

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13698

研究課題名(和文)高Biot数多孔質体へ適用する構造体内熱伝導性を加味した界面熱流束モデルの構築と評価

研究課題名(英文) Derivation and evaluation of an interfacial heat flux model that takes into account the inner heat conduction in the porous materials with high Biot number

研究代表者

佐野 吉彦 (SANO, Yoshihiko)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：90720459

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)：研究背景として、多孔質体の伝熱解析で広く採用される2エネルギーモデルにおいて、Biot数が大きい(熱伝導率が低い)場合には、伝熱量の見積りができないことを問題提議した。そこで、本研究では、多孔質構造体内における熱抵抗の非定常性を検討し、高Biot数多孔質体に適用できる非定常多孔質体伝熱モデルを提案した。Biot数が0.001から1000の広範囲で、このモデルは多孔質体における非定常伝熱挙動を正確に予測できることが分かった。一方、従来モデルの適用範囲は多孔質構造体内の熱抵抗が無視できるBiot数が1までは適用できることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案した非定常多孔質体伝熱モデルにより、多孔質体の熱伝導率に依らず、多孔質体の非定常伝熱解析を行えるようにした。この伝熱モデルを活用することで、熱伝導率の低い多孔質体である蓄熱材や断熱材の温度解析の精度向上が見込まれ、持続可能社会が実現するために今後ますます重要となる蓄熱システムや断熱材の開発に貢献すると考えられる。以上より、本研究の成果は学術的な意義のみならず、今後の工業界の発展においても意義のある研究成果である。

研究成果の概要(英文)：The background of this research is that even if the two-energy model widely used for heat transfer in porous media is adopted, the amount of heat transfer cannot be accurately estimated in the case of the high Biot number problems (i.e. the thermal conductivity is low.). In this study, estimating the non-steady thermal resistance inside porous structures, an unsteady heat transfer model was derived for applying to heat transfer in porous materials with the high Biot number. It was found that the proposed model can accurately predict unsteady heat transfer in porous materials with a wide range of Biot number from 0.001 to 1000. On the other hand, it was found that the applicable range of the conventional model is that Biot number is up to 1.0 in which the thermal resistance in the porous structure is negligible.

研究分野：伝熱工学

キーワード：多孔質体 伝熱 高Biot数

1. 研究開始当初の背景

(1) 多孔質体の伝熱解析で広く採用される2エネルギーモデルは多孔質体内の固相と流体相の空間平均温度に基づきモデル化されており、高 Biot 数問題 (つまり、低熱伝導率材料の熱解析) では、多孔質体固相界面からの熱流束の見積りに誤差が生ずる可能性があった。

(2) 1.(1)に記載の問題を解決するアプローチとして、多孔質体固体内の熱抵抗を加味した総括熱伝達率を採用する方法 (従来モデル) があるが、抜本的な解決には至らないことを本研究では問題提起とする。通常、従来モデルの総括熱伝達率は一定値として扱われる。しかし、空間平均温度に基づく2エネルギーモデルでは多孔質体固体内の熱抵抗に非定常性が現れることを、研究代表者は懸念していた。このことは、多孔質体の非定常伝熱解析において、その伝熱量を正確に予測する理論モデルは存在しないことを示し、この問題を解決する必要があった。

2. 研究の目的

(1) 1.に記載の問題を解決するために、多孔質構造体内の非定常熱伝導を加味し、その熱抵抗の非定常性を検討することで、高 Biot 数多孔質体に適用できる非定常多孔質体伝熱モデルを提案する。

(2) 2.(1)の目的に加え、従来モデルと本研究で提案する非定常多孔質体伝熱モデルの伝熱予測精度を定量的に評価するとともに、各モデルの Biot 数に対する適用範囲を検討する。

(3) 基本的な多孔質体構造において非定常多孔質体伝熱モデルのモデル定数のデータベースを作成する。

3. 研究の方法

(1) 高 Biot 数多孔質体を構成する基礎構造体を解析対象し、非定常冷却過程における伝熱理論解析および直接数値シミュレーションを行った。多孔質構造体内の非定常熱抵抗を見積もり、高 Biot 数多孔質体に適用できる非定常多孔質体伝熱モデルを検討した。

(2) 高 Biot 数多孔質体自身を解析対象し、シングルブロー法を想定した非定常冷却過程における多孔質体の伝熱直接数値シミュレーションを実施した。その後、3.(1)で求めた非定常多孔質体伝熱モデルおよび従来モデルにて、同条件の巨視的伝熱解析を行った。巨視的伝熱解析と直接数値シミュレーションで得られた伝熱量と温度場を比較することで、非定常多孔質体伝熱モデルの妥当性の検証をするとともに、その適用範囲を検討した。

※研究開始当初、3D プリンターで作成した多孔質体を用いて、シングルブロー法による非定常冷却過程の伝熱計測実験を実施する予定であった。しかし、新型コロナウイルス感染症の影響により研究室の出入りが制限され、実験を完遂することができなかった。そこで、直接数値シミュレーションによる定量評価に切り替えて、本研究を遂行した。

4. 研究成果

(1) 熱抵抗の非定常性の確認

多孔質体構造内の熱抵抗を固体-流体の界面熱抵抗 R_{wf} と非定常熱伝導を加味した非定常内部熱抵抗 R_{sw}^* に分解した。

$$Nu_{sf}(Fo) = \frac{1}{R_{sw}^*(Fo) + R_{wf}^*}$$

ここで、 Nu_{sf} は総括ヌッセルト数であり、 Fo は時間の無次元数であるフーリエ数である。

図1に多孔質基本構造の球における内部熱抵抗の非定常性を示す。図1より、フーリエ数が0.1までは熱抵抗に非定常性が見られ、その後、一定値に収束することが分かった。また、その収束値は高 Biot 数と低 Biot で異なる収束値が存在することが分かった。この結果は、熱伝導率の低い高 Biot 問題では、熱抵抗の非定常性が現れる実時間が長く、従来モデルでは伝熱予測精度が落ちることを示唆している。

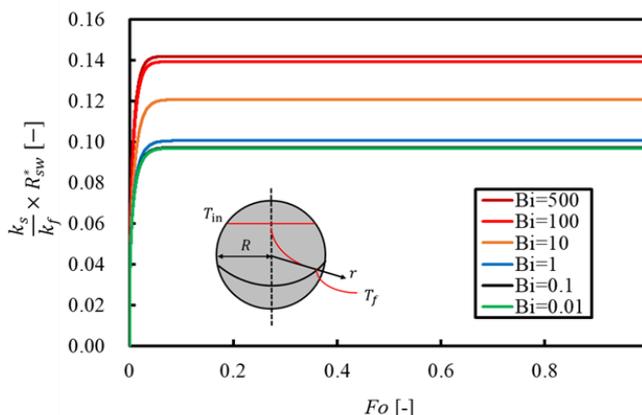


図1 多孔質体内部抵抗の非定常性

(2) 非定常多孔質体伝熱モデルの提案

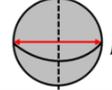
4.(1)で得られた多孔質体を構成する基礎構造体の内部熱抵抗に基づき、以下の非定常多孔質体伝熱モデルを提案した。

$$R_{sw}^*(Fo) = W \times \frac{1}{\frac{k_s}{k_f}} \times (1 - \exp(-CF_o))$$

$$C = X(1 - \exp(-Y \times Bi)) + Z$$

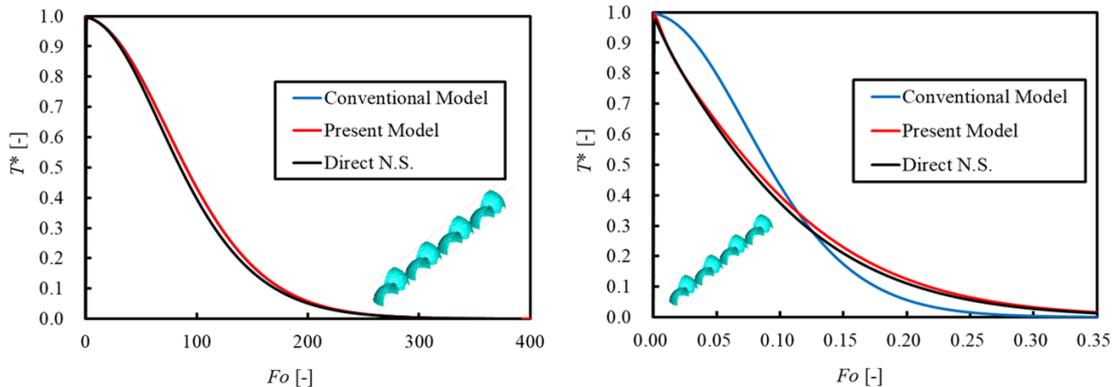
なお、このモデルは伝熱解析を行う者の利便性を考え、2エネルギーモデルに実装することを想定して導出した。非定常多孔質体伝熱モデルは Biot 数 Bi とフーリエ数 Fo の関数であり、 $0.001 < Bi < 1,000$ の範囲でその妥当性を確かめた。式中の W, X, Y, Z はモデル定数であり、多孔質体を構成する基礎構造体によって、その値は異なる。表 1 はモデル定数のデータベース例であり、代表的なモデル定数をいくつか示す。

表 1 モデル定数データベース

構造体	代表長さ	W	X	Y	Z
平板		0.403	12	0.0537	15
円柱		0.161	42	0.0152	100
球体		0.141	46	0.0135	130

(3) 非定常多孔質体伝熱モデルの妥当性の検証

4.(2)で提案した非定常多孔質体伝熱モデルの妥当性を検証した。図 2 に直接数値シミュレーションから得られた球粒子充填層における多孔質体出口温度の経時変化を示す。また、同図に非定常多孔質体伝熱モデルと従来モデルの巨視的伝熱解析で得られた多孔質体出口温度の予測結果を併せて示す。図 2 より、低 Biot 数の場合(a)では、従来モデルと非定常多孔質体伝熱モデルの予測結果に差異は無く、両者とも直接数値シミュレーションの出口温度を正確に再現していることが分かる。一方、高 Biot 数の場合(b)では、両者の予測結果はズレており、本研究で提案した非定常多孔質体伝熱モデルのみが出口温度を正確に再現できている。この結果は本モデルの妥当性及び有用性を示している。一方、1.(2)で問題提起した通り、従来モデルでは多孔質体の非定常伝熱挙動を再現できないことを裏付けた。



(a) 低 Biot 数 ($Bi=0.1$) の場合

(b) 高 Biot 数 ($Bi=10$) の場合

図 2 多孔質体非定常冷却過程における出口温度の推移 (球の粒子充填層)

(4) 非定常多孔質体伝熱モデルと従来モデルの適用範囲

4.(2)で記述した通り、本研究で提案した非定常多孔質体伝熱モデルは Biot 数の関数であり、 $0.001 < Bi < 1,000$ の広範囲でその有用性があることが確かめられた。一方、従来モデルの適用範囲は、固体の熱抵抗の影響が無視できる $Bi=1$ までは適用でき、それ以降は伝熱予測に誤差が生じることが分かった。

(5) 総括および成果

4.(1)-(4)の研究成果から、本研究で提案した非定常多孔質体伝熱モデルは妥当であり、 $0.001 < Bi < 1,000$ の範囲で有用である。特に、Biot 数が 1 を超える多孔質体伝熱を扱う場合は、非定常多孔質体伝熱モデルを活用することで、正確な伝熱解析が行えるようになる。本モデルを活用することで、熱伝導率の低い多孔質体である蓄熱材や断熱材の伝熱解析精度が向上すると見込まれ、エネルギーの有効活用が問われる持続可能社会の発展に貢献するであろう。

以上の成果は、国内学会として第 57 回日本伝熱シンポジウム、熱工学コンファレンス 2020 で発表した。また、The 8th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow で発表予定であり、国際論文誌 Journal of Porous Media に投稿する予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 栗島 尚汰, 佐野 吉彦, 桑原 不二郎, 本山 英明
2. 発表標題 高Biot数多孔質体に適用する新たな熱伝達モデルの検討
3. 学会等名 第57回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 栗島 尚汰, 佐野 吉彦, 桑原 不二郎
2. 発表標題 高ピオ数多孔質体に適用する伝熱モデルの数値的検討
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuki Nomura, Yoshihiko Sano, Fujio Kuwahara
2. 発表標題 Unsteady overall heat transfer coefficient in porous media with the high Biot number
3. 学会等名 The 8th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------