

モデルベース手法による液冷デバイスの流路設計

Flow Path Designing for Liquid Cooling Device by Model-Based Simulation

明戸大介¹⁾, 小野謙二²⁾

Daisuke Aketo and Kenji Ono

1) 九州大学大学院 (〒819-0395 福岡市西区元岡744, E-mail: aketo.daisuke.626@s.kyushu-u.ac.jp)

2) 博(工) 九州大学教授 (〒819-0395 福岡市西区元岡744, E-mail: keno@cc.kyushu-u.ac.jp)

Today liquid cooling systems are adopted increasingly for high heat generating electronic devices. These liquid flow path affects cooling performance, so determining rough flow path in the early development phase can improve the efficiency of downstream processes. In this paper, we report on the model-based system for analysis of thermo-fluid limited phenomena based on CFD results and parametric optimization of flow path using this system.

Key Words: model-based design, graph data, CFD, liquid cooling system, parametric optimization

1. 序論

昨今の工業製品は、電子デバイスやバッテリの高性能化の為に高密度化や消費電力が増大する傾向にある。しかしながら、これらの取り組みは熱の発生量の増加をもたらし、熱の処理方法のマネジメントがますます重要な課題となっている。このような背景から、従来は空冷方式を採用していた装置においても、より効果的な冷却手段として液冷方式の採用が増えている。

液冷方式で冷却する装置を設計する際に、液体の通路設計はその熱処理性能に大きな影響を与えることが知られている。フロントローディング的な設計思想の元、初期段階で大まかな流路を決定することができれば、その後の設計プロセスを効率的に進めることができる。このような熱性能設計を支援するために、現在の工業製品の開発現場ではシミュレーションを積極的に使用している。具体的には、CFD (Computational Fluid Dynamics) などの数値解析手法を活用し、CAD形状データから装置の性能を予測することが一般的である[1,2]。しかしながら、実際の設計初期の段階では厳密な数値解析に使用できるほどの精度の良いCAD形状が存在していないことや、解析リソースが十分に割り当てられない等の理由で、十分に活用できているとは言い難い状況がしばしば発生している。

本講演では製品の熱冷却性能を設計初期の段階で簡易的に推測する[3]ことを目的とし、モデルベース的な発想の元グラフデータ構造上でCFDからサンプリングしたパラメータを与えた解析を実施し、およその熱性能を評価する手法とその適用可能範囲の検証、及び開発した手法を実際に用いて最適設計した事例を述べる。

2. 解析対象

例として電気自動車のリチウムイオンバッテリを液冷する装置（以下、バッテリ冷却プレート）への適用を検討

した。バッテリ冷却プレートは、バッテリに隣接させて設置され、内部を流れる冷媒でバッテリからの発熱を処理する板状の装置である。一般的にアルミ板2枚をプレスして凹凸を作り、張り合わせることで冷媒を流す流路とする製造方法をとることが多い。この装置は、車両全体の冷媒循環サイクルの一部として組み込まれ冷媒を供給されている。形状の特徴として、後述の理由により全体に冷媒が行き渡ることを目的として、迷路状になるよう壁面が備えられている。また、流路の途中にディンプル（窪み）形状を設けることで、上下面の板を接触させ、内圧に耐える構造上の機能と、流れを乱すことで熱交換フィンとしての機能を兼ね備えさせることもある。

リチウムイオンバッテリは高温条件下で負極の被膜形成が促進され、そこにリチウムイオンが捕捉される事で移動量が減少し、寿命が損なわれることが判明している[4]。また、その反応速度はアレニウス則に従うとの報告も存在している[5]。

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (1)$$

ここで、 k は反応速度定数、 A は係数、 E は活性化エネルギー、 R は気体定数、 T は絶対温度である。この式からも、温度が上昇することによって著しく劣化の進行が増加することが分かる。

バッテリ冷却プレートの冷却能力が面で等しくない場合、バッテリを構成するモジュール毎に劣化速度に差が生じ、結果的にバッテリ寿命のばらつきの原因となる。また、短期的な視座においては、最悪の場合構成部材の耐熱性を超過してしまい発火の原因になる。したがって、バッテリ冷却プレートの流路はできるだけ全てのバッテリモジュールを等温に保つ能力を持つ必要がある。また、流量を確保する観点から、低圧力損失な流路も求められている。

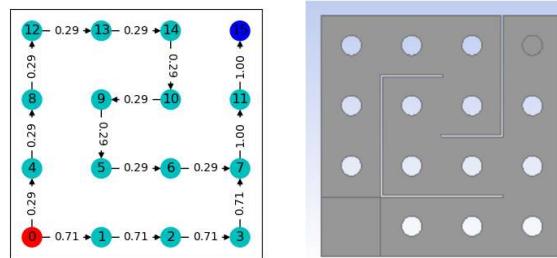


図-1 グラフデータ構造モデルによる表現(左)と相当するCFD解析形状(右)

3. 解析モデルの構築

(1) グラフデータ構造を用いた形状表現

流路形状を簡易的に表現する方法としてグラフ構造の利用を検討した。グラフはノードとエッジで表現されるデータ型である。実形状において繰り返し出現する流路形状を単位要素と見なすと、ノードが各単位要素の事象、エッジが要素間の接続とその接続関係下に存在する事象を表現することが出来る。以下の値をプロパティとしてそれぞれに持たせた。

- ・ノード…圧力、温度、中心位置座標、流入口、流出口
- ・エッジ…流量

また、エッジが流れ方向の情報を持つことから、これは最終的に図-1に示す有向グラフとなる。

グラフデータ構造において、各ノード、エッジ間で次の流体及び熱の現象が成立する。

- ・あるノード*i*に接続する全てのエッジの流量の合計は流入口に相当するノード以外は0であり、流入出口においては流入出量*q*となる。

$$\sum M_{ij} = \begin{cases} 0 & (i \neq \text{inlet/outlet node}) \\ q & (i = \text{inlet/outlet node}) \end{cases} \quad (2)$$

- ・隣接ノード間の圧力差によって流れは駆動している。

$$M_{ij} = \frac{h^3}{12\mu} \frac{dp}{dx} = c_n (P_i - P_j) \quad (3)$$

- ・ノード単位の熱量の増減は示量と示強的両側面で記述できる。

$$C(T_{n_out} - T_{n_in}) = C_{me} M_n T_{n_in} - C_{me} M_n T_{n_out} + q \quad (4)$$

- ・流入温度は隣接ノードの流出温度に等しくなる(複数個所流入している際は流量平均を取る)。

$$M_n T_{n_in} = \sum M_m T_{m_out} \quad (5)$$

ここで、式(2)は流量保存則、式(3)は流れる進路直交方向の長さが十分に長く、かつ層流と見なした際に成立する平行平板間の流量と圧力の式、式(4)はノードにおけるバッテリから入力される熱量を考慮した熱エネルギー保存則、式(5)はエッジ間の熱エネルギー保存則に相当する。また、 c_n, C, C_{me} は係数であり、特に c_n 及び C_{me} は十字路、丁字路等の各流路形状を反映した値であり、次項CFD解析の結果を用いてフィッティングする。以上の連立方程式

を解くことで各値を導出することができる。これらの等式は解析的に値を導出することができる、収束計算を実施する場合と比較して結果の高速な導出が期待できる。

(2) CFDサンプリング

上記係数が流路の特性を反映した値になるようCFDの結果と比較することを目的とし、以下のCFD解析モデルを構築してサンプリングした。

x, y, z それぞれ $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ の中央に $\phi = 10 \text{ mm}$ のディンプルを想定した障害物のある形状を一つの単位構成要素とし、それを 4×4 接続することで一枚のプレートとしている。接続しない箇所には厚さ 1 mm の仕切り板を挿入することで区切る。流入出口は逆流等の現象を避ける為にそれぞれ z 方向に $10, 30 \text{ mm}$ 延長して作成している(図-1)。

上記の接続をランダムに変化させることで 100 のモデルを作成した。ただし、明らかに製品として不適格な、流れがほぼ 0 に近くなることで高温となることが形状から明らかな要素はランダム生成結果から予め取り除いている。

・行き止りの存在する形状(流入口への最短経路と出口への最短経路に同じ要素を含む形状)

・流入出口までの流路が存在しない要素がある形状(一枚のプレートになっていない形状)

本研究のCFD解析は冷媒を流し始めてから十分に時間が経ち発達しきった流れの状態を模擬することを念頭に、定常非圧縮の条件下で商用の汎用CFDソルバを用いて実施した。

サンプリング結果から、それぞれの隣接する要素への流入出量、各要素の圧力平均、質量平均温度を取得した。このCFDの結果と本解析モデルの結果の差異が小さくなるよう最小二乗法によって各種係数をフィッティングした。フィッティング後の係数の値を使用した本モデルの各ノード及びエッジの温度と流量とCFDの結果の比較を図-2に示す。

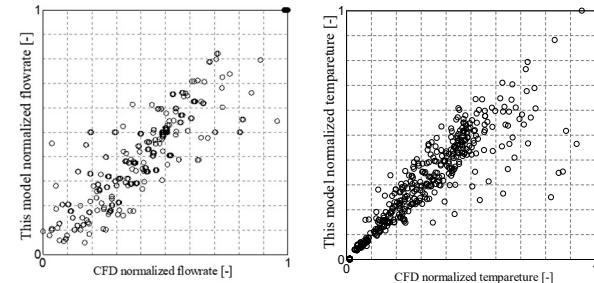


図-2 CFDの結果と係数をフィッティングしたグラフデータ構造モデルによる解析結果の各エッジの流量(左)及び各ノードの温度(右)の比較

4. モデルの検証

本モデルによってCFDと完全に同等の結果が再現できていると仮定すると、 $x=y$ の等式上に全ての値が存在す

るはずである。しかし実際はある程度ばらつきがあることが図-2から分かる。この中でも特に乖離が著しい点の状態を調べると、主に次の二つの要因によって起きていることが判明した。

・CAD形状とグラフによる表現要素の乖離に起因する差異

本モデルでは、流体は各ノードから上下左右それぞれの方向にエッジで接続されたノード間を流れることを想定して構成されている。しかしながら、図-3の中央の4要素に示すようなあるノードとその隣接2ノード、更にその2ノード両方に隣接する元のノード以外のノードで相互にエッジが接続され、グラフ上四角形の最小単位のサイクルが生成されている時、CAD形状を用いてCFDで流れ解析を実施すると、その要素では斜め方向の流れが支配的になることが判明した。実際に、図-3に示す形状において、各基礎形状の接続面における流速ベクトルを測定し、このうち断面に垂直でない方向ベクトル成分の大きさの占める割合を調べると、非サイクル面において平均2割程度であるのに対して、サイクルを構成する面では約6割に達する。この現在のモデルの表現方法では考慮できない流れ方が、今回の差の原因となっていると推測される。

一方で、この斜め方向の流れが発生しているときの実際の製品における熱流体のふるまいを考えると、斜めに流体が流れる際にはその主流の周囲に局所的に流れが遅くなる箇所が発生してしまうことが多い。その場所では冷媒が滞留してしまうことから、結果的に斜めに流れる要素が存在するとき、どこかで局所的に高温になると解釈可能である。図-3においては上から2番目、左から2番目の要素が相当し、この形状には流入口からの全体流入量の内1.7%程度の流量しか流れていない。この流量不足により局所的に高温となることは本製品に求められる性能としてはふさわしくないことから、この四角状に接続された形状の生成をそもそも行わないようにすることによってこの差異は無視することが可能である。

・慣性を考慮していないことに起因する結果の差異

図-4に示すような経路の途中で二股に分かれる形状を考える。この形状において、両流路が合流するまでの流路長は等しく、また流路内で曲がる回数も同じである。本モデルではこれら両流路を等しく評価する為、結果的に分岐先の流量は等しくなる。

一方で、CFDの結果を確認すると、分岐部において下から上へ直進する方の流量が大きくなる傾向が見られる。これは、分岐前の流れが偏ることで速度が上がり、他の場所に較べて局所的に慣性項が支配的な流れになることで直進方向へ強く流れる傾向が生じていると推測される。実際に、この分岐箇所の最大速度はそこまでの流路の最大速度に較べて30%程度増速している。式(3)に示すように、本モデルでは慣性力の影響を考慮していないことから、この差異が生じていると考えられる。

前述のCAD形状との差異が生じさせている現象と異な

り、慣性力が働く状況が起きる形状は、必ずしも性能的に劣っているとは限らない。その為、次項のような形状生成後の最終的な優良形状案として、この現象が発生しうる形状が存在するときは、CFDを追加で解析して数値の確かしさを調べる、等の追加対応が必要である。

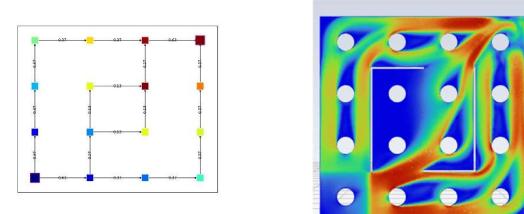


図-3 グラフデータ構造モデルによる縦横方向に限定された流れ(左)と CFD 流れ流速分布上確認できる斜め方向流れ(右)

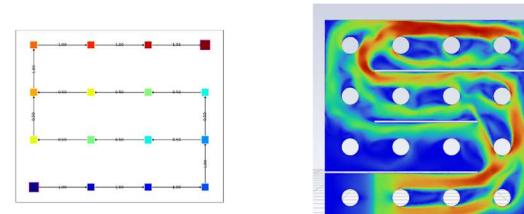


図-4 グラフデータ構造モデル上分岐先で流量差のつかない形状(左)と CFD 流れ流速分布上慣性力により上分岐方向の流量が大きくなる結果(右)

5. 解析モデルを利用した形状の作成

上記グラフデータ解析モデルを使い、圧力損失の最小化と温度均一化を目的関数とした形状の最適化を行うことで製品形状の生成を試みた。ここでは、圧力損失の最小化は流入口と流出口の圧力差を小さくすること、温度均一化は全ノードにおける最大温度と最小温度の差を小さくすることと定義している。

上記二つの目的は完全な両立は難しいことが推測されることから、多目的な最適化を行う必要がある。今回はNSGA-II[6,7]を用いて探査を実施した。ノードの数を 6×6 、設計変数は各エッジの有無60の二水準、流入流出ノードを左端上部及び下部と設定した。また、「本モデルによる解析を実施せずとも、形状要素だけで明らかに分かる性能的に劣った状況でない」ことをグラフデータ構造上の制約条件として与えている。

- A) 行止りは存在しない。 \Leftrightarrow 各ノードに接続するエッジの数(次元)が流入/流出口に相当するノードは1、それ以外は2以上になる。
- B) 流路が寸断されていない。 \Leftrightarrow 全てのノードが流入及び流出ノードへの経路を最低限一つは有している。
- C) 斜めに流れる流路は存在しない。 \Leftrightarrow 四角状のサイクルを形成するエッジは存在しない。
- また、本モデルの適用後の結果から分かる次の条件も制約として取り入れている。
- D) 全てのエッジで流量は0より大きい。

これは、本モデル上ではエッジの流量が0になってしまっても、接続するノードで温度を管理していることから、必ずしも高温になるとは限らない一方で、より空間の解像度が高いCFDにおいてはエッジ相当の流路のどこかで著しく流速が遅いことによって高温になる可能性が高いからである。

以上の条件で1世代の個体群を200、総世代数200として最適化計算を実施した。解析結果を以下に示す。図-5は導出された最適解候補の温度差及び圧力損失をプロットした結果、及びその中から任意に一点選んで可視化した結果である。所謂パレートフロントが導出されていることからも、最適化が適切に実施されていることが分かる。また、このパレート解の内最も温度が均一な結果と低圧損な結果を図-6に示す。温度均一な結果ではなるべく流れを全体に分配して極端な偏りを無くしつつ、出口近傍の流路は流れを集合させることで流量を増やすことで温度のさらなる上昇を防いでいる傾向が見られる。一方で低圧損な結果では入口と出口をなるべく短絡することで圧力の上昇を防いでいる傾向が分かった。この各傾向を製品設計の指針として取り扱うことで、今後より詳細な設計に役立てることができる。

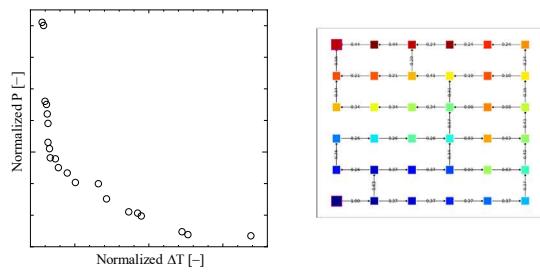


図-5 最適化による形状生成例

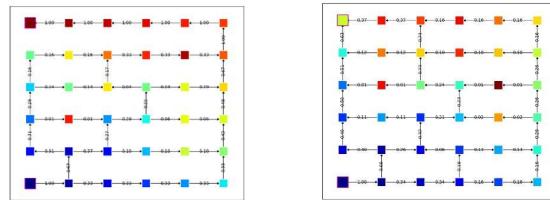


図-6 パレート解上最も温度均一な結果（左）と低圧損な結果（右）

6. 結論

本研究では、自動車用バッテリプレートを対象として流路をモデルベース的手法で性能検討することを目的とし、グラフデータ構造で表現する解析系を構築した。さらに、この解析系がCFDの結果に対して、慣性力が支配的にならないような条件下においては十分近い値を導出でき、性能設計に使用可能であることを示した。ただし、上記解析が外れる条件は製品性能上決して悪い現象とは限らないため、何らかの手段によって補正する必要があることが課題としてあげられる。また、この解析系を利用して最適化計算を行うことで、形状を十分に短い時間で生成評価できることを確認した。

参考文献

- [1] 古川 竜次, 寺田 圭佑, 福里 翔丸, 宗像 瑞恵, 吉川 浩行, 小野 謙二: ドーム型サイクロンセパレータ内燃焼排気流れの数値解析, 日本機械学会九州支部講演論文集, 2021.
- [2] 明戸 大介, 塩澤 博行, 小暮 正幸, 染谷 友和: 空調製品性能開発における形状最適化の適用, 自動車技術会秋季大会学術講演会予稿集, 2018.
- [3] 今山 慎太郎, 申 ライ, 菊地 知希, 前野 亮一, 川本 英貴, 岩本 和也: モデルベース開発と最適化技術の組み合わせによる蒸気タービンの設計最適化, 第32回計算力学講演会講演論文集, 2019.
- [4] Wang, J., et al.: Degradation of lithium ion batteries employing graphite negatives and nickel-cobalt-manganese oxide + spinel manganese oxide positives: Part 1, aging mechanisms and life estimation, *Journal of Power Sources*, Vol. 269, pp.937-948, 2014.
- [5] Broussely, M., et al.: Aging mechanism in Li ion cells and calendar life predictions, *Journal of Power Sources*, Vol. 97-98, pp.13-21, 2001.
- [6] Deb, K., et al.: A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, pp. 182-197, 2002.
- [7] Blank, J. and Deb, K.: pymoo: Multi-Objective Optimization in Python, *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 89497-89509, 2020.