

# 回転場におけるヒートパイプの作動特性と 熱交換器への応用

贅川 潤\* ・松本 厚二\* ・小泉 達也\*  
長谷川啓司\*\* ・金子博太郎\*\* ・溝口 行生\*\*

(1982年1月6日受理)

## Performance of Revolving Heat Pipes and Application to a Rotary Heat Exchanger

By

Jun NIEKAWA, Kouji MATSUMOTO, Tatsuya KOIZUMI,  
Keiji HASEGAWA, Hirotaro KANEKO and Yukio MIZOGUCHI

**Abstract:** Heat transfer performance of a heat pipe is largely affected by various kinds of body forces such as gravity, electric forces, and centrifugal forces when it is operated under these forces. The purpose of the present study is to clarify the effect of centrifugal force on performance characteristics of a revolving heat pipe whose axis is parallel to the center axis. The present paper also describes the application of this revolving heat pipe to the rotary heat pipe heat exchanger which has been developed for heat recovery from dust-laden flue gases.

### 概 要

ヒートパイプはその使用される環境に応じて種々の体積力が働く。回転による遠心加速度もその一つである。本報告は回転軸とヒートパイプ軸が平行となるような位置でヒートパイプが公転するような形式におけるヒートパイプの基本的な作動特性について述べる。更にその応用例としてダーティガスから効率良く熱回収をするために開発された回転式ヒートパイプ熱交換器についても述べ

---

\* 古河電気工業株式会社

\*\* 荏原製作所

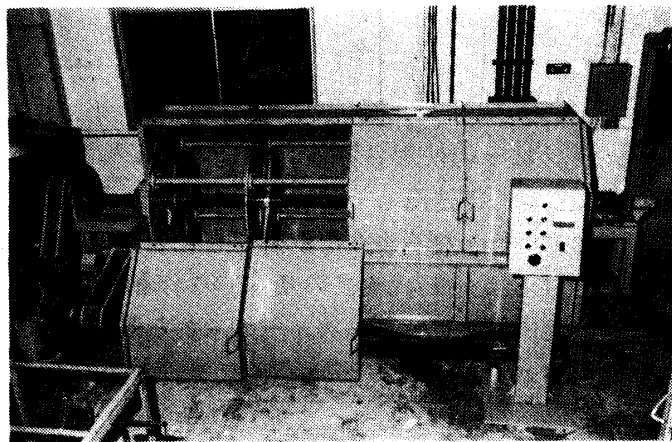
る。

## 1. はじめに

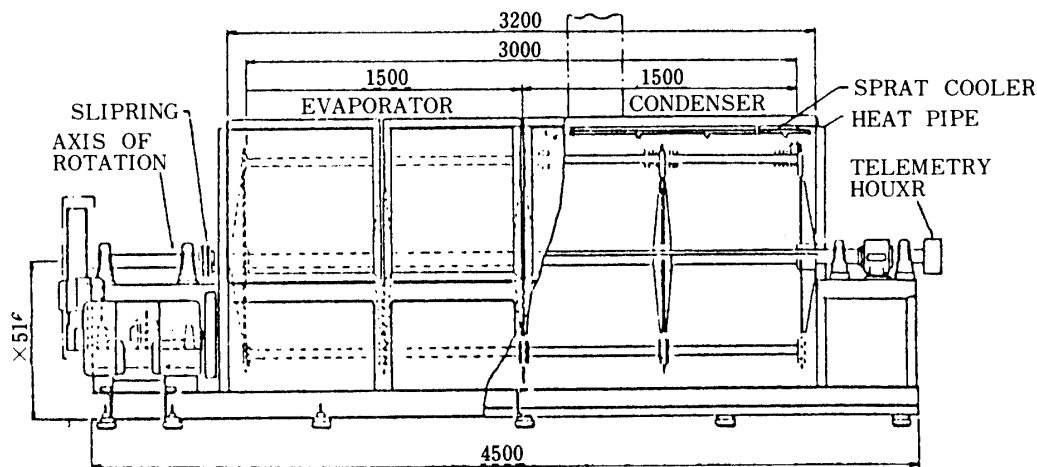
近年、省エネルギーへの関心が増すとともにヒートパイプを用いた効率の良い熱回収システムの研究と応用が促進されてきている。ヒートパイプを用いた熱交換器としては特に流体がガス・ガスの場合の熱交換に有利なことが知られている [1]。しかしながら、重油燃焼排ガスのようなダーティガスから熱回収する場合には伝熱面の汚れ、閉塞が大きな問題となる。この点を解決し、さらに高効率な性能を得るために、回転するヒートパイプ管群を有する新しいタイプのヒートパイプ式熱交換器の研究が行なわれてきた。回転するヒートパイプ長さ方向の軸と回転軸との位置関係には様々なものが考えられる。例えば、垂直、同軸、平行などである。それらのうち垂直或いは同軸の位置関係で回転するヒートパイプの作動特性についてはいくつかの発表文献がみられる [2],[3]。しかし今回我々が開発目標とした回転式熱交換器のように回転軸とヒートパイプが平行な位置で公転するヒートパイプの作動特性についてはこれまで殆んど知られていなかった。本研究の目的は熱交換器設計の際の基礎データとして上記回転場でのヒートパイプの伝熱特性を、蒸発部、凝縮部の熱伝達率および最大熱輸送量の点について把握することにある。さらにこの回転式ヒートパイプ熱交換器が有するいくつかの特徴についても述べる。

## 2. 実験装置および方法

第1, 2図に本研究に用いた実験装置を示す。本装置は可変速モータによって最大長さ3 mのヒートパイプに20 gまでの遠心力を加えることができる。ヒートパイプの蒸発部外壁はニクロム線ヒータが巻かれ十分に保温されている。ヒータへの入力スリップリングを介して行なわれスライダックによって入力をコントロールしている。回転するヒートパイプ各部の温度はテレメトリーシステムを用いて測定した。本システムはCA 熱電対、トラ



第1図 実験装置



第2図 回転試験装置概略図

表1. Dimensions of the Tested Heat Pipes (mm)

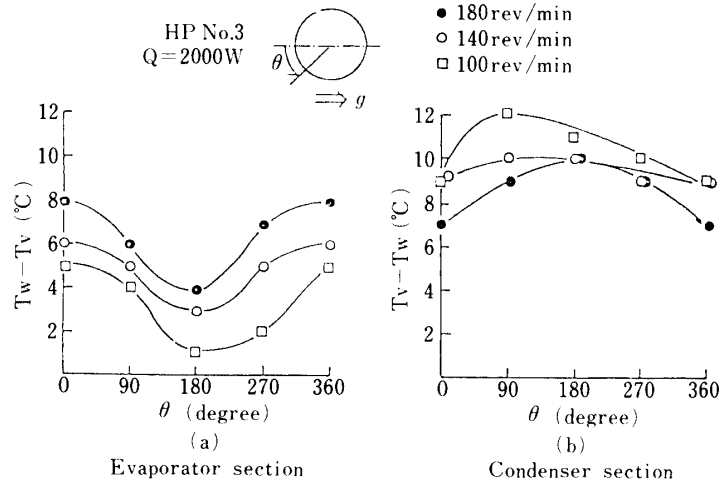
Item	Outside diameter	Inside diameter	Evaporator length	Condenser length	Number of grooves	Depth of grooves	Width of grooves
No.1	19.05	17.55	1,500	1,500	—	—	—
No.2	19.05	11.1	1,500	1,500	80	0.30	0.27
No.3	25.4	23.6	1,500	1,500	110	0.30	0.28

ンスミッタ，マルチプレクサー，レシーバーなどからなり9点の測定が可能である．測定精度は0°Cから100°Cの間でキャリブレーションを行なうことにより±1%以内とすることができる．測定は，回転数，入力などを決め，その条件で定常状態となったところで行なった．第1表にテストに供したヒートパイプの諸元を示す．テストには3種類の異なるヒートパイプを用いた．すなわち内面が平滑なスムーズ管，軸方向の溝を有するグループ管，より径の大きなグループ管である．ヒートパイプのコンテナは銅製で，作動液には高純度水を用いた．

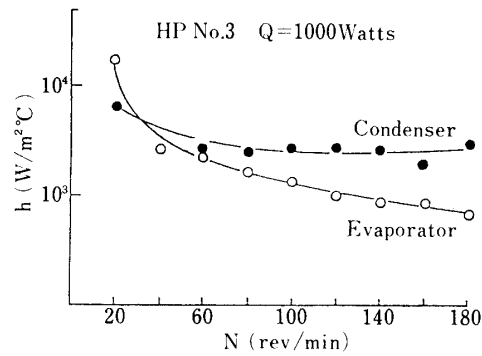
### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 作動液の偏り

回転するヒートパイプ内の作動液はいくつかの力を受ける．例えば，気液対向流によるせん断力，グループ管の場合であれば毛管力，そして回転による遠心力である．これらの力を含めた回転ヒートパイプの作動解析は複雑なものとなるからまず実験によってその性能を把握した．第3図はNo.3ヒートパイプについて周方向温度分布を管壁温度と蒸気温度の差をとることによって調べたもので，第3図(a)，(b)は各々蒸発部，凝縮部での特性



第3図 Circumferential temperature distribution



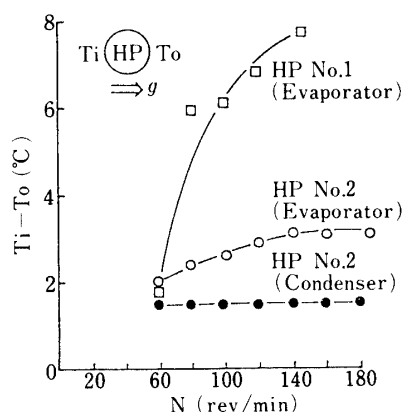
第4図 Variation in heat transfer coefficient

を示している。蒸発部では管壁温度と蒸気温度の差は回転数の増加にともなって増加する。凝縮部では逆に減少している。さらに蒸発部では回転の内側 ( $\theta=0^\circ$ ) の温度差は外側 ( $\theta=180^\circ$ ) の温度差より高く、凝縮部では逆の傾向を示している。第4図に蒸発部と凝縮部に対する熱伝達率の回転数による影響を示す。熱伝達率は次式を用いて求めた。

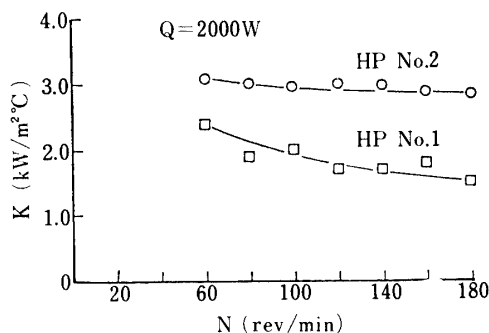
$$h = \frac{Q}{A \cdot |(T_w - T_v)|}$$

ここで

- $h$  : 熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]
- $Q$  : 熱輸送量 [W]
- $A$  : みかけの管内表面積 [m<sup>2</sup>]
- $T_w$  : 平均管壁温度 [°C]
- $T_v$  : 作動温度 [°C]



第5図 Variation in circumferential temperature difference

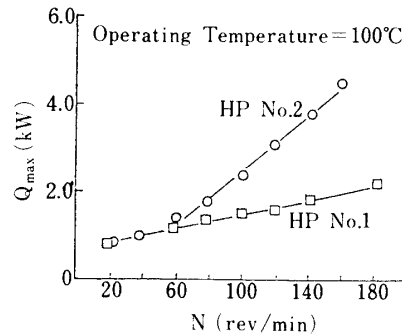


第6図 Overall heat transfer coefficient for two types of heat pipe

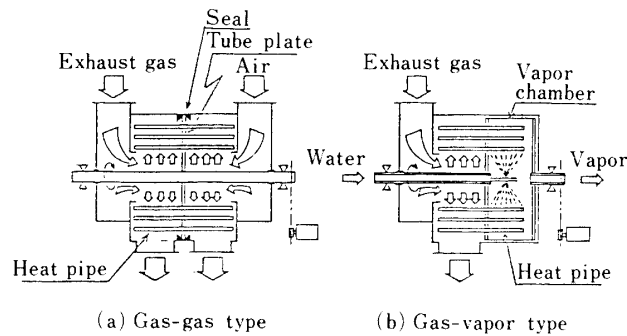
蒸発部での熱伝達率は回転数の増加とともに減少している。しかし凝縮部では60 rpm以上では殆んど一定の値を示している。第3図で示した周方向温度分布および第4図で示した熱伝達率の回転数依存性に対する実験結果から蒸発部でも凝縮部でも遠心加速度によって作動液が偏りを生じ、その結果有効な伝熱面積が変化すると考えられる。蒸発部では、蒸発は作動液が存在するところのみで起こる。それ故回転の内側の管内では作動液が部分的ドライアウトを生ずると熱伝達率は減少する。一方凝縮部では凝縮液膜の厚さが遠心力に影響されると、熱伝達率は回転の外側では液膜が厚くなるため減少し、回転の内側は液膜が薄くなるため増加すると考えられる。したがって作動液の偏りを抑えるようなヒートパイプ内部構造を用いることで、管内熱伝達率、特に熱伝達率を向上することができる。

第5図に異なる内部構造のヒートパイプについて回転内側( $\theta=0^\circ$ )と外側( $\theta=180^\circ$ )との温度差の回転数依存性を示す。軸方向グループヒートパイプ(No. 2)の温度差はスムーズヒートパイプ(No. 1)より明らかに小さい。2種類のヒートパイプの総括熱伝達率(K値)を第6図に示す。低回転域でのK値の絶対値の相異は管内有効伝熱面積の相異によるものである。回転によるK値の減少率はスムーズ管よりグループ管の方が小さい。このことから作動液の偏りがその内部構造によって大きく変化することがわかる。

### 3.2 最大熱輸送量



第7図 Maximum heat transport capability vs. number of revolutions

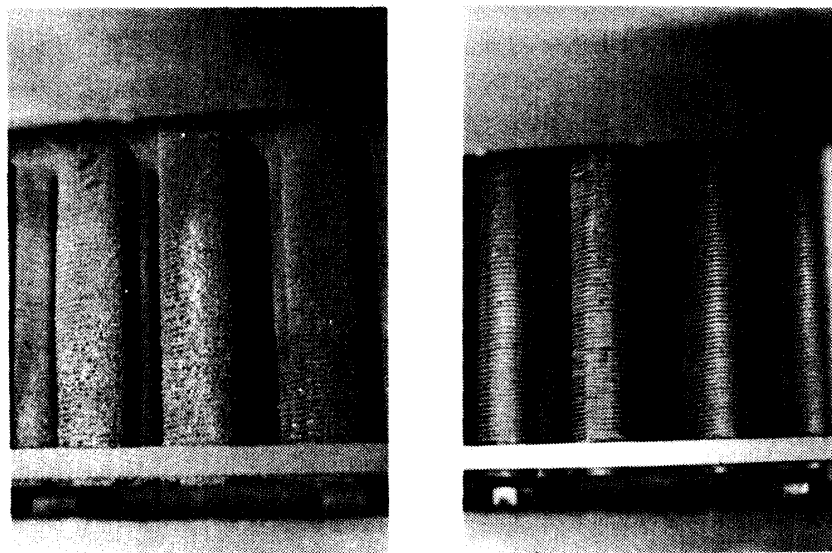


第8図 Schematic diagram of the rotary heat pipe heat exchangers

第7図に回転場でのヒートパイプ最大熱輸送量の測定結果を示す。作動温度は100°C一定に保たれている。ヒートパイプNo.1もNo.2も回転数の増加にもなって直線的に増加している。回転数は遠心力の平方根に比例するから最大熱輸送量は遠心力の平方根に比例して増加する。また第7図ではその比例係数がヒートパイプの内部構造によって大きく変化することを示している。

#### 4. 熱交換への応用

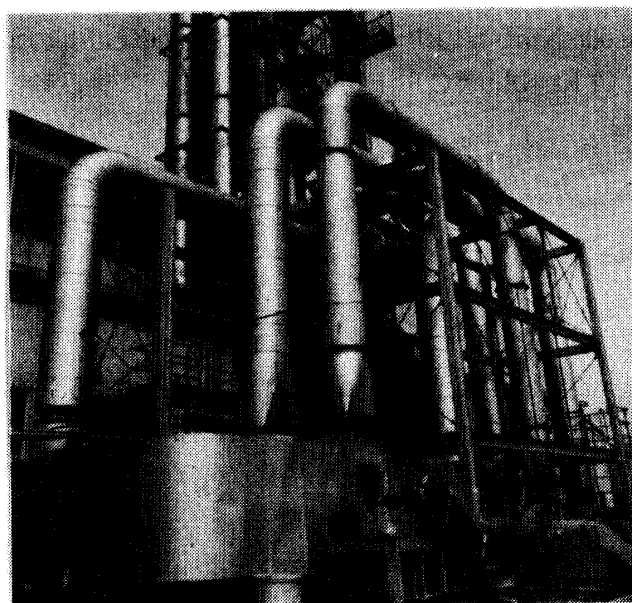
既に述べたように、本研究は回転式ヒートパイプ熱交換器の開発のための要素技術の一つとして行なわれたものである。本熱交換器は熱風回収と水蒸気や冷媒蒸気で熱回収を行なう蒸気回収の2通りの方法が考えられている。第8図にその概略図を各々示す。熱風回収形はヒートパイプが同心円状に配列構成され熱交換しようとする2種類のガスは回転するヒートパイプ管群の中心から入り、ヒートパイプ管群を通り抜けて外側へ排出される。また一方のガスを回転管群の外から内へ流し対向流とすることもできる。両流体を仕切る管板の外周部は液シールによって両流体の混合を防いでいる。蒸気回収形の場合には蒸気室は压力容器となり独立している。水或いは冷媒は回転軸を通して蒸気室中のヒートパイプ管群へ供給される。発生した蒸気は反対側の回転軸より取り出される。



(a) ダスト付着時

(b) クリーニング後

第9図 回転ヒートパイプ管群の伝熱面



第10図 熱風回収形回転式ヒートパイプ熱交換器プロトタイプ機

この回転式ヒートパイプ熱交換器はヒートパイプを回転させることにより次のようないくつかの特徴を有している。

(1) ダスト除去が容易

伝熱面が回転しているため、単純なスートブローシステムでも有効に働く。そのためダ

スト量の多い排ガスに対する連続安定運転が可能である。(第9図)

(2) 排ガスの変動に対応可能

ヒートパイプ管群の回転速度を制御することによって最大熱輸送量を変えることができるためヒートパイプのドライアウト限界に対して従来の静置式タイプよりも余裕をもつことができる。

(3) 圧力損失の減少

回転ヒートパイプ管群によって「ファン効果」を生ずるため、ガスを回転管群の中心から外周へ流す場合には圧力損失を非常に低く抑えることができる。

(4) 総括熱通過率の向上

ガス・ガス熱交換器の場合、ガスと管壁表面の熱抵抗はヒートパイプ自身の熱抵抗よりはるかに大きい。それ故ガスと管壁の相対速度を増加させることで、管外熱伝達率を向上することが可能であり、従来の静置式ヒートパイプ熱交換器と比較して総括熱通過率を120%高めることができた。

金属溶解炉の実排ガスに対してテストされた熱風回収形熱交換器プロトタイプ機を第10図に示す。本試験は伝熱性能、液シール性能、長期信頼性について調べるためクリーンガスに対して行なわれた。ヒートパイプ外側のフィンチューブはアルミニウム製で、内管は銅、作動液として純水を用いている。本熱交換器は長さ1mのヒートパイプが300本組込まれている。ヒートパイプ管群の回転数は最大360rpmまで変化させることができる。温度200°C、流量20,000 Nm<sup>3</sup>/hの排ガスから約200,000 Kcal/hのエネルギーが回収される。総括熱通過率は40 Kcal/hm<sup>2</sup>°C以上達成され、長期信頼性試験は約1年継続され良好な結果が得られている。

## 5. ま と め

本研究によって次のことが明らかとなった。

- (1) 回転場におけるヒートパイプではその作動液は遠心力によって偏り周方向温度分布を生ずる。
- (2) 遠心力によって影響されたヒートパイプのみかけの熱伝達率は本実験範囲では蒸発部では遠心力の増加にともない減少し、凝縮部ではほぼ一定に保たれる。
- (3) 回転ヒートパイプの蒸発部の周方向温度分布はヒートパイプの内部構造に大きく依存する。
- (4) 作動蒸気温度一定の場合、回転ヒートパイプの最大熱輸送量は遠心力の平方根に比例して増加する。また比例係数はヒートパイプの内部構造によって変化する。
- (5) 回転式ヒートパイプ熱交換器設計の際の基礎データが得られ実機への応用が可能となった。

本研究は通商産業省工業技術院の委託研究として行なわれました。ここに謝意を表します。



## 参 考 文 献

- [ 1 ] M. A. Ruch, (1975), Heat Pipe Thermal Recovery Units, *Tenth Intersociety Energy Conversion Engineering Conference* 1507 - 1510.
- [ 2 ] H. Hwangbo, R. J. Eby, (1976), Performance of Heat Pipe Rotating about The Vertical Axis and Its Application to a Spinning Spacecraft, *2 nd International Heat Pipe Conference* 315 - 324.
- [ 3 ] P. J. Marto, L. L. L. Wagenseil, (1978), Augmenting the Condenser Heat Transfer Performance of Rotating Heat Pipes, *3 rd International Heat Pipe Conference* 147 - 154.
- [ 4 ] J. Niekawa, K. Matsumoto, T. Koizumi, (1980), Research and Development of the Rotary Heat Pipe Heat Exchanger, *Furukawa Electric Review* Vol. 71, 13 - 17.