

令和 2 年 5 月 25 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13674

研究課題名（和文）革新的レドックスフロー電池の創成に向けたマルチフィデリティ設計法の開発

研究課題名（英文）Development of multi-fidelity method for innovative design of redox flow battery

研究代表者

矢地 謙太郎 (Yaji, Kentaro)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：90779373

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：風力や太陽光といった自然エネルギーを貯蔵するための次世代の蓄電システムとして、レドックスフロー電池(RFB: Redox Flow Battery)が注目を集めている。これに伴い、RFBに関する研究が盛んに行われているものの、実用化には更なる充放電性能の向上が求められている。これに対し本研究では、巨視的かつ数理的な視点からのRFBの高性能化を目指し、電極構造や各種設計パラメータを対象とした最適設計に関する研究を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、RFBの流動場の最適な形態をコンピュータを用いて自動的に創成することを可能とする。これは設計者の勘や経験に依存することなく数学的に求まるため、これまでになかった革新的な流動場を見出す可能性を秘めている。また、得られた流動場は従来のモデルを凌駕する性能を有することが数値計算上明らかになったため、今後のRFBの社会実装に向けた一研究として意義のあるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Redox flow battery (RFB) is a rechargeable battery that has attracted attention as a next-generation energy storage system. It is widely known that achieving high performance in terms of power density is critical for the commercialization of VRFBs. The aim of this study is to develop a computational design approach for generating optimized flow fields.

研究分野：最適設計

キーワード：最適設計 トポロジー最適化 レドックスフロー電池 マルチフィデリティ設計法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球環境保全が叫ばれる現代社会において、風力や太陽光といった自然エネルギーを利用した発電システムの導入は益々加している。一方で、自然エネルギーは天候や環境の影響を受けることから、これらを積極的に利用していくためには、各地域に電力貯蔵システムを自立分散的に配備する必要がある。このような背景のもと、次世代の電力貯蔵システムの有力候補としてレドックスフロー電池(RFB: Redox Flow Battery)が注目を集めている。一般にRFBはバナジウムイオンの電解液を利用した蓄電池であり、電解液を供給するタンク、イオン交換膜、多孔質電極、電解液を流動させるための流路構造から構成される(図1)。

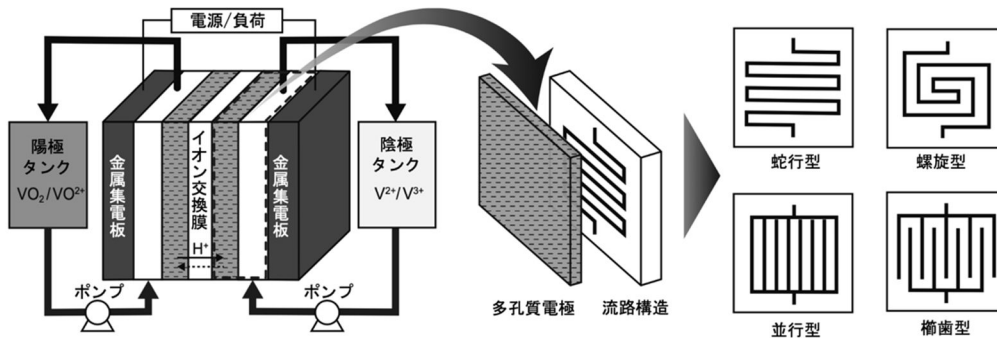


図1: レドックスフロー電池の概略図

RFBは既存の蓄電池と比較して、大規模化が容易、常温で作動するため安全かつメンテナンス性が高い、といった特徴を持つ。一方でRFBを今後本格的に実社会へ普及させていくためには、充放電性能の更なる向上が求められている。

この課題に対し、研究代表者は自身の最近の研究によってRFBの流路形状を対象としたトポロジー最適化法の開発に成功した。トポロジー最適化法とは、設計者の試行錯誤に依存することなく、数値解析により設計対象物の形態(トポロジー)を変更することで最適形状を導き出す数理的最適化手法である。この研究によって多孔質電極を挟んで互いに接続されていない、いわゆる楕歯型の流路が最適解であることを明らかにした。

一方で、RFBの設計では流路形状のみならず、様々な設計パラメータが存在するため、その設計自由度は無敵大といっても過言ではない。RFBの性能は複雑な電気化学反応に支配されているため、設計者の勘や経験で設計パラメータの最適な組み合わせを見出すことは事実上不可能と言える。そのためRFBの高性能化には、性能に強く影響を及ぼす設計パラメータの特定、およびそれらの依存関係を考慮した最適設計が重要となる。その上で、既存のRFBを参照モデルとして、最適解がどの程度の性能を有するかを比較・検証する必要がある。このような高設計自由度の最適設計を実現させるためには、単に対象とする物理モデルをもとにトポロジー最適化問題を定式化するだけでは膨大な計算資源を要すると共に、そもそも解空間が複雑になりすぎることで、解探索を行うことが極めて困難になるという問題に直面する。したがって、扱う物理モデルや最適化の定式化において何らかの近似処理が不可欠であり、これらを試行錯誤だけに頼るのではなく、系統的に行うための枠組みの構築が鍵となる。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究ではRFBの革新的な流路形状の創成に向けて、実際のRFBの最適設計を見据えた近似モデルの提案と、それを用いた新たな最適設計法の枠組みの開発を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、複合領域最適化の一手法であるマルチフィデリティ設計法に基づく枠組みを構築した。マルチフィデリティ設計法の基本的な考え方は、忠実度(フィデリティ)は低い安定して数値計算を行える低フィデリティモデルと、高精度の計算結果が得られる高フィデリティモデルを組み合わせることで、複雑な設計問題を効率的に解くことにある。図2に示すように、本研究ではトポロジー最適化法を用いて多様な設計案を生成した上で、高精度の解析モデルを用いた数値計算を行うことによって、各設計パラメータの充放電性能に対する応答を明らかにする。そして、得られた応答から低フィデリティモデルを最適化の過程で逐次改良していくことで、これまで直接解くことができなかった問題を、間接的に解くことを可能とする。

ここで、本研究はそのままでは本質的に解が求まらない最適化問題を、解けるレベルへ分解することに注目している。一方で従来のマルチフィデリティ設計法は主に計算コストの削減のみに利用されてきたことを踏まえると、これはマルチフィデリティ設計法の新たな可能性を示唆する着想と言える。また、数理的な最適化によってRFBの高性能化を図る従来の研究は、多孔質電極の空隙率といった設計パラメータのみを考慮した最適化に留まっている。これに対し本研

究は、複雑な物理モデルを扱いながらもトポロジー最適化によって RFB の流路構造の形態変更をも考慮した方法論の構築を実現することで、既存の RFB に代わる革新的な設計代替案の創成を図る取り組みであり、これは当該研究分野において非常に特色のある研究と言える。

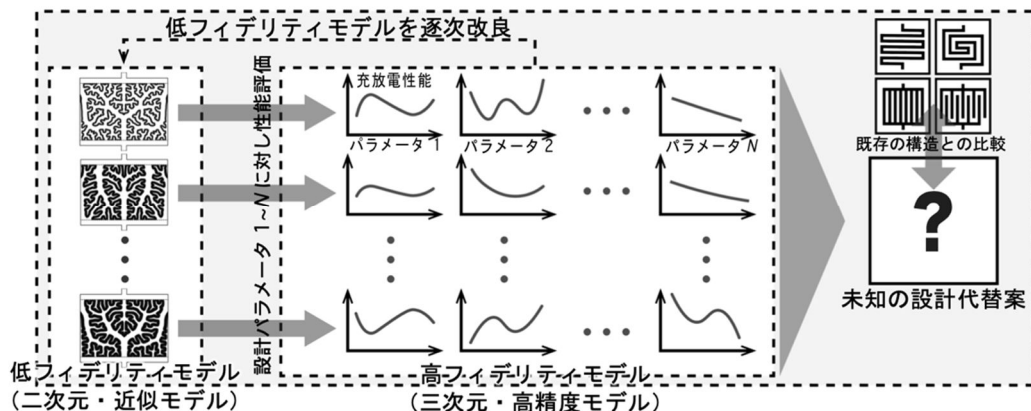


図 2：トポロジー最適化法とマルチフィデリティ設計法による最適設計の枠組み

4. 研究成果

前述の提案手法をもとに、以下の研究成果を得た。

- (1) トポロジー最適化とマルチフィデリティ設計法を統合した基礎的な枠組みを構築した。RFB の最適化問題を扱う前に、まずは非熱流体における圧力損失最小化問題に取り組んだ。具体的には、低フィデリティモデルを低レイノルズ数領域における層流とし、高フィデリティモデルを乱流として枠組みの有効性を検証した。結果として、有望な設計解を系統的に導出できることを明らかにした。
- (2) つづいて、熱流体問題へ展開した。具体的には低フィデリティモデルを低レイノルズ数領域における熱伝達モデルとし、高フィデリティモデルを乱流熱伝達モデルとした。この問題についても系統的に設計解を導出できることを明らかにした。これら(1)と(2)の成果については、マルチフィデリティ設計法とトポロジー最適化を統合した新たな設計方法論として確立し、構造最適化の分野でトップジャーナルとして知られる Structural and Multidisciplinary Optimization に掲載された。
- (3) 熱流体問題で構築したモデルを RFB の最適設計問題へ展開した。具体的には、低フィデリティモデルを二次元の近似化された電気化学反応モデルとし、高フィデリティモデルを三次元の電気化学反応モデルとした。これについても有望な設計解を系統的に導出することに成功した(図 3)。この成果については、設計工学の分野で著名な国際会議として知られる ASME DETC Conference に採択された。なお、高フィデリティモデルについては、現状、低フィデリティモデルと同じ電気化学反応モデルを用いている。複雑で高精度の電気化学反応モデルの実装については今後の課題である。

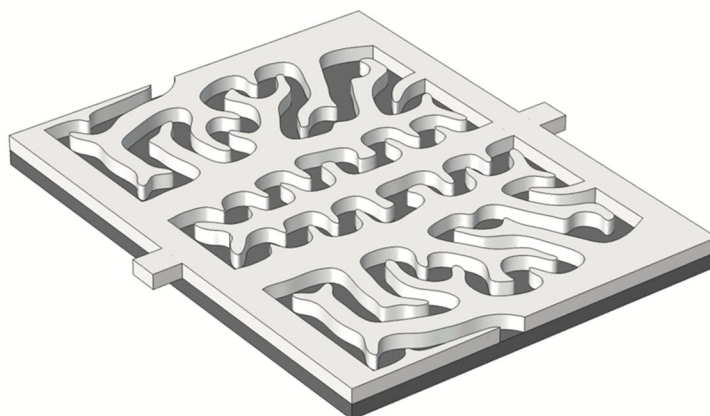


図 3：提案手法によって得られた RFB の流路形状

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3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 Kobayashi Hiroki, Yaji Kentaro, Yamasaki Shintaro, Fujita Kikuo	4. 巻 161
2. 論文標題 Freeform winglet design of fin-and-tube heat exchangers guided by topology optimization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Thermal Engineering	6. 最初と最後の頁 114020 ~ 114020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.applthermaleng.2019.114020	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 -
1. 著者名 Chen Chih-Hsiang, Yaji Kentaro, Yamasaki Shintaro, Tsushima Shohji, Fujita Kikuo	4. 巻 26
2. 論文標題 Computational design of flow fields for vanadium redox flow batteries via topology optimization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Energy Storage	6. 最初と最後の頁 100990 ~ 100990
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.est.2019.100990	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 -
1. 著者名 Yaji Kentaro, Yamasaki Shintaro, Fujita Kikuo	4. 巻 61
2. 論文標題 Multifidelity design guided by topology optimization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Structural and Multidisciplinary Optimization	6. 最初と最後の頁 1071 ~ 1085
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00158-019-02406-4	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 -
1. 著者名 YAJI Kentaro	4. 巻 85
2. 論文標題 Topology Optimization for Beginners	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society for Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 965 ~ 968
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2493/jjspe.85.965	査読の有無 無
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7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Kentaro Yaji, Shintaro Yamasaki, Kikuo Fujita
2. 発表標題 Topology design via physics-based surrogate optimization for complex fluid problems
3. 学会等名 6th European Conference on Computational Mechanics, 7th European Conference on Computational Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kentaro Yaji, Shintaro Yamasaki, Kikuo Fujita
2. 発表標題 Topology design via physics-based surrogate optimization for turbulent heat transfer problem
3. 学会等名 Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kentaro Yaji, Shintaro Yamasaki, Shohji Tsushima, Kikuo Fujita
2. 発表標題 A Framework of Multi-Fidelity Topology Design and its Application to Optimum Design of Flow Fields in Battery Systems
3. 学会等名 ASME Design Engineering Technical Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kentaro Yaji, Shintaro Yamasaki, Shohji Tsushima, Kikuo Fujita
2. 発表標題 A framework of multi-fidelity design guided by topology optimization: application to flow field designs for redox flow batteries
3. 学会等名 Asia Pacific Congress on Computational Mechanics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroki Kobayashi, Kentaro Yaji, Shintaro Yamasaki, Kikuo Fujita
2. 発表標題 Topology optimization of two fluids separated by a wall for heat exchanger design
3. 学会等名 Asia Pacific Congress on Computational Mechanics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kentaro Yaji, Chih-Hsiang Chen, Shintaro Yamasaki, Shohji Tsushima, Kikuo Fujita
2. 発表標題 Freeform design of flow channels in redox flow batteries by topology optimization
3. 学会等名 8th International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢地謙太郎, 山崎慎太郎, 藤田喜久雄
2. 発表標題 流動場設計を目的としたマルチフィデリティポロジー最適化法
3. 学会等名 第24回計算工学講演会
4. 発表年 2019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