

2A04 S-520-RD1 飛行試験データのポストフライト解析

○松山 新吾（宇宙航空研究開発機構）

Post-flight Analysis of S-520-RD1 Flight Experiment Data
Shingo Matsuyama (JAXA)

Key Words : Hypersonic Flow, Propulsion, Transition

Abstract

This presentation describes the test cases of the workshop on post-flight analysis of S-520-RD1 flight experiment and presents examples of analyses for test cases in progress. The test cases for the workshop are issues related to CFD around hypersonic vehicles and scramjet combustion. If you are interested in participating in the workshop, please consider conducting an analysis of one of the test cases and presenting your results at the next workshop. If you have any questions about the workshop, please contact us at the following e-mail address (ws-rd1-postfight@ml.jaxa.jp).

1. はじめに

S-520-RD1は、2022年7月24日午前5時00分に内之浦宇宙空間観測所より打上げられた。観測ロケットおよび飛行試験供試体は想定軌道を飛行して、打上げから412秒後に内之浦南海海上の予定された落下円内に着水した。飛行試験供試体は打上げにより高度約168kmに達した後、降下中に最大マッハ数約5.8の極超音速で飛行した。飛行中には機体壁面への熱流束と3秒超の超音速燃焼に関するデータ（燃焼器内部の圧力分布）を無事に取得し、飛行試験は成功であった¹⁻⁷⁾。

S-520-RD1 飛行試験は日本で初めて実飛行において超音速燃焼を達成した試験であり、極超音速機の推進系、また、極超音速領域での境界層乱流遷移に関する研究にとって、これ以上ない貴重なデータである。通常、このような極超音速飛行データは欧米などの外国研究機関から入手することは難しく、日本が独自で取得したデータは徹底的に調べつくすべきである。著者のグループでは、限られた内輪の玄人研究者だけでデータを保持するのではなく、シンポジウムなどのオープンな場で議論して情報を共有するのが有益であろうと考え、ポストフライト解析のワークショップ形式のイベントを流体力学講演会／航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウムにおいて実施することを提案した⁸⁻¹²⁾。このポストフライト解析ワークショップでは飛行試験中に発生した現象（境界層遷移・超音速燃焼）に関する理解を深め、CFDなどによる評価技術を獲得することを最終的なアウトプットとしたい。また、得られた知見はワークショップ資料および学術論文などを通して、広く日本国内の研究コミュニティで共有されることを目指すものである。今回はワークショップの課題を簡単

に説明し、実施中の解析例を紹介する。

2. S-520-RD1ポストフライト解析ワークショップの課題と解析例

S-520-RD1ポストフライト解析ワークショップの課題は大まかに以下の二つである。

- ・ 飛翔体周りの CFD に関する課題（熱流束と境界層の乱流遷移の評価）
- ・ スクラムジェット燃焼に関する課題（超音速燃焼の評価）

それぞれの課題では、飛行供試体の壁面熱流束・境界層乱流遷移を正しく評価できるか、燃焼器供試体およびRJTF地上試験の超音速燃焼を正しく評価できるか、を目標とする。

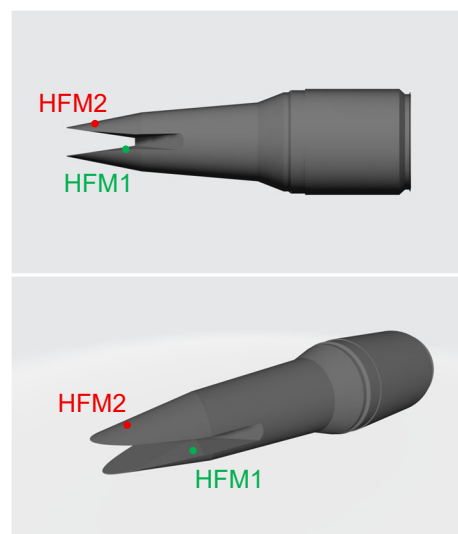


図 1 S-520-RD1飛行供試体とセンサー位置^{2,6)}

2. 1. 飛翔体周りの CFD に関する課題（熱流束と境界層の乱流遷移の評価）

図1に示すように、S-520-RD1の飛行供試体にはインレットの内側（HFM1）と外側（HFM2）に2つの熱流束センサーが設置されており、試験飛行中に熱流束データが取得されている^{2,6)}。それぞれのセンサーによって取得された熱流束の履歴を図2に示すが、層流解析（Laminar-CFD）および全域乱流を仮定した解析（Turbulent-CFD）との比較^{6,8)}により、飛行動圧が50kPaを超えたあたりから境界層の乱流遷移が生じていたと考えられる。

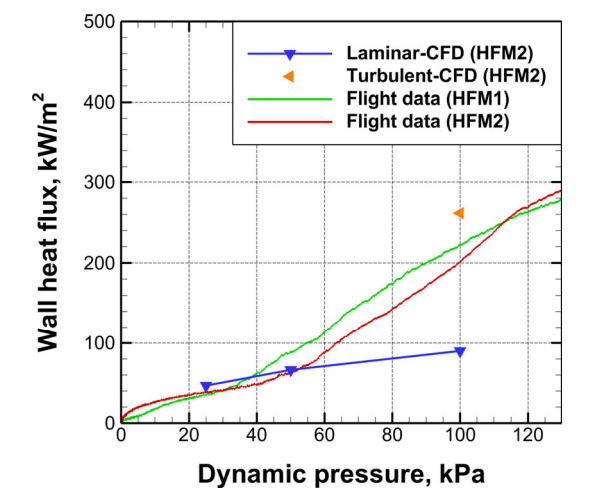


図 2 飛行試験時の熱流束データとCFDの比較⁸⁾

表1 S-520-RD1主流条件⁶⁾

動圧, kPa	速度, m/s	圧力, Pa	温度, K
25	1710.68	1127.8	229.942
50	1717.07	2170.6	222.689
100	1705.86	4224.9	213.929

そこで、飛翔体周りの CFD に関する課題として以下の3つの課題を設定する。

- 課題1a：層流条件（主流動圧25kPa）での熱流束評価
- 課題1b：乱流条件（主流動圧100kPa）での熱流束評価
- 課題1c：遷移領域（主流動圧50 kPa付近）での熱流束評価 and/or 境界層遷移の予測

3つのケースの主流条件⁶⁾を表1に示す。参加者には設定された課題について何らかの解析結果を（手法などに制限は設けず、どんなアプローチでも良いものとする）発表してもらいたい。例を挙げると、課題1aは層流を仮定したCFDにより熱流束の飛行データを再現できるか、また、熱流束の評価に影響を与える要素（格子解像度、スキーム、飛行迎角の誤差、など）

を検討した結果などを発表することが考えられる。課題1bは境界層が乱流に遷移した状態と考えられるため、全域乱流を仮定したCFDにより同様な熱流束評価を行うことが考えられる。また、DNSやLESにより乱流遷移の過程を正確に捉える試みも歓迎したい。課題1cは飛行動圧50kPa前後の条件についていくつか解析を実施し、乱流遷移モデルが正しく遷移を再現できるか、といった評価を行うことが考えられる。また、CFDによる解析だけでなく、線形安定性解析や全体安定性解析などの擾乱が発達する過程の解析も歓迎したい。ここに書いた内容はあくまでも事例として挙げたものであるので、参加者は興味の赴くままに自由な発想で課題に取り組んでいただいて構わない。

現在、飛翔体周りの CFD に関する課題について実施中の解析事例を紹介する。すでに図2に示したCFD解析の結果は層流解析、および、全域乱流を仮定したRANS（Baldwin-Lomaxモデル）により解析を行った結果⁸⁾である。これらの結果はインレット外側のセンサーHFM2について課題1a～1cの解析を網羅的に実施した形になるが、課題1a（25kPa）については層流解析で良い一致、課題1b（100kPa）はRANS解析は若干過大評価気味で層流解析はかなり過少評価、課題1cについては層流解析が飛行データに良く一致するが、50kPa前後の条件についてさらに網羅的に解析をし、遷移領域の挙動が再現できるかを評価する必要があるだろう。より詳細で網羅的な解析の結果¹¹⁾が報告されており、そちらの結果も参考にされたい。

また、課題1bの乱流条件について乱流熱流束をDNSにより評価した結果⁸⁾を紹介する。

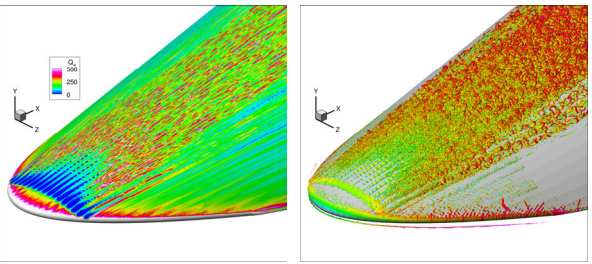


図 3 DNSによる瞬時の（左）壁面熱流束、および、（右）乱流構造⁸⁾

このDNS解析はノーズ先端の壁面上に人工的な擾乱を付加して境界層の乱流遷移を発生させたものである。瞬時の壁面熱流束分布と乱流構造（速度勾配テンソルの第二不変量の等値面をマッハ数で色付け）を可視化した結果を図3に示す。センサー位置（HFM2）での時間平均した熱流束値は220.756kW/m²であり、飛行試験データの202.661kW/m²とまずまず一致する。

しかしながら、本解析で与えた擾乱は完全に人工的なものであるため、実際の飛行試験における環境とは異なるものと考えられる。実飛行時に乱流遷移を生じさせる原因となる初期擾乱を正確に再現することがさらに必要であろう。

2. 2. スクラムジェット燃焼に関する課題（超音速燃焼の評価）

スクラムジェット燃焼に関する課題としては以下の3つの課題を設定する。

課題1a：RJTF地上試験M6S条件（水蒸気無し）での試験データ（圧力分布）を再現

課題1b：RJTF地上試験M6V条件（水蒸気あり）での試験データ（圧力分布）を再現

課題2：飛行試験ケース①～⑤での計測データ（圧力分布）を再現

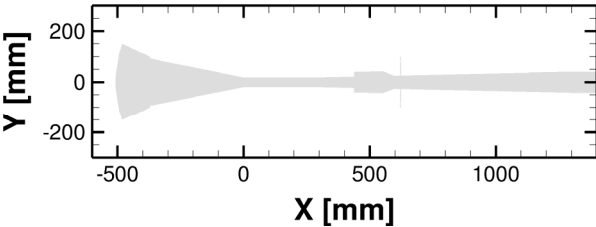


図 4 RJTF地上試験供試体^{2,9)}

課題1aと1bは図4に示すRJTF地上試験を対象とする。RJTF地上試験の気流条件⁹⁾を表2に示す。それぞれ、M6S条件、M6V条件とするが、課題1aのM6S条件は試験気流に水蒸気が含まれないケース、課題1bのM6V条件は試験気流に水蒸気が含まれるケースについてスクラムジェット燃焼器の解析を行う。いずれも非燃焼状態での計測データも提供可能であるため、燃焼なしの解析を実施してもらってもよい。燃焼あり・なしの両方を実施してもらうのが望ましいが、参加者の可能な範囲で解析を実施してもらいたい。なお、解析手法は層流、RANS、LES、DNS、いずれでも構わないが、定常解析では十分に収束した結果、非定常解析では統計的に十分な長さの時間で解析を実施した結果で議論してもらうことを期待する。解析の比較対象は壁面圧力の計測データ^{2,9)}であるが、燃焼による圧力上昇の開始位置や圧力上昇の度合い、また、非燃焼解析と燃焼解析の両方を実施した場合には燃焼あり・なしの差異が正確に再現できるか、といったことが議論のポイントであると考えている。3つ目の課題2は対象をS-520-RD1飛行試験とし飛行試験時に取得された燃焼データ（壁面圧力分布）をCFDにより再現することであるが、こちらは圧力センサーの数

が少ないこともあり、飛行試験から得られる情報が地上試験と比べると限られるため、応用編と考えている。参加者にはまず課題1aおよび1bを実施することを推奨するが、課題選定の判断は参加者にお任せしたい。

表2 RJTF地上試験気流条件⁹⁾

	M6S	M6V
速度, m/s	1707	1765
圧力, Pa	5700	5770
温度, K	262	280
H ₂ O, mol%	0.00	17.3

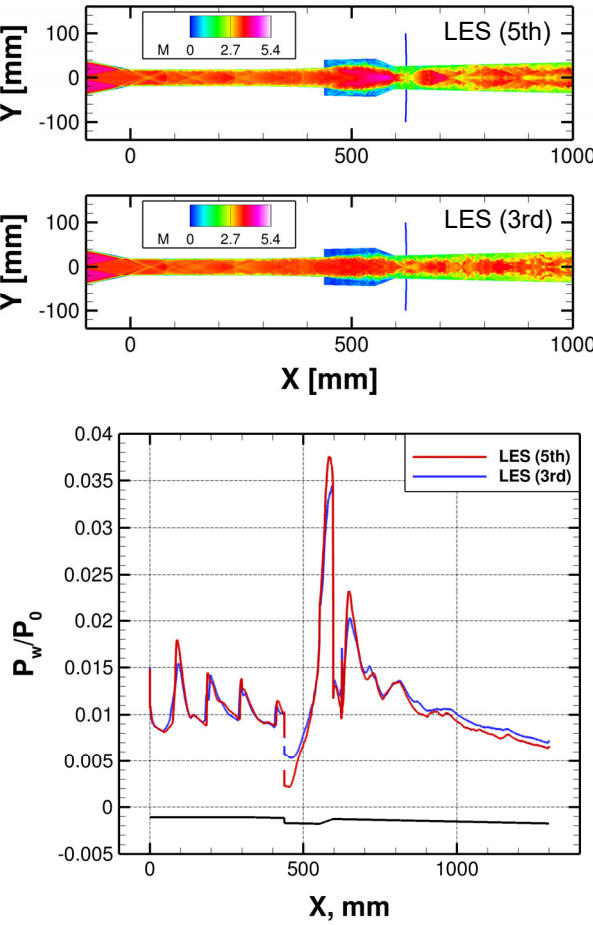


図 5 RJTF地上試験M6S条件（水蒸気無し）に対する非燃焼LES解析の結果，（上）瞬時のマッハ数分布，（下）壁面圧力の時間平均分布

課題1aに関する解析例を図5に示す。RJTF地上試験M6S条件（水蒸気無し）について非燃焼の解析をLESにより実施した結果である。空間解像度による差異をみるため、三次精度MUSCL法、および、高次精度補間（スカラーを三次精度MUSCL法、速度成分は五次精度多項式により補間）により解析を実施した。瞬時のマッハ数分布を見ると、大まかな衝撃波の構造

は一致するが、空間精度の違いにより微細な渦構造に差異があるように見える。時間平均した壁面圧力分布の結果を見ると、キャビティより上流域では衝撃波の入射による圧力ピークの位置は空間精度で差異はないが高次精度補間による解析の方がピークはシャープになっている。キャビティ内部および下流域については大まかな分布に違いはないが高次精度補間による解析結果でピークが大きくなる傾向が見られる。今後、RJTF地上試験の計測データと比較を行い、どちらの解析結果がより正確であるかを考察する予定である。また、並行して燃焼解析を実施し、燃焼あり・なしでの結果の比較も行いたい。

3. おわりに

本講演ではS-520-RD1飛行試験を対象としたポストフライト解析ワークショップの課題を説明し、実施中の解析例を紹介した。本講演を聴講して興味を持った方はぜひ解析を実施してワークショップで発表をすることを検討いただきたい。ワークショップに関する問い合わせは以下のメールアドレス

ws-rd1-postflight@ml.jaxa.jp

へご連絡ください。次回、2026年の第58回流体力学講演会／第44回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウムにて解析結果を発表したい参加者は事前に問い合わせ先アドレスへ連絡ください。ワークショップ課題の解析を実施するのは難しいが結果の議論などに参加したい、聴講したいという方も歓迎しますので、次回シンポジウムの会場にて自由にご参加ください。

謝辞

本研究では数値計算を実行するにあたって、宇宙航空研究開発機構スーパーコンピュータ「JSS3」を用いた。

参考文献

- 1) JAXA研究開発部門，観測ロケット S-520-RD1による超音速燃焼飛行試験，
<https://www.kenkai.jaxa.jp/research/pastres/supersonic.html>
- 2) 宇宙航空研究開発機構，“極超音速飛行に向けた、流体・燃焼の基盤的研究”，安全保障技術研究推進制度 令和5年度成果報告書，
https://www.mod.go.jp/atla/funding/hyouka/r05_seika/R5seika_01jaxa.pdf
- 3) 谷 香一郎，他，“S-520-RD1号機における、数値解析活用について”，第55回流体力学講演会/第41回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム論文集，JAXA-SP-23-009，pp.151-161，2024.
- 4) 長谷川 進，谷 香一郎，“極超音速飛行試験を行う上での空気力学上の諸問題について：S-520-RD1飛行試験におけるシミュレーションの活用事例”，第55回流体力学講演会/第41回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム論文集，JAXA-SP-23-009，pp.163-171，2024.
- 5) 小寺 正敏，他，“S-520-RD1飛行試験用スクラムジェット燃焼器のCFDによる性能予測”，第55回流体力学講演会/第41回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム論文集，JAXA-SP-23-009，pp.173-184，2024.
- 6) 高橋 俊，他，“極超音速流れにおける埋め込み境界法を用いた複雑形状周りの熱流束予測”，第55回流体力学講演会/第41回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム論文集，JAXA-SP-23-009，pp.185-203，2024.
- 7) 竹腰 正雄，他，“S-520-RD1号機飛行試験供試体開発段階における熱・構造・振動解析”，第55回流体力学講演会/第41回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム論文集，JAXA-SP-23-009，pp.205-219，2024.
- 8) 松山 新吾，“S-520-RD1飛行試験データのポストフライト解析ワークショップ”，第56回流体力学講演会/第42回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム論文集，JAXA-SP-24-006，pp.93-103，2025.
- 9) 高橋 政浩，“RD1飛行試験データのポストフライト解析ワークショップ：地上燃焼試験について”，第56回流体力学講演会/第42回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム論文集，JAXA-SP-24-006，pp.105-114，2025.
- 10) 小寺 正敏，他，“RD-1飛行試験データのポストフライト解析ワークショップ：燃焼器解析について”，第56回流体力学講演会/第42回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム論文集，JAXA-SP-24-006，pp.115-128，2025.
- 11) 大西 南斗，他，“汎用熱流体解析ツールscFLOWによる極超音速飛行試験機の熱流体解析”，第56回流体力学講演会/第42回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム論文集，JAXA-SP-24-006，pp.129-140，2025.
- 12) 松山 新吾，“S-520-RD1飛行試験データのポストフライト解析ワークショップ：ディスカッション”，第56回流体力学講演会/第42回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム論文集，JAXA-SP-24-006，pp.141-152，2025.