

貫流と内壁回転のある環状流路内乱流の螺旋状渦構造が熱伝達およびトルク性能に与える影響の LES 解析

藤本 慶

東京農工大学大学院工学府機械システム工学専攻

1. はじめに

近年の省エネルギー化の要求から、ジャーナル軸受、電気モータ、ガスタービン、遠心分離機などの回転機械では、エネルギー効率向上のための効果的な冷却および損失低減が求められる。それらを達成するためには、回転機械内の熱伝達および摩擦抵抗の理解が重要となる。

回転機械内の流れは内壁が回転する同心二円筒間環状流路内の流れ (Taylor-Couette 流れ^[1] (図 1)) に単純化出来る。Taylor-Couette 流れでは、内壁回転による遠心力が原因となり、周方向に回転軸を持つ周期的な環状渦構造 (Taylor 渦^[1]) が形成される。また、Taylor-Couette 流れに軸方向貫流のある場合 (図 2) では、環状や螺旋状渦構造が形成され、それらが貫流方向に移動する^[2]。Taylor-Couette 流れに軸方向貫流のある場合では、貫流が熱伝達や摩擦抵抗に与える影響が古くから研究が行われている^[3,4,5,6,7,8,9,10]が、その現象のメカニズムの理解は十分でない。

本研究課題では、Taylor-Couette 流れに軸方向貫流のある場合について、熱および運動量輸送の Large Eddy Simulation (LES) 解析を行う。当初の目的は、周期的な渦構造と熱伝達および摩擦抵抗の関係の解明であったが、これを変更し、貫流が熱伝達および摩擦抵抗に与える影響の定量的な評価を目的とした。今回、テイラー数 Ta (内壁回転数の無次元数) が 4000、貫流のレイノルズ数 Re が 1000, 4000 の条件で解析を行った。ここでは、瞬時の渦構造の可視化結果を示し、貫流のレイノルズ数が流れ場の構造に与える影響について述べる。

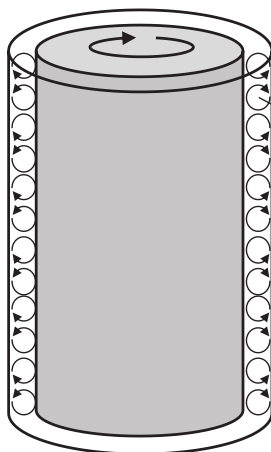


Fig. 1 Flow in concentric annular channel with inner wall rotation (Taylor-Couette flow).

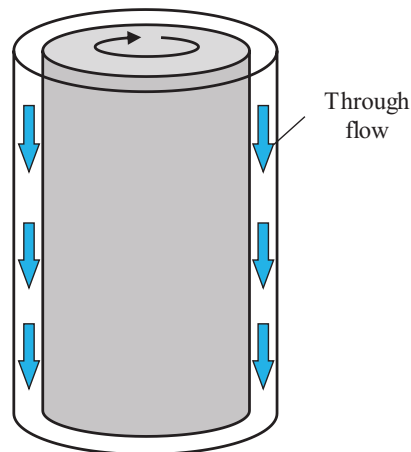


Fig. 2 Flow in concentric annular channel with inner wall rotation and through flow.

2. 数値解析方法

計算対象の同心二円筒間環状流路 (図 3) の内壁と外壁の半径比は $R_i/R_o=0.87$, 流路高さは H [m], 軸方向長さは $18H$ [m]である. ここで R [m]は円筒半径, 添え字 i, o はそれぞれ内壁および外壁を表す. 計算領域の周方向サイズは 90 度であり, 内壁および外壁に滑りなし条件を, 周および軸方向に周期境界条件を課した. 内壁は角速度 ω [rad/s]で回転し, 外壁は静止する. また, 内壁および外壁をそれぞれ等熱流束で加熱および冷却している. 内壁回転数の無次元数であるテイラー数 $Ta (=R_i\omega H/\nu)$ を 4000 , 貫流のレイノルズ数 $Re (=U_z(2H)/\nu)$ を $1000, 4000$ とした. ここで ν [m²/s]は動粘度を, U_z [m/s]は貫流の平均流速を表す. 支配方程式は, 非圧縮流れの連続の式, Navier-Stokes 方程式, エネルギー方程式である. 周期境界条件下で軸方向に貫流を実現するため, Navier-Stokes 方程式に平均圧力勾配を付加した. 基礎式の離散化は有限体積法 (OpenFOAM-4.1) で行い, 時間の離散化に 2 次精度後退差分を, 空間の離散化に 2 次精度中心差分を用いた. LES の Sub-Grid Scale (SGS) モデルとして, Smagorinsky 定数を流跡線に沿い平均化する Lagrangian dynamic Smagorinsky モデル^[11]を用いた.

計算格子には構造格子を用いた. 摩擦速度 u_τ [m/s]を $u_\tau = (\sqrt{\nu \partial \bar{u}_\theta / \partial r}|_{r=R_i})$ [m/s]と定義した時, 摩擦速度で規格化した格子解像度および時間刻みを表 1 に示す. ここで u [m/s]は速度を, 横棒は時間平均成分を, 山括弧は周および軸方向平均を, 上付き十字は摩擦速度での規格化を表す. 統計量は, 統計的定常を判定後, 貫流の入れ替わり 10 回分程度の統計時間 t^+ で算出した.

$Re=1000$ の条件で, 統計量を周方向サイズ領域サイズが 90 度と 360 度の場合で比較した結果, 大きな違いが無かった. また, 同様に $Re=1000$ の条件で, 格子解像度を各方向に約 1.5 倍粗くした場合で統計量を算出し, 大きな変化が無いことも確認した. SGS モデルの検証を行うために, (貫流の無い) Taylor-Couette 流れの数値解析を Dong(2007)^[12]と同様の流路形状で行い, 解析結果を比較した. Dong(2007)はスペクトル法を用い, 乱流域の Taylor-Couette 流れの DNS を行った. 半径比は 0.5 であり, 軸方向長さは πH または $2\pi H$ であった. 今回, $Ta=8000$ の条件で比較を行った. 比較に用いた数値解析において, 半径比は同じであるが, 軸方向長さは $6.3H$ であった. また, 格子数は径 (r), 周 (θ), 軸 (z) の各方向に $150, 384, 288$ であった. 本研究の解析結果は DNS の結果と良く一致した.

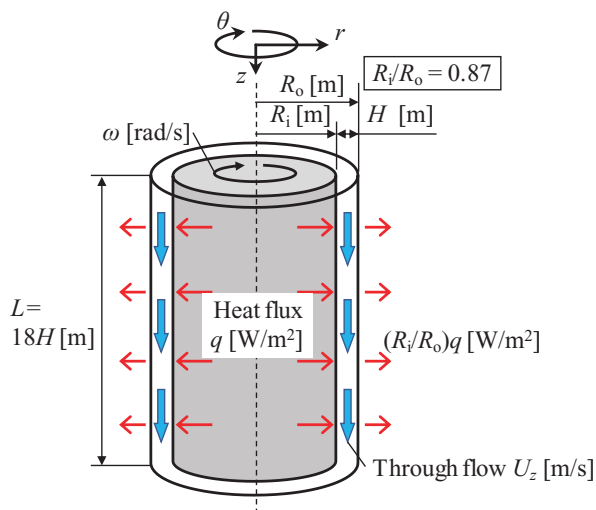


Fig. 3 Schematic of geometry and coordinates.

Tab. 1 Grid and time resolution.

Taylor number Ta		4000	
Through Reynolds number Re		1000	4000
Circumferential domain size		90 deg.	
Number of computational grids	r	100	104
	θ	256	288
	z	384	400
	Total	9,830,400	11,980,800
Grid resolution	Δr^+	0.240~6.01	0.241~6.03
	$(r\Delta\theta)^+$	7.54~8.65	6.99~8.02
	Δz^+	8.53	8.54
Time step Δt^+		0.127	0.0915
Averaging time t^+ (Number of sweeps of through flow)		12,233 (10.3)	3,294 (10.2)
Number of time steps		96000	36000

利用システムは Oakforest-PACS であり、領域分割による並列計算を行った。計算領域を軸方向に分割し、複数ノードを使用し計算を実行した。この際、各ノードの先頭の物理コア 2 つを除き L1 キャッシュを 1 プロセスが専有する様にピンングし、また、各ノードの MPI プロセス数が等しくなる様に設定した。表 2 に、使用ノード数、MPI プロセス数、計算時間を示す。

Tab. 2 Conditions for parallel computing and calculation time.

Taylor number Ta	4000	
Through Reynolds number Re	1000	4000
Number of nodes	3	4
Number of MPI processes	192	200
Calculation time (to obtain statistical stability)	512 hrs. (21.3 days)	156 hrs. (6.51 days)
Calculation time (to calculate statistics)	49.7 hrs. (2.08 days)	52.1 hrs. (2.17 days)

3. 渦構造の可視化

ここでは渦構造の可視化結果を示す。図4に瞬時温度の等値面を示す。カラーコンターは流路高さで規格化した内壁からの距離 $(r-R_i)/H$ を表す。(a) $Re=1000$ では、渦構造が軸方向に周期的に並ぶ様子が見られる。これは、内壁回転の方が貫流の影響よりも大きく、Taylor 渦が流れ場で保持されていることを示す。一方、(b) $Re=4000$ では、そのような構造は見られない。これは、 $Re=1000$ と比べ $Re=4000$ では貫流流速が速いため、流れ場への貫流の影響が大きく、Taylor 渦が流れ場で保持されないことを示す。

また、図5および6に、 $Re=1000, 4000$ において、内側円筒における周方向平均摩擦速度で規格化した速度勾配テンソルの第2不変量 Q^+ の等値面（渦管）を示す。速度勾配テンソルの第2不変量 Q [$1/s^2$] は式(1)で定義され、主に渦の可視化に用いられる。ここで x_i は3次元における i 方向座標を表す。

$$Q = (1/2) \left\{ [(\partial u_i / \partial x_j - \partial u_j / \partial x_i) / 2]^2 - [(\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i) / 2]^2 \right\} \quad (1)$$

$Re=1000$ (図5) では、周方向に連なる渦管の集合が、軸方向に周期的に並ぶ様子が確認出来る。よって、流れにおいて周方向の剪断応力が支配的であることが分かる。これは、 $Re=1000$ においては、内壁回転の影響の方が貫流の影響よりも大きいことと対応している。一方、 $Re=4000$ (図6) では、 $Re=1000$ と比べ渦管が軸方向に傾いていることが分かる。これは、 $Re=1000$ と比べ $Re=4000$ では、貫流流速が速いため、流れへの軸方向の剪断応力の影響が大きいことと対応している。

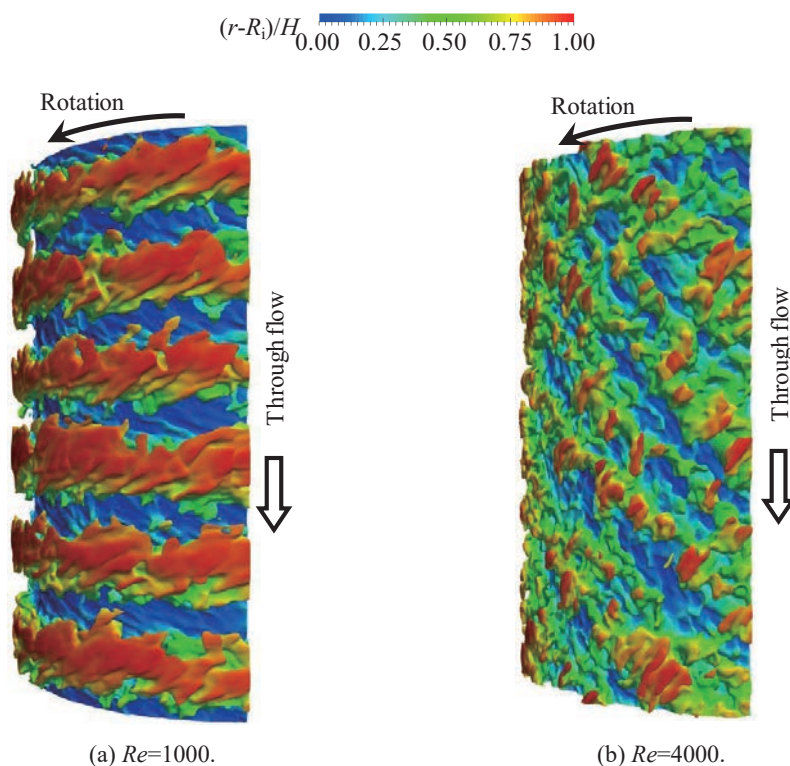


Fig. 4 Iso-contour of instantaneous temperature $(T - \bar{T}|_{r=R_o}) / (\bar{T}|_{r=R_i} - \bar{T}|_{r=R_o}) = 0.5$ for $Ta=4000$, $Re=1000$, 4000 viewed from outer cylinder side.

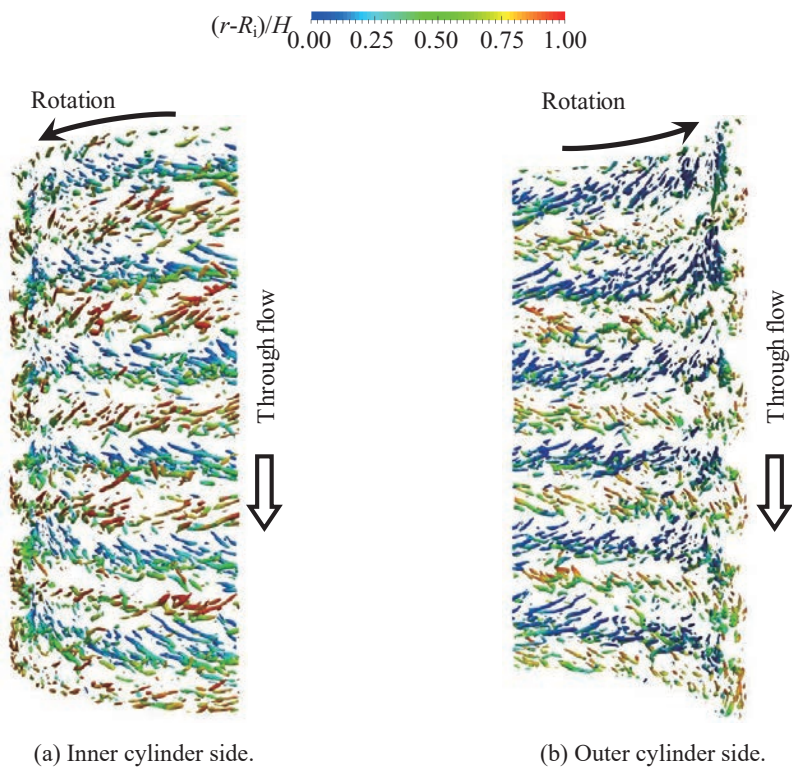


Fig. 5 Iso-contour of the second invariant of deformation tensor $Q^+=0.01$ for $Ta=4000$, $Re=1000$.

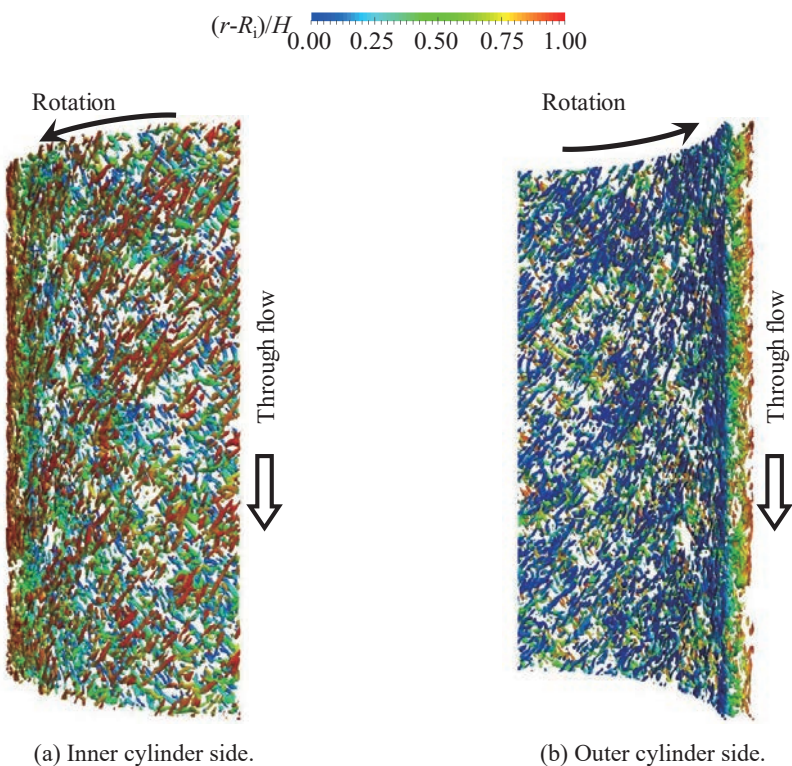


Fig. 6 Iso-contour of the second invariant of deformation tensor $Q^+=0.01$ for $Ta=4000$, $Re=4000$.

4. まとめと今後の予定

軸方向貫流のある内壁が回転する同心二円筒間環状流路内の流れについて、テイラー数 $Ta=4000$ 、貫流のレイノルズ数 $Re=1000, 4000$ の条件で熱および運動量輸送の Large Eddy Simulation (LES) 解析を行った。

瞬時の渦構造の可視化より、以下のことが分かった。瞬時温度の等値面では、 $Re=1000$ において渦構造が軸方向に周期的に並ぶ様子が見られ、 $Re=4000$ では、そのような構造は見られなかった。これは、 $Re=1000$ では内壁回転の方が貫流の影響よりも大きく、Taylor 渦が流れ場で保持されていることを示す。速度勾配テンソルの第2不変量 Q^* の等値面では、 $Re=1000$ において周方向に連なる渦管の集合が、軸方向に周期的に並ぶ様子が確認出来た。一方、 $Re=4000$ では、 $Re=1000$ と比べ渦管が軸方向に傾くことが分かった。これは、 $Re=1000$ と比べ $Re=4000$ では、貫流流速が速いため、流れへの軸方向の剪断応力の影響が大きいことと対応している。

今後は、貫流のレイノルズ数 Re がより大きい条件 ($Re>10000$) で解析を行い、熱伝達および摩擦抵抗の関係について評価を行いたい。

謝 辞

本研究は東京大学情報基盤センター「若手・女性利用者推薦」平成30年度(後期)の課題として行われたものである。また、村田章教授、山本昌平特任助教(東京農工大学大学院工学府機械システム工学専攻)には多くの指導、助言をいただいた。ここに記して謝意を記す。

参 考 文 献

- [1] Taylor, G.I., "Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, Vol. 223, (1923), pp. 289-343.
- [2] Wereley, S. T. and Lueptow, R. M., "Velocity field for Taylor-Couette flow with an axial flow," *Physics of Fluids*, Vol. 11, No. 12(1999), pp. 3637-3649.
- [3] Yamada, Y., "Resistance of a flow through an annulus with an inner rotating cylinder," *Bulletin of JSME*, Vol. 5, No. 18(1962), pp. 302-310.
- [4] Yamada, Y., "Torque resistance of a flow between rotating co-axial cylinders having axial flow," *Bulletin of JSME*, Vol. 5, No. 20(1962), pp. 634-642.
- [5] Murata, A. and Iwamoto, K., "Heat and Fluid Flow in Expanding Concentric Annular Flow-Passage with Rotating Inner-Wall," *Proceedings of International Conference on Heat Transfer(IHTC-14)*, Washington D.C., US, IHTC14-22403, pp.1-10.
- [6] Fénot, M., Bertin, Y., Dorignac, E., and Lalizel, G., "A review of heat transfer between concentric rotating cylinders with or without axial flow," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, No.7 (2011), pp. 1138-1155.
- [7] Murata, A. and Iwamoto, K., "Heat and Fluid Flow in Cylindrical and Conical Annular Flow-Passages with Through Flow and Inner-Wall Rotation," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 32, No. 2(2011), pp. 378-391.
- [8] Ohsawa, A., Murata, A., and Iwamoto, K., "Large eddy simulation of through-flow effects on turbulent heat transfer characteristics in concentric annulus with inner cylinder rotation," *ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015*, Seoul, Korea, July 26-31,2015, AJK2015-03135(7pages).
- [9] Ohsawa, A., Murata, A., and Iwamoto, K., "Through-flow effects on Nusselt number and torque coefficient in Taylor-Coutte-Poiseuille flow investigated by large eddy simulation," *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol. 11, No.2(2016), DOI: 10.1299/jtst.2016jtst0031 (12pages).

- [10] Ohsawa, A., Murata, A., and Iwamoto, K., "Contribution of advection, turbulent transport and diffusion terms to Nusselt number and torque coefficient in Taylor-Couette flow," *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol.11, No.2(2016), DOI: 10.1299/jtst.2016jtst0027 (13pages).
- [11] Meneveau, C., Lund, T. S., and Cabot, W. H., "A Lagrangian dynamic subgrid-scale model of turbulence," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 319, (1996), pp. 353-385.
- [12] Dong, S., "Direct numerical simulation of turbulent Taylor-Couette flow," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 587, (2007), pp. 373-393.