

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

ロケット打ち上げ時の音響環境を評価する Euler/LEEコード 第1報 Eulerオプション

金田 英和, 岩永 則城, 村上 桂一, 橋本 敦
北村 圭一, 青山 剛史, 中村 佳朗

2008年2月

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

ロケット打ち上げ時の音響環境を評価する Euler/LEE コード 第1報 Euler オプション*

金田 英和^{*1}, 岩永 則城^{*1}, 村上 桂一^{*2}, 橋本 敦^{*2},
北村 圭一^{*3}, 青山 剛史^{*2}, 中村 佳朗^{*3}

Euler/LEE Code for Acoustic Load Evaluation during Rocket Launch -First Volume Euler Option-*

Hidekazu KANEDA^{*1}, Noriki IWANAGA^{*1}, Keiichi MURAKAMI^{*2},
Atsushi HASHIMOTO^{*2}, Keiichi KITAMURA^{*3}, Takashi AOYAMA^{*2}
and Yoshiaki NAKAMURA^{*3}

ABSTRACT

Acoustic loads are the principal source of structural vibration and internal noise during launch. Therefore, it is important to predict the acoustic loads on space vehicles such as a rocket. Conventionally, the prediction has been made by empirical methods. These methods are difficult to deal with shielding and reflection. To avoid these difficulties, we have been developing a Euler/LEE(Linearized Euler Equation) hybrid code and applying it to the acoustic evaluation of H2A's launch pad. In this report, we explain how to use the Euler option of the hybrid code.

Keywords : Euler/LEE code, Acoustic loads, Rocket

概 要

ロケット打ち上げ時の構造振動や内部騒音の主要要因である音響荷重を予測することは重要である。この予測は、従来、経験的手法によって行われてきたが、そうした手法では遮蔽や反射を扱うのが困難である。こうした困難を回避するために、我々は Euler/LEE コードを開発し、H2A の打ち上げ射場の音響評価に応用してきた。本報告では、当コードの Euler オプションの使用方法を解説する。

*平成 20 年 1 月 15 日受付(Received 15 January , 2008)

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

*2 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)

*3 名古屋大学 (Nagoya University)

1. はじめに

ロケット打ち上げ時に噴出されるジェットからは強い音波が生じる。この音波がロケット本体へ及ぼす音響効果、特に音圧荷重を予測する事は重要課題である。従来、文献(1)に見られるように、実測データに基づく経験則的手法による予測が行われてきた。しかし、文献(1)の手法では、近傍音場特性を部分的に遠方音場特性で近似する等の解析上の粗さや、ブルームからロケットに至る間に構造物を有しないなどの使用上の制約があった。数値計算の適用により、従来手法の粗さや制約は緩和され、より正確な音響効果予測が可能となる。このことに関連して、音響解析手法として有効性をもつ Euler/LEE コード^{(2)~(4)}が射場規模モデル用に拡張されてきた^{(5)~(7)}。

本報告では、第1報として当コードの Euler オプションの理論的背景、使用法及び解析例について解説する。当コードは将来的にロケット射場以外の対象にも拡張可能であるが、当面は JAXA 内でのロケット射場を対象とした解析に使用されることを前提としている。解説に当たっては、非常に簡単にモデル化した射場形状(直方体の地上構造物と曲がり管の排煙溝)及びジェットの出口条件を用いた。

2. 流体解析コードの概要

2.1 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オイラー方程式並びに理想気体の状態方程式である。
- ・有限体積法により離散化し、数値流束の計算に Roe の近似リーマン解法を用いている。
- ・MUSCL 法により物理量を空間 3 次精度で内挿している。
- ・時間積分は 3 段階 3 次精度のルンゲクッタ法を用いている。
- ・並列処理言語 MPI を用いて並列化している。

2.2 基礎方程式

2.2.1 微分形

基礎方程式である圧縮性 Euler 方程式は、直交座標系 $(x^j) = (x^1, x^2, x^3) = (x, y, z)$ を使って次のように表せる。

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{f}^j}{\partial x^j} = 0 \quad (2-1)$$

$$\mathbf{q} = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho v^1 \\ \rho v^2 \\ \rho v^3 \\ e \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{f}^j = \begin{Bmatrix} \rho u^j \\ \rho v^j v^1 + \delta^{j1} p \\ \rho v^j v^2 + \delta^{j2} p \\ \rho v^j v^3 + \delta^{j3} p \\ v^j (e + p) \end{Bmatrix} \quad (2-2)$$

ここで、 \mathbf{q} : 保存量ベクトル、 δ^{ji} : クロネッカーのデルタ記号、 $\mathbf{f}^j = (\mathbf{f}^1, \mathbf{f}^2, \mathbf{f}^3) = (\mathbf{f}^x, \mathbf{f}^y, \mathbf{f}^z)$: 非粘性流束ベクトル、 ρ : 密度、 $(v^j) = (v^1, v^2, v^3) = (u, v, w) = (v_j)$: 直交座標系での x, y, z 方向の速度、 e : 全エネルギー、

$p = (\gamma - 1) \left(e - \frac{1}{2} \rho v_i v^i \right)$: 圧力、 γ : 完全気体の比熱比 (=1.4) である。

2.2.2 空間離散化

有限体積法を用いて空間離散化する。微分型方程式 (2-1) を体積積分することにより、まず、

$$\omega_i \frac{d\mathbf{q}_i}{dt} + \sum_{\sigma} s_{\sigma} (\mathbf{f}_{\sigma}^j n_j) = 0 \quad (2-3)$$

を得る。ここで、 \mathbf{q}_i : 保存変数ベクトルの i 番目セル平均値、 ω_i : i 番目セルの体積、 s_{σ} : i 番目セルの σ 番目境界面の面積、 $\mathbf{n} = (n_j) = (n_1, n_2, n_3)$: セル境界面における外向き単位法線ベクトルである。 σ についての和は、 i 番目のセルを囲む全ての境界面について行う。(2-3) において

$$(\mathbf{f}_{\sigma}^j n_j) = \mathbf{f}_{\sigma} = \mathbf{T}_{\sigma}^{-1} \mathbf{F}_{\sigma} \quad (2-4)$$

を用いれば、

$$\omega_i \frac{d\mathbf{q}_i}{dt} + \sum_{\sigma} s_{\sigma} \mathbf{T}_{\sigma}^{-1} \mathbf{F}_{\sigma} = 0 \quad (2-5)$$

を得る。ここで、 \mathbf{T}_{σ} は境界面での局所基底ベクトル \mathbf{n} 及び $\mathbf{l} = (l_j) = (l_1, l_2, l_3)$ と $\mathbf{m} = (m_j) = (m_1, m_2, m_3)$ を用いて定義した変換行列であり、

$$\mathbf{T}_\sigma = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n_1 & n_2 & n_3 & 0 \\ 0 & l_1 & l_2 & l_3 & 0 \\ 0 & m_1 & m_2 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

$$\mathbf{T}_\sigma^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n_1 & l_1 & m_1 & 0 \\ 0 & n_2 & l_2 & m_2 & 0 \\ 0 & n_3 & l_3 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

と書ける。 \mathbf{F}_σ は境界面上で平均した局所 1 次元非粘性流束であり、

$$\mathbf{Q} = \mathbf{T}_\sigma \mathbf{q} = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho U \\ \rho V \\ \rho W \\ e \end{Bmatrix}, \quad (2-8)$$

を用いて、

$$\mathbf{F}_\sigma = \mathbf{F}_\sigma(\mathbf{Q}) = \begin{Bmatrix} \rho U \\ \rho U^2 + p \\ \rho UV \\ \rho UW \\ U(e + p) \end{Bmatrix} \quad (2-9)$$

と書ける。ここで、 U, V, W は局所基底座標における速度ベクトルの成分である。

(2-9) の \mathbf{F}_σ は、更に数値流束 \mathbf{F}_σ^{num} によって置き換える。結局、解くべき式は次のようにかかる。

$$\frac{d\mathbf{q}_i}{dt} = \mathbf{R}_i(\mathbf{q}) \quad (2-10)$$

$$\mathbf{R}_i(\mathbf{q}) = -\frac{1}{\omega_i} \sum_\sigma s_\sigma \mathbf{T}_\sigma^{-1} \mathbf{F}_\sigma^{num}$$

ここで、右辺の数値流束 \mathbf{F}_σ^{num} は、Roe の近似リーマン解法を用いて計算する。その際、セル境界での物理量は、van Albada の制限関数を用いた 3 次精度 MUSCL 法を用いて、高次精度化する。

2.2.3 時間離散化

時間離散化には、3 段階 3 次精度のルンゲクッタ法を用いる。これは

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_i^{(1)} &= \mathbf{q}_i^n + \frac{1}{3} \Delta t \mathbf{R}_i(\mathbf{q}^n) \\ \mathbf{q}_i^{(2)} &= \mathbf{q}_i^n + \frac{1}{2} \Delta t \mathbf{R}_i(\mathbf{q}^{(1)}) \\ \mathbf{q}_i^{n+1} &= \mathbf{q}_i^n + \Delta t \mathbf{R}_i(\mathbf{q}^{(2)}) \end{aligned} \quad (2-11)$$

のように実装できる。 Δt は時間ステップである。このスキームは通常の CFL 条件の下で安定である。

2.3 境界条件

境界条件は以下の通りである。

- ・物体表面はすべり有りで、断熱条件を満たす。
- ・流入条件は、ノズル条件によって決定する。
- ・流出条件は、速度勾配が 0 になるように外挿する。具体的には、流出面での速度勾配が 0 になるように、内側 2 セル分の値を用いて、外側 2 セル分の値を決める。
- ・ブロック境界では、2 セル分を重ねて値を共有させる。

2.4 アルゴリズム

計算格子は物体適合型で、解ベクトルは直交座標系成分で構成する。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 Roe の近似リーマン解法を用いている。

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。

2.4.1 数値流束の計算

数値流束は Roe の近似リーマン解法を用いて計算している。これは、FDS (Flux Difference Splitting) 系のスキームであり、直交座標系と同形に表された物理流束 $\mathbf{F}_\sigma = \mathbf{F}_\sigma(\mathbf{Q})$ にスキームを適用して数値流束 \mathbf{F}_σ^{num} を得た後、本来の流束に戻す。

任意のセルの境界面における単位基底ベクトル $\mathbf{n}, \mathbf{l}, \mathbf{m}$ は

$$\begin{aligned} \mathbf{n} \cdot \mathbf{l} &= \mathbf{n} \cdot \mathbf{m} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{l} = 0 \\ \mathbf{n} \cdot \mathbf{n} &= \mathbf{l} \cdot \mathbf{l} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{m} = 1 \end{aligned} \quad (2-12)$$

という性質を持つことに注意すると、セル表面に垂直ならびに平行な速度成分 U, V, W は

$$\begin{aligned} U &= \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = n_1 v^1 + n_2 v^2 + n_3 v^3 \\ V &= \mathbf{l} \cdot \mathbf{v} = l_1 v^1 + l_2 v^2 + l_3 v^3 \\ W &= \mathbf{m} \cdot \mathbf{v} = m_1 v^1 + m_2 v^2 + m_3 v^3 \end{aligned} \quad (2-13)$$

と表せる。

次に、(2-4)から

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{f}_\sigma^j n_j) &= \mathbf{f}_\sigma \\
 &= \mathbf{T}_\sigma^{-1} \mathbf{T}_\sigma \mathbf{f}_\sigma \\
 &= \mathbf{T}_\sigma^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n_1 & n_2 & n_3 & 0 \\ 0 & l_1 & l_2 & l_3 & 0 \\ 0 & m_1 & m_2 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \rho U \\ \rho U v^1 + n_1 p \\ \rho U v^2 + n_2 p \\ \rho U v^3 + n_3 p \\ U(e + p) \end{Bmatrix} \quad (2-14) \\
 &= \mathbf{T}_\sigma^{-1} \begin{Bmatrix} \rho U \\ \rho U^2 + p \\ \rho UV \\ \rho UW \\ U(e + p) \end{Bmatrix} = \mathbf{T}_\sigma^{-1} \mathbf{F}_\sigma
 \end{aligned}$$

となることより、(2-9)の \mathbf{F}_σ を得る。 \mathbf{F}_σ は直交座標系の流束と同じ形をしている。この \mathbf{F}_σ にRoeの近似リーマンスキームを適用して数値流束 \mathbf{F}_σ^{num} を求め、 \mathbf{F}_σ の代わりに(2-14)に代入する。結果として、表面積分部分は以下のよう評価される：

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{f}_\sigma^j n_j) &= \mathbf{T}_\sigma^{-1} \mathbf{F}_\sigma = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n_1 & l_1 & m_1 & 0 \\ 0 & n_2 & l_2 & m_2 & 0 \\ 0 & n_3 & l_3 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{\sigma,1}^{num} \\ F_{\sigma,2}^{num} \\ F_{\sigma,3}^{num} \\ F_{\sigma,4}^{num} \\ F_{\sigma,5}^{num} \end{Bmatrix} \quad (2-15) \\
 &= \begin{Bmatrix} F_{\sigma,1}^{num} \\ n_1 F_{\sigma,2}^{num} + l_1 F_{\sigma,3}^{num} + m_1 F_{\sigma,4}^{num} \\ n_2 F_{\sigma,2}^{num} + l_2 F_{\sigma,3}^{num} + m_2 F_{\sigma,4}^{num} \\ n_3 F_{\sigma,2}^{num} + l_3 F_{\sigma,3}^{num} + m_3 F_{\sigma,4}^{num} \\ F_{\sigma,5}^{num} \end{Bmatrix}
 \end{aligned}$$

Roeの近似リーマンスキームを使うと、境界面 σ での数値流束は

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F}_\sigma^{num} &= \frac{1}{2} [\mathbf{F}(\mathbf{Q}_R) + \mathbf{F}(\mathbf{Q}_L) - |\mathbf{A}| (\mathbf{Q}_R - \mathbf{Q}_L)]_\sigma \quad (2-16) \\
 |\mathbf{A}|_\sigma &= \mathbf{R}_\sigma |\mathbf{A}|_\sigma \mathbf{L}_\sigma
 \end{aligned}$$

という形で計算される。 $\mathbf{A}, \mathbf{R}, \mathbf{L}$ はセル境界面での固有値行列、右及び左固有ベクトルである。境界面での $\mathbf{A}, \mathbf{R}, \mathbf{L}$ を計算する際は、Roe平均と呼ばれる平均量

$$\begin{aligned}
 \rho_{ave} &= \sqrt{\rho_L \rho_R}, \\
 u_{ave} &= \frac{\sqrt{\rho_L} u_L + \sqrt{\rho_R} u_R}{\sqrt{\rho_L} + \sqrt{\rho_R}} \\
 H_{ave} &= \frac{\sqrt{\rho_L} H_L + \sqrt{\rho_R} H_R}{\sqrt{\rho_L} + \sqrt{\rho_R}}
 \end{aligned} \quad (2-17)$$

を用いることに注意する。ただし、 H_{ave} は平均全エンタルピー

$$H_{ave} = \frac{\mathcal{P}_{ave}}{(\gamma - 1)\rho_{ave}} + \frac{v_{ave} v_{ave}^i}{2} \quad (2-18)$$

であり、平均音速は

$$c_{ave}^2 = (\gamma - 1) \left(H_{ave} - \frac{v_{ave,i} v_{ave}^i}{2} \right) \quad (2-19)$$

で定義される。

2.4.2 MUSCL法による高次精度化

$\mathbf{Q}_L, \mathbf{Q}_R$ の評価は、MUSCL内挿を用いて高次精度化する。ここでは、van Albadaの制限関数を内挿の過程に導入する。具体的には、セル境界 $\sigma=j+1/2$ において物理量の評価を次式で行う。

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{Q}_L)_{j+1/2} &= \mathbf{Q}_j + \frac{s_j}{4} [(1 - \kappa s) \Delta_- + (1 + \kappa s) \Delta_+]_j, \\
 (\mathbf{Q}_R)_{j+1/2} &= \mathbf{Q}_{j+1} - \frac{s_{j+1}}{4} [(1 + \kappa s) \Delta_+ + (1 - \kappa s) \Delta_-]_{j+1}
 \end{aligned} \quad (2-20)$$

ここで、 $\kappa=1/3$ （空間3次精度）ならびに

$$(\Delta_-)_j = \mathbf{Q}_j - \mathbf{Q}_{j-1}, \quad (\Delta_+)_j = \mathbf{Q}_{j+1} - \mathbf{Q}_j \quad (2-21)$$

であり、

$$s = \frac{2\Delta_+ \Delta_- + \varepsilon}{(\Delta_+)^2 + (\Delta_-)^2 + \varepsilon} \quad (2-22)$$

はvan Albadaの制限関数である。 ε は0でない小さな数である。

3. 使用方法

本章では、図 3-1 に示す H2A ロケット打ち上げ射場の簡易モデル(排煙溝の形状を矩形折れ曲がり管で近似し、PST などの地上構造物を直方体で近似)を例にとり、当コードの使用方法を説明する。但し、2007 年 12 月現在、当コードには次の制約がある。

- ・排煙溝及び、PST (Pad Service Tower、圧力波を遮蔽する効果がある) 有りに固定する。
- ・ブロック数は 2 に固定する。
- ・セル数の変更は、コード内変数の値を変える事により行なう。
- ・各ブロックの境界条件は、次のように固定する。

(1) ブロック 1

地面以外の 5 面は流出条件とする。地面は次の通りとする。

- (1-1) 排煙溝入口と接している部分: すべりありの断熱条件。
- (1-2) 排煙溝出口と接続している部分: ブロック境界。
- (1-3) 排煙溝と接していない部分: すべりありの断熱条件。

(2) ブロック 2

排煙溝入口出口以外の面は、すべりありの断熱条件とする。他の面は次の通りとする。

- (2-1) 排煙溝入口面: ジェットが噴出する部分は流入条件。それ以外はすべりありの断熱条件。
- (2-2) 排煙溝出口面: ブロック境界。

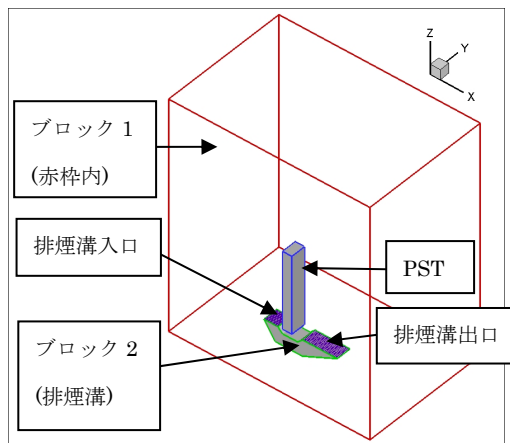
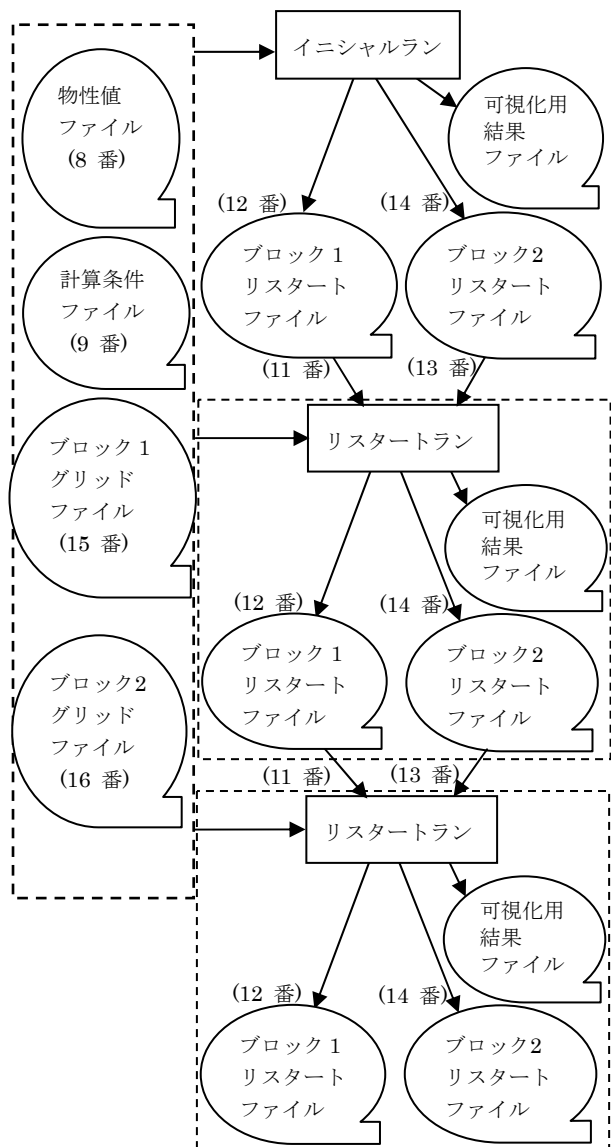


図 3-1 解析モデル

3.1 ジョブの実行方法

ジョブを実行する場合、次の手順に従う。

- (1) 次節で説明するファイル予めを用意して、CeNSS 内の所定ディレクトリにコピーする。
- (2) nsub コマンドで、nsub スクリプトを実行する。
- (3) 計算終了後、可視化用結果ファイルを、ユーザーが使用する可視化処理ツール等の書式に変換する。その後、必要に応じて後処理を行なう。



- (注 1) かっこ内の番号は、ファイル割り当て番号を示す。
 (注 2) リスタートランは、必要に応じて行なう。また連続して何回行なっても良い。

図 3-2 解析の流れ

3.2 計算に必要なファイル

本節では、

(1) セル数の変更方法

(2) 事前に用意するファイル

- ・ブロック 1 のグリッドファイル (バイナリ形式)
- ・ブロック 2 のグリッドファイル (バイナリ形式)
- ・物性値ファイル (テキスト形式)
- ・計算条件ファイル (テキスト形式)
- ・nsub スクリプトファイル (テキスト形式)

(3) 可視化用結果ファイル (バイナリ形式)

の内容を説明する。

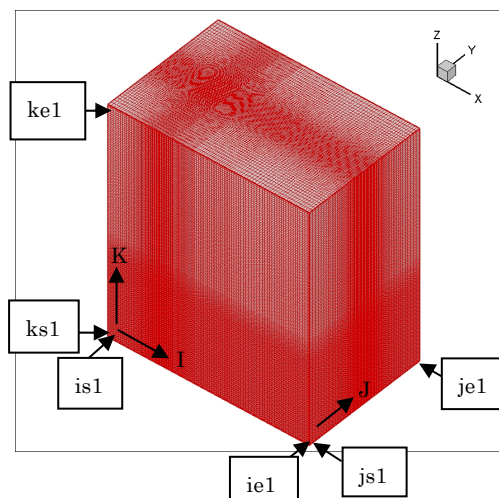


図 3-4 ブロック 1 のメッシュ及びセル番号

3.2.1 セル数の変更方法

解析領域のセル数を変更する場合は、ソースファイル内の変数

- ie1 : ブロック 1 I 方向セル数
- je1 : ブロック 1 J 方向セル数
- ke1 : ブロック 1 K 方向セル数
- ie2 : ブロック 2 I 方向セル数
- je2 : ブロック 2 J 方向セル数
- ke2 : ブロック 2 K 方向セル数

を再設定し、実行ファイルを再作成する。(図 3-3～図 3-5 参照)

<pre>c (cinc.f) parameter(incr=2) parameter(la=6,lb=la-1) c---LP1 detail mesh--- *grid1 parameter(is1= 1,ie1=131) parameter(js1= 1,je1=88) parameter(ks1= 1,ke1=209) *grid2 parameter(is2= 1,ie2=20) parameter(js2= 1,je2=20) parameter(ks2= 1,ke2=58) (以下、省略)</pre>	
<p>ブロック 1 のセル数を変更する場合は ie1、je1、ke1 を変更する。</p>	
<p>ブロック 2 のセル数を変更する場合は ie2、je2、ke2 を変更する。</p>	

図 3-3 セル数の変更方法

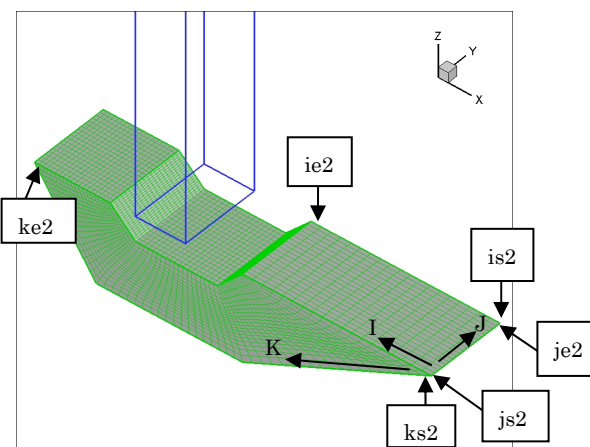


図 3-5 ブロック 2 のメッシュ及びセル番号

3.2.2 事前に用意するファイル

次の(1)～(4)に示すファイルを用意する必要がある。

(1) ブロック 1、ブロック 2 のグリッドファイル

ブロック 1、ブロック 2 のグリッドファイル（両者ともバイナリ形式）の内容を、

- ・表 3-1 ブロック 1 グリッドファイルの書式
- ・表 3-2 ブロック 2 グリッドファイルの書式

に示す。

I 方向グリッドの開始番号は、-2 からとする。また I 方向セルの開始番号は、-1 からとする。J、K 方向グリッド、セルの開始番号についても同様である。（図 3-6 参照）

解析領域の外側に、ゴーストセルを設けなければならない。ゴーストセルは、I、J、K 方向に 2 セルずつ（一方向、+方向）用意する。（図 3-7～図 3-12 参照）

各ブロックの K 方向を、次のように定義する。（図 3-13 参照）

- ・ブロック 1：地面から +Z 方向
- ・ブロック 2：排煙溝出口から入口方向

排煙溝出口面ブロック境界における物理量の整合性をとる為に、この面におけるゴーストセルの座標値を、解析領域セルの座標値と一致させる。（図 3-14～図 3-16 参照）

表 3-1 ブロック 1 グリッドファイルの書式

レコード番号	変数名	内容
1	ie1,je1,ke1	ブロック 1 I,J,K 方向のセル数（整数型）
2	(((xg1(i,j,k),i=-2,ie1+2),j=-2,je1+2),k=-2,ke1+2)	xg1(i,j,k) : ブロック 1 グリッドの X 座標値 (倍精度実数型)
	(((yg1(i,j,k),i=-2,ie1+2),j=-2,je1+2),k=-2,ke1+2)	yg1(i,j,k) : ブロック 1 グリッドの Y 座標値 (倍精度実数型)
	(((zg1(i,j,k),i=-2,ie1+2),j=-2,je1+2),k=-2,ke1+2)	zg1(i,j,k) : ブロック 1 グリッドの Z 座標値 (倍精度実数型)

表 3-2 ブロック 2 グリッドファイルの書式

レコード番号	変数名	内容
1	ie2,je2,ke2	ブロック 2 I,J,K 方向のセル数（整数型）
2	(((xg2(i,j,k),i=-2,ie2+2),j=-2,je2+2),k=-2,ke2+2)	xg2(i,j,k) : ブロック 2 グリッドの X 座標値 (倍精度実数型)
	(((yg2(i,j,k),i=-2,ie2+2),j=-2,je2+2),k=-2,ke2+2)	yg2(i,j,k) : ブロック 2 グリッドの Y 座標値 (倍精度実数型)
	(((zg2(i,j,k),i=-2,ie2+2),j=-2,je2+2),k=-2,ke2+2)	zg2(i,j,k) : ブロック 2 グリッドの Z 座標値 (倍精度実数型)

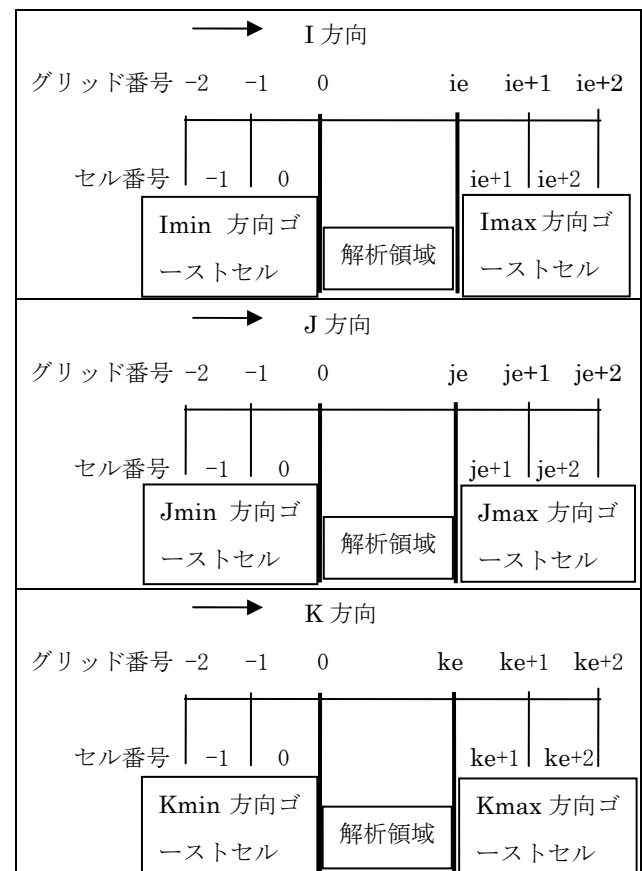


図 3-6 グリッド番号とセル番号の関係

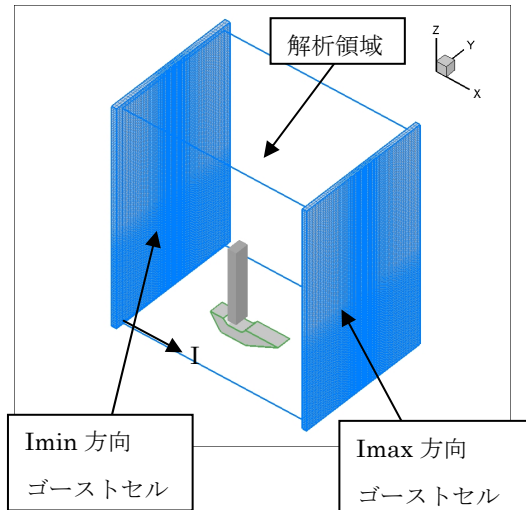


図 3-7 ブロック 1 I 方向ゴーストセル

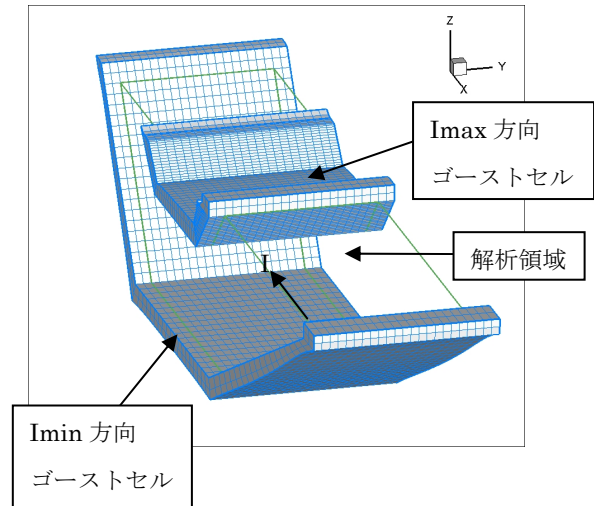


図 3-10 ブロック 2 I 方向ゴーストセル

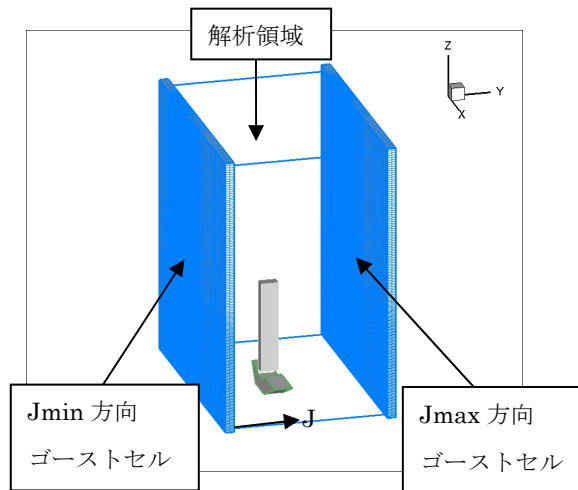


図 3-8 ブロック 1 J 方向ゴーストセル

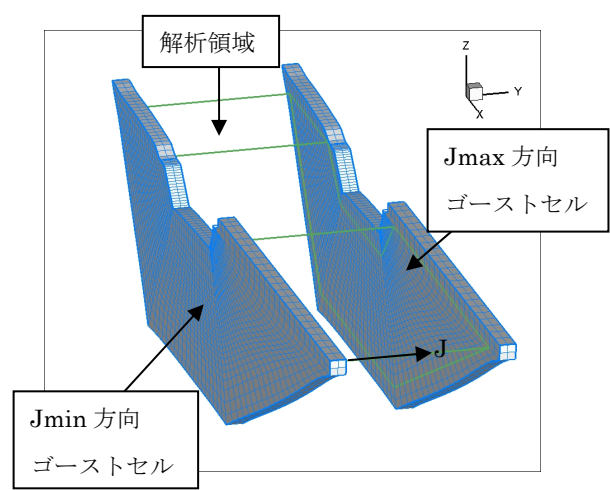


図 3-11 ブロック 2 J 方向ゴーストセル

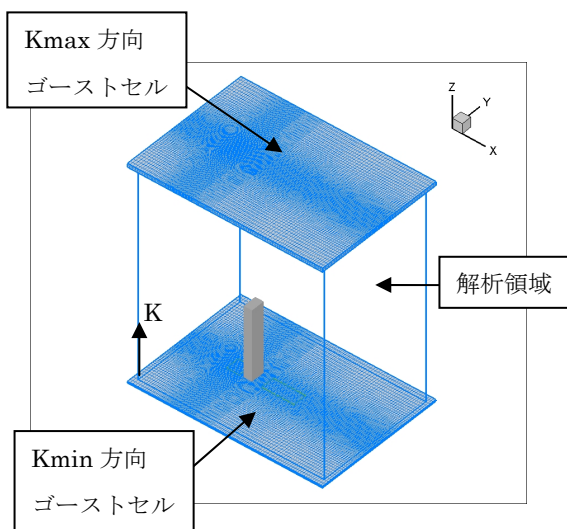


図 3-9 ブロック 1 K 方向ゴーストセル

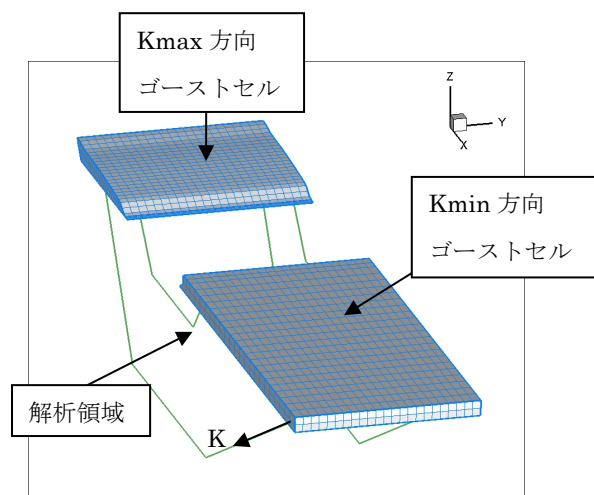


図 3-12 ブロック 2 K 方向ゴーストセル

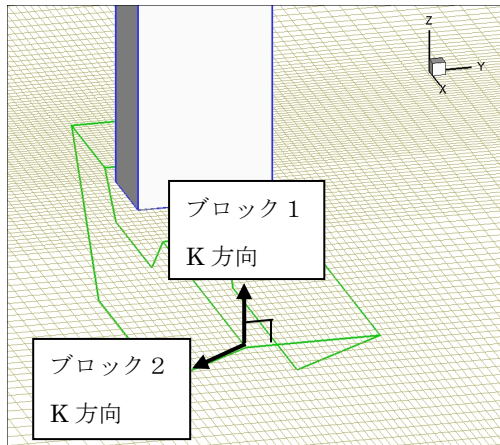


図 3-13 ブロック 1、ブロック 2 の K 方向インデックス

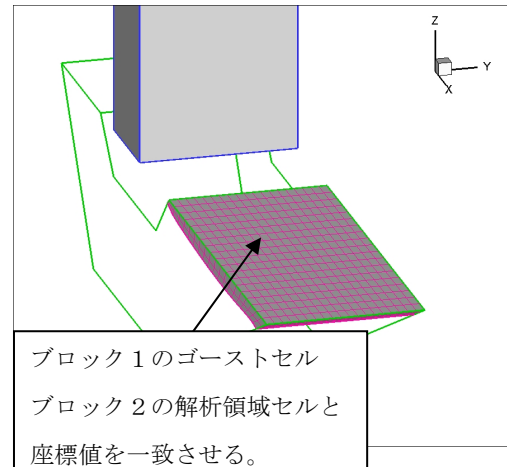


図 3-16 排煙溝出口面のブロック 1 ゴーストセル

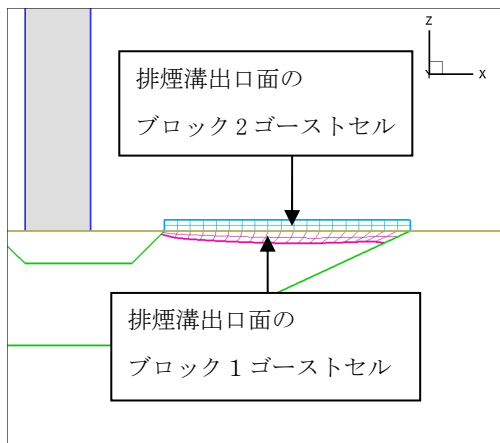


図 3-14 排煙溝出口面のゴーストセル

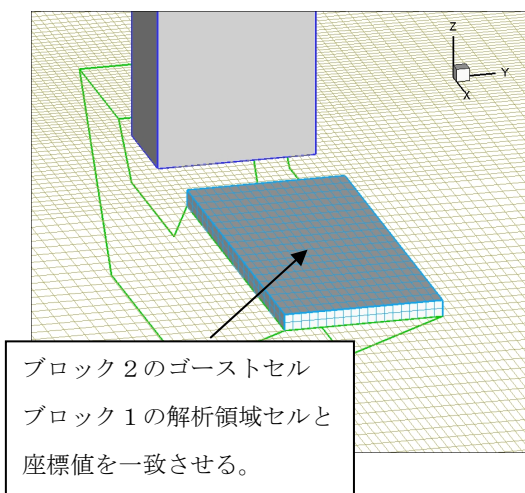


図 3-15 排煙溝出口面のブロック 2 ゴーストセル

(2) 物性値ファイル

物性値ファイルの内容を

- ・表 3-3 物性値ファイルの説明
- ・図 3-17 物性値ファイルのサンプル

に示す。

表 3-3 物性値ファイルの説明 (1/2)

行番号	変数名	説明
1	gamm	比熱比
2	tref	参照温度
3	tw	壁面温度 (2007 年 12 月現在、無効)
4	prn	プラントル数 (参考値)
5	rhoinf	自由流の密度
6	uinf	自由流の速度
7	pinf	自由流の圧力
8	tinf	自由流の温度
9	rhojet	メインロケットノズルから噴射するガスの密度
10	ujet	メインロケットノズルから噴射するガスの速度
11	pjet	メインロケットノズルから噴射するガスの圧力
12	tjet	メインロケットノズルから噴射するガスの温度

表 3-3 物性値ファイルの説明(2/2)

行番号	変数名	説明
13	rhosrb	補助ロケットノズルから噴射するガスの密度
14	usrb	補助ロケットノズルから噴射するガスの速度
15	psrb	補助ロケットノズルから噴射するガスの圧力
16	tsrb	補助ロケットノズルから噴射するガスの温度

1.4	! gamm	1
288.0d0	! tref	2
288.0d0	! tw	3
0.72d0	! prn	4
1.226d0	! rhoinf	5
0.0d0	! uinf	6
1.013d5	! pinf	7
288.0d0	! tinf	8
0.182d0	! rhojet	9
-3165.d0	! ujet	10
101300.d0	! pjet	11
1933.d0	! tjet	12
0.156d0	! rhosrb	13
-3198.d0	! usrb	14
101300.d0	! psrb	15
2251.d0	! tsrb	16

(注) ! 以降はコメント

図 3-17 物性値ファイルのサンプル

(3) 計算条件ファイル

計算条件ファイルの内容を、

- ・表 3-4 計算条件ファイルの説明
- ・図 3-18 計算条件ファイルのサンプル

に示す。また、図 3-19～図 3-25 に補足説明を示す。

表 3-4 計算条件ファイルの説明(1/4)

行数	変数名	説明
1	isave	可視化用ファイル出力ステップ間隔
1	itrmax	計算ステップ数
1	cfl	CFL 数
	dt	無次元時間増分 Δt
1	isym	対称条件フラグ (2007 年 12 月現在、無効)
1	icont	イニシャルラン／リスタートランフラグ = 0 : イニシャルラン = 1 : リスタートラン
1	savendir	可視化用ファイルを出力するディレクトリ名
1	njet	ブロック 2 の メインロケットのノズル数
	nsrb	ブロック 2 の 補助ロケットのノズル数
	idetail	PST 以外の地上構造物及びデフレクタが存在するか否かのフラグ = 0 : 存在しない = 1 : 存在する
(2007 年 12 月現在、無効)	is_jet1(i)	メインロケットノズルのブロック 1 I 方向開始セル番号
	ie_jet1(i)	メインロケットノズルのブロック 1 I 方向終了セル番号
	js_jet1(i)	メインロケットノズルのブロック 1 J 方向開始セル番号
	je_jet1(i)	メインロケットノズルのブロック 1 J 方向終了セル番号
	ks_jet1(i)	メインロケットノズルのブロック 1 K 方向開始セル番号
	ke_jet1(i)	メインロケットノズルのブロック 1 K 方向終了セル番号

表 3-4 計算条件ファイルの説明(2/4)

行数	変数名	説明
nsrb (2007 年 12月 現在、 無効)	is_srb1(i)	補助ロケットノズルのブロック 1 I 方向開始セル番号
	ie_srb1(i)	補助ロケットノズルのブロック 1 I 方向終了セル番号
	js_srb1(i)	補助ロケットノズルのブロック 1 J 方向開始セル番号
	je_srb1(i)	補助ロケットノズルのブロック 1 J 方向終了セル番号
	ks_srb1(i)	補助ロケットノズルのブロック 1 K 方向開始セル番号
	ke_srb1(i)	補助ロケットノズルのブロック 1 K 方向終了セル番号
1 (図 3-19 参照)	is_out1	排煙溝出口面のブロック 1 I 方向開始セル番号
	ie_out1	排煙溝出口面のブロック 1 I 方向終了セル番号
	js_out1	排煙溝出口面のブロック 1 J 方向開始セル番号
	je_out1	排煙溝出口面のブロック 1 J 方向終了セル番号
	ks_out1	排煙溝出口面のブロック 1 K 方向開始セル番号
	ke_out1	排煙溝出口面のブロック 1 K 方向終了セル番号
1 (図 3-20 図 3-21 参照)	is_pst	射場構造物 (PST) のブロック 1 I 方向開始セル番号
	ie_pst	射場構造物 (PST) のブロック 1 I 方向終了セル番号
	js_pst	射場構造物 (PST) のブロック 1 J 方向開始セル番号
	je_pst	射場構造物 (PST) のブロック 1 J 方向終了セル番号
	ks_pst	射場構造物 (PST) のブロック 1 K 方向開始セル番号
	ke_pst	射場構造物 (PST) のブロック 1 K 方向終了セル番号

表 3-4 計算条件ファイルの説明(3/4)

行数	変数名	説明
10 (但し、 idetail =1 の時 に入力 する)	is_sub1(i)	地上構造物のブロック 1 I 方向開始セル番号
	ie_sub1(i)	地上構造物のブロック 1 I 方向終了セル番号
	js_sub1(i)	地上構造物のブロック 1 J 方向開始セル番号
	je_sub1(i)	地上構造物のブロック 1 J 方向終了セル番号
	ks_sub1(i)	地上構造物のブロック 1 K 方向開始セル番号
	ke_sub1(i)	地上構造物のブロック 1 K 方向終了セル番号
njet (図 3-22 図 3-23 参照)	is_jet2(i)	メインロケットノズルのブロック 2 I 方向開始セル番号
	ie_jet2(i)	メインロケットノズルのブロック 2 I 方向終了セル番号
	js_jet2(i)	メインロケットノズルのブロック 2 J 方向開始セル番号
	je_jet2(i)	メインロケットノズルのブロック 2 J 方向終了セル番号
	ks_jet2(i)	メインロケットノズルのブロック 2 K 方向開始セル番号
	ke_jet2(i)	メインロケットノズルのブロック 2 K 方向終了セル番号
	ke_jet2(i)	メインロケットノズルのブロック 2 K 方向終了セル番号

表 3-4 計算条件ファイルの説明(4/4)

行数	変数名	説明
(図 3-22 図 3-24 図 3-25 参照)	nsrb	補助ロケットノズルのブ ロック 2 I 方向開始セル番 号
	ie_srb2(i)	補助ロケットノズルのブ ロック 2 I 方向終了セル番 号
	js_srb2(i)	補助ロケットノズルのブ ロック 2 J 方向開始セル番 号
	je_srb2(i)	補助ロケットノズルのブ ロック 2 J 方向終了セル番 号
	ks_srb2(i)	補助ロケットノズルのブ ロック 2 K 方向開始セル 番号
	ke_srb2(i)	補助ロケットノズルのブ ロック 2 K 方向終了セル 番号
2 (但し、 idetail=1 の時に 入力 する)	is_sub2(i)	デフレクタのブロック 2 I 方向開始セル番号
	ie_sub(i)	デフレクタのブロック 2 I 方向終了セル番号
	js_sub2(i)	デフレクタのブロック 2 J 方向開始セル番号
	je_sub(i)	デフレクタのブロック 2 J 方向終了セル番号
	ks_sub2(i)	デフレクタのブロック 2 K 方向開始セル番号
	ke_sub2(i)	デフレクタのブロック 2 K 方向終了セル番号

200	!isave	
2000	!itrmax	
0.5,5.0e-3	!cfl, dt	
0	!isym	
0	!icont	
"/large/data"		ブロック 1
1,4,0	!njet,nsrb,idetail	njet 行 必要 但し無効
84, 90, 84,90, 0, 0	!(block1 jet)	
84, 90, 74,82, 0, 0	!(blcok1 srb1)	ブロック 1 nsrb 行 必要 但し無効
84, 90, 92,98, 0, 0	!(blcok1 srb2)	
74, 82, 84,90, 0, 0	!(blcok1 srb3)	
92, 98, 84,90, 0, 0	!(blcok1 srb4)	
96, 78, 35,73, 1, 2	!(block1 out)	
60, 68, 35,53, 1,99	!(block1 PST)	ブロック 2
9, 11, 9,11, 58,59	!(block2 jet)	njet 行 必要
9,11, 6, 8, 58,59	!(block2 srb1)	ブロック 2 nsrb 行 必要
9,11, 12,14, 58,59	!(block2 srb2)	
6, 8, 9,11, 58,59	!(block2 srb3)	
12,14, 9,11, 58,59	!(block2 srb4)	

(注) !以降はコメント

図 3-18 計算条件ファイルのサンプル

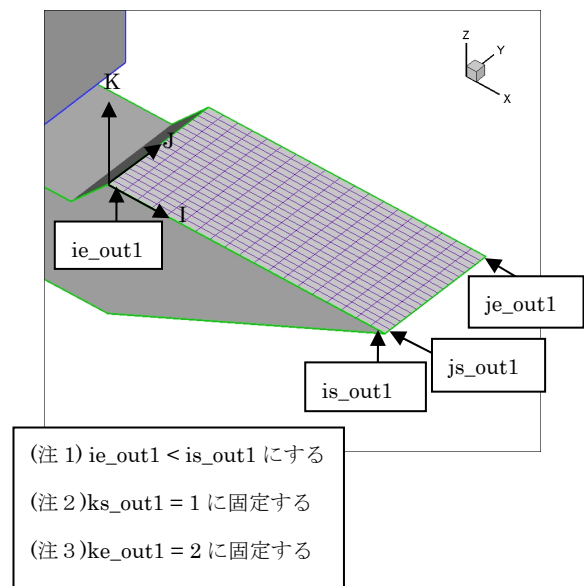


図 3-19 排煙溝出口面のセル番号

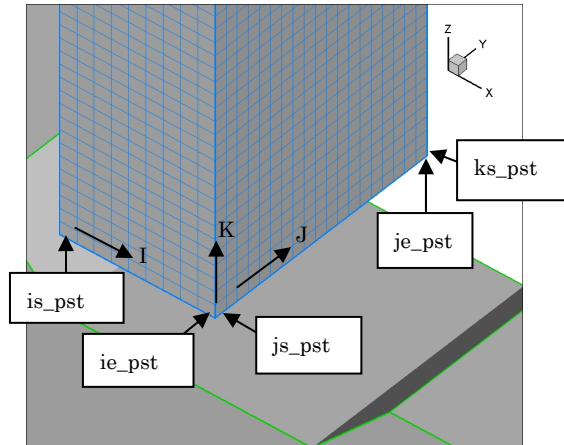


図 3-20 PST のセル番号 (1/2)

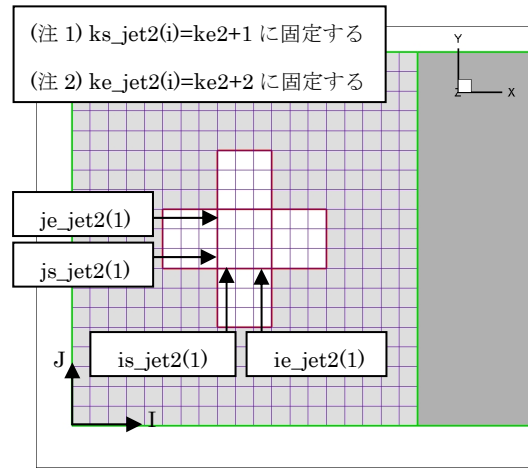


図 3-23 メインロケットノズルのセル番号

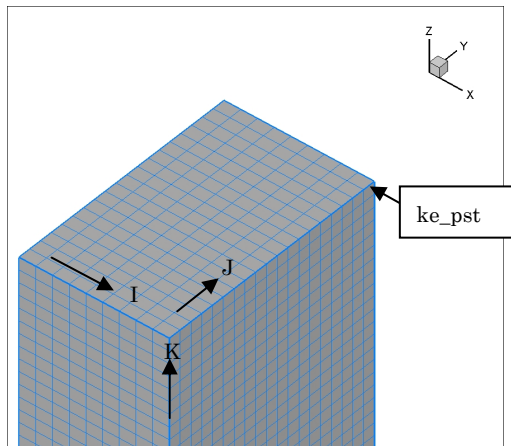


図 3-21 PST のセル番号 (2/2)

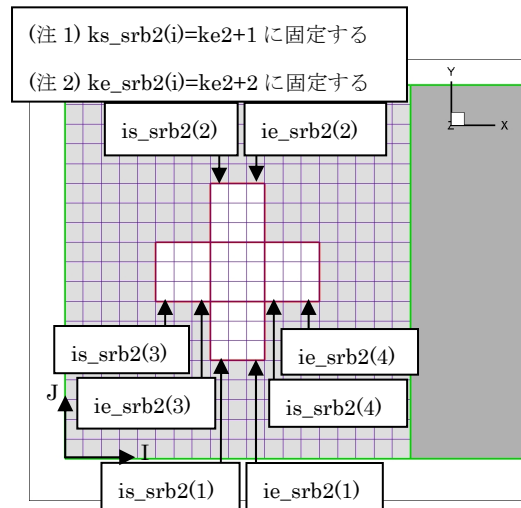


図 3-24 補助ロケットノズルのセル番号 (1/2)

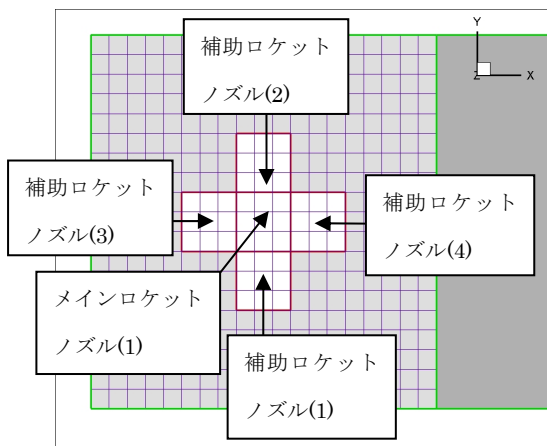


図 3-22 ロケットのノズル

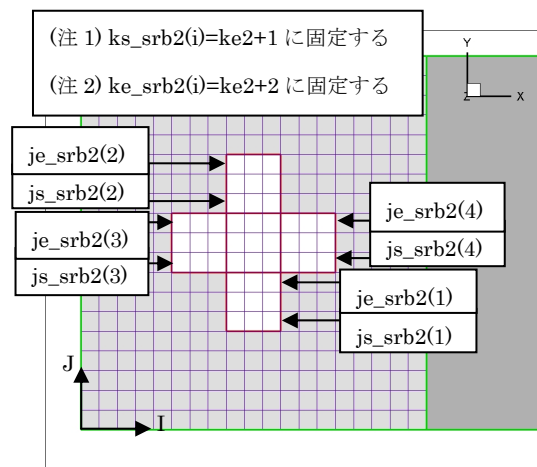


図 3-25 補助ロケットノズルのセル番号 (2/2)

(4) nsub スクリプト

ジョブを実行する場合、nsub スクリプトを用いる。
nsub スクリプトの詳細は、CeNSS のオンラインマニュアル等を参照する。

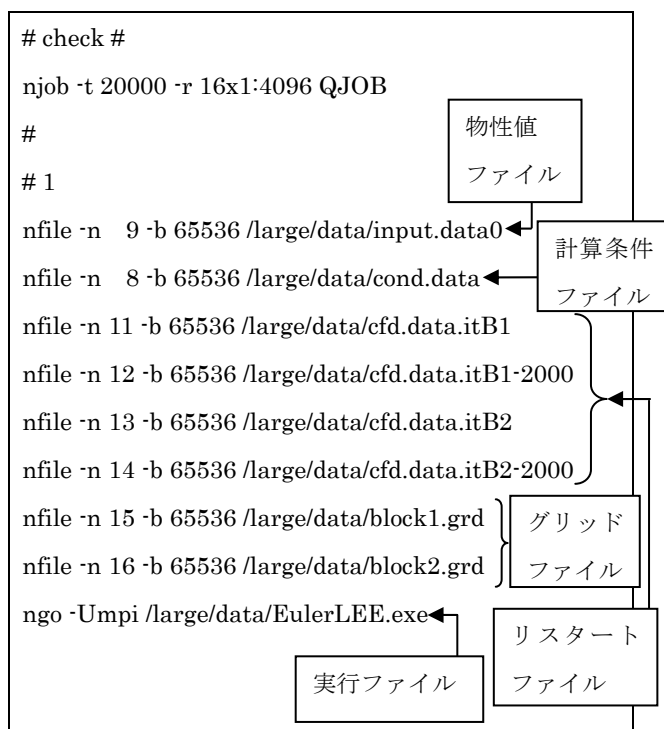


図 3-26 nsub スクリプトファイルのサンプル

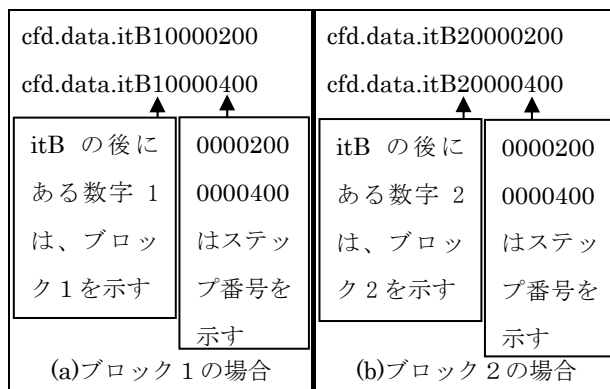


図 3-27 可視化用結果ファイルの名称

表 3-5 可視化用結果ファイル(ブロック 1)の書式

レコード番号	変数名	内容
1	q1(i,j,k,l) ,i=-1,ie1 +2) ,j=-1,je1 +2) ,k=-1,ke 1+2) ,l=1,5)	ブロック 1 におけるセル中心での無次元物理量(単精度実数型) q1(i,j,k,1) : 密度 ρ q1(i,j,k,2) : i 方向運動量 ρu q1(i,j,k,3) : j 方向運動量 ρv q1(i,j,k,4) : k 方向運動量 ρw q1(i,j,k,5) : エネルギー e
2	itr ,tim	itr : ステップ番号(整数型) tim : 無次元時刻 (倍精度実数型)

3.2.3 可視化用結果ファイル

計算が終了すると、可視化用結果ファイル(2種類、ブロック 1 及びブロック 2 の結果ファイル)が作成される。可視化用結果ファイルが作成された後、必要に応じて後処理を行なう。可視化用結果ファイルの名称、及び内容を、

- ・ 図 3-27 可視化用結果ファイルの名称
- ・ 表 3-5 可視化用結果ファイル(ブロック 1)の書式
- ・ 表 3-6 可視化用結果ファイル(ブロック 2)の書式

に示す。

表 3-6 可視化用結果ファイル(ブロック 2)の書式

レコード番号	変数名	内容
1	q2(i,j,k,l) ,i=-1,ie2 +2) ,j=-1,je2 +2) ,k=-1,ke 2+2) ,l=1,5)	ブロック 2 におけるセル中心での無次元物理量(単精度実数型) q2(i,j,k,1) : 密度 ρ q2(i,j,k,2) : i 方向運動量 ρu q2(i,j,k,3) : j 方向運動量 ρv q2(i,j,k,4) : k 方向運動量 ρw q2(i,j,k,5) : エネルギー e
2	itr ,tim	itr : ステップ番号(整数型) tim : 無次元時刻 (倍精度実数型)

4. 解析例

4.1 解析モデル

3章で用いた簡易モデルにおける解析結果例を、以下に示す。(解析モデル及びメッシュは、図 3-1、図 3-4、図 3-5 を参照)

ブロック 1、ブロック 2 のセル数は、以下の通りである。

ブロック 1 : $131 \times 88 \times 209 = 2,409,352$

ブロック 2 : $20 \times 20 \times 58 = 23,200$

ブロック 1 I 方向セル数 : 131

ブロック 1 J 方向セル数 : 88

ブロック 1 K 方向セル数 : 209

ブロック 2 I 方向セル数 : 20

ブロック 2 J 方向セル数 : 20

ブロック 2 K 方向セル数 : 58

メインロケットノズル数 : 1

補助ロケットノズル数 : 4

4.2 解析結果

前述の解析モデルにて、有次元時間 8 秒まで計算した。計算終了後、可視化用結果ファイル (cfdata.itB1***等) を用いて、次の後処理を行なった。

- ・観測点 (ロケット軌道上 120m) における圧力データを抽出し、圧力増分変動グラフを作成。
- ・抽出した圧力データをパワースペクトルデータに変換し、観測点におけるパワースペクトルデータを作成。
- ・Plot3D 形式に変換し、Y 軸に関して対象な断面の任意時刻における圧力等高線図を作成。

図 4-1 に、観測点及び圧力等高線表示断面を示す。また、解析結果例として

- ・図 4-2 に、観測点における圧力増分変動グラフ
- ・図 4-3 に、観測点におけるパワースペクトルグラフ
- ・図 4-4～図 4-9 に、Y 軸に関して対象な断面の任意時刻での圧力等高線図

を示す。

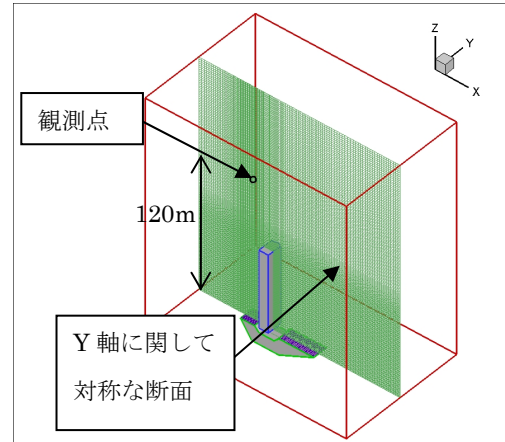


図 4-1 観測点及び圧力等高線表示断面

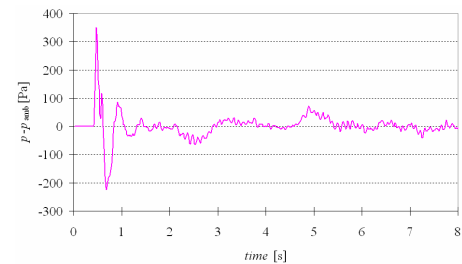


図 4-2 観測点における圧力増分変動グラフ

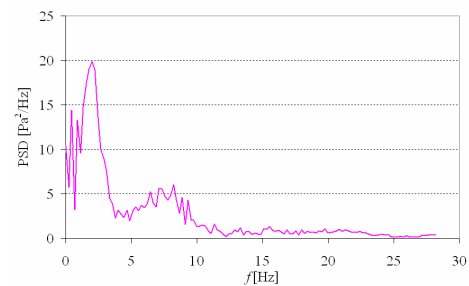


図 4-3 観測点におけるパワースペクトルグラフ

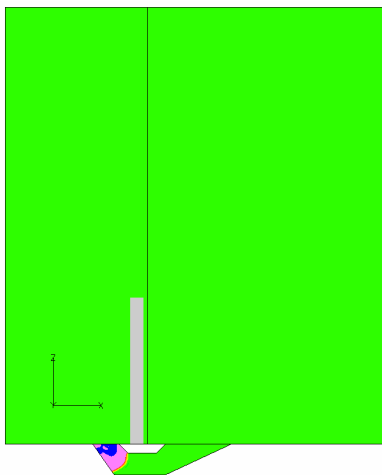


図 4-4 圧力等高線 (0.02 秒)

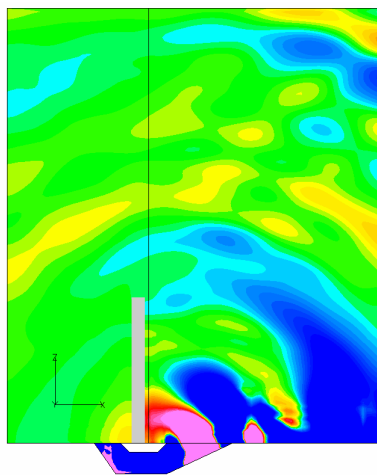


図 4-7 圧力等高線 (1.76 秒)

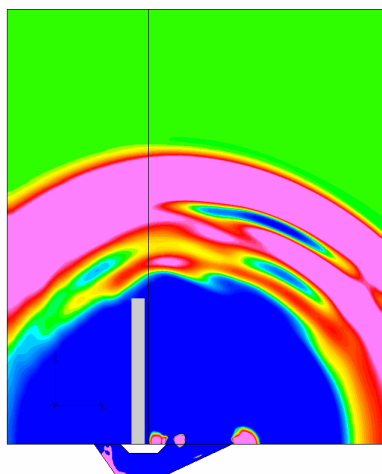


図 4-5 圧力等高線 (0.48 秒)

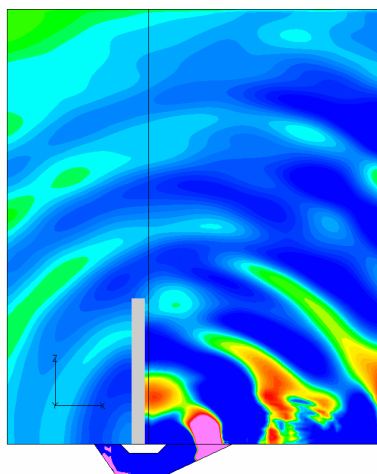


図 4-8 圧力等高線 (2.41 秒)

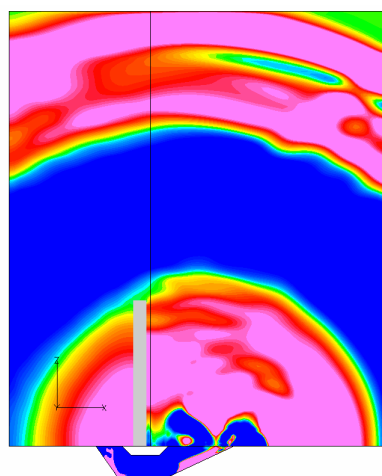


図 4-6 圧力等高線 (0.69 秒)

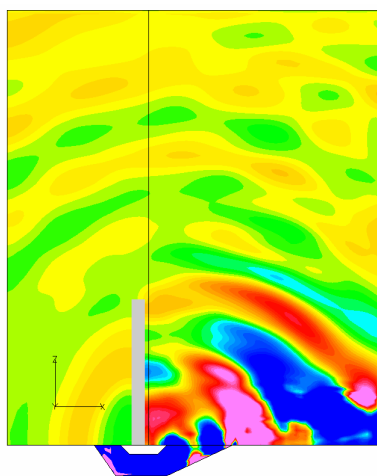


図 4-9 圧力等高線 (3.47 秒)

5. 補足

本報告書では、Euler/LEE コードのうち、Euler オプション使用方法の解説を行なった。

現在の Euler オプションでは、次のような改良すべき点を有している。

- ・セル数を変更する場合、ソースプログラム内の変数を変更し実行ファイルを再作成している。セル数が変わる度に実行ファイルを再作成するようでは、作業効率が悪い。
- ・並列計算を行なう場合、全 PE が全メッシュ情報を記憶している。本来ならば、各 PE が計算に必要な領域の情報のみを記憶すればよい。このままでは、メモリの使用効率が悪い。
- ・使用可能なブロック数は2ブロックのみである。これを複雑な形状をした射場（ブロック数が3以上ある場合）に適用できない。

今後は、上記問題点の改良を行ないたいと考えている。

また LEE バージョンについては、次年度に第2報で報告する予定である。

参考文献

- (1) Acoustic Loads Generated By The Propulsion System, NASA SP8072 (1971).
- (2) Saito, T., et al., AIAA Paper 2004-2342 (2004).
- (3) Men'shov, I., and Nakamura, Y., J. of Comp. Phys., Vol. 182 (2002), pp. 118-148.
- (4) Kaneko, M., et al., AIAA Paper 2006-801 (2006).
- (5) 北村圭一他, 第20回数値流体力学シンポジウム (2006), p.28.
- (6) 北村圭一他, JAXA SP-06-010 (2006), pp. 83-88.
- (7) 村上桂一他, JAXA SP-06-010 (2006), pp. 107-112.

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-07-015

発 行 平成 20年 2月 29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 弘久写真工業(株)

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

© 2008 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。

