

[共同研究成果]

民間航空機開発における大規模 CFD 解析の適用

前田一郎
三菱航空機株式会社

三菱航空機株式会社では、平成 20 年度の先端的大規模計算利用サービスに始まり、平成 23 年度からは民間企業利用サービスの枠組みで、東北大学サイバーサイエンスセンターにて運用しているベクトル計算機、SX-9/SX-ACE を利用している。このスーパーコンピュータを利用することで、数値流体力学 (CFD) による空力解析シミュレーションを MRJ 開発で本格的に活用することが可能となった。これにより、空力に関連する設計リスクを最小限に抑え、飛行安全上のリスク低減を図ることができた。本稿では、この空力解析シミュレーションの内容と、MRJ 開発における適用状況を紹介する。

1. はじめに

三菱航空機株式会社では、平成 20 年度より YS-11 以来半世紀ぶりとなる国産旅客機、三菱リージョナルジェット (MRJ: 図 1) の開発を進めている。MRJ の開発では、環境負荷低減のため、同クラスの現行ジェット旅客機の燃費に対して、機体の軽量化・低抵抗化と新エンジンの搭載を含めて 2 割以上の燃費削減を目標としており、これを支える要素技術の開発に東北大学や宇宙航空研究開発機構と連携した産官学の共同研究を積極的に活用してきた。その内容は、空気力学、空力弾性、材料／構造、装備、飛行制御等の各要素技術や、多分野統合最適化／多目的設計探索の研究など、広範囲にわたっている。本稿では、東北大学との共同研究で開発した数値流体力学 (CFD) を用いた空力解析コードについて、東北大学所有の SX-9/SX-ACE による解析例と MRJ 開発における適用状況を紹介する。



図 1 三菱リージョナルジェット (MRJ)

2. MRJ 開発における CFD 解析

MRJ の開発においては、平成 20 年度より東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ及び解析ツールを利用して、空力設計、空力データ設定、空力に関連する装備品設計等に対して CFD 解析を活用してきた。本稿では、その中でも設計や現在実施中の飛行試験において特に重要となる項目に対する解析について紹介する。尚、本稿には記載した解析以外にも、本システムの利点を活用した計算も数多く実施しており、MRJ 開発に大きく貢献して頂いている。その例としては、飛行試験（主には荷重飛行試験）のデータ処理に必要な CFD データベースの構築や飛行試験対応解析等が挙げられる。前者の飛行試験データ処理に関しては膨大なケース数の解析が必要となるため、スーパーコンピュータを適用することで飛行試験データ処理を効率的に実施することが出来た。また、後者の飛行試験対応解析に関しては、スーパーコンピュータの適用により迅速により詳細な CFD 解析を実施することが可能となり、飛行試験で観察された事象の把握や理解に役立てることで飛行試験をより効率的かつ効果的に実施することが出来ている。

3. CFD 解析コード

MRJ 開発には主に東北大学の非構造格子ソルバーTAS (Tohoku University Aerodynamic Simulation) コード[1-5]を使用している。主に 3 次元の圧縮性・粘性流体に本ソルバーを適用している。図 2 に解析形状例を、図 3 に解析格子例をそれぞれ示す。

開発した解析コードは SX-ACE 向けにチューニングされており、効率の良い計算領域分割による MPI 並列化を用いて大規模並列計算を実現している。



図 2 解析形状例（巡航形態）

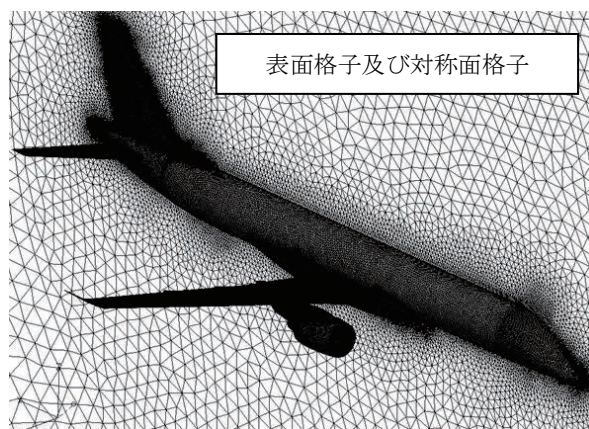


図 3 解析格子例（巡航形態）

4. 空力解析例

本章では、MRJ の開発における空力関連の設計評価・確認への解析適用例及び飛行試験に対する解析適用例を紹介する。解析例は機体表面の C_p 分布として示す（図 6 については流線）。

4.1 設計評価・確認への CFD 解析適用

4.1.1 各飛行形態

MRJ の開発においては、航空機の離陸から着陸後の静止までの一連の形態に対して CFD 解析を適用している。その中には、比較的規模の大きな解析が必要となる形態が含まれる。その適用例について図 4～6 に示す。

図 4 は着陸形態における解析例である。脚・脚扉については計算格子点数が膨大となりデータの生産性等の理由から模擬しない場合が多いが（風洞試験においては、脚・脚扉は模擬されている）、脚・脚扉の影響を把握するためにこれらを模擬した解析を実施した。

図 5 は舵面（スポイラ）操舵形態に対する解析例である。航空機には操舵面が幾つかあり、それぞれの舵面の操舵舵角にも多くのパターンがあるため形態の数が膨大となる。そのため、これまでは CFD の適用は限定的であったが、スーパーコンピュータの利用により解析が可能となった。

図 6 は着陸後に制動方法として使用されるスラスト・リバーサーに対する解析例である。スラスト・リバーサーには多数の空気吹き出し口があり、その開口方向等のパラメータが多数存在する。これらのパラメータに対して制動能力等を最適化する組み合わせを決定する必要があり、風洞試験等も実施している。その際、事前に CFD 解析によりパラメータの絞り込みを実施することで試験を効率的に実施することが出来た。また、CFD 解析により詳細に流れ場を確認することが可能となり飛行試験でのリスクの低減を図ることが出来た。



図 4 着陸形態（脚下げ状態）



図 5 舵面操舵形態

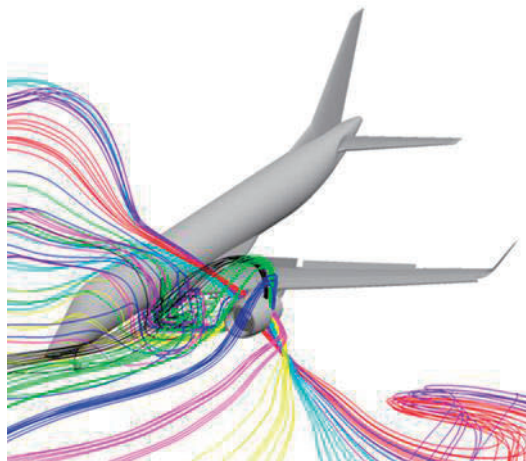


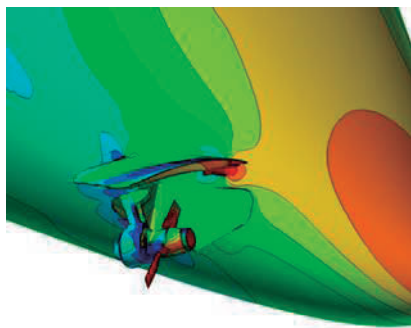
図 6 スラスト・リバーサー作動状態

4.1.2 機外装備品

航空機には機外に展開される装備品が数多く存在し、それらの多くが機体のサイズと比較して小さいため、風洞試験での評価が困難な場合がある。MRJ の開発においてはこれらの機外装備品等に対して CFD 解析を適用した（図 7, 8 参照）。

図 7 は RAT（Ram Air Turbine）に対する解析例である。通常のジェット機では、エンジンに付属する発電機により機内で必要な電力を供給しているが、エンジン故障等によりエンジンからの電力供給が途絶えた場合に RAT が展開される。RAT は風車のようにブレードを回転させることで発電し、機内で最低限必要な電力を一時的に供給する。CFD 解析はこの RAT を安全に展開するために必要な空気力データの取得に適用された（風洞試験も実施しているが、速度域が限られるため CFD 解析で補完した）。

図 8 は脚扉開状態の解析例である。通常の下脚状態（4.1.1 参照）に加えて、脚扉のリンクが故障した場合に脚扉が展開する場合（不時展開）についても解析を実施した。リンク故障は高速域についても検討する必要があるため、風洞試験では確認が難しいため CFD 解析を活用した。



CFD 解析例



実機



図 7 RAT 展開状態

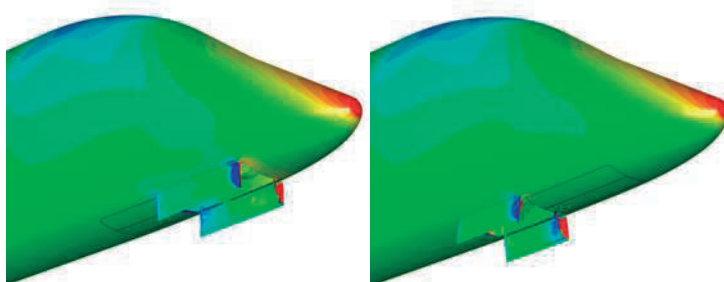


図 8 脚扉開形態（不時展開時）

4.2 飛行試験への空力解析適用

4.2.1 飛行試験計装

飛行試験においては、各飛行試験を実施するために必要な個別の計装が必要となる。それらの計装の中には機外に取り付けられるものがあり、機体の飛行特性や飛行試験計測への影響を検討する必要がある。これらの計装についても通常の機外装備品同様に風洞試験での確認が困難なものが多く、それらに対して CFD 解析を適用した。

図 9 に圧力ベルトの影響評価への適用例を示す。圧力ベルトは飛行時の荷重を計測する荷重飛行試験に必要な計装であり、機体表面圧力を計測する圧力センサが計装されている。そのため圧力ベルト自体による圧力場の変化を最小化する必要がある、CFD 解析により圧力ベルトの影響を最小化するように圧力センサ配置等を決定した。

図 10 にフラッター加振装置への適用例を示す。飛行試験においては空力弾性不安定現象であるフラッターが飛行中に発生しないこと確認する必要がある、本装置はフラッター飛行試験において強制的に主翼や尾翼を加振するための装置である。風洞試験についても実施し、全機の飛行特性等については確認しているが、主翼（ウィングレットを含む）や尾翼の局所的な空気力に対する影響を把握するため、CFD 解析を実施した。

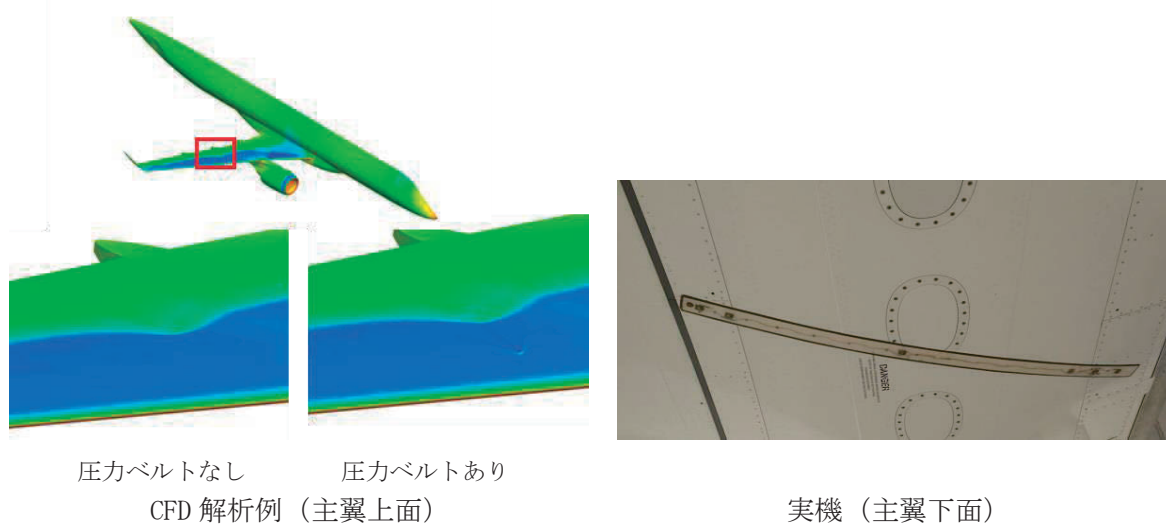


図 9 圧力ベルトの影響評価（主翼）

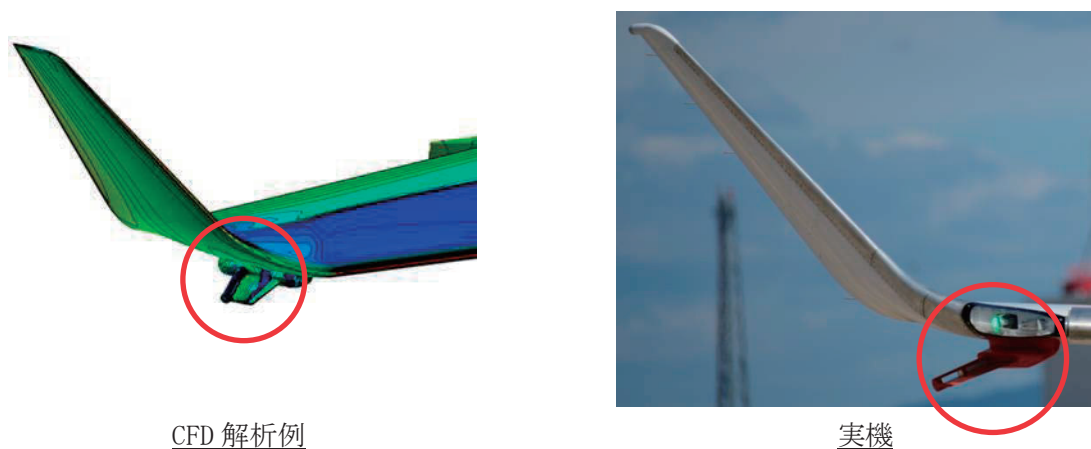


図 10 フラッター加振装置の影響評価（主翼）

4.2.2 着氷飛行試験

飛行試験においては、計測するための計装品の他に、着氷形状のような機体形状変化を模擬するための部品を使用する。航空機がある条件下を飛行した場合に、機体先端部（機首や翼前縁）付近に氷が付着する（着氷）。飛行試験では、実際にそのような条件下を飛行して着氷の状態を確認する試験（自然着氷試験）や着氷状態を模擬して安全に飛行することが出来るかを確認する試験（模擬着氷試験）を実施する必要がある。いずれの試験においても飛行安全の観点で、予め着氷時の空力特性変化を把握しておく必要があり、MRJ の開発においても風洞試験を実施している。ただし、これらの風洞試験は主には全機の空力特性把握が目的であり、局所的な空気力変化については把握が難しいため CFD 解析を適用した（図 11 参照）。しかしながら、着氷形状はその後方に大きな剥離領域を伴うため通常の CFD 解析では定量的な評価は困難である。そのため、CFD 解析結果だけでなく、風洞試験で計測された全機空力特性も考慮した上で検討に使用している。着氷形状に対する定量的な空力評価に関しては、LES や DNS 等を適用出来る可能性はあるが、航空機設計へ適用するためには今後の検討が必要である。

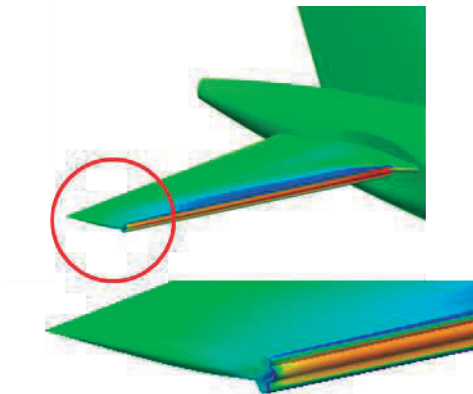


図 11 着氷の影響評価（水平尾翼）

5. おわりに

民間企業利用サービスにより、世界でもトップレベルの計算機環境を利用することで、当社の計算機環境では困難であった CFD 空力解析の本格活用を MRJ 開発で実現することができた。東北大学で開発された解析コードやスーパーコンピュータを MRJ の設計段階から積極活用することにより、空力に関連する設計リスクを最小限に抑え、飛行試験における飛行安全上のリスク低減を図ることができた。今後も引き続き飛行試験や設計確認作業のためにスーパーコンピュータを活用させて頂くとともに、飛行試験データを用いて解析コードの検証や精度向上を図る予定である。

謝辞

本研究開発は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用することで実現することができた。解析コードの開発では、東北大学の大林研究室、旧中橋研究室にご協力いただいた。また、計算機利用と解析コードのチューニングにあたっては、同センター関係各位に有益なご指導とご協力をいただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Nakahashi, K., Togashi, F., Fujita, T. and Ito, Y., “Numerical Simulations on Separation of Scaled Supersonic Experimental Airplane from Rocket Booster at Supersonic Speed,” AIAA Paper 2002-2843, June 2002.
- [2] Murayama, M. and Yamamoto, K., “Comparison Study of Drag Prediction for the 3rd CFD Drag Prediction Workshop by Structured and Unstructured Mesh Method,” AIAA Paper 2007-0258, June 2002.
- [3] Ito, Y. and Nakahashi, K., “Surface Triangulation for Polygonal Models Based on CAD Data,” *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 39, Issue 1, 2002.
- [4] Shrov, D. and Nakahashi, K., “A Boundary Recovery Algorithm for Delaunay Tetrahedral Meshing,” Proceedings of 5th International Conference on Numerical Grid Generation in Computational Fluid Simulations, Mississippi State, Mississippi, 1996, pp.229-238.
- [5] Ito, Y. and Nakahashi, K., “Improvements in the Reliability and Quality of Unstructured Hybrid Mesh Generation,” *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 45, Issue 1, May 2004, pp.79-108.