

D-SEND#2再試験に向けたJAXAの取り組み状況

～第43回航空科学技術委員会 説明資料～

2013年8月に実施したD-SEND#2試験における飛行異常の再発防止対策に基づく改修設計と、確実な飛行試験に向けた技術検討状況につきまして、現在のJAXAの取り組み状況をご報告致します。

1. D-SENDプロジェクトの概要	P.2
2. 経緯	P.3
3. 原因究明結果	P.4
4. 再試験に向けた取り組み状況	P.5
5. 今後の予定	P.9
6. まとめ	P.10
参考資料1～7	P.11～P.17

2014年 6月 2日
JAXA航空本部

1. D-SENDプロジェクトの概要

出典: 第42回航空科学
技術委員会 (H26年3月
11日) 資料より抜粋

目的: 「静かな超音速旅客機」の実現に必要な鍵技術である**低ソニックブーム設計概念で設計された機体の飛行実証** (参考資料1, 2)

- 目標:**
- ①非軸対称供試体による先端/後端の低ソニックブーム設計効果の実証
 - ②低ブーム波形取得技術の確立
 - ③低ブーム伝播解析技術の検証

← スウェーデン宇宙公社 (SSC) エスレンジ宇宙センター敷地内

気球落下試験イメージ

分離 (高度30km)
Separation (Alt=30km)

2. 分離可能な領域
域まで移動

3. 機体を分離

機体 (供試体) 数 : 2式
第1回飛行試験 : 2013年8月16日

GPS衛星

マッハ1.3, 50度ダイブ飛行
Mach1.3, 50deg Dive

4. 発生した低ブーム
波形を計測

低ブーム波形
Low Boom Signature

1. 機体を設置
した気球を放球

係留気球 (高度1km)
Blimp @ Alt=1km

5. 自動的
に投棄

ブーム計測システム (BMS)
Boom Measurement System



2. 経緯

- (1) 2013年8月16日： 飛行異常※を踏まえて、調査・対策チームを立ち上げ、原因究明調査に着手 ※参考資料3参照
- (2) 2013年10月18日： 原因特定および対策提言のための外部有識者委員会設置（第1回開催。合計4回を開催。）
- (3) 2013年12月： 第4回外部有識者委員会で、原因の特定と、再試験の確実な成功に向けた対策について提言
（対策方針：制御則の安定余裕確保、基準軌道の再検討、空力モデルの改修）
調査・対策チームで、直接原因とその背景要因を洗い出し、全ての課題を抽出したものと結論。対策方針の妥当性も確認。
- (4) 2014年 3月11日： 第42回航空科学技術委員会で原因究明結果と対策方針、及びJAXAにおける取り組み状況を報告
- (5) 2014年 5月20日： JAXA理事会議において、今夏の再試験に向けた計画変更を承認

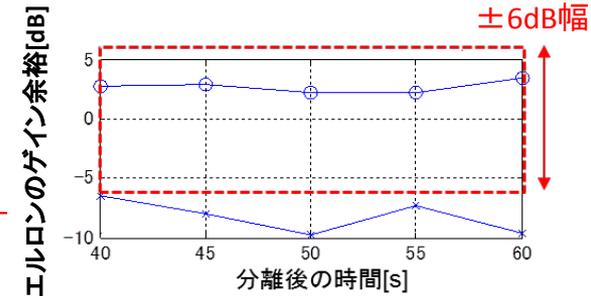
3. 原因究明結果

出典：第42回航空科学
技術委員会（H26年3月
11日）資料より抜粋

○飛行異常の原因

原因①： 制御則の安定余裕不足

- 機体に高い運動性が求められるミッション※1の性質上、俊敏に飛行できる先進的な制御手法を用い※2、多くの誤差を考慮してシステムを総合的に評価できるモンテカルロシミュレーションで誤差耐性が評価されたが、ブーム計測成功率を上げるパラメタの最適化の過程で、姿勢制御の安定余裕※3が少ない※4 飛行制御プログラムとなった。



※1 超音速で機体姿勢を引き起こし、BMS上空へ適切な速度と角度で向かって飛行

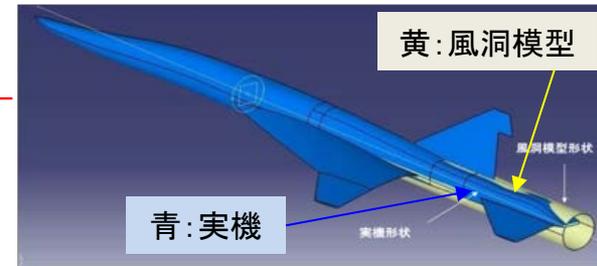
※2 機体モデル(空力モデルを含む)を用いて現在の操舵状態での角加速度の推定値を考慮することで制御性能を上げる方式

※3 舵の状態にかかわらず姿勢を安定に保つことができる制御能力の範囲

※4 従来の制御則における一般的な設計基準のゲイン余裕±6dB(空気が想定の半分～2倍になっても正常に制御可能)に比べて小さい、という意味(飛行後解析で最小2dBを確認)。

原因②： 空力モデル不適切

- 機体モデルの空力特性のうちロール及びヨー特性の一部において、設計条件を超える実機との差異があった。その主要因は、風洞試験において模型を固定する支持装置を胴体後部に装着する必要性から、胴体後部形状を実機と異なる形状にしていたが、特にそのロール・ヨー特性への影響の考慮が不足していたことにあった。



実機と風洞模型の後部形状の比較

以上より、姿勢制御の安定余裕が少なかったところに、飛行制御プログラムに組み込まれていた空力特性の一部の実機との大きな差異が影響した結果、機体特性が不安定となり、ロール運動及びヨー運動の増幅を引き起こし、飛行破綻に至った。

4. 再試験に向けた取り組み状況(1/4)

再試験においては、D-SEND計画の意義の再確認、飛行異常の再発防止対策の実施に加え、確実な成功を達成するために必要と考えられるその他の全ての技術的な項目についても再検討を行った。結果と現状は以下の通り。

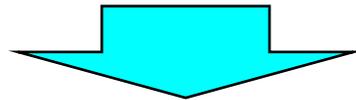
(1) 試験目的の意義の再確認

○D-SEND計画の意義 (参考資料4)

- ・「低ブーム設計コンセプトの実証」と「空中計測ブーム技術の実証」により、世界初の先端/後端ブーム低減設計概念を飛行実証し、ICAOのブーム基準策定検討へ貢献する

○現状認識

- ・他国において同種の飛行実証計画は具体化されていないので、その意義・価値は不変
- ・現在、ICAOのブーム基準策定計画(2016年2月)に変更はない。(参考資料5)
またICAOの場は国際的なプレゼンスの向上にも資する。



異なる気象条件(2回の飛行)での低ブーム波形データの計測はできないが、2014年中に飛行試験を1回実施できれば、高度方向の複数の低ブーム波形データを取得できるので、低ブーム設計概念の飛行実証と、ICAOへの成果の提供は十分可能であり、その意義と価値は変わらない。 (尚、試験時期はSSC*実験場の風条件から7~8月が最適。)

4. 再試験に向けた取り組み状況(2/4)

(2) 飛行異常の再発防止対策 (参考資料6)

調査・対策チームによる原因究明・対策方針の結論に対応し、下記対策A～Dを完了した。

対策A: 姿勢制御に十分な安定余裕を持つ飛行制御プログラムへの改修

- これまでの航空機設計において確立された姿勢制御に対する安定余裕の設計基準(ゲイン余裕 $\pm 6\text{dB}$ 以上等)を設けて飛行制御プログラムを改修し、改修した機体モデル(下記対策B)を用いたモンテカルロシミュレーションにより、姿勢制御に対する十分な安定余裕の確保、飛行異常の防止の確認を通して、飛行制御プログラムを確定した。

確定した飛行制御プログラムでは、想定した基準の飛行軌道に対して線形解析に加え非線形解析においても姿勢制御に対する安定余裕が設計基準を満足していることを確認できた。

対策B: 機体モデルの空力特性の見直し

- 追加の風洞試験及びCFD解析を行い、実機と大きな差異を生じないモデルを再構築できた。
- 過去の開発機例を考慮して、実機と空力モデルとの誤差を一部拡大して再設定した。

改修した空力モデルから算出される空気力は、第1回飛行試験の空気力(特にモーメント特性)と良く一致した。また改修した空力モデルを組み込んだ制御プログラムは飛行異常を再現できたことから、改修した空力モデルは実機の特性を表現できているものと判断される。

4. 再試験に向けた取り組み状況(3/4)

対策C: 上記対策A, Bを講じた上で、計測成功率との関係から、必要に応じて飛行軌道の再検討、及びそれらに伴う飛行誘導プログラムの改修

- 飛行軌道に関して再検討を行った結果、従来の飛行軌道でも計測成功率の向上は十分可能であることが明らかとなり、軌道の変更は行わず、飛行誘導方式及びゲイン調整等を行って、飛行誘導プログラムを確定した。

改修した飛行制御及び誘導プログラムを用い、従来の飛行軌道に対して機体モデルの複数の誤差を考慮したモンテカルロシミュレーションにおいて、十分な安定余裕の確保と飛行異常の防止、及び十分な計測成功率の向上を確認した。

対策D: チェック体制(技術、管理、コスト)の強化と、不具合再発防止等の対策の実施

- 背景要因に関わる対策について全てを実施し、不具合対策の有効性も確認した。

人員体制の強化、審査会へのJAXA外の専門委員の導入による技術審査の質的向上、空力/誘導制御関連レビュー会へのプロジェクト外の専門家(JAXA)及びメーカーの参加による検討の詳細化、技術管理方式の見直し、などを通してこれまでの進め方を大幅に改善した。

4. 再試験に向けた取り組み状況(4/4)

(3) 確実な成功に向けた追加対策： 下記の追加対策E～Iを完了した。

対策E: テレメトリ・データの総点検

- ・ 全飛行フェーズのテレメトリ・データを詳細に点検し、各機器の健全性と機能を確認した。

対策F: 現地に保管の機体点検

- ・ SSC実験場に保管の機体について、外観検査、機器点検等を実施し、全て健全であることを確認した。

対策G: 試験実施計画の再検討

- ・ 第1回試験を踏まえ、運用手順見直し、不具合対策、レッスンズ・ラウンドを試験計画書及び手順書に反映した。

対策H: 特別点検の実施

- ・ JAXA内の特別点検チームにより、国内作業(誘導制御を含む不具合対応等)の妥当性を独立に評価した。

対策I: リスクの洗い出しと識別の再見直し

- ・ 改修設計に反映すべきことは全て完了した。(ブーム計測システムの冗長系:参考資料7)

(4) 以上の対策に関連した今後の取り組み

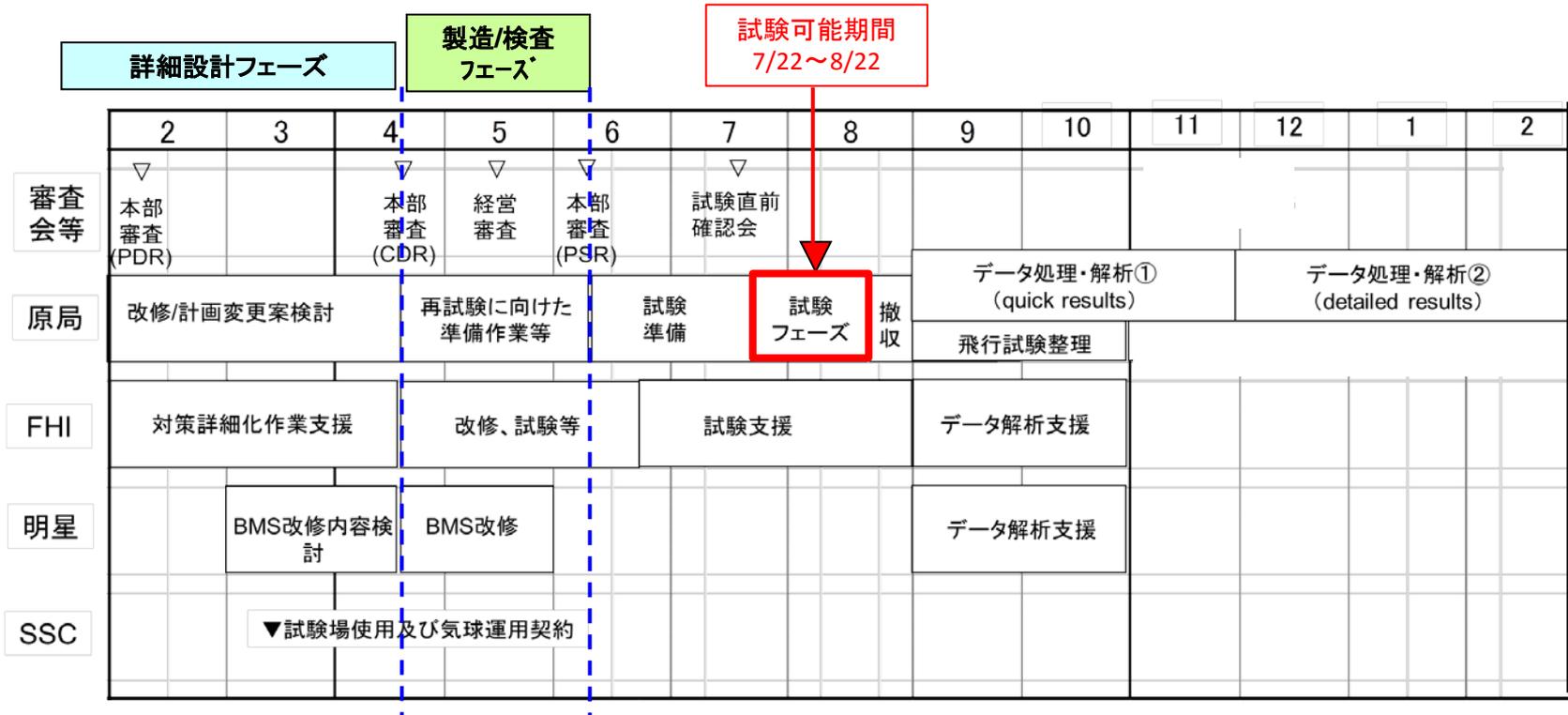
- ・ 担当メーカーによるプログラムの改修・試験作業の完了を審査会にて確認する。
- ・ 現地作業についても、特別点検チームにより独立した妥当性の評価を行う。
- ・ 現地でも更なるリスク低減に努める。なお気球を用いた実験システムであるので試験実施は気象条件に大きく依存している。

5. 今後の予定

○過密なスケジュールの中においても、ソフトウェアを含む改修・試験等を確実に実施し、6/9に改修完了及び試験準備状況の確認のための審査会を実施する。

○現地での試験準備作業を6月中旬から開始する。

○試験フェーズへの移行は7/22を目標としている。



6. まとめ

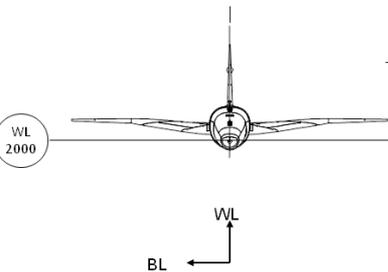
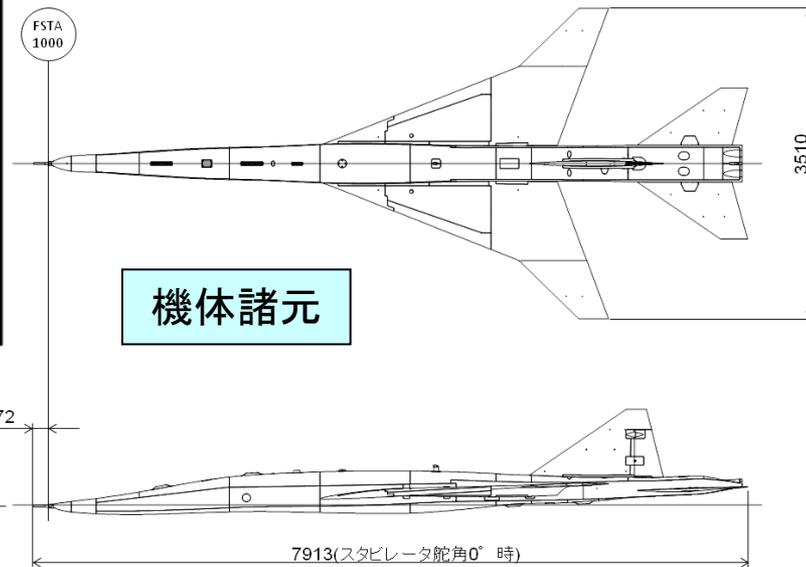
- 第1回試験の飛行異常に対する直接原因を特定し、その対策が妥当であることを確認した。
- 飛行異常の背後要因についても分析を行い、対策を行った。
- 落下試験は当初計画の2回から1回となるが、D-SEND計画の目標に対する意義と価値は損なわれないことを確認した。
- 改修設計(空力モデル/誘導制御則の改修、BMS冗長化等)によってシステムの信頼度レベルは前回よりも向上しており、実施可能と判断している。
- 再試験に向けたリスク・課題については、JAXA内の特別点検チームによる確認、外部審査員による確認、メーカーも含めたピアレビューの強化等により、十分に確認されている。
- 再試験に向け、残りの作業を着実かつ慎重に進めていく。

以上より、2014年夏期の再試験に向けた準備が整っていると判断している。

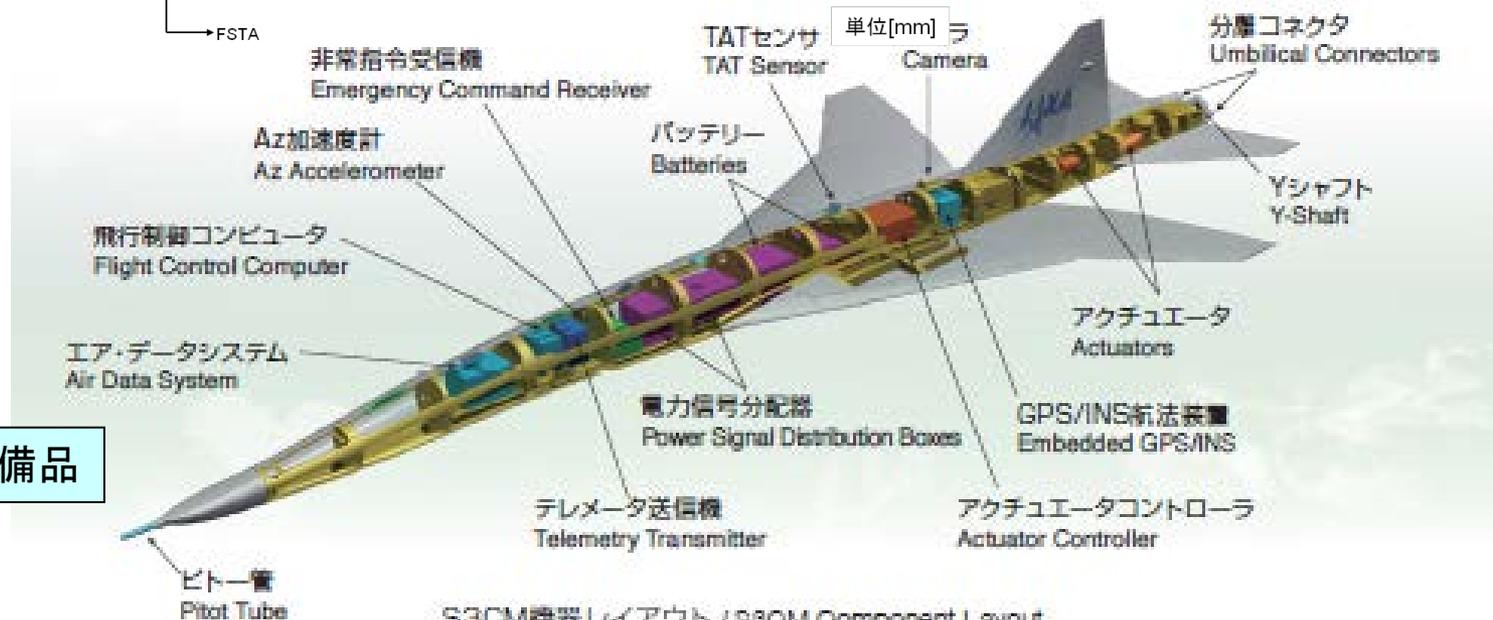
参考資料1. D-SEND#2機体の概要

出典: 第42回航空
科学技術委員会
(H26年3月11日) 資
料より抜粋

項目	諸元
全備重量	1000kg
主翼面積	4.891m ²
主翼平均空力翼弦長	1.912m
主翼幅	3.510m
全長 (ヒト含む)	7.913m
スタビレータ舵角	±20°
ラダー舵角	±20°

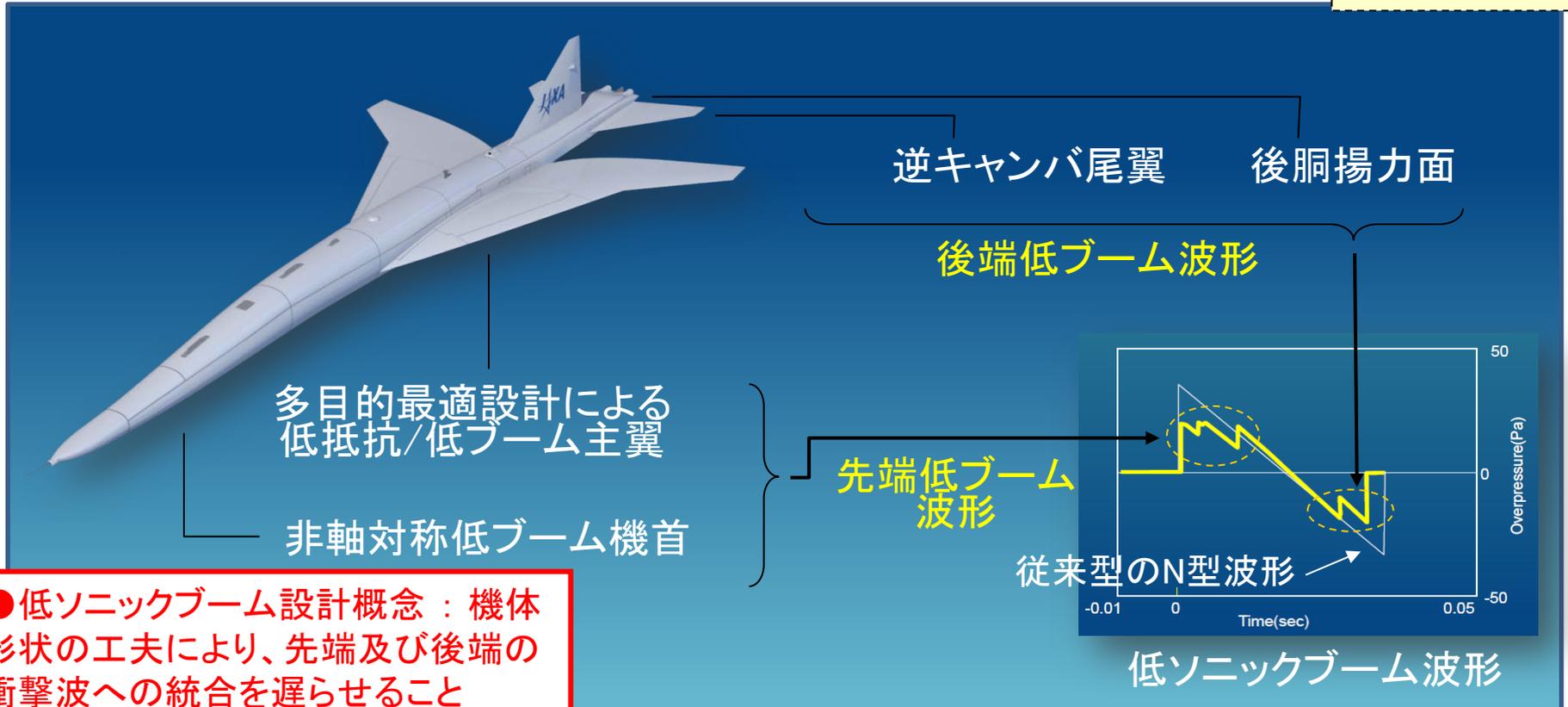


搭載装備品

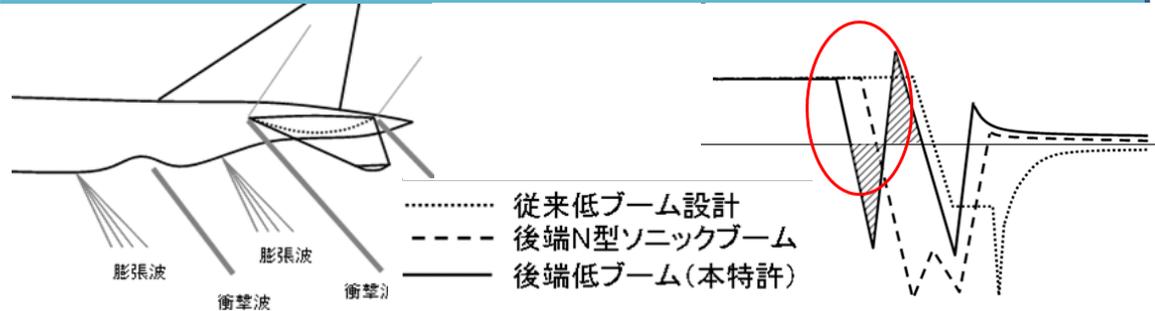
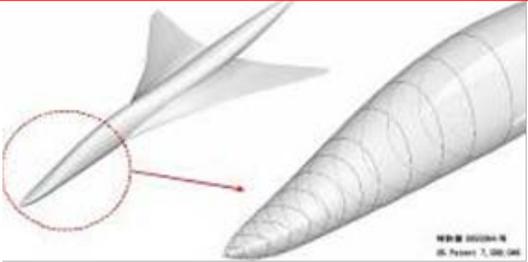


参考資料2. 低ソニックブーム設計概念

出典: 第42回航空
科学技術委員会
(H26年3月11日) 資
料より抜粋



● 低ソニックブーム設計概念：機体形状の工夫により、先端及び後端の衝撃波への統合を遅らせること



【先端ブーム低減設計コンセプト】
特許3855064号 / US Patent 7309046

特

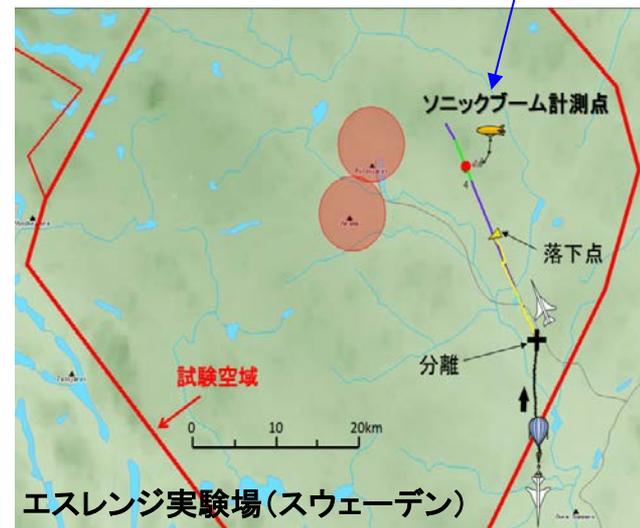
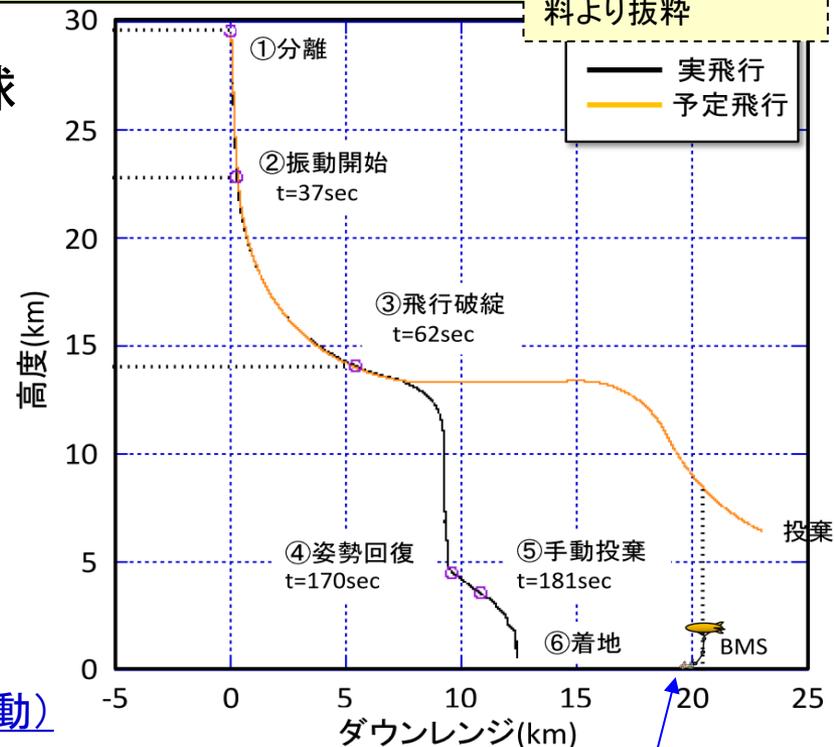
【後端ブーム低減設計コンセプト】
特許5057374号

参考資料3. 第1回飛行試験の発生事象

出典: 第42回航空
科学技術委員会
(H26年3月11日) 資
料より抜粋

○2013年8月16日 14:10(日本時間): 気球放球

- ①同日19:55: 機体を気球から分離(高度約30km)
- ②分離37秒後: 引き起こし(迎角5度→12度)開始
(高度23km、マッハ数1.2)
機体にロール及びピヨー運動が発生
- ③分離62秒後: 姿勢制御不能(飛行破綻)
(高度14km, マッハ数1.5)
・同120秒後頃: 引き起こし時の機体上面から発生した
ソニックブームを計測(BMS*は正常に作動)
- ④分離170秒後: 再度機体姿勢が回復し、制御ができるよ
うになり、計測点(BMS*)に向かって滑空
- ⑤分離181秒後: 通常終了手順に従い、投棄コマンド送信
- ⑥分離220秒後: エリア内に着地
(計測地点の手前約8km)



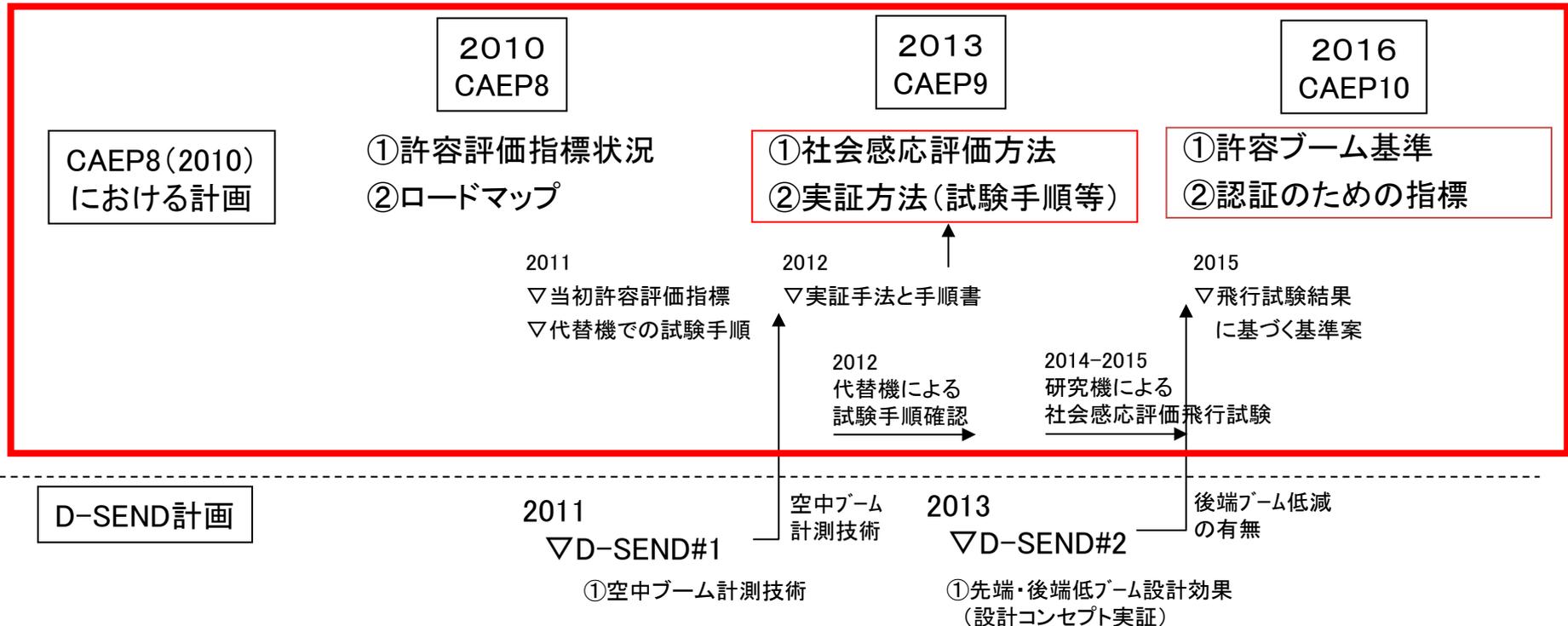
*BMS: Boom Measurement System(ソニックブーム計測システム)

参考資料5. ICAO/CAEPブーム基準策定計画

出典：第42回
航空科学技術
委員会（H26年
3月11日）資料
より抜粋

○ICAOソニックブーム基準策定計画とD-SENDプロジェクトとの関係

- ICAOでは、CAEP10(2016年2月)においてソニックブーム環境基準策定を計画しており、ロードマップは計画時(2010年)のままで変化なし。
- 下記のD-SEND計画は移行審査時(2011年1月)のものであるが、CAEPとの関係は1年遅れでも成立。

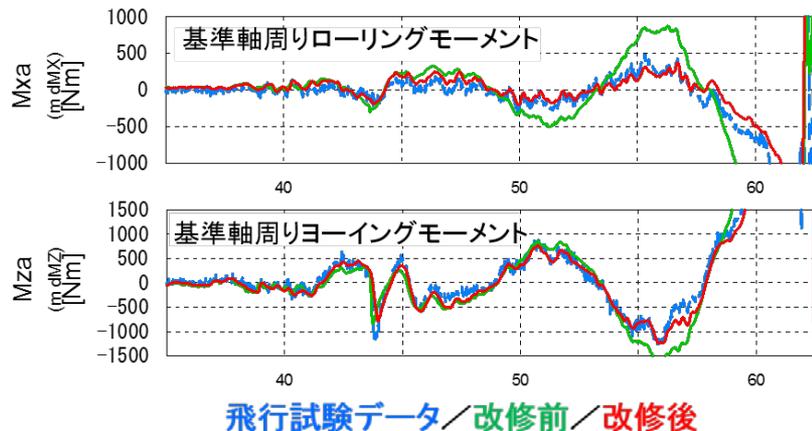


参考資料6. 飛行異常防止対策への対応状況

○「調査・対策チーム」の結論に従って、下記を実施し、審査会(2014年4月24日)において飛行異常の再発防止を確認した。

(1) 空力モデルの改修

・空力モデルと実機との差異(特に横・方向特性)を解決するため、追加の風洞試験並びにCFD解析を行ってノミナル特性を改修し、第1回飛行試験データとの比較・検証を通して、飛行試験状態に近いと推定される値に近づけた。(右図)



・誤差モデルについては実績のある他機例データ(HSFD-2(HOPE-X)モデル、NEXST-1実績)を参考に再考し、余裕のあるモデルを設定した。

(2) 誘導制御則の改修

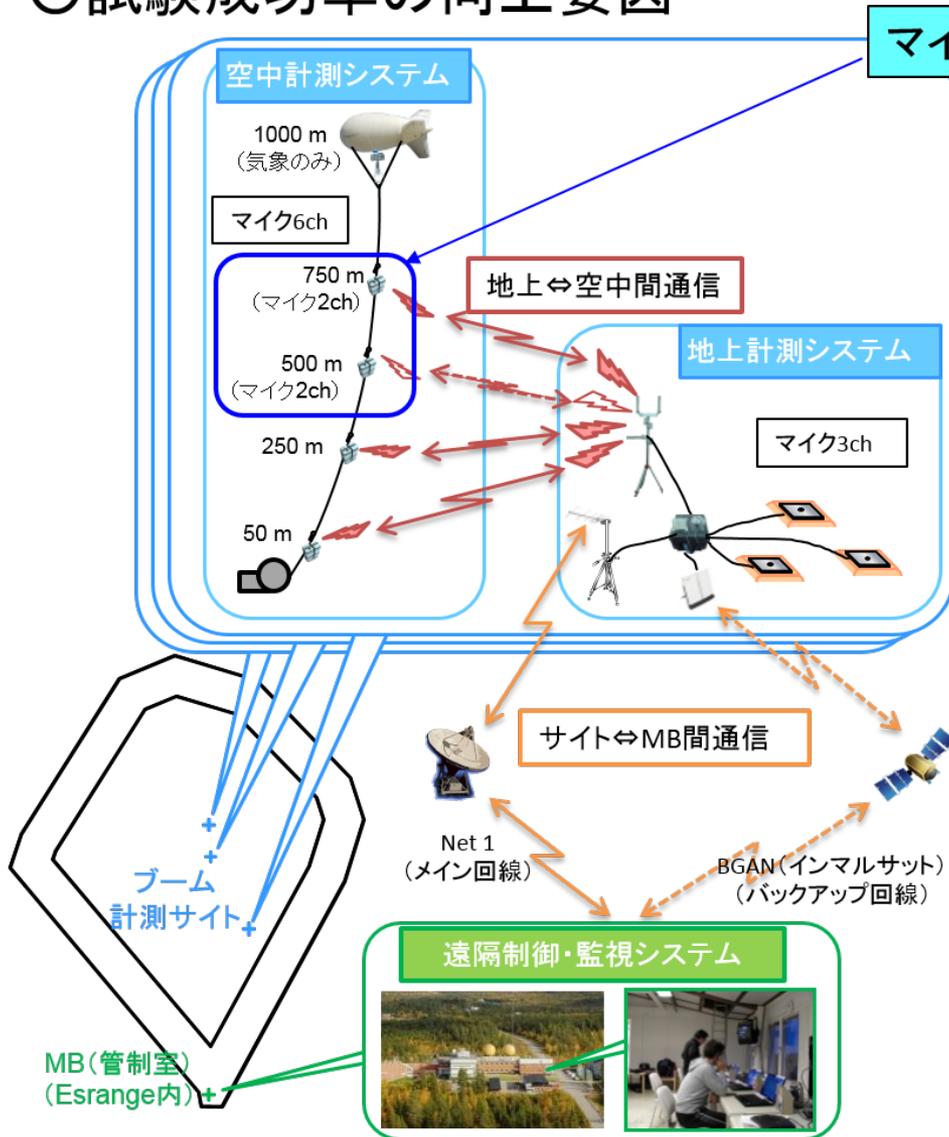
・十分な安定余裕確保の設計条件としてゲイン余裕±6dB等を新たに設定し、制御則の一部を改修し、さらに安定余裕が十分確保されていることを最後に確認するプロセスを新たに追加して、基準軌道に沿った飛行について姿勢安定に関する制御則を確定した。

・機体モデルにおける複数の誤差を考慮した飛行状態のモンテカルロ・シミュレーション※により、ゲイン調整等を行った結果、誘導制御則の改修設計の妥当性を確認した。

※) パラメータ105項目(空力特性、センサ出力、重心位置、慣性特性等)についての誤差/ばらつきを正規分布または一様分布で同時に発生させ、取りうるパラメータの組合せを多数回実施することにより、システムのパラメータ変動に対する挙動を把握する手法

参考資料7. ブーム計測システムの改善対策

○試験成功率の向上要因



変更箇所	変更内容
空中計測システム	<ul style="list-style-type: none"> ①計測時間の延長 (12時間から13時間以上に延長) ②他サイトへの流用性向上 (単独動作化) ③防水性向上 (ケーブル取出口、コネクタ等の防水処置)【不具合対策】 ④AD変換器動作安定性の向上 (USBケーブルの固定)【不具合対策】
空中マイク	<ul style="list-style-type: none"> ⑤冗長性向上 (750mと500mのマイクを2本に増加) ⑥防水性の向上 (防水グリッドの導入)【不具合対策】 ⑦防振性の向上 (パーツ接合部の固定)【不具合対策】 ⑧ケーブルコネクタ強度向上 (変換アダプタの導入、取付方法の変更)【不具合対策】
計測ソフト	<ul style="list-style-type: none"> ⑨バージョン管理性能の向上 (バージョン表示機能の追加)