

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：基盤研究 (C)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560208  
 研究課題名(和文) 遷移レイノルズ数領域における三次元剥離流れと熱輸送機構の数値解析  
 研究課題名(英文) Numerical Simulation of Three-Dimensional Separated Flow and Heat Transfer in Transient Reynolds Region  
 研究代表者  
 吉川 浩行 (YOSHIKAWA HIROYUKI)  
 熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授  
 研究者番号：40221668

研究成果の概要：本研究では、遷移レイノルズ数領域における矩形断面对称急拡大流路内流れを解析の対象とし、三次元剥離流れおよび壁面からの熱伝達特性を調査した。レイノルズ数の増加にともない、流路内の流れは、定常対称流れ、定常非対称流れ、非定常流れへと遷移する。流れの遷移によって熱伝達特性は大きく変化し、非定常流れでは、再付着領域においてはスパン方向に軸を持つ渦に、それより下流域では流れ方向に軸を持つ渦により熱伝達が促進されることを明らかにした。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：Separated Flow, Heat Transfer, Transient Reynolds Region

## 1. 研究開始当初の背景

剥離した流れが再付着する物体あるいは流路内の熱伝達特性の解明は、それら種々の形式の熱交換器の性能評価、さらには伝熱促進方法と密接に関連し、熱エネルギーの有効利用・省エネルギー、低炭素化社会実現の観点から緊急を要するきわめて重要な課題である。近年、工学機器の小型化およびエネルギー損失低減のために、遷移レイノルズ数領域における剥離をともなう流れ場の流れ特性および熱輸送機構の解明が求められている。

## 2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、本研究では、遷移レイノルズ数領域における矩形断面急拡大流路内流れを解析対象とし、剥離剪断層の挙動、再付着位置の移動、大規模渦塊の放出機構、それらに基づく熱伝達機構を直接数値計算により解明する。実験による再現性が困難であり、未解明な点が多々ある、遷移レイノルズ数領域における複雑な剥離をともなう流れ場における大規模渦の動的挙動と熱輸送機構を詳細に調査する。

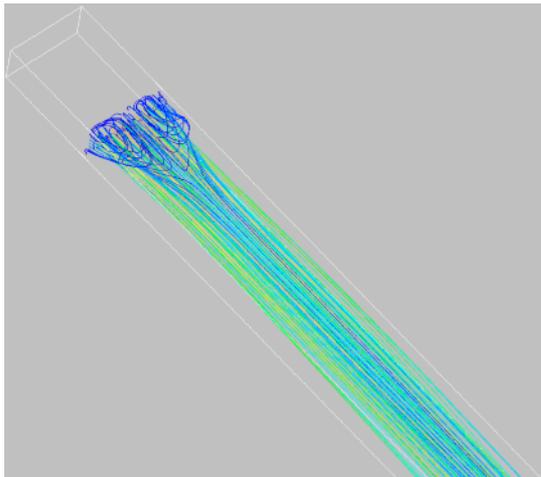
### 3. 研究の方法

本研究の数値解析の対象を、矩形断面对称急拡大流路内の三次元非定常流れとする。遷移レイノルズ数領域における流れの剥離、それにより生じる渦を正確に把握できるように、対流項に5次精度、粘性項に4次精度の高次差分スキームを採用する。

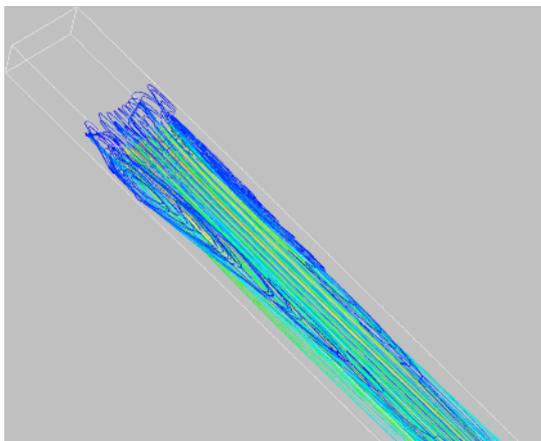
(1) 種々のアスペクト比に対して解析することにより、対称流から非対称流、非定常流への遷移、流れ場および温度場に及ぼす側壁の影響を調査する。

(2) 強い三次元性を有する非定常な大規模渦構造の動的挙動を明白にし、流れと熱伝達特性の相関を明らかにするのみならず、剪断応力や熱流束を含む時間変動諸量の統計的特性を調査する。

(3) 以上の計算結果を基礎とし、遷移レイノルズ数領域における剥離・再付着流れに関して、定常流から非定常流への遷移過程、剥離剪断層の揺動、再付着位置の移動、流れ場および温度場に及ぼす側壁の影響、大規模渦塊の放出機構および動的挙動、さらにはこれらに基づく局所熱伝達率分布およびその非定常変化などの熱伝達機構の詳細を解明する。



(a) 上壁側からの様相



(b) 下壁側からの様相

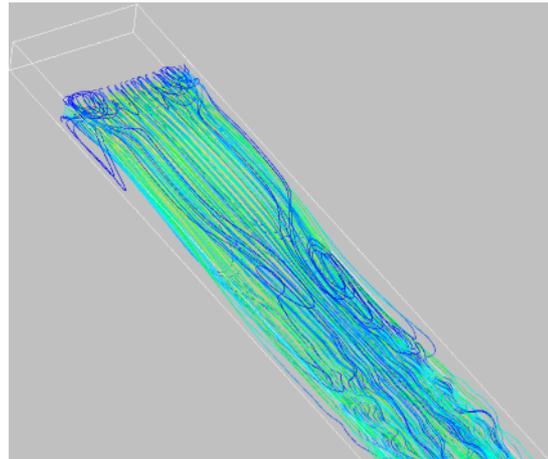
図1 流線 ( $AR=8$ ,  $Re=350$ )

### 4. 研究成果

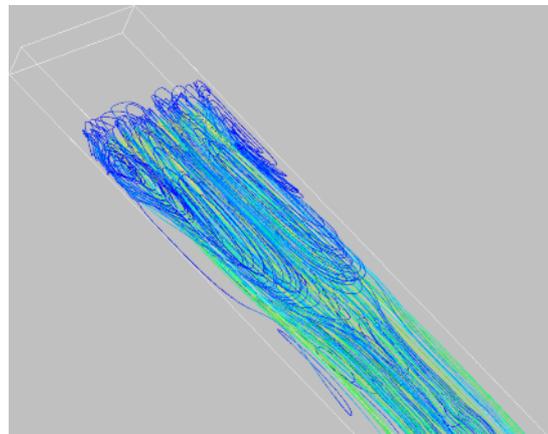
本研究により得られた主な研究成果を以下に述べる。

(1) 矩形断面对称急拡大流路内に形成される三次元非対称流れを明らかにするために、図1にアスペクト比  $AR=8$ 、レイノルズ数  $Re=350$  の流線を示す。流れが最初に偏る上壁側では、流路拡大部の直下に三次元性が強く、短い循環領域が形成される。側壁近傍から流入した流体はこの循環領域に巻き込まれ、上壁と平行に大きく旋回しながら流路中央部に運ばれ、ついには主流に取り込まれて下流へと流れ去ることがわかる。下壁近傍には上壁よりも長い循環領域が形成されている。側壁近傍には流体が側壁と平行な大規模な旋回流が形成され、これにより上壁に高速に接近する流れが生じている。

図2に  $AR=16$ ,  $Re=350$  の流線を示す。図2(a)より、 $x/H=34$  付近の側壁近傍に側壁と平行な旋回流が形成されていることが見て取れる。下壁に形成される循環流は  $AR=8$  のそれより強く旋回していることがわかる。また、アス



(a) 上壁側からの様相

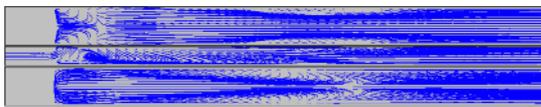


(b) 下壁側からの様相

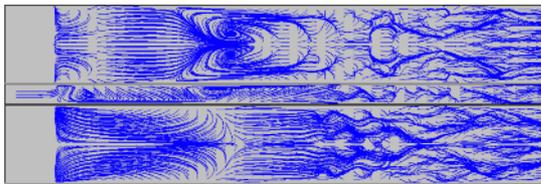
図2 流線 ( $AR=16$ ,  $Re=350$ )

ペクト比は16と十分大きいにもかかわらず、流路中央においてさえ流れの二次元性は観察できない。流路内流れはきわめて複雑な三次元性を有しており、流れ場に及ぼす側壁の影響が大きいことは明らかである。

図3に  $AR=8, 16, Re=350$  の限界流線を示す。上から順に上壁、側壁、下壁におけるものである。上下壁の限界流線から、上述した上下壁に形成される循環流とその旋回の様相がわかる。 $AR=16$  のとき、図2で述べたように、 $x/H=34$  付近の側壁近傍に側壁と平行な旋回流が存在し、それによって側壁には旋回を明示する限界流線が描かれている。また、その付近の上壁では、限界流線は特徴的な様相を呈しており、それらは互いに干渉しあっているものと考えられる。



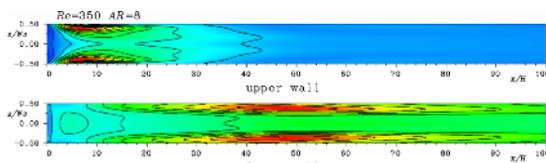
(a)  $AR=8$



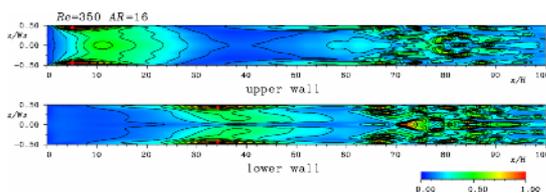
(b)  $AR=16$

図3 壁面での限界流線 ( $Re=350$ )

(2) 図4に  $AR=8, 16, Re=350$  の上下壁における正規化した局所ヌッセルト数分布を示す。アスペクト比によらず、側壁と平行な旋回流によって上下壁に向かう高速な流れが生じる側壁近傍で、上下壁ともに局所ヌッセルト数は最大となっている。また、ヌッセルト数が最大となる位置は、上壁ではほぼ一致しているが、下壁ではその領域は  $AR=16$  の方が  $AR=8$  より上流側に位置している。



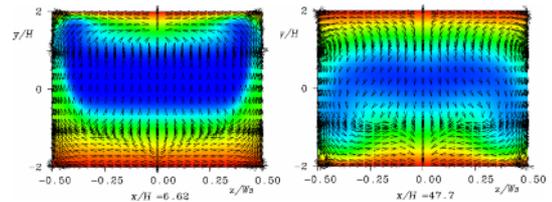
(a)  $AR=8$



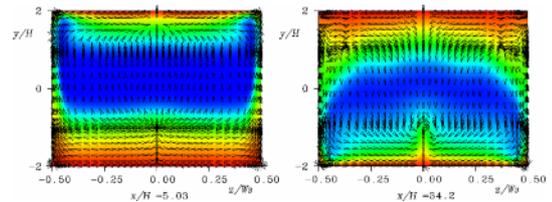
(b)  $AR=16$

図4 局所ヌッセルト数分布 ( $Re=350$ )

図5に  $Re=350$  のとき、上壁(左図)および下壁(右図)で局所ヌッセルト数が最大となる断面における正規化した温度分布および速度ベクトルを示す。側壁近傍に形成される旋回流により、低温の流体が主流から側壁近傍の上下壁に高速に運ばれ、その付近で温度境界層が薄くなっていることがわかる。そのために、図4に示すように、その領域で熱伝達が促進される。また、上下壁に形成される循環領域で流れは比較的低速で温度境界層が厚くなるため、熱輸送が緩慢であることがわかる。



(a)  $AR=8$



(b)  $AR=16$

図5 温度分布と速度ベクトル ( $Re=350$ )

(3) 図6に  $AR=6, Re=1000$  の流路内に現れる渦管(速度勾配テンソル第二不変量  $Q$  の等値面)を示す。複数の渦管が  $40 \leq x/H \leq 50$  の領域で流路全体に生じ、複雑にからみあっている。図ではスパン方向渦度  $\omega_z$  をカラー表示している。図中の渦管は小規模であるが、大規模な渦がこれらの渦管により構成されている。このスパン方向に軸を持つ渦により、下壁に

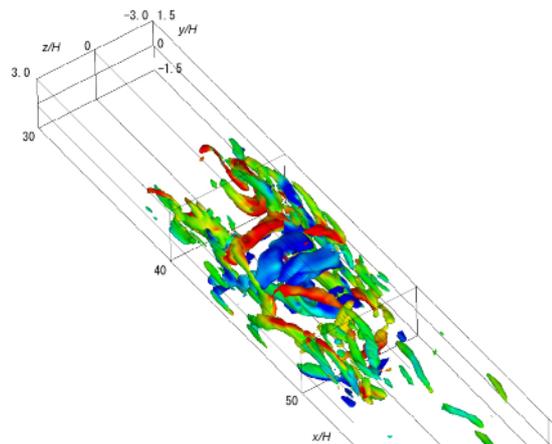


図6 渦管 ( $AR=6, Re=1000, Q=0.5$ )

向かう流れが誘起される．この渦は時間とともに下流に流され，その渦度は徐々に低下していく．一方，さらに下流では，この大規模渦は崩壊し，その際に流れ方向に軸を持つ渦管が生成されていることがわかる．

図7に大規模渦が形成される領域で，流路中央における垂直速度変動のパワースペクトルを示す．この図より，大規模渦の放出にともなう明瞭な卓越周波数を読み取ることができる．そのストローハル数は  $St=0.0277$  であり， $40 \leq x/H \leq 50$  領域から  $t=36.1H/U_0$  の周期で大規模渦が放出されていることがわかる．

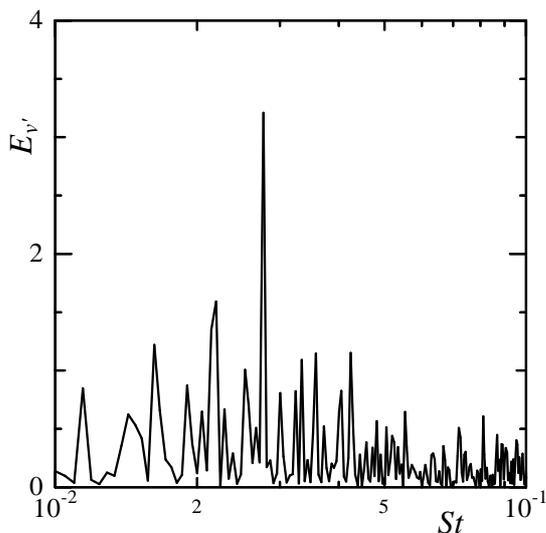


図7 垂直方向速度変動のパワースペクトル ( $AR=6$ ,  $Re=1000$ ,  $x/H=50$ ,  $y/H=z/H=0$ )

図8に  $AR=6$ ,  $Re=1000$  の下壁面における瞬間ヌッセルト数分布を示す．図6で示すスパン方向に軸を持つ大規模な渦が存在する領域で，ヌッセルト数の高い領域がスパン方向に広がっており，定常非対称流のときは大きく異なっている．ヌッセルト数が高い領域は，時間の進行による渦の流下とともに下流へと移動しながら低下し，渦の崩壊に対応して分散する様相を示す．さらに下流では，流路中央でのヌッセルト数は低下するのに対し，熱伝達率は側壁近傍で上昇している．

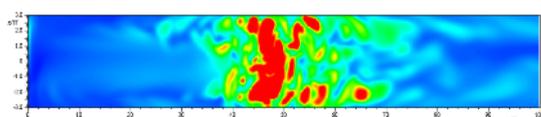


図8 下壁面瞬間ヌッセルト数分布 ( $AR=6$ ,  $Re=1000$ )

図9に  $AR=6$ ,  $Re=1000$  の下壁面における時間平均ヌッセルト数分布を示す．図6, 8で述べた瞬間的な流れ場および熱伝達特性に対応し，時間平均ヌッセルト数が高い領域は，

スパン方向に軸を持つ渦が形成され，時間とともに流下する  $x/H=50$  付近を中心にスパン方向に長い分布をしている．この領域より下流では，図8で述べたように，流路中央よりも側壁近傍で主流方向に長く，ヌッセルト数の高い領域が形成されている．

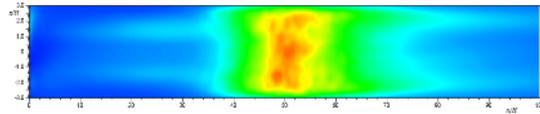


図9 下壁面時間平均ヌッセルト数分布 ( $AR=6$ ,  $Re=1000$ )

図10に  $AR=6$ ,  $Re=1000$  の下壁面におけるヌッセルト数の変動強さ分布を示す．図6に示す大規模渦が形成されて崩壊するまでの広範な領域で変動強さは高い値をとり，その分布は時間平均ヌッセルト数分布とよく対応していることから，これらの渦が熱伝達の促進に大きく寄与していることは明白である．

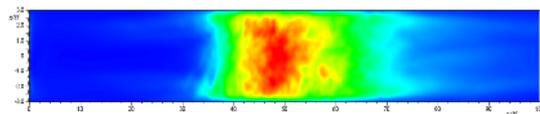


図10 ヌッセルト数の変動強さ分布 (下壁面,  $AR=6$ ,  $Re=1000$ )

## 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1件)

YOSHIKAWA, H., ICHINOMIYA, K., MUNEKATA, M., OHBA, H., Numerical Simulation of Deflecting Flow in a Symmetric Enlarged Channel, Journal of Thermal Science, Vol. 16, 353-359, 2007, 査読有.

〔学会発表〕(計1件)

YOSHIKAWA, H., ICHINOMIYA, K., MUNEKATA, M., OHBA, H., Numerical Simulation of Deflecting Flow in a Symmetric Enlarged Channel, Proceedings of 8th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flow, Lyon, France, 719-725, 2007-7.

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

吉川 浩行 (YOSHIKAWA HIROYUKI)

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授  
研究者番号：40221668