

## 道路政策の質の向上に資する技術研究開発

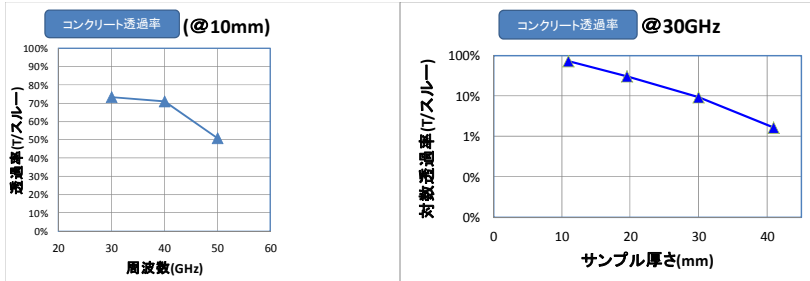
## 【研究状況報告書（2年目の研究対象）】

①研究代表者	氏名（ふりがな）		所属		役職
	小山 裕		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	
		[副領域]	タイプ		
③研究経費（単位：万円）	平成23年度	平成24年度	平成25年度	総合計	
※H23は精算金額、H24は受託金額、H25は計画額を記入。端数切り捨て。	2430	3000	2637	8067	
④研究者氏名	（研究代表者以外の主な研究者の氏名、所属・役職を記入。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				
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				
久田 真	国立大学法人 東北大学 大学院工学研究科・教授				
斎藤 恭介	国立大学法人 東北大学 大学院工学研究科・助教				
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。）				
本研究の目的は、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。目標は、これまでの研究評価意見から、対象をかぶり30mm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。					

## ⑥これまでの研究経過

(研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら具体的に記入。)

### 【コンクリート透過特性の周波数依存性】



コンクリートのTHz波透過率

かぶり30mm超のコンクリート埋設鉄筋の腐食状態を検査するため、コンクリートの透過能の周波数依存性を測定した。テラヘルツ光源はガン発振器、検出はショットキーダイオードを用いた。い

ずれも室温動作である。結果を図に示す。その結果、10mm当りのコンクリート透過率は30GHz～40GHzで70%超であり、30mmコンクリートでも約10%ほどの十分高い透過率が見込めることが分かった。

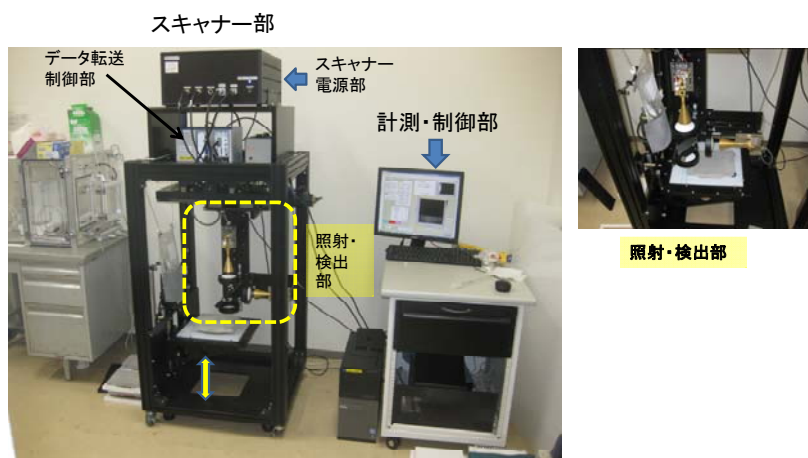
### 【かぶり30mm超供試体測定用装置の改造】

かぶり30mm超で約200mm×200mmのコンクリート供試体を撮像するため、イメージング装置の改造を行った。装置構成上の主な改造点は以下のとおりである。

1. かぶり30mm超の深度方向に焦点を合わせるためのZ軸移動距離拡張
2. コンクリート供試体を保持するための試料台補強
3. 測定の高速度化

図に改造したイメージング測定装置の外観を示す。

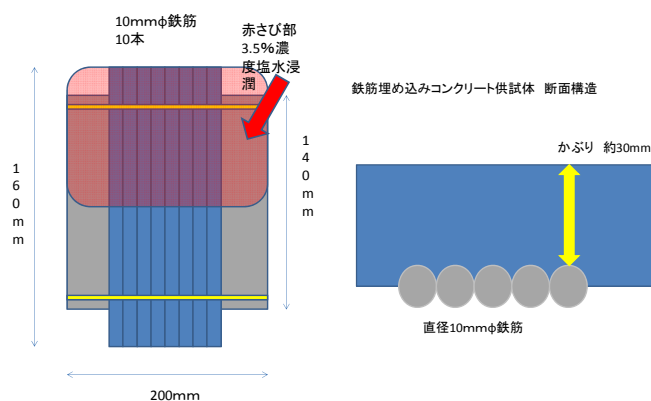
### 改造テラヘルツ イメージング装置 外観



### 【イメージング測定の高速度化】

イメージング装置の駆動制御プログラムを実行する CPU と別に、測定データ転送を FPGA (Field Programmable Gate Array) で別個に実行することで、これまでより測定速度を倍増することができた。具体的には毎秒約 200mm の走査速度で、10 ミクロンステップのデータ転送を行い、毎秒 20000 データ転送を行うことができる。その結果、200mm×200mm 範囲の供試体を 15 分程度イメージングすることができる。

### 【鉄筋埋め込みコンクリート供試体】



かぶり 30mm 超の部分的に腐食した鉄筋を埋め込んだコンクリート供試体を作成した。参考のためかぶり 20mm の供試体も作成した。

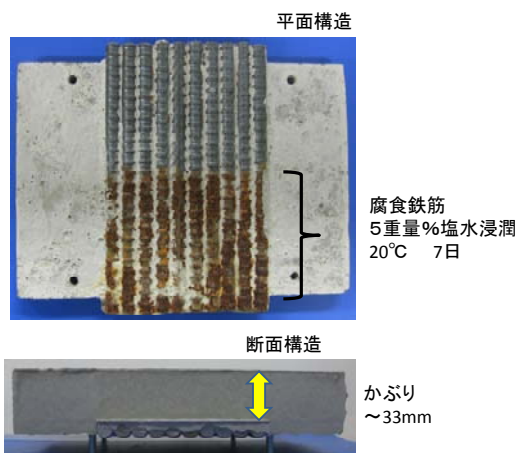
図に供試体構造の概略図と実際の供試体写真を示した。

腐食を更に進行させるため、埋め込みした鉄筋表面から更に塩

一部腐食鉄筋を埋設したコンクリート供試体の外観

水を滴下して腐食を進行させた。

この状態は、実際の道路あるいは橋梁構造物中の鉄筋の腐食状況を反映していると考えられる。



### 【鉄筋腐食度の色分析による定量評価】

鉄筋の腐食進行度を、定量的に把握する目的で、さび部分の「色相」分析を行った。

Microsoft windows 付属の「ペイント」を用いて下記パラメータを定量測定した。

- ・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)

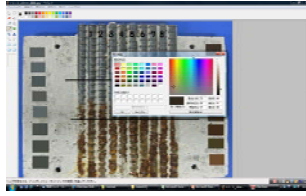
## 鉄筋さび状態の定量的評価



鉄筋さび状態の定量的評価

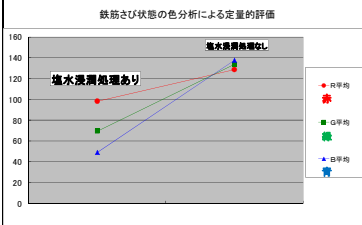
色分析により、さび進行度の定量的評価を行う。

・測定箇所：各供試体の10本の鉄筋のうち、原則\*両端を除く8本の鉄筋の、平均的にさびが見えている領域に引いたライン上の点。  
 ・塩水浸漬処理していない部分については1供試体のみで測定

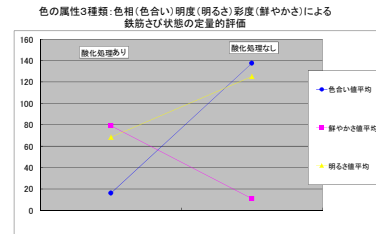


Microsoft windows付属の「ペイント」を用いて下記パラメータを測定  
 ・色合い(0-240)  
 ・鮮やかさ(0-240)  
 ・明るさ(0-240)  
 ・赤(0-255)  
 ・緑(0-255)  
 ・青(0-255)

## 鉄筋さび状態の定量的評価



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成分の減少率が大きい。



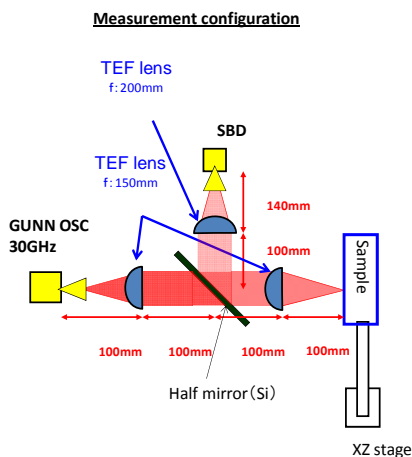
鉄筋さびの進行とともに、色相(色合い)が大きく低下する。明度(明るさ)も低下する。逆に彩度(鮮やかさ)は増加する。

測定部位の写真と分析画面の実際を示す。

その結果、鉄筋さびはR(赤)G(緑)B(青)の色相の内、全てが減少するが、特にB(青)の腐食による変化が大きい事がわかる。また、色合い・鮮やかさ・明るさでは、「色合い」(色相)の変化がさびによって敏感に変化することが分かった。この色相分析を用いれば、これまで目視による定性的な判断であったさびの進行度を定量的に評価することが可能となる。

## 【30GHz イメージングの分解能】

30GHz テラヘルツ波は、かぶり 30mm 鉄筋埋め込みコンクリート供試体のイメージングに適している事が分かった。そのため、30GHz ガン光源とショットキー検出を備えたイメージング装置を構成して、空間分解能を確認した。イメージング装置構成はこれまで同様、共焦点配置とした。図に共焦点配置装置構成を示す。

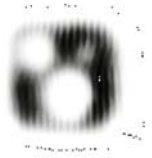
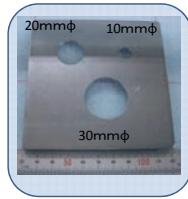
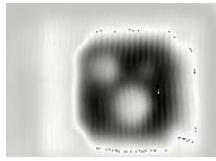


この周波数の自由空間波長は 10mm であることから、共焦点配置では 10mm を若干上回る空間分解能が得られると考えられた。

空間分解能を確認するために、かぶり 10mm のコンクリート内に埋め込んだ穴あき鉄板を撮像した。

図にその結果を示す。

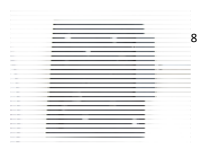
コンクリート埋設 穴あき鉄板供試体のイメージング @30GHz



コンクリート中へ埋設

波長@30GHz=10mm

\* 共焦点配置によって、波長分解能(10mm)を超える空間分解能が得られる。



5mm  
8.5mm



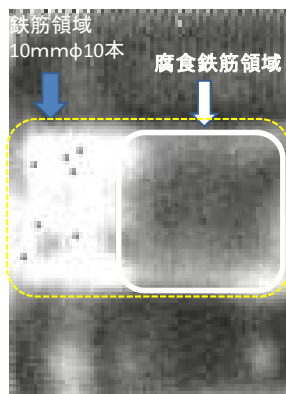
この結果から、波長 10mm を上回る空間分解能 8.5mm 程度を得ることが分かった。

### 【偏光方向による撮像の違い】

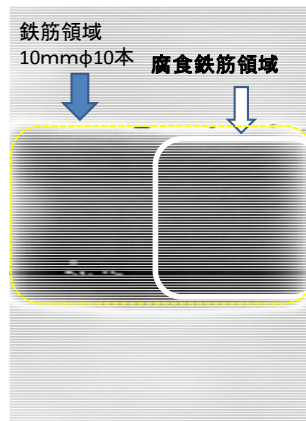
本研究で用いたテラヘルツ光源は、直線偏光特性を持つ。したがって、鉄筋のような直線状の導体は、偏光方向により反射率が異なる。偏光が鉄筋の方向と平行である場合、導体に誘導される高周波電流により反射率が高まる。逆に鉄筋と偏光が垂直である時、反射率は減少するが、鉄筋の腐食状態に反射率が敏感に変化することが分かった。

図にその結果を示す。

### テラヘルツ波の「偏光方向」による腐食領域撮像の相違



鉄筋の方向に垂直な偏光。  
鉄筋の腐食領域が敏感に解像されている。



鉄筋の方向に平行な偏光。  
鉄筋腐食領域が解像されない。  
反射強度は高い。

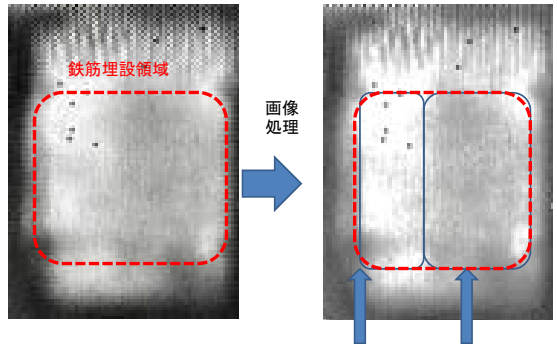
これは、鉄筋と偏光方向が平行である時、反射強度が高まるため、鉄筋表面の腐食層の影響が小さく、腐食領域の撮像が困難であるが、鉄筋と偏光が垂直である場合は、反射率が減少し、鉄筋表面腐食層が反射強度に与える影響が顕在化してくるためであろうと考えられる。

この結果から、部分腐食した鉄筋埋設コンクリート供試体のイメージングでは、鉄筋と偏光

方向を垂直に配置して実施した。

## 【10mmΦ部分腐食した鉄筋列埋め込み供試体のイメージング測定】

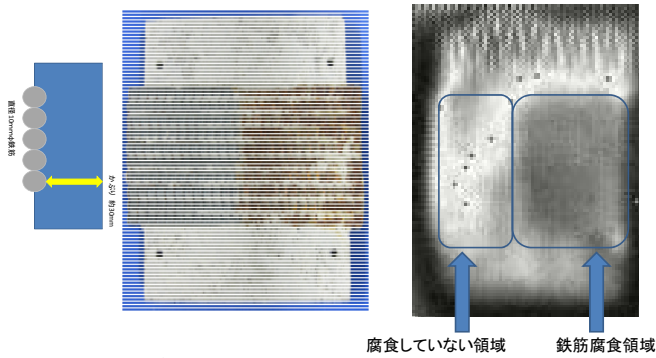
かぶり約33mmコンクリート埋設部分腐食鉄筋の腐食領域判定



\* 黒いドットはノイズによる

埋設鉄筋の腐食領域が撮像可能である。

コンクリート側から照射して撮像したかぶり約20mmの部分腐食鉄筋イメージ



\* 黒いドットはノイズによる

\* 腐食鉄筋の領域が撮像されている

直径 10mm  $\phi$  の部分的に塩水で腐食させた鉄筋列10本を埋め込んだコンクリート供試体のテラヘルツイメージングを行った。偏光方向は鉄筋列方向と垂直である。

以下に結果を示す。かぶり約33mmと約20mmの二種類について結果を示す。

この結果から、かぶり約30mm程度以下であれば、埋設された鉄筋の腐食を領域的に把握することが可能であることが示された。

## ⑧研究成果の活用方策

(本研究から得られた研究成果について、実務への適用に向けた活用方法・手段・今後の展開等を記入。また、研究期間終了後における、研究の継続性や成果活用の展開等をどのように確保するのかについて記述。)

### 【今後の展開、研究期間終了後における研究の継続性】

コンクリートや木材あるいは樹脂等の絶縁物に内包された金属の腐食状態判定技術として、他の多くの応用分野へ対象を広げる。例えば、絶縁被覆電線内の素線腐食判定等は既に有用な結果を得ており、ほぼ同様な構造を持つエクストラード橋の外ケーブル腐食・破断診断に大変有効であろうと考えている。このような多くの有用な応用展開を図っており、共同研究により今後も研究を継続する考えである。また、金属表面腐食のテラヘルツ反射現象の学問的解明は文科省による科研費等で継続するつもりである。

### 【実務への適用に向けた活用方法・手段・研究期間終了後における成果活用の展開】

学内産学連携組織を通じて、テラヘルツ波のこのような特徴を生かした応用について興味を示し、事業展開を打診している複数の検査会社と共同で成果活用を図る。

## ⑨特記事項

(本研究から得られた知見、学内外等へのインパクト等、特記すべき事項があれば記入。また、研究の目的・目標からみた、研究成果の見通しや進捗の達成度についての自己評価も記入。)

本研究は、道路構造物の欠陥探傷を対象としているが、テラヘルツ波の特徴を生かした他の構造物の腐食度検査応用への期待も大きい。特に昨年10月～11月にかけて行った新聞発表やイノベーションフェア等では大きな関心を持たれた。また、更新予定の本学工学研究科ホームページでは、所属専攻の代表的な成果として、我々のテラヘルツ応用の成果が開示されることになった。もちろんテラヘルツ波で全ての対象が検査可能となる訳でない事は認識しており、適用限界を明らかにしつつ応用展開を図るつもりである。かぶり30mmのコンクリート供試体は達成されたと考えている。