

平成 22 年 4 月 1 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2008～2009

課題番号：20860070

研究課題名（和文） チャンネル内遷移流の大規模 DNS による乱流縞と熱流動特性の解明

研究課題名（英文） Analysis on turbulence stripe and its flow-thermal characteristics in transitional channel flow through large-scale DNS

研究代表者

塚原 隆裕（TSUKAHARA TAKAHIRO）

東京理科大学・理工学部・助教

研究者番号：60516186

研究成果の概要（和文）：大規模直接数値シミュレーションおよび可視化実験等を行い，乱流縞を伴う平行平板間流れの熱流動特性を評価した．ポアズイユ流，クエット流および回転系平面クエット流で確認された乱流縞は，粘性長さでスケーリングされ，縞の角度は主流方向に対して 20～30 度傾いた普遍的な構造である．また，乱流縞の影響は熱輸送においても顕著であり，縞構造に沿って空間的に大規模な温度変動（乱流熱輸送）を伴うことを見出した．

研究成果の概要（英文）：Large-scale direct numerical simulations and experiments were conducted in two types of plane channel flows, i.e., plane Poiseuille and Couette flows without/with system rotation, in the subcritical-transition regime. Both flows gave rise to coexisting laminar and turbulent equilibrium regions in the form of oblique stripes, which were tilted by a certain angle with respect to the mean flow. In this context, the turbulence stripe can be seen as an intrinsic phenomenon in the reverse transition in a channel flow. It was found that the turbulence stripe should be effective in sustaining turbulence and in heat-transfer enhancement.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,330,000	399,000	1,729,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,530,000	759,000	3,289,000

研究分野：熱流体力学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学（5005）

キーワード：乱流熱伝達，チャンネル乱流，遷移，乱流縞，数値流体力学，DNS

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年，マイクロ熱交換器や高密度電子機器の熱除去技術の開発が進められている中，

それに伴う熱流体機器の小型化により，冷却材流れの低レイノルズ数化が進んでいる．レイノルズ数が低くなれば，一般的に熱伝達率

も低くなり、さらに層流・乱流の遷移レイノルズ数を下回る場合、乱流挙動による熱輸送が起きなくなる。つまり、狭い流路を持つ熱流体機器では高効率な乱流熱伝達の維持が重要な課題となる。また、MEMS（微小電気機械素子）などによる乱流制御技術についても関心が高まっており、実用化（例えば、流体抵抗の低減、熱や物質の輸送と拡散の増進や抑制などを通じて、省エネルギー化や環境工学などに貢献）に向けて精力的な開発研究が行われている。そこで、乱流制御の指針を得るためにも、乱流・層流間の遷移レイノルズ数域における熱流動特性は益々重要な問題とされてきている。それら乱流の流動特性・伝熱特性を解析する際には、直接数値シミュレーション（DNS）が欠かせないツールである。しかしながら、遷移域におけるDNSおよび実験例は数少ない上に、熱伝達を考慮した研究は殆ど行われていない。その理由として、層流化に近いレイノルズ数におけるチャンネル乱流では大規模な間欠的構造を生じ、それを十分に捉える計算領域を用いたDNSや長流路の実験が困難であったことが挙げられる。以上のことから、大型並列計算機による大規模な計算領域を用いた解析により、チャンネル内遷移流の熱流動現象の解明を行う必要がある。

(2) 壁乱流の乱流熱伝達の研究を行う上で、しばしば解析対象となる規範的（canonical）な流れ場は、図1に示すポアズイユ流（圧力勾配駆動による流れ）とクエット流（壁面相對運動による駆動）のチャンネル内流れが挙げられる。過去二十年で大型計算機の発達に伴い、ポアズイユ流において様々なレイノルズ数やプラントル数におけるDNSが行われてきた。しかし、それらは完全発達した乱流場（ $Re_\tau \geq 110$ 。ここで $Re_\tau$ は摩擦速度、チャンネル半幅 $\delta$ 、動粘性係数 $\nu$ に基づくレイノルズ数）に関する研究が多数である。特に、運動量や熱の輸送に大きく寄与する準秩序的構造の解明に関心が払われ、中程度から高レイノルズ数における実験的・数値的研究が盛んに行われてきた。一方、遷移レイノルズ数域（ $Re_\tau \leq 80$ ）のDNSは、本研究グループの他1件（Iida & Nagano, Flow Turbulence and Combustion, Vol. 60, 1998）であり、遷移流にのみ現れる間欠構造についての知見は得られていなかった。現在までに、本研究グループでは、 $Re_\tau = 56 \sim 80$ のチャンネル内ポアズイユ流において、乱れが空間的に間欠となり、円管内流で観察されるパフに似た現象が現れること、さらには乱流域が特徴的な斜めの構造（乱流縞）を持つことを報告している。その空間スケールは、主流方向にチャンネル幅の25倍、スパン方向に10倍以上という大規模な構造である為、DNSによる解析を行う

際、従来よりも広大な計算領域を要する。もし、流れに内在する構造よりも小さい計算領域を用いた場合には、これを捉えることができず、もしくは周期境界条件により重大な変動を及ぼすこととなり、正しい流れ場を再現できなくなる。つまり、乱流縞よりも小さな計算領域では乱流縞を捉えることができず、乱流縞の無い非現実的な流れ場となる恐れがある。この乱流縞の有無は、各種乱流統計量・熱伝達率・臨界レイノルズ数等にも影響するため、このような非物理的な影響が無いよう、十分に構造を捉え得る計算領域を確保することが重要である。

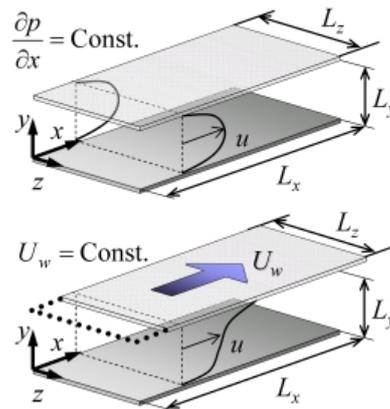


図1 解析対象:(上図)ポアズイユ流れ,(下図)クエット流れ。水平方向には周期境界条件を与え、仮想的な無限平板間流路を模擬。

(3) 主流方向に対して傾斜した乱流域を形成する乱流縞は、チャンネル内クエット流においても観察されている（Barkley & Tuckerman, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 576, 2007）。また、テイラー・クエット流におけるスパイラル乱流（Andereck et al., Journal of Fluid Mechanics, Vol. 164, 1986）とも酷似している。これらの現象は、上記のポアズイユ流の乱流縞と、ほぼ同程度の空間スケールと傾斜角を有しており、共通の現象と考えられる。しかし、乱流域が主流方向に対して傾斜して平衡状態に至る原因、定まった角度の理由、発生条件（レイノルズ数や流路形状）など、未解明の点は多い。従来のDNSや実験では、主にマクロな可視化のみで、詳細なメカニズムの解明は行われていない。大規模DNSと可視化実験による乱流縞の解析に焦点を置き、ポアズイユ流・クエット流を含む遷移チャンネル流における乱流縞の詳細な解明が必要とされる。

## 2. 研究の目的

(1) 平行平板間ポアズイユ流において、乱れの大規模な間欠性が縞状に現れる遷移レイ

ノルズ数域のDNSを実施し、乱流縞構造の詳細なメカニズムを調べ、特に空間スケールと傾きのレイノルズ数依存性を調査する。

(2) 一定の加熱条件を課した時の温度場の解析を行い、乱流縞による影響について、定量的評価を行う。

(3) 乱流縞の可視化方法について、実験的アプローチ(フレークによる可視化)及び数値的アプローチ(フレークを模擬した可視化シミュレーション)から検討を行う。

(4) 平行平板間クエット流においても、ポアズイユ流に似た乱流縞が形成されることが予測される。これについても同様に解析し、ポアズイユ流における乱流縞との相違について検討する。

### 3. 研究の方法

(1) 乱流縞の解析(ポアズイユ流・クエット流それぞれについて)

レイノルズ数(及び回転パラメータ)を段階的に下げながら、大規模DNSを実施。計算領域のサイズとして、ポアズイユ流には  $327.68\delta \times 2\delta \times 128\delta$ 、クエット流には  $204.8h \times h \times 102.4h$  ( $h$ はチャネル幅)を適用し、格子点数は最大で約8億点とした。可視化実験に用いる小片状のフレーク粒子を模擬した、DNSにおける可視化解析。中規模DNSにより、乱流縞の局所的な乱れエネルギー収支を解析。

フレークを用いた可視化実験による乱流縞の検証と傾斜角の測定。

LDV(レーザードップラー流速計)による測定により、遷移域の流動特性を評価。

(2) 乱流熱伝達の解析(ポアズイユ流・クエット流それぞれについて)

大規模DNSにより、各種乱流統計量を測定(プラントル数0.71(空気)とし、物性値一定)。

異なる二種の熱的境界条件を課し、熱伝達に関する各種統計量を測定。

### 4. 研究成果

本研究課題を通して、以下の知見を得ることができた。

(1) ポアズイユ流の乱流縞は摩擦レイノルズ数で  $Re_\tau = 56 \sim 80$  の範囲、クエット流では  $Re_\tau = 25 \sim 28$  の範囲で発生する(図2)。ここで、各流れ場における外層スケールに基づくレイノルズ数  $Re$ (ポアズイユ流:チャネル中心速度とチャネル半幅に基づくレイノルズ

数、クエット流:壁面相対速度とチャネル幅に基づくレイノルズ数)を用いて整理すれば、 $Re = 1070 \sim 1500$  が乱流縞の発生レイノルズ数域と言える。

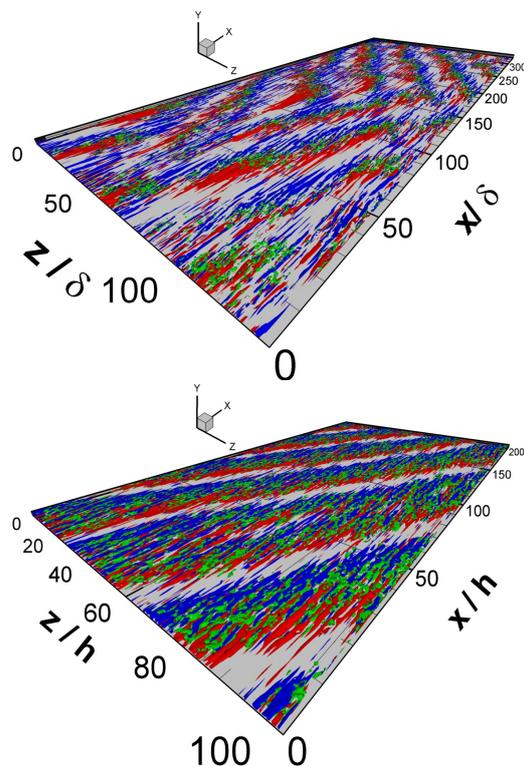


図2 DNSにより再現された乱流縞を伴う遷移レイノルズ数域のチャンネル内流れの瞬時場:(上図)ポアズイユ流,(下図)クエット流。主流方向速度変動と渦を可視化(赤:正の速度変動,青:負の変動,緑:渦)。速度変動と渦が偏在し、縞状にクラスター形成している様子が分かる。

(2) 乱流縞の空間スケールは粘性長さ(摩擦速度と動粘性係数に基づく長さスケール)でスケールリングされ、縞の角度は主流方向に対して  $20 \sim 30$  度傾いた構造を有する(表1)。また、これは実験結果(図3)とも良く一致しており、乱流縞の存在が実証された。

表1 乱流縞の主流方向スケール  $\lambda_x^*$  とスパン方向スケール  $\lambda_z^*$  および縞の角度  $\theta$ 。PF:ポアズイユ流れ, CF:クエット流れ。

	$Re_\tau$	$Re$	$\lambda_x^*$	$\lambda_z^*$	$\theta$
PF	56	1070	6100	2400	$21^\circ$
PF	64	1170	5200	2100	$21^\circ$
PF	80	1440	5200	2100	$21^\circ$
CF	25	1400	3400	1700	$27^\circ$
CF	27	1500	2800	1400	$27^\circ$

(3) 回転系平面クエット流においても乱流縞は観察され、コリオリ力が流れを安定化させる方向に働くときはより高いレイノルズ

数でも乱流縞は発生し得る．図 4 に示す可視化結果は， $Re = 3000$ （静止系であれば流れ場全域に完全発達した乱流場となるレイノルズ数）であり，回転による安定化作用のために高レイノルズ数でも上記の DNS 結果とも良く一致する乱流縞が確認された．

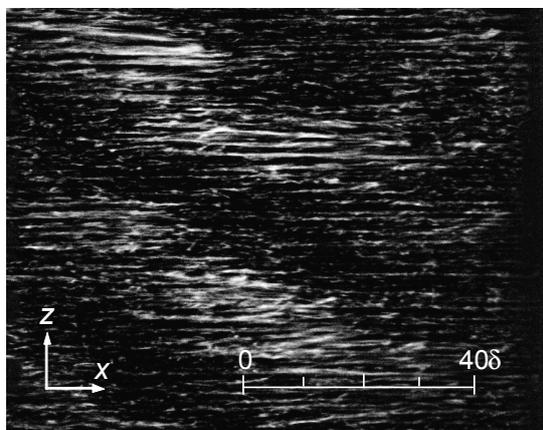


図 3 遷移レイノルズ数域のポアズイユ流の可視化実験結果．薄片状のフレーク粒子を用いて可視化．比較的暗い領域が乱流域，明るい領域が層流域．主流方向（図の横方向）に対して乱流域が傾いている様子（乱流縞）が確認できる．

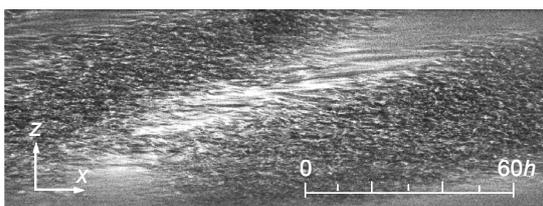


図 4 回転平面クエット流において観察された乱流縞．細かい明度の変動がある比較的暗い領域が乱流域，明るい領域が層流域．主流方向（図の横方向）に対して傾いた乱流縞が確認できる．

(4) 乱流縞の影響は熱輸送においても顕著であり，縞構造に沿って空間的に大規模な温度変動（乱流熱輸送）を伴う．また，低レイノルズ数域でも居所的に強い乱流域を維持するため，層流時よりも高い熱伝達率が得られる．つまり，乱流縞は乱流熱伝達の維持・促進に寄与している．

(5) 遷移レイノルズ数域であれば，層流中の発達した乱流斑点は乱流縞を呈するため，縞構造は初期条件に因らず遷移レイノルズ数域において本質的な現象であると示唆される．

以上の得られた成果は，国際学会等で発表され，関心を集めている．遷移域の流れ場に内在する秩序構造について，その普遍性を解明したことは工学分野のみならず流れの不安

定性問題に重要な指針を与えるものとなる．また，本解析対象は規範的な乱流場であり，本研究で得られた DNS データベースは，乱流熱伝達に関する研究の進展や工業分野での熱流動特性の予測に大きく寄与するものである．

## 5．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 10 件)

塚原隆裕，他，遷移域チャンネル流の大規模な乱れ間欠性に関する数値的・実験的研究，第 87 期日本機械学会流体工学部門講演会，2009 年 11 月 7-8 日，名古屋

橋本修一，塚原隆裕，川口靖夫，河村洋，可視化実験及び LDV 計測によるチャンネル内遷移流の研究，日本流体力学会年会 2009，2009 年 9 月 2-4 日，東京

T. Tsukahara，Turbulence stripe in plane channel flow，RIMS Workshop, Mathematics and Physics across the Diversity of Turbulence Phenomena，2009 年 7 月 9-11 日，神戸

塚原隆裕，川口靖夫，河村洋，遷移レイノルズ数域の平行平板間流れにおける乱流熱伝達の DNS（第 3 報：ポアズイユ流とクエット流における乱流縞の比較），第 46 回日本伝熱シンポジウム，2009 年 6 月 2-4 日，京都

T. Tsukahara，Y. Kawaguchi，H. Kawamura，Turbulent stripe in direct numerical simulation of transitional channel flow，61th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamic，2008 年 11 月 23-25 日，USA

〔図書〕(計 3 件)

S. Hashimoto，A. Hasobe，T. Tsukahara，Y. Kawaguchi，H. Kawamura，BegeII House Inc.，Turbulence, Heat and Mass Transfer 6，2009，pp. 193-196

T. Tsukahara，Y. Kawaguchi，H. Kawamura，Springer，Advances in Turbulence XII，2009，pp. 71-74

T. Tsukahara，他，Springer，Proceedings of the Seventh IUTAM Symposium on Laminar-Turbulent Transition，IUTAM Bookseries，Vol. 18，2009，pp. 421-426

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://murasun.me.noda.tus.ac.jp/db/>

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

塚原 隆裕 (TSUKAHARA TAKAHIRO)  
東京理科大学・理工学部・助教  
研究者番号：60516186