

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560275

研究課題名 (和文) 水トリーの微細構造観察と3次元等価回路解析

研究課題名 (英文) Micro-structural observation of water tree and three dimensional equivalent circuit analyses.

研究代表者

鈴木 雅史 (SUZUKI MASAFUMI)

秋田大学・工学資源学部・教授

研究者番号：60226553

研究成果の概要：

水トリーの電気伝導特性を決定するために必要となる貫通水トリー形状と併せた電圧-電流特性の実測値及びシミュレーションの妥当性を評価するために必要な損失電流波形の実測値等の電氣的特性に関するデータは非常に少ない。そこで本研究ではまず、この損失電流測定法を研究するための基礎データとして水トリー形状の観察と共にその電氣的特性を測定し、得られた結果について検討した。そして次に実測した損失電流波形を再現できる3次元水トリーモデルを作製した。次に、これを用いて、印加電圧、周波数の変化による損失電流波形歪みの変化を調べ、水トリー劣化試料内部の水トリー劣化部と絶縁体健全部の電圧比の変化と比較した。それにより、損失電流波形歪みの変化傾向と水トリーの伸びの関連性を確認した。また、水トリーの電気特性を変更し、水トリーの導電性が高い場合、導電性が低い場合を仮定して、印加電圧、周波数、水トリーの伸びを変化させて損失電流波形を計算し、水トリー劣化試料内部の水トリー劣化部と絶縁体健全部の電圧比を比較する。そして、水トリーの電気特性の違いによる損失電流波形歪みの変化傾向の違いを検討した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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、損失電流、等価回路シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

架橋ポリエチレン絶縁ケーブル (CV ケーブル) は布設及び保守管理の容易さから使用量は年々増加し、現在では電力ケーブルの主流となっている。一方で CV ケーブルが長時間に渡り水と共存する状態で電界にさらされると、半導電層の突起や絶縁体中の異物やボイドといった電界集中部に水が凝集して水トリーが発生する。水トリーは時間と共に電界方向に進展し、それに伴ってケーブルの絶縁性能が低下していくことが各種の撤去ケーブル調査から明らかにされている。この水トリー劣化による絶縁破壊事故を未然に防ぐため、現在各種劣化診断法が提案されており、中でも損失電流測定法が注目されている。損失電流とは水トリーが発生したケーブルを流れる電流から充電電流を差し引いたものであり、この損失電流に含まれる情報と水トリーの伸びや絶縁破壊電圧との間には相関関係があるため、損失電流測定法はケーブル内の水トリーが未貫通であっても検出の可能性がある有効な劣化診断法として期待されている。

## 2. 研究の目的

本研究では、損失電流測定法による水トリーの危険予測に役立つデータを得ることを目的として、実測した損失電流波形を再現できる水トリーの3次元等価回路モデルを作製した。そして作製したモデルを用いて実験では得ることが難しい水トリー発生試料の電圧分布等を PSpice により求め、得られた結果について検討した。具体的には、水トリー発生試料内において水ト

リー部に加わる最大電圧を  $V$ 、水トリーの進展していない絶縁体健全部に加わる最大電圧を  $V'$  としてそれらの電圧比  $V/V'$  を求め、電圧比と損失電流波形歪の特徴との間に関連性が見られるかを検討した。そして最後にそれらのデータが水トリーの危険予測に役立てられるかを検討した。

## 3. 研究の方法

本研究では、Fig. 1(a)に示すような、 $2\text{mm} \times 2\text{mm} \times 1\text{mm}$  の LDPE 試料に、Fig. 1(b)に示すように水トリーが進展していくモデルを仮定する。そこで、始めに LDPE 試料の等価回路を以下のように考える。

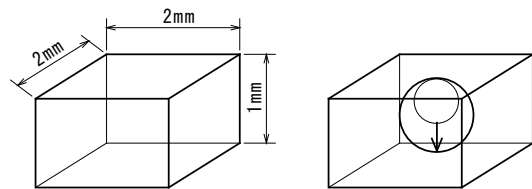


Fig. 1 水トリーモデル

LDPE 試料 (ブロック) を、Fig. 2 のように横と奥行き方向に 20 個、高さ方向に 10 個、合計 4000 個の微小な立方体に分割する。各々の微小立方体の辺の中心に抵抗  $R$  とコンデンサ  $C$  の並列接続で表されるインピーダンス  $Z$  を仮定する。これにより、LDPE 試料は Fig. 3 のような三次元のマトリックス状に結合された等価回路モデルとなる。

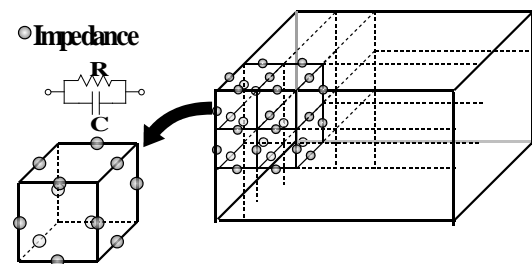


Fig. 2 等価回路モデル

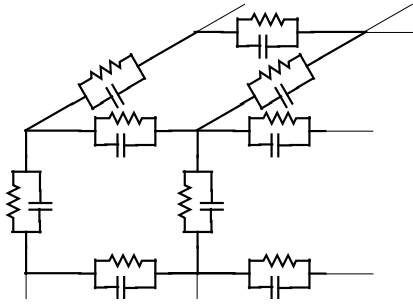


Fig. 3 インピーダンス配置

このLDPE試料 (2mm×2mm×1mm) において、ポリエチレンの比誘電率を 2.3 とすると、LDPEブロックの静電容量は 0.081pFとなるので、回路シミュレータ (LTspice) を用いて、等価回路モデルの静電容量がこの値となるように、インピーダンスZ中のコンデンサCの静電容量を求めた。その結果、Cの値は 0.00224pFとなり、理論値とよく一致したLDPEブロックの静電容量が求められた。一方、ポリエチレンの体積抵抗率は  $10^{14} \Omega \cdot m$ 程度であることを考慮し、インピーダンスZ中の抵抗Rの値は  $1T\Omega$ と決定された。

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パスから構成されていると考えられる。このような構造の水トリーに高電界が加わると Maxwell 応力によって水が電界方向に引っ張られ、電流が急増するため、電圧-電流特性は非線形である。ここで水トリーを微視的に見ると、非線形特性を示す回路が複数個繋がって構成されているとも考えられる。そこで本研究では、Fig. 4 に示すように、先にモデル化した LDPE に水トリーが発生し、存在する場合、水トリー劣化部は非線形な電気伝導特性を示すと考えられるので、モデル中

に水トリーが存在する箇所は、その箇所のインピーダンス  $Z$  を電圧依存型抵抗 (VDR) に置き換えた。ここで、水トリーは LDPE 試料上面の中央から球状に進展するものとし、試料中の電極間隔の 50%まで進展した水トリーは、試料上面中央に接した直径 0.5mm の球として表現され、この中に入るインピーダンス  $Z$  が VDR に置き換えられる。なお、VDR の特性は場所によらず一定とした。また、VDR の特性は後に示すように、損失電流の実測値とシミュレーション値が一致するように決定された。

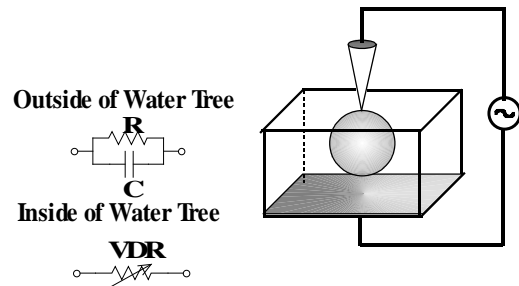


Fig. 4 水トリーのモデル化

#### 4. 研究成果

決定した等価回路モデルにおいて算出された損失電流波形を実測値とともに Fig. 5 に示す。実測値、計算値いずれも水トリーの伸びは 90%であり、1kHz, 5kVp-p の印加電圧を対象とした。図より、本研究で決定された等価回路モデルは実測値をよく再現できていることが分かる。

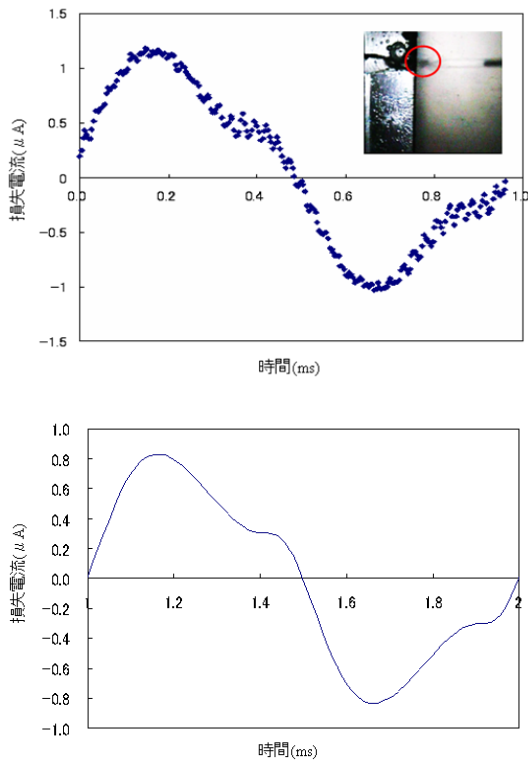
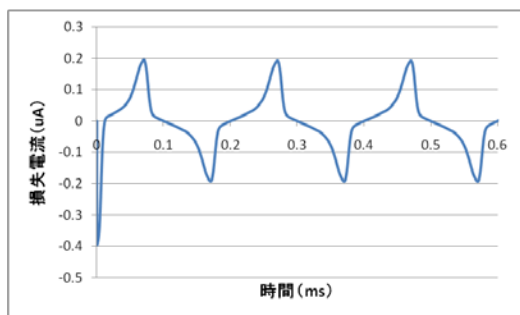
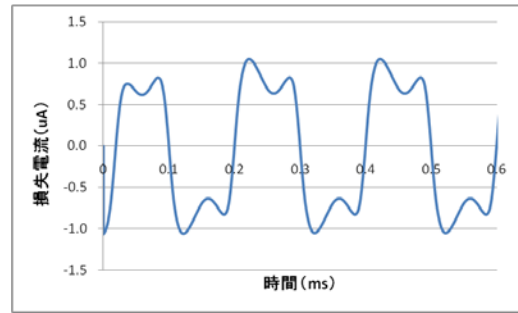


Fig. 5 損失電流の実測値と計算値

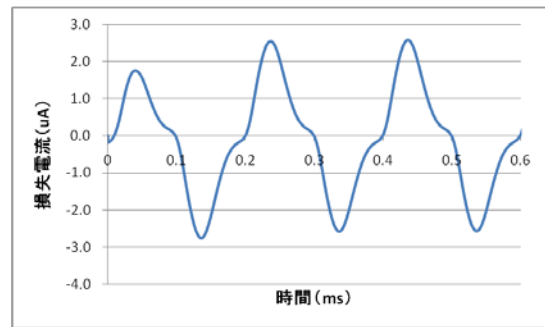
次に、印加電圧を  $5kV_{p-p}$  一定、周波数を  $5kHz$  一定とし、水トリーが  $10\sim 90\%$ まで伸展した場合の損失電流を算出した。この結果を Fig.6 に示す。この図より、水トリーが進展するにつれ損失電流は増加するとともに、その歪み方が異なることが分かる。



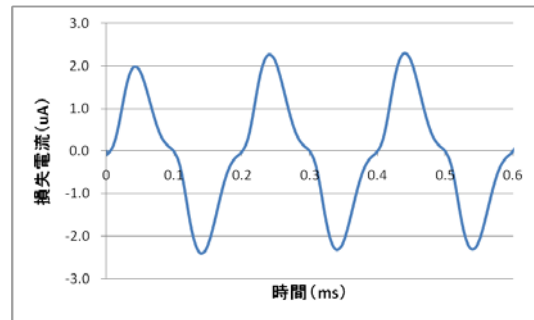
(a) 10%



(b) 30%



(c) 70%



(d) 90%

Fig.6 損失電流

印加電圧、周波数、水トリーの伸びの変化による損失電流波形歪みを調べた。その結果、水トリーの伸びが大きくなるにつれて損失電流波形の前方突出箇所が低電圧・高周波数側から高電圧・低周波数側へ広がっていく傾向があることがわかった。次に、水トリーの伸びの変化に対する前方突出箇所の広がり要因を調べるために、水トリー劣化試料の水トリー劣化部と絶

縁体健全部に加わる電圧比を計算し、損失電流波形歪みの変化傾向と比較した。その結果、電圧比が1を超えた付近から損失電流波形の後方突出から前方突出への移り変わりが見られ、さらに電圧比が高くなると中央突出に変化することがわかった。よって損失電流歪みと電圧比には関係があり、損失電流波形の前方突出、中央突出の場合は水トリーの更なる劣化進展の危険性があることが考えられる。

水トリーの電圧-電流特性を導電性が高い特性、導電性が低い特性に変化させて、印加電圧、周波数、水トリーの伸びの変化による損失電流波形歪みの変化傾向を調べた。また、水トリー劣化試料の水トリー劣化部と絶縁体健全部の電圧比との比較も行った。その結果、水トリーの電気特性の変化による損失電流波形歪みの変化傾向に違いは見られなかった。ただし、水トリー特性の違いによって損失電流波形の前方突出の広がり大きさに多少の違いがあることがわかった。これは水トリー特性の違いによって水トリー劣化部と絶縁体健全部に加わる電圧分担が変化するためだと考えられる。

以上のことから、水トリーの損失電流波形歪みの印加電圧、周波数、水トリーの伸びに対する変化傾向がわかった。また、水トリーの特性が変化しても多少は電圧比、波形歪みの広がり方には差があるものの、損失電流波形歪みの変化傾向は変わらないということがわかった。よって様々な水トリーの特性に対して同様のことがいえ

ると考えられる。そのため、損失電流波形歪みの変化傾向を調べることは水トリーの劣化診断に有効なデータだと考えられる。また、印加電圧と劣化試料に流れる電流の位相差を計算した。水トリーの電気特性が変化しても、水トリーの伸びが大きくなるにつれて位相差が小さくなり、さらに高電圧・低周波数側にかけて位相差が小さくなるという傾向は変化しなかった。よって水トリーの劣化の進展状況を確認する際には、損失電流波形歪みの変化傾向に加えて位相差の情報も役に立つことが考えられる。

## 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 2件)

①伊藤 淳、鈴木 雅史、鈴木 晴彦、吉村 昇、損失電流による水トリー検出のシミュレーション、静電気学会誌、31 巻、2号、67-71、2007、査読有

②Masafumi Suzuki, Atsushi Itoh and Noboru Yoshimura, Three-dimensional equivalent circuit analysis of water tree, Proc. of 2008 Int. Symp. on Electrical Insulating Materials, P2-5, 123, 2008, 査読無

[学会発表] (計 5件)

①鈴木 雅史、伊藤 淳、吉村 昇、水トリーの三次元等価回路解析、電気学会基礎・材料・共通部門大会、2007. 8. 27 (大阪)

②鈴木雅史、水戸部一孝、石川義博、中野裕明、テラヘルツを用いた水トリーのイメージング、電気学会東北支部大会、2007. 8. 21 (郡山)

③Masafumi Suzuki, Atsushi Itoh and Noboru Yoshimura, Three-dimensional equivalent circuit analysis of water tree, ISEIM2008, 2008. 9. 8 (四日市)

④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、DEI-09-19、2009.1.23（秋田）

⑤バトムンク ドウジーバウウー、鈴木雅史、吉村 昇、伊藤 淳、水トリー三次元等価回路シミュレーション、電気学会全国大会、2009.3.17（札幌）

〔図書〕（計 0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0件）

○取得状況（計0件）

〔その他〕

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

鈴木 雅史 (SUZUKI MASAFUMI)

秋田大学・工学資源学部・教授

研究者番号：60226553

### (2)研究分担者

### (3)連携研究者

吉村 昇 (YOSHIMURA NOBORU)

秋田大学・学長

研究者番号：60006674

伊藤 淳 (ITOH ATSUSHI)

福島高専・電気工学科・准教授

研究者番号：70193472