

# 平成 29 年度 共同利用研究報告書

平成 30 年 3 月 6 日

九州大学 マス・フォア・インダストリ研究所長 殿

所属・職名 : 静岡大学・助教

提案者 氏名 : 佐野 吉彦

下記の通り共同研究の報告をいたします。 記

|             |                                                      |                       |  |          |           |
|-------------|------------------------------------------------------|-----------------------|--|----------|-----------|
|             |                                                      | ※整理番号                 |  | 20170019 |           |
| 1.研究計画題目    | 均質化理論と局所体積平均理論の融合及びその新展開～構造体の迷路性と機械的分散効果に迫る～         |                       |  |          |           |
| 2.種別 (○で囲む) | a. 研究集会 I      b. 研究集会 II      ©.短期共同研究      d.短期研究員 |                       |  |          |           |
| 3.研究代表者     | 氏名                                                   | 佐野 吉彦                 |  |          |           |
|             | 所 属<br>部局名                                           | 静岡大学大学院総合科学技術研究科 工学専攻 |  |          | 職 名<br>助教 |
|             | 連絡先                                                  |                       |  |          |           |
|             | e-mail                                               |                       |  | TEL      |           |
| 4.研究実施期間    | 平成 29 年 12 月 6 日 (水曜日) ～平成 29 年 12 月 8 日 (金曜日)       |                       |  |          |           |

5.参加者数・参加者リスト (\*別紙「共同利用研究報告書作成上の注意」参照)

(a,b は参加者数のみ記入し, 集会参加者リストを添付. c.の非公開プログラム参加者と d.は参加者リストに記入. c.は公開プログラムを含めた全参加者数を記入し, 公開プログラム参加者リストを添付.)

参加者数 : 12 人

参加者リスト (a,b は記入不要, c.は非公開プログラム参加者, d.は共同研究参加者を記入)

| 氏名          | 所属    | 職名  | 氏名    | 所属        | 職名  |
|-------------|-------|-----|-------|-----------|-----|
| 佐野 吉彦       | 静岡大学  | 助教  | 中澤 嵩  | 大阪大学      | 准教授 |
| 桑原 不二朗      | 静岡大学  | 教授  | 水上 友人 | 株式会社キャタラー | 室長  |
| M. Mobedi   | 静岡大学  | 准教授 | 史 戈   | 株式会社キャタラー | 研究者 |
| 正宗 淳        | 北海道大学 | 教授  | 麓 悠太郎 | 株式会社ユタカ技研 | 研究者 |
| 黒田 紘敏       | 北海道大学 | 准教授 | 高井 貴生 | 山口東京理科大   | 学生  |
| W. Chunyang | 静岡大学  | 学生  | 小林 大和 | 静岡大学      | 学生  |

6.本研究で得られた成果の概要

本短期共同研究では、マルチスケール・マルチフィジクス現象を記述するために数学と工学で別々に発展した均質化理論と局所体積平均理論の研究者を集め、均質化理論と局所体積平均理論の融合をはかり、その産業展開を模索していった。まず、多孔質体構造を表現する上で代表的な 3 種類の構造体を取り上げ、固体内熱伝導問題を対象にし、局所体積平均理論と均質化理論の両手法で有効熱伝導率を求めた。その結果、全ての有効熱伝導率において、両手法で求めた有効熱伝導率は一致しており、両手法の妥当性を確認した。今後、勾配を含めて検討する予定ではあるが、この一致は本短期共同研究での大きな成果であり、対象構造によって計算コストが少ない手法を選択して良いことは、産業・工学界で大きな意味合いを持つ。また、均質化理論における corrector の物理的意味について議論を交わしており、今後のさらなる構造体で議論することで、その意味合いは判明するだろう。また、本短期共同研究では、産業界を含め多孔質構造体とその物理性質として、伝熱、蓄熱、触媒反応、吸音、物質移動など様々な分野から講演があり、産業界のさらなる発展を考えて、有意義なディスカッションをすることができた。

九州大学 IMI 共同利用研究・短期共同研究  
均質化理論と局所体積平均理論の融合及びその新展開  
～構造体の迷路性と機械的分散効果に迫る～

日程 2017 年 12 月 6－8 日

場所 九州大学マス・フォア・インダストリ研究所  
ウエスト 1 号館 C 棟 5F W1-C-513 513 中講義室

本研究会の趣旨

本短期共同研究では、マルチスケール・マルチフィジクス現象を記述するために数学と工学で別々に発展した均質化理論と局所体積平均理論の研究者を集め、均質化理論と局所体積平均理論の融合をはかり、その産業展開を模索していく。特に、研究集会では、見かけの拡散係数に注目し、均質化理論と局所体積平均理論を専門とする研究者による多孔質体の拡散係数の導出法の講演を行う。構造体の見かけの拡散係数は、ラジエーター、触媒、燃料電池等を設計する上で重要なパラメーターである。しかし、設計段階で見かけの拡散係数の予測は困難であり、産業界からは実用性の高い数学的同定法が求められてきた。そこで、本研究集会では、見かけの熱伝導率の数学的本質に迫り、産業界へ貢献しうる理論モデルの構築を行う。

Program 12 月 6 日 (水)

- 13:30 - Opening
- 13:40 - 14:40 局所体積平均理論の概要と紹介  
講師: 佐野 吉彦 (静岡大学)
- 14:50 - 15:50 均質化理論の概要と紹介  
講師: 正宗 淳 (北海道大学), 黒田 紘敏 (北海道大学)
- 16:00 - 18:00 共同研究における進捗状況と報告

12 月 7 日 (木)

- 10:00 - 11:00 局所体積平均理論における有効拡散係数の決定法  
講師: 桑原 不二朗 (静岡大学)
- 11:10 - 12:10 均質化理論における有効拡散係数の決定法  
講師: 正宗 淳 (北海道大学), 黒田 紘敏 (北海道大学)
- 12:10 - 13:30 Lunch
- 13:30 - 14:30 局所体積平均理論と均質化理論の精度評価  
講師: 小林 大和 (静岡大学)
- 14:40 - 15:40 Questionability of validation of volume average theory for mixed convection heat transfer in porous media  
講師: MOBEDI MOGHATAI (静岡大学)
- 15:50 - 16:50 多孔質体理論と形状最適化  
講師: 中澤 嵩 (大阪大学)
- 17:00 - 18:30 フリーディスカッション

**12月8日(金)**

10:00 - 10:30 多孔質体のアプリケーション1

講師: 高井 貴生 (山口東京理科大学)

10:30 - 11:00 多孔質体のアプリケーション2

講師: Wang Chunyang (静岡大学)

11:10 - 12:10 産業界における多孔質体構造(会社紹介)

12:20 - 13:30 Lunch

13:30 - 14:30 局所体積平均理論のアプリケーションの紹介

講師: 佐野 吉彦 (静岡大学)

14:40 - 15:40 均質化理論のアプリケーションの紹介

講師: 正宗 淳 (北海道大学), 黒田 紘敏 (北海道大学)

16:00 - 18:00 フリーディスカッション

2018 年 3 月 6 日

静岡大学大学院総合科学技術研究科  
助教 佐野吉彦

# 報告書

## 均質化理論と局所体積平均理論の融合及びその新展開

### ～構造体の迷路性と機械的分散効果に迫る～

開催日：2017 年 12 月 6-8 日

| ○内容                                                  | 頁    |
|------------------------------------------------------|------|
| ➤ 本共同研究の趣旨                                           | …… 1 |
| ➤ 本共同研究の概要と成果<br>(佐野 吉彦, 桑原 不二郎, 小林 大和, 正宗 淳, 黒田 紘敏) | …… 2 |
| ➤ 発表の概要 (高井 貴生)                                      | …… 5 |
| ➤ 発表の概要 (Moghtada Mobedi)                            | …… 6 |
| ➤ 発表の概要 (ChunYang Wang)                              | …… 7 |
| ➤ 発表の概要 (水上 友人)                                      | …… 9 |
| ➤ まとめ                                                | ……10 |

#### ○本共同研究の趣旨

本短期共同研究では、マルチスケール・マルチフィジクス現象を記述するために数学と工学で別々に発展した均質化理論と局所体積平均理論の研究者を集め、均質化理論と局所体積平均理論の融合をはかり、その産業展開を模索していく。特に、研究集会では、見かけの拡散係数に注目し、均質化理論と局所体積平均理論を専門とする研究者による多孔質体の拡散係数の導出法の講演を行う。構造体の見かけの拡散係数は、ラジエーター、触媒、燃料電池等を設計する上で重要なパラメーターである。しかし、設計段階で見かけの拡散係数の予測は困難であり、産業界からは実用性の高い数学的同定法が求められてきた。そこで、本研究集会では、見かけの熱伝導率の数学的本質に迫り、産業界へ貢献しうる理論モデルの構築を行った。

○本共同研究の概要と成果

静岡大学・助教・佐野吉彦

静岡大学・教授・桑原不二朗

静岡大学・小林大和

北海道大学・教授・正宗淳

北海道大学・准教授・黒田紘敏

本短期共同研究では、均質化理論と局所体積平均理論の研究者にて、構造体内部で熱伝導率の異なる固体内熱伝導問題を対象にして、局所体積平均理論と均質化理論の2つの方法で有効熱伝導率を求めた。

局所体積平均理論では、構造体を含む検査体積にて空間平均を施し、その空間平均量にて、マクロ場を取り扱う手法である。物理量 $\phi$ の実質平均量 $\langle\phi\rangle^f$ は以下と定義する。

$$\langle\phi\rangle^f = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} \phi dV$$

このとき、物理量は実質平均量とその偏差 $\tilde{\phi}$ に分けられるとする。局所体積平均理論では、以下の諸法則に基づき、ミクロな支配方程式からマクロな支配方程式を導出していく。

$$\langle\phi_1\phi_2\rangle^f = \langle\phi_1\rangle^f \langle\phi_2\rangle^f + \langle\tilde{\phi}_1\tilde{\phi}_2\rangle^f$$

$$\left\langle \frac{\partial\phi}{\partial x_i} \right\rangle = \frac{\partial\langle\phi\rangle}{\partial x_i} + \frac{1}{V} \int_{A_{\text{int}}} \phi n_i dV$$

$$\left\langle \frac{\partial\phi}{\partial t} \right\rangle = \frac{\partial\langle\phi\rangle}{\partial t}$$

$A_{\text{int}}$ は固体-流体界面の面積で、 $n_i$ は流体側から固体側に向かう単位法線ベクトル $i$ 方向成分である。熱伝導方程式に対して、以上の諸法則を適用すると、みかけの熱伝導率は以下で得ることができる。

$$k_{\text{eff}} = (\varepsilon k_f + (1-\varepsilon)k_s) + (k_f - k_s) \frac{\Delta x}{\Delta T} \left\langle \frac{1}{V} \int_{A_{\text{int}}} T n_x dA \right\rangle$$

一方、均質化理論は特性の異なるいくつかの材料で構成された単位微細構造が周期的に並ぶような複合材料の、均質化された特性を求める方法である。今、発熱を伴う熱伝導方程式について考える。

$$\begin{cases} -\text{div}(k(x)\nabla T)(x) = f(x) & \text{in } \Omega \\ T = 0 & \text{on } \partial\Omega \end{cases}$$

ここで、 $\Omega$ は滑らかな境界を持ち、 $\Omega$ 内の座標を $x \in \Omega \in \mathfrak{R}^d$ とする。 $\varepsilon$ は周期微細構造寸法

を示す．単位セルを次のような  $1 \times 1$  の正方形領域と定義し，この単位セルが周期的に並んでいると考える．

$$y \in Y = (0,1)^d \quad (2.18)$$

構造の周期性から， $k$  を  $\mathfrak{R}^d$  上に拡張することは容易であり， $k(x/\varepsilon)$  が周期構造内の熱伝導率を表す． $\varepsilon \rightarrow 0$  のとき均質であるとする，周期微細構造材料における解である  $T_\varepsilon$  を用いることで，式(2.17)は次のように表すことができる．

$$\begin{cases} -\operatorname{div}(k(x/\varepsilon)\nabla T_\varepsilon)(x) = f(x) & \text{in } \Omega \\ T_\varepsilon = 0 & \text{on } \partial\Omega \end{cases}$$

今， $T_\varepsilon(x)$  は次のように展開できると仮定する．

$$T_\varepsilon(x) = T_0\left(x, \frac{x}{\varepsilon}\right) + \varepsilon T_1\left(x, \frac{x}{\varepsilon}\right) + \varepsilon^2 T_2\left(x, \frac{x}{\varepsilon}\right) + \cdots$$

ここで  $T_i(x, y)$  は変数  $y$  に関して周期関数である．また， $T_i(x, x/\varepsilon)$  の勾配は次のようになる．

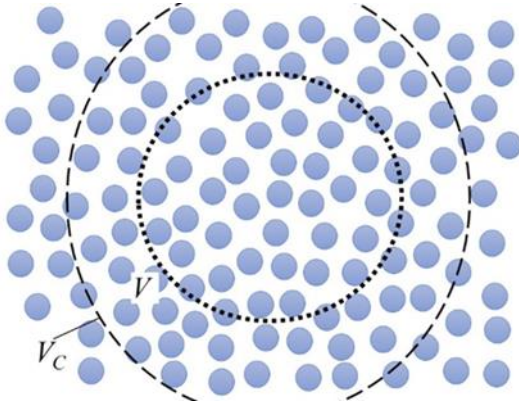
$$\nabla[T_i(x, x/\varepsilon)] = (\nabla_x T_i)(x, x/\varepsilon) + \frac{1}{\varepsilon} (\nabla_y T_i)(x, x/\varepsilon)$$

この関係を熱伝導方程式に適用し， $\varepsilon$  の次数について整理すると，有効熱伝導率テンソル  $k_{\text{eff}}$  は次式で与えられる．

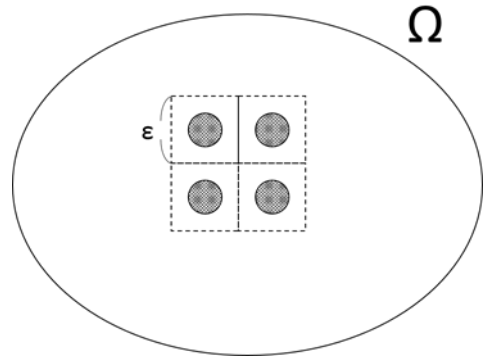
$$k_{\text{eff},jk} = \int_Y \left( k_{jk}(y) + \sum_{l=1}^d k_{jl} \frac{\partial \omega_k}{\partial y_l}(y) \right) dy$$

ここで， $\omega_i(y)$  は corrector であり，以下の関係を満たす．

$$-\operatorname{div}_y(k(y)(\nabla_y \omega_i(y) + \mathbf{e}_i)) = 0$$

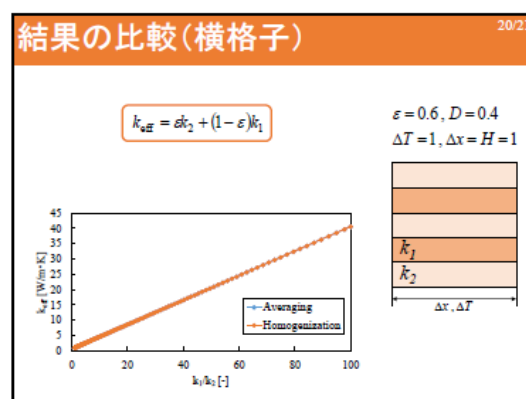
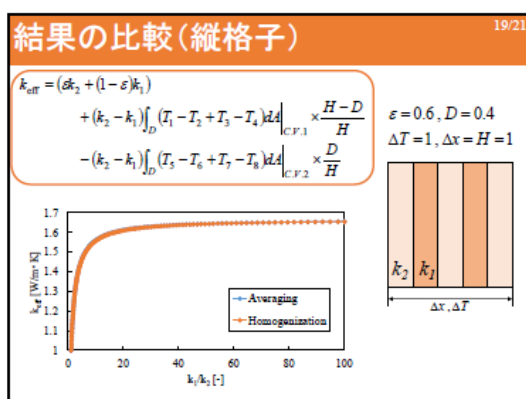
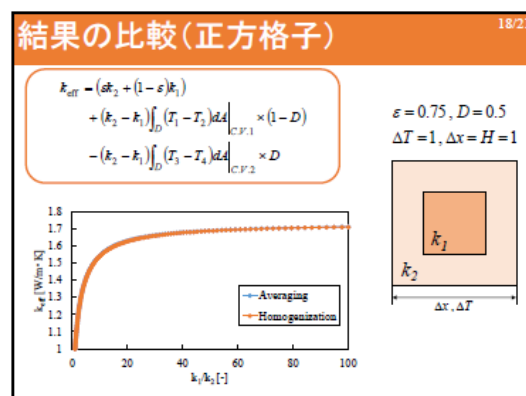
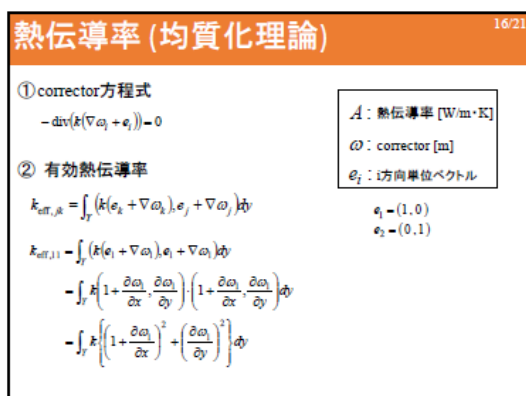
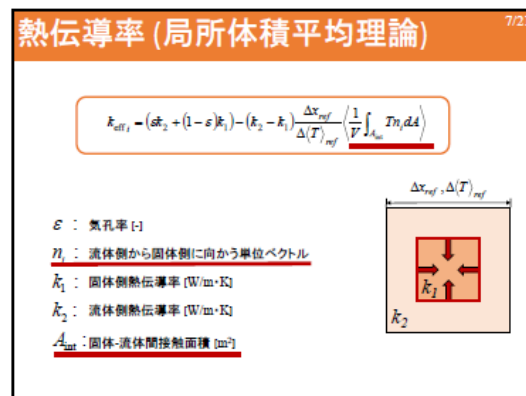
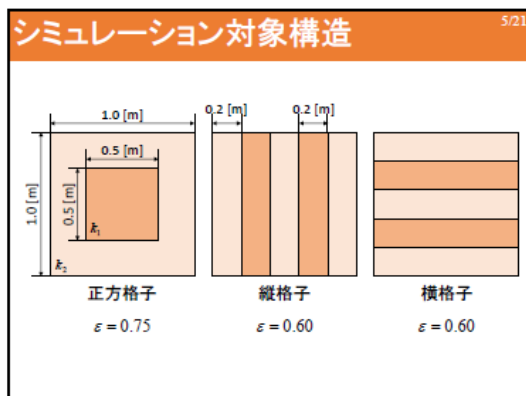


局所体積平均理論での検査体積



均質化領域

本短期共同研究にて求めた有効熱伝導率の結果を、当日のスライドと共に以下に示す。代表的な3種類の構造体にて、均質化理論と局所体積平均理論から求めた有効熱伝導率は全て一致した。これにより、両手法の妥当性を確認された。また、当日は **corrector** の物理的意味づけについて議論を交わしており、今後、検討していくことが決まった。



## ○発表の概要

山陽小野田市立山口東京理科大学 高井 貴生

ポーラス体を用いた冷却デバイスについて講演した。一連の実験および数値シミュレーションから得られたポーラス構造とその冷却性能の関係を説明した。

九州大学 (MI) 共同利用研究・短期共同研究  
均質化理論と局所体積平均理論の融合及びその新展開  
～構造体の迷路性と機械的分散効果に迫る～

H29.12.8

多孔質体のアプリケーション1

### ポーラス体を用いた冷却デバイス EVAPORON

～粒子ポーラス体・一方向性ポーラス体の利用～

山口東京理科大学 工学研究科 結城研究室  
高井 貴生



公立大学法人 山陽小野田市立  
山口東京理科大学

### 1. 高熱流束機器冷却へのポーラス体利用

伝熱分野へのポーラス体の応用例:  
ヒートパイプ、ペイパーチャンバー  
⇒ ポーラス体の毛細管現象による液供給  
⇒ 最大でも1MW/m<sup>2</sup>が限界

高熱流束機器の冷却問題  
核融合ダイバータ: 10MW/m<sup>2</sup>  
⇒ 冷却水を高流量・高ポンプ動力で流す

電気自動車用車載インバーター: 3~5MW/m<sup>2</sup>  
⇒ 走行距離向上の観点から軽量かつ  
省エネルギーな液冷システムが望まれる

省エネ・低炭素社会に向け、  
低ポンプ動力型の冷却デバイスが必要



核融合炉ダイバータ

Inverter  
Motor  
Battery

電気自動車用車載インバーター

Reference: [http://www.fusion-jst.go.jp/ITER/ITERpage1\\_1.html](http://www.fusion-jst.go.jp/ITER/ITERpage1_1.html)

### ➤ 金属ポーラス体を用いた冷却デバイスEVAPORON<sup>(1)</sup>

EVAPORON: Evaporated-Fluid-Porous-Thermodevice  
Reference: (1) S. Toda et al., Proceedings of 11th IHTC, 4 (1998), 503

- ✓ 流動沸騰・蒸発伝熱の利用
  - 液体の蒸発潜熱を利用した熱輸送現象  
⇒ 蒸発潜熱(水): 2257kJ
- ✓ 金属ポーラス体の導入
  - 伝熱面積の拡大(フィン効果)
  - マイクロチャンネルによる蒸発促進

蒸発潜熱を最大限に活用できるポーラス体と冷却液供給及び蒸気排出構造の検討

EVAPORON-2<sup>(2,3)</sup>  
サブチャンネル装荷型粒子供給ポーラス体  
・サブチャンネルによる生成蒸気の排出  
・伝熱面の均温化と大面積面への適用性が課題



Fig. Porous media

Sub-channel

Fig. EVAPORON-2

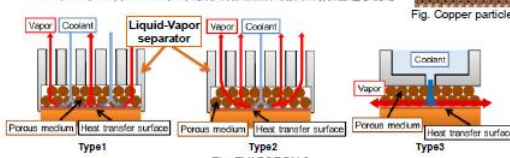
Reference: (2) K. Yuki et al., Fusion Sci. and Tech., 60 (2011), 238.  
(3) K. Yuki et al., Fusion Sci. and Tech., 64-2 (2013), 325.

### 2. 粒子ポーラス体を用いた冷却デバイス: EVAPORON-3

EVAPORON-3 (Type1・Type2・Type3)<sup>(4,5)</sup>:  
銅粒子充填層型ポーラス体

- 銅粒子 (粒子径:  $\Phi 1.0 \text{ mm} \pm 20 \mu\text{m}$ )
- 直径:  $\Phi 30 \text{ mm}$  (Type1, 2),  $\Phi 20 \text{ mm}$  (Type3),  
高さ: 1.82 mm (2層), 空隙率: 43.4%

⇒ ポーラス体への冷却液供給と蒸気排出構造を変更

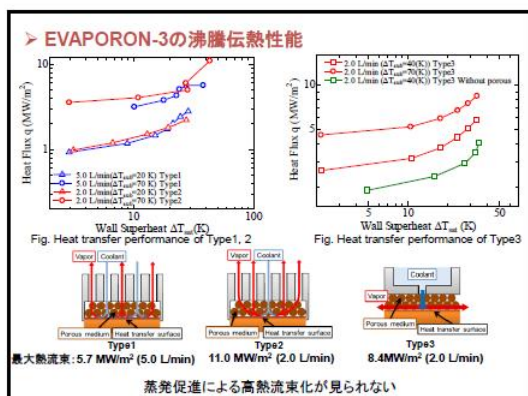


Vapor  
Coolant  
Liquid-Vapor separator  
Porous medium  
Heat transfer surface

Type1  
Type2  
Type3

Fig. EVAPORON-3

Reference: (4) K. Takai et al., Plasma and Fusion Res., 12 (2017), 1405015.  
(5) K. Takai et al., Fusion Sci. and Tech., 72-4 (2017), 699

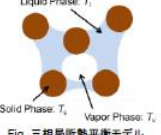


### ➤ ポーラス体内における二相流動現象の数値解析

- ・二相混合モデル  
ポーラス体内の二相流を巨視的にとらえ、  
平均量で置き換わる連続体として取り扱うモデル
- ・三相局所熱平衡モデル  
局所的に固相・液相・気相の温度を一律と  
仮定したモデル  
 $T_s = T_l = T_v$
- ・支配方程式  
Ergunの式:  $-\nabla p = \frac{\mu}{K} \mathbf{u} + \frac{C}{\sqrt{K}} \rho |\mathbf{u}| \mathbf{u} - \rho \mathbf{g}$   
運動方程式:  $\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -\frac{K}{v + C\sqrt{K}|\mathbf{u}|} (\nabla p - \rho \mathbf{g})$   
エネルギー方程式:  $\Omega \frac{dT}{dt} + \nabla \cdot (\gamma_s \mathbf{u} T) = \nabla \cdot (\Gamma_s \nabla T) + \nabla \cdot \left[ f(s) \frac{K \Delta \rho h_{fg}}{v_s + \sqrt{K} k_{eff} C |\mathbf{u}|} \right]$

解析手法: SIMPLE法 (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)

Reference: K. Yuki et al., Journal of Heat Transfer, 130 (2008), 012602



Liquid Phase:  $T_l$   
Solid Phase:  $T_s$   
Vapor Phase:  $T_v$

Fig. 三相局所熱平衡モデル

連続の式:  $\delta \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$



## **Questionability of validation of volume average theory for mixed convection heat transfer in porous media**

**Hasan Celik\*, Moghtada Mobedi, Akira Nakayama**

**Mechanical Eng. Department, Izmir Institute of Technology, Urla, Izmir, Turkey**

**Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu-shi, Japan**

Mixed convection heat transfer (or combined forced and free convection heat transfer), occurs when the buoyance force considerably affects forced convection. Practically, in industry, it takes place (or intentionally appears) when the desired heat cannot be transferred due to reasons such as high heat generation (or heat flux) and/or low required pump/fan power. On the other hand, porous media (particularly high conductive porous media such as metal foams) becomes popular in heat transfer enhancement field due to high volumetric convective heat transfer coefficient and effective thermal conductivity. The analysis of mixed convection in heat transfer has taken the attention of researchers in recent years.

Volume Average Method (VAM) is widely used to handle heat and fluid flow problems in porous media. The solution of volume averaged governing equations yields volume averaged velocity, temperature and pressure, which are imaginary quantities. In VAM, there are volume averaged transport properties (macroscopic transport properties) such as permeability, interfacial convective heat transfer coefficient, thermal dispersion and thermal tortuosity whose values must be known.

In this study, the interfacial convective heat transfer coefficient and thermal dispersion for a periodic porous medium under mixed convection is determined numerically. The pore scale governing equations are solved computationally for a representative volume. A detailed discussion on the effect of governing dimensionless parameters (porosity, Reynolds and Richardson numbers) on the local and average interfacial Nusselt number and thermal dispersion are done.

## **A study on comparison of volume averaged and pore scale results of solid/liquid phase change assisted by porous media,**

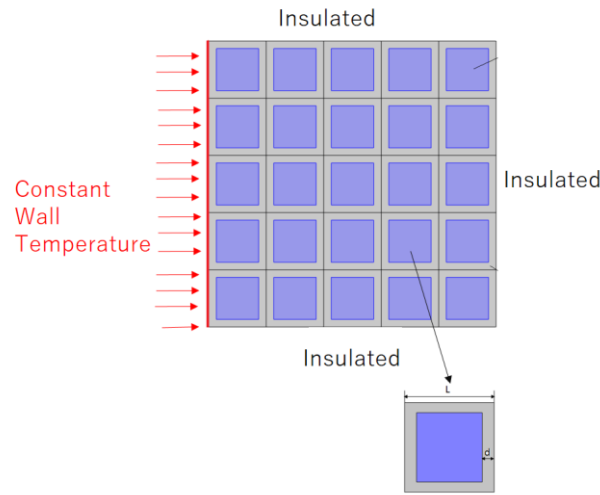
**ChunYang Wang, Moghtada Mobedi, Fujio Kuwahara, Akira Nakayama  
Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Naka-ku, Hamamatsu-shi, Japan**

Thermal energy storage is one of the hottest topic in the field of heat transfer. Among many methods of thermal energy storage, solid/liquid thermal energy storage seems a proper approach for many applications due to easy cycling, no maintenance, cheapness and possibility of various designs based on the application. However, this method has its own disadvantages such as late response due to low thermal conductivity of Phase Change Materials (PCM).

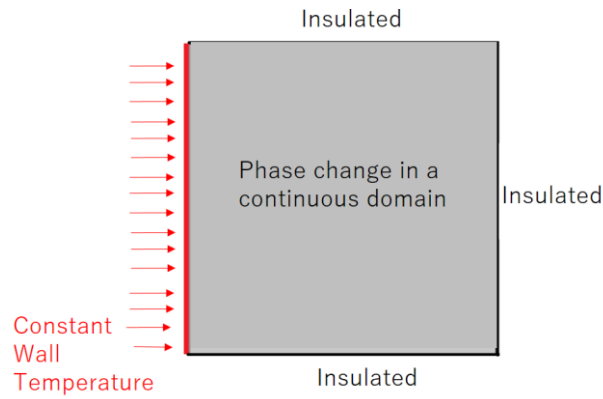
Many methods for enhancement of thermal conductivity for PCM has been reported. The use of high thermal conductive porous media (such as metal foam) can be a proper solution, however, the selection of proper porous media is significant. The number, size and shape of pores and cells, porosity, number of connection points to each other and diameter of ligaments are important parameters should be designed well. Although both conduction and convection play an important role on heat transfer during the phase change, conduction heat transfer is the dominant mechanism for the micro-porous media or tight permeable porous media having large surface area (such as 40 PPI aluminum foams).

The aim of this study is to compared the results of pore scale and the volume averaged approaches for a PCM cavity assisted with porous media. The cells (in which PCM is located) is closed. For pore scale approach, the continuity, momentum and energy equations are solved for PCM placed in the cells while conduction heat transfer is solved for the porous frame during the phase change. Local thermal non-equilibrium approach is used to find the volume averaged temperature, and then the obtained results of pore scale and volume averaged are compared. All surface of cavity except a side surface is insulated. The effective thermal conductivity is directly obtained from the solution of pore scale analysis for the case of no fluid motion. Water is used as phase change material. The governing equations are solved by a commercial CFD solver. The comparison is

performed for different values of Rayleigh number, porosity and thermal conductivity ratio. It is found that for analyzing such problem, two Rayleigh numbers which are pore scale and macro-scale Ra numbers are needed. A good agreement between the pore scale and volume averaged results is observed.



(a)



(b)

**Figure 1** Schematic view of the studied cavity with dominant conduction effect a) domain for pore scale analysis b) the volume averaged domain

○発表の概要

株式会社キャタラー・室長・水上友人

株式会社キャタラーの企業説明を行い，その後，自動車，オートバイの排ガス処理触媒の構造と処理性能について説明を行った．

※以下非公開

#### ○本研究で得られた成果の概要

本短期共同研究では、マルチスケール・マルチフィジクス現象を記述するために数学と工学で別々に発展した均質化理論と局所体積平均理論の研究者を集め、均質化理論と局所体積平均理論の融合をはかり、その産業展開を模索していった。まず、多孔質体構造を表現する上で代表的な 3 種類の構造体を取り上げ、固体内熱伝導問題を対象にし、局所体積平均理論と均質化理論の両手法で有効熱伝導率を求めた。その結果、全ての有効熱伝導率において、両手法で求めた有効熱伝導率は一致しており、両手法の妥当性を確認した。今後、勾配を含めて検討する予定ではあるが、この一致は本短期共同研究での大きな成果であり、対象構造によって計算コストが少ない手法を選択して良いことは、産業・工学界で大きな意味合いを持つ。また、均質化理論における *corrector* の物理的意味について議論を交わしており、今後のさらなる構造体で議論することで、その意味合いは判明するだろう。また、本短期共同研究では、産業界を含め多孔質構造体とその物理性質として、伝熱、蓄熱、触媒反応、吸音、物質移動など様々な分野から講演があり、産業界のさらなる発展を考えて、有意義なディスカッションをすることができた。