

フロン用伝熱管内面(水面)の形状比較とその応用

(流線写真による渦パターンの観察)

田 中 清 裕*・栗 須 正 登*

Comparison of Inner Surface (Water Surface) An Experiment on Inner Shapes (Water Side) of Heat Transfer Pipes for Flon Use and its Applications

(Observation of Vortex Patterns by Flow Visualization of Stream Lines)

by

Kiyohiro TANAKA* and Masato KURISU*

Authors are carrying out Ocean Thermal Energy Conversion, in this process we experienced that heat transfer pipes are the most problem. Our heat pipes are the ones improved for home refrigeration use. They have very excellent quality, but we knew that there is a margin for improvement. This was unbalance between heat transfer quality of flon surface and that of water surface.

We made an observation on vortex patterns of water surface by flow visualization method. After the observation, we knew that vortex patterns much concern to heat transfer. In this paper, mainly, vortex patterns were tested, but a suitable shape of water surface which can make a strong vortex was clarified.

1. 緒 言

筆者らは、海洋の小温度差利用の研究を進めている。このエネルギー利用は、石炭や石油などを使用しないので、甚だ都合が良いが、そのかわりに極めて大容量の熱交換器を必要とする。小温度差利用に当たって最大の問題点は熱交換器の性能向上である。Fig. 1 は、フロン用最新型凝縮器の性能を示したものである。図よりわかるように、管外は十分良い性能であるが、管内はこれに比較して熱伝達(K)が小さい。この結果から、

性能の向上の為に管内の性能向上が急務であると考えた。この報告では、伝熱管内面(水面)に発生する剥離渦が伝熱性能に大幅に左右することに着目し、流線写真による渦発生状況を観察した。その結果、内面形状により渦パターンが異なり、それに伴って伝熱性能および流体抵抗が異なることが明らかになった。

2. 剥離渦の伝熱作用

Fig. 2 は、スムーズな管の管壁近くの流速分布を示

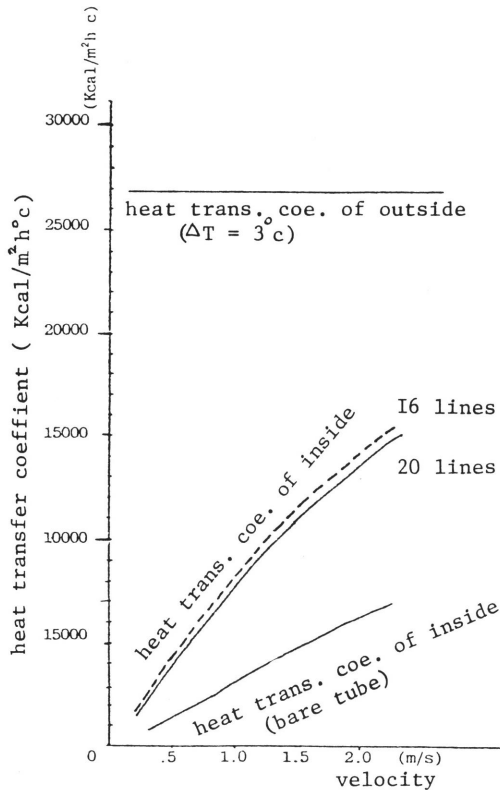


Fig. 1 Compare of Heat Transfer.

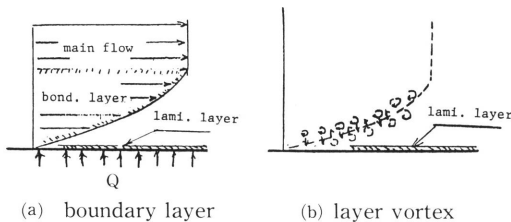


Fig. 2 Boudary Layer, Layer Vortex and Laminar Sublayer.

す。主流と管壁近くには境界層（速度勾配のある部分同図(a)参照）があり、また、管壁の極めて近傍に粘性低層がある。金属面より流体への伝熱に際して問題は、粘性低層の存在で、この低層は粘着しているために、金属よりここへ伝わった熱の主流への伝達が阻害される。この問題を解決するため各種の試みが行われているが、水面については剥離渦が有効なことが着目されている。

Fig. 2 (b)には、レイノルズ渦（境界層渦）を示したが、境界層にはこの渦があり、この渦の移動により粘性低層の熱が主流へ運ばれる。

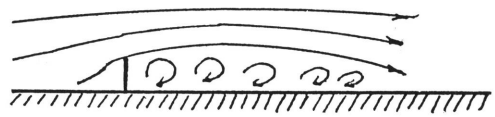


Fig. 3 Separated Vortexes after a Projection.

Fig. 3は、管壁に突起を設けるときは、その後に剥離渦が発生することを示したものである。図2 (a, b)で説明したように境界層内にも（境界層渦＝レイノルズ渦）が発生している。剥離渦はレイノルズ渦Pに比べてその大きさが桁違いに大きいため粘性低層の流体を削りとり、これを主流へ運ぶ作用が大きい。

3. 剥離渦の観察

3. 1 流線写真実験装置

流線写真は回流水槽にアルミ粉末（銀粉）を浮かべた通常の方法を採用した。

Fig. 4は、伝熱管内面の構造であり、これを流線写真を撮影するのに便利な構造にした流線モデルの写真をFig. 5に示した。

Fig. 6は、流線写真を撮影した各種モデルの構造図の一覧である。

3. 2 単独突起

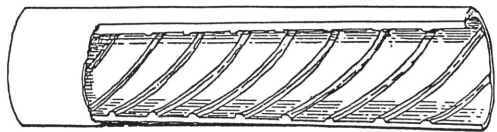


Fig. 4 Inside Shapes of Heat Transfer Pipe.

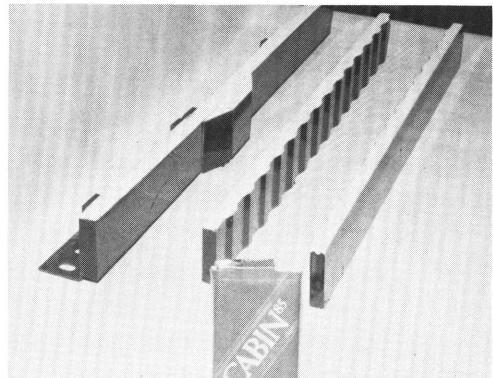


Fig. 5 Models for Stream Lines.

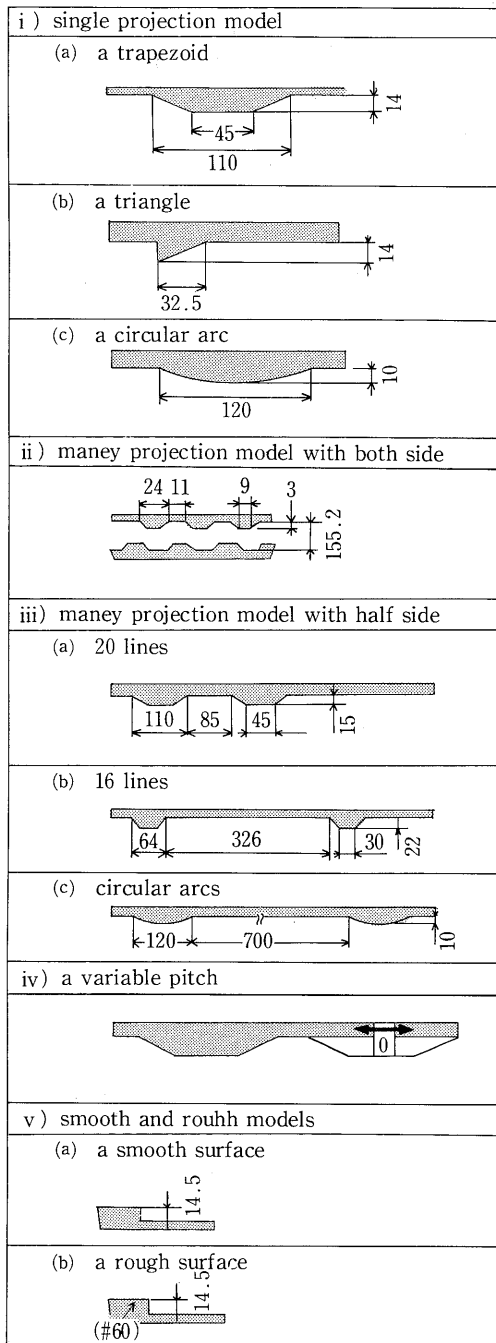


Fig. 6 Shapes of Models Tested.

Fig. 7～9 は、単独突起モデルで、その結果は、(a)は流線写真で、(b)はそのスケッチ図である。Fig. 7 は、梯形であり、Fig. 8 は三角、Fig. 9 は円弧である。これらのことより次のことが明らかである。

(a) 剥離渦の影響のおよぶ範囲は突起の形状に関係

なく、突起高さの10～12倍の長さである。

(b) 梯形および三角モデルにおいては、剥離は前縁の角より生じている。

(c) 剥離渦は、鋭角（三角）程強い。

(d) 三角および梯形モデルの前縁には Dead Zone（死水域）②が生じている。これは、伝熱性能には一となる。

(e) 円弧突起の利点は、前縁に Dead Zone が生じ難い点であろう。

3. 3 連続突起

実際の伝熱管は突起が連っており、この場合どうなるかを調べた。結果は、Fig. 10 に示す通りで、凹部に固定渦が発生し、これは主流との交換も少なく、また、その速度も遅い。しかし、もちろん、裸銅管よりも良いことはもちろんである。

3. 4 突起の条数と剥離渦の状況

突起の条数が剥離渦にどのような影響を与えるかを見るため、突起の条数、20条 (Fig. 6 参照) および16条に変わるものを作り、実験を行った。

Fig. 11 (a)は、条数が20条である。同図より明らかなように、ピッチの間隔が小さいと渦は固定渦となり、主流との交換が非常に少なく、また、渦速も小さい。同図(b)は、最も良好な渦を形成し、主流との交換も活発に起こり、かつ、渦速度も大きい。ここまでの結果を統合して判断すると、Fig. 11 (b)の16条のピッチが最も良好な渦の発生を呈した。これは、また、Fig. 1の管内熱伝達率の結果とここでの流線渦の結果と合せて判断すると、両者の関係が一致した結果である。

3. 5 可変ピッチ実験

Fig. 11の実験で突起ピッチが渦パターンに大幅に影響することが明らかになったので、最適ピッチを求める実験を行った。

Fig. 6(iv)に示すように一方の突起は固定にして他方を移動可能な構造として、突起形状は、Fig. 12の構造のものを使用し、ピッチは突起高さの倍数で段階的にずらして流線の変化を観察した結果 (Fig. 13 参照) 以下のことが判明した。

$P = 4h$ 位までは、固定渦であるが、 $5h$ 位になると、やや渦に動きが出てくる。

$P = 7h \sim 10h$ は、渦が良く動き主流との交換が良いが、 $10h \sim 13h$ は、時々第二突起手前に渦が、存在しない状況が起きる。

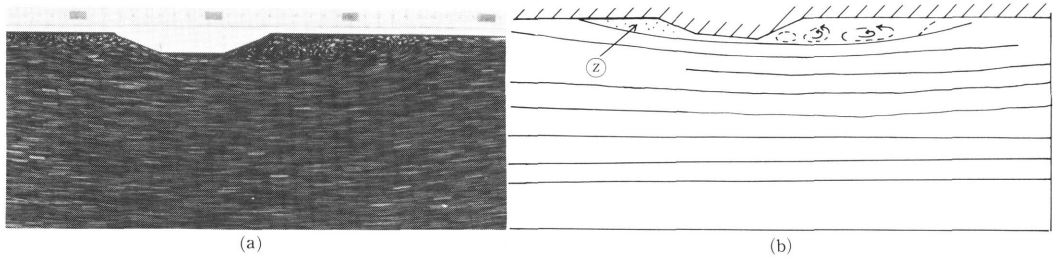


Fig. 7 A Single Projection shaped Trapezoid.

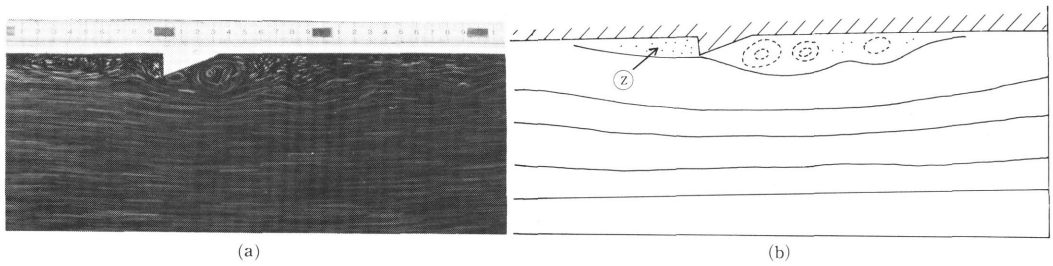


Fig. 8 A Single Projection shaped Triangle.

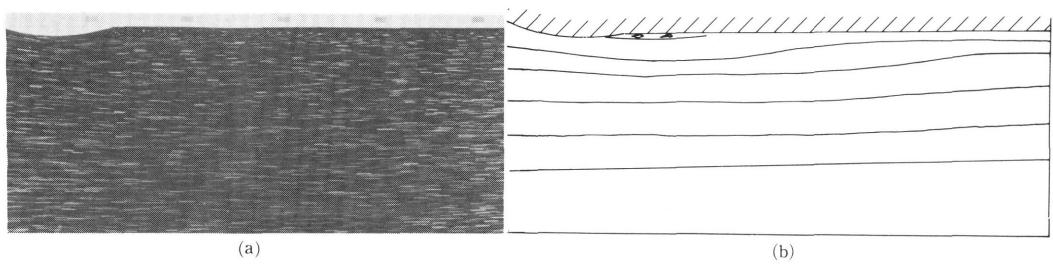
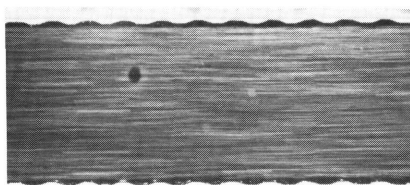


Fig. 9 A Single Projection shaped Circular Arc.



(a)

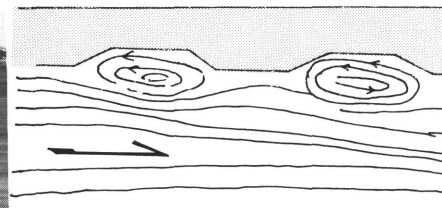
(a) stream lines visualized

(b) enlarged one

(c) sketched one



(b)



(c)

Fig. 10 Maney Projections.

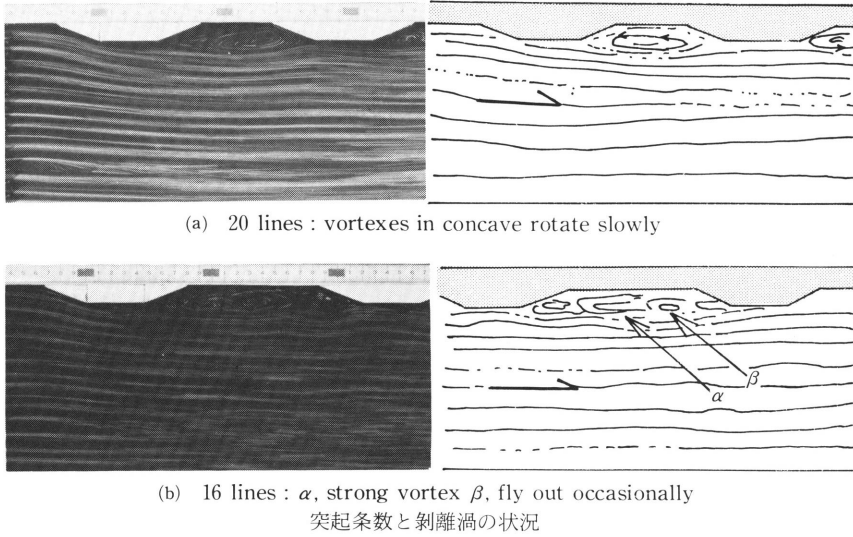


Fig. 11 Change of Vortices with No. of Projections.

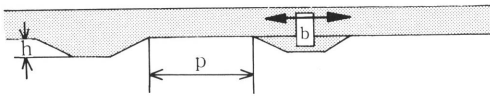


Fig. 12 A Variable Pitching Construction.

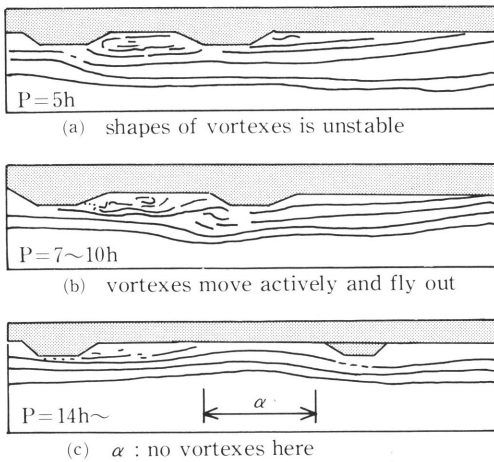


Fig. 13 Three Vortex Patterns by Pitch.

$P=14h$ 以降は渦の全く存在しない遊びの部分が生じた。

以上の結果より、ピッチは狭すぎても広すぎてもだめで、突起高さとの相関関係で決まる。ただし、突起の高さは、流体抵抗とのかねあいもあり、ある程度制限を受ける。上記の実験より、 $7h\sim 10h$ が良好と思わ

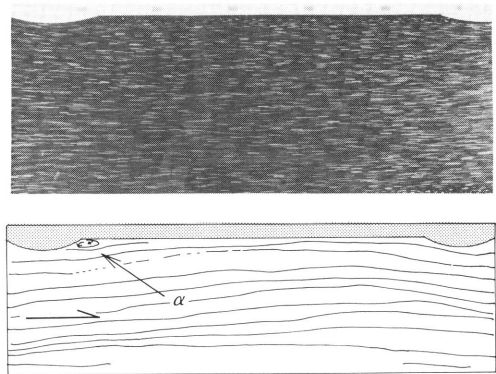


Fig. 14 A Circular Arc Projection.

れるので条数とねじれ角で、ピッチ幅を操作すると良い。又単位長さ当りの伝熱面積を大きくする為には、 $7\sim 8h$ を最適と考えた。

3. 6 円弧突起の実験

Fig. 14は、円弧突起の実験で、渦の発生、主流との交換も良好であるが、渦部後縁より後部に約 $10h$ の長さで渦の影響を受けない遊びの部分が出来ている。

3. 7

Fig. 15(a), (b)の様に滑面と粗面を、同寸法で製作し、その後方に出来る剥離渦を流線写真により観察した。

Fig. 15(a)においては、渦が後方に移動すると小さく

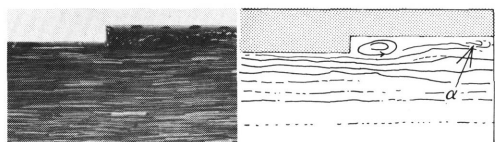
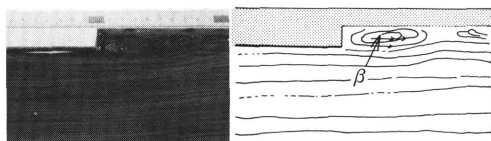
smooth surface α : vortexes are borne but smallrough surface β : strong vortexes

Fig. 15 Difference between Smooth and Rough Surfaces.

なり消失してしまう。同時に2つ以上の渦が存在するのは、まれである。

Fig. 15 (b)より、渦が後方に流れても初期渦が強い為、渦の形をとどめ同時に2つ、時には3つの渦を有することがわかる。

以上の実験で粗面で強い初期渦が得られることがわかった。この理由は、粗面境界層渦の方が滑面より強いためである。すなわち剥離渦の源エネルギーは、前方の境界層渦にあることが解る。

4. 好適なフロン伝熱内面（水面）の形状

剥離渦によって伝熱性能を向上させる伝熱内面（水面）の渦について筆者らは、次のような考え方で研究を進めている。

- 管内壁に剥離渦の発生が、主流へ熱を運ぶこと。
- 剥離渦は、固定していなく、連続して発生し、これが主流との交換が多いこと。

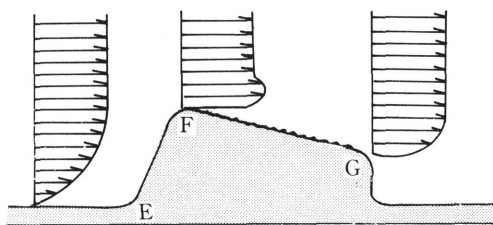


Fig. 16 A Suitable Shape of Inner Surface which can make A Strong Stole Vortex.

c. 剥離渦の流速は出来るだけ速いこと。

この実験結果をもとに、強い剥離渦を作る突起の形状として、Fig. 16 のような形状を提案する。同図において、E F間に絞り、F点での流線のエネルギーを強くする。F G間は、管軸と角度を 3° に保っておりこの部分では、境界層渦を発達させる。剥離点Gは、剥離をここで確実に起こす部分で、これより後部には強い境界層渦を起こすことを目的とする。さらにF G間は粗面として境界層の内部エネルギーを増大させる。

5. 伝熱管の流体抵抗

伝熱管内面の形状改良によって熱伝達率を向上させることは、先に述べたが、それはまた流体抵抗に影響し、エネルギー損失を増すことも考えられる。そこで、ここでは数種の伝達管の損失水頭とエネルギー損失を測定した。

5. 1 各種伝熱管の損失水頭

伝熱管はそれぞれ内面形状が異なっているが、それによって損失水頭、エネルギー損失等に相違が生じる。この実験に際しては、Fig. 4 に示すようにチューブ内

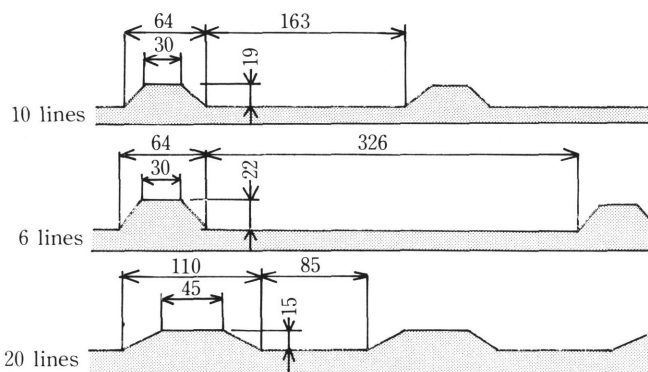


Fig. 17 Inner Dimesiones Heat Transfer Pipe measured Hydraulli Loss.

面にスパイラル突起を施してある伝熱管をモデルにした。その形状は、Fig. 17 に示してある 3 種類とした。

ここで Fig. 17 は、伝熱管を長手方向に切断した断面形状を示している。

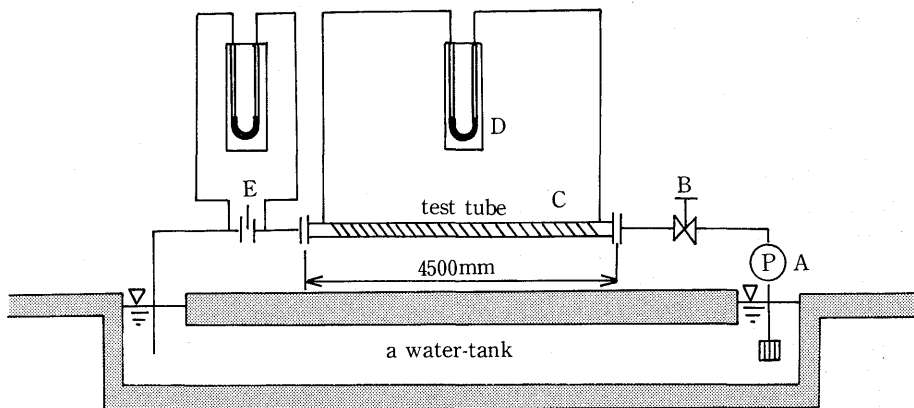


Fig. 18 Experimental Apparatus.

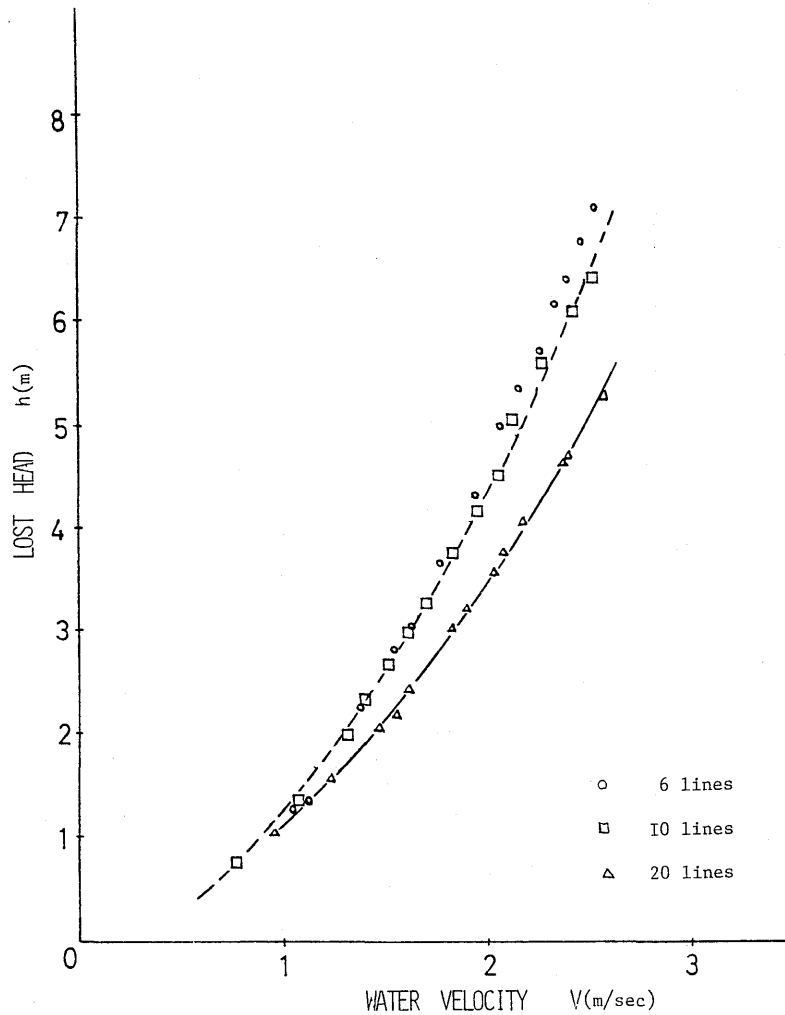


Fig. 19 V-h Diagram.

5. 2 実験装置

Fig. 18 には、装置の概略を示し、(A)は給水ポンプで、(B)は流量調整バルブで、(E)は流量測定用オリフィス、(C)はテストチューブで、圧力損失は、このチューブの入口と出口の圧力差から求めた。

5. 3 実験結果および考察

Fig. 19 に示す $V-h$ 線図からもわかるように、6条と10条では流速に対する損失水頭は、ほぼ同じ値をとり、20条のみがやや低い。これは、3. 3 で述べたように突起の間に入り込んでいる固定渦が小さく、主流に対する影響が少ないからで、抵抗係数が大きくなれば、流体抵抗も大きくなり、エネルギー損失も増大する。Fig. 20 を参照すれば明らかなように突起のピッチ

は、7h~10h が良好であると考ええる。また、Table 1 には、実験を行った伝熱管内面の流体損失その他を示した。Fig. 19, 20 および Table 1 より次のことが言える。

これらより、流体（エネルギー）損失は、20条より10条の方が小さい。しかしながら、例えば、流速2m/sでその値の差を見れば（3~4）Watt（Table 1, 参照）に過ぎない。流体損失の増大よりも、伝熱性能向上の方がはるかに有利であることが数値的に言える。

参考文献

- 1) 吉川；古河電工時報（昭和53年）

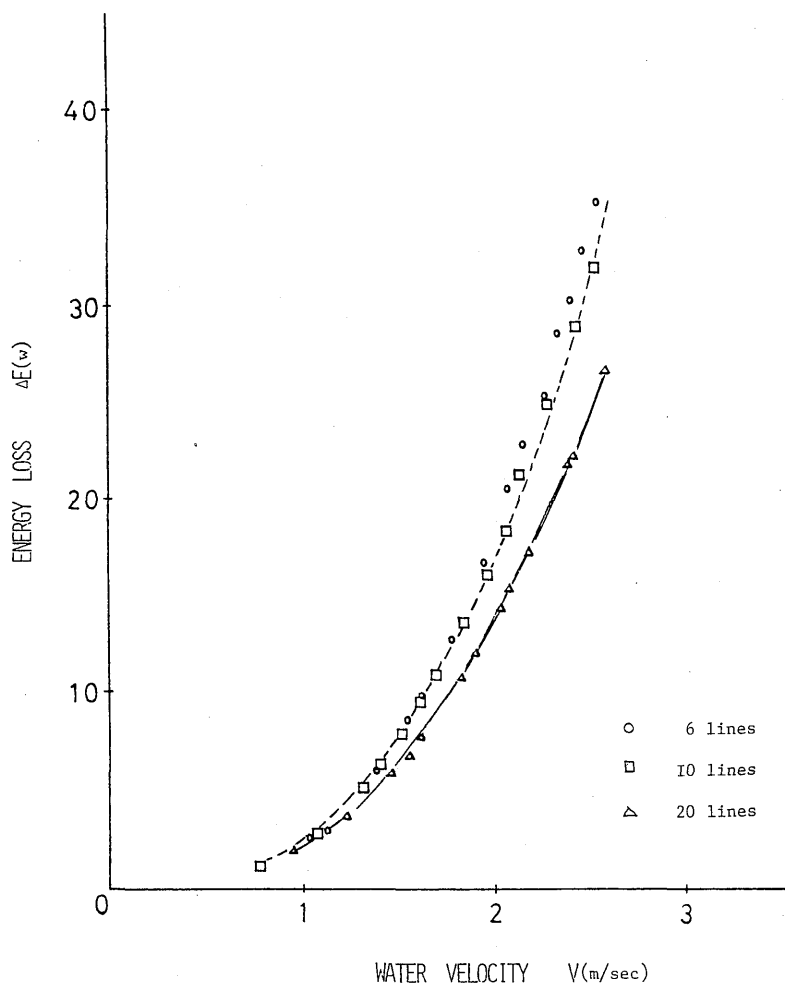


Fig. 20 $V-\Delta E$ Diagram.

Table 1 Hydraulic Loss of Heat Transfer Pipe.

	NO.	H(m)	Q(m ³ /sec)	V(m/sec)	hg(m)	h(m)	ζ	$\Delta E(w)$
6 lines	1	0.372	0.000509	2.53	0.563	7.07	21.6	35.3
	2	0.297	0.000455	2.26	0.453	5.69	21.8	25.3
	3	0.182	0.000356	1.77	0.290	3.64	22.8	12.7
	4	0.112	0.000279	1.39	0.178	2.23	22.7	6.1
	5	0.064	0.000211	1.05	0.099	1.24	22.1	2.6
	6	0.139	0.000311	1.55	0.244	2.81	23.0	8.6
	7	0.252	0.000419	2.08	0.397	4.98	22.5	20.5
	8	0.334	0.000482	2.40	0.510	6.40	21.8	30.3
	9	0.350	0.000494	2.46	0.538	6.75	21.9	32.7
	10	0.319	0.000471	2.34	0.491	6.16	22.0	28.5
	11	0.270	0.000434	2.16	0.426	5.35	22.5	22.7
	12	0.220	0.000391	1.95	0.344	4.32	22.3	16.6
	13	0.154	0.000327	1.63	0.243	3.05	22.5	9.8
	14	0.075	0.000229	1.14	0.106	1.33	20.2	3.0
10 lines	1	0.369	0.000507	2.52	0.511	6.41	19.8	31.9
	2	0.261	0.000426	2.12	0.403	5.06	22.1	21.1
	3	0.196	0.000369	1.84	0.297	3.73	21.6	13.5
	4	0.114	0.000282	1.40	0.183	2.30	22.9	6.3
	5	0.034	0.000154	0.77	0.058	0.73	24.4	1.1
	6	0.068	0.000218	1.08	0.106	1.33	22.3	2.8
	7	0.100	0.000264	1.31	0.157	1.97	22.4	5.1
	8	0.150	0.000323	1.61	0.239	3.00	22.8	9.5
	9	0.223	0.000394	1.96	0.331	4.15	21.2	16.0
	10	0.299	0.000456	2.27	0.444	5.57	21.2	24.9
	11	0.342	0.000488	2.43	0.481	6.04	20.1	28.9
	12	0.246	0.000414	2.06	0.359	4.51	20.8	18.3
	13	0.168	0.000342	1.70	0.258	3.24	21.9	10.9
	14	0.133	0.000304	1.51	0.210	2.64	22.5	7.9
20 lines	1	0.382	0.000516	2.57	0.421	5.28	15.7	26.7
	2	0.276	0.000438	2.18	0.321	4.03	16.6	17.3
	3	0.193	0.000367	1.82	0.238	2.99	17.6	10.7
	4	0.123	0.000293	1.46	0.163	2.05	18.9	5.9
	5	0.052	0.000190	0.95	0.081	1.02	22.2	1.9
	6	0.088	0.000248	1.23	0.124	1.56	20.1	3.8
	7	0.140	0.000312	1.55	0.173	2.17	17.6	6.7
	8	0.240	0.000409	2.03	0.284	3.56	16.9	14.3
	9	0.328	0.000478	2.38	0.369	4.63	16.1	21.7
	10	0.382	0.000516	2.57	0.419	5.26	15.7	26.6
	11	0.335	0.000483	2.40	0.374	4.69	15.9	22.2
	12	0.252	0.000419	2.08	0.297	3.73	16.8	15.3
	13	0.209	0.000382	1.90	0.255	3.20	17.4	12.0
	14	0.151	0.000324	1.61	0.193	2.42	18.3	7.7

