

5.2. 数値シミュレーションを用いた ロケット打上げ時の音響環境解析

宇宙航空研究開発機構
情報・計算工学センター
堤 誠司 開発員

第9回試験技術ワークショップ，筑波宇宙センター

数値シミュレーションを用いた ロケット打上げ時の音響環境解析



2011/11/10

JAXA/情報・計算工学(JEDI)センター

堤誠司，高木亮治

JAXA/研究開発本部 数値解析グループ

高橋孝，松尾裕一

1



Agenda



1. JEDIセンター・数値解析Gの紹介
2. 打上げ時音響振動と解析手法
3. hybrid FEM/WBMによるフェアリング透過解析
4. CFDを用いた騒音発生機構の解析
5. まとめと今後の予定



2



Agenda



1. JEDIセンター・数値解析Gの紹介
2. 打上げ時音響振動と解析手法
3. hybrid FEM/WBEMによるフェアリング透過解析
4. CFDを用いた騒音発生機構の解析
5. まとめと今後の予定



3



1. 情報・計算工学(JEDI)センター



JAXA's Engineering Digital Innovation → JEDI

Mission

他の研究領域や産業界をリードする技術力をもって、情報技術・計算工学技術を宇宙開発、特にJAXAが進めるプロジェクトに活用しその信頼性向上と効率化に貢献する。



情報技術による衛星・輸送系の信頼性向上と設計・開発プロセスの効率化

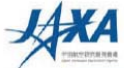


数値シミュレーション利用促進による信頼性向上と開発プロセス効率化




JAXAスーパーコンピュータの一体的運営

4



1. 研開本部 数値解析グループ



非定常・振動セクション

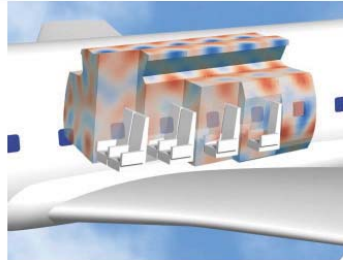
- WBM-FEMハイブリッド法によるフェアリング内の音響環境予測
- WBMによる機内騒音解析
- 完全自動格子生成技術に関する研究
- 遷音速風洞の全体解析

乱流・燃焼セクション

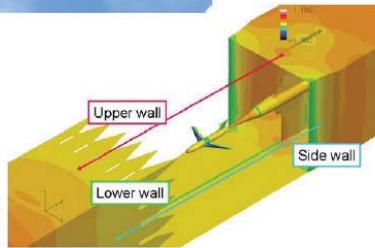
- 超/亜臨界燃焼非定常解析
- 乱流燃焼モデリング
- 液体燃料微粒化過程解明・モデル化

異分野融合セクション

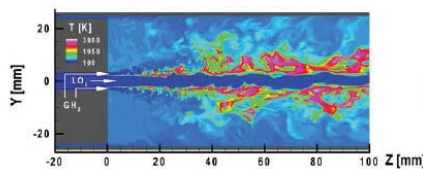
計算情報基盤セクション



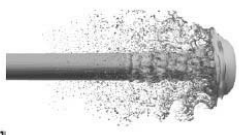
WBMによる機内騒音解析
(音圧レベル @500Hz)




遷音速風洞の全体解析



音響／火炎応答解析



燃料噴流からの液系生成





Agenda



1. JEDIセンター・数値解析Gの紹介
2. 打上げ時音響振動と解析手法
3. hybrid FEM/WBMによるフェアリング透過解析
4. CFDを用いた騒音発生機構の解析
5. まとめと今後の予定



6



2. ロケット打上げ時の音響振動問題



ロケット打上げ時、莫大な推力を有するエンジンの排気プルームから非常に大きな音波(圧力波)が発生

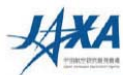
ex. 推力800ton のH-IIAでは約10MW (音響パワ:190dB)



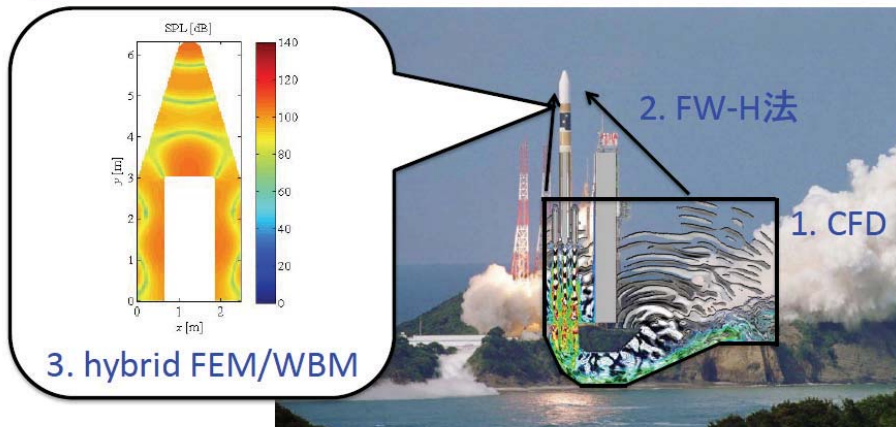
フェアリングを通じてペイロードを加振



7
7



2. 解析プロセス



1. 騒音発生と音響波の近傍伝播 (JEDI)

⇒ 数値流体力学 (CFD)

2. 音響波の遠方伝播 (数値解析G)

⇒ Ffowcs-Williams & Hawkins (FW-H)法

3. フェアリング透過 (数値解析G)

⇒ ハイブリッド有限要素-波動ベース法 (hybrid FEM/WBM)



8



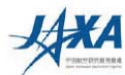
Agenda



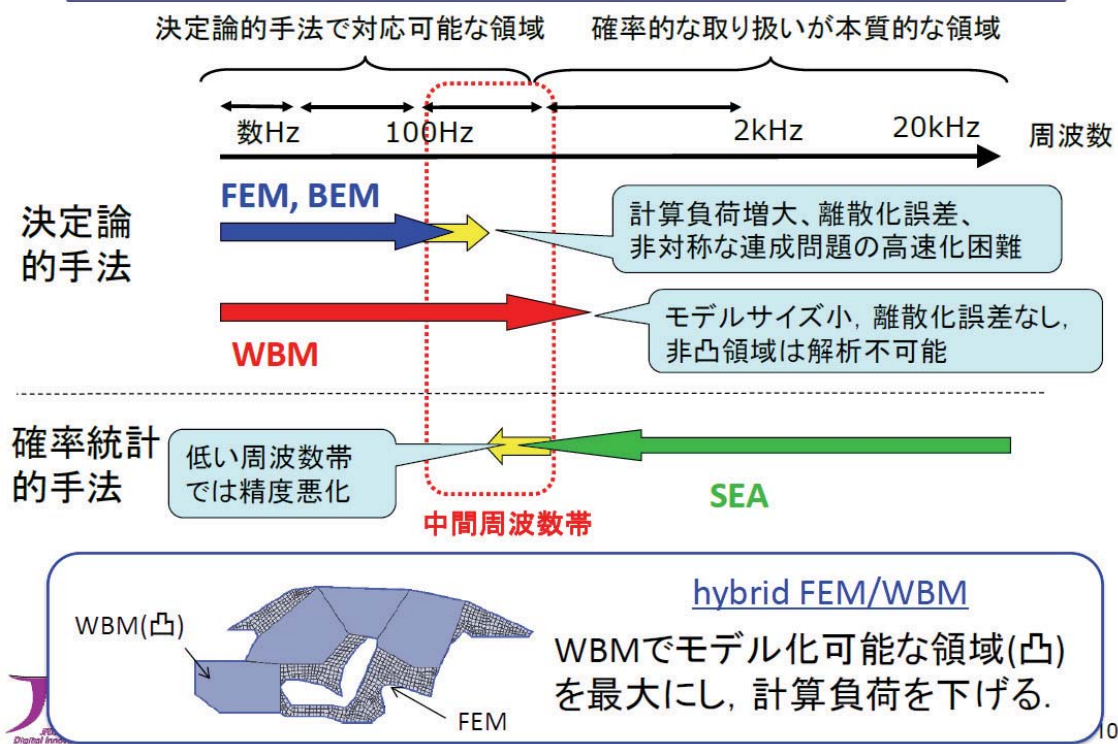
1. JEDIセンター・数値解析Gの紹介
2. 打上げ時音響振動と解析手法
3. hybrid FEM/WBMによるフェアリング透過解析
4. CFDを用いた騒音発生機構の解析
5. まとめと今後の予定



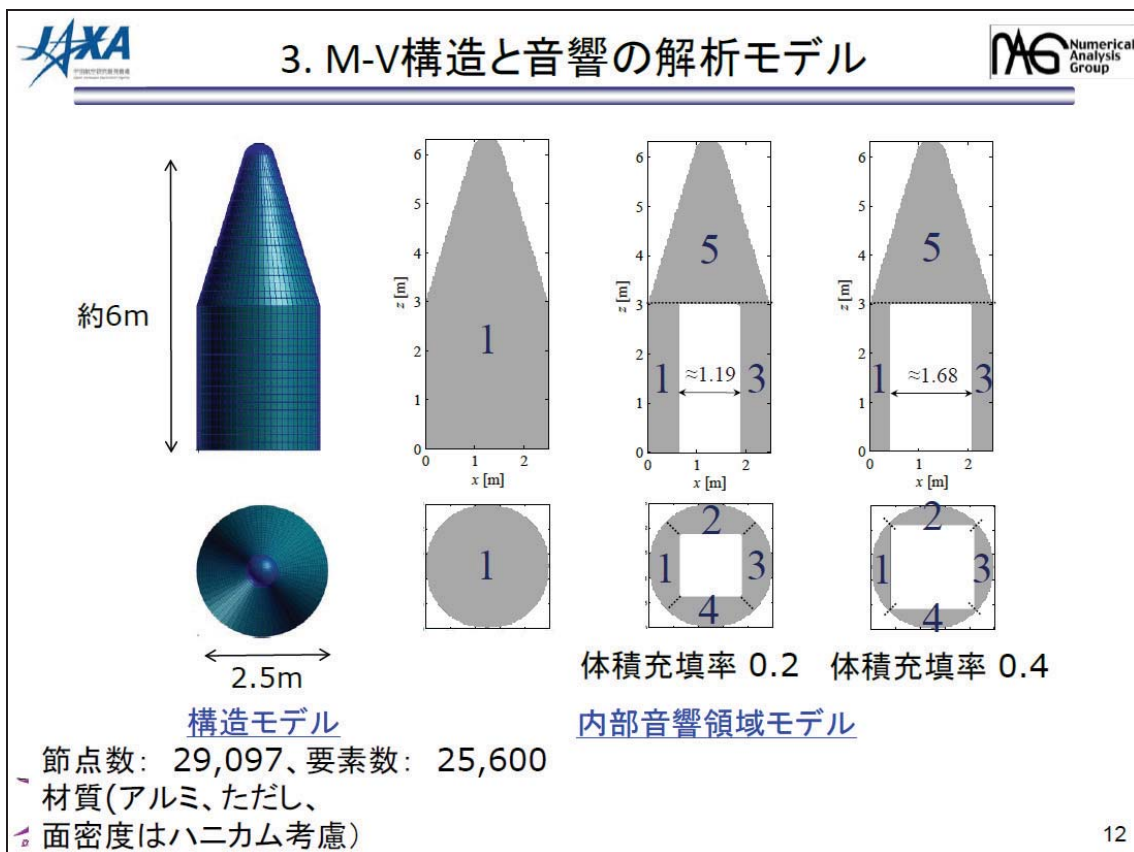
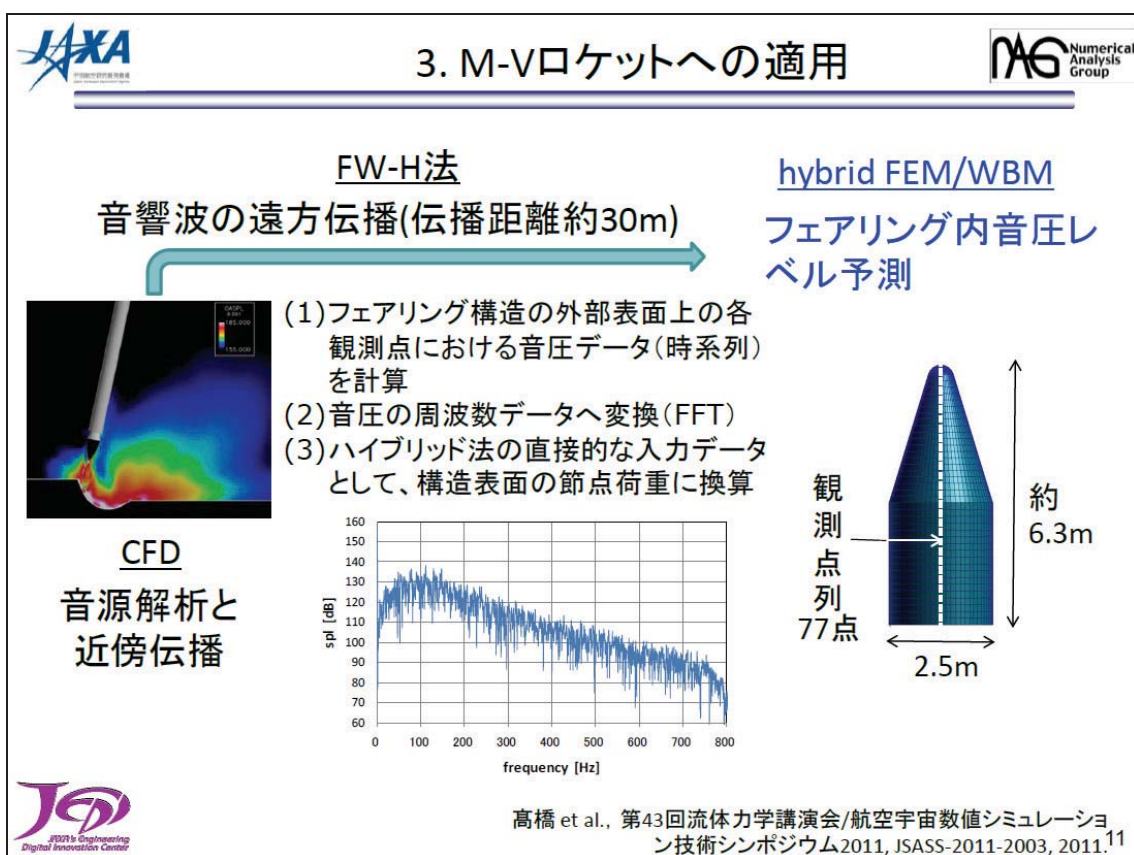
9

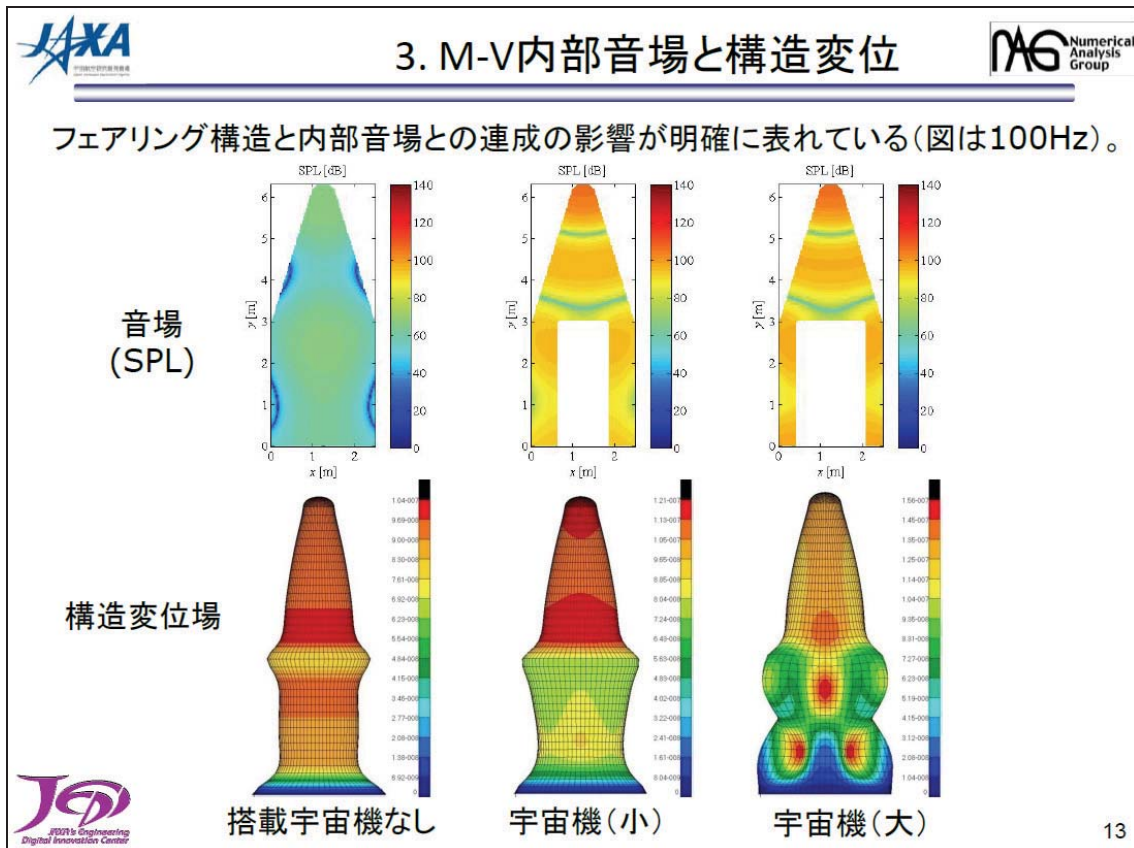


3. 音響構造解析手法



10





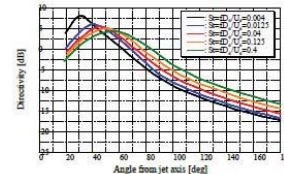
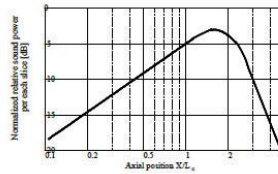


4. 半経験則(NASA SP-8072)

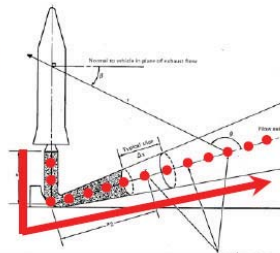


1. フリージェットを元にしたモデリング

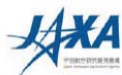
- ✓ 音響変換効率
- ✓ 音源分布
- ✓ 指向性



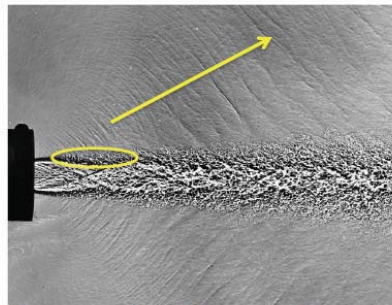
2. プルーム流れを仮定し、フリージェット音源を分布させ、球面波を仮定して観測点までの伝播を計算。



- ✓ 流れ場・音源・伝播の3つをモデル化する。
- ✓ 騒音発生機構が必ずしも明らかではないため、低騒音化に向けた設計指針を得ることが難しい。



4. 空力騒音



Shadowgraph of a Mach2.0 Cold Jet[#]

ナヴィエ・ストークス方程式
$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ik}}{\partial x_k} + \rho F_i$$

- ✓ 音は流体の渦運動に起因する。
- ✓ ナヴィエ・ストークス方程式を解けば流体の運動、音の発生、伝播のすべてを解析することができる。
- ✓ ナヴィエ・ストークス方程式を解析的に解くことは不可能に近いのでモデル化が必要。



Tam, C.K.W, AIAA Journal, Vol.47, No.10, 2009, pp.2440-2448. 16



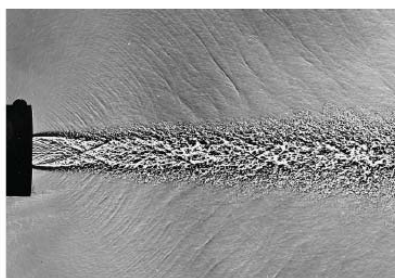
4. CFD解析の現状



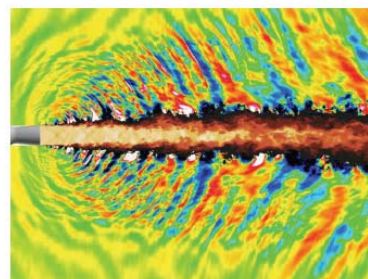
近年のスパコン性能とCFD技術の進歩により、ナビエ・ストークス方程式を数值的に計算し、流れ場・音の発生・伝播をシミュレーションすることが徐々に可能となってきた。



JAXAスパコン (JSS)
(135TFlops)



実験



CFD (静圧分布)



17

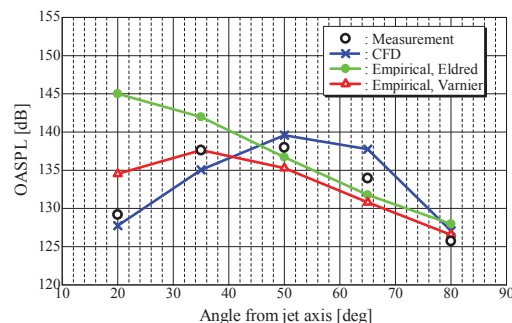


検証: 260kN固体モータ



(イプシロンロケットプロジェクト, 航空プログラムG, 環境試験Cとの協力)

ノズル出口径	0.614 m
ノズル出口マッハ数	2.92
レイノルズ数	1.75×10^6
出口圧力比	0.418



✓半経験則よりもCFDの予測精度は高く, OASPL値で3dB程度.

✓50degに見られる指向性もCFDは精度よく予測できている.



Fukuda, et al., AIAA 2009-3368.

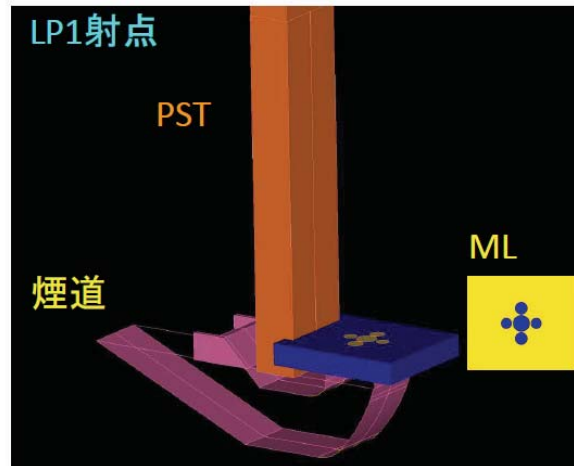
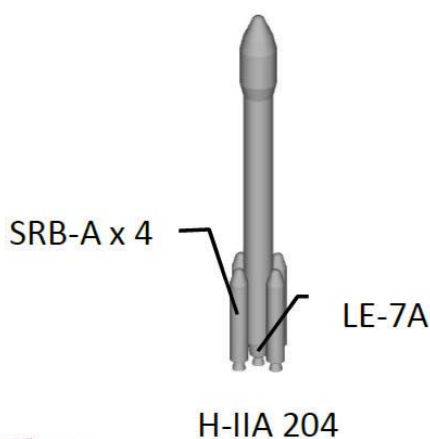


4. H-IIAへの適用



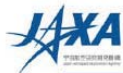
H-IIA 204形態(2006年12月18日打上げ成功)に対してCFD解析を実施.

プルームと射場との干渉による音波(圧力波)の発生, 及びその伝播特性を解析し, 現象の物理的なメカニズムの解明を目指す.

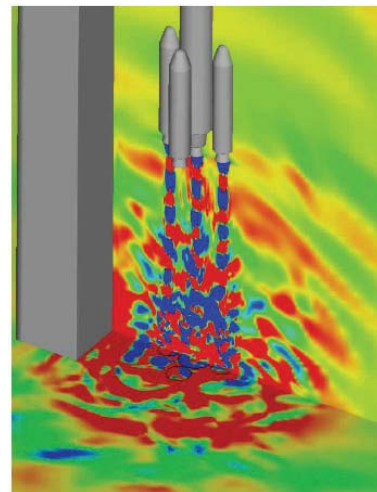
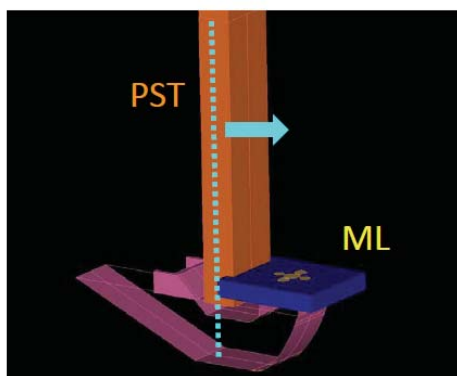


Tsutsumi et al., AIAA 2008-0390.

19



4. 音響発生メカニズム

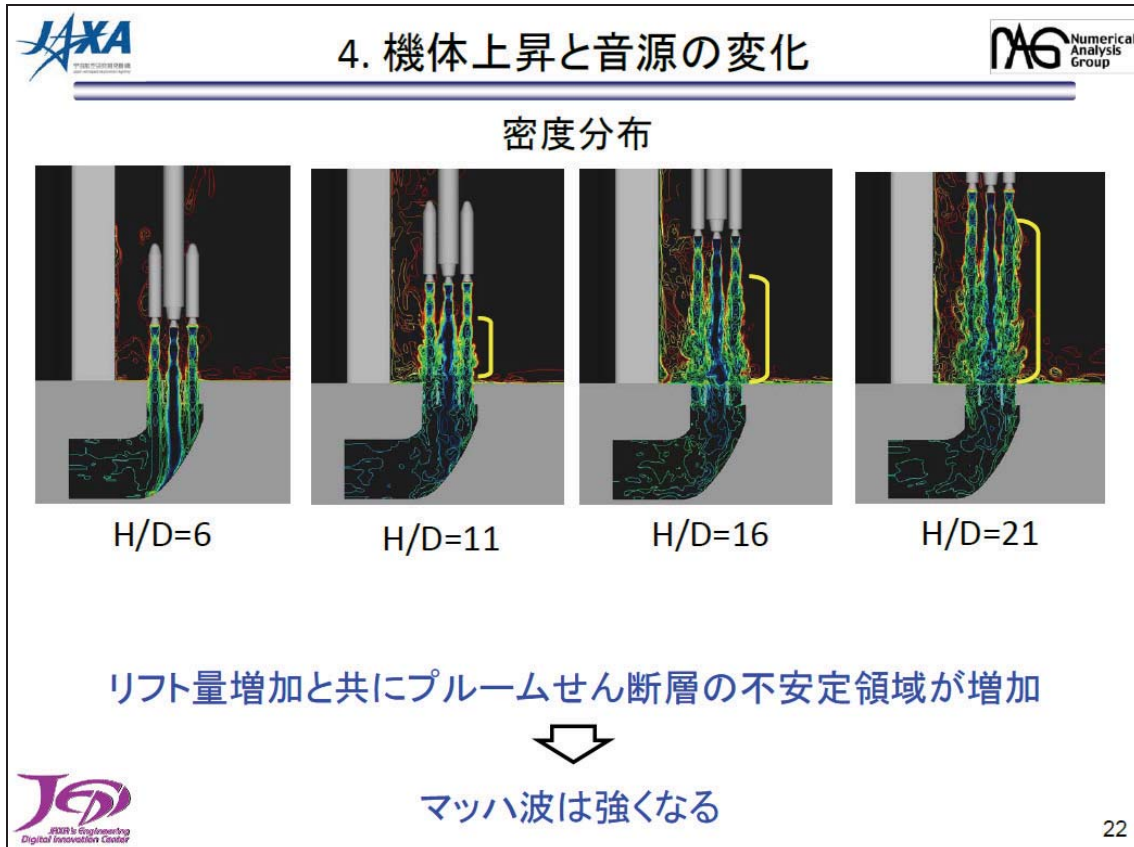
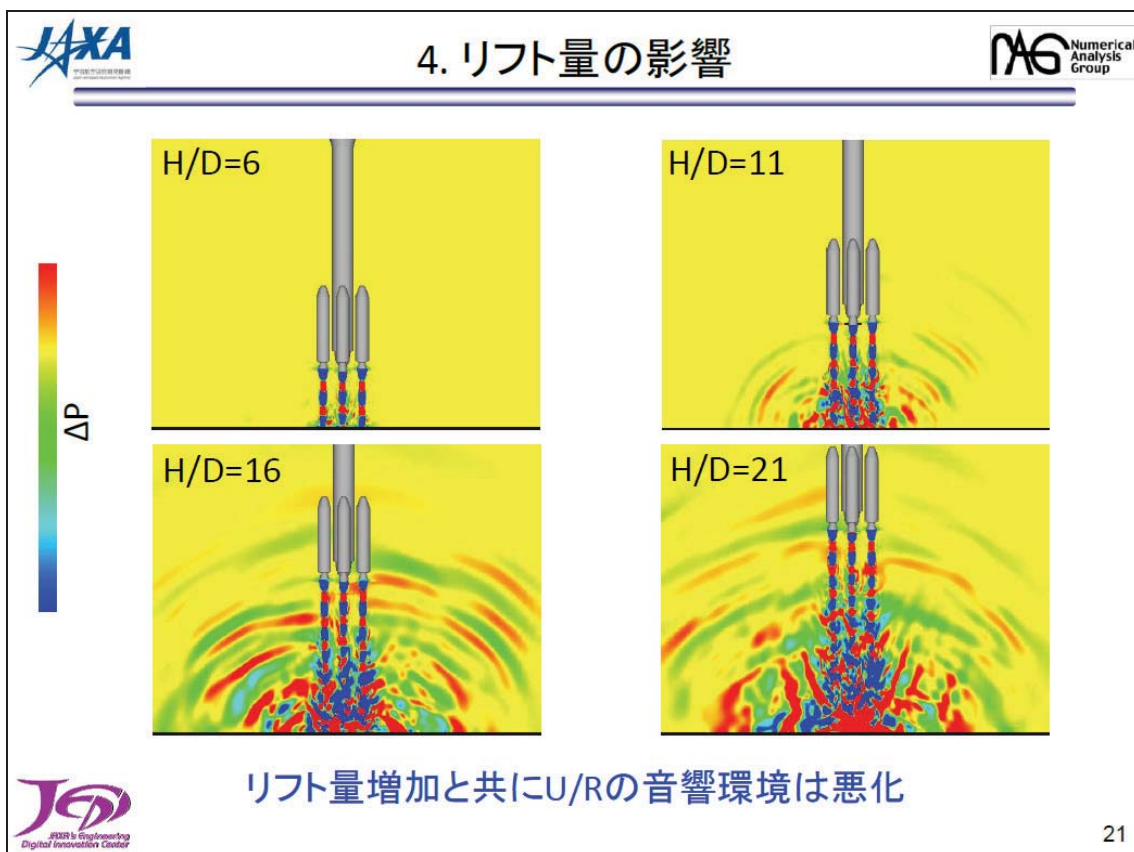


静圧分布@H/D=16[#]

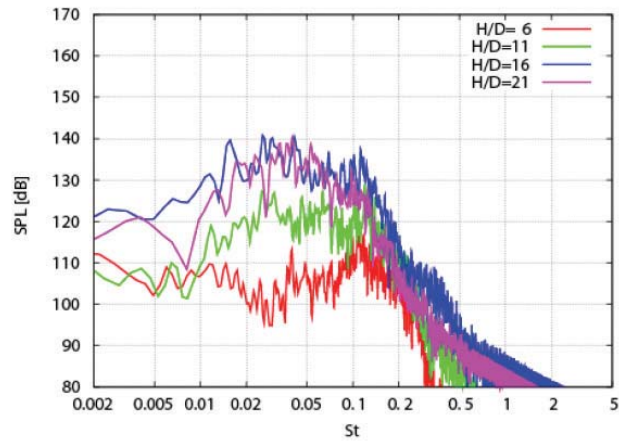
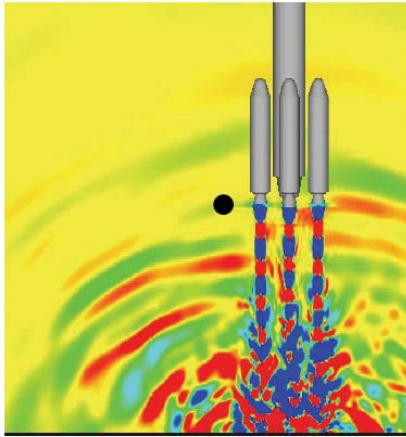
- ✓ プルームのせん断層不安定性に起因してマッハ波が発生.
- ✓ MLやPSTで反射し, 機体へと伝播.



[#] H:機体高度, D:SRBノズル出口径



4. 機体上昇と機体近傍SPL値の変化



$$H/D=6 < H/D=11 < H/D=16 > H/D=21$$

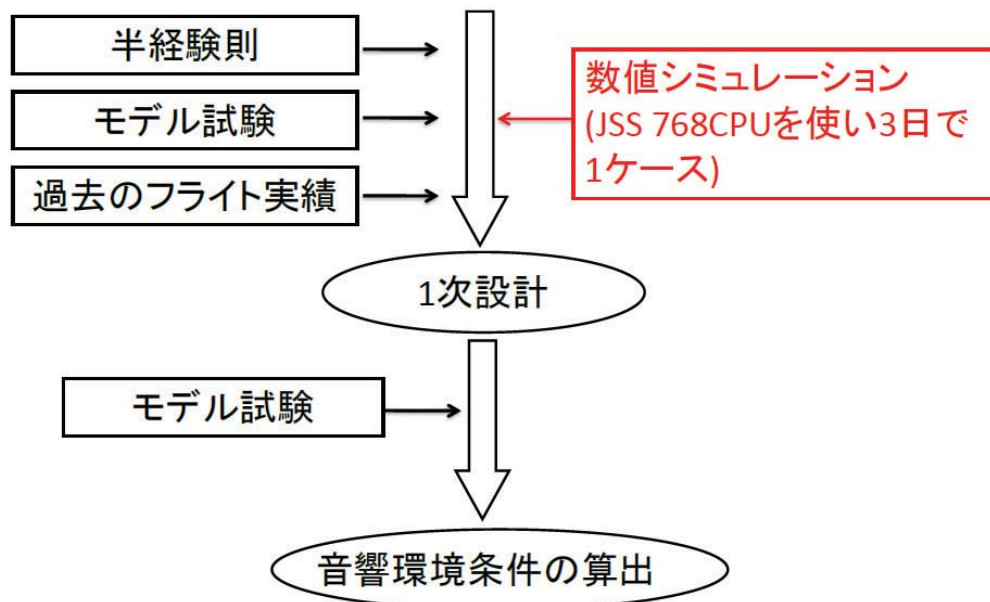
せん断層不安定
領域の増加

減衰特性($\propto R^{-2}$)

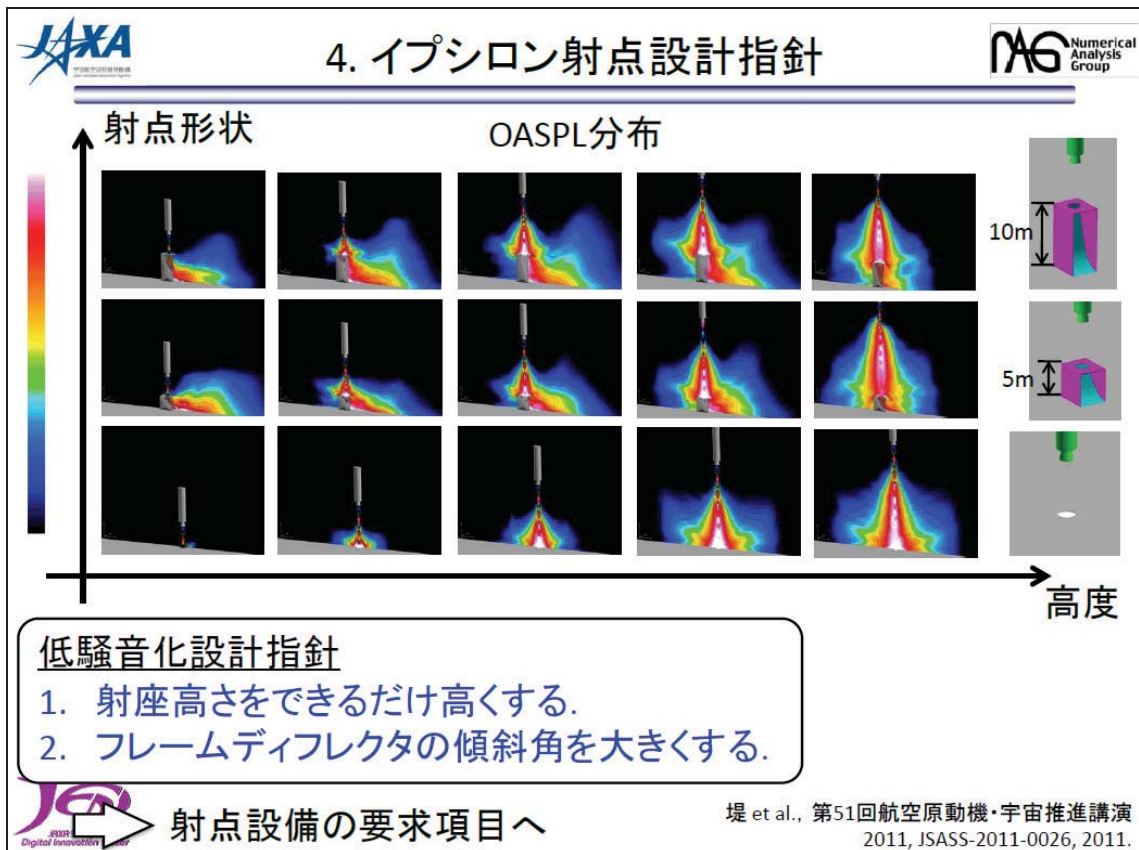
マッハ波に起因したU/Rの音響環境は極大値を持つ 23



4. ロケット射点設計の革新



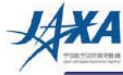
⇒ イプシロンロケット射点設計への適用



JAXA **Agenda** **NAG Numerical Analysis Group**

1. JEDIセンター・数値解析Gの紹介
2. 打上げ時音響振動と解析手法
3. hybrid FEM/WBEMによるフェアリング透過解析
4. CFDを用いた騒音発生機構の解析
5. まとめと今後の予定

JEDI **26**



まとめ



✓JEDIセンターと数値解析Gで研究開発中のロケット打上げ時音響振動解析ツールを紹介した.

- ◆CFDを用いた騒音発生と音響波の近傍伝播
- ◆FW-H法を用いた音響波の遠方伝播
- ◆hybrid FEM/WBMを用いたフェアリング透過

✓hybrid FEM/WBMを用いたM-Vロケットフェアリングへの適用事例を紹介した.

✓CFDを用いたH-IIA打上げ時騒音発生機構の解析とイプシロンロケットへの適用事例を紹介した.



27



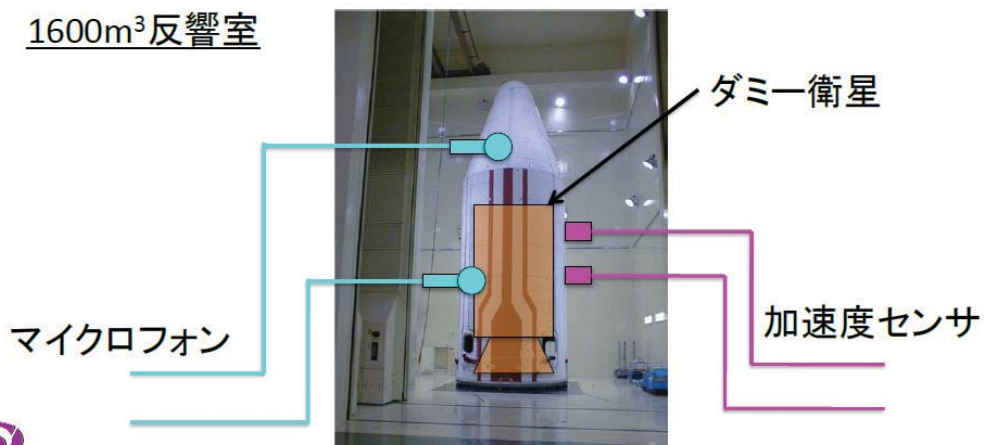
今後の予定 (1)



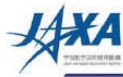
フェアリング透過解析 (輸送本部 要素C, 環境試験Cとの協力)

JAXA/環境試験センターにおいて実施された4Sフェアリングの音響試験データを利用し, hybrid FEM/WBMの検証を実施予定.

1600m³反響室



28



今後の予定 (2)



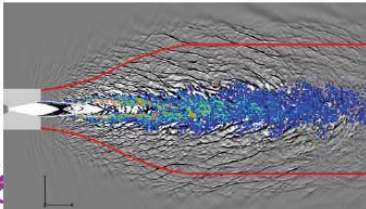
CFD解析

➤ イプシロンロケット模擬射点音響環境計測試験(SMAP)^{#1}



- ✓イプシロンロケットの外部音響環境条件の予測
- ✓低騒音化に向けた遮音板の検討

➤ 音響環境条件の定量的予測を可能とする音響環境予測ツールの開発



- ✓JAXA-CNES共同研究^{#2}
- ✓SMAPデータを利用した検証

#1 堤 et al., 第55回宇科連, 2011 (発表予定)

#2 Morizawa, et al., J. Acoust. Soc. Am. Vol.130, 2011, pp.2544.



質疑応答

質問者①

Hybird の考え方についてですが、FEM と WBM の結合方法に関して具体的な結合の考え方を教えていただけないでしょうか。

また、フェアリング内部の音響解析について、試験という観点から見ると均一な音場を与えることを条件としていますが、実際の打上げ時にはフェアリング内部の音響環境がどうなっているのか興味があります。知見があれば教えていただけないでしょうか。

発表者

FEM と WBM の結合方法については、数値解析グループが担当であり、実際のインターフェース等の詳細については後ほどお答えします。

打上げ時にフェアリング内部が均一音場でないという認識は我々も持っており、均一音場である試験設備で試験を行なっていることは問題ではないかと思っています。数値シミュレーションを通じて現状が見えてくるということはメリットであり、集めた知見を試験センターと共有し試験とシミュレーション双方向でやりとりしていくことで、日本の力を上げていくことがあるべき姿ではないかと考えています。

質問者②

宇宙機が曝される音響環境というのは打上げ時だけでなく、遷音速付近にもピークがありますが、遷音速時の環境についても CFD は行なっているのでしょうか。

発表者

宇宙機が曝される振動・音響環境というものは、ご存知の通りロケットの打上げ時と遷音速時にピークが現れています。打上げ時の音響低減に向けて解析に注力しておりましたが、逆に遷音速時が上がるという減少もあり、双方に取り組まないとトータルとして結果が良くないということから、どちらも取り組んでいるのが現状です。遷音速時の非定常流れ場を CFD 解析する場合、どのような計算モデル(乱流モデル)を適用すればよいかは現状では必ずしも明確ではありません。そこで JEDI では、どの様にモデル化すれば遷音速時の振動を模擬できるのか研究を進めている所であり、学会論文もいくつか出し始めているところです。

質問者③

スライド内容を見ていると煙道の影響が現れているように見られますが、ロケット打上げ高さと煙道の位置関係については音環境に影響があるのでしょうか。

発表者

音響環境については煙道というよりフレームデフレクタとの干渉が挙げられます。この部分については今までも研究を重ねてきています。機体高度が低いほどフレームデフレクタ、煙道からの音響が支配的であり、機体高度が上がるとジェットからの音の影響が現れてきます。高度によって支配的になる音響の関係が見えてきていますが、ジェットがフレームデフレクタに当たってどのようなメカニズムで音が現れてくるのか等の研究を進めているところです。