

宇宙システム解析検証(宇宙輸送・再突入機のシステム挙動統合シミュレーション技術の構築)

報告書番号：R24JDG20155

利用分野：研究開発

URL：<https://www.jss.jaxa.jp/ar/j2024/27132/>

● 責任者

清水太郎, 研究開発部門第三研究ユニット

● 問い合わせ先

辻 真次郎, JAXA 研究開発部門 第三研究ユニット (tsuji.shinjiro@jaxa.jp)

● メンバ

藤本 圭一郎, 伊藤 孝行, 河原 昌平, 菊地 正子, 村田 あかり, 中尾 章吾, 辻 真次郎, 椿 直人

● 事業概要

ロケット上段や宇宙機のリエントリ安全評価(溶融残存デブリによるリスク評価)は宇宙開発の持続性確保の上で重要テーマであり,革新的将来宇宙輸送システムなどの複雑システムに対応できる総合システム設計,モデルベース設計・開発法の確立も重要である.本事業ではこの2つの重要テーマの共通課題である『効率的なシステム挙動統合シミュレーション技術開発』を進めており,リエントリ溶融解析コード LS-DARC,次期基幹ロケット等の新しい輸送システム検討や有人宇宙輸送における安全設計のための宇宙輸送システムの打上・リエントリ統合解析ツール LS-LUCA によるパラメトリックスタディ・確率論的評価のような大規模な解析を JSS 上で効率的に実施できる手法の研究・開発を実施する.

● JAXA スーパーコンピュータを使用する理由と利点

- ・ JAXA 職員であれば煩雑で時間を要する手続きなしでクイックに利用可能であること.
- ・ JAXA 内システムであるため,同じ JAXA イン트라ネット内で接続可能であり情報流出のリスクが少ないこと.
- ・ 秘匿性の高いロケット上段や宇宙機の設計情報のような機微情報をセキュアに JAXA 内で閉じて扱えること.
- ・ システム使用方法等について手厚いサポートが即座に受けられること.

● 今年度の成果

成果1:ロケット上段のリエントリ溶融解析におけるモデル高精度化の検討

・基幹ロケット上段のリエントリ溶融解析の高精度化, デブリの溶融性を向上させる設計改良(溶融促進設計)を実現するために, 実複雑形状に対する空力特性及び熱流束分布, 3次元的な伝熱, 溶融に伴う形状・熱容量変化を考慮することができる LS-DARC の機能改良に伴う数多くの検証解析, それを用いた実際のロケット上段に対する溶融解析を JSS3 の演算能力を利用することで効率的に実施することができた. 実複雑形状や形状変化を扱うことが出来る LS-DARC は, 曲率半径が小さい箇所における熱流束増加や溶融に伴う熱容量の減少が考慮できるため, これまでの解析技術では扱えなかった物体が溶融しやすくなる物理現象を評価可能である(Fig.1 および 2).

・リエントリ時の6自由度機体挙動, 熱流束レベルのプロファイルを決定する高度・速度時間変化の基礎的な把握, 突入角度を変えた時の機体を構成するコンポーネントに対する熱流束の時間変化, 総入熱量といったデブリ溶融判断に必要な多量データを得ることができた.

・事業の最終目的であるロケット上段の溶融解析高精度化や EC 低減を達成するためには, 100 個以上のコンポーネントで構成される全機形状について, リエントリ開始時の突入角度や姿勢レート等を振ったパラメトリック解析が必要であり, 市販の計算機では不可能であったが, JSS3 を活用することで1ケースあたり20時間で実施可能であることがわかり, 短期間での目標達成をすることができる見込みを得ることができた.

成果2: ロケット上段・宇宙機基礎形状に対するリエントリ溶融解析モデル定式化の改良検討

・現行のリエントリ溶融解析ツール ORSAT-J では, 複雑物体の形状を円柱, 球, 箱等の基礎形状の組み合わせで取り扱う Object-oriented モデルであり, デブリ運動を3自由度と仮定し, 空力・熱流束モデル化には半経験的な定式化で扱っている. 本テーマでは, まずはロケット上段や衛星のコンポーネント形状や質量に合わせた6ケースの円柱について, 姿勢レート3成分を1000ケース振った確率論的評価を JSS3 の演算能力を利用することで効率的に実施することができた.

・実機に対する溶融解析を通して, デブリの減速ペースに関係する抵抗係数, 総入熱量に対する形状や質量特性の影響を体系的に把握することができた.

・事業の最終目的であるリエントリ溶融解析モデル定式化の改良を達成するためには, 数十ケース以上の形状・質量特性の組み合わせに対して, 1ケースあたり1000回以上のモンテカルロ解析が必要であり, 市販の計算機では不可能であったが, JSS3 を活用することで1ケースあたり1000回のモンテカルロ解析を5時間で実施可能であることがわかり, 短期間での目標達成をすることができる見込みを得ることができた.

成果3: 宇宙輸送システムの打上・リエントリに関するシステム成立性評価の効率化

・将来輸送システムの検討のためには再使用のためのリエントリ帰還を含めたシステム成立性評価, 有人宇宙輸送への拡張性確保のための打上アポロシステムによる乗員救命の成立性評価のための複数物理分野の連成解析を数多くのシステム設計オプションについて行う必要があるが, JSS3 の演算能力を利用することで効率的なシステム成立性評価をすることができ, 設計検討イタレーションを迅速で数多く行うことができるようになった.

・基幹ロケットのリファレンス設計に対する打上・リエントリ時の空力安定性・軌道成立性に加えて, 構造成立性評価を行うことで, 主要な設計パラメータの感度評価をすることができた.

・事業の最終目的である次期基幹ロケットのシステム成立性評価を達成するためには, 数十ケース以上の機体形状・質量特性等の組み合わせに対する空力・軌道・耐熱・構造等の多領域システム成立性評価が必要であり, JSS3 の演算能力を活用することで数多くの設計オプションに対する成立性評価をすることができることを確認することができた. 現段階では1オプションに対して10分程度の解析時

間に抑えることができている。今後はさらに解析精度を必要とする亜・超音速における空力特性評価に対する高負荷な CFD 解析, 詳細形状に対する耐熱・構造成立性評価のための FEM 解析を短時間で実施できるようにする必要がある。

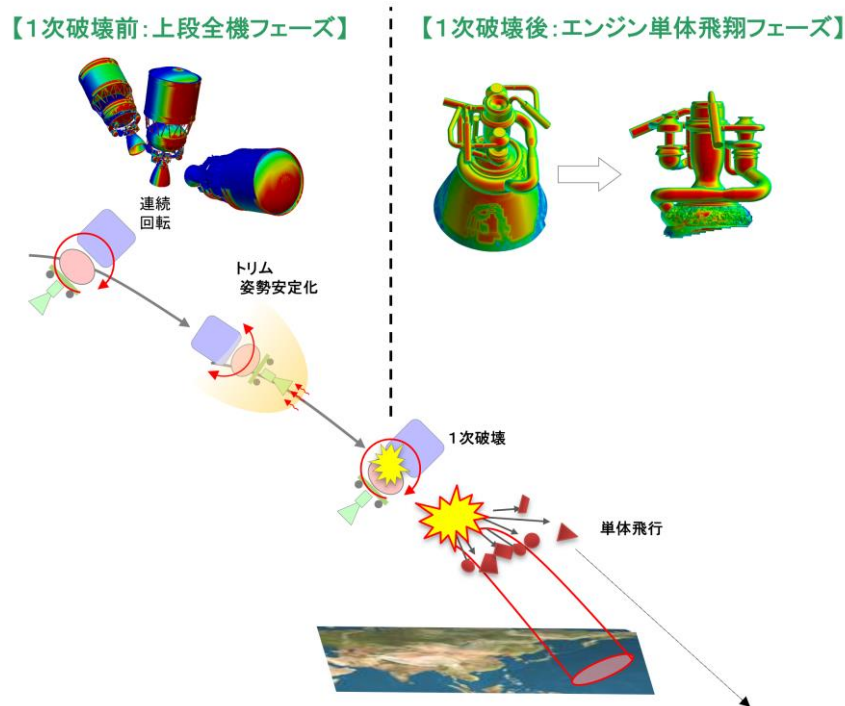


図 1: 実形状や溶融に伴う形状変化を考慮した溶融解析結果例 (ロケット上段)

● 成果の公表

-査読なし論文

1) Keiichiro Fujimoto, Hideyo Negishi, Shinjiro Tsuji, Kenichi Sato, Tsutomu Matsumoto, Takayuki Itoh, Shohei Kawahara, "COMPARISON OF RE-ENTRY SAFETY ANALYSIS TOOL LS-DARC AND ORSAT-J FOR MODEL UPDATE," 13th IAASS Conference, 2024.

2) Keiichiro Fujimoto, "DEVELOPMENT OF QUANTITATIVE CREW SAFETY ASSESSMENT METHOD BASED ON MULTI-PHYSICS SIMULATION CODE LS-LUCA," 13th IAASS Conference, 2024.

-口頭発表

3) 辻真次郎, 藤本圭一郎, 根岸秀世, "宇宙輸送・再突入機の複合物理連成ツール LS-DARC/LUCA の熱流束・空力モデルの検証-第 1 報," 4O11, 第 68 回宇宙科学技術連合講演会, 2024.

4) 藤本圭一郎, 河津要, 富田悠貴, 蜂谷友理, 内山崇, "有人宇宙輸送のための打上アボートシステムに関する 定量的安全評価モデルの構築-第 2 報," 1G18, 第 68 回宇宙科学技術連合講演会, 2024.

5) 神谷卓伸, 藤本圭一郎, 根岸秀世, "上段ロケットに対するデブリ対策の取組み," 第 11 回スペースデブリワークショップ.

● JSS 利用状況

● 計算情報

プロセス並列手法	MPI
スレッド並列手法	OpenMP
プロセス並列数	1 - 216
1 ケースあたりの経過時間	16 時間

● JSS3 利用量

総資源に占める利用割合※1 (%) : 0.08

内訳

計算資源		
計算システム名	CPU 利用量(コア・時)	資源の利用割合※2 (%)
TOKI-SORA	0.00	0.00
TOKI-ST	684,791.89	0.70
TOKI-GP	9.58	0.00
TOKI-XM	0.00	0.00
TOKI-LM	0.00	0.00
TOKI-TST	0.00	0.00
TOKI-TGP	0.00	0.00
TOKI-TLM	0.00	0.00

ファイルシステム資源		
ファイルシステム名	ストレージ割当量(GiB)	資源の利用割合※2 (%)
/home	500.06	0.34
/data 及び/data2	500.00	0.00
/ssd	36,576.67	1.96

アーカイバ資源		
アーカイバシステム名	利用量(TiB)	資源の利用割合※2 (%)
J-SPACE	4.77	0.02

※1 総資源に占める利用割合 : 3つの資源(計算,ファイルシステム,アーカイバ)の利用割合の加重平均

※2 資源の利用割合 : 対象資源一年間の総利用量に対する利用割合

● ISV 利用量

ISV ソフトウェア資源		
	利用量(時)	資源の利用割合※2 (%)
ISV ソフトウェア(合計)	0.11	0.00

※2 資源の利用割合：対象資源一年間の総利用量に対する利用割合