

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：51401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K21281

研究課題名(和文)高精度・高速な高電圧感電時の人体内部の電流密度-熱伝導-構造連成解析

研究課題名(英文) Accurate and fast coupled current density-thermal conduction-structure analysis inside the human body during high-voltage electric shock

研究代表者

野村 政宗 (Nomura, Masamune)

秋田工業高等専門学校・創造システム工学科、電気電子情報系・助教

研究者番号：90967259

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ADVENTUREシステムを用いた人体の「静電界」-「熱」-「構造」連成解析手法の開発を行った。並列計算機をADVENTUREに導入することで、ボトルネックであった人体の構造解析の計算時間を大幅に短縮することができた。また、「静電界」-「熱」の数値解析結果から、家庭内で100Vの感電の場合、熱的影響はほとんど得られなかったが、6,600Vの電線によるものでは、人体内部の熱影響に大きな違いが見られた。次に22,000Vの変電所での感電では、感電部から瞬間的に熱が拡散することがわかった。さらに「熱」-「構造」解析では、大幅に収束性が悪化し、計算時間が増加することが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、まず、数値人体モデルの問題点である、辺接触・点接触境界を面接触に修正することで表面境界を抽出したモデルを作成できた。本モデルは、「電磁界」、「音響」、「静磁界」など様々な他の数値解析に関する研究に応用することができる。また、本解析の一旦(例えば「静電界」-「熱」)を示すことで、電気作業員の感電に関する危機意識の教育につながると確信している。さらに、本解析では、数値人体モデルの熱応力解析では静電界・熱よりも大幅に計算時間が悪くなるという新たな課題も見出すことができ、おそらく世界で初めて人体モデルを丸々用いた「静電界」-「熱」-「構造」連成解析の第一次的な近似である数値解析例である。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a coupled "electrostatic field" - "thermal" - "structural" analysis method for human bodies using the ADVENTURE system. The introduction of parallel computers into ADVENTURE has significantly reduced the computation time for structural analysis using numerical human body models, which had been a bottleneck. The numerical analysis of "static electric field" - "thermal" showed that little thermal effect was obtained in the case of 100 V electric shock in the home, but a significant difference in the thermal effect inside the human body was observed for those caused by 6,600 V wires. Next, in the case of an electric shock in a 22,000 V substation, heat was found to diffuse instantaneously from the electrocuted area. Next, the "thermal" - "structural" analysis was found to have significantly worse convergence and increased computation time.

研究分野：計算科学

キーワード：数値人体モデル 感電解析 電気-熱-構造連成解析 並列計算 ADVENTURE 大規模計算

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

低電圧下での帯電体と人体の接触に関する数値解析は 1 つの物理領域のみを扱い、多くの研究例があるが、より人命に関わりのある家庭内、送電線、変電所など高電圧の感電を想定した「電気」-「熱」-「構造」連成解析は人体の複雑な相互作用を考慮しないといけないため、世界的に見て研究例がないのが実状である。

2. 研究の目的

以上の研究背景より、本研究では領域分割法を土台とする並列有限要素法コード、ADVENTURE システムを応用して高電圧下での「電気」-「熱」-「構造」の連成解析を実現する。

3. 研究の方法

(1) 並列計算機環境の構築

まず、感電解析を行うには、約 800 万要素の微小ボクセルで近似された人体モデルを用いる必要がある。電気、熱解析では 1 節点 1 自由度、「構造」解析ではその 6 倍の自由度の問題となり、一台の一般的な計算機で解くことは、メモリ使用量、実用的な時間の観点で不可能である。そこで、本研究では、本研究資金を用いて、並列計算機の導入を行う。

(2) 「電気」-「熱」-「構造」連成解析に関する物理作用の線形数値モデルの構築

本研究では、「電気」-「熱」-「構造」連成解析に関する第一次的近似として、物理作用の線形作用のみを考えた物理モデルの構築を行う。具体的には、静電界解析から得られる電位と電流密度の内積を取ることで内部発熱を計算し、それを非定常熱伝導解析の入力として数値解析を行い、得られた温度分布から熱応力解析を行う手順である。

(3) 人体モデルを ADVENTURE システムに適用

2 で構築した数値モデルをもとに、東京大学が開発・公開しているオープンソース並列有限要素解析プラットフォームである ADVENTURE システムの Adventure-Thermal (熱解析)、Adventure-Solid (構造) を用いて、線型連成解析を実現する (静電界解析の支配方程式は定常熱伝導の支配方程式と同じであるため同じものとして解ける)。また、既存の Adventure-Thermal には、使える要素タイプが四面体要素しかなく、ボクセルで構築される人体モデルには非効率なので、六面体要素の導入を行う。他、境界表面パッチ抽出、ジュール熱を計算する後処理機能の追加を行う。

4. 研究成果

1. 並列計算機環境の構築

大規模計算のため本研究資金で導入し、開発した並列計算機を図 1 に示す。本並列計算機は、CPU : AMD Ryzen 9 7950 16 コア@4.5GHz、メモリ : 64GB 搭載した計算機を 4 台繋げている形で、全部で 64 並列、256GB の大規模並列計算が可能である。実際に、ADVENTURE-Solid による熱応力計算では、ADVENTURE-Thermal と比較して自由度数が 6 倍に増加する。よって簡単なモデル (立方体モデル) を用いた熱応力解析の計算時間について、購入前に数値解析に使用していた 10 並列の単体 PC で 7,500 秒ほど計算時間がかかってしまうが、本並列計算機を使用した MPI 並列計算で最大で 888 秒ほど計算時間を短縮することができ、作業の効率化を図ることができた。図 2 は、構築した並列計算機の並列数ごとの計算時間と高速化 (単並列での計算時間を 1 としたときの何倍か) を比較したものである。本並列計算機を使用することで計算時間は最大で 29 倍の高速化を達成することができた。後に示す感電連成解析も実用的な時間で解くことを可能にした。



図 1 本研究資金で導入した並列計算機

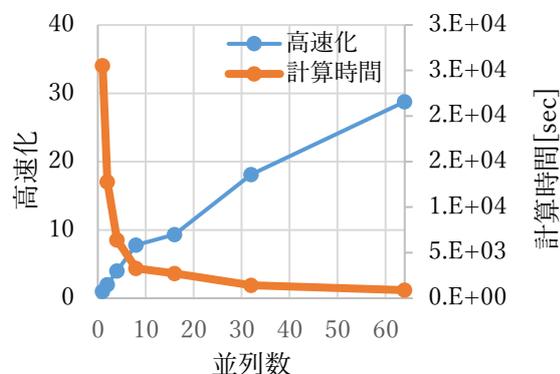


図 2 並列計算機の高速化と計算時間

2. 「電気」-「熱」-「構造」連成解析に関する物理作用の線形数値モデルの構築

まず「電気」-「熱」の連成解析について、本研究では低周波準静電界解析を行い、得られた電流密度からジュール熱を計算し、非定常熱伝導解析を行う。二次元の場合のそれぞれの支配方程式は以下の通りである [1][2]。

$$\sigma \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

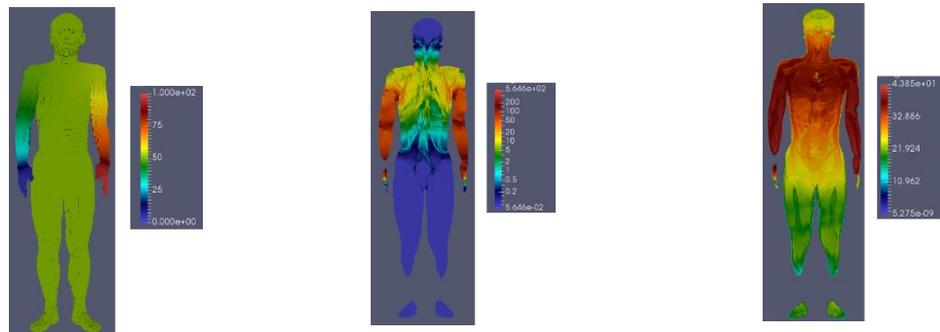
(1)式は準静電界解析、(2)式は非定常熱伝導解析の支配方程式を示している。(1)式について、 V は電圧[V]、 σ は導電率[S/m]を示している。(2)式について、 T は温度[K]、 λ は熱伝導率[W/(m·K)]、 q は単位体積当たりの発熱量[J/m³]、 ρ は密度[kg/m³]、 c は比熱[J/kg·K]を示している。

本研究では、低周波準静電界解析から、電流密度を計算し、電流密度からジュール熱を計算する。ジュール熱は電流密度 J [A/m²]と電界 E [V/m]の内積で求めることができる。よって、(2)式は、

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + J \cdot E = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

と表現できる。本研究では(1)式を静電界解析、(3)式を非定常熱伝導解析とする 2つの支配方程式を軸に有限要素離散化を行う。実際に、人体モデルを用いた静電界→非定常熱伝導解析の可視化結果を図 3、図 4 に示す。尚、境界条件としては静電界解析では両掌に家庭内での感電 100[V]、送電線での感電 6,600[V]、変電所での感電 22,000[V]の電圧を印加し、それで得られたジュール熱を内部発熱として非定常熱伝導解析の入力で用いている。尚、導電率、密度、比熱、熱伝導率に関する物性値の設定については、スイス、チューリッヒの研究機関である IT'IS Foundation[3] が公開している物性値を使用している。

具体的に図 3 は、100[V]での感電時のそれぞれ体内電位・電界強度・電流密度を示している。電位分布の可視化図では、左→右掌の順に 100[V]-0[V]に変化していることが分かる。また、電界強度では、腕の関節や脇などに高い電界強度が得られた。電流密度では最大値は約 4×10^{-2} [mA/mm²]であった。また、6,600[V],22,000[V]感電時も最大値が違うだけで同様な結果が得られた。



体内電位分布 (表面) [V] 電界強度分布 (断面) [V/m] 電流密度分布 (断面) [A/m²]

図 3 静電界解析での可視化結果 (100[V]感電時)

6,600[V]の電圧を印加した時の非定常熱伝導解析の温度分布の可視化結果を図 4 に示す。尚、100[V]感電時は、温度分布に変化がなかったので省略する。1 ステップ 1[sec]、ステップ数は 60 で、初期温度 30°Cとし、20[sec]ごとの非定常熱伝導解析の温度分布の可視化結果を示している。

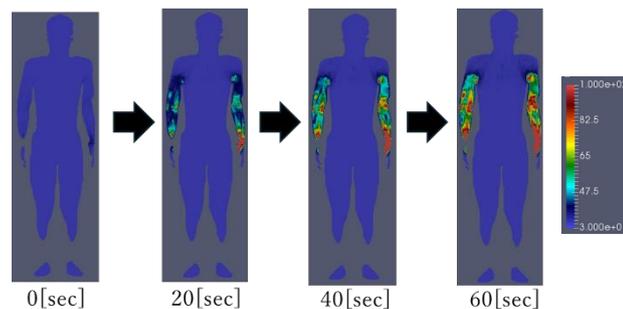


図 4 非定常熱伝導解析[°C]の可視化結果 (6,600[V]感電時)

6,600[V]の感電では、静電界解析でのジュール熱に対する温度変化がみられることが分かり、感電から数秒で100[°C]以上まで上昇する箇所が見られた。また、腕の関節箇所や、脇などの静電界解析で高い電界強度が出ている個所付近で温度分布の上昇割合も大きいことが分かった。

22,000[V]における非定常熱伝導解析結果の可視化結果が図5のとおりである。図4の6,600[V]の感電のもの比べると、時間当たりの温度上昇の割合が大きいことが分かり、感電してから数秒で腕全体が100[°C]以上に温度上昇することが分かった。

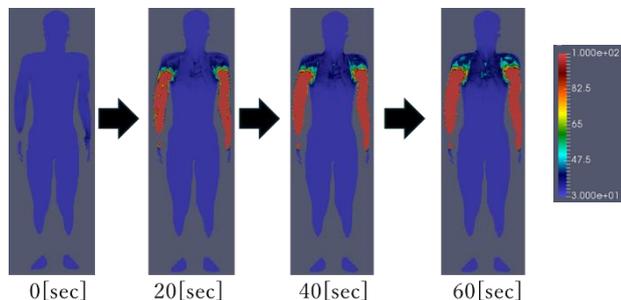


図5 非定常熱伝導解析[°C]の可視化結果(22,000[V]感電時)

次に「熱」-「構造」の部分については、非定常熱伝導解析で得られた温度を入力とする熱応力解析を支配方程式として考える。具体的には、応力-体積力のつり合い式、ひずみ-変位関係式、応力-ひずみ関係式を支配方程式として、熱応力を考慮したものを有限要素離散化する。熱応力の発生過程として、物体における温度変化が不均一、異質材料の場合を想定した。また、熱応力解析に必要な物性値[4][5]である、ヤング率、ポアソン比、熱膨張率については、骨、皮膚、それ以外の要素を皮下脂肪と見てそれぞれ割り当てた。熱応力解析の可視化結果を図6に示す。図6の可視化結果は相当応力(ミーゼス応力)を示しており、6,600[V]感電時の60[sec]における温度分布を入力としたものである。反復回数は約6万回、計算時間は64並列で7771秒ほどかかった。本可視化結果より、主に頭部付近で応力値が高いことが分かる。しかしながら、懸念点としては、示した応力値が実際の温度上昇について予想より小さく、今後適切なかどうか検証が必要である。

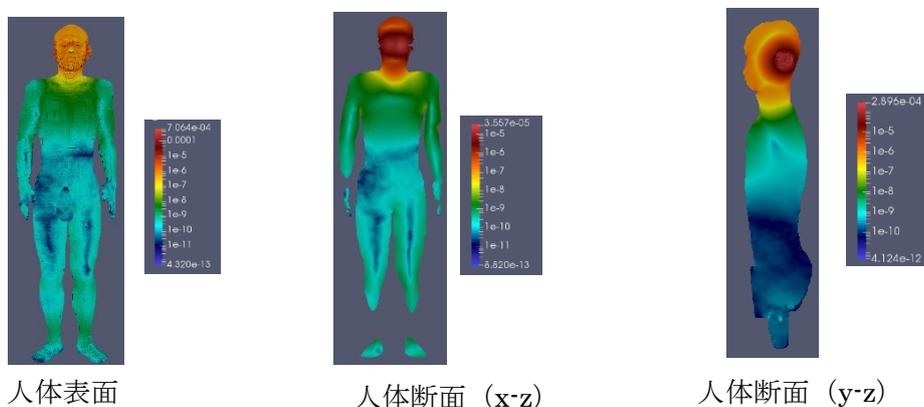


図6 熱応力解析[Pa]の可視化結果(6600[V]感電時 60[sec])

本研究にあたって、当初基盤となる開発コードをUG4としていたが、他の関連する研究者の議論より、比較的規模の大きい問題を解くので領域分割法を用いた並列有限要素法であるADVENTUREシステムを用いる変更を行った。この変更の際して、人体モデル境界表面パッチを付与するmsh2pchというツールにいままで見られなかったエラーが起きた。これは微小ボクセルで構成される人体モデルの皮膚(ボクセル)と空気(ボクセル)の境界において、辺接触、または点接触なる箇所(図7)があり、人体モデルのもつ構造的なバグであるといえる。そこで、本研究では、人体感電連成解析のほかに、この点接触・辺接触の部分を変換するコードの開発もおこなった。構造的に適切な面接触からなる人体モデルを作ることによって、表面境界に境界条件を付けることができ、「静電界」、「構造」以外に「電磁界」、「静磁界」、「音響」など様々な物理シミュレーションに応用できると考えている。

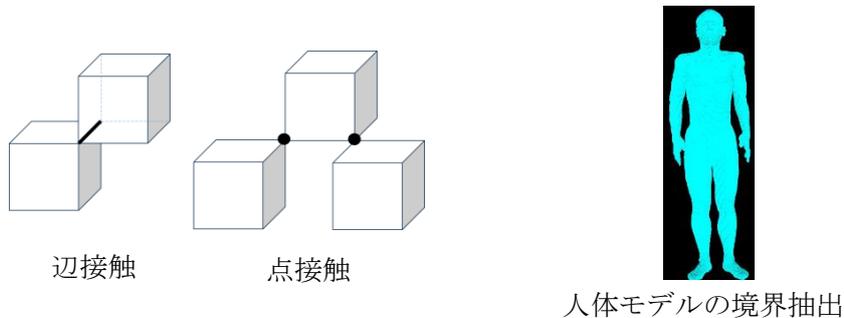


図7 人体モデルにおけるボクセル境界の辺・点接触と境界抽出

本研究では、線型的ではあるが「静電界」-「熱」-「構造」の感電連成解析において人体モデルでの解析を実現した。人体モデル全体の感電連成解析は調べた限りではあるが、おそらく世界初であると考えている。しかしながら、本研究ではまだ課題も多く、例えば、人体の各組織のヤング率、ポアソン比、熱膨張率などの構造的物性値を示した研究例は少なく今回は人体を骨、皮膚、皮下脂肪の近似としたが、より多くの文献を調べて、人体の力学的構造を調べる必要がある。また、実際には熱的变化に対する導電率の変化など非線形性も考慮する必要がある。具体的にどれくらいの値で非線形性を考慮するのかなど実験などを通して調べる必要がある。ほかに、大規模・複雑な人体モデルの熱応力解析は、静電界解析、非定常熱伝導解析と比べて収束性がかなり悪く、並列計算機を用いても、多くの計算時間がかかることが新たに分かり、収束性改善手法も必須である。

このように、本研究から新たな研究につながる多くの課題を発見することができた。より高精度な人体感電解析を実現するため、本研究根にして、構築した並列計算機を用いながら今後継続的に行っていく予定である。

<引用文献>

- [1] 邵長城：「基本からわかる有限要素法」，森北出版雑誌名，2021
- [2] R. E. Dodde, S.F. Miller, J.D. Geiger and A.J. Shih: “Thermal-Electric Finite Element Analysis and Experimental Validation of Bipolar Electrosurgical Cautery”, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol 130, Issue 2, 021015, 2008.
- [3] IT’IS Foundation, URL <https://itis.swiss/who-we-are>, Access 2024/4.
- [4] F. Xu · T. J. Lu · K. A. Seffen : “Bio thermomechanical behavior of skin tissue”, Acta Mechanica Sinica, Vol 24, Issue 1, DOI:10.1007/s10409-007-0128-8,2008.
- [5] Mohd Faizal Bin Ali Akhbar, Ahmad Razlan Yusoff, “Optimization of drilling parameters for thermal bone necrosis prevention”, Vol 26, Issue 1, DOI:10.3233/THC-181221, 2018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 野村政宗、武居周	4. 巻 J107-C
2. 論文標題 高精度と高速性を両立した人体内準静電界解析	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 C	6. 最初と最後の頁 47-57
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14923/transelej.2023JCP5002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 野村政宗 武居周
2. 発表標題 高電圧感電時の人体内部の 電流密度-熱伝導-構造連成解析の 基礎検討
3. 学会等名 第7回 大規模電磁界数値解析手法に関する研究シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 野村政宗 武居周
2. 発表標題 人体における高電圧感電時の電流密度-熱伝導連成解析に関する 基礎検討
3. 学会等名 第36回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Masamune Nomura, Amane Takei
2. 発表標題 Accurate and Fast Electrostatic Analysis Using Mesh Smoothing and Geometric Multi-Grid for Numerical Human Body Model
3. 学会等名 CEFC2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野村政宗 武居周
2. 発表標題 高精度と高速性を両立した人体内静電界解析
3. 学会等名 電気情報通信学会研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野村政宗 武居周
2. 発表標題 高精度と高速性を両立する人体内静電界解析のための研究
3. 学会等名 第6回 大規模電磁界数値解析手法に関する研究シンポジウム
4. 発表年 2023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
研究協力者	武居 周 (Takei Amane)		

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
---------	---------