

乾式リサイクルシステム解析コードの開発 (研究報告)

2000年4月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquires about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

乾式リサイクルシステム解析コードの開発 (研究報告)

戸澤克弘*、松本俊一*、掛樋 熱*

要 旨

本研究は、従来の Purex 再処理法と異なるシステム概念の乾式リサイクルシステム（乾式再処理）について、主要機器であるカソードプロセッサ（蒸留器）の蒸留挙動を模擬し、処理時間及び物質収支などを把握するための蒸留解析コード及び、プロセスセルの冷却挙動解析をパーソナルコンピュータ上で実施できるように解析モデルを作成したものである。これらは、乾式リサイクルシステム構築、評価のためのシステム解析ツール（設計ツール）開発の一環として行ったものである。

カソードプロセッサ蒸留解析コードの作成にあたっては、検証計算としてベンチマークデータが公開されている 2 次元キャビティ内の自然対流問題のベンチマーク解と本解析コードでのパーソナルコンピュータ上での計算結果を比較した結果、よく一致することを確認した。次に、本解析コードの精度向上、作業効率向上を目的とした改良を行った上で、本解析コードを用いてカソードプロセッサを模擬した円筒状の密閉容器の体系にて Cd の蒸留について蒸留解析を実施し、蒸留挙動がシミュレーションできることを確認した。

乾式プロセスセルの冷却挙動解析モデルの作成に当たっては、ワークステーション上の詳細解析モデルとのベンチマーク解析からパーソナルコンピュータ上でも十分な精度でモデル化できることを確認した。定常解析によりセル内の流況と温度分布を確認した上で、非常時冷却過渡解析を行った結果、定常的にはヒートバランスがとれた条件であっても、初期の段階で過渡的な温度ピークが発生することがわかった。さらに過渡解析の最終的な定常値は非定常変動の部分的な循環流のでき方に左右され、現象自体の不安定さに影響される可能性があるため、セル空調系の設計にあたっては、冷却ガスのよどみ部に発熱に伴う循環流を起こさない設計とする必要があることがわかった。

*大洗工学センター システム技術開発部 再処理システムグループ

Development of system analysis code for pyrochemical process using molten salt electrorifining

K.TOZAWA*, T.MATSUMOTO*, I.KAKEHI*

Abstract

This report describes accomplishment of development of a cathode processor calculation code to simulate the mass and heat transfer phenomena with the distillation process and development of an analytical model for cooling behavior of the pyrochemical process cell on personal computers. The pyrochemical process using molten salt electrorefining would introduce new technologies for new fuels of particle oxide, particle nitride and metallic fuels.

The cathode processor calculation code with distillation process was developed. A code validation calculation has been conducted on the basis of the benchmark problem for natural convection in a square cavity. Results by using the present code agreed well for the velocity-temperature fields, the maximum velocity and its location with the benchmark solution published in a paper. The functions have been added to advance the reality in simulation and to increase the efficiency in utilization. The test run has been conducted using the code with the above modification for an axisymmetric enclosed vessel simulating a cathode processor, and the capability of the distillation process simulation with the code has been confirmed.

An analytical model for cooling behavior of the pyrochemical process cell was developed. The analytical model was selected by comparing benchmark analysis with detailed analysis on engineering workstation. Flow and temperature distributions were confirmed by the result of steady state analysis. In the result of transient cooling analysis, an initial transient peak of temperature occurred at balanced heat condition in the steady-state analysis. Final gas temperature distribution was dependent on gas circulation flow in transient condition. Then there were different final gas temperature distributions on the basis of the result of steady-state analysis. This phenomenon has a potential for it's own metastable condition. Therefore it was necessary to design gas cooling flow pattern without cooling gas circulation flow derived from component in the hot cell gas cooling system design.

*Reprocessing System Engineering Group, System Engineering Technology Division,
O-arai Engineering Center, JNC

目 次

第 I 編 カソードプロセッサ蒸留解析コードの作成

1. 緒言	I - 1
2. コードの作成	I - 2
2.1 蒸留解析コードの計算領域	I - 2
2.2 プログラム概要	I - 2
2.3 基礎式	I - 5
3. プログラム使用例	I - 11
4. カソードプロセッサ蒸留計算例	I - 23
4.1 検証計算	I - 23
4.1.1 温度及び速度に関する空間分布	I - 24
4.1.2 速度分布に関する定量的比較	I - 24
4.2. カソードプロセッサ模擬体系による試計算	I - 29
4.2.1 計算条件	I - 29
4.2.2 機能確認計算の結果	I - 38
5. まとめ	I - 61
6. 参考文献	I - 62

第 II 編 乾式プロセスの冷却挙動解析モデルの検討

1. 緒言	II - 1
2. 解析モデルの作成	II - 2
3. ベンチマーク計算	II - 8
4. 定常解析	II - 16
5. 過渡解析	II - 30
6. まとめ	II - 47

図表リスト

第 I 編 カソードプロセッサ蒸留解析コードの作成

表 4-1 キャビティー中央断面での最大速度及び最大速度点（計算値）	I -28
表 4-2 キャビティー中央断面での最大速度及び最大速度点（文献値）	I -28
表 4-3 アスキ-ファイル出力例 *** 速度 U (m/s) 空間分布***	I -52
表 4-4 アスキ-ファイル出力例 *** 速度 V (m/s) 空間分布***	I -53
表 4-5 アスキ-ファイル出力例 *** 温度 (K) 空間分布 ***	I -54
表 4-6 アスキ-ファイル出力例 *** 圧力変動 (Pa) 空間分布***	I -55
表 4-7 アスキ-ファイル出力例 ***成分質量分率 空間分布 (1/2) ***	I -56
表 4-7 アスキ-ファイル出力例 ***成分質量分率 空間分布 (2/2) ***	I -57
表 4-8 アスキ-ファイル出力例 ***成分密度 (kg/m ³) 空間分布 (1/2) ***	I -58
表 4-8 アスキ-ファイル出力例 ***成分密度 (kg/m ³) 空間分布 (2/2) ***	I -59
表 4-9 アスキ-ファイル出力例 *** 熱伝導係数 (W/m/K) 空間分布 ***	I -60
 図 2-1 蒸留解析コードの計算領域	I -9
図 2-2 蒸発モデル	I -10
図 4-1 温度 (T) の等高線図の比較	I -25
図 4-2 水平流速ベクトル (u) の等高線図の比較	I -26
図 4-3 垂直流速ベクトル (v) の等高線図の比較	I -27
図 4-4 格子生成	I -30
図 4-5 気・液領域の設定	I -31
図 4-6 計算条件の設定	I -32
図 4-7 初期条件の設定	I -33
図 4-8 境界条件の設定—上面および下面の温度と第 1 種の化学種 (アルゴン) の濃度境界条件	I -34
図 4-9 境界条件の設定—側壁の温度境界条件	I -34
図 4-10 境界条件の設定—上面および下面の第 2 種の化学種 (C d) の濃度境界条件	I -35
図 4-11 境界条件の設定—側壁の第 2 種の化学種 (C d) の濃度境界条件	I -35
図 4-12 モニターグラフ出力の設定	I -36
図 4-13 アスキーデータ出力の設定	I -36
図 4-14 物質の特性値の設定	I -37
図 4-15 物質収支のリアルタイム表示例	I -39
図 4-16 物質収支のリアルタイム表示例（代表ケース：るつぼ底～液面までの高さ；0.16m）	I -40
図 4-17 物質収支のリアルタイム表示例（るつぼ底～液面までの高さ；0.145m）	I -41

図 4-18 物質収支のリアルタイム表示例（るつぼ底～液面までの高さ；0.085m）-----	I -42
図 4-19 流速分布表示例（代表ケース：るつぼ底～液面までの高さ；0.16m）-----	I -43
図 4-20 流速－温度分布表示例（代表ケース：るつぼ底～液面までの高さ；0.16m）-----	I -44
図 4-21 流速－Cd 濃度分布表示例（代表ケース：るつぼ底～液面までの高さ；0.16m）-----	I -45
図 4-22 流速分布表示例（るつぼ底～液面までの高さ；0.145m）-----	I -46
図 4-23 流速－温度分布表示例（るつぼ底～液面までの高さ；0.145m）-----	I -47
図 4-24 流速－濃度分布表示例（るつぼ底～液面までの高さ；0.145m）-----	I -48
図 4-25 流速分布表示例（るつぼ底～液面までの高さ；0.085m）-----	I -49
図 4-26 流速－温度分布表示例（るつぼ底～液面までの高さ；0.085m）-----	I -50
図 4-27 流速－濃度分布表示例（るつぼ底～液面までの高さ；0.085m）-----	I -51

第Ⅱ編 乾式プロセスの冷却挙動解析モデルの検討

図 2-1 セル解析体系（ベンチマーク解析）	II-3
図 2-2 1.1万メッシュモデル	II-4
図 2-3 1.1万ポーラスマッシュモデル	II-4
図 2-4 2.2万メッシュモデル	II-5
図 2-5 4万メッシュモデル	II-5
図 2-6 STAR-CDによる解析メッシュモデル：24万メッシュ	II-6
図 2-7 長辺方向から見た詳細メッシュ（4万メッシュ）	II-7
図 2-8 短辺方向から見た詳細メッシュ（4万メッシュ）	II-7
図 2-9 上面方向から見た詳細メッシュ（4万メッシュ）	II-7
図 3-1 照明レベルでの機器中心部におけるガス温度分布の比較（モデルによる違い）	II-9
図 3-2 長手方向断面の流速分布（PHOENICS）	II-10
図 3-3 長手方向断面の流速分布（STAR-CD）	II-10
図 3-4 長手方向断面の温度分布（PHOENICS）	II-11
図 3-5 長手方向断面の温度分布（STAR-CD）	II-11
図 3-6 セル表面の温度分布（PHOENICS）	II-12
図 3-7 セル表面の温度分布（STAR-CD）	II-12
図 3-8 セル下面の温度分布（PHOENICS）	II-13
図 3-9 セル下面の温度分布図（STAR-CD）	II-13
図 3-10 機器中心部長手方向断面の流況（PHOENICSのモデルによる違い）	II-14
図 3-11 機器中心部長手方向断面の温度分布（PHOENICSのモデルによる違い）	II-15
図 4-1 セル解析体系（非常時解析）	II-18
図 4-2 1万メッシュ×2の解析メッシュ	II-19
図 4-3 2万メッシュ×2の解析メッシュ	II-19
図 4-4 4万メッシュ×2の解析メッシュ	II-20
図 4-5 照明レベルでの高発熱機器側機器中心部のガス温度分布比較（初期条件）	II-22
図 4-6 照明レベルでの高発熱機器側機器中心部のガス温度分布比較（低流量条件）	II-23
図 4-7 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況（初期条件）	II-24
図 4-8 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況（低流速条件）	II-25
図 4-9 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度（初期条件）	II-26
図 4-10 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度（低流速条件）	II-27
図 4-11 4万メッシュモデルにおける短辺方向の中心断面の流況分布及び温度分布の比較	II-28

図 5-1 照明レベルでの高発熱機器側機器中心の短辺方向中心部のガス温度の時間変化	II-31
図 5-2 4万メッシュ×2 モデルの 150 時間後の流況及び温度分布	II-32
図 5-3 2万メッシュ×2 モデルの 150 時間後の流況及び温度分布	II-33
図 5-4 4万メッシュ×2 モデルの 150 時間後の条件を初期条件とした場合の定常解析結果と収束予想条件の比較（各部の流況）	II-36
図 5-5 4万メッシュ×2 モデルの 150 時間後の条件を初期条件とした場合の定常解析結果と収束予想条件の比較（各部の温度）	II-37
図 5-6 詳細サイクルの照明レベルでの高発熱機器側機器中心の短辺方向中心部のガス温度の時間変化	II-39
図 5-7 詳細サイクルの 2万メッシュ×2 モデルの 50 時間後の流況及び温度分布	II-40
図 5-8 詳細サイクルの 4万メッシュ×2 モデルの 50 時間後の流況及び温度分布	II-41
図 5-9 現象確認用 2次元解析モデル	II-43
図 5-10 現象確認非定常解析での左端機器直上 1m でのガス温度の時間変化	II-44
図 5-11 現象確認非定常解析での初期条件及び低流速（収束条件）での各部の流況、温度	II-45
図 5-12 現象確認非定常解析での 30 分後の各部の流況、温度とそれを初期値とした定常解析結果	II-46

第Ⅰ編 カソードプロセッサ蒸留解析コードの作成

1. 緒言

乾式リサイクルプロセス（以下、乾式プロセス）の一つとして、使用済燃料の再処理工程に電解精製プロセスを使用した乾式プロセスがあり、従来の湿式リサイクルプロセス（以下、湿式プロセス）に比べて、主要なプロセス機器を小規模化できること、高い核不拡散性を有すること等の特徴を有している。

乾式プロセスは、使用済燃料集合体を解体した後に燃料ピンをせん断するための解体／せん断工程、せん断ピンからウラン（U）やプルトニウム（Pu）などを電気化学的に分離して陰極（固体陰極や液体カドミウム（Cd）陰極）に析出・回収するための電解精製工程、陰極を処理してUやPuをインゴット状にするための蒸留工程、回収したU、Puから新燃料集合体を製造するための燃料製造工程等から構成されている。

これらの工程に用いられる主要な機器は、従来の湿式プロセスで十分な使用実績がある機器も多いが、電解精製工程や蒸留工程などの乾式プロセス特有の機器については、一部の機器を除き、今後、研究開発、設計検討が必要と考える。

乾式プロセスの蒸留工程は、電解精製工程で回収されるU、Pu金属に含まれる塩化物（Salt）やCdを蒸留して分離、除去し、U、Pu金属をインゴット状で回収するプロセスであり、米国アルゴンヌ国立研究所（ANL）では、この蒸留装置をカソードプロセッサと呼んでいる。

乾式プロセス技術開発において、カソードプロセッサの装置設計を実施するためには、SaltやCdなどの蒸留挙動を把握した上で装置の最適化を進めていく必要があり、蒸留挙動を把握するためには、実験によるデータ取得と並行して解析コードを用いた検討が有効である。

本検討では、カソードプロセッサについて、蒸留炉寸法、運転条件（温度、圧力）、処理物質組成及び処理物種類を入力条件とした蒸留挙動を模擬する多成分2次元蒸留解析コードを作成する。また、作成したコードを用いてANLでのカソードプロセッサ体系での試計算を実施し、蒸留挙動を明らかにする。

2. コードの作成

2.1 蒸留解析コードの計算領域

カソードプロセッサ体系に対する本蒸留解析コードの計算領域を図 2-1 に示す。図示する通り本コードでは、るつぼ液面からの蒸発物質の蒸発挙動に着目したものであり、蒸発物質は蒸発面から自然対流及び物質移動（拡散）によりバッフル板、装置上面（上壁）、装置側壁面（側壁）へ移動し、それぞれの箇所での蒸発物質の凝縮量が求められる。また、本コードでは、カソードプロセッサ下部（下壁）は断熱壁と想定しているため、実機体系での回収るつぼは想定していない。

本解析コードは、蒸発面での飽和蒸気圧及び固体壁温度を境界条件とし、装置内での対流・拡散挙動についてのみ評価を行なう。

2.2 プログラム概要

本計算プログラムは、円筒状密閉容器内における多成分混合気体の対流・拡散現象を再現する数値シミュレーションコードである。

名称：CNVAXIS version1 (実行ファイル : cnvaxis.exe)

名称：CNVAXIS version2.0.1 (実行ファイル : cnvaxis_ver2.0.1.exe)

なお、「version2.0.1」は、「version 1」の解析精度及び作業効率向上を目的として、以下の機能を追加したものである。

- ①容器側壁上での壁面温度および組成の質量分率の分布を設定できる機能
- ②液面での蒸発量、壁面での凝縮量の時間変化を計算中にリアルタイム表示できる機能
- ③各種変数の全計算点デジタル値を一覧ファイルとして出力できる機能

出力内容は、流速分布、温度、圧力、蒸留成分濃度、混合気体密度、蒸留成分密度、輸送係数（粘性係数、熱伝導率、拡散係数）等である。

(1) 主な仕様

- ①軸対称圧縮性ナビエ・ストークス方程式に基づく直接数値解析法（DNS）に基づく。(ただし、圧力伝播に関しては 0 マッハ数近似を用いているため、高速流問題への適用は困難である。)
- ②重力項（浮力）の影響を考慮しているため熱対流問題への適用が可能である。
- ③多成分の濃度拡散を考慮している。（最大 7 種の成分まで設定可能である。）
- ④流体に関しては、理想気体の状態方程式を満たす气体とする。

(2) カソードプロセッサのモデル化

① 境界条件

- ・本コードにて蒸発成分の物質移動及び温度分布を計算するための境界条件としては、以下の項目を設定し、入力条件とした。

(温度)

るつぼ液面温度

るつぼ外表面温度

装置上壁温度

装置側壁温度

装置下壁温度

(蒸発成分濃度)・

るつぼ液面での各蒸発成分の濃度

装置上壁での各蒸発成分の濃度

装置側壁での各蒸発成分の濃度

装置下壁での各蒸発成分の濃度

* 各蒸発成分の濃度 : n_i^0 は、以下の式に基づき各蒸発成分の飽和蒸気圧から求める。

$$n_i^0 = \frac{p_i^0 V}{RT} \quad (p_i^0 : \text{各蒸発成分のある温度における飽和蒸気圧})$$

本コードでは、液面及び壁面での気-液平衡を仮定している。

② 物質移動のモデル化

- ・るつぼ液面（気-液界面）においては、蒸発成分は気-液平衡に達しているとみなし、蒸発成分は液面において濃度勾配による拡散のために上方の気体境界層に移動した後、対流及び気体中の拡散により空間中に移動する。（図 2-2 参照）
- ・液面上の空間（気体中）に移動した蒸発成分は、容器内の空間全体における温度差及び濃度差に起因する密度差によって誘起される拡散、対流により空間を移動する。
- ・空間内に広がった蒸発成分は、装置壁面に形成された気体境界層に至り、境界層内での対流と拡散及び装置壁面（正確には凝縮液膜表面：ただし、本コードでは液膜の厚さ及び熱抵抗は無視）での濃度勾配による拡散により気相中から壁面へ移行する。
- ・装置壁面での各種蒸発成分の凝縮量は、壁面での蒸発成分の分圧を飽和蒸気圧と仮定し、計算によって求まる壁面での蒸発成分の濃度が、この蒸気圧から求めた濃度以上になつた場合（以下の式の関係を満たす場合）、蒸発成分は全て壁面に凝縮する。

$$n_i' > n_i^0 = \frac{p_i^0 V}{RT}$$

 n_i' : 計算によって求まる蒸発成分の濃度 n_i^0 : 平衡蒸気圧より求まる蒸発成分の濃度

- ・蒸発速度 (g/s) は、各蒸発成分について拡散係数 (cm^2/s) (式(8)参照) を算出し、こ

の拡散係数に各蒸発成分の密度及びるつぼ液面面積を掛けることにより求められる。

(式 (13) 式参照)

③マスバランスのモデル化

- ・体系全体での蒸発成分のマスバランスに関しては、液面からの蒸発量から容器壁面での凝縮量を差し引いた残りが空間中に気相で存在する蒸発成分の量とする。

④温度分布のモデル化

- ・るつぼと装置壁面の間の空間での半径方向温度分布は、るつぼ外表面に設定した温度と装置壁面に設定した温度を境界条件として、空間内の蒸発成分の対流熱輸送及び熱伝導、気体と装置壁面間の対流熱伝達からなる伝熱により、温度分布が決定される。

⑤蒸気圧と液体組成のモデル化

- ・本コード内では、蒸気圧（分圧）と液体組成を考慮した関係式は含んでいない。
- ・多成分溶液系での解析を実施する場合は、液体混合系を想定しラウル則を用いて各蒸発成分の飽和蒸気圧に各蒸発成分の重量割合を掛け、補正した飽和蒸気圧を入力条件とすることで対応できる。

(3)動作環境

- ①CPU : Intel Pentium (または同互換 CPU) を使用するパーソナルコンピュータとする。
(CPU : 200MHz、メモリー : 64M で起動確認済み)
- ②OS : Windows 95/98 及び NT4.0 とする。
(ただし、Windows95 では、OpenGL ライブラリーがインストールされていること。)

2.3 基礎式

2.3.1 流れ場の支配方程式

容器内の対流拡散現象を支配する方程式は以下の通りである。

質量保存式

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot u \quad (1)$$

運動量保存式

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\left(\chi - \frac{2}{3} \mu \right) (\nabla \cdot u) \delta_{lk} + \mu \left(\frac{du_l}{dx_k} + \frac{du_k}{dx_l} \right) \right] + \rho g \quad (2)$$

エネルギー保存式

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (3)$$

化学種質量保存式

$$\rho \frac{DY_i}{Dt} = \nabla \cdot (\rho D_i \nabla Y_i) \quad (4)$$

ただし、体積粘性率 χ は、ストークスの関係式を用いて 0 と仮定した。

状態方程式に関しては

$$p = \rho RT \sum_i \left(\frac{Y_i}{m_i} \right) \quad (5)$$

なお、上記支配方程式は、一般的な記述を用いて表記されたものであり、プログラム内部では、軸対象 2 次元座標系で記述されている。

2.3.2 混合気体の輸送特性

化学種ごとの輸送係数（粘性係数、熱伝導係数、拡散係数）の計算には、分子動力学に基づく算出式^{1), 2), 3)}

$$\mu_i = 2.6693 \times 10^{-5} \times \frac{\sqrt{m_i T}}{\sigma^2 \Omega^{(2,2)}} \quad [\text{g/cm}\cdot\text{s}] \quad (6)$$

$$\lambda_i = 1.9891 \times 10^{-4} \times \frac{\sqrt{T/m_i}}{\sigma^2 \Omega^{(2,2)}} \quad [\text{cal/cm}\cdot\text{s}\cdot\text{K}] \quad (7)$$

$$D_{ij} = 1.8583 \times 10^{-3} \times \frac{\sqrt{T^3 \left(\frac{1}{m_i} + \frac{1}{m_j} \right)}}{p \sigma_{ij}^2 \Omega_{ij}^{(1,1)F}} \quad [\text{cm}^2/\text{s}] \quad (8)$$

を用いている。ここで、 D_{ij} は2体拡散係数で、多成分混合系での拡散係数 D_{ij} とは厳密には異なるものであるが、両者のずれは 10 % 以内であることが知られているため、

$D_{ij} \approx D_{ij}$ とした。

混合気体系での粘性係数、熱伝導係数計算には、それぞれ Wilke⁴⁾, Manson and Saxena⁵⁾による近似公式、

$$\mu = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{1 + \frac{1}{X_i} \sum_{j \neq i} \Phi_{ij} X_j} \quad (9)$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{1 + \frac{1.065}{X_i} \sum_{j \neq i} \Phi_{ij} X_j} \quad (10)$$

$$\Phi_{ij} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left(1 + \frac{m_i}{m_j} \right)^{-\frac{1}{2}} \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{m_i}{m_j} \right)^{\frac{1}{4}} \right] \quad (11)$$

を用いた。

また、多成分系での有効拡散係数 D_i は、

$$\frac{1}{D_i} = \sum_{j \neq i} \frac{X_j}{D_{ij}} \quad (12)$$

とした。

なお、溶融金属（組成 i ）の液面からの蒸発量は、上記有効拡散係数 D_i と液面近傍での i 種気体濃度勾配から、 i 種の質量流速 M_{fluxi} として求めることができる。

$$M_{fluxi} = \rho D_i \times \frac{dY_i}{dn} \quad [\text{g}/\text{s}/\text{cm}^2] \quad (13)$$

混合気体の定圧比熱は、

$$C_{p,i} = A_0 + A_1 \hat{T} + A_2 \hat{T}^2 + A_3 \hat{T}^3 + A_4 \hat{T}^4 + A_5 \hat{T}^5 + A_6 \hat{T}^6 \quad [\text{J}/\text{mol}\cdot\text{K}] \quad (14)$$

$$C_p = \sum_i^N Y_i C_{p,i} \quad (15)$$

より求める。ただし、 $\hat{T} = T/1000$ とする。

2.3.3 計算手法

(1)圧力ポワソン方程式

前節で示した流れ場の各種保存式（質量保存式、運動量保存式、エネルギー保存式、化学種質量保存式）の解法は、差分法による直接数値シミュレーションに基づいて行われる。特に本解法では、運動量保存式より圧力場に関するポワソン方程式、

$$\nabla^2 p = -\rho \frac{d(\nabla \cdot u)}{dt} - \rho \nabla \cdot (u \cdot \nabla) u + \frac{1}{\rho} \nabla \rho \cdot \nabla p + \nabla \cdot \rho g \quad (15)$$

を導き出し、速度ダイバージェンスに関しては、

$$\nabla \cdot u = -\frac{C_p - R}{C_p p} \frac{Dp}{Dt} + \frac{1}{\rho C_p T} \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (16)$$

を用いている。上式は、質量保存式、エネルギー保存式、状態方程式より得られるものであり、この式の導入により、エネルギー輸送の効果を圧力場の変化に反映させている。

(2)離散化

差分法における離散化は、時間積分にオイラー陰解法、対流に関する空間微分項には3次精度風上差分法⁶⁾、それ以外の空間微分項には2次精度中心差分法を用いている。

それぞれの離散化に関する表記は以下の通りである。

オイラー陰解法

$$\frac{df}{dt} = \frac{f^{n+1} - f^n}{\Delta t} = L[f^{n+1}] + O(\Delta t) \quad (17)$$

3次精度風上差分法

$$u_i \frac{df}{dx_i} = u_i \frac{-f_{I+2} + 8f_{I+1} - 8f_{I-1} + f_{I-2}}{12\Delta x_i} + |u_i| \frac{f_{I+2} - 4f_{I+1} + 6f_I - 4f_{I-1} + f_{I-2}}{4\Delta x_i} + O(\Delta x_i^3) \quad (18)$$

2次精度中心差分法

$$\frac{df}{dx_i} = \frac{f_{I+1} - f_{I-1}}{2\Delta x_i} + O(\Delta x_i^2) \quad (19)$$

前述の流れ場の支配方程式、混合気体の輸送特性、圧力ポワソン方程式等で用いた記号を以下に示す。

C	モル濃度
C_p	定圧比熱
D	2体拡散係数
D	拡散係数（多成分系）
\mathbf{g}	重力ベクトル
m	分子量
p	圧力
R	普遍気体定数
T	温度
t	時間
\mathbf{u}	流速ベクトル
X	モル分率
Y	質量分率
λ	熱伝導率
μ	分子粘性係数
Ω	衝突積分
χ	体積粘性係数
ρ	密度
σ	衝突径

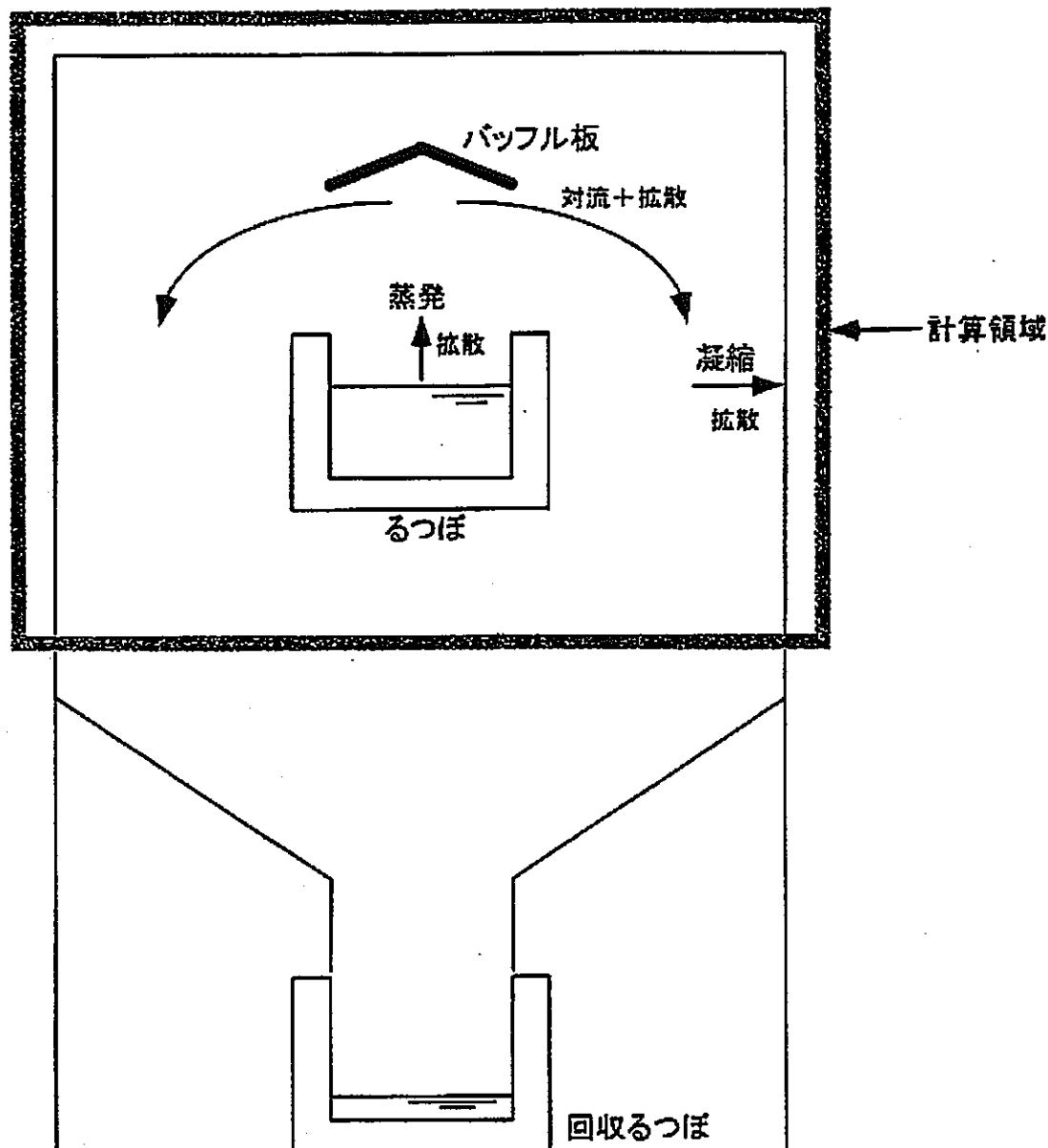
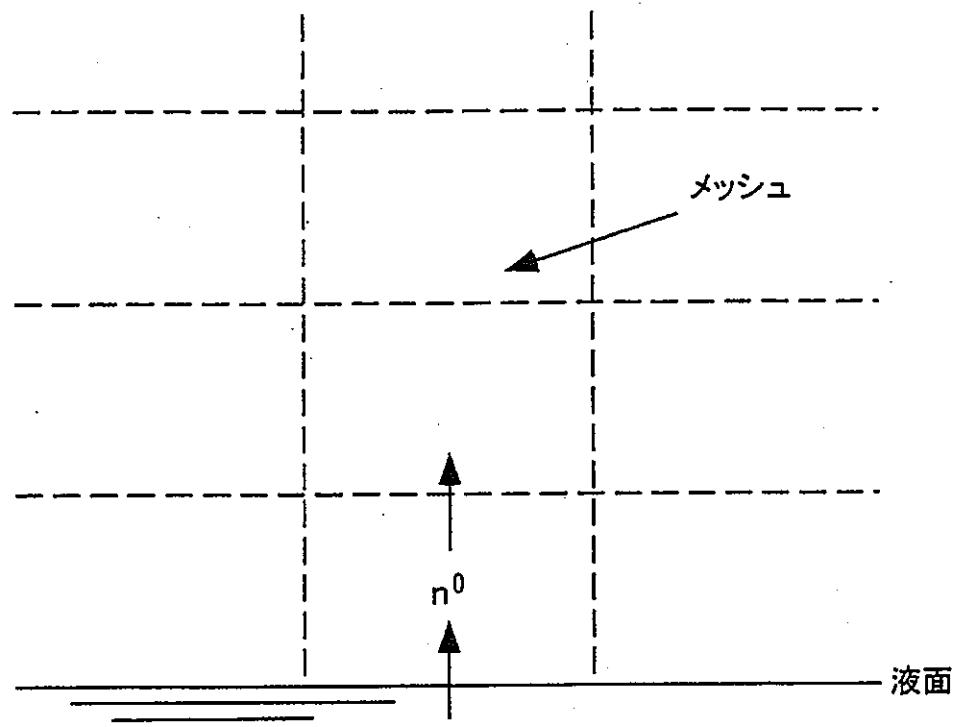


図 2-1 蒸留解析コードの計算領域



本コードでは、液面からの蒸発量 n^0 に対して常に同量が液中から補給されると考える。

図 2-2 蒸発モデル

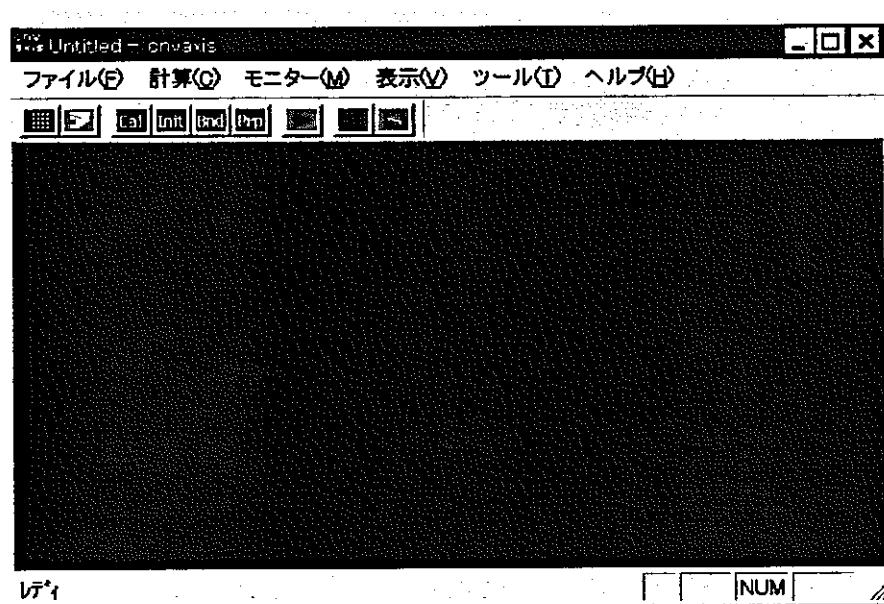
3. プログラム使用例

ここでは、プログラムを立ち上げてから、計算格子を新規に生成し、物性値などを入力した後、計算を開始させるための一連の手順について説明する。

計算は、格子生成からパラメータの入力、実行など全て1つのウィンドウ上の作業で行なわれる。なお、各項目で最初に太字で示された部分は、ウィンドウのプルダウンメニューである。

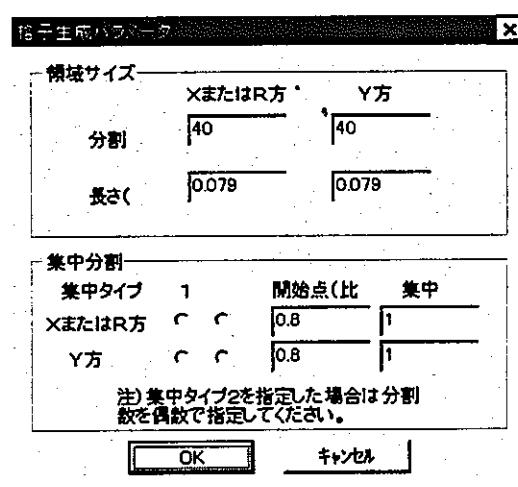
3.1 プログラムの起動

コマンドラインで `cnavaxis.exe` または `cnavaxis_ver2.0.1.exe` を入力するか、または、デスクトップに設定したアイコンをクリックすると本プログラムのウィンドウが立ち上がる。



3.2 格子生成

ファイル→格子生成



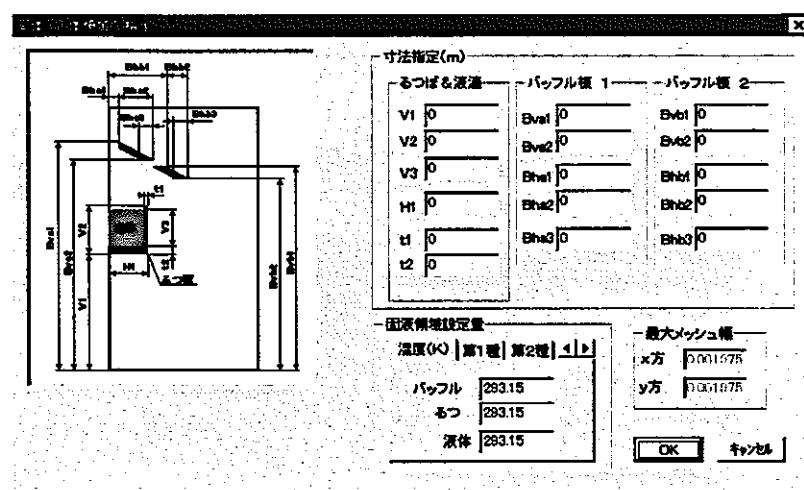
本プログラムは、計算領域境界近くで格子を集中させることができる。

格子を集中させるには、集中分割パラメータで、格子集中させる方向、集中度（1以上）、集中開始点（各辺の長さを1とする）などを指定する。集中タイプ1、2は片側壁集中に対応する。また、集中度1を指定すると自動的に等分割となる。格子分割数の最大数は、各方向256である。

以上の設定を行なうと、計算格子ファイルを保存するためのメニューが開かれるので、任意のファイル名を指定して保存する。（デフォルトでは fort.10）

3.3 固体、液体領域の指定

ファイルー固液領域生成

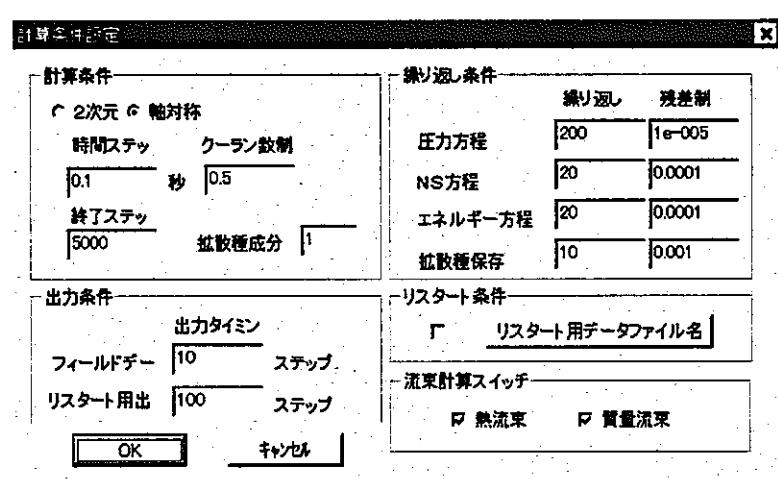


各寸法は、ダイアログボックス内の寸法指示に従って入力する。

固液領域の温度、濃度（質量分率）に関しては、本メニューで設定する。ただし、それぞれの量に関しては一定とする。また、液体領域に対する濃度指定は無いが、この部分に関しては、物性値設定（4.7）における飽和蒸気圧の設定によって行われる。

3.4 計算条件の設定

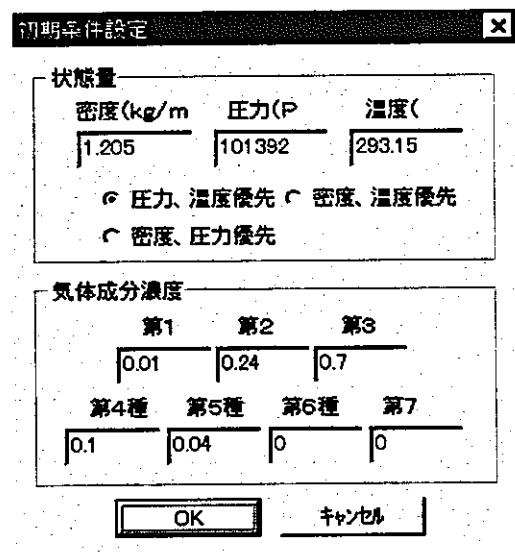
計算ー計算条件



計算条件では、2次元あるいは軸対称計算が選択できる。ここでは入力される時間ステップは、初期時間ステップで、クーラン数制限により実際の時間ステップは、計算途中で変化する。(クーラン数制限値を大きく設定すれば、一定の時間ステップで計算させることも可能) また、多成分系(7種まで設定可能)で、計算を行なう場合は、化学種成分数をここで正しく与える必要がある。出力条件の出力タイミングは、計算結果の出力タイミングである。

3.5 初期条件の設定

計算一初期値

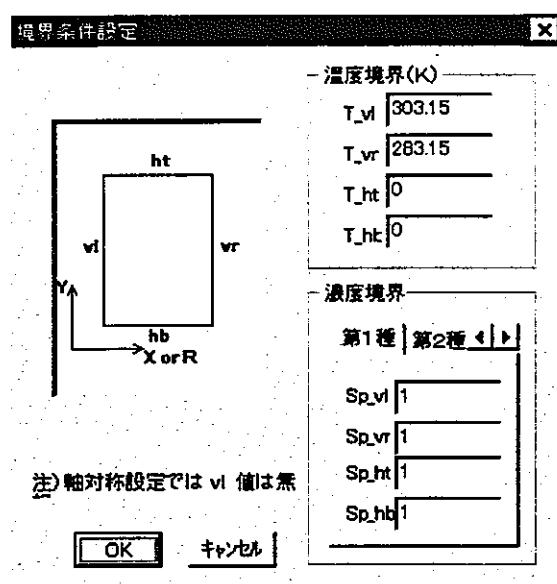


ここでは、容器内気体の初期状態量を設定する。状態量は、密度、圧力、温度のそれぞれが指定可能であるが、いずれの値を優先するかは、ボタンで選択する。

気体成分濃度に関しては、質量分率の値で指定し、設定した化学種の総和が1となるようにする。

3.6 境界条件の設定

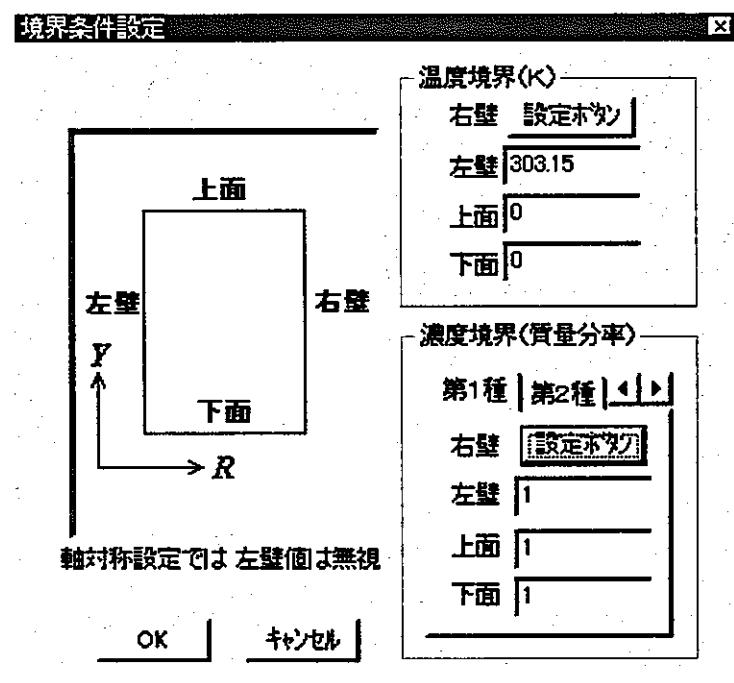
計算一境界値



温度に関しては、0を指定すると断熱壁条件となる。濃度境界値は、質量分率で指定し、設定した化学種の総和が1となるようにする。

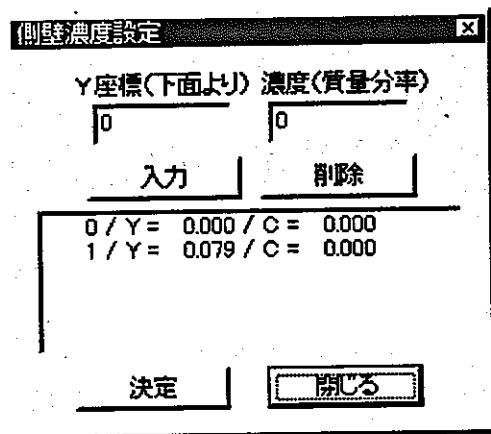
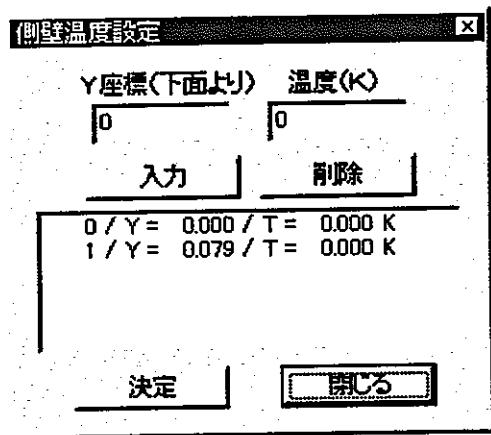
<CNVAXIS version 2.0.1において改良された側壁境界上の分布条件の設定について>

側壁境界条件（温度および成分質量分率）の設定を分布指定形式で以下の要領で行う。
先ず、【計算一境界値】により境界条件設定メニューを開く。



上記メニュー中の「右壁」は容器側壁にあたり温度境界、濃度境界の設定ボタンを押すと境界上での分布を指定することができる。

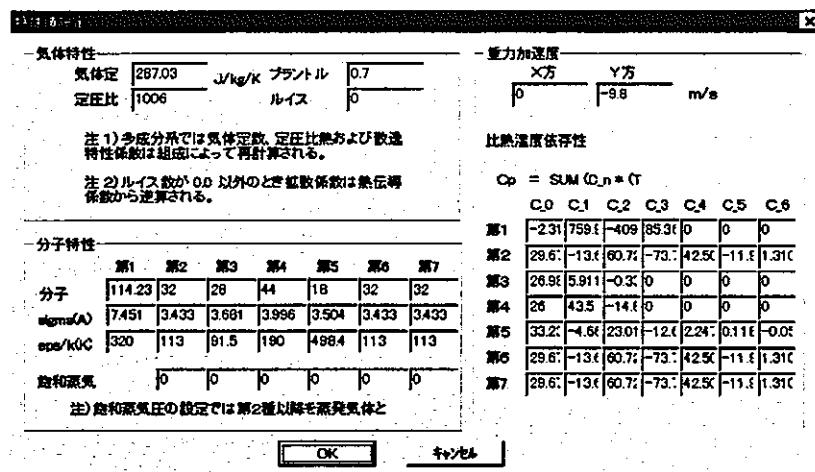
温度境界の設定ボタンを押すと境界上温度分布指定メニュー（下図の側壁温度設定画面）が、濃度境界の設定ボタンを押すと境界上濃度（質量分率）分布指定メニュー（下図の側壁濃度設定画面）が開く。



数値入力ボックスに座標値（下端が Y=0）と対応する温度、質量分率を入力し、入力ボタンをクリックするとリストボックス内に値が挿入される。初期メニューでは側壁下端と上端の値のみが設定されている。値を変更する場合は、リストボックスの値をダブルクリックすると数値入力メニューに該当する値が表示されるので、ここで値を変更し再度入力する。また、削除ボタンによりリストボックス内で指定された値を削除することも可能である。決定ボタンを押すと指定した値に基づいて側壁上の分布が計算される。分布は指定した座標値間で値が同じ場合は一定値、異なる場合は線形補間を行い決定される。なお、指定できる点数は上端下端含めて最大 20 点である。

3.7 物性値の設定

計算一 特性値



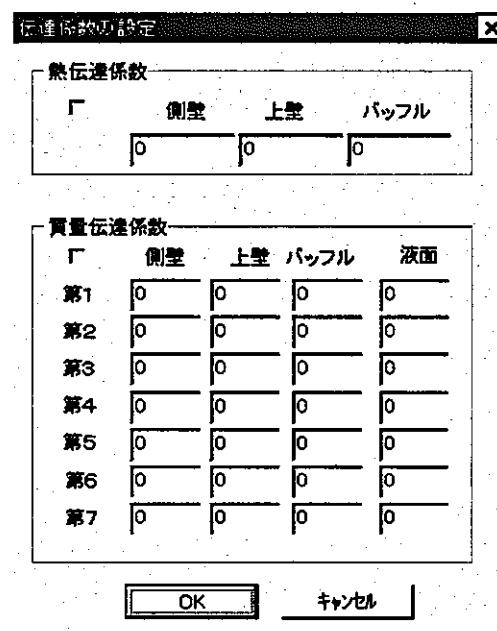
気体特性値に関しては、多成分系で計算する場合は、別個に計算されるためこの値は参照されない。分子特性の飽和蒸気圧に関して、本プログラムは液体の蒸発を扱うため、液体の飽和蒸気圧を設定するようになっている。この場合、液体は、第2種以降とし、第1種は初期に容器内に満たされている不活性ガスとして設定する。

σ , ϵ/k の値は、各成分の輸送特性（粘性、熱伝導、拡散）を計算するためのパラメータで、zero energy collision diameter, maximum energy of attraction/Boltzmann constant である。

比熱温度式に使用されている係数は、比熱の単位を J/mol/K とした時の値である。

3.8 伝達係数の設定

計算一 伝達係数



本プログラムでは、壁面、バッフル板への熱流束、質量流束は、プログラム内部で計算された気体の熱伝導率、拡散係数と各物理量の勾配から算出するが、熱伝導率、拡散係数の変わりに伝達係数として予め与えることが可能である。その場合の各流束Fは、伝達係数hを参考して、

$$F = h \times (\phi_g - \phi_s) \quad (20)$$

で計算される。（ ϕ は物理量）

上式を適用する場合には、メニュー中にチェックボックスをチェックした上で、各値を設定する。

3.9 計算開始

計算一開始

以上の条件を設定した後、上のメニューより計算を開始することができる。

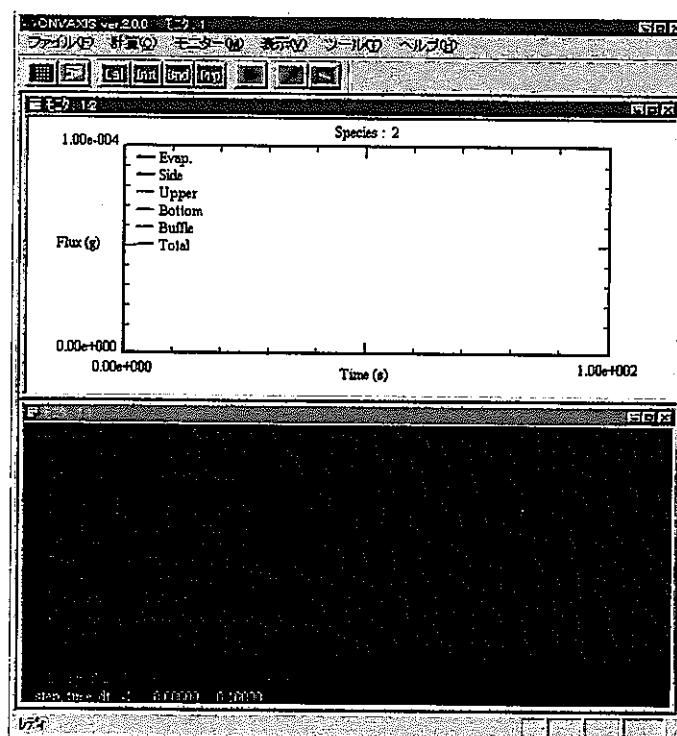
メニュー指定後、まず、プログラムは出力データのファイル名を要求してくれるので、任意のファイル名を入力する。(デフォルトでは fort.20)

入力後、計算は開始され、ウィンドウには計算の途中経過がモニタリングされる。

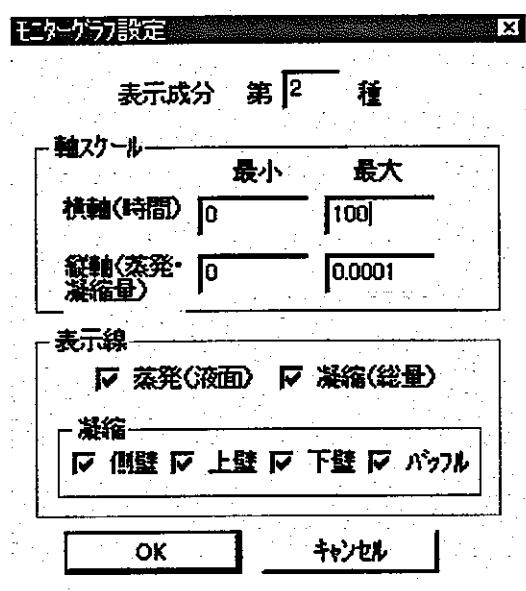
なお、表示されている画像は、等値線及び速度ベクトルでモニターメニューにより表示状態を変更することができる。(等値線の表示物理量No.は、u、v、密度、圧力変更、温度、以下化学種の質量分率の順番に対応する。)

<CNVAXIS version 2.0.1 にて改良された蒸発・凝縮量時間変化モニタリンググラフの表示について>

CNVAXIS VERSION 2.0.1 では、蒸発・凝縮量時間変化をモニタリングするため新たにグラフ表示用別ウィンドウを追加している。グラフ表示用ウィンドウは、メインメニューより【表示一グラフィック】をクリックすると開かれる。メインフレームには、可視化用モニタリングウインドウとグラフ表示用モニタリングウインドウの2つが開かれるが、【表示一上下に並べる】[表示一左右に並べる]により下図のように並べて表示することが可能である。



この状態で解析計算をスタートさせるとグラフ内には液面からの蒸発量(Evap)、側壁、上壁、下壁、バッフルでの凝縮量(Side, Upper, Bottom, Buffle)およびトータルの凝縮量(Total)がアニメーション可視化と同時に表示される。なお、表示されているグラフの縦軸(蒸発・凝縮量)、横軸(時間)のスケールはデフォルト値で設定されており、モニタリング対象となる蒸発気体成分もデフォルトで第2種(註:第1種は雰囲気气体の設定)となっている。それぞれのデフォルト値の変更は【モニター蒸発・凝縮変化】により下図のモニターグラフ設定メニュー内で行うことができる。



3.10 定点データの出力

ツールー定点データ出力

本プログラムは、指定したポイントのデータを時系列テキストデータとして出力することができる。その場合、計算を開始する前に予め本メニューより参照点、出力タイミングを指定しておく。

また、計算終了後、入力ファイルとして計算出力データを参照して、指定ポイントの時系列データを出力することもできる。その場合、出力タイミングを0とする。

なお、出力データの並びは、

ステップ数、時刻、u、v、密度、圧力変動、温度、質量分率(第1種)…、質量分率(第7種)の順番となる。

ここで書き込まれる出力ファイルは、上書きされずにデータとして書き加えられていくため、以前のファイルが残っている場合は、予め消しておく必要がある。

3.11 流束データの出力

ツールー流束データ出力

本プログラムは、側壁、上壁、バッフル板への熱流束、質量流束及び液面からの質量流束を時系列テキストデータとして出力することができる。その場合、計算を開始する前に、予め本メニューよりファイル名、出力タイミングを指定しておく。なお、ここで出力される流束は、単位面積当たりの流束ではなく、物体あるいは壁が回転体であることを想定した上の指定対象物表面全体への流束である。なお、出力データの並びは、

熱流束に関しては、

ステップ数、時刻、側壁熱流束、側壁熱流束(累積)、上壁熱流束、上壁熱流束(累積)、バッフル板熱流束、バッフル板熱流束(累積)

質量流束に関しては、

ステップ数、時刻、

(液面質量流束、液面質量流束(累積)、側壁質量流束、側壁質量流束(累積)、上壁質量流束、上壁質量流束(累積)、バッフル板質量流束、バッフル板質量流束(累積))=====第1種

(液面質量流束、液面質量流束(累積)、側壁質量流束、側壁質量流束(累積)、上壁質量流束、上壁質量流束(累積)、バッフル板質量流束、バッフル板質量流束(累積))=====第2種

(液面質量流束、液面質量流束(累積)、側壁質量流束、側壁質量流束(累積)、上壁質量流束、上壁質量流束(累積)、バッフル板質量流束、バッフル板質量流束(累積))=====第7種
である。

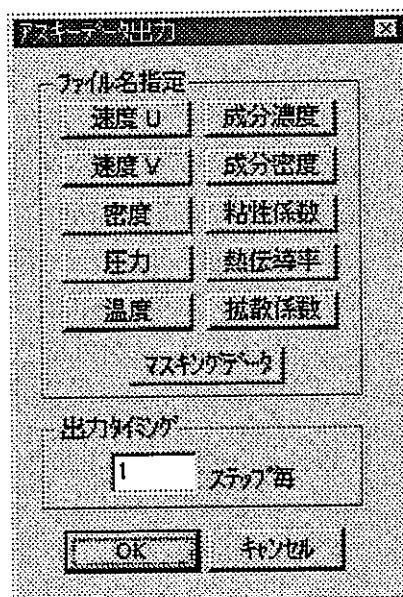
ここで書き込まれる出力ファイルは、上書きされずにデータとして書き加えられていくため、以前のファイルが残っている場合は、予め消しておく必要がある。

<CNVAXIS version 2.0.1 にて改良された各種変数の全計算点デジタル値一覧ファイル出力>

全計算点における流速分布 (U , V)、温度、圧力、混合気体密度、成分別濃度、成分別密度、粘性係数、熱伝導率、拡散係数、およびマスキングデータをそれぞれアスキーデータリストとしてファイルに出力することができる。各データは、変数毎に別のファイルに保存され指定した出力ステップ毎に書き加えられていく。(ファイルがすでに存在する場合は上書きされずにデータが追加される。) デフォルト値は、出力ステップが 1 で、ファイル名は以下の通りである。

流速分布 U	:	Ascii_u.dat
流速分布 V	:	Ascii_v.dat
温度	:	Ascii_temp.dat
圧力	:	Ascii_pres.dat
混合気体密度	:	Ascii_dens.dat
成分別濃度	:	Ascii_sp_cons.dat
成分別密度	:	Ascii_sp_dens.dat
粘性係数	:	Ascii_visc.dat
熱伝導率	:	Ascii_cond.dat
拡散係数	:	Ascii_diff.dat
マスキングデータ	:	Ascii_msk.dat

デフォルト値の変更は [ツール-アスキ-出力] により下図のアスキーデータ出力メニューを開いて指定する。



3.12 パラメータの保存及び読み込み

パラメータ保存

パラメータ読み込み

本計算プログラムは、上で設定したパラメータをパラメータファイルとして保存し、プログラム再起動後、それらのファイルを読み込んで計算を行なうことができる。その場合、パラメータを読み込んだ後、それらの値を修正することも可能である。

各パラメータファイルの種類は、

- ・格子生成パラメータ
- ・固液領域パラメータ
- ・計算条件パラメータ

の3種類である。

<注意事項>

前バージョン CNVAXIS version 1 とのデータファイルとの互換性について
CNVAXIS version 2.0.1 では複数のデータ（パラメータ）ファイルを読み込むことが可能であるが、今回の拡張機能を使用する場合には、一部、前バージョンとの互換性の無くなつたものがある。それぞれのファイルの互換性は以下の通りである。

互換性有り：格子生成パラメータファイル、固液領域パラメータファイル

互換性無し：計算条件パラメータファイル、リストア用データファイル

4. カソードプロセッサ蒸留計算例

4.1 検証計算

本プログラム検証のための計算を以下の要領で実施した。

比較データ：

“Natural Convection of Air in a Square Cavity : a Bench Mark Numerical Solution,”
G.De.Vahl Davis.

Vahl Davis は、2次元キャビティ内の自然対流問題を、レイリー数： 1×10^3 から 1×10^6 までの条件で解いた。計算手法は、流れ関数－渦度フォーミュレーションに基づく有限差分計算で、結果はベンチマークデータとして公開されているので、本プログラムによる計算結果と比較することができる。

なお、本計算プログラムは、入力パラメータ、計算データとしてすべて有次元の値を想定している。ここでは、Vahl Davis のベンチマークと計算条件を合わせることを考慮して、以下のようにパラメータを設定した。

密度 : 1.20 kg/m^3

圧力 : 1.0147 Pa

温度 : 293.15 K

壁温 : $T_c=283.15 \text{ K}, T_h=303.15 \text{ K}$

粘性係数 : $1.813 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

熱伝導率 : $2.60 \times 10^{-2} \text{ W/m/K}$

気体定数 : 287.03 J/kg/K

定圧比熱 : 1006 J/kg/K

レイリー数	キャビティ幅（高さ）m
1.0×10^3	0.0079
1.0×10^4	0.0170
1.0×10^5	0.0370
1.0×10^6	0.079

4.1.1 温度及び速度に関する空間分布

キャビティ内の各物理量分布に関して本計算結果とベンチマークデータとの比較を図 4-1～図 4-3 に示す。示された結果比較から空間的な流れ場の状況及びレイリー数による流れ場の変化がほぼ一致することがわかる。

4.1.2 速度分布に関する定量的比較

文献 7 では、定量データの一つとして、キャビティー中央断面での各速度分布からその最大値と壁からの距離が求められている。本計算結果でも文献の結果とスケールをあわせた上で同様の値を求め、定量的な比較を行なった。

表 4-1～表 4-2 は、それぞれの比較を表したものである。水平速度に関しては、レイリー数の大きなところでは、若干最大速度の差が現れているものの（粘性見積もりの影響と考えられる）、全体的に最大値及び最大ポイントともにほぼ一致しているとみるとみることができる。

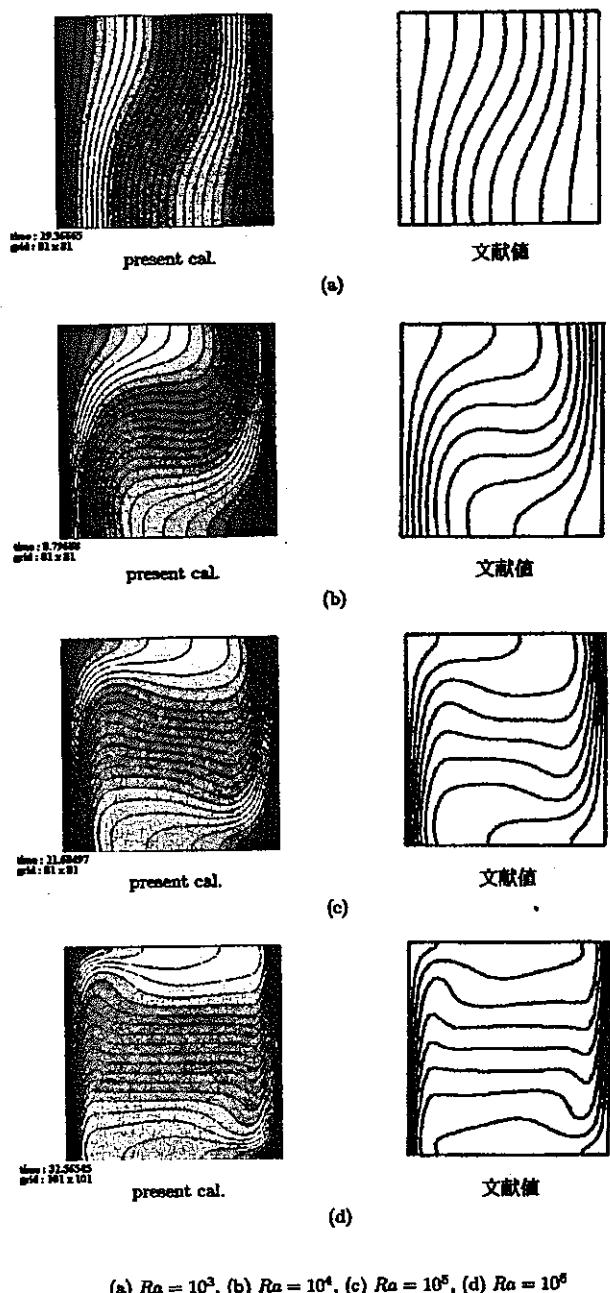


図 4-1 温度 (T) の等高線図の比較

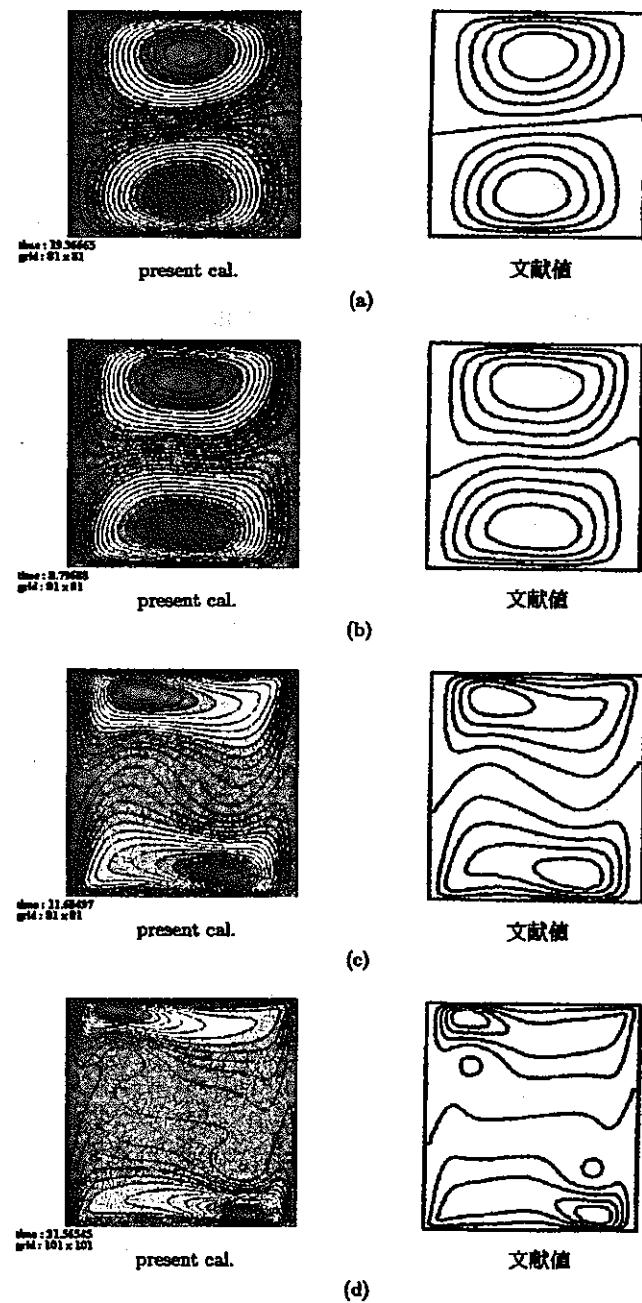
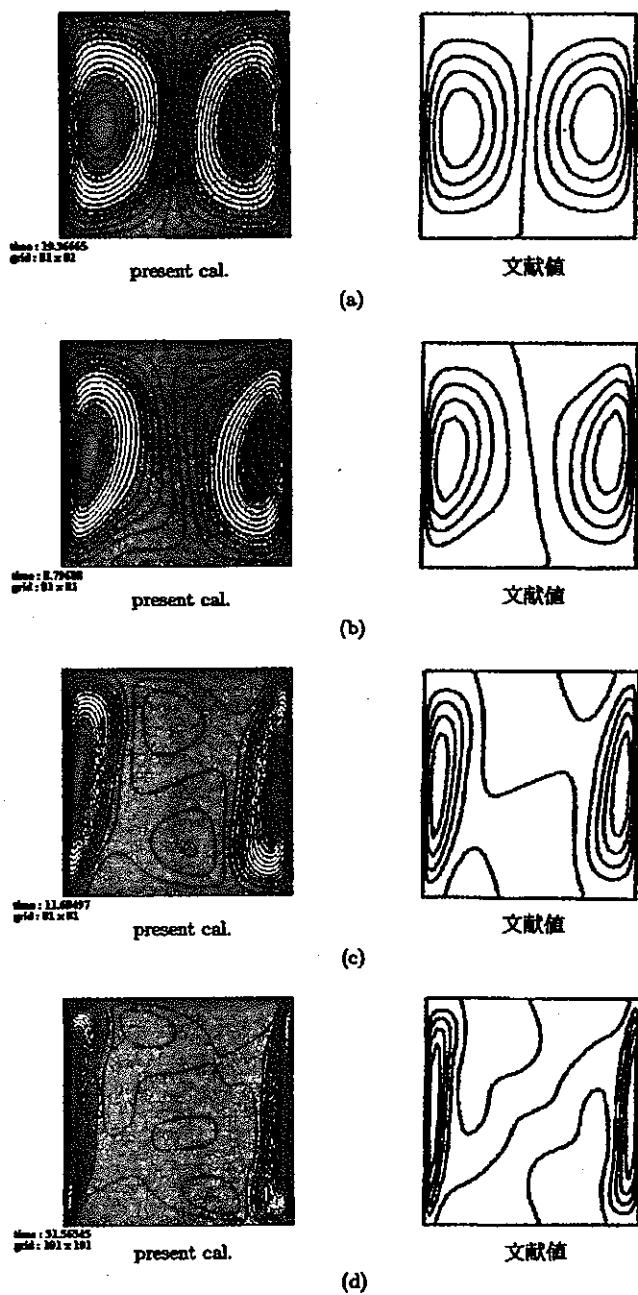
(a) $Ra = 10^3$, (b) $Ra = 10^4$, (c) $Ra = 10^5$, (d) $Ra = 10^6$

図4-2 水平流速ベクトル（u）の等高線図の比較



(a) $Ra = 10^3$, (b) $Ra = 10^4$, (c) $Ra = 10^5$, (d) $Ra = 10^6$

図4-3 垂直流速ベクトル（v）の等高線図の比較

表4-1 キャビティー中央断面での最大速度及び最大速度点（計算値）

Ra	u max	y umax	v max	x vmax
1.0×10^3	3.49	0.820	3.97	0.190
1.0×10^4	16.03	0.825	19.92	0.120
1.0×10^5	41.31	0.870	70.57	0.065
1.0×10^6	84.56	0.880	220.59	0.040

表4-2 キャビティー中央断面での最大速度及び最大速度点（文献値）

Ra	u max	y umax	v max	x vmax
1.0×10^3	3.634	0.813	3.679	0.179
1.0×10^4	16.182	0.823	19.509	0.120
1.0×10^5	34.810	0.855	68.220	0.066
1.0×10^6	65.330	0.851	216.75	0.039

4. 2. カソードプロセッサ模擬体系での計算例

ここでは、CNVAXIS version 2.0.1において新たに追加された機能の確認を主な目的として実施した計算例について説明する。

4.2.1 計算条件

カソードプロセッサを模擬した円筒状の密閉容器の体系において、カドミウム (Cd) を含有する高温の液体（以下、Cd 液）がるつぼに貯留されており、容器内のアルゴンガス中に Cd が蒸発し、空間内で対流・拡散し、低温に保たれた容器側壁および下壁に凝縮する過程の計算を試みた。

主な計算条件は以下のとおりである。（機能確認が目的であり、一部の条件は仮想的な設定である。）

- (1) Cd 液面温度 600°C、るつぼ温度 500°C、上壁温度 600°C、側壁温度は上端で 300°C-下端で 200°C として高さ方向に線形の分布を設定、下壁温度 200°C
- (2) 初期の容器内アルゴンガス温度 200°C、圧力 15185Pa
- (3) Cd 液面、側壁および下壁の Cd 濃度境界条件は壁温度での Cd の飽和蒸気圧から決定。
- (4) 上壁では凝縮を無視

また、蒸発速度、凝縮速度に影響する要因としてるつぼ内の Cd 液面高さを 3 ケース（るつぼ内壁高さ 0.175m は固定して、るつぼ底から Cd 液面までの高さを 0.16m、0.145m、0.085m）変化させた計算を行った。

代表ケース（るつぼ底から Cd 液面までの高さを 0.16m としたケース）に対するコードの入力データを図 4-4 から図 4-14 に示す。

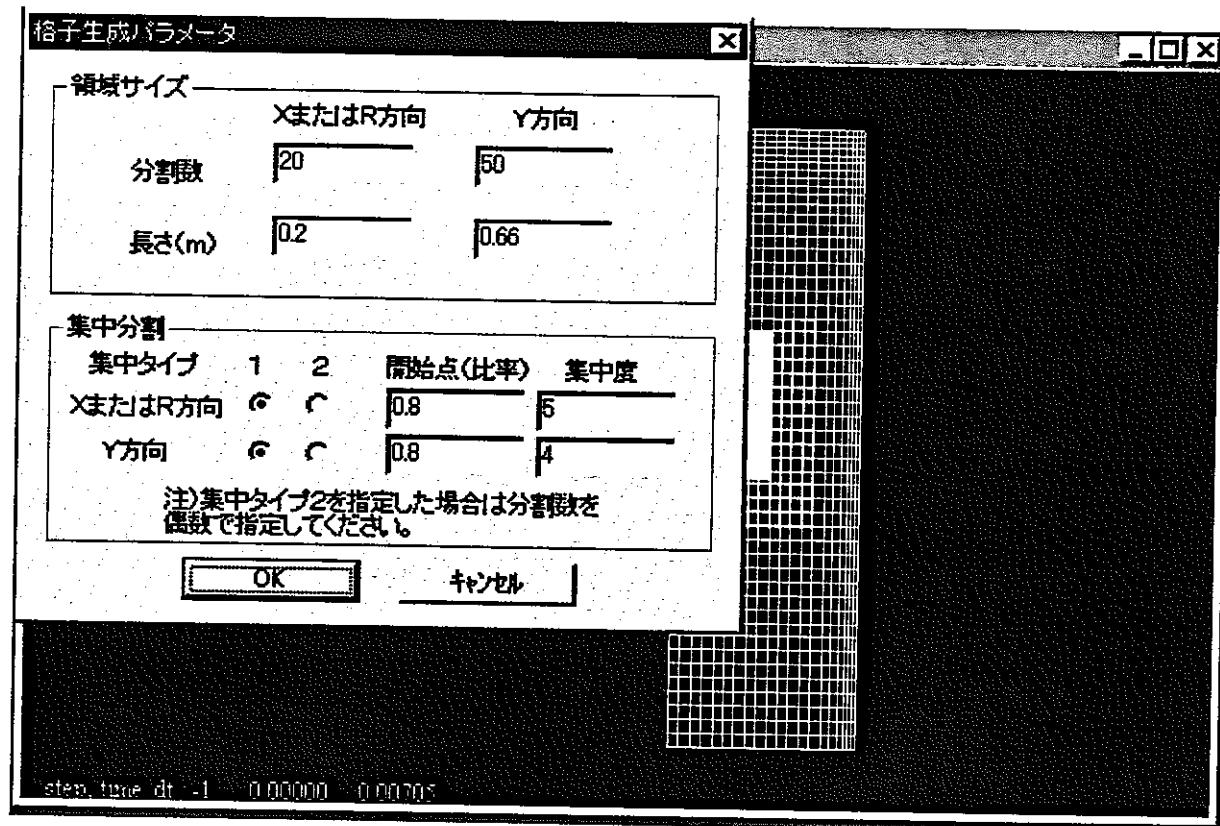


図4-4 格子生成

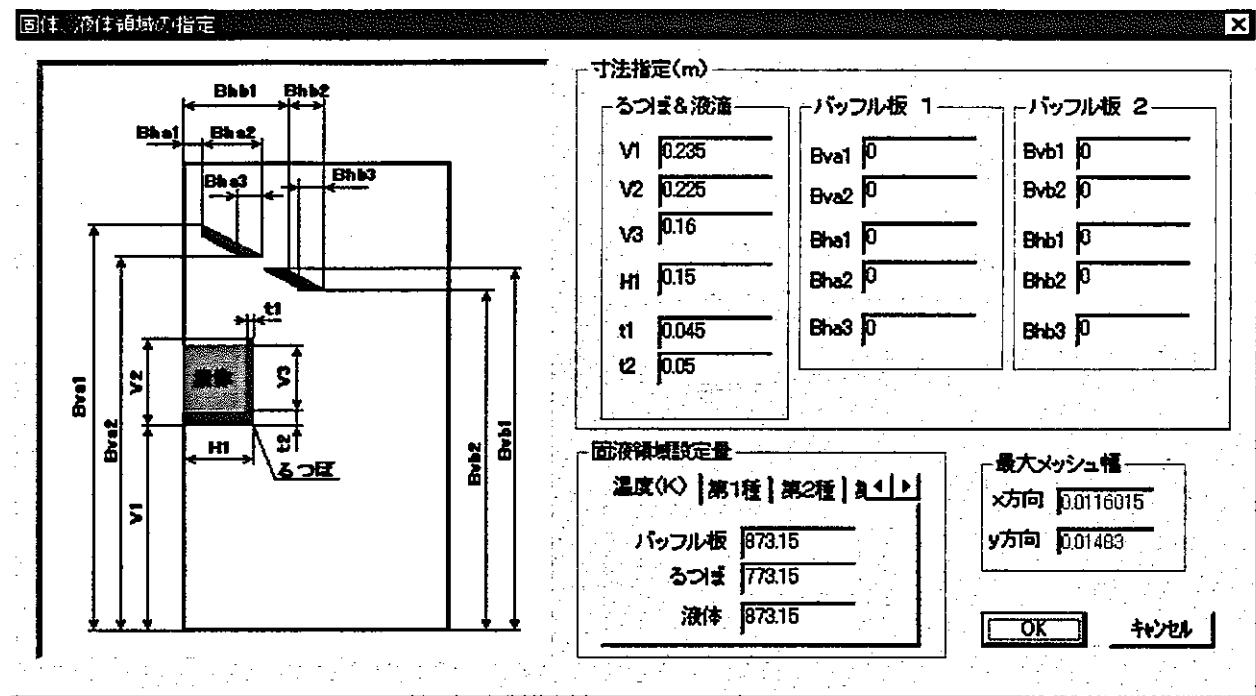


図4-5 気・液領域の設定

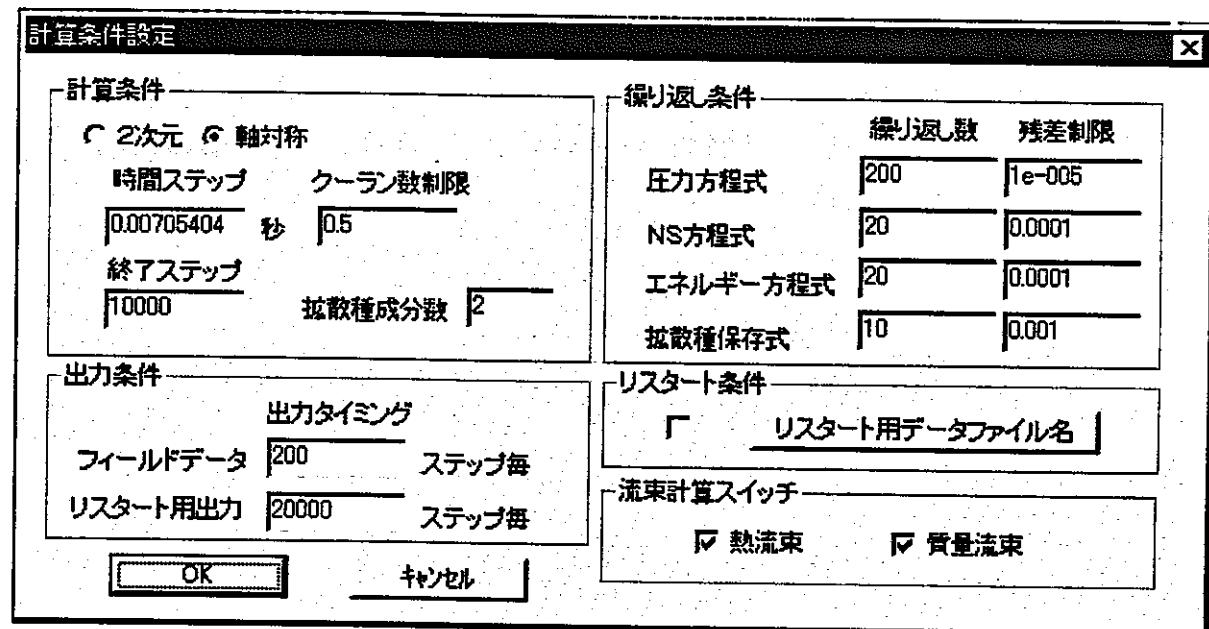


図4-6 計算条件の設定

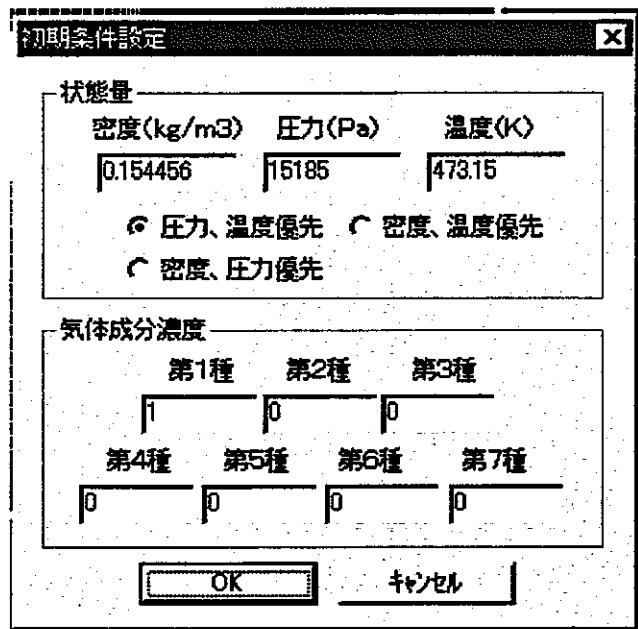


図4-7 初期条件の設定

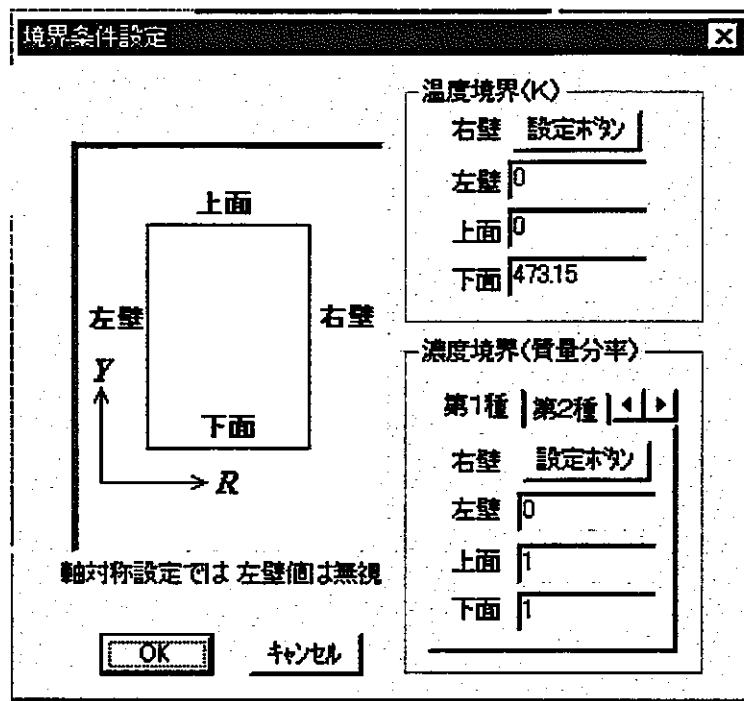


図4-8 境界条件の設定——上面および下面の温度と第1種の化学種（アルゴン）の濃度境界条件

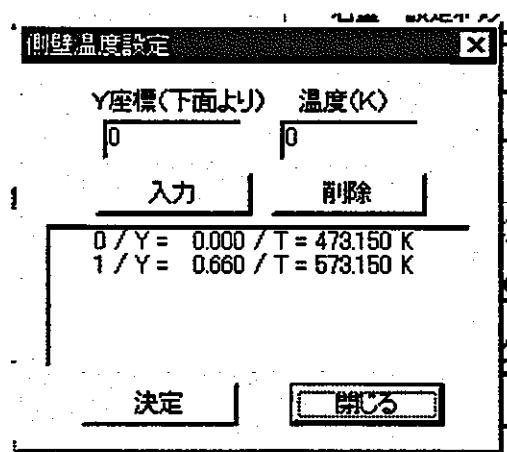


図4-9 境界条件の設定——側壁の温度境界条件

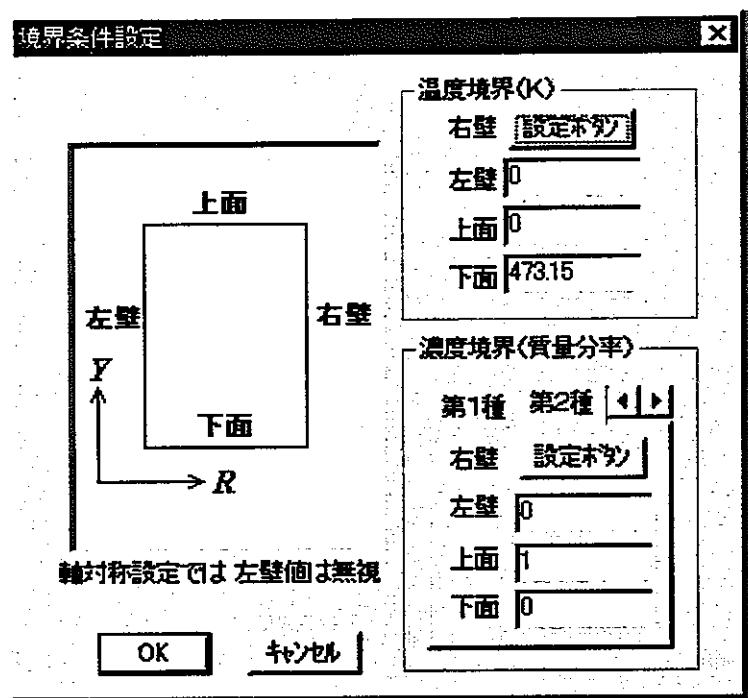


図4-10 境界条件の設定——上面および下面の第2種の化学種(Cd)の濃度境界条件

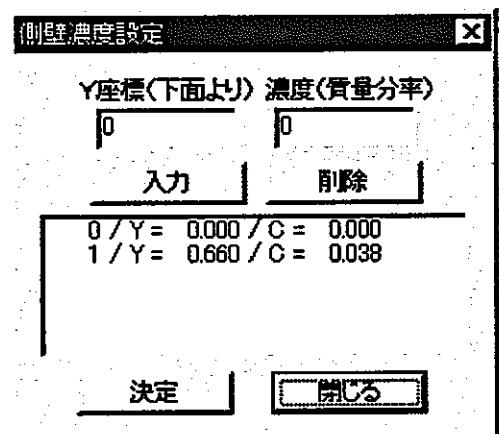


図4-11 境界条件の設定——側壁の第2種の化学種(Cd)の濃度境界条件

(注) 側壁の第1種の化学種(アルゴンガス)の濃度境界条件についても、

Cdの濃度との和が1になるように設定する。

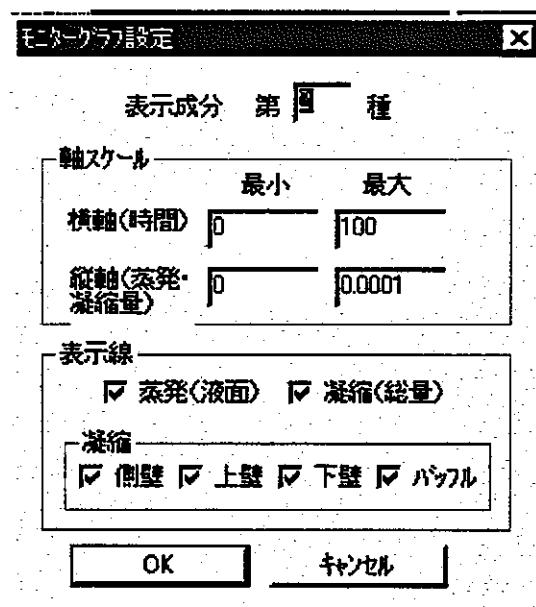


図4-1-2 モニターグラフ出力の設定

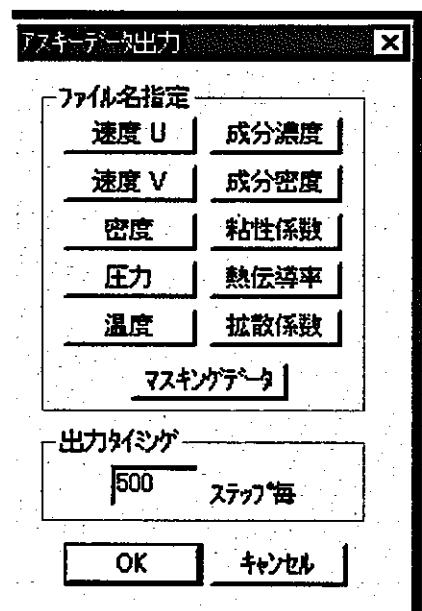


図4-1-3 アスキーデータ出力の設定

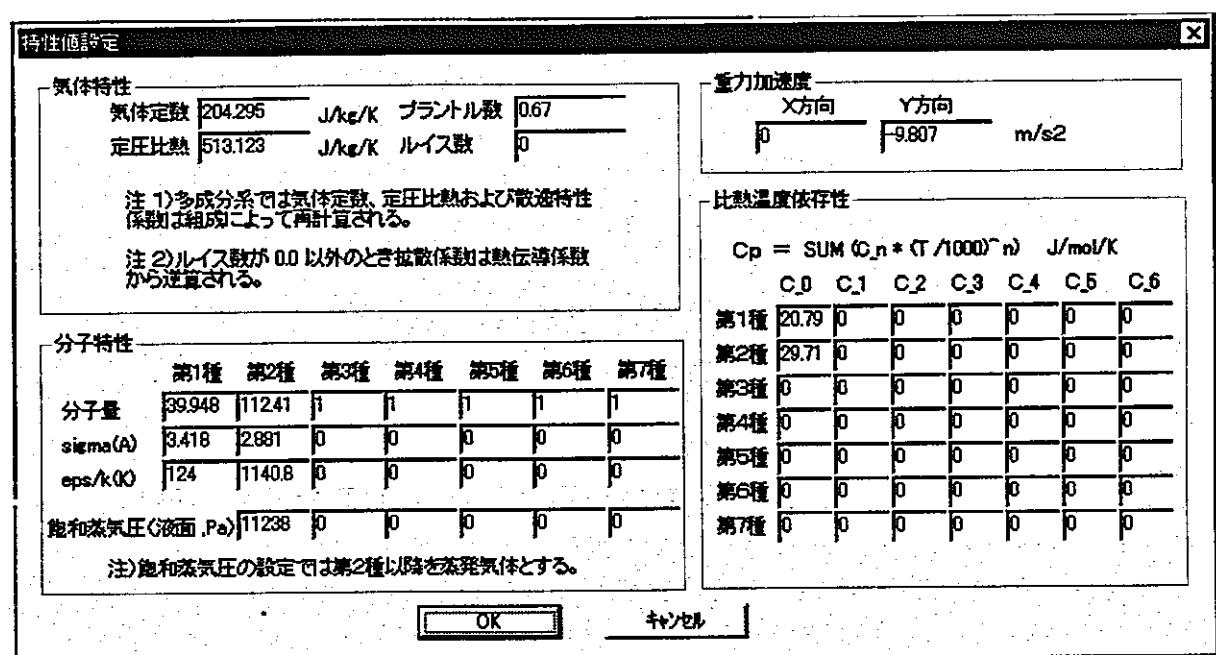


図 4-14 物質の特性値の設定

4.2.2 機能確認計算の結果

蒸留計算の実行中において、Cd液面での蒸発量、壁面での凝縮量を、従来の温度・流速分布のアニメーション表示と同時に、画面上にリアルタイムで描画できる機能を使用した画面表示例を図4-15に示す。

計算結果を図4-16から図4-27に示す。また、代表ケース（るつぼ底からCd液面までの高さを0.16mとしたケース）に対するアスキーファイル出力の例を表4-3から表4-9に示す。

以上の計算条件等の入力および計算結果の検討により、本コードの追加機能が満足されていることを確認した。

計算の結果、次のことが分かった。

- (1) るつぼ内のCd液面が下がると、るつぼ内に高温で高Cd濃度の気体層がCd液面上に形成され、容器内上部空間の対流がるつぼ内に進入しにくくなる。このため、蒸発速度、凝縮量が低下する。
- (2) 系の流動、温度分布、蒸発および凝縮速度は、ほぼ30秒で定常に至る。従って、今回計算したスケールの機器では、設計の評価を多数ケースの感度解析に対して行う場合、モニターグラフを参考にしつつ約60秒程度の計算を行えばよいと思われる。
- (3) 計算時間の節約をねらって、タイムステップ（時間刻み幅）を大きくすると解の誤差が大きくなり、不自然な流動が発生し、妥当な結果が得られない。タイムステップを決定する要因は、「計算条件」画面で入力するクーラン数であり、0.5程度以下に設定する（時間が許す限り小さくする）ことが必要と考えられる。

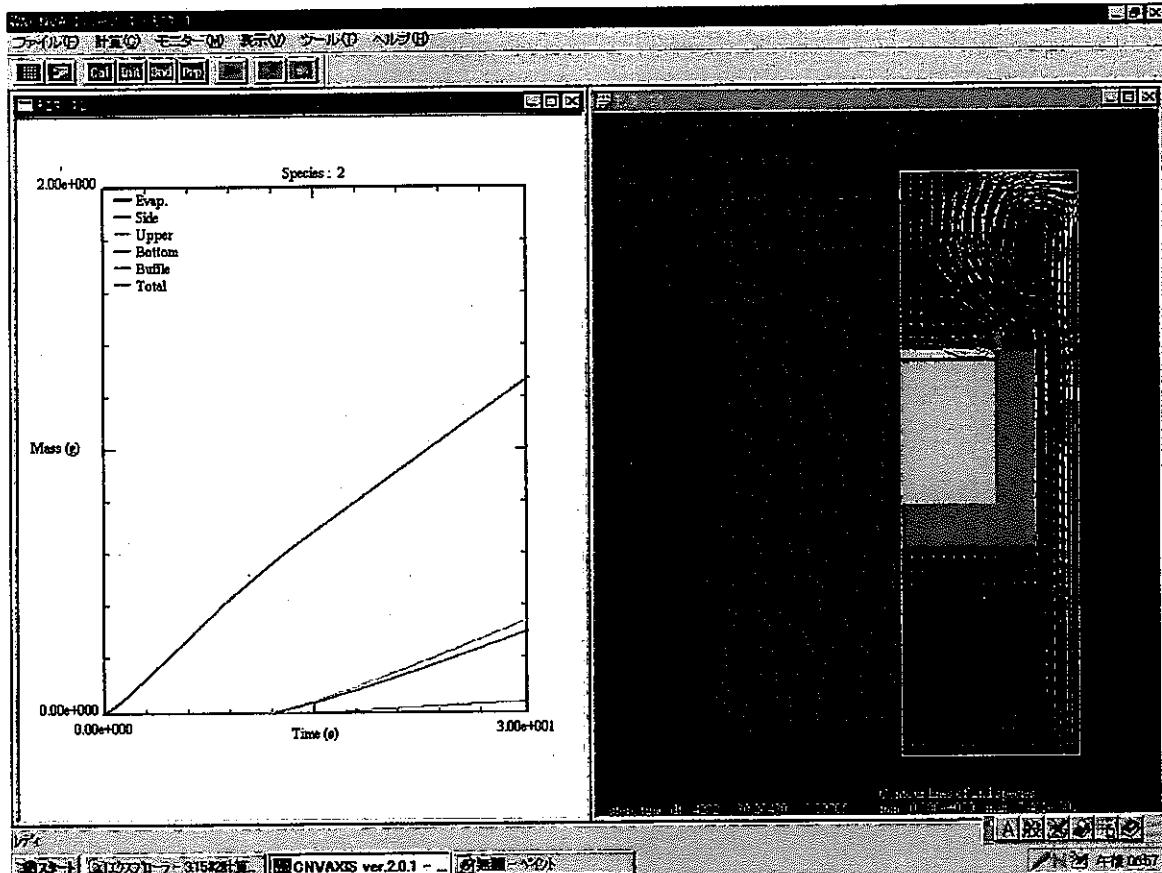


図4-15 物質収支のリアルタイム表示例

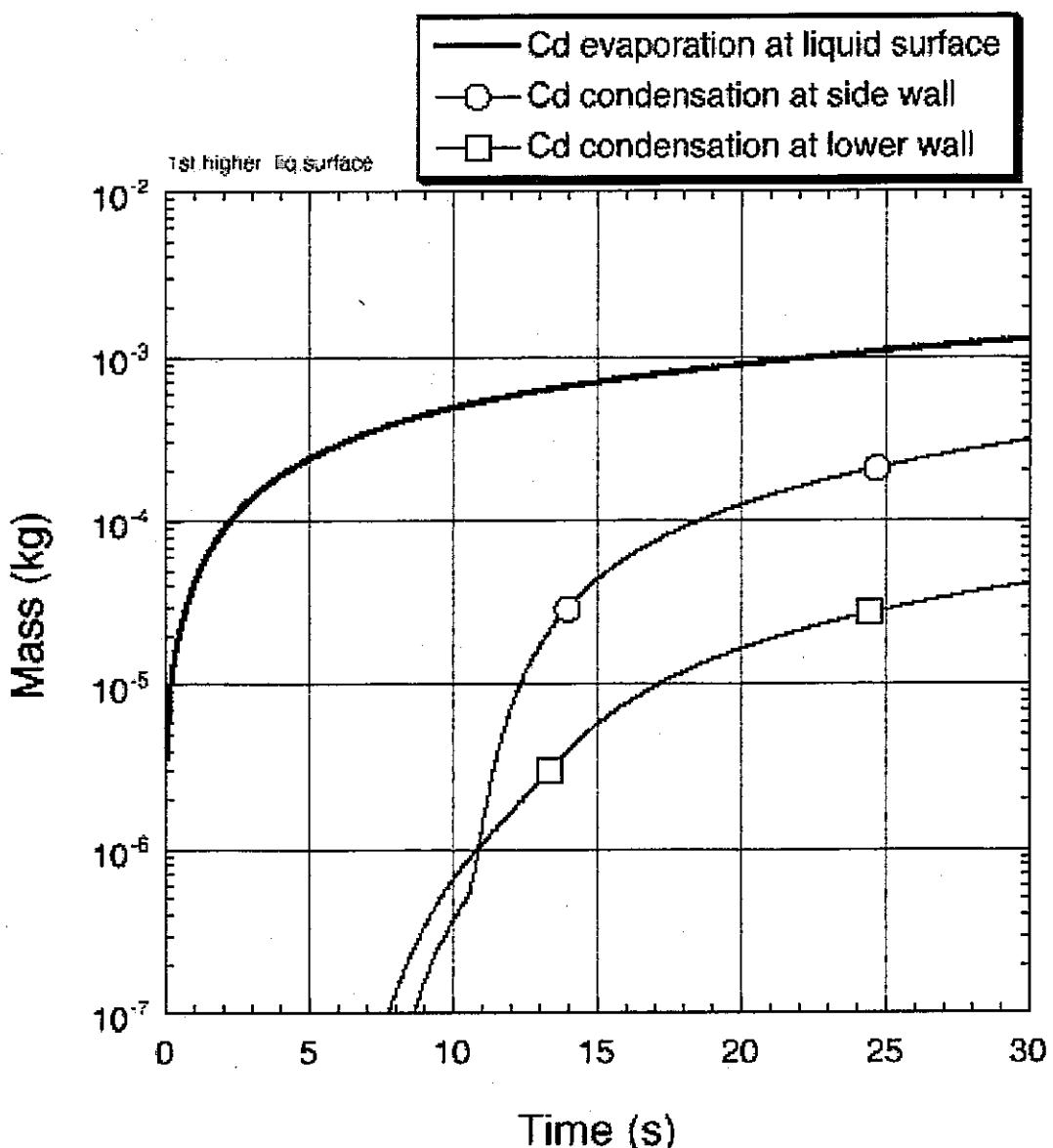


図4-16 物質収支のリアルタイム表示例
代表ケース（るつぼ底からCd液面までの高さを0.16mとしたケース）

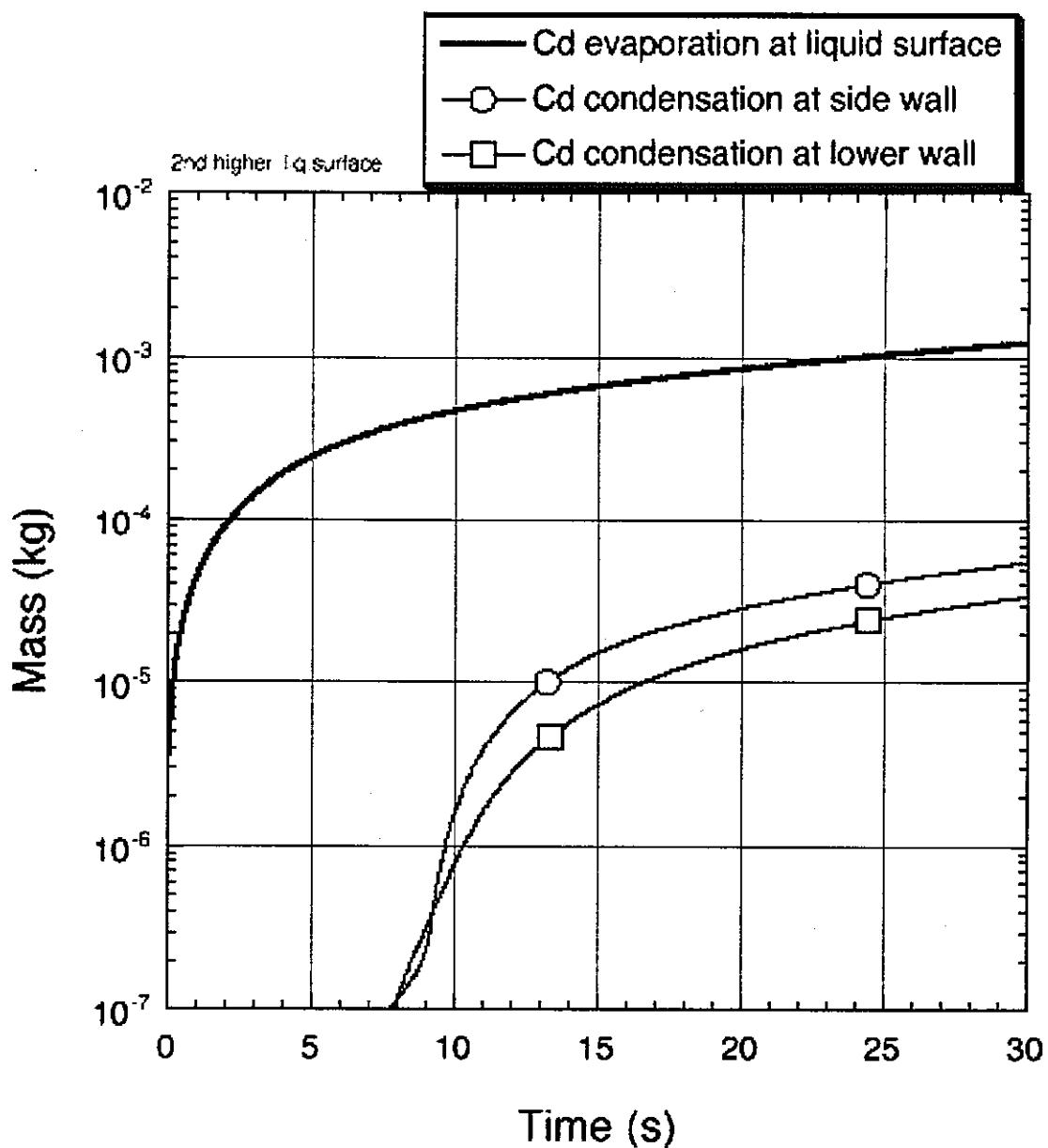


図4-17 物質収支のリアルタイム表示例
るつぼ底からCd液面までの高さを0.145mとしたケース

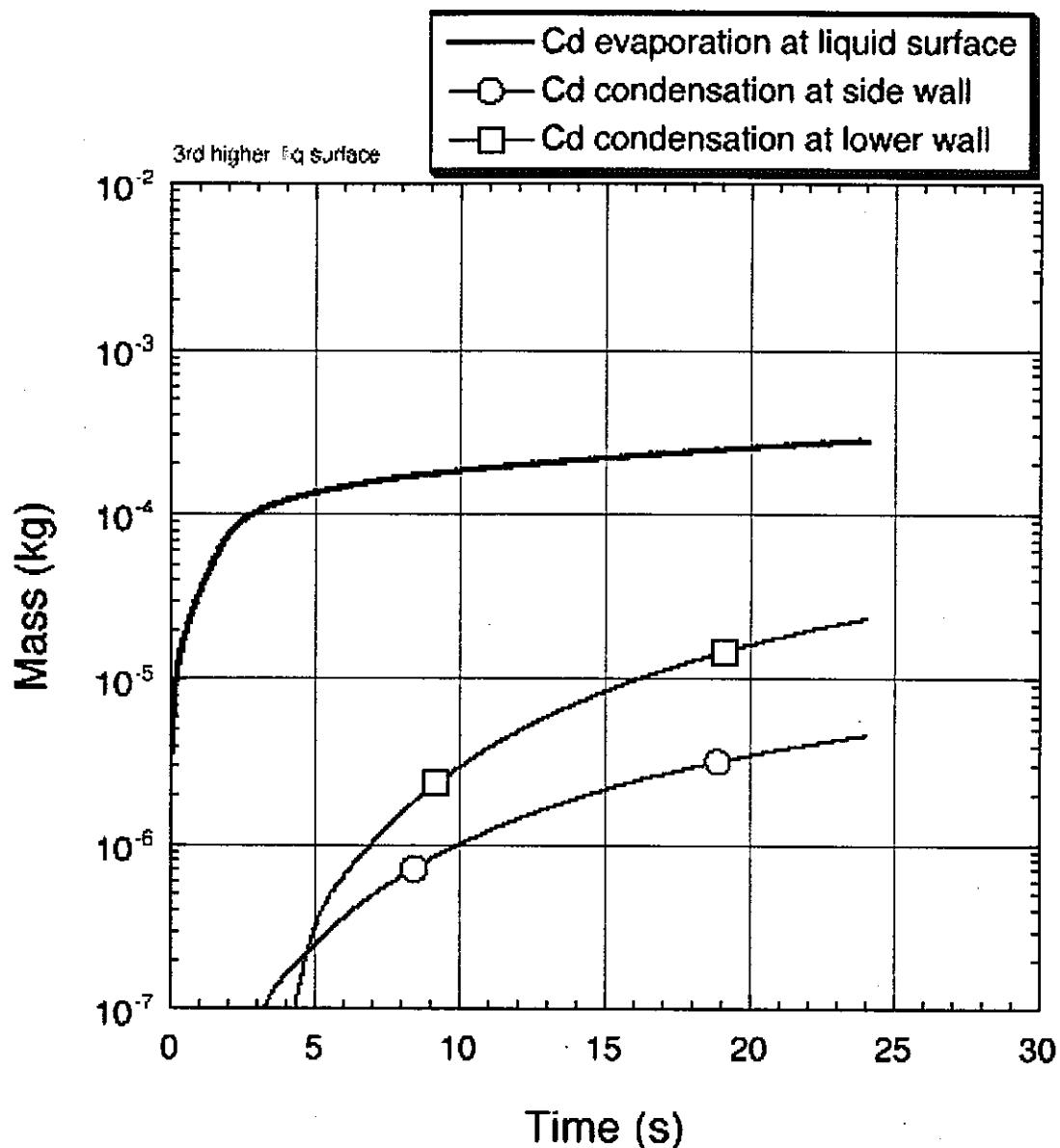


図4-18 物質収支のリアルタイム表示例
るつぼ底からCd液面までの高さを0.085mとしたケース

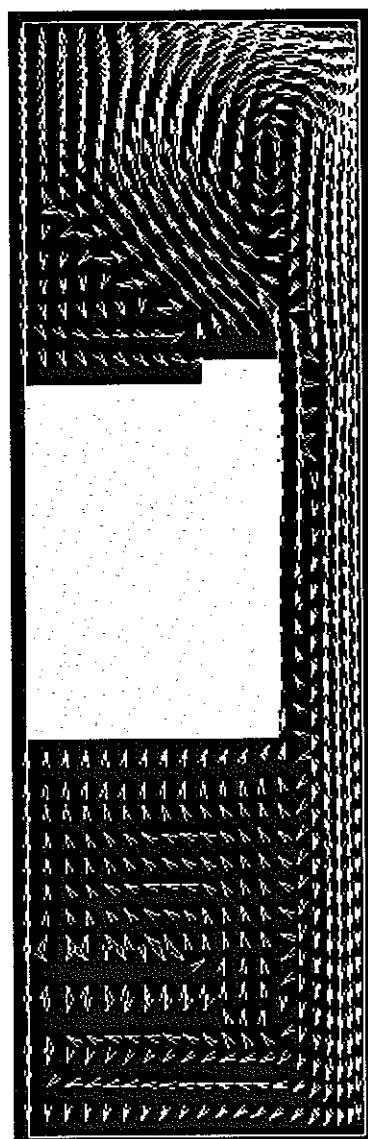


図4-19 流速分布表示例
代表ケース（るっぽ底からCd液面までの高さを 0.16mとしたケース）

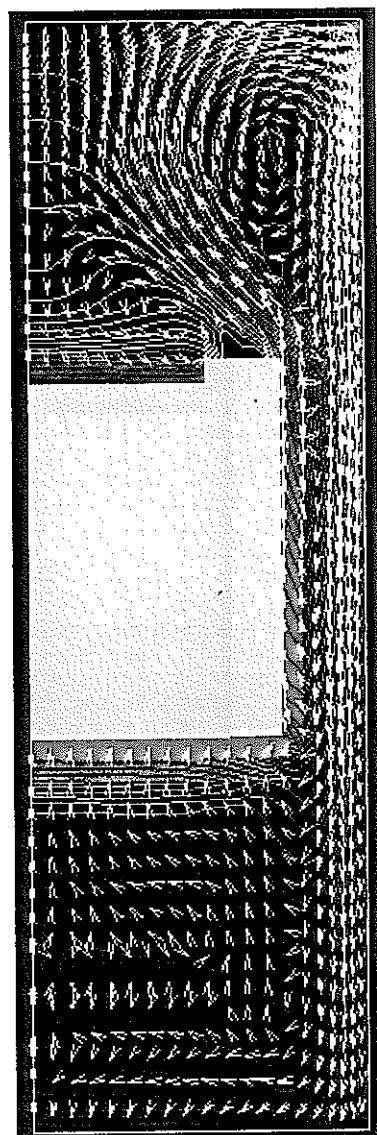


図4-20 流速-温度分布表示例
代表ケース（るつぼ底からCd液面までの高さを 0.16m としたケース）

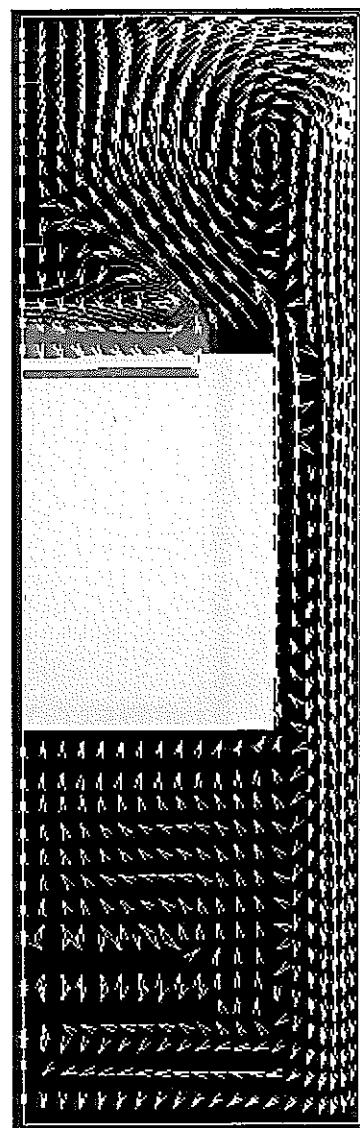


図 4-21 流速-Cd 濃度分布表示例
代表ケース（るっぽ底から Cd 液面までの高さを 0.16m としたケース）

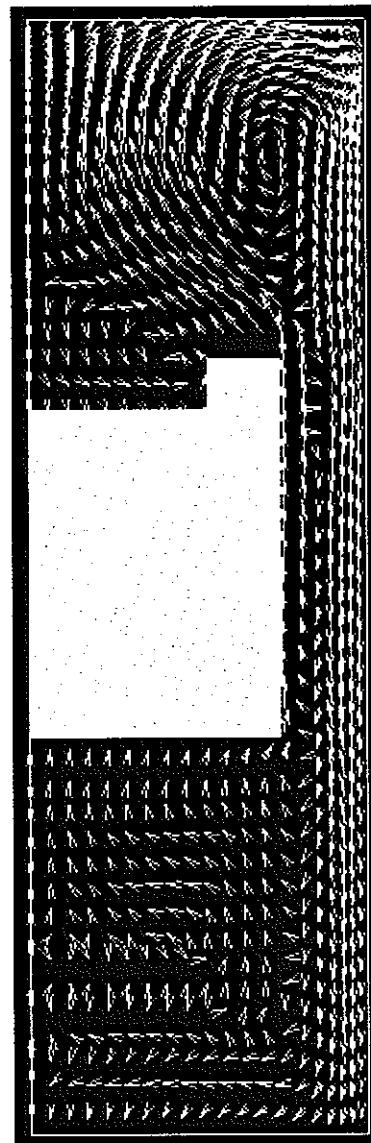


図4-22 流速分布表示例
るつぼ底からCd液面までの高さを 0.145mとしたケース

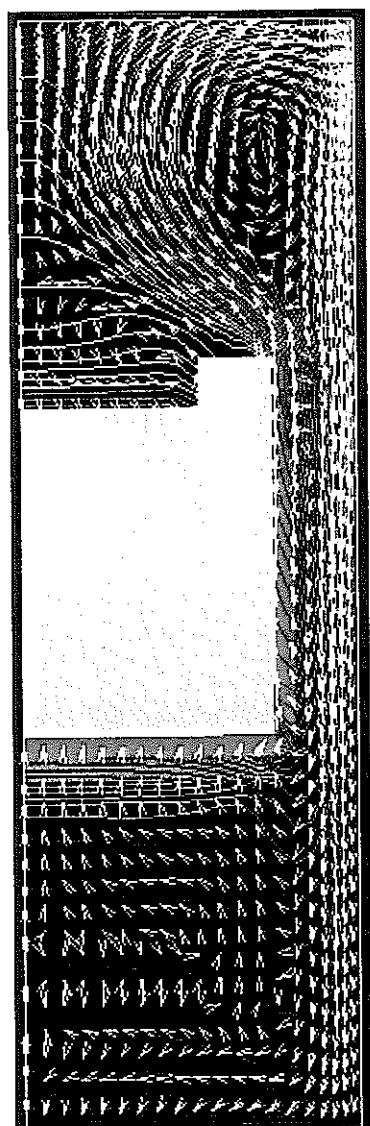


図4-23 流速-温度分布表示例
るつぼ底から Cd 液面までの高さを 0.145m としたケース

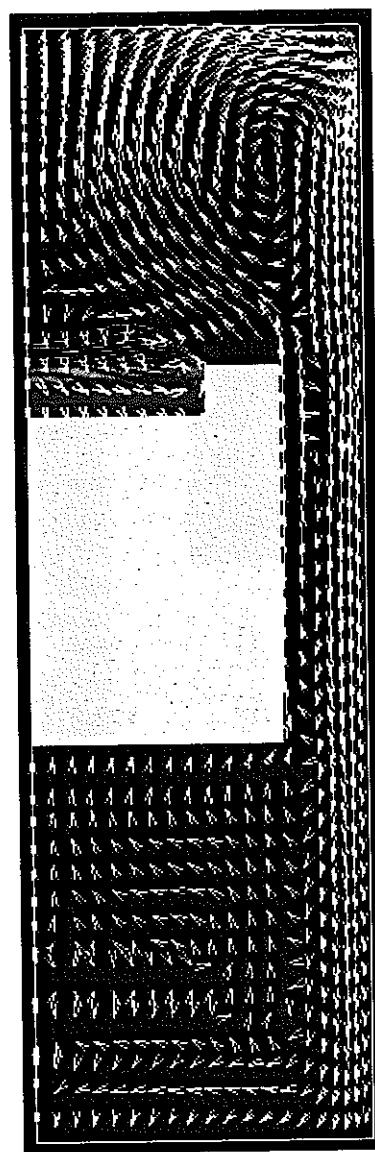


図4-24 流速-濃度分布表示例
るつぼ底から Cd 液面までの高さを 0.145m としたケース

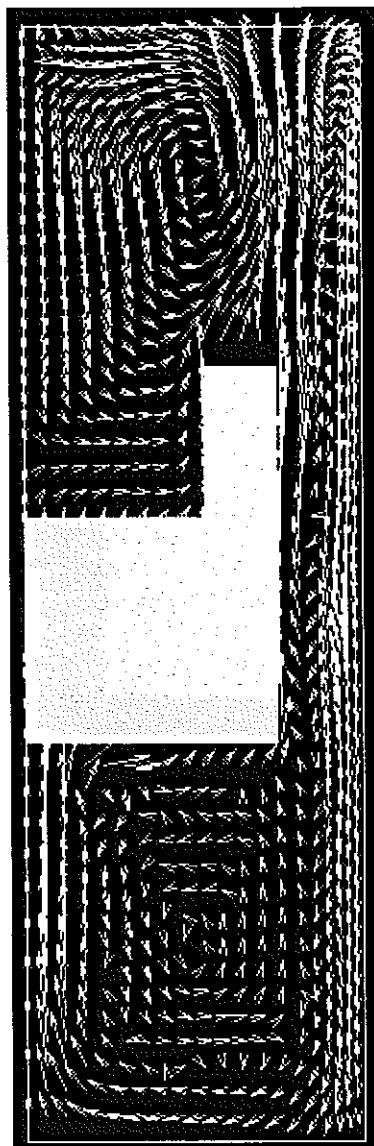


図4-25 流速分布表示例
るつぼ底からCd液面までの高さを 0.085mとしたケース

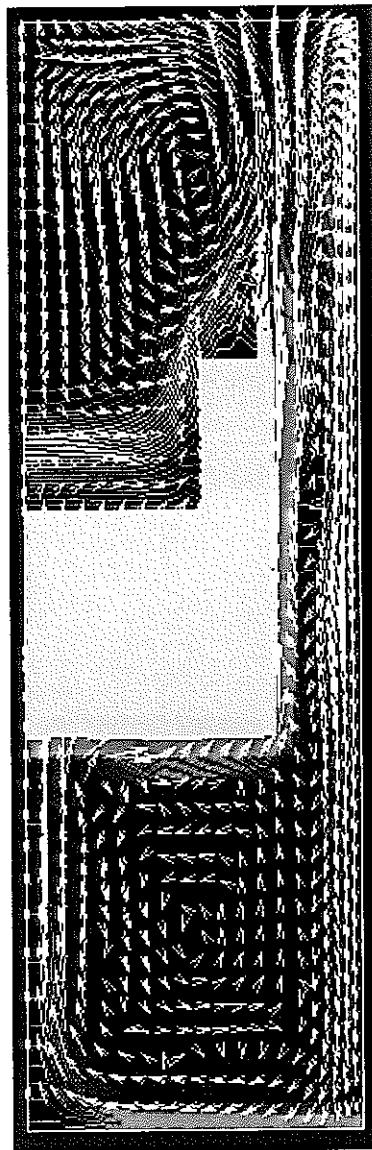


図4-26 流速-温度分布表示例
るつぼ底からCd液面までの高さを 0.085mとしたケース

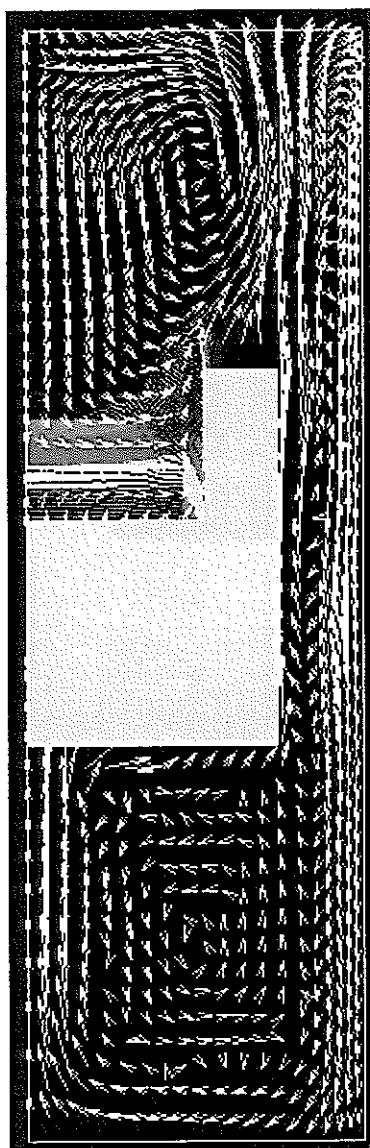


図4-27 流速・濃度分布表示例
るつぼ底から Cd 液面までの高さを 0.085m としたケース

表4-3 アスキーファイル出力例 *** 速度U(m/s)空間分布***

ステップ:500		時刻	:3.527e+000 秒				
J=	I=		1	2	3	4	5
	51	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	50	0.00E+00	-8.85E-03	-1.78E-02	-2.05E-02	-1.87E-02	-1.87E-02
	49	0.00E+00	-1.32E-02	-2.50E-02	-2.81E-02	-2.51E-02	-2.51E-02
	48	0.00E+00	-1.48E-02	-2.71E-02	-3.04E-02	-2.72E-02	-2.72E-02
	47	0.00E+00	-1.48E-02	-2.66E-02	-2.99E-02	-2.73E-02	-2.73E-02
	46	0.00E+00	-1.40E-02	-2.51E-02	-2.88E-02	-2.76E-02	-2.76E-02
	45	0.00E+00	-1.30E-02	-2.36E-02	-2.79E-02	-2.86E-02	-2.86E-02
	44	0.00E+00	-1.21E-02	-2.24E-02	-2.77E-02	-3.05E-02	-3.05E-02
	43	0.00E+00	-1.14E-02	-2.17E-02	-2.80E-02	-3.30E-02	-3.30E-02
	42	0.00E+00	-1.09E-02	-2.14E-02	-2.88E-02	-3.58E-02	-3.58E-02
	41	0.00E+00	-1.05E-02	-2.12E-02	-2.96E-02	-3.84E-02	-3.84E-02
	40	0.00E+00	-1.01E-02	-2.09E-02	-3.00E-02	-4.01E-02	-4.01E-02
	39	0.00E+00	-9.50E-03	-2.00E-02	-2.93E-02	-3.98E-02	-3.98E-02
	38	0.00E+00	-8.46E-03	-1.81E-02	-2.68E-02	-3.66E-02	-3.66E-02
	37	0.00E+00	-6.81E-03	-1.47E-02	-2.19E-02	-2.95E-02	-2.95E-02
	36	0.00E+00	-4.29E-03	-9.65E-03	-1.46E-02	-1.93E-02	-1.93E-02
	35	0.00E+00	1.94E-04	-8.79E-04	-3.20E-03	-4.35E-03	-4.35E-03
	34	0.00E+00	9.91E-03	1.81E-02	2.07E-02	2.34E-02	2.34E-02
	33	0.00E+00	2.92E-02	5.81E-02	7.55E-02	8.83E-02	8.83E-02
	32	0.00E+00	4.24E-02	8.78E-02	1.20E-01	1.42E-01	1.42E-01
	31	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	30	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	29	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	28	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	27	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	26	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	25	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	24	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	23	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	22	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	21	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	20	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	19	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	18	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	17	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	16	0.00E+00	-2.19E-04	-2.00E-03	-1.94E-03	-2.97E-03	-2.97E-03
	15	0.00E+00	-9.84E-04	-3.85E-03	-4.93E-03	-7.69E-03	-7.69E-03
	14	0.00E+00	-1.69E-03	-5.38E-03	-7.64E-03	-1.19E-02	-1.19E-02
	13	0.00E+00	-1.43E-03	-4.77E-03	-6.94E-03	-1.13E-02	-1.13E-02
	12	0.00E+00	-7.63E-04	-3.27E-03	-4.45E-03	-7.45E-03	-7.45E-03
	11	0.00E+00	-3.85E-04	-2.39E-03	-2.83E-03	-4.67E-03	-4.67E-03
	10	0.00E+00	1.47E-04	-1.15E-03	-7.66E-04	-1.70E-03	-1.70E-03
	9	0.00E+00	1.26E-04	-1.08E-03	-4.14E-04	-8.97E-04	-8.97E-04
	8	0.00E+00	-2.99E-05	-1.35E-03	-7.39E-04	-1.21E-03	-1.21E-03
	7	0.00E+00	-4.90E-04	-2.30E-03	-2.14E-03	-3.02E-03	-3.02E-03
	6	0.00E+00	-1.01E-03	-3.39E-03	-3.76E-03	-5.16E-03	-5.16E-03
	5	0.00E+00	-1.29E-03	-4.07E-03	-4.85E-03	-6.74E-03	-6.74E-03
	4	0.00E+00	-1.08E-03	-3.85E-03	-4.53E-03	-6.51E-03	-6.51E-03
	3	0.00E+00	1.57E-05	-1.86E-03	-1.63E-03	-3.04E-03	-3.04E-03
	2	0.00E+00	5.54E-04	-7.21E-04	-1.90E-04	-1.26E-03	-1.26E-03
	1	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

表4-4 アスキーファイル出力例 *** 速度V(m/s)空間分布***

ステップ:500		時刻	:3.527e+000 秒				
J=	I=		1	2	3	4	5
	51	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	50	-1.16E-02	-1.16E-02	-7.98E-03	-2.54E-03	2.77E-03	
	49	-2.48E-02	-2.48E-02	-1.85E-02	-8.90E-03	3.90E-04	
	48	-4.26E-02	-4.26E-02	-3.16E-02	-1.53E-02	4.05E-04	
	47	-6.12E-02	-6.12E-02	-4.51E-02	-2.23E-02	-9.83E-04	
	46	-7.98E-02	-7.98E-02	-5.87E-02	-2.96E-02	-2.90E-03	
	45	-9.81E-02	-9.81E-02	-7.23E-02	-3.78E-02	-6.63E-03	
	44	-1.16E-01	-1.16E-01	-8.63E-02	-4.71E-02	-1.24E-02	
	43	-1.34E-01	-1.34E-01	-1.01E-01	-5.82E-02	-2.09E-02	
	42	-1.53E-01	-1.53E-01	-1.17E-01	-7.13E-02	-3.24E-02	
	41	-1.72E-01	-1.72E-01	-1.34E-01	-8.68E-02	-4.73E-02	
	40	-1.92E-01	-1.92E-01	-1.53E-01	-1.05E-01	-6.55E-02	
	39	-2.13E-01	-2.13E-01	-1.73E-01	-1.25E-01	-8.63E-02	
	38	-2.34E-01	-2.34E-01	-1.94E-01	-1.46E-01	-1.08E-01	
	37	-2.54E-01	-2.54E-01	-2.14E-01	-1.66E-01	-1.28E-01	
	36	-2.71E-01	-2.71E-01	-2.31E-01	-1.83E-01	-1.44E-01	
	35	-2.78E-01	-2.78E-01	-2.40E-01	-1.90E-01	-1.50E-01	
	34	-2.71E-01	-2.71E-01	-2.38E-01	-1.90E-01	-1.49E-01	
	33	-2.30E-01	-2.30E-01	-2.06E-01	-1.67E-01	-1.28E-01	
	32	-1.45E-01	-1.45E-01	-1.33E-01	-1.12E-01	-8.84E-02	
	31	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	30	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	29	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	28	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	27	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	26	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	25	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	24	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	23	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	22	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	21	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	20	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	19	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	18	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	17	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	16	6.02E-02	6.02E-02	6.05E-02	6.07E-02	6.12E-02	
	15	4.63E-03	4.63E-03	5.06E-03	5.49E-03	6.13E-03	
	14	1.86E-02	1.86E-02	1.85E-02	1.83E-02	1.80E-02	
	13	-5.02E-03	-5.02E-03	-5.77E-03	-6.86E-03	-8.23E-03	
	12	-8.30E-04	-8.30E-04	-2.44E-03	-5.09E-03	-8.31E-03	
	11	-1.10E-02	-1.10E-02	-1.27E-02	-1.53E-02	-1.83E-02	
	10	-1.00E-02	-1.00E-02	-1.20E-02	-1.50E-02	-1.84E-02	
	9	-1.30E-02	-1.30E-02	-1.45E-02	-1.71E-02	-2.02E-02	
	8	-1.47E-02	-1.47E-02	-1.60E-02	-1.82E-02	-2.09E-02	
	7	-1.57E-02	-1.57E-02	-1.65E-02	-1.81E-02	-2.04E-02	
	6	-2.29E-02	-2.29E-02	-2.32E-02	-2.43E-02	-2.59E-02	
	5	-2.23E-02	-2.23E-02	-2.22E-02	-2.27E-02	-2.37E-02	
	4	-3.81E-02	-3.81E-02	-3.79E-02	-3.81E-02	-3.85E-02	
	3	-2.40E-02	-2.40E-02	-2.37E-02	-2.34E-02	-2.34E-02	
	2	-5.76E-02	-5.76E-02	-5.75E-02	-5.75E-02	-5.76E-02	
	1	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	

表4-5 アスキーファイル出力例 *** 温度(K)空間分布 ***

ステップ:500		時刻:3.527e+000 秒		平均温度:		
J=	I=	1	2	3	4	5
	51	5.45E+02	5.45E+02	5.49E+02	5.53E+02	5.56E+02
	50	5.45E+02	5.45E+02	5.49E+02	5.53E+02	5.56E+02
	49	5.45E+02	5.45E+02	5.49E+02	5.53E+02	5.57E+02
	48	5.46E+02	5.46E+02	5.50E+02	5.54E+02	5.58E+02
	47	5.46E+02	5.46E+02	5.50E+02	5.55E+02	5.59E+02
	46	5.46E+02	5.46E+02	5.51E+02	5.56E+02	5.60E+02
	45	5.47E+02	5.47E+02	5.51E+02	5.57E+02	5.62E+02
	44	5.47E+02	5.47E+02	5.52E+02	5.58E+02	5.63E+02
	43	5.48E+02	5.48E+02	5.53E+02	5.59E+02	5.65E+02
	42	5.48E+02	5.48E+02	5.53E+02	5.60E+02	5.67E+02
	41	5.49E+02	5.49E+02	5.54E+02	5.61E+02	5.68E+02
	40	5.49E+02	5.49E+02	5.55E+02	5.62E+02	5.69E+02
	39	5.50E+02	5.50E+02	5.56E+02	5.63E+02	5.70E+02
	38	5.50E+02	5.50E+02	5.56E+02	5.64E+02	5.71E+02
	37	5.51E+02	5.51E+02	5.57E+02	5.64E+02	5.71E+02
	36	5.53E+02	5.53E+02	5.58E+02	5.66E+02	5.72E+02
	35	5.54E+02	5.54E+02	5.60E+02	5.66E+02	5.71E+02
	34	5.43E+02	5.43E+02	5.47E+02	5.53E+02	5.57E+02
	33	5.15E+02	5.15E+02	5.18E+02	5.24E+02	5.30E+02
	32	5.71E+02	5.71E+02	5.74E+02	5.80E+02	5.88E+02
	31	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02
	30	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02
	29	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02
	28	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02
	27	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02
	26	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02
	25	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02
	24	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02
	23	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02
	22	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02
	21	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02	8.73E+02
	20	7.73E+02	7.73E+02	7.73E+02	7.73E+02	7.73E+02
	19	7.73E+02	7.73E+02	7.73E+02	7.73E+02	7.73E+02
	18	7.73E+02	7.73E+02	7.73E+02	7.73E+02	7.73E+02
	17	7.73E+02	7.73E+02	7.73E+02	7.73E+02	7.73E+02
	16	6.17E+02	6.17E+02	6.17E+02	6.17E+02	6.16E+02
	15	5.58E+02	5.58E+02	5.58E+02	5.58E+02	5.57E+02
	14	5.23E+02	5.23E+02	5.24E+02	5.24E+02	5.24E+02
	13	5.12E+02	5.12E+02	5.13E+02	5.13E+02	5.13E+02
	12	5.06E+02	5.06E+02	5.06E+02	5.06E+02	5.07E+02
	11	5.02E+02	5.02E+02	5.02E+02	5.02E+02	5.02E+02
	10	4.99E+02	4.99E+02	4.99E+02	4.99E+02	4.99E+02
	9	4.97E+02	4.97E+02	4.97E+02	4.97E+02	4.96E+02
	8	4.95E+02	4.95E+02	4.95E+02	4.94E+02	4.94E+02
	7	4.93E+02	4.93E+02	4.93E+02	4.92E+02	4.92E+02
	6	4.91E+02	4.91E+02	4.91E+02	4.90E+02	4.90E+02
	5	4.89E+02	4.89E+02	4.89E+02	4.89E+02	4.88E+02
	4	4.87E+02	4.87E+02	4.87E+02	4.87E+02	4.86E+02
	3	4.85E+02	4.85E+02	4.84E+02	4.84E+02	4.83E+02
	2	4.81E+02	4.81E+02	4.81E+02	4.80E+02	4.80E+02
	1	4.73E+02	4.73E+02	4.73E+02	4.73E+02	4.73E+02

表4-6 アスキーファイル出力例 *** 圧力変動(Pa)空間分布***

ステップ:500		時刻: 3.527e+000 秒	平均圧力: 1.764e+004 Pa			
J=	I=	1	2	3	4	5
	51	3.81E-02	3.80E-02	3.82E-02	3.83E-02	3.85E-02
	50	3.81E-02	3.80E-02	3.82E-02	3.83E-02	3.85E-02
	49	3.82E-02	3.81E-02	3.82E-02	3.82E-02	3.83E-02
	48	3.81E-02	3.81E-02	3.81E-02	3.81E-02	3.82E-02
	47	3.80E-02	3.80E-02	3.80E-02	3.79E-02	3.80E-02
	46	3.78E-02	3.78E-02	3.78E-02	3.77E-02	3.77E-02
	45	3.76E-02	3.75E-02	3.75E-02	3.75E-02	3.75E-02
	44	3.73E-02	3.72E-02	3.72E-02	3.71E-02	3.71E-02
	43	3.69E-02	3.68E-02	3.68E-02	3.67E-02	3.67E-02
	42	3.64E-02	3.63E-02	3.63E-02	3.63E-02	3.62E-02
	41	3.58E-02	3.57E-02	3.57E-02	3.57E-02	3.56E-02
	40	3.51E-02	3.51E-02	3.50E-02	3.50E-02	3.49E-02
	39	3.43E-02	3.42E-02	3.42E-02	3.41E-02	3.40E-02
	38	3.34E-02	3.33E-02	3.33E-02	3.31E-02	3.30E-02
	37	3.24E-02	3.23E-02	3.22E-02	3.20E-02	3.19E-02
	36	3.15E-02	3.14E-02	3.13E-02	3.10E-02	3.08E-02
	35	3.10E-02	3.09E-02	3.06E-02	3.02E-02	2.98E-02
	34	3.13E-02	3.12E-02	3.06E-02	3.01E-02	2.96E-02
	33	3.31E-02	3.30E-02	3.20E-02	3.10E-02	3.01E-02
	32	3.91E-02	3.90E-02	3.75E-02	3.59E-02	3.42E-02
	31	3.91E-02	3.90E-02	3.75E-02	3.59E-02	3.42E-02
	30	2.88E-02	2.87E-02	2.80E-02	2.69E-02	2.57E-02
	29	2.02E-02	2.01E-02	1.96E-02	1.88E-02	1.77E-02
	28	1.26E-02	1.25E-02	1.21E-02	1.14E-02	1.04E-02
	27	5.86E-03	5.80E-03	5.40E-03	4.74E-03	3.81E-03
	26	-1.13E-04	-1.77E-04	-5.39E-04	-1.15E-03	-2.01E-03
	25	-5.41E-03	-5.48E-03	-5.81E-03	-6.37E-03	-7.15E-03
	24	-1.01E-02	-1.02E-02	-1.05E-02	-1.10E-02	-1.17E-02
	23	-1.43E-02	-1.44E-02	-1.46E-02	-1.51E-02	-1.57E-02
	22	-1.80E-02	-1.81E-02	-1.83E-02	-1.87E-02	-1.93E-02
	21	-2.14E-02	-2.15E-02	-2.17E-02	-2.20E-02	-2.24E-02
	20	-2.27E-02	-2.28E-02	-2.30E-02	-2.32E-02	-2.35E-02
	19	-2.48E-02	-2.49E-02	-2.50E-02	-2.51E-02	-2.54E-02
	18	-2.68E-02	-2.69E-02	-2.69E-02	-2.70E-02	-2.71E-02
	17	-3.05E-02	-3.05E-02	-3.05E-02	-3.05E-02	-3.05E-02
	16	-3.05E-02	-3.05E-02	-3.05E-02	-3.05E-02	-3.05E-02
	15	-3.34E-02	-3.35E-02	-3.34E-02	-3.34E-02	-3.34E-02
	14	-3.17E-02	-3.17E-02	-3.17E-02	-3.17E-02	-3.16E-02
	13	-3.08E-02	-3.09E-02	-3.09E-02	-3.09E-02	-3.09E-02
	12	-2.87E-02	-2.88E-02	-2.88E-02	-2.88E-02	-2.88E-02
	11	-2.70E-02	-2.71E-02	-2.71E-02	-2.71E-02	-2.71E-02
	10	-2.47E-02	-2.48E-02	-2.47E-02	-2.48E-02	-2.48E-02
	9	-2.25E-02	-2.26E-02	-2.25E-02	-2.26E-02	-2.26E-02
	8	-1.99E-02	-2.00E-02	-2.00E-02	-2.00E-02	-2.01E-02
	7	-1.75E-02	-1.75E-02	-1.75E-02	-1.76E-02	-1.76E-02
	6	-1.46E-02	-1.46E-02	-1.46E-02	-1.46E-02	-1.46E-02
	5	-1.20E-02	-1.21E-02	-1.20E-02	-1.21E-02	-1.21E-02
	4	-8.60E-03	-8.66E-03	-8.60E-03	-8.62E-03	-8.57E-03
	3	-6.59E-03	-6.65E-03	-6.58E-03	-6.59E-03	-6.52E-03
	2	-1.80E-03	-1.87E-03	-1.79E-03	-1.78E-03	-1.69E-03
	1	-1.74E-03	-1.80E-03	-1.72E-03	-1.72E-03	-1.63E-03

表4-7 アスキーファイル出力例 ***成分質量分率 空間分布 (1/2) ***

ステップ:500		時刻:3.527e+000 秒				
---第1種---						
J=	I=	1	2	3	4	5
	51	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01	9.97E-01	9.97E-01
	50	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01	9.97E-01	9.97E-01
	49	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01	9.97E-01	9.97E-01
	48	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01	9.97E-01	9.97E-01
	47	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01	9.97E-01	9.97E-01
	46	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01	9.97E-01	9.97E-01
	45	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01	9.97E-01	9.97E-01
	44	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01	9.97E-01	9.97E-01
	43	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01	9.97E-01	9.97E-01
	42	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01	9.97E-01	9.97E-01
	41	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01	9.97E-01	9.97E-01
	40	9.98E-01	9.98E-01	9.98E-01	9.97E-01	9.97E-01
	39	9.98E-01	9.98E-01	9.97E-01	9.97E-01	9.97E-01
	38	9.98E-01	9.98E-01	9.97E-01	9.97E-01	9.97E-01
	37	9.98E-01	9.98E-01	9.97E-01	9.97E-01	9.96E-01
	36	9.97E-01	9.97E-01	9.97E-01	9.96E-01	9.96E-01
	35	9.97E-01	9.97E-01	9.97E-01	9.97E-01	9.97E-01
	34	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
	33	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
	32	8.61E-01	8.61E-01	8.57E-01	8.50E-01	8.39E-01
	31	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01
	30	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01
	29	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01
	28	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01
	27	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01
	26	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01
	25	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01
	24	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01
	23	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01
	22	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01
	21	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01	2.60E-01
	20	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
	19	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
	18	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
	17	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
	16	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
	15	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
	14	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
	13	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
	12	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
	11	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
	10	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
	9	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
	8	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
	7	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
	6	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
	5	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
	4	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
	3	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
	2	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
	1	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00

表4-7 アスキーファイル出力例 ***成分質量分率 空間分布 (2/2) ***

第 2種		1	2	3	4	5
J=	I=					
	51	1.75E-03	1.75E-03	2.19E-03	2.60E-03	2.85E-03
	50	1.75E-03	1.75E-03	2.19E-03	2.60E-03	2.85E-03
	49	1.78E-03	1.78E-03	2.22E-03	2.64E-03	2.88E-03
	48	1.81E-03	1.81E-03	2.27E-03	2.69E-03	2.93E-03
	47	1.85E-03	1.85E-03	2.32E-03	2.74E-03	2.97E-03
	46	1.88E-03	1.88E-03	2.36E-03	2.78E-03	3.00E-03
	45	1.92E-03	1.92E-03	2.40E-03	2.82E-03	3.04E-03
	44	1.94E-03	1.94E-03	2.43E-03	2.86E-03	3.07E-03
	43	1.97E-03	1.97E-03	2.46E-03	2.89E-03	3.12E-03
	42	2.00E-03	2.00E-03	2.49E-03	2.92E-03	3.17E-03
	41	2.02E-03	2.02E-03	2.52E-03	2.96E-03	3.23E-03
	40	2.05E-03	2.05E-03	2.55E-03	3.01E-03	3.30E-03
	39	2.07E-03	2.07E-03	2.57E-03	3.04E-03	3.36E-03
	38	2.05E-03	2.05E-03	2.56E-03	3.04E-03	3.41E-03
	37	2.13E-03	2.13E-03	2.65E-03	3.16E-03	3.56E-03
	36	2.70E-03	2.70E-03	3.20E-03	3.67E-03	4.01E-03
	35	2.57E-03	2.57E-03	2.94E-03	3.22E-03	3.35E-03
	34	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	33	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	32	1.40E-01	1.40E-01	1.43E-01	1.50E-01	1.61E-01
	31	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01
	30	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01
	29	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01
	28	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01
	27	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01
	26	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01
	25	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01
	24	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01
	23	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01
	22	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01
	21	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01	7.40E-01
	20	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	19	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	18	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	17	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	16	1.62E-10	1.62E-10	2.33E-10	3.26E-10	4.31E-10
	15	2.26E-10	2.26E-10	3.31E-10	4.34E-10	1.59E-10
	14	2.91E-10	2.91E-10	4.33E-10	5.54E-10	4.95E-11
	13	3.09E-10	3.09E-10	4.57E-10	5.69E-10	1.07E-11
	12	3.08E-10	3.08E-10	4.47E-10	5.57E-10	2.13E-10
	11	2.96E-10	2.96E-10	4.25E-10	5.44E-10	3.68E-10
	10	2.71E-10	2.71E-10	3.87E-10	5.22E-10	5.38E-10
	9	2.41E-10	2.41E-10	3.42E-10	4.75E-10	5.78E-10
	8	2.09E-10	2.09E-10	2.92E-10	4.05E-10	5.14E-10
	7	1.75E-10	1.75E-10	2.41E-10	3.28E-10	4.08E-10
	6	1.43E-10	1.43E-10	1.94E-10	2.57E-10	3.06E-10
	5	1.09E-10	1.09E-10	1.46E-10	1.90E-10	2.17E-10
	4	7.96E-11	7.96E-11	1.05E-10	1.35E-10	1.53E-10
	3	4.74E-11	4.74E-11	6.16E-11	7.88E-11	9.01E-11
	2	2.56E-11	2.56E-11	3.27E-11	4.20E-11	4.91E-11
	1	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

表4-8 アスキーファイル出力例 ***成分密度(kg/m3)空間分布 (1/2) ***

		時刻:3.527e+000 秒				
---第1種---						
J=	I=	1	2	3	4	5
	51	1.56E-01	1.56E-01	1.54E-01	1.53E-01	1.52E-01
	50	1.56E-01	1.56E-01	1.54E-01	1.53E-01	1.52E-01
	49	1.55E-01	1.55E-01	1.54E-01	1.53E-01	1.52E-01
	48	1.55E-01	1.55E-01	1.54E-01	1.53E-01	1.52E-01
	47	1.55E-01	1.55E-01	1.54E-01	1.53E-01	1.52E-01
	46	1.55E-01	1.55E-01	1.54E-01	1.52E-01	1.51E-01
	45	1.55E-01	1.55E-01	1.54E-01	1.52E-01	1.51E-01
	44	1.55E-01	1.55E-01	1.54E-01	1.52E-01	1.50E-01
	43	1.55E-01	1.55E-01	1.53E-01	1.52E-01	1.50E-01
	42	1.55E-01	1.55E-01	1.53E-01	1.51E-01	1.49E-01
	41	1.54E-01	1.54E-01	1.53E-01	1.51E-01	1.49E-01
	40	1.54E-01	1.54E-01	1.53E-01	1.51E-01	1.49E-01
	39	1.54E-01	1.54E-01	1.52E-01	1.50E-01	1.49E-01
	38	1.54E-01	1.54E-01	1.52E-01	1.50E-01	1.48E-01
	37	1.54E-01	1.54E-01	1.52E-01	1.50E-01	1.48E-01
	36	1.53E-01	1.53E-01	1.52E-01	1.50E-01	1.48E-01
	35	1.53E-01	1.53E-01	1.51E-01	1.50E-01	1.48E-01
	34	1.56E-01	1.56E-01	1.55E-01	1.53E-01	1.52E-01
	33	1.65E-01	1.65E-01	1.64E-01	1.62E-01	1.60E-01
	32	1.40E-01	1.40E-01	1.39E-01	1.38E-01	1.35E-01
	31	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02
	30	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02
	29	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02
	28	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02
	27	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02
	26	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02
	25	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02
	24	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02
	23	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02
	22	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02
	21	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02	4.83E-02
	20	1.10E-01	1.10E-01	1.10E-01	1.10E-01	1.10E-01
	19	1.10E-01	1.10E-01	1.10E-01	1.10E-01	1.10E-01
	18	1.10E-01	1.10E-01	1.10E-01	1.10E-01	1.10E-01
	17	1.10E-01	1.10E-01	1.10E-01	1.10E-01	1.10E-01
	16	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01	1.38E-01
	15	1.52E-01	1.52E-01	1.52E-01	1.52E-01	1.52E-01
	14	1.62E-01	1.62E-01	1.62E-01	1.62E-01	1.62E-01
	13	1.65E-01	1.65E-01	1.65E-01	1.65E-01	1.65E-01
	12	1.68E-01	1.68E-01	1.68E-01	1.68E-01	1.67E-01
	11	1.69E-01	1.69E-01	1.69E-01	1.69E-01	1.69E-01
	10	1.70E-01	1.70E-01	1.70E-01	1.70E-01	1.70E-01
	9	1.71E-01	1.71E-01	1.71E-01	1.71E-01	1.71E-01
	8	1.71E-01	1.71E-01	1.71E-01	1.72E-01	1.72E-01
	7	1.72E-01	1.72E-01	1.72E-01	1.72E-01	1.72E-01
	6	1.73E-01	1.73E-01	1.73E-01	1.73E-01	1.73E-01
	5	1.73E-01	1.73E-01	1.73E-01	1.74E-01	1.74E-01
	4	1.74E-01	1.74E-01	1.74E-01	1.74E-01	1.75E-01
	3	1.75E-01	1.75E-01	1.75E-01	1.75E-01	1.75E-01
	2	1.76E-01	1.76E-01	1.76E-01	1.77E-01	1.77E-01
	1	1.79E-01	1.79E-01	1.79E-01	1.79E-01	1.79E-01

表4-8 アスキーファイル出力例 ***成分密度(kg/m3)空間分布(2/2)***

---第2種---					
J=	I=	1	2	3	4
	51	2.72E-04	2.72E-04	3.38E-04	3.99E-04
	50	2.72E-04	2.72E-04	3.38E-04	3.99E-04
	49	2.76E-04	2.76E-04	3.44E-04	4.05E-04
	48	2.82E-04	2.82E-04	3.51E-04	4.12E-04
	47	2.88E-04	2.88E-04	3.58E-04	4.19E-04
	46	2.93E-04	2.93E-04	3.64E-04	4.25E-04
	45	2.97E-04	2.97E-04	3.69E-04	4.30E-04
	44	3.02E-04	3.02E-04	3.74E-04	4.35E-04
	43	3.05E-04	3.05E-04	3.78E-04	4.39E-04
	42	3.09E-04	3.09E-04	3.82E-04	4.43E-04
	41	3.13E-04	3.13E-04	3.86E-04	4.48E-04
	40	3.17E-04	3.17E-04	3.90E-04	4.54E-04
	39	3.19E-04	3.19E-04	3.92E-04	4.58E-04
	38	3.16E-04	3.16E-04	3.90E-04	4.59E-04
	37	3.28E-04	3.28E-04	4.04E-04	4.76E-04
	36	4.15E-04	4.15E-04	4.87E-04	5.50E-04
	35	3.94E-04	3.94E-04	4.46E-04	4.82E-04
	34	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	33	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	32	2.27E-02	2.27E-02	2.32E-02	2.43E-02
	31	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01
	30	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01
	29	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01
	28	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01
	27	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01
	26	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01
	25	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01
	24	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01
	23	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01
	22	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01
	21	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01	1.37E-01
	20	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	19	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	18	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	17	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	16	2.22E-11	2.22E-11	3.19E-11	4.48E-11
	15	3.44E-11	3.44E-11	5.03E-11	6.60E-11
	14	4.71E-11	4.71E-11	7.02E-11	8.96E-11
	13	5.11E-11	5.11E-11	7.57E-11	9.41E-11
	12	5.17E-11	5.17E-11	7.49E-11	9.33E-11
	11	5.00E-11	5.00E-11	7.18E-11	9.19E-11
	10	4.60E-11	4.60E-11	6.57E-11	8.86E-11
	9	4.11E-11	4.11E-11	5.83E-11	8.10E-11
	8	3.57E-11	3.57E-11	5.00E-11	6.95E-11
	7	3.01E-11	3.01E-11	4.15E-11	5.65E-11
	6	2.46E-11	2.46E-11	3.34E-11	4.44E-11
	5	1.89E-11	1.89E-11	2.54E-11	3.29E-11
	4	1.39E-11	1.39E-11	1.84E-11	2.36E-11
	3	8.30E-12	8.30E-12	1.08E-11	1.38E-11
	2	4.51E-12	4.51E-12	5.77E-12	7.41E-12
	1	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

表4-9 アスキーファイル出力例 *** 热伝導係数 (W/m/K)空間分布 ***

ステップ:500		時刻:3.527e+000 秒				
J=	I=	1	2	3	4	5
	51	2.76E-02	2.76E-02	2.78E-02	2.79E-02	2.80E-02
	50	2.76E-02	2.76E-02	2.78E-02	2.79E-02	2.80E-02
	49	2.77E-02	2.77E-02	2.78E-02	2.79E-02	2.81E-02
	48	2.77E-02	2.77E-02	2.78E-02	2.80E-02	2.81E-02
	47	2.77E-02	2.77E-02	2.78E-02	2.80E-02	2.81E-02
	46	2.77E-02	2.77E-02	2.78E-02	2.80E-02	2.82E-02
	45	2.77E-02	2.77E-02	2.79E-02	2.81E-02	2.82E-02
	44	2.77E-02	2.77E-02	2.79E-02	2.81E-02	2.83E-02
	43	2.77E-02	2.77E-02	2.79E-02	2.81E-02	2.83E-02
	42	2.78E-02	2.78E-02	2.79E-02	2.82E-02	2.84E-02
	41	2.78E-02	2.78E-02	2.80E-02	2.82E-02	2.85E-02
	40	2.78E-02	2.78E-02	2.80E-02	2.83E-02	2.85E-02
	39	2.78E-02	2.78E-02	2.80E-02	2.83E-02	2.85E-02
	38	2.78E-02	2.78E-02	2.80E-02	2.83E-02	2.85E-02
	37	2.78E-02	2.78E-02	2.81E-02	2.83E-02	2.85E-02
	36	2.79E-02	2.79E-02	2.81E-02	2.84E-02	2.86E-02
	35	2.80E-02	2.80E-02	2.82E-02	2.84E-02	2.86E-02
	34	2.76E-02	2.76E-02	2.78E-02	2.79E-02	2.81E-02
	33	2.66E-02	2.66E-02	2.67E-02	2.69E-02	2.71E-02
	32	2.69E-02	2.69E-02	2.70E-02	2.70E-02	2.72E-02
	31	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02
	30	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02
	29	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02
	28	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02
	27	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02
	26	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02
	25	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02
	24	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02
	23	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02
	22	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02
	21	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02	2.40E-02
	20	3.52E-02	3.52E-02	3.52E-02	3.52E-02	3.52E-02
	19	3.52E-02	3.52E-02	3.52E-02	3.52E-02	3.52E-02
	18	3.52E-02	3.52E-02	3.52E-02	3.52E-02	3.52E-02
	17	3.52E-02	3.52E-02	3.52E-02	3.52E-02	3.52E-02
	16	3.02E-02	3.02E-02	3.02E-02	3.02E-02	3.02E-02
	15	2.81E-02	2.81E-02	2.81E-02	2.81E-02	2.81E-02
	14	2.69E-02	2.69E-02	2.69E-02	2.69E-02	2.69E-02
	13	2.65E-02	2.65E-02	2.65E-02	2.65E-02	2.65E-02
	12	2.62E-02	2.62E-02	2.62E-02	2.63E-02	2.63E-02
	11	2.61E-02	2.61E-02	2.61E-02	2.61E-02	2.61E-02
	10	2.60E-02	2.60E-02	2.60E-02	2.60E-02	2.60E-02
	9	2.59E-02	2.59E-02	2.59E-02	2.59E-02	2.59E-02
	8	2.58E-02	2.58E-02	2.58E-02	2.58E-02	2.58E-02
	7	2.58E-02	2.58E-02	2.58E-02	2.57E-02	2.57E-02
	6	2.57E-02	2.57E-02	2.57E-02	2.57E-02	2.56E-02
	5	2.56E-02	2.56E-02	2.56E-02	2.56E-02	2.56E-02
	4	2.56E-02	2.56E-02	2.55E-02	2.55E-02	2.55E-02
	3	2.54E-02	2.54E-02	2.54E-02	2.54E-02	2.54E-02
	2	2.53E-02	2.53E-02	2.53E-02	2.53E-02	2.53E-02
	1	2.50E-02	2.50E-02	2.50E-02	2.50E-02	2.50E-02

5. まとめ

本研究では、パーソナルコンピュータの Windows 環境で実行可能な円筒状密閉容器内における多成分混合気体の対流・拡散現象を対象とする 2 次元数値シミュレーションコードを作成した。

本コードの主な特徴を以下に示す。

- ①軸対称圧縮性ナビエ・ストーク方程式に基づく直接数値解析法 (DNS) に基づく。
- ②重力項 (浮力) の影響を考慮しているため熱対流問題への適用が可能である。
- ③多成分の濃度拡散を考慮している。(最大 7 種の成分まで設定可能である。)
- ④流体に関しては、理想気体の状態方程式を満たす気体とする。
- ⑤各種蒸発成分の蒸発量は、液面における蒸発成分の分圧の飽和蒸気圧と等しいとする。
また、装置内壁での各種蒸発成分の凝縮量は、壁での蒸発成分の分圧を飽和蒸気圧と仮定し、壁方向に拡散する蒸発成分は全て壁面にて凝縮するものとする。

また、本コードは以下の事項が計算できる機能を有する。

- ①各蒸発成分の蒸留量と時間変化
- ②各蒸発成分の空間濃度分布と時間変化
- ③各蒸発成分の装置壁凝縮量の時間変化
- ④装置内部の混合ガス温度分布と時間変化
- ⑤装置内部の混合ガス速度分布と時間変化

本コードの妥当性を確認するための検証計算として、ベンチマークデータとして公開されている 2 次元キャビティ内の自然対流問題の結果と本解析コードでの計算結果を比較した結果、温度、速度に関する空間分布及び最大速度の値及び発生位置ともによく一致した。

更に、本コードを用いてカソードプロセッサを模擬した円筒状の密閉容器の体系にて、カドミウムの蒸留について解析を行ない、蒸留挙動がシミュレーションできることを確認した。その際には、上記計算事項が問題なく出力できることを確認するとともに、以下の機能が満足されていることを確認した。

- ・物質収支のリアルタイム表示
- ・流速分布表示
- ・流速-温度分布表示
- ・流速-カドミウム濃度分布表示

なお、本研究は川崎重工業株式会社に業務を委託した成果をまとめたものである。赤松幹夫氏、東達夫氏、他の方々のご尽力に謝意を表します。

6. 参考文献

- 1) S. Chapman and T. G. Cowling, "The Mathematical Theory of Non-uniform gases", Cambridge Univ., Dec. 1991.
- 2) W. G. Vincenti and C. H. Kruger, Jr., "Introduction to Physical Gas Dynamics", John Wiley and Sons, June 1975.
- 3) E. S. Oran and J. P. Boris, "Numerical Simulation of Reactive Flow", Cambridge Univ., Aug. 1990.
- 4) Wilke, C. R., "A viscosity equation for gas mixtures", Jour. Chem. Phys., Vol. 18, No. 4, pp. 517-519, 1950.
- 5) Mason, E. A., and S. C. Saxena, "Approximate Formula for the Thermal Conductivity of Gas Mixtures", Phys. Fluids 1, pp. 361-319, 1958.
- 6) Kawamura, T., and K. Kuwahara, "Computation of high Reynolds number flow around a circular cylinder with surface roughness", AIAA Paper 84-0340, 1984.
- 7) Davis, G. De Vahl, "Natural Convection of Air in a Square Cavity:a Bench Mark Numerical Solution", International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol. 3, pp. 249-264, 1983.

第Ⅱ編 乾式プロセスの冷却挙動解析モデルの検討

1. 緒言

先進的核燃料リサイクルシステムでは溶融塩電解プロセスを用いて、再処理と燃料加工を一体化するとともに、主工程をコンパクト化できる乾式リサイクルシステムを検討している。この乾式リサイクルシステムでは、ホットセル中での高温プロセスとなることから、セル内雰囲気の調整方法が課題となる。定常時のセルの冷却フローによってセル内の温度分布が異なり、高発熱機器の表面温度が高くなることから表面温度を低減するためになんらかの対応が必要であると考えられる。

本検討では、非常時におけるセル内温度の変動傾向について解析コード PHOENICS を導入した場合の解析モデル化に必要なモデル条件と解析コードの違いによる結果の違いについて明らかにするため、ベンチマーク解析を行うとともに作成、検証したモデルを用いて非常時の定常状態における冷却挙動及び過渡条件での冷却挙動を模擬した解析を行い、ホットセル冷却系の安全設計に資することを目的とする。

2. 解析モデルの作成

照明灯を天井より下側に配置し、冷却ダクトを中心と両端側部に配置したセル条件で解析モデルを作成した。

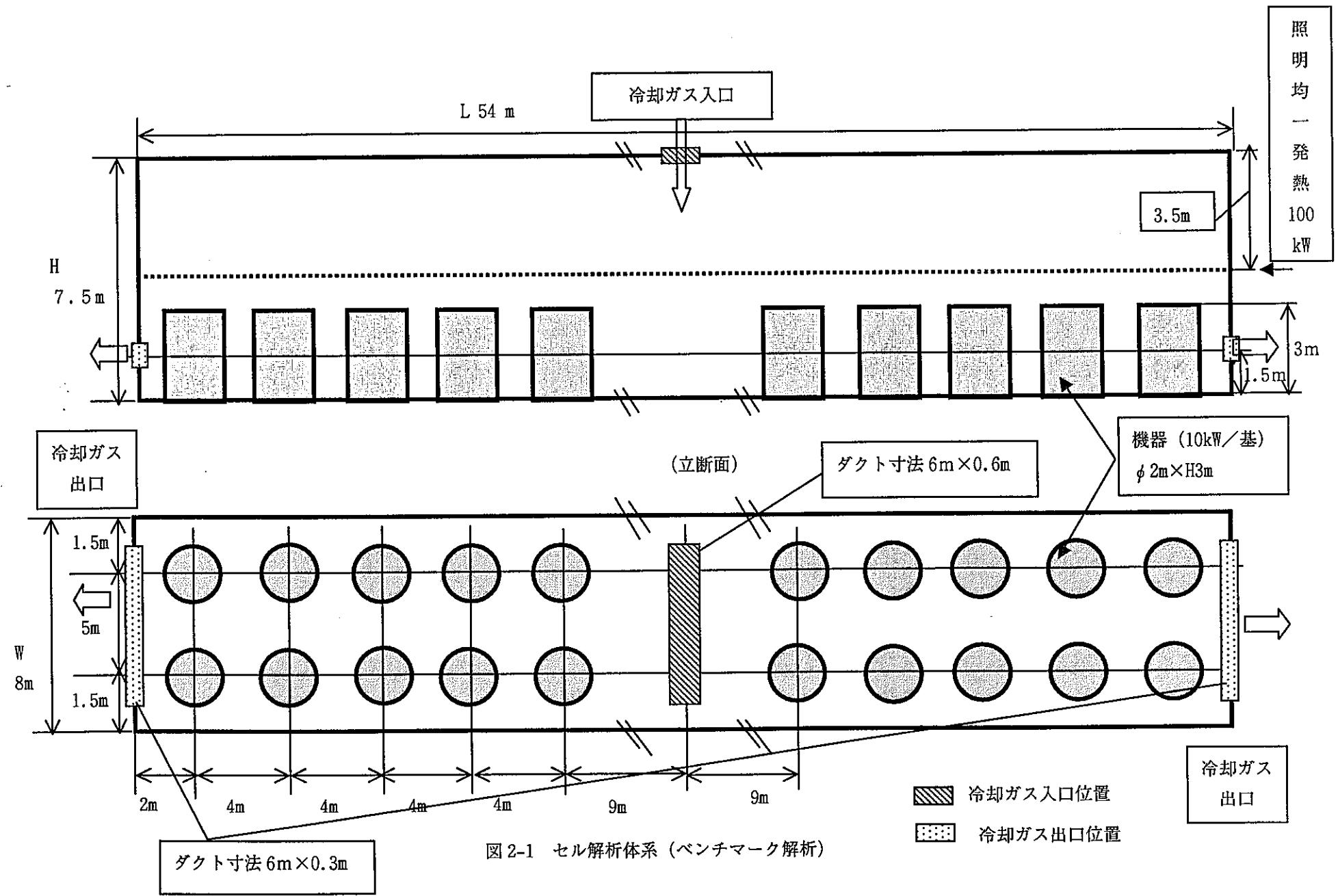
- ・モデル体系：図 2-1
- ・セル寸法：L54m×W8m×H7.5m
- ・機器寸法：Φ2m×H3m
- ・機器数：20 基
- ・機器配置：図 2-1 のとおり
- ・放散熱量：機器放散熱量 10 kW／基（表面全体から均一放熱：ただし、機器の下端 100mm 部分は脚部のため、非発熱領域とする）
セル照明放散熱 100 kW（天井面から 3.5m 下の面で均一放熱）
- ・冷却ガス風量：8000m³/h ($\Delta T = 15^\circ\text{C}$: 入口ガス温度 25°C、出口ガス温度 40°C とした場合の 300 kW 除熱に必要な通風量)
- ・ガス流の出入り口位置（入り口：天井のセル長辺方向中央部に入口ダクト（6m × 0.6 m）、出口：短辺の下から 1.5m 情報の出口ダクト（6m × 0.3m））
- ・雰囲気（冷却）ガス：Ar
- ・雰囲気ガス出入口温度：40°C / 25°C（出口／入口）

これらに基づき作成した解析メッシュを図 2-2～5 に示す。

- ・モデル 1 機器形状を残したままメッシュ数を 1.1 万メッシュ：図 2-2
- ・モデル 2 機器部分をポーラスボディモデルとして 1.1 万メッシュ：図 2-3
- ・モデル 3 機器形状を残したままメッシュ数を 2.2 万メッシュ：図 2-4
- ・モデル 4 機器形状を残したままメッシュ数を 4 万メッシュ：図 2-5

なお、別途実施した UNIX ワークステーションでの STAR-CD の詳細解析の解析メッシュを図 2-6 に示す。今回の解析モデルではパソコン版での動作時間も考慮して、STAR-CD の詳細解析の解析メッシュが約 24 万メッシュに対して、最大のモデルでもメッシュ数を約 1/6 の 4 万メッシュに削減している。

また、4 万メッシュの場合の各部の詳細メッシュを図 2-6～2-8 に示す。



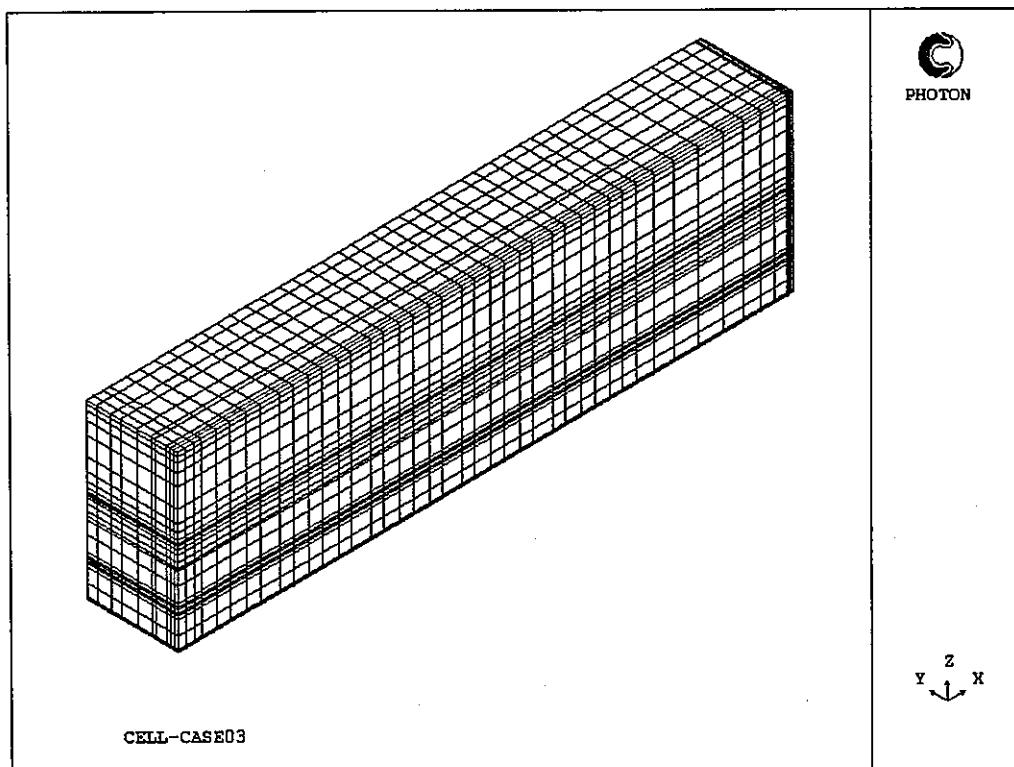


図 2-2 1.1万メッシュモデル

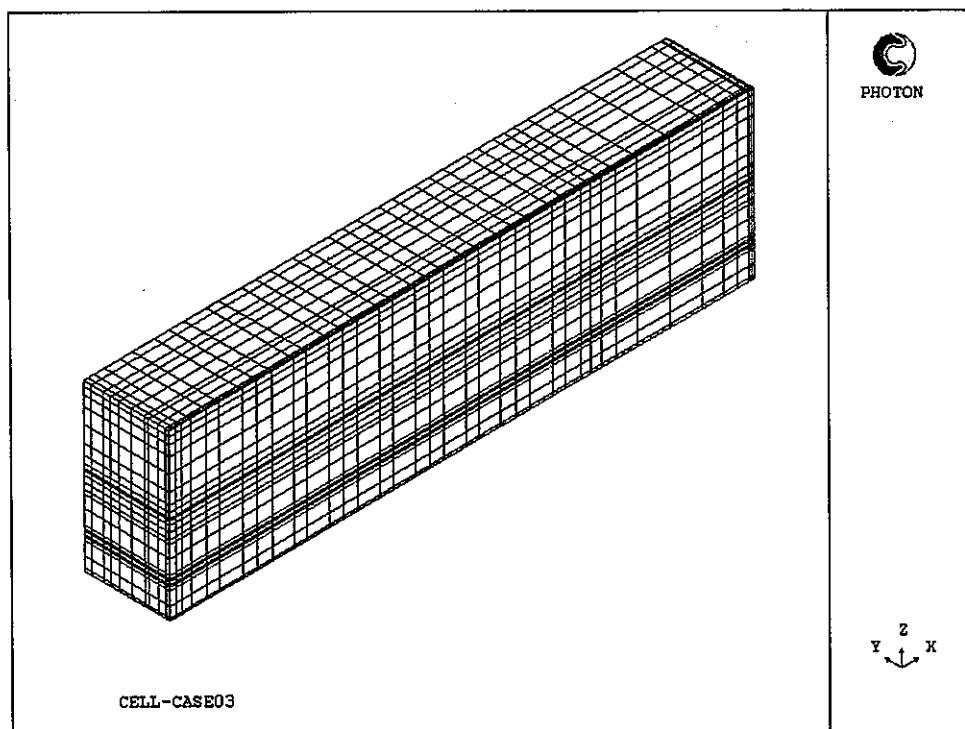


図 2-3 1.1万ポーラスメッシュモデル

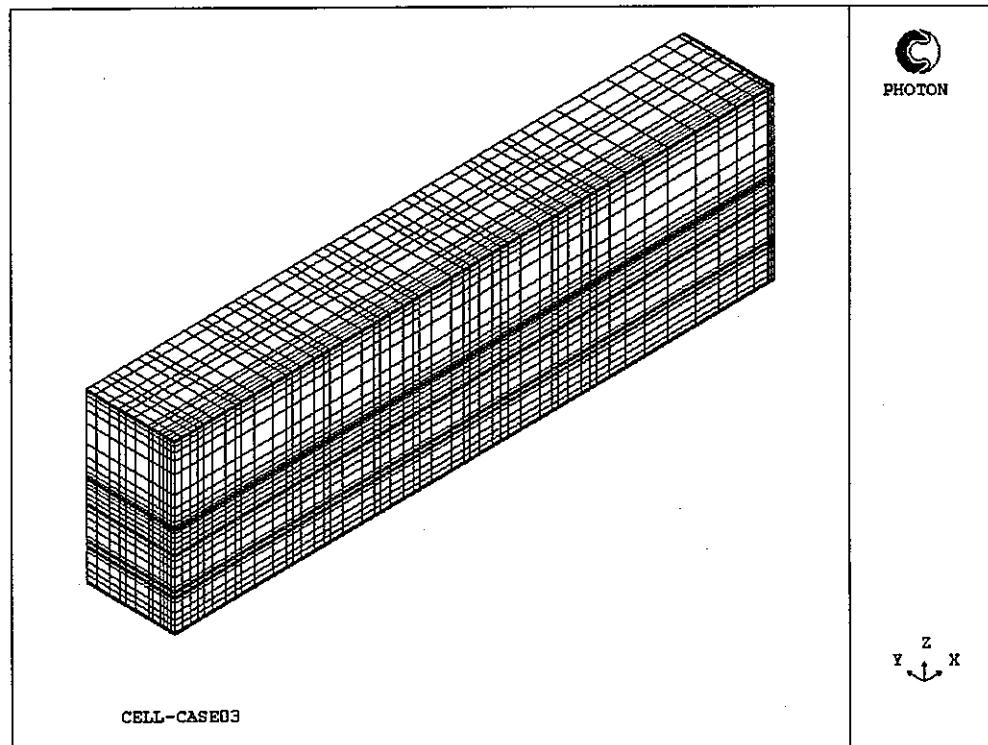


図 2-4 2.2 万メッシュモデル

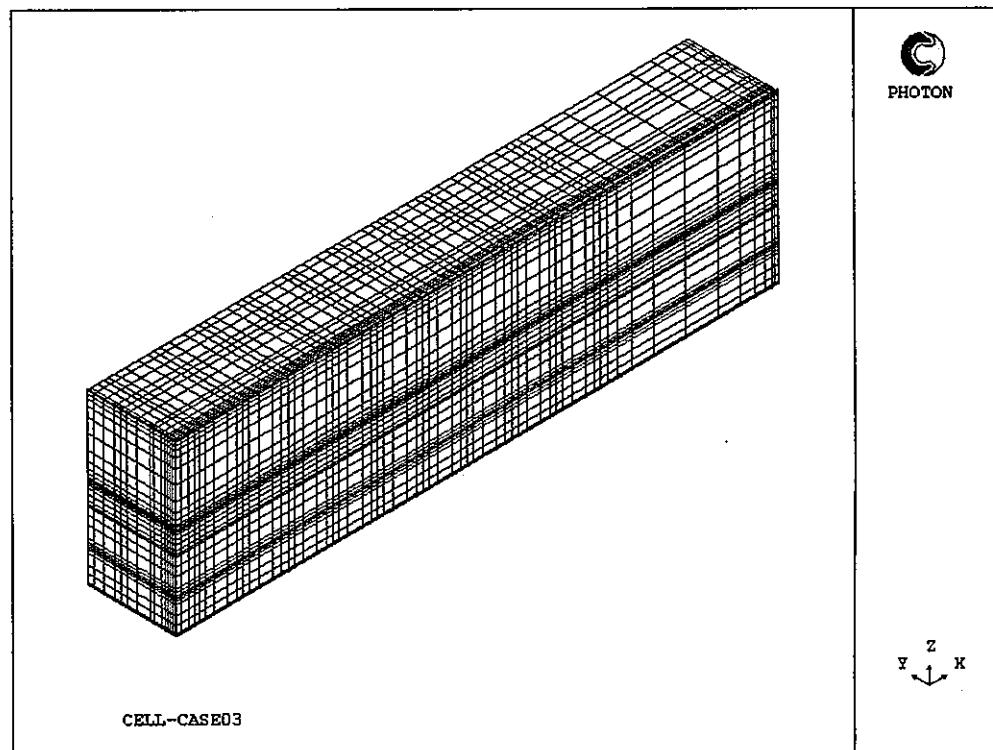
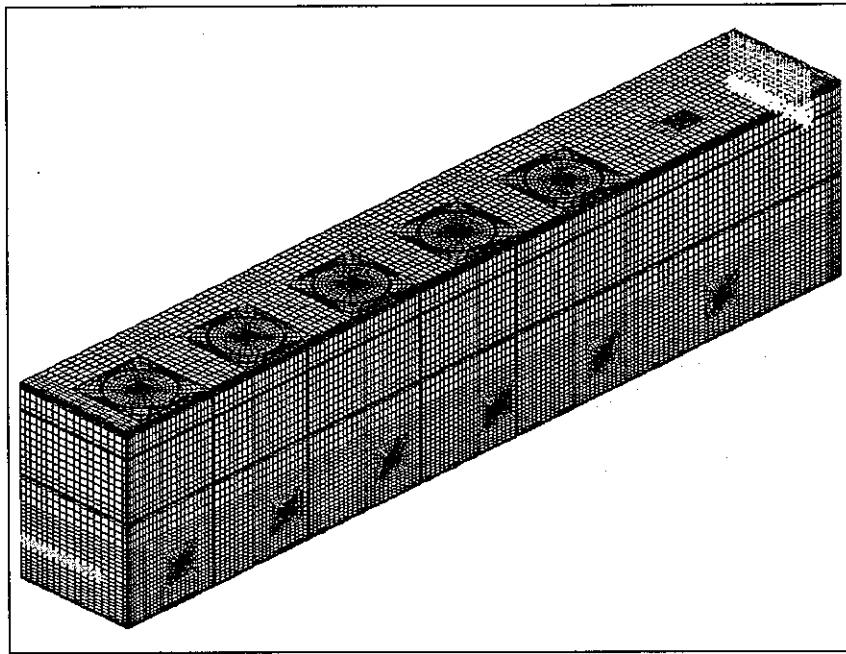


図 2-5 4 万メッシュモデル



STAR
D
PROSTAR 3.00

17-Mar-99
VIEW
1.000
1.000
1.000
ANGLE
0.000
DISTANCE
11.299
CENTER
13.500
2.000
3.750
EHIDDEN PLOT
BOUNDARIES

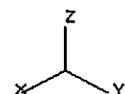


図 2-6 STAR-CD による解析メッシュモデル：24 万メッシュ

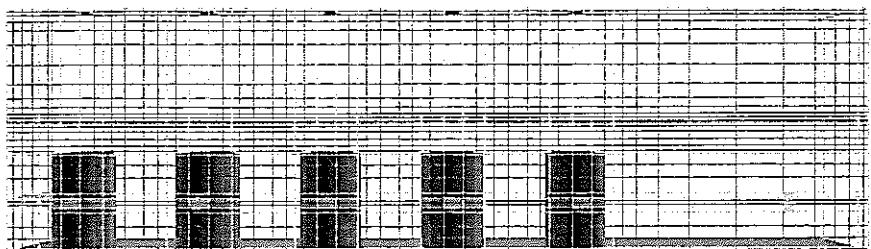


図 2-7 長辺方向からみた詳細メッシュ（4万メッシュ）

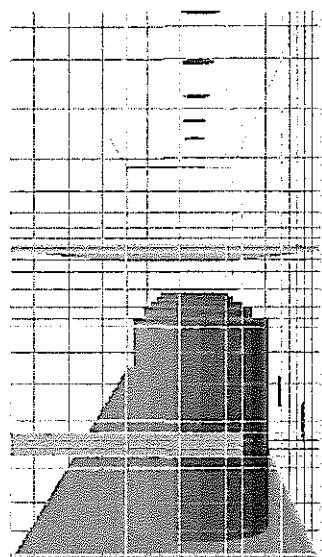


図 2-8 短辺方向からみた解析メッシュ（4万メッシュ）

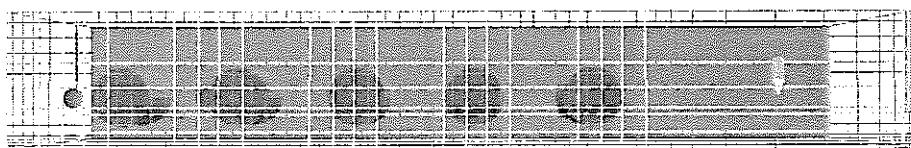


図 2-9 上面方向からみた詳細メッシュ（4万メッシュ）

3. ベンチマーク計算

照明灯を天井より下側に配置し、冷却ダクトを中心と両端側部に配置したセル体系についてベンチマーク計算を実施した。

図 3-1 照明レベルでの機器中心部におけるガス温度分布の比較

図 3-2 長手方向断面の流速分布 (PHOENICS4 万メッシュ)

図 3-3 長手方向断面の流速分布 (STAR-CD)

図 3-4 長手方向断面の温度分布 (PHOENICS4 万メッシュ)

図 3-5 長手方向断面の温度分布 (STAR-CD)

図 3-6 セル表面の温度分布分布 (PHOENICS4 万メッシュ)

図 3-7 セル表面の温度分布分布 (STAR-CD)

図 3-8 セル下面の温度分布分布 (PHOENICS4 万メッシュ)

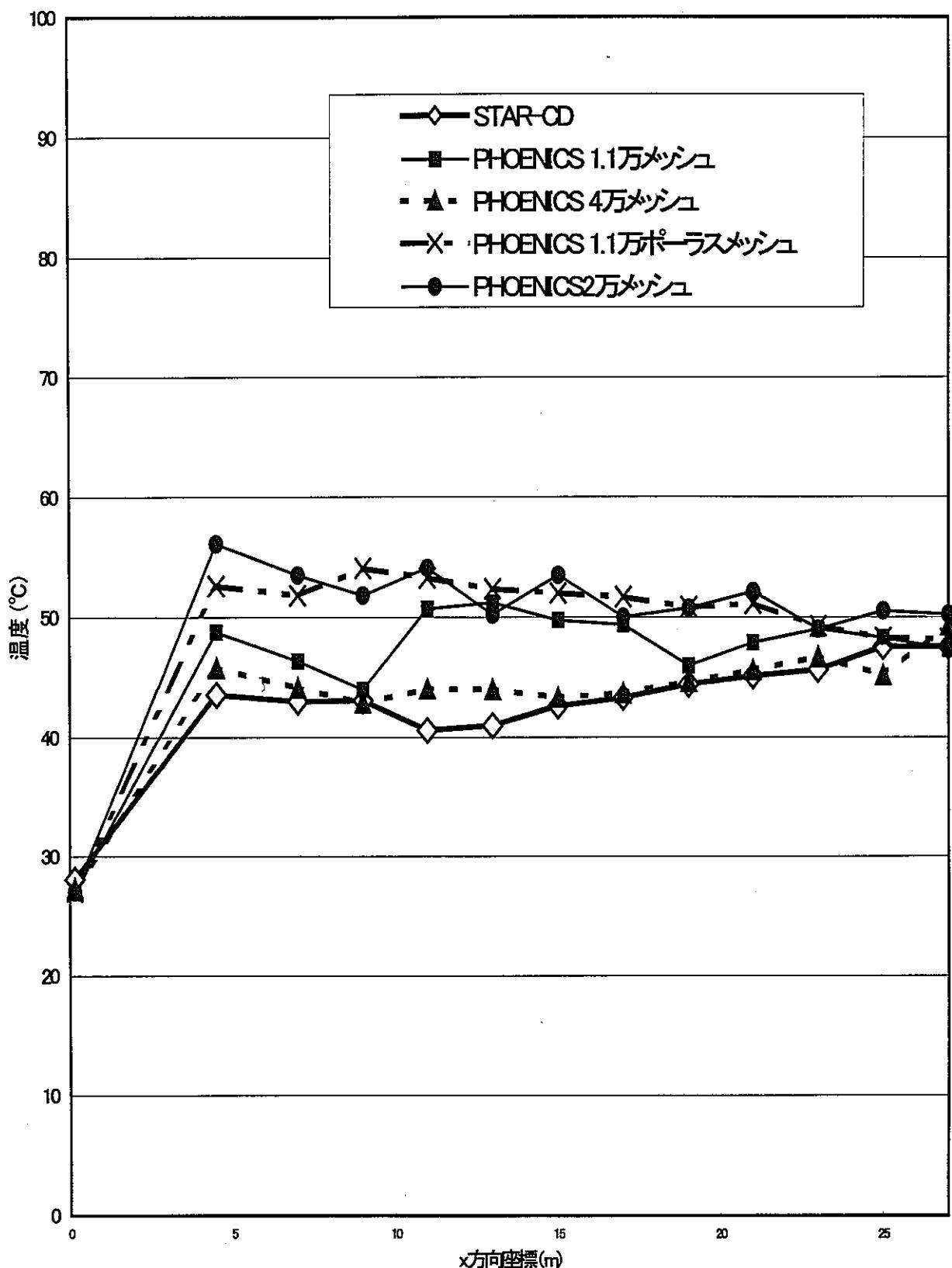
図 3-9 セル下面の温度分布分布 (STAR-CD)

図 3-10 機器中心部長手方向断面の流況 (PHOENICS のモデルによる違い)

図 3-11 機器中心部長手方向断面の温度分布 (PHOENICS のモデルによる違い)

この結果から、以下のことがわかった。

- ① 図 3-1～9 までから PHOENICS のモデルの中では 4 万メッシュモデルの解析結果が STAR-CD の詳細解析モデルの解析結果とよく一致することがわかる。4 万メッシュモデルではメッシュ数は約 6 分の 1 に荒くなっているが、全体的な流動傾向はほぼ一致し、セル内の温度分布についても代表的な温度分布を表した図 3-1 の比較のとおり良く一致している。
- ② 図 3-10,11 からポーラスマッシュのケースでは機器の形状に沿って現れる上昇流が無いことから右側の空間の対流状況大きく異なること、及び温度分布も他の解析結果と大きく異なることから、今回のモデルでポーラスマッシュを用いることはあまり得策ではない。
- ③ 図 3-10,11 から最も精度が高いと考えられる 4 万メッシュモデルと比べ、1.1.万メッシュモデルによりメッシュ数の多い 2.2 万メッシュの方が流況、温度とも差が大きい。以上から非定常解析用モデルも最低 4 万メッシュ相当の精度で、機器の発熱分布のモデル化もできるようにモデル化領域を 2 倍にしてモデル化しておく必要がある。
- ⑤ 本解析では、今回使用した SGI のワークステーションでは解析が収束した 20000 ステップで 40 時間程度の解析時間を必要としており、パソコン版にて使用する際は CPU パワーから考えるとさらに時間が必要になることも考えられるため、4 万メッシュ相当以下のモデルについても非定常解析の条件でモデル化しておくことが必要である。



図B-1 照明レベルでの機器中心部におけるガス温度分布の比較(モデルによる違い)

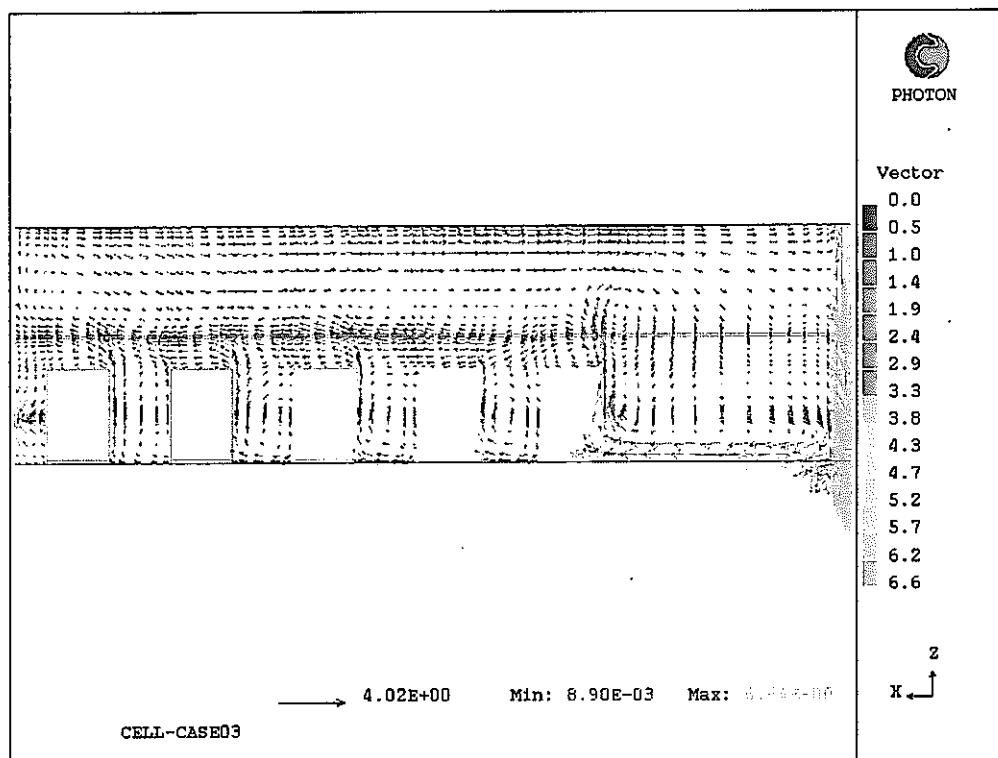


図 3-2 長手方向断面の流速分布 (PHOENICS) 単位 : m/sec

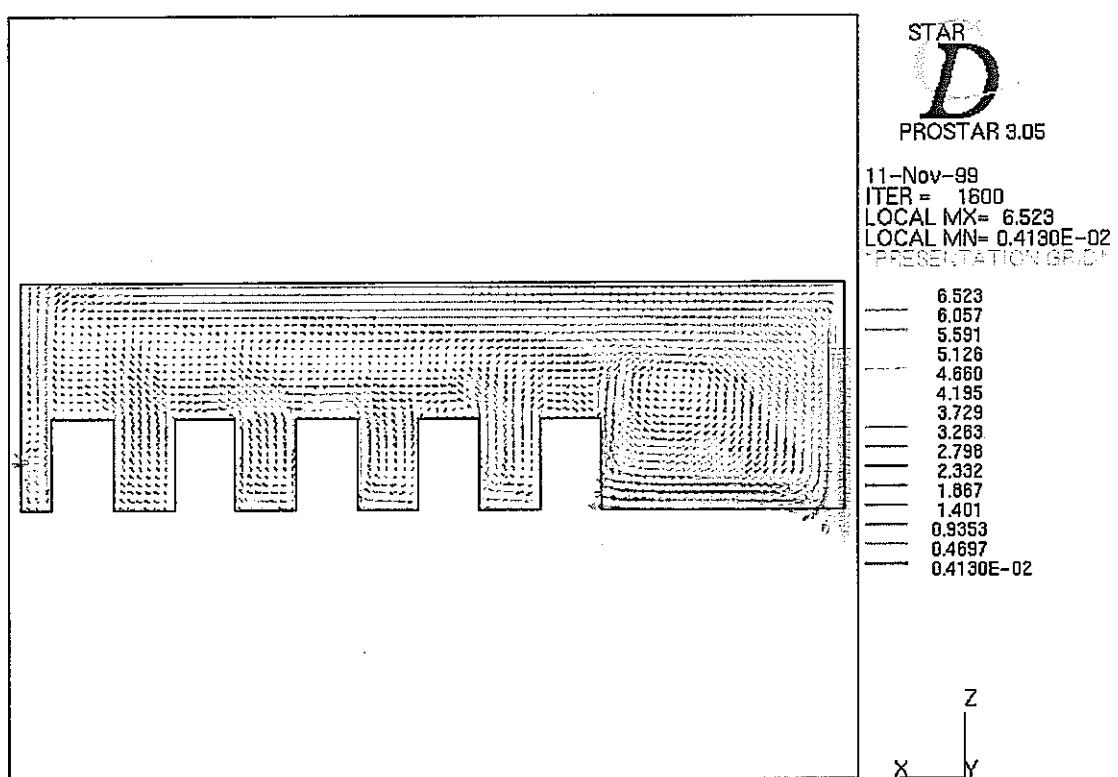


図 3-3 長手方向断面の流速分布 (STAR-CD) 単位 : m/sec

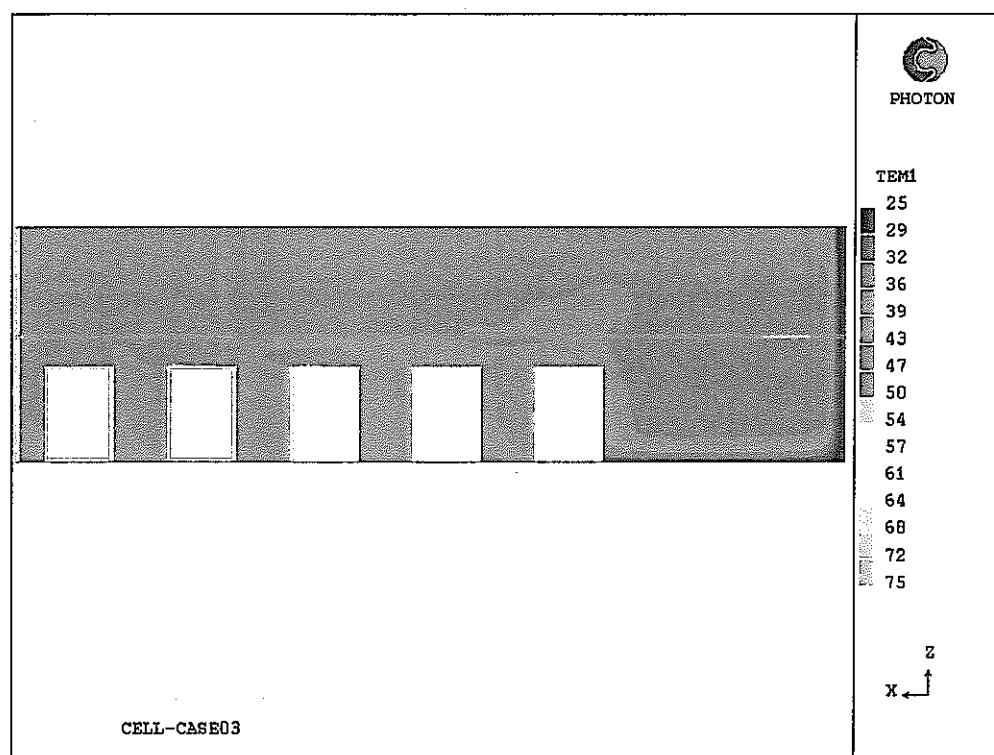


図 3-4 長手方向断面の温度分布 (PHOENICS) : 単位°C

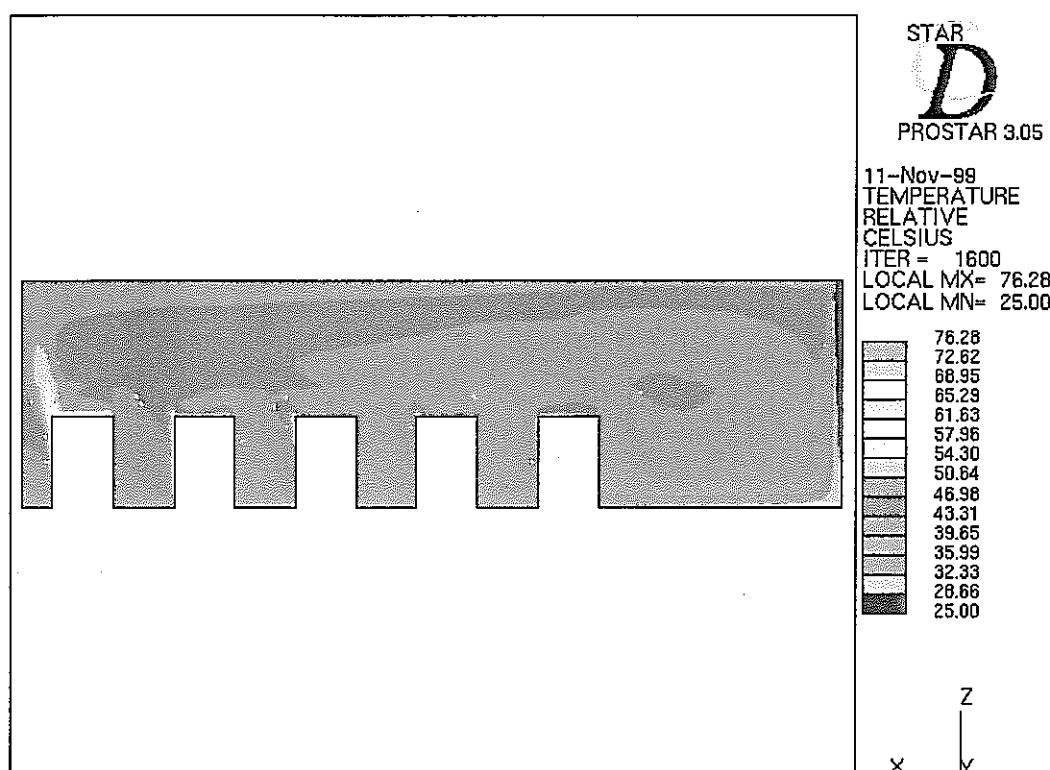


図 3-5 長手方向断面の温度分布 (STAR-CD) 単位 : °C

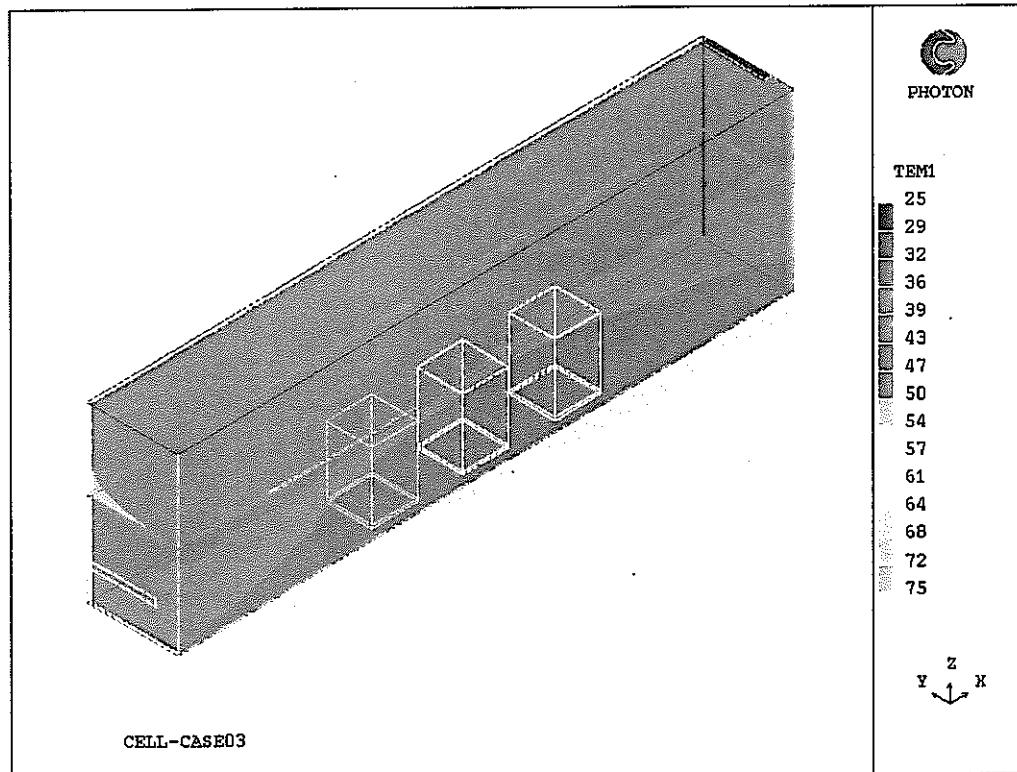


図 3-6 セル表面の温度分布 (PHOENICS) : 単位°C

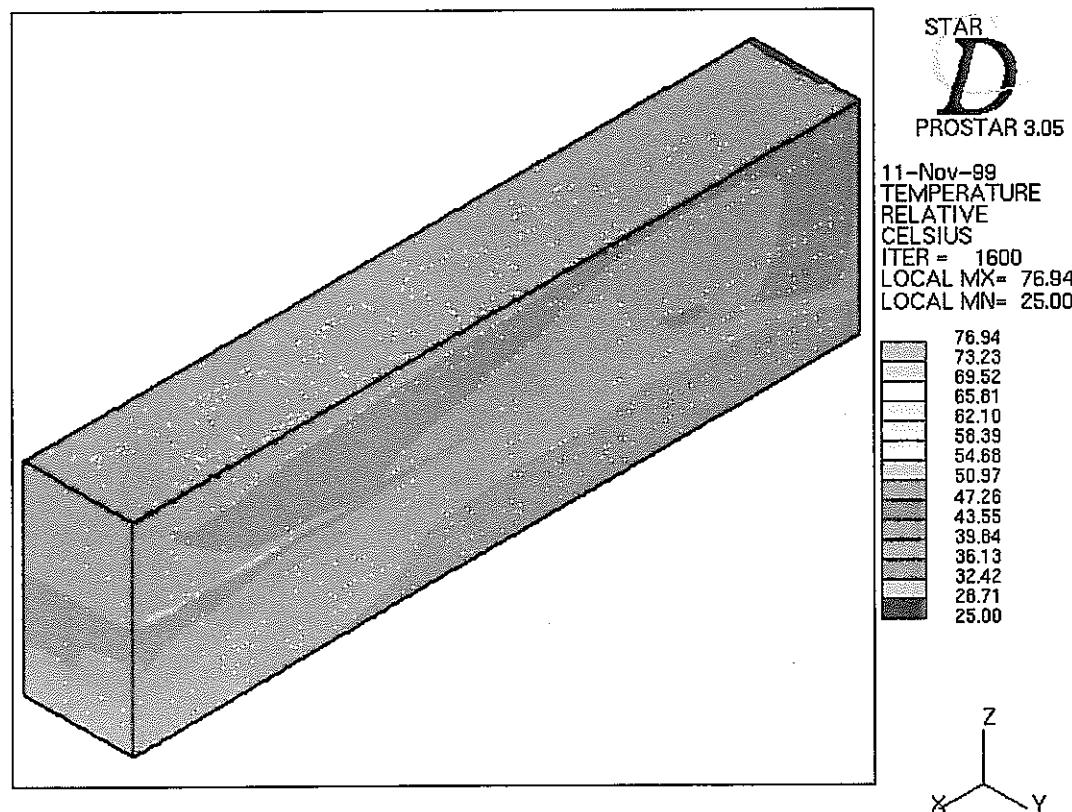


図 3-7 セル表面の温度分布 (STAR-CD) : 単位°C

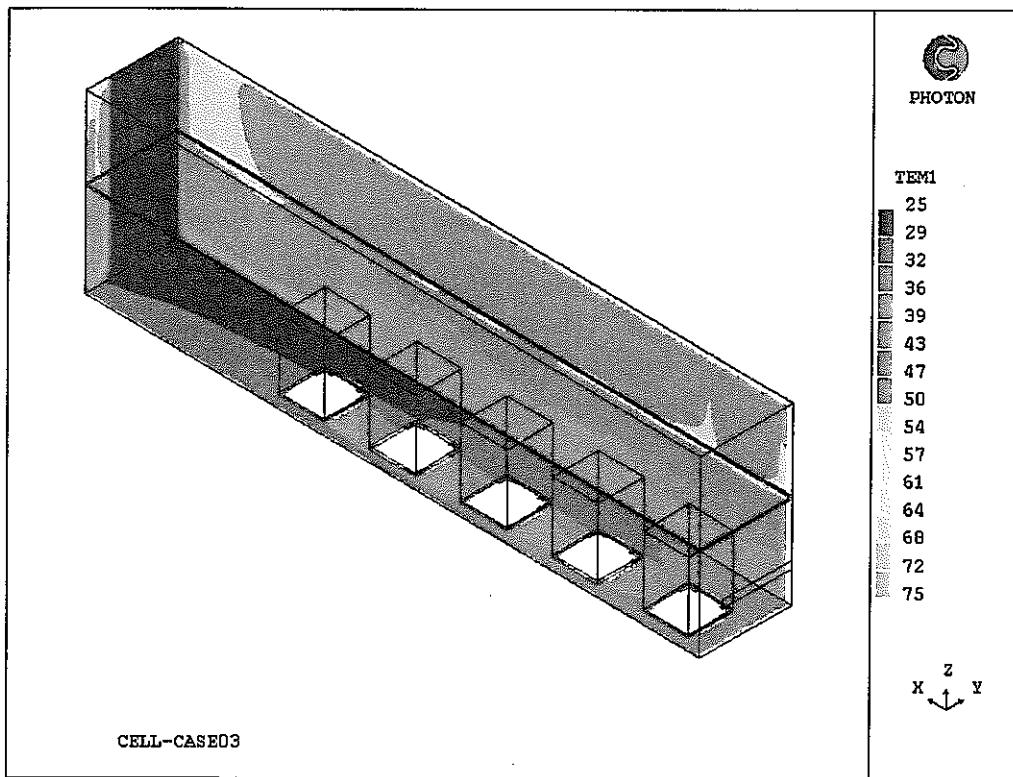


図 3-8 セル下面の温度分布 (PHOENICS) : 単位°C

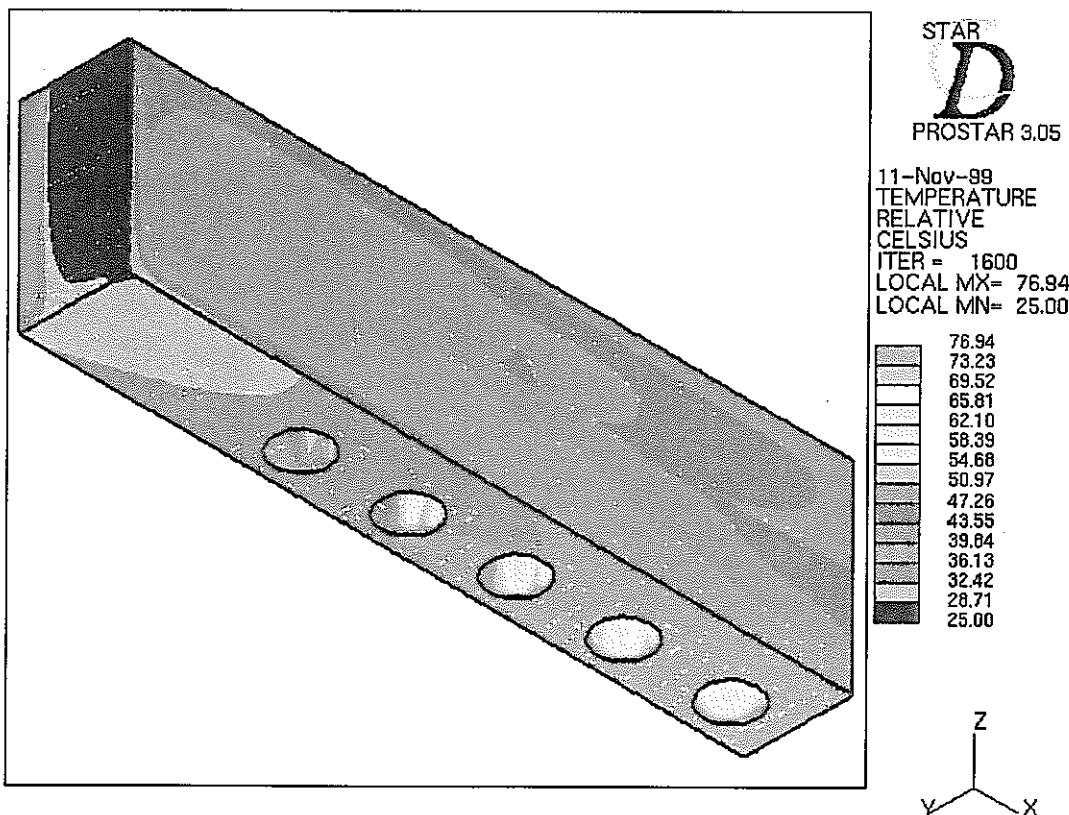
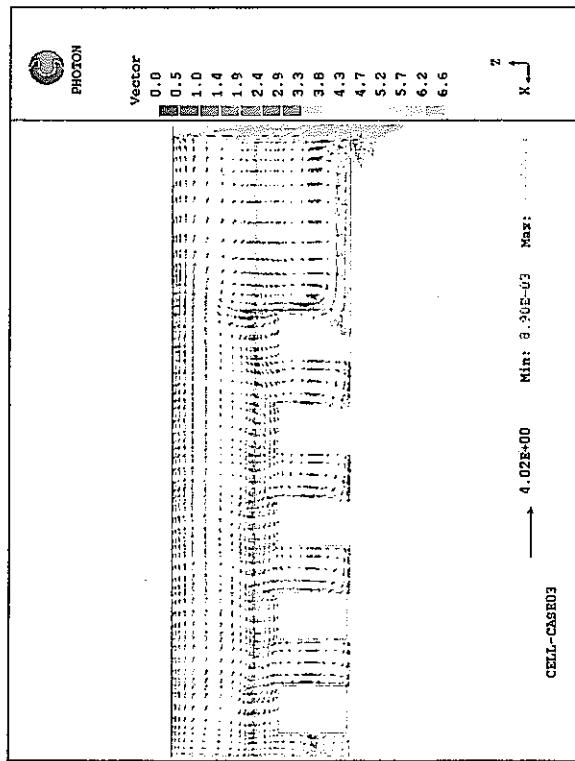
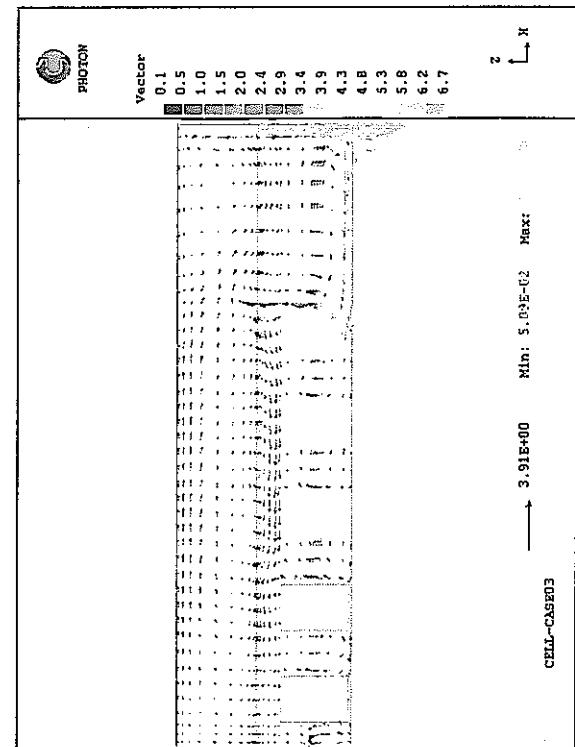


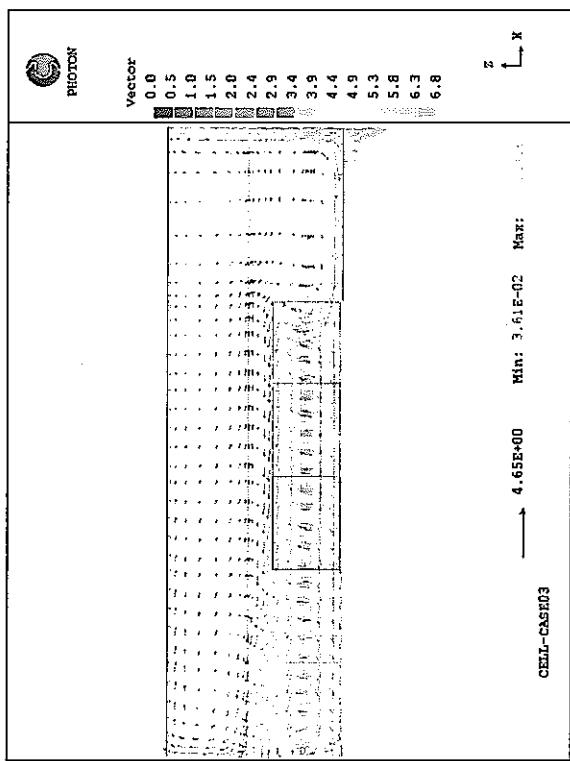
図 3-9 セル下面の温度分布 (STAR-CD) : 単位°C



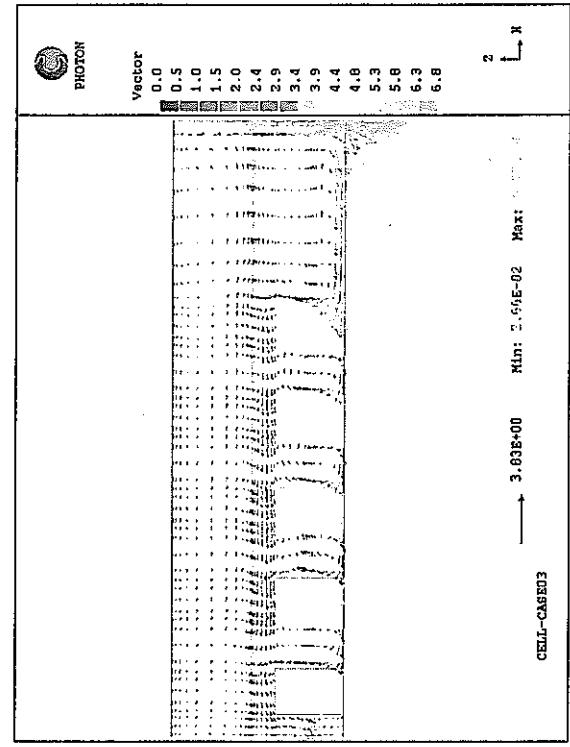
(1) ケース 0 (4万メッシュ) の流速分布

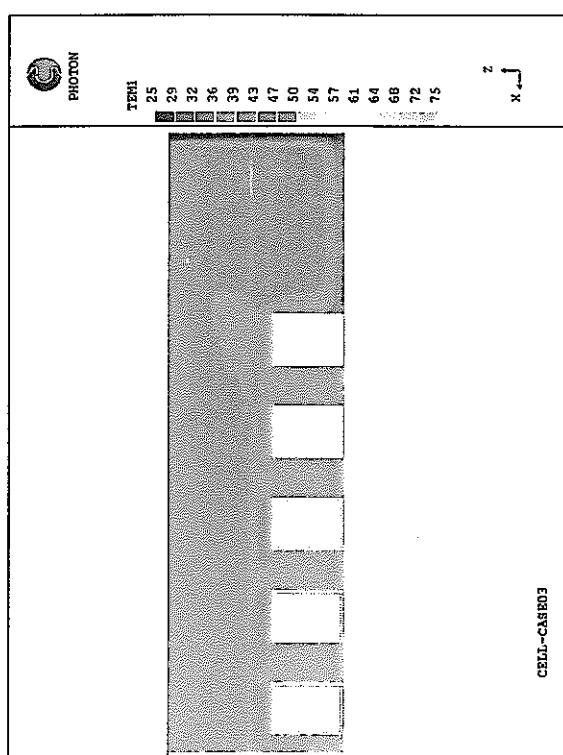


(2) ケース 1 (1.1万メッシュモデル) の流速分布

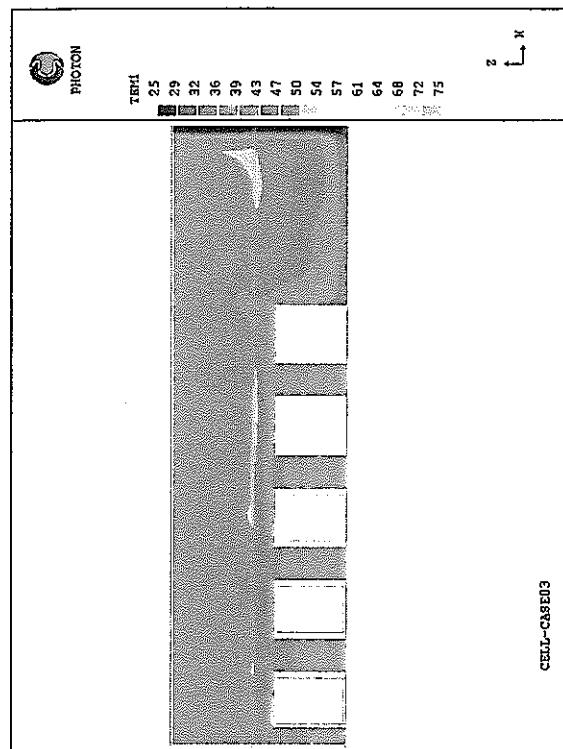


(3) ケース 2 (1.1万ボーラスメッシュ) の流速分布

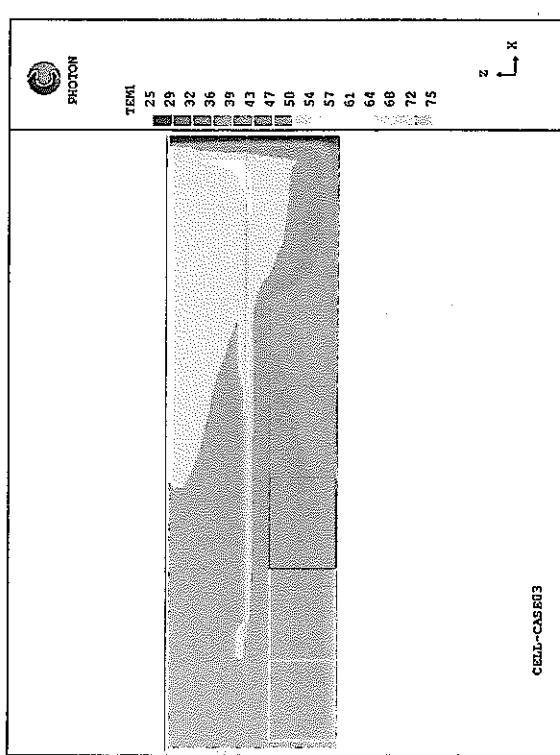
(4) ケース 3 (2.2万メッシュ) の流速分布
図 3-10 機器中心部長手方向断面の流況 (PHOENICS のモデルによる違い)



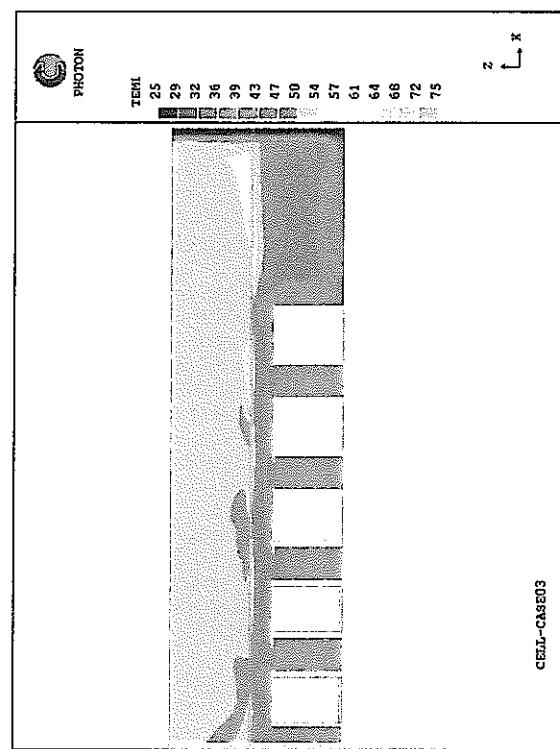
(1)ケース 0 (4万メッシュ) の温度分布



(2)ケース 1 (1.1万メッシュモードル) の温度分布



(3)ケース 2 (1.1万ボーラスマッシュ) の温度分布



(4)ケース 3 (2.2万メッシュ) の温度分布

図 3-11 機器中心部長手方向断面の温度分布 (PHOENICS のモデルによる違)
(4)ケース 3 (2.2万メッシュ) の温度分布

4. 定常解析

(1) 目的

通常時の発熱分布を考慮した過渡解析の初期値に相当する条件及び非常時の低流速条件におけるセル内温度分布を求め、非定常解析における収束状態の見通しを得る。

(2) 解析条件

- ・解析モデル体系

3章のベンチマーク解析体系と同等とする。ただし、今回は発熱部の非対称性を考慮できるよう1/2対称モデルとする。

- ・モデル体系：図4-1

- ・セル寸法：L54m×W8m×H7.5m

- ・機器寸法：Φ2m×H3m

- ・ガス流量：初期条件 80000Nm³/h（下記の発熱量に対して入口ガス温度25°Cとして出口温度40°C： $\Delta T=15^\circ\text{C}$ で除熱可能なアルゴンガス風量）

低流速条件 8000Nm³/h（後述のとおり発熱条件を1/10と想定し、その場合に安全排気系が動作することにより全体として熱バランスがとれるものとして流量を暫定した）

ただし、1/2対称モデル化する際の左右の流配は暫定的に発熱量比例とする。

- ・発熱量

- 初期条件：合計300kW

高発熱機器 15kW/基×3基、低発熱機器 9.1kW/基×17基

（それぞれ表面から均一発熱、ただし、下から100mmは非発熱）

照明発熱 100kW（天井面から3.5m下で均一面の体系）

設定の考え方

総発熱量は同一であるが、高発熱機器側には1.5倍与えて他の機器との合計が照明発熱と合わせて300kWとなるように設定した。

低流速条件：合計30kW

高発熱機器 6kW/基×3基、低発熱機器 0.1kW/基×17基

（それぞれ表面から均一発熱、ただし、下から100mmは非発熱）

照明発熱 10kW（天井面から3.5m下で均一面の体系）

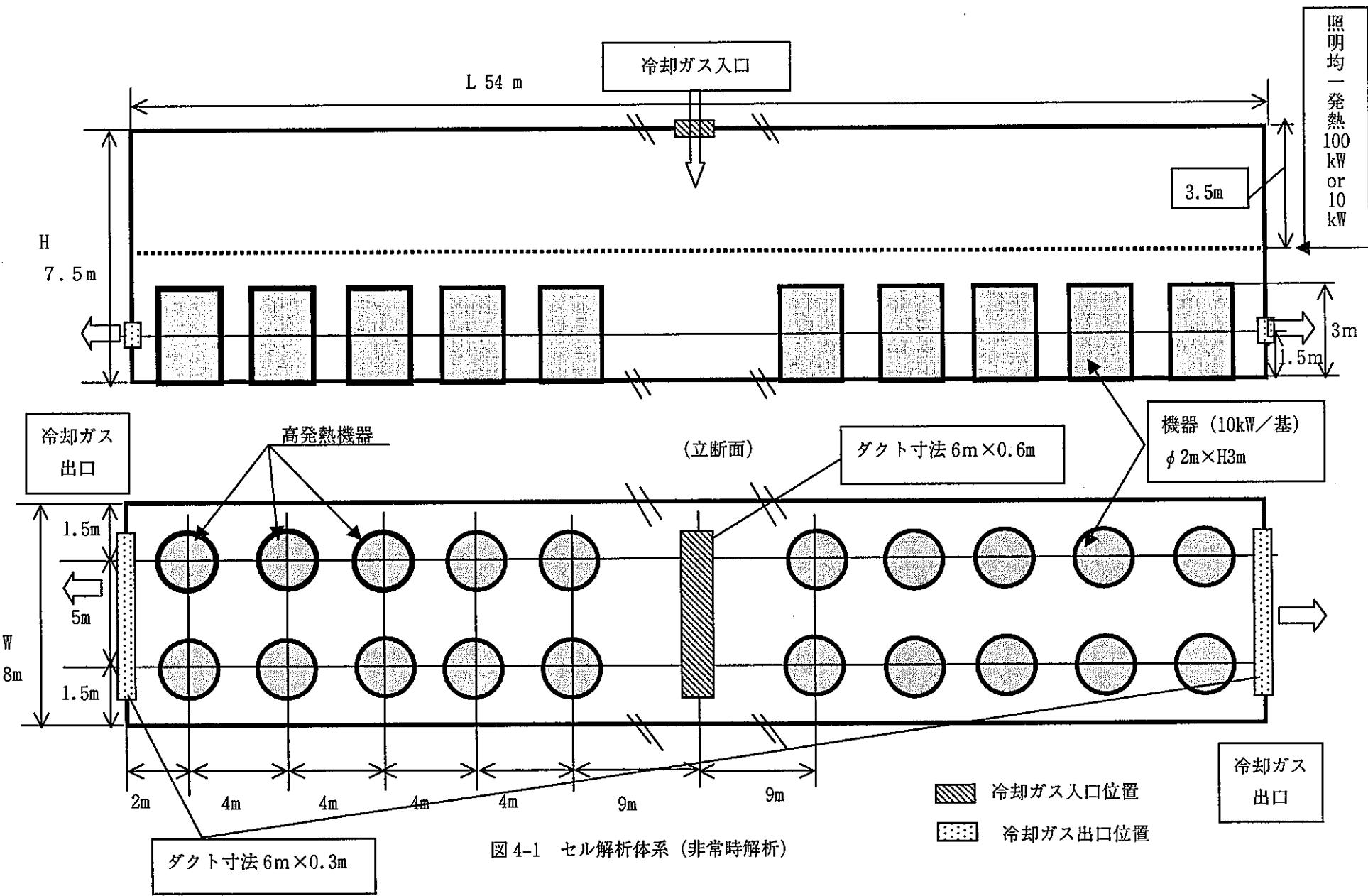
設定の考え方

高発熱機器については溶融塩電解槽のFP滞留分5kWに処理中の集合体からのい崩壊熱を加えて0.6kW程度を加えてあるめた。低発熱機器については発熱が殆どないものとして、発熱機器の合計発熱量が初期条件の1/10となるよう設定した。照明発熱については事故時の最低限の照明を残しあとは消灯するものとして1/10と暫定した。

- ・ガス流の出入り口位置（入り口：天井のセル長辺方向中央部に入口ダクト（6m×0.6m）、出口：短辺の下から1.5m上方の出口ダクト（6m×0.3m））
- ・雰囲気（冷却）ガス：アルゴンガス
- ・雰囲気ガス出入口温度：40℃／25℃（出口／入口）

解析モデルの作成において解析メッシュ数としては、第2章において作成した解析メッシュを中心軸に対して対称に2倍したメッシュを3種類作成した。1万メッシュ×2、2万メッシュ×2、4万メッシュ×2の解析メッシュをそれぞれ図4-2～4に示す。

なお、ここで各モデルメッシュ数に×2となっているのは解析モデル上、機器発熱を2次元的に変化させていることから、ベンチマーク解析モデルでは1/4対称モデルとなっていたものを1/2対称モデルとしたため、モデル化領域が2倍になったことを示している。ベンチマーク解析モデルとメッシュの詳細さが同じものは同じメッシュ数として領域が2倍になっていることをあらわすためにこうした表記方法とした。



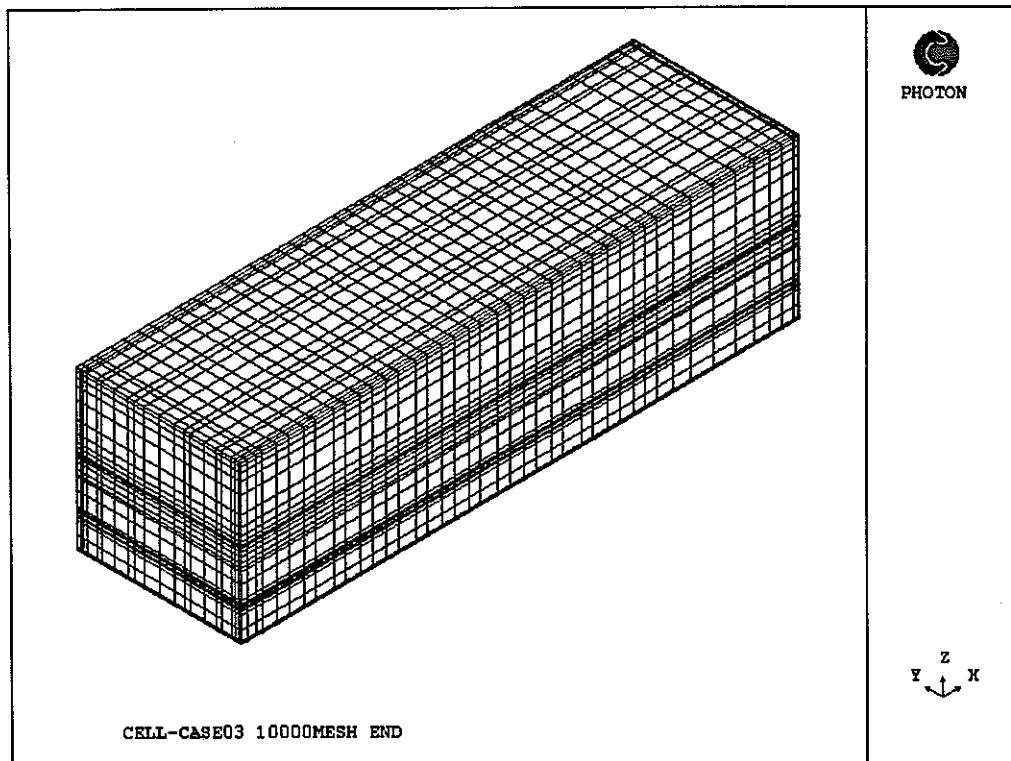


図 4-2 1万メッシュ×2の解析メッシュ

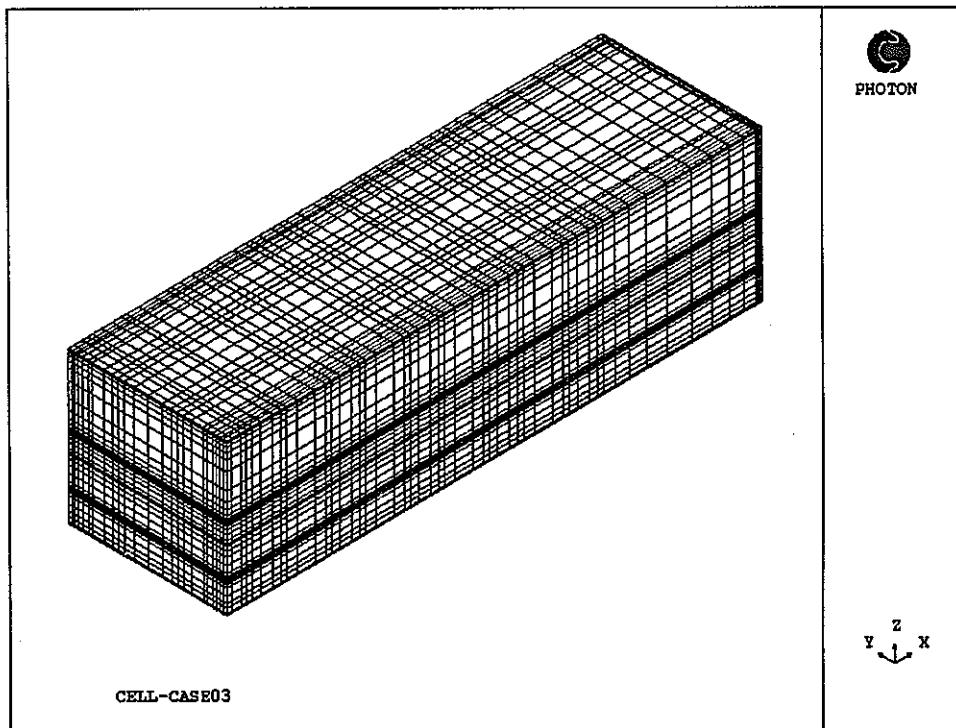


図 4-3 2万メッシュ×2の解析メッシュ

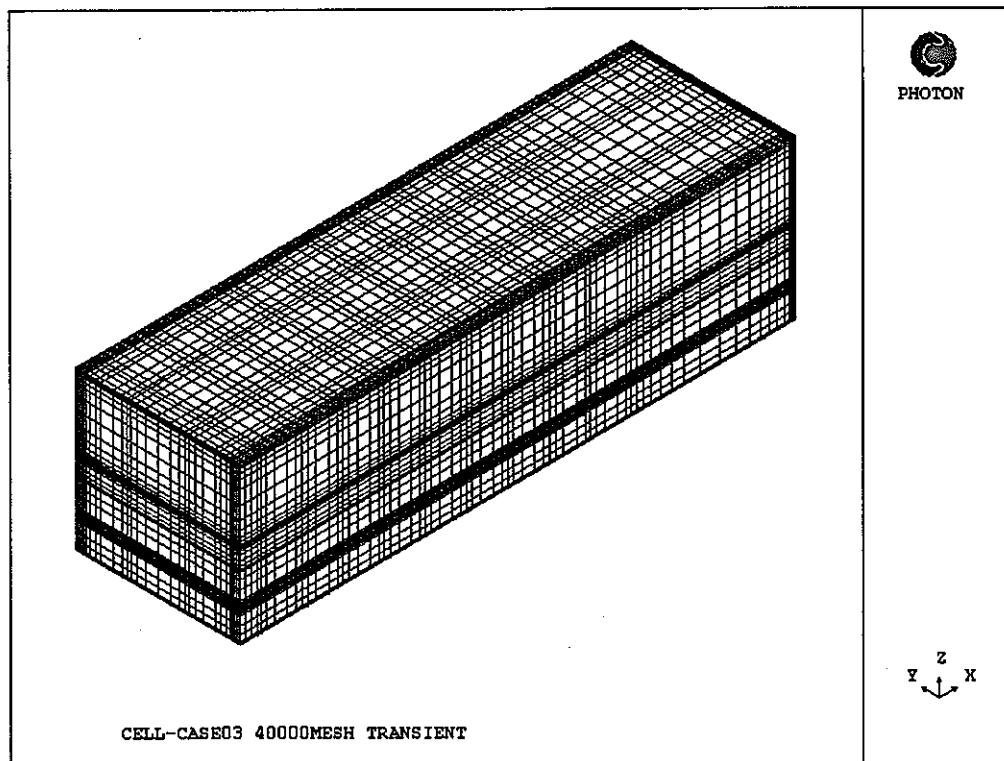


図 4-4 4万メッシュ×2の解析メッシュ

(3) 解析結果

解析結果を下記の図にまとめて示す。

- 図 4-5 照明レベルでの高発熱機器側機器中心部のガス温度分布比較（初期条件）
- 図 4-6 照明レベルでの高発熱機器側機器中心部のガス温度分布比較（低流量条件）
- 図 4-7 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況（初期条件）
- 図 4-8 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況（低流速条件）
- 図 4-9 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度（初期条件）
- 図 4-10 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度（低流速条件）
- 図 4-11 4万メッシュモデルの各部の流況（初期条件）
- 図 4-12 4万メッシュモデルの各部の流況（低流速条件）
- 図 4-13 4万メッシュモデルの各部の温度（初期条件）
- 図 4-14 4万メッシュモデルの各部の温度（低流速条件）

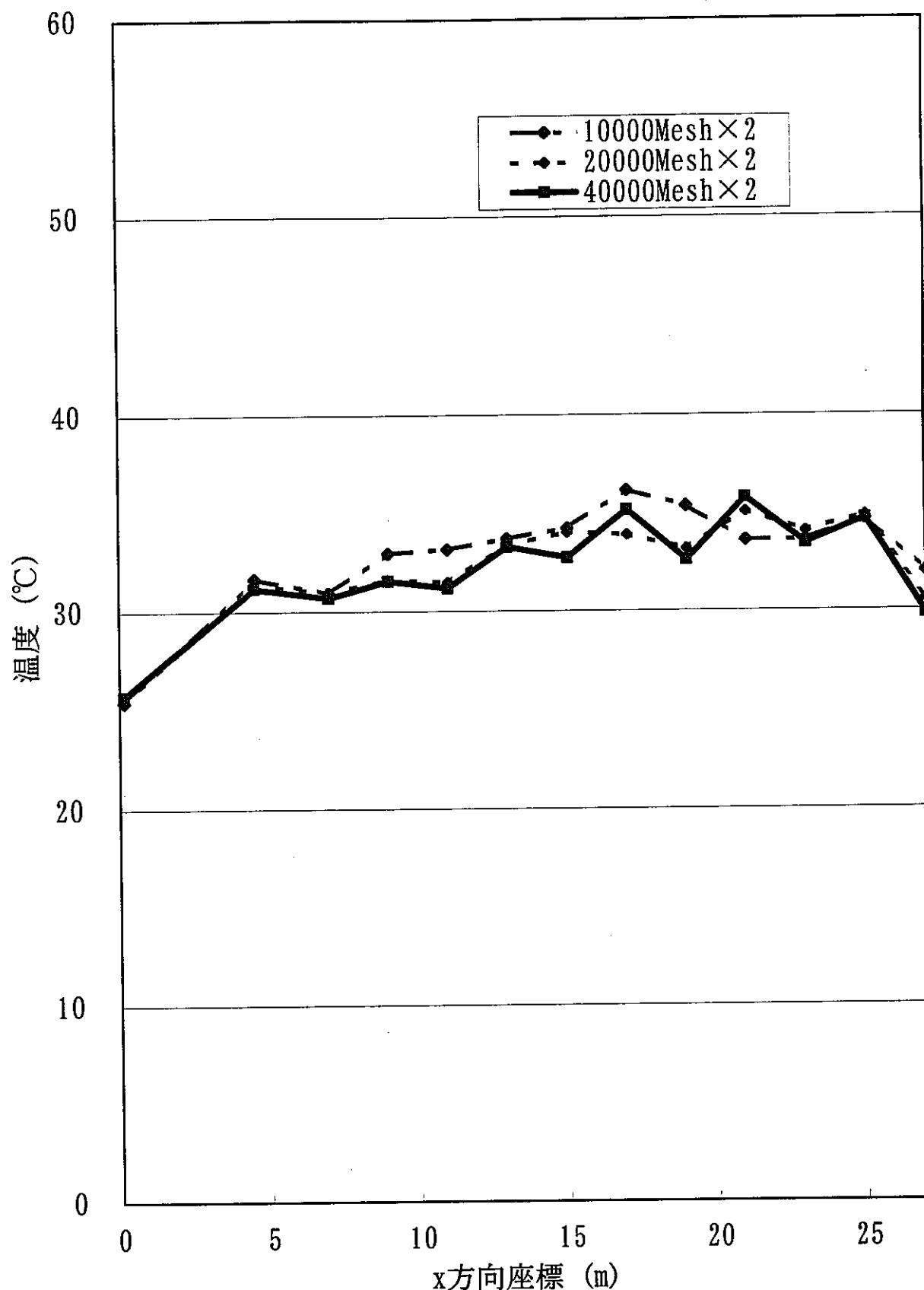


図4-5 照明レベルでの高発熱機器側機器中心部のガス温度分布比較（初期条件）

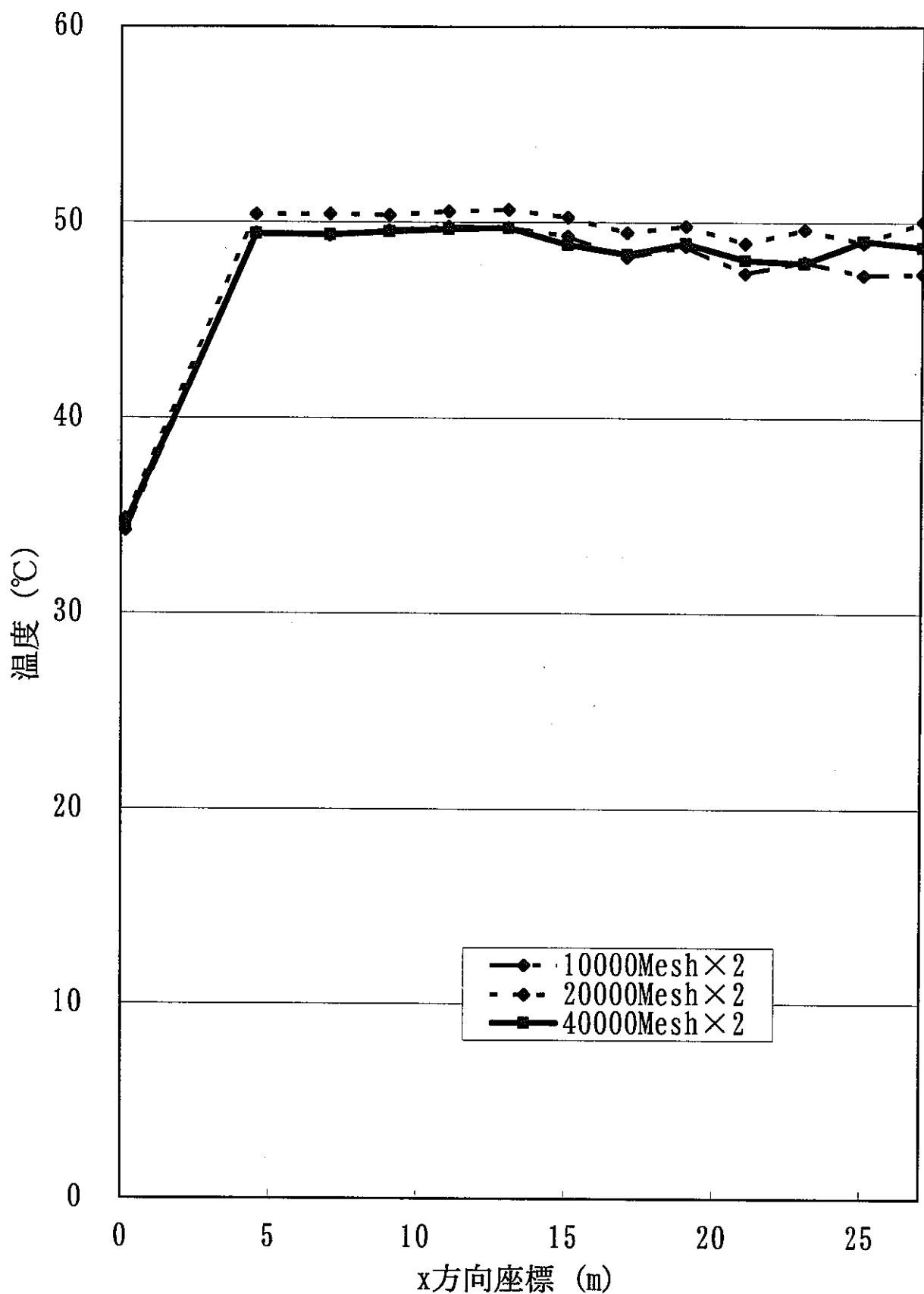
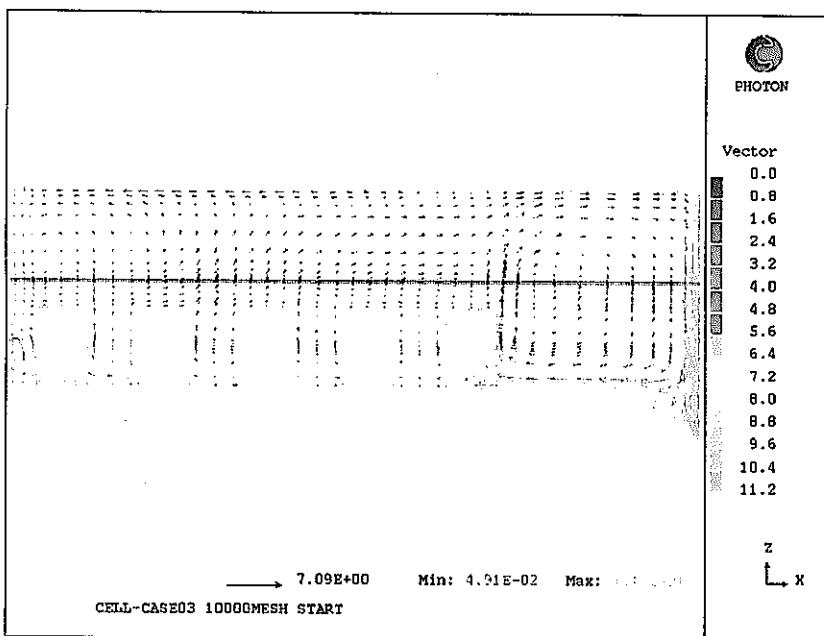
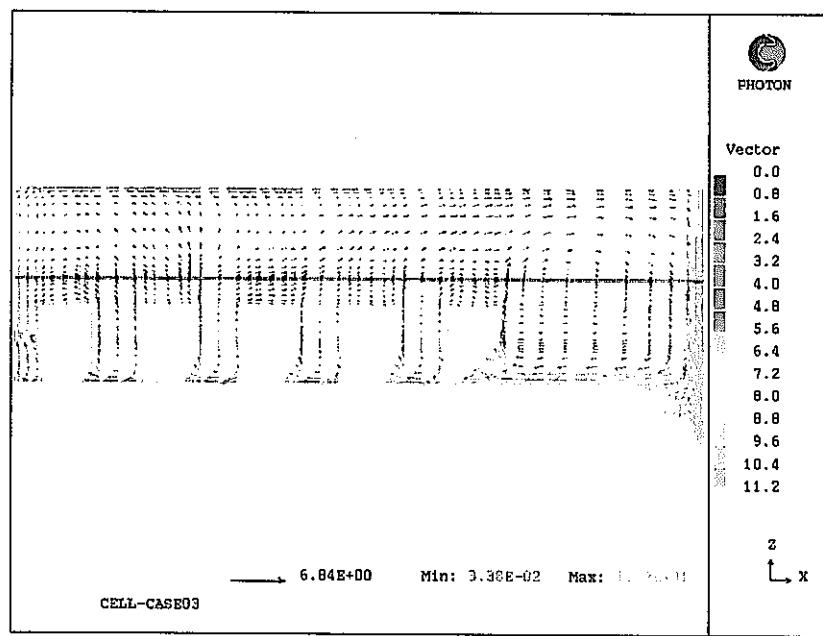


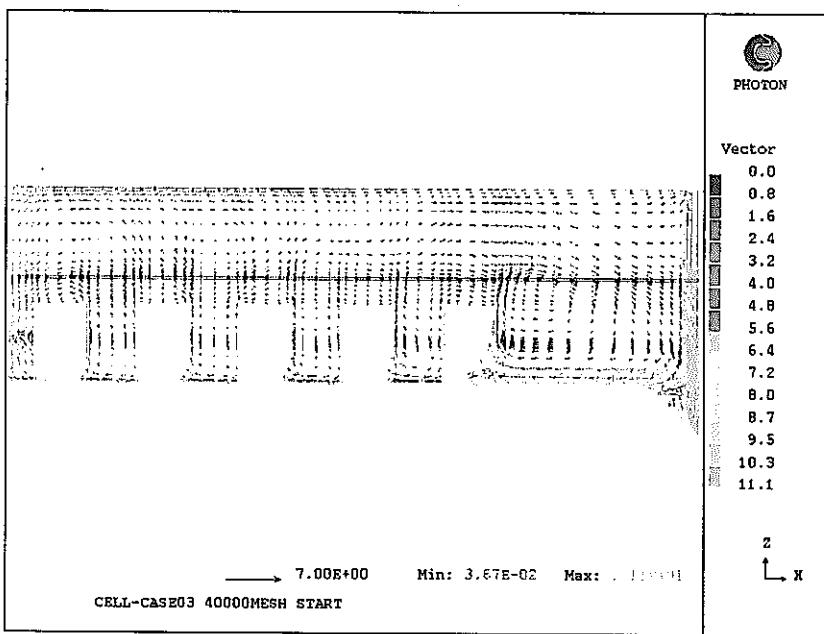
図4-6 照明レベルでの高発熱機器側機器中心部のガス温度分布比較（低流量条件）



(1)1万メッシュ×2の流速分布

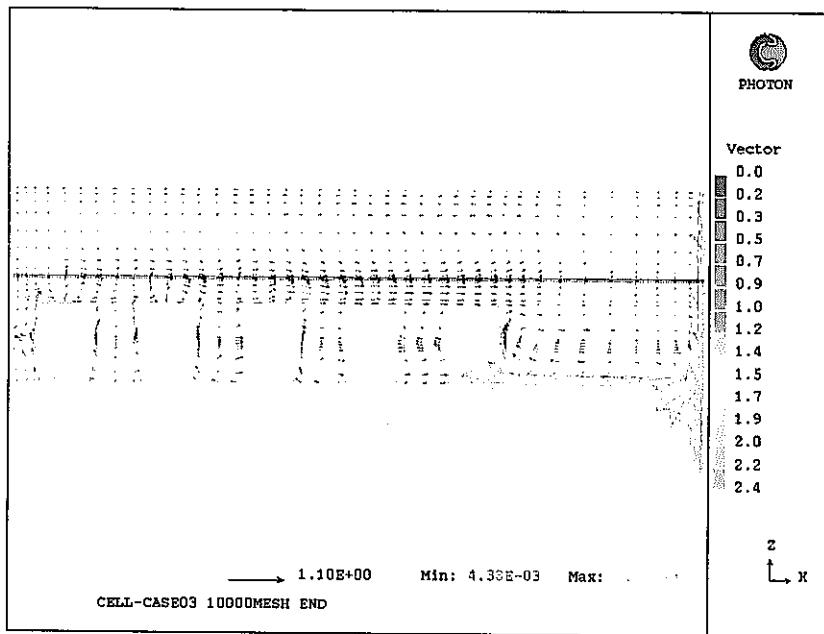


(2)2万メッシュ×2の流速分布

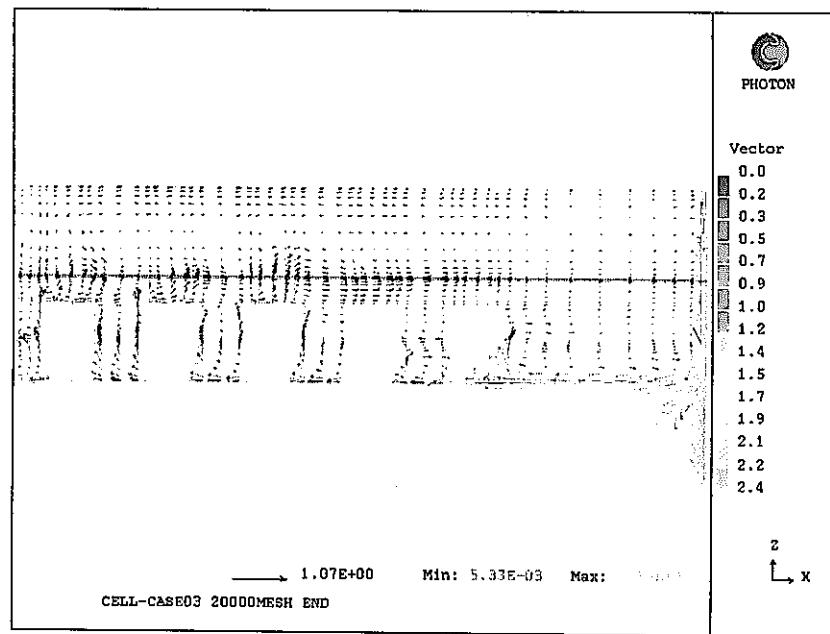


(3)4万メッシュ×2の流速分布

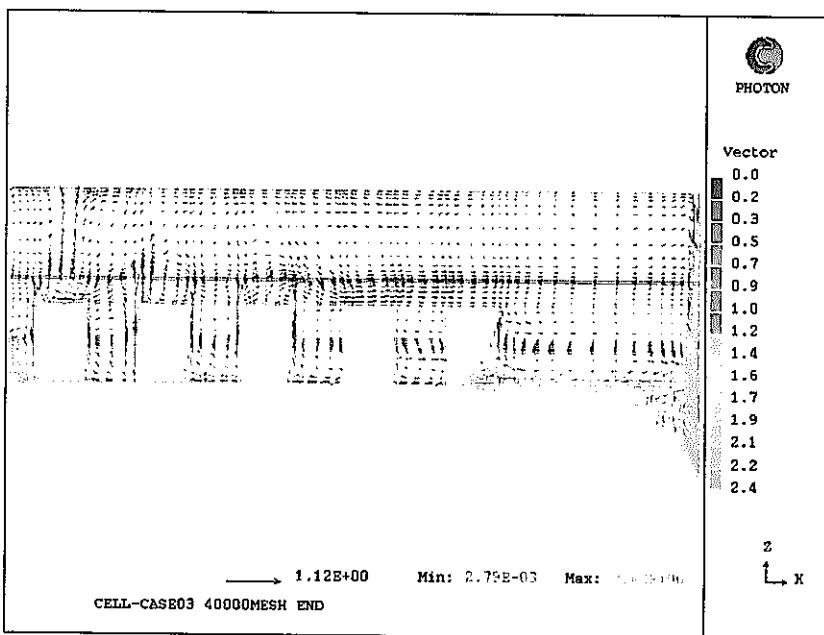
図 4-7 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況（初期条件）



(1)1万メッシュ×2の流速分布

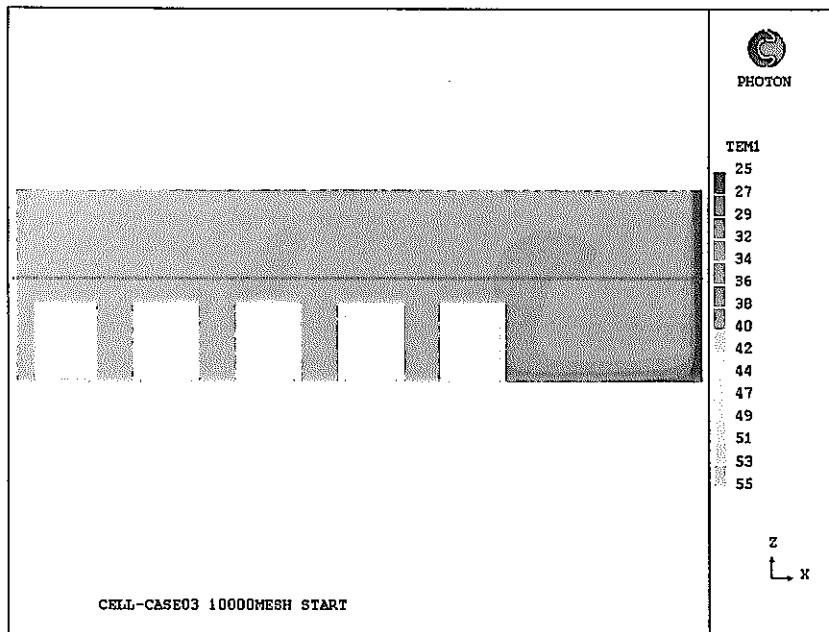


(2)2万メッシュ×2の流速分布

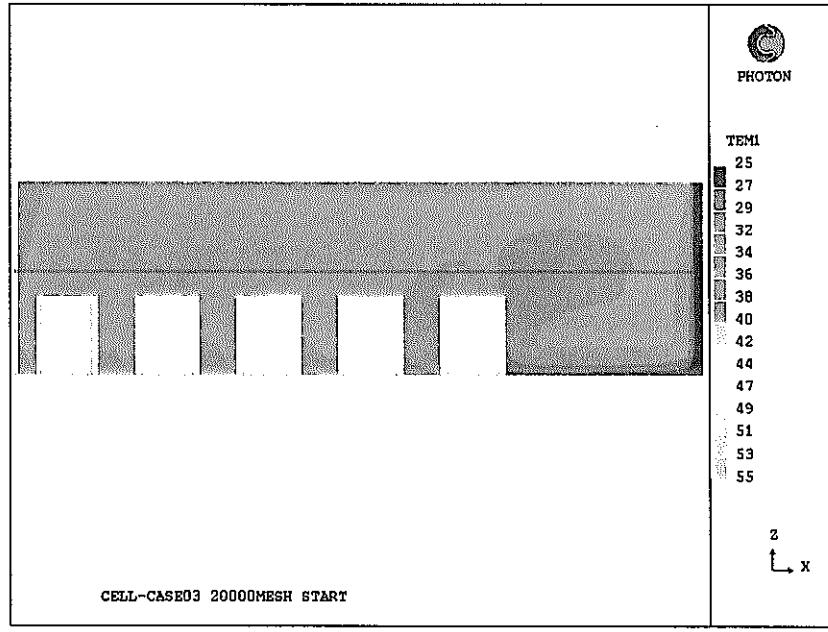


(3)4万メッシュ×2の流速分布

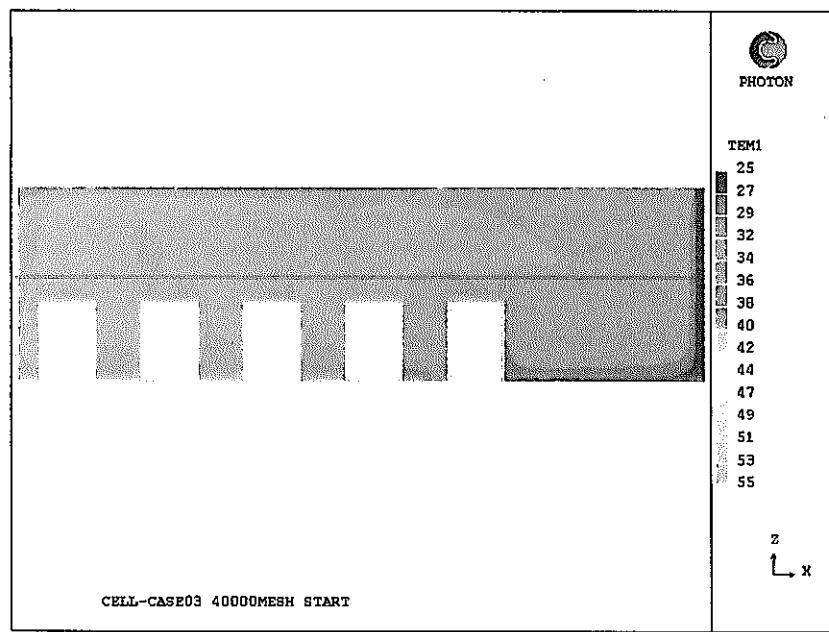
図 4-8 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況（低流速条件）



(1)1万メッシュ×2の温度分布

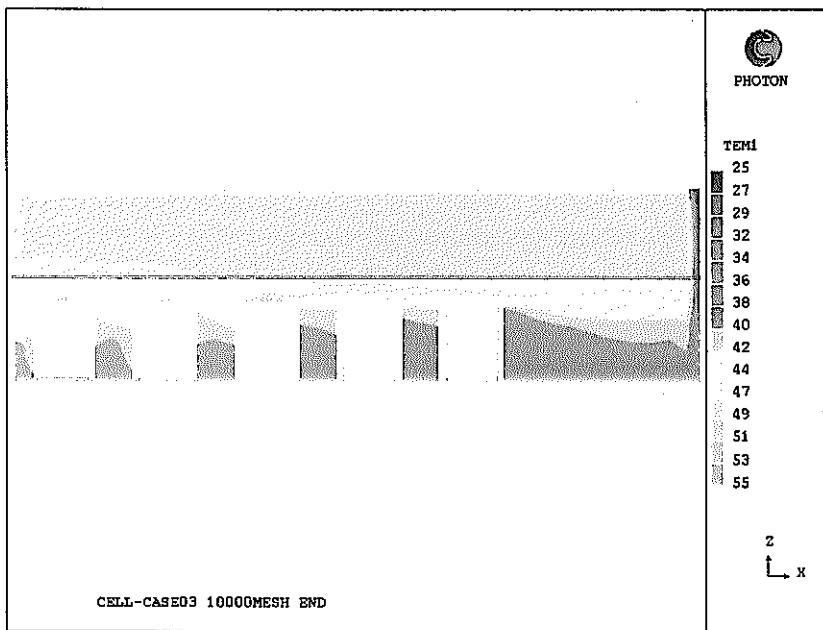


(2)2万メッシュ×2の温度分布

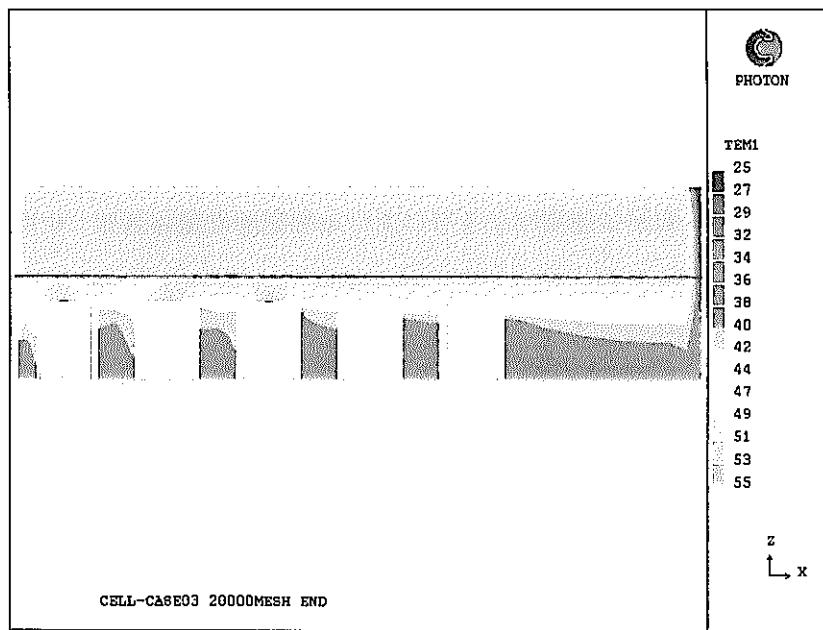


(3)4万メッシュ×2の温度分布

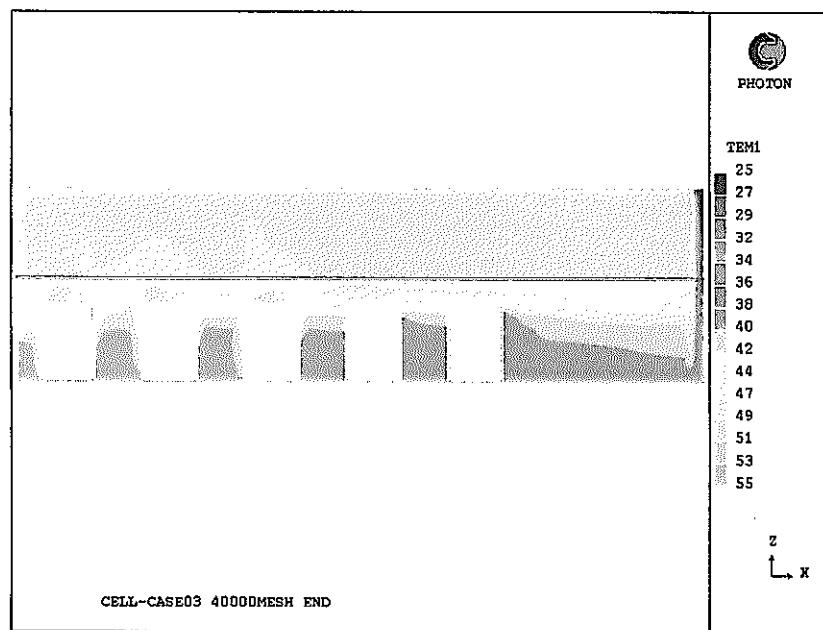
図 4-9 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度（初期条件）



(1) 1万メッシュ×2の温度分布

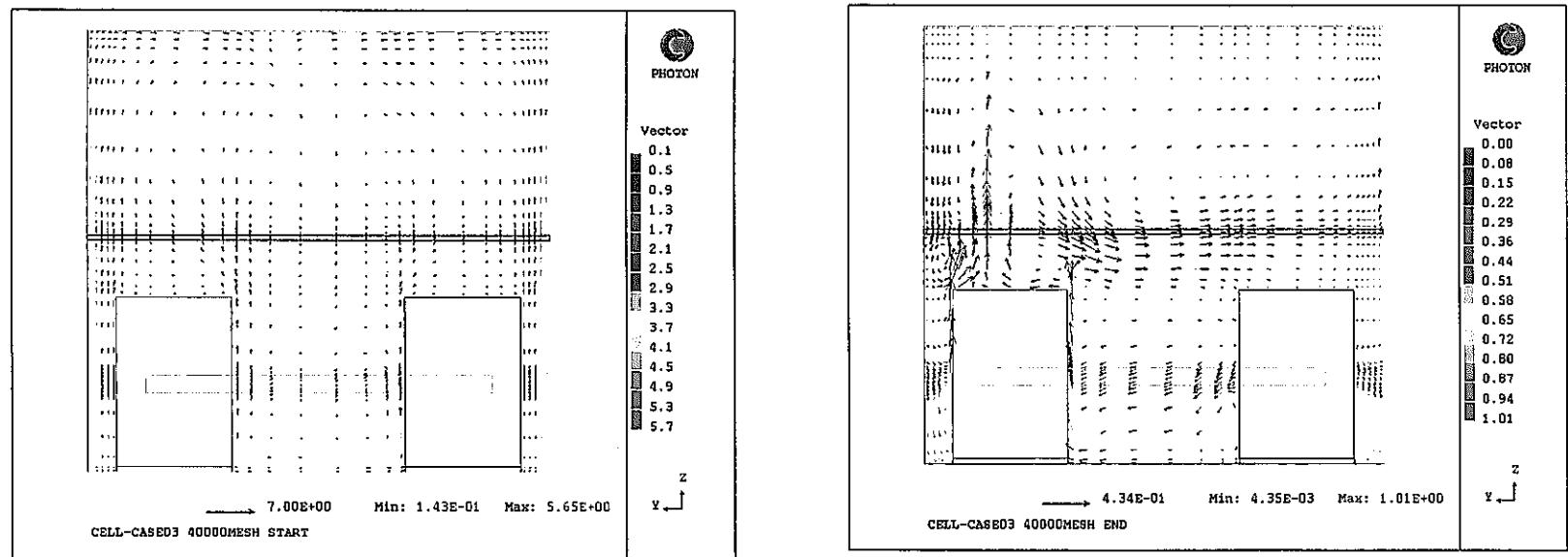


(2) 2万メッシュ×2の温度分布



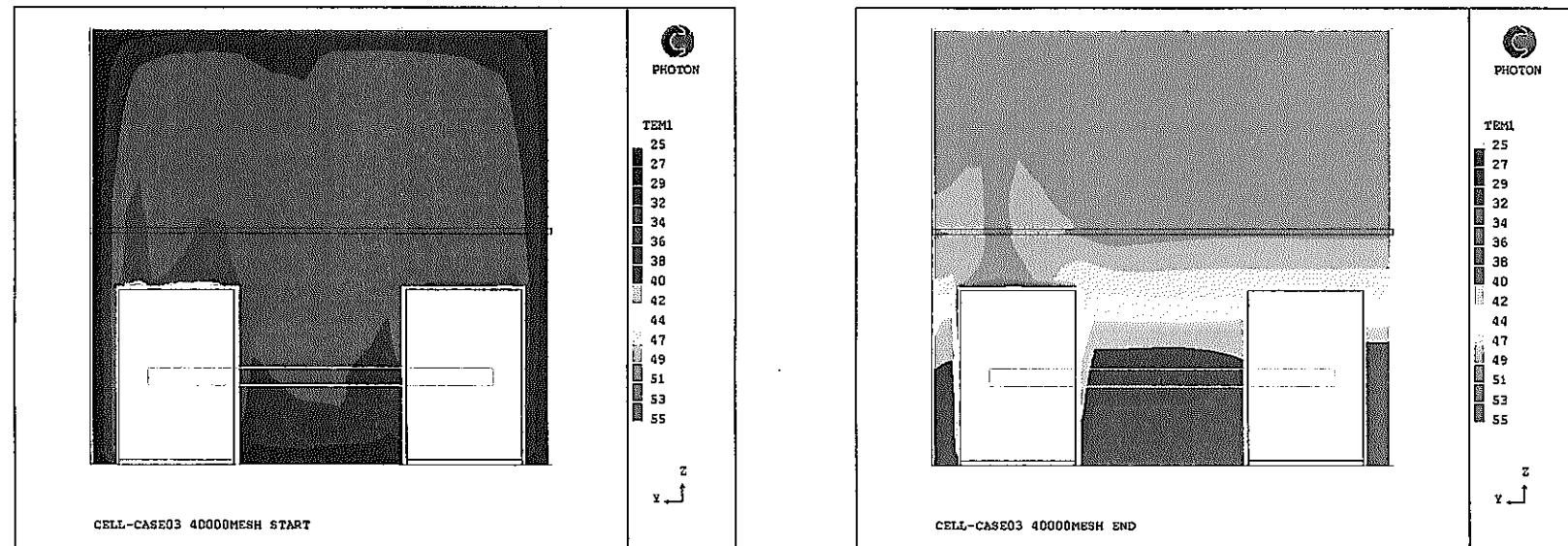
(3) 4万メッシュ×2の温度分布

図 4-10 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度（低流速条件）



(1) 高流速初期条件の流況

(2) 低流速収束条件の流況



(3)高流速初期条件の温度

(4)低流速収束条件の温度

図 4-11 4万メッシュモデルにおける短辺方向の中心断面の流況分布及び温度分布の比較

(4) 解析結果の評価

以上の解析結果から下記のことがわかった。

- ① ベンチマーク解析でメッシュ数を変更した場合と異なり、今回の解析モデル体系ではメッシュ数による温度分布の差は小さく、1万メッシュ×2よりも2万メッシュ×2が4万メッシュ×2の解析結果により近い結果が得られた。この傾向は流況分布を見ても同様である。したがって、非定常解析については2万メッシュ×2と4万メッシュ×2の解析モデルについて実施することとした。
- ② 4万メッシュ×2の流況解析結果から、初期条件（流量 80000Nm³/h、高発熱機器 15kW、低発熱機器 9.1kW）では各機器からの発熱からの上昇流が見られるのに対して、局的に発熱を集中させた低流速条件（流量 8000Nm³/h、高発熱機器 6kW、低発熱機器 0.7kW）では高発熱機器のみからの上昇流が支配的である。
また、セル全体の流れとしては対称面の流況からわかるように初期条件では冷却ガス入口からセル全体を循環する大きな循環が支配的なのに対して、低流速条件ではその循環が弱まり高発熱機器から低発熱機器への流況も顕著に見られるようになっている。
- ③ 4万メッシュ×2の温度解析結果からみると、初期条件では照明部より上の領域においても循環流の効果に伴う温度分布があるが、低流速条件では高発熱機器の直上部では上昇流があるもののそれ以外はほとんど成層化していることがわかる。このため、照明レベル以上の領域でガス温度は初期温度 33°C 前後に比べ 20°C も高い 50°C 以上の温度となっている。また、短辺方向の温度分布からわかるように、高発熱機器表面の最高ガス温度は機器上面部に発生し、ガス温度としては 55°C 程度となっている。

5. 過渡解析

(1) 目的

非常時の低流速条件におけるセル内温度分布を求め、非定常解析における収束状態の見通しを得る。

(2) 解析条件

- ・解析モデル体系：定常解析と同等（ただし熱容量考慮）
- ・初期値：1.項の初期条件解析結果を用いる。
- ・ガス流量：8000N m³/h
- ・発熱量：合計 30kW

高発熱機器 6kW/基×3基、低発熱機器 0.1kW/基×17基

（それぞれ表面から均一発熱、ただし、下から 100mm は非発熱）

照明発熱 10kW（天井面から 3.5m 下で均一面発熱）

- ・各機器の熱容量：アルゴンヌにおける溶融塩電解槽の図面から概略推定した熱容量を実機スケール相当に拡張して 1.2 倍を考慮する。

1048.8kg/kJK(物性値としては支配的になっている保温材のデータを用いた)

内訳 溶融塩 1465.45kJ/kgK 400kg

Cd 209.35kJ/kgK 900kg

S U S 0.511kJ/kgK 512.47kg

保温材 0.92kJ/kgK 39.49kg

合計 7.748×10⁵kJ/K→保温材物性値（ケイ酸カルシウム）で換算

(3) 解析結果

解析結果を下記の図にまとめて示す。

図 5-1 照明レベルでの高発熱燃料側機器中心の短辺方向中心部のガス温度の時間変化

図 5-2 4万メッシュ×2 モデルの 150 時間後の流況及び温度分布

図 5-3 2万メッシュ×2 モデルの 150 時間後の流況及び温度分布

なお、図 5-1において 2万メッシュ×2 モデルの 25000sec 近傍で温度の低下が見られるが、これは計算時にリスタートオプションを用いたため、その部分のソフトのバグにより温度低下が発生したものであり、実際の挙動ではこの温度低下は発生しない。

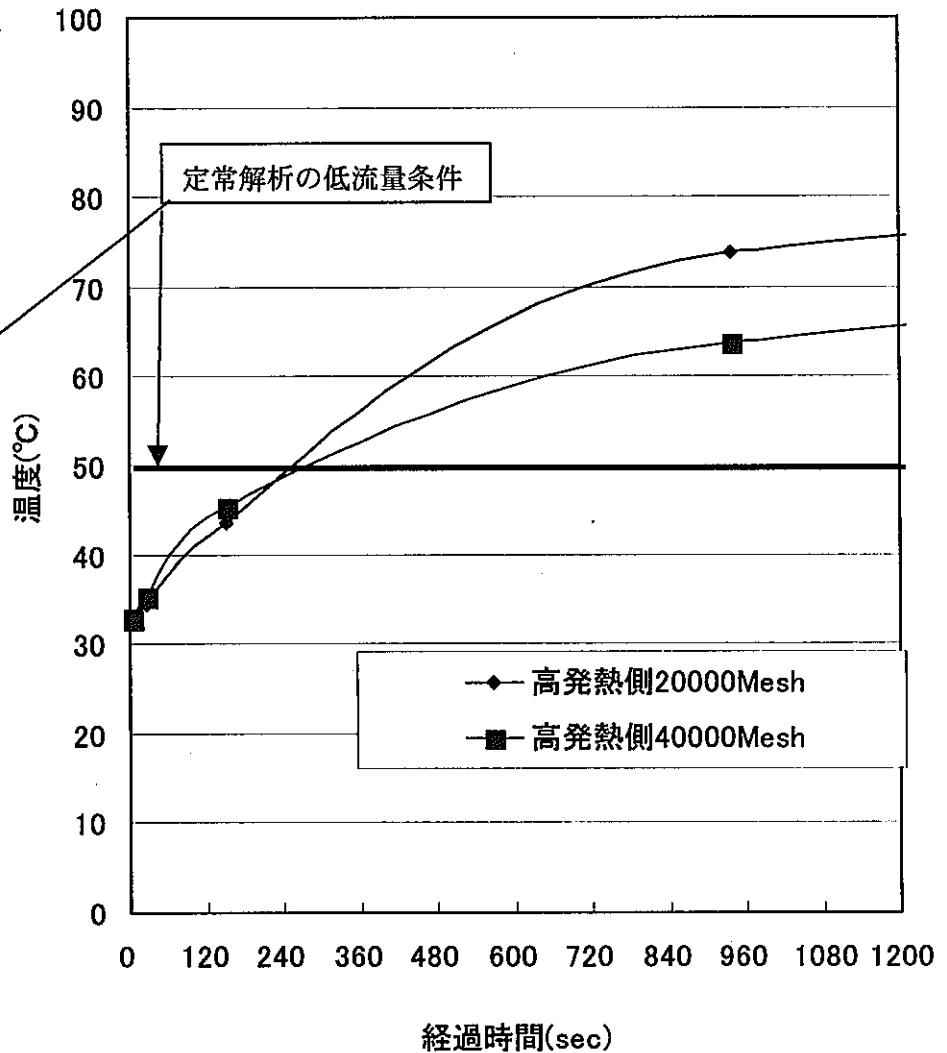
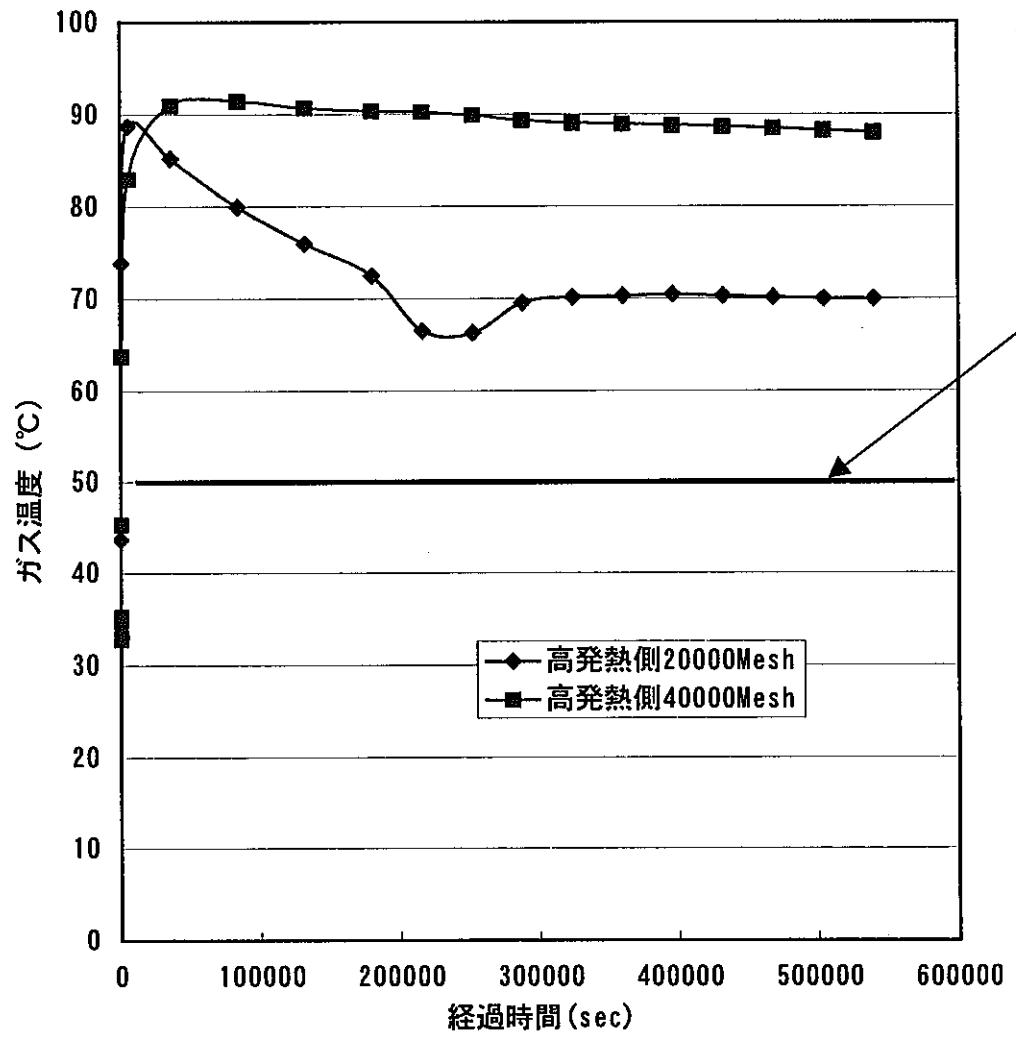
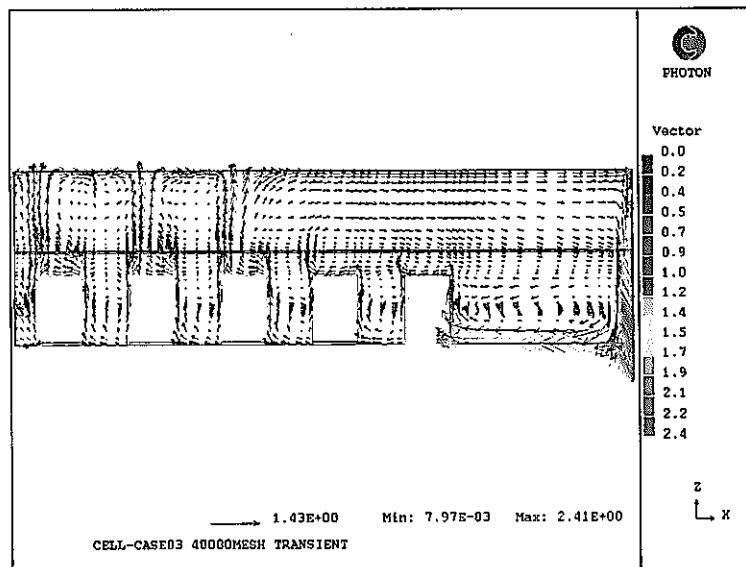
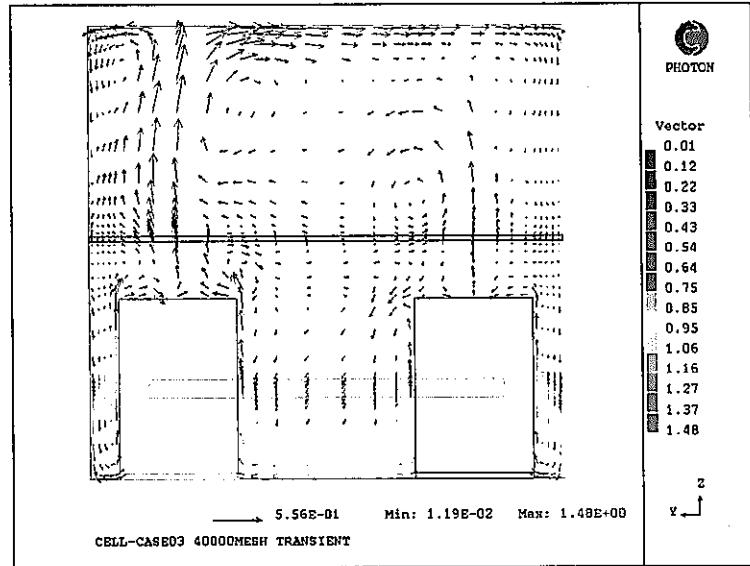


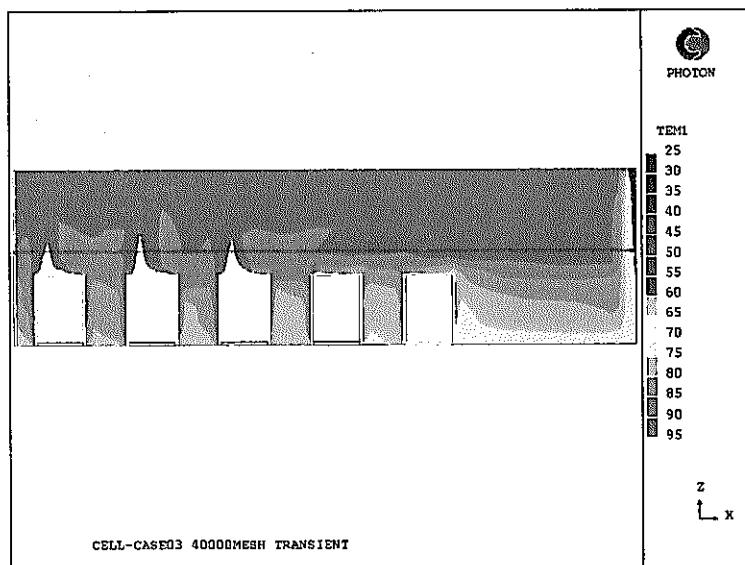
図 5-1 照明レベルでの高発熱機器側機器中心の短辺方向中心部のガス温度の時間変化



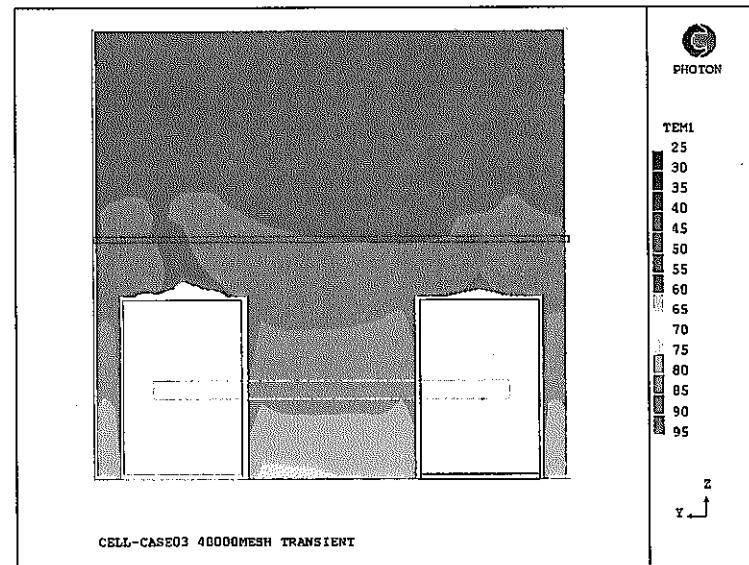
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況

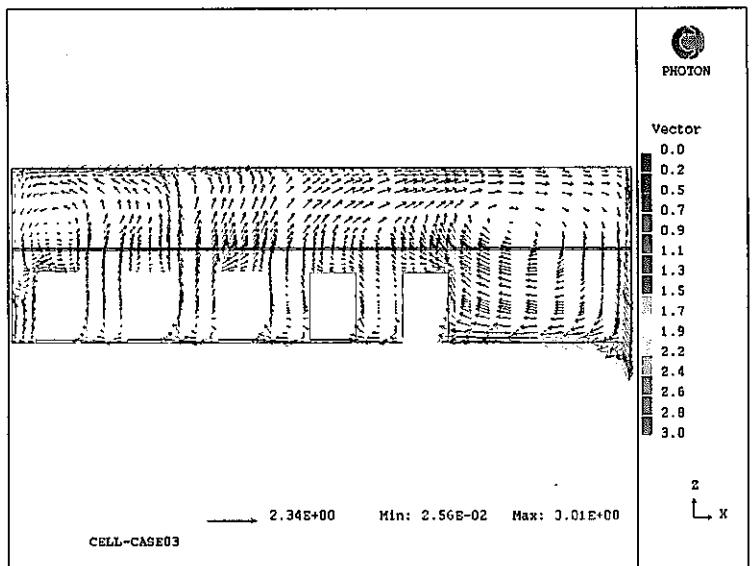


(3) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度

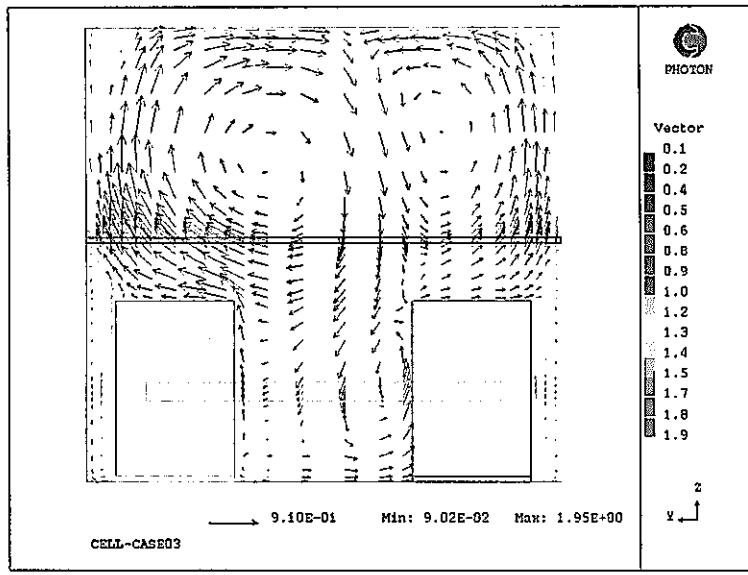


(4) 短辺方向の中心断面の流温度

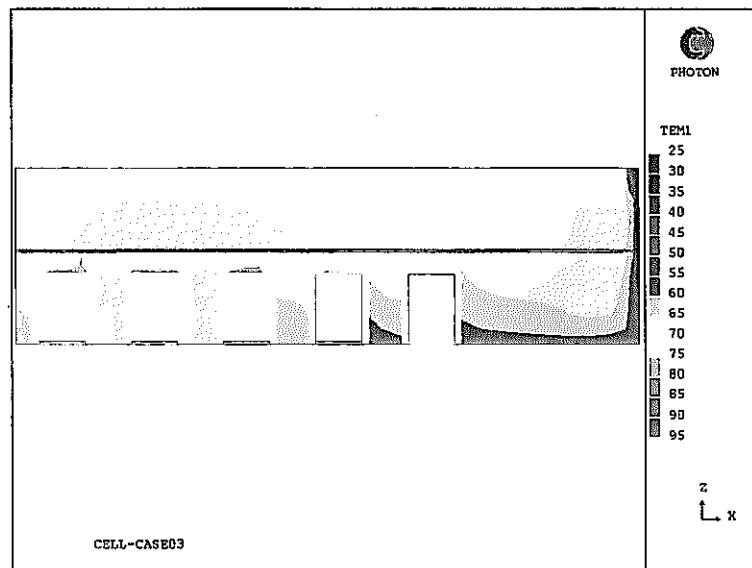
図 5-2 4万メッシュ×2モデルの150時間後の流況及び温度分布



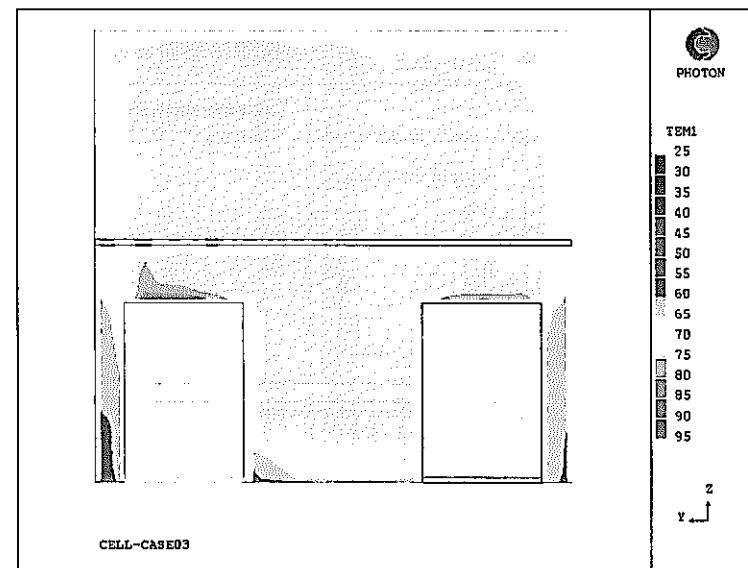
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況



(2) 短辯方向の中心断面の流況



(3) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度



(4) 短辯方向の中心断面の流温度

図 5-3 2万メッシュ×2モデルの150時間後の流況及び温度分布

(4) 解析結果の評価

非定常解析については、定性的な温度変化としては通常冷却が無くなったあと、一時的にガス温度上昇が発生し、90℃前後まで上昇したあと低下して定常に至るような特性を示している。しかし、現段階では、絶対値としての温度挙動及びガス流況はメッシュ数により異なった結果となっており、十分信頼できる結果が得られていない。これについては、下記の要因が考えられる。

- ① 非定常解析では、時間経過を分割してある時間範囲内毎に収束計算を繰り返して次のステップに進む解析を行っている。今回の解析では 200 ステップにわけ収束性を考慮して解析はじめが 0.02sec/ステップ、以降時間刻みを荒くして最後が 360sec/ステップとなる解析とし、この 1 ステップ毎に 100 サイクルの収束計算を行い、次のステップに進むこととした。一方、定常計算では 20000 サイクルで収束することがわかっている。定常計算の場合には流速 0、温度 25℃ 均一条件を初期値とした収束計算のため、非定常計算が収束条件からスタートすることを勘案すれば収束までのサイクルは短くできると予想されるものの、初期のステップで未収束のまま次のステップへ進んだ場合、現実的な条件からさらに外れてくることが予想される。これを防ぐためには 1 ステップ当たりのサイクル数を増加させる必要があるが、これはそのまま解析時間の増加となることからサイクル数の効果を見てやる必要がある。
- ② 1.項で実施した低流速条件（過渡解析の収束条件に対応）のガス流速、温度分布を見ると、ガス流速自体も小さく、特に照明レベル以上はほとんどスタグナントに近く、ガス温度分布が成層化しているようにも見受けられる。一方、過渡解析の 150 時間後のガス流速、温度分布はいずれも、流速が速く、かつガス温度が 40℃ないし、20℃程度高い温度を示している。1 つの可能性として、初期条件から低流量条件となる場合には大きな過渡的な温度変動が発生するためにガスの大きな渦が発生し、定常解析が進んでもそれが解消しないため、低流速条件での収束値にならないことも考えられる。

以上の 2 点について確認するため下記の解析を実施した。

① 収束性確認解析

過渡解析の 150 時間後のデータを初期値とした低流速条件での定常解析を行い、過渡解析のステップ数を増加させることで収束条件となるかどうかを確認する。

② 詳細サイクル解析

1 ステップのサイクルを 1000 回とこれまでの 10 倍として結果に影響がでるかの確認を行う。

(5) 収束性確認解析

過渡解析の 150 時間後のデータを初期値とした低流速条件での定常解析を行い、過渡解析のステップ数を増加させてゆけば最終的に 4 章の低流量条件となるかどうかを確認した。具体的には初期値としては 4 万メッシュ×2 モデルの 150 時間後の状態を初期値とした解析を実施した。その結果を以下に示す。

図 5-4 4 万メッシュ×2 モデルの 150 時間後の条件を初期条件とした場合の定常解析結果と収束予想条件の比較（各部の流況）

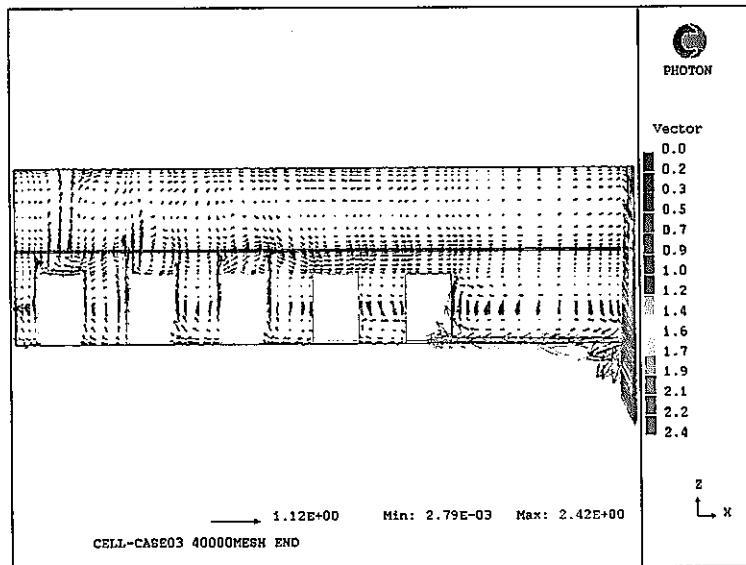
図 5-5 4 万メッシュ×2 モデルの 150 時間後の条件を初期条件とした場合の定常解析結果と収束予想条件の比較（各部の温度）

図 5-5 から明らかなように、4 万メッシュ×2 モデルの 150 時間後の状態を初期値とした場合には定常収束計算した結果である確認収束値（図の(3)、(4)）でも最高温度が 95°C と低流速条件で定常計算した 4 章の結果（図の(1)、(2)）55°C との温度差は約 40°C あり、縮まっていない。流況分布を見ても今回の解析の方が全般に流速が大きく、異なった結果となっている。

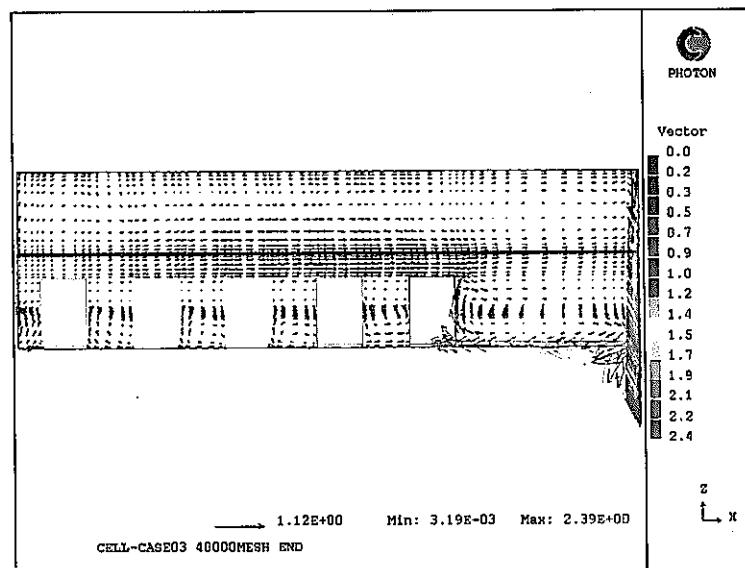
これは、初期条件から低流量条件となる場合には大きな過渡的な温度変動が発生するためガスの大きな渦が発生し、定常解析が進んでもそれが解消しないため、低流速条件での収束値にならないが、低流速条件の定常計算では初期値として温度 25°C 均一、流量 0 からスタートした収束計算をしているため、渦などが発生しにくく均一に成層化する条件となると推測される。

以上のこと考慮すると、非定常解析の収束値としては 4 章に示したような成層化した温度分布にはならず、非定常変動の途中の渦のでき方に依存する可能性が高い。したがって、十分な精度で過渡現象を追いかけた解析により流動計算を行わない限り非常時の過渡事象後の状態は予測し得ないことがわかった。

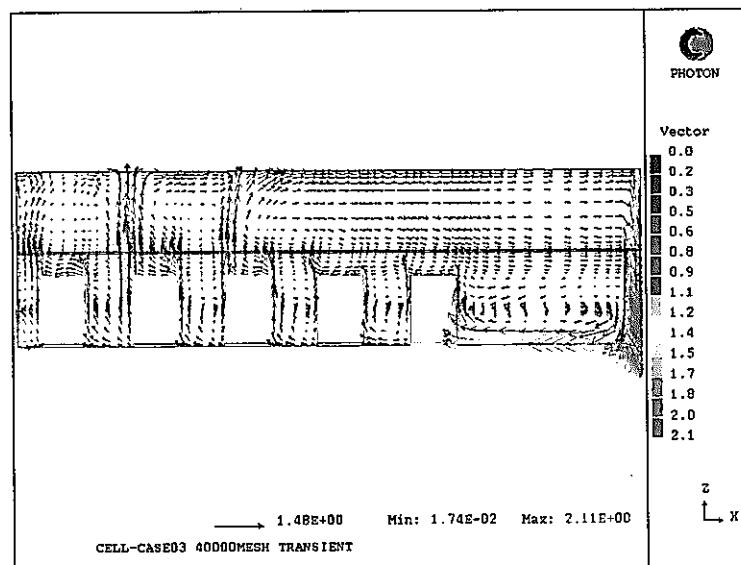
したがって、次項で示す詳細サイクル解析の結果が重要となる。



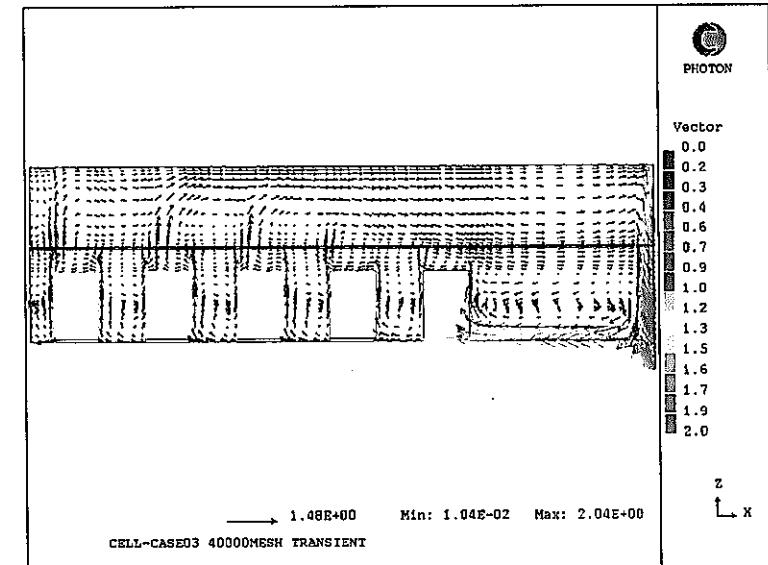
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況（収束予想値）



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況（収束予想値）

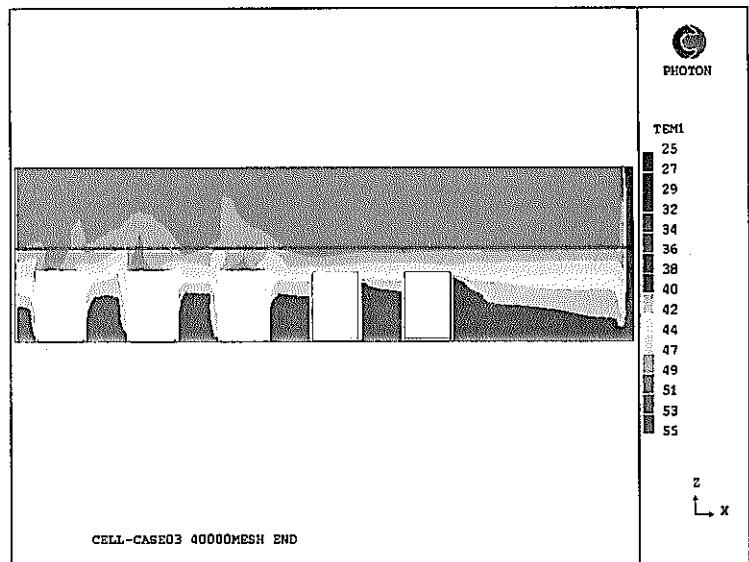


(3) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況（確認収束値）

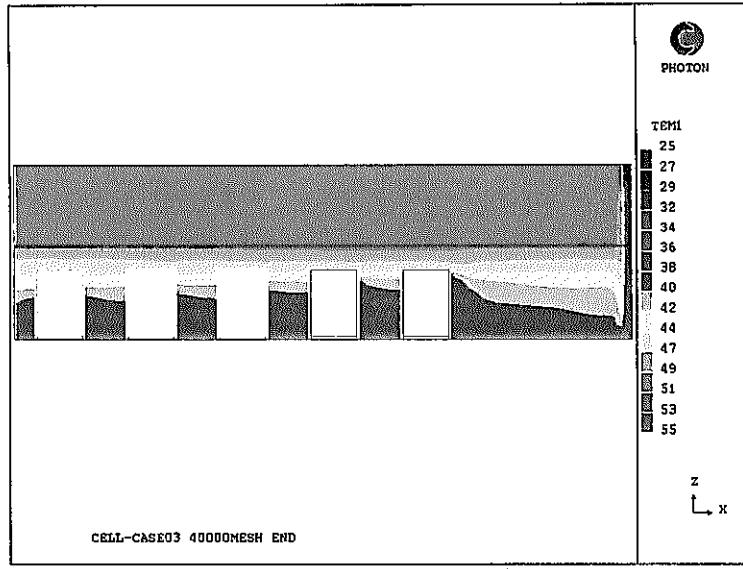


(4) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況（確認収束値）

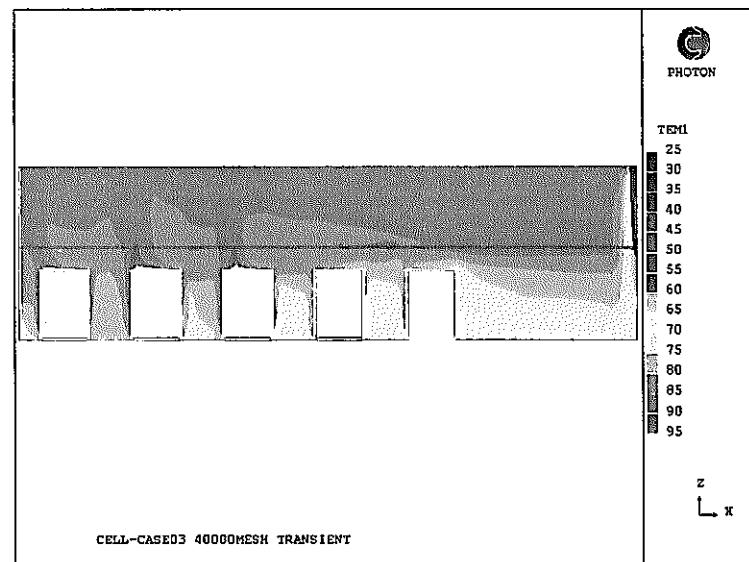
図 5-4 4万メッシュ×2モデルの150時間後の条件を初期条件とした場合の定常解析結果と収束予想条件の比較（各部の流況）



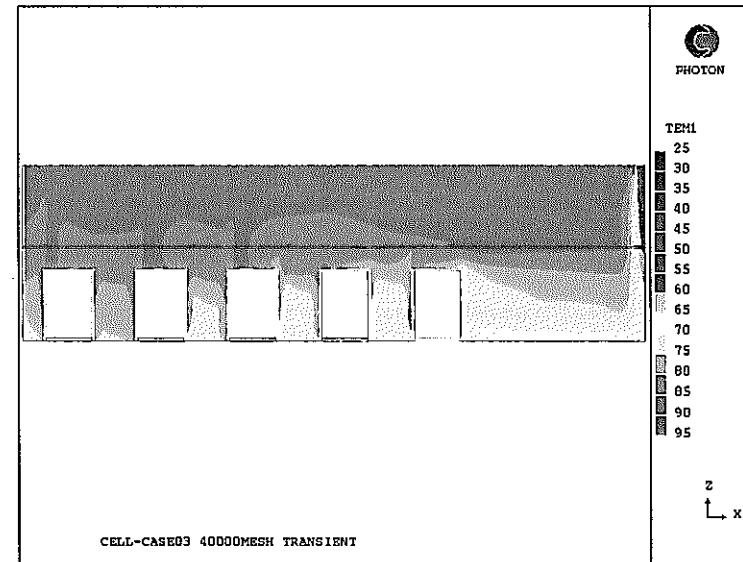
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度（収束予想値）



(2) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度（収束予想値）



(3) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度（確認収束値）



(4) 低発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度（確認収束値）

図 5-5 4万メッシュ×2モデルの150時間後の条件を初期条件とした場合の定常解析結果と収束予想条件の比較（各部の温度）

(6) 詳細サイクル解析

1ステップのサイクルを1000回とこれまでの10倍として結果に影響がでるかの確認を行った。ケースとしては2万メッシュ×2モデルと4万メッシュ×2モデルの両方について実施した。なお、解析時間は1ステップのサイクル数が10倍になるため、ほぼ10倍の時間がかかる（従来のステップでは2万メッシュ×2：約70時間、4万メッシュ×2：約110時間）ことからその都合上過渡解析は50時間後まで行った。なお、図5-8で4万メッシュ×2の詳細サイクル解析の80ステップで温度上昇が見られるが、これはここでソフトのリスタートがかかったためであり、2万メッシュ×2の100サイクルの解析結果と同様にリスタート時のソフトのバグの影響である。

図 5-6 詳細サイクルの照明レベルでの高発熱燃料側機器中心の短辺方向中心部のガス
温度の時間変化

図 5-7 詳細サイクルの 2 万メッシュ×2 モデルの 50 時間後の流況及び温度分布

図 5-8 詳細サイクルの 4 万メッシュ×2 モデルの 50 時間後の流況及び温度分布

これらの解析結果から下記のことがわかった。

- ① 各ステップのサイクル数を10倍の1000回としたこの解析の結果は同じ2万メッシュ×2モデルよりも温度の低下が遅い傾向が見られ、サイクル数100回ではまだ十分に収束していないことが考えられることがわかった。
- ② 各ステップのサイクル数を1000回とした解析では4万メッシュ×2モデルと2万メッシュ×2モデルの解析結果を比較した範囲では類似した温度経過となっており、実現象もこれに近いことが推測される。
- ③ 過渡解析の結果、定常的にはヒートバランスがとれた条件であっても、初期の段階で過渡的な温度ピーク（90°C程度まで上昇）が発生し、初期の変化に大きく依存する可能性が高いことがわかった。
- ④ 本体系では冷却ガスの主流は上から床に下がって跳ね返り、側面の排気口から流れるが、主流とは独立のよどみに相当する部屋上部に、機器及び照明の発熱による循環流があり、この循環流が不安定要因をもたらしている可能性が高い。

実現象が本当に今回の解析のような条件となっているかを、モデルの詳細化、解析ステップの詳細化により詰めることは現状の1000サイクルの非定常解析でも数週間を必要としていることから現実的ではない。

したがって、今回の解析条件とした流れの状態について不安定性及び基本挙動の確認については解析時間を短縮するとともに、現象の明確化を行うため、より簡潔な2次元モデルによる非定常解析解析を実施することで現象の確認を行うこととした。

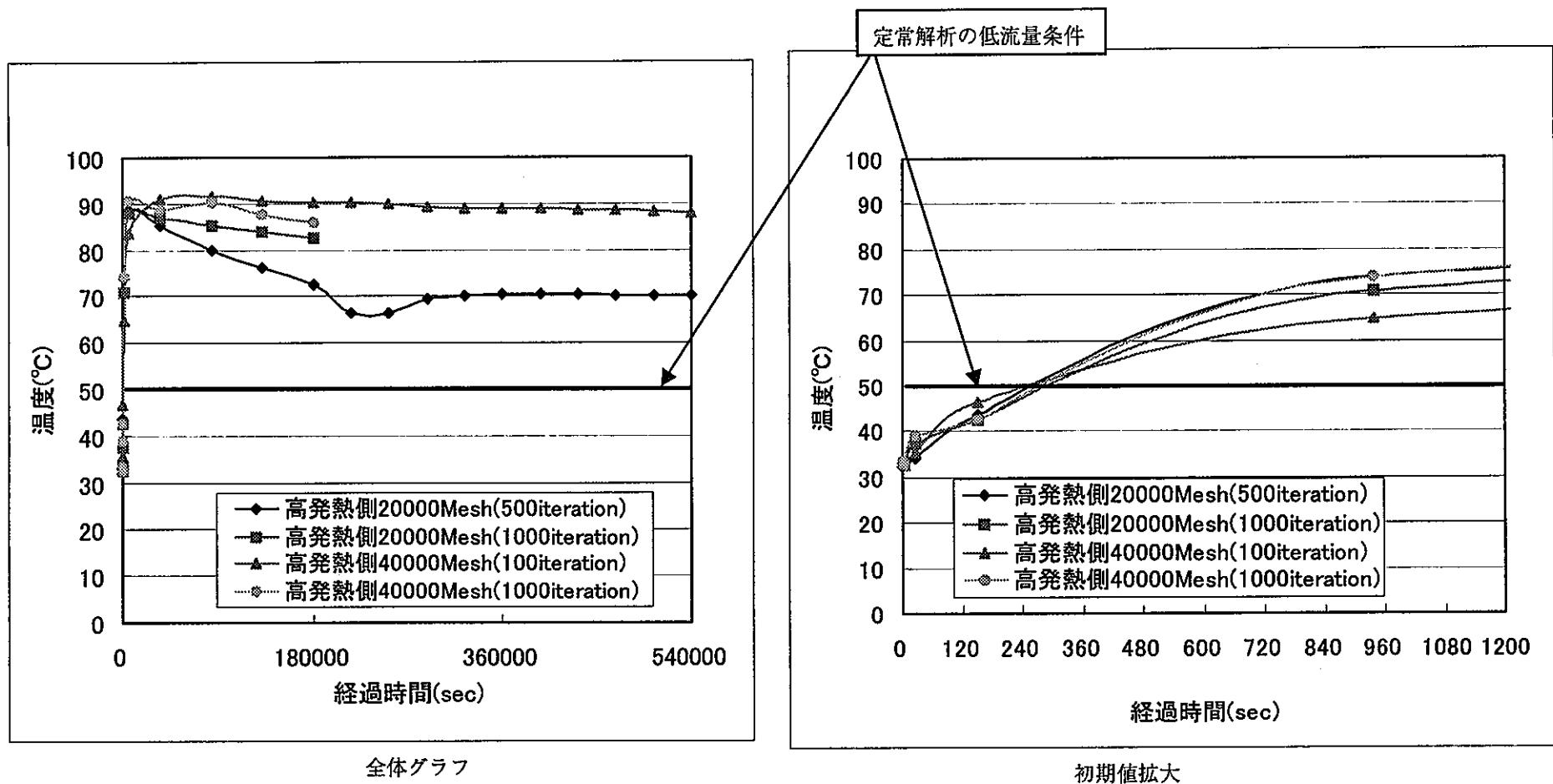
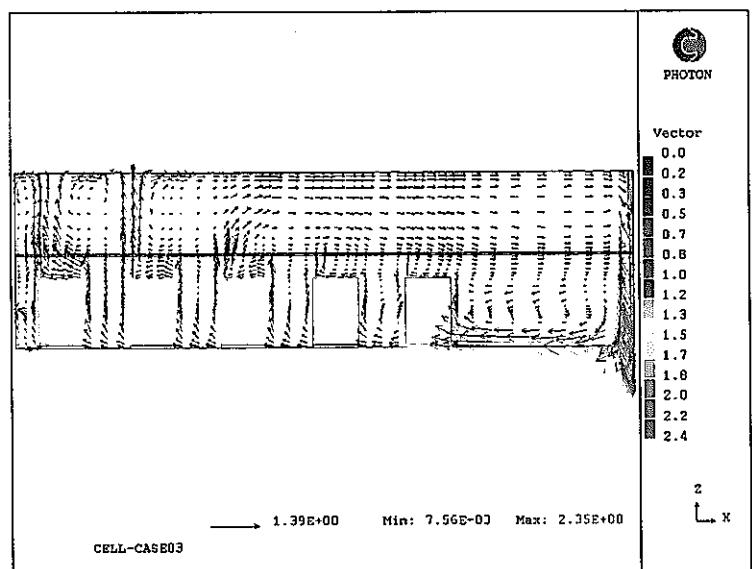
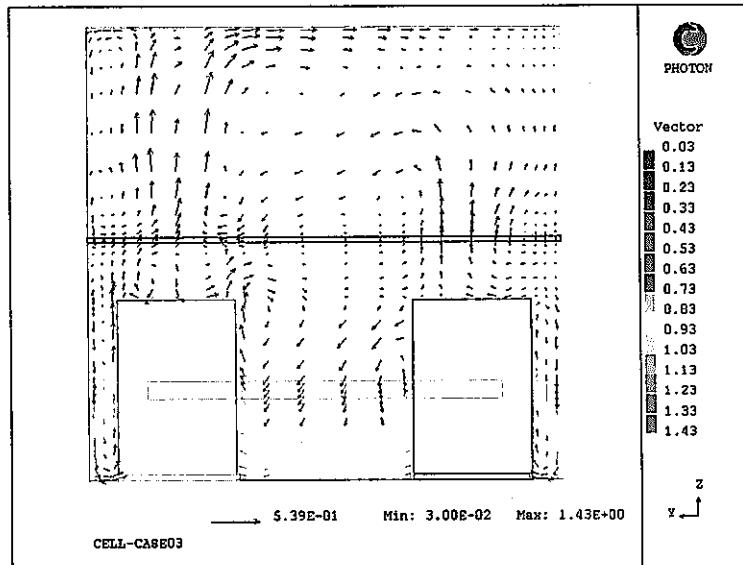


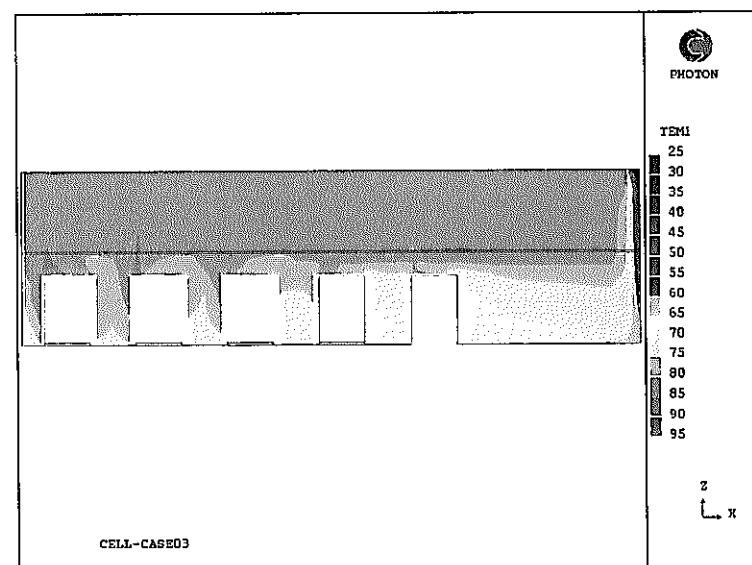
図 5-6 詳細サイクルの照明レベルでの高発熱機器側機器中心の短辺方向中心部のガス温度の時間変化



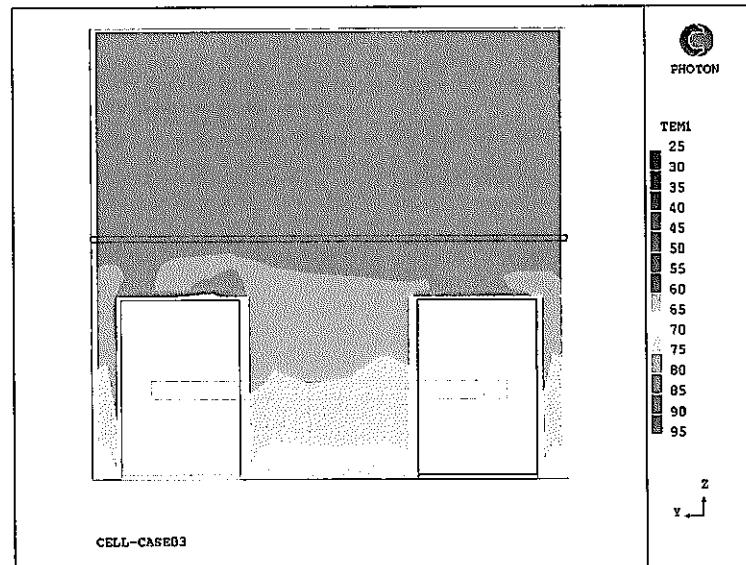
(1) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の流況



(2) 短辺方向の中心断面の流況



(3) 高発熱機器側機器中心部の長手方向断面の温度



(4) 短辺方向の中心断面の温度

図 5-7 詳細サイクルの2万メッシュ×2モデルの50時間後の流況及び温度分布

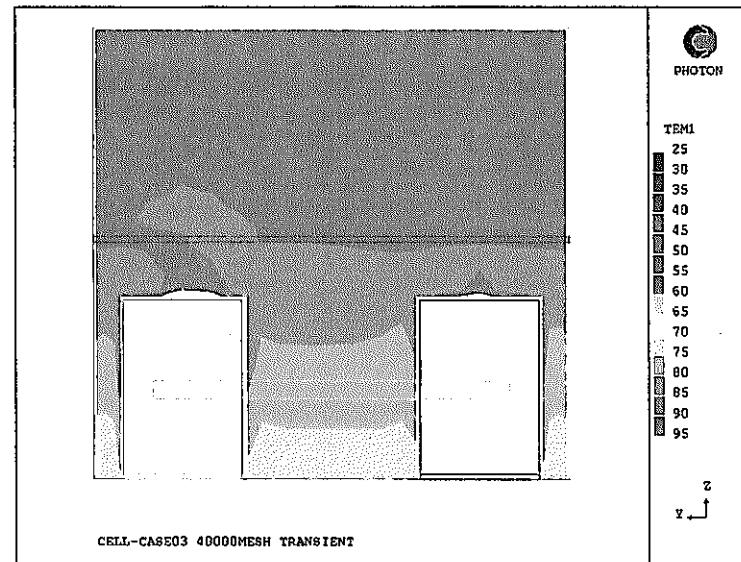
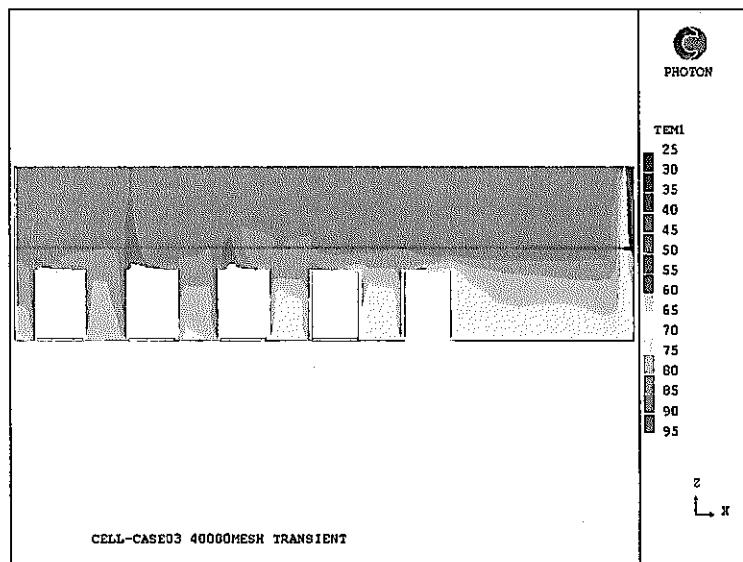
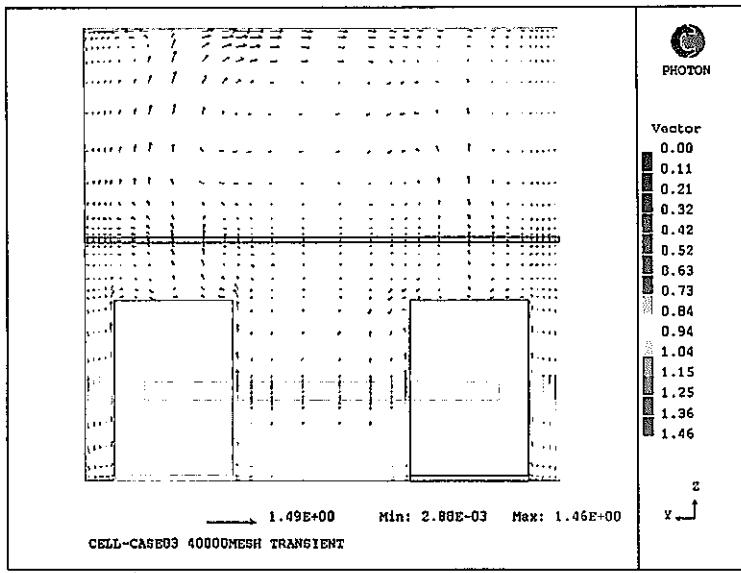
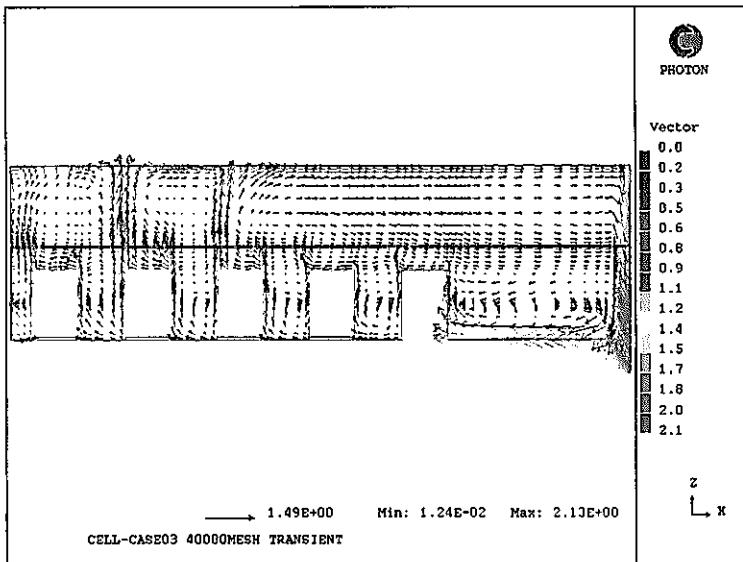


図 5-8 詳細サイクルの4万メッシュ×2モデルの50時間後の流況及び温度分布

(7)現象確認解析

a.解析条件

(6)のとおり、本体系のように強制冷却の主流とは独立によどみに相当する部屋上部に発熱による上昇流に駆動される循環流がある体系で、どのような現象が発生しているかを確認した。なお、本解析においては、非定常解析の安定性を考慮して、詳細解析に用いた解析コード STAR-CD を用いて解析を実施した。

・解析モデル

図 5-9 に解析モデルを示す。同図に示すとおり、モデルとしては非定常解析モデルを 2 次元化した上で、機器数を 3 基に減らしてモデルを簡素化するとともに、2 次元モデルでも冷却ガスの主流がセル内下部を側面に向かって流れるように機器の下部を空間とした。

・解析条件

発熱量、熱容量等は非定常解析モデルと同等の総発熱量を 3 基の機器に与えた。流量についても、3 次元モデルと同じ流速値で与えた。初期値は 3 次元の非定常解析と同様、本体系での定常解析を行って求めた流速温度分布を初期値とした。また、低流速収束条件での定常解析も行い、非定常の途中値からの定常計算と合わせて収束性を確認した。

b. 解析結果

解析結果を以下の図に示す。

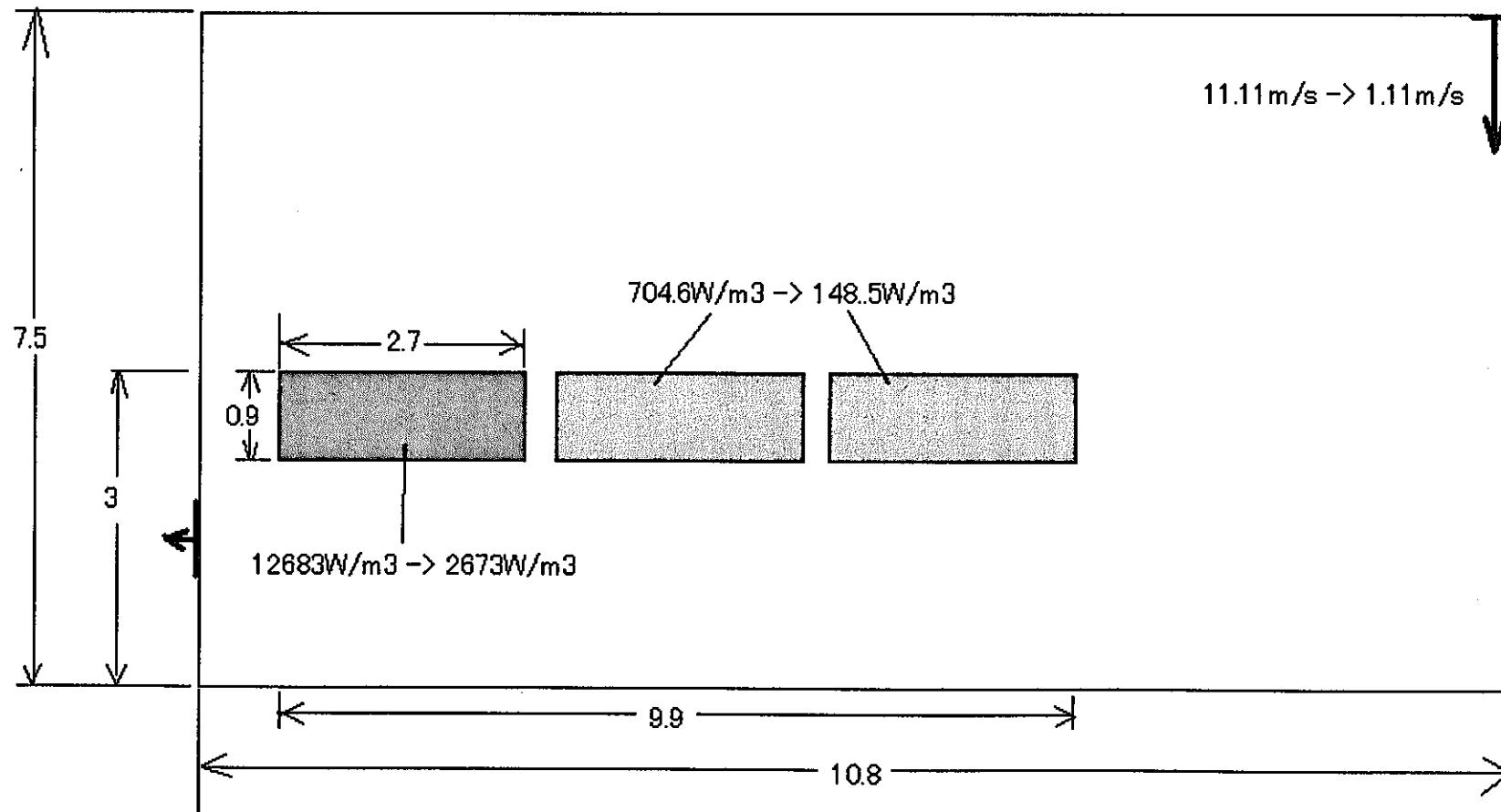
図 5-10 現象確認非定常解析での左端機器直上 1m でのガス温度の時間変化

図 5-11 現象確認定常解析での初期条件及び低流速（収束条件）での各部の流況、温度

図 5-12 現象確認非定常解析での 30 分後の各部の流況、温度とそれを初期値とした定常解析結果

図 5-10 に示すとおり、本解析でも、3 次元の詳細解析と同様に流速を落とすと同時に温度ピークが現れ、それ以降は徐々に低下する傾向を示した。図 5-12 に示すように高温状態の 30 分後の状態を初期状態とした定常解析を行ったところ、図 5-11 に示す低流速の収束条件の定常解析結果とほぼ同等の結果になったことから、この非定常解析を十分時間をかけることで最終的に収束条件に至る見通しのあることがわかる。なお、前述の 3 次元解析では同様の計算で収束していないが、これは 3 次元解析の方が多くの渦が発生する上にモデルが大きいことから収束性が悪く、その影響が出ている者と考えられる。実際、2 次元解析においても、解析の時間刻みを大きくすると発散する例もあり、この体系での過渡事象自体もかなり不安定な事象であると思われる。

以上のことから強制冷却の主流とは独立によどみに相当する部屋上部に発熱による上昇流に駆動される循環流がある体系でのセル内冷却は設計上あまり望ましくないと思われる。



単位 : m

図 5-9 現象確認用 2 次元解析モデル

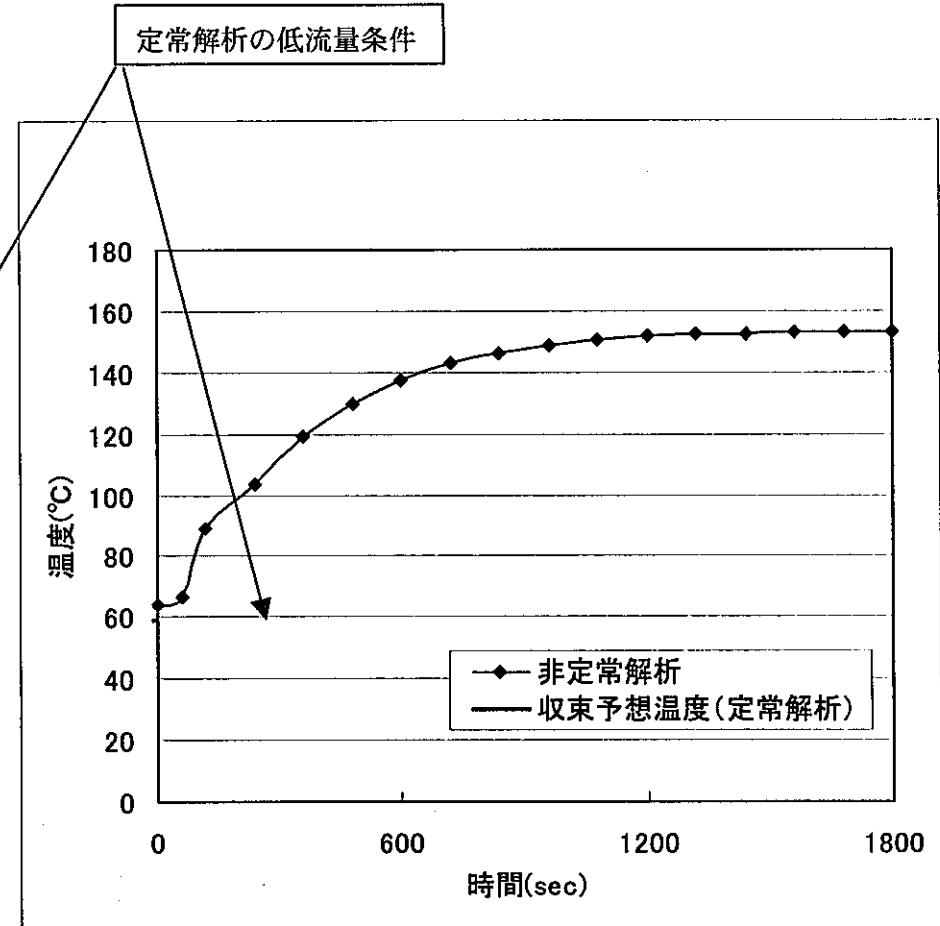
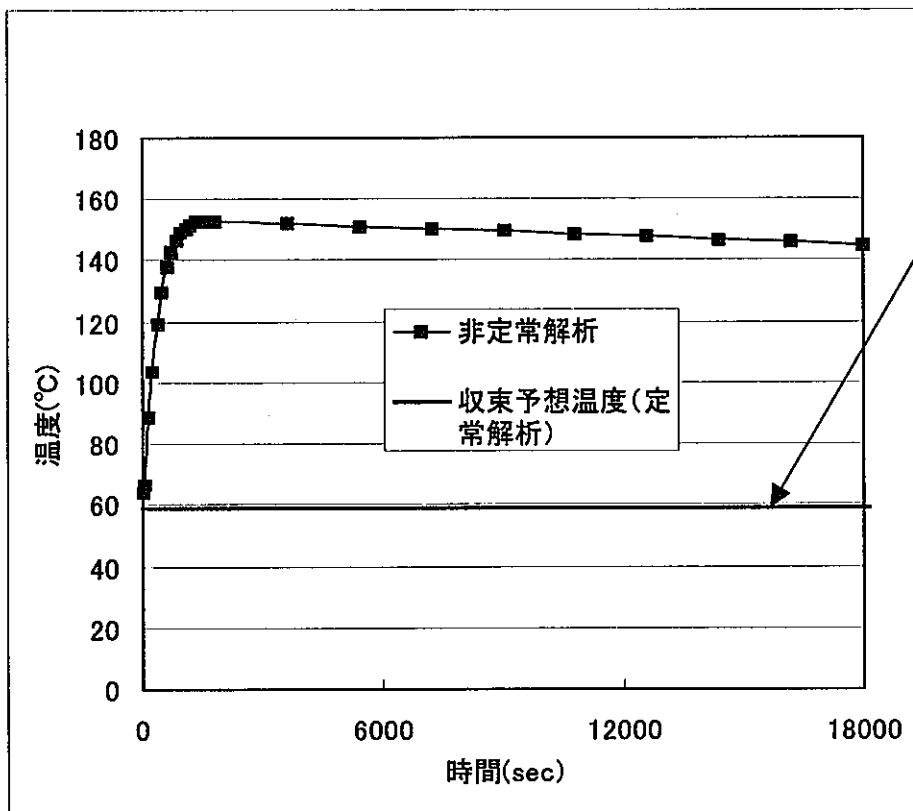
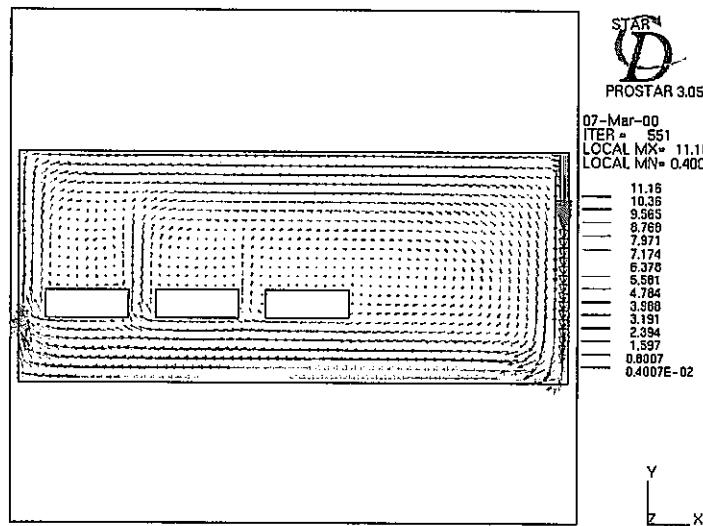
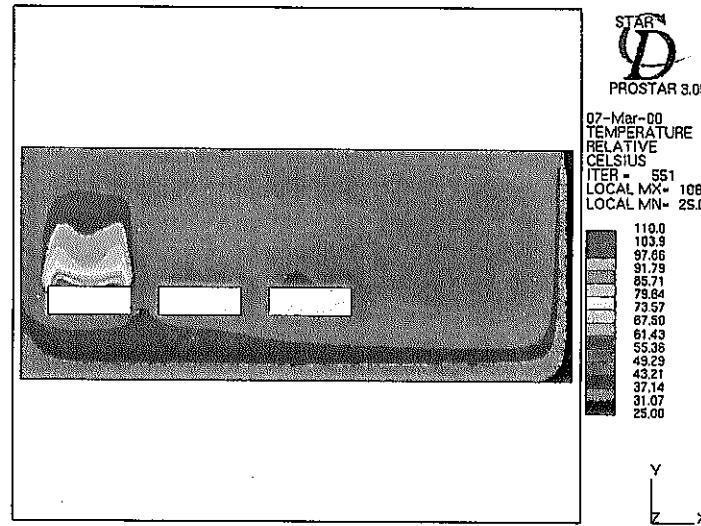


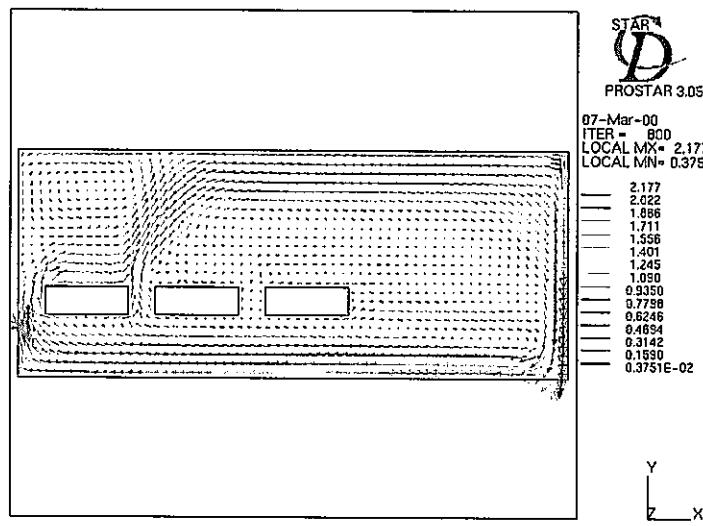
図 5-10 現象確認非定常解析での左端機器直上 1m でのガス温度の時間変化



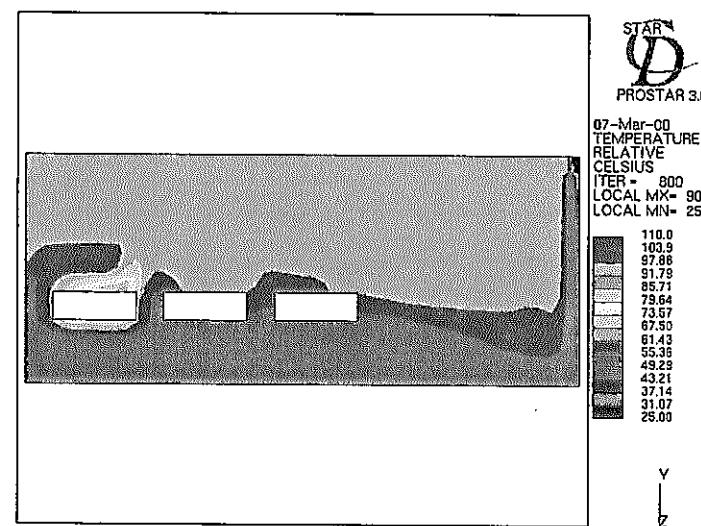
(1) 初期条件の流況



(2) 初期条件の温度

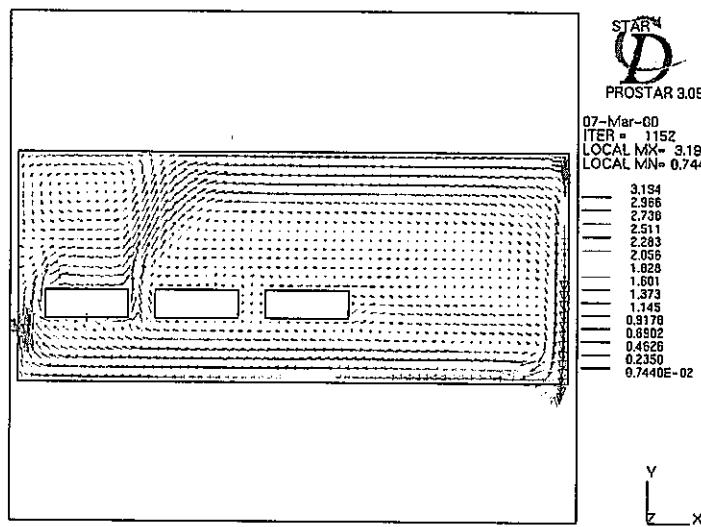


(3)低流速（収束条件）の流況

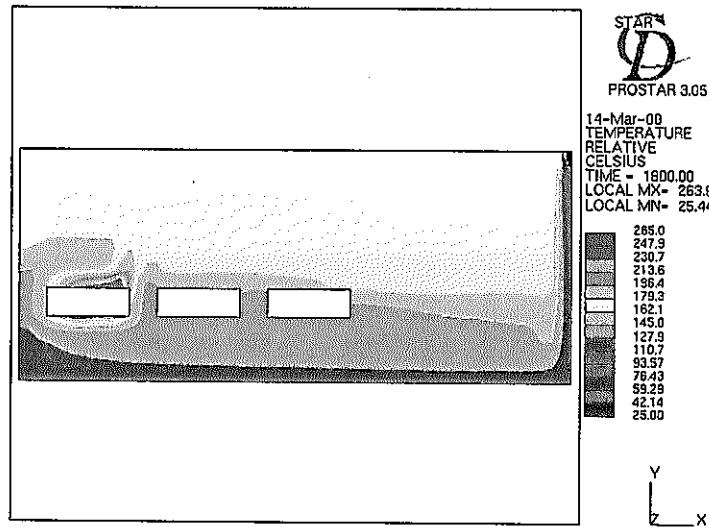


(4) 低流速（収束条件）の温度

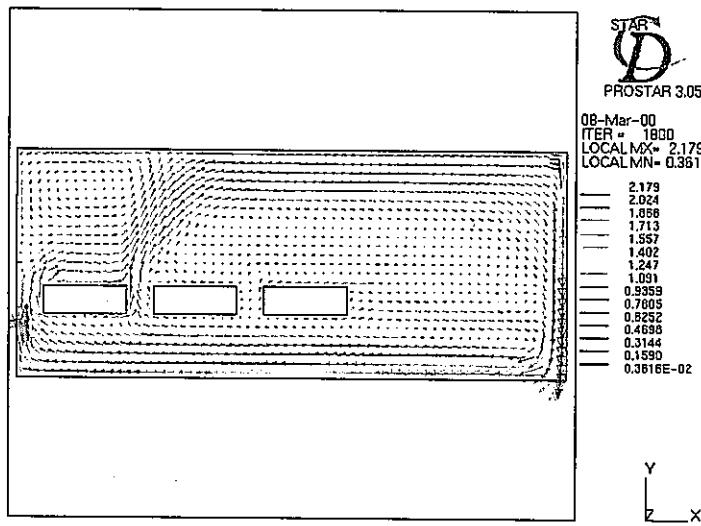
図 5-11 現象確認定常解析での初期条件及び低流速（収束条件）での各部の流況、温度



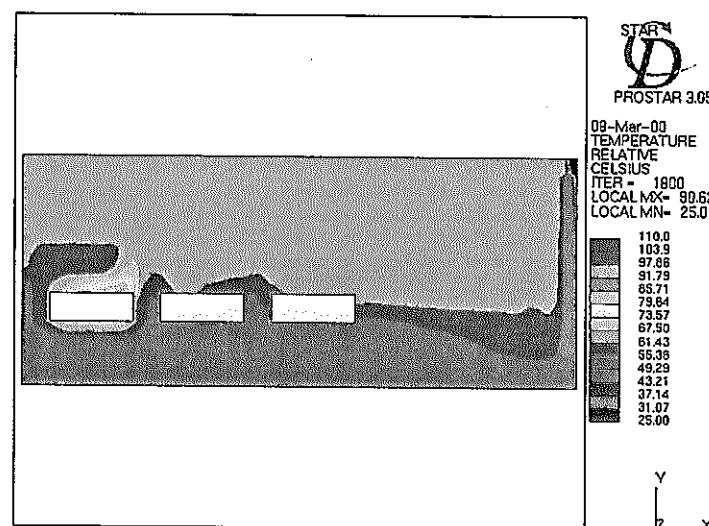
(1) 非定常解析 30 分後の流況



(2) 非定常解析 30 分後の温度



(3)(1)を初期値とした低流速定常解析（収束確認値）の流況



(4) (2)を初期値とした低流速定常解析（収束確認値）の温度

図 5-12 現象確認非定常解析での 30 分後の各部の流況、温度とそれを初期値とした定常解析結果

6. まとめ

(1) モデル作成

パソコン版での解析も考慮して、詳細解析モデル 24 万メッシュに比べ、約 1/6 の 4 万メッシュ以下のモデルを作成した。

(2) ベンチマーク解析

詳細解析モデルと複数の解析メッシュによる解析結果の比較から以下のことがわかった。

- ① 解析モデルの中では 4 万メッシュモデルの結果が詳細解析モデルの結果とよく一致した。4 万メッシュモデルではメッシュ数は約 6 分の 1 に荒くなっているが、全体的な流動傾向はほぼ一致し、セル内の温度分布についても良く一致している。
- ② これに対し、1.1.万メッシュモデルによりメッシュ数の多い 2.2 万メッシュの方が流況、温度とも差が大きい。以上から非定常解析用モデルも最低 4 万メッシュ相当の精度で、機器の発熱分布のモデル化もできるようにモデル化領域を 2 倍にしてモデル化しておく必要がある。

(3) 非常時定常解析

非常時の初期値に相当する定常解析及び、収束値に相当する低流速条件での定常解析を行った結果以下のことがわかった。

- ① ベンチマーク解析での定常解析ではメッシュ数と結果の精度は比例していない現象がみられたが、今回の解析モデル体系ではメッシュ数による流況分布及び温度分布の差は小さく、メッシュ数を増加させることにより精度が高くなっていると考えられる。このため、非定常解析はよりメッシュ数の大きな 2 ケース（2 万メッシュ × 2 領域と 4 万メッシュ × 2 領域）の解析モデルについて実施した。
- ② 初期条件（流量 80000Nm³/h、高発熱機器 15kW、低発熱機器 9.1kW）では各機器からの発熱からの上昇流が見られるのに対して、局的に発熱を集中させた低流速条件（流量 8000Nm³/h、高発熱機器 6kW、低発熱機器 0.7kW）では高発熱機器のみからの上昇流が支配的である。

また、セル全体の流れとしては初期条件では冷却ガス入口からセル全体を循環する大きな循環が支配的なのに対して、低流速条件ではその循環が弱まり高発熱機器から低発熱機器への流況も顕著に見られるようになっている。

- ③ 初期条件では照明部より上の領域においても循環流の効果に伴う温度分布があるが、低流速条件では高発熱機器の直上部では上昇流が発生しているがそれ以外はほとんど成層化していることがわかる。このため、照明部以上の領域でガス温度は初期温度 33℃ 前後に比べ 20℃ も高い 50℃ 以上の温度となっている。また、高発熱機器表面の最高ガス温度は機器上面部に発生し、ガス温度は 55℃ 程度となっている。

(4) 非常時過渡解析

定常解析結果を初期値として過渡解析を行った。その結果以下のことがわかった。

- ① 本過渡（非定常）解析では 1 ステップあたりの繰り返し計算回数を 1000 回以上とすることで精度を確保した解析を行うことが必要であることがわかった。

- ② 過渡解析の最終的な定常値は非定常変動の渦のでき方に左右され、均一温度流速条件からスタートした定常解析とは異なる結果となる例も見られたが、これは定性的には現象自体の不安定さによる可能性がある。
- ③ 過渡解析の結果、定常的にはヒートバランスがとれた条件であっても、初期の段階で過渡的な温度ピーク（90°C程度まで上昇）が発生し、初期の変化に大きく依存することがわかった。この変動は簡素な2次元モデルでも確認された。
- ④ 本体系では冷却ガスの主流は上から床に下がって跳ね返り、側面の排気口から流出する体系であるが、主流とは独立のよどみに相当する部屋上部に機器及び照明の発熱による循環流があり、この循環流が不安定要因をもたらしている可能性が高いことがわかった。その意味ではこの体系での冷却はあまり適切ではなく、こうした循環流を起こさないような空調系設計上の配慮が必要なことがわかった。

今後、これらの結果をもとに適切なセル空調系の設計を行うとともに、その条件でも過渡的な温度ピークの発生の有無についても評価を行い、セル空調系の設計に反映してゆく必要がある。

なお、本研究は、富士電機株式会社に業務を委託した成果をまとめたものである。尾崎博氏、松本悟史氏、他の方々のご尽力に謝意を表します。