

TED Plaza

水中に置かれた水平な楕円形状伝熱管周りの凍結現象に関する研究



廣瀬 宏一

岩手大学 教授
 理工学部 システム創成工学科 機械科学コース
k.hirose@iwate-u.ac.jp



王 強勝

岩手大学大学院 工学研究科博士後期課程
 機械・社会環境システム工学専攻
wqs0403@gmail.com

1. はじめに

水を相変化物質 (Phase Change Material : PCM) として蓄熱槽内に充填し、凍結および融解する際の潜熱を利用し蓄冷する氷蓄熱装置には、大きく分けて生成した氷を移動させるダイナミック型と、移動させないスタティック型がある。スタティック型は水を強制的に流動させない分、熱伝達率が低くなり蓄冷速度はダイナミック型に劣るが、その分省エネルギーであり、蓄冷速度を必要としない夜間電力を用いた蓄冷などではメリットが大きい。

一般的なスタティック型氷蓄熱装置の蓄冷性能を向上させるために重要なのは、冷媒を循環させる伝熱管群周りに水を凍結させる際の伝熱現象の最適化である。水は伝熱管表面から凍結を開始し成長していくが、この時に成長した氷自体が熱抵抗になる。さらに時間経過すると、管群から成長した氷は、お互いに結合 (ブリッジング) し、周囲の水の自然対流を妨げる。これらの原因により、氷の生成と成長とともに蓄冷効率が低下していく問題がある。また、凍結の際の体積膨張による高い応力の発生や、氷によって閉じ込められた水が高圧になることで、伝熱管の塑性変形が発生し、管群の損傷を招くことが知られている。従って、ブリッジングが発生しないように氷蓄熱槽の構造を設計することが多く、結果的に氷の充填率が小さい値に留まってしまうことで、蓄冷量の増加や氷蓄熱槽の小型化などの、装置の高性能化を妨げる要因となっている。したがって、工学的な背景からは、氷蓄熱槽の高度設計に向けた伝熱管群周りにおける水の凍結現象、およびそれを司る自然対流現象を体系的に評価することは、特に昨今の電力問題やエネルギー問題への寄与も期待できる有益な課題である。かつ、公知のように水は 4℃で密度が最大になるなど、他の物質と異なる特異な性質を持つことから、特に凍結に関与する自然対流の影響の探求は学術的にも興味深い課題である。

以上の背景から、スタティック型氷蓄熱装置を想定した水の固液相変化についての研究が広く行われている。水を PCM として検証した事例として、舟渡らは水平環状空間内に封入した水の密度逆転を伴う 3次元自然対流熱伝達の数値計算を実施している (舟渡, 鈴木, 2003)。筐口らは多

孔質層内の氷の融解過程に関する水の密度反転の影響の数値解析(笹口, 1994)や, 矩形容器内に伝熱管を配置した場合の固液相変化実験(笹口他, 1995)などを報告している. 平澤らは, 氷蓄熱槽に用いる伝熱管に樹脂製細管マットを用いた応用事例について, 凝固・融解実験(平澤他, 2008a)および熱流動解析(平澤他, 2008b)を実施している. 以上から, 水-氷の固液相変化の基礎的な現象から, 応用システムレベルでの評価まで, 多岐にわたる研究が行われている. 一方で, 初期水温, 管形状や配置角度, 管の相互配置, 水槽の大きさなどの氷蓄熱槽の設計値に関するパラメタスタディについてはまだ検討の余地があり, 体系的な検証による設計最適化に寄与することによる工学的価値も期待できる.

これらから, 著者らにおいては, スタティック型氷蓄熱槽内でみられる固液相変化現象について, 特に氷蓄熱槽の構造や設計, 固液相変化, 伝熱管周囲の自然対流, それぞれの関係を体系的に評価する研究を進めている(佐々木他, 2011). 特に近年は, 自然対流の促進を狙って, 断面を楕円形にした伝熱管を氷蓄熱槽に実装した場合, 氷蓄熱槽における初期水温, 管形状や配置角度, 管の相互配置, 水槽の大きさの変化が伝熱管周囲で発生する水の凍結およびブリッジングに対し与える影響を調査している. 研究の特徴として, 実験による評価も行うとともに, 相変化を考慮した数値シミュレーションコードを開発し活用することにより研究を推進してきている. 特に相変化現象の数値解析を行う際には, 相変化界面が時間とともに移動する移動境界問題となるため, 界面位置の取り扱いが困難となる. この問題に対する解析方法を大別すると, 固相と液相を区別して解く **Multi-domain model** と, 固相と液相を区別せず一組の式で解く **Single-domain model** がある. 特に氷蓄熱槽の研究においては **Single-domain model** を用い, 潜熱を比熱に組み込むことにより氷と水の伝熱現象を1組の式でシミュレーションして, 氷蓄熱槽内の水の凍結現象を評価している. 以上により, 凍結現象そのものの現象調査に加え, 氷蓄熱槽における製氷時間の短縮化およびブリッジング時間の数値予測技術の構築などを目指している. そこで本稿ではこれらの取り組みの概要について紹介したい.

2. 数値解析

2.1 物理モデルおよび座標系

図1に, 2本の楕円管を用いた蓄冷水槽の物理モデルおよび座標系を示す. 物理モデルではPCM(水)で満たされた領域に, 伝熱管を模擬した2本の楕円管を水平に配置して冷却し, 管の周りに凍結層が出来ることを想定した. また, 伝熱管の配置については, 水平方向軸間距離を D_x , 鉛直方向軸間距離を D_y とし, 伝熱管の相互配置を決めた. 図中の一点鎖線は計算領域を表す周囲境界面を示しており, 破線は計算領域の接合境界面を示している. 座標系は計算領域左下を原点 O とするデカルト座標系を用いた. 境界条件については, まず速度場の境界条件は, 楕円管表面と筐体壁において滑り無し壁境界条件を与えた. また, 温度場の境界条件は, 楕円管表面に等温境界条件, 筐体壁において断熱境界条件を与えた.

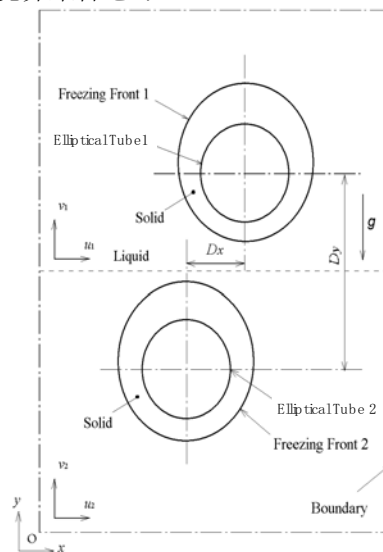


Fig. 1 Physical model and coordinate systems for elliptical two tubes

2・2 基礎方程式

楕円管周囲の流れを解析する場合、デカルト座標系の基礎方程式を用いて、任意の管形状に沿った境界条件を設定し、境界適合座標法を用いて一般座標系 (ξ, η) に写像して上下計算領域にそれぞれ適用し、接合境界面においてそれぞれの計算領域の計算データを順次接合することで解析を行った。

$$J \frac{\partial f}{\partial t_0} + \frac{\partial}{\partial \xi}(Uf) + \frac{\partial}{\partial \eta}(Vf) - \frac{\partial}{\partial \xi} \{ \Gamma J (q_{11} f_\xi + q_{12} f_\eta) \} - \frac{\partial}{\partial \eta} \{ \Gamma J (q_{21} f_\xi + q_{22} f_\eta) \} = J \cdot S(\xi, \eta) \quad (1)$$

$$q_{11} = \xi_x^2 + \xi_y^2, \quad q_{12} = \xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y, \quad q_{21} = q_{12}, \quad q_{22} = \eta_x^2 + \eta_y^2, \quad J = x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi$$

U は一般座標系における ξ 方向速度, V [m/s] は一般座標系における η 方向速度である. 式 (1) 中の浮力項を含む生成項において、本解析では管周囲の PCM として密度反転を有する水を想定しているため、藤井の式 (藤井他, 1974) を用いることで、水の密度変化を考慮した. 上式を、集中格子を使用した有限体積法により離散化し、SIMPLE 法を適用して解析を行った. なお各保存式に関する変数 f および生成項の詳細については以下の表 1 に示すとおりである. なお、 ν [m²/s] は動粘度である.

Table 1 Relationship between f and each parameter

Equation of continuity	$f = 1$	$\Gamma = 0$	$S = 0$
Equation of motion (x-direction)	$f = u$	$\Gamma = \nu$	$S = -(\xi_x p_\xi + \eta_x p_\eta)$
Equation of motion (y-direction)	$f = v$	$\Gamma = \nu$	$S = -(\xi_y p_\xi + \eta_y p_\eta) + g\beta(T - T_0)f(T)$
Energy equation	$f = T$	$\Gamma = a$	$S = 0$

2・3 ブリッジング時間の推定

本解析は、一般座標系による計算で物理平面 (x, y) を計算平面 (ξ, η) に写像して計算を行うことになる. 図 2 に示すように物理平面上の各格子点は、管毎に管の周方向を η 軸、管の中心から半径方向を ξ 軸とした. 相変化の取り扱い、格子点毎に温度が凍結温度 T_s より大きければ液相, T_s 以下であれば固相とした. ブリッジングは一方の管壁から他方の管壁へ達する各々の η 格子線に着目し、この η 線上の各格子点 (図 2 中のプロット点) の状態が全て固相に変化したと判断された時の η 格子線が 1 本でも現れた場合の時刻を監視しておき、これをブリッジング時間とした.

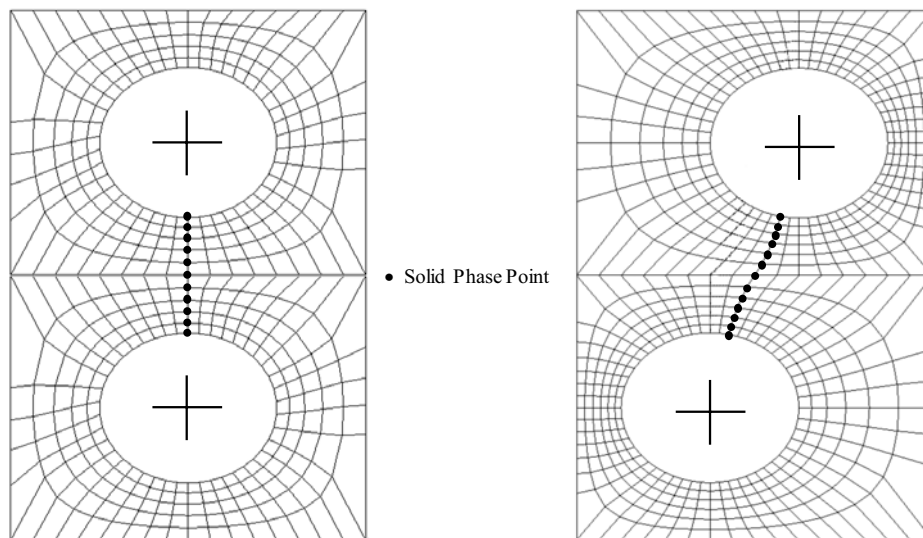


Fig. 2 Judgment of bridging time

3. 実験装置および方法

図3に実験装置の概略図を示す。大別して試験部、冷媒循環装置、実験水槽、恒温水循環装置、温度測定機器、写真撮影装置からなる。供試体には、 $\phi 40$ mm、肉厚 2.0 mm の銅管を用いて楕円率 0.85 の楕円管を製作した。また、楕円管の配置角度を φ_g とし、 $\varphi_g = 0^\circ$ で縦型、 $\varphi_g = 90^\circ$ で横型とした。

図4には供試体の管形状及び配置角度の詳細図を示す。実験の場合は一定温度に保った 35%プロピレングリコール水溶液を銅管内に循環させ管壁面温度を調節した。試験領域は、内寸：高さ 270 mm × 幅 180 mm × 奥行き 170 mm とし、周囲を断熱材で覆うことで熱の出入りを防いだ。温度測定には素線径 0.2 mm の銅-コンスタン (T 型) 熱電対を用いた。写真撮影は銅管正面から凝固界面形状の変化を一定時間間隔で撮影し記録した。写真で得られた水と氷の界面形状から、氷の生成量を画像処理にて定量的に算出している。

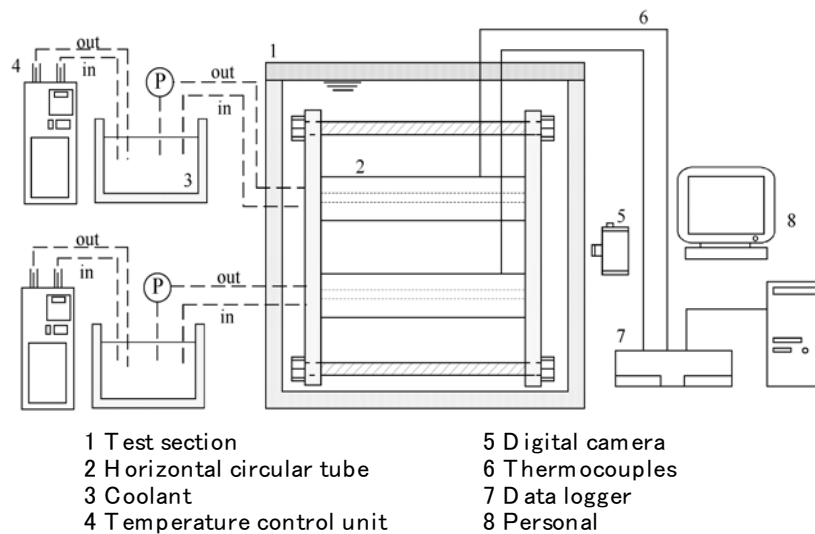


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

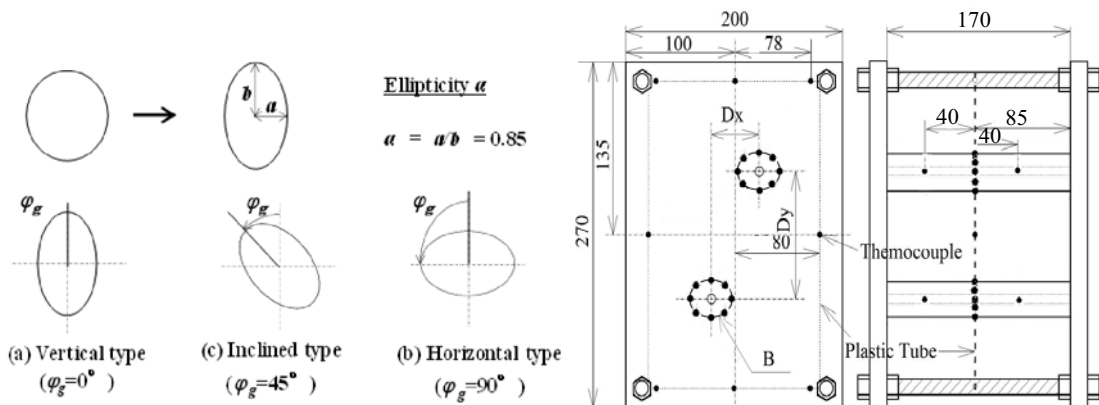


Fig. 4 Inclined angle and detail of test section

4. 解析結果および実験結果

代表的な場合として、初期水温 T_{ini} が 4°C と 7°C の場合の高さ 270 mm × 幅 180 mm × 奥行き 170 mm における、水平方向軸間距離 $D_x = 0$ mm、鉛直方向軸管距離 $D_y = 2.0 D$ (80 mm) とした時の結果を示す。

図5には解析および実験により凝固率の時間変化を示す。図中の実線が解析結果であり、プロットが実験結果である。この図から、解析も実験も凝固率の伸びが時間の経過と共に緩やかになっていくことがわかる。また、図からわかるように凝固率について実験と解析で良好な一致が見られ、本解析手法は十分妥当であると考えられる。

図6には代表的な時間での温度場及び流れ場を示す。 $T_{ini} = 4^\circ\text{C}$ の条件では、管付近の水は冷却されることで密度が小さくなり、周囲流体よりも軽くなるため、上昇流が支配的となる。この様子は図6(a)から良くわかる。さらに時間が経過すると、冷却された水が容器上部側に集まり、相変化温度近くまで下がることで、管周囲の流体との密度差がなくなるために上昇流はしだいに弱くなっていく。容器下部側では、 4°C 付近の水が成層化しており、その影響で対流がほとんど起こっていないため、この領域では熱伝導が支配的となる。この様子は、図6(b)~(d)からわかる。また、ブリッジングした後は、氷層の結合により流れは管の左右に完全に分離される。他の箇所と比較して流れの弱い管壁間において水温の低下している領域では、ブリッジングした後、氷の成長速度が一時的に高まると考えられる。

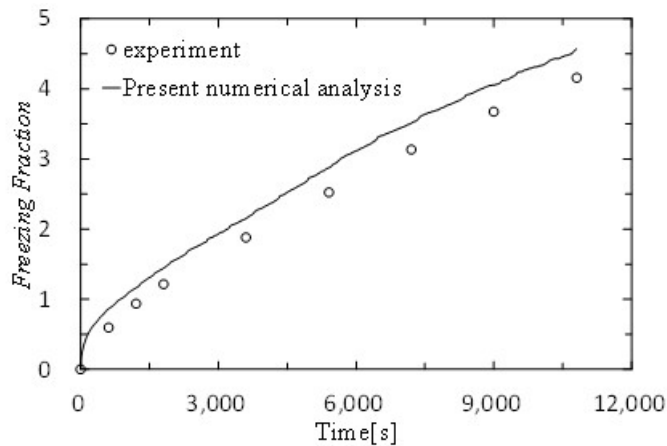


Fig. 5 Comparison of freezing fraction by analysis and experiment for two elliptical tubes ($D_x = 0 \text{ mm}$, $D_y = 80 \text{ mm}$, $\phi_{g1} = \phi_{g2} = 90^\circ$, $T_{ini} = 4.0^\circ\text{C}$, $T_{w,1} = T_{w,2} = -10^\circ\text{C}$)

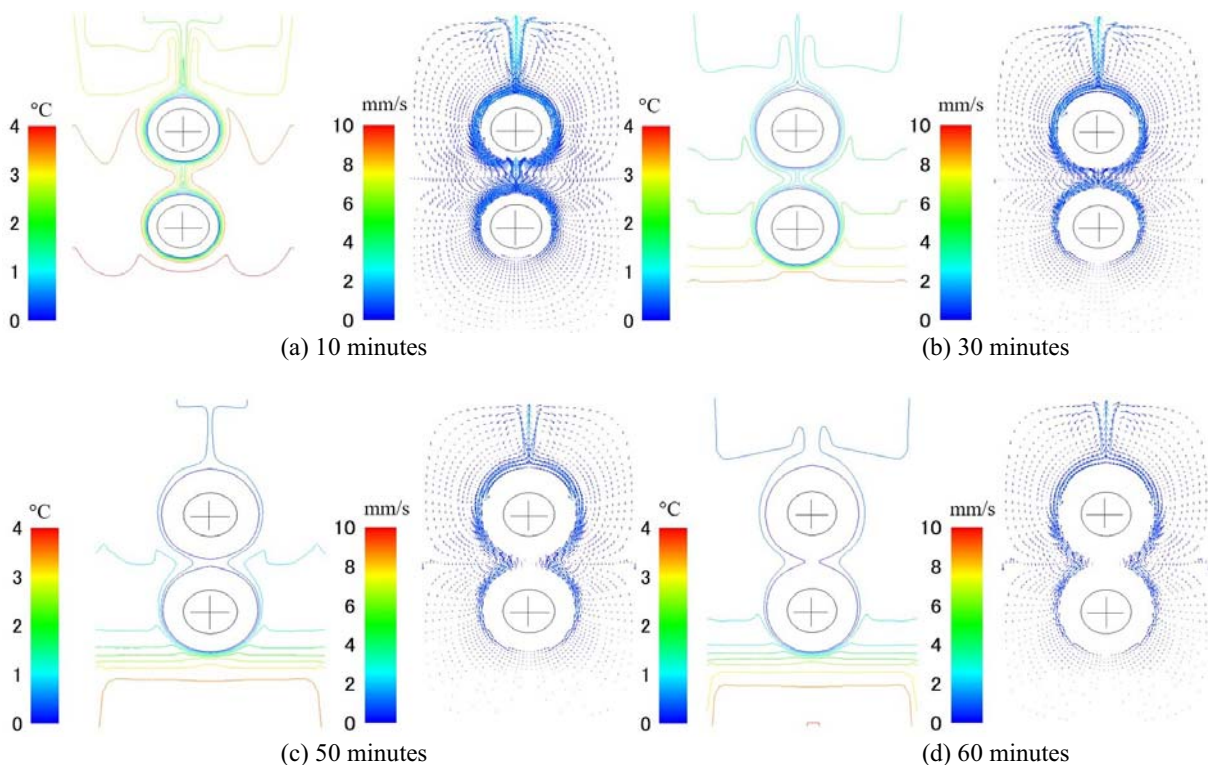


Fig. 6 Isotherms and velocity fields ($D_x = 0 \text{ mm}$, $D_y = 80 \text{ mm}$, $\phi_{g1} = \phi_{g2} = 90^\circ$, $T_{ini} = 4.0^\circ\text{C}$, $T_{w,1} = T_{w,2} = -10^\circ\text{C}$)

図7には代表的な解析と実験における凝固界面の時間変化を示す。氷の成長を見ると、管上部側で若干厚く成長していることがわかる。これは、管上部側では上昇流により冷たい水が流れ込むため、凝固点まで温度降下しやすいが、管下部側には初期水温に近い 4°C 付近の水が停滞し凍結温度まで降下しにくいと考えられる。特に、氷がブリッジングした後に、結合部分で氷の

成長が周囲よりも早くなる特徴が見られる。また、解析結果と実験結果は定性的によく一致している。

図8には初期水温が4°Cおよび7°Cの場合の水槽内部温度の時間変化を示す。初期水温4°Cの場合、水温を水槽のそれぞれ上部、中部、下部とわけて各領域を見ると、上部水温、中部水温は時間が経過するに従って温度が急激に減少するのに対し、下部水温は、4°Cから緩やかに減少する。これは、4°Cにおける密度が最大であり、温度降下と共に密度が減少し、冷却された流体が上昇していくためである。初期水温7°Cの場合では、3000秒付近から5000秒付近の間で上部水温が急激に下がっているのがわかる。これは、下降流から上昇流に切り替わり、容器上部に停滞していた暖かい流体の冷却が完了したためである。また、実験の水槽上部の水の温度が初期水温より高いのは、実験装置が完全に断熱状態になっていないためである。

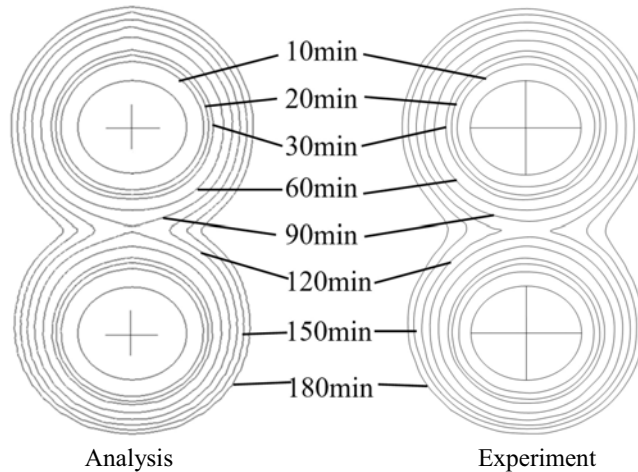


Fig. 7 Comparison of freezing front contour by analysis and experiment.
 ($D_x = 0$ mm, $D_y = 80$ mm, $\phi_{g1} = \phi_{g2} = 90^\circ$, $T_{ini} = 4.0$ °C, $T_{w,1} = T_{w,2} = -10$ °C)

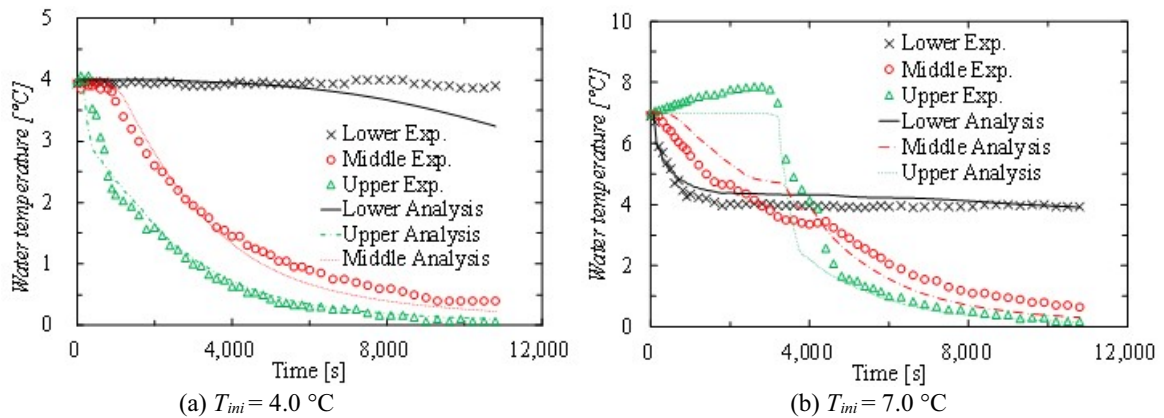


Fig. 8 Temperature distribution of water with time for freezing by analysis and experiment
 ($D_x = 0$ mm, $D_y = 80$ mm, $\phi_{g1} = \phi_{g2} = 90^\circ$, $T_{w,1} = T_{w,2} = -10$ °C)

図9には各条件における凝固率の時間変化を示す。横型楕円管を基準とし、それぞれの D_x において伝熱管表面距離が等しくなるように整理している。この図から初期水温が4°Cおよび7°Cとも凝固率の伸びが時間の経過と共に緩やかになっていくことがわかる。これは成長した氷自体が熱抵抗となるために凝固率の増加が鈍化すると考えられる。初期水温、水平方向軸間距離問わず、楕円管縦型 ($\phi_g = 0^\circ$)、楕円管横型 ($\phi_g = 90^\circ$) を比較すると、楕円管横型 ($\phi_g = 90^\circ$) の凝固率が大きく、楕円管縦型 ($\phi_g = 0^\circ$) の凝固率が小さい。これは、横型にすることにより、容器下部の4°C付近の水が成層化している領域の影響を受けにくいいため、縦型に比べ、下部管の氷の成長が妨げられないと考えられる。また、初期水温が7°Cの場合と初期水温が4°Cの場合を比較すると、3000秒付近から5000秒付近の間で凝固率の増加が一時的に鈍化することがわかる。これは、 $T_{ini} = 7^\circ\text{C}$ の条件では、密度反転の影響により冷却されるとともに密度が増加し、4°C付近まで周囲流体より

も重くなり、下降流となった水は、水槽下部側の領域に停滞し、伝熱管が氷生成時に用いるエネルギーが一時的に水の冷却に使用されるため、凝固率の増加率が鈍化してしまう。

図 10 には、 D_x を 0 および 20mm とした縦型と横型楕円管とした場合に伝熱管表面温度を -10°C と固定した時、初期水温の変化におけるブリッジング時間の変化を示す。図からわかるように、水平方向軸間距離に関わらず、初期水温が低くなるとブリッジング時間も早くなっている様子がしめされるが、ブリッジング時間は初期水温に単純比例していないことがわかる。これは伝熱管の温度を -10°C と一定にする場合、初期水温が高くなると伝熱管周りの水の冷却度合いが大きくなり、対流の影響が強くなるためと考えられる。また、横型楕円管の方が縦型に比べて、同じ条件でのブリッジング時間が早いことがわかる。これは、横型にすることにより、水槽容器下部における 4°C 付近の水が安定成層化している領域の影響を受けにくいいため、縦型に比べ、下部管の氷の成長が妨げられないためではないかと考えられる。また、これらから異なる条件であっても管壁温と初期水温をパラメータとすれば、ブリッジング時間について、ある程度類型化ができる可能性があることがわかる。

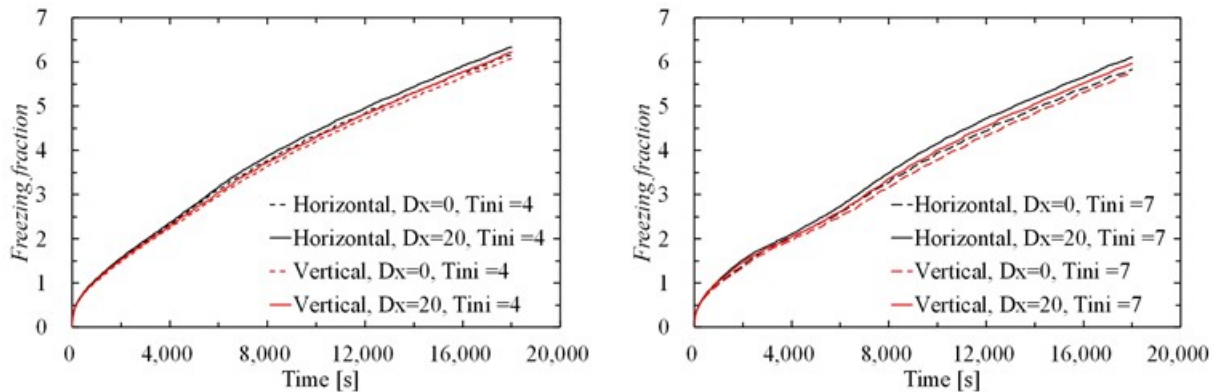


Fig. 9 Comparison of freezing fraction by analysis ($D_x = 0$ mm, $D_y = 80$ mm, $\phi_{g1} = \phi_{g2} = 90^{\circ}$, $T_{w,1} = T_{w,2} = -10^{\circ}\text{C}$)

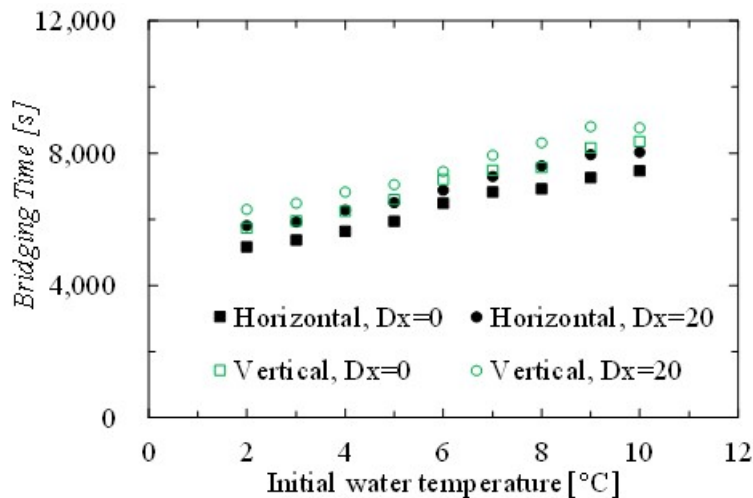


Fig. 10 The relationship between bridging time and the initial water temperature ($D_y = 80$ mm, $\phi_{g1} = \phi_{g2} = 90^{\circ}$, $T_{w,1} = T_{w,2} = -10^{\circ}\text{C}$)

5. おわりに

現段階では 2 本の水平な楕円形状伝熱管まわりの凍結現象に留まっているが、本研究で使用した解析は任意の管形状、任意の管本数、任意の配置、さらには任意の PCM に対して凝固過程のみならず融解過程に対しても解析することが可能な応用範囲の広い有用な手法であることから、伝熱管を多数の管群とした場合や管の配置を変化させた場合における固液相変化現象の研究にも対応可能だと考えられる。また、多数本の伝熱管群の場合、凝固過程に伴う周囲の流れ場、温度場といった現象に関しては、より複雑な対流が生じ、その干渉が凍結現象にどのような影響を与えるかなどへの応用展開が期待できる。また、より高い氷充填率を保つような伝熱管形状を考慮し

た氷蓄熱装置の設計・製作を通して信頼性を確認することともに、コンパクト・高性能な氷蓄熱装置の実現などを目指していきたい。

文献

- (1) 佐々木治, 廣瀬宏一, 地代所昌幸, 藤田尚毅, 水中に置かれた 2 本円管周りの凍結現象とブリッジング時間, 日本冷凍空調学会論文集, Vol. 28, No. 4 (2011), pp. 353-362.
- (2) 笹口健吾, 多孔質層内の固-液相変化(水の密度反転が矩形領域の融解過程に及ぼす影響), 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 60, No. 580 (1994), pp. 4138-4144.
- (3) 笹口健吾, 草野剛嗣, 北川秀昭, 二円筒回りの固-液相変化(水の密度逆転の影響に関する実験的研究), 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 61, No. 581 (1995), pp. 208-214.
- (4) 平澤良男, 小坂暁夫, 喜多野一幸, 樹脂細管マットを用いた氷潜熱蓄熱槽の凝固・融解特性に関する実験的検討, 日本冷凍空調学会論文集, Vol. 25, No. 2 (2008), pp. 193-199.
- (5) 平澤良男, 喜多野一幸, 小坂暁夫, 樹脂細管マットを用いた氷潜熱蓄熱槽の凝固・融解特性に関する数値解析による検討, 日本冷凍空調学会論文集, Vol. 25, No. 2 (2008), pp. 201-206.
- (6) 藤井哲, 片山功蔵, 斎藤彬夫, 服部賢, 戸田三朗, 伝熱工学の進展 3 (1974), 養賢堂.
- (7) 舟渡裕一, 鈴木立之, 水平環状空間内の水の密度逆転を伴う 3次元自然対流熱伝達, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 69, No. 680 (2003), pp. 881-887.