

水平加熱円管まわりの氷の融解挙動

(第二報：加熱管2本, 3本の場合について)

佐々木 章・岡見 昌紀*

Melting of Ice around Horizontal Heated Cylinder (2nd report, For two or three heated pipes)

Akira SASAKI and Masaki OKAMI*

(2004年11月29日受理)

Process during melting from the horizontal cylinders of uniform surface temperature embedded in ice have been studied experimentally.

In this experiment, the horizontal cylinder was 20mm in diameter, and the cavity was 260mm in height, 140mm in width and 20mm depth. The cylinder pitch was 2d regularly. Experiments were performed a vertically in-line array of equally spaced two or three cylinders. The temperature of the heated cylinder was changed from 5°C to 20°C. The shape of melt front of ice was photographed by the digital camera every 10 minutes. The volume of the melt was measured by tracing the melting layer on the graph paper and counting the number of the squares of it.

The heat transfer characteristics of melting ice around horizontal heated cylinders have been discussed in this report.

1. 緒言

エネルギーの有効利用が大きな課題となっている今日、電力需要平準化の観点から氷蓄熱システムが高層ビルなどで広く普及している。そのため、固相から液相へと相変化を伴う潜熱蓄熱に関する研究が多く行われている。これらの研究において、Bathelt^{(1),(2)}らは、パラフィン系流体を用いて、単一円管、二円管及び複数円管まわりの融解実験を行い、円管まわりの局所熱伝達特性について検討を加えている。笹口⁽³⁾らは、加熱管まわりの氷の融解実験を行い、水の密度逆転が融解挙動に及ぼす影響について検討を加えている。Herrmann and Viskanta⁽⁴⁾は、試験部に冷却ガスを送った場合の実験を行い、融解挙動、円管表面の局所熱伝達特性について実験を行っている。鳥越⁽⁵⁾らは、伝熱管表面に一定の熱流束を与えた場合の実験を行い、非定常時のヌセルト数 $Nu/Ra^{1/4}$ は時間に対し、一定値を示すことを

報告している。

また、相変化を伴わない場合の二重円管内の水の自然対流熱伝達特性に関する研究が Kuehn and Goldstein⁽⁶⁾によって調べられている。その結果、彼らはヌセルト数の無次元整理式を示した。

一方、前報⁽⁷⁾で著者らは、密閉容器内に水平単一円管を埋設した場合の氷の融解実験を行い、加熱管温度の影響及び融解領域内での熱伝達特性を明らかにした。しかし、実用化されている氷蓄熱システムの蓄熱層内には、多数の円管が配列されていることから、管群の場合の知見を得ることは重要と思われる。

そこで、本報では前報⁽⁷⁾に引き続き、密閉容器内に水平加熱管を2本、3本と垂直に配置した場合の氷の融解実験を行い、融解量、融解形状に及ぼす加熱管温度の影響および融解領域内での熱伝達特性について実験的検討を加えた。

記号

a : 熱拡散率 [m²/s]

* オムロンフィールドエンジニアリング株式会社

- B : 容器の奥行き [m]
- c : 比熱 [kJ/kgK]
- d : 加熱管直径 [m]
- Fo : フーリエ数
= at/r_p^2
- g : 重力加速度 [m/s²]
- L : 融解潜熱 [kJ/kg]
- n : 加熱管本数
- Nu : ヌセルト数 = Q_c/Q_s
- Q_c : 対流で輸送される熱量 [W]
= $L\rho dV/dt$
- Q_s : 伝導伝熱で輸送される熱量 [W]
= $\{2\pi B\lambda(T_h - T_o)\}/\ln(R'/r_p)$
- R : 融解界面半径 [m]
- R' : 平均融解界面半径 [m]
- Ra : レイレー数
= $g\beta(T_h - T_o)(R' - r_p)^3/\nu$
- r_p : 加熱管半径 [m]
- Ste : ステファン数
= $c(T_h - T_o)/L$
- t : 時間 [sec]
- T_h : 加熱管温度 [°C]
- T_o : 融解界面温度 [°C]
- V : 融解量 (体積) [m³]
- V_p : 加熱管体積 [m³]
- β : 体膨張係数 [1/°C]
- λ : 熱伝導率 [W/mK]
- ν : 動粘性係数 [m²/s]
- ρ : 密度 [kg/m³]

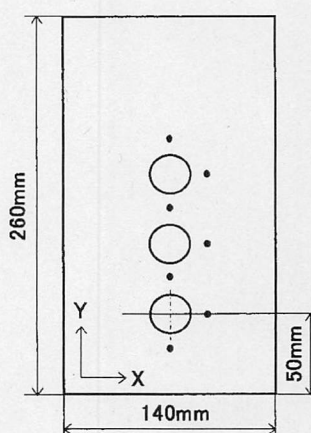


図1 試験部容器内寸法及び熱電対位置

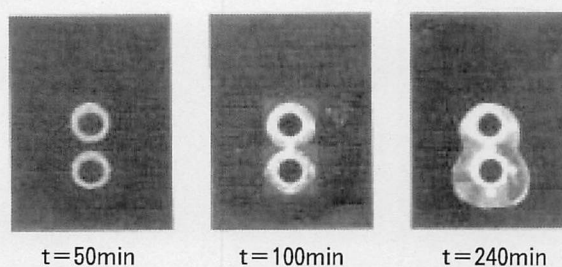


図2 融解面形状の経時変化 (n=2, T_h=5°C)

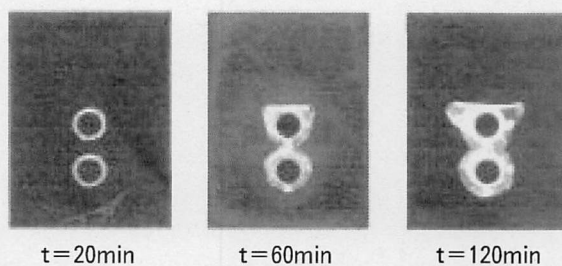


図3 融解面形状の経時変化 (n=2, T_h=10°C)

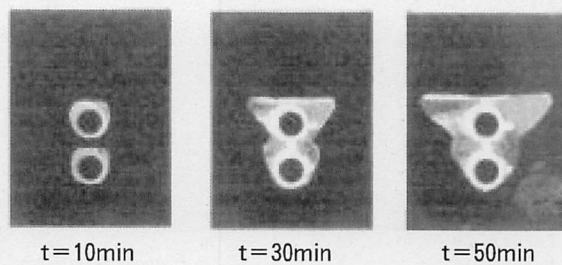


図4 融解面形状の経時変化 (n=2, T_h=20°C)

2. 実験装置及び方法

本研究で用いた実験装置ならびに実験方法については、前報⁷⁾で示したものと同様である。試験部容器内寸法及び熱電対位置を図1に示す。図に示した白円は直径d=20mmの加熱管であり、黒円は容器内温度分布の測定のため用いた熱電対である。この熱電対を加熱管表面から10mmの位置に取り付けた。また、加熱管表面温度を測定するため、加熱管上部及び下部表面にも熱電対を貼り付けた。管ピッチは2dとした。加熱管温度T_hは5°C、10°C、15°C、20°Cとし、加熱管本数は2本、3本とした。なお、試験部容器内に埋設した加熱管を容器上部から順に第一円管、第二円管、第三円管と呼ぶことにする。融解面形状、融解量を求めるため、融解領域を10分間隔で、OHP用紙にトレースするとともにデジタルカメラで撮影した。

3. 実験結果

3.1 融解面形状の経時変化

図2に、加熱管本数n=2、加熱管温度T_h=5°Cの場合の融解面形状の経時変化を示す。写真の黒い部分が氷、白い部分が融解領域、その中の黒い円が加熱管である。実験開始t=50minでは、各加熱管

水平加熱円管まわりの水の融解挙動

まわりにほぼ同心円状に融解層は独立して成長しており、自然対流の影響はほとんど認められない。したがって、この段階での熱移動は伝導伝熱で行われていると考えられる。時間が経過し $t=100\text{min}$ になると、第一円管下部の領域で融解層が第二円管上部の融解層と接触していることがわかる。更に時間が経過し $t=240\text{min}$ になると、第一円管下部に比べ、第二円管下部の領域で融解層は成長している。これは、水の密度逆転によって加熱管まわりに下降流が形成されるためと思われる。すなわち、加熱管近傍で約 4°C (最大密度点) に加熱された水は、密度が大きくなり、加熱管表面に沿って下降する流れを形成することになる。第一円管まわりに沿って下降する水が、第二円管近傍で更に 4°C 付近まで加熱され、その水の流速が加速され、第二円管下部の融解界面に突き当たるため、下部領域の融解が促進されることになる。

$T_h=10^\circ\text{C}$ の場合 (図3), $t=20\text{min}$ では $T_h=5^\circ\text{C}$ の場合と同様に、各加熱管まわりにほぼ同心円状に融解層は成長している。時間が経過し $t=60\text{min}$ になると各加熱管まわりに独立していた融解層は既に結合していることがわかる。更に時間が経過して $t=120\text{min}$ になると、第一円管上部領域で著しく融解層が成長している。これは、独立融解層が結合し、融解領域の幅が広がると、加熱管近傍の水は 4°C 以上となり、密度が小さくなるためと考えられる。

$T_h=20^\circ\text{C}$ の場合 (図4), 融解の初期 ($t=10\text{min}$) から加熱管に沿って上昇する流れの影響が強くなり、融解層は各加熱管上部領域で成長していることがわかる。時間が経過し $t=30\text{min}$ になると、第二円管上部で融解層は既に結合していることがわかる。更に時間が経過して $t=50\text{min}$ になると、第二円管下部に比べ、第一円管上部横の領域で融解層は著しく成長している。また、第二円管下部の融解形状は同心円状になっており、 4°C 以下の領域に生ずる流れの影響はほとんど認められない。

図5に、加熱管本数 $n=3$ の場合の実験終了時の

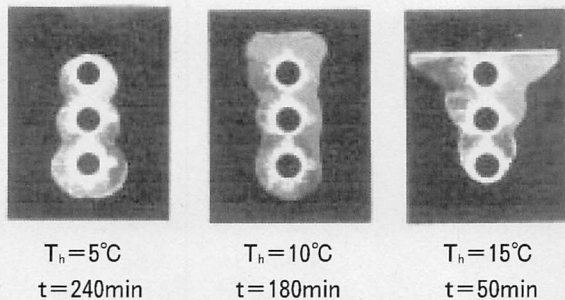


図5 実験終了時の融解面形状 ($n=3$)

融解面形状を示す。 $T_h=5^\circ\text{C}$ の場合、 $n=2$ の場合と同様に 4°C 以下の下向きの流れの影響が大きく、第一円管から第三円管に向かって融解領域が増大している。 $T_h=10^\circ\text{C}$ の場合、各加熱管まわりの全体で融解領域が増大している。更に $T_h=15^\circ\text{C}$ の場合は、 $n=2$ における $T_h=20^\circ\text{C}$ の場合と同様に、加熱管に沿って上昇する流れのため、上部円管まわりほど融解領域が増大している。

図6に、加熱管本数 $n=2$ とし、加熱管温度をパラメータとした場合の融解界面半径比 $R_{0^\circ}/R_{180^\circ}$ の経時変化を示す。縦軸は加熱管真上および真下における融解界面半径の比 $R_{0^\circ}/R_{180^\circ}$ 、横軸は無次元時間 $Fo \cdot Ste$ である。なお、 R の添字は角度を示し、加熱管上部を 0° 、加熱管下部を 180° とし、時計方向に角度を変化させたときの値である。図より $Fo \cdot Ste$ が非常に小さいとき、加熱管温度に関係なく $R_{0^\circ}/R_{180^\circ} \approx 1$ を示している。このことから、いずれの加熱管温度の場合も融解の初期において、熱移動は伝導伝熱で行われたことがわかる。加熱管温度 $T_h=5^\circ\text{C}$ の場合、 $Fo \cdot Ste=0.25$ ($t=50\text{min}$) 以降、 $R_{0^\circ}/R_{180^\circ}$ は徐々に減少している。これは、図1から知られるように、加熱管に沿って下降する流れの影響が大きいことを示している。 $T_h=10^\circ\text{C}$ の場合、 $Fo \cdot Ste=0.41$ ($t=40\text{min}$) 以降 $Fo \cdot Ste=1.0$ 付近 ($t=100\text{min}$ 頃) まで $R_{0^\circ}/R_{180^\circ}$ は減少し、 $Fo \cdot Ste > 1.0$ では緩やかに増大する傾向を示している。これは、融解の初期においては、加熱管に沿って下降する流れの影響が強く、第二円管下部領域の融解が促進されることを示す。それに対し、 $Fo \cdot Ste > 1.0$ となると、融解領域の幅が広くなり、加熱管近傍の流体温度が 4°C 以上となり、密度が小さくなって上部に流れる上昇流が強くなるため、上部領域の融解が促進されるものと思われる。更に時間が経過し、 $Fo \cdot$

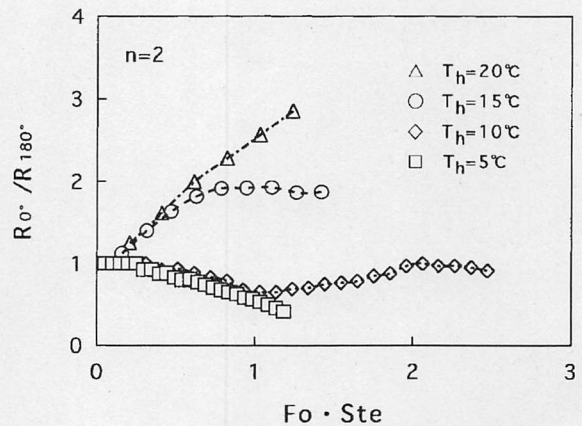


図6 融解界面半径比 $R_{0^\circ}/R_{180^\circ}$ の経時変化

Ste=2 以上 (t=200min 以降) となると, $R_{0^{\circ}}/R_{180^{\circ}}$ は増加し, その値は 1 に近づく。これは, 融解領域上部に空気層ができ, $R_{0^{\circ}}$ の増大が妨げられたためと考えられる。加熱管温度が高い $T_h=15^{\circ}\text{C}$, 20°C の場合, 融解開始直後から $R_{0^{\circ}}/R_{180^{\circ}}$ は急激に増大しており, 加熱管に沿って上昇する流れの影響が大きいことを示している。また, $T_h=15^{\circ}\text{C}$ の場合, $Fo \cdot Ste=0.79$ (t=50min) 以降, 加熱管上部に生じた空気層の影響を受け, 融解領域上部 ($R_{0^{\circ}}$) での融解層の成長が抑制されていることがわかる。

加熱管本数 $n=3$ の場合 (図 7), $n=2$ の場合と同様の傾向を示していることがわかる。しかし, $T_h=15^{\circ}\text{C}$, 20°C の場合, $n=2$ の場合に比べ, $R_{0^{\circ}}/R_{180^{\circ}}$ の値は小さくなる。これは, 加熱管本数が増えると, 加熱管上部の融解界面半径 $R_{0^{\circ}}$ は小さくなることを示している。

3.2 融解量の経時変化

図 8 に, 加熱管本数 $n=3$ とし, 加熱管温度をパ

ラメータとした場合の融解量の経時変化を示す。縦軸は加熱管 1 本当りの無次元融解量 V/V_p , 横軸は無次元時間 $Fo \cdot Ste$ である。図よりいずれの温度の場合も時間の経過とともに, 融解量は直線的に増大していることがわかる。また, 加熱管温度が高いほど融解量は増大するが, $T_h=5^{\circ}\text{C}$ と $T_h=10^{\circ}\text{C}$ の場合の融解量はほぼ等しくなる。これは, $T_h=10^{\circ}\text{C}$ の場合, 融解領域内での対流の強さが $T_h=5^{\circ}\text{C}$ の場合とほぼ等しいためと考えられる。なお, 加熱管本数 $n=2$ の場合も同様の結果が得られた。

図 9 に, 加熱管温度 $T_h=5^{\circ}\text{C}$ の場合の加熱管本数の増加に伴う全融解量の増加量を調べた結果を示す。 ΔV は, 加熱管が 1 本増えたことによる融解量の増加分である。すなわち, $n=2$ の場合の ΔV は, 加熱管 2 本のときの全融解量から加熱管 1 本のときの全融解量を差し引いた値であり, $n=3$ の場合は, 加熱管 3 本のときの全融解量から加熱管 2 本のときの全融解量を差し引いた値である。また, $n=1$ の場合の ΔV は, 加熱管 1 本の場合の全融解量であ

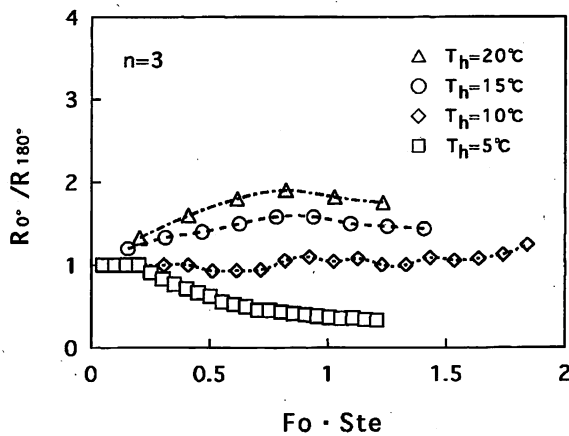


図 7 融解界面半径比 $R_{0^{\circ}}/R_{180^{\circ}}$ の経時変化

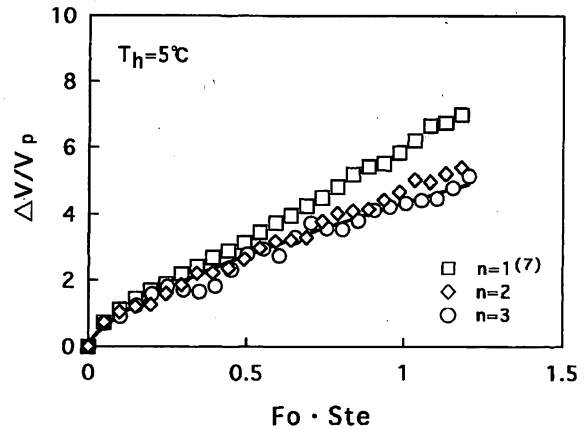


図 9 加熱管本数の増加に伴う全融解量の増加量

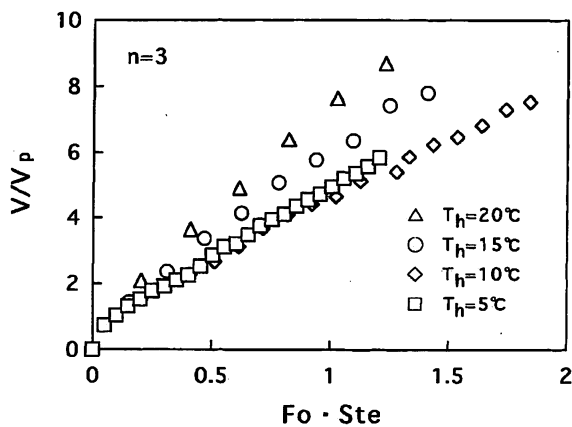


図 8 融解量の経時変化

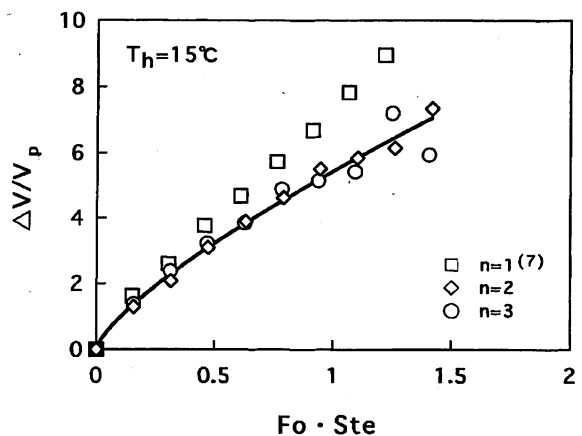


図 10 加熱管本数の増加に伴う全融解量の増加量

る。なお、加熱管1本の場合の全融解量は前報⁽⁷⁾によるものである。図より、 $Fo \cdot Ste=0.3$ までは各加熱管まわりの融解層が独立して存在するため、加熱管本数による ΔV の違いは見られない。しかし、 $Fo \cdot Ste=0.3$ 以降、 $n=2, 3$ と増えると ΔV は減少する。また、加熱管が1本から2本に増えた場合の ΔV と、加熱管が2本から3本に増えた場合の ΔV とは違いは見られない。更に $T_h=15^\circ\text{C}$ の場合(図10)も、 $T_h=5^\circ\text{C}$ の場合と同様のことがいえる。また、 $T_h=10^\circ\text{C}, 20^\circ\text{C}$ の場合についても $T_h=5^\circ\text{C}$ の場合と同様の結果が得られた。

3.3 熱伝達特性

本報でヌセルト数 Nu は、前報⁽⁷⁾のように実験で得られた融解領域を平均融解界面半径 R' の同心円管に置き換え、Kuehn and Goldstein^{(6), (8)}と同様に定義した。図11に、加熱管本数 $n=2$ の場合のヌセルト数 Nu の経時変化を示す。図より加熱管温度が高い $T_h=15, 20^\circ\text{C}$ の場合、 Nu は大きい値を示すことがわかる。また、いずれの加熱管温度においても、融解開始直後は Nu が急激に増大するが、 $Fo \cdot Ste$ の増大とともに、その増加割合は緩やかになることがわかる。しかし、 $T_h=5^\circ\text{C}, 10^\circ\text{C}$ の場合、図7に示した融解量の結果と同様、 Nu はほぼ等しい値となる。これは、 $T_h=5^\circ\text{C}$ の場合と $T_h=10^\circ\text{C}$ の場合とで、融解領域内での対流の強さがほぼ等しいためと考えられる。

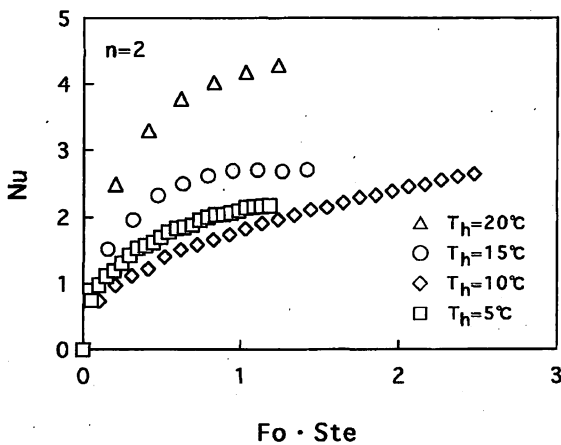


図11 ヌセルト数 Nu の経時変化

本報では、前報と同様にヌセルト数 Nu をレイレー数 Ra の関数として無次元整理することを試みた。図12に、加熱管本数 $n=2, 3$ の場合について整理した結果を示す。比較のために、前報による加熱管本数 $n=1$ の結果を同図に示す。図に示すように、

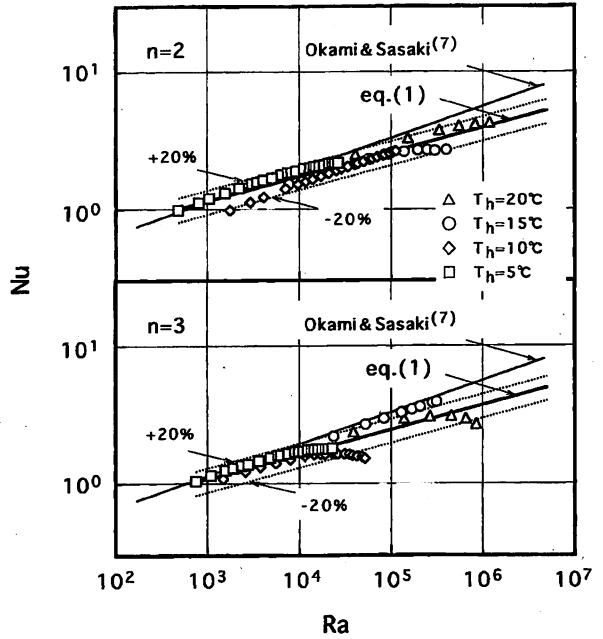


図12 Nu と Ra の関係

本実験結果は $n=2, 3$ どちらの場合も式(1)の形で表され、 $\pm 20\%$ の範囲で整理できることがわかる。

$$Nu = a \cdot Ra^m \tag{1}$$

式(1)を用いた各加熱管本数の場合の係数 a, m ならびに Ra の範囲の一覧表を表1に示す。また、比

表1 係数 a, m とレイレー数 Ra の範囲

n	a	m	Ra
1	0.23	0.23	$10^3 \sim 10^7$
2	0.33	0.18	$10^3 \sim 10^6$
3	0.31	0.18	$10^3 \sim 10^6$

較のため、前報⁽⁷⁾で示した $n=1$ の場合の結果も示す。

表1より $n=2, 3$ の場合は、 $n=1$ の場合に比べ Ra の範囲が 10^7 から 10^6 へと小さくなっていることがわかる。更に、図より $n=2, 3$ の場合は $n=1$ の結果に比べ小さくなっていることから、係数 m も小さくなり、 Nu の Ra に対する増加割合は減少することがわかる。これは、融解の初期に各加熱管まわりに独立して存在していた融解層が、時間の経過とともにそれぞれ結合したことにより、融解量の増加割合が減少し、対流による効果が弱まったためと考えられる。

融解層厚さ ($R' - r_p$) も、前報⁽⁷⁾と同様、無次元時間 $Fo \cdot Ste$ およびレイレー数 Ra のべき乗に比例するものと考えて、無次元整理を試みた。実験デー

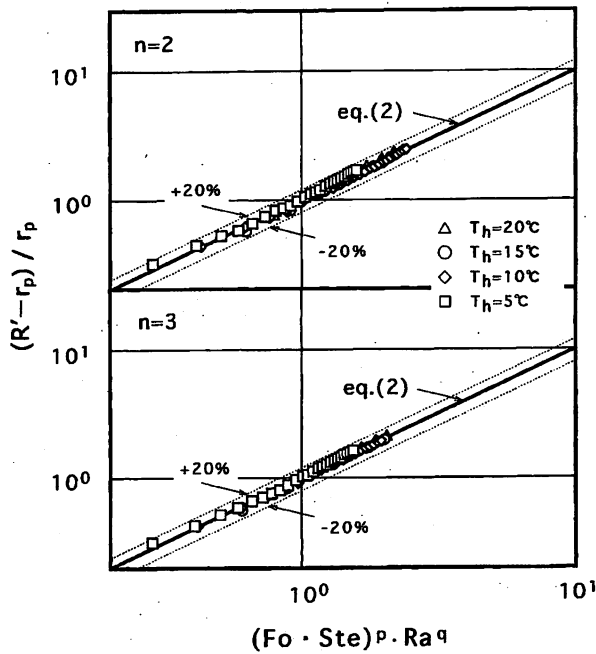


図13 $(R'-r_p)$ と $Fo \cdot Ste, Ra$ の関係

タに対して最小二乗法により、 $Fo \cdot Ste, Ra$ の関数として整理した結果を図13に示す。縦軸は、融解層厚さ $(R'-r_p)$ を加熱管半径 r_p で無次元化した値である。図に示すように、 $n=2, 3$ どちらの場合も $(R'-r_p)$ は、 $Fo \cdot Ste, Ra$ の増大に伴い直線的に増大していることがわかる。また、いずれの加熱管本数の場合も実験結果は式(2)の形で表され、 $\pm 20\%$ の範囲で整理できることがわかる。

$$\frac{(R'-r_p)}{r_p} = a \cdot (Fo \cdot Ste)^p \cdot Ra^q \quad (2)$$

式(2)を用いた各加熱管本数の場合の係数 a, p, q ならびに Ra の範囲の一覧を表2に示す。また、比較のため、前報⁽⁷⁾で示した $n=1$ の場合の結果も

表2 係数 a, p, q とレイレー数 Ra の範囲

n	a	p	q	Ra
1	0.62	0.43	0.094	$10^3 \sim 10^7$
2	0.67	0.42	0.076	$10^3 \sim 10^6$
3	0.67	0.41	0.076	$10^3 \sim 10^6$

示す。表2よりいずれの加熱管本数の場合も係数 a, p, q はほぼ等しいため、 $(R'-r_p)$ の $Fo \cdot Ste, Ra$ に対する増加割合はほぼ等しくなる。

4. 結 言

本報では前報⁽⁷⁾に引き続き、密閉容器内に水平加熱管を2本、3本と埋設した場合の氷の融解実験を行い、融解量、融解形状に及ぼす加熱管温度の影響および融解領域内の熱伝達特性について実験的検討を加えた。その結果、本実験範囲内で以下のことが明らかになった。

- (1) 加熱管温度 $T_h=5^\circ\text{C}$ では、いずれの加熱管本数の場合も加熱管下部の領域で融解層が成長する。 $T_h=10^\circ\text{C}$ では、いずれの加熱管本数の場合も加熱管まわりの全体で融解層が成長する。温度が高い $T_h=15, 20^\circ\text{C}$ では、いずれの加熱管本数の場合も加熱管上部の領域で融解層が成長する。
- (2) 加熱管2本、3本の場合の加熱管1本当たりの融解量 V/V_p は、加熱管まわりに独立して存在していた融解層が接触し結合すると、加熱管1本の場合に比べ減少する。
- (3) ヌセルト数 Nu の無次元整理式は、加熱管2本、3本の場合、加熱管1本の場合に比べ、係数が小さくなるため Nu の Ra に対する増加割合は小さくなる。
- (4) 融解層厚さ $(R'-r_p)$ の無次元整理式は、いずれの加熱管本数の場合も係数がほぼ等しいため、 $(R'-r_p)$ の $Fo \cdot Ste, Ra$ に対する増加割合はほぼ等しくなる。

参考文献

- (1) Bathelt, A. G. and Viskanta, R., Int. J. Heat Mass Transf., 23-11(1980), 1493.
- (2) Bathelt, A. G. et al., Trans. ASME, J. Heat Transf., 101-3(1979), 453.
- (3) 笹口, 草野, 北川, 機論 (B), 61-581(1995), 208.
- (4) Herrmann, J., Leidenfrost W. and Viskanta, R., Chem. Eng. Commun., 25(1984), 63.
- (5) 鳥越, 仲沢, 山下, 第26回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (II), E215(1989), 580.
- (6) Kuehn, T. H. and Goldstein, R. J., Fluid Mech., 74(1976), pp. 695-719.
- (7) 岡見, 佐々木, 秋田工業高等専門学校研究紀要 39(2004.2), pp. 1-8.
- (8) 関 信弘 編集, 伝熱工学, 森北出版株式会社, (1997), pp. 106-108.