極低温領域における竹－氷複合系の交流絶縁破壊特性に 及ぼす電界方向の影響

志治 雄平^{*,†}, 村本 裕二^{*}, 清水 教之^{*}

Effect of Field Direction on the ac Breakdown Properties of a Bamboo-Ice Composite System at Cryogenic Temperature

Yuhei SHIJI^{*,†}, Yuji MURAMOTO^{*} and Noriyuki SHIMIZU^{*}

Synopsis: We studied the use of bamboo as a material of low environmental impact. Bamboo is widely distributed in warm climates, naturally decomposes and is characterized by the properties of excellent elasticity and ability to absorb water. We believe that a bamboo-ice composite system can be used as a substitute for glass fiber reinforced plastics (GFRP), which do not naturally decompose, in electrical insulation systems that operate at cryogenic temperature. In this paper, we report the effect of field direction on alternating-current (ac) breakdown properties of the bamboo-ice composite system in liquid nitrogen. The ac breakdown properties of the bamboo-ice composite system show strong anisotropy.

Keywords: Bamboo-ice composite system, material of low environmental impact, cryogenic temperature, field direction, ac breakdown

1. はじめに

筆者らは、深刻化する環境問題への対策として、竹材を用いた廃棄時に環境への負荷を低減できる材料（低環境負荷材料）の開発を目指している。竹材の需要は、プラスチック製品の需要増加に伴い、大きく減少してきたが、近年その優れた特性が見直され、様々な分野での利用が検討されている。竹材は繊維の長い植物であり、繊維として取り出すことが容易であることから、竹の繊維を使用したファイバーボードや合板材の開発が進められている。また、竹炭は吸水性に優れ、多孔質であることから吸湿材としての利用、竹のエキスには抗菌成分が含まれることから、抗菌剤としての利用なども検討されている¹⁾。さらに、竹を特徴づける性質のひとつに、その生長速度の速さが上げられる。竹は先端にある生長点の他に、各節ごとに生長点の集合体である生長帯を持っているため、非常に速く生長する。そのため、木材の代替材料として使用することで、森林破壊問題の解決策になり得ると考えられる。

竹材は吸水性に優れる材料であることから、筆者らは含

水させた竹材を凍らせた竹－氷複合系を、極低温領域における電気絶縁に用いられるガラス繊維強化プラスチック (GFRP) の代替材料として使用することを提案してきた^{2)~5)}。近年、プラスチック製品の大量生産・大量消費が問題となっているが、中でも超電導機器などの極低温領域における電気絶縁材料としてよく使用される GFRP は、難分解性物質として問題視されている。氷は極低温領域において優れた電気絶縁特性を示し⁶⁾、環境に優しい材料である。筆者らはこれまでに液体窒素に浸漬した竹－氷複合系の交流絶縁破壊特性に及ぼす含水の影響について報告してきた⁷⁾。竹－氷複合系の交流絶縁破壊の強さは、竹の含水条件によって異なり、含水量の増加とともに増加する。これは、竹中の導管などの高電界下において弱点部となる箇所が、氷によって補強されるためであると考えられる。一方、竹は繊維質な材料であることから、その電気的特性は異方性があると考えられる。本報告では、液体窒素に浸漬した竹－氷複合系の交流絶縁破壊特性に及ぼす電界方向の影響について実験・検討を行った。また、異なる 2 種類の竹材 (マダケ、モウソウチク) の比較についても実験・検討を行ったので、同時に報告する。

2. 試料および実験方法

モウソウチク (*Phyllostachys pubescens*) 及びマダケ (*Phyllostachys bambusoides*) をブロック状 (10 mm×10 mm×1 mm) に切り出し、実験試料とした。本実験では、伐

Received July 10, 2006

* 名城大学

〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口一丁目 501 番地
Meijo University, 1-501, Shiogamaguchi, Tempaku-ku, Nagoya,
Aichi 468-8502, Japan

† E-mail: m0441503@ccmail.meijo-u.ac.jp

採から、半年以上経過した竹を使用した。**Fig. 1** は、試料形状及び切り出し方向を示す。電圧印加方向、すなわち電界がかかる方向は、竹の生長方向に平行な繊維方向、垂直な円周方向と半径方向の3方向とした。また、竹の内側と外側では、細胞の密度が異なるため、半径方向は内側、中間部、外側の3種類に分類した。**Fig. 2** は、試料の光学顕微鏡写真を示す。**Fig. 2** より、竹の内側と外側では、通導組織である維管束の大きさと密度が大きく異なっていることが確認できる。本論文では、電界が繊維方向に平行にかかる試料を A 試料、円周方向に平行にかかる試料を B 試料、半径方向に平行にかかる試料を C 試料と呼び、C 試料では、内側の試料を C₁ 試料、中間部の試料を C₂ 試料、外側の試料を C₃ 試料と呼ぶ。

試料は、あらかじめ含まれている水分を取り除くために、7 日間以上の真空脱気処理 (温度: 18~25℃、真空度: 1~10 Pa) を行った。真空脱気後、試料を水道水に 24 時間浸漬し、含水処理を行った。**Fig. 3** は、マダケの含水量-含水時間特性を示す。含水量は試料重量を基に (1) 式から求めた。

$$\text{含水量}[\%] = \frac{\text{含水後重量} - \text{脱気後重量}}{\text{脱気後重量}} \times 100 \quad \cdots (1)$$

試料重量は電子天秤を用いて測定した。未処理試料の含水量は、マダケ、モウソウチクともに 6~9 %であった。含水開始から、含水量は時間とともに増加し、各試料とも約 12~24 時間で飽和する。本実験では、含水時間を 24 時間とした。マダケとモウソウチクの含水量-含水時間特性は同様の傾向を示した。**Table 1** は、各試料の脱気後比重と飽和時含水量を示す。脱気後比重は C₃ 試料が最も大きく、C₁ 試料が最も小さい。脱気後比重とは反対に、飽和時含水量は C₁ 試料が最も大きく、C₃ 試料が最も小さくなった。前述したように、竹の内側と外側では細胞の密度、特に維管束の密度が異なっていることから、比重及び含水量に差が生じたと考えられる。マダケとモウソウチクを比較すると、脱気後比重はマダケの方が大きくなり、飽和時含水量はモウソウチクの方が大きくなった。

Fig. 4 は、本実験で使用した球-平板電極系を示す。本実験では、電圧印加中の沿面放電を防止するために試料を氷で覆った。氷の作製手順は以下の通りである。所定の処理を行った試料を球-平板電極系を取り付けたホルダーにセットし、ホルダーと試料の間の隙間を水道水で満たし、冷凍庫を用いて -30℃ まで冷却し、試料周囲に氷を作製した。脱気試料についても、同様の方法で氷の作製を行ったが、試料周囲を約 0℃ の冷水で満たし、冷凍庫内温度が 0℃ の状態で冷凍庫内に入れ、冷却を行っていることから、竹中への水の浸入はほとんど行われていない。また、比較のために、同一の作製方法で氷のみの試料の作製も行った。なお、氷単体の電気的特性については、導電率、誘電率、 $\tan \delta$ 、絶縁破壊の強さ等が過去に報告されている^{6), 8)-10)}。しかし、竹-氷複合系では、竹中のイオン

Fig.1 The specimen configuration and direction of cutting.

Fig.2 Microscopic photographs of the specimen (*Phyllostachys bambusoides*).

Table 1 Specific gravity after degassing and water content following the immersion of each specimen

Direction of Cutting	Average value of specific gravity after degassing (g/cc)		Average value of water content after immersion (%)	
	<i>Phyllostachys bambusoides</i>	<i>Phyllostachys pubescens</i>	<i>Phyllostachys bambusoides</i>	<i>Phyllostachys pubescens</i>
A specimen	0.784	0.727	107.51	113.42
B specimen	0.767	0.714	102.15	109.37
C ₁ specimen	0.652	0.622	159.7	155.57
C ₂ specimen	0.762	0.693	118.05	125.55
C ₃ specimen	1.123	1.053	54.33	57.1

が水中に溶け出していることや、竹の主成分であるセルロースとの複合系であるということから、氷単体の電気的特性が、そのまま竹-氷複合系に適用できるとは考えにくい。氷作製後、ホルダー全体を液体窒素に浸漬し、沸騰が収まった後に電圧印加を行った。**Fig. 5** は、実験装置外略図を示す。球電極に周波数 60 Hz、電圧上昇率 100 Vrms/sec の交流ランプ電圧を印加し、対向する平板電極を接地した。絶縁破壊が生じた時点で電圧印加を打ち切った。電圧印加後、試料をホルダーから取り外し、光学顕微鏡を用いて試料表面を観察し、破壊痕の確認を行った。

3. 竹-氷複合系の交流絶縁破壊特性に及ぼす電界方向の影響

Fig.6 は、含水飽和試料の絶縁破壊痕の光学顕微鏡写真を示す。破壊痕の形状は試料によって異なり、A 試料では円形に貫通したのに対して、B 試料、C 試料では繊維に沿って裂けるような形状となった。また、C 試料では、電界方向に対して斜めに絶縁破壊が生じた。これらの結果は、竹の構造、特に導管の位置が深く関与しているために生じたと考えられる。詳細については、次節で述べる。

Fig.7 は、液体窒素温度におけるマダケの交流絶縁破壊に及ぼす電界方向の影響、**Fig.8** は、液体窒素温度におけるモウソウチクの交流絶縁破壊に及ぼす電界方向の影響を示す。図中の数字は試料個数、▲印、●印はそれぞれ脱気試料と含水試料の平均値、×印は最大値、*印は最小値を示し、上下のエラーバーは平均値から上下に標準偏差をとったものである。図中には、比較のために、本研究室で測定した液体窒素と氷の交流絶縁破壊の強さも示してある。交流絶縁破壊の強さは、脱気試料、含水試料の両方において、A 試料が最も低くなった。A 試料の脱気試料では、交流絶縁破壊の強さの最小値が、液体窒素のものと同等の値となった。脱気試料では、C₃ 試料が最も高く、含水試料では B 試料、C₁、C₂、C₃ 試料がほぼ同等の値となった。脱気試料と含水試料を比較すると、ほとんどの試料において、含水試料の方が交流絶縁破壊の強さは高くなったが、マダケの C₃ 試料では、ほぼ同等の値となった。含水試料の交流絶縁破壊の強さは、氷に比べて高くなった。

マダケとモウソウチクを比較すると、脱気試料、含水試料ともに、A 試料においてモウソウチクのばらつきが大きくなった。また、モウソウチクでは、A 試料において、脱気試料と含水試料の最小値が同様の値となった。B 試料、C 試料では、マダケとモウソウチクはほぼ同様の傾向を示したが、C₃ 試料の脱気試料においてマダケの方が高い値となった。これらの結果は、マダケとモウソウチクの構造の違いによるものと考えられる。詳細については、次節で述べる。

Fig.3 The water content as a function of immersion time in water (tap water, *Phyllostachys bambusoides*).

Fig.4 Sphere-plate electrode system.

Fig.5 Schematic of the experimental set-up.

4. 検討

Fig.9 は、竹の断面図、**Table 2** は、竹の構成要素を示す。竹は、導管 (Vessel)、篩管 (Sieve tube)、維管束鞘 (Bundle sheath) を含む維管束 (Bundle)、柔細胞 (Parenchymatous cell) から構成されている。中でも、導管は水の通り道であり、原形質の消失した死細胞であることから、細胞内は空洞となっており、高電界下では弱点部になると考えられる。

Fig.10 は、各方向の絶縁破壊経路モデルを示す。A 試料では、弱点部となる導管が、電界方向と平行に伸びていることから、絶縁破壊が生じやすく、交流絶縁破壊の強さが最も低くなったと考えられる。それに対して、B 試料、C 試料では、電界方向に対して導管が垂直に伸びており、絶縁破壊は複数の導管を巻き込んで生じていると考えられる。導管が電界方向に対して、垂直に伸びているため、絶縁破壊が電界方向以外の方向にも進み、繊維に沿って裂けたような形状になったと考えられる。また、B 試料では、

Fig.6 Microscopic photographs of the breakdown path in the specimen of saturated water content.

Fig.7 The effect of field direction on ac breakdown strength in *Phyllostachys bambusoides* at liquid nitrogen temperature (77 K).

Fig.8 The effect of field direction on ac breakdown strength in *Phyllostachys pubescens* at liquid nitrogen temperature (77 K).

電界方向に対して導管が一直線に位置しているのに対して、C 試料では、導管がランダムに位置していることから、破壊が斜めに生じると考えられる。

A 試料の脱気試料では、交流絶縁破壊の強さの最小値が、液体窒素のものと同等の値となった。試料を液体窒素に浸漬した場合、脱気試料では、導管などの空隙が液体窒素で満たされていると考えられることから、導管が電界方向と平行に伸びている A 試料では、最小値が液体窒素と同等になったと考えられる。脱気試料において、C₃ 試料の交流絶縁破壊の強さが最も高くなった。Table 1 より、比重について比較すると、C₃ 試料が最も大きいことから、脱気試料においては、比重の違いが交流絶縁破壊の強さに大きな影響を与えることが示唆される。しかし、含水試料では、C₁、C₂、C₃ 試料はほぼ同等の値を示した。Table 1 より、含水量について比較すると、C₁ が最も大きく、C₃ が最も小さくなっていることから、比重の小さい C₁ では、導管などの空隙が氷によって満たされ、補強される効果が大きかったことが考えられる。含水試料の交流絶縁破壊の強さは、氷に比べて高くなった。氷のみの試料では、試料中にボイドやクラックが生じやすいと考えられ、含水試料では、導管などの空隙を氷が満たしている。これらのことから、A 試料の含水試料の交流絶縁破壊の強さが、氷よりも高くなったことは、竹-氷複合系では、氷のみの場合に比べて、クラックやボイドが生じにくいことを示唆している。

A 試料の脱気試料、含水試料の両方において、モウソウチクの交流絶縁破壊の強さは、マダケに比べてばらつきが大きくなった。また、モウソウチクの含水試料の最小値は脱気試料と同等の値となった。この結果は、含水により弱点部が補強されなかった試料が存在することを示しており、絶縁材料の信頼性を考える上で重要となる。C₃ の脱気試料では、モウソウチクよりもマダケの方が大きな値となった。マダケとモウソウチクでは、通導組織である維管束の大きさや密度に差が見られる。Fig. 11 はマダケとモウソウチクの試料表面図を示す。マダケはモウソウチクに比べて、導管を含む維管束の密度が、内側では疎であり、外側では密になっている。また、Table 1 より比重が異なることも確認できる。これらのことから、モウソウチクとマダケの結果の違いは、両者の構造の違いによるものであると考えられ、含水状態も異なっていると考えられる。

以上の結果は、竹-氷複合系の交流絶縁破壊特性は、強い異方性を示し、竹の種類により異なることを示している。

液体窒素温度における GFRP 積層板の交流絶縁破壊の強さは、厚さ 0.5 mm の 45° 方向材において、40~50 kVrms/mm と報告されている¹¹⁾。本実験で測定した竹-氷複合系の交流絶縁破壊の強さは、マダケ、含水試料の繊維方向において 20~25 kVrms/mm、円周方向、半径方向において 30~45 kVrms/mm であった。このことから、円周方

Fig.9 Cross sectional view of bamboo.

Table 2 Components in bamboo.

Component	Characteristic
Vessel	Path of water. Protoplasm in cell are vanished. Dead cell.
Sieve tube	Path of nutrition. Protoplasm exists in cell.
Parenchymatous cell	A lot of water. Chloroplast and starch are included.

Fig.10 Model of the breakdown path of each direction.

Fig.11 Photographs of the surfaces of *Phyllostachys bambusoides* and *Phyllostachys pubescens*.

向、半径方向の交流絶縁破壊の強さは、GFRP 積層板に近い値を有していると言える。さらに、マダケとモウソウチクでは、交流絶縁破壊特性に差異が見られたことから、極低温領域における電気絶縁材料としての竹-氷複合系の実用化には、異方性および竹材によるばらつきの影響を改善する加工が必要であると考えられる。その加工方法の一つとして、本研究室では、竹にパルプ化を行い、竹パルプ-氷複合系として利用することを検討している。詳細については、今後報告を行っていく。

5. まとめ

本研究では極低温領域における竹-氷複合系の交流絶縁破壊に及ぼす電界方向の影響について実験を行った。結果を以下に示す。

- 1) 竹-氷複合系の交流絶縁破壊の強さは電界方向によって異なり、生長方向に平行な繊維方向が最も小さくなった。この結果は、竹-氷複合系の電気絶縁特性は、強い異方性を有することを示している。
- 2) 含水試料の交流絶縁破壊の強さは、脱気試料よりも高くなった。この結果から、含水を行うことで、導管などの空隙が水で満たされ、補強されたと考えられる。また、比重の小さい試料の方が、補強の効果が大きくなった。
- 3) モウソウチクの繊維方向の試料では、マダケに比べて交流絶縁破壊の強さのばらつきが大きくなり、交流絶縁破壊特性が異なった。これらの結果から、竹-氷複合系の交流絶縁破壊の強さは、竹の種類により異なり、その構造に依存することが示唆される。

なお、本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金の補助により行われた。

参 考 文 献

- 1) 清岡高敏：「竹資源」，マネジメント伸社，東京（2001）
- 2) Y. Shiji and N. Shimizu: "Electrical insulating properties of bamboo as a material of low environment load", Proceedings of The 7th ICPADM (03CH37417), **2**, P4-2 (2003) 703-706
- 3) Y. Shiji and N. Shimizu: "Electrical insulating properties of bamboo-ice composite system at low temperature", 2003 IEEE Annual Report of CEIDP (03CH37471), **2A-2** (2003) 48-51
- 4) Y. Shiji, Y. Muramoto, N. Shimizu: "Effect of condition of water absorption on electrical insulating properties of bamboo-ice composite system at cryogenic region", Proceedings of the 2004 IEEE ICSD (04CH37539), **1**, 4P-13 (2004) 470-473
- 5) Y. Shiji, Y. Muramoto and N. Shimizu: "Electrical insulating properties of bamboo and effect of water absorption on them", 2004 IEEE Annual Report CEIDP (04CH37584), **5A-3** (2004) 348-351
- 6) T. Kohno, H. Nakazawa, M. Kosaki and K. Horii: "Electrical breakdown of ice at cryogenic temperatures", IEEE Transactions on

Electrical Insulation, **EI-15** (1980) 27-32

- 7) Y. Shiji, Y. Muramoto and N. Shimizu: "Ac breakdown properties of bamboo-ice composite system at cryogenic region", IEEE Transaction **126-A** (2006) 310-316 (in Japanese)
志治雄平、村本裕二、清水教之：「極低温領域における竹-氷複合系の交流絶縁破壊特性」，電気学会論文誌 A, **126** (2006) 310-316
- 8) N. Maeno: "Electrical conduction of ice", Kagaku, **45** (1975) 296-301 (in Japanese)
前野紀一：「氷の電気伝導」，科学, **45** (1975) 296-301
- 9) N. Shimizu, H. Nakashima, M. Kurono, M. Kosaki, K. Horii: "Dielectric and breakdown properties of ice at temperature around -10°C", IEEE Transaction, **104-A** (1984) 525-530 (in Japanese)
清水教之、中島秀樹、黒野正裕、小崎正光、堀井憲爾：「-10°C付近における氷の誘電特性と絶縁破壊特性」，電気学会論文誌 A, **104** (1984) 525-530
- 10) K. Mathes: "Electrical properties of cryogenic liquids and of ice at cryogenic temperature", 1965 IEEE Annual Report of CEIDP (1965)
- 11) K. Sonoda, Y. Kaneda, S. Kim, K. Yoshino: "Effect of mechanical stress on electrical insulating properties of glass fiber reinforced plastic at cryogenic temperature", IEEE Transaction, **108-A** (1988) 97-102 (in Japanese)
園田克己、金田吉治、金相賢、吉野勝美：「ガラス繊維強化プラスチックの極低温における電気絶縁特性に及ぼす機械的応力の効果」，電気学会論文誌 A, **108** (1988) 97-102

志 治 雄 平

2004 年 3 月名城大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻博士前期課程修了。同年 4 月、同大学院電気電子・情報・材料工学専攻博士後期課程入学。現在に至る。主として極低温領域における電気絶縁材料に関する研究に従事。電気学会会員。

村 本 裕 二

1995 年 3 月豊橋技術科学大学大学院工学研究科博士後期課程修了。豊橋技術科学大学工学部助手、名城大学理工学部講師を経て、2006 年同大学理工学部助教授、現在に至る。主として固体電気絶縁材料の高電界電気特性および部分放電劣化現象に関する研究に従事。電気学会会員。IEEE 会員。博士（工学）。

清 水 教 之

1979 年名古屋大学大学院博士後期課程修了。名古屋大学工学部講師、助教授を経て、99 年名城大学理工学部教授、現在に至る。1981 年～83 年カナダ NRC 客員研究員。電気絶縁材料、超電導電力応用、エネルギー環境材料の研究に従事。低温工学協会、電気学会会員。IEEE Senior 会員。工学博士。