

## 研究助成実施報告書

助成実施年度	2022 年度
研究課題（タイトル）	電波親和型壁構造に関する研究
研究者名※	李 尚曄
所属組織※	東京工業大学 科学技術創成研究院 未来産業技術研究所 助教
研究種別	研究助成
研究分野	建築技術
助成金額	150 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

( ) は、報告書提出時所属先。

## 大林財団 2022 年度研究助成実施報告書

所属機関名 東京工業大学  
申請者氏名 李 尚曄

研究課題	電波親和型壁構造に関する研究
<p>(概要) ※最大 10 行まで</p> <p>本研究は、東京工業大学未来社会 DESIGN 機構が支援する DLab Challenge2021 に採択された「通信と建築の発展速度ギャップを融合した未来の暮らし」で得られた知見から拡張されたものである。本研究の主な目的は、将来の建築設計において必要不可欠となる建物内の通信特性を予測できる材料単体および組み合わせモデルを構築することである。この研究ロードマップの一環として、具体的に電波親和型壁構造を建設し、その性能を実験によって検証することを目指している。電波親和型とは、電波の透過性や反射性を最適化し、建物内部での通信効率を最大化するための壁構造を指す。この壁構造により、建物内での通信品質の向上が期待されている。基礎研究であることから、通信の透過特性を改善するための目標周波数帯は、一般の人にも電波の透過性能がわかる 2.4GHz と 5GHz 帯(Wi-Fi) であり、さらに 5G 通信を想定し、3.5GHz 帯についても測定を行う。</p>	

1. 研究の目的	(注) 必要なページ数をご使用ください。
<p>2020 年から 5G 通信が開始され、日本では 3.7GHz 帯を使ったサービスが提供されている。また、28GHz 帯というミリ波周波数帯(30GHz~100GHz)での通信が本格的に開始される見込みがある。さらに、大手キャリアである NTT ドコモやソフトバンク、KDDI、楽天等は、HAPS (High Altitude Platform Station) という高高度飛行体を用いた無線中継技術や、人工衛星を用いた無線中継技術を研究しており、大地震などの震災時や、田舎の山奥まで通信のカバレッジを広げようとしている。</p> <p>このように急速に進化してきた通信技術と比べ、建物の更新頻度は日本だと約 30 年ごとである。また、建物での電波特性などは考慮せずに建築設計が行われてきた。しかし、今後通信技術の発展により、現状の 3.7GHz 帯の 5G 周波数だけでなく、室内では LAN ケーブルに変わり、ミリ波やテラヘルツ帯(100GHz~10THz)による高速・大容量無線技術が建物内の様々な場所で利用できるようになると期待されている。その際に問題となるのが、外壁での 5G 電波の透過特性や、室内の内壁での高速・大容量無線電波の透過特性である。特に、現状の建物では、通信特性を考慮せずに設計が行われているため、壁によって電波が反射されやすくなり、それによって多重反射(Multi path)と呼ばれる現象が生じ、室内の特定の場所で通信性能が大きく低下することがある。</p> <p>本研究では、上記の問題点を克服するため、様々な建築材料の電波透過・反射特性をモデリングし、それらの組み合わせによる性能予測ができる環境を構築することを目指す。それを基に、壁材料の厚み、間隔、断熱材の選定により、外壁では、5G 電波(例：3.7GHz)の透過特性を改善し、室内では、Wi-Fi(2.4GHz 帯, 5GHz 帯)の透過特性を改善するための最適な壁構造・材料の組み合わせを提案することを目的とする。</p>	

## 2. 研究の経過

(注) 必要なページ数をご使用ください。

以下のような年間スケジュールで活動を行った。

- 2023年4月～7月：無線電波実験小屋の敷地調査
- 2023年6月～9月：建築材料の電波特性調査
- 2023年8～9月：無線電波実験小屋の構想
- 2023年10月～12月：無線電波実験小屋の建設
- 2024年3月：木造壁の無線電波特性実験

※研究終了後も、最適な電波親和型壁構造を見出すために、無線電波実験小屋を利用して、電波特性実験を繰り返し行う計画である。

## 3. 研究の成果

(注) 必要なページ数をご使用ください。

### (1) 建材特性調査およびシミュレーション



図 1. 自由空間法（ベクトル・ネットワーク分析器利用）による建材測定の様子

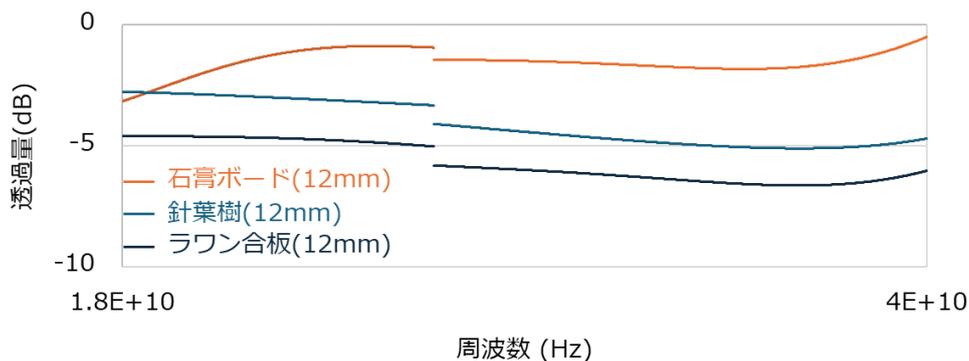


図 2. 測定結果（透過特性）

様々な建材の電波に対する周波数特性を測るために、京都府中小企業技術センターにて、VNA（ベクトル・ネットワーク分析）を用いた自由空間法（18GHz～40GHz）による測定を行った（図 2）。その一部の結果を図 2 に示す。石膏ボードのほうが木造住宅によく用いられる部材のうち、一番優れた透過特性を示し、木材の中では、針葉樹が一番良い透過特性を示した。

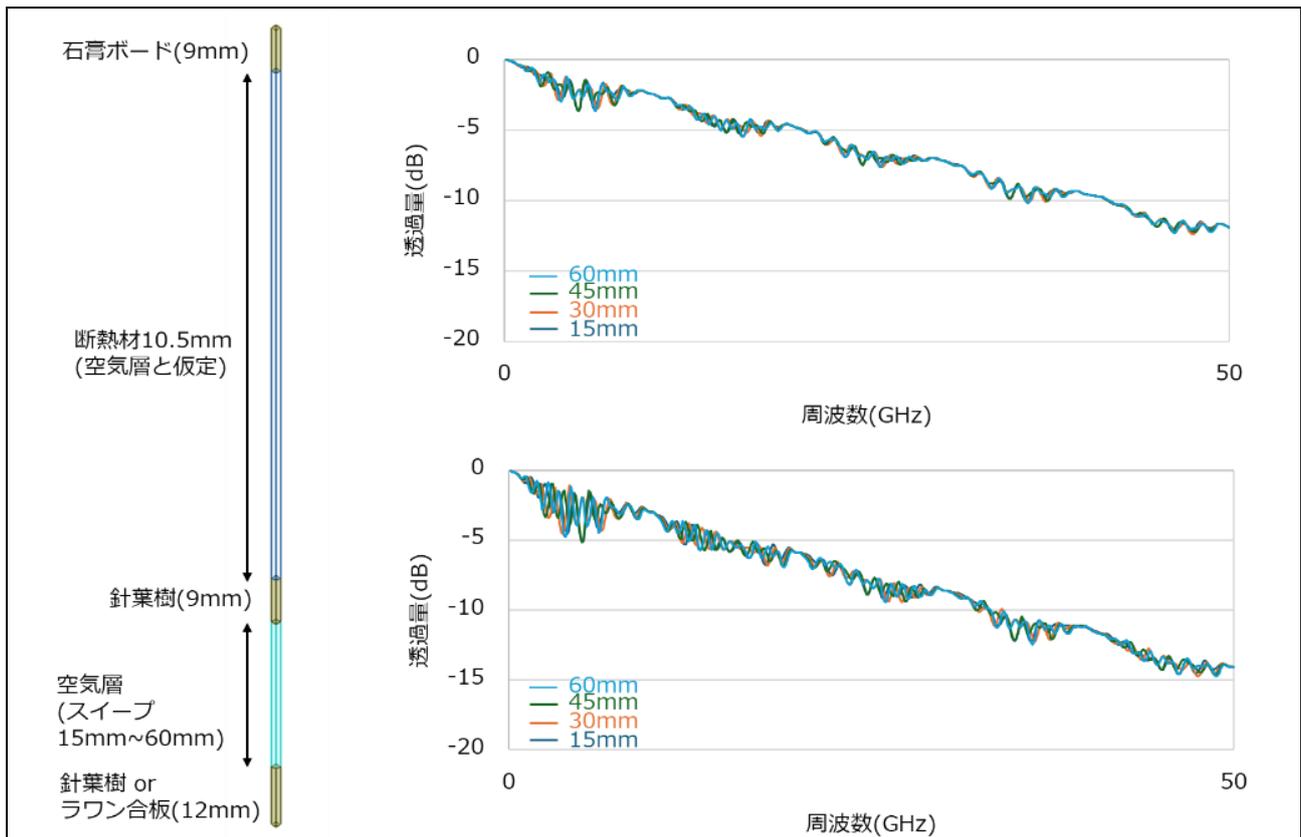


図 3. シミュレーション結果 (透過特性)

図 3 には図 2 の測定をベースにして電磁界シミュレーションを行った結果を示す。測定結果より、針葉樹は比誘電率 1.4 (誘電損失:0.09)、ラワン合板は比誘電率 2.5 (誘電損失:0.09)、石膏ボードは比誘電率 2.7 (誘電損失:0.015) の均一な誘電体と仮定し、Ansys HFSS によるシミュレーションを行った。基本的に、材料の厚みを薄くすると透過特性は改善され、また部材間の間隔によっても特性が変わってしまう。上記の設計結果では、5GHz 以下で 5dB 以下の損失になるように設計を行った。

\*外装材は一般的によく用いられる杉板を使用

## (2) 実験小屋設計および建設

### 1) 建設地の選定

本研究では、最適な電波親和型壁構造を見出すために、シミュレーションを行い、それを実証し、さらにその後も繰り返して実験を行うために無線電波実験小屋を建設する。また、HAPS を想定して、ドローンによる屋根の電波特性調査のため、ドローンの運用に制約がない地域を探した。その結果、東京付近の中山間地域である千葉県鴨川市釜沼北集落を無線電波実験小屋の建設地として選定した。具体的な建設地は、この集落の耕作放棄地の最上部であり、既存の農家と距離を十分確保することで、電波実験に影響がないように考慮した(図 4)。



図 4. 建設地の様子

## 2) 設計コンセプト

この実験小屋は、鉄筋コンクリート構造に比べて、電波の透過性が優れた木造構造で建設され、その効果を実験的に検証するためのものであり、四方の壁はそれぞれ異なる材料構成となっている。電波特性実験壁 A(以下、壁 A)は、間柱がないフリーウォールで、室内から、構造用合板  $t=9$ 、防湿シート、グラスウール  $t=100$ 、石膏ボード  $t=9$ 、透湿防水シート、胴縁、杉板  $t=12$  となっている。壁 A は、間柱がないため、構造強度を高めるために壁の両側に耐力壁を設けた。この壁 A を基準に、壁 B、壁 C、壁 D の間柱の間隔と外装材の種類を変更することで、パラメータによる電波特性の変化を比較できるようにしている。(図 5)。

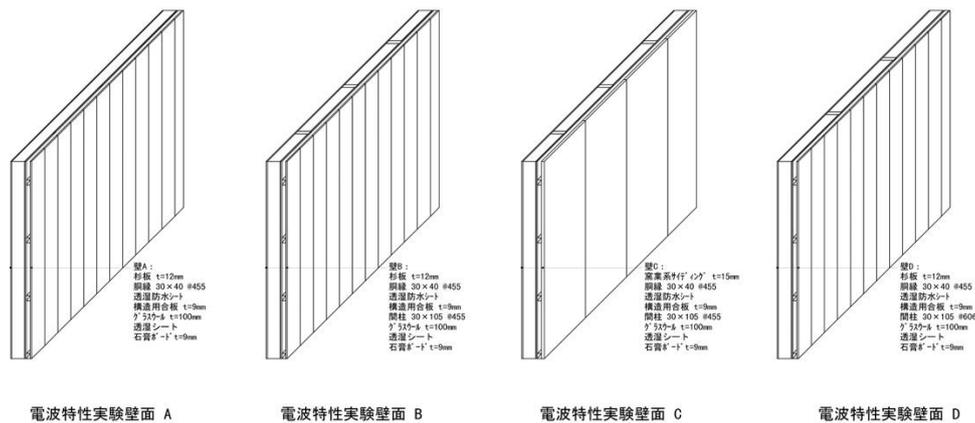


図 5. 電波特性実験壁の材料構成

## 3) 建設

施工は①整地、②遣り方、③基礎、④刻み、⑤建て方、⑥屋根、⑦床、⑧壁、⑨天井順で行った。各工程を映像で記録し、その一部を youtube (<https://www.youtube.com/@DLabChallenge>) で公開している。基礎はホームセンターで入手可能なプレキャストコンクリート製の独立基礎を採用している。在来軸組構法に従い、木材を刻んでから建て方を行い、屋根工事を行った。屋根材は瓦やアルミ波板に比べて電波の透過性がすぐれたアスファルトルーフィングとした。その後、床に構造用合板を施し、外壁の防水工事と外装材を貼り、電波特性調査をする部分には室内で石膏ボードを貼った。建設は 10 月から 12 月まで、約 2 か月間かかった(図 6、図 7)。



図 6. 建設過程



図 7. 完成の様子

#### 4) 電波特性実験

実験小屋の完成後、各電波特性実験壁に対して電波特性調査を行った。具体的には、(\*電波法を考慮したとき、屋外で3.5GHz帯の測定は困難であったため行わず)2.4GHz帯及び5.0GHz帯の送受信にはWiMAXとアンテナを用いて電波を送受信し、ポータブル・スペクトラム・アナライザに受信された電波の電力を測定した。アンテナ設置位置は壁面から水平距離300mmの位置とした(図8)。ここでは、5.0GHz帯における各電波特性実験壁の測定結果について紹介する(他の周波数帯で得られたデータについては、今投稿準備中の論文で公開する予定である)。まず、壁Bの構造と材料構成について詳しく述べる。壁Bは、455mmの間隔で配された間柱の外側に構造用合板と透湿防水シートと杉板が施されている。一方、室内側には石膏ボードが貼られている。この壁の電波特性を調べたところ、-12.63dBの電波減衰が確認された。次に、壁Cは壁Bに類似しているが、外装材として使用されている杉板を窯業系サイディングに変更している。これにより、電波減衰は-18.21dBとなり、壁Bよりも顕著に大きな減衰が観察された。最後に、壁Dについて説明する。壁Dは壁Bと比較して、間柱の間隔を455mmから606mmに広げたものである。この変更により、-7.36dBの電波減衰が確認され、壁Bと比べて減衰が少ないことが確認された。これらの結果から、いくつかの重要な知見が得られた(表1、図9)。まず、外装材については、窯業系サイディングよりも木質材料である杉板を使用する方が電波の透過性が良好であることがわかった。シミュレーション結果より損失は増えたが、それは湿度などの影響およびアンテナ近傍界で測った影響だと考えられる。さらに、間柱の間隔を広げることで電波の減衰を減少させることができることも確認された。これにより、建築物の電波特性を改善するための具体的な方法として、木質材料の使用と間柱の配置の見直しが有効であることが示された。これらの知見は、今後の建築設計において非常に重要な指針となるだろう。特に、無線通信の利用がますます増加する現代において、建築物が電波の伝播に与える影響を理解し、最適化することは、快適な通信環境を提供するために不可欠である。今後も、さらに多くのデータを収集し、詳細な解析を進めることで、より精度の高い設計ガイドラインを確立することが重要である。これにより、より精度の高い建築設計が可能となり、無線通信の効率と品質が向上することが期待される。



図 8. 電波特性実験の様子

表 1.5. 175GHz 帯における受信電力の測定値及び電波減衰量

建築部位	レファレンス a	受信電力 b	減衰量(a-b)
電波実験壁 B	-69.87dBm	-82.50dBm	-12.63dB
電波実験壁 C	-69.87dBm	-88.08dBm	-18.21dB
電波実験壁 D	-69.87dBm	-77.23dBm	-7.36dB

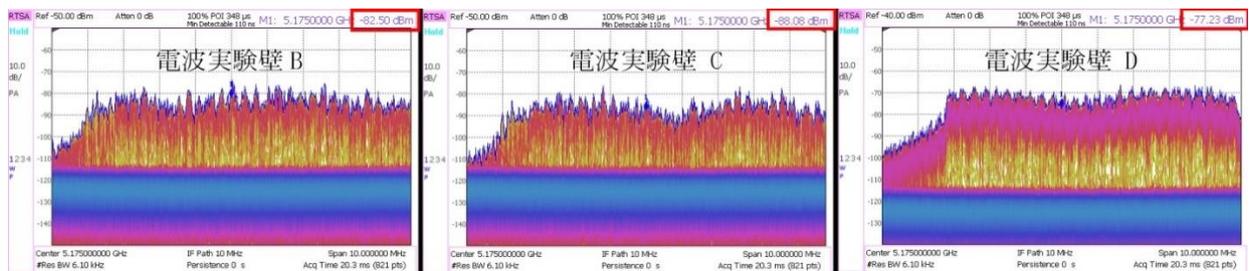


図 9. 測定結果

#### 4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

今回の電波特性実験を踏まえて、浮かび上がってきた今後の課題は下記の通りである。

- ・各壁の構造が電波減衰に与える影響をより詳細に解析し、電波減衰メカニズムを明確にする。
- ・間柱の素材や太さも検討項目に加え、最適な間柱配置を見つけるために追加実験をする。
- ・長期的な耐候性やコストパフォーマンスを視野に入れながら、電波特性に優れた外装材の選定基準を確立するために、さまざまな材料の特性を比較検討する。
- ・異なる気象条件が電波特性に与える影響を調査する。
- ・今後得られるデータをさらに蓄積し、詳細なデータベースの作成・公開を通じて、他の研究者や実務者との情報交換を促進する。