

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：57701

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14727

研究課題名（和文）送電線着雪による大規模停電を着雪体の局所および大域的誘電構造解析から予測する

研究課題名（英文）Numerical Analysis of Local and Global Dielectric Property of Snow for Preventing Large Blackout

研究代表者

屋地 康平 (Yaji, Kohei)

鹿児島工業高等専門学校・電気電子工学科・准教授

研究者番号：80516667

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：人工雪を模擬して、絶縁体中に導電性粒子が浮遊する場合の最大電界、見かけの誘電率を数値計算により求めた。粒子の形状、配置、充填率を変化させた。同一の充填率のもとで、回転楕円体粒子は、球粒子に比べて最大電界が高くなる傾向がある。また、回転楕円体粒子は、粒子の角度が特定の方向を向いた場合に、球粒子に比べて見かけの誘電率が大きくなることもある。

電荷重畳法による電界計算の誤差の挙動を精度保証付き数値計算を用いて検討した。電位係数行列の条件数が小さい場合について、逆行列とLU分解による方法を比較した。条件数が10の2乗のオーダーの場合、電位の相対誤差はいずれも10の-12乗程度であることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

縁体中に導電性粒子が浮遊する場合の最大電界は、粒子の形状、配置、充填率によって影響を受けると考えられており、それらを変化させたときの計算結果は、絶縁数値計算等何らかの手法で確認する必要があった。本研究では、人工雪を模擬して、見かけの誘電率を数値計算により求め、粒子の形状、配置、充填率と電界分布の定性的な関係を明らかにした。

数値電界計算の誤差評価は、この方法の精度向上における課題のひとつである。本研究では、電荷重畳法による簡単な電極配置について、電位の相対誤差は10の-12乗程度であることが分かった。この場合、計算結果への影響は小さいが、条件数が大きくなると、計算結果に影響を及ぼす可能性がある。

研究成果の概要（英文）：The maximum electric field and effective dielectric constant in the presence of conductive particles floating in an insulating material were studied by numerical calculation. Simulating snow, the shape, arrangement, and filling rate of particles were varied. The spheroidal particles tend to have higher maximum electric fields than spherical particles. Depending on the arrangement of the particles, spheroidal particles may have a higher apparent dielectric constant than spherical particles.

The behavior of the error in the Charge Simulation Method were studied using a verified numerical computation. The inverse matrix method and the LU decomposition method when the condition number of the potential coefficient matrix is small were compared. In the case that the condition number is on the order of 10 squared, the relative error of the potentials is found to be about 10 to the -12 power.

研究分野：電気絶縁材料、数値電界計算、高電圧工学

キーワード：雪害 人工雪 誘電率 数値電界計算 誤差評価 がいし フラッシュオーバ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

送電線のがいしに塩分を含む着雪が発達し、比重が高い状態(しまり雪)になると、着雪のインピーダンスが低下し、絶縁破壊(フラッシュオーバー)して大規模停電に陥る可能性のあることが、この10年ほどに国内各所で実施された研究で明らかにされた。雪害の予測精度を本質的に向上するためには、雪の誘電的な特性に基づくリスク評価が必要である。雪の誘電特性は、雪の結晶・粒子の変態・変質が不可避であり、実験の再現性等の観点から、実験的に明らかにすることが難しい特性のひとつである。比重が高い雪(しまり雪)は多くの人工雪と同様、結晶が消失して粒形を帯びている。雪の誘電特性を明らかにするためには、雪粒子の集合体としての雪片をモデル化し、雪片中の局所/大域的な誘電・絶縁特性の数値計算手法の提案が求められている。

2. 研究の目的

雪片中の雪粒子をモデル化し、局所/大域的な誘電・絶縁特性の数値計算手法を開発する。具体的には、雪の粒子間の誘電的相互作用に着目し、人工雪のモデルとして、導電性粒子が絶縁媒質中にランダムに浮遊するモデルを考案し、数値電界計算を行い、各種条件での最大電界と見かけの誘電率を明らかにする。がいしに着雪したときの、電流分布とインピーダンスの変化を明らかにする。数値電界計算としては大規模計算に適しており高速手法のひとつである、電荷重畳法の計算誤算について、精度保証付き数値計算を用いた評価を行う。

3. 研究の方法

本研究では、絶縁媒質中に、雪を模擬した導電性粒子を分散した構造の有限要素法によるモデルを用いて、粒子の形状・サイズ・体積分率・分散状況を変化させたときの、系の最大電界と見かけの誘電率を数値計算で求めた。がいし上の電流分布を変化させたときのインピーダンスの変化を有限要素法により数値的に評価した。数値電界計算としては大規模計算に適しており高速手法のひとつである、電荷重畳法の計算誤算(浮動小数点数形式特有の誤差)について、精度保証付き数値計算を用いた評価を行った。

4. 研究成果

雪片中の最大電界と見かけの誘電率

着雪体の構造を単純化したモデルである球分散系において、有限要素法による数値電界計算を行い、局所的な誘電的作用が大域へと広がっていく様子を調査した。具体的には媒質中に、半径一定の金属球を浮遊させた場合、ならびに半径をランダムに変化させた金属球を浮遊させた場合について、系内の最大電界および体積分率に対する見かけの誘電率を求めた。その結果、系内の最大電界は、球の半径にたいしてバスタブ曲線のようになり最小の最大電界を与える条件の存在が示唆された。系内の見かけの誘電率は、体積分率0.10~0.35の範囲ではおよそ体積分率に対して正比例となる傾向が確認された。球の場合と回転楕円体の場合で比較を行った。球と回転楕円体で充填率が同じ場合は、回転楕円体のほうが球より最大電界が高くなる傾向が認められた。また、見かけの誘電率は、回転楕円体の長軸の向きによって変化し、長軸が背後電場に直交する向きに並べて置いた場合に、最も大きくなった。これらの結果は、Maxwell-Wagnerの有効媒質理論に概ねしたがったものと考えられる。

がいし上の電流分布を変化させたときのインピーダンスの変化

典型的な送電用ポリマーがいしの形状をもつモデルに対し、外被表面に汚損被膜を形成した。汚損被膜にわたって一様な導電率を与えた場合、がいしの円周方向に沿って導電率を変化させた場合、がいしの長さ方向に沿って導電率を変化させた場合について、電流場の数値計算を行い、汚損被膜の最大電流密度、金具間の漏れ抵抗を評価した。導電率が周方向に偏って分布し、ある一方に導電率が高いパスが形成される場合に、最大電流密度・漏れ抵抗ともに大きくなった。反対に、導電率ががいしの長さ方向に分布する場合には、最大電流密度・漏れ抵抗ともに小さくなった。なお、すべてのケースは、がいし表面の単位面積あたりESDD(Equivalent Salt Deposit Density: 等価塩分付着密度)のがいし表面全体での平均値が一定となる条件同士で比較計算したものである。

浮動小数点数形式特有の計算誤差

電荷重畳法の計算誤差が解にもたらす影響について、領域の形状を変化させ、精度保証付き数値計算法を用いて調査した。計算領域の形状が円・楕円など単連結かつ凸の場合、星形など単連結だが凸ではない場合、二重連結の場合について誤差を調べた結果、二重連結の場合に誤差が大きくなりやすい傾向が見られたが、単連結の形状であっても計算条件によっては誤差が大きくなる場合があることが分かった。特異な電極形状または大規模計算では、解に対する誤差の影響が、場合によっては著しく大きくなる可能性があると考えられる。

単一の球と平板からなる電極で、「逆行列を用いた解法」と「LU分解を用いた解法」の2種類

に対し、境界条件に対する解(電位)の誤差評価を行った。その結果、「LU分解を用いた解法」が「逆行列を用いた解法」より誤差が1/3程度小さくなった。また、単一の円柱と平板からなる電極で、円柱内部およびその円周上に、それぞれ仮想電荷、輪郭点を等間隔に配置した理想的な条件で、境界条件に対する解(電位)の誤差を調べ、最良近似問題と同様の考え方で、最大誤差を最小にすることができるかを数値実験により検証した。輪郭点と電荷の距離をパラメータとして誤差の大きさを調べた結果、このパラメータでは最良近似問題と同様の考え方を摘要することは難しいことが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 牧瀬 諒哉, 屋地 康平
2. 発表標題 電荷重畳法における電極上の電位計算の誤差の分布と符号の観察
3. 学会等名 2020年度情報文化学会九州支部大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 祝田 彪磨, 屋地 康平
2. 発表標題 精度保証付き数値計算による数値電界計算の誤差評価
3. 学会等名 2020年度情報文化学会九州支部大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------