

## 障害物配置の最適化による電気自動車用バッテリー冷却流路の設計

古澤 善克<sup>1)</sup> 新谷 国隆<sup>1)</sup> 廣谷 俊輔<sup>1)</sup> 矢地 謙太郎<sup>2)</sup> 須藤 海<sup>1)</sup>

## Design of battery cooling channel for electric vehicles optimizing object distribution

Yoshikatsu Furusawa Kunitaka Shintani Shunsuke Hirotsu Kentaro Yaji Kai Suto

Because of growing interest in electric vehicles, demand for high-performance battery systems is rising. While developing a high-performance battery system requires an efficient battery cooling unit, design optimization of cooling channels is difficult due to the highly non-linear dynamics of fluid flow. Recently, an optimization method that obtains an optimal object distribution has been proposed for designing efficient and manufacturable cooling channels. This study applied the method to the design of a battery cooling plate for electric vehicles, optimizing the diameters of 150 cylinders in the design domain. It was demonstrated that the optimization method can obtain an optimal distribution of cylinder diameters for uniform cooling of a battery module and is applicable to practical design.

**KEY WORDS:** EV and HV systems, Battery technology, Cooling, design optimization (A3)

## 1. 背景

電気自動車需要の高まりに伴い、より高性能なバッテリーシステムが求められている。自動車用バッテリーにおいては、モジュール全体の温度を一定に保つことが性能維持および寿命延長の観点から極めて重要である。特に、セル間の温度差は局所的な劣化を引き起こし、バッテリー全体の容量低下や安全性の低下につながる<sup>(1)(2)</sup>。そのため、各バッテリーセルを均一に冷却することで局所的な劣化を防止することが求められる。

均一な冷却を実現するための冷却プレートの設計では、作成した形状モデルに対して流体解析を行いながら逐次設計変更を行っていくことが一般的である。しかしながら、人の手で作成した流路形状で流体解析を行い、その結果から再び流路形状の手修正に戻るといった従来の設計手順では開発に非常に時間がかかる。そこで、最適化アルゴリズムを設計に用いることで、自動的に最適な冷却流路を設計することが可能となる。そのアルゴリズムとして、空間内の最適な材料配置を求める手法であるトポロジー最適化の流路設計への適用に関する研究が進められている<sup>(3)(4)(5)</sup>。トポロジー最適化は人の手では生成が難しい非常に高性能な流路形状を創出できる可能性を有しているものの、流体の流れは強い非線形性を有していることから、最適な流路形状を得ることは非常に難しい。加えて、トポロジー最適化で得られた形状は一般的に量産が困難な複雑形状となることも実設計への適用時の課題となる。

近年、トポロジー最適化のアルゴリズムを応用することでピンフィンのような障害物の配置を最適化し、性能と製造性

が良い流路形状が得られる可変格子密度最適化と呼ばれる手法が提案されている<sup>(6)(7)</sup>。この手法はバッテリー冷却プレート設計に有用だと考えられるものの、適用できるレイノルズ数が低く( $Re \sim O(10^2)$ )、より産業的に重要な高レイノルズ数の流れに適用することは難しい。そこで本研究では、その手法をより高いレイノルズ数( $Re \geq O(10^3)$ )の流れに適用できるよう拡張することで、障害物配置の最適化によりバッテリー冷却プレートの流路設計を行うことを目的とする。

## 2. 手法

## 2.1. 問題設定

本研究では、設計領域はFig.1に示すように1.0m×1.5mの長方形とし、その中に置かれた150個の円柱のそれぞれの直

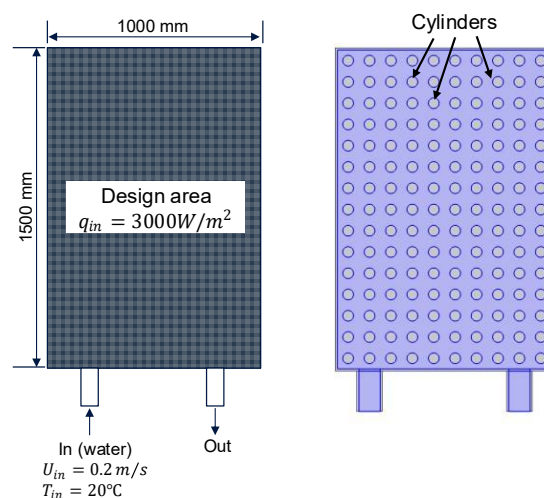


Fig.1 Computational domain and design target.

1) Nature Architects(株) (103-0013 東京都中央区日本橋人形町1-3-8)

2) 大阪大学(565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

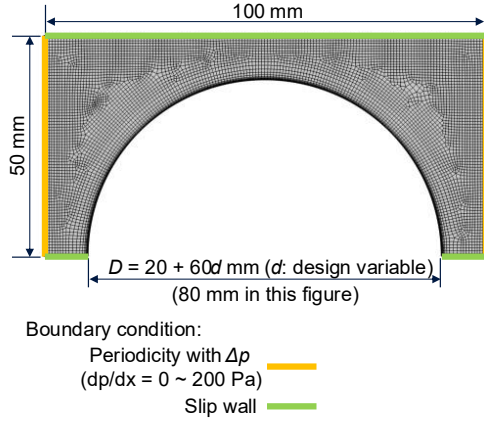


Fig.2 Computational condition for unit cell calculation.

径を最適化する．計算は全て二次元で行う．流入速度は $U_{in} = 0.2 \text{ m/s}$ ，流入温度は $T_{in} = 20^\circ\text{C}$ とし，設計領域の下面からの均一な熱流束 $q_{in} = 3000 \text{ W/m}^2$ を課す．固体部にはアルミニウム，流体部には水の物性を用いる．最適化の目的関数には温度の分散を用い，その最小化を行う．

$$\text{minimize } f(d) = \int_{\Omega_d} (T_{ave} - T)^2 d\Omega / |\Omega_d| \quad (1)$$

ここで $T$ は温度， $T_{ave}$ は設計領域内平均温度， $\Omega_d$ は設計領域を表す．また，設計制約として流体部の比率が設計領域面積の80%以下となるよう制約条件を設定する．

$$\int_{\Omega_d} \phi d\Omega \leq 0.8 |\Omega_d| \quad (2)$$

ここで $\phi$ は空隙率である．

## 2. 問題設定

本研究で用いる可変格子密度最適化では，以下の2段階の

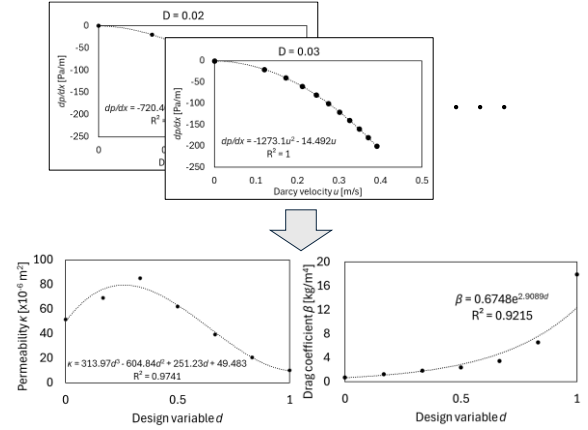


Fig.3 Calculated permeability and drag coefficient.

手順で最適な円柱配置を求める．

1. 周期的な構造の1ユニットを取り出し，物体の寸法および流れの条件を変更しながら流体解析を行い，ユニットセルの多孔体近似モデルを作成する．
2. 手順1で作成した多孔体近似モデルを用いて設計領域内の円柱の直径分布の最適化を行う．

手順1では，Fig.2のような $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ の正方形の中心に円柱が置かれた計算領域の半切モデルを表すユニットセルを作成し，境界条件の圧力差および円柱直径をそれぞれ $0 \sim 200 \text{ Pa}$ および $20 \sim 80 \text{ mm}$ の間で値を振った計算を実施する．この図において円柱直径 $D$ を表す式に含まれる $d$  ( $0 \leq d \leq 1$ )が設計変数であり，手順2では $d$ の空間分布を最適化することで最適な円柱列分布を求める．上記のユニットセル計算の結果から得られた各円柱直径における圧力差に対するDarcy速度のグラフを最小二乗法によりフィッティングし，その式から以下のDarcy-Forchheimerの法則の透過率 $\kappa$ および抵抗係数 $\beta$ を

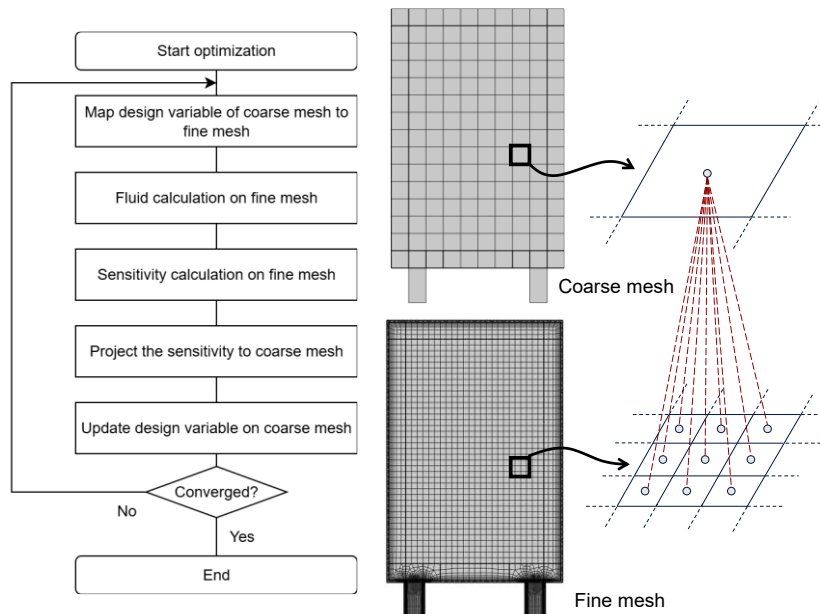


Fig.4 Flowchart of optimization.

算出する。

$$\nabla p = -\frac{\mu}{\kappa} - \rho\beta|\mathbf{u}|\mathbf{u} \quad (3)$$

ここで $p$ は圧力、 $\mu$ は粘性係数、 $\rho$ は密度、 $\mathbf{u}$ は速度ベクトルである。Fig.3 は今回の計算結果から得られた $\kappa$ と $\beta$ のグラフを示している。この時、今回の計算設定では最大透過率で定義するレイノルズ数は $Re_{\max} = \rho|\mathbf{u}|\sqrt{\kappa_{\max}}/\mu = 1782$ である。

手順2では、手順1で得られた $\kappa$ と $\beta$ の値を用いて円柱直径分布の最適化を行う。Fig.4 は手順2のフローチャートおよび最適化に用いるメッシュを示す。この図に示すように、本手法では粗いメッシュと細かいメッシュの2種類のメッシュを用いる。粗いメッシュ上で設計変数が更新され、細かいメッシュ上で流体解析および感度計算が行われる。その際、粗いメッシュの要素内に位置する細かいメッシュの要素に設計変数がマッピングされて計算が行われ、その細かいメッシュの要素で得られた感度を面積加重平均した値が粗いメッシュに射影され、設計変数の更新が行われる。設計変数の更新にはMethod of Moving Asymptotes (MMA)を用いる<sup>(8)</sup>。流体解析では、支配方程式には多孔質内の流れを記述する式である以下のBrinkman–Forchheimerの式を用いる。

$$\frac{\rho}{\phi} \mathbf{u} \cdot \left( \frac{\nabla \mathbf{u}}{\phi} \right) = -\nabla p + \frac{\mu + \mu_t}{\phi} \nabla^2 \mathbf{u} - \frac{\mu}{\kappa} - \rho\beta|\mathbf{u}|\mathbf{u} \quad (4)$$

ここで $\mu_t$ は乱流粘性係数であり、本研究では $k-\varepsilon$ 乱流モデルを用いて計算する。温度に関する支配方程式は以下のように多孔質内の流体の温度の輸送方程式とする。

$$\phi\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \phi \nabla \cdot \mathbf{q} = q_{in} \quad (5)$$

ここで $C_p$ は定圧比熱、 $\mathbf{q}$ は熱流束である。

### 3. 計算結果

ここでは目的関数である温度分散(式(1))を最小化する円柱の直径分布の最適化を行って得られた結果について議論する。また、最適化の妥当性の検証のために、得られた設計解に対して細かいメッシュで流体解析(以下、高忠実度計算と表記)を行った結果とも比較する。

Fig.5 は最適化の収束履歴を示している。この図では初期状態(空間全体で均一に $d = 0.5$ とした)での目的関数値を1として規格化した値を示しており、初期状態から0.1程度まで下がっていることが確認できる。Fig.6 は最適化の100stepにおける設計変数分布とその分布から再構築した円柱列、また最適化計算および高忠実度計算で得られた速さ分布を示す。Fig.6(a),(b)より、設計領域の中央付近と出口付近に直径の大きい円柱がまとまって配置された流路が生成されていることがわかる。Fig.6(c)左の速さ分布を見ると、流入した流れが計算領域全体に行き渡るような流れが形成されていること、また外周に沿って速い流れが形成されていることがわかる。またFig.6(c)右の高忠実度計算の速さ分布を見ると、最適化計算では生じていない入口から出口へ直接向かう速い流れが発生し

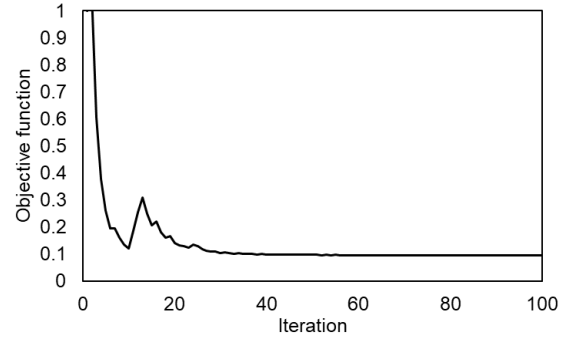


Fig.5 History of objective function.

ているものの、全体的な流れの傾向は最適化計算と近いことが確認できる。Fig.7 は最適化計算と高忠実度計算の温度分布および $x = 0.5 \text{ m}$ ,  $y = 0.5 \text{ m}$ ,  $1.0 \text{ m}$ の位置における温度の比較である。3つのグラフの縦軸は温度を表しているが、それぞれの位置での高忠実度計算結果の最高温度が1、最低温度が0となるように規格化した値である。Fig.7(a)左の最適化での温度分布を見ると、中央付近だけでなく外周にも速い流れを形成することで、局所的な高温部の発生を抑えて全体的に温度が均一となるような分布となっていることがわかる。二つの全体の温度分布を比較すると、高忠実度計算において高速領域が生じていた入口～出口付近、および中央部の温度分布が最適化計算と高忠実度計算でやや差異が生じているものの、全体的には傾向は似ていることがわかる。Fig.7(b)(c)(d)に示す断面の温度の比較からも、最適化計算と高忠実度計算で近い温度分布が得られていることが確認できる。また、この時の両計算の目的関数値は最適化計算では  $29.8 \text{ K}^2$ 、高忠実度計算では

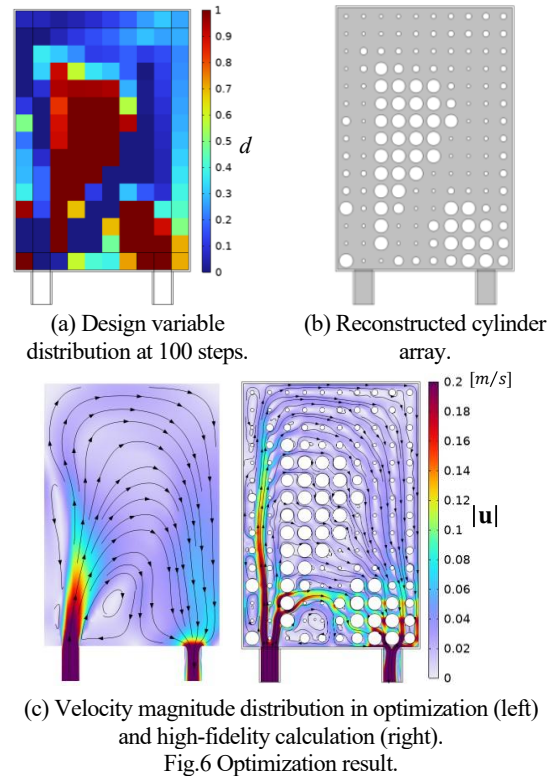
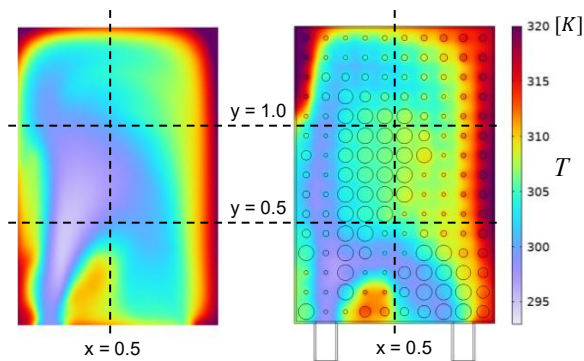
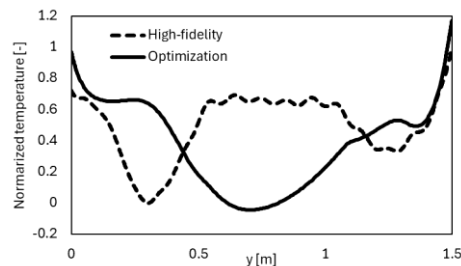


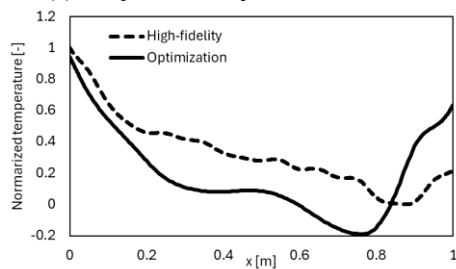
Fig.6 Optimization result.



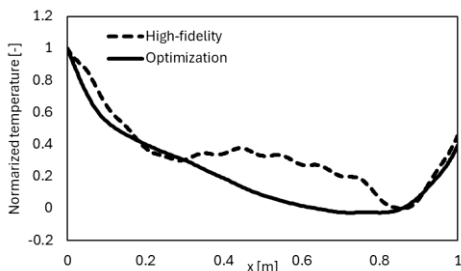
(a) Temperature distribution in optimization (left) and high-fidelity calculation (right).



(b) Temperature comparison at  $x = 0.5$  m.



(c) Temperature comparison at  $y = 0.5$  m.



(d) Temperature comparison at  $y = 1.0$  m.

Fig.7 Temperature distributions and comparisons.

26.2 K<sup>2</sup>であり同等な結果が得られていることから、実用的には十分な精度で最適化が行われていることが確認できた。

#### 4. まとめ

本研究では、性能及び製造性の高い電気自動車用バッテリーモジュール冷却プレートを実現するため、可変格子密度最適化を高レイノルズ数流れに拡張し、実際にバッテリーモジュールの冷却プレートを模擬する流れに適用して流路設計を試みた。設計領域は  $1.0 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$  の長方形とし、その中に置かれた 150 個の円柱の直径分布を最適化することで流路生成を行った。その結果、温度の分散を目的関数としたときにそれを最小化するような円柱列分布を得ることができた。また最

適化計算と高忠実度の流体解析の速さおよび温度分布は概ね近かったことから、最適化計算の妥当性が確認でき、実際の流路設計への適用可能性を示すことができた。

本研究では長方形の設計領域に置かれた円柱列の直径分布を変えることのみで流路を創出したが、将来的にはより実用的な管路状の流路形状と障害物配置の両方の最適化を行うことで、より高性能な冷却プレートを創出することを目指している。

#### 参考文献

- (1) Foo Shen Hwang et al.: Review of battery thermal management systems in electric vehicles, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 192, 114171 (2024)
- (2) Hussein Togun et al.: A comprehensive review of battery thermal management systems for electric vehicles: Enhancing performance, sustainability, and future trends, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 97, No. 6, pp. 1077–1107 (2025)
- (3) 矢地謙太郎: トポロジー最適化の流体問題への展開, *精密工学会誌*, Vol. 86, No. 6, pp. 400–404 (2020)
- (4) 松森 唯益ほか: トポロジー最適化による熱伝達最大化を目的とした熱交換器内部の流路設計, *設計工学・システム部門講演会講演論文集*, Vol. 20, 3103 (2010)
- (5) Ahmad Fawaz et al.: Topology Optimization of Heat Exchangers: A Review, *Energy*, Vol. 252, 124053 (2022)
- (6) Akihiro Takezawa et al.: Optimization of an additively manufactured functionally graded lattice structure with liquid cooling considering structural performances, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 143, 118564 (2019)
- (7) Akihiro Takezawa et al.: Validity of the quasi-2D optimal variable density lattice for effective liquid cooling based on Darcy-Forchheimer theory, *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 55, 102898 (2024)
- (8) Krister Svanberg: The method of moving asymptotes—a new method for structural optimization, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 24, No. 2, pp. 359–373 (1987)