

スウェーデン ESRANGE 実験場における超音速試験機の落下試験

原田 賢哉, 川上 浩樹, 本田 雅久 (ATD/JAXA), Mikael Töyrä (SSC)

1. はじめに

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 航空技術部門は、低ソニックブーム設計概念実証 (Drop test for Simplified Evaluation of Non-symmetrically Distributed sonic boom, D-SEND) プロジェクトを進めている^{1,2)}。ソニックブームとは超音速で飛行する機体から発生した衝撃波による爆音であり、その低減は次世代超音速旅客機を実現するための最重要課題となっている。D-SEND プロジェクトでは、JAXA 独自のソニックブーム低減技術 (低ソニックブーム設計概念及び形状設計法) 及び計測技術を実証し、国際民間航空機関 (ICAO) で進められているソニックブームの国際基準策定に貢献することを目指している。

プロジェクトは2段階の実証試験から構成されている。第1段階の D-SEND#1 試験では、形状の異なる2つの軸対称物体を高度 20~30km から自由落下させて超音速に加速し、発生したソニックブームを地上~高度 1km に設置したマイクロホン (Boom Measurement System, BMS³⁾) によって計測する。第2段階の D-SEND#2 試験では、低ブーム設計された試験機を高度 28~33km から落下、BMS 直上で所定の飛行状態 (マッハ数 1.3, 揚力係数 0.12 等) となるように誘導制御し、発生したソニックブームを計測する。

いずれの試験においても、長大な供試体 (全長 8m, 重量 1トン超) を懸吊できる大型気球及びその運用設備と、複数の BMS を分散配置するための広大な試験エリアが必要となる。気球を用いた落下実験システム (気球システム) の開発及び運用はスウェーデン宇宙公社 (Swedish Space Corporation, SSC) が担当し、試験はスウェーデン北部のキルナ市郊外に位置する SSC の ESRANGE 実験場及びその周辺に設定された観測ロケット実験のための落下・回収エリア (インパクトエリア) において実施した。

本稿では、D-SEND#1 及び D-SEND#2 試験について、特に気球システム及びその運用 (試験方法) を中心に報告する。

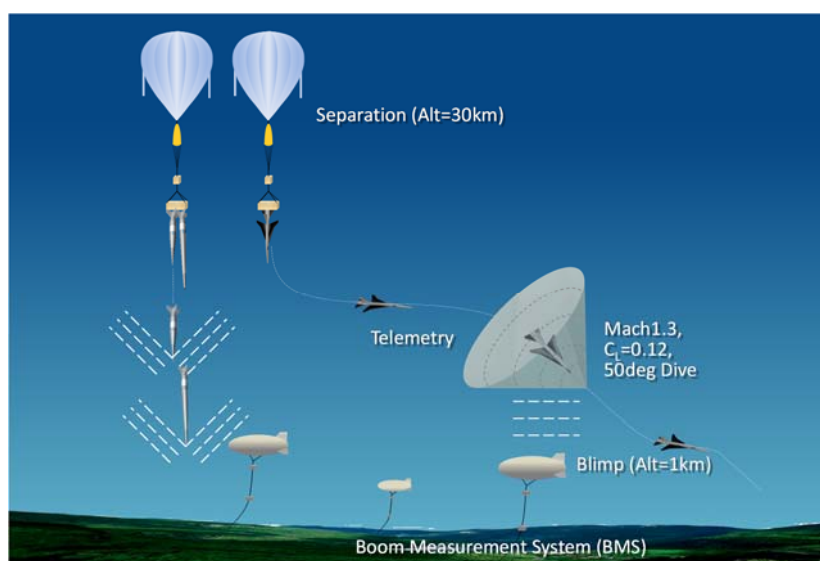
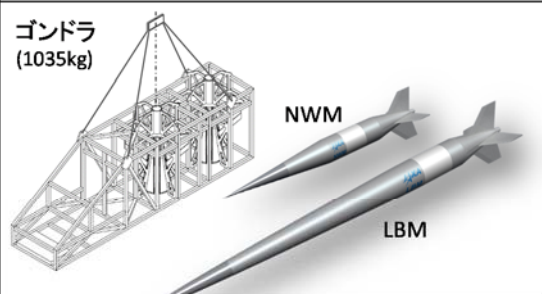
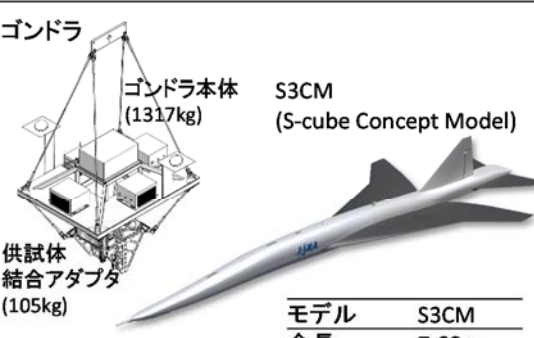


図1 D-SEND#1/#2 落下試験シーケンス

2. 供試体及び気球システム

供試体の諸元を表 1 に示す。D-SEND#1 では、従来の超音速機と同様のソニックブームを発生する N-Wave Model (NWM) と、先端に低ソニックブーム設計概念を適用した Low Boom Model (LBM) に対して、同じ環境条件下で発生・伝播するソニックブームを計測する。そのため、表中に示すゴンドラによって 2 つの供試体を搭載し、約 10 秒の時間間隔をあけて逐次分離する。D-SEND#2 のゴンドラは、供試体用の外部バッテリーや分離制御装置などを搭載したゴンドラ本体と、供試体結合アダプタとに分かれており、試験時には放球クレーンに吊下げられたゴンドラ本体と、分離機構を介して予め供試体に結合されているアダプタとを 4 本のワイヤで接続する。供試体、ゴンドラと気球運用機器（通信/制御装置、パラスト、パラシュート等）の総質量は 3t (D-SEND#1)/3.2t (D-SEND#2) であり、33.5 万 m³ (質量 1.4t) の気球を用いて高度約 30km まで上昇させる。

表 1 供試体及びゴンドラ

D-SEND#1			D-SEND#2		
 <p>ゴンドラ (1035kg)</p> <p>NWM</p> <p>LBM</p>			 <p>ゴンドラ</p> <p>ゴンドラ本体 (1317kg)</p> <p>S3CM (S-cube Concept Model)</p> <p>供試体結合アダプタ (105kg)</p>		
モデル	NWM	LBM	モデル	S3CM	
全長	5.6m	8.0m	全長	7.68m	
直径	0.613m	0.613m	翼幅	3.51m	
質量	700kg	630kg	質量	1000kg	

3. 試験方法(試験条件)

試験実施のための気象条件及びその適合判断に供する気象情報を表 2 に示す。

表 2 気象条件及び気象情報

項目	条件(適合基準)	判断に供する情報
気球・供試体運用	Esrance 放球パッドにおいて 地上風速が 2~3m/s 以下であること 上空 200m の風速が 3~4m/s 以下であること 放球時の風向が安定していること 屋外作業時に降雨が無いこと	<ul style="list-style-type: none"> • 予報データ (SMHI, GFS, ウェザーニューズ) • 風速計/パイロットバルーン/気象レーダ等による観測データ • ヘリ会社/パイロット判断
BMS 運用	BMS サイトにおいて 上空 1km の風速が 10~15m/s 以下であること 作業時に降雨が無いこと	
BMS 要員輸送	要員移動時にヘリが飛行できること	
気球軌道	気球軌道が分離空域に入ること 気球軌道が安全上の条件を満たしていること	<ul style="list-style-type: none"> • 予報データ (HIRLAM, ECMWF, GFS) • ズンデ観測データ
供試体誘導制御	風速の高度分布が統計モデルの平均±3σ 以内であること	
ブーム計測(伝播)	相対湿度の高度分布における 3 点(850, 700, 600hPa)中 2 点が統計モデルの平均-1σ 以上であること	

また、供試体の分離空域を図2に示す。D-SEND#1では、4地点に配置された各BMSに対して、水平距離2~10km、高度20~30kmの円筒状の空域。但し、インパクトゾーン内にある2箇所の集落から水平距離4km以内(Stay Out Zone, SOZ)を除く。D-SEND#2では、3地点に配置された各BMSに対して図2中に示す範囲である。但し、安全上の理由から前述のSOZのほか以下を除く。

- 1) 飛行制限空域の境界(R01)から5NM以内
- 2) インパクトゾーン(Zone-B)境界から所定の離隔距離内(分離直後に機体を投棄した場合の落下分散距離として試験時の気象条件をもとに4~8.7kmの範囲で設定)
- 3) 目標BMS上空を通過後にSOZに至る(SOZ内に着地する可能性がある)場合

試験実施には予想される気球飛行経路が上述の空域に入ることが必要となるが、これが最も厳しい条件となる。そこで、試験期間の設定に際しては、過去10年間の気象データ(NCEP再解析データ⁴⁾)に対する気球飛行経路を分析し、試験機会が極大となる時期として4~5月または7~8月を選定した。これは成層圏高度において東風が卓越する時期(ただし風速が強すぎる6月は適さない)である。また、BMSの配置についても試験機会が最大となるように選定した。

一方、試験当日の条件適合判断に際しては、表2に示すように複数の数値予報データ及びゾンデによる観測データを参照するとともに、数値予報の誤差モデルを作成して判断基準に組み込む等、精度の向上に努めた。

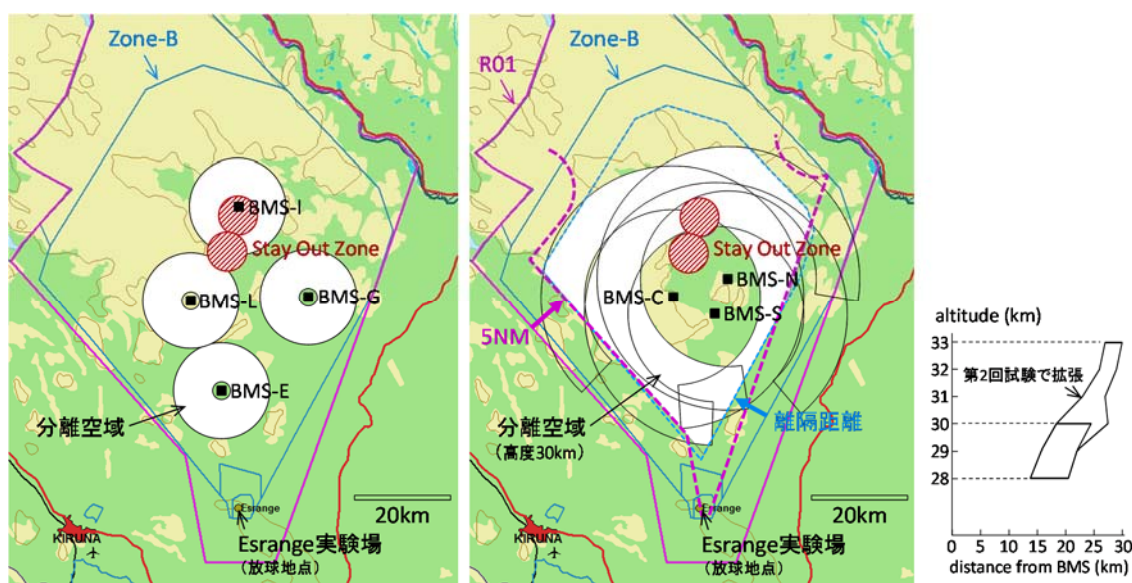


図2 分離空域(左:D-SEND#1(第1回試験), 右:D-SEND#2(第2回試験))

4. 試験結果

(1)D-SEND#1 試験

2011年4月19日~5月16日に設定した試験期間中に2回の飛行試験を実施した。気球は概ね計画どおり飛行し、目標分離空域内で2つの供試体を分離した。BMSによるソニックブームの計測にも成功し、低ソニックブーム設計技術検証のためのデータを取得するとともに、試験方法及び計測方法の妥当性を確認することができた。

(2)D-SEND#2 試験

2013年7月25日~8月24日に2回の試験を計画し、8月16日に1回目の試験を実施したが、試験機の飛行に不具合が生じたため所期のデータを取得できなかった。原因究明と対

策を行ったのち翌 2014 年に再試験に臨んだが、期間(8 月 2 日～26 日)中に気象条件を満たす機会に恵まれず、試験を実施できなかった。2015 年には、試験機会を増やすために、試験期間延長(6 月 29 日～8 月 31 日)のほか、分離空域の拡大、到達高度の低下、準備作業時間の短縮、予備の気球の準備など、できる限りの対策を講じて臨み、7 月 24 日に第 2 回試験を実施することができた。このときの気球の飛行経路を図 3 に示す。気球は放球後 5 時間 17 分後かけて分離空域に到達。分離された試験機は目標とする BMS 上空に向かって正常に飛行し、所期の飛行条件におけるソニックブームの計測に成功した。そして、計測された波形を解析した結果、ソニックブーム低減技術の実現性が実証された⁵⁾。

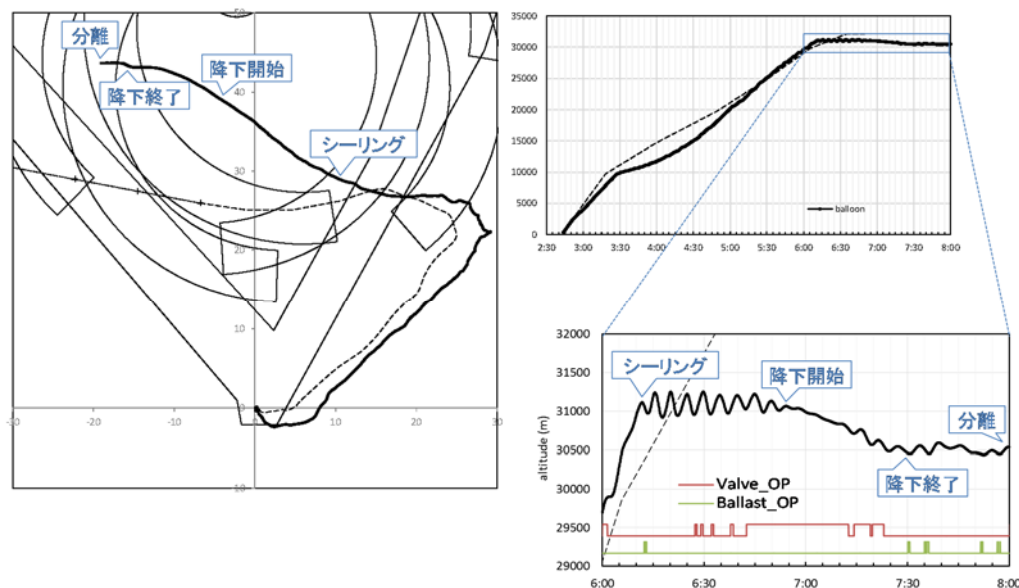


図 3 D-SEND#2 試験における気球飛行経路(左)及び高度プロファイル(右)

謝辞

D-SEND プロジェクトは初期の計画段階より宇宙科学研究所大気球実験グループの方々に支援いただきながら進められてきました。特に昨年度に実施した試験機会を拡大するための計画見直しに際しては、気球の運用に関して数多くの重要な指摘や助言をいただき、その後の試験成功につながりました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 本田 雅久, 他: D-SEND プロジェクト概要, 日本航空宇宙学会誌, 第 60 巻, 7 号, pp.245-249, 2012.
- 2) 牧野 好和: D-SEND プロジェクトにおけるソニックブーム設計概念, 日本航空宇宙学会誌, 第 60 巻, 8 号, pp.313-318, 2012
- 3) 川上 浩樹, 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.
- 4) NCEP Reanalysis data provided by the NOAA/ OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, from their Web site at <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>
- 5) JAXA プレスリリース: 超音速機から発生するソニックブームの低減技術を実証 ～将来の超音速旅客機の実現を目指して～(2015 年 10 月 27 日)