

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760119

研究課題名(和文)柔軟性を利用した新スマート発電システムの最適構造創成設計法の開発

研究課題名(英文)Optimum design method for a new smart power generation system utilizing its flexibility

研究代表者

山田 崇恭 (Yamada, Takayuki)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：30598222

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、流体デバイスの効率の最大化を目的として、独自に開発したトポロジー最適化法に基づき、マルチフィジクス流体デバイスの最適構造創成設計法の開発を行った。流体場の解析手法として、格子ボルツマン法を用いることで、大規模問題や複雑な流れ場への拡張を可能とした。さらには、ボルツマン方程式に基づいて設計感度を導出する方法を、随伴変数法を用いて構築した。また、構造の非線形解析手法として粒子法を採用し、幾何学的非線形を考慮したトポロジー最適化法を開発した。これらの提案手法をいくつかの流体問題とマルチフィジクス問題に展開し、数値解析例により提案手法の妥当性を示した。

研究成果の概要(英文)：The objective of the research is maximizing energy efficiency in several fluid devices utilizing optimization method. That is, this research proposes an optimum design method for multi physics fluid devices based on our proposed topology optimization method and level set method. In order to easily extend to complex and large scale problems, the Lattice Boltzmann Method is used as a solver for fluid dynamics problem. The design sensitivity for updating the design variable is derived based on the continuum Boltzmann equation and adjoint variable method. The proposed sensitivity analysis is free from complex matrix calculation. In addition, topology optimization method considering geometrical nonlinearity is constructed using a particle method. Several numerical examples for fluid dynamics problem and multi physics problems are provided to confirm the validity and utility of the proposed topology optimization method.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：トポロジー最適化 最適設計 計算力学 随伴変数法 レベルセット法 感度解析 マルチフィジクス解析 設計工学

1. 研究開始当初の背景

構造最適化は、力学的観点と、数学的観点に基づいて構造物の最適な形状を同定する方法である。中でもトポロジー最適化は、構造の形状だけでなく、穴の数などの形状形態をも変更可能とする最も設計自由度の高い構造最適化手法である。現在、機械産業や航空機産業を中心に、産業界に利用されつつあるが、これまでの応用例は、剛性最大化や振動特性を目的とした構造力学の分野に限られている。学术界においては、熱、流体、電磁気など、構造力学分野を超えた新しい物理領域への適用が、海外の研究グループから報告されている。

トポロジー最適化は、幾何学的に極めて複雑な構造や、外形形状を明確に表現できないグレースケール(中間領域)を最適設計解として許容しているため、工業製品への展開には多くの問題を抱えている。さらには、グレースケールに起因して、大変形等の非線形問題において、数値不安定が生じることが知られている。このような問題を解決することを目的として、新しい構造最適化法の開発に関する研究も近年、活発に行われている。このような動向の中、グレースケールの問題を抜本的かつ本質的に解決する方法として、研究代表者の研究グループは、グレースケールを含まない明瞭な形状表現をしながら、最適形状の幾何学的複雑さを設定可能な方法論を世界に先駆けて開発することに成功し、国際的に高い評価を受けている。

他方、自然エネルギーを有効に利用した発電システムへの注目が急速に高まっている。現在、それらの発電システムの高効率化等を目指した基盤技術開発が必要不可欠となっている。それらの多くは、空気や水などの流体の流れを回転運動に変換することによって、電気エネルギーを得るものであるため、流体現象を最適に制御することにより、効率よく電気エネルギーに変換することが可能になる。

2. 研究の目的

本研究では、独自に開発したトポロジー最適化法に基づき、エネルギー効率の最大化を目的として、発電システム等の流体問題を対象とした翼構造の最適構造創成設計法の開発を行う。また、自然エネルギーを対象とする場合は、エネルギー供給が一定ではないため、常に最適な形状は存在せず、時々刻々最適形状が変化していることになる。そこで、単に流体の流れを制御するだけでなく、流体力による幾何学的な変形を利用して、流れの大きさに対して適切な形状へと自動的に変形する構造を創成設計可能な方法論の拡張を行う。すなわち、流れの大きさに対応した最適形状への変更により、高効率化が可能となるが、その変更を流体力そのものによる幾何学的変形を利用する、今までにはない画期的な構造創成設計を目指す。

3. 研究の方法

流体力学の領域と構造力学の領域を同時に考慮可能なレベルセット法に基づくトポロジー最適化の基本的な方法の明確化を行う。すなわち、二つの物理領域についての数値解析結果を反映すべき設計変数の設定法、設計要件の明確化、さらには、その設計要件を満足する新しい多目的問題の定式化を検討する。

次に、前述の最適化問題の定式化に基づき、最適化アルゴリズムを構築する。なお、支配方程式と随伴方程式の解析には有限要素法を用いる。最初に、非連成問題として、簡単なベンチマークテストを行い、流体特性最適化法の検証を行う。

構造力学の領域における非線形効果を利用したトポロジー最適化法との統合化を行う。

4. 研究成果

形状表現方法として、レベルセット法を採用し、レベルセット関数(図1)と呼ばれるスカラー関数の正負により、流体領域と構造領域を識別し、その零等位面によりそれらの境界を表現する。この表現方法を用いて、連成解析が可能な方法論の構築ができた。

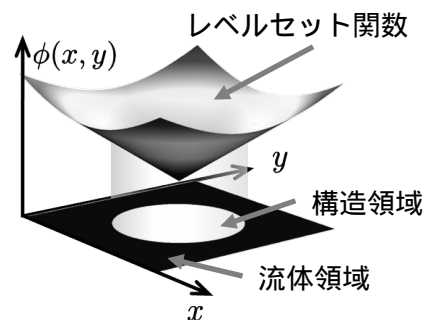


図1 レベルセット法による形状表現

レベルセット関数場は有限要素法を用いて離散化を行うこととした。すなわち、設計領域内を有限要素により分割し、レベルセット関数値は、節点毎に離散化された値として定義される。流体解析用の格子及び、非線形構造解析用に用いる粒子法の粒子配置は、レベルセット関数値に基づいて生成するアルゴリズムの開発に成功した。

次に、設計変数の更新に必要な設計感度を解析的に導出する方法論を開発した。感度解析には、随伴変数法を用いることにより、計算量の大幅な削減を可能とするが、先行研究では、離散化された格子ボルツマン方程式に基づいて方法論を構築していた。この方法の場合、大規模行列演算を必要とするため、設計感度の導出に膨大な計算時間を必要とする問題があることがわかった。そこで、本

研究では、ボルツマン方程式に基づいて最適化問題を定式化し、設計感度を解析的に導出する方法の構築を試みた。ここで、随伴ボルツマン方程式を導入し、その方程式を格子ボルツマン法と同様のアルゴリズムを解くことにより、その方程式の解を求める方法論の構築にも成功した。すなわち、連続系の定式化を用いることで、大規模行列演算を必要としない設計感度の導出に成功した。

数値解析例により、構築した方法論の妥当性の検証を行った。その結果、従来の有限要素法に基づく方法と同様の結果が得られることがわかった。

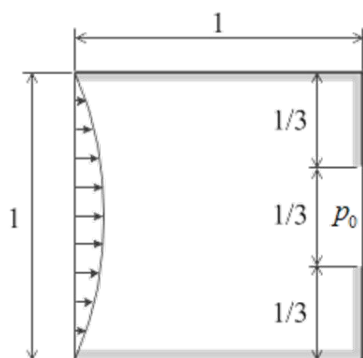


図2 固定設計領域と境界条件

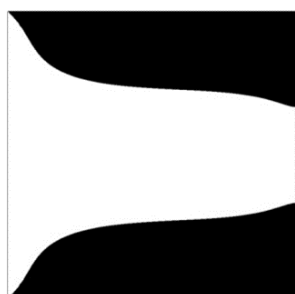


図3 有限要素法を用いた場合の最適構造

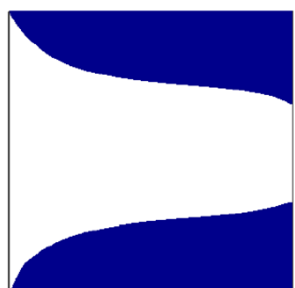


図4 格子ボルツマン法を用いた場合の最適構造

図2にベンチマーク解析モデルの固定設計領域と境界条件を示す。図に示す流路に対

して、体積制約下で圧力損失が最小となる形状を求める。なお、ここでは、定常の非圧縮性流体を対象とする。図3に、有限要素法を用いた場合の結果を示す。図4に、格子ボルツマン法を用いた場合の結果を示す。図に示すように、有限要素法を用いた場合と、格子ボルツマン法を用いた場合の両者は、同様の最適構造が得られていることから、構築した方法論が妥当であることがわかった。この他、マルチフィジクス問題への拡張を行い、物理的に妥当な最適構造が得られることもわかった。

他方、非線形性を考慮したトポロジー最適化手法として、粒子法を用いた方法論の構築を行った。これまでに、幾何学的非線形性を考慮した方法論に関する基本的なアルゴリズムの構築を行っており、そのアルゴリズムを拡張し、材料非線形性を考慮可能な方法論の開発を行った。その結果、最適化過程において、幾何学的接続性が破綻しないように、最適化に関するパラメータを適切に設定する必要があることがわかった。さらには、材料非線形性を考慮した場合においても、適切にトポロジー最適化を行うことが可能であることがわかった。

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3件)

矢地謙太郎, 山田崇蒸, 吉野正人, 松本敏郎, 泉井一浩, 西脇眞二, 格子運動論スキームを用いたレベルセット法に基づくトポロジー最適化, 計算数理工学論文集, 査読有, Vol.13, No.18-131129, (2013), pp.85-90.

<http://gspsun1.gee.kyoto-u.ac.jp/JASC/OME/denshi-journal/13/JA1318.pdf>

矢地謙太郎, 山田崇蒸, 吉野正人, 松本敏郎, 泉井一浩, 西脇眞二, 格子ボルツマン法を用いたレベルセット法に基づくトポロジー最適化, 日本機械学会論文集(C編), 査読有, 79巻, 第802号(2013), pp. 2138-2163. doi:

10.1299/kikaic.79.2152

Yamada, T., Manabe, M., Izui, K., Nishiwaki, S., Topology optimization for geometrically nonlinear problems incorporating level set boundary expressions using a particle method, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 査読有, Vol.7, No.4(2013), pp.630-643. doi: 10.1299/jamdsm.7.630

[学会発表](計18件)

Yaji, K., Yamada, T., Yoshino, M., Matsumoto, T., Izui, K., Nishiwaki, S., Level

set-based topology optimization method for flow channel problem using lattice Boltzmann method, 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2013), 11-14 December 2013, Singapore, Singapore, No.1517

矢地謙太郎, 山田崇恭, 吉野正人, 松本敏郎, 泉井一浩, 西脇眞二, 格子運動論スキームを用いたレベルセット法に基づくトポロジー最適化, 計算数理工学シンポジウム2013, 日本計算数理工学会, 2013年11月29日-30日, 北海道, 日本, No.13-11129.

守田拓朗, 松本敏郎, 山田崇恭, 吉野正人, 高橋徹, 飯盛浩司, Bounce-back境界条件を用いた格子ボルツマン法による流れ場のトポロジー最適化, 第26回計算力学講演会, 日本機械学会, 2013年11月2-4日, 佐賀市, 日本, No. 2206.

矢地謙太郎, 山田崇恭, 吉野正人, 松本敏郎, 泉井一浩, 西脇眞二, Lattice Kineticスキームを用いた最適流路設計におけるレベルセット法に基づくトポロジー最適化, 第26回計算力学講演会, 日本機械学会, 2013年11月2-4日, 佐賀市, 日本, No. 2204.

北川晃祥, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二, 柴田和也, 最小二乗近似に基づく粒子法を用いたトポロジー最適化に関する考察, 第26回計算力学講演会, 日本機械学会, 2013年11月2-4日, 佐賀市, 日本, No. 1902.

矢地謙太郎, 山田崇恭, 吉野正人, 松本敏郎, 泉井一浩, 西脇眞二, 最適流路設計を目的としたレベルセット法に基づくトポロジー最適化, 日本機械学会第23回設計工学・システム部門講演会, 日本機械学会, 2013年10月23日-25日, 読谷村, 日本, No.1114.

久保世志, 矢地謙太郎, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二, 流量制約を考慮した非圧縮粘性流れのレベルセット法に基づくトポロジー最適化, 日本機械学会第23回設計工学・システム部門講演会, 日本機械学会, 2013年10月23日-25日, 読谷村, 日本, No.1113.

矢地謙太郎, 山田崇恭, 吉野正人, 松本敏郎, 泉井一浩, 西脇眞二, 格子ボルツマン法を用いた流路設計問題におけるレベルセット法に基づくトポロジー最適化手法の適用, 日本機械学会年次大会, 日本機械学会, 2013年9月8日-11日, 岡山, 日本, J121024.

矢地謙太郎, 山田崇恭, 吉野正人, 松本敏郎, 泉井一浩, 西脇眞二, 流路設計問題を対象とする格子ボルツマン法を用いたレベルセット法に基づくトポロジー最適化, 第18回計算工学講演会, 日本計算工学会, 2013年6月19日-21日, 東京, 日本, No.E-4-3.

Yaji, K., Yamada, T., Yoshino, M., Matsumoto, T., Izui, K., Nishiwaki, S., Level set-based topology optimization method for viscous flow using Lattice Boltzmann Method, 10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO10), 19-24 May 2013, Florida, USA, No.5171.

Kubo, S., Yaji, K., Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, S., Level set based topology optimization of switching fluidic device for incompressible viscous flow, 10th World Congress on Structural Multidisciplinary Optimization (WCSMO10), 19-24 May 2013, Orland FL, USA, No.5328.

矢地謙太郎, 山田崇恭, 吉野正人, 松本敏郎, 泉井一浩, 西脇眞二, 流体を対象としたトポロジー最適化問題におけるボルツマン方程式に基づく感度解析手法の考察, 日本応用数理学会2013年研究部会連合発表会, 日本応用数理学会, 2013年3月14日-15日, 東京.

Yaji, K., Yamada, T., Kubo, S., Izui, K., Nishiwaki, S., A Topology Optimization Method Under Oseen Flow Based on the Level Set Method, ICOME/JASCOME Symposium 2012, December 12-14, Kyoto, Japan, No.J02.

矢地謙太郎, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二, 非圧縮性流体を対象としたレベルセット法に基づくトポロジー最適化, 日本機械学会第10回最適化シンポジウム, 日本機械学会, 2012年12月6日-7日, 神戸市, 日本, No.1201.

矢地謙太郎, 山田崇恭, 吉野正人, 松本敏郎, 泉井一浩, 西脇眞二, 格子ボルツマン法を用いたレベルセット法に基づく構造最適化における一考察, 日本機械学会第25回計算力学講演会, 日本機械学会, 2012年10月6日-9日, 神戸市, 日本, pp.142-143.

矢地謙太郎, 山田崇恭, 吉野正人, 松本敏郎, 泉井一浩, 西脇眞二, 格子ボルツマン法を用いた構造最適化における一考察, 日本機械学会第22回設計工学・システム部門講演会, 日本機械学会, 2012年9月26日-28日, 東広島市, 日本, pp.480-487.

Yaji, K., Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, S., Topology Optimization Method Using Level Set Boundary Expressions in Navier Stokes Flow, 14th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference (2012MAO), September 17-19, 2012, Indianapolis, Indiana, USA, AIAA2012-5526.

山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二, ポテンシャル問題におけるトポロジー導関数に関する考察, 2012年度日本応用数理学会年会, 日本応用数理学会, 2012年8月28

日-9月2日, 稚内市, 日本, pp.117-118.

〔図書〕(計0件)

該当無し

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

該当無し

取得状況(計0件)

該当無し

〔その他〕

該当無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 崇恭 (YAMADA, Takayuki)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 30598222

(2) 研究分担者

該当無し

(3) 連携研究者

該当無し