流水中におかれた1行管群周りの凍結*
(第1報, 管ピッチ60 mmの場合)平田 哲夫*¹, 横澤 成昭*², 涌澤 篤*³Formation of Linked Ice Layer around Isothermally Cooled Cylinders
Arranged in a Parallel Line with Water Flow
(1st Report, For 60 mm Cylinder Pitch)

Tetsuo HIRATA, Shigeaki YOKOSAWA, and Atsushi WAKUSAWA

Ice formation phenomena around isothermally cooled cylinders which were arranged in a parallel line with water flow were examined experimentally. Under the conditions of a low Reynolds number and a large cooling temperature ratio, it was shown that the cylinders are linked by an ice layer, and the amount of ice formed around the cylinders is much more than that for a single cylinder. A correlation equation was proposed for the amount of linked ice around cooled cylinders. It was found that the local heat transfer coefficient on the linked ice surface shows periodic changes, decreasing and increasing in the direction of flow; and the average value of the local Nusselt number has the same characteristic as that on a flat plate in a turbulent flow. A non-dimensional parameter which represents how efficiently the cylinders can work as a thermal energy storage system was introduced.

Key Words: Phase Change, Convective Heat Transfer, Ice Formation, Thermal Energy Storage, Aligned Cylinders, Linked Ice

1. 緒 言

強制対流中の凍結問題としては、一般に冷却平板上や円管内における凍結現象について従来から多くの研究がなされているが、円管周りの凍結を取扱ったものは少ない現状である。円管周りの凍結現象は、例えば冷凍装置における冷却管周りの着氷による熱効率の低下あるいはアイスバンク方式⁽¹⁾といわれる氷による蓄冷システム⁽²⁾などに関連があるが、これらにおいては管群周りの凍結問題として取扱わねばならない。

流れに直交する単一円管周りの凍結については、岡田ら⁽³⁾が実験と理論解析を行い定常状態における凍結層形状を整理する無次元数を見いだしている。また稲葉ら⁽⁴⁾、Cheng ら⁽⁵⁾は凍結層周りの平均熱伝達率を整理し、さらに円管周りの凍結層を蓄冷媒体としてとらえその蓄冷熱量をまとめている。一方、管群周りの凍結に関してはほとんど報告されておらず、わずかに Lock ら⁽⁶⁾が流れをせき止める目的のもと、2本の冷却円管を適当な間隔で流れに直角方向に並べた場合の

円管間の凍結層成長について調べている。管群周りの凍結現象については、凍結量が多い場合にはそれぞれの冷却管が凍結層で連なってしまい、単一円管周りの凍結挙動とは全く異なるものとなる。

本研究では、管群周りの凍結における基礎的段階として、流れに直交しておかれた1行10段の冷却円管群を取り上げ、円管周りの凍結挙動や熱伝達率さらに蓄冷熱量について実験的に調べた。なお、本報では管ピッチが60 mmの場合に限定して述べる。

2. 主 な 記 号

A_i : 円管単位長さ当たりの凍結量

A^* : 無次元凍結量, 式(9)

C_{pw} : 水の比熱

d : 円管外径

D : 凍結層平均厚さ, 図1

h_x : 局所熱伝達率

H : 無次元数, 式(8)

L : 円管群有効長さ, 図1

L_i : 水の凝固熱

$Nu_{m,L}$: 平均ヌッセルト数, $h_m L / \lambda_w$

Nu_x : 局所ヌッセルト数, $h_x x / \lambda_w$

p : 円管ピッチ

* 昭和62年8月21日 第65期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和62年1月28日。

*¹ 正員、信州大学工学部(〒380 長野市若里500)。

*² 学生員、信州大学大学院。

*³ ほくさん(株)(〒060 札幌市中央区北3西1)。

λ^* : 氷と水の熱伝導率比, λ_i/λ_m

熱伝導率, y_i は凍結層表面の座標である。

5. 実験結果と考察

5・1 凍結挙動と熱伝達 図3には定常状態における凍結層形状の代表的な例を示す。流れは左から右方向であり円管周囲の白い部分が凍結層である。

図3(a)は流れが比較的速く、無次元冷却温度 θ が小さい条件である。この場合凍結層はそれぞれの円管に独立に形成されるが、凍結層形状は前後の円管の影響を受けていることがわかる。例えば左より第5円管に注目すると、流れ方向に対して円管前面部分に凍結層が突き出し局所的に厚くなっている。これは円管間の流れが凍結層成長に伴いよどんだ状態になっていき、局所的に熱伝達が低下するためと考えられ、単一円管周りの凍結現象⁽³⁾⁽⁴⁾と大きく異なる点である。この円管間の凍結層の突き出しは流れをさらによどませるため、突き出し量はある限界を超えると加速的に大きくなる性質をもっている。図3(a)の実験条件は、円管ピッチ 60 mm において全円管の凍結層が独立に存在するほぼ限界の条件である。なお、この場合凍結層は流れ方向に対して必ずしも左右対称とはならない傾向がみられた。

図3(b)は図3(a)より凍結層が少し厚くなる条件で得られた結果である。主流の水温が冷却円管をよぎるたびに低下するため、この場合第5円管以降の下流側で円管が凍結層により連なっている。この場合のような凍結層が比較的薄い条件のもとでは、円管間の凍結層はあまり発達しないため凍結層表面にはく離流が存在し、図3(b)第5円管以降にみられるような円管

間の凍結層のくびれ現象がみられる。

図3(c)は円管すべてが連なった例を示している。凍結層表面は、図3(b)でみられたようなく離流によるくぼみはみられないが、円管ピッチに相当した波長の正弦波的形状を呈している。これは凍結層表面より円管への熱伝導による熱流束が円管の配置に大きく影響され局所的に異なるためである。また凍結層厚さは下流側で厚くなっており、流れによる熱伝達の影響も受けている。なお、このように円管が連なる場合には、左右対称の凍結層が形成された。

図4には凍結層形状 y_i , 局所凍結層厚さ $\delta(x)$, 局所熱伝達率 h_x を直交座標で示す。横座標の局所的に線が太い部分は円管の位置を示している。図4(a)は凍

図2 一定境界要素の分割数

(a) $Re_d=3170$,
 $\theta=0.98$

(b) $Re_d=2310$,
 $\theta=1.17$

(c) $Re_d=2060$,
 $\theta=2.44$

図3 凍結挙動 (流れは左から右方向)

結層が独立に存在する場合であり、凍結量が比較的小さい。局所熱伝達率は Re_d が比較的小さいため、従来管群に対して得られているような⁽⁹⁾第1円管のみが小さく他はほぼ同じ値となる傾向とはならない。図4(a)の場合、第2円管は第1円管ではなく離れた流れの再付着領域に位置しているため局所熱伝達率が大きくなっているが、第3円管以降では流れが円管をよぎることによる流れの乱れの増加のため下流ほど h_x が大きくなる傾向となっている。

図4(b)は第3円管以降が連なっている場合である。凍結層形状は第3円管以降で正弦波的形状を呈するが、その振幅は、局所凍結層厚さ $\delta(x)$ に注目する

と、第1, 2円管と第3円管以降で大きな相違がみられる。すなわち、凍結層で連なると円管間が凍結層で埋められ、それが全体の凍結量に占める割合が非常に大きいことが、第3円管以降に示されている。このことは管群における氷蓄冷の大きな特徴であり凍結凍結の有効性を表している。第3円管以降の局所熱伝達率については、もはや図4(a)のように下流側で大きくなる傾向とはならず増減を繰返しながら減少する。

図4(c)はすべての円管が連なる場合であり、図4(a)の凍結層厚さ $\delta(x)$ と比較してみると、凍結凍結の場合の凍結量がいかに多いかがわかる。また凍結層が下流側で徐々に厚くなる傾向や局所熱伝達率が増減を繰返しながら減少するようすが明らかである。本研究では主に図4(c)のような場合に注目している。

5.2 局所ヌッセルト数 冷却円管が凍結層により連なる場合、凍結層表面の熱伝達率はもはや円管群のそれとしては取扱えず、凍結層はむしろ平板上に発達する形状に近い。本報においては、原点を第1円管前面端(図1参照)にとり、平板上の熱伝達と同様なまとめ方を試みた。その結果を図5に示す。ここで横座標の Re_x は代表速度に凍結層外側の平均速度 u_e を用いている。本実験の Re_x の範囲は、平板上であれば遷移領域や層流領域に相当しているにもかかわらず、 Nu_x は局所的な増減を繰返しながらも全般的には乱流平板のこう配にそって変化していることがわかる。これは波状凍結層による流体の局所的な加速、減速の繰返しが、流れを不安定にするためであろうと推測される。

なお、本実験に用いた冷却円管の長さは直径に対し

図4 凍結層形状と局所熱伝達率

で十分長いとはいえず、管群直後の流れは側壁の影響を受けている可能性がある。この点については、図5の Nu_x の Re_x に対する変化が全円管にわたって一貫した傾向を示していることより、側壁の影響は波状凍結層表面の流れに対して、この場合小さいと判断した。

5.3 蓄冷効果 円管周りに氷蓄冷を行う場合、円管での吸引熱量に対する蓄冷量の多少の程度を表す指標、すなわち、円管による吸引熱量 q_w に対する蓄冷熱量 q_i の割合 q_i/q_w が重要なパラメータと考えられ、ここではこれを蓄冷効果と称することとする。単位時間当たりの蓄冷熱量は、円管周りの凍結量を円管単位長さ当たり A_i (m^3/m) とし顕熱を潜熱に対して無視すると次式で表される。

$$q_i = \gamma_i L_i A_i \dots (2)$$

ここに γ_i , L_i はそれぞれ氷の比重量と凝固潜熱である。一方円管よりの吸引熱量は、定常状態においては流体より凍結層界面への伝達熱量に等しいから、円管単位長さ当たり

$$q_w = 2 \int_0^L h_x (T_\infty - T_f) dx \dots (3)$$

と表される。ここで L は円管群の有効長さ(図1参照)であり、式(2)右辺の2倍は円管左右の凍結層を意味している。図5において、凍結層のヌッセルト数は全体的には乱流平板の傾向を示すことより、ここではまず乱流平板上の凍結層についての蓄冷効果を導出し、主要な無次元パラメータを考察する。乱流平板上の凍結量は左右両面を考えると次式で与えられる。

$$A_i = 2 \int_0^L \delta(x) dx \dots (4)$$

ここに

$$\delta(x) = \lambda^* \theta x / Nu_x \dots (5)$$

である⁽¹⁰⁾。また乱流平板の Nu_x としては $5 \times 10^5 < Re_x$

$< 10^7$ に対する次の簡易式⁽¹¹⁾を用いる。

$$Nu_x = 0.0296 Re_x^{0.8} Pr^{1/3} \dots (6)$$

式(2)~(6)より乱流平板上に成長する凍結層の蓄冷効果は次式で表される。

$$q^* = q_i/q_w = 620H \dots (7)$$

H は蓄冷効果を支配する無次元量で、次式で表される。

$$H = \frac{\lambda^* \theta}{Nu_{m,L}^2 C_{pw} (T_\infty - T_f)} \frac{L_i}{L} \dots (8)$$

ここに λ^* は氷と水の熱伝導率比であり、水の物性値は $0^\circ C$ の値を用いた。 $Nu_{m,L}$ は $x=0 \sim L$ の平均ヌッセルト数である。式(8)右辺は無次元蓄冷熱量を意味している。

図6には式(8)を座標系にとった蓄冷効果の結果を示す。○印は凍結層が図3(a), (b)のように独立している場合である。本実験データは良い相関を示し、 H が大きくなると蓄冷効果が増加することがわかる。すなわち H が大きくなると吸引熱量に対する蓄冷量が増加することとなる。一方乱流平板との比較について考えてみると、本実験の円管群のほうが q^* の値が50%以上大きくなっている。このことは、平板上に蓄冷するよりも円管群のほうが、同じ吸引熱量に対して、より効果的であることを示している。以上のことより、式(8)の無次元パラメータ H は蓄冷効果を考察するうえで有効な無次元量であることがうかがえる。従来蓄冷に関する研究は、無次元凍結量についての考察がほとんどであるが、このような吸引熱量に対する蓄冷量の割合を考えることは、効率的な蓄冷装置の設計などに関連しており重要なことと思われる。

5.4 凍結量の整理 凍結量の無次元表示については、従来単一円管周りの凍結層の場合⁽⁵⁾、円管相当体積の凍結量に対して無次元化されているが、ここでは次式で定義する。

図5 凍結層の局所ヌッセルト数

図6 蓄冷効果

図7 単一円管周りの凍結量との比較

$$A^* = \left(A_i + \frac{\pi d^2 L}{4p} \right) / \frac{\pi d^2 L}{4p} = 4p A_i / \pi d^2 L + 1 \quad (9)$$

ここに p は円管ピッチである。

図7には単一円管に対して得られた Cheng ら⁽⁵⁾の結果と比較してある。横座標は岡田ら⁽³⁾により求められた単一円管周りの凍結量を整理するパラメータである。図7の○印は凍結層が独立している場合を示しており、 Re_d が大きいと凍結凍結とはならないため凍結量が減少し、単一円管の値に近づく傾向がみられるが、 Re_d が小さい場合は単一円管の2倍以上の凍結量を示している。また、本実験結果は単一円管に対するパラメータ Re_d / θ^2 では整理できないことがわかる。

ここで再び図5の結果をもとに、凍結層表面が乱流熱伝達に支配されているとすれば、凍結量について以下のように考えることができる。仮に円管ピッチがその限界まで減少したとすると、巨視的に円管群は平板とみなすことができ、凍結層厚さは乱流平板上に発達するものより推測できるであろう。式(4)~(6)を式(9)へ代入し、 $Re_L = Re_d L / d$ を用いると次式が得られる。

$$A^* = 292 (Re_d^{0.8} / \theta)^{-1} + 1 \quad (10)$$

ここに $Pr = 13$ とした。式(10)は、円管群に対する式(9)へ乱流平板上の凍結量を代入して得られているので、右辺の係数や指数にはあまり意味がないが、無次元量 $Re_d^{0.8} / \theta$ は A^* を支配する物理量と考えられる。

図8はこれらのパラメータを用いて整理したものである。本実験範囲においては、凍結層が部分的に独立する場合のデータも含めて良い相関を示している。また図8には、いったん凍結層を厚くし、融解させながら定常状態へ到達した結果(△印)も示してある。観察によれば、同じ実験条件であっても、成長しながら定常状態になる場合は独立した凍結層となるが、融解しながらの場合は凍結凍結となる傾向がみられた

図8 凍結量の無次元量

が、これは凍結層が連なる限界条件近傍において局部的に起こることであり、円管群全体としては、図8にみられるようにその違いはほとんど認められなかった。

すべてのデータに対して、最小二乗法を用いて次の実験式を求めた。

$$A^* = 11.9 (Re_d^{0.8} / \theta)^{-0.324} \quad (11)$$

ただし適用範囲は $34 < Re_d^{0.8} / \theta < 770$ とする。式(11)は、 $A^* = 1$ が漸近値となるよう定めるべきであるが、本実験範囲では漸近の程度が明らかではないため、本報ではこれにとどめておく。

6. 結 言

流れに直交しておかれた1行10段の冷却円管周りに形成される凍結層の凍結挙動、凍結した凍結層の熱伝達、蓄冷効果、凍結量などについて実験的に調べ、本実験範囲で以下の結論を得た。

(1) 凍結層表面の熱伝達率は局所的に規則的な増減を示しながらも、凍結凍結層全体としては平板上の乱流熱伝達と同様な傾向を示すことがわかった。

(2) 蓄冷の効率の良さを表す無次元量として、式(7)に示す蓄冷効果を導入しその有効性を示した。また、この蓄冷効果は式(8)で表される無次元量 H で規定されることを明らかにした。

(3) 凍結凍結層では、凍結層が円管間を連なることによる凍結層の増加が著しく、単一円管周りの場合より2倍以上大きくなること、また無次元凍結量は式(11)で整理できることを示した。

なお、円管ピッチ変化の影響や管群の圧力損失の変化などは今後の課題である。

文 献

- (1) 高田, 冷凍, 59-680 (昭59), 61.

- (2) 宅, 冷凍, 59-680 (昭59), 54.
 - (3) 岡田・ほか4名, 機論, 44-378 (昭53), 624.
 - (4) 稲葉・Cheng, K. C., 冷凍, 58-663 (昭58), 13.
 - (5) Cheng, K. C., ほか2名, *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 103-4 (1981), 733.
 - (6) Lock, G. S. H. and Kaiser, T. M. V., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 28-9 (1985), 1689.
 - (7) Cheng, K. C. and Sabhapathy, P., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 107-3 (1985), 703.
 - (8) 田中・ほか2名共訳, 境界要素法入門, (昭58), 培風館.
 - (9) 相場・ほか2名, 機論, 47-422, B (昭56), 2004.
 - (10) Hirata, T., ほか2名, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 22-10 (1979), 1435.
 - (11) Holman, J. P., *Heat Transfer*, (1976), 180, McGraw-Hill.
-