



ISSN 1349-1121  
JAXA-RM-08-009

JAXA

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

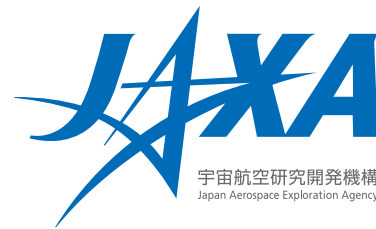
# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## 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2報 LEEオプション

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

JAXA-RM-08-009



2009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2報 LEE オプション\*

岩永 則城<sup>\*1</sup>, 金田 英和<sup>\*1</sup>, 村上 桂一<sup>\*2</sup>, 橋本 敦<sup>\*2</sup>,  
北村 圭一<sup>\*3</sup>, 青山 剛史<sup>\*2</sup>, 中村 佳朗<sup>\*4</sup>

## Euler/LEE Code for Acoustic Load Evaluation during Rocket Launch -Second Volume LEE Option- \*

Noriki IWANAGA<sup>\*1</sup>, Hidekazu KANEDA<sup>\*1</sup>, Keiichi MURAKAMI<sup>\*2</sup>,  
Atsushi HASHIMOTO<sup>\*2</sup>, Keiichi KITAMURA<sup>\*3</sup>, Takashi AOYAMA<sup>\*2</sup>,  
and Yoshiaki NAKAMURA<sup>\*4</sup>

### 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 spacecraft such as a rocket. Conventionally, the prediction has been made by empirical methods. In these methods shielding and reflection are not considered. To solve these problems, we have been developing an Euler/LEE(Linearized Euler Equation) hybrid code and applying it to the acoustic evaluation of H-IIA's launch pad. In this report, we explain how to use the LEE option of the hybrid code.

**Keywords :** Euler/LEE code, Acoustic loads, Rocket

### 概 要

ロケット打ち上げ時に生じる構造振動や内部騒音の主因とな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、そうした手法では音響伝播過程における遮蔽や反射が考慮されていない。こうした問題を解決するために、我々は Euler/LEE コードを開発し、H-IIA の打ち上げ射場の音響評価に応用してきた。本報告では、第1報に引き続き当コードの LEE オプションの使用方法を解説する。

#### 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。こうした従来手法の粗さや制約は、数値計算を適用することで緩和され、より正確な音響効果予測が可能となる。この直接的関連として、音響解析手法として有効性をもつ Euler/LEE(Linearized Euler Equation)コード<sup>(2)-(4)</sup>が射場規模モデル用に拡張されてきた<sup>(5)-(7)</sup>。LEE は、Euler 方程式を線形化して得られる方程式であり、音波の伝播を精度よく捉えるのに適している。

本報告では、当コードの LEE オプションの使用方法を解説する。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。解説に当たり、かなり簡単なモデル化をした射場形状(直方体の地上構造物と曲がり管の排煙溝)を用いた。

#### 2. LEE 解析コードの概要

##### 2.1 LEE 解析コードの特徴

LEE 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。
- ・支配方程式は線形化 Euler 方程式(LEE)並びに理想気体の状態方程式である。
- ・ここでの線形化 Euler 方程式は、Men'shov ら<sup>(3)</sup>に従って導出されるものである。すなわち、圧縮性 Euler 方

\* 平成 20 年 12 月 10 日受付 (Received 10 December, 2008)

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

\*2 研究開発本部 数値解析グループ (Numerical Analysis Group, Aerospace Research and Development Directorate)

\*3 情報・計算工学センター (JAXA's Engineering Digital Innovation Center)

\*4 名古屋大学 (Nagoya University)

程式を有限体積法によって空間離散化後、線形化して得られた保存型方程式である。

- 数値流束の計算には、変分リーマン問題の解<sup>(3)</sup>を用いている。
- MUSCL(Monotone Upstream-centered Schemes for Conservation Law) 法あるいは WENO(Weighted Essentially Non-Oscillatory)法により物理量を空間 3 次あるいは 5 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(Message-Passing Interface)を用いて並列化している。

## 2.2 基礎方程式

### 2.2.1 微分形

出発点となる基礎方程式は圧縮性 Euler 方程式であり、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、 $\delta^{ji}$  : 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、 $\rho$  : 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、 $\gamma$  : 完全気体の比熱

比 (=1.4) である。変数は、参照長  $L_{\text{ref}} = 1\text{m}$ 、参照時間  $t_{\text{ref}} = L_{\text{ref}}/c [\text{sec}]$  ( $c$ :音速)、参照質量  $m_{\text{ref}} = \rho_{\infty} L^3 [\text{kg}]$  ( $\rho_{\infty}$  : 自由流の密度)を用いて無次元化する。

### 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、 $\omega_i$  :  $i$  番目セルの体積、 $s_{\sigma}$  :  $i$  番目セルの  $\sigma$  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。 $\sigma$  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、 $\mathbf{T}_{\sigma}$  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。 $\mathbf{F}_{\sigma}$  は境界面上で平均した局所一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。

### 2.2.3 線形化

流れ場の量をベース流れ場(背景流れ場)と音響擾乱場に分離し、前者に比べて後者は十分に小さいものとする。ベース場は他の手法によって得られており、擾乱の影響を受けないものとする。一方、擾乱場は、得られた線形化方程式の右辺の音源項で生成され、伝播時はベース場の影響を受けるものとする。

導出においては、まず、流れ場変数を分離する。

$$\mathbf{q}_i = \bar{\mathbf{q}}_i + \varepsilon \hat{\mathbf{q}}_i \quad (2-10)$$

ここで、 $\bar{\mathbf{q}}_i$  : ベース場、 $\hat{\mathbf{q}}_i$  : 擾乱場、 $\varepsilon \ll 1$  である。この時、物理流束は、

$$\mathbf{F}_\sigma = \bar{\mathbf{F}}_\sigma + \hat{\mathbf{F}}_\sigma + \tilde{\mathbf{F}}_\sigma \quad (2-11)$$

のように 3 つの項に分離される。それぞれ、 $\bar{\mathbf{F}}_\sigma : O(1)$  のベース流れ場流束、 $\hat{\mathbf{F}}_\sigma : O(\varepsilon)$  の音響擾乱場流束、 $\tilde{\mathbf{F}}_\sigma : O(\varepsilon^2)$  の非線形音響擾乱場流束である。

次に、分離式(2-10) (2-11)を空間離散化方程式(2-5)に代入し、 $\varepsilon$  に関して同じオーダーの項を集めることにより、音響擾乱に対する方程式を得る。

$$\omega_i \frac{d\hat{\mathbf{q}}_i}{dt} + \sum_\sigma s_\sigma \mathbf{T}_\sigma^{-1} \hat{\mathbf{F}}_\sigma = \omega_i \mathbf{S}_i \quad (2-12)$$

$$\hat{\mathbf{F}}_\sigma = A(\bar{\mathbf{Q}}_\sigma) \hat{\mathbf{Q}}_\sigma \quad (2-13)$$

ここで  $A(\mathbf{Q}) = \partial \mathbf{F} / \partial \mathbf{Q}$  は局所 1 次元非粘性流束のヤコビアン行列である。導出の際は、次の仮定を用いた。

仮定 1 : ベース場変数は離散化 Euler 方程式(2-5)を満足するため、 $O(1)$  の項は全て取り除ける。

仮定 2 : 非線形音響流束  $\tilde{\mathbf{F}}_\sigma$  は、最も音波生成過程に寄与するものであるが、適当なソース項  $\mathbf{S}_i$  に組み込む。 $\mathbf{S}_i$  は単位体積当たりの音源項である。

更に、物理流束  $\hat{\mathbf{F}}_\sigma$  を Men'shov らによる変分リーマン問題解法<sup>(3)</sup>並び WENO 法による 5 次精度物理量構築法<sup>(15)</sup>を用いて評価した数値流束  $\hat{\mathbf{F}}_\sigma^{num}$  によって置き換える。結局、解くべき式は次のように書ける。

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\mathbf{q}}_i}{dt} &= \mathbf{R}_i(\hat{\mathbf{q}}, \bar{\mathbf{q}}) \\ \mathbf{R}_i(\hat{\mathbf{q}}, \bar{\mathbf{q}}) &= \mathbf{S}_i - \frac{1}{\omega_i} \sum_\sigma s_\sigma \mathbf{T}_\sigma^{-1} \hat{\mathbf{F}}_\sigma^{num} \end{aligned} \quad (2-14)$$

数値流束評価に関し、Euler オプション<sup>(16)</sup>では Roe の近似リーマン解法ならびに 3 次精度 MUSCL 法による物理量内挿を用いたが、LEE オプションではリーマン並び

に変分リーマン問題の近似解ならびに 3 次精度 MUSCL 法あるいは 5 次精度 WENO 法による物理量構築法を用いる。解くべき離散式についても、Euler オプションとは異なり、LEE の式(2-12)の右辺には音源項が存在し、擾乱場の時間発展はベース場の影響を受けることが示されている。

### 2.2.4 時間離散化

時間離散化には、Euler 計算の場合と同様、3 段階 3 次精度のルンゲクッタ法を用いる。これは

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_i^{(1)} &= \mathbf{q}_i^n + \frac{1}{3} \Delta t \mathbf{R}_i(\mathbf{q}_i^n, \bar{\mathbf{q}}^n) \\ \mathbf{q}_i^{(2)} &= \mathbf{q}_i^n + \frac{1}{2} \Delta t \mathbf{R}_i(\mathbf{q}_i^{(1)}, \bar{\mathbf{q}}^n) \\ \mathbf{q}_i^{n+1} &= \mathbf{q}_i^n + \Delta t \mathbf{R}_i(\mathbf{q}_i^{(2)}, \bar{\mathbf{q}}^n) \end{aligned} \quad (2-15)$$

のように実装できる。 $\Delta t$  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。

### 2.2.5 音源

音源項  $\mathbf{S}_i$  は音響擾乱生成をモデル化した項であり、①入手可能な実験データ、②直接数値シミュレーションや適当な制限下での LES で得られた計算結果、③解析的なモデル化、等の方法で作られる。本コードでは③を採用し、 $p'_s$  : 音源圧力、 $\bar{q} = \sqrt{\bar{v}_i \bar{v}^i}$  : 速さ、を用いた次式

$$\mathbf{S}_i = \begin{Bmatrix} 1 \\ \bar{v}^1 \\ \bar{v}^2 \\ \bar{v}^3 \\ \left( \frac{1}{\gamma-1} + \frac{\bar{q}^2}{2} \right) \end{Bmatrix} p'_s \quad (2-16)$$

でモデル化する。このとき、 $\mathbf{S}_i$  は

$$p'_s = p_{in} \sin(2\pi f_{in} t) \quad (2-17)$$

なる形の唯一つの関数  $p'_s$  で与えられる。ここで  $p_{in}$ 、 $f_{in}$  は音源部分の振幅、周波数である。広がりのある音源を考える場合、ガウス分布表現

$$p_{in} = p_{in0} \exp \left[ -(\ln 2) \left\{ \frac{(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2 + (z-z_s)^2}{b^2} \right\} \right] \quad (2-18)$$

を用いて  $p_{in}$  を表す。ただし、 $(x_s, y_s, z_s)$  : 音源中心座標

値、 $b$  : 半値幅、 $p_{in0}(=const.)$  : 音源中心振幅値である。  
広がりのない音源を考える場合、デルタ関数を用いた表現

$$p_{in} = p_{in0} \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad (2-19)$$

を使う。このとき、音源圧力は音源中心座標値を有する  
1 個のセル内のみ分布することになる。

### 2.3 境界条件

音波成分を精度よく捕らえるには、壁や流出流入部分  
に設定する境界条件の適切性が大切である。この点は近  
年の CAA(Computational Aeroacoustics)に関する国際学会  
(8)~(11)や関連論文(12)~(14)等においても着目されてきた。そ  
こで、解析領域の外側に吸収層(sponge region)を設けて、  
境界からの反射を防ぐ。また、方程式の右辺に吸収項を  
導入し、反射源となる音波成分をカットする。

具体的な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。
- ・流入条件はジェット流入を考慮しないために不要。
- ・音源条件は、ジェット並びにブルームを(2-17)~  
(2-19)でモデル化したものを入れる。
- ・(吸収層に設定した)流出条件は、音響擾乱を 0 とする。
- ・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 Men'shov らによる変分リーマン問題の  
解法<sup>(3)</sup>を用いている。セル境界左右における物理量は  
WENO 法による 5 次精度で内挿する。

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

まず、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

$$\begin{aligned} \mathbf{n} \cdot \mathbf{l} &= \mathbf{n} \cdot \mathbf{m} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{l} = 0 \\ \mathbf{n} \cdot \mathbf{n} &= \mathbf{l} \cdot \mathbf{l} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{m} = 1 \end{aligned} \quad (2-20)$$

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

$$\begin{aligned} U &= \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = n_1 v^1 + n_2 v^2 + n_3 v^3 \\ V &= \mathbf{l} \cdot \mathbf{v} = l_1 v^1 + l_2 v^2 + l_3 v^3 \\ W &= \mathbf{m} \cdot \mathbf{v} = m_1 v^1 + m_2 v^2 + m_3 v^3 \end{aligned} \quad (2-21)$$

と表せる。

次に、Euler 方程式の物理流束から LEE の物理流束 (音  
響擾乱流束) を取り出し、それを数値流束で置き換えた  
式を導く。Euler 方程式の物理流束は

$$\begin{aligned} (\mathbf{f}_\sigma^j n_j) &= \mathbf{f}_\sigma \\ &= \mathbf{T}_\sigma^{-1} \mathbf{T}_\sigma \mathbf{f}_\sigma \\ &= \mathbf{T}_\sigma^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n_1 & n_2 & n_3 & 0 \\ 0 & l_1 & l_2 & l_3 & 0 \\ 0 & m_1 & m_2 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \rho U \\ \rho U v^1 + n_1 p \\ \rho U v^2 + n_2 p \\ \rho U v^3 + n_3 p \\ U(e + p) \end{Bmatrix} \\ &= \mathbf{T}_\sigma^{-1} \begin{Bmatrix} \rho U \\ \rho U^2 + p \\ \rho UV \\ \rho UW \\ U(e + p) \end{Bmatrix} = \mathbf{T}_\sigma^{-1} \mathbf{F}_\sigma \end{aligned} \quad (2-22)$$

となることより、(2-9)の  $\mathbf{F}_\sigma$  を得る。 $\mathbf{F}_\sigma$  は直交座標系  
の流束と同じ形をしている。(2-22)に流れ場変数の分離  
式(2-10)ひいては流束分離式(2-11)を代入することによ  
り

$$\begin{aligned} (\mathbf{f}_\sigma^j n_j) &= (\bar{\mathbf{f}}_\sigma^j n_j) + (\hat{\mathbf{f}}_\sigma^j n_j) + (\tilde{\mathbf{f}}_\sigma^j n_j) \\ (\bar{\mathbf{f}}_\sigma^j n_j) &= \mathbf{T}_\sigma^{-1} \bar{\mathbf{F}}_\sigma \\ (\hat{\mathbf{f}}_\sigma^j n_j) &= \mathbf{T}_\sigma^{-1} \hat{\mathbf{F}}_\sigma \\ (\tilde{\mathbf{f}}_\sigma^j n_j) &= \mathbf{T}_\sigma^{-1} \tilde{\mathbf{F}}_\sigma \end{aligned} \quad (2-23)$$

を得る。第 2 項  $(\hat{\mathbf{f}}_\sigma^j n_j) = \mathbf{T}_\sigma^{-1} \hat{\mathbf{F}}_\sigma$  が解くべき方程式(2-12)  
で使用する音響擾乱物理流束である。この  $\hat{\mathbf{F}}_\sigma$  の代わり  
に、後述する数値流束  $\hat{\mathbf{F}}_\sigma^{num}$  を用いることにより、音響  
擾乱流束は次のように評価される。

$$\begin{aligned}
 (\hat{\mathbf{f}}_{\sigma}^j n_j) &= \mathbf{T}_{\sigma}^{-1} \hat{\mathbf{F}}_{\sigma}^{\text{num}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n_1 & l_1 & m_1 & 0 \\ 0 & n_2 & l_2 & m_2 & 0 \\ 0 & n_3 & l_3 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{F}_{\sigma,1}^{\text{num}} \\ \hat{F}_{\sigma,2}^{\text{num}} \\ \hat{F}_{\sigma,3}^{\text{num}} \\ \hat{F}_{\sigma,4}^{\text{num}} \\ \hat{F}_{\sigma,5}^{\text{num}} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \hat{F}_{\sigma,1}^{\text{num}} \\ n_1 \hat{F}_{\sigma,2}^{\text{num}} + l_1 \hat{F}_{\sigma,3}^{\text{num}} + m_1 \hat{F}_{\sigma,4}^{\text{num}} \\ n_2 \hat{F}_{\sigma,2}^{\text{num}} + l_2 \hat{F}_{\sigma,3}^{\text{num}} + m_2 \hat{F}_{\sigma,4}^{\text{num}} \\ n_3 \hat{F}_{\sigma,2}^{\text{num}} + l_3 \hat{F}_{\sigma,3}^{\text{num}} + m_3 \hat{F}_{\sigma,4}^{\text{num}} \\ \hat{F}_{\sigma,5}^{\text{num}} \end{bmatrix} \quad (2-24)
 \end{aligned}$$

次に、Men'shov らによる変分リーマン問題の解法スキームを用いて、数値流束  $\hat{\mathbf{F}}_{\sigma}^{\text{num}}$  を評価する。このスキームは、ゴドノフ法の立場つまり、隣接セル内部の摂動場が相互作用することによる、とする考えに立つてセル境界流束を近似するスキームである。従って、ベース流れ場のリーマン問題の解  $\bar{\mathbf{Q}}_{\sigma}^R$  ならびに変分リーマン問題の解  $\hat{\mathbf{Q}}_{\sigma}^R$

$$\begin{aligned}
 \bar{\mathbf{Q}}_{\sigma}^R &= \bar{\mathbf{Q}}_{\sigma}^R(\lambda, \bar{\mathbf{Q}}_{\sigma,l}^R, \bar{\mathbf{Q}}_{\sigma,r}^R)_{\lambda=0} \\
 \hat{\mathbf{Q}}_{\sigma}^R &= M_{\sigma,l}(\lambda, \bar{\mathbf{Q}}_{\sigma,l}, \bar{\mathbf{Q}}_{\sigma,r})_{\lambda=0} \hat{\mathbf{Q}}_{\sigma,l} + M_{\sigma,r}(\lambda, \bar{\mathbf{Q}}_{\sigma,l}, \bar{\mathbf{Q}}_{\sigma,r})_{\lambda=0} \hat{\mathbf{Q}}_{\sigma,r} \quad (2-25)
 \end{aligned}$$

を用いて数値流束を表す。ここで、 $\lambda = x/t$ ,

$$M_{\sigma,i} = M_{\sigma,i}(\lambda, \mathbf{Q}^R) = \partial \mathbf{Q}_{\sigma}^R / \partial \mathbf{Q}_{\sigma,i}, \quad i = l, r \quad (2-26)$$

である（詳細は文献(3)を参照）。また、 $\bar{\mathbf{Q}}_{\sigma,l}, \bar{\mathbf{Q}}_{\sigma,r}$  はベース流れ場変数のセル境界  $\sigma$  における左側ならびに右側の値であり、 $\hat{\mathbf{Q}}_{\sigma,l}, \hat{\mathbf{Q}}_{\sigma,r}$  は音響擾乱場の対応値である。セル境界における  $\hat{\mathbf{Q}}_{\sigma}^R$  に対応する速度  $\mathbf{v}'$  と圧力  $p'$  は、音速  $c$  を用いて次のように書ける。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{v}' &= \{c_l \mathbf{v}'_l + c_r \mathbf{v}'_r - (p'_r - p'_l)\} / \bar{c} \\
 p' &= \{c_r p'_l + c_l p'_r - c_l c_r (\mathbf{v}'_r - \mathbf{v}'_l)\} / \bar{c} \\
 \bar{c} &= c_l + c_r \quad (2-27)
 \end{aligned}$$

下付添字  $l, r$  はそれぞれセル境界における左側および右側の物理量の、セル境界に対する法線方向成分値を表わす。(2-25)の  $\bar{\mathbf{Q}}_{\sigma}^R$  と(2-25)~(2-27)で表した  $\hat{\mathbf{Q}}_{\sigma}^R$  を、(2-13)の  $\bar{\mathbf{Q}}_{\sigma}$  と  $\hat{\mathbf{Q}}_{\sigma}$  に代入することにより、最終的な数値流束の形

$$\begin{aligned}
 \hat{\mathbf{F}}_{\sigma}^{\text{num}} &= A(\bar{\mathbf{Q}}_{\sigma}^R) \hat{\mathbf{Q}}_{\sigma}^R \\
 &= A(\bar{\mathbf{Q}}_{\sigma}^R) [M_{\sigma,l} T_{\sigma} \hat{\mathbf{q}}_{\sigma,l} + M_{\sigma,r} T_{\sigma} \hat{\mathbf{q}}_{\sigma,r}] \quad (2-28)
 \end{aligned}$$

を得る。

#### 2.4.2 WENO 法による高次精度化

$\mathbf{Q}_{\sigma,i}$  ( $i = l, r$ ) (両者はベース流れ変数と音響擾乱変数の両方を表す) の評価は、5 次精度の WENO 法を用いて高次精度化する<sup>(15)</sup>。この手法では、各ステンシルに適切な重みを持たせて変数を近似する。重みの値は、流れのスムーズな領域では高次精度達成用の最適値に近づき、不連続流れ付近では不連続を含むステンシルの重みがほとんど 0 になるように選ばれる。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。簡単のために、 $i=l$  側のみを表示する。

$$\begin{aligned}
 (\mathbf{Q}_l)_{j+1/2} &= \omega_0 W_0(\mathbf{Q}_{j-2}, \mathbf{Q}_{j-1}, \mathbf{Q}_j) \\
 &\quad + \omega_1 W_1(\mathbf{Q}_{j-1}, \mathbf{Q}_j, \mathbf{Q}_{j+1}) \\
 &\quad + \omega_2 W_2(\mathbf{Q}_j, \mathbf{Q}_{j+1}, \mathbf{Q}_{j+2}) \quad (2-29)
 \end{aligned}$$

ここで、 $W_k$  ( $k = 0, 1, 2$ ) は

$$\begin{aligned}
 W_0(\mathbf{Q}_{j-2}, \mathbf{Q}_{j-1}, \mathbf{Q}_j) &= \frac{1}{3} \mathbf{Q}_{j-2} - \frac{7}{6} \mathbf{Q}_{j-1} + \frac{11}{6} \mathbf{Q}_j \\
 W_1(\mathbf{Q}_{j-1}, \mathbf{Q}_j, \mathbf{Q}_{j+1}) &= -\frac{1}{6} \mathbf{Q}_{j-1} + \frac{5}{6} \mathbf{Q}_j + \frac{1}{3} \mathbf{Q}_{j+1} \\
 W_2(\mathbf{Q}_j, \mathbf{Q}_{j+1}, \mathbf{Q}_{j+2}) &= \frac{1}{3} \mathbf{Q}_j + \frac{5}{6} \mathbf{Q}_{j+1} - \frac{1}{6} \mathbf{Q}_{j+2} \quad (2-30)
 \end{aligned}$$

のごとく補間され、重み  $\omega_k$  ( $k = 0, 1, 2$ ) は

$$\omega_0 = \frac{\alpha_0}{\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2}, \omega_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2}, \omega_2 = \frac{\alpha_2}{\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2} \quad (2-31)$$

と定義される。ただし、

$$\alpha_0 = \frac{1/10}{(\varepsilon + IS_0)^2}, \alpha_1 = \frac{6/10}{(\varepsilon + IS_1)^2}, \alpha_2 = \frac{3/10}{(\varepsilon + IS_2)^2} \quad (2-32)$$

上式中の  $\varepsilon, IS_k$  ( $k=0, 1, 2$ ) は、LEE オプションでは  $\varepsilon = 0$ ,  $IS_k = 1$  となる。ちなみに、Euler オプションでは、 $\varepsilon = 10^{-6}$  とし、 $IS_k$  ( $k=0, 1, 2$ ) は、

$$\begin{aligned}
 IS_0 &= \frac{1}{2} \{ (Q[j-2,1])^2 + (Q[j-1,1])^2 \} + (Q[j-2,2])^2 \\
 IS_1 &= \frac{1}{2} \{ (Q[j-1,1])^2 + (Q[j,1])^2 \} + (Q[j-1,2])^2 \\
 IS_2 &= \frac{1}{2} \{ (Q[j,1])^2 + (Q[j+1,1])^2 \} + (Q[j,2])^2
 \end{aligned}
 \tag{2-33}$$

となる。ただし、

$$\begin{aligned}
 Q[j-2,1] &= Q_{j-1} - Q_{j-2} \\
 Q[j-1,1] &= Q_j - Q_{j-1} \\
 Q[j,1] &= Q_{j+1} - Q_j \\
 Q[j+1,1] &= Q_{j+2} - Q_{j+1}
 \end{aligned}
 \tag{2-34}$$

$$\begin{aligned}
 Q[j-2,2] &= Q[j-1,1] - Q[j-2,1] = Q_j - 2Q_{j-1} + Q_{j-2} \\
 Q[j-1,2] &= Q[j,1] - Q[j-1,1] = Q_{j+1} - 2Q_j + Q_{j-1} \\
 Q[j,2] &= Q[j+1,1] - Q[j,1] = Q_{j+2} - 2Q_{j+1} + Q_j
 \end{aligned}
 \tag{2-35}$$

とする。なお、MUSCL 法による内挿は第 1 報 Euler オプション<sup>(16)</sup>に記述済みである。

### 3. 使用方法

本章では、図 3-1 及び図 3-2 に示す H-IIA 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したモデルで、ブロック数は 2 ブロックである)を例にとり、当コードの使用方法を説明する。但し 2009 年 2 月現在、当コードには次の制約がある。

- 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。
- ブロック 1 は、地面以外の 5 面(境界条件が流出条件の面)に対して吸収層を設定する事が可能である。吸収層を設定しない場合、境界面から音圧の不自然な反射が起こるため、吸収層を設定した方が良い。吸収層のセル幅は、 $\Delta x_i = ar^i$  ( $i$ : 吸収層の解析領域境界から数えて  $i$  番目のグリッド番号、 $a$ : 解析領域境界にあるセルの幅、 $r$ : 公比(1 より大きい値))によって決める。吸収層を設定した場合、これはブロック 1 に含める。また、ブロック 2 は流出条件の境界面が無いいため、吸収層を設定する必要が無い。
- 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。地面以外の 5 面に吸収層を設定した場合は、吸収層の境界面を流出

条件とし、解析領域と吸収層が接続している面には境界条件を設定しない。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。

また、PST (Pad Service Tower) 内についてもメッシュを作成し、この表面に境界条件を設定する。境界条件は、すべりありの断熱条件とする。

#### (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。

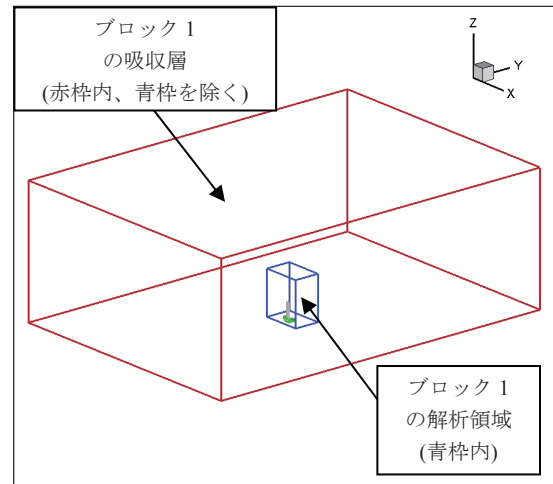


図 3-1 解析モデル

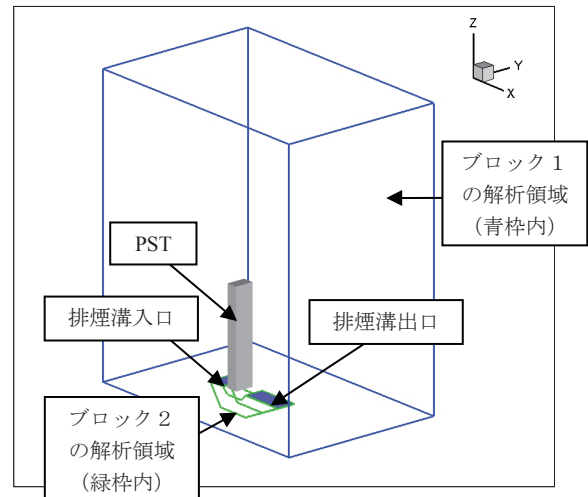
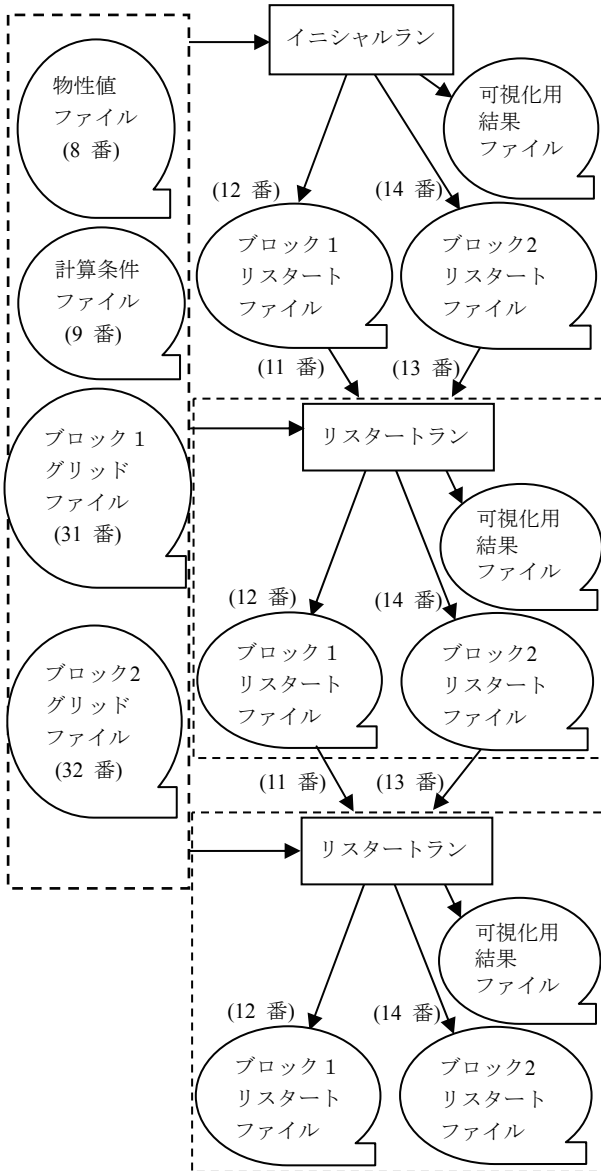


図 3-2 解析モデル (解析領域拡大)

### 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 3-3 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。

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

を再設定し、実行ファイルを再作成する。(図 3-4～図 3-7 参照)

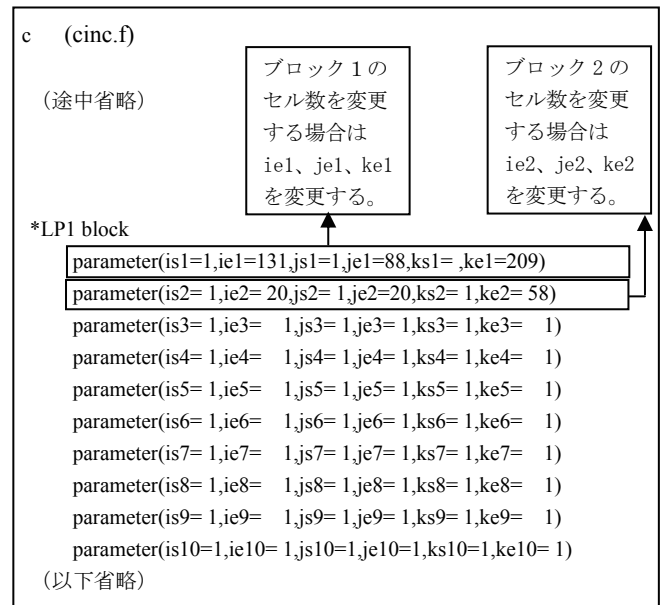


図 3-4 セル数の変更方法



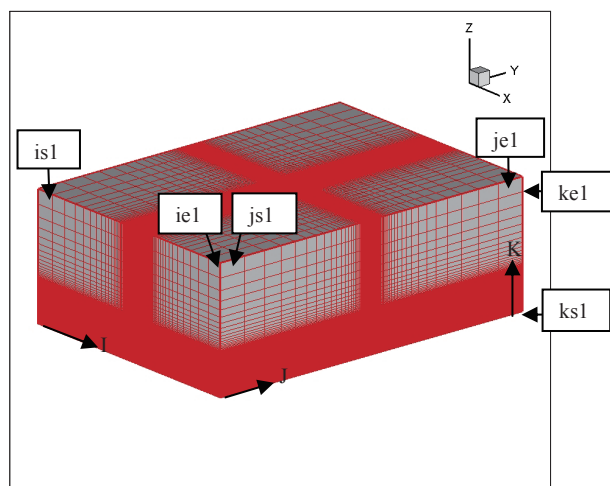


図 3-5 ブロック 1 のメッシュ及びセル番号  
(吸収層を含む場合)

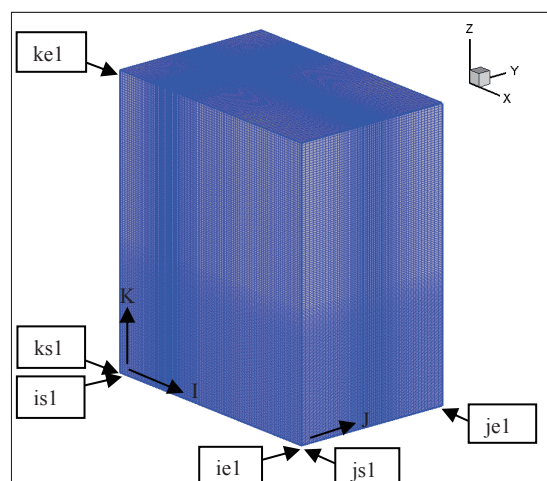


図 3-6 ブロック 1 のメッシュ及びセル番号  
(吸収層を含まない場合)

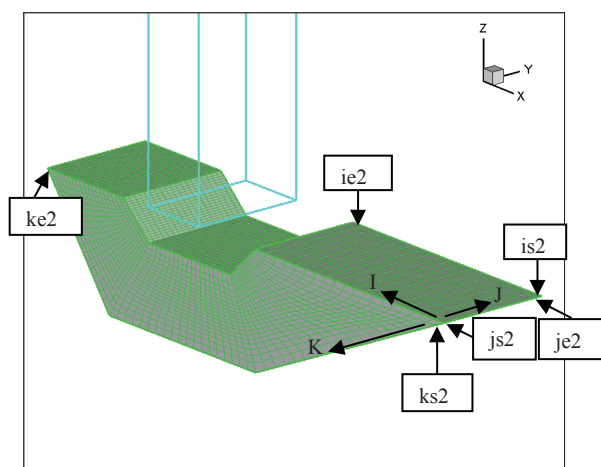


図 3-7 ブロック 2 のメッシュ及びセル番号

### 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 用グリッドファイルの書式
- ・表 3-2 ブロック 2 用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 3-8 参照）

ブロック 1 における解析領域の-K 方向を除く 5 面に吸収層を設定する事が出来る。（図 3-9～図 3-11 参照）

各ブロック境界面の外側に、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 の一方向及び + 方向に 2 セルずつ用意する。（図 3-12～図 3-17 参照）

各ブロックの K 方向を、次のように定義する。（図 3-18 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 3-19～図 3-21 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 の I,J,K 方向セル数 (整数型)
2	(((xgg(i,j,k,ib) ,i=-2,ie1+2) ,j=-2,je1+2) ,k=-2,ke1+2) ,ib=1) (((ygg(i,j,k,ib) ,i=-2,ie1+2) ,j=-2,je1+2) ,k=-2,ke1+2) ,ib=1) (((zgg(i,j,k,ib) ,i=-2,ie1+2) ,j=-2,je1+2) ,k=-2,ke1+2) ,ib=1)	xgg(i,j,k,ib) : ブロック 1 における グリッドの X 座標値 (倍精度実数型)  ygg(i,j,k,ib) : ブロック 1 における グリッドの Y 座標値 (倍精度実数型)  zgg(i,j,k,ib) : ブロック 1 における 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 の I,J,K 方向セル数 (整数型)
2	$(((((xgg(i,j,k,ib)$ $,i=-2,ie2+2)$ $,j=-2,je2+2)$ $,k=-2,ke2+2)$ $,ib=2)$ $(((((ygg(i,j,k,ib)$ $,i=-2,ie2+2)$ $,j=-2,je2+2)$ $,k=-2,ke2+2)$ $,ib=2)$ $(((((zgg(i,j,k,ib)$ $,i=-2,ie2+2)$ $,j=-2,je2+2)$ $,k=-2,ke2+2)$ $,ib=2)$	$xgg(i,j,k,ib)$ : ブロック 2 における グリッドの X 座標値 (倍精度実数型)  $ygg(i,j,k,ib)$ : ブロック 2 における グリッドの Y 座標値 (倍精度実数型)  $zgg(i,j,k,ib)$ : ブロック 2 における グリッドの Z 座標値 (倍精度実数型)

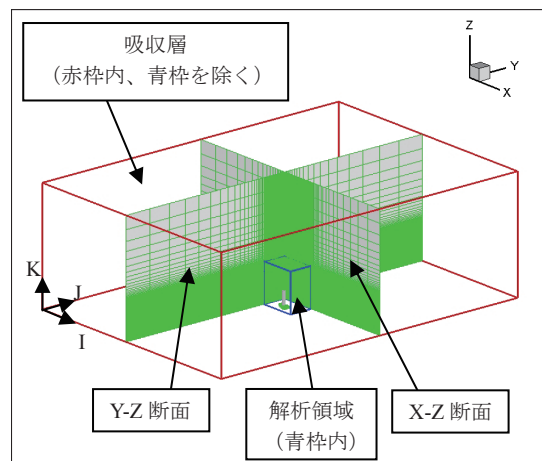


図 3-9 吸収層

I 方向 グリッド番号 -2 -1 0 ie ie+1 ie+2 セル番号 -1 0 ie+1 ie+2 Imin 方向 ゴーストセル    ブロック 1 又は ブロック 2    Imax 方向 ゴーストセル	
J 方向 グリッド番号 -2 -1 0 je je+1 je+2 セル番号 -1 0 je+1 je+2 Jmin 方向 ゴーストセル    ブロック 1 又は ブロック 2    Jmax 方向 ゴーストセル	
K 方向 グリッド番号 -2 -1 0 ke ke+1 ke+2 セル番号 -1 0 ke+1 ke+2 Kmin 方向 ゴーストセル    ブロック 1 又は ブロック 2    Kmax 方向 ゴーストセル	

図 3-8 グリッド番号とセル番号の関係

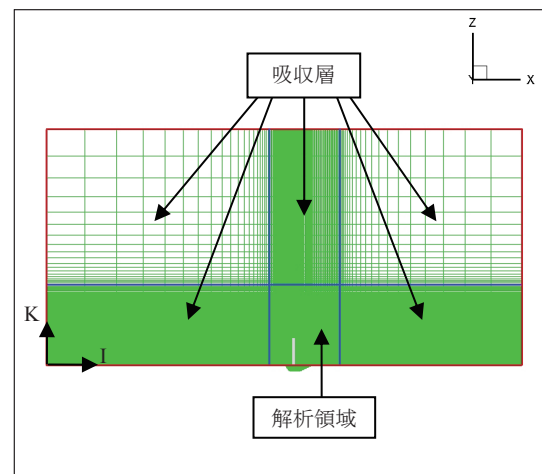


図 3-10 吸収層 (X-Z 断面)

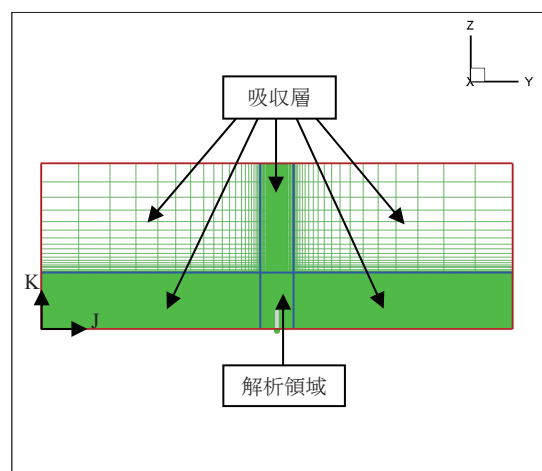


図 3-11 吸収層 (Y-Z 断面)

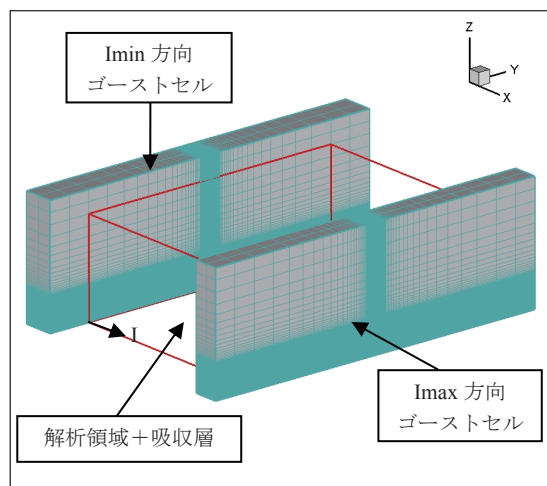


図 3-12 ブロック 1 の I 方向ゴーストセル  
(吸収層を含む場合)

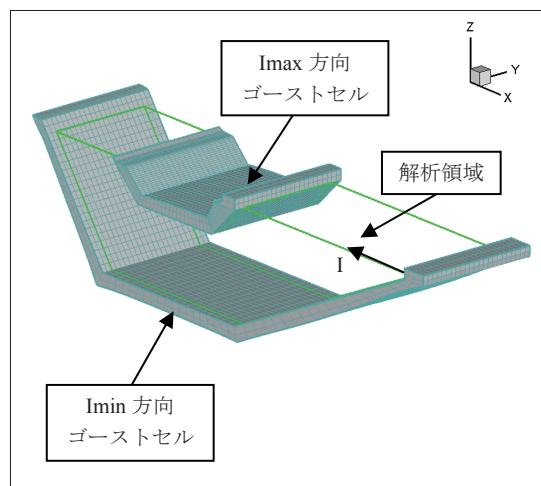


図 3-15 ブロック 2 の I 方向ゴーストセル

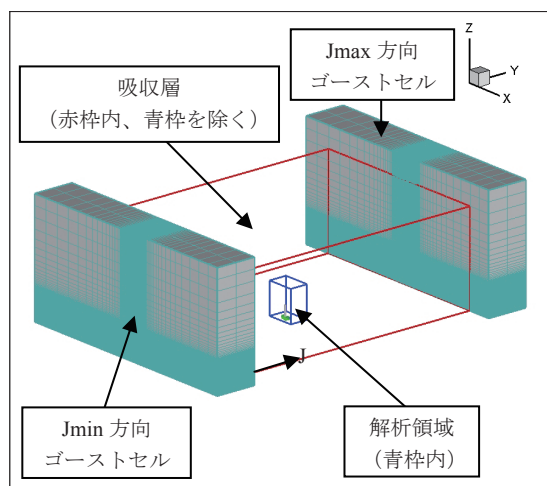


図 3-13 ブロック 1 の J 方向ゴーストセル  
(吸収層を含む場合)

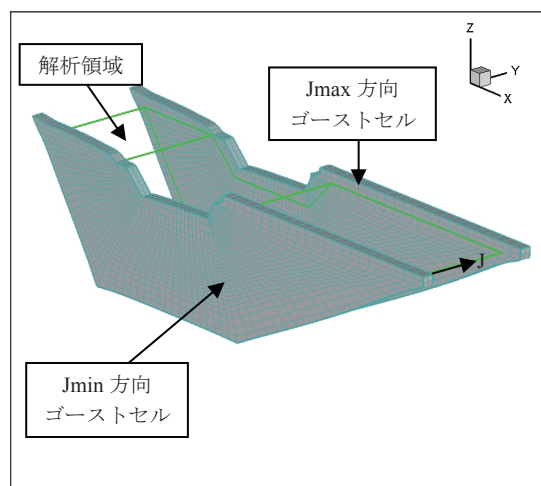


図 3-16 ブロック 2 の J 方向ゴーストセル

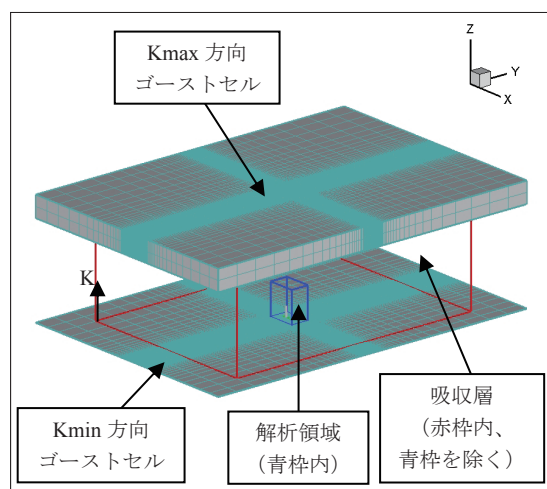


図 3-14 ブロック 1 の K 方向ゴーストセル  
(吸収層を含む場合)

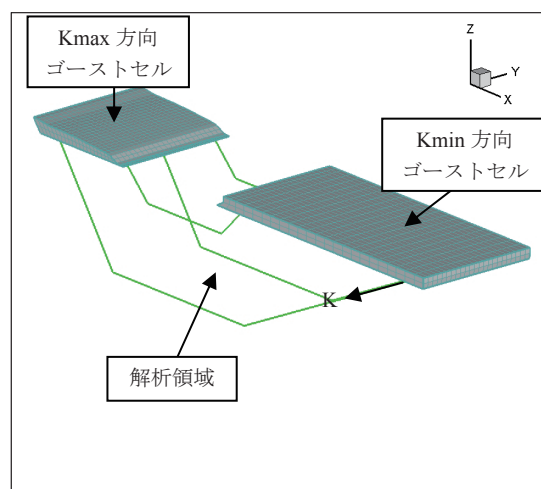


図 3-17 ブロック 2 の K 方向ゴーストセル

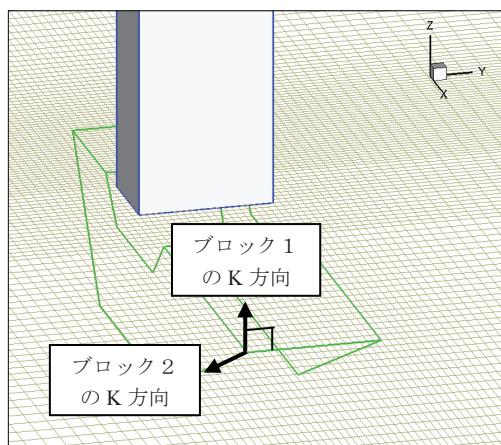


図 3-18 ブロック 1、ブロック 2 の K 方向インデックス

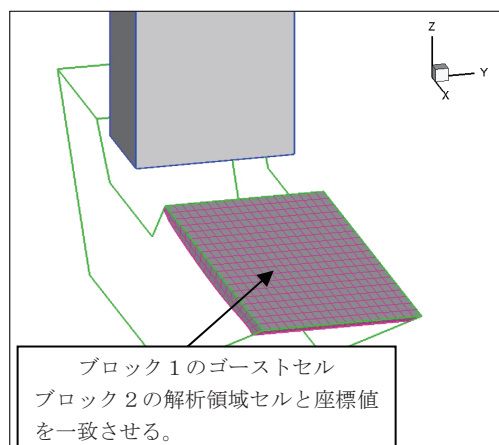


図 3-21 排煙溝出口面におけるブロック 1 のゴーストセル

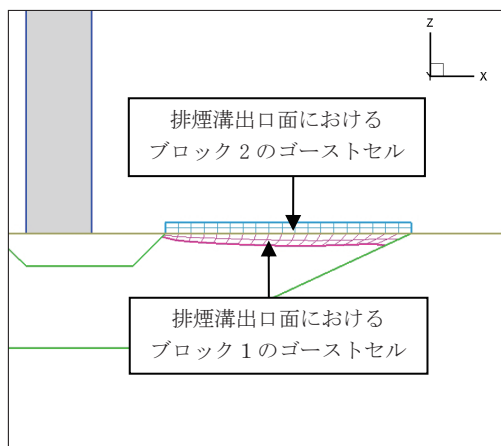


図 3-19 排煙溝出口面のゴーストセル

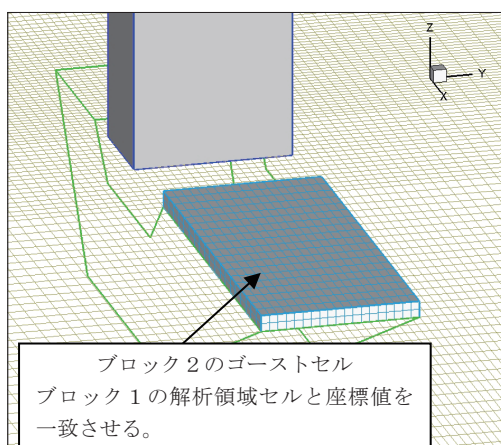


図 3-20 排煙溝出口面におけるブロック 2 のゴーストセル

## (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 3-22 物性値ファイルのサンプル

に示す。以下の表で、無効と記述してある変数についても何らかの値を入れる。

表 3-3 物性値ファイルの説明 (1/2)

行番号	変数名	説明	単位
1	gamm	比熱比	
2	tref	参照温度	K
3	tw	壁面温度 (2009 年 2 月現在、無効)	K
4	prn	プラントル数 (参考値)	
5	rhoinf	自由流の密度	kg/m <sup>3</sup>
6	uinf	自由流の速度	m/s
7	pinf	自由流の圧力	Pa
8	tinf	自由流の温度	K
9	rhojet	メインロケットノズルから 噴射するガスの密度 (LEE オプションでは無効)	kg/m <sup>3</sup>
10	ujet	メインロケットノズルから 噴射するガスの速度 (LEE オプションでは無効)	m/s
11	pjet	メインロケットノズルから 噴射するガスの圧力 (LEE オプションでは無効)	Pa
12	tjet	メインロケットノズルから 噴射するガスの温度 (LEE オプションでは無効)	K

表 3-3 物性値ファイルの説明(2/2)

行番号	変数名	説明	単位
13	rhosrb	補助ロケットノズルから 噴射するガスの密度 (LEE オプションでは無効)	kg/m <sup>3</sup>
14	usrb	補助ロケットノズルから 噴射するガスの速度 (LEE オプションでは無効)	m/s
15	psrb	補助ロケットノズルから 噴射するガスの圧力 (LEE オプションでは無効)	Pa
16	tsrb	補助ロケットノズルから 噴射するガスの温度 (LEE オプションでは無効)	K

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
0.18d0	! rhojet	9
-3200.d0	! ujet	10
100000.d0	! pjet	11
1900.d0	! tjet	12
0.16d0	! rhosrb	13
-3200.d0	! usrb	14
100000.d0	! psrb	15
2200.d0	! tsrb	16

(注) ! 以降はコメント

図 3-22 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 3-23 計算条件ファイルのサンプル

に示す。また、図 3-24～図 3-27 に補足説明を示す。

表 3-4 計算条件ファイルの説明(1/3)

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
	itest	プログラムのデバッグ用 (2009 年 2 月現在、無効)
	nlee	どのブロックまで LEE 計算 するかの個数 0 : 全ブロックオイラー計算 1 : ブロック 1 まで LEE 計算、 ブロック 2 はオイラー 計算 2 : ブロック 2 まで LEE 計算
1	itrmax	計算ステップ数
1	cfl	CFL 数
	dt	無次元時間増分 $\Delta t$
1	isym	対称条件フラグ (2009 年 2 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 における メインロケットのノズル数
	nsrb	ブロック 2 における 補助ロケットのノズル数
	npst	ブロック 1 の PST 数
(2008 年 3 月 現在 無効)	is_jet1(i)	メインロケットノズルに おけるブロック 1 の I 方向 開始セル番号
	ie_jet1(i)	メインロケットノズルに おけるブロック 1 の I 方向 終了セル番号
	js_jet1(i)	メインロケットノズルに おけるブロック 1 の J 方向 開始セル番号
	je_jet1(i)	メインロケットノズルに おけるブロック 1 の J 方向 終了セル番号
	ks_jet1(i)	メインロケットノズルに おけるブロック 1 の K 方向 開始セル番号
	ke_jet1(i)	メインロケットノズルに おけるブロック 1 の K 方向 終了セル番号

表 3-4 計算条件ファイルの説明 (2/3)

行数	変数名	説明
(2008 年 3 月 現在 無効)	nsrb	
	is_srb1(i)	補助ロケットノズルのブロック 1 における 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 における 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 における 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 における 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 における K 方向 開始セル番号
(図 3-24 参照)	1	
	is_out1	排煙溝出口面のブロック 1 における I 方向開始セル番号
	ie_out1	排煙溝出口面のブロック 1 における I 方向終了セル番号
	js_out1	排煙溝出口面のブロック 1 における J 方向開始セル番号
	je_out1	排煙溝出口面のブロック 1 における J 方向終了セル番号
	ks_out1	排煙溝出口面のブロック 1 における K 方向開始セル番号
(図 3-25 図 3-26 参照)	npst	
	is_pst	射場構造物 (PST) のブロック 1 における I 方向 開始セル番号
	ie_pst	射場構造物 (PST) のブロック 1 における I 方向 終了セル番号
	js_pst	射場構造物 (PST) のブロック 1 における J 方向 開始セル番号
	je_pst	射場構造物 (PST) のブロック 1 における J 方向 終了セル番号
	ks_pst	射場構造物 (PST) のブロック 1 における K 方向 開始セル番号
1	ke_pst	射場構造物 (PST) のブロック 1 における K 方向 終了セル番号
	jstyp	ジェットを考慮するときのオプション (2009 年 2 月現在、無効)

表 3-4 計算条件ファイルの説明 (3/3)

行数	変数名	説明
1	nsrc0	2009 年 2 月現在、無効
	nsrc1	2009 年 2 月現在、無効
	nsrc	音源の個数
(図 3-27 参照)	nsrc	
	iwave	値を 1 に固定
	xs	音源中心の x 座標値[m]
	ys	音源中心の y 座標値[m]
	zs	音源中心の z 座標値[m]
	dp0	音源中心の圧力振幅[Pa]
	b	音源分布の半値幅
	f	音源の周波数[Hz]
1	theta	音源の位相
	r0	音源の広さ[m] (音源中心からの半径で与える)
1	notim	可視化用結果ファイルに出力する 特定無次元時刻出力点数
(注)	otim(1) ~ otim(notim)	可視化用結果ファイルに出力する 特定無次元時刻

(注) ( (notim-1)/n ) + 1 行

notim : 特定無次元時刻出力点数

n : 1 行に記述する時刻点数 (n は notim 以下の値であれば、幾らでも良い)

```

100,1,2    *isave,itest,nlee /= 1
1000      *itrmax   org=5000
0.5,1.25e-1
0         *isym
0         *icont
"/large/data" *savedir
0,0,1     *njet,nsrb,npst
#---block 1---
116,98,55,73,1, 2
80,88,55, 3,1,99 ← ブロック 1
#---block 2---
0         *jstyp
0,0,2     *nsrc0,nsrc1,nsrc---LP1---1cell
1, 0.,6.5,-4.4,500000.,0.2,25.,0.,0. ← nsrc 行必要
1,31.,6.5,-4.4,500000.,0.2,25.,0.,0.
31        *notim
1400.5,1401.0,1401.5,1402.0,1402.5,
1403.0,1403.5,1404.0,1404.5,1405.0,
1405.5,1406.0,1406.5,1407.0,1407.5,
1408.0,1408.5,1409.0,1409.5,1410.0,
1410.5,1411.0,1411.5,1412.0,1412.5,
1413.0,1413.5,1414.0,1414.5,1415.0,
1415.5 *otim(notim)

```

notim 個のデータが必要

(注) \* 以降はコメント

図 3-23 計算条件ファイルのサンプル



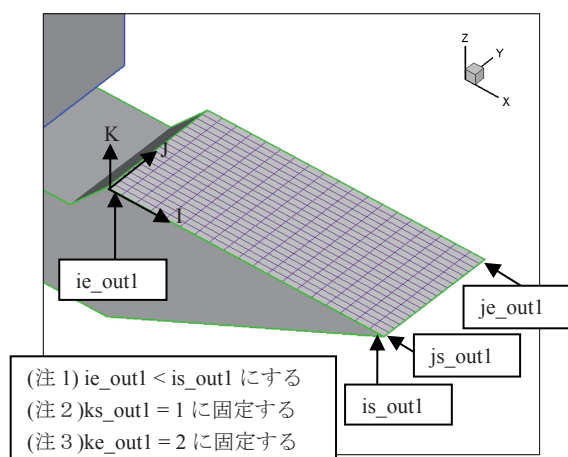


図 3-24 排煙溝出口面のセル番号

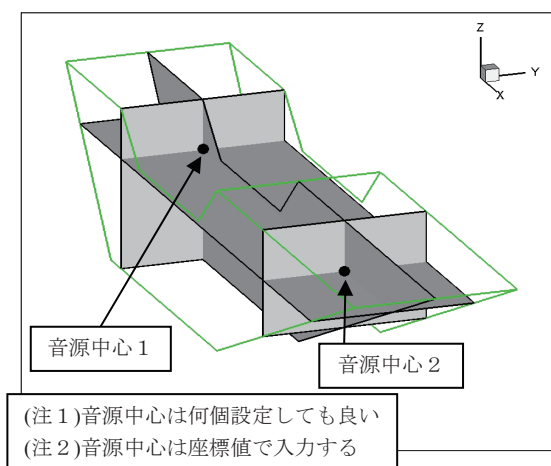


図 3-27 音源中心

## (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。nsub スクリプトファイルのサンプルを図 3-28 に示す。

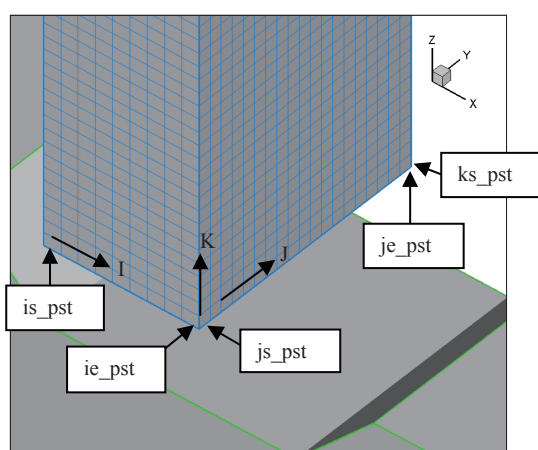


図 3-25 PST のセル番号 (1/2)

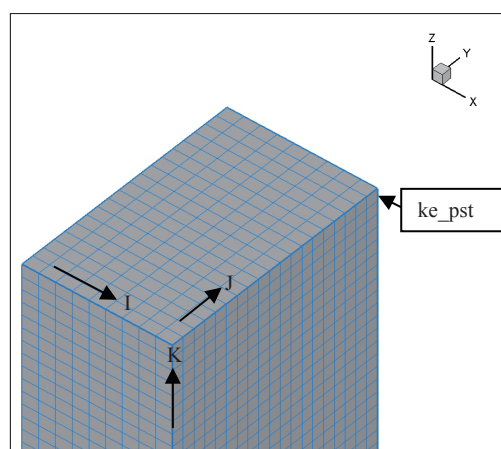


図 3-26 PST のセル番号 (2/2)

```

njob -r 32x1:20000 QJOB
nfile -n 8 -b 65536 /large/data/cond.data
nfile -n 9 -b 65536 /large/data/input.data0

nfile -n 11 -b 65536 /large/data/cfd.data.itB1
nfile -n 12 -b 65536 /large/data/cfd.data.itB1-2000
nfile -n 13 -b 65536 /large/data/cfd.data.itB2
nfile -n 14 -b 65536 /large/data/cfd.data.itB2-2000

nfile -n 31 -b 65536 /large/data/block1.grd
nfile -n 32 -b 65536 /large/data/block1.grd
nfile -n 41 -b 65536 /large/data/geo01.data
nfile -n 42 -b 65536 /large/data/geo02.data
nfile -n 51 -b 65536 /large/data/op-image.sol
nfile -n 100 -b 65536 /large/data/cfd.data.itBPE0
(途中省略)
nfile -n 115 -b 65536 /large/data/cfd.data.itBPE15
nfile -n 120 -b 65536 /large/data/tmp.rst
ngo -Umpi /large/data/EulerLEE.exe
  
```

物性値ファイル  
 計算条件ファイル  
 リスタートファイル  
 グリッドファイル  
 実行ファイル

(注)ワークファイルの説明を省略した。

図 3-28 nsub スクリプトファイルのサンプル

### 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 3-29 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。

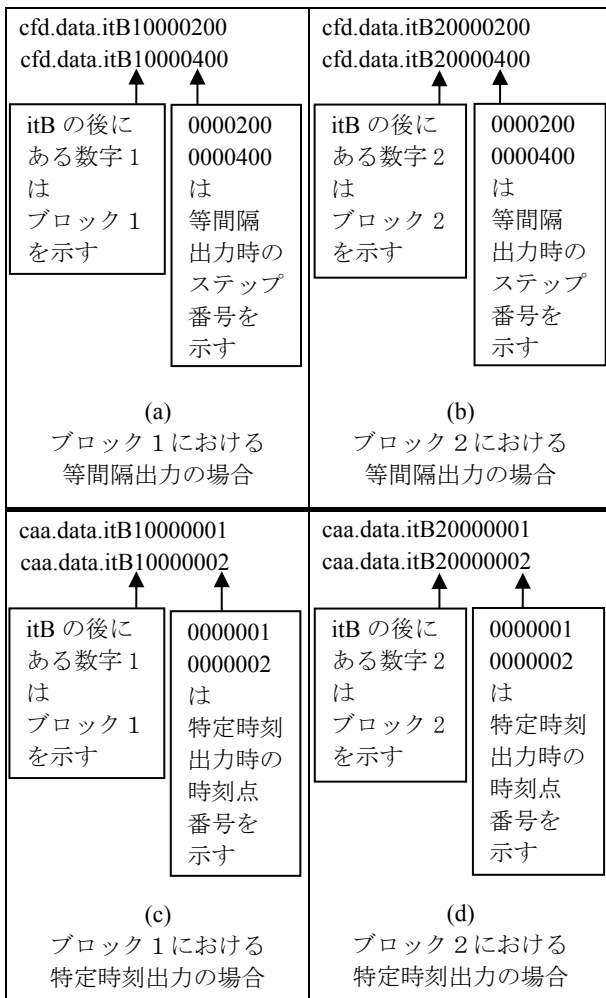


図 3-29 可視化用結果ファイルの名称

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	qg(i,j,k,l,ib) ,i=-1 ,ie1+2) ,j=-1 ,je1+2) ,k=-1 ,ke1+2) ,l=1,5) ,ib=1)	ブロック1におけるセル中心での無次元物理量 (等間隔出力の場合は単精度実数型 指定時刻出力の場合は倍精度実数型) qg(i,j,k,1,ib) : 密度 $\rho$ qg(i,j,k,2,ib) : i 方向運動量 $\rho u$ qg(i,j,k,3,ib) : j 方向運動量 $\rho v$ qg(i,j,k,4,ib) : k 方向運動量 $\rho w$ qg(i,j,k,5,ib) : 全エネルギー $e$
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)

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	qg(i,j,k,l,ib) ,i=-1 ,ie2+2) ,j=-1 ,je2+2) ,k=-1 ,ke2+2) ,l=1,5) ,ib=2)	ブロック2におけるセル中心での無次元物理量 (等間隔出力の場合は単精度実数型 指定時刻出力の場合は倍精度実数型) qg(i,j,k,1,ib) : 密度 $\rho$ qg(i,j,k,2,ib) : i 方向運動量 $\rho u$ qg(i,j,k,3,ib) : j 方向運動量 $\rho v$ qg(i,j,k,4,ib) : k 方向運動量 $\rho w$ qg(i,j,k,5,ib) : 全エネルギー $e$
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

第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。(解析モデルは図3-1、図3-2を参照。メッシュ図は図3-5～図3-7を参照。メッシュのセル数は表4-1を参照。)解析は、ブロック1に吸収層を設定した場合と、吸収層を設定しない場合(解析領域のみ)の2種類について行なった。

吸収層は、ブロック1地面以外の5面に20セルずつ設定した。<sup>(17),(18)</sup>(図4-1～図4-3を参照。)

音源は単極子音源を排煙溝入口付近と出口付近の2箇所用意し、 $p'_s = p_{in} \sin(2\pi f_{in} t)$ の音源圧力(圧力振幅 $p_{in} = 5.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、周波数 $f_{in}$ は10Hz、20Hz、30Hzの3ケース)を負荷した。(図4-4、表4-2を参照。)

表4-1 各ブロック各方向のセル数

ブロック番号	セル数			
	I	J	K	トータル
ブロック1 (解析領域+ 吸収層)	170	127	228	4,922,520
ブロック1 (解析領域)	130	87	208	2,352,480
ブロック2	19	19	57	20,577

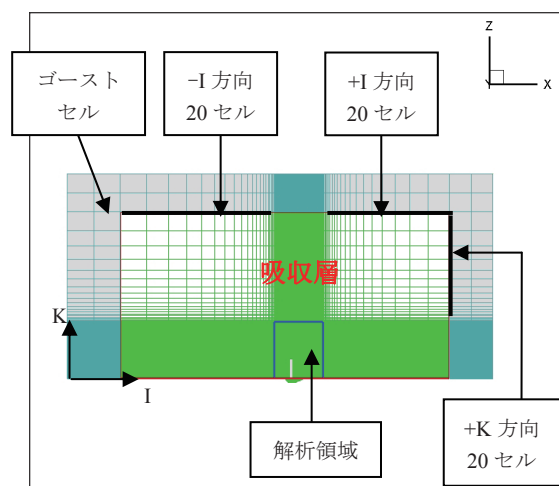


図4-2 吸収層 (X-Z 断面)

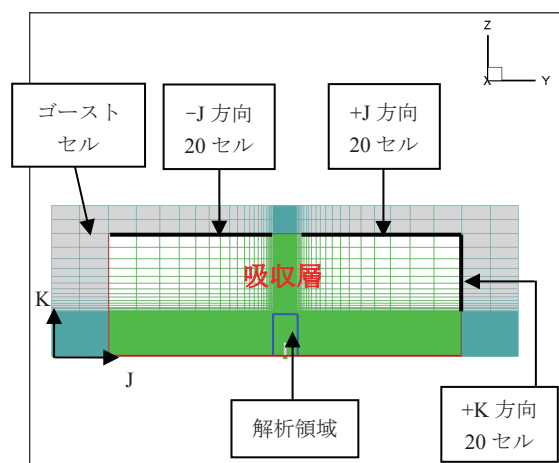


図4-3 吸収層 (Y-Z 断面)

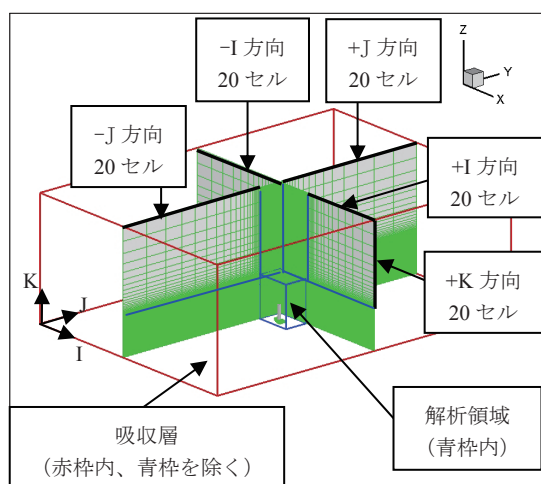


図4-1 吸収層

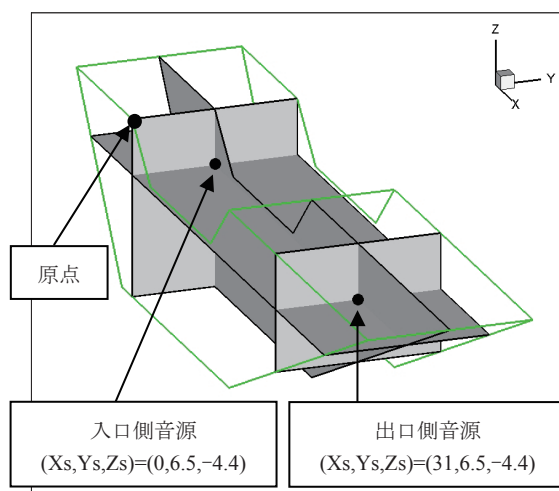


図4-4 音源位置

表 4-2 周波数パターン

有次元	周波数 $f$ [Hz]	10	20	30
	周期 $T$ [sec]	0.1	$5.0 \times 10^{-2}$	$3.33 \times 10^{-2}$
	角周波数 $\omega$ [rad/sec]	62.8	125.7	188.5
	波長 $\lambda$ [m]	34.0	17.0	11.3
無次元	周波数 $f^*$	$2.94 \times 10^{-2}$	$5.88 \times 10^{-2}$	$8.82 \times 10^{-2}$
	周期 $T^*$	34.0	17.0	11.3
	角周波数 $\omega^*$	0.185	0.370	0.554
	波長 $\lambda^*$	34.0	17.0	11.3

## 4.2 解析結果

前述の解析モデルにて、調和振動状態（有次元時間約 4 秒）に達するまで計算した。計算終了後、可視化用結果ファイル（`cfld.data.itB1XXX` 等）を用いて、次の後処理を行なった。

- ・観測点における調和振動状態後の圧力データを抽出し、音圧履歴グラフを作成。
- ・抽出した調和振動状態後の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調和振動状態後の任意時刻における圧力等高線図を作成。

図 4-5 に観測点の位置、図 4-6 に圧力等高線表示断面を示す。また解析結果例として、

- ・図 4-7～図 4-24 に、任意観測点における音圧履歴グラフ
- ・図 4-25～図 4-42 に、任意観測点におけるパワースペクトルグラフ
- ・図 4-43～図 4-48 に、Y 軸に関して対象な断面における調和振動状態後の任意時刻（有次元時間 4.12 秒）での圧力等高線図

を示す。

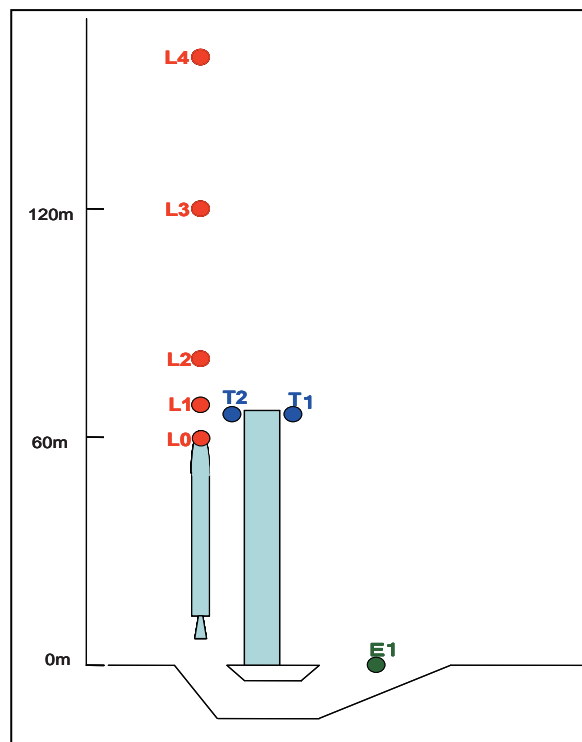


図 4-5 観測点の位置

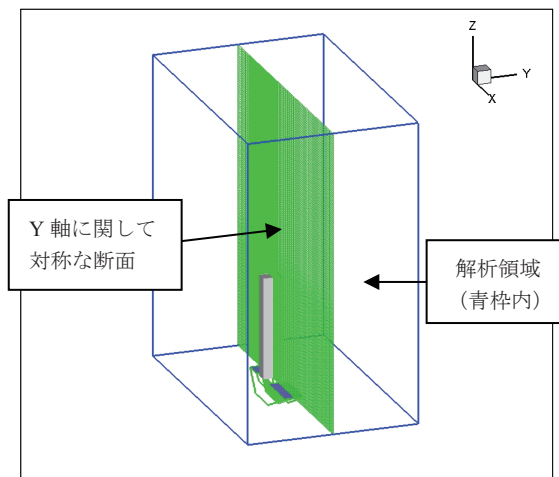


図 4-6 圧力等高線表示断面

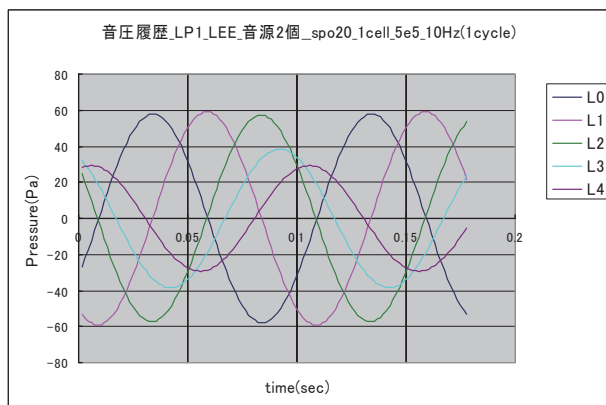


図 4-7 観測点 L0~L4 の音圧履歴(吸収層有、10Hz)

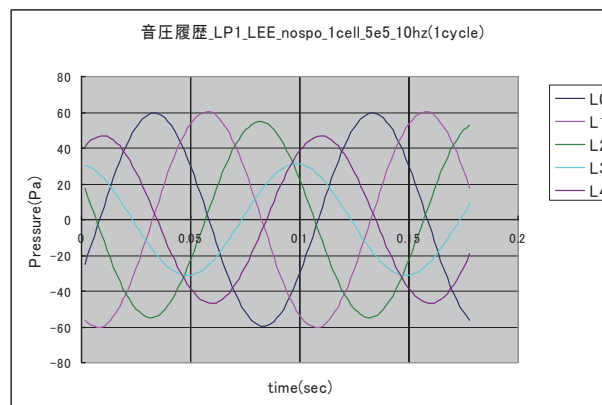


図 4-10 観測点 L0~L4 の音圧履歴(吸収層無、10Hz)

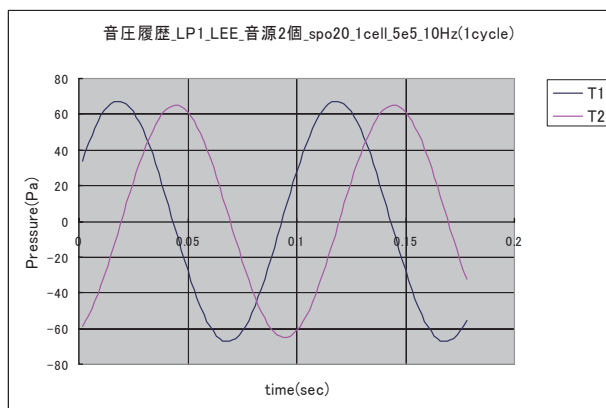


図 4-8 観測点 T1, T2 の音圧履歴(吸収層有、10Hz)

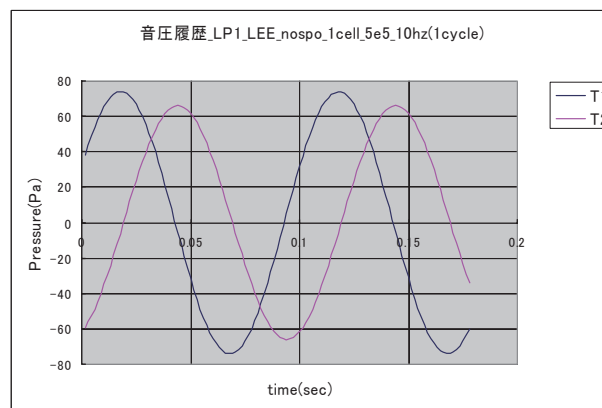


図 4-11 観測点 T1, T2 の音圧履歴(吸収層無、10Hz)

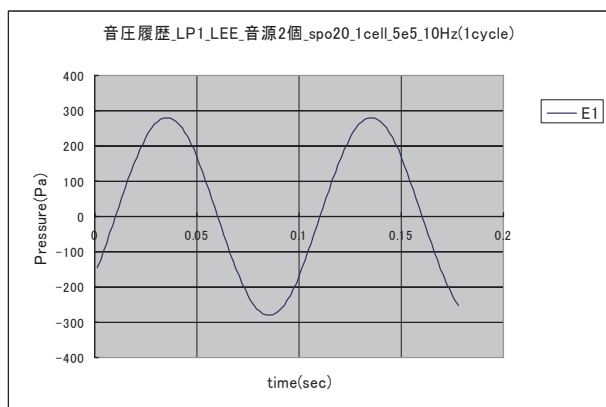


図 4-9 観測点 E1 の音圧履歴(吸収層有、10Hz)

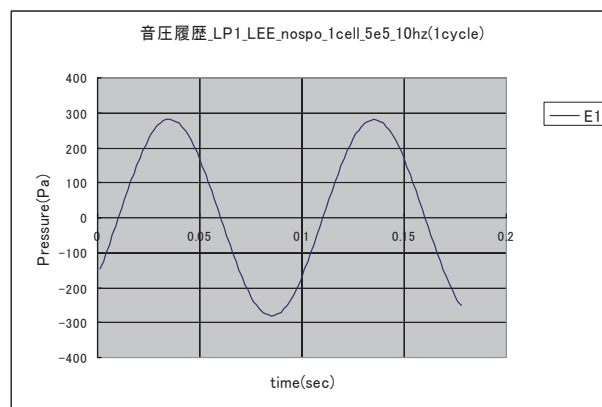


図 4-12 観測点 E1 の音圧履歴(吸収層無、10Hz)

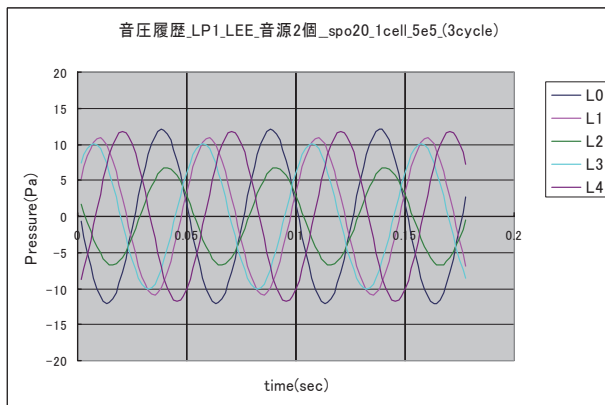


図 4-13 観測点 L0~L4 の音圧履歴(吸収層有、20Hz)

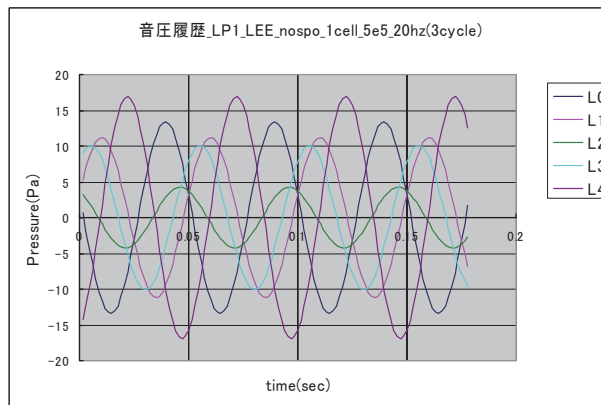


図 4-16 観測点 L0~L4 の音圧履歴(吸収層無、20Hz)

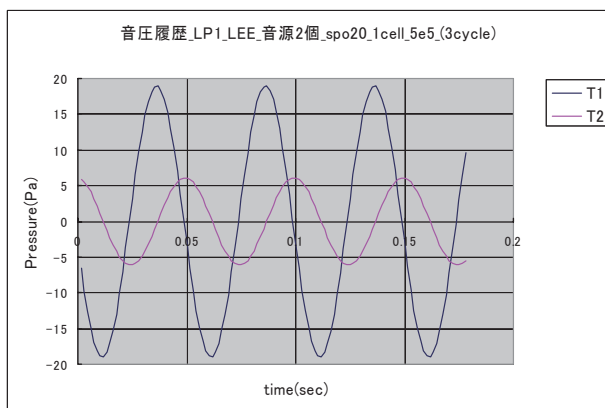


図 4-14 観測点 T1, T2 の音圧履歴(吸収層有、20Hz)

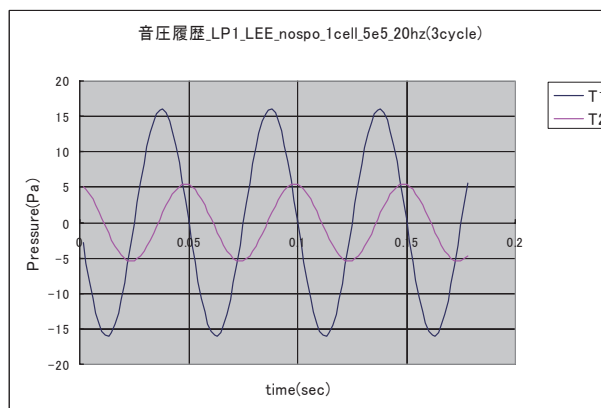


図 4-17 観測点 T1, T2 の音圧履歴(吸収層無、20Hz)

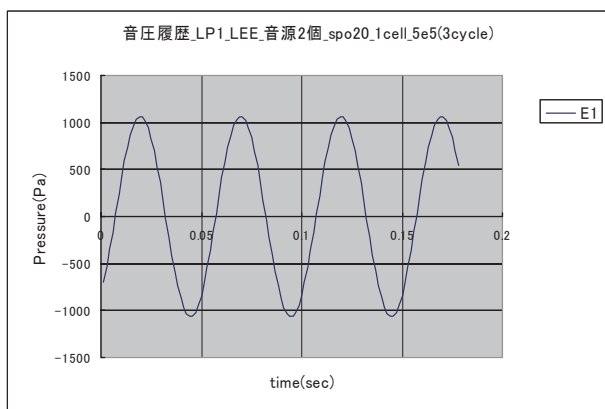


図 4-15 観測点 E1 の音圧履歴(吸収層有、20Hz)

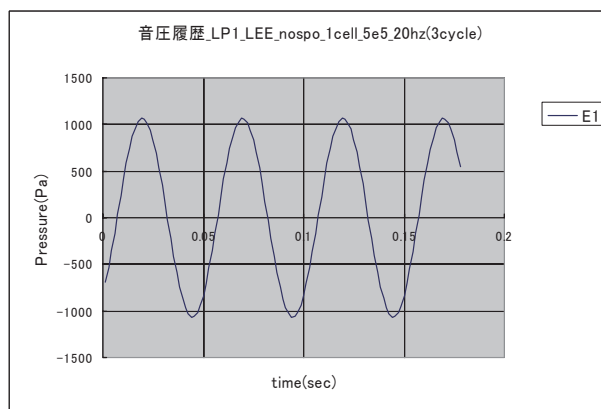


図 4-18 観測点 E1 の音圧履歴(吸収層無、20Hz)

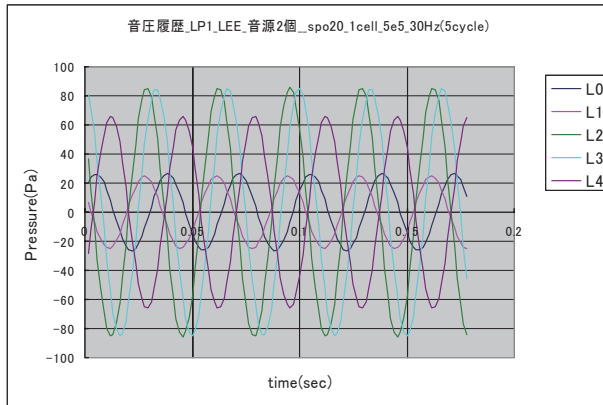


図 4-19 観測点 L0~L4 の音圧履歴(吸収層有、30Hz)

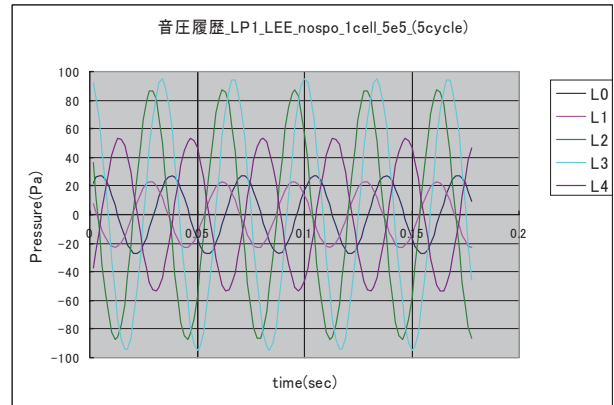


図 4-22 観測点 L0~L4 の音圧履歴(吸収層無、30Hz)

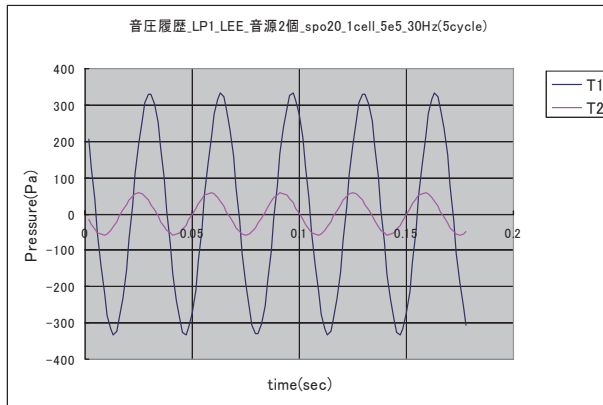


図 4-20 観測点 T1, T2 の音圧履歴(吸収層有、30Hz)

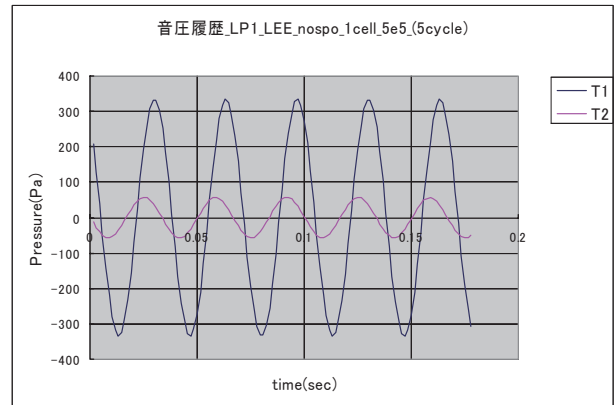


図 4-23 観測点 T1, T2 の音圧履歴(吸収層無、30Hz)

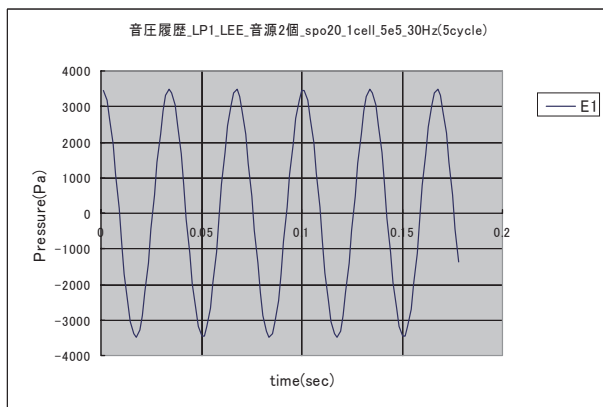


図 4-21 観測点 E1 の音圧履歴(吸収層有、30Hz)

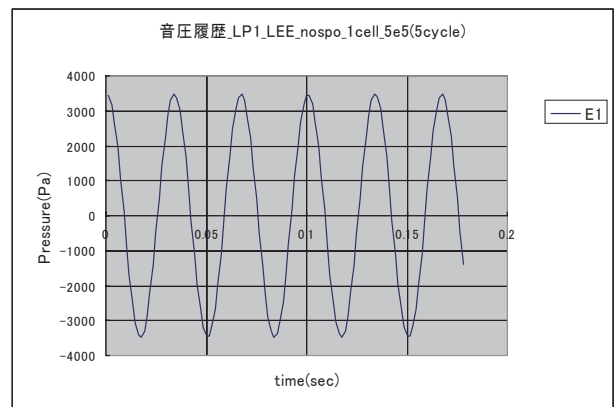


図 4-24 観測点 E1 の音圧履歴(吸収層無、30Hz)

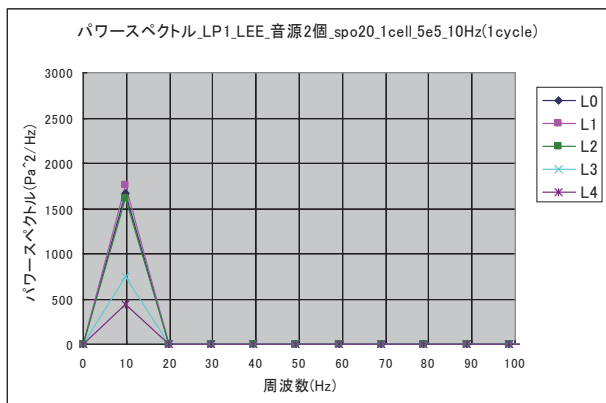


図 4-25 観測点 L0~L4 のパワースペクトル  
(吸収層有、10Hz)

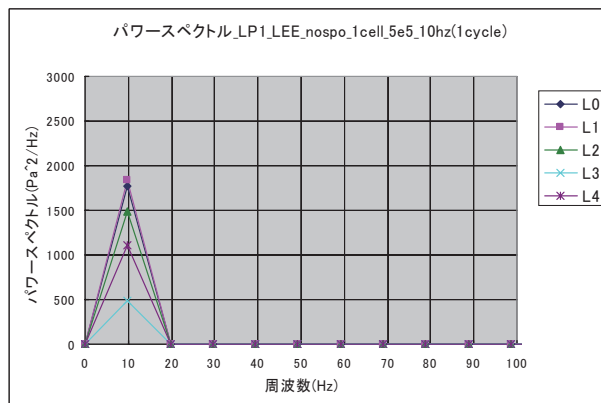


図 4-28 観測点 L0~L4 のパワースペクトル  
(吸収層無、10Hz)

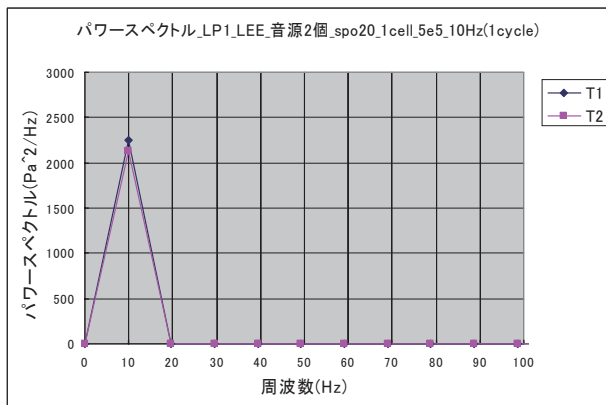


図 4-26 観測点 T1, T2 のパワースペクトル  
(吸収層有、10Hz)

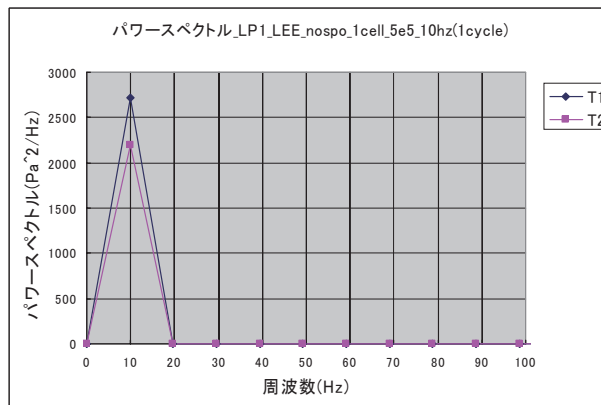


図 4-29 観測点 T1, T2 のパワースペクトル  
(吸収層無、10Hz)

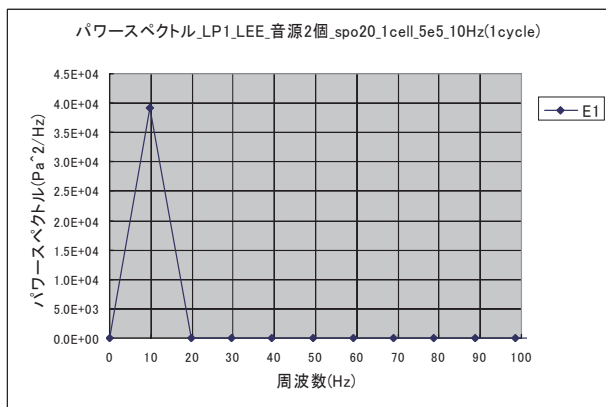


図 4-27 観測点 E1 のパワースペクトル  
(吸収層有、10Hz)

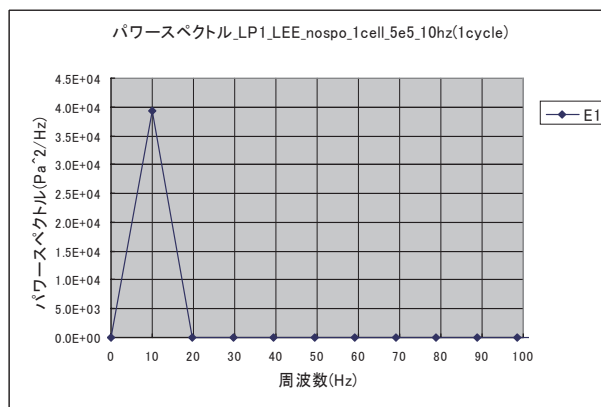


図 4-30 観測点 E1 のパワースペクトル  
(吸収層無、10Hz)

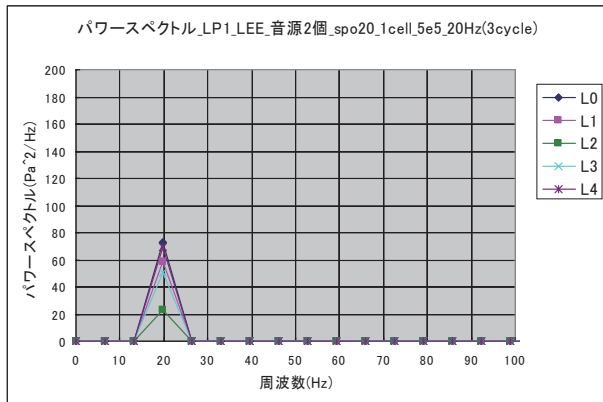


図 4-31 観測点 L0~L4 のパワースペクトル  
(吸収層有、20Hz)

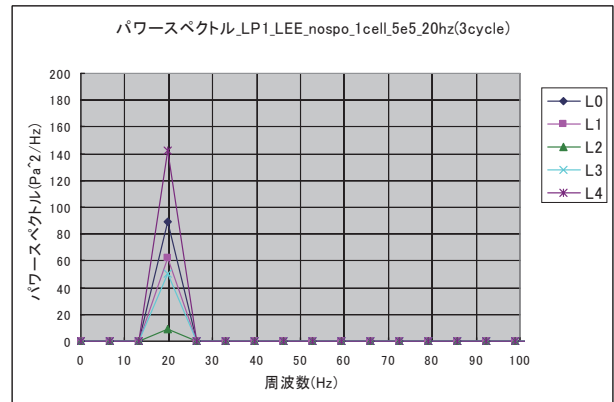


図 4-34 観測点 L0~L4 のパワースペクトル  
(吸収層無、20Hz)

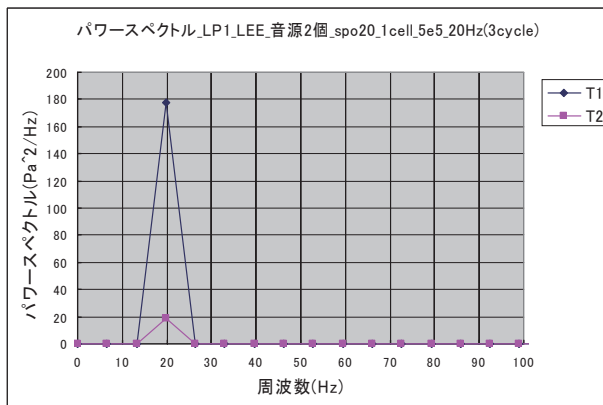


図 4-32 観測点 T1, T2 のパワースペクトル  
(吸収層有、20Hz)

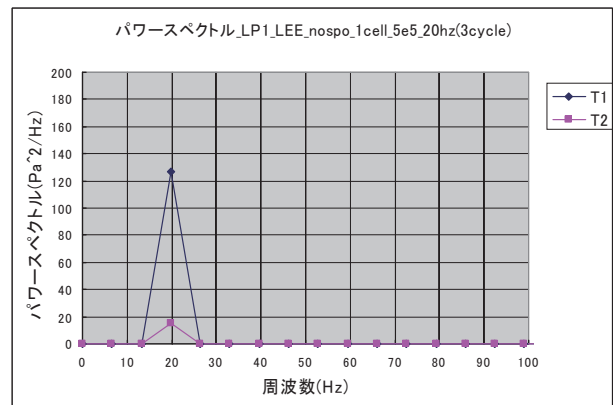


図 4-35 観測点 T1, T2 のパワースペクトル  
(吸収層無、20Hz)

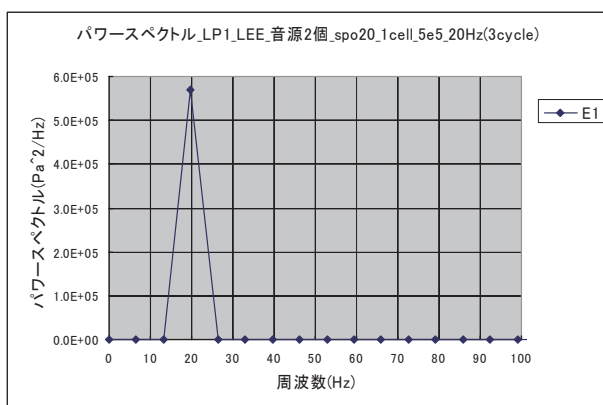


図 4-33 観測点 E1 のパワースペクトル  
(吸収層有、20Hz)

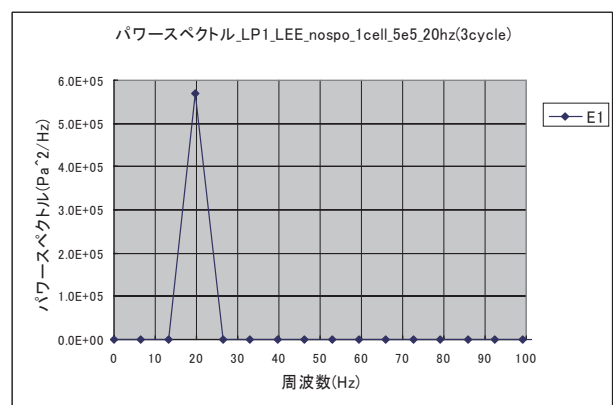


図 4-36 観測点 E1 のパワースペクトル  
(吸収層無、20Hz)

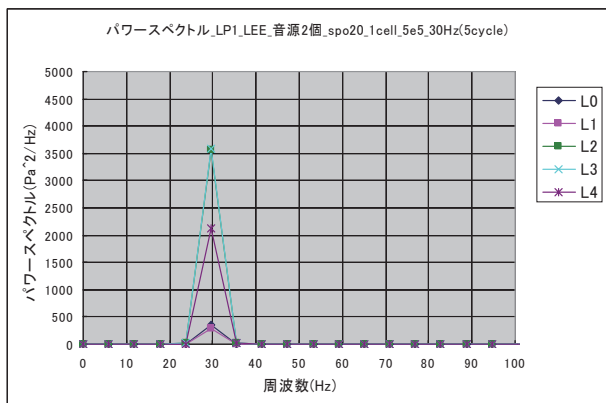


図 4-37 観測点 L0~L4 のパワースペクトル  
(吸収層有、30Hz)

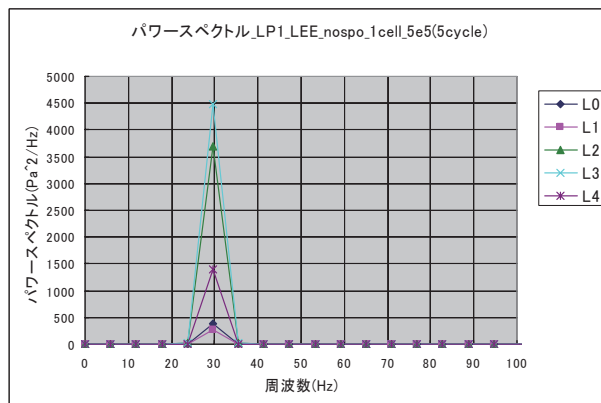


図 4-40 観測点 L0~L4 のパワースペクトル  
(吸収層無、30Hz)

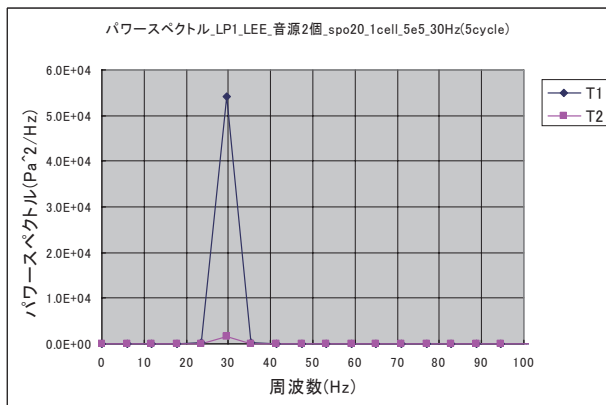


図 4-38 観測点 T1, T2 のパワースペクトル  
(吸収層有、30Hz)

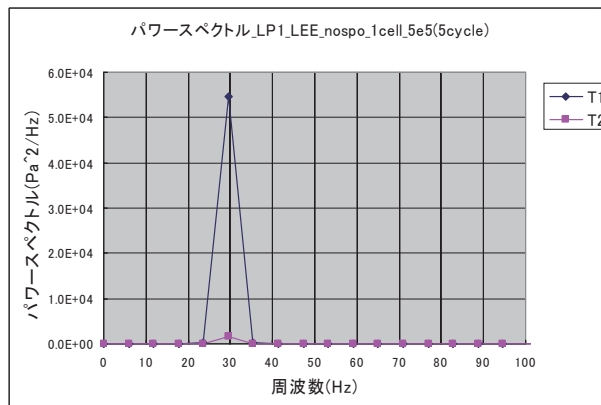


図 4-41 観測点 T1, T2 のパワースペクトル  
(吸収層無、30Hz)

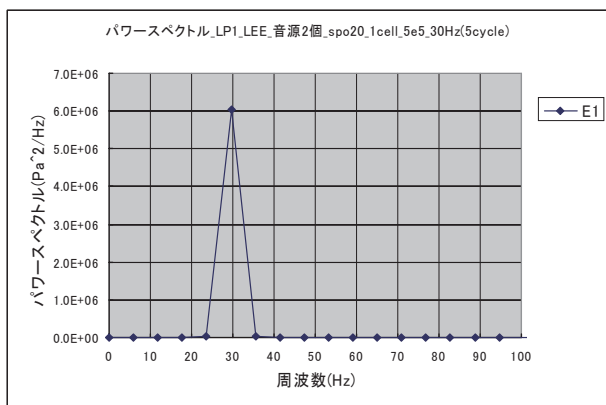


図 4-39 観測点 E1 のパワースペクトル  
(吸収層有、30Hz)

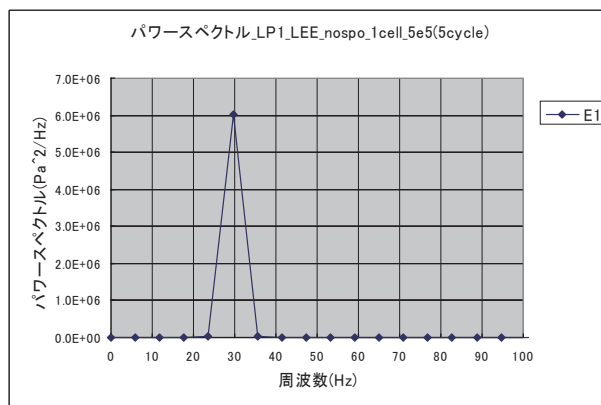


図 4-42 観測点 E1 のパワースペクトル  
(吸収層無、30Hz)



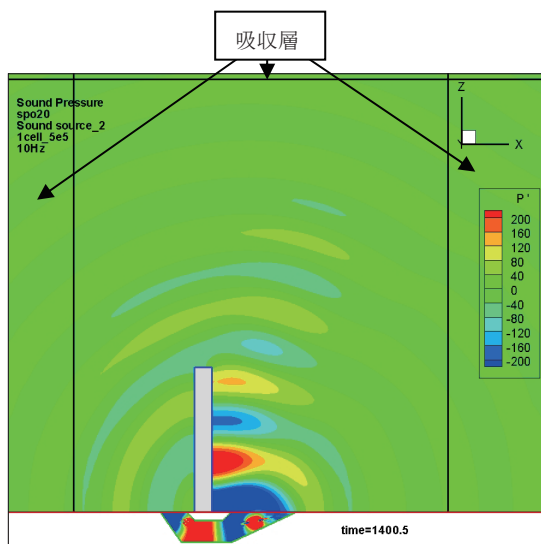


図 4-43 音圧等高線(吸収層有、10Hz)

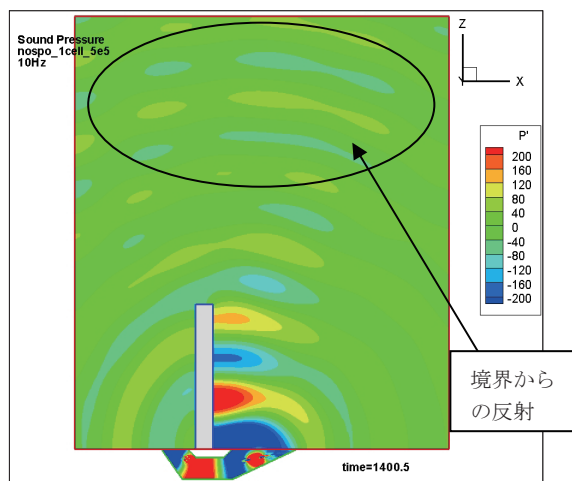


図 4-46 音圧等高線(吸収層無、10Hz)

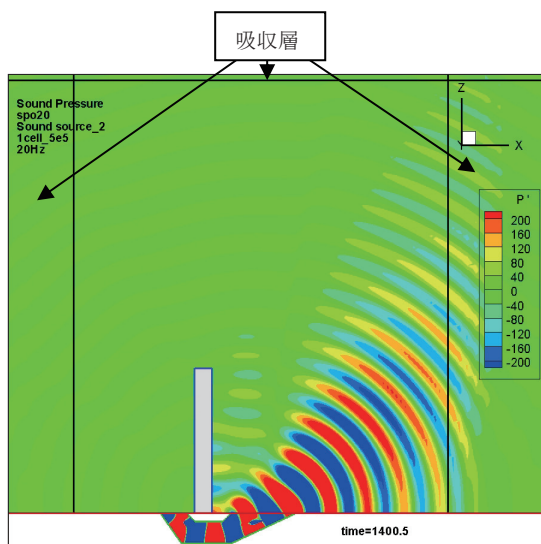


図 4-44 音圧等高線(吸収層有、20Hz)

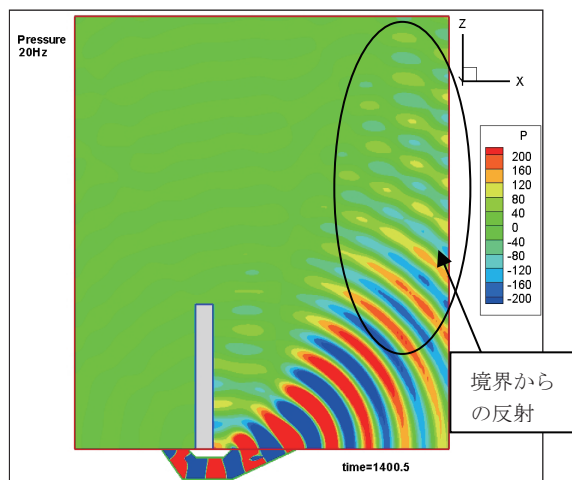


図 4-47 音圧等高線(吸収層無、20Hz)

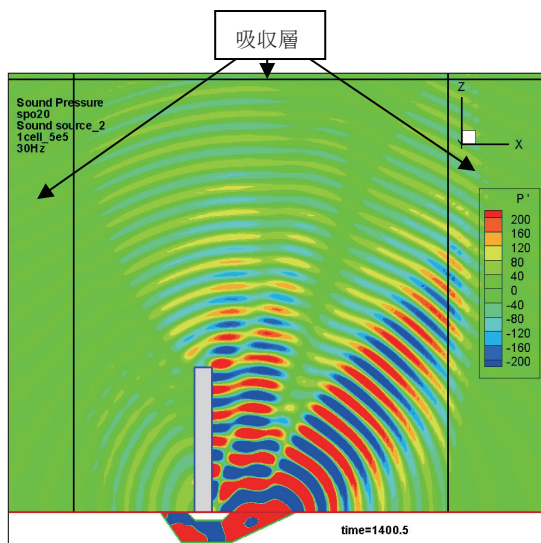


図 4-45 音圧等高線(吸収層有、30Hz)

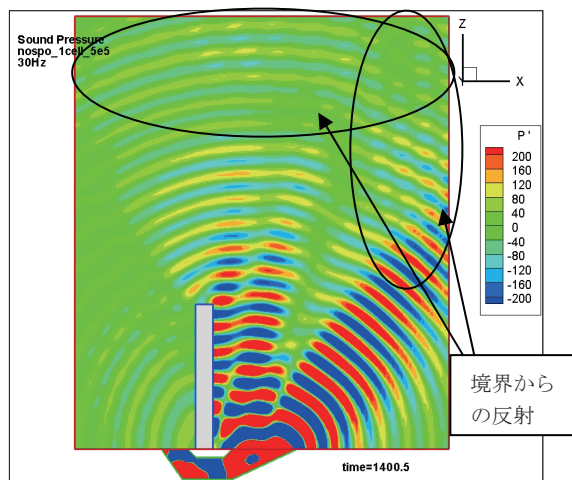


図 4-48 音圧等高線(吸収層無、30Hz)

## 5. 補足

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

現在の LEE 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て実行ファイルを再作成しているの  
で、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。

今後は、上記問題点の改良を行ないたいと考えている。

## 参考文献

- (1) Acoustic Loads Generated By The Propulsion System, NASA SP8072, June 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.
- (8) Hardin, J.C., Ristorcelli, J.R., and Tam, C.K. (eds): ICASE/LaRC Workshop on Benchmark Problems in Computational Aeroacoustics (CAA) NASA Conference Publication 3300, May 1995.
- (9) Tam, C.K., and Hardin, J.C. (eds): Second Computational Aeroacoustics (CAA) Workshop on Benchmark Problems, NASA Conference Publication 3352, 1997.
- (10) Third Computational Aeroacoustics (CAA) Workshop on Benchmark Problems, NASA Conference Publication 2000-209790, August 2000.
- (11) Fourth Computational Aeroacoustics (CAA) Workshop on Benchmark Problems, <http://www.math.fsu.edu/caa4>
- (12) 釜土敏裕, ながれ, Vol. 23 (2004), pp.285-294.
- (13) 今村太郎他, 日本航空宇宙学会論文集, 第 53 巻, 第 621 号(2005), pp. 452-460
- (14) [www.codiciel.fr/database/acoustic/acoustc.html](http://www.codiciel.fr/database/acoustic/acoustc.html)
- (15) Jiang, G.S., and Shu, C.W., J. of Comp. Phys., Vol. 126, (1996), pp. 202-228.
- (16) 金田英和他, JAXA RM-07-015 (2007)
- (17) 岩永則城他, JAXA SP-07-016 (2007), pp. 107-112.
- (18) 岩永則城他, 第 21 回数値流体力学シンポジウム, (2007), p.62.