

総合計画・要素技術の研究

Research Planning and Study on Subsystem Technologies for Reusable Launch Vehicles

将来宇宙輸送系研究センター総合計画チーム

Future Space Transportation Research Center

Program Planning and Subsystem Technology Team

石本真二, 種村利春, 伊藤健, 小笠原俊夫, 元田敏和, 森戸俊樹, 紙田徹, 大野正博

Shinji Ishimoto, Toshiharu Tanemura, Takeshi Ito, Toshio Ogasawara,

Toshikazu Motoda, Toshiki Morito, Toru Kamita, and Masahiro Ohno

Abstract

This paper describes a research plan for reusable launch vehicles. Drastic improvement in vehicle reliability and reduction in space flight costs are expected through realizing reusable systems. Although there are two goals, we take account of commonality between expendable and reusable systems and give priority to increasing reliability. From this viewpoint, we have selected some key technologies that we will intensively develop during the current medium term (from fiscal 2003 to 2007). This paper also reports the status of key technology research on composite material main structure, and advanced avionics and flight control. Another key item is rocket propulsion, and this is described in a different paper. We aim to conduct flight demonstration for the key technologies in the next medium term starting from fiscal 2008.

1. はじめに

抜本的な安全性・信頼性向上, 運用コスト削減の面で再使用型宇宙輸送システムの実現が期待されている。平成 15 年度より開始した本研究では, これらの期待に応えるため, 飛行実証の具体案, 将来の実用化構想を含めた研究開発シナリオの策定を進めている。信頼性向上は, 再使用型システムだけでなく, 使い切り型ロケットにも共通する重要な課題であることから, 今中期計画中のひとつの柱として, 信頼性向上に寄与する技術研究を重点的に進めることとしている。

本研究では, 上述の観点から選定された三つの信頼性向上重点技術のうち, 複合材主構造技術, アビオニクス・飛行制御技術に関する研究を進めている (もう一つの重点技術は, 推進系技術)。今中期計画中に飛行実証が可能な技術レベルまで到達し, 平成 20 年度から始まる次期中期において飛行実証することを目指す。JAXA 発足前, これらの要素技術研究は, 「HOPE-X (宇宙往還技術試験機) プロジェクト」及び, 旧三機関連携事業「再使用型宇宙輸送システム研究プロジェクト」[1] の一環として行われてきたが, 新たな研究計画に沿って平成 15 年度より研究内容を再編した。

各研究テーマの今中期計画中の達成目標は以下の通りである。

(1) 研究開発シナリオ策定

飛行実証の具体案, 将来の実用化構想を含め, 今後 20 年程度までの研究開発シナリオを策定すること

(2) 複合材主構造技術研究

統計的設計解析手法による複合材構造に対する構造信頼度の定量化, 損傷許容設計技術の確立, 及び構造ヘルスマニタ技術の評価

✧ 機体の軽量化・低コスト化, 信頼性の向上に寄与

(3) アビオニクス・飛行制御技術研究

分散システムによる故障許容・高運用アビオニクス技術, 機体異常を早期に発見するヘルスマネジメント技術, アクチュエータの故障を許容する再構成制御技術, アバート (緊急時運用) の際に飛行経路をオンボードで再設定するリアルタイム誘導技術の確立

✧ 機体の生存性・信頼性の向上, 地上点検整備作業の効率化に寄与

2. 研究の概要

(1) 研究開発シナリオ策定

再使用型宇宙輸送システムに関する研究の今中期計画の方針を策定するとともに、長期的な研究開発の流れを立案した。

(2) 複合材主構造技術研究 [2, 3, 4]

本格的な研究に先行して複合材構造解析の試行を実施した。

(3) アビオニクス・飛行制御技術研究 [5-8]

分散アビオニクスシステムに関する研究開発の成果をとりまとめるとともに、機体状況等に応じて自律的にアボート（飛行中断）の要否を判断し、適切な代替飛行経路を設定可能とする誘導技術の研究に着手した。

3. 成果の概要

(1) 研究開発シナリオ策定

現在想定している技術開発の流れを図1に示す。実用システムについては、部分再使用から完全再使用へ、また、小型から大型ペイロード用へという発展シナリオをたどるのが適切であると考えている。使い切り型ロケットとの技術的共通性や想定される実用化の時期に応じて、今中期計画中の再使用型輸送システムの研究を以下のように大きく二つの項目に分けて構成することとした。

①次段階実験運用を目指した主要技術（信頼性向上重点技術）の研究

宇宙輸送システムの信頼性向上に寄与する主要技術の研究を重点的に進め、次期中期計画での飛行実証を目指す。この項目には以下の研究が該当する（詳細はそれぞれの研究を参照されたい）。

- ・総合計画・要素技術の研究
- ・再使用推進系の総合研究
- ・フライト実証の研究

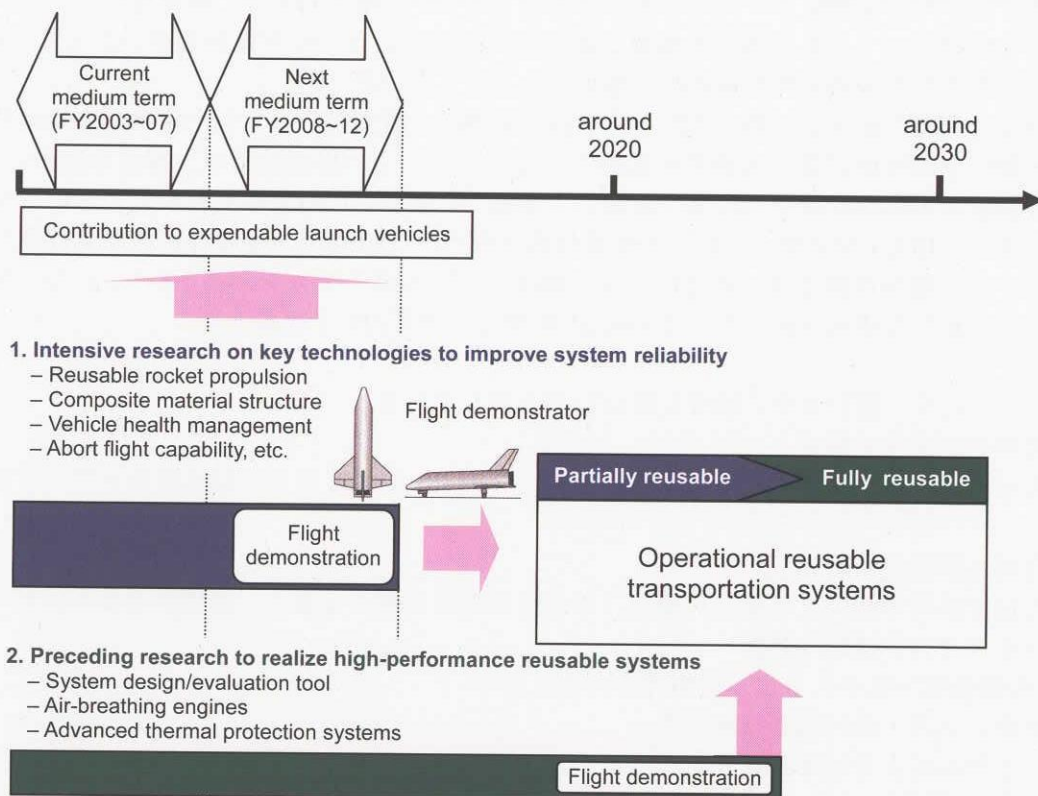


Fig. 1 Scenario toward Future Reusable Transportation Systems (under Discussion)

②高性能再使用システム実現のための先行研究

将来の再使用型輸送システム概念の絞り込みを目的として、長期的な観点から、設計・評価ツールの整備や基盤データの取得・蓄積を進める。この項目には以下の研究が該当している。

- ・システム解析の研究
- ・極超音速ターボジェットエンジンの研究開発
- ・複合エンジンの研究開発
- ・高速飛行実証計画

先行研究に関しては、今中期終了時に評価を行い、次期中期計画において主要技術開発にする再使用型輸送システム概念を二つ程度（基本案、代替案）まで絞り込むこととしている。

(2) 複合材主構造技術研究

HOPE-X プロジェクトにおいて試作された複合材構造の接着継手を対象とし、過去に取得された材料／構造試験データ及び解析結果を用いて、応力解析、損傷進展解析を実施した。得られた知見は以下の通りである。

- ・応力解析の結果、応力／歪みが高い部位と試験での破壊の起点と推定される部位とが整合することを確認
- ・損傷進展解析の結果、接着剤先端と母材との界面からの損傷進展を仮定した場合、接着膜厚が厚いほどエネルギー解放率が大きく損傷進展が発生しやすい等、試験結果を定性的に模擬できることを確認

複合材接着継手構造の応力解析の結果例を図2に示す。さらに、破壊メカニズム特定を目指し、詳細解析を実施するための破壊進展解析ソフトウェア（GENOA）を導入し、解析モデルの作成に着手した。

(3) アビオニクス・飛行制御技術研究

従来の集中制御型のアビオニクスシステムに対して、自律分散制御型のシステムには

- ・サブシステム間の故障伝播が小さく、故障時でも機能を最大限確保可能（耐故障性・生存性・信頼性向上）
- ・サブシステムの追加・変更が容易。冗長さの変更も容易（拡張性・開発効率向上）
- ・サブシステム毎の整備点検作業が可能（運用性・整備性向上）

などの長所があり、宇宙輸送システムの大幅な信頼性・運用性向上につながる事が期待されている。平成 11 年度より分散アビオニクスシステムの研究開発を行ってきており、15 年度に中間的なとりまとめを行った。

これまでに、分散アビオニクスシステムの基本仕様を設定し、それに基づいて、処理要求の厳しい HOPE-X 制御系のコア部分を模擬した仮想的なシステム（ハードウェア・ソフトウェア）を試作・評価した。その結果、分散アビオニクスシステムの成立性及びシステム構成技術の目処を得ることができている。システムの成立性を確認した試験装置の外観を図3に示す。また、民生品を多用した供試体（耐環境モデル、図4）の設計・試作・試験を通して、民生品を活用した高い演算性能・ネットワーク伝送性能を持つ

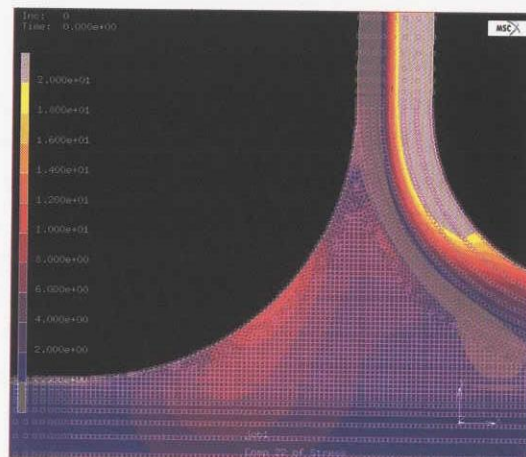


Fig. 2 Stress Analysis Result of Bonded Composite Structural Parts (Example)



Fig. 3 Feasibility Test of Autonomous Decentralized Avionics System

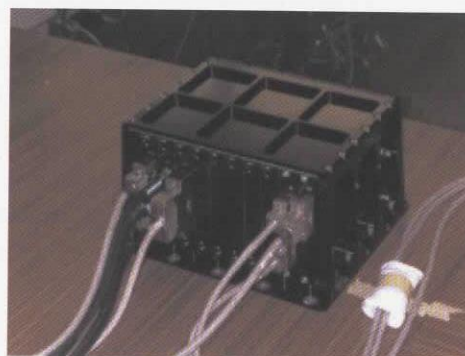


Fig. 4 Environment Test Model

搭載機器の開発手法の目処を得た。

4. まとめ

(1) 研究開発シナリオ策定

当面の研究計画を策定したことにより 15 年度の目標は達成したと考える。16 年度は、次期中期計画での実施を目指す飛行実証案の絞り込み、及び将来の実用化構想の検討を進め、研究開発シナリオの第一案を策定する予定である。

(2) 複合材主構造技術研究

平成 15 年度には HOPE-X の接着継手を対象として複合材解析の試行を行い、今後予定している解析ツール開発の指針を得ることができた。16 年度以降は、将来の宇宙輸送システムでキーとなる複合材構造要素を抽出し、これを対象として統計的解析（信頼度定量化）手法及び損傷解析手法の解析ツールの開発を行う予定である。また、構造ヘルスマニタ技術についても、技術調査や適用部位の検討を行い、技術課題を抽出する計画である。

(3) アビオニクス・飛行制御技術研究

平成 15 年度までに、将来の宇宙輸送システムに適している分散アビオニクス（ハードウェアの構成技術及びシステムソフトウェア）の技術的な目処が得られたことから、16 年度は分散アビオニクスにアプリケーションとして搭載するソフトウェアの研究を重点的に進める予定である。特に、モデルに基づく予測と観測結果の違いから故障箇所・故障モード等を推論するヘルスマネジメント技術や、さまざまな飛行条件・故障状態に対応したアバート飛行を可能にする自律飛行管理機能やリアルタイム誘導（オンボード飛行経路生成）の検討を深める計画である。

参考文献

- [1] “Ⅲ. 再使用型宇宙輸送システム研究プロジェクト”，三機関連携事業融合プロジェクト成果報告書，三機関連携・協力運営本部，平成 14 年度，pp. 771-1078.
- [2] 紙田徹，鷺谷正史，村山英晶，“再使用型宇宙輸送システムの構造・熱防護技術（解説）”，日本航空宇宙学会誌，第 51 巻，第 596 号，2003 年 9 月，pp. 239-244.
- [3] 宮田武志，鷺沢潔，紙田徹，井川寛隆，西脇巧造，浅田正一郎，新津真行，“HOPE-X 全複合材機体構造の開発における CAE の活用”，第 28 回複合材料シンポジウム，秋田，2003 年 10 月.
- [4] 下田孝幸，紙田徹，“複合材構造設計の信頼性向上のための確率論的手法の紹介（寄書）”，日本航空宇宙学会誌，第 52 巻，第 601 号，2004 年 2 月，pp. 48-50.
- [5] Morito, T., Ohno, M., Iwasaki, T., and Shimura, K., “Flexible Avionics Architecture Based on Autonomous Decentralized System for Space Transportation Systems,” 5th International Conference on Space Launchers: Mission, Control and Avionics, Madrid, Spain, Nov. 2003.
- [6] Morito, T., Ohno, M., Nakao, T., Shimura, K., and Ogasawara, K., “New Approach to Real-Time Abort Guidance for Reusable Launch Vehicle,” 5th International Conference on Space Launchers: Mission, Control and Avionics, Madrid, Spain, Nov. 2003.
- [7] Shimura, K., Yamaguchi, Y., Nakao, T., Ogasawara, K., Ohno, M., Morito, T., and Fujii, K., “Development and Evaluation of Fault-tolerant Flight Control for RLV by Mutual Compensation with Available Aerosurfaces,” 16th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, St. Petersburg, Russia, June 2004.
- [8] 永塚満，宍戸紀彦，丸山辰也，森戸俊樹，石本真二，“Receding Horizon 制御の自律的飛行経路策定への適用”，自動車技術会 2004 春季大会・学術講演会，横浜，2004 年 5 月.