

## LEEによるロケットの音響効果予測

岩永則城、金田英和 (計算力学研究センター)、  
村上桂一 (宇宙航空研究開発機構)、北村圭一 (名古屋大学)、  
橋本敦、青山剛史 (宇宙航空研究開発機構)、中村佳朗 (名古屋大学)

## Prediction of sound effects on a rocket by LEE

Noriki Iwanaga, Hidekazu Kaneda (RCCM), Keiichi Murakami (JAXA),  
Keiichi Kitamura (Nagoya University), Atsushi Hashimoto, Takashi Aoyama (JAXA),  
Yoshiaki Nakamura (Nagoya University)

## Abstract

Acoustic loads are the principal source of structural vibration and internal noise during launch or static-firing operations. The loads cause various problems, so 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 have some limitations, since shielding and reflection are difficult to be dealt with. To avoid these difficulties, we are planning to use our LEE (Linearized Euler Equation) code and evaluate the acoustic field to predict the acoustic loads on a rocket. As a first step, we report the results of some benchmark tests for validating our code's precision.

## 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、プ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。そこで、音響解析手法として有効性をもつLEE(Linearized Euler Equation)コード<sup>[2]</sup>を射場規模モデル用に拡張する<sup>[3]-[7]</sup>。最終目標は、「打ち上げ射場の音響場評価を数値計算で代用して、ロケットに生じる音響荷重を予測する」システムの構築である。本論文では、使用するLEEコードの精度や境界条件の適切性の検証のために、いくつかのベンチマークテストを行う。

## 2. 計算手法

LEEは3次元圧縮性Euler方程式を線形化したものである。古典的な音響アナロジーの式と異なり、音波の回折効果の解析が可能であり、音源のコンパクト性や流れの一樣性がなくても使用可能である。また、音波のみならず、エントロピーや渦の波も解析できる。このLEEの守備範囲の広さは、射場での音場評価にとって適切なものである。

LEEによる数値計算を射場での音場計算に適用する際に考慮すべき条件は、(1)解析領域が広く長時間に渡るデータが必要であること、(2)ロケットの振動源となる音波成分を捕らえられること、である。(1)は大規模計算になることを要求するため、MPIによるマルチブロック並列計算を行えるように計算コードを拡張した。(2)は、射場に設けられた排煙溝内の音響伝播や放射、(構造物の存在する)射場内の音響伝播を高精度に解くことを要求する。そのためには、スキームの散逸誤差や位相誤差が小さいこと、壁や流出流入部分に設定する境界条件の適切性が大切になる。この点は近年のCAAに関する国際学会<sup>[8]-[11]</sup>や関連論文<sup>[12]-[14]</sup>等においても着目されてきた部分である。そこで、本論文では、精度のみならず、境界条件の適切性に注目した検証を行い、その妥当性を検討する。なお、使用コードの他の面(例えばスキームの精度や適用例等)に関しては、既に文献[3]-[7]において検証されている。

計算は1次の変動成分について行う。速度と圧力は、セル境界においてそれぞれ

$$u'_i = \frac{c_l u'_i + c_r u'_i - (p_r - p_l)}{\bar{c}}, \quad p'_i = \frac{c_l p'_i + c_r p'_i - c_l c_r (u_r - u_l)}{\bar{c}},$$

$$\bar{c} = c_l + c_r,$$

で与えられる<sup>[3]</sup>。ここで、 $u$ は速度、 $p$ は圧力、 $c$ は音速である。また添え字 $l$ 、 $r$ はそれぞれセル境界における左側および右側の物理量であり、セル境界に対し法線方向成分の値である。セル境界左右における物理量は制

関数を用いずにMUSCL法により3次精度で内挿する。時間積分には3段階3次精度のRunge-Kutta法を用いる。

3. 結果

以下、背景流れ場が静止している場合を考える。

3. 1 検証1：音響パルスとエントロピーパルスの伝播と衝突<sup>[8]</sup>

この問題では、(1)両パルスが衝突する際に、波のプロファイルが保存されること、(2)音響波流出後、解析領域内で外部境界からの反射波の影響が現れないこと、を確認する。前者は本コードの精度を、後者は放射境界の取り扱い方の妥当性をみるものである。fig.1に示すように、解析領域は $-100 \leq x \leq 100, -100 \leq z \leq 100$ とし、使用したセル数はi、k方向ともに200であり、格子幅は $\Delta x = \Delta z = 1.0$ 、無次元時刻は $\Delta t = 0.2$ とした。領域から出て行く波の境界での反射を防ぐために、本来の解析領域の外側に吸収層を加えている。吸収層は $\Delta x_i = ar^n$  ( $a$ は境界セル幅、 $r=1.2$ 、 $n$ は層内セル番号、 $i=x,y,z$ )によって次第に間隔が広がるように設定している。ここでは(i)吸収層なし、(ii)10セル分吸収層あり、(iii)20セル分吸収層あり、の3通りを調べる。

fig.2は、 $x=+96$ 線上での圧力変動の最大相対誤差  $\epsilon_{p,i} = \left| \frac{p' - p'_{ref}}{p'_{ref}} \right|_{\max}$  ( $p'_{ref}$ は厳密解)である。波が解析領域から出ていってしばらくの間は相対誤差が大きく、その後は小さくなるのが分かる。吸収層格子点数の効果は10セルよりも20セルの方が明らかによい。なお、20セルの $t=300$ 以降での誤差上昇は境界条件の影響であり、10セルに対する優位性は変わらない。fig.3は観測点 $(x,z)=(+96,0)$ における密度変動成分の時間履歴である。吸収層がない場合、時刻 $t=220$ 及び $t=350$ において、音響パルス波の反射の影響が現れていることが分かる。

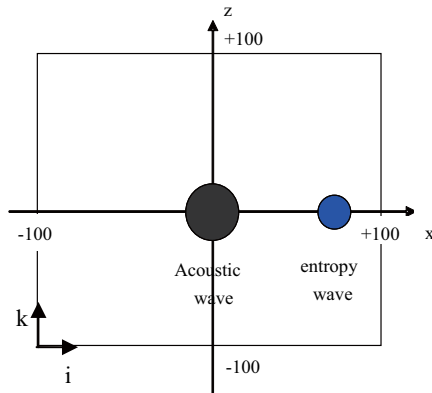


fig.1 Problem setting 1

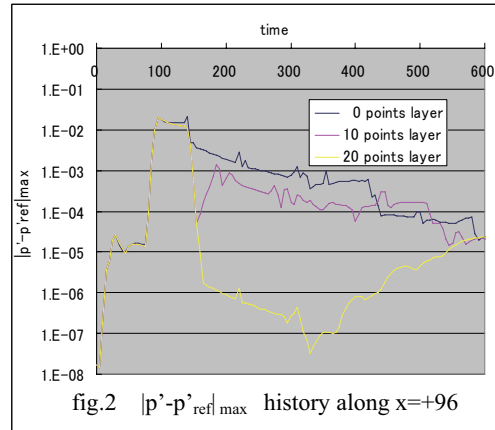


fig.2  $|p' - p'_{ref}|_{\max}$  history along  $x=+96$

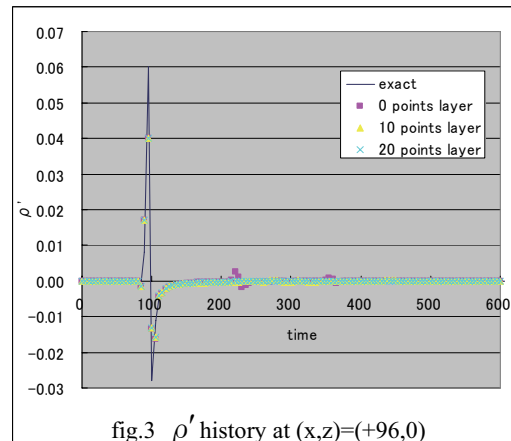


fig.3  $\rho'$  history at  $(x,z)=(+96,0)$

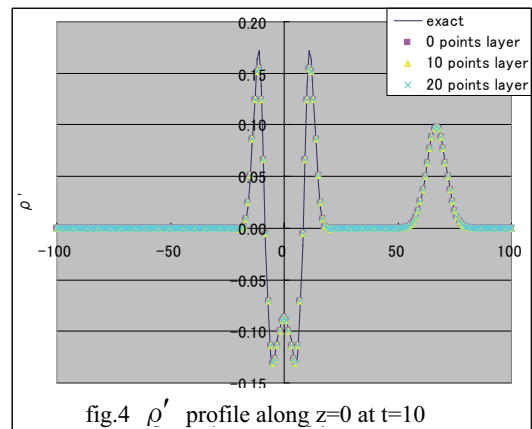


fig.4  $\rho'$  profile along  $z=0$  at  $t=10$

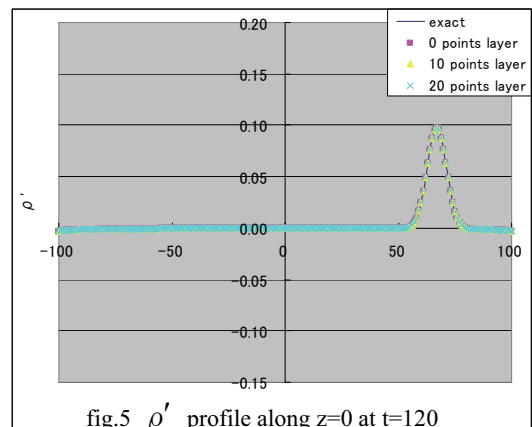


fig.5  $\rho'$  profile along  $z=0$  at  $t=120$

fig.4とfig.5は $z=0$ における密度変動のプロファイルを代表的な時間ごとに表示したものである。音響パルスが領域から出て行きエントロピーパルスが領域内に残る姿を示している。解析解と数値解はほぼ一致しているが、エントロピーパルスに比べ、音響パルスの鋭いピークの捕獲度はよくない。これを改善するにはソルバーの空間精度を上げるか、1波長当たりの格子点数を増やす必要があるだろう。fig.6とfig.7に、吸収層20セルの場合に対して代表時刻ごとの密度コンターを示す。境界近傍の解析領域において境界からの反射が現れないことが分かる。

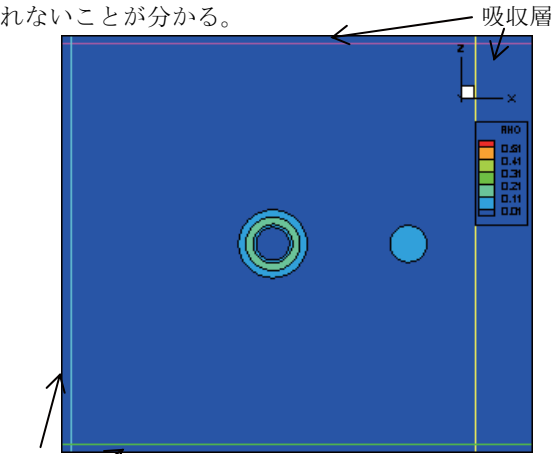


fig.6 Density contour at t=10

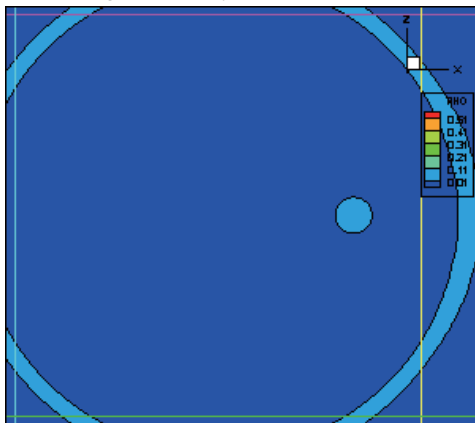


fig.7 Density contour at t=120

### 3. 2 検証2：音響パルスの壁における反射<sup>[8]</sup>

この問題では、(1)パルスが壁に衝突した後も波のプロファイルを正確に捕獲できること、(2)音響波流出後、解析領域内で外部境界からの反射波の影響が現れないこと、を確認する。fig.8に示すように、解析領域は $-100 \leq x \leq 100$ 、 $0 \leq z \leq 200$ 、使用したメッシュのセル数は $i, k$ 方向ともに200であり、格子幅は $\Delta x = \Delta z = 1.0$ 、無次元時間刻みは $\Delta t = 0.2$ とした。ここでは3. 1と同様(i)(ii)(iii)という3通りの吸収層を扱う。更に、(ii)(iii)に対しては、吸収層内において支配方程式の右辺に吸収項を加える場合を考慮し、吸収項の吸収係数の大きさを示す量  $\text{sigmdx}$ (これは吸収層セル幅決定式  $\Delta x_i = ar^i$  の  $a$ ) をパラメタにして結果を比較する。

### 3. 2. 1 吸収項なしの場合

吸収層があっても吸収項がない場合、吸収層内において数値拡散のみにより反射源を抑えることを意味する。

fig.9は、 $L_p(t) = \sqrt{\frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} (p')^2}$  の時間履歴であり、 $p'$ は

圧力変動量、 $N_e$ は解析領域内のメッシュ数である。吸収層が厚いほど厳密解に近い。これは、全体としての誤差を見る限りにおいて、吸収層は10セルでも十分であることを示唆している。fig.10は直線 $x=+96$ に沿って計算した密度変動成分の最大相対誤差である。吸収層セル数が多い方が誤差は小さい。境界近傍領域の誤差を見る場合は、吸収層は20セルにした方がよいといえる。fig.11は、点 $(x,z)=(+96,25)$ における密度変動成分の時間履歴である。音響パルスの後ろに、壁からの反射波が通過する様子がわかる。吸収層がない場合、 $t=120$ では右側境界からの反射波が、 $t=300$ では左側境界からの反射波が現れている。これより吸収層の必要性がわかる。fig.12と13には、直線 $x=z$ に沿った密度変動成分のプロファイルを代表時刻ごとに与えた。吸収層がある場合、解析解と数値解はよい一致を示す。吸収層がない場合、fig.13の原点付近では、境界からの反射成分が現れている。fig.14と15には、20セル分吸収層付の場合について、各時刻における圧力変動成分のコンターを示す。境界近傍の境界内側における反射は見られない。

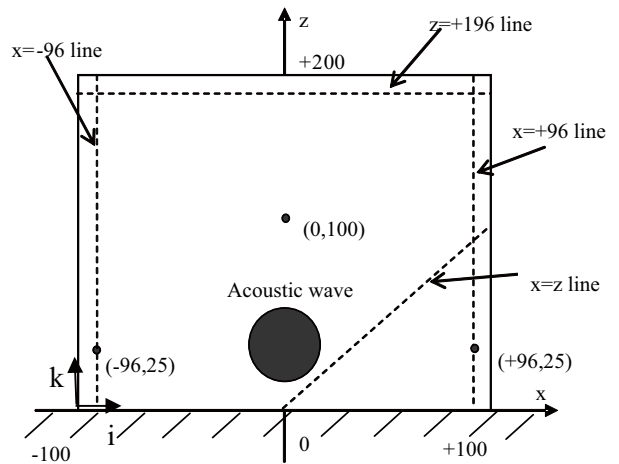


fig.8 Problem setting 2

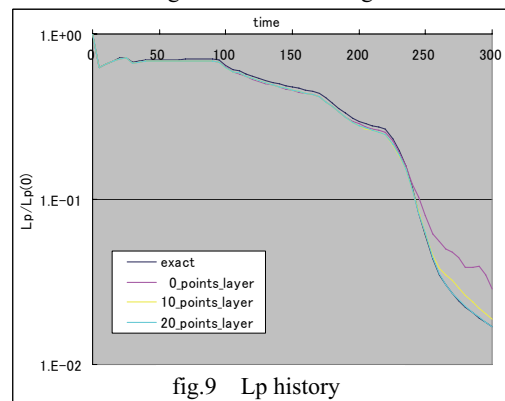


fig.9 Lp history

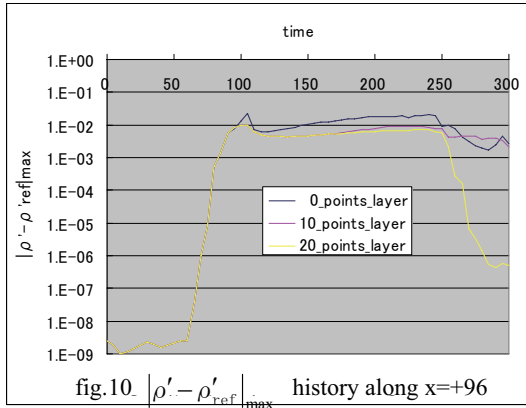


fig.10  $|\rho' - \rho'_{ref}|_{max}$  history along  $x=+96$

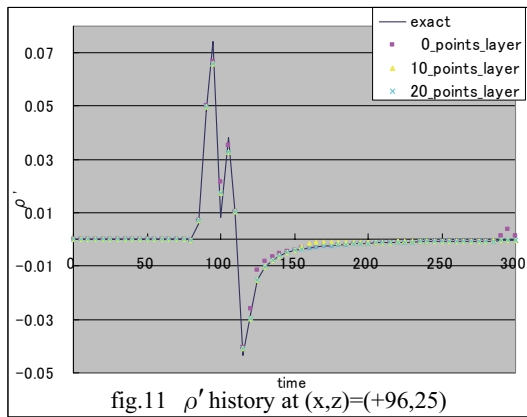


fig.11  $\rho'$  history at  $(x,z)=(+96,25)$

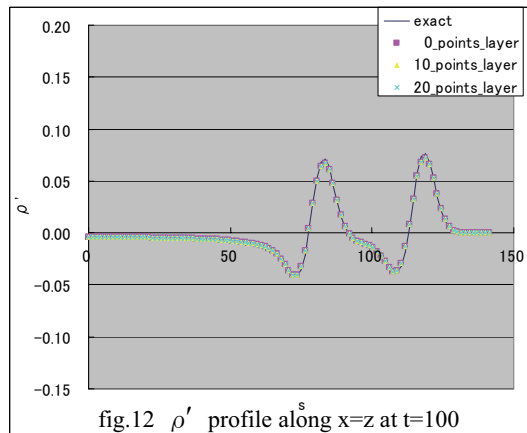


fig.12  $\rho'$  profile along  $x=z$  at  $t=100$

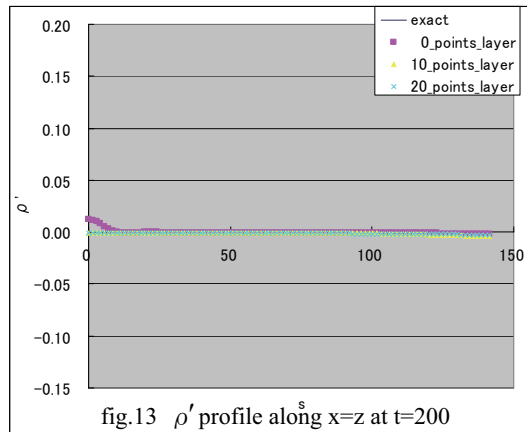


fig.13  $\rho'$  profile along  $x=z$  at  $t=200$

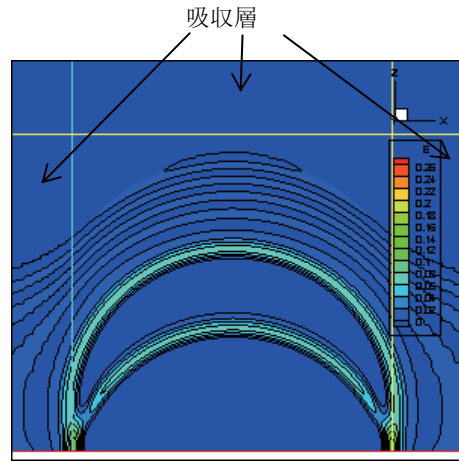


fig.14 Density contour at  $t=100$

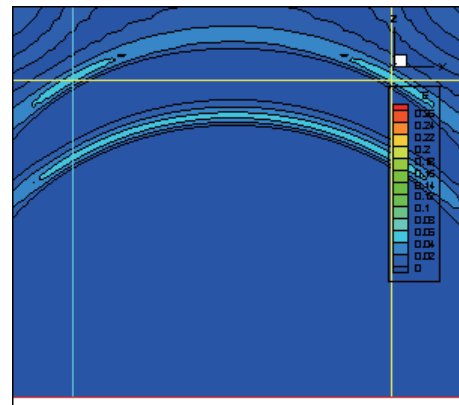


fig.15 Density contour at  $t=200$

### 3. 2. 2 吸収項ありの場合

吸収項は、吸収層内において、前ステップからの擾乱の増分を吸収することにより、反射源抑制を狙うものであり、数値拡散による抑制とは異なる。その効果は、吸収係数の大きさを示す量  $\text{sigmdx}$  によって変わる。

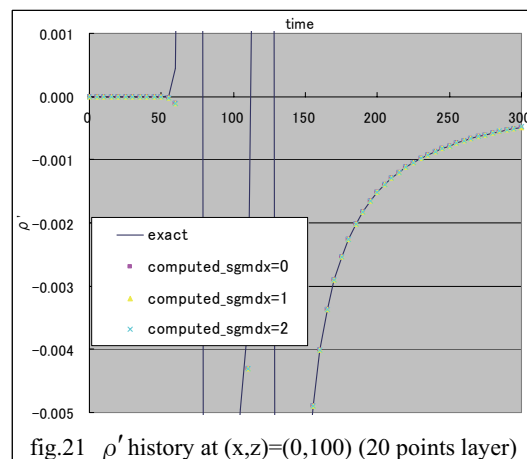
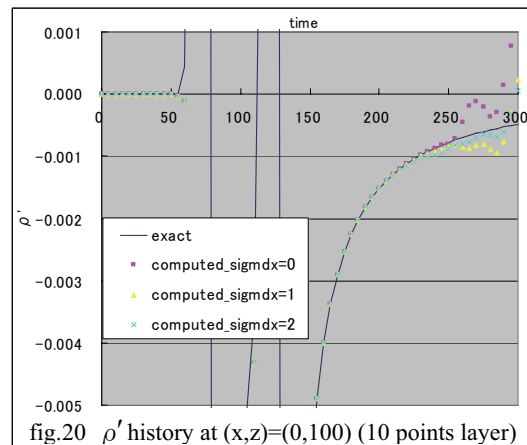
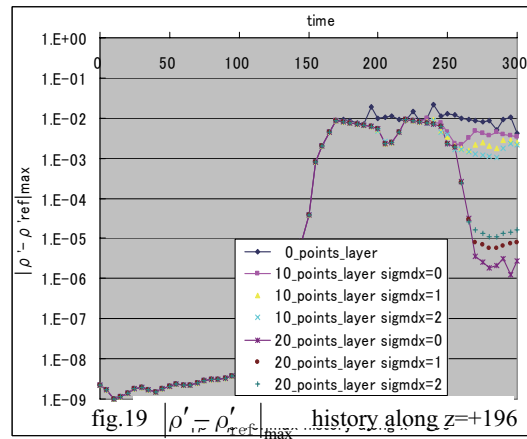
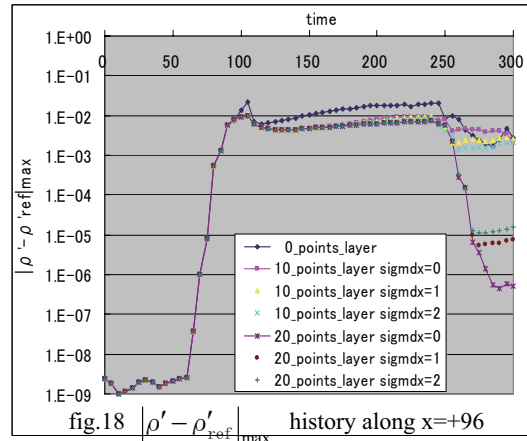
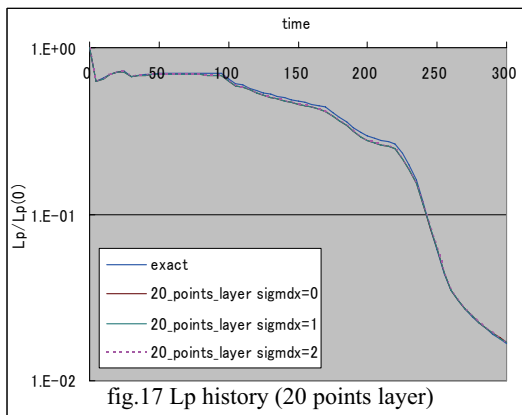
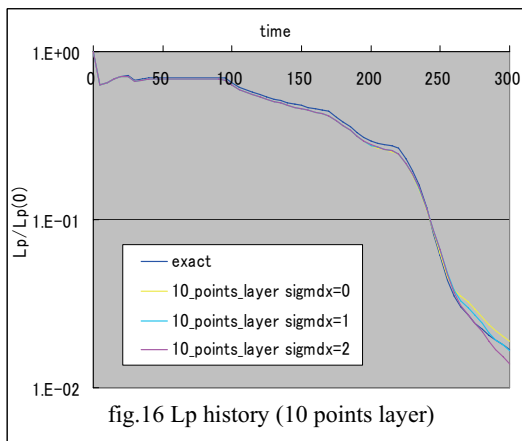
fig.16 と 17 は、10 及び 20 セル吸収層付の場合に、 $\text{sigmdx}$  をパラメタにした  $L_p$  の時間履歴である。 $t=250$  以降、10 セルでは  $\text{sigmdx}$  の値にかかわらず厳密解からずれているのに対し、20 セルではどれもほぼ厳密解に一致している。これは、吸収係数の大きさを変えるよりも、吸収層セル数を増やした方が精度的にはよいことを示している。

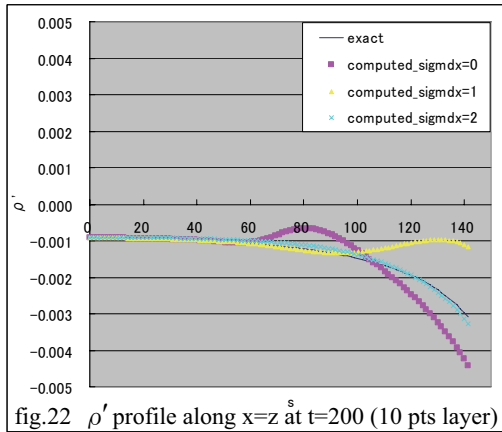
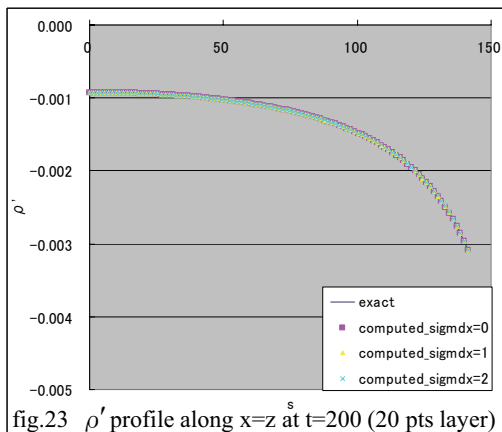
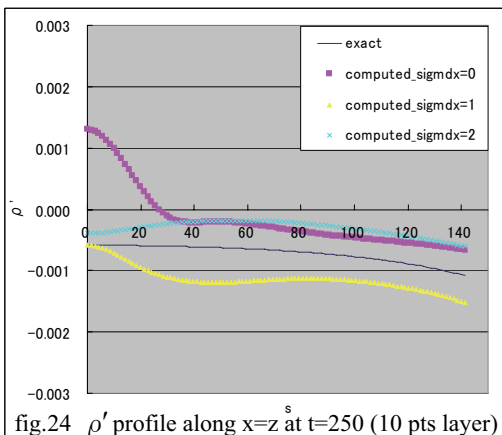
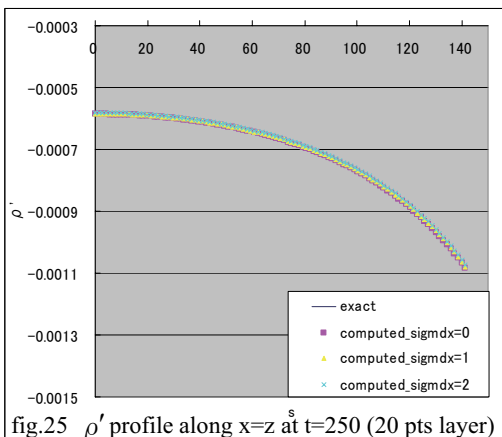
fig.18 と 19 は、直線  $x=+96$  ならびに  $z=+196$  に沿って計算した密度変動の最大相対誤差を  $\text{sigmdx}$  をパラメタにしてプロットしたものである。 $t=250$  以降、10 セルでは  $\text{sigmdx}$  が大きくなると誤差も小さくなるのに対し、20 セルでは  $\text{sigmdx}$  が大きくなると誤差も大きくなる。最も誤差が小さくなるのは 20 セル吸収層付で吸収係数を 0 にする場合である。ただし、他の 2 つの場合との差は小さい。扱う音波が強い場合は、吸収係数を大きくした方がよいことも想定される。従って、誤差最小化という目的においては、単に吸収層のセル数を増やして吸収係数を大きくすればよい、という単純なものではなく、吸収層のセル数に応じた吸収係数

の大きさを考える必要がある。

fig.20 と 21 では、点  $(x, z)=(0, 100)$  における密度変動の時間履歴を、 $\text{sigmdx}$  をパラメタにしてプロットしている ( $s$  は直線の始点からの距離)。10 セルにおいては  $\text{sigmdx}$  が大きくなっても厳密解に一致していないが、20 セルでは  $\text{sigmdx}$  に関わらず厳密解に一致している。

fig.22 ~25 は、 $\text{sigmdx}$  に応じて密度プロファイルをプロットした図である。図中の pts は points の略。見易さを考慮し、3. 1. 1 における図よりもスケールを大きくしている。fig. 22 ( $t=200$  で 10 セル) の場合は  $\text{sigmdx}=2$  において初めて厳密解に一致するのに対し、fig. 23 ( $t=200$  で 20 セル) の場合はどの  $\text{sigmdx}$  に対してもほぼ厳密解に一致している。fig. 24 ( $t=250$  で 10 セル) では  $\text{sigmdx}=2$  にしても厳密解に一致しないのに対し、fig. 25 ( $t=250$  で 20 セル) ではどの  $\text{sigmdx}$  に対してもほぼ厳密解に一致している。よって、吸収層セル数が少ない場合には、吸収係数を大きくすることで誤差を抑える効果は必ずしも期待できない。吸収係数の大きさを変えるよりも、吸収層セル数を増やした方が精度的には確実によくなるといえる。



fig.22  $\rho'$  profile along  $x=z$  at  $t=200$  (10 pts layer)fig.23  $\rho'$  profile along  $x=z$  at  $t=200$  (20 pts layer)fig.24  $\rho'$  profile along  $x=z$  at  $t=250$  (10 pts layer)fig.25  $\rho'$  profile along  $x=z$  at  $t=250$  (20 pts layer)

#### 4. まとめ

「打ち上げ射場の音響場評価を、従来の経験則的手法からLEEによる数値計算に変えることにより、音響荷重予測手法を改良する」目標の下で、既存コードを拡張し、ベンチマークテストを行った。以下に結果をまとめる。

- ・放射境界は吸収層を用いることで境界からの反射の効果を除去できた。
- ・吸収層は20セル使用すれば十分であった。
- ・壁による反射境界も妥当であった。
- ・全体的な誤差低減を目的にすれば、吸収層セル数は10でもよいが、境界近傍の誤差低減を重視する場合は20必要である。
- ・誤差低減には、吸収層のセル数を増やして吸収係数を大きくするという単純な手段は通用せず、吸収層のセル数に応じた吸収係数の大きさを考える必要がある。
- ・吸収係数の大きさを変えるよりも、吸収層セル数を増やした方が精度的には良くなる。

#### 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, pp. 118-148 (2002).
- [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、28 (2006).
- [6] 北村圭一他、JAXA SP-06-010, 83-88 (2006).
- [7] 村上桂一他、JAXA SP-06-010, 107-112 (2006).
- [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, pp.285-294 (2004).
- [13] 今村太郎他, 日本航空宇宙学会論文集, 第53巻, 第621号, 452-460 (2005).
- [14] [www.codiciel.fr/database/acoustic/acoustic.html](http://www.codiciel.fr/database/acoustic/acoustic.html)