

平成 21 年 6 月 22 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560215

研究課題名（和文） ダイナミック熱交換器の開発

研究課題名（英文） Development of a dynamic heat exchanger

研究代表者

稲岡 恭二 (INAOKA KYOJI)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：60243052

研究成果の概要：小型再生熱交換器への適用を念頭に、円筒形状の回転配管から噴流を噴出させるダイナミック熱交換器を考案し、熱交換要素の基礎特性を調べた。その結果、回転配管からの噴流は均一で良好な熱交換促進を果たすことが分かり、有効性が示された。熱交換の促進効果は噴流の衝突頻度パラメータにより整理でき、最適設計に繋がる指針を得ることができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：熱交換器，衝突噴流，回転，熱伝達

## 1. 研究開始当初の背景

熱交換器は高温流体から低温流体にエネルギーを伝えるための機器であり、その高効率化は熱流体機器の熱利用効率を上げることに直結するため、これまで種々の検討が施されてきた。しかし、特に再生式熱交換器は、より広範囲な機器への適用が可能となるよう、主として汎用向けに設計されることが多かった。これまで例えば熱交換器内のフィン列要素に関して、形状変更や小寸法化による最適化等々が図られてきたが、熱交換器そのものの構造を大きく変えるような、新たな変革はなされていない。

本研究は、現在の動力エンジンに多く見られる回転機械への接続に特化した新たな熱

交換器を創製するとともに、その基本性能を評価するものであり、そのキーワードが衝突噴流と回転（ダイナミック）である。衝突噴流を利用する熱伝達は、噴流が衝突する中心位置で極めて高い熱伝達特性を示すため、コンピュータのCPU冷却に認められるような高発熱体のスポット冷却や、鋼材の精錬工程に例をみるようなマルチ多孔化による均一面冷却、また、製紙工程における紙面の乾燥などに製品製造過程における加熱・冷却の各種プロセスに多用されてきた。このように、衝突噴流は物質・熱伝達上極めて有効であるにもかかわらず、コンパクトネスと汎用性が重視されている熱交換器においては、この衝突噴流を積極的に応用した例は皆無である。本



体流量、噴流孔の数と位置、回転数等をパラメータとして変更し、熱交換面の局所温度を測定するとともに実験結果を整理して流路の熱交換特性を把握し、最適な熱交換特性がどのような条件で得られるのかを中心に年度内のまとめを行った。

2008年度には、噴流の回転とともに局所熱伝達率が時間的に変化することを踏まえ、温度の動画像を採取する変更を行った。また、アクリル製の可視化用テスト流路を作成し、噴出した噴流の円筒流路内の流れを煙とレーザー光を用いて可視化し、熱交換の動特性を与えるメカニズムについて調べた。

#### 4. 研究成果

本研究の成果の概略を下に記す。なお、研究成果は主として流れのレイノルズ数が4000（代表長さは噴流の直径）、噴流孔数を1~8、回転数を0~160rpmの実験条件内でまとめたものである。

##### (1) ダイナミック熱交換器の流動特性

最もシンプルな噴流孔が一つの場合については、コアに回転を付与しない場合においては、コアから噴出した噴流は、衝突面が緩い曲率を有するにもかかわらず、垂直のいわゆる衝突噴流の場合との差異はさほど見られない。しかし、コアに回転を与え、その回転速度を増大させ、80rpm程度にすると、噴流は噴出方向が回転方向とは逆方向に傾斜し、伝熱面に衝突する。その傾斜は、回転数の増加と共に顕著になる。また、噴流孔を2, 4, 8と増加させ、例えば孔数が4になると、噴流間の角度ピッチが90度となり、回転速度が80rpmと高くなれば噴流が互いに干渉し合い、回転方向の噴流の前方に渦が循環して定在するセル構造の発生が認められた。その様子を図3に例示する。この傾向は孔数8の場合にはさらに顕著で、回転方向の特に壁面近傍に大規模な渦セル構造と、噴流への巻込み流れが発生し、噴流自体に大きな構造の変化をもたらすことが分かった。

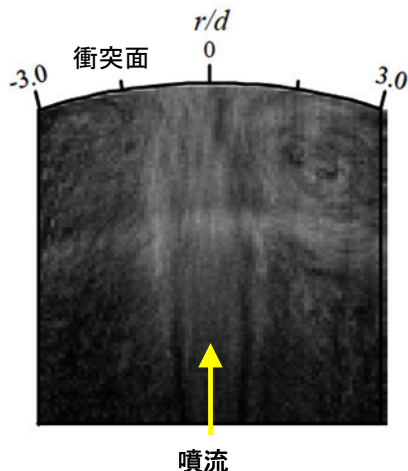


図3 渦循環のセル (孔数4, 80rpm)

なお、本報告には全ての場合の可視化画像を示していないが、この主の曲面への衝突噴流の様子は未だ解明されていない点が多く、貴重な知見であると思われる。

##### (2) 衝突面の局所熱伝達率分布

図4に一例として、噴流の孔数が4の場合の熱交換面における局所熱伝達率分布を示す。

回転を付与しない場合については、全ての孔数の条件において、熱伝達率は噴流の中心で最大値をとり、中心から離れるにつれて低下する。衝突面が曲率を持っているが、熱伝達率は円筒テスト部のコア軸方向への低下は比較的緩やかであるいっぽう、周方向への低下は大きく、噴流中心に対し非対称な分布になる。また、噴流の孔数を増加させていくと、噴流間の流れが干渉し、熱伝達率の低下は緩やかになることが分かった。いっぽう、コア回転を与えると、全ての条件において噴流が衝突する位置の高い熱伝達領域が周方向に均一化され、熱伝達率のピークは減じるものの、帯状に均一な分布が得られることが分かった。個々の孔から出る流量を一定に保つ条件では、孔数の増加とともに熱伝達率の値も高くなる。

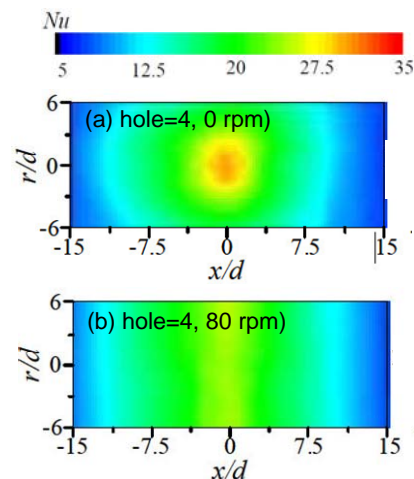


図4 局所熱伝達率分布の一例 (孔数4)

局所熱伝達率を周方向に平均した平均熱伝達率の軸方向分布についてみると、その値は、孔数が1と2の場合には、いずれの回転数においても大きくなり有効であった。回転によって噴流が熱交換面をくまなく冷却するため、均一かつ高い熱交換特性が期待できる。孔のピッチが大きい場合には、可視化実験で見たように渦循環も生じず、回転のメリットが大きい。最大回転速度の160rpmでは、噴流の射出方向に角度があり、壁面に垂直方向の速度低下が生じ、熱伝達特性は低下する現象が認められたので、回転速度には熱伝達を良好にする最適値が存在する。孔数が4となり、ピッチが小さくなると、依然として値



は高いものの、高回転時の値の低下が大きくなり、非回転時のそれより低下するため、回転による熱伝達促進効果は消失する。これは、可視化実験で見た噴流の近傍に生成する渦循環のセル構造の影響と考えられる。この種のセル構造を持つ渦は壁面での熱交換を果たした後に高温になり、隣接する噴流の熱交換を阻害するものと考えられる。この傾向は、孔数が8の場合により顕著に現れ、より小さな回転数においても熱伝達促進効果は得られず、この大規模渦のセル構造の生成を抑えながら回転を与えることが熱伝達促進効果を最大にするポイントであると結論づけられる。

### (3) 熱交換促進率

回転を与える場合に生じる熱交換促進率の概要を図5に例示する。回転付与による熱交換促進率は、孔数が8の場合には得られず、この熱交換器においては噴流近傍に発生する大規模渦のセル構造の抑制が重要である。その他の孔数においては、回転時の熱交換促進率は、非回転時に対して最大1.13倍に達した。良好な熱交換促進は、各孔数において回転数が異なり、孔数が少ない場合ほど、高い回転数で現れることが分かった。図6に噴流の孔数と回転速度からなる衝突頻度パラメータ（1秒間に任意の壁面に衝突する噴流の回数）により整理した結果を示す。熱交換促進率はこのパラメータが2[Hz]において最大なることが分かり、この種の熱交換器の最適設計に繋がる指針を得ることができた。

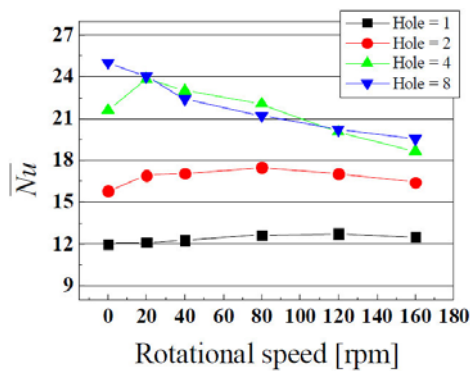


図5 熱交換促進率の回転数に対する変化

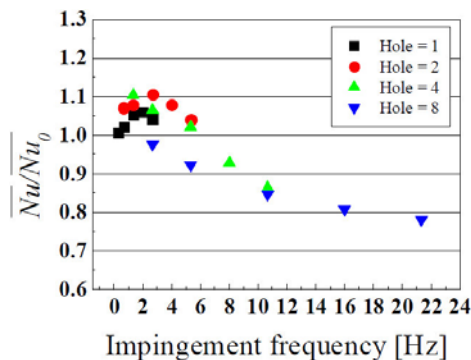


図6 衝突頻度パラメータに対する変化

### (4) 今後の展望

熱交換器として回転要素を持つものは、発電プラント用の蓄熱式再生熱交換器のみであり、それ以外の熱交換要素は、狭い静止流路と固体フィン列から構成される静止型のものしかない。したがって、本研究のように積極的に“ダイナミックに動く”回転要素を取り入れた熱交換器を試作し、提案することは、熱工学の分野に新たな“動き(ダイナミック)”を提供することになると思われる。加えて、衝突噴流は高い熱交換特性を有することが知られているが、有効な領域が狭い領域に限られる。この点で、本研究において高い熱交換性能をさらに引き上げると同時に、均一化をも果たすことを回転によって明示できたことは、極めて有意義な成果であると考えている。

今後、本研究で得られた結果を基に、回転噴流コアを利用した実機モデルの検証が望まれる。特に、本研究のアイデアは、小型分散化されたエンジンの熱効率低下を小コストで引き上げる一方策になり得るもので、例えば分散電源や小型コージェネレーションなどへの適用が有効であろうと考える。

### 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)

[学会発表] (計3件)

①高橋一生, 中 信幸, 稲岡恭二, 千田 衛, 回転円管に設けた小孔から同軸円筒内壁への衝突噴流熱伝達, 日本機械学会関西支部第84期定時総会講演会, 2009年3月16日, 近畿大学本部キャンパス.

②高橋一生, 稲岡恭二, 回転円筒に設けた孔より曲面に噴射する噴流群の熱伝達特性, 同志社大学・京都工芸繊維大学合同研究会 2008, 2008年11月16日, 同志社びわこリトリートセンター.

③高橋一生, 稲岡恭二, 衝突噴流群を利用した熱交換器の開発, 同志社大学・京都工芸繊維大学合同研究会 2007, 2007年12月8日, 京都ゼミナールハウス.

### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

稲岡 恭二 (INAOKA KYOJI)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号: 60243052