

論 文

損失電流による水トリー検出のシミュレーション

伊藤 淳^{*,1}, 鈴木 雅史^{**}, 鈴木 晴彦^{*}, 吉村 昇^{**}

(2006年4月11日受付, 2006年11月22日受理)

Simulation of Water Tree Detection by Loss Current

Atsushi ITO^{*,1}, Masafumi SUZUKI^{**}, Haruhiko SUZUKI^{*} and Noboru YOSHIMURA^{**}

(Received April 11, 2006; Accepted November 22, 2006)

Degradation of XLPE cable by water trees is still one of the serious factors of the cable accident. Therefore, not only the prevention of water tree but also the detection of water tree at early stage is very important. Until now, a lot of methods which can detect water trees have been studied. In these techniques, the loss current measurement is paid to attention as a method that can detect water trees by nondestructive. Many studies have been carried out including numerical simulations, in order to understand the mechanisms of loss current generation and the relationship between the progress of water tree and the loss current. In the previous studies, the shape of water tree was not considered though the length of water tree had been considered in the simulation of loss current measurements. However, water tree changes its shape by the situation, therefore, in water tree's simulation, it is necessary to consider not only the length of water tree but also its shape. In the present paper, we examined the possibility of the detection of water tree by the loss current measurement while changing the shape and the length of water tree.

1. はじめに

架橋ポリエチレン(XLPE)ケーブルにおける水トリー劣化は、今なおケーブル事故の主要な原因の一つとなっている。ケーブルの絶縁破壊に伴う停電事故は社会的にも大きな問題となることから、水トリーの発生抑制は勿論のこと、既設のケーブルにおいて早期に水トリーの発生を知ることは極めて重要である。このため、直流漏れ電流、誘電特性、残留電荷などに注目した非活線での劣化診断法や直流重畠、活線 $\tan \delta$ 、損失電流などに着目した活線での劣化診断法が研究されている。これらの劣化診断法の中で、損失電流測定法は活線状態で非破壊により水トリー検出の可能性がある手法として注目されている。

キーワード：水トリー、等価回路、シミュレーション、損失電流

* 福島工業高等専門学校電気工学科 (970-8034 いわき市平上荒川字長尾 30)

Fukushima National College of Technology, 30 Nagao Kamiarakawa Taira, Iwaki, 970-8034, Japan

** 秋田大学工学資源学部電気電子工学科 (010-8502 秋田市手形学園町 1-1)

Engineering and Resource Science, Akita University 1-1 Tegata Gakuenmachi, Akita 010-8502, Japan

¹ atsuito@fukushima-nct.ac.jp

水トリー発生試料の損失電流を測定した場合、損失電流波形に歪が見られ、このような波形の歪みによる高調波が発生する。特に高調波のうち最大である第3高調波電流と水トリー寸法、交流破壊電圧等との間には相関関係があると言われている。損失電流の歪みは水トリーの非線形な電気伝導特性に起因すると考えられ、このような現象を説明するためシミュレーション手法を含む多くの研究がなされている。例えば、川井らは水トリーの非線形な電圧-電流特性を双曲線関数や多項式によりモデル化し、水トリー発生試料を未劣化部と劣化部の2層からなるマクスウェル-ワグナー型の誘電体とみなして損失電流の解析を試みており、モデルのパラメータを適切に設定すると過去に報告されている損失電流の特徴が再現できることを明らかにしている^{1)~4)}。

しかしながら、水トリーはその発生箇所や発生条件によりその形状を様々に変える。従って、筆者らは水トリーの伸びと損失電流の関係のみを議論するのではなく、その形状の違いまでも考慮したシミュレーションが必要であると考え等価回路モデルを用いた研究を行い、水トリーの伸びが同じであってもその形状が異なると観察される損失電流波形に違いがある可能性を見出した⁵⁾。

そこで、本研究では水トリーの早期発見を目的とし、種々の形状の水トリーの伸展を模擬し、これに実効値や周波数の異なる正弦波交流電圧を印加した場合どのような損失電流が得られるかをシミュレーションし、この結果からより早く水トリーを検知できる条件を明らかにすることを目的とした。

2. 等価回路モデル

本研究においても、先の論文⁵⁾と同様に図1に示すような厚さ1mmのXLPE試料に水トリーが発生した状態を模擬する。詳細は先の論文に詳しく述べられているのでここでは割愛するが、試料の厚さは幅に比べて薄く、電界は縦方向であるため、水トリーを図1のように上部水電極を含む電界に平行な断面に投影した2次元モデルで考えることにする。また、XLPE試料は横方向に60分割、縦方向に30分割されておりそれぞれの境界部分に抵抗R及びコンデンサCの並列回路からなるインピーダンスZを配置する。抵抗R及びコンデンサCの値はXLPE試料の実測データを基に、 $R=1.0\text{T}\Omega$ 、 $C=0.012\text{pF}$ と決定された。

実際のCVケーブルでは、内田ら⁶⁾、熊澤ら⁷⁾の報告にもあるように、形状が円形に近い水トリーや電界方向に細長く伸びた水トリーなどが観察されている。水トリー形状は、その発生起点や電圧印加条件などにより様々に変化すると思われるが、本研究では上記の報告にある形状を参考に、簡単化のためXLPE試料に図2(a)のように円形に水トリーが発生、伸展したモデル、(b)のように横長の楕円形($L1:L2=1:1.5$)に水トリーが発生したモデル、(c)のように

縦長の楕円形($L1:L2=1:0.5$)に水トリーが発生したモデルを考えた。横長の楕円形形状は、水トリーの形状と損失電流の関係を比較するために仮定された。また、仮定したモデル(b)と(c)において楕円の短軸と長軸の比が異なるが、ここでは短軸と長軸の比率による損失電流の違いを検討するのではなく、形状の違いによる損失電流の違いに着目したため、モデル作成の容易な比率を採用した。なお、水トリーの長さはそれぞれのモデルにおいて電極間長に対して20%、40%、60%、80%まで伸展したモデルを考えた。ここで、水トリー内に含まれるインピーダンスZを新たに電圧依存型抵抗に換え、回路シミュレータ(PSpice)を用いて解析を行った。なお、電圧依存型抵抗の電圧-電流特性は本井らの貫通水トリーの電圧-電流特性の実測値⁸⁾より決定した⁵⁾。

3. 計算結果と検討

前述のように決定された3種類の形状、4種類の伸び(計12種類)の水トリーモデルそれぞれに対して、正弦波交流電圧の周波数を50Hz, 100Hz, 200Hz, 400Hz, 600Hz, 800Hz, 1kHz(7通り)、実効値を1kV, 2kV, 4kV, 6kV, 8kV, 10kV(6通り)と変えた、合計42種類の電圧印加条件で損失電流を求めた。以下に、水トリーの形状ごとにまとめて結果を整理する。

3.1 円形モデル

図3に算出された損失電流の一例として、水トリーが電極間の20%まで伸展した場合に周波数200Hz、実効値1kV, 2kV, 4kV, 6kV, 8kV, 10kVの電圧を印加した場合を示す。図より、この周波数(200Hz)においては、損失電流の値はほぼ印加電圧に比例して増加している事が分かる。また、この図からは損失電流波形の大きな歪みは認められない。損失電流が歪む大きな原因として、第3高調波の存在が指摘されており、この第3高調波の存在を検知することで、水トリーの存在を検知できる可能性がある。

そこで、本研究では得られた損失電流波形をフーリエ変換し、第3高調波の値を基本波で割ることで第3高調波の比率を求

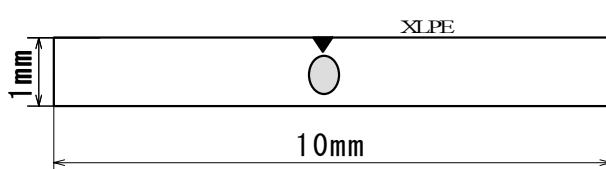
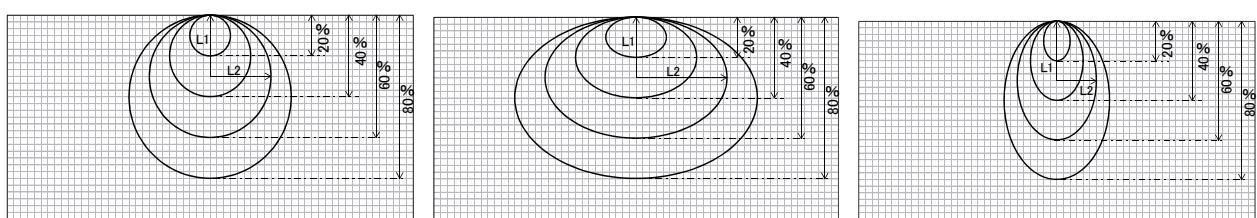


図1 水トリーの概略図

Fig.1 Schematics of water tree.



(a)円形モデル

(b)横長楕円形モデル

(c)縦長楕円形モデル

図2 水トリーモデル

Fig.2 Water tree model.

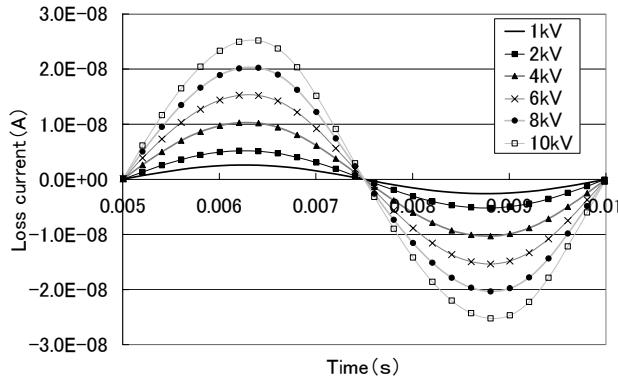
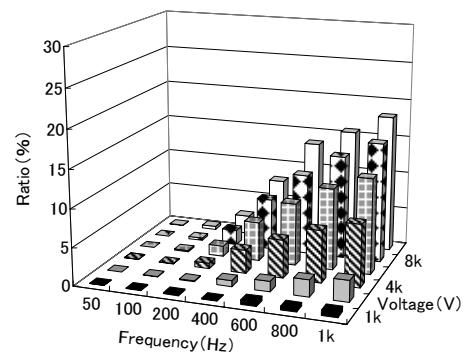


図3 損失電流波形 [200Hz, 20%伸展]

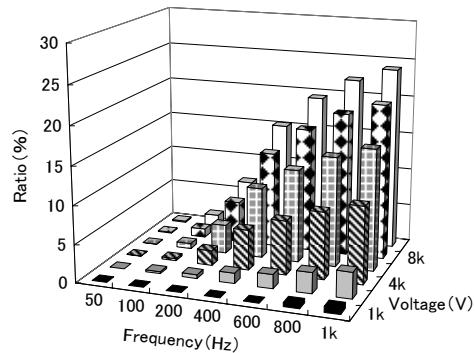
Fig.3 Loss current waveform.

めた。図4(a)～(d)に水トリーが20%～80%まで伸展した際の第3高調波の比率を印加電圧の周波数、実効値をパラメータとして示す。これらの図より、いずれの水トリー伸展割合でも印加電圧が高いほど、また周波数が高いほど第3高調波の割合は大きくなっている。これは水トリーが非線形な電気伝導特性を持っているためで、印加電圧を上げることにより電流が非線形に増加したためである。同様に周波数を上げることにより未劣化のXLPE部分の電圧分担が減り、水トリー劣化部の電圧分担が上昇し、電流が非線形に増加することにより歪みも大きくなる。しかし、同じ伸展割合で比較すると、印加電圧または周波数の増加に対する第3高調波の割合の増加は飽和傾向が見られる。例えば伸展割合が20%の場合において印加電圧を10kVとした場合、周波数が100Hzから600Hzまでは第3高調波の比率が大きく増加しているのに、600Hz以上では増加傾向が鈍化している。同様に印加電圧の周波数を1kHzに固定すると、印加電圧が1kVから6kVまでは第3高調波の比率が急増しているが、それ以上ではやや鈍化の傾向が見られる。

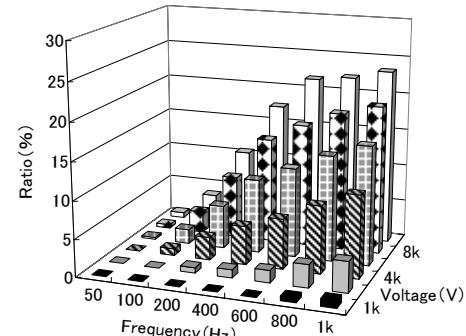
水トリー伸展に対する第3高調波の比率の変化を見ると、いずれの印加電圧条件においても水トリー伸展に伴い比率は増加している。これから水トリーの伸展と第3高調波の比率には関連がある事が確認される。出来るだけ水トリー発生の初期段階でこれを損失電流の歪から検出することを目的とすると、損失電流の測定は出来るだけ高い電圧、周波数で行う事が望ましい。しかし、実用性を考えると出来るだけ印加電圧及び周波数は抑えたい。水トリーの電気特性は様々であるが、今回仮定した水トリーでは200Hz, 6kVあるいは100Hz, 8kV程度の印加電圧で基本波に対する第3高調波の比率が1%を超える、損失電流の歪から水トリー存在の検知の可能性があると考えられる。



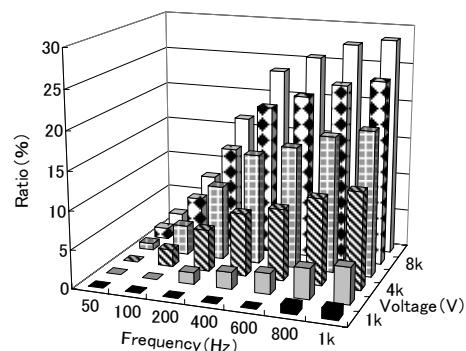
(a) Water tree expanded to 20%



(b) Water tree expanded to 40%



(c) Water tree expanded to 60%



(d) Water tree expanded to 80%

図4 第3高調波の比率

Fig.4 Ratio of third harmonics.

3.2 横長楕円形モデル

図5に算出された損失電流の一例として、水トリーが電極間の20%まで伸展した場合に周波数200Hzの電圧を印加した場合を示す。この条件は図3に示した円形の水トリー モデルに加えた電圧と同じである。図5より、横長の楕円形水トリー モデルでも伸展割合が20%の場合は、損失電流はほぼ印加電圧に比例して増加している事が分かる。また、目視からは大きな波形の歪みは認められない。

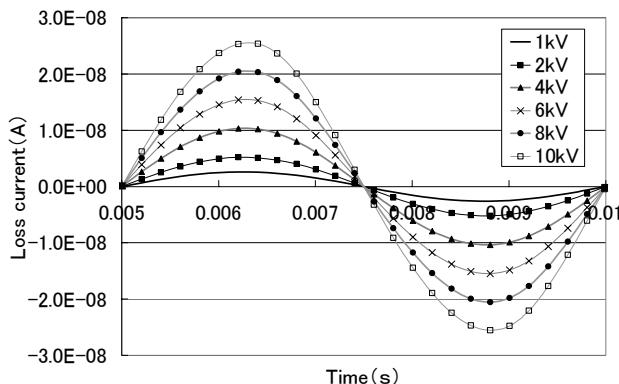
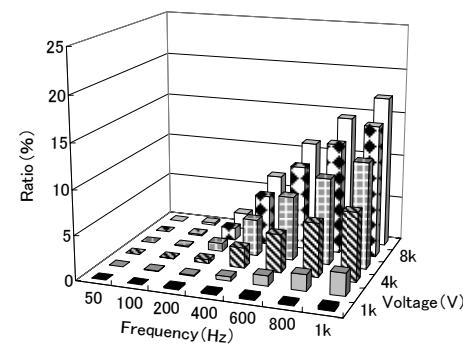


図5 損失電流波形 [200Hz, 20%伸展]

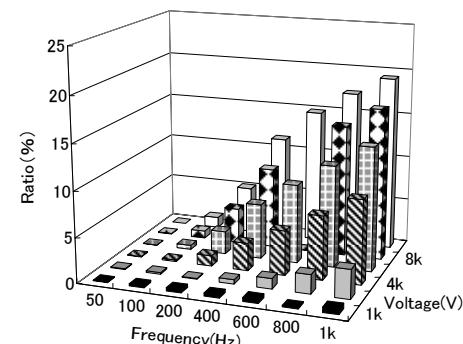
Fig.5 Loss current waveform.

ここでも、円形の水トリー モデルの解析と同様に、損失電流波形をフーリエ変換し、第3高調波の基本波に対する比率を求めた。結果を図6(a)～(d)に示す。水トリー の伸展に対する第3高調波の割合の変化、電圧印加条件の違いによる第3高調波の割合の変化は概ね円形の水トリー モデルの場合と同様で、水トリー が伸びるほど第3高調波の割合は増加し、印加電圧値や周波数が増加するほど第3高調波の割合は増加する。また、図4に示した円形の水トリー モデルの第3高調波の比率と比較すると、例えば200Hz, 6kVの条件において、水トリー が20%伸展した場合は円形モデルで第3高調波の比率が1.40であったものが横長楕円モデルでは0.92、80%伸展したモデルでは円形モデルの場合の9.78%が横長楕円モデルでは7.95%と、同じ水トリー 伸展割合において、横長楕円形水トリー モデルの第3高調波の比率はやや減少している。これは、水トリー が広がったことで水トリー 部分の電圧分担が減少したため、電圧-電流特性の非線形性が減少したためである。これより、同じ水トリー の伸展割合であっても、水トリー が電界に垂直な方向に広がりながら伸展した場合には損失電流波形の歪が少なくなる事が分かる。損失電流の歪から水トリー 存在の有無を検知しようとする際にはこの違いは重要であり、電界に対して垂直方向に広がった水トリー は検出が多少難しくなる可能性がある。

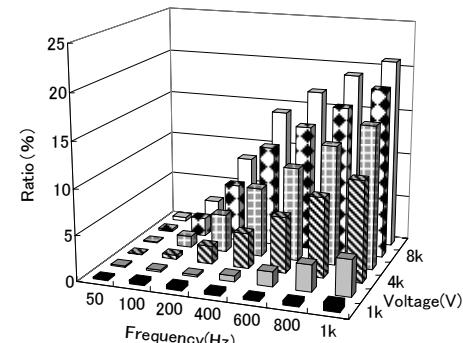
円形モデルの場合と同様に、水トリー の初期段階での検



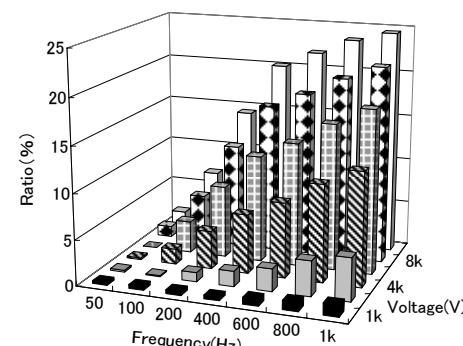
(a) Water tree expanded to 20%



(b) Water tree expanded to 40%



(c) Water tree expanded to 60%



(d) Water tree expanded to 80%

Fig.6 第3高調波の比率
Fig.6 Ratio of third harmonics.

出の可能性を検討するため、伸展割合 20%の場合に注目すると、200Hz, 6kV の電圧を印加して損失電流を測定した場合、第3高調波の比率は円形モデルの場合より 10%ほど低下するが、基本波に対して 0.9%程度はあり、まだ検出の可能性はあると考えられる。

3.3 縦長槽円形モデル

次に、図 2(c)に示した縦長に伸展した水トリー モデルについて同様に損失電流波形の解析を行った。このモデルでは長辺 (L1) と短辺 (L2) の比が 1:0.5 であり、水トリーの面積は円形モデルの 1/2、横長槽円形モデルの 1/3 となる。

算出された損失電流の一例として、これまでと同様に、水トリーが 20%伸展した場合に、200Hz, 1kV から 10kV の電圧を印加して算出した損失電流波形を図 7 に示す。図より損失電流の値は印加電圧にはほぼ比例して増加している。また、図 3 の円形水トリー モデル、図 5 の横長槽円形モデルと比較して、損失電流の大きさにはほとんど変化がない。これから、損失電流の大きさはその発生初期段階では、水トリーの面積の影響はほとんど受けず、伸展割合によってのみ決定されると考えられる。

次に円形および横長槽円形水トリー モデルと同様に損失電流波形における第3高調波の基本波に対する比率を、水トリー伸展割合ごとに図 8 に示す。縦長の槽円形水トリー モデルにおける第3高調波の割合は、先程と同様に 200Hz, 6kV の条件を例に取ると、水トリーが 20%伸展した場合 1.99, 80%伸展した場合 13.17 と他の円形や横長槽円形水トリー モデルのそれより大きく、40%~100%程度大きな値となっている。縦長槽円形モデルでは、水トリー部の面積は他のモデルに比べて小さいが、水トリー部の電圧分担が高い（電界が集中する）ために、電圧-電流特性の非線形性が強く表れた結果であると考えられる。

この結果から、電界方向に鋭く伸展した水トリーでは損失電流の歪が大きく、損失電流波形の歪から水トリーの検

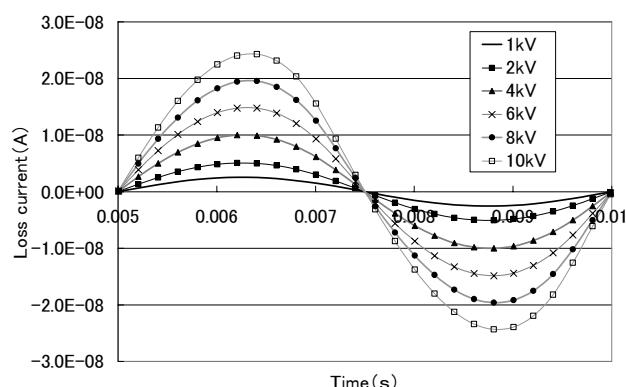
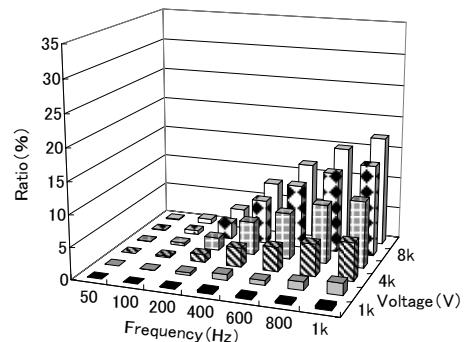
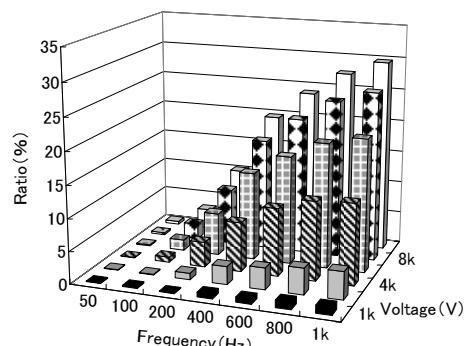


図 7 損失電流波形 [200Hz, 20%伸展]

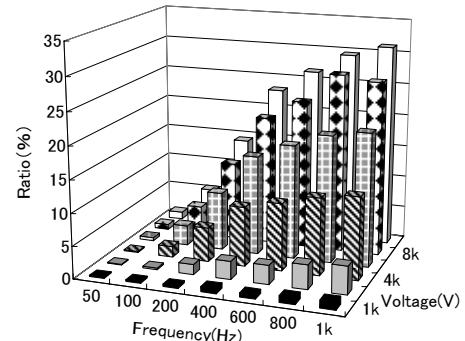
Fig. 7 Loss current waveform.



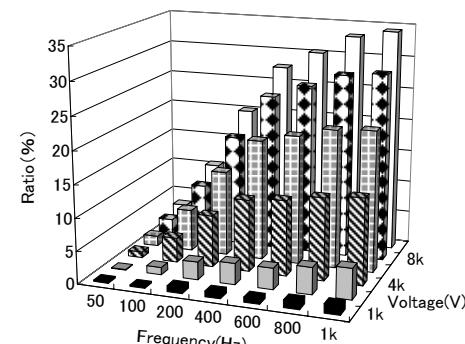
(a) Water tree expanded to 20%



(b) Water tree expanded to 40%



(c) Water tree expanded to 60%



(d) Water tree expanded to 80%

Fig. 8 第3高調波の比率

Fig. 8 Ratio of third harmonics.

出を行う際には感度良く検知できると考えられる。

これらの結果をまとめると、損失電流波形における第3高調波の割合と水トリーの伸びには一定の関係があり、水トリーが進展するにつれて第3高調波の割合が増加する事が分かる。しかし、その変化は水トリーの形状により異なり、電界に垂直な方向に広がった水トリーは電界方向に鋭く伸展した水トリーより損失電流の歪が小さく、水トリーの検出が難しい事が分かる。

また、今回仮定した水トリーモデルでは、いずれも 200Hz, 6kV 程度の電圧を印加して損失電流を測定することで、第3高調波の比率が 1%を超える水トリー発生の比較的初期段階において、水トリー存在の有無が検知できるのではないかと考えられる。

3.4 水トリー形状と損失電流波形

これまで水トリー検出の可能性を探るため、水トリー伸展割合 20% の初期段階について主に議論してきた。このため図3、図5、図7の損失電流波形には目視での大きな歪は確認できない。一方で筆者らは水トリーの伸展割合が同じでも、形状により損失電流の歪みが異なることを報告した⁵⁾。このため、今回仮定したモデルでもこの現象が現れるか確認した。ここでは比較的歪の大きな、水トリー伸展割合が 80%，印加電圧の 10kV，周波数 1kHz の場合について、円形、横長・縦長楕円形の水トリーモデルの損失電流を図9に示す。図より、いずれのモデルにおいても損失電流波形は正弦波のピークがつぶれ、二つのピークが見られるようになっている。しかし、円形の水トリーモデルと横長楕円形モデルを比較すると、横長楕円形モデルの方が後ろのピークが突出している。一方、円形モデルと縦長楕円形モデルの比較では、縦長楕円形モデルの損失電流は前のピークがより突出している事が分かる。このように、今回のシミュレーションからも水トリーの伸展割合が同じでも、その形状が異なると損失電流波形は異なる事が確認された。また、電流値は、横長楕円形モデル > 円形モデル >

縦長楕円形モデルの順に大きくなっている。これは水トリーの面積の関係と同じくなっている。

4. まとめ

本研究では、水トリーの存在をその発生初期に損失電流の歪から検出する可能性について検討するため、形状の異なる3種類の水トリーモデルにおいて等価回路モデルを用いたシミュレーションを行った。また、水トリーの伸びのみならず、その形状により損失電流波形に違いが見られるかを確認した。水トリーの伸びや形状は発生起点や電圧印加条件で様々に変化するため、本研究で得られた結果は全ての水トリー形状に対して適用できるわけではなく、形状を模擬した一部の水トリー形状に対して示されたことである。以下に本研究で得られた成果をまとめる。

- (1) 水トリー発生の初期段階（伸展割合 20%）では、損失電流波形をフーリエ変換した結果、電界方向に細く伸展した水トリーは広く伸展した水トリーに比べ第3高調波の割合が大きい事が分かった。
- (2) 仮に第3高調波の基本波に対する割合が 1%程度となる条件を求めるとき、本研究で用いたモデルでは 200Hz, 6kV 程度の印加電圧が必要と思われる。しかし、前述のように水トリーの形状により第3高調波の割合は異なり、電界方向に細く伸展した水トリーでは、多少低い電圧でも第3高調波の割合は 1%になる。実際のケーブルにおいてどのような条件が最適かは更に検討する必要がある。
- (3) 水トリーが 80%程度進展すると、損失電流波形は、伸展割合が同じでも水トリーが発生している面積（体積）が増加するほど増える。また、水トリーの形状が異なると波形の形状は大きく異なる。

参考文献

- 1) 川井二郎, 品川潤一, 中村修平, 澤五郎 : 電学論 A, 119 (1999), 92
- 2) 川井二郎, 萩島みゆき, 李 英, 品川潤一, 海老沼康光, 中村修平, 澤五郎 : 電学論 A, 120 (2000), 92
- 3) 川井二郎 : 静電気学会誌, 24(2000)245
- 4) 中村修平, 伊東則幸, 川井二郎, 品川潤一, 海老沼康光 : 電学論 A, 120 (2000), 1114
- 5) 鈴木雅史, 伊藤淳, 吉村昇 : 電学論 A, 125(2005)367
- 6) 内田克己, 岡本達希 : 電学論 A, 124(2004)935
- 7) 熊澤孝夫, 堀田昌弘, 杉山真一, 橋詰俊成, 谷恒夫 : 電学論 B, 117(1997)1538
- 8) 本井見二, 弘津研一, 細江勝広, 徳丸亀鶴, 松生哲治 : 電気学会誘電・絶縁材料研究会資料, DEI-95-37(1995)

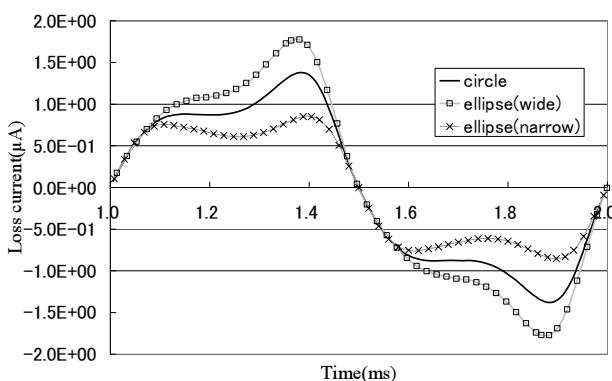


図9 各モデルの損失電流波形

Fig.9 Loss current waveform of each model.