

# 軸対称体落下試験によるソニックブーム計測試験 (D-SEND#1)

宇宙航空研究開発機構 航空プログラムグループ D-SEND プロジェクトチーム  
本田 雅久、進藤 重美

## 1. はじめに

宇宙航空研究開発機構、航空プログラムグループ超音速機チームでは、1997年より超音速機旅客機の実現に向けた研究開発を行っている。2011年5月(7日、16日)、スウェーデンのESRANGE実験場において、D-SENDプロジェクト(低ソニックブーム設計概念実証)<sup>[1]</sup>の第一ステップとしてD-SEND#1気球落下試験が2回行われた。落下試験では、地上から高度1kmの間の複数点において、世界で初めて軸対称体の低ソニックブーム波形の取得に成功した<sup>[2]、[3]</sup>。気球落下試験による低ソニックブーム技術の実証方法(空中ソニックブーム計測手法を含む)は、世界に類の無いユニークな方法で、本成功は、低ソニックブーム化設計技術の研究開発において、大きな前進である。本稿では、実際の試験準備及び試験結果の概要を解説する。

## 2. 試験準備

### 2.1 遠隔制御・監視システム

スウェーデン・キルナから約40km離れた所に、スウェーデン宇宙公社(SSC)のESRANGE実験場がある。超音速の供試体を落下させてよい領域(ゾーンB)の広さは70km×100kmで、その中の4箇所にソニックブームを計測する空中ブーム計測システムが配置される。気球が所定の高度でこの4つの円のいずれかに入った時に、供試体が分離される。この4箇所を管制室から遠隔制御するために、ゾーンB内にWi-Fi中継アンテナ(1Mbps)及び太陽電池パネルを13箇所設置した(図1)。この中継により、管制室にて各計測点のソニックブーム波形がリアルタイムにモニタ可能となっている。4月の実験場は、まだ雪深く、設置作業は予想以上に苦戦を強いられ、設置作業は2週間強を要した。尚、中継アンテナのバックアップとして各計測サイトにインマルサットの衛星回線(32kbps)も準備した。

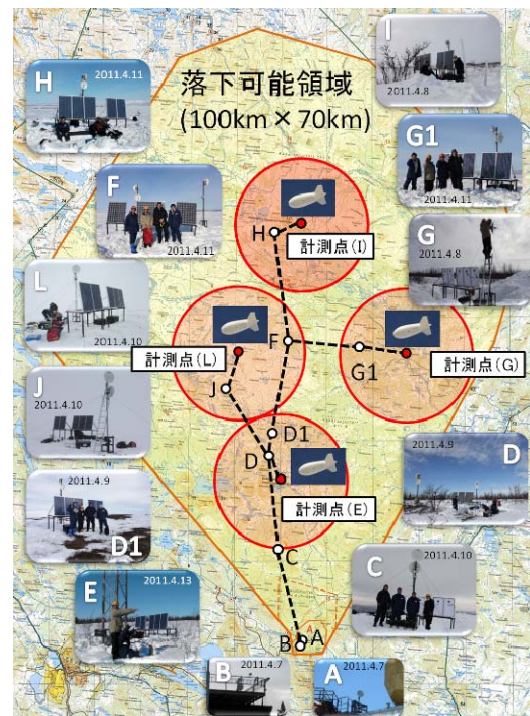


図1 遠隔制御・監視システムネットワーク図

### 2.2 空中ブーム計測システム<sup>[4]</sup>

空中ブーム計測システムは、大気境界層の影響が計測可能な様に、高度1kmに係留できる係留気球(全長約15m)(図2)とソニックブームを計測・記録するための複数のマイクロフォンシステム(図3)から構成される。係留索の高度1000m、750m、500mの3箇所にマイクロフォンシステム(マイクロフォン、記録・通信機器)が取り付けられている。また、地上にも3箇所設置(1m×1mのAL板上)されている。各サイトの気象状態(温度、湿度、気圧、風向、風速)を計測するために高度1km及び地上に気象観測センサを設置した。記録の時刻合せ及び係留気球のドリフト量計測にはGPSが用いられている。試験当日は、係留気球担当2名と計測システム担当1名が半日前に各サイトに向い準備を行った。



図2 係留気球 (Blimp)



図3 マイクロフォンシステム

### 2.3 気球システム

気球の運用は、全てスウェーデン宇宙公社 (SSC) が、担当した。気球システム (図4) は、気球 (335,000m<sup>3</sup>)、パラシュート (φ130ft)、バラスト (約300kg)、搭載機器、ゴンドラ等から構成される。パラシュートは、緊急降下時及びゴンドラ回収時に用いられる。供試体は、ゴンドラに固定され、冗長のワイヤカッタを用いた分離機構で分離される。パイロード重量 (供試体+ゴンドラ) は、ESRANGE で放球された中では、過去最大の重量 (第1回: 2930kg、第2回: 3070kg) であった。

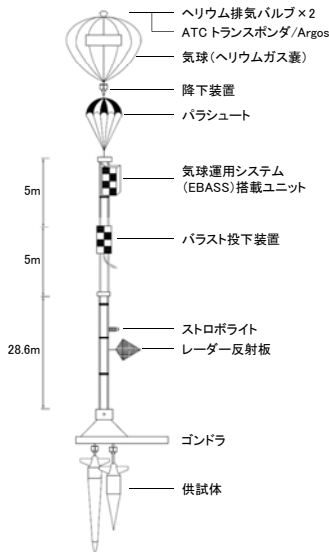


図4 気球システム [5]

### 2.4 供試体

供試体は、コンコルド等の超音速機が通常発生するN型波形を発生するNWM(全長5.6m、重量700kg)と、軸対称形で最適化された低ソニックブーム波形を発生するLBM(全長8m、重量630kg)の2種類が設計され、それぞれ2式準備された。供試体(NWM1式を除く)には、GPSによる位置・速度データを送信可能な搭載機器が搭載され、GPS時刻を介して地上の計測システムと時刻の同期を取ることができ、落下試験後、どの高度、速度でのソニックブームを計測したか照合可能としている。機体には落下時の状況を把握するために3軸の加速度、角速度センサも搭載されている。図5に2つの供試体の概要図を示す。

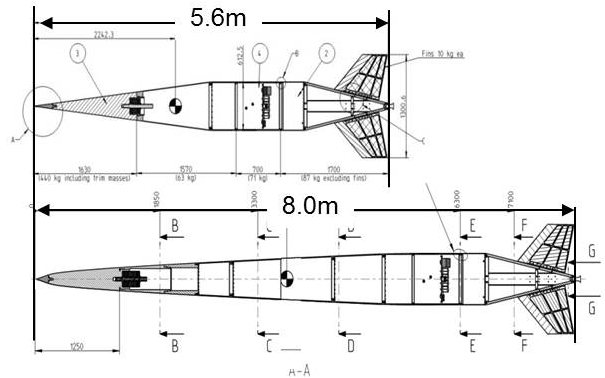


図5 NWM 及び LBM 概要図

### 2.5 ヘラクレス

放球時に用いられる自走式大型クレーン (図6) は、ヘラクレスと呼ばれる。放球時には、ゴンドラ+供試体を吊り下げ、放球後気球の流れる方向に向かって走行し、気球とゴンドラの相対速度を最小化してゴンドラを分離する。供試体の最大長さ8mは、このヘラクレスのクレーン高さ12mから決まった。



図6 ヘラクレス (第1回放球準備中)

## 2.6 気球軌道の予測

気球軌道の予測は、SSC が実施していたが、JAXA でも独自に軌道予測を行って、SSC との気象会議に臨んだ。軌道予測には、SSC から提供される ECMWF と HIRLAM の数値予報値やラジオゾンデデータが用いられた。2 回の落下試験の予測軌道の例を図 7、図 8 に示す。

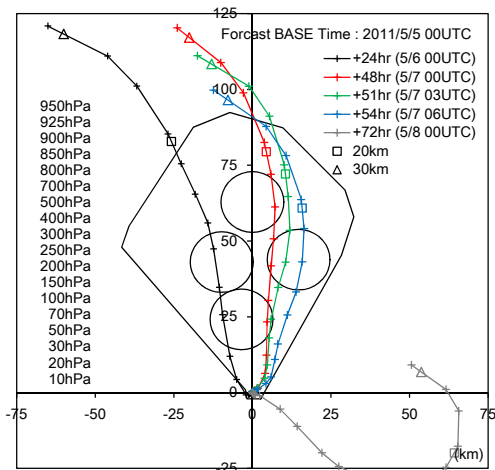


図 7 D#1-1 放球前々日の飛翔経路予測 (ECMWF) [5]

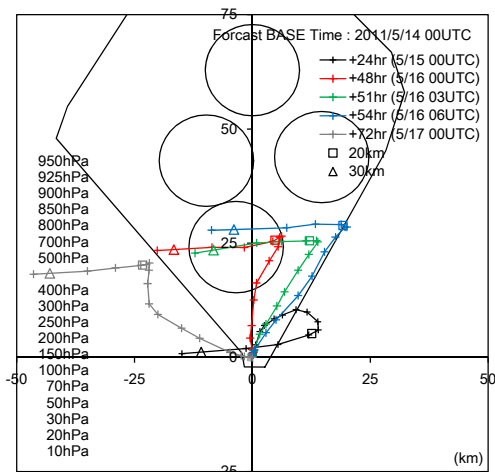


図 8 D#1-2 放球前々日の飛翔経路予測 (ECMWF) [5]

10 秒の間 (LBM→NWM の順) をおいて、計測点 G から北北東 4.1km の位置で分離された。分離高度は、約 21km、落下中の供試体の最大到達マッハ数は、1.44 であった。図 9 に最終的な気球の予測軌道と実際の軌道を比較して示す。計測点のまわりには、小さな赤線の円 (半径 2km) と大きな赤線の円 (半径 10km) がある。気球がこの 2 つの円に囲まれたドーナツの中に入り、極力計測点に近い所で供試体が分離される。尚、リアルタイムの軌道は、SSC の WEB 上で公開された。

落下中の供試体から発生するソニックブームがマイクに到達するイメージを図 10 に示す。2 つの供試体のソニックブーム波形は、高度 1000m、750m、500m、地上 (3ch) の全ての位置で記録することができ、中継アンテナを経由し、管制室の中でリアルタイムにモニタすることもでき、ブーム計測システム全体を実証することができた。また、取得された LBM 波形は、当初の設計通り、NWM を半減した波形となった (図 11)。

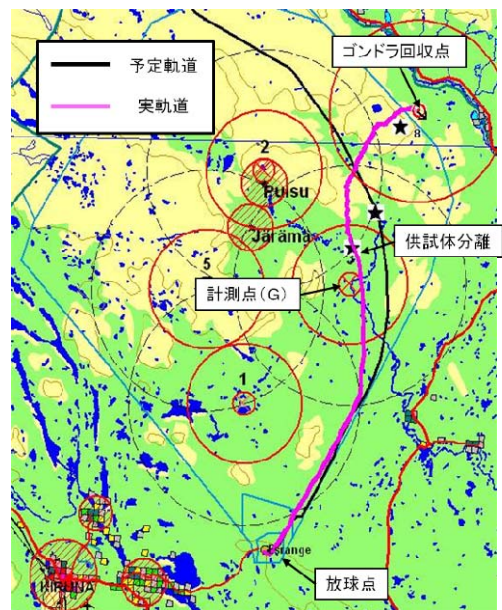


図 9 第 1 回の気球の軌道

## 3. 試験結果

### 3.1 第 1 回落下試験

現地時間 5 月 7 日 5 時 44 分、初めての放球が行われた。放球時は、ほぼ無風で、ヘラクレスから切り離された供試体は青空へゆっくりと吸いこまれていった。ESRANGE では過去最も重いペイロードであったため、放球が成功した時には皆一様にかなり興奮気味であった。気球の軌道は、前出の通り気象予報値 (ECMWF, HIRLAM, ゾンデ) を用いて予め予測される。実軌道は、ほぼ予定通りで、上昇中に更に計測点に近づけるための操縦 (ガス抜きとバラスト投下) が行われ、2 個の供試体は、



図 10 落下中の供試体と係留気球

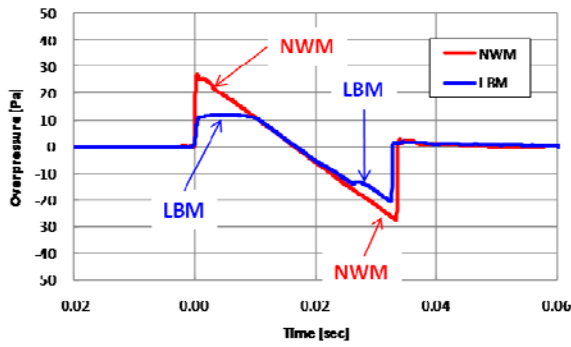


図 11 ソニックブーム計測結果（第 1 回、500m）<sup>[6]</sup>

### 3.2 第 2 回落下試験

1 回目の試験から 9 日後の現地時間 5 月 16 日午前 5 時 30 分（契約期間最後の日）、再び、落下試験が可能な風が巡って来た。図 12 に放球時の様子を、図 13 に気球の軌道を示す。今回は高度 20km まで北東に一直線に上昇し、その後急激に真西に向かって上昇し、計測点 (E) の円（第 1 回から見直し半径 8km としている）にうまく入ってくれた。コマンドのトラブルにより、NWM が先に分離（高度 27km）、1 分後に LBM（高度 27km）が分離された。幸いな事に両者の分離位置は、計測点 E からほぼ同じ約 4.3km であった。供試体は、それぞれ最大マッハ数 1.73 及び 1.7 に到達した。1 回目の経験から、気球の軌道はほぼ予測した通りに飛行することが判っていたので、気球が通過する可能性の低い G 点と I 点のマイクロフォンシステムを、通過する可能性の最も高い E 点とフォーカスブームの計測の可能性が出てきた管制室近傍に集約した。その結果、第 1 回目より多くの計測データ（20ch）を得ることができた。特に E 点では、係留索の 250m にもマイクロフォンを追加することができ、地上から 250m 置きで高度 1km までのブーム波形データを取得できた。また、落下時には、管制室内（落下点から 20km）でも、NWM、LBM のソニックブームを聞くことが出来た。



図 12 第 2 回落球時の様子

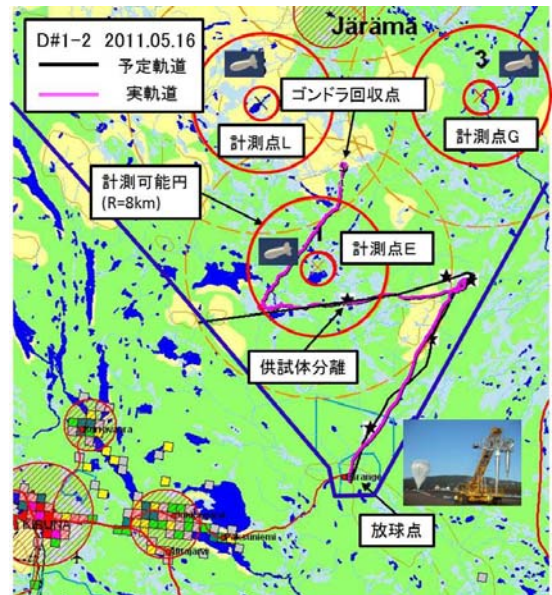


図 13 第 2 回落球時の軌道

### 4. まとめ

本キャンペーンを通し、JAXA オリジナルの気球落下によるソニックブーム計測試験方法、空中ブーム計測手法を実証することができた。低ソニックブーム設計技術検証のためのデータも多数取得することができ、これからの研究開発に大きな弾みをつけることが出来た。

今後は、データの詳細な解析を行うと共に試験で得られた知見を踏まえ、次のステップの D-SEND#2 落下試験の準備を万全なものとして行くつもりである。試験計画では、ISAS 大気球実験室の皆様にも数多くの助言を頂いた。この場を借りて深くお礼申し上げます。

#### 参考文献

- [1] 本田、「低ソニックブーム設計概念実証（D-SEND）計画」、平成 22 年度 JAXA 宇宙航空技術研究発表会
- [2] [http://www.jaxa.jp/press/2011/05/20110519\\_dsensend\\_j.html](http://www.jaxa.jp/press/2011/05/20110519_dsensend_j.html)
- [3] 本田他、「D-SEND#1 落下試験結果概要」、第 49 回飛行機シンポジウム、2011 年
- [4] 川上他、「D-SEND#1 試験におけるソニックブーム計測システムの構築と運用」、第 49 回飛行機シンポジウム、2011 年
- [5] 原田他、「D-SEND#1 における成層圏気球を用いた落下実験システム」、第 49 回飛行機シンポジウム、2011 年
- [6] 中他、「D-SEND#1 試験におけるソニックブーム計測結果」、第 49 回飛行機シンポジウム、2011 年