

# 振動する 2 重円筒内の流れの数値シミュレーション

Computational Analysis of a Flow Between the Oscillating Annular Cylinders

谷 口 伸 行\*・泉 元\*\*・川 田 裕\*\*・小 林 敏 雄\*

Nobuyuki TANIGUCHI, Hajime IZUMI, Yutaka KAWATA and Toshio KOBAYASHI

## 1. はじめに

過渡的な流体現象や流体関連振動問題などでは、時間の進行とともに移動変形する非定常境界を考慮する必要が生じる。本研究では、移動する境界に適合しながら変形する移動境界適合座標を、常に一定の計算座標に対応させて運動方程式を解くという手法により、非定常境界を含む流れ場の数値シミュレーションを行う。対象としては、同心 2 重円筒の内筒が流れの中で振動する問題を取り上げ、非定常な流体力を評価する。

## 2. 解析方法

移動する物体周りの流れを解析するために、移動境界適合座標を導入する。これは時間の進行とともに移動する境界に対して適合しながら変形していく物理座標である。移動境界適合座標に時間を含めた変数変換を施すことにより、非定常境界を含む場合においても常に一定の計算座標に対応させることができる。

物理座標と計算座標を  $X = X(\xi, \eta, \zeta, \tau)$  および  $t = \tau$  として対応させると、支配方程式の時間項は以下の式により計算座標に変換される。

$$\partial_t = \partial_\tau - x_\tau \partial_x - y_\tau \partial_y - z_\tau \partial_z \quad (1)$$

支配方程式であるナビエ・ストークス (N-S) 式と圧力ポアソン方程式に変数変換を施した後、時間微分項はオイラーの一次後退差分で、また対流項は以下に示す三次精度風上差分により離散化する。

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)_i = f_i \frac{-u_{i+2} + 8(u_{i+1} - u_{i-1}) + u_{i-2}}{12\Delta x} + |f_i| \frac{u_{i+2} - 4u_{i+1} + 6u_i - 4u_{i-1} + u_{i-2}}{4\Delta x} \quad (2)$$

非定常境界を含む流動解析のフローチャートを図 1 に

\*東京大学生産技術研究所 第 2 部

\*\*三菱重工株式会社

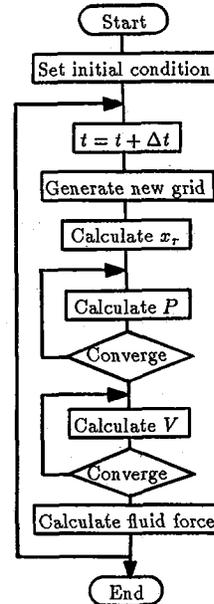


図 1 移動境界適合座標による流れ解析のフローチャート

示す。毎時間ステップごとに、境界の移動に伴う新たな格子を代数的方法により形成し、各格子点の移動速度  $X_r$  を計算する。圧力ポアソン方程式は MAC 法に基づき SOR 法で解き、N-S 式は陰解法を適用して繰り返し計算により解く。この過程を繰り返しながら時間を進行させる。

本研究においては、正弦的に境界を強制振動させる。そこで、移動壁上の速度境界条件は次式で与える。

$$V_{mw} = 2\pi f a \cos(2\pi ft), \quad (3)$$

where  $V_{mw}$  : 境界の移動速度  
 $f$  : 境界の振動周波数  
 $a$  : 境界の振動振幅

固定壁では速度は non-slip 条件、圧力は Nuemann 条件を与えるものとする。

表 1 二重円筒流れの 2 次元解析条件

	外径比 D/d	無次元 振 幅 a	無次元 周波数 f	レイノルズ数 $Re = \frac{Ud}{\nu}$	振動レイノルズ数 $S = \frac{\omega (d/2)^2}{\nu}$	メッシュ数
CASE 1	3	0.2	0.1	60	75	80×41
CASE 2	2	0.2	0.1	60	75	80×41
CASE 3	1.5	0.2	0.1	60	75	80×41

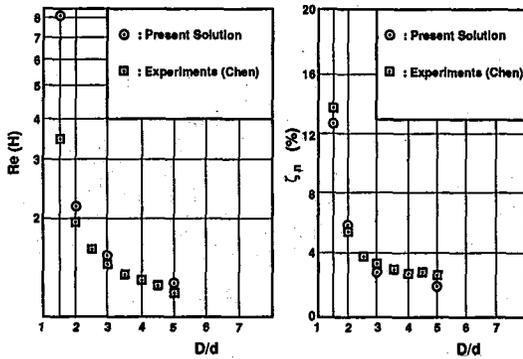


図 2 二重円筒流れの付加質量と減衰比

3. 二 次 元 解 析

まず、同心二重円筒が静止流体中で正弦的に強制振動する場合の流れを、二次元数値解析により検討した。内外筒比をパラメータにとり表 1 の解析条件で計算を行い Chen の実験結果<sup>6)</sup>と比較した (図 2)。ここで、付加質量  $m_f$ 、粘性減衰係数  $C_f$ 、減衰比  $\zeta_n$ の間には以下の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} m_f &= \pi \rho (d/2)^2 Re(H) \\ C_f &= -\pi \rho (d/2)^2 \omega Im(H) \\ \zeta_n &= \frac{1}{2} \left[ \frac{M}{Re(H)M + m_f} \right] Im(H) \times 100 \end{aligned} \right\} (4)$$

この結果から本手法が定量的に妥当な精度を有することが示された。

4. 三 次 元 解 析

次に本手法を三次元解析に拡張して、環状流路に発生する隙間流動起振動問題に適用した。すなわち、ディフューザ付同心二重円筒の内筒が、一定流量の軸方向流れの中で正弦的に強制振動する場合の流れ場を、軸方向流速をパラメータにとり数値シミュレーションを行った。解析条件を表 2 に、解析モデルおよび解析格子を図 3 に示す。

図 4 の波形は円筒の変位  $y$  と内筒に作用する流体力  $F$  の解析結果で、添字番号は  $z$  方向の格子点番号 (図 3) に対応しており、各断面での成分を意味している。  $Re = 7500$  の場合、内筒変位  $y$  に対し全断面で流体力  $F$  は遅れ位相となっており、正減衰力 (制振力) が働いている。

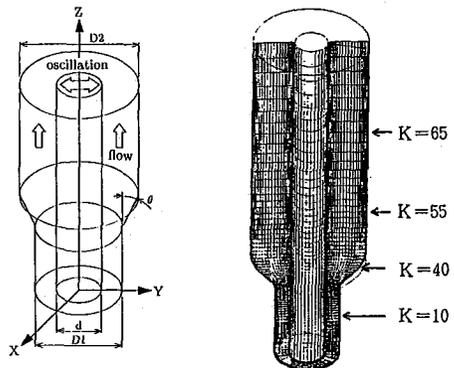


図 3 ディフューザ付二重円筒内流れの解析モデルと解析格子

表 2 ディフューザ付二重円筒内の流れの 3 次元解析条件

流入部 外径比 D1/d	流出部 外径比 D2/d	ディフューザ角 (deg) $\theta$	無次元振幅 a	無次元 振動周波数 f	レイノルズ数 $Re = \frac{Vd}{\nu}$	振動レイノルズ数 $S = \frac{2\pi f (d/2)^2}{\nu}$
2	3.5	45	0.05	0.05	7500~30000	11781

研 究 速 報

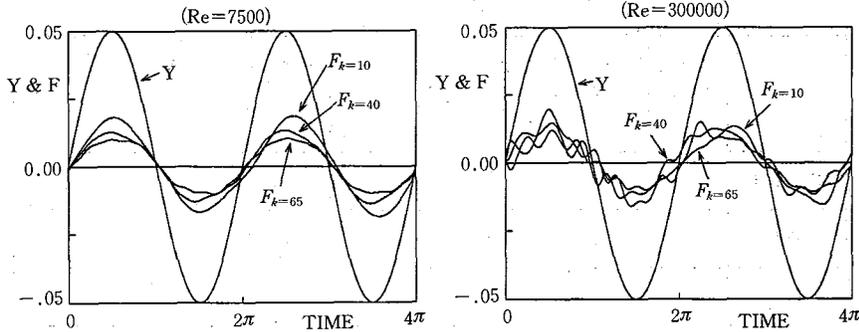


図 4 内筒変位と内筒にかかる流体力の時間履歴

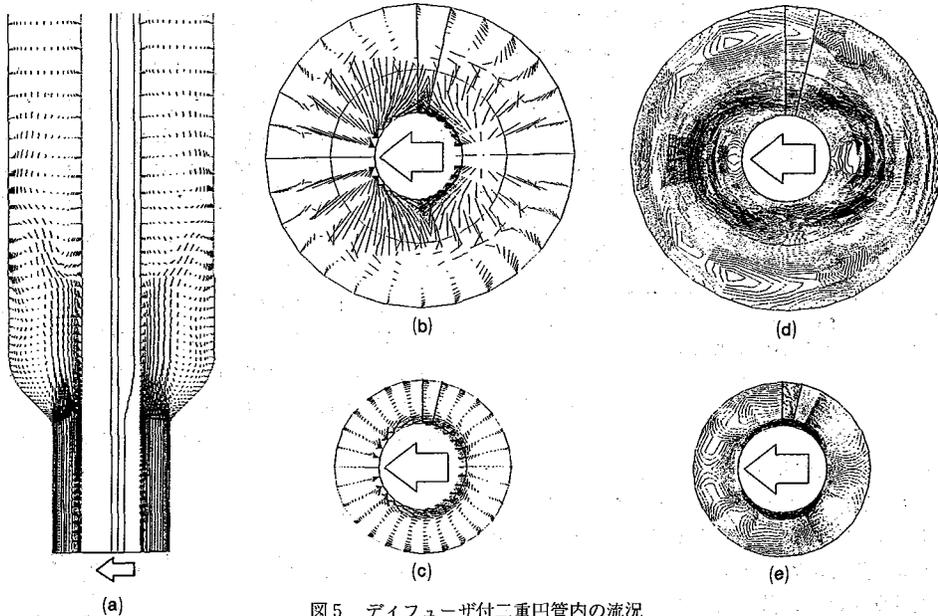


図 5 ディフューザ付二重円管内の流況 (Re=30000, 数値解析結果)

一方  $Re=30000$  の場合には、入口付近 ( $k=10$ ) および出口付近 ( $k=65$ ) で遅れ位相であるが、ディフューザ部 ( $k=40$ ) では内筒の変位に対し流体力  $F_{k=40}$  が進み位相となっており、負減衰力 (励振力) が予測されている。これは、振動を増幅させる力が局所的には発生することを意味している。

$Re=30000$  の場合の流況を図 5 に示す。 $Re=7500$  では、 $z$  軸に垂直な断面の圧力分布が 2 次元解析の場合と基本的に変わらず軸流速度分布もほぼ対象性を保つものに対し、 $Re=30000$  では、三次元性が強く現れ流れ場は複雑な構造になっている。すなわち、軸流速度 (図 5a) の対象性が崩れ、ディフューザ部下流の  $z$  軸に垂直な断面 (図 5b) では吹出しと吸込みが存在する様な二次流れが生じている。また、圧力分布では移動する内筒筒の背後に

高圧部が生じており、これが励振力に寄与していると考えられる。

解析で得られた流体力を以下に示す粘性減衰係数  $C_v$  で評価した。

$$C_v = \frac{1}{2\pi f} \frac{F}{a} \sin \theta \tag{5}$$

$F$  = 流体力の振動周波数成分

$\theta$  = 振動周波数における変位と流体力の位相差

解析結果から  $F$  および  $\theta$  を 2 チャンネル FFT で分析して得られた  $C_v$  の結果を図 6 に示す。ディフューザ上流断面 ( $k=10$ ) での値は、外筒が直管 (Straight) のディフューザが無い場合とほぼ一致しており、本解析の妥当性を裏付けている。全体的には、レイノルズ数の増

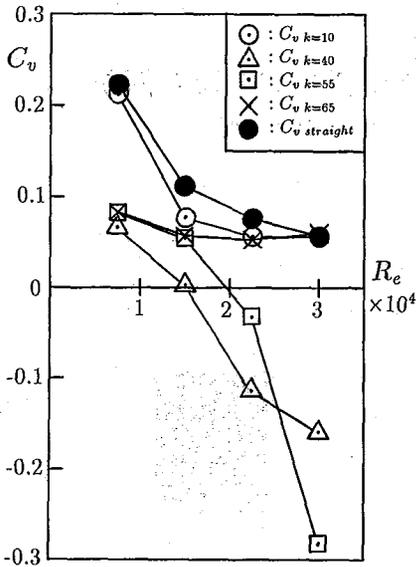


図6 レイノルズ数による粘性減衰係数の予測値の変化

加に伴って  $C_v$  が低下する傾向を示している。またいずれのレイノルズ数でもディフューザ下流断面 ( $k=40, 55$ ) で  $C_v$  が低下する傾向を示しており、特に  $Re = 20000$  以上ではそれが負の領域 (負減衰力) にまで達している。

### 5. おわりに

非定常境界を含む流動解析技術を、二重円筒の内筒が軸方向流れの中で振動する問題に適用した。その結果、外筒にディフューザがある場合には局所的に内筒に負減衰力が生じることが解析され、本技術が流体関連振動問題を流動面から解明する有効な手法であることが確認された。  
(1992年10月20日受理)

### 参 考 文 献

- 1) 小川, 石黒, 第2回航空機計算空気学シンポジウム論文集, pp43-51(1984)
- 2) K. Tsuboi, T. Tamura and K. Kuwahara, AIAA paper 89-0294(1989)
- 3) 大金, 佐久田, 高橋, 白樫, 機論 B, 57-554, p4058 (1991)
- 4) 泉, 川田, 谷口, 小林, 機械学会流体工学部門講演会論文集 [910-50], p70(1991)
- 5) 泉, 川田, 谷口, 小林, 機械学会流体工学部門講演会論文集 [920-68], p (1992)
- 6) S.S. Chen, ASME (E) J. Appl. Mech, 43-2, p325(1976)