

往復運動する伝熱面上の熱伝達

Heat Transfer on the Heating Surface Moving Reciprocally

(平成15年9月受理)

高橋 章* (TAKAHASHI Akira)

Abstract

For the purpose of promoting Heat Transfer, the experiment which the heating surface was moving reciprocally in the still air was carried out. The heating surface was a vertical cylinder made of copper tube. A cartridge heater was disposed in it. The cylinder was mounted on the table of a slider. Also, the cylinder was moved on the cross direction to the axis of the cylinder. The strokes were 250, 500, 750 and 1000mm. These acceleration and deceleration were 2m/s^2 . Each constant speeds were 300, 600, 900 and 1200mm/s. The experiments were carried out on the steady state. The temperatures on the cylinder were measured by seven thermocouples deposited at interval of 30 degrees along the cylinder surface.

In the consequence of this study, these temperature distributions for the reciprocal movement were confirmed. The heat transfer characteristics were influenced greatly by the speed of the motion. Also, the accelerations and the deceleration influenced upon the performances.

1. 緒言

エネルギーの有効活用、および地球温暖化や都市のヒートアイランド現象などの環境問題改善のために、伝熱促進技術の向上が切望されて久しい。これまでの伝熱促進技術は、(1)フィンなどを用いて伝熱面積を増大させる方法、(2)流体に添加物を加える方法、(3)電場を加える方法、(4)親水性や撥水性などの表面処理技術を応用した方法などをはじめとして、様々な方法が考案されている。

著者らは伝熱促進技術向上のための1つの方法として、伝熱面を往復運動させることによる伝熱促進効果の研究を行なっている。これまでに、沸騰熱伝達について、伝熱面を往復運動させることによる伝熱性能向上の結果を得て来た¹⁾²⁾。また、伝熱面が往復運動するときの沸騰現象も可視化して観察し、伝熱性能との比較をしてきた^{3)~6)}。伝熱性能向上は、限界熱流束の上昇および平均熱伝達率の上昇で確認された。沸騰現象では、効率良く伝熱面から発生蒸気泡を離脱させることが性能向上に大きく影響する。伝熱面の往復運動は、経路両端における速度の逆転、すなわち切り返

しのために蒸気泡が離脱されやすくなることが考えられるが、非沸騰領域においても熱伝達率の上昇があり、また、沸騰の実験から、切り返しの周波数よりも速度の大きさの影響が大きいという結果が得られたこと²⁾から、今回、静止流体中を伝熱面が往復運動する強制対流熱伝達の効果を調べる目的で実験的研究を行なった。

流体の往復流動に関する研究はあまり行なわれておらず、行なわれている研究のうちのいくつかの例を示す。まず黒田ら⁹⁾によれば、管内の水またはエチレングリコールをピストンによって往復運動させ、管内の温度分布を測定して、この場合の伝熱量を求めた。また、Reynolds数、Nusselt数、Prandtl数を用いて実験式を整理した。つぎに、満保ら⁷⁾は加熱された円柱を流路内に挿入して固定し、ピストンによって往復運動する空気流中の伝熱を非定常法により調べ、数は振幅ならびに周波数の増大につれて増大する結果を得ており、またNusselt数を振動Reynolds数ならびにRichardson数を用いて整理している。

本研究では、静止した空气中を垂直な加熱円柱を往復運動させ、円柱上の温度分布を求め、さらに熱伝達を調査した。

* 福島工業高等専門学校 機械工学科 (いわき市平上荒川字長尾 30)

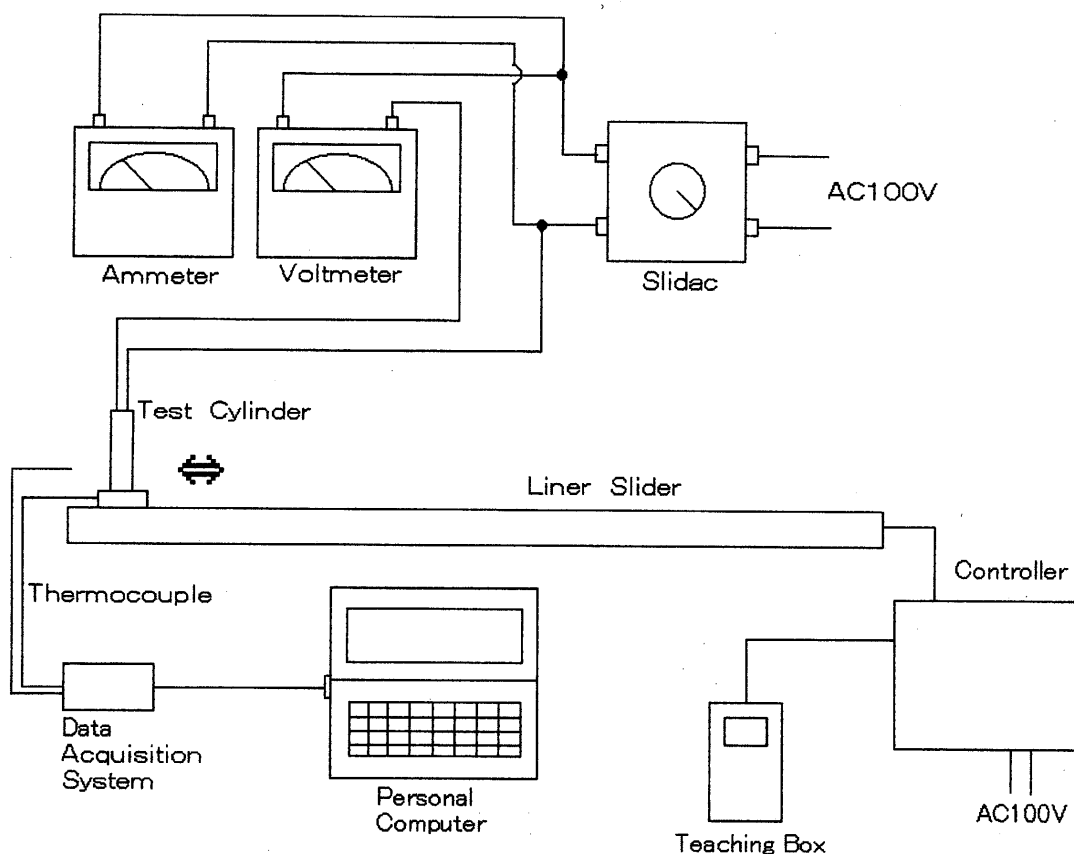


Fig.1 Experimental Apparatus

2. 実験装置および実験方法

図1に実験装置の系統図を示している。実験装置は、供試円柱、スライダ、電力供給系、スライダ制御系、および計測系から構成されている。

供試円柱は、外径 22mm、内径 19mm、長さ 100mm の銅管であり、加熱のために管の内部には外径 15.8mm、長さ 102mm、出力 120V-250W のカートリッジヒータが挿入されている。このヒータへの供給電力は、50Hz、100V の交流電源をスライダックにより制御されて供給される。管の両端はベークライトで断熱され、さらにカートリッジヒータが管と同心になるように支持されている。銅管内面とカートリッジヒータの間は熱伝導性を良くするために銅線で埋められている。この供試円柱は、スライダのテーブルに垂直に固定され、設定された往復動の距離と速度で運動する。スライダのテーブルはACサーボモーターとリードボールねじにより移動することができる。伝熱面温度を測定するために、管の上下中間高さの管表面に、水平に 30° ごとに熱電対を取り付けている。この熱電対は素線径が 0.01mm のTタイプ熱電対である。また、静止している空気の温度を測定するために、供

試円柱から離れた場所にTタイプシース熱電対が設置されている。熱電対からの電気信号は、データ収集システムを介してパーソナル・コンピュータに送られ、温度が測定、記録されるようになっている。

実験は定常状態で行なった。まず、温度計測用のパーソナル・コンピュータを立ち上げる。つぎにスライダのティーチング・ボックスを用いて、あらかじめ作成されたプログラムにより往復動の距離すなわちストロークと速度を設定してスライダを運転し、供試円柱を往復運動させる。さらに、スライダックで供給電力を設定して供試円柱を加熱する。電圧は一定値とした。すなわち、熱流束一定とした。次に、温度の変化を計測し、温度が5分間一定であったならば、電流、電圧値を計測し、温度の測定を終了する。実験条件として、加減速を除いて円柱の運動が等速になった時の速度、および往復動のストロークを変えた。速度は 300, 600, 900, 1200mm/s の4種類、ストロークは、250, 500, 750, 1000mm の4種類で、合計16種類の条件で実験を行なった。

3. 往復運動する伝熱表面上の温度分布

図2に供試円柱上の熱電対取り付け箇所を示している。前述のように、熱電対は 30° おきに取り付けられている。移動方向に対して真横に1番、それから移動方向に向かって図のように2番から7番までの熱電対が取り付けられている。

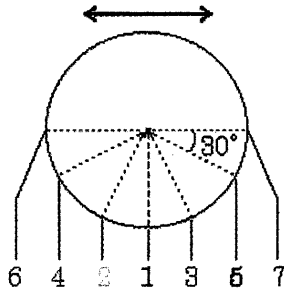
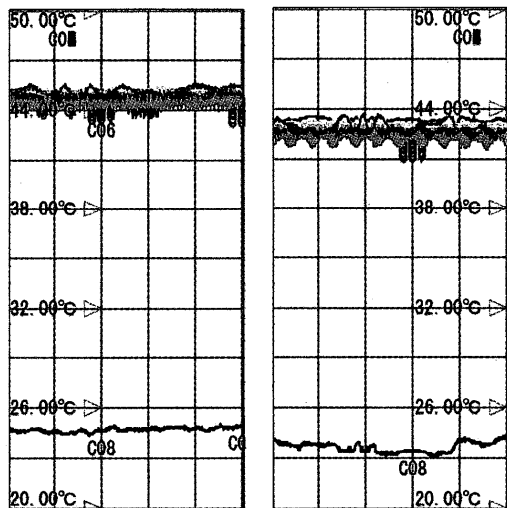
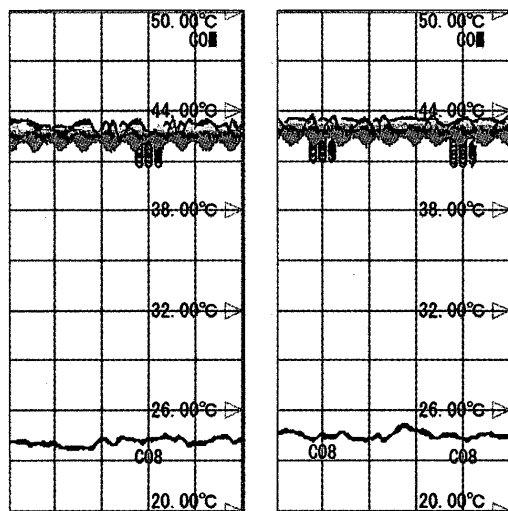


Fig. 2 Positions of each thermocouples on the Test Cylinder



(a) Speed: 300mm/s

(b) Speed: 600mm/s



(c) Speed: 900mm/s

(d) Speed: 1200mm/s

Fig. 3 Temperature distribution for the lapse of time. (Stroke: 250mm, Chart time: 1min/div)

図3に温度分布の一例として、ストロークが250mmで、速度を(a)300mm/s、(b)600mm/s、(c)900mm/s、(d)1200mm/sとした場合の結果を示している。横軸の1目盛は1分間であり、縦軸の1目盛は3Kである。上記の速度は等速状態になったときの速度であり、往復運動には加速・減速が伴う。その加速度、減速度はそれぞれ 2 m/s^2 である。この加減速度を含めて平均速度を求めると、ストロークが250mmの場合、300mm/sに対しては約195mm/s、600mm/sに対しては約242mm/s、900mm/sに対しては約248mm/s、1200mm/sに対しては約253mm/sになる。

それぞれのグラフの下部にある「C08」は室温であり、若干の温度変動があるが、ほとんど一定の値である。変動幅は大きくても約1Kである。44°C付近に曲線が集まっているが、これらが円柱上の温度分布を示しているものである。ほとんどの曲線が上下に変動しており、往復運動の特徴を表している。

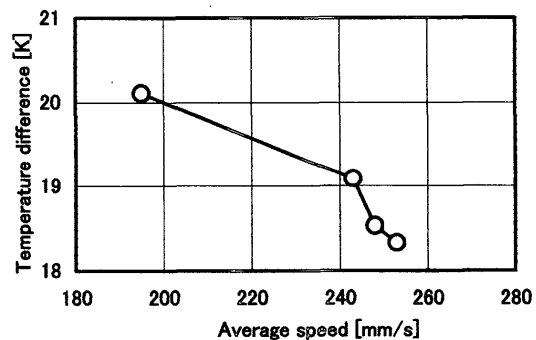


Fig. 4 Temperature difference (Stroke: 250mm)

図4は、円柱上の温度を平均し、室温との差を表したものである。平均速度の増大と共に温度差が減少し、速度が大きい方が冷却されやすいことを示している。他のストロークの場合も同様な結果となった。本実験装置では、これより速い速度は達成できないが、このグラフでみると、この後、曲線は18.3K位で漸近するように見える。

図3では円柱上の温度分布が混み合っているの、図5に分割し、また拡大して示している。横軸の1目盛は2秒間であり、縦軸の1目盛は0.4Kである。図5(a)は1番の熱電対の温度を示している。この熱電対は往復運動の方向に対して真横に設置してあるが、若干の温度変動がある。これは逆転を伴う流れで加速と減速という非定常の状態を持つことによる温度変動を検出した可能性がある。(b)は2番と3番の熱電対の温度である。これらは1番を中心として対称の位置にあり、往復運動により進行方向が逆になるために、温度の上昇と下降が逆になると言うことがわかる。

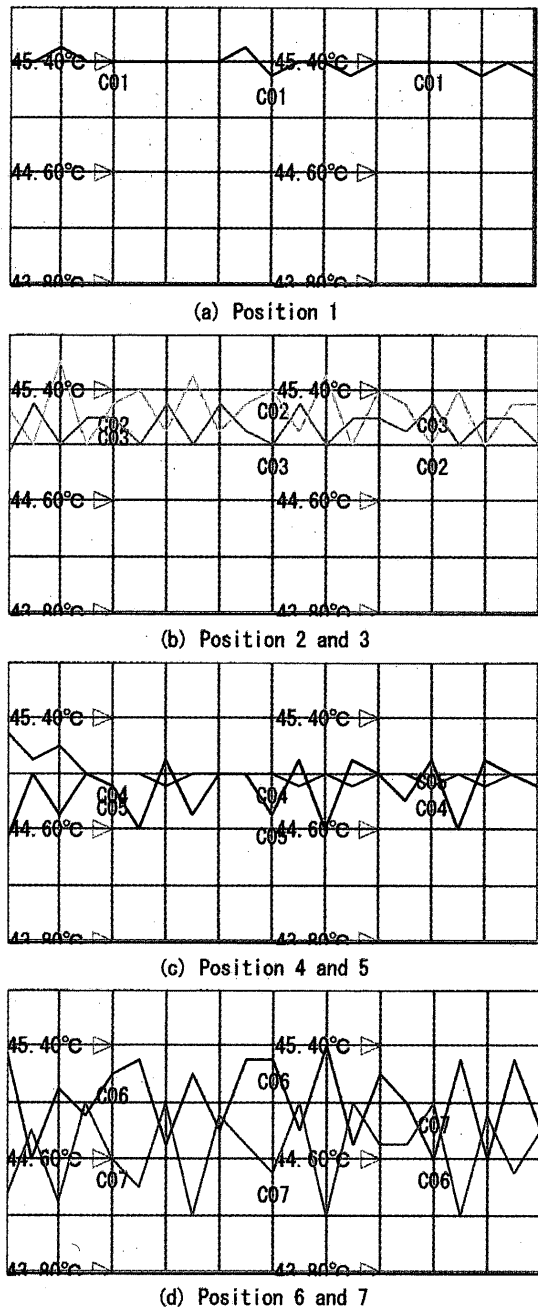


Fig. 5 Symmetrical temperature distribution
(Stroke:250mm, Speed:300mm/s, Chart time:2sec/div)

(c)は4番及び5番の熱電対の温度を示しており、(d)は6番と7番の熱電対の温度を示している。(c)、(d)ともに(b)と同様に往復運動により温度の上昇と下降が見られ、さらに(b)よりも(c)、(c)よりも(d)と温度変動幅が大きくなっていることがわかる。これらの結果から、進行方向に向かって側面は冷却されやすく、その反対側の面では冷却されにくいと言える。たとえば、7番を先頭にして移動する場合には、7番が最も温度の低い空気が当たるために一番冷却されやすい。加熱円柱から奪われた熱は円柱の表面に沿って流れて5番の位置に達するために5番の場

所ではあまり温度が下がらない。そして2番から6番に行くにしたがって前の部分の熱が後方に移動するために、温度が高くなっている。流れの可視化をしていないので不明な点もあるが、流れが剥離せずに円柱に沿って流れているか、または剥離しても渦により円柱後方で熱を蓄えた空気を取り除かれにくいのではないかと考えられる。

さらに、図5(b)から(d)に示す温度の最高温度は(a)で示される温度よりも高くない。すなわち進行方向に向かって真横の温度(1番の熱電対の温度)が最も高く、(b)、(c)、(d)となるにしたがい、温度変動の幅は大きくなるものの、その平均温度は下がっていることがわかる。往復運動する円柱上の温度分布は、このような特徴があることが分かった。

4. 往復運動する伝熱上の熱伝達

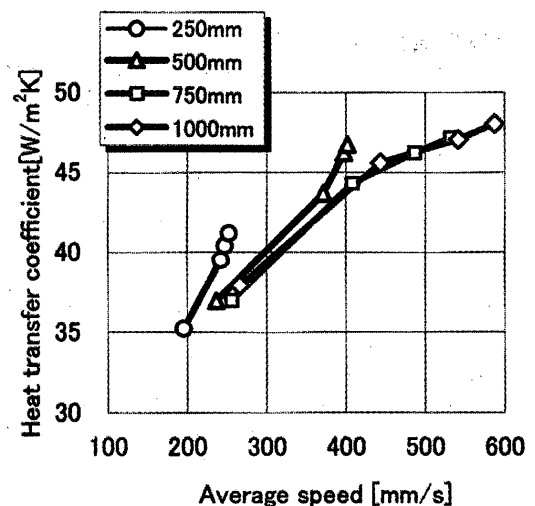


Fig. 6 Heat transfer coefficient versus Speed

図6に平均速度に対する熱伝達率を示している。パラメータはストロークである。

ここで、熱伝達率 h [W/m^2K] はニュートンの冷却則より、下式で表される。

$$h = q / \{ S(t_s - t_\infty) \}$$

q : 単位時間あたりの伝熱量 [W], S : 円柱の表面積 [m^2], t_s : 円柱表面の平均温度 [$^{\circ}C$], t_∞ : 空気温度 [$^{\circ}C$] である。

図から、それぞれのストロークで、平均速度が増すにつれて熱伝達率が増大していることが分かる。ストロークによって平均速度が違うのは、加速・減速領域の割合が異なるためであり、ストロークが長い方が加速・減速が少なくなるので、高い速度を保持して運動す

るので熱伝達率が高くなるものと考えられる。

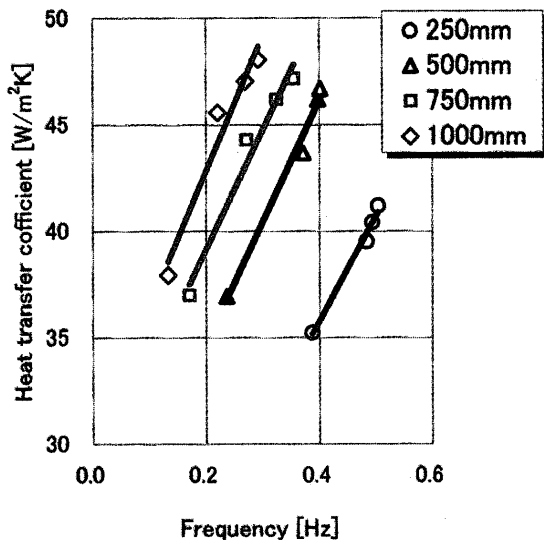


Fig. 7 Heat transfer coefficient versus Frequency

図7に往復運動の周波数に対する熱伝達特性を示している。等速領域の速度とストロークにより、図にあるような周波数となる。同じ周波数に対して、ストロークが長いほど、すなわち速度が高いほど熱伝達率が高くなっていることが分かる。

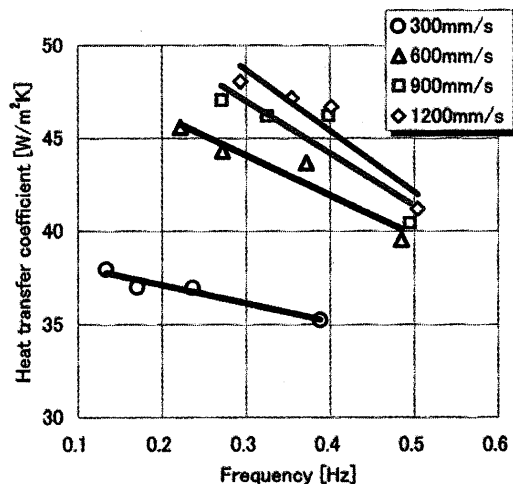


Fig. 8 Heat transfer coefficient versus Frequency

図8は等速運動領域の速度をパラメータとして、周波数と熱伝達率の関係を求めたものである。速度が増大するにつれて、熱伝達率が増大しているのが分かる。また、同じ速度でも、周波数が増大するにつれて熱伝達率が減少していることが分かる。これについても、加速・減速領域の影響であり、周波数が大きくなることは、平均速度が減少することを意味している。この

グラフにおいて、ストロークは、周波数が小さい方が長いことになる。以上の結果から、往復運動の熱伝達は、速度の影響が大きいことが確認された。

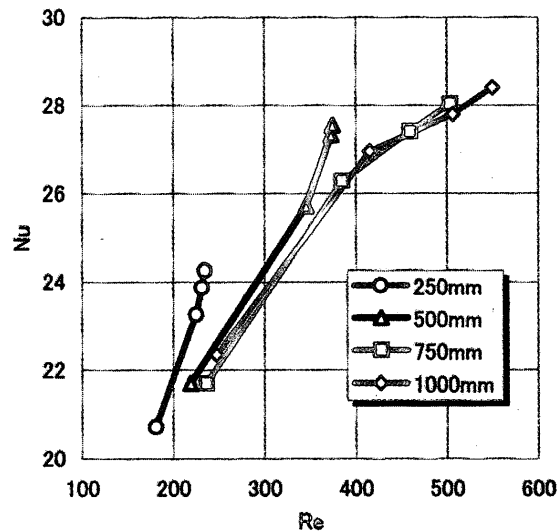


Fig. 9 Nusselt Number versus Average Reynolds

図9は横軸に平均 Reynolds 数、縦軸に平均 Nusselt 数をとって無次元化したグラフである。流体が1方向のみに流れる円柱周りの強制対流熱伝達に関して得られた Zukauskas の推奨した式⁸⁾と比較すると、本件究で得られた値が2~3倍大きな値となった。本件究の結果から往復運動による熱伝達向上の顕著な結果は得られていないので、流体が1方向のみに流れる場合の強制対流熱伝達の結果と同様となるはずであると考えられる。平均 Nusselt 数が大きくなった原因としては、ヒータへの供給熱量がすべて円柱の半径方向にのみ流れたのではなく、軸方向流れて熱損失が生じたためであると考えられる。本研究は往復運動による円柱表面上の温度分布の変化および熱伝達の変化を定性的に求めようとしたものであり、定量的な調査は今後行なう予定である。

5. 結言

往復運動する物体上の熱伝達について定性的に調査した結果、以下の結論を得た。

- (1) 往復運動する物体上の温度分布は、進行方向前面で温度が降下するが、後面では温度が上昇し、往復運動に伴って温度の上昇と降下を繰り返す。
- (2) 往復運動する伝熱面と周囲の空気との熱伝達には、速度が大きく影響する。

(3)往復運動の周波数の増減により、加速・減速回数
が変化し、それに伴って平均速度が変化して伝熱特性
に影響を及ぼす。

謝辞 平成13年度卒業研究生の橋本辰也君、吉田
真二君、平成14年度卒業研究生の大藪安澄君、山田
真也君のご協力に感謝致します。

参考文献

- (1)北原・亀井, 伝熱面を周期的に運動させた場合の
プール沸騰, 第33回日本伝熱シンポジウム講演論文
集, pp.745-746, 1996
- (2)北原・亀井, 伝熱面を往復運動させた場合
の沸騰熱伝達, 第35回日本伝熱シンポジウム講演論
文集, pp.181-182, 1998
- (3) 亀井・北原, 強制対流的核沸騰伝熱現象, 高速度
撮影とフォトニクスに関する総合シンポジウム 1995
講演論文集, pp.139-142, 1995
- (4) Akira KITAHARA et al., Phenomena due to the
Periodically Moving Heated Surface in the Pure
Water Pool, SPIE proceedings of 22nd International
Congress on High-Speed Photography and
Photonics, pp.268-274, 1996
- (5) 北原・亀井, 沸騰現象の可視化, 高速度撮影とフ
ォトニクスに関する総合シンポジウム 1997 講演論文
集, pp.87-92, 1995
- (6) 黒田・原村, 往復流動による管内の熱伝達, 第38
回日本伝熱シンポジウム講演論文集, pp.17-18, 2001
- (7) 満保智之ほか4名, 往復動流中に挿入された過熱
円柱表面からの対流熱伝達, 第38回日本伝熱シンポ
ジウム講演論文集, pp.7-8, 2001
- (8) 日本機械学会編, 伝熱工学資料(改訂第4
版)(1986), p.61, 日本機械学会