

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月23日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2012

課題番号：22656032

研究課題名（和文） テラヘルツ電磁波トモグラフィの開発とこれによる材料劣化評価

研究課題名（英文） Development of THz electromagnetic wave tomography and its application for evaluation of material deterioration

研究代表者

阪上 隆英 (TAKAHIDE SAKAGAMI)

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：50192589

研究成果の概要（和文）：本研究ではテラヘルツ（THz）電磁波の持つ良好な物質透過性を利用した、被膜下の材料劣化すなわち腐食生成物評価に対する新しい非破壊評価法の開発を行った。テラヘルツ時間領域分光法（THz-TDS）により、腐食生成物である酸化鉄(III)第二および四酸化三鉄に対する THz 電磁波の分光吸収特性を調べるとともに、塗装被膜下の腐食生成物のイメージング計測を行った。時間領域での THz 反射計測により、塗装膜下の酸化鉄(III)第二の3次元形状のトモグラフィックイメージングを行った。周波数領域での THz 反射計測では、酸化鉄(III)第二および四酸化三鉄の THz 分光吸収性の違いを利用して、腐食生成物の分離同定が可能であることを示した。上記の実験的検討を通じて、THz 電磁波による非破壊評価法の実現可能性が示された。

研究成果の概要（英文）：In this study, a new nondestructive evaluation technique for evaluating deterioration of materials was developed utilizing transmission property of THz wave. Experimental studies were carried out for evaluating THz wave transmittance for iron (III) oxide (Fe_2O_3) and iron (II) iron (III) oxide (Fe_3O_4), followed by THz imaging of them for paint coated steel plate using terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) system. Time-domain THz reflection measurement data were utilized for 3-D imaging of the corrosive materials under coating. Frequency-domain THz reflection data were utilized successfully for separate identification of iron (III) oxide and iron (II) iron (III) oxide under coating based on their spectrum absorption. Feasibility of the nondestructive evaluation technique based on THz-TDS was demonstrated by the present study.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	0	1,500,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	480,000	3,580,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、機械材料・材料力学

キーワード：非破壊評価、テラヘルツ電磁波、テラヘルツ時間領域分光法、被膜材料

1. 研究開始当初の背景

機械・構造物の健全性を評価し、老朽化に

より生じる破壊事故を防ぐことは、安心・安全な社会生活を保障する上で必要不可欠である。機械・構造物の破壊事故を未然に防ぐ

ためには、構造物に生じる劣化損傷や欠陥を早期に検出することが重要である。その手段として非破壊検査があり、様々な非破壊検査手法が対象とする欠陥および材料に応じて相補的に用いられている。材料の腐食は、構造物の保守管理に深刻な問題を引き起こしている経年劣化の一つである。一般に腐食が問題となる構造物には防食塗装が施されているが、防食塗装の経年劣化により生じる塗膜下の腐食については、腐食の進行により塗膜表面に膨れが顕在化するまでは、その検出は困難とされており、潜在的な材料劣化の検出および評価が可能な非破壊評価法の開発が急務となっていた。研究代表者は、赤外線による防食塗装膜下の素地鋼板の劣化検出法の開発に取り組み、効率的な劣化検出を可能にしたが、さらに高い精度で劣化検出が可能な手法が要求されていた。

2. 研究の目的

本研究では、より高いレベルでの構造物の保守管理のため、塗膜下の腐食生成物の定量計測および腐食生成物に関する物質同定が可能な非破壊評価手法の開発を目的として研究を行った。

近年、遠赤外線から電磁波領域、すなわち 0.1~10THz の周波数帯のテラヘルツ (THz) 電磁波に注目が集まっている。THz 電磁波は、優れた物質透過性を持ちながらも人体に無害である、水には吸収され金属には反射する、特徴的な指紋スペクトルを持つ等の特徴を有するため、様々な産業分野での応用が進められている。本研究では、THz 電磁波の持つ優れた物質透過性に着目し、主材料保護のために用いられる被膜・被覆材越しに、主材料の腐食に関する健全性を非破壊的に評価する手法を開発した。

3. 研究の方法

テラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) を用いて、試験片に THz 電磁波を集光照射した際に、試験片を透過した電磁波および試験片表面で反射した電磁波を計測し、その分布を画像化できる THz-TDS イメージングシステムを構築した。一例として、反射型の THz-TDS イメージングシステムの構成を図 1 に示す。THz 電磁波の発生には、フェムト秒レーザおよび光伝導アンテナを用いた。発生した THz 電磁波を、2 つの放物面鏡とミラーを介して試験片に集光照射させた場合の THz 電磁波の透過波形および反射波形を計測することで時間領域データを得た。また、得られた時間波形をフーリエ変換することで、各周波数での振幅強度(スペクトル分布)と位相情報を得た。さらに、試験片の走査を行うことで、

任意の時間および任意の周波数における THz 波の強度分布を画像化した。

本研究における主な計測・評価対象は、防食塗装が施された鋼板素地の腐食生成物とした。このため、種々の防食塗装膜に対する THz 電磁波の透過特性を調べた。また、腐食生成物としては、防食塗装の劣化により塗膜下で進行する腐食生成物として、赤錆(酸化鉄(III)第二)および黒錆(四酸化三鉄)を対象に、これらに対する THz 電磁波の透過および吸収に関する分光特性を調べた。腐食生成物を模擬した試験サンプルとして、透過試験では、酸化鉄(III)第二および四酸化三鉄の粉末を、THz 電磁波を透過させるポリエチレン板に付着させた試験片を用いた。反射試験では、同じ粉末を鋼板表面に付着させた試験片と、さらにその上から塗膜を施した試験片を用いた。

さらに、時間領域データを用いて、模擬腐食生成物の形状に関する 2 次元および 3 次元のトモグラフィックイメージング計測を行った。また、周波数領域での THz 反射計測では、酸化鉄(III)第二および四酸化三鉄に対して、分光吸収イメージングを行い、THz 電磁波の分光吸収性の違いを利用して、模擬腐食生成物の分離同定が可能であるかどうかを実験的に確かめた。

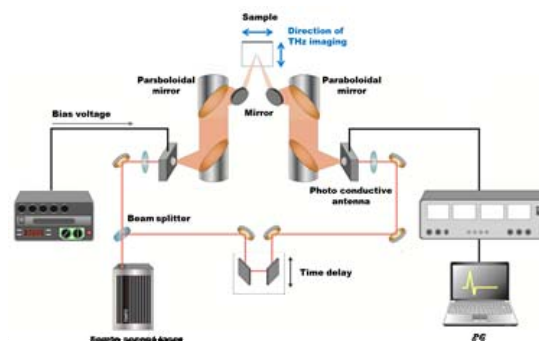


図 1 反射型 THz-TDS イメージングシステム

4. 研究成果

防食塗装膜に対する THz 電磁波の分光透過特性、ならびに前述の模擬腐食生成物を THz 電磁波を用いた非破壊評価手法により検出・評価した結果を以下に示す。

①防食塗装膜の THz 電磁波分光透過特性

まず、耐食性を高めるためのガラスフレークを含有する、防食塗装膜の THz 透過特性を調べた。塗装膜のみを板状にした厚さ 400 μm 、600 μm 、800 μm 、1000 μm の単離塗膜試験片に対して得られた、透過 THz 波の時間波形を図 2 に、分光透過特性を図 3 にそれぞれ示す。図 2 より、塗膜の存在に起因する THz 波の強

度低下および位相遅れが確認でき、膜厚が大きくなる程その影響は顕著になっている。図3より、ガラスフレークを含有する防食塗装膜に対する THz 波透過性は、0.25THz 付近までの低周波数では高いが、周波数が高くなるにつれて透過率が低くなることがわかった。次にガラスフレークを含有しない塗膜の透過特性を図4に示す。図より、ガラスフレークを含有しない場合には、0.5THz 付近を超える周波数においても0.5以上の透過率を有していることがわかる。

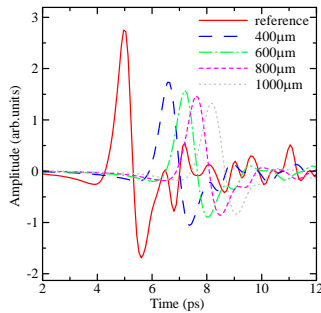


図2 防食塗装膜を透過した THz 波形

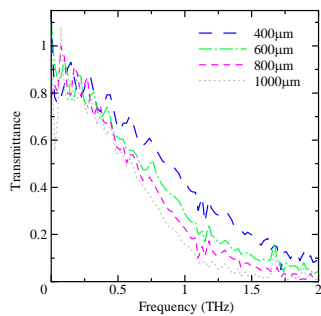


図3 防食塗装膜の THz 波透過特性 (ガラスフレーク含有塗料)

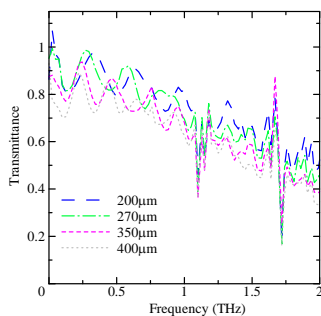


図4 防食塗装膜の THz 波透過特性 (ガラスフレーク非含有塗料)

②腐食生成物の THz 電磁波分光透過特性

酸化鉄(III)第二および四酸化三鉄の粉末を、THz 電磁波を透過させるポリエチレン板に付着させた試験片を用いて、THz 電磁波分光透過特性を調べた結果を図5に示す。酸化

鉄(III)第二については、THz 電磁波の強度低下は 0.5THz 付近まではほとんど見られないが、1THz 付近から顕著になっている。一方、四酸化三鉄については、THz 電磁波の強度低下は 0.2THz 付近から顕著に見られる。このことから、THz 電磁波透過性が両者で異なる 0.5~1.0THz の周波数帯の THz 波を利用することで、酸化鉄(III)第二および四酸化三鉄、すなわち赤錆と黒錆の分離同定が可能になることがわかった。

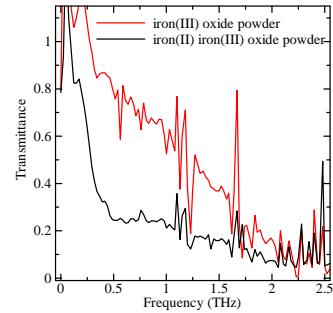


図5 腐食生成物の THz 波透過特性

③腐食生成物のトモグラフィックイメージ

時間領域データを用いて、厚さ 380・m の防食塗装膜下の模擬腐食生成物 (酸化鉄(III)第二) の形状に関する 2 次元および 3 次元のトモグラフィックイメージング計測を行った結果を示す。イメージング範囲は 30mm×30mm、画素数は 30×30 に設定した。塗膜表面、酸化鉄(III)第二粉末表面および鋼板表面での THz 波の反射波形と時間遅延をもとに、健全部および模擬腐食生成物の断層イメージングを行った結果を図6に示す。図より、酸化鉄(III)第二の厚さが断層イメージングで表現されていることがわかる。さらに、同様の方法で領域全体のイメージングを行った結果を図7に示す。図より、塗装膜下の酸化鉄(III)第二粉末の付着状況が三次元的に表現されていることがわかる。

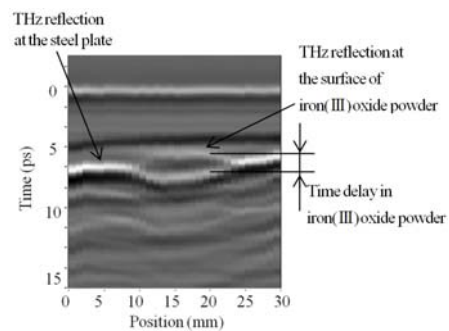


図6 腐食生成物の断層イメージング

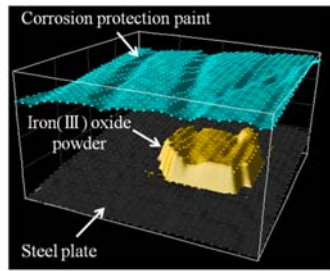


図7 腐食生成物の3次元イメージング

④腐食生成物の分離同定

THz 電磁波透過性が異なる 0.5~1.0THz の周波数帯の THz 波を利用することで、酸化鉄(III)第二および四酸化三鉄の分離同定を行った。塗膜下の腐食生成物を模擬した試験片として、酸化鉄(III)第二および四酸化三鉄の粉末を鋼板に付着させた上に 290・m の防食塗装膜を施した試験サンプルに対して、THz 透過イメージングを行った結果を示す。計測ではイメージング領域を 36×36mm、画素数を 30×30pixel に設定した。

0.39THz, 0.61THz, 1.03 THz および 1.51THz において得られた周波数領域画像を図8に示す。0.39THz および 0.61THz においては、酸化鉄(III)第二粉末を付着させた部分の縁(輪郭部)において THz 波の強度低下がみられるが、内部の THz 波の強度は高くなっている。これは、低い周波数域における酸化鉄(III)第二粉末の THz 波の透過性に起因するものである。輪郭部分で THz 波の強度低下が生じている原因は、本計測システムにおける THz 電磁波の照射径(3mm)と1ピクセルあたりの空間分解能(1.2mm)の関係によるものである。THz-TDS での計測の際、酸化鉄(III)第二粉末の輪郭部分では、粉末のある部分とない部分両方の反射波形が合成されたものとなるため、これをフーリエ変換した場合の強度が著しく低下したものと考えられる。一方、四酸化三鉄粉末を付着させた部分では、中央部分においても THz 波の強度が低下している。1.03THz では酸化鉄(III)第二粉末を付着させた部分においても、THz 波の強度が全体的に低下している。これらは、図5に示した酸化鉄(III)第二および四酸化三鉄の分光透過性を反映した結果となっている。1.51THz における周波数領域画像には、大きなノイズが見られ、酸化鉄(III)第二および四酸化三鉄粉末を付着させた領域の同定は困難であった。1.51THz においては、防食塗装膜の透過率が0.5程度と低くなること、塗膜表面での反射の影響も大きくなることにより、酸化鉄(III)第二および四酸化三鉄粉末を付着させた部分での THz 波吸収の影響が相対的に小さくなったためと考えられる。

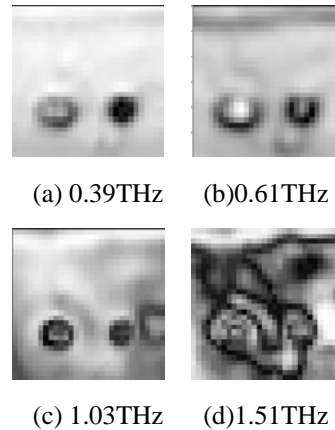


図8 周波数領域画像による酸化鉄(III)第二および四酸化三鉄の分離同定

以上の結果から、防食塗装膜を施した鋼板に対するテラヘルツイメージングにより、1.0THz 以下の周波数を選択すれば防食塗装膜下の酸化鉄(III)第二および四酸化三鉄すなわち赤錆および黒錆の検出が可能になること、THz 電磁波透過性が異なる 0.5~1.0THz の周波数帯の計測で赤錆と黒錆の分離同定が可能になることがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- (1) Takahide Sakagami, Hiroaki Anzai, Shiro Kubo,
 “Development of a gas leak detection method based on infrared spectrum imaging utilizing microbolometer camera”
 Proceedings of SPIE,
 査読有, Vol. 8013, 2011, pp. C-1-C-6

[学会発表] (計9件)

- ① Akihisa Moriguchi, Tomoya Tanaka, Takahide Sakagami, Masanori Hangyo
 “Nondestructive evaluation of steel plate coated with corrosion protection paint utilizing transmission property of THz wave”
 13th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials,
 2013. 5. 24, Le Mans, France

- ② Akihisa Moriguchi, Tomoya Tanaka, Takahide Sakagami, Masanori Hangyo
 “Nondestructive evaluation of steel

plate coated with corrosion protection paint utilizing transmission property of THz wave”

International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology
2013.4.3, Kyoto Ter sa, Kyoto

③田中智也, 森口彰久, 阪上隆英, 関根和喜, 土田智彦

「テラヘルツ電磁波計測による石油タンク底板の健全性評価に関する基礎的検討」
日本高圧力技術協会秋季講演会
2012.12.6, 北九州市・男女共同参画センター

④田中智也, 森口彰久, 阪上隆英

「テラヘルツ電磁波計測による塗装鋼板の健全性評価」
日本機械学会 M&M2012 材料力学カンファレンス
2012.9.24, 愛媛大学

⑤田中智也, 森口彰久, 阪上隆英

「テラヘルツ電磁波の物質透過性を応用した非破壊検査技術の開発」
日本材料学会第 61 期学術講演会
2012.5.26, 岡山大学

⑥阪上隆英, 安西宏晃, 久保司郎

「赤外線分光イメージングによるガス検知技術の開発」
日本高圧力技術協会秋季講演会
2011.10.6, 室蘭市・日本製鋼所

⑦田中智也, 松井南帆人, 安西宏晃, 阪上隆英, 久保司郎

「テラヘルツ電磁波イメージング計測に基づく非破壊検査」, 日本機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス
2011.7.17, 九州工業大学

⑧安西宏晃, 松井南帆人, 阪上隆英, 久保司郎

「テラヘルツ波イメージング計測に基づく非破壊検査に関する基礎的検討」
日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会
2011.3.19, 京都工芸繊維大学

⑨井南帆人, 安西宏晃, 阪上隆英

「テラヘルツイメージングによる機械材料の非破壊健全性評価」
日本機械学会関西学生会平成 22 年度学生員卒業研究発表講演会
2011.3.18, 京都工芸繊維大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阪上 隆英 (Sakagami Takahide)
神戸大学・工学研究科・教授
研究者番号：50192589

(2) 研究分担者

久保 司郎 (Kubo Shiro)
大阪大学・工学研究科・教授
研究者番号：20107139

(3) 研究分担者

萩行 正憲 (Hangyo Masanori)
大阪大学・レーザーエネルギー学研究中心
教授
研究者番号：10144429