

報告 サブテラヘルツ反射波を用いたスペクトル測定による鋼材腐食の検出手法開発に関する基礎的研究

倉品 吏玖*1・小林 知大*1・西脇 智哉*2・田中 章夫*3

要旨： 現在様々な分野にて利用可能性が検討されるサブテラヘルツ波について、鋼材腐食の検出技術に関する基礎的な検討を行った。具体的には、鋼材単体での腐食検出、コンクリート内部の鋼材を模擬した試験体の鋼材検出および腐食検出について検討した。その結果、鋼材腐食の進行に伴いサブテラヘルツ波の反射強度が低下すること、かぶり厚さを 10~20 mm としたコンクリート内部の鋼材は検出が可能であることを確認した。加えて、連続的に周波数を変化させたスペクトル測定により、特定の周波数を測定に用いることで、腐食検出の可能性が示唆された。

キーワード： サブテラヘルツ波、スペクトル、非破壊検査、内部探査、鋼材腐食

1. はじめに

社会資本の老朽化やストック型社会への移行が進む昨今では、住宅やインフラ設備といった構造物の適切な補修・および維持・管理方法が求められており、特に、鉄筋コンクリート構造物に対する検査方法の需要が高まっている。現在では、鉄筋コンクリート構造物を対象とした非破壊・微破壊検査手法は多く存在している^{1) 2)}。例えば内部鉄筋の状態を検査する手法として、構造物表面をはつり取り目視で検査を行うはつり調査や、鉄筋の腐食により生じる電位の変化を読み取る自然電位法、鉄筋探査機を用いた電磁波レーダ法などが確立されている。これらの検査手法はその有用性から広く普及しているが、いずれも接触による診断を必要としているため、原子力発電所建屋のような管理区域や、立ち入りが制限されるほど老朽化の激しい構造物のような、直接接触しての検査が困難な場所への適用が困難である。したがって、遠隔・非接触による検査手法が必要とされ、特にコンクリート内部の鉄筋の腐食状況を遠隔・非接触で判別する検査手法の精力的な検討が進められている^{3) 4)}。

近年では、このような非接触検査手法の一つとして、サブテラヘルツ波の適用が提案されている⁵⁾。サブテラヘルツ波とは、電波と光波の中間領域に属する電磁波であり、電波の透過性と光波の直進性を兼ね備えている。すなわち、コンクリートに対する透過性と測定装置としての利便性の点から、コンクリート内部の欠陥検出への適用が期待されている。

そこで本研究では、サブテラヘルツ波を用いた遠隔・非接触による鋼材腐食の検出手法を提案する。本手法の鉄筋コンクリート実構造物への適用を視野に入れ、鋼材単体での測定に加え、かぶりコンクリートを模擬し

た試験体の内部鋼材を対象とした、実験室レベルでの基礎的検討の結果について報告する。

2. サブテラヘルツ波について

図-1 に、テラヘルツ波・サブテラヘルツ波の帯域を示す。テラヘルツ波とは、電波と光波の中間領域に属する電磁波であり、周波数が約 0.3~10 THz、波長が 300 μm ~ 1 mm (真空中) の電磁波を指す。テラヘルツ波は電波に見られる透過性を持ち、コンクリートなどの非極性物質への透過率が高い。また、光波に見られる直進性を有し、レンズやミラーを用いた集光や反射等による操作が容易なため、比較的高い分解能を得られる⁶⁾。テラヘルツ波は主に材料分野での活用が精力的に検討されている。隠された危険物の特定など、内容物の特定に関し、その例は多岐にわたり存在する⁷⁾。

サブテラヘルツ波とは、周波数が約 0.03~0.3 THz、波長が真空中で 1~10 mm (真空中) の電磁波を指し、テラヘルツ波に似た特性でありながらより高い透過性能を有している。サブテラヘルツ波はその高い透過性から、コンクリートを透過して内部の様子を可視化する技術への応用が進められている。Dash らのコンクリート内部のひび割れや空隙を検出する研究⁸⁾や、田邊らの内部鉄

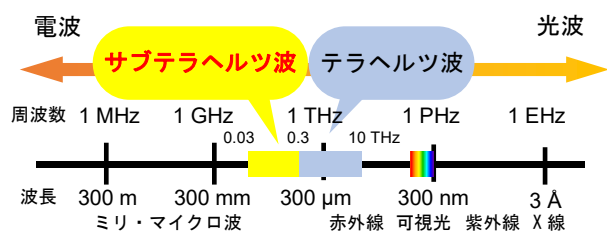


図-1 テラヘルツ・サブテラヘルツ波の周波数帯域

*1 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 (学生会員)

*2 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 日本工業大学 建築学部建築学科 建築コース 准教授 博士 (工学) (正会員)

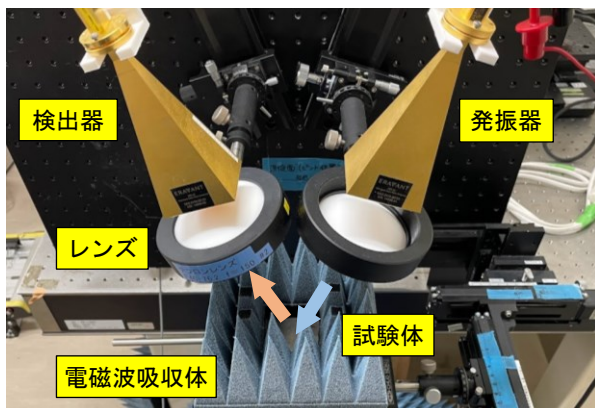
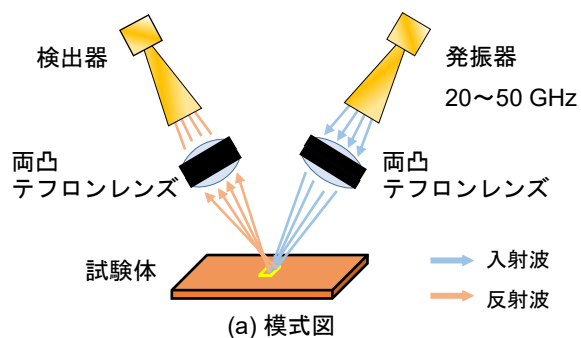
筋腐食をイメージング画像として可視化する研究⁹⁾などが挙げられ、コンクリートの内部性状の複合的な評価への利用可能性が期待されている。

本研究ではコンクリートへの透過性能を考慮し、サブテラヘルツ波を採用した。

3. 測定・実験概要

3.1 測定概要

本研究では実構造物への適用を考慮し、測定対象の両側に発振・検出器を設置する必要の無い反射波による測定を行った。また、テラヘルツイメージング技術を用いた既往研究^{10) 11)}における手法は、測定の簡便性と出力結果を容易に解釈できる点に大きな優位性がある。しかし、これらの手法は任意の単一周波数を用いた測定であり、周波数によって結果が大きく変動することが確認されている。そのため、これらの手法では周波数を連続的に変化させ、測定に適した周波数を事前に検討する必要がある。そこで本研究では、20~50 GHz の周波数域を 0.2 GHz ごとに連続的に変化させ測定した。サブテラヘルツ波の照射により得られる反射波の検出強度（単位 [V]）を周波数ごとに 5 回ずつ測定し、その結果の平均



(b) 実際の測定系
図-2 測定系の概要

値をグラフ上にプロットすることで反射スペクトルを求めた。

測定系の概要を図-2 に示す。サブテラヘルツ波の光源にはマイクロ波発生装置を使用し、18~52 GHz まで発信可能な増倍器により増幅させて発振した。なお、発振器には EMI 除去フィルタを接続せずに実験を行った。小林ら¹¹⁾の検討を参考にテフロンレンズを用いて、試験体で反射したサブテラヘルツ波が検出器に集光するよう試験体、レンズ、発振・検出器の距離や角度を調整した。また、試験体以外からの反射を極力抑えるために電磁波吸収体により試験体を囲った。

3.2 実験概要

本論文では、最も基礎的な鋼材単体を試験体とする測定を実験 1、かぶりを模擬したコンクリートをかぶせた鋼材を試験体とする測定を実験 2 として、反射スペクトル測定を行った。実験 1 では、腐食鉄筋を模擬した鋼材試験体を 50 × 50 mm の範囲で測定し、鋼材の腐食の程度による反射スペクトルの変化を確認した。また、本文 3.1 で述べた微小区域での反射率を一点ずつ求めてメッシュ状に可視化する方法で面測定を行い、反射スペクトルの結果との整合性を確認した。

実験 2 では、腐食期間の異なる鋼材をかぶり厚さ 10, 20, 30 mm のコンクリートで覆った試験体と、鋼材を含まない厚さ 10, 20, 30 mm のコンクリート試験体 100 × 100 mm の範囲で測定することで、鋼材の有無および腐食の程度の違いによる反射スペクトルの変化を確認した。

ここでは、検出器により測定される電圧の値を反射強度（単位 [V]）とする。腐食の無い健全な試験体から得た反射強度を V_1 、腐食した試験体から得た反射強度を V_2 とし、式(1)にて求められる値を反射強度の増減率 $Cr[\%]$ と定義した。

$$Cr = \frac{V_2 - V_1}{V_1} \times 100 \quad (1)$$

3.3 使用材料と配（調）合

鋼材形状による影響を考慮し、平坦な測定面を広く確保可能な SS400D のミガキ平鋼板を腐食対象の鋼材として用いた。また、コンクリート部分にはセメントとして普通ポルトランドセメント（密度 3.16 g/cm³，比表面積 3140 cm²/g），細骨材として砕砂（表乾密度 2.66 g/cm³），粗骨材として砕石（表乾密度 2.68 g/cm³，最大寸法 20 mm）を使用した。

コンクリートの配（調）合を表-1 に示す。水セメント比は 55 % とし、細骨材・セメントを投入して空練りを 1 分行った後、水を加えて 1 分練り、最後に粗骨材を入れて 2 分練り混ぜた。スランブは 24 cm，練り混ぜ時の温度は 14.8 °C，空気量は 1.0 % であった。練り混ぜにはオムニミキサー（容量 5 L）を用いた。

表-1 コンクリートの配（調）合 (kg/m³)

水	セメント	細骨材	粗骨材
192	349	873	1048

3.4 試験体の作製

試験体概要を図-3 に示す。実験 1 に用いる腐食させる鋼材試験体として、大きさ 100×50 mm、厚さ 1 mm の平鋼板を用いて、乾湿繰り返し操作により表面を腐食させて作製した。腐食の手順として、15 %過酸化水素水を酸化剤に用い、NaCl 飽和水溶液と併用して試験体に噴霧し、40 °C の条件で乾燥と湿潤の条件を繰り返し静置した。なお、温度は 40 °C 一定として乾燥時は湿度 0 %、湿潤時は 80 % に調整した。また、同一面上において腐食の有無をパラメータとして測定するための試験体として、大きさ 100 × 50 mm、厚さ 1 mm の平鋼板の表面を 50 mm ずつに二分し、片側をビニールテープにより保護して、片側のみ上記と同様の条件で腐食させたものを作製した。

実験 2 に用いる模擬試験体の作製には実験 1 に用いた腐食鋼材を使用し、腐食面を覆うように 100 × 100 × 400 mm のコンクリートを打ち込み作製した。打込み後 3 日で脱型し、材齢 7 日まで水中養生した後、湿式コンクリートカッターにより厚さ 11, 21, 31 mm に切断した。その後、90 °C ・ 1 日間の条件で乾燥させ測定を行った。

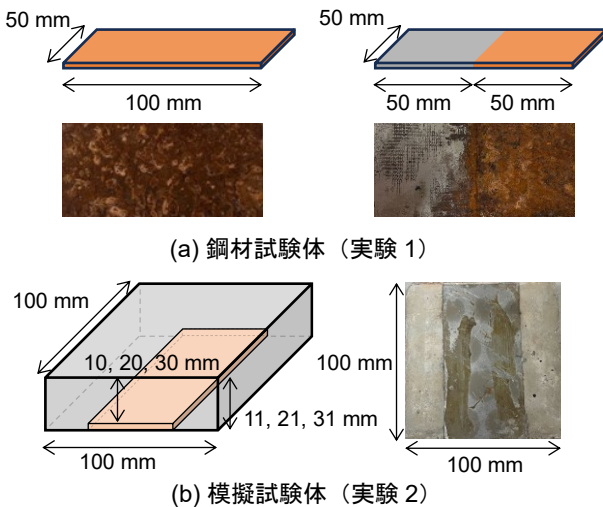


図-3 試験体概要

表-2 実験水準

試験項目	パラメータ	変数
実験 1.1 鋼材単体	鋼材厚さ [mm]	1
	腐食期間 [週]	0, 1, 3, 5, 7
	周波数 [GHz]	20~50 0.2 ずつ
実験 1.2 面測定	鋼材厚さ [mm]	1
	周波数 [GHz]	24.8, 29, 49.4
実験 2 模擬試験体	鋼材厚さ [mm]	1
	かぶり厚さ [mm]	10, 20, 30
	腐食期間 [週]	0, 3
	周波数 [GHz]	20~50 0.2 ずつ

3.5 測定項目

本研究での実験水準を表-2 に示す。

実験 1 として、腐食した鋼材単体を試験体として測定を行った。異なる腐食期間の試験体を使用し、腐食の進行度合いによる反射スペクトルの変化を検討した。また、腐食部と非腐食部を持つ試験体を使用し、50 × 50 mm の範囲を 2 × 2 mm ピッチで一点ずつ測定し、メッシュ状に取得した反射強度をコンター図として画像化した。

実験 2 として、かぶりコンクリートを設置した模擬試験体の測定を行った。かぶり厚さを変更することで、金属の検出可能な厚さおよび腐食の有無の検出可能性について検討した。

4. 結果と考察

4.1 腐食程度の確認

はじめに、実験 1 で使用する鋼材の腐食の進行度合いを確認した。鋼材の腐食期間 (単位 [週]) と試験体の単位面積あたりの質量増加量 (単位 [g/m²]) の関係を図-4 に示す。一般的には、鋼材の腐食度合いは腐食生成物を除去した後の試験体の質量減少量を元に評価される。しかし、本実験では試験体の腐食を進行させ、この過程を経時的に測定して変化を確認することを目的としているため、測定ごとに腐食生成物を除去することができない。したがって、ここでは佐藤らの報告を元に質量増加量により腐食の程度を評価した¹²⁾。腐食期間の増加に伴い、試験体の質量が大きくなることから腐食期間に応じた腐食の進行を確認した。

4.2 鋼材単体の測定

はじめに、腐食期間の異なる腐食試験体の測定結果を図-5 に示す。実験 1, 2 において、試験体名の C に続く数字は腐食週数を表す。腐食期間を長くして腐食が進行するに従って、反射強度が概ね低下する傾向が確認できる。図-6 は、この結果から低周波域 (24~30 GHz) および高周波域 (45~50 GHz) を抜粋して示した結果である。これらのグラフから読み取れるように、実線で示した 24~25 GHz や 49~50 GHz では、腐食期間が長くなり腐食が進行するにつれて反射強度が低下する傾向が

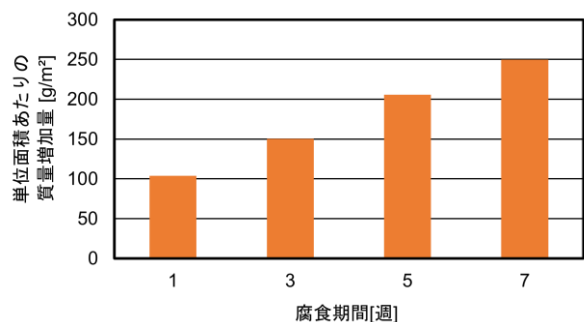


図-4 単位面積における質量増加量の推移

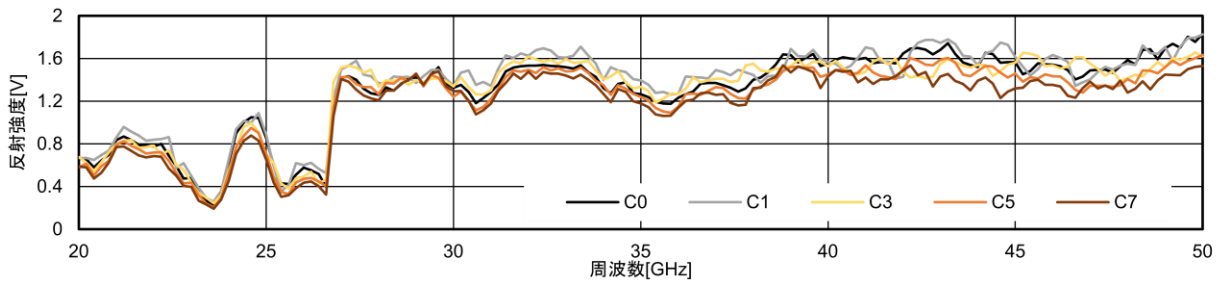
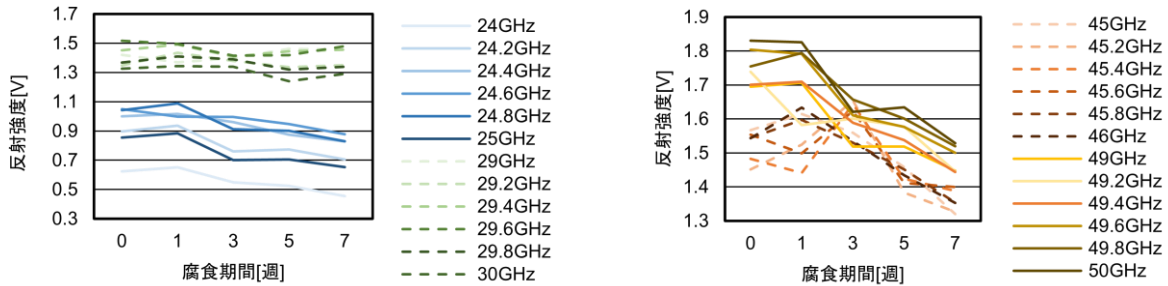


図-5 腐食期間の異なる試験体の反射強度の変化



(a) 低周波域 (24~30 GHz)

(b) 高周波域 (45~50 GHz)

図-6 特定の周波数帯における反射強度の変化

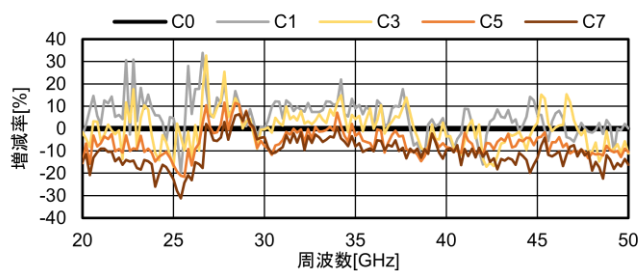


図-7 反射強度の増減率

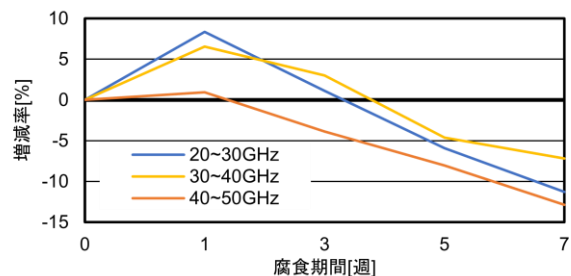


図-8 周波数毎の増減率の平均値と腐食期間の関係

確認できる。一方で、点線で示した 29~30 GHz の場合は反射強度の変化が非常に小さく、45~46 GHz では腐食期間 1 週または 3 週での反射強度が最も大きくなった。このように、周波数を連続的に変化させて細分化し、それぞれの反射強度を確認すると、特定の周波数では反射強度の変化の傾向が異なることが確認できる。これは、電磁波の波長や入射する物質の組成や形状等に応じて散乱・吸収する電磁波の量が異なることが原因だと考えられる。全体的に反射強度は腐食の進行とともに低下していることから、その傾向を正確に読み取れる 24~25 GHz や 49~50 GHz の周波数帯が鋼材の腐食程度の判定に適していると予想できる。このように、20~50 GHz の範囲を連続的に測定することで、鋼材の腐食程度の判定に適した特定の周波数を用いて、より詳細な腐食状態を特定できる可能性が示唆された。また、27 GHz 周辺では反射強度の大きさが急激に変化する様子が確認できるが、これは使用した検出器の特性により 27 GHz 前後で検出器の感応性が異なることが原因と考えられる。

反射強度の増減率を求めたグラフを図-7 に示す。ここで、増減率は式(1)に示した式を用いて、C0 試験体を基準として算出した。20~26 GHz や 40~50 GHz で、腐食期間の長い C7 試験体では 20%程度の低下を示し、腐食期間の短い C3 では 5~10%程度の低下を示した。この結果についても、周波数によって腐食期間に対して減少率が一定とはならないことが確認できるが、図-8 に示すように、10 GHz ごとの範囲で平均をとると、腐食の進行につれて増減率が低下する傾向を確認できた。これらの結果から、鋼材の腐食程度の判定に適していると思われる周波数帯域で、増減率の平均値を算出して評価することにより、判別の妨げとなる周波数ごとの増減率の細かい挙動の差を軽減することが可能になり、より正確に腐食状態の判定ができると考えられる。

ここまでに実施した反射強度測定において、鋼材腐食の進行に伴う反射強度の減少傾向を明確に確認できた 24.8 GHz や 49.4 GHz を使用して行った面測定の結果を図-9 に示す。ここでは、相対反射強度について、測定

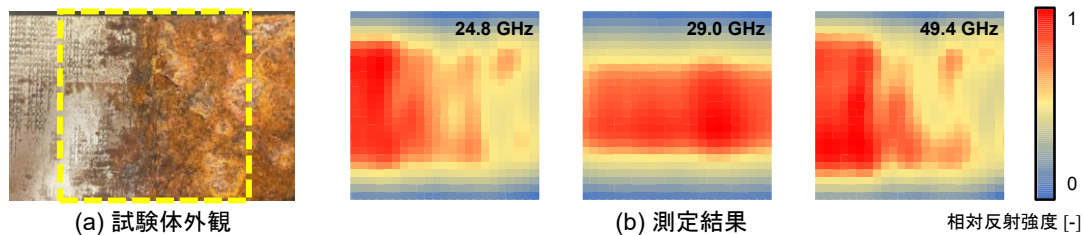


図-9 面測定の結果

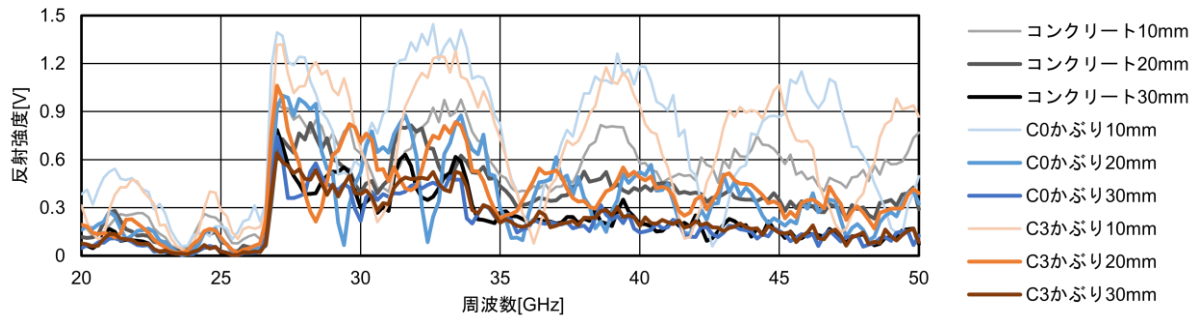


図-10 模擬試験体測定結果

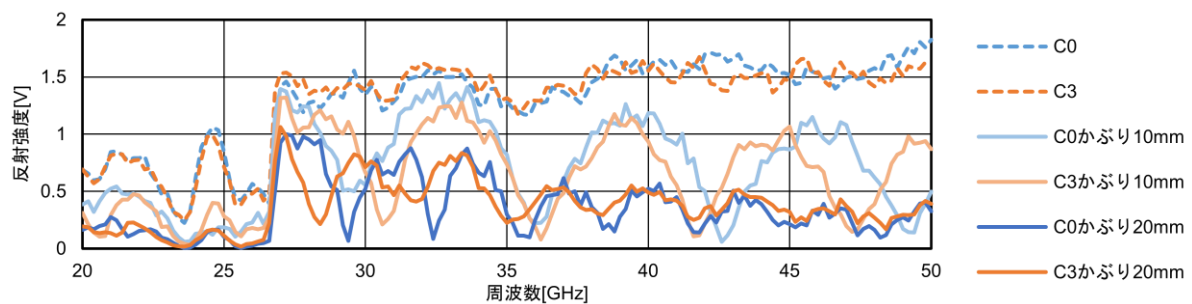


図-11 鋼材単体の試験結果との比較

範囲の反射強度の最大値を1，最小値を0として規準化して表示している。図中の左側半分は腐食の無い健全な面であり，右側は腐食期間7週を経た腐食の進行した面である。ここに示した図からは，腐食面の反射強度が健全な面と比較して低下している傾向が視覚的に確認できた。また，比較として強度変化が小さい29 GHzの測定も行ったが，こちらは左右の強度差が確認できなかった。これらの傾向は図-6の結果と一致しており，イメージングによる測定結果との整合性を確認できた。このように，反射スペクトル測定によって適切な周波数を発見し，可視化技術に応用することで，より精度の高い測定を迅速に行うことができる可能性が示唆された。

4.3 模擬試験体の測定

C0，C3を含んだ模擬試験体と鋼材を含まないコンクリート試験体の測定結果を図-10に示す。かぶり厚さ10，20 mmにおいては，鋼材の有無により反射強度の大きさが変化する傾向が確認できた。鋼材がある場合，コンクリート単体と比較して波形が大きくなることがグラフから読み取れる。また，特にかぶり厚さ20 mmにて

顕著に見られる傾向として，C0に比べてC3のスペクトル波形の振れ幅が小さいことが確認できる。このことから，周期的に表れるスペクトル波形の大きさを読み取ることによって腐食の有無を判別できる可能性が示唆される。この一方で，かぶり厚さ30 mmの場合は鋼材の有無による波形の違いが確認できなかった。本実験に用いた周波数帯では，かぶり厚さ30 mmに対しては透過性能が十分ではなく，コンクリート部分からの反射成分が卓越して鋼材面での反射を測定できていないものと考えられる。

図-11に実験1で得られた結果との比較を示す。かぶり10 mmの模擬試験体との比較より，27 GHz以降で周期的な反射強度の低下が確認できる。かぶりがあることで，コンクリート面での反射波と鋼材面での反射波が干渉を起こし，反射強度の増加と低下を周期的に生じさせると考えられる。C3を含むコンクリートのスペクトル波形はC0を含むコンクリートの波形と比べて周期のずれが大きくなる様子が分かる。このようなずれの原因として，鋼材面に生じた腐食生成物の種類による屈折率の変化や腐食膜厚の増加¹³⁾により，屈折率および光路長

に変化が生じることで、反射波の位相および干渉の周期がずれた可能性が考えられる。周期のずれを補正し、適切な周波数を選ぶことが出来れば反射強度や振幅の大きさによる腐食評価を行える可能性がある。もしくは、かぶり厚さの増加に伴って周期が短くなる様子が見られることから、周期幅によるかぶり厚さの推定も同時に行える可能性が示唆される。

5. 結論

サブテラヘルツ波を用いた鋼材腐食の検出方法の開発に向け、腐食鋼材単体やかぶりを模擬したコンクリートをかぶせた腐食鋼材を対象として、反射波によるスペクトル測定を実施した。以下に、本実験の範囲で得られた知見を示す。

- 1) 鋼材腐食が進行するにつれて、反射強度が低下することを 20~50 GHz の周波数帯にて確認できた。また、測定結果から 24~25 GHz, 49~50 GHz が鋼材の腐食程度の判定に有効であることを特定した。
- 2) 反射強度から増減率を算出することで、20~26 GHz や 40~50 GHz で 20%程度の増減率の減少を確認した。また、判定に適した周波数帯で増減率の平均値を求めることで、より正確に鋼材の腐食程度の判定ができる可能性を確認した。
- 3) スペクトル測定で特定した鋼材の腐食程度の判定に有効な周波数と強度変化が見られない周波数を使用して面測定を行い、測定画像とスペクトル測定の整合性を確認した。
- 4) かぶり厚さ 10, 20 mm において、内部鋼材の有無による反射強度の変化を確認した。
- 5) かぶりがある場合に波の干渉による周期的なスペクトル波形を確認した。また、腐食生成物の変化や腐食膜厚の増加に応じた周期のずれを補正することで、かぶり厚さや鋼材腐食の推定を行える可能性を示した。

本研究では基礎的検討として、検出難易度が低いと考えられる平鋼板を用いた。今後、鉄筋などの実構造物に用いられる鋼材についても検討を行うことで、構造物の非破壊検査技術としての実用化に向けたデータの蓄積をする必要がある。本手法による反射スペクトルによる測定と、先に示した鉄筋コンクリート内部の可視化技術との併用により、サブテラヘルツ波を用いた検査技術のさらなる機能拡大が期待される。

謝辞

本研究は、JAEA 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業 JP JA 21 P 21458909 の助成を受け行ったものである。また本研究の実施にあたり、芝浦工業大学・濱

崎仁教授、田邊匡生教授、株式会社コンステック・佐藤大輔氏に多大なる助力を頂いた。ここに記し深謝する。

参考文献

- 1) 永山勝：コンクリートの非破壊試験の理論と実際、コンクリート工学, 51(2), 194-199, 2013
- 2) 榊田佳寛, 森濱和正, 濱崎仁：電磁波レーダおよび電磁誘導による鉄筋探査の日本非破壊検査協会規格の制定, コンクリート工学, 49(4), 15-21, 2011
- 3) 片山英樹：屋外環境における大気腐食モニタリング, 表面科学, 36(1), 24-28, 2015
- 4) 高德類, 新井淳一, 野嶋潤一郎, 溝渕利明：赤外線を用いたコンクリート中の鉄筋腐食状況の把握に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 36(1), 2032-2037, 2014
- 5) 原星海, 清水耕史, 西脇智哉, 田中章夫：サブテラヘルツ反射波を用いた非破壊検査手法の開発に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, 44(1), 1408-1413, 2022
- 6) 福地哲生, ほか：テラヘルツ波イメージングによる遮熱コーティングの非破壊検査における空間分解能評価, 電気学会論文誌 A, 132(10), 864-870, 2012
- 7) 深澤亮一：応用物理, 公益社団法人応用物理学会, 75(4), 312-316, 2010
- 8) 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 (IRMMW-THz), 2013, DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2013.6665690
- 9) T. Tanabe and Y. Oyama, "Terahertz Non-Destructive Monitoring for Infrastructure Components," 2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Kyoto, Japan, 2018, 1471-1473, DOI: 10.23919/APMC.2018.8617139.
- 10) 疋島宗哉, 濱崎仁, 荒川璃音, 田邊匡生：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・非接触型評価手法の検討, コンクリート工学年次論文集, 45(1), 1282-1287, 2023
- 11) 小林知大, 原星海, 西脇智哉, 田中章夫：サブテラヘルツカメラを利用した反射波による鉄筋コンクリート内部の可視化技術に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, 45(1), 1438-1443, 2023
- 12) 佐藤幸弘, 左藤眞市, 中出卓男, 村上義夫：金属材料の腐食試験方法, 大阪府立産業技術総合研究所報告, 15, 42-49, 2001
- 13) 高谷哲, ほか：コンクリート中における鉄筋の腐食生成物の生成プロセスおよび電気化学的特性, 土木学会論文集 E2, 71(3), 235-247, 2015