

## 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16日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21560286

研究課題名（和文） テラヘルツイメージングによる水トリー劣化の早期発見技術の構築

研究課題名（英文） Construction of the early detection technology of water tree degradation by terahertz imaging

研究代表者

鈴木 雅史（SUZUKI MASAFUMI）

秋田大学・大学院工学資源学研究所・教授

研究者番号：60226553

研究成果の概要（和文）：

水トリー劣化はケーブルの絶縁破壊の主要な要因である。このため、多くの研究がなされているが、本研究では近年注目されているテラヘルツ波を用いて水トリーの検出を試みた。その結果、水による吸収が顕著であるテラヘルツ波を利用することで、非破壊で水トリーを検出できることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：

It is widely recognized that degradation by water tree of electrical power cables would cause serious problems. Therefore, many methods have been studied in order to detect water tree at the early stages. As a result, it found that a water tree is detectable by using a terahertz wave.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費      | 間接経費      | 合計        |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 2,100,000 | 630,000   | 2,730,000 |
| 2010年度 | 1,000,000 | 300,000   | 1,300,000 |
| 2011年度 | 600,000   | 180,000   | 780,000   |
| 年度     |           |           |           |
| 年度     |           |           |           |
| 総計     | 3,700,000 | 1,110,000 | 4,810,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電気機器工学

キーワード：水トリー, テラヘルツ

## 1. 研究開始当初の背景

現在、絶縁体として有機高分子材料である架橋ポリエチレンが使用された高経年 CV ケーブルが用いられている。水が CV ケーブルの周囲に存在する条件下で交流電圧を印加し続けると、水分が絶縁体に侵入し、トリー

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。この微小なボイド内の水が 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、ボイドの間

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。水トリーが絶縁体に発生することにより、CV ケーブルの絶縁性能が大幅に低下し、絶縁破壊事故が起こるといふ問題が発生している。従って、XLPE 内部に発生した水トリーを検出することは非常に重要なことである。

## 2. 研究の目的

現在、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。これによって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得ることができず、どうしても切断などを行い、絶縁体の部分をスライスして着色後、顕微鏡で観察するという方法が必要である。

本研究では水による吸収が顕著であるテラヘルツ波を利用することにより、非破壊で水トリーを検出することができるか検討する。

## 3. 研究の方法

### (1) テラヘルツイメージング装置

すべての実験に TIS-200G を用いている。図 1 は TIS-200G の概略図である。イメージング装置はファンクションジェネレータ (DF1905 : NF 回路設計ブロック) と直流電源 (KX-100H : 高砂製作所) によってタンネットダイオードを繰り返し周期 4kHz で駆動し、ダイオードが発生する 0.189THz (固定) の連続波を口径 1.0mm のアパーチャを介して試料に照射する。その後試料を透過または反射してきたテラヘルツ波を SBD で検出、ロックインアンプ (SR810 : STANFORD RESEARCH SYSTEMS) によって信号成分を抽出し PC に取り込む。

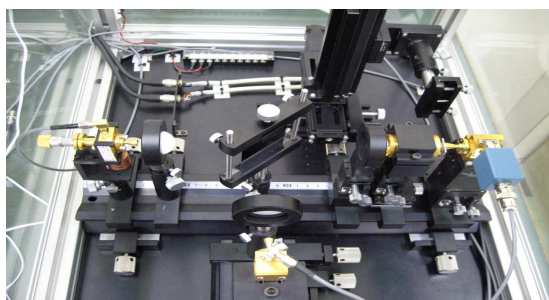


図 1 テラヘルツイメージング装置

タンネットで発振されたテラヘルツ波はホーンアンテナによって自由空間に放出される。テラヘルツ波はポリエチレンレンズで平行光にされ伝播し再びポリエチレンレンズ集光した後、アパーチャを通してサンプル

に照射される。周波数は 181.9GHz 固定、波長にして約 1.6mm でアパーチャ開口は 1.0mm であり、波長以下の開口によってレンズのみの場合より高い空間分解能が得られるようになっている。アパーチャを通したテラヘルツ波は試料を通過して SBD に導入される。

### (2) 水トリー劣化試料の作製

初めに、ポリエチレンシートを 60mm × 55mm に切断する。このポリエチレンシートの半分に水トリーを発生させるため、シートの半分の面を鑊で傷つけた。このシートの上にアクリルパイプを設置し、中に NaCl 溶液を入れることで水電極とした。

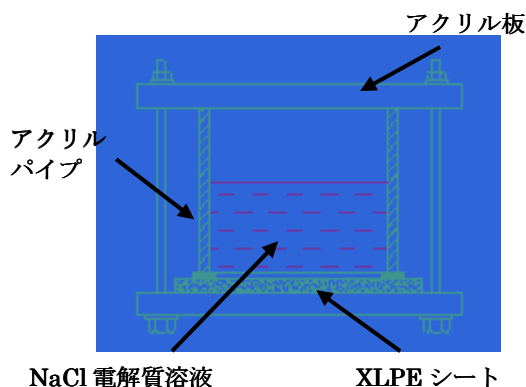


図 2 実験装置の構成

上部の水電極と下部電極の間に、ファンクションジェネレータと高電圧電力増幅器 (エヌエフ回路設計ブロック HVA4321) を使い、所定の電圧を印加する。

## 4. 研究成果

上記のように作製した試料に、7kV<sub>p-p</sub>, 3kHz を印加し、水トリーを作製した。印加時間は 70 時間と 120 時間である。図 3 において、左半分が未劣化部分、右半分が水トリー発生部分である。この試料の赤線で囲んだ中央部分をテラヘルツで観察した。

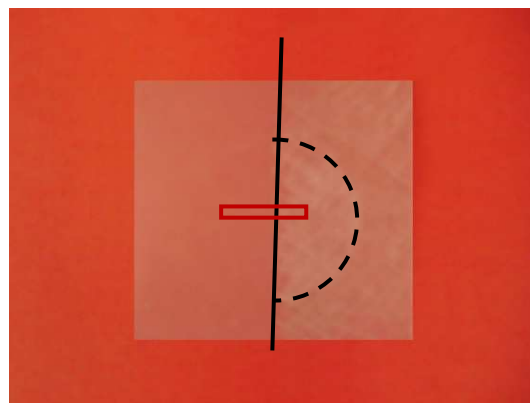


図 3 電圧 120 時間印加

図4において、左半分(X=0~8mm)が傷付けない区域、つまり、未劣化の区域であり、右半分(X=8~16mm)が傷付けた区域、つまり、水トリーを発生させた区域である。

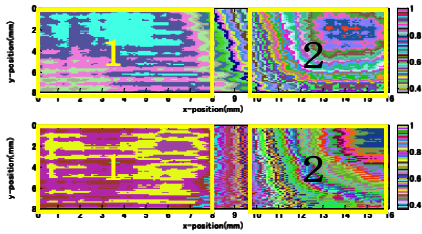


図4 テラヘルツイメージングその1  
(上図：電圧印加前，下図：劣化後)

また、上図が電圧印加前、下図が電圧印加後であり、電圧印加により“1”の領域ではテラヘルツ波の透過量に変化は見られないが、“2”の領域では透過量が減少していることがわかる。透過量の変化を詳細に示した図が図5である。

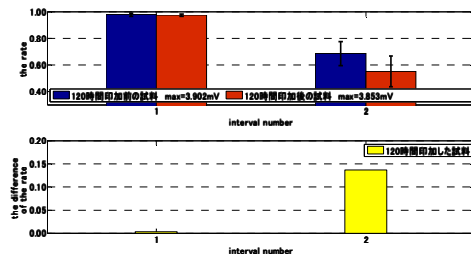


図5 テラヘルツ波の透過量変化

図5に示すように、高電圧印加前後、区域“1”(120時間印加した試料において傷付けない区域)の平均比率はほとんど変わらないが、区域“2”(120時間印加した試料において傷付けた区域の一部分)の平均比率は大幅に減少した。  
同様に7kV<sub>P-P</sub>、3kHzの交流電圧を70時間印加する前と70時間印加した後で、それぞれテラヘルツイメージング実験を行った。得られたテラヘルツイメージングを比率画像に変換し、図6に示す。

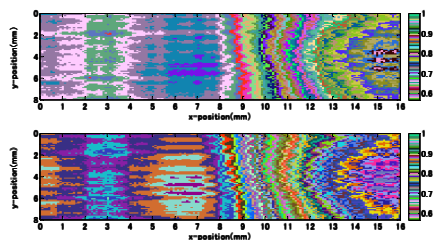


図6 テラヘルツイメージングその2

また、先ほどと同様に、透過量の変化の詳細を図7に示す。

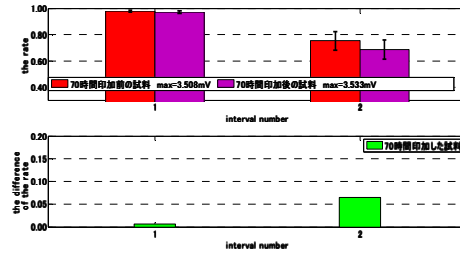


図7 テラヘルツ波の透過量の変化

図7に示すように、高電圧印加前後、70時間印加した試料において傷付けない区域の平均比率はほとんど変わらないが、70時間印加した試料において傷付けた区域の一部分の平均比率はやや減少した。

このように透過量に変化が見られた原因として、傷をつけた領域において水トリーが発生し、これによりテラヘルツ波が吸収された可能性があるため、試験後の試料を薄くスライスし、着色の後顕微鏡で観察した。

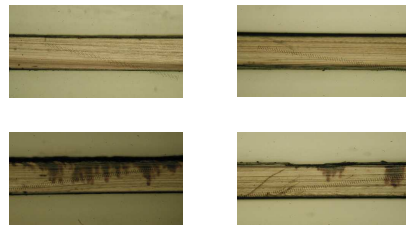


図8 顕微鏡写真  
(左, 120時間印加 上図：傷をつけない領域  
下図：傷をつけた領域  
右, 70時間印加 上図：傷をつけない領域  
下図：傷をつけた領域)

この図より、電圧を120時間印加した場合、70時間印加した場合いずれにおいても試料の左側(傷をつけない部分)には水トリーの発生は見られない。一方で、右側(傷をつけた領域)には水トリーの発生が見られた。また、水トリーの発生量は電圧を120時間印加した試料が多く、70時間印加の試料は少なかった。これらのことから、テラヘルツ波の透過量の減少は水トリーによってもたらされ、水トリーの発生量が多いほど透過量は減少すると考えられる。即ち、テラヘルツ波を利用することで、絶縁劣化の程度を非破壊的に観察できる可能性があると考えられる。

今後の課題としては、装置を反射構成に変更し、実際のケーブルにおいても水トリーの有無を検出できるか検討することなどがあげられる。

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 7 件)

1. A new Analytical Method for the Cellulose Acetate Electrophoresis by the Terahertz Imaging, H.Zhang, K.Mitobe, M.Suzuki and N.Yoshimura, Jpn.J.Appl.Phys. Vol.48, No.6, pp.1-5(2009) 査読あり
2. テラヘルツ波を用いたイオンマイグレーションの検出, 石川義博, 水戸部一孝, 鈴木雅史, 吉村 昇, 静電気学会誌, Vol.33, No.4, pp.163-8(2009) 査読あり
3. New Imaging Method for Electrophoresis by Sub-Terahertz Wave, H.Zhang, K.Mitobe, M.Suzuki and N.Yoshimura, Proc. 6th International Conference on Materials Engineering for Resources, ICMR, pp.508-10(2009) 査読なし
4. Continuous Wave Terahertz Imaging Method for Ion Migration Detection, H.Zhang, K.Mitobe, M. Suzuki and N.Yoshimura, Proc. International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 2010, pp.770-3 (2010) 査読なし
5. Single Frequency Continuous Wave Terahertz Imaging of DNA Marker and Protein Marker on Membrane, Zhang, H., Mitobe, K., Suzuki, M., Mitobe, Y., Habuchi T. and Yoshimura, N., Proc. International Conference on Advanced Electro materials (2011) 査読なし
6. Analysis of the dendrite on printed wiring board by soft X-ray microscope and THz imaging, Mitobe, K., Suzuki, M. and Yoshimura, N., Proc. International Conference on Power and Energy Systems (2011) 査読なし
7. Three-dimensional Equivalent Circuit Analysis of Water Tree, Suzuki, M. and Yoshimura, N. Proc. International Conference on Power and Energy Systems (2011) 査読なし

[学会発表] (計 6 件)

1. THz 波による水トリー劣化の検出, 王維、鈴木雅史、水戸部一孝、吉村昇, 第 25 回センサ工学研究会(2010.9) 秋田
2. テラヘルツ波を用いた水トリー検出に関する研究, 王維、鈴木雅史、水戸部一孝、吉村昇, 第 41 回電気電子絶縁材料システムシンポジウム(2010.11) 秋田
3. 三次元等価回路モデルを用いた水トリー劣化試料のシミュレーション, 浅野 高浩, 鈴木 雅史, 吉村 昇, 第 41 回電気電子絶縁材料システムシンポジウム (2011.11) 秋田

4. 水トリー内部の電流分布シミュレーション, 浅野 高浩, 鈴木 雅史, 吉村 昇, 平成 23 年電気学会全国大会(2011.3) 大阪
5. 水トリー形状と電界分布のシミュレーション, 浅野 高浩, 鈴木 雅史, 吉村 昇, 平成 23 年度電気関係学会東北支部連合大会(2011.8) 仙台
6. 等価回路モデルを用いた水トリーの検出および劣化進展の危険性, 浅野 高浩, 鈴木 雅史, 吉村 昇, 誘電・絶縁材料／電線・ケーブル合同研究会(2011.11) 秋田

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 雅史 (SUZUKI MASAFUMI)  
秋田大学・大学院工学資源学研究所・教授  
研究者番号：2 1 5 6 0 2 8 6

(2) 研究分担者

水戸部 一孝 (MITOBE KAZUTAKA)  
秋田大学・大学院工学資源学研究所・准教授  
研究者番号：6 0 2 8 2 1 5 9  
カビール ムハムドゥル (KABIR MAHMUDUL)  
秋田大学・大学院工学資源学研究所・講師  
研究者番号：1 0 4 2 2 1 6 4