

サブテラヘルツ波によるコンクリート内部鋼材の腐食検出

および腐食程度の非破壊評価

DETECTION AND NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF STEEL CORROSION IN CONCRETE USING SUB-TERAHERTZ WAVES

倉品 吏玖

Riku KURASHINA

This study investigated non-destructive, non-contact reflection measurements using sub-terahertz waves in the 18–52 GHz range for corroded steel plates and round bars embedded in concrete under simulated salt damage conditions. A negative correlation was confirmed between the root mean square surface roughness and the amplitude variation of the reflection spectrum, indicating that corrosion of steel plates embedded at cover depths of up to 30 mm can be estimated. In addition, the average reflection intensity in the 27–34 GHz band showed potential for estimating corrosion of round bars embedded at cover depths of up to 20 mm.

Keywords : *Non-destructive testing, Steel Corrosion, Sub-terahertz wave, Non-contact, Internal investigation, Spectrum*

非破壊検査, 鋼材腐食, サブテラヘルツ波, 非接触, 内部探査, スペクトル

1. はじめに

かつてのスクラップアンドビルドの考えに基づくフロー型社会から、構造物の長寿命化を基盤とするストック型社会への移行が進んだ現代では、構造物の補修・維持管理技術の需要が高まっている。特に、高度経済成長期に急増した RC 造はその多くが老朽化しており、膨大な建築ストックの維持管理をいかに効率良く進められるかが喫緊の課題となっている。

RC 造の主要な劣化要因であるコンクリート内部の鉄筋腐食の検査においては、はつり調査等の破壊検査や自然電位法などの微破壊検査が用いられることが一般的である。これらは精度良く腐食状態を評価できる反面、基本は部分的な破壊やそれに伴う接触を要することから適用範囲や試験の効率面において課題も存在する。これに対し、マイクロ波や超音波などを用いた非破壊検査技術による非接触型の腐食検査技術の開発が現在精力的に行われている^{1),2)}。

本研究では、非接触型の検査技術の中でもサブテラヘルツ波を用いた鋼材腐食の非破壊検査手法を提案する。サブテラヘルツ波はミリ波近傍の周波数帯を指す電磁波であり、コンクリートに対する透過性と指向性を兼ね備えることからコンクリート分野での適用が現在模索されている^{3),4)}。また、透過性と指向性を兼ねる特徴からコンクリート内部の鋼材を対象とした簡易的な非接触測定にも応用可能であると期待される。

本手法は、鋼材が腐食に伴い形成する腐食生成物がサブテラヘルツ波に与える影響を、反射強度の変化として取得することにより腐食状態の判別を行うものである。本論文では、鋼材腐食の程度を定

量的に示す値として二乗平均平方根粗さを取り上げ、サブテラヘルツ波の反射性状との相関関係を確認し、腐食程度の推定可否を検討する。RC 造を模擬した簡易試験体としてコンクリートへ埋設した鋼板と丸鋼を対象とした、実験室レベルでの基礎的な検討について報告する。

2. サブテラヘルツ波とは

サブテラヘルツ波は、約 10 - 300 GHz（真空中約 1 - 30 mm）のミリ波帯近傍の周波数帯域の電磁波を指す。サブテラヘルツ波は、非極性物質への透過率が高く、コンクリート内部の欠陥検出や内在塩分の評価事例が存在する^{5),6)}。また、マイクロ波に比べて高い指向性を持つため、テフロンレンズやミラーを用いて自在に光路を調整できる。加えて、比較的高い分解能を有することから、非接触型の測定においても試験対象のどの位置から取得した情報かを判別し易い。この性質を活用し、Kobayashi らの検討ではコンクリート内部の鉄筋の存在を可視化することに成功している⁷⁾。また、濱崎らの検討ではサブテラヘルツ波を用いてコンクリート内部鉄筋の腐食グレードを評価しており、鉄筋形状の変化がサブテラヘルツ波の反射に影響を与える可能性を述べている⁸⁾。

このように、サブテラヘルツ波は土木・建築分野においても、その活用方法が精力的に検討されている。本研究では、透過性を重視し、該当する周波数域の中でより低周波側に位置する 18 - 52 GHz を使用した。

3. 実験概要

3.1 試験体作製

表-1 に試験体の水準を示す。実験に使用する試験体として、表面に腐食処理を施した鋼材（鋼材試験体）と、鋼材試験体が埋設されたコンクリート（埋設鋼材試験体）を作製した。図-1 に試験体の模式図を示す。使用する鋼材には、SPCC 相当の 1 mm シムプレートと SS400 の丸鋼 13φ を選択した。腐食処理は JIS Z 2371 と JIS G 0597 を参考として、塩水噴霧と乾湿繰り返しによる腐食促進試験により行った。海水を模擬した 3.5% 食塩水を試験体全体に均一に噴霧し、35°C・90%RH の湿潤条件で 1 時間、その後に 50°C・0%RH の乾燥条件で 2 時間静置した。以上の工程を 1 サイクルとして 28 サイクル行ったものと、その後さらに上記の湿潤環境下で約 5 か月静置したものを準備した。これらを、後述する定量評価結果に基づき、腐食の進行が軽微なものを「軽度 (L)」, 顕著なものを「重度 (H)」として整理した。また、比較用として同寸法かつ腐食の無い健全な鋼板および丸鋼を「腐食なし (N)」として別途用意した。

腐食処理後の鋼材は、後述する表面粗さ計測と反射率測定を行った後に、コンクリートへ埋設した。表-2 に使用したコンクリートの調合を示す。水セメント比 53%, 細骨材比 46% の普通コンクリートを使用し、試験体表面を平滑に整えるため、消泡剤 (D: AFK-2) を加えている。埋設鋼材試験体は 87.5×100×200 mm の角柱であり、鋼材の測定面からかぶり厚さが 10, 20, 30 mm になるように配置して打設を行った。打設後は 2 日間の初期養生の後に、鋼材面を保護しつつ 1 週間の水中養生を行った。養生後は 105°C で 2 日間乾燥させてから 23°C・30%RH の一定環境下で静置し、内部の質量含水率が概ね 3% 以下となるように調整した。上記の内容に加え、比較用として同寸法の無筋コンクリートも 3 体、同様の手段で作製した。

3.2 鋼材試験体の表面粗さ計測

本論文で定義した腐食状態について、実際の腐食程度を定量的に評価するため、表面粗さの計測を行った。表面粗さの指標には、局

所的な凹凸の影響を考慮しやすい二乗平均平方根粗さ S_q を選択した。本研究では、鋼材試験体表面の腐食生成物による表面粗さをレーザー距離計により計測した。距離計と試験体の距離を記録し、健全時との差分を測定箇所の隆起量 (mm) として算出した。この時、表面全体に対して 2 mm 間隔で計測を行い、試験体全面の隆起量を求めた。そして、後述する反射強度測定の測定範囲における二乗平均平方根粗さを、該当する範囲の隆起量分布から算出した。なお、測定範囲は 3.3 節の図-3 に示す 3 か所とし、二乗平均平方根粗さの算出には、ISO 25178 を参考として式(1)を用いた。

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A Z^2(x, y) dx dy} \quad (1)$$

ただし、 S_q : 二乗平均平方根粗さ (mm), A : 測定面積 (mm²), $Z(x, y)$: 座標 (x, y) の隆起量 (mm)

3.3 サブテラヘルツ測定系による反射強度測定

図-2 に本研究で使用する測定系を示す。測定系は実構造物への適用を考慮し、測定物に対して片側に装置を集約可能な反射型の測定系を採用した。(a) に示す斜め入射型の測定系と (b) に示す垂直入射型の測定系を構築し、それぞれ鋼板と丸鋼の測定に使用した。サブテラヘルツ波の発振器にはマイクロ波発生装置を使用し、18 - 52 GHz まで発振可能な通倍器により高調させて発振した。発振後は、テフロンレンズを用いて試験体表面および検出器へサブテラヘルツ波が集光するように、位置および角度を調整した。発振器の発振強度は 13 dBm とし、18-52 GHz の周波数を 0.1 GHz 間隔で変動させながら発振するスイープ信号を使用した。検出器は反射波を電圧値として取得可能であり、これを反射強度とした。

サブテラヘルツ測定系を用いて、鋼材試験体および埋設鋼材試験体の反射強度測定を行った。測定は 1 試験体に対して図-3 に示す 3 か所を測定した。なお、1 か所の測定の所要時間は概ね 1 分間である。測定時には常に鋼材表面からレンズまでの距離が 200 mm で一定となるように測定系を設置した。測定は鋼材試験体と埋設鋼材試

パラメータ	変数
鋼種	鋼板 (SPCC 相当), 丸鋼 (SS400)
腐食状態	腐食なし, 軽度, 重度
埋設時かぶり厚さ	10, 20, 30 mm

単位量 (kg/m ³)						
C	S	G	W	AE	D	
340	810	954	180	1.7	0.0102	

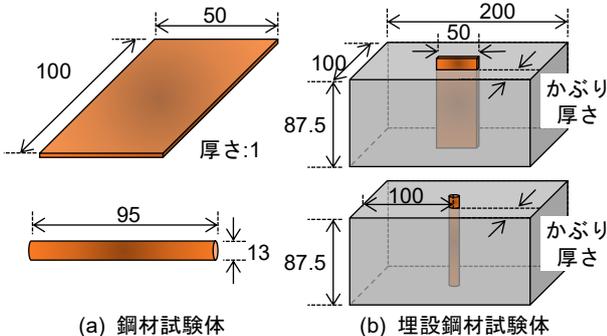


図-1 試験体の模式図 (単位: mm)

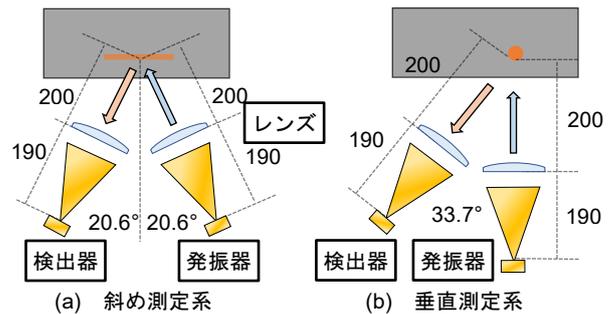


図-2 使用する測定系と測定の模式図 (単位: mm)

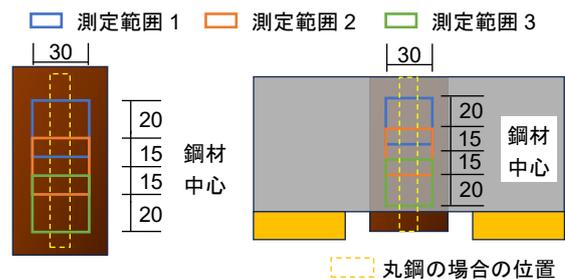


図-3 測定箇所の模式図 (単位: mm)

験体に加え、比較用の無筋コンクリートに対して実施した。また、鋼材試験体および鋼板の埋設鋼材試験体の反射強度は試験体間の比較を容易にするため、基準試験体から得られる反射強度で除することで、反射率スペクトルへ変換して評価を行った。この時、鋼材試験体の基準試験体には同種の 1 mm シムプレートを使用し、埋設鋼材試験体の基準試験体には、無筋コンクリートの内 1 体を使用した。

4. 実験結果とスペクトルの特徴分析

図-4 に鋼材試験体の反射率スペクトルを示す。なお、本論文で示す反射率スペクトルは±0.2 GHz の範囲で移動平均をとり、微細なノイズを平滑化している。鋼材試験体の反射率は、鋼板と丸鋼の双方で概ねどの周波数においても腐食なし>軽度>重度の順に低下した。これは腐食が進むほど試験体表面に形成される腐食生成物により表面形状が粗くなり、照射されたサブテラヘルツ波の一部が散乱するためと考えられる。表面粗さによる影響を確認するため、二乗平均平方根粗さと反射率の比較を行った結果を図-5 に示す。ここで示す反射率平均は、18-52 GHz で得られた反射率の平均値である。多少のばらつきがみられるものの、二乗平均平方根粗さと反射率には、決定係数が約 0.7 の強めの負の相関が見られた。このことから、反射率の低下から二乗平均平方根粗さを大まかに推定できるものと考えられる。ただし、丸鋼の方が試験体ごとのばらつきが多く出ており、鋼板に比べて測定誤差が大きく出るものと想定される。次に、鋼板の埋設鋼材試験体と無筋コンクリートの反射率スペク

トルを図-6 に示す。無筋コンクリートの反射率は概ね 1 付近にまとまる一方で、特にかぶり厚さ 10, 20 mm では、反射率スペクトルに周波数に依存した増減が繰り返し現れることが確認された。この挙動は、かぶり厚さ 30 mm においても 18 - 35 GHz 周辺でわずかに確認でき、埋設鋼板の有無による反射率スペクトルの変調であると想定される。この現象は、本測定系の検出器が内部鋼板からの反射波だけでなくコンクリート表面からの反射波を同時に取得しており、二成分が干渉を起しているためと考えられる。

ここでは、これらの増減の強さとかぶり厚さ・腐食状態との関係に着目するため、反射率スペクトルに含まれる周波数に依存した揺らぎを定量化する指標として、周波数方向の特定周波数域における RMS 振幅を導入した。RMS 振幅は、スペクトルの平均値からの偏差の大きさを表す量であり、干渉や散乱など複数の要因によって生じる周波数応答の不安定性を、現象論的に評価することができると考えられる。ここでは、反射率の増減幅を周波数ごとに局所 RMS 振幅として式(2)より算出し、特定の周波数域での平均値をその反射率スペクトルの増減幅とした。なお、窓幅はスペクトルの最大最小ピークを常に含むように、変化の発生間隔を参考にかぶり厚さ 10 mm で 61, 20 mm で 31, 30 mm で 21 と設定した。また、RMS 振幅を抽出する周波数域はかぶり厚さ 10 mm で 18 - 52 GHz, 20 mm で 18 - 42 GHz, 30 mm で 18 - 35 GHz と定めた。

$$A(f_i) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (r - \bar{r})^2} \quad (2)$$

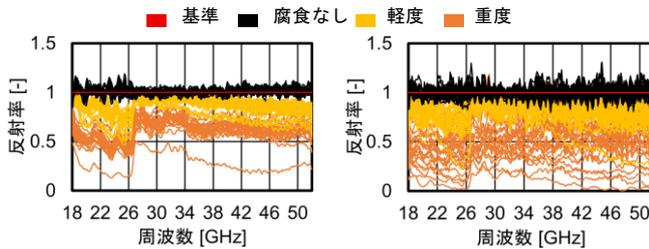


図-4 鋼材試験体の反射率スペクトル

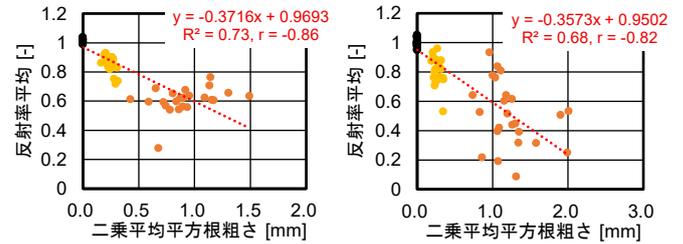


図-5 鋼材試験体の二乗平均平方根粗さと反射率の関係

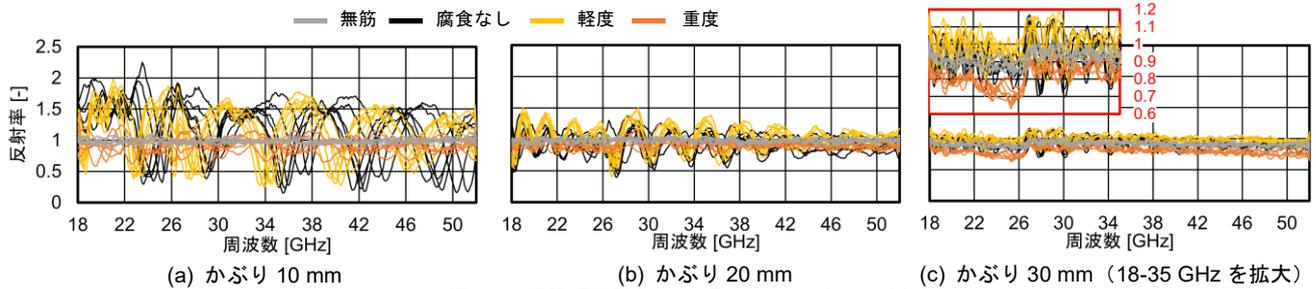


図-6 埋設鋼材試験体 (鋼板) の反射率スペクトル

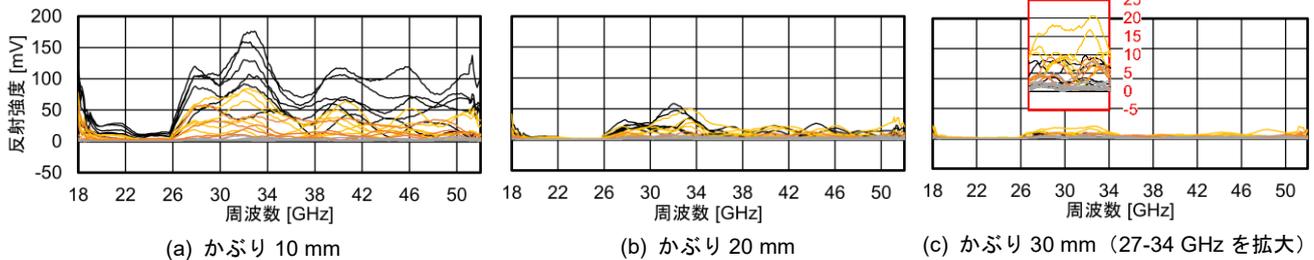


図-7 埋設鋼材試験体 (丸鋼) の反射強度スペクトル

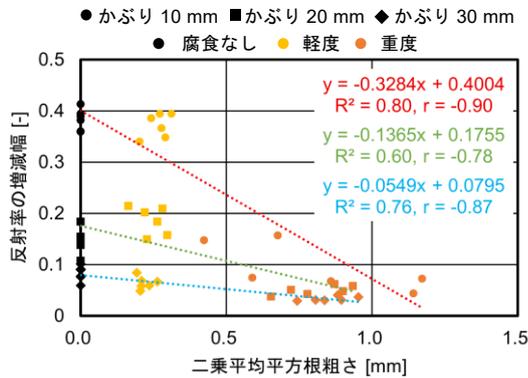
ただし、 $A(f_i)$: 周波数 f_i を基準とした RMS 振幅 (-), N : 窓幅, r : 反射率 (-), \bar{r} : 窓幅内の平均反射率 (-)

図-7 に丸鋼の埋設鋼材試験体と無筋コンクリートの反射強度スペクトルを示す。なお、 ± 1.0 GHz の範囲で移動平均をとり、ノイズを平滑化している。反射強度スペクトルは埋設された丸鋼の測定時には、垂直測定系の特性としてコンクリート表面からの反射成分が抑制され、前述した干渉を示す周期的な強度の増減は確認されなかった。また、無筋コンクリートの反射強度は周波数に関わらずほぼ 0 V を示したことから、丸鋼の埋設鋼材試験体の反射強度スペクトルはおおよそ丸鋼からの反射成分のみを示すものと仮定できる。

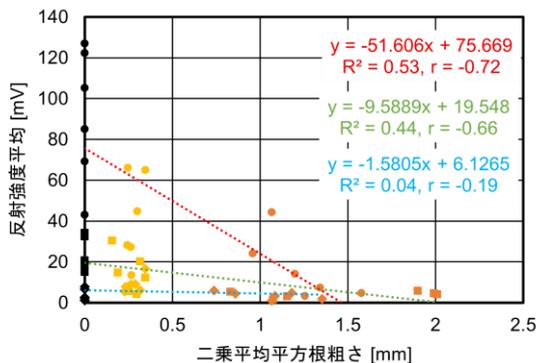
かぶり厚さ 10, 20 mm では、健全時には高い反射強度を示し、特に 27-34 GHz で高いことが確認された。また、丸鋼の腐食が進むにつれて、腐食なし>軽度>重度の順に反射強度が低下する傾向を示した。ただし、腐食の有無に関わらず、かぶり厚さが増加するほど反射強度は小さくなっており、特にかぶり厚さ 20 mm 以降では腐食状態による強度差の判別は難しくなった。これは、周波数の増加に伴う透過力の低下が要因と考えられ、丸鋼の埋設鋼材試験体の評価を行う場合には、低周波側の周波数域を使うのが適当であると思われる。ただし、27 GHz 以下の周波数域では反射強度の変動が確認出来なかったため、本論文では丸鋼の埋設鋼材試験体の腐食量と比較する特徴量として、27 - 34 GHz における反射強度の平均値を用いた。

5. 二乗平均平方根粗さとスペクトルの特徴量の比較

図-8 にスペクトルの特徴量と二乗平均平方根粗さの関係と、かぶり厚さごとに算出した近似曲線を併せて示す。かぶり厚さ 30 mm の丸鋼以外において、二乗平均平方根粗さの増加に従い、すなわち、



(a) 埋設鋼材試験体の腐食量と反射率の増減幅の関係



(b) 埋設鋼材試験体の腐食量と 27-34 GHz 反射強度平均の関係

図-8 二乗平均平方根粗さとスペクトル特徴量の比較

腐食程度が大きくなるに従い、反射率の増減幅あるいは 27 - 34 GHz における反射強度平均が小さくなる様子が確認された。特に鋼板のかぶり 10 - 30 mm では高い相関を示しており、反射率の増減幅から未知の埋設鋼板の表面粗さでも近似式を基に推定可能であることが示唆された。一方、かぶり 30 mm の丸鋼は透過減衰の影響が支配的となり、粗さの大小に関わらず反射強度が非常に小さくなり腐食状態ごとの差異が判別不能になったと想定される。この結果は、本測定系における適用限界を示すものと解釈でき、本手法単体で測定を行った場合には、かぶり厚さ 30 mm 以下の鋼板とかぶり厚さ 20 mm 以下の丸鋼の腐食状態の推定が可能であることが示唆された。鋼板と比較すると、各かぶり厚さで丸鋼の方が相関係数は低く、同程度の粗さであってもスペクトル特徴量のばらつきが見られた。これは、埋設された丸鋼の測定時に得られる反射強度の絶対値が非常に小さく、コンクリート中で受ける骨材等での散乱による強度減衰の影響が、鋼板に比べて強く表れている可能性が懸念される。したがって、推定精度の向上にはコンクリート中で生じる信号強度の減衰特性の詳細な把握が必要と思われる。

6. まとめ

サブテラヘルツ非破壊検査によるコンクリート中の埋設鋼材の腐食検出手法の開発に向け、腐食状態の異なる鋼板・丸鋼を対象に反射強度測定を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 腐食鋼板・丸鋼の反射強度測定の結果から、18 - 52 GHz で腐食に伴う反射率の低下を確認した。また、粗さ計測の結果との比較から、二乗平均平方根粗さと反射率の間に決定係数 0.7 程度の負の相関を確認した。
- (2) 18 - 52 GHz におけるコンクリート中の埋設鋼板の反射強度測定の結果より、反射率スペクトルに表れる反射率の増減幅の大きさから、かぶり厚さ 30 mm 以下の埋設鋼板の腐食程度を推定できる可能性を示した。
- (3) 18 - 52 GHz におけるコンクリート中の埋設丸鋼の反射強度測定の結果より、27 - 34 GHz の反射強度平均からかぶり厚さ 20 mm 以下の埋設丸鋼の腐食程度を推定できる可能性を示した。

参考文献

- 1) Roqueta, G., Jofre, L., and Feng, M.: Analysis of the Electromagnetic Signature of Reinforced Concrete Structures for Nondestructive Evaluation of Corrosion Damage, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 60(4), 1090-1098, 2012.4
- 2) Ghosh, D. et al.: Nondestructive Evaluation of Rebar Corrosion-Induced Damage in Concrete through Ultrasonic Imaging, Journal of Materials in Civil Engineering, 32(10), 04020294, 2020.7
- 3) Oyama, Y. et al.: Sub-terahertz imaging of defects in building blocks, NDT&E International, 42(1), 28-33, 2009.1
- 4) Tanaka, A. et al.: Fundamental Properties of Sub-THz Reflected Waves for Water Content Estimation of Reinforced Concrete Structures, Buildings, 14(4), 1076, 2024.4
- 5) Tripathi, S. R. et al.: Non-destructive Inspection of Chloride Ion in Concrete Structures Using Attenuated Total Reflection of Millimeter Waves, Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 34(2), 181-186, 2013.2
- 6) Dash, J. et al.: Non-Destructive Inspection of Internal Defects in Concrete Using Continuous Wave 2D Terahertz Imaging System, 2013 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2013.9
- 7) Kobayashi, C., et al.: Non-destructive testing of reinforced concrete structures using sub-terahertz reflected waves, Developments in the Built Environment, 18, 100423, 2024.3
- 8) 濱崎仁ほか: サブテラヘルツ波を用いたコンクリート中の鉄筋腐食に対する非破壊・非接触型評価手法に関する研究, 実験力学, 24(2), 50-58, 2024.6