

論文 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

原 星海*1・清水 耕史*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、コンクリート材料への適用の可能性について基礎的な検討を行った。具体的には、細骨材・粗骨材の有無が測定に及ぼす影響、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、モルタル部と比較して粗骨材の透過性が大きいこと、厚さ 30 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 2 mm 以上のスリットの検出が可能であることを確認した。加えて、周波数 30 GHz では仕上げ材を模擬した厚さ 5 mm のモルタル裏面のスリットについても検出が可能であった。

キーワード：サブテラヘルツ波、周波数、非破壊検査、内部探査、ひび割れ、鉄筋

1. はじめに

近年、社会資本であるコンクリート構造物の老朽化が急速に進行していることや、スクラップアンドビルドから資源循環型社会への転換が求められていることを受けて、コンクリート構造物の適切な維持管理への関心が高まっている。そのため、鉄筋コンクリート構造物を対象とした非破壊・微破壊試験方法が数多く提案されている（たとえば 1), 2), 3)）。また、サーモグラフィによる仕上げ材の剥離調査やレーダによる鉄筋探査など、電磁波などの光学系を利用した調査方法も確立されたものがある。この一方で、原子力発電所の管理区域などに代表される、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も困難である。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、コンクリートや仕上げ材を透過可能な特性を有するサブテラヘルツ波を用いた、非接触・非破壊での鉄筋コンクリート構造物の検査手法を提案する。ここでは、この手法の将来的な実用化を見据え、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 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、筆者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⁴⁾。また、サブテラヘルツ波（ミリ波）とは、周波数が概ね 0.03~0.3 THz とテラヘルツ波よりも低い電磁波であり、テラヘルツ波と類似の性質を持ちながら、コンクリートなどへの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⁵⁾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^{6), 7)}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⁸⁾。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。

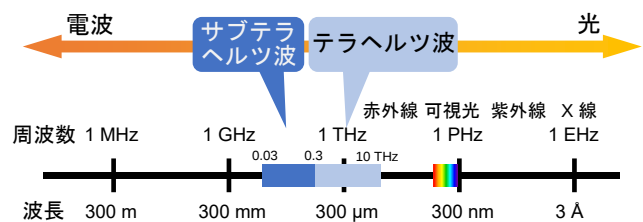


図-1 テラヘルツ・サブテラヘルツ波の周波数帯域

2.2 測定系

測定系の概要を図-2 に示す。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。そのためここでは、照射したサブテラヘルツ波が試験体から戻る反射波を計測する測定系を用いた。サブテラヘルツ波の光源には 30, 50 GHz の GUNN

*1 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻（学生会員）

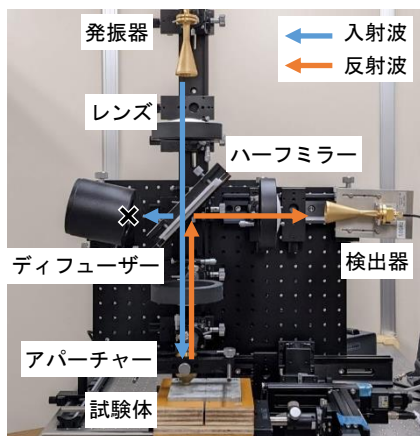
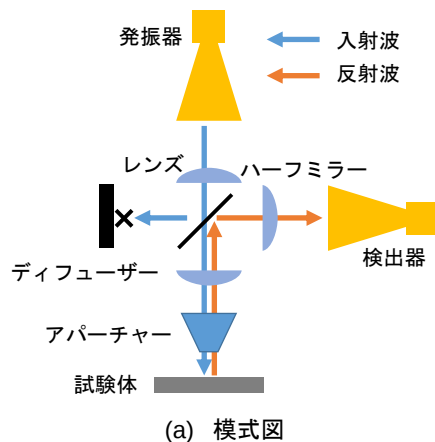
*2 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 准教授 博士(工学)（正会員）

*3 日本工業大学 建築学部建築学科 助教 博士(工学)（正会員）

ダイオードを使用した。30 GHz・50 GHz の発信装置は、それぞれ 100 mW・150 mW の発振出力である。ここで、アパーチャーとは空間分解能を向上させるための治具で、試験体の直前に設置することにより試験体表面に集光しない光をカットし、焦点の合う光のみを取り出すことができる。30 GHz では直径 8 mm、50 GHz では直径 6 mm のアパーチャーを使用した。これらの直径内の範囲の代表値が測定されると考えられる。測定範囲は試験体中央の 50 mm×50 mm、測定ピッチは 2 mm とした。測定データは試験体の反射強度からノイズ（試験体を置かない場合の反射強度）を引いた値を金属板の反射強度で除した反射率で評価した。

3. 実験概要

本論文では、以下に示す 3 つの実験を実施した。第一に、骨材の有無がサブテラヘルツ波での測定に及ぼす影響を明らかにするために、コンクリート・モルタル・セメントペーストについて測定した。第二に、埋設鉄筋を模擬し、試験体裏面にアルミテープを貼った試験体について測定した。第三に、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。



図ー2 測定系の概要

ここでは、測定結果として測定各点における反射率をプロットしたコンタ図として画像化した。

3.1 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），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），粗骨材として碎石（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・セメントペーストの調合を表ー1に示す。水セメント比は全て 55%とした。コンクリートの練り混ぜには強制 2 軸ミキサー（容量 60 L）を用いた。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℃，空気量は 4.9%であった。モルタル・セメントペーストの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。練り混ぜ時のスランブフローは 240 cm，空気量は 7.4%であった。セメントペーストは 30 分毎に練り返しを行い，ブリーディングがなくなった後に打設した。

試験体は直径 100 mm，高さ 200 mm の円柱試験体と幅・高さ 100 mm，長さ 400 mm の梁型試験体を作製した。試験体は打設後 1 日で脱型し材齢 28 日まで水中養生した。その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℃・3 日間の条件で乾燥させた後測定を行った。

3.2 測定概要

実験水準を次の表ー2に示す。骨材の有無としてコンクリート・モルタル・セメントペーストを厚さ 5 mm に切断した試験体について測定した。厚さを 5 mm としたのは試験体裏面での反射を加味し骨材による反射率の違いを明確に評価するためである。

表ー1 試験体の配(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		
セメントペースト	635	1154			

表ー2 実験水準

試験項目	測定パラメータ	変数
アルミテープ	試験体厚さ [mm]	5, 10, 20, 30, 50
	アルミテープ幅 [mm]	10
	周波数 [GHz]	30, 50
スリット	試験体厚さ [mm]	10, 20, 30
	スリット幅 [mm]	0, 1, 2, 3, 5
	スリット上面の設置物	なし，モルタル 5 mm
	周波数 [GHz]	30, 50

次に埋設鉄筋を模擬しアルミテープを裏面に貼った試験体について測定した。裏面のアルミテープを検出可能な試験体厚さを検討するため、試験体厚さの異なる複数の試験体を用いて測定した。

また、図-3 に示す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。検出可能なスリット幅の検討するため、スリット幅を0~5 mm まで変化させて測定した。加えて、仕上げ材を模擬した厚さ 5 mm のモルタルをスリット上部に配置した場合について測定した。

考えられる。

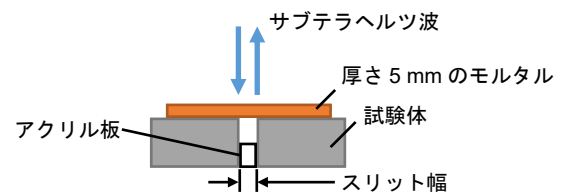


図-3 ひび割れを模擬したスリット測定の様式図

4. 結果と考察

4.1 骨材の有無が測定画像に及ぼす影響

コンクリート・モルタル・セメントペーストを測定した結果を図-4 に示す。モルタル・セメントペーストは反射率が場所によってほぼ変化せず、均質な材料であることが画像からも確認できた。モルタル 30 GHz の画像左上の反射率の低い箇所は表面の空隙である。コンクリートはセメントペースト・モルタルと比較すると反射率の低い領域が点在している。これは粗骨材によるものであり、モルタル部と比較して粗骨材で反射率が低下することが確認できた。このことから、モルタル部と比較して、粗骨材の方がサブテラヘルツ波の透過性が高いと

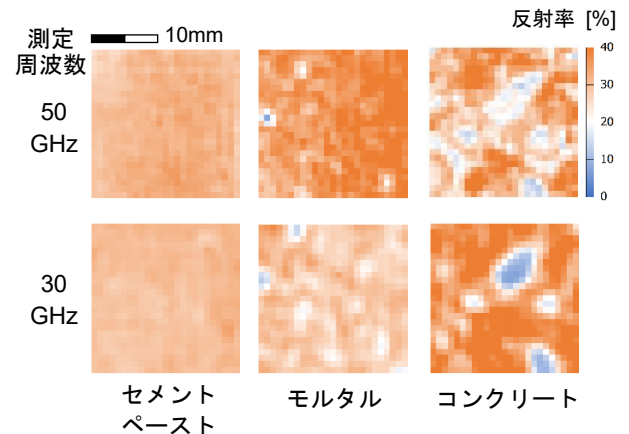


図-4 材料の違いが測定画像に及ぼす影響

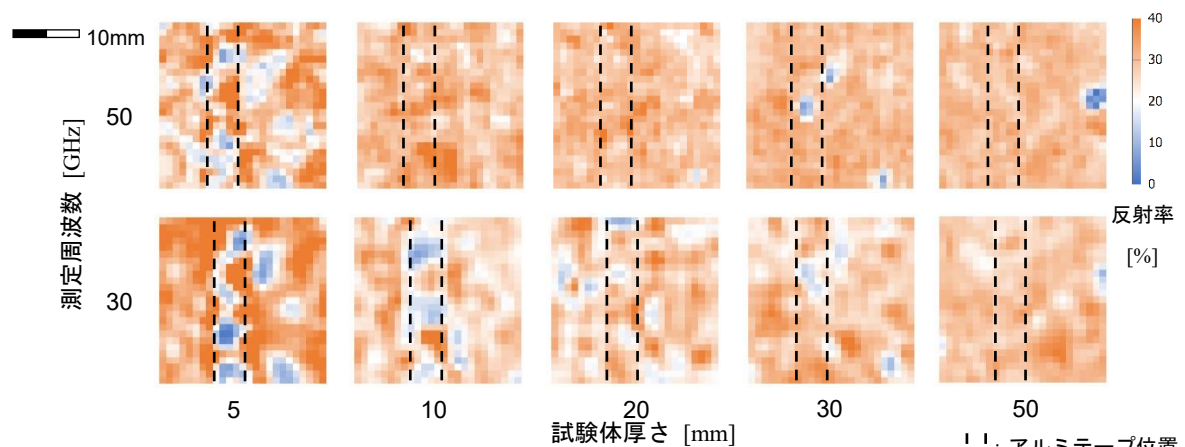


図-5 コンクリート裏面のアルミテープの検出

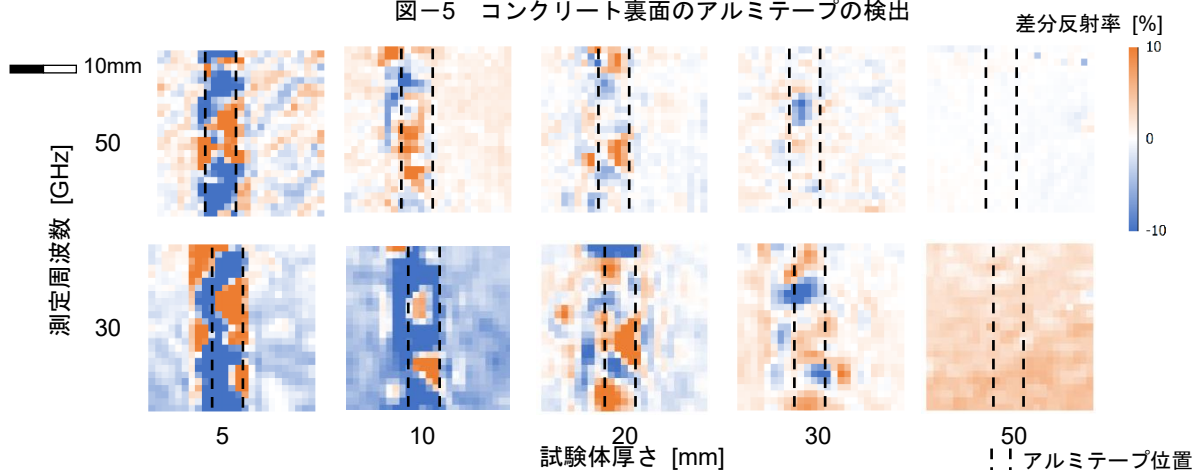


図-6 コンクリート裏面のアルミテープの検出（差分）

4.2 アルミテープの測定

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-5に示す。50 GHz では厚さ 5 mm で、点線で示すアルミテープの範囲に反射率の低い青色の範囲が一部確認できた。これは先述したように骨材部とモルタル部で反射率が異なるためと考えられる。厚さ 10 mm より厚い場合はアルミテープを貼った範囲と他の範囲で差が確認できなかった。30 GHz の厚さ 5、10 mm では、点線で示すアルミテープを貼った範囲に反射率の低い範囲が一部確認できた。しかし、厚さ 20 mm 以上ではアルミテープを貼った範囲と他の範囲で違いが確認できなかった。このようにアルミテープを貼った場合、50 GHz では厚さ 5 mm、30 GHz では厚さ 10 mm までは、反射率が一部低下する範囲として裏面のアルミテープを検出が可能であった。

次に、アルミテープの有無による反射率の差分を取った結果を図-6に示す。ここで、差分反射率とはアルミテープを貼った場合の反射率からアルミテープを貼らない場合の反射率を引いた値である。差分を取ることでアルミテープの有無による変化のみを抽出した評価が可能となる。図-6を見ると、点線で示すアルミテープ幅の幅とその周囲で色の濃い、差分反射率の絶対値が大きい

範囲が検出できていることが分かる。アルミテープ幅の他の範囲ではどの厚さにおいても色の薄い、差分反射率が 0 に近い値となっており、差分反射率とすることでアルミテープ以外の影響を排除できていることが分かる。アルミテープ幅の範囲で、差分反射率の絶対値が大きい理由は、上述のように粗骨材とモルタル部でサブテラヘルツ波の反射率が異なるためと考えられる。アルミテープの検出が可能な試験体厚さについては、30 mm 厚さのコンクリート裏面のアルミテープが 30、50 GHz の両方で検出できていることが分かる。これは、アルミテープを貼った画像単独では判別できなかった厚さである。試験体厚さ 50 mm では、いずれの周波数でも検出ができなかった。2 つの周波数の違いを見ると、同じ試験体厚さでは 30 GHz の方が差分反射率の絶対値が大きく、明確に検出できた。一方で、50 GHz では差分反射率の絶対値が大きい範囲が点線で示すアルミテープ幅に同程度の幅で検出できた。このことから、周波数が低いほど高い透過性能が得られ、周波数が高いほど分解能が向上すると考えられる。

以上のように、試験体裏面にアルミテープを貼った測定では、50 GHz では試験体厚さ 5 mm、30 GHz では試験体厚さ 10 mm での検出が可能であった。アルミテープを

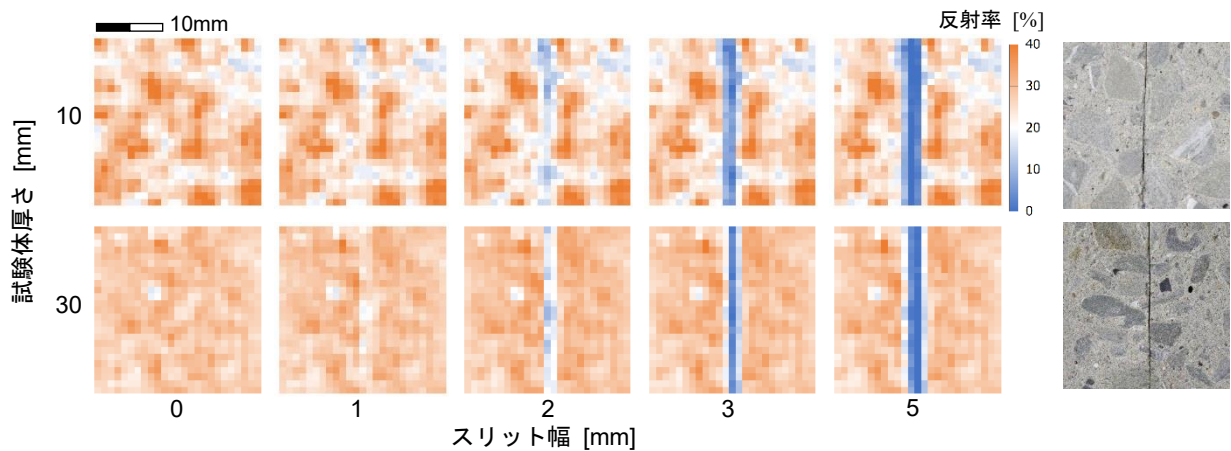


図-7 スリット幅の変化 (50 GHz)

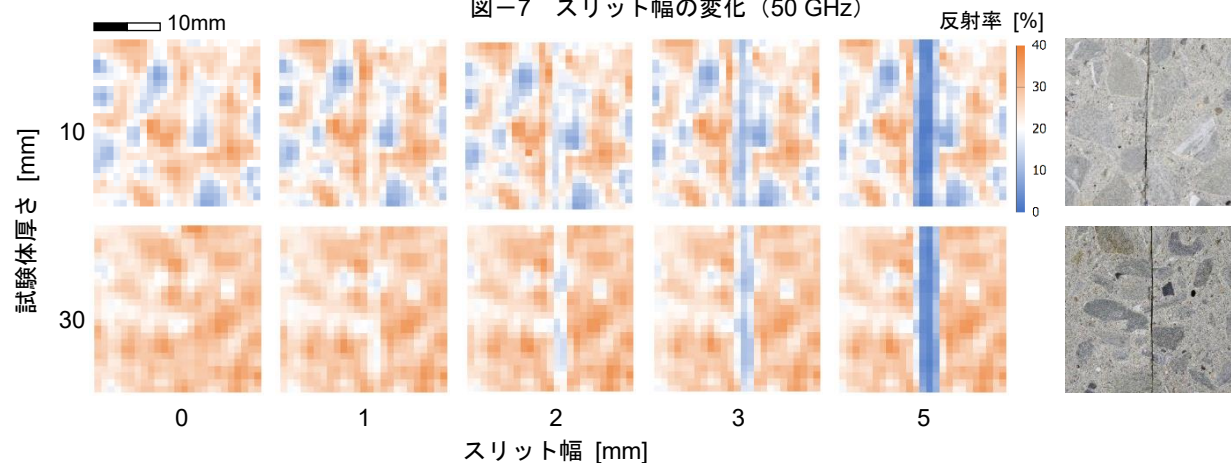


図-8 スリット幅の変化 (30 GHz)

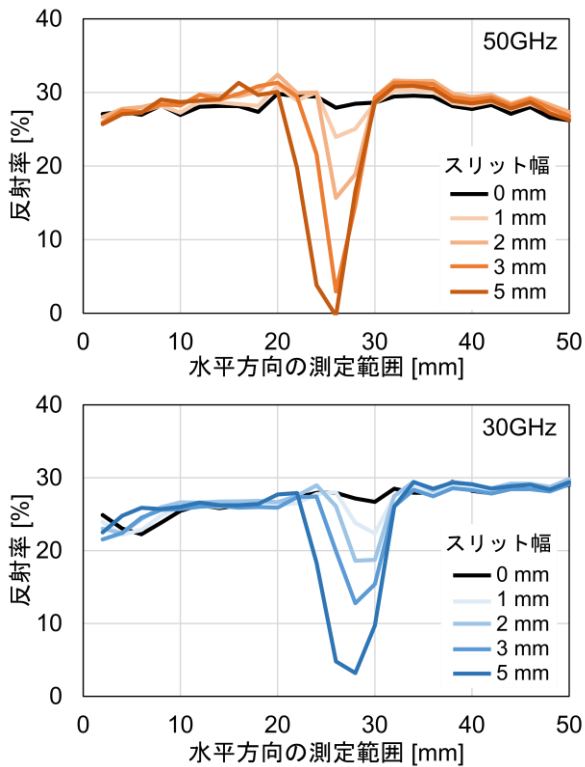


図-9 スリット部分の反射率変化

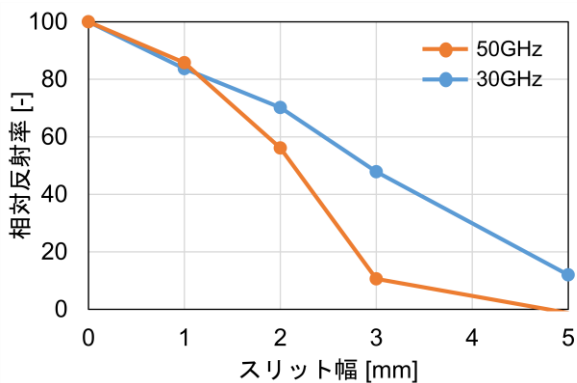


図-10 スリット部の反射率の推移

貼らない場合との差分を取り評価すると、本検討の範囲内では試験体厚さ 30 mm の試験体裏面のアルミテープが検出限界であった。

4.3 ひび割れ（スリット）の測定

図-7, 8 に、スリット幅を変化させたときの測定画像の変化と、測定範囲の試験体写真を示す。スリット幅が大きいほど、中央の青い反射率の低い幅が広くなること、いずれの周波数でも確認できた。スリット幅 1 mm の場合はスリット部の反射率は他の領域とほとんど変化がないが、スリット幅 2 mm 以上ではいずれの周波数でも明確にスリットを検出できた。また、スリット幅 2 mm では反射率の低い領域が水平方向に 2 マス、3 mm では 3 マス、5 mm では 4 マスとスリット幅が大きくなるにつれて反射率の低下する幅が拡大することが確認できる。測定ピッチが 2 mm であることから、2 mm 幅のスリットは幅 4 mm 分として検出されると分かる。同様に、スリット幅 3 mm は幅 6 mm 分、スリット幅 5 mm は幅 8 mm 分として検出される。このように測定ピッチ 2 mm の測定では、スリットとその周囲数 mm が反射率の低下した領域として検出が可能であると分かった。

次に、試験体厚さの影響を考える。試験体厚さ 10 mm では試験体厚さ 30 mm よりも骨材による反射率が低い箇所が点在していることが確認できるが、いずれの周波数でも試験体厚さによるスリットの検出に違いは見られない。このように、測定ピッチ 2 mm のスリット測定では試験体厚さの影響を検出できなかった。

次に、周波数の違いがスリットの検出に及ぼす影響について考える。スリット挿入による測定画像鉛直方向の変化は確認されなかったため、鉛直方向 25 点の平均値で比較を行った。図-9 に、厚さ 30 mm での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

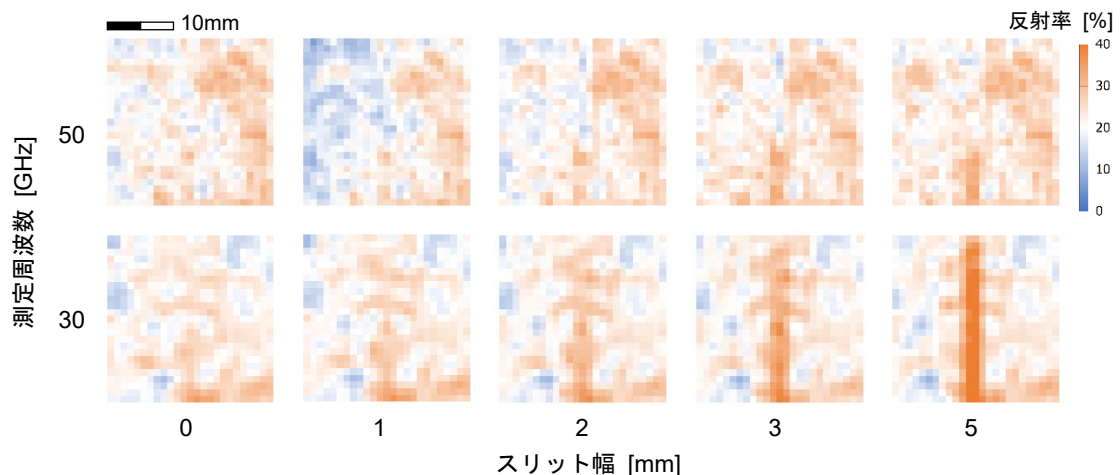


図-11 モルタル裏面のスリットの検出（厚さ 20 mm）

向が確認できる。50 GHz と 30 GHz を比較すると、50 GHzの方がスリット周囲の反射率の低下が顕著である。図-10に、スリット部分の反射率の推移を、スリット幅 0 mm を 100 とした相対値で示す。この図から、50 GHz では 30 GHz よりも反射率の低下が顕著である。このことから、50 GHz の方がより微細なスリットについても検出が可能であると考えられる。

4.4 仕上げ材（表面モルタル）の有無がひび割れ（スリット）の測定画像に及ぼす影響

仕上げ材を模擬した厚さ 5 mm のモルタル裏面で、スリット幅を変化させた場合の結果を図-11 に示す。

図から、50 GHz ではスリット幅の大きさによらず測定画像が変化せず、裏面のスリットが検出できないことが分かる。一方で、30 GHz ではスリット幅 2 mm 以上で中央に反射率の高い範囲が確認でき、仕上げ材裏面のスリットを検出できていることが分かる。

このように、30 GHz では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。

5. 結論

サブテラヘルツ反射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、サブテラヘルツ反射波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) 周波数が 30、50GHz のサブテラヘルツ反射波を用いてコンクリート・モルタル・セメントペーストを測定した結果、骨材とモルタル部で反射率に違いがあることを確認した。
- 2) 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は、アルミテープの有無による差分反射率で評価することで、試験体厚さ 30 mm まで検出が可能であった。
- 3) 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、2 mm 以上のスリット幅について検出が可能であった。
- 4) 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た測定では、30 GHz を用いた場合にモルタル裏面のスリットを検出可能であった。

今後さらに低周波数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と合わせて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) Torrent, R.J.: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Mater. Struct., Vol. 25, pp. 358-365, 1992.
- 2) コンクリート委員会・規準関連小委員会：土木学会規準「短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法（案）（JSCE-G 582-2018）」の制定，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol. 74, No. 4, pp. 256-259, 2018.
- 3) 関川昌之，渡邊健：シリンダーを用いた透気試験器の開発，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp. 1041-1042, 2021.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.