

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（1年目の研究対象）】

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	
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			
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		
	2430	3388	2608	8426		
H23は受託金額、H24以降は計画額を記入。端数切り捨て。						
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				
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				
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。）						
<p>本研究の目的は、F S研究でコンクリート内の金属構造物や空洞等を確認し、コンクリートのテラヘルツ電磁波透過率あるいはその周波数依存性等の基礎的なデータが整備された結果を基盤として、より実的な検査装置を構築し、F S研究結果から必要とされる高出力光源を用いた一体型計測ヘッドを構成し、検査対象を静置して計測ヘッドを走査することで、より実検査対象に近い構造物に適用出来る欠陥探傷装置開発を行う事である。目標は、F S研究の評価意見から対象を構造物の欠陥を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こととし、また土木専門家との討論に鑑み、コンクリート中の鉄筋構造物周辺の融雪剤を想定した腐食性液体の可視化が目標である。</p>						

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。また、研究の目的・目標からみた研究計画、実施方法、体制の妥当性についても記入。)

【現役鋼橋及びコンクリート橋の腐食状態調査】

主桁側面 : 鉄骨を含んだ遊離石灰など確認



検査対象となるコンクリート中の鉄腐食状態が、実際にはどの程度のものを把握するために、土木専門家の共同研究者久田教授と討論し、いくつかの具体的な現役コンクリート橋及び鋼橋の腐食状態を調査した。いずれも現役橋梁であるので、腐食部から試験体を採取することは出来ないが、その調査結果を元に、検査対象とすべき鉄さびの程度を把握する事が出来た。



コンクリート橋外壁には、遊離石灰を伴うひび割れや内部鉄骨構造が腐食したための考えられる赤さび様の液体がコンクリートひび割れ部から多数露出している事が分かる。土木専門家の久田教授によれば、これはグラウトの充填不良によって形成された空隙に浸潤した水あるいは融雪剤成分による腐食であろうとの見解である。同じく現役鋼橋の腐食調査を行った。鋼橋は、典型的な橋梁用防錆塗装がなされているが、永年の侵食により塗膜面下の鋼材が腐食し、著しくは腐食孔にまで

至っている。その腐食さびの厚さは、少なくとも1mm以上と計測される。これらを元に、検査対象とすべき「さび」の程度を想定した。

その結果、本研究ではコンクリート中の厚さ1mm程度以上のさびの状態把握と、グラウト充填不良により形成される鉄構造物に接した空隙中の融雪剤水溶液の検出を検知対象とした。

【コンクリート中の鉄筋の腐食状態把握】

劣化が進行したPC橋及び鋼橋の腐食状態調査から、橋梁の鉄構造物腐食層厚さは1mm以上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が多いとの事であった。鉄さびの成分は複数の鉄酸化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。

厚さ約1mmの鉄さび



Fe₂O₃ 50wt% pellet(PE混)

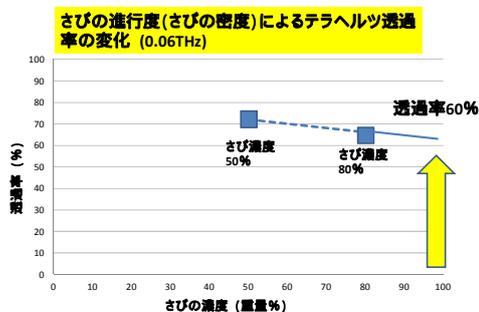
Fe₂O₃ 80wt% pellet(PE混)

さび成分の酸化第二鉄
+
さび以外の有機物成分(ポリエチレン粉)

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。十分現実の鉄構造物さびに近い試験体として、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

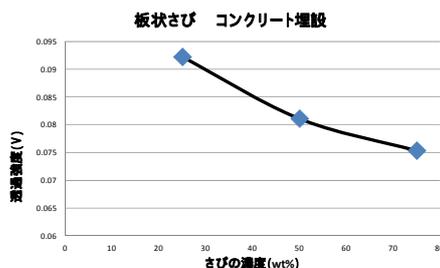
鉄の板状試料の厚さが厚いものを、同じくさびが進行しているものとした。

【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)

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。



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。

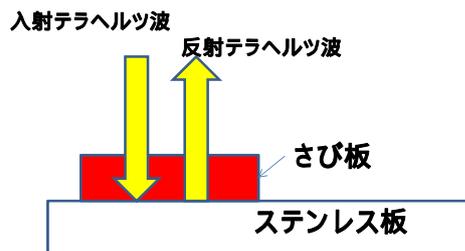
酸化第二鉄の濃度及び厚さ（さびの進行度とさびの厚さ）に対応して、透過率は減少していくが、100%酸化第二鉄濃度でも60%もの高い透過率を示している。この結果は、板状のさび試料をかぶり厚さ約1cm程度でコンクリート中に埋設して測定しても同じように得られた。

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。

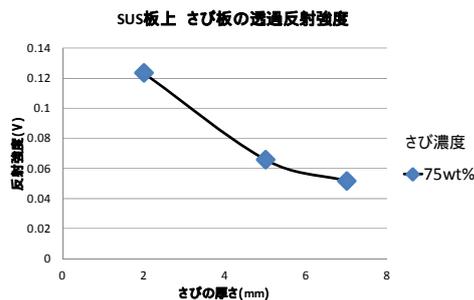
【鉄さびのテラヘルツ波反射透過特性】

下図は、テラヘルツ波が反射するステンレス鋼板上にさび板状試料を貼り付け、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。

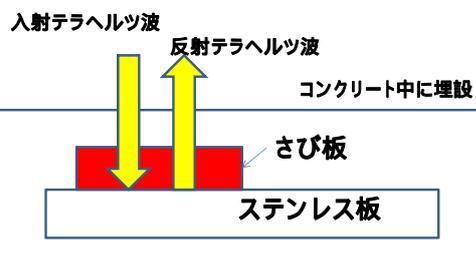


さびの透過反射強度測定用試験体の断面構造

ステンレス板上に貼り付けた板状さびを透過して反射してくるテラヘルツ波の強度のさび厚さ依存性



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。



さびの透過反射強度測定用試験体の断面構造

る前と同様に、さび進行度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鉄構造物のさびの進行度が把握できたと考えられる。

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減少する結果が得られる。

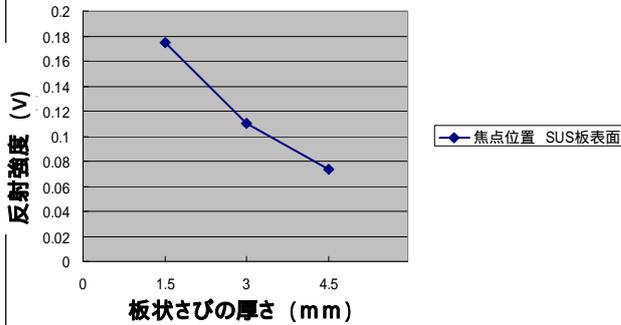
次に、これらのさび試料をかぶり厚さ約1cm程度でコンクリート中へ埋設し、同様の測定を行った。コンクリート中へ埋設した様々な酸化第二鉄濃度及び厚さの鉄さび板状試料の透過強度測定を行った。その結果、テラヘルツ波透過強度は、さびの進行度（濃度の増加とさび層の厚さの増加）に伴い、単調に減少した。

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減少する結果が得られる。

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鉄さび板状試料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。

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さび進行度が異なるさびもかぶり厚さ約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、さび層に到達してさび層を透過し、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、さび進行度とともに単調に減少した。

**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板状のさびからのテラヘルツ反射強度の、さびの厚さ依存性**

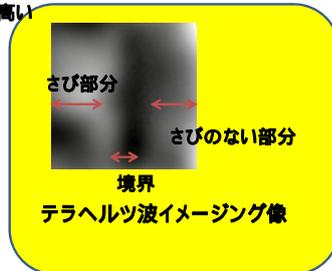
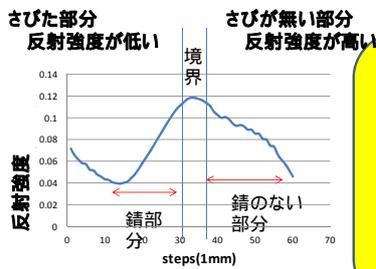


【コンクリートに埋設したさび鉄骨材料のテラヘルツイメージング】

海水に長時間曝された事によってさびた鉄鋼構造物のサンプルを採取する事が出来た。この一部をフライス加工によりさびを除去し、一部にさびを残存した試験体をかぶり厚さ約1cm程度でコンクリートに埋設した。

この試験体のテラヘルツイメージングを行った結果を左図に示す。

FS研究及び我々の予備実験から推察された通りに、鉄さび部からのテラヘルツ反射強度は



さびていない部分からの反射強度より減少し、コンクリート中に埋設された鉄骨構造物のさび状態を把握する事が可能となる結果を示した。これは、さび層はテラヘルツ波の透過率は十分高いが、透過する間に有る程度減衰し、下地鉄部からの反射強度が減少しているためと思われる。



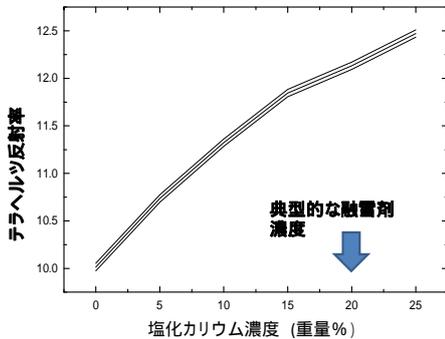
津波被災地多賀城から採取したさびた鉄板を加工し、半分の領域のさびを除去(フライス加工)した。これをコンクリートに埋設し、テラヘルツ波反射強度を測定した。FS研究の予備実験と同様に、さび部からの反射強度が減少した。

【グラウトの充填不良個所への融雪剤成分浸食状態把握】

現況コンクリート橋の腐食状態調査で見たように、PC 橋等の内部鉄構造物への空隙を埋めるため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、空隙周辺鉄構造物を腐食させあるいは、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、鉄構造物直近の空隙を模擬したコンクリート試験体を作成し、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充填し、その検出を行った。結果は、塩化カリウム水溶液によるテラヘルツ波の吸収により、融雪剤水溶液の液面を把握することが出来た。

【融雪剤塩化カリウム溶液のテラヘルツ波反射特性】

塩化カリウム水溶液からのテラヘルツ波の反射強度、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。

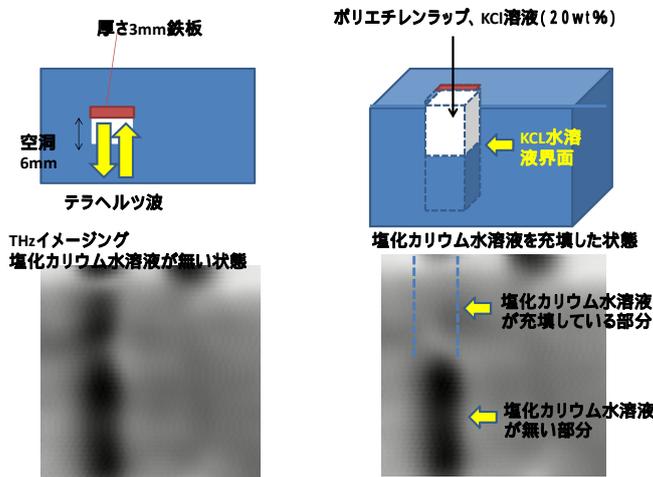


テラヘルツ波の透過率が十分高いポリスチレン製の液体セルを用いて、塩化カリウム水溶液の透過率及び反射率を求めた。更にその結果から、より汎用性が高い実誘電率と複素誘電率の塩化カリウム水溶液濃度依存性を求めた。この超高周波数領域での液体試料の誘電的性質は、初めて明らかになった結果である。

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、コンクリート中の液体を検出する事が可能な十分に程度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減少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中空隙中の融雪剤溶液検出】



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鉄鋼構造物直近に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、鉄鋼構造物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

ることが出来ると予想される。

本項では、鉄構造物直近の空隙を模擬したコンクリート試験体を作成し、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。

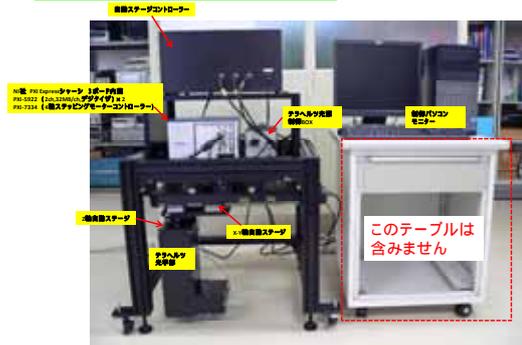
その結果、図に示すように、融雪剤水溶液が浸潤した空隙領域では、予想されたように、融雪剤水溶液が浸潤していない領域に比べてコンクリート内部の鋼材構造

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。

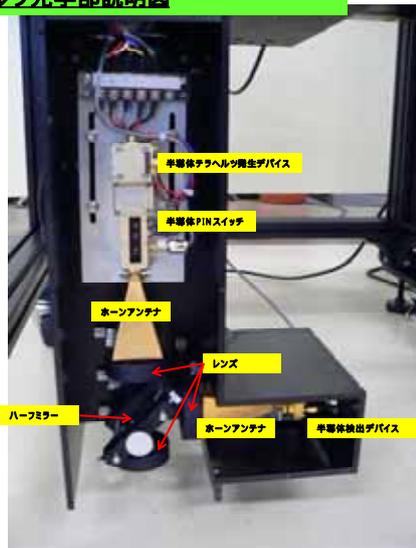
【テラヘルツ光源・検出系一体駆動型イメージング装置プロトタイプ】

【装置構成】

テラヘルツイメージングシステム装置説明図



テラヘルツ光学部説明図



可能とする構成とした。

【装置特性】

以上の新規な装置構成を採用することにより、本プロトタイプ器の総合性能として、毎秒100mmの走査イメージングが可能となり、高速に検査が行えることとなった。テラヘルツ波変調には半導体 PIN スイッチを適用して、7MHz の広い帯域幅で高速にデータ収集できる。テラヘルツ光源部は、一体として堅牢なプローブ部に収納され、プローブ部を走査することによりイメージングを行う事が出来る。

前年度までの既存装置を用いたFSでは、試料を走査する方式であったため、小さく軽量の試験体を用いて基本的な特性を把握するには十分であったが、試験体の大きさ・重量に制限があった。また、データ取り込み計測系も最大周波数4KHzまでの計測系であったため、測定に時間がかかるきらいがあった。

本研究では、これら従来の計測装置性能を大幅に改良したプロトタイプ器を作成した。プロトタイプ器は、テラヘルツ光源と反射検出系が一体となったプローブヘッド構成とし、試験体を静置しこのプローブヘッドを高速に走査することにより、テラヘルツ反射強度及びイメージングを行える装置構成とした。更に、テラヘルツ光源強度も従来装置強度よりも数10倍高強度とし、検出深さの向上を図った。また、従来のテラヘルツ光源の変調方式であるバイアス電流変調方式から、共振を高速にバイアス電圧でオン・オフするPINスイッチ型変調方式、更には連続波検出方式とすることと、データ収集系も従来の4KHzから7MHz超と約1000以上倍高速にデータ取り込み

特記事項

【研究で得られた知見】

本研究で得られた主な知見を列記すると以下にまとめられる。

1. 道路構造物等の検査に実用的なテラヘルツ反射測定装置を試作した。
2. コンクリート中の約1mm厚の鉄さび（酸化第二鉄）層を反射法で可視化する事が出来た。
3. コンクリート中の鉄さびのさび進行度（さび層の密度及びさび層の厚さ）を反射法で評価することが出来た。
4. グラウト充填不良による空隙中の融雪剤水溶液の存在を反射法で可視化する事が出来た。

【研究の見通しや進捗についての自己評価】

テラヘルツ波光源の構築に関わる各種部品の調達に思いのほか時間がかかる点は、今後研究を進める上で考慮すべき課題である。

コンクリート内の構造物は多種多様であり、本方式による構造物欠陥の検査対象は当然限定される。その内、今回設定したさび状態の検査は本方式に好適な対象であると考えている。これらの結果は今後、土木・建築関係学会にても発表したいと考えている。