

多孔質体構成部材のアスペクト比が通過流れに及ぼす影響

ON THE EFFECT OF ASPECT RATIO OF COMPONENT MEMBER ON THE FLOW THROUGH POROUS MEDIA

河海工学分野 渡辺 友哉

River and Coastal Environmental Engineering Yuya Watanabe

現在まで、多孔質体通過流れの効果や多孔質体の安定性を定量的に表すためにさまざまなモデルが提案されている。しかし、ほとんどの研究において多孔質体は球で近似されている。自然界に存在する礫層、消波構造物は楕円体形状を有するものも多く、楕円体で構成された多孔質体通過流れの検討は必須である。したがって、本研究では楕円体を面心立方状に配置した多孔質体通過流れの微細流動計算を行い、楕円体のアスペクト比が多孔質体通過流れに及ぼす影響を検討した。

So far, various models have been proposed to quantitatively express the effect of the flow through the porous media and the stability of the porous body. However, in most studies, porous bodies are approximated by spheres. Many of the gravel layers and wave dissipating structures existing in the nature have ellipsoid shapes, and the study of porous flow composed of ellipsoids is indispensable. Therefore, in this study, a microfluidity calculation of a flow through a porous body in which ellipsoids are arranged in zigzag was performed, and the influence of the aspect ratio of the ellipsoid on the flow through the porous body was examined.

1 研究背景, 目的

多孔質体とは、内部に多くの間隙をもつ物体を示し、身の回りに多く存在する。例えばフィルターや透水性舗装、地下の砂層や礫層、消波構造物に用いられる石積み堤などは多孔質体である。このような多孔質体内部を通過する空気や液体は、その内部形状の複雑さゆえ間隙部において様々な影響を受ける。例えば熱工学の分野では、多孔質体が間隙により、表面積が大きく、高い熱交換率をもつことに着目し、多孔質体をフィンとして用いる熱交換器が有望とされている¹⁾。また地熱学の分野においては、地下熱貯留層を流れる地熱流体の挙動や熱エネルギーの移動を把握することで、地熱採取の効率化が望まれている²⁾。このような特長から、多孔質体通過流れの効果や多孔質体の安定性を定量的に表すためにさまざまなモデルが提案されている。Ergun³⁾は640もの既往の実験データをもとに、多孔質体通過前後の圧力降下量を粘性項(Blake-Kozeny式)と慣性項(Burke-Plummer式)からなる式を用いて表した。またErgunの巨視的経験則に基づき、Navier-Stokes式に局所体積平均操作を導入したモデルが用いられるようになり、このモデルは多孔質体通過時の乱れの影響を考慮している⁴⁾。しかし、巨視的経験則に基づいたモデルは多孔質体通過前後の圧力差から平均的な流れを考慮しているにすぎない。そのため局所的な間隙構造の影響などは表現できていない。これを考慮するための数値モデルの開発が進められている。大桐ら⁵⁾は、格子ボルツマン法を用いた数値モデルにより、

面心立方格子状、さらには体心立方格子状に設置された球間を通過する流体の透水率を算出した。またDeら⁶⁾は球を有限体積法とImmersed Boundary Methodを導入した(FVM-IBM)二相モデルを用いて、ランダム配置した球群を通過する通過流れの流路・渦運動に関する検討を行った。しかし上述した研究も含め、多種多様な形状を有する多孔質体構成要素を球と理想化して取り扱うものが多く、構成要素の形状の影響について検討した例は皆無である。自然界に存在する礫層、消波構造物は楕円体形状を有するものも多く、楕円体で構成された多孔質体通過流れの検討は必須である。

したがって、本研究では複雑な固体壁面の境界条件を容易に取り込むことができるImmersed Boundary Method(以下、IB法)を導入した3次元数値計算モデルを用いて、楕円体を面心立方状に配置し、楕円体のアスペクト比が多孔質体通過流れの流況や流体力に及ぼす影響について検討を行った。

2 数値計算手法と計算条件

2.1 数値計算手法

本研究では、強制外力項を導入して任意固体壁面における境界条件を満足させるIB法を適用した。基礎方程式は、非圧縮粘性流体運動の質量保存則と運動量保存則式である。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F} + \mathbf{g} \quad (2)$$

表-1 楕円体で構成された多孔質体通過流れの計算条件

計算ケース	計算領域 xL, yL, zL [m]	多孔質体サイズ L_{px}, L_{py}, L_{pz} [m]	U_{in} [m/s]	代表径 D_p [m]	間隙率 ϕ	R_{ep} (Ergun)
Porous_AS1.0	0.168, 0.027, 0.027	0.0524, 0.027, 0.027	0.001	0.0146	0.562	14.6
			0.004			58.3
			0.016			233.4
			0.064			933.9
Porous_AS2.0	0.216, 0.027, 0.027	0.105, 0.027, 0.027	0.001	0.0161	0.562	15.6
			0.004			64.4
			0.016			257.5
			0.064			1030
Porous_AS1.5	0.216, 0.027, 0.027	0.0785, 0.027, 0.027	0.001	0.0156	0.562	15.6
			0.004			62.5
			0.016			249.9
			0.064			999.4
Porous_AS0.5	0.168, 0.027, 0.054	0.08, 0.027, 0.054	0.001	0.0178	0.562	18.0
			0.004			71.7
			0.016			286.8
			0.064			1147.4

ここに、 u は流体の速度ベクトル、 P は圧力、 t は時間、 ρ は流体の密度、 μ は粘性係数、 g は外力ベクトルである。 F は、固体境界条件満足させるために導入された強制外力ベクトルである。多孔質体は複雑な間隙形状をもつため、通常の直交格子法では壁面の解像度に制約があり、境界適合格子による計算は間隙形状が複雑になると適用が困難である。したがって強制外力を導入することで任意の固体壁を表現し得る Immersed Boundary 法はこうした難点を回避するために有効な手法である。強制外力項は物体表面上に配置される Lagrange 点 (図-1) 近傍においてのみ作用し、算出手法は Lima e Silva et al.⁷⁾ により提案された Physical Virtual Model を参考にした。

2.2 計算条件

数値計算は、一方向流場に置かれた多孔質体周り流れに対して実施し、多孔質体を構成する楕円体のアスペクト比 AS を変えて計算した。ここでいうアスペクト比とは楕円体の x 軸方向長さ D_x と z 軸方向長さ D_z の比を示しており、 D_y は一定とした。計算領域を図-2、計算条件を表-1 に示す。流入境界で一様流速 $U_{in}=0.001, 0.004,$

$0.016, 0.064$ m/s を、流出境界では Sommerfeld の放射境界条件を、側方境界には non-slip 境界を与え、数値計算の安定性の問題により側方境界と多孔質体の間に $0.05D_y$ のクリアランスを設けている。計算格子には等長格子を用い、格子幅 Δx は 0.0005625 m とし、Lagrange 点間距離 $\Delta k/\Delta x=0.5\sim 0.6$ の範囲で設定した。

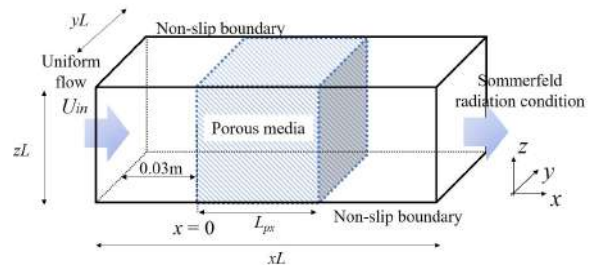


図-2 計算領域と境界条件

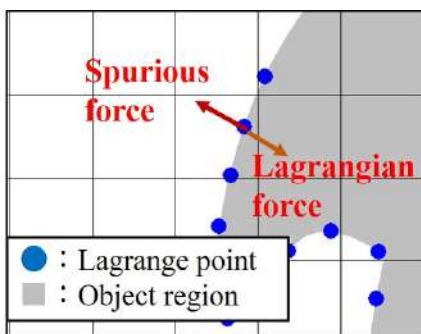


図-1 Lagrange 点と流体計算格子

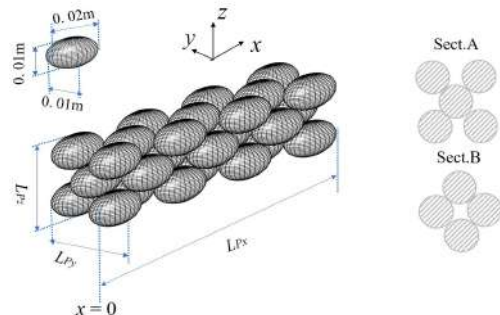


図-3 多孔質体の構成

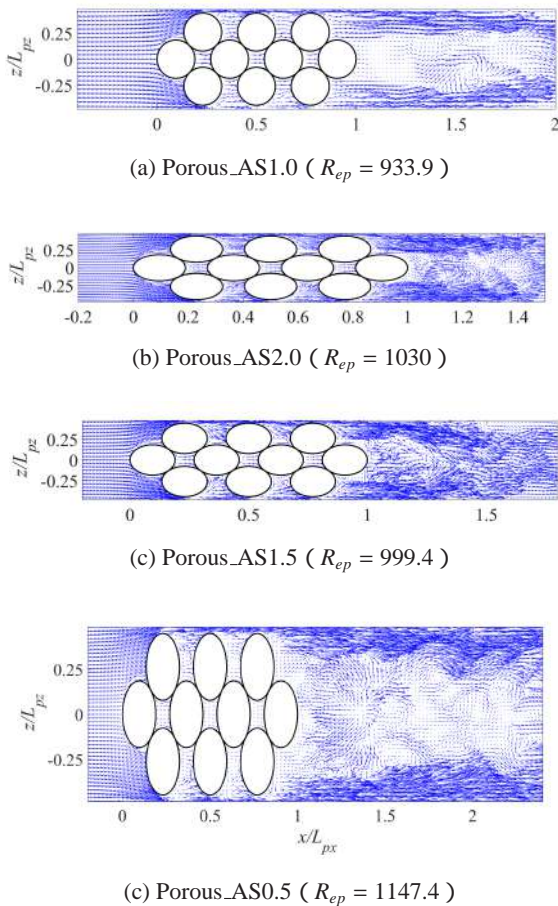


図-4 $y/L_{px}=0$ 断面における多孔質体内部及び周辺の流速ベクトル図 ($U_{in}=0.064\text{m/s}$, 無次元時刻 $T^* (=U_{in}t/D_p) = 9.8$)

Reynolds 数は Ergun の式より算出した等価直径を記載している．しかし楕円体で構成された多孔質体通過流れの流況に影響を及ぼす物体長さも不明なため，本稿では流入条件について流入流速 U_{in} をそろえている．時間刻み $\Delta t = 4.0 \times 10^{-4}\text{s}$ とした．計算領域の中心に原点を，流下方向に x 軸をとるように座標系を設定し，多孔質体流入端が $x=0$ となるように設置した．多孔質体は，径 (D_x, D_y, D_z) が $0.01\text{m} \times 0.01\text{m} \times 0.01\text{m}$ の球（以下 AS=1.0 の楕円体とする）， $0.02\text{m} \times 0.01\text{m} \times 0.01\text{m}$ の楕円体（AS=2.0）， $0.01\text{m} \times 0.01\text{m} \times 0.02\text{m}$ の楕円体（AS=0.5）を構成材とし，同一アスペクト比の構成材を面心立方状に積み上げることで表現した．具体的には構成材を 5 個設置した SectA と 4 個設置した SectB を交互に配置し総数 32 個の構成材から多孔質体を作成した．アスペクト比 AS = 2.0 の楕円体から構成された多孔質体は図-3 のようになる．実際の消波構造物は間隙率から積み方を決めているケースも多いため，本稿において検討する多孔質体全てにおいて間隙率 ϵ と構成材個数 N は統一している．間隙率は多孔質体流入端から流出端までの管路内に存在する流体の体積と多孔質体流入端から流出端までの管路体積の比によって与えている．間隙率 $\epsilon=0.562$ ，構成材個数 $N=32$ 個を与えている．以下，AS=1.0, 2.0, 0.5 の楕円体で構成された多孔質体流れを Porous_AS1.0, 2.0, 0.5 と表記する．

3 構成材のアスペクト比が多孔質体通過流れに及ぼす影響について

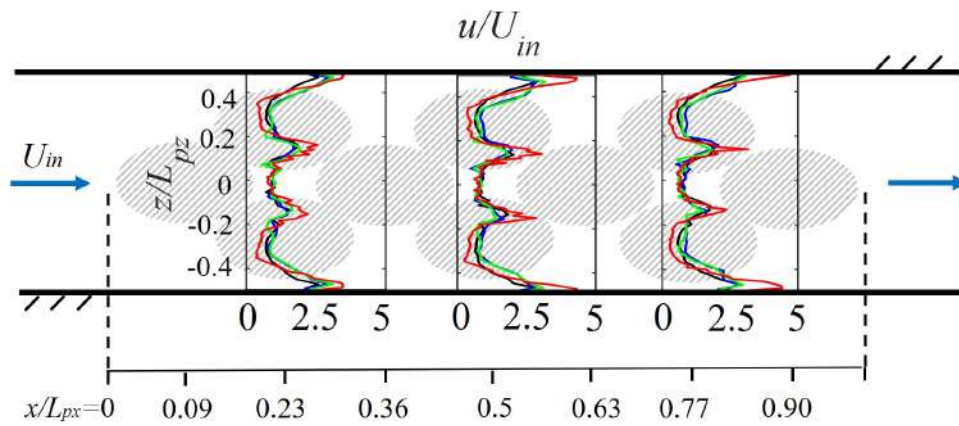
3.1 多孔質体内部及び周辺の流況

$U_{in}=0.064\text{m/s}$ 時における各多孔質体通過間流れの流速ベクトル図を図-4 に示す．どの多孔質体通過流れにおいても xz 断面流れにおいて非対称な流れを示した．その非対称性は間隙内部と多孔質体流出後で異なる．間隙内部では， $z/L_{pz} \geq 0$ の壁面付近で流速値が大きくなり揺らぎも $z/L_{pz} \leq 0$ の壁面付近流れに比べ大きい．この非対称性は単一物体周りの流れにおいても確認されている．しかし，アスペクト比が 0.5 の楕円体について，単一物体周り流れでは物体通過直後下降する傾向を示しており，多孔質体通過流れにおける間隙上部で揺れが大きくなる傾向とは異なる．また四方が構成材に囲まれた $z/L_{pz}=0$ 地点の間隙部における流速値が中條ら⁸⁾ の計測値と比べて小さい値を示していることから，構成材-壁面間のクリアランスによって間隙部に流れ込む流量が減少したと考えられる．

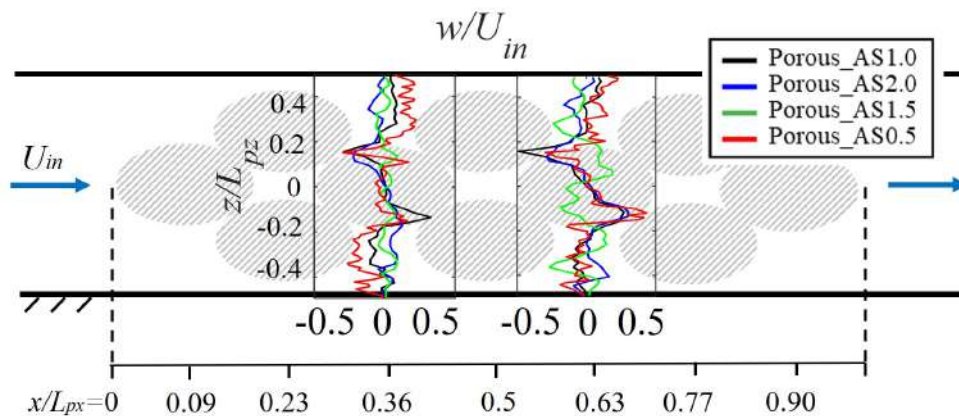
アスペクト比による流速ベクトルの変化について述べていく．Porous_AS1.0 においては多孔質体流入直後は壁面-構成材間を直線的に流れる流動が大きく，構成材間においても直線的に流下する流れも多く見られた．多孔質体通過後は緩やかに揺れながら流下していき， $x/L_{px}=1.5$ 地点意向で比較的大きな揺れが生じ始める．Porous_AS2.0 では Porous_AS1.0 と異なり，壁面-構成材間から多孔質体内部に入り込む流れが多く見られた．Porous_AS1.5 でも，同様な傾向が生じているが間隙内部に入り込む流速ベクトル値は Porous_AS2.0 に比べて小さい．アスペクト比が 2.0 の楕円体は球に比べ，流軸に沿うような形状であるため直線的に流下すると予測していたが，その予測とは異なる結果が得られた．また後流域において Porous_AS1.0 と比べ多孔質体通過直後から揺らぎが大きくなり， $x/L_{px}=1.2$ 地点で大きく渦巻くような流れが生じていた．Porous_AS1.5 では後流域における揺らぎは $x/L_{px}=1.3$ 付近で大きく表れており，構成材のアスペクト比が増加するにつれて，後流域の揺らぎが多孔質体流出端近くで発生すると考えられる．Porous_AS0.5 通過流れは他の多孔質体通過流れと傾向が異なり，多孔質体流入直後，多孔質体内部から壁面方向に向かう流動が多く見られた．そのため壁面付近の流速ベクトル値が増大しながら流下していく．

3.2 多孔質体間隙部における流速変動

前節で多孔質体周りの流況について把握し，構成材のアスペクト比によって多孔質体内部に流入する流動，壁面-構成材間の流動に変化することが示された．これらの点を踏まえ，多孔質体内部における流速流下方向変化について述べていく． $x/L_{px}=0.23, 0.5, 0.77$ における無次元水平流速 u/U_{in} の z 軸方向分布， $x/L_{px}=0.37, 0.63$ における



(a) $x/L_{px}=0.23, 0.5, 0.77$ における水平流速 u/U_{in} の z 軸方向分布



(b) $x/L_{px}=0.37, 0.63$ における鉛直流速 w/U_{in} の z 軸方向分布

図-5 楕円体で構成された多孔質体通過流れの流速鉛直分布 ($T^* = 9.8$)

無次元鉛直流速 w/U_{in} の z 軸方向分布を図-5 に示す。水平流速、鉛直流速ともに y 軸方向において平均化したものを鉛直方向にプロットしている。水平流速・鉛直流速において示す x 軸位置が異なるのは、Porous_AS0.5 の壁面付近流速の増加が顕著に見られたのが構成材が 5 つ存在する Sec.A であったため、また多孔質体中央部に向かって壁面付近から流れ込む流動が多く見られたのが構成材が 4 つ存在する Sec.B であったためである。水平流速の鉛直分布より、 $-0.1 \leq z/L_{pz} \leq 0.1$ における水平流速は、 x 座標、アスペクト比によらず全て同じ値を示していた。また $-0.45 \leq z/L_{pz} \leq -0.2$ 、 $0.2 \leq z/L_{pz} \leq 0.45$ では壁面付近から多孔質体内部に入り込むような流れが見られた Porous_AS2.0, 1.5 における流速が Porous_AS1.0 に比べ 10~20% 増加していた。Porous_AS2.0 と Porous_AS1.0 における多孔質体中央部の間隙流速がほとんど等しい値であることから、Porous_AS2.0, 1.5 では壁面付近から多孔質体内部に入り込むような流れは多くみられるようになったが、 $-0.1 \leq z/L_{pz} \leq 0.1$ の間隙部にまでは到達せずに流下したと推測される。これほどに壁面-構成材間のクリアランスによる影響はかなり大きく、現地の多孔質体間隙部における流動

を再現するためには、クリアランスを必要としない数値計算モデルを構築していく必要がある。Porous_AS0.5 では壁面付近の流速値が Porous_AS1.0 に比べ、 $x/L_{px}=0.23$ では約 1.2 倍、 $x/L_{px}=0.77$ では約 1.8 倍もの値を示した。一方 Porous_AS0.5 の $0.45 \leq z/L_{pz} \leq -0.2$ 、 $0.2 \leq z/L_{pz} \leq 0.45$ における流速も壁面付近流速の増加とともに流下するごとに減少し、 $x/L_{px}=0.77$ では Porous_AS1.0 の約 1/3 の値まで減少していた。

$-0.45 \leq z/L_{pz} \leq -0.2$ 、 $0.2 \leq z/L_{pz} \leq 0.45$ における鉛直流速の鉛直分布をみると、Porous_AS0.5 では壁面付近から多孔質体内部に、Porous_AS2.0, 1.5 では多孔質体内部から壁面付近に、Porous_AS1.0 ではほぼ 0 値を示していることから直線的に流下していることが分かる。また鉛直流速の鉛直分布が流出端に近づくにあたって、変動幅が増加する傾向も見られた。Porous_AS1.5 では、 $-0.45 \leq z/L_{pz} \leq -0.2$ 、 $0.2 \leq z/L_{pz} \leq 0.45$ においてそれぞれ鉛直流速が正負に変動しており、その他の多孔質体通過流れと異なる傾向を示した。このようにクリアランスの影響が大きい中でも、アスペクト比が変化することで間隙内部の流動が異なり、流速値にも大きな差を生み出す。Porous_AS1.5

における流動のみ傾向が異なっていたことから今後は1.0~1.5のアスペクト比の構成材による多孔質体通過流れに関する検討が必須である。

3.3 多孔質体通過前後の圧力差について

アスペクト比の変化によって、内部流況や流速変動がどのように変化するかについて把握できた。次はアスペクト比の変化が多孔質体通過時の圧力降下量に及ぼす影響を検討する。各多孔質体通過流れにおいて、 $U_{in}=0.001, 0.004, 0.016, 0.064\text{m/s}$ と変化させた場合における多孔質体通過前後の無次元圧力降下量と Ergun の巨視的経験則を図-4 に示す。Ergun の経験則を以下に示す。

$$\frac{\Delta P}{L_{px}} = 150 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3 D_p^2} \mu U_{in} + 1.75 \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3 D_p} \rho U_{in}^2 \quad (3)$$

ΔP は多孔質体通過前後の圧力差である。

また、無次元圧力降下量を以下の式より算出した。

$$C_f = \frac{\Delta P}{L} \frac{D_p}{\rho U_{in}^2} \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)} \quad (4)$$

いずれの多孔質体通過流れにおいても Ergun の経験式の傾向に沿った値を示し、Ergun の実験値のプロット幅を考えれば許容範囲といえる。一方で、アスペクト比によって圧力降下量に差が生じている。多孔質体通過流れが層流状態を示す $U_{in}=0.001$ では Porous_AS1.0 において最も圧力降下量が大きい値を示し、Porous_AS2.0 の約 2.3 倍の値を示した。多孔質体内部流れが粘性作用が大きいために y 軸、z 軸方向に広がるように流下し壁面摩擦の影響を大きく受けるためであると考えられる。 $U_{in}=0.064\text{m/s}$ 時において壁面付近の流速が大きい値を示した Porous_AS0.5 は xz 断面で広がるような流れは見られたものの、xy 断面において流速値が小さく結果的に圧力降下量が Porous_AS1.0 より小さい値を示した。流速が増加していくと Porous_AS0.5 の圧力降下量が最も大きい値を示すようになる。流速増加に従い、Porous_AS0.5 通過流れの壁面付近流速が増加し、壁面摩擦の影響を大きく受けるようになるためであると考えられる。

次に $U_{in}=0.064\text{m/s}$ における圧力降下量の流下方向変化を図-7 に示す。いずれの多孔質体においても構成材の重心位置において圧力降下の傾きが緩やかになり、その後再度傾きが増加し流下していく傾向を示した。傾きにおいてはアスペクト比によって違いが生じるが、変化傾向については、多孔質体の構成材位置に変曲点が依存していることから圧力降下の傾向は構成材の積み方に依存すると推測される。また、Porous_AS1.0 と Porous_1.5 において、流入直後は圧力降下の傾きが異なり、僅かながら圧力降下量に差が生じていたが、流出端に近づくにつれて差が縮まり、多孔質体通過前後の圧力差はほとんど等しい値を示した。圧力損失値では、アスペクト比の変化に

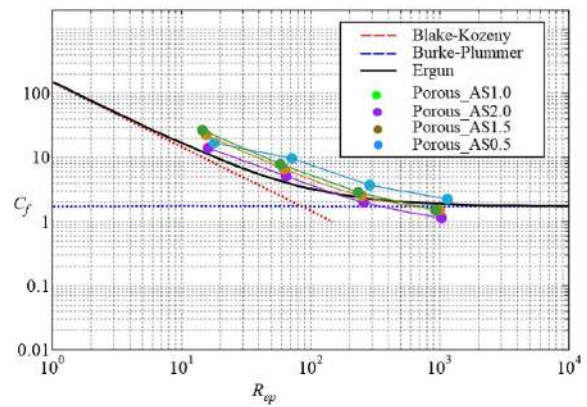


図-6 多孔質体通過前後の圧力差

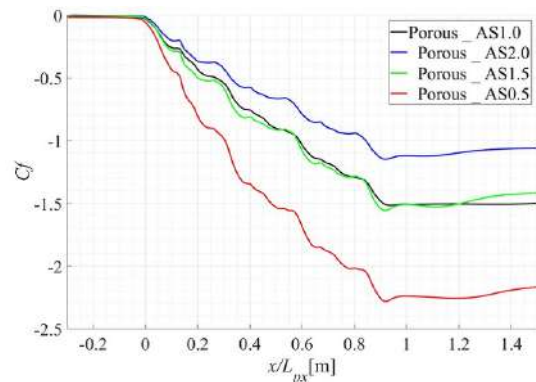


図-7 $U_{in}=0.064\text{m/s}$ 時における圧力降下量の流下方向変化

よる値のばらつきが確認できた一方で、アスペクト比に関わらず圧力降下量の流下方向における変化傾向のように違いが生じないものも確認できた。

3.4 多孔質体に作用する流体力について

多孔質体に作用する流体力の時系列平均値を断面平均したものを図-8 に示す。抗力係数・揚力係数は流下方向から見た投影面積 A_p を用いて無次元化している。

抗力について、どのケースの多孔質体流れについても流下方向に抗力が減少していき、流出端の手前で上昇するという傾向は一致している Porous_AS0.5 において、多孔質体に作用する抗力が最も大きくなり、この結果は単一楕円体周りの流れの検討結果と一致している。流入端では Porous_AS1.0 に比べ約 3 倍ほどの抗力が作用している。しか一方 $x/L_{px}=0.23$ 以降における抗力減少率も他 2 ケースに比べて大きく、流出端に作用する抗力は流入端に作用する抗力の半分程度である。この要因として、流下するにつれて多孔質体構成材間から壁面付近に向かう流れが増え、構成材間の流速値が減少したことによって、流下方向に抗力が大きく減少したと考えられる。また $x/L_{px}=0.37, 0.77$ 地点で抗力が増加傾向にあり、壁面付近から多孔質体内部に入り込む流れが影響していると推測される。そのため、直前断面 $x/L_{px} = 0.64$ の抗力値と比

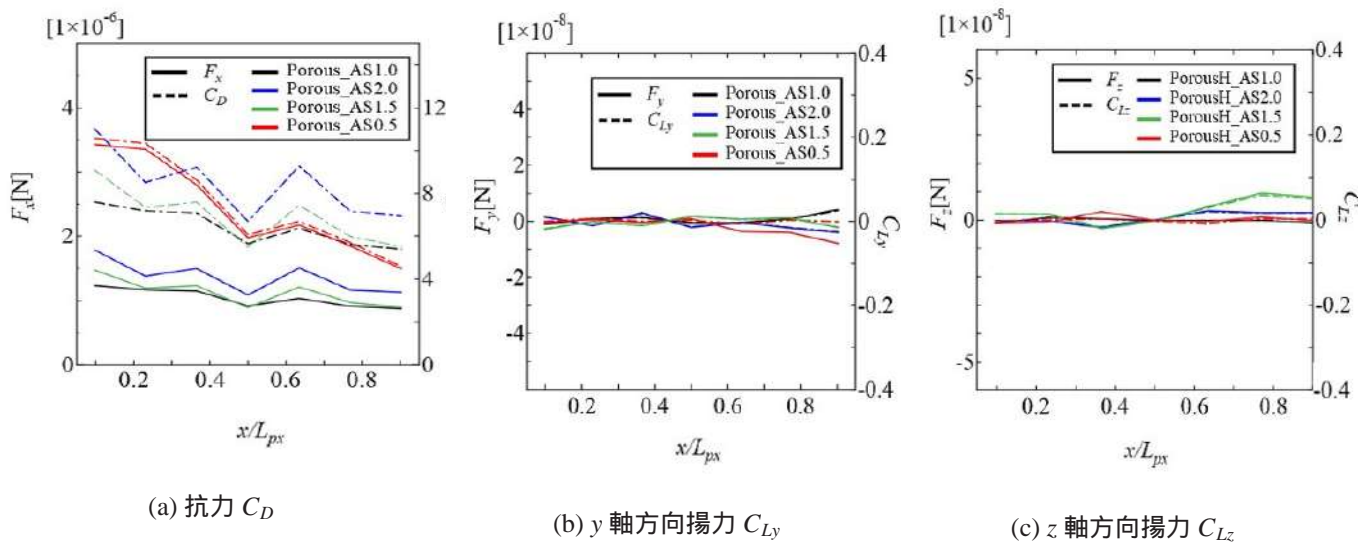


図-8 多孔質体に作用する断面平均流体力 ($U_{in}=0.064\text{m/s}$)

較した $x/L_{px} = 0.77$ における抗力の増加率は Porous_ が最も大きい。抗力係数の値については Porous_AS2.0 における値が最も大きい値を示した。しかし単一物体周りの流れにおいては、アスペクト比が 2.0 の楕円体よりも球に作用する抗力の方が大きいといった結果が得られており、予測から外れた結果となった。一方で Porous_AS2.0, 1.5, 0.5 の抗力係数・抗力値の大小関係は単一物体流れの検討結果と一致している。

揚力について、Porous_AS1.0 においては y 軸、 z 軸方向揚力ともにほぼ 0 値を示しており通過流れが非対称を示しているものの流体力は y 軸、 z 軸方向で釣り合っていることが分かる。しかし、各方向長さが等方的でない構成材からなる Porous_AS2.0, 1.5, 0.5 通過流れにおいては僅かではあるが（最大値は抗力の 0.5%）多孔質体に作用する y 軸、 z 軸方向の流体力が対称性を満たさなくなる。また後流域で y 軸、 z 軸方向ともに揚力が増加する傾向にあり、後流域で形成される渦によるものと考えられる。

4 結論

本稿における結論を以下に示す。

- $U_{in}=0.064\text{m/s}$ 時において、多孔質体構成材のアスペクト比が 1.0 より大きくなると、多孔質体内部に入り込む流動が多く生じるようになり、後流域の揺れも多孔質体流出端に近い位置で発生する。一方で多孔質体中央部の流速は小さい値を示しており、壁面-構成材間から流入した流体は中央部に到達せずに多孔質体縁部を流下していると考えられる。
- $U_{in}=0.064\text{m/s}$ 時において、多孔質体構成材のアスペクト比が 1.0 より小さくなると、多孔質体縁部に向かって噴出するような流れが増え、壁面-構成材間の流量が流下するごとに増加した。そのため流下するごとに間隙内部の流速が減少し、多孔質体に作用す

る抗力は流入端で最も大きな値を示し、その後は線形的に減少していく。

- $U_{in}=0.064\text{m/s}$ 時における多孔質体通過前後の圧力差について、多孔質体構成材のアスペクト比が 2.0 の場合、多孔質体構成材のアスペクト比が 1.0 と比べ、圧力降下量が約 26% 程減少し、多孔質体構成材のアスペクト比が 2.0 の場合は圧力降下量が約 50% 程増加した。一方で多孔質体構成材のアスペクト比が 1.5 の場合、多孔質体構成材のアスペクト比が 1.0 の圧力降下量とほとんど等しい値を示し。アスペクト比が 1.0~1.5 間では圧力損失値はほとんど変化しないことが推測される。
- 多孔質体構成材のアスペクト比が 1.0 を外れると、多孔質体に作用する抗力値は増加し、アスペクト比が 2.0 の場合、全体として多孔質体に作用する抗力係数は約 1.5 倍の値を示した。また揚力は抗力値の 0.5% という微小な値ではあるが対称性を満たさなくなる。

参考文献

- 1) 小田豊, 岩井裕, 鈴木健二郎, 吉田英生 (2003): 多孔質体内熱流動と、固体壁内熱伝導の連成解析, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 69, No. 679, pp. 674-681
- 2) 島生大祐, 牛島省 (2013): 熱伝導性を有する多孔質体中の自然対流現象に対する多相場モデルの適用性, 土木学会論文集 A2, Vol.69, No. 2, pp. 171-178.
- 3) Ergun, S.(1952): Fluid flow through packed columns, *Chemical Engineering Progress*, Vol. 48, pp. 89-94.
- 4) F.Kuwahara, Y.Kameyama, S.Yamashita, and A.Nakayama(1998): Numerical modeling of turbulent flow in porous media using a spatially periodic array. *J. porous Media*, Vol. 1, pp. 47-55.
- 5) 大桐邦夫, 稲葉武彦, 山口康隆 (2008): 多孔質体の内部構造と流れ特性に関する研究, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 74, No.739, pp. 552-557.
- 6) S. De, J.A.M. Kuipers, E.A.J.F. Peters, J.T. Padding(2017): Viscoelastic flow simulations in random porous media, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 248, pp. 50-61.
- 7) Lima e Silva, A. L. F., Silveira-Neto, A., and Damasceno, J. J. R.(2003): Numerical simulation of two-dimensional flows over a circular cylinder using the immersed boundary method, *Journal of Computational Physics*, Vol. 189, pp. 351-370.
- 8) 中條壮大, 重松孝昌, 辻本剛三, 竹原幸生 (2007): 多孔質体によって生成される乱流諸量に及ぼすレイノルズ数の影響に関する実験的研究, 海岸工学論文集, Vol. 54, pp. 801-805.