

低ソニックブーム設計概念実証落下試験 (D-SEND#1)の試験実施条件検討

牧野好和, 富田博史, 本田雅久, 橋本敦
宇宙航空研究開発機構

Consideration of test condition for low-boom design concept demonstration(D-SEND#1).

by

Yoshikazu Makino, Hiroshi Tomita, Masahisa Honda, and Atsushi Hashimoto

ABSTRACT

Test conditions for the first phase of JAXA's low-sonic-boom concept demonstration project(D-SEND#1) are considered. The purposes of the D-SEND#1 project are to validate the airborne sonic-boom measurement method and to make sure the possibility of low-sonic-boom concept demonstration with the scaled airplane model by dive maneuver in D-SEND#2 project. For these purposes, the differences of sonic-boom signatures from two D-SEND#1 models have to be observed in the sonic-boom data measured with the airborne boom measurement system. The test conditions of D-SEND#1 drop test such as required altitude and position for the model separation, and atmospheric conditions, are defined through the sonic-boom propagation analyses of two D-SEND#1 models. These conditions are revised after the first drop test of D-SEND#1 conducted in May, 2011 at Sweden.

1. はじめに

宇宙航空研究開発機構では低ソニックブーム設計概念実証プロジェクト D-SEND (Drop test for Simplified Evaluation of Non-symmetrically Distributed sonic boom) を進めており, その第1フェーズとして低ソニックブーム設計概念実証技術の確立を目的とした落下試験 (D-SEND#1) を 2011 年 5 月にスウェーデンのキルナ近郊のエスレンジ宇宙センターで実施した¹⁾. この落下試験では一般的な N 型波形のソニックブームを発生する軸対称形状 (NWM: N-Wave Model) と, 同じ最大断面積で低ソニックブーム設計された断面積分布を有する低ブーム軸対称形状 (LBM: Low Boom Model) の 2 種類の供試体から発生するソニックブームを空中において計測することで, D-SEND#1 に続いて計画されている 3 次元揚力体による低ソニックブーム設計概念実証試験 (D-SEND#2, 図 1) のために「空中ブーム計測技術の確立」と「低ブーム波形計測可能性の確認」を行う。

本論文では D-SEND#1 試験に先立ち, 2 種類の D-SEND#1 供試体から発生するソニックブームを数値解析により予測し, 分離高度や分離位置, 気象条件などが低ブーム波形計測可能性の確認に与える影響について調べ, 試験実施条件について検討した結果について報告する。また, 2011 年 5 月 7 日に実施された第 1 回目の D-SEND#1 落下試験の結果を反映し, 第 2 回目の落下試験に向けて見直した試験実施条件の変更点についても紹介する。

2. D-SEND#1 試験

D-SEND#1 試験は, 図 2(a)に示す 2 つの軸対称供試体 (NWM 及び LBM) を図 2(b)に示す様に成層圏気球から連続して落下させ, それぞれが発生するソニックブームを地上から係留気球で上空 1000m 程度まで持ち上げた空中ソニックブーム計測システム (ABBA システム)²⁾ によって観測する試験である。供試体の 1 つである LBM は, Darden の低ブーム設計手法³⁾ により, 台形型の低ブーム圧力波形を発生する様に設計された軸対称物体である。LBM の断面積分布は水平定常飛行を想定して Darden 法により定義した。その設計条件はマッハ数 $M=1.4$, 飛行高度 $H=8\text{km}$, 機体長 $L=5.6\text{m}$, 機体重量 $W=3.0\text{ton}$ とし, 目標とする地上ソニックブーム圧力波形のパラメータは $B=0.0$ (台形型波形), $y_f=0.05$ (先端鈍頭度緩和係数) としている。結果として設計された LBM 形状は, 全長が 8m (先端から最大断

面積位置までが設計全長 5.6m となっている), 最大断面積が約 0.3m^2 (最大直径約 0.6m) となり, 上記設計条件にて推算される台形型圧力波形の先端圧力上昇量は約 20Pa (地上反射係数 $K_R=2.0$) となる。一方, NWM は LBM と同じ最大断面積を有し, 全長は LBM 設計全長の 5.6m, 単純な円錐と円柱で構成された軸対称物体であり, 通常の N 型ソニックブーム圧力波形を発生すると推算される供試体である。LBM と同じ条件で First-Cut 法を用いて推算される N 型波形の先端圧力上昇量は約 37Pa と LBM 推算値のほぼ倍となる。

D-SEND#1 試験においては, 2 つの供試体が同じ条件 (高度, マッハ数) で発生したソニックブームを観測し, 比較することが重要であるため, 落下軌道が同じになる様に, 両供試体の空力特性の差 (LBM の方が NWM よりも細長比が大きく造波抗力が小さいため, 摩擦抗力を考慮しても抗力が小さい) を考慮して供試体重量を設定した。NWM を 700kg, LBM を 630kg と設定して, 分離高度を 30km (成層圏気球は高度約 30km に到達すると上昇を抑え, 水平移動に移行する様に制御されることになっている) とした場合の落下軌道解析結果を図 3 に示すが, 両形状の高度とマッハ数の履歴はほぼ一致していることが分かる。

次にこの落下軌道予測データから, 供試体が発生するソニックブームの波線伝播解析⁴⁾ を実施する。ソニックブーム (衝撃波) の波線は発生時の位置, 飛行方向とマッハ数, 及び伝播経路上の気象条件によって決まるため, 落下軌道がほぼ同じ NWM と LBM では同じ結果となる。本解析は高度方向の気温分布を標準大気とし, 無風状態で実施した。図 4(a)に示す通りソニックブーム波線は落下軌道 (鉛直落下) を中心に同心円状に広がり, 地上における伝播領域は半径約 25km に及ぶことが分かる。また, 図 4(b)には地上におけるソニックブームの観測時刻と落下位置からの距離との関係を示すが, 落下地点から半径 20km 以内では衝撃波の発生時刻とソニックブーム観測時刻が逆転している (低空で発生したソニックブームが先に聞こえ, 高空で先に発生したブームは数秒~数十秒後に聞こえる) ことが分かる。なお, 半径 21km 付近においては異なる位置・時刻に発生した 2 つのソニックブームが同時に聞こえることになっており, フォーカシングが起こると予測される。(同じく最大半径 26km 付近においても波線の集中が起こるためフォーカスブームが観測されると予想される。)

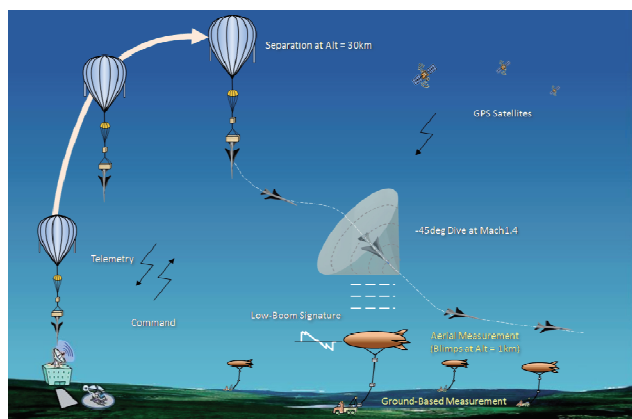
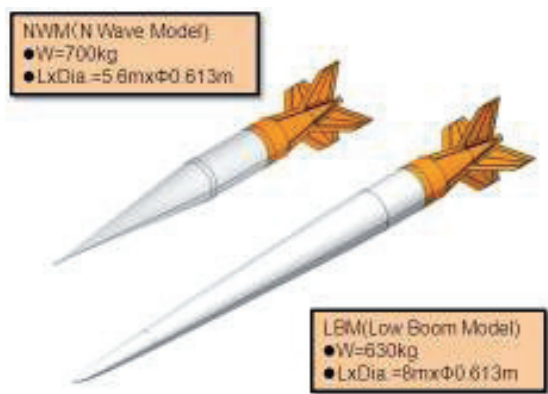


図 1 D-SEND#2 試験概要



(a) 供試体



(b) 落下試験概要

図 2 D-SEND#1 試験

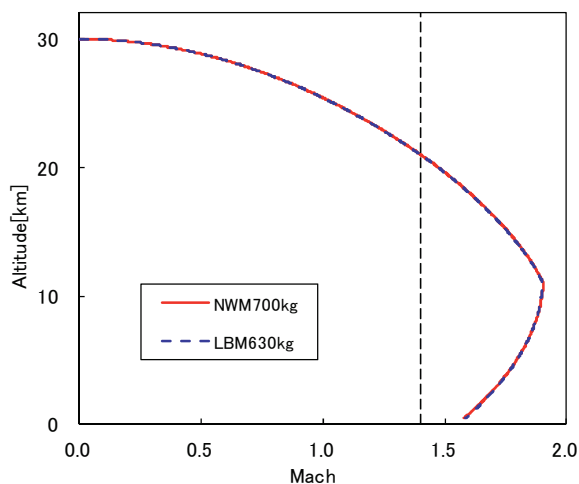
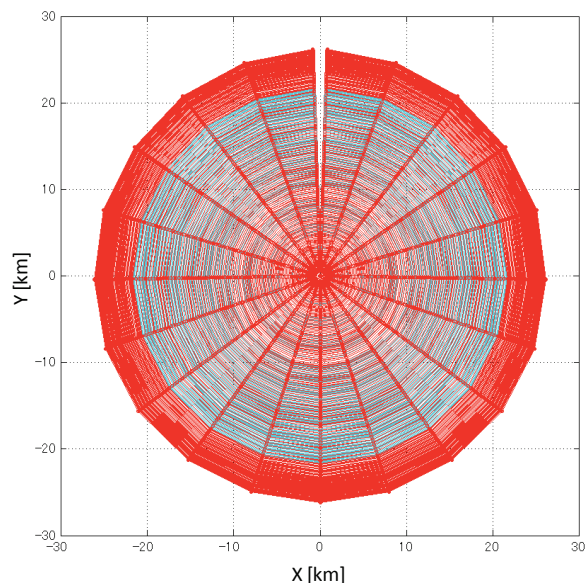
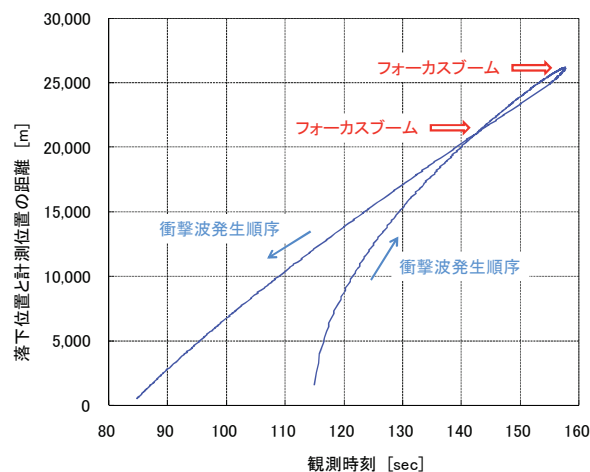


図 3 D-SEND#1 落下軌道推算結果 (30km 分離)



(a) 地上におけるブーム伝播領域



(b) 観測時刻と落下点からの距離の関係

図 4 D-SEND#1 ソニックブーム波線伝播解析結果 (30km 分離ケース)

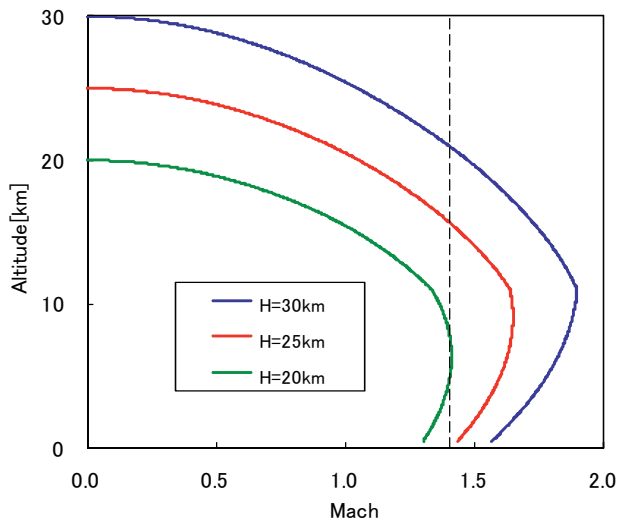
3. 試験条件検討

前節で解析したノミナル落下軌道でのソニックブーム伝播解析結果をベースに、D-SEND#1 試験において両供試体のソニックブームの差異を観測するために必要な試験条件について検討を行う。

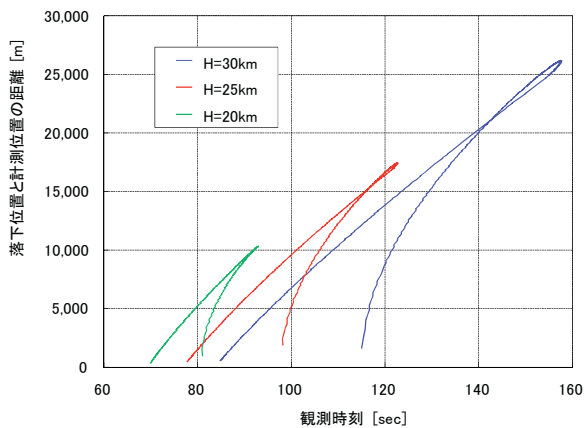
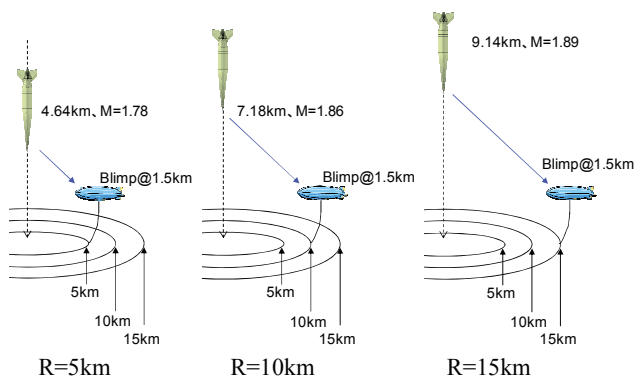
3. 1 分離高度

まずはじめに、供試体分離時の成層圏気球高度の影響について検討する。図 5(a)には分離高度が 20km, 25km, 30km での予測落下軌道を示す。最大マッハ数が設計マッハ数 ($M=1.4$) に到達するためには、高度 20km 以上が必要であることが分かる。それぞれの落下軌道に対するソニックブーム伝播解析結果を図 5(b)に示すが、分離高度が下がるにつれて、地上においてソニックブームが観測される領域が狭くなり、分離高度 20km では半径約 10km 以内となる。分離高度が 30km あれば、分離位置と計測点の距離が 15km あってもフォーカスブームを観測することなく 2 回のブームを観測できると考えられるが、一方で伝播距離が長くなることによって観測されるブーム強度が弱くなることが考えられる。図 6 に分離高度 30km ケースにおいて分離位置が計測位置から $R=5\text{km}$, 10km , 15km の場合に観測されるブーム推算波形 (地上反射係数 $K_R=1.0$) を示すが、距離が離

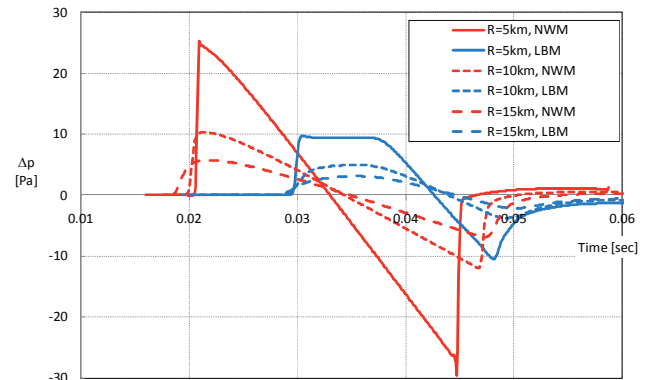
れるに従って強度が弱くなり、 $R=15\text{km}$ ではNWMとLBMの波形の違いを確認することが困難になることが予想される。一方、図7にはブーム強度の強いNWMのブーム強度が、分離位置と計測位置との距離 R に従ってどう変化するか推算値（地上反射係数 $K_R=2.0$ ）を示すが、 $R=2\text{km}$ 程度でコンコルドのブーム強度レベルであり、 $R=1\text{km}$ 程度になるとコンコルドの2倍以上の強度となることが予想される。本解析結果より、分離高度については少なくとも高度 20km 以上が必要で、分離許容位置は図7に示す通り計測点から $2\sim 10\text{km}$ （できれば 5km 以内が望ましい）と設定した。



(a) 落下軌道

(b) 観測時刻と落下点からの距離の関係
図5 D-SEND#1 分離高度の影響

(a) 分離位置と計測位置による伝播距離の違い



(b) 推算ブーム波形

図6 分離位置と計測位置の距離によるブーム強度の減衰

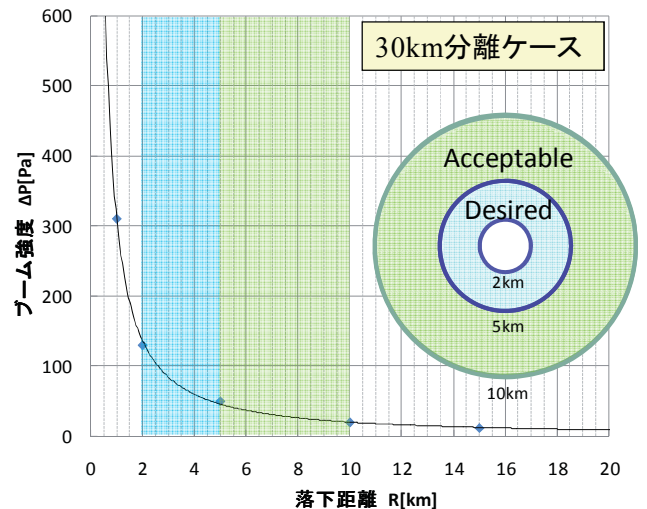


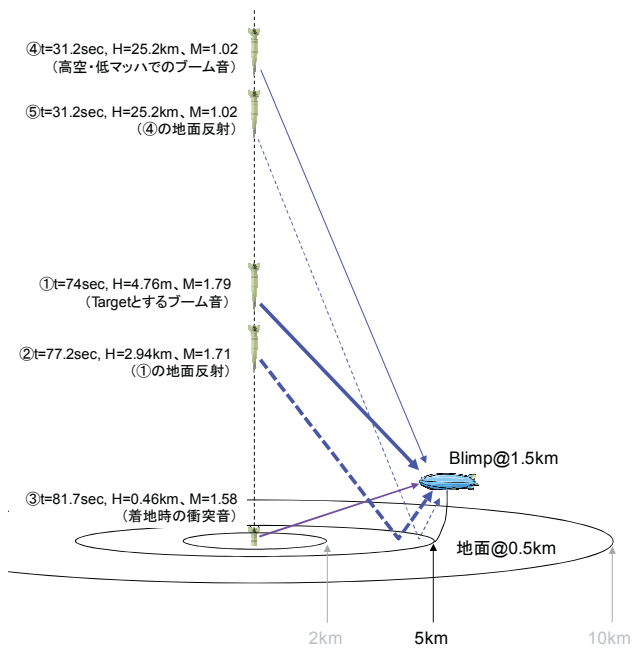
図7 NWM ブーム強度推算

3. 2 分離時間差

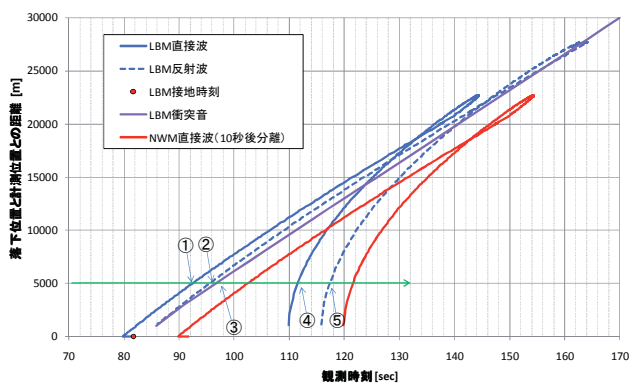
続いてNWMとLBMの分離時間差について検討する。先に落下する供試体が引き起こす圧力擾乱が、続けて落下する供試体のソニックブーム圧力波形に与える影響を最小限とするため、低ブームのLBMを先に落とすこととしているが、後に分離するNWMを何秒後に分離すれば良いかは、両供試体が発生するブームを十分に分離して観測できる程度に間を置いて分離する必要がある一方、LBM分離後に成層圏気球が上昇、あるいは風に流されて分離高度と位置が変わり、落下軌道が異なってしまうことを極力避ける様に短い時間差で分離することが求められる。

図8には、ABBAシステム（地上から 1km 上空）が観測する可能性のある音の伝播経路と観測時刻を示す。最も先に聞こえるのが観測ターゲットとしている低高度で発生するソニックブーム（直接波）であり、引き続き更に低高度で発生し、地面で反射して到達するブーム（反射波）が聞こえる。その後供試体の地面への衝突音、高高度で発生するブームの直接波と反射波が聞こえると考えられるが、それら3波の強度は最初の2波に比べれば十分に小さいと考えられるため、LBMとNWMの分離時間差は10秒程度あれば十分と考えられる。なお、この分離時間差10秒はそのままNWMとLBMの観測ターゲット波形の観測時間差となり、分離位置と計測位置の距離によらず一定である。分離位置と計測位置が遠くなることによる問題は、LBMの高高度発生ブームとNWMの観測ターゲット波形が重なる可能性であるが、前述の通り高高度発生ブームの強度は小さい上、元々LBMのブームがNWMの半分であることを考え

れば、万一同時に観測されたとしても問題無いものと判断した。



(a) D-SEND#1 試験時に観測される音の伝播経路

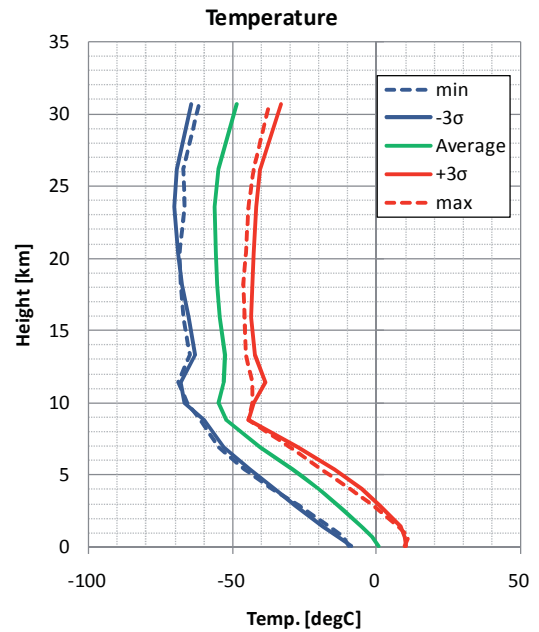


(b) 観測時刻と落下点からの距離の関係

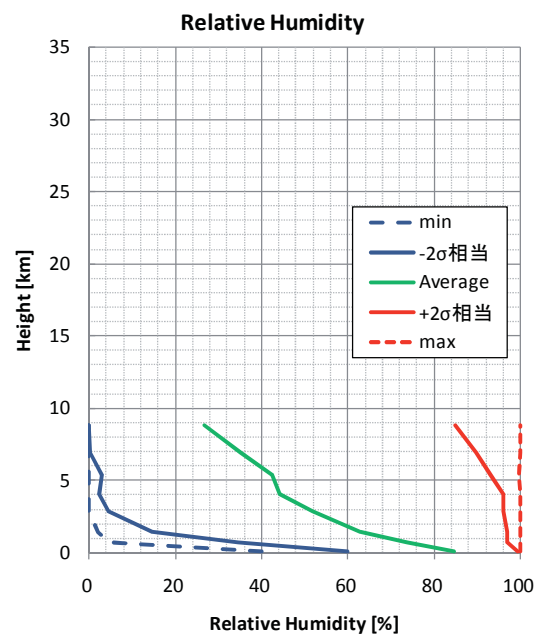
図8 D-SEND#1 空中ブーム観測予測
(分離高度 30km のケース)

3. 3 気象条件

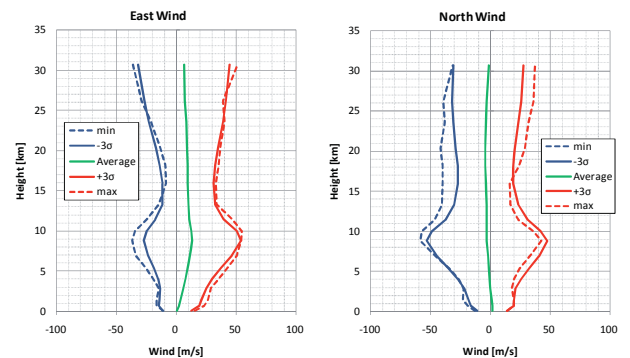
最後に、試験時の気象条件が D-SEND#1 試験目的達成に与える影響について検討した。本検討に用いる解析手法は、JAXA で開発した Burgers 方程式ベースのソニックブーム伝播解析ツール⁵⁾であり、大気温度分布、風分布、湿度分布を考慮した上でソニックブーム波形を推算することができる。なお、本解析ツールの入力データとしての両供試体の近傍場圧力波形は、パネル法推算結果に非線形補正を加えたものを用いる。図9に本検討に用いたキルナの気象データ(4月)のグラフを、図10にはそれらの条件を用いて解析した空中ブーム推算波形を示す。まず気温の影響については、低温側で波形が鈍る傾向にあるものの、その影響は許容範囲であり気温に関する制約は不要とした。一方、湿度の影響は大きく、低湿度において NWM と LBM の波形の差が不明確になる程波形が鈍る傾向が見られたため、湿度が -1σ 相当以上であることを試験条件とした。なお、図10(c), (d)に示す様に、東西風及び南北風についてはブーム到達位置が風により流されるだけで、波形には大きな変化が見られなかったため制約は不要とした。



(a) 気温



(b) 相対湿度



(c) 東西風

(d) 南北風

図9 キルナ気象データ (4月)

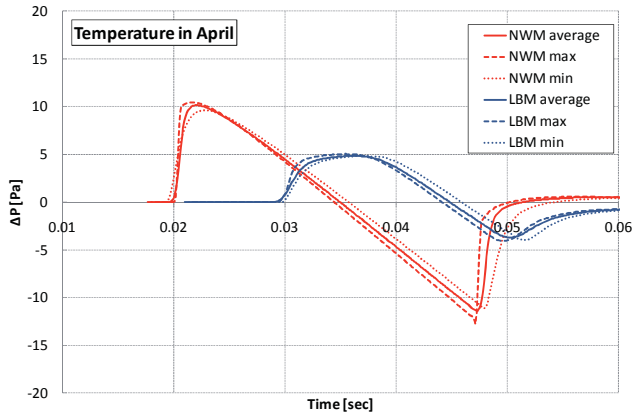
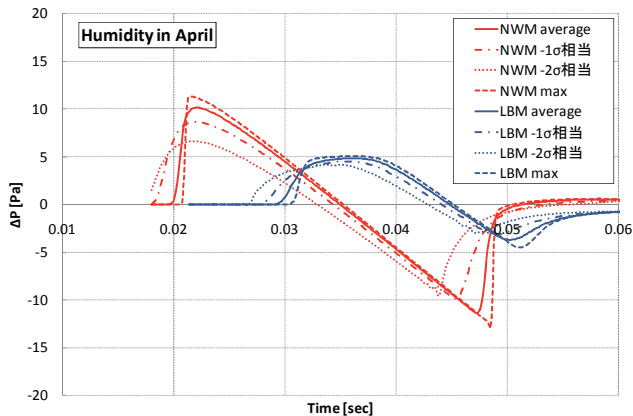
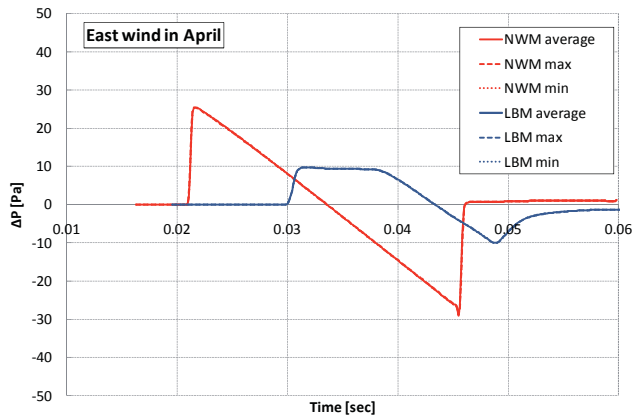
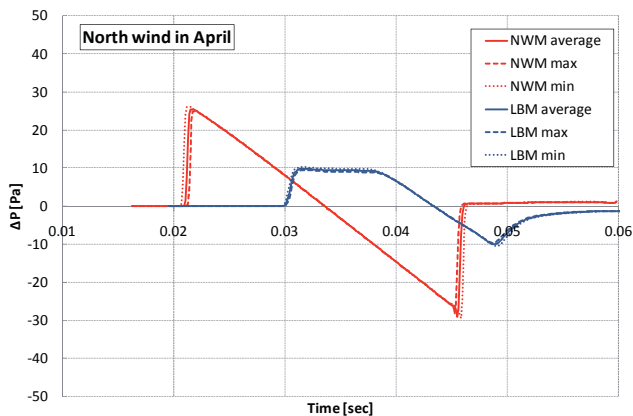
(a) 気温の影響 (ΔP [Pa]-Time[sec], $R=10$ km)(b) 湿度の影響 (ΔP [Pa]-Time[sec], $R=10$ km)(c) 東西風の影響 (ΔP [Pa]-Time[sec], $R=5$ km)(d) 南北風の影響 (ΔP [Pa]-Time[sec], $R=5$ km)

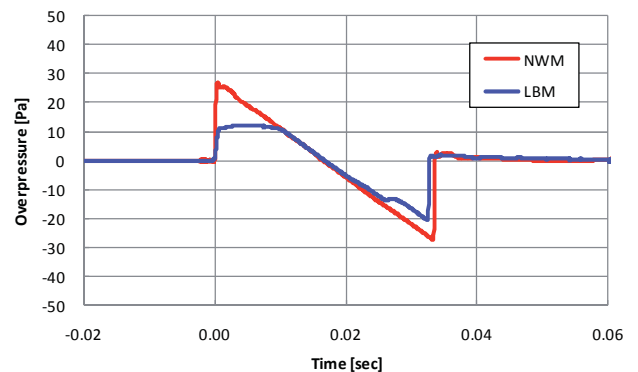
図 10 気象条件がブーム波形に与える影響

4. 試験条件見直し

前章までに検討した試験実施条件で第 1 回目の D-SEND#1 落下試験に臨み、2011 年 5 月 7 日に試験を実施した⁶⁾。落下試験の様子を図 11(a)に、試験で計測された空中ブーム波形（地表から 500m 地点マイク）を図 11(b)に示す。NWM と LBM の波形の違いを明確に観測することができた。一方図 12(a)には第 1 回試験の供試体落下軌道データを示す。分離高度は約 21km であり、ノミナルと想定していた 30km よりもかなり低い高度となった。（もちろん前述の分離許容高度 20km 以上は満たしている。）最大到達マッハ数は約 1.43 であった。この落下軌道データを用いて、試験後にブーム伝播解析を実施した結果を図 12 (b)に示す。GPS データによれば、供試体落下位置と計測位置の水平距離は約 5.7km であったことから、観測されたソニックブームは、供試体が高度約 6.8km、マッハ数はほぼ最大マッハ数である $M=1.43$ で発生した衝撃波によるものであることが分かった。ただし、本推算結果からは分離位置が計測点から 9km 以上離れていたらブームが観測されなかった危険性が示されており、また分離位置 8km 以上ではブームは観測できるものの、低高度と高高度の高度差が小さくなるため高高度で発生する第 2 波のソニックブーム強度が相対的に強くなる上に第 1 波の 0.7 秒以内に観測されることとなり、観測ターゲット波形に影響を及ぼす可能性も否定できない。そこで第 2 回落下試験に際して分離許容範囲の見直しを行った。図 13 に見直し前（第 1 回）と見直し後（第 2 回）の分離許容範囲を示す。変更点は、分離高度が低い時には分離許容位置を計測位置の 8km 以内とすること、及び第 1 回試験のブーム強度を十分な解像度で観測できる計測システムの能力が示されたことから、分離高度が高い場合には $R=15$ km まで分離許容範囲を広げたことである。



(a) 落下試験の様子



(b) 空中 500m マイク観測結果

図 11 D-SEND#1 第 1 回落下試験結果

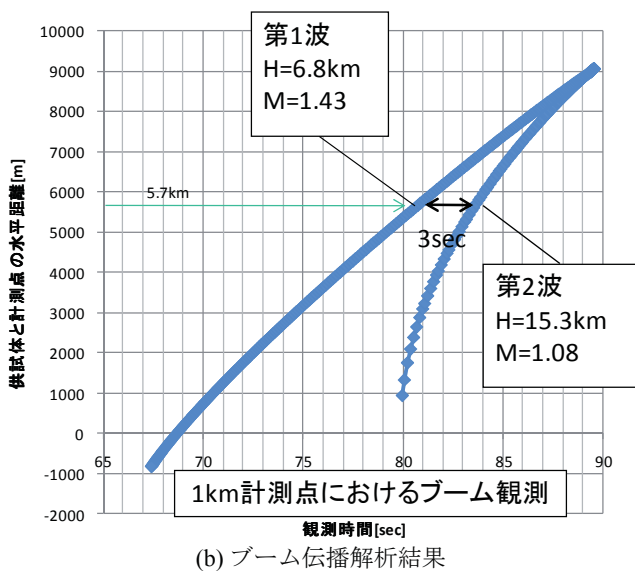
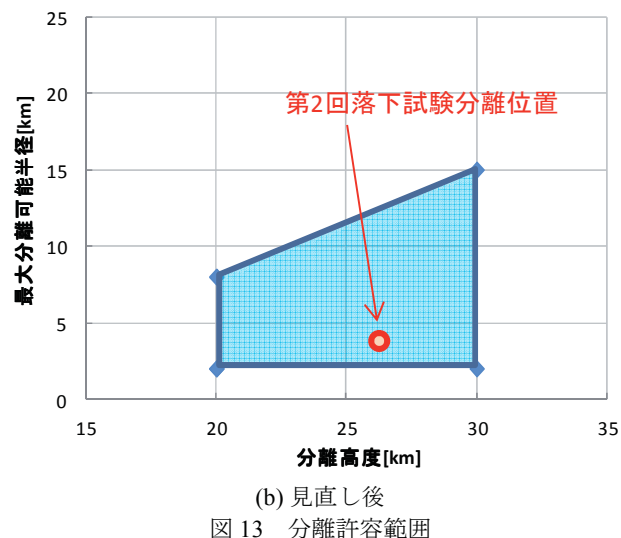
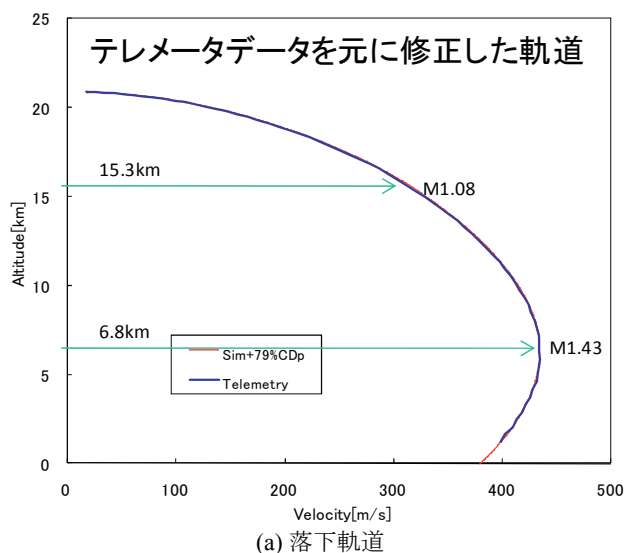
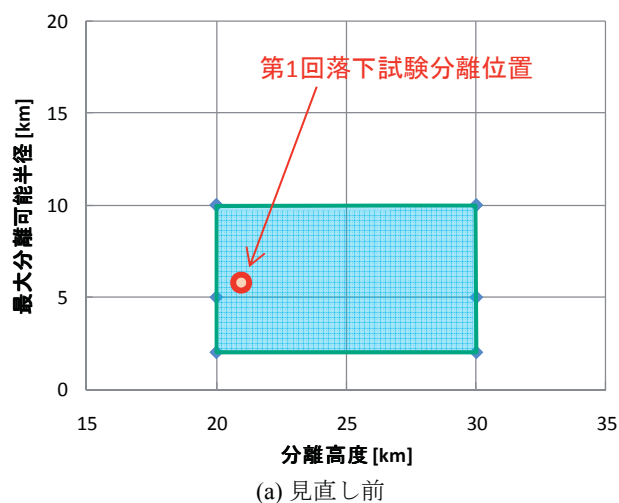


図 12 D-SEND#1 第1回落下試験後ブーム伝播解析



5. まとめ

JAXA が進めている低ソニックブーム設計概念実証プロジェクト (D-SEND プロジェクト) の第 1 フェーズである軸対称供試体落下試験 (D-SEND#1 試験) の試験目的である「低ブーム波形計測可能性の確認」達成に必要な試験条件の検討を行い、以下の結果が得られた。

- ・設計マッハ数の達成には、成層圏気球からの分離高度が 20km 以上必要である。
- ・低高度で発生するソニックブームと高高度で発生するソニックブームを分離して観測するには、分離位置は観測位置の 10km 以内であることが望ましい。(分離高度に依存するため第 1 回落下試験後に見直し。)
- ・両供試体の分離時間差は 10 秒程度が適当である。
- ・気温が低いとソニックブーム圧力波形が鈍る傾向にあるものの、キルナの最低温度を想定しても両供試体の波形の差異は確認可能と考えられる。
- ・湿度が低いとソニックブーム圧力波形が鈍る傾向にあり、 -2σ 相当の湿度では両供試体の波形の差異を確認することが困難になる。

謝辞

本論文中に用いた気象データは JAXA 無人機・未来型航空機チームの原田賢哉氏に検討して頂いた。またブーム伝播解析の一部は、2010 年 JAXA インターンシップに参加された慶応義塾大学の富岡大河さんと早稲田大学の松本万有さんに実施して頂いた。この場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 本田雅久, 他「低ソニックブーム設計コンセプト確認 落下試験 (D-SEND)計画」日本航空宇宙学会第 41 期年会講演会講演集, pp.652-655, 2010.
- 2) 中右介, 他「空中ソニックブーム計測システム確認飛行試験 (その 1)」JAXA-RM-10-012, 2010.
- 3) Darden, C.M., "Sonic-boom Minimization with Nose-bluntness Relaxation," NASA TP-1348, Jan. 1979.
- 4) 牧野好和, 他「小型超音速実験機のソニックブーム計測」第 44 回飛行機シンポジウム講演論文集, pp.60-68, 2006.
- 5) 山本雅史, 他「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/ANSS2010 講演論文集, pp.549-555, 2010.
- 6) http://www.jaxa.jp/press/2011/05/20110519_dsend_j.html