

バーガース方程式によるジェット騒音予測

○岩永則城, 山本雅史 (RCCM, Inc)
橋本敦, 青山剛史, 福田紘大, 堤誠司, 高木亮治 (JAXA)

Jet Noise Prediction using Burgers Equation

Noriki Iwanaga, Masafumi Yamamoto (RCCM, Inc)
Atsushi Hashimoto, Takashi Aoyama, Kota Fukuda, Seiji Tsutsumi, Ryoji Takaki(JAXA)

Abstract

Nonlinear effect, as well as geometrically decreasing effect, in jet noise is examined by Burgers equation. A captive firing test conducted in JAXA is used. The resulting facts are that (1) propagation mode changes from cylindrical type to spherical one as the longitudinal coverage becomes longer due to reflection from the ground and so on, (2) nonlinearity distributes acoustic energy around peak frequency to waves with higher frequency. Especially, what is important for the purpose of rocket launch is that, the increase of sound pressure level in higher frequency region resulting from the energy distribution stated above is in 130~2000Hz, and the maximum value is likely to be about 6dB.

1. はじめに

強い音波の伝搬過程では、非線形効果（例えば波の突っ立ち）や分散、散逸効果が現れる。ロケット排気ジェットから出る爆音予測をはじめとして、航空機の衝撃波音予測などにとっても、これらの効果を調べることは重要である。

ここでは特に非線形効果に着目する。既往研究^[1]によると、非線形効果を考慮する場合、Convective Mach Numberが大きくなると影響周波数（線形伝搬計算による音圧プロットと非線形計算によるプロットの交差周波数）が低周波側に移動する、伝搬距離が長くなると高周波側での音圧が上昇する、等が判明している。本論文では、Burgers方程式^[2]を用いて、地上燃焼試験の騒音予測を行い、非線形効果を検討する。

ロケットのフェアリングが受ける音圧の周波数帯としては、10~2000Hz帯がターゲットとなる。この周波数帯において非線形効果を考慮した方がよい周波数帯が存在するか、するとすればどの程度の音圧変化が起こるのかを調べる。

2. 解析手法

2.1 Burgers方程式

当目的においては、音波の伝播過程における非線形効果の影響を考慮できる手法を使う必要がある。しかしながら、従来の経験的手法^[3]やハイブリッド手法（CFD+積分面手法）^{[4][5]}では、伝搬中の非線形効果が考慮されていない。そこで、それが考慮されているBurgers方程式を採用する。これは、「音源抽出と

音響擾乱伝搬を分離し、後者は音源に影響を与えない」とする分離型解法の一つである。利点としては、非線形性を考慮できるという点の他に、“実測”で得た音響情報をもとに音響擾乱の伝搬が計算できる、計算時間は非常に短くて済む、という点が挙げられる。

採用するBurgers方程式は空間1次元の圧力に関する方程式である：

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\beta}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial p^2}{\partial t} - \frac{m}{x} p + \frac{1}{2\rho_0 c_0} \frac{\partial(\rho_0 c_0)}{\partial x} p$$

+熱粘性項+緩和吸収項

ここで、 $p=p(x,t)$ は音圧、 x は伝搬距離、 m は幾何学的減衰係数（平面波：0.0、円筒波：0.5、球面波：1.0）、

$t' = t - \int_0^x (1/c_0) dx$ は遅延時間、 c_0 は音速、 ρ_0 は周

囲密度、 β は非線形係数（線形：0.0、非線形：1.2）である。右辺各項は順に①非線形、②幾何学的減衰、③大気インピーダンス $\rho_0 c_0$ の非一様効果、④熱粘性、⑤緩和吸収効果を示す。Burgers方程式は、音源近傍の1点から移動開始する音響擾乱の圧力が、到達位置の前進につれて物理効果①~⑤によりどう変わっていくかを教示する。この方程式の離散化式を評価することにより、最終到達点である観測点での音圧時系列予測が可能となる。

本研究では、この方程式に基づいて開発した非線形音響伝播コードXnoise^{[6][7]}を用いる。これまでに、①~③の効果については、ソニックブームの伝播解

析を実施し、波形パラメータ法との比較により検証を行った^[6]。また、④と⑤の効果については、振動エネルギーの非平衡を考慮したCFD解析との比較による検証を行っている^[7]。

解析上、音波は真の音源から放射され、一次元方程式に記述される形で周囲に進むと仮定する。幾何学的減衰係数 $m=0.0$ ならば平面波として測定点方向へ直進するとみなす。また、 $m=0.5$ ならば円筒波状、 $m=1.0$ ならば球面波状に広がり、波面のどこかが測定点を通るものとする。この仮定を導入することで、真の音源から少し離れた測定点での音圧履歴データを計算用音源とし、そこから離れた位置にある測定点での音圧履歴を求めることが可能となる。

2. 2 DFT (離散フーリエ変換)

Burgers方程式を使って得た観測点での音圧時系列データに、DFTをかけることによって、周波数特性を調べる。ところで、線形問題を解く場合、得られた時刻歴データの時間間隔は一樣となり、そのままDFTをかけることができる。一方、Poisson解を使用して非線形問題を解く場合^[6]は、伝搬中の音波の形が歪んでしまうために、波形解像用のサンプリング時間間隔を非一樣にせざるをえなくなる。しかしながら、非一樣間隔の時刻歴データにDFTをかけるのは困難なので、線形補間を用いて一樣な時間間隔の時刻歴データに直した後に、DFTをかけるという手順を踏むことにする。

3. 解析対象

Fig. 1 にM24地上燃焼試験の音響測定概要を示す。ノズル中心軸から測って60degの直線上に3個の測定用マイク(M3near, M3, M3far)を置いている。各マイクは、ノズル出口ノズル直径を $De[m]$ とした時に、出口ノズルから距離23.3 De, 46.5De, 62.0Deの位置にある。

解析対象となる音波経路は、(i)M3near \Rightarrow M3 (ii)M3 \Rightarrow M3farの2つである。(i)ではM3nearが音波の出発点であり、M3が到達点である。(ii)ではM3が出发点、M3farが到達点となる。

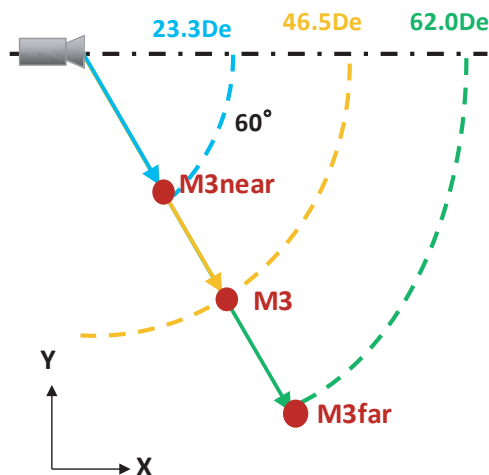


Fig.1 Location of Microphones

Fig.2にノズル内圧の時間履歴を示す。点線で囲んだ範囲は圧力変動が少ないので、この時間帯の一部分(3.0s)を解析対象時間とする。

各測定点で得られている時刻歴データのサンプリング時間は $8.2e-5s$ である。周波数特性グラフ(音圧v.s.周波数グラフ)作成時の周波数上限値は約6000Hzとなる。

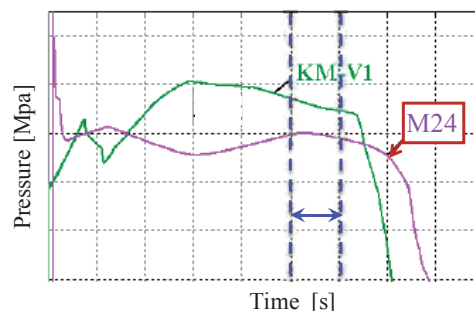


Fig.2 Pressure History in the nozzle and duration available for the analysis

4. 解析手順

まず音波の出发点と到達点における音圧履歴データにDFTをかけることにより、両点における音圧v.s.周波数データを取得する。次に、出发点の音圧時刻歴データを入力とし、離散化されたBurgers方程式によって音波の逐次到達点とそこでの音圧を更新していき、最終的な到達点となるマイク位置での音圧時刻歴データを取得する。この時刻歴データに離散フーリエ変換DFTをかけることにより、最終到達点で予測される周波数特性データを取得する。最後に、試験データならびに計算から得られた周波数特性データを同時グラフ化して比較検討する。

5. 結果

5. 1 幾何学的減衰特性

Xnoiseでは、幾何学的減衰係数を変えることにより、音源から放射された音波が平面波として伝搬するのか、円筒波としてなのか、あるいは球面波としてなのかを指定することができる。どれを選択するかは現象ごとに選択する必要がある。地上燃焼試験のように、超音速JETの周囲に発生する主要音波は、マッハ波なので、円筒波オプションを使って計算するのが自然である。しかしながら、周囲の形状や物理特性のために、マッハ波の理想的な伝搬状況は実現されていないと考えられる。例えば、地上反射等の影響が考えられる。従って、どの幾何学的減衰オプションが妥当かを調べる必要がある。

経路(i)をみる。Fig.3に、マイク位置M3における実験結果と、各種幾何学的減衰オプションによる非線形オプションを用いた計算結果とを、1/3オクターブバンド幅で示す。70Hzまでは円筒波オプション(cylindrical)による計算結果が最も実測値に近いが、70Hz以降ではいずれのオプションの結果も実測値から離れてしまっている。あえて選択すれば、球面波オプション(spherical)の方が近い。70Hz以上の高周波帯では、地上からの反射波等の影響が大きくなるなど、幾何学的減衰特性以外の影響が効き、円筒波としての伝搬形態が大きく崩れていると考えられる。

経路(ii)をみる。Fig.4に、マイク位置M3farにおける実験結果と、各種幾何学的減衰オプションに対応する非線形計算結果とを、1/3オクターブバンド幅で示す。6000Hzまでの周波数全体において、いずれのオプションも実測値とは合わなかった。強いて挙げれば、球面波オプションが実測値に近い。

経路(i)(ii)の結果を総合すると、円筒波として伝搬していた音波は、周波数帯ならびに伝搬距離に依存して、地上からの反射波等、幾何学的減衰効果以外の影響が効いてくる、といえる。

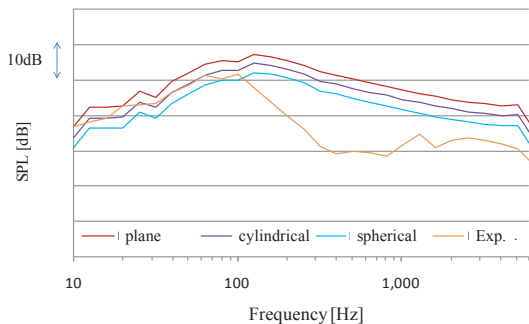


Fig.3 Sound Pressure level v.s. Frequency at the M3 location along the path (i) using the nonlinear option

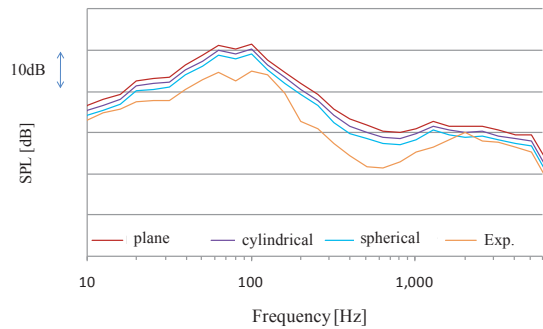


Fig.4 Sound Pressure level v.s. Frequency at the M3far location along the path (ii) using the nonlinear option

5. 2 非線形特性

ロケットの排気ジェットから出る強い音波は、伝播中の非線形効果によって波形が歪みながら伝播する。そのため、観測点における周波数特性は、非線形効果を入れない場合とは異なる傾向を示す。Xnoiseでは、非線形係数 β を1.2に設定することにより、非線形効果を取り入れることが可能となる。この効果を2つの経路で評価する。

経路(i)をみる。Fig.5に、マイク位置M3における実験結果と円筒波オプションによる線形計算(linear)及び非線形計算(nonlinear)の結果を、1/3オクターブバンド幅で示す。60Hzまでは線形計算と非線形計算の差は見られないが、60~300Hz範囲において線形計算値が非線形計算値を超えた後、300~2000において今度は非線形計算値の方が線形計算値を最大6dBほど超えている。これは、非線形計算値のピーク値が下がって高周波側への音響エネルギー分配が行われていることを示しており、既往研究[1]にも挙げた効果と符合している。

経路(ii)をみる。Fig.6に、マイク位置M3farにおける実験結果と円筒波オプションによる線形・非線形計算結果を、1/3オクターブバンド幅で示す。130Hzまでは線形計算と非線形計算の差は見られないが、130~1000Hz範囲において非線形計算値が線形計算値を最大5dBほど凌駕している。更に1000~6000Hzでは両者が入れ替わっている。

経路(i)(ii)の結果を総合すると、伝播中の音波は、非線形効果により音響エネルギーが高周波側(具体的には130~2000Hz)に分配され、この周波数帯では最大6dBほど音圧が上昇する、といえる。

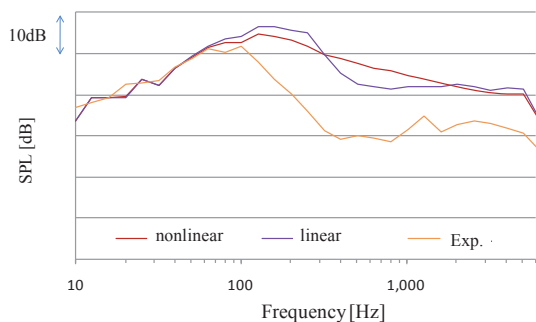


Fig.5 Sound Pressure level v.s. Frequency at the M3 location along the path (i) using the cylindrical and nonlinear option

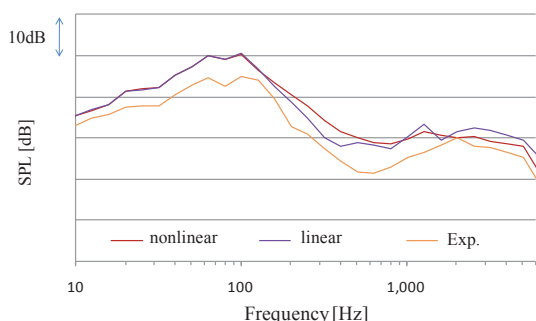


Fig.6 Sound Pressure level v.s. Frequency at the M3far location along the path (ii) using the cylindrical and nonlinear option

6. 結論

地上燃焼試験を対象とし、Burgers方程式をベースとする非線形音響コード“Xnoise”を用いて、音響擾乱が観測点まで伝搬する過程を計算した。観測点音圧の周波数特性を通して、幾何学的減衰特性と非線形性の影響を調べ、以下のことが分かった：

- ・円筒波として伝搬していた音波は、周波数帯ならびに伝搬距離に依存して、地上からの反射波等、幾何学的減衰効果以外の影響が効いてくる。
 - ・伝搬中の音波は、非線形効果により音響エネルギーが高周波側(具体的には130~2000Hz)に分配され、この周波数帯では最大6dBほど音圧が上昇する。
- ロケットのフェアリングが受ける音圧の周波数帯としては、10~2000Hz帯が重要である。この周波数帯中に非線形効果を考慮した方がよい周波数帯が存在し、そこでの音圧変化が最大で6dBに達し得るという結果は、地上燃焼試験や打ち上げ時の音響環境分析にとって重要な知見となる。

7. 参考文献

- [1] Saxena, *et al.*, AIAA -2008-2934, 2008.
- [2] Cleveland,R.O., *et al.*, J.Acoust.Soc.Am. 99, 1996.
- [3] NASA SP8072, JUNE 1971
- [4] Tsutsumi,S., *et al.*, 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 21-23 July 2008, Hartford, CT
- [5] N. Iwanaga, *et al.*, 6AWCFD, AW6-25, 2010
- [6] 山本雅史, 橋本敦, 村上桂一, 青山剛史, 石川敬揚, 牧野好和, 自動格子生成と Burgers 方程式を用いたソニックブーム解析, 第 23 回数値流体力学シンポジウム, B6-2, 2009.
- [7] 山本雅史, 橋本敦, 村上桂一, 青山剛史, 酒井武治, Burgers 式を用いたソニックブーム伝播計算における熱粘性減衰および分子緩和効果, 第 42 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2010, 2B11.