

吸い込み口のある環状流路内の流動解析

Numerical Simulation for Turbulent Flow in a Annulus Flow Path with Outlet Hole

小林 敏 雄*・山 本 哲 三*・森 西 洋 平*

Toshio KOBAYASHI, Tetsuzou YAMAMOTO and Youhei MORINISHI

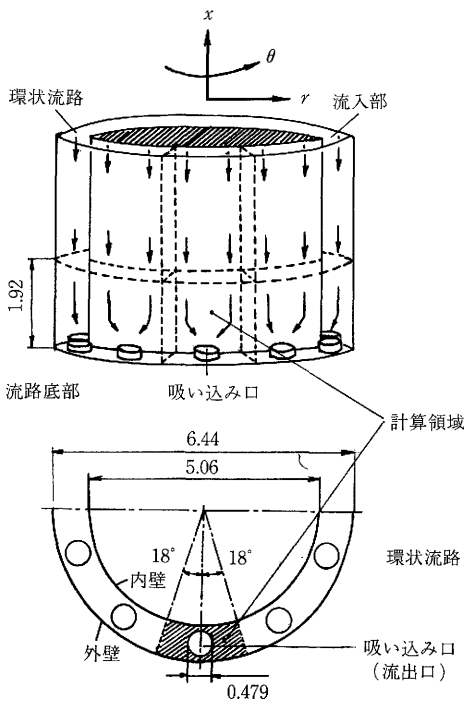
1. ま え が き

LES (Large Eddy Simulation) は、乱流の数値シミュレーション手法の一つであり、 $k-\epsilon$ モデルで計算されるような時間平均量ではなく、各瞬時の速度場の情報が得られる。そのため、LESは“数値風洞実験”という言葉が表すように、実験の手法よりもはるかに多くの乱流場のダイナミックな情報を得ることができる数値シミュレーション手法として関心を集めている。

本研究は、比較的複雑な体系である“吸い込み口のある環状流路”に対し、LESを用いダイナミックな解析を行い、同流れ場の物理量のゆらぎを調査することを目的としている。

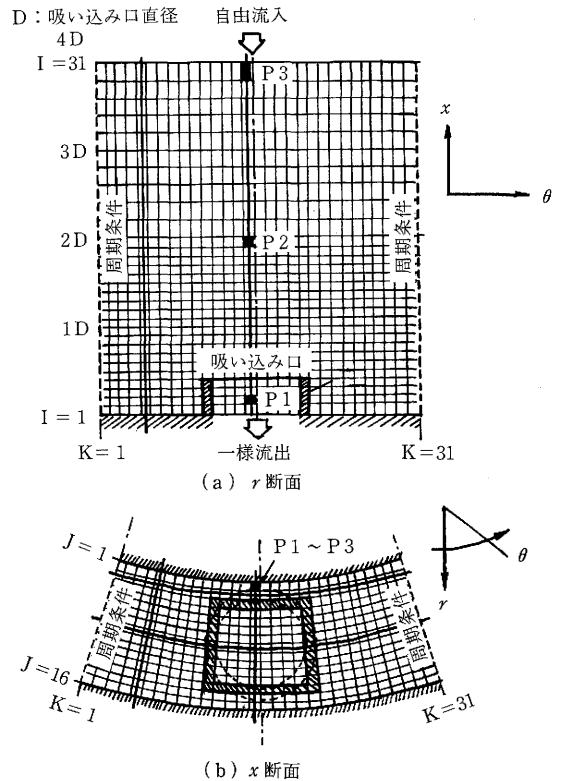
2. 数値シミュレーション対象

計算対象を図1に示す。流れ場は、2重円筒で構成さ



※各部寸法は、環状流路の有効直径により無次元化した。

図1 計算対象の流れ



■ 圧力変動評価点 ■ 壁 — 速度ベクトル表示面

図2 メッシュ分割および境界条件

*東京大学生産技術研究所 第2部

表 1 基礎方程式

表 2 計算条件

—連続の式—

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r\bar{v})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \theta} = 0$$

—運動方程式—

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}\bar{u})}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r\bar{v}\bar{u})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\bar{w}\bar{u})}{\partial \theta}$$

$$= -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{1}{Re} + \nu_\tau \right) \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) \right]$$

$$+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\frac{1}{Re} + \nu_\tau \right) \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \right) \right]$$

$$+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\left(\frac{1}{Re} + \nu_\tau \right) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \theta} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) \right]$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r\bar{v}\bar{v})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\bar{w}\bar{v})}{\partial \theta} - \frac{\bar{w}^2}{r}$$

$$= -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{1}{Re} + \nu_\tau \right) \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \right) \right]$$

$$+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\frac{1}{Re} + \nu_\tau \right) r \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial r} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} \right) \right]$$

$$+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\left(\frac{1}{Re} + \nu_\tau \right) \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial r} - \frac{\bar{w}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \theta} \right) \right]$$

$$- \frac{1}{r} \left[2 \left(\frac{1}{Re} + \nu_\tau \right) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \theta} + \frac{\bar{v}}{r} \right) \right]$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}\bar{w})}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r\bar{v}\bar{w})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (\bar{w}\bar{w})}{\partial \theta} + \frac{\bar{v}\bar{w}}{r}$$

$$= -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{1}{Re} + \nu_\tau \right) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \theta} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) \right]$$

$$+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\frac{1}{Re} + \nu_\tau \right) \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial r} - \frac{\bar{w}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \theta} \right) \right]$$

$$+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[2 \left(\frac{1}{Re} + \nu_\tau \right) \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \theta} + \frac{\bar{v}}{r} \right) \right]$$

$$+ \frac{1}{r} \left[\left(\frac{1}{Re} + \nu_\tau \right) \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial r} - \frac{\bar{w}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \theta} \right) \right]$$

—Smagorinskyモデル—

$$\nu_\tau = (C\Delta)^2 \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \bar{w}}{\partial \theta} + \frac{\bar{v}}{r} \right)^2 \right\} \right. \right.$$

$$\left. + \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial r} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \theta} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right)^2 \right. \right.$$

$$\left. + \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial r} - \frac{\bar{w}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \theta} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\Delta = (\Delta x \cdot \Delta r \cdot r \Delta \theta)^{1/3}, C=0.1 \text{ (Smagorinsky定数)}$$

計算手法	LES
基礎方程式座標系	円筒座標系
差分格子	スタガード(コントロール・ボリューム法)
時間スキーム	Adams・Bashforth法
空間スキーム	2次中心差分 (一部ドナー・セル差分適用)
圧力の解法	速度・圧力同時緩和法 (HSMACスキーム)
流入条件(速度)	自由流入
流出条件(速度)	一様流出
壁面境界	log則(2層モデル)
周方向境界	周期条件
Smagorinsky定数	0.10
Reynolds数	10 ⁵
格子数(x×r×θ)	30×15×30
時間さざみ	10 ⁻³
速度・圧力同時緩和法収束条件	MA× div u < 10 ⁻²

T-START=0.00 T-END=5.60 RE=100000

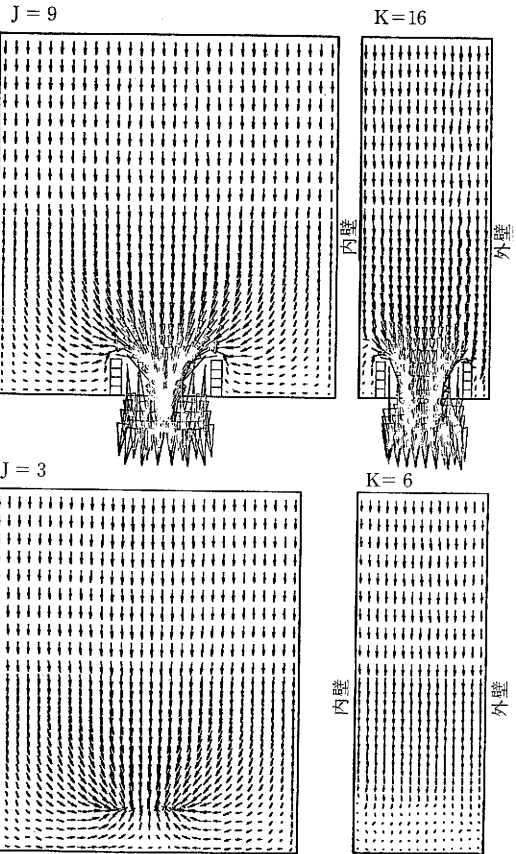


図 4 平均速度ベクトル図

T (無次元時間)=0.0~5.6

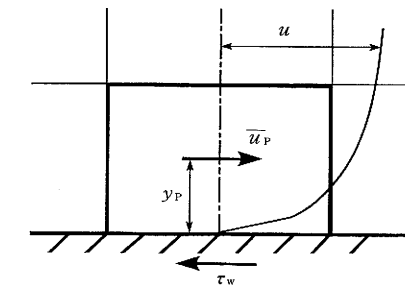


図 3 壁面に接するコントロール・ボリューム

研究速報

れる環状流路であり、流路底部には円筒で囲まれた吸い込み口（流出口）が、 360° にわたって10個、等間隔に設置されている。流体は、上部の環状の流入部より入り、環状流路を下ってゆき、流路底部の吸い込み口より流出する。計算は、この吸い込み口1個分の領域（吸い込み口を中心とし、周方向両側 18° ずつの領域）に対して行った。

メッシュ図を図2に示す。メッシュ数は x - r - θ 座標系で $30 \times 15 \times 30$ の13,500メッシュである。 r 、 θ 方向は等間隔メッシュで、 z 方向は吸い込み口側を密にとった不等間隔メッシュである。

本報では、計算結果として、場所による圧力変動幅を検討したが、その評価点は、図2に示す3点で、すべて内側円筒の外壁面からの第1セルである。

なお円形の吸い込み口は簡略化のため、同図に示すように扇形の形状とした。

3. 数値シミュレーション手法

3.1 基礎方程式

非圧縮性・粘性流体の円筒座標系での運動方程式は、コントロール・ボリューム法を用いた離散化を意図して記述すると、表1のように与えられる。 \bar{u} 、 \bar{v} 、 \bar{w} はそれぞれ x 、 r 、 θ 方向のGS速度、 ν_T はSGSの渦粘性係数を示す。

3.2 壁面境界条件

壁面境界条件として壁面摩擦応力および速度勾配を壁法則（2層モデル）を用いて与える方法を採用する¹¹⁾。すなわち図3に示すように、壁面に接するコントロール・ボリュームを想定する。コントロール・ボリュームの代表点の壁からの距離を y_p とし、その点における壁に平行なGS速度 \bar{u}_p を2層モデルを適用して拘束することになる。壁面境界条件の設定方法は文献2)に詳述してあるが、本報では関連する値として $Re = 1 \times 10^5$ 、 $\kappa = 0.4$ 、 $E = 9.025$ 、 $y_c^+ = 11.635$ を用いている。

3.3 計算条件

計算条件を表2に示す。差分格子はコントロール・ボリューム法を用いたスタガードメッシュである。表1に示す基礎方程式に対し、コントロール・ボリュームの各界面での物理量フラックスを考えた離散化を行った。離散化の方法は、時間的にはAdams-Bashforth型スキーム、空間的には中心差分スキームを用いた。また、運動方程式と連続の式とのカップリングには、速度圧力同時緩和法であるHSMAC法を用いる。

境界条件としては、壁面境界には3.2で述べた条件を、流入境界には(速度勾配) = 0の自由流入、流出境界には(流出速度) = 一定値のよう流出条件を与えた。また、周

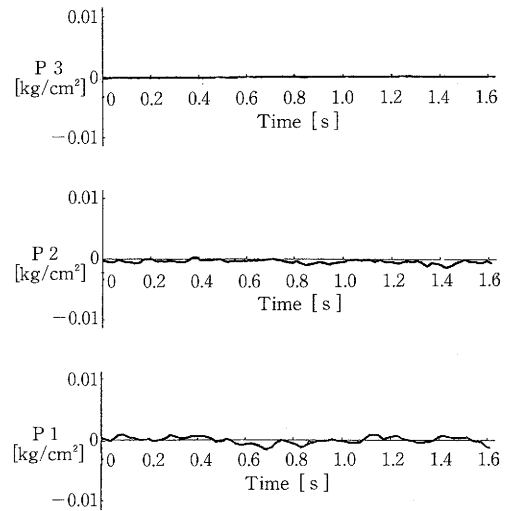


図5 評価点での圧力変動

方向の両端面には周期条件を与えた（図2参照）。なお、計算の初期値としてはすべての点で速度0を与えている。

LESにおけるSGS渦粘性係数 ν_T の評価式であるSmagorinskyモデルのモデル定数は、 $C = 0.10$ とした（表2参照）。

4. 数値シミュレーション結果

図4に無次元時間 $T = 0.0 \sim 5.6$ の間の平均速度ベクトルを示す。各断面図は、図2の中に太線で示している $J = 9$ 、 $J = 3$ 、 $K = 16$ 、 $K = 6$ のセル中心での速度成分を計算し、2方向の速度成分をベクトル図に示したものである。図4に示す $J = 9$ および $J = 3$ の平均速度場をみると、流れの対称性は保たれている。この速度ベクトル図を見ると、 $K = 16$ の断面において、吸い込み口まわりの壁と内壁の間に上昇流がみられ、内壁に沿って下降してきた流れと衝突した後に加齢され、吸い込み口に流入している。一般にポンプ部吸い込み部と壁との間には、条件によっては吸い込み渦の発生が観察されるが、この部分に、それと同等の現象が起きる可能性があることを示している。

今回はLESによって得られた物理量の時間的ゆらぎの一例として、各圧力評価点（図2参照）における圧力変動を調査した。この結果を図5に示す。圧力評価点は吸い込み口中心を通る θ 断面上の、環状流路内壁に接するセルから選んだ。 x 方向（軸方向）に3点とり、P1は吸い込み口まわりの壁と環状流路の内壁にはさまれた点、P2は流路底部より2D（D：吸い込み口の口径）、P3は4Dの高さの点である（図2参照）。図から明らかなように、吸

