

## 道路政策の質の向上に資する技術研究開発

## 【研究終了報告書】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)		所属		役職
	小山 裕 (おやま ゆたか)		国立大学法人 東北大学 大学院工学研究科		教授
②研究 テーマ	名称	新たな超高周波電磁波を用いた道路構造物欠陥診断の研究開発			
	政策 領域	[主領域] (8) 「道路資産の保全」	公募 タイプ	タイプII	
③研究経費 (単位: 万円)	平成22年度 (FS)	平成23年度	平成24年度	平成25年度	総合計
	※端数切り捨て。 1000	2430	3307	400	7137
④研究者氏名 (研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)					
氏名		所属・役職 (※平成26年3月31日現在)			
斎藤 恭介		国立大学法人 東北大学 大学院工学研究科・助教			
久田 真		国立大学法人 東北大学 大学院工学研究科・教授			
田邊 匡生		国立大学法人 東北大学 多元物質科学研究所・准教授			
⑤研究の目的・目標 (提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)					
<p>本研究の目的は、新規な高周波電磁波であるテラヘルツ波により、コンクリート内の金属構造物や空洞等の可視化等の基礎的な成果が整備された結果を基盤として、より実検査対象に近い金属構造物埋設コンクリート供試体に適用出来る装置構成に改良して欠陥探傷を行う事である。最終年度の目標は、これまでの研究評価意見から、対象をかぶり40mm超のコンクリート中の鉄筋の腐食状態把握と、欠陥の特定に対する制約条件や適用限界そして信頼性を明らかにする事である。また、実用を念頭に撮像の高速化を行う。コンクリート構造物欠陥探傷に加えて、他のコンクリート内欠陥撮像を行うことで、本方式の展開可能性を調査する。更にはエクストラドーズド鋼橋等の外ケーブル健全度診断等、広範囲は応用可能性についても調査を行う。</p>					

## ⑥これまでの研究経過・目的の達成状況

(研究の進捗や目的の達成状況、各研究者の役割・責任分担、本研究への貢献等(外注を実施している場合は、その役割等も含めて)について、必要に応じて組織図や図表等を用いながら、具体的かつ明確に記入下さい。)

【研究の目標と達成状況・進捗】

### ①かぶり 40mm 超でコンクリート埋設鉄筋の腐蝕状況を把握する。

**達成状況：**コンクリート供試体の透過強度を高めるため、適用周波数を 30GHz~140GHz の範囲で調査した。かぶり 40mm 以下のコンクリート埋設鉄筋供試体で、「領域として」鉄筋腐蝕領域を把握する事が出来た。しかし、かぶり 50mm 供試体では、腐蝕領域の判定は困難であった。

### 供試体の作製・計測

異形鉄筋 D6~D22 を用いて、概略以下のような供試体を形成し、鉄筋側及びコンクリート側からサブテラヘルツイメージング計測を行った。供試体構造は、各種異形鉄筋を組み合わせる配筋した構造である。これは実際のコンクリート構造物の配筋状態を模擬したものである。その中央部を部分的に塩水浸潤して腐食したものを供試体とした。ここで、各異形鉄筋素材は、予め黒錆塗布の表面処理がなされているため、そのままでは赤さびによる浸食を短時間に形成することが難しい。そのため、本研究では、異形鉄筋表面をサンドブラスト処理して表面に塗布してある黒錆を除去し、そのうち塩水浸潤処理により、所望の赤錆を生成することとした。

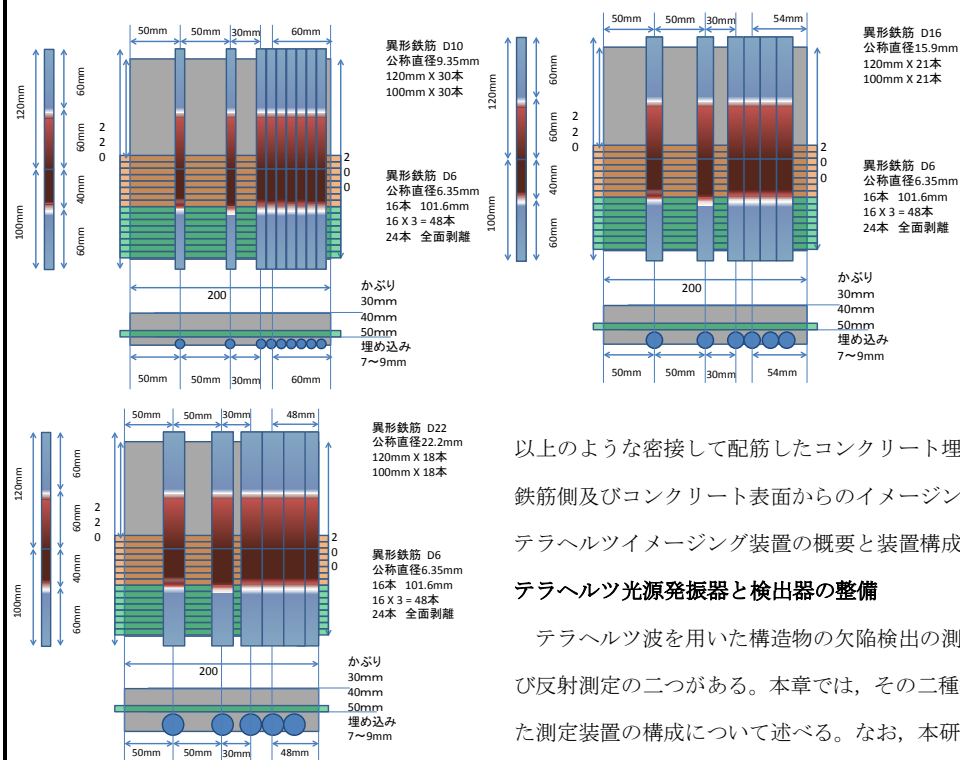


図 0-1 異径鉄筋を配筋したコンクリート埋設供試体。サンドブラスト処理によって表面の黒錆塗布層を除去し、中央部分の茶色部を塩水浸潤して赤さび領域を形成した。

以上のような密接して配筋したコンクリート埋め込み供試体なども形成して、鉄筋側及びコンクリート表面からのイメージングを行った。

テラヘルツイメージング装置の概要と装置構成について記述しておく。

### テラヘルツ光源発振器と検出器の整備

テラヘルツ波を用いた構造物の欠陥検出の測定方法としては、透過測定および反射測定の二つがある。本章では、その二種類の測定方法と本研究で利用した測定装置の構成について述べる。なお、本研究では、小型かつ常温で稼動する高精度なイメージング装置の構築という観点から、テラヘルツ発振器(光源)としていずれも半導体電子デバイスである GaAs タンネット発振器、InP インパットダイオードそして GaAs GUNN ダイオードを用い、検出器として SBD (ショットキー接合ダイオード) 検出器及び焦電検出器 (DTGS) を使用した。焦電検出器 (DTGS) は従来赤外分光光度計に用いられていたものであり、室温動作かつ高感度であるとともに、電磁波の偏波面依存性が無く、熱的に検出するため入射電磁波周波数に依存しない広帯域な検出が可能である特徴があるが、動作周波数が数 100Hz 程度と遅い難点がある。しかしイメージング応用に対しては十分高速な検出が実現できる。一方、SBD 検出器は数 10GHz 以上の高速応答が可能であり室温動作であるが、発振器と同様に共振器中に装着されているため、入射電磁波の偏波面により検出感度が大きく左右される。加えて、検出する電磁波周波数に応じて用意する必要がある。電磁波が垂直に入射する場合は、金属表面での偏波面変化は無いが、斜め入射の場合には入射波の偏波面と反射波の偏波面が変動する点に注意する必要がある。

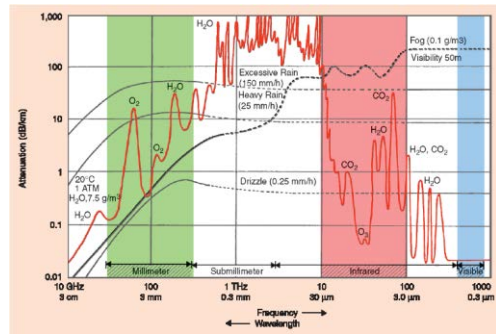
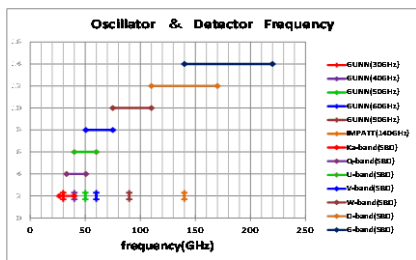


図 0-2 大気および大気中の水分による電磁波の吸収

左図は図 0-2 大気および大気中の水分による電磁波の吸収は大気および大気中の水分による電磁波の吸収を表したものである。この図から、180 GHz 付近に水による吸収ピークが存在することが分かる。このような水によるテラヘルツ波の吸収が大きい周波数を選択することによって、コンクリートやセメント中の水分の分布を測定することが可能であると同時に、コンクリート中のその場水分計測やアルカリ



骨材反応を検出出来る可能性がある。反対に、95 GHz のように吸収が小さい周波数では、試料中の水分による透過強度の減少を抑えて測定することが可能であると考えられる。本研究では、解像度（波長が空間分解能に相当）、光源発振器の出力および水による吸収、さらにコンクリート等における透過率を考慮した結果、30GHz 帯の光源発振器を選択した。

### 透過測定

透過測定装置配置概略図

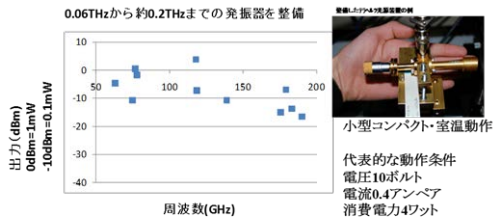
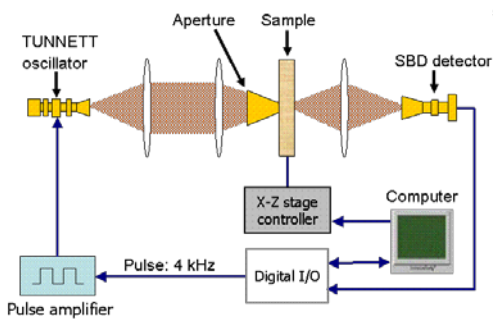


図3.2 本研究開発で整備したテラヘルツ光源

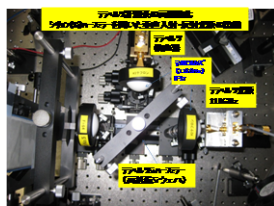
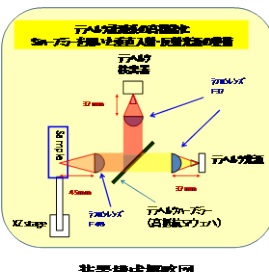
透過測定では、光源発振器から発生させたテラヘルツ波を試料に集光し、その透過光の強度を SBD 検出器により検出するという作業を、測定範囲全体にわたって繰り返し行うことで透過強度の分布を得る。欠陥の存在しない部分における透過強度は、ランベルト・ベールの法則に従い、以下のように表される。

$$I/I_0 = \exp(-\alpha x)$$

ここで、 $I$ は透過光の強度、 $I_0$ は入射光の強度、 $\alpha$ は吸収係数、 $x$ は透過距離を表す。試料内部に欠陥が存在する場合、試料内を透過するテラヘルツ波は、その箇所において散乱もしくは吸収される。このような透過強度の違いがコントラストとなり、欠陥の存在を判別することが可能となる。



本研究で用いた透過測定装置の概略図を示す。光源デバイスより発生したテラヘルツ波は、ポリエチレンあるいはテフロンレンズにより試料上で集光され、SBD 検出器へと到達する。このとき、ステージを一定のステップで移動させてスキャンを行った。試料上における集光度は、金メッキされた円錐形のアパーチャーを用いることによって高めることができる。63 GHz 透過測定においては、3 mm φ のアパーチャー（絞り）を用いた。



装置の構成写真

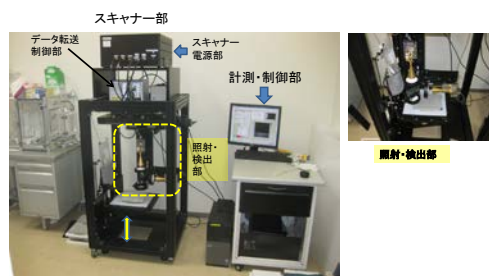
定においては、3 mm φ のアパーチャー（絞り）を用いた。

### 反射測定

反射測定では、欠陥が存在する部分の反射強度の違いを検出することにより、イメージング画像を得ている。透過測定では、発振

器と検出器が試料の両側に位置するため、実際の構造物の欠陥検査を行う際に光路を正確に合わせるのは非常に困難である。一方、反射測定では、発振器・検出器ともに試料の片側に存在するため、より実用に即した測定方法であると言える。図に反射測定装置の概略図と原理的光学系の写真を示す。共焦点光学系配置となっている。試料表面および内部で反射したテラヘルツ光を検出するため、前述の透過測定とは光路が異なるが、それ以外は透過測定装置とほとんど同じである。試料からの反射光は、高抵抗 Si ハーフミラーによって検出器側へと光路を変えられる。今回行った反射測定においては、30~200GHz帯の発振器を使用している。

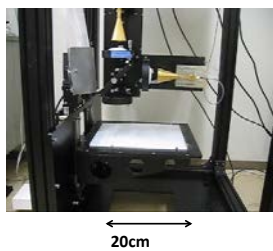
**テラヘルツイメージングシステム装置(全体図)**



この原理を基盤として発展させて構成したイメージング装置の概観を示す。

一部既存大型スキャナーを用いて構成したテラヘルツイメージングシステム装置

**実際の動作の様子**



最大掃引速度  
~10cm/秒  
10ミクロン毎にデータ収集  
来年度は~40cm/秒が可能

走査領域の両端で一時的に止まる。  
(2011年構成)  
2012年、データ転送時間が殆ど無い。

FPGAで処理させる事に依り、データ転送なしに撮像を続ける事が出来る。

走査の制御もPC側で行わず、FPGAで行なう事が出来る。

~20cm x 20cm領域走査時間  
2011年~9分 ⇒ 2012年~1分 ⇒ 2013年以降 15秒が可能

基本原理光学系を元に試作したテラヘルツイメージングシステムの試料走査部。計測電子回路部及び計測ソフトウェアの改良により、20cm四方のイメージングにかかる時間を大幅に短縮することが出来た。更に4倍の高速化が可能である。

**研究実施体制 と役割分担**

本研究の実施体制を下図に示す。

- 実施体制**
- 研究代表者:** 小山 裕 (東北大院 工)
- 共同研究者:** 土木専門家  
久田 真教授 (東北大院 工)
- データ解析・計測光学系設計  
斎藤 恭介助教(東北大院 工)  
田邊 匡生准教授(東北大 多元研)  
技術員A
- 供試体作成・計測  
技術員B  
人材派遣A

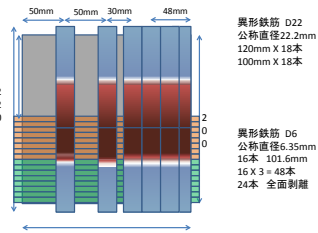
研究代表者は、テラヘルツ・サブテラヘルツ波の発生・検出デバイス特に半導体デバイスが専門であるため、土木専門家に共同研究者として参画を頂き、供用コンクリート橋や鋼橋の腐食程度調査、及び検査対象の欠陥等について議論を行なった。

**かぶり40mm超の埋設鉄筋供試体の作成**

D6及びD22の異形鉄筋を配筋した供試体の例を二種類の異形鉄筋を組み合わせる配筋した供試体構造。コンクリート打設前の構造を上部から撮影した。コンクリート打設後、約一か月間、室温で養生したのち、イメージング測定を行った。全面剥離とは、サンドブラスト処理で鉄筋表面の黒錆を除去したものである。配筋後、コンクリートを打設し約一か月養生したのち、イメージング測定を行った。



コンクリート打設前の配筋例  
D22とD6の組み合わせ  
中央部分に塩水でさび生成(点線内部の領域)

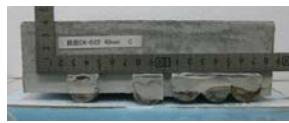


異形鉄筋 D22  
公称直径22.2mm  
120mm X 18本  
100mm X 18本

異形鉄筋 D6  
公称直径6.35mm  
16本 101.6mm  
16 X 3 = 48本  
24本 全面剥離

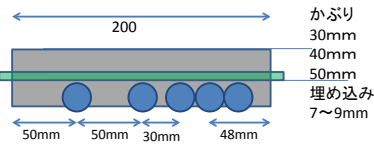
二種類の異形鉄筋を組み合わせて配筋した供試体構造。コンクリート打設前の構造を上部から撮影した。コンクリート打設後、約一か月間、室温で養生したのち、イメージング測定を行った。全面剥離とは、サンドブラスト処理で鉄筋表面の黒錆を除去したものである。

異形鉄筋を型枠に配筋後、コンクリートを打設した供試体の断面構造写真と断面構造図である。かぶりは、30mm、40mm、50mm の3種類の供試体を作成した。



コンクリート打設後の配筋例  
断面写真  
D22とD6の組み合わせ  
中央部に領域的にさび部を形成

二種類の異形鉄筋を組み合わせた配筋供試体の断面構造写真と断面構造図。D6とD22の配筋構造の例。

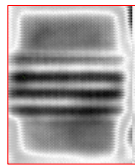
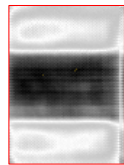
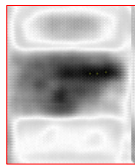


かぶり  
30mm  
40mm  
50mm  
埋め込み  
7~9mm

D10-50mm

D16-50mm

D22-50mm



コンクリート面  
異形鉄筋部  
コンクリート面

### 二種類の異形鉄筋を配筋したコンクリート供試体のテラヘルツイメージング

配筋した供試体のイメージングは、焦点深さを表面から内部鉄筋部まで 0.5mm ごとに変化して撮像した。そのうち最も鮮明に撮像された結果を示す。用いた光源波長は自由空間中で約

5mm であり、焦点深度はその 1/10 程度の精度で変化したことになる。また、テラヘルツビームはガウシアン形状のビームプロファイルを持っていて、テフロンレンズで集光しているが、そのビーム径は約 30mm 程度と広い。初めに、30GHz 共焦点配置のイメージング装置空間分解能を見積もるため、異形鉄筋そのもののイメージング画像を示す。

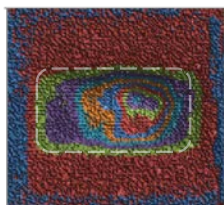
異形鉄筋撮像空間分解能の見積もり。D22 異形鉄筋は個々の鉄筋が撮像できるが、それ以下の鉄筋は、領域的な存在を確認できる。

その結果、D22 異形鉄筋はほぼ一本ずつの鉄筋の存在を個々に撮像可能であるが、それ以下の径の異形鉄筋は一本ごとでなく、領域的にその存在を撮像することが出来る。これは用いた光源の波長が空気中で約 10mm であり、テフロンレンズで収束しているが、そのビーム径は約 30mm 程度あるためである。

次に、二種類の異形鉄筋を配筋してコンクリート中に埋設した供試体のイメージング像を示す。かぶりは 30mm から 50mm であり、配筋は D6 と D10 及び D6 と D22 の二種類の異形鉄筋を配筋したものである。また、異形鉄筋はサンドブラスト処理に

より表面黒錆部を除去してあり、部分的に中央部に塩水浸潤による深刻な赤錆部を故意に形成した供試体である。

かぶり  
30mm



イメージング像(D6とD22鉄筋)  
点線内が赤錆領域

コンクリート打設前



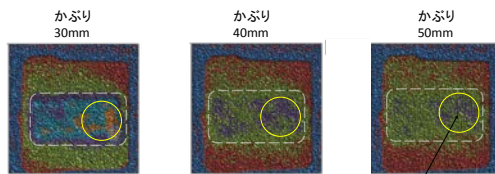
コンクリート打設前の鉄筋の配筋状況。  
点線内領域が赤錆領域となる。

二種類の異形鉄筋で配筋し、中央部に赤錆部を形成した供試体のイメージング像。領域的なさび部(腐食部)の可視化が可能である。D22 鉄筋の場合、配筋間隔が密



であるほど、明瞭に認識できる。

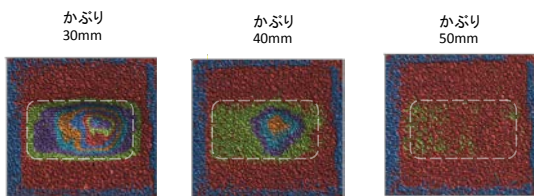
D6とD10異形鉄筋の組み合わせ配筋構造のイメージング



かぶり30mmでは明瞭にさび部を領域的に可視化できている。  
かぶり40mmでも領域的にさび部を可視化できるが、かぶり50mmでは、一部縦鉄筋のさび部に  
対応すると思われる領域が把握できるが、かなり不明瞭となる。

D6 と D10 の異形鉄筋で配筋した供試体のイメージング像。かぶり 30mm ではかなり明瞭にさび部を領域的に認識できる。かぶり 40mm でも領域的にさび部を認識することが可能であるが、かぶり 50mm では認識することが困難である。

D6とD22の組み合わせ配筋構造のイメージング



かぶり30mmでは明瞭にさび部を領域的に可視化できている。D10よりもD22では、更に明瞭に可視化可  
能である。かぶり40mmでも明瞭に領域的にさび部を可視化できるが、かぶり50mmでは、かなり不明瞭と  
なる。

D6 と D22 の異形鉄筋によるコンクリート埋め込み配筋供試体のイメージング像。かぶり 30mm と 40mm では、D10 よりも明瞭にさび部を領域的に認識することが出来るが、かぶり 50mm では、困難である。

に示すように、実際の配筋状況に近い二種類の異形鉄筋を用いて配筋しコンクリートに埋設した供試体で、さび部に対応する

領域を識別する事が可能であった。また、D6-D10 及び D6-D22 のいずれの組み合わせでも、かぶり 30mm 及び 40mm ではさび部を領域的に認識することが可能であるが、かぶり 50mm では、極めて困難であった。また D10 異形鉄筋よりも径が太い D22 異形鉄筋の方がより明瞭にさび部の領域を把握できることが分かった。これは、コンクリート内部からの反射強度が、行きと帰りの2倍増加する行路により、その指数関数で強度が減少するためである。加えて、行路の長さが増加するとともに、コンクリート内部での骨材などによる散乱の影響も大きくなると考えられる。反射強度の減少は、更に高感度な検出器、例えば液体ヘリウム冷却のシリコンプロモーターなどを用いることで克服可能であると考えられるが、あまり現実的ではない。以上の結果から、テラヘルツ波方式による鉄筋のさび状態検査は、かぶりが 40mm 程度以下で領域的に可能であると結論されると考えている。実地に用いるためには、現在重量 40kg 以上ある装置の軽量化と走査面を制御する機械的機構が必要となるが、技術的な困難性は大きくないと考えている。

#### 【コンクリート埋設腐蝕鉄筋の検出：まとめ】

コンクリート中の鉄筋構造物のさび部を把握出来る事を研究開発対象とした。

検出対象とすべきさびの程度を把握するために、土木専門家の久田教授の指導の下、供用年数が長い (20 年~40 年) 供用コンクリート橋及び鋼橋を実施調査し、厚さ 1mm 単位のさびを対象とする事が妥当であるとした。実際の配筋状態に近い二種類の異なる異形鉄筋をコンクリートに埋設し、人工的に塩水浸潤により部分的な厚さ約 1mm 程度以下の赤錆腐食部を形成して、30GHz テラヘルツイメージングを行った。その結果、かぶり 40mm 以下程度のコンクリート埋設異形鉄筋の配筋であれば、一本ずつの個別の鉄筋の腐食状況は把握できないが、領域的にさび部を検出することが可能であった。国総研との議論では、領域的に腐蝕部分が認識可能であれば、非常に有効であるとの見解を得ている。かぶり 50mm 以上の構造物に対しては、更に高感度な検出器の適用など、検討が必要である。

#### ② テラヘルツ波のコンクリート透過特性

**コンクリート試験体の吸収係数  
セメントに対する細骨材組成依存性**

細骨材の混入割合が高い程、透過しやすい。  
\* 通常施工混合比〜3

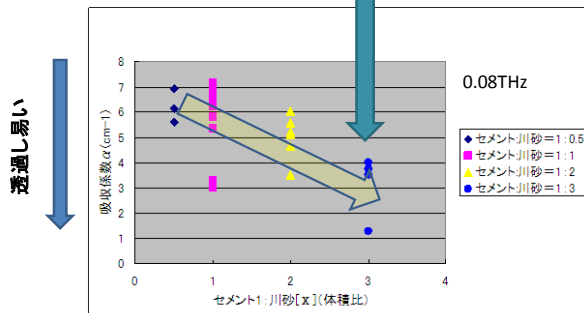


図 0-3 コンクリート供試体の吸収係数のセメント・細骨材組成依存性。表面反射の影響がない、真の吸収係数を求めている。

コンクリート材料の欠陥イメージング測定を行なうに先立ち、ポルトランドセメントと細骨材、粗骨材を配合したセメント材料の、J バンドから F バンドに亘る高周波電磁波透過特性を調査した。発生源はホーンアンテナを装着した空洞共振器型タンネットダイオード発振器であり、検出器は室温動作のゼロバイアス・ショットキー検出器である。電磁波集光系は吸収が少ないポリエチあるいはテフロンレンズである。

図 0-3 にコンクリート試験体の透過特性を示す。適用周波数は 80GHz(0.08THz)である。物質の吸収係数を求める場合、入射電磁波は空気と試料の屈折率の違いにより表面で反射される成分が存在する。従って、単に透過した電磁波強度を測定し試料厚さで除した値では、真の吸収係数とはならない。

試験体の屈折率が既知であれば、計算により補正出来るが、

通常試験体の屈折率は不明であるので、その場合は、二種類以上の厚さが異なる試験体を測定し、以下の要領で表面反射及び試験体内部での反射を考慮した計算により、真の吸収係数を求める事が出来る。本研究開発ではその手法を適用し、超高周波数帯域で初めてコンクリート試験体の真の吸収係数を求めた。

ほぼ平行な板状試料に光あるいは電磁波が入射する場合を想定する。透過係数 T は、入射光の電力  $I_0$  に対する透過光の電力 I の比、 $I/I_0$  で定義される。試料の厚さを x、吸収係数を  $\alpha$ 、反射係数を R であるとき、試料表面から試料内部へ入る光強度は

$$(1 - R)I_0$$

試料を透過して、試料の裏面に到達する光強度は、試料を透過する間に吸収されて指数関数 exp 的に弱くなるから、

$$(1 - R)I_0 \exp(-\alpha x)$$

試料裏面に到達した光は試料内部で再び試料内部側へ反射係数 R で反射され、その結果、試料裏面から出てくる光強度は

$$(1 - R)I_0 \exp(-\alpha x)(1 - R)$$

となる。この光は更に試料表面へ戻り、同じように反射と透過を繰り返して (多重反射条件)、最終的に試料裏面から放出される総透過量は、

$$T = \frac{(1 - R)^2 \exp(-\alpha x)}{1 - R^2 \exp(-2\alpha x)}$$

で求められる。もし  $\alpha x$  が大きい場合は (仮定)、分母の第二項が無視出来て、

$$T \approx (1 - R)^2 \exp(-\alpha x)$$

とすることが出来る。あくまで仮定であって、常に正しいわけではない。

もし反射係数 R と x が分かっていたら、この式から吸収係数  $\alpha$  を直接求める事が出来る。しかし一般に試料の反射係数 R は分からない場合が多い。

その場合は、厚さが  $x_1$  と  $x_2$  と異なる試料の透過強度  $T_1$  と  $T_2$  を測定し、

$$\frac{T_1}{T_2} \approx \exp\{\alpha(x_2 - x_1)\} \Rightarrow$$

**コンクリート試験体の吸収係数  
セメントに対する細骨材+素骨材組成依存性**

コンクリートは、組成により軽量木材のバルサや木材のスギと同程度の高い透過性がある。(粗骨材は細骨材の2倍容積混合)

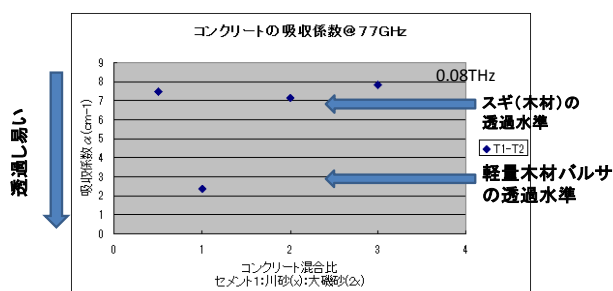


図4.2 細骨材の2倍容積の粗骨材(大磯砂)を投入したコンクリート試験体の吸収係数の組成依存性

$$\alpha = \frac{1}{(x_2 - x_1)} \ln \left\{ \frac{T_1}{T_2} \right\}$$

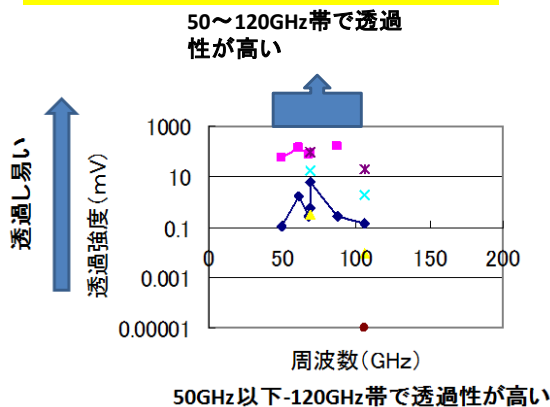
から吸収係数  $\alpha$  を求める事が出来る。 $\alpha$  は一般に  $[\text{cm}^{-1}]$  単位で表す。従って、試料の厚さ  $x_1$  と  $x_2$  も  $\text{cm}$  単位で計算する。

図 0-3 の結果は、ポルトランドセメントに対して骨材組成が増加するほどテラヘルツ波の吸収係数は減少し透過しやすくなる事を示す。これはポルトランドセメントの比重が  $3.15\text{g/cc}$  と骨材の比重 ( $1.5\text{g/cc}$ ) よりも大きく、コンクリート材料中最も大きい事から理解できる結果である。

次に、細骨材の 2 倍容積の粗骨材 (大磯砂) を投入したコンクリート試験体の吸収係数の組成依存性を図に示す。組成により吸収係数は  $2\sim 8\text{cm}^{-1}$  の間で変化するが、これは木材のスギ (吸収係数が約  $7\text{cm}^{-1}$ ) 及び軽量木材のバルサ (吸収係数が約  $2\text{cm}^{-1}$ ) に匹敵し、十分透過しやすい材料である事を示している。

### コンクリート試験体透過強度の周波数依存性

#### コンクリート透過強度の周波数依存性



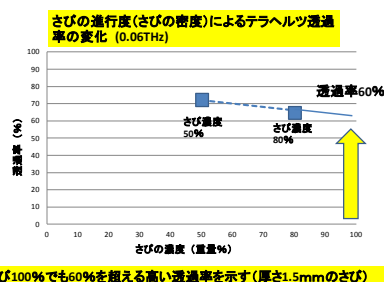
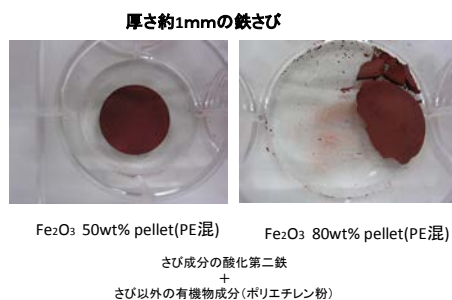
図にコンクリート試験体の透過強度の周波数依存性を示す。骨材の種類や粒径などに依存すると思われるが、本研究で作成した試験体では、50乃至120GHz帯域の透過能が高いことが分かる。本研究では、上記の周波数帯域のテラヘルツ光源を用いて、種々のコンクリート構造物欠陥イメージングを行った。

図 コンクリート透過強度の光源周波数依存性。

### ③ コンクリート埋設鉄構造物の腐蝕程度の非破壊測定

#### 模擬赤錆供試体 (鉄酸化化合物) を用いた さび化合物のテラヘルツ透過特性

さび劣化が進行した供用中のPC橋及び鋼橋の腐食状態調査から、橋梁の腐食層厚さは  $1\text{mm}$  以上も有る場合が見受けられ、著しく腐食が進行した部位では、腐食孔まで到達している事を把握出来た。橋梁用鉄鋼材料を供給しているメーカー担当部署から聴取した所、コンクリート橋を構成する鋼材は、特に表面腐食防止塗装や腐食防止膜の処理を行う事は少なく、自然の赤さび (酸化第二鉄主成分) が薄く形成された状態でコンクリート中に埋設される事もあるとの事であった。鉄さびの成分は複数の鉄酸化化合物及びその水酸化物によって構成されているが、さびが十分進行した場合の主要成分は酸化第二鉄 (いわゆる赤さび) である。

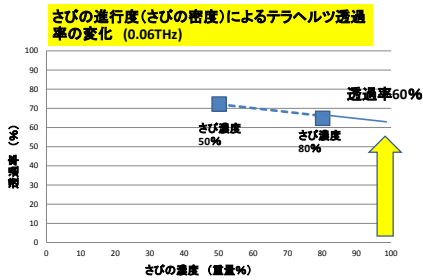


酸化第二鉄と PE 粉による模擬さび供試体 サブテラヘルツ波透過率の酸化第二鉄濃度依存性



さびの進行程度は、さび成分の濃度（密度・充填率）及びさび層の厚さで推し量られる。十分現実のさびに近い供試体として、酸化第二鉄とその他の水酸化物等の成分としてポリエチレン粉末を混入した板状のものを「さび」とした。さびの進行具合は、酸化第二鉄の濃度が高いものをさびが進行しているものとし、酸化第二鉄の板状試料の厚さが厚いものを、同じくさびが進行しているものとした。

### 鉄さびのテラヘルツ波透過率



さび100%でも60%を超える高い透過率を示す(厚さ1.5mmのさび)

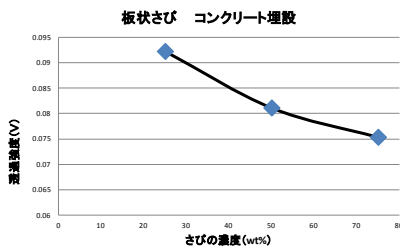
模擬さび供試体（厚さ 1.5mm）のサブテラヘルツ波透過率のさび濃度依存性

様々なさび状態に対応した酸化第二鉄板状試料を用意し、テラヘルツ波透過基本特性を把握した。様々なさび状態とは、酸化第二鉄濃度が異なる試料と、酸化第二鉄の厚さが異なる試料である。さび濃度を変えた模擬さび供試体のサブテラヘルツ透過率の濃度依存性を

図に示す。酸化第二鉄を主剤とした模擬さび供試体の透過率は大変高く、100%濃度を想定した場合でも、約 60%の透過率を得ることができるものと推定できる。従って、この高い透過率を用いることにより、実用的な反射・透過配置によるさび状態把握が可能であると考えられる。

次に、この供試体をコンクリートに埋設し、その透過率を同様に測定した。その結果を図に示す。

板状さびをコンクリートに埋設してテラヘルツ透過強度を測定。さびの進行が進むにつれて、透過強度が減少する。



コンクリートに埋設した模擬さび供試体のサブテラヘルツ波透過率のさび濃度依存性

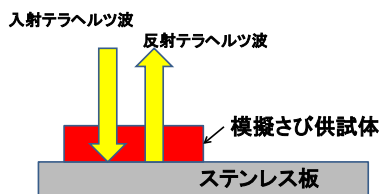
コンクリートに埋設した状態でも、埋設していない状態と同様な透過率のさび濃度依存性を示している。

即ち、酸化第二鉄の濃度及び厚さ（さびの進行度とさびの厚さ）に対応して、透過率は減少していくが、100%酸化第二鉄濃度でも 60%もの高い透過率を示している。この結果は、板状の模擬さび供試体をかぶり厚さ約 1cm 程度でコンクリート中に埋設して測定しても同じように得られた。

この結果から、コンクリート中のさびの進行程度を把握することが可能であることが分かるとともに、反射法によるさび状態の把握が可能である。鉄材上のさびがある状態で、さび表面からテラヘルツ波を照射し、さびの層を透過して下地の鉄表面で反射し、再びさびの層を透過して、さび状態の把握を行うことが可能である。

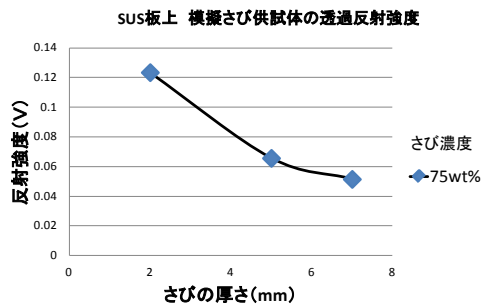
### 鉄さびのテラヘルツ波反射透過特性

図は、テラヘルツ波が反射するステンレス鋼板上に模擬さび供試体を貼り付け、表面からテラヘルツ波を照射してさびの層を透過する強度を測定した結果である。



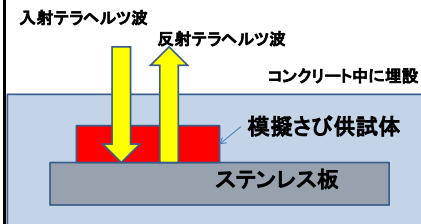
さびの透過反射強度測定用供試体の断面構造

ステンレス板上に貼り付けた模擬さび供試体を透過して反射してくるテラヘルツ波強度のさび層厚さ依存性



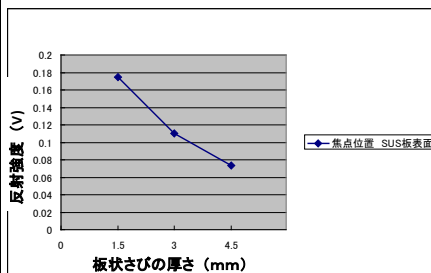
透過測定結果と同様に、さびの進行度（濃度）とさび層の厚さが増加するとともに、テラヘルツ反射強度が単調に減少する結果が得られた。

コンクリート中に埋設した模擬さび供試体の透過反射強度測定用供試体断面構造



次に、これらのさび試料をかぶり厚さ約 1cm 程度でコンクリート中へ埋設し、同様の測定を図 0-4 コンクリート中に埋設したステンレス板上に貼り付けた模擬さび供試体からのテラヘルツ反射強度の、模擬さび供試体厚さ依存性測定を行った。コンクリート中へ埋設した様々な酸化第二鉄濃度及び厚さの模擬さび供試体の透過強度測定を行った。その結果、テラヘルツ波透過強度は、さびの進行度（濃度の増加とさび層の厚さの増加）に伴い、単調に減少した。

透過測定結果と同様に、さびの進行度（濃度）と模擬さび供試体の厚さが増加するとともに、テラヘルツ反射強度が減少する結果が得られる。



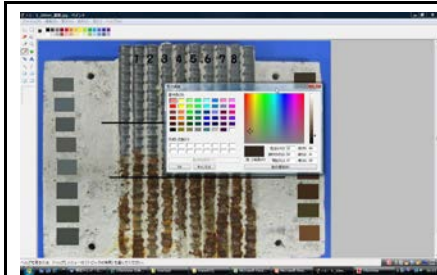
次に、これらの模擬さび供試体をかぶり厚さ約 1cm 程度でコンクリート中へ埋設し、同様の測定を行った。コンクリート中へ埋設した様々な酸化第二鉄濃度及び厚さの模擬さび供試体の透過強度測定を行った。その結果、テラヘルツ波透過強度は、さびの進行度（濃度の増加と模擬さび供試体の厚さの増加）に伴い、単調に減少した。

また、反射透過測定用の、ステンレス鋼板上に貼り付けた様々な酸化第二鉄濃度が異なる模擬さび供試体も、かぶり厚さ約 1cm 程度でコンクリート中に埋設し、反射強度のさび進行度による変化を測定した。コンクリートを透過し、模擬さび供試体に到達して供試体を透過し、下地のステンレス鋼板表面で反射して表面に戻るテラヘルツ波強度は、コンクリートに埋設する前と同様に、模擬さび供試体の酸化第二鉄濃度の増加とともに単調に減少した。これらの結果から、コンクリート中に埋設された金属のさびの進行度が把握できると考えられる。

### 鉄さびの進行度の色分析による定量化

コンクリート内の鉄構造物のさび状態を、構造物を破壊することなく評価するためには、さび状態の定量評価を行う必要がある。従来の JIS 規格によるさび・腐蝕度の進行度の定義は、腐蝕による重量変化であるから、構造物を破壊して腐蝕度を測定しなければならない。そのための予備的な手法として、さびの色分析による腐蝕進行度の定量化を試みた。色分析は、さび供試体をデジタルカメラにより撮影し、そのカラー画像を、RGB（赤、緑、青）の三原色強度で定量化し、更に色相・明度・彩度も数値化する。一定の同じ撮影条件下で色分析することにより、さびの進行度を、破壊的な重量変化でなく、非破壊的な手法で評価できる可能性がある。

図は、標準的な色分析ソフトであるマイクロソフトのペイントを用いた色分析の手法である。RGB 及び色相・彩度・明度を数値化することが出来る。これを用いて、腐蝕していない部分と腐蝕部の二点で、色分析によるさび進行度を定量化した結果を示す。



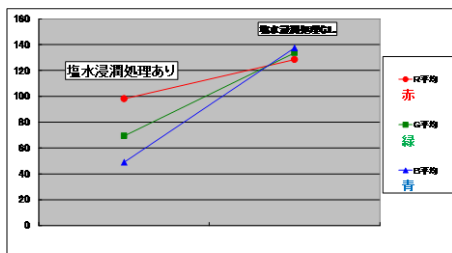
Microsoft windows付属の「ペイント」を用いて下記パラメータを測定  
 ・色合い(0-240)  
 ・鮮やかさ(0-240)  
 ・明るさ(0-240)  
 ・赤(0-255)  
 ・緑(0-255)  
 ・青(0-255)

腐蝕鉄筋を用いた腐蝕進行度の色分析による定量化の試み。

17

### 鉄筋さび状態の定量的評価

鉄筋さび状態の色分析による定量的評価

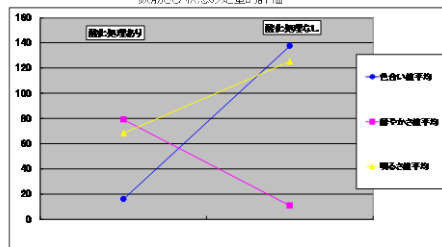


鉄筋さび部の腐蝕状態の色分析による数値化 (RGB 分析)。腐蝕が進行するに従い、特に B (青) 成分の減少が際立つ。

さびが進行するに伴い、赤R・緑G・青B成分のいずれも減少するが、特に青B成分の減少率が大い。

### 鉄筋さび状態の定量的評価

色の属性の種類・色相(色合い)・明度(明るさ)彩度(鮮やかさ)による鉄筋さび状態の定量的評価



さびの進行とともに、特に色合いの減少が目立つ。明るさも減少することがわかる。

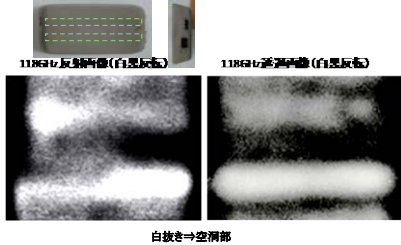
鉄筋さびの進行とともに、色相(色合い)が大きく低下する。明度(明るさ)も低下する。逆に彩度(鮮やかさ)は増加する。

19

#### ④コンクリート構造物内の空洞可視化

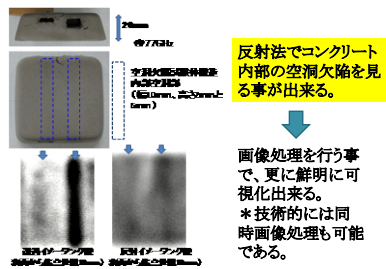
##### コンクリート構造物中の空洞欠陥イメージング

反射及び透過でコンクリート中の空洞を可視化出来る。  
\*同時画像処理も可能である。



##### 高周波テラヘルツによる空洞欠陥イメージング像

人工的に形成された欠陥を含む道路構造物試験体の欠陥検出(道路構造物試験体内部の亀裂・空洞)



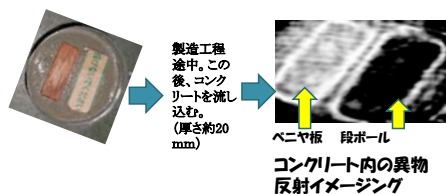
##### コンクリート供試体内部に形成した空洞のテラヘルツイメージング

図にコンクリート試験体内部に形成した空洞欠陥のテラヘルツイメージング像を示す。透過法及び反射法でも、空洞欠陥を撮像することが可能である。これは、空洞部(空気)とコンクリートの屈折率の違いから、空洞界面でテラヘルツ波の反射が生じるためであろうと思われる。また、空洞の隙間厚さは波長限界より小さな2mmも撮像できている。光学顕微鏡でも同様であるが、波長が揃った単色光を用いた場合、縦方向(高さ方向)の分解能は極めて高く(干渉顕微鏡法)、3A(オングストローム)の分子層を解像できる。

#### ⑤コンクリート構造物内の異物検出

人工的に形成された欠陥を含む道路構造物試験体の欠陥検出(道路構造物試験体内部の異物)

コンクリート試験体中の異物(ベニヤ板、段ボール)



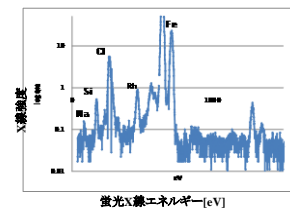
コンクリート中に埋設された異物(ベニヤ板と段ボール)のテラヘルツイメージング像。コンクリートとの屈折率の違いにより反射強度に違いが生じるものと考えられる。

図に、コンクリート中に埋設したベニヤ板及び段ボールのテラヘルツイメージング像を示す。前述の空洞の場合と同様に、コンクリートと異物の屈折率の違いがあるため、その界面でテラヘルツ波の反射が生じるため、反射法で異物の撮像が可能となっていると考えられる。

人工的に形成された欠陥を含む道路構造物試験体の欠陥検出(金属構造物の塗膜下さび)

模擬さび部(50℃塩水付着鉄)の組成化学分析(蛍光X線分析)

RhはX線源由来。  
錆部の組成は(鉄・塩素・ナトリウム・シリコン)から成り立つと思われる。  
\*軽元素の検出は検出出来ないが恐らく共存している。



人工的に鉄板上に塩水浸潤により形成した「さび」の成分を化学分析した

#### ⑥目に見えない塗膜下の金属表面のさび可視化

テラヘルツ波は、電波の種類であるから金属に反射される。加えて鉄や銅等の酸化物(錆)により、その反射強度が大きく変化する。また、いくつかの酸化物ではテラヘルツ周波数帯に特有の吸収ピークを示すことを我々は既に明らかにしている。その特徴を生かして、通常の可視光や赤外光では見ること

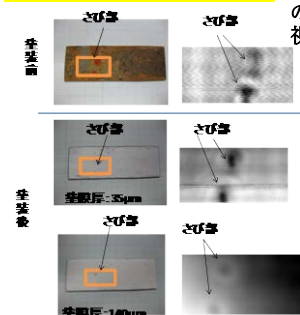
が出来ない着色塗膜面下の錆状態を検出することが可能となる。塗装面や樹脂等は透過し、内部の金属構造物表面からは強く反射され、しかも金属表面の錆により反射強度が変化する特徴を生かした、テラヘルツ波の重要な「キラアブリケーション」の一つになるものと期待している。この種の樹脂等に内包された金属構造物には多種多様なものがあり、その応用範囲は極めて広い。

本研究で人工的に鉄板上に形成した錆の成分分析結果を示す。この鉄さびの成分は、塩水の成分を反映して、ナトリウム・塩素、シリコン、鉄を主成分としている。

図に、各種樹脂塗料で覆われた錆部のテラヘルツイメージング結果を示す。錆を覆った塗装面を通して、その下の錆を可視化することが可能である。

**人工的に形成された欠陥を含む道路構造物試験体の欠陥検出(金属構造体の塗膜下さび)**

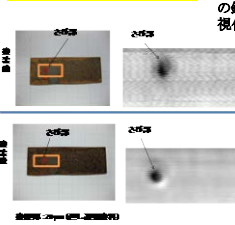
**エポキシ樹脂塗装膜下のさび**



塗膜面下の錆を可視化

**人工的に形成された欠陥を含む道路構造物試験体の欠陥検出(金属構造体の塗膜下さび)**

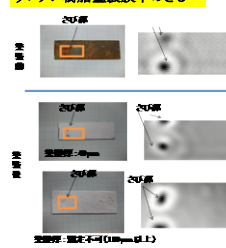
**フッ素樹脂塗装膜下のさび**



塗膜面下の錆を可視化

**人工的に形成された欠陥を含む道路構造物試験体の欠陥検出(金属構造体の塗膜下さび)**

**ウレタン樹脂塗装膜下のさび**



塗膜面下の錆を可視化

エポキシ樹脂塗料で覆われたさびのテラヘルツイメージング

フッ素樹脂塗料下のさびイメージング

ウレタン樹脂塗装膜下のさびイメージング

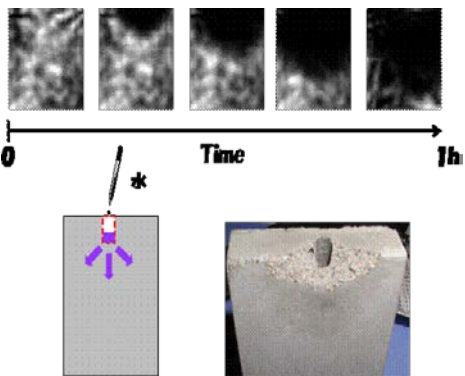
**⑦コンクリート内部への水の浸潤可視化**

**コンクリートへの水の浸潤測定**

コンクリート建材の強度形成過程には、骨材（砂や砂利など、コンクリートの骨格をなすもの）との水和物形成が密接に関係している。コンクリートの強度劣化には脱アルカリ反応の影響が大きく、コンクリート中の水により引き起こされる脱アルカリ反応として炭酸化がある。コンクリートの炭酸化は内部を高アルカリから中性に近い環境に変化させ、鉄筋をさびやすくする。セメント・コンクリートの炭酸化の原因は、主に、コンクリート中の液相に炭酸ガスが溶解し、それによって生じた炭酸イオンがセメント水和物と反応することで起こる。

また、コンクリートの膨張やひび割れの原因となるアルカリ骨材反応にも水が関与している。アルカリ骨材反応のうち最も被害が大きいのはアルカリ-シリカ反応であるが、これは十分な水、ある量以上の水酸化アルカリ濃度、反応性骨材の存在という三つの条件が揃ったときに起こる。逆に言えば、三つのうちどれかを防げば反応は起こらない。したがって、上記の条件のひとつであるコンクリートの過剰水分を迅速かつ精密に検出することで、建材破壊を早期に予防することが可能である。





コンクリートへの水の浸潤

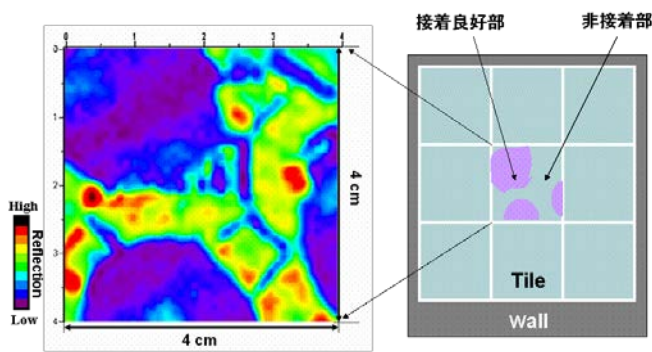
100GHz 付近の電磁波は大気中の吸収係数が適度に小さいので、リモートイメージングに適している。さらに、この周波数領域では水分子による吸収が大きいため、建造物中の水の存在を高感度に検出することが可能である。図は通常のポルトランドセメントで形成した試料内部に小径の孔を形成し、その孔から水を浸潤させて、試料内部の水の浸潤状態を透過イメージングしたものである。この図においては、透過が小さい、すなわち水による吸収が大きいところほど濃い色で表されており、時間が経過するにしたがってコンクリート中に水分が広がっていく様子が見て取れる。このようにテラヘルツイメージングを用いてコンクリートの含水量を計測することで、

建造物の健全性の評価や建材破壊の原因の予測を容易に行うことができると考えている。

### ⑧ セラミックスタイルの接着不良検出

#### セラミックタイルの接着不良欠陥

コンクリートと同様に、外壁建材として広く用いられている各種セラミックタイルもテラヘルツ透過特性が良好である。



反射測定におけるセラミックタイルのイメージング画像

テラヘルツ波を用いることで外壁とセラミックタイルの接着不良部を画像として把握することが出来る。図は、コンクリートの表面にセラミックを接着し、それを反射測定することにより得られたイメージング画像である。この図より、画像の中心部から Y 字状に反射強度の強い部分が存在していることが分かる。これはこの領域でセラミックタイルとコンクリート表面の間に間隙が存在し、その間隙と試料の界面で反射が起こる

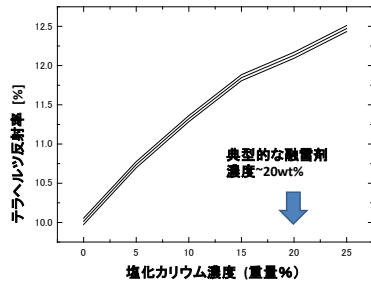
ためだと考えられる。従来、建築業界ではこの種の検査を行う場合、主に打診法が用いられており、壁を叩いた際の音響変化によって接着状態の良否を診断している。近年では発生する音響のスペクトル解析も行なわれているが、多くは熟練した検査技師の判断に頼っている。トンネル内壁の剥離状態も同様の手法が用いられるが、テラヘルツイメージングを適用することで誰でも定量的に接着・劣化状態を把握できるものと期待している。本方法は従来のモルタル工法でも近年の接着工法でも適用可能である。

### ⑨ グラウト空隙の浸水（融雪剤混入水）検出

供用中の PC 橋の腐食状態調査で示したように、PC 橋等のグラウト充填不良は、その不良箇所への永年に亘る水や融雪剤成分の浸入により、空隙周辺 PC 鋼材を腐食させる。また PC 橋のシースを浸食する可能性がある。本項では、典型的な融雪剤成分である塩化カリウム水溶液のテラヘルツ波反射透過特性を求め、その後、シーソ周辺の空隙を模擬したコンクリート供試体を作成し、空隙の一部に典型的な融雪剤濃度である 20 重量%の塩化カリウム水溶液を充填した領

域を形成し、浸潤領域と浸潤していない領域の検出を行った。その結果、塩化カリウム水溶液によるテラヘルツ波の吸収により、融雪剤水溶液の浸潤領域を把握することが出来た。

### 融雪剤塩化カリウム水溶液のテラヘルツ波反射特性



融雪剤塩化カリウム水溶液からのサブテラヘルツ波の反射率、水溶液濃度依存性。水溶液濃度が高くなるほど、反射強度が増加し、透過しにくくなる。

テラヘルツ波の透過率が十分高いポリスチレン製の液体セルを用いて、塩化カリウム水溶液の透過率及び反射率を求めた。

その結果を用いて、塩化カリウム水溶液の屈折率を算出した。通常の古典的なマックスウェルによる電磁界方程式から導出される p 偏光のフレネルの式を用いている。

$$r_p = \frac{-\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \cos \theta_i + \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2 \theta_i}}{\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \cos \theta_i + \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2 \theta_i}}$$

$r_p$  ... 反射係数  
 $R_p$  ... 反射率  
 $n$  ... 屈折率

$$R_p = r_p^2$$

屈折率を求める p 偏光に対するフレネルの式

ここで入射角度  $\theta$  は本測定では 45 度とした。

更にその結果から、より汎用性が高い実誘電率と複素誘電率の塩化カリウム水溶液濃度依存性を求めた。複素誘電率は屈折率・消衰係数と誘電率との関係を示す下記の一連の式から求めた。

✓ 複素誘電率

$$\epsilon = \epsilon_1 + i\epsilon_2$$

複素誘電率を求める一連の式

✓ 実数部、虚数部

$$\frac{\epsilon_1}{\epsilon_0} = n^2 - \kappa^2 \quad \frac{\epsilon_2}{\epsilon_0} = 2n\kappa \quad \kappa \dots \text{消衰係数}$$

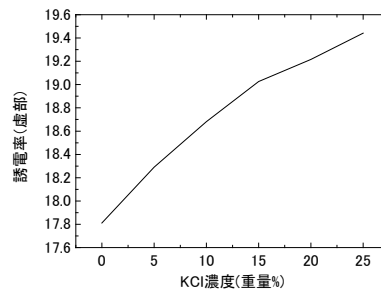
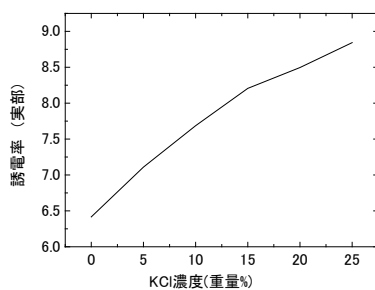
この超高周波数領域での液体試料の誘電的性質は、初めて明らかになった結果である。

✓ 消衰係数

$$\kappa = \alpha \times \frac{\lambda}{4\pi} \quad \alpha \dots \text{吸収係数} \quad \lambda \dots \text{波長}$$

✓ 吸収係数

$$\alpha = \frac{1}{(x_2 - x_1)} \ln \left( \frac{T_1}{T_2} \right) \quad T \dots \text{透過率} \\ x \dots \text{試料の厚さ}$$



融雪剤成分 (塩化カリウム) 水溶液の複素誘電率濃度依存性

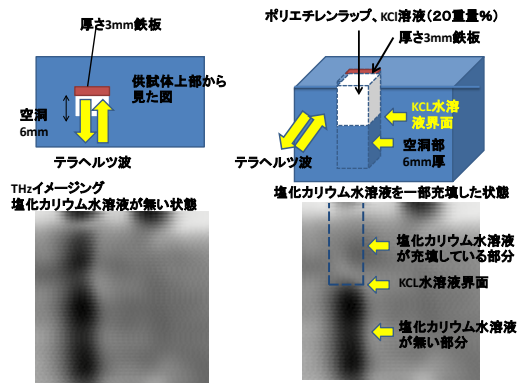
塩化カリウム水溶液のテラヘルツ波反射率は、濃度の増加とともに単調に増加することが分かった。その結果と呼応す

る形で、透過率は減少する。しかし、水溶液のテラヘルツ波透過率は、コンクリート中の融雪剤（本研究では塩化カリウム）水溶液を検出する事が可能な程十分に小さいことがわかった。

また、これらの測定結果から、塩化カリウム水溶液の実誘電率と複素誘電率の濃度依存性を求めた。実誘電率は液体の屈折率を決め、複素誘電率は消衰係数とも言い、吸収損失を決定する物理量である。測定の結果、いずれの誘電率も濃度とともに単調に増加することがはじめて明らかになった。

#### グラウトの充填不良を模擬したコンクリート空隙中の融雪剤水溶液検出

以上の、塩化カリウム水溶液のテラヘルツ帯吸収反射特性から、グラウトの充填不良により存在する空隙に融雪剤水溶液（塩化カリウム水溶液）が浸潤した場合、コンクリートを透過し、金属表面で反射されるテラヘルツ波強度は、塩化カリウム水溶液により大きく吸収され、融雪剤水溶液が存在する場所としない場所を可視化することが出来ると予想される。



グラウト充填不良を模擬した鉄板上の空洞部を持つ  
供試体の構造と、そのサブテラヘルツイメージング像

本項では、シース周辺の空隙を模擬したコンクリート供試体を作成し、空隙に典型的な融雪剤濃度である 20 重量%の塩化カリウム水溶液を一部充填して、その可視化を行った。その結果、図に示すように、融雪剤水溶液が浸潤した空隙領域では、予想されたように、融雪剤水溶液が浸潤してい

ない領域に比べてコンクリート内部の鋼材構造物からのテラヘルツ反射強度が大きく減少し、融雪剤水溶液の浸潤状態を可視化することが出来た。

## ⑦ 中間・FS評価で指摘を受けた事項への対応状況

(中間・FS評価における指摘事項を記載するとともに、その対応状況を簡潔に記入下さい。)

### 【指摘事項】

- ① 測定時間を高速化する方法について検討する必要がある。

撮像駆動部制御プログラムを計測制御系と独立させたFPGAプログラムの採用により、20cm四方の撮像を約15秒で行う事が出来るように高速化を達成した。当初FS段階では約9分程度を必要としたから、約40倍程度の高速化を達成した。

- ② かぶり厚のイメージング限界性能を見極める必要がある。

実際に、かぶり10mm～50mmの腐蝕鉄筋埋設コンクリート供試体を作成し、使用周波数や積算方式等種々撮像条件を変えて撮像試験を行った。その結果、ほぼかぶり40mmまでは、腐蝕鉄筋部を腐蝕していない鉄筋配筋部を領域的に識別する事が可能であったが、かぶり50mmコンクリート供試体では、鉄筋の腐蝕領域を解像することが出来なかった。

- ③ 実際の配筋状況でイメージングする必要がある。

実際の配筋状況に即した鉄筋埋設コンクリート供試体を作成して、撮像実験を行った。

## ⑧研究成果

(本研究で得られた知見、成果、学内外等へのインパクト等について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

### ①かぶり 40mm でコンクリート埋設鉄筋の腐蝕状況を把握。

本目的を達成するために、共焦点配置等を採用したテラヘルツイメージング測定装置のプロトタイプを試作し、更に最終的には、FPGA プログラム構成を採用してイメージング測定時間の短縮を図り、FS 段階より、約 40 倍の高速化を達成した。また、測定対象に適切に対応するため、30GHz～180GHz までの広範囲な周波数範囲にわたるテラヘルツ光学系を構築した。

これを用い、コンクリート供試体を作成し、テラヘルツイメージングを行った。

その結果、部分的に腐蝕した D6 から D22 鉄筋を埋め込んだコンクリート供試体に対して、かぶり 10mm～40mm までは、領域的に腐蝕鉄筋部を判別できることが示された。しかし、かぶり 50mm 供試体では腐蝕鉄筋部を判別する事が出来なかった。

この成果は、国内外の学術誌や学会にて発表するとともに、近々に発足となる、福島第一原子力発電所に係る、文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業『廃止措置等基盤研究・人材育成プログラム委託費』(事業担当組織 東北大学等) の検査技術部門の一つとして組み入れられることとなった。

### ② テラヘルツ波のコンクリート透過特性

コンクリート構造物のテラヘルツイメージングの基本的なデータとなる、各種組成コンクリートのテラヘルツ物性値を明らかにした。コンクリートのセメント・砂・骨材組成に対するテラヘルツ波透過率、及び汎用的な組成コンクリートに対するテラヘルツ波透過率の周波数依存性を明らかにした。

### ③ コンクリート埋設鉄構造物の腐蝕程度の非破壊測定

テラヘルツ波の反射強度は、金属表面の酸化層の存在により減少する事が示されていた。この現象を用いることにより、金属表面の腐蝕(さび)状態を非破壊的に把握する事ができると考えられた。本研究では、鉄さびの模擬供試体を酸化第二鉄を用いて作成し、そのさび層厚さのテラヘルツ波反射強度依存性を明らかにした。更にさびの模擬供試体をコンクリート中に埋設して、テラヘルツ波反射強度測定から、コンクリート中の金属構造物表面のさび進行度を計測することに成功した。

加えて、本研究者らは、金属構造物の腐蝕進行度を非破壊で定量的に把握するため、鉄構造物表面のさびの色分析を行い、RGB 分析と色相分析により、さびの進行度が定量的に表現できることを示した。

### ④コンクリート構造物内の空洞可視化

コンクリート構造物内の空洞は、コンクリート構造物欠陥の一つと考えられ、コンクリート充填不良から生じて水の蓄積を招き、コンクリート本体の劣化及び内部金属構造物の腐蝕を招きかねない。本研究では、人工的に空洞部を形成した供試体を作成し、透過法及び反射法で空洞の撮像を行うことに成功した。更に、空洞内の融雪剤成分を含む水溶液の存在も検出することに成功した。



## ⑧研究成果（つづき）

### ⑤コンクリート構造物内の異物検出

テラヘルツ波に対する屈折率の違いを用いることにより、コンクリート構造物に埋設された異物を検出することに成功した。コンクリート内に段ボール板やベニア板を埋設した供試体を作成し、これをイメージングすることで、これら異物を検出することに成功した。

### ⑥目に見えない塗装膜下の金属表面のさび可視化

人間の目視では見ることが出来ない塗装膜下の金属表面のさびを、テラヘルツイメージングで可視化することに成功した。テラヘルツ波は、各種樹脂塗料に対しては透過性が高く、塗膜下の金属表面では良く反射される。加えて、反射テラヘルツ波強度は、金属表面さびの程度により減衰する。この現象を用いることにより、肉眼では目視検査出来ない不透明樹脂塗装膜下の金属表面さび領域およびさび程度を非破壊的に検査することに成功した。

### ⑦コンクリート内部への水の浸潤可視化

コンクリート構造物内部への水の浸潤は、コンクリート強度劣化や内部金属構造物腐蝕の主因となり、重大な検査対象である。テラヘルツ波は水分子等の極性物質に対しては大きな吸収及び反射特性を有する。本研究ではこれを利用して、コンクリートブロックに穿孔し、その中へ水を注入することでコンクリート内部へ水が浸潤する様子を撮像することに成功した。これは透過法でも反射法でも撮像可能である。同様の結果は、木材に対しても得ることが出来、木造建造物への水の浸潤も非破壊でとらえる事が可能である。

### ⑧ セラミックスタイルの接着不良検出

トンネル内壁や建物外壁などの構造物として用いられるセラミックスタイルの接着不良を、テラヘルツ波の反射を用いて非接触に検査することに成功した。これは、テラヘルツ波のセラミックスに対する高い透過性を利用したものである。故意に0.3mm程度の隙間をコンクリート板とタイルの間にモルタル工法で形成した供試体を作成し、テラヘルツ反射イメージングにより撮像した。本方法は、従来のモルタル工法に対しても、近年の接着剤工法に対しても適用する事が出来る。

### ⑨ グラウト空隙の浸水（融雪剤混入水）検出

融雪剤水溶液のグラウト空隙への侵入が、コンクリート鋼橋の腐蝕の大きな原因の一つであると指摘されている。そこで本研究では、まず、融雪剤水溶液のテラヘルツ波物性を明らかにした。融雪剤水溶液の屈折率と吸収係数（消衰係数）の濃度依存性を明らかにすることに成功した。

加えて、先にイメージングに成功していたコンクリート構造物内部の空洞欠陥部へ、融雪剤水溶液を封入し、その存在を検出することに成功した。

### ⑩ エクストラドーズド鋼橋等の外ケーブル健全度診断への応用

上記、外ケーブルの破断・腐蝕に対しては、現在、有効な検査手法が無い。そこで、外ケーブルと構造が酷似している絶縁被覆電線を模擬供試体としてテラヘルツイメージングを行い、被覆を剥ぐことなく、内部の金属素線を可視化することに成功した。

## ⑨研究成果の発表状況

学術論文

テラヘルツ波の非破壊検査応用.[日本工業出版 検査技術,18(5), (2013), 1-5]高橋星也、小山裕

Observation of damage in insulated copper cables by THz imaging,

NDT & E International, Volume 61, January 2014, Pages 75-79

Seiya Takahashi, Tomoyuki Hamano, Kaori Nakajima, Tadao Tanabe, Yutaka Oyama

学会発表

国際会議

SUB-TERAHERTZ INSPECTION OF DEFECTS IN BUILDING BLOCKS,

Yutaka Oyama\* and Kyosuke Saito

First International Conference on Advances in Structural Health Management and Composite Structures (ASHMCS2012) 2012年8月28日-31日韓国 全州市、Chonbuk National University (CBNU) in Jeonju, Jeonbuk, South Korea.

出崎光, 田邊、小山, Joint Symposium on Materials Science and Engineering 2011, Nanyang Technological University Singapore 2011.6.18, Material science and technology as a basis for device realization for THz, Oral

仮屋英孝, 佐藤、田邊、齋藤、西原、谷山、小山,Honolulu Prime 2012\_The Electrochemical Society, Hawaii Convention Center and the Hilton Hawaiian Village, 2012.10.7~10.12, Non-Destructive Evaluation for Evaluation for Corroded Metal Surface Using Terahertz Wave, Poster

仮屋英孝, 齋藤、山形、田邊、小山, Honolulu Prime 2012\_The Electrochemical Society, Hawaii Convention Center and the Hilton Hawaiian Village, 2012.10.7~10.12, Application to Non-Destructive Inspection of Copper Corrosion via Coherent Terahertz Light Sources, Poster

国内会議

高橋星也, 中村、田邊、前田、中嶋、浜野、小山, 電子情報通信学会・電子デバイス研究会, 東北大学電気通信研究所, 2013.12.16~2013.12.17, テラヘルツ波方式による絶縁被覆電線の素線断線可視化技術

高橋星也, 中村、小山、田邊、浜野、中嶋, 第153回日本金属学会, 金沢大学角間キャンパス, 2013.9.17, テラヘルツ波方式による絶縁被覆電線の素線断線可視化技術

中村悠太, 仮屋、田邊(多元研)、西原(新日鉄住金)、谷山(新日鉄住金)、小山, 第74回応用物理学会秋季大会, 同志社大学京田辺キャンパス, 2013.9.16~9.20, テラヘルツ分光イメージングによる溶融Znめっき鋼板の塗膜下腐食状態検査

など

## ⑩研究成果の社会への情報発信

ウェブ（研究室HP）

<http://www.material.tohoku.ac.jp/~denko/lab.html>

新聞掲載（テラヘルツ波を用いた絶縁電線の内部素線可視化に関して）

1. 東北大学がテラヘルツ波で電線を「透視」、点検作業を大幅に効率化へ（資料提供 新聞 河北新報社）(2012.10)
2. 東北大学がテラヘルツ波で電線を「透視」、点検作業を大幅に効率化へ（資料提供 新聞 日本経済新聞）(2012.10)
3. 東北大学がテラヘルツ波で電線を「透視」、点検作業を大幅に効率化へ（資料提供 新聞 日経エレクトロニクス オンライン版）(2012.10)

公開イベント

2013.1.17 東北大学イノベーションフェアにて「テラヘルツ波応用」の展示を行いました。

2014.03.29 KDDI財団賞を受賞しました。（テラヘルツデバイス・結晶育成そして応用と、テラヘルツ光源開発から応用まで一貫した研究に対して）

## ⑪研究の今後の課題・展望等

（研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や道路政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。）

本研究により、従来この種の検査に適用されることが無かったテラヘルツ波の、コンクリート構造物内部の各種欠陥検査への適用可能性が示され、その適用限界についても調査することが出来た。今後は、この結果を受け、以下の応用が特に有望であろうと考えている。

テラヘルツ波の透過能は、コンクリートより各種樹脂材料の方が圧倒的に高い事が示された。そして、金属に対する反射率が高く、その反射率は金属表面の腐蝕により低下する。

この、テラヘルツ波の特性を最も有効に発揮する事が出来る道路政策の質の向上へ向けた研究開発課題は、「エクストラロード鋼橋等の外ケーブル腐蝕・断線検出」であろうと考えている。

本提案課題については、既に外ケーブルとほとんど全く同じ構造を持つ絶縁電線の検査事例を得ており、極めて有望なテラヘルツ波のキラーアプリケーションの一つとなると確信している。

## ⑫研究成果の道路行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、道路政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

道路行政への実務への反映は今後の課題であるが、文部科学省「国家課題対応型研究開発推進事業」『廃止措置等基盤研究・人材育成プログラム委託費』（事業担当組織 東北大学等）の検査技術部門の一つとして組み入れられることとなった。

また、本方式は、複数のインフラ関連企業から高い関心を持たれ、共同研究を通じて応用展開を図る端緒となっている。

## ⑬自己評価

(研究目的の達成度、研究成果、今後の展望、道路政策の質の向上への寄与、研究費の投資価値についての自己評価及びその理由を簡潔に記入下さい。)

種々の道路構造物欠陥の中で、コンクリート埋設鉄筋の腐蝕状況、空洞部、異物の混入あるいはセラミックスタイルの接着不良等の重大な災害の原因ともなり得るもののテラヘルツイメージングによる検査の可能性を調査することが出来、その適用可能性と適用限界をある程度明らかにすることが出来た事は、今後の道路政策の質の向上へ貢献できたと考えている。

今後は、現在、有効な検査方法が無いと言われている、エクストラドーズド鋼橋等のポリエチレン被覆された外ケーブル等の検査への応用展開が、極めて有望なテラヘルツ波のカラーアプリケーションの一角をなすものと考えている。

研究費の投資価値については、従来の伝統的な検査手法、例えば外観の目視で深刻な腐食がみられる部分をドリル穿孔して、コンクリート内部を検査する方法などと併用して、その前段階で、一定の制限はあるものの、腐蝕の兆候を非破壊的に捉える、先進的で従来法と全く異なる検査手法の可能性について調査出来た事は、大きな投資価値があったと考えている。他の各種インフラ保守・点検への展開可能性についても調査できたことは、その投資価値を更に高めていると考える。