令和4年度 課題解決型ローカル 5G 等の実現に向けた開発実証 【開発実証事業】

ローカル 5G を活用した風力発電の設備利用率向上 によるカーボンニュートラル社会の実現

成果報告書

令和5年3月

株式会社秋田ケーブルテレビ

目次

1.	実証概要1					
	1.1	背景・目的	均	1		
	1.2	実証の概要	要	8		
2.	実証斑	実証環境の構築				
	2.1	対象周波数	数带	23		
	2.2	実施環境.		23		
	2.3	ネットワ-	−ク・システム構成	32		
	2.4	システムホ	機能・性能・要件	63		
	2.5	その他		64		
		2.5.1	実証システムの拡張性等	64		
		2.5.2	実証システムの安全性確保のための対策	64		
3.	ローカル 5G の電波伝搬特性等に関する技術的検討(技術実証) 65					
	3.1	実証概要.		65		
	3.2	実証環境.		66		
	3.3	実施事項.		72		
		3.3.1	電波伝搬モデルの精緻化	72		
		3.3.2	エリア構築の柔軟性向上	163		
		3.3.3	準同期 TDD の追加パターンの開発	163		
4.	ローナ	カル 5G 活	用モデルに関する検討(課題実証)	164		
	4.1	実証概要.		164		
		4.1.1	背景となる課題	164		
		4.1.2	本実証におけるローカル 5G 活用モデル	181		
		4.1.3	実証内容の新規性・妥当性	187		
		4.1.4	実証目標	188		
	4.2	実証環境.		196		
	4.3	実施事項.		201		
		4.3.1	ローカル 5G 活用モデルの有効性等に関する検証	201		
		4.3.2	ローカル 5G 活用モデルの実装性に関する検証	254		
		4.3.3	ローカル 5G 活用モデルの実装に係る課題の抽出および解			
		434	ローカル 5G 活用モデルの実装・普及展開	285		
		4.14	a ,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	/ O:		

5.	普及啓発活動の実施 31			
	5.1	映像制作311		
	5.2	実証視察会の実施311		
	5. 3	その他普及啓発活動313		
6.	実施体制3			
	6.1	実施体制の全体像317		
	6.2	実施体制内の役割319		
7.	スケジ	ュール		

1. 実証概要

1.1 背景·目的

(1) 本実証の目的

本実証は、日本のエネルギー戦略において、重要成功要因である洋上風力発電事業の普及・拡大成功に向けて、ステークホルダーとなる「日本」、「地域」、「発電事業者」等の視点から、それぞれの目標達成のために取り組むべき課題について風車のメンテナンスという視点からアプローチし、その手段として無線通信技術であるローカル 5G の活用を提案するとともに、社会実装に向けた実証検証を行うものである。

(2) 本実証の背景

1) 日本のエネルギー戦略における洋上風力発電の重要性

再生可能エネルギーは、エネルギー安全保障にも寄与できる有望かつ多様で、長期を展望した環境 負荷の低減を見据えつつ活用していく重要な低炭素の国産エネルギーであることが、平成 30 年 7 月 に閣議決定した「エネルギー基本計画」にて位置付けられた。さらに、2021 年度に「第 6 次エネルギー 基本計画」が閣議決定され、2030 年度時点で電源構成比に占める再生可能エネルギーの割合を 36 ~38%にするという非常に挑戦的な目標が示された。

この決定を受け、今後、発電事業者は化石電源の低減、非化石電源の導入拡大をさらに加速させ、 着実に脱炭素化を進めていく必要がある。中でも風力発電は、大規模に開発できれば発電コストの低 減ができることから、経済性も確保できる可能性のあるエネルギー源であるとされている。

特に、海に囲まれた日本においては、洋上風力発電は大量導入、コスト削減、地域経済波及効果の観点から導入ポテンシャルが高く、将来の主力電源化に向けた切り札として期待される。政府のグリーン成長戦略においては、2040年までに3,000万~4,500万kWの案件形成を目指すなど、2050年のカーボンニュートラル実現に向け、特に洋上での風力発電は、再生可能エネルギーの主力電源化としての期待は大きい。



図 1-1 「第6次エネルギー基本計画」における風力発電の位置付け出典:「第6次エネルギー基本計画の概要」(経済産業省)

〈促進区域、有望な区域等の指定・整理状況(2022年9月30日)〉





図 1-2 今後の洋上風力発電開発候補地点 出典:経済産業省資源エネルギー庁 国土交通港湾局

2) 電力業界における保安・運用管理のスマート化の推進の必要性

現在、電力分野においては構成する設備の経年劣化や電気保安人材の高齢化・人材不足、そして再生可能エネルギー業者等の参入に伴う電力分野を構成するプレーヤーの多様化など産業構造の変化への課題に直面している。また、近年大型台風や豪雨等の自然災害の激甚化や、新型コロナウイルス感染対策を行いながらの電力の安定供給の実現など外部環境変化の課題も多く出現している。電力供給は社会活動の基盤となる重要インフラであり、そのための保安作業についても安定性と効率性の向上および高度化を図っていくことが必要である。

このような状況にあって、近年では IoT、AI やドローンに代表されるような新しい技術が登場し実用 化されており、電気保安の分野においても安全性を前提とした電力の安定供給を将来にわたり実現す るべく、これらの技術の活用による電気保安水準の維持向上および生産性向上等を両立させる保安・運 用管理のスマート化の推進が強く求められている。

経済産業省産業保安グループでは、スマート保安官民協議会電力安全部会を設置し、官民連携での電気保安のスマート化について検討を行った。具体的には電気保安のスマート化について、2025 年をターゲットイヤーとして、現状の課題や導入が期待される技術を踏まえ、電気保安の将来像やスマート化実現に向けたポイントを整理し、官民のアクションが検討・整理されている。

この中で洋上風力発電設備についても、今後案件形成が進捗していく見込みである。一般的に風力発電設備の保守作業にあたっては、①高所での点検が必要であるなど、風力発電設備構成に起因する作業コストに加え、②風況や、住環境等との一定の離隔距離を前提とすることといった立地の制約があるためアクセスが困難であり、その他、③メンテナンス人材や主任技術者の不足といった課題が挙げられている。また2025年においては、一定程度技術が確立したセンサーやドローン等の本格活用を目指すことが示されている。コンダクター等の導通試験やボルトの増締めのスマート化等、有用であるが未確立の技術については、その開発を促進し、また、スマート保安技術の導入による保安力の向上により、事故率の低減を目指すとしている。

将来的には、センサーやドローンから取得したデータを活用した予兆診断の実現を目指し、これらの 取り組みを通じ、地域社会から受容される再エネ型地域社会の構築への貢献を図るとされている。



図 1-3 スマート保安官民協議会とアクションプランの位置付け 出典:電気保安分野スマート保安アクションプラン

3) 日本の洋上風力発電事業の推進に向けた課題

a. 洋上風力発電事業における課題の全体像

日本国内において大規模な洋上風力発電事業を展開するためには、「海洋再生可能エネルギー発電 設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律(再エネ海域利用法)」に基づく公募を勝ち抜き、事 業者として選定される必要がある。候補事業者は、供給価格、事業の実施能力、地域との調整、地域経 済等への波及効果といった観点から事業計画を評価されることとなるが、以下に示すような課題が顕在 化している。

まず、供給価格の観点から、他電源や他候補事業者と比較して競争力のある価格を実現する必要があり、そのためには洋上風力発電のライフサイクルコストの 35%以上を占めるとされる運転保守においてコスト削減を進めるとともに、売電収入に直結する設備利用率のさらなる向上を図る必要がある。特に、日本においては洋上風力先進国の欧州と異なり、台風・落雷・風のうねりなど、日本・アジア特有の気象現象に対応した独自の運転保守技術開発を行う必要がある。

次に、事業の実施能力(継続性)という観点では、おおよそ 20 年とされる運転期間、設備の運用保守を担う人材を確保し続ける必要があるが、少子高齢化が進む中では人材確保は容易ではなく、既存の保守方法を抜本的に改善、合理化していくことが喫緊の課題として挙げられている。

発電事業者として、この二点の課題解決は、政府が掲げる再生可能エネルギー、特に洋上風力発電の主力電源化を強力に後押しするポイントであり、その課題解決に向けて、洋上風力発電における運転保守の高度化・効率化を、産官学が一体となって、総力を挙げて推し進めていくことが重要であると考える。

b. 洋上風力発電におけるブレードメンテナンスの現状

現状、風力発電のブレードメンテナンスは、点検も含めロープワークによる方法が一般的である。しかし、ロープワークによるメンテナンスは、メンテナンスコスト自体が高い上に、作業の都合上ブレードを下向きにするためブレードの回転に時間を要し、ダウンタイムが長時間化することで発電機会損失も発生する。さらに、今後ウィンドファームの開発が陸上から洋上へシフトすることが想定される中では、波高により洋上風力発電アクセス船(Crew Transfer Vessel:CTV)が出航できないなどによるメンテナンス遅延の発生(=発電再稼働遅延)が懸念される。また、ロープワークには常に墜落災害の危険性がある。作業は比較的風が穏やかな時期に実施するとはいえ、洋上風力発電地点の風は陸上に対して相対的に強く、風車が大型化すればするほど危険度は増す。浮体式の場合、この傾向はより顕著である。

そのような中で、安定した風車へのリーチと迅速な点検・再稼働を目指して、アクセス船(CTV)による 風車への接岸およびロープワークに比べて風に対して耐性のあるドローンによる撮影および画像解析技 術の活用の検討が進んでいる。外観点検をロープワークからドローンに転換することで、ロープワー カーの CTV から風車への乗り移り、ナセルまでの登塔(ブレード本数分)、ロープワーク作業の準備にか かる時間を短縮できる。また、ブレードを点検するには、ブレードを時計の 6 時近辺まで回転をさせる必 要があるが、その回転に要する時間も省略できる。ドローンへの転換によって作業時間を 8 分の 1 に短 縮(2 日→2 時間に短縮)できる見通しである。 しかしドローン点検には課題がある。ドローンが風車に対し安全離隔距離(10m 以上)を確保した上で、1mm 程度の損傷を判定するためには 5,000 から 6,000 万画素の高精細画像が必要になるが、現状、それだけの高精細画像をリアルタイムに陸域へと伝送する無線通信手段がない。撮影画像を確認するためにはドローンが陸域まで帰還した後に SD カードを回収するしかないため、撮影漏れや画像必要品質未達(ピンぼけ、アングルずれ、逆光)などの撮影失敗時や損傷箇所が発見された後に実施される再検査には、再びドローンを飛行させ再撮影するしかなく、メンテナンス停止時間を長引かせ、発電設備の稼働率に大きな影響を及ぼす課題がある。

表 1-1 風力発電のブレードメンテナンス

ロープワークによる目視確認

風車に作業員がロープでぶら下がり損傷箇所を発見する。熟練作業員による目視点検となるため、損傷箇所の特定の手戻り(再調査)が少ないというメリットがある一方、作業には危険が伴うとともに、洋上風力発電では有義波高 1.5m を越えると予想される日はアクセス船(CTV)が出航不可となり作業遅延が頻繁に発生するというデメリットがある。

また、作業員には高度なスキルが要求され、技術習得の困難さから地域での雇用創出も限定的となる可能性がある。



・ ドローンによる画像確認

ドローンで 5,000 から 6,000 万画素の画像を連続撮影、画像解析による損傷箇所を発見する。ロープワークと異なり、安全に作業が可能であるとともに、波高よる作業遅延がなく、技術の進展により点検精度が向上している。





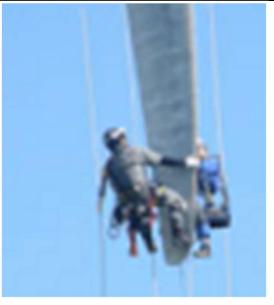


図 1-4 ロープワークでの点検・検査の状況

出典:JWPA 風車発電メンテナンス基礎研修(北拓)

また、洋上風力先進地の欧州と異なり、落雷・台風への対応など日本特有の気候に適合するメンテナンス技術は十分に開発されていない。ゼロカーボンの確実な実現には発電所建設のみならず、日本に適合するメンテナンス技術確立は、発生電力量の最大化とメンテナンスコストの最小化の観点からも必須である。日本における洋上風力発電所の適地は落雷が多発する傾向があり、特に、冬季の雷は夏季の雷に比べエネルギー量が大きく(数十倍から数百倍)、一度の被雷で大きなダメージを受ける可能性があることから、確実な被雷対策と被雷後の迅速な対応はダウンタイム最小化のために重要である。

最大落雷数 地域区分 宗谷 5 道央·道南 6 下北 13 津軽 30 山本 33 秋田 38 由利 43 酒田 34 北陸北部 31 坂井 40

中国

北九州·豊関

太平洋側

表 1-2 各地域の風車への1年あたりの最大落雷回数

出典:第43回風力エネルギーシンポジウム 「日本海·太平洋沿岸部にある風車への落雷特性」山本和男他

54

5

8

本実証では、ドローンから陸域への情報伝送にローカル 5G を活用してドローン撮影画像をリアルタイムに陸域基地局へと伝送し、随時確認する点検ソリューションを確立することで、課題解決を図った。

点検に伴う運転停止時間の短縮を通じて再生可能エネルギー発電稼働率を向上させ、化石燃料による発電から再生可能エネルギーへとエネルギーミックスバランスがシフトすることによって、CO2 排出量が削減された安定した発電事業の実現に寄与することができる。また、本事業において速やかに技術開発することで、国産技術で持って日本国内特有の課題を解決し、洋上風力発電事業の拡大に寄与するものである。

4) 洋上風力発電の導入拡大による地域関連産業の振興や雇用創出に向けて

日本の沿岸地域では、地域が持つ洋上風力発電のポテンシャルを最大限に生かし、我が国が目指す エネルギーミックスの実現に貢献するとともに、再生可能エネルギーの導入拡大を地域における関連産 業の振興および雇用創出につなげるための取り組みを一層強化している。こうした洋上風力発電の急 速な導入拡大とともに、そのメンテナンス需要も増大している。メンテナンスは建設時の一過性とは異な り運転開始後 20 年以上継続されるため、持続的な雇用確保が図れるなど地域への経済波及効果は大きく、地域における関連産業の振興および雇用につながるキラーコンテンツとして注目されている。

しかしながら、風車ブレードの点検に必要なロープワークの技術習得は簡単ではなく、専門のエンジニアが派遣されるケースが多いため、現状のままでは同業務の地域定着化(地元雇用化)は限定的にならざるを得ないと推察される。

本実証を通じて、ドローンによるメンテナンスがさらに効率化され、メンテナンス方法の主流となった場合、地域の産業創成において、地域のドローンオペレーター(秋田県下では現状でも 50 名以上はいると言われる)の新たな雇用先となり、持続的な雇用が確保されることが期待される。

5) 秋田県におけるエネルギー戦略と現状

本実証のフィールドである秋田県は、全国の中でも人口減少と少子高齢化の動きが速く、人口減少率全国1位(2021年)となるなど極めて厳しい状況におかれている。県内では、若者の県内定着や少子化対策などの直接的な取り組みを展開する他、コンパクトシティ化など人口減少社会においても住民サービスを維持できる社会システムの検討も行われているが、合わせて、生産性の向上や県内消費の拡大等、産業経済の規模や雇用の維持・拡大に向けた確かな産業経済基盤の確立を進めることが求められている。秋田県内の産業構造としては、電子部品・デバイス産業の占める割合が大きく、また製造業の多くが外需型(下請・加工組立型)であり、国内外の景気動向に左右されやすい構造という特徴がある。

秋田県では、現在、柱となる新たな産業創造として、地域資源を生かした産業分野である新エネルギー関連産業の振興、その中でも雇用を創出する部品製造・建設・メンテナンスなど関連産業への県内企業の参入に力を入れている。これらが普及拡大することにより、産業も内需型に変化し、県内の産業経済基盤は安定化し、地域経済の拡大へと発展するものである。

具体的なアクションとしては、平成 28 年 3 月に「第 2 期秋田県新エネルギー産業戦略」を策定し、県を挙げて洋上風力発電を推進している。さらに、国における 2050 年カーボンニュートラル宣言などの脱炭素を加速させる意欲的な方針が数多く示されたことを受け、情勢変化を踏まえた新エネルギー関連産業の集積を県の持続的発展に確実につなげること等を目的に、令和 4 年 3 月に「第 2 期秋田県新エネルギー産業戦略(改訂版)」を策定した。これは、平成 28 年度~令和 7 年度の期間で設定した戦略の令和 4 年度~令和 7 年度の下期期間を改訂し、「洋上風力の継続的導入拡大と国内最大級の産業集積拠点の形成に向けた取り組み推進」、「再エネ発電施設等の建設工事、部品製造、運転・保守への県内企業の参入拡大促進」を最重要プロジェクトとして含む 5 つの項目を下期重点プロジェクトとして具体化したものである。

県下では既に洋上風力発電事業は始まっており、港湾内であるが日本国内で初の商業ベースでの大型洋上風力発電事業となる秋田港・能代港風力発電について、能代港は 2022 年 12 月、秋田港は 2023 年 1 月に運用を開始している。さらに一般海域における第 1 ラウンドでは、能代市、三種町および 男鹿市沖と由利本荘市沖の地点の事業者が決定している他、今後も多くの地点で洋上風力発電の建設が計画されている。

秋田県内においては、産官学連携体制の下、効率的な人材育成システムの構築とともに、参加する県内の大学等におけるノウハウの構築を図る「風車メンテナンスに係る人材育成プログラム」を展開し、長

期的に安定した人材供給を通じ、県内と同様に、今後急速に加速する国内全体における風車メンテナンス市場に進出できるような県内企業の育成を目指すとしている。

しかし、秋田県が実施した発電事業者へのアンケートでは、「メンテナンス作業そのものは県内企業で実施できるものの、県外メーカーの立ち合いが必須となることでの対応時間がかかり費用も多く必要になる」、「県内にメンテナンスや修繕関係の業者が少なく、県外企業にメンテナンスや修繕を委託しており費用が高くなっている」など、対応可能な県内企業が少なく価格適正などメンテナンスに関する課題が多く挙げられている。また、県の経済波及効果算定時に設定した県内発注率に対して、規模の大きな案件については未達となったケースが複数確認されており、今後、部品調達やオペレーションアンドメンテナンス(O&M)では、県内企業の育成とともに、県内企業が中心に展開できる手法の確立が需要となる。また、県下では、政策として関連産業への県内企業の参入拡大を目指して、重点プロジェクトとして、県内企業と発電事業者等とのマッチングや県内企業の人材育成や技術力の向上を取り組んでいる。

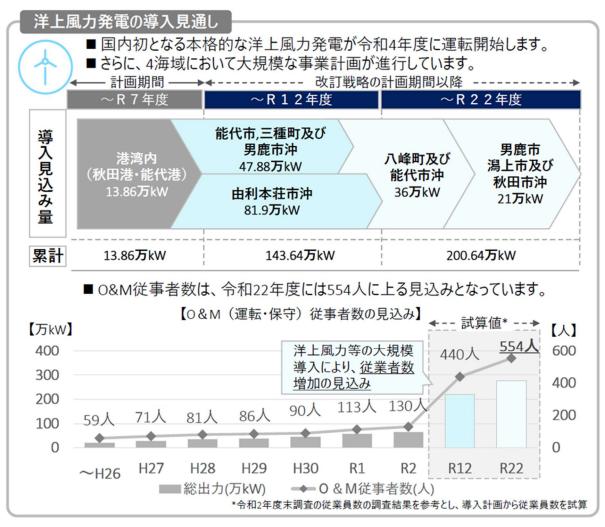


図 1-5 秋田県における洋上風力発電の導入の見通しと雇用創出の見通し 出典:第2期秋田県新エネルギー産業戦略(改訂版)(令和4年3月)

1.2 実証の概要

(1) 実証の全体像

本実証は、洋上風力発電事業の普及・拡大にあたりステークホルダーとなる「日本(国)」「地域」「発電事業者(業界)」の現状から、ライフサイクルコストの 35%以上を占める運転保守の高度化・合理化に着目し、今後メンテナンスの主力化が期待されるドローンを活用した風車メンテナンスにおいて課題となる点検データ回収を、ローカル 5G の大容量伝送により効率化を図り、メンテナンスによる停止時間の最小化による発電設備利用率の拡大を実現するものである。

日本のエネルギー戦略

目標:2050年カーボンニュートラル社会の実現

- ✓ 再生可能エネルギーは安全保障にも寄与できる国産エネルギー
- ✓ 中でも風力は海に囲まれた日本にとって主力となる再生可能エネルギー
- ✓ 将来のエネルギーミックスの安定化への貢献

洋上風力発電は、エネルギー安全保障にも寄与 できる重要な低炭素の国産エネルギー

洋上風力発電のライフサイクルコストの35%以上を占める 運転保守において、ローカル5Gを活用して高度化、効率化

> 設備稼働率向上による発生電力量の増大 エネルギーミックスにおける中心的な位置付の確立

地域のエネルギー戦略と地域振興

目標:地域産業の創出・雇用の創出

✓ メンテナンス等運用業務への参画 ✓ サプライチェーンへの参画

メンテナンス・サプライは20年以上継続 されるため確実に延ばしていきたい領域 業界

発電事業者のエネルギー戦略

目標:発電の安定化・効率化

- ✔ 競争力のある発電コストの実現
- ✔ 少子高齢化社会における人材確保

コスト高と言われる再生可能エネルギーで安定供給と安定コストを実現し競争力を確保

図 1-6 洋上風力発電に関するステークホルダーと本施策のポジション

具体的には、ドローンに搭載した高精細カメラを用いて発電風車のブレードを約 5,000 万画素の画像で連続撮影し、画像解析により損傷箇所を発見する点検ソリューションを実現し、社会実装に向けて検討を行うものである。

撮影した画像は、ローカル 5G を活用して飛行中のドローンからリアルタイムに画像伝送を行うことで、現状、ドローンを陸域まで飛行させ SD カードの画像情報を回収するまで画像解析に着手できなかったものが、ドローン撮影と画像解析が並行して実施可能となり、また、撮影失敗時や損傷箇所発見時の再撮影のための飛行など作業手戻りが最小化されるため、メンテナンスによる発電停止時間が大幅に削減できる。

本実証では、社会実装に向けた技術課題として、ローカル 5G の開放地(海上)、天頂方向(アップチルト)での利用を想定し、海面反射、潮位変動、波高の影響による長期、短期の変動の発生など、電波伝搬特性の一般的なモデルに当てはまらないケースにおけるエリアシミュレーションと実測値の差異の明確化(電波伝搬モデルの精緻化)および、施設の遮蔽物としての電波特性への影響と最適配置を中心に検証を行った。

一方、課題実証としては、本ソリューションの機能面、運用面の有効性評価および、その結果を踏まえた経済性、市場性、実装性の観点について、ステークホルダーのヒアリング等を通じて課題を洗い出し、ローカル 5G 活用モデルの確立を目指す検証を行った。

なお、今後のローカル 5G の制度設計において、上空での利用(ドローンと地上基地局間の通信)は、 本ユースケースのみでなく、ドローンによる社会インフラ維持管理、過疎地への物資輸送、災害支援など、 地域における様々なユースケースへの適用が期待できる分野であり、デジタル田園都市構想実現の一 角を担う取り組みとして、本実証が検討の一助となることが期待される。

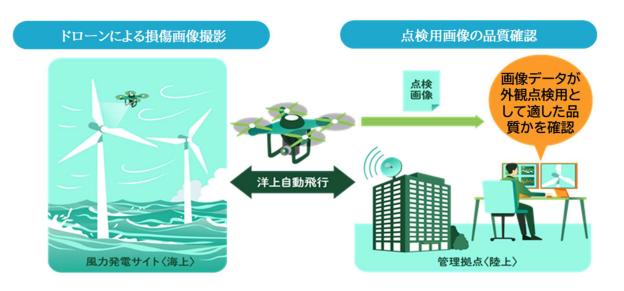


図 1-7 ローカル 5G を活用したドローンによるブレードメンテナンスの実現イメージ 出典:株式会社 Dshift リーフレット(一部修正)

(2) 現状の課題と解決の方策

ドローンによる撮影においては、カメラの焦点がブレードに合うようにプログラミングされているものの、 稀に焦点が合わないことや、逆光なども発生し、現状では、SD カード回収後でないと点検用画像として 活用可能かの確認がとれない。

データ回収後の画像解析開始となるため、損傷箇所発見の際は翌日の再調査が必要となり、発電停止時間増加による経済ロスが発生する。

ドローンによる風車メンテナンスの効率化には、ドローンと陸域間の無線通信による業務の並列化の 実現が最も有効であり、そのためには、アップリンク通信に対してアドバンテージがあるローカル 5G の 適用の検討が最も有効である。

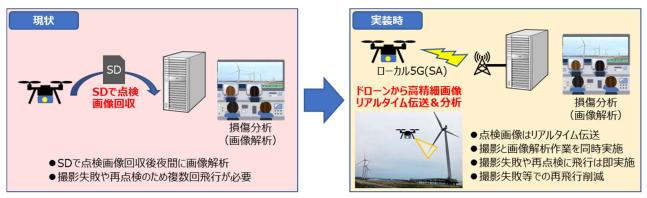


図 1-8 ローカル 5G を活用したドローンによる風車メンテナンスの実装イメージ

(3) フィールド検証における検証環境

本実証では、隣接する洋上風車間でローカル 5G 電波を照射し、無線通信エリアを構成するパターン (将来モデル 1)と、自風車に対してローカル 5G 電波を照射し、無線通信エリアを構成するパターン(将来モデル 2)を社会実装モデルと想定して検証を行った。

隣接する風車間で電波を照射し通信エリアを構成するパターンでは、数台のローカル 5G で複数本の風車を通信エリア化できるためコスト性に優れていると考えた。一方、将来、一般海域でのウィンドファーム展開により発電風車の大型化が進み、風車間の設置距離が広くなる場合は、電波到達距離の関係から、自風車に対して電波を照射し、ウィンドファームの通信スポットとして通信エリアを構成するパターンの方が優れていると考えた。

表 1-3 洋上風力ウィンドファームにおける将来実装モデル

将来モデル 1	港湾区域等でのウィンド	【実装条件・課題等】
	ファーム展開モデル	・ 中小規模風車(陸上風車とほぼ同サイズ)であるため、費
	(着床式で比較的中小	用対効果の観点から無線通信設備にかけるコストを抑え
	型の風車)	る必要がある。
		・ ローカル 5G の相互照射にてエリアを構成できる範囲は、
		電波到達距離を考慮すると風車設置間隔は 300~
		400m 程度となるため、港湾区域等でのウィンドファーム
		で実装可能となる。(多くはロータ直径×3 倍程度の風車
		距離を保つ)
将来モデル2	一般海域でのウィンド	【実装条件・課題等】
	ファーム展開モデル	・ 一般海域での風力ウィンドファームの場合、風車が大型化
	(着床式、浮体式の両方	しており、風車設置間隔は lkm 前後となるため、自風車に
	が存在し大型の風車)	対して電波を照射する方式となる。
		・ 無線設備設置コストとダウンタイム短縮による増収とのバ
		ランスを考慮し、特定の風車にローカル 5G を使用した通
		信スポットを設置し通信エリア確保する方法を想定する必
		要がある。

1) 実証実験の内容

秋田市秋田港の海岸線に設置されている既存の発電風車を洋上風力発電の疑似フィールドとして、前項記載の将来モデルケースでの使用を想定した実証を行った。

将来モデル1のフィールド実証としては、実証対象風車に対して、数百メートル離れた位置にローカル5G 基地局を設置し、洋上飛行するドローンとの通信検証を行った。気象海象および風車の遮蔽条件を想定した Case1~Case3 の検証を実施した。

将来モデル2のフィールド実証としては、実証対象風車の基礎部分にローカル5G基地局を設置し、 自風車に対する電波照射を行い、実証対象風車周辺を飛行するドローンとの通信検証を行った。気象 海象および風車の遮蔽条件を想定したCase4の検証を実施した。

表 1-4 将来モデルケースでの使用を想定したフィールド検証

ートル離れの通信エリ		
の通信エリ 		
_		
検証課題 検証方法		
zル、シャフ		
虱車遮蔽に		
にあたり波		
るため、波		
こした。		
が変化しや		
波伝搬への影響 すい防波堤の外側で飛行させ、飛行するドローンと		
た。		
定し、比較		
皮伝搬の状		
での波の影		
の内側での		
に向けてほ		
トセル、シャ		
、風車遮蔽		
お、自風車		
のほぼ真上方向を通信エリアとするため波の影響		
は限定的となる。		
虱にるとががた。定皮での「に」と、お車あたた。変ロ。「し、搬波側」け、「・車自		

(Case 詳細については、1.2(3)5)を参照)

洋上を自律飛行するドローンからローカル 5G の通信を利用してリアルタイムに風車の点検画像の伝送を実施し、陸上にてドローンから伝送された点検画像の評価試験を実施した。

なお、本実証では、環境に対して必要十分なスペックの機材を選定した。

2) 実験期間

フィールドにおける実験期間、時間帯は以下の通りにて実施した。

表 1-5 実験期間

準備期間	2022年9月~10月
実験期間	2022年12月2日~9日
	2022年12月19日~23日
	2023年3月8日、9日
実験時間帯	6:00(日出から)~17:00(日没まで)(日中帯)

フィールド実証の流れ

· 実験前準備:2時間程度

・ ドローン合計飛行時間:8時間程度

· 片付:1 時間程度

- ※ 雨天時や降雪時は、点検画像撮影用カメラのレンズへの水滴の付着等にて点検に必要な画像品質を担保できないことから、ドローンによる点検を想定していない。
- ※ 様々な気象・海象条件で実験を実施するとともに、ドローン飛行不可や船の出航が不可となる気象・海象条件の発生に備えて、検証候補日は予備日を含めて複数日設定した。

3) 実証フィールドの様子(ユーラス秋田港ウィンドファーム)

表 1-6 ユーラス秋田港ウィンドファーム概要

所在地	秋田県秋田市向浜1丁目13
発電量	18,000kW(3,000kW×6 基)(Siemens 社製)
運転開始	2015年2月



図 1-9 実証フィールド概要(秋田県秋田市) 出典:国土地理院地図



図 1-10 ユーラスエナジー秋田港ウィンドファーム概要 出典:秋田県ホームページ





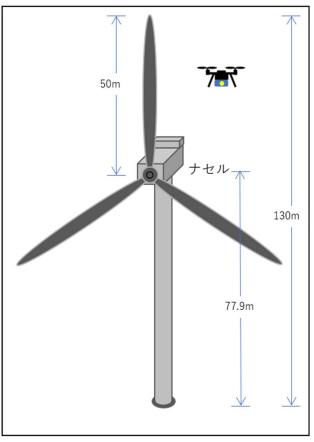


図 1-11 実証対象風車

4) 実証概要図

a. 将来モデルケースでの使用を想定したフィールド検証

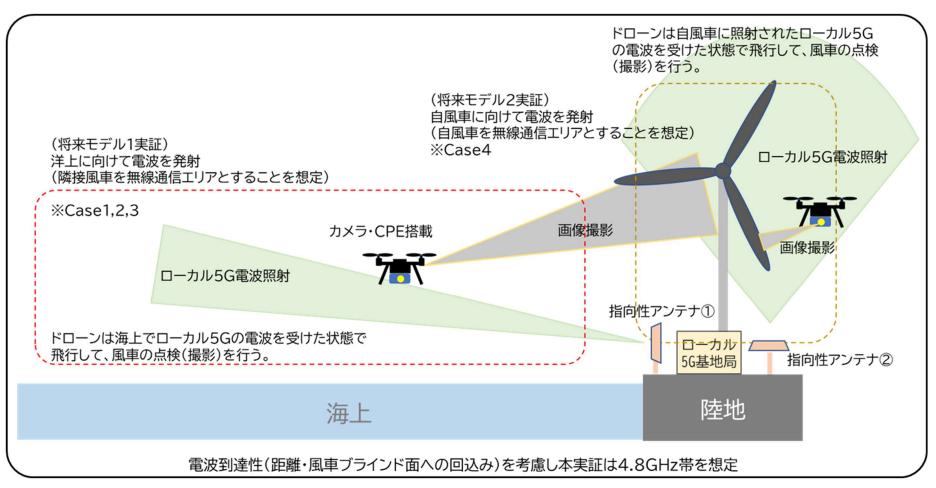


図 1-12 実証概要図

b. FPV 画像による自立目視外飛行へのローカル 5G 適用検証(危機回避行動時)※First Person View:一人称視点

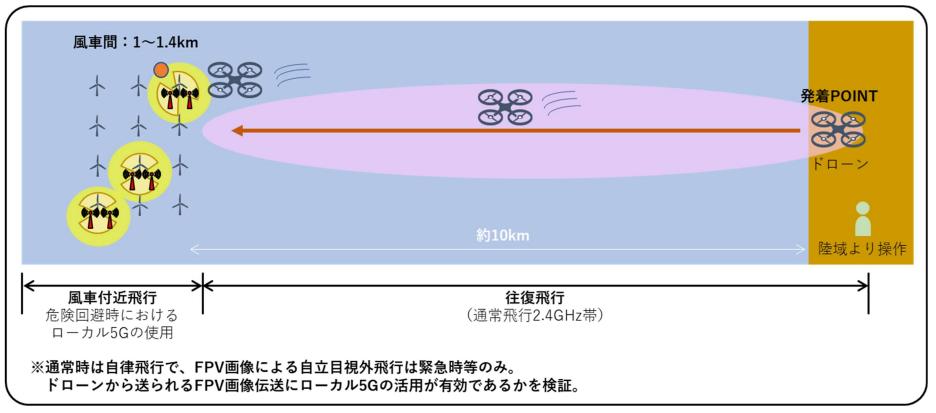


図 1-13 FPV 画像によるドローンのリモート操作へのローカル 5G 適用イメージ(将来像) ※本将来像を疑似環境で実証

技術実証概要:上記ケース(a、b 共通)における電波伝搬モデルの精緻化

- ・ 技術実証概要:上記ケースにおける電波伝搬モデルの精緻化(後述 3.3.1 を参照)
- ・ 周波数:4.8-4.9GHz 帯(電波到達性(距離・風車ブラインド面への回込み)を考慮)
- ・ ローカル 5G 使用要件:屋外、開放地(海上)、天頂方向(アップチルト)

5) 将来モデルを想定した実証ケース

将来モデル 1 として、隣接風車を無線通信エリアとすることを想定した以下に示す Case1~Case3の検証を実施した。将来モデル 2 として、自風車を無線通信エリアとすることを想定した Case4の検証を実施した。それぞれ、気象海象の影響や風車の遮蔽を想定した。以下の全 Case 共通仕様としては、ローカル 5G を利用して、自律飛行するドローンから 1 秒間隔で撮影した高精細画像(点検画像)を伝送し、画像の点検業務を並行作業で行う評価試験を実施した。

撮影間隔について、従来方式では、カメラに搭載している SD カードへ画像データを保管後、SD カードを地上局に受け渡すことで画像データ取得を行っている。その際、高精細の画像をカメラから SD カードへ保管する最短時間が 1 秒であるため、本実証においてもその撮影間隔を用いた。

共通事項

- ・ ドローン飛行は、風速 10m/s 以内とした。
- ・ 降雨、降雪時は、ドローン点検カメラに水滴が付着するため点検作業は実施しない想定とした。
- ・ 精緻化について、潮位(=基地局と水面の相対距離)の影響を考えられるが、実装ケースでは潮 位の考慮は不可能なため実証しなかった。
- ・ 気象庁の発表を参考に波の高さを記録し、付随して天気や気温の情報を記録した。

a. Casel

表 1-7 実証 Casel 概要

F 1 - 1 2 4 1 - 1 2 7 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1				
想定するモデル	将来モデル 1(隣接風車を無線通信エリア化)			
実証概要	実証対象風車(4 号機)に対して、250m 程度離れた地点から、地上 80m 程度			
	にあるナセル(風車の中心点)に向けてローカル 5G 電波を発射した。ドローン			
	は、実証対象風車(4 号機)を挟んだ海上を飛行し、ブレードの撮影を実施した。			
検証課題	風車遮蔽の電波伝搬への影響			
検証のポイント	ブレードもしくは風車本体の影となり、ローカル 5G 電波のブラインドエリアとな			
	る部分を確認し、社会実装にあたっての課題抽出と最適実装モデルの確立を			
	行った。			
検証方法	測定器を搭載したドローンを風車のナセル、シャフト、ブレードの影となる部分で			
	飛行させ、風車遮蔽による電波伝搬への影響を検証した。検証にあたり波の影			
	響による測定結果の変化を回避するため、波の影響を受けにくい防波堤の内側			
	での検証とした。			



図 1-14 Casel 配置図 出典:国土地理院地図

b. Case2

表 1-8 実証 Case2 概要

想定するモデル	将来モデル1(隣接風車を無線通信エリア化)
実証概要	実証対象風車(4 号機)から洋上方向に電波を発射した。地上 100m 付近を飛
	行するドローンとの通信を想定しローカル 5G 電波を発射した。ドローンは、海上
	を飛行しブレードの撮影を実施した。
検証課題	海象(荒波等)の電波伝搬への影響
検証のポイント	ドローンの飛行は防波堤の外側を想定し、気象海象の影響(海面や波の影響)の
	確認を行い、社会実装にあたっての課題抽出と最適実装モデルの確立を行った
	(一部データについては船舶に測定機器を搭載して取得)。また、洋上方向におけ
	る電波受信の最遠距離測定も行った。
検証方法	測定器を搭載したドローンを波の状態が変化しやすい防波堤の外側で飛行さ
	せ、飛行するドローンと基地局の通信に対する波の影響を検証した。



図 1-15 Case2 配置図 出典:国土地理院地図

c. Case3

表 1-9 実証 Case3 概要

想定するモデル	将来モデル 1(隣接風車を無線通信エリア化)			
実証概要	実証対象風車(4 号機)から 570m 離れた、風車(5 号機)に向けて電波を発射			
	した。地上80m程度にあるナセル(風車の中心点)に向けてローカル5G電波を			
	発射した。ドローンは、実証対象風車(5 号機)周辺を飛行し、ブレードの撮影を			
	実施した。			
検証課題	伝送距離の電波伝搬への影響+海象(小波等)の電波伝搬への影響			
検証のポイント	ローカル 5G 基地局から 500m 程度離れた位置における電波伝搬の検証を実			
	施した。防波堤の内側の飛行のため、海面や波が比較的穏やかな状態での確認			
	を行い、社会実装にあたっての課題抽出と最適実装モデルの確立を行った(一部			
	データについては船舶に測定機器を搭載して取得)。			
検証方法	隣接風車で電波を照射し合うシーンを想定し、比較的長い距離(500m 程度)に			
	おける電波伝搬の状態を検証した。また、穏やかな状態での波の影響(鏡面反			
	射)を検証するため、防波堤の内側での検証とした。			



図 1-16 Case3 配置図 出典:国土地理院地図

d. Case4

表 1-10 実証 Case4 概要

Z I I O Z E OGO I POZ			
想定するモデル	将来モデル 2(自風車を無線通信エリア化)		
実証概要	実証対象風車(4号機)のデッキ付近から自風車に対して電波をほぼ垂直に発射		
	した。ドローンは、ほぼ真下から発射される電波を受けながらドローンを飛行させ		
	て対象風車を撮影した。		
検証課題	自風車照射時の風車遮蔽の電波伝搬への影響		
検証のポイント	風車本体もしくはブレードの影になりローカル 5G 電波のブラインドエリアとなる		
	部分を確認した。また、自風車のエリア化において、実用にあたり最適な無線通		
	信エリアのモデルの確立を行った。		
検証方法	測定器を搭載したドローンを自風車のナセル、シャフト、ブレードの影となる部分		
	で飛行させ、風車遮蔽による電波伝搬への影響を検証した。なお、自風車のほぼ		
	真上方向を通信エリアとするため波の影響は限定的となる。		



図 1-17 Case4 配置図 出典:国土地理院地図

2. 実証環境の構築

2.1 対象周波数帯

本実証においては課題実証に必要な伝搬距離や伝送速度を鑑みてローカル 5G として電波法関係 審査基準に記載されている Sub6 帯を活用した。本実証においては屋外にてローカル 5G の電波放射 を行うため 4.8GHz-4.9GHz の指定を受け実証を行った。

2.2 実施環境

(1) 実施環境の概要

秋田県秋田市向浜地区の既設の発電風車を実証フィールドとして選定した。今回選定の発電風車は、海岸線上に位置し海面に迫り出す形状であり、洋上風力発電での社会実装を想定した本実証の検証要件を満たす最適な実施場所である。また、実証作業の安全性を確保しつつ、海上伝搬における精緻化および課題実証における各評価を行うのに最適な実証場所である。

なお、本実証における検証フィールドであるユーラスエナジー秋田港ウィンドファームは、ローカル 5G 活用モデル実装時の疑似環境として選定したフィールドであることから、検証環境の継続実装ではなく、本実証を通じて必要データを収集し、実用性を評価した上で、今後国内で進められる洋上風力の導入計画に反映させることを目指す。



図 2-1 実証実施場所周辺図 出典:国土地理院地図



図 2-2 実証実施場所拡大図 出典:国土地理院地図



図 2-3 実証対象風車



図 2-4 4号風車基礎部分



図 2-5 実証対象 4 号風車を望む



図 2-6 実証対象 4 号風車から実証対象 5 号風車を望む

(2) 実施場所

図 2-7 に、実証業務範囲および基地局設置位置を示す。



図 2-7 実証区域と基地局設置場所 出典:国土地理院地図

基地局設置位置は以下の通り。

設置位置①(実証対象風車(4 号機)から 250m 程度離れた地点)では Casel を、設置場所②(実証対象風車(4 号機))では Case2~4 の実証を行った。

	設置位置	緯度経度	空中線	実証 Case
設置位置①	秋田県秋田市	北緯 39 度 44 分 27 秒	地上高 2m	Casel
	向浜1丁目13	東経140度03分14秒	海抜高 5m	屋外/平面(砂浜)
設置位置②		北緯 39 度 44 分 19 秒	地上高 2m	Case2~4
		東経140度03分12秒	海抜高 7m	屋外/水面

表 2-1 基地局設置位置

(3) 既存環境の利用

本実証では活用可能な既存の機材、環境等は存在せず、全て新規で環境構築を実施した。

(4) エリアシミュレーション

本実証実験で検証を行う各 Case におけるそれぞれのエリアシミュレーションを以下に示す。



図 2-8 Casel エリアシミュレーション(設置位置①、受信点地上高 1.5m) 出典:国土地理院地図



図 2-9 Casel エリアシミュレーション(設置位置①、受信点地上高 100m) 出典:国土地理院地図



図 2-10 Case2 エリアシミュレーション(設置位置②、受信点地上高 1.5m) 出典:国土地理院地図

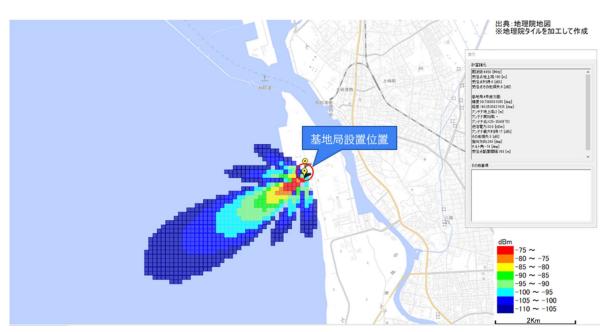


図 2-11 Case2 エリアシミュレーション(設置位置②、受信点地上高 100m) 出典:国土地理院地図



図 2-12 Case3 エリアシミュレーション(設置位置②、受信点地上高 1.5m) 出典:国土地理院地図



図 2-13 Case3 エリアシミュレーション(設置位置②、受信点地上高 100m) 出典:国土地理院地図

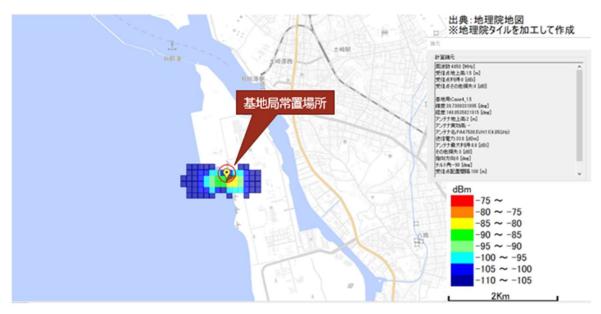


図 2-14 Case4 エリアシミュレーション(設置位置②、受信点地上高 1.5m) 出典:国土地理院地図



図 2-15 Case4 エリアシミュレーション(設置位置②、受信点地上高 100m) 出典:国土地理院地図



図 2-16 Case4 エリアシミュレーション(設置位置②、受信点地上高 300m) 出典:国土地理院地図

2.3 ネットワーク・システム構成

- (1) ネットワーク・システム構成
- 1) ネットワーク・システム系統図

ネットワーク・システム系統図を以下に示す。

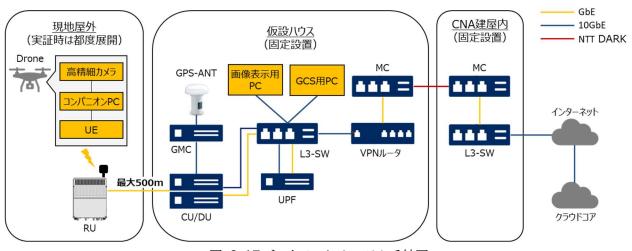


図 2-17 ネットワーク・システム系統図

2) 各設備・機器等の機能と役割

ネットワーク構成図のうち使用した各機器等の機能と役割を以下に示す。

表 2-2 使用機器一覧

#	機器名	機能・役割
1	Central Unit(CU)	5G 基地局·集約部
2	Distributed Unit(DU)	5G 基地局・デジタル部
3	Grandmaster Clock(GMC)	時刻同期システム
4	GPS-ANT	時刻同期用 GPS 受信アンテナ
5	User Plane Function(UPF)	ユーザーデータ送受信処理
6	Grand Control Station	ポータブル地上制御ステーション
7	ドローン撮影画像表示用 PC	点検画像表示
8	L3-SW	ネットワークスイッチ
9	VPN ルータ	ネットワークルータ
10	Media converter(MC)	電気信号と光信号の変換
11	Media converter(MC)	電気信号と光信号の変換
12	L3-SW	ネットワークスイッチ
13	Radio Unit(RU)	5G 基地局·無線部
14	Drone	画像撮影用ドローン
15	User Equipment(UE)	5G 送受信端末 (5G ゲートウェイ装置、5G 対応スマホ)
16	コンパニオン PC	ドローンの各種制御
17	高精細カメラ	画像撮影用カメラ

3) 各設備・機器等の数量・設置形態

ネットワーク構成図のうち使用した各機器等の数量と設置形態を以下に示す。

表 2-3 各機器の数量と設置形態

#	表 Z-3 合機 機器名	数量	設置場所	設置形態
1	Central Unit(CU)	1	仮設ハウス	固定設置
2	Distributed Unit(DU)	1	仮設ハウス	固定設置
3	Grandmaster Clock(GMC)	1	仮設ハウス	固定設置
4	GPS-ANT	1	仮設ハウス	固定設置
5	User Plane Function(UPF)	1	仮設ハウス	固定設置
6	Grand Control Station(GCS)	1	仮設ハウス	固定設置
7	ドローン撮影画像表示用 PC	1	仮設ハウス	固定設置
8	L3-SW	1	仮設ハウス	固定設置
9	VPN ルータ	1	仮設ハウス	固定設置
10	Media converter(MC)	1	仮設ハウス	固定設置
11	Media converter(MC)	1	CNA 建屋	固定設置
12	L3-SW	1	CNA 建屋	固定設置
13	Radio Unit(RU)	1	_	仮設
14	Drone	1	-	可搬
15	User Equipment(UE)	1	-	可搬(ドローンに実装)
16	コンパニオン PC	1	-	可搬(ドローンに実装)
17	高精細カメラ	1	_	可搬(ドローンに実装)

(2) 基地局相当装置無線部特性

基地局相当装置無線部特性は以下の通り。

ア、無線局数:1式

イ、 周波数帯:Sub6 帯 4.8-4.9GHz

ウ、通信方式:TDD NR エ、SA/NSA の区別:SA オ、占有帯域幅:100MHz

表 2-4 ローカル 5G システム(基地局)の概要

	基地局(MB5400)		
製造ベンダ	NEC		
台数	1 台		
設置場所(屋内/屋外)	屋外		
同期/準同期	同期		
UL:DL 比率	2:7		
周波数带	4.8GHz 帯		
SA/NSA	SA		
UL 周波数	4.8-4.9GHz		
DL 周波数	4.0 ⁻ 4.9GHZ		
UL 帯域幅	100MHz		
DL 帯域幅	TOOMIZ		
UL 中心周波数	4 OF CIL-		
DL 中心周波数	4.85GHz		
UL 変調方式	2560 AM		
DL 変調方式	256QAM		
MIMO	2×2MIMO		

表 2-5 ローカル 5G システム(CU/DU)の概要

- X Z J ロ			
CU/DU			
CU/DU各1台			
屋内			
2U ラックサーバ			
(W)434 x (H)86.8 x			
(D)715.5mm·28.6kg			
2x Intel® Xeon®			
Gold 6230R			
2x 26Core, 52			
Threads			
512GB			
3x1.6TBSSD, RAID1			
2x 10G SFP+ ports			
4x 1GbE LAN ports			
AC100V·500W			
温度:10℃~35℃			
湿度 10%~80%			

使用した基地局アンテナ外観、パターンを以下に示す。

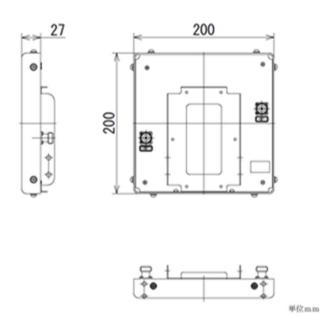


図 2-18 基地局相当装置のアンテナ外観(指向性アンテナ):Case1、Case2、Case3

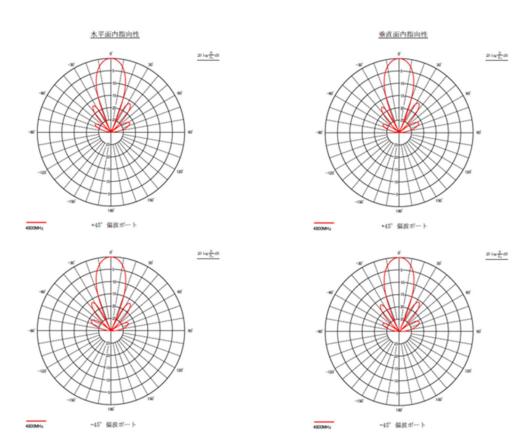


図 2-19 基地局相当装置のアンテナパターン(指向性アンテナ): Case1、Case2、Case3

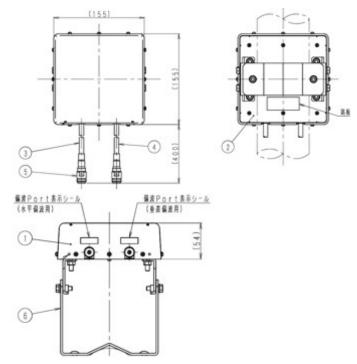


図 2-20 基地局相当装置のアンテナ外観(指向性アンテナ):Case4

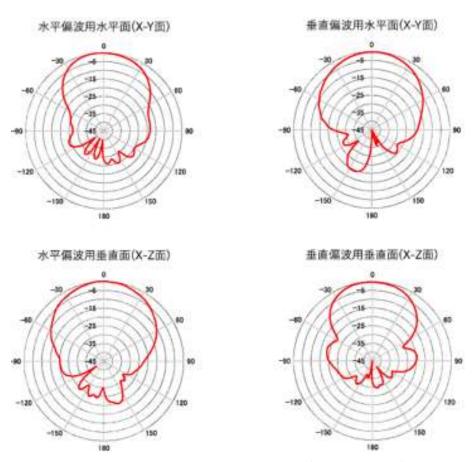


図 2-21 基地局相当装置のアンテナパターン(指向性アンテナ):Case4

(3) UE(端末)

1) CPE(FG900CS)

表 2-6 CPE(FG900CS)仕様一覧

項目	値
変調方式(1 次変調)	$\pi/2$ BPSK, QPSK, 16QAM,
	64QAM,256QAM
変調方式	OFDM
複信方式	TDD
帯域幅	99.96MHz
中心周波数	4.84998GHz
アンテナ構成	内蔵型無指向性アンテナ
送信電力	23.0dBm 200MW
アンテナ利得	1.85dBi, 2.97dBi
給電線損失	0.0dB
最大 EIRP	25.97dBm
電波の型式	100MX7W



図 2-22 FG900CSの外観

2) CPE(iR730B)

表 2-7 CPE(iR730B)仕様一覧

項目	值
変調方式(1次変調)	$\pi/2$ BPSK, QPSK, 16QAM,
	64QAM,256QAM
変調方式	OFDM
複信方式	TDD
帯域幅	99.96MHz
中心周波数	4.84998GHz
アンテナ構成	外付け型無指向性アンテナ
送信電力	23.0dBm 200MW
アンテナ利得	12dBi
給電線損失	3.0dB
最大 EIRP	32.0dBm
電波の型式	100MX7W





図 2-23 iR730Bの外観

3) スマートフォン(FCNT)

表 2-8 スマートフォン(FCNT)仕様一覧

項目	值
変調方式(1次変調)	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
変調方式	DFT-s-OFDM
複信方式	TDD
帯域幅	99.96MHz
中心周波数	4.84998GHz
アンテナ構成	内蔵型無指向性アンテナ
送信電力	23.0dBm 200MW
アンテナ利得	-5.5dBi
給電線損失	0.0dB
最大EIRP	17.5dBm
電波の型式	100MX7W



図 2-24 FCNT の外観

4) CPE(K5G-C-100A)

表 2-9 CPE(K5G-C-100A)仕様一覧

X 2 0 01 2 (110 0	
項目	值
変調方式(1次変調)	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
変調方式	DFT-s-OFDM
複信方式	TDD
帯域幅	99.96MHz
中心周波数	4.84998GHz
アンテナ構成	内蔵型無指向性アンテナ
送信電力	23.0dBm 200MW
アンテナ利得	0.4dBi
給電線損失	0.0dB
最大EIRP	23.4dBm
電波の型式	100MX7W



図 2-25 K5G-C-100A 外観

5) CPE(RAKU Plus)

表 2-10 CPE(RAKU Plus)仕様一覧

項目	値
変調方式(1 次変調)	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
変調方式	OFDM (DL: 4x4 MIMO, 2x2 MIMO for
	SA)
複信方式	TDD
帯域幅	99.96MHz
中心周波数	4.84998GHz
アンテナ構成	内蔵型無指向性アンテナ
送信電力	23.0dBm 200MW
アンテナ利得	2.4dBi
給電線損失	2 dB
最大 EIRP	23.4dBm
電波の型式	100MX7W



図 2-26 RAKU Plus 外観

6) ドローン(E6106)

表 2-11 ドローン(E6106)仕様一覧

表 Z-11 トローノ(E0100/仕塚一見		
項目	值	
全幅	1,060mm	
全高	550mm	
本体重量	8.4kg	
飛行時間	約15分(撮影機器、安全装備搭載時)	
耐風性能	10m/s以上	
フェールセーフ機能	・バッテリー残量規定値以下で自動帰還	
	・プロポ(操縦機)通信断での自動帰還	
	・ジオフェンス※による自動帰還	
	※PC 上の仮想空間上で境界線を設定し、	
	境界の出入りを管理すること。ここでは境界	
	線からの飛び出しを管理する。	



図 2-27 E6106 外観

7) カメラ(Sony α 1)

表 2-12 カメラ(Sony α1)仕様一覧

項目	值
イメージセンサーサイズ	35 mmフルサイズ(35.9×24.0mm)
有効画素数	約 5,010 万画素
本体重量	約 740g



図 2-28 Sony α1外観

8) 測定器(MA8780A)

表 2-13 測定器(MA8780A)仕様一覧

項目	值
寸法	ML8780A 単体:240(W)× 170(H)× 41(D)mm
	ML8781A 単体:240(W)× 170(H)× 41(D)mm
本体重量	約 3kg



図 2-29 MA8780A 外観

(4) ネットワーク・システムの構築・運用

1) 設置場所

設置位置①と設置位置②の設置場所について以下に示す。



図 2-30 設置位置全体像(設置位置①) 出典:国土地理院地図



図 2-31 設置位置全体像(設置位置②) 出典:国土地理院地図



図 2-32 通信線ルート全容図 出典:国土地理院地図

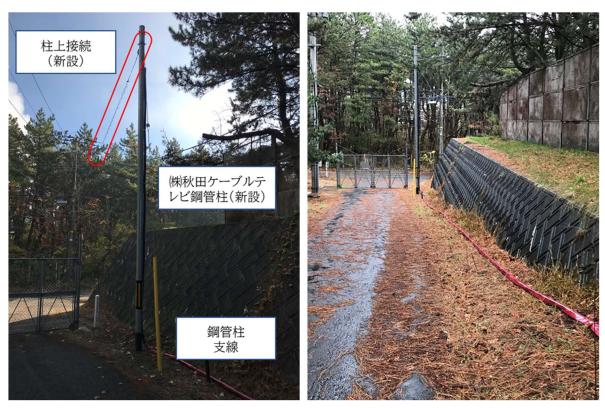


図 2-33 通信線ルート(起点付近)



図 2-34 通信線ルート(中間)



図 2-35 通信線ルート(仮設ハウス周辺)







図 2-36 仮設ハウスおよび周辺設備



図 2-37 仮設回線(仮設ハウス~RU間①)



図 2-38 仮設回線(仮設ハウス~RU間②)





図 2-39 RU





図 2-40 アンテナ設置(左 Casel、右 Case2)

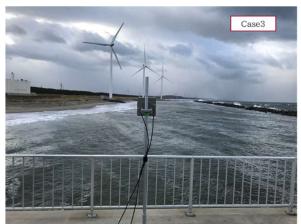




図 2-41 アンテナ設置(左 Case3、右 Case4)

2) ラボによる事前検証(環境)

a. 目的

現地環境影響を排除した環境で、NEC ネッツエスアイ株式会社の既設ラボ施設の機器を利用し、所 要の動作、スペックの基礎データを取得した。また現地実証での各パラメータを確認した。

b. 内容

ラボによる事前検証で確認する項目は以下の通り。

表 2-14 ラボ検証項目

	衣 Z-14 ノ小快i	<u> </u>
項目	内容	手法
端末性能試験	端末単体の性能を確認。また、無線	5 種類ある端末の性能として、RSRP、スルー
	系に ATT を挿入して疑似的に「距	プット、遅延をそれぞれ測定し、現地実証で用
	離」を伸ばしての各性能確認(※)	いる端末を選定する。
ローカル 5G シス	ローカル 5G システム単体で要求ス	ドローンに端末を搭載し、ローカル 5G システ
テム性能試験	ペックを満たすかを確認	ム単体の性能として、RSRP、スループット、
		遅延を測定する。
カメラ映像確認	カメラ(ドローン)+画像確認用 PC	カメラ+画像確認用 PC を接続し、映像送信
	接続による、高精細画像送受信およ	から映像確認の動作を確認する。
	び画像品質の確認	
	ドローン+カメラ+ドローンコント	ドローン+カメラ+ドローンコントロール PC
	ロール PC 接続による動作確認	を接続し、FPV 映像送信およびドローン遠隔
		操作の動作を確認する。
	現地実証で行う各パラメータの絞り	スループットの実力値からのフィールド実証に
	込み	おける送信画像の解像度を決定する。
		設定したパラメータでデータが取得できるか
		確認する。

※「距離」の定義については、2.3(4)2)c を参照

c. 手法

現地実証を想定した測定方法の確立

- ① 秋田実証場所と比べて狭い範囲の測定ポイント (実証 30 か所以上 x 1000) また、免許取得エリアのため、事前にエリアテスタで RSRP を測定し、その結果から「距離」を設 定し、測定箇所を確立した。
 - 風車に見立てた鉄塔周辺で測定
 - 端末単体で以下の測定を実施

- A) 秋田実証で優先的に使用する端末を選定するために、端末の性能を-80~-120dBm の範囲で RSRP、スループット、遅延時間を測定
- B) ローカル 5G システム単体の性能確認として、図 2-44 で地上 $1.5m \Rightarrow 10m$ を 5m ずらしながら、-90 から -100 dBm の各範囲で飛行し RSRP、スループット、遅延時間を測定
- C) ローカル 5G の電波を使ってのドローン飛行にはオペレーターが 2 人必要であるが、ラボ検証 当日は1名体制だったため、映像確認はドローンを飛ばさず、-90,-100,-110,-のポイントで台車に搭載し実施
- ② ドローン飛行経路(鉄塔 東、北、西面で実施)
 - ① ドローン離陸、
 - ② 鉄塔面 10m 位置まで浮上(停止)
 - ③ 5m 面を移動(停止)
 - ④ 1.5m 位置まで降下(停止)
 - ⑤ 5m 面を移動(停止)
 - ⑥ 離陸ポイントに戻り降下、着陸
 - ※①の時点でエリアテスタの測定開始ボタンを押下する。

各停止位置の停止時、移動開始時の時間を確認する。(3 分 30 秒停止) このタイミングで、スループット、ping も測定する。

 $%10\lambda$ (60cm)範囲のドローンの位置精度も合わせて確認する。(手動操作、揺らぎ等)

※ドローンのバッテリー交換のタイミングで順番が変更になる場合あり。

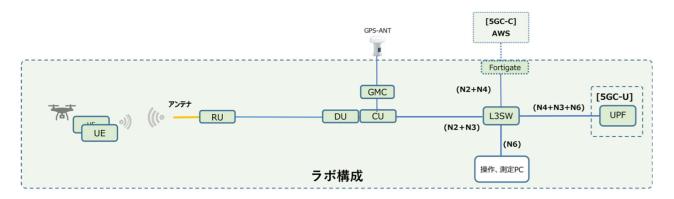


図 2-42 NEC ネッツエスアイ株式会社 ラボネットワーク構成図



図 2-43 ラボ検証作業区画 出典:国土地理院地図

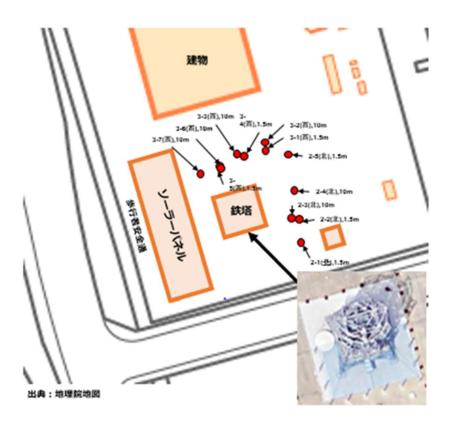


図 2-44 ローカル 5G システム性能測定場所 出典:国土地理院地図

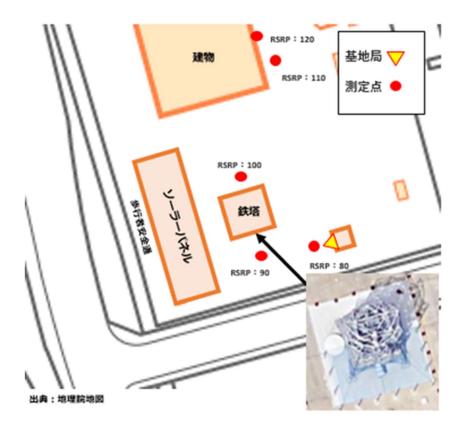


図 2-45 端末性能測定場所 出典:国土地理院地図

d. 結果

ア) 端末性能試験

候補端末

- ① FG900CS
- ② RAKU Plus
- ③ KSG-C 100A

現地では①の端末にて実証を行う。理由として、エリア―テスタで測定した RSRP に対して、端末自身で測定した RSRP が高い結果(=アンテナの感度良い)となり、それに伴いスループットが出ている。 ①については電源供給が必要なため、ドローン側のコンパクト PC が DC12V を供給していただくことで、現地実証にて連続試験を行う(※)。

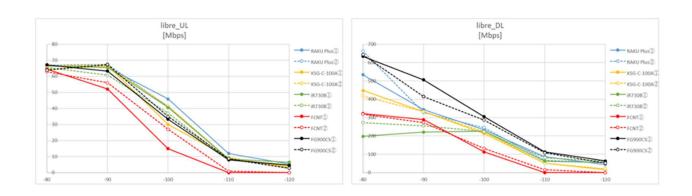
(※)電源供給が不安定になる場合は、②を代替えの候補として使用する。

表 2-15 端末性能測定結果

禁束/エリアテスを測定RSRP			-80					-90					-100					-110					-120		
效末測定結果	RSRP [dBm]	libre_UL [Mbps]	libre_DL [Mbps]	iperf_UL [Mbps]	iperf_DL [Mbps]	RSRP [dBm]	libre_UL [Mbps]	libre_DL [Mbps]	iperf_UL [Mbps]	iperf_DL [Mbps]	RSRP [dBm]	libre_UL [Mbps]	libre_DL [Mbps]	iperf_UL [Mbps]	iperf_DL [Mbps]	RSRP [dBm]	libre_UL [Mbps]	libre_DL [Mbps]	iperf_UL [Mbps]	iperf_DL [Mbps]	RSRP [dBm]	libre_UL [Mbps]	libre_DL [Mbps]	iperf_UL [Mbps]	iperf_DL [Mbps]
RAKU Plus 1	-79	66.7	534	61.6	533	-83	65.6	344	62.1	407	-101	45.9	234	50.6	305	-113	11.9	87.2	11	85.5	-119	5.4	43.9	4.55	42.7
RAKU Plus 2	-79	67	663	62.4	540	-89	67.4	328	62.4	340	-103	41	245	39	232	-114	8.39	66.9	6.93	91.4	-125	2.7	57	3.45	40.4
KSG-C-100A①	-83	66.4	448	62.3	414	-88	66.7	333	62	309	-105	30	213	29.6	164	-112	9.42	51.9	8.3	45.6	-118	3.07	16.8	2.98	15.4
KSG-C-100A2	-80	64.7	418	58.5	458	-91	66.2	332	62.2	314	-101	41.5	223	32.5	195	-111	8.68	51.4	7.48	37.9	-120	3.89	20.8	3.23	15
iR730B①	-83	66.4	198	61.4	257	-86	65.5	221	52	165	-100	40.6	226	30.6	195	-115	8.51	62.6	6.88	72	-119	6.51	55.2	6.53	33.3
iR730B2	-83	65.6	273	60.7	257	-88	60.7	256	58.7	250	-98	37.1	224	38.8	189	-109	7.75	81.3	7.56	94.1	-116	4.87	61.9	4.29	56.8
FCNT(1)	-88	64.5	322	51.7	319	-94	52.1	289	45.8	271	-108	14.9	113	13.1	139			測定不同	ij				測定不可	ij	
FCNT2	-86	62.9	319	62.4	311	-95	56	273	47.7	272	-106	27	132	17.4	119	-124	0.92	15.6	1.75	16.5			測定不同	ij	
FG900CS1	-77	67.2	634	62.2	609	-87	63.3	506	57.3	481	-98	33.3	305	32.4	278	-111	8.03	113	7.29	102	-113	4.59	63.6	3.6	54.2
FG900CS2	-76	63.9	643	62.4	621	-85	67.3	414	61.4	396	-96	35	287	33.8	257	-110	8.77	108	8.23	99.9	-114	2.73	52.2	2.36	58.3

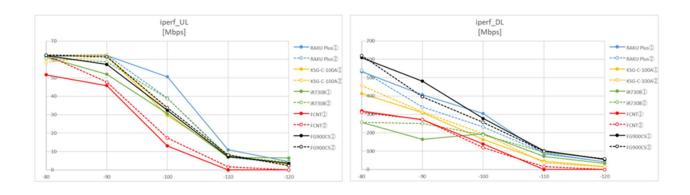
表 2-16 端末遅延時間比較結果

	-80	-90	-100	-110	-120
端末/エリアテスタ測定RSRP 端末測定結果	遅延時間 [ms]	遅延時間 [ms]	遅延時間 [ms]	遅延時間 [ms]	遅延時間 [ms]
RAKU Plus①	24.7	18.7	17.9	23.4	17.1
RAKU Plus2	21.7	19.3	20.9	20.1	24.1
KSG-C-100A①	18	19.7	18.3	24.7	24.7
KSG-C-100A2	21.4	20.6	20.3	25.2	25.8
iR730B①	23.8	21.7	20.8	25.1	23.8
iR730B2	24.5	22.2	23.6	22.8	23.4
FCNT1	22.3	23.9	19.4	測定不可	測定不可
FCNT2	23.4	23.6	21.7	23.9	測定不可
FG900CS①	19.4	18.2	20	20.7	22.4
FG900CS2	25.1	25	21.1	23.9	23.6



※IDYは指向性のためアンテナ向きでスループットにブレあり

図 2-46 端末測定スループット比較測定結果(Libra Speed)



※IDYは指向性のためアンテナ向きでスループットにプレあり

図 2-47 端末測定スループット比較測定結果(iperf)

イ) ローカル 5G システム性能試験

候補端末の内、ドローンからの電源供給ができないため、②の端末にてドローンに搭載して性能試験を実施。RSRP に対して十分なスループット性能が出ており、この結果をもとにフィールド実証の参考データとする。遅延については RSRP の影響を受けない想定の結果となっている。

表 2-17 ローカル 5G システム性能測定結果

測定ポイントでの取得データ

端末:RAKU Plus①

エリアテスタ エリアテスタ 1.5m or 10m

中央值

ポイント	北維	東経	地上高(m)	測定回数(回)	RSRP(dBm)	スループット(DL)Mbps	スループット(UL)Mbps	遅延時間(msec)
2-1 (北-小屋側)	35.54238646	139.672799	1.5	1000	-83.9	482	61	26.4
2-2 (北)	35.54243909	139.6727978	1.5	1000	-89.1	331	54.2	25.7
2-3 (北)	35.54244108	139.6727907	10	1000	-102.4	297	60.8	23.9
2-4 (北)	35.54248463	139.6727961	10	1000	-104.3	240	36.2	26.5
2-5 (北)	35.54255349	139.6727829	1.5	1000	-100.8	192	28.2	26.0
3-1 (西一富士通側)	35.54255662	139.6727498	1.5	1000	-104.55	213	26	25.6
3-2 (西)	35.54256481	139.6727484	10	1000	-102.7	195	25.9	26.5
3-3 (西)	35.542569	139.672694	10	1000	-102.6	195	29	25.8
3-4 (西)	35.54256556	139.6727039	1.5	1000	-98.7	242	26.6	26.2
3-5 (西)	35.54253857	139.6726453	1.5	1000	-100.3	223	28.2	27.7
3-6 (西)	35.54253953	139.6726416	10	1000	-99.6	209	32.1	25.9
3-7 (西-道路側)	35.54254047	139.6725964	10	1000	-101.6	198	28.9	26.1

ウ)カメラ映像確認

ドローンへの端末搭載位置によって電波受信の向きの影響がある可能性があると考え、表 2-18 の通り、ドローンに搭載された端末がアンテナ方向を向く場合と、逆方向を向く場合との比較を実施した。結果、受信状況が弱い場所では搭載位置の影響が顕著に確認された。しかし、十分な受信強度がある場合の端末取り付け位置の影響は大きくないと判断し、フィールド実証時における基地局アンテナに対するドローン向きは考慮しないこととした。また、解像度についても良好な電波受信環境であれば 5 秒/枚程度で画像を受信できていたことから、フィールド検証時にもラボ検証時の設定通りに撮影して問題ないことを確認できた。

ドローン+カメラ+ドローンコントロール PC を接続して、FPV 映像送信およびドローン遠隔操作の動作確認については、ドローン側とローカル 5G 通信を利用可能なサーバルーム側との携帯電話による

コミュニケーションにより、問題なく FPV 映像送信および遠隔操作による動作が可能であることを確認した。

平均画像 1枚あたりの 端末 画像取得時間 画像枚数 UL DL ping No. 電界 (COMPAL) サイズ 取得時間 (Mbit/sec) (M bit/sec) (ms) (秒) (枚) 向き (秒/枚) (MB) 1 -90dBM 45.2 412 19.396 178 21.43 3.6 逆 2 251 21.4 -90dBM アンテナ方向 60.9 443 18.396 50 5.0 3 アンテナ方向 39.2 266 51 21.18 5.2 -100dBM 293 19.398 4 238 21.8 -100dBM 46.7 250 19.454 50 4.8 逆 5 -110dBM アンテナ方向 9.11 89.1 21.781 664 28 20.14 23.7 6 459 20.93 -110dBM 4.69 40.1 19.951 6 76.5

表 2-18 課題実証ラボ検証結果

エ)ラボ検証結果・課題

ラボ検証で明らかになった課題およびフィールド実証に向けて想定された課題を表 2-19 にまとめた。 ラボ検証を通して、

- ・ ドローンに測定器を搭載することにより、バッテリーに関係する課題を確認した。フィールドで1回 に測定できるポイントが3箇所程度となることから、交換の時間等を考慮したスケジュール作成 を事前に検討できることができた。また、フィールドでの測定条件を事前に把握することで、事前 に準備をすることができた。
- ・ ネットワーク・システムについて、本実証向けにコンパクト PC および CPE(電源供給必要)を搭載するために必要な設定および電源供給の課題把握することで、フィールド測定前に確認、準備することができた。

#	カテゴリ	課題	対処策(すべて解決済)
1	ドローン	ドローンのバッテリーの持続時間(10分)	検証タイムスケジュールへの影響を考慮して、測定器の測定サイクルを短縮
2		バッテリー交換時の搭載機器の影響	搭載する端末、PC再起動時間を考慮した飛行スケジュール計画を設定
3		バッテリー交換時に端末のL5G疎通確認が、離発着 場所によっては不可	Caseごとに離発着場所、疎通確認方法を確立済み
4		ドローンの離発着には5m四方の開けたスペースが必要	離発着場所を確認済み
5		飛行経路の設定方法	緯度、経度の設定によって飛行ルートをあらかじめ設定しておく
6		定在波の影響回避(10 λ)	ドローンの風の揺れの範囲で問題なし
7		磁場の影響	現地で磁場の影響ないこと事前に確認済み
10		FPV映像配信	キャプチャ動画を確認したところ、たまに画像が飛んでしまう現象が起きて いる。実証は飛びの発生しないタイミングで実施することで回避
11	ネットワーク・	コンパクトPCと端末の接続でトラブル	コンパクトPCに固定IPアドレスを付与することで解決
12	システム	マグナス端末	ドローンから電源供給でくるよう確認済み

表 2-19 課題一覧

3) ネットワーク・システムの構築

ネットワーク・システムの構築スケジュールは以下の通り。

	22年		23年	23年					
	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
現地調査	-								
回線調査	-								
回線調達									
占用調整		-							
占用申請			-						
免許事前確認		•							
免許申請					-				
 発注手配 									
回線敷設工事				•					
仮設ハウス工事				-					
ラック・電源工事				-					
機器設置調整				-					
実験									
(ラボ検証)					-				
実験									
(フィールド検証)									
撤去·整地									→

図 2-48 ネットワーク・システムの構築スケジュール

4) ネットワーク・システムの運用

今回の実証においては、実証目的・内容を把握している株式会社秋田ケーブルテレビ、NEC ネッツエスアイ株式会社、株式会社 Dshift の技術者にてシステム操作を行うことで、ユーザーによる予期せぬシステム操作などが発生しない運用体制とした。また、実証期間中に発生したシステム不具合については、上記記載の技術者を中心に迅速に原因特定および対処を行う運用とした。

実証期間中の実証参加者からの問い合わせ等は、記録・対応を行う体制を敷いていたものの、特に発生しなかった。なお、ユーザーによるシステム操作が発生しないため、本実証においてヘルプデスクは 設置しないものとした。

2.4 システム機能・性能・要件

(1) システム全体の性能

システムの性能は技術実証および課題実証の内容を満たすカバーエリアを設計でき、また後述の課題実証に必要十分な伝送性能を有する下記システムとした。

NEC MB5400						
対応周波数帯	4.8GHz-4.9GHz					
最大出力	33.6dBm(2300MW)x2					
空中線利得	8.5dBi, 17dBi					
占有帯域幅	100MHz					
MIMO レイヤ数	ダウンリンク 2x2 MIMO					
変調方式	最大 256QAM					
最大スループット	理論値					
	ダウンリンク 700Mbps(同期 TDD)					
	アップリンク 65Mbps(同期 TDD)					
ネットワーク接続方式	10Gbps LAN					
時刻同期方式	PTP 同期方式					
電源	AC100V					

表 2-20 システム性能

(2) コアネットワーク性能(クラウドコア)

コアネットワーク性能(クラウドコア)は以下の通り。

- ア、規格:3GPP で規定される 5G コアとして動作し、クラウドサービスとして提供される。
- イ、 認証:ローカル 5G 基地局制御部(CU/DU)と接続し、SIM を用いて端末を認証し、データ通信を処理できる。
- ウ、接続方法:VPN ルータとそれに対向する VPN ルータ機能をクラウド側で提供することによりインターネットを経由して本クラウドコアサービスへアクセスすることが可能である。
- 工、管理機能:加入者管理·認証機能(UDM)を有する。
- 才、最大収容端末数:10,000以上
- 力、最大同時接続数:10,000以上
- キ、AMF(Access and Mobility Management Function)機能を有する。
- ク、SMF(Session Management Function)機能を有し、ローカル 5G U-plane 装置(UPF) と接続できる。
- ケ、冗長化:UDM、AMF、SMF の各機能が複数サーバで構成され冗長化されている。

2.5 その他

2.5.1 実証システムの拡張性等

本実証で使用しているクラウドコア、CU/DU、RU は 3GPP に準拠しており、今後の各リリースについても拡張性を具備している。また、本実証から得られた結果および知見に基づき、将来実装での最適なシステム構成においても同様の拡張性を具備していることを必要要件とする。

2.5.2 実証システムの安全性確保のための対策

(1) 特定高度情報通信技術活用システム

本実証にて使用した基地局設備は特定高度情報通信技術活用システムの開発供給および導入の促進に関する法律(令和 2 年法律第 37 号)に基づく開発供給計画認定を受けた実績を有する事業者が開発供給した機器に該当する。認定開発供給事業者名、開発供給計画認定番号、認定日等を下記に記載する。

- · 認定開発供給事業者名:日本電気株式会社
- · 開発供給計画認定番号:2021 開 1 総経第 0001 号 3
- · 認定日等:令和 4 年 3 月 28 日認定

また、システムの設計、調達・構築、運用、システム停止の各段階において情報セキュリティに関する取り組みを実施し、本実証にて使用する機器(ネットワーク設備、コア設備)はサプライチェーンリスクを含むサイバーセキュリティ対策が施されている状態を維持した。また、無線ネットワーク部分はSIM認証を活用しアクセス可能な主体を制限し不正アクセスを防止する対策をとった。

(2) その他の実証システム

本実証ではクラウドコアを利用したが、ユーザーデータはローカルのサーバにとどめることとした。またドローン搭載のカメラに人物等が映り込む可能性があるが、本データもローカルの画像確認用 PC 内部にとどめたため、クラウドサービス等の外部ネットワークには送信しない構成とした。これによりデータ伝送経路全般に渡り、セキュリティを確保した。

3. ローカル 5G の電波伝搬特性等に関する技術的検討(技術実証)

3.1 実証概要

(1) 技術実証の概要

本実証では NEC 製のローカル 5G 基地局を使って検証を行った。ローカル 5G の電波伝搬特性、 モデルの精緻化の観点より、課題実証 Case2 の配置において指向アンテナによる全海上伝搬、課題実 証 Case3 の配置において指向アンテナによる半海上半陸上伝搬モデルを検証した。

また、本実証は海上および上空でのローカル 5G 利活用を想定した精緻化による審査基準等の改定に向けた検討に寄与するものである。具体的には他海域への展開やドローン搭載カメラによる画像伝送などのユースケース展開・普及につながるものである。また、現時点ではローカル 5G の端末は自己土地利用に限り端末の移動は認められているが、今後ドローン等により他者土地利用での活用ニーズが想定される。ローカル 5G 端末の他者土地への移動が許容されることで、ローカル 5G のさらなる普及に寄与し得るものである。

表 3-1 技術実証の概要

項目			該当(○·×)
技術実証の	周波数带	4.8GHz 带	0
実施環境		28GHz 帯	×
		キャリア 5Gの周波数帯	×
	屋内外	屋内	×
		屋外	0
		半屋内	×
	周辺環境	都市部	×
		郊外	×
		開放地	×
		その他	海上·沿岸
テーマ別	I.電波伝搬モデルの精緻化	Kの精緻化	0
実証		Sの精緻化	×
		Rの精緻化	×
		その他の精緻化	×
	II.エリア構築の柔軟性向上	実施の有無	×
	III.準同期 TDD の追加パ	TDD2の検討	×
	ターンの開発	TDD3の検討	×
		TDD2、3 以外のパターンの検	×
		討	
		追加パターンを具備した実機で	×

(2) ローカル 5G の利用環境、所要性能

本実証においては、用途より、可用性、経済性、安全性を鑑み、下記の性能要件とした。

- ・ 操縦遅延&操作用画像伝送遅延:0.1 秒/2=50ms 風車とドローンは 10m の離隔をとり、風速 10m/s の風が吹いている中、手動制御への切り替えによるドローンの風車への衝突回避のために許容可能な伝送遅延を算出。
- ・ 高精細画像伝送速度:最大値 50Mbps 点検中のドローン待機時間低減のために、点検画像 1 枚を 30MB と仮定し安全率 2 を考慮した上で、10 秒程度で地上側に伝送可能な速度として伝送速度最大値を想定。(30MB を 10 秒で送ることができなければ、SD カード受渡し方式から変更する優位性がなくなる。)

衣 5 と ラステム性能安什衣										
必要なシステム	伝送速度	伝送遅延	接続台数							
ドローン遠隔操縦	500kbps	50ms	1							
操縦用画像伝送	8Mbps	50ms	1							
高精細画像伝送	最大 50Mbps	100ms	1							

表 3-2 システム性能要件表

電波法関係審査においては今回採用する 100MHz システムの場合、カバーエリアは-84.6dBm、 干渉調整区域(許容干渉レベル)は-91.0dBm である。

		X 0 0 X 11			
 無線設備の区分	40MHz	50MHz	60MHz	80MHz	100MHz
無務設制の人	システム	システム	システム	システム	システム
4.00 -117	_	-87.6dBm	-86.9dBm	-85.6dBm	-84.6dBm
カバーエリア	88.6dBm				
調整対象区域	_	-94.0dBm	-93.0dBm	-92.0dBm	-91.0dBm
- 調整刈家区域 	95.0dBm				

表 3-3 受信雷力一覧表

3.2 実証環境

本実証では、将来像の洋上ウィンドファームへの実装のための海上伝搬モデルおよび、ドローン活用を想定した天空方向への無線伝搬モデルのローカル 5G 運用にあたり、どのような特性があるのか、またローカル 5G のこのような環境におけるネットワークとしての有効性を検討した。この目的を鑑み、実証 Case2 および実証 Case3 の配置で実証を行った。

また、通常では CU/DU、UPF のサーバ群はデータセンター等に整備することを想定するが、本実証では、データセンターから実証場所までの距離が離れていることから、サーバ群を実証場所の仮設ハウス内に整備した。

以下に実証時のネットワーク、物理・論理構成図および SW のポート収容、パラメータ(VLAN/IP アドレス)一覧を示す。

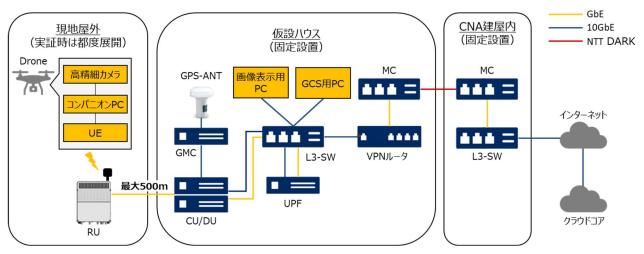


図 3-1 ネットワーク構成図

なお、環境要因を可能な限り排除し、システム全体の基礎データ取得のため、事前にラボ環境での動作、性能評価を行った。(1.1.1(1)1)参照)

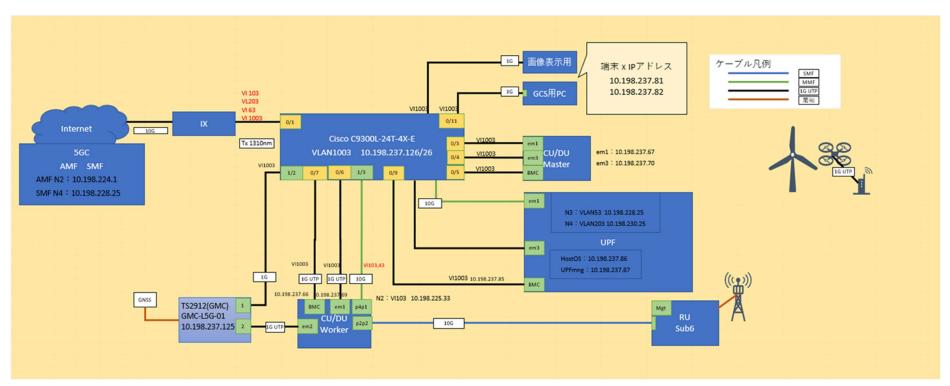


図 3-2 物理・論理構成図





図 3-3 物理(アンテナ設置)構成

表 3-4 物理(ドローン接続)構成

ドローンにて点検画像撮影時の構成

電波伝搬検証時の構成 (ドローンに測定器を搭載)





仮設ハウスにある画像表示用 PC でカメラの画像を 見ながら、GCS 用 PC にてローカル 5G ネットワー ク経由で UE とコンパニオン PC を LAN ケーブル (一部 Type-C 変換を使用)で接続し、ドローンを制 御した。

コンパニオン PC と UE は搭載されているカメラ位 置と整合しながら搭載した。 専用のユニットを接続、測定器のみ搭載した。ドローンの制御は、手動と自動プログラムで行った。

表 3-5 SW ポート収容一覧表

	ポート番号	接続先	SFP	VLAN	備考	λ£
	1/0/1					
	1/0/2					
	1/0/3	5GC CU/DU (master)	UTP	1007	em1	
	1/0/4	5GC CU/DU (master)	UTP	1007	em3	
	1/0/5	5GC CU/DU (master)	UTP	1007	BMC	
	1/0/6	5GC CU/DU (worker)	UTP	1007	em1	
	1/0/7	5GC CU/DU (worker)	UTP	1007	BMC	
	1/0/8					
	1/0/9	UPF port3	UTP	1007	port3	
	1/0/10	UPF BMC	UTP	1007	BMC	
	1/0/11	画像表示用PC	UTP	63	N6にてUE側と通信	
	1/0/12	GCS用PC	UTP	63	N6にてUE側と通信	
	1/0/13	作業用PC(iperfなど)	UTP	63	N6にてUE側と通信	
C9300L-24T-4X-E	1/0/14					
C3300L-241-4X-L	1/0/15					
	1/0/16					
	1/0/17					
	1/0/18					
	1/0/19	インストール用OAMポート	UTP	1007		
	1/0/20					
	1/0/21	GMC port1	UTP	1007	OAM	
	1/0/22					
	1/0/23					
	1/0/24	IX	UTP	103,203,63,1007	N2,N4,N6	
	1/1/1					
	1/1/2	_	-	_	_	
	1/1/3	5GC CU/DU (worker) p4p1	10G	103,43	N2,N3	MMF
	1/1/4	UPF port1	10G	53,203,63	N3,N4,N6	MMF
TC2010(CMC)#1	1	C9300L-24T-4X-E	UTP	-	OAM	
TS2910(GMC)#1	2	5GC CU/DU (worker)	UTP	-	CU/DU用	

表 3-6 パラメーター覧表

	アドレス	HOST	サブネット	VLAN
RAN(N2)	10.198.225.32		/28	103
	10.198.225.33	worker(vCU-CP)		
	10.198.225.46	GW		
	10.198.225.47	ブロードキャスト		
RAN(N3)	10.198.227.32		/28	43
	10.198.227.33	worker(vCU-UP)		
	10.198.227.46	GW		
	10.198.227.47	ブロードキャスト		
UPF(N3)	10.198.228.24		/29	53
	10.198.228.25	UPF#秋田		
	10.198.228.30	GW		
	10.198.228.31	ブロードキャスト		
UPF(N4)	10.198.230.24		/29	203
	10.198.230.25	UPF#秋田		
	10.198.230.30	GW		
	10.198.230.31	ブロードキャスト		
UPF(N6)	10.198.232.24		/29	63
DNN1	10.198.232.25	UPF#秋田		
	10.198.232.26	作業用		
	10.198.232.27	GCS		
	10.198.232.28	画像配信		
	10.198.232.29	L3Sw		
	10.198.232.30	GW		
	10.198.232.31	ブロードキャスト		
F1-C	10.198.233.24		/29	13
	10.198.233.25	worker(vCU-CP)		
	10.198.233.26	worker(vDU1)		
	10.198.233.27	worker(vDU2)		
	10.198.233.30	GW		
	10.198.233.31	ブロードキャスト		
F1-U	10.198.234.24		/29	23
	10.198.234.25	worker(vCU-UP)		
	10.198.234.26	worker(vDU1)		
	10.198.234.27	worker(vDU2)		
	10.198.234.30	GW		
	10.198.234.31	ブロードキャスト	•••••	
E1	10.198.235.24		/29	33
	10.198.235.25	worker(vCU-CP)		
	10.198.235.26	worker(vCU-UP1)		
	10.198.235.27	worker(vCU-UP2)		
	10.198.235.30	GW (VCC CI Z)		
	10.198.235.31	ブロードキャスト		

	アドレス	HOST	サブネット	VLAN
M&0	10.198.237.64		/26	1007
	10.198.237.65	Master iDRAC		
	10.198.237.66	Worker iDRAC		
	10.198.237.67	Master em1(br0)		
	10.198.237.68	Master CDM		
	10.198.237.69	Worker em1		
	10.198.237.70	Master		
	10.198.237.71	mCMS(cms1)		
	10.198.237.72	mCMS(cms2)(PEER CMS)		
	10.198.237.73	mCMS(VIP)		
	10.198.237.81	端末1		
	10.198.237.82	端末2		
	10.198.237.85	akita_UPF00_BMC		
	10.198.237.86	akita_UPF00_host		
	10.198.237.87	akita_UPF00_mgmt		
	10.198.237.88	akita_UPF00_6wg5		
	10.198.237.89	akita_UPF00_zabbix		
	10.198.237.90	akita_UPF00_HAASVM0		
	10.198.237.124	C9300		
	10.198.237.125	GMC		
	10.198.237.126	GW&NTP		
	10.198.237.127		Ĭ	

3.3 実施事項

3.3.1 電波伝搬モデルの精緻化

(1) 実証の目的・目標

1) 背景となる技術的課題と実証目的

将来モデル 1(港湾区域等でのウィンドファーム展開モデル)および、将来モデル 2(一般海域でのウィンドファーム展開モデル)おける海上または沿岸地域においては、海面反射、潮位変動、波高の影響により長期、短期の変動が発生し、電波伝搬特性として一般的なモデルに当てはまらない可能性が高い。また水平より一定の仰角以上での上方向への伝搬は一般的には自由空間伝搬モデルとなるが、同様に海上固有の特性を有する可能性がある。さらに風力発電施設近傍への基地局設置が想定される中、施設が遮蔽物として伝搬特性に影響を与える可能性がある。

将来実装された際に、エリアシミュレーション(机上設計)と実測値との間で差異が発生すると、所望の保守点検効率化を得られない、または大幅なシステム変更、追加投資などのコストが発生し、普及の妨げになることも想定されるためエリア設計の精緻化が求められる。

2) 実証目標

電波法関係審査基準に記載の電波伝搬モデルの伝搬損失 L の精緻化を目標とした。伝搬損失 L の中のどのパラメータの精緻化を行うかは後述する。受信レベル(受信電力)を求める計算式は下記の通りとなる。

Pr = Pt + Gt - Lf + Gr - L - 8

 Pr[dBm]
 :受信レベル(受信電力)

Pt[dBm] :送信電力(基地局の空中線電力)

Gt[dBi]:送信アンテナ利得

Lf「dB」:基地局の給電線損失

Gr[dBi] :受信アンテナ利得

L[dB] :伝搬損失

伝搬損失パラメータ L は自由空間伝搬損失式および拡張秦式を基礎として算出され、伝搬距離により異なる。今回の実証においては伝搬距離 100m 超であり、以下の式で定義される。

本実証においては基地局設置が屋外であること、基地局と測定点との距離が 100m 以上確保可能であること、水面の影響が存在する環境であることから、伝搬損失 L の中のパラメータ K の精緻化を目標とした。

$$\begin{split} L &= L_{H} \! = \! 46.3 + 33.9 log_{10}(2000) + 10 log_{10}\left(\frac{f}{2000}\right) - 13.82 log_{10}\left(max(30, H_{b})\right) + \left\{44.9 - 6.55 log_{10}\left(max(30, H_{b})\right)\right\} \\ &\left(max(30, H_{b})\right) \left\{(log_{10}(d_{xy})\right)^{a} - a(H_{m}) - b(H_{b}) + R - K - S \right\} \end{split}$$

f(MHz) : 使用する周波数 中心周波数 4850MHz を使用

H_h (m) : 基地局の空中線地上高

d_{xy}(km) : 基地局と伝搬損失を算定する地点との距離

H_m (m) : 陸上移動局の空中線地上高

R(dB) : 基地局を屋内に設置する場合の建物侵入損(16.2)。実際の建物侵入損

が明確な場合は、明示の上、建物に応じた値を適用する。

α:遠距離に対して考慮する係数であり、下記による。

$$\alpha = 1: d_{xy} \leq 20km$$

a(H_m):陸上移動局高に対して考慮する補正項であり、下記による。

大都市 : 市街地のうち特に大規模な都市の領域であって、概ね 5 階建て以上の建

物が密集した地域

中小都市 : 市街地のうち、大都市に相当する地域以外のもの

b(Hb) :基地局高に対して考慮する補正項であり、下記による

$$b(H_b) = \begin{cases} 0; H_b \ge 30m \\ 20log_{10}\left(\frac{H_b}{30}\right); H_b < 30m \end{cases}$$

K ・ 地形情報データにより算入しにくい地形の影響等の補正値であり、通常は 0 と

し、地形水面の反射、小規模の見通し外伝搬の影響等を特に考慮する必要のあ

る場合に算入する。

S(dB) : 市街地、郊外地および開放地に対して考慮する補正値であり、下記による。

・ 市街地(都市の中心部であって、2 階建て以上の建物の密集地や建物と繁茂した高い樹木の混合地域など):S=0.0

・ 郊外地(樹木、家屋等の散在する田園地帯、郊外の街道筋など陸上移動局近傍に障害物はある が密集していない地域):S=12.3

・ 開放地(電波の到来方向に高い樹木、建物などの妨害物がない開けた地域で、目安として前方 300~400m 以内が開けているような畑地・田地・野原など):S=32.5

3) 過年度技術実証からの発展性・新規性

過年度実証における海上面での伝搬路の精緻化実証と比較し、伝搬路の多くが水面である類似性がある。過年度実証においては陸上に固定された基地局からの水平より下向き方向での指向性アンテナによる電波発射および受信点海抜は固定高さ(船舶に設置)となる伝搬環境であった。これに対し本実証では、基地局相当装置が海上位置に設置されていることの他、基地局相当装置のアンテナに上方向のチルトがあること、移動局相当装置をドローンに搭載し高さ方向の移動があることが挙げられる。本実証環境での受信強度は2波モデルによる評価となるが、基地局~移動局間距離が一定以上離れている場合においても、移動局海抜高の変化による影響は大きく受けると考え、取得データ分析において潮位、波高の依存度についても評価した。

(2) 実証仮説

水面環境であり、仕様書別紙 1 「技術実証実施要領」に記載の方向性に合致する。この環境では基本的に直接波と海面反射波の 2 波の合成で評価されるが、潮位が変化した場合基地局アンテナ高および受信点との相対高さが潮位変化に応じた値となるため、これらもパラメータ K に影響を与える可能性が考えられる。同様に波高が変化した場合にも、海面における反射波が影響を受けて、干渉電力の変動の大きさが変化する可能性が考えられる。

本実証環境では移動局海抜高の変化による影響を大きく受けることが考えられるため、取得データ 分析において潮位、波高の依存度についても評価した。また、伝搬路上の海面陸地割合の変化により、 それぞれをモデル化した。(実証 Case2 環境:全海面上、実証 Case3 環境:半海半陸)

図 3-4、図 3-5 の作図に使用した K 値について、算出式と海上伝搬・2 波モデルによる比較を考察するため、算出式中の K 値を仮説としては 0 としてその差分を検証した。

また、K の値について、伝搬路の海面陸地割合等による補正計算の有効/無効、および 2 波モデルによる比較から傾向を考察し、精緻化方針を検討した。



図 3-4 干渉調整区域とカバーエリア図(設置位置②、実証 Case2、受信点地上高 100m) 出典:国土地理院地図



図 3-5 干渉調整区域とカバーエリア図(設置位置②、実証 Case3、受信点地上高 100m) 出典:国土地理院地図

(3) 評価・検証項目

1) 測定

エリア設計で作図したシミュレーション図におけるカバーエリア、調整対象区域内において 30 地点以上の測定を行った。測定項目は RSRP、SIR、通信品質(スループット、遅延時間)とした。また、各測定ケースにおいては高さ方向の移動も行った。具体的には高さ 100m 程度(規制解除および各所との調整により最大 300m 程度)までにおいて一定ピッチで高さを変え測定した。これにより各測定値の高さ方向への変異も把握した。

フィールドでは、算出法エリア図と仮説エリア図のカバーエリアおよび調整対象区域端における実際の受信電力を測定した。また、ある一方向だけではなく、複数方位でのエリア算出法に定めるカバーエリアおよび調整対象区域端について、それぞれ実測により基地局からの距離を確認した。本実証では、基本的な電波伝搬データ取得のため、実証 Casel および実証 Case4 の配置においても各測定を実施した。なお、フィールドでは気象海象状況に応じて、安全に測定ができる範囲で測定を実施した。

	I	☆ 3-7 例足項目C側足機备				
測定項目	測定項目	測定手法	測定する値(単位)	測定機器		
受信電力	RSRP	Anritsu	dBm	ML8780A		
		エリアテスタ				
受信電力	RSSI	Anritsu	dBm	ML8780A		
		エリアテスタ				
電波干渉	SIR	Anritsu	dB	ML8780A		
		エリアテスタ				
通信品質	スループット	SpeedTest ツール	Mbps	CPE		
遅延	遅延時間	Ping	msec	Windows PC		
				(Ping)		

表 3-7 測定項目と測定機器



図 3-6 干渉調整区域とカバーエリア図(設置位置①、実証 Casel、受信点地上高 100m) 出典:国土地理院地図



図 3-7 【精緻化対象】干渉調整区域とカバーエリア図(設置位置②、実証 Case2、受信点地上高 100m) 出典:国土地理院地図



図 3-8 【精緻化対象】干渉調整区域とカバーエリア図(設置位置②、実証 Case3、受信点地上高 100m) 出典:国土地理院地図



図 3-9 干渉調整区域とカバーエリア図(設置位置②、実証 Case4、受信点地上高 100m) 出典:国土地理院地図

2) 測定状況

以下に各 Case における測定状況を示す。測定状況写真のポイント番号はそれぞれ表 3-8 および表 3-22 の測定ポイントに該当する。

a. Casel



図 3-10 Case1アンテナ設置状況





図 3-11 測定ポイント(左ポイント191、右ポイント192)

b. Case2



図 3-12 Case2 アンテナ設置状況





図 3-13 測定ポイント(左ポイント 2、右ポイント 3)





図 3-14 測定ポイント(左ポイント14、右ポイント15)

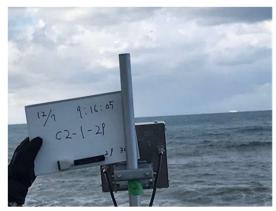




図 3-15 測定ポイント(左ポイント29、右ポイント30)

c. Case3



図 3-16 Case3 アンテナ設置状況





図 3-17 測定ポイント(左ポイント 98、右ポイント 99)





図 3-18 測定ポイント(左ポイント119、右ポイント120)

d. Case4

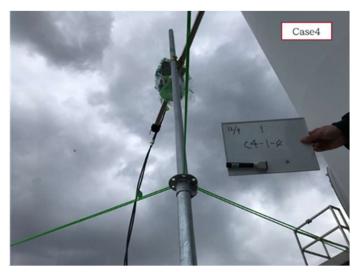


図 3-19 Case4 アンテナ設置状況

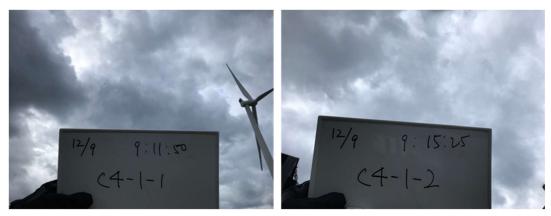


図 3-20 測定ポイント(左ポイント 203、右ポイント 204)



図 3-21 測定ポイント(左ポイント 237、右ポイント 238)

3) 測定場所に関する地形情報

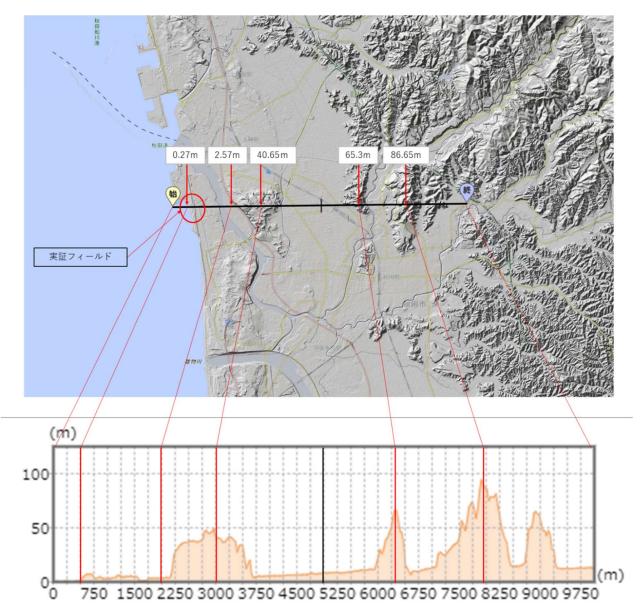


図 3-22 広域地形図·断面図 出典:国土地理院地図



図 3-23 基地局設置位置①(竿太郎風車)地形図·東西断面図(実証 Casel) 出典:国土地理院地図



図 3-24 4号風車付近地形図・東西断面図(実証 Case 2、Case 3、Case 4) 出典:国土地理院地図



図 3-25 5 号風車付近地形図·東西断面図(実証 Case3) 出典:国土地理院地図

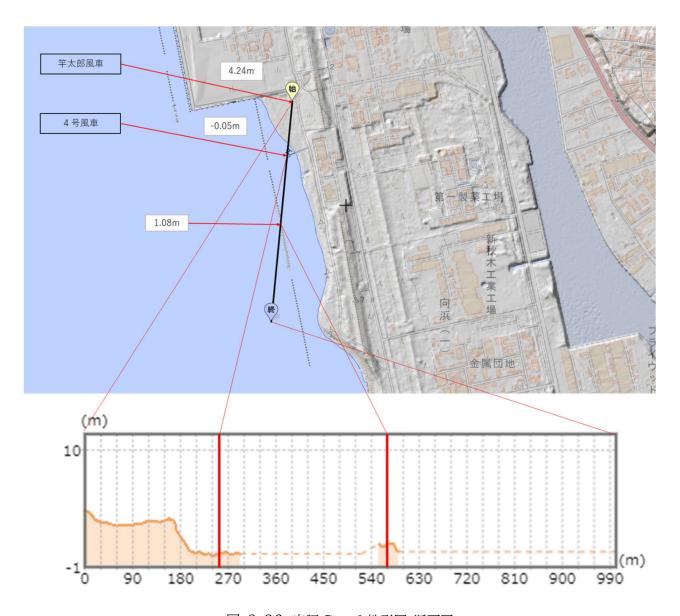


図 3-26 実証 Casel 地形図·断面図 (基地局設置位置①(竿太郎風車)~4号風車間断面図) 出典:国土地理院地図

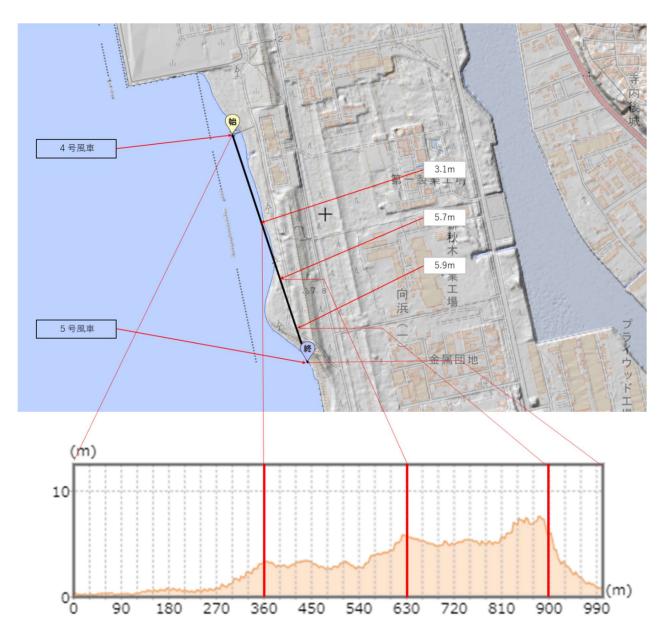


図 3-27 実証 Case3 地形図・断面図 (4号風車~5号風車間断面図) 出典:国土地理院地図

(4) 評価・検証方法

受信電力(RSRP)を30地点以上にて測定し、電波法関係審査に記載の伝搬モデルと比較した。測定方法は事前に確認を得る方法とした。比較の差異は電波法関係審査の伝搬モデルは受信電力(RSSI)を用いるため、測定したRSRPとRSSIを変換した上で比較、検証を行った。RSRPとRSSIの変換式は下記の式を利用した。

RSRP(dBm) = RSSI(dBm) - 10log (12N)

N:リソースブロック数 本実証においては 273 となる。

受信レベルを比較の上、パラメータのチューニングを行いモデルの精緻化を実施した。精緻化の結果をフィードバックし再度机上計算を行い、比較することで精緻化の妥当性を検証した。

測定に際しては定在波の影響を避けるため、1 つの測定点において 10 λ (λ は波長)の範囲で測定位置を動かしながら測定を実施し、得られた全てのサンプルを統計処理し結果とした。測定器の空中線は無指向性とした。

測定点あたりの測定結果に対し、中央値、α、上位 10%値、下位 10%値を算出した。

なお、測定にあたっては、試験系統図、配置等の環境図、実施写真等を収集するとともに測定機器諸元や測定手順、測定データ、並びに伝搬モデルと測定結果の比較等の情報を取りまとめた。

精緻化においては主ビームに沿った面において、X 方向(基地局から離れていく方向)に 10 ポイント程度、Z 方向(上方)に数十 m 程度のピッチで測定点を設定した。実証環境の無線特性測定においては、上記に加えビーム幅を加味した測定点を設定した。高さの取得については、ドローン本体のフライトログの高度データを取得、場合によりトラッカーを同時搭載しての高度データ取得をすることで精度維持を図った。

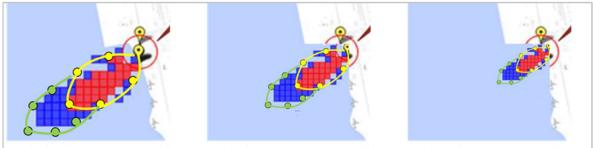
(5) 実証結果および考察

計測値は直接波と海面反射波の 2 波の合成波で評価されるが、潮位、基地局アンテナ高、受信点高さの相対関係が潮位変化に応じた値となる。これらがパラメータ K へ与える影響の可能性を評価するため、単一水平面での評価ではなく、高さを一定ピッチで変動させた各位置での測定結果をプロットした。それを当該各受信点地上高でのシミュレーション結果との対比、分析を行うことで、パラメータ K の精緻化を図った。

また、搬路の海面陸地割合等による補正計算の有効/無効、および 2 波モデルによる比較を実施し、 算出式として 2 波モデルの適用が考えられる精緻化ケースについても考察した。

1) 完成イメージ図

精緻化後のシミュレーション図と実測値をプロットした完成イメージ図を以下に示す。



受信点地上高 1.5m の場合※ 受信点地上高 100m の場合

受信点地上高 300m の場合

※ドローンの飛行安全上、海上10mとする。 (その他、樹木や地形、構造物等との安全離隔距離を確保するための安全飛行高度を考慮して測定を実施)

黄色:実測カバーエリア、緑色:実測調整区域

赤色:精緻化後の算出式によるカバーエリア、青:同調整区域

図 3-28 実証環境に即したイメージ図 出典:国土地理院地図

2) 精緻化測定ポイント

①事前に測定した測定ポイントイメージを以下に示す。



図 3-29 測定ポイント(設置位置②、実証 Case2、受信点地上高 100m) 出典:国土地理院地図



図 3-30 測定ポイント(設置位置②、実証 Case3、受信点地上高 100m) 出典:国土地理院地図

②実際の測定ポイントイメージを以下に示す。

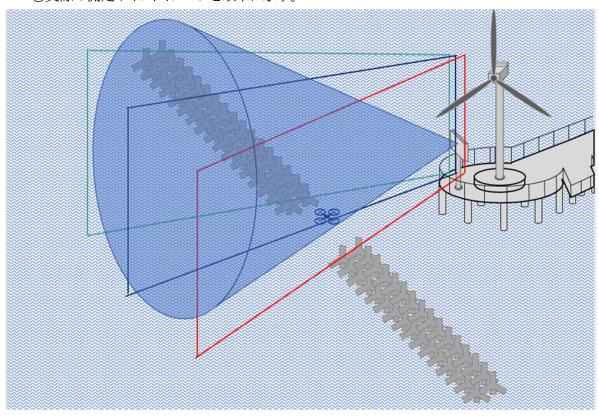


図 3-31 Case2 測定ポイントイメージ(ドローンおよび船舶)

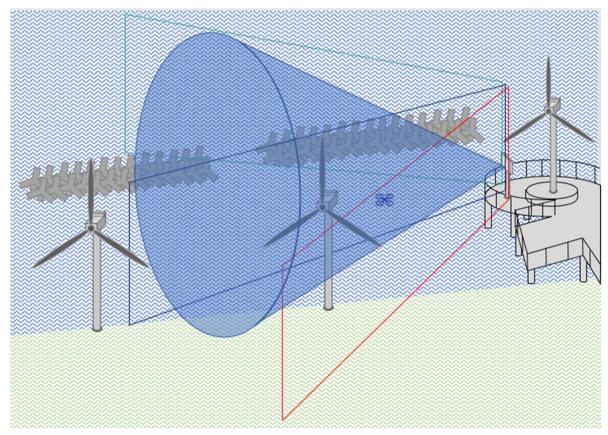


図 3-32 Case3 測定ポイントイメージ(ドローンおよび船舶)

3) 測定フィールド、測定点について

①測定ポイントと位置

今回選定の発電風車は、海岸線上に位置し海面に迫り出す形状であり、洋上風力発電での社会実装 を想定した本実証の検証要件を満たす最適な実施場所である。また、実証作業の安全性を確保しつつ、 海上伝搬における精緻化および課題実証における各評価を行うのに最適な実証場所である。

以下に、各 Case における測定ポイントと位置を図示する。



図 3-33 Case2-1 受信点地上高 10m,50m,100m ポイント番号 出典:国土地理院地図

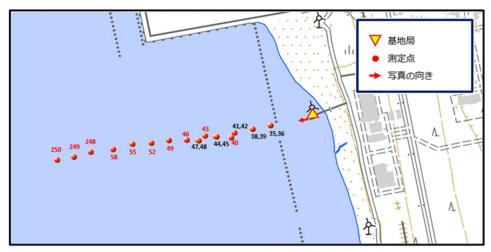


図 3-34 Case2-2 受信点地上高 10m,50m,100m ポイント番号 (赤色番号:3 月測定 船上 1.5m ポイント番号) 出典:国土地理院地図



図 3-35 Case2-3 3 月測定ポイント番号 出典:国土地理院地図



図 3-36 Case3-1 受信点地上高 10m,50m,100m ポイント番号 出典:国土地理院地図



図 3-37 Case3-2 3 月測定 船上 1.5m ポイント番号 出典:国土地理院地図



図 3-38 Case3-3 受信点地上高 50m,100m ポイント番号 出典:国土地理院地図

②基地局設置状況

以下に示す通り、各設置位置に対して、支持柱、支線、錘で固定しチルト可変アンテナ固定具によりアンテナチルト角度を設定した。基地局装置は風雨風雪の影響を受けないように、樹脂製の Box に格納し、作業性と防水性を確保した。

以下に各 Case における基地局設置状況を示す。

·Casel の設置状況





図 3-39 Casel 基地局・アンテナ設置状況

·Case2 の設置状況





図 3-40 Case2 基地局・アンテナ設置状況

·Case3 の設置状況





図 3-41 Case3 基地局・アンテナ設置状況

·Case4 の設置状況





図 3-42 Case4 基地局・アンテナ設置状況

③電波伝搬空間状況

いずれの Case においても、アンテナ前面は広角的に遮蔽物や構造物のない開けた空間となっている。3.3.1(5)7)に述べている通り、Case によって電波伝搬路の陸水混合比が異なる。

以下に各 Case での電波伝搬空間状況を示す。



図 3-43 Casel 電波伝搬空間状況(主ビーム方向のパノラマ写真)



図 3-44 【精緻化対象】Case2 電波伝搬空間状況(主ビーム方向のパノラマ写真)



図 3-45 【精緻化対象】Case3 電波伝搬空間状況(主ビーム方向のパノラマ写真)



図 3-46 Case4 電波伝搬空間状況(アンテナ周辺のパノラマ写真)

4) 測定方法

①ドローンによる測定

端末設置状況確認

- ・ ドローン下部へエリアテスタ、およびローカル 5G 端末を設置(タイラップ止め)
- エリアテスタのアンテナ方向は基地局側となるようドローンオペレーターへ連絡指示
- ・ ローカル 5G 端末は防水のためラッピングを実施

フライト条件等

- ・ 天候が雨雪でないこと(端末、エリアテスタ、ドローン側機器への浸水防止)
- ・ 風速 10m 以下を風速計で監視

位置·高度確定方法

- ・ 事前に測定点を記録、ドローンオペレーターへ緯度経度高度の情報を連絡、自動にて測定点へ 移動
- 緊急時用に手動で操作できるようにオペレーター待機

測定

・ 指定した緯度経度にドローンを飛行させ、エリアテスタで 1,000 データを収集、リモートからコンパクト PC 間で UL/DL スループットおよび遅延を測定 ※ドローンのバッテリー時間を確認しながら、着陸、交換、離陸、測定を行う

②船舶による測定

端末、測定器アンテナ設置

- ・ 船上からローカル 5G アンテナに方向に遮蔽物のない位置に測定台の上に設置
- ・ 端末は常にローカル 5G アンテナに向ける
- ・ 測定器アンテナはオプションの磁石付き台座に取り付けて固定する

位置確定方法

- ・ 事前に測定点を記録、船長に緯度経度の情報を連絡、自動にて測定点へ移動
- ・ 風、潮流に影響で同位置に測定時間中に停泊することが難しく、最終測定点はエリアテスタの 1,000 データの平均緯度経度とする

測定

- ・ 指定した緯度経度に船を移動、停船させ、エリアテスタで 1,000 データを収集
- ・ リモートからコンパクト PC 間で UL/DL スループットおよび遅延を測定



図 3-47 船上端末・測定器アンテナ設置状況

5) 精緻化の方法

以下の手順にて精緻化を行った。

①該当の測定点に対し、実測値と算出式の伝搬損失を比較

実測値の伝搬損失*1,2 Lmes. = -Pr + Pt + Gt + Gr + Lf 算出式の伝搬損失*3,4,5 Lpred. = -Pr + Gt + Gr + Pt - 8

この時各項は以下とする。

Pr:受信レベル [dBm]

Pt:送信電力[dBm]

Gt:送信アンテナ利得[dBi] Gr:受信アンテナ利得[dBi]

Lf:給電線損失[dB]

** 1 実測値 Pr=実測値 RSRP の中央値+ $10log_{10}(12 \times 273)$ で算定

- st 2 実測値 \Pr は給電線損失 $\mathop{\rm Lf}$ を含むため、 $\mathop{\rm Lmes.}$ の計算においても影響を除外するため $\mathop{\rm Lf}$ を加算
- ※ 3 算出式 Pr は人体損失(8dB)を含む。本件ではドローン周辺に人体損失はないため、Lpred. の計算ではその影響を除外するために人体損失(8dB)を減算
- ※ 4 算出式の Pr 計算時に、基地局の給電線損失 Lf は 0 とする
- ※ 5 Lpred.の算出方法は後述する。

②精緻化後の K 値の算出

各測定点 i の実測値 Lmes.(i)と算出式による値 Lpred.(i)から計算される、以下の E が最小となる K 値を最小二乗法により求める。

$$E = \sum_{i} \left\{ L_{pred.}^{i}(K) - L_{mes.}^{i} \right\}^{2}$$

③標準偏差による精緻化の有効性の確認

Lmes.(i)とLpred.(i)に対して平均二乗偏差RMSEで精緻化前後の値を評価する。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (L_{mes.} (i) - L_{pred.} (i))^{2}}{N}}$$

④算出式による伝搬損失 Lpred.の計算方法

電波法関連審査基準における算出式で定義されている基地局・端末の高さは以下のように定義されている。

③ dxy≥0.1kmの場合

 $L=L_H$

 $=46.3+33.9\log_{10}(2000)+10\log_{10}(f/2000)-13.82\log_{10}(\max(30, H_b))+\{44.9-6.55\log_{10}(\max(30, H_b))+(30.900)\}$

 H_b))} $(log_{10}(d_{xy}))^a - a(H_m) - b(H_b) + R - K - S$

f(MHz);使用する周波数

H_b(m);基地局の空中線地上高

dxy(km);基地局と伝搬損失を算定する地点との距離

H_m(m); 陸上移動局の空中線地上高。第2項の定めるところによる。

図 3-48 電波法関連審査基準における算出式の定義

この時 Hb、Hm はそれぞれ

Hb=基地局の空中線地上高

Hm=陸上移動局の空中線地上高

と定義されている。

現状の算出式はこの拡張秦式をベースとしている。

現行の算出式に従い、

Hb:基地局高

Hm:陸上移動局高(ドローン高)

として計算した場合の実測伝搬損失と算出伝搬損失の関係を以下に示す。 なお算出式のうち S 値は、実証環境を鑑み S=32.5(解放地)を採用する。

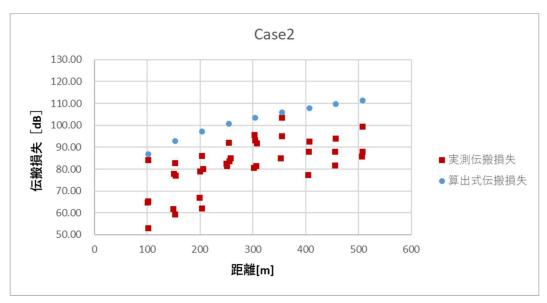


図 3-49 Case2

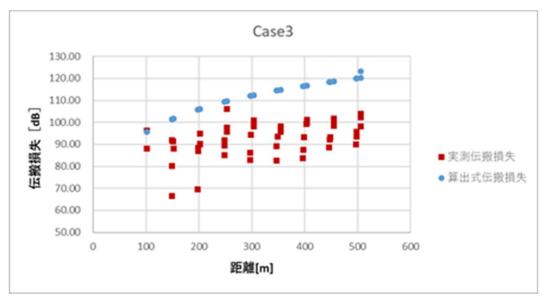


図 3-50 Case3

いずれの距離および移動局高(ドローン高)においても、算出式伝搬損失と実測伝搬損失の間に大きな乖離がある。そこで、以下の制限について評価をする。

拡張秦式(Extended Hata model)は、ITU-R 報告(SM.2028-2)で次の制限がされている。 (出典:令和3年度ローカル5G開発実証調査報告書(技術実証編 全体版より))

- ・ 基地局、移動局にかかわらず、高い方のアンテナ高を Hb、低い方のアンテナ高を Hm とする。
- · lm より低いアンテナ高は、lm を採用する。
- ・ アンテナ高が 200m より高い場合には適用できない。
- ・ アンテナ間の距離が 100 km より離れている場合には適用できない(α の値の制限)。

今回の精緻化では基地局よりも移動局の方が高い高度で測定をしているため、以降、精緻化後の評価については本制限に従い伝搬損失を算出するものとする。

この時のそれぞれのパラメータは以下とする。

Hb:陸上移動局高(ドローン高)

Hm:基地局高

これに基づき計算した場合の実測伝搬損失と算出伝搬損失の関係を以下に示す。

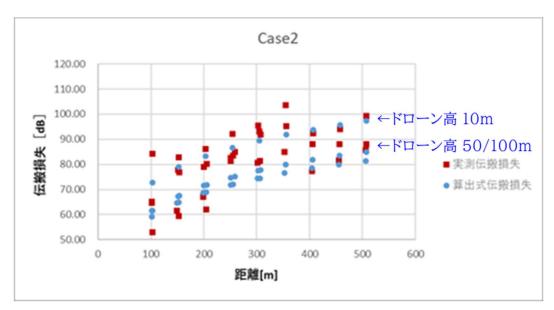


図 3-51 Case2

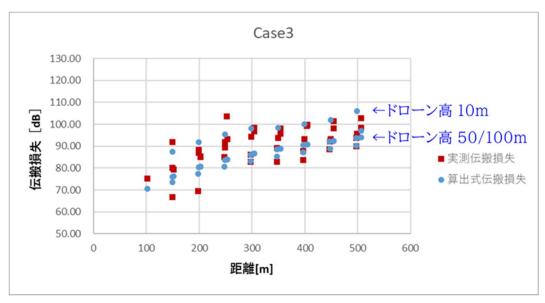


図 3-52 Case3

6) 測定データ

各ポイントでの測定データを以下に示す。 この時 RSRP および標準偏差は以下とする。

RSRP :測定点あたり1000 サンプル以上の測定を実施。

標準偏差 :標本自体の標準偏差 sd を求めるため下記式にて算出。

$$sd = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}$$

$$104$$

n = サンプル数 $X_i = 測定値$

表 3-8 測定ポイントでの取得データ(Case2、3)

ポイ	北緯	東経	地上高	基地局	基地局	基地局	測定	RSRP	SIR	標準偏
ント			(m)	からの	との距	から見	回数	(dBm)	(dB)	差
番号				角度	離	たチル	(回)			
				(TN)	(m)	ト角度				
4	39.7383	140.052	10.01	236	97.04	-13.28	1000	-84.2	21.7	3.0617
5	39.7383	140.052	50.09	236	105.42	9.02	1000	-80.7	21.4	1.4439
7	39.7381	140.052	10.01	236	145.55	-13.52	1000	-82.9	22.1	1.6214
8	39.7381	140.052	50.05	236	151.27	1.81	1000	-82.6	21.5	1.6713
9	39.7381	140.052	100.04	236	171.77	18.08	1000	-81.3	22.2	0.8458
10	39.7378	140.052	10.02	236	194.06	-13.64	1000	-86.1	22.0	1.4980
11	39.7379	140.052	50.03	236	198.39	-2.01	1000	-80.4	21.8	0.8817
12	39.7379	140.052	100.02	236	214.43	11.18	1000	-83.8	21.9	2.0453
13	39.7376	140.051	10.03	236	242.58	-13.71	1000	-92.1	21.3	3.8557
14	39.7376	140.051	50.03	236	246.06	-4.35	1000	-81.2	21.8	0.7049
15	39.7376	140.051	100.02	236	259.17	6.61	1000	-86.6	21.9	1.0680
16	39.7374	140.051	10.00	236	291.09	-13.76	1000	-93.1	21.1	3.5724
17	39.7374	140.051	50.13	236	294.00	-5.93	1000	-94.0	19.8	2.1347
18	39.7374	140.051	100.14	236	305.06	3.41	1000	-84.8	21.9	1.1315
19	39.7371	140.050	10.02	236	339.61	-13.79	1000	-95.2	20.5	4.5367
20	39.7371	140.050	50.06	236	342.10	-7.07	1000	-100.8	16.9	3.2808
21	39.7372	140.050	100.05	236	351.65	1.04	1000	-90.3	21.4	1.3620
22	39.7369	140.050	10.00	236	388.12	-13.84	1000	-92.5	21.1	3.1986
23	39.7369	140.050	50.10	236	390.29	-7.96	1000	-86.4	21.4	1.3221
24	39.7369	140.050	100.14	236	398.66	-0.79	1000	-82.3	21.1	1.7570
25	39.7367	140.049	10.00	236	436.63	-13.86	1000	-94.1	21.0	2.3224
26	39.7367	140.049	50.06	236	438.56	-8.63	1000	-86.4	21.8	1.3434
27	39.7367	140.049	100.05	236	446.03	-2.22	1000	-83.2	21.9	0.7934
28	39.7364	140.049	10.01	236	485.15	-13.87	1000	-99.4	19.4	4.7279
29	39.7364	140.049	50.91	236	486.88	-9.16	1000	-86.6	21.8	1.0018
35	39.7386	140.052	50.06	256	105.37	8.95	1000	-82.1	21.3	1.4065
36	39.7386	140.052	100.05	256	133.08	29.19	1000	-108.6	12.5	2.5673
38	39.7385	140.052	50.13	256	151.23	1.76	1000	-95.9	17.9	3.9624
39	39.7385	140.052	100.14	256	171.69	18.04	1000	-90.5	21.7	1.0405
41	39.7384	140.051	50.91	256	198.36	-2.05	1000	-95.1	19.9	3.1702
42	39.7384	140.051	100.02	256	214.37	11.14	1000	-92.4	20.2	3.3768
44	39.7383	140.051	50.35	256	246.03	-4.38	1000	-98.3	18.1	3.8216
					-					

45	39.7383	140.051	100.05	256	259.12	6.59	1000	-101.2	16.0	4.3019
47	39.7382	140.050	50.10	256	293.98	-5.96	1000	-103.8	16.3	4.1447
48	39.7382	140.050	100.11	256	305.02	3.38	1000	-99.1	17.3	2.7086
97	39.7375	140.054	10.05	161	147.86	-9.20	1000	-86.4	19.9	3.7787
98	39.7375	140.054	50.03	161	153.52	5.91	1000	-83.4	19.0	3.5705
99	39.7375	140.054	100.03	161	173.77	22.00	1000	-91.4	17.9	3.0267
100	39.7371	140.054	10.02	161	197.15	-9.29	1000	-82.8	21.3	2.2018
101	39.7371	140.054	50.03	161	201.44	2.16	1000	-85.9	17.2	4.2897
102	39.7371	140.054	100.09	161	217.30	15.17	1000	-88.2	19.9	2.1369
103	39.7367	140.054	10.03	161	246.43	-9.40	1000	-86.4	21.1	2.6519
104	39.7367	140.054	50.12	161	249.86	-0.19	1000	-86.2	19.2	3.2194
105	39.7367	140.054	100.08	161	262.80	10.63	1000	-89.3	19.5	2.2863
106	39.7362	140.055	10.03	161	295.72	-9.39	1000	-88.8	20.8	2.2561
107	39.7363	140.055	50.03	161	298.62	-1.69	1000	-81.0	20.0	2.1873
108	39.7363	140.055	100.03	161	309.57	7.51	1000	-86.5	19.1	3.3471
109	39.7358	140.055	13.01	161	345.01	-9.17	1000	-88.2	20.8	2.8756
110	39.7358	140.055	50.03	161	347.69	-2.56	1000	-82.6	20.2	2.4155
111	39.7358	140.055	100.03	161	357.36	5.42	1000	-86.6	20.4	3.1967
112	39.7354	140.055	13.20	161	394.30	-9.21	1000	-87.8	20.9	3.0000
113	39.7354	140.055	50.01	161	396.66	-3.42	1000	-81.9	20.4	2.3252
114	39.7354	140.055	100.01	161	405.19	3.63	1000	-86.6	20.5	3.2953
115	39.7350	140.055	13.22	161	443.59	-9.17	1000	-87.9	20.9	3.6880
116	39.7350	140.055	50.03	161	445.75	-4.02	1000	-83.1	20.9	3.4721
117	39.7350	140.055	100.04	161	453.44	2.28	1000	-91.1	18.6	4.1468
118	39.7346	140.055	10.00	161	492.86	-9.29	1000	-90.2	21.3	3.2470
119	39.7346	140.055	49.99	161	494.77	-4.66	1000	-84.1	21.2	3.2598
120	39.7346	140.055	100.02	161	501.64	1.04	1000	-91.7	17.7	4.1774
155	39.7381	140.054	50.02	141	107.34	13.62	1000	-95.8	14.2	3.5295
156	39.7381	140.054	100.01	141	135.18	33.48	1000	-100.1	12.2	2.2979
158	39.7377	140.055	50.00	141	154.44	7.09	1000	-87.0	19.8	1.3308
159	39.7377	140.055	99.99	141	175.53	22.91	1000	-85.3	21.4	0.8038
161	39.7374	140.055	50.04	141	202.30	3.27	1000	-88.5	20.6	0.9111
162	39.7374	140.055	100.01	141	219.01	16.12	1000	-88.9	21.3	1.5339
164	39.7370	140.055	50.01	141	250.65	0.83	1000	-94.6	18.0	3.0007
165	39.7370	140.055	100.04	141	264.39	11.54	1000	-105.1	12.0	3.1890
167	39.7367	140.056	50.04	141	299.42	-0.67	1000	-96.2	17.4	3.1678

168	39.7367	140.056	100.06	141	311.21	8.46	1000	-98.0	17.5	1.9869
170	39.7363	140.056	49.94	141	348.60	-1.45	1000	-93.8	17.3	1.7760
171	39.7363	140.056	99.98	141	359.20	6.46	1000	-96.3	17.4	1.7272
173	39.7360	140.056	50.01	141	397.39	-2.53	1000	-98.0	17.5	2.8554
174	39.7360	140.056	99.98	141	406.67	4.48	1000	-98.5	18.6	1.5907
176	39.7357	140.057	50.00	141	446.13	-3.55	1000	-100.5	14.8	3.1384
177	39.7357	140.057	100.01	141	454.22	2.73	1000	-97.1	18.8	2.7193
179	39.7353	140.057	50.01	141	494.88	-4.51	1000	-101.6	13.2	1.8837
180	39.7353	140.057	100.01	141	501.89	1.19	1000	-97.3	13.9	2.0968

※2023 年 3 月測定ポイント

ポイ	北緯	東経	地上高	基地局	基地局	基地局	測定	RSRP	SIR	標準偏
ント番			(m)	からの	との距	から見	回数	(dBm)	(dB)	差
号				角度	離	たチル	(回)			
				(TN)	(m)	ト角度				
40	39.7383	140.051	1.50	216.00	194.21	-11.77	1000	-97.7	16.0	3.3525
43	39.7383	140.050	1.50	216.00	242.69	-12.22	1000	-106.1	8.1	3.1364
46	39.7382	140.050	1.50	216.00	291.19	-12.51	1000	-111.1	3.3	4.4919
49	39.7382	140.049	1.50	216.00	339.69	-12.73	1000	-109.2	5.6	5.2926
52	39.7382	140.049	1.50	216.00	388.19	-12.89	1000	-111.0	3.7	3.6801
55	39.7381	140.048	1.50	216.00	436.70	-13.01	1000	-108.2	6.3	3.6798
58	39.7380	140.048	1.50	216.00	485.21	-13.11	1000	-111.2	3.4	3.4003
248	39.7379	140.047	1.50	216.00	533.72	-13.19	1000	-111.5	3.1	4.3484
249	39.7378	140.046	1.50	216.00	582.23	-13.26	1000	-110.5	4.3	2.6640
250	39.7377	140.046	1.50	216.00	630.74	-13.32	1000	-111.4	3.4	3.7402
76	39.7364	140.052	1.50	216.00	291.09	-13.81	1000	-106.3	8.4	3.0778
79	39.7358	140.051	1.50	216.00	339.60	-13.84	1000	-109.1	5.7	3.8183
82	39.7354	140.051	1.50	216.00	388.12	-13.86	1000	-109.9	4.7	3.9457
85	39.7352	140.050	1.50	216.00	436.63	-13.88	1000	-104.0	10.1	4.5199
251	39.7351	140.049	1.50	216.00	533.72	-13.19	1000	-94.5	17.8	3.7861
252	39.7349	140.048	1.50	216.00	582.23	-13.26	1000	-91.3	19.4	3.8334
253	39.7351	140.047	1.50	216.00	630.74	-13.31	1000	-87.7	20.9	2.5738
266	39.7339	140.048	1.50	216	679.25	-13.36	1000	-94.5	18.0	2.3604
267	39.7336	140.048	1.50	216	727.76	-13.40	1000	-94.8	17.9	2.6793
268	39.7334	140.047	1.50	216	776.27	-13.44	1000	-92.3	19.0	2.7979
255	39.7335	140.052	1.50	181	542.19	-8.90	1000	-102.4	11.4	3.7992
256	39.7328	140.052	1.50	181	591.47	-8.97	1000	-105.2	9.1	3.1966

257	39.7324	140.052	1.50	181	640.75	-9.02	1000	-104.8	9.5	2.4654
258	39.7319	140.052	1.50	181	690.03	-9.07	1000	-107.1	7.4	2.7046
260	39.7314	140.052	1.50	181	837.88	-9.18	1000	-102.2	11.8	1.5577
261	39.7308	140.052	1.50	181	887.17	-9.21	1000	-103.8	10.7	1.8393
262	39.7304	140.052	1.50	181	936.45	-9.24	1000	-105.4	8.9	1.8736
263	39.7298	140.052	1.50	181	985.73	-9.26	1000	-104.4	10.1	1.8740
264	39.7294	140.052	1.50	181	1035.02	-9.28	1000	-107.2	7.2	1.6960
265	39.7289	140.052	1.50	181	1084.30	-9.30	1000	-111.9	2.7	2.1563

7) 予測 K 値の説明と机上シミュレーションと実測値の比較

本実証では、伝搬路上の質(海面または陸地)による差異を分離するため、陸海混合伝搬路補正※に基づき「基地局と移動局間の距離は 30km 未満、基地局側に海面の条件」において、実証環境の電波伝搬路を以下と定義する。

※引用:文献「陸上移動無線における伝搬特性の実験的研究」(奥村善久他)

Case 2

⇒ 水面比率 100%

➤ Case3

⇒ 水面比率 30%+陸地比率 70%

上記の環境定義をもとに、K 値の陸海混合伝搬路補正において、それぞれ水面の比率 $\beta = (ds1+ds2)/d=100\%$ および 30%における K 値を以下の通り仮説する。

> Case2

⇒ 仮説 K 値 11

> Case3

⇒ 仮説 K 値 2

仮説K値は伝搬路の質に影響を受ける可能性があるため、エリアごとに設定することとする。

表 3-9 本実証で設定する仮説 Κ値

条件	全海面上	海面上 30%陸上 70%
本実証で設定する K 値	11	2

本仮説 K 値に基づく机上シミュレーションと実測値との比較を下表に示す。

表 3-10 机上シミュレーションと実測値の比較(Case2、3)

				= 1, , , , . ,	
ポイント	地上高	予想される	シミュレーション結果 RSRP	実測値	シミュレーション値と実
番号	(m)	K 値	(dBm)	RSRP(dBm)	測値の差分
4	10.01	11	-85.3	-84.2	-1.1
5	50.09	11	-74.0	-80.7	6.7
7	10.01	11	-91.4	-82.9	-8.5
8	50.05	11	-79.8	-82.6	2.8

9	100.04	11	-77.2	-81.3	4.1
10	10.02	11	-95.8	-86.1	-9.7
11	50.03	11	-84.0	-80.4	-3.6
12	100.02	11	-81.1	-83.8	2.7
13	10.03	11	-99.2	-92.1	-7.1
14	50.03	11	-87.3	-81.2	-6.1
15	100.02	11	-84.3	-86.6	2.3
16	10.00	11	-102.0	-93.1	-8.9
17	50.13	11	-90.0	-94.0	4.0
18	100.14	11	-86.9	-84.8	-2.1
19	10.02	11	-104.3	-95.2	-9.1
20	50.06	11	-92.4	-100.8	8.4
21	100.05	11	-89.0	-90.3	1.3
22	10.00	11	-106.4	-92.5	-13.9
23	50.10	11	-94.3	-86.4	-7.9
24	100.14	11	-90.9	-82.3	-8.6
25	10.00	11	-108.2	-94.1	-14.2
26	50.06	11	-96.1	-86.4	-9.7
27	100.05	11	-92.5	-83.2	-9.3
28	10.01	11	-109.8	-99.4	-10.4
29	50.91	11	-97.5	-86.6	-10.9
35	50.06	11	-74.1	-82.1	8.0
36	100.05	11	-71.8	-108.6	36.8
38	50.13	11	-80.1	-95.9	15.8
39	100.14	11	-77.5	-90.5	13.0
41	50.91	11	-84.3	-95.1	10.8
42	100.02	11	-81.5	-92.4	10.9
44	50.35	11	-87.7	-98.3	10.6
45	100.05	11	-84.6	-101.2	16.6
47	50.10	11	-90.3	-103.8	13.5
48	100.11	11	-87.1	-99.1	12.0
97	10.05	11	-100.1	-86.4	-13.7
98	50.03	11	-88.7	-83.4	-5.3
99	100.03	11	-86.1	-91.4	5.3
100	10.02	11	-104.5	-82.8	-21.7
101	50.03	11	-92.9	-85.9	-7.0

102	100.09	11	-90.0	-88.2	-1.8
103	10.03	11	-107.9	-86.4	-21.5
104	50.12	11	-96.2	-86.2	-10.0
105	100.08	11	-93.2	-89.3	-3.9
106	10.03	11	-110.6	-88.8	-21.8
107	50.03	11	-98.8	-81.0	-17.8
108	100.03	11	-95.6	-86.5	-9.1
109	13.01	11	-110.8	-88.2	-22.6
110	50.03	11	-101.0	-82.6	-18.4
111	100.03	11	-97.8	-86.6	-11.2
112	13.20	11	-112.7	-87.8	-24.9
113	50.01	11	-103.0	-81.9	-21.2
114	100.01	11	-99.6	-86.6	-13.0
115	13.22	11	-114.5	-87.9	-26.6
116	50.03	11	-104.7	-83.1	-21.6
117	100.04	11	-101.3	-91.1	-10.2
118	10.00	11	-118.5	-90.2	-28.3
119	49.99	11	-106.3	-84.1	-22.2
120	100.02	11	-102.8	-91.7	-11.1
155	50.02	2	-83.1	-95.8	12.7
156	100.01	2	-80.7	-100.1	19.4
158	50.00	2	-89.0	-87.0	-2.0
159	99.99	2	-86.3	-85.3	-1.0
161	50.04	2	-93.1	-88.5	-4.6
162	100.01	2	-90.3	-88.9	-1.4
164	50.01	2	-96.4	-94.6	-1.8
165	100.04	2	-93.4	-105.1	11.7
167	50.04	2	-99.1	-96.2	-2.9
168	100.06	2	-96.0	-98.0	2.0
170	49.94	2	-101.4	-93.8	-7.6
171	99.98	2	-98.1	-96.3	-1.8
173	50.01	2	-103.3	-98.0	-5.3
174	99.98	2	-99.9	-98.5	-1.4
176	50.00	2	-105.0	-100.5	-4.5
177	100.01	2	-101.5	-97.1	-4.4
179	50.01	2	-106.6	-101.6	-5.0

180	100.01	2	-103.0	-97.3	-5.7
-----	--------	---	--------	-------	------

※2023 年 3 月測定ポイント

ポイント番	地上高	予想される	シミュレーション結果 RSRP	実測値	シミュレーション値と実
号	(m)	K値	(dBm)	RSRP(dBm)	測値の差分
40	1.50	11	-99.2	-97.7	-1.5
43	1.50	11	-101.5	-106.1	4.6
46	1.50	11	-102.1	-111.1	9.0
49	1.50	11	-102.2	-109.2	7.0
52	1.50	11	-102.0	-111.0	9.0
55	1.50	11	-101.7	-108.2	6.5
58	1.50	11	-101.4	-111.2	9.8
248	1.50	11	-101.1	-111.5	10.4
249	1.50	11	-100.2	-110.5	10.3
250	1.50	11	-99.3	-111.4	12.1
76	1.50	11	-84.6	-106.3	21.7
79	1.50	11	-86.1	-109.1	23.0
82	1.50	11	-86.3	-109.9	23.6
85	1.50	11	-85.9	-104.0	18.1
251	1.50	11	-86.1	-94.5	8.4
252	1.50	11	-85.6	-91.3	5.7
253	1.50	11	-85.1	-87.7	2.6
266	1.50	11	-83.4	-94.5	11.1
267	1.50	11	-82.6	-94.8	12.2
268	1.50	11	-81.7	-92.3	10.6
255	1.50	2	-137.9	-102.4	-35.5
256	1.50	2	-139.7	-105.2	-34.5
257	1.50	2	-140.7	-104.8	-35.9
258	1.50	2	-141.8	-107.1	-34.7
260	1.50	2	-142.9	-102.2	-40.7
261	1.50	2	-144.0	-103.8	-40.2
262	1.50	2	-144.8	-105.4	-39.4
263	1.50	2	-145.8	-104.4	-41.4
264	1.50	2	-146.5	-107.2	-39.3
265	1.50	2	-147.2	-111.9	-35.3

8) K值精緻化

①Case2

ア)精緻化のセグメントは以下のように分類する。

- ・ 全ての測定ポイントに対する伝搬路は、基地局との間に陸地を含まないため、水面比率 100% のセグメントとする。
- ・ ドローンの測定時高度 10m、50m、100m の 3 つのセグメント毎に精緻化を行う。

耒	3-11	Case2 の精緻化セグメント
10	\cdot	

エリア	番号	セグメント	環境·補足
水面比率 100%	01	1	高度 10m
		2	高度 50m
		3	高 度
			100m

イ)伝搬式と実測値との比較

Case2で測定した全データについて以下の損失式に従い比較を行う。

実測値の伝搬損失

Lmes. = -Pr + Pt + Gt + Gr + Lf

 $Pr = RSRP(p+d) + 10log10(12 \times 273)$

算出式の伝搬損失

Lpred. = -Pr + Gt + Gr + Pt - 8%

Gt:送信アンテナ利得[dBi]

Gr:受信アンテナ利得[dBi]

Pt:送信電力[dBm](=33.6 dBm)

Lf:給電線損失 [dB] (=3 dB)

※ 実測環境は人体損失(8dB)が影響しない環境

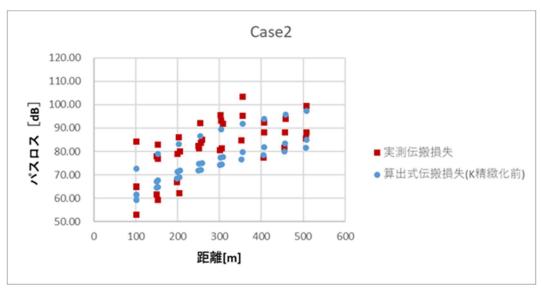


図 3-53 Case2 全データ 伝搬損失比較

ウ)セグメント1(高度 10m)精緻化

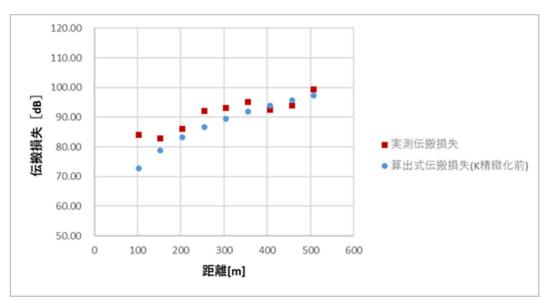


図 3-54 Case2 セグメント1 精緻化前 伝搬損失比較

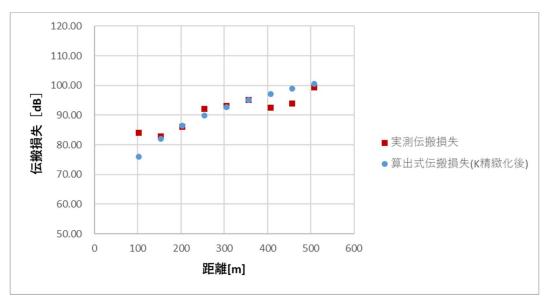


図 3-55 Case2 セグメント1 精緻化後 伝搬損失比較

表 3-12 Case2 セグメント 1 精緻化結果

	K値	RMSE[dB]
精緻化前	11.0000	4.8754
精緻化後	7.7494	3.6336

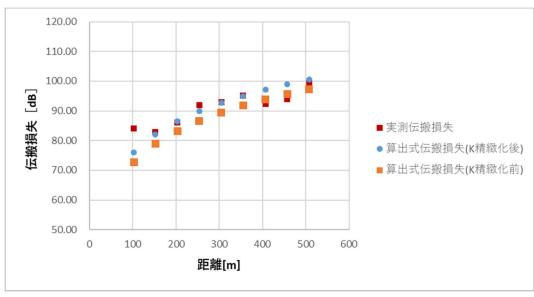


図 3-56 Case2 セグメント1 精緻化前後比較

エ)セグメント 2(高度 50m)精緻化

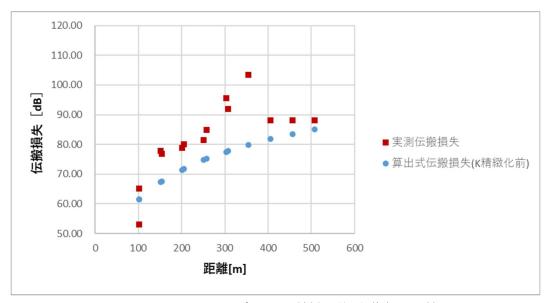


図 3-57 Case2 セグメント 2 精緻化前 伝搬損失比較

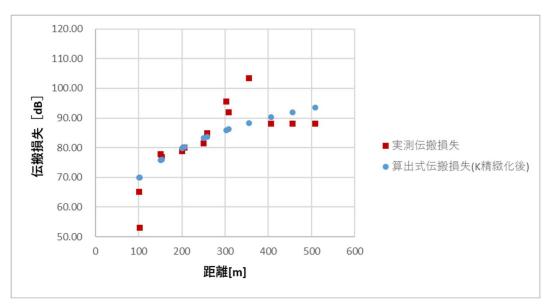


図 3-58 Case2 セグメント 2 精緻化後 伝搬損失比較

表 3-13 Case2 セグメント 2 精緻化結果

	K値	RMSE[dB]
精緻化前	11.0000	11.0295
精緻化後	2.5222	4.1674

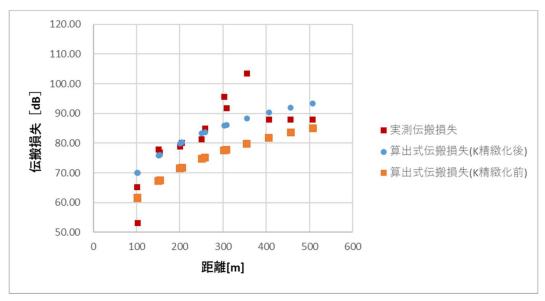


図 3-59 Case2 セグメント 2 精緻化前後比較

オ)セグメント3(高度100m)精緻化

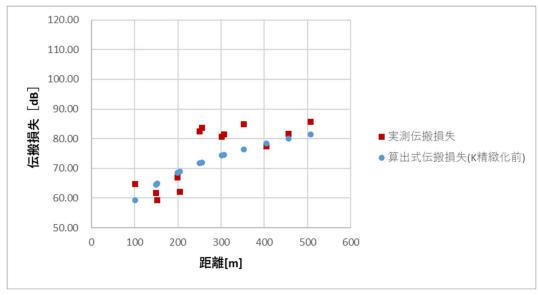


図 3-60 Case2 セグメント 3 精緻化前 伝搬損失比較

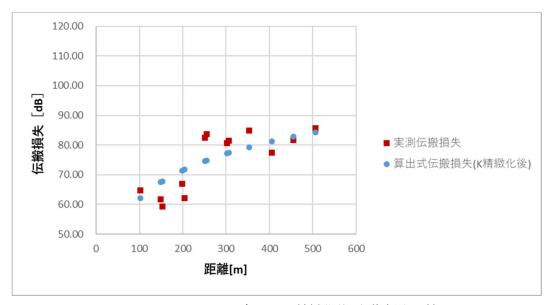


図 3-61 Case2 セグメント 3 精緻化後 伝搬損失比較

表 3-14 Case2 セグメント 3 精緻化結果

	K値	RMSE[dB]
精緻化前	11.0000	6.4756
精緻化後	8.1458	5.8127

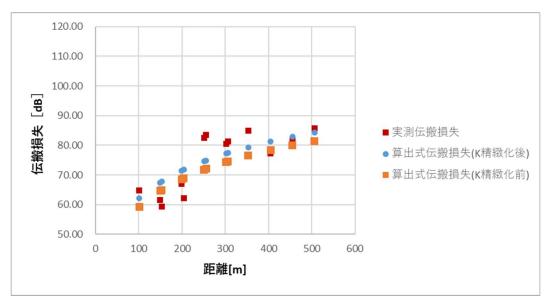


図 3-62 Case2 セグメント 3 精緻化前後比較

カ)Case2精緻化前後のカバーエリアおよび調整対象区域

・セグメント1 高度 10m



図 3-63 Case2 セグメント 1 精緻化前後 出典:国土地理院地図

・セグメント 2 高度 50m

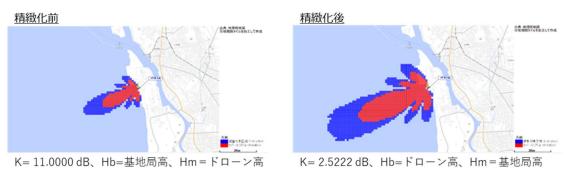


図 3-64 Case2 セグメント 2 精緻化前後 出典:国土地理院地図

・セグメント3 高度 100m

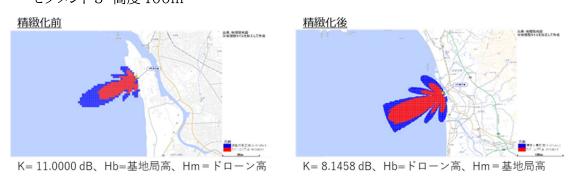


図 3-65 Case2 セグメント 3 精緻化前後 出典:国土地理院地図

2Case3

ア)Case2 同様に精緻化のセグメントは以下のように分類する。

- 事前の仮説 K 値検討段階においては、Case3 全体を同質と扱い K 値を仮説としたが、より伝 搬路の特徴を反映させるため、Case3-A は全ての測定ポイントが基地局との間に陸地を含ま ない水面比率 100%のセグメントに分類することとする。
- Case3-B は一部の測定ポイントと基地局との間に陸地を含む。基地局から最遠の測定ポイント との間の水面比率を代表値とし、水面比率30%のセグメントとする。
- ・ ドローンの測定時高度 10m、50m、100m の 3 つのセグメント毎に精緻化を行う。

表 3-15 Case3 の精緻化セグメント					
エリア	番号	セグメント	環境、補	足	
水面比率 100%	02	1	高度 10:	m	
Case3-A		2	高度 50	m	
		3	高	度	
			100m		
水面比率 30%		4	高度 50	m	
Case3-B		5	高	度	
			100m		

イ)伝搬式と実測値との比較

Case3 で測定した全データについて以下の損失式に従い比較を行う。

実測値の伝搬損失

Lmes. = -Pr + Pt + Gt + Gr + Lf

 $Pr = RSRP(中央値) + 10log10(12 \times 273)$

算出式の伝搬損失

Lpred. = -Pr + Gt + Gr + Pt - 8%

Gt:送信アンテナ利得[dBi]

Gr:受信アンテナ利得[dBi]

Pt:送信電力[dBm](=33.6 dBm)

Lf:給電線損失 [dB] (=3 dB)

※ 実測環境は人体損失(8dB)が影響しない環境

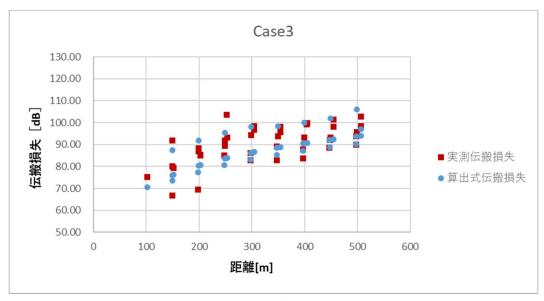


図 3-66 Case3 全データ 伝搬損失比較

ウ)セグメント1(水面比率 100%・高度 10m)精緻化

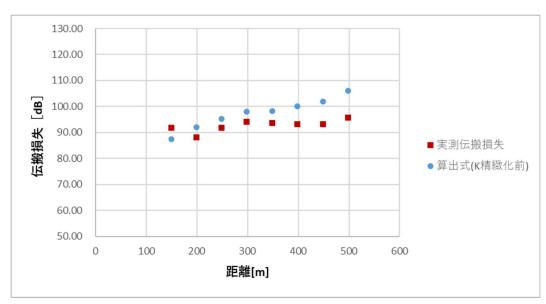


図 3-67 Case3 セグメント1 精緻化前 伝搬損失比較

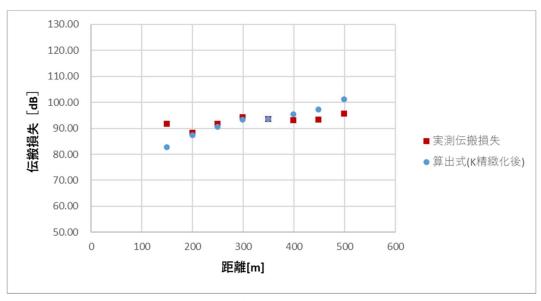


図 3-68 Case3 セグメント1 精緻化後 伝搬損失比較

表 3-16 Case3 セグメント1 精緻化結果

	K値	RMSE[dB]
精緻化前	2.0000	6.2476
精緻化後	6.6815	4.1371

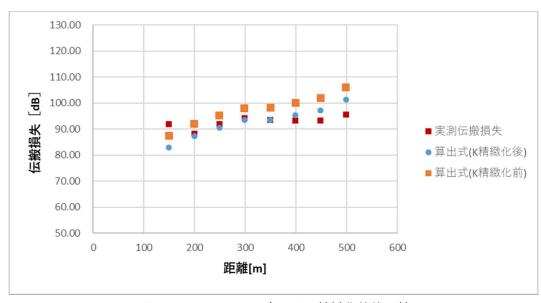


図 3-69 Case3 セグメント1 精緻化前後比較

エ)セグメント 2(水面比率 100%・高度 50m)精緻化

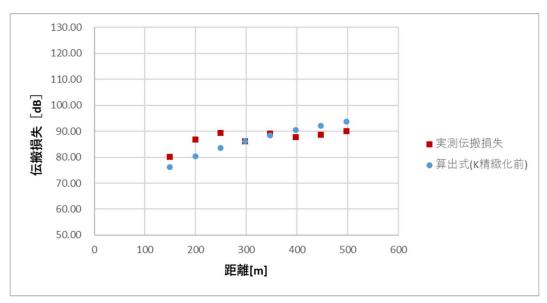


図 3-70 Case3 セグメント 2 精緻化前 伝搬損失比較

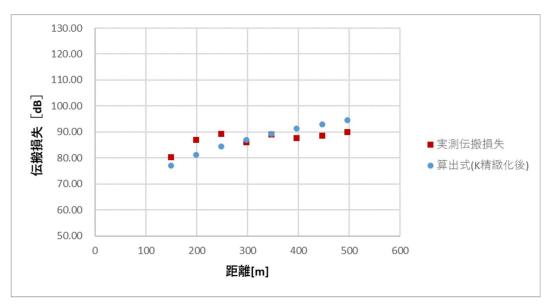


図 3-71 Case3 セグメント 2 精緻化後 伝搬損失比較

表 3-17 Case3 セグメント 2 精緻化結果

	K値	RMSE[dB]
精緻化前	2.0000	3.9797
精緻化後	1.1631	3.8907

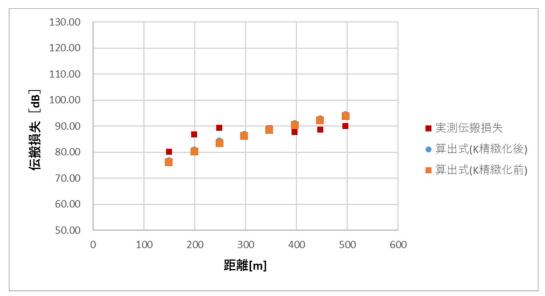


図 3-72 Case3 セグメント 2 精緻化前後比較

オ)セグメント 3(水面比率 100%・高度 100m)精緻化

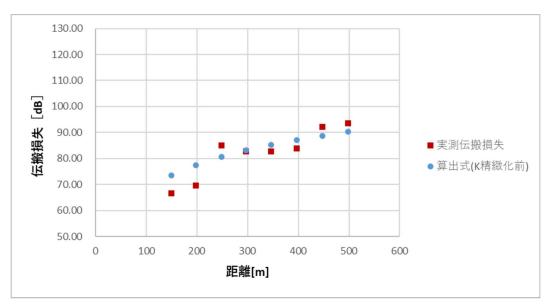


図 3-73 Case3 セグメント3 精緻化前 伝搬損失比較

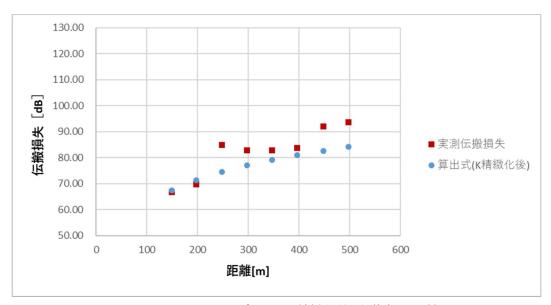


図 3-74 Case3 セグメント3 精緻化後 伝搬損失比較

表 3-18 Case3 セグメント 3 精緻化結果

	K値	RMSE[dB]
精緻化前	2.0000	4.5956
精緻化後	3.3240	4.4252

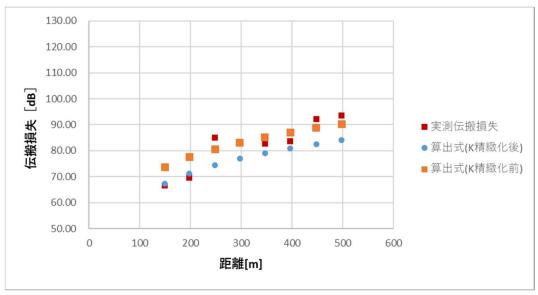


図 3-75 Case3 セグメント 3 精緻化前後比較

カ)セグメント 4(水面比率 30%・高度 50m)精緻化

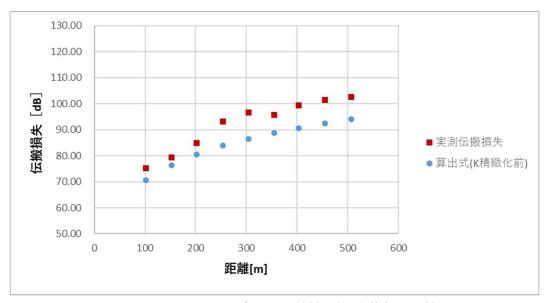


図 3-76 Case3 セグメント 4 精緻化前 伝搬損失比較

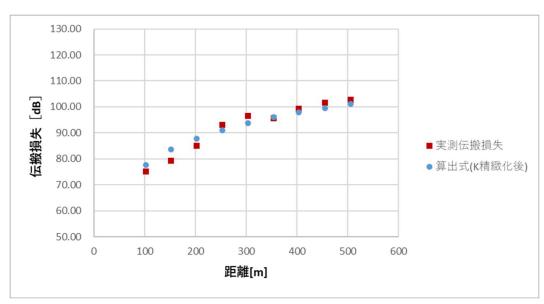


図 3-77 Case3 セグメント 4 精緻化後 伝搬損失比較

表 3-19 Case3 セグメント 4 精緻化結果

	K値	RMSE[dB]
精緻化前	2.0000	7.5471
精緻化後	-5.1437	2.4344

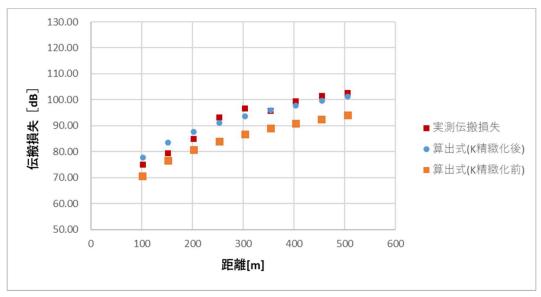


図 3-78 Case3 セグメント 4 精緻化前後比較

キ)セグメント5(水面比率 30%・高度 100m)精緻化

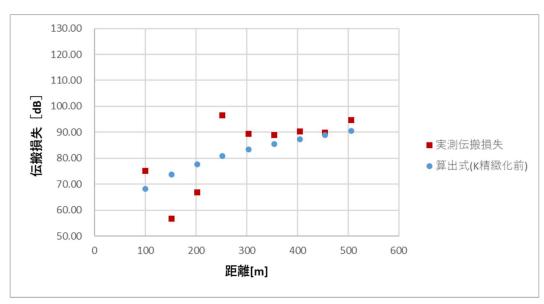


図 3-79 Case3 セグメント 5 精緻化前 伝搬損失比較

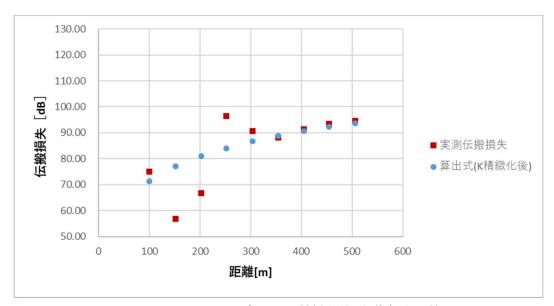


図 3-80 Case3 セグメント 5 精緻化後 伝搬損失比較

表 3-20 Case3 セグメント 5 精緻化結果

	K値	RMSE[dB]
精緻化前	2.0000	9.3242
精緻化後	-1.2706	6.9832

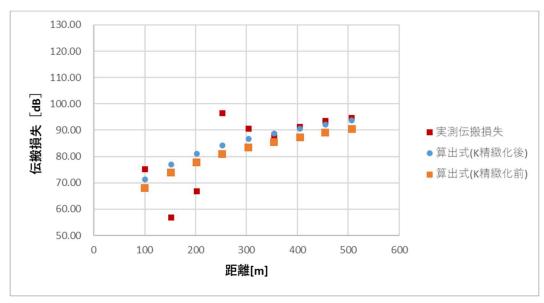


図 3-81 Case3 セグメント 5 精緻化前後比較

ク)Case3 精緻化前後のカバーエリアおよび調整対象区域

・セグメント1 水面率 100%・高度 10m

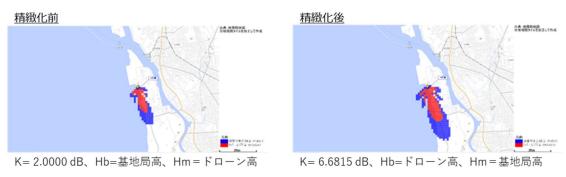


図 3-82 Case3 セグメント 1 精緻化前後 出典:国土地理院地図

・セグメント2 水面率 100%・高度 50m



図 3-83 Case3 セグメント 2 精緻化前後 出典:国土地理院地図

・セグメント3 水面比率 100%・高度 100m



図 3-84 Case3 セグメント 3 精緻化前後 出典:国土地理院地図

・セグメント 4 水面率 30%・高度 50m



図 3-85 Case3 セグメント 4 精緻化前後 出典:国土地理院地図

・セグメント 5 水面比率 30%・高度 100m

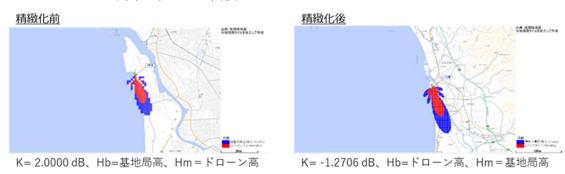


図 3-86 Case3 セグメント 5 精緻化前後 出典:国土地理院地図

表 3-21 K 值精緻化

		20 -1			
エリア	番号	セグメント	高度	K 値仮説値	RMSC 仮説 値
				精緻化後	精緻化後
水面比率 100%	01	1	高度 10m	11.0000	4.8754
Case2				7.7494	3.6336
		2	高度 50m	11.0000	11.0295
				2.5222	4.1674
		3	高度 100m	11.0000	6.4756
				8.1458	5.8127
水面比率 100%	02	02 1	高度 10m	2.0000	6.2476
Case3-A	3			6.6815	4.1371
		2	高度 50m	2.0000	3.9797
				1.1631	3.8907
		3	3 高度 100m	2.0000	4.5956
				3.3234	4.4252
水面比率 30%	ase3-B	4	高度 50m	2.0000	7.5471
Case3-B				-5.1437	2.4344
		5	高度 100m	2.0000	9.3242
				-1.2706	6.9832

9) 考察

①高度に対する考察

- ・ 伝搬路に水面が含まれた場合、電界強度は一般に陸上伝搬路の場合よりも高くなる。
- ・ K値は、以下のように伝搬損失に対してマイナスで与えるため、K値がプラスとなることが一般的な傾向に合致する。

③ dxy≥0.1kmの場合

 $L=L_H$

 $=46.3+33.9\log_{10}(2000)+10\log_{10}(f/2000)-13.82\log_{10}(\max{(30,\ H_b)})+\ \{44.9-6.55\log_{10}(\max{(30,\ H_b)})\}$ $(\log_{10}(d_{xy}))^a-a(H_m)-b(H_b)+R-K-S$

b(H_b);基地局高に対して考慮する補正項であり、下記による。

$$b(H_b) = \begin{cases} 0 & : H_b \ge 30 \text{m} \\ 20 \log_{10}(H_b/30) & : H_b < 30 \text{m} \end{cases}$$

・ 本件では、Hb を陸上移動局高(ドローン高)、Hm を基地局高とする。この変更の影響範囲は以下である。

伝搬損失 L の式の第 4 項(-13.82log10(max[30,Hb]))および第 5 項の 2 次元距離に対

する係数(44.9-6.55log10(max[30,Hb]))は、基地局高に対する項であるが前述の通り本件では、ドローン高に対して適用するため、以下のようにドローン高が上がるほど値が小さくなる。

高度 10m:第4項 = -20.4 dB、第5項の2次元距離に対する係数 = 35.2 高度50m:第4項 = -23.5 dB、第5項の2次元距離に対する係数 = 33.8 高度100m:第4項 = -27.6 dB、第5項の2次元距離に対する係数 = 31.8

- b(Hb)は、基地局高に対して考慮する補正項である。本件では、ドローン高が10mの場合-9.5
 dB、50m以上の場合0dBとなる。
- ・ a(Hm)は都市規模に応じて決定される係数である。本件では、中小都市を表す 0.057 とした。

ア)水面比率 100%の場合

- ・ 全てのケースで精緻化後の K 値はプラスとなった。
- ・ 高度に対する傾向について、b(Hb)の値が、高度 30m を境に異なるため、まずは 50m 以上の 2 点で考える。
- ・ 高度が上がるほど、水面上の構造物、浮揚物、波浪の影響が小さく、電波が飛びやすい傾向となることが予想されている。
- ・ 高度 50m と 100m とでは、100m の方が K 値は大きい傾向となっており、予想される傾向と 合致している。

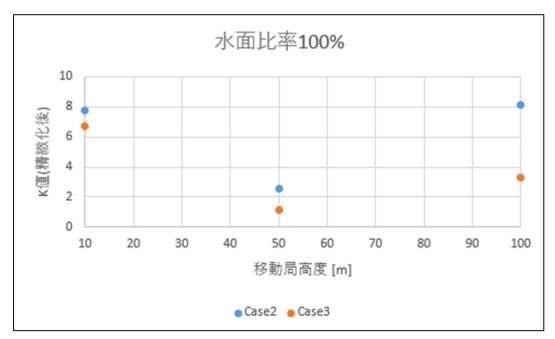


図 3-87 精緻化後 K 値と高度比較 1

さらに高度 10m も含めた相関を探る。

- ・ 拡張秦式に関する ITU-R 報告によると、b(Hb)は Urban(=都市部) で考慮されるパラメータ である。
- ・ 本件の環境は開放地であり、仮に高度 10m で b(Hb)=0 で算出を行った場合、精緻化後の K

値は高度に対して増大する傾向を表す。

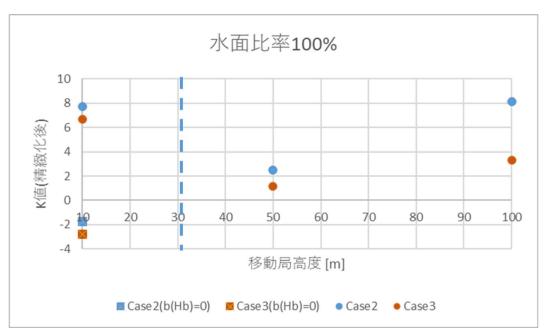


図 3-88 精緻化後 K 値と高度比較 2

イ)水面比率30%の場合

- ・ 全てのケースで精緻化後の K 値はマイナスとなった。
- ・ 水面比率が大きくなるほど、K 値は大きくなるため、ア)の水面比率 100%の精緻化後の K 値より小さい点は、傾向に合致している。
- ・ 拡張秦式の制限を入れたことで、ドローン高が高くなるほど伝搬損失は小さくなる。
- ・ このため、ドローン高に応じた損失の減算を補償する形で、精緻化後の K 値がマイナス値となっている。

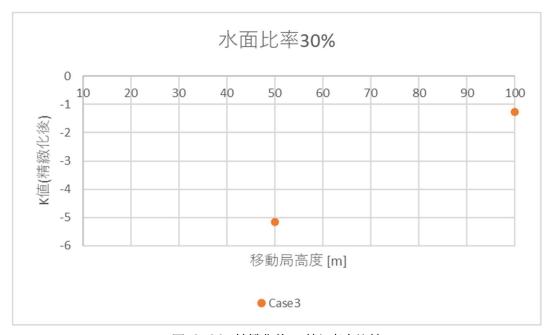


図 3-89 精緻化後 K 値と高度比較

②2 波モデルとの比較考察 実測および算出伝搬損失を 2 波モデルと比較する。

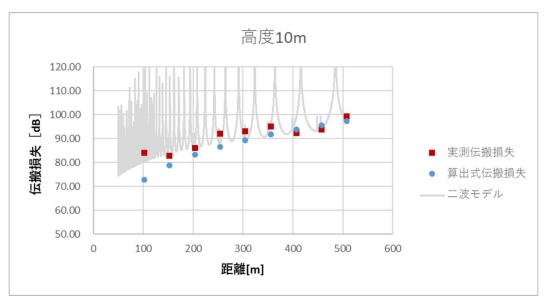


図 3-90 2波モデルと伝搬損失比較(Case2、高度 10m)

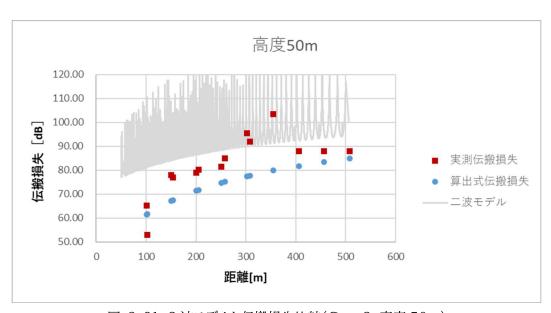


図 3-91 2 波モデルと伝搬損失比較(Case2、高度 50m)

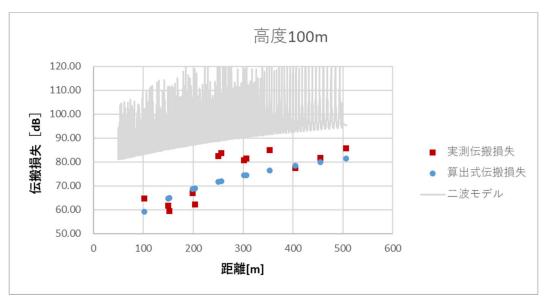


図 3-92 2波モデルと伝搬損失比較(Case2、高度 100m)

比較の結果、算出式による伝搬損失および実測による伝搬損失ともに以下の傾向が認められる。

- ・ 2 波モデルによる伝搬損失との比較では、ドローンの高度が上昇するほど、実測された伝搬損失 よりも 2 波モデルの伝搬損失が大きくなる傾向が見られた。
- ・ いずれの高度でも距離が遠くなるほど、実測された伝搬損失が 2 波モデルの包絡線に近づく傾向にある。言い換えると、包絡線と伝搬損失との距離に対する傾斜が異なる。
- ・ 伝搬損失における距離は水平距離となるので、距離が短いほどかつ高度が高いほど受信点への 仰角が大きくなる。すなわち、受信点までの水平距離に対する直線距離(3D 距離)の差異が大き くなるため、その領域での 2 波モデルとの差異が大きい。
- ・ 同様に、距離が遠くなるほど受信点への仰角が小さくなる。すなわち受信点までの水平距離に対する直線距離(3D距離)の差異が小さくなるため、この領域での2波モデルとの差異が小さい。

以上の傾向を踏まえ、受信点高が変化する環境において、これらの影響を考察する。

※引用:文献「マイクロウェーブ伝搬解説」(渋谷茂一)

2波モデルは、直接波と反射波のベクトル和で与えられる。このような干渉伝搬路においては、送受信点の相対位置関係が変わると、直接波並びに反射波の位相関係および振幅比関係が変化するため受信電界強度は一般的に変化する。このモデルの場合、反射点位置は送受信アンテナ高および距離により求められ、また接地角 ϕ (グレージング角)が比較的小さい領域では、受信電界強度は近似的に送信または受信アンテナ高に比例し、距離の二乗に反比例する近似式で求められることが知られている。

電波伝搬空間における干渉分布は、伝搬方向を軸として、高さパターン(h-パターン)・距離パターン(d-パターン)の軸に分けられる。

- ・ h-パターン(ハイトパターン) 距離を一定にして海抜高を変化した時のパターン
- ・ d-パターン 送受信点を含む園直面内で海抜高を一定として距離を変化させた時のパターン

ここで、本実証環境の電波伝搬への影響要素を示す。

- ・ 海面の反射係数は波長が短いほど小さくなる(文献より)
- ・ 波長が短くなるとハイトパターンの計算値と実測値との比較において、山と谷の位置がずれることが起こる(文献より)
- ・ 送信点より受信点の高度の方が高く、かつ指向性アンテナを水平面より上方向に向けていること (実証環境より)

これら要素と上述の傾向を考察する。

- ・ 同じ距離であれば、受信点高度が高くなるほど受信電界強度が強くなる。
- ⇒実測データ傾向および電界強度近似式と一致する。
- ・ 同じ高さであれば距離が遠くなるほど受信電界強度が弱くなる。 ⇒距離に対して 2 次曲線的に伝搬損失が大きくなっていることが。実測データと近似式とで一致 している。
- ハイトパターンの顕著な影響は現れてない。
 ⇒送信アンテナの指向性効果が働き、直接波と反射波の振幅比ρが大きく引き下げられていることにより、パターンの振幅の深さ、つまりハイトパターン影響が小さくなることおよび実測データ傾向が一致する。

③波高、潮位の影響度合い

波高および潮位の影響は、それぞれ測定時間に対して

波高 ⇒ 短周期

潮位 ⇒ 長周期

の影響があると推定できる。そこで、それぞれ以下の相関に顕在すると想定し、その関係を確認する。

波高の影響度合い ⇒ 測定データの標準偏差との相関

潮位の影響度合い ⇒ 精緻化後のシミュレーション値と実測値の差分との相関

ア)波高

1,000 サンプルの測定時間(約 2.5 分)に対して短周期で変化する海面波形は、2 波モデルにおける 海面反射波に変化を及ぼすことになり、それは各測定ポイントにおける標準偏差(データのばらつき)に 顕在すると想定している。

以下の通り、波高に対する各測定データの標準偏差を示す。参考に潮位も同様の比較をする。

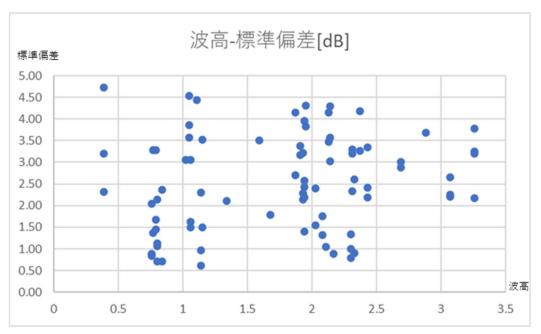


図 3-93 波高と標準偏差比較

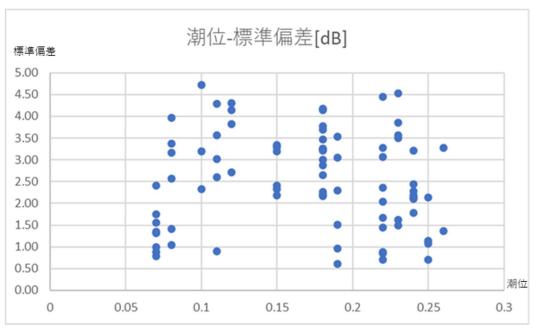


図 3-94 潮位と標準偏差比較

比較した結果、波高と標準偏差の間に特徴的な相関は確認できない。参考比較している潮位との間にも特徴的な相関は確認できない。

イ)潮位

1,000 サンプルの測定時間(約 2.5 分)に対して長周期で変化する潮位も同様に 2 波モデルにおける海面反射波に変化を及ぼすことになり、これは精緻化後のシミュレーションに対する実測データの差分として顕在すると想定している。

以下の通り、潮位に対する「精緻化後のシミュレーション値と実測値の差分」を示す。参考に波高も同様の比較をする。

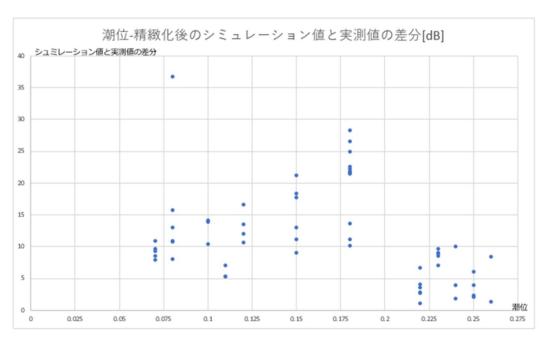


図 3-95 潮位と「精緻化後のシミュレーション値と実測値の差分」比較

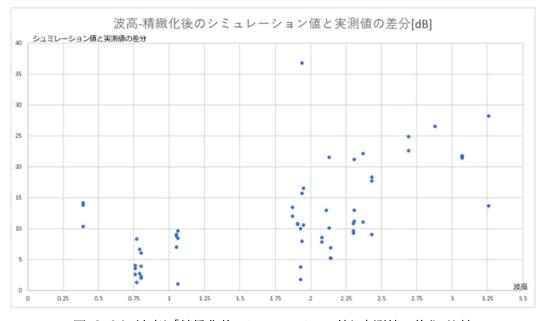


図 3-96 波高と「精緻化後のシミュレーション値と実測値の差分」比較

比較した結果、潮位と「精緻化後のシミュレーション値と実測値の差分」の間に特徴的な相関は確認

できない。参考比較している波高との間にも特徴的な相関は確認できない。

以上より、本実証環境および測定方法においては、波高並びに潮位により顕著な影響は認められず、 本用途においては波高および潮位の影響がない可能性が確認できた。

以下に、波高および潮位の影響が顕在しない要因について考察する。

ア)アンテナのチルト角

本実証ではドローンとの通信を確立させるため、水平面より上方向へのチルト角で電波発射している。このため、受信点には主ビーム(メインローブ)または主ビームに近い受信電力が到達する。また海面方向は半値角度(ビーム幅 20°、主ビーム方向に対して上下 10°)より外側の角度になる。使用アンテナのサイドローブ(ビーム幅 5°程度)の最大点では主ビームに対する減衰量が 15dB 程度であるが、それ以外の角度に対しては主ビームに対する減衰量は 25dB 以上、または Null 点となる。このため、受信点での直接波対海面反射波比が大きく、反射波の変動影響が顕在しない、と考えられる。

イ)受信点の高度

本実証では飛行中のドローンに受信点があり、その水面高は各ケースとも最大 100m となっている。 それに対して測定期間の最大波高(有義波高)は 3.26m、統計的には 1,000 回に1回程度その倍程度 の高さの波が出現すると言われている。 仮に最大 5m の波高での影響度を評価した場合、波高 0mと比較してアンテナから見た時の反射点に対する仰角の差異は最大で 2.8°程度となる。 使用しているアンテナのアンテナパターンより、アンテナ利得に大きな変化が生じないことにより影響が顕在しない、と考えられる。

ウ)その他測定環境要因

その他の測定環境要因によるぶれにより、波高、潮位の影響が顕在しなくなっている可能を否定しない。

- ・ アンテナ支持柱の剛性によるぶれ
 - 3)測定フィールド、測定点について ②基地局設置状況項の通り基地局およびアンテナを仮設しているが、支持柱の剛性により強風のタイミングによっては支持柱が撓むことによるアンテナ方向のぶれが発生する可能性。
- ・ ドローンの姿勢制御によるぶれ 強風化での飛行時には姿勢制御時に多少飛行角度が変わる(風に対してカウンターをあてる)こ とによる受信アンテナ角度のぶれが発生する可能性。
- ・ ドローンの高さ制御による受信点高さのぶれ ドローンでの高さ制御による高度誤差(数十 cm 程度)による、受信点高さのぶれが発生する可 能性。

本考察より、本測定環境においては風速も測定結果に影響を与えている可能性があることから、それぞれ風速との相関を確認する。

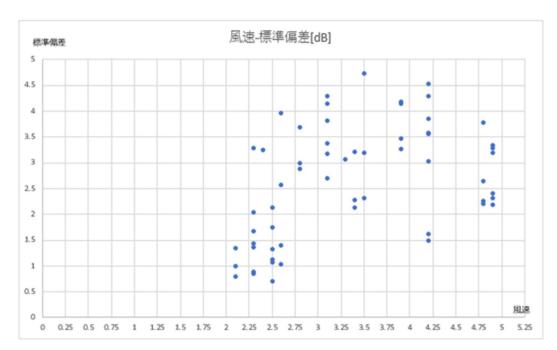


図 3-97 風速と標準偏差比較

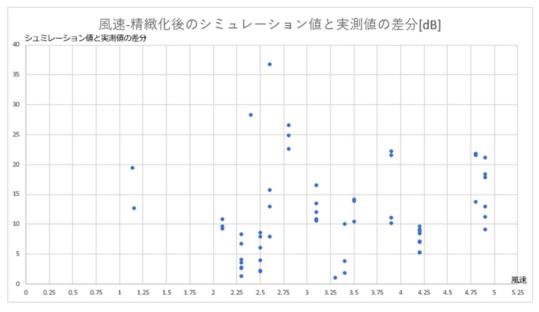


図 3-98 風速と「精緻化後のシミュレーション値と実測値の差分」比較

比較した結果、標準偏差および「精緻化後のシミュレーション値と実測値の差分」ともに測定時風速との間に若干の正の相関の傾向が見受けられるが、確定的な相関は確認できない。

以上より、本実証環境および測定方法においては、風速はそれぞれ正の相関は見られるものの強い 影響は認められず、本用途における電波伝搬に対する風速の影響はない可能性が確認できた。

気象海象の本用途に対する影響について以下のように総括する。

· 波高:

電波伝搬上顕著な影響は与えないが、波高によってはドローンや無線設備へのしぶきがかかる可能性がある。ドローンは十分な飛行高度を確保すること、無線設備は重塩害対策を十分に施

すことが必要となる。

· 潮位:

電波伝搬上および本用途に対して顕著な影響は与えないが、潮位変動が大きい時間帯では潮流が発生し、CTV による風力発電施設への乗り移りや機器搬入作業効率に影響を与える可能性がある。

· 風速:

電波伝搬上顕著な影響を与えないが、ドローン飛行の精度や、姿勢制御頻度が多くなることにより消費電力が多くなる影響を与える。さらに強風の際は安全を考慮し飛行自体を断念する必要があり、作業効率に影響を与える。

④まとめ

以上の考察より、本用途における海上による電波伝搬を考えた時、満たすのが好ましい設置要件は 以下と結論付ける。

- ・ 基地局アンテナのチルト角は、水平より上向きが好ましい
- ・ 電波伝搬路の陸海混合比は100%海面であることが好ましい

また、K 値並びに算出式結果への大きな変動要素は以下となる。

- ・ 受信点の高度:高度により補正すべき K 値が大きく変動する 高度が高い ⇒ K 値が大きい、高度が低い ⇒ K 値が小さい
- ・ 基地局と端末の相対高度:基地局より端末が低いか、基地局より端末が高いかにより算出式の 制約が変わるため、計算結果に差が発生する。

10) 精緻化後のカバーエリア図と測定結果

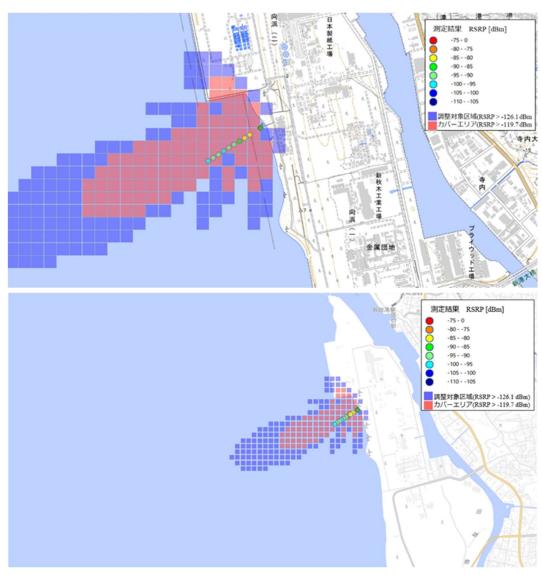


図 3-99 精緻化後のカバーエリア図と測定結果 Case2-1 受信点地上高 10m 出典:国土地理院地図

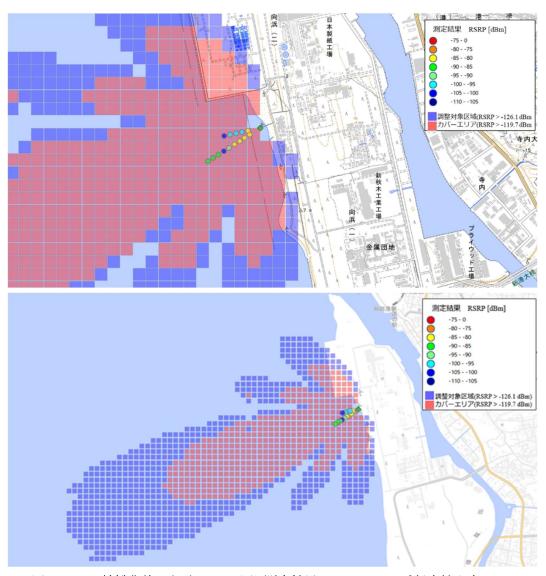


図 3-100 精緻化後のカバーエリア図と測定結果 Case2-1,2 受信点地上高 50m 出典:国土地理院地図

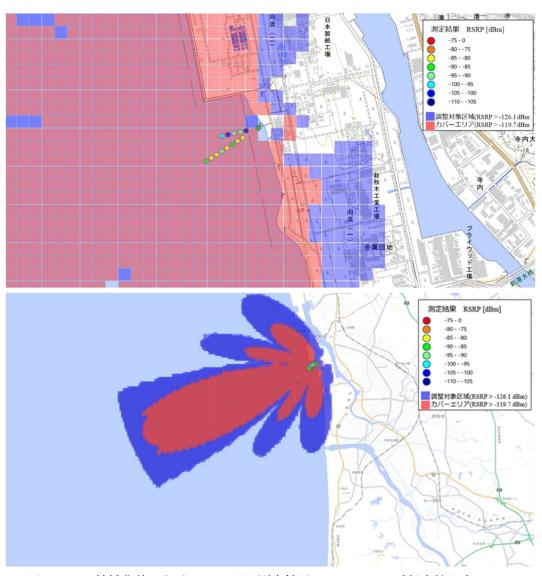


図 3-101 精緻化後のカバーエリア図と測定結果 Case2-1,2 受信点地上高 100m 出典:国土地理院地図

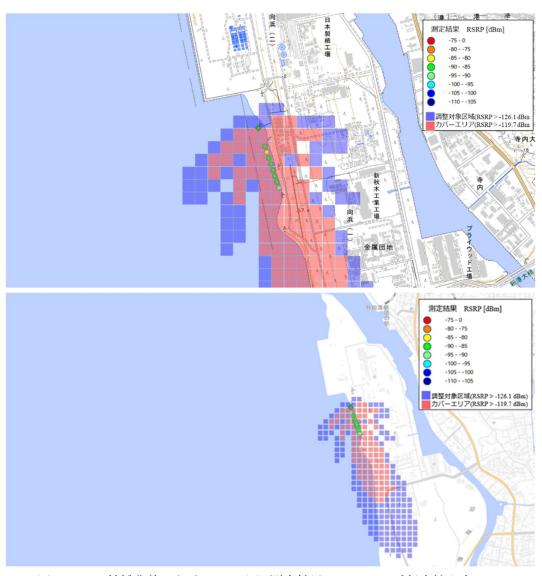


図 3-102 精緻化後のカバーエリア図と測定結果 Case3-1 受信点地上高 10m 出典:国土地理院地図

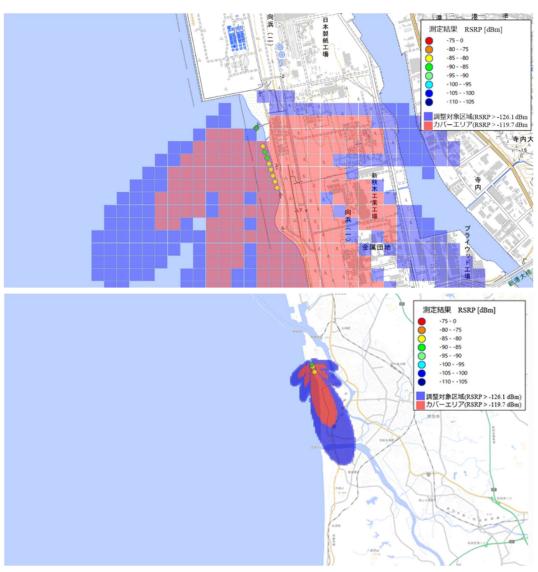


図 3-103 精緻化後のカバーエリア図と測定結果 Case3-1 受信点地上高 50m 出典:国土地理院地図

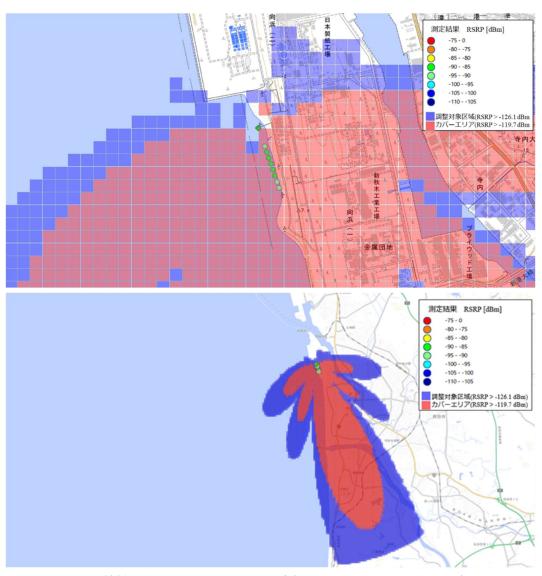


図 3-104 精緻化後のカバーエリア図と測定結果 Case3-1 受信点地上高 100m 出典:国土地理院地図

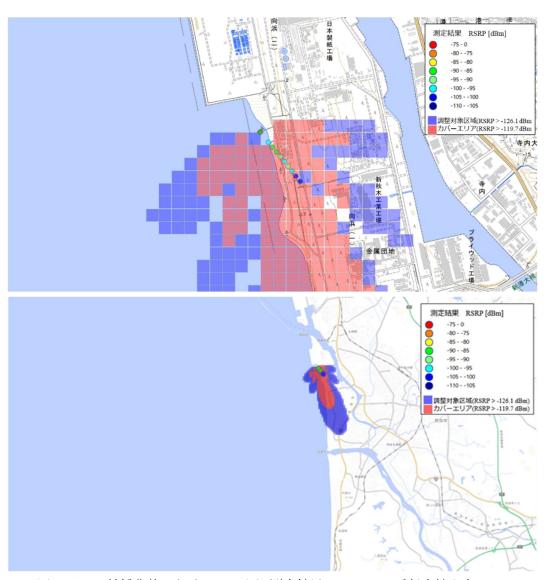


図 3-105 精緻化後のカバーエリア図と測定結果 Case3-3 受信点地上高 50m 出典:国土地理院地図

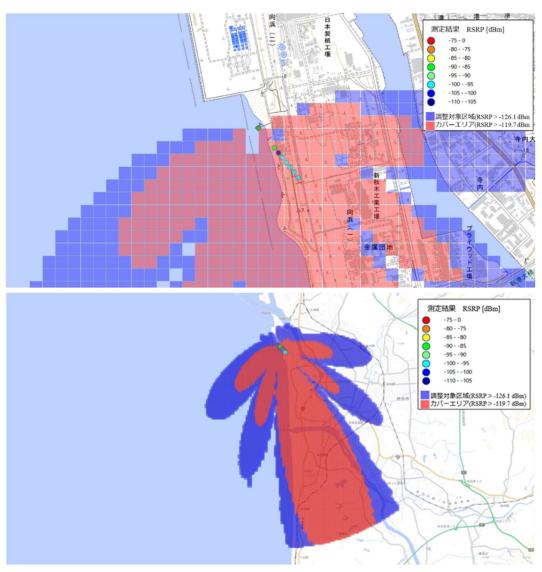


図 3-106 精緻化後のカバーエリア図と測定結果 Case3-3 受信点地上高 100m 出典:国土地理院地図

11) Casel、Case4 測定データ

表 3-22 測定ポイントでの取得データ(Casel、4)

ポイ	北緯	東経	地上高	基地局	基地局	基地局	測定	RSRP	SIR	標準偏
ント			(m)	からの	との距	から見	回数	(dBm)	(dB)	差
番号				角度	離	たチル	(回)			
				(TN)	(m)	ト角度				
191	39.7406	140.054	10.03	187	47.47	-11.76	1000	-72.2	22.0	1.3885
192	39.7406	140.054	49.93	187	66.32	24.89	1000	-77.0	21.9	0.9335
193	39.7406	140.054		187	107.60	44.11	1000	-92.1	19.0	1.5090
			100.02							
194	39.7402	140.054	10.03	187	94.21	-15.86	1000	-83.7	22.0	1.5241
195	39.7402	140.054	50.04	187	104.98	6.47	1000	-75.3	20.9	0.8913
196	39.7402	140.054		187	134.91	25.85	1000	-78.9	22.0	0.6527
			100.03							
197	39.7397	140.054	10.05	187	141.13	-17.16	1000	-87.3	21.7	1.9600
198	39.7397	140.054	50.04	187	148.58	-1.56	1000	-87.8	16.9	4.1220
199	39.7397	140.054		187	171.11	14.53	1000	-75.0	21.7	2.9250
			100.03							
200	39.7393	140.054	10.03	187	187.99	-18.60	1000	-89.4	21.7	2.3485
201	39.7393	140.054	50.03	187	193.16	-6.65	1000	-79.4	21.7	1.8159
202	39.7393	140.054		187	210.40	6.72	1000	-80.8	21.2	1.0703
			100.02							
203	39.7388	140.055		90	132.66	45.61	1000	-83.0	21.6	1.4073
			100.05							
204	39.7388	140.055		90	215.77	64.53	1000	-96.4	19.6	2.1640
			200.13							
205	39.7388	140.055		90	309.06	72.53	1000	-92.3	21.3	1.1414
			300.05							
206	39.7392	140.054	100.01	60	130.36	46.78	1000	-81.8	21.9	0.6580
207	39.7392	140.054		60	214.46	65.40	1000	-83.5	22.0	0.9980
			200.02							
208	39.7392	140.054		60	308.21	73.16	1000	-86.8	22.0	0.9420
			292.40							
209	39.7395	140.054		30	127.77	47.77	1000	-93.0	19.0	5.4652
			100.00							
210	39.7395	140.054		30	212.71	66.19	1000	-87.1	21.9	1.1921

			200.01							
211	39.7395	140.054		30	306.86	73.75	1000	-85.9	22.0	1.2625
			300.01							
212	39.7396	140.053		0	125.20	48.11	1000	-89.9	21.0	1.8867
			100.08							
213	39.7396	140.053	200.11	0	210.51	66.60	1000	-85.8	21.6	5.7684
214	39.7396	140.053	300.11	0	304.89	74.09	1000	-88.0	21.1	3.9628
215	39.7395	140.053		330	123.32	47.61	1000	-87.4	21.8	0.7982
			100.00							
216	39.7395	140.053		330	208.39	66.49	1000	-84.7	21.9	1.1590
			200.03							
217	39.7395	140.053		330	302.72	74.06	1000	-87.7	21.8	2.0253
			300.02							
218	39.7392	140.053		300	124.35	47.09	1000	-90.9	20.6	2.1596
			100.03							
219	39.7392	140.053		300	209.00	66.10	1000	-86.2	21.8	1.1649
			200.01							
220	39.7392	140.053		300	303.14	73.78	1000	-86.3	21.9	0.8427
			300.02							
221	39.7388	140.052		270	127.15	46.41	1000	-96.6	19.2	2.5226
			100.02							
222	39.7388	140.052		270	211.16	65.47	1000	-97.9	18.7	3.6568
			200.00							
223	39.7388	140.052		270	304.97	73.29	1000	-86.9	21.6	0.9443
			300.01							
224	39.7384	140.053		240	128.98	44.97	1000	-90.5	20.9	1.8601
			100.05							
225	39.7384	140.053		240	211.82	64.48	1000	-90.8	21.6	0.8819
	20 = 20 4		200.10	0.40	00=10	=0.00	1000		21.0	0.5050
226	39.7384	140.053		240	305.12	72.60	1000	-92.3	21.0	3.7353
005	00 5001	140.050	300.05	010	101.05	10.00	1000	07.5	01.5	0.0700
227	39.7381	140.053	100.00	210	131.27	43.99	1000	-87.5	21.5	0.6786
222	20.7201	140.050	100.03	010	010.00	60.71	1000	00.4	01.0	0.0510
228	39.7381	140.053	200.05	210	213.22	63.71	1000	-89.4	21.6	0.6519
220	20 7201	140.053	200.05	210	206 10	72.02	1000	_02 =	21.0	1.4055
229	39.7381	140.053	300.03	210	306.10	72.03	1000	-93.5	21.0	1.4055
			300.03							

230	39.7380	140.053		180	132.73	43.38	1000	-92.4	19.1	0.7942
			100.02							
231	39.7380	140.053		180	214.17	63.23	1000	-95.8	20.1	1.4815
			200.03							
232	39.7380	140.053		180	306.77	71.67	1000	-92.6	21.4	0.6568
			300.01							
233	39.7381	140.054		150	133.05	43.28	1000	-111.1	7.0	2.7957
			100.00							
234	39.7381	140.054		150	214.35	63.13	1000	-109.6	12.4	4.2910
			200.00							
235	39.7381	140.054		150	306.90	71.60	1000	-109.7	12.6	3.3272
			300.00							
236	39.7384	140.054		120	134.10	44.56	1000	-94.5	18.8	2.0182
			100.30							
237	39.7384	140.054		120	216.34	63.79	1000	-80.1	22.2	0.6970
			200.04							
238	39.7384	140.054		120	309.23	72.00	1000	-82.7	22.1	0.9899
			300.04							

※2023年3月測定 4号風車前、遮蔽面ポイント

ポイ	北緯	東経	地上高	基地局	基地局	基地局	測定	RSRP	SIR	標準偏
ント			(m)	からの	との距	から見	回数	(dBm)	(dB)	差
番号				角度	離	たチル	(回)			
				(TN)	(m)	ト角度				
270	39.7388	140.053	2.70	187	234.95	-19.07	1000	-94.7	17.9	3.3036
271	39.7388	140.053	2.70	187	281.93	-19.23	1000	-109.8	4.6	3.6420



図 3-107 Casel 受信点地上高 10m,50m,100m ポイント番号 (赤色番号:3 月測定 1.5m ポイント番号)

出典:国土地理院地図

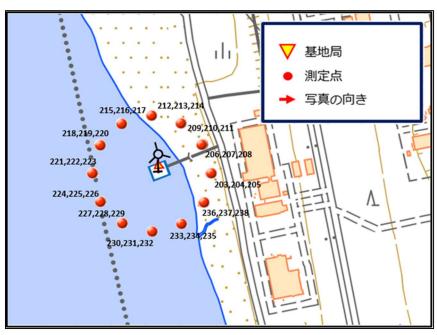


図 3-108 Case4 受信点地上高 100m,200m,300m ポイント番号 出典:国土地理院地図

12) 風力発電設備による遮蔽について

Case1 および Case4 の測定データより、風力発電設備の最も遮蔽影響が大きいシャフト部分に関し、見通し位置と遮蔽位置との電力差の例は以下の通り。

表 3-23 Casel での遮蔽の影響(伝搬距離距離 250m 前後)

	RSRP	SIR
アンテナから見通しあり	-94.7dBm	17.9dB
シャフトでの遮蔽位置	-109 . 8dBm	4.6dB
差分	15.1dB	13.3dB

表 3-24 Case4 での遮蔽の影響

	RSRP	SIR
アンテナから見通しあり	-94.5dBm	18.8dB
(120°方向 高度 100m)		
シャフトでの遮蔽位置	-111.1dBm	7.0dB
(150°方向 高度 100m)		
アンテナから見通しあり	-80.1dBm	22.2dB
(120°方向 高度 200m)		
シャフトでの遮蔽位置	-109.6dBm	12.4dB
(150°方向 高度 200m)		
アンテナから見通しあり	-82.7dBm	22.1dB
(120°方向 高度 300m)		
シャフトでの遮蔽位置	-109.7dBm	12.6dB
(150°方向 高度 300m)		
差分(平均)	24.4dB	10.4dB

いずれの Case でもシャフトの遮蔽影響は 10dB から 20dB を超える伝搬損失となっており、対策が必要となる。この影響の回避策としては以下のような案が考えられる。

・ 対策案① アンテナ設置位置による回避 洋上ウィンドファームの場合、主風向によりブレードが向く確率が高い方向がある。その時のドローンの飛行範囲に対して、見通しの位置にアンテナを設置することで、シャフト遮蔽影響を回避する。

対策案② セクタ化

アンテナを同軸分岐し 2 セクタ化させて、それぞれをシャフトの正面位置と背面位置に設置することで死角をなくし、シャフト遮蔽影響を回避する。



図 3-109 Casel エリアシミュレーション 1(受信点地上高 10m K 値あり) 出典:国土地理院地図



図 3-110 Casel エリアシミュレーション 2(受信点地上高 10m K 値あり) 出典:国土地理院地図



図 3-111 Casel エリアシミュレーション 1(受信点地上高 50m K 値あり) 出典:国土地理院地図



図 3-112 Casel エリアシミュレーション 2(受信点地上高 50m K 値あり) 出典:国土地理院地図



図 3-113 Casel エリアシミュレーション 1(受信点地上高 100m K 値あり) 出典:国土地理院地図

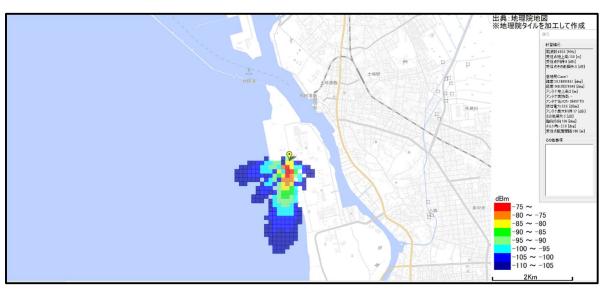


図 3-114 Casel エリアシミュレーション 2(受信点地上高 100m K 値あり) 出典:国土地理院地図



図 3-115 Case4 エリアシミュレーション 1(受信点地上高 100m K 値あり) 出典:国土地理院地図



図 3-116 Case4 エリアシミュレーション 2(受信点地上高 100m K 値あり) 出典:国土地理院地図



図 3-117 Case4 エリアシミュレーション 1(受信点地上高 200m K 値あり) 出典:国土地理院地図



図 3-118 Case4 エリアシミュレーション 2(受信点地上高 200m K 値あり) 出典:国土地理院地図



図 3-119 Case4 エリアシミュレーション 1(受信点地上高 300m K 値あり) 出典:国土地理院地図

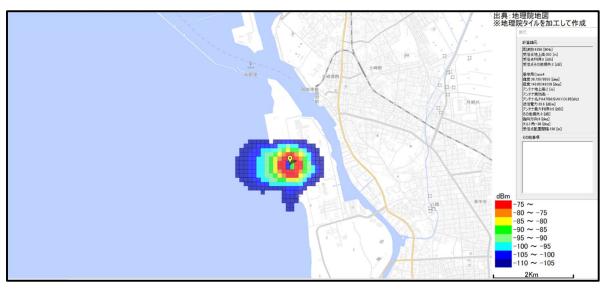


図 3-120 Case4 エリアシミュレーション 2(受信点地上高 300m K 値あり) 出典:国土地理院地図

13) 環境(遠方)測定データ

環境測定として端末が通信できる最遠方の距離を測定した。リモートから船上のコンパクト PC 間で遅延を継続測定し、ポイント番号 269(基地局からの距離 6.3km)でレスポンスが途切れることを確認した。

ポイ	北緯	東経	地上高	基地局	基地局	基地局	測定	RSRP	SIR	標準偏
ント			(m)	からの	との距	から見	回数	(dBm)	(dB)	差
番号				角度	離	たチル	(回)			
				(TN)	(m)	ト角度				
241	39.7350	140.042	1.50	236	1164.38	-13.63	1000	-93.3	18.8	3.1545
242	39.7333	140.038	1.50	236	1455.46	-13.71	1000	-93.9	18.5	2.7164
243	39.7318	140.035	1.50	236	1746.55	-13.75	1000	-96.5	16.9	3.0930
244	39.7305	140.032	1.50	236	2037.63	-13.79	1000	-99.2	14.9	3.8027
245	39.7288	140.029	1.50	236	2328.72	-13.81	1000	-99.4	14.7	2.7423
246	39.7271	140.027	1.50	236	2619.81	-13.84	1000	-100.7	13.6	3.5371
247	39.7251	140.024	1.50	236	2910.90	-13.85	1000	-102.7	11.8	3.2034
269	39.7022	139.995	1.50	236	6306.93	-13.93	1000	-118.4	-3.4	4.6461

表 3-25 環境(遠方)測定



図 3-121 Case2-1 3 月測定 船上 1.5m 遠方測定ポイント番号 出典:国土地理院地図

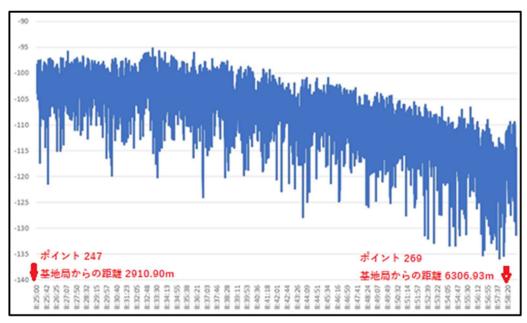


図 3-122 ポイント 247~269 間の RSRP 遷移

一般的な陸上環境ではおおよそ 500m 前後で見られる挙動だが、指向性アンテナの使用、水平より 上向き方向のアンテナチルト角であること、100%水面上であることで、実際に相当の距離まで通信が 可能であることが確認できた。条件と整えることで、洋上ウィンドファーム環境での本用途において、 ローカル 5G は十分にかつ効率的に活用が可能であると判断できる。

3.3.2 エリア構築の柔軟性向上

このテーマには取り組まなかった。

3.3.3 準同期 TDD の追加パターンの開発

このテーマには取り組まなかった。

4. ローカル 5G 活用モデルに関する検討(課題実証)

4.1 実証概要

4.1.1 背景となる課題

(1) 本実証の背景

本実証は、洋上風力設備のブレードメンテナンスにおいて、現状行われている「作業員によるロープワークでの目視確認」から「ドローン撮影による画像確認」へ切り替えに際し課題であった、撮影時の撮影漏れ(カメラ電源の入れ忘れなど)や画像必要品質未達(アングルずれ、ピンぼけ、逆光、図 4-1、図 4-2、図 4-3 参照)など、撮影失敗による作業手戻りを最小化し、メンテナンスの効率化(メンテナンスによる発電停止時間の短縮)を図るもので、この技術活用をセキュリティや通信の安定性を担保した上で実現し、今後益々導入拡大が進む洋上風力発電設備にて対応させるものである。

実際の作業では、風車に落雷があった際、風車ブレードの運転を保安停止させた上で 1mm 程度のブレード表面の損傷(図 4-4 参照)の確認を、ドローンに搭載する約 5,000 万画素のカメラで撮影し実施するが、撮影画像が大容量であるためドローン撮影画像をリアルタイムに陸域のメンテナンス拠点へと伝送する通信手段がなく、ドローン撮影画像は SD カードに保存しドローンが陸域拠点まで帰還した後に回収確認する方法をとっており、前述の撮影失敗時には、ドローンを再び飛行させ、再撮影を行うため、発電再開時間が大きく遅延するという課題があった。

そこで本実証では、ローカル 5G を活用し、ドローン撮影画像をリアルタイムに陸域へと伝送し、随時 点検画像を確認できる点検ソリューションを確立し、メンテナンス効率上の課題解決を図るものである。 これにより秋田県下に現状 50 名以上はいると言われるドローンオペレーターの新たな雇用先が確保さ れるとともに、点検に伴う運転停止時間の短縮が、再生エネルギー電源による発電量の増加(化石燃料 由来の発電量の抑制)へつながり、安定した再生可能エネルギーの発電の実現に寄与するものである。

本事業において速やかに技術開発することは、国産技術を以って日本国内特有の課題を解決し、国内の洋上風力発電事業の拡大に寄与するものである。



図 4-1 ドローンで撮影した風車ブレード先端部(アングルずれ)



図 4-2 ドローンで撮影した風車ブレード先端部(ピンぼけ)



図 4-3 ドローンで撮影した風車ブレード(アングルずれ、逆光)

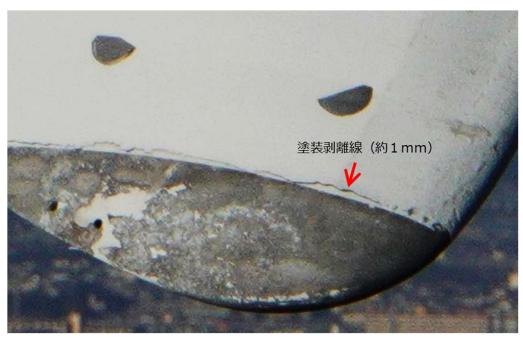


図 4-4 ドローンで撮影した風車ブレード先端部

(2) 経済産業省が進める洋上風力発電分野でのスマート保安

経済産業省産業保安グループでは、構成する設備の経年劣化や電気保安人材の高齢化・人材不足、近年大型台風や豪雨等の自然災害の激甚化や、新型コロナウイルス感染対策を行いながらの電力の安定供給の実現など、外部環境変化の課題も多く出現しているため、電力供給の安定性と効率性の向上および高度化を図っていくことが必要であるとし、IoT、AI やドローンに代表されるような新しい技術の活用を目指し、スマート保安官民協議会電力安全部会を設置し、官民連携での電気保安のスマート化について検討を行っている。具体的には電気保安のスマート化について、2025 年をターゲットイヤーとし、現状の課題や導入が期待される技術を踏まえ、電気保安の将来像やスマート化実現に向けたポイントを整理し、官民のアクションが検討・整理されている。

この中で洋上風力発電設備についても、今後案件形成が進捗していく見込みである。一般的に風力発電設備の保守作業にあたっては、①高所での点検が必要であるなど、風力発電設備構成に起因する作業コストに加え、②風況や、住環境等との一定の離隔距離を前提とすることといった立地の制約があるためアクセスが困難であり、その他、③メンテナンス人材や主任技術者の不足といった課題が挙げられている。また 2025 年においては、一定程度技術が確立したセンサーやドローン等の本格活用を目指すことが示されている。

ダウンコンダクター等の導通試験やボルトの増締めのスマート化等、有用であるが未確立の技術については、その開発を促進し、また、スマート保安技術の導入による保安力の向上により、事故率の低減を目指すとしている。

将来的には、センサーやドローンから取得したデータを活用した予兆診断の実現を目指し、これらの取り組みを通じ、地域社会から受容される再エネ型地域社会の構築への貢献を図るとされている。(図 4-5、図 4-6、図 4-7 参照)

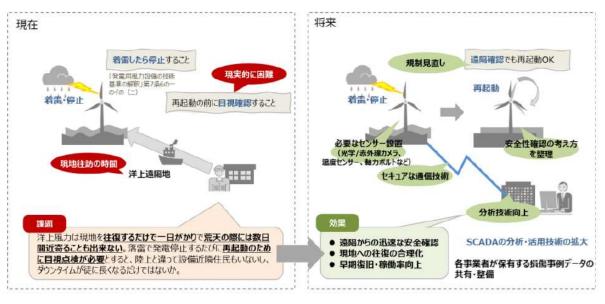


図 4-5 洋上風力発電における遠隔異常確認技術 出典:スマート保安官民協議会 電力安全部会

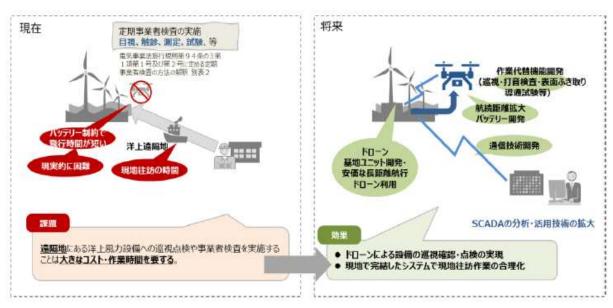


図 4-6 洋上風力発電におけるドローン巡視点検技術 出典:スマート保安官民協議会 電力安全部会

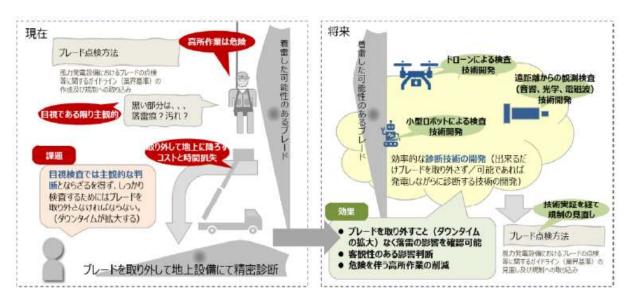


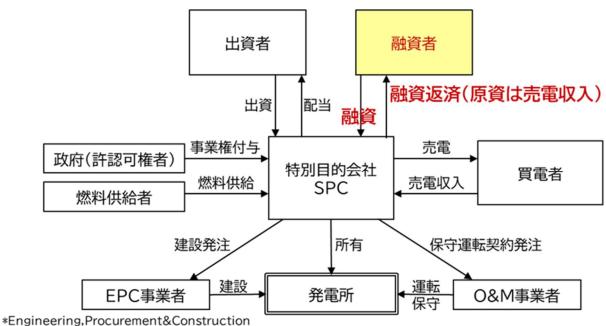
図 4-7 ブレード健全性診断技術 出典:スマート保安官民協議会 電力安全部会

(3) 洋上風力発電の事業構造とソリューションのニーズ

洋上風力発電事業は、発電所立地地点となる海域を国が指定し上で、その海域の占用許可に対し公募を行う。この公募には一般的にコンソーシアムを組んだ企業体が入落札し建設地点を確保する。入札の評価項目は多種多岐に及ぶが、発電単価における点数配分が高く、各コンソーシアムは入札に勝ち抜くために、新技術を採用するなどして発電単価を低減させることが重要になる。

洋上風力発電事業は、図 4-8 に示す通り、出資者や融資者から資金提供を受け組成する特別目的会社(SPC)が事業主体となる。SPC では、洋上風力発電事業で必要となる出資者調整、環境アセスメント、調査、設計、施工、稼働、売買電、オペレーションアンドメンテナンス(O&M)、設備撤去(図 4-9

参照)を実施する。



出資者 プロジェクトに出資しているメンバーを指す。

SPC 特別目的会社で Special Purpose Company の略。

本成果報告では、出資者が出資し立ち上げた会社で、洋上風力発電事業を行う

のはこの会社を意味し、「洋上風力発電事業会社」とも表す。

SPC に融資を行う銀行、保険会社等を指す。 融資者

通常は一般送配電事業者に売電する。コーポレート PPA の場合はその契約相 買電者

手を指す。

O&M 事業者 O&Mとは Operation & Maintenance の略。

風車メーカーおよび独立系のO&M事業者を指す。

風車メーカーは、当該発電所に風車を納入したメーカー・ベンダを指し、自社が

納入した風車のみ対応する。

独立系の O&M 事業者とは、基本的にマルチメーカー・ベンダで O&M を請け

負う事業者を指す。

EPC 事業者 EPC は E=設計(Engineering)、P=調達(Procurement)、C=建設

(Construction)の頭文字をとった略称。

洋上風力発電所の、設計・調達・建設を一貫した形で請け負う事業者を指し、

SPC から建設業務を受注する。

図 4-8 洋上風力発電事業のビジネススキーム例

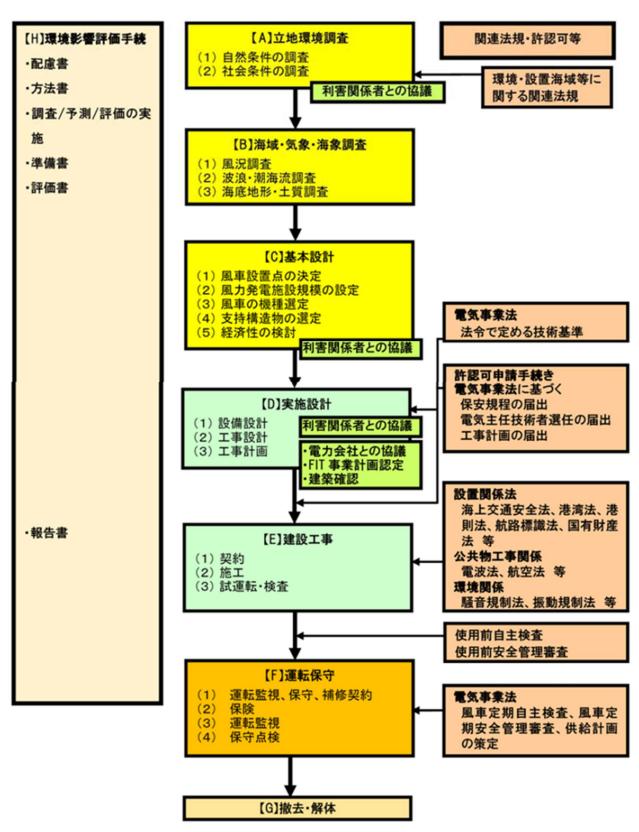
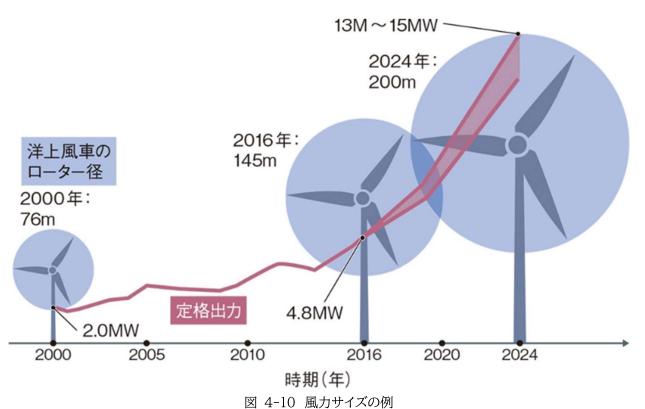


図 4-9 風力発電事業のサイクルの例 出典:着床式洋上風力発電導入ガイドブック

SPC ではライフサイクルコストの最小化のため様々な方策を検討するが、ライフサイクルコストに大きく影響を与える風車基数の削減は重要となる。設置する風車の基数が少なくなれば海上工事量も減少し、さらに O&M コストの圧縮や撤去費用も低減可能になるため、ライフサイクルコストを抑制できる。しかしながら発生電力量が下がれば収入が減少し収益性が低下する。

そこで、設置する風車基数を減少させた上で、発生電力量は当初画と比べ維持か向上させることを目的に風力発電設備が大型化する傾向が強い。風車は大型になればなるほど発電効率が上がるため、世界で大型風車の開発が進められており、現在ではロータ径 150m、ブレード先端の高さ 200m を超える風車も運転を開始しようとしている。(図 4-10 参照)



出典:「風車版ムーアの法則で海上発電を低コスト化(日経クロステック)」

今回実証する洋上風力発電ごとに向けローカル 5G システムを活用したドローンによる点検の実装は、まずは SPC にて検討され、SPC 内部で合意が得られれば、出資している株主(出資者)融資者および発電開始後の風車メンテナンスを担う風車メーカーへの説明・合意を経て採用が決定される。洋上風力発電事業の場合、風力発電事業、出資者、融資者および風車メーカーは、同時に複数の洋上発電事業を検討・実施している。このため、当システムが優れたシステムであれば、自ずと自身の別プロジェクトに水平展開すべく、当該プロジェクトの特別目的会社への提案などを行うこととなる。

建設された風力発電所は、洋上発電設備等の敷地の占用許可の関係で、一般的には 20 年間運転を継続した後撤去することになる。なお最近の海外における洋上風力プロジェクトでは、20 年経過後も占用許可を延長するなどして設備を残置し、運転を継続する計画を用いるケースもある。これは設置した設備をより長く使用することにより減価償却を抑制し発電単価を低減させることを目的にしているが、前

述の通り、入札に勝ち抜く方策として用いられる。すなわち洋上風力発電事業者は公募にて地点を獲得するため、公募申請書には落札により有利となる提案を行う。公募には洋上風力発電の運転・保守方法の記載も必要になる。本実証実施事業者である関西電力㈱が過年度に調査した英国の洋上風力発電事業の事例で見ると、建設費は新技術採用やサプライチェーン整備に伴い CAPEX(Capital Expenditure:減価償却が必要となる資本的支出)は 2011 年の 70-80%から 2019 年は 58%に改善されているが、O&M費用となる OPEX(Operating Expenditure:都度経費に計上される事業運営費用)は CAPEX の率の低下もあり、2011年の 20-30%から 2019年は 40%に上昇し全体に占める割合が大きくなっている。このため、O&Mへの新技術適用によるコスト削減は必須となる。(図4-12参照)

また風車は海外 3 メーカーで寡占状態であり、新技術適用に伴う風車標準仕様の変更・改良は、公募申請までに基本合意した上でメーカー見積りに反映しなければ、工事着手準備中に行う本契約時に 莫大な追加費用が発生する。風車標準仕様の変更・改良が伴う場合は、基本計画段階の検討が必須である(公募記載内容は実施義務を負う)。

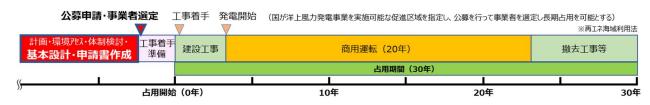


図 4-11 洋上風力発電事業の全体スケジュール例

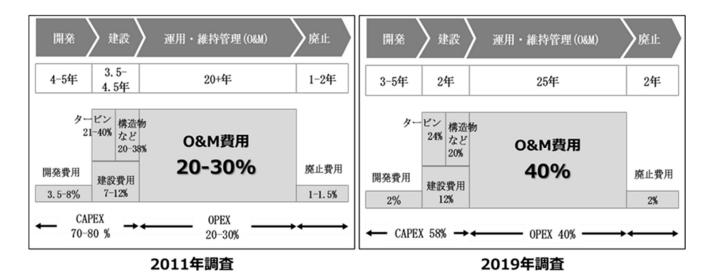


図 4-12 英国における洋上風力発電プロジェクトのライフサイクルコストの費用構成

(4) 洋上風力発電のオペレーションアンドメンテナンスを取り巻く課題

洋上風力発電は欧州が先進地であるが、日本で多発する落雷・台風は少なく、日本特有の気候に適合するメンテナンス技術は十分に開発されていない。ゼロカーボンの確実な実現には発電所建設のみならず、日本に適合するメンテナンス技術確立は、発生電力量の最大化とメンテナンスコストの最小化の

観点からも必須となる。

洋上風力発電所の適地は落雷が多発し(図 4-13 参照)、特に冬季雷は夏季雷に比べエネルギー量が大きく(数十倍から数百倍)、一度の被雷で大きなダメージを受ける可能性があり、確実な被雷対策と被雷後の迅速な対応はダウンタイム最小化のため重要となる。

陸上の風車が落雷を受けた場合、安全のため保安停止する。これは例えば、落雷にて大きなエネルギーを受けた風車のブレードがひび割れ等損傷していた場合、風車の回転を止めなければ損傷拡大が促進され、短時間の内にブレードが割れて飛び第三者に被害を与えることを未然に防止する観点からの処置である。このため保安停止するとともに不定期点検を実施し、設備異常の有無を目視点検し、問題ないと判断した上で発電再開可能となる。

洋上風力発電設備も風車が落雷を受けた場合、安全のため保安停止することになるが、停止後の不定期点検で陸上風車と大きく異なる点として、現状ではアクセス船(CTV)で現地の風車に接岸し実施することになる。

アクセス船(CTV)の出航基準は有義波高データによっており、出航する時間帯において有義波高について 1.5m 以上の予測があれば出航不可となる。この場合、落雷が多発する冬季間(11-3月)の連続出航不可日数の月間最長は、秋田県沖 16 日間(1月)、秋田港 8 日間(1,12月)となる。(表 4-1、図 4-14 参照) 前述の通り、落雷を受け停止した風車は不定期点検(目視)による安全確認の後に発電再開が可能なため、アクセス船(CTV)による洋上風車へのアクセスでは、最長で 16 日間、発電が停止することになり、安定的な電力供給の観点において大きな課題と言える。そこで波の影響を受けないドローンを活用した不定期点検(目視)が有効になる。ドローンでの飛行基準となる風速に関し、気象庁の毎正時風速データ(2016~2020年)では、風速10m/s連続超過の最大時間数は、能代港24時間、秋田港42時間となり、風速15m/s連続超過の最大時間数は、能代港1時間、秋田港18時間となる。アクセス船(CTV)とドローンを比べると、発電停止時間が著しく短縮可能なドローンでのアクセスが有利であり、安定的な発電に寄与できる。(表 4-2、図 4-14 参照)

効果は、洋上風車の不定期点検を対象に、アクセス船(CTV)の利用からドローンに変更した場合の 増電効果で示す。算定方法は、前記データ、学識経験者および秋田県の陸上風車事業者他とのヒアリ ング内容を参考に、CTV あるいはドローンによる緊急停止に伴う不定期点検 1 回あたりの点検遅延日 数等の数値を各々仮定し、点検遅延日数の差分であるドローンによる発電再開改善時間を試算したと ころ、年間約 670 時間で、これに洋上風力発電での設備利用率を考慮すると年間約 230 時間相当と なった。この 230 時間の改善にて、日本の洋上ウィンドファームでの一般的な出力である 300~700 MWで増電効果を試算すると 21,150~49,350MWh/年(金額換算で 5.5~12.8 億円/年)という大 きな効果が期待でき、安定的な電力供給のみならず、kWh あたりの発電コスト低減に寄与できる可能 性があると言える。

その他の課題として、ロープワークによる定期点検(外観点検、図 4-15 参照)が上げられる。外観点検に必要なロープワーカーの人数について、2030年代では全国で1日あたりの必要人数が約480名になると推定されている。現状の日本のロープワーカーが約200名その日は出航できないものと判定であることから、将来人手不足が課題となる。一方ドローンの場合、風車1基あたりの作業時間が1/8に短縮(16時間→2時間に短縮)可能であり、ドローンオペレーターは2030年代で1日あたり約60名となる。多くの講習を受講し、資格取得が必要なロープワーカーと異なり、比較的参入障壁が低いド

ローンオペレーターは、秋田県下でも現状で 50 名以上いると言われ、現状においても確保可能な人数 である(表 4-3 参照)。なおロープワーカーは不足すれば価格高騰が予想されるが、ドローンへ転換すれば価格上昇抑制効果にも期待できる。

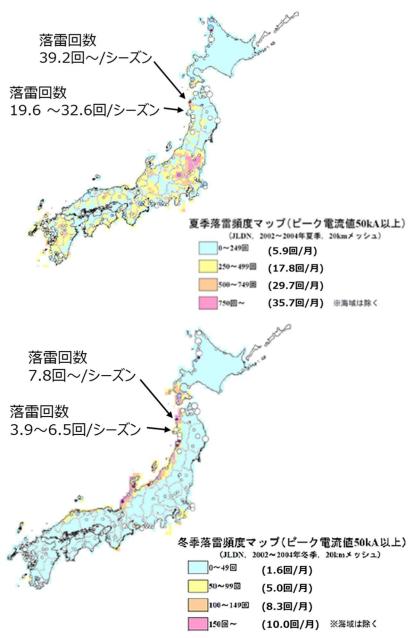


図 4-13 夏季(4月-10月)・冬季(11月-3月)別の落雷回数 出典:日本型風力発電ガイドライン 落雷対策編(NEDO)

表 4-1 秋田県沿岸地域における有義波高データを用いたアクセス船(CTV)連続出航不可日数 **秋田県沖 <'16,'17,'18,'19の4ヶ年データ>**

波高	区分						J	₹					
(m)	区ガ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	最長	11	9	7	5	2	2	2	2	3	5	14	8
2	平均	10	8	4	3	2	2	1	1	2	4	7	7
	最短	8	6	2	2	1	1	0	1	1	2	2	6
	最長	29	19	9	6	6	5	2	4	4	11	14	19
1.5	平均	16	15	8	5	4	3	1	3	3	6	11	15
	最短	11	12	4	3	2	2	1	2	1	3	8	8
	最長	31	24	23	12	7	5	4	6	6	15	24	31
1	平均	22	21	16	8	5	4	3	5	5	10	20	26
	最短	17	17	9	6	4	3	3	3	4	5	13	19

秋田港 < '16,'17,'18,'19,'20の5ヶ年データ>

波高	区分						J	3					
(m)	区刀	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	最長	8	6	4	3	21	2	1	1	2	5	5	9
2	平均	4	5	3	2	5	1	1	1	2	2	3	5
	最短	2	3	1	1	1	0	1	1	1	1	1	4
	最長	11	10	6	6	21	4	1	2	4	5	10	10
1.5	平均	8	7	4	4	7	2	1	1	2	3	7	8
	最短	6	3	3	2	2	1	1	1	1	2	3	5
	最長	13	18	9	9	21	4	2	5	4	6	14	22
1	平均	10	16	7	7	7	2	2	3	3	4	9	14
	最短	6	9	4	4	3	1	1	1	2	2	4	8

- ※ ナウファスデータを使用し整理(各地点においてデータ取得可能分が対象)
- ※ 24 時間データの内、7 時~17 時の間での、9,12,15 時の波高データにおいて、1 回でも各条件 (1.0m, 1.5m, 2.0m)に達していれば、当日は出航できないものと判定(多地点でのアクセス船 (CTV)運行判断適用)

表 4-2 秋田県沿岸地域における風速データを用いたドローン飛行連続不可時間数

	12 4 4	1// 111 2//	1117-		() O 174/7	<u> </u>	л c m v	/C1 H	- // (1 .7	141XV	
	項目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7.月	8月	9月	10 月	11月	12月
	データ数	341	312	341	330	341	330	341	341	330	341	330	341
能代港									341	330	341	330	341
BET V/2	10m/s						8/01/25						
		24 / 7%	16 / 5%	13 / 4%	12 / 4%	11 / 3%	7 / 2%	1 / 0%	8 / 2%	24 / 7%	8 / 2%	12 / 4%	30 / 9%
	11m/s	15	時間 (20	17/12/2	6 16:00	~ 201	7/12/27	07:00)					
	22,5	12 / 4%	11/4%	6 / 2%	4 / 1%	9 / 3%	1 / 0%	0 / 0%	3 / 1%	12 / 4%	5 / 2%	6 / 2%	24 / 7%
			100				-		3 / 1/0	127	3,20	0 / 2 / 0	24777
	12m/s						7/12/27						
		6 / 2%	4 / 1%	4 / 1%	1 / 0%	6 / 2%	0 / 0%	0 / 0%	0 / 0%	6 / 2%	2 / 1%	2 / 1%	11/3%
	13m/s	15	時間 (20	17/12/2	6 16:00	~ 201	7/12/27	07:00)					
	25,5	0 / 0%		1 / 0%			0 / 0%	0 / 0%	0 / 0%	3 / 1%	1 / 0%	0 / 0%	3 / 1%
									0 / 0.0	3727	1,000	0 / 0.0	3727
	14m/s						8/12/07						
		0 / 0%	1 / 0%	1 / 0%	0 / 0%	2 / 1%	0 / 0%	0 / 0%	0 / 0%	0 / 0%	0 / 0%	0 / 0%	2 / 1%
	15m/s	1	時間 (20	18/12/0	7 10:00	~ 2018	8/12/07	11:00)					
	13111,5	0 / 0%	0 / 0%	0 / 0%	0 / 0%	0 / 0%	0 / 0%	0 / 0%	0 / 0%	0 / 0%	0 / 0%	0 / 0%	1 / 0%
		0,00	07010	0 / 0 / 0	0 / 0 / 0	07010	0,000	0,000	0 / 0 / 0	0700	0,000	0 / 0 / 0	1/0/0
	福日	1.8	2日	3 🗐	48	5.8	6.8	7日	8 🗐	9.8	10日	11日	12 目
	項目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
10mm	データ数	341	312	341	330	341	330	341	8月 341	9月 330	10 月 341	11月 330	12月 341
秋田港	The state of the s	341	312	341	330	341		341					
秋田港	データ数	341	312 時間 (20	341	330 1 14:00	341 ~ 201	330	341					
秋田港	データ数 10m/s	341 42 34 / 10%	312 時間 (20 27/9%	341 17/12/1 26 / 8%	330 1 14:00 24 / 7%	341 ~ 2013 25 / 7%	330 7/12/13 9/3%	341 08:00) 6 / 2%	341	330	341	330	341
秋田港	データ数	341 42 34 / 10% 40	312 時間 (20 27/9% 時間 (20	341 17/12/1 26 / 8% 18/03/0	330 1 14:00 24 / 7% 1 15:00	341 ~ 2017 25 / 7% ~ 2018	330 7/12/13 9/3% 8/03/03	341 08:00) 6 / 2% 07:00)	341 1 / 0%	330 8 / 2%	341 20 / 6%	330 14 / 4%	341 46 / 14%
秋田港	データ数 10m/s 11m/s	341 42 34 / 10% 40 22 / 7%	312 時間 (20 27/9% 時間 (20 19/6%	341 17/12/1 26 / 8% 18/03/0 19 / 6%	330 1 14:00 24 / 7% 01 15:00 16 / 5%	341 ~ 2013 25 / 7% ~ 2018 7 / 2%	330 7/12/13 9/3% 8/03/03 4/1%	341 08:00) 6 / 2% 07:00) 6 / 2%	341	330	341	330	341
秋田港	データ数 10m/s	341 42 34 / 10% 40 22 / 7% 20	312 時間 (20 27/9% 時間 (20 19/6% 時間 (20	341 17/12/1 26 / 8% 18/03/0 19 / 6% 18/03/0	330 1 14:00 24 / 7% 01 15:00 16 / 5% 01 15:00	341 ~ 2011 25 / 7% ~ 2018 7 / 2% ~ 2018	330 7/12/13 9/3% 8/03/03 4/1% 8/03/02	341 08:00) 6/2% 07:00) 6/2% 11:00)	1 / 0%	330 8 / 2% 7 / 2%	341 20 / 6% 14 / 4%	330 14 / 4% 12 / 4%	341 46 / 14% 34 / 10%
秋田港	データ数 10m/s 11m/s	341 42 34 / 10% 40 22 / 7% 20	312 時間 (20 27/9% 時間 (20 19/6% 時間 (20	341 17/12/1 26 / 8% 18/03/0 19 / 6%	330 1 14:00 24 / 7% 01 15:00 16 / 5% 01 15:00	341 ~ 2011 25 / 7% ~ 2018 7 / 2% ~ 2018	330 7/12/13 9/3% 8/03/03 4/1%	341 08:00) 6 / 2% 07:00) 6 / 2%	341 1 / 0%	330 8 / 2%	341 20 / 6%	330 14 / 4%	341 46 / 14%
秋田港	データ数 10m/s 11m/s 12m/s	341 42 34 / 10% 40 22 / 7% 20 12 / 4%	312 時間 (20 27/9% 時間 (20 19/6% 時間 (20 7/2%	341 17/12/1 26 / 8% 18/03/0 19 / 6% 18/03/0 14 / 4%	330 .1 14:00 .24 / 7% .1 15:00 .16 / 5% .1 15:00 .10 / 3%	341 ~ 201: 25 / 7% ~ 201: 7 / 2% ~ 201: 2 / 1%	330 7/12/13 9/3% 8/03/03 4/1% 8/03/02 2/1%	341 08:00) 6/2% 07:00) 6/2% 11:00) 1/0%	1 / 0%	330 8 / 2% 7 / 2%	341 20 / 6% 14 / 4%	330 14 / 4% 12 / 4%	341 46 / 14% 34 / 10%
秋田港	データ数 10m/s 11m/s	341 42 34 / 10% 40 22 / 7% 20 12 / 4% 20	312 時間 (20 27/9% 時間 (20 19/6% 時間 (20 7/2%	341 17/12/1 26 / 8% 18/03/0 19 / 6% 18/03/0 14 / 4% 18/03/0	330 1 14:00 24 / 7% 0 1 15:00 16 / 5% 0 1 15:00 10 / 3% 0 1 15:00	341 ~ 2013 25 / 7% ~ 2018 7 / 2% ~ 2018 2 / 1% ~ 2018	330 7/12/13 9/3% 8/03/03 4/1% 8/03/02 2/1% 8/03/02	341 08:00) 6/2% 07:00) 6/2% 11:00) 1/0% 11:00)	1 / 0% 1 / 0% 0 / 0%	330 8 / 2% 7 / 2% 6 / 2%	341 20 / 6% 14 / 4% 9 / 3%	330 14 / 4% 12 / 4% 11 / 3%	341 46 / 14% 34 / 10% 23 / 7%
秋田港	データ数 10m/s 11m/s 12m/s 13m/s	341 42 34 / 10% 40 22 / 7% 20 12 / 4% 20 7 / 2%	312 時間 (20 27/9% 時間 (20 19/6% 時間 (20 7/2% 時間 (20 5/2%	341 17/12/1 26 / 8% 18/03/0 19 / 6% 18/03/0 14 / 4% 18/03/0 11 / 3%	330 1 14:00 24 / 7% 0 1 15:00 16 / 5% 0 1 15:00 10 / 3% 0 1 15:00 6 / 2%	341 ~ 2013 25 / 7% ~ 2013 7 / 2% ~ 2013 2 / 1% ~ 2013 0 / 0%	330 7/12/13 9/3% 8/03/03 4/1% 8/03/02 2/1% 8/03/02 0/0%	341 08:00) 6/2% 07:00) 6/2% 11:00) 1/0% 11:00) 0/0%	1 / 0%	330 8 / 2% 7 / 2%	341 20 / 6% 14 / 4%	330 14 / 4% 12 / 4%	341 46 / 14% 34 / 10%
秋田港	データ数 10m/s 11m/s 12m/s	341 42 34 / 10% 40 22 / 7% 20 12 / 4% 20 7 / 2% 19	312 時間 (20 27 / 9% 時間 (20 19 / 6% 時間 (20 7 / 2% 時間 (20 5 / 2%	341 17/12/1 26 / %% 18/03/0 19 / 6% 18/03/0 14 / 4% 18/03/0 11 / 3% 18/03/0	330 24 / 7% 01 15:00 16 / 5% 01 15:00 10 / 3% 01 15:00 6 / 2% 01 15:00	341 ~ 201: 25 / 7% ~ 201: 7 / 2% ~ 201: 2 / 1% ~ 201: 0 / 0% ~ 201: 0 / 0%	330 7/12/13 9/3% 8/03/03 4/1% 8/03/02 2/1% 8/03/02 0/0% 8/03/02	341 08:00) 6/2% 07:00) 6/2% 11:00) 1/0% 11:00) 0/0% 10:00)	341 1 / 0% 1 / 0% 0 / 0% 0 / 0%	330 8 / 2% 7 / 2% 6 / 2% 5 / 2%	341 20 / 6% 14 / 4% 9 / 3% 6 / 2%	330 14 / 4% 12 / 4% 11 / 3% 7 / 2%	341 46 / 14% 34 / 10% 23 / 7% 16 / 5%
秋田港	データ数 10m/s 11m/s 12m/s 13m/s	341 42 34 / 10% 40 22 / 7% 20 12 / 4% 20 7 / 2%	312 時間 (20 27/9% 時間 (20 19/6% 時間 (20 7/2% 時間 (20 5/2%	341 17/12/1 26 / 8% 18/03/0 19 / 6% 18/03/0 14 / 4% 18/03/0 11 / 3%	330 24 / 7% 01 15:00 16 / 5% 01 15:00 10 / 3% 01 15:00 6 / 2% 01 15:00	341 ~ 2013 25 / 7% ~ 2013 7 / 2% ~ 2013 2 / 1% ~ 2013 0 / 0%	330 7/12/13 9/3% 8/03/03 4/1% 8/03/02 2/1% 8/03/02 0/0%	341 08:00) 6/2% 07:00) 6/2% 11:00) 1/0% 11:00) 0/0%	1 / 0% 1 / 0% 0 / 0%	330 8 / 2% 7 / 2% 6 / 2%	341 20 / 6% 14 / 4% 9 / 3%	330 14 / 4% 12 / 4% 11 / 3%	341 46 / 14% 34 / 10% 23 / 7%
秋田港	データ数 10m/s 11m/s 12m/s 13m/s 14m/s	341 42 34 / 10% 40 22 / 7% 20 12 / 4% 20 7 / 2% 19 2 / 1%	312 時間 (20 27 / 9% 時間 (20 19 / 6% 時間 (20 7 / 2% 時間 (20 5 / 2% 時間 (20 4 / 1%	341 17/12/1 26 / 8% 18/03/0 19 / 6% 18/03/0 14 / 4% 18/03/0 11 / 3% 18/03/0 8 / 2%	330 24 / 7% 21 15:00 16 / 5% 21 15:00 10 / 3% 21 15:00 6 / 2% 21 15:00 3 / 1%	341 ~ 201: 25 / 7% ~ 201: 7 / 2% ~ 201: 2 / 1% ~ 201: 0 / 0% ~ 201: 0 / 0%	330 7/12/13 9/3% 8/03/03 4/1% 8/03/02 2/1% 8/03/02 0/0% 8/03/02	341 08:00) 6/2% 07:00) 6/2% 11:00) 1/0% 11:00) 0/0% 10:00) 0/0%	341 1 / 0% 1 / 0% 0 / 0% 0 / 0%	330 8 / 2% 7 / 2% 6 / 2% 5 / 2%	341 20 / 6% 14 / 4% 9 / 3% 6 / 2%	330 14 / 4% 12 / 4% 11 / 3% 7 / 2%	341 46 / 14% 34 / 10% 23 / 7% 16 / 5%
秋田港	データ数 10m/s 11m/s 12m/s 13m/s	341 42 34 / 10% 40 22 / 7% 20 12 / 4% 20 7 / 2% 19 2 / 1%	312 時間 (20 27/9% 時間 (20 19/6% 時間 (20 7/2% 時間 (20 5/2% 時間 (20 4/1%	341 17/12/1 26 / 8% 18/03/0 19 / 6% 18/03/0 14 / 4% 18/03/0 11 / 3% 18/03/0 8 / 2%	330 1 14:00 24 / 7% 1 15:00 16 / 5% 1 15:00 10 / 3% 1 15:00 6 / 2% 1 15:00 3 / 1% 1 15:00	341 ~ 201: 25 / 7% ~ 201: 7 / 2% ~ 201: 2 / 1% ~ 201: 0 / 0% ~ 201: 0 / 0% ~ 201: 0 / 0%	330 7/12/13 9/3% 8/03/03 4/1% 8/03/02 2/1% 8/03/02 0/0% 8/03/02 0/0% 8/03/02	341 08:00) 6 / 2% 07:00) 6 / 2% 11:00) 1 / 0% 11:00) 0 / 0% 10:00) 0 / 0% 09:00)	341 1 / 0% 1 / 0% 0 / 0% 0 / 0%	330 8 / 2% 7 / 2% 6 / 2% 5 / 2%	341 20 / 6% 14 / 4% 9 / 3% 6 / 2%	330 14 / 4% 12 / 4% 11 / 3% 7 / 2%	341 46 / 14% 34 / 10% 23 / 7% 16 / 5%

- ※ 気象庁アメダス地点データ使用し整理(毎正時の10分間平均風速)
- ※ 24 時間データ(毎正時の10分間平均風速)の内、7時~17時の間での風速データを対象に各 条件(10m/s~15m/s)を判定
- ※ 5 ヶ年 $(2016\sim2020$ 年)データに対し各条件 $(10\text{m/s}\sim15\text{m/s})$ を対象に、上段は連続超過した最大時間数、下段は出現個数と出現率





図 4-14 有義波高、風速の観測位置

出典:(左図)ナウファス、(右図)国土地理院地図





図 4-15 ロープワークでの点検・検査の状況 出典:株式会社特殊高所技術のホームページ

表 4-3 風力発電導入量に応じたロープワークとドローンの1日あたりの必要人員数比較

10	衣 4 5 風力光電寺八重に応じたローテテーテビ ロップロ ロップ・タス 兵 数								
	風力発電 1日あた					1日あたり	きり		
西曆	陸	上	洋	上	合	計	点検必要人数		要人数
四倍	出力 (万kW	基数 (基)	出力 (万kW	基数 (基)	出力 (万kW	基数 (基)	点検基数 (基)	ロープ ワーク	ドローン
2010	245	1,739	3	3	248	248	9	57	9
2020	1,020	5,614	70	64	1,090	1,090	31	186	24
2030	2,660	13,814	1,000	909	3,660	14,723	80	481	63
2040	3,800	19,514	4,500	4,091	8,300	23,605	129	771	99

- ※ 出力は、2010 年度は陸上・洋上とも NEDO データベースより 2017 年 3 月末までの単機出力 10kW 以上かつ、総出力 20kW 以上の風車で稼働中のものを集計、陸上・洋上の 2020 年度 は JWPA ロードマップを引用、陸上の 2030 年度は JWPA ロードマップを引用、洋上の 2030, 2040 年度は「洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会」での導入量目標を引用。
- ※ 基数は、2010 年度は NEDO データベースより 2017 年 3 月末までの単機出力 10kW 以上かつ、総出力 20kW 以上の風車で稼働中のものを集計し、2030 年度以降については、資源エネルギー庁資料等より陸上は約 0.2 万 kW/基、洋上は約 1.1 万 kW/基として算出。
- ※ 1日あたりの点検基数は、点検頻度は雷対策重点地域(1回/2年)、その他地域(1回/3年)として上で、雷対策重点地域の基数は全体の約3割とし(毎年、全体の38.3%が点検)、気象条件が整いやすい7~8月、および雷時期(11~3月)のシーズン前(10月)、シーズン後(4月)の4か月間を点検時期とし、1か月あたりの稼働日数を22日、稼働率80%として算出。
- ※ 1日あたりの点検必要人数は、ロープアクセス点検に係る1基あたりの作業日数は3名が2日間、ドローン点検に係る1基あたりの作業日数3名が2時間とし算出。

(5) ドローンによるメンテナンスを取り巻く課題

1) 効率化の観点での課題

前述の通り、洋上風力設備でのブレードメンテナンスにおいて、現状行われている「作業員によるロープワークでの目視確認」から「ドローン撮影による画像確認」への切り替えは有効であるが、ドローンによる画像撮影時の撮影漏れ(カメラ電源の入れ忘れなど)、画像必要品質未達(ピンぼけ、アングルずれ、逆光)など、撮影失敗は起こり得る現象となる。また、落雷した風車ブレードは、運転を保安停止させた上で 1mm 程度のブレード表面の損傷確認が必要となり(確認後に問題がなければ発電再開可能)、ドローンに搭載する約 5,000 万画素のカメラで撮影する高精細画像での確認が必要となる。このため、撮影画像が大容量であり、LTE や Wi-Fi 等の通信手段ではドローン撮影画像を安定的かつリアルタイムで陸域基地局へと伝送することはできなかった。

ドローンが洋上風力発電設備を撮影し帰還した後に、ドローン搭載カメラの SD カードを取り出し、パソコンにデータを移行させた後にモニター等で確認して初めて、前述のケースなどでの撮影失敗時に気付くことになる。撮影失敗時には、ドローンは再び飛行し撮影し直す必要があり、この場合、発電再開が翌日以降に繰り延べされるなど、発電再開時間が大きく遅延し、ダウンタイムが増大することにより発電コストが上昇することが課題になる。(図 4-16 参照)

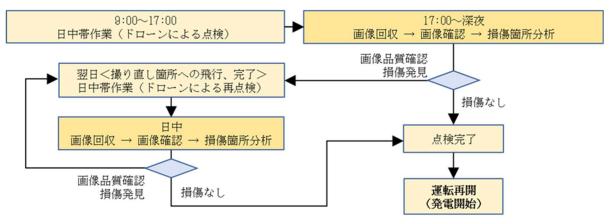


図 4-16 現状のドローン点検による作業の流れ

2) 安全性の観点での課題

前述の通り、洋上風力設備でのブレードメンテナンスは、現状、「作業員によるロープワーク」にて実施 している。(図 4-15 参照)

通常風車は相当な風が吹く地点に建設されるが、ロープでぶら下がる方法では、法令等に基づいた 安全対策を施しても一定の危険度は残ると推察される。

さらに今後大型化(陸上風車での地上高 120m 程度に対し、大型化する洋上風車は地上高 200m 超過)する洋上風力発電設備におけるロープワークは、法令等に基づいた安全対策を施しても、より危険度が増すと言える。こうした状況において、2030 年代で不足すると試算されるロープワーカーの確保は益々困難になると推察する。

洋上風力発電所の安定的な稼働に向けて、洋上風力発電設備の外観点検を持続的、安定的な体制 で維持するには、安全性を高めることが重要であり、ロープワークからの転換が課題になる。 図 4-17 に問題解決ツリー(イシューツリー)を示す。

日本のエネルギー戦略の実現に向けて、再生可能エネルギーの主力電源化を期待される洋上風力発電は、電力業界に対し常に電力の安定供給が求められている一方で、外部環境や産業構造変化にさらされていることから、電気保安水準の維持向上と生産性向上を両立させるスマート化の推進が強く求められている。

持続可能性のあるメンテナンス供給モデルの確立に向けて、ローカル 5G を含むデジタル技術を活用 したソリューションについて、イシューツリーにて具体的な実証課題の抽出を行った。

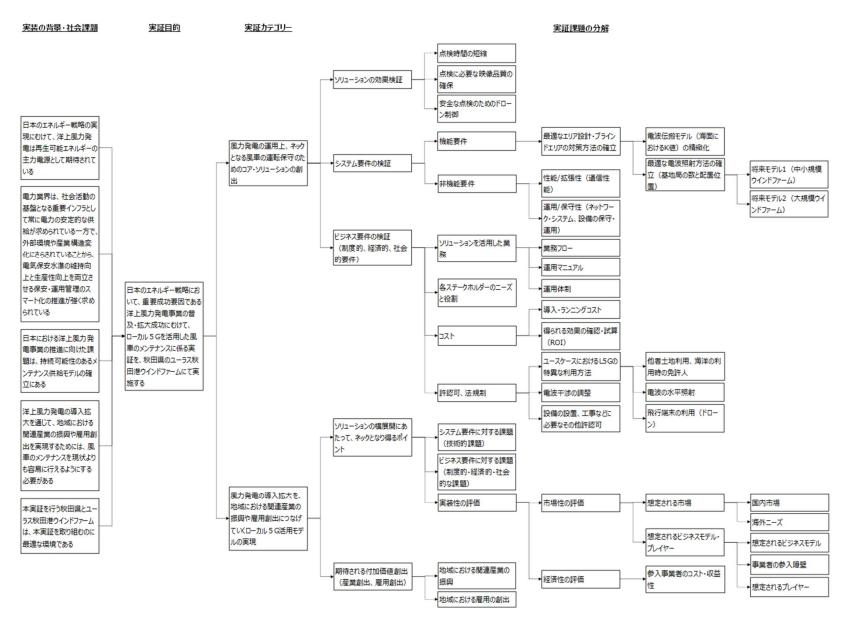


図 4-17 問題解決ツリー(イシューツリー)

(6) 課題のまとめ

- (1)で述べた本実証の背景、(2)で述べた経済産業省が進める洋上風力発電分野でのスマート保安、(3)で述べた洋上風力発電を取り巻く課題、(4)で述べた洋上風力発電のオペレーションアンドメンテナンスを取り巻く課題、(5)で述べたドローンによるメンテナンスを取り巻く課題、(6)で整理した課題解決のためのイシューツリーから、今回の課題を以下の通りに整理した。
- i. ドローンを活用した風車ダウンタイム改善に資する革新的な外観点検方法の確立
- ii. 上記を実現するための通信手段の確立

上記課題を解決するため、洋上域を対象に実際の風力発電設備を用いた各種実証試験を実施し、機能・性能、利便性・実用性を検証・評価した。

4.1.2 本実証におけるローカル 5G 活用モデル

(1) ローカル 5G を用いたソリューション

1) ソリューション検討の方向性

ドローンを活用した風力発電のブレードメンテナンスにおいてローカル 5G の活用が求められるケースとして、ドローン飛行時間の多くを基地局から対象設備までの移動飛行に費やさなければならない洋上での風力発電事業において効果が高いと考えた。

想定するソリューションは以下の通り。

- ① ドローンが陸域基地から洋上風力発電設備まで飛行(離岸距離:数 km~数十 km)
- ② ドローンが風車外観状況を高精細画像にて撮影
- ③ 撮影と同時に陸域基地へローカル 5G を活用し画像伝送
- ④ 画像を受信した陸域基地では、調査員が画像品質等(撮り漏れ、ピンぼけ、アングルずれ、逆光など)をチェック
- ⑤ ④の結果を踏まえ、再撮影が必要であればその場でドローンをリモート操作し、必要な再撮影を 実施
- ⑥ 撮影画像の不備等がなくなれば撮影を終了し、ドローンは陸域基地に帰還

上記のソリューションを実現するシステム構成については、洋上風力発電事業の事業規模、1 基あたりの風車規模(隣接する風車設備間距離)に応じ、ローカル 5G を用いた最適なソリューションを考案する必要がある。

2) 将来モデル 1(港湾区域等でのウィンドファーム展開モデル)の場合

将来モデル 1 は港湾区域内での展開を想定しているため、沿岸からウィンドファームまでの距離は比較的短く、風車規模は陸上風車と概ね同程度であり、風車と風車の間隔も比較的短くなる。

これを踏まえ、同規模でのウィンドファームの場合のローカル 5G を用いた概略構成図を図 4-18、図 4-19 に示す。

コスト抑制を鑑み、より少ない機器数量にすべく、隣接する風車でお互いローカル 5G 電波を照射することにより通信エリアを構成する。

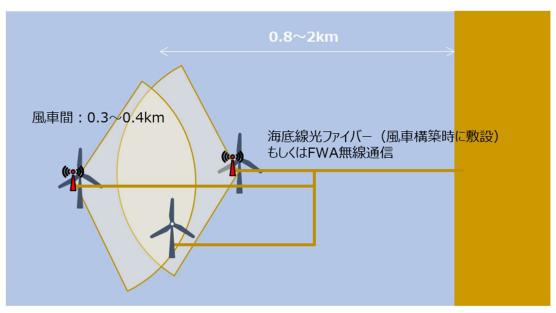


図 4-18 将来モデル 1 ヘローカル 5G を用いた場合の概略構成図(全体)

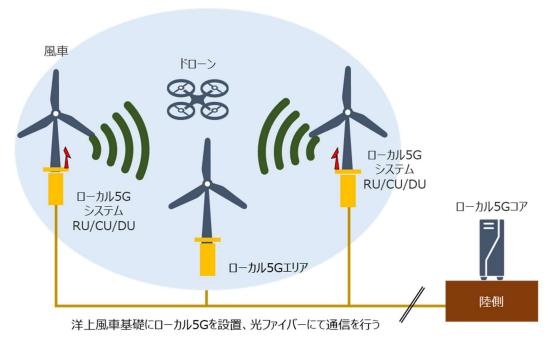


図 4-19 将来モデル 1 ヘローカル 5G を用いた場合の概略構成図

3) 将来モデル 2(一般海域でのウィンドファーム展開モデル)の場合

将来モデル 2 は一般海域での展開を想定しているため、沿岸からウィンドファームまでの距離は比較的長くなり、風車規模は陸上風車を大きく上回る。また、風車と風車の間隔も長くなる。

これを踏まえ、同規模でのウィンドファームの場合のローカル 5G を用いた概略構成図を図 4-20、図 4-21 に示す。

コスト抑制を鑑み、機器数量の効率化を図るべく、自己風車にローカル 5G 電波を照射することにより、通信エリアを構成する。通信エリアを構成しない風車を撮影したドローンは、通信エリアまで移動し、通信を実施する。

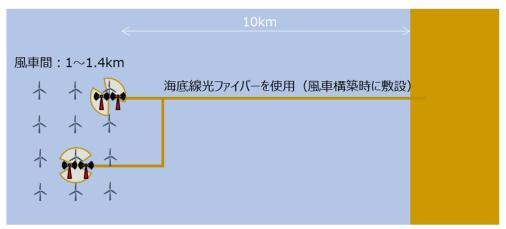


図 4-20 将来モデル 2 ヘローカル 5G を用いた場合の概略構成図(全体)

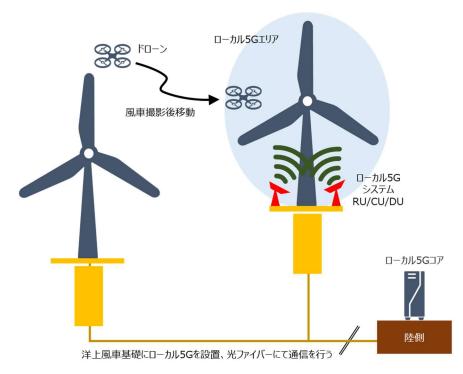


図 4-21 将来モデル 2 ヘローカル 5G を用いた場合の概略構成図

(2) ローカル 5G 活用モデル(当初仮説)

今回実証するローカル 5G のモデルの活用については 4.1.1(3)で述べた通り、ドローンによる点検の実装が前提となるが、まずは SPC にて検討され、SPC 内部で合意が得られれば、出資している風力発電事業・出資者(SPC)、融資者および発電開始後の風車メンテナンスを担う風車メーカーへの説明・合意を経て決定される。

なお前述の通り、洋上風力発電事業の場合、風力発電事業・出資者(SPC)、融資者および発電開始 後の風車メンテナンスを担う風車メーカーは、同時に複数の洋上発電事業を検討・実施している。このた め、当システムが優れたシステムであれば、自ずと自身の別プロジェクトに水平展開すべく、当該プロ ジェクトの SPC への提案などを行うこととなる。

また、洋上風力発電サイトまで敷設する光ファイバーのローカル 5G への利用に関し、SPC と合意でき、ローカル 5G 端末が独立系 O&M 事業者によって準備される場合、独立系 O&M 事業者も実装や水平展開の主体者となり得ると考えられる。(表 4-4 参照)

表 4-4 ローカル 5G 活用モデル(当初仮説)

表 4-4 ローカル 5G 福用モデル(当例仮説)
内容
① 風力発電事業・出資者(SPC)
② 融資者
③ O&M 事業者(風車メーカーあるいは独立系)
・ ①、②は自社設備として設置し、O&M事業者に貸与し活用する。
・ ③の場合、①、②に許可を得た上、自社費用で設置し、①、②の了解を得た
後に活用する。
・ SPC から点検業務等を受注した O&M 事業者が実施する。
・ ドローンによる点検の効率化による風力発電設備のダウンタイム短縮・発電
量増加に伴う増収が見込める。
・ 風力発電設備の最大限の活用を可能とし、CO2 排出量を抑制し、ゼロ
カーボン社会実現に貢献できる。
・ 当実証での成果等を用いて、独立系O&M事業者が、風力発電事業・出資
者(SPC)、融資者および風車メーカー等に提案し、プロジェクトへの採用
を働きかける。
・ 風力発電分野やインフラメンテナンス分野等への応用、可用性、課題解決
に資するかどうか等、横展開の仮説評価を実施する。

(3) ローカル 5G の必然性・必要性

4.1.1(1)で述べた通り、洋上風力設備の安定的稼働で重要となるブレードメンテナンスにおいて、現状の「作業員によるロープワークでの目視確認」から「ドローン撮影による画像確認」への切り替えは有効であるが、ドローンによる画像撮影時の撮影漏れ(カメラ電源の入れ忘れなど)、画像必要品質未達(ピンぼけ、アングルずれ、逆光)など、撮影失敗は起こり得る現象となる。また落雷した風車ブレードは、運転を保安停止させた上で 1mm 程度のブレード表面の損傷確認が必要となり(確認後に問題がなければ発電再開可能)、ドローンに搭載する約 5,000 万画素のカメラで撮影する高精細画像での確認が必要となる。このため、点検画像が大容量であり、LTE や Wi-Fi 等の通信手段ではドローン撮影画像を安定的かつリアルタイムで陸域基地局へと伝送に限界や制約が発生する。

ドローンが洋上風力発電設備を撮影し帰還した後に、ドローン搭載カメラの SD カードを取り出し、パソコンにデータを移行させた後にモニター等で確認して初めて、前述のケースなどでの撮影失敗時に気付くことになる。撮影失敗時には、ドローンは再び飛行し撮影し直す必要があり、この場合、発電再開が翌日以降に繰り延べされるなど、発電再開時間が大きく遅延し、ダウンタイムが増大することによる発電コストが上昇することになる(図 4-23 参照)。

そこで今回、ローカル 5G を活用して飛行中のドローンからリアルタイムに画像伝送を行うことで、撮影失敗時や損傷か所発見時の再撮影のための飛行など作業手戻りが最小化される(図 4-22 参照)。 ドローン撮影と画像解析が並行して実施可能となり、メンテナンスによる発電停止時間が大幅に削減できる(図 4-24 参照)。発電停止時間の削減効果については、4.3.2(1)3)a で詳述する。

本実証においては、点検中のドローン待機時間低減のために、点検画像 1 枚を 30MB と仮定し安全率 2 を考慮した上で、10 秒程度で地上側に伝送可能な速度として伝送速度の所用性能として設定した(30MB を 10 秒で送ることができなければ、SD カード受渡し方式から変更する優位性がなくなる)。

なお、国際的なセキュリティ会議(Black Hat Asia 2016)や学会(※)等で、暗号通信、非暗号通信 の脆弱性を利用した地上制御局との無線通信によるなりすまし攻撃で、警察や農業分野で利用される ハイエンドな無人航空機への不正制御可能な事例が報告されている。重要なインフラ設備に位置付けられる洋上風力発電設備も、サービス不能(DoS)攻撃による無人航空機の停止を未然に防ぐなど、十分 なセキュリティ対策が必要となる。

この点について、ローカル 5G は Wi-Fi や LTE での通信に比べセキュリティ確保が容易で確実である。

また、洋上風力発電設備は離岸距離 10~20km の海上に設置されるため、外観点検に適用するドローンは自律(自動)での目視外飛行となる。この時、突風による風車への衝突を防ぐ緊急回避操作、野鳥との回避操作など、一瞬を争う操作は陸域の基地局から、FPV 画像で確認しながらリモート操作することになる。この場合、ドローンから伝送される FPV 画像の遅延や、オペレーターからドローンに伝送する操作信号の遅延は、タイミングのずれにより、緊急的な被害回避操作とは逆の操作になる可能性がある。

この点、ローカル 5G は Wi-Fi や LTE での通信に比べ低遅延であり、有効な緊急回避操作が可能となる。

※無人航空機分野 サイバーセキュリティガイドライン Ver.1.0 2022.3(国立研究開発法人新エネル

ギー・産業技術総合開発機構)

現状の洋上風車の点検方法

- 調査員(ロープワーカー)がアクセス船(CTV)で洋上風車に乗り付ける。
- ロープワークによって、洋上風車 のブレードを1枚ずつ回転させな がら点検する。
- 3. 調査員がCTVで帰還する。
- ✓ 波高等によって、船が出せず点検 ができない間、洋上風車は発電停 止する。
- ✓ ロープワーカーの不足、作業の危険等がある。

ドローンを活用した 洋上風車の点検

- 1. ドローンが陸上基地から洋上風力発電施設まで、自律飛行する。
- 2. ドローンが風車外観状況を高精細 画像で撮影して搭載SDカードに 保存する。
- 3. ドローンが陸域基地に帰還する。
- 4. 陸域基地で、SDカードに保存された点検画像をもとに、調査員が 異常の有無を点検する。
- 5. 4.において、撮影不備箇所があった場合、1.の作業から再度行う。
- ✓ 撮影失敗時の手戻りが大きく、作業が完了できるまでの間、洋上風車は発電停止する。

ローカル5G活用モデルによる 洋上風車の点検

- 1. ドローンが陸上基地から洋上風力発電施設まで、自律飛行する。
- 2. ドローンが風車外観状況を高精細画像で撮影し、ローカル5Gを活用して陸域基地へ点検画像を伝送する。
- 3. 陸域基地で、受信した点検画像を もとに、調査員が異常の有無を点 検する。
- 4. 3.において、必要に応じて、点検 箇所を再撮影する。
- 5. 点検が完了し次第、ドローンが陸域基地に帰還する。
- ✓ 洋上風車の点検を効率化することで、洋上風車の発電停止時間を最小化する(発電効率を向上する)。

図 4-22 洋上風車の点検手法と変化

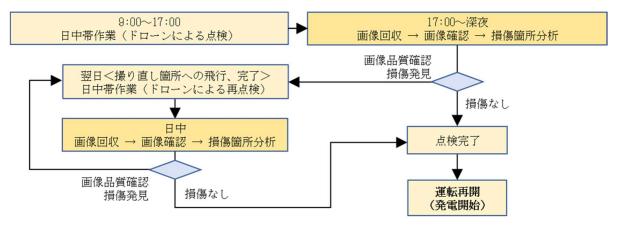


図 4-23 現状のドローン点検による作業の流れ

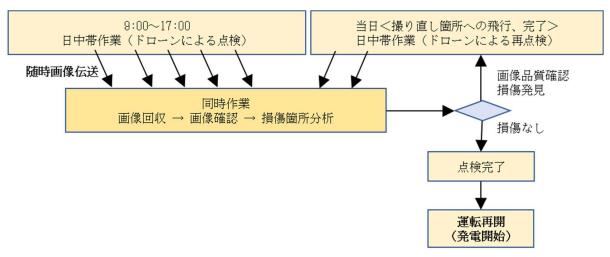


図 4-24 無線を活用したドローン点検による作業の流れ

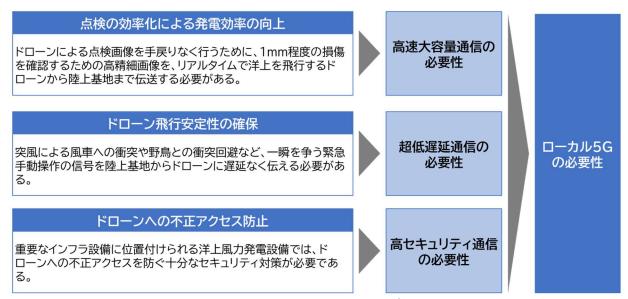


図 4-25 ローカル 5G の必要性

4.1.3 実証内容の新規性・妥当性

(1) 実証内容の新規性

海外の洋上風力発電においてローカル 5G を用いられている事例は存在するものの、ドローンとの組み合わせにおいて利用している事例は現在のところ確認できておらず、日本においては初めての試みとなるため、新規性は高いと言える。

また、目視外で飛行するドローンを活用した外観点検技術は、新規性も評価され、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下、NEDO)が行う「風車運用・維持管理技術高度化研究開発」に係る公募において、本実証実施者でもある関西電力㈱が開発助成先として選定され、助成金の交付が決定している。(関連特許:特願 2021-003396 号)

また同社は、同じく NEDO が公募する「グリーンイノベーション基金事業/洋上風力発電の低コスト 化プロジェクト」に「浮体式風車ブレードの革新的点検技術の開発」を応募し、採択を受けている。(関連 特許:特願 2021-091575 号、特願 2021-149473 号)

上記のいずれの取り組みもドローン本体の開発や点検技術に関する開発事業であるが、それらの技術を活用した点検手法をより効率的に運用させるための技術が、本ローカル 5G 活用モデルの実証により新たに構築されると位置付けている。

(2) 過年度実証事業との関連性

本実証はエネルギー(風力発電)分野でのメンテナンスの効率化、生産性向上の価値を生み出すユースケースにおいてドローンによるローカル 5G 活用、高精細画像伝送、海上でのローカル 5G 活用のモデル確立を目指している。

過年度実証では他分野(鉄道、漁業、エネルギー(陸上))においてユースケースまたはソリューション での類似性が認められる事業もあるが、本実証は以下の点において差異、発展性がある。

- ・ 基地局から水平角より上方に電波発射することにより 100m を超える海抜高にローカル 5G エリアを整備すること。
- ・ ローカル 5G 端末を搭載したドローンが、目視外飛行にて洋上風車近傍で海上 100m 以上の高度を飛行して通信を行うこと。

これらの発展性をもって、ローカル 5G のさらなる活用促進に寄与するものである。

また、上記発展性も踏まえ、社会インフラのメンテナンス分野や陸上風力発電分野など、類似性のある他分野について、応用、可用性、課題解決に資するかどうか等、横展開の仮説評価を実施した。

4.1.4 実証目標

(1) 実証の方向性

洋上風力発電分野でのローカル 5G 利活用、実装性においては特に、他の手段で得られる情報獲得性能やその取得信頼性、現在の作業代替え価値との効率性、合理性の比較が、ステークホルダーへの予備ヒアリングなどから重要であることが示唆されている。

具体的には、コストや時間をかけてでも、従来通り人が風車に接近して風車の情報を獲得することと 比較し、ドローンや通信手法など、遠隔から種々の手段により情報を獲得することは可能なのか、かつ 効率的なのかを、各実証ケースで示したパラメータにおいて通信やデータ伝送性能を中心に定量的に 整理していくことが求められている。

本実証は、実装に向けたステークホルダー観点での課題の洗い出し、並びに解決のための具体策策 定に向けた評価という位置付けであり、経済性に関する検証、市場性に関する検証の結果、実装性を高める手法とローカル 5G 活用モデル確立を目標とした。これは、機能としてのモデル確立だけでなく、市場への展開、投入計画を立案することで、実装計画のスタートを行うものである。具体的には、洋上風力発電への実装を前提とした提供フロー、サービス仕様、ビジネスモデルの確立および、実装時の経済効果の算定、販路、提案サイクルの確立を目指す。

この方向性で、本実証は運転保守の高度化・合理化を以てメンテナンスでの停止時間の最小化による発電設備利用率の拡大に寄与するものである。

また、本実証成果の一層の活用を促進するため、総務省が実施する「仮想空間における電波模擬システム技術の高度化」で研究開発が進められているワイヤレスエミュレータの研究開発関係者やユーザー等によって組織される「ワイヤレスエミュレータ利活用社会推進フォーラム」に参加する等の連携を行った。

(2) 要件等

本件システムが主に導入される事業規模および風力発電設備規模を想定し、本実証実施後速やかに 実装可能とするために、本実証において検証すべき確認事項を適切に評価できるよう実証の要件等と して以下を設定した。

1) 実証試験対象設備に関する要件等

- ・ 洋上風力ウィンドファームでの風車基数は 30~100 基程度であり、1 回の点検では複数の風車 設備が対象となることを想定。
- ・ 沿岸からの距離に応じて 2 パターンの風車設備規模および隣接する風車間距離を想定し、各 ケースにおいて費用対効果を踏まえた有効なシステム構成を考慮。
- ・ 沿岸から近距離に設置するウィンドファームの場合(設置場所が港湾内等、比較的小規模のウィンドファーム)、風車サイズは比較的中小型(ロータ直径 100m 程度)となり、風車と風車の間隔は 300~400m 程度と仮定。
- ・ 沿岸から遠距離に設置するウィンドファームの場合(大規模なウィンドファームで将来主流になる)、風車サイズは比較的大型(ロータ直径 200m 程度)となり、風車と風車の間隔は 1km 前後あると仮定。

2) 実証時のシステム要件等

本実証において必要なシステムおよび満たすべき要件は以下の通り。

必要なシステム	伝送速度	伝送遅延(Ping)	接続台数
ドローン遠隔操縦	500kbps	50ms	1
操縦用画像伝送	8Mbps	50ms	1
高精細画像伝送	最大 50Mbps	100ms	1

表 4-5 システム性能要件

これらの要件は、風車設備とドローンの衝突回避、検査中のドローン空中待機時間の最小化を目標に算出した。

洋上風力ウィンドファームにおける風車設備のうち、特にブレードの外観点検にはミリ単位の損傷有無判定が必要であり、そのための画像解析には、現状 5,000 万画素程度の高精細画像が必要とされている。点検中のドローン空中待機時間の最小化のための高精細画像伝送速度については、JPEG 形式の 5,000 万画素の検査画像 1 枚を 30MB と仮定し、安全率 2 を考慮した上で、10 秒程度で地上

側に伝送可能な速度として伝送速度最大値を想定した。(30MB を 10 秒で送ることができなければ、 SD カード受渡し方式から変更する優位性がなくなる)

衝突回避要件に関しては、点検対象とドローンが 10m の離隔で飛行している中、風速 10m/s の風が急に吹き点検対象設備方向へ流された場合でも、その状態を基地局で情報取得し、速やかに手動制御へ切り替えることで、ドローンの風車への衝突を回避することが可能であり、そのために許容可能な伝送遅延を算出した。これは制動距離目標値から安全率を考慮して設定した。

人による手動制御モードへの切り替え時間を約 0.8 秒と仮定し、操縦遅延&操作用画像伝送遅延は制動距離内にとどまるための残り 0.2 秒を均等に割り振り、0.1 秒/2=50ms を許容遅延時間と設定した。

人による切り替え時間については、過去のドローンオペレーターによる操作実例およびヒアリング結果から設定した。なお、類似の取り組みに関する成果報告書(「農業分野の課題解決(農業ロボットによる農作業の自動化の実現)に向けたローカル 5G 等の技術的条件および利活用に関する調査検討の請負」、2021 年 3 月 31 日、111 頁)において、オペレーター操作時間が約 0.52 秒とあった。これに 50%の安全率を考慮して約 0.8 秒と仮定することは妥当であると考える。

検査中のドローン空中待機時間の最小化に関しては、通信機器性能の最大値として期待される 50mbps を設定した。

(3) 確認事項と目標

次に示す実証試験各ケースにおいて、前述までの課題および要件に適合するか確認を行い、目標の達成度合いを評価した。

なお、点検用画像の品質確認に関して、従来方法による確認時間については、本実証の中で比較検証することで設定した。

1) 洋上風力ウィンドファームにおける将来実装モデルについて

洋上風力発電設備には、港湾区域等で展開する沿岸から比較的近く、風車間の間隔が短いウィンドファーム(将来モデル 1)と、一般海域で展開する沿岸から比較的遠く、風車間の距離が遠いウィンドファーム(将来モデル 2)がある。

この 2 つの将来実装モデルを軸とし、各モデルにおける撮影条件を考慮したケースの確認を行い、目標の達成度合いを評価した。

【将来モデル 1(港湾区域等でのウィンドファームの展開モデル)の場合】 隣接する風車で互いにローカル 5G 電波を照射することで通信エリアを構成する。



図 4-26 将来モデル1(港湾区域等でのウィンドファームの展開モデル)の通信エリア構成

【将来モデル 2(一般海域でのウィンドファームの展開モデル)の場合】

自己風車にローカル 5G 電波を照射することで通信エリアを構成する。通信エリアを構成しない風車を撮影したドローンは通信エリアまで移動し通信を実施する。

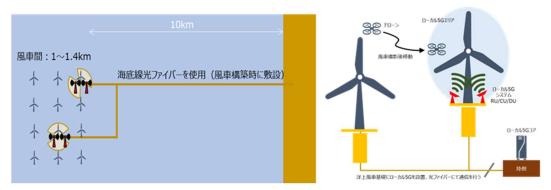


図 4-27 将来モデル 2(一般海域でのウィンドファームの展開モデル)の通信エリア構成

2) 将来モデル1(港湾区域等でのウィンドファーム展開モデル)を想定した検証

a. Case1:ローカル 5G ブラインドエリアの飛行撮影検証

ローカル 5G電波がブレードもしくは風車本体の影となり、電波のブラインドエリアとなる部分をドローンが飛行した場合における飛行安全性確認および点検可能な画像一式の取得確認を行った。実証対象風車(4 号機)に対して、250m 程度離れた地点から、地上 80m 程度にあるナセル(風車の中心点)に向けてローカル 5G 電波を発射した。ドローンは実証対象風車(4 号機)を挟んだ防波堤側の海上を飛行し、ブレードを撮影した。

【洋上飛行想定条件】

・ ローカル 5G 電波のブラインドエリアを飛行撮影

【検証方法】

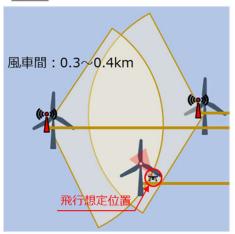
- ・ 必要に応じてブレードを停止し、全体点検として、ドローンで1回/秒の点検画像を撮影した。
- ・ ブレードに損傷がある場合(損傷がない場合は損傷個所があると想定)は、手動にて詳細撮影を 行い、損傷個所および損傷範囲を特定した。

【確認事項】

- ・ 風車本体もしくはブレードの影になり電波のブラインドエリアとなる部分をドローンが飛行しても、 飛行安全性を確保し、点検可能な画像を一式取得できること。
- 対象風車:4号機(洋上設置号機)

- ・ ローカル 5G を使用したリアルタイム無線伝送により点検可能な画像を一式取得し終える時間が、作業員による画像確認時間より短時間なこと。
- ・ 緊急時でも点検対象施設や第三者への接触や危害を与えることなく飛行操作を適切に実施できること。(制動距離 10m 以内相当)

将来像



実証の飛行撮影イメージ



図 4-28 将来像と実証の飛行撮影イメージ(Casel) 出典:国土地理院地図

b. Case2:ローカル 5G 気象海象影響エリアの飛行撮影検証

ローカル 5G 電波が気象海象の影響(海面や波の影響)を受ける防波堤の外側でドローンを飛行した場合の飛行安全性確認および点検可能な画像一式の取得確認を行った。実証対象風車(4 号機)から洋上方向に、地上 100m 付近を飛行するドローンとの通信を想定しローカル 5G 電波を発射した。ドローンは防波堤の外側の海上を飛行し、ブレードを撮影した。

【洋上飛行想定条件】

・ 気象海象の影響を受ける状況による飛行撮影

【検証方法】

- ・ 必要に応じてブレードを停止し、全体点検として、ドローンで1回/秒の点検画像を撮影した。
- ・ ブレードに損傷がある場合(損傷がない場合は損傷個所があると想定)は、手動にて詳細撮影を 行い、損傷個所および損傷範囲を特定した。

【確認事項】

- ・ ローカル 5G 電波が海面や波の影響を受けるエリアをドローンが飛行しても、飛行安全性を確保し、点検可能な画像を一式取得できること。
- · 対象風車:4号機(洋上設置号機)

- ・ ローカル 5G を使用したリアルタイム無線伝送により点検可能な画像を一式取得し終える時間が、作業員による画像確認時間より短時間なこと。
- ・ 緊急時でも点検対象施設や第三者への接触や危害を与えることなく飛行操作を適切に実施できること。(制動距離 10m 以内相当)







図 4-29 将来像と実証の飛行撮影イメージ(Case2) 出典:国土地理院地図

c. Case3:ローカル 5G 電波伝達エリア内風車を対象とした飛行撮影検証

ローカル 5G 基地局から約 500m 離れた位置において、ドローンが飛行した場合の飛行安全性確認 および点検可能な画像一式の取得確認を行った。実証対象風車(4 号機)から約 570m 離れた風車(5 号機)の地上 80m 程度にあるナセル(風車の中心点)に向けてローカル 5G 電波を発射した。ドローンは実証対象風車(5 号機)周辺を飛行し、ブレードを撮影した。

【洋上飛行想定条件】

・ ローカル 5G 基地局から 500m離れた状況による飛行撮影

【検証方法】

- ・ 必要に応じてブレードを停止し、全体点検として、ドローンで1回/秒の点検画像を撮影した。
- ・ ブレードに損傷がある場合(損傷がない場合は損傷個所があると想定)は、手動にて詳細撮影を 行い、損傷個所および損傷範囲を特定した。

【確認事項】

- ・ ローカル 5G 基地局から 500m 離れた位置をドローンが飛行しても、飛行安全性を確保し、点 検可能な画像を一式取得できること。
- ・ 対象風車:4号機(洋上設置)の電波を受けて、5号機(陸上設置号機)を撮影。

- ・ ローカル 5G を使用したリアルタイム無線伝送により点検可能な画像を一式取得し終える時間が、作業員による画像確認時間より短時間なこと。
- ・ 緊急時でも点検対象施設や第三者への接触や危害を与えることなく飛行操作を適切に実施できること。(制動距離 10m 以内相当)



図 4-30 将来像と実証の飛行撮影イメージ(Case3) 出典:国土地理院地図

3) 将来モデル 2(一般海域でのウィンドファーム展開モデル)を想定した検証

a. Case4:ローカル 5G 垂直照射エリアの飛行撮影検証

ローカル 5G 電波がブレードもしくは風車本体の影となり、電波のブラインドエリアとなる部分をドロー ンが飛行した場合における飛行安全性確認および点検可能な画像一式の取得確認を行った。実証対象 風車(4 号機)のデッキ付近から自風車に対して電波をほぼ垂直に発射した。ドローンは、ほぼ真下から 発射される電波を受けながら飛行し、ブレードを撮影した。

【洋上飛行想定条件】

ローカル 5G 電波の垂直照射によるブラインドエリアの飛行撮影

【検証方法】

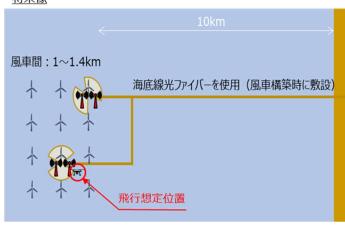
- 必要に応じてブレードを停止し、全体点検として、ドローンで1回/秒の点検画像を撮影した。
- ブレードに損傷がある場合(損傷がない場合は損傷個所があると想定)は、手動にて詳細撮影を 行い、損傷個所および損傷範囲を特定した。

【確認事項】

- 風車本体もしくはブレードの影になり電波のブラインドエリアとなる部分をドローンが飛行しても、 飛行安全性を確保し、点検可能な画像を一式取得できること。
- 対象風車:4号機(洋上設置号機)

- ローカル 5G を使用したリアルタイム無線伝送により点検可能な画像を一式取得し終える時間 が、作業員による画像確認時間より短時間なこと。
- 緊急時でも点検対象施設や第三者への接触や危害を与えることなく飛行操作を適切に実施で きること。(制動距離 10m 以内相当)





実証の飛行撮影イメージ



図 4-31 将来像と実証の飛行撮影イメージ(Case4) 出典:国土地理院地図

4.2 実証環境

本実証におけるソリューションが特に効果的となるのは、洋上風力発電設備への適用時である。

本格的な洋上風力発電設備として、港湾内であるが日本国内で初の商業ベースでの大型洋上風力発電事業となる秋田港・能代港風力発電があるが、能代港は2022年12月、秋田港は2023年1月に運用を開始したばかりであり、実証試験の準備を整えることは困難であった。またその他の地域においても、洋上風力の本格的な開発が始まろうとしているところである(表 4-6 参照)。これまでに実証試験サイトおよび実証試験後に商用運転に移行したものや、表 4-7 に示す通り、実証試験を終え商用運転を開始したサイト(千葉県銚子市沖)および実証試験中のサイト(福岡県北九州市沖、長崎県五島市沖)は存在するが、いずれも設置する風車は1基のみであり、複数の風車を対象にした実証試験としては適していない。

他方、表 4-8 に、現状での日本の陸上風力発電設備の一覧を示す。同表には大型化する洋上風力発電設備を鑑み、単機出力 3,000kW 以上の風車を抽出している。

同表から、本実証の実施時点において、本実証試験対象地点として望ましい、風車が洋上に設置されかつ複数の風車を有するウィンドファームは、No.22 の合同会社ユーラスエナジー秋田港が有するウィンドファームのみである。(表 4-9、図 4-32 参照)

従って、今回は合同会社ユーラスエナジー秋田港が有するウィンドファームでの 4 号および 5 号風車 を対象に実証試験を実施した。

また、実証環境において構築するネットワーク・システムの構成としては、表 4-10 に示す通りである。 表 4-6 至近の開発地点

	地点
第一回公募(済)	秋田県能代市·三種町·男鹿市沖、秋田県由利本荘市 沖、千葉県銚子市沖
第二回公募(受付中~2023 年 6 月 30 日)	秋田県八峰町·能代市沖他

表 4-7 日本における洋上風力発電

		<u> </u>	(7 O 1 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 - 1 -		
設置場所	銚子沖 (千葉県)	北九州沖 (福岡県)	北九州市沖 (福岡県)	福島沖 (福島県)	五島沖 (長崎県)
基礎形式	着床式 重力式	着床式 重力・ジャケット式	浮体式 バージ型	浮体式 セミサブ型 アドバンストスパー型	浮体式 ハイブリッドスパー型
基数、出力	1基、2.4MW	1基、2MW	1基、3MW	3基、 2MW/5MW/7MW 洋上変電所 1基	1基、2MW
離岸距離	約3km	約1.4km	約15km (離島からは約 5km)	約23km	約5km
主催	NEDO	NEDO	NEDO	経済産業省	環境省
実施者·団体	東京電力	電源開発	丸紅、日立造船、 グローカル、エコパ ワー、東大、九電み らいエナジー	丸紅、東大、MHI、 三菱造船、JMU、 三井造船、日立、 古河電工、新日鐵 住金、清水建設	戸田建設
試験期間・現状	・2013年に実証試験(運転)を開始し、2016年終了・2019年より東京電力により商用運転開始	・2013年に実証試 験(運転)を開 始し、2016年終 了 ・2019年撤去	・2018年から現地での実証開始し、2021年度まで実証運転の予定	 ・第1期として洋上変電所と2MW機を2011~2013年に設置 ・第2期として5MW機、7MW機を2014~2015年に設置 ・事業の継続の希望者がいないため、2021年撤去 	・2015年度末に実 証試験が終了し、 長崎県五島市と 戸田建設が事業 を継承

出典:NEDO ホームページ

表 4-8 日本における陸上風力発電一覧

	2、40日本に切りる性上周月元电 見									
NO	都道府県	市町村	設備内訳	発電所名:会社名等	単機	設置場所	(補足)			
1	茨城県	神栖市	5,310kW×1	鹿島港深芝風力発電所:日立ウインドパワー㈱	5,310	陸上				
2	福岡県	北九州市	4,999kW×1	北九州響灘風力発電所:北九州響灘風力太陽光発電(同)	4,999	陸上				
3	北海道	小樽市	3,400kW×10	リエネ銭函風力発電所:銭函ウィンドファーム(同)	3,400	陸上				
4	北海道	松前町	3,400kW×12	松前北部風力発電所:松前ウインドファーム(同)	3,400	陸上				
5	宮城	石巻市	3,400kW×6	ユーラス石巻ウインドファーム:㈱ユーラス石巻風力	3,400	陸上				
6	秋田県	八峰町	3,400kW×2	峰浜風力発電所:ウェンティ・パル八峰(同)	3,400	陸上				
7	秋田県	男鹿市	3,400kW×7	若美風力発電所:若美風力開発㈱	3,400	陸上				
8	北海道	小樽市	3,300kW×2	石狩湾新港風力発電所:エコ・パワー㈱ <※1>	3,300	陸上				
9	福岡県	北九州市	3,300kW×2	響灘ウインドエナジーリサーチパーク:響灘ウインドエナジーリサーチパーク(同)	3,300	陸上				
10	福岡県	北九州市	3,300kW×1	バージ型浮体式洋上風力発電システム実証機「ひびき」:NEDO/丸紅㈱他	3,300	洋上	1基のみ			
11	北海道	石狩市	3,200kW×7	石狩コミュニティウインドファーム:㈱ウイネット石狩	3,200	陸上				
12	北海道	せたな町	3,200kW×16	せたな大里ウィンドファーム:㈱ジェイウインドせたな	3,200	陸上				
13	青森県	つがる市	3,200kW×38	つがるウィンドファーム:グリーンパワーつがる(同)	3,200	陸上				
14	秋田県	八峰町	3,200kW×7	八峰風力発電所:八峰風力開発㈱	3,200	陸上				
15	秋田県	由利本荘市	3,200kW×13	ユーラス東由利原WF:㈱ユーラス東由利原風力	3,200	陸上				
16	秋田県	由利本荘市	3,200kW×3	にかほ高原ウインドファーム:㈱にかほ高原風力発電	3,200	陸上				
17	秋田県	にかほ市	3,200kW×3	にかほ馬場風力発電所:㈱にかほ市民風力発電	3,200	陸上				
18	福島県	飯館村	3,200kW×2	いいたてまでいな再エネ発電所:いいたてまでいな再エネ発電㈱	3,200	陸上				
19	石川県	羽咋市	3,200kW×3	JRE志賀西海風力発電所:(同)JRE志賀西海	3,200	洋上	僅かに海上			
20	北海道	稚内市	3,000kW×10	天北ウインドファーム:㈱天北エナジー	3,000	陸上				
21	秋田県	潟上市	3,000kW×22	秋田潟上ウインドファーム発電所:秋田潟上ウインドファーム(同)	3,000	陸上				
22	秋田県	秋田市	3,000kW×6	ユーラス秋田港ウインドファーム:㈱ユーラスエナジー秋田港	3,000	洋上	1基のみ			
23	秋田県	由利本荘市	3,000kW×17	ユーラス由利高原ウインドファーム:㈱ユーラス由利高原風力	3,000	陸上				
24	山形県	酒田市	3,000kW×1	酒田港大浜風力発電所:エコ・パワー	3,000	洋上	1基のみ			
25	山形県	酒田市	3,000kW×2	酒田港宮海風力発電所:エコ・パワー	3,000	陸上				
26	静岡県	磐田市	3,000kW×5	磐田ウィンドファーム:磐田ウィンドファーム㈱(エコパワー)	3,000	陸上				
27	島根県	出雲市	3,000 k W×26	新出雲風力発電所:㈱新出雲ウィンドファーム	3,000	陸上				
28	高知県	大月町	3,000kW×11	(同)グリーンパワー大月	3,000	陸上				

※ 2020 年 12 月末までに設置されている風車に対し単機出力 3,000kW 以上でスクリーニング

表 4-9 実証試験対象風車の諸元

所在地	秋田市
事業者	合同会社ユーラスエナジー秋田港
発電量	18,000kW(3,000kW×6 基)(Siemens 社製)
運転開始	2015年2月



図 4-32 現地の風車設置状況

表 4-10 実証試験時に模擬するネットワーク・システム状況

- T		するネットワーク・システム状況
No.	ケースイメージ	実証時の通信環境
1	N 「中国主義」(大きな事業) ローカルの日本市・共和国主教	ローカル 5G 電波に対して、風車本体もしくはブ
	the state of the s	レードの影になる部分を飛行し、ドローンが電波
	コーザル5の場合 **** 中国機	のブラインドエリアにいる状態を模擬した。
	49 高級(以近対象)	
	FOLDMAN	
	# #	
	電流発射方向 金色風景(1985年8月5)	
2	N (Grant (Kritan)	 海面や波など気象・海象の影響を検証するため、
	th I want	 陸から洋上方向に電波を発射し、洋上を飛行し
	0 - \$6.50min - \$10.00min	ているドローンとの通信状況を確認した。
	Has to control to the	
	FD-VRH4/4-D	
	電波発射力向	
	#	
	国土地阅读地园 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
3	N A SPARE NAME OF THE PARTY OF	 500m 以上離れて隣接する風車設備から別の
	加土地學院地図	風車設備方向へ電波を発射し、点検飛行中のド
	49 AM (912976)	ローンが適切に受信できるかどうかを確認した。
	4年後後では20年後。	The second of th
	NAME OF THE PARTY	
	577m * (RE1798)	
	THE THE STREET	
	S明風風 (明25年) 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	
4	N A STATE OF THE S	風車設備のタワー基部からほぼ真上に電波を発
	The state of the s	射し、同風車設備の点検のためのドローン飛行・
	FD - 2007 (メーン 727) 現影 (2007 7 20 1 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	画像伝送を問題なく実施できるかどうかを確認し
	日土地特別地図 ローカックの日本 フロファル 日本 地特別でも図 日本 大 日本	た。
	RARAIZA .	
	MARTINES	
	# # # # # # # # # # # # # # # # # # #	
	- TA III'	Month Rep Month

出典:国土地理院地図

4.3 実施事項

4.3.1 ローカル 5G 活用モデルの有効性等に関する検証

(1) 機能検証

1) 検証項目

ドローンによる点検業務にローカル 5G を活用することで、点検用画像を円滑に地上局まで転送するための機能および緊急時でも遅滞なく手動操作によりドローンが安定飛行を維持できることが期待できる。具体的には、点検用画像伝送機能(データ確認時間および画像品質)、緊急回避性能(飛行操作情報伝送時間および飛行監視用画像伝送時間の遅延(Ping))として表 4-11 に示すシステム性能要件が満たされるかを評価した。(表 4-11 の数値根拠については、4.1.4(2)2)参照)

X 1 11 Vm.×1000111							
対象機能	検証項目	伝送速度	伝送遅延(Ping)				
点検用画像伝送機能 高精細画像データ伝送速度		最大 50Mbps	(100ms)*				
緊急回避性能 ドローン手動操作情報伝送時間		(500kbps)*	50ms				
飛行監視用画像伝送時間		(8Mbps)*	50ms				

表 4-11 検証項目および内容

2) 検証方法

点検用画像伝送機能については、3.3.1 においてドローンを飛行させて測定されたスループットの計測結果から、本課題実証においてドローンが飛行撮影するエリアにおけるスループットを推定し評価した。

緊急回避性能については、ドローン手動操作情報伝送および飛行監視用画像伝送ともに、3.3.1 においてドローンを飛行させて測定された遅延時間の計測結果から、本課題実証においてドローンが飛行撮影するエリアにおける遅延時間を推定し評価した。

点検用画像伝送機能、緊急回避性能の評価に利用した 3.3.1 の計測結果については、3.3.1(3)1) に記載した方法で計測したスループット(SpeedTest ツール(Iperf))および遅延時間(Ping)の数値のうち、機能検証で設定した各ケースの飛行ルートの近傍かつ高度 100m の計測結果を参照した。これらの結果が実証計画時に掲げた性能要件を満たしているかを評価した。

・ スループットの値参照箇所

Casel: 高度 100m、アンテナからの距離 150m 地点(最大値)

Case2: 高度 100m、アンテナからの距離 250m 地点(最大値)

Case3: 高度 100m、アンテナからの距離 450m 地点(最大値)

Case4: 高度 100m、タワー中心位置から水平に 90m 真北方向の地点(最大値)

^{※ ()}内の値は、性能目標値ではなく概ね許容できる値として記載している。

遅延時間の参照箇所(各 Case 参照箇所での計測値(平均値)の平均値)

Casel:高度 100m、アンテナからの距離 150m 地点(平均値)

Case2: 高度 100m、アンテナからの距離 250m、300m、450m 地点(平均値)

Case3:高度 100m、アンテナからの距離 450m、500m 地点(平均値)

Case4:高度100m、全計測值(平均值)

本検証においてスループットおよび遅延時間を推定するエリアについては、1.2(3)5)で示した各ケースに対してドローンが点検を想定して飛行する下図赤色の飛行ルートを考慮した。



図 4-33 Casel 飛行ルート 出典:国土地理院地図



図 4-34 Case2 飛行ルート 出典:国土地理院地図



図 4-35 Case3 飛行ルート 出典:国土地理院地図



図 4-36 Case4 飛行ルート 出典:国土地理院地図

各ケースの飛行ルート図に関して、白線は基地局から±20 度の仰角をなす位置を示しており、 Case4 に関しては、高度 100m と高度 300m における±20 度位置を表した 2 つの円を示している。 本検証で点検を想定して定めたドローン飛行ルートは、風力発電設備のうち主にブレード、ナセルの 外観点検として㈱Dshift が想定しているドローン点検飛行方法のうち、大きな損傷がないかを確認す るための飛行方法である水平旋回飛行方式である。

本実証対象設備と同規模の風車ロータ径約 100m の設備に対し、直径 200m の円を描くルート上を速度 5m/s で、高度を変えて最大 3 周飛行し、カメラレンズを円の中心に向けて毎秒撮影する設定としてドローン飛行撮影を実施した。

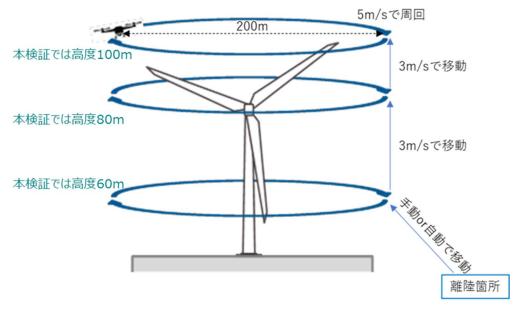


図 4-37 ドローン旋回飛行図

アンテナ設置各ケースに対して同様の飛行を実施した。なお、Case2 および Case4 の高度 300m 飛行時には対象風車設備がないが、架空の風車設備があるものと想定して飛行および撮影を実施した。

3) 検証結果および考察

各ケースのスループット値素材を以下に示す。(飛行ルートに近い参照値としては黄色部分)

Case1 Case アンテナから 計測回数 平均 最大 取得日時 最小 の距離(m) (回) 50 7.3 3.7 12.4 12/8 10:39 30 100 60.5 47.8 74.1 12/8 10:57 30 57.9 62.6 12/8 11:14 150 62.3 30 200 62.2 56.4 63.2 12/8 11:31 30

表 4-12 Casel スループット値

表 4-13 Case2 スループット値

Case	Case2					
アンテナから の距離(m)	平均	最小	最大	取得日時	計測回数	
50	27.5	26.0	31.0	12/7 09:59	60	
100	27.3	20.0	33.2	12/7 10:16	60	
150	52.6	42.2	61.8	12/7 10:22	60	
200	57.3	47.4	63.0	12/7 10:55	60	
250	54.4	43.3	62.6	12/7 11:12	60	
300	53.7	37.4	62.7	12/7 11:26	60	
350	62.0	57.4	62.7	12/6 15:07	30	
400	62.2	55.9	63.8	12/7 08:53	30	
450	61.4	50.1	73.9	12/7 09:07	30	
500	62.2	53.6	63.5	12/7 09:22	30	

表 4-14 Case3 スループット値

Case	Case3					
アンテナから の距離(m)	平均	最小	最大	取得日時	計測回数	
50	23.2	17.4	26.0	12/21 12:35	60	
100	34.5	23.4	47.1	12/21 12:21	60	
150	40.8	26.6	58.3	12/21 12:03	60	
200	52.7	39.4	62.8	12/21 11:45	60	
250	48.6	32.5	63.2	12/21 11:28	60	
300	40.3	26.9	53.4	12/22 11:07	60	
350	45.0	31.8	53.6	12/20 10:47	60	
400	38.3	27.5	47.1	12/20 10:43	60	
450	42.9	27.5	63.0	12/20 09:14	90	
500	39.8	19.2	62.9	12/19 14:48	90	

表 4-15 Case4 スループット値

Case	Case4					
計測ポイント	平均	最小	最大	取得日時	計測回数	
1-3	52.1	46.5	54.1	12/9 09:14	30	
4-6	50.5	46.9	53.0	12/9 09:46	30	
7-9	56.9	49.7	62.3	12/9 10:12	30	
10-12	60.1	52.7	64.4	12/9 10:49	30	
13-15	48.1	44.7	50.7	12/9 11:10	30	
16-18	33.0	30.2	35.0	12/9 11:32	30	
19-21	27.3	25.2	29.5	12/9 11:51	30	
22-24	37.7	24.8	49.2	12/9 13:16	30	
25-27	43.9	41.5	45.3	12/9 13:35	30	
28-30	33.4	30.8	35.1	12/9 13:56	30	
31-33	4.0	1.9	6.5	12/9 14:18	30	
34-36	37.5	30.4	40.8	12/22 08:27	30	

各ケースの遅延時間素材を以下に示す。(飛行ルートに近い参照値としては黄色部分)

表 4-16 Casel 遅延時間

Case	Case1				
アンテナから の距離(m)	平均	最小	最大	取得日時	計測回数
50	25.6	16.5	47.8	12/8 10:39	30
100	22.3	12.8	30.2	12/8 10:57	30
150	17.9	11.8	20.4	12/8 11:14	30
200	21.9	14.8	28.7	12/8 11:31	30

表 4-17 Case2 遅延時間

Case	Case2				
アンテナから の距離(m)	平均	最小	最大	取得日時	計測回数
50	20.6	9.7	28.3	12/7 09:59	60
100	22.2	11.7	35.3	12/7 10:16	60
150	19.6	9.8	32.7	12/7 10:22	60
200	21.9	10.3	30.4	12/7 10:55	60
250	21.5	15.8	36.8	12/7 11:12	60
300	20.4	12.8	26.7	12/7 11:26	60
350	16.8	10.4	21.3	12/6 15:07	30
400	21.4	12.8	23.9	12/7 08:53	30
450	21.1	10.8	23.9	12/7 09:07	30
500	18.9	16.7	24.3	12/7 09:22	30

表 4-18 Case3 遅延時間

Case	Case3				
アンテナから の距離(m)	平均	最小	最大	取得日時	計測回数
50	24.8	12.8	34.9	12/21 12:35	60
100	24.8	19.8	38.1	12/21 12:21	60
150	19.9	9.7	28.1	12/21 12:03	60
200	23.0	9.7	31.9	12/21 11:45	60
250	22.2	9.8	30.9	12/21 11:28	60
300	22.7	9.3	45.3	12/22 11:07	60
350	20.5	9.7	29.8	12/20 10:47	60
400	21.3	15.3	30.8	12/20 10:43	60
450	23.4	14.8	38.6	12/20 09:14	90
500	23.0	9.7	34.2	12/19 14:48	90

表 4-19 Case4 遅延時間

Case	Case4				
計測ポイント	平均	最小	最大	取得日時	計測回数
1-3	23.3	11.6	29.8	12/9 09:14	30
4-6	19.0	16.7	25.5	12/9 09:46	30
7-9	24.3	19.7	31.9	12/9 10:12	30
10-12	23.6	16.4	34.3	12/9 10:49	30
13-15	19.3	9.4	30.2	12/9 11:10	30
16-18	22.9	11.3	30.5	12/9 11:32	30
19-21	24.1	9.6	37.5	12/9 11:51	30
22-24	16.3	9.4	21.4	12/9 13:16	30
25-27	23.4	12.8	34.4	12/9 13:35	30
28-30	23.3	10.8	29.3	12/9 13:56	30
31-33	20.6	15.7	29.9	12/9 14:18	30
34-36	19.5	15.2	25.5	12/22 08:27	30

高精細画像データ伝送速度および手動操作情報伝送・飛行監視用画像伝送遅延時間について、性能要件が満たされているか以下の表で評価した。

表 4-20 飛行実績に基づく機能評価表

対象機能	検証項目	(性能要件) 伝送速度/ 伝送遅延	(実績) 伝送速度/ 伝送遅延
			Case1: 62.6Mbps
 点検用画像伝送機能	高精細画像データ	最大50Mbps	Case2: 73.9Mbps
点快用凹缘位达機能 	伝送速度	最入SUMUPS	Case3: 63.0Mbps
			Case4: 64.4Mbps
	ドローン手動操作		Case1: 17.9ms
 緊急回避性能	情報伝送時間	50ms	Case2: 21.0ms
	飛行監視用画像	501118	Case3: 23.2ms
	伝送時間		Case4: 21.6ms

伝送速度としては、各ケースの飛行ルート周辺での Iperf の計測結果として得られたスループット最大値が 60Mbps 以上であり、性能要件である最大 50Mbps を満たしていることがわかった。

遅延時間については、各ケースの飛行ルート周辺の計測結果平均値がいずれも 30ms 未満であり、 性能要件である 50ms を下回っているため、ローカル 5G 通信の機能要件としては満たしていることを 確認できた。 同じ計測ポイントの伝送速度および遅延時間については同じ時刻に測定した結果であるが、天候についてはどのポイントも時折少量の降雪または降霰がある曇りの状態であった。日照の程度や気温は多少ばらつきがあった状態での測定であったが、測定結果として天候による伝送速度や遅延時間への影響は見られなかった。

以上より、点検用画像伝送機能、緊急回避性能としての遅延時間ともに機能要件を満たし、ローカル 5G 通信を洋上風力発電所におけるドローン点検に活用する際に特段の支障がないことがわかった。

(2) 運用検証

1) 検証項目

a. 洋上風力発電所における最適なネットワーク・システム構成

本ローカル 5G 活用モデルの社会実装に向けて、より実用性のあるシステム構成を検討する必要がある。そこで、本実証の疑似環境の特異な点を明確化した上で、実装環境である洋上を想定したシステム構成、運用方法を検証した。検証のポイントとしては、通信・電源設備の整備されていない特殊環境(洋上)でのシステムやネットワークの構築、エリア設計等を検証した。また、本実証を踏まえ、実装に耐え得るローカル 5G システムの耐久性、および保守性(冗長の必要性や現地保守対応の必要性など)について検討した。

ローカル 5G 設備自体の保守性としては、陸上局と同様に遠隔保守を基本とし、必要時にはアクセス船(CTV)による現地保守対応を想定している。現地保守対応はその緊急度、重要度により、定期対応、即時対応の切り分けが必要となるため、本実証を通じ保守対応レベルを検討した。また、1 つのウィンドファームに対して複数の基地局を配置させることで冗長効果を持たせることも経済性とのバランスの中で検討した。

b. ステークホルダーへの実現性確認

本ローカル 5G 活用モデルを洋上風力発電所へ導入・運用する場合、SPC が設備所有者となることが想定される。ローカル 5G を運用するためには無線局の免許申請が必要となるとともに、第三級陸上特殊無線技士以上の資格を持つ無線従事者が必要となる。これらの運用上の諸条件への対応については、本実証の中で SPC となり得る事業者等へのヒアリングを実施し、実装に向けた課題等を抽出した。

c. ドローン飛行・画像取得整理方法に関する実現性評価、業務フロー評価

ドローンによる点検システム運用に関しては、O&M 事業者は洋上風力発電所設置地域の地元企業の協力を得てドローン飛行管理、設備点検用画像の取得・整理を実施することを想定している。そのため、高度な専門技術を有さない作業員でも安全性および品質を確保したドローン飛行・点検用画像取得に取り組めることが必要であり、本実証を通じて運用マニュアルを策定し、そのマニュアルに沿って適切にドローン飛行・画像取得できることを検証した。

業務フローに関しては、ローカル 5G 活用により、ドローン飛行中でも設備点検用画像を取得できる

点が、従来開発のドローン点検システムとの違い(効率化に資する点)である。よって、ドローン飛行監視 と点検画像取得・評価を並行して適切に実施できるような業務フローを構築できていることを実証によ り検証した。

d. 人員配置シミュレーション

併せて、上記業務フローを効率的かつ確実に実施するため、陸域の点検管理箇所に配置するドローン飛行監視要員および設備点検用画像を取得・評価する要員の配置・構成がどのような状態が適切かを検証した。本件システムの運用にあたり、想定した要員配置は次の通りである。なお、無線設備の操作は、無線局の免許人等が選任した主任無線従事者の監督下で行い、ドローン飛行管理責任者は主任無線従事者を兼ねる。

- ・ ドローン飛行管理責任者(気象情報をもとに飛行可否を判断できる者)1名
- ・ ドローン操縦者(民間やドローン検定協会が発行する資格を有する者)1名
- ・ ドローン飛行状況監視者(室内の画面上で操縦者を補助できる者) 1名
- ・ 画像評価責任者(画像評価結果を最終判定する者)1名
- ・ 画像評価者(ピンぼけ、アングル外れ、逆光(白飛び)、撮影漏れの有無を評価する者)3名

e. 費用対効果シミュレーション

4.3.1(2)1)a において検討する洋上風力発電所に設置するべき最適なネットワーク・システムの構成をもとに導入費用の算出を行い、本ローカル 5G システムの導入による費用対効果を評価する。

2) 検証方法

各検証項目について、表 4-21 の方法で検証した。

なお、ヒアリング対象事業者については、既に開発中あるいは開発が決定している事業者に加え、応募回数(予定を含む)、応募開始時期が比較的早い地点の応募予定事業者などから選定し、ヒアリングを実施した。

表 4-21 運用検証の検証項目 検証内容

	検証項目	検証	E内容
a	洋上風力発電所に設置するべき最適	•	本実証を通じて明らかになった洋上風力発電所の規模
	なネットワーク・システム構成		や費用対効果を考慮した最適なネットワーク・システム構
			成を検討する。
b	ステークホルダーへの実現性確認	•	洋上風力発電所立地地域の個別事情、実証時と実装時
			の差異、その他不確実性要素についても洋上風力発電
			所 SPC、O&M 事業者等の関連事業者・団体にヒアリン
			グを実施し、その結果を踏まえ、実装に向けた課題抽出・
			評価を行った。
			ヒアリングの目標合意獲得率は、関西電力株式会社が
			NEDO から助成を受けて実施している関連事業(洋上

			風力点検用 UAV 開発研究)における将来の技術導入
			風力点候用 UAV 開光伽丸/にのける付木の技術等人
			割合の想定値を引用し、20%とする。
С	ドローン飛行・画像取得整理方法に	•	実証試験の現場実施期間に併せてO&M事業者への操
	関する実現性評価・業務フロー評価		作見学会を開催し、ドローン操作・ソフトウェア操作・点検
			画像確認の一連の流れについて、参加者のご意見やア
			ンケートを通じ実現性評価を行った。実現性理解率およ
			び業務フロー理解率に関して、アンケートにおける理解
			獲得率はいずれも 60%を目指す。
d	人員配置シミュレーション		想定配置での実証試験実施結果に対する評価を行っ
			た。
е	費用対効果シミュレーション	•	洋上風力設備の構成を考慮した上で、導入設計、導入
			費用の算出を行い、費用対効果を評価した。

3) 検証結果および考察

a. 洋上風力発電所における最適なネットワーク・システム構成

ア) アプローチ

洋上風力発電所に設置するべき最適なネットワーク・システムの検討にあたっては、導入によって得られる効果と、システムの可用性、運用の実現性、コストのバランスから、費用対効果が最適化される構成を導く必要がある。

以下、それぞれの観点から考慮すべき事項について検討した。

イ) 電波の上空利用に向けたアンテナチルト角とエリアカバー率

本ローカル 5G 活用モデルによる導入効果得るためには、ドローンが洋上風車を撮影と同時に撮影 画像をリアルタイムに伝送するか、ドローンが洋上風力発電所のローカル 5G スポットに移動して伝送 する 2 つの方法が考えられる。すなわち、データ伝送を行うためのドローンの移動距離が小さくなれば なるほど効率は向上する。

一方で、ドローンが洋上風車を撮影と同時に撮影画像をリアルタイムに伝送するためには、風車のブレードを直接電波照射範囲に捉える必要があるものの、図 4-10 に示すように、今後益々サイズアップしていく風車に対して、電波の高度を確保するためには、アンテナのチルト角を上方に向けていく必要がある。特に、浮体式のようにブレードの頂までの高度が 200m を超えるような場合は、本実証におけるCase4 のように、チルトを垂直にする必要が出てくることが想定される。一方で、チルト角を上方に向ければ向けるほど、洋上風力発電所全体に占めるローカル 5G のエリアカバー率は小さくなり、メンテナンス効率の低下を招く。(図 4-38 参照)

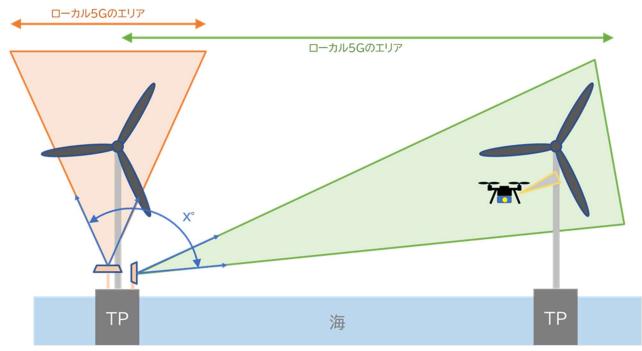


図 4-38 アンテナのチルト角とエリア

ウ) システムの可用性と運用の実現性

重要インフラのメンテナンスであること、ネットワーク・システムの運用にあたっては、十分な可用性が求められる。しかし、極地での利用であることから、陸地のように、障害等が発生してから迅速に対処、復旧させるといった運用は困難である。よって、洋上風力では、機器それぞれの可用性を考慮するのではなく、洋上風力における、ローカル 5G のエリア全体で可用性を考慮する必要がある。

例えば、仮に1台の基地局が利用不能に陥ったとしても、ドローンがすぐ隣の5Gスポットに移動すれば利用が継続できるといったように、メンテナンスオペレーションを柔軟に変更することで可用性を担保することができる。一方、ネックとなる、洋上風力全体のネットワーク・システムを集約するコアネットワークは、陸上のデータセンター等に設置することで、保守性を高め、可用性を確保する。

エ)コストの考え方

本ローカル 5G 活用モデルの場合、基地局の設置台数によって全体のシステムコストは大きく変化する。理想的には、風車 1 基に対して 1 台の基地局を設置した上で、将来モデル 1 のような隣接する風車が比較的近い距離にある場合は相互に電波を照射し、将来モデル 2 のように風車が大型化している場合は、自風車に向かって垂直に電波を照射することで、全ての風車を 5G スポット化することが望ましいが、コストは最大化する。しかし、設置する基地局の台数を減らせば減らすほどコストは下がる一方で、5G スポットまでのドローンの移動距離は大きくなり、効率性は損なわれていく。

よって、コストメリットは、メンテナンスの効率性とコストのバランスによって判断する必要がある。(費用対効果の検証に関する詳細は 4.3.2(1)を参照)

なお、今後ローカル 5G システムに係る機器費用等が低廉化していく、あるいは、今後洋上風力におけるローカル 5G の活用の幅が広がっていけば、コストメリットはさらに高まるため、機器の設置台数は

理想的な状況にまで増やすことができると考えられる。

オ) 洋上風車への機器等の設置方法

洋上風力発電所にローカル 5G システムを導入するには、洋上風車の建設と保守にかかるステークホルダー等との調整が必要になる。想定されるステークホルダーとして SPC の他、ナセル、ブレード等の設計・工事を担う風車メーカー、トランジションピース(以降 TP)の設計・工事を担う建設業者、風車設備の点検を担う O&M 事業者がいる。風力事業には複数のステークホルダーが関与しており、風車設備へネットワーク機器を設置するにはこれらのステークホルダーとの調整が必要になる。

洋上風車へのローカル 5G システムの設置について、想定される設置環境を整理した。TP とは風車のタワーと接続している基礎部分のことで、CTV が船付けできる屋外プラットフォーム(以降屋外 PF)や分電盤等が設置されているケーブルターミネーションプラットフォーム(以降 CTPF)など、洋上風車の運転に必要な設備が整えられている。

なお、洋上風車の TP には、通常、風車のメンテナンス等に使用するための光通信ケーブルが敷設されており、洋上風車と陸上局との間の通信はそれを用いることが想定できるため、本ローカル 5G 活用モデルの実装のために新たに用意する必要はない。ただし、洋上風車までの海底ケーブルは、海底地質や、漁業情報、港湾区域等を考慮して最小コストのルート設計がなされることになる。一般に、ケーブルの配策はクラスタ化して構成することが想定されるため、ローカル 5G を設置するにあたっても、そのクラスタを考慮する必要がある。

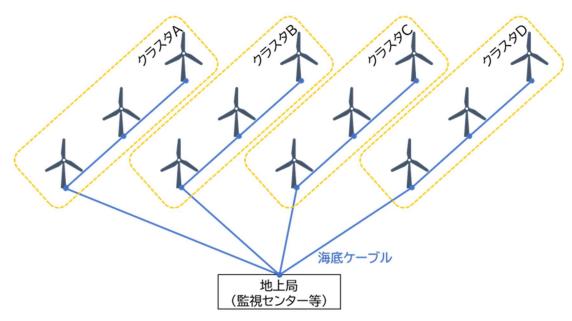


図 4-39 洋上風車における海底ケーブルのクラスタ構成

屋外 PF は波しぶきがかかるため、設置する機器と取り付け方法には防水、重塩害対策が必要な他、 洋上風力を建設するロケーションでもあることから風も強いため、耐風設計が必要である。

また、TP 内については、仕様書上の要求から、風車側の換気装置、除湿装置で湿度管理がなされているものの、夏季は高温多湿で外気温よりも高温となる環境下にある。ネットワーク機器は高温、低温、

高湿度に弱く、このような極地での運用は想定されていない。ただし、TP 内は一般に保守員が作業する環境として整備されているため、温湿度に対応した機器であれば問題ないと考えられるが、今後このような環境での動作確認等の実証試験が必要である。

ネットワーク・システムの設置について、基地局は CTPF に設置し、分電盤から電源を確保する。TP 内の温湿度環境に耐えるため、基地局は屋外用を設置する。また、洋上という環境では関連機材を最小化した方が良いと判断し、CU、DU、RU が 1 つになっている一体型を設置する。なお、現在想定している屋外用基地局は、温度-35℃~50℃、湿度 0~95%まで対応可能であるため、TP 内の温湿度環境にも十分耐え得ると考えられる。

アンテナについては、屋外 PF を囲う柵に設置する。屋外のため重塩害仕様が必要である他、洋上風力のロケーションに合わせた耐風設計を検討する必要がある。屋外 PF には CTV が船付けし、点検のために O&M 事業者等が出入りするため、アンテナは OM 事業者の導線に干渉しないよう設置する必要がある。また、建設段階で設置する場合は、風車の据え付け工事を行う建設業者との調整も必要である。

ケーブルについては、TP にはケーブルを通す貫通孔と屋外 PF 外周部を走るケーブルトレイがあり、TP 内に設置する基地局と屋外 PF に設置するアンテナを有線でつなげることを想定している。

サーバについては、陸上変電所等の陸上局にサーバを設置し、冗長性を持たせる。

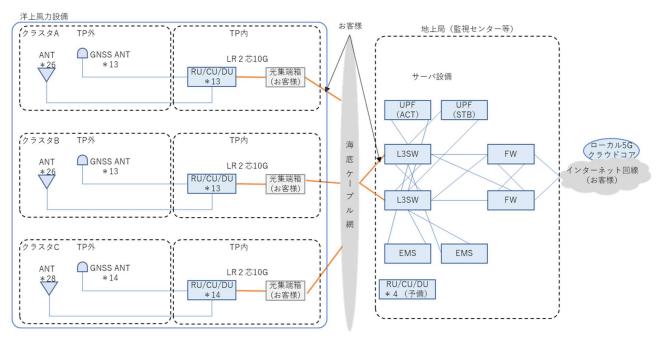


図 4-40 ネットワーク・システム構成

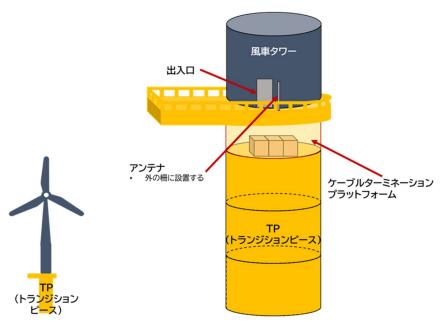


図 4-41 トランジションピース(TP)図

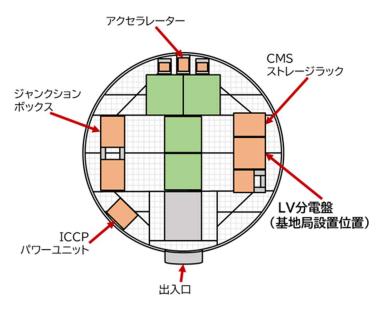


図 4-42 ケーブルターミネーションプラットフォーム(CTPF)図

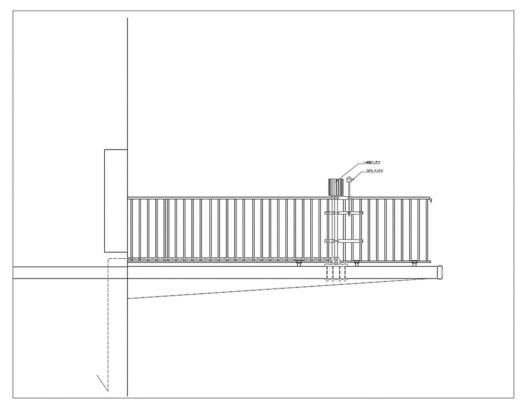


図 4-43 アンテナ設置イメージ

カ) エリア設計の考え方

前述の最適なネットワーク・システム構成をもとに、各地の洋上風力発電設備へ導入する際のエリア設計の考え方を整理する。本実証の効果を最大限に発揮するためには、風車 1 基に基地局 1 台を設置し、ウィンドファームの全エリアを通信エリアとすることが理想の構成であるが、その構成をとった場合、現時点では得られる費用対効果に課題が残る。具体的には、本ローカル 5G 活用モデル単体の導入で見た場合に、コストメリットが十分に発揮される構成について試算を行った結果、得られる効果と費用のバランスが確実に取れる現実的な構成は、風車2基に対して1台以下であるとする結論を得た。ただし、それもウィンドファームの風車の配置によって異なる。

また、当初想定していた将来モデル 1 のような隣接する風車同士で互いに吹き合う構成においても、 風車 2 基に対して基地局 1 台以下とする構成をとる必要がある。風車感の距離が短い場合は、アンテナを分配し基地局数を減らす方法も考えられるが、構成が複雑になることから現実的な設置が難しく、 保守性にも課題がある。さらに、将来、風車の大型化に伴い風車間の離隔距離が必要になれば、隣接する風車までローカル 5G 電波が届かず、構成としては意味をなさない可能性もある。

洋上風車間の離隔距離については、ロータ径に対し推奨する離隔距離をメーカーと確認して確定する。例えば主風向にはロータ径の8倍の離隔距離、それと直行する方向には4倍の離隔距離を設定する。現在運転している4.5MWh クラスの風車であればロータ径は120m程度で、離隔距離は1kmに収まるが、2030年になると15MWh クラスの風車が運転され、ロータ径も200mと大きくなる。もしロータ径の8倍の離隔距離を取れば、ロータ径約200m×8倍の1.6km程度の離隔距離が必要になる。3.3.1より、ローカル5G電波は本実証環境において6.3kmまで端末で受信可能であることが明

らかになったが、将来想定される風車の離隔距離を、点検に十分な機能要件を満たした状態で飛ばすことは難しい。

撮り直しのために陸上まで戻らずその場で再撮影できることが本ソリューションの一番の効果であることを踏まえると、ドローンが飛行可能な距離範囲の中で、かつメンテナンス業務の効率を妨げない範囲で、ローカル 5G をスポット運用するのがコストメリットも含めて最適である。

またスポット運用であれば、将来大型化するウィンドファームの規模に合わせ、ネットワーク・システム構成を柔軟に対応できる。スポット運用にすることでドローンの緊急回避の効果を得られないエリアが生じてしまうが、本実証による緊急回避性能の検証では、ローカル 5G による効果のみではマニュアル操作の観点から有効な性能を評価できなかったため、スポット運用であっても安全性は変わらないことが明らかになっている。緊急回避性能については、さらなる通信技術の発展はもとより、AI によるドローンの自立飛行性能の向上や関連するシステム、ソフトウェア等を含めた全体的な技術開発の継続が必要になる。

洋上風力におけるローカル 5G 活用においては、メンテナンス対象となる風車のナセル高の高度まで 電波を飛ばす必要があることから、その電波照射方法は重要な論点となる。

当初想定していた将来モデル1のパターンでは、隣接する風車から点検対象となる風車全体がエリア内になるよう電波を吹く必要がある。一方、将来モデル2のパターンでは、垂直に電波を吹くことで自風車全体をエリア内に捉えることができる。

ローカル 5G 電波を可能な限り水平方向に吹くことで、洋上風力発電施設全体でのエリアカバー率を上げることができる一方で、風車が大型化すればするほど伝播方向を垂直に近づけなければ必要な高度まで電波を吹くことができなくなる。

チルト角度を平面方向に展開し通信エリアを確保する方法が最適か、垂直方向に展開し風車の大型 化による高さをカバーする方法が最適か、あるいはその両方を用いるかは、各洋上風力発電施設の洋 上風車の配置、地形によって個別に検討が必要である。

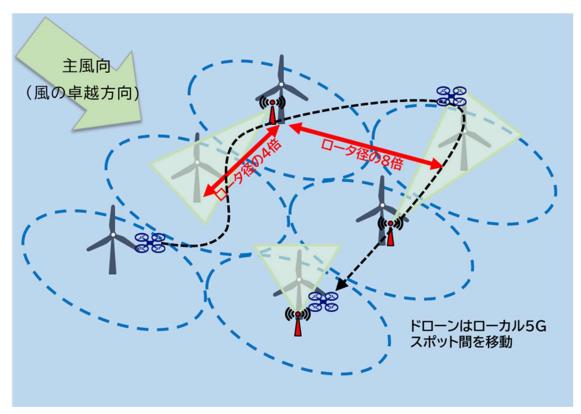


図 4-44 ウィンドファームにおけるエリア設計とローカル 5G のスポット運用イメージ

キ)運用・保守

ローカル 5G システムの点検には死活監視体制が必要である。日常点検は遠隔監視とし、目視による確認は風車の定期点検に合わせた現地監視を行うことを想定している。

通信設備の監視プレーヤーとしては、洋上 BOP という洋上部分の点検を全般的に請け負う事業者が手配する電気通信会社にメンテナンスを委託することを想定している。ただし、洋上風車の点検にあたっては GWO 訓練認証を受ける必要がある。現時点では、ローカル 5G の運用、保守ができる事業者の中で GWO 訓練認定を受けている者は希少であると考えられるが、本ローカル 5G 活用モデルの実装にあたっては、電気通信会社が GWO 訓練認証を受けることが現実的と考えられる。

現状では、日本国内に GWO 訓練提供機関として認証を受けている施設が少ないものの、今後洋上 風力発電が本格展開していくにあたって、施設も新たに整備されていことが予測される。

なお、ローカル 5G の運用にあたっては、5 年目毎に法定点検が必要であるが、将来的に常時監視している場合は、5 年ごとの法定点検を不要とする議論がされている。

ク) 洋上風力発電所へのローカル 5G 実装に向けたプロセス

本実証におけるフィールド構築までの流れとフェーズ毎の課題およびその対処方法を整理する。 ローカル 5G の電波免許取得については、以下の対応が必要である。

- ・ 土地利用の同意を取得する。置局場所の決定や自己土地で実施する場合はそれを示す書類等 も必要である。
- 干渉調整の対象有無の確認として、周辺で電波発射している事業者等について各地域の総務

省総合通信局へ確認する。

- ・ 電波発射場所が出力制限地区か確認する。
- ・ 免許申請の要件に漏れがないか、各地域の総務省総合通信局に事前照会を実施する。

本実証における要件として、以下の対応が必要であった。

- ・ 公共業務用無線に対する出力制限地区であり、その免許人との干渉調整が必要であった。
- 近接地域において複数の実証実験が採択されたため、双方の干渉調整確認が必要であった。
- ・ 通常とは異なり、電波の上方チルト発射、航空法において制限のある高度 150m 以上のドローン飛行を行うため、関係各所への確認が必要であった。他者土地での端末移動といった制度上の緩和検討が必要であるが、実験免許申請の際にはこの要件を説明し、記載事項を総務省総合通信局へ指示を仰いだ。

占用許可取得

- ・ 港湾管轄のエリアは、場所毎に所管がわかれていることが多く、細かな確認と照会の上、漏れが ないよう対応する必要がある。
- ・ 国、県においても港湾空港課、地域振興局建設用地課、防風林管理課等との対応が必要であり、 沿岸海域部分も同様に対応する必要がある。

上位回線調達

- ・ 自社回線として調達構築する場合は、電柱の共架申請に時間がかかるとともに、借用できる目 処が不明であり、並行して他社回線の活用の検討を進める必要がある。
- ・ 自社回線+他者回線の組み合わせも検討可能である。

機器調達(ローカル 5G システム、ドローン等システム)

・ 現地調査の結果と、試験内容に基づき構成等システム設計を実施する必要がある。(ローカル 5G 通信システム)

ドローンはウィンドファーム規模や風車の規模、試験内容、環境に応じた仕様に仕上げる必要がある。

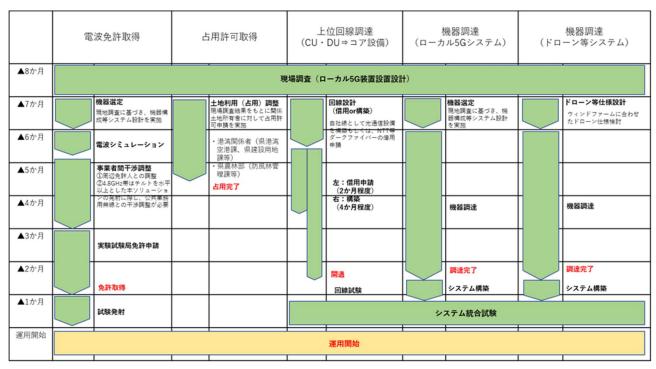


図 4-45 実証フィールド構築までの流れとフェーズ毎の課題

ローカル 5G の干渉調整について(図 4-46 参照)

- ・・・ミリ波帯は固定衛星業務の地球局からの保護を要求しないことが前提となる。
- ・ Sub6 帯は公共業務用無線局との共用条件があり、屋外利用では一部市町村における使用条件設定がある。
- ・ 公共業務用無線の定義として、人命および財産の保護、治安の維持、気象通報その他これに準ずる公共の業務を遂行するために開設する無線局を言う(電波監理委員会規則第十二号 第二条三)。
- ・ 対象となる公共業務用無線について、出力制限を伴う場所等においては、各地域の総務省総合 通信局に事前確認を行い、干渉調整対象となるか確認をする。
- ・ 沿岸部にて陸上電波で合法的に運用できる3海里(約5.5km)外に漏れ及ぶ電波の強度、向きなどが影響しないか確認が必要となる(公共業務用無線局の場所・諸元・運用については非公開)。

以上の内容により、一般のローカル 5G 免許申請の事前相談・確認とは異なるため、通常のフローより早めの準備、対応することが必要となる。

通常のローカル 5G 免許申請の基本的な流れは図 4-47 の通りとなる。また、携帯局や他のローカル 5G 局についての調整手順は図 4-48 と図 4-49 の通りとなる。公共業務用無線の調整結果次第で、実施可否や対応が変わることもあり得るため、通常の調整より前に必要な確認と調整が必要となる。

■ 他システムとの共用条件



図 4-46 他システムとの共用条件

出典:第五世代モバイル推進フォーラム 地域利用推進委員会 ローカル 5G 免許申請支援マニュアル 2.02 版

所管の総合通信局への申請までの流れとして、以下の手続きが必要である。

- ・ 電気通信事業登録もしくは登録変更(電気通信事業の登録の場合)
- ・ ローカル 5G 無線局免許申請
- ・ ローカル 5G 特定無線局の免許申請
- ※ 技術基準適合表示の無線設備以外で開設する場合、申請書提出後に新設検査が必要。
- ※ 空中性電力が 1W を超える基地局は、定期検査の対象となる。



図 4-47 ローカル 5G 免許申請の基本的な流れ

出典:第五世代モバイル推進フォーラム 地域利用推進委員会 ローカル 5G 免許申請支援マニュアル 2.02 版 ローカル5Gの無線局が携帯無線局と併設する場合は、物理遮蔽の影響が生じる可能性があることから、全国MNOと調整を行うことが必要。

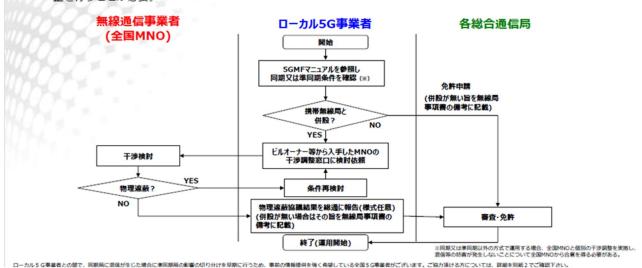


図 4-48 携帯無線通信事業者との調整の手順について

出典:第五世代モバイル推進フォーラム 地域利用推進委員会 ローカル 5G 免許申請支援マニュアル 2.02 版

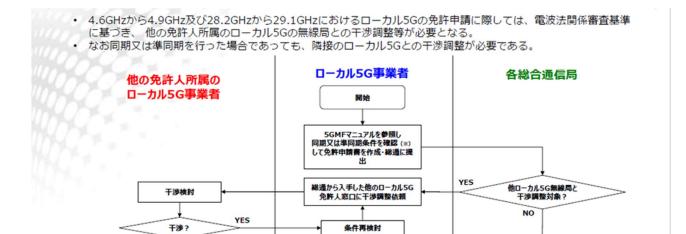


図 4-49 他ローカル 5G との調整の手順について

総務省に干渉同意書を 提示して免許申請

終了(運用開始)

審査·免許

NO

※ 同期又は準同期以外の方式で護用する場合、近隣の他のローカル5G免許人と個別の干渉調整を実施し、提供等の妨害が発生しないことについて既存のローカル5G免許人から会長を得る必要がある。その際、干渉調整の対象先の決定を含めて時間を要する場合があることに偏関が参照。

出典:第五世代モバイル推進フォーラム 地域利用推進委員会 ローカル 5G 免許申請支援マニュアル 2.02 版

b. ステークホルダーへの実現性確認

ステークホルダーへの実現性確認として、ローカル 5G 設備所有者となり得る事業者(発電事業者、 SPC、O&M 事業者)へのヒアリングを実施した。

ヒアリングに先立ち、資料(説明資料巻末添付「ローカル 5G を活用した風力発電の設備利用率向上によるカーボンニュートラル社会の実現」)を用いて、ローカル 5G の概要、特徴・必要性、ローカル 5G 採用による点検方法の新旧比較(点検方法比較)、メリット・デメリット、実装イメージ・システム構成、推定効果額、導入費用、発電単価へのインパクト、点検サービススキーム案他を説明、理解を得た上でヒアリングを実施した。

ヒアリングは図 4-50 に示すインタビューガイドに基づき、図 4-51 および図 4-52 に示すアンケートシートも活用し実施した。

課題感に関するインタビューガイド

- 1. 洋上風力発電所でのローカル5Gを使った風車点検の実現性について、教えていただきたく存じます
- 2. 洋上風力発電所でのローカル5Gを使った風車点検の実現性について、気づきが あれば教えていただきたく存じます

<u>キーワード</u>

➤ エネルギー戦略 発電の安定化・効率化、35%以上の運転保守、

設備稼働率向上、発生電力量の増大

▶ 点検 : ローカル5G、リアルタイム伝送、

自律目視外飛行

発電停止時間の大幅削減、

▶ メリット : 手動操作による衝突等の被害回避、

画像のリアルタイム分析、 撮影失敗時の即時把握

▶ デメリット : 高額なローカル5Gシステム導入費用、

無線有資格者の要配置

推定総効果額 (ドローン+ローカル5G)年間9.8億円、20年総額196.3億円

図 4-50 インタビューガイド

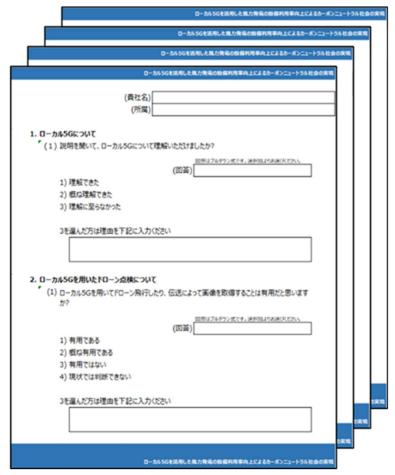


図 4-51 アンケートシート(発電事業者、SPC 用)

ローカル5Gを活用した風力発薬の粉傷利用率向上によるカーボンニュートラル社会の
ローカルSGを送用した風力脅薬の粉傷料用率向上によるカーボンニュートラル社会の実現
ローカルSGセ35周した風力発電の設備利用率向上によるカーボンニュートラル社会の実際
ローカル5Gを活用した風力発薬の粉傷利用率向上によるカーボンニュートラル社会の実現
(責社名) (所鑑) (氏名) (E-mailアドレス)
1. ローカル5Gについて
「(1) この見学会に参加して、ローカル5Gについて理解できましたか?
 理解できた 板ね理解できた
2) (40/40年度できた) 理解に至らなかった
3を選んだ方は理由を下記に入力ください
コーカルSGを用いたドローン点検について (1) この見学会に参加して、ローカルSGを用いたドローン操作・ソフトウェア操作・点検 医・検強認の一連の流れを理解できましたか?
(回答)
1) 理解できた
2) 板ね理解できた 3) 理解に至らなかった
9 / *2/100-20 2/9/F/IC
3を選んだ方は理由を下記に入力ください
)灰斑
疾病
ローカルSGを活用した風力発薬の絵質利用率向上によるカーボンニュートラル社会の実現

図 4-52 アンケートシート(O&M 事業者用)

表 4-22 にステークホルダーへの実現性確認結果の概要を示す。

発電事業者、SPC は、ダウンタイム改善による導入効果がローカル 5G システムの導入費用の総額よりも高く導入に前向きであったと言える。O&M 事業者は点検の手戻り解消による効率化が望めるため、拘束時間が短縮される可能性が高いなどの有効性への理解を得られた。

発電事業者、SPC に対するアンケート結果の集約を図 4-53、図 4-55、図 4-56 に示す。主なアンケート結果(コメント)を以下に示す。なお目標とした獲得率は 20%であり、目標を大きく上回った。

- ローカル 5G の理解は 100%(理解できた 100%)得られた。
- ・ ローカル 5G を用いたドローン点検の有用性は 100% (有用である 100%)の理解が得られた。 またヒアリング時の主なコメントを以下に示す。
- ・ 有効性・継続性等を精緻に検討・評価し、説明資料に示された高い効果が得られるのであれば、 コンソメンバー、レンダー、風車メーカー等の理解は必須となるが、導入に向け取り組める。(発電 事業者・SPC の取締役他)

- ・ i 地点への導入検討は可能であり、引き続きコミュニケーションを図りたい。(発電事業者・SPC の取締役)
- ・ ii 地点への適用に関し、まずは情報収集ベースになるが検討を進めたい。(発電事業者・SPC のプロジェクト部長)
- ・ 洋上風力地点への適用を含め、ローカル 5G には興味があるので、引き続き情報連携をして欲 しい。(発電事業者・SPC の DX 戦略室長他)
- ・ 新技術適用は評価ポイントの 1 つでもあり、ウィンドファーム検討地点への適用に向け情報連携を引き続きお願いしたい。(発電事業者・SPC のプロジェクトマネージャー他)
- ・ O&M のみならず洋上風車の建設時にも活用したい。(発電事業者・SPC のプロジェクト部長)

O&M事業者に対するアンケート結果の集約を図 4-57、図 4-58に示す。主なアンケート結果を以下に示す。

- ・ ローカル 5G の理解は 100% (理解できる 25%、概ね理解できた 75%)得られた。
- ・ ローカル 5G を用いたドローン点検の理解は 100%(理解できる 25%、概ね理解できた 75%) 得られた。

またヒアリング時の主なコメントを以下に示す。

- ・ 撮影画像がリアルタイムで確認でき、再飛行等の手戻り作業がなくなるため、非常に良いシステムだと思う。(O&M 事業者の部長)
- ・ 今後のビジネスを視野に入れドローンの活躍の場をもっと広げることができると感じた。(O&M 事業者の部長)
- ・ 低遅延通信は非常に興味深いが、事業免許とコストのハードルが正直高いと思う。ローカル 5G のコスパ向上と Wi-Fi 規格の低遅延化との競争になるように思う。ローカル通信としてローカル 5G が Wi-Fi に割ってはいるのは相当大変で、利用シーンは限られる気がする。(O&M 事業者の部長)
- ・ 事業免許がものすごく楽になり、Wi-Fi チップよりもあらゆるバンドの 5G に対応するチップが安くなって、ほとんどのデバイスに搭載されるようになれば変わってくるかもしれない。(O&M 事業者の担当課長)
- ・ 実際、ドローンを活用する場面が見られなかったのは、残念だが、5Gを活用した場面は、今後広がってくると感じた。(O&M事業者の担当課長)

ローカル 5G システムの導入に関し、ステークホルダーへの実現性確認として、ローカル 5G 設備所有者となり得る事業者(発電事業者、SPC、O&M 事業者)へのヒアリングを実施したが、ヒアリングしたステークホルダーからは、ローカル 5G およびローカル 5G を用いたドローン点検に対し、点検効率を高める方策であるとの理解が得られた、またローカル 5G を用いたドローン点検の点検フローに対しても、ダウンタイム短縮等の効果が得られ事業収益に貢献できるなど、有用性が高いとの理解が得られた。

ローカル 5G の効果に対しても、発電事業者、SPC からダウンタイム短縮に伴う増電効果に対し理解を得ており、今後のウィンドファーム検討地点への導入に対する確度を高めるため、引き続きローカル 5G システム導入費用のコスト削減情報や、新たな商品の発売情報などを連携するとともに、これらの情

報を活用した提案活動の推進等により、発電所立地地点の公募申請書への記載などの具体的な導入検討につなげる。

表 4-22 ステークホルダーへの実現性確認結果(概要)

属性	会社名等	感触	主なコメント
発電事業者	A 社(O&M 事務所長他 2	導入に前向き	有効であり引き続き連携したい。
SPC	名)		
	B社(DX戦略室長他3名)	導入に前向き	ローカル 5G には興味があるので引き
			続き情報連携をして欲しい。
	C 社(取締役他 3 名)	導入に前向き	最新情報の連携をお願いしたい。
	D社(取締役他1名)	導入に前向き	導入検討は可能であり、引き続きコミュ
			ニケーションを図りたい。
	E 社(WF プロジェクトマ	導入に前向き	今後の検討地点において参考にした
	ネージャー他2名)		l,
	F社(取締役他1名)	導入に前向き	次期ウィンドファーム検討地点への適用
			に向け情報収集を引き続き行いたい。
	G 社(プロジェクト推進部長	導入に前向き	ウィンドファーム検討地点への適用に向
	他 6 名)		け情報収集を引き続き行いたい。
	H 社(WF プロジェクトマ	導入に前向き	今後の検討地点において参考にしたい
	ネージャー他2名)		
	I 社(プロジェクト部長他)	導入に前向き	適用に関し情報収集ベースになるが検
			討を進めたい。
	J社(WFプロジェクトマネー	導入に前向き	新技術適用はポイントの1つであり最新
	ジャー他 2 名)		情報へのアップデートや適用事例を引
			き続き連携して欲しい。
	K 社(WF プロジェクト主任	導入に前向き	検討中のウィンドファーム地点への適用
	クラス 3 名)		性を評価するため引き続き情報連携を
			行いたい。
O&M	L社(14名)	有効性を理解	再飛行等の手戻り作業がなくなるため、
事業者			非常に良いシステムだと思う。
	M 社(4 名)	有効性を理解	点検の効率化が図れる。
	N 社(6 名)	有効性を理解	ローカル 5G を活用した場面は、今後広
			がってくると感じた。

表 4-23 ステークホルダーへの実現性確認の理解獲得率

ヒアリング対象	ヒアリング項目	目標理解獲得率	結果	
発電事業者·SPC	ローカル5Gへの理解	20%	100%	
光电争未行・37℃	ドローン点検の有用性	20%	100%	
O0 M = ** *	ローカル5Gへの理解	20%	100% (理解できる25%、 概ね理解できる75%)	
O&M事業者	ドローン点検の有用性	20%	100% (理解できる25%、 概ね理解できる75%)	

1.ローカル5Gについて

(1)説明を聞いて、ローカル5Gについて理解いただけましたか?

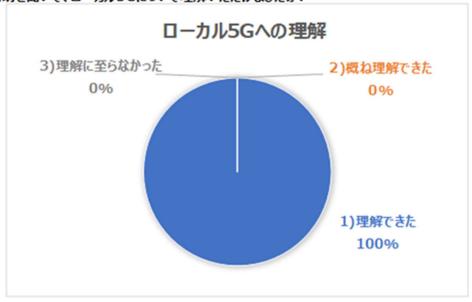
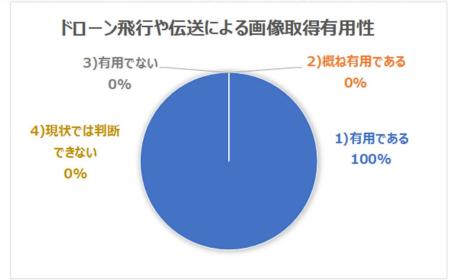


図 4-53 アンケート集約結果(発電事業者、SPC)1

2.ローカル5Gを用いたドローン点検について (1)ローカル5Gを用いてドローン飛行したり、伝送によって画像を取得することは有用だと思いますか?



(2)ローカル5Gを用いたドローンでの点検フローは有用だと思いますか?

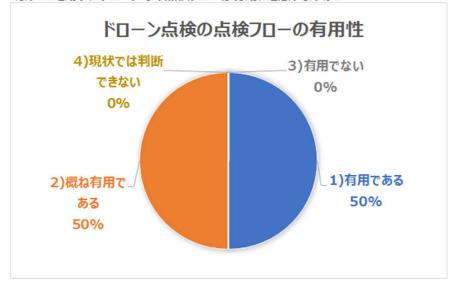
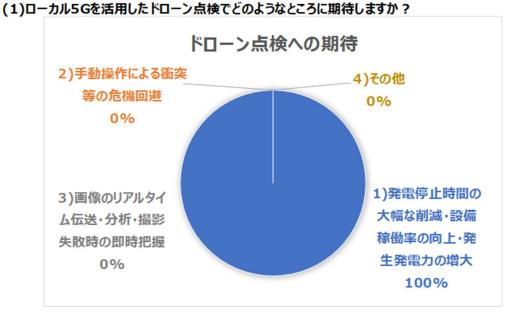


図 4-54 アンケート集約結果(発電事業者、SPC)2

3.ローカル5Gを用いた風車の点検での期待・懸念について



(2)ローカル5Gを活用したドローン点検でどのようなところに懸念がありますか?

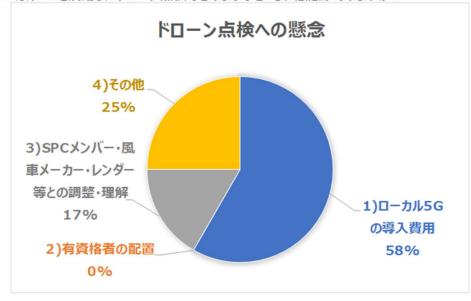
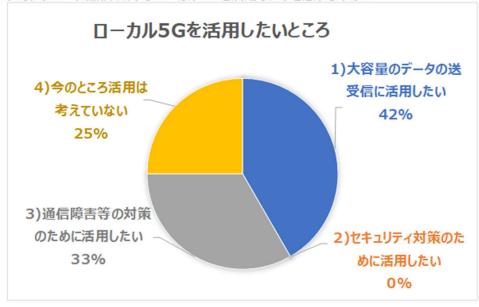


図 4-55 アンケート集約結果(発電事業者、SPC)3

4.ドローン点検以外へのローカル5Gの活用について

(1)将来的にドローン点検以外でローカル5Gを活用したいと思いますか?



5.ドローンを用いた事業の解消したい課題について (1)あなたはドローンを用いて、解消したい課題はありますか?

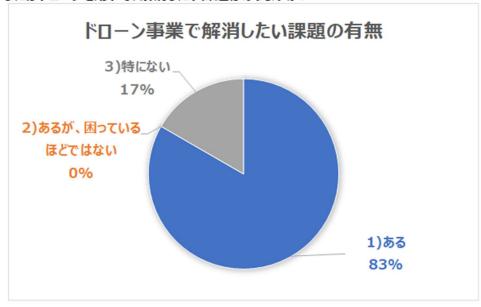
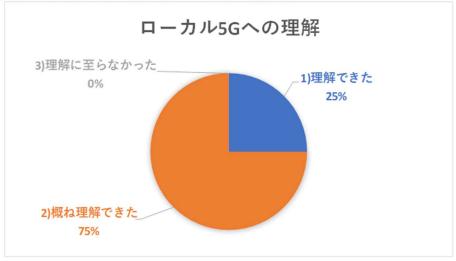


図 4-56 アンケート集約結果(発電事業者、SPC)4

1.ローカル5Gについて

(1)この見学会に参加して、ローカル5Gについて理解できましたか?



2.ローカル5Gを用いたドローン点検について

(1)この見学会に参加して、ローカル5Gを用いたドローン操作・ソフトウェア操作・点検画像確認の 一連の流れを理解できましたか?

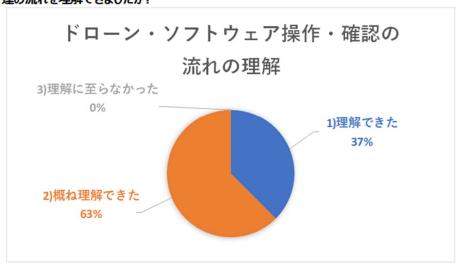
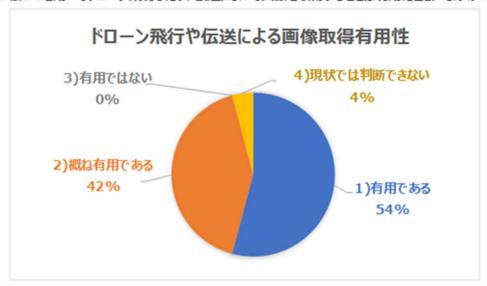


図 4-57 アンケート集約結果(O&M 事業者)1

(2) D-加5Gを用いてドローン飛行したり、伝送によって画像を取得することは有用だと思いますか?



(3) ローカル5Gを用いたドローン点検の点検フローは有用だと思いますか?

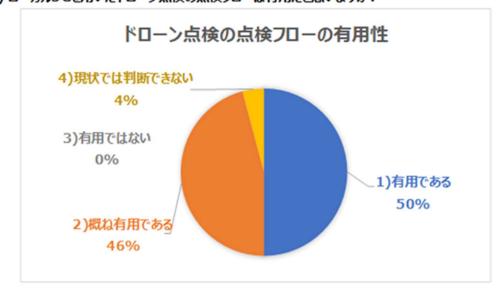
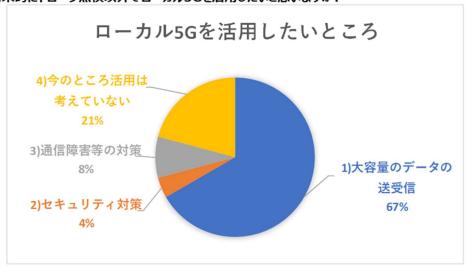


図 4-58 アンケート集約結果(O&M 事業者)2

3.ドローン点検以外へのローカル5Gの活用について

(1)将来的にドローン点検以外でローカル5Gを活用したいと思いますか?



4.ドローンを用いた事業の解消したい課題について

(1)あなたはドローン事業を用いて、解消したい課題はありますか?

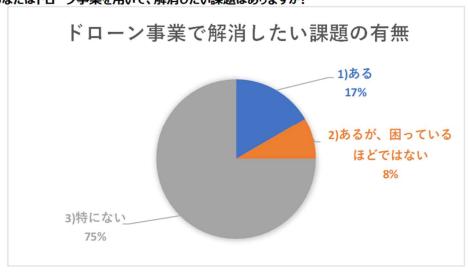


図 4-59 アンケート集約結果(O&M 事業者)3

c. ドローン飛行・画像取得整理方法に関する実現性評価、業務フロー評価

ステークホルダーとなるローカル 5G 設備所有者になり得る事業者(発電事業者、SPC、O&M 事業者)に対し、ドローン飛行・画像取得整理方法に関する実現性評価、業務フロー評価のためにヒアリングを実施した。(運用マニュアルについては、説明資料巻末添付「自律飛行型ドローン風車ブレード点検作業手順書」を参照)

O&M 事業者に対し実施した操作見学会の開催概要を表 4-24 に記載する。

秋田県下の O&M 事業者の社員を対象に、秋田県総合食品研究センター(机上説明)およびユーラス秋田港ウィンドファーム(実証試験状況見学)にて、2022 年 12 月 20 日の午前と午後の 2 回開催実施した。

ヒアリングは、図 4-60、図 4-61 他を用いて(説明資料巻末添付「洋上風力発電設備外観点検へのローカル 5G 通信の活用について」)、ローカル 5G 採用による点検方法の新旧比較(点検方法比較) 他を説明し、理解を得た上で実施した。

表 4-25 にステークホルダーへのドローン飛行・画像取得整理方法の実現性評価、業務フロー評価の結果の概要を示す。

発電事業者、SPC および O&M 事業者とも、画像取得整理方法の実現性評価および業務フロー評価として、ローカル 5G システムの導入はドローンによる点検方法に対し通信手段を改善し効率化を図れるため、ドローンによる点検の長所を伸ばす方法と受け止められ、ドローン飛行・画像取得整理方法として、実現可能であり有用との理解が得られた。

発電事業者・SPC および O&M 事業者に対するアンケート結果の集約を図 4-62、図 4-63 に示す。

ヒアリングおよびアンケート結果を以下に示す。なお目標とした獲得率は、ドローン飛行・画像取得整理方法の実現性評価、業務フロー評価とも 60%であり、いずれも目標を大きく上回った。

(発電事業者·SPC)

- ・ ドローン、ローカル 5G を活用した飛行・画像取得整理方法は実現があると評価できる。
- ・ ローカル 5G を用いたドローン点検の点検フローと従来法による点検フローを比較し、100%が 有用(有用である 50%、概ね有用である 50%)だとした。

(O&M 事業者)

- ・ ドローン、ローカル 5G を活用した飛行・画像取得整理方法はより効率的であり、実現があると 評価できる。
- ・ ローカル 5G を用いたドローン点検の点検フローと従来法による点検フローを比較し、96%がローカル 5G を用いたドローン点検の点検フローが有用(有用 52%、概ね有用 44%)だとした。

表 4-24 〇&M 事業者に対し実施した操作見学会(概要)

1. 開催日時 2022.12.20(午前と午後の2回開催)

2. 場所 秋田県総合食品研究センターおよびユーラス秋田港ウィンドファーム

3. 時間 午前 1030 開始、午後 13:30 開始

4. 参加者 O&M 事業者の社員

5. プログラム 下表参照(午後の部は13:30 集合に読み替えタイムテーブルは午前と同様)

時間	内容	場所
~10:30	集合	秋田県総合食品研究センター研修室2
10:30~10:40	概要説明(10分)	
10:40~11:00	プロモーションビデオ鑑賞(20分)	
11:00~11:10	質疑応答(10分)	
11:10~11:20	移動(10分)	ユーラス秋田港ウインドファームへ
11:20~11:40	ローカル5G実証試験状況見学(20分)	
11:40~11:50	質疑応答(10分)	
11:50~	解散	

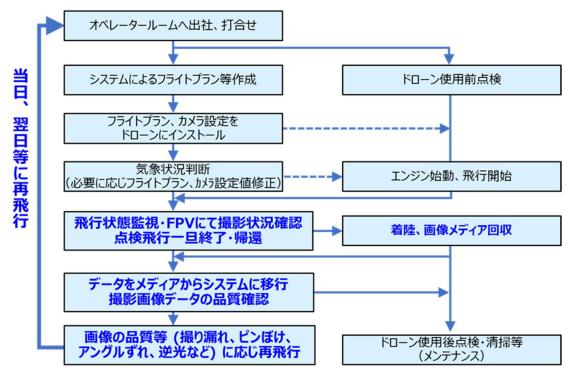


図 4-60 従来法による点検フロー

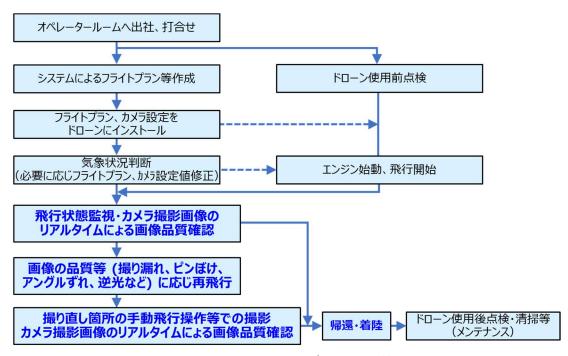


図 4-61 ローカル 5G 活用モデルによる点検フロー

表 4-25 ステークホルダーへのドローン飛行・画像取得整理方法の実現性評価、業務フロー評価結果(概要)

属性	会社名等	実現性評価	業務フロー評価
発電事業者	A 社(O&M 事務所長他 2 名)	実現可能	従来法より有用
SPC	B社(DX戦略室長他3名)	実現可能	従来法より有用
	C 社(取締役他 3 名)	実現可能	従来法より有用
	D社(取締役他1名)	実現可能	従来法より有用
	E社 (WF プロジェクトマネージャー他 2 名)	実現可能	従来法より有用
	F社(取締役他1名)	実現可能	従来法より有用
	G社(プロジェクト推進部長他6名)	実現可能	従来法より有用
	H 社 (WF プロジェクトマネージャー他 2 名)	実現可能	従来法より有用
	I 社(プロジェクト部長他)	実現可能	従来法より有用
	J 社(WF プロジェクトマネージャー他 2 名)	実現可能	従来法より有用
	K 社(WF プロジェクト主任クラス 3 名)	実現可能	従来法より有用
O&M	L社(14名)	実現可能	従来法より有用
事業者	M社(4名)	実現可能	従来法より有用
	N社(6名)	実現可能	従来法より有用

表 4-26 ステークホルダーへのドローン飛行・画像取得整理方法の実現性評価、業務フロー評価の理解獲得率

ヒアリング項目	目標理解獲得率	結果
ドローン飛行・画像取 得整理方法に関する 実現性評価	60%	100% (有用である50%、 概ね有用である50%)
業務フロー評価	60%	96% (有用である54%、 概ね有用である42%)

(2)ローカル5Gを用いたドローンでの点検フローは有用だと思いますか?

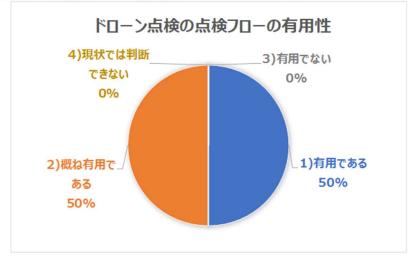


図 4-62 業務フロー評価結果(発電事業者·SPC)

(2) D-加5Gを用いてドローン飛行したり、伝送によって画像を取得することは有用だと思いますか?

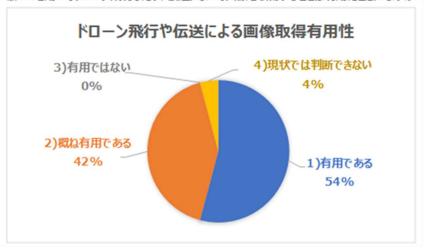


図 4-63 業務フロー評価結果(O&M事業者)





図 4-64 O&M 事業者への操作見学会の実施状況写真

d. 人員配置シミュレーション

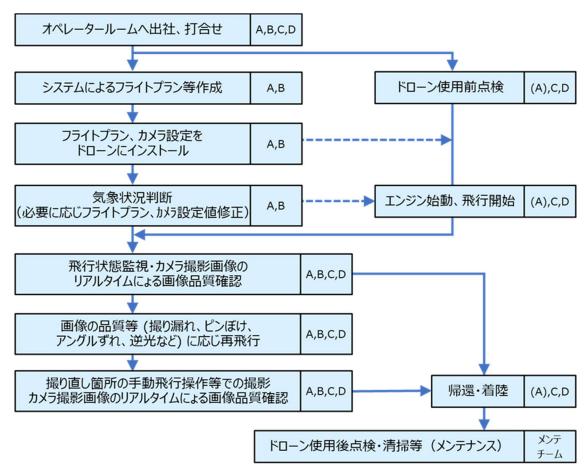
ローカル 5G 活用モデルによるドローン点検時の人員配置を図 4-65 に示す。

ドローンの飛行は4名1チームで実施する。

チームの構成は、全体統括管理、SPC や風車メーカー他との連携・調整を担うフライトマネージャーを 1 名、ドローンのメインオペレーター(ドローン管理システム等の操作を含む)を 1 名、サブのドローンオペレーター(機体の飛行前点検、飛行対応を含む)を 1 名、全体の補助としてのドローオペレーター(機体の飛行前点検、ドローンフライトデータ監視、FPV にて撮影状況確認を含む)を 1 名とする。

またドローン飛行後の使用後の、点検・清掃・部品交換他のメンテナンス対応としてメンテナンスチームを配置する。当体制は、実証試験での実施状況や㈱Dshift でのこれまでのドローンのオペレーションの実績等を踏まえ構成したものである。

当体制は前述の通り実績等を踏まえた最少人数で構成しており、コストミニマムを要求される発電事業者・SPC のニーズに適合した現実的な内容であり、受け入れ・採用が可能な内容として評価されると考える。



配置

- ・ フライトマネージャー (A):全体統括管理、各所との連携他
- ・ メインドローンオペレーター (B):ドローンのメインオペレーター、システム操作他
- ・ サブドローンオペレーター (C):ドローンのサブオペレーター、機体対応業務担当他
- ・ オペレーター補助 (D):各種補助、ドローンフライトデータ監視、FPV にて撮影状況確認他
- ・ メンテナンスチーム:使用後のドローンの点検・清掃・部品交換他

図 4-65 ドローン点検時の人員配置

e. 費用対効果シミュレーション

洋上風力設備の構成を考慮した上で、導入設計、導入費用の算出を行い、費用対効果を評価した。 費用対効果の詳細については、4.3.2(1)に記載する。

(3) 効果検証

1) 検証項目

ローカル 5G 回線が設置されていない海域において、ドローンを用いた洋上風力設備外観点検を実施する場合、ドローンカメラに搭載される SD カード等記憶媒体へ撮影画像を保存し、ドローンが都度帰還し SD カード等を地上で抜き差しし保存データを受け渡しする方式をとることが想定される。

同様に、ローカル5G回線が設置されていない海域において、ドローンを用いた洋上風力設備外観点検を実施する際、陸からの距離などを踏まえて、目視外飛行中のドローン飛行制御の緊急回避性能を向上するためには、LTE 通信網を設備周辺に構築することが想定される。

そこで、ドローンを用いた洋上風力設備外観点検に対してローカル 5G 回線を活用した場合に、取得画像の品質として点検可能な状態を確保した上での点検に要する時間が現在想定される既存手法と比べて短縮すること、並びに、現在ローカル 5G 以外に想定される手法と比べ緊急回避性能における向上効果がより高くなることを検証した。

検証	効果内容	検証内容	詳細
項目			
a	点検時間	画像データ確認時	点検可能な画像を一式取得し作業員により再撮影要否を判
	短縮効果	間	定する時間を計測し SD カード受け渡し方式による確認時間
			と比較した。
		画像品質	SD カード受け渡し方式とデーター式が同品質であることを
			確認した。
b	緊急回避	ドローン手動操作	データ伝送遅延が LTE 通信等他方式と比較し低減されるこ
	性能向上	情報伝送時間	とを確認した。
	効果	飛行監視用画像	飛行監視用画像品質が LTE 通信等他方式と比較し同等以
		品質および伝送時	上となり、かつ、データ伝送遅延が他方式より低減されること
		間	を確認した。

表 4-27 効果検証項目

2) 検証方法

a. 点検時間短縮時間

点検用画像伝送機能について、以下の方法で各確認項目を検証した。

・ 画像データ確認時間:

ドローンによる画像撮影後、再撮影の必要性を判定するために、ドローンを基地局へ戻し SD カードを回収、データをダウンロードして確認する SD カード受け渡し方式と比べて、ローカル 5G を活用した都度のデータ伝送方式の方が、確認時間が短くなることを、本実証において両方式で画像確認を実施した上比較した。

· 画像品質:

ローカル 5G を活用して取得した点検用画像データについて、SD カード受け渡し方式により取得されるデータとデータサイズが同等であることを確認した。

なお、点検用画像伝送機能を測定する際のドローン飛行方法については、4.3.1(1)2)で示した飛行方法と同じく、設備近傍に到着し水平旋回を開始した時点から画像撮影をスタートさせた。気象状況の制約等からケースにより飛行時間(周回回数)は異なるが、各ケース 2 回の飛行検証を実施した。

b. 緊急回避性能

緊急回避性能について、以下の方法で各確認項目を検証した。

・ ドローン手動操作情報伝送時間:

飛行中の映像確認後、ドローンを手動操作した場合にドローンが応答するまでの時間を計測し、 その遅延時間の間に制動距離目標値を超過しないことを確認した。また、従来通信方法である、 2.4GHz 帯やキャリア LTE 各バンドなどとの比較を行った。

・ 飛行監視用画像品質および伝送時間:

飛行状況を地上局で遠隔監視するためのドローン搭載カメラから伝送される FPV 画像に関する画像品質および伝送時間について、その後のドローン手動切り替え後のドローン反応時間(制動距離)と合わせて評価した。また、従来通信手法である、5.7GHz 帯やキャリア LTE 各バンドなどとの比較を行った。

なお、制動距離目標値については、ドローン飛行可能の中でも強い風に相当する風速 10m/s が発生 しドローンが流された場合に、手動操作へ切り替え、点検対象設備との離隔距離として想定している 10m 以内にホバリング状態へ移行させ、設備との衝突を回避することを目標とした。

検証方法としては、以下を想定し、ローカル 5G 通信を介して送受信される FPV 画像および手動操作切り替え後のホバリング指示情報の伝送遅延の評価を、他の通信手法との比較も踏まえて実施した。

Step1:ドローンを自律飛行モードとして一定方向を撮影しながら速度10m/sで直進させ、モニター越しに遠隔で撮影状況を監視。

Step2:あらかじめ緊急事態を表す目印を陸域等撮影範囲に設置しておき、ドローンが撮影。

Step3:撮影画像がモニター上に表示され、目印を人が確認した後、手動操作へ切り替えホバリング 状態に移行。

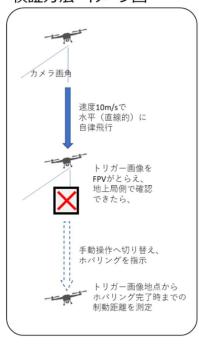
Step4:目印撮影地点からホバリングをするまでの制動距離等で伝送遅延を評価。

ローカル 5G、LTE、2.4GHz(映像伝送は 5.7GHz)それぞれの通信方式に対して、高画質静止画の伝送をしない状態で、速度 10m/s の自律直進飛行している状態から、各通信方法によってホバリング指示を出した場合の制動距離を計測することで緊急回避性能を比較した。

ローカル 5G の検証については、実ユースケースを考慮した毎秒の高画質静止画の伝送を並行して 処理するフライトを「負荷あり」ケースとして複数回実施し、通信容量負荷有無による影響も確認した。

検証方法 イメージ図

ローカル5G基地局との位置関係





ドローンが映す動画映像(PCモニター上で監視している画面例)



PCモニター上でドローンから配信される動画映像を監視し、トリガー印が確認されたら、監視者が手動操作にてホバリング指示し、トリガー印位置とホバリング完了位置との水平距離を制動距離として記録

図 4-66 緊急回避性能の検証方法 出典:(右上図)国土地理院地図

3) 検証結果および考察

a. 点検時間短縮効果

実証各 Case で飛行中にドローンが撮影し、ローカル 5G を通じて地上 PC で取得した画像の例を以下に示す。なお、Case2 については風車設備がない部分を撮影したため、撮影画像に風車が見えることを想定した描画を上書きして示している。

Case1





Case3



Case4



図 4-67 効果検証実施時の撮影画像

ドローン飛行撮影中にローカル 5G 経由で地上 PC に取り込むことができた画像枚数および取り込み時間を下表に示す。

表 4-28 効果検証の飛行撮影データ

			飛行関連	Ē		点検用画像			
No.	検証ケース	飛行高度	飛行速度	撮影インター	撮影画像取込	撮影画像取込	画像取り込み速	設備停止状態	備考
		(m)	(m/s)	バル(枚/秒)	枚数	時間 (秒)	度(枚/分)		
1	case1	60	5	1	22	97	13.6	4号ブレーキ停止	1-1
2	case1	60	5	1	16	71	13.5	4号ブレーキ停止	1-2
3	case2	60,80,100	5	1	108	421	15.4	架空号機	2-1
4	case2	60,80,100	5	1	107	418	15.4	架空号機	2-2
5	case3	60,80,100	5	1	96	423	13.6	5号発電運転中	3-1
6	case3	60,80,100	5	1	101	424	14.3	5号発電運転中	3-2
7	case4	100	5	1	25	121	12.4	4号ブレーキ停止	4-1
8	case4	100	5	1	24	122	11.8	4号ブレーキ停止	4-2
9	case4	300	5	1	48	176	16.4	架空号機	高度300m飛行
10	case4	300	5	1	41	176	14.0	架空号機	高度300m飛行

画像取り込み時間については、ドローンが設備近傍に到着し、撮影を開始した時間を取り込み開始時間とし撮影終了した時間を取り込み終了時間とした。各ケースで飛行した時間に違いがあるため取り込み枚数に差があるが、1分あたりの画像取り込み枚数を算出すると11.8 枚/分~16.4 枚/分となり大きな差はなかった。以降で検証結果について記載する画像確認時間の効果検証において、画像取り込みスピードとしては、本実績で得られた平均値である14.0 枚/分を用いることとした。

点検用画像伝送機能の内の画像確認時間に関する効果検証については、本実証における飛行実績からローカル 5G を介して取得できる画像枚数(複数回の飛行結果の平均的な値)を設定し、実装環境を想定した陸域から約 10 km離れたサイト、作業員による画像処理枚数を仮定して、実際に連続飛行させた結果ではなく机上シミュレーションによって非ローカル 5G 環境下(従来手法である SD カード受け渡し方式)における画像確認時間との比較評価をした。

画像確認時間のシミュレーションの前提条件は以下の通りである。

- ・ 画像取り込みスピードについて、フィールド実証での検証結果として得られた各ケースの平均値 である 14 枚/分を用いることとした。
- ・ 画像確認スピードについて、フィールド実証中に 3 名の異なるスタッフで複数回実施した画像確認スピードの検証結果の平均値として得られた 3.9 枚/分・人を使用することとした。
- ・ 点検対象設備までは片道 10 kmの距離と仮定:10m/sで進む想定として片道 17 分必要である。
- ・ 飛行開始後 7 分で撮影が完了すると仮定する。(撮影枚数 380 枚と想定)
- ・ 点検飛行撮影完了後、非ローカル 5G 環境では、24 分後に SD カードが到着する。
- ・ SD カードから 2 秒/ファイルで取り込めるとすると、380 枚取り込むのに 12 分必要である。
- ・ 画像確認体制:チェック要員 3 人である。(確認スピード:11 枚/分)

机上シミュレーション実施結果から、確認結果として再撮影が必要なかった場合、風車 1 基のみをドローンで点検して陸上へ戻ってくるとすると、ローカル 5G を活用した場合、活用しなかった場合(SDカード受渡し)と比べて 35 分の点検時間短縮効果があることがわかった。

また、仮に 2 基を点検する場合であれば、ローカル 5G 環境下であっても 2 基目の点検画像確認の 完了まで空中で待機していては、ドローン帰還までに係る時間が現状連続飛行可能時間の限界として 想定している 90 分を超過するため、ローカル 5G 環境下における 2 基目の画像確認は 18 枚が陸上にドローン帰還後の作業となる。その場合においても同条件下でシミュレーションすると、全画像確認を終える時間は、ローカル 5G 環境の方が非ローカル 5G 環境よりも約 34 分早くなる見込みである。同様に、90 分以内の 1 回の往復飛行で点検可能な上限基数である 6 基を点検するとした場合、ローカル 5G 環境の方が非ローカル 5G 環境よりも約 59 分早く画像確認が完了する結果が得られた。

表 4-29 点検画像短縮効果結果

点検基数(1 フライト)	1基	2基	3基	4 基	5基	6基
確認短縮時間	35 分	34 分	40 分	47 分	52 分	59 分

仮に、ウィンドファーム内の 20 基の風車に対して点検が必要となった場合、この条件下では、6 基の 点検を 3 フライト、2 基のフライトを 1 フライト実施することになり、その際の確認短縮時間は、40 分×3 +34 分=154 分。

風車設備が本実証規模と同一の風車であるとすると、3MW/基である。

売電単価として、エネ庁発電コスト検証 WG 参照し 25.9 円/kWh を採用すると、

3,000×25.9×20×154/60=199,430 (円)となる。

実際の洋上では、より単基出力の大きい設備を設置するため、より効果が大きくなることが期待される。

表 4-30 点検用画像確認所要時間(机上シミュレーション)比較表

イペン			非ローカル5G環境下					
		点検開始後				画像取込み		
ローカル5G環境下	非ローカル5G環境下	(分)		数(枚)		枚数(枚)	数(枚)	(枚)
ドローン点	(検撮影開始	1	14	11	3	0	0	0
		2	14	11	6	0	0	0
		3	14	11	9	0	0	0
		4	14	11	12	0	0	0
		5	14	11	15	0	0	0
		6	14	11	18	0	0	0
ドローン点	(検撮影完了	7	14	11	21	0	0	0
ドローン空中待機	ドローン帰還開始	8	14	11	24	0	0	0
		9	14	11	27	0	0	0
		10	14	11	30	0	0	0
		11	14	11	33	0	0	0
		12	14	11	36	0	0	0
		13	14	11	39	0	0	0
		14	14	11	42	0	0	0
		15	14	11	45	0	0	0
		16	14	11	48	0	0	0
		17	14	11	51	0	0	0
		18	14	11	54	0	0	0
		19	14	11	57	0	0	0
		20	14	11	60	0	0	0
		21	14	11	63	0	0	0
		22	14	11	66	0	0	0
		23	14	11	69	0	0	0
	ドローン帰着	24	14	11	72	0	0	0
	(SDカード回収開始)	25	14	11	75	0	0	0
		26	14	11	78	0	0	0
		27	14	11	81	0	0	0
		28	2	11	72	0	0	0
		29	0	11	61	0	0	0
		30	0	11	50	0	0	0
		31	0	11	39	0	0	0
		32	0	11	28	0	0	0
		33	0	11	17	0	0	0
		34	0	11	6	0	0	0
☆画像チェック完了		35	0	6	0	0	0	380

画像データー式取得	36	0	0	0	380	11	369
	37	0	0	0	0	11	358
	38	0	0	0	0	11	347
	39	0	0	0	0	11	336
	40	0	0	0	0	11	325
	41	0	0	0	0	11	314
	42	0	0	0	0	11	303
	43	0	0	0	0	11	292
	44	0	0	0	0	11	281
	45	0	0	0	0	11	270
	46	0	0	0	0	11	259
	47	0	0	0	0	11	248
	48	0	0	0	0	11	237
	49	0	0	0	0	11	226
	50	0	0	0	0	11	215
	51	0	0	0	0	11	204
	52	0	0	0	0	11	193
	53	0	0	0	0	11	182
	54	0	0	0	0	11	171
	55	0	0	0	0	11	160
	56	0	0	0	0	11	149
	57	0	0	0	0	11	138
	58	0	0	0	0	11	127
	59	0	0	0	0	11	116
	60	0	0	0	0	11	105
	61	0	0	0	0	11	94
	62	0	0	0	0	11	83
	63	0	0	0	0	11	72
	64	0	0	0	0	11	61
	65	0	0	0	0	11	50
	66	0	0	0	0	11	39
	67	0	0	0	0	11	28
 	68	0	0	0	0	11	17
	69	0	0	0	0	11	6
★画像チェック完了	70	0	0	0	0	6	0

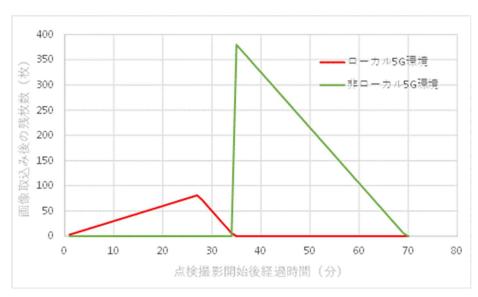


図 4-68 画像確認時間検証結果

点検用画像伝送機能のうち画像品質については、下表の通り画像ファイルごとの容量が全く同じであることから、SD カード受渡し時と同様の品質を確認している。

表 4-31 画像品質検証結果

	1 2											
					2							
No.		1-1L		1-2L								
	ローカル 5G	SD	サイズ 差異	ローカル 5G	SD	サイズ 差異						
1	21,018	21,018	0	19,604	19,604	0						
2	21,239	21,239	0	19,957	19,957	0						
3	20,369	20,369	0	20,011	20,011	0						
4	20,757	20,757	0	20,439	20,439	0						
5	20,502	20,502	0	20,596	20,596	0						
6	20,413	20,413	0	20,500	20,500	0						
7	20,850	20,850	0	20,416	20,416	0						
8	21,266	21,266	0	20,300	20,300	0						
9	20,796	20,796	0	20,138	20,138	0						
10	20,477	20,477	0	20,092	20,092	0						
11	20,214	20,214	0	20,092	20,092	0						
12	20,544	20,544	0	20,179	20,179	0						
13	20,625	20,625	0	20,058	20,058	0						
14	20,198	20,198	0	20,124	20,124	0						
15	20,604	20,604	0	20,304	20,304	0						
16	20,721	20,721	0	20,259	20,259	0						
17	21,122	21,122	0									
18	20,706	20,706	0									
19	21,058	21,058	0									
20	20,314	20,314	0									
21	20,319	20,319	0									
22	20,135	20,135	0									

b. 緊急回避性能

緊急回避性能(ドローン手動操作情報伝送時間、飛行監視用画像品質および伝送時間)に関しては、 目標 10m 未満という制動距離に対して、いずれの通信方法でも満たすことができず、本実証結果とし ては約 22m~約 34m という結果であった。

人の操作にかかった時間は計画時に仮定して設定した時間よりも短い時間であったが、人の操作にかかった時間にはばらつきがあるので、そのばらつきをなくした上で通信手段による制動距離への影響可否を確認するため、各フライトの(制動距離/操作所要時間)を比較した。

(制動距離/操作所要時間)を比較した結果から、ドローン操作で一般に用いられている 2.4GHz(映像伝送は 5.7GHz)と比較してもローカル 5G の回避性能は遜色ない結果となっており、本モデルユースケースの代替え手段である LTE と比較すると、ローカル 5G の方がやや優れた結果を示した。

また、本実証において計画時に機能要件として掲げていた、遅延時間や人の操作時間の仮定についてはいずれも機能を満たしている。さらに通信手段として、ローカル 5G は他の通信方法と比べて遜色がない結果を得られた。さらに緊急回避時の操作に要するデータ量も非常に少ないため、通信手段の違いは大きな影響がないとも考えられる。

以上より、ローカル 5G 活用モデルを社会実装するにあたり、本検証結果から緊急回避性能という点でローカル 5G という通信に対して課題はないと言える。

なお、今回実証した機体が 10m/s の速度で流されている状態は、機体断面形状および機体重量から、機体が無抵抗の状態で 10m/s の風圧を 5 秒以上受けている状態を模擬しており、突発的に 10m/s の風を受けた直後の機体状態よりも非常にシビアな状態と言える。よって、制動距離の絶対量と いう点において目標値 10m を満たさなかったことに対しては、即座に運用方法を見直す必要があると いうわけではないがドローン機体固有の特性に応じて詳細検証していく必要があることを示唆している。

制動距離が目標値を満たさなかった原因としては、通信手段によるものではなく、ドローンの制御機構によるものと推測される。具体的には、ドローン機体がホバリングの指示を受信した後、急に制止するためには前後のプロペラ回転数を制御して機体を大きく傾ける必要があるが、機体の傾きについては墜落しないための上限値がある。この上限値に達しないように緩やかな傾きでホバリングに移行できるよう、機体側の制御機構が働き、安定的にホバリングに推移した結果であると考えられる。

本結果を受けて、ドローンが飛行可能な気象条件下で、どの程度の外力を受けると考えるのが妥当であるのか、その場合にどこまで制動距離を短縮できる制御が可能なのか、仮に制御機構として限界があるのであれば、点検対象設備への接近距離をどの程度に設定する必要があるのか、ドローンの飛行運用や制御機構をさらに検討していくことで対応していきたい。

表 4-32 緊急回避性能測定データ

20 米心回歴は配例だり ク									
テレメトリ・操作指令伝送 /映像伝送	回数	風向き	風速 (m/s)	制動距離 (m)	ターゲット視認から操作時間 (秒)	切替後から静止 までの時間(秒) ※VSDC確認	備考		
LTE/LTE	1	南南東	0.9	31.8	0.44	2.97	南→北		
	2	南南東	0.8	32.0	0.37	3.30	北→南		
	3	南南東	1.0	31.3	0.43	3.51	南→北		
	4	南南東	2.0	32.3	0.36	3.14	北→南		
	5	南南東	2.3	31.1	0.40	3.04	南→北		
	7	南南東	1.9	31.0	0.40	3.37	南→北		
	8	南南東	2.7	33.3	0.40	3.31	北→南		
ローカル5G/ローカル5G	1	南南東	1.2	29.9	0.41	3.73	南→北		
	2	南南東	1.2	28.8	0.41	3.10	北→南		
	3	南南東	1.8	28.4	0.40	3.23	南→北		
	4	南南東	1.5	29.7	0.40	2.71	北→南		
	5	南南東	1.3	28.5	0.37	2.80	南→北		
	6	南南東	1.5	29.9	0.40	3.24	北→南		
	1	南南東	0.8	38.3	0.52	3.28	回線に負荷、南→北		
	2	南南東	1.2	35.8	0.43	3.21	回線に負荷、北→南		
	3	南南東	1.2	43.6	0.41	3.97	回線に負荷、南→北		
	4	南南東	1.1	40.8	0.47	3.97	回線に負荷、北→南		
2.4GHz/5.7GHz		南南東	3.2	28.7	0.32	2.81	南→北		
		南南東	3.1	22.3	0.32	4.51	北→南		
		南南東	4.2	27.8	0.63	2.37	南→北		
	4		4.5	25.2	0.32	3.18	北→南		
	5	南南東	4.3	28.4	0.30	2.62	南→北		

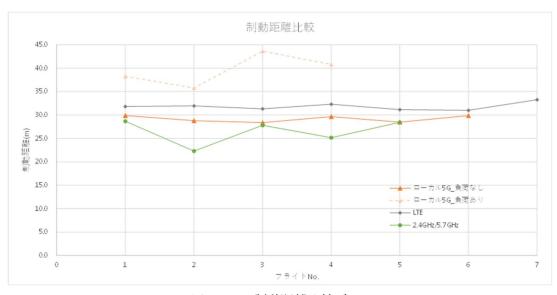


図 4-69 制動距離比較グラフ

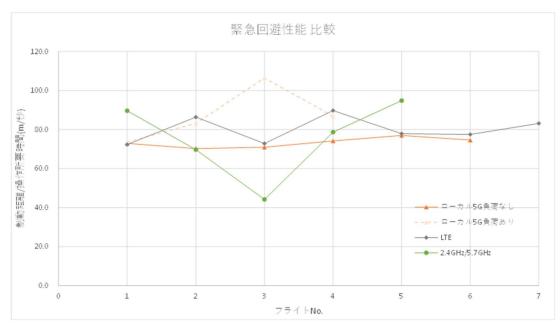


図 4-70 緊急回避性能比較グラフ

(4) ローカル 5G 活用モデルの有効性等に関する総評

本実証では、4.1.4 において示したシステム性能要件に対して、伝送速度と遅延時間のいずれも要件 を満たすことを検証できた。

また、ローカル 5G を使用して飛行中のドローンから地上拠点 PC ヘリアルタイム無線伝送により点検可能な画像を一式取得し確認を終える時間が、ドローンが帰還し SD カードを取り出すなど物理的にデータ取得することによる画像確認時間より短時間なことを確認できた。

緊急回避性能(ドローン手動操作情報伝送時間、飛行監視用画像品質および伝送時間)に関しても、 飛行監視用画像品質は緊急操作する上で問題となるような画像乱れはなく、情報伝送時間においても 人による操作完了後問題なく機体が反応していることを確認できた。

以上より、本実証の結果から当初仮説通りローカル 5G 活用モデルは有益であり、機能検証の面では技術的には顕在化している課題もなく即実装が可能であると考える。

他方、緊急回避性能(ドローン手動操作情報伝送時間、飛行監視用画像品質および伝送時間)に関しては、目標としていた 10m 未満という制動距離を満たすことができなかったが、この結果についてはローカル 5G を用いない他の通信方法でも満たすことができておらず、ローカル 5G を用いることが制動距離目標値を満たさなかった原因というわけではないと考える。この結果は通信手段によるものではなく、ドローンの制御機構によるものと推測されるため、ドローン飛行制御に係るシステムの検討または運用時の飛行条件に関する検討の領域で引き続きの対応を検討していく。

4.3.2 ローカル 5G 活用モデルの実装性に関する検証

(1) 経済性・市場性の検証

1) 検証項目

a. 経済性に関する検証

経済性の評価は、洋上風力設備の一般的な運転期間である 20 年間において、ローカル 5G 活用モデル導入の効用として発電事業者・SPC が得る収入増に対し、モデル導入に伴い必要となる初期費用・機器運用費用、ドローン点検サービスの費用(ロープワーカーとモデルを活用した点検費用の差分)との関係性を検証する必要がある。

なお発電事業者・SPC が得るローカル 5G 活用モデル導入による収入増については、モデル実装時に想定される発電停止時間(ダウンタイム)短縮効果を適用するとした、

具体的には以下の手順で検証を実施し経済性を評価した。

○ローカル 5G 活用モデル導入の効用(ダウンタイム短縮効果)

- ・ ロープワーカーからドローンへの点検置き換え効果
- ・ 撮影画像の、記憶媒体の回収からローカル 5G 活用への変更による効果
- 〇モデル導入に伴う費用(必要費用)
- ・ ローカル 5G システムの初期費用・機器運用費用
- ・ ドローン点検サービスの費用(ロープワーカーとモデルを活用した点検費用の差分)

ローカル 5G のシステム構成等は、実証結果を用いて設定し各種費用を算定した。

b. 市場性に関する検証

前述の通り、現状で洋上風力発電設備のライフサイクルコストの約 35%以上を占める運転保守 (O&M)の高度化・効率化の問題は、洋上風力発電の安定的な発電と発電効率向上に向けた世界的課題でもある。これは洋上風力発電設備の設置位置が、ヨーロッパ、日本共に、着床式による離岸距離が比較的近い位置から、浮体式にて離岸距離が比較的遠くなる位置に移行する状況において、O&M への対応はより困難となり、洋上風力発電ライフサイクルに占める O&M の割合の上昇も推察されることから言える。O&M の高度化・効率化の取り組みなしには、安定的な発電の持続的な維持は難しく、本実証でのモデルに対するニーズについて検証した。

またウクライナ情勢も踏まえ、エネルギー安全保障の観点からも再生可能エネルギーは益々重要性を 増しており、その中でも風力発電への期待は大きく、世界的に見ても風力発電の導入量は増え続けると 推察する。風力発電の導入量とともに風車設置数も増えるため、現状でも不足するロープワーカーは、 さらに不足することが予想される。この課題への対応となる外観点検のドローンへの転換は必須であり、 ヨーロッパ・アジアの洋上風力発電設備および、国内外の陸上風力発電設備等への、本実証でのモデル に対するニーズについて検証した。

2) 検証方法

a. 経済性に関する検証方法

将来モデル1と将来モデル2の両者について、本実証を踏まえたシステム構成を検討し、その初期費用・機器運用費用を概算した。また、システム導入による発電停止時間短縮効果と合わせて、SPC としての費用対効果の分析を実施した。

b. 市場性に関する検証方法

市場性に関する検証として、ローカル 5G 活用モデルのニーズについてヒアリングを実施し、改善点や実導入に際する課題等を抽出・評価した。

国内に対しては、洋上・陸上の風力発電事業・出資者(SPC)、融資者および風車メーカー、独立系 O&M 事業者等にヒアリングし、ヨーロッパ・アジアに対しては、海外事情に詳しい商社、コンサルタント にヒアリングを行った。

ヒアリング対象事業者については、既に開発中あるいは開発が決定している事業者に加え、応募回数(予定を含む)、応募開始時期が比較的早い地点の応募予定事業者などから選定し、ヒアリングを実施した。なお、今回、フィールド提供いただく合同会社ユーラスエナジー秋田港は、発電設備保有および事業運営を専門とする会社でありヒアリング対象外とした。本事業では、コンソーシアムメンバーである関西電力を含め、複数の特別目的会社(SPC)の代表幹事企業に対して、ヒアリング調査を実施した。融資者、風車メーカー、独立系 O&M 事業者および海外事情に詳しい商社、コンサルタントの選定については、コンソメンバーにてつながりのある企業等を選定し実施した。

3) 検証結果および考察

a. 経済性に関する検証結果および考察

ローカル 5G 活用モデルで想定される具体的なターゲットが、発電事業者や SPC となる理由は、電力業界のビジネスモデルに基づいて検討を進めた。4.1.1(3)に詳細を記載している。

経済性の評価にあたり、前提条件を整理する。

ローカル 5G 活用モデル導入時のシステムについて、導入費用試算条件は以下の通り。

- · 初期費用および機器運用費用を試算する。
- ・システムの耐用年数は年と仮定する。
- ・システム更新費用は、経年による価格低廉は加味せず初期導入費と同等コストと仮定する。
- ・ ランニング費用にはローカル 5G 機器の利用、法定点検(5 年毎)、メーカー保守費を含む。

次に、ローカル5G活用モデル導入の効用(ダウンタイム短縮効果)における発電事業者・SPCのローカル5G活用モデル導入効果試算条件は以下の通り。

共通

- ・ 落雷に伴い風車を緊急停止し実施する不定期点検が対象(不定期点検で健全性を確認し問題 がなければ運転再開するため点検が遅延するとダウンタイムが長引く)
- ・ 緊急停止年間発生回数(落雷年間発生回数)は、論文(※)を参考に想定 ※日本海・太平洋沿岸部にある風車への落雷特性、山本和男・天野龍二・伊達知大、第43回風 カエネルギーシンポジウム
- ・ 設備利用率は、発電設備を定格出力で運転し続けたと仮定した場合の発電電力量に対する、発 電設備が実際に発電した電力量の百分率で、洋上風力発電において、落雷が多発する冬季にお ける一般的な利用率を採用
- ・ 売電単価は、エネ庁発電コスト検証 WG 参照し 25.9 円/kWh を採用
- ・ 総効果額に対応する売電期間は、洋上風力発電における一般的な期間である 20 年間を採用
- ・ WF 総出力は、計画するウィンドファームでの総出力で、 $10~\rm F~kW$ から $10~\rm F~kW$ 単位で $70~\rm F~kW$ までのケースを設定
- ・ 10万 kW、20万 kW が将来モデル 1 に対応、30万 kW 以上が将来モデル 2 に対応する

ロープワーカー(船)からドローンへの点検置き換え効果の試算

- ・ 緊急停止年間発生回数 1 回あたりの点検遅延日数は、風車の点検が実施できるまでの日数
- ・ 風車停止率は、落雷に伴い緊急停止し実施する不定期点検対象風車のウィンドファーム全体に 対する割合
- ・ 増電量は、ドローンによる効用

撮影画像の記憶媒体の回収からローカル 5G 活用への変更による効果の試算

- ・ 年間の緊急停止回数(落雷年間発生回数)に対し、再点検なし、再点検ありの2パターンを設定
- ・ 再点検なしは、ローカル 5G を活用した場合、ドローンが撮影した画像を保存した記憶媒体の回収が不要になるため、ドローンのウィンドファームから O&M 拠点まで飛行時間等も不要となることに対し、この時間分を運転再開時間短縮となり効果として算出。なお、必要となる不定期点検の90%がこれに該当すると設定
- ・ 再点検ありは、ドローンによる撮影失敗時等に、ローカル 5G を活用によりドローンが再度ウィンドファームまで飛行し ドローンのウィンドファームから O&M 拠点までの往復飛行時間が不要なることに対し、この時間分を運転再開時間短縮となり効果として算出なお、必要となる不定期点検の 10%がこれに該当すると設定

以上の前提条件を踏まえ、ドローンへの点検置き換え、ローカル 5G への置き換えのローカル 5G 活用モデル導入による効果を試算した。(図 4-71 参照)

ローカル 5G 活用モデル導入による効果は、総出力 20 万 kW(将来モデル 1)のウィンドファームであれば、ドローンへの点検置き換えで年間 3.7 億円、20 年間の総効果額は 73.0 億円、ローカル 5G への置き換えで年間 0.5 億円、20 年間の総効果で 10.0 億円となり、これらを合わせたローカル 5G 活用モデル導入による効果は、年間 4.2 億円、20 年間の総効果で 83.0 億円の効果が見込める。

総出力 50 万 kW(将来モデル 2)のウィンドファームであれば、ドローンへの点検置き換えで年間 9.1

億円、20 年間の総効果額は 182.6 億円、ローカル 5G への置き換えで年間 1.3 億円、20 年間の総効果で 26.0 億円となり、これらを合わせたローカル 5G 活用モデル導入による効果は、年間 10.4 億円、20 年間の総効果で 209.6 億円の効果が見込める。

将来モデル1,2とも高い経済効果が見込める。

WF	FO- 2	が点検	ローカ	N5G	≙	습타		
総出力 (MW)	年間効果額 (億円/年)	総効果額 (億円)	年間効果額 (億円/年)	総効果額 (億円)	年間効果額 (億円/年)	総効果額 (億円)		
100	1.8	36.5	0.3	5.4	2.1	41.9		
200	3.7	73.0	0.5	10.6	4.2	83.6		
300	5.5	109.6	0.8	16.2	6.3	125.8		
400	7.3	146.1	1.1	21.6	8.4	167.7		
500	9.1	182.6	1.4	27.0	10.5	209.6		
600	11.0	219.1	1.6	32.2	12.6	251.3		
700	12.8	255.6	1.9	37.8	14.7	293.4		

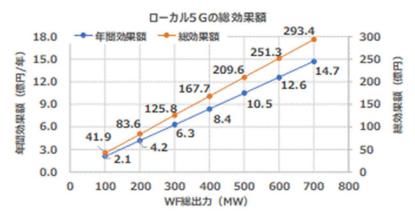


図 4-71 ローカル 5G 活用モデル導入による効果試算の集約

表 4-33 総出力 50 万 kW のウィンドファームでのローカル 5G 活用モデル導入費用の例

分類	項目	費用	備考
初期語	増用 (億円)	2.49	
	システム設計・構築費・免許取得他	1.34	
	機器費用	1.04	
	横築時運用費	0.11	
維持·	運用費用 (億円)	10.19	20年間合計
	ランニング費用	7.55	毎年
	法定費用	0.40	5年毎
	設備更新費用	2.24	10年で更新
í	合計	12.68	

表 4-34 に洋上ウィンドファームへのローカル 5G モデル適用に関する経済性評価を示す。評価結果となる経済性評価は費用対効果(B/C:benefit by cost)で表し、1.0 を超えれば経済性を有していると判断した。

費用対効果の試算・評価条件は以下の通り。

- ・ 離岸距離は、ヒアリングを実施した発電事業者・SPC における一般海域での検討地点 に対し、 O&M 拠点から風車までの平均距離が 10km 前後であることを鑑み設定
- ・ 緊急停止年間発生回数(落雷年間発生回数)は、論文(※)を参考に年間 14 回(論文に示された 各地域の風車への 1 年あたりの最大落雷数の平均値の 50%)と想定 ※日本海・太平洋沿岸部にある風車への落雷特性、山本和男・天野龍二・伊達知大、第 43 回風 カエネルギーシンポジウム
- ・ 設備利用率とは、発電設備を定格出力で運転し続けたと仮定した場合の発電電力量に対する、 発電設備が実際に発電した電力量の百分率で、洋上風力発電において、落雷が多発する冬季に おける一般的な利用率(35%)を採用
- ・ 総効果額に対応する売電期間は、洋上風力発電における一般的な期間である 20 年間を採用
- ・ 風車単機出力は現状の風車スペック等を考慮し12.5MW に設定
- ・ WF 総出力とは、計画するウィンドファームでの総出力で、 $10~\rm F~kW$ から $10~\rm F~kW$ 単位で $70~\rm F~kW$ までのケースを設定
- ・ 10万 kW、20万 kW が将来モデル1に対応、30万 kW 以上が将来モデル2に対応する
- ・ アンテナ設置風車数とは、アンテナを設置する風車の数で、現地実証結果等を踏まえ全風車の 50%に取り付けるとした。
- ・ ローカル 5G 導入後の点検費用の差分とは、従来法であるロープワーク(船)による点検からドローンによる点検に置き換え時の点検費用の差分である ドローンによる点検費用 - ロープワーク(船)による点検費用 = 点検費用の差分

表 4-34 より、例えば、総出力 20 万 kW(将来モデル 1)のウィンドファームであれば 20 年間での、

ローカル 5G 導入コスト 6.6 億円、ローカル 5G 導入後の点検費用の差分 \triangle 0.5 億円の合計 6.1 億円に対し、総効果額は 83.6 億円となり経済性評価(B/C)は 13.7 で 1.0 を超過しており投資可能と判断できる。

同様に、総出力 50 万 kW(将来モデル 2)のウィンドファームであれば 20 年間での、ローカル 5G 導入コスト 12.7 億円、ローカル 5G 導入後の点検費用の差分 \triangle 1.3 億円の合計 11.4 億円に対し、総効果額は 209.6 億円となり経済性評価(B/C)は 18.4 で 1.0 を超過しており投資可能と判断できる。

経済性評価結果を以下の通りまとめる。

- ・ 経済性での評価結果は、将来モデル1、2での全てのケースで投資可能
- ・ 全てケースで B/C が 9 を超える高い費用対効果を示す
- ・ WF 総出力が増えるほど経済性は高まる(ダウンタイム短縮効果)
- ・ 全てのケースで、ローカル 5G 置き換え効果のみでローカル 5G 活用モデル導入が可能(例えば、10万kWのケースで見れば、20年間でのローカル 5G 導入コスト 4.6 億円に対し、ローカル 5G 置き換え効果は 5.4 億円であり、B/C は 1.2 となり 1.0 を超過)

表 4-35 に洋上ウィンドファームへのローカル 5G モデル適用に関する経済性評価の内、風車 1 基 に対しアンテナ 1 基を設置した場合を示す。

ウィンドファームの規模が大きくなれば風車 1 基につき 1 台の構成もあり得るが、経済性評価の結果を踏まえると、現時点では風車 2 基につき 1 台の構成を基本と考えることが、コストミニマムを要求される発電事業者・SPC のニーズに適合した選択として現実的である。風車の配置状況によっては、風車 2 基につき 1 台以下の構成をとる場合でさらに経済性評価が高まる可能性はあるものの、構成の実現性については各ウィンドファーム別に検証が必要となる。

表 4-34 洋上ウィンドファームへのローカル 5G モデル適用に関する経済性評価結果

〇 評価条件

 離岸距離
 10 km
 売電単価
 25.9 円/kW

 緊急停止年間発生回数
 14 回/年
 発電期間
 20 年間

 設備利用率
 35 %
 風車単機出力
 12.5 MW

※ カッコ内はローカル5G置換え単独での評価、判断

	ケース		20年間での)必要費用約	総額 (億円)	20年間	での発電	停止時間第	豆縮効果額	頃 (億円)		
WF		アンテナ	ローカル5G	ローカル5G	ローカル5G			カル5G置	換え		経済性	投資可否
総出力 (MW)	風車数	設置風車数	リーガル3G 導入 コスト	導入後の 点検費用 の差分	導入の トータル コスト C	ドローン置換え	再点検 なし	再点検 あり	#	トータル 増収額 B	評価 B/C	判断
100	8	4	4.6	△ 0.3	4.3	36.5	1.4	4.0	5.4	41.9	9.7 (1.2)	可能 (可能)
200	16	8	6.6	△ 0.5	6.1	73.0	2.6	8.0	10.6	83.6	13.7 (1.6)	可能 (可能)
300	24	12	8.6	△ 0.8	7.8	109.6	4.0	12.2	16.2	125.8	16.1 (1.9)	可能 (可能)
400	32	16	10.7	△ 1.0	9.7	146.1	5.4	16.2	21.6	167.7	17.3 (2.0)	可能 (可能)
500	40	20	12.7	△ 1.3	11.4	182.6	6.8	20.2	27.0	209.6	18.4 (2.1)	可能 (可能)
600	48	24	14.7	△ 1.5	13.2	219.1	8.0	24.2	32.2	251.3	19.0 (2.2)	可能 (可能)
700	56	28	16.8	△ 1.8	15.0	255.6	9.4	28.4	37.8	293.4	19.6 (2.3)	可能 (可能)

表 4-35 洋上ウィンドファームへのローカル 5G モデル適用に関する経済性評価結果 (風車1基に対しアンテナ 1 基設置)

〇 評価条件

. 離岸距離 10 km 売電単価 25.9 円/kW 緊急停止年間発生回数 14 回/年 発電期間 20 年間 設備利用率 35 % 風車単機出力 12.5 MW

※ カッコ内はローカル5G置換え単独での評価、判断

	ケース		20年間での)必要費用約	総額 (億円)	20年間	での発電	停止時間	短縮効果額	頃(億円)		
WF		アンテナ	ローカル5G	ローカル5G	ローカル5G			カル5G置	換え		経済性	投資可否
総出力 (MW)	風車数	設置風車数	導入 コスト	導入後の 点検費用 の差分	導入の トータル コスト C	ドローン 置換え	再点検 なし	再点検 あり	<u></u>	トータル 増収額 B	評価 B/C	判断
100	8	8	6.6	△ 0.3	6.3	36.5	1.4	4.0	5.4	41.9	6.7 (0.8)	可能 (不可)
200	16	16	10.7	△ 0.5	10.2	73.0	2.6	8.0	10.6	83.6	8.2 (0.99)	可能 (不可)
300	24	24	14.7	△ 0.8	13.9	109.6	4.0	12.2	16.2	125.8	9.0 (1.1)	可能 (可能)
400	32	32	19.0	△ 1.0	18.0	146.1	5.4	16.2	21.6	167.7	9.3 (1.1)	可能 (可能)
500	40	40	23.0	△ 1.3	21.7	182.6	6.8	20.2	27.0	209.6	9.7 (1.2)	可能 (可能)
600	48	48	27.0	△ 1.5	25.5	219.1	8.0	24.2	32.2	251.3	9.9 (1.2)	可能 (可能)
700	56	56	31.0	△ 1.8	29.2	255.6	9.4	28.4	37.8	293.4	10.0 (1.2)	可能 (可能)

b. 市場性に関する検証結果および考察

市場性に関する検証として、ローカル 5G 設備所有者となり得る事業者(発電事業者、SPC)へのヒアリングを実施した。また海外での市場性に関する検証とし、欧州の洋上風力発電事業に詳しいコンサルタントへのヒアリングを実施した。

ヒアリング結果を表 4 36 に示す。全てのヒアリング対象者から、ローカル 5G 活用モデルに対する市場性を確認し、また自社で検討中、建設中あるいは運用中のウィンドファームへの適用に対し検討可能とのコメントを得た。

表 4-36 ステークホルダーへの市場性確認結果(概要)

属性	会社名等	市場性	市場性に対する感触、コメント
発電事業者	A 社(O&M 事務所長他 2 名)	あり	運用中のウィンドファームへ適用検討可能
SPC	B社(DX戦略室長他3名)	あり	検討するウィンドファームへ適用検討可能
	C 社(取締役他3名)	あり	検討するウィンドファームへ適用検討可能
	D社(取締役他1名)	あり	建設中のウィンドファームへ適用検討可能
	E 社(WF プロジェクトマネー	あり	検討するウィンドファームへ適用検討可能
	ジャー他 2 名)		
	F社(取締役他1名)	あり	検討するウィンドファームへ適用検討可能
	G社(プロジェクト推進部長他 6	あり	検討するウィンドファームへ適用検討可能
	名)		
	H 社(WF プロジェクトマネー	あり	検討するウィンドファームへ適用検討可能
	ジャー他 2 名)		
	I 社(プロジェクト部長他)	あり	建設中のウィンドファームへ適用検討可能
	J 社(WF プロジェクトマネー	あり	検討するウィンドファームへ適用検討可能
	ジャー他 2 名)		
	K社(WFプロジェクト主任クラス	あり	検討するウィンドファームへ適用検討可能
	3名)		

海外での市場性に関する検証とし、欧州の洋上風力発電事業の事情に詳しい経営コンサルティングファーム(マネージャークラス)へのヒアリング時の主なコメントを以下に示す。

・ ローカル 5G の普及状況について

欧州における 5G の導入は、2020 年以降商用利用が始まり、各種 PoC、インフラ整備に向けた取り組みも始まっている。

ローカル 5G については、一部の大手企業における先行事例が出ている。(メルセデスベンツ、ルフトハンザ等)

- ・ ローカル 5G+ドローンによる洋上風力点検への適用状況について 5G を洋上風力点検へ適用することは検討されている模様。 ローカル 5G を活用したドローンによる風車の点検事例例は見当たらない。
- ・ 風力点検以外への展開の可能性について ローカル 5G を活用したドローン輸送については可能性があると考えられている。また、ローカル 5G を活用した映像(テレビ等)配信のニーズもあると想定されている。
- ・その他

全体的に具体的な事例・情報は少なく、まだ検討初期段階と思われる。

ヒアリング対象者のコメントを整理・分析し、発電事業者等の事業計画から市場性を評価した結果、 国内においては各洋上風力発電へのローカル 5G システムの適用に期待が持てるため市場性は高く、 発電事業者・SPC に対しローカル 5G システム導入費用のコスト削減情報や、新たな商品の発売情報 などを連携するとともに、これらの情報を活用した提案活動の推進等により、発電所立地地点の公募申請書への記載などの具体的な導入検討につなげる。

一方で海外(欧州)では市場性については、現状では一部の大手企業における先行事例が出始めた 検討初期の段階である。洋上風力発電に対しては 5G を洋上風力点検へ適用することは検討されてい るが、ローカル 5G の適用検討はこれかであり、現状で市場性が高いとは言えない。しかしながら、今後 も大手企業での採用が進み認知度が上がるなどし、その有効性等が広く認められれば、日本と同様に 洋上風力発電事業へ検討が進むなど、今後期待できる市場に成長する可能性があると推察する。

なお、ローカル 5G 活用モデルで想定される具体的なターゲットが、発電事業者や SPC となる理由は、電力業界のビジネスモデルに基づいて検討を進めた。4.1.1(3)に詳細を記載している。

(2) 運用スキーム・ビジネスモデルの検討

1) 検証項目

ローカル 5G を活用したソリューションを洋上風力発電事業者へ提供する場合のビジネスモデルイメージを図 4-72 に示す。

ローカル 5G 導入による効果を赤字で示している。SPC がローカル 5G 導入に対する費用対効果を高く得られる場合、SPC、O&M 事業者および通信機器販売事業者の全ての事業者がローカル 5G 活用モデル導入の効用を得られる。

本ビジネスモデルを実現するため、洋上風力発電所に設置するべき最適なネットワーク・システム構成を洋上風力発電所の規模等に応じてそれぞれ検討した。また、本ビジネスモデルでは洋上風力発電所所有者(SPC)がローカル 5G の所有者となる。ローカル 5G 所有者が運用していくためには無線局の免許申請が必要となる。また、ローカル 5G 基地局を扱う無線従事者については、第三級陸上特殊無線技士の資格が必要となる。

免許および資格者配置の必要性について、本実証の中でコンソーシアムメンバーである関西電力㈱など SPC となり得る潜在的な事業者等へのヒアリングを実施し、実装に向けた課題等を抽出した。本実証コンソーシアムに参画している(㈱Dshift は、関西電力グループ会社ではあるものの、親会社の競合事業者と言える事業者・団体に対しても広くサービス展開することを親会社からコミットされているため、本実証事業を実施する機関と深く関連する特定の地域や事業者のみならず、潜在的に発電所所有者となり得る全ての事業者に対して意見聴取することが可能である。

また、洋上風力発電所立地地域の個別事情、実証時と実装時の差異、その他不確実性要素についても関連事業者・団体から意見聴取等調査を実施し、ビジネスモデルの精緻化に取り組んだ。

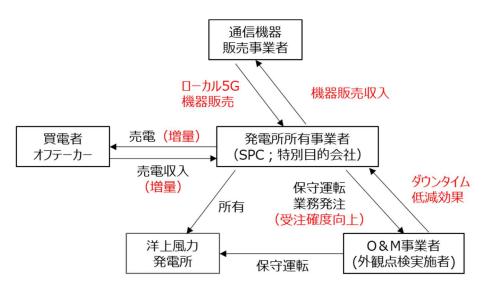


図 4-72 ローカル 5G 活用モデル導入に関するビジネスモデルイメージ

2) 検証方法

ビジネスモデル関連事業者による各立場に基づく事業性評価を実施した。

外観点検実施事業者については、本ビジネスモデルに則った実施体制で点検を行う場合、事業参入に対する障壁として、風車メーカーからの点検事業者認証のハードルが高い点が考えられる。外観点検 実施事業者として想定されるプレーヤーは、ドローンを用いてインフラ設備の点検を実施できる事業者などが考えられるため、地域における関連事業者や団体へヒアリングを実施し、本ビジネスモデル実現にあたり費用対効果以外の観点も含めた課題の抽出・評価を行った。

また、発電所所有者となり得る潜在的な事業者(SPC 参画事業者や出資者。関西電力㈱が該当。)に対してもヒアリングを実施し、その結果を踏まえ、実装に向けた課題抽出・評価を実施した。

3) 検証結果および考察

洋上風力発電所 SPC、通信機器メーカー、O&M 事業者の事業性評価として、本ローカル 5G 活用 モデルの概要と、費用対効果の試算結果を示した上で、実現性に関する評価をヒアリングし、いずれか に事業性が認められなかった場合、その原因を把握し解決策を検討した。

発電所所有者となり得る潜在的な事業者(SPC 参画事業者や出資者。関西電力㈱が該当。)に対するヒアリング結果、および、地域関連事業者や団体等へのヒアリング結果を整理し提示した。また、それらの結果を踏まえたローカル 5G 活用モデル実装に向けた課題評価結果を一覧表などで取りまとめた。なお、ネットワーク・システム構成については、4.3.1(2)3)a に詳細を記載している。

図 4-73 に点検サービススキーム案を示す。

風車メーカーによる長期の点検・運転サービス(LTSA)実施期間中においては、ブレードの点検は風車メーカーの所掌範囲になるため、LTSA 中と LTSA 終了後に自社でメンテナンスするケースに対し、点検サービススキーム案を分けて例示する。

ローカル 5G 設備が SPC の所有であれば、SPC から風車メーカー等に無償貸与となるが、風車メー

カーあるいはドローン O&M 事業者が所有する場合は、それぞれがローカル 5G 設備のリース費等を 発注者に請求し、イニシャルコスト・ランニングコストを回収することになる。

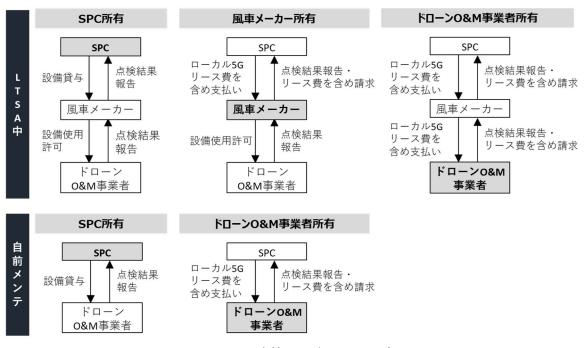


図 4-73 点検サービススキーム案

- ※1 LTSA(Long-Term Service Agreement)とは長期保守契約のことで、一般に風車メーカーによる稼働率保証(※2)を伴う長期メンテナンス契約 稼働率保証を風車メーカーが負う分、契約費用も割高である
- ※2 稼働率保証とは、事前に取り決めた保証基準稼働率(実稼働時間÷(24h×365 日 免責時間(自然災害など))を下回った場合、風車メーカーがその率に応じ SPC 等に保証を支払う(あるいはその逆)義務を負う契約のこと
- ※3 LTSA を終了させた場合、自前メンテナンスに移行(当然、LTSA と異なり風車メーカーによる稼働率保証は付かない)

本システムを構築、運用するための法規制の考慮を以下に記載する。

- ・ 工事業免許について
 - ローカル 5G 設備工事を請け負う場合は、電気通信工事業免許を取得している必要があり、請 負金額によって、適切な技術者を配置する必要がある。
- ・ 無線局免許および無線従事者について 原則として免許人は設備所有者とするが、以下 2 つのパターンが想定される。SPC の意向とし てはパターン 2 が望まれる。
 - パターン1 SCP 所有

風力発電設備はSPC 所有物であるため、ローカル 5G 設備もSCP 所有とする場合。SCP にて無線局免許取得(自己土地利用)および無線従事者(必要資格所有者)が必要となる。

無線局を維持管理する委託先から無線従事者を登録するケースもある。

▶ パターン2 ○ 0&M 事業者所有

実質使用するのは O&M 事業者が主となるため、O&M 事業者所有とする場合、O&M 事業者が無線局免許取得(場合により他者土地利用)および無線従事者(必要資格所有者)が必要となる。また、O&M 受託範囲で設備を利用する条件とする必要がある。さらに、O&M 事業者が複数 SPC に対してローカル 5G 設備を提供するモデルが考えられる。

- ・ 電気通信事業者届け出について
 - ▶ パターン 1:SPC は自らの通信の用には供するため、電気通信事業者届け出等は不要と考えられる。
 - ▶ パターン 2:O&M 事業者は他社の通信の用に供すると見なせる場合は、電気通信事業者 届け出等が必要となる場合がある。

ヒアリング結果を表 4-37 に示す。

スキームについては、O&M 事業者は全て SPC 所有を望んだ。これは導入コストが高く、投資した費用を回収可能だとしても初期費用の負担が大きいためである。発電事業者・SPC は O&M 事業者と SPC の所有とでわかれた。これが、各発電事業者・SPC の検討する事業・地点での検討方針等の違いによるもので、全てのインフラ設備を発電事業者・SPC で準備するとのスタンスと、付帯設備は O&M 事業者等での準備を基本とするとのスタンスの違いである。

課題については、O&M 事業者としての実務的な視点として、通信の知識がなくても使用可能であることや、トラブル発生時の対応方法を明示することなどが挙がった。発電事業者・SPC からは、導入コストが高いこと、点検以外での利活用が必要なこと、トラブル時の代替え手段が必要なことなどが挙がった。いずれの課題に対しても、例えば50万kWのウィンドファームで効果算定のプロセスや、期待できる投資対効果として19.1倍であること、またO&M以外にウィンドファーム建設中の通信手段として先行利用が可能なことなど、導入コストに見合う価値のある投資であることをダウンタイム短縮に伴う増電量を用いるなど具体的な数値にて丁寧に説明するなど、引き続きコミュニケーションを実施し理解を深め課題の解決を図る。

表 4-37 運用スキーム・ビジネスモデル実装に向けた課題評価結果(概要)

属性	表 4-37 連用スキーム・ピンス 会社名等	選択スキーム		課題等
		LTSA 中	自前メンテ	
O&M	L社	SPC	SPC	通信知識不要で使用可
事業者				能として欲しい
	M社	SPC	SPC	通信知識不要で使用可
				能として欲しい
	N社	SPC	SPC	トラブル発生時対応方法
				を示して欲しい
発電事業者	A 社(O&M 事務所長他 2	O&M 事業	O&M 事業	導入コストが高い
SPC	名)	者	者	
	B社(DX戦略室長他3名)	O&M 事業	O&M 事業	点検以外の利活用が必
		者	者	要
	C 社(取締役他3名)	O&M 事業	O&M 事業	導入コストが高い
		者	者	
	D社(取締役他1名)	O&M 事業	O&M 事業	トラブル時の代替え手段
		者	者	が必要
	E社(WF プロジェクトマ	SPC	SPC	導入コストが高い
	ネージャー他 2 名)			
	F社(取締役他1名)	O&M 事業	O&M 事業	導入コストが高い
		者	者	
	G 社(プロジェクト推進部長	O&M 事業	O&M 事業	トラブル時の代替え手段
	他 6 名)	者	者	が必要
	H社(WF プロジェクトマ	O&M 事業	O&M 事業	導入コストが高い
	ネージャー他 2 名)	者	者	
	I 社(プロジェクト部長他)	O&M 事業	O&M 事業	点検以外の利活用が必
		者	者	要
	J 社(WF プロジェクトマネー	SPC	SPC	導入コストが高い
	ジャー他 2 名)			
	K 社(WF プロジェクト主任	SPC	SPC	点検以外の利活用が必
	クラス3名)			要

(3) ローカル 5G 活用モデルの構築

1) ローカル 5G 活用モデルの全体像

a. ターゲット

今回実証するローカル 5G のモデルの活用については 4.1.1(3)で述べた通り、ドローンによる点検の実装が前提となるが、まずは SPC にて検討され、SPC 内部で合意が得られれば、風力発電事業への出資者、融資者および発電開始後の風車メンテナンスを担う風車メーカーへの説明・合意を経て決定される。

なお前述の通り、洋上風力発電事業の場合、風力発電事業への出資者、融資者および発電開始後の 風車メンテナンスを担う風車メーカーは、同時に複数の洋上発電事業を検討・実施している。このため、 当システムが優れたシステムであれば、自ずと自身の別プロジェクトに水平展開すべく、当該プロジェクトの SPC への提案などを行うこととなる。

また、洋上風力発電サイトまで敷設する光ファイバーのローカル 5G への利用に関し、SPC と合意でき、ローカル 5G 端末が独立系 O&M 事業者によって準備される場合、独立系 O&M 事業者も実装や水平展開の主体者となり得ると考えられる。

ターゲットとなる洋上風力発電施設としては、以下の3つのパターンが想定される。

- ① 既設の洋上風力発電施設
 - (ア)秋田市、能代市(2022年12月、2023年1月商用運転開始)
- ② 今後商用運転開始予定の洋上風力発電施設
 - (ア)長崎県五島市沖(2023年商用運転開始予定)
 - (イ)福島県響灘沖(2025年商用運転開始予定
- ③ 今後入札予定の洋上風力発電施設
 - (ア)秋田県男鹿市・潟上市・秋田市沖(2023年度入札予定)
 - (イ) 新潟県村上市・胎内市沖(2023年度入札予定)
 - (ウ)長崎県西海市江島沖(2023年度入札予定)
 - (エ)その他未発表案件

ユーザーとなる関連事業者は以下を想定している。

- SPC とその出資者
- 融資者
- ・ O&M 事業者(風車メーカー、独立系)

b. 対象となるシステム

本ローカル 5G 活用モデルのネットワーク・システム構成は、将来モデル 1、将来モデル 2 の区別なく 同様に考えることができる。(詳細は 4.3.1(2)3)a を参照)

将来実装を想定したローカル 5G システム構成イメージ図を図 4-74 に、エリア設計のイメージを図 4-75 に示す。

【機能要件】

- ・ 基地局設置数 :全風力発電施設の 1/2 の施設
- ・ 端末登録数 :100 台(ドローンおよびシステム保守観点)
- ・ 同時通信端末数 :1 台(一時にフライトするドローンは1機)
- ・ 高精細画像データ伝送速度(Iperf 計測結果):50Mbps 以上
- ・ 高精細画像データ伝送速度(画像取得速度):14 枚/分
- ・ ドローン手動操作情報伝送時間の遅延:50ms 以下
- · 飛行監視用画像伝送時間の遅延:50ms 以下

【非機能要件】

- ・ ローカル 5G システムの可用状態、死活状態を適切に遠隔監視できること
- ・ 基地局類はトラジションピース(以降 TP)内の温湿度環境で適切に稼働すること
- ・ アンテナ類は TP の屋外プラットフォーム(以降屋外 PF)環境への耐環境性を備えていること

【システム構成 / 設置場所】

· 5G コア :クラウドコア / クラウド上

· U-Plane :UPF(Act/Sby)/ 地上局

· EMS :統合監視装置 / 地上局

FW :ファイアウォール / 地上局

· NW 機器 :L3SW / 地上局

・ 基地局 :一体型基地局/TP ケーブルターミネーションプラットフォーム

(以降 CTPE)内

・ アンテナ :5G 対応指向性アンテナ、GNSS アンテナ / TP 屋外 PF

UE :ローカル 5G 端末 / ドローン搭載

ソリューションの提供・利用方法

- ・ 風力発電事業・出資者(SPC)が本ローカル 5G システムを所持する場合、自社設備として設置 し、O&M 事業者に貸与し活用する。
- ・ O&M 事業者が本ローカル 5G システムを所持する場合、風力発電事業・出資者(SPC)、融資者に許可を得た上、自社費用で設置し、了解を得て活用する。

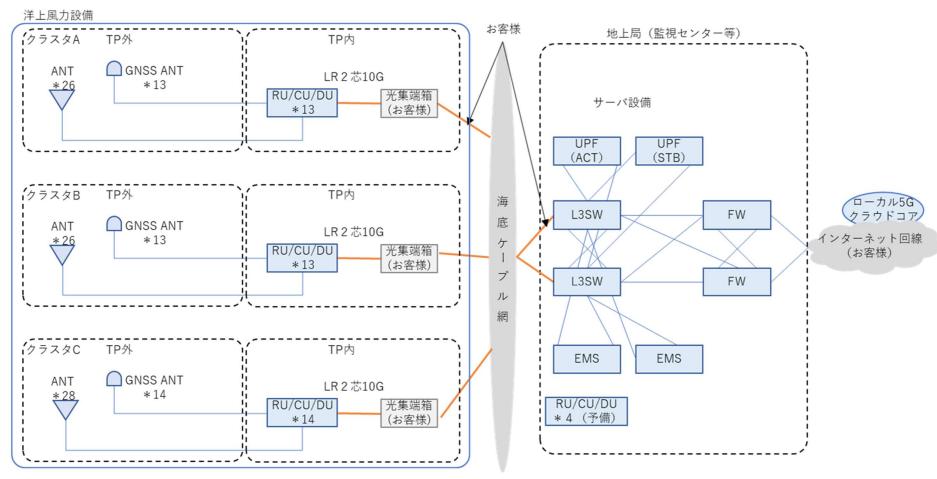


図 4-74 システム構成案

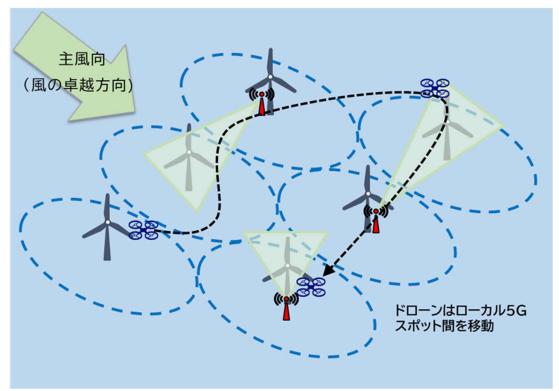


図 4-75 エリア設計のイメージ

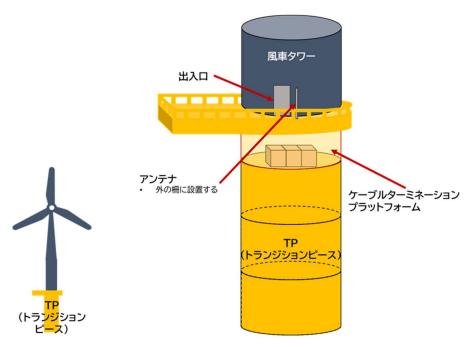


図 4-76 トランジションピース(TP)図

図 4-77 にローカル 5G 実装時の点検フローを示す。

点検要請を受け集合したドローンオペレーター他の点検要員にて、打ち合わせ、ドローン使用前点検、フライトプラン作成などの点検飛行の準備作業を実施し、気象状況に応じ飛行を開始する。

飛行中はローカル 5G の特性を生かし、飛行状態監視・カメラ撮影画像のリアルタイムによる画像品質確認を実施し、撮り漏れ、ピンぼけ、アングルずれあるいは逆光などとなる画像を抽出し、撮り直し必 270 要箇所の手動飛行操作等を実施する。必要となる点検用画像が全て取得できたことが確認できればドローンは帰還する。

飛行終了後はドローンの使用後点検・清掃等のメンテナンスを実施し、次の飛行に備える。

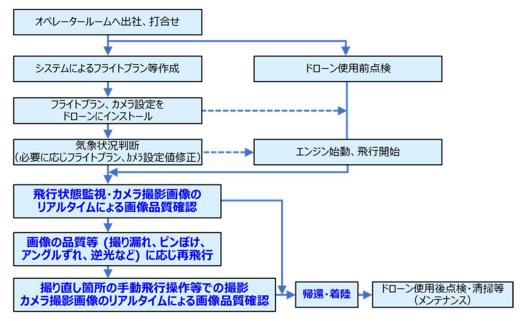


図 4-77 ローカル 5G 実装時の点検フロー

c. ビジネスモデル

ローカル 5G を活用したソリューションを洋上風力発電事業者へ提供する場合のビジネスモデルイメージを図 4-78 に示す。

ローカル 5G 導入による効果を赤字で示している。SPC がローカル 5G 導入に対する費用対効果を高く得られる場合、SPC、O&M 事業者等の全ての事業者がローカル 5G 活用モデル導入の効用を得られる。

本ビジネスモデルを実現するため、洋上風力発電所に設置するべき最適なネットワーク・システム構成を洋上風力発電所の規模等に応じてそれぞれ検討する。また、本ビジネスモデルでは洋上風力発電所所有者(SPC)がローカル 5G の所有者となる。ローカル 5G 所有者が運用していくためには無線局の免許申請が必要となる。また、ローカル 5G 基地局を扱う無線従事者については、第三級陸上特殊無線技士の資格が必要となる。

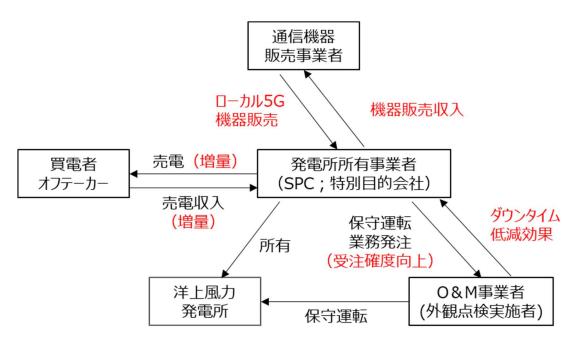


図 4-78 ローカル 5G 活用モデル導入に関するビジネスモデルイメージ

図 4-79 に洋上風力発電事業でのオペレーションアンドメンテナンス(O&M)での一般的な体制を示す。

運転開始後のO&Mは、主に事業出資社で構成されるSPCが事業主体となる。

O&M の分担・体制は一般的に、「風車本体」、「風車本体以外」、「傭船」の3つで構成される。当ローカル5G活用モデルはドローン点検会社が活用することになり、ドローン点検会社は実際の発注時には風車メーカーから、当ローカル5G活用モデルを活用したシステムの構築費用、運用費用等を含めた費用にて請け負い、実施することとなる。

図 4-80 に風車メーカーから受注したドローン点検会社における業務実施体制を示す。

ドローンでの点検実施体制は、システムメーカー、通信機器メーカー、ドローンオペレーター会社(地元)、画像評価診断会社、傭船会社で構成される。

ドローン点検会社は風車メーカーから受注すれば、点検システムや基地局の整備を、システムメーカー、通信機器メーカーに発注し、ローカル 5G 活用モデルを使用し当該海域で使用可能となる環境を構築する。

ドローン点検会社は、ドローンの日々の飛行をドローンオペレーター会社(地元)に発注し、撮影画像評価は直営かあるいは、画像評価診断会社に発注する。

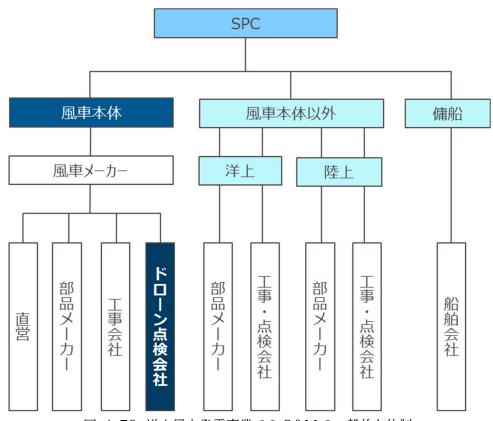


図 4-79 洋上風力発電事業での O&M の一般的な体制

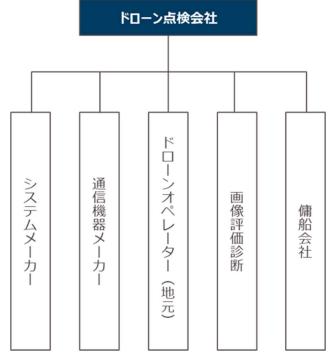


図 4-80 ドローン点検会社における業務実施体制

2) 体制·役割分担

本コンソーシアムにおける想定実装体制を図 4-81 に示す。実際の洋上風力発電施設への実装を行う際は、ローカル 5G 設備は SPC である関西電力(株)が所持する前提でとなる。ローカル 5G 導入時の構築、運用後の保守は(株)秋田ケーブルテレビと NEC ネッツエスアイ(株)が連携して実施する。初期導入費用については SPC から直接(株)秋田ケーブルテレビや NEC ネッツエスアイ(株)に支払われるが、その後の運用に係る費用は、O&M 事業者である(株)Dshift を通して、(株)秋田ケーブルテレビや NEC ネッツエスアイ(株)に支払われる。これは一般的に SPC が契約を一本化するためである。本実証代表機関である(株)秋田ケーブルテレビはローカル 5G 設備の一次保守として、二次保守となる NEC ネッツエスアイ(株)と連携していく。

なお一次保守は、ユーザーからの問い合わせへの対応、障害発生の確認から機器等の目視確認、障害発生原因の切り分け等を担う。二次保守は、交換機器の手配、一次保守業者からの問い合わせへの対応としてのバグ等の検証、ファームウェアのバージョンアップ等に係る検証等、メーカー問い合わせ等を担う。

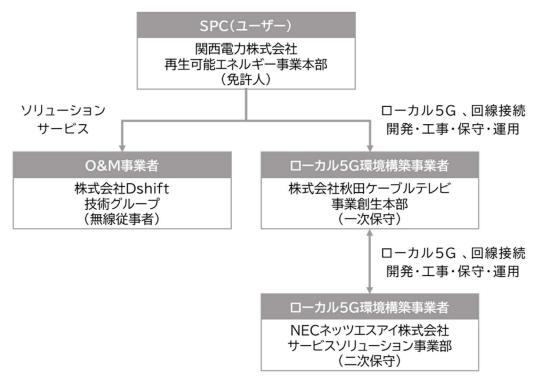


図 4-81 実装時の役割・体制

3) 導入効果

経済性検証の結果から、本ローカル 5G 活用モデルの導入によって、将来モデル 1 および将来モデル 2 のどちらのウィンドファームの規模においても、ローカル 5G 活用したドローンによる点検の効率化によって、風力発電設備のダウンタイム短縮・発電量増加に伴う増収を見込むことができる。また、今後風車が大型化していけば、陸域からウィンドファームまでの距離はより長くなるため、本ローカル 5G による効果はより高くなっていくことが期待できる。

表 4-38 洋上ウィンドファームへのローカル 5G モデル適用に関する経済性評価結果

〇 評価条件

偏利用学 35 % ペースデー 機能 12.5 MW ※ かりつ内はローカル5G置換え単独での評価、判断

	ケース		20年間での	D必要費用約	総額 (億円)	20年間	での発電	停止時間第	頭縮効果額	頃 (億円)		
WF		アンテナ	ローカル5G	ローカル5G	ローカル5G			カル5G置	負え		経済性	投資可否
総出力 (MW)	風車数	設置風車数	導入 コスト	導入後の 点検費用 の差分	導入の トータル コスト C	ドローン 置換え	再点検 なし	再点検	<u></u>	トータル 増収額 B	評価 B/C	判断
100	8	4	4.6	△ 0.3	4.3	36.5	1.4	4.0	5.4	41.9	9.7 (1.2)	可能 (可能)
200	16	8	6.6	△ 0.5	6.1	73.0	2.6	8.0	10.6	83.6	13.7 (1.6)	可能 (可能)
300	24	12	8.6	△ 0.8	7.8	109.6	4.0	12.2	16.2	125.8	16.1 (1.9)	可能 (可能)
400	32	16	10.7	△ 1.0	9.7	146.1	5.4	16.2	21.6	167.7	17.3 (2.0)	可能 (可能)
500	40	20	12.7	△ 1.3	11.4	182.6	6.8	20.2	27.0	209.6	18.4 (2.1)	可能 (可能)
600	48	24	14.7	△ 1.5	13.2	219.1	8.0	24.2	32.2	251.3	19.0 (2.2)	可能 (可能)
700	56	28	16.8	△ 1.8	15.0	255.6	9.4	28.4	37.8	293.4	19.6 (2.3)	可能 (可能)

その他、本ローカル 5G 活用モデルが、秋田県下のウィンドファームおいて実装されることで、秋田県への雇用創出、産業創出への波及効果も期待できる。

秋田県への雇用創出、産業創出への波及効果は、次に示す、「R4 年 3 月 第 2 期 秋田県新エネルギー産業戦略(改訂版)」にて公表されている通りである。

経済波及効果は、「建設工事」、「運用・保守」および「撤去」の各段階に分けて試算した。

直接効果の算出では、国の調達価格等算定委員会による想定値を用いた他、ヒアリング調査結果などから県内受注率を推計し、「建設工事」時で12%、「運転・保守」時で17%、「撤去」時で建設工事時と同様の12%とした。

現戦略ではもう 1 つの目標として、関連産業による県内への経済効果を設定しているが、今回のソリューションにより、「運転・保守」時 17%内で想定されていなかった分野にも秋田県内受注額の増額が見込まれる。これにより経済波及効果と雇用創出効果の増額が期待される。

例えばドローン技術の向上や普及に資する部分、ドローンオペレーター含めた仕事量増加等により雇用の確保が期待されるとともに、ローカル 5G の側面から見た場合、情報通信分野としてネットワーク関連の業務追加による保守仕事量増加等で雇用の安定や増加が見込まれると想定する。また、これらを受注した県内企業の県外進出展開などの発展も期待される。

表 4-39 港湾内洋上風力に係る経済波及効果試算

港湾内(秋田港及び能代港)	建設工事	運転·保守	撤去	ät	
経済効果		20年累計	年当たり		
総合効果	12,418 百万円	11,978 百万円	599百万円	2,593 百万円	26,989百万円
直接効果	8,516 百万円	8,671 百万円	434百万円	1,780 百万円	18,966百万円
1次波及効果	2,396 百万円	1,646 百万円	82百万円	426 百万円	4,469百万円
2次波及効果	1,506 百万円	1,661 百万円	83百万円	387 百万円	3,555百万円

港湾内(秋田港及び能代港)	建設工事	事 運転·保守		撤去	āt	
雇用創出効果		20年累計	年当たり			
総合効果	1,153 人	1,210 人	61 人	282 人	2,645 人	
直接効果	811 人	924 人	46 人	219 人	1,954 人	
1次波及効果	214 人	144 人	7人	33 人	391 人	
2次波及効果	128 人	142 人	7人	30 人	300 人	

表 4-40 一般海域洋上風力に係る経済波及効果試算

一般海域	建設工事	運転・保守		撤去	āt
経済効果		20年累計	年当たり		
総合効果	161,117百万円	161,078百万円	8,054百万円	32,914百万円	355,109百万円
直接効果	110,486百万円	116,599百万円	5,830百万円	22,589百万円	249,674百万円
1次波及効果	31,088百万円	22,137百万円	1,107百万円	5,412百万円	58,636百万円
2次波及効果	19,543百万円	22,342百万円	1,117百万円	4,912百万円	46,798百万円

一般海域	建設工事	運転·保守		撤去	ät
雇用創出効果		20年累計	年当たり		
総合効果	14,974 人	16,331 人	817 人	3,647 人	34,952 人
直接効果	10,513 人	12,419 人	621 人	2,786 人	25,718 人
1次波及効果	2,772 人	1,972 人	99 人	450 人	5,194 人
2次波及効果	1,689 人	1,940 人	97 人	411 人	4,040 人

出典:R4年2月第2期秋田県新エネルギー産業戦略(改訂版)

(4) 実装性を高める手法の検討および実行

1) 検証項目

特定規模・地域の洋上ウィンドファームに対するローカル 5G 活用モデル適用性を検証するだけではなく、今後開発が予定されている他地域での導入可能性を評価するため、将来モデル 1 と将来モデル 2 の最低 2 パターンのウィンドファームを想定し、それぞれのケースにおける導入時の費用対効果でローカル 5G 活用モデル適用可否を検証した。

ローカル 5G の電波伝搬特性については、導入が期待される対象設備が全て洋上にあり、通信品質 (伝送速度・遅延時間等)に対して陸域と異なることが予想される。よって、本実証での実測値を踏まえ 洋上での運用要件を定め直し、ローカル 5G 活用モデルの普及展開の加速に向け、同様の課題を抱え

る他のユーザー企業や団体、他地域や分野等へ普及させるための情報展開の在り方について検討し、 実行した。将来、一般海域でのウィンドファームの導入が主流となった場合、風車の大型化が予想される。 本実証では、将来の一般海域での実装を想定し、300mの高度におけるローカル 5G の実用性検証も 併せて実施した。

総務省へは「5G ソリューション提供センター」との連携など、本実証の結果や知見を広く発信できる機会をもらえるよう働きかけ、ドローンへローカル 5G を活用することを慫慂されることを目指した。

また、発電事業の規制を所掌する経済産業省商務情報政策局産業保安グループ電力安全課へは、 保安規程に関するガイドライン等へ新たな点検手法の 1 つとして掲載されるように連携し、将来の洋上 風力発電事業者へのローカル 5G 活用モデル導入の関心を高める取り組みを推進した。

風力発電事業者への別の展開方策としては、業界団体である一般社団法人日本風力発電協会 (JWPA)が自主規制として定めているガイドライン等への反映や、学術的組織となる一般社団法人日本風力エネルギー学会(JWEA)の学会誌への掲載なども考えられ、多方面から情報連携し、本実証によるローカル 5G 活用モデルの実装性を高め普及展開の加速を目指した。

さらには、洋上風力発電所立地地域の自治体に対しても、ローカル 5G 活用モデルの有効性について情報連携し、地域方策の立案などでローカル 5G 活用モデルの展開加速に資する対応をしてもらえるよう働きかけた。本実証では、フィールドである秋田県に対して、今後ソリューションを実装展開していくにあたり、産業振興への効果、地域雇用への効果がどの程度期待できるかを検証した。

表 4-41 実装性を高める手法の検討および実行における検証項目

検証項目	検証内容	
費用対効果	ウィンドファームの規模に合わせた導入時の費用対効果を評価し、ローカ	
	ル 5G 活用モデル適用可否を検証した。	
高度 300m 飛行	将来の一般海域での実装を想定し、300m の高度におけるローカル 5G	
	の実用性を検証した。	
関係各所への働きかけ	ローカル 5G 活用モデルの普及展開の加速に向け、同様の課題を抱える	
	他のユーザー企業や団体、他地域や分野等へ普及させるための情報展	
	開の在り方について検討し、実行した。	
	・ 総務省「5G ソリューション提供センター」	
	・ 経済産業省商務情報政策局産業保安グループ電力安全課	
	· 一般社団法人日本風力発電協会(JWPA)	
	・ 一般社団法人日本風力エネルギー学会(JWEA)	
	・ 自治体(秋田県)	

2) 検証方法

複数の規模のウィンドファームを想定したローカル 5G 活用モデル適用可否検証にあたっては、最適なローカル 5G システム構成および導入後のダウンタイム短縮効果を試算し費用対効果により評価した。 将来高度である 300m を想定した実証については、航空法上の制限である 150m を越えるため、国土交通省へ飛行に関する申請を行い、その上で実飛行における電波の状態検証を実施評価した。

関係各所への働きかけとして、総務省には、本実証の幹事会社である㈱秋田ケーブルテレビや NEC ネッツアイ㈱が主体となり実施し、経済産業省や風力発電の業界団体、学術的組織に対しては、関西電力㈱または㈱Dshift が主に連携した。自治体との連携については、秋田県が本実証実施メンバーであることから、産業振興への効果、地域雇用のへの効果、業界動向等を中心に意見聴取を行った。

表 4-42 関係各所への働きかけの内容整理

機関名	担当	働きかけ内容、論点等
総務省	(株)秋田ケーブルテレビ	法令等の改正(改正の可否、追加検討事項、
	NEC ネッツエスアイ(株)	範囲·内容、時期等)
「5G ソリューション提	(株)秋田ケーブルテレビ	会合、研究会等での事例紹介の調整等
供センター」	NEC ネッツエスアイ(株)	
経済産業省	関西電力(株)	関係官庁との連携依頼(総務省および国土交
	(株)Dshift	通省等)
		法令等の改正の有無を確認(改正等が必要な
		場合、必要な説明資料等の調整等)
風力発電の業界団体	関西電力㈱	業界標準書(ガイドライン等)への反映等の調
	㈱Dshift	整等
		業界団体の会合、研究会等での事例紹介の
		調整等
学術的組織	関西電力㈱	学術的意義のまとめ(論文、レポートでの発表
	㈱Dshift	に向けた科学的・技術的な意義他の協議等)
自治体	秋田県	地域産業活性化·事業創出、雇用創出(県内
		企業が中心となったメンテナンス事業の創出
		に向け、県内企業・人材の情報発信、支援、育
		成プランの協議等)

3) 検証結果および考察

費用対効果については、4.3.2(1)にて検証・考察を行った。

将来高度である 300m を想定した実証については、ドローンから高精細画像データを転送するための伝送速度として設定した機能要件である最大 50Mbps を確保するかという観点で、検証ケース Case4のアンテナ配置のもと伝送速度測定を実施した。計測結果としては、最大 50.6Mbps を得られたため、Case4 すなわち真上向きに自風車に対して電波を吹くアンテナ設置方法でメンテナンス方法を変更することもなく問題なく実装可能であることを確認できた。

産業振興への効果、地域雇用のへの効果については、ヒアリング結果を踏まえた上での推計を実施した。各省庁、自治体、その他業界団体等への働きかけに関しては、本実証の結果・知見およびローカル5G活用モデル導入効果に関する紹介資料(パワーポイントによる図表・テキストを想定)にて実施した。以下実施したアプローチについて記載する。

・ 秋田県内をはじめ各地域におけるステークホルダーへのアプローチ

秋田県に協力を仰ぎながら、秋田県内におけるデモンストレーション等を通じて、各ステークホルダーにアプローチする他、地域産業活性化・事業創出、雇用創出に向け、県内企業が中心となったメンテナンス事業の創生、企業・人材の情報発信、支援、育成プランの協議等を行った。

実施日時	実施内容
2022年12月20日	O&M 事業者見学会として、秋田県内の Q&M 事業者になり得る企業に対して本取り組みを紹介・説明した。

・ 初期提案に向けたアクションの実行

先述の通り、ローカル 5G 活用モデルの実装提案に向けて、具体的な事業企画、導入戦略を策定し、初期提案に向けたアクションを実行した。

実施日時	実施内容
2023年1月	国内 SPC(秋田洋上風力発電(AOW)を含む)に対して、 本ソリューションの説明および重要要望等をヒアリングし、 実装に向けた初期提案を実施した。

・ 洋上風力発電所所有者(SPC)等へのアプローチ

ローカル 5G 活用モデルの実装に向けて、今後の公募案件に入札を行うことが想定される 潜在的な洋上風力発電所所有者(SPC)等に対して、情報提供や提案を行った。

実施日時	実施内容
2023年1月	国内 SPC(秋田洋上風力発電(AOW)を含む)に対して、 本ソリューションの説明および重要要望等をヒアリングし、 実装に向けた初期提案を実施した。

関連事業者のローカル 5G 活用モデル導入への関心を高めるため、展示会等への出展、実績を踏まえた事例紹介等を行った。

実施日時	実施内容
2022年11月9日~10日	GLOBAL OFFSHORE WIND SUMMIT - JAPAN 2022 にてパネル展示を実施し、風力発電のステークホルダーに対して本事業を紹介した。
2023年3月15日~17日	WIND EXPO 風力発電展へ出展し、風力発電のステークホルダーに対して本事業を紹介した。

・ 業界団体・学術組織へのアプローチ

JWPA や JWEA に対して、洋上風力発電事業者へのローカル 5G 活用モデル導入の関心を高めるために、研究会等での事例紹介、論文、レポートの発表に向けた情報提供を行った。

実施日時	実施内容
2022年12月1日~2日	日本風力エネルギー学会誌(令和4年11月 第46巻 第 3号(通巻 第 143号))へ寄稿・掲載し、風力エネルギー のステークホルダーに対して本事業を紹介した。

保安規程に関するガイドライン等へ新たな点検手法の 1 つとして掲載されるよう、働きかけを行った。

実施日時	実施内容
2023年1月	JWPA 関係者とのヒアリングを実施し、ローカル 5G 適用 の有効性について理解を得た上で、JWPA のガイドライン において、問題、調整、検討等が必要な点は見受けられな いことが確認できた。(表 4-43 参照)

関係省庁へのアプローチ

法令等の改正に向けて、総務省をはじめとした関係省庁へ積極的な情報提供を行った。また、洋上風力発電事業者へのローカル 5G 活用モデル導入への関心を高めるために、保安規程に関するガイドライン等へ新たな点検手法の 1 つとして掲載されるよう、経済産業省に働きかけを行った。

実施日時	実施内容
2022年12月19日	東北総合通信局とのフィールド実証見学および電波の利用など意見交換を実施し、本施策での電波利用等についてディスカッションした。
2023年1月26日	資源エネルギー庁 風力政策室、経済産業省 保安課、電力安全課へのヒアリングを実施した。ローカル 5G の有効性について理解が得られた他、浮体式など離岸距離が延びた場合により効果を発揮するとの理解が得られ、このことから EEZまで洋上風力発電の範囲を広げた場合に有効であるとの観点から、総務省と法令面での確認などのコミュニケーションを実施したい旨のコメントを得た。(表4-43 参照)

表 4-43 ステークホルダーへの実現性確認結果(概要)

属性	機関·会社名等	感触	主なコメント
監督官庁	経済産業省 保安課、電力安全課	有効性を理解	洋上風力発電の導入に際し有効。
	課長補佐他 4 名		
	経済産業省 資源エネルギー庁	有効性を理解	スマート保安の観点からも当技術が
	風力政策室 課長補佐他1名		実用化されることが重要。
			EEZ まで洋上風力発電の範囲を広
			げた場合を見据え、総務省と法令面
			での確認などのコミュニケーションを
			実施したい
風力業界	JWPA 関係者	有効性を理解	ローカル 5G 適用に対し JWPA のガ
			イドラインにおいて、問題や調整が必
			要な点は見受けられない。

4.3.3 ローカル 5G 活用モデルの実装に係る課題の抽出および解決策の検討

(1) ローカル 5G 活用モデルの実装に係る課題

本実証のローカル 5G モデル実証結果について、技術、制度、経済、社会それぞれの観点から課題を 抽出した。

1) ローカル 5G 活用にあたっての技術的課題

・ 洋上風力発電所におけるローカル 5G エリア設計の高度化

洋上風力発電所におけるローカル 5G のエリア設計は、4.3.1(2)3)a.カ)に記載の通り、各洋上風力発電施設の洋上風車の配置、地形によって個別に検討が必要となる。具体的には、効率的にメンテナンスを行うために必要なエリアカバー範囲の検討から、基地局を配置する風車、アンテナの設置台数、アンテナの方向、チルト角などを検討していくこととなる。合わせて、今後、大型化が想定される洋上風車に対して、どのように各要素を考慮して、どのようにエリア設計を行うか、その手法の詳細を現時点で確立することは困難である。

・ 洋上風車へのアンテナ・機器の設置

洋上風車へのアンテナの設置にあたっては、4.3.1(2)3)a.オ)に記載の通り、TP の屋外 PF を囲う柵に取り付けることを想定しているため、防水、重塩害対策、耐風設計が重要となり、設置にあたっては洋上風車建設業者や風車メーカーとの設計等に関する討議が必要となる。しかし、洋上風車の設計等に関する風車メーカーとのやりとりは、公募・入札が完了し、洋上風車の建設検討段階にはいってからの交渉、調整となることが現実的である。一方、TP は、洋上風車建設業者との調整となるため、ある程度事前の相談が可能である。しかし、最終的な実装検討にあたっては、やはり風車メーカーへの実現可否の確認が発生するため、時間軸としては風車メーカーとの調整と同様になる。

また、洋上風車への基地局、ネットワーク機器の設置にあたっては、4.3.1(2)3)a.オ)に記載の通り TP 内の CTPF に設置することになる。基地局については CU、DU、RU 一体型の屋外用基地局を採用することで環境への対応が可能になると考えられる。一方で、ネットワーク機器については一般に高温、低温、高湿度に弱く、このような極地での運用は想定されていないことから、設置方法を検討し、その動作について実証試験を行う必要がある。

2) ローカル 5G 活用にあたっての制度的・経済的・社会的課題

・・電波の上空利用、他者土地における端末の移動利用に係る制限

本実証で行った水平よりも上向きの電波照射や、海上における端末の移動利用については、現在のところ実験局免許の取得は可能であるが、商用免許の取得ができない。その背景として、現在のところローカル 5G は海上での利用が想定されていないことがある。具体的には、海上は自己土地か他者土地であるかが定まっておらず、ローカル 5G は干渉の懸念がない場合でも、他者土地における端末の移動利用が認められていない点が課題となる。

・ 洋上における電波干渉の調整

本実証ではローカル 5G の使用にあたり、4.8GHz 帯を使用する公共業務用無線の免許人との干渉が問題となり、事前に調整を行った。一般に、ローカル 5G の電波干渉は、免許申請の際に干渉が懸念される場合にのみ調整の手続きを進めていくことになるが、海上における利用にあたっては、一般的に電波干渉の調整が必要になるケースは想定されない。しかし、海上や沿岸部は、その地理の特殊性から、本実証のように安全保障等の観点から電波干渉の調整が設置前だけでなく、設置後についても発生する可能性がある。

普及展開までのリードタイム

本ローカル 5G 活用モデルの普及展開にあたっては、より多くのユースケースへの提案、実績の蓄積が重要となる一方で、洋上風力発電所が全国的に本格運用開始されるまでには 5 年程度かかることから、実装可能なウィンドファームが少なく実績が蓄積しにくい状況にある。

・ 洋上風力におけるローカル 5G 活用の付加価値向上

4.3.1(2)3)a.カ)に記載の通り、本実証の効果を最大限に発揮するためには、風車 1 基に基地局 1 台を設置し、ウィンドファームの全エリアを通信エリアとすることが理想の構成であるが、現状では、費用対効果の観点からその構成が望ましいとは言えない。しかし、洋上風力発電所において、ローカル 5G を風車のブレードメンテナンスだけでなく、他の用途へも幅広く活用可能としていくことで、本ローカル 5G 活用モデルの付加価値が高まり、風車 1 基に基地局 1 台を設置することも可能になると考えられる。今後、洋上風力発電所におけるローカル 5G の活用用途とその実装方法について、継続的に検討を重ねるとともに、実証を行っていく必要がある。

・ ローカル 5G の運用、保守ができる事業者における GWO 訓練認定取得者の確保

洋上風車の点検にあたっては GWO 訓練認証を受ける必要がある一方で、現時点では、 ローカル 5G の運用、保守ができる事業者の中で GWO 訓練認定を受けている者は希少 であると考えられる。今後、本ローカル 5G 活用モデルを普及展開していくにあたって、ロー カル 5G の運用、保守ができる事業者における GWO 訓練認定取得者を確保する必要が ある。

(2) ローカル 5G 活用モデルの実装に係る課題に対する解決策の検討

上記 4.3.3(1)で挙げた各課題に対して、現状考えられる解決策の検討方法を以下に示す。

1) ローカル 5G 活用にあたっての技術的課題に対する解決策の検討

・ 洋上風力発電所におけるローカル 5G エリア設計の高度化

今後、大型化が想定される洋上風車に対してどのように各要素を考慮して、どのようにエリア設計を行うか、その設計の高度化にあたっては、今後展開が予測される洋上風力発電における実装に向けて、より多くのユースケースによる知見の蓄積が重要となる。そこで、知見の蓄積に向けた具体的なアクションとして、4.3.4(2)2)に記載の実装計画を検討した。

・ 洋上風車へのアンテナ・機器の設置

アンテナの設置にあたっての防水、重塩害対策、耐風設計自体は、現在の技術の活用で十分対処可能であり、大きな問題は発生しないと考えられる。また、設置場所もTPの屋外PFを囲う柵であることから、風車メーカーからの厳しい制約を受ける可能性は低いと考えられる。しかし、実際の取り付けにあたっては、取り付け位置やケーブルトレイへの配線方法などについては、導入初期段階の案件における実装検討によってその手法を確立することになる。

ネットワーク機器は、サーバに比較して機器使用時の発熱量が小さく、TP 内への設置にあたっては排熱よりも湿度管理がより重要になると考えられることから、既存製品・技術の活用によって比較的容易に調達が可能と考えられる空調付きの収納ケースによる対処が現実的であると考える。

2) ローカル 5G 活用にあたっての制度的・経済的・社会的課題に対する解決策の検討

・電波の上空利用、他者土地における端末の移動利用に係る制限

電波の上空利用については、情報通信審議会での議論やパブリックコメントを経て制度改正が行われる見込みであり、2022 年度内を目途に制度改正が目指されている。また、FDD-LTE 帯域のうち、現在上空利用が可能な 800MHz、900MHz、1.7GHz、2GHz 帯において、上空端末用の電力制御の機能が盛り込まれていれば高度 150m 以上も含めて 5G の上空利用が可能になる。ローカル 5G については今後新たなニーズが示された際に、検討を進めるという状況であることから、新世代モバイル通信システム委員会等が実施する法整備の検討に対し、本実証結果の報告を含め、情報提供を継続するなどして貢献していく。

他者土地における端末の移動利用については、海上は原則他者土地相当とし、法令等に基づき特定の者が所有・占有する海上構造物等は自己土地相当、海上構造物等がワイヤー等で海底から係留されている場合、係留構造物等が移動し得る範囲は自己土地相当とすることで検討が進められている。

これに基づけば、着床式および浮体式の洋上風車上は自己土地相当と解釈することができ

るものの、海上をドローンが飛行するにあたっては他者土地における端末の移動利用が認められる必要がある。こちらについても、本ローカル 5G 活用モデルの実装に向けて、新世代モバイル通信システム委員会等が実施する法整備の検討に、本実証結果の報告を含め、利用方法等に関する情報提供を行うなどして貢献していく。

・ 洋上における電波干渉の調整

本ローカル 5G 活用モデルの実装にあたっては、海上や沿岸部など特殊性な地理条件を含むことから、陸上における一般的なローカル 5G の活用と異なり、公共業務用無線免許人等との電波干渉調整等が発生する可能性があるため、一般的な商用免許の取得よりも十分な準備時間を確保して申請を行う必要がある。

普及展開までのリードタイム

本ローカル 5G 活用モデルの普及展開にあたって、より多くのユースケース提案、実績の蓄積が重要となることから、洋上風力発電所が全国的に本格運用開始されるまで間の具体的な知見の蓄積と、関連事業者への認知拡大と理解促進に向けたアクションとして、4.3.4(2)2)に記載の実装計画を検討した。

・ 洋上風力におけるローカル 5G 活用の付加価値向上

洋上風力発電所におけるローカル 5G の活用用途とその実装方法について、継続的に検討を重ねるとともに、実証を行っていくために、4.3.4(2)2)に記載の実装計画を検討した。

・ ローカル 5G の運用、保守ができる事業者における GWO 訓練認定取得者の確保 日本国内に GWO 訓練提供機関として認証を受けている施設が少ないものの、今後洋上 風力発電が本格展開していくにあたって、施設も新たに整備されていことが予測されること から、本ローカル 5G 活用モデルを導入するにあたって、電気通信会社による GWO 訓練 認証の取得が進んでいくことが予測される。

4.3.4 ローカル 5G 活用モデルの実装・普及展開

(1) 実装・普及展開シナリオ

1) SPC(出資者)や O&M 事業者における実装時の方向性

2050年のカーボンニュートラル実現に向け、再生可能エネルギーの主力電源化として期待が大きい洋上風力発電は、順次運転開始される計画である。

本実証における検証フィールドは洋上風力発電所ではないが、海上でのドローン飛行およびローカル 5G 通信を行えるため当ローカル 5G 活用モデル実装時の疑似環境として適したフィールドである。従って、今回の疑似環境でのフィールド検証にて、必要データを収集し、実用性を評価した上で洋上風力の 導入計画に反映させることを目指す。

実装シナリオの課題に対し、洋上風力発電設備の事業主体となる SPC や O&M 事業者における実 装時の姿・方向性を以下に示す。(1.2(1)を参照)

・ 本件内容は、洋上風力発電設備地点の開発権取得のための公募入札において、その評価点で 大きなウエイトを占める発電単価の低減に資するものであり、その有効性を確認した SPC(出資 者)にとっては、導入に際し高いモチベーションが生じる。

・ O&M 事業者は、本開発技術が実装されたサービスを提供することが、将来的なロープワーカー 不足のリスク解消および安全性確保(従来手法との差別化)、作業手戻り時間の短縮に伴う発電 停止時間の低減という技術的優位性の確保(ドローンによる類似手法との差別化)に寄与するた め、上記と同様の有効性等を SPC に提案することで、自社サービスを導入される可能性が高ま り、本件に係るサービス提供事業の持続可能性が期待される。

2) 普及展開に向けたステップ

実装シナリオに対する課題に対し、実装に向けた道筋やステップを以下に示す。

- ステップ 1:本コンソーシアムは、1.1.1 で述べた課題の解決に向けては、洋上風力関連発電事業者および自治体等と連携しながら、さらに実証を積み重ねていく。具体的なアクションについては4.3.4(2)2)を参照。
- ステップ 2:(株)Dshift は SPC、融資者および O&M 事業者(風車メーカーあるいは独立系)への 提案に向けて、本実証で得られる有効性やステップ 1 で得られた成果を踏まえ、技 術提案書を作成、更新する。
- ステップ 3:㈱Dshift は、SPC のコンソーシアムメンバー、融資者および O&M 事業者を対象に、 ステップ 2 で作成した技術提案書をもとにプレゼンテーションを実施する。
- ステップ 4:関係者間で理解を進め、導入推進となれば、具体的なシステム設計をメーカー等と交えて実施し、導入費用・メンテナンスコストを算出する。
- ステップ 5:ステップ 4 にて算出されたコストを SPC で評価するとともに、SPC、融資者および風車メーカーへの説明で合意を得られれば導入が決定される。
- ステップ 6:洋上風力発電設備の建設に合わせてシステムを設置し、商用運用開始とともに運用を開始する。

3) 普及展開の見通し

本実証実施者等は、図 4-82、図 4-83 に示す洋上風力発電地点毎に組成される各コンソーシアムの SPC の内、現在ウィンドファームの開発検討が進められている 4.3.2(3)1)a に示すターゲットに対して提案を実施する。本実証実施者の㈱Dshift は、発電設備外観点検事業を担うことのできる関西電力㈱の子会社(O&M 事業)であるが、親会社の競合事業者となる発電事業者等に対しても広くサービス展開することを親会社とコミットできているため、関西電力㈱と関連する特定の地域や発電事業者のみならず、全ての洋上風力発電開発地点に対してサービス提案することが可能である。

なお既に落札者が決定している主要な洋上風力サイトは、運用開始時期が 2028 年であり、現地着手までに時間的猶予があるため、コスト削減に資する提案は受け付けられると考えられる。本実証実施後に㈱Dshift が SPC 等に技術提案活動を実施する予定である。

(株)Dshift は、社会インフラのメンテナンス分野や陸上風力発電分野などについて、応用、可用性、課題解決に資するかどうか等、横展開の仮説評価を実施する。具体的には指標と水準を定義して、一般的事項に対してその適否レベルを評価する。

ここで、発電事業者・SPC に提示する指標は、投資対効果(B/C)が有効であり、表 4-34 で示した

内容を、各発電事業者・SPC で検討するウィンドファーム地点にアレンジし提示しコミュニケーションを 図る。適否水準は、投資対効果(B/C)において、最低限 1.0 を超過することが必要となる。

〈促進区域、有望な区域等の指定・整理状況(2022年9月30日)〉



①長崎県五島市沖

図 4-82 今後の洋上風力発電開発候補地点 出典:経済産業省資源エネルギー庁 国土交通港湾局



図 4-83 風力サイトと応募予定事業者 (各社のプレス発表情報等をベースに独自に整理(2021 年 12 月現在))

図 4-84、図 4-85、図 4-86 にローカル 5G 活用モデルを活用したシステムの想定実装スケジュールを示す。

ローカル 5G 活用モデルの想定実装スケジュールとして、令和 5 年度以降本実証で使用したローカル 5G 装置を用いた有償デモパッケージ等による実証の積み重ねを通じて(詳細は 4.3.4(2)参照)、令和 6 年度以降、①既設の洋上風力発電施設への実装(図 4-84)と、②今後商用運転開始予定の洋上風力発電施設への実装(図 4-85)と、③今後入札予定の洋上風力発電施設への実装(図 4-86)の3つのアプローチを実施する。

a. ①既設の洋上風力発電設備への実装

既設の洋上風力発電施設への実装については、洋上風力発電所が商用運転を開始後に、本モデルの提案アプローチを実施する。アプローチ先としては、秋田洋上風力発電を想定する。

提案にあたっては、本モデルの導入を想定していない既存設備へのアドオンが前提となるため、ステークホルダーと協議なども必要になるが、まずは、想定効果、サービス価格、点検方法の新旧比較等、検討の土台となる資料を整えた上でのアプローチを実施する。

また、SPC への提案と並行して、導入関係者である風車メーカーへ、レンダー、業界団体等への提案

を実施する。新技術であり、採用には慎重な姿勢が予想されるが、優位性、実用性、効果などを説明し、 システム採用に向け調整を実施する。

なお、実装にあたってはSPC、風車メーカーとの調整に目途を立て、融資者への説明を実施する必要 がある。融資者もコスト削減策は歓迎するものの、確実な資金回収の観点から新技術採用には慎重な ため、SPC 等と同様の説明・調整を実施する。

SPC、風車メーカー、融資者との合意を経て、風車メーカー等から受注を請け、保安規程等ルールへ の明記について、SPC、風車メーカーとの調整および監督官庁との協議と、基地局整備に際し、電波法 等に対し監督官庁との協議を実施し、各種許認可を得る必要がある。その際、洋上ウィンドファームでの 実装を想定し耐久性やローカル 5G 設備自体の保守性なども検討する。

許認可関連対応と並行し、点検システム、基地局の設計、整備を運用開始までに余裕を持って着手 する必要がある。

そして運用開始の約半年前からは、ローカル 5G 活用モデルを活用したシステムの試験運用を行い、 風車メーカー、SPC 等のチェックを経て実運用を開始する。

	2022年度	2023年度	2024年度	2025年度	2026年度	2027年度	2028年度	2029年度	2030年度
秋田県能代市。秋田市沖 地点の全体動向		023年1月 用運転開始	▼ 採用 ▼	2024年度実装					
ローカル5G開発実証事業	実証実施(ローカ	ル5G活用の確実	性·有効性検	Œ)					
技術的課題の解決	物理標	は、同期方式の	· 仮説・精緻						
ローカル5Gによる点検方法・ サーと、ススキーム・価格他の検討	点検方	法比較、メリット、	メリット等を含	め整理					
ローカル5G提案書作成	→ 導入:	効果を分かりやすぐ	整理						
SPC(幹事会社)に対する 提案	→ 提案	を実施(有効性	等を提示)						
SPC(幹事会社以外)に 対する提案	- S	→ PCメンバーが多数	なため、幹事会	会社に提案順番等を	聞き取り				
風車メーカー・O&M事業者 に対する提案		━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━━	メント(ローカ	ル5G提案書の内、風	車メーカー関連部	分)英訳			
レンダー等、必要な関係者に 対する提案・理解促進		出資者視点の	の資料に再整理	₽					
SPCとの詳細協議		導入に関し具	体的に協議						
風車メーカー・O&M事業者と の詳細協議		全体システム	】 设計、基地局	端末側詳細仕様検	討、風車仕様との	詳細調整、運用・	保守方法検討		
運用スキーム・運用ルールの 調整			→→ SPC·風	車メーカー・O&M事業	者と具体的運用	方法を協議			
保安規程 (※1) 対応 (必要に応じ)、点検ルール(※2)等への反映			上記で決	定した運用ルール等を	まとめたMETI対応	説明資料作成	(必要に応じ)、タ	ま検ルール等 (※2)	こ反映
ローカル5G機器の選定・設 置			コーカル5G株	器設置対応工事実	施、試験運用を紹	て実装			

- 具体的には、秋田市、能代市 (2022年12月、2023年1月商用運転開始)を想定
- 対象星数:能代港4,200kW×20基、秋田港4200kW×13基 適用タイプ: 将来モデル1
- 本資料では当該箇所への実装計画について記載、利害関係者等の調整先が多く上記は最速行程

※1:保安規程:発電所の保安に関するルール。営業開始(発電開始)等までにMETIの認可が必要

※2:点検ルール:各事業者が独自で定める点検に関するルール

図 4-84 ①既設の洋上風力発電設備への実装

b. ②今後商用運転開始予定の洋上風力発電設備への実装

今後商用運転開始予定の洋上風力発電施設への実装については、現在建設工事中の洋上風力発電 所は建設工事の進捗が最優先で業務多忙であり、商用運転を開始後に本モデルの提案アプローチを本 格的に実施することを基本とするが、以下の 2 地点については、先方の業務状況において提案を受け 付ける余地が確認できれば、適宜アプローチを実施する。

- ひびきウインドエナジー(2023年3月頃着工、2025年度運転開始予定)
- 五島フローティングウィンドファーム(2022年10月着工、2024年1月運転開始予定)

既設の洋上風力発電施設へのアプローチと同様となるが、本モデルの導入を想定していない設備へのアドオンが前提となるため、ステークホルダーと協議なども必要になるが、まずは、想定効果、サービス価格、点検方法の新旧比較等、検討の土台となる資料を整えた上でのアプローチを実施する。

また、SPC への提案と並行して、導入関係者である風車メーカーへ、レンダー、業界団体等への提案を実施する。新技術であり、採用には慎重な姿勢が予想されるが、優位性、実用性、効果などを説明し、システム採用に向け調整を実施する。

	2022年度	2023年度	2024年度	2025年度	2026年度	2027年度	2028年度	2029年度	2030年度
長崎県五島市沖地点の全 体動向			2024年1月 商用運転開始	▼ 採用 ▼	2025年度実装				
ローカル5G開発実証事業	実証実施(ロー) ル5G活用の確認	其性·有効性検証						
技術的課題の解決	物理構	成、同期方式の	→ 仮説・精緻						
ローカル5Gによる点検方法・ サーヒ、ススキーム・価格他の検討	━► 点検方	法比較、メリット、	デメリット等を含め	整理					
ローカル5G提案書作成	→	効果を分かりやす	≺整理						
提案書の既設洋上風力発 電への提案を踏まえた修正		より分かりやすい	提案書に修正						
SPC(幹事会社)に対する 提案		ž.	▶ 是案を実施(有効	性等を提示)					
SPC(幹事会社以外)に 対する提案			→ SPCメンバーが多	数なため、幹事会	社に提案順番等	を聞き取り			
風車メーカー・O&M事業者 に対する提案			説明資料等ド	キュメント (ローカル	ル5G提案書の内、	風車メーカー関連	部分)英訳		
レンダー等、必要な関係者に 対する提案・理解促進			出資者視	◆ 点の資料に再整理	9				
SPCとの詳細協議			導入に関し	具体的に協議					
風車メーカー・O&M事業者との詳細協議			全体システ	△設計、基地局	・端末側詳細仕様	検討、風車仕様の	の詳細調整、運	用•保守方法検討	t
運用スキーム・運用ルールの 調整				SPC·風車	車メーカー・O&M事	業者と具体的運	用方法を協議		
保安規程 (※1) 対応 (必要 に応じ)、点検ルール(※2)等へ の反映			Ŀ	一→記で決定した運用	引ルール等をまとめた	METI対応説明資	資料作成 (必要)	「応じ)、点検ル-	-ル等 (※2) に反映
ローカル5G機器の選定・設置				ローカル5G機和	器設置対応工事第	『施、試験運用を	経て実装		

- ・ 具体的には、①長崎県五島市沖(2023年度商用運転開始予定)及び②福岡県響灘沖(2025年度商用運転開始予定)を想定
- ・ 適用タイプ: 将来モデル 2
- 本資料では①への実装計画について記載②への実装計画については本資料のスケジュールを2年弱程度後ろ倒しにしたものを想定、利害関係者等の調整先が多く上記は最速行程 【用語】

「Maria」 ※1:保安規程:発電所の保安に関するルール。営業開始(発電開始)等までにMETIの認可が必要 ※2:点検ルール:各事業者が独自で定める点検に関するルール

図 4-85 ②今後商用運転開始予定の洋上風力発電設備への実装

c. ③今後入札予定の洋上風力発電設備への実装

今後入札予定の洋上風力発電設備への実装については、2023 年度入札予定案件である秋田県男 鹿市・潟上市・秋田市沖、新潟県村上市・胎内市沖、長崎県西海市江島沖へ応札予定の SPC 等へのア プローチを実施する。技術説明、コスト効果検討の提案を実施し、落札後には、システム設計、仕様検討 など詳細調整および運用保守方法の検討を行う。

2023 年度以降の入札案件は、現時点では、明らかになっていないが、随時状況に応じて提案を実 施していく。

	2022年度	2023年度	2024年度	2025年度	2026年度	2027年度	2028年度	2029年度	2030年度
2023年度入札予定地点の 全体動向		023年度 ▼ 札開始	応札	72024年度 落札				2028年度実装 商用運転開始	i.
ローカル5G開発実証事業	実証実施(ロー	ト カル5G活用の確実	性・有効性核	証)					
技術的課題の解決	物理構	成、同期方式の	反説·精緻						
ローカル5Gによる点検方法・ サーヒ゛ススキーム・価格他の検討	→ 点検方	法比較、メリット、	デメリット等を言	め整理					
ローカル5G提案書作成	→	効果を分かりやす	(整理						
既提案箇所への提案結果を 踏まえた修正		より分かりやすい	是案書に修正						
SPC(幹事会社)に対する 提案		提案を実施	→ (有効性等を	提示)					
SPC(幹事会社以外)に 対する提案		SPCメンバ	一が多数なたと)、幹事会社に提案!	順番等を聞き取り				
風車メーカー・O&M事業者 に対する提案		説明資料等	→ ドキュメント(ローカル5G提案書の	内、風車メーカー関	連部分)英訳			
レンダー等、必要な関係者に 対する提案・理解促進		出資者視点	→ の資料に再整	理					
SPCとの詳細協議				導入に関し具体的に	協議				
風車メーカー・O&M事業者と の詳細協議				全体システム設計、	基地局·端末側許	細仕様検討、風	→ 車仕様との詳細調	整、運用·保守方	法検討
運用スキーム・運用ルールの 調整						SPC-	ユーナー・O&	M事業者と具体的	運用方法を協議
保安規程 (※1) 対応(必要 に応じ)、点検ルール(※2)等へ の反映				上記で決定した運用	ルール等をまとめた	METI対応説明資	● 資料作成(必要(i	応じ)、点検ルー	ル等 (※2) に反映
ローカル5G機器の選定・設置						ローカ	ル5G機器設置対	応工事実施、試験	運用を経て実装

- 具体的には、①秋田県男鹿市・潟上市・秋田市沖、②新潟県村上市・胎内市沖、③長崎県西海市江島沖(いずれも2023年度入札予定)を想定
 対象基数:秋田県男鹿市・潟上市及び秋田市沖(40万KW) 42基(想定)、新潟県村上市・胎内沖(60万KW) 63基(想定)、
- 長崎県西海市江島沖(30万KW)35基(想定)
- ・ 適用タイプ: 将来モデル2 ・ 本資料では2023年度入札予定案件への実装計画について記載、2024年度以降の入札案件については本資料のスケジュールを入札時期の差分後ろ倒しにしたものを想定

バニニー ※1:保安規程:発電所の保安に関するルール。営業開始(発電開始)等までにMETIの認可が必要 ※2:点検ルール:各事業者が独自で定める点検に関するルール

図 4-86 ③今後入札予定の洋上風力発電設備への実装

d. ④普及展開に資する活動および類似分野への実装等

上記と並行して、本ローカル 5G の実装に資する活動および類似分野等へのアプローチも進めていく。洋上風力発電事業関係者、通信事業関係者、O&M 事業者に対する普及啓発活動の他、洋上風力類似分野への実装可否の検討、制度面に係る検討を実施する。

	2022年度	2023年度	2024年度	2025年度	2026年度	2027年度	2028年度	2029年度	2030年度
洋上風力発電事業関係者 に対する普及啓発活動	風車メ	-カー・レンダー・業	界団体・学術組織	戦等に対するローカ	 ル5G活用による	リットの周知	 必要に応じて活動	 継続	→
通信事業関係者に対する 普及啓発活動	ローカル	5G機器ベンダー等	手に対する洋上環	・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	5G機器の開発・	普及促進	必要に応じて活動	継続	→
O&M事業者に対する普及 啓発活動	サービス	提供者である08	M事業者に対する	→ るローカル5G活用	によるメリットの周知		必要に応じて活動		→
制度面(電波法等)に係 る検討	他者土地における移! の緩和、海上への利り 総務省様にて検討中		ħD						
類似分野への実装	実装可否の基準分析及び実装先候補の検		するアプローチ	-		実装に向けた個	別案件先との調整等		

図 4-87 実装に資する活動および類似分野への実装等

(2) 実装計画

1) 実装計画の作成方法

実装計画の作成は、図 4-88 に示すアプローチおよび、図 4-89 に示すスケジュールで実施した。 2021 年 12 月から、フィールド実証の実施と並行して、ステークホルダー等へのヒアリングの準備と、 本実証の提案検討時からのコンソーシアムメンバー等による討議内容、その他各コンソーシアムメンバーが保有する情報等の取りまとめを開始した。 2023 年 1 月以降は、フィールド実証結果の取りまとめ、ヒアリング実施と並行して、整理した情報をもとにコンソーシアムにて実装計画の検討を継続していった。

実証計画の検討は、主に表 4-44 に示す日時、議事内容、参加者にて実施した他、適宜コンソーシアムメンバーによる分科会を開催し、討議内容および結果を実装計画として本成果報告書にまとめた。



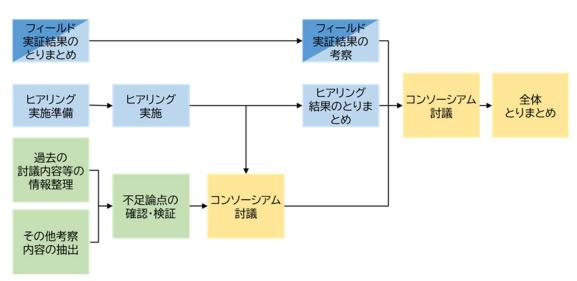


図 4-88 実装計画の作成アプローチ

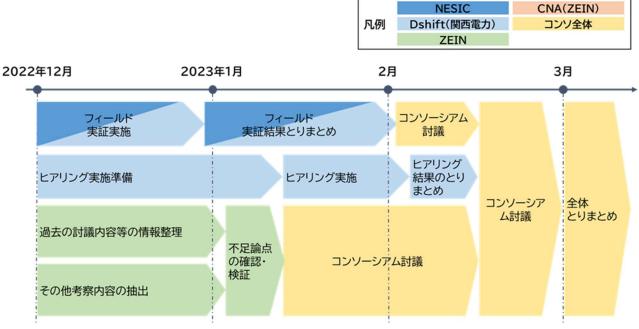


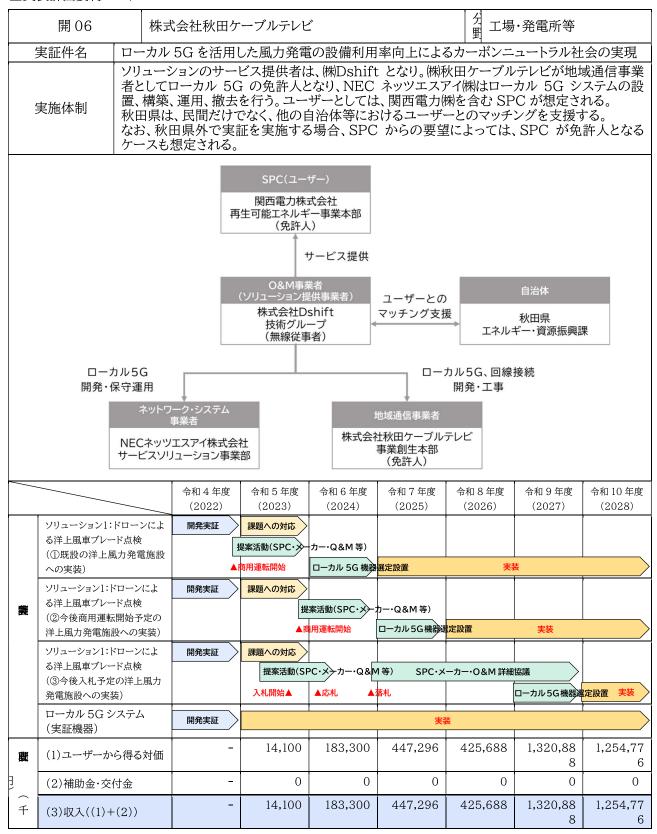
図 4-89 実装計画の作成スケジュール

表 4-44 実装計画の策定に向けたコンソーシアム討議日程と内容

#	日時	表 4-44 実装計画の策定に向けたコン 計議内容	ソーンアム討議日程と内容 討議参加者
	-		司。就多加有
1	1/11(水)	・・ネットワーク・システム構成の検	(株)秋田ケーブルテレビ、NEC ネッツエスア
	16:00-	討	イ㈱、㈱Dshift、関西電力㈱、ZEIN㈱、秋
	17:00		田県 産業労働部 エネルギー・資源振興
	18:00-		課、一般社団法人日本ケーブルテレビ連盟
	19:00		
2	1/18(水)	・ ネットワーク・システム構成	(株)秋田ケーブルテレビ、NEC ネッツエスア
	16:00-	・経済性	イ(株)、(株)Dshift、関西電力(株)、ZEIN(株)
	18:00		
3	1/25(水)	・経済性	㈱秋田ケーブルテレビ、NEC ネッツエスア
	16:00-		イ㈱、㈱Dshift、関西電力㈱、国立大学法
	18:00		人東京大学 先端科学技術研究センター、
			ZEIN(株)
4	2/1(水)	・実装に向けた課題と解決策	㈱秋田ケーブルテレビ、NEC ネッツエスア
	16:00-		イ㈱、㈱Dshift、関西電力㈱、ZEIN㈱、一
	18:00		般社団法人日本ケーブルテレビ連盟
5	2/8(水)	・実装に向けた課題と解決策	機秋田ケーブルテレビ、NEC ネッツエスア
	16:00-		イ㈱、㈱Dshift、関西電力㈱、ZEIN㈱、一
	18:00		般社団法人日本ケーブルテレビ連盟
6	2/10(金)	ネットワーク・システム構成	(株)秋田ケーブルテレビ、NEC ネッツエスア
	10:00-	・実装に向けた課題と解決策	イ(株)、(株)Dshift、関西電力(株)、国立大学法
	11:30	・実装計画案の作成	人東京大学 先端科学技術研究センター、
			ZEIN(株)
7	2/15(水)	・実装計画案の作成	(株)秋田ケーブルテレビ、NEC ネッツエスア
	16:00-	・市場性	イ(株)、(株)Dshift、関西電力(株)、国立大学法
	18:00		人東京大学 先端科学技術研究センター、
			ZEIN(株)
8	2/17(金)	· 実装計画の精緻化	(株)秋田ケーブルテレビ、NEC ネッツエスア
	18:00-		イ(株)、(株)Dshift、関西電力(株)、国立大学法
	19:30		人東京大学 先端科学技術研究センター、
			ZEIN(株)
9	2/22(水)	 ・ 実装計画の精緻化	(株)秋田ケーブルテレビ、NEC ネッツエスア
	16:00-	ンヘンスロードコーンコロルタイロ	イ(株)、(株)Dshift、関西電力(株)、ZEIN(株)
	18:00		
	10.00		

2) 実装計画の要約

■実装計画要約シート



(4)ネットワーク設置費	_	5,000	146,000	184,600	5,000	751,000	5,000
(5)ネットワーク運用費	_	1,000	1,000	14,667	31,010	31,010	86,635
(6)ソリューション購入費	_	0	0	167,730	312,980	312,980	948,262
(7)ソリューション開発費	_	8,100	8,100	8,100	8,100	8,100	8,100
(8)支出((4)+(5)+(6) +(7))	I	11,400	152,400	372,397	354,390	1,100,39 0	1,045,29 7
(9)収支((3)-(8))	-	0	28,200	72,199	68,598	217,798	206,779

収入、支出の算定根拠

収支計画各項目の内訳

- 1. ソリューション1(①~③)に係る収支計画
- (1) ユーザーから得る対価: ローカル 5G システム構築費(イニシャル) + ローカル 5G システム運用保守費(ランニング) + ドローン点検請負費(ランニング)
- (2) 補助金・交付金: なし
- (4) ネットワーク設置費: ローカル 5G システム構築費原価(イニシャル)
- (5) ネットワーク運用費: ローカル 5G システム運用保守費原価(ランニング)
- (6) ソリューション購入費:ドローン点検請負費原価(ランニング)
- (7) ソリューション開発費: なし
- 2. ローカル 5G システム(実証機器(有償デモパッケージ))に係る収支計画
- (1) ユーザーから得る対価: デモを行うことにより発生する原価相当分(普及展開のための活動であるため利益は考慮しない)
- (2) 補助金・交付金: なし
- (4) ネットワーク設置費: デモ用回線調達、機器設置調整などインテグレーション費用
- (5) ネットワーク運用費:保守・保守運用費、クラウドコア使用に係る費用
- (6) ソリューション購入費: なし
- (7) ソリューション開発費: ドローン調達、飛行試験に係る費用

諸条件

- ・ 実装計画①:将来モデル1(港湾区域等でのウィンドファーム展開モデル)
- ・ 実装計画②、③:将来モデル2(一般海域でのウィンドファーム展開モデル)
- ・ ドローンによる年間点検回数: 月次法定点検 12 回+年次法定点検 2 回+不定期点検 4 回(風車 1 基あたりの平均)
- ・ 1日あたりのドローンによる点検可能基数:10基(ただし不定期点検は1日あたり3基とする)

		どのようにして(手段、取組方法、アウトカム)	いつまでに
実装を確実	提供コスト低減	・ SPC にとっての費用対効果の向上による相対的なコスト低減に向けて、ローカル 5G を風車のブレードメンテナンスだけでなく、他の用途へも幅広く活用可能としていくことで、本ローカル 5G 活用モデルの付加価値を高める。 ・ より高効率で低コストのソリューションの提供に向けて、機器の設置台数を低減できるような設計手法についても継続的に検討していく。	2024 年度以降、既設または今後商用運転開始予定の洋上風力発電施設における導入検討にあたって、案件ごとにコスト最適なエリア設計およびネットワーク・システム構成の検討を進める。
美にするための取組	ソリューション追加開発	・大型化が想定される洋上風車に対してどのように各要素を考慮したエリア設計手法の確立を目指す。 ・本ローカル 5G 活用モデルの普及展開に向けて、継続的な実証を通じて、より多くのユースケース提案、実績の蓄積を行う。 ・ドローンによるブレードの外観点検以外へのローカル5G活用用途に関する検討および実証に継続的に取り組む。	2024 年度以降、既設または今後商用運転開始予定の洋上風力発電施設における導入検討にあたって、案件ごとにコスト最適なエリア設計およびネットワーク・システム構成の検討を進める。
	顧客開拓	・ 洋上風力発電においては、メンテナンス方法や担 当企業が建設設計時にほぼ確定されることから、 既存設備へのアドオンについては、業界への啓発 を含めて、ステークホルダーとの継続的な協議が	ステークホルダーとの協 議にあたっては、2024 年度の既設または今後 商用運転開始予定の洋

	重要となる。	上風力発電施設におけ る導入を目指す。	
運用面の改善	・ドローンによるブレードメンテナンスは、落雷等不定期点検にも対応する必要があるため、ウィンドファームの立地に合わせて地域企業も巻き込んだ運用保守体制づくりが重要となる。今後、SPC 等への提案にあたっては、これらの体制についての提案も行っていく。	2024 年度の既設また は今後商用運転開始予 定の洋上風力発電施設 における導入を目指す。	
ルールメイキングへの貢献	・ 実装を進めるにあたり、総務省新世代モバイル通信システム委員会の審議に貢献する。また、保安規程に関するガイドライン等へ新たな点検手法の1つとして掲載を目指した提言を行い、本ローカル5G活用モデルの展開環境の整備を目指す。	2023 年 3 月の成果報告をもとに 4 月のパブリックコメント等で提言する。	

計画した収入を下回った場合の対応方法(資金調達など)

ユーザーへの実装に対し、まずは令和6年度に既設の洋上風力発電施設への適用を目指すが、協議・ 交渉が遅延した場合や、既設の洋上風力発電施設への実装が実現できなかった場合、以下の方策を 並行して検討・推進する。

- ➤ グリーンイノベーション基金(NEDO 委託・助成事業)の内、洋上風力発電の低コスト化プロジェクトフェーズ 2(浮体式洋上風力実証事業)の提案書への組み込み
- ▶ 新規の大型陸上風力発電への提案

陸上風力発電建設地点の情報を収集するとともに、分析・評価を実施し、費用対効果が得られる地点を発掘した上で提案を実施する。

a. 実施体制

各洋上風力発電施設への実装にあたっては、各案件別に体制が組成されることになるが、本コンソーシアムにおける想定実装体制は、1.1.1(1)1)に記載の通りである。

以下に、本ローカル 5G 活用モデルの利活用に関する知見を幅広く秋田県下の洋上風力発電関連事業者に普及啓蒙するとともに、新たなソリューション開発に向けた実証を推進するため、各関連事業者に向けた有償デモパッケージを提供する際の、実施体制を示す。

ソリューションのサービス提供者は、(株)Dshift となり。(株)秋田ケーブルテレビが地域通信事業者としてローカル 5G の免許人となり、NEC ネッツエスアイ(株)はローカル 5G システムの設置、構築、運用、撤去を行う。ユーザーとしては、関西電力(株)を含む SPC が想定される。

秋田県は、民間だけでなく、他の自治体等におけるユーザーとのマッチングを支援する。

なお、秋田県外で実証を実施する場合、SPC からの要望によっては、ユーザーである SPC が免許人となるケースも想定される。

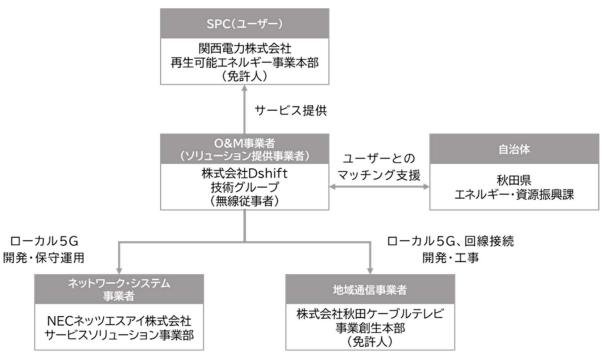


図 4-90 有償デモパッケージの実施体制

b. 実装計画(実施事項)

本ローカル 5G 活用モデルは、本実証を通じてその有用性について SPC 等から理解いただけることが確認できている。しかし、今後展開される洋上風力への幅広い実装を目指すにあたっては、洋上風力が本格展開期を迎えるまでに、さらにソリューションの仕組みと価値を認知、理解を深めてもらい、本ローカル 5G 活用モデルへの信頼性を確立する必要がある。また、1.1.1 で述べた課題の解決に向けては、洋上風力関連発電事業者および自治体等と連携しながら、さらに実証を積み重ねていく必要がある。

そこで、本ローカル 5G 活用モデルへの理解促進、認知拡大はもとより、本実証を通して得られた洋 上風力におけるローカル 5G システムの利活用に関する知見を幅広く秋田県下の洋上風力発電関連事 業者に普及啓蒙するとともに、新たなソリューション開発に向けた実証を推進するため、各関連事業者 に向けた有償デモパッケージを準備する。

有償デモパッケージでは、各ユーザーのニーズに応じた実証を行えるようにするとともに、洋上風力発電所におけるローカル 5G の活用の幅をさらに拡大していくための取り組みを継続していくことを想定する。特に現状では、本ローカル 5G 活用モデルは実験局免許でなければ電波発射が不可であるため、本実証にて行った取り組みを、有償デモパッケージを通じて、ユーザーとなる SPC 等の要望をもとに実証環境を個別に構築するとともに実績を積むことで、具体的な提案に結び付けていく。

実際のアプローチとしては、4.3.4(1)3)に示すように、令和 6 年度以降の洋上風力発電施設への実装に向け、以下の①既設の洋上風力発電施設、②今後商用運転開始予定の洋上風力発電施設と、③ 今後入札予定の洋上風力発電施設それぞれの関連事業者に対して、本ローカル 5G 活用モデルの技術提案と合わせて、幅広く実証に取り組んでいただける洋上風力関連事業者を模索する。

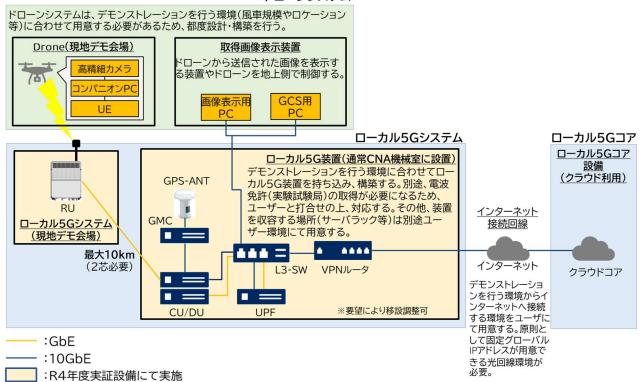
令和 5 年度は、本事業で構築したローカル 5G 活用システムを活用してローカル 5G エリア設計の高度化や、ローカル 5G 活用の付加価値向上などに向けた追加実証を実施する。残念ながら実証箇所

は未定であるが、令和 5 年 10 月までに実証場所を確定し、同年 11 月~令和 6 年 3 月に実施する。

表 4-45 有償デモパッケージの想定提案先

アプローチ	地点
①既設の洋上風力発電施設	· 秋田県秋田市、能代市(2022年12月、2023年1月商用
	運転開始)
②今後商用運転開始予定の	・ 長崎県五島市沖(2023 年商用運転開始予定)
洋上風力発電施設	・ 福岡県響灘沖(2025 年商用運転開始予定)
③今後入札予定の洋上風力	· 秋田県男鹿市·潟上市·秋田市沖(2023 年度入札予定)
発電施設	・ 新潟県村上市・胎内市沖(2023 年度入札予定)
	・ 長崎県西海市江島沖(2023 年度入札予定)
	・ その他、2024 年度以降の入札予定案件

ドローンシステム



デモンストレーションを行うにあたり新規でご用意が必要なもの

- ① デモンストレーション環境に適合したドローン本体
- ② ローカル5G装置からクラウドコアへ接続する回線設備
- ③ クラウドコア利用料
- ④ 電波免許(実施場所を管轄する総務省総合通信局へ申請)
- ⑤ その他土地占用等申請
- ※秋田県外でデモンストレーションを行う場合は、ローカル5G装置は移設設定する必要あり

図 4-91 有償デモパッケージの概要

有償デモパッケージのサービス仕様は以下を想定している。

対象実施エリア

原則として、秋田県内での実施を想定する。ただし、ユーザーが県外での実施を規模する場 299 合は、個別に要望を確認した上で実施可否を判断する。

・ ローカル 5G システム

本実証で使用したローカル 5G 装置を、ユーザーがデモンストレーションを行う環境に合わせて持ち込み、構築する。別途、電波免許(実験試験局)の取得が必要になるため、ユーザーと打ち合わせの上、対応する。その他、装置を収容する場所(サーバラック等)は別途ユーザー環境にて用意し、運用する。

メンテナンス用ドローン

ドローンシステムは、実施する実証の内容、風車の規模やロケーション等、ユーザーのニーズとデモンストレーションを行う環境に合わせて用意する必要があるため、都度設計・構築を行う。

・ インターネット接続、接続回線

デモンストレーションを行う環境から、クラウドコア等へ接続するためのインターネット接続環境は、ユーザーがデモンストレーションを行う環境に合わせて用意する。ただし、原則として、固定グローバル IP アドレスが利用できる光回線環境が必要となる。

・ クラウドコア、電波免許取得(実験免許)

クラウドコアの利用手配は、ユーザーの利用に合わせて都度行う。また、実証を行うための 電波免許(実験免許)は、デモンストレーションを行う環境に合わせて管轄の総務省総合通 信局への申請を受けて行う。その際の免許人は、ユーザーまたは㈱秋田ケーブルテレビが 免許人となることを想定している。

c. 収支計画

ア)収支計画

収支計画案の各項目について、算出根拠は以下の通りである。

		(本年度) 令和4年度	令和5年度	令和6年度	令和7年度	令和8年度	令和9年度	令和10年度
	記の洋上風力発電 されの実装		課題への対応 案活動(SPC・メーかG 所運転開始	&M等 - 5G機器選定設 <mark> </mark>	ŧ	実装	ŧ	
定の	〉後商用運転開始予)洋上風力発電施設)実装	開発実証	_	提案活動(SPC・メー) 商用運転開始	Q&M等) ロ-カル5G機器選定設 派		実装	
	学後入札予定の洋上 日発電施設への実装	開発実証	課題への対応 提案活動(SP 入札開始 ▲	C・メーカ ン Q&M等) ▲応札	SPC 落札	・メーカ・〇 &M詳細協議 [ᢤ □-加5G機器選定設置	実装
	1ーカル5Gシステム 証機器)	開発実証			実装	:	:	
売上	計画(百万円)		14.1	183.3	447.3	425.7	1320.9	1254.8
	①既設(構築)			(169.2)				
	①既設(運用·保守)				(217.7)	(217.7)	(217.7)	(217.7)
	②今後商用(構築)				(215.5)			
	②今後商用(運用・保守)					(193.9)	(193.9)	(193.9)
	③今後入札(構築)						(895.2)	
	③今後入札(運用·保守)							(829.1)
	④ローカル5G機器(実証 機器によるデモ)		(14.1)	(14.1)	(14.1)	(14.1)	(14.1)	(14.1)
コス	ト計画(百万円)		14.1	155.1	375.1	357.1	1103.1	1048.0
	①既設(構築)			(141.0)	:			
	①既設(運用·保守)				(181.4)	(181.4)	(181.4)	(181.4)
	②今後商用(構築)				(179.6)			
	②今後商用(運用・保守)					(161.6)	(161.6)	(161.6)
	③今後入札(構築)						(746.0)	
	③今後入札(運用·保守)							(690.9)
	④ローカル5G機器(実証 機器によるデモ)		(14.1)	(14.1)	(14.1)	(14.1)	(14.1)	(14.1)
収支	計画(百万円)		0	28.2	72.2	68.6	217.8	206.8

図 4-92 収支計画案

表 4-46 収支計画案の前提条件

	・ 将来モデル 1(港湾区域等でのウィンドファーム展開モデル)
 RU 設置数	:風車基数の 1/3 を想定
NU 設區数	・ 将来モデル 2(一般海域でのウィンドファーム展開モデル)
	:風車基数の 1/2 を想定
	・ 月次法定点検:12回
年間点検回数	・ 年次法定点検:2回
	・ 不定期点検:風車1基あたり平均4回
	・ 1日あたりのドローンによる点検可能基数:10基
	(ただし不定期点検は1日あたり3基とする)
その他	・ 経済性検証の結果を踏まえユーザーにとって投資対効果が得られる価格を設定
	・ ソリューションの導入促進費にかかる費用をソリューション開発費(ローカル 5G
	システム)として計上。主に、ソリューションの追加開発および提案経費

表 4-47 収支計画案の算出根拠①~③

			回来の昇山(区)処し * 0				
実装パタ	ターン	①既設の洋上風力発電設	②今後商用運転開始予定	③今後入札予定の洋上風			
		備への実装	の洋上風力発電設備への	力発電設備への実装			
			実装				
モデル		将来モデル 1	将来モデル 2	将来モデル 2			
風車基準	数	33 基(RU 12 台)※	32基(RU 16台)	140基(RU 71台)※			
原価	構築費	機器 9300 万円+	機器:11560 万円+	機器:46200 万円+			
		工事 4800 万円	工事:6400 万円	工事:28400 万円			
		<u>計:14100 万円</u>	<u>計:17960 万円</u>	<u>計:74600 万円</u>			
	年間ローカル	電波利用+コア利用+	電波利用+コア利用+	電波利用+コア利用+			
	5G 機器運	法定点検(5年に1回を年	法定点検(5年に1回を年	法定点検(5年に1回を年			
	用費	に配分) <u>1366.7 万円</u>	に配分) <u>1634.3 万円</u>	に配分) <u>5562.5 万円</u>			
	年間点検	年間点検回数×風車基数	年間点検回数×風車基数	年間点検回数×風車基数			
	保守費	16773 万円	14525 万円	63528.2 万円			

[※]ウィンドファームの構成・形状を考慮して算出

表 4-48 収支計画案の算出根拠④

実装パターン	④ローカル 5G システム(実証機器によるデモ)
前提	デモパッケージによる年1回の有償デモ
原価	・・デモ用回線調達、機器設置調整などインテグレーション費用
	(電波免許申請取得、建柱、回線手配等):500 万円
	・ 保守運用費、クラウドコア使用に係る費用:100 万円
	・ ドローン調達、飛行試験に係る費用(3日間デモ+準備撤収予備日)
	(ドローン借用および飛行試験費等): 810 万円

(参考)算出式

①既設の洋上風力発電設備への実装

【構築費】

- ・ ファーム 1:5RU 設置を想定 4040 万円(機器) +2000 万円(工事)
- ・ ファーム 2:7RU 設置を想定 5260 万円(機器) + 2800 万円(工事) 合計 14100 万円(イニシャル(構築当初のみ発生))

【年間保守費(ローカル 5G 機器保守)】

- ・ 保守運用費:(24 万円+5 万円×RU12 台)×12 か月=1008 万円
- : 電波利用料(基地局):6400 円/年×RU12 台=7.68 万円
- ・ コア利用料:12 万円/月×12 か月×2 ファーム=288 万円
- 5年に1回の法定点検:1日4RU点検と仮定し315万円 ⇒年あたり換算で63万円/年合計1366.7万円/年

【年間保守費(ドローンによる点検)】

(前提)

- ・ 年間点検回数:月次法定:年12回、年次法定:年2回、不定期点検:1基あたり平均年4回
- ・ 1日あたりのドローンによる点検可能基数:10基(ただし不定期は3基/日とする)
- 1日あたりの単価:166万円(原価)を想定

	月次法定点検回数	年次法定点検回数	不定期点検回数	合計点検回数	年間合計保守費
ファーム 1	20 基÷10 基×12 回	20 基÷10 基×2 回	20 基÷3 基×4 回	54.7 回/年	136 回×80 万円
	分=24 回	分	=26.7 回		=10880 万円/年
		=4 回			
ファーム 2	13 基÷10 基×12 回	13基÷10基×2回分	13 基÷3 基×4 回	35.5 回/年	35.5 回×166 万
	分=15.6 回	=2.6 回	=17.3 回		円
					=5893 万円/年

合計 16773 万円/年

②今後商用運転開始予定の洋上風力発電設備への実装

【構築費】

- · ファーム 1:12RU 設置を想定 8080 万円(機器) +4800 万円(工事)
- ・ ファーム 2: 4RU 設置を想定 3480 万円(機器)+1600 万円(工事) 合計 17960 万円(イニシャル(構築当初のみ発生))

【年間保守費(ローカル 5G 機器保守)】

- · 保守運用費:(24 万円+5 万円×RU16 台)×12 か月=1248 万円
- · 電波利用料(基地局):6400 円/年×RU16 台=10.3 万円
- ・ コア利用料:12 万円/月×12 か月×2 ファーム=288 万円
- ・ 5年に1回の法定点検:1日 4RU 点検と仮定し440万円 ⇒年あたり換算で88万円/年 合計1634.3万円/年

【年間保守費(ドローンによる点検)】

(前提)

- ・ 年間点検回数:月次法定:年12回、年次法定:年2回、不定期点検:1基あたり平均年4回
- ・ 1日あたりのドローンによる点検可能基数:10基(ただし不定期は3基/日とする)

1日あたりの単価:166万円(原価)を想定

	月次法定点検回数	年次法定点検回数	不定期点検回数	合計点検回数	年間合計保守費
ファーム 1	24 基÷10 基×12 回	24 基÷10 基×2 回分	24 基÷3 基×4 回	65.6 回/年	65.6 回×166 万
	分=28.8回	=4.8 回	=32 回		円
					=10889.6 万円/
					年
ファーム 2	8 基÷10 基×12 回分	8 基÷10 基×2 回分	8 基÷3 基×4 回	21.9 回/年	21.9回×166万円
	=9.6 回	=1.6 回	=10.7 回		=3635.4 万円/
					年

合計 14525 万円/年

③今後入札予定の洋上風力発電設備への実装

【構築費】

- · ファーム 1:21RU 設置を想定 13540 万円(機器)+8400 万円(工事)
- ・ ファーム 2:32RU 設置を想定 21140 万円(機器)+12800 万円(工事)
- ・ ファーム 3:18RU 設置を想定 11520 万円(機器) + 7200 万円(工事) 合計 74600 万円(イニシャル(構築当初のみ発生))

【年間保守費(ローカル 5G 機器保守)】

- ・ 保守運用費:(36 万円+5 万円×RU71 台)×12 か月=4692 万円
- · 電波利用料(基地局):6400円/年×RU71台=45.5万円
- ・ コア利用料:12 万円/月×12 か月×3 ファーム=432 万円
- 5年に1回の法定点検:1日 4RU 点検と仮定し1965 万円 ⇒年あたり換算で393 万円/年 合計 5562.5 万円/年

【年間保守費(ドローンによる点検)】

(前提)

- ・ 年間点検回数:月次法定:年12回、年次法定:年2回、不定期点検:1基あたり平均年4回
- ・ 1日あたりのドローンによる点検可能基数:10基(ただし不定期は3基/日とする)
- · 1日あたりの単価:166万円(原価)を想定

	月次法定点検回数	年次法定点検回数	不定期点検回数	合計点検回数	年間合計保守費
ファーム 1	42 基÷10 基×12 回	42基÷10基×2回分	42 基÷3 基×4 回	114.8 回/年	114.8 回×166 万
	分=50.4 回	=8.4 回	=56 回		円
					=19056.8 万円/
					年
ファーム 2	63 基÷10 基×12 回	63 基÷10 基×2 回分	63 基÷3 基×4 回	172.2 回/年	172.2 回×166 万
	分=75.6 回	=12.6 回	=84 回		円
					=28585.2 万円/
					年
ファーム 3	35 基÷10 基×12 回	35基÷10基×2回分	35 基÷3 基×4 回	95.7回/年	95.7 回×166 万
	分=42 回	=7回	=46.7 回		円
					=15886.2 万円/
					年

合計 63528.2 万円/年

④ローカル 5G システム(実証機器によるデモ) (前提)

・ デモパッケージによる年 1 回の有償デモンストレーション

【ネットワーク設置費】

- ・ デモ用回線調達など(免許申請、建柱、土地占用、光ファイバー借用等):100 万円
- ・ デモンストレーション環境整備(設置据え付け、ラック、撤去):200 万円
- ・ 機器設置調整などインテグレーション費用:200万円

【ネットワーク運用費】

・ 保守運用費、クラウドコア使用に係る費用:100万円

【ソリューション開発費】

・ ドローン調達、飛行試験に係る費用(3日間デモ+準備撤収予備日):810万円

イ) ユーザーにおける必要リソース(モデルケース)

収支計画案に記した3つの実装パターン(①既設の洋上風力発電設備への実装、②今後商用運転開始予定の洋上風力発電設備への実装、③今後入札予定の洋上風力発電設備への実装)および、有償デモパッケージにおけるユーザーの費用負担を以下に示す。なお、有償デモパッケージは実験免許による導入となるため、ランニングコストは発生しない。

表 4-49 既設の洋上風力発電設備への実装におけるユーザーの費用負担

		項目	イニシャルコスト (初年度)	ランニングコスト (次年度以降、年間)
ロー	-カル 50	Gシステム	169,200 千円	16,400 千円
a.		ル 5G システム運用業務 <i>社で実施する場合)</i>	_	_
b.	ローカル 5G システムに係る運用業務委託 (※他社に委託する場合)		169,200 千円	_
c.	c. ローカル 5G システムに係る保守運用、コア 使用(クラウド)の委託			16,400 千円
П-	-カル 50	G 活用モデルに係るソリューション	_	201,276 千円
a.	ドロー	ンによるブレード外観点検リューション	_	201,276 千円
	1	運用に係る環境整備等に係る経費 <i>(※自社で負担する費用)</i>	_	_
	2	ドローン調達および飛行試験委託費 (※他社に委託する費用)	_	201,276 千円

表 4-50 今後商用運転開始予定の洋上風力発電設備への実装におけるユーザーの費用負担

		項目	イニシャルコスト (初年度)	ランニングコスト (次年度以降、年間)
 -	-カル 50	G システム	215,520 千円	19,612 千円
a.		ル 5G システム運用業務 <i>社で実施する場合)</i>	_	_
b.		ル 5G システムに係る運用業務委託 <u>社に委託する場合)</u>	215,520 千円	_
c.	ローカル 5G システムに係る保守運用、コア 使用(クラウド)の委託			19,612 千円
ロー	-カル 50	G 活用モデルに係るソリューション		174,300 千円
a.	ドロー	ンによるブレード外観点検リューション		174,300 千円
	1	運用に係る環境整備等に係る経費 (※自社で負担する費用)	_	_
	2	ドローン調達および飛行試験委託費 (※他社に委託する費用)	_	174,300 千円

表 4-51 今後入札予定の洋上風力発電設備への実装におけるユーザーの費用負担

		項目	イニシャルコスト (初年度)	ランニングコスト (次年度以降、年間)
ロー	-カル 50	G システム	895,200 千円	66,750 千円
a.		ル 5G システム運用業務 <i>社で実施する場合)</i>	_	_
b.	ローカル 5G システムに係る運用業務委託 (※他社に委託する場合)		895,200 千円	_
c.	ローカル 5G システムに係る保守運用、コア 使用(クラウド)の委託			66,750 千円
ローカル 5G 活用モデルに係るソリューション		G 活用モデルに係るソリューション	_	762,338 千円
a.	ドロー	ンによるブレード外観点検リューション	_	762,338 千円
	① 運用に係る環境整備等に係る経費 (※自社で負担する費用)		_	_
	2	ドローン調達および飛行試験委託費 (※他社に委託する費用)	_	762,338 千円

表 4-52 有償デモパッケージにおけるユーザーの費用負担

		項目	イニシャルコスト (初年度)	ランニングコスト (次年度以降、年間)
П-	-カル 50	G システム	6,000 千円	_
a.		ル 5G システム運用業務 <i>社で実施する場合)</i>	_	_
b.		ル 5G システムに係る運用業務委託 <u>社に委託する場合)</u>	5,000 千円	_
c.		ル 5G システムに係る保守運用、コア クラウド)の委託	1,000 千円	_
ロー	-カル 50	G 活用モデルに係るソリューション	8,100 千円	_
a.	ドロー	ンによるブレード外観点検リューション	8,100 千円	_
	3	運用に係る環境整備等に係る経費 (※自社で負担する費用)	_	_
	4	ドローン調達および飛行試験委託費 (※他社に委託する費用)	8,100 千円	_

d. 実装を確実にするための取り組み

洋上風力発電施設への実装に向けて、有償デモパッケージの提供を通じて取り組む内容を以下に、示す。有償デモパッケージの提供は、2023 年度以降、4.3.4(1)3)に記載の、各洋上風力発電設備への提案活動の一環として実施することも想定しているため、洋上風力発電所の商用運用開始時期に合わせた提案タイミングでの実施を想定している。

各取り組みは、継続的な取り組みを要するものであるものの、その成果については、各洋上風力設備への実装提案にあたって使用する提案資料等に適宜反映していく。

ア) 提供コスト低減

ローカル 5G の利用が現状よりも市場に浸透し、一般化すればローカル 5G 装置およびその保守費等の提供価格は必然的に低減可能になるが、本ローカル 5G 活用モデルでは、4.3.1(2)3)a.カ)に記載の通り、風車 1 基に基地局 1 台を設置し、ウィンドファームの全エリアを通信エリアとすることが本来的には目指すべき姿である。そこで 4.3.3(1)2)に記載の通り、ローカル 5G を風車のブレードメンテナンスだけでなく、他の用途へも幅広く活用可能としていくことで、本ローカル 5G 活用モデルの付加価値を高めることが重要になる。

洋上風力発電においてローカル 5G の付加価値が高まれば、SPC にとっての費用対効果はさらに高まり、相対的なコストは低減していくことになる。具体的に想定される用途としては、ブレードの外観点検以外のドローンによる点検や、CTV によるメンテナンスの際の作業者の高速通信手段としての利用、その他の風車点検における利用、安全保障上の観点からの緊急時や、災害時の利用などが挙げられる。

また、4.3.3(2)1)に記載の通り、エリア設計の高度化によって機器の設置台数を低減できるような設計手法についても継続的に検討していくことで、より高効率で低コストのソリューションの提供が可能になると考える。

目先は、2024 年度以降、既設または今後商用運転開始予定の洋上風力発電施設における導入検討にあたって、案件ごとにコスト最適なエリア設計およびネットワーク・システム構成の検討を進める。

イ) ソリューション追加開発

4.3.3(2)1)および 4.3.3(2)2)に記載の通り、以下のソリューション開発について継続的な取り組みを行っていく。

・ 洋上風力発電所におけるローカル 5G エリア設計手法の確立

今後、大型化が想定される洋上風車に対してどのように各要素を考慮して、どのようにエリア設計を行うか、その設計の高度化に向けて実証ユースケースによる知見の蓄積とともに、有効な設計手法の確立を目指す。

・ 洋上風力発電所が全国的に本格運用開始されるまで間の具体的な知見の蓄積と関連事業者への認知拡大と理解促進

本ローカル 5G 活用モデルの普及展開に向けて、継続的な実証を通じて、より多くのユースケース提案、実績の蓄積を行う。

・ 洋上風力におけるローカル 5G 活用の付加価値向上

洋上風量発電所における、ドローンによるブレードの外観点検以外へのローカル 5G 活用用途に関する検討および実証に継続的に取り組む。特に、新たな利用用途についての実装性については、ユーザーのニーズを踏まえ、本実証と同様のプロセスによる事業性の評価を行っていく。

目先は、2024 年度以降、既設または今後商用運転開始予定の洋上風力発電施設における導入検討にあたって、案件ごとにコスト最適なエリア設計およびネットワーク・システム構成の検討を進める。

ウ)顧客開拓

本ローカル 5G 活用モデルは、風車の設計段階から無線機器の設計や電源および通信ルート確保等について検討することで導入が容易になる。実装にあたっては、新たに風車設計や建設計画の立案を行う段階にある公募案件に対する提案について、特に注力する。

洋上風力発電においては、メンテナンス方法や担当企業が建設設計時にほぼ確定されることから、既存設備へのアドオンについては、業界への啓発を含めて、ステークホルダーとの継続的な協議が重要となる。

目先は、ステークホルダーとの協議にあたって、2024 年度の既設または今後商用運転開始予定の 洋上風力発電施設における導入を目指す。また、風力業界への啓発として、JWPA、JWEA 等の業界 団体、学術組織の会誌等への論文投稿、秋田県主催の洋上風力発電メンテナンス研究会など、洋上風 力発電立地地域各自治体が主催・開催する研究会等での情報発信によって実施する。

エ)運用面の改善

普及展開に向けた SPC および O&M 事業者向けの説明会や研修を実施することで、地域における O&M 事業従事者を育成し、産業普及と雇用基盤を固める。

ドローンによるブレードメンテナンスは、落雷等不定期点検にも対応する必要があるため、ウィンドファームの立地に合わせて地域企業も巻き込んだ運用保守体制づくりが重要となる。今後、SPC 等への提案にあたっては、これらの体制についての提案も行っていく。

目先は、2024 年度の既設または今後商用運転開始予定の洋上風力発電施設における導入を目指す。

オ)ルールメイキングへの貢献

実装を進めるにあたり、総務省新世代モバイル通信システム委員会の審議に貢献する。

また、本ローカル 5G 活用モデルはドローンを用いた風車の外観点検手法となるが、ドローンの点検技術開発に関しては、NEDO が行う事業で採択済み(「風車運用・維持管理技術高度化研究開発:風車の次世代型運用・維持管理技術開発」と、「グリーンイノベーション基金事業/洋上風力発電の低コスト化プロジェクト: 浮体式風車ブレードの革新的点検技術の開発」に本実証実施者でもある関西電力㈱他が開発助成先)であり、ローカル 5G 活用は NEDO での取り組みと合わせて、「保安規程」、「洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説」で取り扱いの確認を経済産業省電力安全課等に引き続き実施する。「風力発電設備 ブレード点検および補修ガイドライン(JWPA)」に対しても取り扱いの確認を引き続き働きかけするとともに、ガイドライン改定のタスクフォースが組成されれば、タスクフォースメンバー等への情報提供等を通じ新たな点検手法の1つとして掲載を目指した提言を行い、本ローカル5G 活用モデルの展開環境の整備を目指す。なお、現状ではローカル5G の上空利用や海上利用が制度化されていないため、JWPA 他への提言は、制度化と歩調を合わせ実施する。

目先は、本成果報告をもとに、ローカル 5G 電波の上空利用や、海上における他者土地での端末の移動利用等について、4 月のパブリックコメント等で提言する。

e. 計画した収入を下回った場合の対応方法(資金調達など)

ユーザーへの実装に対し、まずは令和6年度に既設の洋上風力発電施設への適用を目指すが、協議・交渉が遅延した場合や、既設の洋上風力発電施設への実装が実現できなかった場合も想定し、次の方策を平行して検討・推進する。

- ・ グリーンイノベーション基金(NEDO 委託・助成事業)の内、洋上風力発電の低コスト化プロジェクトフェーズ 2(浮体式洋上風力実証事業)の提案書への組み込み
- 新規の大型陸上風力発電への提案

浮体式洋上風力実証事業について、ローカル 5G は陸域とウィンドファームまでの距離が長いほど効果が高くなるため、陸域からより離れる浮体式はより高い効果が得られると言える。また先端技術を活用した提案は、フェーズ 2 の採用評価に際し有利に働くとのコメントも得ている。この点を提案・応募を検討する発電事業者に説明し、提案書への組む込みを図り、浮体式洋上風力実証事業への採用を目指

す。

また新規の陸上風力発電への提案については、近年の大規模化する陸上風力発電において、ローカル 5G 導入に対する費用対効果が得られる地点もあり得るため、陸上風力発電建設地点の情報を収集するとともに、分析・評価を実施し、費用対効果が得られる地点を発掘した上で提案を実施する。

また、本ローカル 5G 活用モデルにおいては、洋上風力発電施設への導入は、多くの場合で、入札段階で長期の収支がほぼ確定するため想定されにくいと思われる。

なお、収支が下振れになった場合は、以下の対応が検討される。

- ・ 基本的には計画の調整(配当見直し、出資者による保証他)
- ・ 事業者が明らかに適切でない場合は、レンダー等による、適切な事業者への事業譲渡
- ・ 事業者の努力でリスクを排除できないような、甚大な大規模災害の場合は保険適用

5. 普及啓発活動の実施

5.1 映像制作

(1) コンソーシアム制作映像

実証コンソーシアムにおいて、実証の取り組み成果に係る動画を制作した。制作にあたっては、実証の 準備導入フェーズから検証フェーズまでを連続的に収録し、様々な切り口に対応可能なコンテンツ素材 を確保した上で、普及啓発に資する動画として構成検討の上、編集制作を行った。

| 実施会社 | 株式会社 TEAM CNA CREATION (秋田ケーブルテレビ 100%子会社の番組および映像制作会社) | 秋田ケーブルテレビの自社番組の制作実績を有する。 | 2022年10月~2022年12月 | 動画尺 | 13分 | 撮影概要 | ・ フィールド環境整備の様子 | ・ ラボ環境における検証の様子 | ・ 実証フィールドにおける検証の様子 | ・ 実証視察会の様子

表 5-1 映像制作の実施内容

(2) 実証事務局制作映像への協力

実証事務局が本事業に関する映像制作を行うにあたり、素材提供を実施した。

5.2 実証視察会の実施

普及啓発の一環として、2022 年 12 月 8 日(木)に実証視察会を主催した。当日は、関係省庁、地方公共団体、実証事務局および報道関係者が参加し、本事業の概要説明(説明資料巻末添付「成果報告書」実証視察会説明資料」)、フィールドでのドローン飛行検証、秋田港ウィンドファーム視察および質疑応答、意見交換などを行った。

表 5-2 実証視察会の実施内容

	な ひ と 大皿 沈永云の天	WEI 1.H.
13:00~14:00	開会の挨拶	秋田県総合食品研究センター
	実証概要説明	(秋田市新屋町字砂奴寄 4-26)
	質疑応答	
14:00~14:10	移動	
14:10~15:00	ドローン飛行検証視察	秋田市向浜
	実証フィールドにおいて、実際にドロー	ユーラスエナジー秋田港ウィンドファー
	ン飛行を行いながらブレードメンテナン	厶内
	スを実施	(秋田市向浜 1-13)
15:00~15:20	移動	
15:20~15:50	秋田港風力発電見学	セリオンリスタ展望台
		(秋田市土崎港西 1-9-1)
16:00~16:40	実証実験映像鑑賞	セリオンリスタ 2 階イベントホール
	質疑応答	
	関係者挨拶	
	閉会	





図 5-1 実証概要説明の様子



図 5-2 ドローン飛行検証視察の様子①



図 5-3 質疑応答の様子(コンソーシアムからの回答)

5.3 その他普及啓発活動

普及啓発活動の一環として、実証成果のその他普及啓発活動(テレビ・新聞・WEB 記事等におけるインタビュー対応、学会参加、イベント開催等)に積極的に取り組んだ。

普及啓発活動は以下の通りである。

表 5-3 普及啓発活動

	表 5-3 普及啓発活動 普及啓発活動内容	実施時期
1	BUSINESS NETWORK への記事掲載	2022年11月8日
2	GLOBAL OFFSHORE WIND SUMMIT - JAPAN 2022	2022年11月9~10日
	パネル展示	
	場所:あきた芸術劇場「ミルハス」・秋田市文化創造館	
	https://gows-j.com/	
3	一般社団法人日本風力エネルギー学会誌への寄稿・掲載	2022年12月1~2日
	令和4年11月 第46巻 第3号(通巻 第143号)	
	(技術情報・最新情報)ローカル 5G を活用したドローンによるブ	
	レードメンテナンスの作業効率向上プロジェクトの紹介	
4	毎日新聞(地方版)への記事掲載	2022年12月17日
5	フィールド実証視察	2022 年 12 月 19~22
	参加者:秋田県デジタル政策推進課	日
	総務省東北総合通信局 他	
	秋田県港湾空港課	
	日本政策投資銀行東北支店	
6	O&M 事業者見学会	2022年12月20日
	場所:秋田県総合食品研究センター研修室	
	参加人数:午前の部:10名、午後の部:14名	
7	日本計画研究所(JPI)エグゼクティブセミナーでの登壇	2023年2月1日
	・ タイトル:関西電力グループ:洋上風力発電メンテナンスへの	
	ドローン、ローカル 5G 他 最新技術活用の意義と今後の展開	
	· 登壇者:株式会社 Dshift 代表取締役社長 角田 恵(技術	
	士(建設部門))	
8	WITH YOU(関電社外広報・一般公開)への掲載	2023年2月21日
9	東北 5G デジタル変革推進フォーラムでの登壇	2023年3月9日
	・ タイトル:ローカル5Gを活用した風力発電の設備利用率向上	
	によるカーボンニュートラル社会の実現について	
	・ 登壇者:株式会社秋田ケーブルテレビ カスタマー本部	
	マネージャー 石井浩幸	
10	電気新聞インタビュー対応・記事掲載	2023年3月15日
11	WIND EXPO 風力発電展への出展	2023年3月15~17日
	場所:東京ビッグサイト	
	https://www.wsew.jp/hub/ja-jp/about/wd.html	









図 5-4 GLOBAL OFFSHORE WIND SUMMIT パネル展示の様子





図 5-5 O&M 事業者見学会の様子

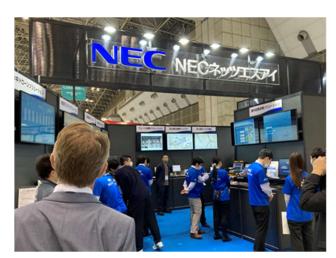




図 5-6 WIND WXPO 風力発電展の様子

6. 実施体制

6.1 実施体制の全体像

地域においてローカル 5G 等の導入および運用実績がある株式会社秋田ケーブルテレビを実証コンソーシアム代表機関として、ローカル 5G システムの構築運用実績がある NEC ネッツエスアイ株式会社を技術実証統括、O&M 事業者としてドローンを活用した風力発電のメンテナンス技術力と実績を備えた株式会社 Dshift を課題実証統括、電力事業者として課題実証に取り組むとともに本実証におけるソリューションの社会実装を推進する関西電力株式会社、地域産業振興・雇用拡大について地域振興視点でアドバイスをする秋田県産業労働部エネルギー・資源振興課、風力発電における学識経験者視点で本ソリューションの実用化および社会実装についてアドバイスをする国立大学法人東京大学、全国の地域通信事業者を通じて水平展開を推進する一般社団法人日本ケーブルテレビ連盟、そして幅広い知見、豊富な実績を活かしプロジェクトマネジメントの支援を横断的に行う ZEIN 株式会社の合計 8 社で実証コンソーシアムを結成し、本事業を確実に履行した。なお、本実証では、これからの日本の再生可能エネルギーの主流となる洋上風力での実用性を検証するため、より洋上発電風車に近い環境として海岸線上の陸上風車を疑似環境として選定した。本実証の検証フィールドである合同会社ユーラスエナジー秋田港様(ユーラスエナジーホールディングスが秋田港における陸上風力のためにおいた SPC)には、疑似環境提供者として、本実証のコンソーシアム外として参加いただいている。

再委託等を行うにあたっては、以下の対応を順守した。

- ・ 総務省様が求める情報セキュリティ対策、個人情報の管理に必要な措置、情報保全のための履 行体制、その他必要な措置を契約に基づき再委託等先に実施、構築させる。
- ・ 貴社や総務省様の求めに従い、再委託等先に実施、構築させた内容とその結果に関する報告を 行う。

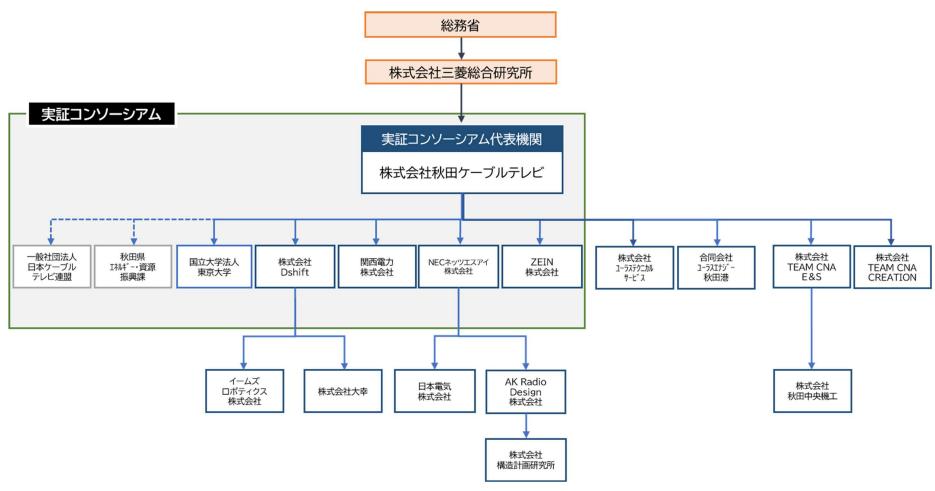


図 6-1 実施体制図

6.2 実施体制内の役割

実施体制における各社の役割は以下の通りである。

表 6-1 コンソーシアムの構成

機関名	構成	役割
株式会社秋田ケーブルテレビ	コンソーシアム代表機関	・プロジェクト全体統括
		・プロジェクト進捗管理
		・経理処理業務
		・実証フィールド構築
		・実証で構築したローカル 5G 等の通信 環境について実証終了後も継続的に 利用する主体
		・実装に係る検討にあたって、実施体制 内外との連携や説明について責任を有 する
		・事業の進捗管理等、事業を統括し貴社 や総務省様の求めに応じて事業の内 容の説明等を行うプロジェクトマネー ジャーが所属
		・実施体制内の各法人・団体・個人等へ の経理処理提出の指示・取りまとめを 行い、事務局への期限内の提出や提 出内容の正確性に責任を負う会計処 理担当者が所属
		・業務実施責任者、業務実施副責任者が 所属
		・情報セキュリティ責任者、副責任者が所属
		・個人情報保護・管理責任者、副責任者が所属
		・情報保全監督責任者、副責任者が所属
		・その他管理体制に係る関係部署の責任 者、副責任者等が所属

	T	
NEC ネッツエスアイ株式会社	コンソーシアム構成員	・ローカル 5G ネットワーク環境構築 ・技術実証統括(仮説、評価、考察) ・電波伝搬測定
		・ローカル 5G の電波伝搬特性等に関する技術的検討に関して、貴社との連絡や検討内容の説明等を行う責任を負う担当者が所属
株式会社 Dshift	コンソーシアム構成員	·課題実証統括(仮説、評価、考察)
		・点検事業者の視点での評価
		・ドローン技術提供
		(ローカル 5G 対応ドローン構築)
		・ブレードメンテナンス分析評価アプリ ケーションの提供
		·現地実証対応
		(ドローン飛行、画像解析)
		・本実証におけるソリューションのユーザー企業
関西電力株式会社	コンソーシアム構成員	·課題実証支援
		・事業者の視点で社会実装性や横展開 の可能性を評価
		・本実証におけるソリューションのユーザー企業
秋田県 産業労働部 エネルギー・資源振興課	コンソーシアム構成員	・地域視点(地域産業振興、雇用拡大)で の評価
ZEIN 株式会社	コンソーシアム構成員	·PMO
		・プロジェクト推進補助
国立大学法人東京大学	コンソーシアム構成員	・技術・課題実証指導
 先端科学技術研究センター		・学識経験者視点での評価
		・実証方針レビュー評価
		・実用および社会実装のための評価
一般社団法人日本ケーブルテレ	コンソーシアム構成員	・地域通信事業者視点での評価
ビ連盟		・全国水平展開に向けた評価協力
	1	

合同会社ユーラスエナジー秋田港	構成員以外の委託先	・検証フィールド提供 (発電風車(合計2基)の実証提供) (実験期間の発電停止)	
株式会社ユーラステクニカルサー ビス	構成員以外の委託先	・発電風車の操作 (実験期間の発電停止)	
株式会社 TEAM CNA E&S	構成員以外の委託先	・実証フィールドの構築工事を担当。実 証実験に必要なサーバ搭載環境、電源 装置、通信用光ファイバーの敷設等	
株式会社 TEAM CNA CREATION	構成員以外の委託先	・実証コンソーシアムで制作する動画を 担当	
株式会社秋田中央機工	構成員以外の委託先	・機器リースおよび実証フィールド環境構築を担当(発電機、ハウスの設置等)	
AK Radio Design 株式会社	構成員以外の委託先	・技術実証における実測、データ解析	
日本電気株式会社	構成員以外の委託先	・ローカル 5G コア設備およびコアサービ ス提供	
株式会社構造計画研究所	構成員以外の委託先	・技術実証における電波伝搬シミュレーション、実測比較考察	
イームズロボティクス株式会社	構成員以外の委託先	・ローカル 5G 搭載ドローン開発、製作、 ドローンオペレーション	
株式会社大幸	構成員以外の委託先	・船舶操縦(ドローン墜落時の回収)	

本実証の進捗報告について以下対応を実施した。

- ・ 進捗報告書や課題管理表等を作成し、実施計画の進捗状況について月 1 回程度、定期的に報告する。
 - ▶ 進捗報告書: 当月の作業内容、遅延状況、経費支出等
 - ▶ 課題管理表:課題内容、対応者、対応方針、対応結果等
- ・
 貴社が報告内容や課題に応じて要望する打ち合わせ・会議に出席し説明する。
- ・ プロジェクトマネージャーは、貴社や総務省様からの進捗や実証内容等に関する確認に対して、 迅速に実証コンソーシアム内で確認の上報告する。
- ・ 技術実証担当者は貴社や総務省様からローカル 5G の電波伝搬特性等に関する技術的検討の 進捗や内容等に関する確認に対して、迅速に実証コンソーシアム内で確認の上報告する。
- ・ 全体の事業の進捗を踏まえた効果的な実証方法や検証方法に関する貴社の助言支援に対して 可能な限り従う。

7. スケジュール

(1) 全体スケジュール

再委託等承認申請手続きを段階的に 9 月~11 月中旬までに完了し、実証に必要な機器の調達およびシステム構築を経て実証事業を実施した。

実証フィールドでの検証後、結果評価、考察を取りまとめ、成果報告書を 2 月末日まで提出、3 月 17 日に最終成果報告書を提出した。

また、中間成果報告会および最終報告会に参加し、成果の共有を行った。

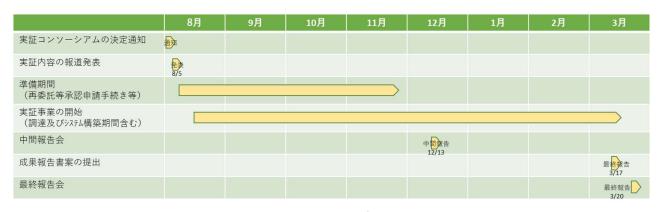


図 7-1 全体スケジュール

(2) 実証実験スケジュール

採択結果に関する報道発表後、実施計画書を提出、並行してローカル 5G 免許申請、検証フィールドの占用許可申請、機器調達等を行った。

上記申請手続き等完了後、11 月月中旬までにフィールド環境構築を完了し、11 月 14~16 日にデモ環境での実証、12 月 2~9 日、12 月 19~23 日に秋田市向浜のフィールドにおいて、技術検証および課題検証を行うとともに、実証実験の様子を映像として記録した。本実証は、実験試験局で対応しているため検証完了後の 3 月上旬に撤去するが、実装に向けた検討は継続的に行う。

また、実証実験中(12 月)にローカル 5G 導入に関心のある企業や地方公共団体、関係省庁等に対する普及啓発の一環として現地にて視察会等を開催した。

実証実験結果を取りまとめ2月中に成果物一式を仮納品し、3月17日に最終納入した。

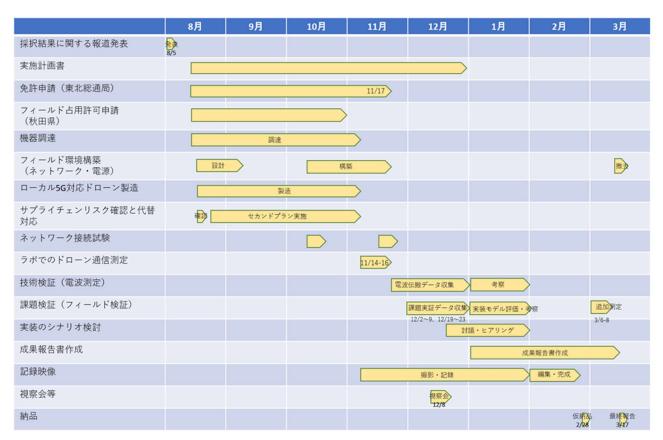


図 7-2 実証実験スケジュール

- ※ 本実証フィールドにおいて 4.8GHz 帯を使用するにあたり、公共業務用無線局の免許人様との 電波干渉調整は総務省移動通信課様経由で実施し、免許人様から反対のご意見がなかったこ とを確認した。
- ※ 本実証事業に採択された東日本電信電話株式会社と 4.8GHz 帯を使用するにあたっての電波 干渉調整を実施し反対のご意見がなかったことを確認した。

令和4年度 課題解決ローカル5Gを活用し			D実現
2023年3月	"		 -