

## 第4章 蓄熱槽の形状および初期水温の影響

### 4.1 緒言

近年、気候変動・地殻変動の激しさや原油を主とするエネルギーの安定供給が大きな問題となっており、省エネルギーやクリーンなエネルギーの利用が必要になってきている。そのような中で、電力需要の昼夜間及び季節格差縮小の手段が求められており、その1つとして潜熱蓄熱システムが挙げられる。これは、相変化物質(Phase Change Material: 以下PCMと省略する)が凝固・融解する際の大きな潜熱を利用する技術である。PCMは固有の温度で凝固・融解するために、一様温度の良質なエネルギーが得られるという特徴がある。潜熱蓄熱のPCMとしては、住空間の冷房などを対象とする場合において安全性や経済性の面から判断して主に水が使用されている場合が多い。水の潜熱は顕熱の約80倍もあるため、氷として冷熱を蓄えることで、蓄熱空間の縮小化が考えられる。特に氷を用いる氷蓄熱システムは経済性、安全性、環境への影響など蓄熱システムとしてのPCMに求められる条件を満たしており、現在ではビルの空調システムとして利用されることが多い。

氷蓄熱システムには大きく分けてスタティック型とダイナミック型があり、スタティック型とは熱交換器表面(伝熱面)に接触している水を、熱交換器壁面を通して間接的に冷却し、その表面に氷層として成長させるものである。これは同一の場所で製氷・解氷を繰り返すのでスタティック型と呼称される。また、スタティック型には解氷の方法によって内融式と外融式がある。スタティック型における氷蓄熱装置の多くは蓄熱層内に多数の伝熱管が配置されていて、蓄熱時にはこの管群周囲に氷層を生成し、放熱時には氷層を融解させている。それに対し、ダイナミック型は伝熱面上で生成した氷を剥ぎ取り、蓄熱槽に移すという方式である。ダイナミック型の場合、水を急激に過冷却する装置や製氷した氷を掻き砕くための装置が必要となる場合が多く、全体が大型化し、高コスト化してしまう問題がある。今後の氷蓄熱システムの普及が一般住宅や小規模店舗など小規模分散需要者に進むことを予測すると、経済性を損なうことなくシステムをコンパクトかつ高性能化したスタティック型に対する研究開発及び実用化が望まれる。

また、相変化現象は工学的に重要な現象であり、PCMの相変化現象を利用した装置が実用化するために、現在まで多くの研究が行なわれてきている。実験的な研究としては古くから多くの報告がある。齋藤らは密度反転を伴う水平な円管内、外の凍結過程について、凍結界面形状に対する自然対流の影響を明らかにした<sup>(1),(2)</sup>。笹口らは2本の円管周りの固-液相変化に対して、初期水温が凝固過程に及ぼす影響及び管壁温が融解過程に及ぼす影響を明らかにした<sup>(3)</sup>。また、鳥越らは、水平な円管群周りの固-液相変化過程について、管の本数や配置の影響を調べている<sup>(4)</sup>。

一方、数値解析を行なう場合、相変化現象は固相と液相との境界が時間と共に移動する移動境界問題となるために、相界面位置の取り扱いの上で困難な問題となる。こ

の問題に対する解析方法を大別すると、固相と液相を別々の式で解き、相界面でのエネルギーバランス式によって界面の位置及び移動を決定する Multi-domain model と、固相と液相を区別せず混合モデルによる一組の式で解く Single-domain model がある<sup>(5)</sup>。

Multi-domain model には境界固定法や Body fit 法などがある。境界固定法は正確な相界面位置を求めることが出来るという利点があるが、相界面形状が複雑な場合には界面位置の取り扱い上の問題がある。Body fit 法は、境界固定法では困難な複雑な問題でも解析可能なように改良したものであるが、時間ステップごとにメッシュ生成を行なう必要があり計算時間が多くかかるという問題がある。Single-domain model にはエンタルピ法や潜熱を比熱に組み込む方法などがあり、いずれの場合もモデル全体を同一の方程式系で解くことが出来る。また、Multi-domain model よりも複雑な幾何学形状に対応できるという利点があり、現在ではより多く使用されている。しかし、欠点として相界面位置が若干曖昧になることが挙げられるが、これは格子を細かくすることである程度防ぐことが出来る。

このような解析手法を用いて相変化現象を解析した例はこれまで、いくつか報告されている。Multi-domain model により相変化現象を解析した例としては、古くは齋藤らが境界固定法により水平な円管周りの凍結問題を解析し<sup>(6)</sup>、Single-domain model による相変化現象を解析した例としては、笹口らが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を解いている<sup>(7)</sup>。また、潜熱を比熱に組み込む方法により T.J.Scannon らが矩形容器内の融解・凍結問題について<sup>(8)</sup>、千葉らが円管内を流れる水の凍結問題について解析している<sup>(9)</sup>。

スタティック型の氷蓄熱システムを一般的に実用化するための 1 つの見解として、氷生成の高効率化が挙げられる。一般向けの氷蓄熱システムは、コンパクト化されることで生じる装置全体の縮小の影響で伝熱管の大きさや本数が制限されるため従来の氷蓄熱システムより蓄熱効率が低下してしまうのが問題である。この問題を解決するためには、伝熱管の形状や相互配置、蓄熱槽のアスペクト比等を変化させることによって、蓄熱槽内の温度を短時間で冷却し、氷生成の効率を上げることが重要だと考えられる。

このように伝熱管周りの相変化現象は、管本数が 1 本あるいは 2 本の場合について数値解析した例はあるが、計算モデルとして対称性があるものに限られていた。さらに、管の本数を増減させる場合には計算格子を作成し直さなければならず手間のかかるものであった。しかしながら先頃、Single-domain model と潜熱を比熱に組み込む方法を採用した解析法が示され、対称性を有さないモデルや管群モデルへと拡張を有することが報告<sup>(10-11)</sup>されている。

本章では、伝熱管周りの凍結過程に着目し、Single-domain model と潜熱を比熱に組み込む方法による数値解析を行い、特に水槽内の初期水温や伝熱管の形状、相互配置、水槽の大きさの変化や影響での氷生成の挙動や効率について調べることを目的としている。まず、水槽内の初期水温を一定の温度とし、垂直方向軸間距離を固定、水平

方向軸間距離を拡張，さらに管形状の変化（円管→楕円管）の影響による2本の伝熱管周りの凍結現象や水槽内の流体の流れ場の様子を詳細に調べた．次に水槽の容積を一定として幅と高さを逆転させ，初期水温や管形状等は同条件のもと，凍結現象や水槽内の流体の流れ場の様子を調べ，初期水温や管の形状，水平方向軸間距離，水槽のアスペクト比が氷生成の効率にどのような影響を及ぼすのかを詳細に調べた．

## 4.2 水槽サイズ $X=180\text{ mm}$ , $Y=270\text{ mm}$ の場合の凍結現象

### 4.2.1 $T_{ini}=4\text{ }^{\circ}\text{C}$ の場合における数値解析

#### (1) 楕円管 ( $\alpha=0.7$ , $\varphi_g=0^{\circ}$ ) $D_x=0\text{ mm}$ , $D_y=80\text{ mm}$ の場合

図 4.2.1 には代表的な時間での流れ場及び温度場を示す。  $T_{ini}=4\text{ }^{\circ}\text{C}$  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 4.2.1(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。また、容器下部側では、 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  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るため、この領域では熱伝導が支配的となる。この様子は、図 4.2.1(b)～図 4.2.1(c) からわかる。

図 4.2.2 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、上部管の方が下部管に比べ、若干厚く成長していることがわかる。これは、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考えられる。

図 4.2.3 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、 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  から緩やかに減少する。これは、初期水温  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  にしているため、最大密度領域である  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  の流体が容器下部に停滞し、管周りで冷却された流体が上昇していくためだと考えられる。

図 4.2.4 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 ( $\alpha=0.7$ , $\varphi_g=0^{\circ}$ ) $D_x=20\text{ mm}$ , $D_y=80\text{ mm}$ の場合

図 4.2.5 には代表的な時間での流れ場及び温度場を示す。(1) の場合は流体の流れ方向が下から上への上下方向に対し、この条件においては、流れ方向が左下から右上の斜め方向になっている。この様子は図 4.2.5(a) からわかる。

図 4.2.6 には代表的な凍結界面の時間変化を示す。(1) の場合と同様に、上部管の方が下部管に比べ、若干厚く成長していることが分かる。

図 4.2.7 には水温の時間変化を示す。(1) の場合と比べ、短時間で水槽内の水温が全体的に下がることがわかる。

図 4.2.8 には凝固率の時間変化を示す。(1) の場合程ではないが凝固率の伸びが時間の経過と共に緩やかになっている。

#### (3) 楕円管 ( $\alpha=0.7$ , $\varphi_g=0^{\circ}$ ) $D_x=40\text{ mm}$ , $D_y=80\text{ mm}$ の場合

図 4.2.9 には代表的な時間での流れ場及び温度場を示す。(2)の場合と同様に流体の流れ方向が左下から右上の斜め方向になっている。この様子は図 4.2.9(a)～図 4.2.9(c)からわかる。

図 4.2.10 には代表的な凍結界面の時間変化を示す。(1), (2)の場合と同様に, 上部管の方が下部管に比べ, 若干厚く成長していることが分かる。

図 4.2.11 には水温の時間変化を示す。(1), (2)の場合と比べ, 短時間で水槽内の水温が全体的に下がることわかる。

図 4.2.12 には凝固率の時間変化を示す。この図から, 時間の経過と共に凝固率の増大がわかる。

図 4.2.13 は(1)～(3)の場合における各水平方向軸間距離の凝固率の時間変化を示す。この図から, これらの条件は水平方向軸間距離を大きくとると凝固率が増大することが示される。

これらの結果から,  $\alpha=0.7$ ,  $\varphi_g=0^\circ$ の条件下では水平方向軸間距離を大きくとることにより, 水槽内の水温の低下時間を短縮化することができ, それに応じ, 凝固率が増大することがわかる。

#### (4) 楕円管 ( $\alpha=0.7$ , $\varphi_g=90^\circ$ ) $D_x=0$ mm, $D_y=80$ mm の場合

(1)の場合と同条件で, 配置角度を $\varphi_g=90^\circ$  (横型)と変化させた場合の結果を示す。図 4.2.14 には代表的な時間での流れ場及び温度場を示す。(1)の場合と同様に  $T_{ini}=4^\circ\text{C}$ 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り, さらに時間が経過すると, 容器下部側では,  $4^\circ\text{C}$ 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るため, この領域では熱伝導が支配的となる。この様子は, 図 4.2.14(a)～図 4.2.14(c)からわかる。

図 4.2.15 には代表的な凍結界面の時間変化を示す。上部管の方が下部管に比べ, 若干厚く成長していることがわかるが, (1)の場合と比べ, 上部管と下部管の氷の成長の差があまり見られなかった。

図 4.2.16 には水温の時間変化を示す。(1)の場合と比べ, 水槽内の水温が全体的に下がりにくいことがわかる。

図 4.2.17 には凝固率の時間変化を示す。この図から凝固率が時間の経過と共に増大していくことがわかる。

#### (5) 楕円管 ( $\alpha=0.7$ , $\varphi_g=90^\circ$ ) $D_x=20$ mm, $D_y=80$ mm の場合

図 4.2.18 には代表的な時間での流れ場及び温度場を示す。(2)の場合と同様に この条件においては, 管間は流れ方向が左下から右上の斜め方向になり, 上部管上部では, 流れ方向が右下から左上の斜め方向になっている。この様子は図 4.2.18(a)からわかる。さらに, 時間が経過するに従って, 流れ方向が全体的に左下から右上の斜め方向になっている。この様子は図 4.2.18(b)～図 4.2.18(c)からわかる。

図 4.2.19 には代表的な凍結界面の時間変化を示す。上部管の方が下部管に比べ、厚く成長していることがわかる。

図 4.2.20 には水温の時間変化を示す。(4)の場合に比べ、短時間で水槽内の水温が全体的に下がることがわかるが、(2)の場合と比べると、水槽内の水温が全体的に下がりにくいことがわかる。

図 4.2.21 には凝固率の時間変化を示す。(4)の場合と同様に凝固率が時間の経過と共に増大していくことがわかる。

(6) 楕円管 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ )  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm の場合

図 4.2.22 には代表的な時間での流れ場及び温度場を示す。(5)の場合と同様に 管間は流れ方向が左下から右上の斜め方向、上部管上部では、流れ方向が右下から左上の斜め方向になり。時間が経過するに従って、流れ方向が全体的に左下から右上の斜め方向になっている。この様子は図 4.2.22(a)～図 4.2.22(c)からわかる。

図 4.2.23 には代表的な凍結界面の時間変化を示す。上部管の方が下部管に比べ、厚く成長していることがわかる。

図 4.2.24 には水温の時間変化を示す。(4), (5)の場合に比べ、短時間で水槽内の水温が全体的に下がることがわかるが、(3)の場合と比べ、水槽内の水温が全体的に下がりにくいことがわかる。

図 4.2.25 には凝固率の時間変化を示す。(4), (5)の場合と同様に凝固率が時間の経過と共に増大していくことがわかる。

図 4.2.26 には(4)～(6)の場合における各水平方向軸間距離の凝固率の時間変化を示す。この図から、(1)～(3)の場合と同様、これらの条件も水平方向距離を大きくとると凝固率が増大することが示される。

これらの結果から、 $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ の条件下では水平方向軸間距離を大きくとることにより、水槽内の水温の低下時間を短縮化することができ、それに応じ、凝固率が増大することが示された。また、(1)～(3)の場合と比べ、水槽内の水温が下がりにくいこともわかる。

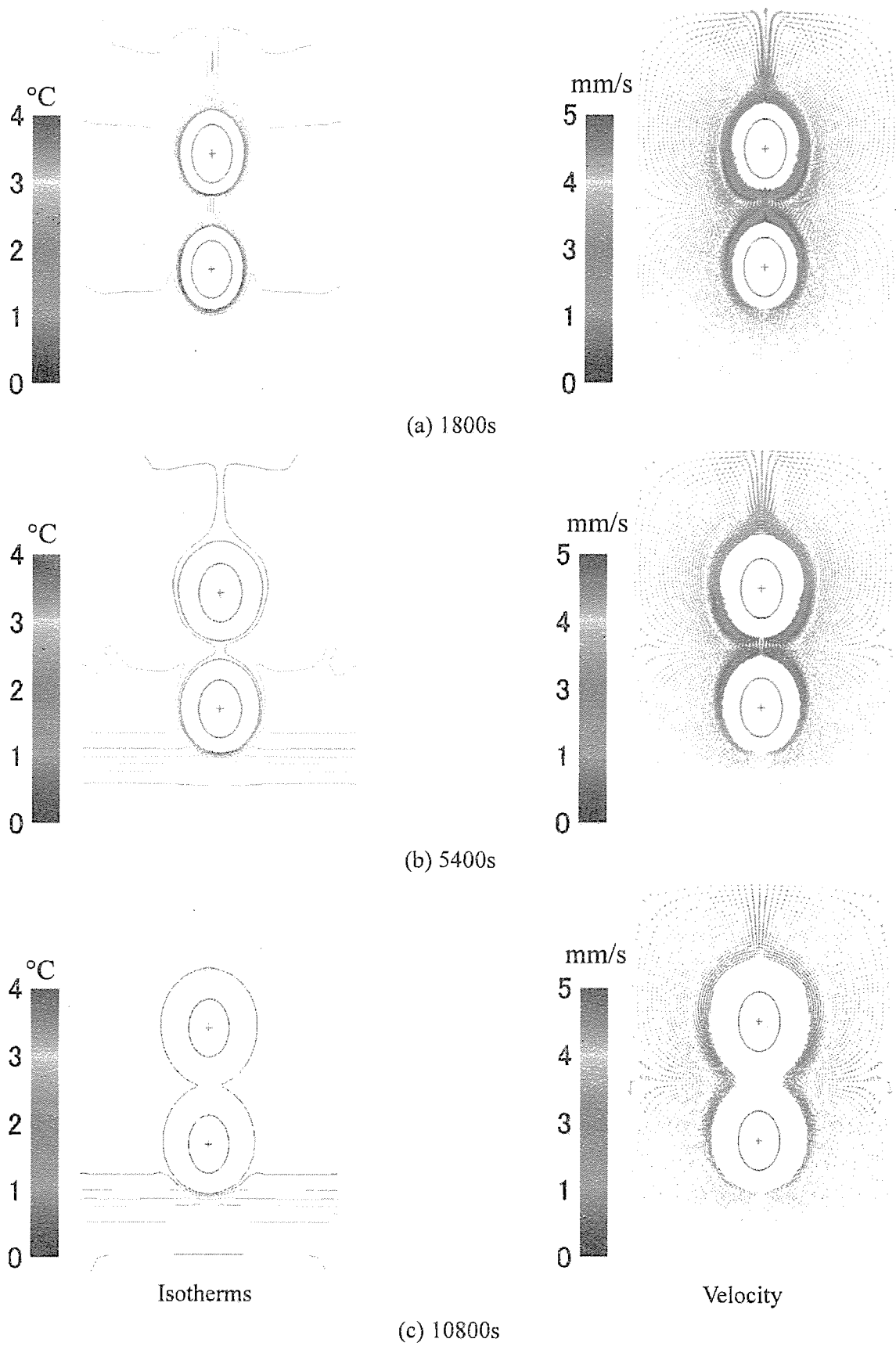


Fig.4.2.1 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.  
 $(\alpha = 0.7, \varphi_g = 0^\circ, D_x = 0 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm}, T_{in} = 4 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,1} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,2} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C})$

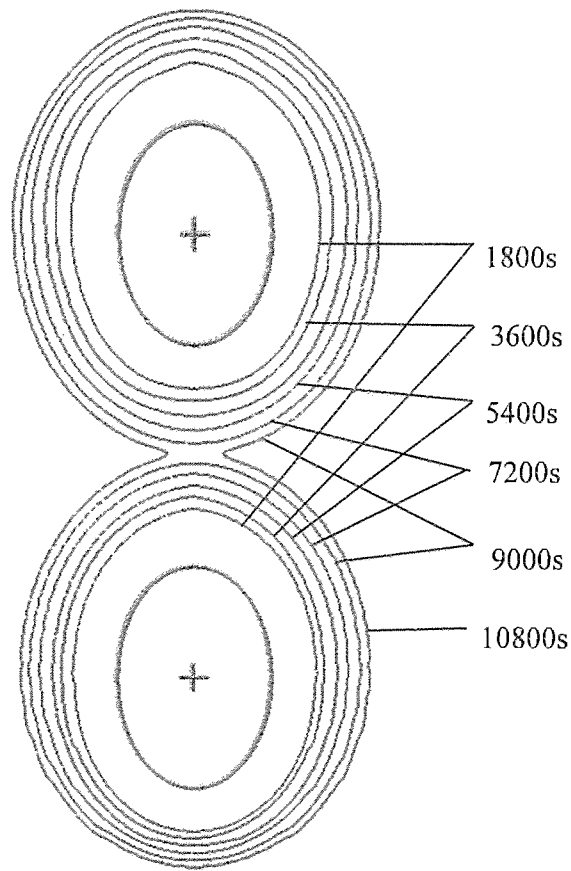


Fig.4.2.2 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\phi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

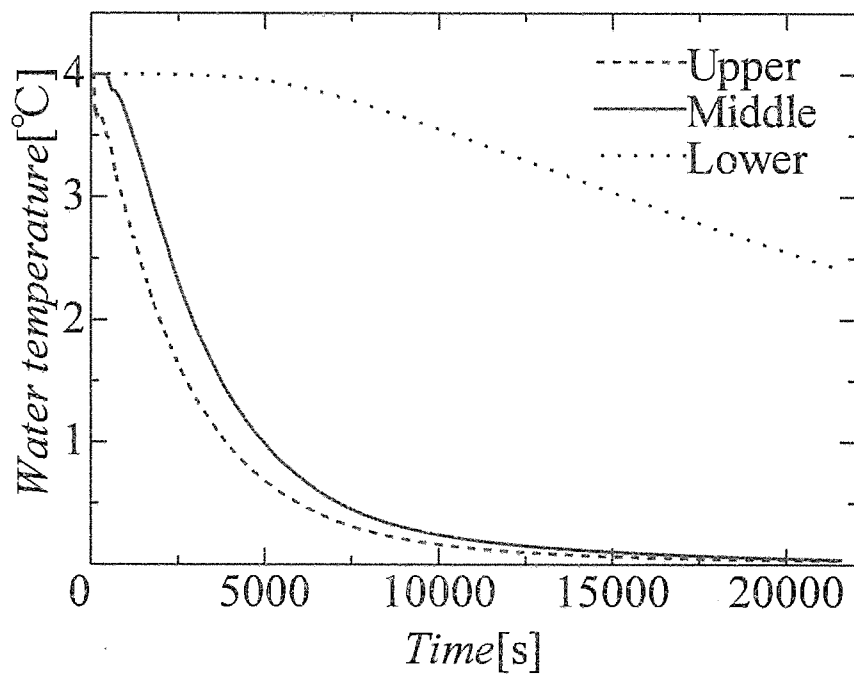


Fig.4.2.3 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\phi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)



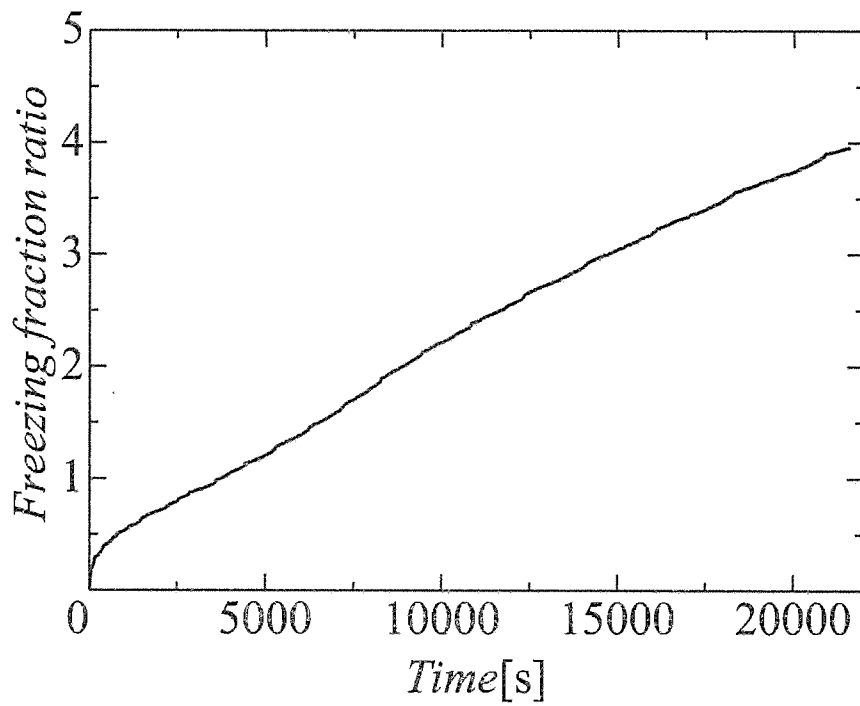


Fig.4.2.4 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

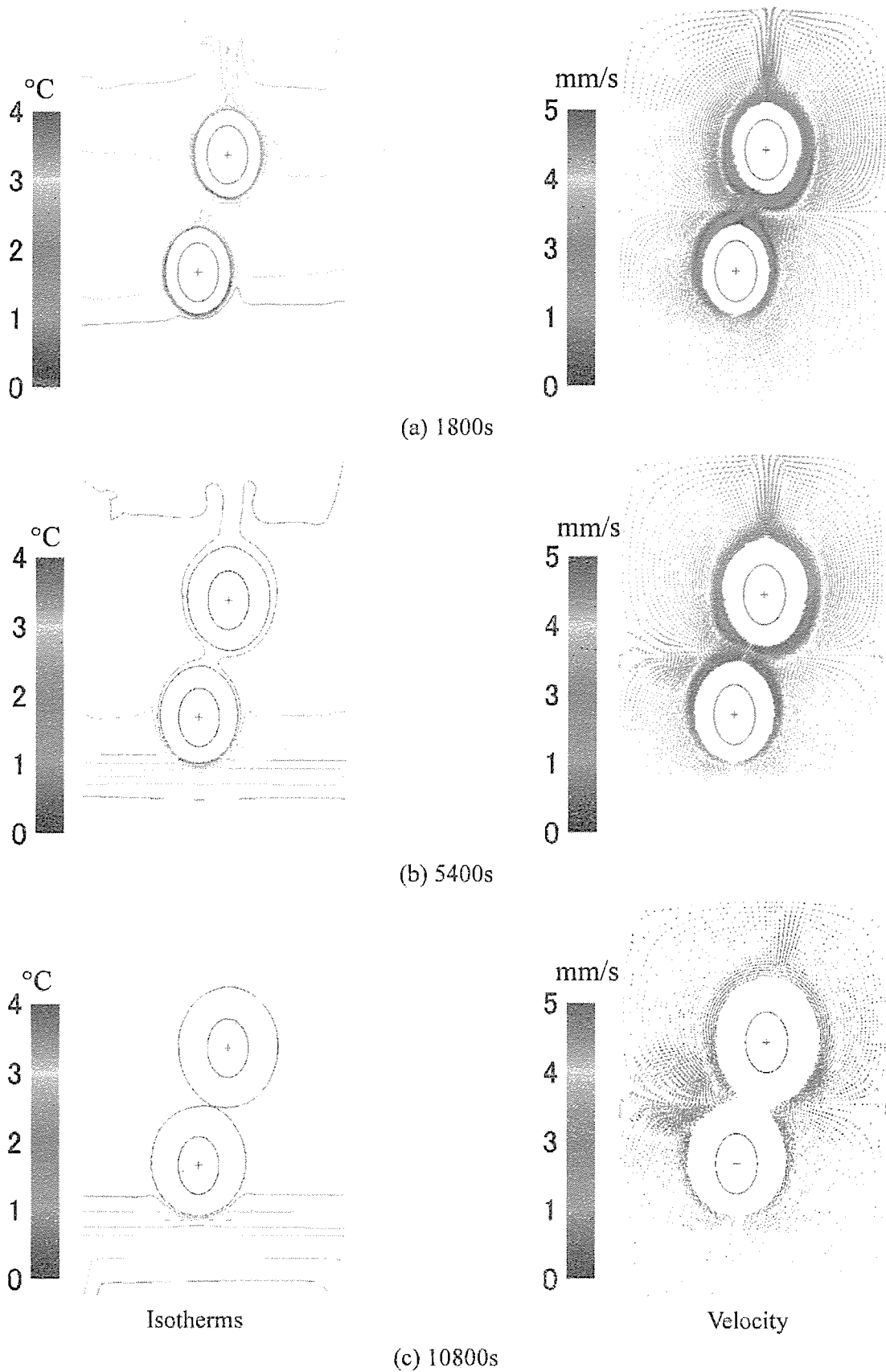


Fig.4.2.5 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

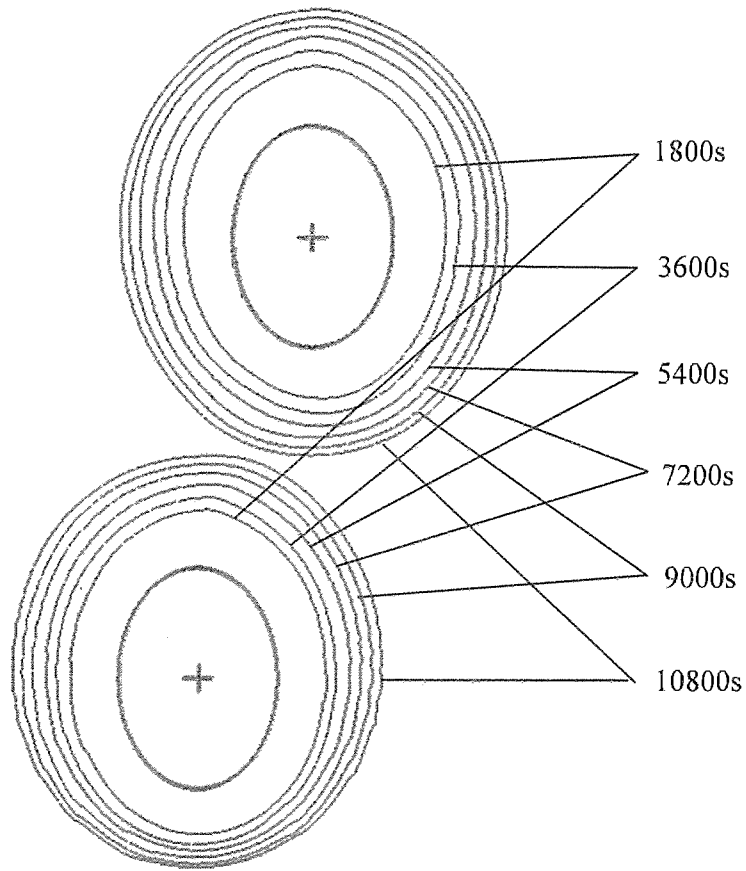


Fig.4.2.6 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\phi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

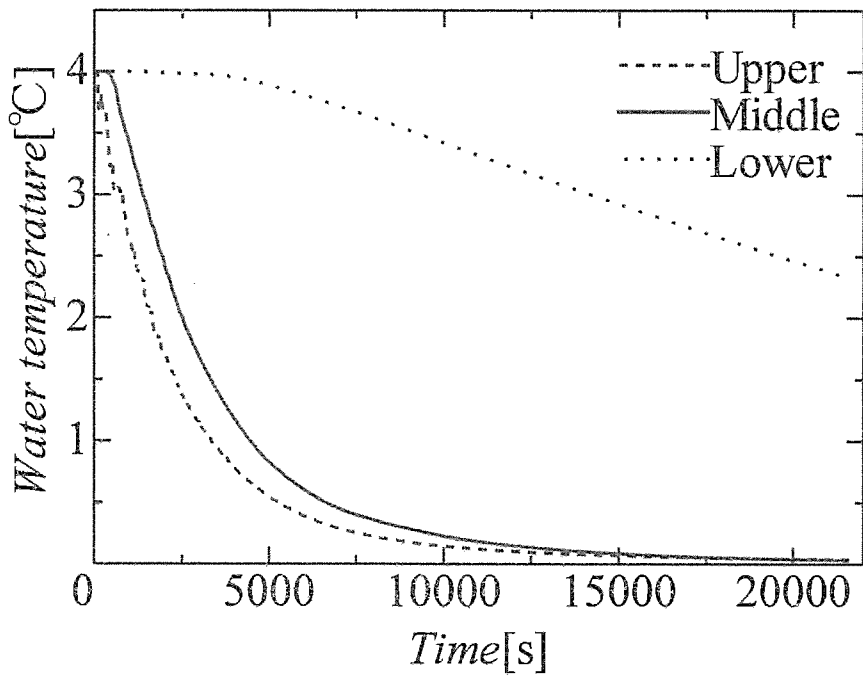


Fig.4.2.7 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\phi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

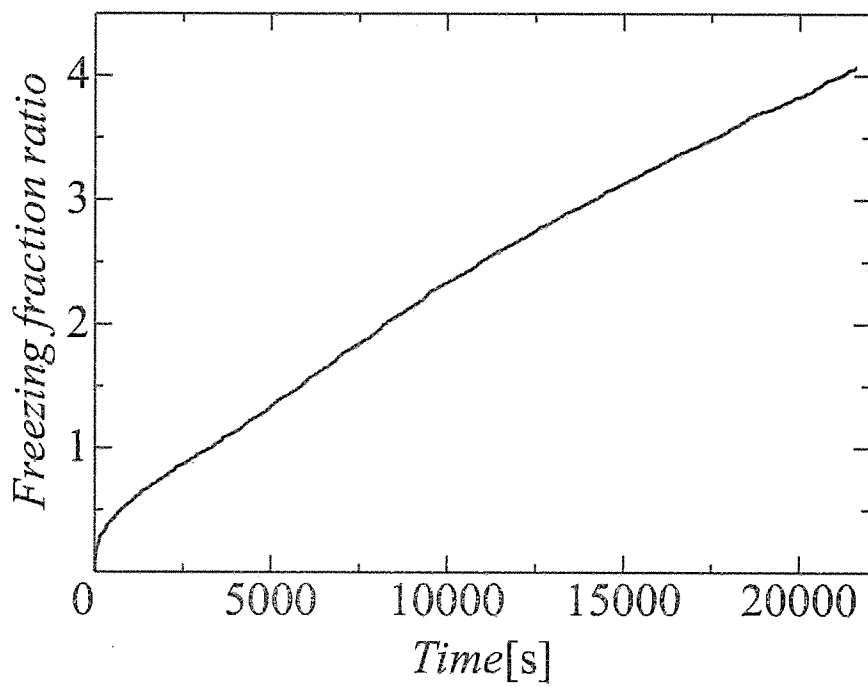
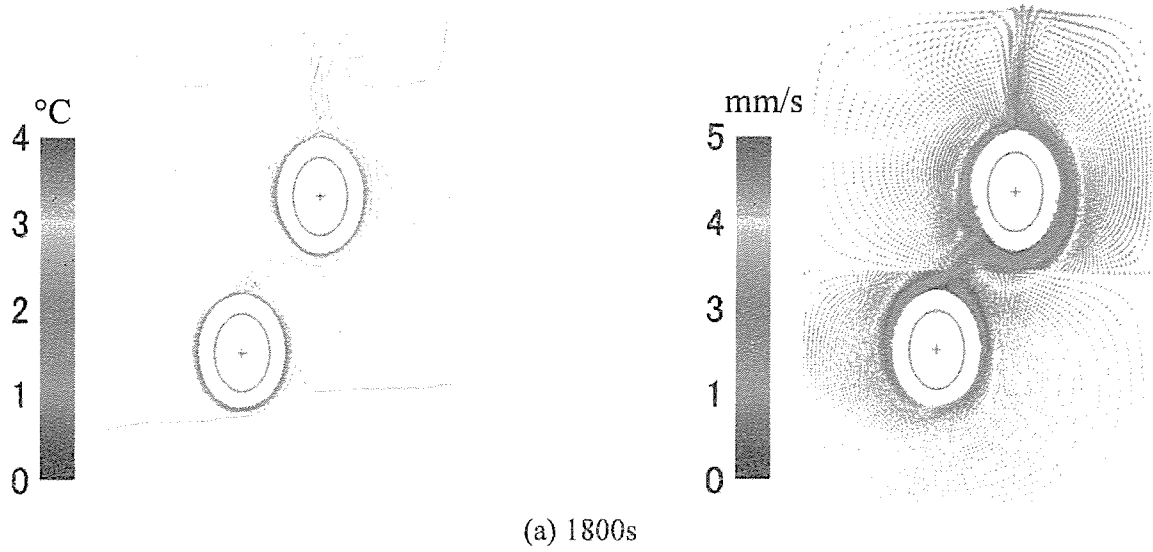
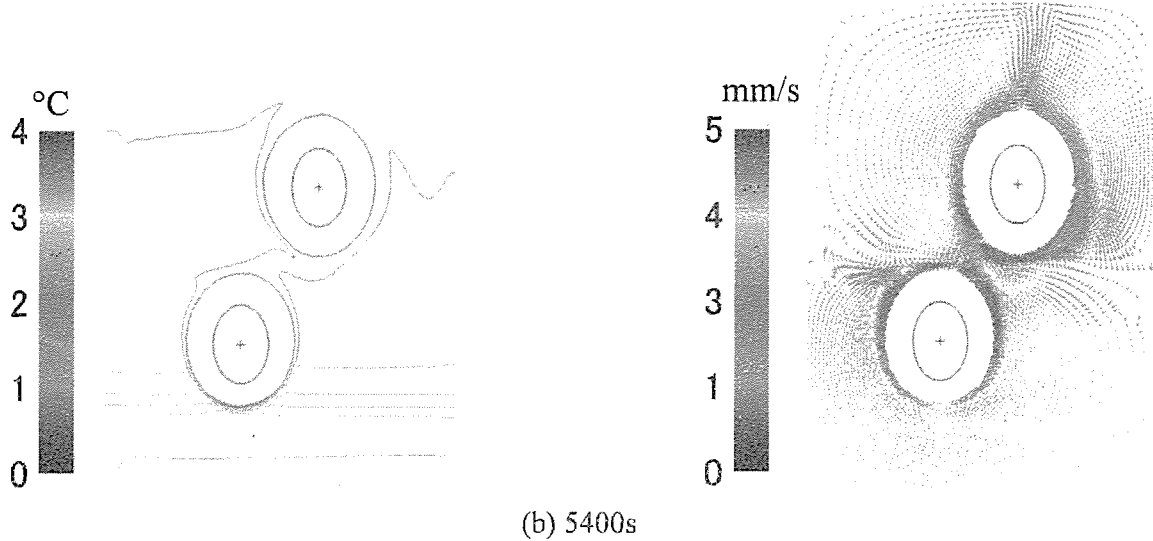


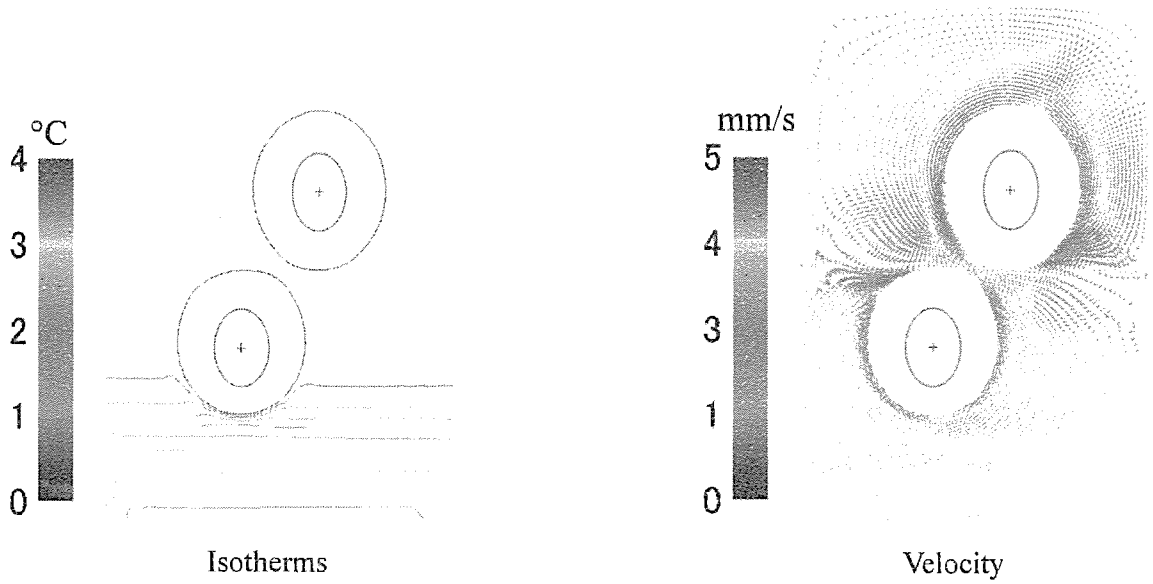
Fig.4.2.8 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
( $\alpha = 0.7$ ,  $\phi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)



(a) 1800s



(b) 5400s



(c) 10800s

Fig.4.2.9 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{l,1} = -5.0$  °C,  $T_{l,2} = -5.0$  °C)

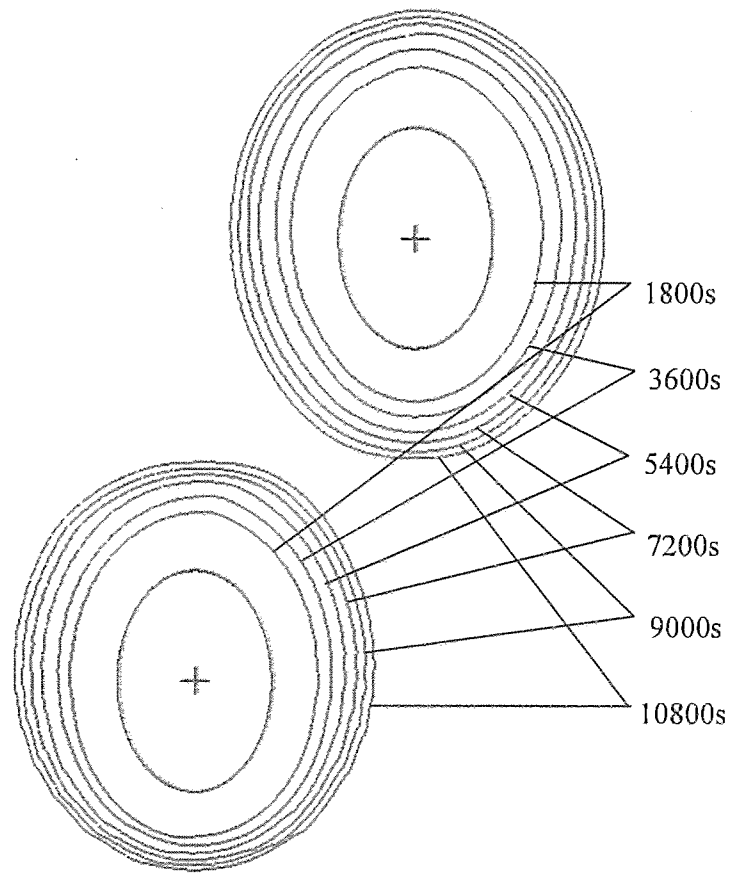


Fig.4.2.10 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

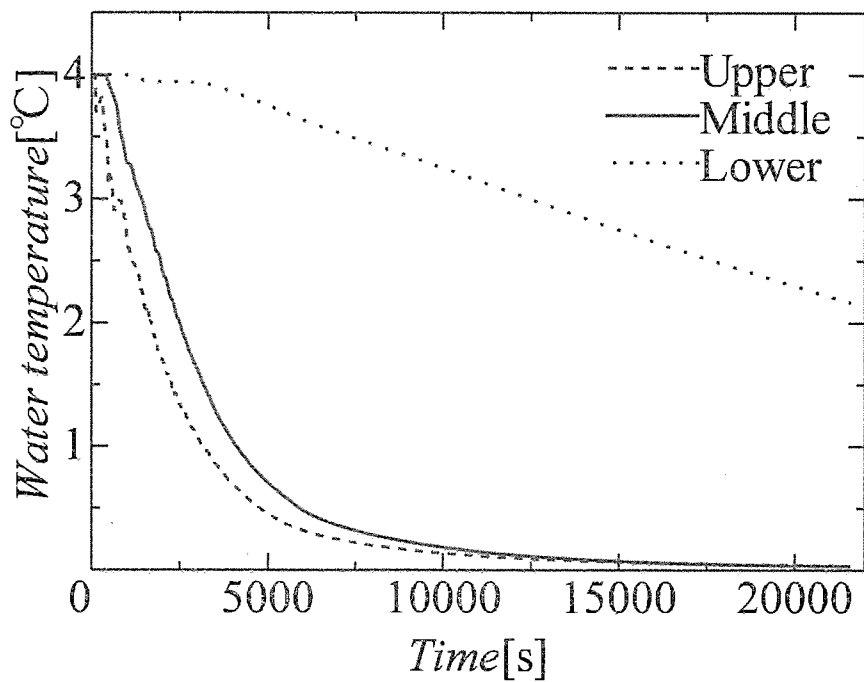


Fig.4.2.11 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

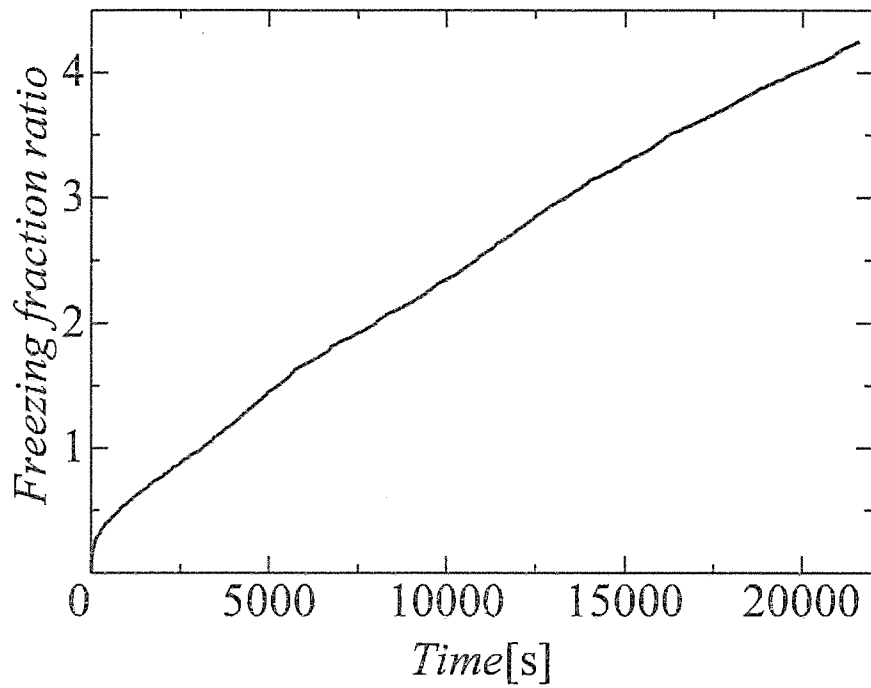


Fig.4.2.12 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

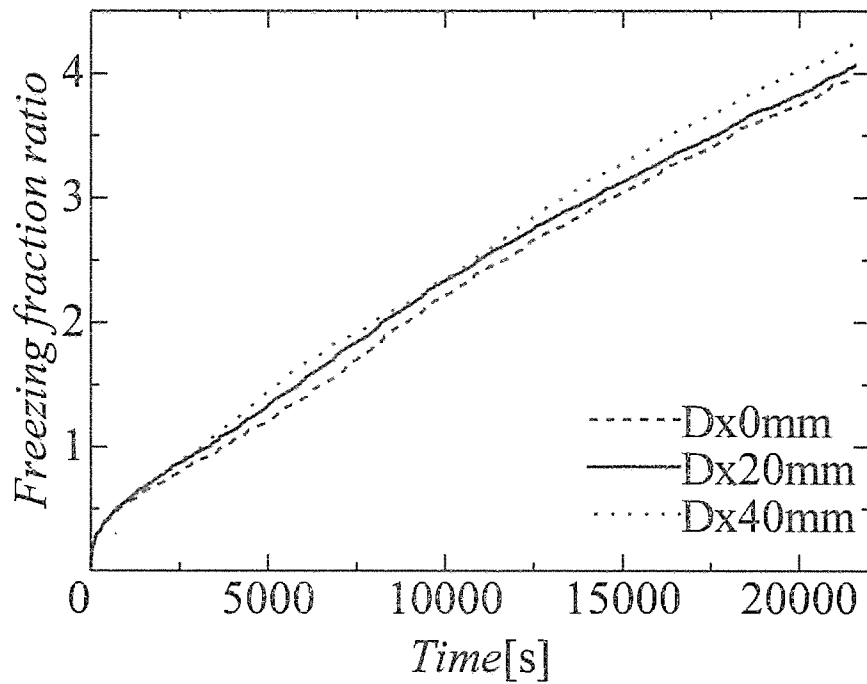


Fig.4.2.13 Comparison of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

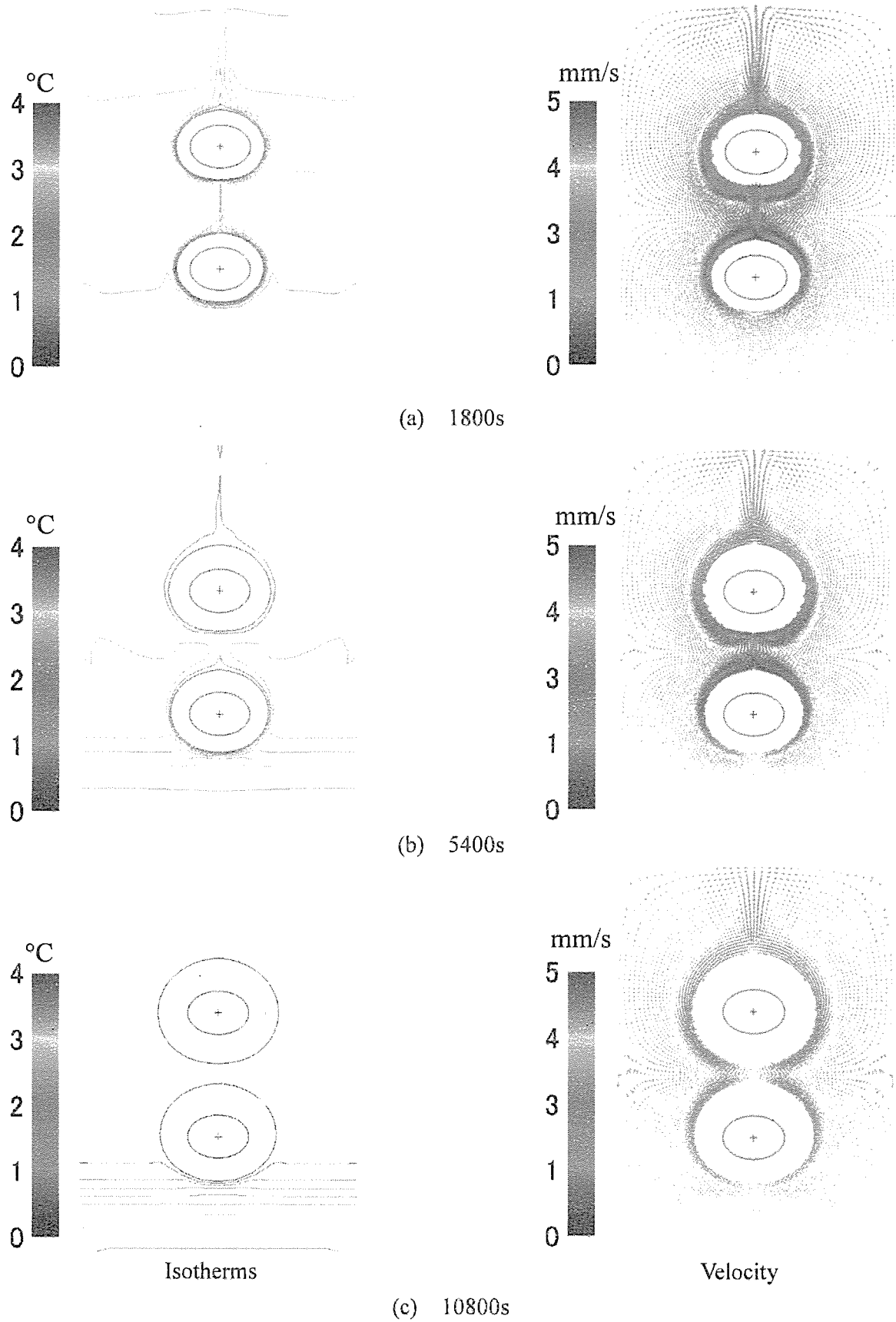


Fig.4.2.14 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{l,1} = -5.0$  °C,  $T_{l,2} = -5.0$  °C)



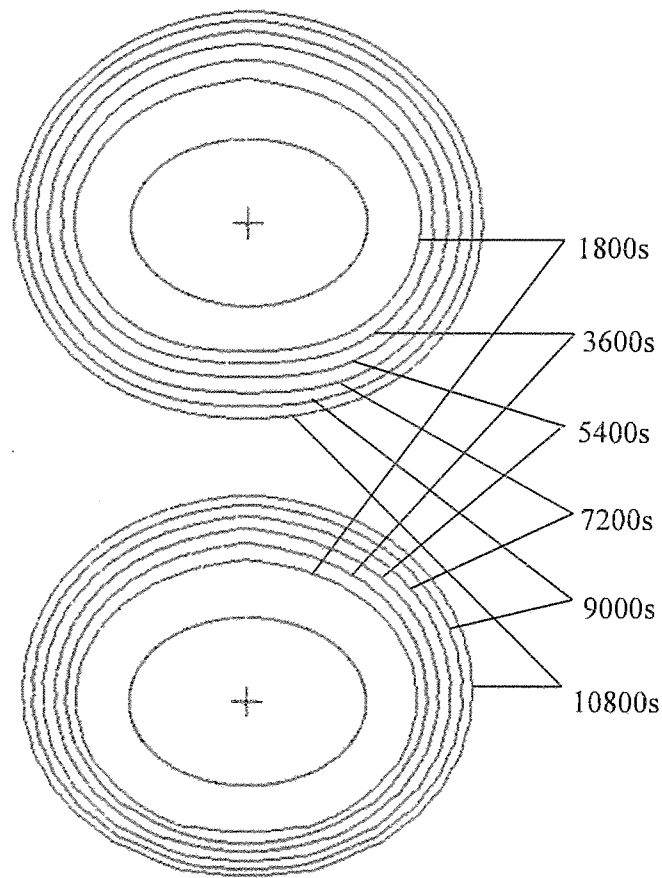


Fig.4.2.15 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{l,1} = -5.0$  °C,  $T_{l,2} = -5.0$  °C)

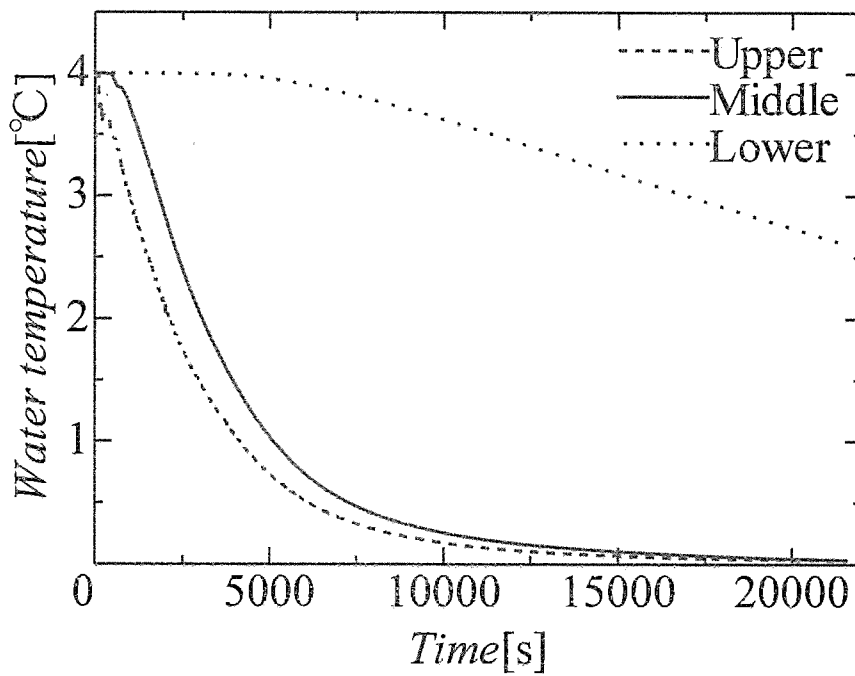


Fig.4.2.16 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{l,1} = -5.0$  °C,  $T_{l,2} = -5.0$  °C)

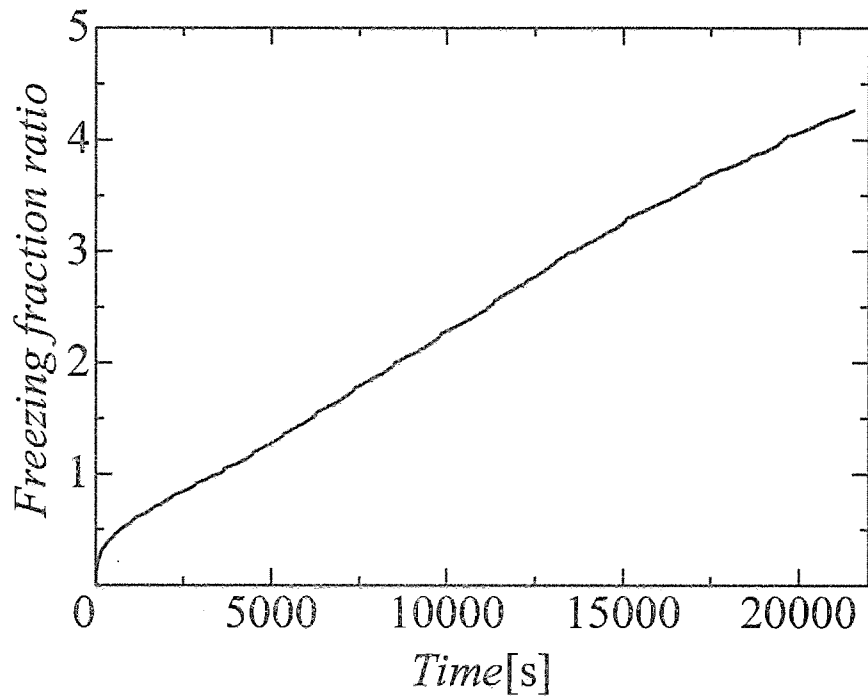


Fig.4.2.17 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{in} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

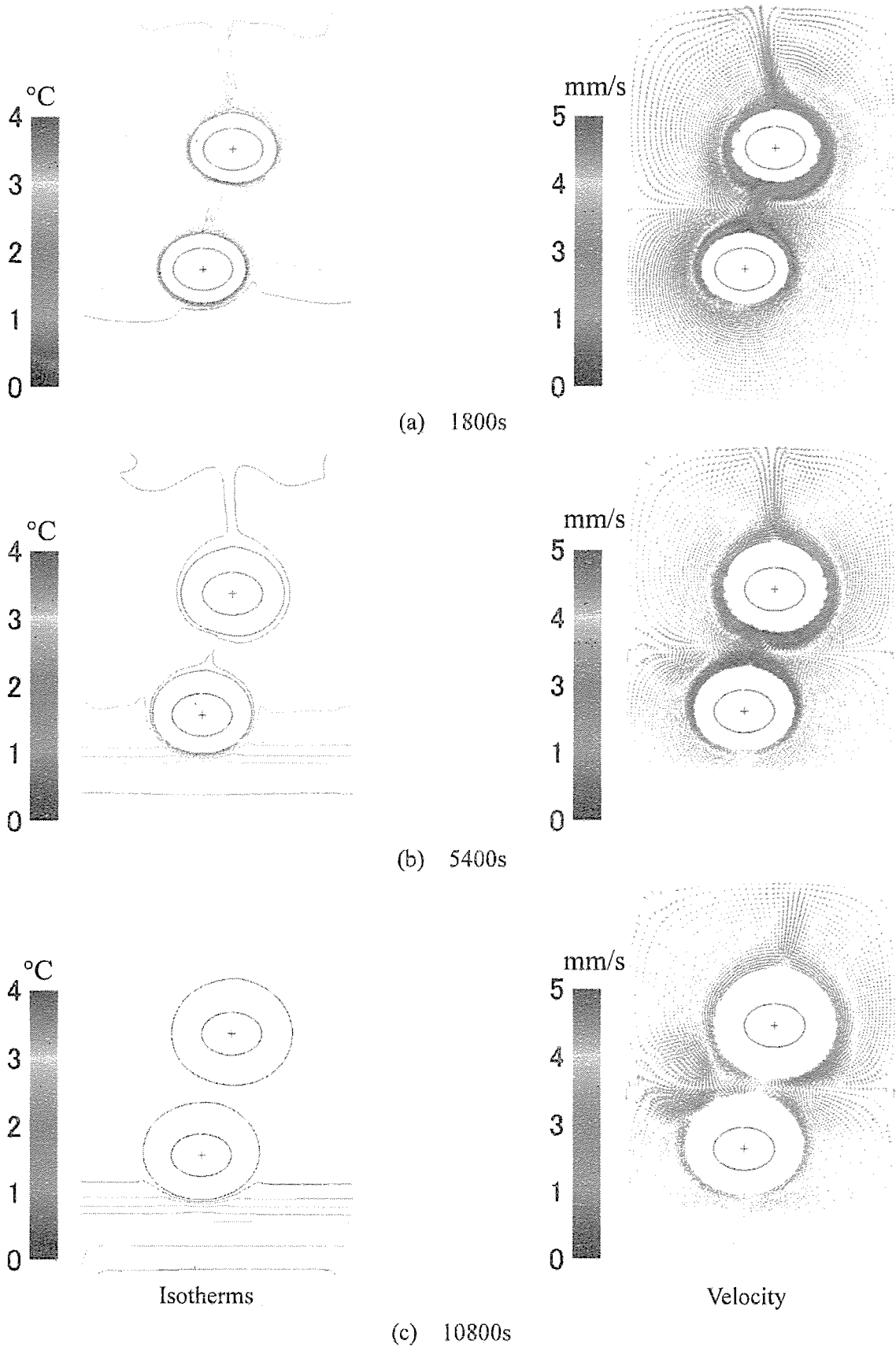


Fig.4.2.18 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\phi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

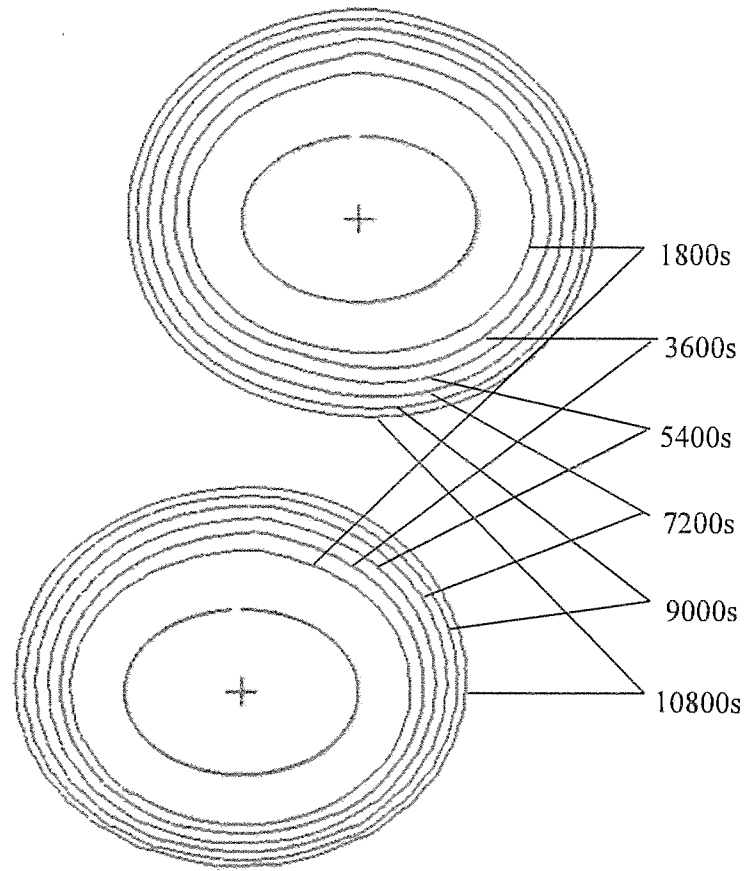


Fig.4.2.19 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

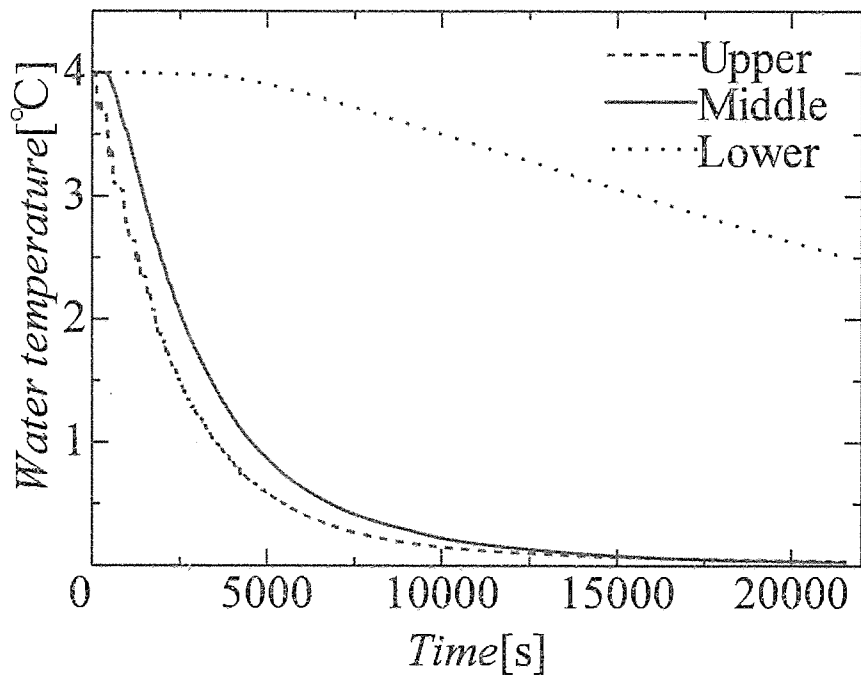


Fig.4.2.20 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

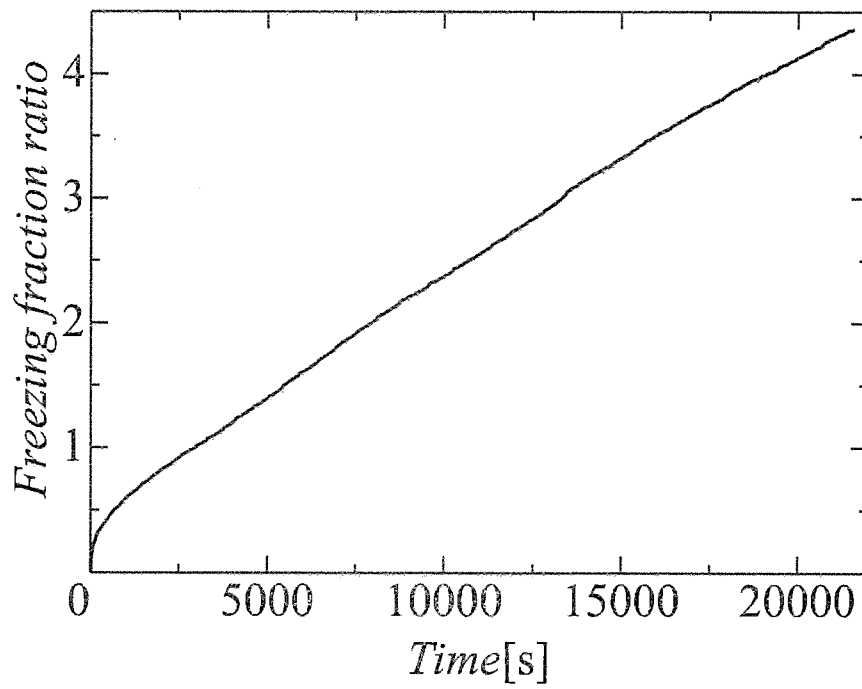


Fig.4.2.21 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

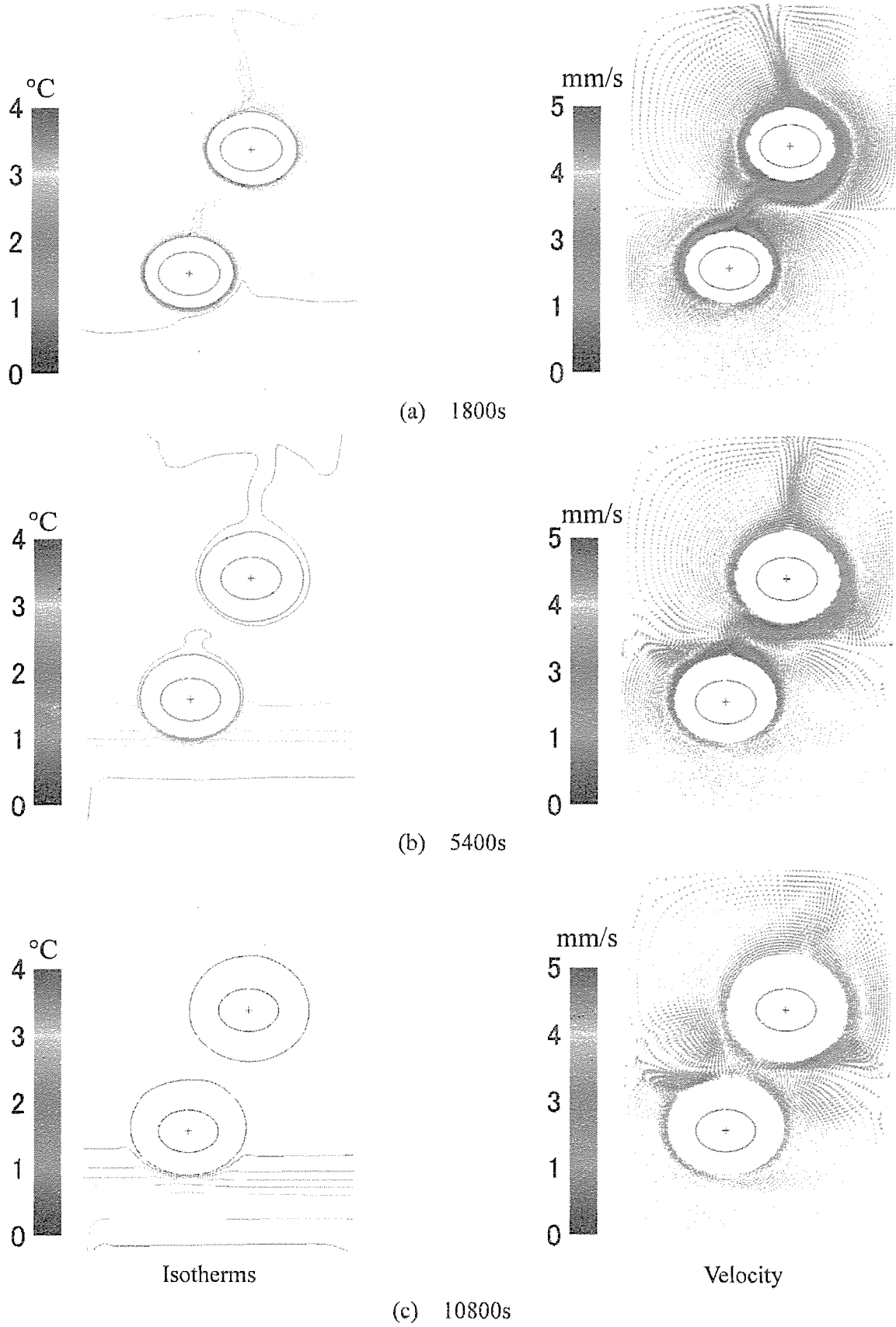


Fig.4.2.22 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

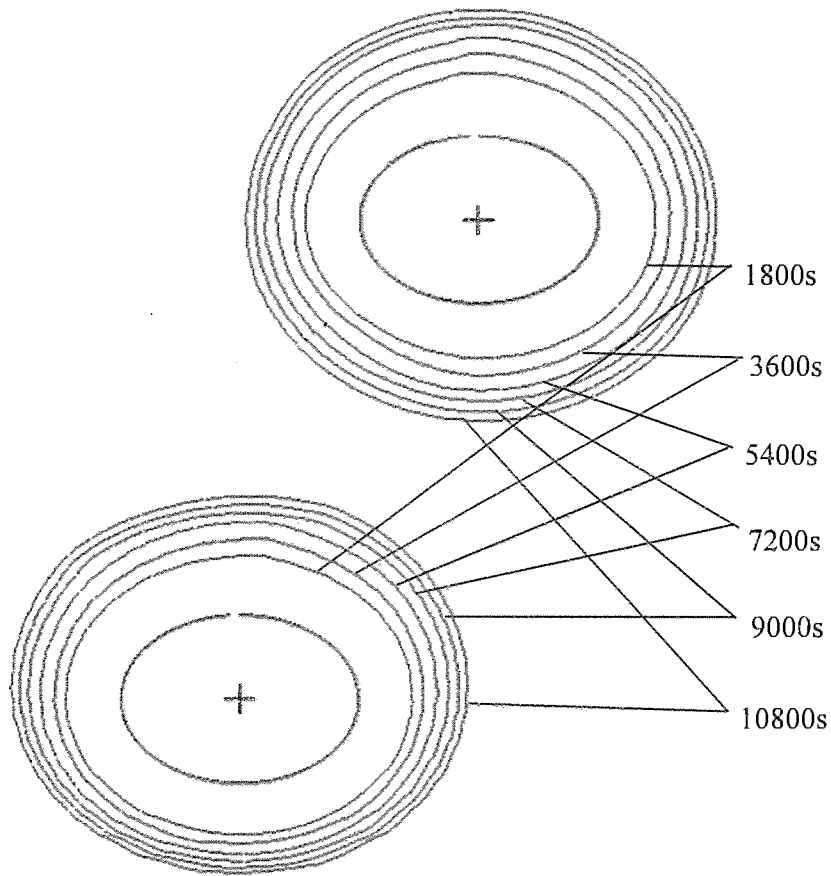


Fig.4.2.23 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

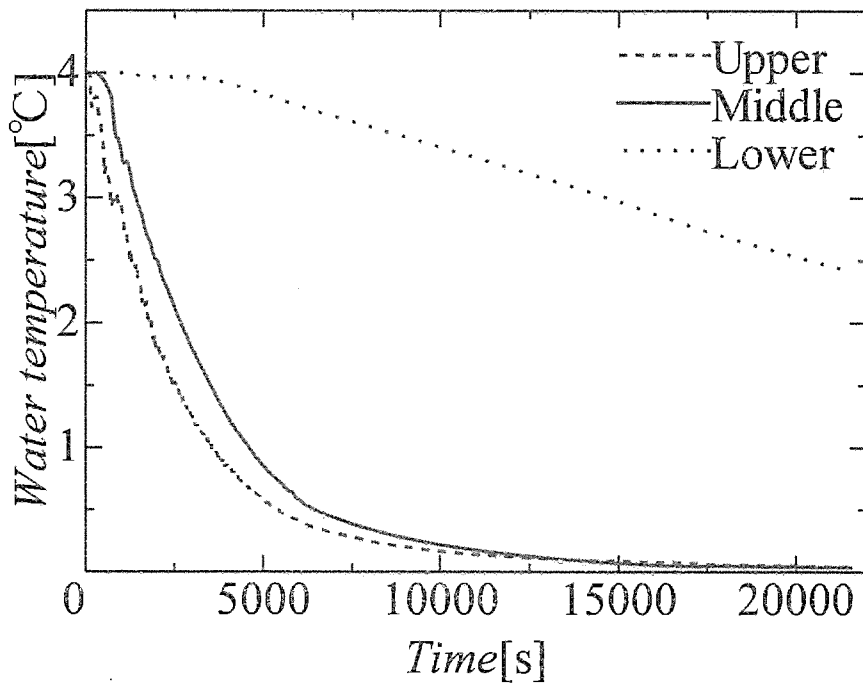


Fig.4.2.24 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

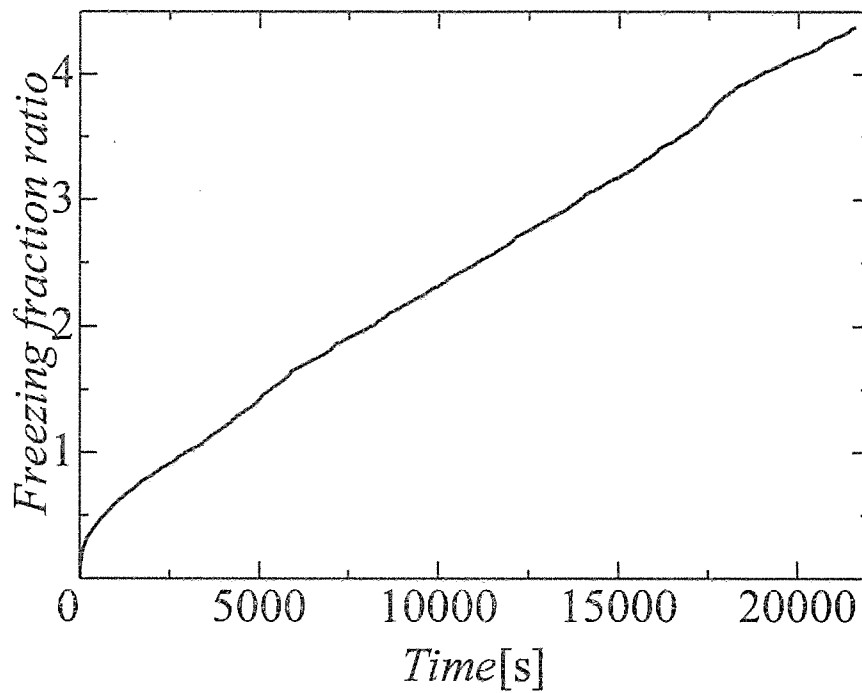


Fig.4.2.25 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

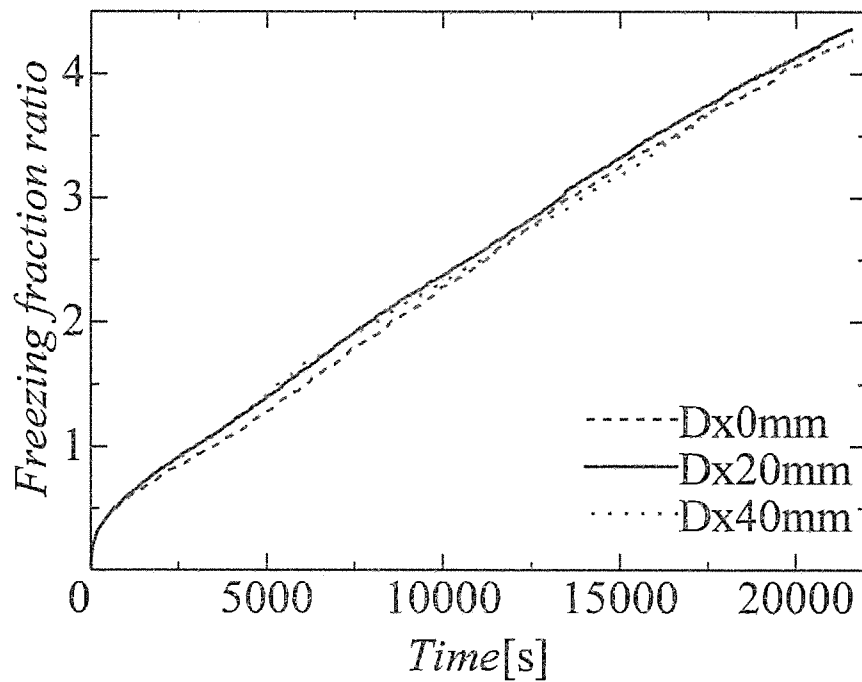


Fig.4.2.26 Comparison of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)



## 4.2.2 $T_{ini} = 7^\circ\text{C}$ の場合における数値解析

(1) 楕円管 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\phi_g = 0^\circ$ )  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm の場合

図 4.2.27 に代表的な時間の流れ場及び温度場を示す。図 4.2.27(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分かる。これは、 $T_{ini} = 7^\circ\text{C}$ の条件では、 $4^\circ\text{C}$ 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 $4^\circ\text{C}$ 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 4.2.27(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 4.2.27(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りこの領域では熱伝導が支配的となる。

図 4.2.28 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、下部管で厚く氷が成長していることがわかる。しかし、密度反転により上昇流が支配的になってくると、上部管での氷の成長が進むようになる様子が見られる。

図 4.2.29 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 4000 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、初期水温が  $7^\circ\text{C}$ から始まるため、冷却された流体が下降流となる。その後、密度反転が起こるため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 4.2.30 には凝固率の時間変化を示す。1800 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分かる。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。5000 秒以降は、凝固率の増加率（傾き）が上がることをわかる。

(2) 楕円管 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\phi_g = 0^\circ$ )  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm の場合

図 4.2.31 には代表的な時間での流れ場及び温度場を示す。(1)の場合と同様に図 4.2.31(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。これ以降は、しだいに上昇流の勢いが強くなり、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。この様子は、図 4.2.31(b)～ 図 4.2.31(c)からわかる。

図 4.2.32 には代表的な凍結界面の時間変化を示す。凍結現象については(1)の場合と同様に下部管で厚く氷が成長し、密度反転により上昇流が支配的になってくると、上部管での氷の成長が進むようになる様子が見られる。

図 4.2.33 には水温の時間変化を示す。(1)の場合と比べ、下部水温が下がりやすいことがわかる。

図 4.2.34 には凝固率の時間変化を示す。(1)の場合と同様に 1800 秒付近から 5000 秒付近まで凝固速度が遅くなり、5000 秒以降は、凝固率の増加率（傾き）が上がることをわかる。

(3) 楕円管 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\phi_g = 0^\circ$ )  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm 場合

図 4.2.35 には代表的な時間での流れ場及び温度場を示す。(1)の場合と同様に図 4.2.35(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。また、図 4.2.35(b)において、(1), (2)に比べ、まだ、流体の速度が速いことがわかる。これ以降は、しだいに上昇流の勢いが強くなり、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。この様子は、図 4.2.35(b), 図 4.2.35(c)からわかる。

図 4.2.36 には代表的な凍結界面の時間変化を示す。凍結現象については(1), (2)の場合と同様に下部管で厚く氷が成長し、密度反転により上昇流が支配的になってくると、上部管での氷の成長が進むようになる様子が見られる。

図 4.2.37 には水温の時間変化を示す。(1), (2)の場合と比べ、短時間で水槽内の水温が全体的に下がることがわかる。

図 4.2.38 には凝固率の時間変化を示す。(1), (2)の場合は 1800 秒付近から 5000 秒付近まで凝固速度が遅くなるのに対し、この条件の場合は 1800 秒付近から 4000 秒付近まで凝固速度が遅くなることをわかる。

図 4.2.39 は(1)~(3)の場合における各水平方向軸間距離の凝固率の時間変化を示す。この図から、これらの条件は水平方向軸間距離を  $D_x = 0$  mm,  $D_x = 20$  mm の場合は特に違いが表れなかったが、 $D_x = 40$  mm まで距離をとると凝固率が增大することが示される。

これらの結果から、 $\alpha = 0.7$ ,  $\phi_g = 0^\circ$  の条件下では  $D_x = 0$  mm,  $D_x = 20$  mm の場合までは、水温の変化や凝固率に差が見られないが、 $D_x = 40$  mm まで距離をとると、水槽内の水温の低下時間を短縮化することができ、それに伴い、凝固率が增大することがわかる。

(4) 楕円管 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ )  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm の場合

(1)の場合と同条件で、配置角度を $\varphi_g = 90^\circ$ と変化させた場合の結果を示す。図 4.2.40 に代表的な時間での流れ場及び温度場を示す。(1)の場合と比べ、図 4.2.40(b)において(1)の場合より下降流が強いことがわかる。これは、管周りで冷却された流体が管の配置角度を $\varphi_g = 90^\circ$ にすることで、 $\varphi_g = 0^\circ$ より上昇流が妨げられてしまうためだと考えられる。これ以降は、しだいに上昇流の勢いが強くなり、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。この様子は(1)の場合と同様である。

図 4.2.41 には代表的な凍結界面の時間変化を示す。凍結現象については(3)と同様で下部管で厚く氷が成長し、密度反転により上昇流が支配的になってくると、上部管での氷の成長が進むようになる様子が見られる。

図 4.2.42 には水温の時間変化を示す。(1)の場合と比べ、全体的に水槽内の水温が下がりにくい。これは、配置角度 $\varphi_g = 90^\circ$ にすることで冷却された流体による上昇流を妨げられてしまい、容器上部の暖かい流体を冷却する時間がかかるためだと考えられる。

図 4.2.43 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ることがわかる。

(5) 楕円管 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ )  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm の場合

図 4.2.44 には代表的な時間での流れ場及び温度場を示す。(1)の場合と同様に図 4.2.44(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。これ以降は、しだいに上昇流の勢いが強くなり、上昇流が支配的となり、管下部側の領域では熱伝導が支配的となる。

図 4.2.45 には代表的な凍結界面の時間変化を示す。凍結現象については(4)の場合と同様に下部管で厚く氷が成長し、密度反転により上昇流が支配的になってくると、上部管での氷の成長が進むようになる様子が見られる。

図 4.2.46 には水温の時間変化を示す。(4)の場合と比べ、ほとんど差が見られなかった。また、(2)の場合と比べ、水槽内の水温が下がりにくいことがわかる。

図 4.2.47 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ることがわかる。

(6) 楕円管 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ )  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm 場合

図 4.2.48 には代表的な時間での流れ場及び温度場を示す。(5)の場合と同様に図 4.2.48(a)では、下降流が支配的であり、これ以降は、上昇流が支配的となり、管下部側の領域では熱伝導が支配的となる。

図 4.2.49 には代表的な凍結界面の時間変化を示す。凍結現象については(4), (5)の場合と同様に下部管で厚く氷が成長し、密度反転により上昇流が支配的になってくると、上部管での氷の成長が進むようになる様子が見られる。

図 4.2.50 には水温の時間変化を示す。(4), (5)の場合と比べ, 短時間で水槽内の水温が全体的に下がることがわかる。また, (3)の場合と比べ, 水槽内の水温が下がりにくいことがわかる。

図 4.2.51 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ることがわかる。

図 4.2.52 は(1)~(3)の場合における各水平方向軸間距離の凝固率の時間変化を示す。この図から, これらの条件は水平方向軸間距離を  $D_x = 0 \text{ mm}$ ,  $D_x = 20 \text{ mm}$  の場合は特に違いが表れなかったが,  $D_x = 40 \text{ mm}$  まで距離をとると凝固率が增大することが示される。

これらの結果から,  $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$  の条件下では  $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$  の条件と同様に  $D_x = 0 \text{ mm}$ ,  $D_x = 20 \text{ mm}$  の場合までは, 水温の変化や凝固率に差が見られないが,  $D_x = 40 \text{ mm}$  まで距離をとると, 水槽内の水温の低下時間を短縮化することができ, それに応じ, 凝固率が增大することがわかる。また, (1)~(3)の場合と比べ, 水槽内の水温が下がりにくいこともわかる。

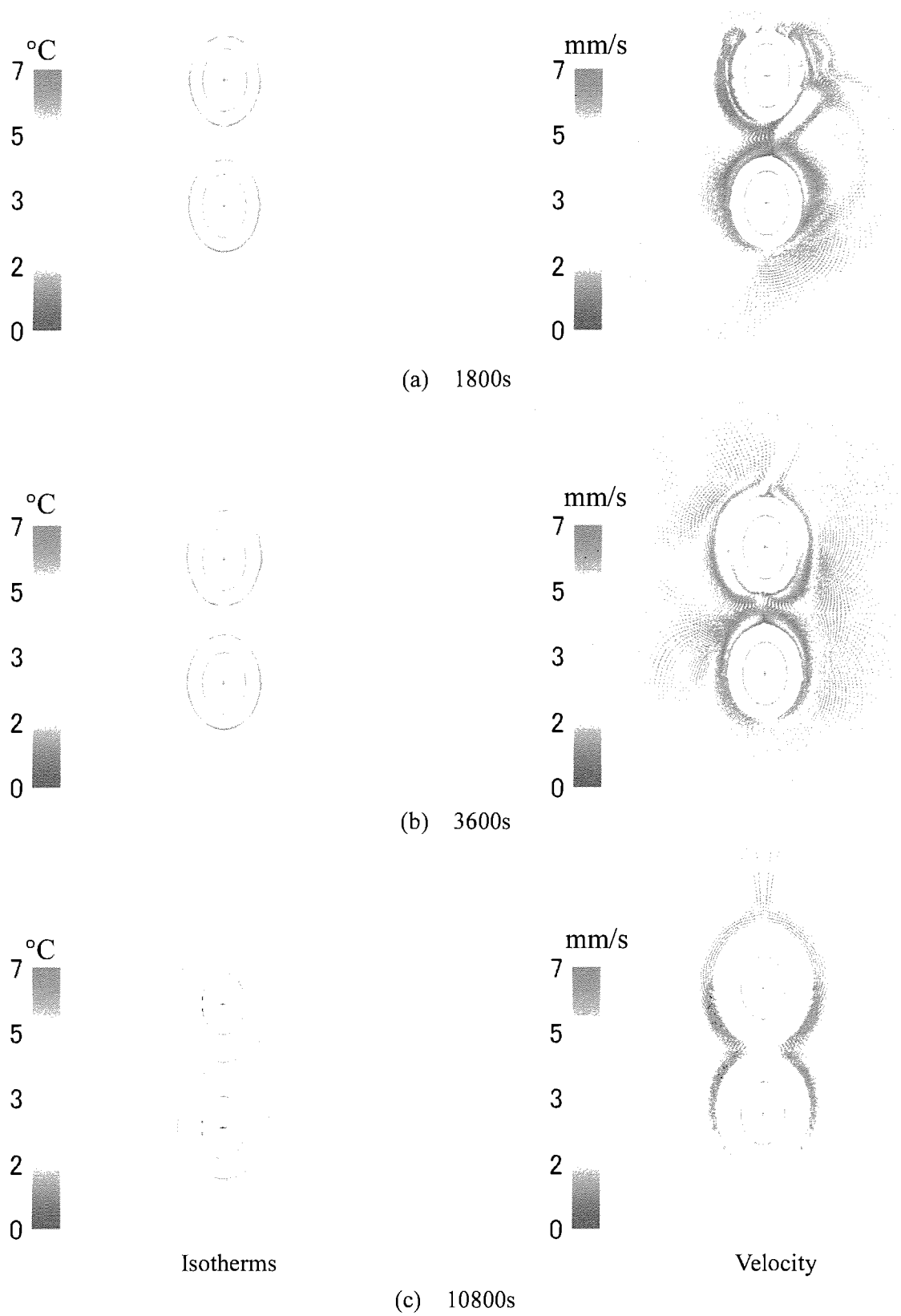


Fig.4.2.27 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.  
 $(\alpha = 0.7, \varphi_g = 0^\circ, D_x = 0 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm}, T_{ini} = 7 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,1} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,2} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C})$

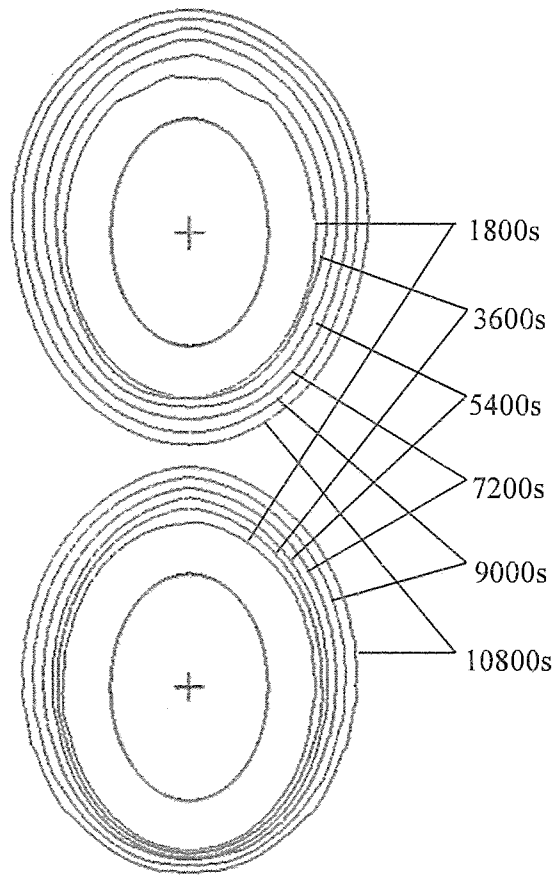


Fig.4.2.28 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

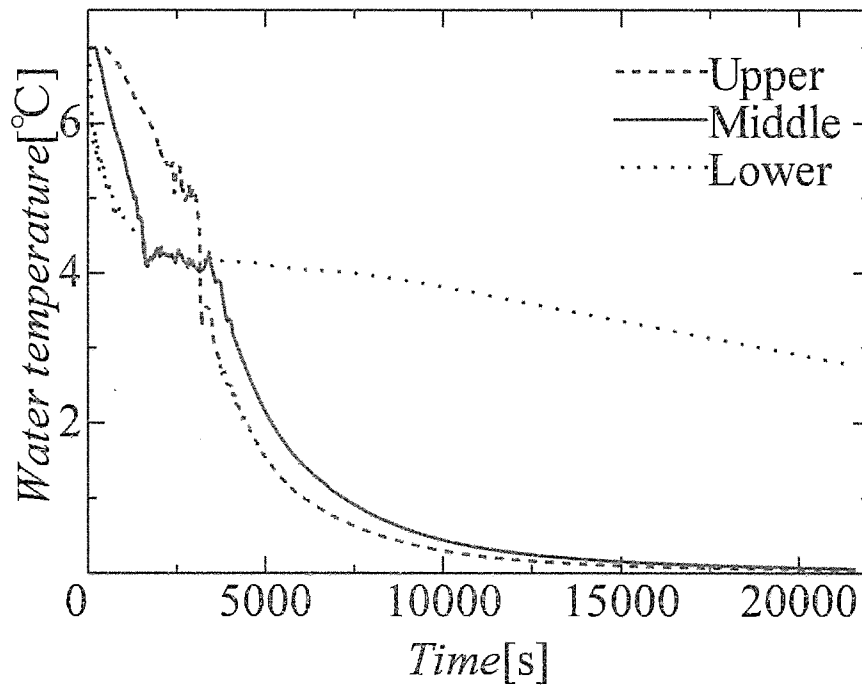


Fig.4.2.29 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

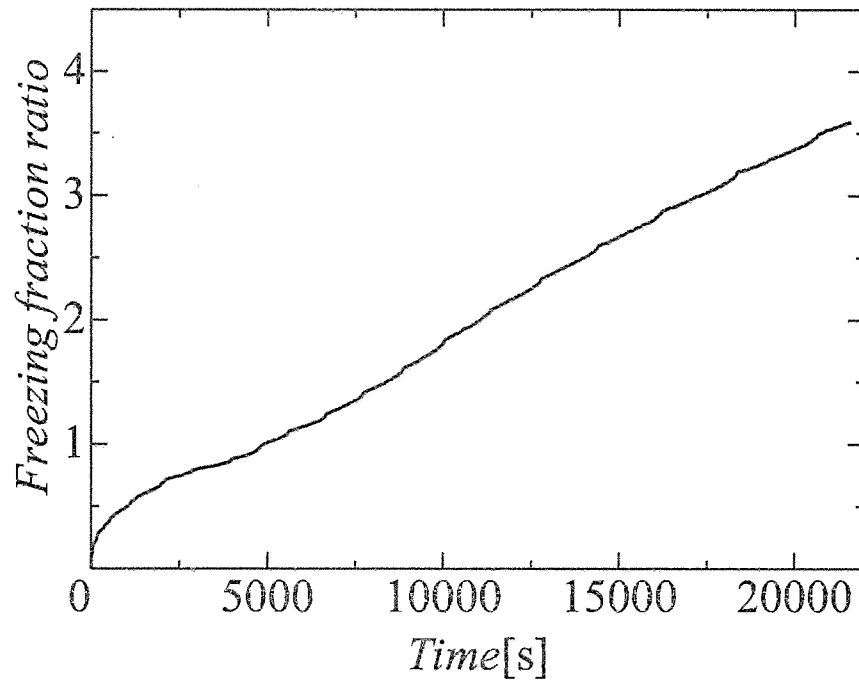
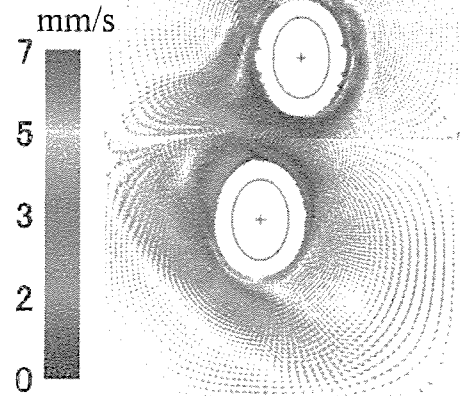
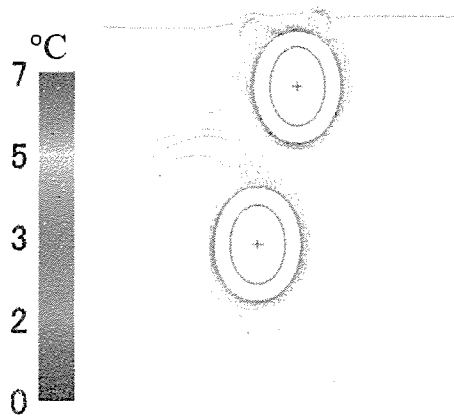
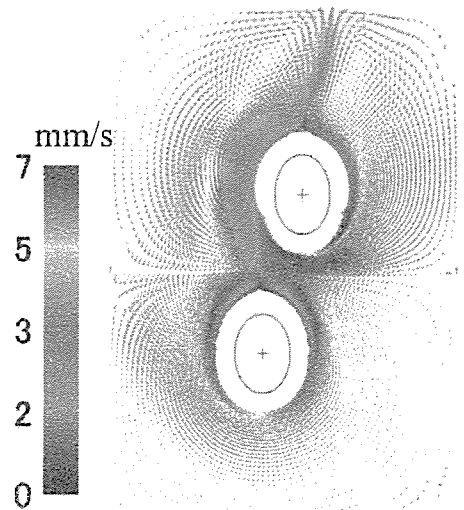
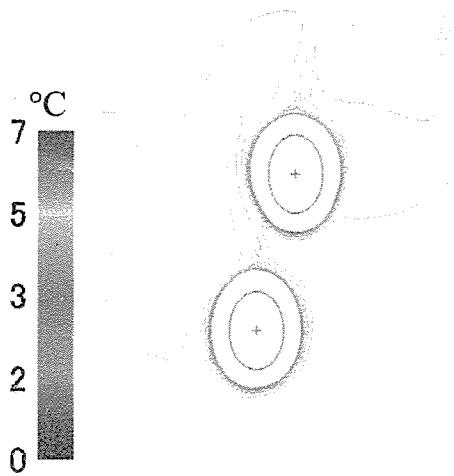


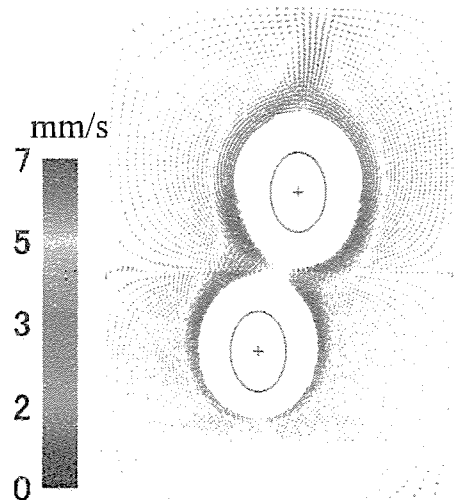
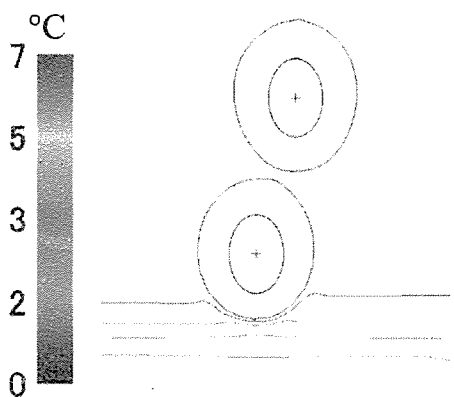
Fig.4.2.30 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)



(a) 1800s



(b) 3600s



Isotherms

Velocity

(c) 10800s

Fig.4.2.31 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{l,1} = -5.0$  °C,  $T_{l,2} = -5.0$  °C)



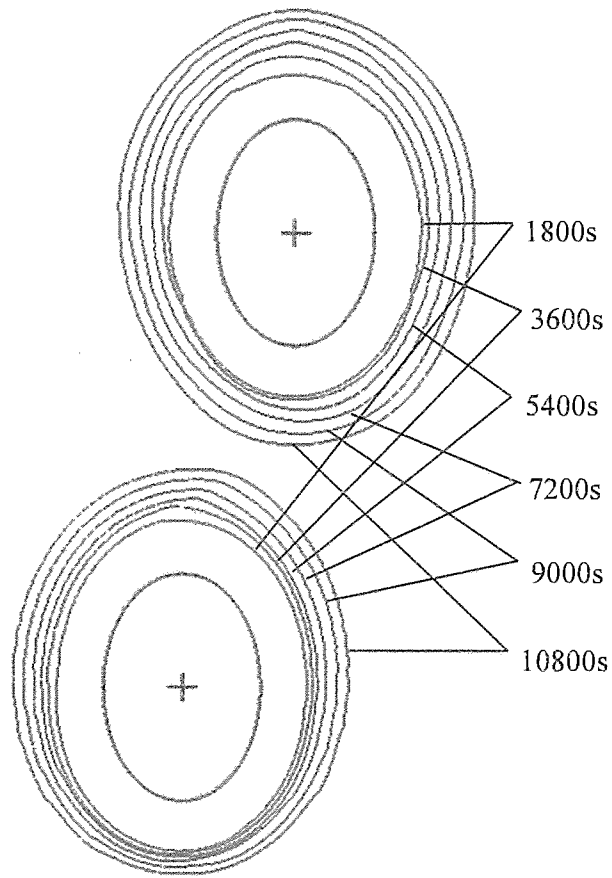


Fig.4.2.32 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

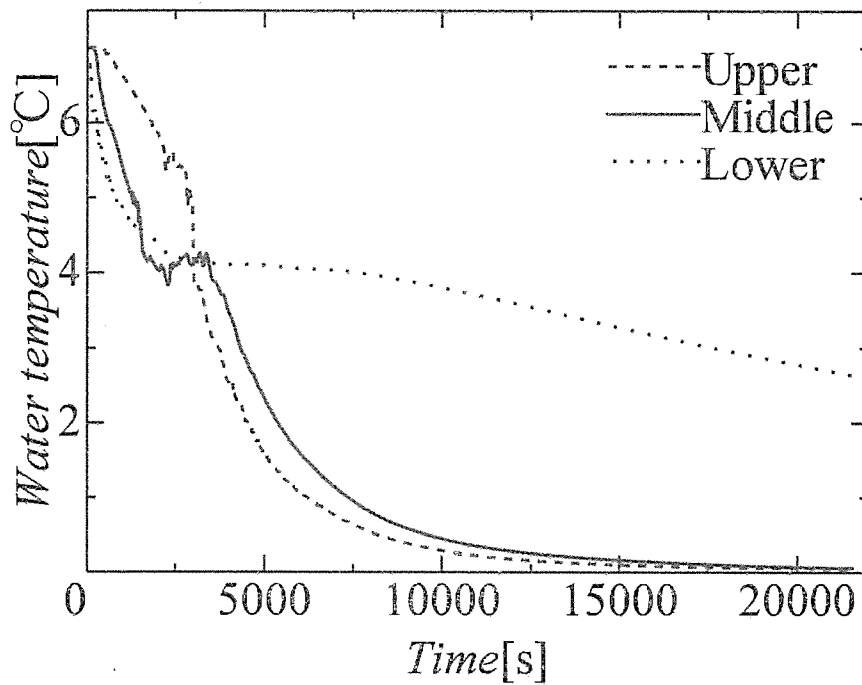


Fig.4.2.33 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

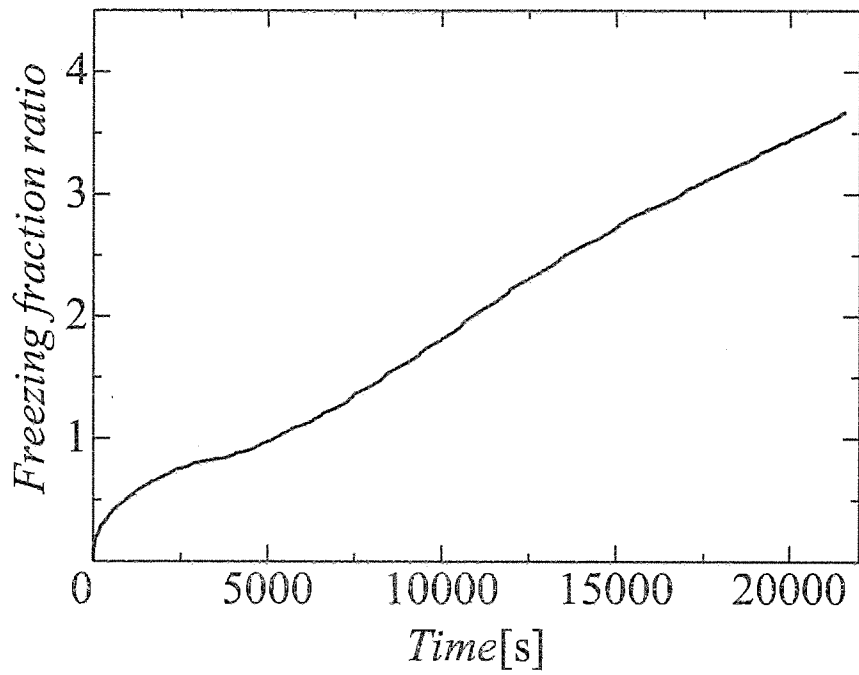
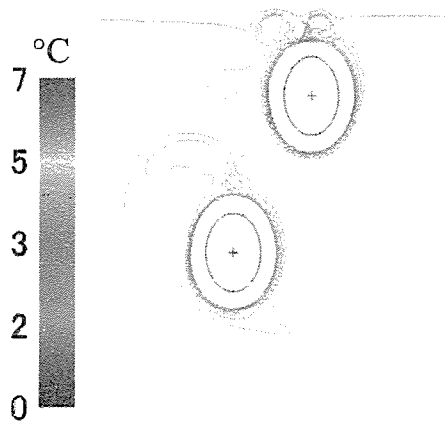
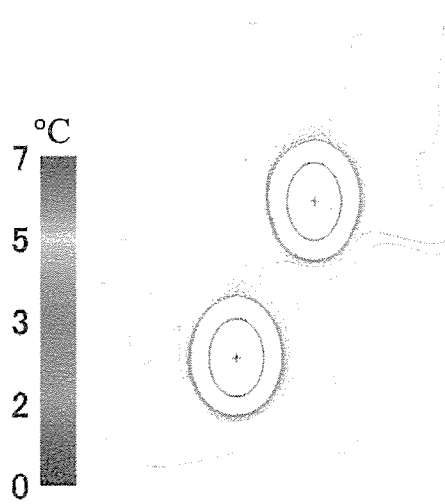
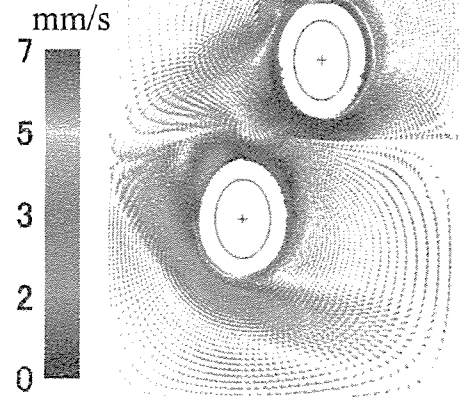


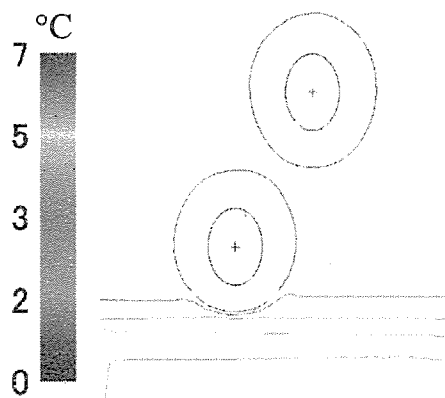
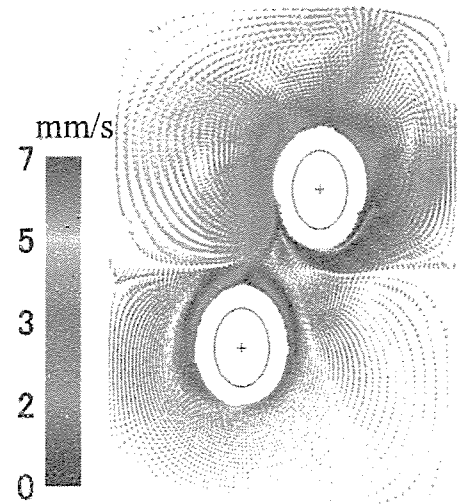
Fig.4.2.34 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)



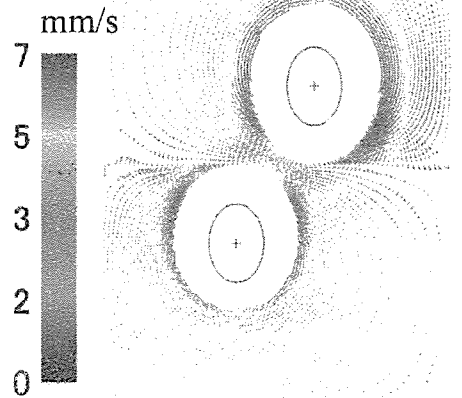
(a) 1800s



(b) 3600s



Isotherms



Velocity

(c) 10800s

Fig.4.2.35 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

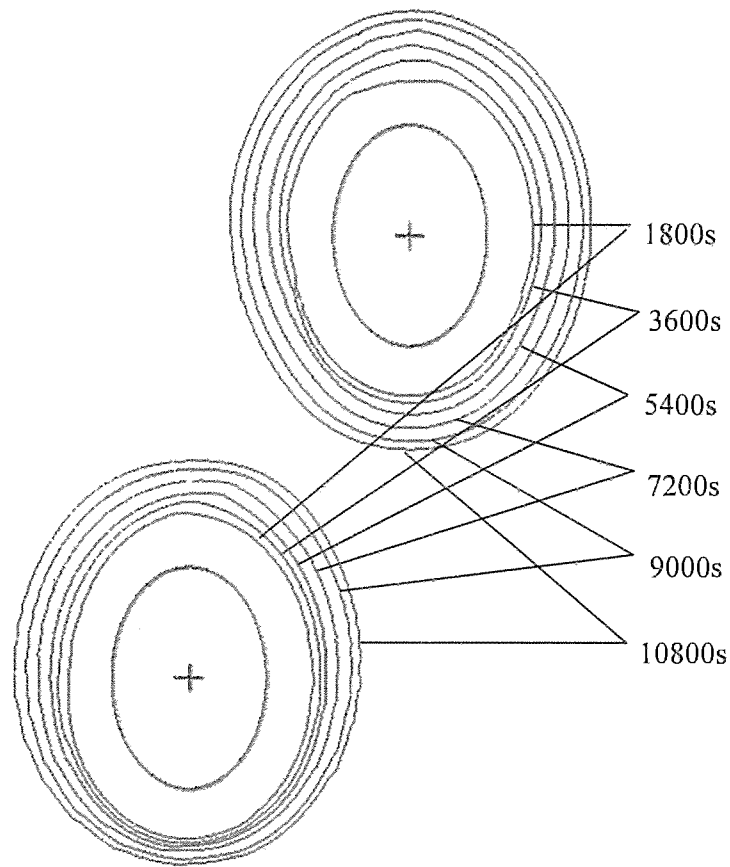


Fig.4.2.36 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

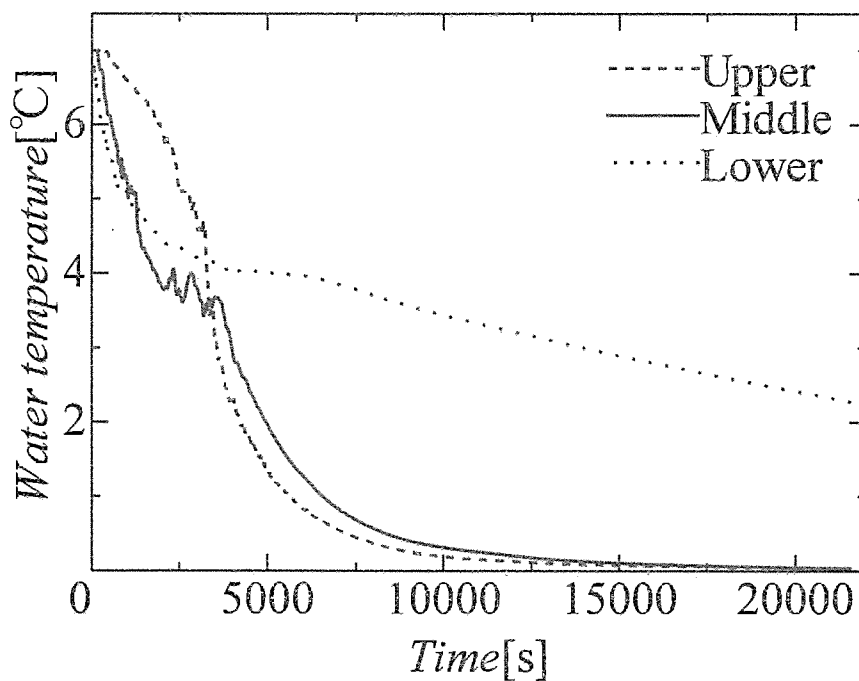


Fig.4.2.37 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

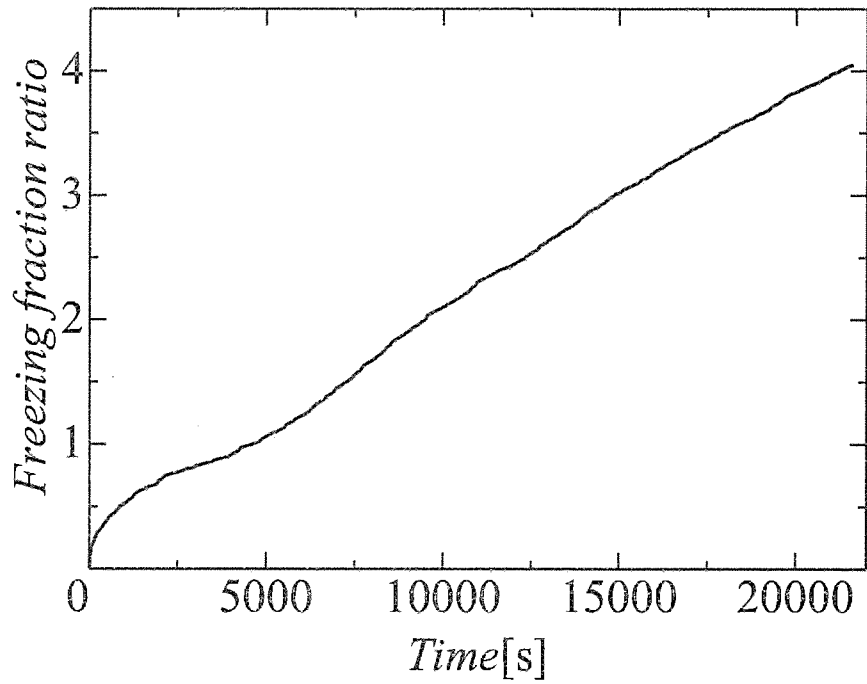


Fig.4.2.38 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

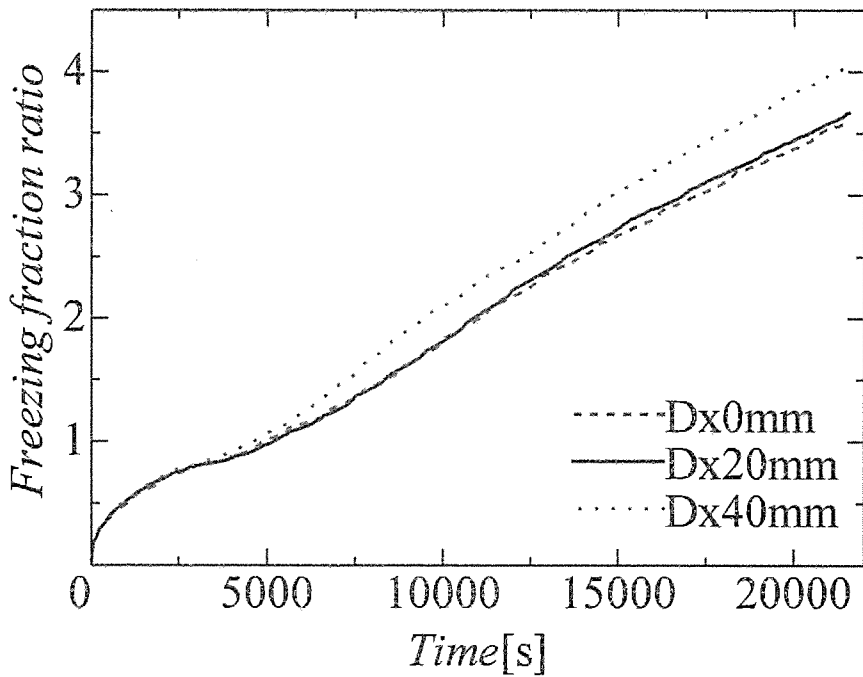
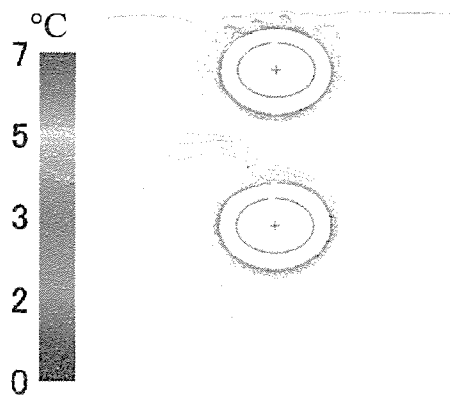
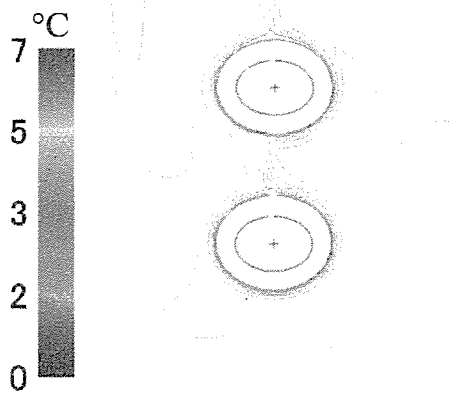
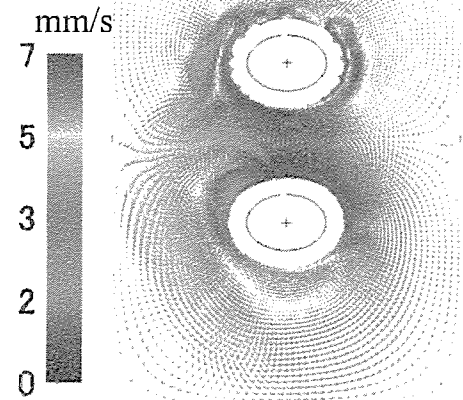


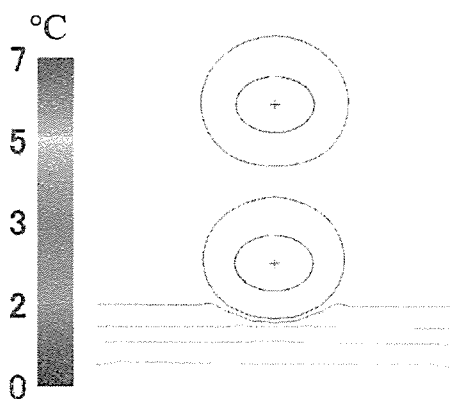
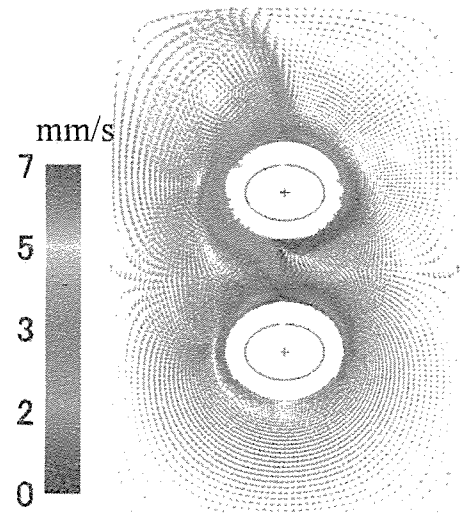
Fig.4.2.39 Comparison of freezing fraction by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)



(a) 1800s

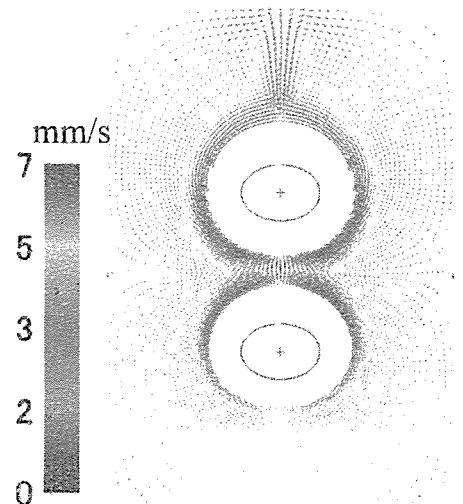


(b) 3600s



Isotherms

(c) 10800s



Velocity

Fig.4.2.40 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

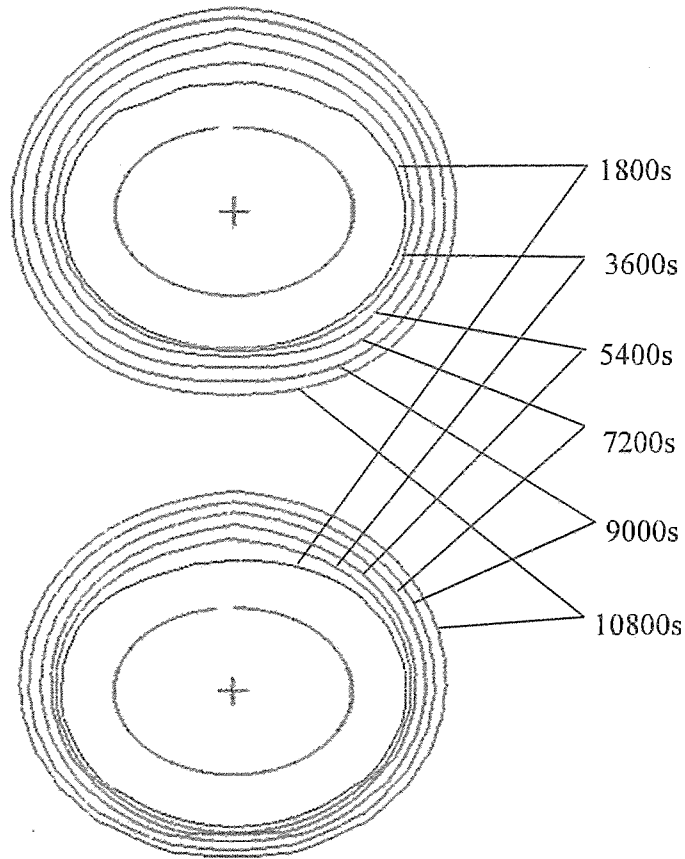


Fig.4.2.41 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

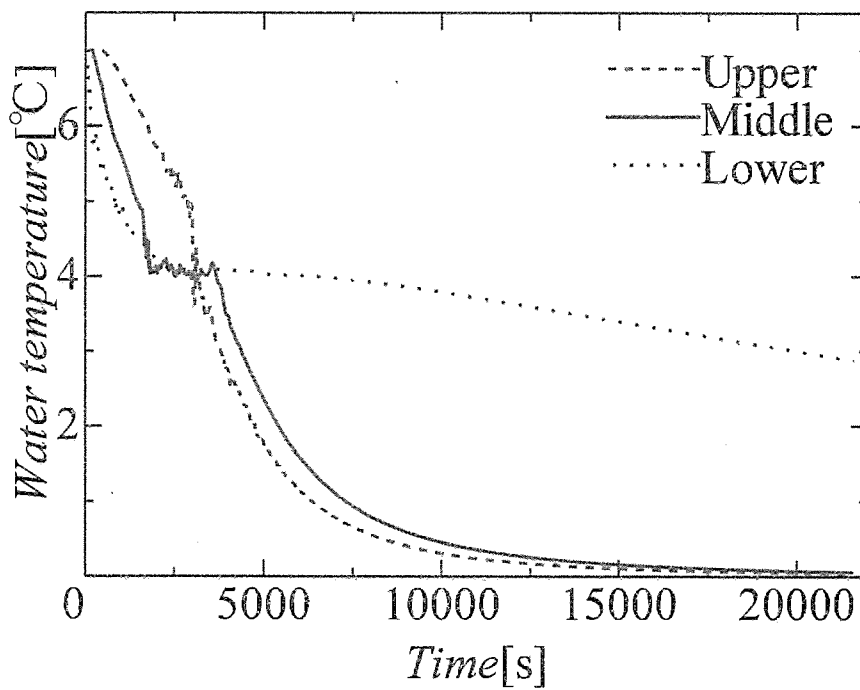


Fig.4.2.42 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

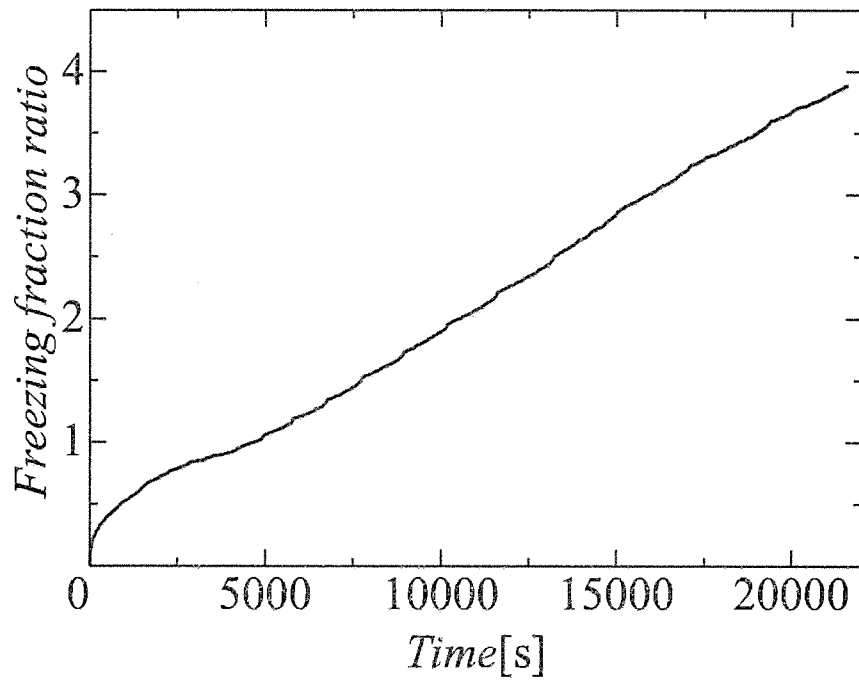
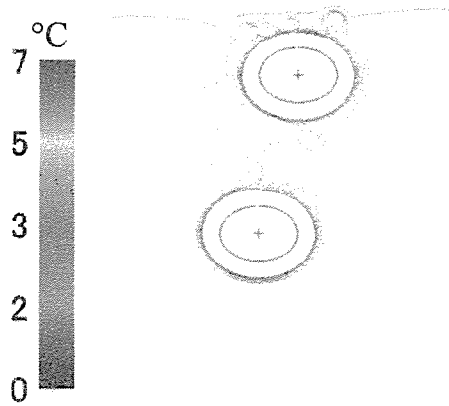
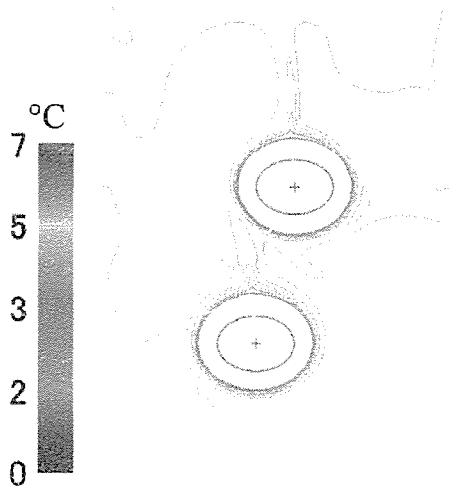
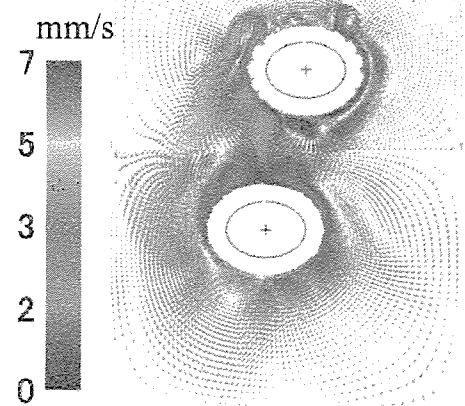


Fig.4.2.43 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

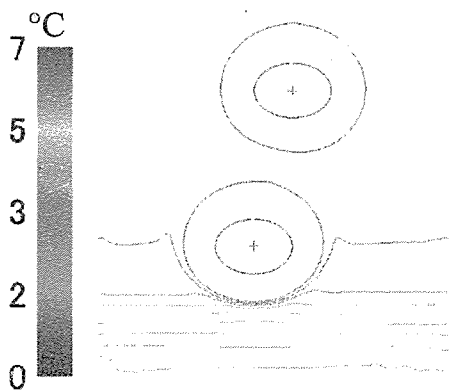
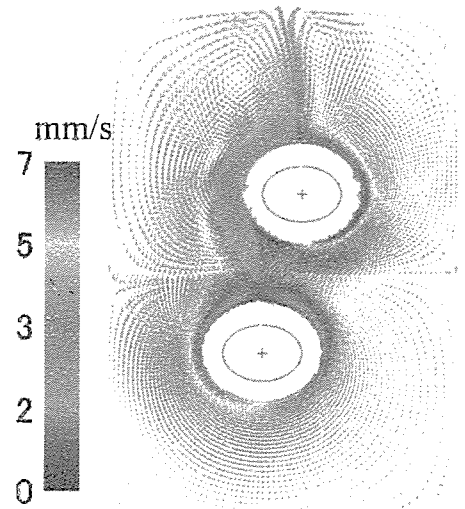




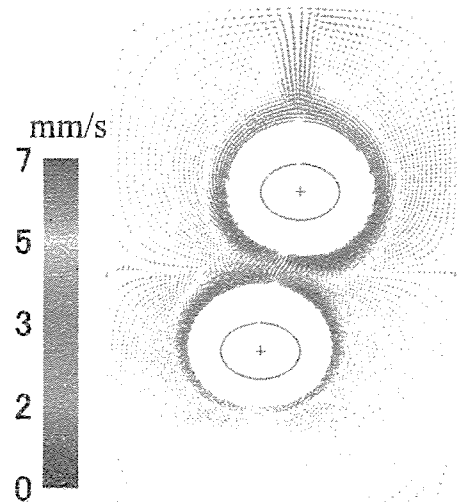
(a) 1800s



(b) 3600s



Isotherms



Velocity

(c) 10800s

Fig.4.2.44 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.

( $\alpha = 0.7$ ,  $\phi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

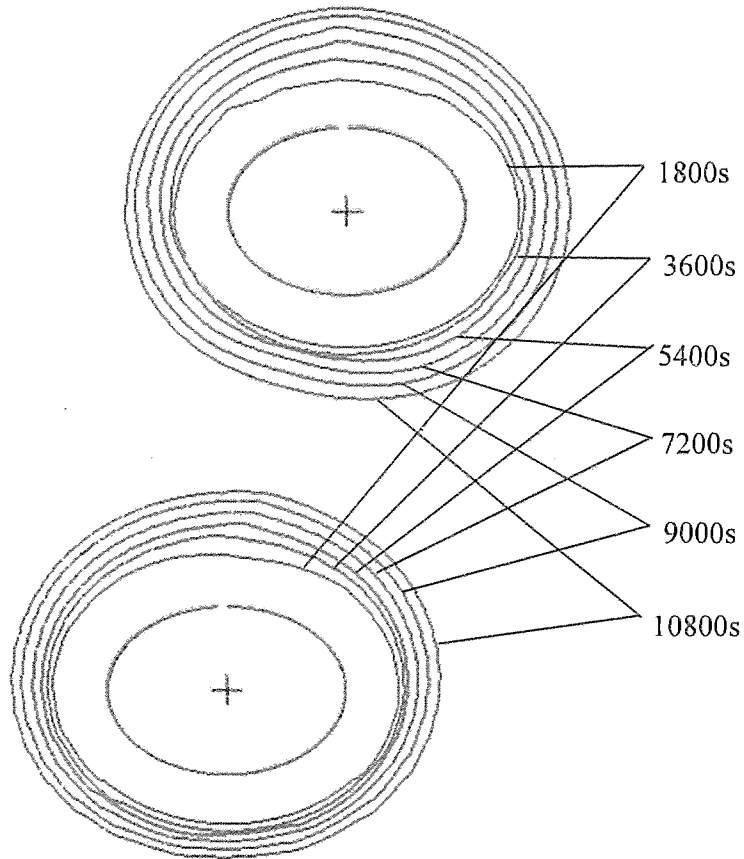


Fig.4.2.45 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

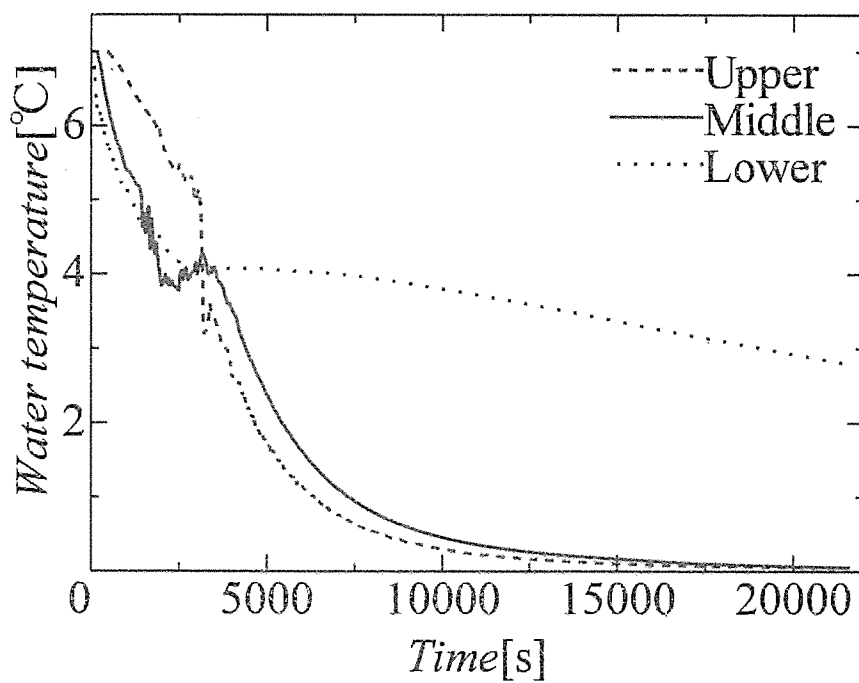


Fig.4.2.46 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

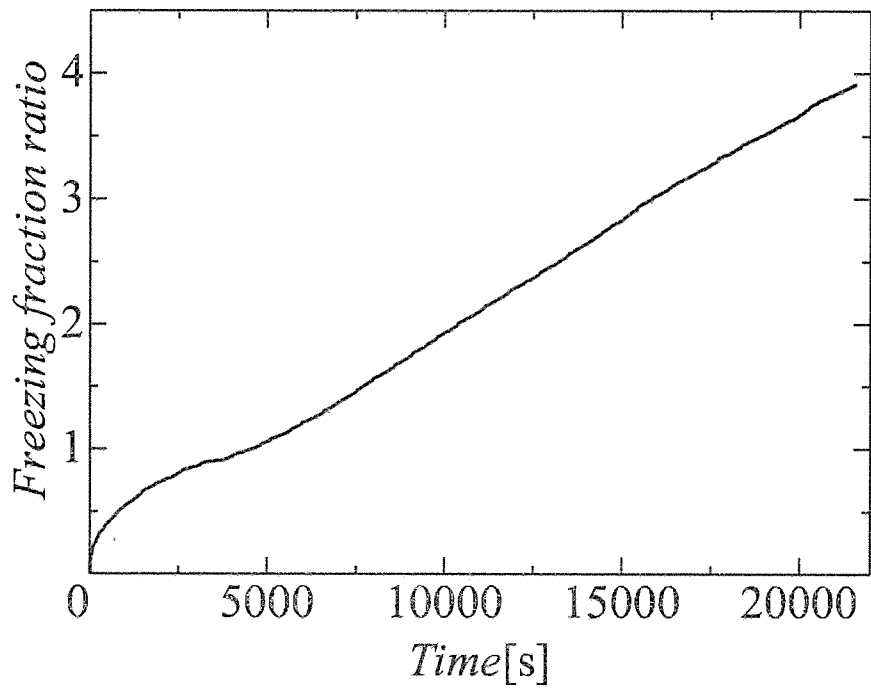


Fig.4.2.47 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

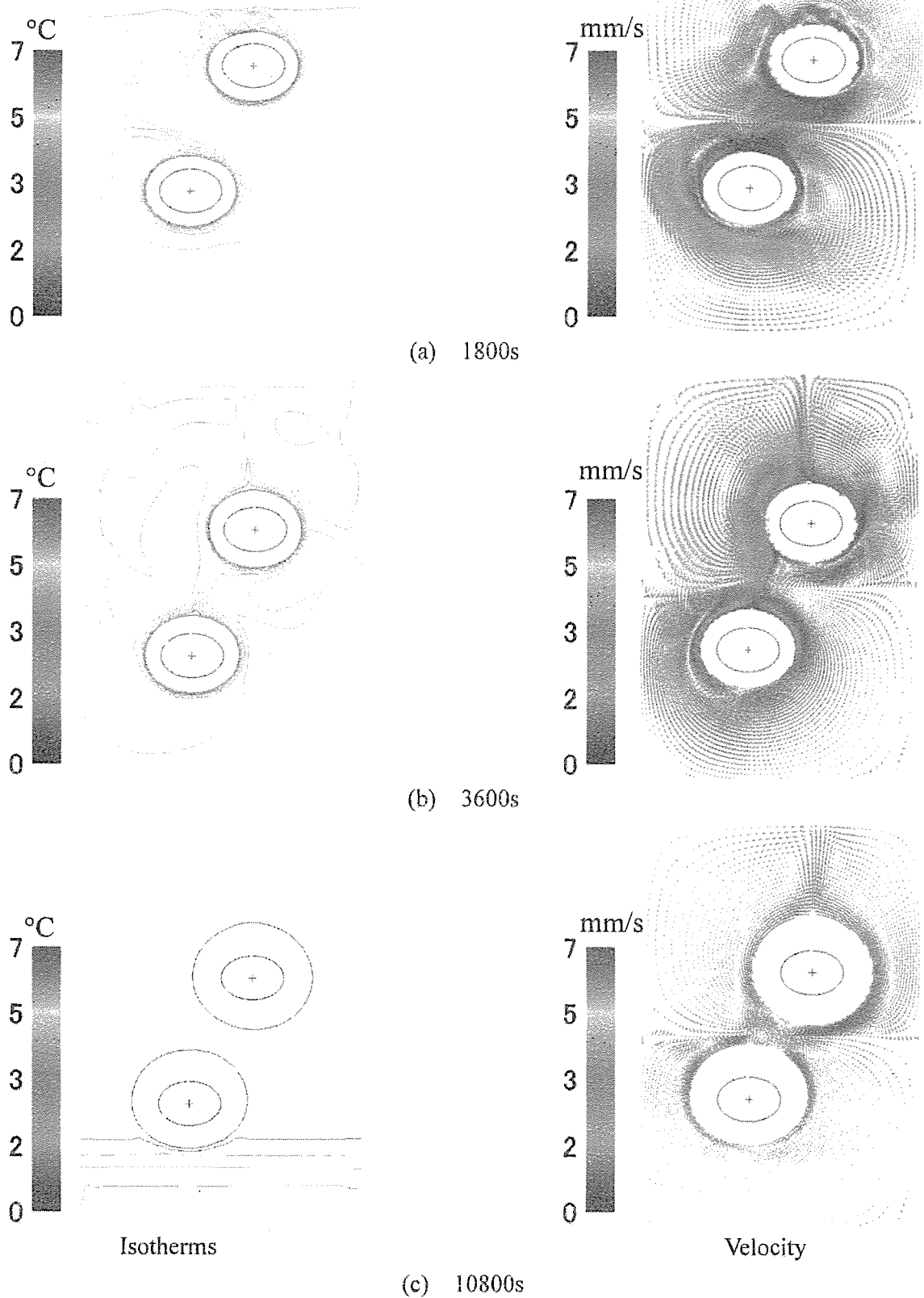


Fig.4.2.48 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

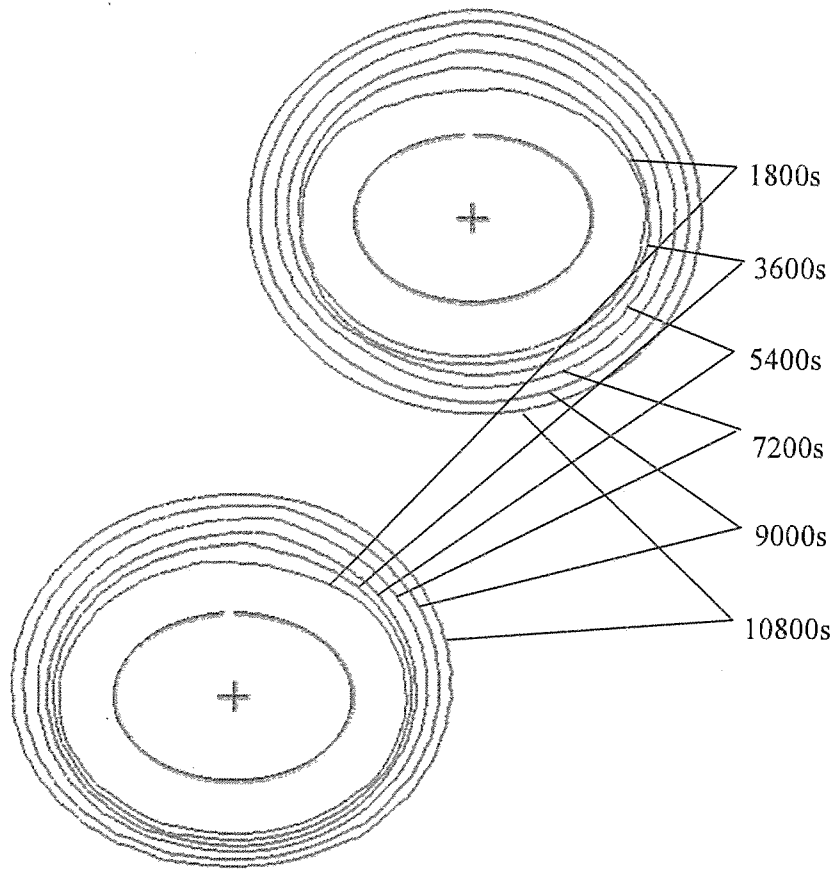


Fig.4.2.49 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\phi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

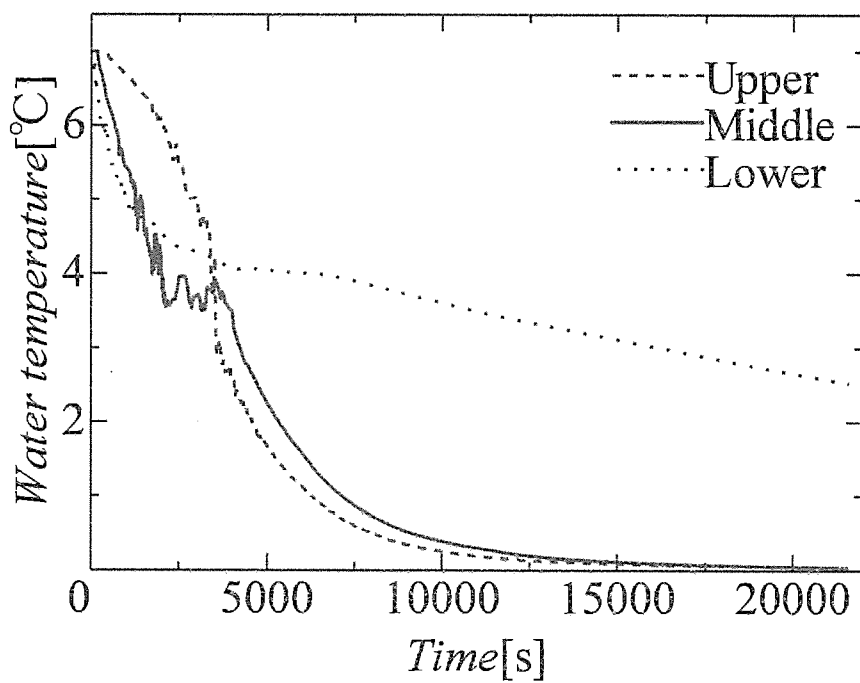


Fig.4.2.50 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\phi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

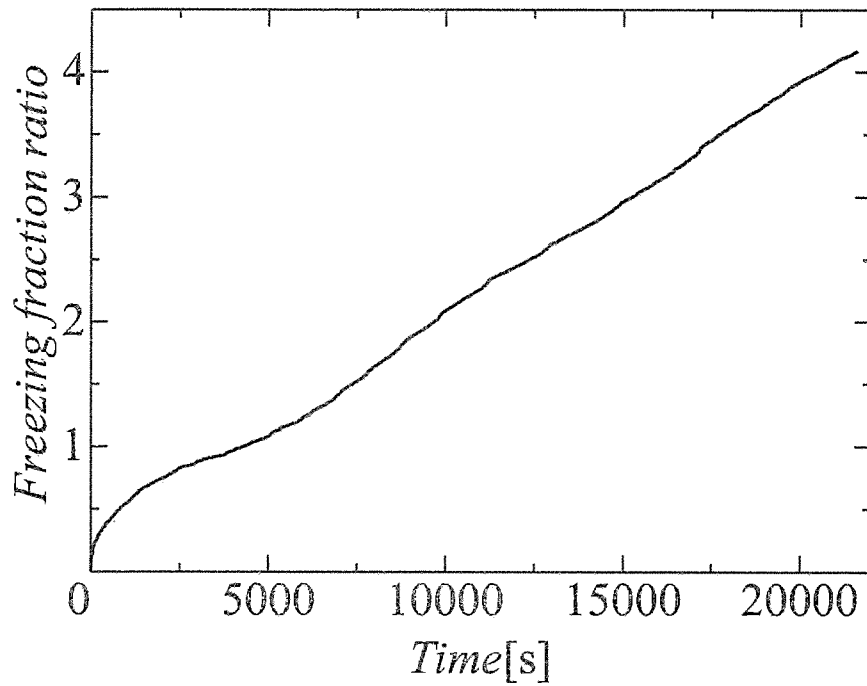


Fig.4.2.51 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 $(\alpha = 0.7, \varphi_g = 90^\circ, D_x = 40 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm}, T_{mi} = 7 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,1} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,2} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C})$

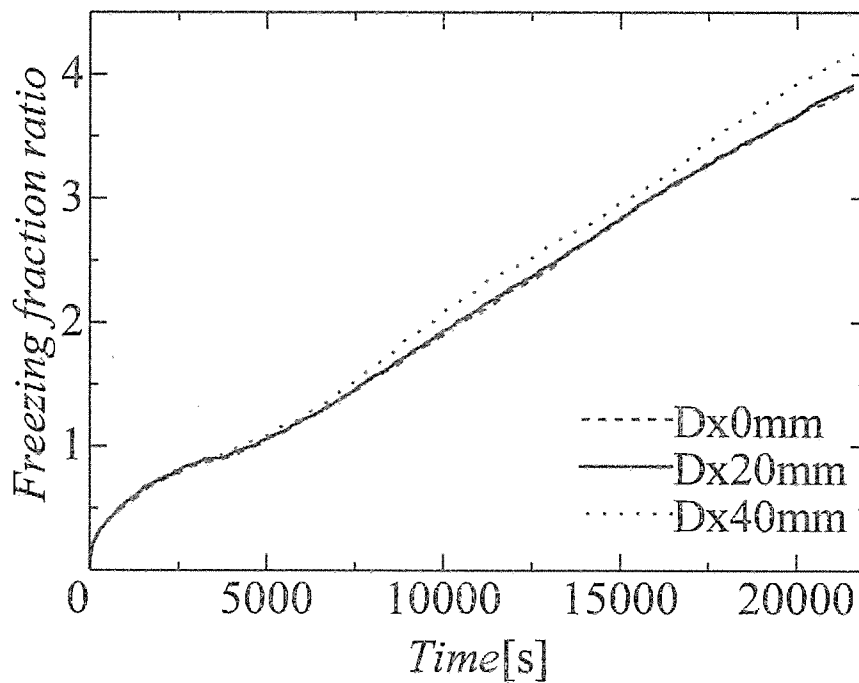


Fig.4.2.52 Comparison of freezing fraction by analysis for two elliptical tubes  
 $(\alpha = 0.7, \varphi_g = 90^\circ, T_{mi} = 7 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,1} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,2} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C})$

### 4.2.3 各管形状および配置角度の凝固率の時間変化の比較

(1)  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °Cの場合

図 4.2.53 に縦型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ), 横型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ), 円管の凝固率の時間変化を示す. この図から, 縦型の凝固率の時間変化が小さく, 横型の凝固率の時間変化が大きくなることがわかる. このことから, この条件下では, 楕円管の長径を重力方向に対し, 垂直にとることにより, 凝固率の増大が得られることがわかる.

(2)  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °Cの場合

図 4.2.54 に縦型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ), 横型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ), 円管の凝固率の時間変化を示す. この図から, (1)の場合と同様に縦型の凝固率の時間変化が小さく, 横型の凝固率の時間変化が大きくなることがわかる.

(3)  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °Cの場合

図 4.2.55 に縦型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ), 横型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ), 円管の凝固率の時間変化を示す. この図から, (1), (2)の場合と同様に縦型の凝固率の時間変化が小さく, 横型の凝固率の時間変化が大きくなることがわかったが, 凝固率の時間変化にほとんど差が見られなかった.

(4)  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °Cの場合

図 4.2.56 に縦型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ), 横型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ), 円管の凝固率の時間変化を示す. この図から, 縦型の凝固率の時間変化が小さく, 横型の凝固率の時間変化が大きくなることがわかる.

(5)  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °Cの場合

図 4.2.57 に縦型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ), 横型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ), 円管の凝固率の時間変化を示す. この図から, 横型の凝固率の時間変化が大きくなるが, 円管と横型の凝固率の時間変化にほとんど差が見られなかった. また, 縦型の凝固率が小さくなることがわかる.

(6)  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °Cの場合

図 4.2.58 に縦型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ), 横型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ), 円管の凝固率の時間変化を示す. この図から, (4), (5)の場合と同様に縦型の凝固率が小さく, 横型の凝固率が大きくなることがわかったが, 凝固率の時間変化にほとんど差が見られなかった.

(1)~(6)の結果から, 管形状及び配置角度を横型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ) にすることにより, 縦型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ), 円管に比べ, 凝固率の増大が示される. また, 水平方向軸間距離を大きくとることにより, 管形状及び配置角度が凝固率の時間変化に与える影響の差がほとんど無くなることがわかる.

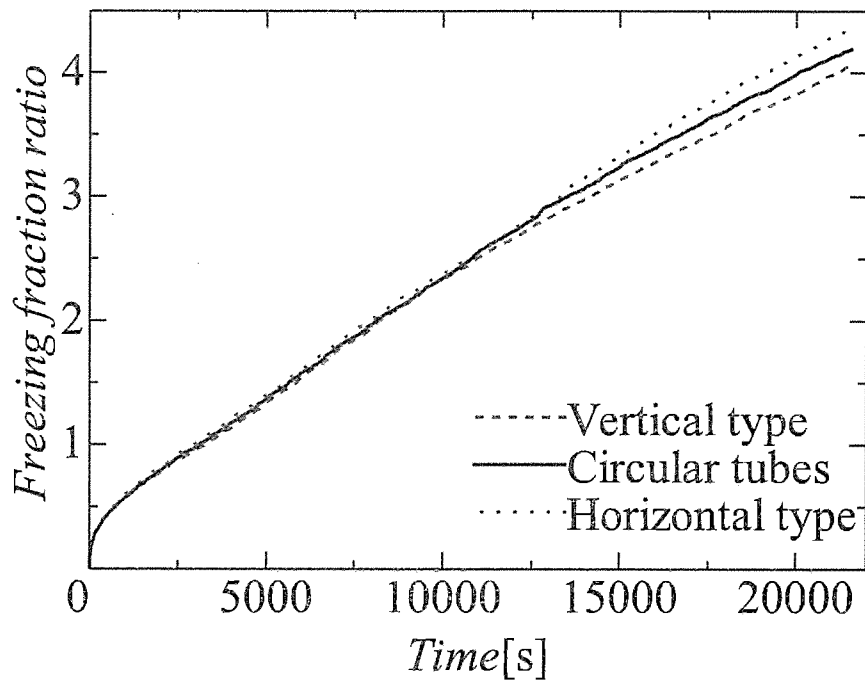


Fig.4.2.53 Comparison of freezing fraction ratio by circular and elliptical tubes for two tubes.  
 ( $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

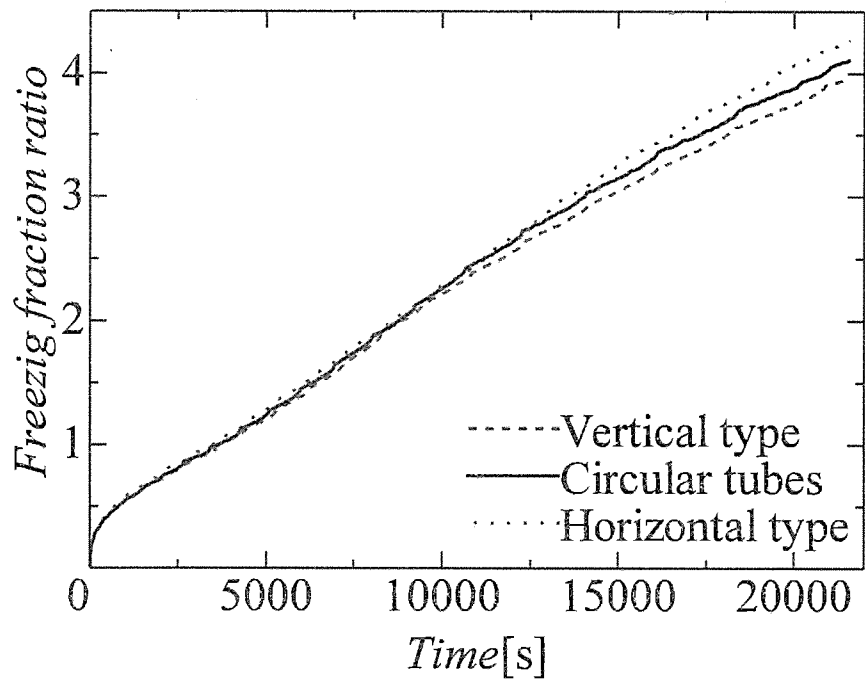


Fig.4.2.54 Comparison of freezing fraction ratio by circular and elliptical tubes for two tubes.  
 ( $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)



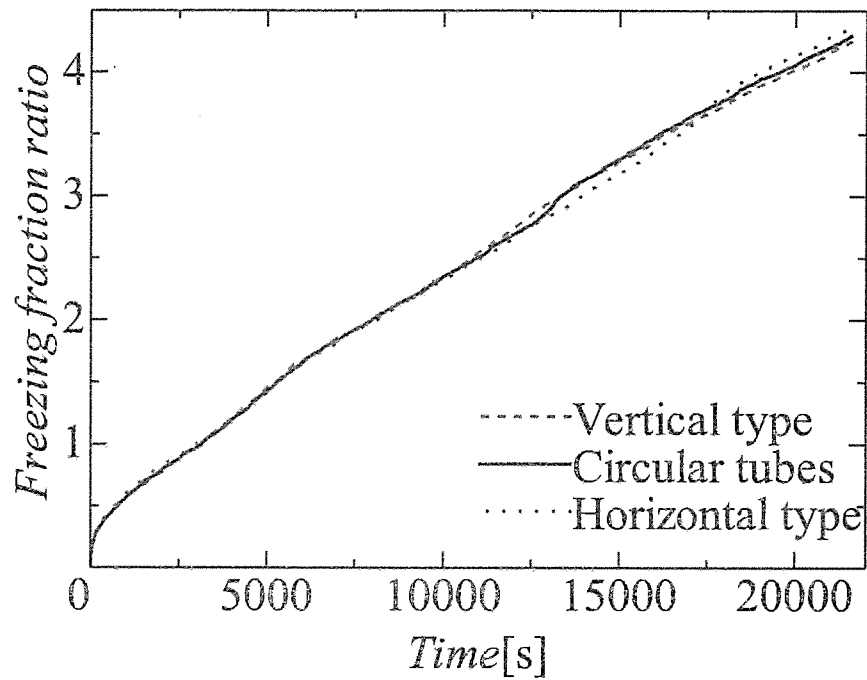


Fig.4.2.55 Comparison of freezing fraction ratio by circular and elliptical tubes for two tubes.  
 ( $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

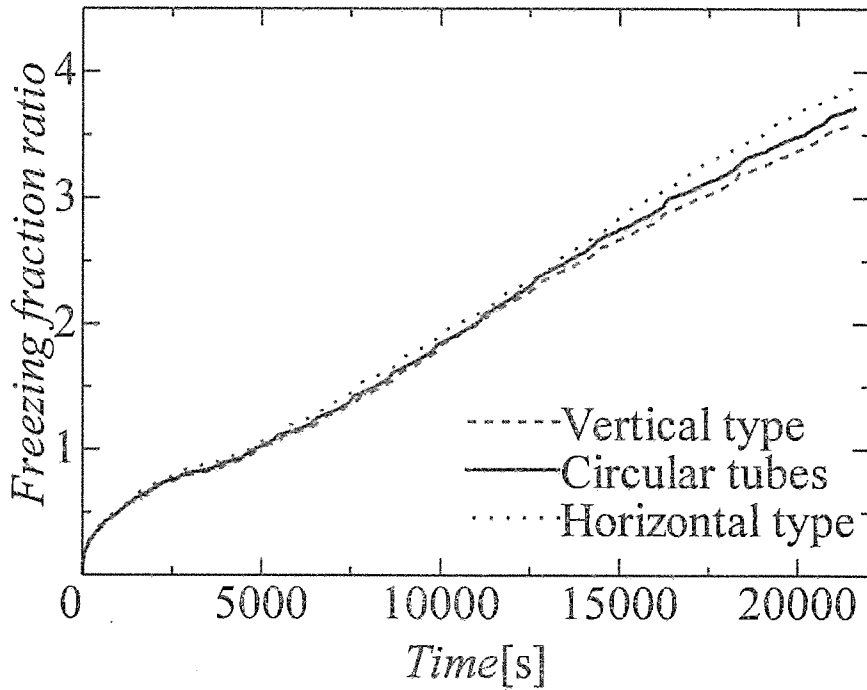


Fig.4.2.56 Comparison of freezing fraction ratio by circular and elliptical tubes for two tubes.  
 ( $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

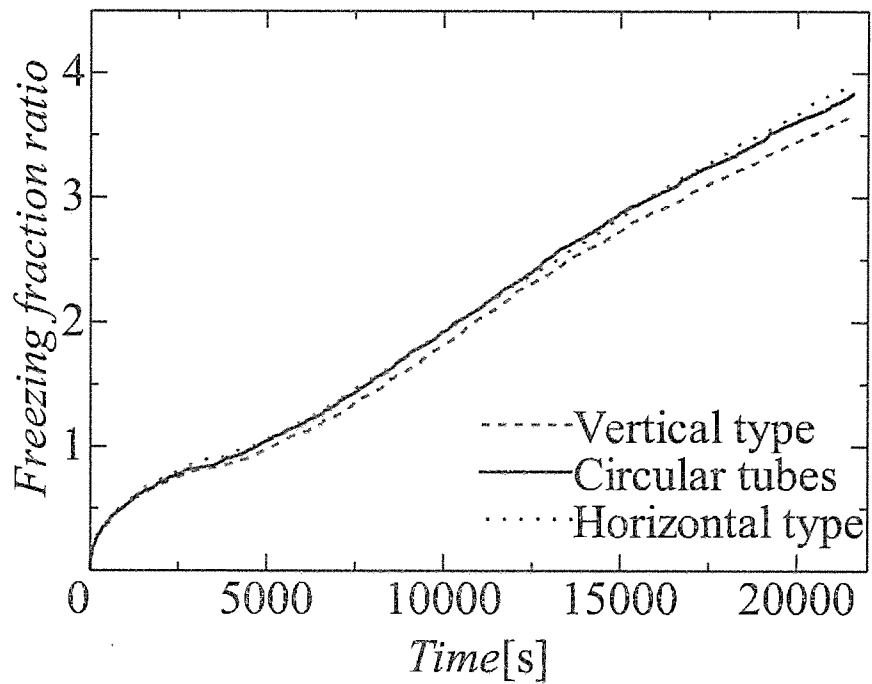


Fig.4.2.57 Comparison of freezing fraction ratio by circular and elliptical tubes for two tubes.  
 ( $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

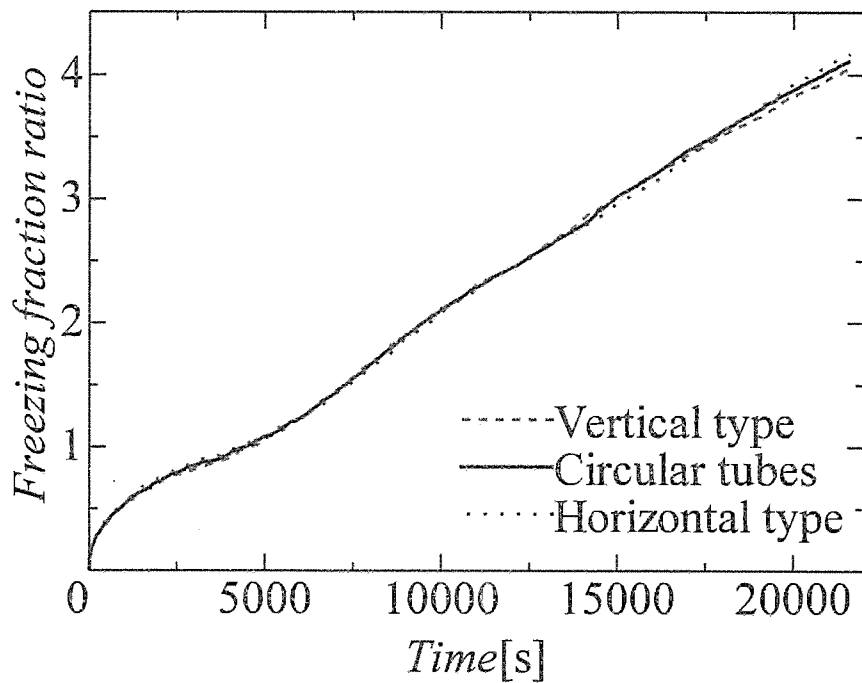


Fig.4.2.58 Comparison of freezing fraction ratio by circular and elliptical tubes for two tubes.  
 ( $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

### 4.3 水槽サイズ $X=270$ mm, $Y=180$ mm の場合の凍結現象

#### 4.3.1 $T_{ini}=4$ °Cの場合における数値解析

##### (1) 楕円管 ( $\alpha=0.7$ , $\varphi_g=0^\circ$ ) $D_x=0$ mm, $D_y=80$ mm の場合

図 4.3.1 には代表的な時間での流れ場及び温度場を示す。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 4.3.1(a)から良くわかる。さらに時間の経過と共に、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。この様子は、図 4.3.1(b)～図 4.3.1(c)からわかる。

図 4.3.2 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、上部管の方が下部管に比べ、若干厚く成長していることがわかる。これは、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考えられる。

図 4.3.3 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、水槽サイズ  $X=180$  mm,  $Y=270$  mm の場合は、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が、この条件の場合は、下部水温が下がりやすく、上部、中部水温は、水槽サイズ  $X=180$  mm,  $Y=270$  mm の場合と比べ、若干水温が下がりにくいことがわかる。

図 4.3.4 には凝固率の時間変化を示す。この図から凝固率が時間の経過と共に増大していくことがわかる。

##### (2) 楕円管 ( $\alpha=0.7$ , $\varphi_g=0^\circ$ ) $D_x=20$ mm, $D_y=80$ mm の場合

図 4.3.5 には代表的な時間での流れ場及び温度場を示す。(1)の場合は流体の流れ方向が下から上への上下方向に対し、この条件においては、流れ方向が左下から右上の斜め方向になっている。この様子は図 4.3.5(a)からわかる。それ以降は、上昇流はしだいに弱くなり、容器左側の流れの速度が上がっていく。この様子は図 4.3.5(b)～図 4.3.5(c)からわかる。

図 4.3.6 には代表的な凍結界面の時間変化を示す。(1)の場合と同様に、上部管の方が下部管に比べ、厚く成長していることがわかる。

図 4.3.7 には水温の時間変化を示す。(1)の場合と比べ、上部、中部水温が下がりやすく、下部水温が下がりにくいことがわかる。

図 4.3.8 には凝固率の時間変化を示す。(1)の場合と同様に凝固率が時間の経過と共に増大していくことがわかる。

##### (3) 楕円管 ( $\alpha=0.7$ , $\varphi_g=0^\circ$ ) $D_x=40$ mm, $D_y=80$ mm の場合

図 4.3.9 には代表的な時間での流れ場及び温度場を示す。(2)の場合と同様に流体の流れ方向が左下から右上の斜め方向になっている。この様子は図 4.3.9(a)～からわかる。また、時間が経過すると共に、(2)の場合と同様に容器左側の部分の流れの速度が上がっている。これは、管周りで冷却された流体が容器上部領域の水温より温度が高く、容器下部領域の水温より温度が低いため、そして、水槽内壁面付近の水温と管壁面付近の水温に温度差が生じ始めたためと考えられる。この様子は図 4.3.9(b)～ 図 4.3.9(c)からわかる。

図 4.3.10 には代表的な凍結界面の時間変化を示す。(1), (2)の場合と同様に、上部管の方が下部管に比べ、厚く成長していることがわかる。

図 4.3.11 には水温の時間変化を示す。(1), (2)の場合と比べ、短時間で水槽内の水温が全体的に下がることがわかる。

図 4.3.12 には凝固率の時間変化を示す。(1), (2)の場合と同様に凝固率が時間の経過と共に増大していくことがわかる。

図 4.3.13 は(1)～(3)の場合における各水平方向軸間距離の凝固率の時間変化を示す。この図から、これらの条件は水平方向軸間距離を大きくとることにより凝固率が増大することが示される。また、水平方向軸間距離  $D_x = 0 \text{ mm}$  と  $D_x = 20 \text{ mm}$  の場合の凝固率を比較すると、それほど差が見られなかった。

これらの結果から、 $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$  の条件下では水平方向軸間距離を大きくとることにより、水槽内の水温の低下時間を短縮化することができ、それに応じ、凝固率が増大することがわかる。

#### (4) 楕円管 ( $\alpha = 0.7$ , $\varphi_g = 90^\circ$ ) $D_x = 0 \text{ mm}$ , $D_y = 80 \text{ mm}$ の場合

(1)の場合と同条件で、配置角度を  $\varphi = 90^\circ$  (横型)と変化させた場合の結果を示す。図 4.3.14 には代表的な時間での流れ場及び温度場を示す。(1)の場合と同様に  $T_{ini} = 4^\circ\text{C}$  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り、さらに時間の経過と共に、容器下部側では、 $4^\circ\text{C}$  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るため、この領域では熱伝導が支配的となる。また、水槽サイズ  $X = 180 \text{ mm}$ ,  $Y = 270 \text{ mm}$  の場合と比べ、容器下部の熱伝導の支配的な領域が高さ方向に対して狭い。この様子は、図 4.3.14(a)～ 図 4.3.14(c)からわかる。

図 4.3.15 には代表的な凍結界面の時間変化を示す。上部管の方が下部管に比べ、若干厚く成長していることがわかる。

図 4.3.16 には水温の時間変化を示す。(1)の場合と比べ、水槽内の水温が全体的に下がりにくいことがわかる。

図 4.3.17 には凝固率の時間変化を示す。この図から凝固率が時間の経過と共に増大していくことがわかる。

#### (5) 楕円管 ( $\alpha = 0.7$ , $\varphi_g = 90^\circ$ ) $D_x = 20 \text{ mm}$ , $D_y = 80 \text{ mm}$ の場合

図 4.3.18 には代表的な時間での流れ場及び温度場を示す。(2)の場合と同様に この条件においては、管間は流れ方向が左下から右上の斜め方向になり、上部管上部では、流れ方向が右下から左上の斜め方向になっている。この様子は図 4.3.18(a)からわかる。さらに、時間が経過するに従って、流れ方向が全体的に左下から右上の斜め方向になっている。この様子は図 4.3.18(b)～図 4.3.18(c)からわかる。

図 4.3.19 には代表的な凍結界面の時間変化を示す。上部管の方が下部管に比べ、厚く成長していることがわかる。

図 4.3.20 には水温の時間変化を示す。(4)の場合と比べ、上部、中部水温が下がりやすく、下部水温が下がりにくいことがわかるが、(2)の場合と比較すると、水槽内の水温が全体的に下がりにくいことがわかる。

図 4.3.21 には凝固率の時間変化を示す。この図から凝固率が時間の経過と共に増大していくことがわかる。

#### (6) 楕円管 ( $\alpha = 0.7$ , $\varphi_g = 90^\circ$ ) $D_x = 40$ mm, $D_y = 80$ mm の場合

図 4.3.22 には代表的な時間での流れ場及び温度場を示す。(5)の場合と同様に 管間は流れ方向が左下から右上の斜め方向、上部管上部では、流れ方向が右下から左上の斜め方向になり。時間が経過するに従って、流れ方向が全体的に左下から右上の斜め方向になり、容器左側の部分の流れの速度が上がっている。この様子は(3)の場合と同様であり、図 4.3.22(a)～図 4.3.22(c)からわかる。

図 4.3.23 には代表的な凍結界面の時間変化を示す。上部管の方が下部管に比べ、若干厚く成長していることがわかる。

図 4.3.24 には水温の時間変化を示す。(4)、(5)の場合に比べ、短時間で水槽内の水温が全体的に下がることわかるが、(3)の場合と比べると、水槽内の水温が全体的に下がりにくいことがわかる。

図 4.3.25 には凝固率の時間変化を示す。この図から凝固率が時間の経過と共に増大していくことがわかる。

図 4.3.26 には(4)～(6)の場合における各水平方向距離の凝固率の時間変化を示す。この図から、(1)～(3)の場合とは反して、これらの条件は水平方向距離を大きくとると凝固率が減少することが示される。これは、水平方向距離を大きくとることにより、容器左側の流体の流れが速い領域の対流の影響が下部管の氷の成長を妨げているためだと考えられる。

これらの結果から、 $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ の条件下では水平方向距離を大きくとることにより、凝固率が減少することがわかる。また、(1)～(3)の場合と比べ、水槽内の水温が下がりにくいこともわかる。

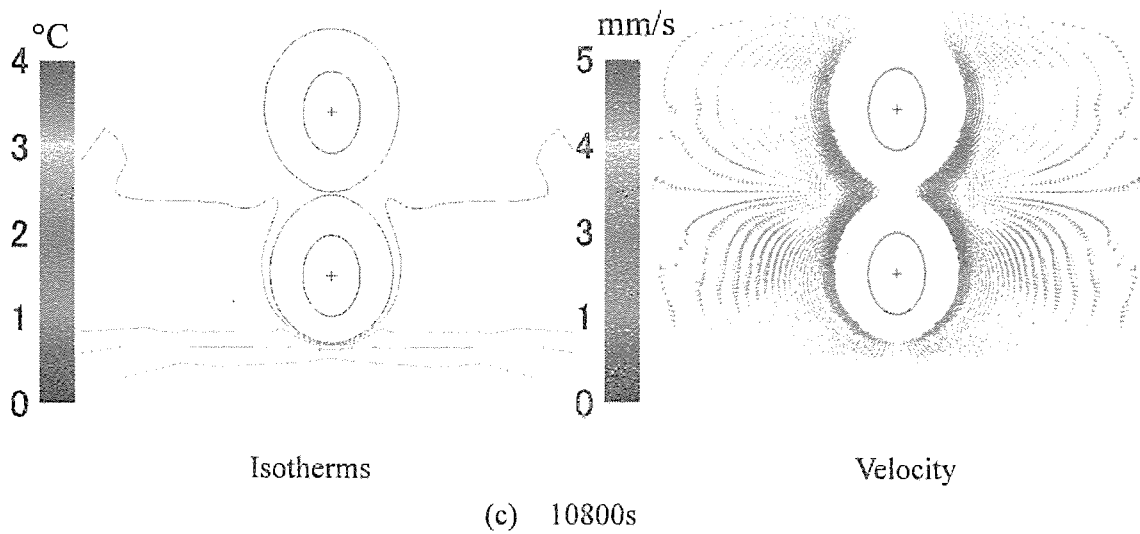
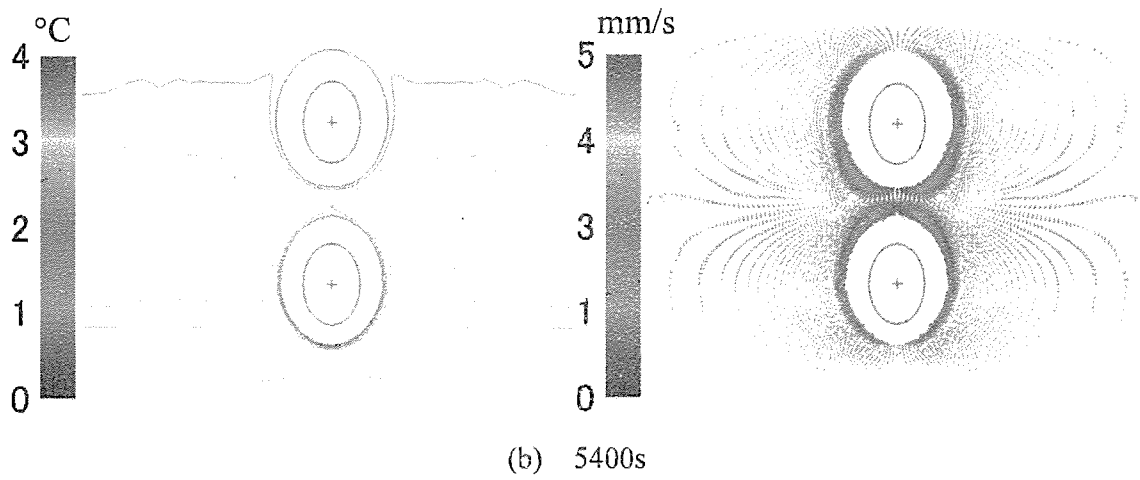
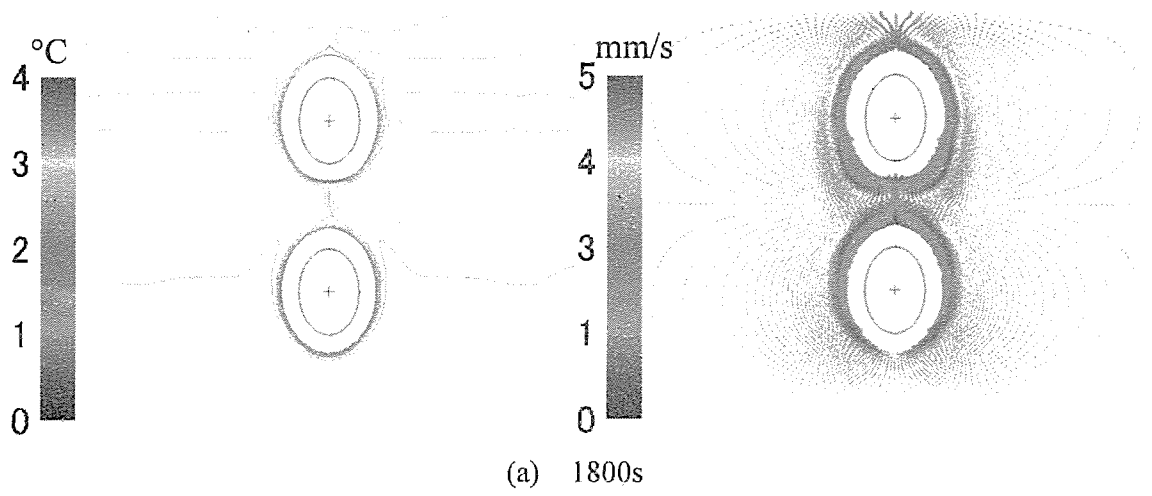


Fig.4.3.1 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.  
 $(\alpha = 0.7, \varphi_g = 0^\circ, D_x = 0 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm}, T_{mi} = 4 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,1} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,2} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C})$

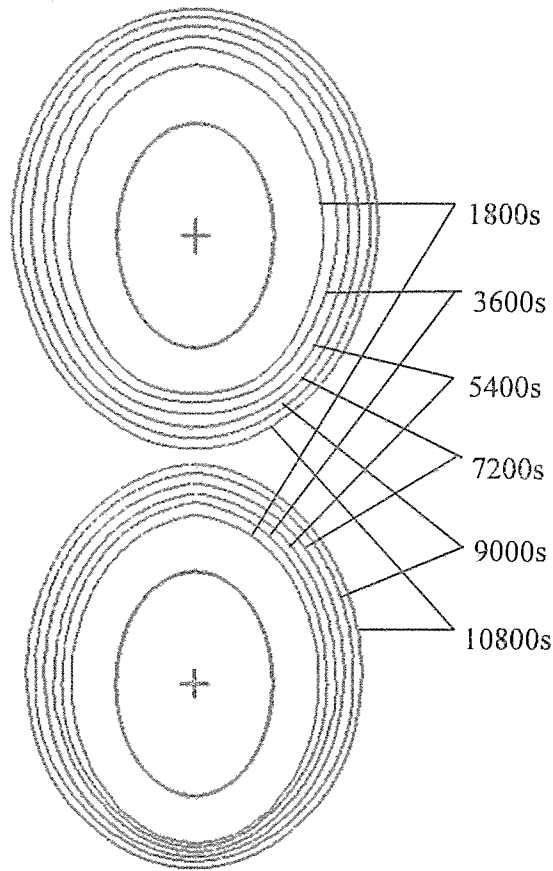


Fig.4.3.2 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 $(\alpha = 0.7, \varphi_g = 0^\circ, D_x = 0 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm}, T_{ini} = 4 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,1} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,2} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C})$

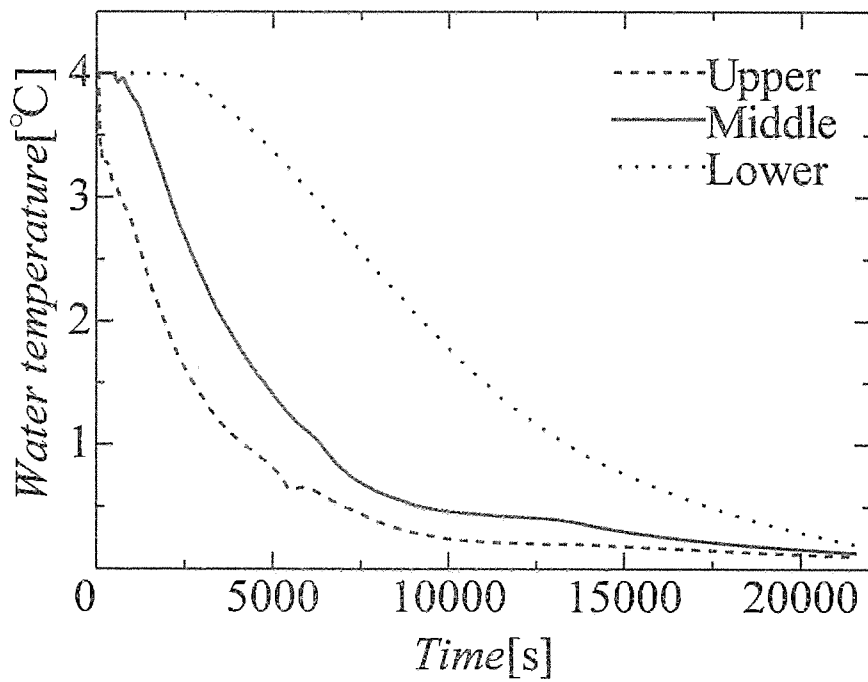


Fig.4.3.3 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 $(\alpha = 0.7, \varphi_g = 0^\circ, D_x = 0 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm}, T_{ini} = 4 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,1} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,2} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C})$

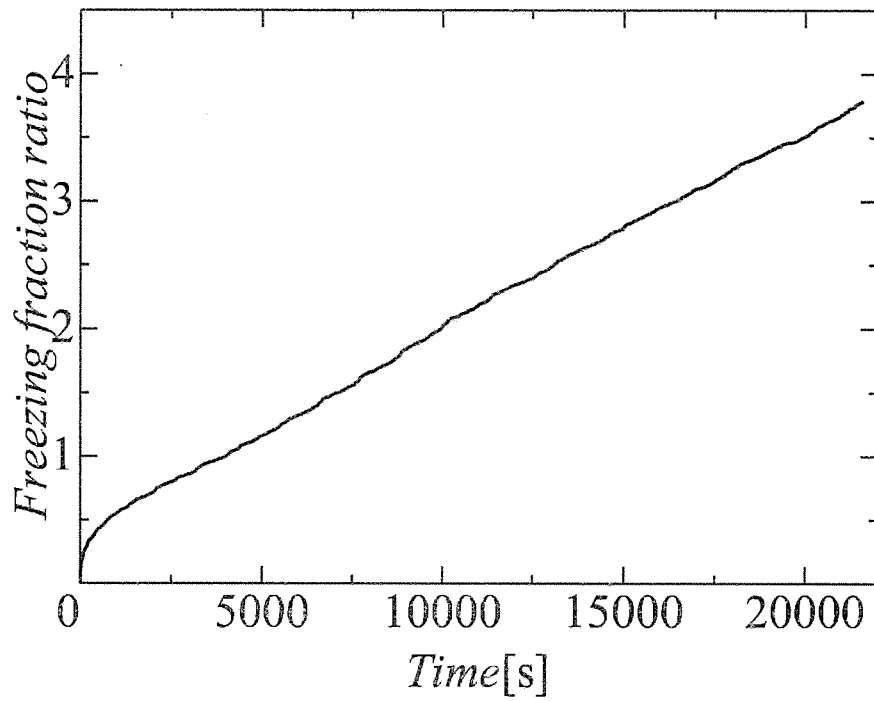


Fig.4.3.4 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)



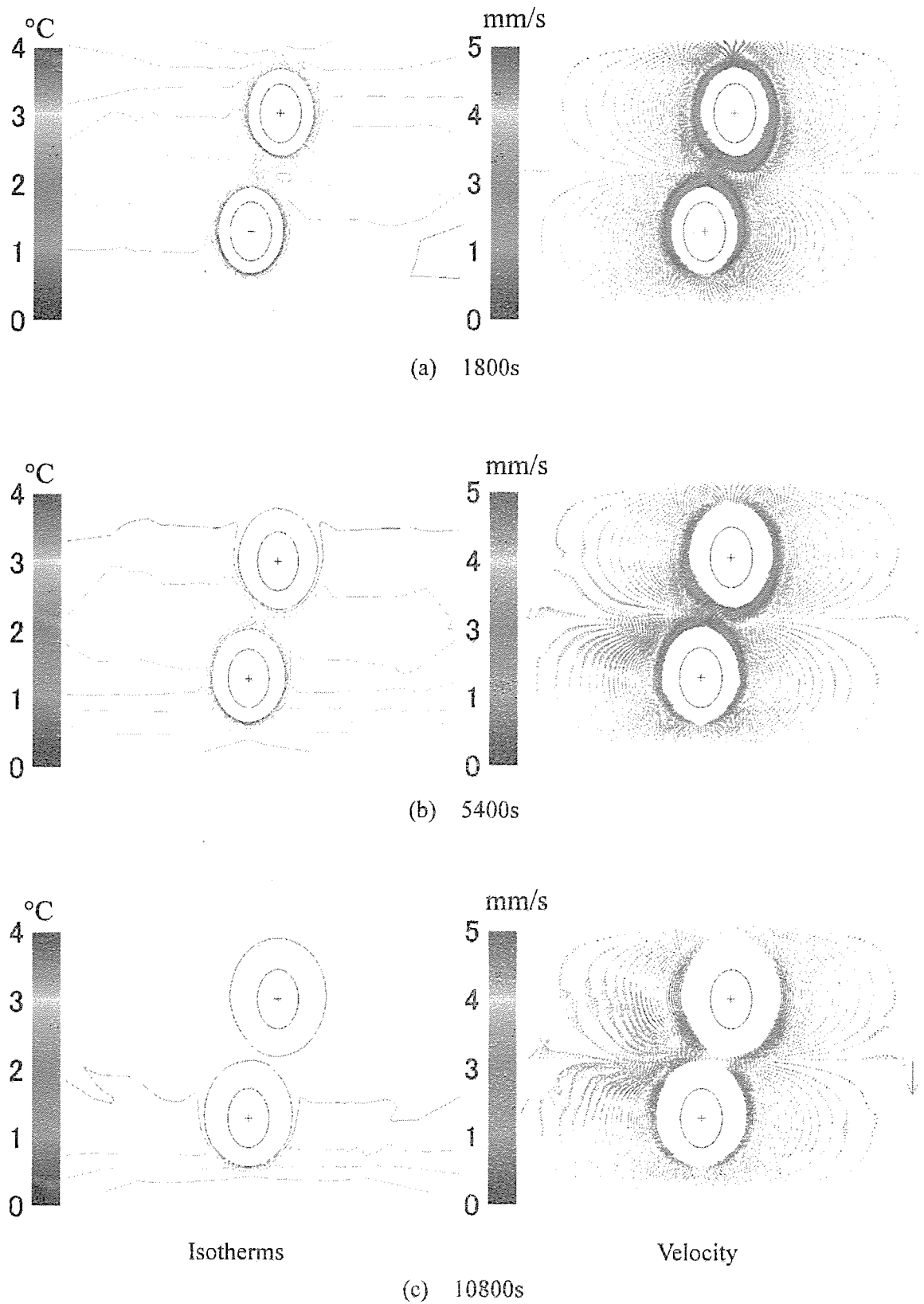


Fig.4.3.5 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

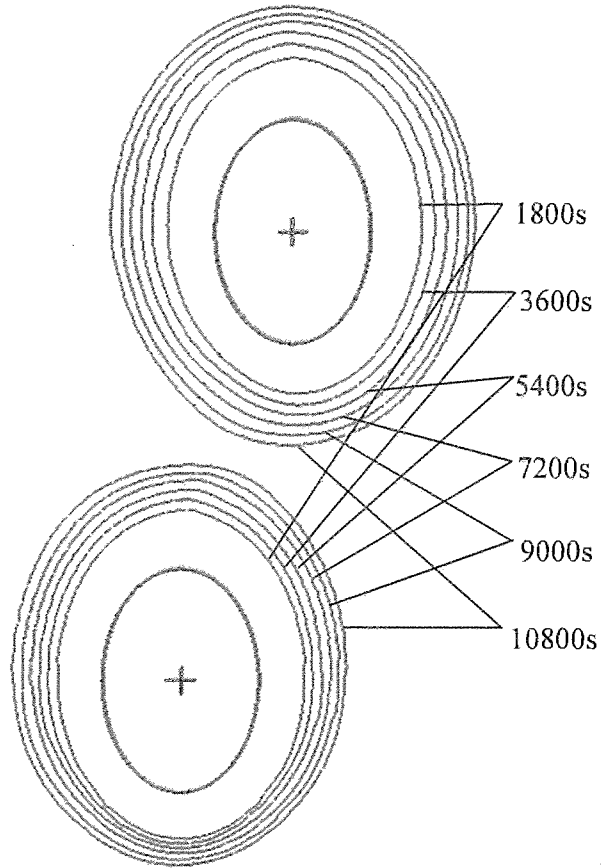


Fig.4.3.6 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{l,1} = -5.0$  °C,  $T_{l,2} = -5.0$  °C)

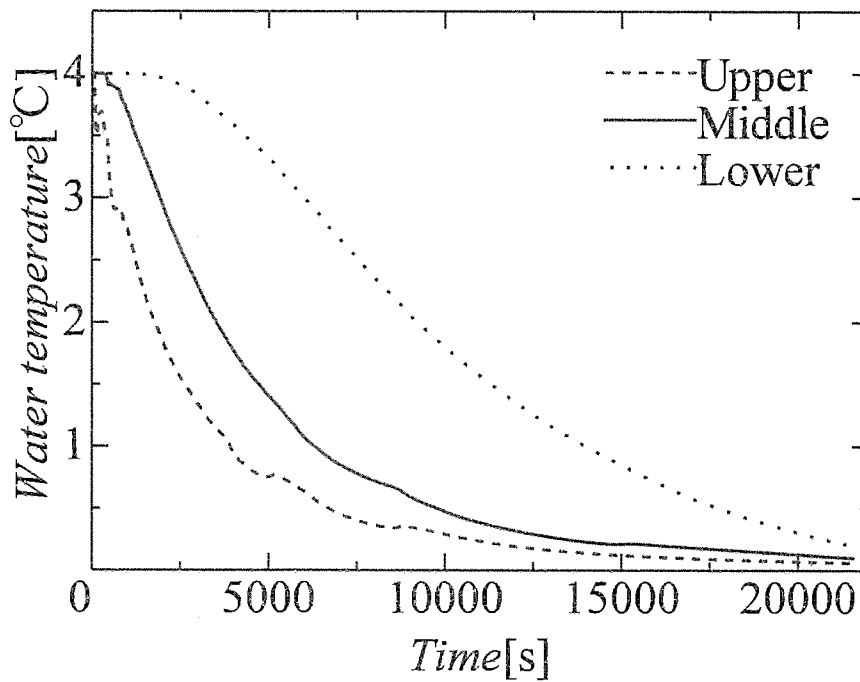


Fig.4.3.7 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{l,1} = -5.0$  °C,  $T_{l,2} = -5.0$  °C)

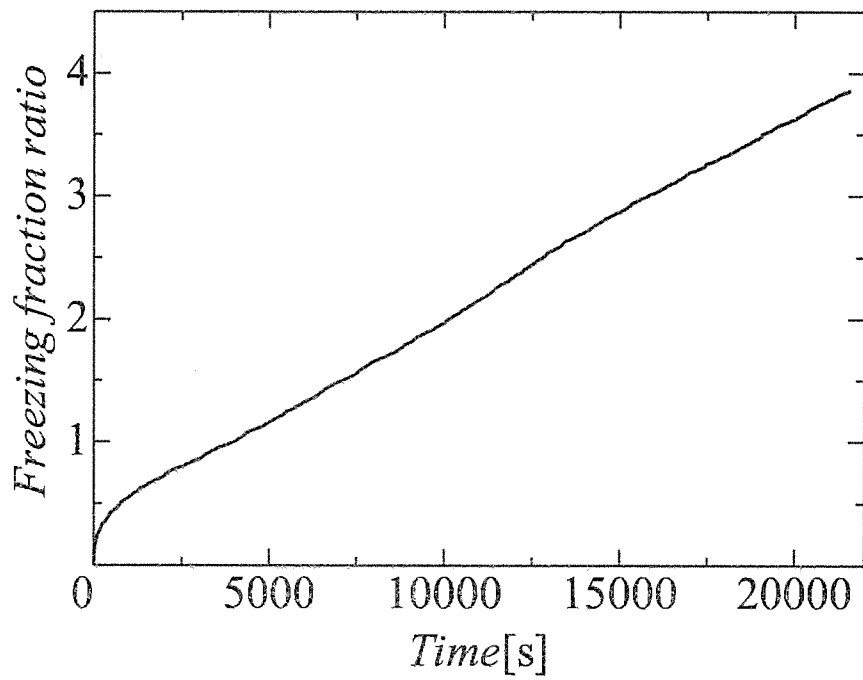
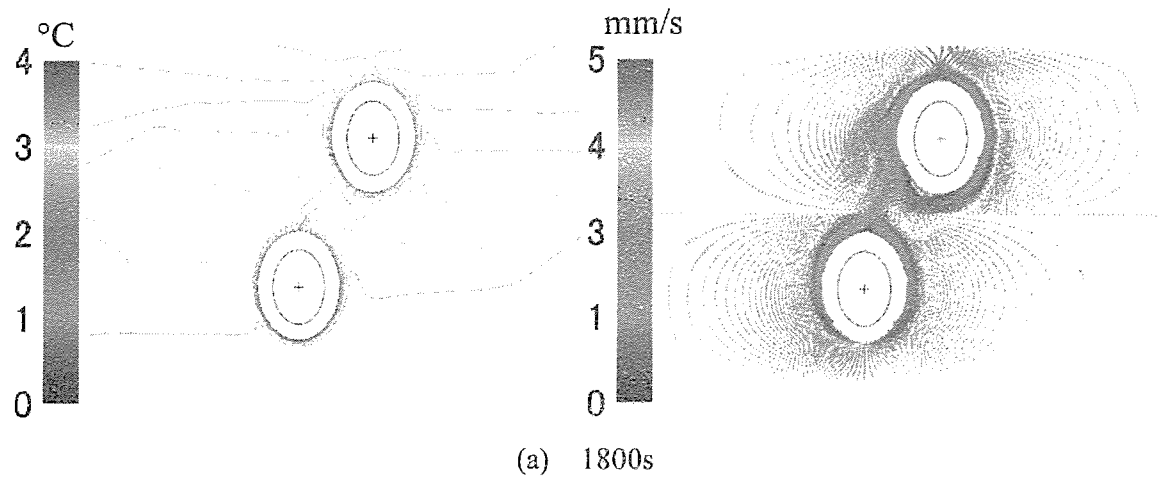
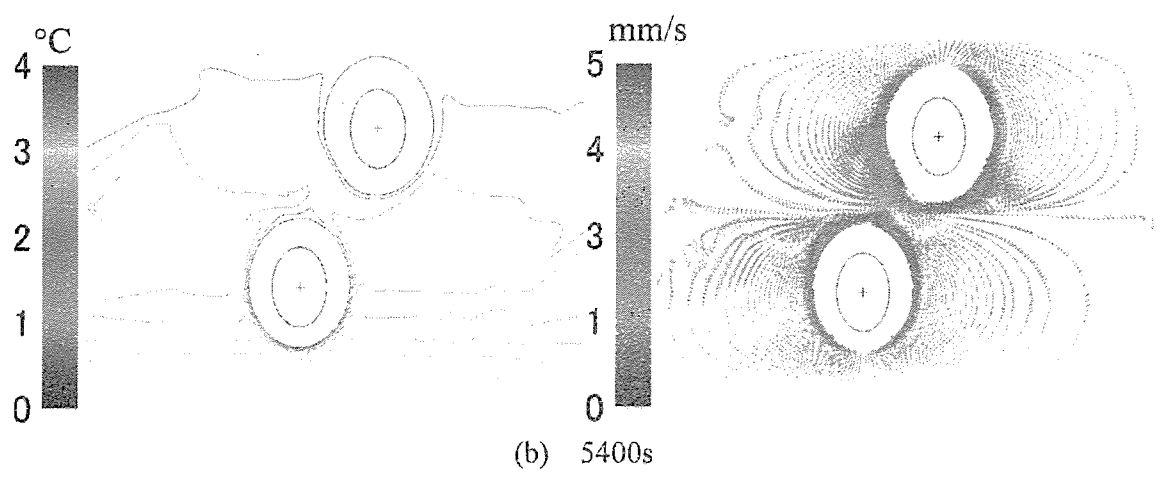


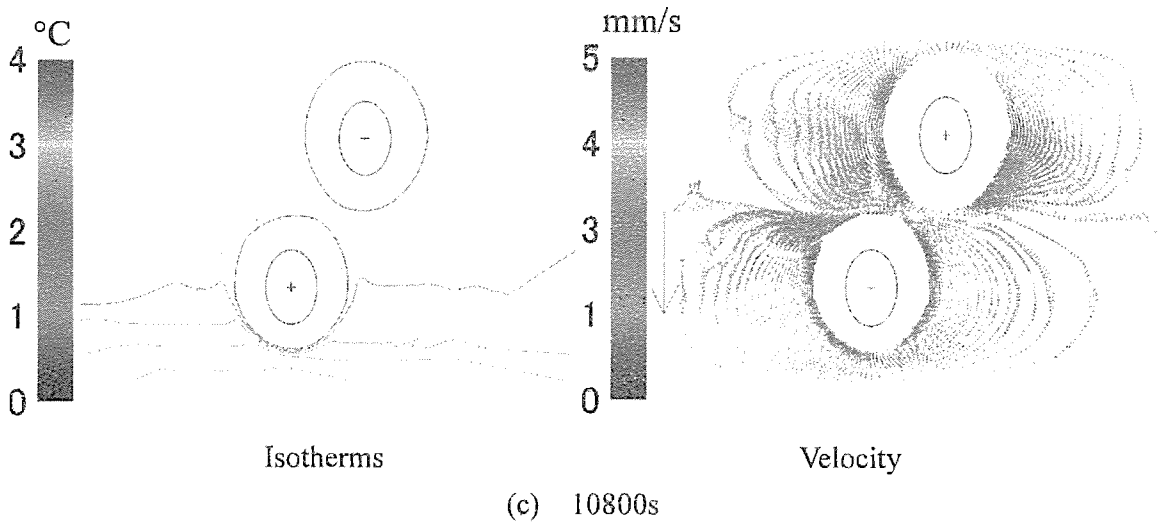
Fig.4.3.8 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)



(a) 1800s



(b) 5400s



(c) 10800s

Fig.4.3.9 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.  
 $(\alpha = 0.7, \varphi_g = 0^\circ, D_x = 40 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm}, T_{ini} = 4 \text{ }^\circ\text{C}, T_{l,1} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C}, T_{l,2} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C})$

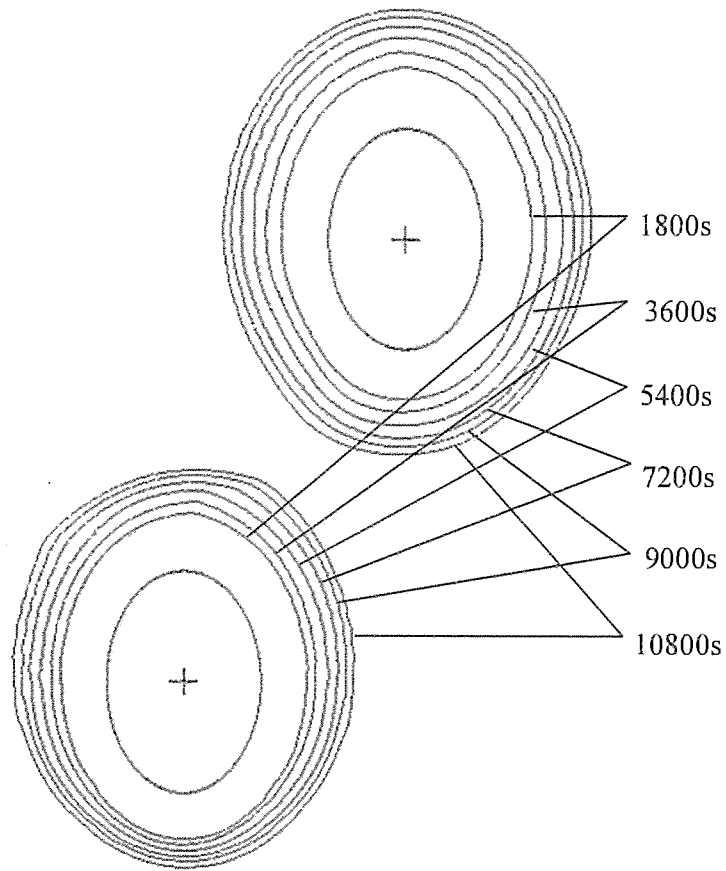


Fig.4.3.10 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

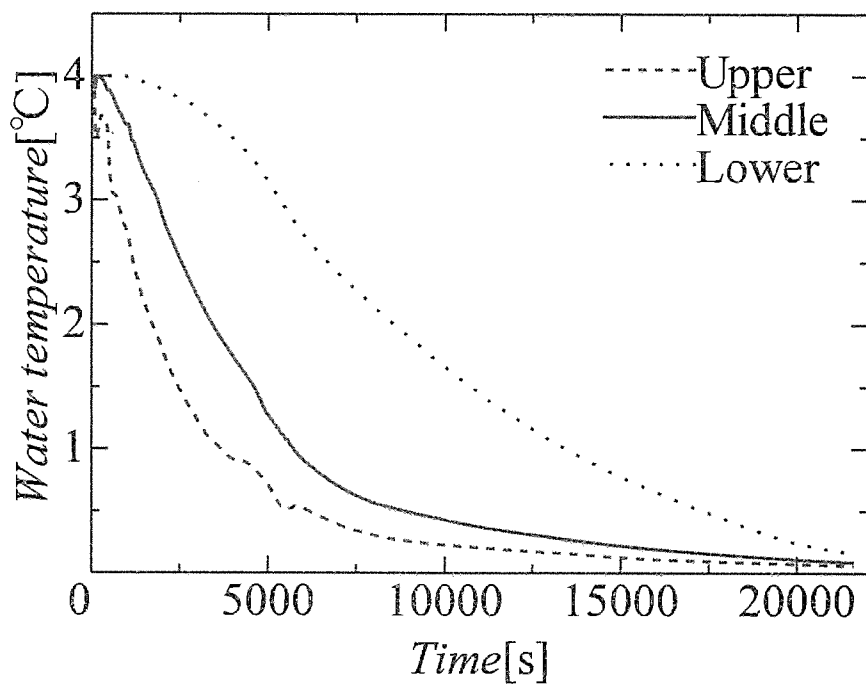


Fig.4.3.11 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

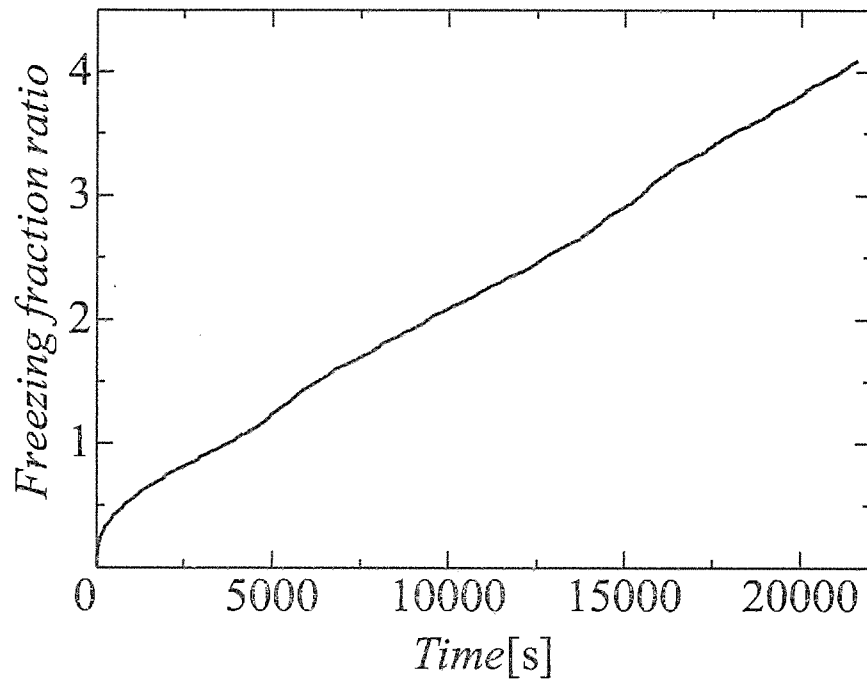


Fig.4.3.12 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 4$  °C,  $T_{l,1} = -5.0$  °C,  $T_{l,2} = -5.0$  °C)

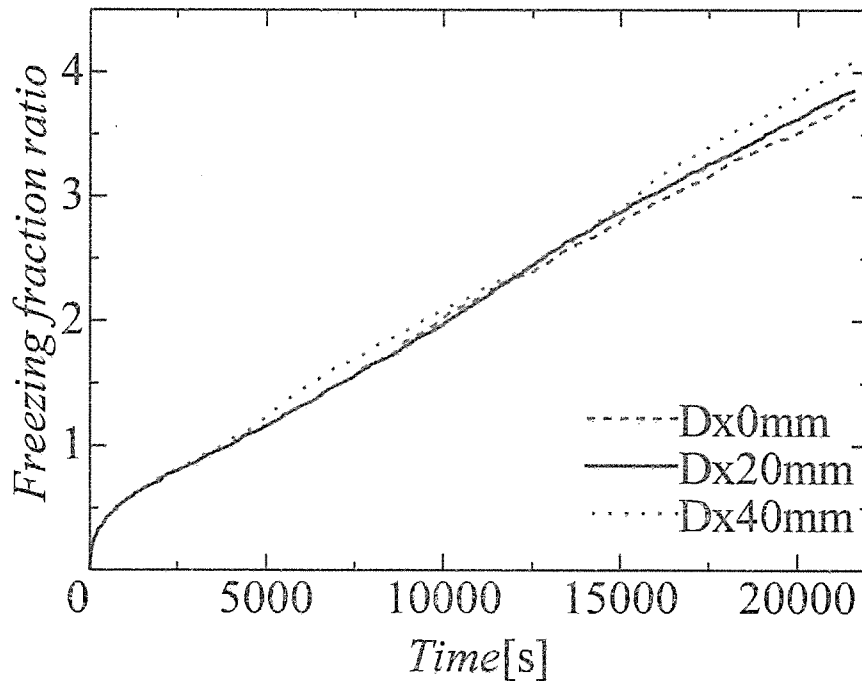


Fig.4.3.13 Comparison of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $T_{mi} = 4$  °C,  $T_{l,1} = -5.0$  °C,  $T_{l,2} = -5.0$  °C)

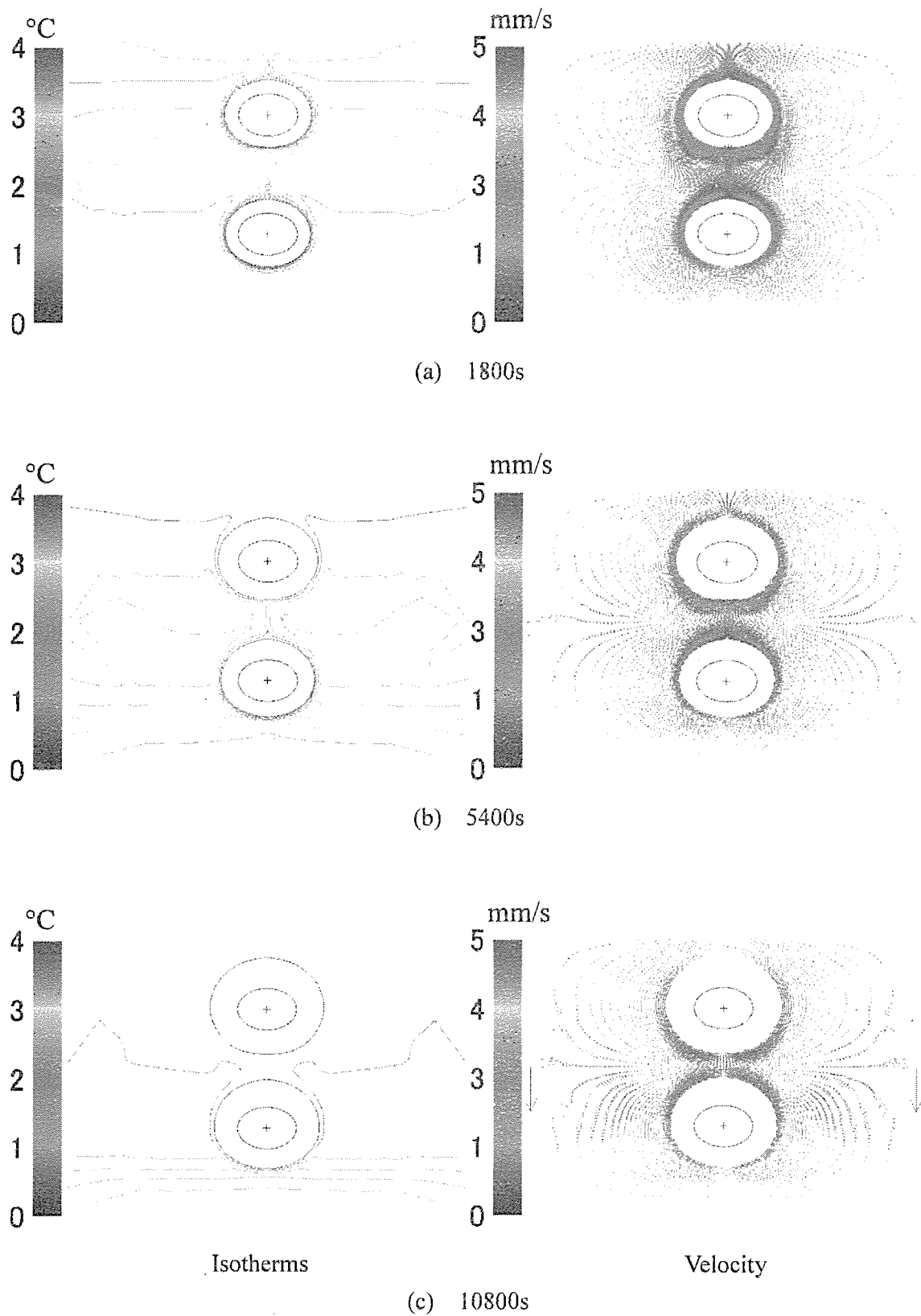


Fig.4.3.14 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

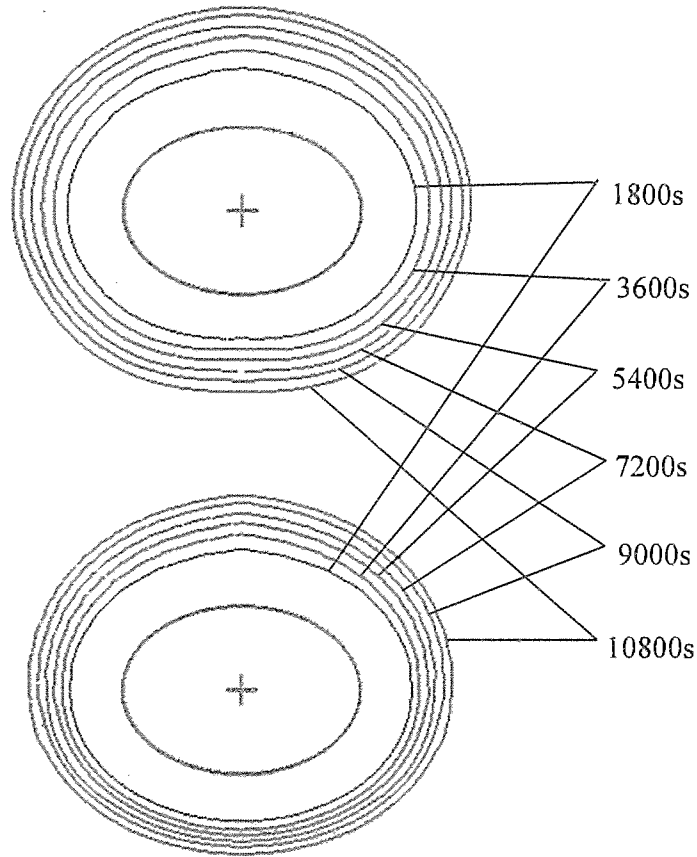


Fig.4.3.15 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 4$  °C,  $T_{l,1} = -5.0$  °C,  $T_{l,2} = -5.0$  °C)

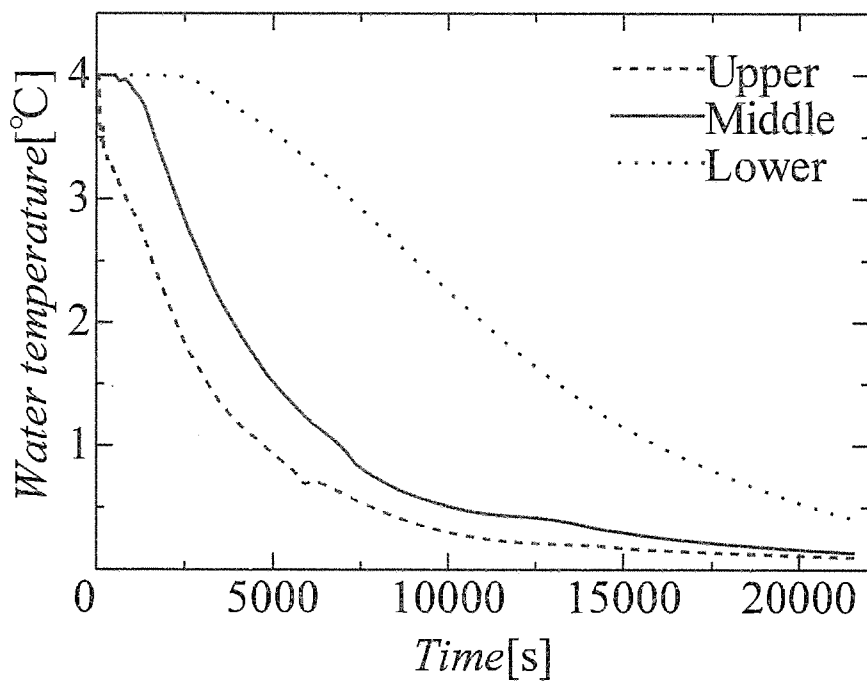


Fig.4.3.16 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 4$  °C,  $T_{l,1} = -5.0$  °C,  $T_{l,2} = -5.0$  °C)



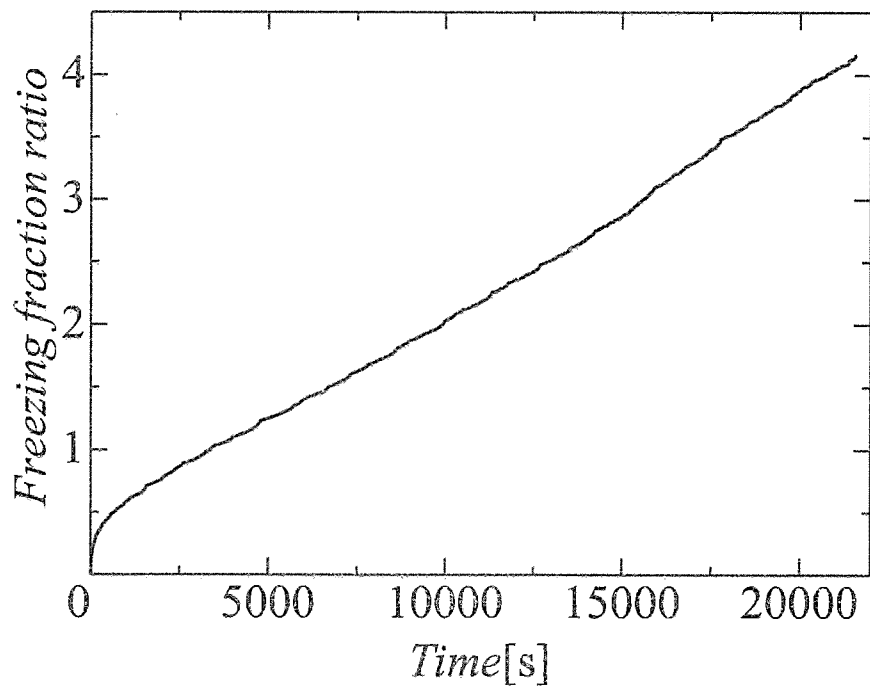


Fig.4.3.17 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

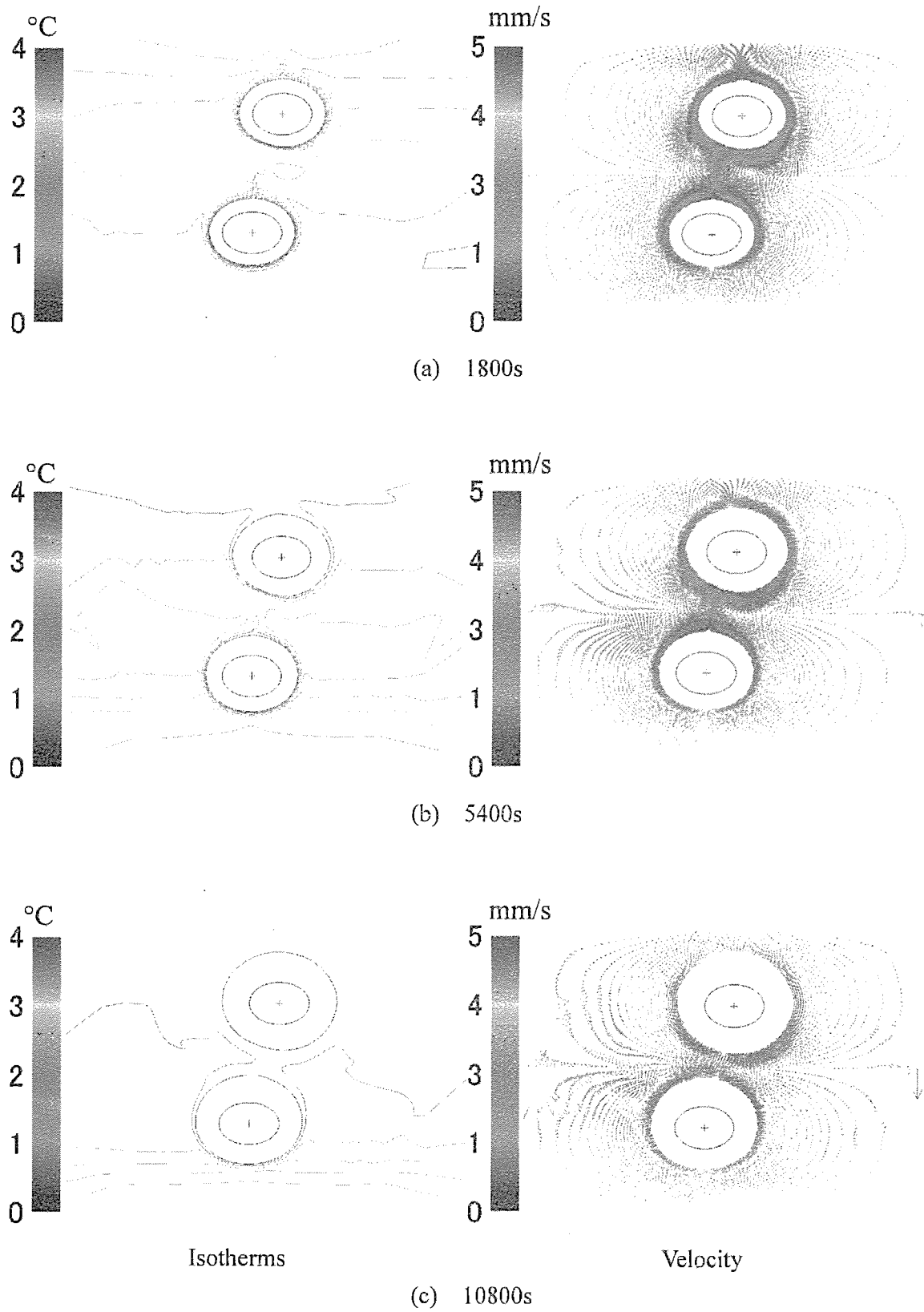


Fig.4.3.18 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\phi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

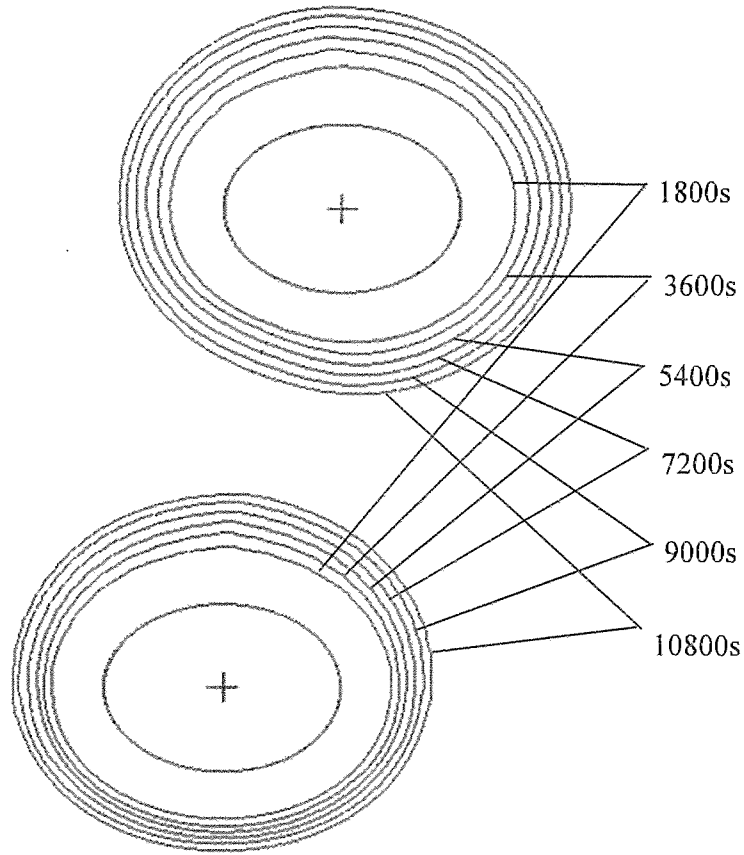


Fig.4.3.19 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

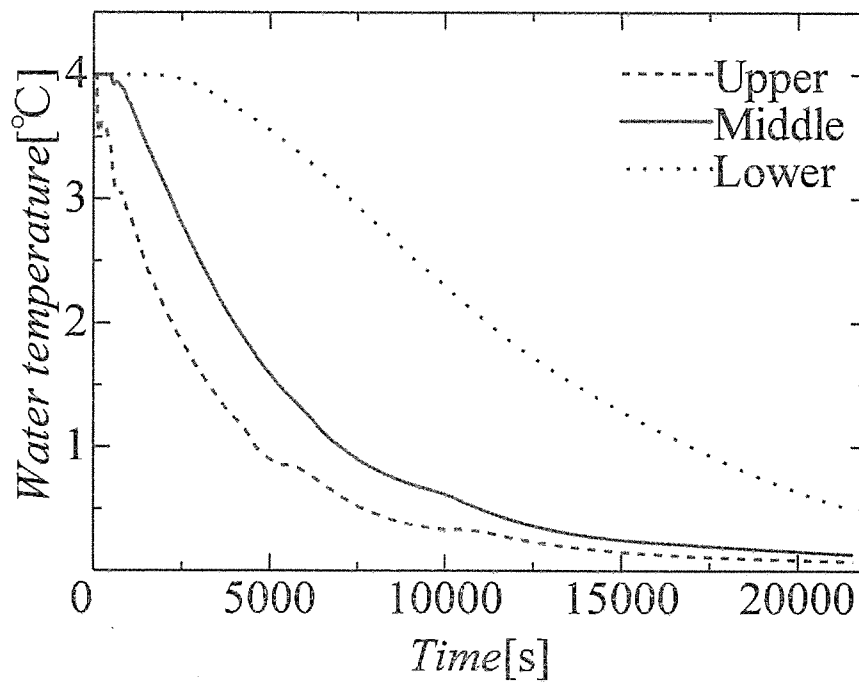


Fig.4.3.20 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

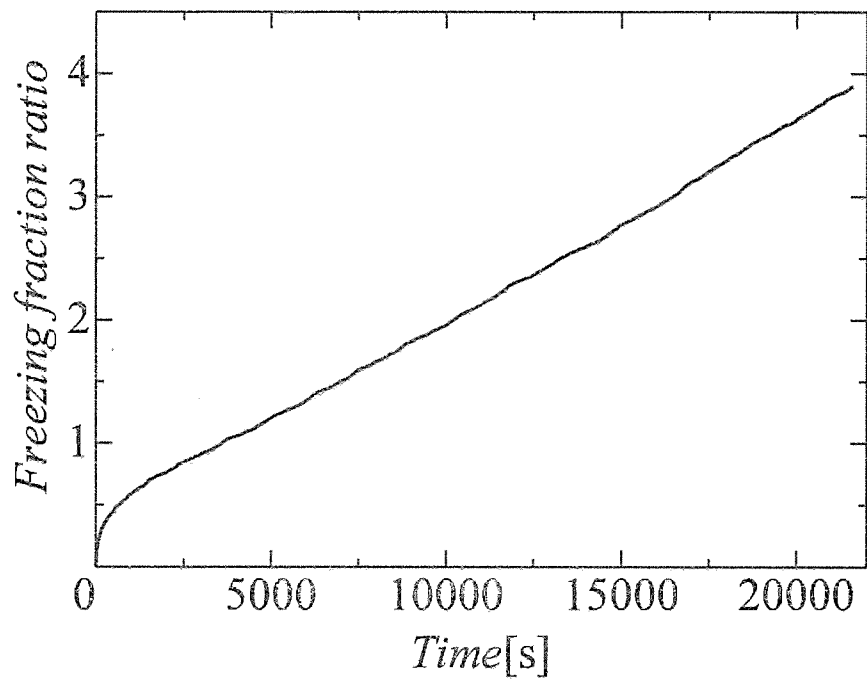


Fig.4.3.21 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

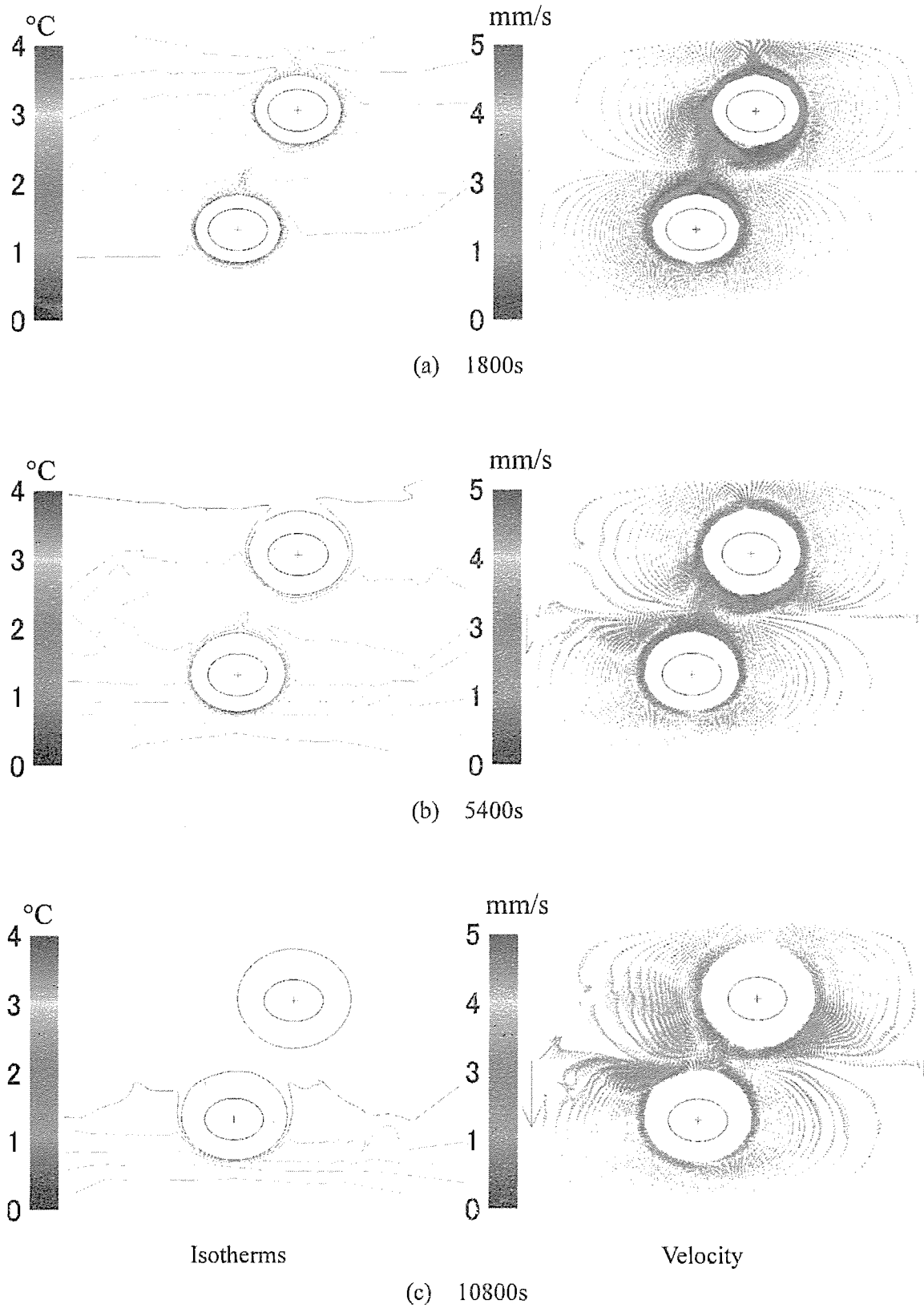


Fig.4.3.22 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{im} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

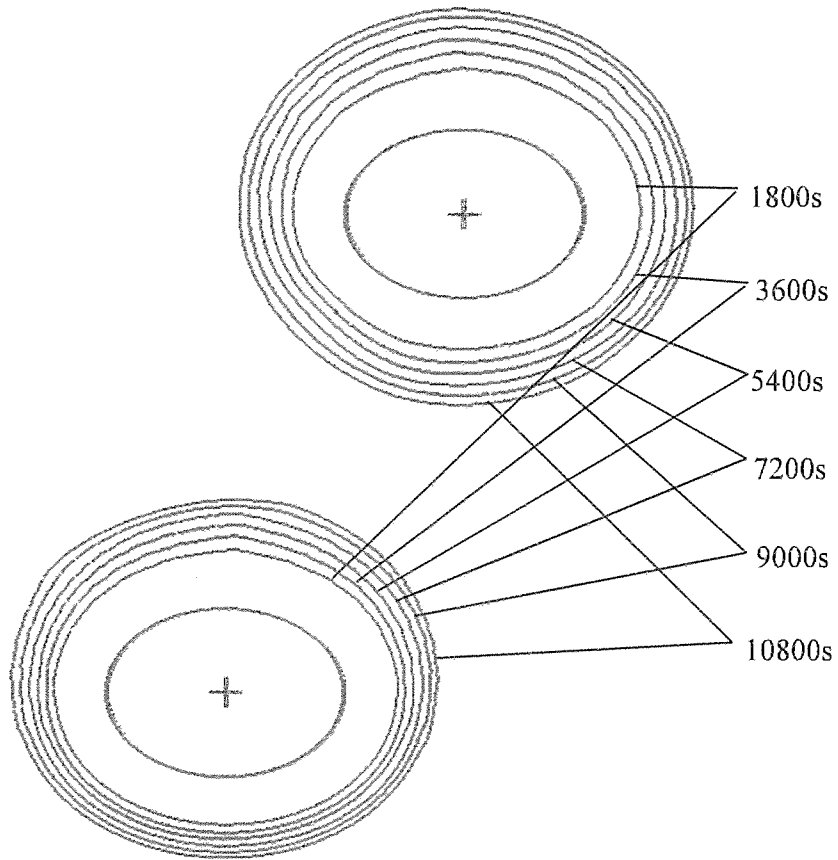


Fig.4.3.23 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{in} = 4$  °C,  $T_{l,1} = -5.0$  °C,  $T_{l,2} = -5.0$  °C)

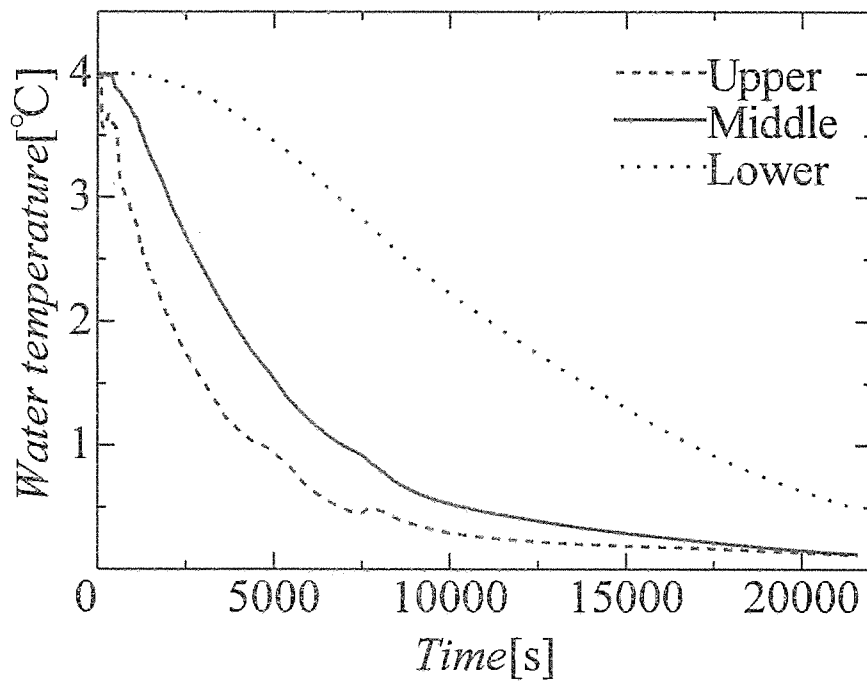


Fig.4.3.24 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{in} = 4$  °C,  $T_{l,1} = -5.0$  °C,  $T_{l,2} = -5.0$  °C)

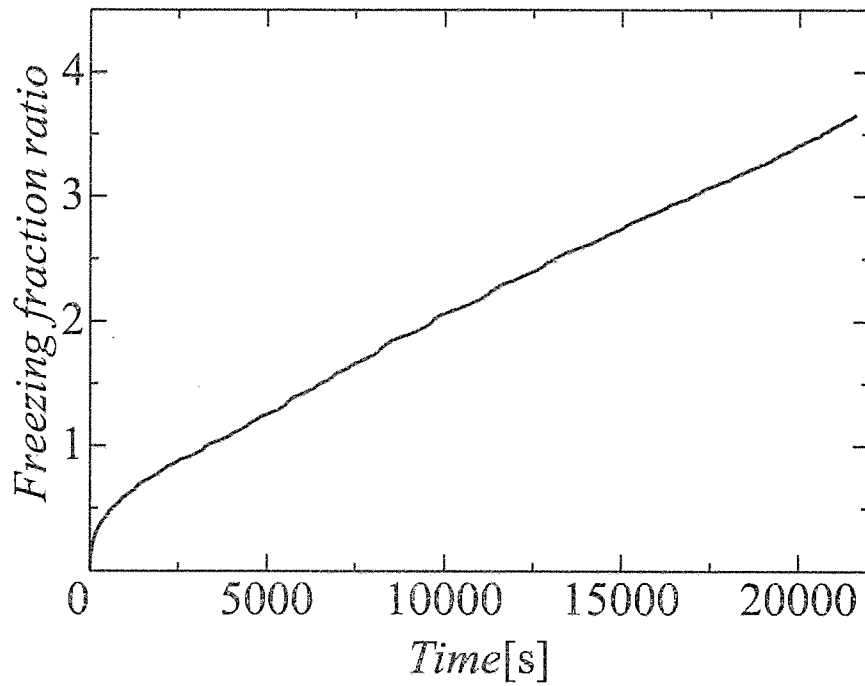


Fig.4.3.25 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

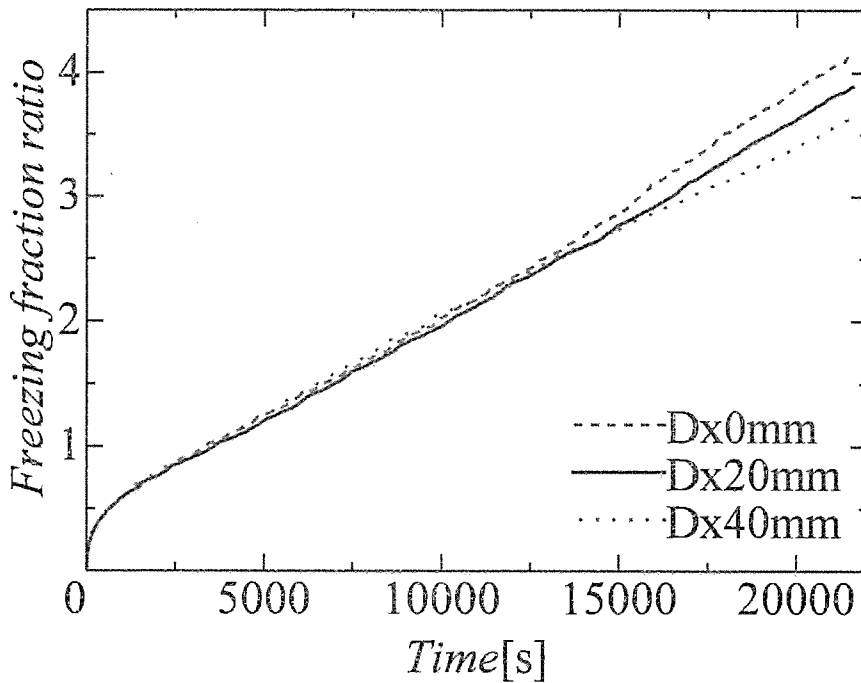


Fig.4.3.26 Comparison of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $T_{ini} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

### 4.3.2 $T_{ini} = 7^\circ\text{C}$ の場合における数値解析

#### (1) 楕円管 ( $\alpha = 0.7$ , $\phi_g = 0^\circ$ ) $D_x = 0$ mm, $D_y = 80$ mm の場合

図 4.3.27 に代表的な時間の流れ場及び温度場を示す. 図 4.3.27(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,  $T_{ini} = 7^\circ\text{C}$ の条件では,  $4^\circ\text{C}$ 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  $4^\circ\text{C}$ 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 4.3.27(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 4.3.27(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りこの領域では熱伝導が支配的となる.

図 4.3.28 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, 下部管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, 上部管での氷の成長が進むようになる様子が見られる.

図 4.3.29 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 2500 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, 中部, 下部水温が同じような減少変化をしているのがわかる. また, 水槽サイズ  $X = 180$  mm,  $Y = 270$  mm の場合と比較すると, 上部水温の急激な低下の時間が早い. これは, 水槽の高さが低くなることにより, 容器上部領域と上部管が近づくため, 冷却された流体が容器上部領域に早く達するためだと考えられる. しかし, 幅が広いため, それ以降は, 水槽サイズ  $X = 180$  mm,  $Y = 270$  mm の場合に比べ, 上部水温の冷却に時間がかかる.

図 4.3.30 には凝固率の時間変化を示す. 水槽サイズ  $X = 180$  mm,  $Y = 270$  mm の場合, 1800 秒付近から 5000 秒付近まで凝固速度が遅くなっているのに対し, この条件では, 2500 秒付近から 7500 秒付近まで凝固速度が遅くなっている. これは,  $X = 180$  mm,  $Y = 270$  mm の場合に比べ, 中部水温を冷やす時間がかかるためだと考えられる. そして, 7500 秒以降は, 凝固率の増加率 (傾き) が上がることがわかる.

#### (2) 楕円管 ( $\alpha = 0.7$ , $\phi_g = 0^\circ$ ) $D_x = 20$ mm, $D_y = 80$ mm の場合

図 4.3.31 代表的な時間での流れ場及び温度場を示す. (1)の場合と同様に図 4.3.31(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. これ以降は, しだいに上昇流の勢いが強くなり, 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.

図 4.3.32 には代表的な凍結界面の時間変化を示す. 凍結現象については(1)の場合と同様に下部管で厚く氷が成長し, 密度反転により上昇流が支配的になってくると, 上部管での氷の成長が進むようになる様子が見られる.



図 4.3.33 には水温の時間変化を示す。(1)の場合と比べ、下部水温が下がりにくく、上部、中部水温が下がりやすいことがわかる。

図 4.3.34 には凝固率の時間変化を示す。2500 秒付近から 6000 秒付近まで凝固速度が遅くなり、6000 秒以降は、凝固率の増加率（傾き）が上がることをわかる。

(3) 楕円管 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ )  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm 場合

図 4.3.35 代表的な時間での流れ場及び温度場を示す。(1)の場合と同様に図 4.3.35(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。また、図 4.3.35(b)において、(1), (2)の場合に比べ、まだ、流体の速度が速いことがわかる。これは、水平方向軸間距離が広くなることで、冷却された流体の逃げ道の増加に伴い、流体が停滞せず、運動し続けるためだと考えられる。これ以降は、しだいに上昇流の勢いが強くなり、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。この様子は、図 4.3.35(b), 図 4.3.35(c)からわかる。

図 4.3.36 には代表的な凍結界面の時間変化を示す。凍結現象については(1), (2)の場合と同様に下部管で厚く氷が成長し、密度反転により上昇流が支配的になってくると、上部管での氷の成長が進むようになる様子が見られる。

図 4.3.37 には水温の時間変化を示す。(1)の場合と比べ、下部水温が下がりにくく、(1), (2)の場合に比べ、上部、中部水温が下がりやすいことがわかる。

図 4.3.38 には凝固率の時間変化を示す。この条件の場合は 2500 秒付近から 5000 秒付近まで凝固速度が遅くなることをわかる。

図 4.3.39 は(1)~(3)の場合における各水平方向軸間距離の凝固率の時間変化を示す。この図から、これらの条件は水平方向軸間距離を  $D_x = 0$  mm,  $D_x = 20$  mm の場合は特に違いが表れなかったが、 $D_x = 40$  mm まで距離をとると凝固率が增大することが示される。

これらの結果から、 $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ の条件下では  $D_x = 0$  mm,  $D_x = 20$  mm の場合までは、凝固率の時間変化に差が見られないが、 $D_x = 40$  mm まで距離をとると、凝固率が增大することがわかる。

(4) 楕円管 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ )  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm の場合

(1)の場合と同条件で、配置角度を $\varphi_g = 90^\circ$  (横型)と変化させた場合の結果を示す。図 4.3.40 に代表的な時間での流れ場及び温度場を示す。(1)の場合と比べ、図 4.2.40(b)において(1)の場合より下降流が強いことがわかる。これは、管周りで冷却された流体が管の配置角度を $\varphi_g = 90^\circ$ にすることで、 $\varphi_g = 0^\circ$ より上昇流が妨げられてしまうためだと考えられる。これ以降は、しだいに上昇流の勢いが強くなり、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。この様子は(1)の場合と同様である。

図 4.3.41 には代表的な凍結界面の時間変化を示す。凍結現象については(3)と同様で下部管で厚く氷が成長し、密度反転により上昇流が支配的になってくると、上部管での氷の成長が進むようになる様子が見られる。

図 4.3.42 には水温の時間変化を示す。(1)の場合と比べ、下部水温が下がりにくい。これは、配置角度 $\varphi_g = 90^\circ$ にすることで、 $\varphi_g = 0^\circ$ の場合に比べ、容器下部領域に下部管が入り込んでいないためだと考えられる。

図 4.3.43 には凝固率の時間変化を示す。5000 秒付近から 10000 秒付近まで凝固速度が遅くなることがわかる。これは、 $\varphi_g = 0^\circ$ の場合と比べ、中部、下部水温の低下に時間がかかるためだと考えられる。

(5) 楕円管 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ )  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm の場合

図 4.3.44 には代表的な時間での流れ場及び温度場を示す。(4)の場合と同様に図 4.3.44(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。これ以降は、しだいに上昇流の勢いが強くなり、時間の経過と共に上昇流が弱くなっていく。この様子は図 4.3.44(b)～図 4.3.44(c)からわかる。

図 4.3.45 には代表的な凍結界面の時間変化を示す。凍結現象については(4)の場合と同様に下部管で厚く氷が成長し、密度反転により上昇流が支配的になってくると、上部管での氷の成長が進むようになる様子が見られる。

図 4.3.46 には水温の時間変化を示す。(4)の場合と比べ、全体的に水槽内の水温が下がりやすくなっている。また、(2)の場合と比べ、水槽内の水温が下がりにくいことがわかる。

図 4.3.47 には凝固率の時間変化を示す。2500 秒付近から 10000 秒付近まで凝固速度が遅くなることがわかる。

(6) 楕円管 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ )  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm 場合

図 4.3.48 には代表的な時間での流れ場及び温度場を示す。(5)の場合と同様に図 4.3.48(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。これ以降は、しだいに上昇流の勢いが強くなり、時間の経過と共に上昇流が弱くなっていく。この様子は図 4.3.48(b)～図 4.3.48(c)からわかる。

図 4.3.49 には代表的な凍結界面の時間変化を示す。凍結現象については(4), (5)の場合と同様に下部管で厚く氷が成長し、密度反転により上昇流が支配的になると、上部管での氷の成長が進むようになる様子が見られる。

図 4.3.50 には水温の時間変化を示す。(4), (5)の場合と比べ、短時間で水槽内の水温が全体的に下がることがわかる。また、(3)の場合と比べ、水槽内の水温が下がりにくいことがわかる。

図 4.3.51 には凝固率の時間変化を示す。2500 秒付近から 5000 秒付近まで凝固速度が遅くなることがわかる。

図 4.3.52 は(1)~(3)の場合における各水平方向軸間距離の凝固率の時間変化を示す。この図から、これらの条件は水平方向軸間距離を  $D_x = 0 \text{ mm}$ ,  $D_x = 20 \text{ mm}$  の場合は特に違いが表れなかったが、 $D_x = 40 \text{ mm}$  まで距離をとると凝固率が增大することが示される。

これらの結果から、 $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$  の条件下では  $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$  の条件と同様に  $D_x = 0 \text{ mm}$ ,  $D_x = 20 \text{ mm}$  の場合までは、水温の変化や凝固率に差が見られないが、 $D_x = 40 \text{ mm}$  まで距離をとると、水槽内の水温の低下時間を短縮化することができ、それに伴い、凝固率が增大することが示された。また、(1)~(3)の場合と比べ、水槽内の水温が下がりにくいことも示された。

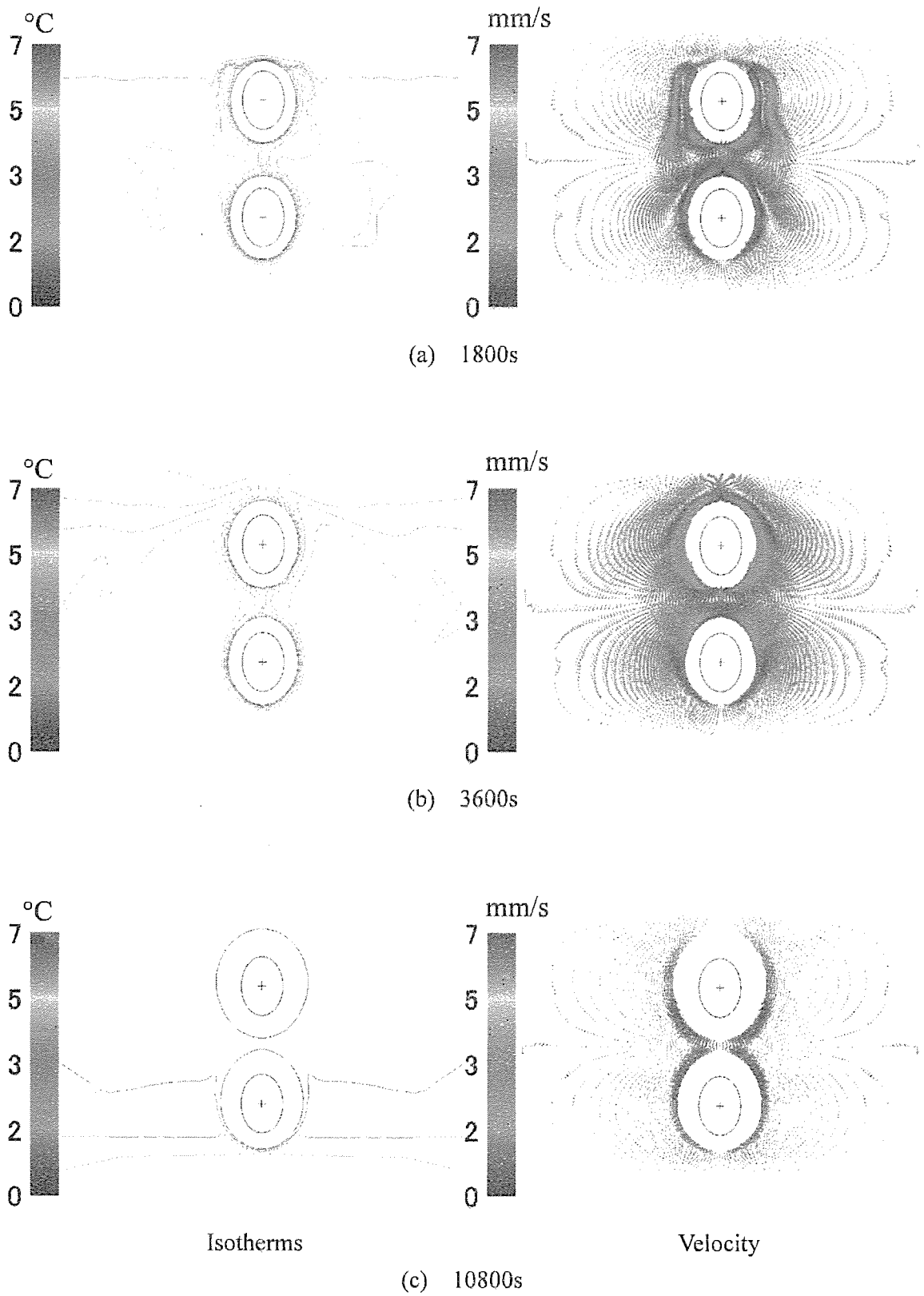


Fig.4.3.27 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.  
 $(\alpha = 0.7, \phi_g = 0^\circ, D_x = 0 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm}, T_{ini} = 7 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,1} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,2} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C})$

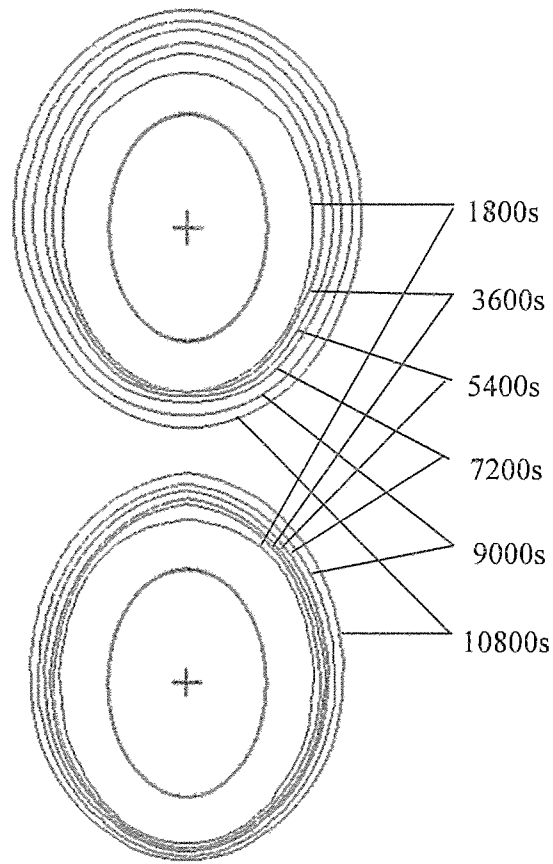


Fig.4.3.28 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\phi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{in} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

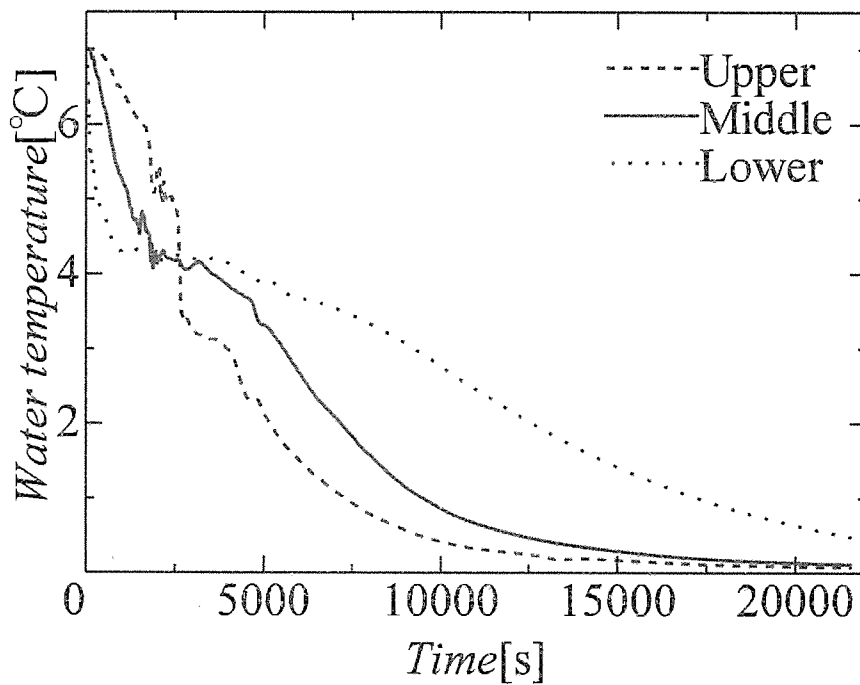


Fig.4.3.29 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\phi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{in} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

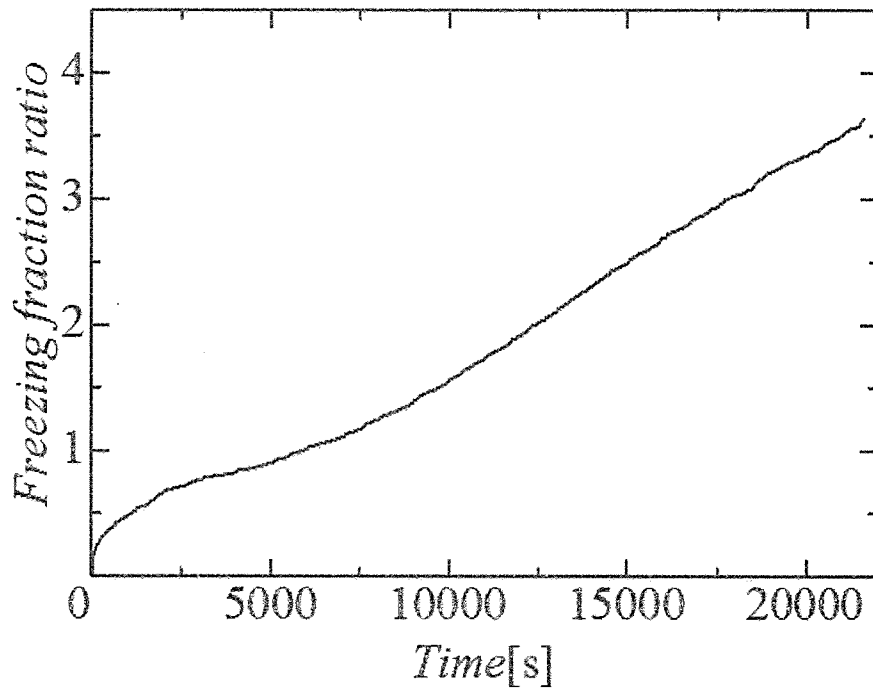


Fig.4.3.30 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

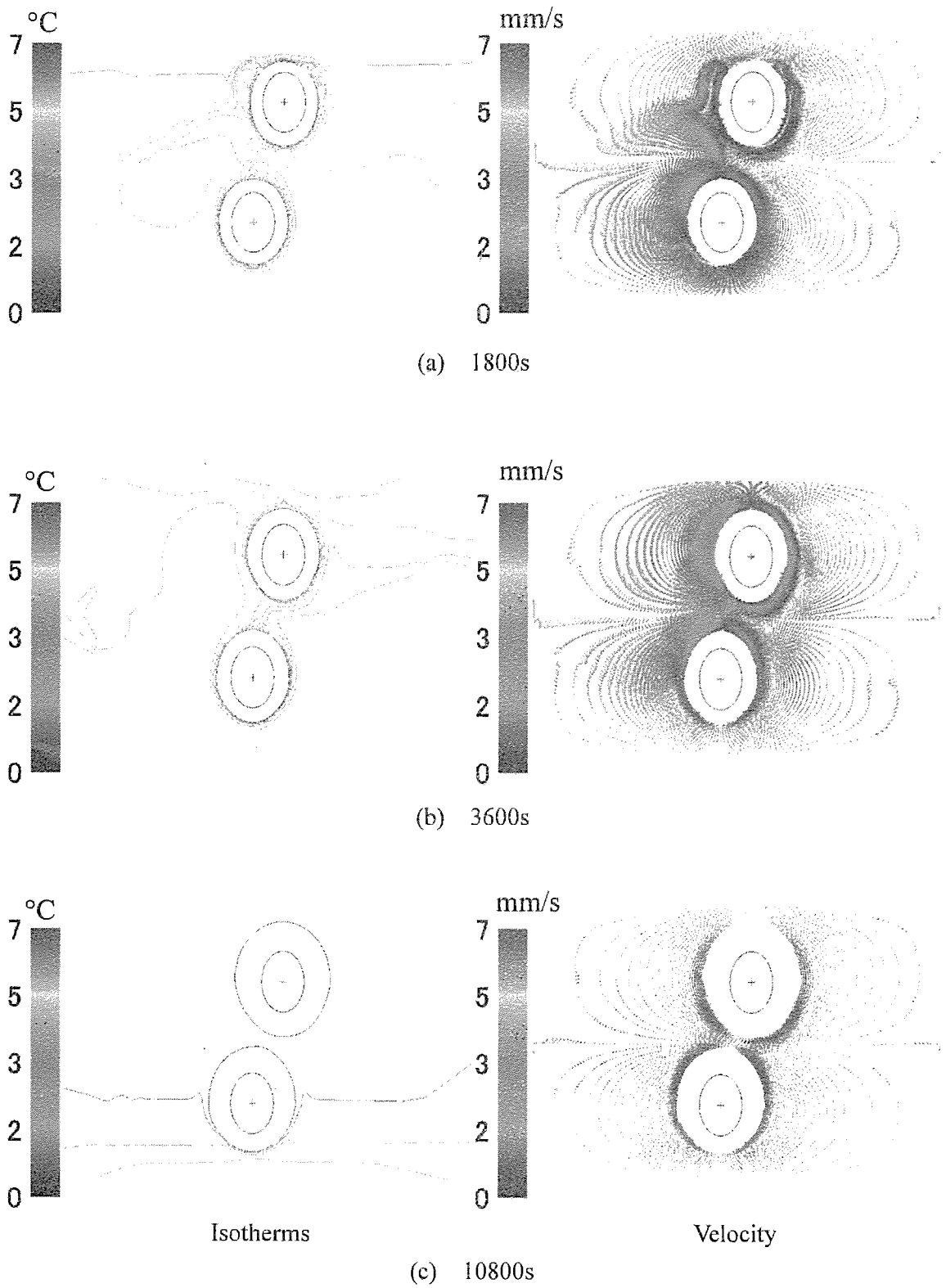


Fig.4.3.31 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^{\circ}$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$   $^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{t,1} = -5.0$   $^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{t,2} = -5.0$   $^{\circ}\text{C}$ )

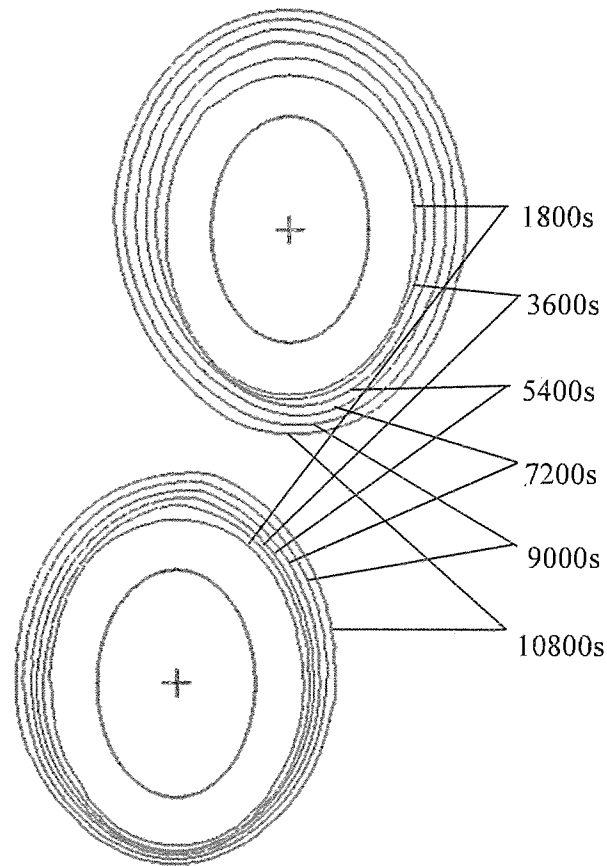


Fig.4.3.32 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

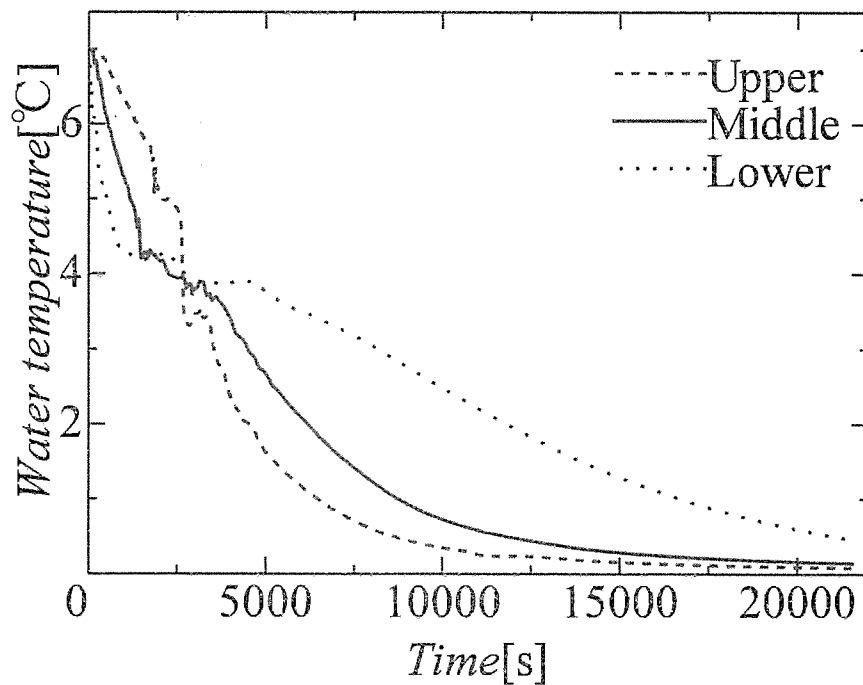


Fig.4.3.33 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)



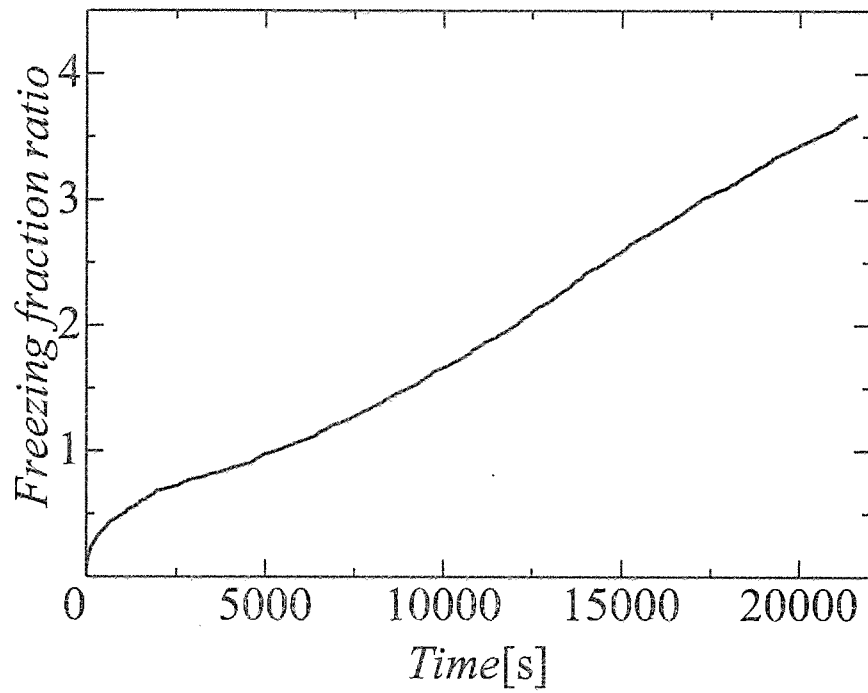


Fig.4.3.34 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes. ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C).

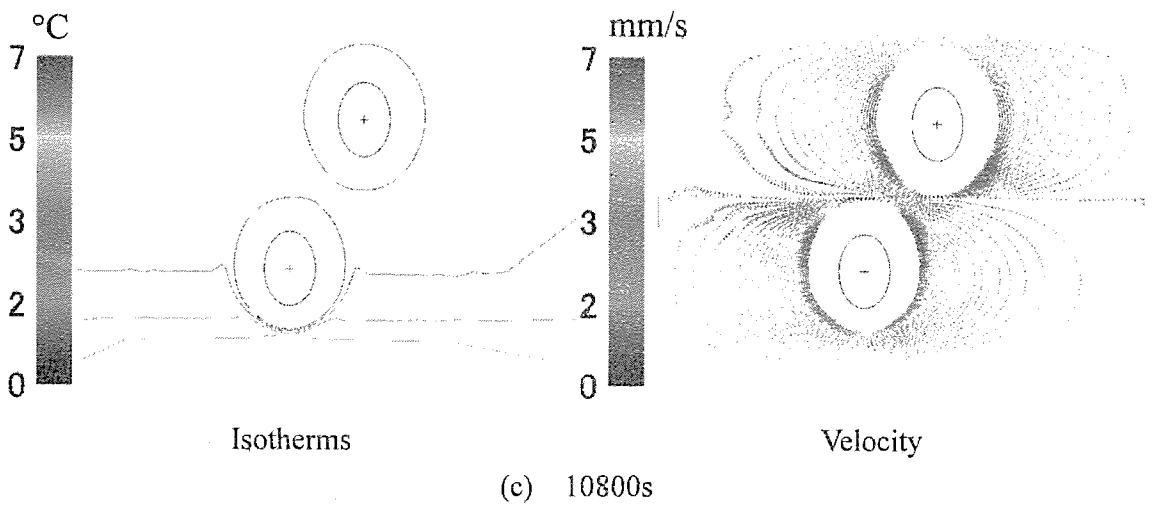
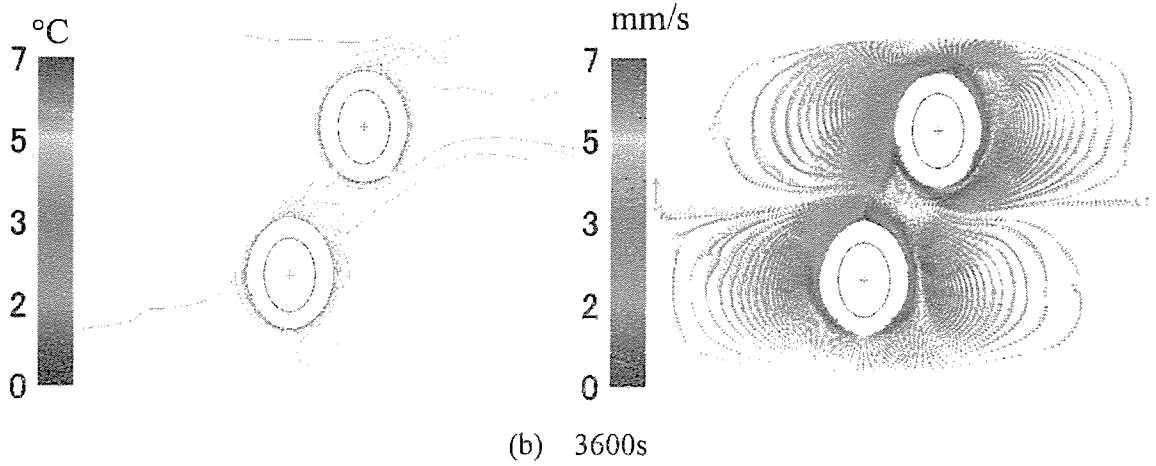
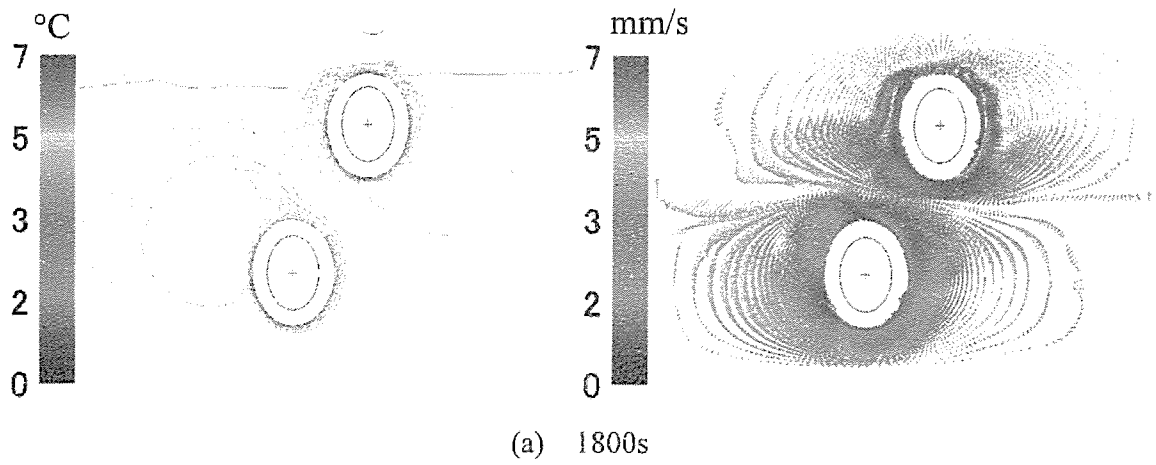


Fig.4.3.35 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

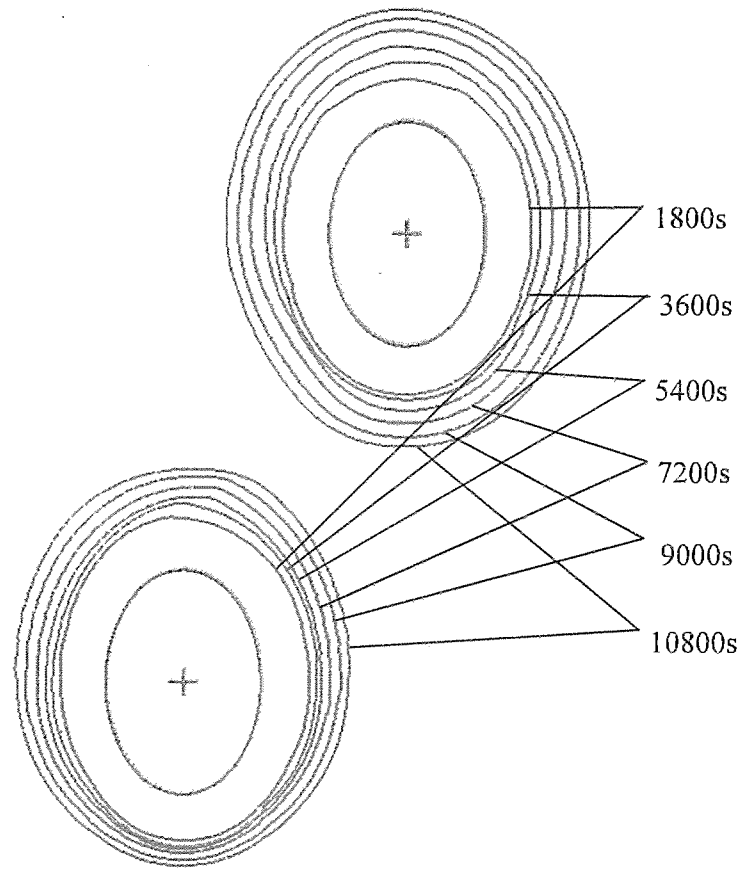


Fig.4.3.36 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{l,1} = -5.0$  °C,  $T_{l,2} = -5.0$  °C)

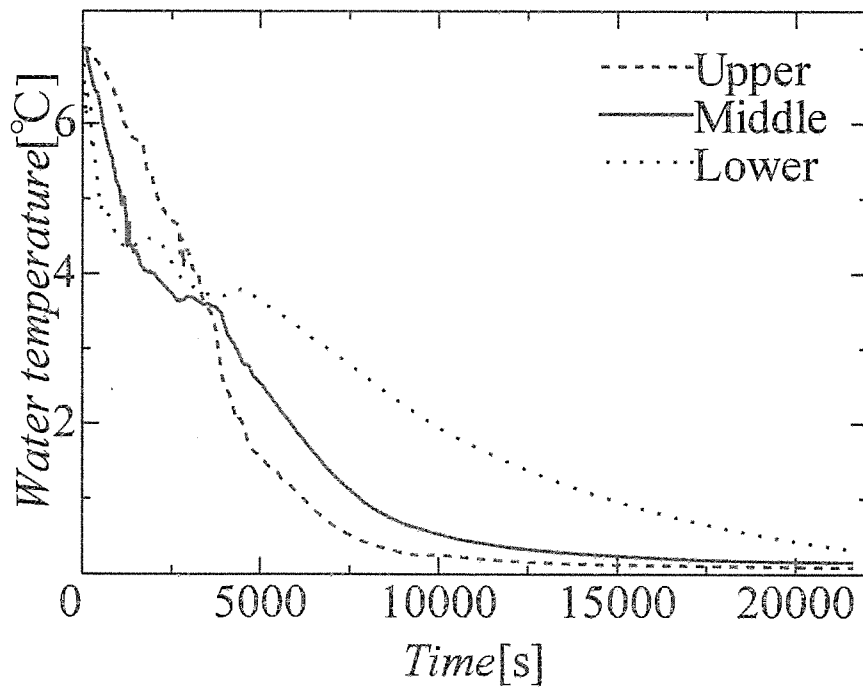


Fig.4.3.37 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{l,1} = -5.0$  °C,  $T_{l,2} = -5.0$  °C)

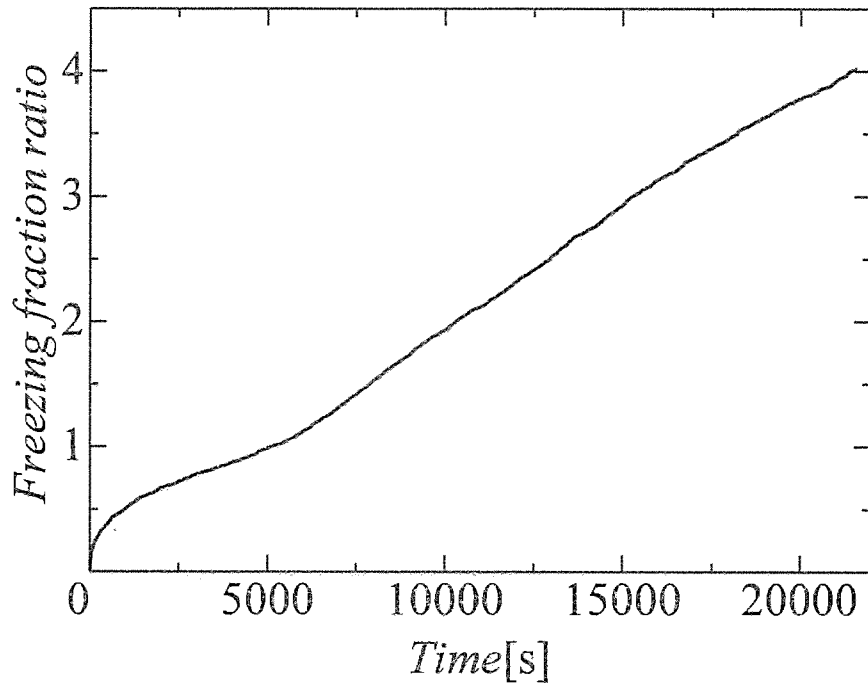


Fig.4.3.38 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 7$  °C,  $T_{l,1} = -5.0$  °C,  $T_{l,2} = -5.0$  °C)

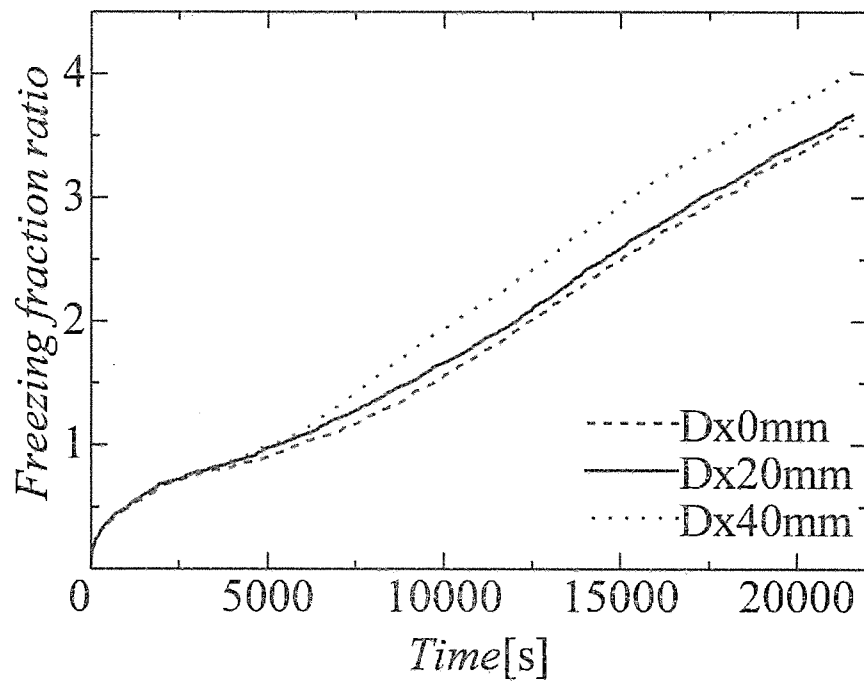


Fig.4.3.39 Comparison of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ,  $T_{mi} = 7$  °C,  $T_{l,1} = -5.0$  °C,  $T_{l,2} = -5.0$  °C)

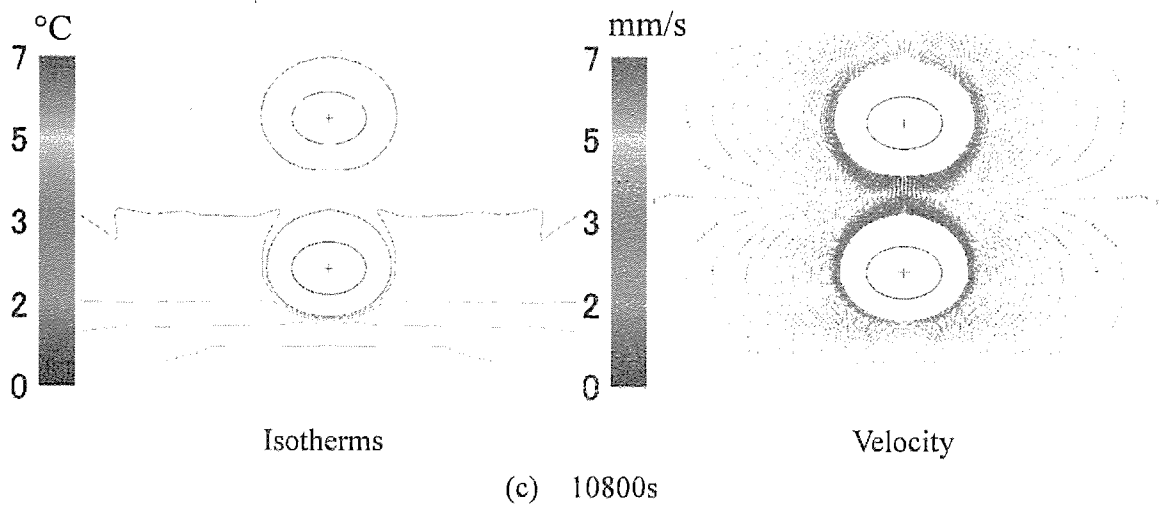
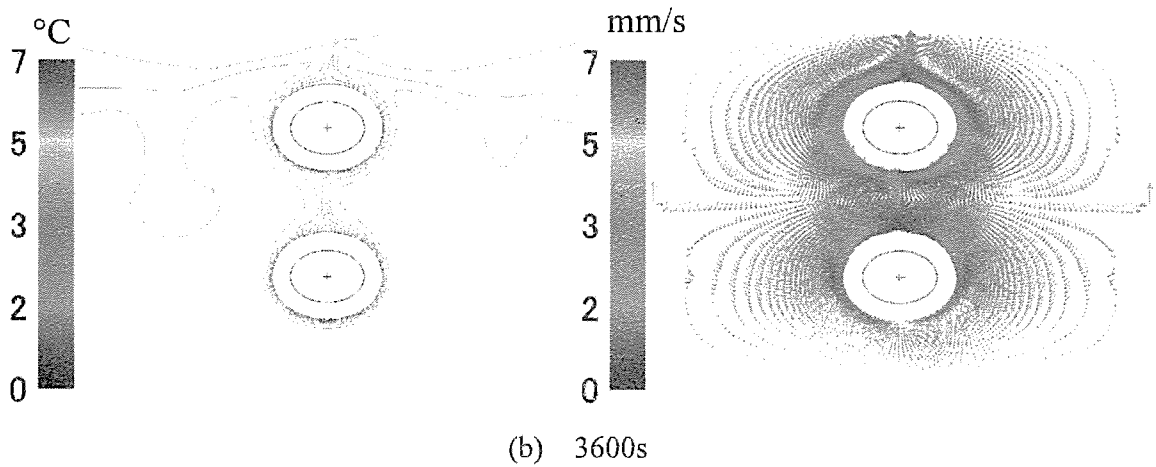
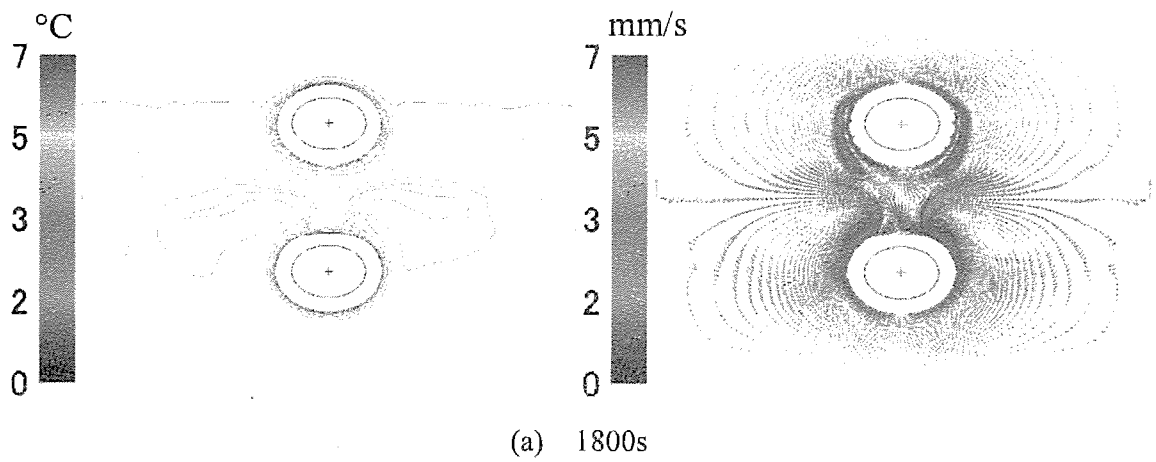


Fig.4.3.40 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.  
 $(\alpha = 0.7, \varphi_g = 90^\circ, D_x = 0 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm}, T_{mi} = 7 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,1} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,2} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C})$

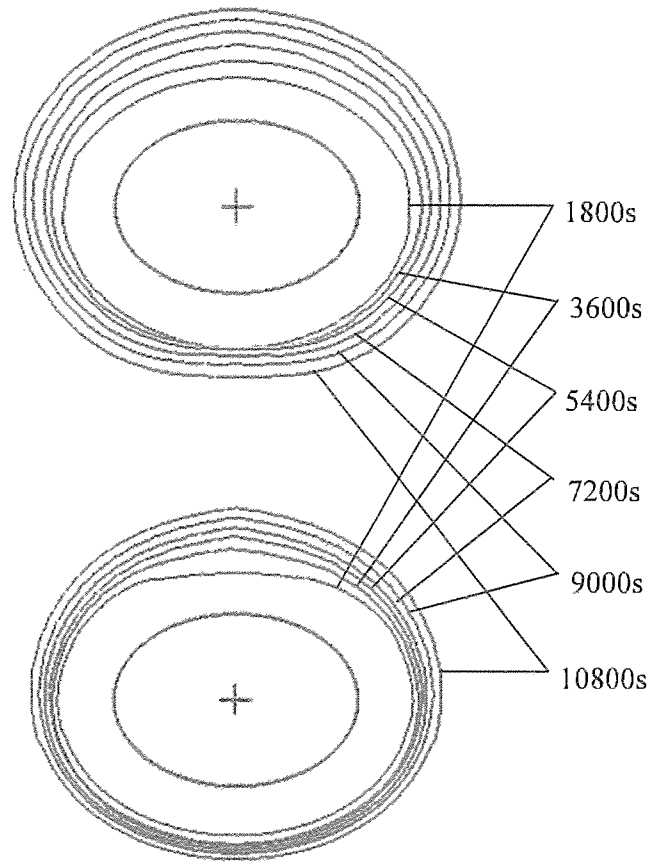


Fig.4.3.41 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

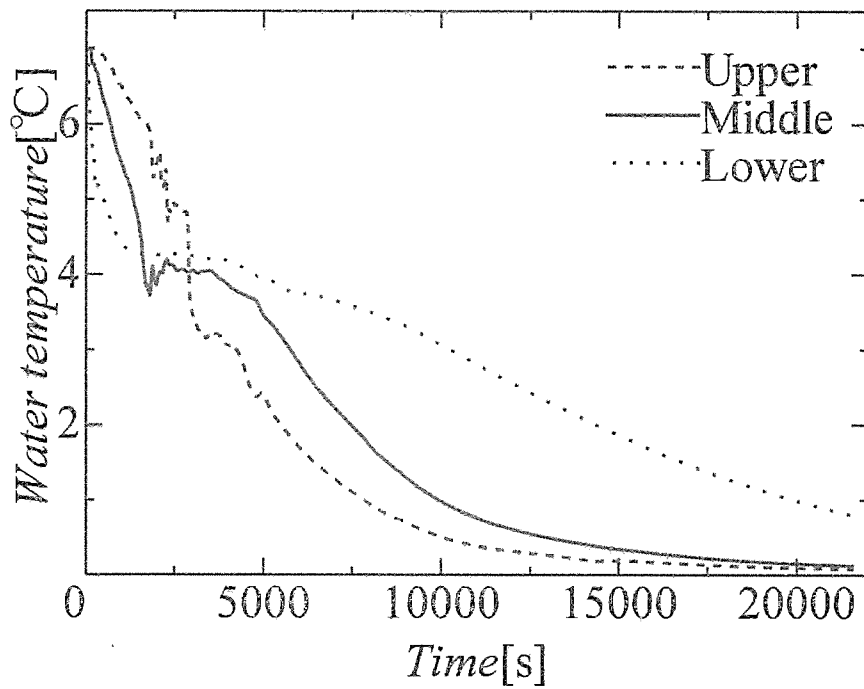


Fig.4.3.42 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

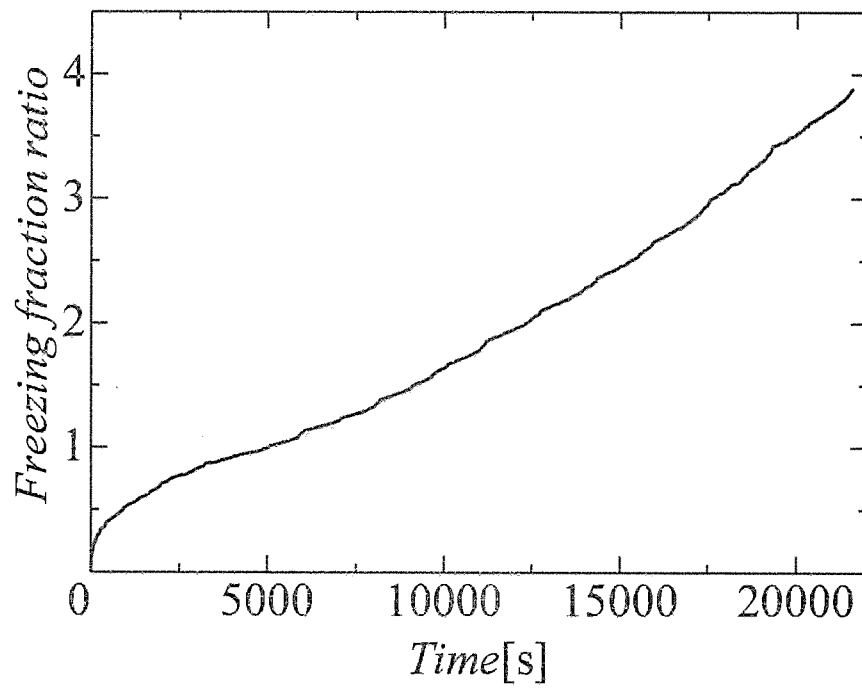


Fig.4.3.43 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

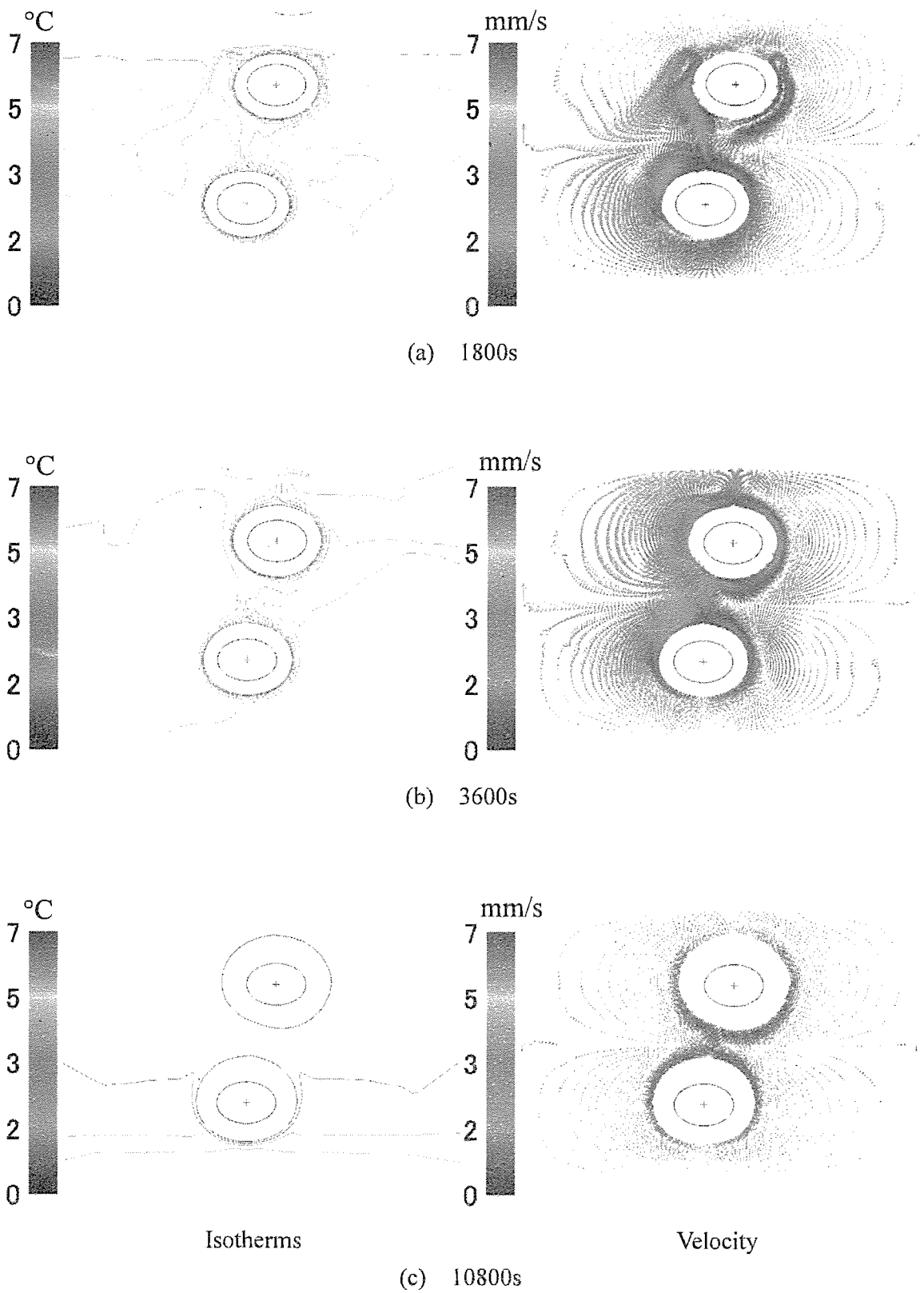


Fig.4.3.44 Isotherms and velocity fields by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)



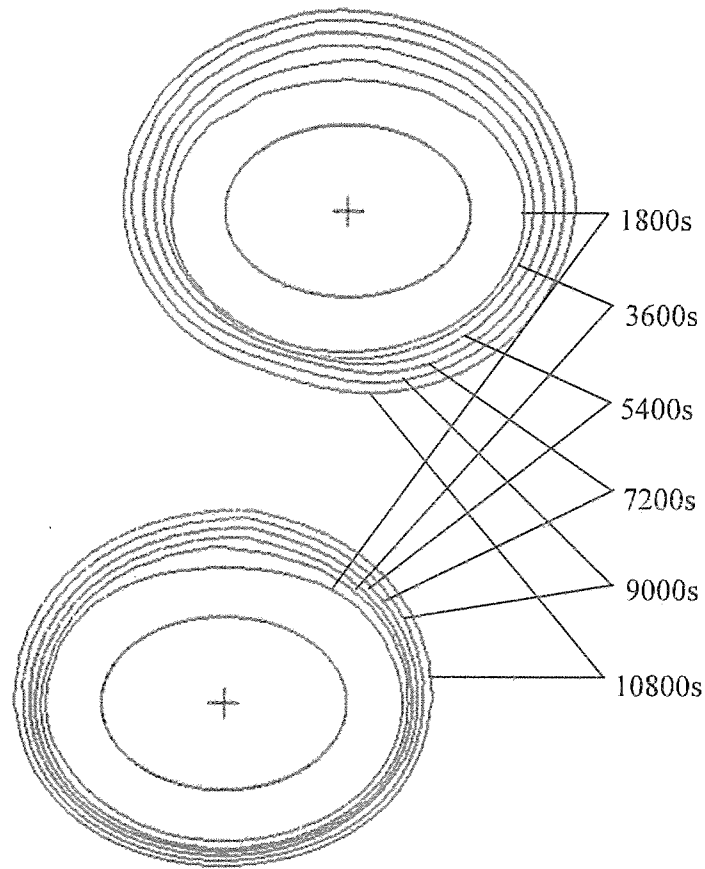


Fig.4.3.45 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\phi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

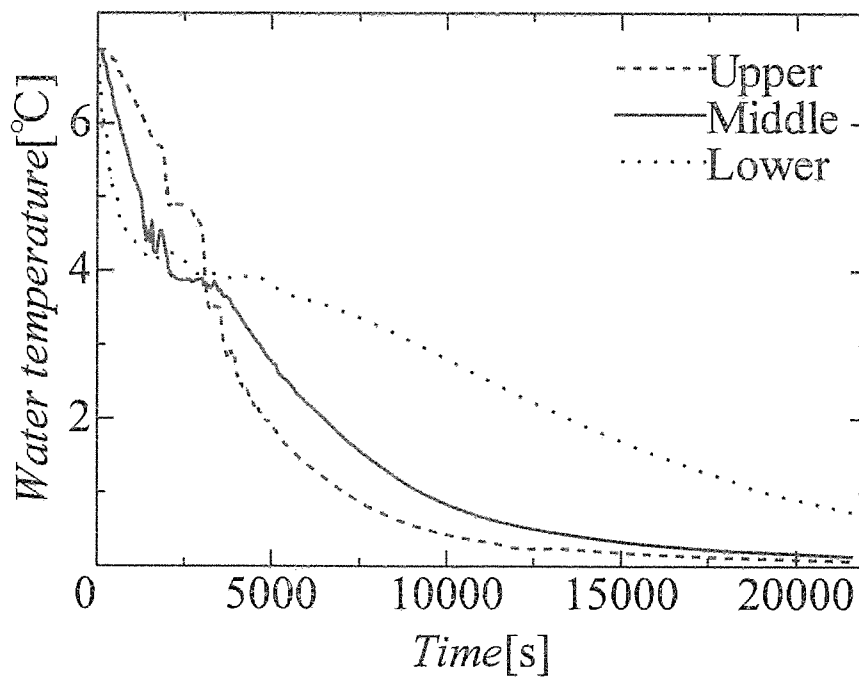


Fig.4.3.46 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\phi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

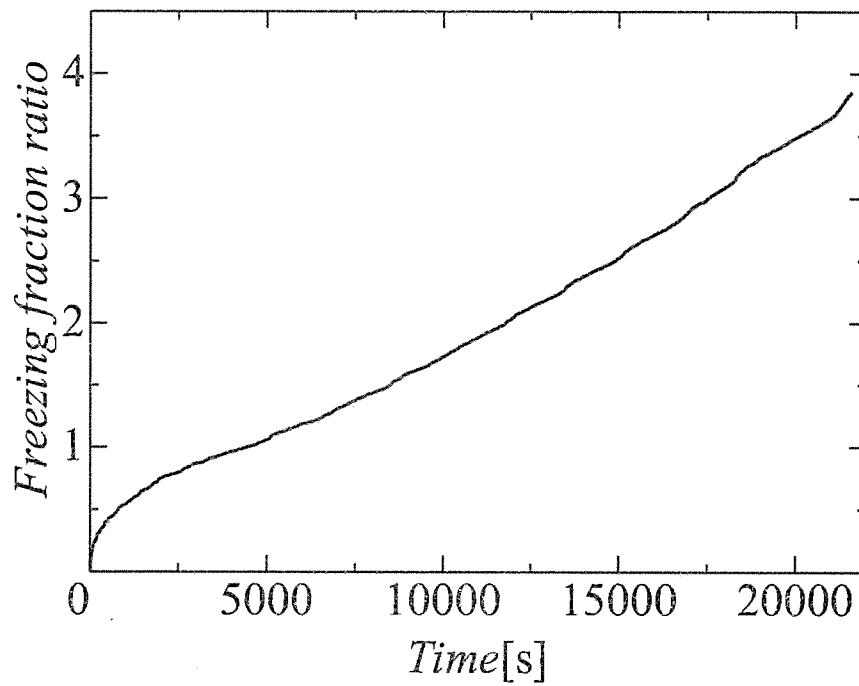


Fig.4.3.47 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

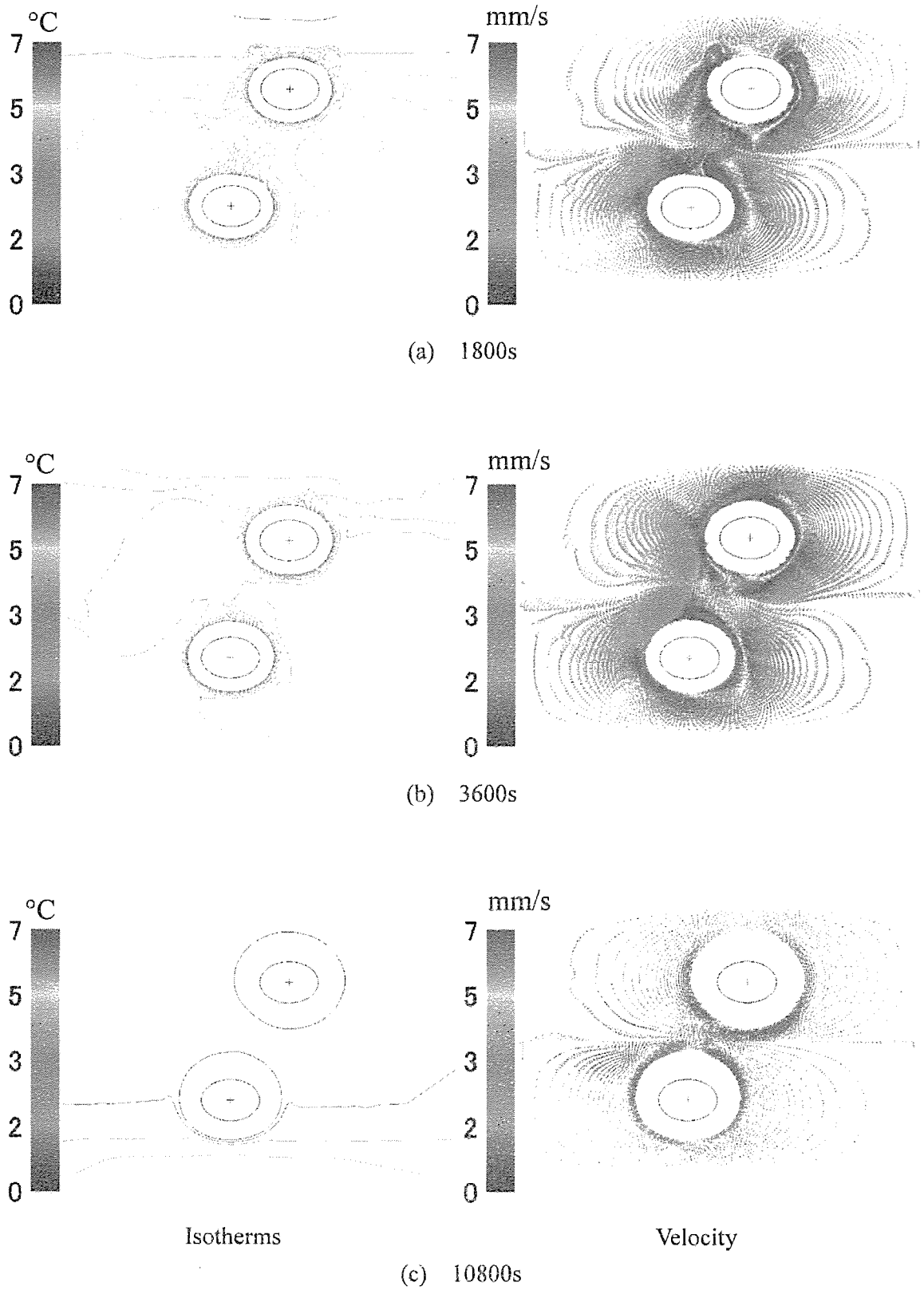


Fig.4.3.48 Velocity fields and isotherms by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

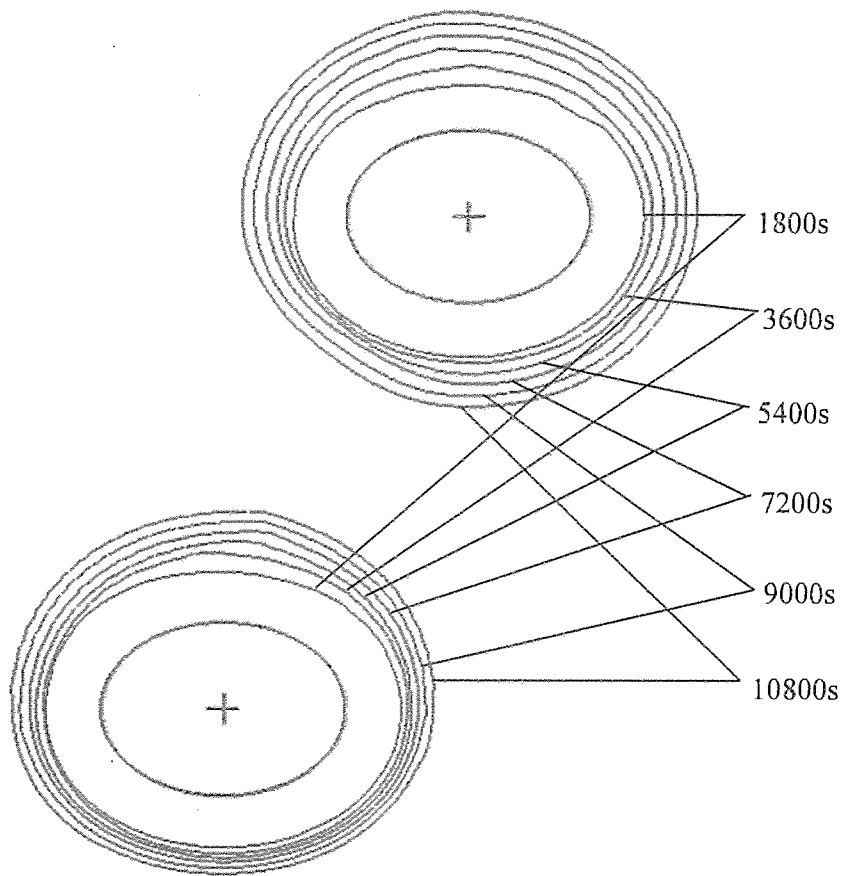


Fig.4.3.49 Transient of freezing front contours by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\phi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

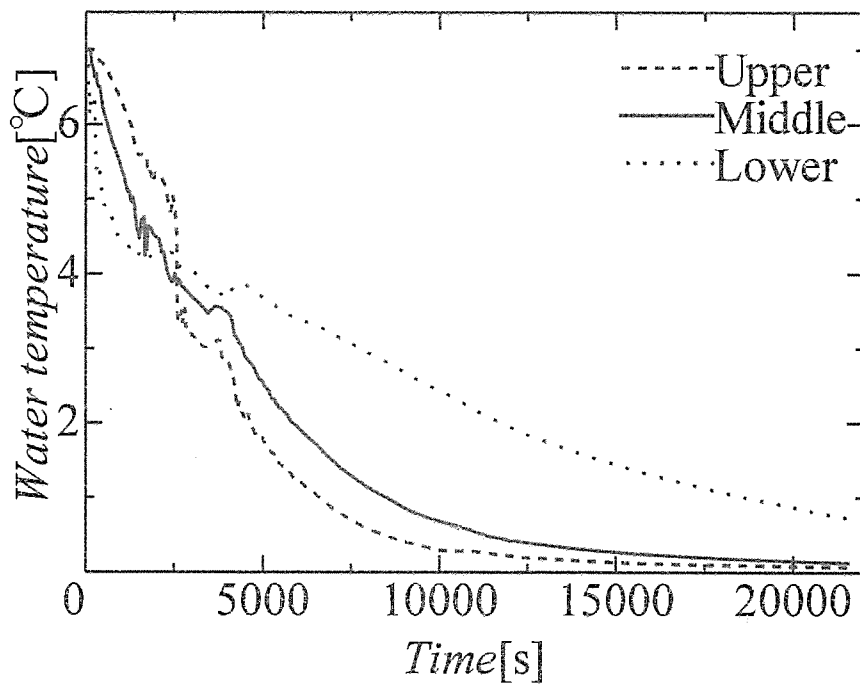


Fig.4.3.50 Time history of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\phi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{ini} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

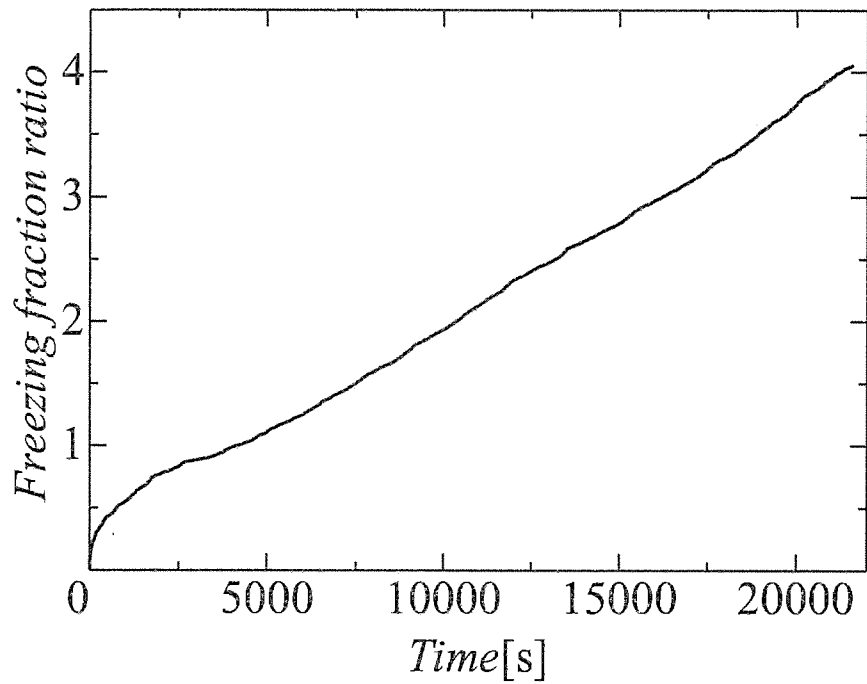


Fig.4.3.51 Time history of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

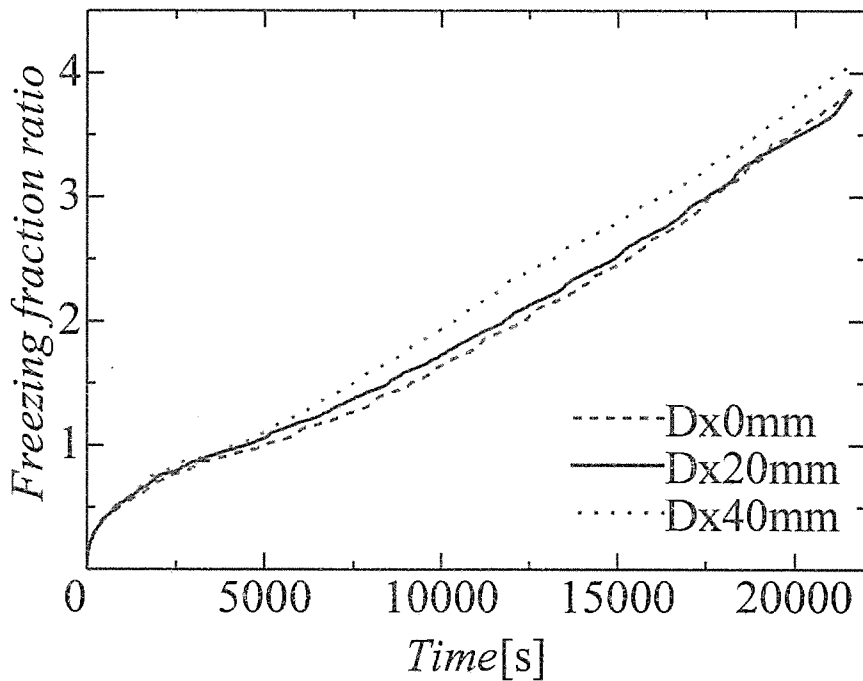


Fig.4.3.52 Comparison of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ,  $T_{mi} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

### 4.3.3 各管形状および配置角度の凝固率の時間変化の比較

(1)  $D_x = 0 \text{ mm}$ ,  $D_y = 80 \text{ mm}$ ,  $T_{ini} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ の場合

図 4.3.53 に縦型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ), 横型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ), 円管の凝固率の時間変化を示す. この図から, 縦型の凝固率の時間変化が小さく, 横型の凝固率の時間変化が大きくなることがわかる.

(2)  $D_x = 20 \text{ mm}$ ,  $D_y = 80 \text{ mm}$ ,  $T_{ini} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ の場合

図 4.3.54 に縦型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ), 横型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ), 円管の凝固率の時間変化を示す. この図から, この条件では, 円管, 横型, 縦型の凝固率の時間変化にほとんど差が見られなかった.

(3)  $D_x = 40 \text{ mm}$ ,  $D_y = 80 \text{ mm}$ ,  $T_{ini} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ の場合

図 4.3.55 に縦型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ), 横型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ), 円管の凝固率の時間変化を示す. この図から, 縦型の凝固率の時間変化が大きく, 横型の凝固率の時間変化が小さくなることがわかる.

(1)~(3)の条件下の場合,  $D_x = 0 \text{ mm}$  では, 管形状及び配置角度を横型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ) にすることにより, 縦型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ), 円管に比べ, 凝固率の増大が示される. また, 水平方向軸間距離を大きくとることで, 縦型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ) にすることにより, 横型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ), 円管に比べ, 凝固率の増大がわかる.

(4)  $D_x = 0 \text{ mm}$ ,  $D_y = 80 \text{ mm}$ ,  $T_{ini} = 7 \text{ }^\circ\text{C}$ の場合

図 4.3.56 に縦型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ), 横型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ), 円管の凝固率の時間変化を示す. この図から, 横型の凝固率の時間変化が大きくなるが, 円管と横型の凝固率の時間変化にほとんど差が見られなかった. また, 縦型の凝固率が小さくなることがわかる.

(5)  $D_x = 20 \text{ mm}$ ,  $D_y = 80 \text{ mm}$ ,  $T_{ini} = 7 \text{ }^\circ\text{C}$ の場合

図 4.3.57 に縦型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ), 横型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ), 円管の凝固率の時間変化を示す. この図から, 円管, 横型, 縦型の凝固率の時間変化にほとんど差が見られなかった.

(6)  $D_x = 40 \text{ mm}$ ,  $D_y = 80 \text{ mm}$ ,  $T_{ini} = 7 \text{ }^\circ\text{C}$ の場合

図 4.3.58 に縦型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^\circ$ ), 横型 ( $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^\circ$ ), 円管の凝固率の時間変化を示す. この図から, この図から, 円管, 横型, 縦型の凝固率の時間変化にほとんど差が見られなかった.

(4)~(6)の条件下の場合, 管形状及び配置角度が凝固率の時間変化に与える影響の差がほとんど無くなることがわかる.

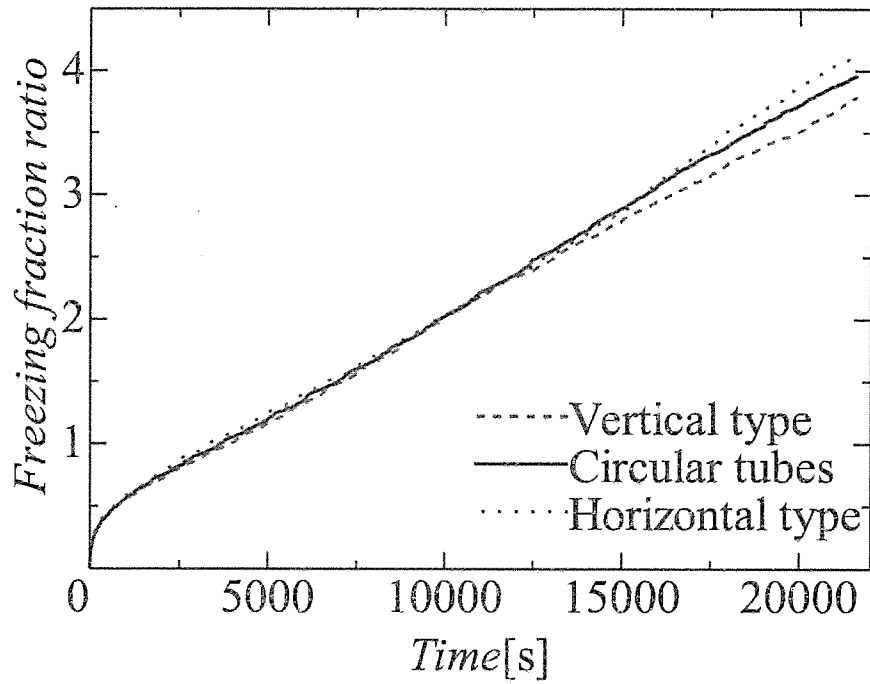


Fig.4.3.53 Comparison of freezing fraction ratio by circular and elliptical tubes for two tubes.  
 $(D_x = 0 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm}, T_{ini} = 4 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,1} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,2} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C})$

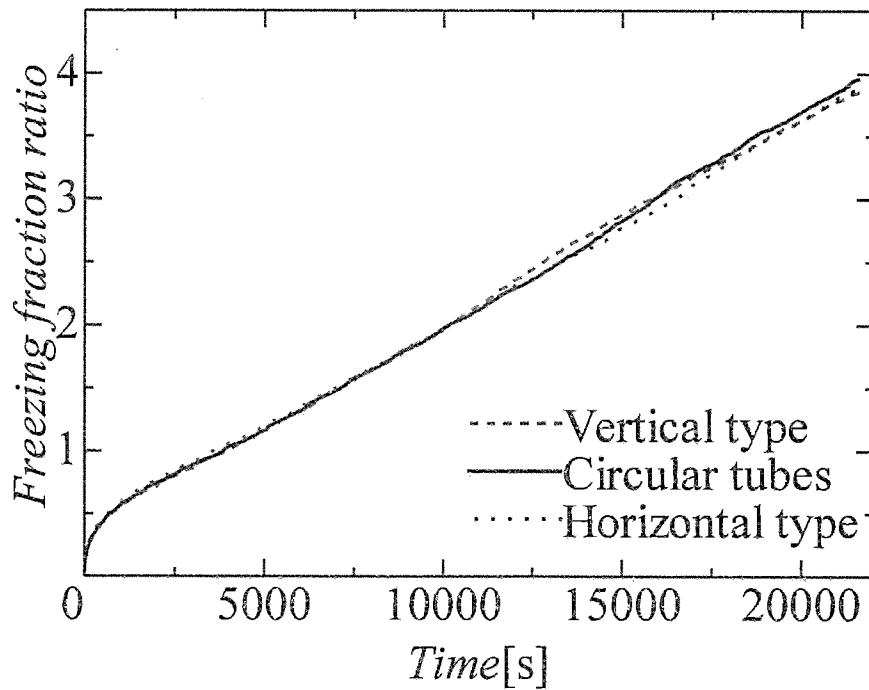


Fig.4.3.54 Comparison of freezing fraction ratio by circular and elliptical tubes for two tubes.  
 $(D_x = 20 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm}, T_{ini} = 4 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,1} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C}, T_{t,2} = -5.0 \text{ }^\circ\text{C})$

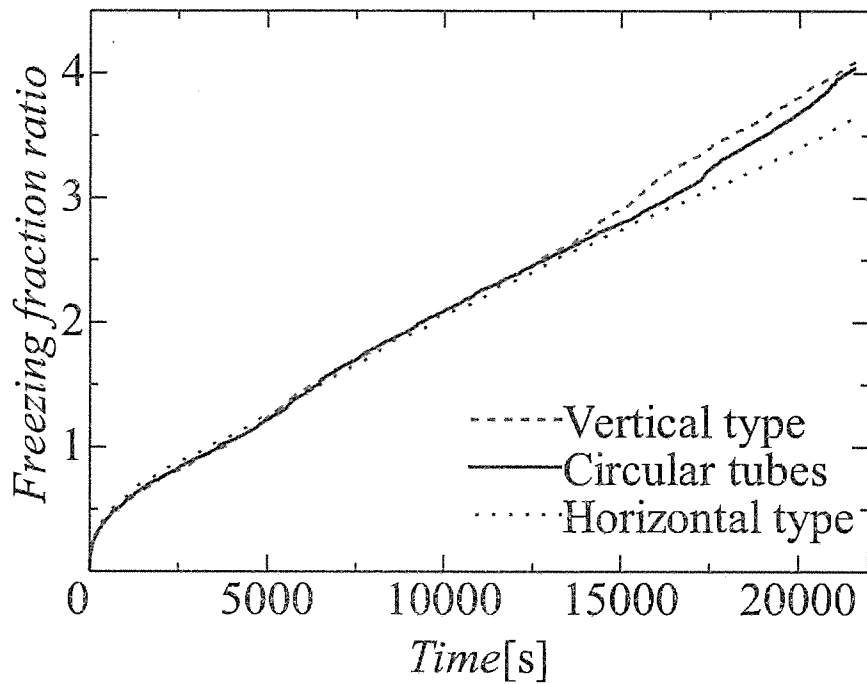


Fig.4.3.55 Comparison of freezing fraction ratio by circular and elliptical tubes for two tubes.  
 ( $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 4$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)

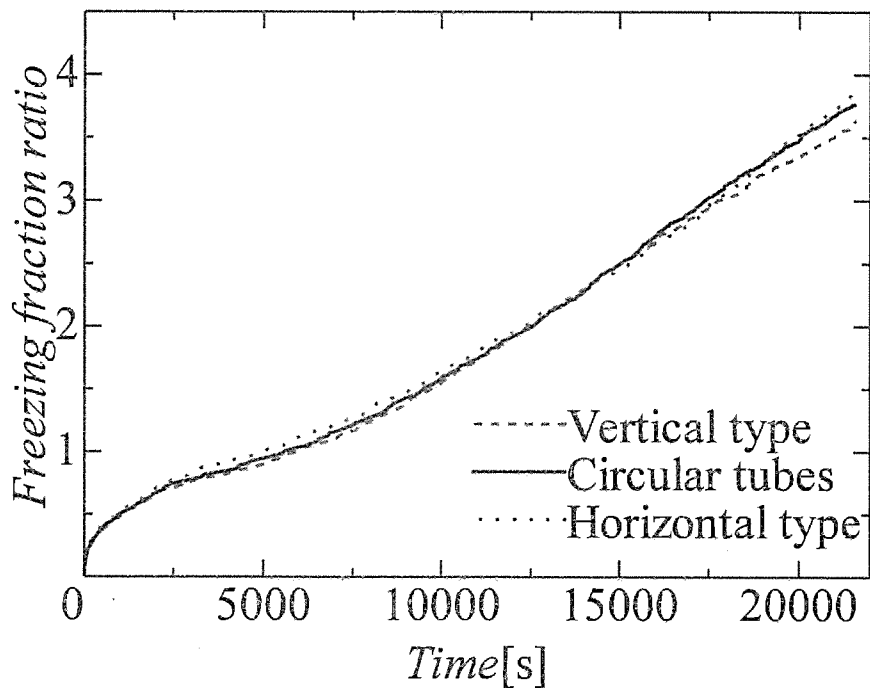


Fig.4.3.56 Comparison of freezing fraction ratio by circular and elliptical tubes for two tubes.  
 ( $D_x = 0$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 7$  °C,  $T_{t,1} = -5.0$  °C,  $T_{t,2} = -5.0$  °C)



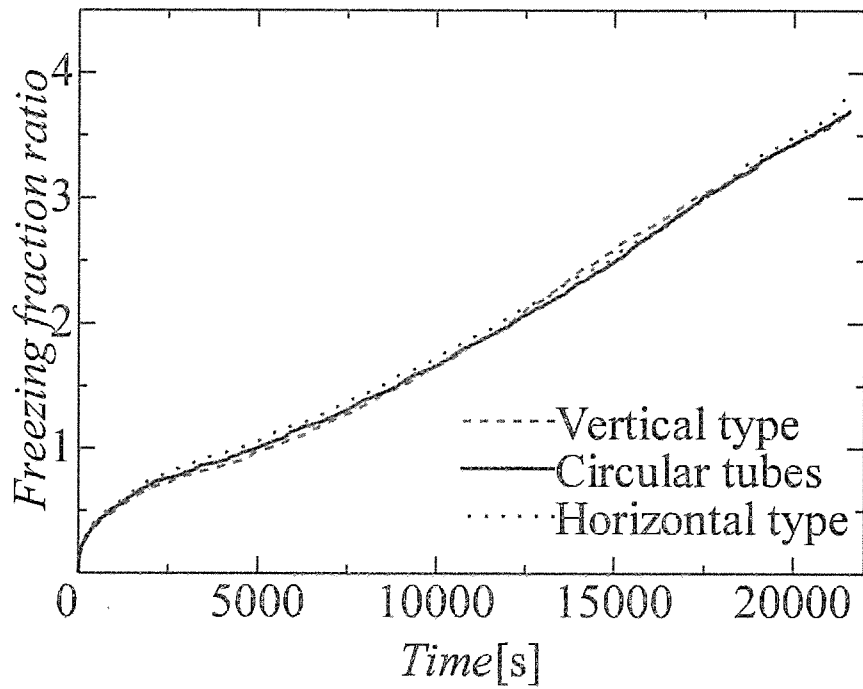


Fig.4.3.57 Comparison of freezing fraction ratio by circular and elliptical tubes for two tubes.  
 ( $D_x = 20$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 7$  °C,  $T_{l,1} = -5.0$  °C,  $T_{l,2} = -5.0$  °C)

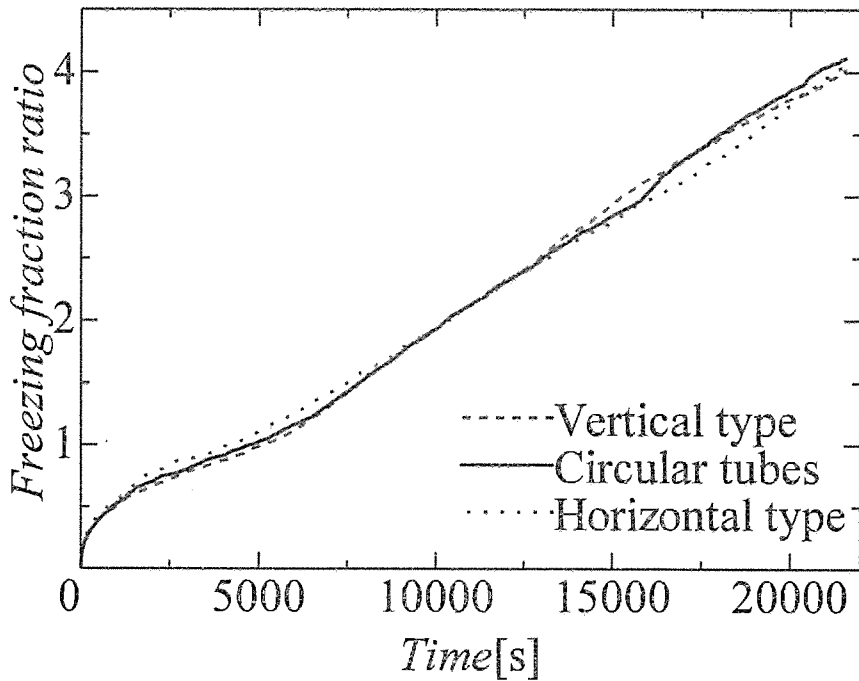


Fig.4.3.58 Comparison of freezing fraction ratio by circular and elliptical tubes for two tubes.  
 ( $D_x = 40$  mm,  $D_y = 80$  mm,  $T_{mi} = 7$  °C,  $T_{l,1} = -5.0$  °C,  $T_{l,2} = -5.0$  °C)

#### 4.4 各水槽サイズおよび初期水温の凍結現象

図 4.4.1 に  $T_{ini} = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$  の場合における各水槽サイズの代表的な水温変化を示す。この図から、図 4.4.1(a) の下部水温に比べ、図 4.4.1(b) の下部水温の方が下がりやすいことがわかる。これは、水槽の垂直方向の距離を小さくすることにより、下部管が容器下部の  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  付近の水が成層化している領域に侵入してしまうため、氷生成時に使われるエネルギーがこの領域の冷却に使われるため、水槽サイズ  $X = 270\text{ mm}$ ,  $Y = 180\text{ mm}$  の容器下部領域がこの影響を受け、水槽サイズ  $X = 180\text{ mm}$ ,  $Y = 270\text{ mm}$  に比べ、冷却されやすいためと考えられる。また、この図から、図 4.4.1(a) の上部、中部水温より図 4.4.1(b) の上部、中部水温が下がりにくいことがわかる。

図 4.4.2 に  $T_{ini} = 7\text{ }^{\circ}\text{C}$  の場合における各水槽サイズの代表的な水温変化を示す。図 4.4.1 と同様に図 4.4.2(a) の下部水温に比べ、図 4.4.2(b) の下部水温の方が下がりやすいことがわかる。

(1)  $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^{\circ}$ ,  $D_x = 0\text{ mm}$ ,  $D_y = 80\text{ mm}$  の場合

図 4.4.3 に各水槽サイズ及び初期水温の凝固率の時間変化を示す。この図から、この条件下では、水槽サイズ  $X = 180\text{ mm}$ ,  $Y = 270\text{ mm}$ ,  $T_{ini} = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$  の凝固率の時間変化が大きく、水槽サイズ  $X = 270\text{ mm}$ ,  $Y = 180\text{ mm}$ ,  $T_{ini} = 7\text{ }^{\circ}\text{C}$  の凝固率の時間変化が小さくなることがわかる。また、全体的に見ると、水槽サイズ  $X = 180\text{ mm}$ ,  $Y = 270\text{ mm}$  の場合の方が水槽サイズ  $X = 270\text{ mm}$ ,  $Y = 180\text{ mm}$  の場合に比べ、凝固率の増大が見られた。

(2)  $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^{\circ}$ ,  $D_x = 20\text{ mm}$ ,  $D_y = 80\text{ mm}$  の場合

図 4.4.4 に各水槽サイズ及び初期水温の凝固率の時間変化を示す。この図から、この条件下では、(1) の場合と同様に水槽サイズ  $X = 180\text{ mm}$ ,  $Y = 270\text{ mm}$ ,  $T_{ini} = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$  の凝固率の時間変化が大きく、水槽サイズ  $X = 270\text{ mm}$ ,  $Y = 180\text{ mm}$ ,  $T_{ini} = 7\text{ }^{\circ}\text{C}$  の凝固率の時間変化が小さくなることがわかる。また、全体的に見ると、(1) の場合と同様に水槽サイズ  $X = 180\text{ mm}$ ,  $Y = 270\text{ mm}$  の場合の方が水槽サイズ  $X = 270\text{ mm}$ ,  $Y = 180\text{ mm}$  の場合に比べ、凝固率の増大が見られた。

(3)  $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 0^{\circ}$ ,  $D_x = 40\text{ mm}$ ,  $D_y = 80\text{ mm}$  の場合

図 4.4.5 に各水槽サイズ及び初期水温の凝固率の時間変化を示す。この図から、この条件下では、水槽サイズ  $X = 180\text{ mm}$ ,  $Y = 270\text{ mm}$ ,  $T_{ini} = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$  の凝固率の時間変化が大きく、他 3 つの条件は凝固率の時間変化にほとんど差が見られなかった。

(4)  $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^{\circ}$ ,  $D_x = 0\text{ mm}$ ,  $D_y = 80\text{ mm}$  の場合

図 4.4.6 に各水槽サイズ及び初期水温の凝固率の時間変化を示す。この図から、この条件下では、水槽サイズ  $X = 180\text{ mm}$ ,  $Y = 270\text{ mm}$ ,  $T_{ini} = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$  の凝固率の時間変化が

大きく、水槽サイズ  $X=270$  mm,  $Y=180$  mm,  $T_{ini}=7^{\circ}\text{C}$  の凝固率の時間変化が小さくなることわかる。また、全体的に見ると、 $\varphi_g=0^{\circ}$  の場合と同様に水槽サイズ  $X=180$  mm,  $Y=270$  mm の場合の方が水槽サイズ  $X=270$  mm,  $Y=180$  mm の場合に比べ、凝固率の増大が見られた。

(5)  $\alpha=0.7$ ,  $\varphi_g=90^{\circ}$ ,  $D_x=20$  mm,  $D_y=80$  mm の場合

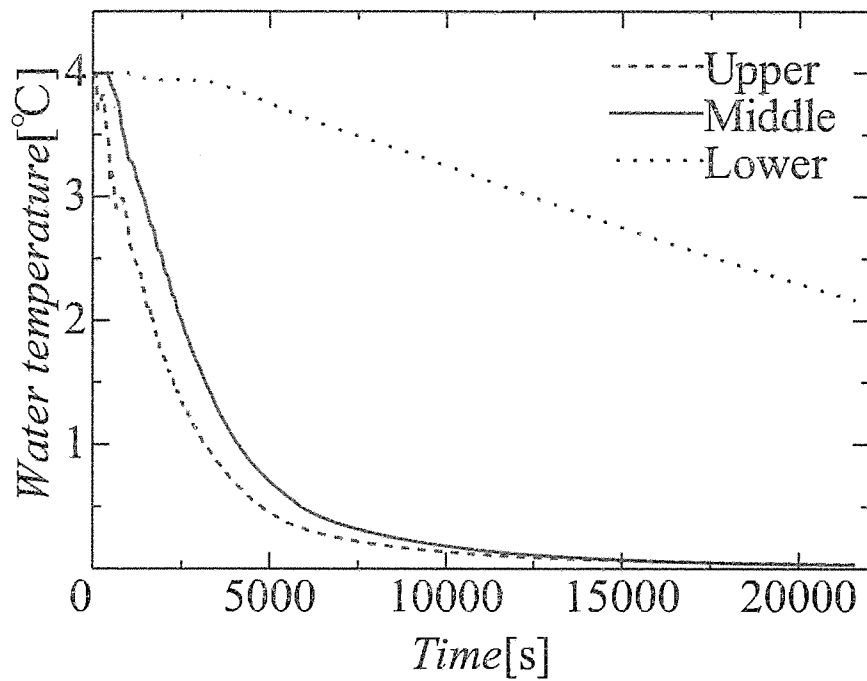
図 4.4.7 に各水槽サイズ及び初期水温の凝固率の時間変化を示す。この図から、この条件下では、水槽サイズ  $X=180$  mm,  $Y=270$  mm,  $T_{ini}=4^{\circ}\text{C}$  の凝固率の時間変化が大きく、水槽サイズ  $X=270$  mm,  $Y=180$  mm,  $T_{ini}=4^{\circ}\text{C}$  と水槽サイズ  $X=180$  mm,  $Y=270$  mm,  $T_{ini}=7^{\circ}\text{C}$  の凝固率の時間変化にほとんど差が見られなかった。また、水槽サイズ  $X=270$  mm,  $Y=180$  mm,  $T_{ini}=7^{\circ}\text{C}$  の凝固率の時間変化が小さくなることわかる。

(6)  $\alpha=0.7$ ,  $\varphi_g=90^{\circ}$ ,  $D_x=40$  mm,  $D_y=80$  mm の場合

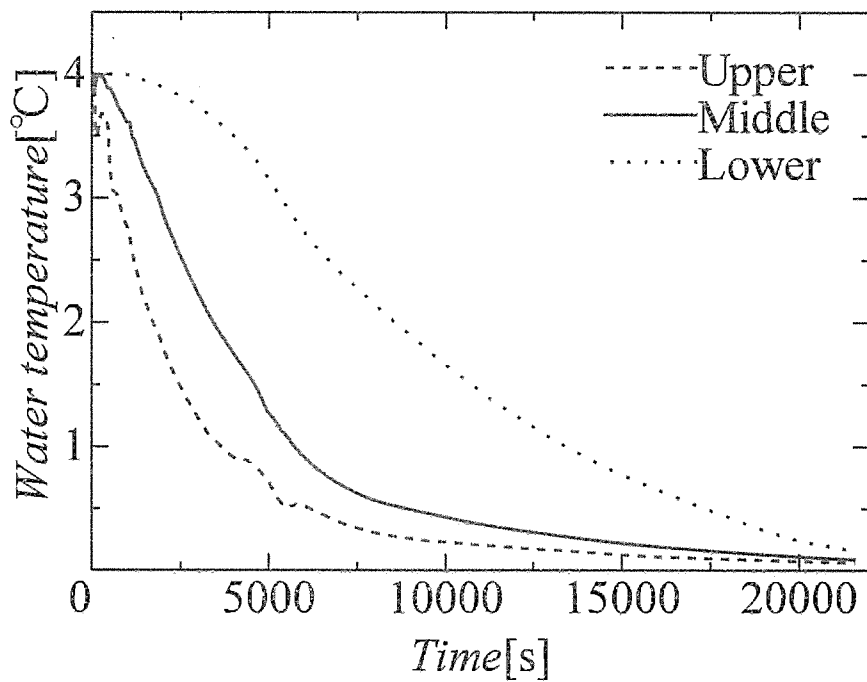
図 4.4.8 に各水槽サイズ及び初期水温の凝固率の時間変化を示す。この図から、この条件下では、水槽サイズ  $X=180$  mm,  $Y=270$  mm,  $T_{ini}=4^{\circ}\text{C}$  の凝固率の時間変化が大きく、水槽サイズ  $X=270$  mm,  $Y=180$  mm,  $T_{ini}=4^{\circ}\text{C}$  の凝固率の時間変化が小さくなることわかる。

水槽サイズにおける全体的な評価として、水槽サイズ  $X=180$  mm,  $Y=270$  mm の場合は水槽サイズ  $X=270$  mm,  $Y=180$  mm の場合と比べ、凝固率の増大が見込めた。この結果から、下部管が容器下部の  $4^{\circ}\text{C}$  付近の水が成層化している領域に入り込んでしまうと、下部管が氷生成時に用いるエネルギーを容器下部領域の冷却に使用され、下部管の氷の成長が鈍化してしまうため、水槽のアスペクト比において、幅を狭く、高さを高くすることにより容器上部を短時間で冷却し、下部管を容器下部領域から離すことができ、氷生成の効率が上がると考えられる。

また、 $T_{ini}=4^{\circ}\text{C}$  の場合、水槽サイズ  $X=180$  mm,  $Y=270$  mm と水槽サイズ  $X=270$  mm,  $Y=180$  mm の場合の凝固率の時間変化の差が大きいが、 $T_{ini}=7^{\circ}\text{C}$  の場合、水槽サイズ  $X=180$  mm,  $Y=270$  mm と水槽サイズ  $X=270$  mm,  $Y=180$  mm の場合の凝固率の時間変化の差が小さい。このことから、水槽内の初期水温が  $4^{\circ}\text{C}$  の場合より高いときは、水槽のアスペクト比の逆転に対しての影響を受けにくいことが考えられるため、 $4^{\circ}\text{C}$  以下の場合に比べ、氷生成の効率が安定すると考えられる。

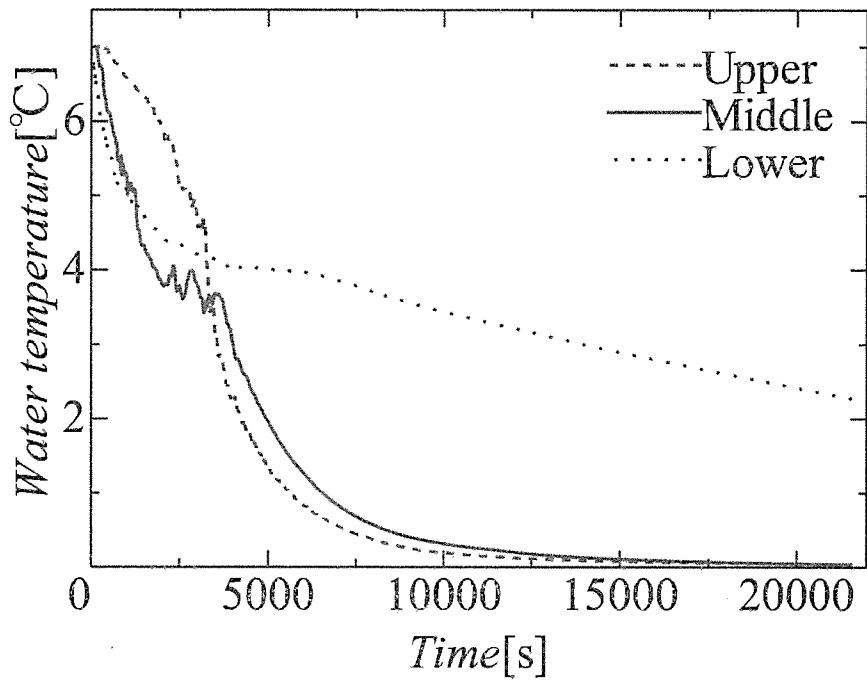


(a)  $X = 180 \text{ mm}, Y = 270 \text{ mm}$

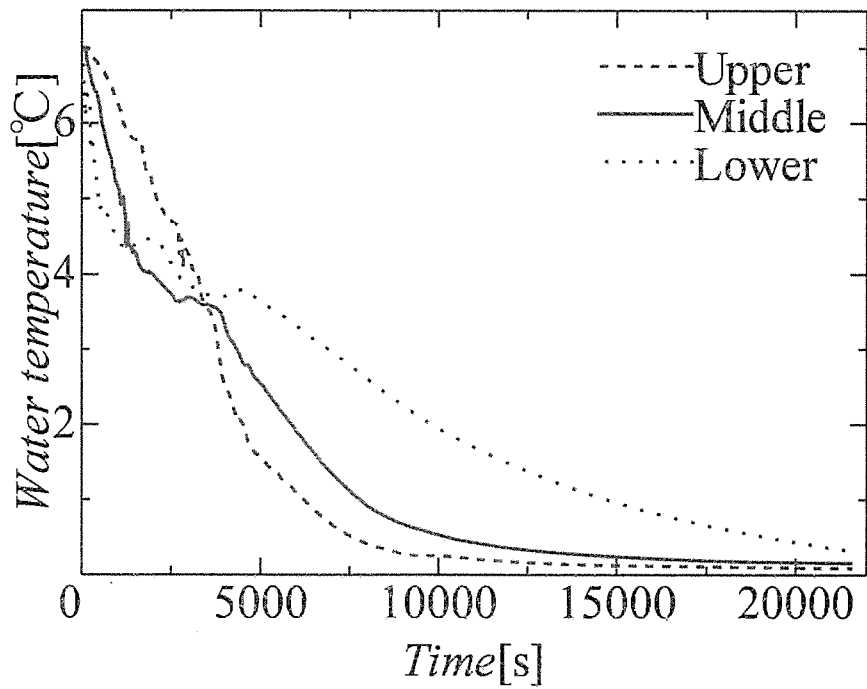


(b)  $X = 270 \text{ mm}, Y = 180 \text{ mm}$

Fig.4.4.1 Comparison of water temperature by analysis for two elliptical tubes.  
 $(\alpha = 0.7, \phi_g = 0^\circ, D_x = 40 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm}, T_{ini} = 4 \text{ }^\circ\text{C})$



(a)  $X = 180 \text{ mm}$ ,  $Y = 270 \text{ mm}$



(b)  $X = 270 \text{ mm}$ ,  $Y = 180 \text{ mm}$

Fig.4.4.2 Comparison of water temperature by analysis for two elliptical tubes.

( $\alpha = 0.7$ ,  $\phi_g = 0^\circ$ ,  $D_x = 40 \text{ mm}$ ,  $D_y = 80 \text{ mm}$ ,  $T_{ini} = 7^\circ\text{C}$ )

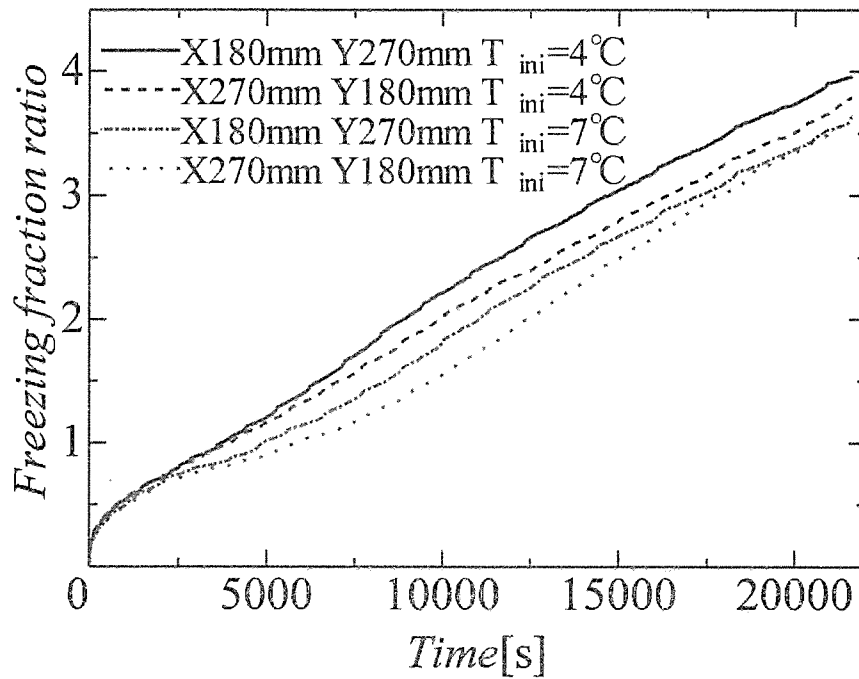


Fig.4.4.3 Comparison of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7, \varphi_{g1} = \varphi_{g2} = 0^\circ, D_x = 0 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm}$ )

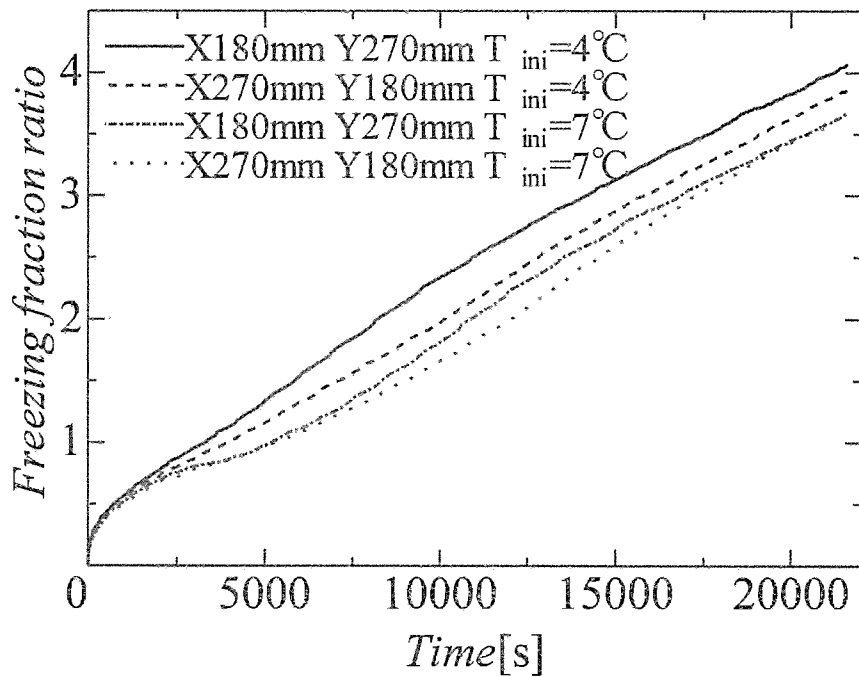


Fig.4.4.4 Comparison of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 ( $\alpha = 0.7, \varphi_{g1} = \varphi_{g2} = 0^\circ, D_x = 20 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm}$ )

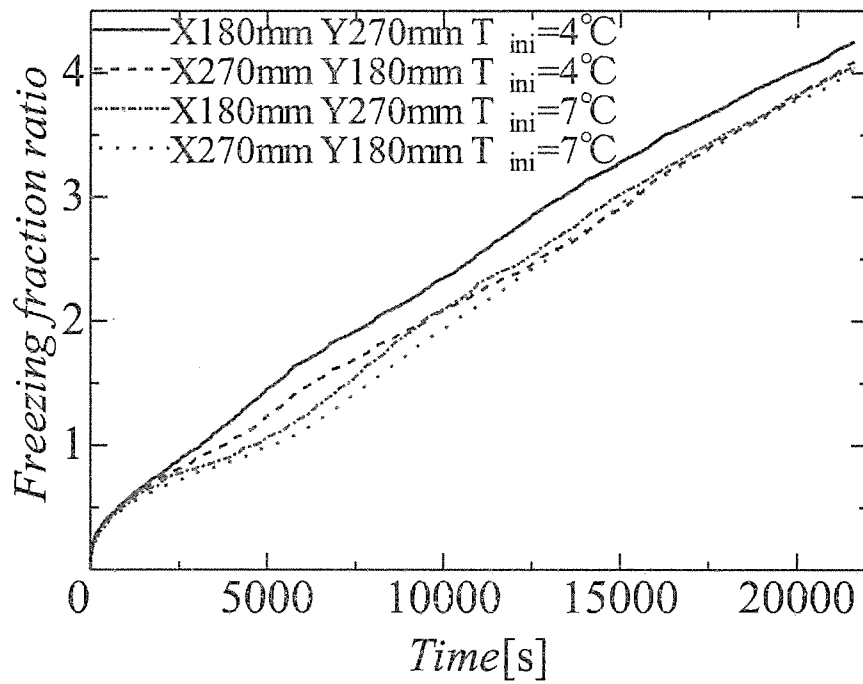


Fig.4.4.5 Comparison of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 $(\alpha = 0.7, \varphi_{g1} = \varphi_{g2} = 0^\circ, D_x = 40 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm})$

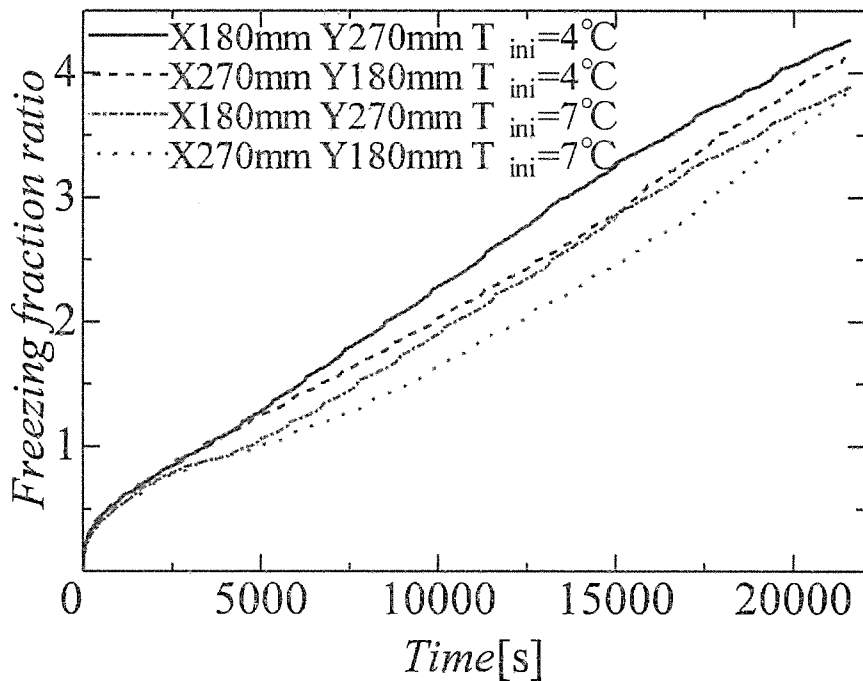


Fig.4.4.6 Comparison of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 $(\alpha = 0.7, \varphi_{g1} = \varphi_{g2} = 90^\circ, D_x = 0 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm})$

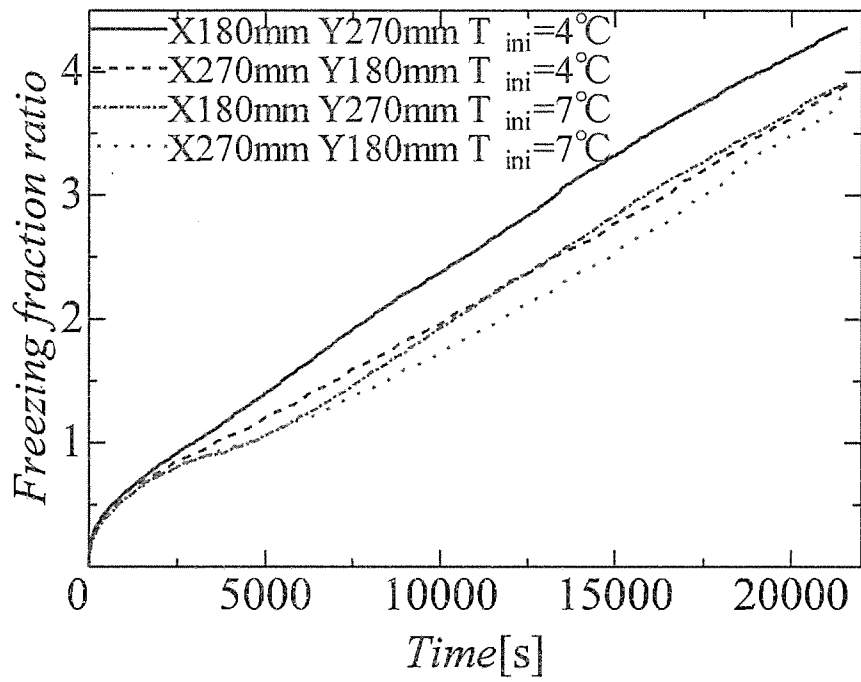


Fig.4.4.7 Comparison of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 $(\alpha = 0.7, \varphi_{g1} = \varphi_{g2} = 90^\circ, D_x = 20 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm})$

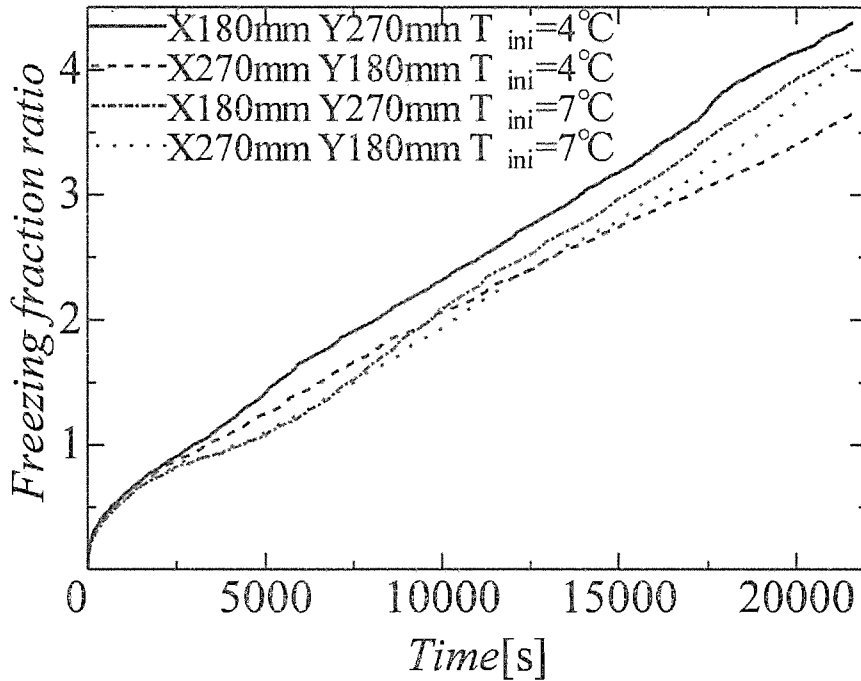


Fig.4.4.8 Comparison of freezing fraction ratio by analysis for two elliptical tubes.  
 $(\alpha = 0.7, \varphi_{g1} = \varphi_{g2} = 90^\circ, D_x = 40 \text{ mm}, D_y = 80 \text{ mm})$



## 4.5 結言

本研究では、水中に水平な伝熱管を 2 本配置し、水平方向軸間距離の変化の場合、管形状及び配置角度を変化させた場合、水槽サイズの変化の場合について、管周囲の相変化過程やそれに伴う水の対流挙動などについて、数値解析及び実験を行ない以下のような知見を得た。

### (I) 数値解析の妥当性

- (1) 初期水温が  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下の密度反転領域を通らない時は、解析結果と実験結果には凝固界面形状や凝固率で一致が見られ、本解析手法の妥当性が確認された。
- (2) 初期水温が  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上の密度反転領域を経由する時は解析結果と実験結果には凝固界面形状や凝固率で違いが現れた。これは、実験では断熱性の不完全さなどの影響により、周囲から熱が流入し、結果的に密度反転が起こる時間に違いが現れたためであるが、解析において密度反転現象を捉えられることが示された。
- (3) 本解析手法により、管形状を楕円管とし、縦型、横型の解析を行ない、任意の管形状に対して解析が可能であることを示した。

### (II) 水平方向軸間距離 $D_x$ の変化の場合による凍結現象について

- (1) 初期水温、管形状、配置角度、水槽サイズ問わず、一部の条件を除いて結果を見ると、水平方向軸間距離  $D_x$  を大きくとることにより、凝固率の増大が見られた。これは、水平方向軸間距離  $D_x$  を大きくとることにより、管周りで冷却された流体が水槽内に広がりやすくなり、上部、中部水温を短時間で冷却することができるためと考えられる。
- (2)  $\alpha = 0.7$ ,  $\varphi_g = 90^{\circ}$ ,  $D_y = 80\text{ mm}$ ,  $X = 270\text{ mm}$ ,  $Y = 180\text{ mm}$ ,  $T_{mi} = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$  の条件では、水平方向軸間距離  $D_x$  を大きくとることにより、凝固率の減少が見られた。これは、水平方向軸間距離  $D_x$  を大きくとることにより、容器左側の流体の流れが速い領域が現れ、その対流の影響を受け、下部管の氷の成長が妨げられているためと考えられる。

(Ⅲ) 管形状及び配置角度の変化の場合による凍結現象について

- (1) 初期水温, 水平方向軸間距離, 水槽サイズ問わず, 楕円管縦型 ( $\varphi_g = 0^\circ$ ), 楕円管横型 ( $\varphi_g = 90^\circ$ ), 円管を比較すると, 楕円管横型 ( $\varphi_g = 90^\circ$ ) の凝固率が最も大きく, 楕円管縦型 ( $\varphi_g = 0^\circ$ ) の凝固率が最も小さい. これは, 横型にすることにより, 容器下部の  $4^\circ\text{C}$  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ためと考えられる.
- (2) 水平方向軸間距離  $D_x$  を大きくとるに従い, 管形状及び配置角度が凝固率の時間変化に与える影響の差が小さくなる.

(Ⅳ) 水槽サイズの変化の場合による凍結現象について

- (1) 初期水温, 管形状, 配置角度, 水平方向軸間距離を問わずに結果を見ると, 水槽サイズ  $X = 180\text{ mm}$ ,  $Y = 270\text{ mm}$  の場合は水槽サイズ  $X = 270\text{ mm}$ ,  $Y = 180\text{ mm}$  の場合と比べ, 凝固率の増大が見込めた. つまり, 水槽のアスペクト比において, 幅を狭く, 高さを高くした方が容器上部水温の冷却の短縮化や下部管が容器下部の  $4^\circ\text{C}$  付近の水が成層化している領域に侵入することを阻止できるため氷生成の高効率が見込める.
- (2)  $T_{mi} = 4^\circ\text{C}$  の場合, 水槽サイズ  $X = 180\text{ mm}$ ,  $Y = 270\text{ mm}$  と水槽サイズ  $X = 270\text{ mm}$ ,  $Y = 180\text{ mm}$  の場合の凝固率の時間変化の差が大きいが,  $T_{mi} = 7^\circ\text{C}$  の場合, 水槽サイズ  $X = 180\text{ mm}$ ,  $Y = 270\text{ mm}$  と水槽サイズ  $X = 270\text{ mm}$ ,  $Y = 180\text{ mm}$  の場合の凝固率の時間変化の差が小さい. このことから, 水槽内の初期水温が  $4^\circ\text{C}$  の場合より高いときは, 水槽のアスペクト比の逆転に対しての影響を受けにくいことが考えられるため,  $4^\circ\text{C}$  以下の場合に比べ, 氷生成の効率が安定する.

以上から, 下部管を如何に容器下部領域に入り込ませないことが重要なため今回の研究で用いた条件から初期水温  $T_{mi} = 4^\circ\text{C}$ , 水槽サイズ  $X = 180\text{ mm}$ ,  $Y = 270\text{ mm}$ , 水平方向軸間距離  $D_x = 40\text{ mm}$ , 楕円管横型 ( $\varphi_g = 90^\circ$ ) という条件が最も凝固率の増大が見込めたため, このような条件が氷生成の高効率化に最も適している.

## 参考文献

- (1) 齊藤武雄, 廣瀬宏一: “密度反転を伴う水平円管内の2次元凍結の研究”, 日本冷凍空調学会, 54(624), pp.845-852, (1979).
- (2) 齋藤武雄: “密度反転領域における水平円柱まわりの2次元凍結の実験”, 日本冷凍空調学会, 53(612), pp 891-896, (1978).
- (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, 61(581), pp 208-214, (1995).
- (4) 鳥越邦和, 仲沢優司, 木下和彦: 第28回伝熱シンポ講論, pp.334(1991).
- (5) 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).
- (6) 齋藤武雄, 廣瀬宏一: “密度反転領域における水平円柱まわりの二次元凍結問題の数値解法”, 日本機械学会論文集 B 編, 46(405), pp.971-980, (1980).
- (7) 笹口健吾, 草野剛嗣: “矩形容器内に置かれた円筒回りの固-液相変化-凝固過程の数値解析-”, 日本冷凍協会論文集, 12(3), pp.295-306, (1995)
- (8) T.J.Scanlon and M.T.Stickland: “A numerical analysis of buoyancy-driven melting and freezing”, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 47, No. 3, pp.429-436, (2004).
- (9) 千葉良一, 泉正明: “周囲から冷却される円管内を流れる水の凍結挙動解析: 凍結回避のための限界流速と氷による管閉塞時間”, 日本冷凍空調学会論文集, 23(1), 25-32, (2006).
- (10) 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).
- (11) 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, 28(4), pp.353-362, (2011).