鉛直方向に配置した水平二円管まわりの水の冷却・
凍結挙動の可視化と数値解析*中根 一朗^{*1}, 鳴海 明^{*1}, 柏木 孝夫^{*2}Experimental Visualization and Numerical Analysis of Cooling
and Freezing Processes of Water around Two Horizontal Tubes Placed
in Vertical Arrangement

Ichiro NAKANE, Akira NARUMI and Takao KASHIWAGI

This paper aims to clarify the cooling and freezing processes of water around two horizontal tubes placed in vertical arrangement, as the basic research for an ice-on-coil type of ice thermal storage system. When water is cooled and frozen in this system, natural convection occurs by the difference of local density. This natural convection governs the heat transfer characteristics and much influences the cooling and freezing processes. Especially, the flow pattern of this convection drastically changes on the way of cooling, because water has a maximum density at 4°C. This complex flow pattern was experimentally visualized by the laser measurement techniques, and calculated by the finite difference method with body fitted coordinate system. These experimental flow visualization and calculation were performed with varying the cooling rate. We could acquire some interesting relations among the flow pattern, the heat transfer characteristics, the release of supercooling and the growth of ice.

Key Words: Numerical Analysis, Flow Visualization, Heat Transfer, Natural Convection, Freezing, Supercooling

1. 緒言

家庭用空調機器の普及およびインテリジェントビルの増加に伴い、夏期のピーク電力需要の尖鋭化は益々顕著となり、現在地球環境問題までも視野にいられた深刻な社会問題になりつつある。このため電力需要の少ない夜間に余剰の電力を蓄熱しておき電力需要を平坦化しようとする技術が注目されており、大規模事業所に対しては蓄熱式エアコンの義務化すら検討されている。そこで、著者らは代表的な蓄熱システムの一つである氷蓄熱システムの中から、経済性および保守性と言った観点から最も普及している Ice-on-Coil 型⁽¹⁾の蓄熱槽（熱交換器）に着目した。

周知のように、水は約 4℃ で密度最大という特異性を持っているので、この熱交換器の管群間では下向きの流れと密度反転による上向きの流れが干渉し、凍結挙動に至るまでに複雑な流動様式で推移するものと思われる。また、過冷却解除後の氷の形成過程も冷却過

程での流動様式の推移パターンにより形成される温度場の履歴の影響を受けるものと思われる。したがって、熱交換器の設計指針を得るためには、管群まわりの水の冷却・凍結過程を詳細に理解しておくことが不可欠となる。そのため、これらの複雑な過程を理解するためには系統だった研究を行うことが肝要であること、および、本現象は鉛直方向への依存性が高いことを考え、その第一歩として、鉛直方向に配置した二円管まわりの場合を取り上げることにした。

定温に加熱された複数円管まわりの自然対流に関する報告^{(2) (3)}は数多いものの、密度反転を伴う複数円管まわりの水の冷却・凍結過程を扱った報告は非常に少ない。このため、最近になり幾つか報告されてはいるが^{(4) (5) (6)}、その絶対数が少なく、基本的なデータが不足している。特に、著者らが着目している『過冷却解除が生ずるまでに、密度反転を伴い円管間で干渉する自然対流はどのように推移するのか。またその推移パターンが過冷却解除と氷の形成や熱伝達特性にどのような影響を与えるのか。』という点に関しては、未だその大部分が明らかになっていない。

そこで本研究では、上記問題を明確にするために、

* 原稿受付 1998 年 4 月 27 日。

^{*1} 正員、神奈川工科大学(☎ 243-0292 厚木市下荻野 1030)。^{*2} 正員、東京農工大学工学部(☎ 184-8588 小金井市中町 2-24-16)。

冷却速度（冷却温度の勾配）をパラメータとして、可視化測定法による実験を行った。これにより、複数の流れが干渉し合う複雑な場でも、場全体をリアルタイムで把握できる。また、実験結果の妥当性を確認するために、冷却過程に対して数値解析を行い、その結果を実験結果と比較検討した。

これらにより、鉛直方向に配置した水平二円管まわりの水の冷却・凍結過程における特徴的流動様式の推移、その推移パターンと熱伝達特性および過冷却解除後の氷の形成過程との関係について、いくつかの知見を得ることができたので報告する。

主な記号

a : 熱拡散率

d : 冷却円管の直径 (15mm)

Fo : フーリエ数 ($= at/d^2$)

T : 温度 ($^{\circ}C$)、

無次元量は $T^* = (T - T_r) / (T_i - T_r)$

t : 冷却開始からの経過時間 (s)

Nu : ヌセルト数

Pr : プラントル数

Ra : d を代表長さとするレイリー数

θ : 円管下端からの角度 ($^{\circ}$) [図1参照]

ϕ : 流れ関数、無次元量は $\phi^* = \phi / a$

ω : 渦度、無次元量は $\omega^* = d^2 \omega / a$

主な添え字

i : 冷却開始時の量

l : 下側円管に関する量

r : 上下円管のどちらかが過冷却を解除する時の量

u : 上側円管に関する量

$*$: 無次元量

— : 円管壁面上での周方向の平均値

Fig.1 Schematic of test section

2. 実験装置および方法

本研究で用いられた試験部の概略を図1に示す。試験部は光学測定を行うためにアクリル製とし、冷却管として幅方向の中央部に直径 15 mmの銅製のパイプを水平に、鉛直方向に 37.5 mm離して、二本配置した。実験の際には、冷媒として 50 質量%のエチレングリコール水溶液を冷却管内に循環させ、試験部内の水を冷却した。なお、本研究では冷却速度をパラメータとしており、冷却速度が大きい場合と小さい場合の二種類に変化させたが、この場合の冷媒温度は、それぞれ $-16^{\circ}C$ と $-8^{\circ}C$ としている。さらに、冷却速度同様、冷却・凍結挙動に影響を与える水の平均初期温度は、冷却速度にかかわらず、実機において一般的と考えられる約 $20^{\circ}C$ ($17^{\circ}C \sim 23^{\circ}C$) としている。本研究ではこのように、初期温度が $4^{\circ}C$ に比べてある程度高い値であるために、冷却の初期の状態では下向きの流れが支配的であり、冷却が進むに従い密度反転による上向きの流れが勢いを増してくる。このため、この両者の干渉により、後述するような興味深い現象が生じる。なお、初期温度に多少の幅があるのは、実験を繰り返し行う際に、現象に影響を与えないと考えられる程度の違いであれば、そのまま測定を行っているためである。実際、この程度の違いは結果になんら影響を及ぼさなかった。また、試験部内の温度は、図1中の 1 ~ 16 の位置において C-C 熱電対により測定された。次に測定方法であるが、本研究では前述したように、

(a) Real time laser holographic interferometry

(b) Laser light sheet method

Fig.2 Optical setups for flow visualization

複雑な温度・流れ場全体の変化をとらえるため、レーザ測定法による可視化実験を行っており、温度場には実時間レーザホログラフィック干渉法を、流れ場にはレーザライトシート法を適用した。これらの光学系配置図を図2(a)、図2(b)にそれぞれ示す。ホログラフィック干渉法においては、測定部の大きさがコリメータレンズおよび乾板より大きいので、測定部への拡散照明を適用した。一方、レーザライトシート法においては、流れの軌跡がより明確になるよう、オブティカルチョッパーを用いて多重露光した。光源としては、いずれの場合も、30mWのHe-Neガスレーザを用いた。

3. 数値解析

3・1 解析手法 本研究の解析対象場は、二次元非定常の自然対流場と見なすことができることから、支配方程式としては流れ関数-渦度系を用い、浮力項以外のすべての物性値を一定とするブジネ近似を適用した。さらに本研究の場合、密度反転を伴う自然対流問題であるので、密度を温度の関数⁽⁷⁾として表して浮力項を評価した。解析対象場は、実験結果において対称性が非常に良かったことから左右対称であるとし、領域の半分のみにThompsonら⁽⁸⁾の方法を適用して、H型の境界適合座標系を生成した。円管の冷却条件としては、実験結果との比較検討を考慮して、実験結果から近似した円管の周平均温度を境界条件として与えた。これら解析領域・格子・境界条件の概略を図3に示す。なお、解析の際には、支配方程式と図中の境界条件を無次元化した上で、境界適合座標系において差分化した。差分化の手法としては、対流項にはハイブリッド法による陰解法を、拡散項には中心差分法を、それぞ

Fig.3 Grid system and boundary conditions

れ適用し、線順法による繰り返しで解を決定した。

3・2 解析手法の評価・確認 本研究において用いられた解析手法の妥当性を確認するために、定温に加熱された水平円管まわりの自然対流場の解析を行い、解析結果を過去の研究報告と比較・検討した。ただしこの際には、解析対象場をX方向に100d・Y方向に200dとしたが、これは図3に示された座標系の上側円管を無くし、領域の外側に格子を増やしただけである。これらの結果を、図4に示す。図4(a)での

(a) Local Nu by the present and other calculations

(b) Mean Nu by the present calculation and other experiments

Fig.4 Comparison of calculated Nu on a heated cylinder

他の数値解析結果との比較から Nu の円管角度に対する変化の妥当性が、図 4(b) での過去に報告された実験式との比較から $\overline{Nu}$ の Ra 数に対する変化の妥当性が、それぞれ確認される。ただし、円柱座標系を用いた、丸原ら⁽⁹⁾、Kuehn⁽¹⁰⁾らとは異なり、本研究では任意座標系を用いているため、精度的にはこれら二者に劣っているはずである。このため、図 4(a) の本研究の結果は、微妙に違った分布形を描いている。しかし、この違いも $\overline{Nu}$ で考えると 1 % 程度とわずかであり、また図 4(b) において、藤井ら⁽¹¹⁾の実験式と 5 % 以内の違いで一致していることを考えあわせれば、本研究のように主に定性的な変化を考えて行く上では、この程度の違いはなんら問題は無いと思われる。なお、本報において掲載している結果の Ra は、冷却速度が大きい場合が $Ra=2.23 \times 10^5$ 、冷却速度が小さい場合が $Ra=1.19 \times 10^5$ である。

4. 結果および考察

何回もの測定から、本研究で得られた過冷却解除までの流動様式の推移パターンは、詳しくは後述するが、(1) 密度反転による上向き流れが円管間に発達する場合、(2) 上向き流れが明確に存在せずに過冷却が解除する場合、の二種類に大別できた。この違いは冷媒温度（冷却速度）に起因しており、冷媒温度が高い場合には (1) のパターンに、冷媒温度が低い場合には (2) のパターンとなった。そこで本研究ではこの事実に対応させて、(1) の場合を「冷却速度が小さい場合」、(2) の場合を「冷却速度が大きい場合」として呼ぶこととした。つまり、前述の実験条件は、上記二種類の推移パターンを分けている臨界温度の高温側と低温側でそれぞれ適当な冷媒温度を選んだだけである。そして、本報ではそれぞれの場合にどのような冷却・凍結挙動を示すかを考えて行く。なお、冷却過程の定量的な目安として、可視化・解析結果として示している場合の円管平均温度の測定結果を図 5 に示す。図 5 においては、上下に二枚の図が示されているが、これは全体の推移が分かりやすいように時間の範囲を変えて示しただけである。また、この図以外は無次元量により表されるため、絶対的な量が判断できるように次元を持った形でグラフ化するとともに、図中の矢印により、後述する流動様式の可視化・解析結果の図と対応させている。同図より、冷却速度が小さい場合、大きい場合、それぞれの冷却・凍結過程の一例が見て取れる。

4・1 冷却速度が小さい場合の冷却・凍結挙動

最初に、冷却速度が小さい場合の冷却・凍結過程における流動様式を考えてみる。図 6 は、代表的流動様式の各段階における可視化写真と対応する解析結果を示し、干渉縞写真と等温線、多重露光写真と等流れ線を比較している。また、図中の数字は、解析結果によるそれぞれの無次元値である。まず、冷却を開始すると [図 6(a)]、各円管でそれぞれ下向きの流れが生じる。しかしこの段階では、円管まわりの等温線（干渉縞）と円管下部の流線分布（多重露光写真）に、上下円管での差は無く、上向きの流れも発生していない。図 6(b) は円管の平均温度が 4°C 以下になった段階のもので ($\overline{T}_t = -3.1^\circ\text{C}$)、この時には下向き流れのために下側円管の近傍がより冷却され、下側円管まわりの等温線（干渉縞）は疎に、上側円管まわりの等温線（干渉縞）は密になり、特に、下側円管の下部が最も冷やされていることが分かる。このため、図ではわかりづらいのであるが、同部において密度反転による非常に小さな上向きの流れが発生している。図 6(c) の段階になると、流線分布（多重露光写真）より明らかに、下側円管での上向きの流れが成長しその領域を広げているが、円管上部には達せず途中ではく離している。このため、下側円管まわりの等温線（干渉縞）はハート形になり、横方向への広がりを見せている。一方この段階で、上側円管においても円管下部で、密度反転による上向きの非常に小さな流れが発生している。図 6(d) は、下側円管からの上向きの流れが上側円管下部に達した段階を示しており、この直後、上側円管で過冷却が解除して、上側円管まわりに針状結

Fig.5 Mean temperatures over the cooling tube surfaces

晶の氷が形成される。この針状結晶氷は、次に温度の低い領域、すなわち下側円管上部に向かって凍結を進

Multi-exposed particle images and calculated streamlines

Interferograms and calculated temperature contours

Fig.6 Comparison of representative flow and temperature fields for the low cooling rate

Fig.7 The processes of releasing the supercooling on the lower cooling tube and ice growth for the low cooling rate

行させようとするが、下側円管に到達する前に、凝固熱のためか融解し、無くなってしまふ。そして、下側円管での過冷却解除がないままに、さらに冷却が進んで行く。

図7に、この冷却条件下での、その後の可視化結果を示す。上側円管での過冷却解除後、上側円管で形成された稠密氷が成長している最中に、突然、上側円管下部に針状結晶氷が形成される[図7(a)]。次に、これが氷柱のように下方へと伸びて行き、下側円管上部に達した途端、下側円管でも過冷却が解除する[図7(b)]。そして、この両円管を連結した針状結晶氷はやがて融解してしまう[図7(c)]。また、このように過冷却解除時間には顕著な差があったにもかかわらず、両円管での稠密氷が円管間で接するころには、両円管で形成された氷の厚みは円管での違いがほとんど無くなり、円管間で厚くなっている[図7(d)]。これは、より冷却の進んでいる水が上側円管に到達した瞬間に上側円管で過冷却解除が起こるために、この冷却の進んでいる水はこれ以上上には流れず円管間に停留するとともに、氷のない下側円管での冷却がより進むためであると考えられる。なお、冷却速度が小さい場合には、全部で六回の測定を行ない再現性を確認した。この際、上側円管で過冷却が解除してから針状結晶氷が成長して下側円管に達するまでの時間には、かなりの違い(約340s～2300s)があったものの、全て同様の冷却・凍結挙動を示した。

4・2 冷却速度が大きい場合の冷却・凍結挙動

この場合は4・1とは異なり、密度反転による上向きの流れが明確に存在せず過冷却が解除する。このた

めこの場合には、冷却開始とともに生じる両円管まわりの下向き流れにより下側円管まわりがより冷却された状態で、下側円管から最初に過冷却解除に至る。この過程を、図6と同様に、干渉縞写真と数値解析による等温線の形で図8に示す。ただし、図8(a)は過冷却解除前であり、図8(b)は下側円管での過冷却解除直後である。同図より明かなように、この場合には、過冷却解除の前後で可視化結果に差が無くパターンが変わっていない。また、そのパターンは図6(b)と同様であり、冷却速度が小さい場合には過冷却が解除しないようなフローパターンの段階である。

次にこの冷却速度が大きい場合に、上側円管で過冷却が解除した直後[図9(a)]と、氷が接するほどに成長した状態[図9(b)]の干渉縞写真を示す。同図より明かなように、冷却速度が大きい場合には、上側円管が過冷却を解除する状態になってもパターンは同じであり、上向きの流れは明確には存在しない[図9(a)]。また、冷却速度が小さい場合[図7(d)]とは異なり、稠密氷が円管間で接する程度になっても、上下円管で氷の大きさが違うとともに、氷の形状が円に近い[図9(b)]。これは、最初に過冷却が解除する円管が上側か下側かという事実に依存していると考えられる。つまり、冷却速度が大きい場合には、より冷却の進んでいる下側円管が初めに過冷却解除をし、過冷却解除後の下側円管では氷を経て液層を冷却することとなり、冷却効率が悪くなる。このため、下側円管での上向きの再循環流を生ずることがない状態で冷却が進行して行き、冷却速度が小さい場合のような円管間での氷の成長が起こらない。また、より冷却の進んでいる下側円管の過冷却解除の方が早いため、下側円管で

Fig.8 Interferograms and calculated temperature contours for the high cooling rate

Fig.9 The process of ice growth for the high cooling rate

の氷の成長が著しくなっている。なお、この冷却速度が大きい場合においても全部で四回の実験を行ったが、全て同じ冷却・凍結挙動を示した。

4・3 数値解析結果からの時系列データ 図6、図8から明らかなように、数値解析により得られた流動様式は実験により可視化されたものと非常に良く一致している。そこで数値解析結果により、冷却過程での両円管それぞれでの平均熱伝達特性を考えてみた。その結果が図10、図11であり、 $\overline{Nu}$ の分布だけではなく、境界条件として与えた円管の平均温度と、流動様式として示された図がどこに対応するかも併記している。

まず図10であるが、この図では、冷却速度が大きい場合に過冷却解除をした時間までの冷却速度の大小による違いが示されている。 $\overline{Nu}$ の分布は、この程度の時間範囲内では定性的には冷却速度の大小にかかわらず同じであり、以下のように推移している。まず冷却開始直後は、対流がまだまだ小さく熱伝導が支配的であるために、 $\overline{Nu}$ は上下の差が無く急激に減少する。しかし、下向き対流が徐々に大きくなり、図6(a)で示された状態以降では、対流による伝熱が支配的となるために、上側円管と下側円管とで差が開いて行く。そしてさらに対流が大きくなり、両円管からの下向きの流れが一つの対流を形成するようになると、 $\overline{Nu}$ はほぼ一定値となる。この冷却速度の大小で、 $\overline{Nu}$ の定性的な分布に差が無いことは、冷却速度の違いが基本的には Ra をわずかに変化させているだけであること

を考えれば当然のことであろう。つまり、冷却速度の大小で、冷却過程の流動様式は基本的には異なることはないが、過冷却解除をどこで引き起こすかが異なるために、凍結挙動が違って来るものと思われる。

次に図11であるが、この図では、冷却速度が小さい場合の冷却過程全体を通しての $\overline{Nu}$ 分布を示している。前述したように Fo が0.05～0.5程度では、 $\overline{Nu}$ はほぼ一定値であるが、その後は、容器内の水が冷却されるに従い $\overline{Nu}$ は小さくなって行く。そして、密度反転後の上向きの対流領域が下側円管である程度成長した図6(c)のようになった段階で、下側円管の $\overline{Nu}$ は最小値を示す。その後、下側円管まわりでの上向きの再循環領域が徐々にその領域を広げるに従って、下側円管の $\overline{Nu}$ は徐々に増加の傾向を示し、上向きの再循環領域が円管間に形成された段階で $\overline{Nu}$ は急激に変化して上下の値が逆転する。そして、実験結果によれば、この段階で上側円管で過冷却解除が起こる。このように、冷却速度が小さい場合の過冷却解除が発生する際には、温度分布がほぼ一定でありながら $\overline{Nu}$ の分布が急激に変化したことから、この変化の原因となった流速（圧力）変動が、過冷却解除をも誘起していると思われる。これに対して、冷却速度が大きい場合はどうか。冷却速度が大きい場合の過冷却解除の際には、 $\overline{Nu}$ の分布にはきわだった変化が無い[図10]。しかし、図5から分かるように、過冷却が解除する際には、より冷却の進んでいる下側円管の平均温度は $T_f = -5.2^\circ\text{C}$ となっており、齊藤ら⁽¹⁴⁾が銅円板から得た過冷却解除の結果から考えると、この段階で

Fig.10 Mean Nu on the cooling tubes by the present calculation

Fig.11 Mean Nu on the cooling tubes by the present calculation for the low cooling rate

自然発生的に下側円管で過冷却解除が生じてでも何ら不思議は無い。

以上の過冷却解除挙動は、最初に解除する円管に対してであるが、残っているもう一方の円管に対しても同様である。つまり、冷却速度が大きい場合には上側円管でも十分に冷却されているために、下側円管での過冷却解除後、比較的短時間で上側円管でも過冷却が解除する〔図5〕。しかし、冷却速度が小さい場合には、自然発生的に過冷却が解除するほど冷却されていないために、上側円管での過冷却解除後、ある程度の時間が経過したところで、流れの変動（針状水の衝突）により下側円管での過冷却が解除する〔図5、図7〕。

さらに、このように冷却速度により過冷却解除の際の挙動が異なることと、前述したように Nu 数の分布が本質的には冷却速度により変わらなかったことを考え合わせると、今回は検討していないような冷媒温度であったとしても、ここで示されたどちらかのパターンで過冷却解除まで移行することが想像される。つまり、本実験程度の条件下では、上下円管がほぼ同時に過冷却解除をする可能性はあるものの、外的な要因が無い限り、下側円管からの上向きの流れが上側円管に到達していない段階では、先に上側円管で過冷却が解除することはないであろうし、この上向きの流れが上側円管に到達した段階では、先に下側円管で過冷却が解除することはないであろう。

また、一定加熱された水平二円管の場合に報告されている⁽²⁾⁽³⁾下流側円管の Nu が、上流側円管の Nu よりも大きくなる現象に関しては、図11から分かるように見受けられなかった。これは、冷却の場合には加熱の場合に比べると温度差に対する密度差が小さいことや、本研究のような断熱密閉容器中では空気中に置かれた細線の場合⁽²⁾とは異なり、冷却に伴いまわりとの温度差が徐々に小さくなるために、対流がそれほど大きくならないことが原因であると思われる。

5. 結論

鉛直方向に配置された水平二円管まわりの水の冷却・凍結過程を可視化実験および数値解析により検討して、以下の結論を得た。

冷却速度により過冷却解除に至るまでの特徴的流動様式の推移を大きく二つに分類することができた。この二つの流動様式は、冷却開始直後はほぼ同様な過程をたどるが、過冷却解除をする過程が異なっている。冷却速度が小さい場合には、密度反転による再循環領域が形成されることにより、上側円管から過冷却を解除する。しかし、冷却速度が大きい場合には、下側円管まわりが下向きの対流により過冷却を解除するのに充分なだけ冷却されるので、下側円管から過冷却が解除する。またこの過冷却解除の発生の違いにより、その後の凍結挙動や形成される氷の形状が異なる。

文献

- (1) 相良、冷凍、62-714 (1987)、393.
- (2) Honda, T., ほか2名, Proc. ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conf., 3 (1983), 221.
- (3) 栗山・ほか3名、化工論、19-6 (1993)、1074.
- (4) 鳴海・柏木、第27回伝熱シンポ講論、(1990)、235.
- (5) 笹口・草野、冷論、12-3 (1995)、295.
- (6) 笹口・ほか2名、第34回伝熱シンポ講論、(1997)、97.
- (7) Cheng, K. C., ほか2名, Numerical Heat Transfer, 1 (1978), 101.
- (8) Thompson, J. F., ほか2名, J. Computational Physics, 24 (1977), 274.
- (9) 丸原・斉藤、第29回伝熱シンポ講論、(1992)、310.
- (10) Kuehn, T. H. and Goldstein, R. J., Int. J. Heat Mass Transfer, 23 (1980), 971.
- (11) 藤井・ほか2名、機論、48-431 (1982)、1312.
- (12) McAdams, W. H., Heat Transmission, (1954), 172. McGraw-Hill
- (13) Churchill, S. W. and Humbert, H. S. C., Int. J. Heat Mass Transfer, 15-10 (1975), 1049.
- (14) 斉藤・ほか4名、冷論、5-2 (1988)、65.