

研究報告

CaCl₂ 水溶液による氷の融解挙動に関する 数値シミュレーション

鎌田秀将**・田子真**・小松喜美**・赤田拓丈**

Numerical Simulation on Melting Behavior of Ice Covered with CaCl₂ Solution

Shuusuke Kamada**, Makoto Tago**, Yoshimi Komatsu** and Hirotake Akata**

Abstract

In this paper, a numerical simulation has been performed to clarify the melting behavior of ice covered with a CaCl₂ solution in a rectangular cavity. First, the numerical results computed for the present study have been compared with the experimental results obtained by another researcher in order to verify the effectiveness of the present numerical calculation method. As a result, the present numerical calculation results for the melting rate of ice with a CaCl₂ solution are shown to be in good agreement with the experimental ones previously obtained by another researcher. Next, the influence of the inclination angle of a rectangular cavity on the ice melting rate has been examined. From the present computed results, it was found that the melting rate of ice with a CaCl₂ solution almost increased by increasing the inclination angle of a rectangular cavity.

1. はじめに

東北、北海道の積雪寒冷地では、路面の凍結による交通のトラブルを回避するため、様々な方法により除雪・融雪が行われている。例えば、電熱線や温水を循環させたパイプにより路面を加熱するロードヒーティングによる融雪装置⁽¹⁾が、周知のように現在一般に広く用いられている。しかしながら、融雪装置・機器の設置や維持管理にかかるコストが高いこともあり、主要な場所に限られているようである。このような融雪装置を用いた方式より経済的な融雪手段として、融雪剤を散布する方法が挙げられる。融雪剤には、安価に入手可能な塩化カルシウム (CaCl₂) を使用することが多く、散布するための特別な器材を必要としないことから、今なお多くの自治体で利用されている。

CaCl₂ による融雪の特徴は、周囲からの加熱を必要としない点である。凍結路面上に散布された CaCl₂ は空気中、もしくは路面上の水分に溶解して CaCl₂ 水溶液となる。CaCl₂ 水溶液と路面上の雪氷との界面にできる濃度差により、雪氷は自発的に融解する。

水溶液の凍結・融解について、これまで実験的に

も数値解析的にも多くの研究^{(2)~(6)}が行われてきた。しかしながら、これらの数値解析的な研究では、氷の融解に伴う融解面の移動が考慮されていない。

本研究では、矩形容器内の CaCl₂ 水溶液による氷の融解を明らかにするため、融解面の移動を考慮した数値計算を行った。これにより、CaCl₂ 水溶液内に生じる対流および矩形容器の傾斜角度が氷の融解挙動に及ぼす影響について検討した。

主な記号

| | |
|---------------------|--------------------------|
| c : 濃度 | [wt%] |
| C_p : 定圧比熱 | [J/(kg·K)] |
| D : 拡散係数 | [m ² /s] |
| f : 液相率 | [-] |
| g : 重力加速度 | [m/s ²] |
| h_L : 融解潜熱 | [J/kg] |
| t : 時間 | [sec] |
| T : 温度 | [°C] |
| u : x 方向速度 | [m/s] |
| v : y 方向速度 | [m/s] |
| ギリシャ文字 | |
| β_c : 濃度体膨張係数 | [(kg/kg) ⁻¹] |
| β_T : 温度体膨張係数 | [K ⁻¹] |
| λ : 熱伝導率 | [W/(m·K)] |
| ρ : 密度 | [kg/m ³] |
| ξ : 氷の融解厚さ | [m] |

2012年7月23日受理

** 秋田大学大学院工学資源学研究所機械工学専攻,
Department of Mechanical Engineering, Graduate School
of Engineering and Resource Science, Akita University.

添え字

F : 融解面

i : 初期値

s : 固相

l : 液相

2. 計算モデル

本研究で用いた計算モデルを図1に示す. 本モデルでは, 高さ 25mm, 幅 15mm の周囲が断熱面で囲われた二次元矩形容器内に, 厚さ 15mm の CaCl_2 水溶液層と厚さ 10mm の氷層が上下に配置されている. 容器内の初期温度 T_i は CaCl_2 水溶液層と氷層ともに -5°C とし, CaCl_2 水溶液の初期濃度 c_i は 20wt% とした. また, 水溶液層から壁面および氷層への物質移動はないものとする. なお, 矩形容器の傾斜角度 θ は鉛直方向からの角度を表わしている.

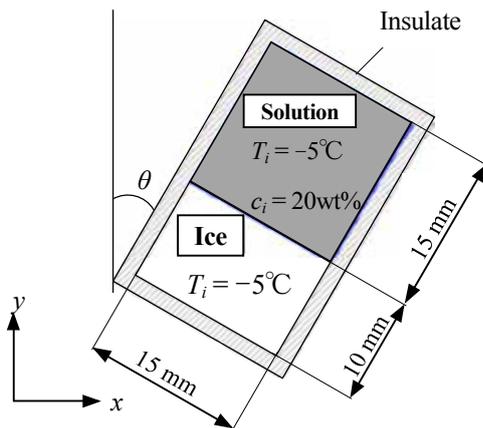


Fig.1 Computational model.

3. 基礎式

本研究に用いた基礎式(1)~(5)を以下に示す. それぞれ, 連続の式, x 方向運動方程式, y 方向運動方程式, エネルギー保存式, ならびに CaCl_2 水溶液の質量保存式である.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u v) \\ = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) \\ + \rho g \sin \theta [\beta_T (T - T_i) + \beta_c (c - c_i)] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u v) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v v) \\ = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) \\ + \rho g \cos \theta [\beta_T (T - T_i) + \beta_c (c - c_i)] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho C_p u T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho C_p v T) \\ = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \rho_s h_L \frac{\partial f}{\partial t} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u c) + \frac{\partial}{\partial y}(v c) = \frac{\partial}{\partial x}\left(D \frac{\partial c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D \frac{\partial c}{\partial y}\right) \quad (5)$$

また, 固相と液相との間をつなぐ結合条件として以下の2式を適用した. 式(6)はエネルギーバランス式を, 式(7)は質量バランス式を示している.

$$\rho_s h_L \frac{\partial \xi_n}{\partial t} = \lambda_l \frac{\partial T_l}{\partial n} - \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial n} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \xi_n}{\partial t} = \frac{1}{c_F} D \frac{\partial c}{\partial n} \quad (7)$$

ここで, n は法線方向を表わしている.

4. 融解面移動の取り扱い

本研究において, 計算領域はコントロール・ボリュームに分割され, それらは固相, 固液共存相, 液相の3つに分けて考えている.

図2は, 任意のコントロール・ボリュームの状態を模式的に示したものである. f はコントロール・ボリュームの液相率を表わしている. コントロール・ボリュームの状態は液相率 f によって判定され, 液相率 f が 0 であれば固相, 液相率 f が 0 より大きく, 1 より小さければ固液共存相, 液相率 f が 1 となれば液相となる. また, 固相および液相には, それぞれ, 氷および CaCl_2 水溶液の物性値を与えており, 固液共存相の物性値については, 固相と液相の割合を考慮し, 液相率 f を用いて以下の式により算定した.

$$\lambda = \frac{1}{(1.0 - f)/\lambda_s + f/\lambda_l} \quad (8)$$

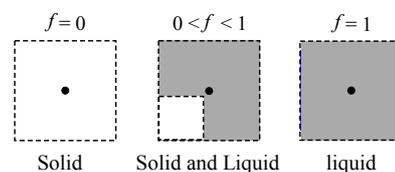


Fig.2 Definition of liquid rate.

$$\rho = (1.0 - f) \cdot \rho_s + f \cdot \rho_l \quad (9)$$

$$C_p = (1.0 - f) \cdot C_{p_s} + f \cdot C_{p_l} \quad (10)$$

ここで、 λ 、 ρ 、および C_p は、それぞれ、熱伝導率、密度、および定圧比熱である。

図3は、右上(北東)から左下(南西)に向かって融解が進行している固液共存相のコントロール・ボリューム(P コントロール・ボリューム)を中心に、その周りに隣接する固相(W および S コントロール・ボリューム)と液相(E および N コントロール・ボリューム)のコントロール・ボリュームを示したものである。図において、太い実線が融解面を表わしている。固液共存相のコントロール・ボリュームは融解完了($f = 1$)まで氷の状態にあるものとして計算を行ったので、氷と水溶液の界面である融解面は、常に固液共存相と液相の間に位置づけられる。なお、融解進行中の固液共存相のコントロール・ボリュームの物性値については、先述したように式(8)~(10)を用いて計算した。

また、図4は、図3に示した固液共存相のコントロール・ボリューム(P コントロール・ボリューム)

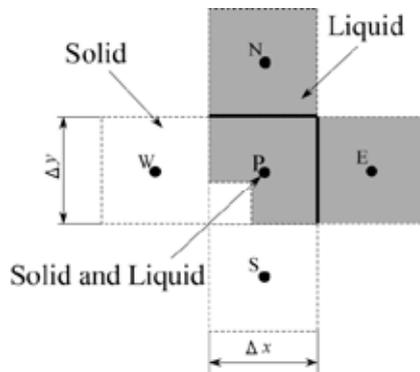


Fig.3 Typical control-volume with melting.

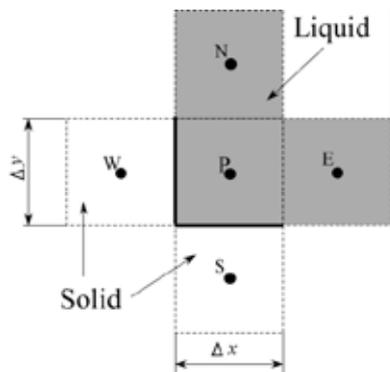


Fig.4 Typical control-volume after melting.

の融解が完了し、液相となったときの状態を示したものである。P コントロール・ボリュームの融解完了後に、P コントロール・ボリュームに隣接する固相のコントロール・ボリューム(W および S コントロール・ボリューム)が次の固液共存相となる。そのため、融解面を示す太い実線は、図3に示されるそれまでの位置から図4に示される新たな固液共存相(W および S コントロール・ボリューム)と液相(P コントロール・ボリューム)の間の位置に移動する。

この様に、本数値計算方法では、固液共存相は融解が完了していない状態と判定しているが、固液共存相では、液相率 f の分だけ融解が進行している。そのため、融解量を算出する際には、液相率 f を用いて、固液共存相の融解量を合わせて算出している。

5. CaCl₂ 水溶液による氷の融解の仕組み

本研究では、初期温度 -5°C の氷を、初期温度 -5°C 、および初期濃度 20wt% の CaCl₂ 水溶液で融解する場合について数値計算を行った。この場合を例に、CaCl₂ 水溶液による氷の融解の仕組みを説明する。

図5に CaCl₂ 水溶液の相平衡状態図⁽⁷⁾を示す。固液界面である融解面では、温度と濃度は平衡状態にあり、本研究では CaCl₂ 水溶液および氷の初期温度が -5°C であるため、融解面濃度は図より約 9wt%となる。水溶液の初期濃度は、融解面濃度よりも高い 20wt%であるので、融解面には濃度勾配が現れる。この融解面の濃度勾配から、式(7)により氷の融解厚さ ξ が求められる。このとき氷の融解に必要な潜熱は周囲から吸収され、その量は氷の融解厚さ ξ から式(6)で求められる。潜熱の吸収により融解面温度は低下していくため、融解面濃度は図に示した液相線に沿って増加していく。さらに、融解が進むと、融解水により水溶液の濃度が低下していくため、融解面の濃度勾配も低下し、式(7)で求められる氷の

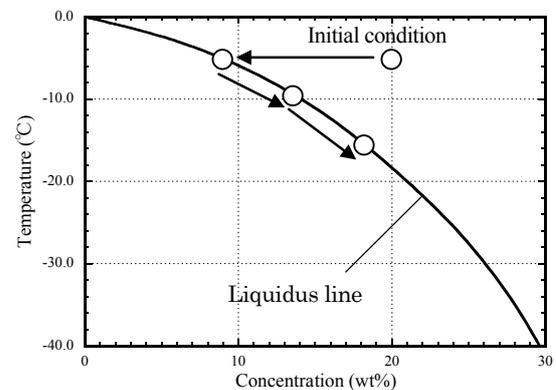


Fig.5 Equilibrium phase diagram of CaCl₂ solution.

融解厚さも小さくなっていく．このように， CaCl_2 水溶液による氷の融解では，温度および濃度が互いに関係し合い，融解が進行していく．

6. 結果および考察

6.1 本数値計算方法の妥当性の検討

融解面の移動を考慮した本数値計算方法の妥当性を検討するため，菅原による実験結果および数値計算結果⁽²⁾との比較を行った．

図 6 に，融解量の時間変化を示す．実線が本数値計算結果を示しており，破線およびプロットが，それぞれ，菅原による数値計算結果および実験結果を表わしている．図より，融解が始まってから 600 秒間において，本数値計算結果は，菅原の数値計算結果より融解量が大きく，菅原の実験結果より融解量が小さくなっている．しかしながら，融解量を y 方向の融解厚さとして換算すると，本数値計算結果と菅原が実験で求めた融解厚さとの差は 600 秒後でも約 0.7mm となり，極めて小さいといえる．したがって，本数値計算方法は妥当であると考えて差し支えないと思われる．

6.2 融解挙動に及ぼす容器傾斜角度の影響

図 7 に，矩形容器の傾斜角度が， 0° ， 30° ， 60° ，および 90° における融解量の時間変化を示す．図より，すべての角度において，時間の経過に伴って融解量が増えていることがわかる．また，融解開始から 120 秒間を通しての 0° の融解量に対して， 30° ， 60° ，および 90° の融解量が大きくなっていることがわかる．

図 8 に，融解開始から 120 秒後の，容器の傾斜角度が融解量に及ぼす影響を示す．図から，傾斜角度の増加とともに融解量もほぼ増加する傾向にあり，その差はわずかであるものの，詳細に数値を見ると 60° の融解量がわずかに大きく，次いで， 90° ， 30° となっている．このように，矩形容器の傾斜角度に

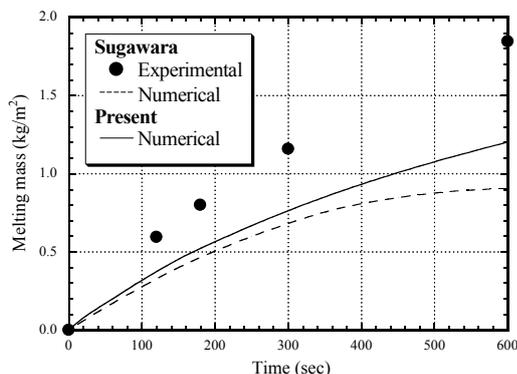


Fig.6 Time variation of melting mass.

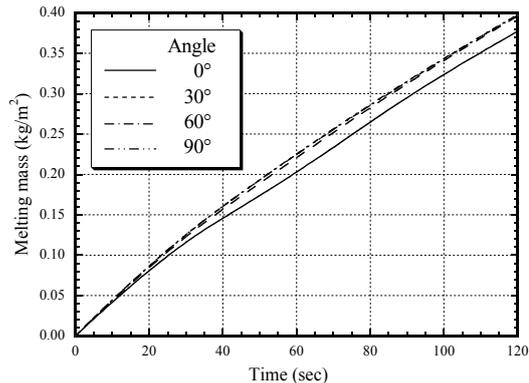


Fig.7 Time variation of melting mass for different inclination angles.

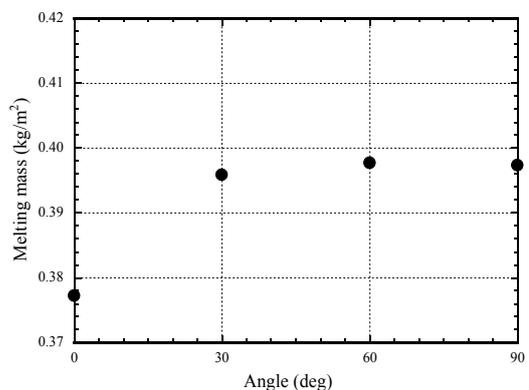


Fig.8 Melting mass for different inclination angles at 120sec.

よって融解量が異なる理由については， CaCl_2 水溶液層に生じる流れ，および容器内の温度分布を用いて以下に検討する．

図 9 に，融解開始から 120 秒後の傾斜角度(a) 0° ，(b) 30° ，(c) 60° ，および(d) 90° における容器内の流線分布を，また，図 10 に温度分布を示す．図 9 および図 10 に示した実線は，融解面の平均位置であり，この実線を境に氷層と水溶液層に分けられる．

まず，融解量の最も小さい傾斜角度 0° の結果を見てみると，図 9 (a)より，水溶液層には無秩序な流れが生じていることがわかる．これは，濃度の小さい融解水が濃度差浮力により上昇してできた流れである．この無秩序な流れは，水溶液層下部では強いものの，水溶液層上部では弱くなっている．

傾斜角度 0° の図 10(a)の温度分布から，対流の強い水溶液層の下部に比べて，対流の弱い水溶液層の上部では温度はほとんど変化していないことがわかる．

次に，傾斜角度 30° の結果を観察すると，図 9(b)の流線分布より，水溶液層内には大きな二つの流れが存在している．一つは，水溶液層上部における濃

度差浮力で上昇した融解水によって生じる右回りの流れであり、もう一つは、水溶液層下部における、温度低下に伴い融解面近傍で密度の小さくなった水溶液の下降流によって生じる左回りの流れである。また、傾斜角度 30°の図 10(b)の温度分布より、矢印の位置で温度勾配が大きくなっていることがわかる。これは、上述した二つの大きな流れによって、水溶液層上部の比較的温度の高い水溶液が水溶液層下部へ送られ、融解面に熱を供給しているためと考えられる。

さらに角度が増加し、傾斜角度 60°の場合、図 9(c)の流線分布より、水溶液層下部には融解面近傍で冷却された水溶液による左回りの大きな流れが生じている。水溶液層上部には、融解水によって生じる右回りの流れもあるものの、左回りの流れに比べて小さい。傾斜角度 60°の図 10(c)の温度分布より、先の図 10(b)にも見られたように、流れによって、水

溶液層上部の比較的温度の高い水溶液が運ばれ、熱が融解面に供給されることで温度勾配が大きくなっている。ここで、再び傾斜角度 30°の図 9(b)の流線分布を見ると、二つの流れは融解面に対してほぼ並行に並んでいる。これに対して、図 9(c)の傾斜角度 60°では、二つの流れの並行性は崩れ、水溶液層下部の流れが大きくなっている。流れが融解面に対して並行であると、水溶液層上部の熱を融解面へ運びにくいいため、傾斜角度 60°に比べて 30°の場合融解量が小さくなったと考えられる。

傾斜角度 90°では、図 9(d)の流線分布より、温度の低い融解面近傍の下降流による左回りの流れが支配的である。これは、傾斜角度 30°および 60°では、融解面近傍の下降流は氷層に衝突するように流れるのに対して、90°では、鉛直下向きに流れることでより流れやすくなっているためと考えられる。また、傾斜角度 60°と 90°の温度分布(図 10(c), (d))を

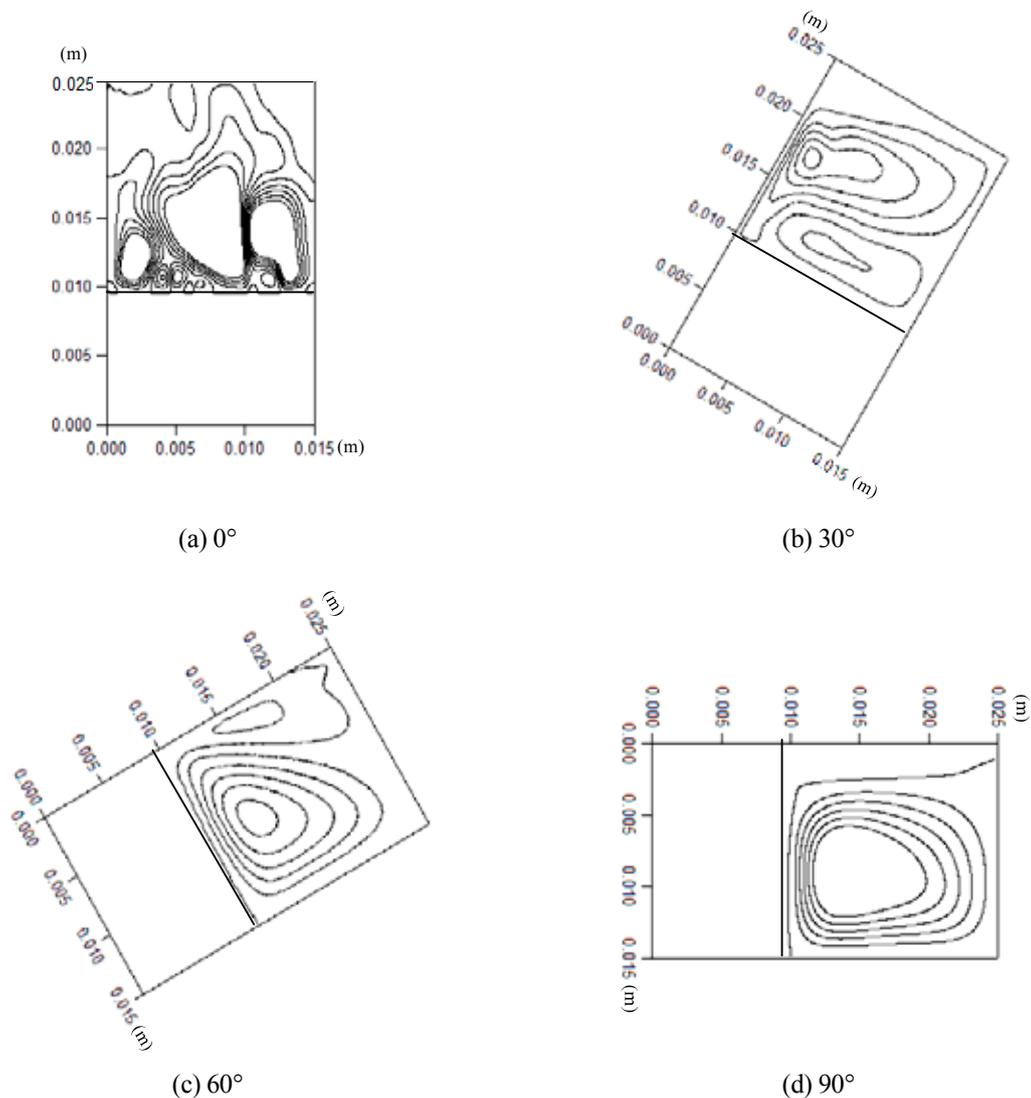


Fig.9 Streamlines for different inclination angles at 120 sec.

比較すると、温度分布はほぼ同様であるが、傾斜角度 90° では、融解面近傍の下降流が強いため、水溶液層上部から融解面へ供給される熱は 60° の場合よりも少ないと考えられる。

6.3 流線、温度、および濃度分布の非定常挙動

容器に傾斜角度がない場合 (傾斜角度 0°) と傾斜角度がある場合 (傾斜角度 30°) の流線、温度、および濃度分布の非定常挙動について検討した。

図 11 に、容器の傾斜角度が 0° の場合における、融解開始から (a) 60 秒後、および (b) 90 秒後の流線分布、温度分布、および濃度分布を示す。融解開始から 60 秒後の流線分布より、濃度差浮力により上昇した融解水による流れが、水溶液層内全体に広がっているのがわかる。しかしながら、90 秒後の流線分布を見ると、水溶液層の上部の流れが弱くなっている。これは、60 秒後と 90 秒後の濃度分布より、90

秒後の方が 60 秒後よりも氷が融解しているため、その分、融解水によって水溶液の濃度は低下し、90 秒後では水溶液層上部に低濃度の水溶液が溜まっている。その結果、水溶液層上部では濃度差浮力が低下したため、水溶液層全体の流れが弱くなったと考えられる。また、温度分布を見ると、融解面近傍の温度勾配は 90 秒後の方が 60 秒後よりも小さくなっているのがわかる。これは、60 秒後の方が 90 秒後よりも流れが強く、融解面への熱伝達が強いためと考えられる。以上のことから、容器に傾斜角度がない場合において、時間の経過に伴って水溶液層の流れが弱くなっていくことで、水溶液層からの融解面への熱伝達によって熱を供給する働きは小さくなると考えられる。

図 12 に、容器の傾斜角度が 30° の場合における、同じく融解開始から (a) 60 秒後、および (b) 90 秒後の

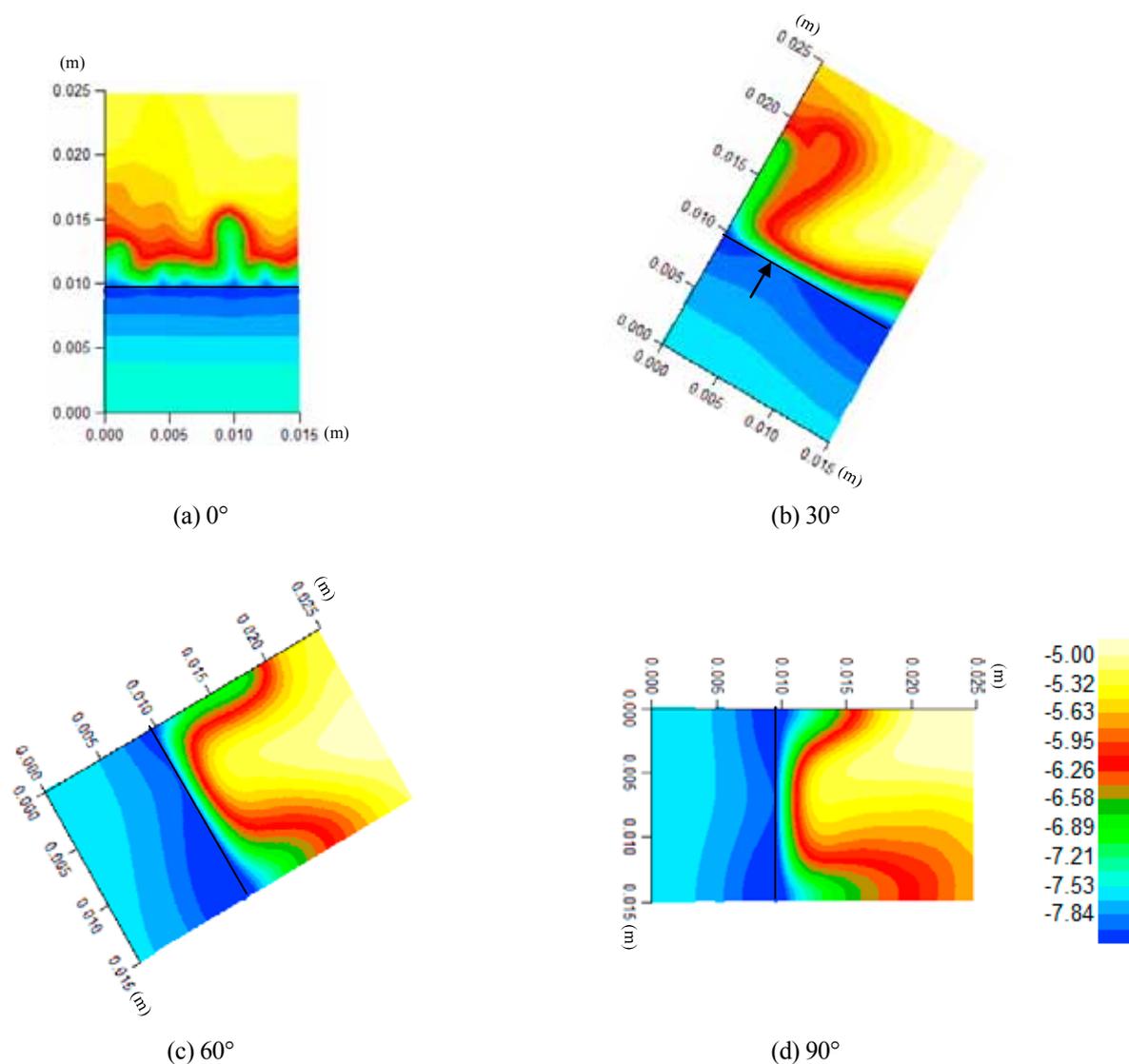


Fig.10 Isotherms for different inclination angles at 120 sec.

流線分布、温度分布、および濃度分布を示す。60秒後および90秒後の流線分布を比較すると、流れの様子はそれほど変わっていないようである。温度分布からも、融解面近傍での温度勾配に大きな差は見られない。しかしながら、濃度分布を見ると、60秒後よりも90秒後の方が、水溶液層上部において融解水によって低濃度となった水溶液の領域が大きくなっている。容器に傾斜角度のない場合では、水溶液層上部に低濃度の水溶液が溜まることで流れを弱くする働きが図 11 (b) に確認されたが、容器に傾斜角度のある場合では、90 秒の時点では、低濃度の水溶液の領域が流れに与える影響はほとんどな

いようである。ただし、さらに時間が経過すると、水溶液層上部に溜まる低濃度の水溶液によって、流れの様子に変化が現れることが考えられ、これについては、今後の検討課題である。

7. まとめ

CaCl₂ 水溶液による氷の融解挙動を明らかにするため、数値計算により検討を行った。本数値計算方法により得られた結果を、他の研究者による実験結果および数値計算結果と比較した。その結果、本数値計算方法は妥当であることが確認された。本研究より得られた結果を要約すると以下ようになる。

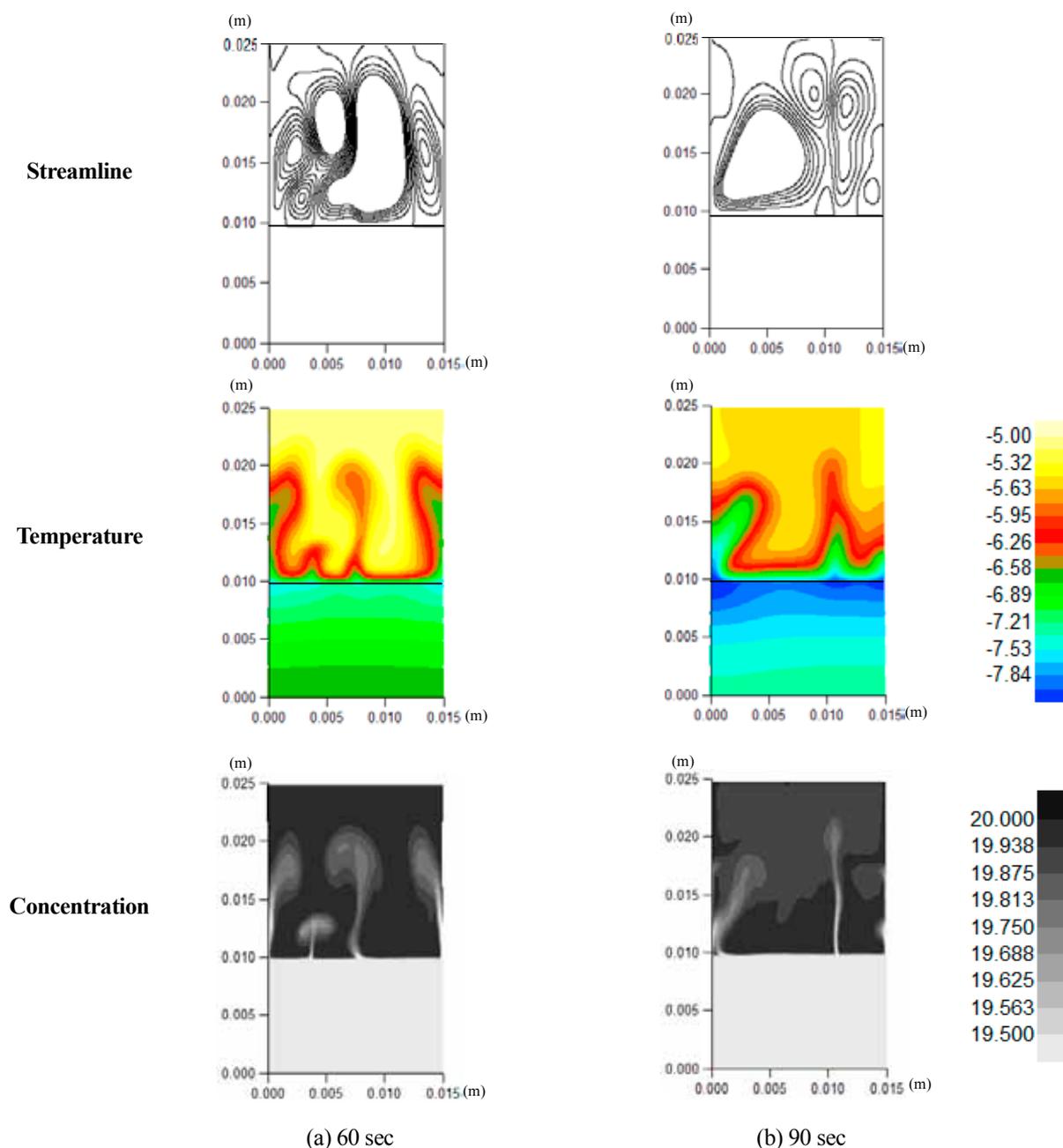


Fig.11 Time variations of streamlines, isotherms and concentration isopleths for 0° inclination angle.

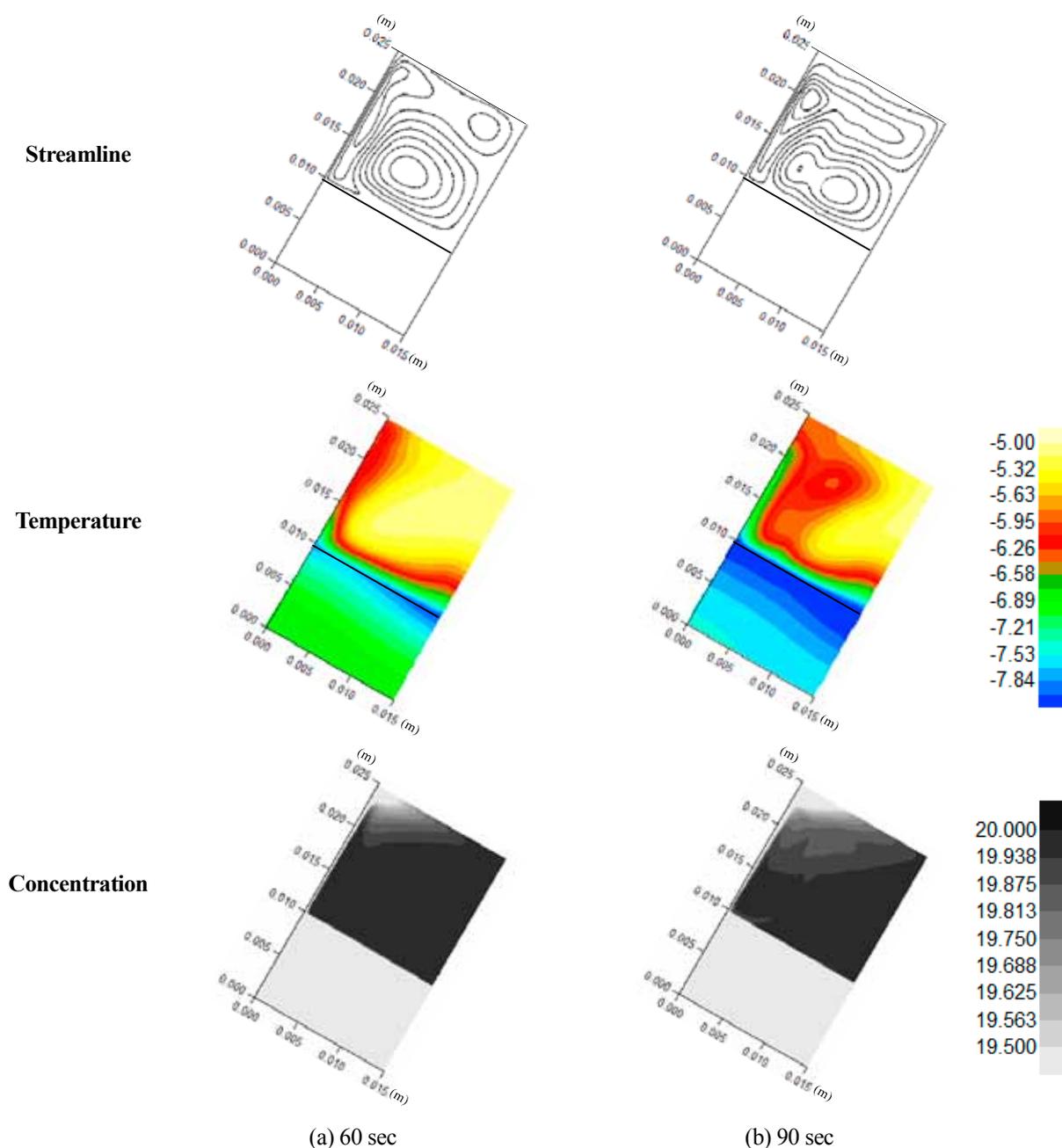


Fig.12 Time variations of streamlines, isotherms and concentration isopleths for 30° inclination angle.

矩形容器内の CaCl_2 による氷の融解量は、矩形容器の傾斜角度によって変化し、傾斜角度が大きくなるほど融解量は概ね増加する傾向にある。また、傾斜角度がない場合は、水溶液層からの融解面への熱伝達による熱の供給は、時間の経過とともに小さくなる。

参考文献

- (1) 加賀屋誠一, 上田真代(1995): 積雪寒冷地における都市エネルギーシステム改善法の評価, 環境システム研究, 23巻, 204-213頁.
- (2) 菅原征洋(2005): 氷板の温度・濃度複合融解に現れるサメ肌現象の解明, 平成15年度~平成16年度科学研究費補助金(基

盤研究(c)(2)研究成果報告書.

- (3) 菅原征洋, 藤田忠(1996): 氷層の温度・濃度複合融解(第1報, 垂直氷板と液層の初期温度が同じ場合), 日本機械学会論文集(B編), 62巻, 599号, 2774-2781頁.
- (4) 福迫尚一郎, 山田雅彦, 渡部力(1994): 塩水中におかれた水平氷円柱の融解熱伝達: 周囲塩分濃度の影響, 日本機械学会論文集(B編), 60巻, 569号, 276-283頁.
- (5) 平田哲夫, 石川正昭, 汪耳洲, 松下貴信(1998): 冷却円管内を流れる水溶液の凍結閉そくに関する研究, 日本機械学会論文集(B編), 64巻, 619号, 918-924頁.
- (6) 稲葉英男, 武谷健吾(1994): 流動過冷却水および水溶液の管内凍結発生限界に及ぼす諸因子の影響, 日本機械学会論文集(B編), 60巻, 578号, 3440-3447頁.
- (7) 日本機械学会, (1983): 流体の熱物性値集