

回転翼挿入による流路内熱伝達の促進に関する研究*

親川 兼 勇*¹, 瀬名 波 出*², 馬 淵 幾 夫*³Augmentation of Heat Transfer in a Tube
with a Blade Wheel at Inlet

Kenyu OYAKAWA, Izuru SENHA and Ikuo MABUCHI

This paper shows how the heat-transfer coefficients along heated tubes are affected by the clearance against the tube wall, the inlet angle and the widths of various types of blade wheels which are propelled by an internal flow in a circular tube and inserted at the inlet in order to augment heat transfer along the tube. The maximum and averaged heat-transfer coefficients in the region from blade position to far downstream were 3.0 and 2.2 times those in smooth duct respectively, for air ranging in Reynolds number from 15 000 to 60 000. Moreover, the performance evaluation was carried out under the condition of fixed pumping power, and it was found that the performance ratio depends more on the inlet angle and the width of the blade than clearance, and the ratio is larger than one.

Key Words: Forced Convection, Heat-Transfer Enhancement, Blade Wheel, Swirl Flow, Pipe Flow, Pressure Drop, Thermal Performance

1. 緒 論

管内熱伝達の促進は高性能熱交換器のための第1ステップである。周知のように管内リップ、フィン、粗面を用いる方法のほか、種々の乱流促進体を挿入することにより熱伝達の促進を図る方法がある⁽¹⁾。特に、旋回流(Swirl flow)を発生させるねじれテープ挿入による促進法は極めて有効な方法として知られる⁽²⁾。ねじれテープは伝熱管の全域に挿入され、全伝熱面の性能の向上を図るものである。この点では粗面管、フィン付管の場合でも同様である。一般に乱流促進体の挿入により、その下流の流れ場がかく乱され、乱流促進体を伝熱管入口に挿入する、いわゆる Start-up による方法は有効な手段として考えられる⁽³⁾。例えば減衰する乱流旋回流を与えた場合、管内熱伝達率が80%向上すると予測もある⁽⁴⁾。上記に述べた乱流促進体は通常管内面に固定されて、促進体の運動は制限される。

このような現状に鑑み、本研究では乱流促進体によ

って管内の温度境界層を有効にかく乱せしめる新しい方法として、流れからその駆動エネルギーの供給を受け、可動する乱流促進体の開発を対象とした。その第1段階として簡単な構造の回転翼を可動乱流促進体を選んだ。これは翼の回転により誘起される二次流れ(旋回流)による流れのかく乱は、リップ粗面などで生成される高せん断渦によるかく乱のエネルギー逸散より一般に小さいという利点があると考えられる。このことはポンプ動力が一定の通常の条件での高い熱的性能比が管内レイノルズ数の高い領域まで適用できる可能性を示唆する。

さて、回転翼挿入による熱伝達の促進法は視点をかえれば、伝熱制御の試みともいえる。例えば、管内流の場合、流量一定の条件で伝熱面熱負荷を制御する場合を考える。回転翼は外部から翼回転数を制動、あるいは停止させることも可能であり、さらには積極的に外部動力を負荷することにより、翼回転数を増速させることも技術的に困難ではないであろう。また、本研究では円管を対象としているが正方形管にも応用可能であり、また、回転翼を流路断面に複数個挿入する場合を考えれば、円管あるいは平行平板流路にも適応可能である。特に後者の場合には翼の回転を同一方向、あるいは交互に反対方向に回転せしめることもできる。

* 平成3年5月30日 第28回日本伝熱シンポジウムにおいて講演、原稿受付 平成5年12月27日。

¹ 正員、琉球大学工学部 (〒903-01 沖縄県西原町字千原1)。

² 准員、琉球大学工学部。

³ (自宅: 〒484 名古屋市長千種区月ヶ丘2-1-11)。

さて、本研究ではく形片にねじれを付与した簡単な構造の平面翼を伝熱管内に挿入し、翼ねじれ角 α および翼幅 W 、翼径 D_i を変化させた場合の局所熱伝達率および管内流動損失を測定し、回転翼の伝熱促進体としての有効性、および回転翼の最適形状について検討したものである。

記号

- D : 管直径
- D_i : 翼径
- f : 抵抗係数
- h : 平均熱伝達率
- h_x : 局所熱伝達率
- $h_{x,max}$: 最大熱伝達率
- N : 回転数
- \overline{Nu} : 平均ヌッセルト数 $= h \cdot D/\lambda$
- Nu_{max} : 最大ヌッセルト数 $= h_{x,max} \cdot D/\lambda$
- Q : 流量比 $= Re/Re_s$
- Re : レイノルズ数 $= U \cdot D/\nu$
- Re_s : 滑面でのレイノルズ数
- U : 主流速度
- W : 翼幅
- X : 流れ方向距離
- α : 翼ねじれ角
- η : 熱的性能比
- λ : 流体の熱伝導率
- ν : 流体の動粘性係数

2. 実験装置および実験方法

流路は入口部にノズルを付けた吸込形とし、作動流体として空気を用いた。測定部である伝熱管にはペー

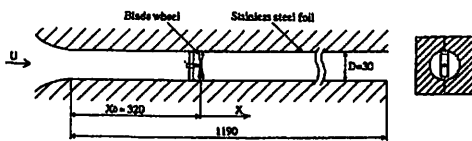


図1 実験装置概略

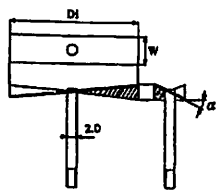


図2 回転翼形状概略

表1 回転翼寸法

DVD	D _i /W	D _i (mm)	W (mm)	α
0.8	3.0	24	8	7.5°
	3.5	8	10	
	2.8	28	12	
0.93	2.33	12	14	30°
	2.0	28	14	45°
0.97	3.625	29	8	

ライト製角棒を削りにし、内径 $\phi 30$ mm の円管としたものを用いた。測定部の概略を図1に示す。それぞれの円管内壁に厚さ $30 \mu\text{m}$ のステンレスはくを接着し、直流電源を通电加熱した熱流束一定の条件の伝熱管とした。ステンレスはくの裏面には $\phi 70 \mu\text{m}$ の銅-コンスタンタン熱電対が流れ方向位置にはんだ付けされており、それにより壁面温度を測定した。局所熱伝達率は壁面温度と主流温度に測定位置までの加熱熱量と等価な温度上昇を加えた流体バルク温度を用いて算出した。また流路には静圧測定用の $\phi 0.5$ mm の孔を設け、流動損失を測定できるようにした。

回転する翼は厚さ 0.5 mm の銅板で翼部分を作り、これに直径 $\phi 2.0$ mm の黄銅棒で作った軸を取付けたものである。回転翼の形状を図2に、その寸法を表1に示す。翼は鉄製のステーを通して伝熱管入口より $X_0 = 320$ mm の位置に取付けられている。回転翼の D_i を $24, 28, 29$ mm と変化させ、また回転翼の幅 $W = 8, 10, 12, 14$ mm とした。また回転数はおもに翼のねじれ角によって変わるので、ねじれ角 $\alpha = 7.5, 15, 30, 45^\circ$ とした。なおこの場合にはねじれ角が大きいほうが主流に対する迎え角が小さいことになる。実験の流路レイノルズ数は $Re = 1.5 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4$ の範囲とした。

3. 実験結果および考察

3-1 局所熱伝達率特性 翼の径 D_i と円管の径 D との比 D_i/D 、ねじれ角 α および翼幅 W を変化させた場合の流れ方向局所熱伝達率を測定した。まず $D_i/W = 2.33$ に対して、流速 $U = 10 \sim 30$ m/s に変化させた場合の結果を図3に示す。 h_x は流速とともに増大し、 h_x 分布は U によらず相似分布となっている。なお流路入口にはトリッピング用のフェンスを設けてあり、翼位置における h_x はそれぞれの流速における

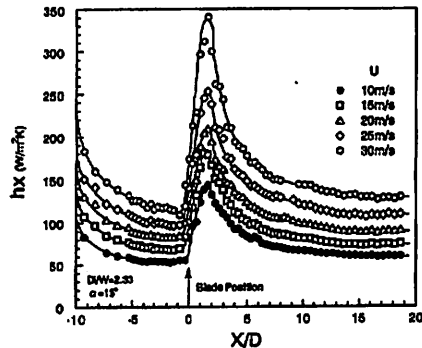


図3 流速による局所熱伝達率分布

十分に発達した流路内乱流熱伝達率と同程度になっている。翼の下流 $X/D=2$ で最大の h_x 値を示し、以下減少するが、十分下流まで滑面流路における h_x 値より高い値を示す。また流速の増大によりわずかながら h_x の最大値が下流に移動するようである。なお下流に単調に減少する分布は、管内にディスク形乱流促進体を挿入した場合⁽⁹⁾と同様となっており、十分下流減においてはスワール流れの効果が小さく、熱伝達率があまり高くなっていないように思われる。これは回転翼が高速で回転しており、旋回流がスワール発生装置を用いた実験⁽⁹⁾⁻⁽¹⁰⁾に比べて発生しにくいと思われる。局所分布値はディスク形と同じように後流によって増大しているが、後述するようにディスク形の場合には流動損失が大きくなり、熱伝達率の増大を上回る結果となるのに比べて、回転翼の場合はディスク形に比べ流動損失が著しく減少する利点がある。

翼形状の違いによる局所熱伝達率の変化を検討しよう。まず D_i/D による変化を後述する最適な翼ねじれ角 $\alpha=15^\circ$ 、 $W=8$ mm の場合を例にとり図4に示す。回転翼挿入による管内熱伝達率は翼の回転により生ずる旋回流の強さに大きく依存しよう。壁近傍に強い旋回流を与えるものとして、 D_i/D を大きくすると局所分布値は増大し、滑面流路の場合に比べてかなり下流まで高い値が持続される。また X/D によらず局所分布の最大値はほぼ同位置で得られ、同程度の旋回流の強さが示唆される。 D_i/D の増大で h_x 分布値は大きくなるものの、 $D_i/D=0.93$ と 0.97 とを比較すると h_x の値に差異はみられない。通常の伝熱促進体挿入による局所熱伝達率 h_x の増加は、伝熱促進体の外縁と壁のすきまの大きさによって強く影響を受けるが、回転翼の場合はその影響は小さいようである。ディスク形の局所分布は、ディスクの設置位置で流路すきまの減少による流体の加速効果のためにピーク値をもち、下流で減少し、その後ディスクの後流の影響で最大値をもつ分布となる。一方回転翼の場合は流路の縮小というマイナス要因をあまり含まない。これは後述する流路抵抗の減少につながる。なお $W=8$ mm、 $\alpha=15^\circ$ を

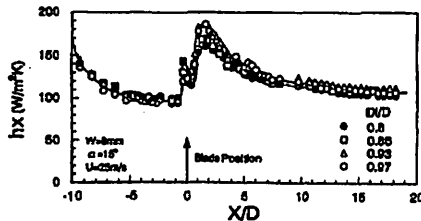


図4 D_i/D による局所熱伝達率分布

例としたが他の場合も同様な結果であった。

次に α を変化させた場合の h_x 分布の相違を $D_i/D=0.97$ 、 $W=10$ mm について図5に示す。ねじれ角 α が 45° 、 30° 、 15° と小さくなるに連れて h_x 値は増大する。ただ $\alpha=7.5^\circ$ と小さくなるとむしろ h_x は減少しており、 $\alpha=15^\circ$ の場合で h_x 分布値は最も高くなる。これは他の回転翼の場合も同様である。また α を大きくすることにより最大熱伝達率の位置は下流に移るようである。これは Hay-West ら⁽⁹⁾の端面を閉じた円管から自由旋回流を与えた場合に、管軸に対する角度が小さくなるとスワール数 S は減少し、かつ流れ方向への S の分布の最大位置が下流に移動することに対応しよう。この点もディスク形と異なる点である。前述の α 、 D_i/D の結果より局所熱伝達率が最も大きくなった $\alpha=15^\circ$ 、 $D_i/D=0.93$ に対して流路に占める回転翼の面積による変化をみるために、翼幅 W を変化させた。回転翼の面積が流路断面積に対して大きくなると、流路内にディスク形の乱流促進体を置いたようになり、流路抵抗が増大することにより翼面積はあまり大きくないほうがよいと思われる。アスペクト比 D_i/W を変化させた場合の流れ方向の局所熱伝達率を $U=20$ m/s に対して図6に示す。 $W=8, 10, 12$ mm、および 14 mm の結果で、これは $D_i/W=2.0\sim 3.5$ に対応する。 D_i/W を $3.5, 2.8, 2.33, 2.0$ と小さくすると、最大熱伝達率 $h_{x,max}$ の値は大きくなり、その位置もわずかに下流にずれる。ここで $D_i/W=2.33$ と 2.0 を比べてみ

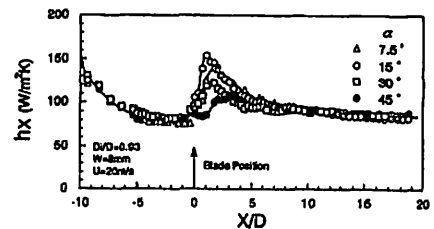


図5 α による局所熱伝達率分布

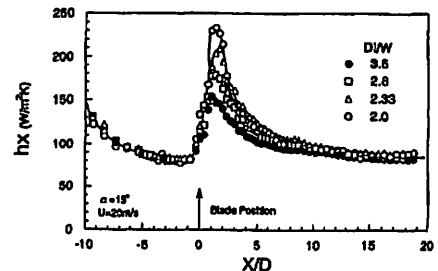


図6 D_i/W による局所熱伝達率分布

ると、 h_x 分布が h_{xmax} を経て減少していく過程において、 $D_i/W=2.0$ のほうがより急に減少しており、 $X/D=2.5$ 付近において $D_i/W=2.33$ のほうが高い h_x を示す。このことが後述の平均ヌッセルト数が両者にほとんど差がないという結果となっている。 W を増大させると、後流の影響が大きくなり極大値は大きくなるもの、早く減少する分布形状となる。このことは旋回流がおさえられた結果であり、大きな W は望ましくない。

3.2 平均ヌッセルト数 回転翼による管内熱伝達率の増大を知るために、流れ方向の平均熱伝達率 h を求めた。Start-up の考えより十分下流までの h を求める必要があるが、下流方向にあるピッチで複数の翼を置くことを考え、ここでは回転翼の直下から下流 $X/D=5$ までを積分平均することより算出した。代表長さを管内径 D にとった平均ヌッセルト数 \overline{Nu} の結果を述べよう。これらは前述の局所熱伝達率分布の場合の翼形状による変化と対応している。

まず D_i/D の違いによる変化を $W=8\text{ mm}$ 、 $\alpha=15^\circ$ の場合について図7に示す。 \overline{Nu} はレイノルズ数の依存性が滑面流路におけるのと同じであり、 $D_i/D=0.93$ のときにわずかながら他より大きい。次に α の影響を図8に示す。前述の h_x 分布と同様に \overline{Nu} の値は

$\alpha=45, 30, 15^\circ$ と小さくなるにつれてその値は増大し、 $\alpha=7.5^\circ$ では減少する。他の形状も含めて、 \overline{Nu} は十分発達した滑面の流路内熱伝達率 $Nu=0.019 Re^{0.8}$ に平行となる傾向を示し、

$$\overline{Nu} = C Re^{0.8} \dots\dots\dots (1)$$

で表される。通常、流路内乱流促進体による熱伝達率の増大は、流れの加速効果および再付着効果によるもので、その場合の Nu に対する Re の依存性はほぼ0.7乗であり、それと比較すると回転翼の場合には高レイノルズ数減でも熱伝達の増大が得られることが示唆されよう。平均ヌッセルト数からみても翼の怪およびねじれ角は $D_i/D=0.93$ 、 $\alpha=15^\circ$ が最適と思われる。

$D_i/D=0.93$ 、 $\alpha=15^\circ$ に対して D_i/W を変化した場合の結果を図9に示す。 D_i/W を小さくすると \overline{Nu} は増大するが、 $D_i/W=2.33$ と 2.0 における \overline{Nu} の値はほとんど差がなく、滑面における値の2.2倍となる。これは、前述したように $D_i/W=2.0$ のときの h_x 分布が h_{xmax} 位置以降で他に比べて急激に減少することによる。

以上平均ヌッセルト数について述べたが、伝熱促進

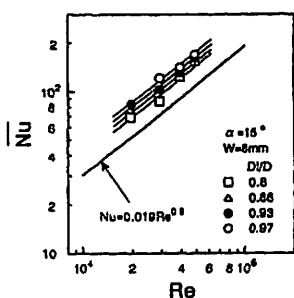


図7 D_i/D による平均ヌッセルト数の変化

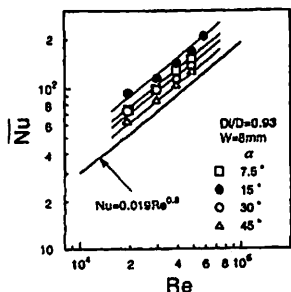


図8 α による平均ヌッセルト数の変化

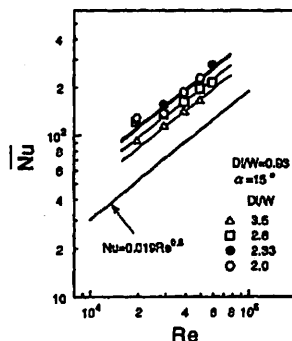


図9 D_i/W による平均ヌッセルト数の変化

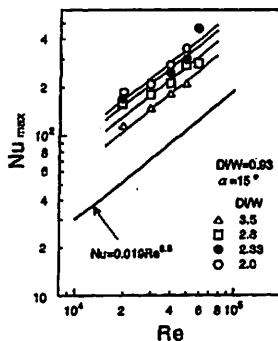


図10 D_i/W による最大ヌッセルト数の変化

の目安となる最大熱伝達率が形状によってどのように変化するかを図10に示す。 $\alpha=15^\circ$, $D_i/D=0.93$ を例にとり, D_i/W による影響をみたものである。最大熱伝達率 h_{max} より求めた最大ヌセルト数 Nu_{max} は D_i/W の減少とともに大きくなる。すべての D_i/W で Nu_{max} は滑面の2倍以上の値をとり, $D_i/W=2.0$ で3.1倍を示す。前述の平均ヌセルト数との比較により, 翼面積が大きくなるほど, すなわち $D_i/W=2.0$ の場合が後流の影響による最大熱伝達率は増大するが, 旋回流の効果が減少するために翼面積の小さい $D_i/W=2.33$ と同程度の平均ヌセルト数となろう。

3-3 流動特性 回転翼挿入により流動損失は増大する。翼形状による流動損失を回転翼上流と $X/D=5$ までの静圧差より管摩擦係数 f の形で求め, Re に対して整理した。また図11中に滑面流路における $f=0.184 Re^{-0.2}$ も示してある。まず D_i/D を変えたときの f を, $W=8\text{mm}$, $\alpha=15^\circ$ について図11に示す。 $D_i/D=0.8, 0.86, 0.93, 0.97$ の順に f の値は大きくなる。 $D_i/D=0.93$ と 0.97 における熱伝達率が同程度であったことを考えると, $D_i/D=0.93$ が適当な回転翼径と思われる。次に $D_i/D=0.93$, $W=10\text{mm}$ で α による f の変化を図12に示す。 $\alpha=45, 30, 15^\circ$ と小さくなればなるほど, すなわち翼に対する主流の流入角と

もに f は大きくなる。前述の α による熱伝達率は $\alpha=15^\circ$ の場合が $\alpha=7.5^\circ$ より増大した。しかし, 抵抗係数は $\alpha=7.5^\circ$ の場合が最も高くなる。本研究における回転翼の翼ねじれ角は $\alpha=15^\circ$ が最適である。アスペクト比 D_i/W に対する f の変化を図13に示す。 f は D_i/W の減少につれて増大し, かつ Re の増大に従って図13中でやや右上がりになる傾向を示し, 特に $D_i/W=2.0$ の場合に顕著となる。前述の \bar{Nu} の値は $D_i/W=2.33, 2.0$ は同程度であったが, f の値は $D_i/W=2.0$ が $D_i/W=2.33$ の約50%の増加を示している。このことより $D_i/W=2.33$ が適当なアスペクト比であるといえよう。なお $D_i/W=2.0$ とアスペクト比を小さくすると流動損失が増大し, ディスク形乱流促進体の特性に近づくことになる。

流動特性の一つとして翼の回転数と流速の関係を図14に示す。 α を変化させた場合のもので, 回転数 N は流速 U に直線的に比例し, α の増大とともにその値は大きくなる。回転翼はねじれテープなどと違って, 回転する際に流路に旋回流を与えるものであるが, 回転数のあまりの増大は管内流の旋回成分の減少を意味し, 前述の熱伝達率および抵抗係数の減少につながる。図14よりわかるように前述した熱伝達率の小さい

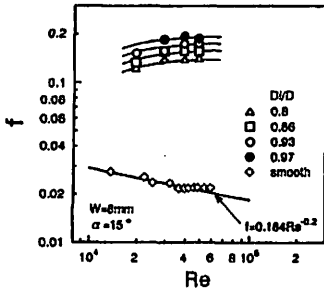


図11 D_i/D による f の変化

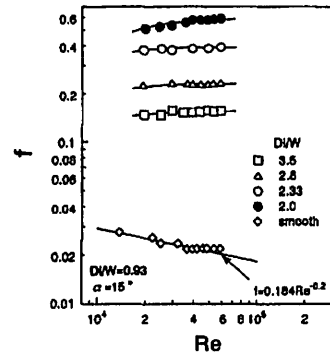


図13 D_i/W による f の変化

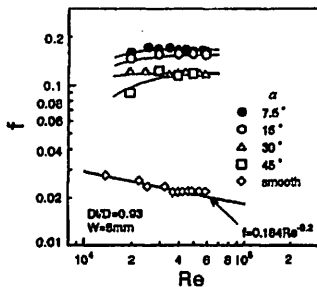


図12 α による f の変化

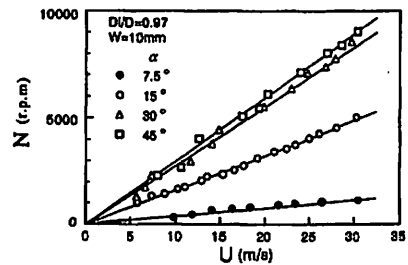


図14 流速による回転数の変化

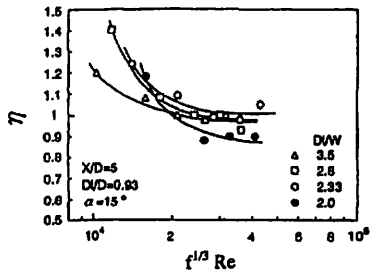


図 15 熱的性能比 (D_i/W による変化)

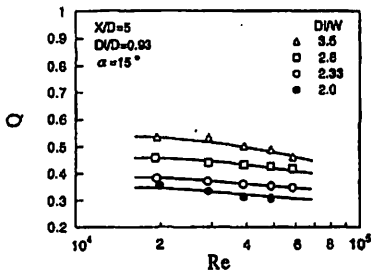


図 16 流量比 (D_i/W による変化)

$\alpha=45^\circ$ の場合に最も回転数は大きい、熱伝達率を増大させるにはブレーキングによる回転数の制動が必要となろう。

3.4 熱的性能比 性能評価の一方法としてポンプ動力一定の条件での平均熱伝達率 \bar{Nu} の滑面の Nu_s に対する増加比 $\eta (= \bar{Nu}/Nu_s)$ を求めた。前述の熱伝達率および抵抗係数の測定結果より最もよいとされた形状、 $D_i/D=0.93$ 、 $\alpha=15^\circ$ について翼幅 D_i/W を変化させた場合の η を図 15 に示す。 η は $f^{1/3}Re$ の増大に対して減少していく分布を示す。 $D_i/W=2.33$ のときの η の値が最も高く、 $f^{1/3}Re$ の大きい領域でも $\eta \geq 1$ となる。ディスク形乱流促進体の場合、熱伝達率も高い値となるが、流動損失が著しく大きく、そのため η は 1 以下となるのが通常であることと異なり、回転翼の場合にはスワール成分をもつために $\eta \geq 1$ となっている。本研究の翼は高速で回転しているため、旋回成分は小さいもののねじれテープなどで得られる η とほぼ同程度の値を示している。

熱的性能比 η そのものも重要であるが、評価基準にいかにか流量を減らすことができるかを加えることも必要であろう。同一ポンプ動力での滑面の流量に対する翼挿入の場合の流量の比 $Q(Re/Re_s)$ を図 16 にみてみよう。例えば $D_i/W=2.33$ の場合に $Q=0.4$ となっており、滑面に比べて約 4 割の流量ですむことがわか

る。性能評価の場合の等ポンプ動力は管内流れの流動抵抗を用いているが、Bergles ら⁽¹⁰⁾ が述べているように流路入口出口等における損失など流量が約 4 割ということで減少しよう。すなわちトータルにみた場合のポンプ動力はより有利となろう。

4. 結 論

管内流路における伝熱促進技術の新しい試みとして、主流により回転する翼を挿入し、伝熱特性および流動損失を明らかにした。得られた結果は次のとおりである。

(1) 回転翼径 D_i と円管内径 D の比 D_i/D を 0.8 ~ 0.97 に変化させた場合、熱伝達率は D_i/D とともに増加するが、その影響は小さい。

(2) 回転翼の翼ねじれ角 α が $7.5 \sim 45^\circ$ の範囲で $\alpha=15^\circ$ の場合が熱伝達率増加比が大きい。

(3) 回転翼アスペクト比を $D_i/W=2.0 \sim 3.5$ と変化させて実験を行った結果、回転翼最適アスペクト比として $D_i/W=2.33$ を得た。

(4) 伝熱促進の程度として、回転翼挿入によって得られる最大ヌッセルト数および回転翼挿入位置より $X/D=5$ までの平均ヌッセルト数は、滑面の場合に対して最大ヌッセルト数で 3.0 倍、平均ヌッセルト数で 2.2 倍に達し、高い伝熱促進効果が得られた。

(5) 伝熱促進体としての評価の一方法として、ポンプ動力一定での熱的性能比 η を求めた結果、 $D_i/W=2.33$ 、 $\alpha=15^\circ$ の回転翼を挿入したとき、 $\eta \geq 1 \sim 1.3$ となり、伝熱促進体として極めて有効であるとの結論を得た。

文 献

- (1) Bergles, A. E. and Webb, R. L., *Augmentation of Convective Heat Transfer*, (1971), 1, ASME.
- (2) Simithberg, E. and Landis, F., *Trans. ASME, Ser. C*, 86 (1964), 39-49.
- (3) Fernandez, J. L. and Poulter, R., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 30-12(1987), 2603-2609.
- (4) Algifri, A. H. and Bhardwaj, R. K., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 28-9(1985), 1637-1645.
- (5) 岡田・武山, 日本伝熱シンポジウム論文集, (1972), 443-446.
- (6) Zaherzadeh, N. H. and Jagadish, B. S., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 18(1975), 941-944.
- (7) Dellenback, P. A., ほか 2 名, *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 109(1987), 613-620.
- (8) Sparrow, E. M. and Chaboki, A., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 106-4(1984), 766-773.
- (9) Hay, N. and West, P. D., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 97(1975), 411-416.
- (10) Lopina, R. F. and Bergles, A. E., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 91-3(1969), 434-442.