

局部冷却面を有するく形容器内の水の凍結

佐貫 康治*・萬田 哲也*・佐々木 章

Freezing behavior in a Rectangular Cavity with Partially Cooled Wall

Yasuharu SANUKI, Tetuya MANDA and Akira SASAKI

(1995年11月30日受理)

Freezing behavior have been investigated in rectangular cavity with partially cooled wall. The cavity is 100 mm in height and 50 mm in width, and the partially cooled wall is 20 mm in height. The initial temperature is changed from 0°C to 20°C. The flow patterns have been visualized and the variations of temperature have been measured.

The effect of the position of cooled wall for the flow patterns and the frozen volume have been discussed in this report.

1. 序 論

水の凍結とは、その相変化温度以下で、潜熱の放出を伴いながら液相である水から固相である氷に変化することである。水の凍結は、有益になる場合もあるが凍害となる場合が多い。特に管内の水の凍結は、化学処理施設や原子力設備、各種工場などに設置されている管路の閉塞、破裂によりその機能を失わせることになるため、重要な問題である。また、一般家庭においても、深夜などに水を長時間停止することにより、水の凍結が起こりやすくなる。

そのため、く形容器内の水の凍結問題をはじめ、円管内及び円管まわりの水の凍結など、これまで数多くの研究がなされている^{(1)~(3)}。また、水の凍結問題では、低温度条件下であることから、密度逆転の影響が生ずることになる⁽⁴⁾。すなわち、水は約4°Cで最大密度を有するため、凍結挙動が複雑になる。しかし、工場の管路網や、水道管などは局部的に外気にさらされている場合が多いにもかかわらず、この種の問題はあまり研究がなされていない。すなわち、局部的に冷却面、加熱面を有する容器内の熱伝達特性に関する研究は、ソーラーエネルギーコレクターの特性把握、電子機器の冷却問題と関連して行われており^{(5),(6)}、相変化を伴う場合に関しては、ほとんど研究がなされていないようである。局部的に冷却され凍結が生ずる問題では、冷却面の位置により種々

変化するフローパターンや熱伝達特性が、管内の凍結挙動に影響を与えるものと考えられる。

そこで本研究では、く形容器内での、容器側面下部を冷却面とした場合、容器側面上部を冷却面とした場合を基本的モデルとし、容器内の水の凍結挙動に及ぼす冷却面位置の影響について、凍結界面形状および流れ模様の撮影、容器内の温度分布、凍結量の算出により検討を加えた。

主要記号

C : 比熱

Fo : フーリエ数 = $\alpha t / W^2$

H : 試験部容器内高さ

L : 潜熱

Ste : ステファン数 = $C_i (T_f - T_c) / L$

T : 温度

t : 時間

V : 体積

ΔV : 増加水位量

v : 比容積

W : 試験部容器内幅

X : 試験部容器内横方向座標

x : マノメータの増加水位

Y : 試験部容器内縦方向座標

α : 温度伝導率

添 字

c : 冷却面

f : 凍結界面

* 秋田工業高等専門学校専攻科学生

- i : 凍結層
- in : 初期
- s : 容器

2. 実験装置および実験方法

本研究で使用した実験装置の系統図を図1に示す。本実験装置は試験部、冷却部および冷媒循環系統部により構成されている。

容器は成長する凍結層の観察が出来るように、透明アクリル樹脂板を組み合わせて作成した。試験部容器内寸法は、高さ $H = 100 \text{ mm}$ 、幅 $W = 50 \text{ mm}$ 、奥行き 80 mm とした。冷却部は独立したブロック構造になっており、冷却面には厚さ 5 mm 、高さ 20 mm 、奥行き 80 mm の銅板を用いた。容器内の温度分布測定のため、直径 0.02 mm のクロメル-アルメル熱電対を通した直径 1 mm のステンレスパイプを冷却面と平行に9本取り付けました。熱電対の位置およびシンボルを、図2に示す。また、冷却面温度測定のため同種の熱電対を、冷却面裏側に取り付けた。容器上部には、凍結に伴う体積膨張による水の逃げ、並びに凍結量算出を目的としてガラス管マノメータを取り付けてある。

実験は、冷却面を容器側面下部に取り付けた場合 ($X/W = 0, Y/H = 0.8 \sim 1.0$)、容器側面上部に取り付けた場合 ($X/W = 0, Y/H = 0 \sim 0.2$) について行った。実験条件は、初期水温を約 0°C 、 4°C 、 8°C 、 20°C に設定し、冷却面温度を約 -10°C に設定した。実験中、周囲からの温度の影響を防ぐため厚さ 50 mm のスタイロフォーム断熱材により試験部を覆った。

実験は、試験部内全体が初期温度条件を満足していることを確認した後、冷却部にブラインを流し、開始する。実験開始後、10分経過ごとに温度分布、マノメータの増加水位、凍結層の形状、流れ模様などの測定を行った。凍結層の形状は、正面からの写真撮影により行うとともに、実験中に OHP 用紙を用いてスケッチした。凍結層の体積は、試験部上端に設けたマノメータの増加水位量をもとに、次式より求めた。

$$V_i = \Delta V \cdot v_i / (v_i - v_w)$$

ここで、 V_i は凍結した氷の体積、 ΔV は増加水分量、 v_i は氷の比容積、 v_w は水の比容積である。流れ模様の可視化は、トレーサーとしてアルミニウム粉末を試験部容器内に投入し、試験部真横よりスリット光線を当てて写真撮影を行った。

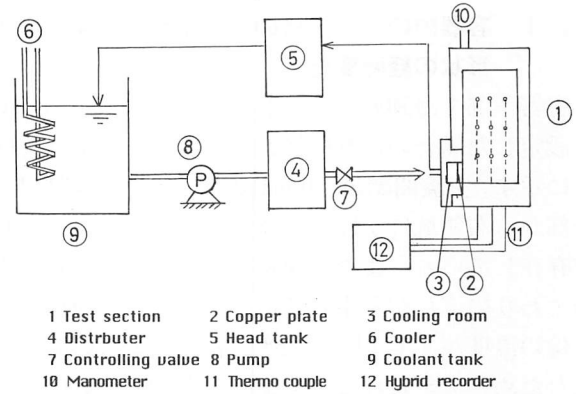
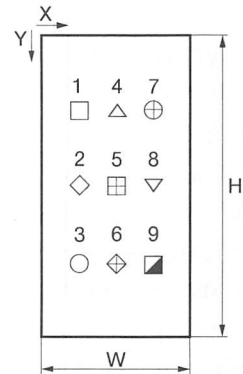
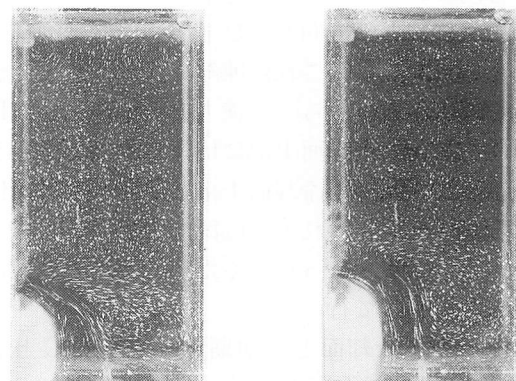


図1 実験装置系統図



Y/H \ X/W	0.25	0.5	0.75
0.25	□	△	⊕
0.5	◇	⊠	▽
0.75	○	⊙	◼

図2 熱電対の位置およびシンボル



(a) $t = 30 \text{ min}$ (b) $t = 60 \text{ min}$

図3 流れ模様及び凍結界面形状

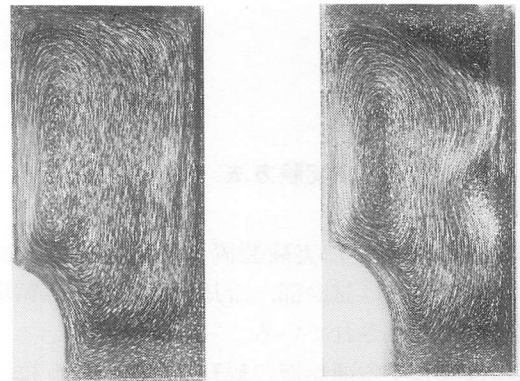
3. 実験結果および考察

3. 1 容器内の流れ模様の可視化および凍結界面形状の経時変化

容器下部を冷却面とし容器内の初期水温を約20℃と設定した場合の流れ模様および凍結界面形状を図3に示す。実験開始後30分経過(a)すると、凍結界面上部から右領域にかけて、反時計方向まわりの流れが存在している。また、凍結界面近傍には、時計方向まわりの流れが発生している。これは、凍結界面近傍の温度が4℃以下になり、密度逆転の影響が現れたためと考えられる。すなわち、水は約4℃で最大密度を有するため、4℃以下では水の密度が小さくなり上向きの流れが生じることになる。凍結界面上部には、反時計方向まわりの流れによって温度の高い水が突き当たることになるため、凍結界面上部の凍結の進行が妨げられている。凍結界面上部で上昇する時計方向まわりの流れと、反時計方向まわりの流れの接触する領域で、熱交換が行われ、反時計方向まわりの流れの領域内の温度が低下する。しかし、容器上部には流れがほとんど見られず、この領域での熱移動は主に伝導伝熱で行われていると言える。実験開始後60分(b)では、凍結界面上部で上昇する時計方向まわりの流れは、容器上部、右方に拡大する。さらに時間が経過すると、凍結界面近傍の流れは、さらに領域が拡大し、反時計方向まわりの流れの領域は狭くなる。

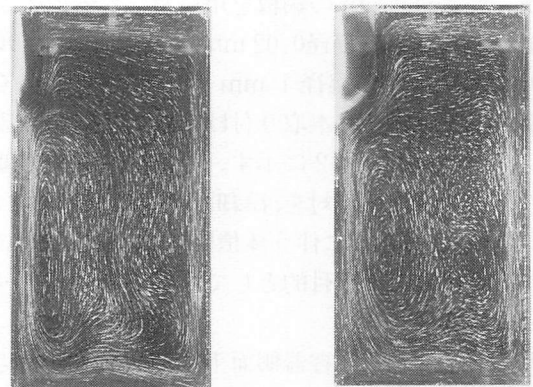
初期水温を約4℃と設定した場合の結果を図4に示す。この場合、初期水温が最大密度を有する温度に等しいことから、実験開始直後から、凍結界面に沿って上昇する流れが観察された。すなわち凍結界面で冷却された水は、凍結界面に沿って上昇し容器上部に到達した後、容器右側壁に沿って下降する時計方向まわりの循環流れを形成する。凍結界面形状は、冷却面上部方向および横方向にほぼ同様の割合で凍結している。これは凍結界面に向かって流れてくる暖かい水によって、横方向への凍結が妨げられるのに対し、冷却面上部には凍結界面で冷却された水が流れるため、冷却面上部領域での凍結が促進されるためと考えられる。時間の経過にともない容器全体の水温が下がって行くため、凍結界面はほぼ円弧状に成長して行く。

容器上部を冷却面とし初期水温を約20℃と設定した場合の結果を図5に示す。実験開始後30分経過(a)すると、大きな反時計方向まわりの流れが容器全体に見られる。すなわち、冷却面近傍の流れは凍結



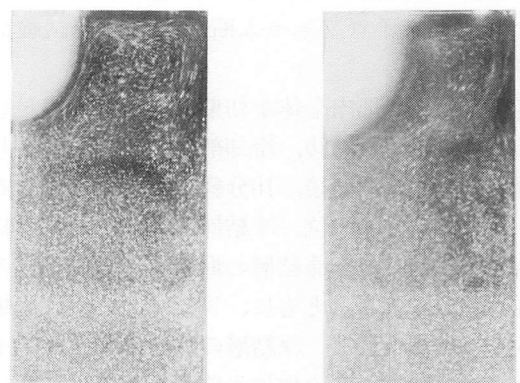
(a) t = 30 min (b) t = 60 min

図4 流れ模様および凍結界面形状



(a) t = 30 min (b) t = 60 min

図5 流れ模様および凍結界面形状



(a) t = 30 min (b) t = 60 min

図6 流れ模様および凍結界面形状

界面に接触し、温度が低下する。そのため凍結界面近傍の流れは密度が大きくなり、下向きに流れるようになる。流れが下向きになるため容器下部にある暖かい水は、右方に移動し、その後容器右側壁に沿

局部冷却面を有するく形容器内の水の凍結

って上向きに流れる。このような流れのため、容器内の温度は全体的に低下することになる。この時凍結界面形状は、温度の高い水が凍結界面上部に接触するため、その部分の凍結界面がくぼんだ形となっている。60分経過(b)すると、凍結界面上部近傍に、密度逆転に伴う時計方向まわりの小さな流れが存在している。この流れは、時間の経過とともに、容器下部および右側壁方向にその領域を広げていく。凍結界面形状は、密度逆転による流れのために、上部のくぼんでいた部分の凍結界面の成長が促進され、その後、凍結界面下部に比べ多く凍結していく。

初期水温を約4℃と設定した場合の結果を図6に示す。実験開始直後から、初期水温が約4℃であるため、凍結界面上部近傍に存在する密度逆転に伴う時計方向回りの流れのみが見られ、20℃の場合で見られた反時計方向まわりの流れや凍結界面の上部のくぼみが見られなかった。この流れに伴い、凍結界面上部が実験終了までにより多く凍結して行く。

3. 2 容器内の温度の経時変化

容器下部を冷却面とし容器内の初期水温を約20℃に設定した場合の容器内の温度分布の経時変化を図7に示す。実験開始後、熱電対3 (X/W = 0.25, Y/H = 0.75), 6 (X/W = 0.5, Y/H = 0.75), 9 (X/W = 0.75, Y/H = 0.75)の領域(容器下部の領域)の温度は、図3に示されるように容器下部領域にのみ流れが集中しているため、時間の経過とともに急激に減少するが、約4℃となる60分頃からは熱電対3以外はほとんど変化は見られなくなる。ここで熱電対3はその後も温度が減少していくが、これは凍結界面に近いためと考えられる。それに対し、熱電対2 (X/W = 0.25, Y/H = 0.5), 5 (X/W = 0.5, Y/H = 0.5), 8 (X/W = 0.75, Y/H = 0.5)の領域(容器中間の領域)、熱電対1 (X/W = 0.25, Y/H = 0.25), 4 (X/W = 0.5, Y/H = 0.25), 7 (X/W = 0.75, Y/H = 0.25)の領域(容器上部の領域)と容器上部領域ほど時間に対する温度低下の割合が小さくなっていることが分かる。これは図3から明らかのように、容器上部領域でほとんど流れが見られないことから、この領域での熱移動が伝導伝熱で行われているためと考えられる。

初期水温を約4℃と設定した場合の結果を図8に示す。実験開始後50分で熱電対3が、160分で熱電対6が温度減少している以外は、実験開始から実験終了まで、ほぼ容器全体で一様にかつ緩やかに温度が減少していることが分かる。これは図4に示され

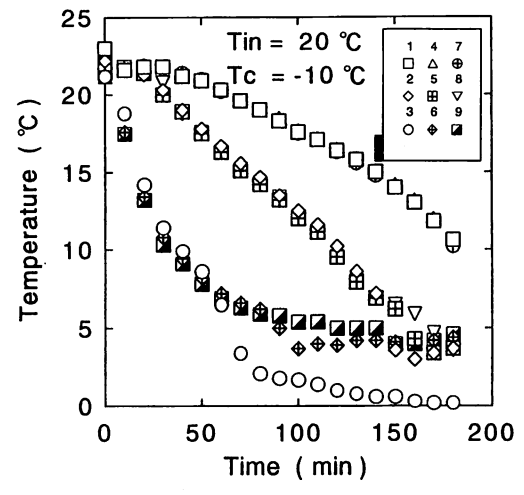


図7 容器内温度分布の経時変化

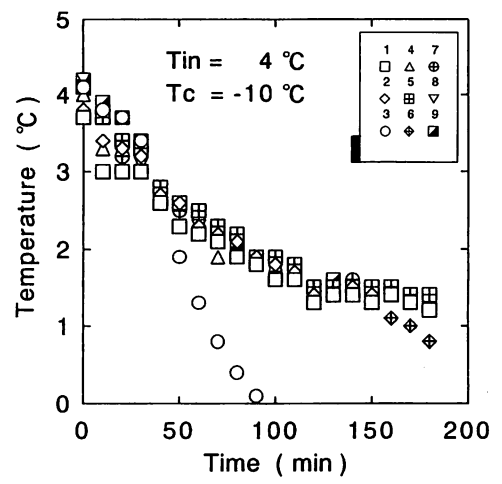


図8 容器内温度分布の経時変化

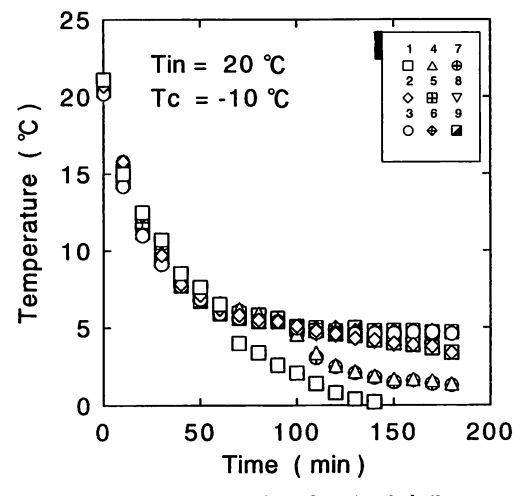


図9 容器内温度分布の経時変化

るように、実験開始直後からほぼ容器全領域において、流れが存在するためと考えられる。

容器上部を冷却面とし容器内の初期水温を約20℃と設定した場合の結果を図9に示す。実験開始後60

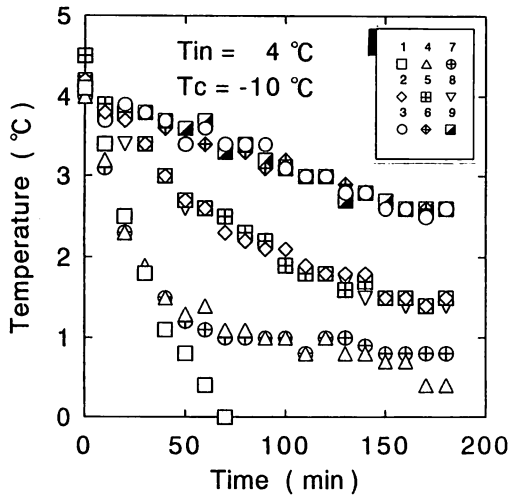


図10 容器内温度分布の経時変化

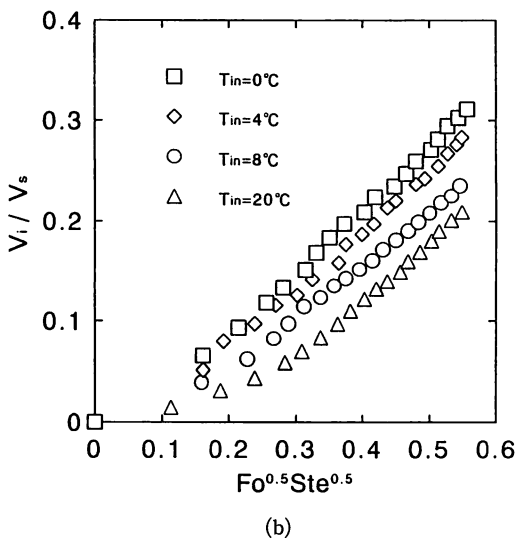
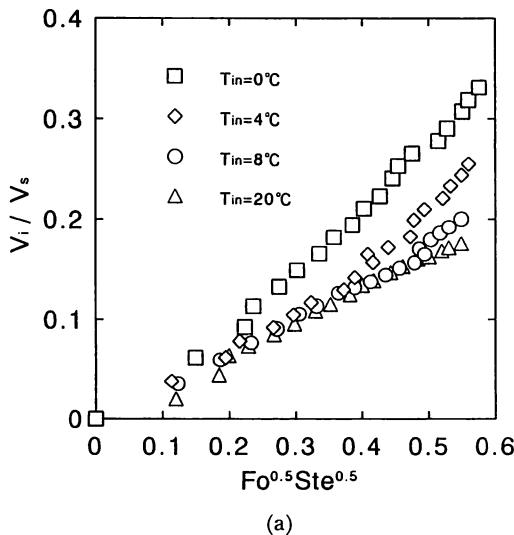


図11 凍結量の経時変化

分まで、容器内全領域の温度が約 4°C まで一様にかつ急激に減少している。これは、図5に示すように容器内全領域において流れが存在するために温度が減少すると考えられる。その後、密度逆転に伴う流れのため熱電対1の領域ではさらに温度が減少していき、110分では熱電対4、7の領域の温度が、130分では熱電対2、5、8の領域の温度が減少し始めることが分かる。

初期水温を約 4°C と設定した場合の結果を図10に示す。この場合、初期水温が約20°C で見られた容器全領域での温度の減少がなく、容器下部領域ほど温度の低下の割合が小さいことが分かる。これは図6に示すように、実験開始直後から密度逆転による流れが容器上部にのみ存在し、下部では流れが見られず、下部領域の熱移動が伝導伝熱で行われるためと考えられる。

3. 3 凍結量の経時変化

容器側面下部を冷却面とし、初期水温を変化させた場合の凍結量の比較を図11(a)に示す。ここで、氷の体積 V_i は容器の体積 V_s により無次元化しており、横軸には、フーリエ数 Fo とステファン数 Ste の積の平方根 $Fo^{0.5}Ste^{0.5}$ を用いている。初期水温を約 0°C と設定した場合は、 $Fo^{0.5}Ste^{0.5} = 0.15$ 付近までは緩やかに増大し、その後、ほぼ直線的に増加して行くことが分かる。初期水温を約 4°C、8°C、20°C と設定した場合は、 $Fo^{0.5}Ste^{0.5} = 0.4$ までほぼ同様に凍結量が増大していることが分かる。これは、初期水温20°C の場合では、流れ模様の可視化写真に示されるように容器下部領域に流れが集中し、その領域でのみ温度が低下し、初期水温 8°C、4°C の場合では、密度逆転に伴う流れのため、容器上部領域の温度低下が促進されるため、凍結が妨げられたものと考えられる。その後、初期水温が高いほど凍結量の増加割合が減少して行くことが分かる。これは、8°C、20°C の場合、容器上部領域で、ほとんど流れが見られず、初期水温が高いため、凍結の進行を妨げるものと考えられる。

容器側面上部を冷却面とし、初期水温を変化させた場合の凍結量の比較を図11(b)に示す。初期水温が約 0°C の場合では、容器側面下部を冷却面とした場合と同様の傾向を示していることが分かる。初期水温を約 4°C と設定した場合も 0°C の場合と同様の傾向を示す。初期水温が約 8°C、20°C の場合は、0°C の場合の結果とほぼ平行に凍結量が増大している。しかし、凍結量が増大し始める時間は温度が高

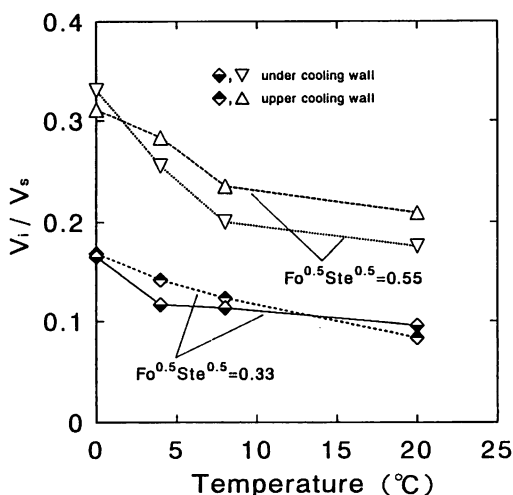


図12 凍結量に及ぼす冷却面位置の影響

いほど遅いことが分かる。これは、冷却面を容器側面上部にした場合、図5、図8(a)に見られるように、流れが冷却開始直後から容器全体に生じ、全領域の温度を低下させるため初期の凍結の進行が妨げられたものと考えられる。

次に、容器側面下部を冷却面とした場合と、容器側面上部を冷却面とした場合の $Fo^{0.5}Ste^{0.5} = 0.33$ (60 min) と $Fo^{0.5}Ste^{0.5} = 0.55$ (180 min) の時の凍結量の比較を図12に示す。 $Fo^{0.5}Ste^{0.5} = 0.33$ で初期水温約4°Cでは、容器側面上部を冷却面とした場合が容器側面下部を冷却面とした場合より凍結量が多いことが分かり、初期水温20°Cの場合は逆であることが分かる。 $Fo^{0.5}Ste^{0.5} = 0.55$ では、初期水温0°Cの場合を除いて容器側面下部を冷却面とした場合より容器側面上部を冷却面とした場合の方が凍結量が多いことが分かる。すなわち、初期水温20°Cでは、容器側面下部を冷却面とした場合は、温度の高い水が容器上部に存在するため、凍結の進行を妨げてしまい、容器側面上部を冷却面とした場合は、冷却開始とともに容器内の温度を急激に低下させるため、凍結の進行が促進されると考えられる。

4. 結 論

本研究では、容器内の水の凍結挙動に及ぼす冷却面位置の影響について、凍結界面形状および流れ模様の撮影、容器内の温度分布、凍結量の算出により検討を加えた。その結果、本研究の範囲内で以下の

ことが明かとなった。

(1) 冷却面が容器側面下部にあり、初期水温が約20°Cの場合は、冷却開始直後から冷却面の存在する容器下部領域にのみ流れが存在し、下部領域の温度低下が急激である。しかし、初期水温が約4°Cの場合は、冷却開始直後から、容器内で循環流れを形成し、容器全体の温度が一様に減少していく。

(2) 冷却面が容器側面上部にあり、初期水温が約20°Cの場合は、冷却開始直後から冷却面に沿って下降する大きな流れが存在し、容器内の温度を一様に低下させる。しかし、容器内温度が約4°Cになると初期水温が4°Cの場合と同様に、凍結界面近傍に生じた密度逆転に伴う流れの領域が容器上部に存在し、下部領域の流れ弱くなり、流れの存在する上部領域の温度低下が下部領域に比べ大きくなる。初期水温が約4°Cの場合では、冷却開始直後から密度逆転に伴う流れが容器上部に見られ、下部領域では流れが見られず、下部領域への熱の移動は伝導熱によって行われる。

(3) 初期水温が20°Cで、容器側面下部を冷却面とした場合、実験開始直後では、容器下部領域の温度低下が急激であるため、凍結量は容器側面上部を冷却面とした場合に比べ多い。しかし、時間が経過すると、温度の高い水が容器上部に存在するため、容器側面上部を冷却面とした場合に比べ凍結量は少なくなる。

参考文献

- (1) 福迫, 日本冷凍協会論文集, Vol. 7, No. 1 (1990), pp. 1.
- (2) 服部, 冷凍, Vol. 62 (1987), pp. 12.
- (3) 笹口, 草野, 北川, 日本機械学会論文集, Vol. 61, No. 581 (1995), pp. 208.
- (4) Seki, N., Fukusako, S., and Inaba, H., Wärme und Stoffübertragung, Vol. 11 (1978), pp. 145.
- (5) VALENCIA. A., and FREDERICK. R.L., Int. j. Heat and Mass Transfer, Vol. 32, No. 8 (1989), pp. 1567.
- (6) Yucel. N., Turkoglu, H., Wärme und Stoffübertragung, Vol. 29 (1994), pp. 471.
- (7) 関 信弘 編, 伝熱工学(1988), 森北出版株式会社.