

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

ITBL 環境における ロケット打ち上げ飛行シミュレーションソフトウェア MUROS

岩宮 敏幸，山本 行光，村上 桂一，甫喜山 潔

2007 年 3 月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

宇宙航空研究開発機構研究開発資料
JAXA Research and Development Memorandum

ITBL 環境における
ロケット打ち上げ飛行シミュレーションソフトウェア
MUROS

Software for Rocket Flight Simulation in ITBL Environment
— MUROS —

岩宮 敏幸^{*1} 山本 行光^{*1} 村上 桂一^{*1} 甫喜山 潔^{*2}
Toshiyuki IWAMIYA ^{*1}, Yukimitsu YAMAMOTO ^{*1}, Keiichi MURAKAMI ^{*1} and Kiyoshi HOKIYAMA ^{*2}

- * 1 総合技術研究本部 計算科学研究グループ
Computational Science Research Group
Institute of Aerospace Technology
- * 2 (株)計算力学研究センター
Research Center of Computational Mechanics, Inc

2007年3月
March 2007

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

ITBL 環境における ロケット打ち上げ飛行シミュレーションソフトウェア MUROS

岩宮 敏幸*¹, 山本 行光*¹, 村上 桂一*¹, 甫喜山 潔*²

Software for Rocket Flight Simulation in ITBL Environment
— MUROS —

Toshiyuki IWAMIYA *¹, Yukimitsu YAMAMOTO *¹, Keiichi MURAKAMI *¹ and Kiyoshi HOKIYAMA *²

Abstract

This is a report on a multidisciplinary simulation software package, MUROS (Multidisciplinary ROcket Simulation), which we have developed to be utilized in an ITBL (Information Technology Based Laboratory) environment— a virtual workspace on the Internet.

In the ITBL environment, ITBL middleware manages the computer resources registered on the network and visualizes workflows. Hence, it is not necessary to be conscious of individual computer resources and application software can be run easily and effectively.

MUROS software is used to predict processes from the launching of a rocket to the separation of booster rockets in the following steps. The first is estimation of thrust and drag by CFD analysis around the rocket. Next is the estimation of the rocket displacement by combining flight movement analysis with the thrust and drag.

Keywords: ITBL, Rocket, Computational Fluid Dynamics, Flight Simulation, Multidisciplinary Simulation

概 要

ITBL (Information Technology Based Laboratory) プロジェクトは、近年飛躍的にその帯域を広げてきた広域ネットワーク上に接続されているスーパーコンピュータやデータベース等の計算資源を有効に活用するための仕組みと、その上で利用可能な計算科学アプリケーション・ソフトウェアを開発することを目的として平成13年度から開始されたプロジェクトで、科学技術庁（現在は文部科学省）傘下の6機関が中心となって役割分担をしながら進めてきたものである。

本報告は、この中でITBL環境において活用されるソフトウェアとして開発してきた、ロケット打ち上げ飛行シミュレーションソフトウェア (Multidisciplinary ROcket Simulation: MUROS) についての報告である。MUROSはロケットの打ち上げから補助ロケットの分離までの過程をロケット周りの流体解析により推力と抵抗を推算し、飛行運動解析と組み合わせるロケットの運動を解析するためのソフトウェアである。

ITBLの提供する基盤ソフトウェアとうまく組み合わせることにより、仮想化された環境の中で個々の計算機資源を意識することなく作業をすることができるようになり、ITBL環境を有効に活用することができる。

本報告では、例題の結果を示した後、一連の操作方法の説明、プログラムについての簡単な説明を示す。例題としてはメインロケットの周りに補助ロケットが4本ついている形状を取り扱う。

キーワード: ITBL, ロケット, 計算空気力学, 飛行シミュレーション, 多分野統合シミュレーション

* 平成19年2月15日 受付 (received 15 February 2007)

* 1 総合技術研究本部 計算科学研究グループ (Computational Science Research Group, Institute of Aerospace Technology)

* 2 (株) 計算力学研究センター (Research Center of Computational Mechanics, Inc)

1 ITBLプロジェクト

ITBL (IT-Based Laboratory) プロジェクトは、研究機関の持つスーパーコンピュータやデータベース等を高速ネットワークで接続することにより、複雑で高度なシミュレーションや遠隔地との共同研究を容易にする仮想研究環境 (ITBL 仮想研究環境) を構築し、スーパーコンピュータ等の計算資源を有効活用して研究を高度化することを旨とするものである。

そこでは、高速ネットワークによって接続されたスーパーコンピュータなどの計算機群が論理的に束ねられ、ITBLに参加した研究者は、計算機の所在やアーキテクチャを気にすることなく計算資源を利用できる。またキャビネットやフォーラムなどの情報伝達サービスにより、研究者間での情報共有やコミュニケーションが可能となっている。

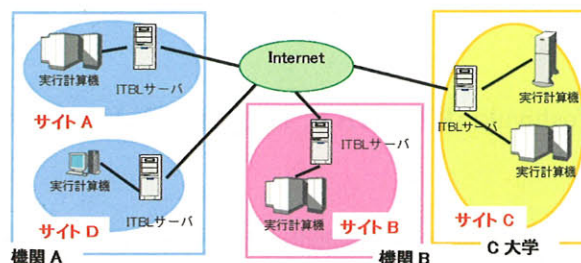


図 1-2 ITBL 仮想研究環境のしくみ

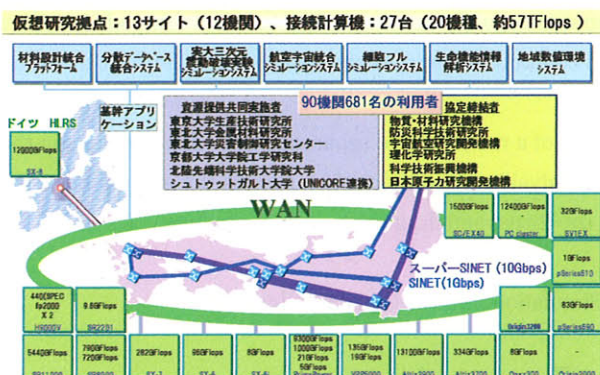


図 1-1 ITBL に接続されているサイトと計算機資源

ITBL仮想研究環境を実現するための基盤となる一群のソフトウェアのことをITBL基盤ソフトウェアと呼んでおり、日本原子力研究所（現 独立行政法人 日本原子力研究開発機構）が開発を担当した。（OSとアプリケーション・ソフトウェアの間であって、特定の目的のための高度な機能を提供することから一般に、この種のソフトウェアはミドルウェアと呼ばれている）ITBLでは、ITBLサーバとその管理下にある複数の計算機から構成される運用上独立とみなせる単位のことをサイトと呼び、複数のサイトをネットワークで繋ぐことで仮想研究環境を実現している。基本的に全てのサイトは管理上等価であり、サイトに上位／下位などの概念はなく、フラットな構造をしている。このような環境の中で利用者の特定と利便性を同時に実現するための仕組みが認証（authentication）である。ITBLを利用できる利用者（以下、ITBL利用者と称する）を登録できるサイトは1つだけであり、そのサイトを特に事務局サイトと呼んでいる。事務局サイトに

ITBL サーバは ITBL の中核となるサーバ群で、各サイトに 1 セットずつ設置され、計算機群の管理や ITBL 利用者へのユーザインタフェースを提供する。ITBL のセキュリティを確保するため、ITBL フロントサーバ、ITBL データサーバ、ITBL 中継サーバの 3 台のサーバから構成される。

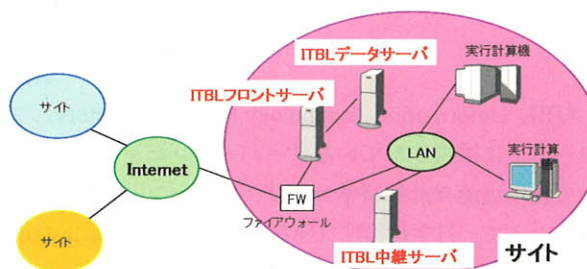


図 1-3 ITBL サーバの構成

ITBLフロントサーバ（以下、フロントサーバと呼ぶ）は、インターネットからアクセス可能なネットワークに接続され、ITBL利用者にITBLを利用するためのインタフェースを提供する。また、サイト同士が連携する際の窓口となる。ITBLデータサーバ（以下、データサーバと呼ぶ）は、ITBLの運用に必要な管理データと研究コミュニティで扱う共有データを格納する。セキュリティ確保のため、インターネットから直接アクセスされないネットワークに接続されている。ITBL中継サーバ（以下、中継サーバと呼ぶ）は、スーパーコンピュータなどの計算機群と直接やり取りを行なうため、構内LANなどの内部ネットワークに接続される。また、フロントサーバとは

ファイアウォールを越えて通信が行えるようになっている。サイトを構成する計算機群のうち、ITBLサーバ以外の計算機を、計算ジョブ実行用計算機（以下、実行計算機）と呼ぶ。これらは、ITBL利用者が実際に研究を行なうための計算資源であり、利用者のアプリケーションプログラムが実行される環境でもある。これらのサーバ上には、ITBL基盤ソフトが実装され、中継サーバ、フロントサーバを介して、ITBL利用者に研究環境を提供する。利用者端末とは、ITBL利用者がITBLのユーザインタフェースを使ってITBLを利用するための端末環境のことである。WebブラウザとJava環境が使えるPCあるいはワークステーションであれば、利用者端末として使用することができる。また、ITBLを利用するためには、利用者端末上のWebブラウザにITBL事務局が発行した証明書を組み込む必要がある。ITBLでは、ITBL事務局から発行されるクライアント証明書を使ってシングルサインオン（ユーザが一度認証を受けるだけで、許可されているすべての機能を利用できるようになる仕組み）を実現している。証明書には、ITBL利用者にユニークに割り当てられたグローバルIDの情報が含まれており、この証明書をWebブラウザに取り込むことにより、ITBL基盤ソフトは利用者端末を認識する。

ITBLでは、実行計算機資源を利用できる機能のほかに、仮想研究環境を実現するための中核として研究コミュニティという概念がある。複数のITBL利用者が、コミュニティを形成することにより、そのメンバー内でデータ（文書）の共有をしたり、電子的に意見を交換することができるようになる。具体的なサービスとして、キャビネットサービスと会議室サービスがある。キャビネットサービスはデータの格納や他のITBL利用者とのデータ共有を行なうためのサービスを提供する。会議室サービスはメッセージの投稿／閲覧をするためのサービスである。この機能を利用して、他のITBL利用者と情報や意見を公開／交換することができる。

2 MUROS の概要と計算実行例

MUROSの概要と、実際にMUROSを使って行なった計算について示す。

2.1 概要

本ソフトウェアMUROSは、現在及び将来のロケット宇宙輸送基盤を支えるため、ロケットの打ち上げ飛行を準定常的にシミュレーションするための基本プログラムである。これまで、地上打ち上げ時から大気中におけるロケット上昇飛行を正確に再現する手段が乏しかったが、MUROSでは、ロケットノズルからの排気プルームとロケット機体まわりの流れを同時に解き、合わせて6自由

度飛行運動方程式を連成させることにより、ロケットの上昇軌道を高精度に把握することを可能としている。また、これまではロケットの質量流量と排気流速ととの簡単な関係式を仮定して、ロケットの推力を見積もることが普通であったが、実際の排気プルームは、ノズル出口から超音速で流出するため、外気との干渉により、パレルショック（樽型衝撃波）等数多くの衝撃波が発生する。このため、精度は十分ではない。MUROSでは、これらの干渉効果とロケット本体の抵抗を正確に見積もることにより、ロケットの性能、到達高度等の予測をより精密に行っている。MUROSの活用により、ノズル形状の設計分野においても最適化がはかられ、ロケット本体にかかる空力荷重の解析、空力加熱や非定常荷重、音響振動の予測等にも大きな貢献をしていくことが期待できる。将来的には、解析能力を拡張することにより、横風の影響、ジンバル制御等の安定性の課題にも対応することが可能となる。

MUROSは、ITBL基盤ソフトが提供する、一連の処理の流れを定義し実行するための仕組みであるTask Mapping Editor (TME) を利用することにより、1) 計算条件の設定、2) 計算の実行までを追って容易に行なうことができる。計算結果の可視化についても、ITBL基盤ソフトの提供するWeb可視化機能を利用して簡単に行なうことができる。更に入力の煩雑さを避けるため、必要な計算条件はGUI画面を操作することにより簡単に設定できるよう配慮している。動作環境は、ITBL基盤ソフトの動作環境に準じる他、計算部分をXPFortranで並列化しているため、ITBLに登録されているJAXA計算機を使用することを推奨する。

2.2 計算実行例

MUROSを使用して $\Delta t = 1(\text{s})$ とし、60秒分の飛行プロファイルを計算した。計算には、JAXAがITBLに提供しているCeNSSのノードであるsecure3を使用した。CPUはSPARC64V、クロック周波数は1.3GHzである。

2.2.1 計算条件

メインロケットの周りに補助ロケットが4本ついている形状を計算対象とする。

ロケットに関する仮定は以下の通りである。

- ロケットの全長は59.9(m)
- ロケットの全体質量は435.5(ton)
- 補助ロケット4本の推力は合計9040(kN)で、全ての高度で同じ推力を持っているとした
- ノズル内の壁面温度は2500(K)
- 燃焼部分の圧力は11.8(MPa)、温度は3579(K)

- 質量流量は2.2902(ton/s)
- 無次元化前のロケット本体の断面積と補助ロケット4本の断面積の合計は32.201(m²)

2.2.2 計算結果

計算格子のセル数は約6万3千である。4プロセス(CPU)で計算を行なった。1秒間の計算に必要な時間は流体解析がほぼ占めているが約14時間かかった。使用するCPUの数を8に増やせば、1秒あたりの計算に約7時間、60秒相当の計算で420時間程度になる。

計算結果の概要は以下の通りである。飛行プロファイルを図2-1に示す。ロケットの速度は、ほぼ直線的に上昇し、最終的には約1,010(m/s)になった。このときのロケット高度は約27(km)となった。

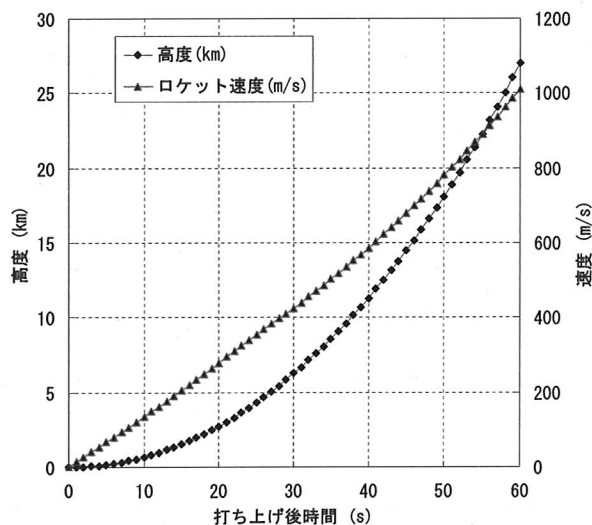


図2-1 飛行プロファイル

次に、メインエンジンの推力の時間変化を図2-2に示す。推力は時間とともに増加していく傾向にあるが、12秒から19秒にかけて一時的に下がっている。この間、ノズル出口の圧力が一時的に低下しているため推力が低下しているが、補助ロケットの推力が大きいので、飛行プロファイルに大きな影響は出ていない。

打ち上げ直後から推力が一時的に減少し、再び上昇に転じるまでの間におけるノズル内の運動量分布と、ノズル出口での半径方向の運動量分布、ノズル壁近傍で出口部分の速度ベクトルのXZ面への射影を図2-3から図2-8に示す。ノズル出口での運動量分布図は、 $z=0$ がノズルの中心部で、マイナスの方向にノズル壁に向かっていく。

打ち上げ直後の状態が図2-3である。ここでの特徴は、ノズル壁から離れた領域では正方向の速い流れが生じている一方、ノズル壁近くでは逆流領域ができてはいるが、

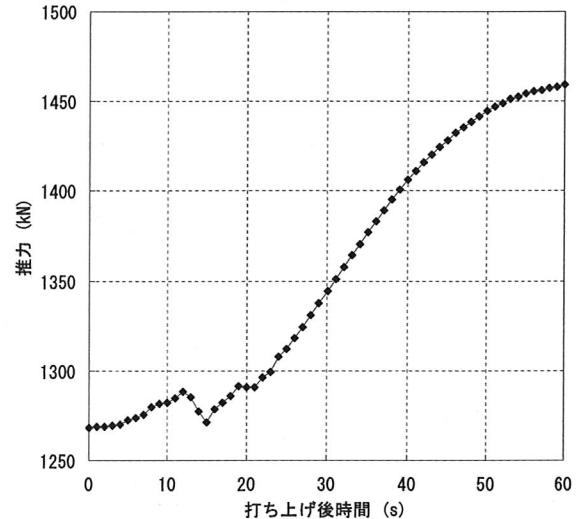


図2-2 メインエンジンの推力変化

その強さは微小である。推力が低下する前の状態が図2-4である。この段階では、正方向の速い流れの下に逆流領域ができていている構図は同じであるが、ノズル壁近傍でも逆流領域になっている。推力が低下し始めた状態が図2-5である。逆流している領域の広さは変わらないが、強い場所が壁近くに移動している。また、速度ベクトルを見ると、渦ができていているだけではなく、ノズル中心へ向かう大きな流れができていている。推力が下げ止まった状態が図2-6である。逆流している領域が減少し、ほぼノズル壁近くまで正方向の分布になっている。逆流が1ヶ所だけ大きくなっているのは、ベクトル図を見ると、ノズル中心へ向かっている流れが逆流方向へ曲がっているためである。推力が上昇に転じたものの、変化がフラットになってしまった状態が図2-7である。前の状態とあまり変化がないが、逆流領域はさらに減少している。推力の変化がフラット状態から上昇に転じた状態が図2-8である。逆流領域はほぼ消滅している。正方向の流れについては、大きな値を持っている領域が拡大している。

これ以降の流れの変化は、正方向の流れが強くなるのみである。

プルームの分布については、参考文献[10]に、「ロケットエンジンのノズル面積比は一般に一定であるので、打ち上げ時には過膨張状態から、高度が上がるに従って適正膨張状態、不足膨張状態になる」と書かれている。例題のプルーム分布は、参考文献の通りの変化をしている。

過膨張とは、ノズル出口の前で衝撃波が発生し、流れは衝撃波の中を動いていく。適正膨張は、ノズル内で衝撃波が発生せず、ノズル幅に沿った流れとなる。不足膨張は、ノズルを出ても更に膨張を続ける流れである。それぞれの流れの状態の図を図2-9から図2-14に示す。

図2-9が過膨張の例、図2-10が適正膨張の例である。

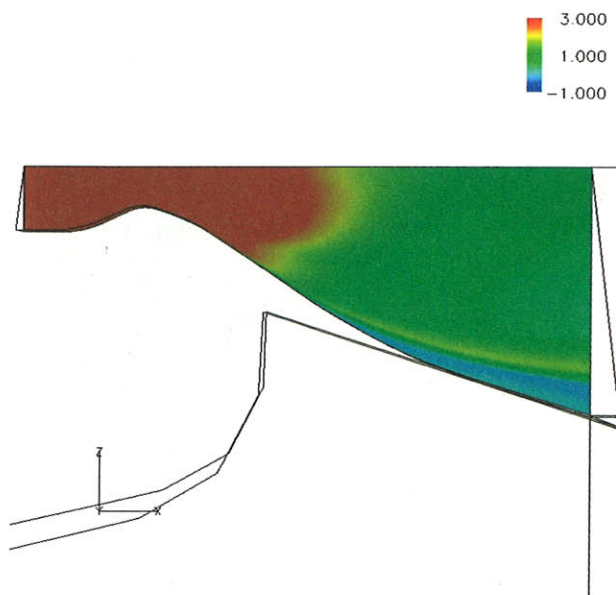


図 2-3 (a) ノズル内の流れ方向の運動量分布(1s)

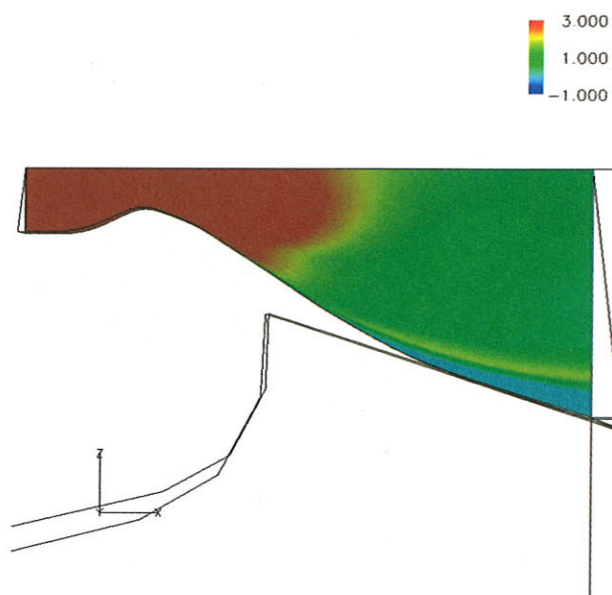


図 2-4 (a) ノズル内の流れ方向の運動量分布(11s)

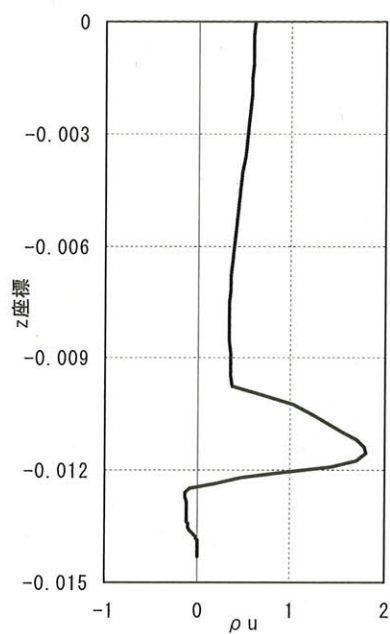


図 2-3 (b) ノズル出口の流れ方向の運動量分布(1s)

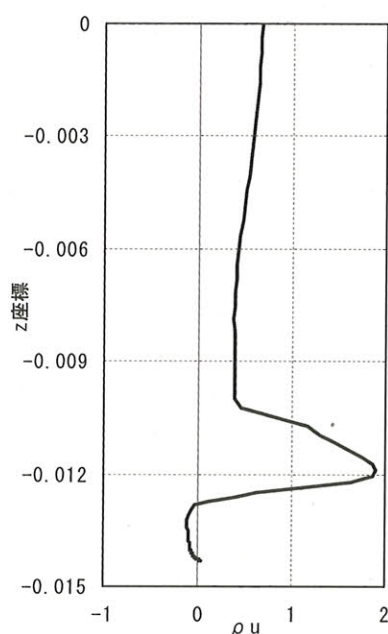


図 2-4 (b) ノズル出口の流れ方向の運動量分布(11s)

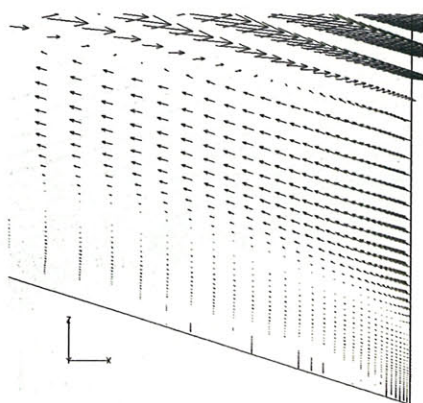


図 2-3 (c) ノズル出口のXZ面速度ベクトル(1s)

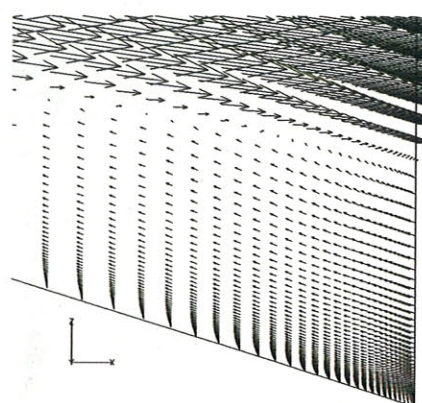


図 2-4 (c) ノズル出口のXZ面速度ベクトル(11s)

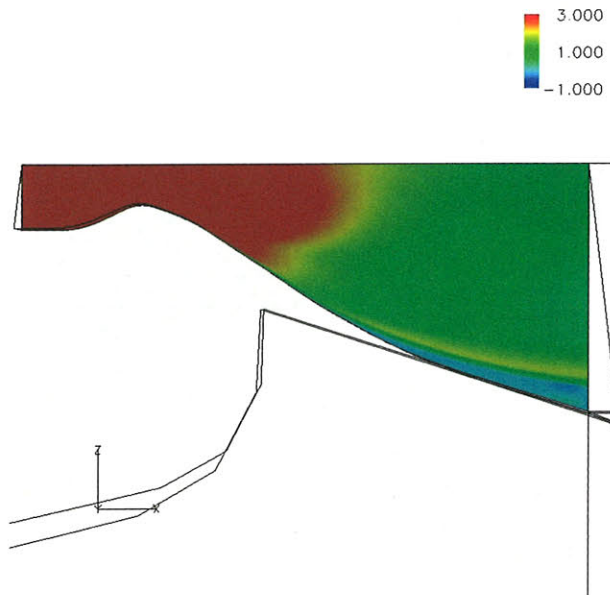


図 2-5 (a) ノズル内の流れ方向の運動量分布(13s)

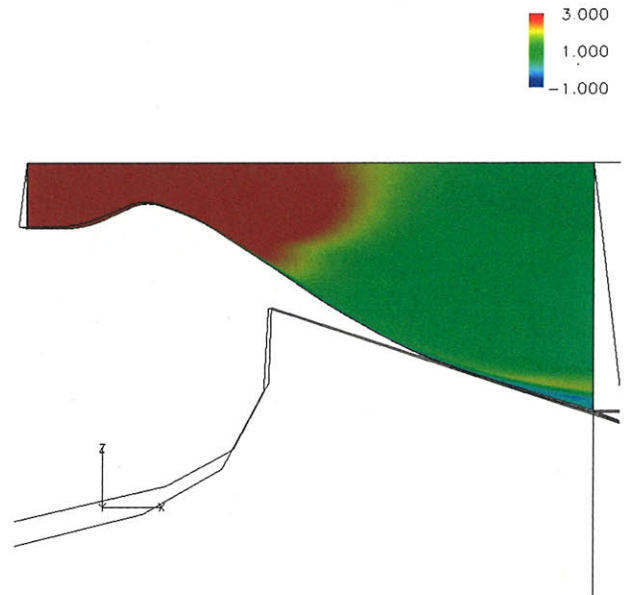


図 2-6 (a) ノズル内の流れ方向の運動量分布(15s)

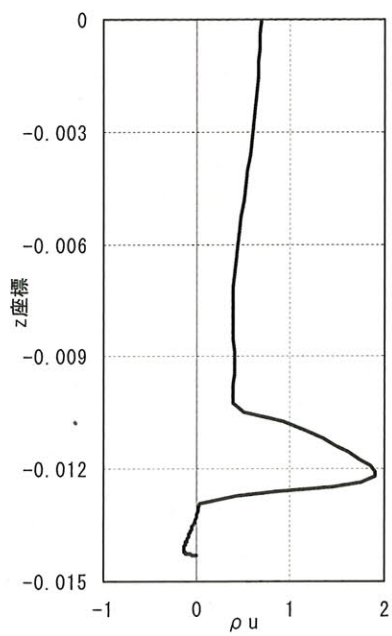


図 2-5 (b) ノズル出口の流れ方向の運動量分布(13s)

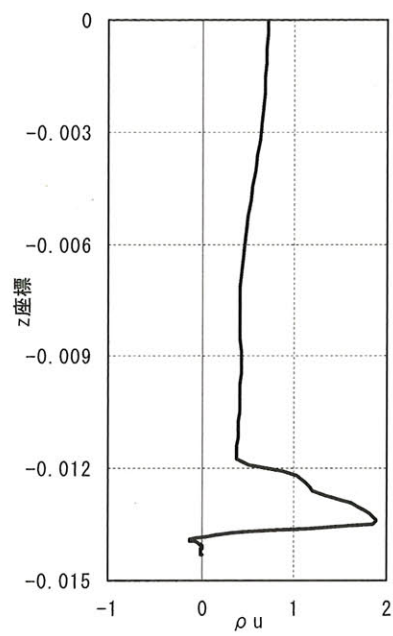


図 2-6 (b) ノズル出口の流れ方向の運動量分布(15s)

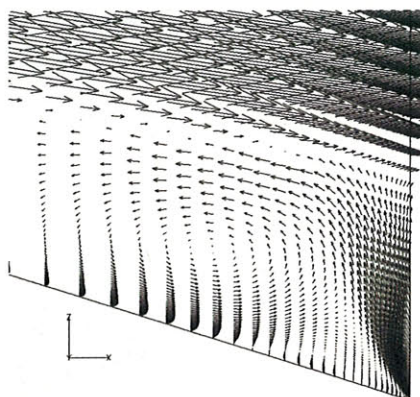


図 2-5 (c) ノズル出口のXZ面速度ベクトル(13s)

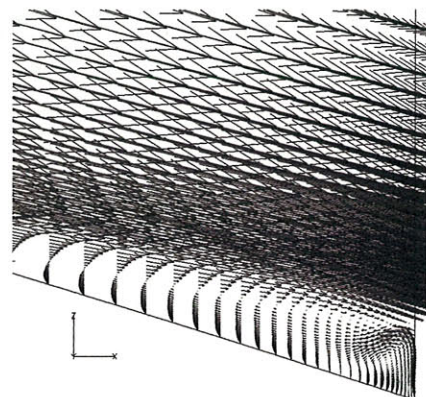


図 2-6 (c) ノズル出口のXZ面速度ベクトル(15s)

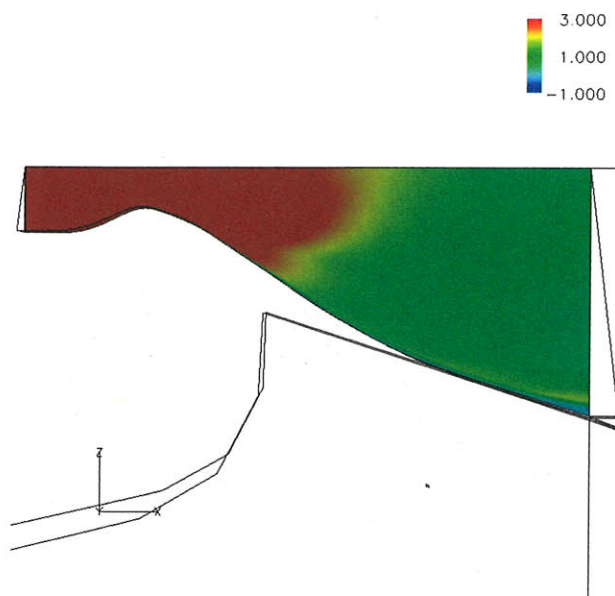


図 2-7 (a) ノズル内の流れ方向の運動量分布(18s)

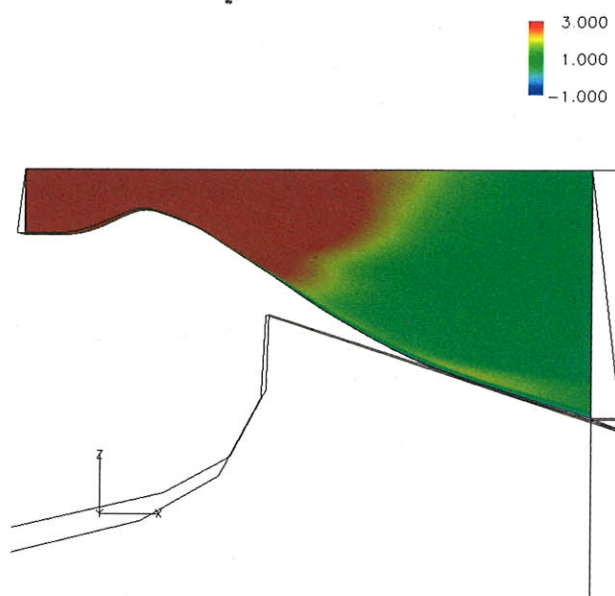


図 2-8 (a) ノズル内の流れ方向の運動量分布(22s)

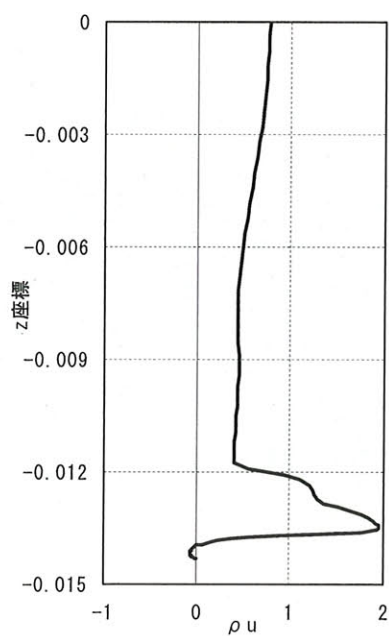


図 2-7 (b) ノズル出口の流れ方向の運動量分布(18s)

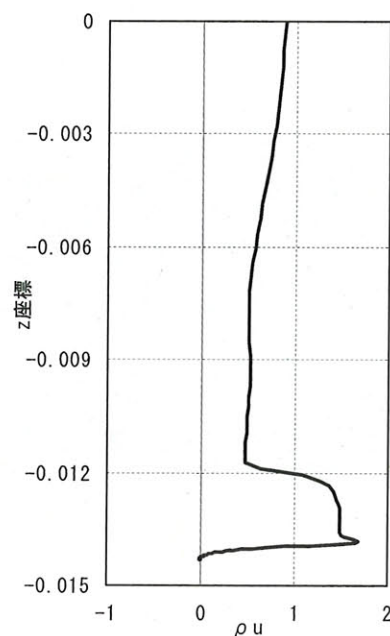


図 2-8 (b) ノズル出口の流れ方向の運動量分布(22s)

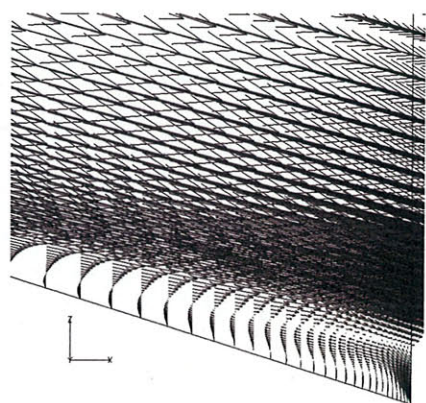


図 2-7 (c) ノズル出口の XZ 面速度ベクトル(18s)

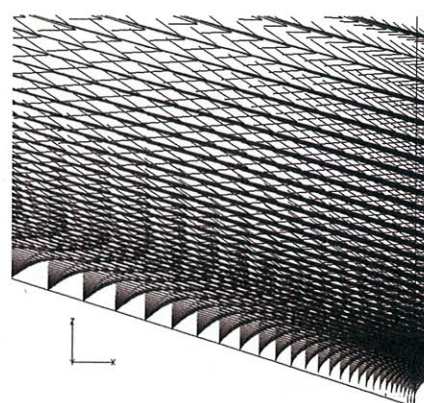


図 2-8 (c) ノズル出口の XZ 面速度ベクトル(22s)

ちょうど推力が減少するところで、流れが過膨張から適正膨張に変化している。図2-11以降は不足膨張の状態である。図2-11では、ノズルを出ても少しだけ膨張しているように見えるが、図2-12になると、完全に膨張している状態を見ることができる。更に時間を進めると、図2-13や図2-14の状態になる。

また、図2-15から図2-19にロケット周りのCp分布を示す。

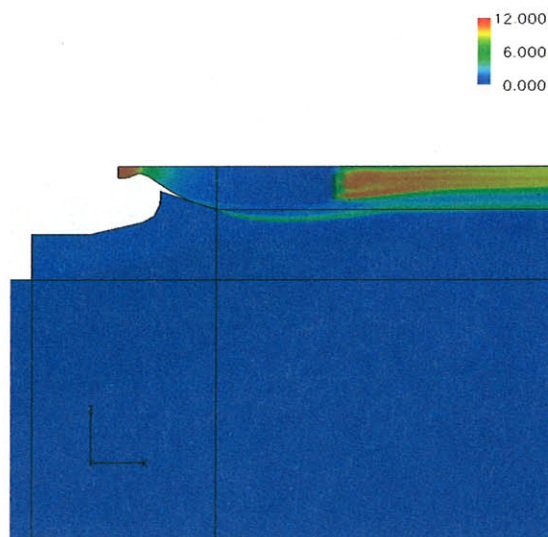


図2-11 適正膨張→不足膨張：34(s) 経過後の温度分布

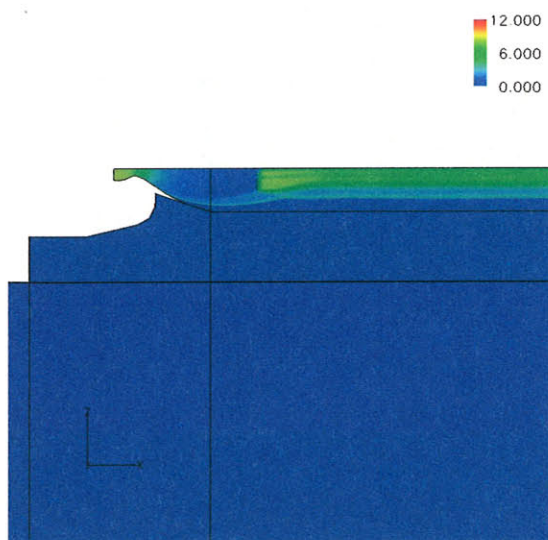


図2-9 過膨張：1(s) 経過後の温度分布

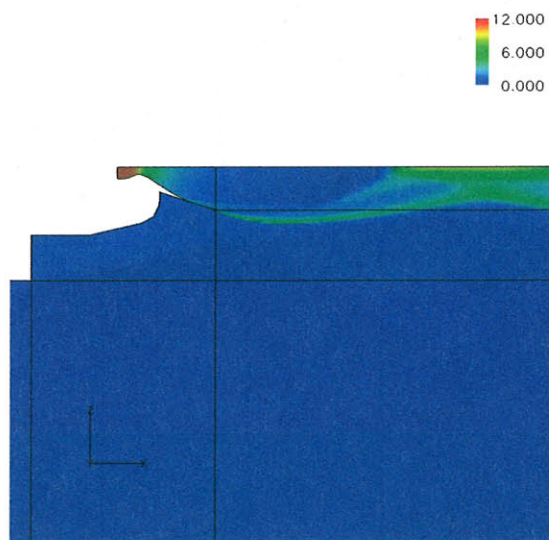


図2-12 適正膨張→不足膨張：35(s) 経過後の温度分布

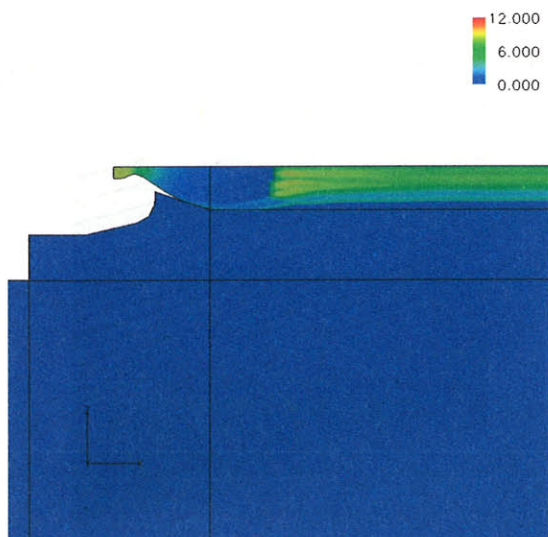


図2-10 適正膨張：15(s) 経過後の温度分布

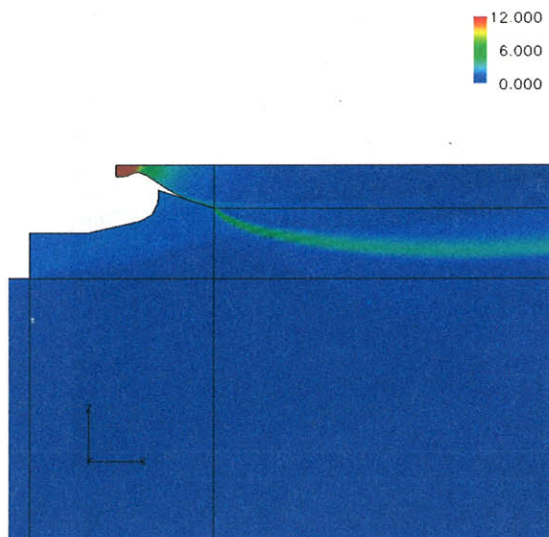


図2-13 不足膨張：50(s) 経過後の温度分布

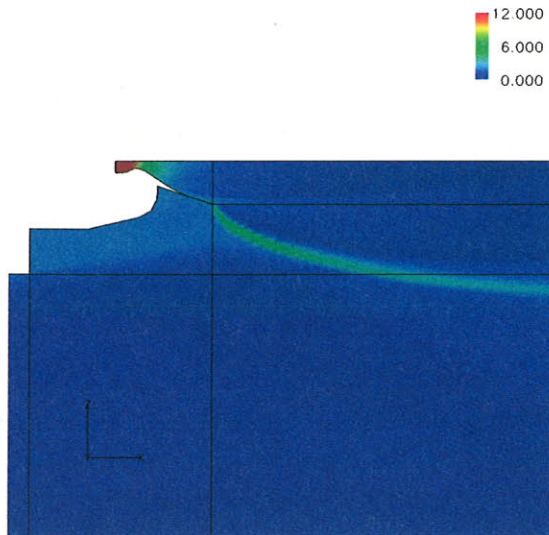


図 2-14 不足膨張：58(s) 経過後の温度分布

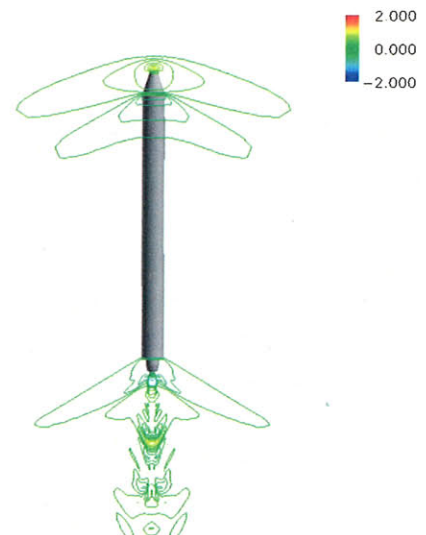
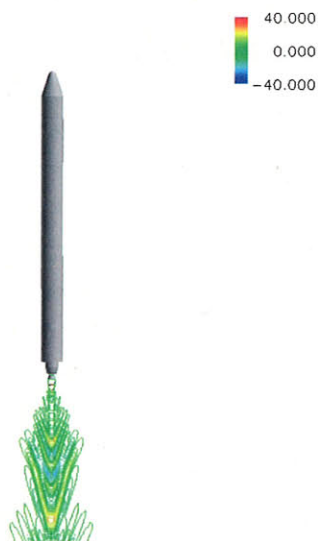
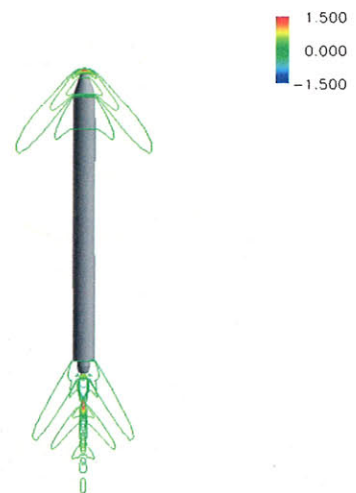
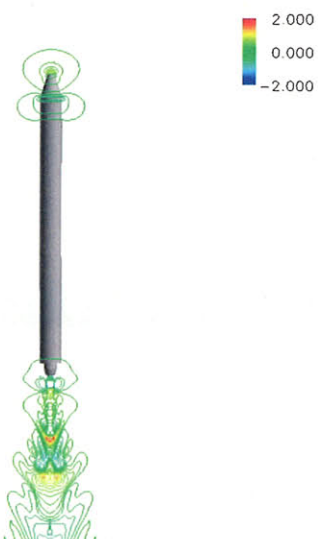
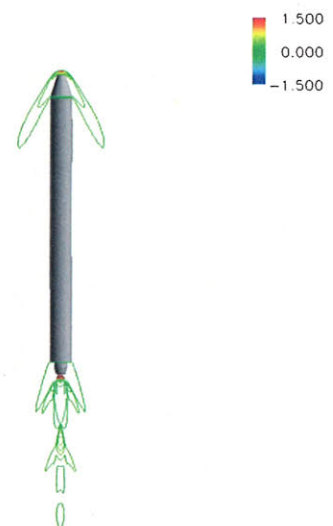
図 2-17 ロケット周りの Cp 分布(25(s), $M = 1.09$)

図 2-15 ロケット周りの Cp 分布(0(s))

図 2-18 ロケット周りの Cp 分布(37(s), $M = 1.77$)図 2-16 ロケット周りの Cp 分布(18(s), $M = 0.75$)図 2-19 ロケット周りの Cp 分布(50(s), $M = 2.63$)

3 解析の流れ

MUROSによる解析の流れを図3-1に示す。

- (1) 計算格子（グリッド）データを用意する
軸対称の倍精度Plot3Dフォーマットのファイルを用意する。ファイルについての詳細は4.1を参照のこと。
- (2) 境界条件ファイルを作成する
グリッドにおける物体面，特異線，境界等の面情報を設定する境界条件ファイルを作成する。ファイルについての詳細は4.2を参照のこと。
- (3) グリッド定義ファイルを作成する
“muros_mkgnl”を使ってグリッドデータと境界条件ファイルからグリッド定義ファイルを作成する。
- (4) 計算条件を設定する
“muros_makenl”でGUI画面を操作して計算条件を設定する。

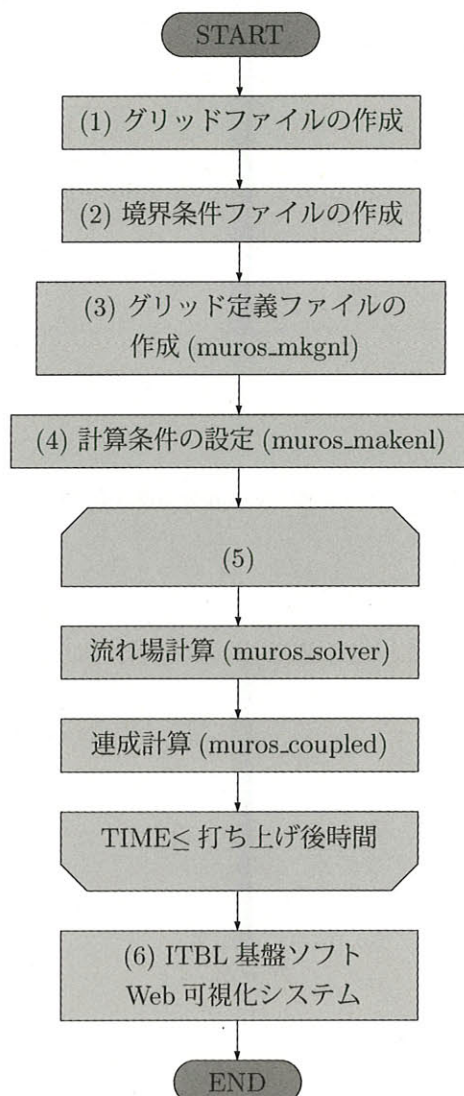


図3-1 解析の流れ

- (5) シミュレーション予定時間分の繰り返し計算を実行する

“muros_solver”で流れ場を計算し，“muros_coupled”で飛行連成計算をして高度・速度等を求める。

- (6) 可視化処理

ITBL基盤ソフト Web 可視化システムを使用して計算結果の可視化を行なう。

4 事前に用意するファイル

本ソフトウェアでユーザーが事前に用意する必要があるグリッドファイルおよび境界条件ファイルについて説明をする。これらを入力データとして，muros_mkgnlによりグリッド定義ファイルが作成される。

4.1 グリッドファイル (muros.grd)

グリッドファイルは基本的に流れ場の計算に使われる。

4.1.1 計算対象の形状

本来であれば，図4-1のような全体の形状データを与えて計算する必要があるが，本ソフトウェアでは，回転対称な形状を計算を対象としているために図4-2のようにJ方向に1セル（1周を120等分したうちの3度分）のみの形状を取り扱うこととし，これに対応したグリッドデータを作成する。ここで，X軸（回転対称軸），Y軸，Z軸は，図4-1，図4-2，図4-3，図4-4，図4-5のように機体軸方向をX軸，水平方向をY軸，鉛直方向をZ軸ととり，それぞれに対応するグリッドの番号付けをI, J, Kとする。これらは，この順番で右手系をなしている。従って，補助ロケットを含んだような非対称な形状の流れ場計算をすることはできないが，補助ロケットによる効果は，パラメータとして設定をするか，ロケット断面の面積比から推定して決めることで考慮することができるようになっている。



図4-1 ロケットの全体形状

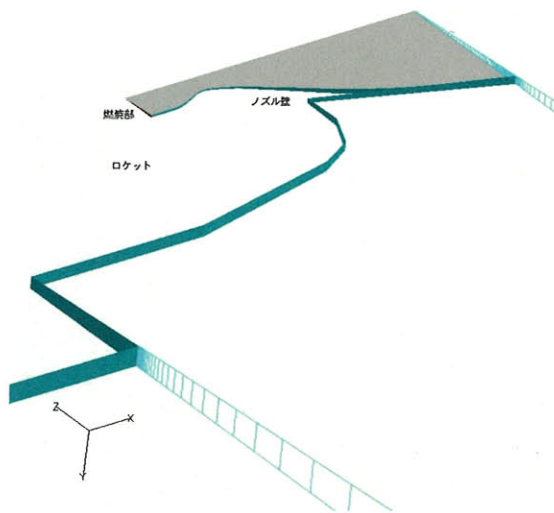


図 4-2 本ソフトウェアで使用するグリッドの例
(ノズル周辺の拡大図)

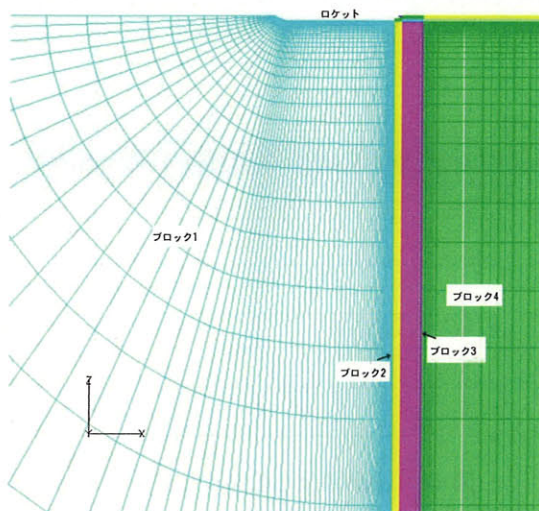


図 4-3 +J 方向から見た全体のグリッド

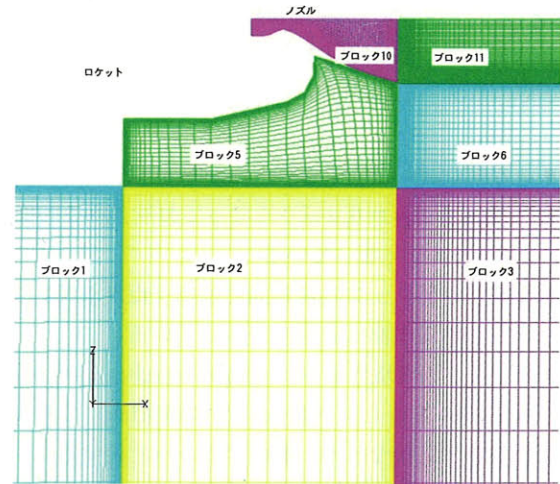


図 4-4 +J 方向から見たノズル周辺のグリッド

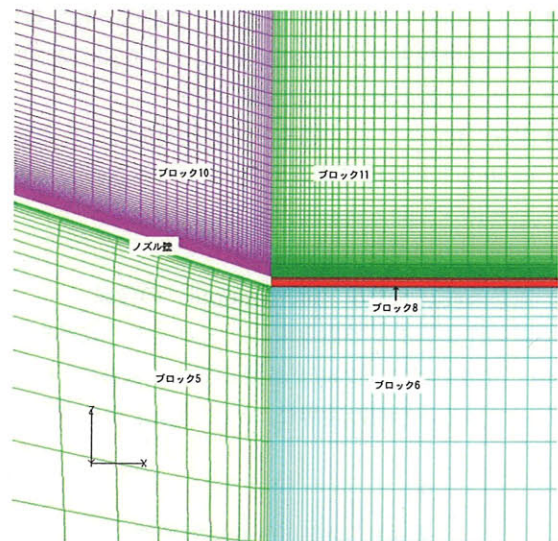


図 4-5 +J 方向から見たノズル出口のグリッド

4.1.2 ファイルフォーマット

計算格子の座標値が格納されているグリッドファイルは、一つまたは複数の3次元構造格子（以下ブロックと呼ぶ）から成り、3次元空間に座標系、配列の添字ともに右手系であるに注意しておく。

ファイル形式は倍精度のPlot3D形式である。ファイル読み込みのFORTRANプログラムは図4-6の通りである（ xg, yg, zg は倍精度実数、他は4バイト整数）。

```
read(11) ibn
read(11) (imaxb(n), jmaxb(n), kmaxb(n), &
          n=1, ibn)
do n = 1, ibn
  read(11) &
    ((xg(i,j,k,n), i=0, imaxb(n)), &
     j=0, jmaxb(n)), k=0, kmaxb(n)), &
    ((yg(i,j,k,n), i=0, imaxb(n)), &
     j=0, jmaxb(n)), k=0, kmaxb(n)), &
    ((zg(i,j,k,n), i=0, imaxb(n)), &
     j=0, jmaxb(n)), k=0, kmaxb(n))
end do
```

図 4-6 グリッドファイルの読み込みプログラム

4.1.3 グリッドファイルの制約

本ソフトウェアで使用するグリッドは以下の条件を満足している必要がある。

- J 方向が回転方向であり, $j_{\max b}(n)=1$ 。
- $j=0$ の面は $y=0, z \leq 0$ になっており, $j=1$ の面は $y < 0, z \leq 0$ となっている。
- 隣接するブロックの境界面では格子点が1対1に対応し, その座標は完全に一致している。
- ブロックの6境界面 ($i=0, i=i_{\max b}(n), j=0, j=j_{\max b}(n), k=0, k=k_{\max b}(n)$ の座標面) のそれぞれが物体と接するか, 他のブロックと接するか, あるいはどことも接していないかという属性は一つの面の中では種類に限られる。
- 燃烧している部分として設定できる境界面は1ヶ所だけである。
- ノズル内のグリッドは1ブロックで構成されており, $i=0$ が燃烧部分, $i=i_{\max b}(n)$ をノズル出口とする。
- ブロック数は最大で100個である。
- 現在, 1プロセス (1CPU) で計算可能なセルの総数は50万セル程度であるため, 1ブロックの大きさもこれ以下に抑える必要がある。

4.2 境界条件ファイル (mueros.input) の作成

境界条件ファイルで指定することができる境界条件を表4-1に示す。ブロック同士が接している場合や, 軸対象になっている J 方向の境界については指定する必要はない。

表 4-1 設定可能な境界条件

属 性	境界条件 ファイル での表現	説 明
物体面	wall	対象物体に接している部分
特異線	pole	境界面が一本の線に集中する場合
外部境界	outside	外側の境界のうち流出境界以外の部分
流出境界	frow	流れ方向の一番外側にある面
燃烧	blowout	ノズル内で燃烧が発生している部分 (imin でのみ選択可能)

境界条件ファイルの書式は以下の通りである。

ブロック番号 境界面 境界条件

ブロック番号には, ブロック番号がそのまま入り, 境界面には i_{\max} , i_{\min} , j_{\max} , j_{\min} , k_{\max} , k_{\min} のいずれかが入る。境界条件には, 先に示した境界条件ファイ

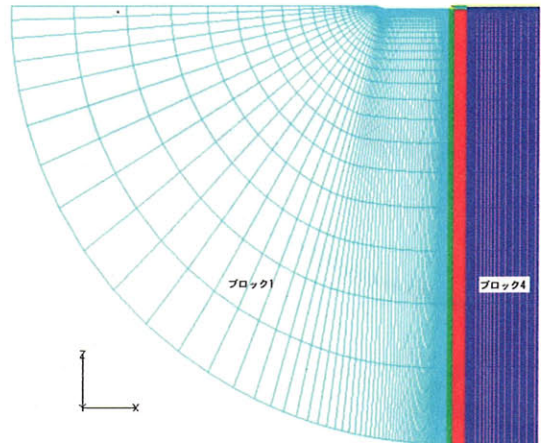


図 4-7 全体のグリッドファイル

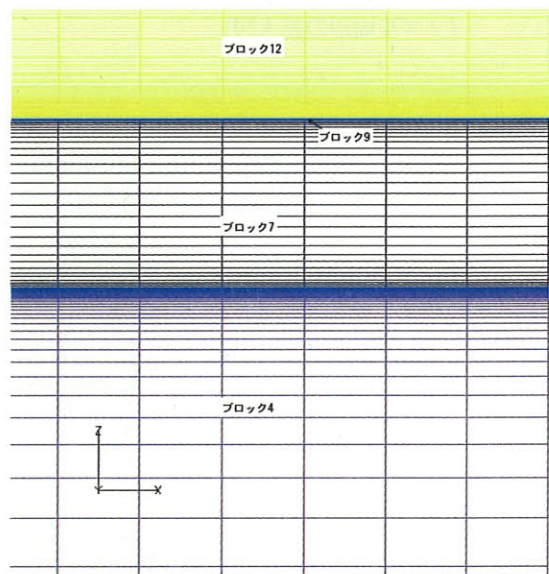


図 4-8 流出部分を拡大したグリッド

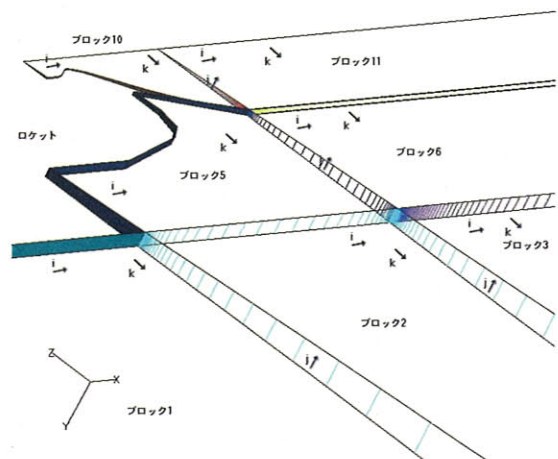


図 4-9 ノズル周辺のグリッド

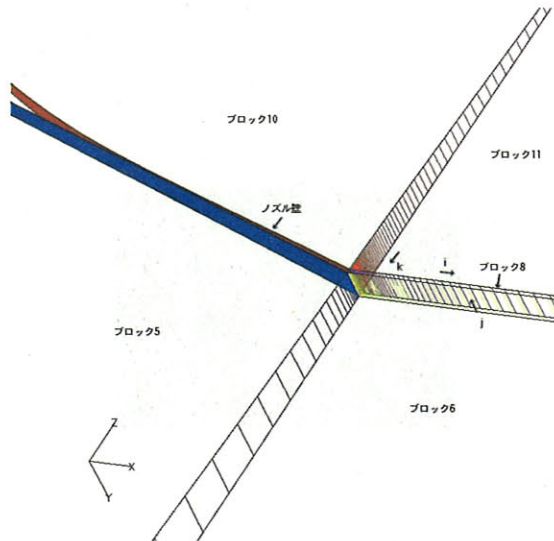


図 4-10 ノズル出口付近を拡大したグリッド

```

1 imin pole
1 kmin wall
1 kmax outside

2 kmax outside

3 kmax outside

4 imax flow
4 kmax outside

5 imin wall
5 kmin wall

7 imax flow

8 imin wall

9 imax flow

10 imin blowout
10 kmin pole
10 kmax wall

11 kmin pole

12 kmin pole
12 imax flow
end

```

図 4-11 境界条件ファイル

ルでの表現が入る。最後に“end”を付ける。

例題のグリッドの詳細を図示する。図4-7の左側が流入側で右側が流出側である。図4-8はノズル後方の流出部分を拡大したものである。図4-9はノズル周辺のグリッドを、図4-10はノズル出口を拡大してノズル壁に接しているブロック8を示したものである。

例題の境界条件ファイル (muros.input) は図4-11のようになっている。

5 ジョブの実行方法

ジョブの実行は ITBL 基盤ソフトウェアに実装されている “Task Mapping Editor” (TME) を使って行なう。TME はアイコン (TME アイコン) の形式で表示されたプログラムとデータをマウスを用いて結び合わせる事により、一連の処理の流れ (フロー) を定義するための機能と、作成したフローを実行する機能によって構成される、フローの定義・実行を行なうためのシステムである。

以下、例題を例にして TME を利用した実行手順を説明する。

計算の準備として、例題のデータファイルを圧縮した tar ファイル (muros.tar) をホームディレクトリにアップロードしておく。ファイルのダウンロード・アップロードについては、ITBL 基盤ソフトのキャビネット機能を使用して行なうことができる。具体的な方法は「ITBL 基盤ソフトユーザーマニュアル共通画面編」の 2.4 を参照のこと。

次に、計算処理の流れが定義されている TME アイコンの参照を行なう。この作業は最初に一度行なうだけでよい。参照した TME アイコンを実行すると計算条件等の設定画面が起動し、設定終了後に計算が実行される。

5.1 ジョブの実行手順

(1) 最初にデータファイルをホームディレクトリに展開する。

ここでは “ITBL” の “chofu.java” をクリックし、“secure3-s1” を使用する計算機として選択する。データファイルを圧縮した tar ファイル (muros.tar) をターミナル上で展開する。ターミナルを起動する “Terminal” は “Programing tools” の下にあるので、“Programing tools” をクリックする。

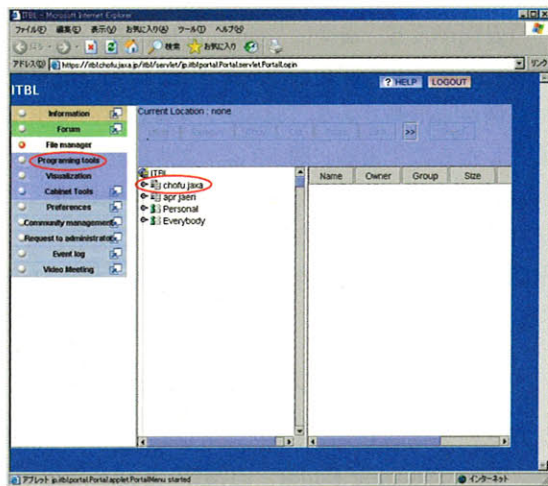


図 5-1 ITBL 基盤ソフト起動時の画面例

- (2) 計算機を選択すると“secure3-s1”のホームディレクトリまで展開される。“Terminal”は右側に隠れているので、“>>”をクリックして右に移動する。

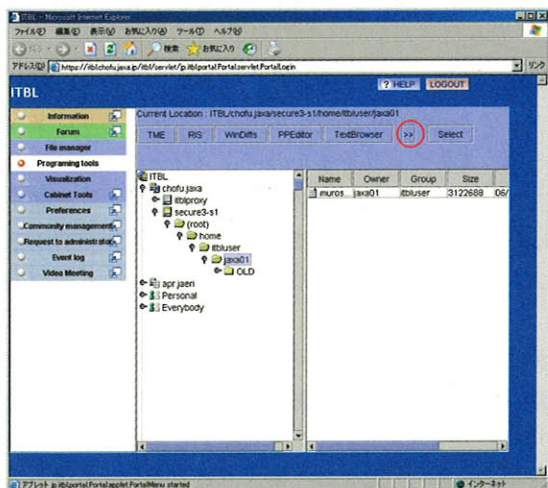


図 5-2 ホームディレクトリまで展開された画面例

- (3) “Terminal”が現れたらクリックする。

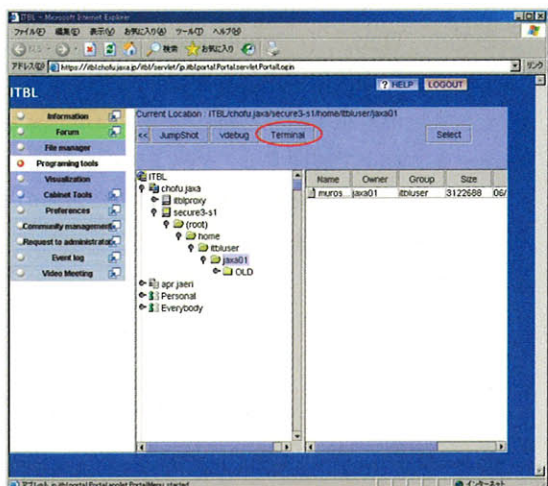


図 5-3 “Terminal”が表示されている画面例

- (4) ターミナルが起動したら“muros.tar”を展開する。展開終了後、“Quit”をクリックしてターミナルを終了する。

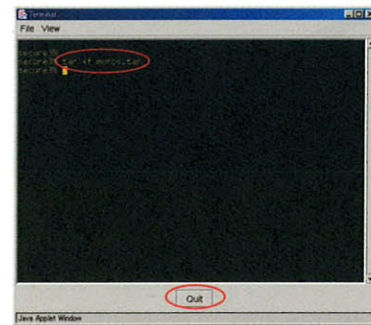


図 5-4 ターミナル画面例

- (5) ファイルが展開されているかを確認する。ホームディレクトリに“muros”というディレクトリが、その下に“grid”と“nl”という2つのディレクトリが作成される。“grid”の中に、“muros.grd”と“muros.input”の2つのファイルが作成されていることを確認する。

次に“TME”を起動する。“TME”が左側に隠れているので、“<<”をクリックして左に移動する。

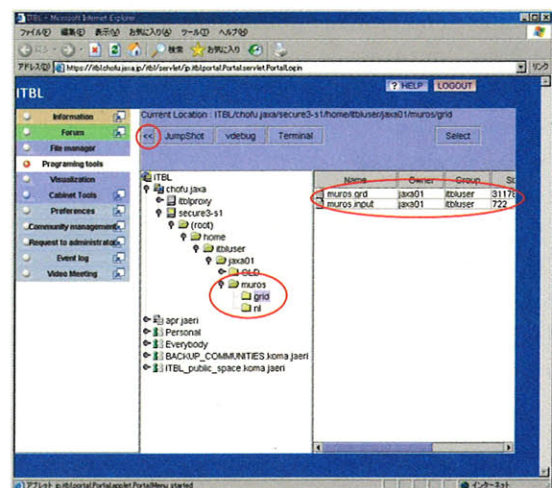


図 5-5 展開されたファイルの確認画面例

(6) “TME” が現れたらクリックする。

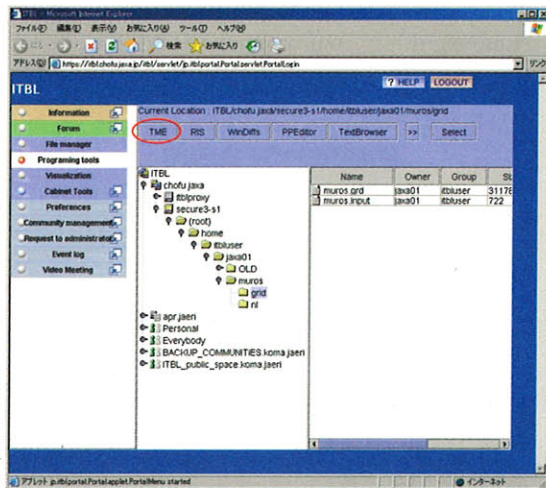


図 5-6 “TME” が表示されている画面例

(7) 新しく “Workspace List” が表示された。

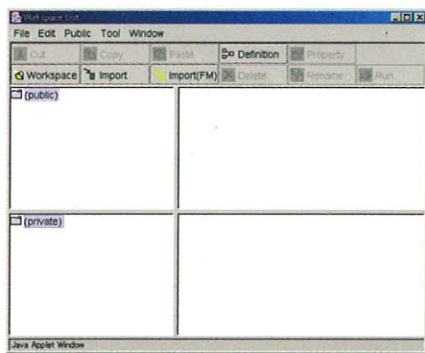


図 5-7 “Programing tools - TME” 選択時の画面例

(8) 公開されている TME アイコンの参照を行なう。
“Public-Reference” を選択する。TME アイコンの参照が終了しているときは “public” をダブルクリックして (11) へ進む。

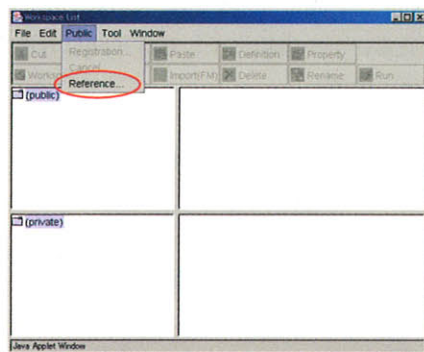


図 5-8 “Workspace List” の画面例

(9) TME アイコンを公開している人の “User ID” を入力する画面が起動する。

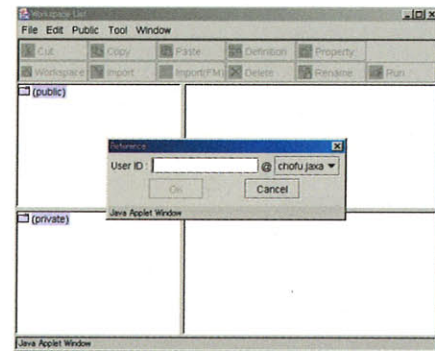


図 5-9 “User ID” の入力画面例 (1)

(10) “User ID” に “0030102Z00001002” を入力する。右側の “@” 以降には “chofu.java” を設定し, “OK” をクリックする。

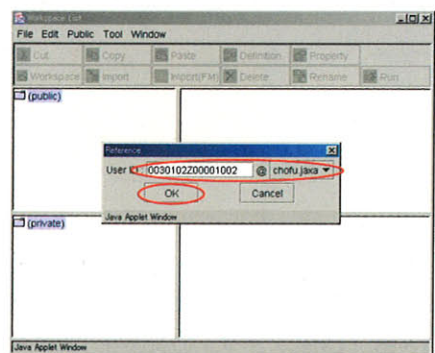


図 5-10 “User ID” の入力画面例 (2)

(11) “public” の “0030102Z00001002@chofu.java” をダブルクリックする。

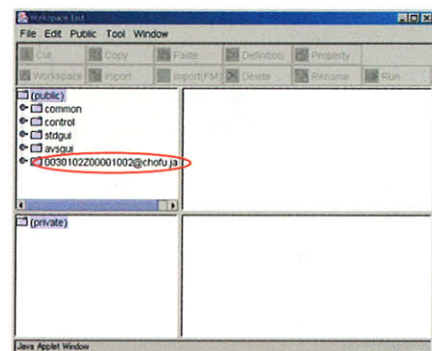


図 5-11 “public” に取り込みが完了した画面例

- (12) “0030102Z00001002@chofu.java” の下の TME アイコングループ名 “muros” をクリックする。

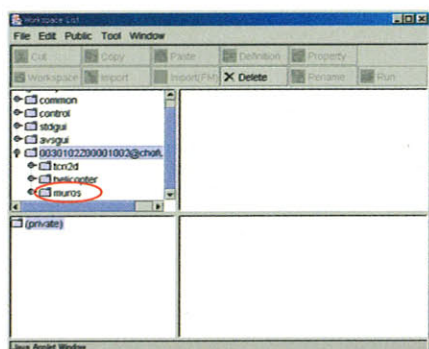


図 5-12 TME アイコングループの参照画面例

- (13) 公開されている TME アイコンが表示される。これで TME アイコンの参照は完了した。

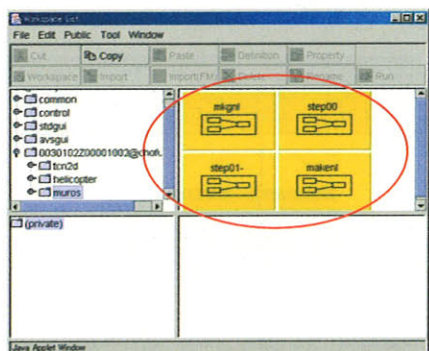


図 5-13 TME アイコンの参照完了画面例

- (14) ブロック間の接続関係を示すグリッド定義ファイルを作成する。“mkgnl”を選択し“Run”をクリックする。

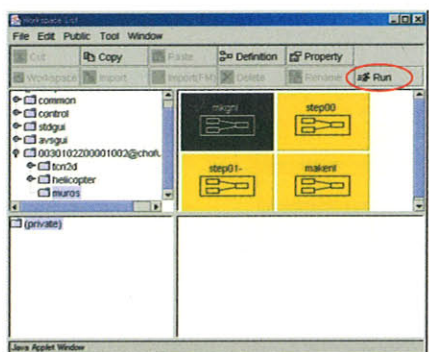


図 5-14 “mkgnl” の起動操作画面例

- (15) ジョブは自動的に開始される。このプログラムは、ホームディレクトリの “muros/grid” の下の “muros.grd” と “muros.input” の2つを入力ファイルとしている。

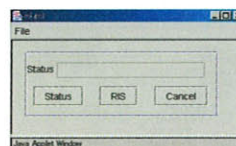


図 5-15 “mkgnl” の画面例

画面に表示されている4つボタン等は、今後、全ての GUI 画面に含まれているので、ここでその意味を簡単に説明をする。

- Status：ジョブの実行状態を示している
 - Running：実行中
 - Normal End：正常終了
 - Abnormal End：異常終了
 - Canceled：強制終了
 - Waiting：実行待ち
 - Manually Waiting：利用者による実行開始指示待ち
 ただし、変数の設定を行なっている間も、Running と表示されることに注意。
- Status ボタン：プログラム構成定義画面中でのジョブ実行状態確認システム起動ボタン
- RIS ボタン：計算機やネットワーク情報の表示システムの起動ボタン
- Cancel ボタン：ジョブの強制終了ボタン

- (16) “Status” が “Normal End” と表示されれば正常終了したことを示す。これでグリッド定義ファイルの作成は完了した。“File-Close” で GUI 画面を終了する。(異常終了や強制終了した時も同じ方法で GUI 画面を終了する)

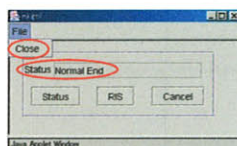


図 5-16 “mkgnl” の正常終了画面例

- (17) 計算条件ファイルを作成する。“makenl” を選択し
“Run” をクリックする。

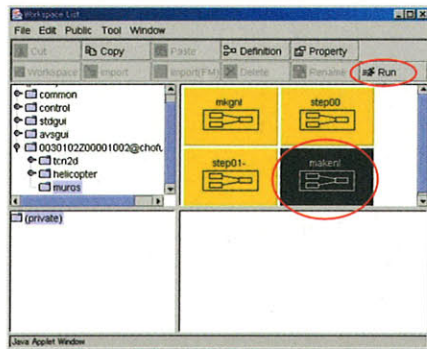


図 5-17 “makenl” の起動操作画面例

- (18) 計算条件等の入力用画面が起動する。以下、入力する変数について、画面を 2 つに分けて説明する。各パラメータの入力・確認終了後，“Set” ボタンをクリックすることで変数の値として確定し、全ての変数が確定した時点で、ジョブはスタートする。

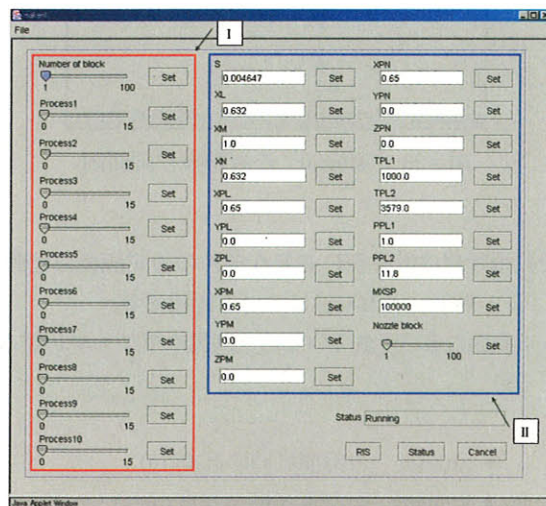


図 5-18 “makenl” の GUI 画面例

I の部分で入力する変数について

例題の場合、以下のように設定をする。(設定を変更する場合は、muros_solver のパラメータを書き換え、再コンパイルすることが必要になる。)

- Number of Block: グリッドの総ブロック数 (例題では 12)
- Process: 1 プロセスあたりに割り付けるブロックの数
 - ー Process1: 例題では 1 番目のプロセスに 1 ~ 4 のブロックを割り当てるので 4
 - ー Process2: 例題では 2 番目のプロセスに 5 ~

9 のブロックを割り当てるので 5

ー Process3: 例題では 3 番目のプロセスに 10 のブロックを割り当てるので 1

ー Process4: 例題では 4 番目のプロセスに 11, 12 のブロックを割り当てるので 2

ー Process5 ~: 例題ではプロセスを割り当てていないので 0 のまま

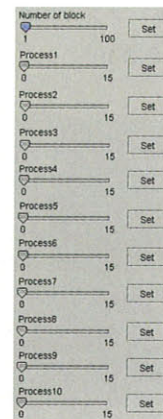


図 5-19 計算条件等の入力画面 (I)

II の部分で入力する変数について

(画面に表示されている値が例題のデフォルト値である)

- S: 計算対象 (ロケット) の長さを 1 としたときの計算対象の断面積
- XL, XM, XN: 計算対象の長さを 1 としたときの各方向のモーメントを計算するための基準長さ
 - ー XL: ローリングモーメント
 - ー XM: ピッチングモーメント
 - ー XN: ヨーイングモーメント
- XPL, YPL, ZPL: ローリングモーメント計算時の基準点の座標
 - ー XPL: X 座標
 - ー YPL: Y 座標
 - ー ZPL: Z 座標
- XPM, YPM, ZPM: ピッチングモーメント計算時の基準点の座標
 - ー XPM: X 座標
 - ー YPM: Y 座標
 - ー ZPM: Z 座標
- XPN, YPN, ZPN: ヨーイングモーメント計算時の基準点の座標
 - ー XPN: X 座標
 - ー YPN: Y 座標
 - ー ZPN: Z 座標

- TPL1：計算開始時の燃焼部の温度(K)
- TPL2：計算開始からイタレイション 1000 回後の燃焼部の温度(K)
- PPL1：計算開始時の燃焼部の圧力(MPa)
- PPL2：計算開始からイタレイション 1000 回後の燃焼部の圧力(MPa)
- MXSP：計算 1 ジョブあたりのイタレイション回数
- Nozzle block：ノズル内のグリッドのブロック番号（例題では 10）



図 5-20 計算条件等の入力画面 (II)

- (19) 計算条件の設定が終了した時点での GUI 画面を以下に示す。画面例では“Status”が“Running”になっているが，“Set”ボタンをクリックして変数の値として確定していないので、ジョブはまだ開始されていない。



図 5-21 計算条件の設定が終了した“maken1”の GUI 画面例

- (20) “Status”が“Normal End”と表示されれば正常終了したことを示す。これで計算条件設定ファイルの作成は完了した。“File-Close”で GUI 画面を終了する。（異常終了や強制終了した時も、同じ方法で GUI 画面を終了する）

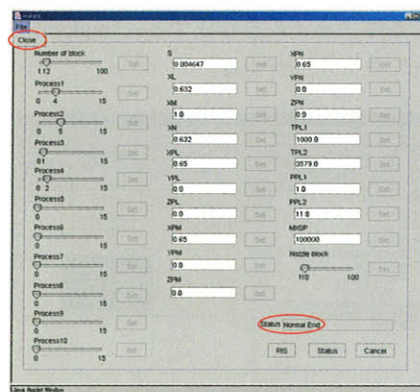


図 5-22 “maken1”の正常終了画面例

- (21) 計算を行なう。最初の計算には“step00”を使用する。“step00”を選択し“Run”をクリックする。

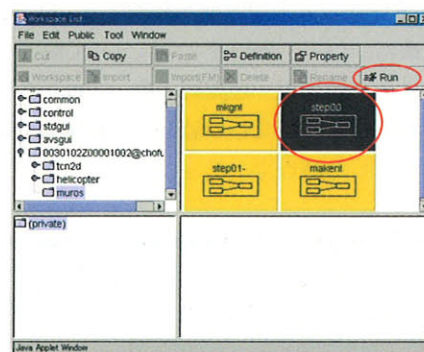


図 5-23 “step00”の起動操作画面例

- (22) 飛行連成計算等に必要の条件の設定画面が起動する。以下、入力項目について説明する。
（画面に表示されている値が例題のデフォルト値である）

- Altitude：計算開始時の高度(m)
- Velocity：計算開始時の速度(m/s)
- Time：計算開始時の時刻(s)
- Nozzle wall temperature：燃焼部分の温度(K)
- Weight：打ち上げ時の総重量(kg)
- Mass flow rate：質量流量の合計値(kg/s)※
- Booster thrust：メインエンジン以外の固体補助ロケットからの推力合計値(N)
- Cross-sectional area：メインエンジンと固体補助ロケットの断面積の合計(m²)
- Normal length：計算対象の全長(m)
- Set Job Number：ログファイル，可視化用ファイル等を退避する際に，ファイル名の頭に付ける文字列（重複すると上書きされてしまうので注意すること）

※質量流量は、メインエンジン、固体補助ロケット別々に“推進剤重量÷燃焼時間”で求め、合計したものである。

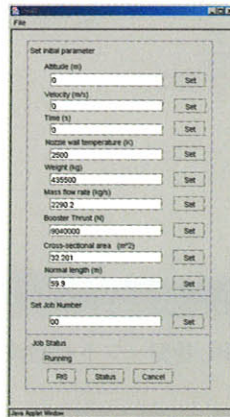


図 5-24 “step00” の GUI 画面例

- (23) “Status” が “Normal End” と表示されれば正常終了したことを示す。これで最初の計算は完了した。“File-Close” で GUI 画面を終了する。(異常終了や強制終了した時も、同じ方法で GUI 画面を終了する)

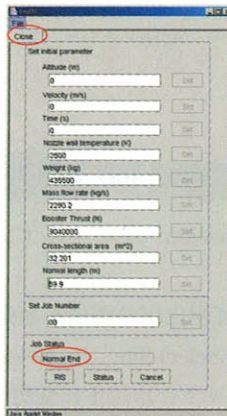


図 5-25 “step00” の正常終了画面例

- (24) 次に、2 番目以降の計算を行なう。“step01-”を選択し“Run”をクリックする。

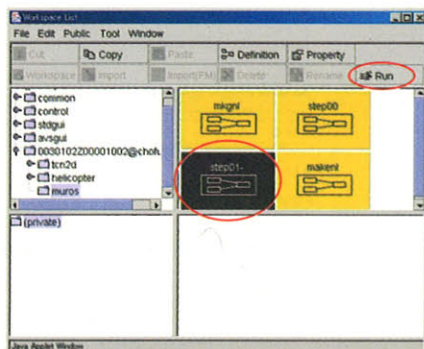


図 5-26 “step01-” の起動操作画面例

- (25) ログファイル、可視化用ファイル等を退避する際に、ファイル名の頭に付ける文字列を設定する画面が起動する。文字列が重複しないように注意する。(重複するとファイルは上書きされる)

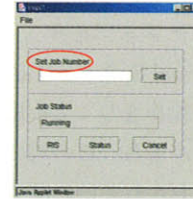


図 5-27 “step01-” の GUI 画面例

- (26) “Status” が “Normal End” と表示されれば正常終了したことを示す。これで1ステップの計算が完了した。“File-Close” で GUI 画面を終了する。(異常終了や強制終了した時も、同じ方法で GUI 画面を終了する)

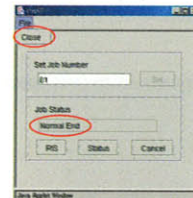


図 5-28 “step01-” の正常終了画面例

- (27) ログファイル等が出力されていることを確認する。計算のログファイル等は “Working directory” (ここではホームディレクトリの mueros/) に出力される。計算を続けるときは、(24) ~ (27) の操作を繰り返す。

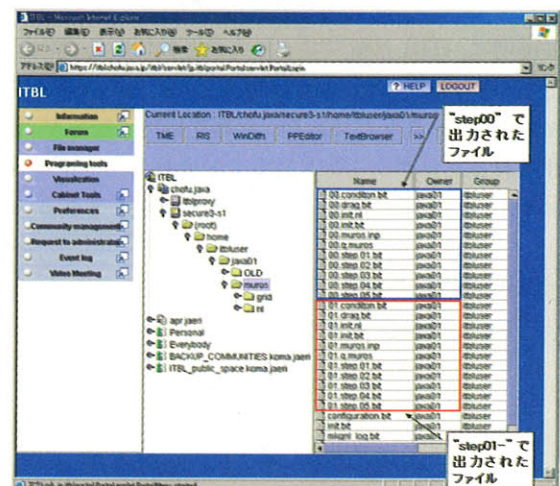


図 5-29 ファイル出力の確認画面例

5.2 ジョブ実行時の注意

“Programing Tools” をクリックし、“TME” をクリックした時に表示される “Workspace List” ウィンドウを閉じると、実行中、待機中に関係なく全てのジョブは終了する。

ターミナルでパッチジョブをキューから削除すると、TME 上では “Abnormal End” となる。

ITBL基盤ソフトの操作をしても反応が鈍くフリーズしたように感じることもある。この場合、Java コンソールを表示してログが出力されていれば実行中であると判断できるが、出力されていない場合はフリーズしたと考えられる。Java コンソールは、タスクバーのJavaのアイコンの上で右クリックをし、“コンソールを表示” を選択することで表示することができる。

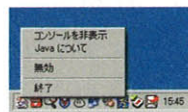


図 5-30 Java コンソールの表示方法



図 5-31 表示されたJava コンソール

ITBL基盤ソフトの反応が鈍くなった場合は、ブラウザを立ち上げなおすことを勧める。

6 可視化の方法

可視化は、ITBL基盤ソフトに実装されている “Web可視化” を使って行なう。これは可視化ソフトウェア AVS/Express をベースとしており、可視化処理手順を V 言語と呼ばれるプログラミング言語で記述したファイル (V ファイル) の指示に従って、可視化処理がなされる。

6.1 Web 可視化の方法

(1) “Visualization” をクリックする。

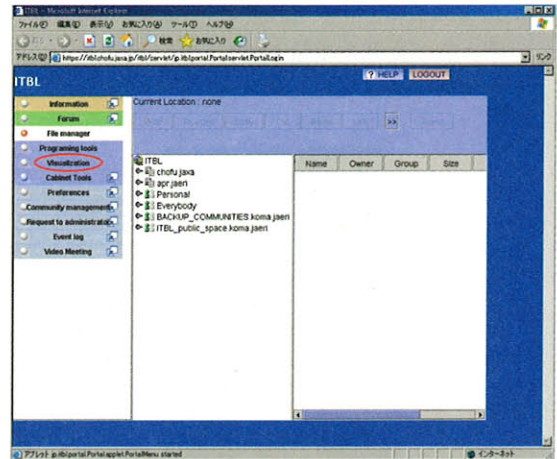


図 6-1 ITBL 基盤ソフト起動時の画面例

(2) “AVS Function” をクリックする。

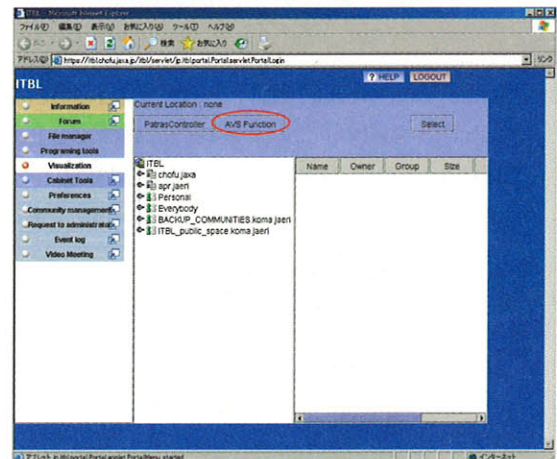


図 6-2 “Visualization” をクリックした後の画面例

(3) 新しく Web 可視化用の画面が起動する。“Change Location” の “Select Site” と “Select Host” を V ファイルのあるサイト、ホストに変更する。

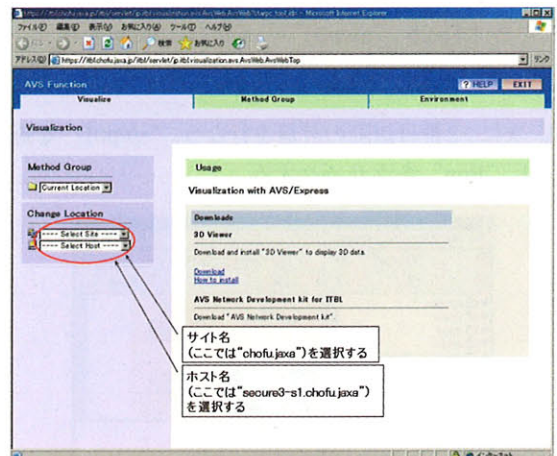
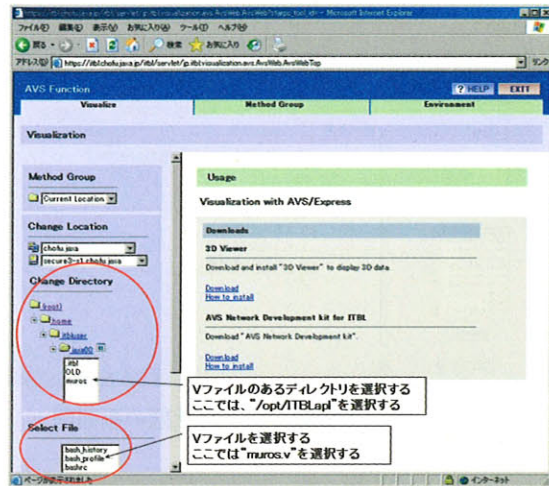
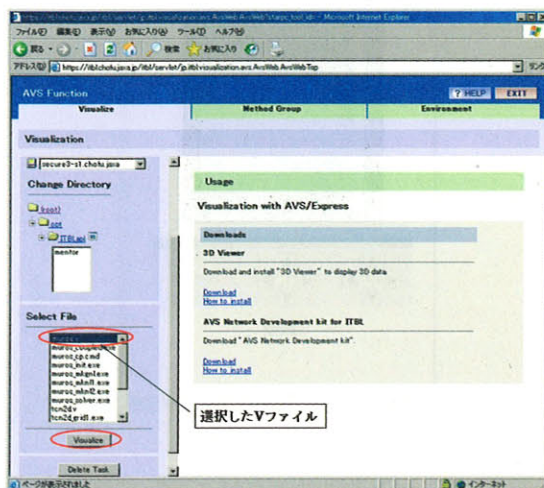


図 6-3 Web 可視化用の画面例

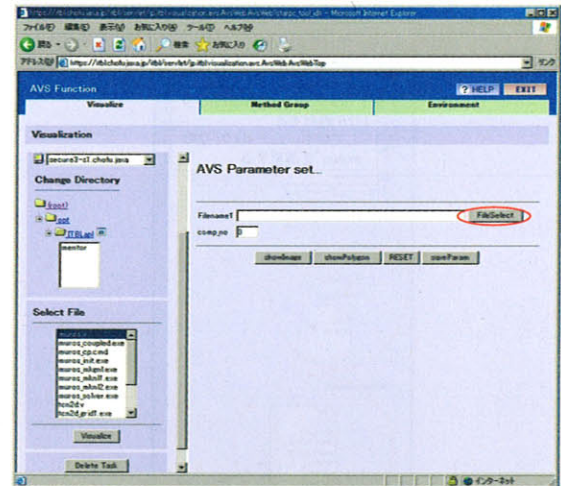
- (4) “Change Directory” で V ファイルのあるディレクトリに変更し, “Select File” で V ファイルを選択する。



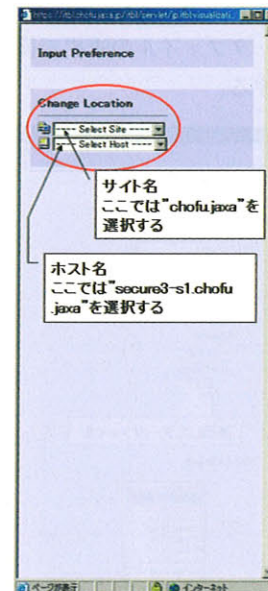
- (5) 読み込む V ファイルを選択後, “Visualize” をクリックする



- (6) V ファイルが実行され, ブラウザの右側が “AVS Parameter set” の画面に遷移する。 “File Select” をクリックする。



- (7) 新しく “Input Preference” という画面が立ち上がる。 “Change Location” の部分で, 可視化用のデータファイルがあるサイトとホストを選択する。



- (8) 可視化用のデータファイルがあるサイトとホストを選択後、“Change Directory”でデータファイルのあるディレクトリを選択し、“Select Input”でデータファイルを選択する。

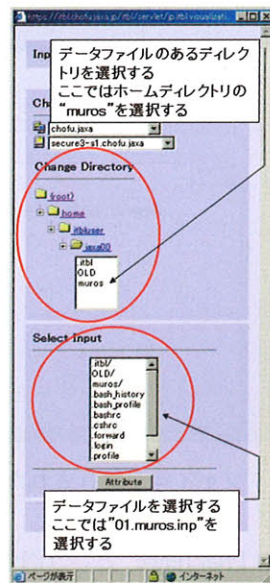


図 6-8 サイト・ホスト選択後の画面例

- (9) 可視化用データファイルの選択が終了したら“Set”をクリックする。

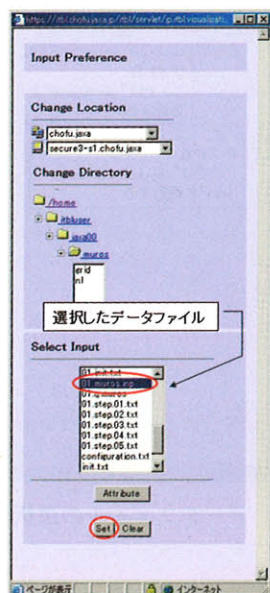


図 6-9 データファイルの選択画面例

- (10) “Filename1”に選択したファイルのロケーションが入力される。その他のオプションの設定をし、“ShowImage”をクリックすると“Image Viewer”が起動する

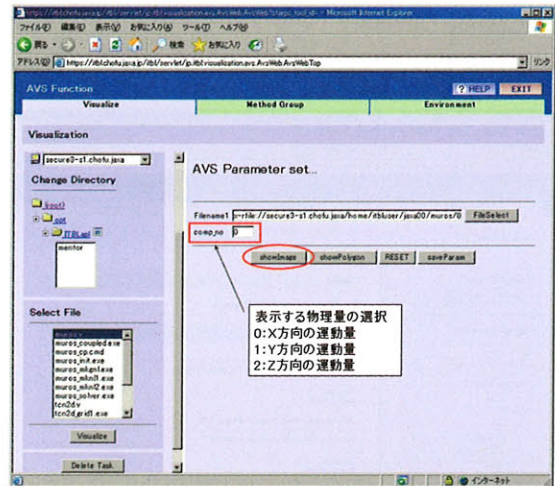


図 6-10 可視化準備の整った状態の画面例

- (11) データファイルを Web 可視化で可視化した結果が表示される。

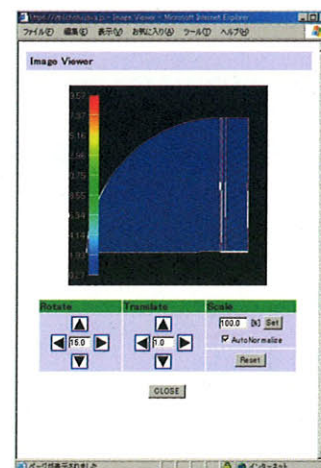


図 6-11 可視化例

※空間方向の格子が広い場合、Web 可視化システムを使って可視化をしても見にくい場合がある。この場合は、ファイルを手元にダウンロードして、AVS Express で可視化することを勧める。

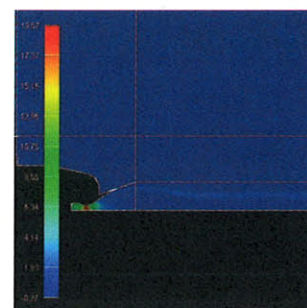


図 6-12 AVS/Express での可視化例

6.2 Web 可視化用 V ファイル

Web 可視化では、AVS/Express に ITBL 用の追加モジュールをインストールし可視化を行なっている。ここでは、全体の流れがわかりやすいように一般の AVS で使用するモジュールのネットワーク構成を示す。

図中の各モジュールの機能は以下の通り。

- Read UCD : UCD フォーマットのファイルを読み込む
- extract cell component : 複数の Cell Data から 1 つのコンポーネントを抽出する
- cell to node : Cell Data を Node Data に変換する
- contour : コンター図 (等値面) を生成する
- external edges : 非構造型データの外部境界線を表示する
- LegendVert : 表示データの縦長カラーレジェンドを生成する
- Uviewer3D : 表示オブジェクトを表示しビューワーウィンドウを作成する

ITBL 用のネットワーク構成では、GUI を作成するモジュールが追加される他、Read UCD が可視化用計算機以外の計算機にあるデータを読み込むことができるモジュールへの置き換え等がなされている。

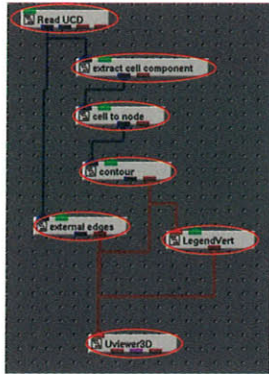


図 6-13 ネットワークモジュール例

7 流体解析コードの概要

7.1 流体解析コードの特徴

流体解析コードの特徴は以下の通りである。

- 計算格子として構造格子およびマルチブロック構造格子に対応している。
- 流体の支配方程式は 2 原子分子の理想気体 ($\gamma = 1.4$) のレイノルズ平均 Navier-Stokes 方程式である。
- 乱流モデルとして Baldwin-Lomax の壁乱流モデルを採用している。

- 有限体積法により離散化し、数値流束の計算には AUSMDV を利用している。
- MUSCL 法による高精度化を Chakravarthy-Osher の制限関数を導入することで TVD (Total Variation Deminishing) 化している。
- 時間積分は IAF (Implicit Approximate Factorization) による。
- 並列処理言語 XPFortran を利用して並列化している。

7.2 基礎方程式

基礎方程式である Navier-Stokes 方程式について簡単に記述する。一般座標系 (ξ, η, ζ) に関する Navier-Stokes 方程式は以下のように書ける。

$$\frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{G}}{\partial \zeta} = \text{Re}^{-1} \left(\frac{\partial \hat{E}_v}{\partial \xi} + \frac{\partial \hat{F}_v}{\partial \eta} + \frac{\partial \hat{G}_v}{\partial \zeta} \right) \quad (7-1)$$

$$\hat{Q} = J^{-1} \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ e \end{bmatrix} \quad (7-2)$$

$$\hat{E} = J^{-1} \begin{bmatrix} \rho U \\ \rho u U + \xi_x p \\ \rho v U + \xi_y p \\ \rho w U + \xi_z p \\ (e+p)U \end{bmatrix},$$

$$\hat{F} = J^{-1} \begin{bmatrix} \rho V \\ \rho u V + \eta_x p \\ \rho v V + \eta_y p \\ \rho w V + \eta_z p \\ (e+p)V \end{bmatrix},$$

$$\hat{G} = J^{-1} \begin{bmatrix} \rho W \\ \rho u W + \zeta_x p \\ \rho v W + \zeta_y p \\ \rho w W + \zeta_z p \\ (e+p)W \end{bmatrix},$$

$$\hat{E}_v = J^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \xi_x \tau_{xx} + \xi_y \tau_{xy} + \xi_z \tau_{xz} \\ \xi_x \tau_{yx} + \xi_y \tau_{yy} + \xi_z \tau_{yz} \\ \xi_x \tau_{zx} + \xi_y \tau_{zy} + \xi_z \tau_{zz} \\ \xi_x \beta_x + \xi_y \beta_y + \xi_z \beta_z \end{bmatrix},$$

$$\hat{F}_v = J^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \eta_x \tau_{xx} + \eta_y \tau_{xy} + \eta_z \tau_{xz} \\ \eta_x \tau_{yx} + \eta_y \tau_{yy} + \eta_z \tau_{yz} \\ \eta_x \tau_{zx} + \eta_y \tau_{zy} + \eta_z \tau_{zz} \\ \eta_x \beta_x + \eta_y \beta_y + \eta_z \beta_z \end{bmatrix},$$

$$\hat{G}_v = J^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \zeta_x \tau_{xx} + \zeta_y \tau_{xy} + \zeta_z \tau_{xz} \\ \zeta_x \tau_{yx} + \zeta_y \tau_{yy} + \zeta_z \tau_{yz} \\ \zeta_x \tau_{zx} + \zeta_y \tau_{zy} + \zeta_z \tau_{zz} \\ \zeta_x \beta_x + \zeta_y \beta_y + \zeta_z \beta_z \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} U &= \xi_x u + \xi_y v + \xi_z w, \\ V &= \eta_x u + \eta_y v + \eta_z w, \\ W &= \zeta_x u + \zeta_y v + \zeta_z w, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{xx} &= \frac{2}{3} \mu (2u_x - v_y - w_z), \\ \tau_{yy} &= \frac{2}{3} \mu (-u_x + 2v_y - w_z), \\ \tau_{zz} &= \frac{2}{3} \mu (-u_x - v_y + 2w_z), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \tau_{yx} = \mu (u_y + v_x), \\ \tau_{yz} &= \tau_{zy} = \mu (v_z + w_y), \\ \tau_{zx} &= \tau_{xz} = \mu (w_x + u_z), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta_x &= \tau_{xx} u + \tau_{xy} v + \tau_{xz} w + \kappa T_x, \\ \beta_y &= \tau_{yx} u + \tau_{yy} v + \tau_{yz} w + \kappa T_y, \\ \beta_z &= \tau_{zx} u + \tau_{zy} v + \tau_{zz} w + \kappa T_z, \end{aligned}$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial x} & \frac{\partial \xi}{\partial y} & \frac{\partial \xi}{\partial z} \\ \frac{\partial \eta}{\partial x} & \frac{\partial \eta}{\partial y} & \frac{\partial \eta}{\partial z} \\ \frac{\partial \zeta}{\partial x} & \frac{\partial \zeta}{\partial y} & \frac{\partial \zeta}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_x & \xi_y & \xi_z \\ \eta_x & \eta_y & \eta_z \\ \zeta_x & \zeta_y & \zeta_z \end{bmatrix}$$

ここで、 \hat{Q} は保存量ベクトル、 \hat{E} , \hat{F} , \hat{G} は非粘性流束ベクトル、 \hat{E}_v , \hat{F}_v , \hat{G}_v は粘性流束ベクトル、 Re はレイノルズ数、 J は直交座標系 (x, y, z) から一般座標系 (ξ, η, ζ) への変換のヤコビ行列式 (ヤコビアン)、 ρ は密度、 u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の速度、 e は全エネルギー、 τ はストレステンソル、 $p = (\gamma - 1)(e - \frac{1}{2} \rho(u^2 + v^2 + w^2))$ は圧力、 γ は完全気体の比熱比 ($= 1.4$)、 μ は粘性係数で、Baldwin-Lomax 壁乱流モデルによる乱流粘性も加味している。 κ は熱伝導係数、 T_x, T_y, T_z はそれぞれ x, y, z 方向の温度勾配である。

7.3 境界条件

ブロックごとの境界条件は以下のように設定する。

- 物体面は滑りなし (速度 0) で、断熱条件を満たす。
- 流出境界条件は、速度勾配が 0 で、具体的には一つ内側の値を外挿している。
- 流出境界条件以外の外部境界では一様流条件 (速度が一様流速度) を満たす。
- ブロック間の境界では隣のブロックの値を代入。

7.4 アルゴリズム

本計算においては、流れ場は準定常的に時間発展すると考えて計算を進める。すなわち、各時刻毎に流れ場は

その時点での境界条件を満たす定常流と同じであると仮定する。ある時刻における流れ場の計算は、適当な物理量から出発し、Navier-Stokes 方程式に基づく対流項の数値流束と粘性項を計算し、近似因子分解法で時間積分することにより物理量を更新する。これを繰り返すことによって定常解を求める。残差 (保存量の変化量) が十分小さくなったところで定常解に収束したと判断し、計算を終了する。

計算格子は物体適合型で、物理座標は一般曲線座標で表わされる。空間はセルをコントロール・ボリュームとするセル中心型の有限体積法で離散化している。数値流束の計算には、安定性を重視して AUSMDV を用いる。粘性項は中心差分により計算する。

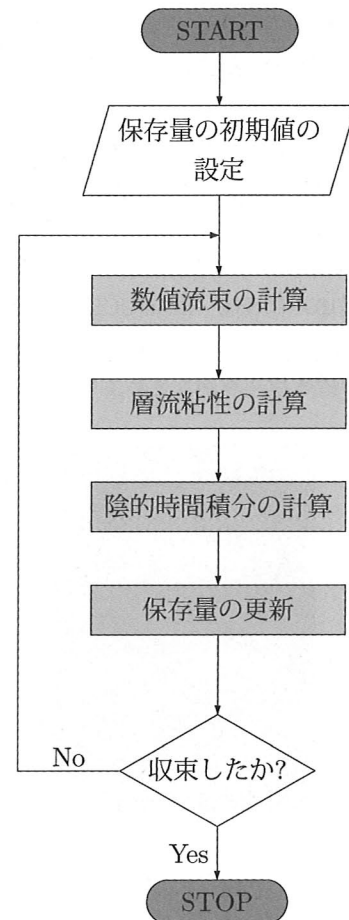


図 7-1 フローチャート

以下、流体の計算で重要と思われるアルゴリズムの詳細を説明する。

7.4.1 AUSMDV法による ξ 方向 1 次の対流項数値流束の計算

AUSMDV スキームを用いて ξ (プログラム中では I) 方向の対流項数値流束を計算している。AUSMDV スキー

ムのような FVS (Flux Vector Splitting) 系のスキームでは、直交座標系と同形で表現された流束に対してスキームを適用した後、一般曲線座標系の数値流束に変換することができる。任意のセルの面に垂直な単位面ベクトル成分を n_j で表し、この面ベクトルに垂直な 2 つの単位ベクトル成分を l_j, m_j とする。従って、ベクトル $\vec{l}, \vec{m}, \vec{n}$ は以下の性質をもつことに注意する。

$$\vec{n} \cdot \vec{l} = \vec{n} \cdot \vec{m} = \vec{l} \cdot \vec{m} = 0, \vec{n} \cdot \vec{n} = \vec{l} \cdot \vec{l} = \vec{m} \cdot \vec{m} = 1. \quad (7-2)$$

これらのベクトルを用いるとセル表面に対する垂直方向、接線方向速度成分 U, V, W は以下のように求まる。

$$\begin{aligned} U &= n_1 u + n_2 v + n_3 w, \\ V &= l_1 u + l_2 v + l_3 w, \\ W &= m_1 u + m_2 v + m_3 w. \end{aligned} \quad (7-3)$$

次に、セル表面での単位面積当りの流束 \hat{E}

$$\hat{E} = n_1 E + n_2 F + n_3 G = \begin{bmatrix} \rho U \\ \rho u U + n_1 p \\ \rho v U + n_2 p \\ \rho w U + n_3 p \\ (e + p) U \end{bmatrix} \quad (7-4)$$

に、次のような変換マトリックス T を左から掛けると

$$\begin{aligned} \bar{E} = T\hat{E} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n_1 & n_2 & n_3 & 0 \\ 0 & l_1 & l_2 & l_3 & 0 \\ 0 & m_1 & m_2 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho U \\ \rho u U + n_1 p \\ \rho v U + n_2 p \\ \rho w U + n_3 p \\ (e + p) U \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \rho U \\ \rho U^2 + p \\ \rho UV \\ \rho UW \\ (e + p) U \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \bar{f}_1 \\ \bar{f}_2 \\ \bar{f}_3 \\ \bar{f}_4 \\ \bar{f}_5 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7-5)$$

となる。FVS 系のスキームでは単純に流束を特性方向に従って分離するので

$$\bar{E} = \bar{E}^+ + \bar{E}^- = T(\hat{E}^+ + \hat{E}^-) = T\hat{E}^+ + T\hat{E}^- \quad (7-6)$$

となり、逆行列 T^{-1} を用いれば

$$\hat{E} = T^{-1}\bar{E} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n_1 & l_1 & m_1 & 0 \\ 0 & n_2 & l_2 & m_2 & 0 \\ 0 & n_3 & l_3 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{f}_1 \\ \bar{f}_2 \\ \bar{f}_3 \\ \bar{f}_4 \\ \bar{f}_5 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \bar{f}_1 \\ n_1 \bar{f}_2 + l_1 \bar{f}_3 + m_1 \bar{f}_4 \\ n_2 \bar{f}_2 + l_2 \bar{f}_3 + m_2 \bar{f}_4 \\ n_3 \bar{f}_2 + l_3 \bar{f}_3 + m_3 \bar{f}_4 \\ \bar{f}_5 \end{bmatrix} \quad (7-7)$$

となる。すなわち直交座標系の流束と同形の \bar{E} に対してスキームを適用すればよい。

AUSMDV スキームの場合、数値流束 \bar{E}_{AUSMDV} は以下のように表される。

$$\begin{aligned} \bar{E}_{\text{AUSMDV}} &= \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \rho_L U_L^+ + \rho_R U_R^- \\ s f_2^{\text{AUSMV}} + (1-s) f_2^{\text{AUSMD}} + p_L^+ + p_R^- \\ \frac{f_1 + |f_1|}{2} V_L + \frac{f_1 - |f_1|}{2} V_R \\ \frac{f_1 + |f_1|}{2} W_L + \frac{f_1 - |f_1|}{2} W_R \\ \frac{f_1 + |f_1|}{2} H_L + \frac{f_1 - |f_1|}{2} H_R \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7-8)$$

ここで、

$$H = \frac{e + p}{\rho}, \quad (7-9)$$

$$f_2^{\text{AUSMV}} = \rho_L U_L^+ U_L + \rho_R U_R^- U_R, \quad (7-10)$$

$$f_2^{\text{AUSMD}} = \frac{f_1 + |f_1|}{2} U_L + \frac{f_1 - |f_1|}{2} U_R, \quad (7-11)$$

$$s = \frac{1}{2} \left(1 + \min \left(1, K \frac{|p_R - p_L|}{\min(p_L, p_R)} \right) \right), \quad (7-12)$$

$$U_L^+ = \begin{cases} \alpha_L \left\{ \frac{(U_L + C_m)^2}{4C_m} - \frac{U_L + |U_L|}{2} \right\} \\ \quad + \frac{U_L + |U_L|}{2}, & \frac{|U_L|}{C_m} \leq 1 \\ \frac{U_L + |U_L|}{2}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7-13)$$

$$U_R^- = \begin{cases} \alpha_R \left\{ -\frac{(U_R - C_m)^2}{4C_m} - \frac{U_R - |U_R|}{2} \right\} \\ \quad + \frac{U_R - |U_R|}{2}, & \frac{|U_R|}{C_m} \leq 1 \\ \frac{U_R - |U_R|}{2}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7-14)$$

$$\alpha_L = \frac{2\left(\frac{p}{\rho}\right)_L}{\left(\frac{p}{\rho}\right)_L + \left(\frac{p}{\rho}\right)_R}, \quad (7-15)$$

$$\alpha_R = \frac{2\left(\frac{p}{\rho}\right)_R}{\left(\frac{p}{\rho}\right)_L + \left(\frac{p}{\rho}\right)_R},$$

$$p_L^+ = \begin{cases} \frac{\rho_L}{4} \left(\frac{U_L}{C_m} + 1 \right)^2 \left(2 - \frac{U_L}{C_m} \right), & \frac{|U_L|}{C_m} \leq 1 \\ \rho_L \frac{U_L + |U_L|}{2U_L}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7-16)$$

$$p_R^- = \begin{cases} \frac{\rho_R}{4} \left(\frac{U_R}{C_m} - 1 \right)^2 \left(2 + \frac{U_R}{C_m} \right), & \frac{|U_R|}{C_m} \leq 1 \\ \rho_R \frac{U_R - |U_R|}{2U_R}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7-17)$$

$$C_m = \max(C_L, C_R) \quad (7-18)$$

である。 K は経験的パラメータであり、通常 $K=10$ としている。このようにして作られた数値流束に T^{-1} を掛けることによって最終的なセル表面での数値流束が求まり、次式のように垂直方向の面ベクトル成分のみで表される。

$$\hat{E} = \begin{bmatrix} f_1 \\ n_1 f_2 + l_1 f_3 + m_1 f_4 \\ n_2 f_2 + l_2 f_3 + m_2 f_4 \\ n_3 f_2 + l_3 f_3 + m_3 f_4 \\ f_5 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} f_1 \\ n_1 f_2 + \frac{f_1 + |f_1|}{2} (u_L - n_1 U_L) \\ \quad + \frac{f_1 - |f_1|}{2} (u_R - n_1 U_R) \\ n_2 f_2 + \frac{f_1 + |f_1|}{2} (v_L - n_2 V_L) \\ \quad + \frac{f_1 - |f_1|}{2} (v_R - n_2 V_R) \\ n_3 f_2 + \frac{f_1 + |f_1|}{2} (w_L - n_3 W_L) \\ \quad + \frac{f_1 - |f_1|}{2} (w_R - n_3 W_R) \\ f_5 \end{bmatrix} \quad (7-19)$$

実際のサブルーチンでは、最後に配列RHSに流束の差を足しこんでいる。

$$\text{RHS} = \text{RHS} + \left(\hat{E}_{\text{AUSMV}} \right)_{i+\frac{1}{2}} - \left(\hat{E}_{\text{AUSMV}} \right)_{i-\frac{1}{2}} \quad (7-20)$$

イタレーションのループ1回毎に、これらと同様の計算を η (プログラム中では J) 方向、 ζ (プログラム中では K) 方向について行っている。

7.4.2 AUSMDV法による ξ 方向MUSCL内挿2次の対流項数値流速の計算

前項で説明した対流項の評価にMUSCL内挿を組み合わせることで高次精度化することができる。このとき、流束制限関数を内挿の過程に導入することで全変動 (Total Variation) に関するいわゆるTVD条件を満足させている。具体的には、セル境界 $i + \frac{1}{2}$ での物理量の評価を次式

$$\left(Q_L \right)_{i+\frac{1}{2}} = Q_i + \frac{1}{4} [(1-\bar{\kappa})\bar{\Delta}_- + (1+\bar{\kappa})\bar{\Delta}_+]_i \quad (7-21)$$

$$\left(Q_R \right)_{i+\frac{1}{2}} = Q_{i+1} - \frac{1}{4} [(1-\bar{\kappa})\bar{\Delta}_+ + (1+\bar{\kappa})\bar{\Delta}_-]_{i+1} \quad (7-22)$$

で行なう。 $\bar{\kappa}$ はパラメータで、これを適当に選ぶことによって2次あるいは3次精度の内挿法が定義できる。ここで、

$$\begin{aligned} \bar{\Delta}_+ &= \min\text{mod}(\Delta_+, b^- \Delta_-), \\ \bar{\Delta}_- &= \min\text{mod}(\Delta_-, b^+ \Delta_+) \end{aligned} \quad (7-23)$$

$$\Delta_+ = \begin{bmatrix} \rho_{i+1} - \rho_i \\ (\rho U)_{i+1} - (\rho U)_i \\ (\rho V)_{i+1} - (\rho V)_i \\ (\rho W)_{i+1} - (\rho W)_i \\ E_{i+1} - E_i \end{bmatrix} \cdot \chi^+,$$

$$\Delta_- = \begin{bmatrix} \rho_i - \rho_{i-1} \\ (\rho U)_i - (\rho U)_{i-1} \\ (\rho V)_i - (\rho V)_{i-1} \\ (\rho W)_i - (\rho W)_{i-1} \\ E_i - E_{i-1} \end{bmatrix} \cdot \chi^- \quad (7-24)$$

Volをセルの体積として

$$\begin{aligned} \chi^+ &= 2 \frac{\text{Vol}_i}{\text{Vol}_i + \text{Vol}_{i+1}}, \\ \chi^- &= 2 \frac{\text{Vol}_i}{\text{Vol}_i + \text{Vol}_{i-1}} \end{aligned} \quad (7-25)$$

$$\begin{aligned} b^- &= 1 + \text{CLIM} \left[\frac{\frac{4}{\chi^-} - 1 - \Psi^-}{1 - \Psi^-} - 1 \right], \\ b^+ &= 1 + \text{CLIM} \left[\frac{\frac{4}{\chi^+} - 1 - \Psi^+}{1 - \Psi^+} - 1 \right] \end{aligned} \quad (7-26)$$

で与えられる。

本サブルーチンでは $\Psi^+ = \Psi^- = -1$ とし空間2次精度を実現している。

MUSCL内挿3次では、 Ψ^+ 、 Ψ^- を次式で定義する。

$$\begin{aligned}\Psi^- &= \frac{-\text{Vol}_{i-1} + \text{Vol}_i + \text{Vol}_{i+1}}{\text{Vol}_{i-1} + \text{Vol}_i + \text{Vol}_{i+1}}, \\ \Psi^+ &= \frac{\text{Vol}_{i-1} + \text{Vol}_i - \text{Vol}_{i+1}}{\text{Vol}_{i-1} + \text{Vol}_i + \text{Vol}_{i+1}}\end{aligned}\quad (7-27)$$

CLIM = 1で、セル体積の分布が滑らかなら $\Psi^+ = \Psi^- = 1/3$ となり、空間3次精度となる。

7.4.3 ξ 方向粘性項の計算

ξ 方向速度勾配による粘性項は、以下の式で表される。

$$\hat{E}_v = J^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{\xi}_x \tau_{xx} + \hat{\xi}_y \tau_{xy} + \hat{\xi}_z \tau_{xz} \\ \hat{\xi}_x \tau_{yx} + \hat{\xi}_y \tau_{yy} + \hat{\xi}_z \tau_{yz} \\ \hat{\xi}_x \tau_{zx} + \hat{\xi}_y \tau_{zy} + \hat{\xi}_z \tau_{zz} \\ \hat{\xi}_x \beta_x + \hat{\xi}_y \beta_y + \hat{\xi}_z \beta_z \end{bmatrix}, \quad (7-28)$$

$$\tau_{xx} = \frac{2}{3} \mu (2u_x - v_y - w_z),$$

$$\tau_{yy} = \frac{2}{3} \mu (-u_x + 2v_y - w_z),$$

$$\tau_{zz} = \frac{2}{3} \mu (-u_x - v_y + 2w_z),$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu (u_y + v_x),$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu (v_z + w_y),$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu (w_x + u_z),$$

$$\beta_x = \tau_{xx} u + \tau_{xy} v + \tau_{xz} w + \kappa T_x,$$

$$\beta_y = \tau_{yx} u + \tau_{yy} v + \tau_{yz} w + \kappa T_y,$$

$$\beta_z = \tau_{zx} u + \tau_{zy} v + \tau_{zz} w + \kappa T_z,$$

$$p = (\gamma - 1) \left(e - \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2 + w^2) \right)$$

ここで、 τ は応力テンソル、 μ は粘性係数、 γ は理想気体の比熱比 (=1.4)、 κ は熱伝導係数、 T_x, T_y, T_z はそれぞれ、 x 方向、 y 方向、 z 方向の温度勾配である。 κT_x は、温度勾配から直接求める替わりに音速 c を二乗した値を使って、以下のように求める。

$$\begin{aligned}\kappa T_x &= \kappa \left(\frac{c^2}{\gamma R} \right)_x \\ &= \frac{\kappa}{\gamma R} (c^2)_x \\ &= \frac{\kappa}{C_p} \frac{1}{\gamma - 1} (c^2)_x \\ &= \left(\frac{\mu_l + \mu_t}{\text{Pr}_l + \text{Pr}_t} \right) \frac{1}{\gamma - 1} (c^2)_x\end{aligned}\quad (7-29)$$

ここで、

$$c^2 = \gamma R T, \quad \text{Pr} = \frac{C_p \mu}{\kappa}, \quad \frac{\kappa}{C_p} = \frac{\mu}{\text{Pr}} \quad (7-30)$$

$$\gamma R = \frac{C_p}{C_v} (C_p - C_v) = C_p \left(\frac{C_p}{C_v} - 1 \right) = C_p (\gamma - 1) \quad (7-31)$$

R は気体定数、 C_p は定圧比熱、 C_v は定積比熱、 Pr_l は層流プラントル数 (=0.72)、 Pr_t は乱流プラントル数 (=0.9)である。乱流粘性係数 μ_t は、Baldwin-Lomax壁乱流モデルによって算出する。また、層流の粘性係数 μ_l は、音速 c と一様流の温度 T_∞ を使って以下の式で求められる。

$$\mu_l = \frac{c^3 \left(\frac{110.4}{T_\infty} + 1 \right)}{c^2 + \frac{110.4}{T_\infty}} \quad (\text{Sutherlandの公式}) \quad (7-32)$$

$$c^2 = \frac{\gamma P}{\rho} \quad (7-33)$$

$\kappa T_y, \kappa T_z$ についても同様の方法で求める。粘性項の各成分を書き直すと、

$$\begin{aligned}S_1 &= 0 \\ S_2 &= \hat{\xi}_x \tau_{xx} + \hat{\xi}_y \tau_{xy} + \hat{\xi}_z \tau_{xz} \\ S_3 &= \hat{\xi}_x \tau_{yx} + \hat{\xi}_y \tau_{yy} + \hat{\xi}_z \tau_{yz} \\ S_4 &= \hat{\xi}_x \tau_{zx} + \hat{\xi}_y \tau_{zy} + \hat{\xi}_z \tau_{zz} \\ S_5 &= S_2 u + S_3 v + S_4 w \\ &\quad + \left(\frac{\mu_l}{\text{Pr}_l} + \frac{\mu_t}{\text{Pr}_t} \right) \frac{1}{\gamma - 1} \\ &\quad \times [(c^2)_x \hat{\xi}_x + (c^2)_y \hat{\xi}_y + (c^2)_z \hat{\xi}_z] \\ &= (\hat{\xi}_x \tau_{xx} + \hat{\xi}_y \tau_{xy} + \hat{\xi}_z \tau_{xz}) u \\ &\quad + (\hat{\xi}_x \tau_{yx} + \hat{\xi}_y \tau_{yy} + \hat{\xi}_z \tau_{yz}) v \\ &\quad + (\hat{\xi}_x \tau_{zx} + \hat{\xi}_y \tau_{zy} + \hat{\xi}_z \tau_{zz}) w \\ &= \hat{\xi}_x \beta_x + \hat{\xi}_y \beta_y + \hat{\xi}_z \beta_z\end{aligned}\quad (7-34)$$

となる。物体表面においては滑り無し、断熱の境界条件(温度勾配が0)を与えるので、式(7-34)の S_5 において、 $u = v = w = 0, T_x = T_y = T_z = 0$ となるので、 $S_5 = 0$ となる。

7.4.4 陰的近似因子分解法の ξ 方向の計算

Navier-Stokesの方程式のうち、対流項、粘性項からなる定常解の行列を陰的近似因子分解法によって反転し、保存量 Q の残差を計算する。Navier-Stokesの方程式を変形すると、

$$\begin{aligned}\frac{\Delta \hat{Q}^n}{\Delta t} + \delta_\xi \hat{E}^{n+1} + \delta_\eta \hat{F}^{n+1} + \delta_\zeta \hat{G}^{n+1} \\ = \text{Re}^{-1} (\delta_\xi \hat{E}_v^{n+1} + \delta_\eta \hat{F}_v^{n+1} + \delta_\zeta \hat{G}_v^{n+1})\end{aligned}\quad (7-35)$$

となる。ここで、上添字 n がついている量は反復の一つ前のループでの値で、上添字 $n+1$ がついている量は現在のループでの値である。

BeamとWarmingに倣い時間方向に局所線型化した対流項、

$$\begin{aligned}
\hat{E}^{n+1} &= \hat{E}^n + \hat{A}^n \Delta \hat{Q}^n + o(\Delta t^2) \\
\hat{F}^{n+1} &= \hat{F}^n + \hat{B}^n \Delta \hat{Q}^n + o(\Delta t^2) \\
\hat{G}^{n+1} &= \hat{G}^n + \hat{C}^n \Delta \hat{Q}^n + o(\Delta t^2)
\end{aligned} \tag{7-36}$$

を代入する。\$h = \Delta t\$ とし、\$h^3\$ 以上の項を無視すると、

$$\begin{aligned}
(I + h\delta_{\xi}\hat{A}^n + h\delta_{\eta}\hat{B}^n + h\delta_{\zeta}\hat{C}^n)\Delta\hat{Q}^n \\
= -h[\delta_{\xi}\hat{E}^n + \delta_{\eta}\hat{F}^n + \delta_{\zeta}\hat{G}^n \\
+ \text{Re}^{-1}(\delta_{\xi}\hat{E}_v^{n+1} + \delta_{\eta}\hat{F}_v^{n+1} + \delta_{\zeta}\hat{G}_v^{n+1})]
\end{aligned} \tag{7-37}$$

となる。式 (7-37) に近似因子分解を施すと、

$$\begin{aligned}
(I + h\delta_{\xi}\hat{A}^n)(I + h\delta_{\eta}\hat{B}^n)(I + h\delta_{\zeta}\hat{C}^n)\Delta\hat{Q}^n \\
= -h[\delta_{\xi}\hat{E}^n + \delta_{\eta}\hat{F}^n + \delta_{\zeta}\hat{G}^n \\
+ \text{Re}^{-1}(\delta_{\xi}\hat{E}_v^{n+1} + \delta_{\eta}\hat{F}_v^{n+1} + \delta_{\zeta}\hat{G}_v^{n+1})]
\end{aligned} \tag{7-38}$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned}
\hat{A}^n &= \left(\frac{\partial \hat{E}}{\partial \hat{Q}} \right)^n, \\
\hat{B}^n &= \left(\frac{\partial \hat{F}}{\partial \hat{Q}} \right)^n, \\
\hat{C}^n &= \left(\frac{\partial \hat{G}}{\partial \hat{Q}} \right)^n,
\end{aligned} \tag{7-39}$$

$$\Delta\hat{Q}^n = \hat{Q}^{n+1} - \hat{Q}^n \tag{7-40}$$

である。また、相似変換によって式 (7-39) の流束ヤコビ行列は、

$$\begin{aligned}
\hat{A}^n &= (T_{\xi} \hat{\Lambda}_{\xi} T_{\xi}^{-1})^n, \\
\hat{B}^n &= (T_{\eta} \hat{\Lambda}_{\eta} T_{\eta}^{-1})^n, \\
\hat{C}^n &= (T_{\zeta} \hat{\Lambda}_{\zeta} T_{\zeta}^{-1})^n,
\end{aligned} \tag{7-41}$$

$$\begin{aligned}
\hat{\Lambda}_{\xi}^n &= \text{diag}[U, U, U, U + c(\xi_x^2 + \xi_y^2 + \xi_z^2)^{1/2}, \\
&\quad U - c(\xi_x^2 + \xi_y^2 + \xi_z^2)^{1/2}] \\
\hat{\Lambda}_{\eta}^n &= \text{diag}[V, V, V, V + c(\eta_x^2 + \eta_y^2 + \eta_z^2)^{1/2}, \\
&\quad V - c(\eta_x^2 + \eta_y^2 + \eta_z^2)^{1/2}] \\
\hat{\Lambda}_{\zeta}^n &= \text{diag}[W, W, W, W + c(\zeta_x^2 + \zeta_y^2 + \zeta_z^2)^{1/2}, \\
&\quad W - c(\zeta_x^2 + \zeta_y^2 + \zeta_z^2)^{1/2}]
\end{aligned} \tag{7-42}$$

$$\begin{aligned}
(\hat{\Lambda}_{\xi}^n)^{\pm} &= \frac{\hat{\Lambda}_{\xi}^n \pm |\hat{\Lambda}_{\xi}^n|}{2}, \\
(\hat{\Lambda}_{\eta}^n)^{\pm} &= \frac{\hat{\Lambda}_{\eta}^n \pm |\hat{\Lambda}_{\eta}^n|}{2}, \\
(\hat{\Lambda}_{\zeta}^n)^{\pm} &= \frac{\hat{\Lambda}_{\zeta}^n \pm |\hat{\Lambda}_{\zeta}^n|}{2},
\end{aligned} \tag{7-43}$$

となる。また、計算を安定にするために固有値には数値粘性を付加し、

$$(\hat{\Lambda}_{\xi}^n)^{\pm} = (\hat{\Lambda}_{\xi}^n)^{\pm} \pm \frac{2\mu(\xi_x^2 + \xi_y^2 + \xi_z^2)}{\text{Re} \cdot \rho \cdot \text{Vol}} \tag{7-44}$$

としている。式 (7-38) の右辺を \$R_n\$ として書き直す。

$$(I + h\delta_{\xi}\hat{A}^n)S^n = R^n \tag{7-45}$$

ここで、

$$S^n = (I + h\delta_{\eta}\hat{B}^n)(I + h\delta_{\zeta}\hat{C}^n)\Delta\hat{Q}^n \tag{7-46}$$

式 (7-45) を相似変換によって変形し、

$$T_{\xi}^n(I + h\delta_{\xi}\hat{\Lambda}_{\xi}^n)(T_{\xi}^{-1})^n S^n = R^n \tag{7-47}$$

両辺に \$T_{\xi}^{-1}\$ を掛けると、

$$(I + h\delta_{\xi}\hat{\Lambda}_{\xi}^n)(T_{\xi}^{-1})^n S^n = (T_{\xi}^{-1})^n R^n \tag{7-48}$$

となる。さらに行列を反転するために、

$$\bar{S}^n = (T_{\xi}^{-1})^n R^n, \quad \bar{\bar{S}}^n = (T_{\xi}^{-1})^n S^n \tag{7-49}$$

と置くと、

$$\bar{\bar{S}}^n + h\delta_{\xi}\hat{\Lambda}_{\xi}^n \bar{\bar{S}}^n = \bar{S}^n \tag{7-50}$$

となる。ここで式 (7-50) の固有値を正と負に分解し、Flux Vector Splitting の手法で変形すると、

$$\bar{\bar{S}}_i^n + h(\hat{\Lambda}_{\xi}^+)^n_{i-1} \frac{\bar{\bar{S}}_i^n - \bar{\bar{S}}_{i-1}^n}{\Delta \xi} + h(\hat{\Lambda}_{\xi}^-)^n_i \frac{\bar{\bar{S}}_{i+1}^n - \bar{\bar{S}}_i^n}{\Delta \xi} = \bar{S}_i^n \tag{7-51}$$

となる。計算空間では \$\Delta \xi = 1\$ なので、結局、

$$\begin{aligned}
-h(\hat{\Lambda}_{\xi}^+)^n_{i-1} \bar{\bar{S}}_{i-1}^n + [I + h\{(\hat{\Lambda}_{\xi}^+)^n_{i-1} - (\hat{\Lambda}_{\xi}^-)^n_i\}] \bar{\bar{S}}_i^n \\
+ h(\hat{\Lambda}_{\xi}^-)^n_i \bar{\bar{S}}_{i+1}^n = \bar{S}_i^n
\end{aligned} \tag{7-52}$$

という三項方程式を得る。これを Thomas 法などで解いて、最後に式 (7-49) の両辺に \$T_{\xi}\$ を掛けて、

$$S^n = T_{\xi}^n \bar{\bar{S}}^n \tag{7-53}$$

を得る。\$\eta\$ 方向、\$\zeta\$ 方向にも同様な計算を行なうと、保存量 \$Q\$ の残差が算出される。

7.5 並列化の方法

富士通株式会社により開発された XPFortran (そのもととなるのは数値風洞 (NWT) 用に開発された NWT-FORTRAN) によって並列化のコーディングが行われている。基本的には各ブロック内の流れ場の計算を各プロセスに 1 対 1 に対応させる。つまり、各ブロック内の計算は逐次型の計算と同じである。本計算コードでは、座

標は i, j, k とブロック番号 i_b の合計4次元配列で表現されるが、並列化はブロック番号の次元を分割することにより行われる。例えば x 座標の配列 $x(i, j, k, i_b)$ は、 i_b の次元の分割によって並列化される。この方法では、各ブロックごとに含まれるセルの総数をできるだけ揃えて各プロセスの計算負荷を平均化することによって並列化による計算時間の短縮効果を上げることができる。一つのプロセスに複数のブロックを対応させることや、プロセスとブロックを不規則に対応させることも可能である。

7.6 プログラム実行上の留意事項

- 遅い流れの計算を回避するため、飛行速度をマッハ数に換算して0.1以下の時は流体解析の一樣流条件のマッハ数を0.1としている。
- ノズル内や近傍における運動量の初期値としてゼロを与えているため、グリッドのトポロジーを変更した場合、初期値を与えるサブルーチンを書き換え再コンパイルをする必要がある。
- ダイナミックアロケーションを使用していないので、グリッドのブロック数やサイズを変更した場合、インクルードファイルを修正し再コンパイルする必要がある。

8 飛行運動解析コードの概要

8.1 コードの特徴

本ソフトウェアに組み込まれている飛行運動解析コードの特徴は以下の通りである。

- 6自由度飛行運動である。
- 時間積分はルンゲ・クッタ法である。
- 大気モデル化には標準大気モデルを使用している。

8.2 基礎方程式

本プログラムおよび方程式中の変数の単位系は、特に断りのない限り国際単位系 (SI単位系) を用いている。航空機を剛体と考え、ニュートンの第2法則を適用すると、航空機の運動方程式は働く力およびモーメントがそれぞれ運動量と角運動量の変化率となることから以下のようになる。

$$\mathbf{F}_t = m \left(\frac{d\mathbf{V}_{CG}}{dt} + \boldsymbol{\omega}_{CG} \times \mathbf{V}_{CG} \right) \quad (8-1)$$

$$\mathbf{M}_{CG} = \mathbf{I} \frac{d\boldsymbol{\omega}_{CG}}{dt} + \boldsymbol{\omega}_{CG} \times \mathbf{I} \boldsymbol{\omega}_{CG} \quad (8-2)$$

ここで、

\mathbf{F}_t : 機体に働く外力

m : 機体質量

\mathbf{V}_{CG} : 重心の速度ベクトル

\mathbf{M}_{CG} : 重心まわりに働くモーメント

\mathbf{I}_{CG} : 機体の重心まわりの慣性テンソル

$\boldsymbol{\omega}_{CG}$: 重心まわりの角速度ベクトル

であり、 $\mathbf{F}_t, \mathbf{V}_{CG}, \mathbf{M}_t, \boldsymbol{\omega}_{CG}$ は機体重心を原点とする機体に固定された直交座標系 XYZ (右手系) で定義される。剛体の自由度は並進運動3、回転運動3の総計6であり、式 (8-1) と式 (8-2) の6自由度方程式で完全に記述できる。

8.3 アルゴリズム

飛行解析コード `muros_coupled` は、ロケットエンジンのノズルの面積等の形状から得られるデータ、流体解析コード `muros_solver` で計算した抵抗係数や圧力データ等と、飛行条件ファイルを使って、単位時間後の位置を計算する。計算終了後は、次に `muros_solver` で使用する計算条件の定義ファイルや、飛行条件ファイルを出力する。

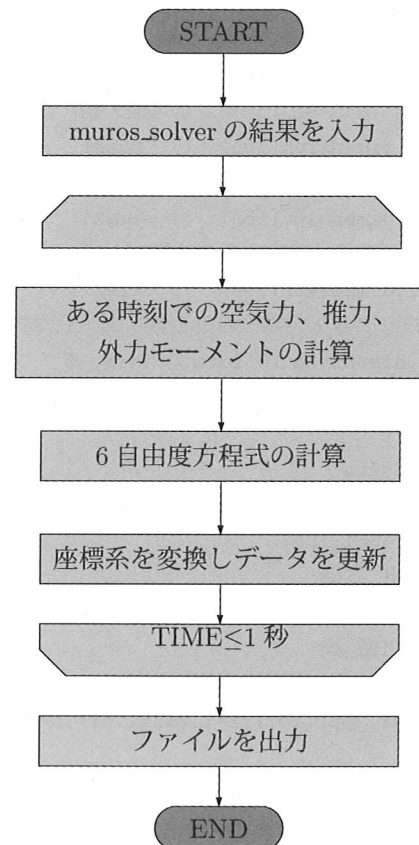


図 8-1 フローチャート

9 出力ファイルのフォーマット

ここでは、出力される流れ場ファイルと可視化用ファイルについて説明する。

9.1 流れ場ファイル

流れ場ファイルは、格子点上ではなくセル中心の以下の5つの値をバイナリー形式で保存している。

- ρ : 密度
- ρu : X方向の運動量
- ρv : Y方向の運動量
- ρw : Z方向の運動量
- e : エネルギー

このファイルは、次ステップの初期値として使うだけでなく、可視化用のPlot3D形式のファイルを作るために使用することができる。

ファイルへの出力部分を図9-1に示す。

```
integer :: ibn ! ブロック数
integer :: idim, jdim, kdim
! 各方向へのセル数インデックス最大値
integer,dimension(ibn) :: imax1
! 各ブロックのi方向へのセル数インデックス
integer,dimension(ibn) :: jmax1
! 各ブロックのj方向へのセル数インデックス
integer,dimension(ibn) :: kmax1
! 各ブロックのk方向へのセル数インデックス
real*8,dimension(0:idim,0:jdim,&
    0:kdim,1:5,ibn) :: q ! 物理量

write(15)ibn
write(15)(imax(ib),jmax(ib),kmax(ib), &
    ib=1,ibn)
do ib = 1, ibn
    write(15) fmach,alph,re,iter,beta
    write(15) &
        (((q(k,i,j,n,ib),i=1,imax(ib)), &
            j=1,jmax(ib)),k=1,kmax(ib)),n=1,5)
end do
```

図9-1 ファイルの出力部のプログラム

9.2 可視化用ファイル

デフォルトで出力されるのは、AVS/Expressの非構造型フィールドデータ (UCD:Unstructured Field Data) である。

物理量として以下の3成分の値を保存している。

- ρu : X方向の運動量
- ρv : Y方向の運動量
- ρw : Z方向の運動量

```
#
(全ノード数)(全セル数)(各ノードのデータ数)(各セルのデータ数)(モデルのデータ数)
(ノード番号1)(X座標)(Y座標)(Z座標)
(ノード番号2)(X座標)(Y座標)(Z座標)

(セル番号1)(材料番号)(セルの種類)(セルを構成するノードのつながり)
(セル番号2)(材料番号)(セルの種類)(セルを構成するノードのつながり)

(セルのコンポーネント数)(コンポーネント1の成分数)(コンポーネント2の成分数) ...
(セルコンポーネントのラベル1),(単位)
(セルコンポーネントのラベル2),(単位)
(セルコンポーネントのラベル3),(単位)
(セル番号1)(第1成分セルデータ)(第1成分セルデータ)(第3成分セルデータ)
(セル番号2)(第1成分セルデータ)(第1成分セルデータ)(第3成分セルデータ)
```

図9-2 UCDのファイルフォーマット


```

#
129900 63190 0 3 0
1 0.000000000000E+00 0.000000000000E+00
  0.000000000000E+00
2 0.501745673269E-03 0.359213235887E-18
  -0.373801764058E-02

129899 0.222834632580E+01 -0.749622133721E-03
  -0.143036423977E-01
129900 0.223933545507E+01 -0.749622133721E-03
  -0.143036423977E-01
1 1 hex 1 92 274 183 2 93 275 184
2 1 hex 2 93 275 184 3 94 276 185

63189 1 hex 129625 129716 129898 129807
  129626 129717 129899 129808
63190 1 hex 129626 129717 129899 129808
  129627 129718 129900 129809
3 1 1 1
X-mom,N
Y-mom,N
Z-mom,N
1 0.000000000000E+00 0.000000000000E+00
  0.000000000000E+00
2 -0.123117788733E-02 0.280456951256E-03
  0.107102219996E-01

63189 -0.721314161429E-17 -0.975430834252E-17
  0.186662408907E-15
63190 -0.161927348910E-15 0.231939932038E-16
  -0.148219833834E-15

```

図 9-3 ファイル出力例

10 考察

MUROS では、煩雑になりがちな計算条件の設定を、ITBL 環境で提供されている Task Mapping Editor の機能を使ってわかりやすい GUI 操作で設定できるようにした。ITBL 環境ではこうした環境構築をアプリケーションプログラムに合わせて容易に構築できる。環境構築が終了すれば、ジョブ投入、ジョブ監視は自動的にシステムが行なうので、PC の前に張り付いてジョブの投入タイミングを待つ必要はなく、ソフトウェアの開発者や IT の専門家でなくてもソフトウェアを容易に利用できるようになる。しかも計算を実行する計算機や可視化に必要な計算機等についての細かい知識は必要ない。このように ITBL 環境はネットワーク上の計算資源をあたかも自分の手元にある PC と同様に扱うことができる機能を有して

いる。

しかしながら、提供されている機能はまだ改良すべき余地がある。例えば、GUI 画面に入力された値のチェックやある設定に対して決まっているオプションを指定できない。そのため、現状では、値やオプションのチェックは一度 GUI から抜けて、ソフトウェア側で担当せざるを得ないが、ソフトウェア側から GUI を制御するパスが提供されていないため、チェックした結果を入力画面に反映させることができず、全ての入力を再度行なわなければならないため、作業効率が落ちてしまう。

また、ジョブ実行中は ITBL 基盤ソフトを起動しておく必要があるが、バックグラウンドで動作していないので、誤って、WEB ブラウザを終了させてしまうと、実行中のジョブまで処理を終了してしまう。これは、ユーザーを戸惑わせてしまうに違いない。

Web 可視化の機能は、ITBL 基盤ソフトと可視化用計算機のアカウントがあれば誰でも利用でき、大変便利である。しかし、現状の可視化処理は、可視化用計算機で AVS を実行し画像を作成し、その画像をクライアント PC に送って表示するので、可視化結果の移動や回転、拡大・縮小の操作に時間がかかってしまう。詳細に可視化結果を見る場合は、グリッドファイルや計算結果ファイルから注目する部分だけを抜き出すプログラムを作成するか、ファイルを手元に持ってきて処理を行なう等しないと、作業効率は低くなってしまう。

以上のように、ITBL 環境の構築によって、本来のユーザーが目的としている計算実行に余り本質的とは思えない計算環境に関して現在生じている様々な煩わしさを省くことができることが実証された。一方、現在の ITBL 環境は、未だ発展途上であり、特に、操作性に関しては、改善の余地がある。

11 まとめ

ITBL (Information Technology Based Laboratory) プロジェクトにおいて整備された ITBL 環境において活用するソフトウェアとしてロケット打ち上げ飛行シミュレーションソフトウェア (MUROS) の開発を行なった。流体解析コードと飛行運動コードを組み合わせることによって、流体解析コードでロケット周りの流れ場を計算し、飛行運動コードでは、初期パラメータや流れ場計算の結果から求めたメインエンジンの推力やロケットの抵抗値等を使って、単位時間後の速度や高度を計算してロケットの打ち上げを模擬できるようになった。

検証のため、ロケットの打ち上げから 60 秒後までの計算を行ない、妥当な結果を得た。

現バージョンでは、ノズル形状の変化がロケットの飛行運動にどのような影響を与えているかを調べることを

ターゲットにしている。そのため、計算時間が少なく済むように制限や工夫を加えてある。今後、プログラムの高速化や計算機性能の更なる向上にあわせ、これらの制限や工夫を取り除いて行きたいと考えている。

12 補足

12.1 TME の構成定義

このソフトウェアのTMEの構成定義を以下に示す。最初に、“muros_mkgnl”のTME構成定義を簡単に説明する。この処理には、ロードモジュールのみ組み込まれている。図12-1の“muros_mkgnl”はグリッド間の接続関係を定義するプログラムである。

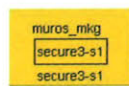


図12-1 “muros_mkgnl”のTME構成

次に、“muros_makenl”のTME構成定義をパーツ毎に簡単に説明する。

- I : GUIで入力するパラメータ
- II : 計算条件ファイル作成プログラム (1)
- III : GUIで入力するパラメータ
- IV : 計算条件ファイル作成プログラム (2)

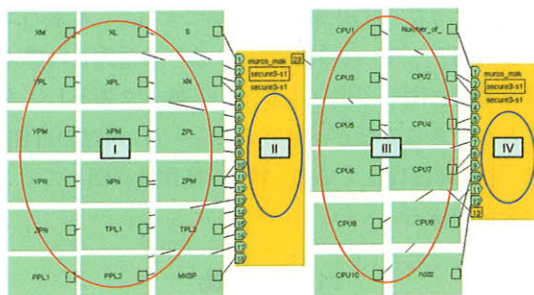


図12-2 “muros_makenl”のTME構成

“step00”のTME構成定義をパーツ毎に簡単に説明する。

- I : GUIで入力するパラメータ
- II : 連成計算で使用するファイル作成プログラム
- muros_solv : 流体解析プログラム
- muros_coup : 飛行運動解析プログラム
- muros_cp.c : ファイル退避スクリプト
- step0*.nl : 計算条件ファイル
- step0*.txt : ログファイル
- JobNumber : GUIで入力するパラメータ

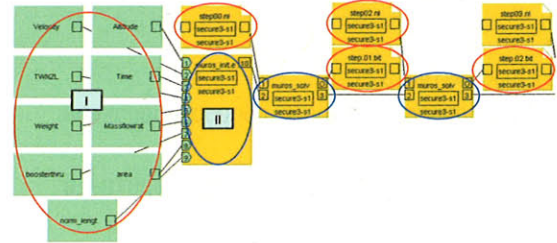


図12-3 “step00”のTME構成 (1)

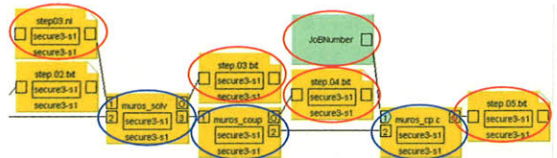


図12-4 “step00”のTME構成 (2)

“step01-”のTME構成定義をパーツ毎に簡単に説明する。

- muros_solv : 流体解析プログラム
- muros_coup : 飛行運動解析プログラム
- muros_cp.c : ファイル退避スクリプト
- step0*.nl : 計算条件ファイル
- step0*.txt : ログファイル
- JobNumber : GUIで入力するパラメータ



図12-5 “step01-”のTME構成 (1)



図12-6 “step01-”のTME構成 (2)

12.2 実行中の構成定義の状態表示

グリッド作成時に表示されるGUIと計算時に表示されるGUIの“Status”をクリックすると、構成定義の実行状態を確認できる。実行状態は定期的に更新される。表示される画面と、表示色について以下に示す。

表 12-1 表示色と実行状態の組み合わせ

色	状態
青色	実行中
桃色	正常終了
赤色	異常終了
茶色	実行取消
緑色	バッチ実行待ち
黄色	実行指示待ち
黒色	実行対象外（部分実行のみ）

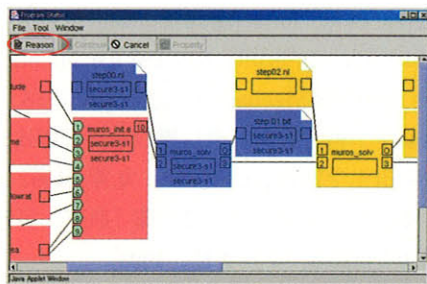


図 12-7 実行中の状態表示例

※ “Reason” をクリックすると “PPEditor” が起動し、TME スクリプトの実行時ログファイルが表示される。

12.3 RIS (Resource Information Server)

グリッド作成時に表示される GUI と計算時に表示される GUI の “RIS” をクリックすると、使用可能な計算機やネットワークの状態を表示することができる。ここでは、計算機のジョブ実行状態の確認の仕方を説明する。

- (1) 表示する “Site” を選択し、“Proc Info” をクリックする。

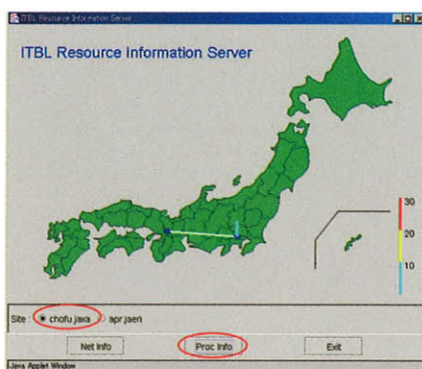


図 12-8 RIS の起動画面

- (2) ジョブ実行の計算機一覧画面が表示され、“Information” の欄が “Processor” になっていることを確認する。表示する計算ジョブ実行用計算機（ここでは “secure3-s1”）をリストから選択し、“Queue” をクリックする。

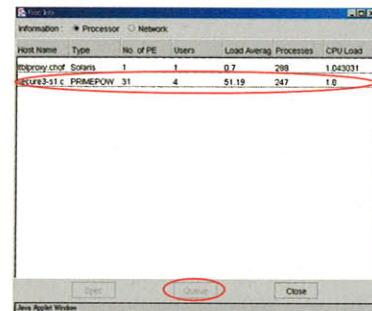


図 12-9 計算機選択画面

- (3) バッチ・キューと実行ジョブの一覧が表示される。“Host Name” と “Queue Name” をクリックすると、投入されている全てのジョブが表示される。

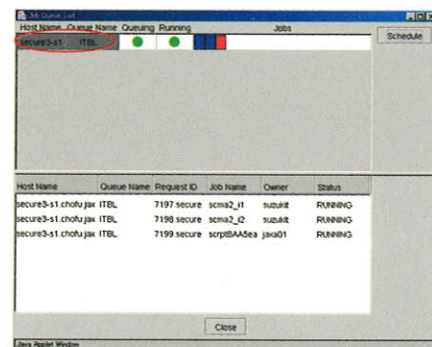


図 12-10 secure3-s1 の status

表 12-2 表示色と状態の対応

欄	色	状態
Queuing	緑色	バッチ・キューが稼働中
	赤色	バッチ・キューが停止中
Running	緑色	バッチ・キューへ投入可能
	赤色	バッチ・キューへ投入不可
Jobs	赤色	自分が投入したジョブ
	青色	他の利用者が投入したジョブ

表 12-3 Status の表示と状態の対応

表示	状態
QUEUED	実行待ち
RUNNING	実行中

参考文献

- [1] 「ITBL 基盤ソフトユーザーマニュアル共通情報管理 / 利用者認証編」日本原子力研究所, 2003
- [2] 「ITBL 基盤ソフトユーザーマニュアル共通画面編」日本原子力研究所, 2003
- [3] 「ITBL基盤ソフトユーザーマニュアルジョブ実行編」日本原子力研究所, 2003
- [4] 「ITBL基盤ソフトユーザーマニュアルAVS方式による可視化編」日本原子力研究所, 2003
- [5] 「Web可視化チュートリアル (改訂版) 2004.6」日本原子力研究所, 2004
- [6] 「AVS/Express ユーザーズ・ガイド」株式会社ケイ・ジー・ティー, 2005
- [7] 「AVS/Express チュートリアルガイド」株式会社ケイ・ジー・ティー, 2005
- [8] 「AVS/Express モジュールリファレンス第1部」株式会社ケイ・ジー・ティー, 2005
- [9] 「AVS/Express モジュールリファレンス第2部」株式会社ケイ・ジー・ティー, 2005
- [10] 中村佳朗, 鈴木弘一「ロケットエンジン」森北出版, 2004
- [11] 橘 正和, 高梨 進「複雑な形状の航空機まわりの流れの数値シミュレーション」NAL SP-10 pp.195-200, 航空宇宙技術研究所, 1989
- [12] Wada, Y., Liou, Meng-Sing, "A flux splitting scheme with high-resolution and robustness for discontinuities" AIAA-1994-83, January 1994
- [13] Baldwin, B., Lomax, H., "Thin-layer approximation and algebraic model for separated turbulent flows" American Institute of Aeronautics and Astronautics, Aerospace Sciences Meeting 16th, January 1978
- [14] 日本航空宇宙学会編「飛行機の運動方程式」第2版 航空宇宙工学便覧 pp.396-398, 丸善, 1992
- [15] 畑 剛, 泉 達司, 川口淳一郎「航空・宇宙における制御」pp.6-8, コロナ社, 1999

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-06-005

発 行 平成19年3月23日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL: <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 株式会社 実業公報社

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1

TEL: 029-868-2079 FAX: 029-868-2956

© 2007 宇宙航空研究開発機構

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等加工することを禁じます。

