

棒状フィン付垂直伝熱面周りの水の
凝固・融解過程に関する実験的研究*平澤良男^{*1}, 陳東^{*2}
渡邊弘毅^{*3}, 竹越栄俊^{*1}An Experimental Study on the Solidification and Melting
of Water around a Vertical Heat Transfer Plate with Pin FinsYoshio HIRASAWA, Dong CHEN,
Koki WATANABE and Eisyun TAKEGOSHI

In the present study, the solidification and melting of water were investigated experimentally for the case of a vertical heat transfer plate with pin fins. In the experiment, temperature distributions, ice and water volume fractions, and heat flux changes were measured and the flow patterns in the water were observed for examination of the phase change process. In the solidification, the phase change rate increased monotonously with increasing number of fins. In the melting, the temperature distribution in water showed a uniformity caused by natural convection based on the density change of water. The contribution of the natural convection to the melting was examined based on the relationship between the modified Nusselt number and the Rayleigh number.

Key Words: Solidification, Melting, Pin Fin, Heat Conduction, Natural Convection, Experiment

1. 緒言

潜熱蓄熱装置に用いられる相変化材料の固・液相変化特性は、潜熱蓄熱装置の性能を評価するための重要な因子の一つであることから、これまで数多くの研究結果⁽¹⁾⁽²⁾が報告されている。さらに、フィンの設置による相変化特性の改善も種々試みられており、円管軸に平行な縦形フィンによる凝固・融解現象に関する研究⁽³⁾⁽⁴⁾、潜熱蓄熱器の熱特性を表すための相似則の検討⁽⁵⁾⁽⁶⁾などが報告されている。

著者らも、この相変化特性の改良を目的として、伝熱促進体を含んだ水の凝固・融解過程に関する研究⁽⁷⁾⁽⁸⁾を行ってきた。これら一連の研究で、分割されたフィンを用いることによって、一般に用いられる平板形フィンよりもその体積率が小さく、より大きな総潜熱量や液相内部の流れの効果などが期待されることを示した。そこで本研究では、棒状フィンを設置した垂直形伝熱面を用いた潜熱蓄熱容器を用い、水の凝固・融解実験を行う。そして、融解過程における自然

対流の発生および流れの様子を可視化することによって、フィンによる伝熱促進効果を実験的に考察する。

使用記号

c_p : 比熱 kJ/(kg·K)
 g : 重力加速度 m/s²
 h : 熱伝達率 W/(m²·K)
 L : 蓄熱器の寸法 m
 Nu : ヌッセルト数
 p : フィンのピッチ mm
 q : 伝熱面の平均熱流束 W/m²
 Ra : レイリー数
 T_c : 固液境界面温度 °C
 T_s : 伝熱面温度 °C
 t : 時間 s
 x, y, z : 座標軸
 β : 体膨張係数 1/K
 λ_e : 融解初期の液相の有効熱伝導率 W/(m·K)
 ν : 動粘性係数 m²/s
 ρ : 密度 kg/m³

* 原稿受付 1997年2月3日。

*¹ 正員、富山大学工学部 (〒930 富山市五福3190)。*² 学生員、富山大学大学院。*³ 関西設計(株) (〒531 大阪市本庄東1-1-10)。

2. 実験装置および手順

図1に本研究に用いた実験装置試験部の構造を示

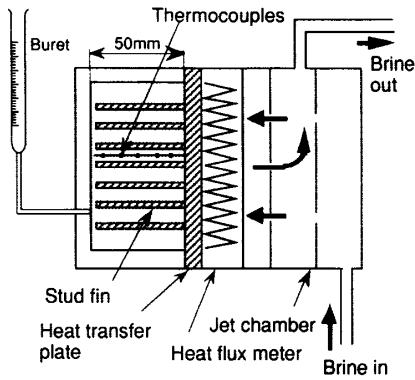


Fig. 1 Structure of experimental apparatus

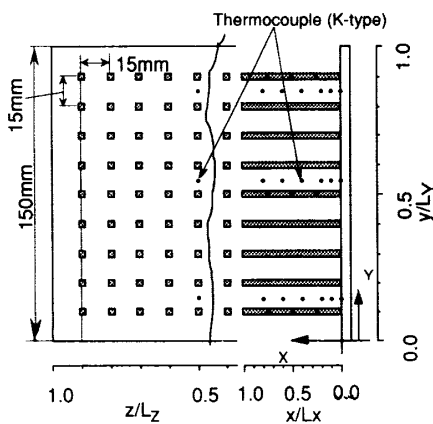


Fig. 2 Example of arrangement of pin fin for Fin P-15

す。試験部は、蓄熱容器、伝熱面、熱流束計、噴流室で構成されている。蓄熱容器は、厚さ 10 mm のアクリル樹脂で作製し、高さ $L_y=150$ mm、厚さ $L_x=50$ mm、奥行き $L_z=150$ mm の矩形とした。伝熱面には厚さ 5 mm の銅板を用いた。今回の実験で用いた棒状フィン、断面寸法 3×3 mm、高さ 50 mm の銅製で、これをフィンピッチ 12~30 mm で伝熱面にハンダ付けした。フィン付伝熱面の一例(フィンピッチ 15 mm : P-15)を図 2 に示す。また、実験に用いたフィンピッチ、フィン体積率を表 1 に示す。

今回の実験では、凝固および融解過程における伝熱面通過熱流を測定するため熱流束計を作製し、厚さ 0.5 mm のゴムシートを介して伝熱面に密着させた。熱流束計の構造を図 3 に示す。この熱流束計は、厚さ 20 mm の銅板の両面に深さ 1 mm の溝を 3 mm 間隔に作り、K 熱電対を直列に 40 対接着剤で固定したものである。そして、その両面は厚さ 5 mm の銅板で保護されている。この熱流束計の熱流束-出力特性は、 $-20 \sim +25^\circ\text{C}$ の温度範囲で検定実験によって求めた。

Table 1 Pitch and volume ratio of pin fins

	Fin pitch p, mm	Number of fins	Volume fraction of fins, V_p , %
No-fin	—	0	0
P-30	30	25	1.00
P-20	20	49	1.96
P-15	15	81	3.24
P-12	12	121	4.84

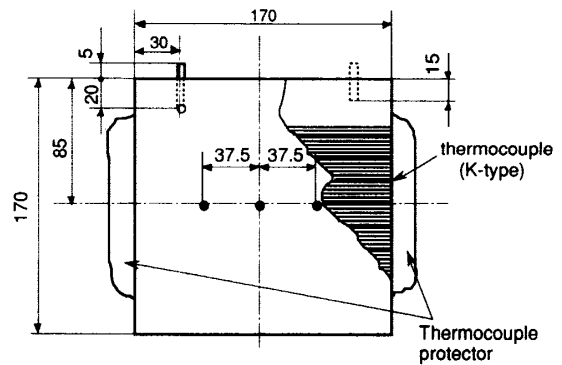


Fig. 3 Structure of heat flux meter

実験の手順は以下のとおりである。まず、2~3 h 沸騰させて十分脱気した蒸留水を、外気に触れないようにしながら試験容器に静かに注入する。凝固実験では、初めに恒温槽によって融点よりわずかに高い温度に制御されたブラインを噴流室に流す。次に、容器全体の水温が約 0°C に安定した後、バルブの切り替えによって -10°C のブラインを、他の恒温槽から噴流室に流して実験を開始する。融解実験では、初めに -10°C のブラインを流して容器の水を完全に凝固させる。そして、融点よりわずかに低い温度まで上昇させて、容器全体が均一になった後、 $+20 \sim 22^\circ\text{C}$ に制御されたブラインを噴流室に流して実験を開始する。なお、相変化量は、相変化に伴う水の体積変化によって押し出される(または吸引される)水量を、容器に設けた複数の小穴に連結したビュレットで測定して求めた。

3. 実験結果および考察

伝熱面付近の相変化を対象とした実験では、伝熱面温度を一定に保つことができれば実験値を整理する上で都合であるが、一般にこれは非常に困難である。本実験においても、伝熱面の熱流が比較的大きいため、伝熱面温度は時間とともにかなり変化し、また、フィンの設置本数によっても異なり、実験を同一条件で定量的に評価することは難しい。そこで、同温度のブラインによる蓄・放熱特性を検討することとし、伝熱面温度の変化を修正する標準化は行わなかった。

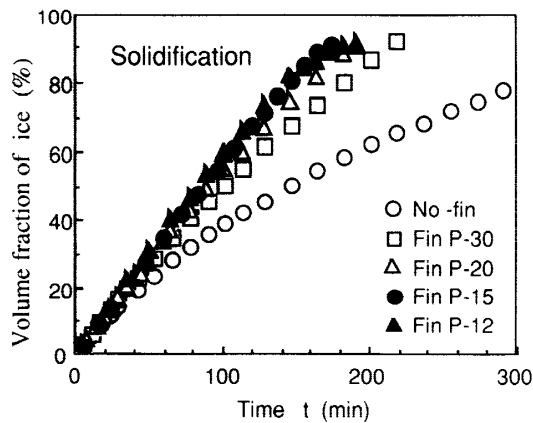


Fig. 4 Relation between volume fraction of ice and time

3・1 凝固過程 図4に、凝固実験における氷の生成率と時間 t の関係を示す。フィンなしの場合 (No-fin), 70 min 付近から氷の生成速度が遅くなり始め、図4には示していないが400 min 付近で凝固が終了した。これは、周知のように凝固開始付近では熱抵抗が小さく、相変化が比較的速やかに進行するが、氷の生成とともに温度こう配が小さくなり熱抵抗が増大するためである。フィンを設置した伝熱面 (Fin P-12~P-30) では、凝固終了は180~220 min となり、フィンの設置によって凝固速度が2~3倍となることがわかる。これは、凝固過程が主として熱伝導によって支配されており、フィンの熱伝導寄与による凝固促進効果が明確に現われるためである。ここで、フィンの数による影響を見ると、P-30ではNo-finよりもかなりの凝固促進効果が得られるのに対し、P-20以上では促進効果が小さくなっている。特に、P-15とP-12では、ほとんど凝固速度が同じである。これは、前述のように伝熱面温度が一定とはならず (図5, 6の T_s 参照)、フィンの設置本数によって異なることが主な原因と推定される。また、フィンピッチが小さくなると、フィンの根本付近で生成した氷が隣接したフィンの氷とつながり、氷と氷の境界面積が減少して、熱抵抗となることも考えられる。

図5および図6に、それぞれFin P-30, P-15のフィン付伝熱面の場合について、 $y/L_y=0.5$ における x 方向の各温度と時間の関係を示す。フィンなしの伝熱面についてはこれらと類似していたので、ここでは省略した。図5のFin P-30の各位置の温度は凝固開始後、時間とともに単調に低下しており、その温度分布は成層化している。この傾向はフィンなしの場合でも全く同様であった。このことから、凝固過程が主として熱伝導によって支配されていることがわかる。

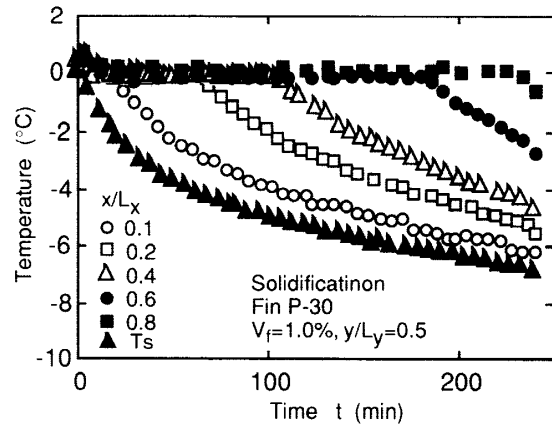


Fig. 5 Relation between temperature and time in solidification for Fin P-30

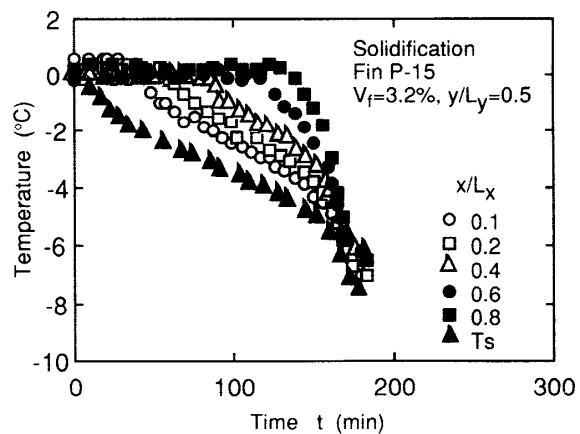


Fig. 6 Relation between temperature and time in solidification for Fin P-15

図6のFin P-15の場合では、すべての位置の温度降下は図5の場合より早い時間から始まっているが、温度の成層化の傾向は約150 minまでは図5と同様である。しかし、150 min以降では各位置の温度が急激に低下し、約 -6°C の温度でほぼ同一となっている。これは特異な現象ではなく、生成した氷の体積率が90%近くに達して、凝固潜熱の影響がほとんどなくなるからである。

図7に、凝固過程における伝熱面平均熱流束 q と時間の関係を示す。この図で、実験開始直後 (およそ10分) の熱流束は、伝熱面の種類によらず比較的大きな値を示す。しかし、その後フィンなし伝熱面では、固相の成長とともに熱抵抗が増大するため、時間の経過とともに急激な減少を示す。一方、フィン付伝熱面では、フィンピッチが小さくなるにつれて、この熱流束の減少が緩やかになることがわかる。これは、フィンのピッチの減少 (フィン数が増加) によって、固相の熱抵抗が減少するためと考えられる。Fin P-15および

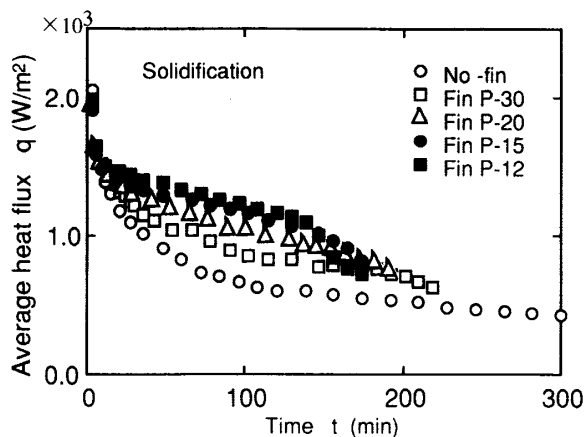


Fig. 7 Relation between heat flux and time in solidification

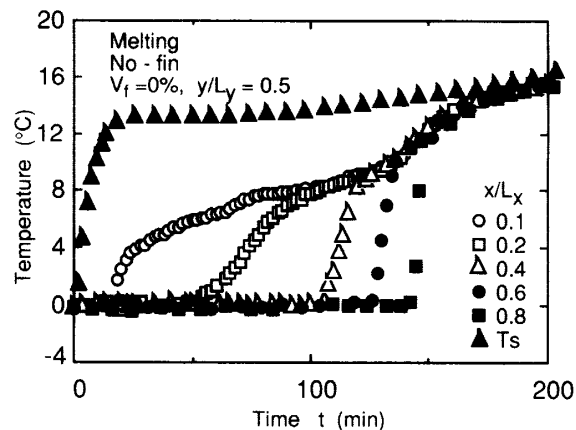


Fig. 9 Relation between temperature and time in melting for No-Fin

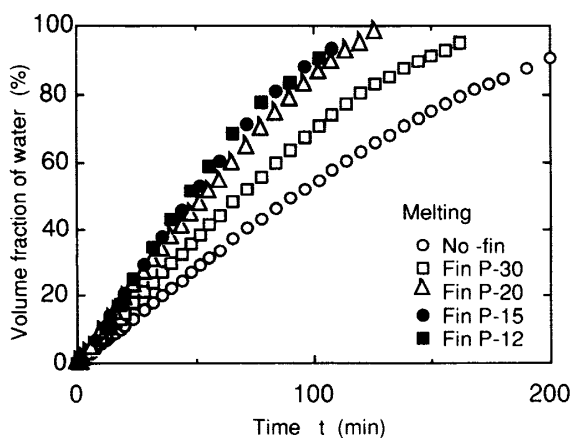


Fig. 8 Relation between volume fraction of water and time

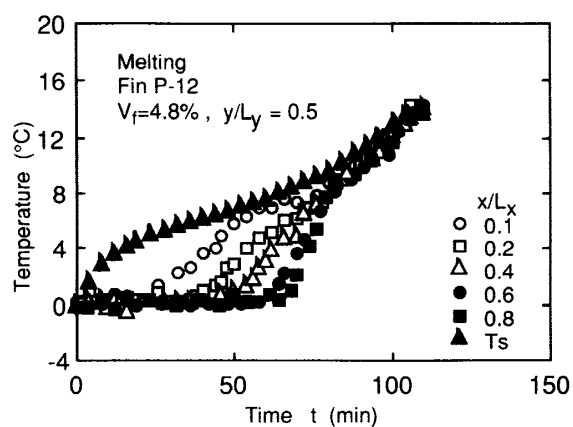


Fig. 10 Relation between temperature and time in melting for Fin P-12

P-12の場合、ここでも150 min 以後になると熱流束の急激な減少が見られる。これは前述のように、生成された固相の一部が断熱面に到達したためである。

3・2 融解過程 図8は、融解過程における融解率と時間の関係を示す。No-finの場合、融解は約250 min後に終了する。しかし、フィンを設置することによって、Fin P-12ではその半分以下の約100 minで融解が終了する。この伝熱促進はフィン数の増加に伴う熱伝導寄与だけでなく、後に示すフィン周りの局所的な自然対流が影響していると推測される。

図9は、No-fin伝熱面の場合の試験容器内の温度と時間の関係を示す。この場合、融解開始と同時に伝熱面の温度は急激に上昇し、約13°Cになった後緩やかな変化を示す。その他の場所、例えば $x/L_x=0.1$ と0.2において、融解開始後しばらく温度が急上昇するが、100 min付近では約8°Cに収束していく。その後、容器内のその他の場所の温度も同様な変化を示している。そして、約8°Cに収束した後、容器内が一様な温

度分布を保ちながら緩やかに上昇し、融解終了に至ることが示されている。これは、水の密度変化に伴う自然対流の影響によって起るものと考えられる。

図10に、フィン付伝熱面Fin P-12における容器内部の温度変化を示す。この場合、伝熱面温度はNo-finの場合と異なって、時間経過とともに穏やかに上昇している。伝熱面以外の温度は、ここでも80 min経過後には約8°Cに収束しているが、その傾向はNo-finの場合に比較してそれほど明確ではなく、80 minを過ぎてもわずかに液相内に温度分布が存在する。これは、フィンの熱伝導が大きいため、自然対流に基づく温度均一化が遅れるからと考えられる。

図11に、伝熱面平均熱流束 q の時間的変化を示す。No-finの場合、熱流束は凝固過程と同様、融解開始直後に急激な減少を示すが、約30 min経過するとほぼ一定値となる。これは、融解過程で生じた自然対流のため、液相内がかくはんされて熱伝達が安定化されるためである。フィン付伝熱面(Fin P-20およびP-30)

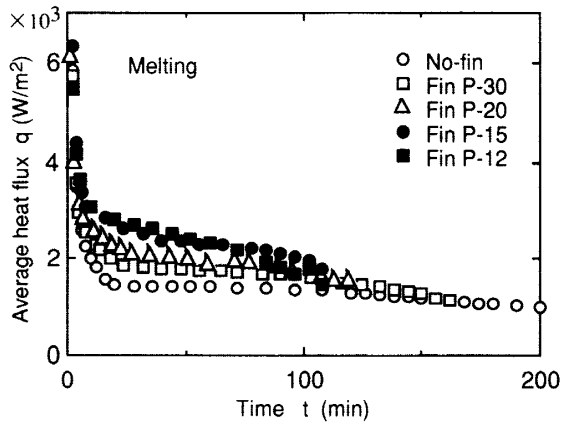


Fig. 11 Relation between heat flux and time in melting

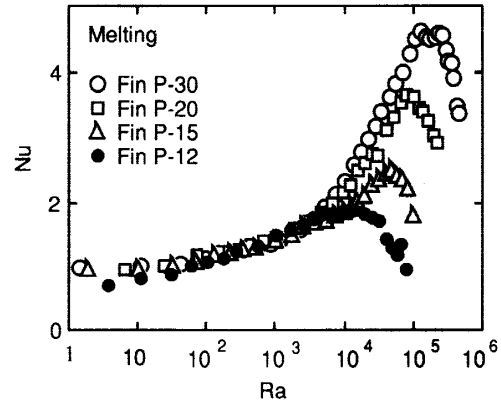


Fig. 13 Relation between Nu and Ra in melting for pin fins

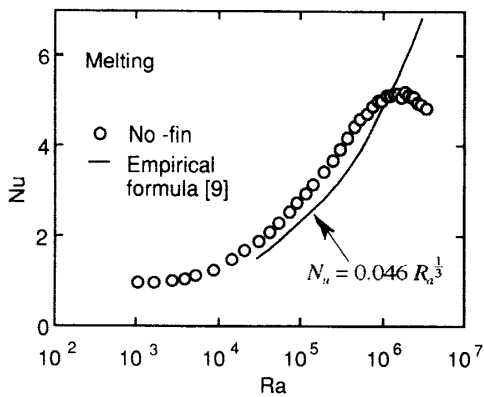


Fig. 12 Relation between Nu and Ra in melting for No-fin

の場合、熱流束は No-fin の場合とほぼ同様の傾向を示す。また、フィン体積が大きい (Fin P-15, P-12) の場合、時間の経過とともに、熱流束が徐々に減少している。これは、フィン数の増加とともに全伝熱量に対する熱伝導の寄与が大きくなり、凝固過程で観察されたような熱流束の減少傾向が現われるためである。

ここで、融解過程における伝導と対流の影響を定量的に考察するために、以下の式に示すような修正 Nusselt 数 Nu および修正 Rayleigh 数 Ra を定義した。

$$Nu = \frac{hx}{\lambda_e} = \frac{qx}{\lambda_e(T_s - T_c)} \dots\dots\dots (1)$$

$$Ra = \frac{gx^3\beta(T_s - T_c)}{\lambda_e \rho c_p} \dots\dots\dots (2)$$

上式で、 x は融解領域の平均厚さとした。また、実験初期の熱流束と液相平均厚さから求めた熱伝導率は、ほぼ一定値であったので、融解初期においては対流の影響はないと考え、この有効熱伝導率を λ_e として用

いた。また、液相部におけるその他の物性値は水の物性値を用いた。なお、式(1)で示されるように、本報における Nu は伝導熱量に対する全伝熱量の比に相当する。

図 12 に No-fin 伝熱面の融解過程における Nu および Ra の関係を示す。図から Ra が 10^3 以下の領域では Nu がほぼ 1 に等しいが、 Ra の増加とともに急激に上昇し、融解過程の終了付近になると約 5 の値に達している。これは、伝導熱量に対して全伝熱量が 5 倍になることを意味し、自然対流の寄与は全伝熱量の約 80% であることがわかる。図 12 中に示した実線は、経験式⁹⁾から求めた推測値である。実験値はこの経験式よりもやや大きい値となっているが、定性的な傾向は良く類似している。なお、 $Ra=10^6$ 以上の領域で Nu の急激な低下が見られるが、これは凝固過程で見られたように、この領域では融解液相の一部が断熱面に到達しており、壁面の影響が現われるためである。

図 13 に、フィン付伝熱面に関する Nu と Ra の関係を示す。 Nu は Fin P-30 の場合、最大でおよそ 4.3、最もフィンピッチの小さな Fin P-12 で最大 2 となった。したがって、本報の定義からすれば対流熱伝達が融解過程に及ぼす効果は、フィンの本数の増加とともに減少し、Fin P-12 では全伝熱量の 50% 程度に減少することがわかる。また、 $Ra=10^4 \sim 10^5$ の領域で Nu が急激に減少しているのは、図 12 と同様、壁面の影響が現れるためである。

図 14 は、融解相内のフローパターンを No-fin, Fin P-30, P-12 について示したものである。流れの可視化は、直径 0.03 mm 以下のアルミニウム粉末を混入させ、スリット光を入射させて写真撮影した。また、Fin P-30, P-12 については、上下方向に並んだフィン列を含む面にスリット光を入射させた場合と、これら

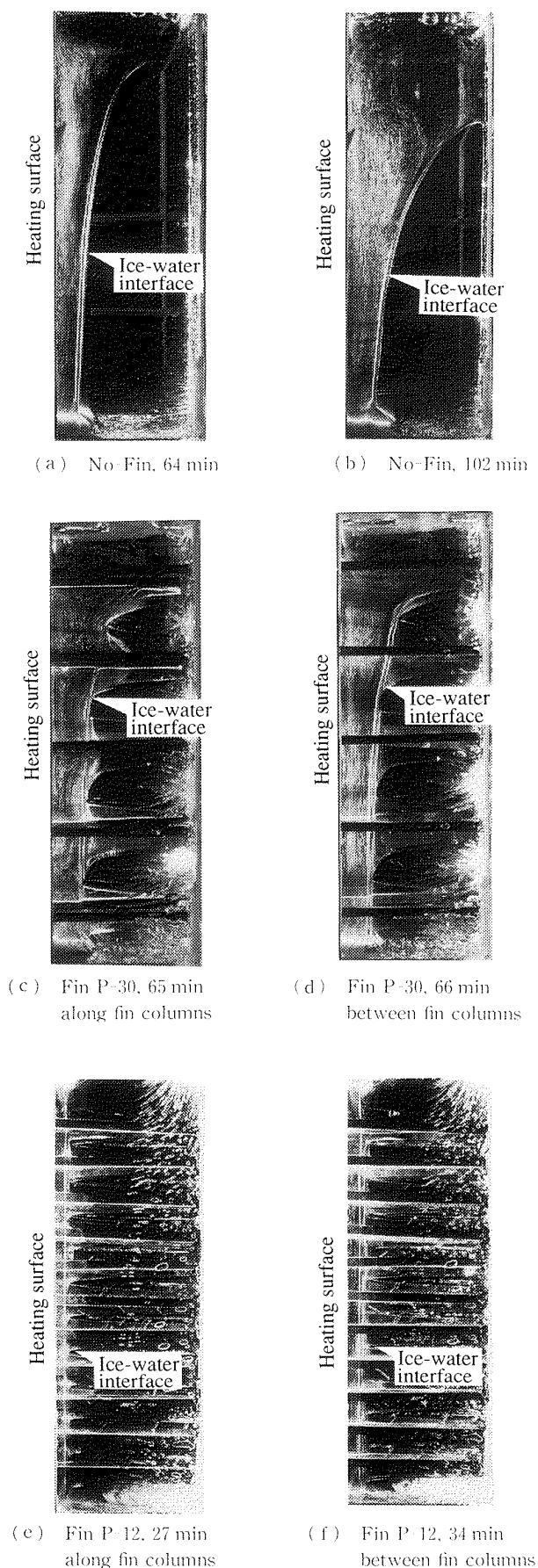


Fig. 14 Flow pattern in water and shape of ice-water boundary surface

のフィン列の中間部にスリット光を入射させた場合を示した。

No-finの場合、よく知られているように、融解によって生じた液相内の伝熱面下部で上向きの上昇流が発達して上部に達し、固液境界面上では逆に下降流となることがわかる。また、上部においては自然対流の滞留する様子も観察される。

Fin P-30のフィン列を含む面内では、伝熱面ばかりでなくフィン周囲からも融解が始まっていることがわかる。また、フィンの存在によってフィン間に小さな流れが発生し、伝熱面付近で生じた液相がフィンの根本付近でフィンに沿って流れ込むため、フィンの下部での融解域がフィン上部に比べて大きくなることも観察される。一方、フィン列間では、伝熱面に沿う自然対流はフィンの影響をあまり受けておらず、No-finの場合と大きな差異は見られない。Fin P-12の場合にも、伝熱面に沿う上昇流が観察されるが、その速度は小さい。フィン下部での融解領域は上部と同程度となり、フィンによる熱伝導が主体となることが示されている。一方、フィン列間の流れは、その速度は緩やかであるが、フィンの影響による乱れはあまり大きくなく、流れの様子はFin P-30と大差ないことがわかる。

4. 結 言

フィンなしおよび棒状フィン付垂直形伝熱面を用いて凝固・融解実験を行ったところ、以下の結論が得られた。

(1) 凝固過程では、フィン数の増加とともに相変化速度が大きくなった。また、熱伝導が支配的なため、凝固相内部の温度は単調な分布を示した。

(2) 融解過程においても、フィンの増加によって相変化速度は改善されたが、時間に対する融解率の変化は凝固過程の場合よりも直線的となった。また、液相内温度は自然対流によって均一化される傾向が見られたが、フィン付伝熱面の場合、やや成層化される傾向が見られた。

(3) フィンなしの場合、凝固および融解過程のどちらにおいても、伝熱面平均熱流束は相変化開始直後に急激に低下し、その後あまり変化しなくなる。しかし、フィンの設置によって熱流束の急激な低下はかなり改善された。

(4) 融解過程における自然対流熱伝達の寄与は、フィンなしの場合、80%に達するが、フィン付伝熱面では50%程度まで減少した。

文 献

- (1) Saito, A., Hong, H. and Hirokane, O., *Int. J. Heat Mass Transfer*, **35**-2(1992), 295-305.
- (2) 岡田昌志, 機論, **53**-487, B(1987), 1055-1060.
- (3) 笹口健吾, 機論, **58**-510, B(1989), 475-482.
- (4) 笹口健吾・武生裕之, 機論, **58**-549, B(1992), 1511-1517.
- (5) 海野紘治, 機論, **59**-557, B(1993), 236-242.
- (6) 海野紘治, 機論, **59**-558, B(1993), 571-577.
- (7) 平澤良男・濱田俊克・竹越栄俊, 機論, **60**-575, B(1994), 2491-2496.
- (8) 平澤良男・竹越栄俊・紺矢浩史, 熱物性, **8**-4(1994), 233-237.
- (9) Holman, J. P. (平田賢訳), 伝熱工学, 上巻, (1982), 238, プレイン図書.