

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：10101

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2017

課題番号：15KK0219

研究課題名（和文）乱流パフの個性とその生存率における出生の影響（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Characteristics and survival rate of a turbulent puff depending on the generation process(Fostering Joint International Research)

研究代表者

田坂 裕司 (Tasaka, Yuji)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：00419946

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 8,800,000円

渡航期間： 7ヶ月

研究成果の概要（和文）：基課題で取り組んだ直円管の乱流パフ生成に関する問題を拡張し、シンセティックジェットアクチュエータ（SJA）により生成されるヘアピン渦列が乱流パフ生成に与える影響を調査した。その結果として、ヘアピン渦列の生成はパフの生成を促進させるが、一方で渦の生成数が多くなるとパフの成長過程で後続の渦列が影響を及ぼし、再層流化をもたらすことが分かった。その他、急拡大管内流れの局所乱流塊の生成では、SJAによる振動攪乱により異なる遷移の形態が現れることが示された。

研究成果の概要（英文）：Influences of hair-pin vortex street generated by a synthetic-jet actuator on creations of a turbulent puff in a pipe flow was investigated. The vortex street enhances the creation of puffs, but too much number of the hair-pins prevent growth of puffs and provide relaminarization. Further application of SJA on a local turbulence in flows through a sudden expansion of a pipe indicated that oscillatory perturbation provides different transition process to create the turbulence in comparison with standard, continuous-jet-type perturbations.

研究分野：流体力学

キーワード：乱流遷移 渦列 孤立乱流塊

1. 研究開始当初の背景

壁面乱流における亜臨界不安定の問題、すなわち、有限振幅攪乱により生成される孤立乱流塊の問題は、乱流遷移問題の中で未解明のまま残された課題である。この遷移過程では、線形安定論で説明される無限小攪乱に端を発する段階的な遷移ではなく、有限振幅攪乱の流れに与えることで、突発的な乱流遷移が生じる。Peixinho & Mullin(2006)は円管内流れに形成される乱流塊である、乱流パフのライフタイムをレイノルズ数の関数として整理した。また、Peixinho & Mullin(2007)では異なる複数の方法で攪乱を加えることにより、乱流パフの生成における攪乱添加方法の影響を調査した。そこでは、加えた攪乱の二次的な作用としてヘアピン渦列が形成される場合に、より小さな攪乱強度で乱流パフが形成されることが示された。Avila *et al.* (2011)では、生成される乱流パフが下流で消滅する確率と、分裂してより乱れの強い乱流スラグに遷移する確率を合わせて整理し、発達乱流に遷移する条件を見いだした。

本申請課題の基課題である「基盤研究(C)「乱流パフの個性とその生存率における出生の影響」では、これらの成果を元に、乱流パフの生成方法がそのライフタイムに与える影響を調査した。乱流パフの内部構造を捉えるため、2色のレーザーシートを用いた新たな可視化計測手法を開発した(Ohkubo *et al.* 2016)。特に、ヘアピン渦列の生成を伴う攪乱注入法に注目して研究を行った。その成果として、攪乱の注入方法により乱流パフの生成確率は大きく変化すること、しかしながら各方法で生成された乱流パフは明瞭に異なる構造は持たないことが分かった。

参考文献

J. Peixinho & T. Mullin, "Decay of turbulence in pipe flow", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 96 (2006) 094501

J. Peixinho & T. Mullin, "Finite-amplitude thresholds for transition in pipe", *J. fluid Mech.*, Vol. 582 (2007) pp.169-178

K. Avila, *et al.*, "The onset of turbulence in pipe flow", *Science*, Vol.333, 192 (2011)

J. Ohkubo, Y. Tasaka, H.J. Park, Y. Murai, "Extraction of 3D vortex structures from a turbulent puff in a pipe using two-color illumination and flakes", *J. Vis.*, Vol.19, pp.643-651 (2016)

2. 研究の目的

本申請課題では、上記基課題で見いだされた乱流パフ形成におけるヘアピン渦列の効果に注目し、異なる流れの体系での遷移における、ヘアピン渦列攪乱の効果を検査することでその物理を明らかにすることを第一の目的とする。また、乱れあるいは乱流の生成に関して視野を広げるべく、熱や磁場により誘起される流れの研究を行い、乱流遷移の一

般的な理解に繋がる知見を得ることを第二の目的とする。さらに研究期間中、ドイツならびにフランスの2カ所の研究期間に滞在し、欧州における国際共同研究と情報収集・発信の拠点を築くことを第三の目的とする。

3. 研究の方法

(1)基課題などを通して開発した、ヘアピン渦列の生成と制御が可能なシンセティックジェットアクチュエータ(SJA)を攪乱生成装置に使用する。乱流パフの生成と挙動に関するより高度な統計的調査を行うため、10m以上の試験区間を有する管内流装置を作成する。フランス・ルーブル大学に滞在し、そこで研究されている急拡大管の亜臨界乱流遷移実験にSJAによる攪乱注入を適用することで、ヘアピン渦列攪乱が異なる系の亜臨界乱流遷移に与える影響を調査する。

(2)ドイツ・ヘルムホルツセンター(HZDR)に滞在し、液体金属、熱、磁場をキーワードにした乱流遷移実験に寄り組む。特に、磁場が加えられた場合の液体金属層の熱対流における、特殊な振動開始条件と構造の三次元化、および熱乱流に至る過程をデータ解析により明らかにする。

乱流の発生に関する新たなテーマとして、HZDRとの相談により交流磁場により形成される特殊な乱流の形態について、液体金属を用いた実験研究を行い、その結果を解析することにより乱流の統計的性質を明らかにする。

4. 研究成果

(1)SJAを用いたヘアピン渦列の制御と孤立乱流塊生成

円筒容器に金属で挟まれた円形の樹脂膜をかぶせ、それをモータと偏心カムで振動させることにより、SJAを実現した。円筒容器対面に設けられた小孔で、渦輪の形成を伴う噴流が周期的に生成される。偏心度の異なるカムを用いることで、振幅を調整することができる。SJAの模式図と写真を図1に示す。これは、後で説明する急拡大管に設置した例である。

高精度に機械加工された内径20mm、長さ150mmの円管をはめあいによりつなぎ合わせ、長さ12mの円管を作成した。上流部には貯水槽、下流端にはピストンとシリンダが設置されており、これを駆動することにより一定流量の流れが生じる。非常に乱れの小さいシステムであり、意図して乱れを加えない場合には、自然遷移レイノルズ数20,000以上を実現することができた。ただし、上記のSJAを取り付けた場合、上流タンクの水位の変化がSJA内の膜を僅かに振動させることにより、 $Re=8000$ 程度で局所乱流塊が生じる。

SJAを用いて上記直円管にヘアピン渦列を形成した可視化写真を図2に示す。膜の振動回数と対応したヘアピン渦列が形成されて

いる．SJA により管内に導入される流れの平均流速（負の部分はない）と管断面平均流速から速度比 V_R を定義し，管断面流速と管径で無次元化した周波数とともに制御パラメータとした．

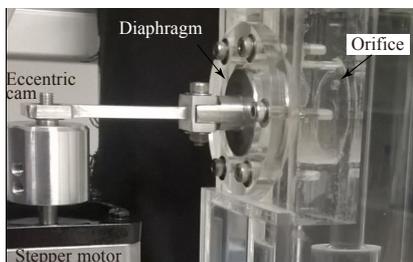
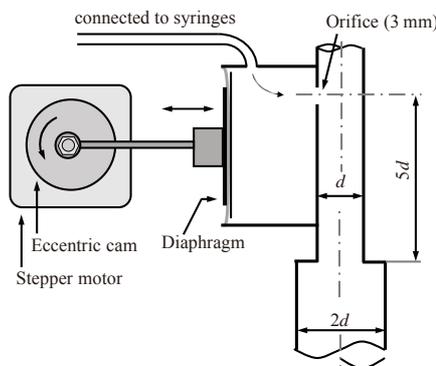


図1 開発したSJAと急拡大管装置に取り付けた例

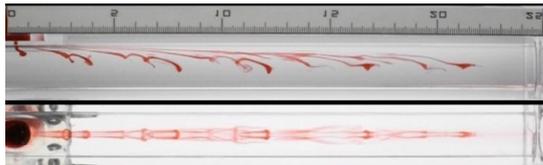


図2 SJAにより直円管内流れに誘起されたヘアピン渦列の例（側面と底面からの撮影）

流れのレイノルズ数を 1,900 に固定して上記パラメータを変化させ，乱流パフの生成確率を調べる実験を行った．しかしながら，攪乱として流体を連続注入する場合に比べて格段の違いは観察されなかった．一方で，振動回数に対する生成確率の推移を調べたところ，興味深い結果が得られた．生成確率は振動回数，つまりヘアピン渦の生成数に比例して単調増加するが，8個を超えたところで1度大きく落ち込んだ．これは，先に導入されたヘアピン渦列により乱流パフの「種」が1度形成され，その移流・発達過程でその後端から後続のヘアピン渦（列）が突入することにより乱れの維持機構（self-sustaining process, SSP）が阻害され，再層流化したものと考えている．

Le Havre 大学の急拡大管内流れの装置を用いて，孤立乱流塊（乱流パッチ）の形成に関する実験を行った．詳細は発表論文にまとめられている．図3は，乱流パッチ生成に必要な速度比（ただし連続注入）のレイノルズ

数増加に対する推移である．エラーバーは攪乱の注入によりヘアピン渦列の形成が確認された範囲である．直円管のパフ生成の場合と異なり，乱流パッチの生成において，ヘアピン渦列の生成は大きく影響しないことが分かった．攪乱の強度が比較的小さい場合，乱れは下流側に移流しつつ急拡大部下流の再循環領域との境界で増幅される．乱れが十分に発達した場合，下流で再循環領域に影響を及ぼし，その影響が上流部に徐々に伝達されてやがて乱流パッチの生成に至る．その過程においては再循環領域を含む流れの偏心が重要であり，ヘアピン渦列によりもたらされる局所的な流れのゆがみはさほど影響を及ぼさないようである．

一方，SJA を設置して乱れを加えた場合，先に説明した偏心が周期的にもたらされ，攪乱の連続注入の場合とはことなる遷移過程が観察された．

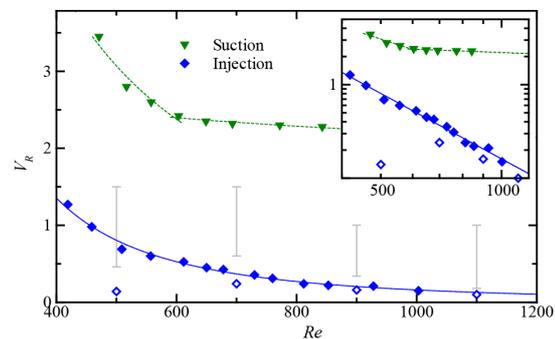


図3 乱流パッチ生成に必要な速度比 V_R の推移（攪乱を吹き出した場合と吸い込んだ場合）

(2) 水平磁場を加えられた液体金属層内の熱対流の振動開始条件と流れの複雑化

これまでの研究で得られた実験結果の解析を行い，振動開始条件とそれを記述する物理について議論した．水平磁場を加えられた液体金属層では，加えられた磁場が十分に強い場合対流が准二次元的になり，磁場方向に回転軸を持つ対流ロールが形成される．さらに磁場共同が強くなると，磁場と直交する容器側壁に形成されるハルトマン層による粘性散逸の効果が無視できなくなり，対流を停止させる．

准二次元対流ロールの状態から磁場を弱くすると，流れは定常状態から振動状態に遷移する．平均速度分布の解析により，振動は通常対流ロールの振動とは異なり准二次元であることが分かった．また，この再循環領域に対するレイノルズ数は800を超えており，その流れが不安定になるのに十分な大きさであった．これは，磁場により流れが二次元に拘束されているため，本来磁場方向の流れにも及ぼされる浮力の寄与が，磁場と垂直方向の流れのみとなり，対流ロール流れの増速をも

たらしたこと、および、 $Re \sim (Ra/Pr)^{1/2}$ で見積もられるように、液体金属の低プラントル数効果が原因となっている。

准二次元ロールに対するレイノルズ数を、磁場強度から求められるチャンドラセカル数に対する変化として調べたところ、図5のような結果を得た。磁場強度の減少に伴いレイノルズ数は増加するが、ある領域を境に減少に転じる。これは、対流ロールが磁場による拘束が弱くなったことにより3次元化することに起因する。また、 $Re_{2D}-Q$ の変化は指数法則に従うことが分かった。磁場が十分に強い場合その変化は $\sim Q^{-0.5}$ となり、この指数はハルトマン層による粘性散逸効果で説明できる。磁場が弱くなると $\sim Q^{-0.2}$ の関係に移行するが、磁場を考慮した場合の臨界レイリー数の変化がおおよそその指数を与えることが分かっている。なお、それらの移行は異なる Ra で得られた変化において、 Q/Ra で整理することにより一致することが示された。

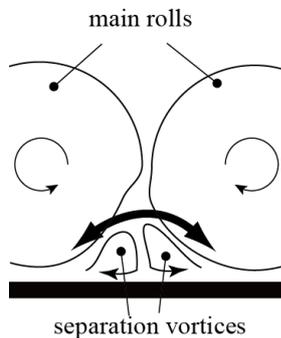


図4 対流ロールの間に形成されるはく離再循環渦対とその振動不安定の模式図

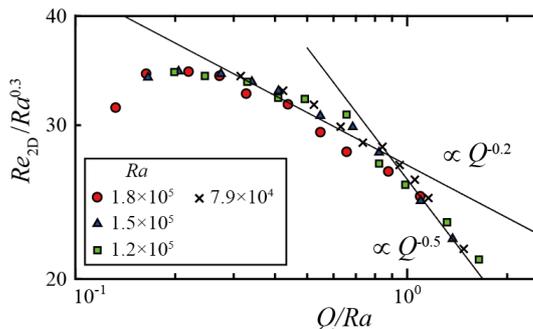


図5 実験結果から算出した准二次元流れのレイノルズ数とチャンドラセカル数 Q に対する変化

磁場強度の減少に伴う流れ場の三次元化については、准二次元ロール自体の三次元化に加え、ハルトマン層の形成をもたらす三次元化が存在することが示された。図6の模式図に示したように、ハルトマン層の形成により磁場と垂直な流体層側壁付近の流れが速くなり、磁場方向に圧力勾配が生まれる。静止壁面に対する回転流れの境界層はヴェーデワット (Bödewadt) 層と呼ばれ、ハルトマン層の形成により強化された圧力勾配によりロール軸方向の流れが形成される。この流

れが流体層中央部で生じた乱れを運搬し、対流に三次元性を与える。

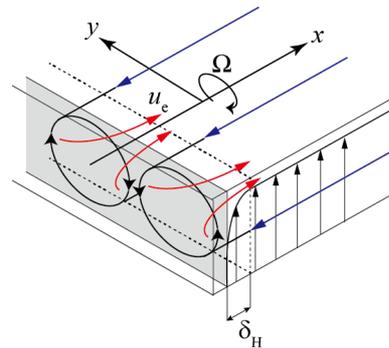


図6 ヴェーデワット・ハルトマン層とそれによりもたらされるロール軸方向流れの模式図

(3) 交流磁場により容器内に形成される乱流

容器内に液体金属を満たし、外部から交流磁場を加えることにより低流速ながら非常に乱れた流れが形成される。この流れは、冶金の誘導炉の原理となっており、その攪拌能力の予測などが重要であるが、生成される乱流(そもそも本当に乱流なのか)の性質やパラメータ依存性は明らかにされていない。

本研究では、図7に示すような直径 $2R = 179\text{mm}$ のアクリル製円筒容器に液体金属である GaInSn の合金を高さ 119mm まで満たした体系で実験研究を行った。蓋をすることで、現実の誘導炉とは異なるが、対称性を持つより理想的な体系を実現した。容器下部に複数本の超音波トランスデューサを鉛直方向上向きに設置し、UVPにより流れの計測を行った。容器を矩形コイルの中心に設置し、交流磁場を加えた。形成される磁場の軸対称性は確認されている。交流磁場の周波数 ($f = \omega/2\pi$) を 10Hz から 1kHz 、磁場の強度(実効値, B_{rms}) を 0.3 から 3mT まで変化させた。対応する無次元パラメータは、交流磁場でよく用いられるシールドングパラメータ、

$$S = \mu_m \sigma \omega R^2 = \frac{R^2/\eta}{(1/\omega)},$$

およびチャンドラセカル数、

$$Q = \frac{\sigma B_{\text{rms}}^2 R^2}{\mu}$$

である。ここで、 μ_m 、 σ 、 μ はそれぞれ流体の透磁率、電気伝導度、粘性係数である。

半径方向に並べた計測線から得られた鉛直方向の平均速度分布より、図7に模式的に示したような、2つのトロイダル循環が形成されていることが確認できた。これについては過去の文献でも示されている。 Q を増加させた場合、循環の速度は速くなり且つ非定常性が増すが、構造自体は変化しない。一方 S を変化させた場合、 $S = 30$ を超えるとこの構造が崩壊し、異なる構造に遷移することが示

された。

壁面近傍に設置した計測線から得られた速度分布を時間方向にフーリエ変換し、さらに計測線に沿って空間平均することで速度変動強度の周波数スペクトルを得た(図8)。図から分かるように、 $S=5$ 以上においてスペクトルは $-5/3$ の傾きを持つ部分を有しており、コルモゴロフのカスケード構造を有する流れになっていることが分かる。しかしながら、計測された速度から見積もった容器内循環流のレイノルズ数はたかだか2000程度であり、このようなカスケード構造を形成するには十分な大きさとは言えない。これに関して、交流磁場の表皮効果(表面のみ誘導電流が流れる)を考慮したスケリングを行った結果、 $-5/3$ の傾きを示した周波数帯のカットオフ周波数が表皮層厚さのスケールと一致した。よってこの流れでは、交流磁場によるローレンツ力で生み出される渦流れが、周波数の増加により薄くなった表皮層内で増強され、容器サイズの循環流に放出されることで、このような乱流型のスペクトルが形成されたものと理解できる。

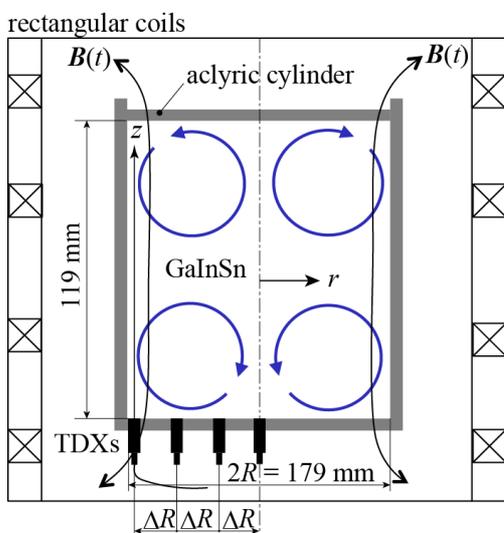


図7 交流磁場により誘起される流れの実験系模式図

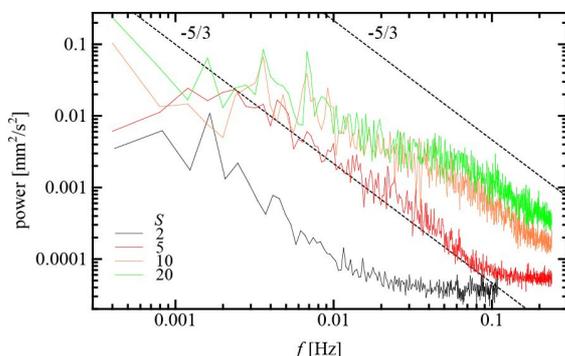


図8 円筒側壁近傍に設置された計測線から得られた速度分布の変動強度周波数スペクトル

5. 主な発表論文等 (研究代表者は下線)

〔雑誌論文〕(計 2 件)

B. Lebon, J. Peixinho, S. Ishizaka & Y. Tasaka, “Subcritical transition to turbulence in a sudden circular pipe expansion”, Journal of Fluid Mechanics (accepted) (査読有)

T. Vogt, W. Ishimi, T. Yanagisawa, Y. Tasaka, A. Sakuraba, S. Eckert, “Transition between quasi-two-dimensional and three-dimensional Rayleigh-Bénard convection in a horizontal magnetic field”, Physical Review Fluids, Vol. 3, 013503 (2018)
DOI: 10.1103/PhysRevFluids.3.013503(査読有)

〔学会発表〕(計 17 件)

S. Ishizaka, “Growth of finite amplitude disturbances in pipe flow with sudden expansion”, 70th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (2017)

Y. Tasaka, “Global structure transitions in an experimental induction furnace”, 70th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (2017)

B. Lebon, “Flow in a circular expansion pipe with synthetic disturbances”, Euromech Sym. Colloquium 591: Three-dimensional instability mechanisms in transitional and turbulent flows (2017)

Y. Tasaka, “Inertia-induced transitions in Rayleigh-Bénard convection confined by a horizontal magnetic field”, 61st Workshop on “Investigation and Control of Transition to turbulence” (2017)

Y. Tasaka, “Low Reynolds number turbulence generated by alternating magnetic field in a cylindrical liquid metal layer”, 16th European Turbulence Conference (ETC2017) (2017)

Y. Tasaka, “Rayleigh-Bénard convection confined by a moderate aspect ratio box”, Invited lecture, Technische Universität Ilmenau (2016)

6. 研究組織

(1)研究代表者

田坂 裕司 (TASAKA, Yuji)
北海道大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 00793671

(2)研究協力者

〔主たる渡航先の主たる海外共同研究者〕
Sven ECKERT

Helmholtz Zentrum Dresden-Rossendorf
(HZDR) • Group of Magnetohydrodynamics •
Director

Jorge PEIXINHO
Université du Havre • Laboratoire Ondes et
Milieux complexes • CNRS 1st class researcher