

# D-SEND#1 データを用いたソニックブーム伝播解析手法検証

中 右介, 牧野 好和, 橋本 敦 (宇宙航空研究開発機構), 山本 雅史 (計算力学研究センター),  
山下 博 (名古屋大), 内田 貴也, 大林 茂 (東北大)

## Validation of Sonic-Boom Propagation Analysis Methods Using D-SEND#1 Data

by

Yusuke Naka, Yoshikazu Makino, Atsushi Hashimoto (JAXA), Masafumi Yamamoto (RCCM),  
Hiroshi Yamashita (Nagoya Univ.), Takaya Uchida, and Shigeru Obayashi (Tohoku Univ.)

### ABSTRACT

Several different sonic boom propagation analysis methods were applied for the D-SEND#1 test cases, and the results were validated by comparing to the measured data. The sonic boom signatures calculated by all of the methods were similar to the measured waveforms as a whole. However, some discrepancies were found in the detailed features of the signatures among the methods, especially the rise times in the shock structures.

### 1. はじめに

ソニックブームの低減はコンコルドに続く次世代の民間超音速旅客機実現のための最重要課題の一つであり、ソニックブームを低減させる機体概念や機体形状設計技術の研究開発が国内外で活発に行われている。一方、ソニックブーム低減の目的は私たちが生活する地上で聞こえるソニックブームの大きさやうるさを軽減することであるため、検討・設計された機体から発生するソニックブームが地上でどのように聞こえるかを正確に推算する技術も重要となる。ソニックブームは機体近傍では非常に大きな圧力変動であり、それが超音速機の航行高度から地上までの十数 km という長距離を伝播する。この伝播過程において、圧力波形は有限振幅音波の非線形性や大気による減衰の影響を受けて大きく変形する。陸地上空の超音速飛行実現のために必須となるソニックブームに関する新たな国際基準策定の観点からも重要となる、ソニックブームが人々に与える聴覚的・心理的影響を検討・評価するには、このような伝播過程における変形を正確に捉え、特にショック部の立ち上がり時間等の詳細までも含めたソニックブーム波形を精度良く推算することが重要である。

ソニックブーム伝播解析手法はこれまでにいくつかの研究開発がされているが、それらの検証や比較は必ずしも十分になされているとは言えない。そこで本研究では、2011 年に JAXA が実施した D-SEND#1 試験<sup>1)3)</sup>の条件に対して各種の手法でソニックブームの伝播解析を行い、実測ソニックブームデータとの比較検証を行う。

### 2. ソニックブーム伝播解析手法

本研究では、以下の 4 種類の手法を用いてソニックブーム伝播解析を実施した。

- (A) 波形パラメータ法<sup>4),5)</sup>
- (B) 波形パラメータ法+Taylor ショック<sup>6)</sup>
- (C) 波形パラメータ法+周波数領域での減衰<sup>7)</sup>
- (D) 拡張 Burgers 方程式法<sup>8),9)</sup>

各手法の詳細は参考文献を参照されたいが、ここではそれぞれの特徴を簡単に述べる。

(A)の波形パラメータ法は 1970 年代に考案され、以降ソニックブーム伝播手法として広く使われてきた。波形パラメータ法では非線形性による波形の変形を考慮することはできないが、大気の熱粘性や分子振動緩和による減衰を扱うことはできない。そのため、結果として得られる波形のショック部分は立ち上がり時間がゼロの不連続な圧力変化を有する。

(B)の手法は波形パラメータ法のような問題を解決するために提案された手法である。波形パラメータ法による計算結果に対して、不連続部分に tanh 関数で表される Taylor ショックを適用して有限の立ち上がり時間を与える。tanh 関数内のパラメータは、過去の実測データを元に半経験則に従って決定されることが多い。

(C)の手法も波形パラメータ法の不連続部分に有限の立ち上がり時間を与えるための手法であり、時間・空間発展的に解かれる伝播過程において一定の間隔で大気による減衰の影響を加味する。大気による減衰は(B)のような半経験則に従うものではなく、大気の熱粘性や分子振動緩和による影響のモデルを使用している。

(D)の拡張 Burgers 方程式を用いる方法は、近年広く使われるようになったものである。拡張 Burgers 方程式には、従来の Burgers 方程式に含まれている有限振幅音波の非線形性と大気の熱粘性による減衰効果に加え、大気中の分子の振動緩和による減衰の影響の項も含まれている。

以上に述べた 4 手法の特徴は表 1 のようにまとめられる。

### 3. 解析条件

D-SEND#1 では、N 波を発生させる N-Wave Model (NWM)と低ブーム波形を発生させる Low-Boom Model (LBM)という形状の異なる 2 種類の供試体を落下させる試験を 2 回実施した (図 1)。従って、合計 4 回の供試体の超音速落下に対してソニックブームを計測した。本研究ではこの 4 回の落下の全てに対し、地表から約 500m の高さに設置されたマイク位置に到達するソニックブーム波形を各手法による伝播解析を実施して求め、同位置で計測された実測データとの比較を行った。

解析に際しては、以下の条件は各手法で同一とするようにした。

- (1) 供試体近傍圧力波形
- (2) マイク高度
- (3) ブーム発生時供試体速度

表 1 ソニックブーム伝播手法の特徴比較

手法	非線形性	大気減衰		解析領域
		モデル	半経験則	
(A)	✓			時間
(B)	✓		✓	時間
(C)	✓	✓		時間 (非線形性) 周波数 (減衰)
(D)	✓	✓		時間

- (4) ブーム発生高度
- (5) 初期ブーム伝播角度
- (6) 気象条件 (気温、風 (水平面内)、湿度)

(1)は CFD 解析 (NS) により機体から 16m 離れた点における圧力波形を求め、これを伝播解析の入力波形として使用した。入力の前傍場圧力波形を図 2 に示す。(2)は D-SEND#1 試験で計測されたマイク位置を用いた。(3)~(5)は D-SEND#1 で計測された供試体の落下運動データと(2)のマイク位置を用いてソニックブーム伝播経路解析を事前に実施して特定した。(2)~(5)の条件を表 2 に示す。(6)は D-SEND#1 実施日のデータを使用した。気象条件を図 3 に示す。ただし、手法(A)の波形パラメータ法は原理的に湿度を考慮することができず、また手法(C)の波形パラメータ法と周波数領域での減衰を組み合わせた手法では、現時点でのツールの制限として湿度の高度方向の分布 (非一様性) は考慮できない。なお、(2)、(3)、(6)に関するデータは D-SEND データベース<sup>3)</sup>にて公開されている。

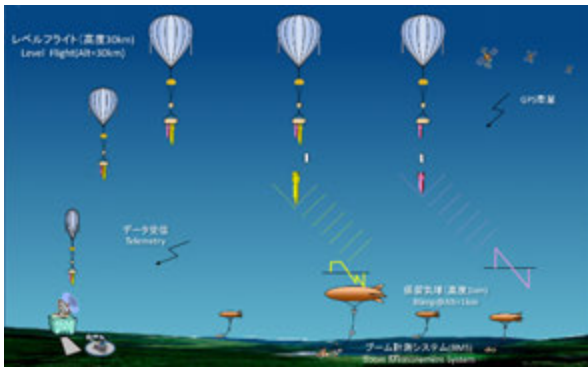
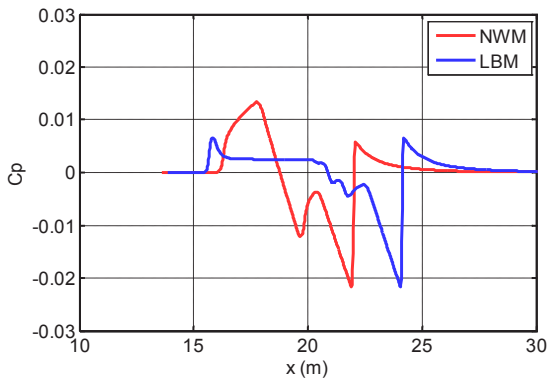
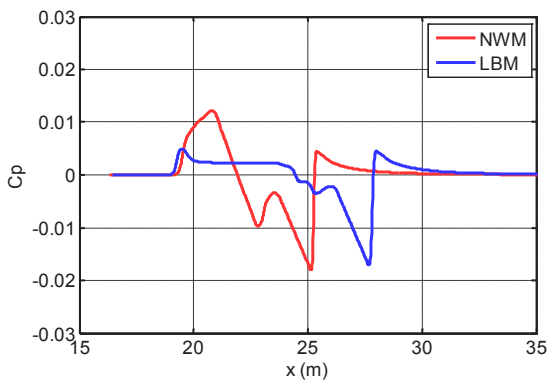


図 1 D-SEND#1 試験概要



(a) 第 1 回落下試験



(b) 第 2 回落下試験

図 2 機体近傍圧力波形

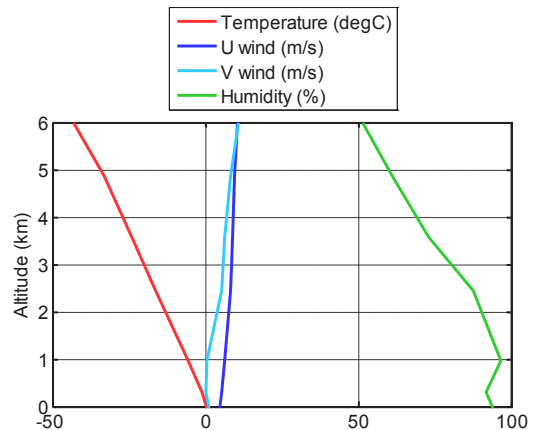
#### 4. 結果および考察

合計 4 回の超音速落下に対するソニックブーム伝播解析結果を図 4~7 に示す。同図には実測波形も併せて示している。上空 500m では大気乱流の影響は小さいが、それでも特に第 2 回落下試験の実測データでは多少の変形が確認される。しかし、地上波形に比べればその変形量は非常に小さく<sup>2)</sup>、立ち上がり時間の検証には不十分であるが、波形全体に対する伝播解析手法の基礎的な検証データとしては利用可能なデータであると言える。

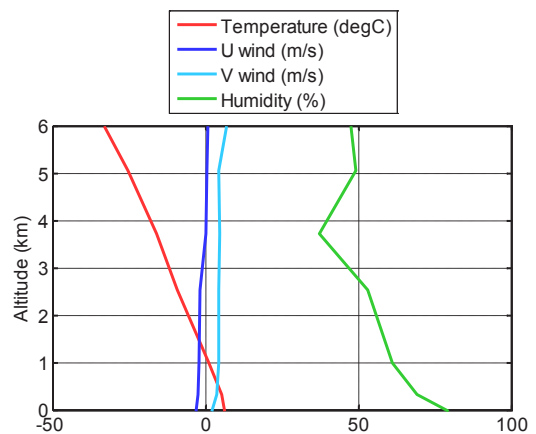
いずれの落下に対しても各手法による結果は波形全体としては実測データとまずまずの一致が見られ、LBM 波形後端の多段ショックも全ての手法でも捉えられている。しかし、各波形を詳細に見ると、手法による差異が認められる。

NWM (図 4、6) においては、波形全体のレベルが(C)の波形パラメータ+周波数領域減衰の手法で他よりも小さくなっている。しかし、同手法による LBM の解析結果 (図 5、7) の先端ショックでは顕著な差異は認められない。従って、ショック部分の音圧変化量によって解析結果の挙動が変化する可能性も推察される。

継続時間 (後端ショックの位置) は、第 2 回落下試験の結果 (図 6、7) に対してはいずれの手法も実測値と比較的に良く一致している。一方、第 1 回落下試験 (図 4、5) では、(D)の拡張 Burgers 方程式法は実測波形とほぼ同じであるが、波形パラメータ法を使用した他の 3 手法はやや異なっている。第 2 回に比べて第 1 回試験の方がソニックブーム発起点からマイクまでの伝播距離も長かったため、第 1 回試験の方が明確に差が現れた可能性も考えられる。



(a) 第 1 回落下試験



(a) 第 2 回落下試験

図 3 気象条件

表 2 解析条件

(a) 第 1 回落下試験

	マッハ数	供試体 x	供試体 y	供試体 z	マイク x	マイク y	マイク z	初期角度
NWM	1.43	1332 m	4903 m	6030 m	74 m	15 m	928 m	196°
LBM	1.42	1324 m	4830 m	6015 m	74 m	15 m	928 m	196°

(b) 第 2 回落下試験

	マッハ数	供試体 x	供試体 y	供試体 z	マイク x	マイク y	マイク z	初期角度
NWM	1.58	1019 m	-4330 m	4652 m	-32 m	10 m	1033 m	346°
LBM	1.59	204 m	-4367 m	4552 m	-32 m	10 m	1033 m	357°

前述の通り第 2 回落下試験の実測波形は立ち上がり部分に波形の歪みが見られ、立ち上がり時間の検証には適さないが、第 1 回試験の波形は変形がほとんどなく、検証に適したデータとなっている。従って、ここでは図 4、5 の第 1 回試験のソニックブーム波形に関してのみ、ショック部分の立ち上がり時間の推算精度を検証する。推算波形を比較すると、立ち上がり時間（波形の傾き）は手法による差異が大きいことが分かる。

まず、(A)の波形パラメータ法では原理的にショックの立ち上がり時間はゼロとなり、有限の立ち上がり時間は考慮できない。波形パラメータ法の結果に対して手法(B)で Taylor ショックを用いた補正を適用すると、D-SEND#1 の計測結果に対しては立ち上がり時間が非常に長くなっていることが分かる。Taylor ショック近似では立ち上がり時間を決定するための時定数をパラメータとして設定するが、通常はこの時定数には飛行試験データから経験的に得られた値が用いられる。この飛行試験データは主に軍用機の水平定常飛行中に発生したソニックブームの観測データである<sup>6)</sup>。D-SEND#1 ではこれらの飛行試験とはソニックブームの伝播距離が大きく異なるため、立ち上がり時間が異なる結果になったと考えられる。従って、様々な飛行条件や気象条件に対応するためには、過去の試験データに基づく経験的な手法よりも、物理現象のモデルを扱う手法が適していると言える。

残る (C)と(D) の 2 手法は大気による減衰効果のモデルを扱っている。NWM の波形 (図 4) に対しては、(C)の波形パラメータ法+周波数領域減衰手法も(D)の拡張 Burgers 方程式法も実測データと非常に良く一致している。一方、LBM の波形 (図 5) に対しては、(D)の拡張 Burgers 方程式による推算波形は実測値と良く合っているが、(C)の波形パラメータ法+周波数減衰の手法は実測波形に比べて立ち上がり時間が短くなっている。立ち上がり時間には湿度の影響が大きい、今回は(C)の手法では全伝播経路において湿度を一様としており、実際の分布とは異なった条件であることも要因の一つとして考えられる。なお、図 4、5 の第 1 回試験に対しては湿度 80%での解析結果を、図 6、7 の第 2 回試験に対しては湿度 50%での解析結果を示している。また、実際にソニックブームが大気中を伝播する際には、非線形性によって波形が急峻になり高周波成分が増大する現象と、大気中の伝播過程で特に高周波成分が減衰して波形の圧力上昇率が緩やかになる現象が同時に起こっているが、(C)の手法ではこれらの現象をそれぞれ時間領域と周波数領域で別々に扱っている。このため、両現象の相互作用や波形変形に対する寄与度を正確に考慮していない可能性も考えられる。波形変形への寄与度は、周波数領域に変換して大気減衰の効果を考慮する頻度と関係していると考えられる。

実際にこの頻度を変更して計算を行ったところショック部分の立ち上がり時間が異なることが確認されたが、適切な頻度の設定は今後の課題である。

## 5. 結言

異なる 4 つの手法を用いてソニックブーム伝播解析を実施し、D-SEND#1 における実測データとの比較による検証と手法間の比較を行った。いずれの手法も波形全体としては実測波形とますますの一致を示しており有用性が示されたが、特にショック部分の立ち上がり時間には差異が認められた。この立ち上がり時間の比較から、様々な飛行条件において立ち上がり時間を正確に推算するためには、過去の飛行試験結果に基づく半経験的な補正ではなく、大気による減衰のモデルを用いることが有用であることが示唆された。しかし、大気による減衰のモデルを用いたものであっても、手法によっては計算時のパラメータ設定等によって立ち上がり挙動の推算結果がことなることがあることも分かり、高精度な推算を行うには更に詳細な検証が必要であると思われる。また、各手法の特徴を把握した上で、要求される推算精度や計算時間等に応じて手法・ツールを選択することも重要である。

## 参考文献

- 1) 本田雅久, 富田博史, 高戸谷健, 進藤重美, 「D-SEND#1 落下試験結果概要」, 第 49 回飛行機シンポジウム講演集, JSASS-2011-5015, pp. 56-62, 2011.
- 2) Y. Naka, "Sonic boom data from D-SEND#1," JAXA-RM-11-010E, 2012.
- 3) JAXA D-SEND データベース, <http://d-send.jaxa.jp>
- 4) C.L. Thomas, "Extrapolation of wind-tunnel sonic boom signatures without use of a Whitham F-Function," NASA-SP-255, pp. 205-217, 1971.
- 5) C.L. Thomas, "Extrapolation of sonic boom pressure signatures by the waveform parameter method," NASA-TN-D-6832, 1972.
- 6) K.J. Plotkin, "State of the art of sonic boom modeling," *J. Acoust. Soc. Am.*, **111** (1), pp. 530-536, 2002.
- 7) H. Yamashita, S. Obayashi, "Atmospheric absorption effect on sonic boom waveform during its propagation," *Proc. 7th International Conference on Flow Dynamics*, OS2-8, pp. 222-223, 2010.
- 8) M. Yamamoto, A. Hashimoto, T. Takahashi, T. Kamakura, T. Sakai, "Long-range sonic boom prediction considering atmospheric effects," *Proc. Inter-Noise 2011*, 2011.
- 9) 橋本敦, 山本雅史, 村上桂一, 青山剛史, 牧野好和, 「Burgers方程式を適用したソニックブームの遠方場解析」第47回飛行機シンポジウム講演集, JSASS-2009-5087, pp. 498-501, 2009.

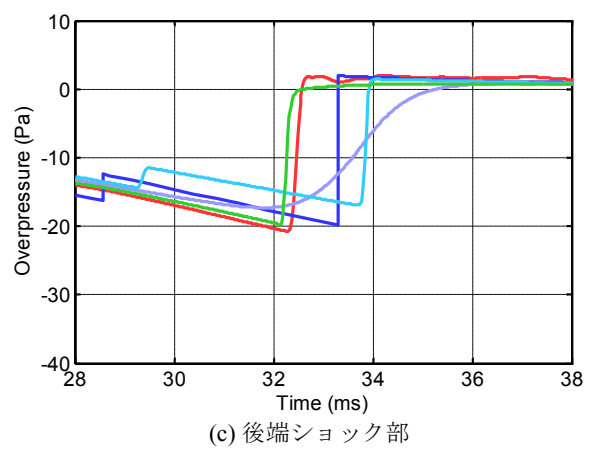
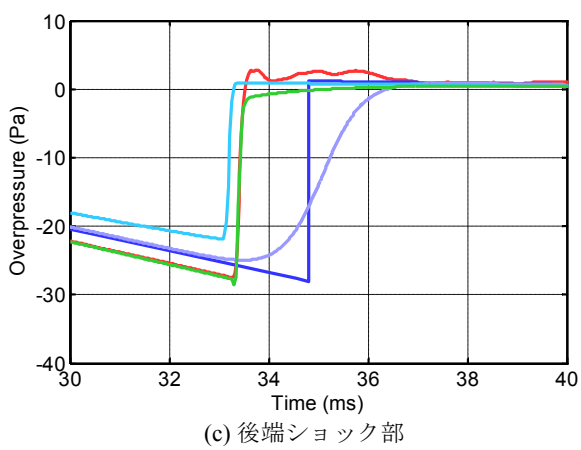
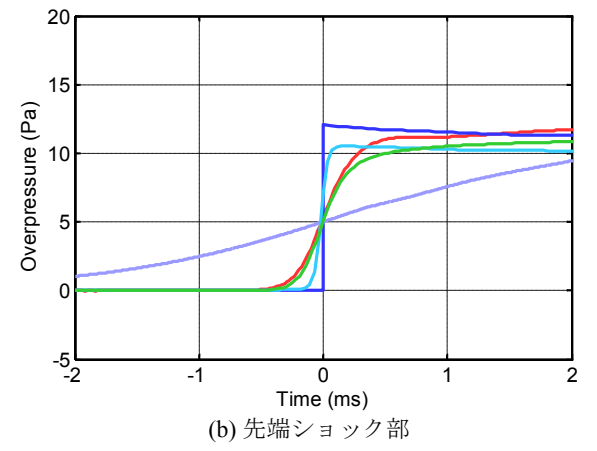
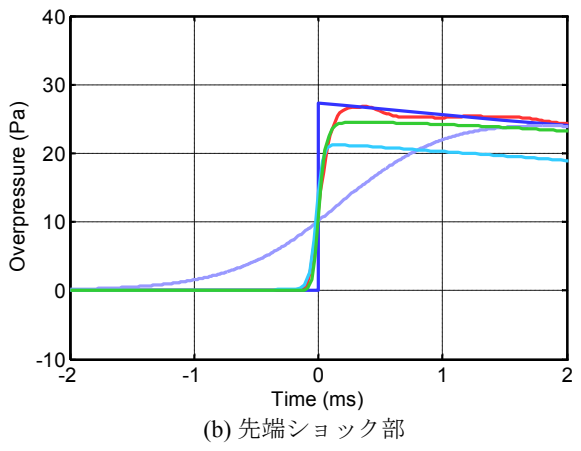
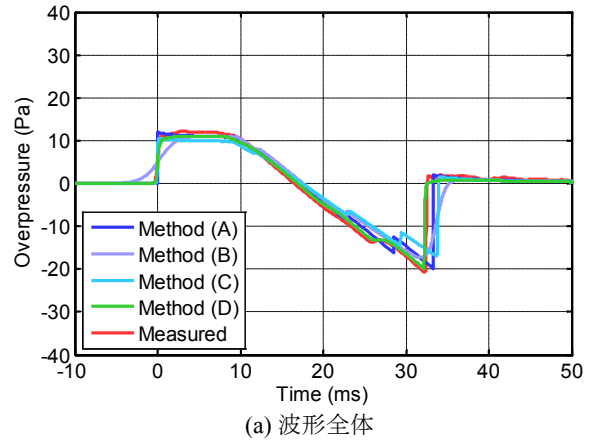
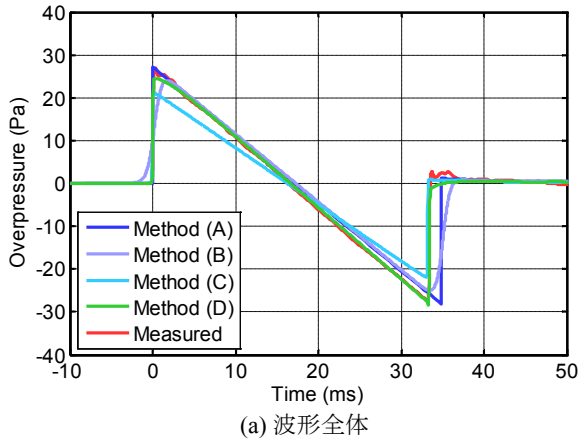


図4 ソニックブーム伝播解析結果および実測波形 (第1回落下試験NWM)

図5 ソニックブーム伝播解析結果および実測波形 (第1回落下試験LBM)

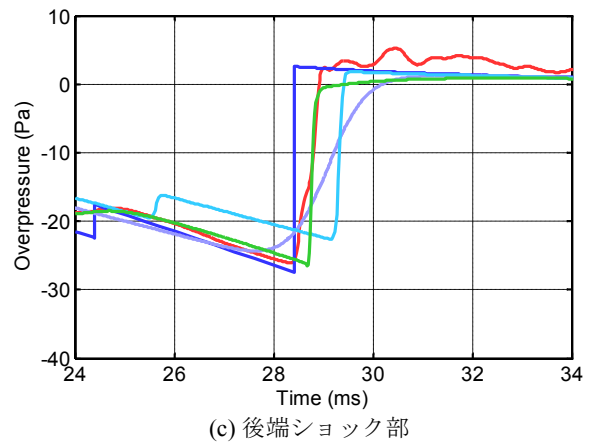
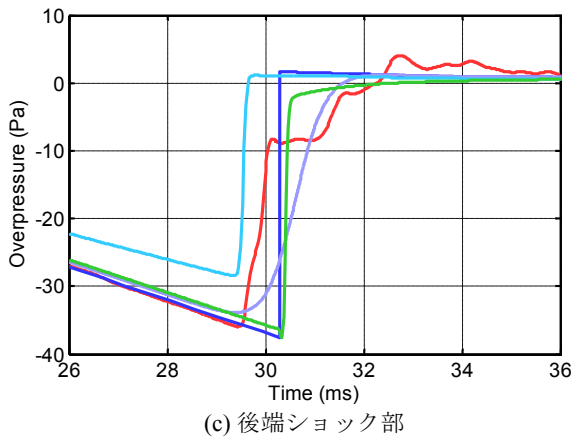
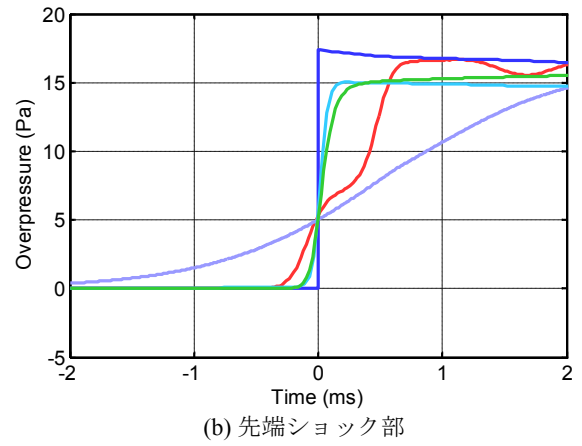
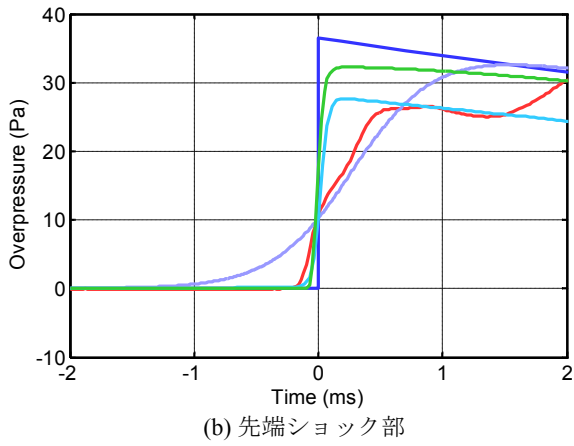
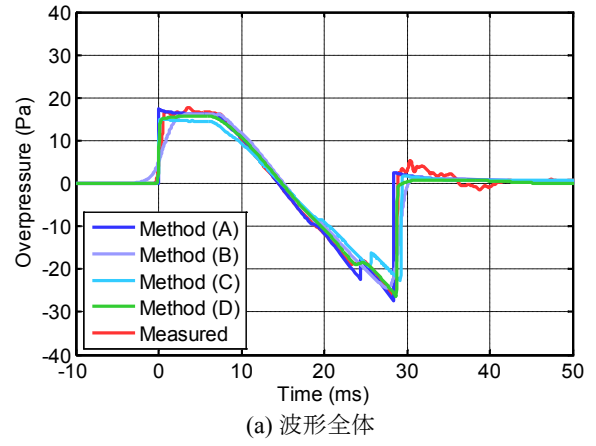
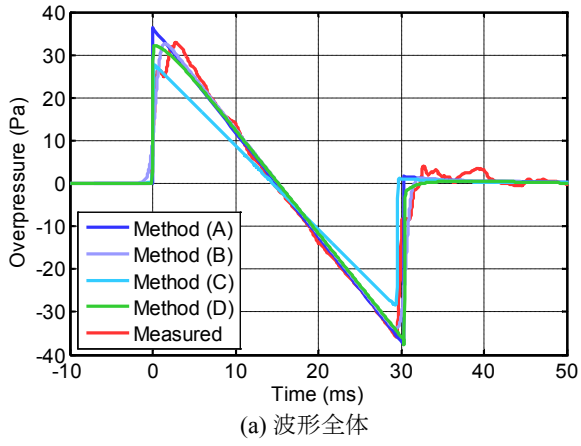


図6 ソニックブーム伝播解析結果および実測波形 (第2回落下試験NWM)

図7 ソニックブーム伝播解析結果および実測波形 (第2回落下試験LBM)