

論文 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

小林 知大^{*1}・原 星海^{*1}・西脇 智哉^{*2}・田中 章夫^{*3}

要旨：新たな電磁波領域として活用が期待されるサブテラヘルツ波について、カメラを用いた鉄筋コンクリート内部の可視化技術について基礎的な検討を行った。具体的には、埋設鉄筋を模擬したアルミテープの検出、ひび割れを模擬したスリットの検出について検討した。その結果、厚さ 20 mm までのコンクリートの裏面にあるアルミテープの検出が可能であること、幅 1 mm 以上のスリットの検出が可能であること、仕上げ材を模擬した厚さ 5 mm のモルタル裏面に隠れたスリットの検出が可能であることを確認した。加えて、カメラの多点同時測定と測定系の小型化により既往の研究と比較して走査性能の大幅な向上を確認した。

キーワード：サブテラヘルツ波、カメラ、非破壊検査、内部探査、ひび割れ、鉄筋

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート構造物など社会資本の急速な老朽化に伴い、適切な調査・診断と維持管理の重要性が指摘されている。鉄筋コンクリート構造物を対象とした非破壊・微破壊試験方法は数多く提案されており^{1) 2)}、赤外線サーモグラフィによる仕上げ材の剥離調査や電磁波レーダによる鉄筋探査など、光学系を利用した調査方法も確立されたものがある。一方で、原子力発電所の管理区域など、容易に人が近づいて作業できない状況下でも適用可能とするためには、非接触・遠隔の非破壊検査手法が必要であるが、未だ十分に整備されていない。特に、仕上げ材の裏側にあるひび割れや、かぶりコンクリートの奥にある鉄筋の状態などは、目視やデジタルカメラなどの光学画像で情報を得ることが困難である。このような情報を非接触で得るための試験方法は確立されていない。

そこで本論文では、サブテラヘルツカメラを利用したコンクリートや仕上げ材を透過可能な非接触・非破壊での鉄筋コンクリート内部の可視化手法を提案する。本手法の将来的な実用化を見据え、サブテラヘルツカメラによる多点同時測定を採用し、ひび割れや鉄筋を模擬した試験体を対象とした実験室レベルでの基礎的検討および実環境に近い形での運用を行った結果について報告する。

2. サブテラヘルツ波による測定

2.1 テラヘルツ波・サブテラヘルツ波とは

図-1 に、テラヘルツ波・サブテラヘルツ波の帯域を示す。テラヘルツ波は周波数が概ね 0.3~10 THz、波長では 300 μm ~1 mm (真空中) の電磁波を指す。コンクリートを含む非極性物質に対する透過性が高い一方で、水に

代表される極性物質に対する吸収性が高い。この特徴を生かすことで、清水らは繊維補強セメント系複合材料の自己治癒効果をテラヘルツ透過波により評価可能であることを確認した³⁾。また、サブテラヘルツ波とは、周波数が概ね 0.03~0.3 THz、波長では 1~10 mm (真空中) と、テラヘルツ波と類似の性質を持ちながら、透過性能がより高い。コンクリートを対象とした既往研究には、テラヘルツ波によるコンクリート内部欠陥の検出の可能性を示した研究⁴⁾や、コンクリートの含水率や塩化物イオン濃度の影響を観測する研究^{5) 6)}などがある。またサブテラヘルツ波による埋設鉄筋の腐食検出事例があり今後の活用が期待される⁷⁾。ここでは、コンクリート内部の計測も意図してサブテラヘルツ波を採用した。

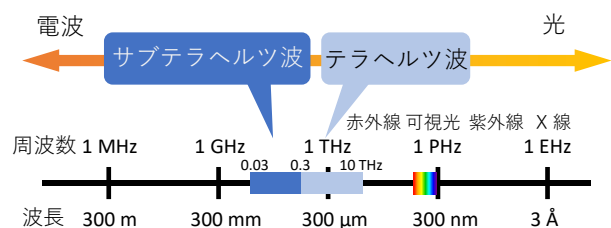


図-1 テラヘルツ・サブテラヘルツ波の周波数帯域

2.2 カメラを用いた反射波による測定

実構造物への適用を考えると、測定対象の両側に発信・受信装置を設置する必要のある透過波よりも、片側に設置できる反射波による計測が望ましい。また、原らによるハーフミラーを用いた測定⁸⁾をはじめ、既往研究では検出素子が1つのため、微小区域での反射率を1点ずつ求めメッシュ状に並べることで画像を生成していた。この方法には高解像度化できるという利点があるものの、

*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 助教 博士(工学) (正会員)

画像生成に時間がかかるため、広範囲の走査性やリアルタイムでのモニタリングが出来ないことが実構造物への適用の課題であった。そこで本研究では、サブテラヘルツ帯に適性を持つ 16×16 の 256 個の素子を 2.4 cm 四方の中に 1.5 mm 間隔で搭載したサブテラヘルツカメラを検出器として用いることで、面的な測定を試みた。測定系の概要を図-2 に示す。

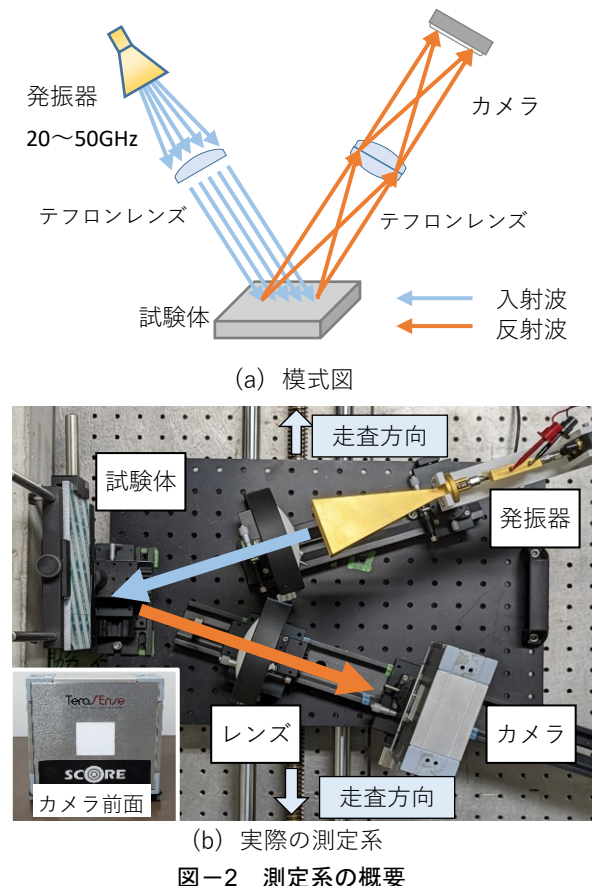
サブテラヘルツ波の光源には 18~52 GHz まで発振可能な GUNN ダイオードを使用し、テフロンレンズを用いて試験体で反射したサブテラヘルツ波がカメラ位置で結像し、測定倍率が約 1 倍になるよう試験体、レンズ、カメラ間の距離を調整した。

3. 実験概要

3.1 測定概要

本論文では、カメラによる測定精度を確認する基礎試験と、広範囲を対象とした走査試験を行った。基礎実験では、埋設鉄筋を模擬し、試験体裏面にアルミテープを貼り付けた試験体、ひび割れを模擬したスリットを導入した試験体について測定した。走査試験では試験体サイズを大きくし、測定装置自身を動かしながら測定することで広範囲の走査性能を確認した。

ここでは、アルミ板の反射を基準としたコンクリート試験体の反射の割合を反射強度と定義し、各素子における反射強度をプロットしたコンタ図として画像化した。



3.2 使用材料と配（調）合

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）および陸砂（表乾密度 2.62 g/cm³）、粗骨材として砕石（表乾密度 2.68 g/cm³、最大寸法 20 mm）、混和剤として AE 減水剤（密度 1.05 g/cm³）を使用した。

コンクリート・モルタルの配（調）合を表-1 に示す。水セメント比は全て 55 %とした。細骨材とセメントを投入し空練りを 1 分行った後水・減水剤を入れて 2 分練り、最後に粗骨材を入れて 1 分練り混ぜた。スランブは 14 cm、練り混ぜ時の温度は 16.3 °C、空気量は 4.9 %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。モルタルは空練り 1 分の後水を入れて 3 分練り混ぜた。練り混ぜ時のモルタルフローは 15 打で 240 mm、空気量は 7.4 %であった。

試験体概要を図-3 に示す。基礎試験用試験体として幅・高さ 100 mm のコンクリート板を作製した。梁型試験体を打込み後 1 日で脱型し材齢 28 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所定の厚さに切断し、60 °C・3 日間の条件で乾燥させ測定を行った。

走査試験用試験体は幅・高さ 100 mm、長さ 400 mm の梁型試験体をそのまま使用し、内部に複数の鉄筋またはスリットを配置し同様に乾燥させた後測定を行った。

3.3 測定項目

実験水準を次の表-2 に示す。

はじめに基礎試験として埋設鉄筋を模擬したアルミテープ裏面に貼った試験体の測定を行った。異なる厚さの試験体を用いて金属を検出可能な厚さと周波数を検討した。

表-1 コンクリート・モルタルの配（調）合

	単位量 (kg/m ³)				
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
コンクリート	168	306	790	1053	1.38
モルタル	301	547	1368		

表-2 実験水準

試験項目	測定パラメータ	変数
裏面金属	試験体厚さ [mm]	10, 20, 30
	アルミテープ幅 [mm]	10
	周波数 [GHz]	20~50, 5 GHz ごと
スリット	試験体厚さ [mm]	10
	スリット幅 [mm]	0, 1, 2.5, 5, 10
	スリット上面の設置物	なし, モルタル 5 mm
埋設鉄筋	鉄筋径	D10, D22
	かぶり厚さ[mm]	5, 10, 20, 30 mm
スリット	スリット幅 [mm]	1, 2.5, 5, 10
	存在深さ[mm]	0, 5, 10 mm

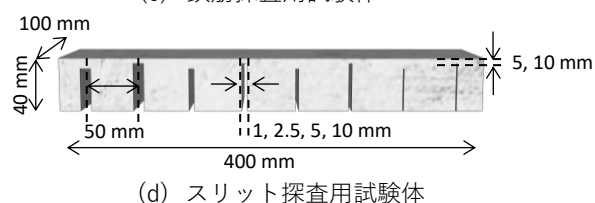
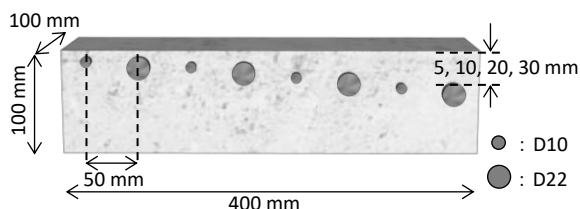
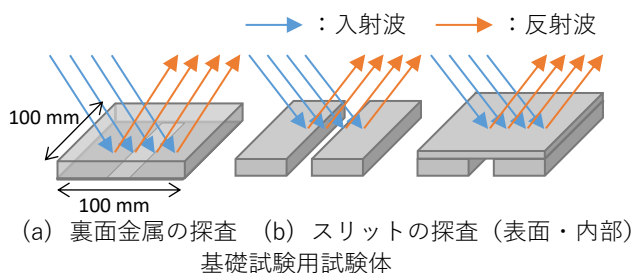


図-3 試験体概要

また、ひび割れを模擬したスリット含んだ試験体の測定を行った。スリット幅を 0~10 mm まで変化させながら測定し、加えて厚さ 5 mm のモルタルでスリットが隠れた状態でも測定した。次に走査性能試験を実施した。かぶり厚さの異なる鉄筋、あるいは幅の異なるスリットを複数含むサイズの大きな試験体に対して測定装置自身を試験体と平行方向に動かしながら測定することで、実地での運用を見据えた広範囲のリアルタイムでの探査を行った。

4. 結果と考察

4.1 裏面金属の測定

裏面にアルミテープを貼ったコンクリート試験体について、測定結果を図-4 に示す。試験体厚さ 10 mm では 45 GHz 以外で、点線で示す位置に存在するアルミテープの反射の影響を縦方向のラインとして確認できる。これは 45GHz で入射波と反射波が干渉し、金属での反射の影響を打ち消しているためと考えられる。試験体厚さ 20 mm では 30 GHz と 40 GHz でアルミテープの存在が確認できた。しかし、試験体厚さ 30 mm になると全ての

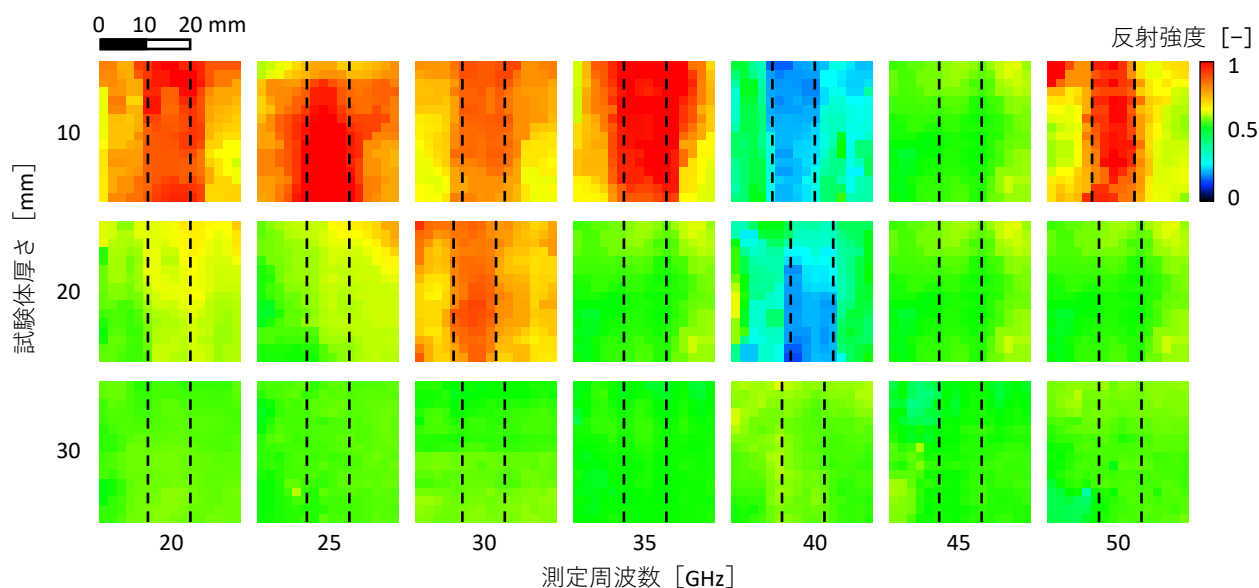


図-4 裏面アルミテープの検出

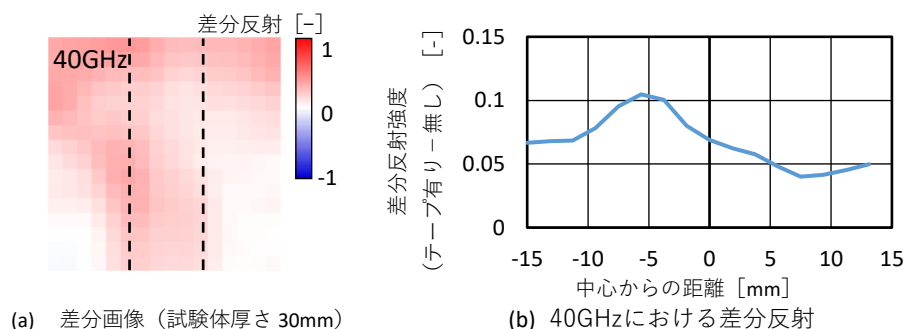


図-5 差分による評価

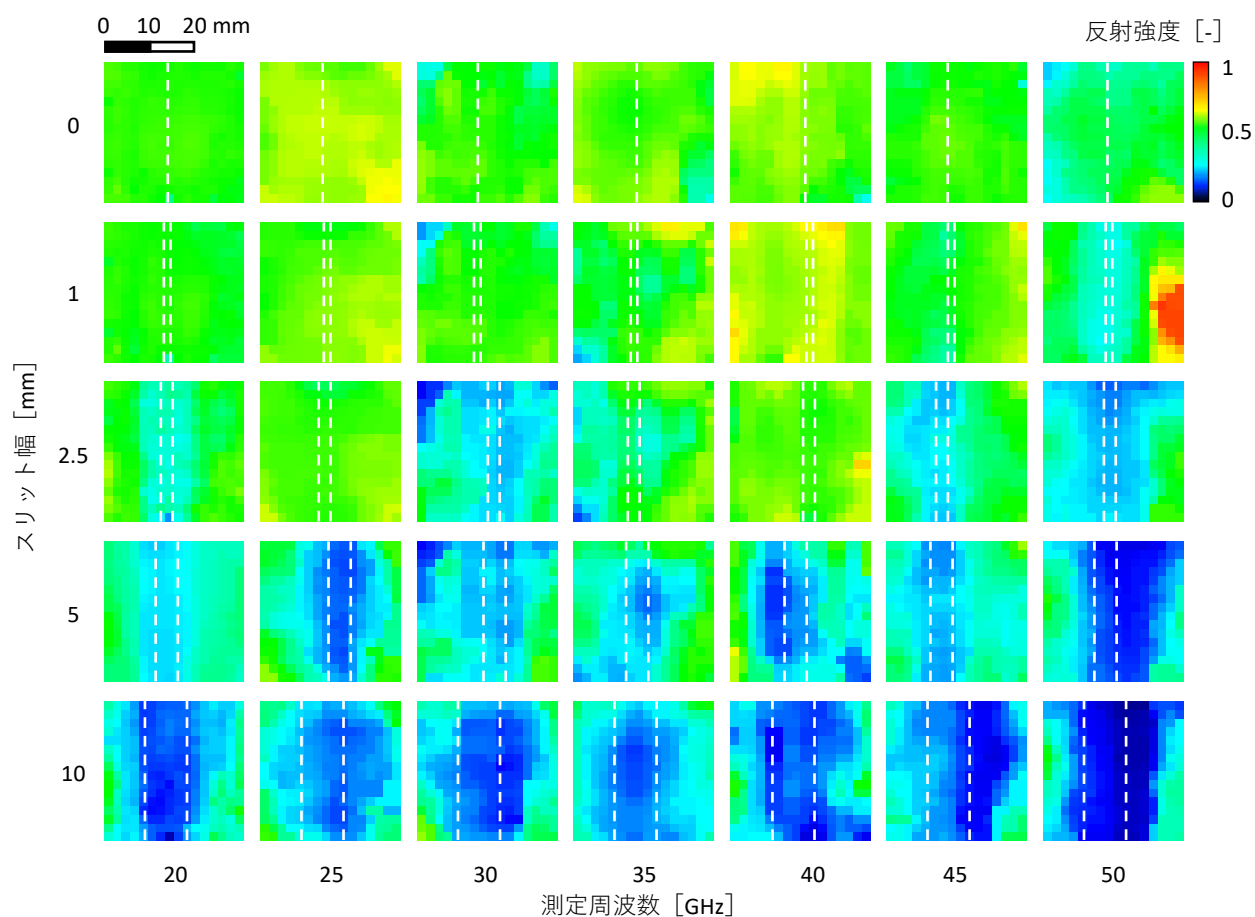


図-6 スリットの検出

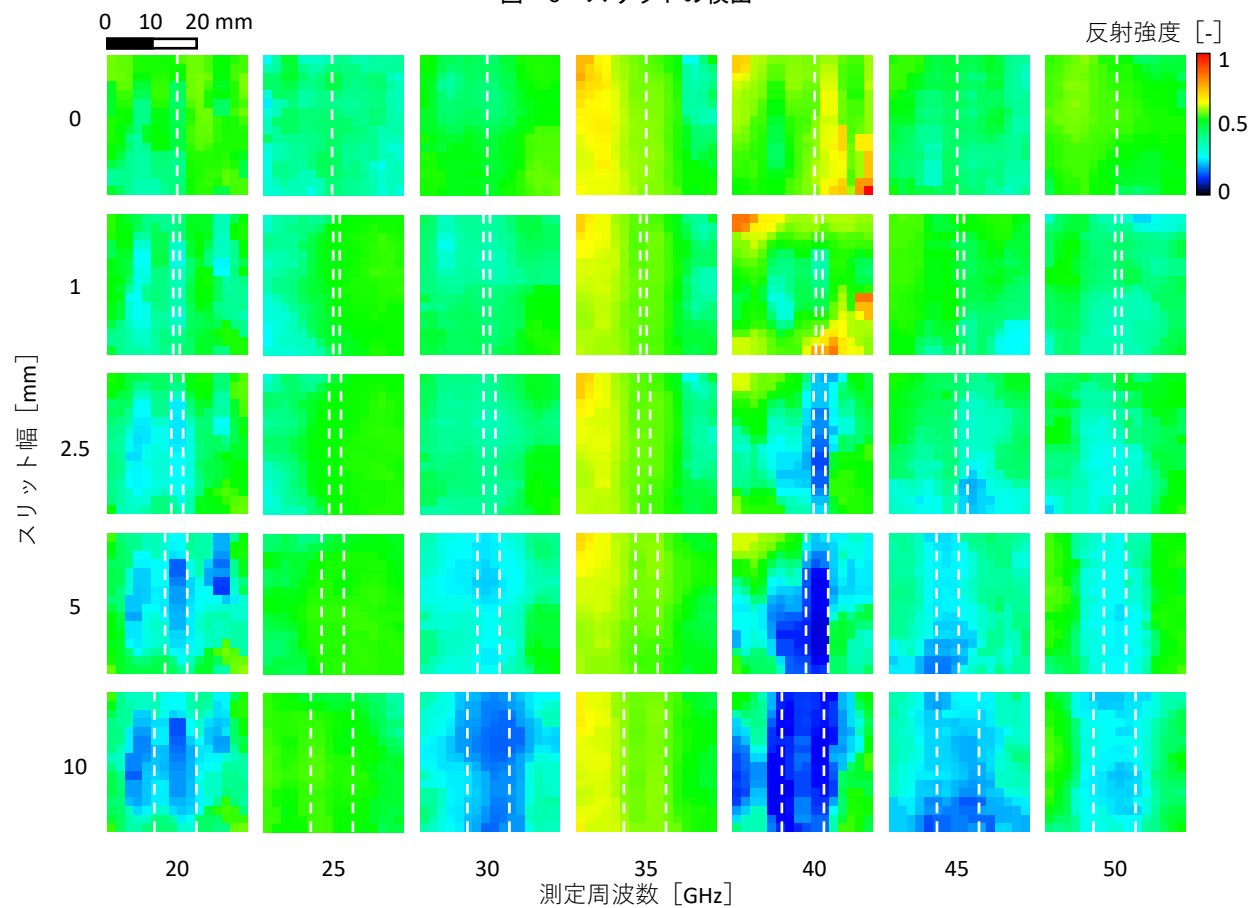


図-7 内部スリットの検出

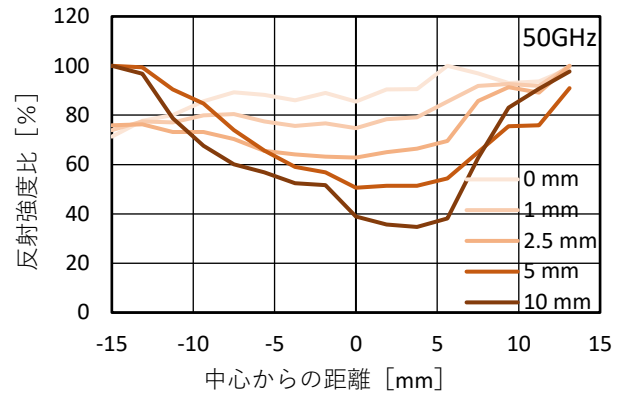
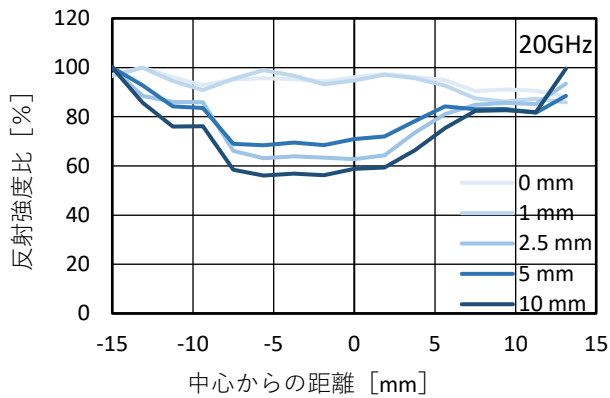


図-8 スリット幅の反射強度低下の関係

周波数においてコンクリートの反射強度を表す緑色が広がり、アルミテープの反応は確認できなかった。この一方で、図-5 に示すようにアルミテープの有無で差分をとり評価することで周波数 40 GHz では厚さ 30 mm でもアルミテープによる反射の増加を確認できた。また、明瞭さの観点では、20 GHz から 30 GHz では輪郭がぼやけてテープの縁を確認できないが、それより高い周波数ではテープの境界まで比較的明瞭に検出可能であった。このようにアルミテープを貼った場合、試験体厚さ 20 mm までは反射強度の差としてテープを検出可能で、周波数が高いほどテープの境界を明瞭に検出が可能であった。

4.2 表面スリットの測定

図-6 に、スリット幅を変化させたときの測定結果を示す。スリット幅が大きいほど中央の反射率の低い範囲が広がるが、いずれの周波数でも確認できた。スリット幅 1 mm の場合は 50 GHz でのみ反射率の低下を確認できた。スリット幅 2.5 mm では 20 GHz, 30 GHz, 45 GHz, 50 GHz で反射率の低下を検出できた。また、スリット幅 5 mm 以上ではいずれの周波数でもスリットを確認できた。このように、反射率の低下によって表面のスリットを検出可能であり、50 GHz では幅 1 mm のスリットまで検出可能であることを確認した。

次に、周波数とスリットの検出感度の関係性を評価する。鉛直方向 16 点の平均値を算出し、コンクリート表面での値を 100 として水平方向の反射強度の比較を行った。図-8 に、スリット幅の変化による反射率の変化を示す。図から、スリット幅が大きくなるほど、スリット部分の反射率が低下する傾向が確認できる。

また、20 GHz ではスリット幅 0 mm と 1 mm のときでほぼ同じ挙動を示すが、50 GHz では 1 mm でも中央で反射強度の低下を確認できることから、50 GHz ではより小さなスリットを検出可能であることが分かる。

4.3 内部スリットの測定

仕上げ材を模擬した厚さ 5 mm のモルタルでスリットを隠した状態で、スリット幅を変化させた場合の結果を

図-7 に示す。25 GHz, 35 GHz 以外で、スリット幅が大きくなるほど反射率の低下範囲も大きくなることを確認できた。表面スリットと比較すると全体的に反応は弱くなり、スリット幅の検出限界は 2.5 mm であった。

このように、仕上げ材裏面のひび割れを検出できる可能性があることが確認できた。

4.4 走査試験

次に走査性能試験の結果を図-9 に示す。ここまで、10 cm 角の試験体を対象としたが、実構造物を対象とした運用を想定し、複数の測定対象を含むサイズの大きな試験体を測定した。図は出力した複数枚の画像をつなぎ合わせて作成した。比較対象として鉄筋もスリットも含

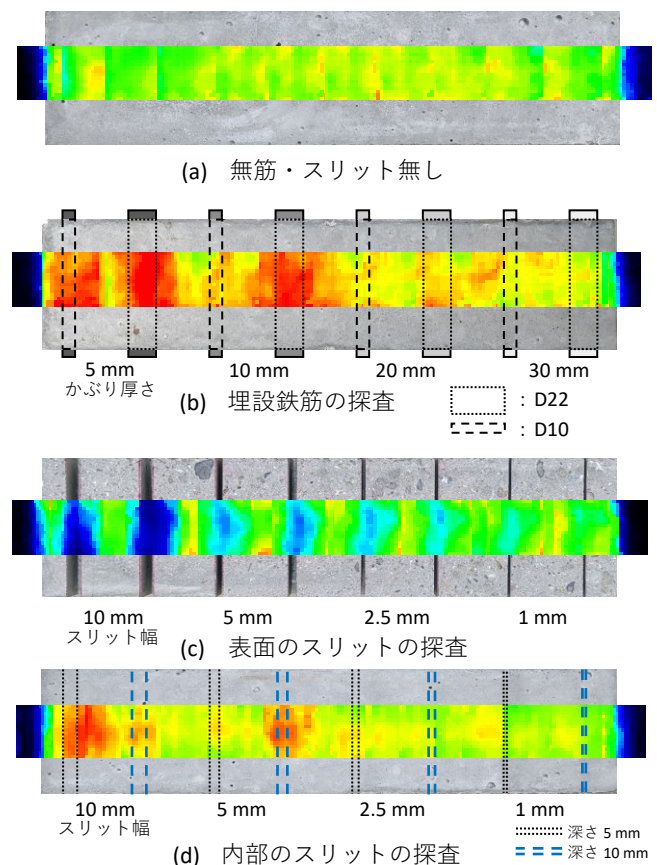


図-9 大型試験体の測定

まない試験体を測定したところ反射強度はほぼ同様であることを確認した。

まず、埋設した鉄筋の走査を行った。アルミテープと比較して影響範囲が広がっているが、50 GHz では、かぶり厚さ 5 mm では D10 と D22 どちらも反射強度の増加を確認できた。かぶり厚さ 10 mm では D22 のみを確認できた。それより深い位置でも、鉄筋による反射と思われる反射強度の増加が見られるも、鉄筋の曲率に由来すると推測される乱れによって鉄筋位置の検出には至らなかった。次に、表面に存在するスリットの走査を行った。50 GHz において 2.5 mm 幅のスリットまで検出可能で、一度の測定でスリット幅の変化による反射率の影響範囲の変化を確認できた。さらに、このスリットが深さ 5 mm, 10 mm に存在する状態で走査を行った。20 GHz では幅 5 mm で深さ 10 mm まで検出が可能であった。

以上の測定から、周波数によって反射・干渉の程度が細かく変動し、長波長による空間分解能の低下やノイズに起因すると考えられる色ムラが生じることを確認した。

また、走査性能の観点から評価すると、40 cm の距離を約 20 秒以内に測定可能であり、カメラ付属のソフトを用いてリアルタイムでのモニタリングが可能であることを確認した。従来の測定系では 5 cm 四方の測定に約 8 分要したことや、カメラを用いた測定系の小型化や軽量化により移動が容易になったことを考慮すると、従来と比較して走査性能が大幅に向上したといえる。

5. 結論

サブテラヘルツ波を用いた非破壊検査手法を鉄筋コンクリート構造物へ適用することを見据えて、カメラを用いてコンクリート表面あるいは内部の埋設鉄筋や欠陥を模擬した測定を実施した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 埋設鉄筋を模擬して試験体裏面に設置したアルミテープを 30 GHz, 40 GHz で試験体厚さ 20 mm まで検出可能で、40 GHz では差分反射率で評価することで試験体厚さ 30 mm まで反応を確認できた。
- 2) ひび割れを模擬したスリットを有する試験体の測定では、50 GHz では幅 1 mm 以上のスリットについて検出が可能であった。
- 3) 仕上げ材を模擬した厚さ 5 mm のモルタルを試験体表面に設置しスリットを隠した状態での測定でも、20 GHz, 40 GHz では幅 2.5 mm までのスリットを検出可能であった。
- 4) 広範囲の走査試験では、40 cm の距離を約 20 秒以内に測定可能であり、カメラを用いた測定系の小型化・軽量化による大幅な走査性能の向上を確認した。

今後さらに高感度かつ多素子を内蔵したカメラでの測定や発振強度を高めることでさらなる活用が期待され

る。また先に示したテラヘルツ波による腐食の検出事例や鉄筋探査器との併用により、構造物の非破壊検査技術としての活用が期待される。

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建築学部の濱崎仁教授、同デザイン工学部の田邊匡生教授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) 北川真也, 木村定雄, 歌川紀之, 森山守: 内部損傷を有するコンクリート床版の打音特性に関する基礎実験, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol. 72, No. 1, pp. 1-11, 2016
- 2) 川上幸一, 小西真治, 村上哲哉, 久保昌史・中山聡子: 赤外線熱計測による地下鉄シールドトンネル内中子型セグメント表層コンクリートの浮き検出, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol. 71, No. 3, pp. 112~121, 2015
- 3) 清水耕史, 西脇智哉, Riccardo Maddalena, 田邊匡生: テラヘルツ透過計測および吸水試験による繊維補強セメント系複合材料の自己治癒性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 1, pp. 1276-1281, 2020
- 4) 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), Sep. 2013
- 5) Tripathi, S.R. et al.: Measurement of chloride ion concentration in concrete structures using terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS), Corros. Sci., Vol. 62, pp. 5-10, Sep. 2012
- 6) Tanabe, T.; Kanai, T.; Kuroo, K.; Nishiwaki, T.; Oyama, Y: Non-Contact Terahertz Inspection of Water Content in Concrete of Infrastructure Buildings, World J. Eng. Tech., Vol. 6, No. 2, pp. 275-281, May 2018
- 7) 田邊匡生, 小山 裕: 見えないものを見るコンクリート構造物と絶縁被覆ケーブルのテラヘルツ透視診断, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol. 139, No. 2, pp. 149-153, 2019
- 8) 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, Vol. 44, No.1, pp. 1408-1413, 2022