

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04259

研究課題名（和文）テイラー・クエット乱流の流動と伝熱に及ぼす進行波制御の効果

研究課題名（英文）Effect of traveling-wave control on fluid flow and heat transfer in turbulent Taylor-Couette flow

研究代表者

光石 暁彦（Mitsuishi, Akihiko）

大阪電気通信大学・工学部・准教授

研究者番号：90456715

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：内側円筒回転同軸二重円筒間流れ（テイラー・クエット乱流）の直接数値計算を行い、外側円筒表面に進行波状吹き出し吸い込み制御によるトルク低減効果を評価した。特に、制御の実装に有利な微小振幅・長波長の進行波による効果を重点的に調査した。検証を行った同軸二重円筒間の半径比は0.95以上である。

その結果、全周96波長分相当の進行波を印加した場合、進行波の伝播方向が内円筒回転と同方向であれば、一定以上の伝播速度でトルク低減効果が得られるものの、その値はおよそ振幅に比例することが分かった。また、伝播方向を逆方向も含めて調査した所、逆方向の方が順方向よりトルク低減効果が得られやすいことが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果により、テイラー・クエット乱流の流動抵抗低減効果を目的とした進行波状吹き出し吸い込み制御という乱流制御手法の適用可能性が示された。特に、クリアランスの狭い実機を想定した0.95以上という高半径比におけるデータは、これまでほとんど調査報告された例がない。研究の結果、内円筒の回転と反対方向に進行する高振幅の進行波であれば一定以上のトルク低減効果が期待できるが、これは実機における振動抑制問題と相克するため、最終的な設計においては流動抵抗と振動・騒音を総合的に考慮することが必要と結論付けられる。

研究成果の概要（英文）： Direct numerical simulation was performed to examine the effect of torque-reduction of traveling-wave control on the outer cylinder in a turbulent Taylor-Couette flow. A special focus is laid on the small-amplitude or long-wavelength controls which is able to be implemented to the real applications. The inner-to-outer radius ratio is beyond 0.95.

As a result, when the traveling wave propagates in the same direction as the rotation of the inner cylinder, high amplitude is required to gain the torque-reduction effect. The traveling wave which propagates in the opposite direction exhibits the better performance.

研究分野：流体工学

キーワード：乱流制御 抵抗低減 進行波状吹き出し吸い込み

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) モータに代表される回転機器内部は、電磁力の有効利用や機器の省スペース化の観点から回転子と固定子間のクリアランスが狭く設計されており、流動抵抗が発生しやすく対流による除熱も困難である。クリアランスに代表される長さスケールは小さいものの、工業的には一般的に回転子の運動速度は速く、流れ場を代表するレイノルズ数は高い。また、同軸二重円筒間で内側円筒の回転する流れ場(テイラー・クエット流れ)は遠心不安定性により比較的乱流遷移しやすい。これらのことから、内部の流れは容易に乱流状態となり流動抵抗は高止まりする傾向にある。モータの機械効率は、特に我が国ではトップラナー制度が施行されて以来 95%を超えるような高い値が義務付けられているが、それでも全消費電力のうちモータの消費電力は半分近くを占めており、流動抵抗低減により大型火力発電所一機分の電力を節約することにもつながるため、効率改善は重要な課題である。

(2) このような固体壁面に沿う乱流の摩擦抵抗低減や伝熱の促進・抑制を目的として、これまで様々な制御手法が提案されてきたが、それらの中でも注目されるのは、主流方向に進行する波状の振動による入力を壁面から与える進行波制御により、乱流の渦構造を消滅させる手法である^[1, 2]。この手法は、実装に新たな動力が必要なことから実機への適用に難があるものの、抵抗低減効果が大きいという特長を有する。例えば、平行平板間乱流や円管内乱流の進行波制御を壁面からの流体の吹き出しや吸い込みによって模擬した直接数値計算(direct numerical simulation, DNS)では、流れが再層流化する条件での抵抗低減率は、平行平板間乱流においては80%^[2]、円管内乱流においても70%以上^[3]に達する。近年、テイラー・クエット乱流に対して進行波制御を行ったDNS結果が報告され、内円筒制御の場合は内円筒回転方向に、外円筒制御の場合は反対方向に進行する制御による乱流摩擦トルクの低減が報告された^[4]。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、回転機の回転子・固定子間の空気の流れをモデル化した内円筒の回転する同心二重円筒間の乱流(テイラー・クエット乱流)において、回転子・固定子の固体表面に印加する円周方向進行波状の吹き出し・吸い込み制御が及ぼす影響を評価し、第一義的には流動抵抗を低減する進行波パラメータを探り当てることを目的とする。

(2) 固体表面に進行波状の制御入力を印加することが一般的に実装困難であることに鑑み、特に実際の回転機の状況に近いクリアランスの狭い場合に流動抵抗を低減することを目的とする。また、進行波の振幅・波長・伝播速度といった進行波パラメータについても、実装への敷居の低い低振幅・長波長・低伝播速度の範囲から可能性を探る。

3. 研究の方法

(1) 本研究の方法には、コンピュータを用いた数値流体解析を用いる。これは、現時点での進行波制御が実装困難であり、実装できたとしても個別の進行波パラメータを独立に操作することが難しいことによる。数値流体解析には乱流変動の取り扱いに応じて、RANS (Reynolds-averaged Navier Stokes)・LES (large eddy simulation)・DNS (direct numerical simulation)の3種類のアプローチが存在する。本研究では、乱流による渦運動の一つ一つのダイナミクスを正確に捕捉するため、全ての乱流運動を離散的な格子系で表しきるDNSを手法として採用した。

(2) DNSを行うためのプログラムソースコードは、過去に円管乱流の研究^[5]で用いられたものを流用した。これは、空間離散化には円筒座標系におけるエネルギー保存型二次精度中心差分法を、時間離散化には粘性項のCrank-Nicolson法を組み合わせた省記憶型三次精度Runge-Kutta法を用いている。テイラー・クエット流れの代表的な特徴量は、内円筒の半径と外円筒の半径の比、半径比である。周方向と軸方向には周期境界条件を課した。一方で、内円筒の境界条件は一定の回転速度とし、外円筒の境界条件には進行波状吹き出し吸い込みを印加した。進行波状の吹き出し吸い込み制御は以下のように定義した。

$$u_r(\theta, t)|_{r_o} = Au_i \sin B \left(\theta - \frac{Cu_i}{r_i} t \right)$$

ここで、 u_i は内円筒回転速度、 A は速度振幅/内円筒回転速度、 B は全周長/波長、 C は伝播角速度/内円筒回転角速度である。

4. 研究成果

(1) 外円筒に進行波制御を印加する効果

図 1 に示すのは、内外円筒ギャップと内円筒回転速度で定義されるレイノルズ数が 6000、半径比 0.96 の場合に $B = 96$ の進行波制御を印加することによるトルク(モーメント)低減率である。ただし、ここでは進行波の伝播方向と内円筒の回転方向が一致する場合について検討した。モーメント係数 c_M は以下のように定義した。

$$c_{M_X} \equiv \frac{M_X}{2\pi\rho r_m^4 \omega^2 L_z}, \quad M_X \equiv -\frac{2\pi}{\theta} \int_0^{L_z} \int_0^\theta \tau_{r\theta X} r_X^2 d\theta dz, \quad \tau_{r\theta X} = \mu \left(\frac{\partial u_r}{r\partial\theta} + r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u_\theta}{r} \right) \right) \Bigg|_{r=r_X}$$

ここで M_X はモーメント ($X = o$: 外円筒, $X = i$: 内円筒), $\tau_{r\theta X}$ は壁面剪断応力, ρ は密度, r_m は平均半径 ($r_i + r_o$)/2, ω は内円筒回転角速度, L_z は円筒長さである。トルク低減率は以下のように定義した。

$$M_R \equiv \frac{\overline{c_{M_0}} - \overline{c_M}}{\overline{c_{M_0}}} \times 100[\%]$$

ここで、上付きバーは時間平均を表し、 c_{M_0} は進行波制御非印加時のモーメント係数である。この図より、伝播速度が一定以上の時にトルク低減効果が得られる一方で、伝播速度が小さい場合は逆にトルクが増加することも分かった。ただし、高伝播速度域において得られるトルク低減は速度振幅 a にほぼ比例していることから、投入エネルギーの少ない微小振幅の制御ではあまり良い効果が期待できない。

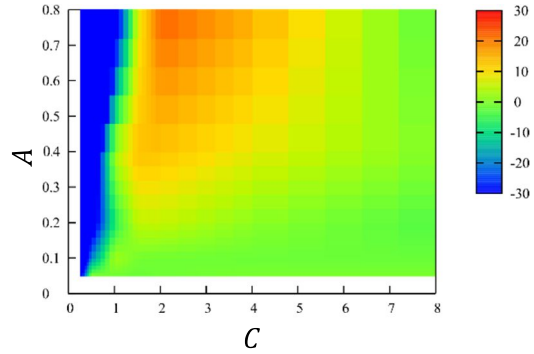


図 1 外円筒に対する進行波制御印加時のトルク低減率マップ ($B = 96$)。

(2) 進行波制御の伝播速度の効果 (内円筒回転方向と逆方向の伝播も含む)

図 1 で検証したように、進行波の伝播方向が内円筒回転方向と同一の場合は、微小振幅の制御で得られるトルク低減効果は低かった。そこで図 2 に示すのは、進行波の伝播速度を内円筒回転方向と逆方向の場合も含めて解析した時のトルク低減率分布である。内外円筒ギャップと内円筒回転速度で定義されるレイノルズ数が 6400、半径比 0.973 である。ここで、相当振幅 η は

$$\eta = \frac{A\lambda}{2\pi|C|}$$

で表される量であり、吹き出し・吸い込みの効果及び得る高さの目安となる。この図より、伝播速度が負の時、つまり進行波の伝播方向が内円筒の回転方向と逆の方が、トルク低減効果が得られやすいことが分かる。ただし、検証した中で最もトルク低減効果の得られた $C = -10$ の場合、 $\eta = 0.05$ は $A \sim 1.2$ となり、高速で回転する内円筒の速度を上回るような速度振幅の進行波を印加する必要があることから、やはり微小振幅の進行波制御ではトルク低減効果は期待できない。

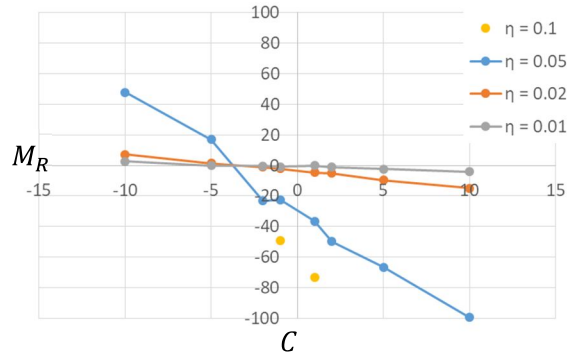


図 2 トルク低減率に及ぼす伝播速度の影響。

(3) 長波長の進行波制御印加の効果

極端に短い波長の進行波の生成には、微細なアクチュエータや高周波の振動子等の開発が必要となり、実装に困難を伴う。そこで、図 3 において進行波の波長を比較的長くした際のトルク低減率の分布を検証した。図の横軸は、進行波の一波長が周方向に占める角度 (度数表記) である。進行波の伝播方向を内円筒の回転方向と同じにした場合と反対にした場合とで比較してみたが、どちらにおいても、トルク

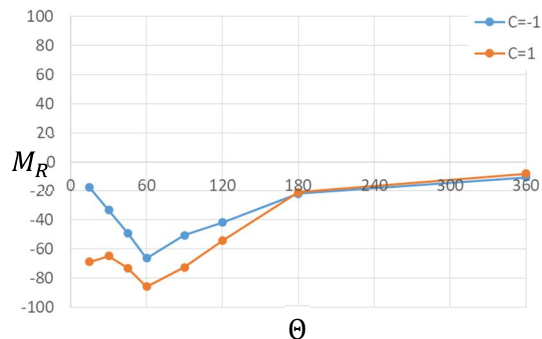


図 3 トルク低減率に及ぼす波長の影響。

ク低減率は負の値を取り，トルク低減効果は得られなかった。ただし，一波長が半周や全周に及ぶような長波長の進行波制御を印加した場合，トルクの増加は短波長の進行波制御と比べて比較的穏やかであることも分かった。

[1] Min, T. et al., “Sustained sub-laminar drag in a fully developed channel flow,” J. Fluid Mech. 558, 309-318 (2006).

[2] Mamori, H. et al., “Effect of the parameters of traveling waves created by blowing and suction on the relaminarization phenomena in fully developed turbulent channel flow,” Phys. Fluids 26, 015101 (2014).

[3] Koganezawa, S. et al., “Pathline analysis of traveling wavy blowing and suction control in turbulent pipe flow for drag reduction,” Int. J. Heat Fluid Flow 77, 388-401 (2019).

[4] Ogino, K. et al., “Direct numerical simulation of Taylor–Couette turbulent flow controlled by a traveling wave-like blowing and suction,” Int. J. Heat Fluid Flow 80, 108463 (2019).

[5] Fukagata, K. and Kasagi, N., “Highly energy-conservative finite difference method for the cylindrical coordinate system,” J. Comput. Phys. 181, 478-498 (2002).

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文] 計0件

[学会発表] 計2件（うち国際学会2件）

著者名：Ishiguro, T., Mitsuishi, A., Shimura, T., Iwamoto, K., Murata, A.

標題名：Effect of Wavelength of Traveling Wavy Blowing and Suction Control of Turbulent Pipe Flow

学会等名：14th World Congress in Computational Mechanics (WCCM)

発表年：2021年

著者名：Yoshida, Y., Mitsuishi, A., Shimura, T., Iwamoto, K. and Murata, A.

標題名：Experimental study on traveling wave control for drag reduction of zero-pressure-gradient turbulent boundary layer flow

学会等名：32nd International Symposium on Transport Phenomena, ISTP32

発表年：2022年

[図書] 計0件

[産業財産権]

○出願状況（計1件）

産業財産権の名称：回転電機

発明者：内山翔，岩本薫，光石暁彦

産業財産権の種類，番号：特許権，特開 2022-154554

○取得状況（計0件）

[その他]

6 . 研究組織

氏名：光石暁彦（MITSUIISHI Akihiko）（90456715）

所属研究機関・部局・職：大阪電気通信大学・工学部環境科学科・准教授（34412）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Ishiguro, T., Mitsuishi, A., Shimura, T., Iwamoto, K., Murata, A.
2. 発表標題 Effect of Wavelength of Traveling Wavy Blowing and Suction Control of Turbulent Pipe Flow
3. 学会等名 14th World Congress in Computational Mechanics (WCCM) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshida, Y., Mitsuishi, A., Shimura, T., Iwamoto, K. and Murata, A.
2. 発表標題 Experimental study on traveling wave control for drag reduction of zero-pressure-gradient turbulent boundary layer flow
3. 学会等名 32nd International Symposium on Transport Phenomena, ISTP32 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 回転電機	発明者 内山翔, 岩本薫, 光石暁彦	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特開2022-154554	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------