

複雑多孔体の画像ベース有限要素法モデリングと熱流体解析

川合 俊輔

Image-based Finite Element Modelling & Thermo-Hydraulic Analysis in Complex Porous Media

Shunsuke KAWAI

Abstract

In this study, the pressure drop and heat transfer in a heat-transfer tube filled with a sintered porous medium comprising Al fibers were investigated using computational fluid dynamics (CFD) simulations. I reconstructed the sintered fibrous porous structure and generated a computational mesh using X-ray computed tomography data. The calculated pressure drop and heat transfer agreed well with earlier experimental study reported by Enoki et al. [2021]. I also performed CFD simulations with porous structures that have the same porosity but completely different topologies and found that the topological features significantly influenced the thermo-hydraulic performance.

キーワード：アルミニウム，熱交換量，圧力損失量，画像ベース有限要素モデリング，熱流体解析

1. はじめに

近年、マルチマテリアル化や多孔質骨格構造など、特徴的な構造付与によって差別化された材料開発が進んでおり、そのような材料の利用先・デバイスも多岐にわたる。高気孔率や高比表面積などの特徴を有する金属多孔体は衝撃吸収性、吸音性、断熱性、放熱性などの優れた機能を付与することができ、次世代の工業材料として期待されている。発泡金属多孔体や纖維金属焼結多孔体など、連通孔構造を有する金属多孔体は、流体が流れやすく、熱伝導性が高い金属と流体の接触面積が大きく、軽量化にも貢献できるため、熱交換器への適用が期待されている¹⁻⁵⁾。三菱マテリアル（株）（以下、当社と呼称する）では、アルミニウム（Al）纖維焼結体をAl伝熱管内に充填することで、従来にはない高効率の熱回収が可能な伝熱管（以下、Al纖維焼結多孔体パイプと呼称する）を開発した⁶⁾。このAl纖維焼結多孔体パイプは低い圧力損失量と高い熱交換量および熱伝達率を有しており、更なる性能向上を目指すために、圧力損失量の低下や熱伝達率の向上に効く多孔体構造因子の理解が求められている。また、高性能を再現性良く発現するための構造因子を特定しておくことは、大量製造時のより良い品質管理指標の提案にも貢献できる。近年は計算機や分析機器の発展とともに、X線CT解析で取得した画像データを活用して再構成した多孔質構造体の形状モデルを用いた流体シミュレーションに関する研究例が増え始めており⁷⁻⁹⁾、原理原則に基づいた多孔質構造体の最適化へのシミュレーション技術活用が期待されている。

NIMS-三菱マテリアル情報統合型材料開発センターの設立に先立ち、筆者はX線CT解析などの先端計測技術で取得した構造体の画像データを活用した数値解析用形状モデルの作成手法の開発や、材料の変形および機械特性のシミュレーション評価の研究に取り組まれている渡邊育夢先生¹⁰⁻¹²⁾の存在を知り、当社における本技術の有用性の見極めと獲得に向けた共同研究を相談した。そして、2020年6月のセンター設立当初から2022年3月末まで共同研究を実施した。本共同研究では、不規則な多孔質骨格構造を有する材料について、先端計測技術で取得した画像データをシミュレーションに活用し、性能発現の原理理解、性能向上指針の提示につなげることを目標として、材料微視構造形態の三次元画像データから数値解析モデルを作成し、その材料（流体）挙動や巨視的特性を評価するための効率的なアプローチの検討・開発を進めた。具体的には、当社製のAl纖維焼結多孔体パイプについて、画像ベース有限要素モデリングにより、計算モデルを作成し、熱流体シミュレーションを実施し、圧力損失量や熱交換量などを評価する技術を開発した。

2. 画像ベース有限要素モデリング

画像ベース有限要素モデリングでは、下記の手順で三次元構造データ取得と、熱流体シミュレーション用の形状モデルおよび計算メッシュ作成を実施した。実施手順や使用ソフトウェアなどの詳細は著者の最近の論文¹³⁾を参考にされたい。

(1) 当社で保有するYXLON社製X線CT分析装置を用いて、Al纖維焼結多孔体パイプの三次元構造データ

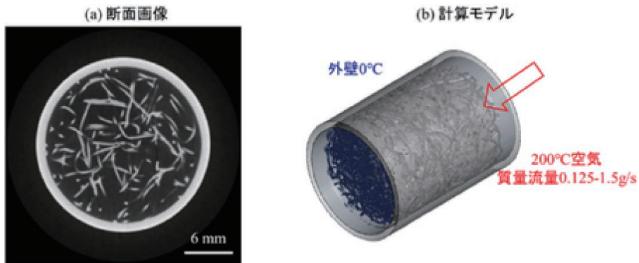


図1 X線CT分析より取得したサンプルの輪切り断面画像データ(a)と作成した計算モデル(b)

(a) Cross-sectional image of the sample obtained using X-ray CT, (b) Generated CFD model of the sample

および輪切り断面画像データを取得する。

- (2) (1)で取得した輪切り断面画像データを、三次元可視化・解析ソフトウェア Avizo で読み込み、本ソフトウェア上で三次元構造の再構築とともに、熱流体シミュレーションで必要となる流体相と固体相の三次元計算メッシュを作成する。
- (3) (2)で取得した三次元計算メッシュを、汎用熱流体解析ソフトウェア Ansys Fluent で読み込み、物性値条件や流入出などの境界条件を設定し、熱流体シミュレーションを実施する。

X線CT分析より取得したサンプルの輪切り断面画像データの一例を図1(a)に、画像データをもとに作成した熱流体シミュレーション用計算モデルおよび熱流体シミュレーション条件を図1(b)に示す。本サンプルは当社イノベーションセンター大宮支所にて作製した纖維長さ約0.3 mm、狙い充填率80 vol%、長さ25 mmのAl纖維焼結多孔体パイプである。

3. 热流体シミュレーション結果

本研究で以降に示す熱流体シミュレーションはパイプおよび纖維の固体相はAlとし、流体相は空気とした。パイプ外壁面の温度を0°Cとし、質量流量を指定した200°Cの空気をAl纖維多孔体パイプ内に流入させた。本シミュレーション条件は、当社製Al纖維多孔体パイプに関する圧力損失量および熱交換量に関する実験の先行研究¹⁻³⁾を参考に選定した。物性値入力条件などの詳細は著者の最近の論文¹³⁾を参考にされたい。

空気の質量流量を変量した際の、圧力損失量および熱交換量のシミュレーション応答結果を図2に示す。圧力損失量の流量および流速に対する応答傾向は、粒子充填多孔体に関する古典的なErgunの式¹⁴⁾や、Forchheimerによって拡張修正された式^{15,16)}を用いた整理により、透過率と形状係数を評価するが多くの先行研究ではなされている。図2(a)に示されるように、シミュレーション結果と先行研究の実験結果とでは、その応答傾向は定性的に一致するが、定量的な一致までは得られなかった。両者では評価対象の多孔体サンプルが厳密には一致して

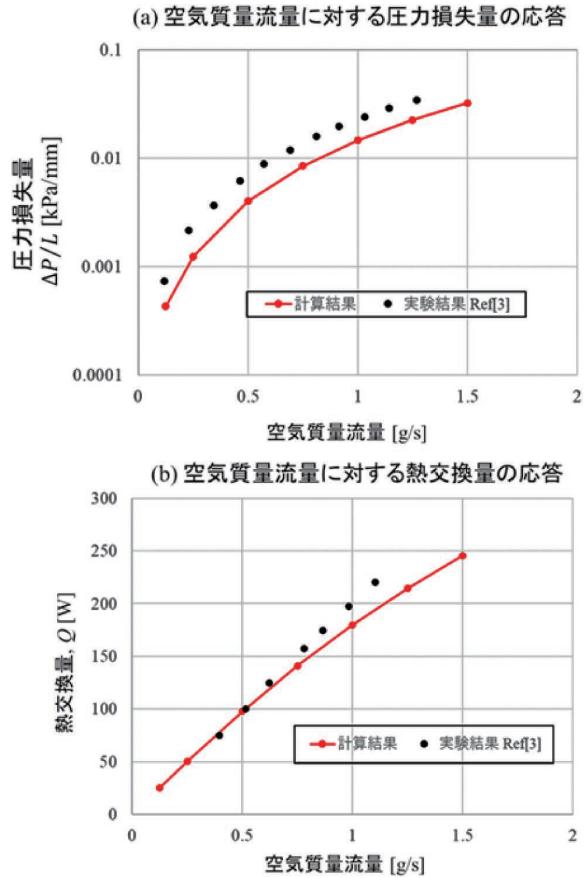


図2 圧力損失量(a)および熱交換量(b)のシミュレーション結果と実測結果[Ref. 3]の比較

Comparison of the pressure drops (a) and amount of heat transferred (b), obtained numerically (present work) and experimentally [Ref. 3]

いないため、それが透過率と形状係数の違いにつながったと考察した。そこで、圧力損失量を評価する上で、透過率と形状係数の違いを生む因子について検討した。具体的には、多孔体の空隙率のみならず、固体比表面積を計算モデルから数値評価し、粒子充填多孔体に関する古典的なErgunの式におけるパラメータと、本研究の纖維充填に対してErgunの式を適用した際のパラメータの数値の違いを考察した。これは画像ベース有限要素モデリングであるからこそ、実材料の空隙率や固体比表面積の数値評価が可能となり、実現できた考察であり、従来の先行研究にはない特徴がある。詳細は著者の最近の論文¹³⁾を参考にされたい。また、図2(b)に示すように熱交換量については、多孔体サンプルが厳密には同じものではないが、シミュレーション結果と先行研究の実験結果とで、ほぼ定量的に一致する結果が得られた。

本シミュレーション技術により、空隙の大きさやその多孔体内分布の不均一性、その連通構造性などを含めた微細構造因子が、圧力損失量や熱交換量などの性能に及ぼす影響のシミュレーション評価が可能となった。続いて、このようなシミュレーション技術による、所望の性

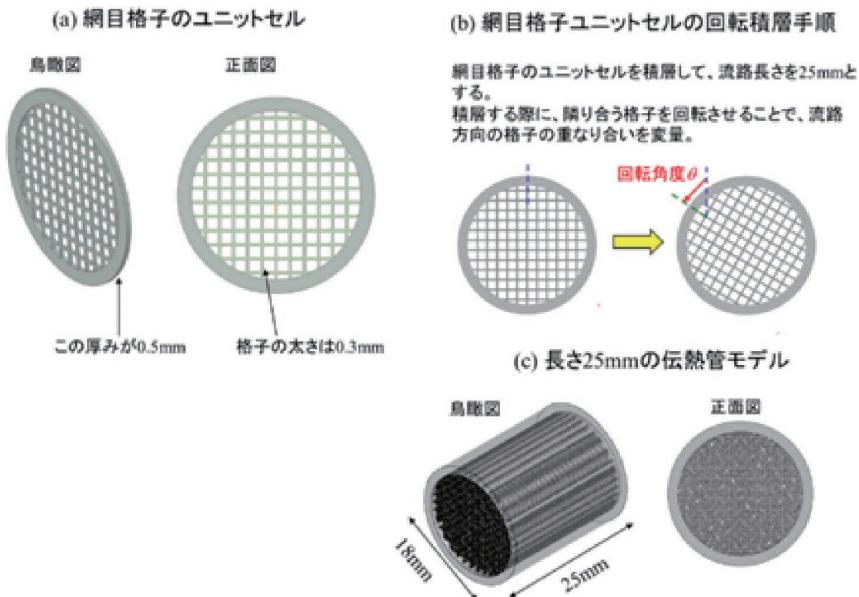


図3 規則的にデザインした網目格子の回転積層による多孔体伝熱管の作成手順
Fabrication procedure of a porous heat transfer tube using rotational stacking of a regularly designed mesh lattice

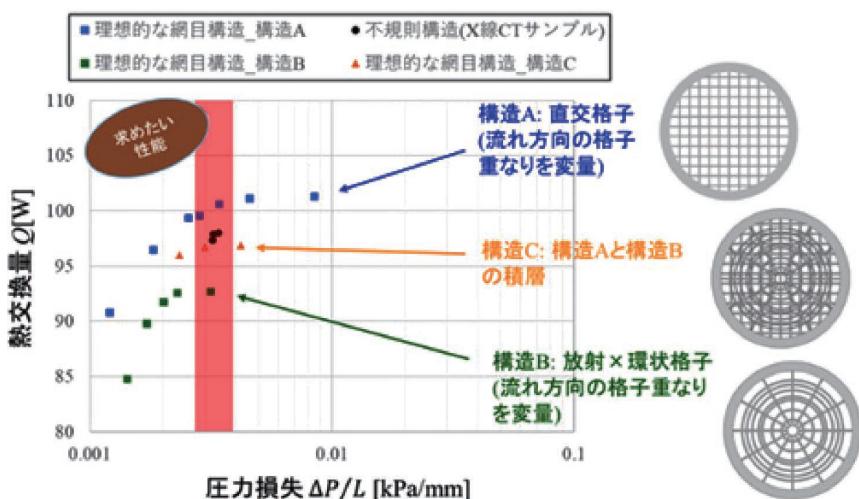


図4 同一空隙率でトポロジーが異なる多孔体モデルの圧力損失と熱交換量のシミュレーション応答結果
Simulation results of pressure drop and heat transfer performance for porous heat exchanger tube models with identical porosity but different topologies

能（低い圧力損失量かつ高い熱交換量）を実現するための精密な微細構造の設計・提案の可能性を検討した。具体的には、図3に示すような金網を回転積層させた多孔体を仮想空間上で作成し、仮想空間上での圧力損失量と熱交換量の相関関係を調査した。その結果の一例を図4に示す。なお、ここでは多孔体伝熱管の長さは25mm、空隙率は80 vol%で統一した。

金網構造およびその積層のさせ方というトポロジーが、性能（圧力損失および熱交換量）に影響を及ぼすことが図4に示されている。2022年3月での共同研究終了後も、

当社内の検討を進め、精密な微細構造は、金属3Dプリンタ技術と当社の強みである粉末焼結技術を用いて実現し、研究開発段階ではあるが、狙いトポロジーを有する試作サンプルにおいてもシミュレーションと同様の高い性能の実現を確認している。

4. おわりに

当社製Al繊維焼結多孔体パイプについて、X線CT解析データを利用した画像ベース有限要素モデリングにより計算モデルを作成し、熱流体シミュレーションを実施

し、圧力損失量や熱交換量などを評価した。本シミュレーション技術により、Al 繊維多孔体の導入による多孔体パイプの熱交換性能の向上や、圧力損失量や熱交換量の実測結果をシミュレーションで再現できることを確認した。規則的にデザインした網目格子で構成される多孔体パイプに関する熱流体シミュレーションを実施し、同じ空隙率と繊維太さの条件における不規則な Al 繊維焼結多孔体パイプでのシミュレーション結果との比較を実施した。金網格子の流路長さ方向の重なり合い具合というトポロジーに対して、圧力損失量や熱交換量が明確に応答する結果が得られた。

NIMS- 三菱マテリアル情報統合型材料開発センターの設立を契機に、このような当社未保有のシミュレーション技術および先端計測機器での分析結果とシミュレーション技術との連携に取り組めたことは、当社イノベーションセンターがシミュレーション技術と分析技術を今後もコア技術として、さらに高めていく上でも最良のタイミングであったと感じている。当社は、脱炭素社会や資源循環型社会の構築・実現に向けた、省エネルギー化や省資源化、工程効率化に資するプロセス開発、そして材料およびデバイスの機能改善や機能発現に資する技術開発に対応するため、本取り組みで獲得した技術の活用と普及を進めつつ、研究者の技術力向上や官学研究機関等のオープンイノベーション活用に努め、新しい計算技術の開発や、実験・合成・製造・計測などに関する技術との連携・融合に今後もチャレンジしていく所存である。

謝 辞

本研究は NIMS- 三菱マテリアル情報統合型材料開発センターにおける共同研究の一環であり、国立研究開発法人物質・材料研究機構 マテリアル基盤研究センター 材料設計分野 材料モデリンググループの渡邊育夢主幹研究員のご指導・ご助言・ご助力をいただきました。心より感謝申し上げます。

また、本研究における X 線 CT 解析データの提供およびご助言をいただきました幸俊彦専任研究員（現 当社イノベーションセンター新規事業推進部製品設計グループ グループ長補佐）にも感謝申し上げます。

文 献

- 1) K. Enoki, T. Kobayashi, R. Watanabe, Y. Otomo, A. Akisawa, I. Yaningsih, B. Kritiawan and A. T. Wijayanta, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **1096**, 012005 (2021).
- 2) 小林拓都, 渡邊廉, 大友優甫, 上田祐樹, 秋澤淳, 榎木光治, 日本冷凍空調学会論文集, **38**(2), 論文

ID: 21-10NK_OA (2021).

- 3) R. Watanabe, T. Kobayashi, Y. Otomo, A. Akisawa, Y. Ueda and K. Enoki, *Applied Thermal Engineering*, **196**, 117284 (2021).
- 4) 安藤健志, 今井悠介, 平井秀和, 中山顕, 日本機械学会論文集 (B編), **77**(782), 1958–1967 原著論文 No.2010-JBR-0313 (2011).
- 5) 近藤義広, 越田博之, 日本機械学会論文集, **82**(844), 1–122 (2016).
- 6) 三菱マテリアル, 従来にない高効率での熱回収が可能な伝熱管の技術を開発 ～カーボンニュートラルで持続可能な社会の実現に向けて飛躍的な貢献を期待～, プレスリリース 2021年10月15日, <https://www.mmc.co.jp/corporate/ja/news/press/2021/21-1015a.html>
- 7) P. Ranut, E. Nobile and L. Mancini, *Applied Thermal Engineering*, **69**, 230–240 (2014).
- 8) S. Meinicke, C.-O. Moller, B. Dietrich, M. Schluter and T. Wetzel, *Chemical Engineering Science*, **160**, 131–143 (2017).
- 9) M. Sadeghi, M. Mirdrikvand, G. R. Pesch, W. Dreher and J. Thoming, *Experiments in Fluids*, **61**, 124 (2020).
- 10) I. Watanabe and A. Yamanaka, *International Journal of Mechanical Sciences*, **150**, 314–321 (2019).
- 11) 渡邊育夢, ふえらむ, **19**(11), 814–819 (2014).
- 12) T. Matsuno, T. Yoshioka, I. Watanabe and L. Alves, *International Journal of Mechanical Sciences*, **163**, 105133 (2019).
- 13) S. Kawai and I. Watanabe, *Applied Thermal Engineering*, **249**(15), 123375 (2024).
- 14) S. Ergun, *Chem. Eng. Prog.*, **48**(2), 89–94 (1952).
- 15) S. M. Richardson, *Fluid mechanics.*, *Mech. Eng. Ser.*, pp.15–113 (1989).
- 16) A. Bejan, A. D. Kraus, *Porous media*. In: *Heat Transfer Handbook*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.; 2003. pp. 1029–1180.



川合 俊輔 Shunsuke KAWAI
開発 TMO 解析領域 テクニカルマネージャー
博士 (工学)