

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 19 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360045

研究課題名(和文) オープンポラス構造体の均質化非弾性構成式のための基礎理論構築とその応用

研究課題名(英文) Homogenized inelastic constitutive equation of open-porous bodies: theoretical developments and applications

研究代表者

大野 信忠(OHNO, Nobutada)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30115539

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,100,000円

研究成果の概要(和文)：最初に、内圧を受ける異方オープンポラス構造体の均質化粘塑性構成式の理論構築に必要なマイクロ-マクロ関係式を導出した。次に、導いたマイクロ-マクロ関係式を用いて、マクロ非弾性変形特性に及ぼすマイクロ粘塑性特性と作用内圧(ポア圧)の影響を理論的に明らかにした。さらに、検討結果に基づいて均質化粘塑性成式を定式化し、その妥当性をプレート-フィン構造体や多孔構造体の単位セル均質化有限要素解析との比較により検証した。

研究成果の概要(英文)：First, micro-macro relations were derived for developing a homogenized viscoplastic constitutive equation of anisotropic open-porous bodies subjected to pore pressure. Second, using the derived micro-macro relations, the effect of micro-viscoplasticity and pore pressure on the homogenized viscoplastic behavior was theoretically investigated. Third, based on the theoretical findings, a homogenized viscoplastic equation was developed. Then, the resulting constitutive equation was verified by performing finite element homogenization analysis of unit cells of plate-fin structures and thick perforated plates.

研究分野：固体力学，計算力学

キーワード：均質化 非弾性変形 構成式 オープンポラス体 ポア圧

1. 研究開始当初の背景

発電機、自動車、航空機等の熱交換器にはプレートフィン構造体や多孔構造体を使用することが多いが、このようなオープンポラス構造体を忠実に有限要素に分割して熱交換器の有限要素解析を行おうとすると、要素数が莫大となり、計算負荷が極めて高くなるという問題が生じる。そこで、計算負荷を大幅に低減するために、オープンポラス構造体を均質体として扱う構成式(均質化構成式)が必要とされており、しかもその定式化には作用内圧の考慮が求められている。

しかし、オープンポラス構造体のようにポア部分が存在すると、ポア部分では変位分布が不定となるため、複合材を対象とした従来のマイクロ-マクロ関係式は成立しないので、導出し直す必要がある。これに伴って、複合材のマイクロ仕事とマクロ仕事の関形式として重要である Hill の定理についても再構築する必要が生じる。特にポア部分に内圧が作用する場合には、作用内圧によるマイクロ仕事を考慮する必要があるから、Hill の定理の再構築は重要である。

2. 研究の目的

(1) 内圧を受ける異方オープンポラス構造体に適用可能なマイクロ-マクロ関係式を導出し、固体部分の材料特性とポア部分の作用内圧がマクロ非弾性変形に及ぼす影響を理論的に検討する。固体部分は、金属材料とする。

(2) 上記(1)の理論的検討に基づいて、一様内圧を受けるオープンポラス構造体の均質化粘塑性構成式の定式化を行う。また、その妥当性を検討するため、高温熱交換器用のプレートフィン構造体と多孔構造体に適用し、単位セルの有限要素法による均質化解析(均質化有限要素解析)との比較を行う。

3. 研究の方法

(1) 異方オープンポラス構造体のマイクロひずみとマクロひずみの関係式を導出するため、周期構造体の単位セル内の変位式について検討する。また、Hill の定理を異方オープンポラス構造体に適用可能な形に拡張することで、マイクロ仕事とマクロ仕事の関係式を導出する。その際、ポア部分に作用する内圧(ポア圧)の影響を考慮する。この関係式を用いることで、マイクロ粘塑性特性とポア圧の影響を理論的に検討する。

(2) 上記(1)の理論的検討結果を Biot の弾性構成式と Mises の一般化相当応力に反映することで、内圧を受ける異方オープンポラス構造体の均質化粘塑性構成式を定式化する。このように構築した均質化粘塑性構成式の妥当性を、高温熱交換器用プレートフィン構造体と多孔構造体に対して検討するため、これらの構造体の単位セルの均質化有限要素

解析を汎用有限要素解析ソフト Abaqus により行う。

4. 研究成果

(1) 固体部分 V_s とポア部分 V_o からなる単位セル Y (図 1) を考え、そのマクロひずみ \mathbf{E} は単位セル表面 ∂Y の固体部分 ∂Y_s 上の変位のみにより表されることを示した。

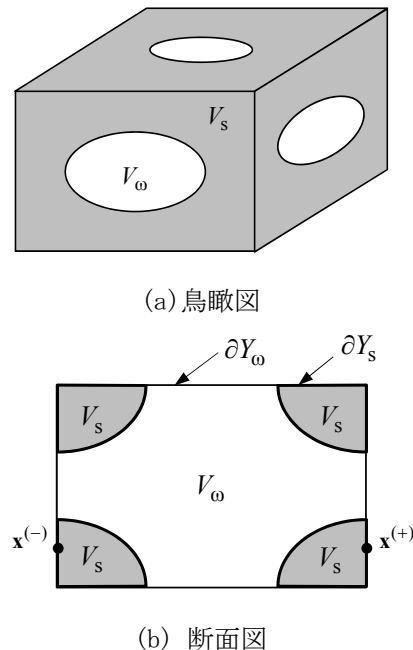


図 1. 固体部分 V_s とポア部分 V_o からなる単位セル Y

(2) Hill の定理を、図 1 のポア部分 V_o に内圧 p が作用する場合に適用可能な形に拡張した。その結果、固体部分 V_s の母材の変形が体積非圧縮であれば、マクロひずみ速度 $\dot{\mathbf{E}}$ に仕事共役なマクロ応力は Terzaghi の有効応力 $\boldsymbol{\Sigma} + p\mathbf{1}$ となることが示された。ここで、 $\boldsymbol{\Sigma}$ はマクロ応力であり、 $\mathbf{1}$ は 2 階の単位テンソルを示す。また、マクロひずみ速度 $\dot{\mathbf{E}}$ のマクロ応力依存性指数は、母材のひずみ速度の応力依存性指数に等しいことも示された。これらの知見は、内圧を受ける異方オープンポラス構造体の非弾性構成式の構築に有効である。

(3) Biot のポア-弾性則に、上記(2)の知見を Mises の一般化相当応力とともに考慮することで、内圧を受ける異方オープンポラス構造体のマクロ弾粘塑性材料モデルの構築を行った。これにより、このようなオープンポラス構造体を均質体として解析できるようになり、計算コストの大幅な削減が可能となった。

(4) 上記(3)で述べたマクロ弾粘塑性材料モデルを検証するため、高温熱交換器用プレートフィン構造体の単位セル(図 2)の均質化有限要素解析を実施し、比較したところ、マ

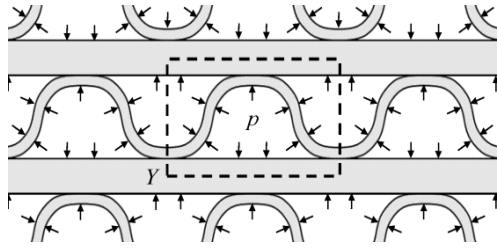


図 2. ポア圧 p を受けるプレート-フィン構造体中の単位セル Y

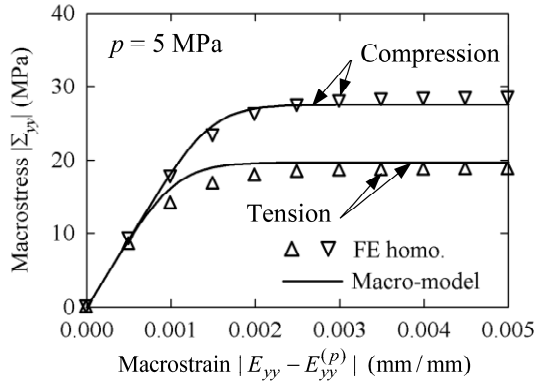


図 3. 積層方向の単軸引張および単軸圧縮でのマクロ応力-ひずみ曲線 (ポア圧 $p = 5$ MPa, 積層方向マクロひずみ速度 $= 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)

クロモデルの妥当性が示された. ポア圧 $p = 5$ MPa の場合の一例を図 3 に示す. この例での母材は Hastelloy X であり, 温度は 900°C である.

(5) 高温熱交換器用多孔構造体 (図 4) の単位セル (図 5) の均質化有限要素解析も実施し, 上記 (3) で述べたマクロ弾粘塑性材料モデルの妥当性を示した. ポア圧 $p = 0$ と $p = 20$ MPa の場合の検証結果の一例を図 6 に示す. この例での母材は改良 9Cr-1Mo 鋼であり, 温度は 550°C である.

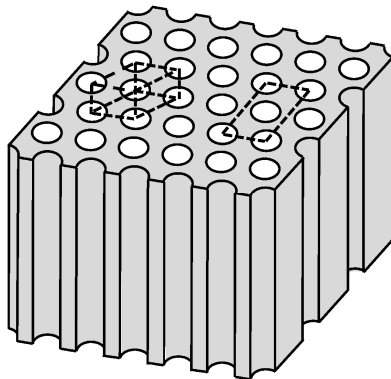


図 4. 多孔構造体

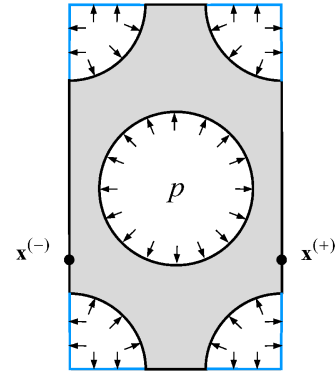
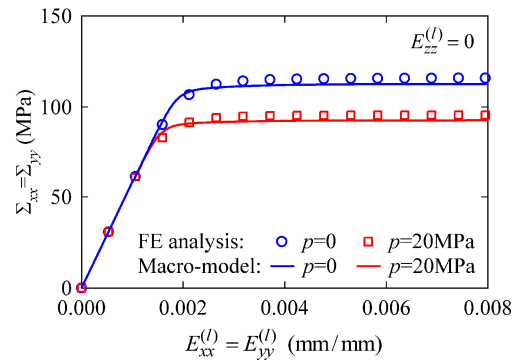
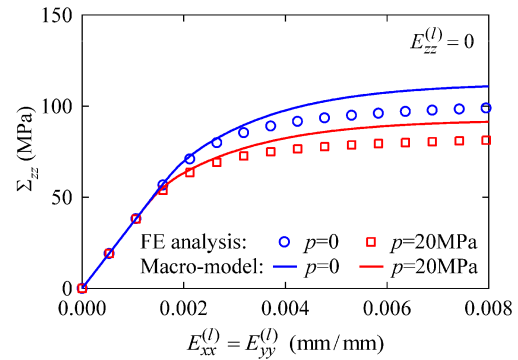


図 5. ポア圧 p を受ける多孔構造体の単位セル (上面図)



(a) 面内マクロ応力-ひずみ曲線



(b) 面外マクロ応力-ひずみ曲線

図 6. 平面ひずみ条件下で面内等二軸負荷を受ける多孔構造体のマクロ応力-ひずみ曲線

(6) プレートフィン構造体の一次流路側ポア圧 p_1 と二次流路側ポア圧 p_2 に差がある場合の均質化粘塑性挙動についても研究した. すなわち, 積層方向に繰返し負荷を受ける場合の 3 つの代表的条件を想定して支配内圧を理論的に明らかにするとともに, 単位セルの有限要素解析を実施してマクロ弾粘塑性材料モデルの適用性の検討を行った. この結果, 支配内圧が p_1 , p_2 , $p_m = (p_1 + p_2)/2$ となる 3 つの代表的ケースが明らかとなった.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計4件)

- ① N. Ohno, Homogenized elastic-viscoplastic behavior of anisotropic open-porous bodies, *Key Engineering Materials*, Vols. 535-536, 2013, pp. 12-17
DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.535-536.12
- ② N. Ohno, K. Narita, D. Okumura, Homogenized elastic-viscoplastic behavior of plate-fin structures with two pore pressures, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 86, 2014, pp. 18-25
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2013.10.015>
- ③ K. Ikenoya, N. Ohno, N. Kasahara, Homogenized elastic-viscoplastic behavior of thick perforated plates with pore pressure, *Advanced Structured Materials*, Vol. 57, 2015, pp. 97-116
DOI 10.1007/978-3-319-14660-7_6
- ④ S. Banno, D. Okumura, N. Ohno, Effect of strain hardening on monotonic and cyclic loading behavior of plate-fin structures with two pore pressures, *Key Engineering Materials*, Vol. 626, 2015, pp. 133-138
DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.626.133

[学会発表] (計10件)

- ① 池之谷和孝, 大野信忠, 奥村大, 松田哲也, 異方オープンポラス体の弾粘塑性均質化構成式, 日本材料学会第61期学術講演会, 2012年5月26-27日, 岡山大学津島キャンパス
- ② 池之谷和孝, 大野信忠, 奥村大, 松田哲也, 内圧を受ける異方オープンポラス体の弾粘塑性マクロ構成式, 日本機械学会 M&M2012 材料力学カンファレンス, 2012年9月21-24日, 愛媛大学
- ③ N. Ohno, Homogenized elastic-viscoplastic behavior of anisotropic open-porous bodies, 11th Asia-Pacific Conference on Engineering Plasticity and Its Applications, December 5-7, 2012, Singapore
- ④ 成田航平, 池之谷和孝, 大野信忠, 笠原直人, 内圧を受ける厚肉多孔板の弾粘塑性均質化シミュレーション, 日本材料学会第62期学術講演会, 2013年5月17-19日, 東京工業大学大岡山キャンパス

- ⑤ N. Ohno, K. Narita, D. Okumura, Homogenized elastic-viscoplastic behavior of open porous bodies with two pore pressures. 3rd International Conference on Material Modelling, September 8-11, 2013, Warsaw, Poland
- ⑥ 成田航平, 大野信忠, 奥村大, 内圧差を有するオープンポラス構造体の弾粘塑性均質化挙動, 日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス, 2013年10月12-14日, 岐阜大学
- ⑦ 成田航平, 大野信忠, 奥村大, 内圧差を有するプレートフィン構造体の弾粘塑性均質化解析, 日本機械学会東海支部第63期総会講演会講演論文集, 2014年3月18-19日, 大同大学
- ⑧ 大野信忠, 奥村大, 成田航平, プレートフィン構造体の弾粘塑性均質化解析に及ぼす内圧差の影響, 日本材料学会第63期学術講演会, 2014年5月16-18日, 福岡大学
- ⑨ 坂野修平, 奥村大, 大野信忠, 内圧差を有するプレートフィン構造体の弾粘塑性均質化挙動に及ぼすひずみ硬化の影響, 日本機械学会 M&M2014 材料力学カンファレンス, 2014年7月18-21日, 福島大学
- ⑩ S. Banno, D. Okumura, N. Ohno, Effect of strain hardening on monotonic and cyclic loading behavior of plate-fin structures with two pore pressures, 12th Asia-Pacific Conference on Engineering Plasticity and Its Applications, September 1-5, 2014, Kaohsiung, Taiwan

[その他]

ホームページ等

<http://www.mech.nagoya-u.ac.jp/mml/JPN/research/research.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大野 信忠 (OHNO, Nobutada)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 30115539

(2) 研究分担者

奥村 大 (OKUMURA, Dai)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 70362283