

平成28年度
LNG貯槽ロールオーバー予測技術の
開発補助事業に関する
研究報告書

室蘭工業大学大学院 航空宇宙総合工学コース
航空宇宙流体機械研究室

今井 良二

稲葉克典

平成29年3月31日



目次

| | |
|--------------------------------------|----|
| 第1章 緒言 | 1 |
| 1.1. 研究背景 | 1 |
| 1.1.1. ロールオーバー現象 | 2 |
| 1.2. 研究目的 | 3 |
| 第2章 研究概要 | 4 |
| 2.1. 実験概要 | 4 |
| 2.2. 数値解析概要 | 4 |
| 第3章 実験方法 | 6 |
| 3.1. 実験装置 | 6 |
| 3.1.1. サブスケールタンク | 6 |
| 3.1.2. 鉛直方向温度分布計測装置 | 7 |
| 3.1.3. 気液界面の水平方向温度分布計測装置 | 8 |
| 3.1.4. 密度場可視化実験装置 | 8 |
| 3.2. 実験条件 | 9 |
| 3.3. 実験手法 | 10 |
| 3.3.1. 気液界面の水平方向温度分布計測実験 | 11 |
| 3.3.2. 密度場可視化実験 | 11 |
| 第4章 数値解析方法 | 12 |
| 4.1. 数値解析モデル及び使用ソフトウェア | 12 |
| 4.2. 基礎方程式・数値解析設定 | 13 |
| 4.3. 物性値 | 17 |
| 4.3.1. 純物質の物性値 | 17 |
| 4.3.2. 混合物の物性値 | 19 |
| 4.4. 境界条件 | 20 |
| 4.4.1. Model1 の境界条件 | 20 |
| 4.4.2. Model2 の境界条件 | 21 |
| 4.4.3. Model3 の境界条件 | 22 |
| 4.4.4. Lee モデル使用時の境界条件 | 22 |
| 4.4.5. Model4 の境界条件 | 23 |
| 4.5. 初期条件 | 24 |
| 4.5.1. Model1 および Model2 の初期条件 | 24 |
| 4.5.2. Model3 の初期条件 | 24 |
| 4.5.3. Lee モデル使用時の初期条件 | 24 |

| | |
|---------------------------------------|----|
| 4.5.4. Model4 の初期条件 | 24 |
| 第5章 研究結果及び考察 | 25 |
| 5.1. 実験結果 | 25 |
| 5.1.1. 鉛直方向温度分布計測実験結果 | 25 |
| 5.1.2. 気液界面の水平方向温度分布計測実験結果 | 26 |
| 5.1.3. 密度場可視化実験結果 | 28 |
| 5.2. 解析結果 | 35 |
| 5.2.1. 液領域のみモデル(Model1)の解析結果 | 35 |
| 5.2.2. 固体領域含むモデル(Model2)の解析結果 | 46 |
| 5.2.3. Mixture モデル(Model3)の解析結果 | 57 |
| 5.2.4. 相変化(Lee モデル)を考慮した解析 | 61 |
| 5.2.5. 気液連成解析 | 66 |
| 5.3. 実験結果と解析結果の比較 | 70 |
| 5.3.1. 温度分布による比較 | 70 |
| 5.3.2. 密度分布による比較 | 73 |
| 第6章 結言 | 93 |
| 6.1. 研究結果のまとめ | 93 |
| 6.2. 今後の課題 | 93 |
| 参考文献 | 94 |

第1章 緒言

1.1. 研究背景

近年、温室効果ガスの排出量が少なくクリーンかつ高発熱量なエネルギー源として液化天然ガス(LNG: Liquefied Natural Gas)の需要が世界的に拡大しており、図 1.1.1 に示すよう北米シェールガス等の登場により LNG を産出・輸出する国が増加する傾向にある。現在の日本国内においては、東日本大震災による原子力発電所の稼働停止に伴う火力発電所の追い焚き目的で LNG 輸入量が増加しており、2016 年には北米シェールガス由来の軽質 LNG が輸入開始されている。LNG の需要拡大によって従来のような長期取引ではなく、安定的かつ安価な LNG の供給のため様々な LNG 供給国から短期・スポット取引を行う必要が高まっている⁽¹⁾。LNG の短期取引を行う場合には、様々な産地から LNG を輸入・貯蔵を行うが、その際異産地 LNG を同一タンクに混合貯蔵することはタンクオペレーションの簡易化につながり、経済的メリットとなる。しかし異産地 LNG の混合貯蔵においては後述するロールオーバー現象⁽²⁾に注意する必要がある。

図 1.1.2 にロケット推進(液体水素)タンクの温度分布を示す。推進タンクにおいても LNG タンク同様の温度成層問題があり、ロールオーバー現象の対策はロケットタンクや将来型宇宙機などの航空宇宙分野にも応用可能である⁽³⁾。

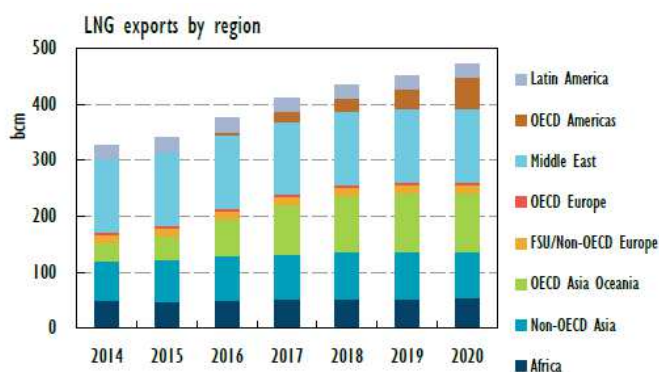


図 1.1.1 地域ごとの LNG 輸出量推移予想⁽⁴⁾

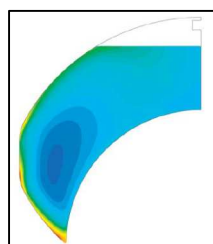
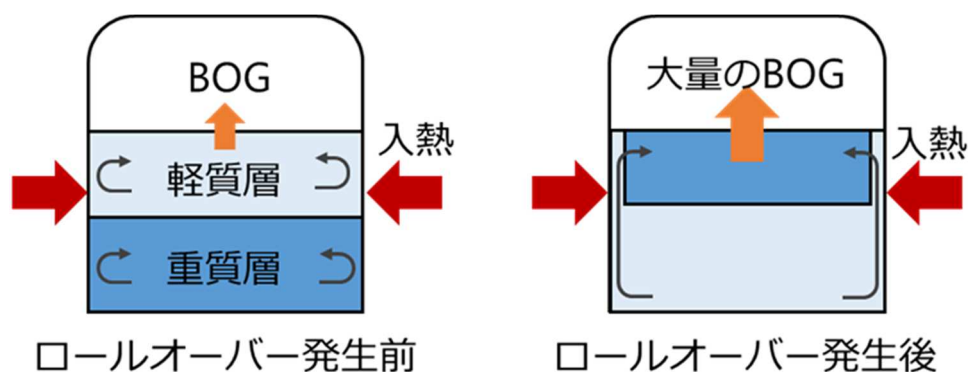


図 1.1.2 液体水素タンク内の温度成層⁽⁵⁾

1.1.1. ロールオーバー現象

LNG は天然ガスを -162°C に冷却し液化したものであり、体積は天然ガスの1/600となる。LNG はメタンを主成分とし、炭化水素、窒素等の混合物であり、産地によって組成、発熱量、密度等は産地によって異なっている。密度の異なるLNG が同一タンクに貯蔵されると、メタン濃度の高い軽質 LNG が上層となり、メタン濃度の低い重質 LNG が下層となる層状化が起こる。この状態で側壁からの入熱が存在すると層毎に内部に熱対流が発生し、層境界を通し少しずつ物質と熱の移動が進む。上下層共に熱侵入による温度上昇が発生し、上層では沸点に達すると温度がほぼ一定となり気液界面からメタン等の軽質成分が蒸発し、下層では気液界面が存在しないため蒸発が発生せず、温度が沸点以上に上昇する。この時、上層では軽質成分の蒸発、層境界からの重質成分の侵入によって密度上昇が発生し、下層では温度上昇、層境界からの軽質成分の侵入によって密度下降が生じる。この結果、上下層の密度差は減少し、密度差がなくなるとタンク内の液体全体が一つの対流を起こし、沸点以上の温度にある下層が気液界面近傍へと移動する。下層が気液界面に達すると熱侵入により蓄積されていたエネルギーが急激に解放され大量の気化ガス(BOG:Boil Off Gas)が発生する。これがロールオーバー現象と呼ばれる現象である。前述したロールオーバー現象のメカニズムを図にしたものを図 1.1.3 に示す。

ロールオーバー現象が発生するとタンク内に大量の BOG が生じ、タンクの破損や LNG の漏洩等につながる可能性があり、タンクオペレーションや LNG 受け入れ基地の設計の障害となる可能性がある。



1.2. 研究目的

前述した様な危険性を秘めているため、ロールオーバー現象による LNG タンクの破損・LNG 漏洩をタンクオペレーションによって防止するためのロールオーバー現象を予測可能なツールが必要とされている。しかし現在の数値解析では一次元での簡易的な解析が主体であり、多次元解析では経験式を用いるものや相変化を取り扱わない解析などに限定され、BOG 発生量の予測には至っていない。そのためより現象を厳密に再現する高精度の予測ツールが求められている。

そのため、本研究ではロールオーバー現象を厳密に予測・再現することのできる数値解析技術の確立を最終目的とする。この解析技術は将来型宇宙機・ロケットにおける液体推進薬タンク、酸化剤タンクの温度成層問題の予測技術につながる事が可能である。昨年度はサブスケールタンクを作成し、模擬液体を使用した実験と簡易的な混合物系の单相流の解析を行い、実験と解析の比較を行った⁽⁶⁾。本年度は模擬液体を用いた実験によるデータ取得を行い昨年度評価できなかった観点からの解析評価と相変化を含む混合物系の熱対流の解析を目的とする。

第2章 研究概要

2.1. 実験概要

模擬タンク内に模擬液体を注入し、層状化及び対流を発生させ、実際の現象を再現し、解析結果評価のため以下のデータ取得を行った。

- 熱電対による模擬タンク内の鉛直方向温度分布取得
昨年度同様の計測を行い、温度分布による解析評価のためのデータ取得を実施した。
- 放射温度計による気液界面の水平方向温度分布計測
実験における二次元性を確認するため、気液界面の温度分布を計測した。現在解析は二次元解析を行っており、気液界面が一次的に温度分布していればタンク内の温度分布は解析同様二次元的に分布するため、二次元解析の妥当性が検証できる。
- シャドウグラフ法による密度場可視化計測
密度場による解析結果評価のためのデータを取得する。昨年度実施した可視化実験では密度場による解析結果評価が困難であったため、今年度ではより詳細な密度場の計測を行い、解析結果評価を行う。

2.2. 数値解析概要

ANSYS社の汎用熱流体解析ソフトウェア **ANSYS Fluent** を用い、混合物系の熱対流解析を行った。その際、実際の実験で使用した模擬タンクを **pointwise** 社のメッシュジェネレーター **Pointwise** を用いてメッシュモデル化した。

本論文では以下の四つの解析について述べる。

- 液領域のみの混合物系単相流解析
昨年度のデータとの比較を行うため、昨年度実施した解析についても実施した。本論文で述べた解析の中では最も簡易的であるため、この解析を元に精度の改善を行う。
- 固体領域及び液領域の混合物系単相流解析
実験における固体壁の影響を観察するため、固体壁をメッシュモデルに含んだ解析を実施した。実験及び液領域のみの混合物系解析と比較し評価を行った。

- 混合物系二相流解析
相変化を取り扱う初期段階として、気相を含んだ混合物系二相流解析を実施した。実験及び液領域のみの混合物系解析と比較し評価を行った。
- 相変化を含む純物質系二相流解析
相変化を取り扱う初期段階として、純物質系において相変化を実施した。純物質系であるため、実験との比較は不可能であるため比較を行わず、相変化が表現できているかの確認を行った。
- 気液連成混合物系解析
実験における気液界面の熱の授受をより厳密に再現することを狙い、気液連成解析を行う。また二相流解析による界面における熱の授受の精度確認も同時に実施する。

第3章 実験方法

3.1. 実験装置

3.1.1. サブスケールタンク

図 3.1.1 に実験で使用するために製作したサブスケールタンクを示す。タンク寸法は幅(X 方向)100[mm]，奥行き(Z 方向)100[mm]，高さ(Y 方向)200[mm]であり，板厚 10[mm]の銅板およびガラス板を対面に配置したものである。銅板にはタンク側壁からの熱侵入を再現するために面状ヒーター(坂口電熱製)を貼り付けてあり，断熱のために銅板側には同じ寸法のエアロフレックスが取り付けられている。ガラス板側には観察可能のまま断熱するため同じ寸法の亚克力が取り付けられている。タンクの底板にはテーパねじ R1/8の穴が四箇所空けられており，内径 6mm のホースニップルに取り付けられている。ホースニップルには廃液処理用のチューブが接続されている。側面のヒーターにはそれぞれ電流計と電圧計が繋がれており，ヒーターに印加した電力が計測できるようになっている。

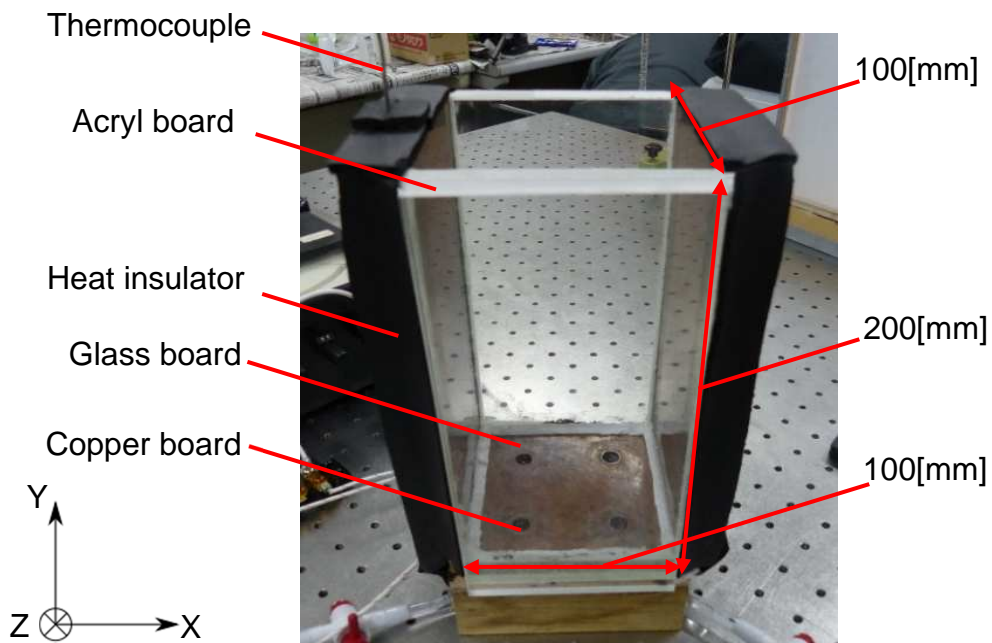


図 3.1.1 サブスケールタンク

3.1.2.鉛直方向温度分布計測装置

図 3.1.2 に温度分布計測装置を示す。タンク内部の温度分布計測には図 3.1.3 のように熱電対(K-type)を 10[mm]間隔で鉛直方向にガラス棒に巻き付けて多点的に使用し、計測点が変わらないようにスタンドとクランプを使用して固定した。温度データへの変換・記録にはデータロガー(日置電気株式会社 メモリハイロガー)を使用した。

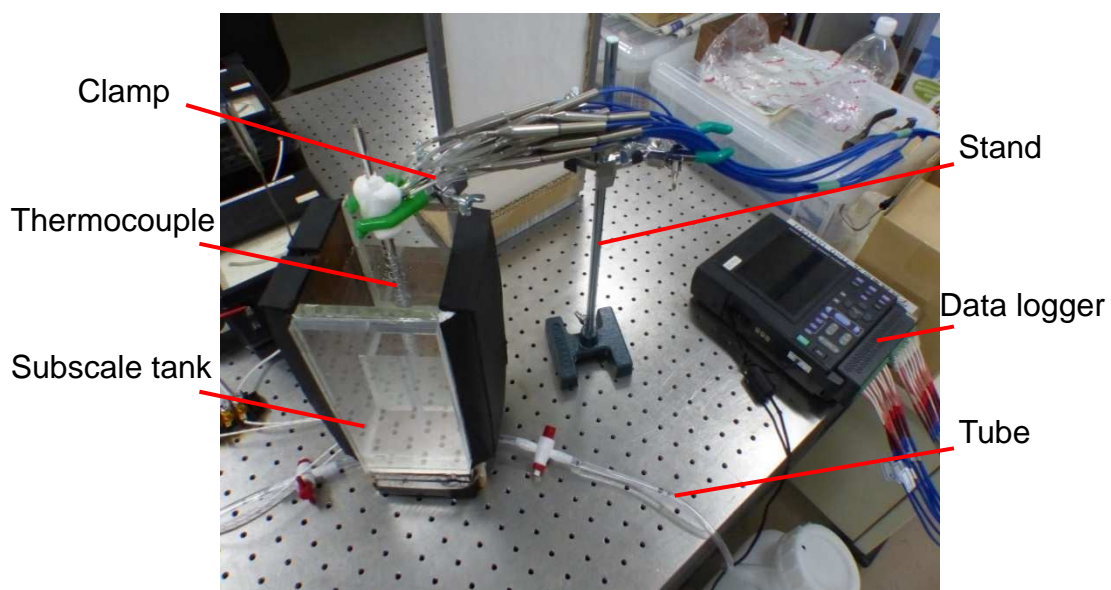


図 3.1.2 温度分布計測装置

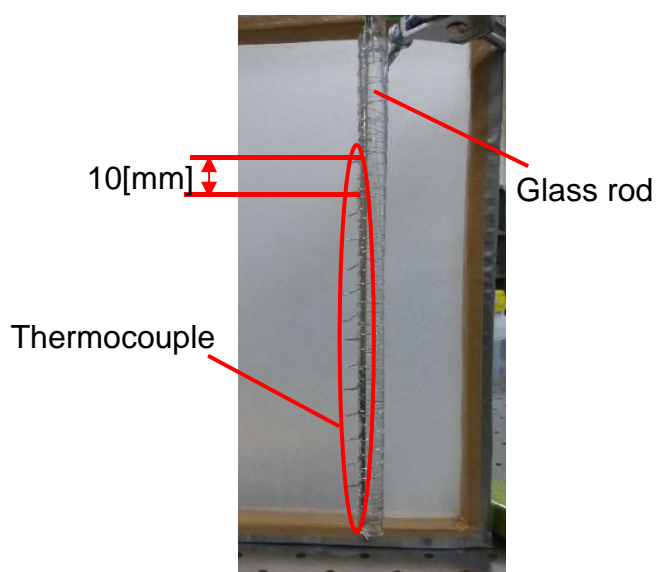


図 3.1.3 温度分布計測用熱電対

3.1.3.気液界面の水平方向温度分布計測装置

図 3.1.4 に示す放射温度計を用いて実験を行う。前述した鉛直方向での計測と違い、多点的ではなく面的に計測を行うため、固定に道具を用いず行った。



図 3.1.4 放射温度計

3.1.4.密度場可視化実験装置

図 3.1.5 に密度場可視化実験装置を示す。シャドウグラフ法の装置にはシステムシュリーレン SS50-NS(カトウ光研製)を使用した。シュリーレン法用の装置のナイフエッジを取り外しシャドウグラフ法の装置として使用した。タンク鉛直方向の撮影部を調整するため、ラボジャッキにタンクを載せ、撮影を行った。

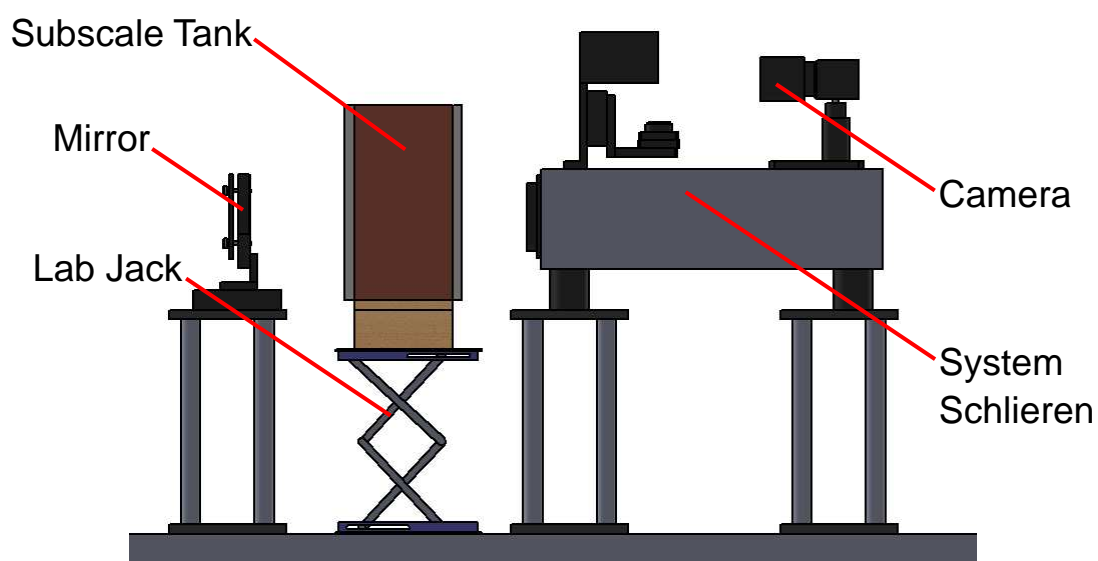


図 3.1.5 密度場可視化実験装置

3.2. 実験条件

初期液温を 293K とし, その際の上層(軽質層)と下層(重質層)の密度差が 8% となるように水とエタノールを混合させ, 実験を行った. 水溶液の密度算出には, 昨年度の研究において物性値計算ソフト REFPROP を用いて求めた値⁽⁶⁾を使用した. 実験に使用したエタノール水溶液の密度およびエタノール濃度(質量分率)を表 3.2.1 に示す.

表 3.2.1 模擬液体の密度及び濃度

| | 密度[kg/m ³] | 濃度[%] |
|-----|------------------------|-------|
| 軽質層 | 830.53 | 80 |
| 重質層 | 900.16 | 54 |

3.3. 実験手法

サブスケールタンク内に密度の異なる2種類の模擬液体(濃度の異なる2種類のエタノール水溶液)を層状化するように注入し、密度成層を形成する。注入する際、重質層を先にいれその上に昨年考案された方法⁽⁶⁾により混合層が形成されない様軽質層を注入する。その後、側板から加熱を行うことによって実際の層状化、ロールオーバー現象を再現し、データを取得する。ヒーターに印加した電圧 E は $E = 30[V]$ 、電流 I は $I = 2.4[A]$ である。

鉛直方向温度分布計測実験

図 3.3.1 に実験の様子を示す。タンク中心において気液界面及び気液界面から鉛直方向に10[mm]毎熱電対によって温度を多点的に取得し、温度分布の時間変化を取得する。側壁からの加熱による温度成層の形成を確認し、解析との比較を行うためのデータを取得する。また、この実験の際には上面をアクリルの落とし蓋によって覆い、相変化による影響を抑えて行う。

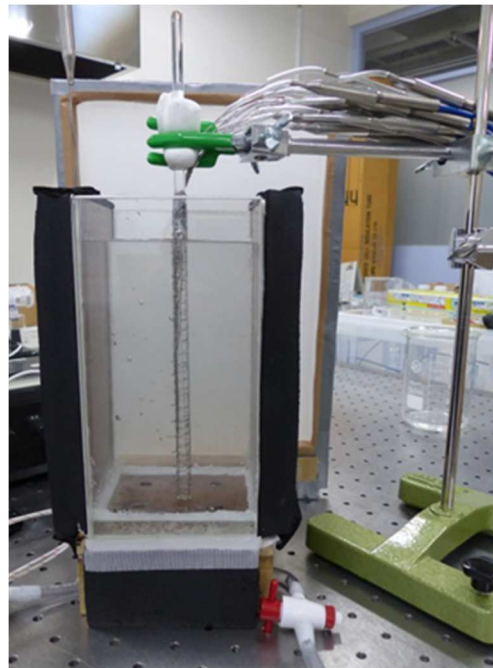


図 3.3.1 鉛直方向温度分布計測実験

3.3.1.気液界面の水平方向温度分布計測実験

図 3.3.2 に実験例の様子を示す. タンク上部から放射温度計によって気液界面の水平方向温度分布を計測する. 解析との比較においては, 実験での温度分布が xy 方向に分布していることを確認し, 二次元解析の妥当性を検証する.



図 3.3.2 水平方向温度分布計測実験

3.3.2.密度場可視化実験

タンク側壁からの加熱による密度場変化を可視化するため, シャドウグラフ法による可視化実験を行った. システムシュリーレンのナイフエッジを取り除き, システムシュリーレンからの光を模擬液体に当て, ミラーで反射した像をカメラで撮影を行う. その際測定範囲は $\phi 50[\text{mm}]$ 程度でありタンク全体を測定できないため, 複数の測定点において測定を行う. 昨年度実施した疑似シャドウグラフによる可視化実験よりも高精度な密度場の可視化を行い, 数値解析との比較を定性的に行う. 昨年度までの研究では数値解析の評価を温度分布でのみ行っていたが, 今年度からは温度分布に加え, 密度場での評価を行う.

第4章 数値解析方法

4.1. 数値解析モデル及び使用ソフトウェア

本研究において数値解析に使用したソフトウェアは ANSYS 社製汎用熱流体解析ソフトウェア ANSYS Fluent であり，メッシュ作成に使用したソフトウェアは Pointwise 社製メッシュジェネレーター Pointwise である。

本研究の数値解析では4種類のメッシュモデルを使用した。図 4.1.1 に示す液領域のみのメッシュモデル(Model1)，図 4.1.2 に示す液領域とタンク側板と底板の固体壁(図 4.1.2 の赤線部分)を含めたメッシュモデル(Model2)，Model1 のスケールを変更したメッシュモデル(Model3)及び図 4.1.3 に示す気相と液相を連成させるため気体領域と液体領域の間に境界を存在させたメッシュモデル(Model4)の4種類である。Model1，Model2 の液領域は 160[mm]×100[mm]であり，固体壁は 10[mm]の厚さを持つよう上部を除いて液領域を囲んでいる。Model3 の液領域は 200[mm]×100[mm]となっている。

Model1 は最も簡易的に実験におけるタンク内の模擬液体を再現したモデルであり，Model2 は模擬液体に加え固体壁を再現したモデルである。Model3 は液領域に加え気体領域を再現するため Model1 よりも大きくなっている。

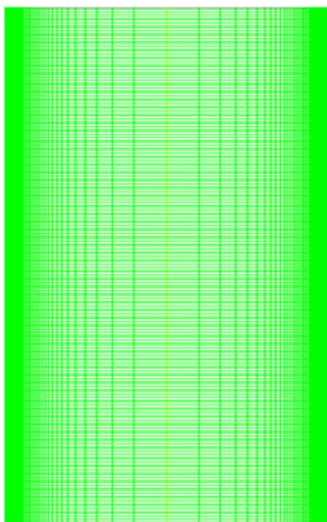


図 4.1.1 液領域のみ

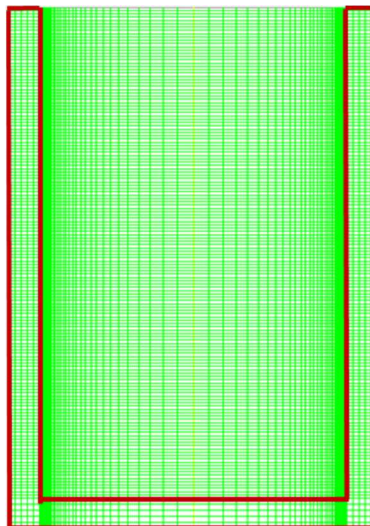


図 4.1.2 固体壁有

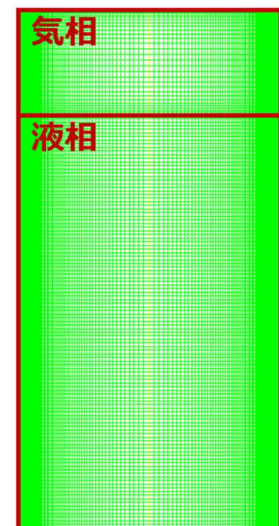


図 4.1.3 気液連成

4.2. 基礎方程式・数値解析設定

本研究での数値解析に使用した基礎方程式を以下に示す.

- 連続の式(質量保存則)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (4.1)$$

ρ は密度, \vec{v} は流速ベクトル, S_m は質量ソースを指す.

- 運動方程式(2次元ナビエーストークス方程式)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = \nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4.2)$$

p は圧力, $\bar{\tau}$ は応力テンソル, \vec{g} は重力加速度ベクトル, \vec{F} は外部からの体積力を指す.

- エネルギー方程式(エネルギー保存則)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{j}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (4.3)$$

E は比内部エネルギー, k_{eff} は有効熱伝導率, h_j は j 種のエンタルピー, \vec{j}_j は j 種の拡散流ベクトル, S_h は熱ソースを指す.

- 化学種輸送方程式(移流拡散方程式)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{j}_i + R_i + S_i \quad (4.4)$$

i は化学種の番号を指しており, Y_i は化学種 i の質量分率, R_i は化学反応による生産速度, S_i は分散相からの追加による生成速度とユーザー定義によるソース項を指す.

次に二相流の解析手法である **Mixture** モデルでの各種方程式について述べる.

- Mixture モデルにおける連続の式

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_m \vec{v}_m = 0 \quad (4.5)$$

ここで, ρ_m は混合密度, \vec{v}_m は質量平均速度であり(4.20), (4.21)のように定義される.

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad (4.6)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (4.7)$$

ここで n は相の総数, k は相番号を指し, α_k は k 相での体積分率を指す.

- Mixture モデルにおける運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = \nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \\ \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) \end{aligned} \quad (4.8)$$

ここで μ_m は混合粘度, $\vec{v}_{dr,k}$ は k 相でのドリフト速度であり(4.9), (4.10)のように定義される.

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (4.9)$$

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (4.10)$$

- Mixture モデルにおけるエネルギー方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (4.11)$$

- 滑り速度

$$\vec{v}_{pq} = \frac{\tau_p}{f_{drag}} \frac{(\rho_p - \rho_m)}{\rho_p} \vec{a} \quad (4.12)$$

ここで、 q は第1相であり、 p は第2相を指す。 \vec{a} は第2相の粒子加速度、 τ_p は粒子緩和時間であり、(4.14)のように定義される。

$$\vec{a} = \vec{g} - (\vec{v}_m \cdot \nabla) \vec{v}_m - \frac{\partial \vec{v}_m}{\partial t} \quad (4.13)$$

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q} \quad (4.14)$$

ここで、 d_p は第2相の粒子直径、 f_{drag} は抗力関数でありここでは `fluent` のデフォルトである Schiller-Naumann の式を用いた。Schiller-Naumann の式を(4.15)に示す。

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15\text{Re}^{0.687} & (\text{Re} \leq 1000) \\ 0.0183\text{Re} & (\text{Re} > 1000) \end{cases} \quad (4.15)$$

- 体積分率方程式(p 相における連続の式)

$$\frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_p) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \quad (4.16)$$

ここで、 \dot{m}_{qp} は q 相から p 相への質量移動速度である。

次に、相変化の検討を行った際に使用した Lee モデルにおける式を示す。

- 蒸気輸送方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{V}_v) = \dot{m}_{lv} - \dot{m}_{vl} \quad (4.17)$$

ここで、 v は気相を指す。 \dot{m}_{lv} 、 \dot{m}_{vl} は相間の質量移動速度であり、(4.18)のように定義されている。

$$\begin{aligned} \dot{m}_{lv} &= coeff \times \alpha_l \rho_l \frac{(T_l - T_{sat})}{T_{sat}} & (T_l > T_{sat}) \\ \dot{m}_{vl} &= coeff \times \alpha_l \rho_l \frac{(T_l - T_{sat})}{T_{sat}} & (T_v < T_{sat}) \end{aligned} \quad (4.18)$$

T_{sat} は沸点をさし, $coeff$ はユーザーの入力する緩和時間である.
 ソルバーやスキーム等の設定を表 4.2.1 に示す.

表 4.2.1 数値解析設定

| | | |
|------------------------|----------------------|--------------------------|
| | Type | Pressure-Based |
| Solver | Velocity Formulation | Absolute |
| | Time | Transient |
| | Space | 2D Planar |
| | Scheme | SIMPLE |
| Spatial Discretization | Gradient | Least Squares Cell Based |
| | Pressure | PRESTO! |
| | Other | Second Order Upwind |

4.3. 物性値

4.3.1. 純物質の物性値

純水及びエタノールの物性値を **Fluent** 上で温度の多項式として入力した。その際、使用した式は昨年度の研究⁽⁶⁾にて物性値計算ソフト **REFPROP** を用いて求めたものを使用した。使用した物性値の多項式について下記する。(T:温度[K])

- 純水密度 ρ_w [kg/m³]

$$\begin{aligned}\rho_w = & -1.0007674810 \times 10^{-11}T^6 \\ & +2.0452418434 \times 10^{-8}T^5 \\ & -1.7462116572 \times 10^{-5}T^4 \\ & +7.9803846159 \times 10^{-3}T^3 \\ & -2.0636269109 \times 10T^2 \\ & +2.8669583685 \times 10^2T \\ & -1.5716794276 \times 10^4\end{aligned}\tag{4.19}$$

- 純水定圧比熱 Cp_w [J/kg·K]

$$\begin{aligned}Cp_w = & 3.2628031180 \times 10^{-10}T^6 \\ & -6.6499955724 \times 10^{-7}T^5 \\ & +5.6502534282 \times 10^{-4}T^4 \\ & -2.5617243361 \times 10^{-1}T^3 \\ & +6.5370426091 \times 10T^2 \\ & -8.9034393673 \times 10^3T \\ & +5.0991509612 \times 10^5\end{aligned}\tag{4.20}$$

- 純水熱伝達率 h_w [W/(m·K)]

$$\begin{aligned}Tc_w = & -5.022683984 \times 10^{-14}T^6 \\ & +1.0226243221 \times 10^{-10}T^5 \\ & -8.6793535798 \times 10^{-8}T^4 \\ & +3.9323623472 \times 10^{-5}T^3 \\ & -1.0043097430 \times 10^{-2}T^2 \\ & +1.3744503807T \\ & -7.8439382418 \times 10\end{aligned}\tag{4.21}$$

- 純水粘度 μ_w [kg/(m·s)]

$$\begin{aligned}\mu_w = & 4.5618297861 \times 10^{-15}T^6 \\ & -9.2298194951 \times 10^{-12}T^5 \\ & + 7.7830730757 \times 10^{-9}T^4 \\ & -3.5022427019 \times 10^{-6}T^3 \\ & + 8.8728850016 \times 10^{-4}T^2 \\ & - 1.2006212594 \times 10^{-1}T \\ & + 6.7840748612\end{aligned}\quad (4.22)$$

- エタノール密度 ρ_{et} [kg/m³]

$$\begin{aligned}\rho_w = & -3.9124172652 \times 10^{-13}T^6 \\ & +6.4247753818 \times 10^{-10}T^5 \\ & -4.5657320393 \times 10^{-7}T^4 \\ & +1.7357288093 \times 10^{-4}T^3 \\ & -3.6158128833 \times 10^{-2}T^2 \\ & +2.9620411238 \times 10T \\ & +8.8492966048 \times 10^2\end{aligned}\quad (4.23)$$

- エタノール定圧比熱 Cp_{et} [J/kg·K]

$$\begin{aligned}Cp_{et} = & 5.1509029680 \times 10^{-11}T^6 \\ & -8.4075602653 \times 10^{-8}T^5 \\ & +5.5744084226 \times 10^{-5}T^4 \\ & -1.9082338620 \times 10^{-2}T^3 \\ & +3.5441293360 \times 10T^2 \\ & -3.3258444535 \times 10^2T \\ & +1.3702495689 \times 10^4\end{aligned}\quad (4.24)$$

- エタノール熱伝達率 h_{et} [W/(m·K)]

$$\begin{aligned}h_{et} = & -1.4105656611 \times 10^{-15}T^6 \\ & +2.6795432226 \times 10^{-12}T^5 \\ & -2.1114103872 \times 10^{-9}T^4 \\ & +8.7887670614 \times 10^{-7}T^3 \\ & -2.0223631826 \times 10^{-4}T^2 \\ & +2.3928087112 \times 10^{-2}T \\ & -9.2425642945 \times 10^{-1}\end{aligned}\quad (4.25)$$

- エタノール粘度 μ_{et} [kg/(m·s)]

$$\begin{aligned}\mu_{et} = & 6.6418244732 \times 10^{-16}T^6 \\ & - 1.3459000716 \times 10^{-12}T^5 \\ & + 1.1427639802 \times 10^{-9}T^4 \\ & - 5.2108971389 \times 10^{-7}T^3 \\ & + 1.3482951559 \times 10^{-4}T^2 \\ & - 1.8816803540 \times 10^{-2}T \\ & + 1.1108113940\end{aligned}\quad (4.26)$$

- 物質拡散係数

Fluent のデフォルト値のオーダーを変更した値を用いた。オーダーはエタノールと水の混合物系において一般的なオーダーとした。実際の現象においても物質拡散係数の影響は小さいため、厳密な値を与える必要はなく、値を決定した。

$$D = 2.88 \times 10^{-9}[\text{m}^2/\text{s}] \quad (4.27)$$

水蒸気の物性値は定数とし、空気の物性値は密度を非圧縮理想気体とし、他は定数とした。また、その値は Fluent データベース上のデフォルト値を使用した。

4.3.2. 混合物の物性値

混合物での物性値は、前述した 2 種類の純物質の物性値を後述する式を用いて算出されるよう Mixture Material を設定した。

- 密度[kg/m³] 体重重み付け平均(Volume-Weight-Mixing-Low)

$$\rho = \frac{1}{\sum_i \frac{Y_i}{\rho_i}} \quad (4.28)$$

- 定圧比熱[J/(kg·K)] 混合平均(Mixing-Low)

$$Cp = \sum_i Y_i Cp_i \quad (4.29)$$

- 熱伝達率[W/(m·K)] 質量重み付け平均(Mass-Weight-Mixing-Low)

$$k = \sum_i Y_i k_i \quad (4.30)$$

- 粘度[kg/(m·s)] 質量重み付き平均(Mass-Weight-Mixing-Low)

$$\mu = \sum_i Y_i \mu_i \quad (4.31)$$

4.4. 境界条件

4.4.1. Model1 の境界条件

ここでの境界条件は昨年度と同様の条件⁽⁶⁾を使用した。図 4.4.1 に示すように Model1 の境界名を定めた。その際の境界条件を表 4.4.1 に示す。液表面を再現するため、Upper Wall はスリップ壁とし、蒸発による熱移動は簡易的に定数を与えた。初期段階として熱対流が簡易的なものとなるよう Bottom Wall は断熱壁とし、底面方向からの熱侵入はない場合の現象を解析する。Heat Wall はヒーターから模擬液体に与えられた熱量を再現するため、ヒーターに印加した電力量とヒーターが銅板に与えた熱量の算出の差分を値として与えた。

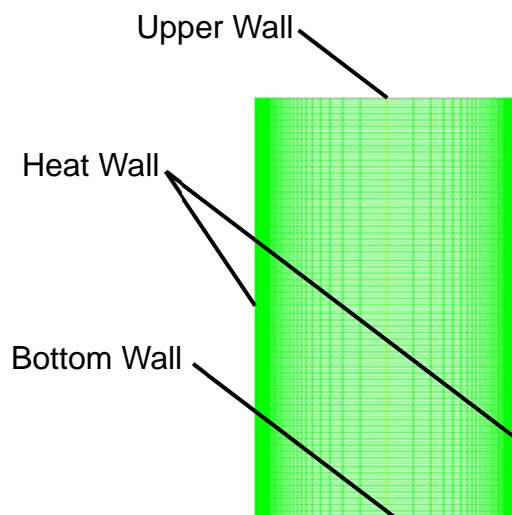


図 4.4.1 Model1 の境界名

表 4.4.1 Model1 の境界条件

| Name | Type | Condition |
|-------------|------|--|
| Upper Wall | wall | Slip Heat Flux: -50,-100[W/m ²] |
| Heat Wall | wall | No Slip Heat Flux: 1256[W/m ²] |
| Bottom Wall | wall | No Slip Heat Flux: 0[W/m ²] |

4.4.2. Model2 の境界条件

図 4.4.2 に示すように Model2 の境界名を定めた. その際の境界条件を表 4.4.2 に示す. Upper Wall_l は前節の Upper Wall と同様の条件とし, Upper Wall_s は断熱壁とした. Bottom Wall は前節同様に断熱壁とし, Heat Wall は銅板もモデル化しているためヒーターに印加した電力量を熱流束として与えた. 固体領域と液領域の境界は, 連成させるように条件設定を行った.

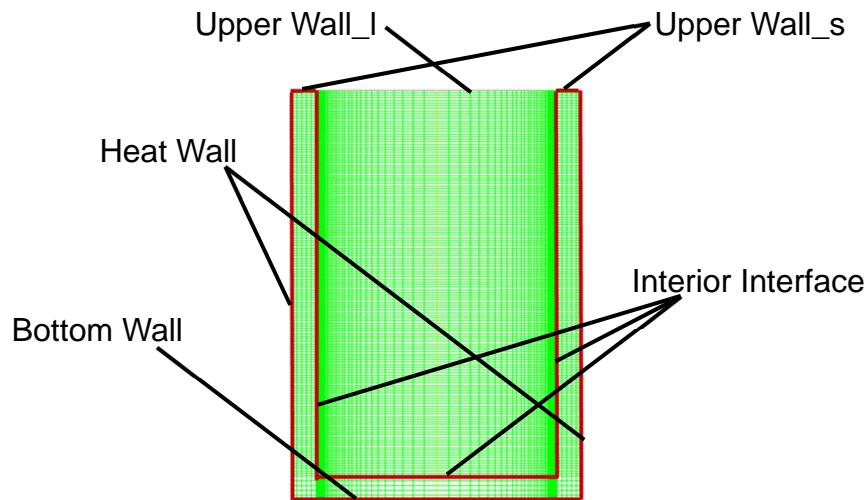


図 4.4.2 Model2 の境界名

表 4.4.2 Model2 の境界条件

| Name | Type | Condition |
|--------------------|------|--|
| Upper Wall_l | wall | Slip Heat Flux: -50,-100[W/m ²] |
| Upper Wall_s | wall | No Slip Heat Flux: 0[W/m ²] |
| Heat Wall | wall | No Slip Heat Flux: 1800[W/m ²] |
| Bottom Wall | wall | No Slip Heat Flux: 0[W/m ²] |
| Interior Interface | wall | No Slip Coupled |

4.4.3. Model3 の境界条件

境界名については4.4.1節と同様にした. この際の境界条件を表 4.4.3に示す. Bottom Wall を高さ 0[mm], Upper Wall を高さ 200[mm]とする. 実際のタンクは上面に壁がなく大気解放されているため, 上面は室温であると考えられる. そのため, Upper Wall は温度が 293[K]となる等温壁に設定した. Bottom Wall は断熱壁とし, Heat Wall は気体領域には入熱せず, 液領域にのみ入熱するよう熱分布を持たせた.

4.4.4. Lee モデル使用時の境界条件

相変化のモデル検討として, まずは簡易的である Lee モデルを用いた. その際のメッシュモデルは Model1 を使用し, Heat Wall の入熱を 15000[W/m²]とし, Upper Wall は断熱壁とした. それ以外は 4.4.1 節と同様である.

表 4.4.3 Model3 の境界条件

| Name | Type | Condition |
|-------------|------|---|
| Upper Wall | wall | Slip Temperature: 293[K] |
| Heat Wall | wall | No Slip Heat Flux:1256[W/m ²](Height0[mm]~160[mm]) Heat Flux:0[W/m ²] (Height160[mm]~200[mm]) |
| Bottom Wall | wall | No Slip Heat Flux: 0[W/m ²] |

4.4.5. Model4 の境界条件

図 4.4.3 に示すように Model4 の境界名を定めた。その際の境界条件を表 4.4.4 に示す。Upper Wall は 4.4.3 節と同様に等温壁とし，Bottom Wall も同様に断熱壁とした。Heat Wall は気液共に同じ熱量を与え，その値は 4.4.3 節と同様にした。気液界面の境界は，連成させるように条件設定を行った。

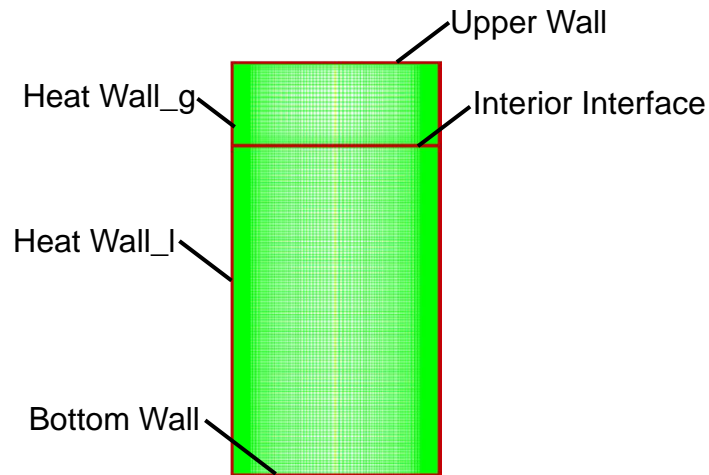


図 4.4.3 Model4 の境界名

表 4.4.4 Model4 の境界条件

| Name | Type | Condition |
|--------------------|------|---|
| Upper Wall | wall | Slip Temperature:293[K] |
| Heat Wall_l | wall | No Slip Heat Flux: 1256[W/m ²] |
| Heat Wall_g | wall | No Slip Heat Flux: 1256[W/m ²] |
| Bottom Wall | wall | No Slip Heat Flux: 0[W/m ²] |
| Interior Interface | wall | Slip Coupled |

4.5. 初期条件

4.5.1. Model1 および Model2 の初期条件

Bottom Wall を高さ 0[mm], Upper Wall を高さ 160[mm]とする。初期条件は実験開始時の条件を再現するため、初期温度 293[K]とし、流速・圧力は 0 とした。0[mm]から 80[mm]の領域ではエタノールの質量分率を 0.54, 80[mm]から 160[mm]の領域ではエタノールの質量分率 0.8 の混合液となるよう設定した。

4.5.2. Model3 の初期条件

Bottom Wall を高さ 0[mm], Upper Wall を高さ 200[mm]とする。初期条件は初期温度 293[K], 圧力・流速は 0 とした。0[mm]から 80[mm]の領域ではエタノールの質量分率 0.54, 80[mm]から 160[mm]の領域ではエタノールの質量分率 0.8 の混合液となるよう設定し、160[mm]から 200[mm]の領域では純物質の水蒸気となるよう設定した。

4.5.3. Lee モデル使用時の初期条件

初期液温を 293K とし、全領域を水として設定した。また、相変化の緩和時間を 0.1, 沸点を 373.15K とした。

4.5.4. Model4 の初期条件

Bottom Wall を高さ 0[mm], Upper Wall を高さ 200[mm]とする。初期条件は初期温度 293[K], 圧力・流速は 0 とした。0[mm]から 80[mm]の領域ではエタノールの質量分率 0.54, 80[mm]から 160[mm]の領域ではエタノールの質量分率 0.8 の混合液となるよう設定し、160[mm]から 200[mm]の領域では純物質の空気となるよう設定した。

第5章 研究結果及び考察

5.1. 実験結果

5.1.1. 鉛直方向温度分布計測実験結果

図 5.1.1 に 300[s]毎の鉛直方向温度分布の計測結果を示す. 80[mm]より上と下でそれぞれ層ができており, 上層と下層の層状化が確認できる. 上層では温度成層が形成されているが, 下層では高さ 0[mm]から 10[mm]での温度下降があり, 高さ 10[mm]以上で温度成層が形成されている. LNG タンク内における層状化および上層における温度成層の形成は模擬できていると言える.

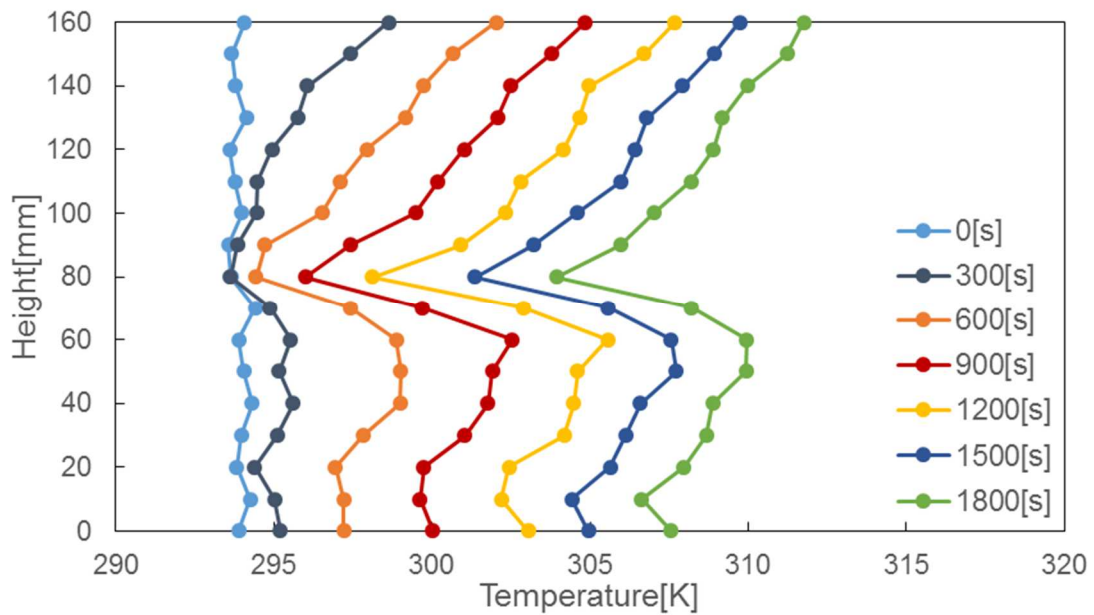


図 5.1.1 鉛直方向温度分布計測実験結果

5.1.2. 気液界面の水平方向温度分布計測実験結果

まず，図 5.1.2 に示すような面を測定面として選んだ．次に 300[s]毎の放射温度計による計測結果を図 5.1.3 に示す．1200[s]後では二次元性がほぼなくなっているがその後の加熱によって徐々に二次元性を取り戻し，2100[s]後ではほぼ二次元的に分布していることが確認できる．そのため，加熱によって二次元的に分布しており，断熱性の悪いアクリル板でも十分に断熱化できることがわかった．そのため，熱移動は側面のヒーターによるものが支配的となり，サブスケールタンク内における二次元性は保たれていると考えられる．温度が二次元的に分布するため二次元解析の妥当性が実証された．



図 5.1.2 測定面の例

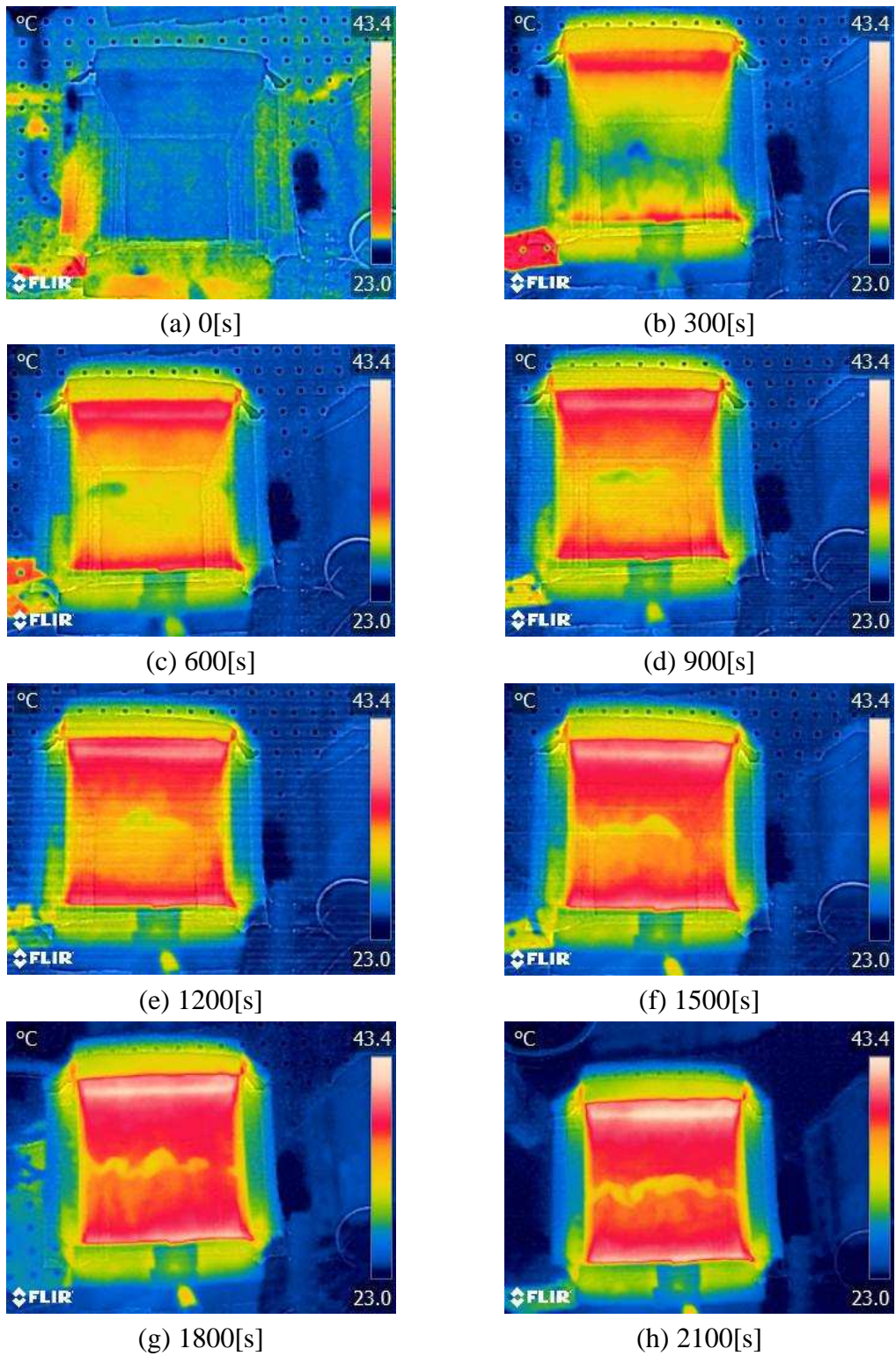


図 5.1.3 水平方向温度分布計測実験結果

5.1.3. 密度場可視化実験結果

密度場可視化の測定点及びその範囲を図 5.1.4 に示す. ①から③は上層の測定点, ④から⑥は下層の測定点となっている. ①は気液界面の中心, ②は気液界面の側板近傍, ③は層境界の側板近傍, ④は上層境界の中心, ⑤は下層境界の側板近傍, ⑥は側底板近傍である. ここで各境界等を図 5.1.4 に示す. 混合層は実験において液注入時に上層と下層が混合して形成された層であり, エタノール濃度が上層以下下層以上にある層の事を指す.

次に, ①~⑥におけるそれぞれの 300[s]毎の測定結果を図 5.1.5~図 5.1.10 に示す. 図 5.1.5 では中心に向かって液が移動し, 中心で衝突し下降及び壁面へ向かって移動する対流の様子が見られる. その際に密度層が形成されていくことが確認され, 時間経過によって密度層が大きくなっていくことがわかる. 図 5.1.6 では壁面から密度場が上昇し, それが気液界面近傍では中心に向かって移動する対流の様子が見られる. 中心から壁面へと密度場が移動することも確認でき, それに伴い層が形成される様子も見られる. 図 5.1.7 では混合層が形成されており, 下層との密度差が小さいため対流が下層境界を貫通し混合層が下層へと混合し縮小することが確認される. 1200[s]後で測定点に写る像がほぼなくなったため測定点を上へ移動させ上層境界近傍が写るようにした. その際時間経過によって上層の層境界が下降することが確認され, これは層境界を通じて物質移動が進むためと考えられる. 図 5.1.8 では下層でも中心で液が衝突し, 液が下降することが確認され, 対流が発生している. また, 対流によって混合層が中心から巻き込まれ, 時間経過によって全体に拡散する様子が見られる. また, 上層とは異なり対流が壁面へ移動する様子は確認できない. 図 5.1.9 では下層でも壁面から液が上昇する対流の様子が見られる. 図 5.1.10 では底板から液が上昇する様子が見られ, 底面からの入熱による対流があることがわかる.

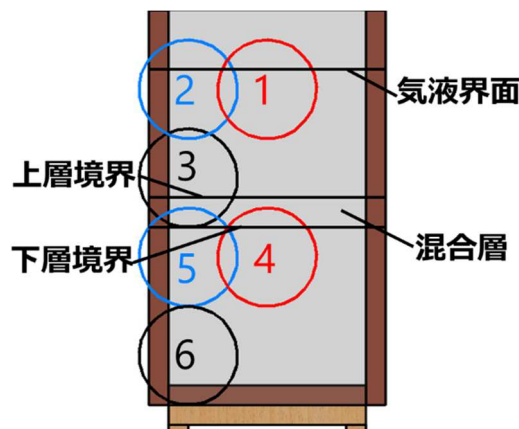


図 5.1.4 密度場可視化の測定点・測定範囲

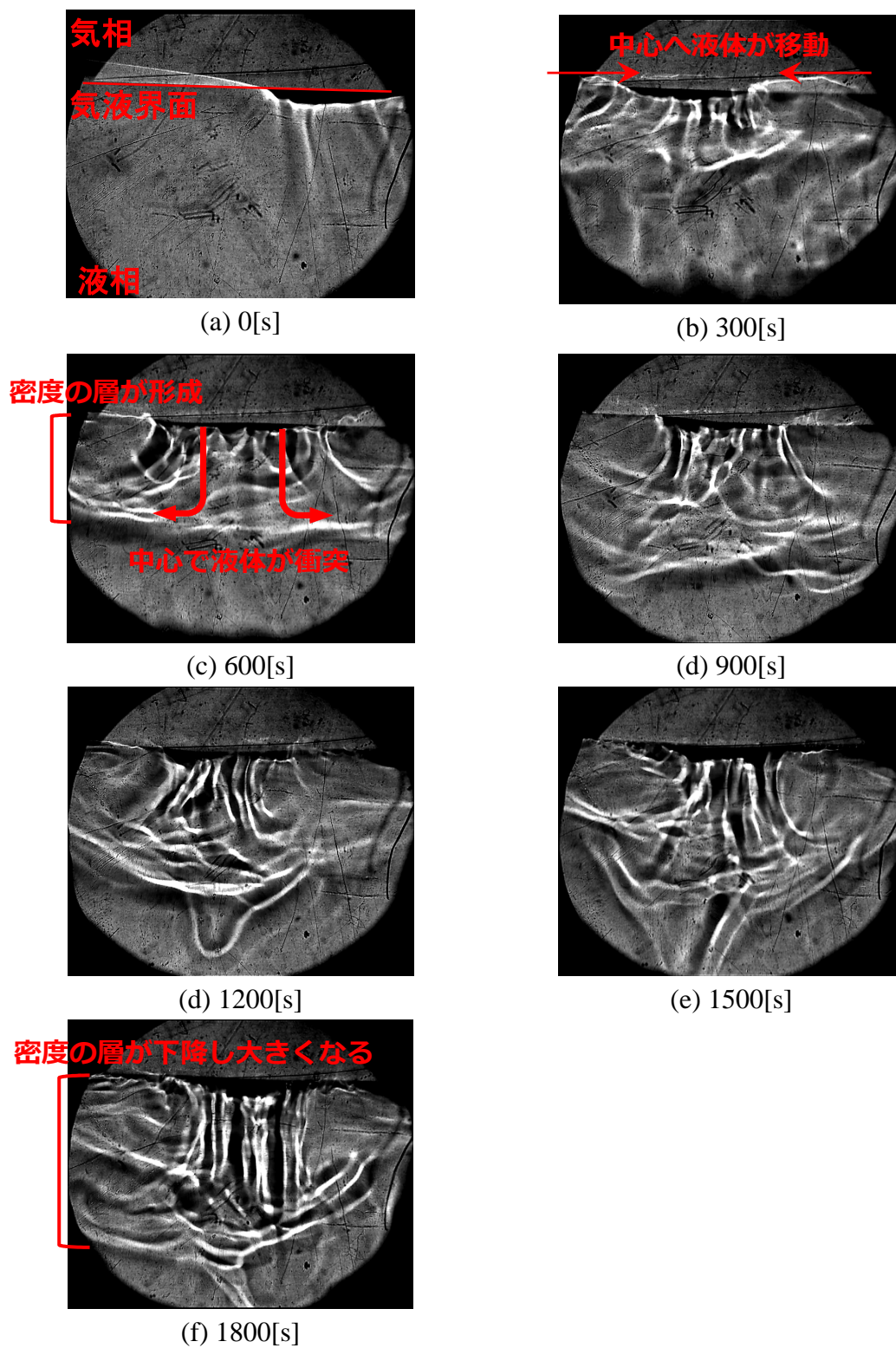


図 5.1.5 気液界面中心での密度場測定結果

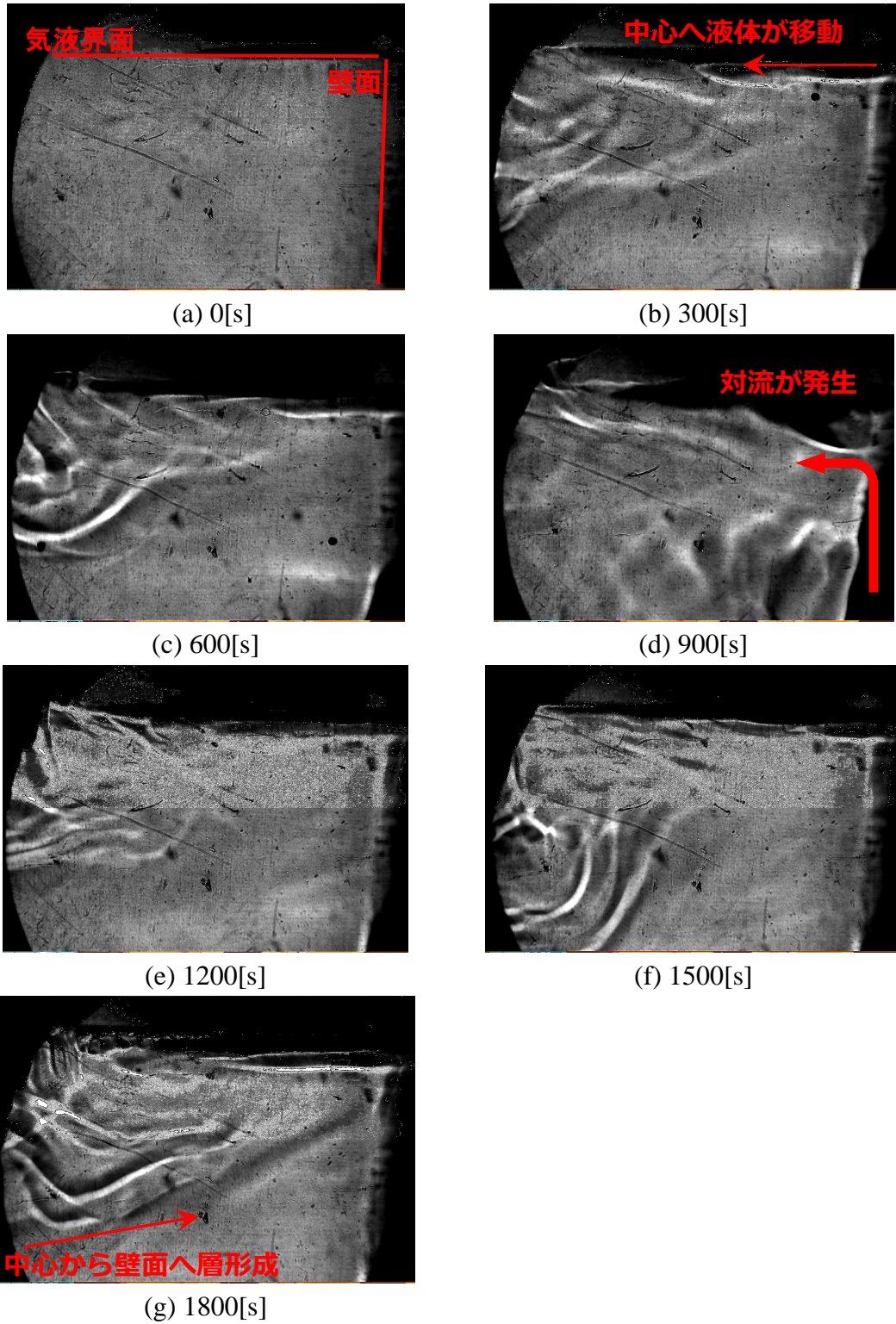


図 5.1.6 気液界面側板近傍の密度分布測定結果

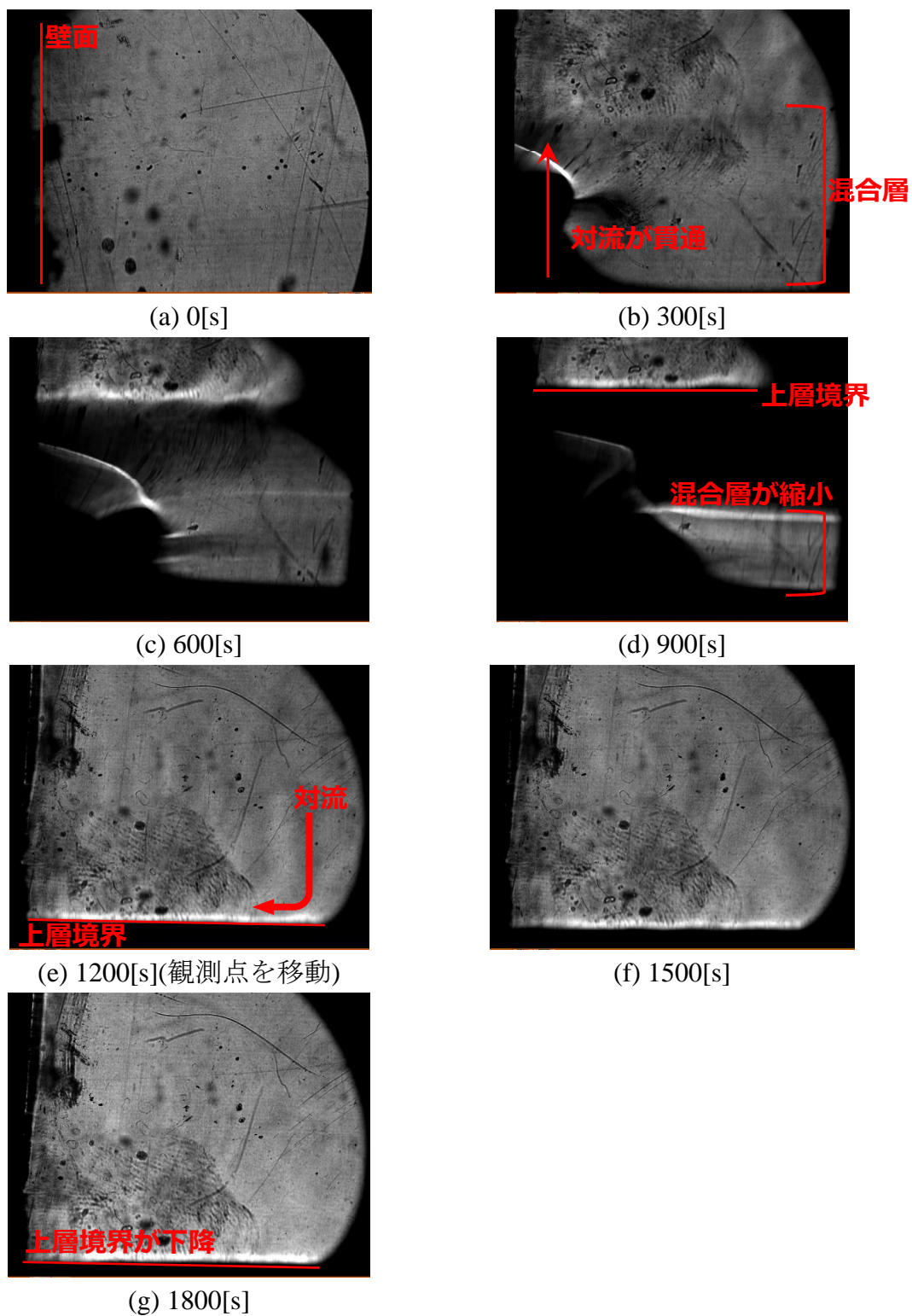


図 5.1.7 層境界側板近傍の密度分布測定結果

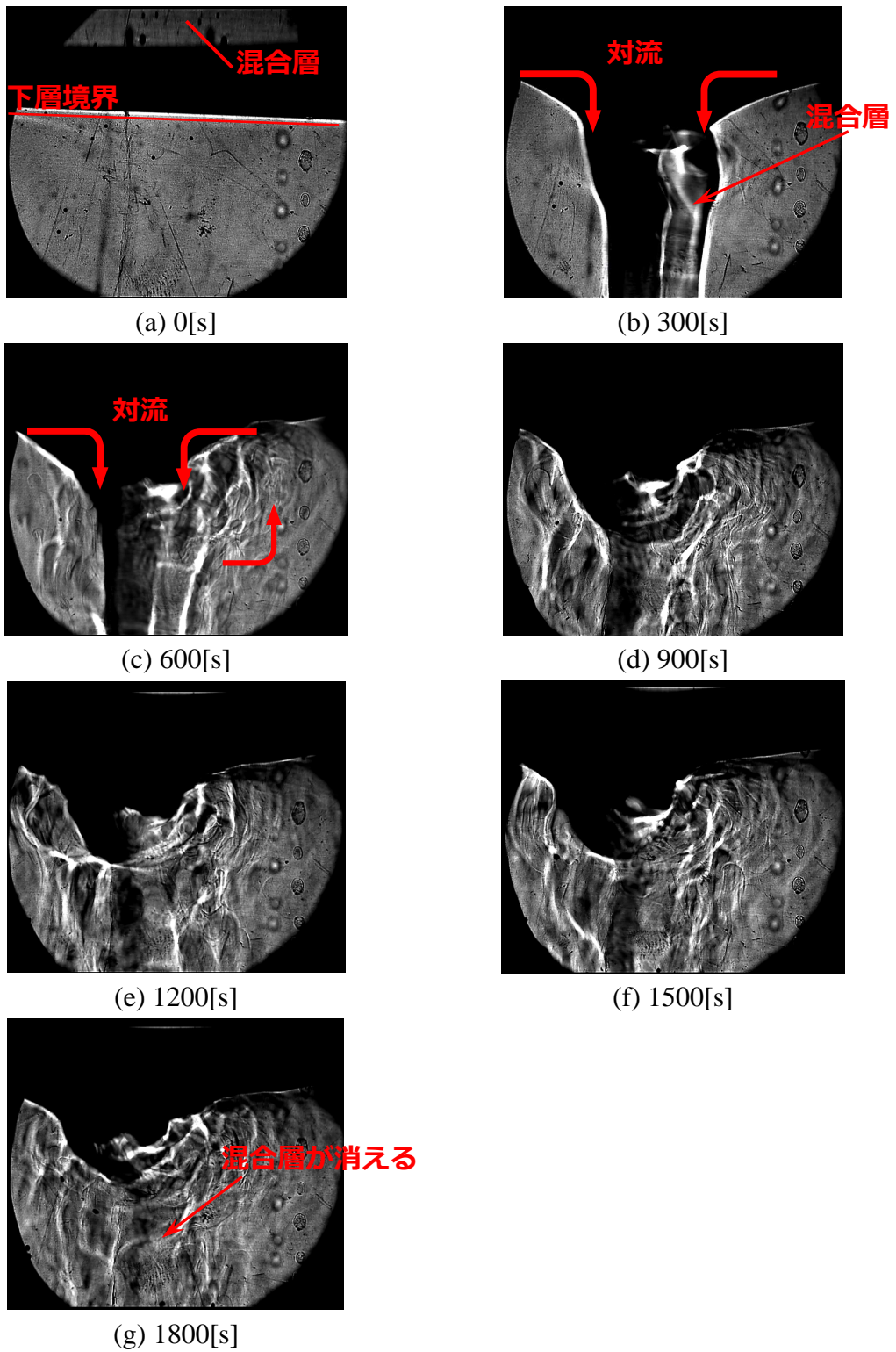


図 5.1.8 層境界中心の密度分布測定結果

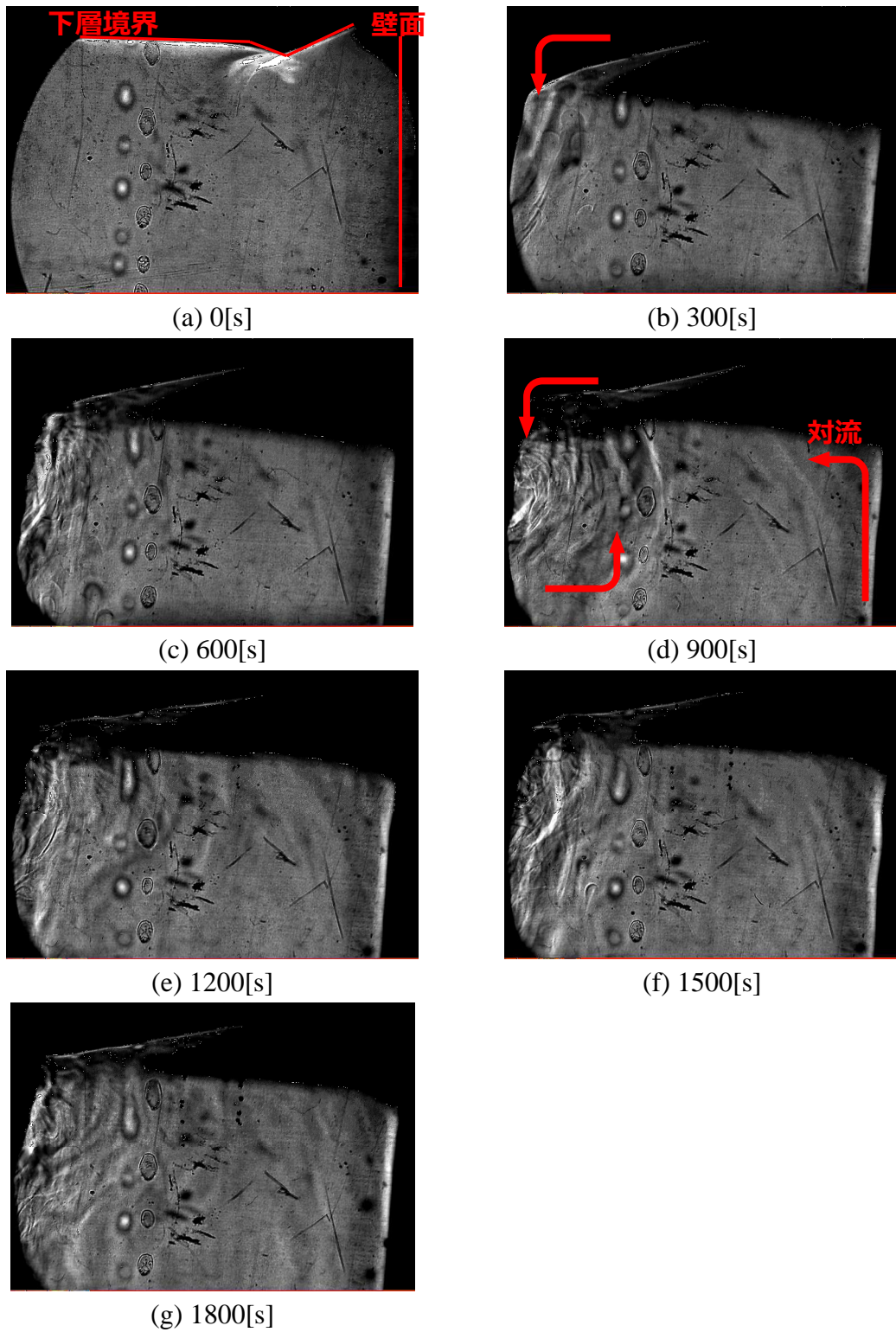


図 5.1.9 層境界側板近傍の密度分布測定結果

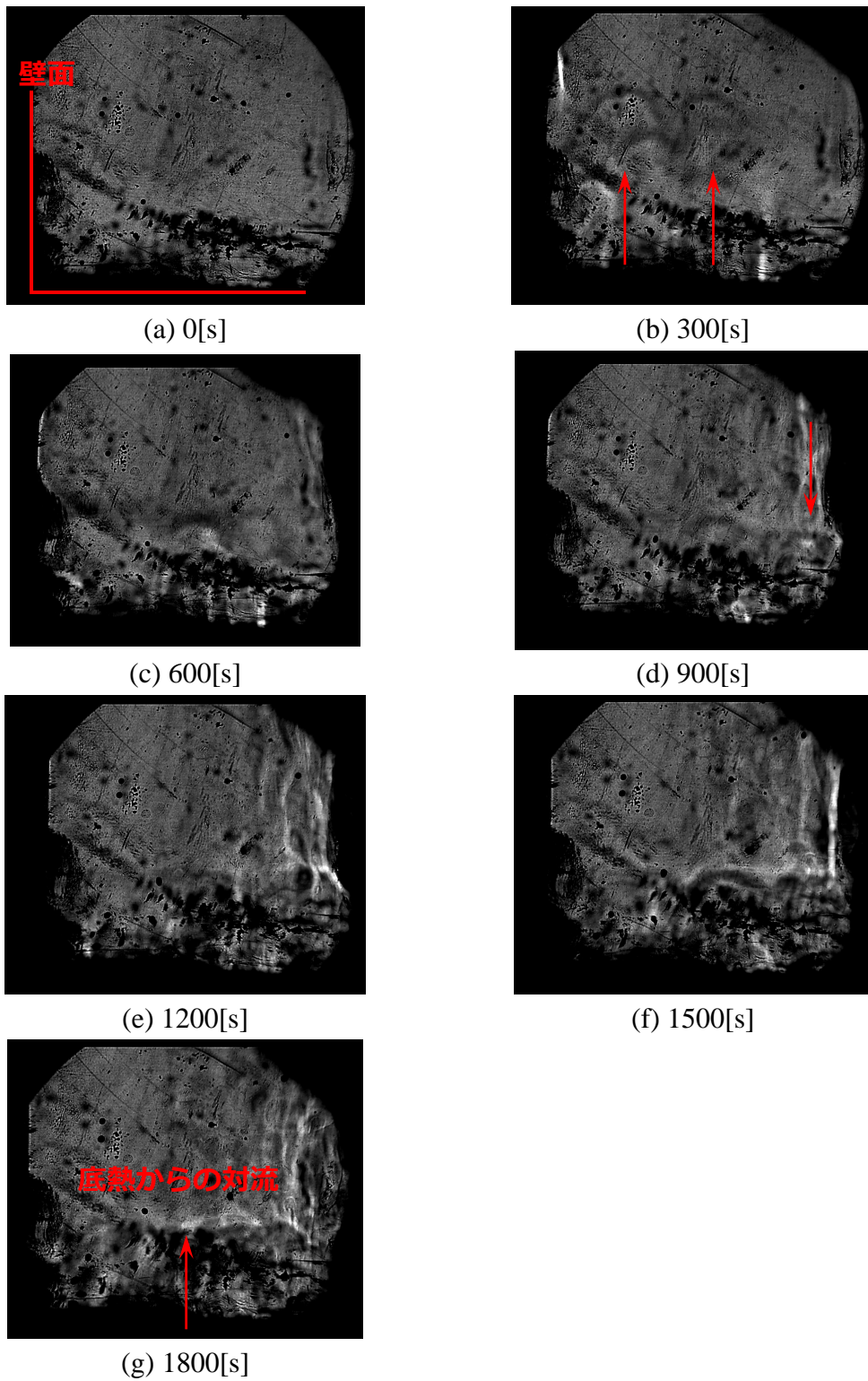


図 5.1.10 側底板近傍の密度分布測定結果

5.2. 解析結果

5.2.1. 液領域のみモデル(Model1)の解析結果

図 5.2.1~図 5.2.2 に上面の熱流束が $-50[\text{W}/\text{m}^2]$, $-100[\text{W}/\text{m}^2]$ でのタンク中心の鉛直方向温度分布の時間変化グラフを示す。

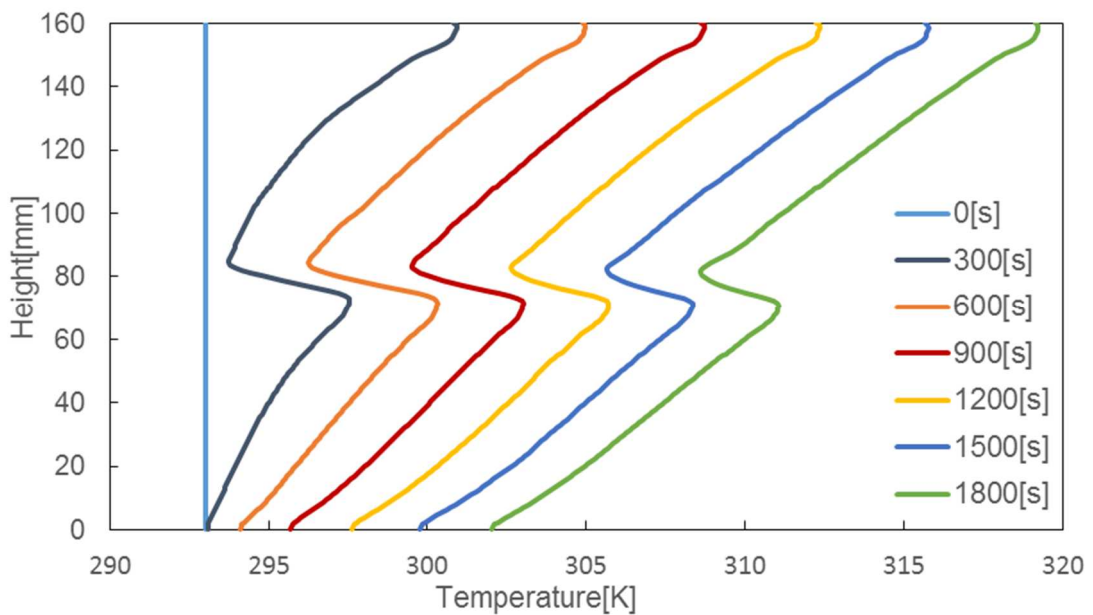


図 5.2.1 Model1 上面熱流束 $-50[\text{W}/\text{m}^2]$ 高さ-温度

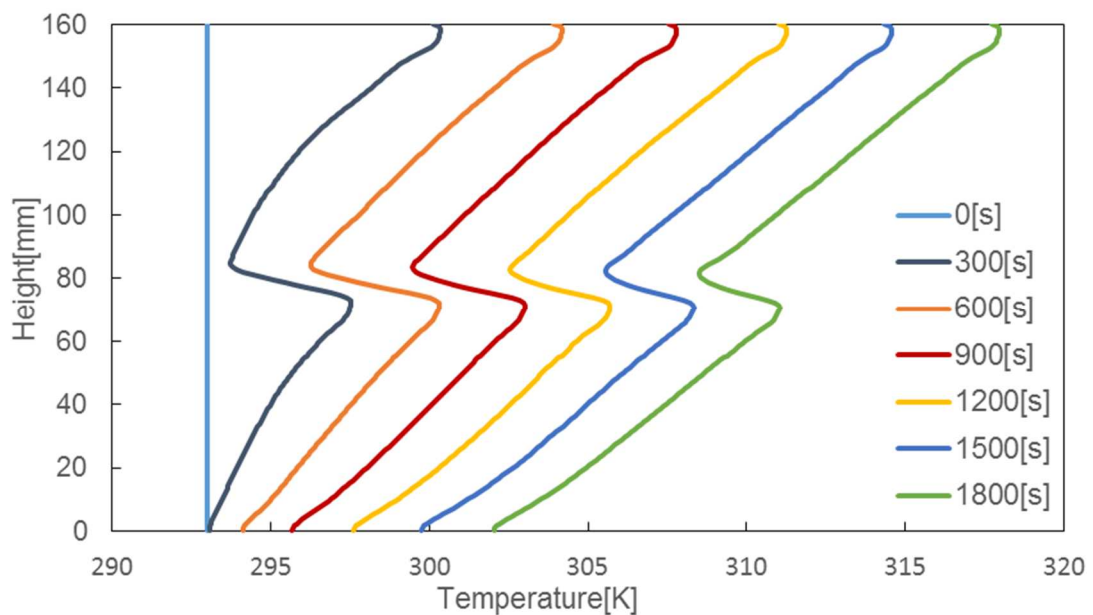


図 5.2.2 Model1 上面熱流束 $-100[\text{W}/\text{m}^2]$ 高さ-温度

図 5.2.1, 図 5.2.2 より, 上層, 下層ともにそれぞれ層毎に温度成層が形成されていることが確認できる. 二つの結果から上面熱流束により上層の温度に差が生まれ, 気液界面に近づくにつれ差が大きくなる. その様子を図 5.2.3 に示す.

各時間での温度分布図を図 5.2.4~図 5.2.9 に示す. (a)が上面の熱流束 $-50[\text{W}/\text{m}^2]$, (b)が上面の熱流束 $-100[\text{W}/\text{m}^2]$ での温度分布である.

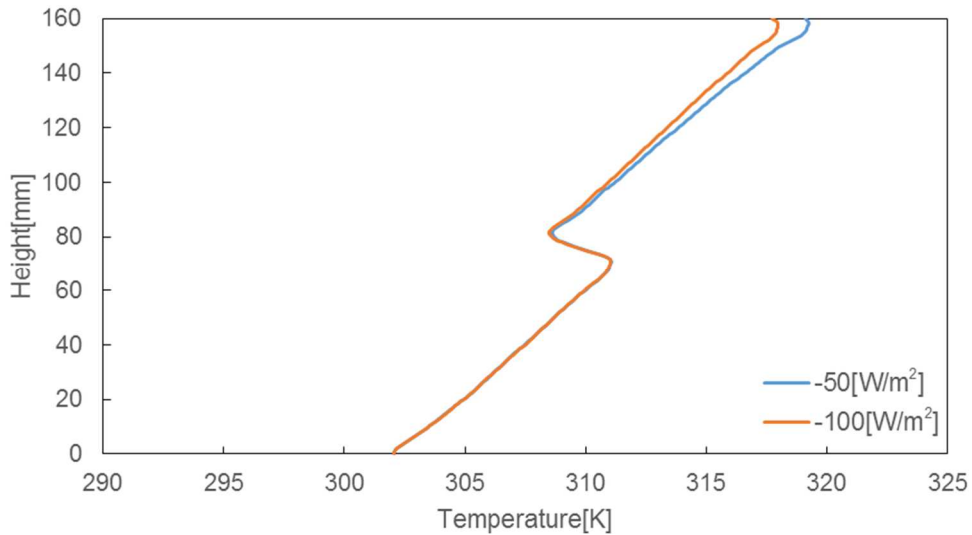
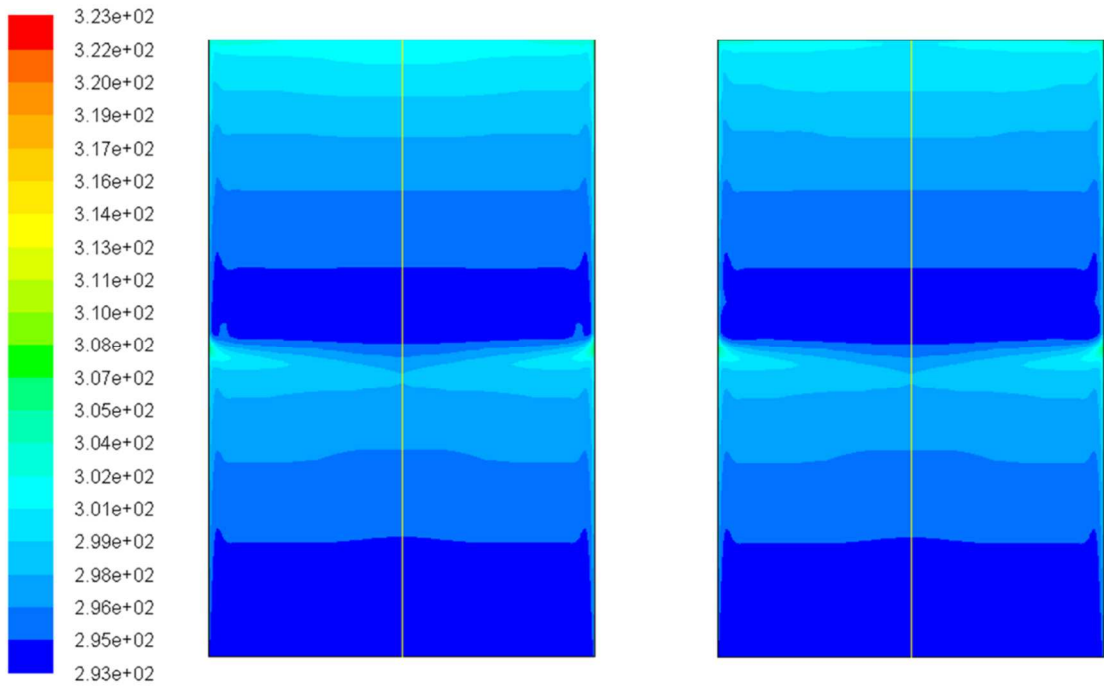


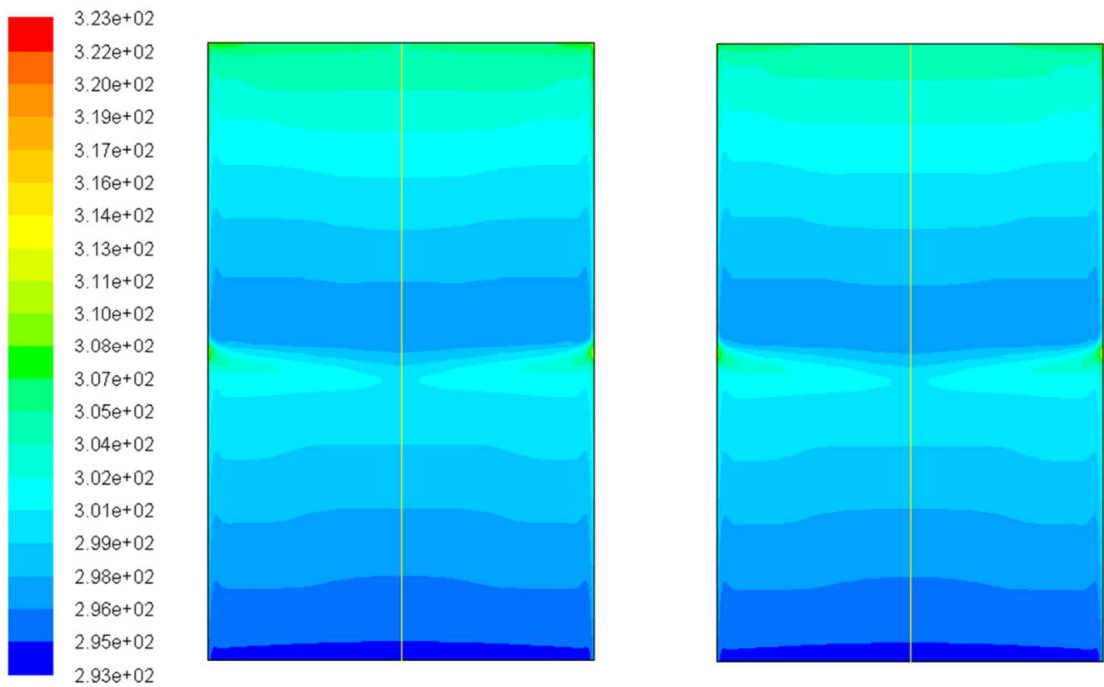
図 5.2.3 上面熱流束の比較 1800[s]後



(a) 上面熱流束 $-50[\text{W}/\text{m}^2]$

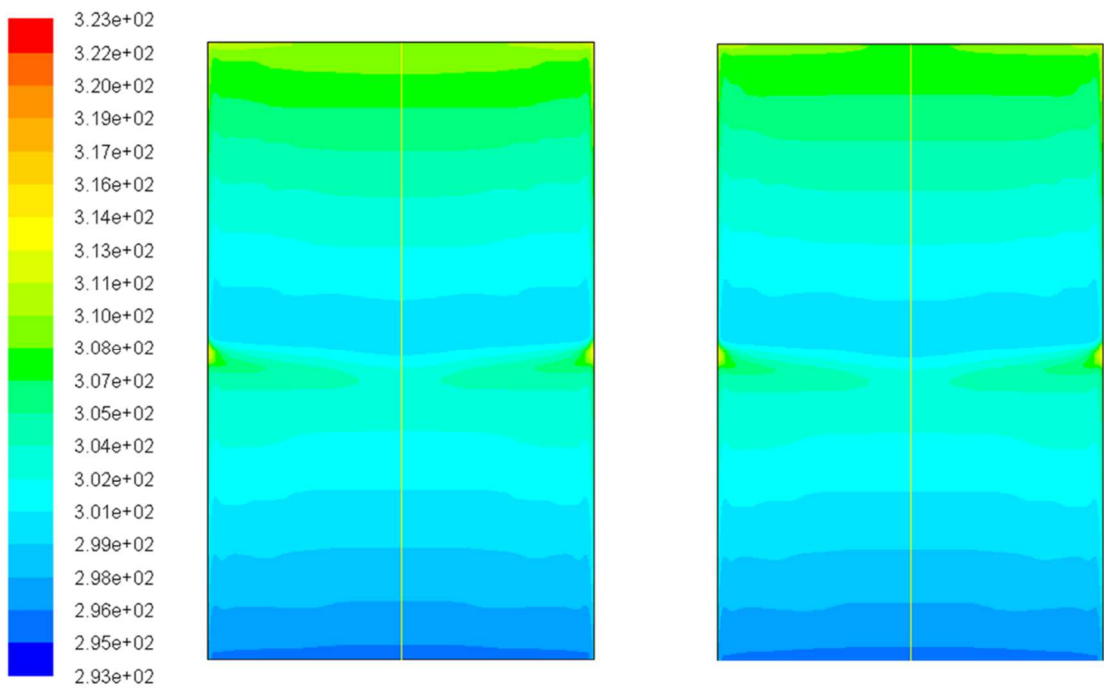
(b) 上面熱流束 $-100[\text{W}/\text{m}^2]$

図 5.2.4 温度分布図 300[s]後



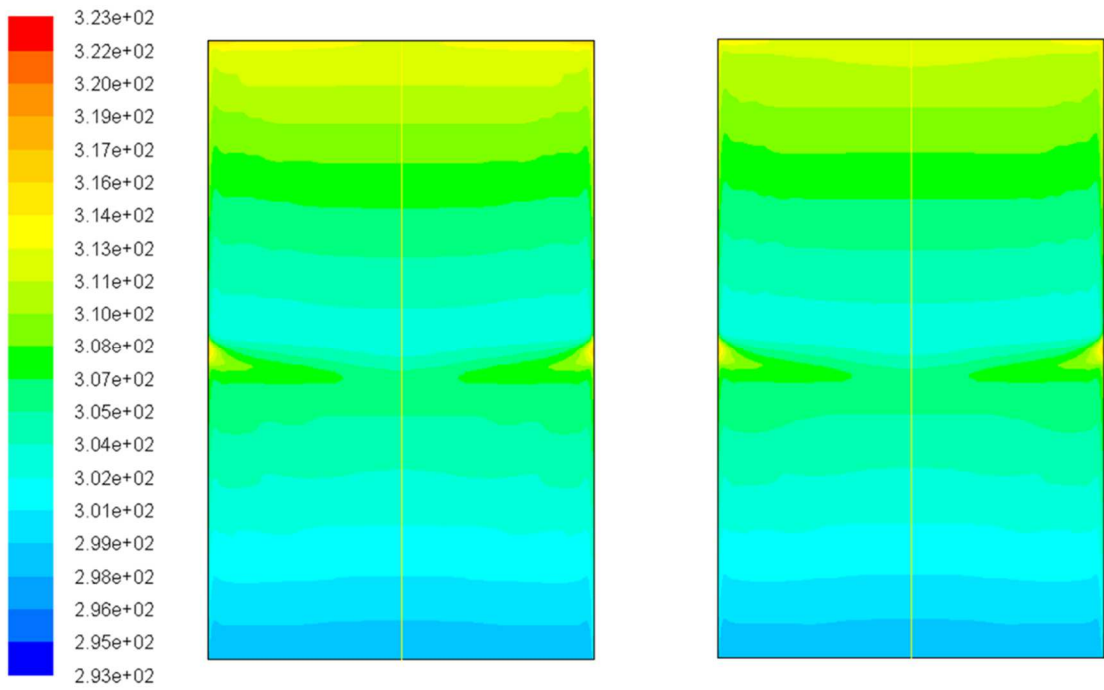
(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]

図 5.2.5 温度分布図 600[s]後



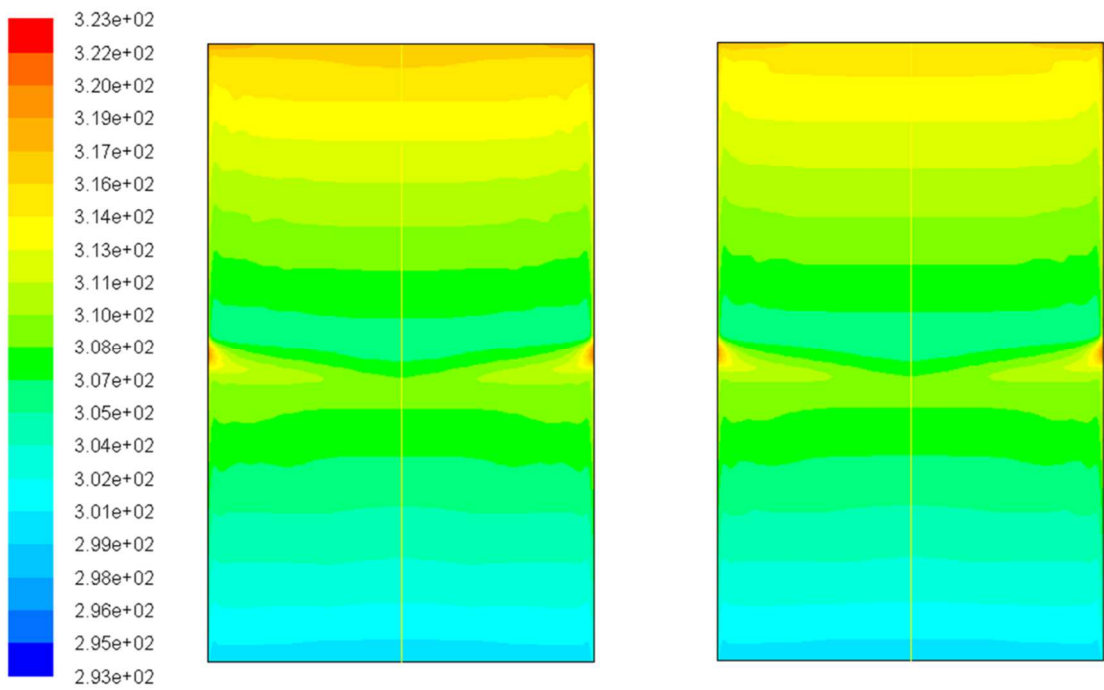
(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]

図 5.2.6 温度分布図 900[s]後



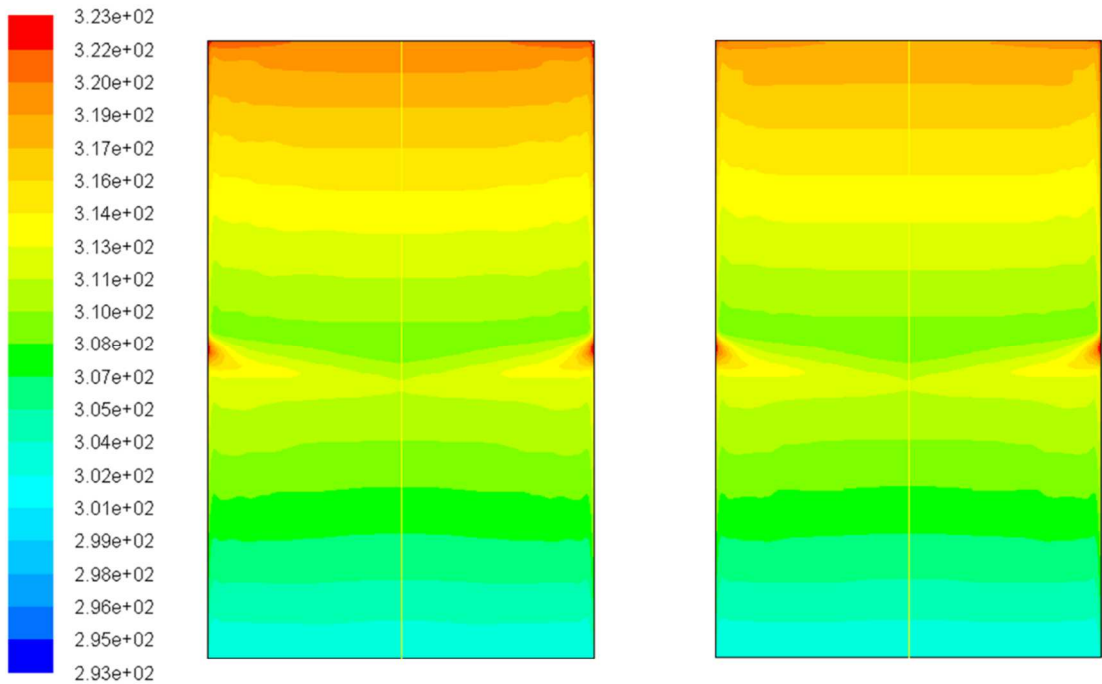
(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]

図 5.2.7 温度分布図 1200[s]後



(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]

図 5.2.8 温度分布図 1500[s]後

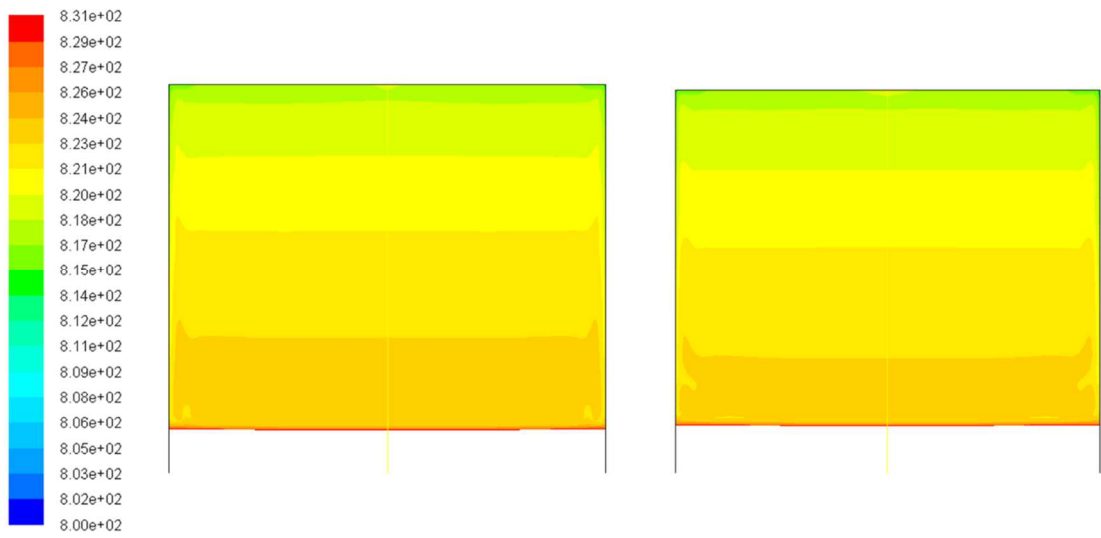


(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]

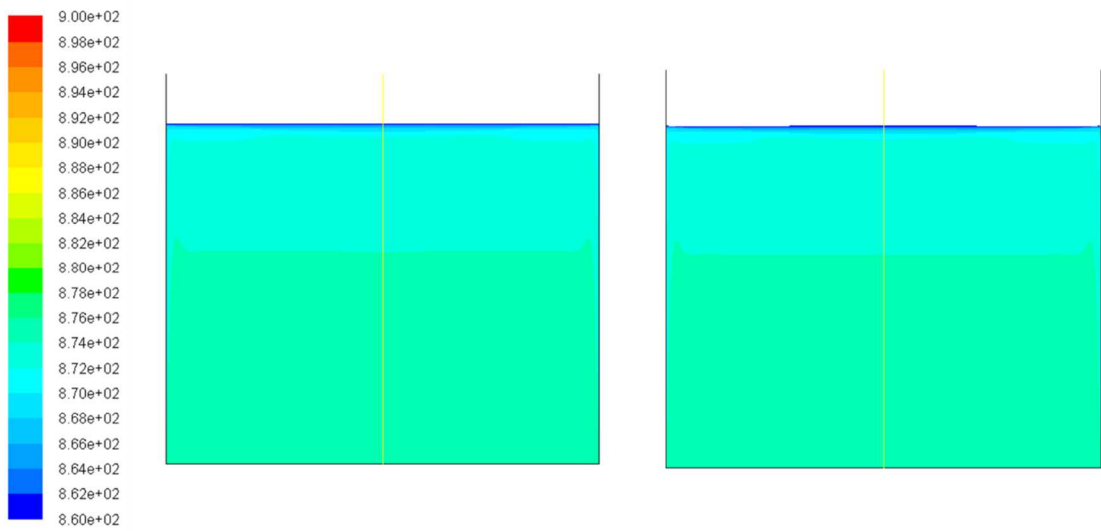
図 5.2.9 温度分布図 1800[s]後

分布図からもグラフ同様に上面熱流束が大きいほど上層の温度が低くなっていることが確認できる。

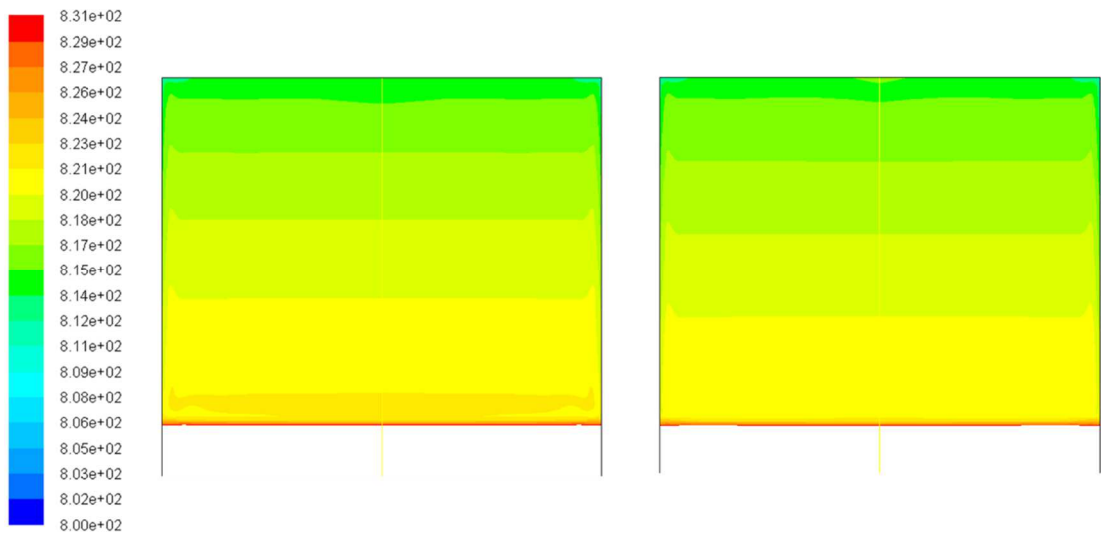
次に、密度分布図を図 5.2.4~図 5.2.15 に示す。先ほどと同様、(a)が上面の熱流束-50[W/m²]、(b)が上面の熱流束-100[W/m²]の場合である。上層と下層を同時に分布図にすると層内の密度分布に対し層間の密度差が大きく、密度成層が見られないため、カラーマップの密度範囲をより細かく取る。そのため、上層と下層を別々に分布図にする。



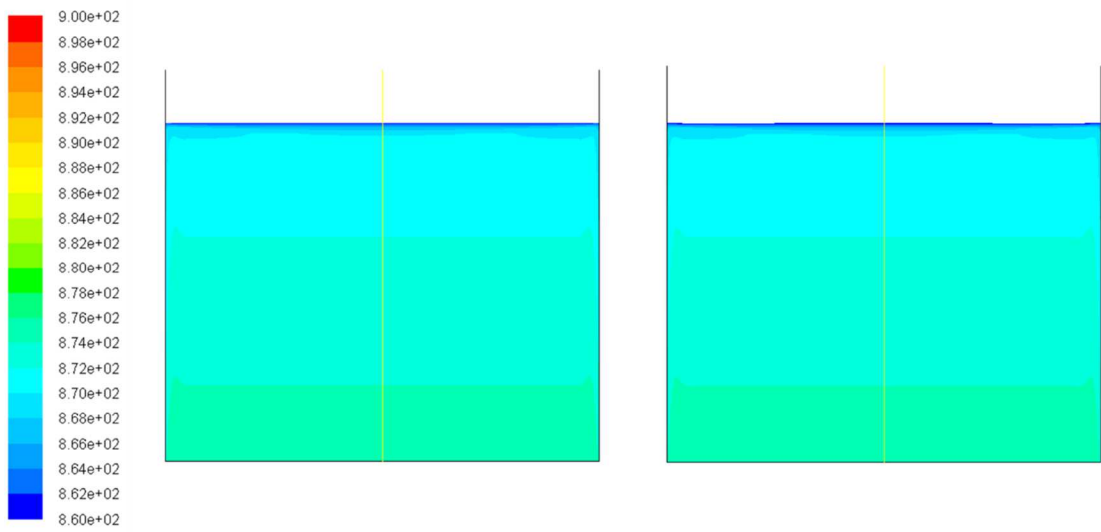
(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]
 図 5.2.10 上層密度分布図 300[s]後



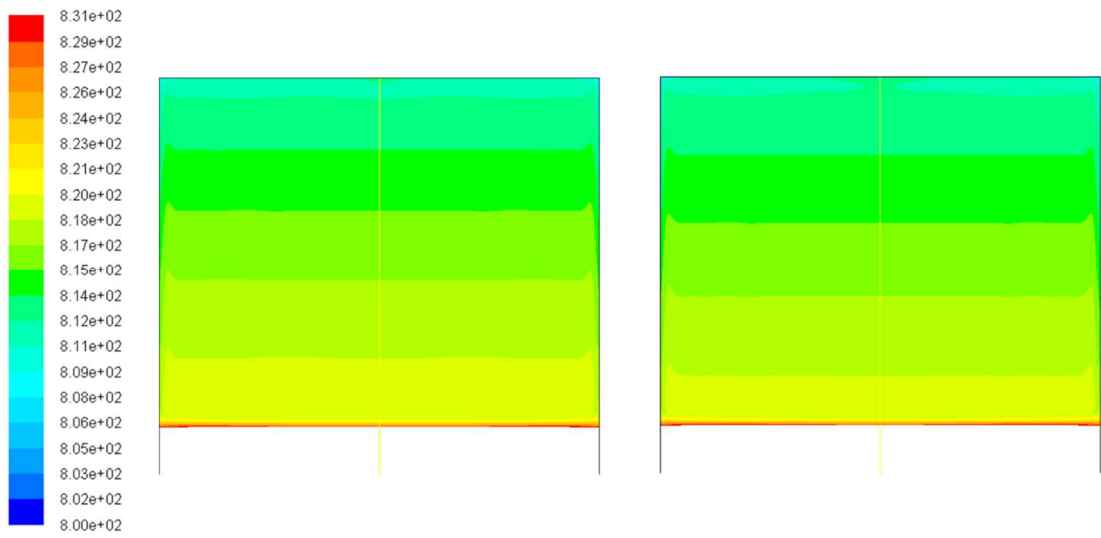
(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]
 図 5.2.11 下層密度分布図 300[s]後



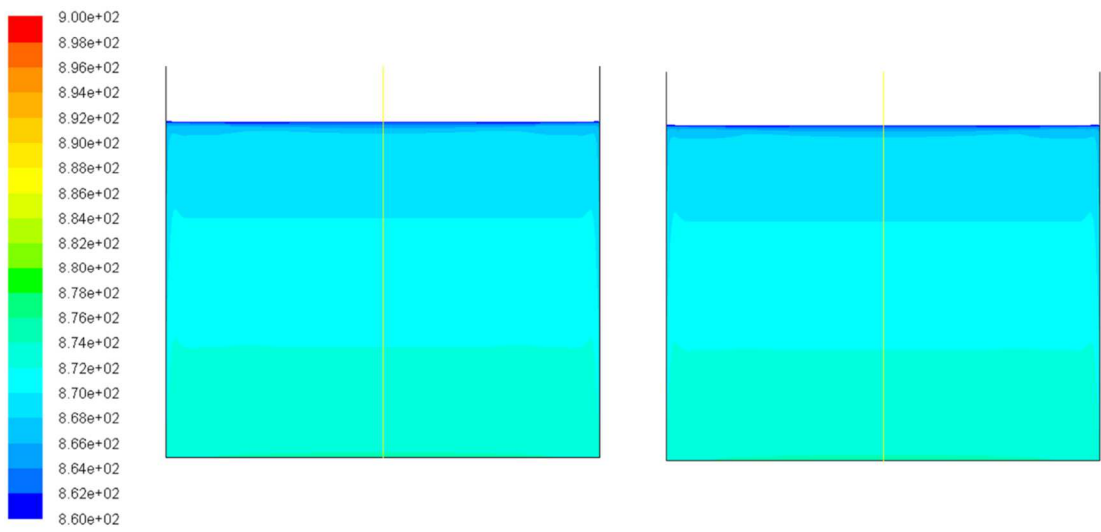
(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]
 図 5.2.12 上層密度分布図 600[s]後



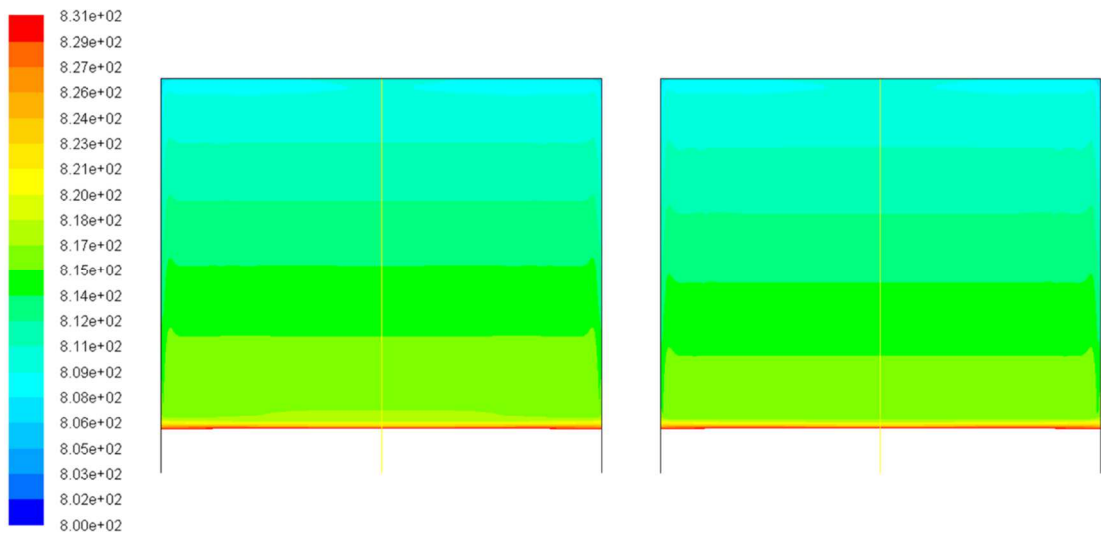
(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]
 図 5.2.13 下層密度分布図 600[s]後



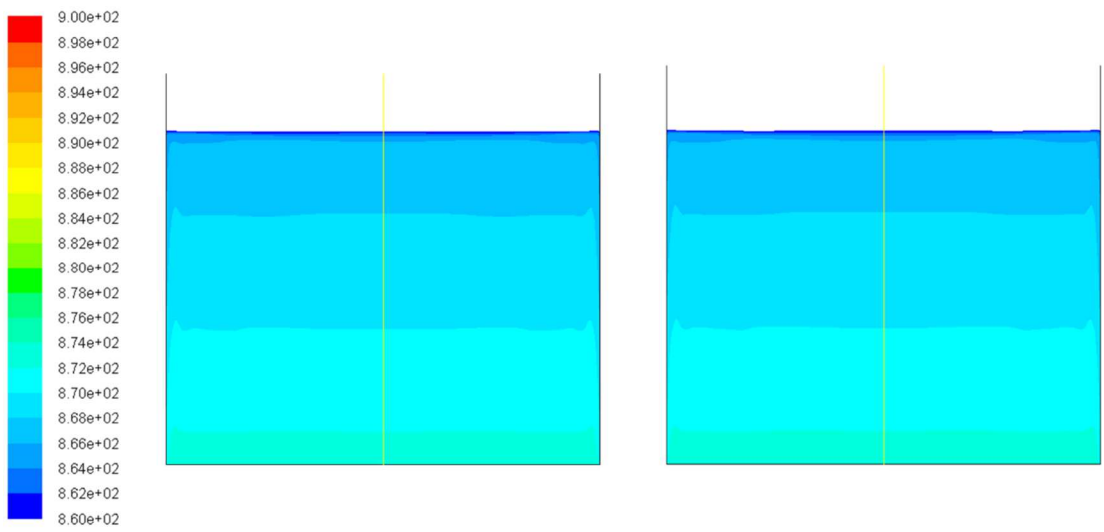
(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]
 図 5.2.14 上層密度分布図 900[s]後



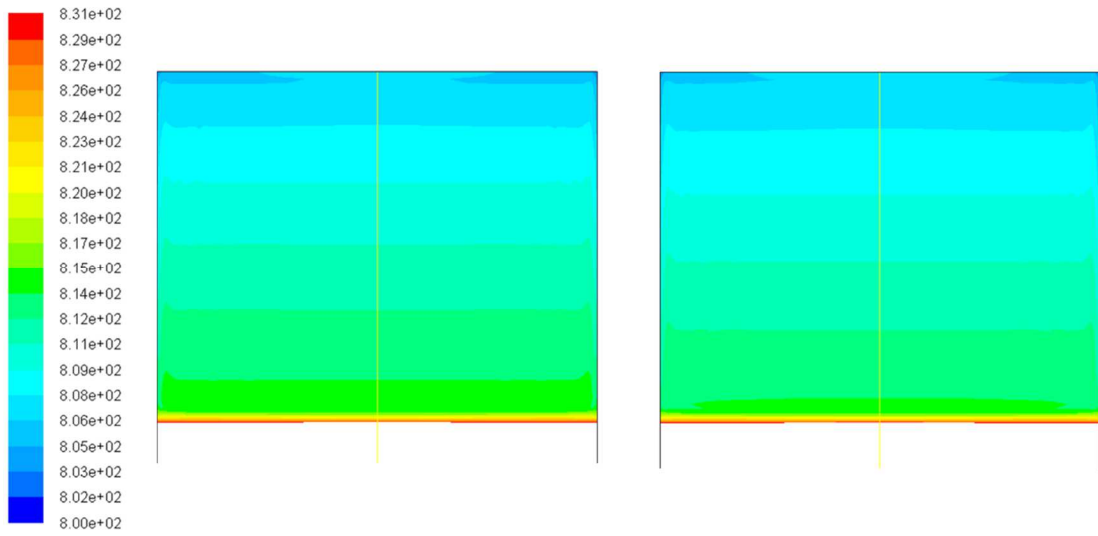
(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]
 図 5.2.15 下層密度分布図 900[s]後



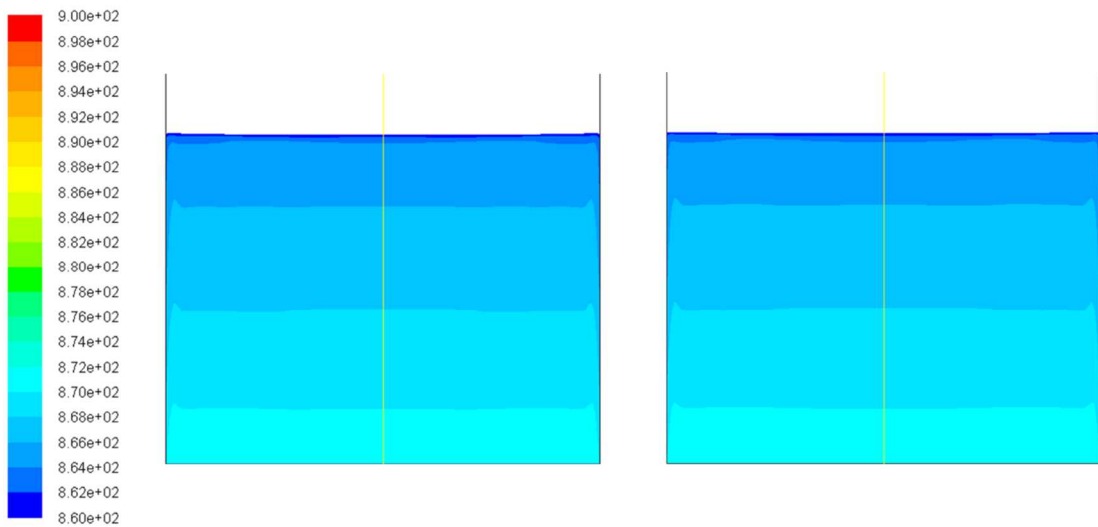
(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]
 図 5.2.16 上層密度分布図 1200[s]後



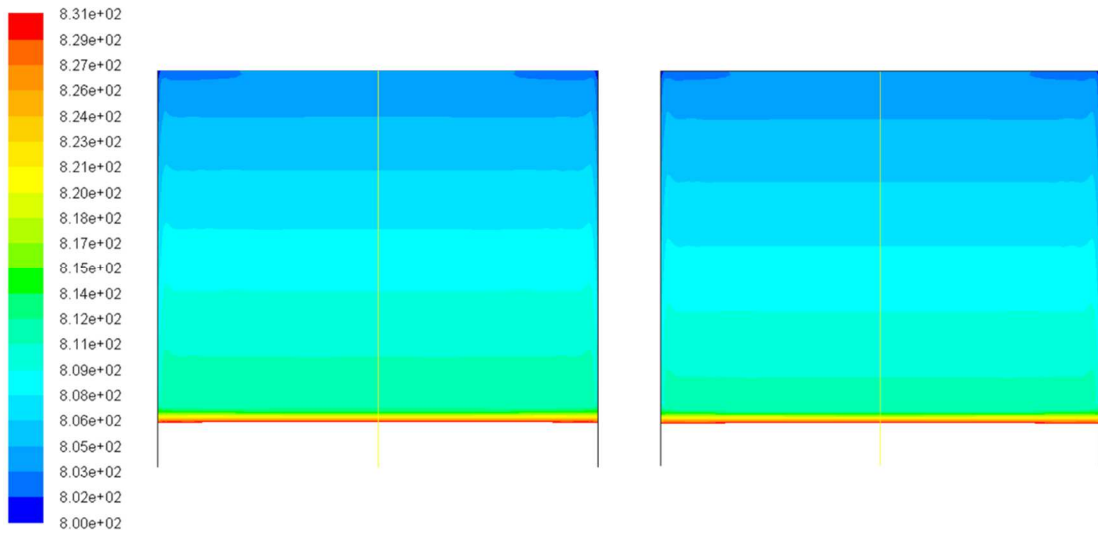
(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]
 図 5.2.17 下層密度分布図 1200[s]後



(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]
 図 5.2.18 上層密度分布図 1500[s]後

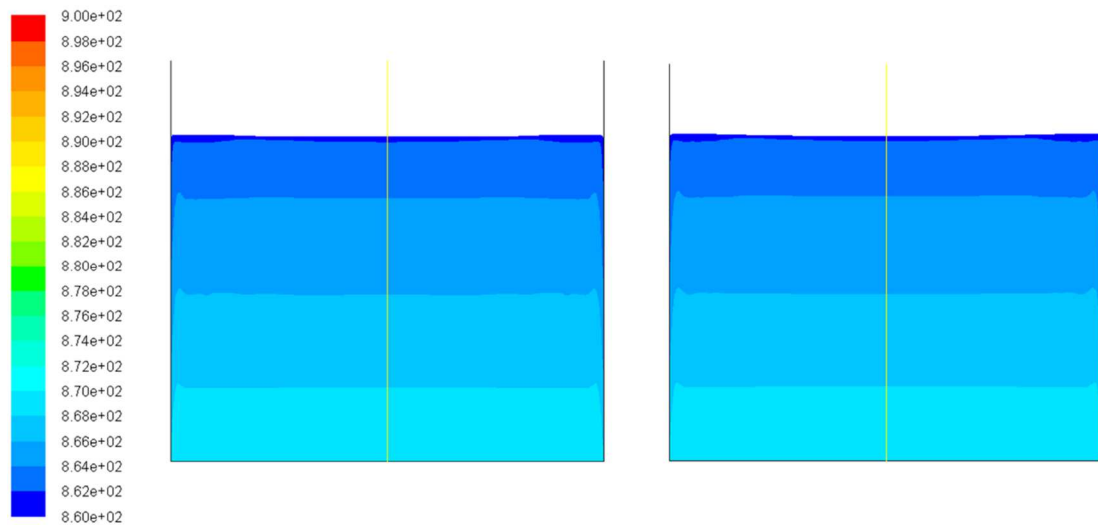


(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]
 図 5.2.19 下層密度分布図 1500[s]後



(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]

図 5.2.20 上層密度分布図 1800[s]後



(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]

図 5.2.21 下層密度分布 1800[s]後

密度分布図から上層，下層内にそれぞれ密度成層が形成されていることが確認できる．また，上面の熱流束が $-50[\text{W}/\text{m}^2]$ に比べ $-100[\text{W}/\text{m}^2]$ では気液界面近傍の密度が大きくなるが，下層ではほぼ変化がないことが確認できる．

5.2.2. 固体領域含むモデル(Model2)の解析結果

図 5.2.22~図 5.2.23 に上面の熱流束が $-50[\text{W}/\text{m}^2]$, $-100[\text{W}/\text{m}^2]$ でのタンク中心の鉛直方向温度分布の時間変化グラフを示す.

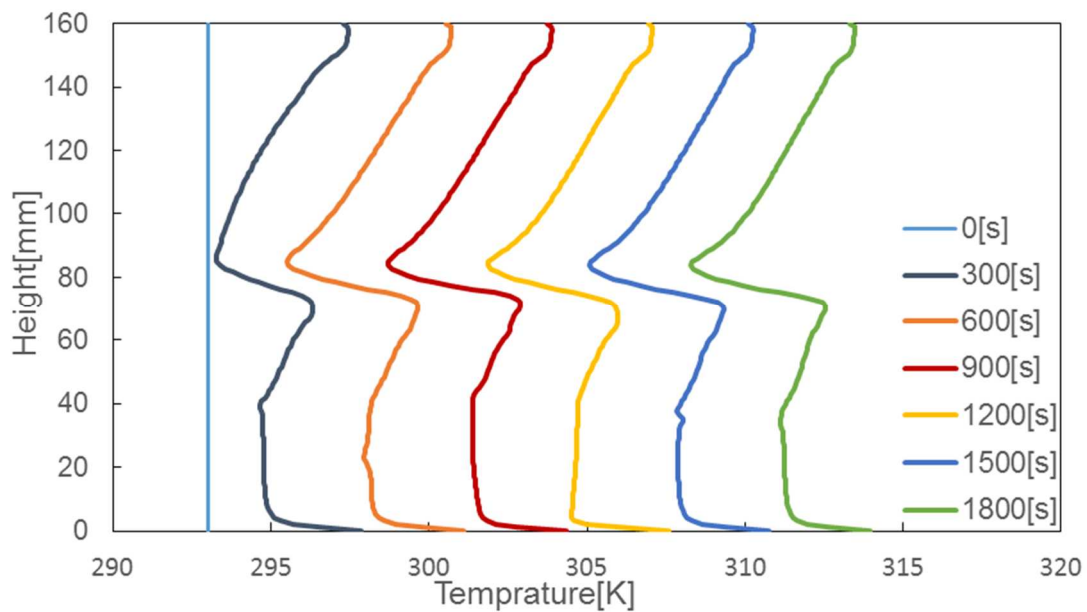


図 5.2.22 Model2 上面熱流束 $-50[\text{W}/\text{m}^2]$ 高さ-温度

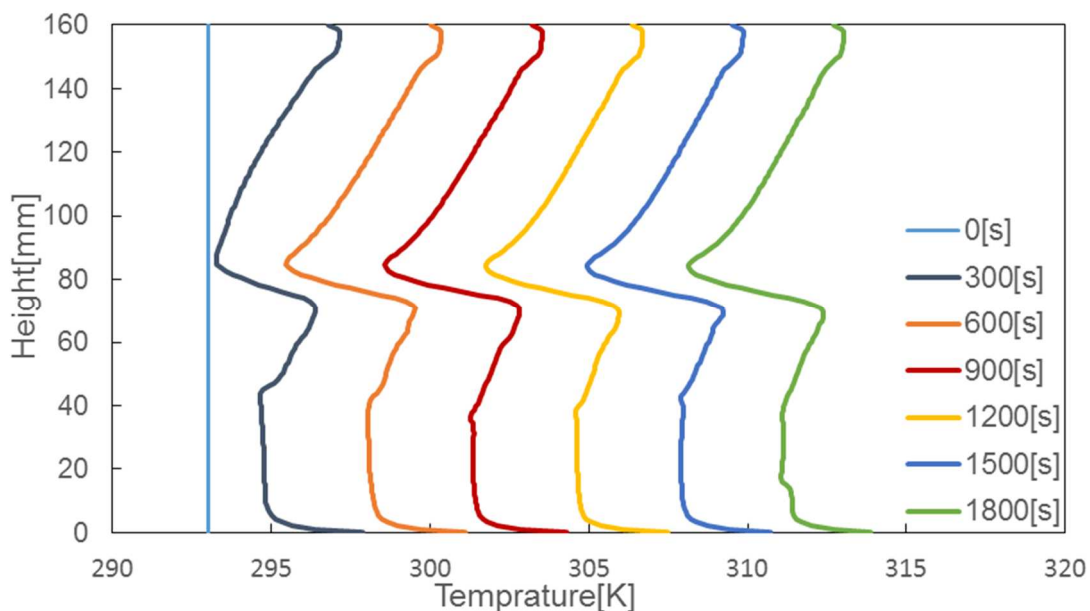


図 5.2.23 Model2 上面熱流束 $-100[\text{W}/\text{m}^2]$ 高さ-温度

図 5.2.22, 図 5.2.23 において上層では温度成層が形成されているが, 下層では底板近傍で温度が高くなっており温度成層が形成されていない。これは側板から侵入した熱が底板に伝導し, 底板近傍の液温が上昇した結果である。

固体壁の有無及び上面熱流束値による影響の比較を図 5.2.24 に示す。固体壁があることによって底板への熱伝導があり, 固体壁がない場合に比べ下層全体の温度が高くなり, 底板にエネルギーが奪われるため上層の温度は低くなる。上面の熱流束が大きくなると固体壁がある場合も気液界面近傍の温度が小さくなるが, 底板への熱伝達があるため, 固体壁がない場合に比べ上面の熱流束による温度変化は小さくなり, 上面で奪われる熱が大きくなり底板への熱移動も少なくなることで下層の温度が小さくなる。

次に, 温度分布図を図 5.2.25~図 5.2.30 に示す。(a)が上面の熱流束が -50 $[W/m^2]$, (b)が上面の熱流束が -100 $[W/m^2]$ での温度分布である。

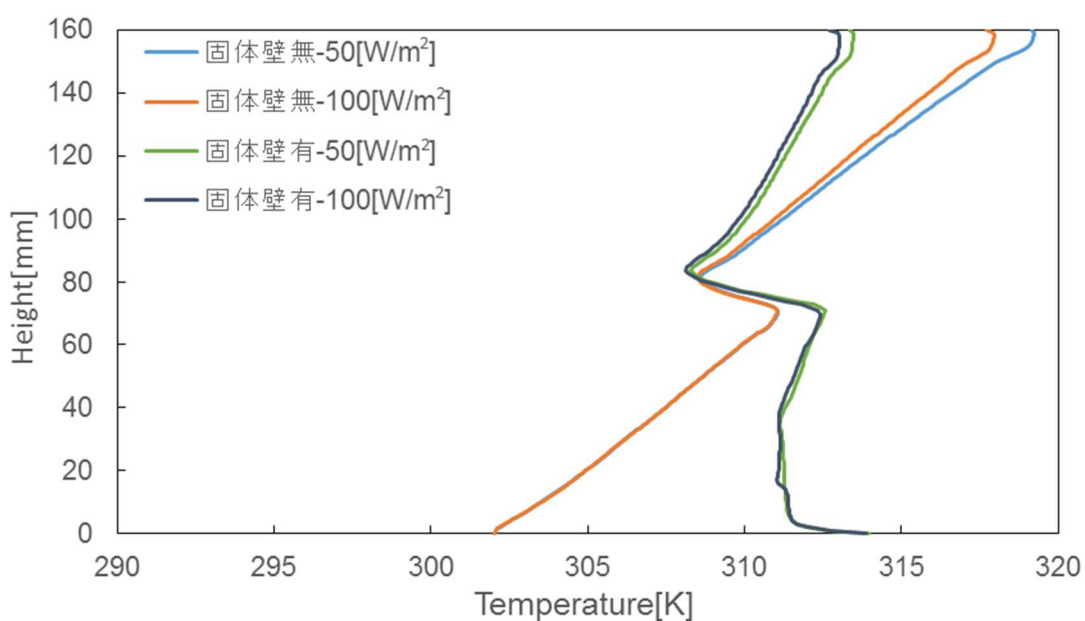
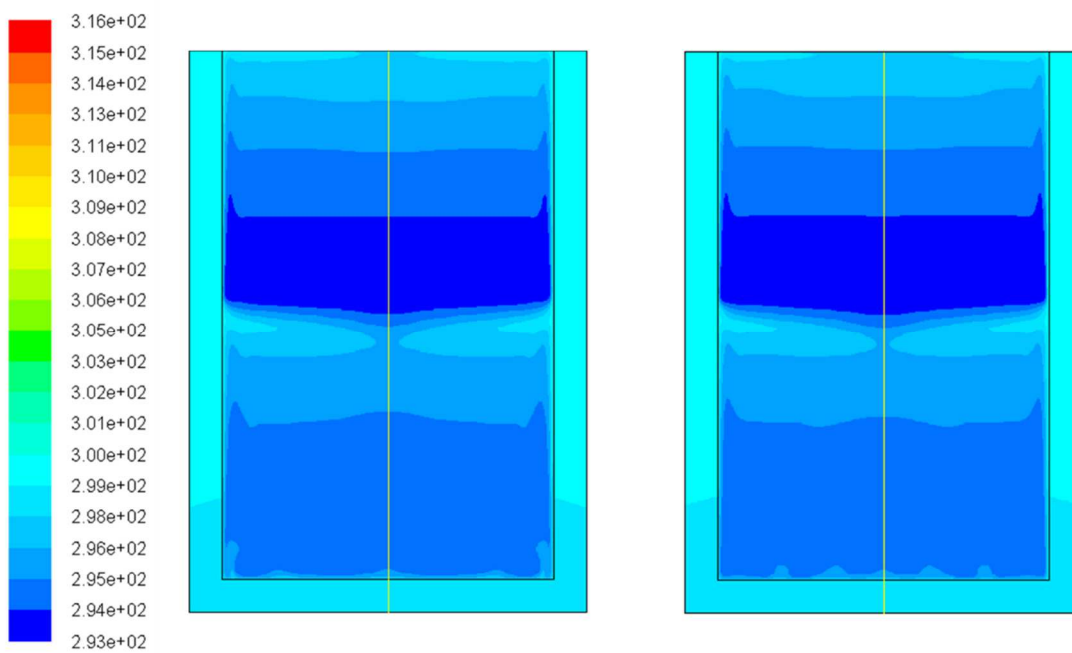
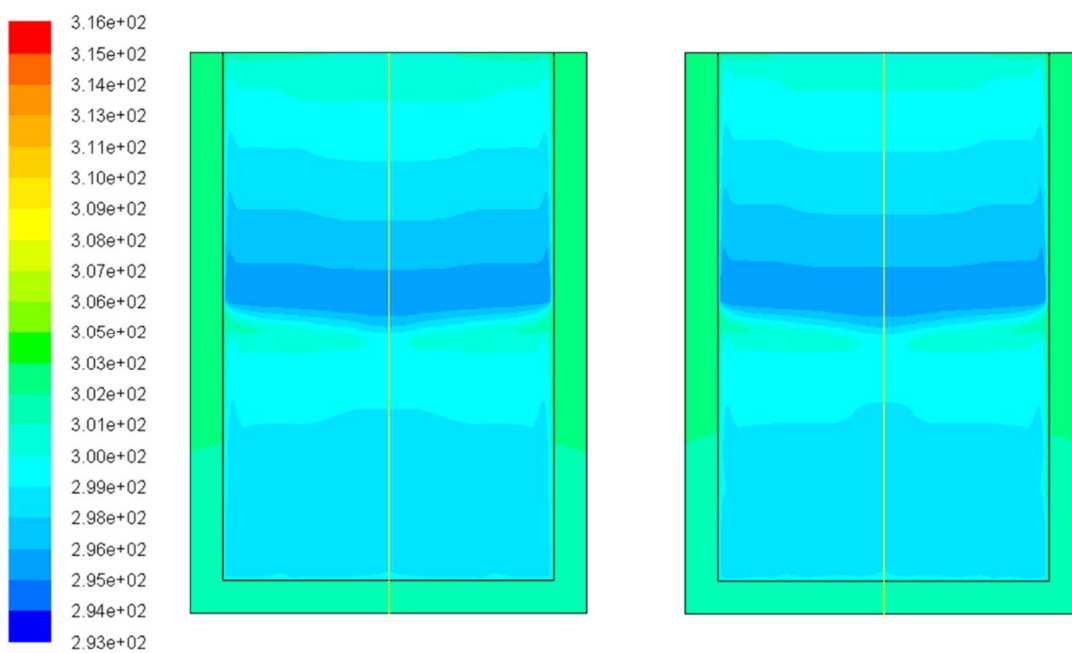


図 5.2.24 固体壁の有無および上面熱流束の影響



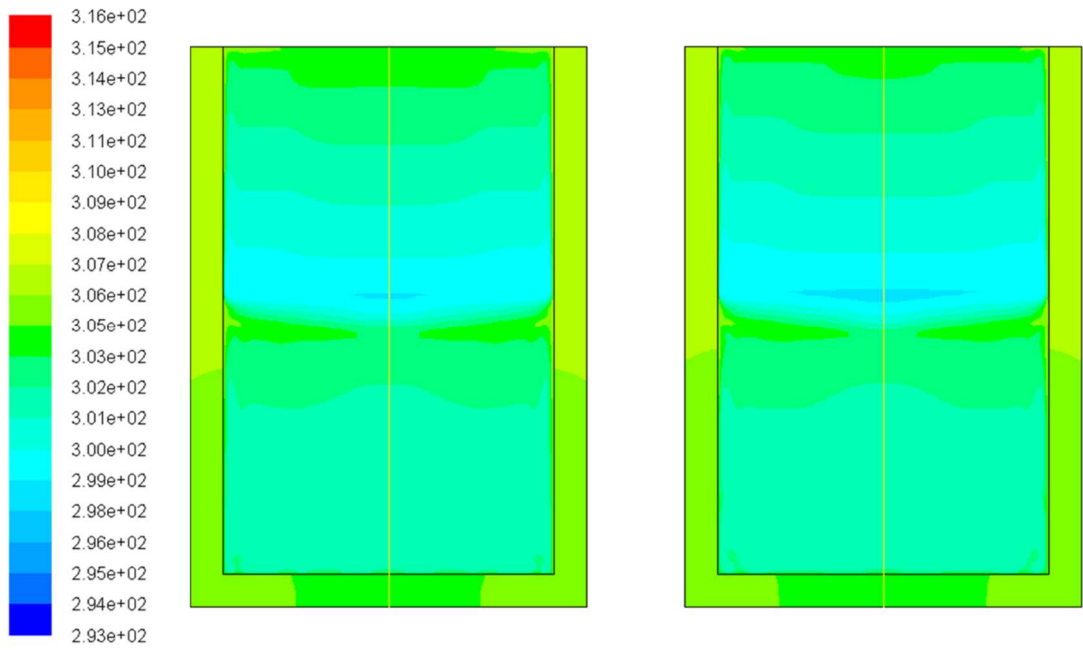
(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]

図 5.2.25 温度分布図 300[s]後



(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]

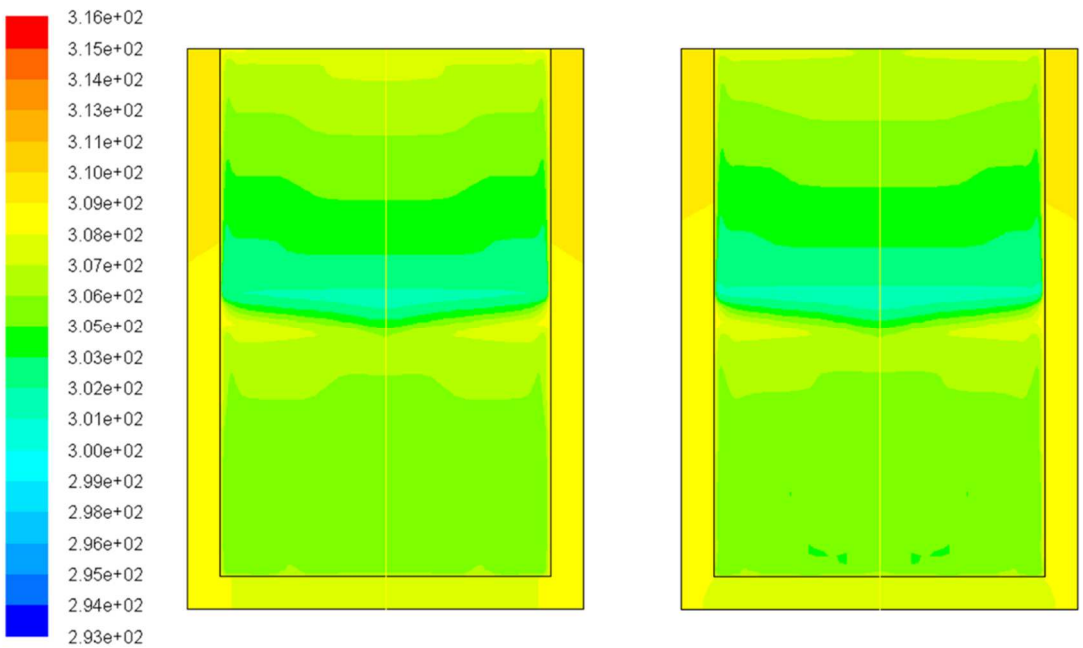
図 5.2.26 温度分布図 600[s]後



(a) 上面熱流束-50[W/m²]

(b) 上面熱流束-100[W/m²]

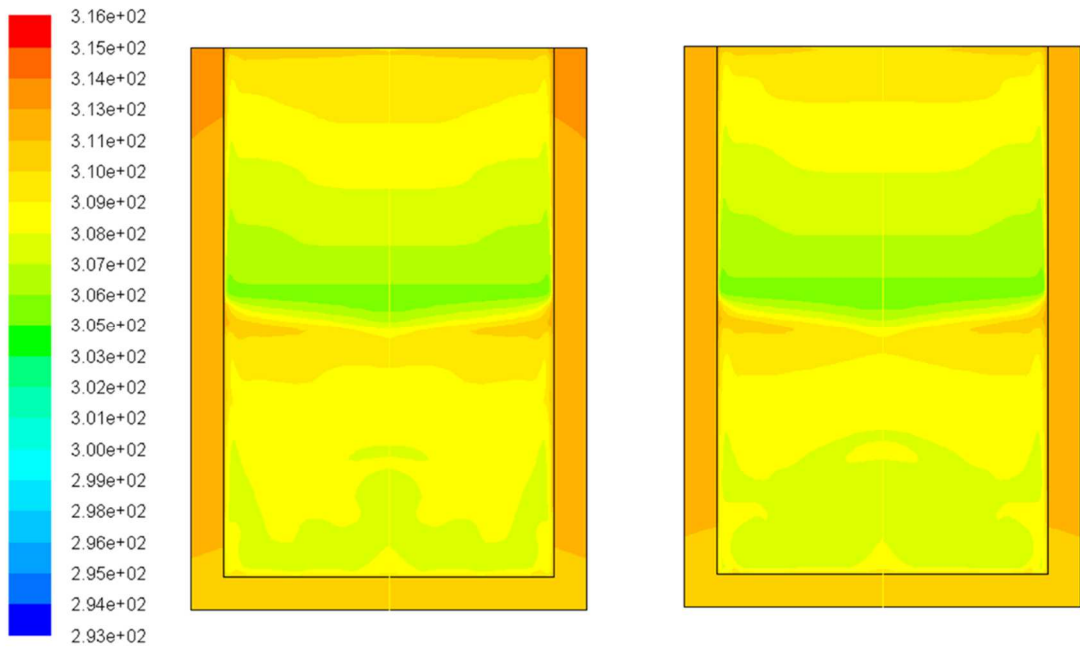
図 5.2.27 温度分布図 900[s]後



(a) 上面熱流束-50[W/m²]

(b) 上面熱流束-100[W/m²]

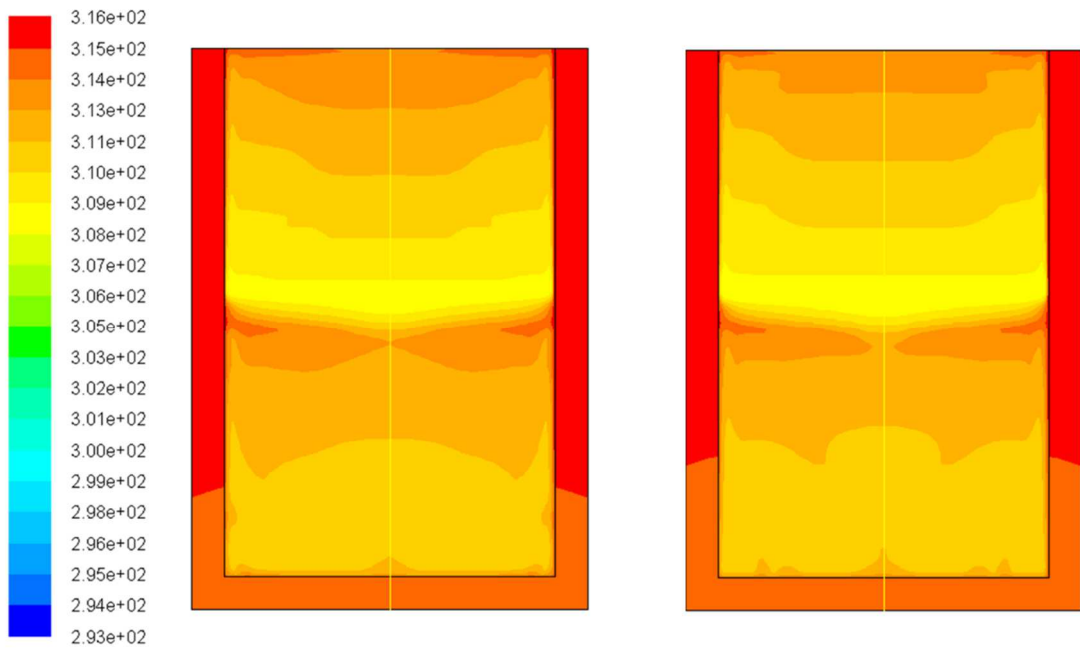
図 5.2.28 温度分布図 1200[s]後



(a) 上面熱流束-50[W/m²]

(b) 上面熱流束-100[W/m²]

図 5.2.29 温度分布図 1500[s]後



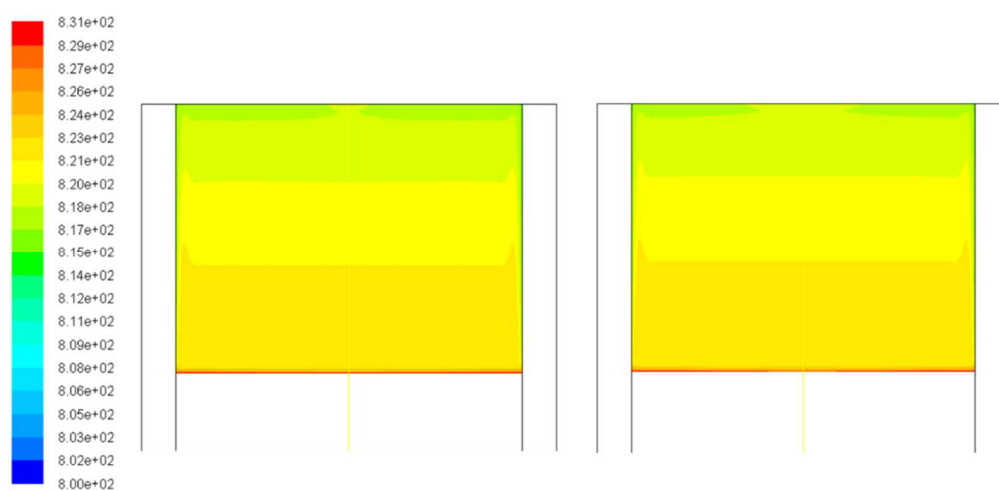
(a) 上面熱流束-50[W/m²]

(b) 上面熱流束-100[W/m²]

図 5.2.30 温度分布図 1800[s]後

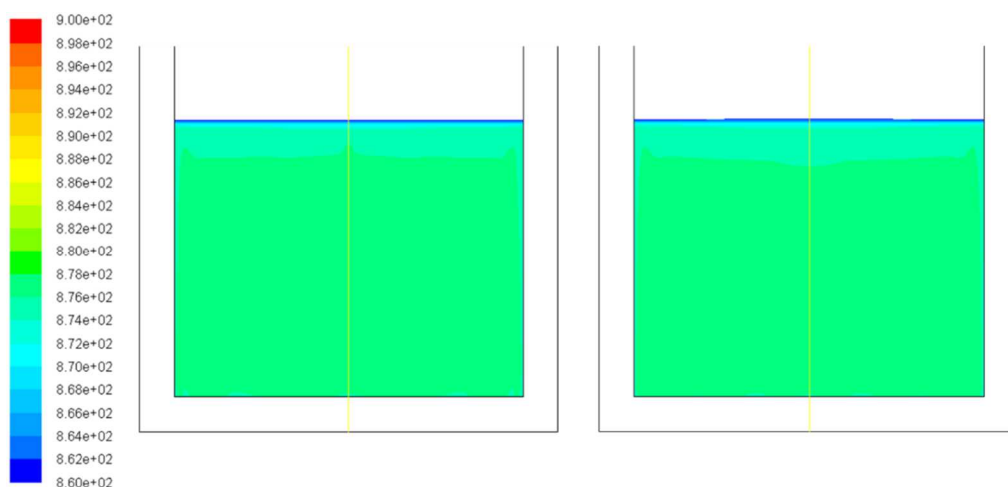
分布図から固体壁において側板から底板へ熱伝導していることがわかる。また、上層では温度成層が形成されるが、下層では底板近傍の液温が上昇しており温度成層が形成されず、底面からの熱侵入による熱対流の発生が確認できる。上面熱流束が大きくなると上層では液温が低く、底板に近い固体領域の温度が低くなっている。このことから上面熱流束が大きくなり底板に伝導する熱量が小さくなることがわかる。

次に、密度分布図を図 5.2.31~図 5.2.42 に示す。先ほどと同様、(a)が上面の熱流束-50[W/m²]、(b)が上面の熱流束-100[W/m²]の場合である。5.2.1 節と同じように上層と下層を分けて分布図にする。



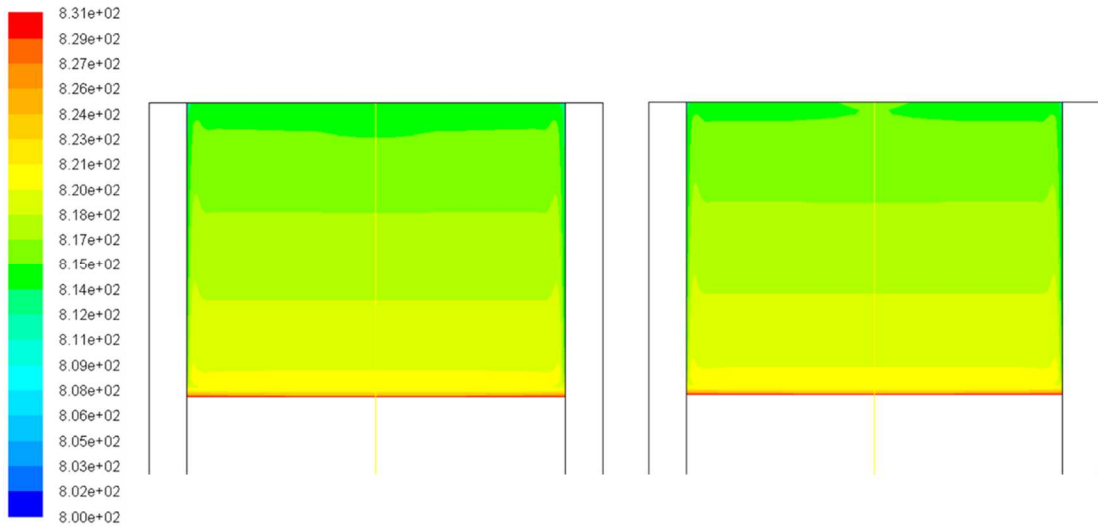
(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]

図 5.2.31 上層密度分布図 300[s]後



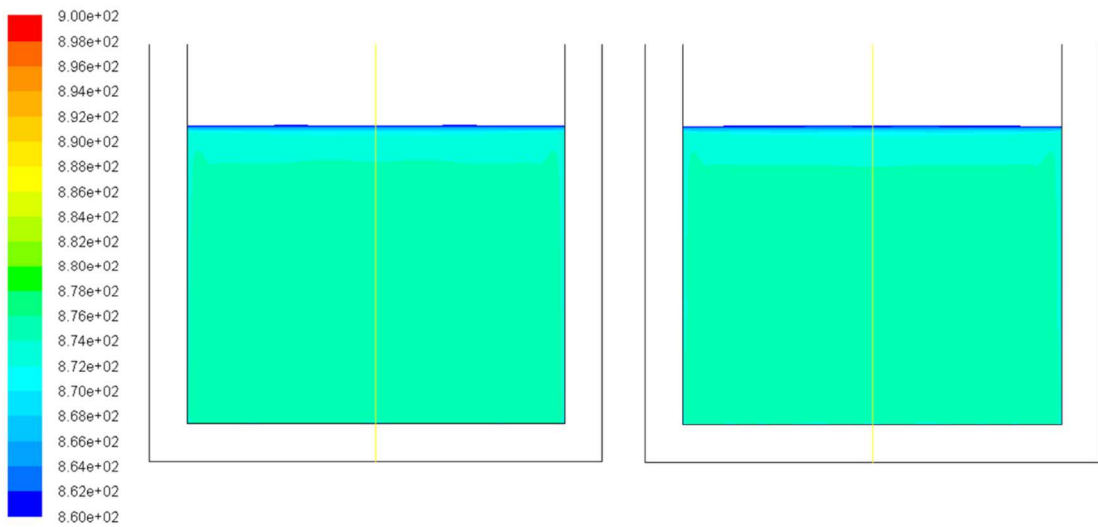
(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]

図 5.2.32 下層温度分布図 300[s]後



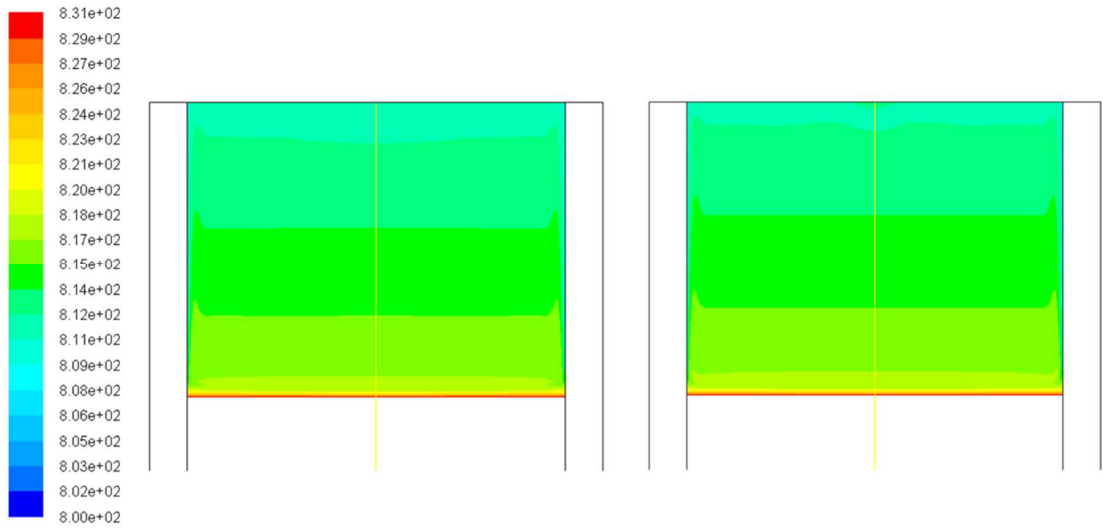
(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]

図 5.2.33 上層密度分布図 600[s]後



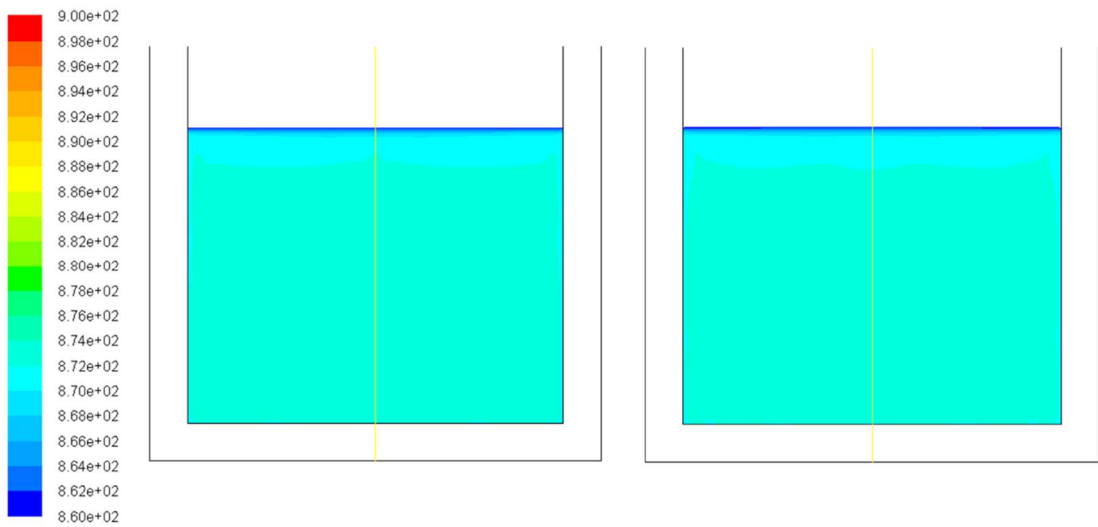
(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]

図 5.2.34 下層温度分布図 600[s]後



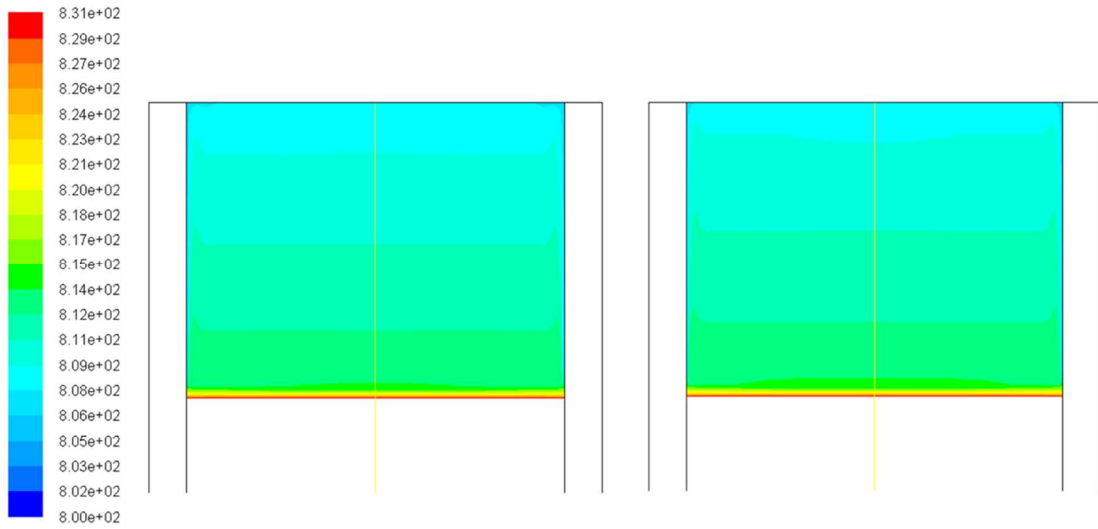
(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]

図 5.2.35 上層密度分布図 900[s]後



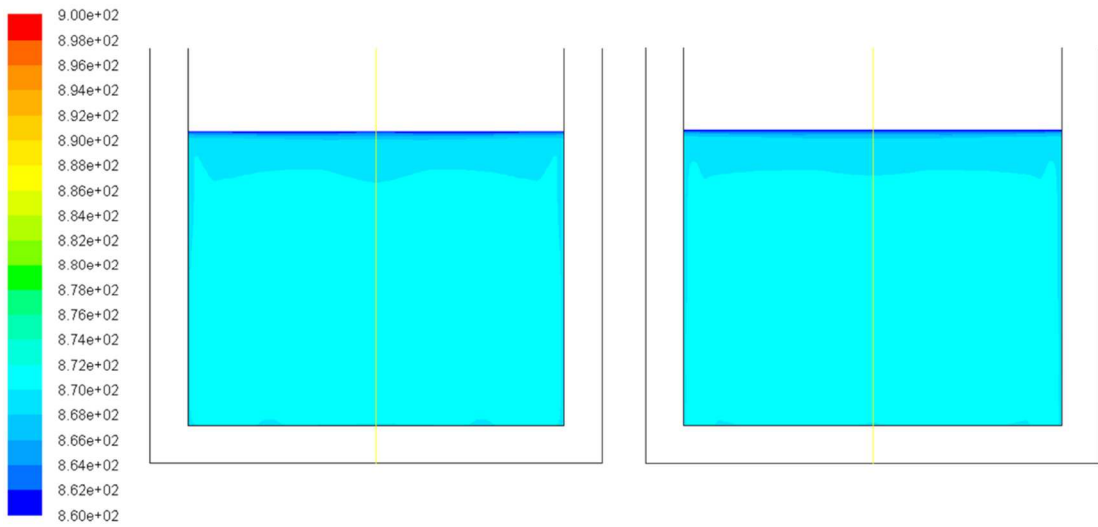
(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]

図 5.2.36 下層密度分布図 900[s]後



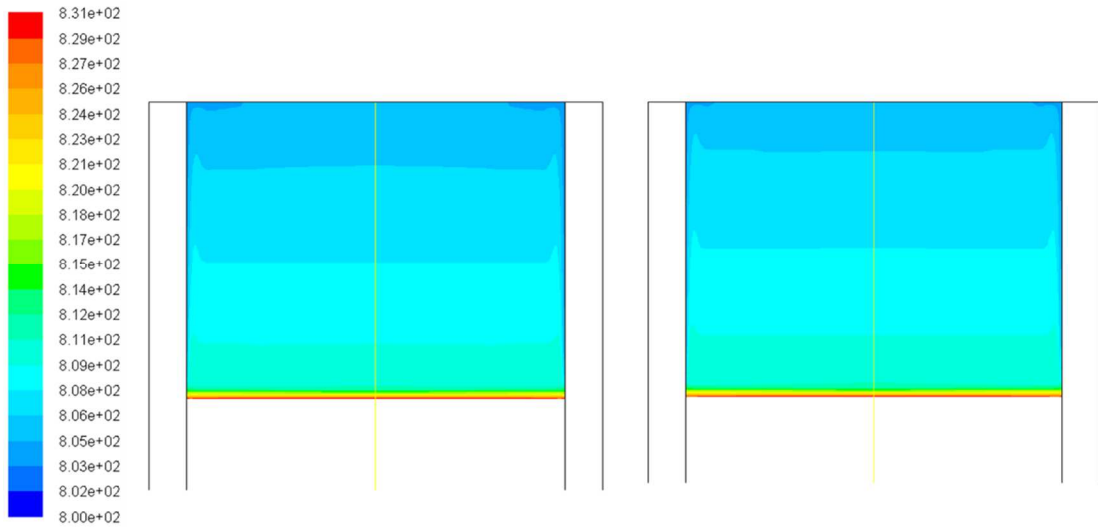
(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]

図 5.2.37 上層密度分布図 1200[s]後



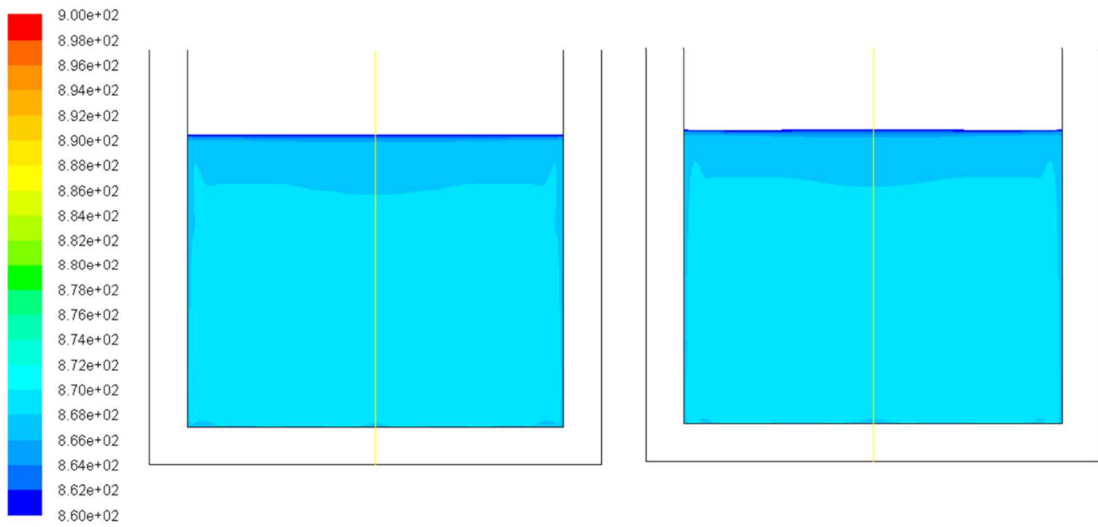
(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]

図 5.2.38 下層密度分布図 1200[s]後



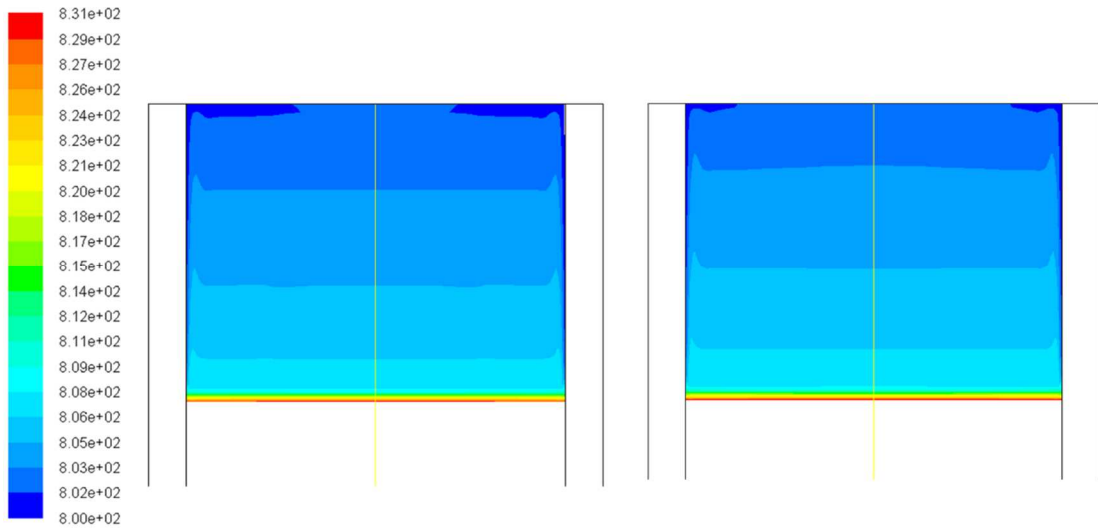
(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]

図 5.2.39 上層密度分布図 1500[s]後



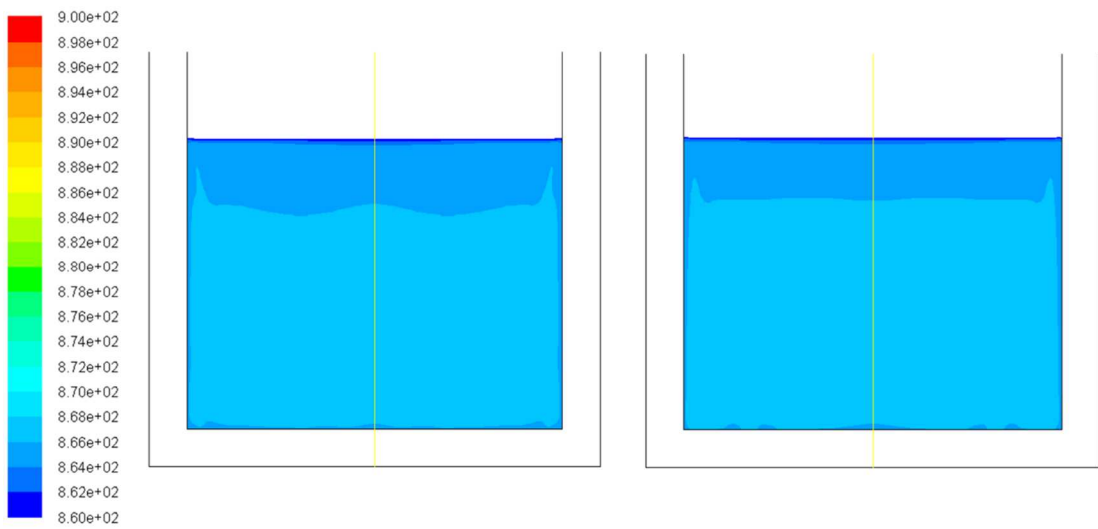
(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]

図 5.2.40 下層密度分布図 1800[s]後



(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]

図 5.2.41 上層密度分布図 1800[s]後



(a) 上面熱流束-50[W/m²] (b) 上面熱流束-100[W/m²]

図 5.2.42 下層密度分布図 1800[s]後

上層では密度成層の形成が確認され、熱流束の値が大きいと密度が大きくなり、気液界面に近づくにつれ差が顕著となる。下層では底板近傍で密度が上昇しており、密度成層が形成されておらず、熱流束の値によって密度に差が生まれている。熱流束の値が大きい程密度が大きくなっており、これは前述した様に熱流束の値によって底板へ伝達される熱量が変化するためである。

5.2.3. Mixture モデル(Model3)の解析結果

図 5.2.43 にタンク中心の液領域における鉛直方向温度分布を示す。1200[s]までは温度成層が形成されており、気相近傍での温度低下があまり見られない。しかし 1500[s]で気液界面近傍の温度が大きく低下し、1800[s]では上層全体で温度成層が形成されているような形状となった。また、熱分布を持たせない場合では数値解析が発散したが、熱分布を持たせることによって収束することがわかった。これは気相と液相に同時に入熱することによって相間の温度差が大きくなるのが原因であると考えられる。ここでは熱分布を持たせることによって発散を回避した。

次に 300[s]毎の温度分布図を図 5.2.44~図 5.2.49 に示す。図 5.2.44~図 5.2.49 からもわかるように気相に熱が逃げる様子が見られ、温度成層が形成された。これは対流によるものではなく、上面を一定温度としたことにより形成されたと考えられる。

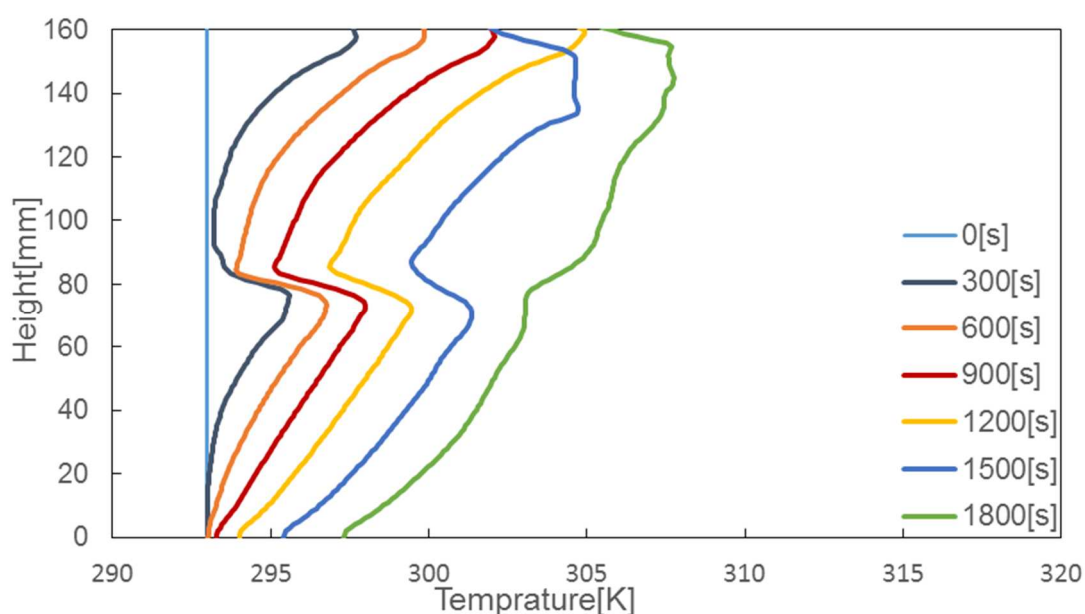


図 5.2.43 Model3 高さ-温度

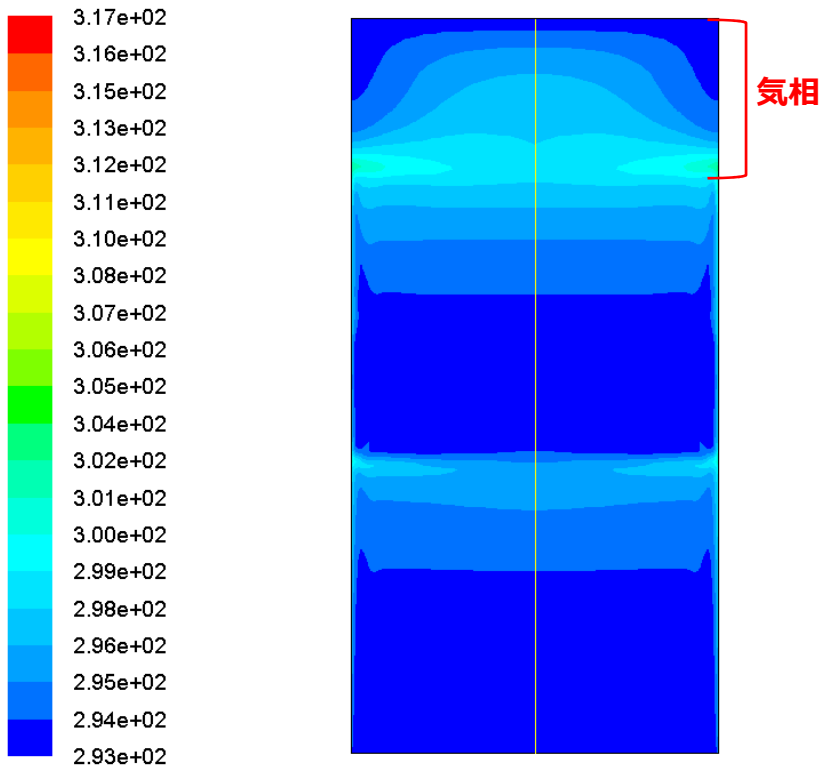


図 5.2.44 温度分布図 300[s]後

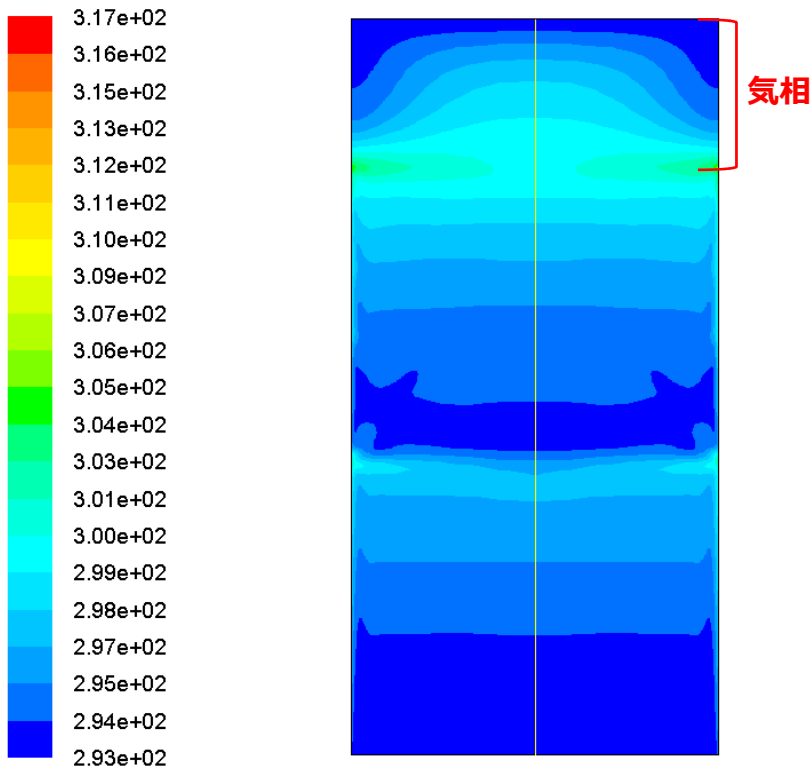


図 5.2.45 温度分布図 600[s]後

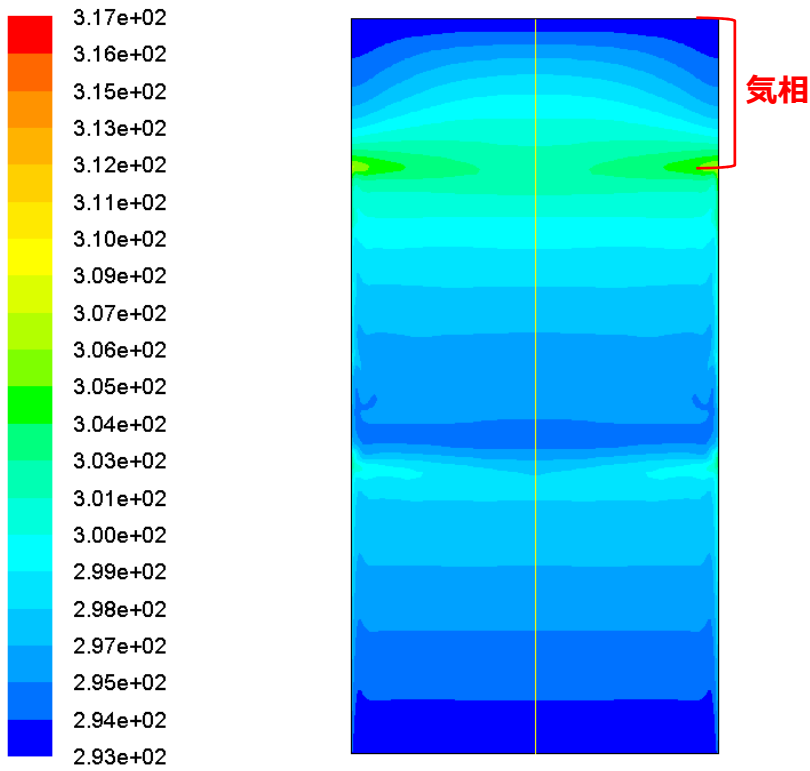


図 5.2.46 温度分布図 900[s]後

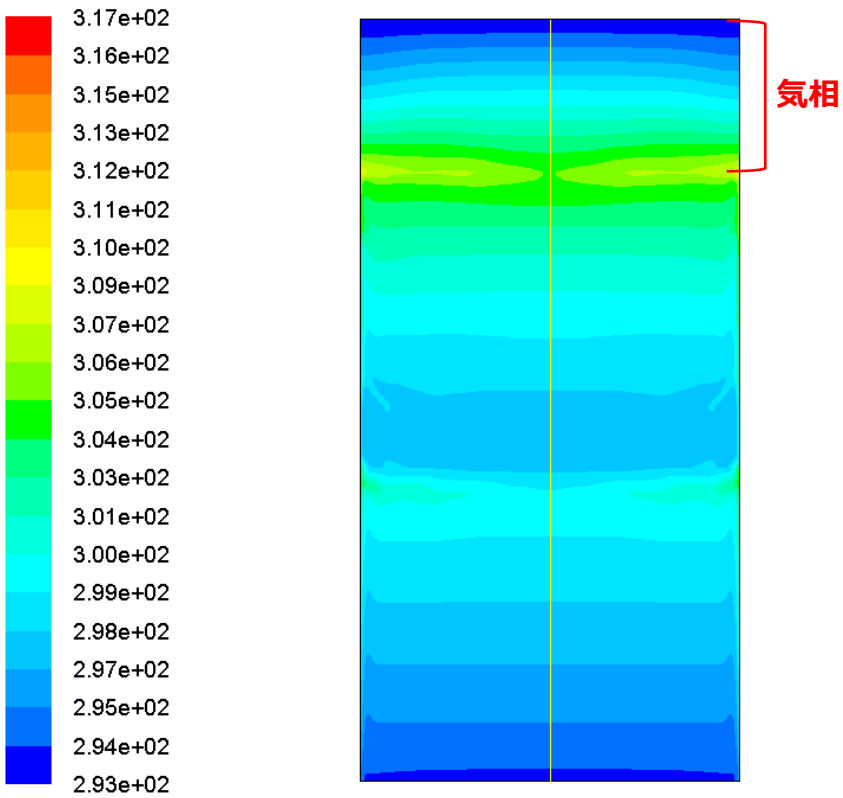


図 5.2.47 温度分布図 1200[s]後

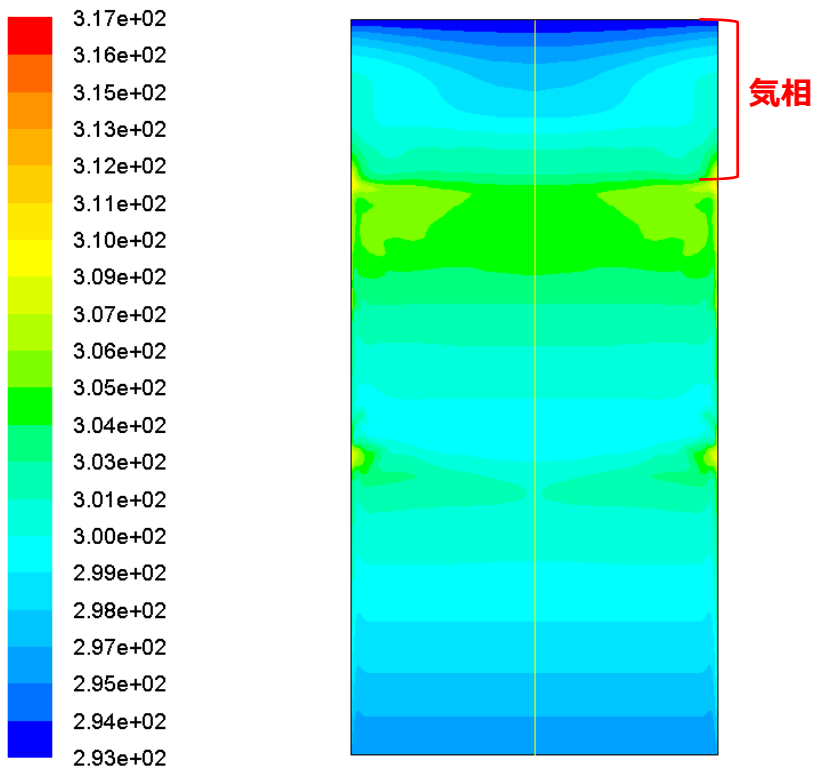


图 5.2.48 温度分布图 1500[s]

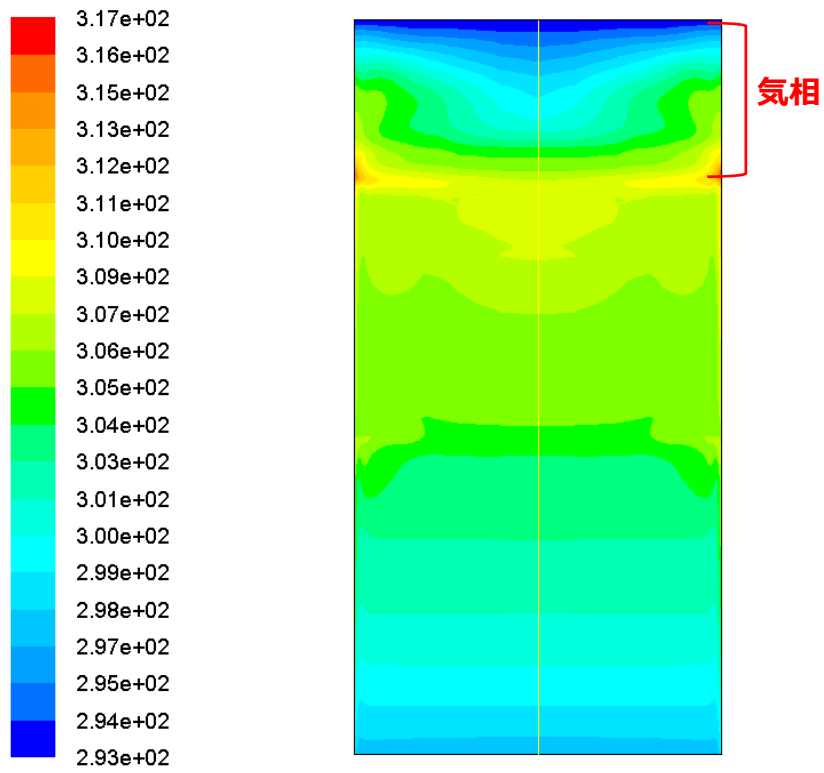


图 5.2.49 温度分布图 1800[s]

5.2.4. 相変化(Lee モデル)を考慮した解析

前述した条件で数値解析を行ったところ、1137.8[s]時点で計算が発散した。発散した原因として、5.2.3 節でも述べたように気相と液相の温度差が大きくなったことが考えられる。5.2.3 節では熱分布による解決をしたが、相変化によって気相の位置が変わるため熱分布による解決が難しく、境界条件を新たに考える必要があることがわかった。

図 5.2.50~図 5.2.52 に 300[s]から 900[s]における 300[s]毎の温度分布図を示し、発散する直前である 1137.8[s]での温度分布図を図 5.2.53 に示す。また、図 5.2.54~図 5.2.26 に 300[s]~900[s]における 300[s]毎の液の体積分率分布図を示し、図 5.2.53 に 1137.8[s]の液の体積分率分布図を示す。温度分布は時間毎の差が大きいため、各時間でカラーマップの範囲を変化させた。温度分布図から対流の発生が確認でき、図 5.2.53 から発散直前での相間の温度が大きいことがわかる。また、体積分率分布図から相変化の発生が確認できた。

相変化の解析が成功したため、次は実験を再現するため単一成分でなく多成分での相変化へと改良する必要がある。Lee モデルは移動先が単一成分の移動のみのモデルであるため、次のような改良方法が考えられる。

- 多成分系の相変化を取り扱う他モデルを使用する
- Secondary Phase を成分数分設定し、各体積分率から BOG の組成を割り出す

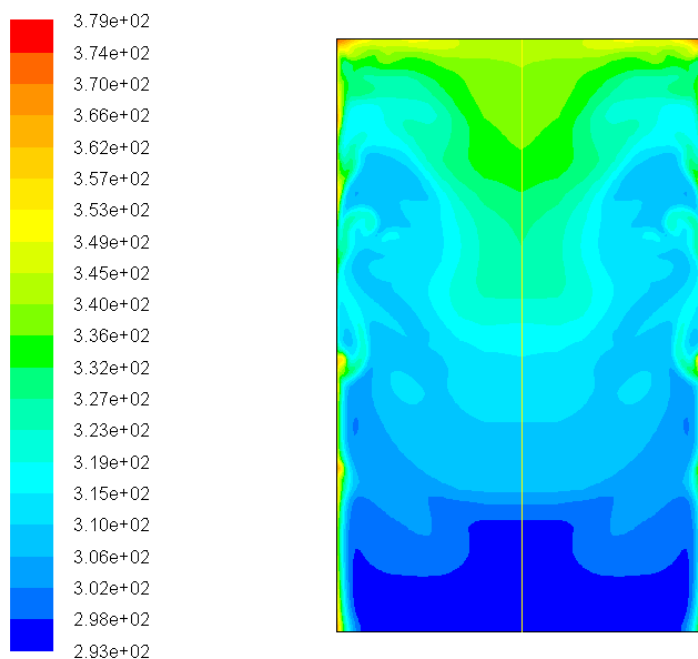


図 5.2.50 温度分布図 300[s]後

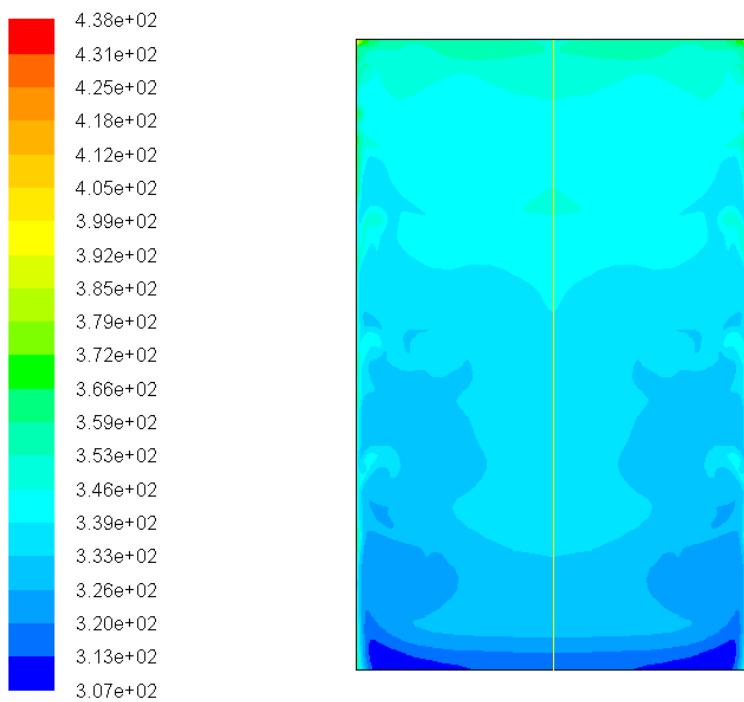


图 5.2.51 温度分布图 600[s]後

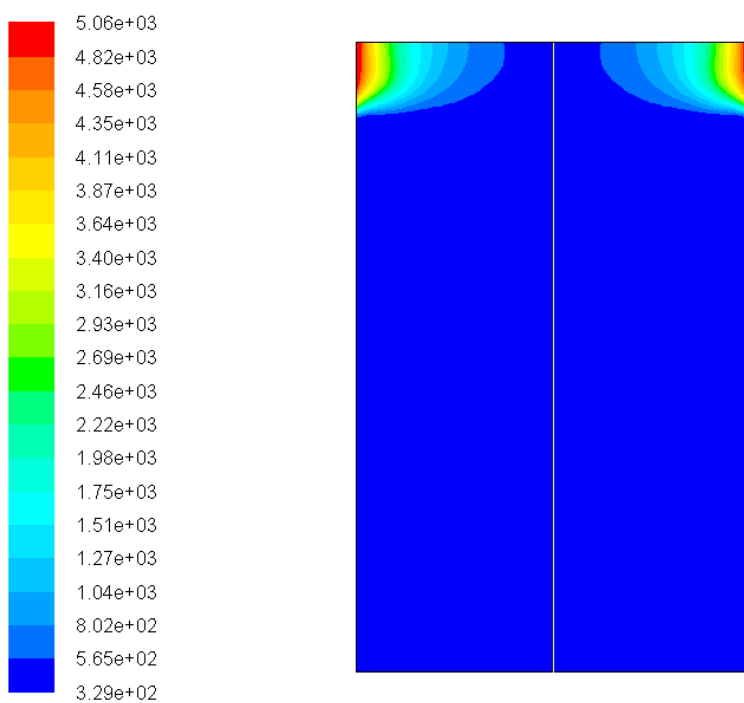


图 5.2.52 温度分布图 900[s]後

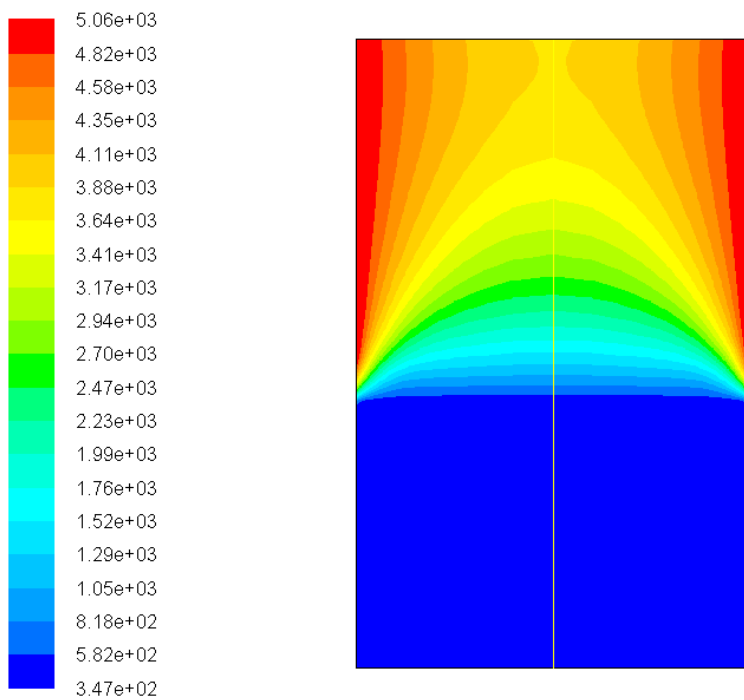


図 5.2.53 温度分布図 1138.7[s]後

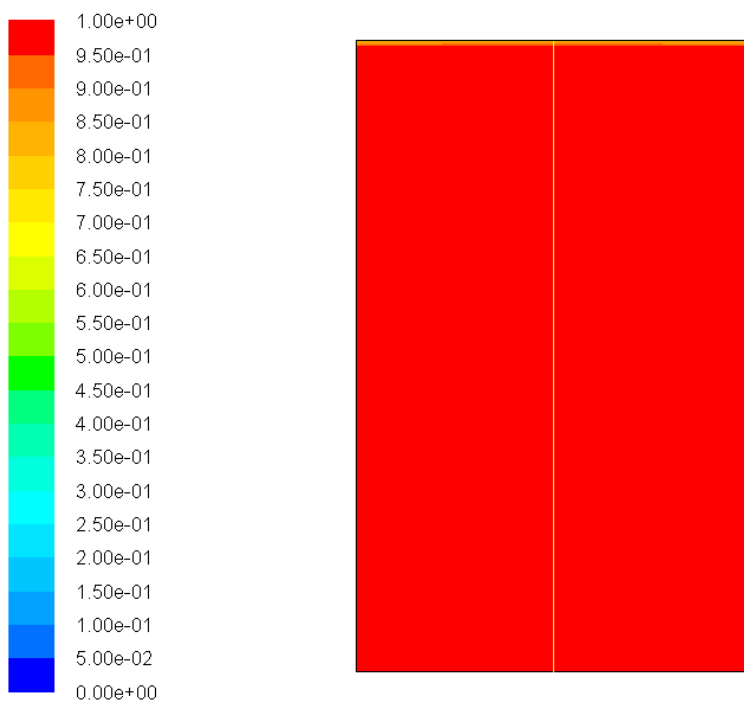


図 5.2.54 液の体積分率分布図 300[s]後

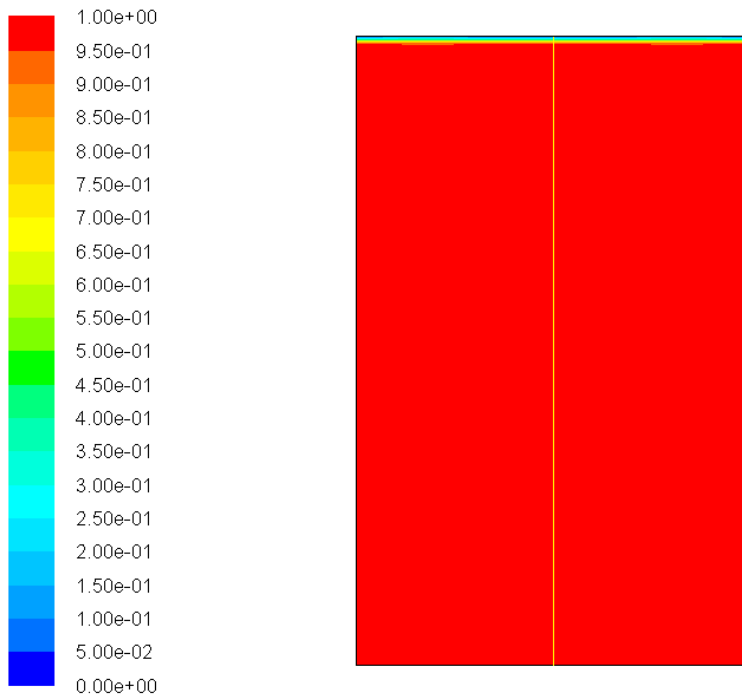


図 5.2.55 液の体積分率分布図 600[s]後

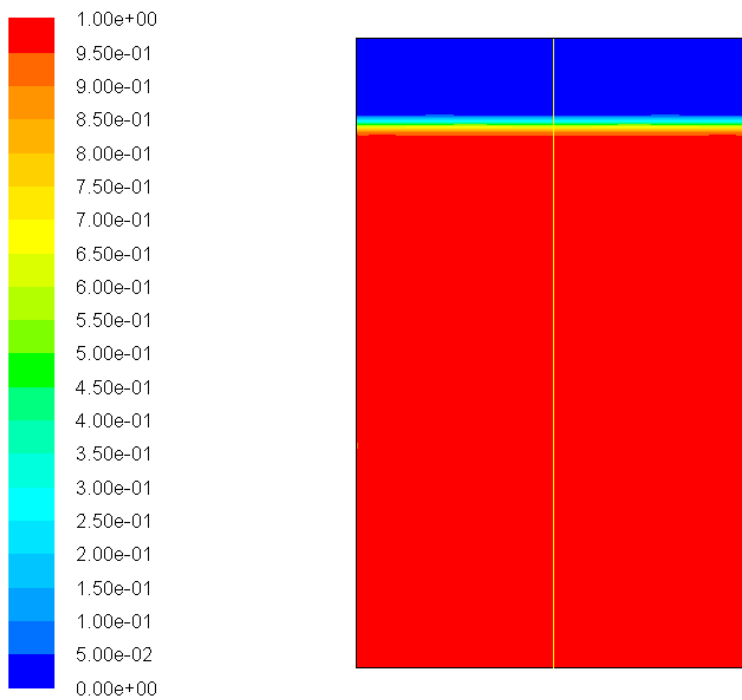


図 5.2.56 液の体積分率分布図 900[s]後

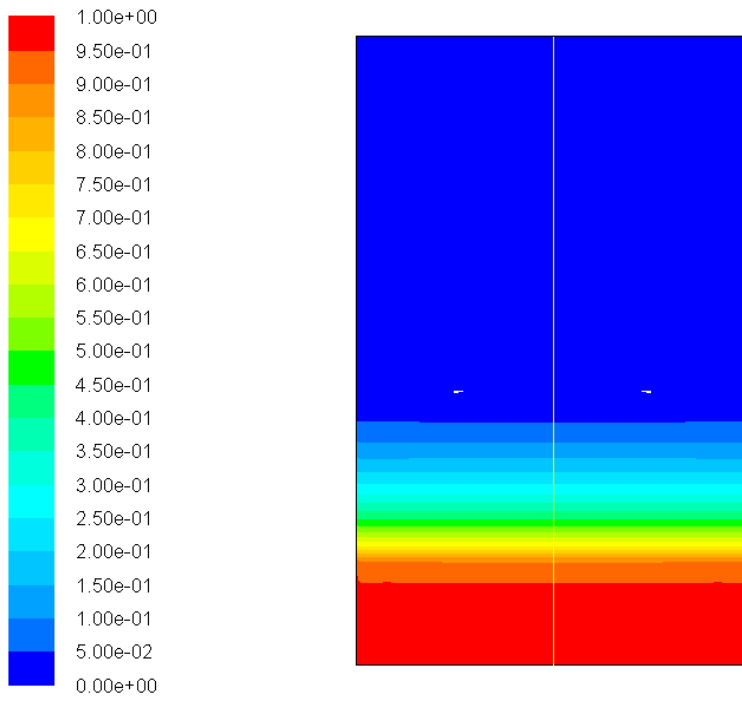


図 5.2.57 液の体積分率分布図 1137.8[s]後

5.2.5. 気液連成解析

図 5.2.58 に鉛直方向温度分布を示す。気液界面近傍での温度勾配が時間と共に変化していることが確認でき、このため気液界面からの熱流束値は時間変化している。また、900[s]までは気液界面付近で温度上昇が見られるが、1200[s]以降では温度低下している。このため、時間経過によってタンク中心軸上において気相の温度が液相温度を下回り、気液界面からの熱流束値が増加する方向に時間変化すると考えられる。

次に 300[s]毎の温度分布図を図 5.2.59~図 5.2.64 に示す。気相において側壁から温度上昇し、対流が発生する様子が見られる。またそれによって等温壁へと熱が逃げていることも確認できる。中心軸上においては気相の温度が液相の温度を下回ることも確認され、対流によって上昇した空気が等温壁によって冷まされることで中心軸上の気相温度があまり上昇しないためであると確認できる。

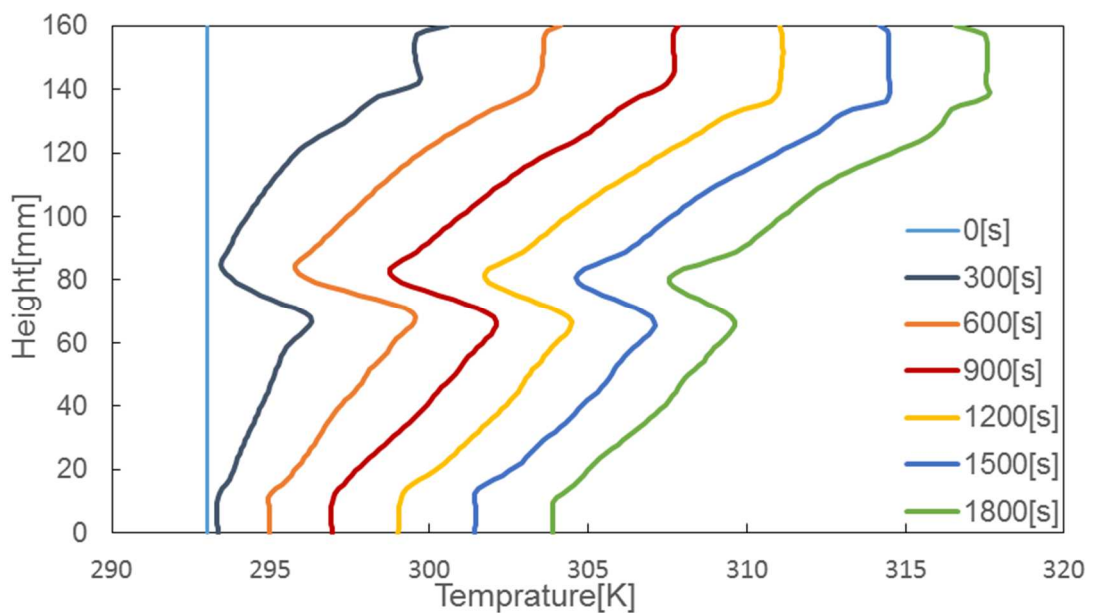


図 5.2.58 Model4 高さ-温度

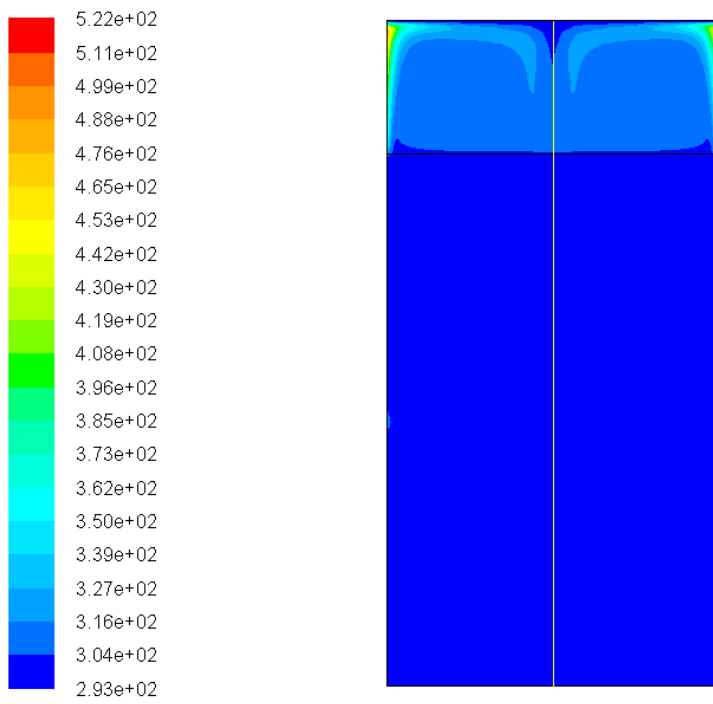


図 5.2.59 温度分布図 300[s]後

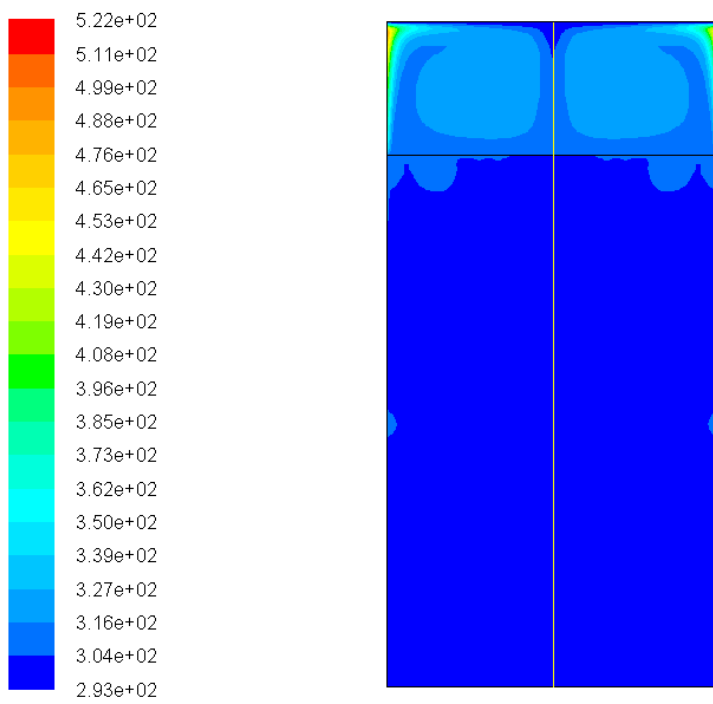


図 5.2.60 温度分布図 600[s]後

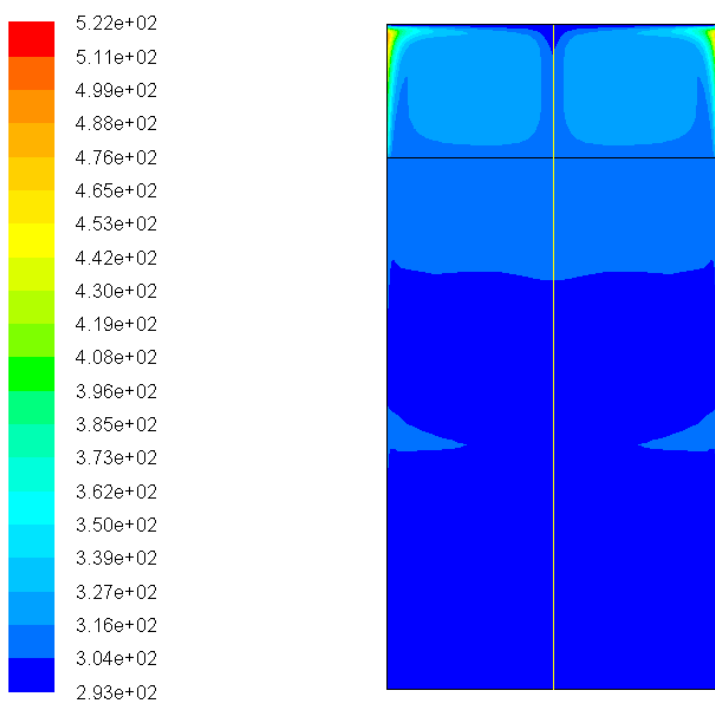


図 5.2.61 温度分布図 900[s]後

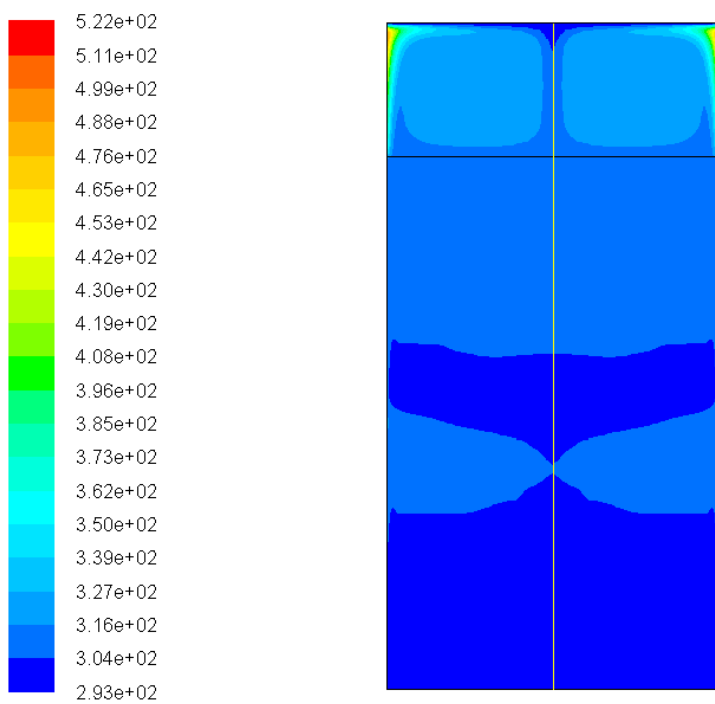


図 5.2.62 温度分布図 1200[s]後

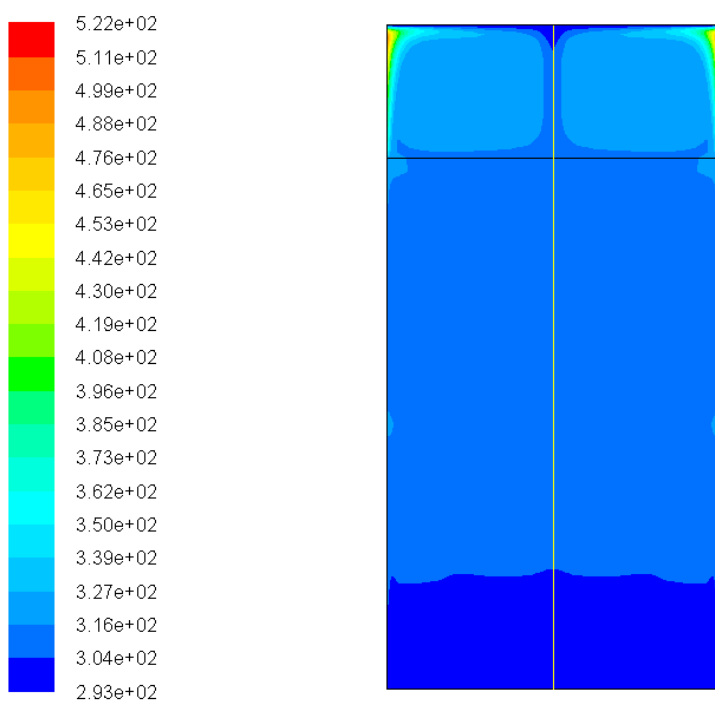


图 5.2.63 温度分布图 1500[s]後

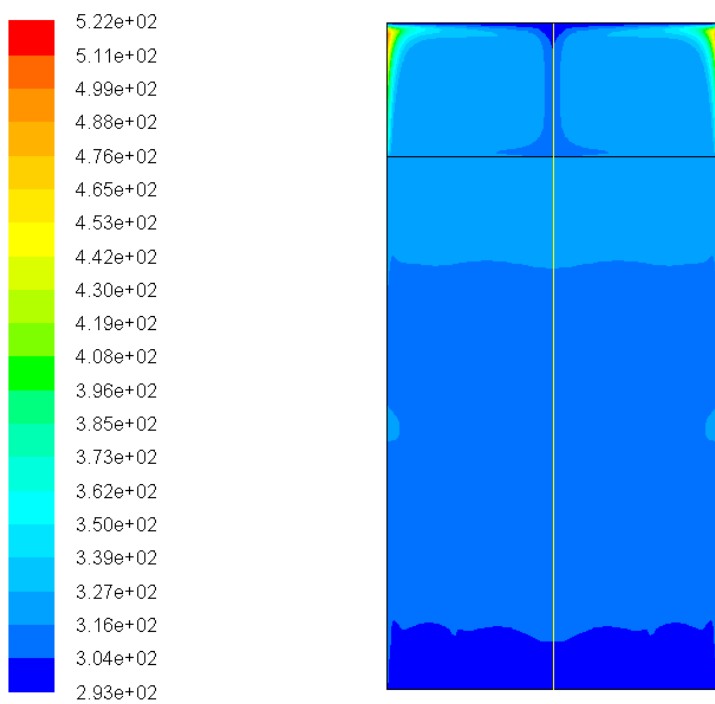


图 5.2.64 温度分布图 1800[s]後

5.3. 実験結果と解析結果の比較

5.3.1. 温度分布による比較

まず、Model1,2 と実験結果で比較を行い、固体壁によって実験値へ近似するかを確認する。その際の上面熱流束はどちらも $-100[\text{W}/\text{m}^2]$ とし、全て加熱後 $1800[\text{s}]$ とする。比較結果のグラフを図 5.3.1 に示す。上層の温度分布が実験値へと近似し、下層では底板に近づくにつれ固体壁を考慮した結果に近似する。また、下層では底板近傍で下に行くにつれ温度上昇する傾向が実験値、固体壁が存在する場合の解析値の両方で見られた。これは固体壁がない場合には見られない解析では傾向であり、固体壁を考慮し解析を行うことで実際の現象をより再現できたと言える。固体壁近傍での温度上昇は 5.2.2 節で述べたように側面から侵入した熱が側板から底板に伝導した結果である。同じ傾向が見られる実験においても同様の現象が起きていると考えられる。底板の温度が上昇すると、底面からの熱侵入による対流が発生し、側面と底面二つの熱侵入による対流となるため、現象が複雑化する。数値解析の初期段階としては簡易的な現象を再現し、徐々に複雑な問題を解くことが望ましいため実験において底面からの対流を抑制する必要がある。そのため底板への熱伝導を抑えることが必要となり、現時点で実験に使用しているサブスケールタンクを改良し、側面からの熱侵入による対流のみが発生するよう改良する必要がある。

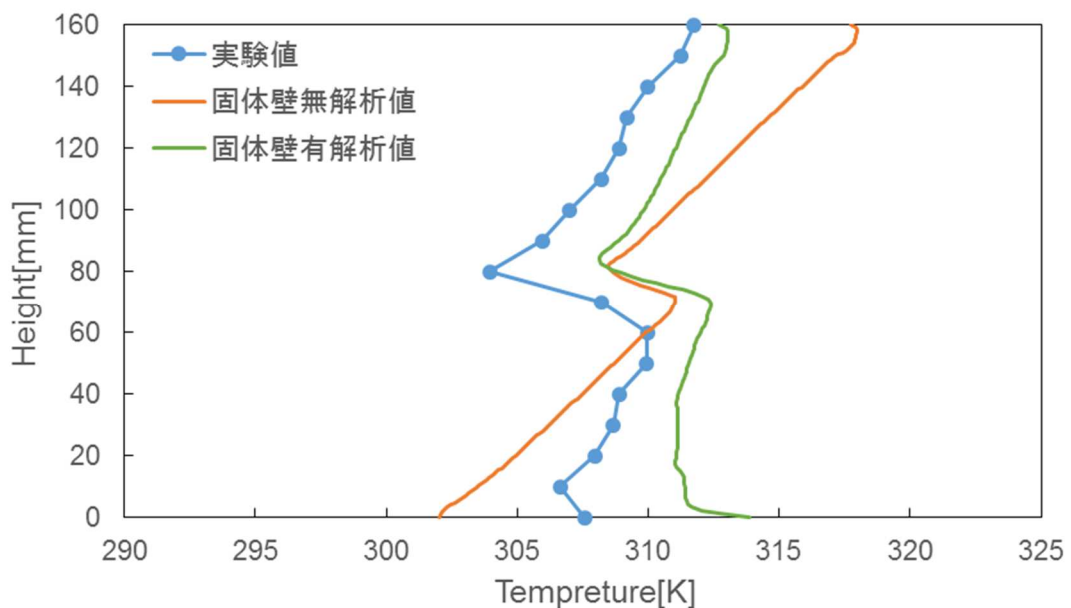


図 5.3.1 固体壁の有無による解析結果への影響比較

次に、上面熱流束値による影響を見るため、Model2 における上面熱流束値 $-50, -100[\text{W}/\text{m}^2]$ での解析値と実験値を比較する。解析値および実験値はすべて $1800[\text{s}]$ 加熱後の値を用いる。比較を行ったグラフを図 5.3.2 に示す。グラフより、上面熱流束値が $-100[\text{W}/\text{m}^2]$ の場合が実験値に近い。しかし、解析では気液界面へ近づくと温度が低下するが、実験では上昇しており、どちらの熱流束値でも実験に近似しているとは言えない。これは簡易的に相変化による熱流束を与えているためと考えられる。そのため上面の熱流束値を定数的に与えるのではなく、より現実に即した方法を考える必要がある。

次に Model1, Model3, Model4 での解析結果と実験結果を比較する。これによって気相を考慮し、タンク上面が室温であるという仮定がどのような影響を及ぼすかを確認する。また、Mixture モデルによる二相流と気液連成での解析を比較し、Mixture モデルによる解析精度を確認する。比較を行ったグラフを図 5.3.3, 図 5.3.4 に示す。Mixture モデルを使用した場合には実験値との差異が大きくなっており、単相流解析及び気液連成の場合に比べ精度が悪くなっている。また、 $1800[\text{s}]$ 時点では Mixture モデルの温度分布が層状となっていないような勾配となっている。これは Mixture モデルでは気泡の存在割合を体積分率として定義している。そのため、気液が完全に分離している解析には適しておらず、化学種の拡散が気相にも及ぶ等の実験では発生しない現象が起こるためであると考えられる。また、気液連成の解析も単相流の解析に比べ差異が大きくなっており、海面の熱流束は気液の温度差による熱の授受が支配的ではなく相変化による潜熱等の他の要因が支配的であると考えられる。

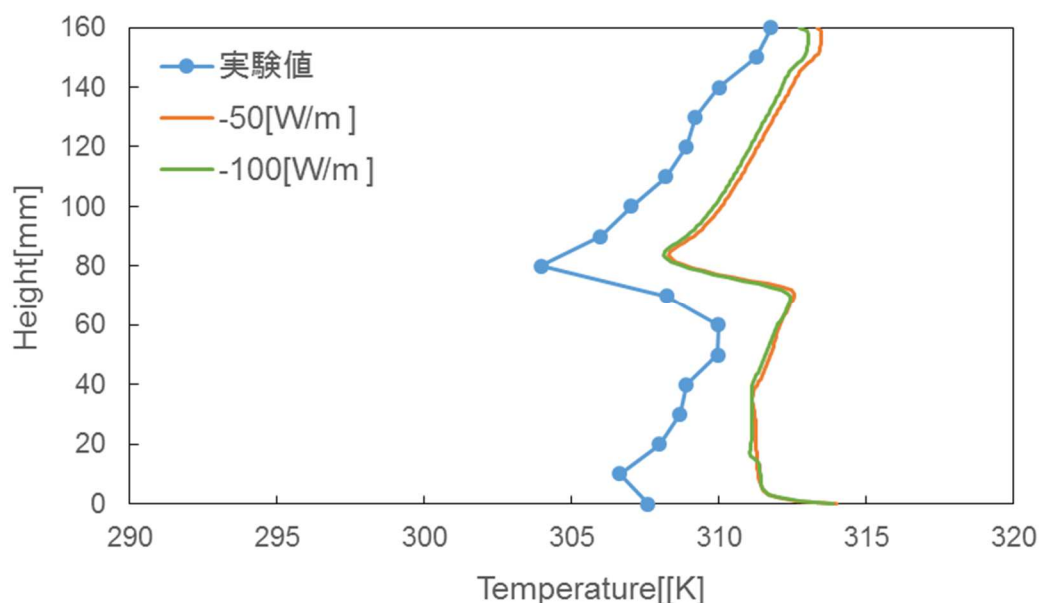


図 5.3.2 上面熱流束値による変化

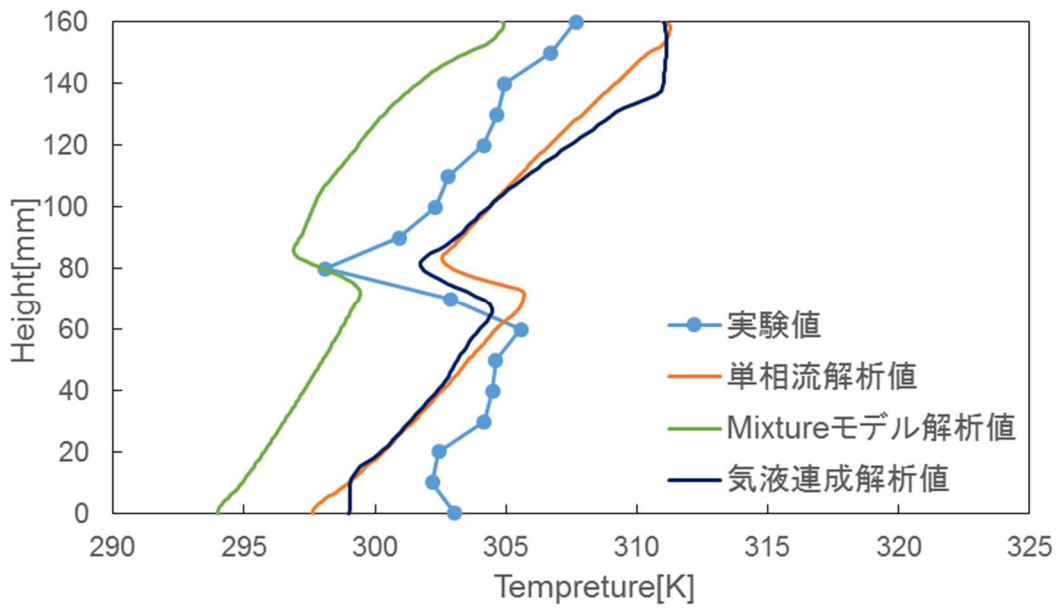


図 5.3.3 気相の影響による比較(1200[s]後)

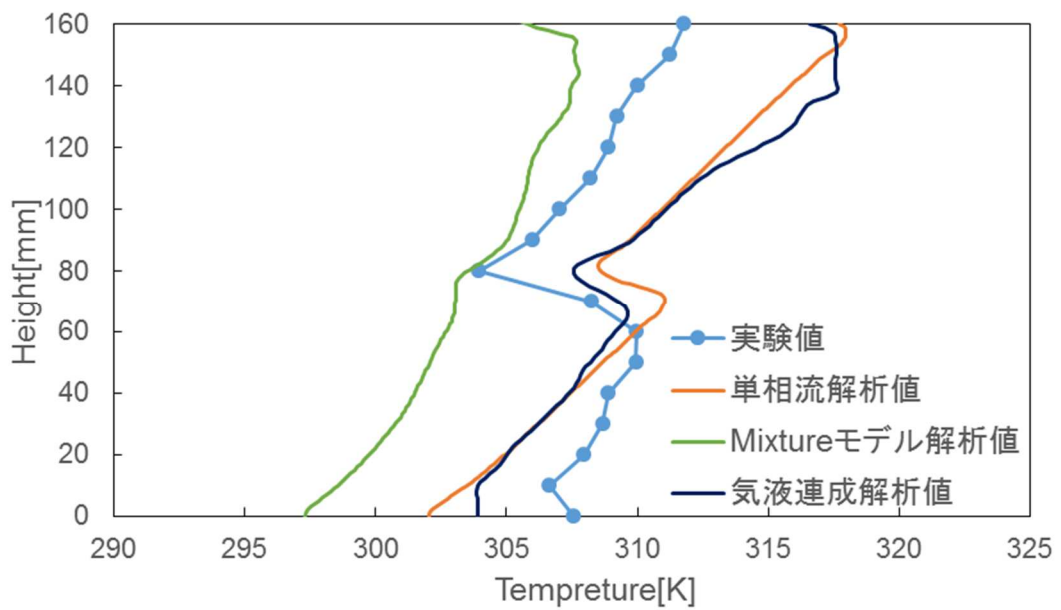
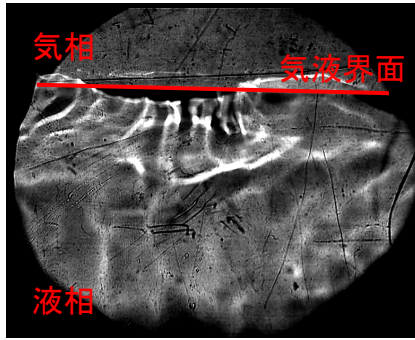


図 5.3.4 気相の影響による比較(1800[s]後)

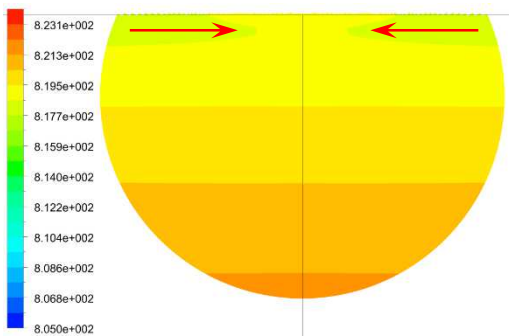
5.3.2. 密度分布による比較

液領域のみの Model1, 固体領域を含む Model2 の解析結果と実験における測定結果の比較を行う。300[s]毎に定性的な比較を行う。図 5.3.5~図 5.3.10 に 300[s] 毎の気液界面中心(図 5.1.4 の①)における実験結果と解析結果の比較を示す。実験及びどちらのモデルの解析でも密度場が中心に向かって移動し、密度成層が形成しており同じ傾向で変化している。図 5.3.11~図 5.3.16 に 300[s]毎の気液界面側板近傍(図 5.1.4 の②)における実験結果と解析結果の比較を示す。壁面近傍から密度場が上昇し、気液界面近傍で中心に向かう様子が共通してみられる。図 5.3.17~図 5.3.22 に 300[s]毎の上層境界(図 5.1.4 の③)における実験結果と解析結果の比較を示す。実験では混合層の形成が見られるが、解析では形成されていない。上層境界下の混合層で発生している現象は解析では見られない。しかし上層境界より上の領域の密度場では混合層は下層に引き込まれるため混合層による影響があまり見られず、解析と実験両方で中心から側板に向かって移動してくる密度場が共通して見られる。また、上層境界の下降も実験及び解析で見られ、解析での層境界の下降を図 5.3.23 に示す。赤線が 1200[s]時点の層境界であり、黒線が 1800[s]時点での層境界である。上層境界の下降は上層境界を通じて物質拡散が行われた結果と考えられるため、層境界を通じた物質拡散は解析での再現が実現できていると考えられる。図 5.3.24~図 5.3.29 に下層境界中心(図 5.1.4 の④)における実験結果と解析結果の比較を示す。実験では液中心に混合層が巻き込まれており、これは混合層がない解析では見られない現象である。また、混合層が下層に侵入することで、混合層が巻き込まれる中心近傍で解析では見られない密度場の移動が見られた。図 5.3.30~図 5.3.35 に下層層境界側板近傍における実験結果と解析結果の比較を示す。側板から上昇してくる密度場が実験・解析共に見られたが、前述した様に中心近傍では混合層の影響によって実験と解析で違う傾向が見られた。図 5.3.36~図 5.3.41 に側底板近傍(図 5.1.4 の⑤)における実験結果と解析結果の比較を示す。実験では Model1 の様に密度成層は形成されず Model2 の解析結果同様底板からの入熱による対流の発生が確認できる。

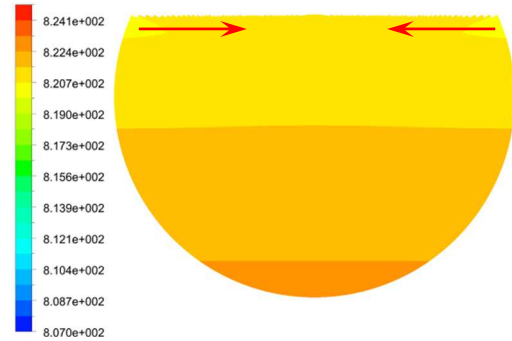
以上のことから、上層境界より上の領域ではほぼ実験と解析が定性的に同じ傾向を示すが、上下層の層境界近傍では混合層による影響があり一致せず、底板近傍では固体領域を含めた解析によって定性的に一致することが分かった。今後は混合層の形成をより抑制する必要があるため、現在の液注入方法を改善する必要がある。



(a) 実験結果

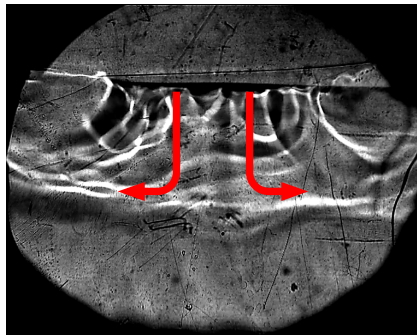


(b) Model1 解析結果

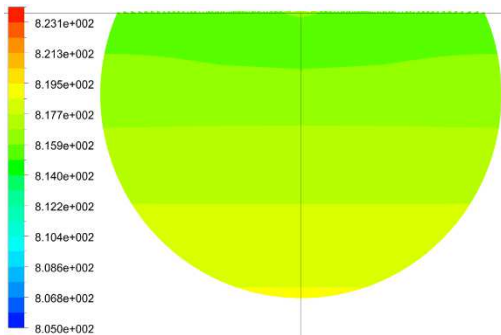


(c) Model2 解析結果

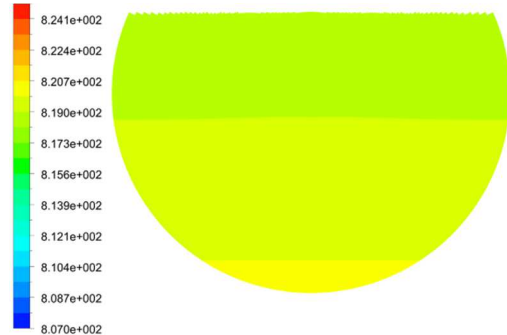
図 5.3.5 気液界面中心における密度分布比較 300[s]



(a) 実験結果

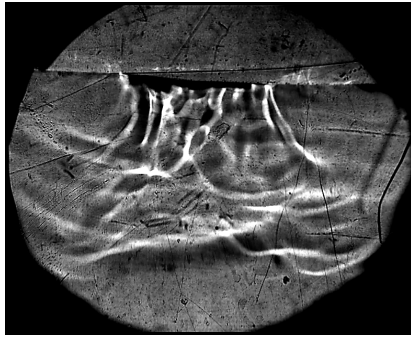


(b) Model1 解析結果

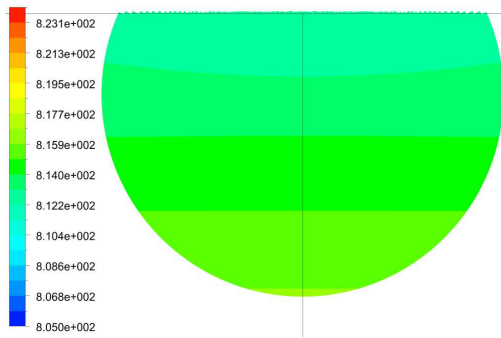


(c) Model2 解析結果

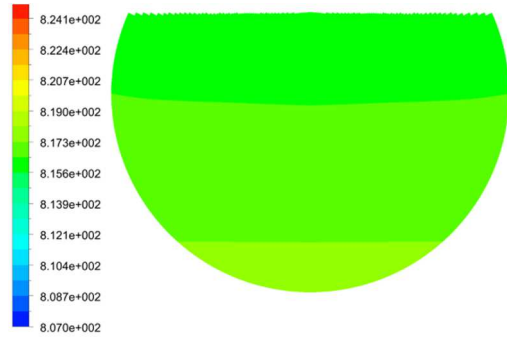
図 5.3.6 気液界面中心における密度分布比較 600[s]



(a) 実験結果

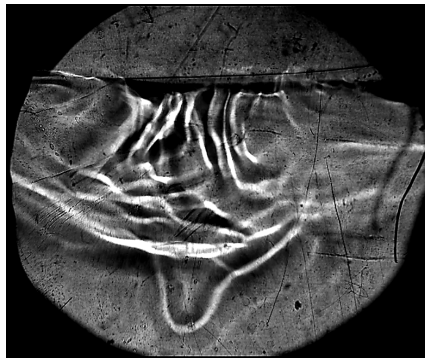


(b) Model1 解析結果

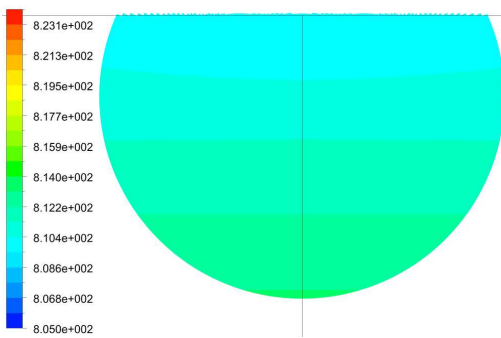


(c) Model2 解析結果

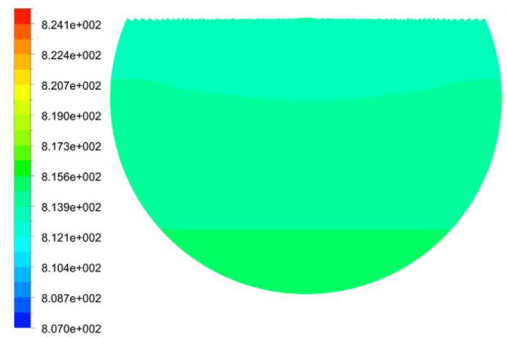
図 5.3.7 気液界面中心における密度分布比較 900[s]



(a) 実験結果

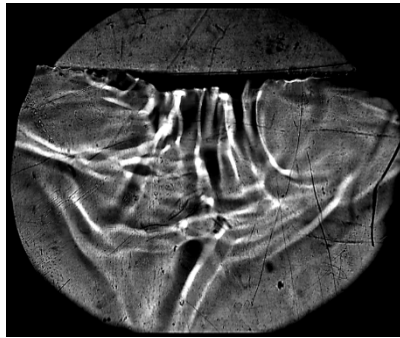


(b) Model1 解析結果

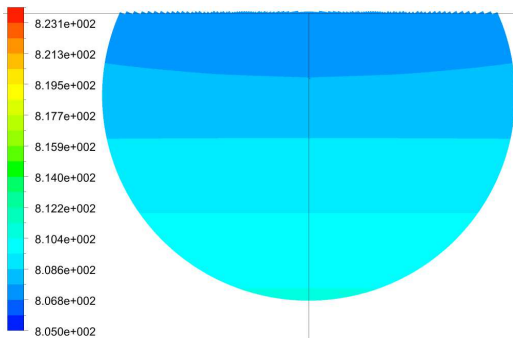


(c) Model2 解析結果

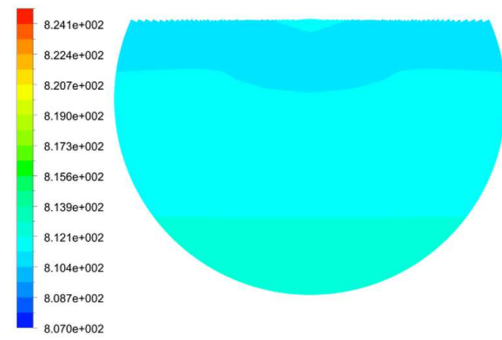
図 5.3.8 気液界面中心における密度分布比較 1200[s]



(a) 実験結果

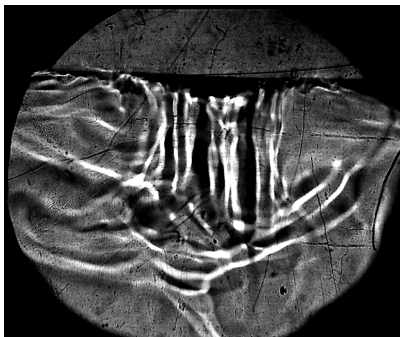


(b) Model1 解析結果

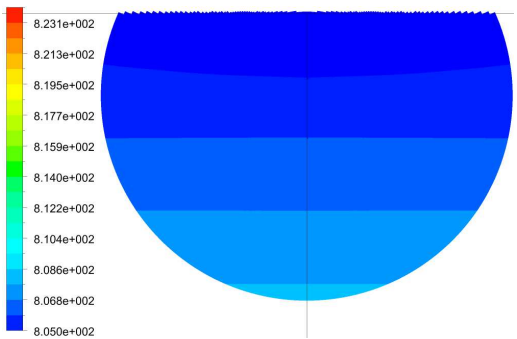


(c) Model2 解析結果

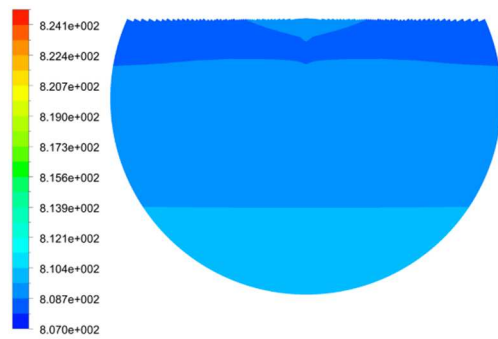
図 5.3.9 気液界面中心における密度分布比較 1500[s]



(a) 実験結果

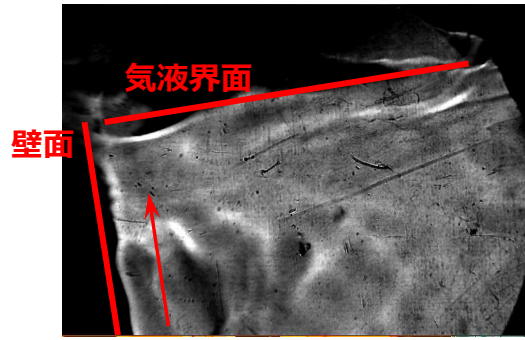


(b) Model1 解析結果

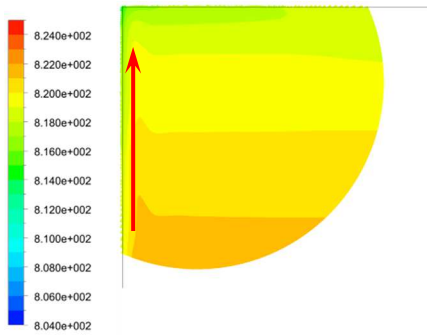


(c) Model2 解析結果

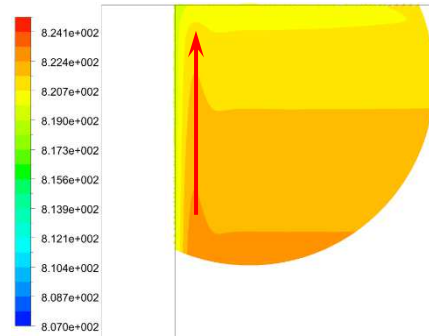
図 5.3.10 気液界面中心における密度分布比較 1800[s]



(a) 実験結果

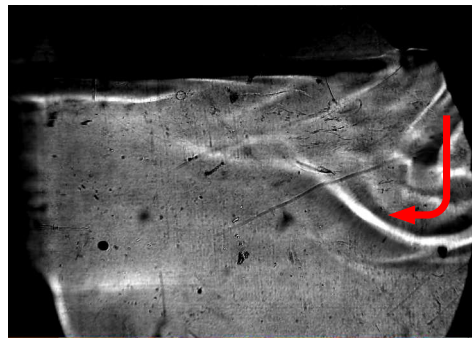


(b) Model1 解析結果

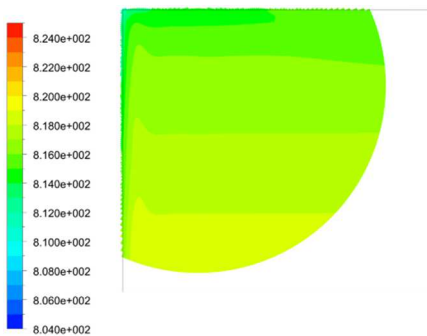


(c) Model2 解析結果

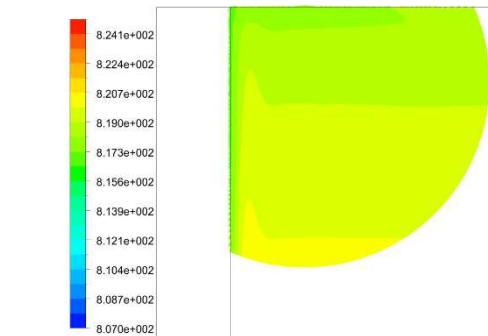
図 5.3.11 気液界面側板近傍における密度分布比較 300[s]



(a) 実験結果



(b) Model1 解析結果

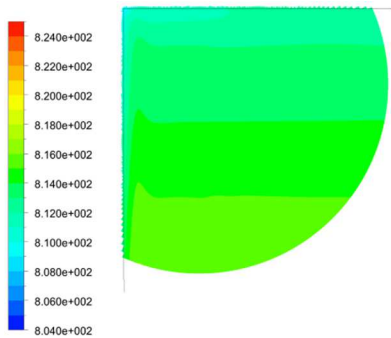


(c) Model2 解析結果

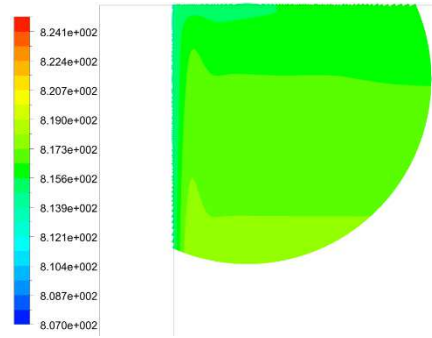
図 5.3.12 気液界面側板近傍における密度分布比較 600[s]



(a) 実験結果

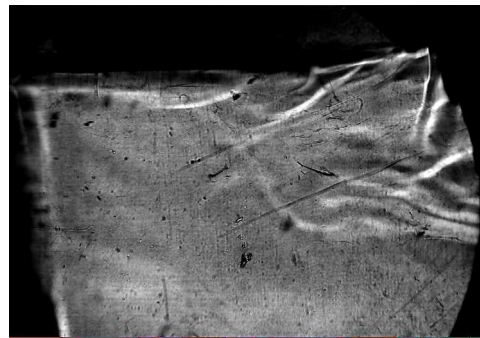


(b) Model1 解析結果

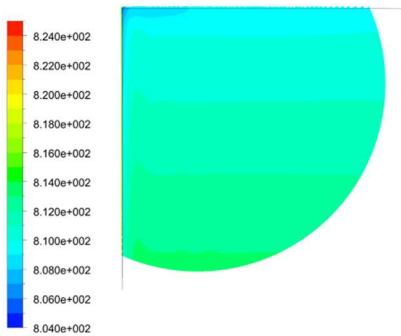


(c) Model2 解析結果

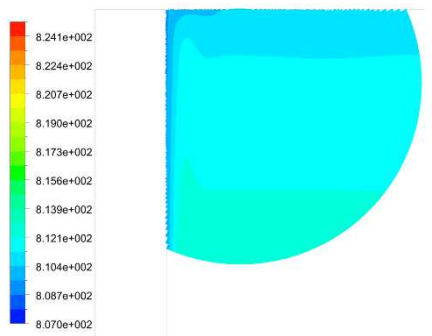
図 5.3.13 気液界面側板近傍における密度分布比較 900[s]



(a) 実験結果

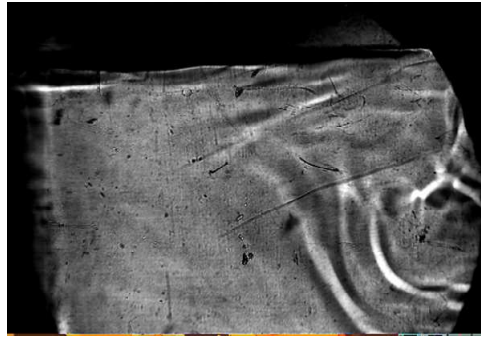


(b) Model1 解析結果

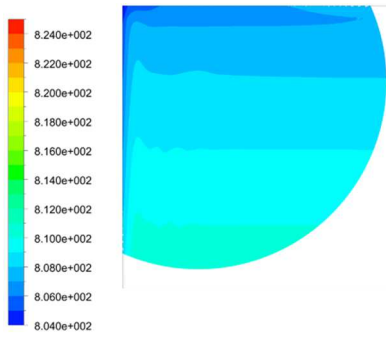


(c) Model2 解析結果

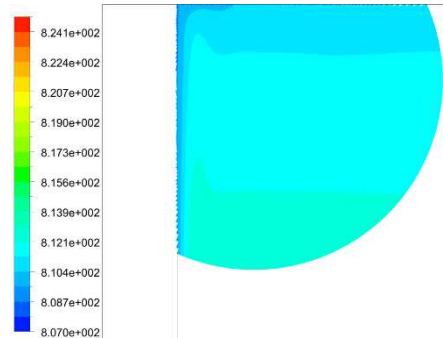
図 5.3.14 気液界面側板近傍における密度分布比較 1200[s]



(a) 実験結果



(b) Model1 解析結果

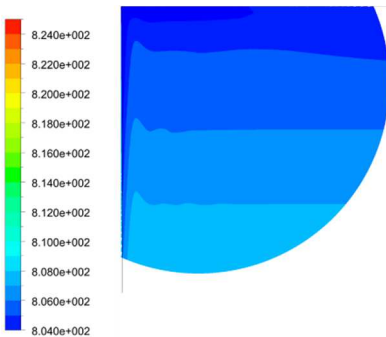


(c) Model2 解析結果

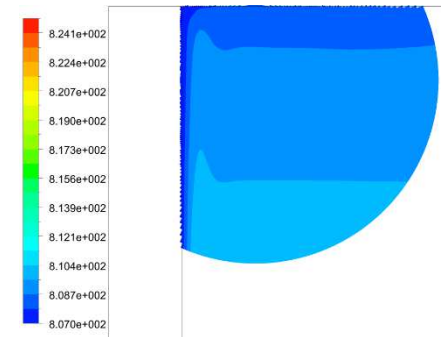
図 5.3.15 気液界面側板近傍における密度比較 1500[s]



(a) 実験結果

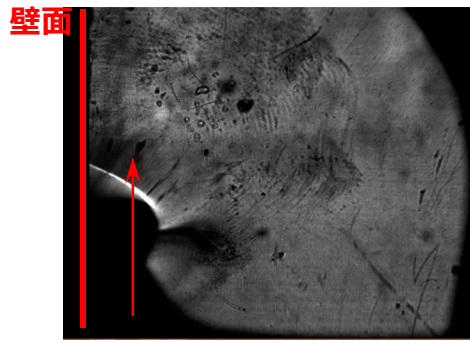


(b) Model1 解析結果

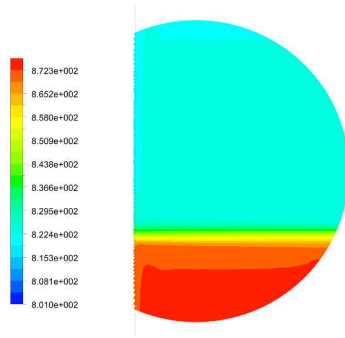


(c) Model2 解析結果

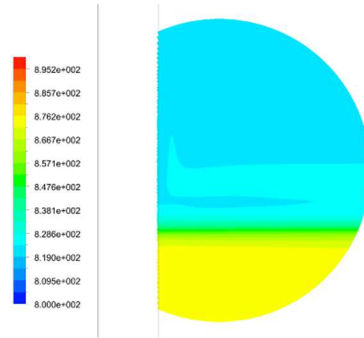
図 5.3.16 気液界面側板近傍における密度分布比較 1800[s]



(a) 実験結果

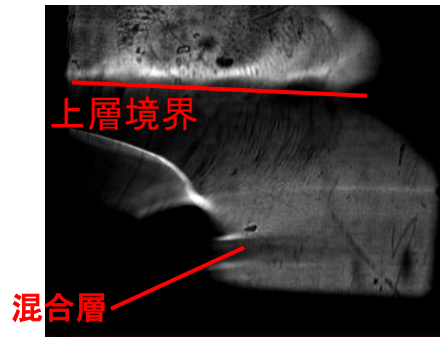


(b) Model1 解析結果

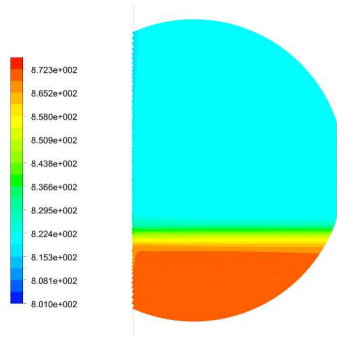


(c) Model2 解析結果

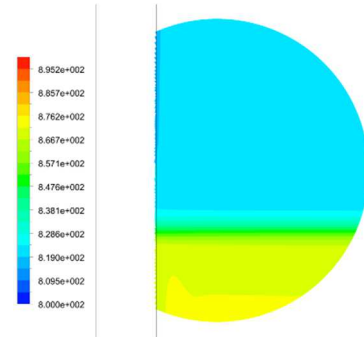
図 5.3.17 上層層境界側板近傍における密度分布比較 300[s]



(a) 実験結果



(b) Model1 解析結果

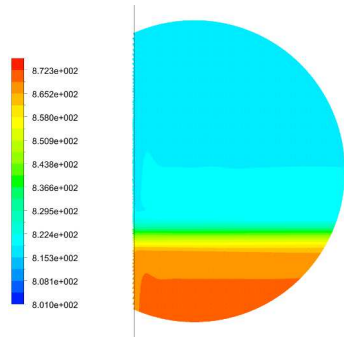


(c) Model2 解析結果

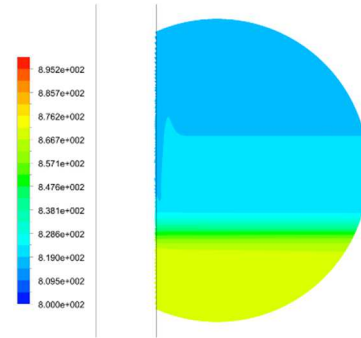
図 5.3.18 上層層境界側板近傍における密度分布比較 600[s]



(a) 実験結果

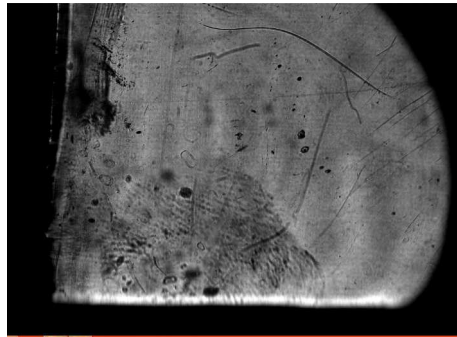


(b) Model1 解析結果

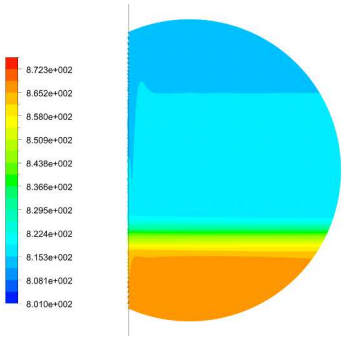


(c) Model2 解析結果

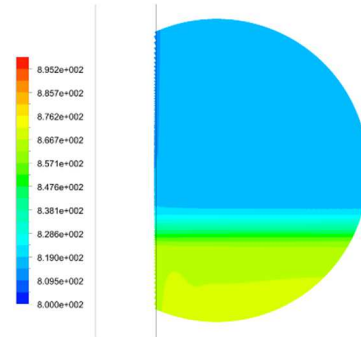
図 5.3.19 上層層境界側板近傍における密度分布比較 900[s]



(a) 実験結果

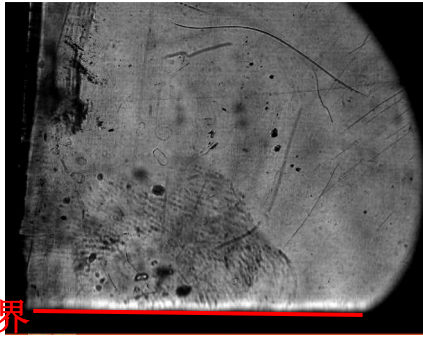


(b) Model1 解析結果



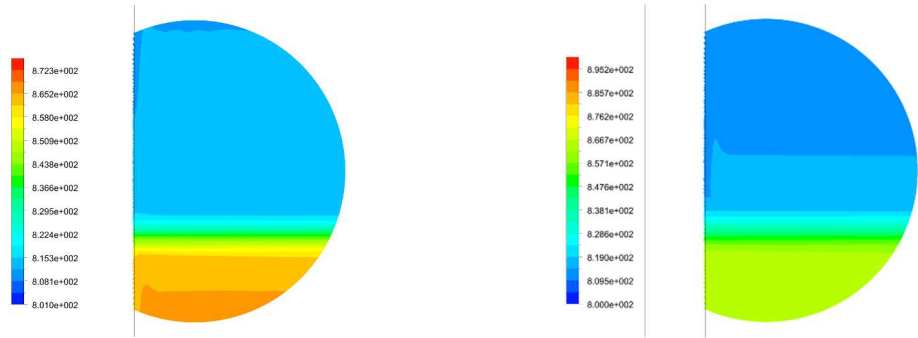
(c) Model2 解析結果

図 5.3.20 上層層境界側板近傍における密度分布比較 1200[s]



上層境界

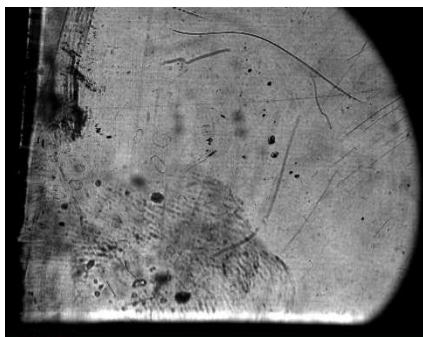
(a) 実験結果(測定点を上昇させた後)



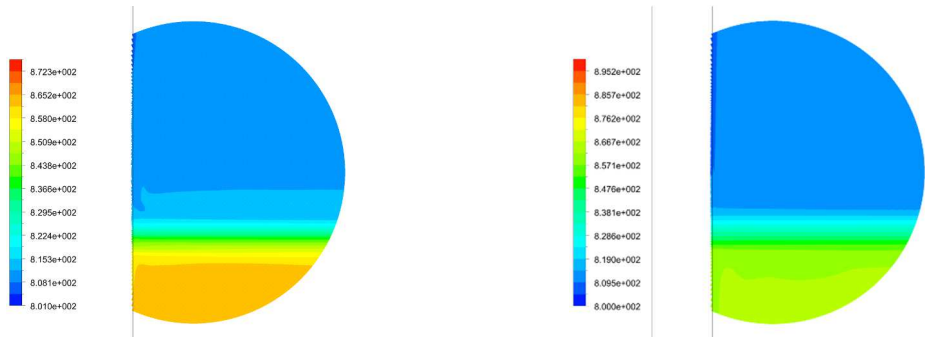
(b) Model1 解析結果

(c) Model2 解析結果

図 5.3.21 上層層境界側板近傍における密度分布比較 1500[s]



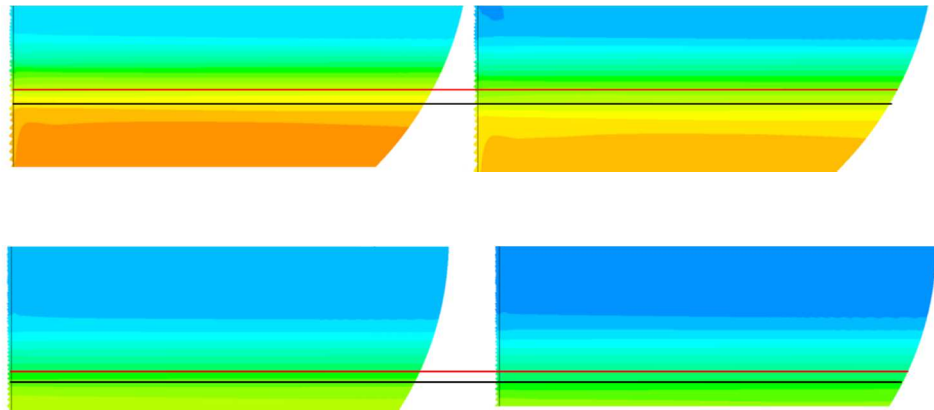
(a) 実験結果



(b) Model1 解析結果

(c) Model2 解析結果

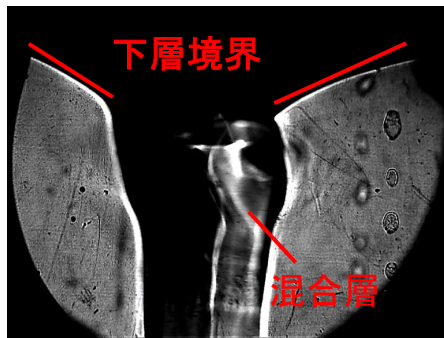
図 5.3.22 上層層境界側板近傍における密度分布比較 1800[s]



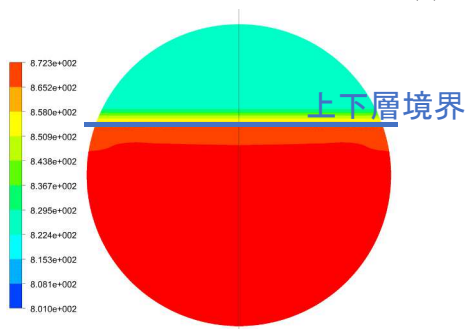
(a) 1200[s]

(b) 1800[s]

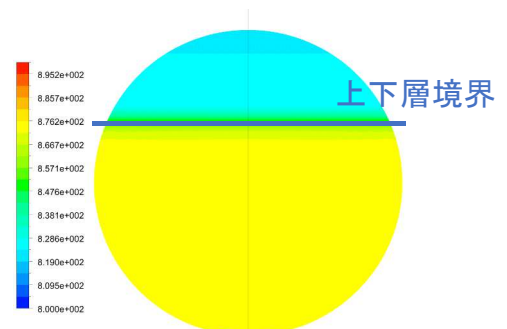
図 5.3.23 層境界の下降(上:Model1, 下:Model2)



(a) 実験結果

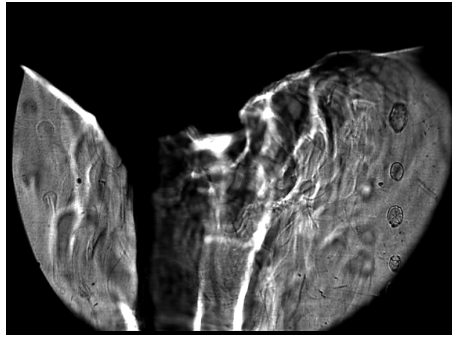


(b) Model1 解析結果

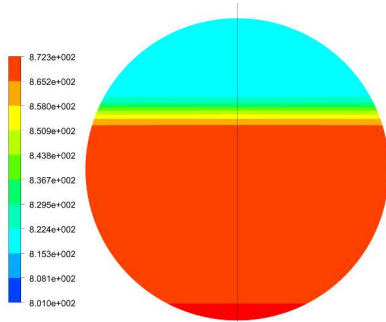


(c) Model2 解析結果

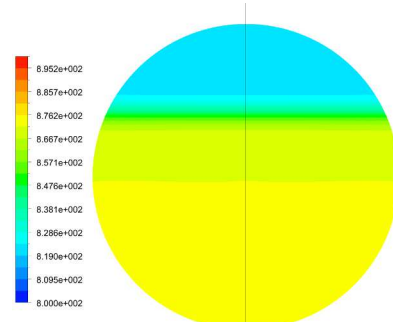
図 5.3.24 下層層境界中心における密度分布 300[s]



(a) 実験結果

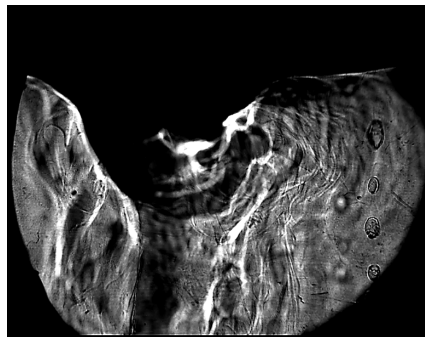


(b) Model1 解析結果

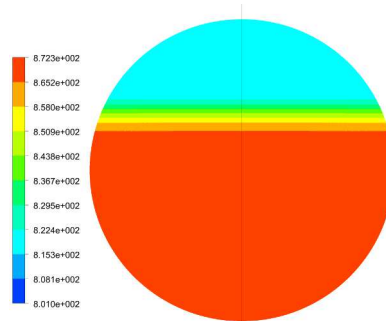


(c) Model2 解析結果

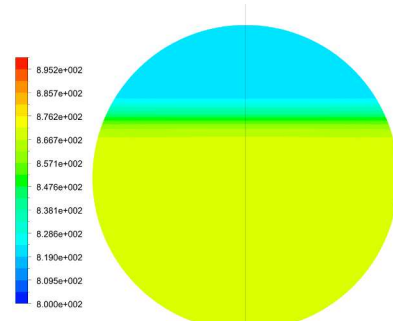
図 5.3.25 下層層境界中心における密度分布 600[s]



(a) 実験結果

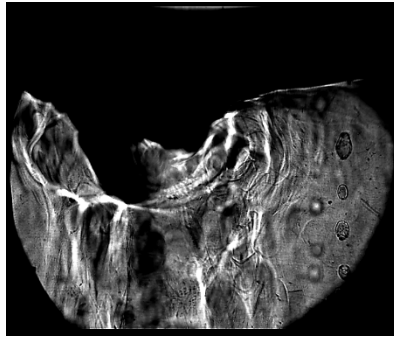


(b) Model1 解析結果

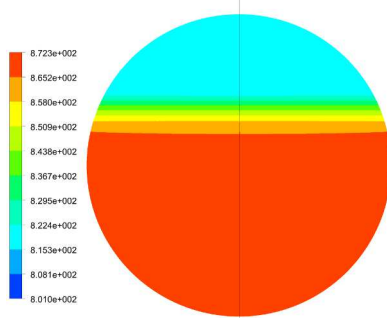


(c) Model2 解析結果

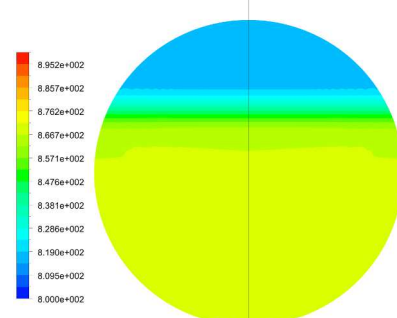
図 5.3.26 下層層境界中心における密度分布 900[s]



(a) 実験結果

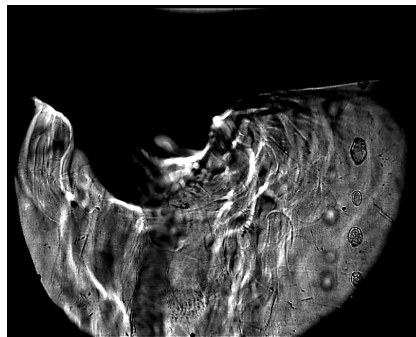


(b) Model1 解析結果

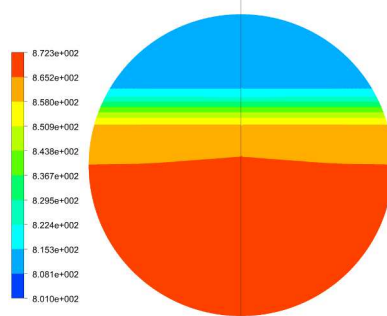


(c) Model2 解析結果

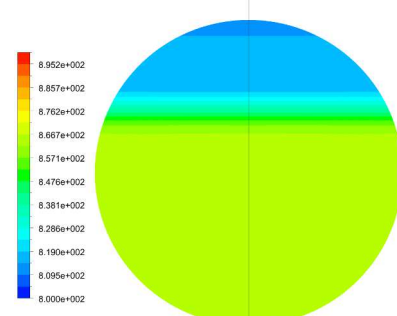
図 5.3.27 下層層境界中心における密度分布 1200[s]



(a) 実験結果

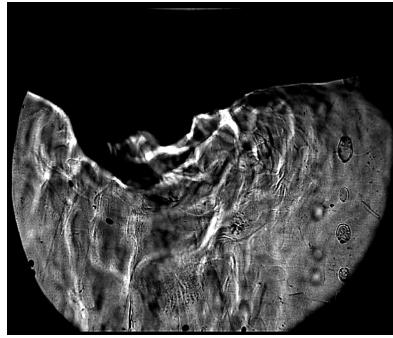


(b) Model1 解析結果

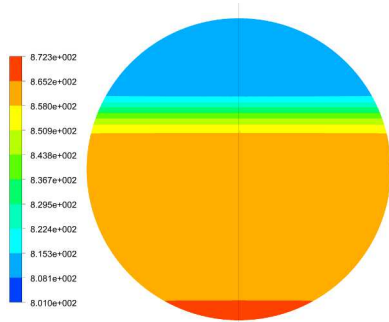


(c) Model2 解析結果

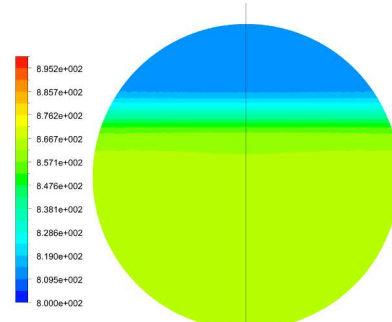
図 5.3.28 下層層境界中心における密度分布比較 1500[s]



(a) 実験結果

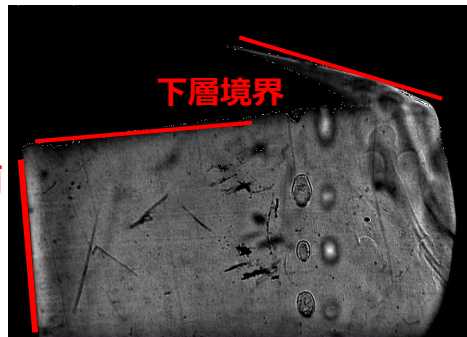


(b) Model1 解析結果

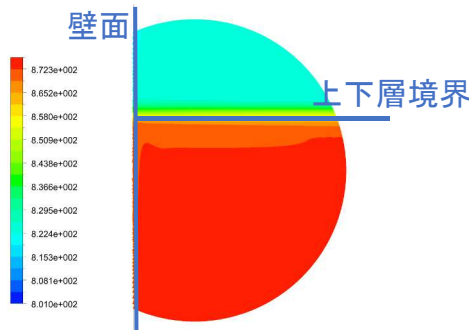


(c) Model2 解析結果

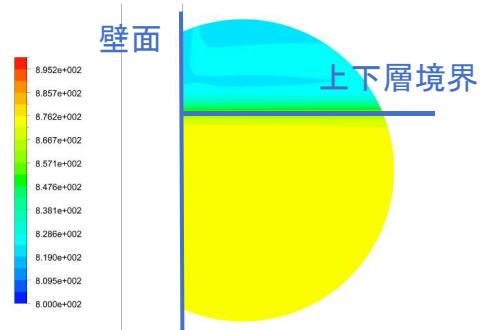
図 5.3.29 下層層境界中心における密度分布比較 1800[s]



(a) 実験結果

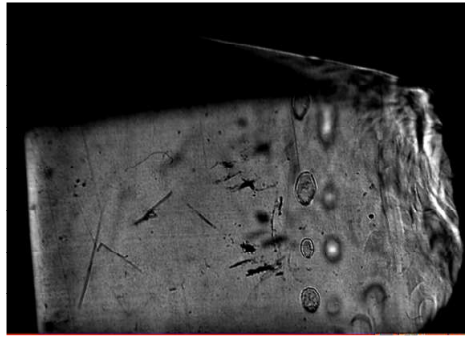


(b) Model1 解析結果

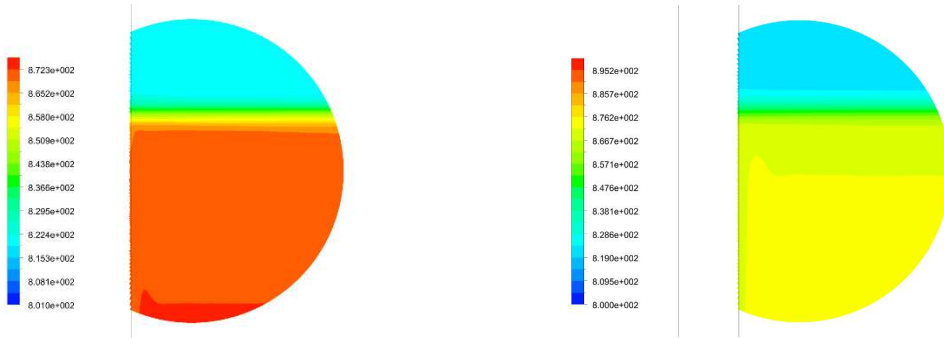


(c) Model2 解析結果

図 5.3.30 下層層境界側板近傍における密度分布比較 300[s]



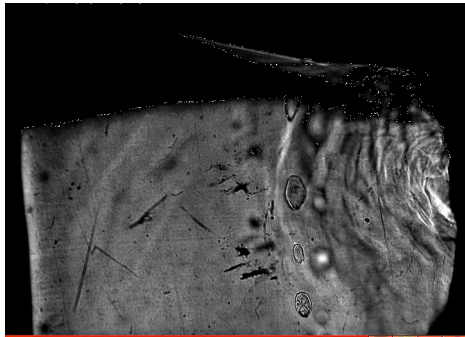
(a) 実験結果



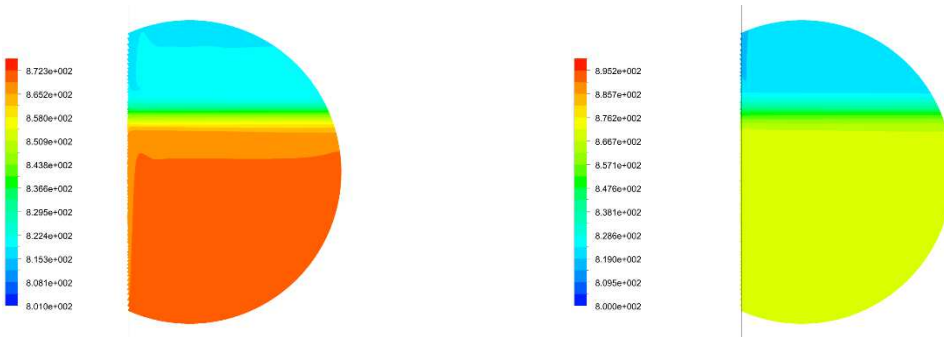
(b) Model1 解析結果

(c) Model2 解析結果

図 5.3.31 下層層境界側板近傍における密度分布比較 600[s]



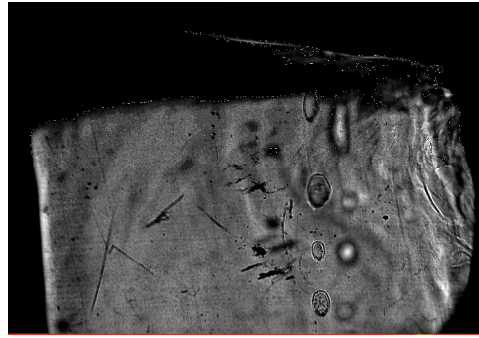
(a) 実験結果



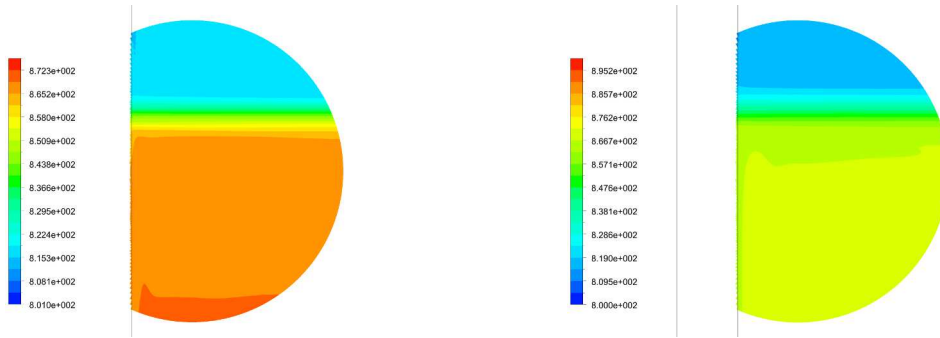
(b) Model1 解析結果

(c) Model2 解析結果

図 5.3.32 下層層境界側板近傍における密度分布比較 900[s]



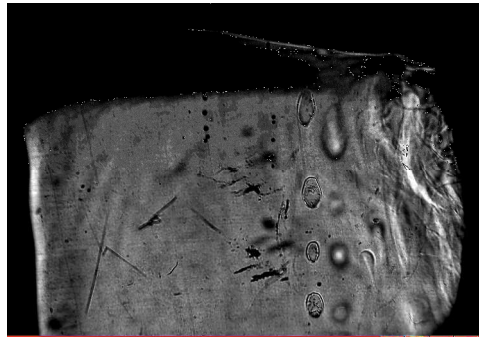
(a) 実験結果



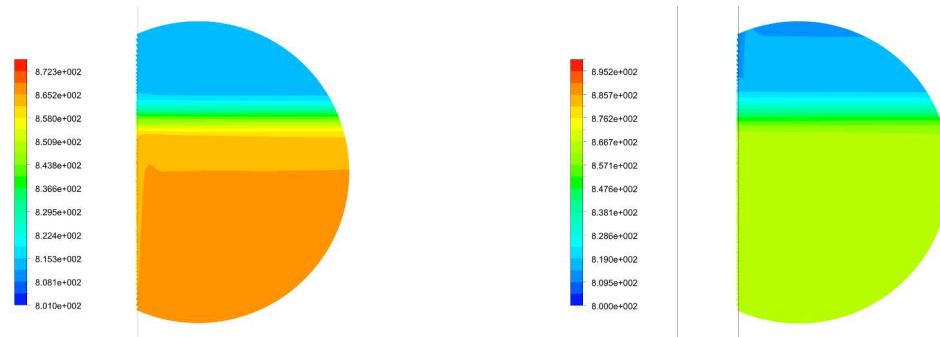
(b) Model1 解析結果

(c) Model2 解析結果

図 5.3.33 下層層境界側板近傍における密度分布比較 1200[s]



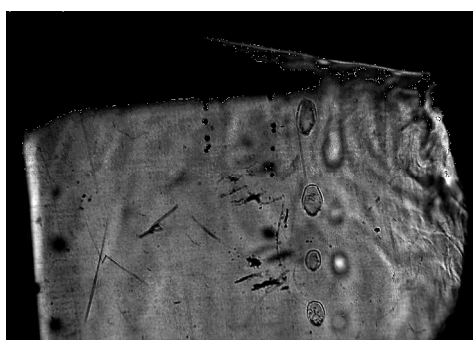
(a) 実験結果



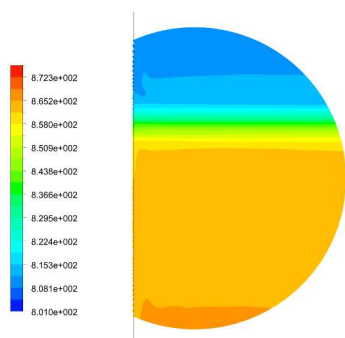
(b) Model1 解析結果

(c) Model2 解析結果

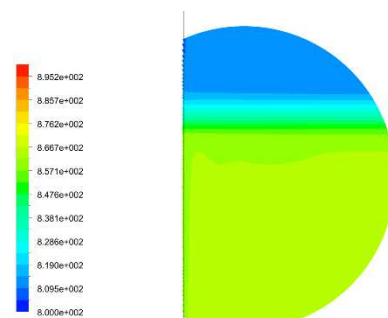
図 5.3.34 下層層境界側板近傍における密度分布比較 1500[s]



(a) 実験結果

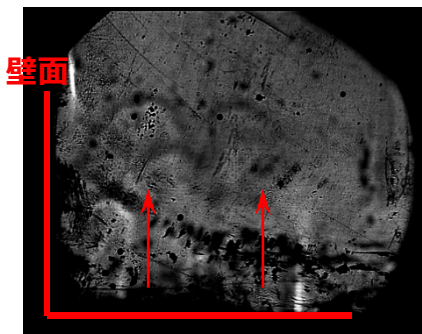


(b) Model1 解析結果

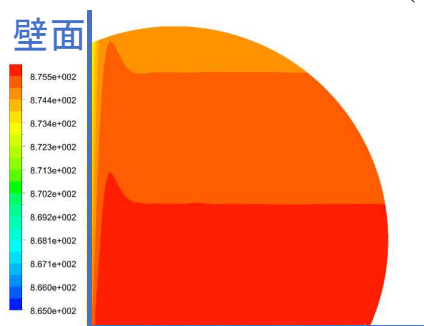


(c) Model2 解析結果

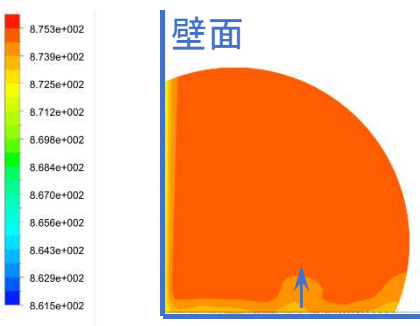
図 5.3.35 下層層境界側板近傍における密度分布比較 1800[s]



(a) 実験結果

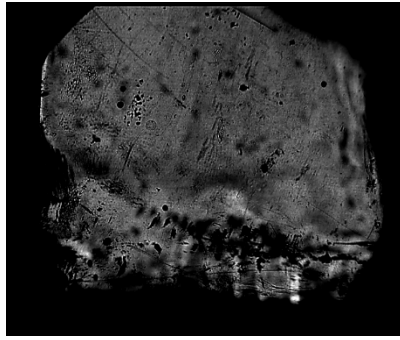


(b) Model1 解析結果

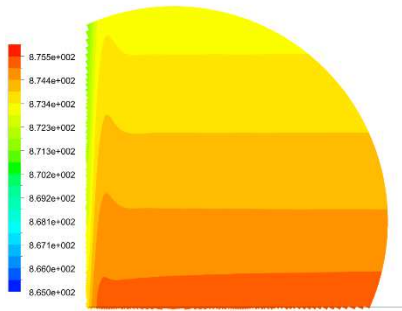


(c) Model2 解析結果

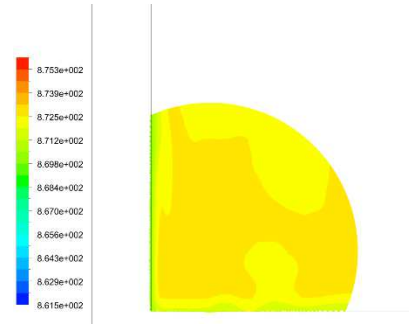
図 5.3.36 側底板近傍における密度分布比較 300[s]



(a) 実験結果

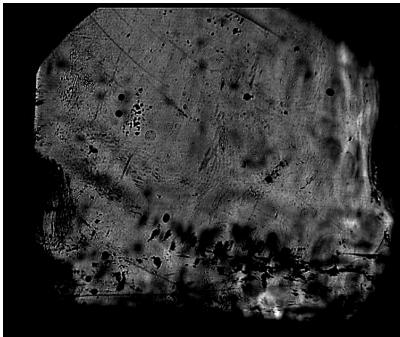


(b) Model1 解析結果

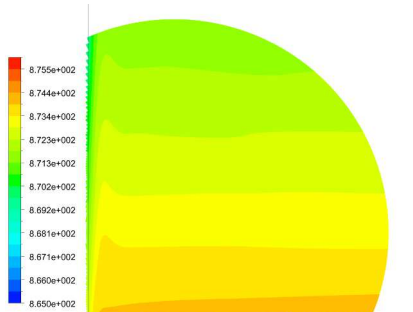


(c) Model2 解析結果

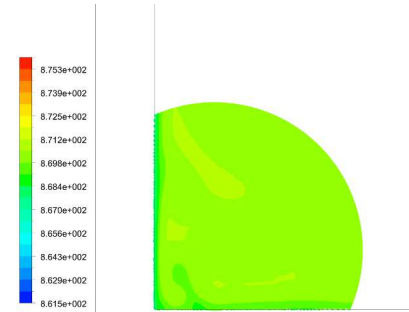
図 5.3.37 側底板近傍における密度分布比較 600[s]



(a) 実験結果

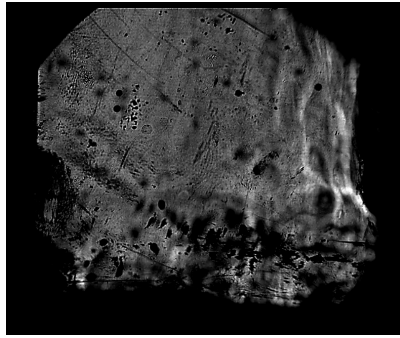


(b) Model1 解析結果

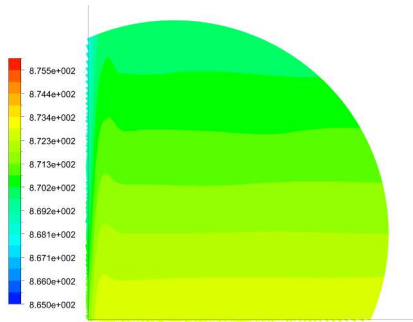


(c) Model2 解析結果

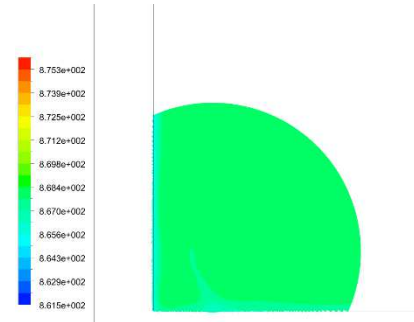
図 5.3.38 側底板近傍における密度分布比較 900[s]



(a) 実験結果

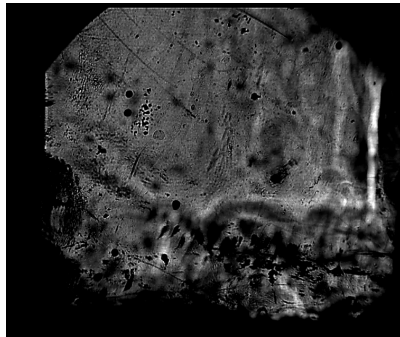


(b) Model1 解析結果

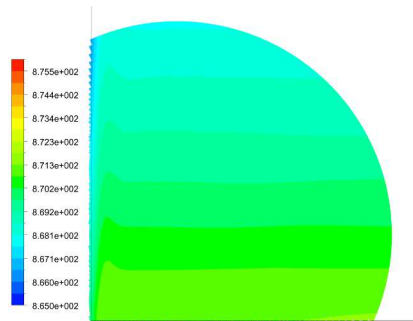


(c) Model2 解析結果

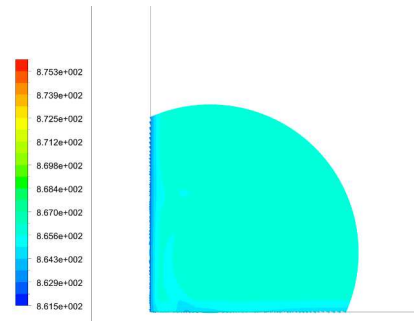
図 5.3.39 側底板近傍における密度分布比較 1200[s]



(a) 実験結果

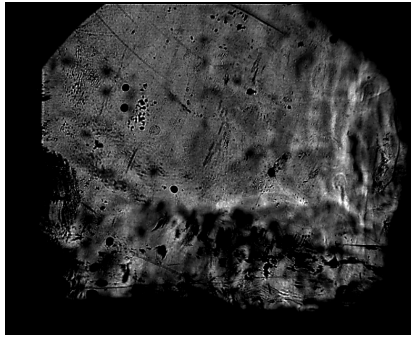


(b) Model1 解析結果

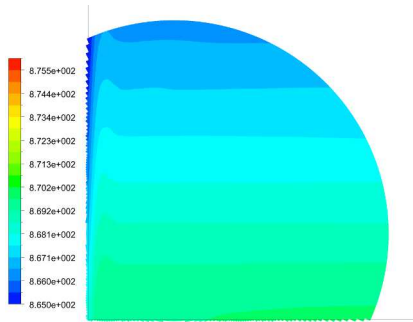


(c) Model2 解析結果

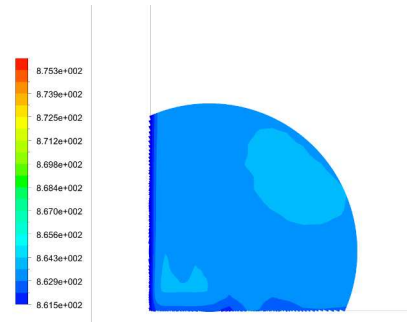
図 5.3.40 側底板近傍における密度分布比較 1500[s]



(a) 実験結果



(b) Model1 解析結果



(c) Model2 解析結果

図 5.3.41 側底板近傍における密度分布比較 1800[s]

第6章 結言

6.1. 研究結果のまとめ

実験結果から温度分布の二次元性が確認でき、二次元解析の妥当性が確認できた。また、解析と実験の比較から実験において底面への熱伝導があり、側板から底板への熱伝導による温度分布の影響が大きいことが確認された。また、同様に実験と解析の比較から界面の熱流束は気液の温度差による熱の授受が支配的ではなく潜熱等の他の要因が支配的である。密度場においては上層では実験と解析において定性的にはほぼ一致し、下層では混合層の影響によって定性的には異なる。また、気相を考慮する際には Mixture モデルによる気液が完全に分離している解析は差異が大きいことが確認された。

6.2. 今後の課題

今後の課題として以下の5つが挙げられる。

- 底面への熱伝導が抑制される実験モデルの構築

現在の実験で確認される側面と底面からの加熱による対流は現象として複雑であるため、まずはより簡単な現象である側面の加熱のみの対流を取り扱い、その後側面と底面の同時加熱による現象に対応させるようにするという流れで解析を進めていく必要がある。初期段階である側面の加熱のみのモデルを評価する実験モデルが必要であるため、新たに構築する必要がある。

- 混合層の抑制

今回実施したシャドウグラフ法によってわずかに形成された混合層によって下層の密度場に影響を与えることがわかった。そのため、より混合層の形成を抑制する方法を考案する必要がある。

- 密度場の定量的測定

密度場の評価を定性的に行っているが、より解析の評価を厳密に行うため定量的な評価が必要となる。そのため密度場を定量的に測定する必要がある。

- BOG 量の評価

相変化による解析を評価する際に、BOG 量がどれだけ現実の値に近いかがということが重要となる。そのため、実験における BOG 量を測定し解析と比較する必要があり、BOG 量の測定方法の構築が必要となる。

- 混合物系の相変化解析

今年度では単一成分での相変化を取り扱った。今後は混合物系の相変化を取り扱い、実験により近い、高精度の解析を目指す必要がある。

参考文献

- (1) 資源エネルギー庁 平成 27 年度エネルギーに関する年次報告
- (2) 小山和夫, シミュレーション技術がリスクを極小化し異種 LNG 混合貯蔵のメリットを生かす, 石油・天然ガスレビュー 2008
- (3) Winter, E.R.F, Improved fluid dynamics similarity, analysis and verification, Oct 01, 1968
- (4) IEA, Gas Medium-Term Market Report 2015
- (5) Jerome Lacapere, Mathieu Gardette, Cryospace 社と Air Liquide 社における宇宙工学の取り組み, Fluent News Fall 2005
- (6) 佐藤収, LNG 貯槽ロールオーバー現象予測技術に関する基礎研究, 平成 27 年度 室蘭工業大学卒業研究論文