

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

D-SEND#2搭載カメラの検討と試験結果

Development and flight test results about the onboard camera on the
D-SEND#2 airplane

高戸谷 健, 平野 義鎮

Takeshi Takatoya, Yoshiyasu Hirano

2016年10月

October 2016

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

D-SEND#2 搭載カメラの検討と試験結果

高戸谷 健*1, 平野 義鎮*2

Development and flight test results about the onboard camera on the
D-SEND#2 airplane

by

Takeshi Takatoya*1 and Yoshiyasu Hirano*2

Abstract

The D-SEND project is a flight demonstration of low sonic boom design technology which is carried out by Japan Aerospace Exploration Agency. In the D-SEND#2 drop test, an unmanned experimental airplane was dropped around 30km altitude and glide over the sonic boom measurement point. The drop test was conducted on 24th July, 2015 at the Esrange Space Center, Sweden. On the experimental airplane, an onboard camera was installed in front of the vertical stabilizer. Several topics about the onboard camera were described in this report. A separated type of action camera was selected to satisfy requirements. Environment tests are conducted to check the behaviors at the high altitude environment. The images were obtained successfully from the balloon launch, ascent, high altitude floating, free flight to landing.

Keywords: D-SEND#2, onboard camera, flight test.

概 要

ソニックブームを半減させる技術の獲得に向けて小型の無人機供試体を用いた低ソニックブーム設計概念実証プロジェクトを進め、第二回飛行試験を 2015 年 7 月 24 日に実施した。D-SEND#2 供試体に搭載した搭載カメラについて仕様を定め、候補を選定し、確認試験を行い搭載カメラの構成を決定した。同時に供試体のプライムメーカーの FHI や JAXA 内との調整を実施して、搭載カメラを載せる位置やカメラカバーの形状、作業手順などを順次決めていった。第二回飛行試験においては、放球から着地までの映像を取得することができた成果について報告する。

* 平成 28 年 9 月 14 日受付 (Received September 14, 2016)

*1 航空技術部門 次世代航空イノベーションハブ
(Next Generation Aeronautical Innovation Hub Center, Aeronautical Technology Directorate)

*2 航空技術部門 構造・複合材技術研究ユニット
(Structures and Advanced Composite Research Unit, Aeronautical Technology Directorate)

1. はじめに

宇宙航空研究開発機構(以下 JAXA と呼ぶ)航空技術部門ではソニックブームを半減させる技術の獲得に向けて小型の無人機を用いた低ソニックブーム設計概念実証(以下 D-SEND と呼ぶ)プロジェクトを進め、飛行試験をスウェーデン ESRANGE 実験場で 2015 年 7 月 24 日に実施した^{[1],[2]}。D-SEND プロジェクトは無人で推力を持たない供試体を気球から自由落下させ超音速飛行中に発生するソニックブームを地上付近で計測した機構プロジェクトである。

本報告では、D-SEND#2 供試体に搭載した搭載カメラについて仕様・機種選定から搭載・飛行試験準備までの一連のプロセスと飛行試験で得られた搭載カメラの結果について報告する。

2. D-SEND#2 飛行試験の概要

D-SEND#2 試験は、JAXA の低ブーム設計概念を適用して設計・開発した供試体を気球を用いて高度約 30km 上空

から自由落下させることにより、所定の経路上で超音速飛行を実現させ、超音速飛行で発生するソニックブームを地上付近で計測し、設計した圧力波形と比較することにより JAXA の低ブーム設計概念の有効性を確認するための試験である。

この試験に用いる供試体の空力形状と制御系は JAXA において設計した。制御系の実装と供試体の詳細設計・製造および飛行試験のための作業支援は富士重工業株式会社(以下 FHI と呼ぶ)が担当した。

供試体は全長 7.913m、主翼幅 3.510m の機体で、無推力の無人機である。気球放球時に用いられるクレーン車のアーム高さ(約 12m)から、気球と供試体を接続するゴンドラの高さ、および地面とのクリアランスを差し引いて、供試体の全長は 8m 以下となるように仕様を定めた。主要諸元を表 1 に、三面図を図 1 にそれぞれ示す。なお、ソニックブーム計測地点を通過後、計測フェーズは終了し、投棄に移行し、きりもみで投棄するため、脚

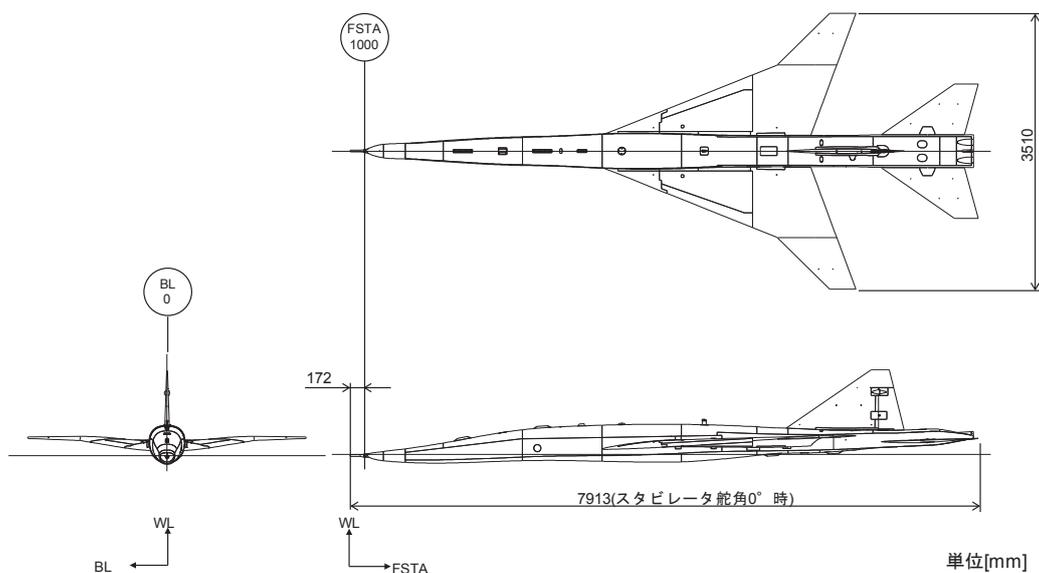


図 1 D-SEND#2 供試体の三面図

等の降着系統やエアバッグ・パラシュートといった回収系統は装備されていない。

表 1 D-SEND#2 供試体の主要諸元

全長	7.913 m
全幅	3.510 m
翼面積	4.891m ²

3. 【参考】小型超音速実験機(ロケット実験機:NEXST-1)の搭載カメラについて

航空技術部門の前身である航空プログラムグループが 2005 年 10 月に実施した小型超音速実験機第二回飛行試験⁴⁾においては、小型超音速ロケット実験機に、カメラを搭載しており機体回収後に映像を確認し、打ち上げ・上昇・打ち上げロケットからの分離・パラシュートの開傘・エアバッグの放出・着地までのプロセスが正常に行われたことが視覚的にとらえられた。詳細な経緯は不明であるが、装備品であるもののオプション扱いとして、JAXA が責任を持つことで搭載するこ

とになった。また、レンズは後ろ向きに設置されており、映像は機体後方の打ち上げロケットとの分離機構、水平尾翼、エアバッグの展開などが撮影されていた。記録部は DV に記録する形式で、電源は機体電源から供給されていた。撮影された映像の代表的なものを図 2 に示す。打ち上げロケットで加速中にマッハ数約 2.5 で飛行した場合、空力加熱でレンズの保証温度を越える可能性があったことから当初はレンズの覆いに断熱材を入れてあったが、断熱材が溶けた場合の影響を考慮して最終的には断熱材を外す処置をした。

4. 搭載カメラの検討

2011 年度に D-SEND #2 供試体の詳細設計が本格化したことを受け、D-SEND#2 供試体にカメラを搭載して気球からの分離および分離後の飛行状況を映像に記録することは有用であることから搭載カメラの検討を開始した。

気球にスマートホンを載せて成層圏まで飛ばした事例などが映像サイト^{4),5)}等

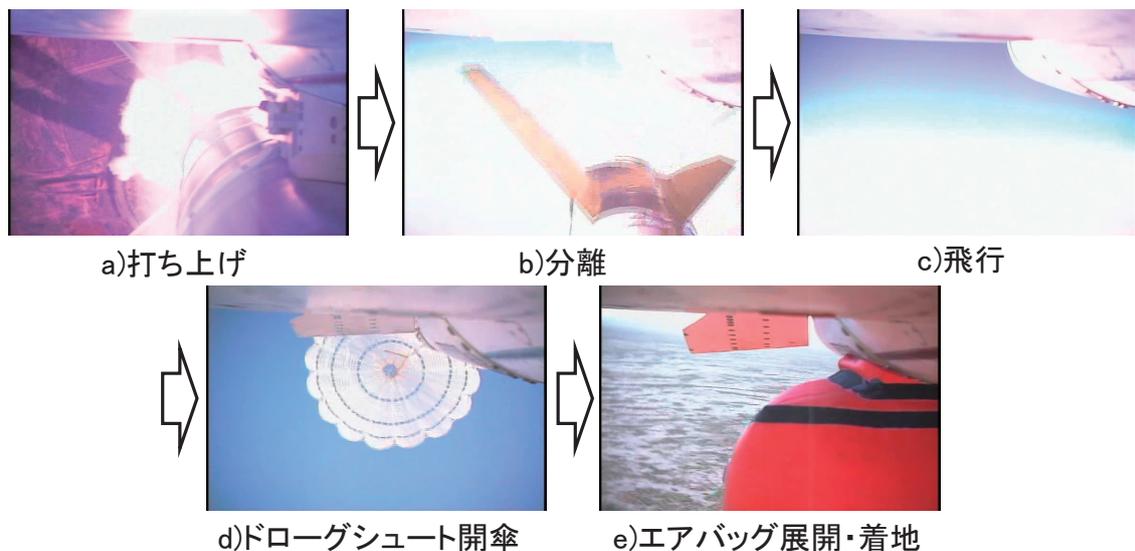


図 2 NEXST-1 搭載カメラの映像

に公開されていたが、設計当時は正規の装備品として環境条件を満足するような器材は市販されておらず、搭載カメラは開発品になることからコストやスケジュールを圧迫することが懸念されたことを受けて、供試体のプライムメーカーである FHI と調整を行った結果、NEXST-1 と同様に JAXA の責任で搭載する装備品として扱うことになった。そのため、搭載カメラの映像取得はオプション扱いとしている。また、D-SEND プロジェクトチームにおいては、システム班と構造班が担当することになった。

D-SEND#2 供試体にカメラを搭載する検討の概要としては、まず第一に搭載カメラの要求仕様を検討し、候補となる機種を選定した。簡易環境試験を実施して、気球で高度 30km 付近を滞空する高真空・低温条件で稼働することを確認した。さらにスウェーデン SSC (Swedish Space Corporation) 社が実施した気球の試験に便乗して搭載カメラを試験した。その後、搭載カメラを供試体に搭載し、FHI が実施したシステム統合試験に

供し、他系統に影響を与えないことを確認し、現地に輸送して、計 2 回の飛行試験を実施した。スケジュールと主要なイベントを列挙して、図 3 に示す。本報告では、イベントに沿って説明していく。

4.1 要求仕様の策定

プロジェクトチーム内で D-SEND#2 供試体にカメラを搭載する際に満たすべき条件を洗い出し、その条件を元に仕様を策定した。満たすべき要求としては、①前方を撮影する、②空力抵抗の増加を最小限におさえる、③市販品を利用する、④操作が簡単、⑤成層圏で曝される高真空・低温環境に対する耐環境性を有する、⑥機体の電源は使わずに独立した電源を使う、⑦映像をダウンリンクしない等が挙げられた。これらの満たすべき要求を仕様にとまとめたものを表 2 に示す。

2011FY	2012FY	2013FY	2014FY	2015FY
検討開始	▽ 簡易環境試験 ▽ 気球確認試験 カメラカバー製作	↔ 輸送 第一回キャンペーン 第一回飛行試験	▽ 簡易環境試験 ↔ 第二回キャンペーン	↔ 第三回キャンペーン 第二回飛行試験

図 3 搭載カメラのスケジュール

表 2 搭載カメラの要求仕様

項目	小項目	仕様
カメラ本体	画質	解像度 VGA(640×480)以上
	撮影コマ数	15 fps 以上
	撮影時間	6 時間(滞空)+3 分(飛行)以上
	電源	独立した電源(機体電源を使わない)
供試体との I/F	突起物の高さ	50mm 以内
	映像信号	記録メディアに保存(ダウンロードしない)
	その他	電磁干渉しないこと スイッチ類は供試体に設けない
環境条件	温度	-13°C～42°Cで動作すること
	圧力	大気圧～高度 32km で動作すること 飛行時の急加圧に耐えること
	荷重	装備品に準ずること

4.2 候補の選定

数多くの市販品の中から搭載カメラとして使える可能性のあるものを探して検討したところ、レンズ部が独立していて研究用に使用した実績もある株式会社エルモ社の ELMO SUV-Cam Professional シリーズが有力であるということから、第一候補として次の段階に進めることにした。表 3 に候補の選定結果を示す。ロケット実験機(NEXST-1)の搭載カメラは機体電源を必要とすること、記録部がメカニカルな記録なため、実績があるものの総合評価としては×とした。Apple 社製 iPhone4 に代表されるスマートホンは、気球に載せて成層圏まで撮影して回収した実績が映像サイトなどに公表されているものの、レンズの向きを前方にすると本体の高さが高いため突起の高さが高くなるため総合評価は×とした。アクションカメラの Woodman Labs 社製 GoPro は付属品も充実していて候補として検討し

たが、防水ケースと外部電源が両立せずに総合評価は×とした。ビデオカメラ JVC ケンウッド社製 GZ-E220 は少々高さが高いものの、それ以外の条件は満足できる見込みのため第二候補とした。

4.3 簡易環境試験(圧力)による搭載カメラの性能確認

第一候補として挙げられた ELMO SUV-Cam Professional シリーズについて、環境条件の中で一番クリティカルと考えられる圧力に関する簡易試験を実施し、動作を確認したことにより、搭載カメラとして選定した。

簡易環境試験(圧力)について詳細を記す。国際標準大気の線形モデル^[6]に定められる高度-圧力の関係より、高度 32km における大気圧は $8.68 \times 10^2 \text{ Pa}$ となるため、汎用の真空ポンプとデシケータを用いた簡易設備で実施することとした。大気圧から高度 32km 相当圧力まで

表 3 搭載カメラの候補の選定結果

候補	NEXST-1 同等品	スマート ホン iPhone4	ビデオ カメラ JVC GZ-E220	アクション カメラ GoPro	アクション カメラ SUV-Cam
性能	○	○	○	○	○
価格	×	○	○	○	○
電源	×	外付け必要	外付け必要	×	外付け必要
欠点	メカニカルな 記録(DAT)	レンズの向き が合わず	高さ 55mm	外付けバ ッテリーが使 えない	解像度が VGA
実績	◎	○(JAXA 外)	NA	NA	○
その他				防水ケー スあり	レンズ部は 防水
総合 評価	×	×	○	×	◎

の減圧・保持・圧力回復は表 4 に示す条件で実施した。減圧時および圧力回復時の圧力履歴を図 4, 5 に示す。高度 32km 相当圧力での保持時間は、録画部本体の液晶を点灯させたまま内蔵バッテリーのみで撮影可能な時間の制約から 46 分間とした。

表 4 減圧・保持・圧力回復の条件

	減圧	保持	圧力回復
圧力	大気圧 ⇒850Pa	850Pa 保持	850Pa ⇒大気圧
試験 時間	17分 13秒	46分	6分 05秒
合計	69分 18秒		

動画は圧力変化の全てのプロセスにおいて正常に取得されており、高度 32km 相当圧力から大気圧までの環境下において搭載カメラが正常に機能する

ことが確認できた。また、試験終了後の外観、液晶部、レンズ部には視認できる損傷は確認されなかった。内蔵バッテリーに関しても変形、液漏れ等は発生していないことを確認できた。

その他、環境条件としては、温度環境・荷重条件などが他にもあるが、録画部は供試体内部のケースに入れることで低温環境には曝されないように保護することで対策することにして回避することにした。また、荷重条件については、アクションカメラとして市販されていることもあり、装備品に近い耐荷重性能があると考えられることから問題ないと判断し、環境試験は実施していない。なお、録画部のケースにスタイロフォームなどの衝撃を吸収できる素材を入れることで耐衝撃性を上げることにした。

これらの結果から、ELMO SUV-Cam Professional シリーズを搭載カメラに選

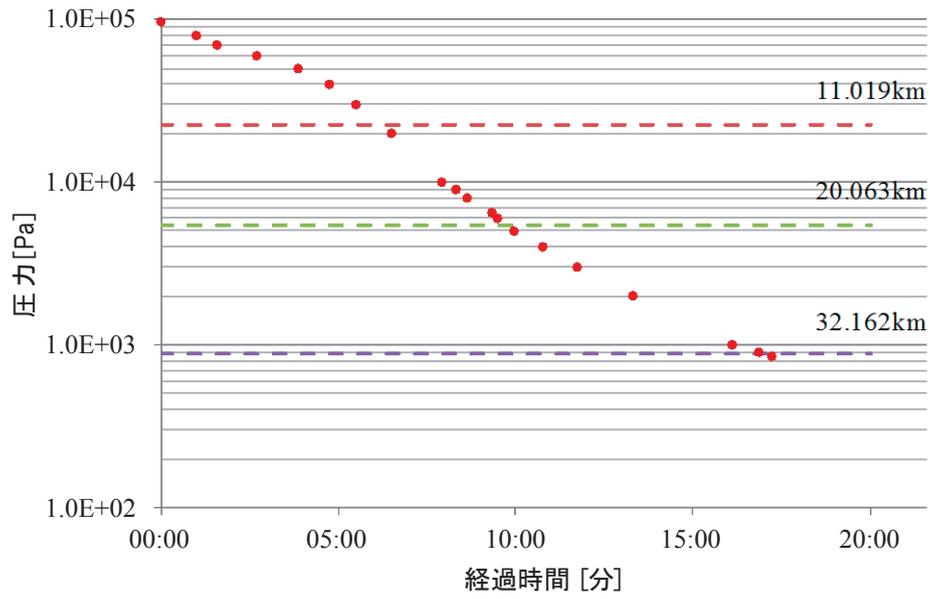


図 4 減圧時の圧力履歴

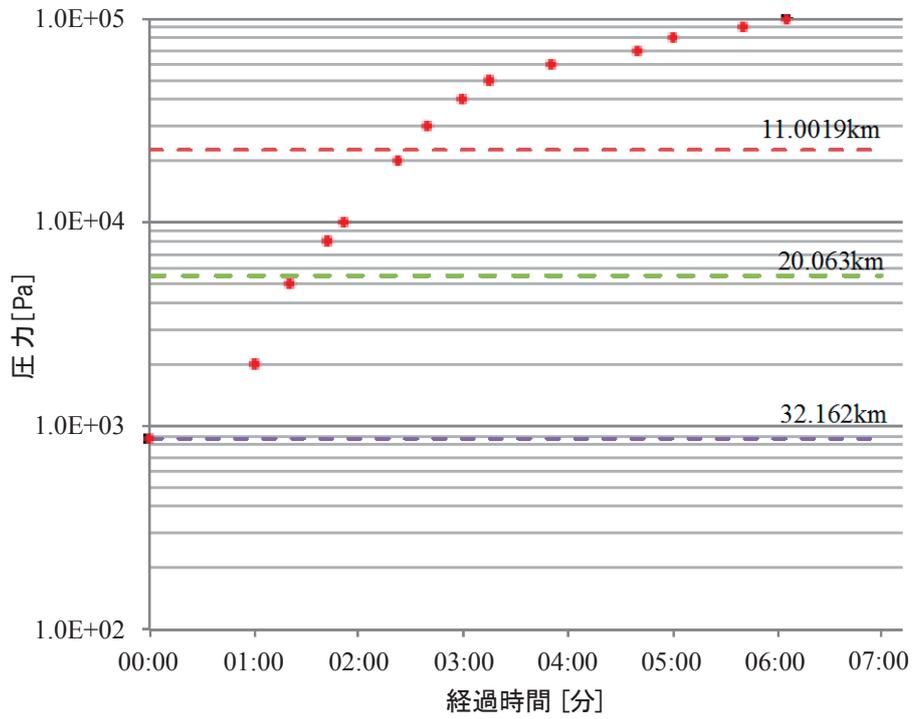


図 5 圧力回復時の圧力履歴

表 5 ELMO SUV-Cam Professional シリーズの仕様^[7]

レンズ部	全体	防水性能	IPX8
		外形寸法	φ 20mm×84.8mm
	レンズ	焦点距離	3.8mm
		F ナンバ	F2.0
	カメラ	撮影素子	1/4 型 CCD
		有効画素	44 万画素
記録部	全体	記録メディア	SDHC メモリーカード
		質量	約 130g
		外形寸法	W58mm×H102mm×D30mm (突起除く)
	外部端子	DC-IN 端子	専用ジャック
電源部	内蔵バッテリー	種別	リチウムイオンバッテリー
		定格容量	1,660mAh
使用環境	使用温度	0°C～40°C (記録部) -10°C～50°C (レンズ部)	

定した ELMO SUV-Cam Professional シリーズの代表的な仕様を表 5 に示す。

4.4 空力形状の設計

供試体に搭載カメラのレンズを搭載するにあたり、空力性能に影響を与えることから空力班と搭載位置・突起物の形状と高さ等について調整を行った。結果を以下に列挙する。

- ・供試体上面にレンズを配置することでソニックブームへは影響しないことを数値流体力学 (CFD) で確認できたため、レンズは上面に配置することにした。

- ・供試体上面の中でレンズの配置としては境界層の厚さとの兼ね合いで垂直尾翼の手前することにした。

- ・抵抗増加を出来るだけ少なくするため、要求仕様にもあるように 50mm 以内

に抑えるようにすること。

- ・レンズを保護すること、外形形状を滑らかにするため、レンズにはカバーを付けること。その外形については、構造班が形状を定義し、汎用 CAD ソフト CATIA を用いて空力班が図 6 に示すような形状データを作成した。

- ・カバーと機体外板の隙間は外板のギャップ・クリアランス要求と同一とすること。例えば、想定される搭載位置ではギャップ 2mm 以下等の条件が決められている。

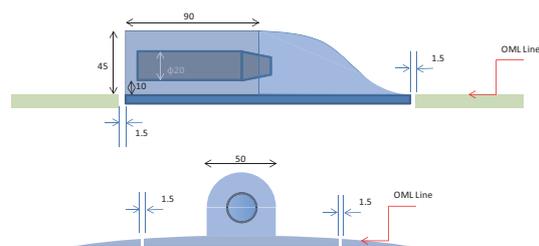


図 6 レンズ部のカバーの外形

4.5 カメラカバーの設計と製造

搭載カメラのレンズ部を保護するカバー(部品名称:カメラカバー)は,外形形状以外の詳細については,FHI と調整しながら設計を行った.供試体の搭載位置前後の外板の強度計算書を参考に,カメラカバーの材質・最小板厚,供試体への固定方法,表面処理や塗装などを設計した.代表的な仕様を表 6 に示す.

表 6 カメラカバーの仕様

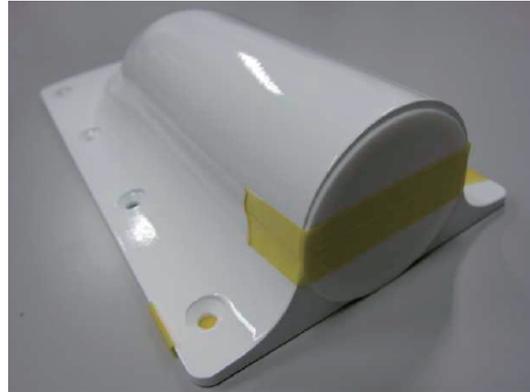
項目	仕様
材質	A-5056
板厚	一般部 5mm
表面処理	研磨後アノダイズ処理
塗装	エポキシプライマ EPORA#3000S+トップコート スカイハロー#200
供試体への固定	NAS1203-5(φ3/16IN.) ×8本

これらの仕様を元に,加工メーカーに製造を依頼した.その他,レンズの固定部や録画部を収めるケースなども合わせて製造した.完成した部品を図 7 に示す.

4.6 外付け電源の検討

内蔵バッテリーだけでは必要な撮影時間を確保できないことから外付け電源が必要である.(株)エルモ社の ELMO SUV-Cam Professional シリーズのオプション品として,外付けが用意されているが,乾電池ケースのため,容量が十分ではない.また,汎用乾電池は低温, 低圧

環境下での動作が保証されていない.カメラ本体には DC +5V を供給すればよいことから,乾電池ケースのコネクタのみ



a)カメラカバー



b)ケース



c)レンズの固定部

図 7 完成したカメラカバー等

流用し、USB のモバイルバッテリーを接続することとした。

また、外付け電源については、「4.10 現地作業手順の事前調整作業」に後述する調整結果により、電源投入してから 10 時間後に録画開始し、6 時間+3 分の撮影時間をカバーできるように容量 10,000mAh のものを選定した。

4.7 詳細設計審査会指摘事項の検討

2012 年 5 月 7 日に実施した D-SEND#2 詳細設計審査会(CDR)において、審査委員の一人である宇宙科学研究所教授 吉田 哲也氏より「不時の電源断が起きた際、オンボードカメラのファイルクローズ処理が適切に行われないうえに画像が全く保存されない可能性が大きい」と指摘を受けた。また、外付け電源が外れないように保護するようにと助言を頂いた。

搭載カメラの仕様を確認するとともに、不意の電源断を模擬する等の確認を行った結果、録画中の動画ファイルが破損して再生できなくなることがあることが確認された。そのため、動画ファイルを 128MB で分割して録画していくモードを使うことで電源断の一つ前の動画ファイルを保存するようにした。また、最高画質、最高フレームレートで 128MB の動画ファイルは撮影時間にして 4 分 22 秒に相当するため、最悪の場合、予定飛行時間 3 分間の映像が保存できない可能性があることから、着地時の衝撃で外付け電源が外れないよう衝撃吸収材で録画部を覆った上でケースに固定するとともに、録画部の取り付け作業手順に外付け電

源コネクタの固定作業を追加することで対応した。

4.8 気球を使った確認試験

D-SEND#2 飛行試験を実施する実験場において、ヨーロッパの学生向けの気球実験 BEXUS15^[8]が計画されていたため、その実験に便乗する形で搭載カメラの実環境での確認試験を実施した。確認試験は 2012 年 9 月 25 日に実施した。放球シーケンスの 1 時間前からの作業工程において、録画を開始した。容積 12,000m³ の気球(D-SEND#2 飛行試験の気球 334,705m³ の 1/25 程度)を用いて、ペイロード約 100kg を搭載したゴンドラを放球した。気球は放球後、高度 25km 付近まで上昇し、滞空した。その後、パラシュートを使いゴンドラのみ降下し、放球してから約 6.5 時間後に着地した。JAXA からは D-SEND プロジェクトチームの佐々木・原田・菊池 3 名が参加し、搭載カメラの設置・操作等を実施した。搭載カメラの設置状況を図 8 に示す。

ゴンドラを回収後、搭載カメラを取り外し、撮影された映像を確認したところ、動画ファイルは 128MB 毎に記録されていることが確認できたが、着地後も撮影を継続し、内蔵バッテリーと外付け電源がつきるまで約 15 時間撮影しているのに対して、記録メディアの 16GB の SDHC メモリーカードは約 12 時間分しか記録できず、記録容量の不足分 3 時間分が上書きされていることが分かった。代表的な撮影した画像を図 9 に示す。また、記録部・レンズ部・外付け電源等に破損・変形・液漏れなどはないことが確認できた。

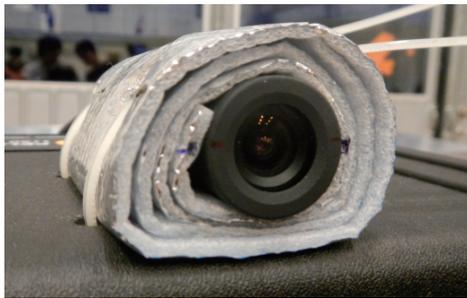


図 8 気球確認試験における
搭載カメラの設置状況

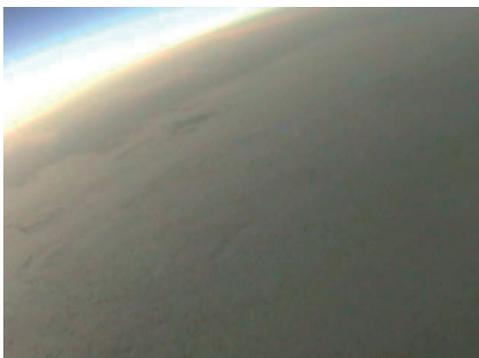


図 9 撮影した画像

この確認試験の結果を受けて、選定した搭載カメラは上空の低温・高真空環境下で動作することが確認できたので、D-SEND#2 供試体に搭載することを決定した。なお、上書きされて映像が消されることがないように、記録メディアの容量を 32GB に増大させるとともに、バッテリーがなくなるまで撮影するのではなく、作業手順に撮影時間を設定することを追加することにした。

またゴンドラの回収状況、および D-SEND#2 に先立って 2011 年に実施された D-SEND#1 落下試験⁹⁾の結果を受けて、湿地帯に D-SEND#2 供試体が着地して水没したとしても、映像が入っている SD カードを回収する可能性を高めるために SD カードは防水・防塵のものを採用することとした。

4.9 搭載カメラの調達と FHI への支給・関連試験の実施

環境試験や気球確認試験に使用するために順次構成品の購入やケース等の加工を行い、仕様を最終的に決めた。最終的に採用した搭載カメラと構成品の一覧と個数を表 7 にまとめて示す。

D-SEND#2 供試体#1001,#1002 号機用に識別するため、S/N を記載したリストを作成し、各部品にラベルを貼って管理した。なお、スウェーデンまでの輸送にあたり、搭載カメラ ELMO SUV-Cam Professional 記録部とレンズ部は(株)エルモ社より輸出貿易管理令規制貨物等に関する該否判定書により非該当であると回答を得ている。

表 7 搭載カメラの仕様と数量

項目	仕様	数量
搭載カメラ記録部	ELMO SUV-Cam Professional	2 式(S/N 001, 002)
レンズ部	ELMO SUV-Cam 用カメラヘッド (80cm)	2 式(S/N 001, 002)
内蔵バッテリー	ELMO SUV-Cam 用内蔵バッテリー	4 式(S/N 001, 002, 003, 004)
外付け電源	KOGES Enecycle EN03	3 式 (S/N 001, 002, 003)
SDHC カード	サンディスク SDSDXPA-032G-J35	3 式(S/N 001, 002, 003)
カメラカバー	専用設計品	2 式(S/N 001, 002)
レンズ固定部	専用設計品	2 式(S/N 001, 002)

その後、搭載カメラ一式が揃ったところで、D-SEND#2 供試体に組み込むため FHI に支給した。FHI 宇都宮製作所において、D-SEND#2 供試体に搭載カメラの組み込みを実施した。その後、関連試験の一つであるシステム統合試験(電磁干渉試験)を実施した。搭載カメラも電源を入れて撮影し、供試体の他系統に影響を与えないことを確認した。試験は空調されている電波暗室で実施したが、装備品からの発熱などにより搭載カメラ記録部が加熱される懸念があったため、ケースには衝撃吸収材を入れず、養生テープで固定するだけにとどめた。試験終了後に搭載カメラを取り出して確認したところ、外付け電源と搭載カメラ記録部はかなりの発熱があることが確認されたことを受けて、現地での地上試験においては衝撃吸収材を入れずに試験する手順とした。

その後、搭載カメラは D-SEND#2 供試体に組み込まれた状態でスウェーデ

ンまで輸送された。

4.10 現地作業手順の事前調整作業

搭載カメラの準備と並行して、現地での作業手順について JAXA 内および FHI と調整を行い、作業手順書を用意した。考慮した項目と作業手順に反映した項目を下記に記す。

- ・カメラカバーと周囲の外板との隙間はシーラント材でギャップを埋めてスムーズな表面にすること。⇒ シーラント材の塗布・硬化・乾燥・補正などで最大四日程度必要になるので、カメラのピント調整作業を早めを実施する。ピント調整作業は休憩時間等を用いて FHI の作業を妨げないようにする。

- ・現地では気球関連の電波と干渉する懸念があるため 2.4GHz 帯の電波(Bluetooth 等が該当)が使えない。⇒ 遠隔操作で録画開始を検討したが、導入せず、予約録画機能を使うことにする。

・屋内から屋外に D-SEND#2 供試体を出す際には、ほこりや異物の侵入を避けるためアクセスパネルは締めておく。
⇒ 屋内でアクセスパネルは締めておくようになるため、録画部には外からアクセスできない。

・トランスポンダーの電源を投入した後は、トランスポンダーのアンテナから一定の離隔距離が必要。⇒ 搭載カメラを先に取り付け、その後、トランスポンダーを取り付けた後、トランスポンダーの電源を投入する。

・D-SEND#2 供試体が倒立した状態およびゴンドラに吊り下げられた状態では、安全のため D-SEND#2 供試体から離隔距離 10m が必要。レンズ部は高さ 6m 程度に位置するためレンズ部にはアクセスできない。⇒ カメラカバーのレンズ保護窓のカバーは倒立前に外す。

これらの要件を満たしつつ、搭載カメラの現地での作業手順書として用意した手順書を表 8 に示す。

表 8 搭載カメラに関する現地作業
手順書リスト

フェーズ	番号	手順書名称
準備	P-AP-003	機上カメラ 準備手順書
	P-AP-004	機上カメラ 搭載・取り外し 手順書
試験	L-AP-001	機上カメラ 運用手順書

5. 第一次キャンペーン現地作業と 第一回飛行試験結果

5.1 準備フェーズ

第一次キャンペーンにおいて、2013年6月24日から構造班平野・高戸谷が現地作業を開始し、準備フェーズの作業手順書 P-AP-003, P-AP-004 に従い、搭載カメラの準備を進めた。搭載カメラのピントおよびレンズの向きの調整は、7月18日に D-SEND#2 供試体#1001 号機を、7月24日に 同#1002 号機を実施した。その後、FHI がカメラカバーの周囲をシーラントで処理している。内蔵バッテリーと外付け電源は充電器に接続し、満充電を保つようにした。また、空いている時間を使い、搭載カメラの録画部の操作を習熟するようにした。

搭載カメラを使った地上試験としては、7月15日にシステム統合試験(現地連成・水平ケース)、7月17日にシステム統合試験(現地連成・垂直ケース)、7月23日にフル・リハーサルを実施した。それぞれ搭載カメラの電源を入れた状態で、他システムへ影響を与えないことを確認した。その際には、熱対策で搭載カメラ記録部は衝撃吸収材を用いず、養生テープでケースに固定していること、外付け電源は S/N003 の予備品を使用したことが、本試験と違う点である。

また、搭載カメラの準備を担当していた平野は、現地では BMS(Boom Measurement System)班の作業を優先することにして搭載カメラの操作は行わないことに役割を変更したため、高戸谷が引き継いでいる。

5.2 試験フェーズ

第一回飛行試験は、8月15日12:00UTCからT-12H(12時間前)のカウントダウンを開始した。翌16日2:00UTC放球を目標としていた。T-9Hからのシーケンス作業において、APL(Airplane:JAXA 富田)の指示でD-SEND#2 供試体への搭載カメラの搭載を開始した。作業手順書L-AP-001に従い、搭載カメラの設定は、放球予定時刻の10分前の1:50UTCから16時間10分間撮影するように予約録画を設定した。図10にカメラカバーのレンズ保護窓のカバーを外した様子を示す。

降雨による中断や準備の遅れなどにより、放球は5:10UTC頃になったことに加え、上空での滞空時間も最大値に近いところまで延びて、気球からのD-SEND#2 供試体の分離は10:55UTCとなった。飛行試験の結果については参考文献^[10]をご参照ください。

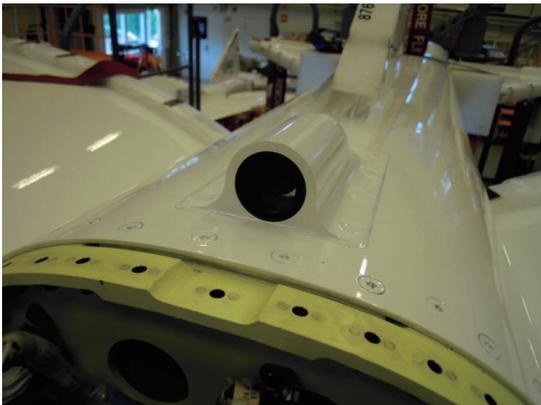


図10 レンズ保護窓のカバーを外した様子

5.3 搭載カメラの結果について

D-SEND#2 供試体は上面の姿勢の

まま乾いたところに着地していたので、スウェーデンSSC社が回収して、現地での作業場所まで持ち帰ることができた。下面のアクセスパネルは衝撃で胴体に食い込んだ状態であったが、何とかアクセスパネルを取り外して、搭載カメラのケースを取り外すことができた。

保存された映像を確認したところ、予定された記録開始時刻の1:50UTCから9:37UTCまでの7時間47分間撮影されていた。要求仕様の6時間+3分間の撮影時間は満足していたものの、飛行試験の推定終了時刻10:58UTCには1時間21分間分の電源が不足しており、飛行中の映像が取得できなかった。天候不順の影響等で、当初予定していたシーケンスから待機時間が大幅に延びたことに伴い、予約録画で待機中の電力消費が想定以上に必要となり、撮影時間が短くなったことも一因である。なお、取得された映像を確認したところ、ピントとコントラストは問題ないこと、音声も取得できており、地上の大気のあるところでの音から、放球され、上昇していくにつれ大気が薄くなり音が伝わらなくなっている状況が記録されていた。

図11に搭載カメラのケースを外した際の搭載カメラの様子を示す。外付け電源の固定の様子が見て取れる。取り付け時と変わりが見られないことから固定には問題なかったと考えている。図12に撮影された映像の例を示す。

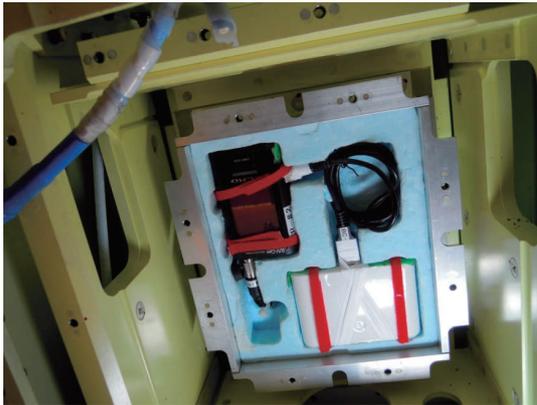


図 11 搭載カメラの回収後の状況



a) 放球直後



b) 最後の映像

図 12 撮影された映像

6. 外付け電源の改修

第一回飛行試験において飛行中の映像を取得できなかったことを受けて、外付け電源を改修することにした。放球するまでのシーケンスは天候などの影響で当

初想定より大幅に延びる可能性があることが分かったため、待機時間が増えても対応できるようにすること、上空での最大滞空時間を 7 時間に延ばす検討がされていたことを受け、撮影時間も 9 時間以上確保することを目標にした。また、外付け電源は二次電池の特性上、満充電でも最大容量まで使えるか懸念されたことから、容量を正確に見積もることができる一次電池に変更することにした。

現地での入手性と実績も考え、トランスポンダーの電源として使われている単一形状の塩化リチウムチオニル電池 SAFT LSH 20HTS (3.6V, 11, 000mAh) を候補とした。電圧を一定に保つため 3 本直列接続にして、降圧型 DC-DC コンバータ CC BEC HMJ000 4-00 を用いて +5.1V の電圧を得ることにした。

6.1 簡易環境試験(圧力・温度)

環境試験を再度実施して新たに導入した外付け電源の動作確認を行った。汎用の真空ポンプとデシケータを用いて大気圧から高度 32km 相当圧力までの減圧した状態で 3 時間の録画を実施した。降圧型 DC-DC コンバータ・塩化リチウムチオニル電池を含め異常は認められず、録画も正常であることを確認できた。図 13 にデシケータに設置した搭載カメラを示す。



図 13 デシケータ内の搭載カメラ

2014年5月29日～30日にかけて、降圧型 DC-DC コンバータ・塩化リチウムチオニル電池を用いた外付け電源の低温での実力値を知るため、恒温環境槽内に衝撃吸収材で覆った搭載カメラ一式を入れ、環境温度 -42°C に保持した状態で、待機時間10時間ののち、録画を開始し、電源が落ちるまでの時間を計測したところ16時間以上の撮影ができることが確認された。ただし、圧力環境は大気圧である。一次電池の容量が低温でも低下しないこと、降圧型 DC-DC コンバータの低温での動作が確認できた。図 14 に恒温環境槽と計測装置を示し、図 15 に温度の測定結果を示す。



図 14 恒温環境槽と計測装置の状況

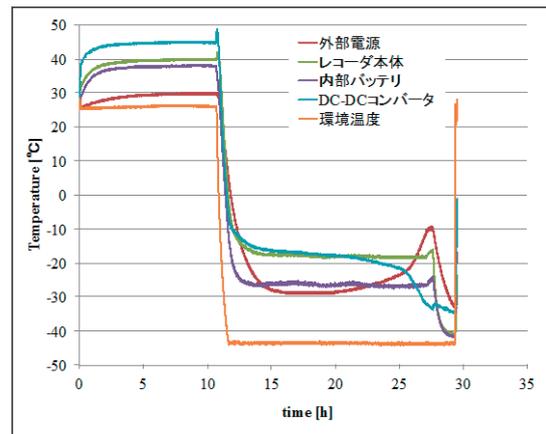


図 15 温度の測定結果

6.2 外付け電源の改修の採用

簡易環境試験の結果を受け、降圧型 DC-DC コンバータ・塩化リチウムチオニル電池を用いた外付け電源を採用することにした。この改修による搭載カメラ一式の重量は改修前後でほぼ同じであり、機体重量 $1,000\text{kg}$ には影響を与えない。ただし、降圧型 DC-DC コンバータはスイッチング電源の一種でありノイズ源にもなるため、現地でのリハーサルを兼ねた電磁干渉試験において不具合が生じた場合は、元の外付け電源に戻すことを代替案とすることにした。

7. 第二次キャンペーン現地作業

第一次キャンペーンの約一年後に現地作業を再開し、保管しておいた搭載カメラを開梱して準備を実施した。搭載カメラを使った地上試験としては、2014年7月20日にフル・リハーサルを実施し、改修した外付け電源を含む搭載カメラの電源を入れた状態で、他系統へ影響を与えないことを確認した。この確認を受け、降圧型 DC-DC コンバータ・塩化リチウム

チオニル電池を用いた外付け電源を使用することに決定した。気球放球に向け、8月22日～23日、25日の2回カウントダウンを開始したが、天候不良によりいずれも途中で中止となった。図16に搭載カメラの搭載状況を示す。



図16 搭載カメラの設置状況

搭載カメラの設定等は一年ぶりになることから、習熟して思い出すように心がけていたが、取扱い説明書に小さく記載されているものや作業手順書に書いていないノウハウに近いものもあり、いろいろ経験を学んだ。例えば、予約録画を開始して外付け電源を外すと内蔵バッテリーで動作を継続するが、外付け電源をつなぎ直しても認識せず、内蔵バッテリーが付きたところで録画が止まること、予約録画の設定をしたつもりでもRECボタンを長押しして点滅しないと予約録画されないこと、HOLDボタンをHOLDにセットすると録画が始まったことがあるので注意すること等である。できるだけ作業手順書に注意書きとして書き込むとともに、RECボタンの点滅についてはFHIの品証に確認してもらいダブルチェックするようにした。

8. 第三次キャンペーン現地作業と 第二回飛行試験結果

第三次キャンペーンにおいては、搭載カメラを使った地上試験として、2015年6月17日にフル・リハーサルを実施し、搭載カメラの電源を入れた状態で、他系統へ影響を与えないことを確認した。キャンペーンに先立ち記録メディアSDHCカードは新品を購入したので、新品に入れ替えて実施した。経年劣化が心配されたため、内蔵バッテリーの新規購入を検討したが、構想開始より年月が経過したため終息品となっており、新たにバッテリーを購入することが出来なかった。従って、これまで使用してきた内蔵バッテリーを引き続き使用する事とした。電力容量としては、一次電池である外付け電源の方がはるかに大きく、経年劣化に伴う内蔵バッテリーの容量低下の影響は僅少であると判断した。

8.1 第二回飛行試験

第二回飛行試験は、7月23日14:00UTCからT-10H(10時間前)のカウントダウンを開始した。翌24日0:00UTC放球を目標としていた。T-9H45Mからのシーケンス作業において、APL(Airplane:JAXA 富田)の指示でD-SEND#2 供試体への搭載カメラの搭載を開始した。搭載カメラの設定は、放球予定時刻の5分前の23:55UTCから16時間05分間撮影するように予約録画を設定した。図17に搭載カメラの設置状況、図18,19にD-SEND#2 供試体のレンズの状況と搭載位置を示す。

予定より多少遅れ、放球は2:43UTC

頃になった。気球からの D-SEND#2 供試体の分離は 8:00UTC となった。今回は録画開始から 8 時間 10 分程度であり、電源は余裕があることから飛行中の映像が期待できた。飛行試験自体の結果については参考文献^[11]をご参照ください。

8.2 搭載カメラの結果について

第一回飛行試験と同様に D-SEND #2 供試体は上面の姿勢のまま乾いたところに着地していたので、スウェーデン SSC 社が回収して、現地での作業場所まで持ち帰ることができた。下面のアクセスパネルは衝撃で胴体に食い込んだ状態であったが、アクセスパネルを取り外して、搭載カメラのケースを取り外すことができた。

保存された映像を確認したところ、予定された記録開始時刻の 23:55UTC から 16:00UTC までの 16 時間 05 分間撮影されていた。今回は放球・上昇・滞空・分離・飛行・着地までの映像が取得できていた。取得された映像を確認したところ、ピントとコントラストは問題ないこと、音声も取得できており、地上の大気のあるところでの音から、放球され、上昇していくにつれ大気が薄くなり音が伝わらなくなっている状況に加え、着地の衝撃の音も記録されていることが確認できた。図 20 に撮影された映像を示す。



図 17 搭載カメラの設置状況



図 18 レンズ保護窓の状況



図 19 D-SEND2 供試体のレンズ位置
(図中の矢印)



a)放球直後



e)着地直前



b)気球からの分離



f)最後の映像

図 20 撮影された映像



c)引き起こし



d)計測フェーズ付近

9. おわりに

ソニックブームを半減させる技術の獲得に向けて小型の無人機供試体を用いた低ソニックブーム設計概念実証プロジェクトを進め、第二回飛行試験を2015年7月24日に実施した。

D-SEND#2 供試体に搭載した搭載カメラについて仕様を定め、候補を選定し、確認試験を行い搭載カメラの構成を決定した。同時に供試体のプライムメーカーのFHIやJAXA内との調整を実施して、搭載カメラを載せる位置やカメラカバーの形状、作業手順などを順次決めていった。第一回飛行試験では想定よりも待機時間がかかり電源容量が不足したため、飛行中の映像が取得できなかったが、その

後、電源容量を増加させるように改修した結果、第二回飛行試験においては、放球から着地までの映像を取得することができた。取得された映像はプレス発表^[12]や JAXA チャンネル^[13]等においても利用されており、飛行試験の理解を進めるうえで有用であったと考えている。

搭載カメラの検討・飛行試験を実施した上での今後に向けた反省点としては、選定当時は候補も少なく解像度が低いものしか選択肢がなかったが、現在では 4K の動画が撮影できるものも入手できるので、地上付近の雲の様子などをもっと精細に撮影できたのではと考えている。一度選定したものを変更しようとする、確認試験のやり直しが必要になったり、固定方法を再検討したりと手間が増えるが、再検討する余地があったのではと反省している。さらに、コストとスケジュールを考えて、搭載カメラの撮影をオプション扱いとしたことで、電源については機体電源を分けてもらえず独立した電源が必要となり、第一回飛行試験では電源容量が不足したこと。また、二回の飛行試験では回収できたからよいものの、テレメトリーで映像をダウンリンクできずに、供試体を回収して、記録メディアを取りださないと映像が確認できなかったことに改善の余地があると考えている。

謝辞

D-SEND#2 搭載カメラの検討と飛行試験を進めるに当たり、様々な方からご支援を頂きました。D-SEND#2 供試体のプライムメーカーである富士重工業株式会社 奈良橋 俊之氏、同 矢野 克彦氏、同

秋葉 公三郎氏、同 高木 明氏、並びに現場の作業員の方々には、搭載するに当たり様々な要望に応じていただきました。JAXA 航空技術部門構造・複合材ユニット 熊澤 寿氏には、第二回飛行試験のリハーサルで搭載カメラの操作を実施して頂きました。JAXA 航空技術部門旧 D-SEND プロジェクトチーム吉田 憲司氏、同 本田 雅久氏、同 富田 博史氏、同 佐々木 豊氏(現 富士重工業株式会社)には、機種を選定から取得された映像の発表まで様々な支援を頂きました。関係者の皆様に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 牧野好和, 「低ソニックブーム設計概念実証(D-SEND)」プロジェクト 第 2 回 D-SEND プロジェクトにおける低ソニックブーム設計概念, 日本航空宇宙学会誌, 60(8), 2012.
- 2) 吉田憲司, 本田雅久, D-SEND プロジェクトの全体概要, (特集) 低ソニックブーム設計概念実証第 2 フェーズ飛行試験(D-SEND#2) 第 1 回, 日本航空宇宙学会誌, 64(1), 2016.
- 3) 大貫武, 町田茂, 吉田憲司, 他 20 名, 小型超音速実験機(ロケット実験機; NEXST-1) 第 2 回飛行実験, JAXA-RR-06-049, 2007.
- 4) iPhone 4S in Space, <https://www.youtube.com/watch?v=IHjX7LlS7OY>, 2011.
- 5) SPACE BALLOON PROJECT, <https://www.youtube.com/watch?v=MfFtUs5BbE4>, 2011.

- 6) MSIS-E-90 Atmosphere Model, A. E. Hedin, NASA, 1990.
- 7) 株式会社エルモ社 SUV-Cam II/Professional 取扱説明書.
- 8) BEXUS 15 successfully launched, <http://www.sscspace.com/news-activities/all-news-archives/2012-1/bexus-15-successfully-launched>, 2012.
- 9) 本田雅久, 富田博史, 高戸谷健, 川上浩樹: D-SEND#1 落下試験概要, <特集> 第3回「低ソニックブーム設計概念実証(D-SEND)」プロジェクト, 日本航空宇宙学会誌, 60(9), 2012.
- 10) 本田雅久, 富田博史, 原田賢哉, 川上浩樹, D-SEND#2 第1回飛行試験結果及びその後の対策, 日本航空宇宙学会第47回年会講演会, 2A2, 2016.
- 11) 吉田憲司, 本田雅久, 川上浩樹, D-SEND プロジェクトの成果概要, 日本航空宇宙学会第47回年会講演会, 2A1, 2016.
- 12) 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～, http://www.jaxa.jp/press/2015/10/20151027_dsend2_j.html, 2015.
- 13) You Tube JAXA チャンネル, D-SEND#2 飛行再現アニメーション+搭載カメラ, <https://www.youtube.com/embed/TcS5wgqznqs>, 2015.

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-16-002

JAXA Research and Development Memorandum

D-SEND#2搭載カメラの検討と試験結果

Development and flight test results about the onboard camera on the D-SEND#2 airplane

発行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL: <http://www.jaxa.jp/>

発行日 平成28年10月27日

電子出版制作 松枝印刷株式会社

©2016 JAXA

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

