

# 論文 異なる波長の電磁波によるモルタル中の水分と塩分の検出

高名 柚衣\*1・上田 隆雄\*2・時実 悠\*3・山本 晃臣\*4

**要旨：**コンクリートの含有する水分や塩分を現場で定量的に把握することがコンクリート構造物の維持管理を効率的に行う上で有効であるが、現状ではこれらを同時に測定する有効な検査手法は確立されていない。そこで本研究では、新たなコンクリート構造物の健全性診断手法として、波長の異なる電磁波である近赤外光とテラヘルツ波に着目した。含有塩化物イオン濃度の異なるモルタル供試体を作製し、異なる含水状態でこれらの電磁波の反射または透過波を測定・分析を行った結果、いずれの電磁波を用いた場合においても、モルタルの含水率および塩化物イオン濃度を定量的に把握できる可能性が示された。

**キーワード：**近赤外分光法, テラヘルツ波, 含水率, 塩化物イオン濃度, 吸光度スペクトル

## 1. はじめに

コンクリート構造物の性能は環境からの様々な作用を受けながら、経時的に低下していく。このようなコンクリート構造物の劣化現象の多くは、コンクリート表面からの劣化因子の侵入、浸透により発生および進行するため、コンクリート構造物の劣化状態を把握し、将来の劣化進行予測を行う上で、コンクリート中の劣化因子の含有状況を定量的に把握することが重要である。種々の劣化因子の中でも、塩化物イオン（以下  $\text{Cl}^-$  とする）と水分は代表的な因子として挙げられるが、これらの含有状況を現場で短時間に把握する手法は現時点で確立されていない。

一方で、著者らは既往の検討<sup>1),2)</sup>により、近赤外領域（波長 800~2500 nm）の光を対象物に照射したときに得られる吸光度スペクトルの変化を分析することで、対象物中の含有物質濃度を推定する手法である近赤外分光法を用いてコンクリート中の  $\text{Cl}^-$  濃度の推定が可能であることを報告している（図-1 参照）。また、モルタル表面の吸水状況を吸光度スペクトルの変化として把握することで、モルタル表層の品質評価も可能であることを明らかにした<sup>3)</sup>。ただし、現状では、コンクリートやモルタルの含水状態の違いが  $\text{Cl}^-$  濃度推定結果に与える影響は明らかになっていない。また、本手法はプローブを対象表面やドリル削孔先端面に近接させて測定を行うため、測定前に構造物表面全体の中で劣化因子含有量が大きい部分を抽出しておくことが望ましい。

そこで本研究では、近赤外光より波長の長い電磁波であるテラヘルツ ( $10^{12}\text{Hz}$ ) 波（波長  $300\mu\text{m}$  周辺）に着目した。テラヘルツ波は、電磁波最後の未開拓領域と呼ばれており、現在は本格的な利用には至っていないが、光波と電波の特性を併せ持ち、良好な物質透過性と非侵襲

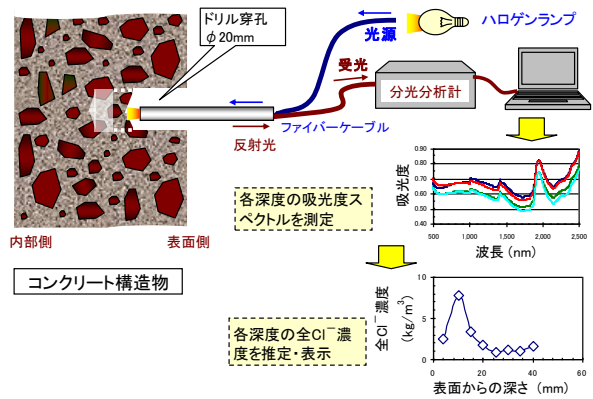


図-1 近赤外分光法によるコンクリート中の  $\text{Cl}^-$  濃度の測定概要<sup>2)</sup>

が特徴である。テラヘルツ波のセメント硬化体の非破壊検査への利用可能性については、いくつかの検討がなされている。丸山らは、セメントペーストの含水率を変化させた時のテラヘルツ波の透過率を測定し、両者の間の相関関係を示している<sup>4)</sup>。また Tripathi らは、モルタル中の  $\text{Cl}^-$  濃度とテラヘルツ波吸収係数の間の相関関係を指摘している<sup>5)</sup>。ただし、いずれも基礎的検討であり、供試体の含水状態と  $\text{Cl}^-$  濃度両者の相互関係は明らかになっていない。

そこで本研究では、 $\text{Cl}^-$  濃度の異なるモルタル供試体を用いて、含水状態を変化させ、近赤外分光法とテラヘルツ波透過法により、モルタル中の含水率と  $\text{Cl}^-$  濃度の推定可能性を実験的に検討することとした。

## 2. 実験概要

### 2.1 モルタル配合と供試体の作製

本研究で用いたモルタルの配合を表-1 に示す。こ

\*1 徳島大学大学院 創成科学研究科理工学専攻 社会基盤デザインコース (学生会員)

\*2 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部社会基盤デザイン系教授 博士 (工学) (正会員)

\*3 徳島大学ポスト LED フォトニクス研究所講師 博士 (工学) (非会員)

\*4 (株) フジタ建設コンサルタント 博士 (工学) (正会員)

に示すように、配合は4種類で、W/Cが45%のNaCl無添加配合を基準として、S/Cが2.5となるように単位細骨材量を決定し、すべての配合で単位ペースト容積が一定となるように、配合設計を行った。セメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm<sup>3</sup>，比表面積：3210 cm<sup>2</sup>/g，R<sub>2</sub>O：0.56%）を用い、細骨材は徳島県阿波市市場産砂岩砕砂（表乾密度：2.57 g/cm<sup>3</sup>，F.M.：2.79）を用いた。モルタルに初期添加したCl<sup>-</sup>濃度は、0，5，10，20 kg/m<sup>3</sup>とし、所定の濃度となるように、細骨材代替で計算された量のNaClを練混ぜ水に溶解して添加した。

本研究で作製した供試体は、強度試験用のモルタルバー（40×40×160 mm），および、近赤外光とテラヘルツ波照射試験用のモルタルプレート供試体（1辺100 mmの正方形断面）とし、すべての供試体は、材齢1日で脱型を行い、封緘養生を20℃の恒温室中で28日間行った。なお、モルタルプレート供試体は、100×100×400 mm角柱供試体作製用の鋼製型枠を木製端板で仕切ることにより、厚さ5 mm，10 mm，15 mmのモルタルプレートをそれぞれ2枚ずつ作製した。

## 2.2 モルタル含水状態の調整

所定の養生が終了したモルタルプレート供試体を用いて、20℃環境において飽和NaCl溶液により約75%R.H.に調整したデシケータ内に、質量変化が無くなるまで保管した時の供試体質量をW（g）とし、以下の式でモルタルプレート供試体の含水率w %を算出した。

$$w = (W - W_d) / (W_s - W_d) \times 100 (\%) \quad (1)$$

ここに、W<sub>d</sub>：60℃の乾燥炉中で質量変化が無くなるまで保管した時の供試体質量（g），W<sub>s</sub>：封緘養生終了直後の飽水時における供試体質量（g）

所定の含水状態に調整した、モルタルプレート供試体を用いて、2.3および2.4に示す各種測定を実施した。

## 2.3 近赤外分光法による吸光度スペクトルの測定方法

近赤外分光法による吸光度スペクトルの測定には、可搬型近赤外分光計（波長域：350～2500 nm，サンプリング間隔：1.4 nm）を用いた。光源受光一体型接触型プローブをモルタル表面に直接接触させて実施し、以下の手順で吸光度の算出を行った。

- 1) 白板の反射光の強さI<sub>s</sub>(λ)を測定
- 2) 試料の反射光の強さI(λ)を測定
- 3) 式(2)により反射率R(λ)を算定し、これを用いて式(3)により吸光度A(λ)を算出する。

$$R(\lambda) = \{I(\lambda) / I_s(\lambda)\} \quad (2)$$

$$A(\lambda) = \log \{1 / R(\lambda)\} \quad (3)$$

## 2.4 テラヘルツ時間領域分光法（THz-TDS）による透過率スペクトルの測定方法

本研究で実施したTHz-TDSでは、フェムト秒パルスレーザー光を光伝導アンテナに入射することによってテ

表-1 モルタルの配合および諸特性

配合名 (Cl濃度)	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				フロー 値 (mm)	28日 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
		C	W	S	NaCl		
0	45	546	246	1365	0	167	61.8
5	45	546	246	1357	8.2	176	63.0
10	45	546	246	1349	16.5	182	58.1
20	45	546	246	1332	33.0	190	58.4

ラヘルツパルスが発生させた。フェムト秒レーザーにはモード同期チタンサファイアレーザー（中心波長：800 nm，パルス幅：100 fs，繰返し周波数：80 MHz）を用いた。レーザーをビームスプリッターで発生側の装置に到達させるポンプ光と検出側の装置に到達させるプローブ光に分けた。分かれたポンプ光とプローブ光の到達時間に差を生じさせることで、2つの光に電位差が生じ、発生側から電流が流れる。これにより発生させたテラヘルツパルスをモルタル供試体に照射し、透過した電気信号からテラヘルツ波の時間波形を得て、それをフーリエ変換することでスペクトルを取得した。なお、本システムではボウタイ型の光伝導アンテナを用いることで0.1 THz以下の低周波テラヘルツの発生・検出を行った。

## 3. 近赤外分光法

### 3.1 含水状態の変化に伴う吸光度スペクトルの変化

20℃，60%R.H.恒温室内において、28日間の封緘養生終了後0秒，30秒，60秒，120秒，180秒，300秒後に測定したモルタル（厚さ5 mm，Cl<sup>-</sup>：0 kg/m<sup>3</sup>）表面の吸光度スペクトルの一部を図-2に示す。なお、同一要因の供試体間で測定結果のばらつきは小さかったことから、これ以降の実験結果は代表例を示すこととする。

近赤外分光法で測定される吸光度スペクトルの様々な波長で現れる吸光度ピークは、光の照射対象物が含有する種々の物質濃度に相当するが、水（H<sub>2</sub>O）に相当すると考えられる吸光度ピークの一つは波長1425 nm付近に存在し、図-2に示した1400～1500 nmが水の波長域と考えられる。なお、図中の波長1412 nm付近に見られる吸光度のピークは、著者らの既往の検討<sup>2)</sup>より、モルタルが含有するCa(OH)<sub>2</sub>のOH基の第一倍音に相当するものであることが明らかになっている。

図-2より、モルタル表面の水に相当する吸光度ピークは、モルタル表面が濡れた状態の封緘養生終了直後が最も大きく、その後の気中乾燥時間の経過とともに徐々に小さくなっている。これは、モルタル表面に付着した水が時間とともに蒸発・消散する現象を示していると考えられる。このような波長1425 nm付近の吸光度ピーク

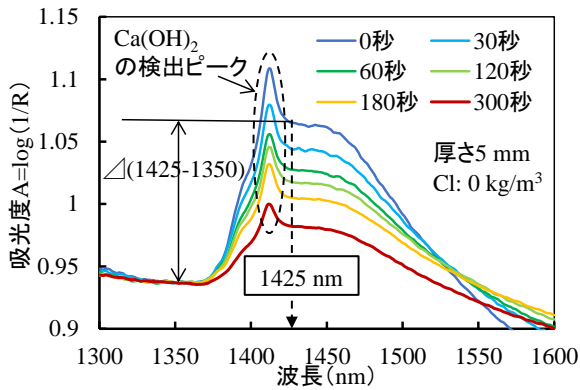


図-2 養生終了後の気中乾燥時間に伴う吸光度スペクトルの変化

の変化を定量的に表す指標として、図に示すようにほとんど吸光度が変化しない波長 1350 nm からの波長 1425 nm における吸光度の差を差吸光度  $\Delta(1350-1425)$  と定義する。

著者らの既往の検討<sup>3)</sup>では、乾燥したモルタル表層に散水時の吸水特性を表す表層品質評価指標として、差吸光度  $\Delta(1425-1350)$  の変化量を用いた。これに対して、図-2 は、養生終了後の飽水状態からの乾燥に伴う吸光度スペクトルの変化を示していることから、水分の移動方向は既往の検討<sup>3)</sup>とは逆方向のモルタル内部から外部に向かう方向であるが、既往の検討と同様の経時的な差吸光度の減少を示している。ただし、厚さ 5 mm であっても飽水状態にあるモルタル供試体がこのような短時間で内部まで乾燥することはないので、これらはいずれも、モルタル表層のごく浅い部分の含水状態の変化を表しているものと考えられる。

Cl<sup>-</sup>濃度の異なる厚さ 5 mm のモルタル供試体について、28 日間の封緘養生終了後からの気中乾燥に伴う差吸光度  $\Delta(1425-1350)$  の経時変化を図-3 に示す。これによると、モルタルの含有する Cl<sup>-</sup>濃度の違いに関わらず、養生終了後の飽水状態からの同じ気中乾燥時間における差吸光度  $\Delta(1425-1350)$  の違いが 0.01 程度の範囲内となっている。これより、モルタルが同様の含水状態の場合には、差吸光度  $\Delta(1425-1350)$  の変化で示される気中乾燥によるモルタル表面の乾燥速度はモルタルの Cl<sup>-</sup>濃度に関わらず、同程度であることがわかる。

この結果を受けて、モルタルの含水状態が異なる場合に、厚さ 5 mm のモルタルの Cl<sup>-</sup>濃度と差吸光度  $\Delta(1425-1350)$  の関係を図-4 に示す。なお、差吸光度の値は、それぞれのモルタル供試体の含水状態で平衡に達している環境から 20°C、60%R.H.の測定環境に移動・暴露してから 300 秒後の測定値とした。これによると、全体的な傾向として、養生終了後、75%R.H.、乾燥後とモルタルの含水状態が低下することにより、差吸光度  $\Delta(1425-$

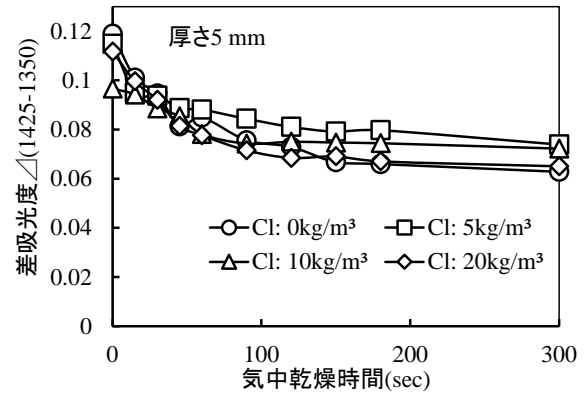


図-3 養生終了後の気中乾燥に伴う差吸光度  $\Delta(1425-1350)$  の経時変化

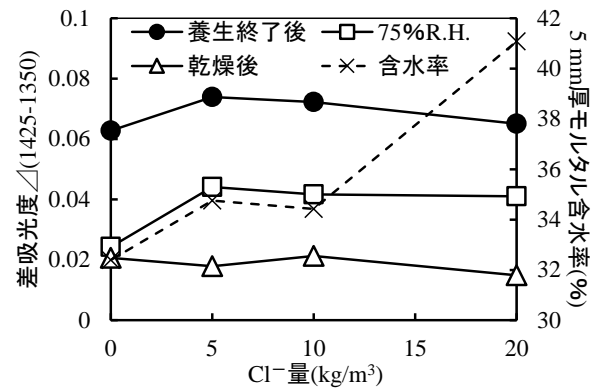


図-4 モルタル含水状態が Cl<sup>-</sup>濃度変化に伴う差吸光度  $\Delta(1425-1350)$  の変化に与える影響

1350)の測定値は低下している。また、モルタルの Cl<sup>-</sup>濃度の影響については、Cl<sup>-</sup>無添加の場合は、やや小さい値を示しているものの、その影響は比較的小さい。

一方で、図-4 に示した 75%R.H.の環境条件で平衡状態となった厚さ 5 mm のモルタル含水率の測定値は、モルタルの Cl<sup>-</sup>濃度によって変化しており、Cl<sup>-</sup>濃度の増加に伴って含水率は上昇している。原田らは Cl<sup>-</sup>含有量の異なるコンクリート供試体を等しい相対湿度環境に保管した場合の含水率について、Cl<sup>-</sup>濃度が高いほど平衡含水率が高くなることを報告<sup>6)</sup>している。これは、コンクリート中の細孔溶液の Cl<sup>-</sup>濃度が上昇することで、同一相対湿度環境下でのコンクリート中における飽和水蒸気圧が低下することが原因と考えられている。本研究においても、同様の理由により 75%R.H.の一定湿度環境に保管したモルタルの含水率が、Cl<sup>-</sup>濃度によって変化したものと考えられる。ただし、図-4 に示したように、測定された差吸光度  $\Delta(1425-1350)$  の値は、モルタル全体の含水率よりは、保管された雰囲気中の相対湿度の影響を強く受けており、このことから、モルタル内部の Cl<sup>-</sup>濃度の影響を受けにくい、モルタル表面の含水状態を評

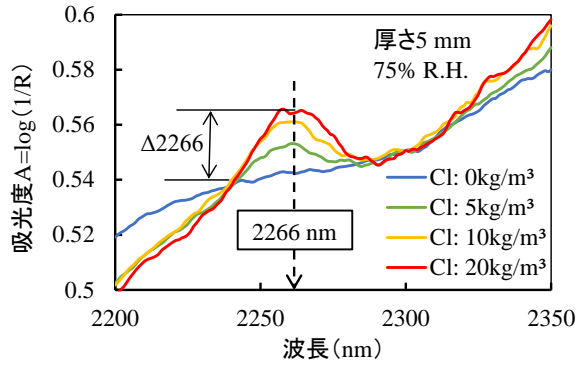


図-5 Cl<sup>-</sup>濃度の変化に伴う吸光度スペクトルの変化

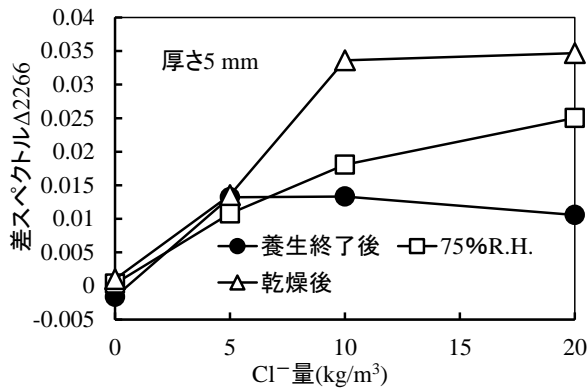


図-6 モルタル含水状態が Cl<sup>-</sup>濃度変化に伴う差スペクトルの変化に与える影響

価しているものと推察される。

### 3.2 塩分濃度の変化に伴う吸光度スペクトルの変化

著者らは過去の検討<sup>1),2)</sup>において、コンクリートやモルタル中の Cl<sup>-</sup>濃度は、近赤外分光法における波長 2266 nm の吸光度と相関性が高いこと、さらには、下記の式に示される差スペクトル Δ2266 を指標として定量的評価が可能となることを報告してきた。

$$\Delta 2266 = A_{2266} - \left( A_a + \frac{A_b - A_a}{\lambda_a - \lambda_b} \right) \times (\lambda_{2266} - \lambda_a) \quad (4)$$

ここに、 $A_{2266}$ 、 $A_a$ 、 $A_b$ ：波長 2266 nm、波長 a(2230 nm)、波長 b(2300 nm)に対する吸光度

$\lambda_a$ 、 $\lambda_b$ ：波長 a(2230 nm)、波長 b(2300 nm)

Cl<sup>-</sup>濃度の異なる厚さ 5 mm のモルタル供試体について、75%R.H.環境に保管後に測定した吸光度スペクトルを図-5 に示す。これより、既往の検討と同様に、波長 2266 nm 付近に、モルタル中の Cl<sup>-</sup>に起因すると考えられる吸光度ピークが検出され、そのピーク高さは、Cl<sup>-</sup>濃度が大きいほど大きくなっていることがわかる。

一方で、モルタル含水状態が Cl<sup>-</sup>濃度変化に伴う差スペクトルの変化を図-6 に示す。全体的な傾向として、モルタルの Cl<sup>-</sup>濃度の増大に伴って、差スペクトル Δ2266 の値は大きくなっているが、Cl<sup>-</sup>量が 5~10 kg/m<sup>3</sup> を

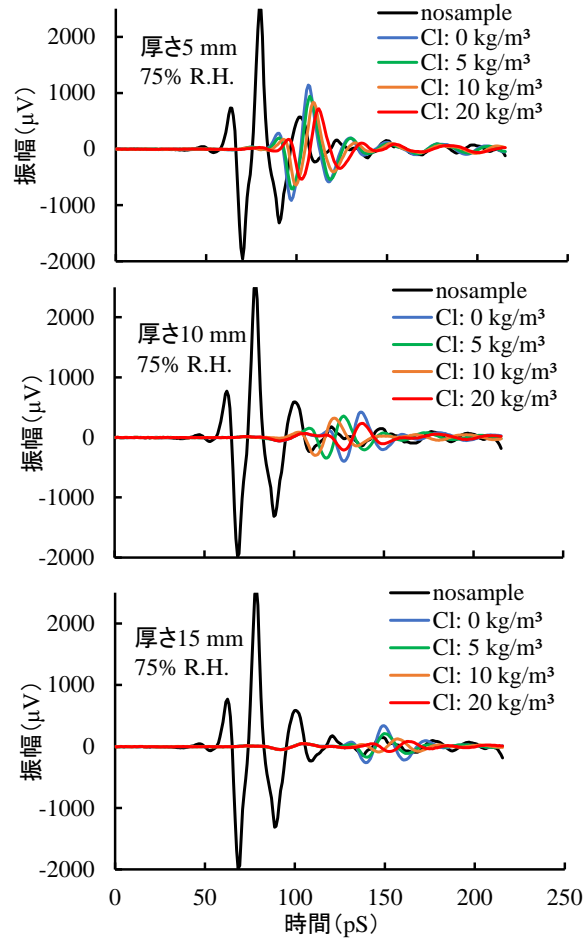


図-7 75%R.H.環境で保管した各種モルタル供試体に対するテラヘルツ透過試験で得られた時間波形

超えると Cl<sup>-</sup>量の増大に対する差スペクトル Δ2266 の上昇が小さくなっている。これは、近赤外分光法によって検出している Cl<sup>-</sup>は、セメント水和物にフリーデル氏塩として固定されている状態のものである<sup>7)</sup>ことから、セメント水和物に固定されない固定化容量を超えた自由な形の Cl<sup>-</sup>は本手法で検出できないためと考えられる。また、図-6 より、モルタルの含水率が低いほど、10 kg/m<sup>3</sup> を超える Cl<sup>-</sup>量に対する差スペクトルの値が大きくなっている。これは、モルタルの含水率が高いほど、モルタル細孔溶液中で Cl<sup>-</sup>がイオン化して存在しやすく、乾燥に伴って、Cl<sup>-</sup>の固定化が促進された結果、近赤外光の吸光度が上昇したものと推察される。

### 4. テラヘルツ時間領域分光法

75%R.H.環境で保管した各種モルタル供試体に対するテラヘルツ透過試験で得られた時間波形を図-7 に示す。これより、試料無しの基準波形 (no sample) に対して、モルタル供試体を通過したテラヘルツ波形は電気信号の検出が遅延するとともに振幅が小さくなっているものの、厚さ 15 mm のモルタルプレートであっても本研究

の条件で生成したテラヘルツ波は、透過可能であることが分かる。これは、前述の近赤外光より大幅に長い波長を有するテラヘルツ波の中でも 0.1 THz 以下の低周波成分の検出により実現した特性と言える。ただし、モルタル供試体の厚さが 5 mm から 10 mm, 15 mm と厚くなるにしたがって時間波形の振幅は大きく減少しており、モルタル内部における吸収等の影響が透過距離とともに大きくなっている。また、特に厚さ 5 mm の場合に明確に見られる傾向として、モルタルの  $\text{Cl}^-$ 濃度が大きくなるほど、通過波形の検出遅延や振幅減少の程度が大きくなっている。

このような、時間波形の変化をフーリエ変換によって周波数 ( $\omega$ ) ごとの成分として定量的に検討するため、以下の式で算出した透過強度  $P_t(\omega)$  および透過率  $T(\omega)$  の周波数スペクトルの例を図-8 および図-9 に示す。

$$P_t(\omega) = 10 \log_{10} E(\omega)^2 \quad (\text{dB}) \quad (5)$$

$$T(\omega) = \left[ \frac{E(\omega)}{E_n(\omega)} \right]^2 \quad (6)$$

ここに、 $E(\omega)$ : 供試体を透過させた時の周波数  $\omega$  に対するスペクトル振幅、

$E_n(\omega)$ : 供試体が無い場合 (no sample) の周波数  $\omega$  に対するスペクトル振幅

図-8 および図-9 は、75%R.H.の湿度環境に保管した厚さ 5 mm のモルタル供試体の測定結果を示しているが、図-8 より、0.02~0.1 THz の周波数領域において、いずれの供試体の場合においても、テラヘルツ波の透過強度は周波数が 0.05 THz 程度までは増加傾向にあるが、それ以降は減少傾向に転じている。また、透過強度のピーク付近に相当する 0.051 THz におけるモルタル供試体の透過強度は、モルタルの  $\text{Cl}^-$ 濃度の増加に伴って小さくなっている。また、図-9 によると、全体的な傾向として、各種モルタルの透過率は周波数の増加に伴って低下しており、さらに 0.051 THz における透過率に着目すると、モルタルの  $\text{Cl}^-$ 濃度の増加に伴って小さくなっている。

電磁波の基本物性として、周波数が小さいほど物質を透過しやすいため、透過強度、透過率ともに、周波数の増加に伴って低下するはずである。ただし、0.04 THz 以下の低周波領域においては、今回の実験で採用した THz-TDS システムにおいては、時間波形データを得る際の測定時間の制約により、透過強度スペクトルの測定精度が低下した可能性がある。そのような観点も踏まえて、本実験条件では、低周波領域の中でも透過強度が大きい 0.051 THz に着目し、モルタル中の  $\text{Cl}^-$ 濃度や含水状態の影響について評価を行うこととした。過去の同様の検討事例では、丸山らが厚さ 3 mm のセメントペースト供試体を用いて含水率の評価を行った際には、水分に対する

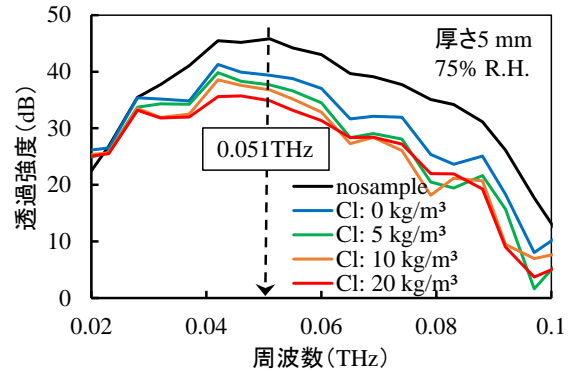


図-8 75%R.H.環境で保管した 5mm 厚モルタル供試体に対するテラヘルツ透過試験で得られた透過強度の周波数スペクトル

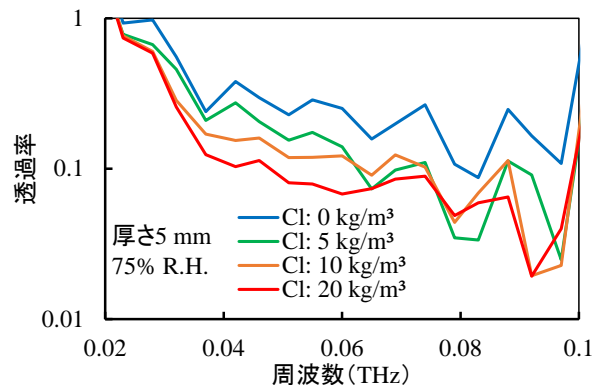
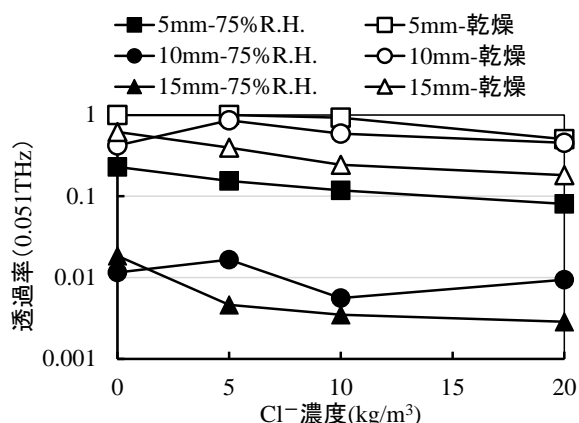


図-9 75%R.H.環境で保管した 5mm 厚モルタル供試体に対するテラヘルツ透過試験で得られた透過率の周波数スペクトル

感度が最も高いのは 0.1 THz であるが、透過率と含水率の線形性が最も高いのは 0.05 THz であると説明している<sup>4)</sup>。また、Tripathi らが塩分濃度の異なる厚さ 2~5 mm のセメントペーストまたはモルタル供試体を用いて透過試験を行った際には、濃度推定のための周波数として 0.1 THz を選定している<sup>5)</sup>。以上より、今回選定した 0.051 THz は、過去の検討で選定された周波数レベルとも概ね一致している。

以上の検討結果を踏まえて、各種モルタル供試体に対する周波数 0.051 THz における透過率をテラヘルツ透過試験で得られた 0.051 THz における透過率とモルタル中  $\text{Cl}^-$ 濃度の関係を図-10 に示す。これによると、モルタル供試体の厚さや  $\text{Cl}^-$ 濃度に関わらず、乾燥時のモルタル供試体の透過率は 75%R.H.環境に保管された供試体の値に比べて大きくなっている。これは、丸山らの検討<sup>4)</sup>でも指摘された現象であり、テラヘルツ波がモルタル中の水分に吸収されたことによるものと考えられる。一方で、モルタル供試体の厚さや含水状態に関わらず、モルタル中の  $\text{Cl}^-$ 濃度が大きくなるほど、透過



図一10 各種モルタル供試体に対するテラヘルツ透過試験で得られた 0.051THz における透過率とモルタル中 Cl<sup>-</sup>濃度の関係

率は低下している。Tripathi らは、透過率の逆数に比例する吸収係数で評価を行っているものの、本研究と同様の関係を指摘している<sup>5)</sup>。ただし、モルタル中の Cl<sup>-</sup>濃度の増大に伴ってテラヘルツ波の透過率が低下する理由については、明確な説明はなされていない。

3.1 で述べたように、一定の相対湿度環境に保管したコンクリートやモルタルの平衡時含水率は、含有 Cl<sup>-</sup>濃度の増加に伴って大きくなることを考慮すると、モルタル中の Cl<sup>-</sup>濃度が増大した場合には、モルタル中で増加した水分によるテラヘルツ波の吸収が促進されるために、透過率が低下したものと推察される。図一10 より、乾燥させた厚さ 5 mm や 10 mm の供試体の場合は、Cl<sup>-</sup>濃度増加に伴う透過率の変化は小さい。一方で、厚さ 15 mm の場合には、Cl<sup>-</sup>濃度増加に伴う明確な透過率低下傾向が見られる。これは、本実験ではモルタルの急速な乾燥による物性変化を避けるために、60℃保管による乾燥を行っていることもあり、厚さ 15 mm のモルタル供試体は完全な乾燥状態に至らず、Cl<sup>-</sup>濃度に応じた水分がモルタル中に残存したためと考えられる。

今後は、含水状態を厳密に制御した上で、モルタルやコンクリート中の Cl<sup>-</sup>濃度によるテラヘルツ波の透過挙動の変化について検討を行い、水分の影響以外の要因の有無について明らかにしたい。また、実構造物への適用を考えると、今回のような透過配置での測定は困難であり、反射配置での測定について検討が必要となる。この場合、近赤外分光法とは異なる、コンクリートやモルタル内部の水分や塩分等の情報が得られる可能性があるが、この点については、透過配置の場合よりも複雑な電磁波の伝搬挙動を考慮するため、今後のさらに詳細な検討が必要である。

## 5. まとめ

本研究結果をまとめると次のようになる。

- (1) 近赤外分光法によって測定された差吸光度  $\Delta$ (1425-1350)によって、周辺相対湿度の影響が強いモルタル表面の含水状態が評価可能であり、その場合にモルタル中の Cl<sup>-</sup>濃度の影響は比較的小さかった。
- (2) 近赤外分光法によって測定された差スペクトル  $\Delta$  2266 によって、モルタル中の Cl<sup>-</sup>濃度が評価可能であるが、10 kg/m<sup>3</sup> を超える高濃度の Cl<sup>-</sup>濃度の場合には、モルタル含水率が低いほど  $\Delta$ 2266 の値は増加する傾向を示し、Cl<sup>-</sup>濃度推定にモルタル含水率の考慮が必要となる可能性を示した。
- (3) テラヘルツ時間領域分光法による透過試験を行ったところ、本実験条件で厚さ 15 mm のモルタルの透過が確認された。
- (4) テラヘルツ波の透過強度のピークが見られた 0.051 THz における透過率で評価を行ったところ、モルタル含水率および Cl<sup>-</sup>濃度の増大に伴う透過率の減少傾向が確認された。

## 参考文献

- 1) 郡 政人, 古川智紀, 上田隆雄, 水口裕之: 近赤外分光法を用いたセメント硬化体中の塩化物イオン量の推定, セメント・コンクリート論文集, No. 61, pp. 189-196, 2007.12.
- 2) 山本晃臣, 郡 政人, 上田隆雄, 七澤 章: 塩分浸透形態が近赤外分光法の吸光度スペクトルに与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 1667-1672, 2010.7
- 3) 山川和輝, 上田隆雄, 郡 政人, 七澤 章: 近赤外分光法によるモルタル表層物性の評価に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 1801-1806, 2013.7
- 4) 丸山一平, 岸 直哉, 川瀬晃道: テラヘルツ波を用いたセメント硬化体の含水率測定に関する基礎研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 75, No. 652, pp. 1073-1079, 2010.6
- 5) S. R. Tripathi, et al.: Measurement of chloride ion concentration in concrete structures using terahertz time domain spectroscopy (THz-TDS), Corrosion Science, Vol. 62, pp. 5-10, 2012.5
- 6) 原田健二, 佐藤駿介, 下村 匠: 塩分がコンクリートの乾湿挙動に及ぼす影響の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 1, pp. 745-750, 2015.7
- 7) 古川智紀, 上田隆雄, 郡 政人, 七澤 章: 近赤外分光法によるコンクリート中のフリーデル氏塩含有量の推定コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 1, pp. 843-848, 2008.7