

第3章 数値解析における妥当性の検証および実験

3.1 緒言

スタティック型の氷蓄熱装置のコンパクトおよび高性能化を果たすためには伝熱管まわりの氷の生成・融解挙動を調べるのが肝心であり、特にスタティック型の氷蓄熱装置の高性能化のためには伝熱管周りの氷層の生成挙動の解明が重要である。

伝熱管まわりの氷層の挙動の研究としては、笹口らが Single-domain model であるエンタルピ法により、水平な円管周りや矩形容器内の凍結問題について研究⁽¹⁻³⁾を行っている。また、廣瀬らが Single-domain model を用い、潜熱を比熱に組み込む方法を使用した解析法により、この手法が対称性を有さないモデルや管群モデルへの拡張性を有すること報告⁽⁴⁾している。いずれの場合も円形伝熱管について解析結果と実験との比較を行っているがこの際の実験は 2 本管の管中心が一致する同軸配置のみであり、同軸配置された楕円形伝熱管の管中心を水平方向にずらした場合についての実験結果は十分に無いのが現状である。

そこで本実験では 2 本楕円形伝熱管の場合について異軸に配置された場合の実験を行い、管相互の配置・中心間距離を変えることが管周りの凍結層の生成挙動と凍結層の結合にどのような影響を及ぼすのか詳細に調べた。

3.2 実験装置

図 3.2.1 に実験装置の概略図を，図 3.2.2 に試験部詳細図を示す．また，図 3.1.3，3.2.4，3.2.5 にはそれぞれ試験部，銅管部分，試験器具の写真を示す．本実験装置は大別して試験部，冷媒，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．

試験部は，冷媒を循環させている銅管，その管を固定する厚さ 18 mm のアクリル板からなっている．供試体である銅管の作成には，長径 42 mm，短径 38 mm，肉厚 2 mm の楕円形状の銅管を用いた．

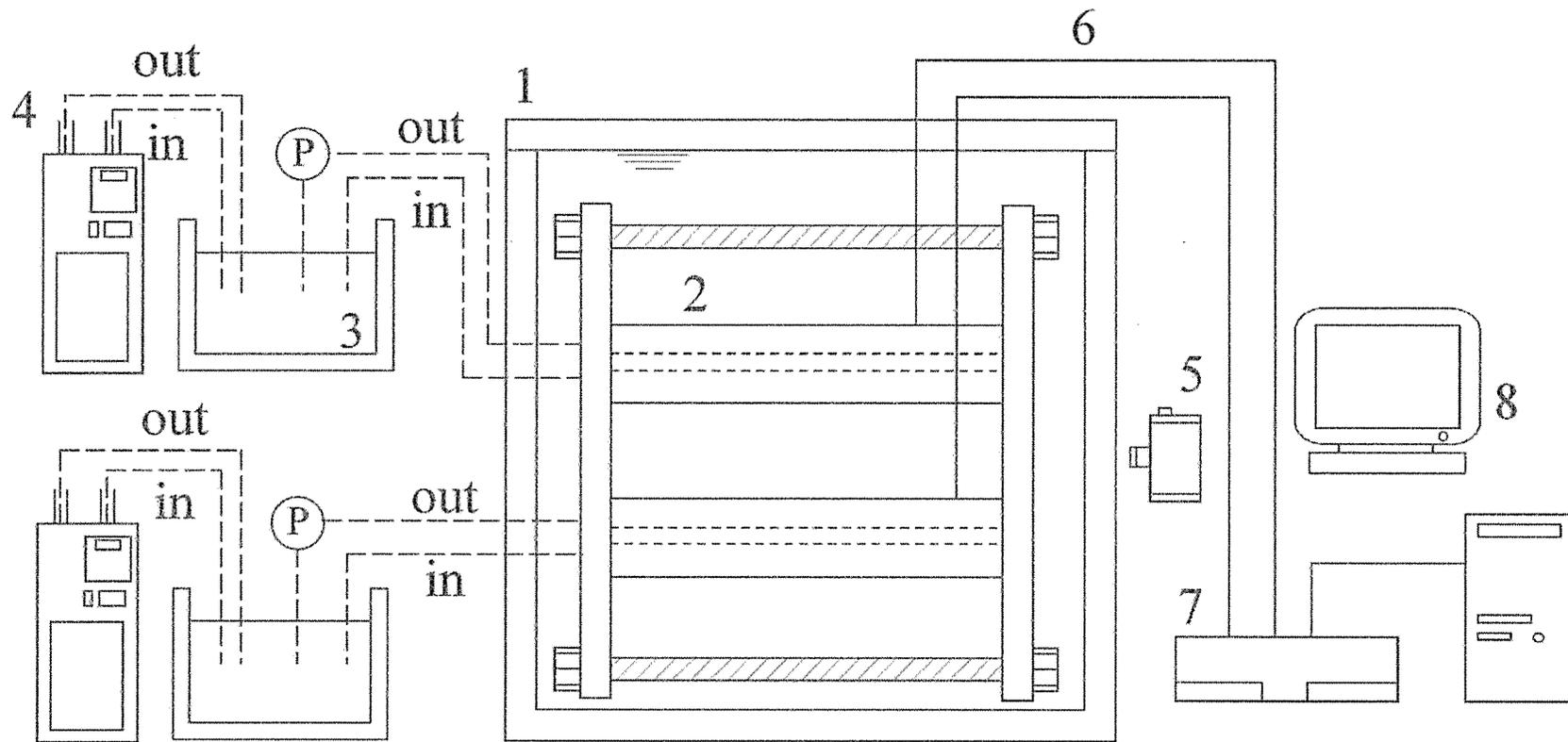
流入口から伝熱管内部に入った冷媒は，管内部にあるパイプをつたい反対側まで進み，中心パイプにあけられた小さな穴から管内部に流れ込む．管内部が冷媒で満たされると，出入り口にある 4 本の流出口からチューブをつたい管外部に出て行く．このように冷媒が管内部に噴出す部分と流出する部分を離すことで，管内部が完全に冷媒で満たされ，場所によって温度差が生じないように工夫をした．斜線②の部分は中心パイプを固定し，さらに管全体をアクリル板に固定するために作成したものである．冷媒用水槽から，冷媒を管まで流すためのチューブは内径 6 mm の柔らかいプラスチック製のものを使用し，チューブ全体に断熱テープを巻きつけ熱の出入りを防いだ．中心パイプは直径 10 mm のアルミパイプを使用し，先端に中心パイプとほぼ同じ断面積になるように数箇所に穴を開け，冷媒が管内部へ流入するための流入口とした．

冷媒は，プロピレングリコールと水を混ぜ合わせた，35% プロピレングリコールを使用した．35% プロピレングリコールの凝固点は -35°C であり，水を凝固させる本実験においては十分な値であると判断した．冷媒温度を一定に保つ際には恒温水循環装置 (EYELACAP-200) を用いた．恒温水循環装置は一定温度 (-5°C ， -10°C) に設定し，実験の間常に運転し，冷媒温度を一定に保つようにした．

実験水槽にはガラス水槽を使用し，水槽内の試験領域は，内寸：高さ 270×幅 250×奥行 235 の領域であり，そこに水を満たし，管を静かに設置した．また，実験水槽についても周囲に断熱材を取り付ける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-コンスタンタン (T 型) 熱電対を用いた．図 3.1.2 に示すように，側面で支えているアクリル板の影響を考慮し，管の軸方向でほぼ中央に 0° ， 45° ， 90° ， 135° ， 180° ， 225° ， 270° ， 330° にそれぞれ 1 点，計 8 箇所に貼り付けた．温度測定機器には，データロガー (YOKOGAWA Data Acquisition Unit DA 100) を用いて温度測定を行い，温度データとして一定時間間隔で保存した．

写真撮影にはデジタルカメラ (NIKON D70) を用いて，凝固界面形状の変化を一定時間間隔で撮影し記録した．



- 1 Experiment Water Bath
- 2 Horizontal elliptical Tubes
- 3 Coolant
- 4 Temperature Control

- 5 Digital Camera
- 6 Thermocouples
- 7 Data Logger
- 8 Personal Computer

Fig.3.2.1 Schematic diagram of experimental apparatus.

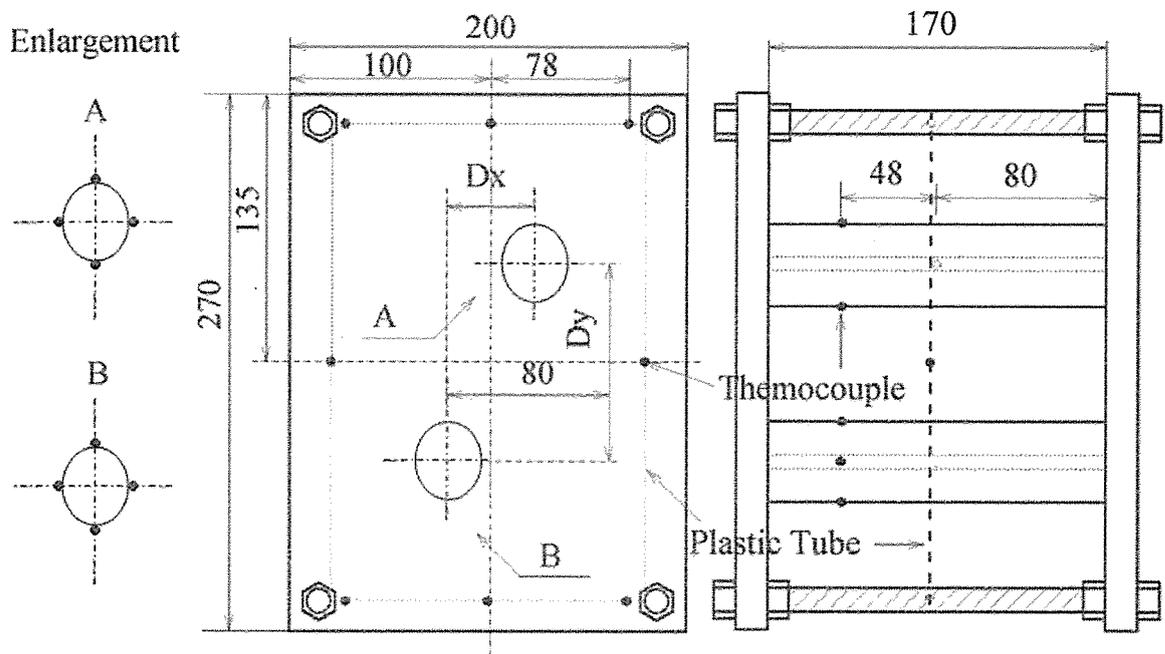


Fig. 3.2.2 (a) Detail of test section for two elliptical tubes. ($\alpha = 0.85, \varphi_g = 0^\circ$)

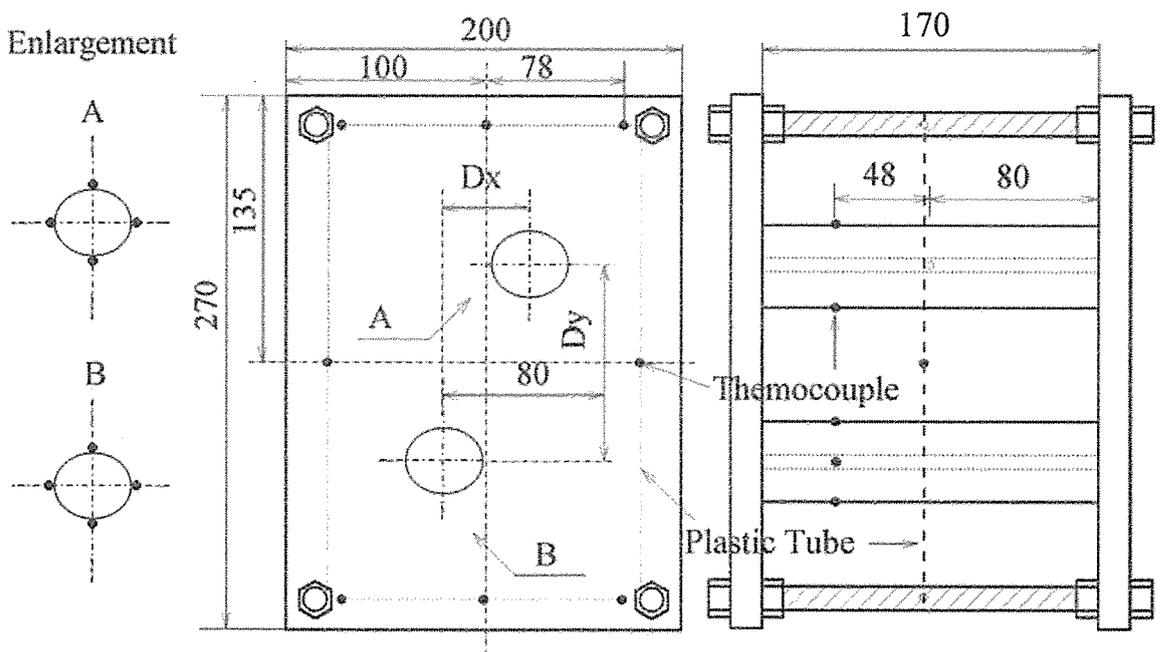
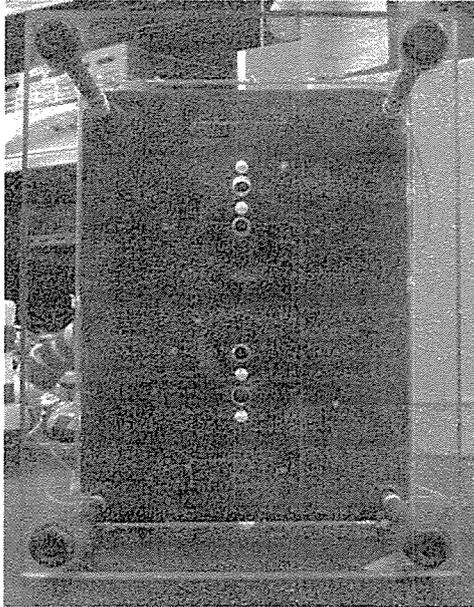
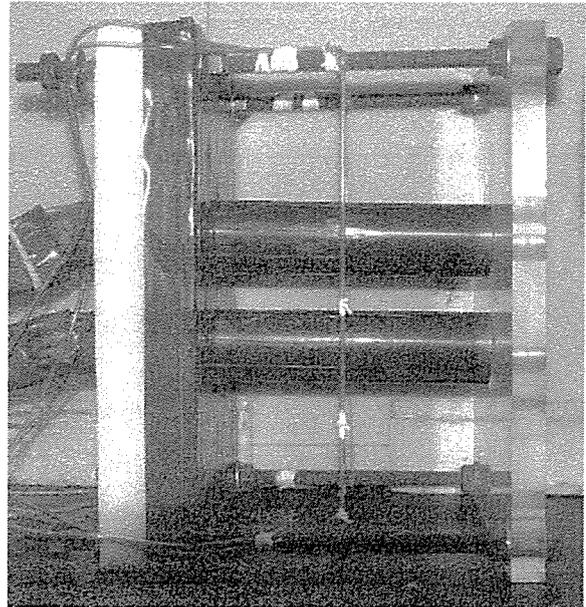


Fig. 3.2.2 (b) Detail of test section for two elliptical tubes. ($\alpha = 0.85, \varphi_g = 90^\circ$)



(a) Front view



(b) Side view

Fig.3.2.3 Photograph of test section for two elliptical tubes.



Fig.3.2.4 Copper elliptical tube of test section.

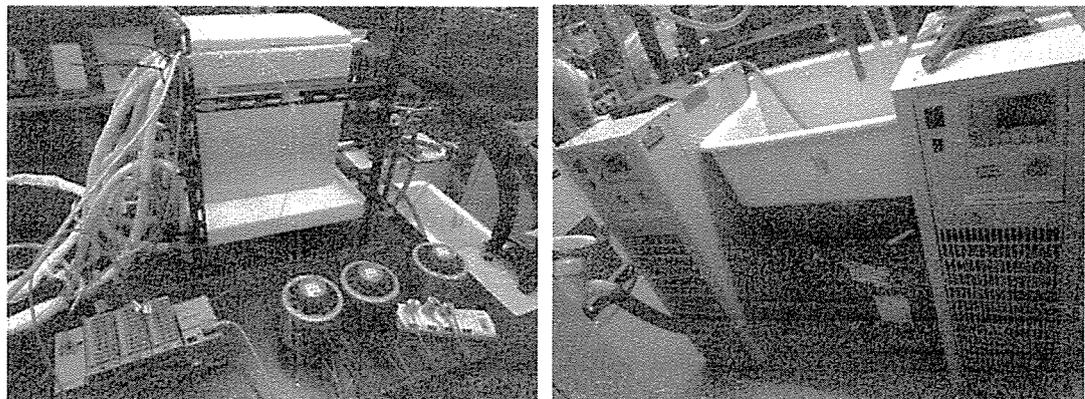


Fig.3.2.5 Photograph of experimental apparatus.

3.3 実験方法

実験を始める前に、冷媒及び実験水槽内の水の温度が所定の温度になるまで恒温水循環装置を作動させ、その間に熱電対をデータロガーに取り付けた。冷媒及び実験水槽内の水が所定の温度に達したところで、実験水槽用の恒温水循環装置のみを停止させ、水槽内の流れが停止するまで待った。アクリル板で固定した管を水槽内に静かに沈め、管内部に冷媒を循環させた時点で実験開始とした。冷媒用の循環装置は実験の間、常に作動させておき冷媒を所定の温度に保つようにした。

実験開始から3時間までは10分間隔に凝固界面形状を撮影し、その後は30分間隔に撮影した。写真撮影にはデジタルカメラ（NIKON D70：画像サイズ；6M（3008×2000）フラッシュモード；発行禁止）を用い、水槽から約1.5m離れたところから管群全体が写りこむように三脚で固定し、撮影を行った。

撮影した写真はコンピュータに取り込み、画像ファイルとして保存した。その後、画像プロセッサ（花子2015）により、凝固界面上を任意にプロットし、その点をベジェ曲線で結んだ近似的な閉曲線を凝固界面形状として凝固率を求めた。凝固率 (Freezing fraction) は式(3.3.1)のように定義した。

$$\text{Freezing fraction} = \frac{A_s}{A_c} \quad (3.3.1)$$

ここで

A_c : 伝熱管断面積

A_s : 氷の断面積

3.4 結果および考察

3.4.1 数値解析結果および考察

数値解析結果で示す流れ場及び温度場において、流れ場の右側にあるカラーバーは周囲熱媒体の速度を示し、凡例ベクトルは速度の大きさの基準であり単位は mm/s である。また、温度場の左側にあるカラーバーは周囲熱媒体の温度を示している。図とカラーバーの対応関係は全て同じであり、これ以降の記述は省略する。

数値解析では過冷却を考慮していないため解析開始時間 $t = 0$ s から凍結が開始する。一方、実験では過冷却により実験開始時間 $t = 0$ s では凍結が開始せず、過冷却解除後から凍結が始まる。このため、解析と実験の凍結開始時間にずれが生じてしまう。そこで、解析と実験の結果を比較する際に示す時間として、実験については過冷却が解除するまでの時間を実際の実験時間から差し引いたものとした。

(1) 楕円管 ($\alpha = 0.85$, $\phi_g = 90^\circ$) $D_x = 40$ mm, $D_y = 80$ mm, $T_{mi} = 4$ °C の場合

図 3.4.1 には代表的な時間での流れ場及び温度場を示す。水の密度は、図 2.3.1 で示した様に $0 \sim 4$ °C の範囲では温度降下と共に単調に減少する。このため $T_{mi} = 4$ °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、上昇流となる。この様子は図 3.4.1(a) から良く分かる。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。一方、図 3.4.1(c) では容器左中部側では渦が生じている。これは、管周りで冷却された流体が容器上部領域の水温に比べ、温度が高いためだと考えられる。また、容器下部側では、 4 °C 付近の水が成層化しているため対流がほとんど起こっていないことがわかる。このため、この領域の水は熱伝導により徐々に冷却されていく。

図 3.4.2 には代表的な凍結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温かい水が停滞し凍結温度まで降下しにくいとと考えられる。

図 3.4.3 には水温の時間変化を示す。水温を上部、中部、下部と 3 つの領域を見ると、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、図 2.3.1 で示した様に、 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。

図 3.4.4 には凝固率の時間変化を示す。この図から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。

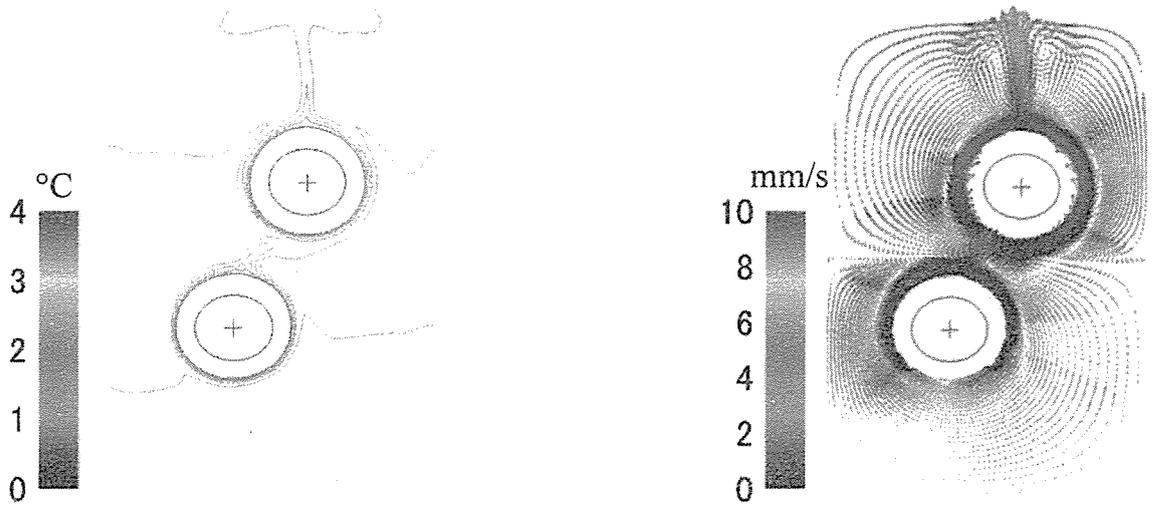
(2) 楕円管 ($\alpha = 0.85$, $\varphi_g = 90^\circ$) $D_x = 40$ mm, $D_y = 80$ mm, $T_{mi} = 7^\circ\text{C}$ の場合

図 3.4.5 に $T_{mi} = 7.0^\circ\text{C}$ の場合における各時間の流れ場及び温度場を示す。図 3.4.5(a)では、下降流が支配的であり、管上部側での流れはほとんどない状態であることがわかる。これは、 $T_{mi} = 7.0^\circ\text{C}$ の条件では、図 2.3.1 で示した様に 4°C 付近まで冷却されるとともに密度が増加し、周囲流体よりも重くなるためである。冷却され下降流となった水は、管下部側の領域に停滞する。その後、さらに冷却され 4°C 以下となった水は、密度反転の影響でこれまでとは逆に周囲流体よりも軽くなり、上昇を始めるようになる。この様子は図 3.4.5(b)から見て取れる。これ以降は、しだいに上昇流の勢いが強くなり、図 3.4.5(c)では上昇流が支配的となり、管下部側の領域ではかなり流れが弱くなっている様子が見られる。

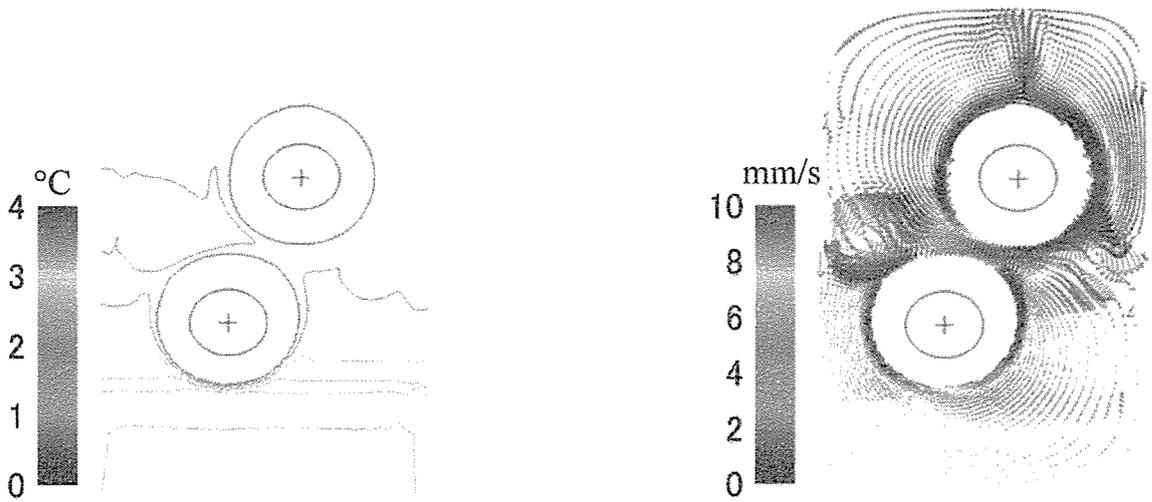
図 3.4.6 には代表的な凍結界面の時間変化を示す。図から下降流が支配的な 1800 秒までは、管下部側で厚く氷が成長していることが分かる。しかし、密度反転により上昇流が支配的になってくると、管上部側での氷の成長が進むようになる様子が見られる。

図 3.4.7 には水温の時間変化を示す。水温を上部、中部、下部と 3 つの領域を見ると、2000 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。

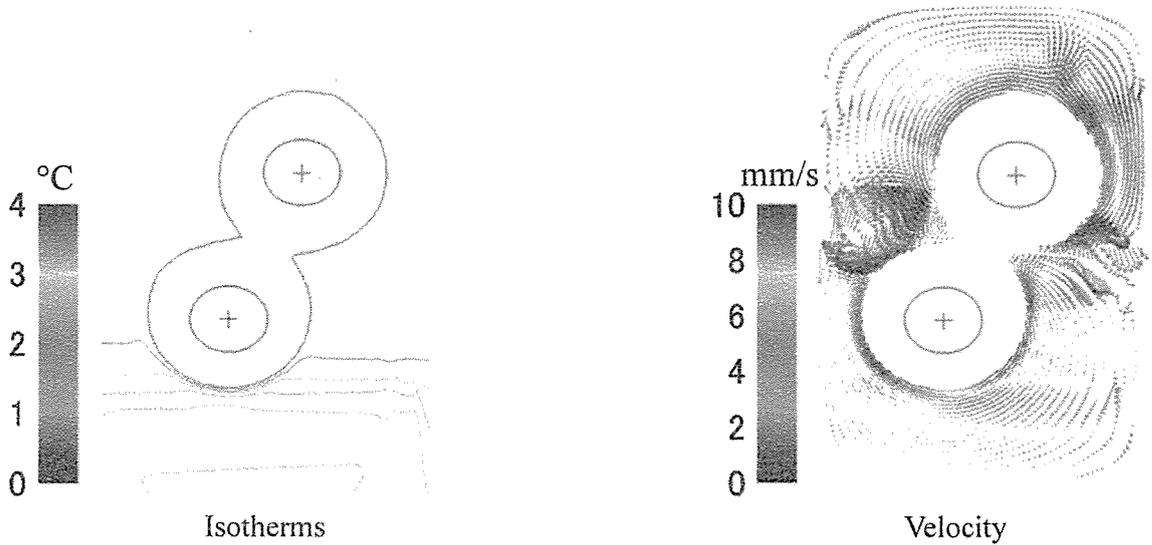
図 3.4.8 には凝固率の時間変化を示す。2000 秒付近から 5000 秒付近まで凝固速度が遅くなっている様子が見られる。この時間帯の流れ場を見ると密度反転が起こっており、下降流から上昇流へ切り替わろうとしている。上昇流へと切り替わった冷たい水は、これまで管上部側に停滞していた暖かい流体を冷却する必要があるため、凝固点までなかなか温度が下がらない。これが原因となり、凝固の遅延が起こっていると考えられる。



(a) 1800s



(b) 5400s



(c) 9000s

Fig.3.4.1 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.
 $(\alpha = 0.85, \varphi_g = 90^\circ, D_x = 40 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm}, T_{ini} = 4 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,1} = -10.0 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,2} = -10.0 \text{ }^\circ\text{C})$

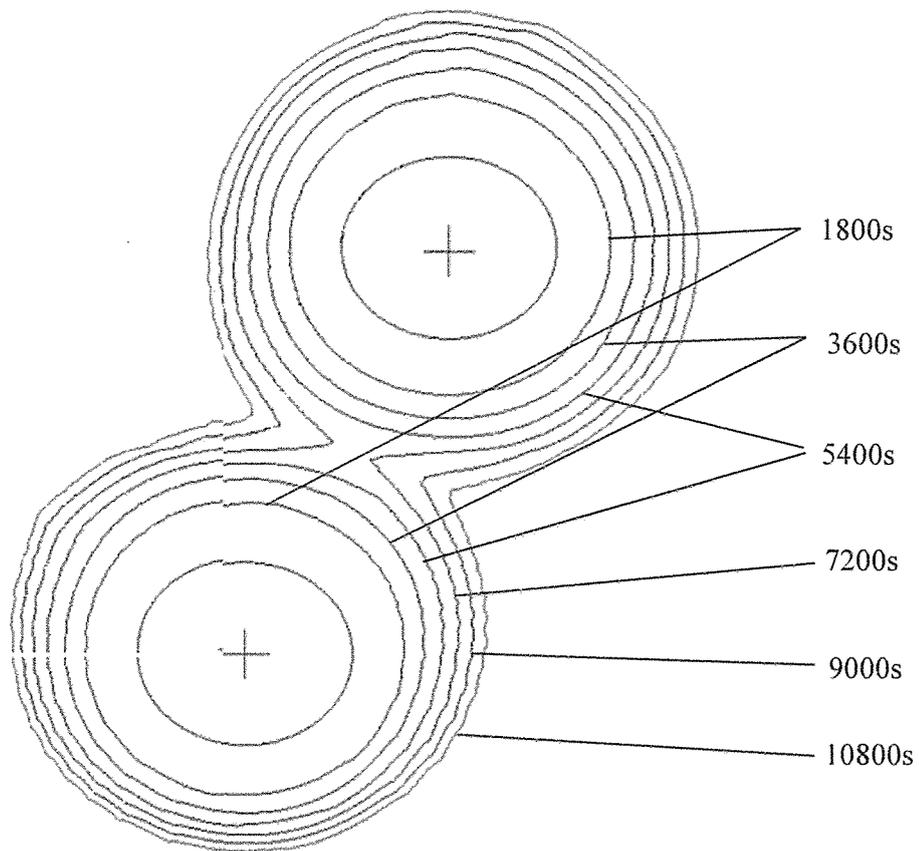


Fig.3.4.2 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.
 ($\alpha = 0.85$, $\varphi_g = 90^\circ$, $D_x = 40$ mm, $D_y = 80$ mm, $T_{ini} = 4$ °C, $T_{l,1} = -10.0$ °C, $T_{l,2} = -10.0$ °C)

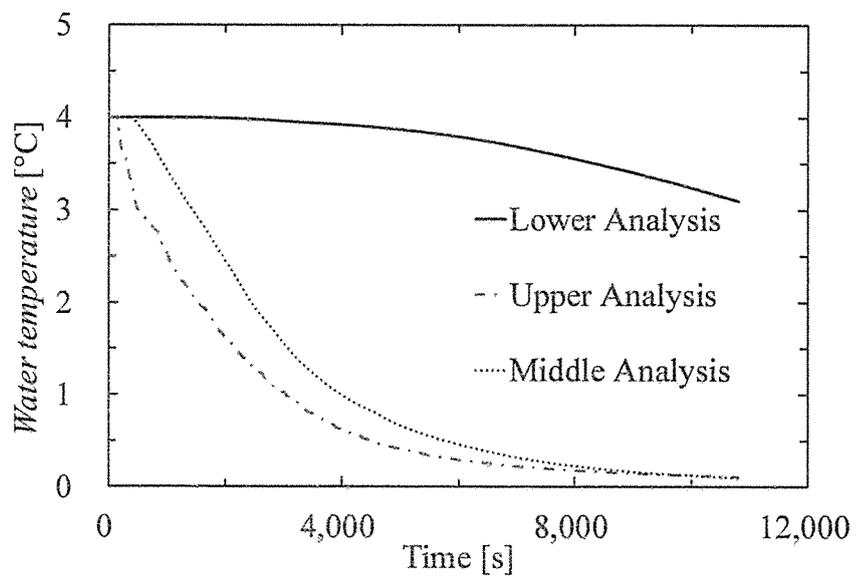


Fig.3.4.3 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.
 ($\alpha = 0.85$, $\varphi_g = 90^\circ$, $D_x = 40$ mm, $D_y = 80$ mm, $T_{ini} = 4$ °C, $T_{l,1} = -10.0$ °C, $T_{l,2} = -10.0$ °C)

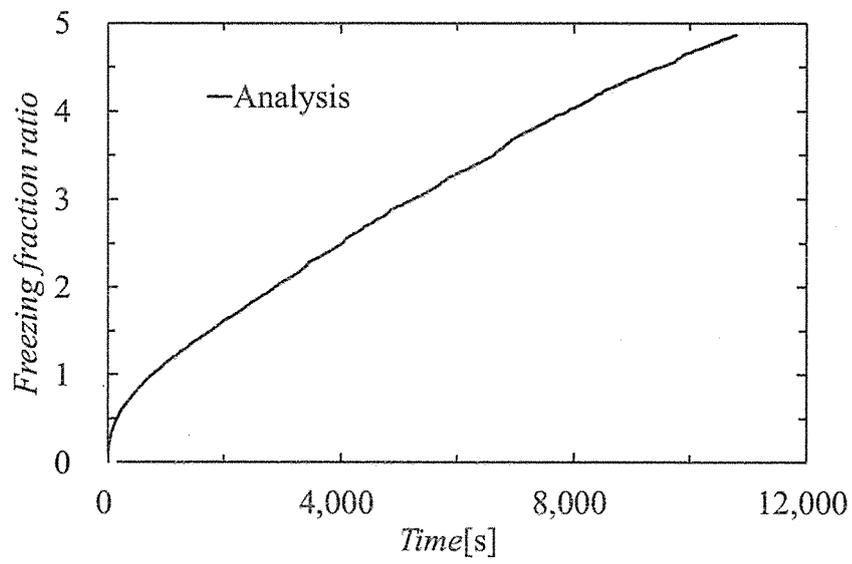


Fig.3.4.4 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.
 ($\alpha = 0.85$, $\varphi_g = 90^\circ$, $D_x = 40$ mm, $D_y = 80$ mm, $T_{im} = 4$ °C, $T_{l,1} = -10.0$ °C, $T_{l,2} = -10.0$ °C)

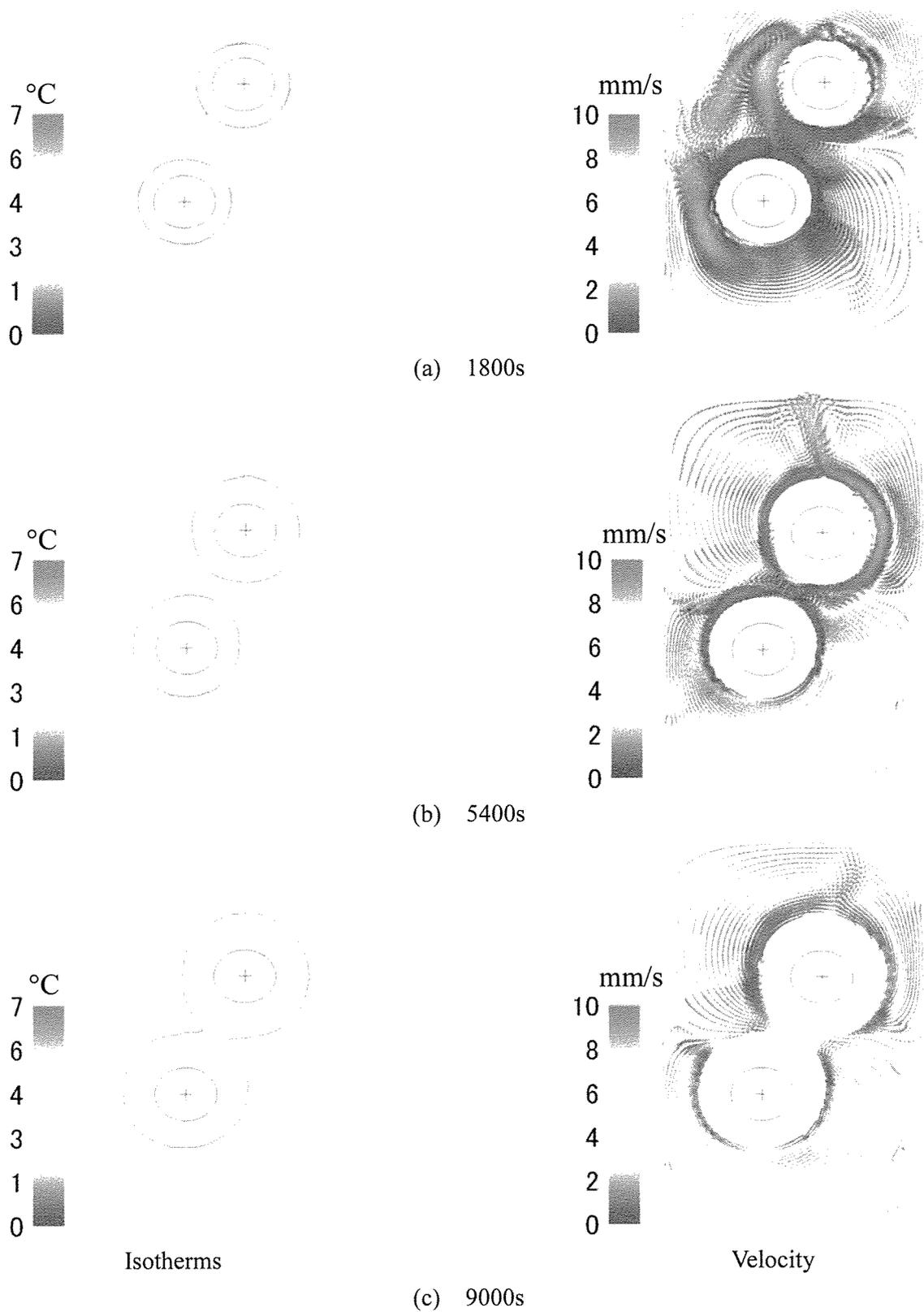


Fig.3.4.5 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.
 ($\alpha = 0.85$, $\varphi_g = 90^\circ$, $D_x = 40$ mm, $D_y = 80$ mm, $T_{ini} = 7$ °C, $T_{t,1} = -10.0$ °C, $T_{t,2} = -10.0$ °C)

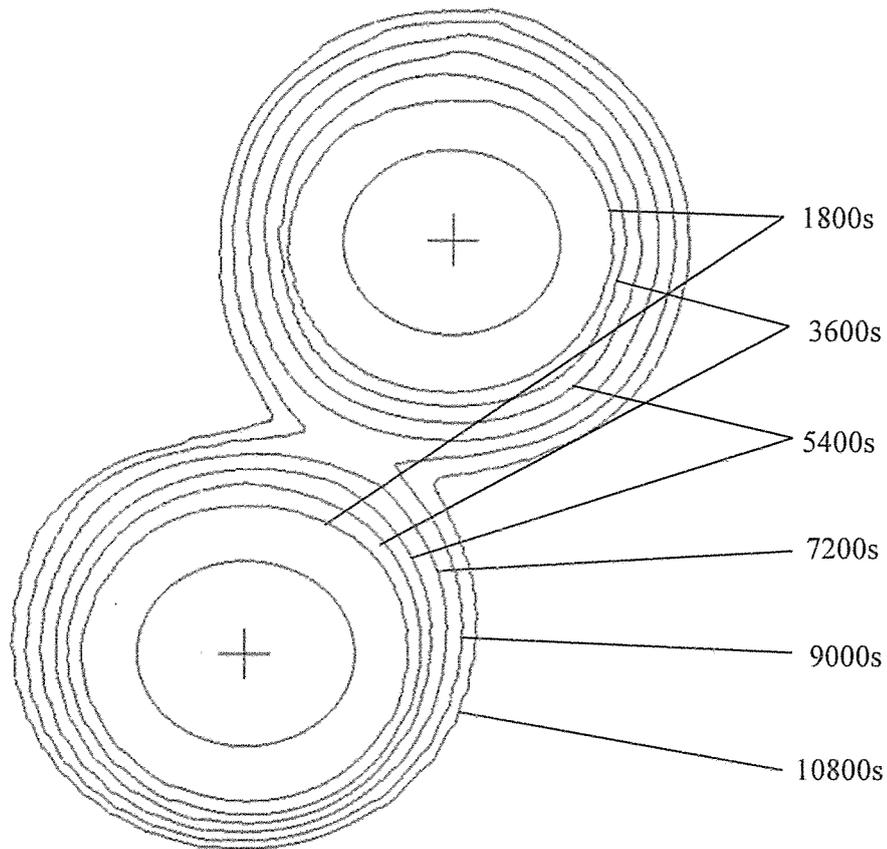


Fig.3.4.6 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.
 ($\alpha = 0.85$, $\varphi_g = 90^\circ$, $D_x = 40$ mm, $D_y = 80$ mm, $T_{ini} = 7$ °C, $T_{t,1} = -10.0$ °C, $T_{t,2} = -10.0$ °C)

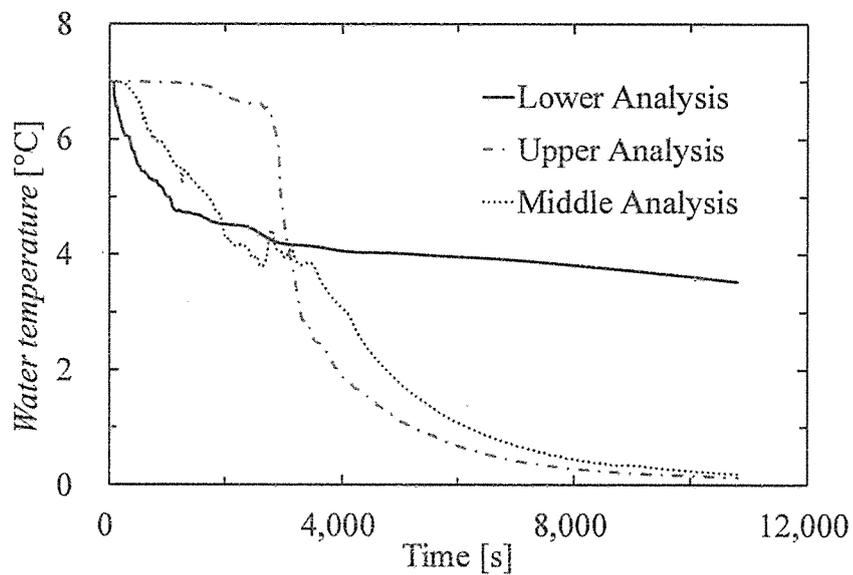


Fig.3.4.7 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.
 ($\alpha = 0.85$, $\varphi_g = 90^\circ$, $D_x = 40$ mm, $D_y = 80$ mm, $T_{ini} = 7$ °C, $T_{t,1} = -10.0$ °C, $T_{t,2} = -10.0$ °C)

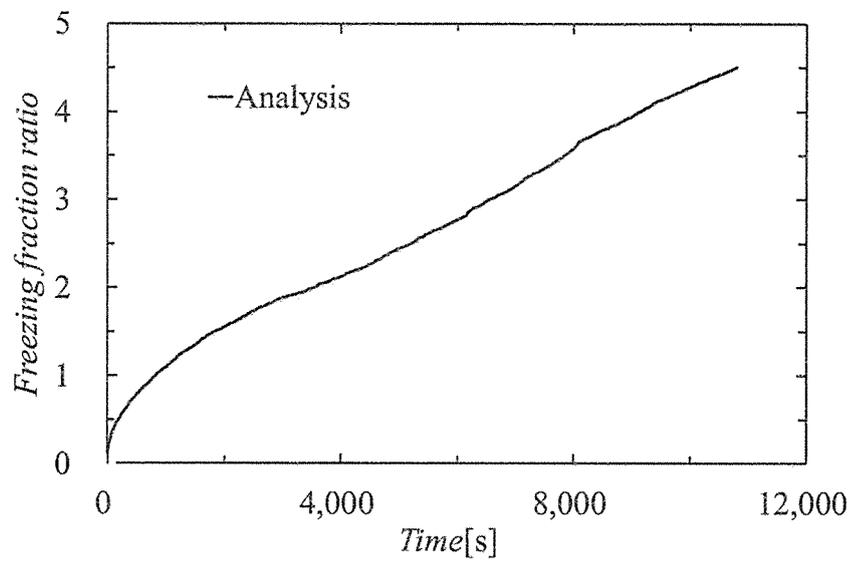


Fig.3.4.8 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.
 ($\alpha = 0.85$, $\varphi_g = 90^\circ$, $D_x = 40$ mm, $D_y = 80$ mm, $T_{ini} = 7$ °C, $T_{t,1} = -10.0$ °C, $T_{t,2} = -10.0$ °C)

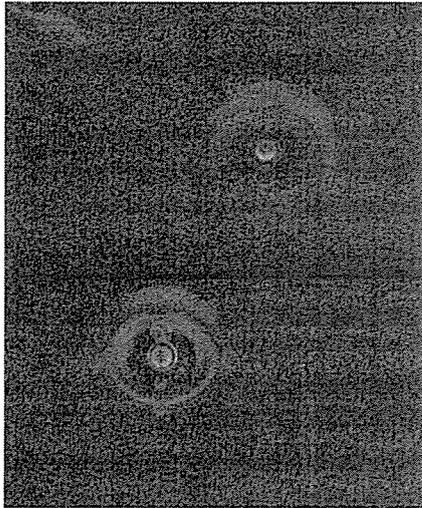
3.4.2 実験結果および考察

(1) 楕円管 ($\alpha = 0.85, \varphi_g = 90^\circ$) $D_x = 40 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm}, T_{ini} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ の場合

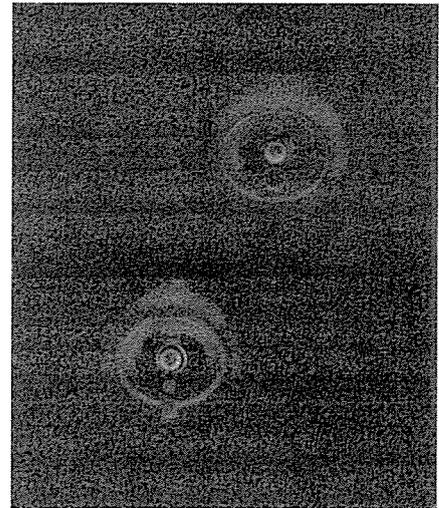
図 3.4.9 には、代表的な時間での凍結界面形状の写真を、図 3.4.10 には凍結界面形状の時間変化を示す。図 3.4.9, 図 3.4.10 から上部管, 下部管共に上側で氷が厚く成長している様子がわかる。さらに, 下部管に比べ, 上部管の氷が全体的に厚く成長している。これは, 上昇流が水槽の上部領域に冷たい水を運んでくるため, 周囲の温度は上部側の方が冷たくなっているためと考えられる。図 3.4.11 は水温の時間変化, 図 3.4.12 に凝固率の時間変化を表す。

(2) 楕円管 ($\alpha = 0.85, \varphi_g = 90^\circ$) $D_x = 40 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm}, T_{ini} = 7 \text{ }^\circ\text{C}$ の場合

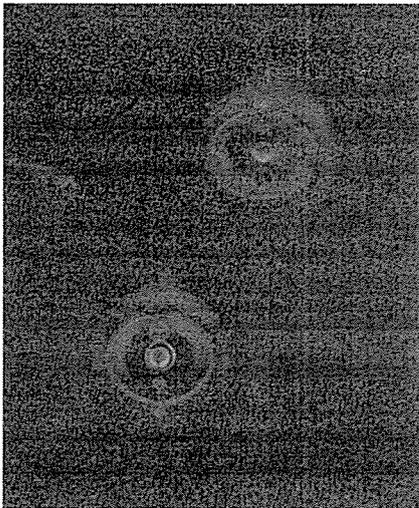
図 3.4.13 には、代表的な時間での凍結界面形状の写真を、図 3.4.14 には凍結界面形状の時間変化を示す。図 3.4.13, 図 3.4.14 から実験開始から 5400 秒付近までは上部管, 下部管共に下側で氷が厚く成長し, それ以降は, 下部管に比べ, 上部管の氷が全体的に厚く成長している。これは, 管周りで冷却され下降流となった水は, 管下部側の領域に停滞する。その後, さらに冷却され $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下となった水は, 密度反転の影響でこれまでとは, 逆に軽くなり, 冷却された流体は上昇を始めるようになるためである。図 3.4.15 は水温の時間変化, 図 3.4.16 に凝固率の時間変化を表す。



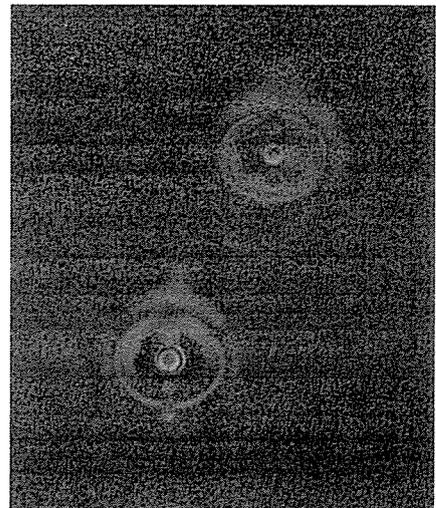
(a) 1800s



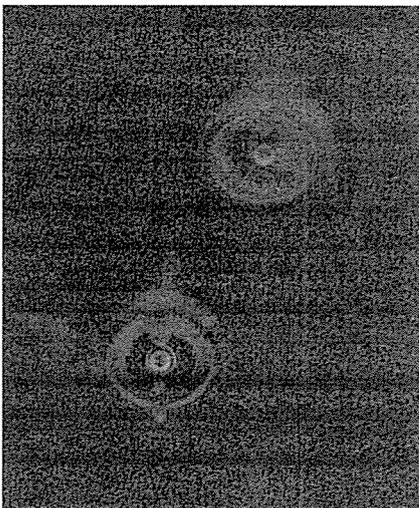
(b) 3600s



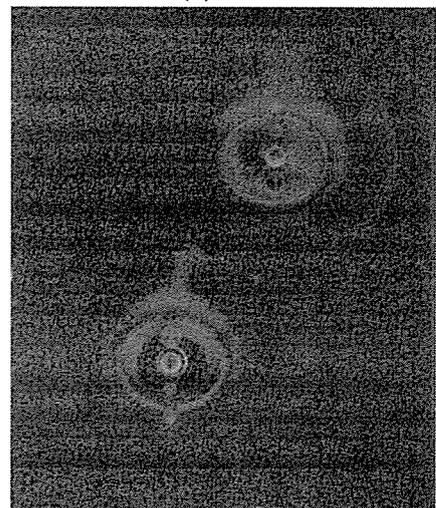
(c) 5400s



(d) 7200s



(e) 9000s



(f) 10800s

Fig.3.4.9 Photograph of freezing front contour at typical time by experiment.
($\alpha = 0.85$, $\varphi_g = 90^\circ$, $D_x = 40$ mm, $D_y = 80$ mm, $T_{ini} = 4$ °C, $T_{l,1} = -10.0$ °C, $T_{l,2} = -10.0$ °C)

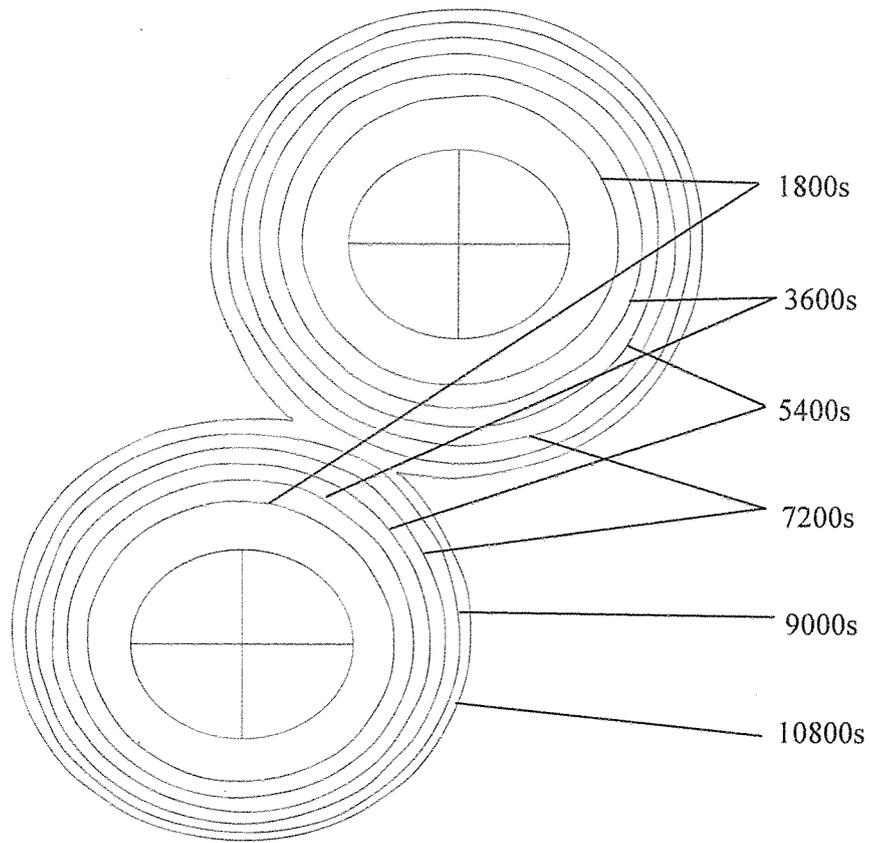


Fig.3.4.10 Transient of freezing front contours by experiment for two elliptical tubes.
 ($\alpha = 0.85$, $\varphi_g = 90^\circ$, $D_x = 40$ mm, $D_y = 80$ mm, $T_{ini} = 4$ °C, $T_{l,1} = -10.0$ °C, $T_{l,2} = -10.0$ °C)

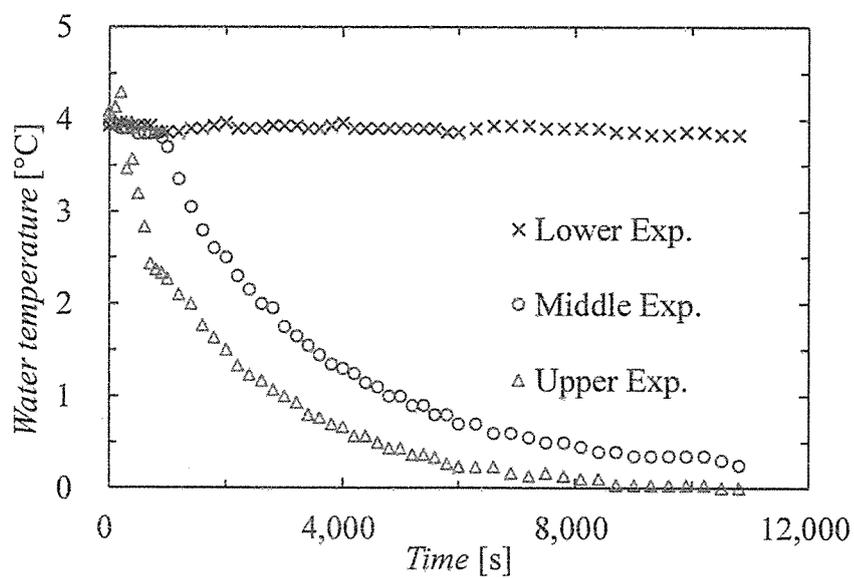


Fig.3.4.11 Time history of water temperature by experiment for two elliptical tubes.
 ($\alpha = 0.85$, $\varphi_g = 90^\circ$, $D_x = 40$ mm, $D_y = 80$ mm, $T_{ini} = 4$ °C, $T_{l,1} = -10.0$ °C, $T_{l,2} = -10.0$ °C)

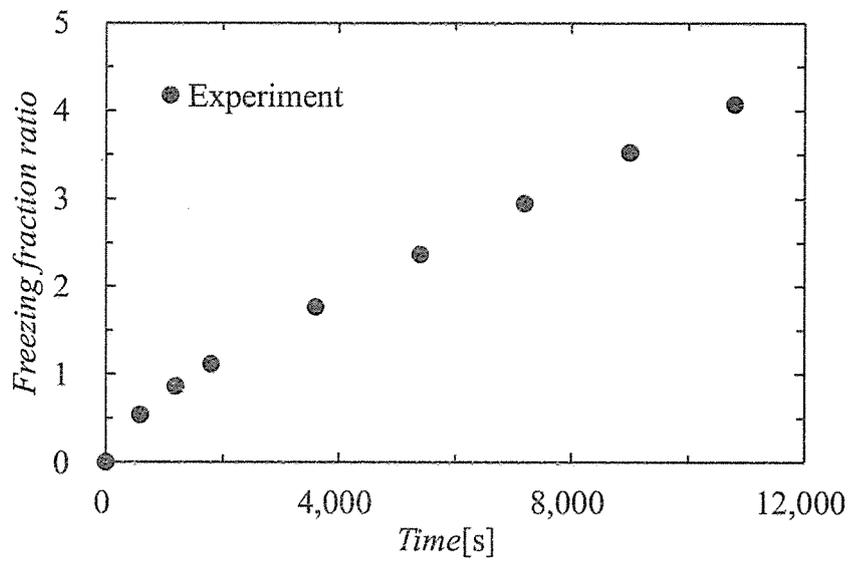
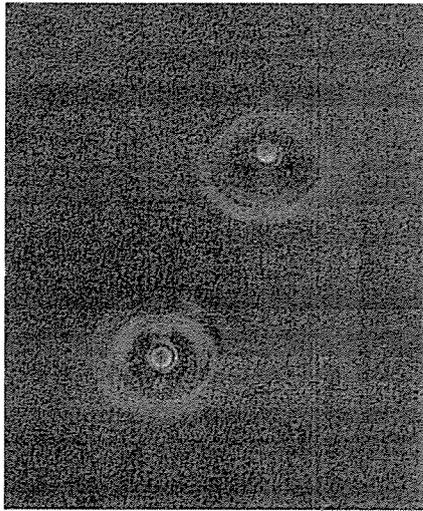
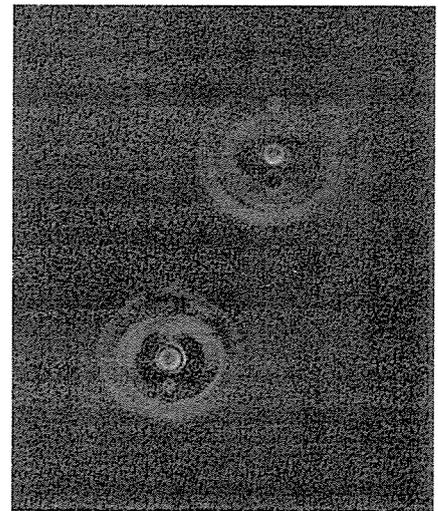


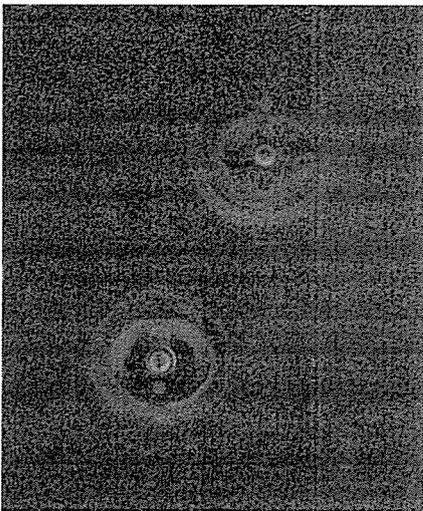
Fig.3.4.12 Time history of freezing fraction ratio by experiment for two elliptical tubes. ($\alpha = 0.85$, $\varphi_g = 90^\circ$, $D_x = 40$ mm, $D_y = 80$ mm, $T_{mi} = 4$ °C, $T_{l,1} = -10.0$ °C, $T_{l,2} = -10.0$ °C)



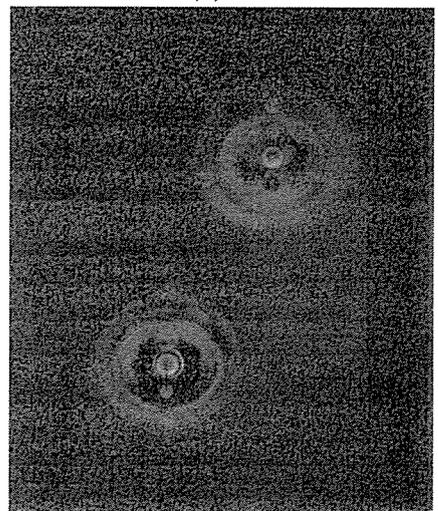
(a) 1800s



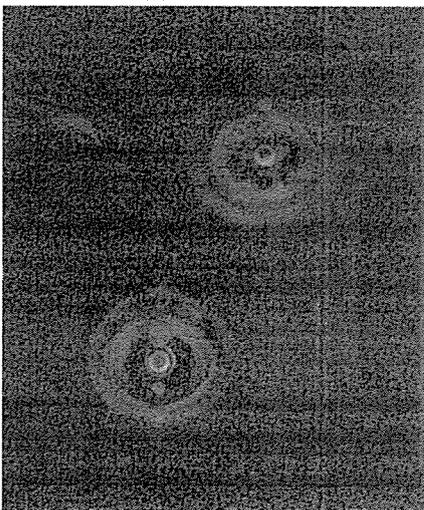
(b) 3600s



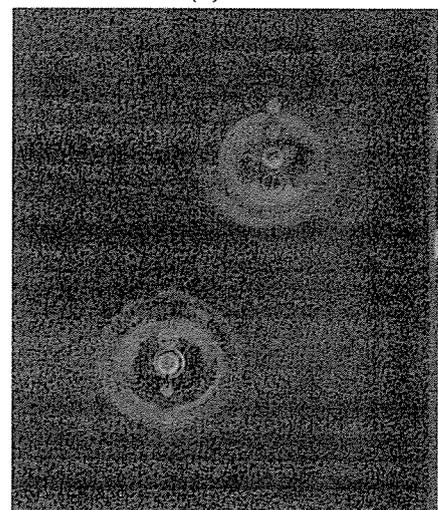
(c) 5400s



(d) 7200s



(e) 9000s



(f) 10800s

Fig.3.4.13 Photograph of freezing front contour at typical time by experiment.
($\alpha = 0.85$, $\varphi_g = 90^\circ$, $D_x = 40$ mm, $D_y = 80$ mm, $T_{ini} = 7$ °C, $T_{l,1} = -10.0$ °C, $T_{l,2} = -10.0$ °C)

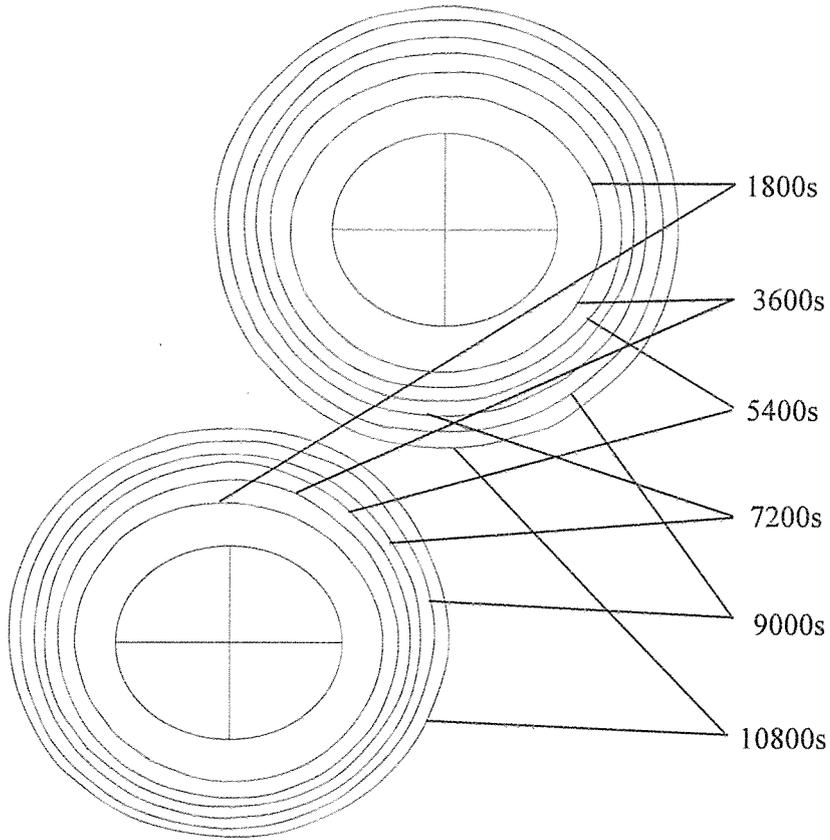


Fig.3.4.14 Transient of freezing front contours by experiment for two elliptical tubes.
 ($\alpha = 0.85$, $\varphi_g = 90^\circ$, $D_x = 40$ mm, $D_y = 80$ mm, $T_{mi} = 7$ °C, $T_{t,1} = -10.0$ °C, $T_{t,2} = -10.0$ °C)

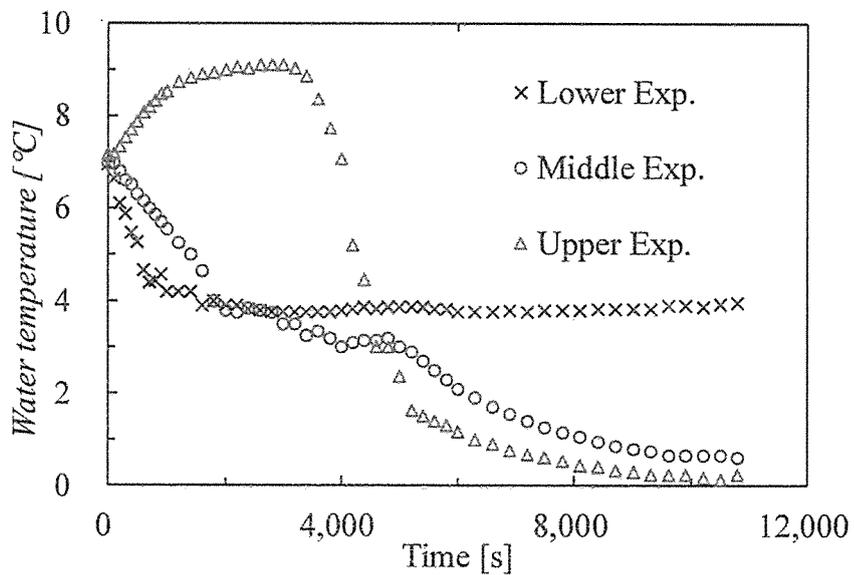


Fig.3.4.15 Time history of water temperature by experiment for two elliptical tubes.
 ($\alpha = 0.85$, $\varphi_g = 90^\circ$, $D_x = 40$ mm, $D_y = 80$ mm, $T_{mi} = 7$ °C, $T_{t,1} = -10.0$ °C, $T_{t,2} = -10.0$ °C)

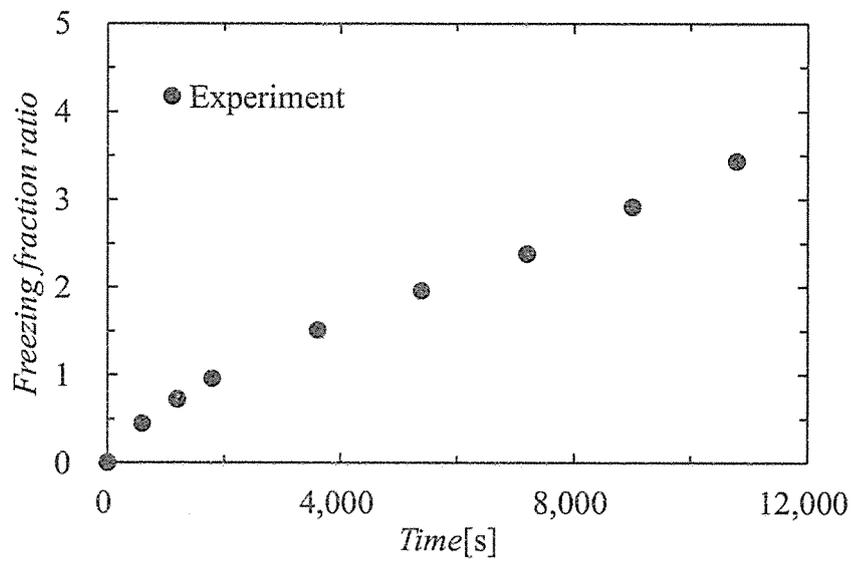


Fig.3.4.16 Time history of freezing fraction ratio by experiment for two elliptical tubes.
 ($\alpha = 0.85$, $\varphi_g = 90^\circ$, $D_x = 40$ mm, $D_y = 80$ mm, $T_{mi} = 7$ °C, $T_{t,1} = -10.0$ °C, $T_{t,2} = -10.0$ °C)

3.4.3 数値解析結果と実験結果の比較

(1) 楕円管 ($\alpha = 0.85$, $\phi_g = 90^\circ$) $D_x = 40$ mm, $D_y = 80$ mm, $T_{mi} = 4$ °Cの場合

図 3.4.17 には解析と実験における凍結界面の時間変化を示す。解析及び実験の両結果において、管上部側の氷が管下部側に比べて厚く成長するという特徴が見られる。また、上部管の氷が下部管に比べて厚くなっていることもよく一致している。

図 3.4.18 には解析と実験における水温の時間変化を示す。解析及び実験の両結果において、水温の時間変化がよく一致しているが、実験結果において、実験開始時の上部、中部水温共に $T_{mi} = 4$ °Cを超えている。これは、実験装置の構造上、実験開始前の準備段階で上部部分の開閉が繰り返し行われるため、その時に熱の出入りがあるためだと考えられる。

図 3.4.19 には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。図から解析と実験の結果についてはほとんど差がなく、非常によく一致していることがわかる。

(2) 楕円管 ($\alpha = 0.85$, $\phi_g = 90^\circ$) $D_x = 40$ mm, $D_y = 80$ mm, $T_{mi} = 7$ °Cの場合

図 3.4.20 には解析と実験における凍結界面の時間変化を示す。解析及び実験の両結果において、上部管、下部管共に下側で氷が厚く成長し、それ以降は、下部管に比べ、上部管の氷が全体的に厚く成長している。

図 3.4.21 には解析と実験における水温の時間変化を示す。解析結果と実験結果を比較すると、上部水温に大きな差が見えた。これは、 $T_{mi} = 4$ °Cの場合と同様、実験開始前の準備段階で上部部分の開閉が繰り返し行われるため、その時に熱の出入りがあるためだと考えられる。

図 3.4.22 に凝固率の時間変化を示す。 $T_{mi} = 4$ °Cの場合に比べ、 $T_{mi} = 7$ °Cの場合は解析結果と実験結果に差が見られたが、凝固率の時間変化の定性的な特徴は一致しているのがわかる。

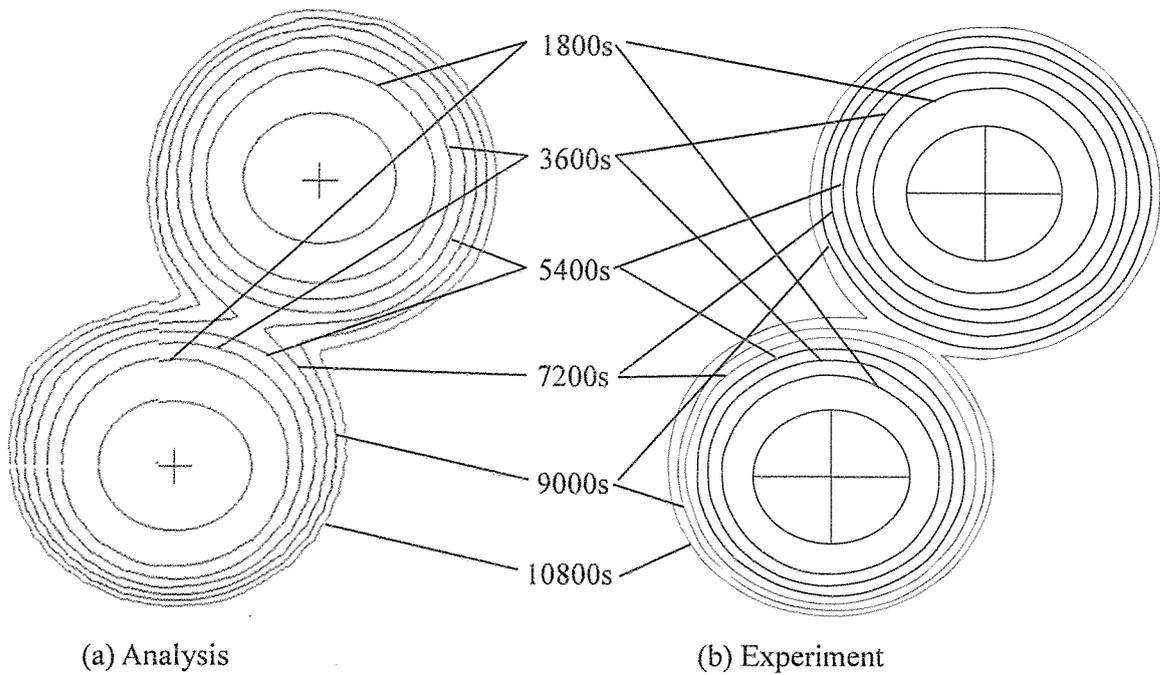


Fig.3.4.17 Comparison of freezing front contour by analysis and experiment.
 $(\alpha = 0.85, \varphi_g = 90^\circ, D_x = 40 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm}, T_{ini} = 4 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,1} = -10.0 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,2} = -10.0 \text{ }^\circ\text{C})$

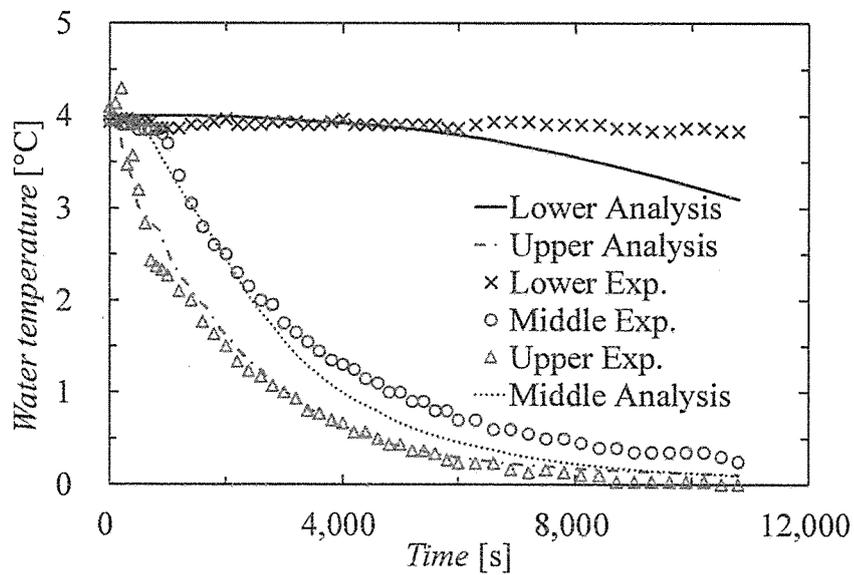


Fig.3.4.18 Comparison of water temperature by analysis and experiment.
 $(\alpha = 0.85, \varphi_g = 90^\circ, D_x = 40 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm}, T_{ini} = 4 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,1} = -10.0 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,2} = -10.0 \text{ }^\circ\text{C})$

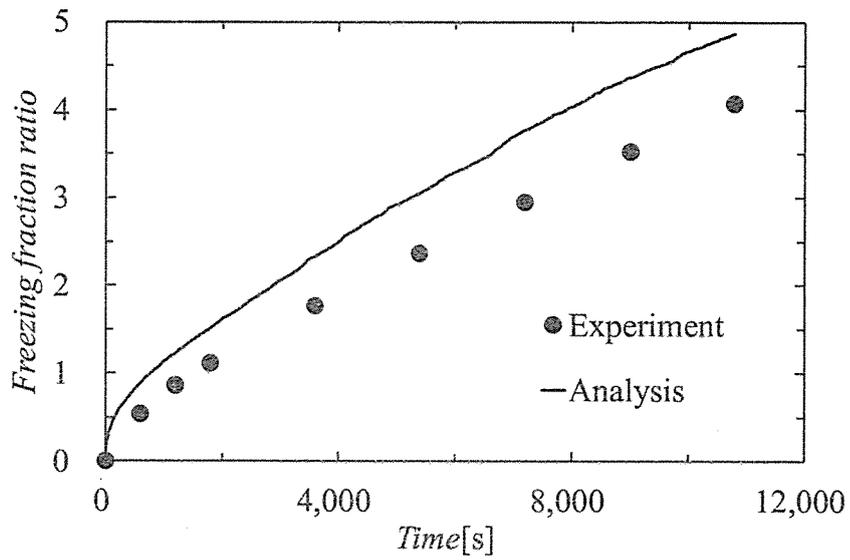


Fig.3.4.19 Comparison of freezing fraction ratio by analysis and experiment.
 $(\alpha = 0.85, \varphi_g = 90^\circ, D_x = 40 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm}, T_{ini} = 4 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,1} = -10.0 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,2} = -10.0 \text{ }^\circ\text{C})$

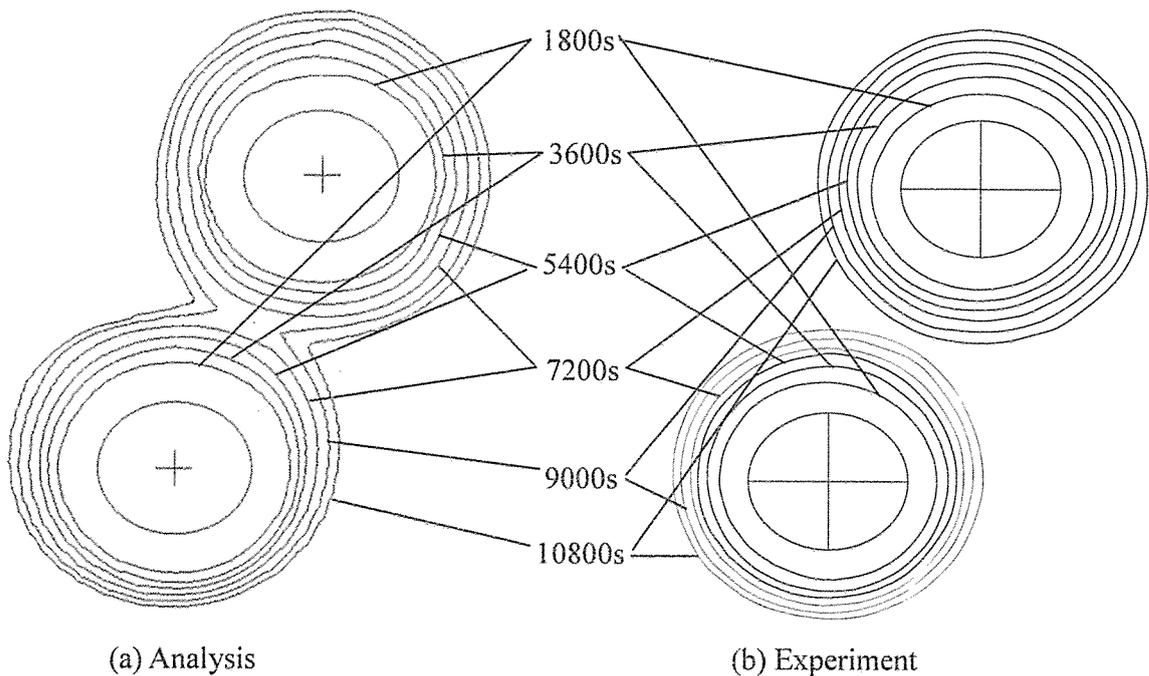


Fig.3.4.20 Comparison of freezing front contour by analysis and experiment.
 $(\alpha = 0.85, \varphi_g = 90^\circ, D_x = 40 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm}, T_{ini} = 7 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,1} = -10.0 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,2} = -10.0 \text{ }^\circ\text{C})$

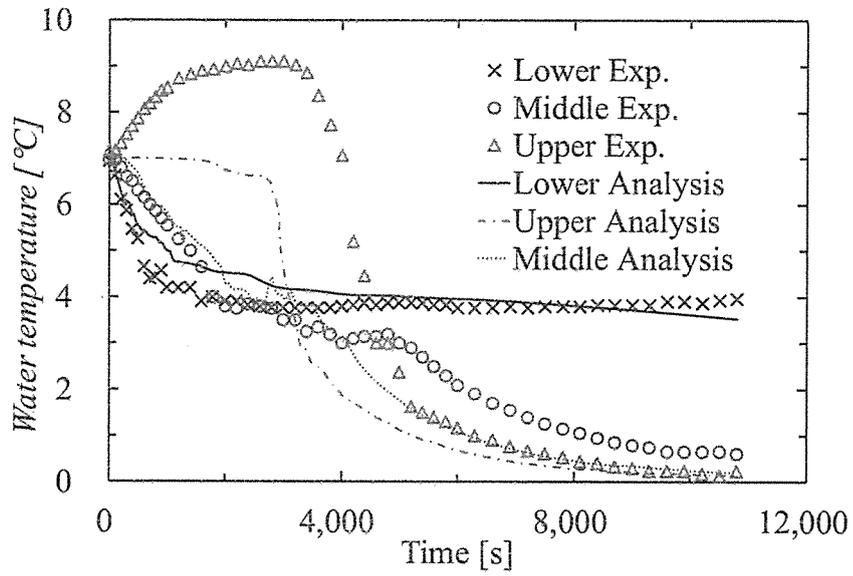


Fig.3.4.21 Comparison of water temperature by analysis and experiment.
 $(\alpha = 0.85, \varphi_g = 90^\circ, D_x = 40 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm}, T_{mi} = 7 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,1} = -10.0 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,2} = -10.0 \text{ }^\circ\text{C})$

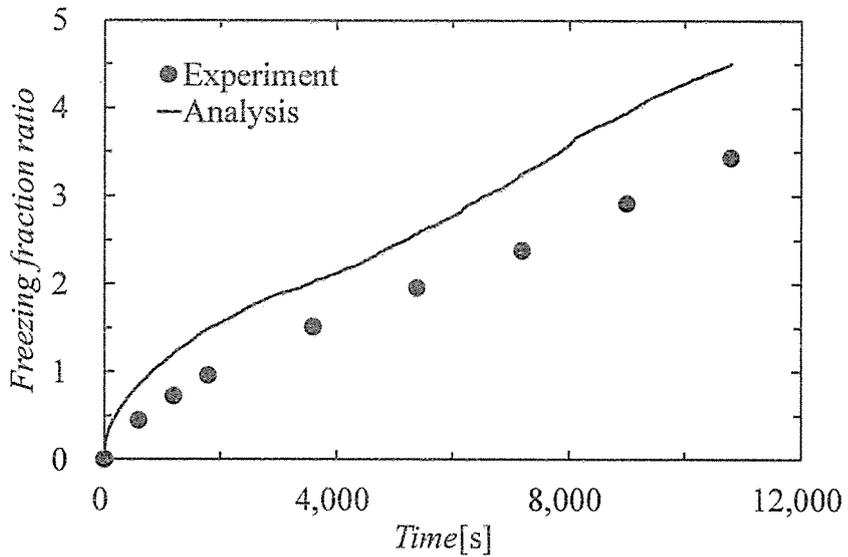


Fig.3.4.22 Comparison of freezing fraction ratio by analysis and experiment.
 $(\alpha = 0.85, \varphi_g = 90^\circ, D_x = 40 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm}, T_{mi} = 7 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,1} = -10.0 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,2} = -10.0 \text{ }^\circ\text{C})$

3.4.4 数値解析結果と厳密解の比較

Stefan 問題⁽⁵⁾とは、初期温度が $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ の水において半無限領域の境界が温度一定に保たれる場合の凍結現象を考えたものであり、円管の内側における氷の成長については理論的な厳密解が求められている。これを拡張すると水温 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ の場合の円管周りの凍結についても理論解が求められる。

さらに、本研究の数値解析手法の妥当性を検証するため、二つの伝熱管がブリッジングする前、管径を $D = 40 \times 10^{-3}\text{ m}$ 、 $T_{ini} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $T_t = -10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ とした場合の解析結果と Stefan 問題の拡張した理論解、水温 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ の場合の円管周りの凝固率について比較した。比較した結果を図 4.2.23 に示す。図 4.2.23 は凝固率 A_s/A_c の時間変化の比較を示している。プロット点が本研究の数値解析の結果であり、実線は Stefan 問題の拡張した理論結果を示す。図からわかるようにブリッジングする前に、本研究の数値解析も Stefan 問題の拡張した理論結果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、凝固率についても良好な一致が見られたことがわかった。

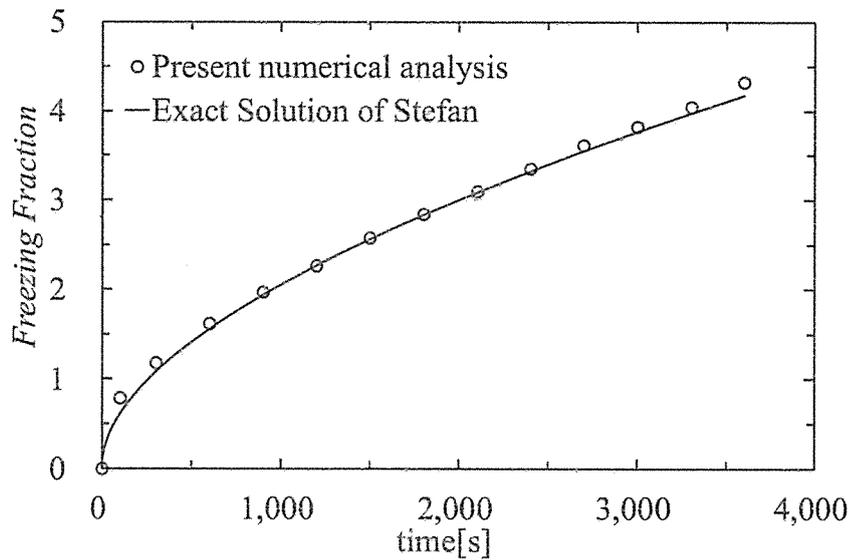


Fig.3.4.23 Comparison of freezing fraction by exact solution and present numerical result for two circular tubes before bridging.

$(D_x = 0\text{ mm}, D_y = 100\text{ mm}, T_{ini} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}, T_{t,1} = T_{t,2} = -10\text{ }^{\circ}\text{C})$

3.5 結言

数値解析結果と実験結果の比較により以下の知見を得た。

- (1) 2本の伝熱管を同軸・異軸と配置したときの管周りの凍結挙動の特性を知ることができた。特に凍結層同士が結合を起こした部分の成長が早いこと、また下部管に比べて上部管の凍結層が大きくなるという特性があることがわかった。
- (2) 管周りの凍結層は基本的には水温によってその成長挙動が決まる。
- (3) 2本管の場合凍結層が結合することにより凝固率の増加は鈍化する。

3.4.3 および 3.4.4 の結果から凍結現象や水温変化、凝固率の定性的な特徴がよく捉えられているため妥当性が示された。また、初期水温が 7°C の場合、解析において水の密度反転現象を捉えられることが示され、本解析手法の妥当性が確認された。

また、 $T_{im}=7^{\circ}\text{C}$ の場合に比べ、 $T_{im}=4^{\circ}\text{C}$ の場合の方が全体的に一致性が見られることから、初期水温が低いほど信頼性が高まることが示された。

さらに、3.4.4 に Stefan 問題の拡張した理論結果との比較結果から、凝固率についても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。

参考文献

- (1) K.Sasaguchi and H.Takeo: "Effect of the orientation of a finned surface on the melting of frozen porous media", Int. J. Heat Mass Transfer, Volume 37, Issue1, pp.13-26, (1994).
- (2) 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, 61(581), pp 208-214, (1995).
- (3) 笹口健吾: "多孔質層内の固 - 液相変化 水の密度逆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, 60(580), pp.4138-4144, (1994).
- (4) 廣瀬宏一, 高橋勇樹, 地代所昌幸: "水中に置かれた水平伝熱管周りの相変化伝熱特性", 日本冷凍空調学会論文集, 25(2), pp.141-148, (2008).
- (5) 甲藤好郎: "伝熱概論", 養賢堂, pp.40-41, 東京(2002).