

平成 21 年 6 月 5 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18360130

研究課題名（和文） テラヘルツ波による電気絶縁劣化診断技術の構築

研究課題名（英文） Development for the sensing technique of insulation degradation by THz wave.

研究代表者 吉村 昇 (Yoshimura Noboru)

秋田大学・学長

研究者番号：60006674

## 研究成果の概要：

本研究では小型かつ連続発振可能なテラヘルツ光源であるタンネットダイオードを用いたイメージングシステムを用い、空間分解能および検出電圧の向上、さらにイメージングシステムの増設による測定時間の短縮と S/N 比の向上を図り、THz イメージングによる絶縁劣化現象の検出を検討した。その結果、透過・反射イメージの同時取得と S/N 比の向上を可能にし、積層基板内で発生したイオンマイグレーション現象の検出とポリエチレンシート内に生じた水トリマーを検出できることを明らかにした。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
2007 年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2008 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電気機器

キーワード：テラヘルツ、絶縁材料、絶縁劣化、電力工学、非破壊検査、イメージング

## 1. 研究開始当初の背景

THz 波はミリ波と遠赤外線の中間に位置づけられる  $10^{11}$  から  $10^{13}$  Hz までの周波数帯の電磁波であり、近年まで利用することが出来なかった未開拓の電磁波である。非電離放射線である THz 波は X 線と異なり材料へ及ぼすダメージが少なく、生体に無害であるため特別な防護施設を必要としない。物質に THz をあてると原子間の振動が共振して電波が吸収される。逆に吸収周波数から物質を構成する分子の結合が分る。そのため、FTIR（フーリエ変換赤外分光光度計）で用いられる赤外

線と比べ、極めて高い精度で有機分子の構造欠陥をも調べる可能性を秘めている。

我々はこれまでに（財）半導体研究所で開発された THz イメージング装置を用いて、可視光線では診断が困難な皮膚ガンの一種であるメラノーマの検査方法を研究してきた。その際、生体組織に含まれる水分により THz 波が吸収されるため、水分を完全に除去するためにホルマリン処理等の前処理が不可欠であった。この経験を基に発想を逆転させ、電力関連設備に必要な不可欠な高分子材料中に進入した僅かな水分が引き起こす絶縁劣

化現象の非破壊検査に THz 波によるイメージング技術を応用するとの発想を得た。また、劣化した絶縁材料および誘電体は THz 帯での電磁波吸収スペクトルに変化が生じると予想され、劣化の程度も推定できると期待できる。また、本研究課題で対象とする THz 波による非破壊検査技術は多くの電気・電子機器で使われているプリント配線板のイオンマイグレーション等の劣化の評価にも応用できると期待できる。

## 2. 研究の目的

本研究課題では THz 波による電気絶縁材料および誘電体の非破壊検査技術を研究する。

### I. THz 波の応用：

①劣化過程で生成される各種水酸化物（水トリー現象、イオンマイグレーション現象）

②熱的に劣化する過程における高分子（トラッキング現象）

### II. イメージング技術の改良：

③透過・反射測定技術の構築

④S/N 比向上のためのイメージングシステムの改良

特に、電力関連設備の CV ケーブルに利用されている架橋ポリエチレン、電気機器等に欠かせないプリント配線基板（FR4）等の誘電体を対象として、絶縁劣化の非破壊検査技術の実現をめざした。

## 3. 研究の方法

### ①THz イメージング装置の改良

イメージング装置は、TUNNETT 発振素子、パルス電源、SBD 検出器、ロックインアンプ、X-Z ステージおよびコンピュータで構成されており、X-Z ステージに取り付けられた試料を走査することで THz 波イメージを作成する。なお、SBD 検出器の配置を換えることで透過像と反射像を得ることができる。課題として、透過像と反射像を同時に計測できないこと、空間分解能が低いこと、THz 帯の電磁波によるイメージング技術が発展途上にあるため回折像等のノイズによりデータの解釈が難しいこと等がある。そこで、透過反射像同時計測技術の構築、空間分解能の向上、イメージング技術の構築をめざした。

### ②プリント配線板の絶縁劣化現象の非破壊検査

PWB 内部に発生するイオンマイグレーションを検知するための基礎研究として、テラヘルツ波が高分子樹脂を透過しやすく金属を透過しないという特性を生かし、プリント基板の層間を伸展するデンドライト（dendrite）を検出できる可能性を検証した。多層基板の層間に伸展するデンドライトを

テラヘルツ波により可視化できるかを調べるために、フレキシブル基板を重ねることで多層基板を模擬した試験基板を作製し、層間において WDT(water drop test)法によりイオンマイグレーションを発生させた。WDT 法は脱イオン水滴下法と呼ばれ、電極および絶縁部分を脱イオン水で覆うため、湿度が 100%の結露した状態を模擬することができ、電極金属の溶出、移行が加速され短時間でイオンマイグレーションを発生させることができる。イオンマイグレーションを発生させた後、加えた水滴が完全に乾くまで、サンプルを空气中で自然乾燥させた。なお、テラヘルツ波による透過画像の妥当性を評価するために、本事業で新たに導入した軟 X 線顕微鏡による X 線透過画像と、光学顕微鏡による光学顕微鏡写真とを比較した。

### ③海底ケーブルの絶縁劣化現象の非破壊検査

地中には多くの高経年 CV ケーブルが使用されている。これらの CV ケーブルには絶縁体の部分に有機高分子材料として架橋ポリエチレンが使用されている。この CV ケーブルの周囲に水分が存在する条件下で、交流電圧を印加し続けると絶縁体中に水分が侵入し、樹枝状に凝縮する。この現象を水トリーと呼ぶ。水トリーは水を含む微小なボイドとそれらを接続する細い線状のパスから構成されていると考えられる。この微小ボイド内の水が Maxwell 応力によって電界方向に引っ張られ細い線状のパスに流入し、ボイド間が電氣的に接続されるため、水トリーを流れる電流が急増する。絶縁体に水トリーが発生することにより絶縁性能が大幅に低下し、絶縁破壊事故が発生するという問題がある。このような問題を受け、架橋ポリエチレン内部に発生した水トリーを検知することは非常に重要なことであると考えられる。

水トリーの劣化診断方法としては、水トリー劣化による損失電流の高調波成分を、電気信号として取得するなどの方法がある。この方法により水トリー劣化を検出することは可能であるが、実際の水トリーの大きさや形状または分布などの可視情報を非破壊的に得ることができず、絶縁体層を切断・スライスして、可視化できる様に着色し、顕微鏡で観察するという方法が必要となる。そこで本研究では、この水トリーの分布や大きさなどを、水による吸収が顕著である THz 周波数帯を利用することによって、その透過強度分布から劣化試料を非破壊で直接観察することを試みた。

## 4. 研究成果

### ①THz イメージング装置の改良

THz 波イメージング装置を用いて、生体組

織および各種絶縁材料試料へのテラヘルツ波の入射角度の影響、アパーチャー、試料およびSBDの相対距離が透過・反射波に及ぼす影響を実験的に調べることで、試料をイメージングするために最適な計測条件を調べ、その一部を明らかにした。

THz波イメージング装置の発信器であるTUNNETTは、出力変動が1%以下で連続発振可能と出力安定性が大きなメリットである。そのため、他のレーザーを使ったTHzイメージング装置と異なり、オープンループでの使用が可能であり、イメージング装置全体の小型化に貢献している。図1にTHzイメージング装置による計測風景を示す。しかし、本研究でターゲットとした微小な金属、水酸化物および水分を検出するとなると、イメージングシステムのS/N比をさらに向上させる必要があると考えた。また、本装置ではTHz透過イメージングと反射イメージングでは装置の構成が異なるため、同時に実施することはできていなかった。そこで、平成19年度はSBD検出器およびLock in Amplifierをそれぞれ1台増設し、入射するTHz波の強度をモニターすることで透過光と反射光の同時取得を可能にし、装置の構成を変えることなくTHz透過・反射同時イメージング装置への改良を実施した。図2にTHz透過・反射同時イメージング装置のブロック図を示す。これにより、X線顕微鏡では検出できないフレキシブル基板間に発生させた dendrite の反射・透過画像を取得することが可能となった。一方、計測感度の向上を目指し、入力信号をリファレンス信号としてサンプルの透過光を規格化しようとしたところ、入力信号に未知の信号が重畳しており、この実験系では引き込み現象が発生していることを発見した。

THz波の波長より短い1.5mm以下の小さな物体を識別できるように、イメージング装置の空間分解能の改良に取り組んだ。その過程で、SBDの前段に近接場効果を利用した近接場プローブを導入することを考案し、空間分解能を向上できることを実験的に明らかにした。図3にナイフエッジ法により評価したプローブ型アンテナによる空間分解能を示す。透過量の変化から0.5mm以下の物体まで識別できることを確認した。また、図4に、ICカードを対象としてイメージングしたTHz波透過画像を示す。同図(a)は標準構成のホーンアンテナによる測定結果、同図(b)はプローブ型アンテナの採用により改善された測定結果を示す。改良前は干渉により配線の弁別が困難だったが、改良後には本来の太さの配線を確認することが出来る。この結果は、使用環境が制限されるX線に代わり、生体に無害なTHz波を非破壊検査に応用できる可能性を示している。

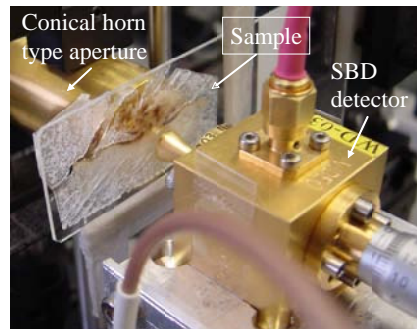


図1 THz波によるイメージング風景

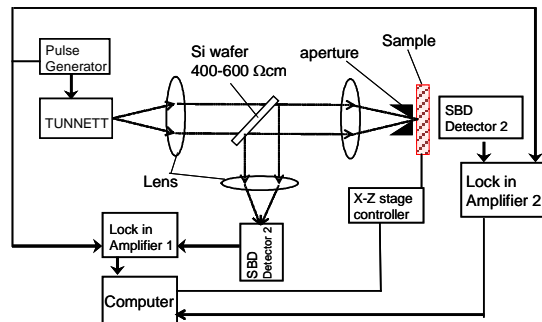


図2 反射透過同時計測可能なTHz波イメージング装置のブロック図

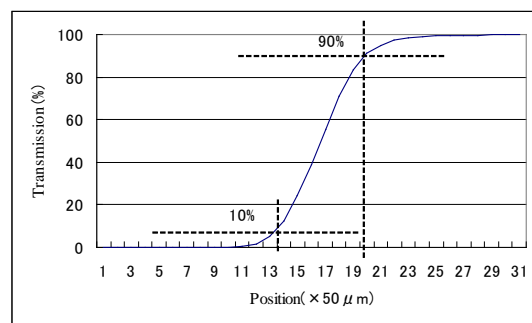
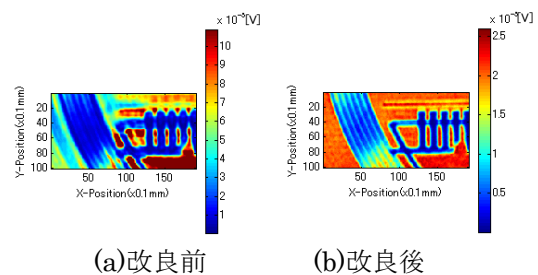


図3 THzイメージング装置の空間分解能



(a)改良前 (b)改良後

図4 空間分解能の向上

## ②プリント配線板の絶縁劣化現象の非破壊検査

本研究で新たに構築したTHzイメージング技術を用いて非破壊的にイオンマイグレーション現象を検出するための条件を調べ、

本技術で検知可能な銅の析出量を調査した。THz波によるイメージングの妥当性を検証・評価するために必要な参照データには、本事業で新たに導入した軟X線顕微鏡によるX線吸収画像を利用した。

その結果、THzイメージングにより、デンドライトを人工的に発生させた10枚のフレキシブル基板において、全てのデンドライトの存在を検知できることを実証した。図5に未劣化サンプル、図6にイオンマイグレーション発生後のサンプル、図7に水酸化銅析出サンプルを示す。それぞれの図において(a)は軟X線による透過画像、同図(b)は光学顕微鏡による透過光画像、同図(c)はTHz透過画像を示す。他の方式と比べてTHz透過画像は空間分解能が低いが、デンドライトの有無を明確に検知できることを確認できる。

THz透過画像が軟X線により定量した銅密度分布画像に近いことがわかり、THz透過画像によりイオンマイグレーション現象を検出できる可能性が明らかにした。この結果は被爆の危険により使用が制限されるX線に代わり、生体に無害なTHz波をイオンマイグレーションの検出に利用できる可能性を示唆している。しかしながら、空間分解能はX線に比べて劣るため、更なる技術開発が必要と考えている。一方、銅密度分布画像から、アノードに近いデンドライト先端部に、より多くの銅金属が蓄積している様子を確認した。テラヘルツ透過画像と銅密度分布画像を比較することで、本テラヘルツイメージングで検出可能な銅の最小密度が、約 $17.8 \mu\text{g}/\text{mm}^2$ であることを明らかにした。

### ③海底ケーブルの絶縁劣化現象の非破壊検査

海底用電力ケーブルの電気的絶縁劣化現象である水トリーの進行度をケーブル表面からのTHz光の反射・透過特性を調べることで検知可能かどうか応用研究を進めた。

非破壊検査用のサンプルとして、2.0mm厚の架橋ポリエチレンシートに2kHz、18kVで528時間課電することで人工的に約0.5mm長の水トリーを発生させた。図8に水トリーが発生したサンプルの外観を示す。図8において、青く示された部分はTHz波の透過量が少なく、赤く示された部分はTHz波の透過量が多いことを意味する。よって左半分(水トリー発生部)のTHz波の透過量が右半分(水トリー未発生部)に比べて低下していることがわかる。これはTHz波が水トリーによって吸収されたことが原因と考えられる。

図9に水トリーの発生の有無によるTHz波の透過量を比較したグラフを示す。水トリー発生部分全体のTHz波の平均透過量は約 $191 \mu\text{V}$ 、未発生部では約 $210 \mu\text{V}$ となった。水トリー発生部分と、未発生部分のTHz波の平均

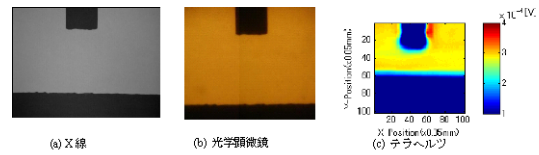


図5 劣化前の配線板

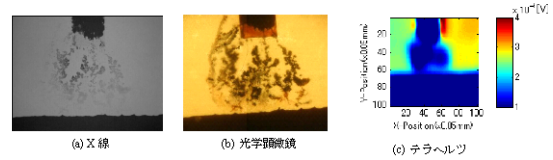


図6 劣化後の配線板

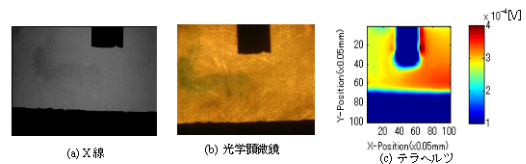


図7 水酸化銅が生成した配線板

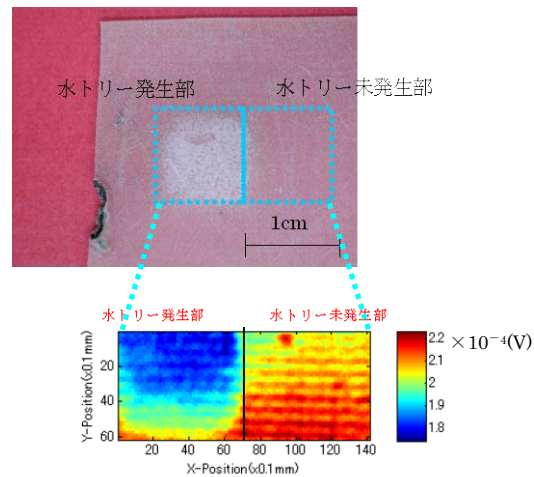


図8 水トリー発生サンプルのTHz透過画像

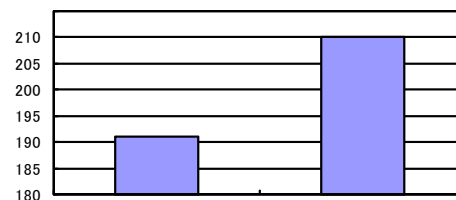


図9 THz波の平均透過量

透過量の差は約  $19\mu\text{V}$  となり、水トリーによって THz 波が吸収され、透過が妨げられたと考えられる。よって、 $0.5\text{mm}$  厚の劣化試料に対して、水トリー長が  $0.3\text{mm}$  (60%) まで進展している場合、THz 波によって水トリー検出が可能であると考えられる。

一般に、テラヘルツ帯の電磁波は樹脂材料を透過しやすく、金属材料で反射するため、テラヘルツ透過・反射イメージングにより積層プリント配線板の内部に発生するイオンマイグレーションの簡易検査も可能になると期待できる。また、X線は人体への被爆のため遮蔽された環境でなければ利用できないが、テラヘルツ帯での電磁波は人体に無害であるため、使用場所に制約がないとのメリットもある。一方、テラヘルツイメージング技術の活用には、今後、テラヘルツ波発振器の出力向上と共に空間分解能向上の技術開発が不可欠と考える。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 10 件)

- ① Zhang, H., Mitobe, K. and Yoshimura, N., Application of Terahertz Imaging to Water Content Measurement, Japanese Journal of Application Physics, 有, Vol. 47, No. 10, 2008, pp. 8065-8070
- ② Zhang, H., Mitobe, K. Suzuki, M. and Yoshimura, N., A New imaging method for the Cellulose Acetate Electrophoresis by the Terahertz Imaging, Japanese Journal of Application Physics, 有, printing now, 2009, printing now.
- ③ 水戸部一孝, 吉村昇, 三次元形状計測によるイオンマイグレーションの評価, 電気学会論文誌, 有, Vol. 127, No. 6, 2007, pp. 335-340.
- ④ 水戸部一孝, 後藤真子, 吉村昇, 液中を成長するデンドライトの挙動に関する検討, 静電気学会誌, 有, Vol. 31, No. 5, 2007, pp. 205-206
- ⑤ カビール ムハムドゥル, 水戸部一孝, 佐藤潤, 玉本英夫, 吉村昇, 磁気式モーションキャプチャにおけるレシーバ位置・角度のキャリブレーションの試み, 電気学会論文誌 C, 有 Vol. 127, No. 1, 2007, pp. 88-89
- ⑥ 中井戸宙・水戸部一孝・吉村昇, イオンマイグレーション発生前の電極表面に生じるナノスケールの兆候, 平成 19 年電気学会全国大会講演論文集, 無, Vol. 2, 2007, p. 37
- ⑦ 張 宏兵, 水戸部一孝, 吉村昇, テラヘ

ルツによる植物の葉の水分含有量とイメージングに関する研究, 平成 19 年電気学会全国大会講演論文集, 無, Vol. 4, 2007, p. 299

- ⑧ 水戸部一孝, 辻 真, 片寄喜久, 小川純一, 吉村昇, THz 波イメージングの空間分解能向上に関する検討, 平成 19 年電気学会全国大会講演論文集, 無, Vol. 1, 2007, p. 210
- ⑨ 後藤真子, 水戸部一孝, 吉村昇, 液中を成長するデンドライトの挙動に関する検討, 電気学会研究会資料, 無, Vol. DEI-06, 2006, pp. 17-20.
- ⑩ 水戸部一孝, 藤原大輔, 吉村昇, 微小プローブを用いたイオンマイグレーションにおける液中抵抗値の測定, 電気学会研究会資料, 無, Vol. DEI-06, 2006, pp. 11-16.

〔学会発表〕 (計 11 件)

- ① 勝間裕嗣, 水戸部一孝, 鈴木雅史, 吉村昇, イオンマイグレーションにおけるデンドライトの伸展に及ぼす液中抵抗に関する研究, 電気学会誘電絶縁材料研究会, 2009 年 1 月 23 日, 秋田市民交流プラザ
- ② 中野裕明, 石川義博, 水戸部一孝, 鈴木雅史, 吉村昇, THz 波による水トリー劣化試料の観察, 電気学会誘電絶縁材料研究会, 2009 年 1 月 23 日, 秋田市民交流プラザ
- ③ 石川義博, 水戸部一孝, 鈴木雅史, 吉村昇, THz イメージング装置の分解能向上, 電子情報通信学会 2008 総合大会, 2008 年 3 月 19 日, 北九州市立大学
- ④ 勝間裕嗣, 水戸部一孝, 吉村昇, イオンマイグレーションにおけるデンドライトの伸展に及ぼす銅イオンの挙動に関する研究, 平成 20 年電気学会全国大会, 2008 年 3 月 19 日, 福岡工業大学
- ⑤ 中井戸宙, 水戸部一孝, 吉村昇, 「イオンマイグレーション発生前の電極表面に生じるナノスケールの兆候」, 平成 19 年電気学会全国大会講演論文集, Vol. 2, pp. 37, 2007 年 3 月 15 日 富山大学
- ⑥ 張 宏兵, 水戸部一孝, 吉村昇, 「テラヘルツによる植物の葉の水分含有量とイメージングに関する研究」, 平成 19 年電気学会全国大会講演論文集, Vol. 4, pp. 299, 2007 年 3 月 15 日 富山大学
- ⑦ 水戸部一孝, 辻 真, 片寄喜久, 小川純一, 吉村昇, 「THz 波イメージングの空間分解能向上に関する検討」, 平成 19 年電気学会全国大会講演論文集, Vol. 1, p. 210, 2007 年 3 月 15 日 富山大学
- ⑧ 後藤真子, 水戸部一孝, 吉村昇: 液中を

成長する dendritic の挙動に関する検討, 電気学会誘電絶縁材料研究会, DEI-06, pp. 17-20 (2006) 平成 18 年 9 月 22 日 秋田大学

- ⑨ 水戸部一孝, 藤原大輔, 吉村昇 「微小プローブを用いたイオンマイグレーションにおける液中抵抗値の測定」, DEI-06, pp. 11-16 平成 18 年 9 月 22 日 秋田大学
- ⑩ 中井戸宙, 水戸部一孝, 吉村昇, 「AFM を用いた環境試験法前後における PWB 表面形状の解析」, 電気関連学会東北支部大会, 平成 18 年 8 月 31 日, 秋田大学
- ⑪ 長澤宏大, 水戸部一孝, 吉村昇, 天野憲一, 三浦周平, 「協会 7 号清酒酵母に及ぼす低出力マイクロ波の非熱的効」, 電気関連学会東北支部大会, 平成 18 年 8 月 31 日, 秋田大学

[図書] (計 2 件)

- ① 水戸部一孝他, JPCA 規格 プリント配線板環境試験方法 JPCA-ET01~09-2007, 社団法人日本電子回路工業会, 2007 年
- ② 吉村昇, 水戸部一孝他, 電気学会, プリント基板の試験と評価—イオンマイグレーション現象とその対策, オーム社, 2007 年

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

発明者: 水戸部一孝, 吉村昇, 権利者: 秋田大学, 特願 2006-040540, F I R アクティブ・サーモグラフィ検査装置, 2006 年 2 月 17 日, 国内

○取得状況 (計 1 件)

発明者: 水戸部一孝, 吉村昇, 権利者: 秋田大学, 特許公開 2007-215809, F I R アクティブ・サーモグラフィ検査装置, 2007 年 8 月 30 日, 国内

[その他]

ナシ

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉村 昇 (Yoshimura Noboru)  
秋田大学・学長  
研究者番号: 60006674

### (2) 研究分担者

鈴木 雅史 (Suzuki Masafumi)  
秋田大学・工学資源学部・教授  
研究者番号: 60226553

水戸部 一孝 (Kazutaka Mitobe)  
秋田大学・工学資源学部・准教授  
研究者番号: 60282159

淀川 信一 (Yodokawa Shinnichi)  
秋田大学・工学資源学部・助教  
研究者番号: 90282160

### (3) 連携研究者

ナシ