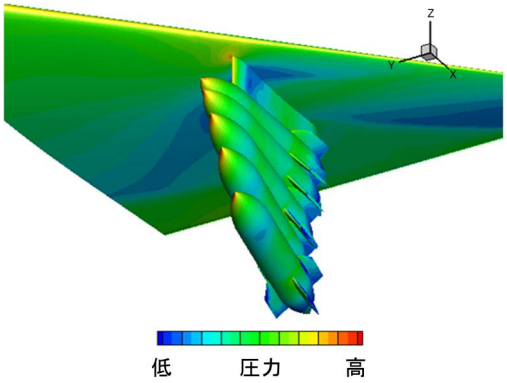
物体衝突回避検討に供する 大規模運動連成空力解析技術開発

Development of Large-scale Dynamic Fluid-Body Interaction Simulation Technology for Multi-body Collision Avoidance Study



吉本 稔 *1 Minoru Yoshimoto
石田 崇 *2 Takashi Ishida
橋本 敦 *3 Atsushi Hashimoto
青山 剛史 *4 Takashi Aoyama

航空宇宙機器においてはロケットの補助ロケット分離のように複数の物体が空気中を相対運動する事象を伴うことがしばしばあり，物体同士の衝突を回避する検討が必要である。このための運動連成空力解析は，解析技術や計算機能力の向上により風洞試験と並ぶ主要な手段となってきている。また，検討対象も複雑化してきており，大規模な非定常運動連成解析が必要とされる。そこで当社では，宇宙航空研究開発機構（以下，JAXA）が主体となり開発を進めている運動連成空力解析が可能なツール FaSTAR-Move[(1)(2)]に対し，ユーザニーズや当社の運動連成解析の経験を踏まえた共同研究による開発協力を行い，解析時間及び解析精度の観点で実用性の高いツールであることを確認の上，運用することとした。

1. はじめに

当社は流体に関連する製品を数多く取り扱っており，とりわけ空中を飛行する航空宇宙機器においては複数の物体が空気中を相対運動する事象を伴うことがしばしばある。代表的なものとしては防衛航空機からの搭載物分離やロケットからの補助ロケット分離といったものがある。また，民間機であっても飛行試験中の非常時緊急脱出が想定され，投棄する扉や脱出する乗員が機体周辺を運動することになる。空中での物体分離では基本的に重力を利用することが多いが，物体には空気力も作用しているためその大きさや向きによっては意図せず物体同士が衝突する可能性がある。防衛航空機の場合の例として図1に実際に搭載物が機体に衝突した例[(3)]を示す。

上記のような実機における物体衝突回避のため，飛行試験を行う前に風洞試験で安全性を確認するのが一般的である。風洞試験には模擬の仕方の異なる複数の方法があるが，特にドロップ風洞試験[(4)(5)]や CTS 風洞試験[(6)]と呼ばれる風洞試験では，風洞内で搭載物を空気力に応じて運動させることでその軌跡や姿勢の変化を把握している。更に，当社ではこのような風洞試験だけでなく運動連成空力解析による検討が可能なツールも整備してきた[(7)(8)]。従来では解析は風洞試験に準ずる手段としての位置づけであったが，解析技術や計算機能力の向上により，風洞試験と並ぶ主要な手段となってきている。また，風洞試験によっては支持の影響，相似則適用の限界，動的空気力の事前準備が必要であるといった原理的な制約を受ける場合があるのに対し，解析ではそれらの制約を排除できる点も位置づけ変化の要因となっている。

検討技術が向上する一方で，検討対象も複雑化してきており，例えばステルス性を重視した防

*1 総合研究所流体研究部 主席研究員
*2 宇宙航空研究開発機構航空技術部門数値解析技術研究ユニット 工博
*3 宇宙航空研究開発機構航空技術部門数値解析技術研究ユニット 主任研究開発員 工博
*4 宇宙航空研究開発機構航空技術部門数値解析技術研究ユニット ユニット長 工博

衛航空機では搭載物を機体内部に格納するため，格納庫のキャビティから搭載物を分離する必要がある。図2に示すようにキャビティ周辺は極めて非定常性の強い複雑な流れ場となっており，搭載物がその流れ場を通過する過程を予測するには，キャビティやその扉等を含む複雑な形状に対する大規模な非定常運動連成解析が必要となる。

以上のような背景の下，非定常性の強い大規模な運動連成解析を実現する方策として，JAXAが主体となり開発を進めている運動連成空力解析が可能なツール FaSTAR-Move に対し，ユーザニーズや当社の運動連成解析の経験を踏まえた共同研究による開発協力を行い，実用性の高いツールとして運用することとした[(1)(2)]。

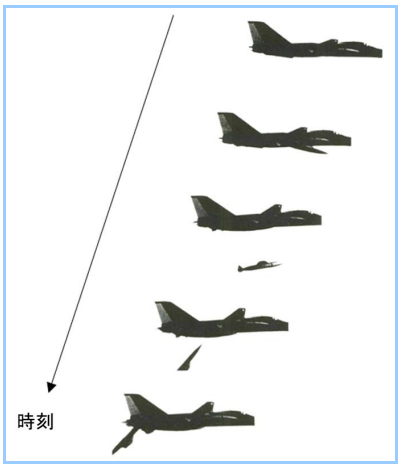


図1 航空機からの搭載物分離時における衝突事例[(3)]

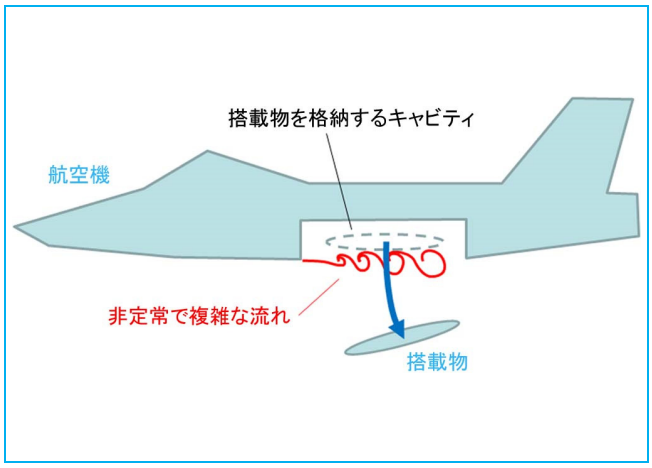


図2 キャビティからの搭載物分離

2. キー技術

大規模解析を設計検討の中で利用していく上で，解析に要する時間短縮は精度向上，コスト低減と並び最も重要な継続的改善項目の1つである。FaSTAR-Move における運動連成空力解析全体の流れを図3に示す。この中で最も時間を要している項目は繰り返しループ内にある“ホール・カット処理”の部分であり，同じループ内にある“流体計算”よりも所要時間が圧倒的に長い。従って，解析時間短縮にあたってはこの部分の効率化がキーとなる。以下では，この処理における課題と対策について述べる。

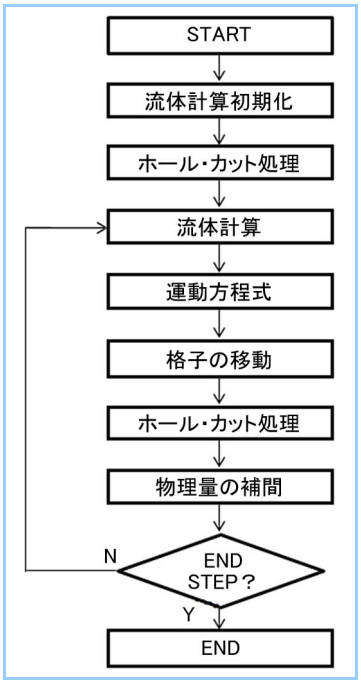


図3 解析全体のフローチャート

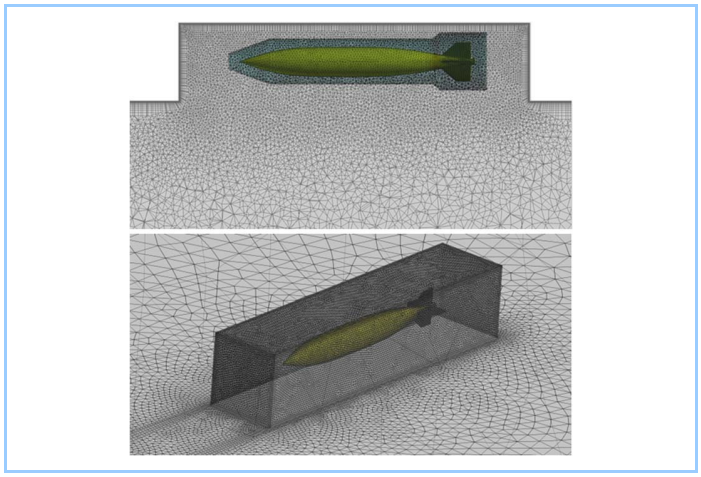


図4 キャビティ内に搭載物がある場合を想定した重合格子の例

2.1 技術課題

流体解析に一般的に用いられる格子には構造格子と非構造格子がある。前者は隣接する格子点(またはセル)が隣接するインデックスで指定できる規則的な六面体要素からなる格子であるが複雑形状の格子作成が容易ではない。一方，後者は並びに規則性のない多面体要素からなり複雑形状の格子自動生成が容易である。FaSTAR-Move では複雑形状が扱えることを目的としているため，その観点で非構造格子を採用している。また，相対運動する物体を扱うため，各物体に対応した格子を重ね合わせることで運動中の格子再生成を不要とする重合格子法を採用している。図4にキャビティ内に搭載物がある場合を想定した非構造格子の重ね合わせの例を示す。

重合格子法では，複数格子の重なりを判定し計算点／非計算点や補間点／参照点の設定・関係を定義するホール・カット処理が必要である。図5に2次元円柱格子のホール・カット処理前後の例を示す。

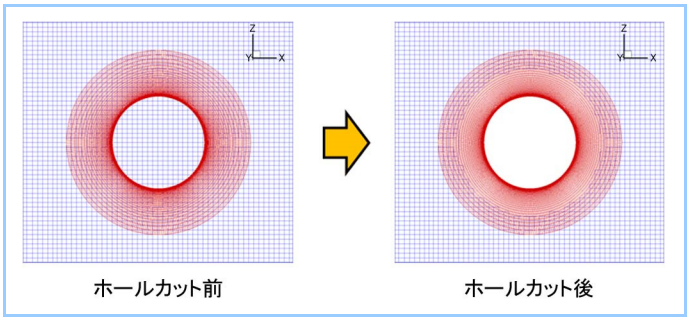


図5 ホールカット前後の2次元計算格子の例

(1) 格子検索

ホール・カット処理では重なり合う一方の格子点がもう一方の格子のどの格子点の近くにあるかを検索する必要がある。それぞれの格子点数が N 点である2つの非構造格子のホール・カットを想定した場合，格子点の並びの規則性を利用することはできないため，例えば線形探索(総当たり探索)をすると $O(N^2)$ の検索回数となる。格子点数の多い大規模解析の場合，その格子点数のべき乗で検索回数が増えることになり，かつ図3に示すように繰り返しループの中にホール・カット処理が含まれるため解析時間の観点で大きなボトルネックとなる。一般に流体計算は計算負荷が高い解析であることはよく認識されているが，重合格子法で大規模な格子を扱う場合は，この検索時間の方が圧倒的に負荷が高くなるのが特徴である。

(2) 並列計算

解析の大規模化に対応する手段として，多数の計算機を使い超並列計算とするのが最近の一般的な方法であり，FaSTAR-Move もそれに対応している。ただし，そこで求められる並列化に伴う性能向上は単に並列数に対し計算速度が単調増加するというだけではなく，効率が落ちることなく比例に近い速度の伸びが必要とされる。従って，計算の大部分を占めるホール・カット処理においてこの並列化効率も極めて重要となる。

2.2 対策

(1) 格子検索

FaSTAR-Move では，格子検索の効率化手法として，二分木を応用したデータ構造である Alternating Digital Tree[9] (以下，ADT)を採用している。ADT について概略的に多少厳密性を犠牲にして述べると，以下のようになる。格子点をその座標値の大小関係に基づきトーナメント表の節に対応付けたものを ADT と呼ぶ。1つの格子点が別の格子のどの格子点の近くにあるかを検索するような場合，座標値の大小関係比較に基づき ADT をトーナメント試合とは逆の順序で遡り探索するという方法をとる。従って，重なり合う2つの格子のそれぞれの格子点数をN点とすると，ADT を用いた検索では最も理想的な場合N個のトーナメントをN回実施することに相当するため，$O(N \cdot \log_2 N)$ の検索回数となる。これは線形探索に比べ $N/\log_2 N$ 分の1の回数

であることを意味し，例えば N＝1000 とすると約 1/100 となる。実際は ADT が理想に近く構成されるとは限らないためこの単純な評価通りにはならないが，例えば後述の検証計算で用いた重合格子のホール・カット時間は図6に示す通り約 1/20 となっており，実績として大幅な時間短縮が達成できている。

(2) 並列計算

FaSTAR-Move ではホール・カット処理の並列化として多様な並列環境に対応できるよう MPI（プロセス並列）と OpenMP（スレッド並列）を組み合わせたハイブリッド並列を採用している。図7に後述の検証計算で用いた重合格子のホール・カット時間について両並列手法を様々に組み合わせてプロットしている。本図より，解析規模に応じて並列数を増すことで大幅な性能低下を伴わず大規模解析に対応できることが分かる。

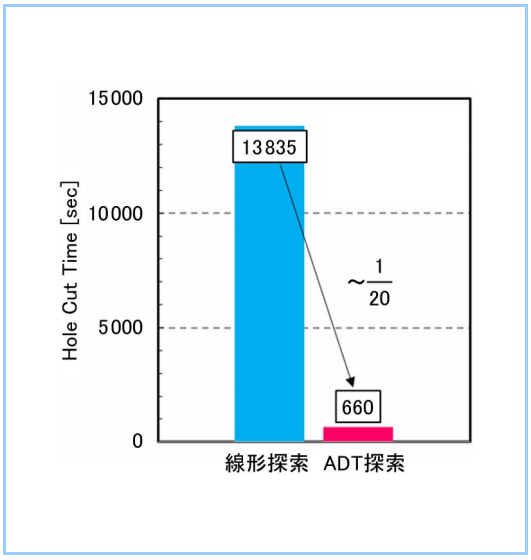


図6 線形探索と ADT 探索でのホール・カット処理時間比較例

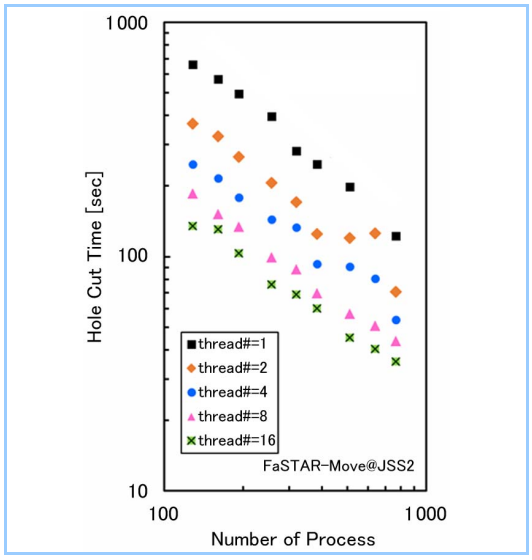


図7 ホール・カット処理時間のハイブリッド並列性能

3. 精度検証

最後にツールとしての精度検証結果を述べる。ここでは，外部搭載物の分離軌跡解析に広く用いられている CTS 風洞試験結果[10]との比較により，FaSTAR-Move による解析結果の妥当性を評価する。

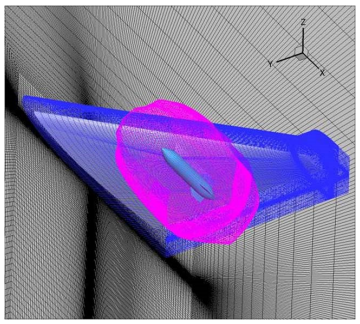


図8 検証解析の計算格子概略図

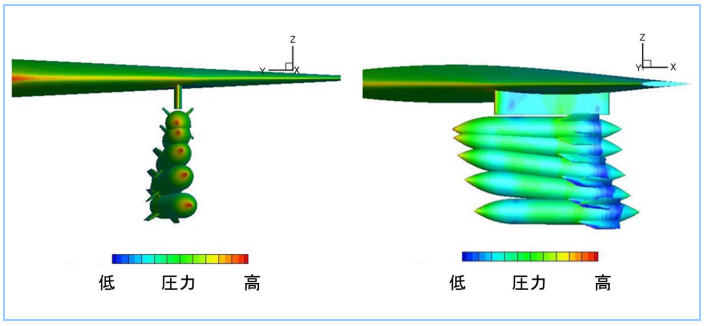


図9 検証解析結果表面圧力分布

図8に解析対象の計算格子概略図，図9に解析結果における複数時間ステップの表面圧力分布図を示す。本解析では結果として得られる空気力だけでなく CTS 風洞試験と同じ外力も模擬した解析となっており，重力及び分離初期に下方向への射出力と頭上げ方向のモーメントが働いている。図9では分離初期の外力が支配的な運動（上から1番目から3番目）とその後の空気力により頭上げから水平に回復する運動（上から4番目から5番目）が捉えられており，定性的に妥当な運動をしていることが分かる。また，定量比較として図 10 に変位，姿勢角，速度，角速度の時間

履歴を示す。本図からは，定量的にも風洞試験結果とよく一致している運動軌跡が得られており，FaSTAR-Move で適切に運動連成空力解析ができていることが分かる。

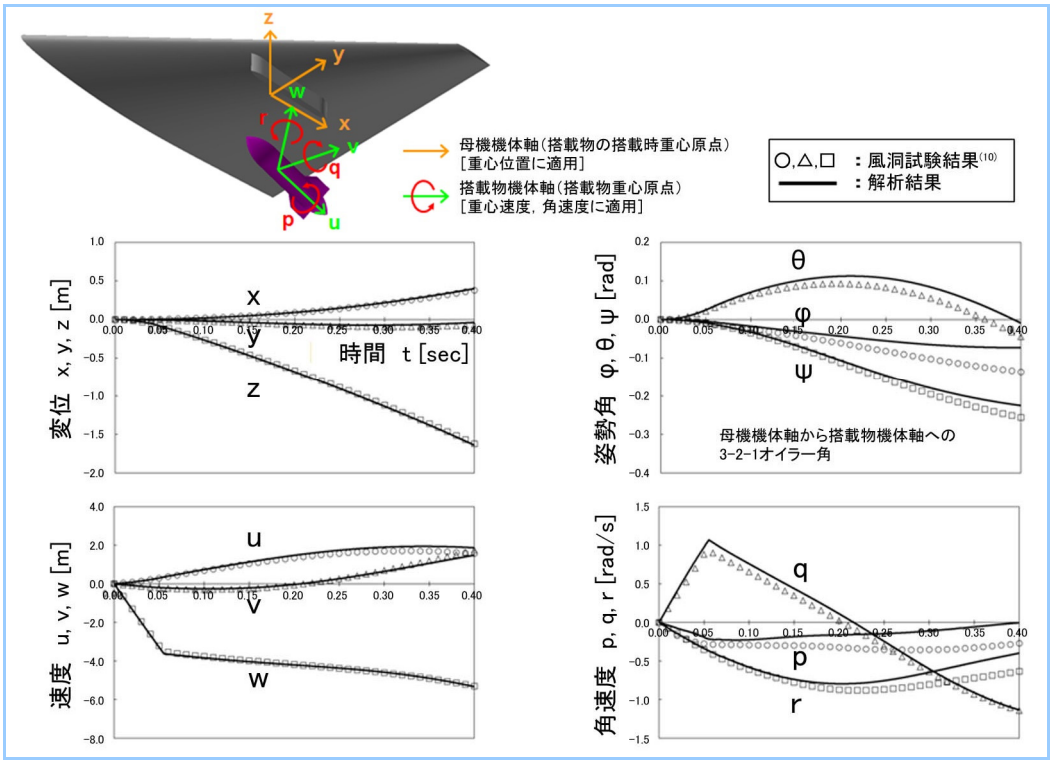


図 10 検証解析結果定量値の時間履歴

4. まとめ

航空宇宙機器を主たる対象とした物体衝突回避検討において，解析の果たす役割は風洞試験に準ずるものから同等の重要度を持つものに変化しており，求められる解析の複雑さや規模も増してきている。そのような背景の下，JAXA との共同研究を経て重合格子法による運動連成空力解析ができる FaSTAR-Move を実用性の高いツールとして運用することとした。

FaSTAR-Move は，計算に最も時間を要するホール・カット処理に対し，キー技術として高速検索手法 ADT 及びハイブリッド並列を採用することで，現在主流となっている超並列計算に対応した仕様とした。また，風洞試験結果により解析の妥当性を検証し，精度の観点でも有効であることを確認した。

今後は，より実践的な課題に取り組み，必要に応じて事業に適した改良も継続すると共に，航空宇宙以外の事業にも適用範囲を広げていく。

参考文献

(1) 上島啓司ほか，移動・変形を伴う物体周りの解析に対応したFaSTAR-Moveの開発，第49回流体力学講演会／第 35 回航空宇宙数値シミュレーションシンポジウム講演集 1D11 (2017)
(2) 上島啓司ほか，FaSTAR-Moveの実用化に向けた機能向上，第55回飛行機シンポジウム講演集 1D01 (2017)
(3) Arnold, R. J. et al., Store Separation Flight Testing, AGARD-AG-300 Volume 5
(4) 杉山勝昌ほか，航空機の外部搭載物投下風洞試験，三菱重工技報 Vol.20, No.1 (1983) p.1～5
(5) 杉田親美ほか，XF-2 の高速投下投棄試験，第 35 回飛行機シンポジウム講演集 1A3 (1997)
(6) 才上隆ほか，XF-2 の CTS 試験，第 35 回飛行機シンポジウム講演集1A4 (1997)
(7) 吉本稔ほか，外部搭載物に関する投下・投棄シミュレーションツールの開発，第 41 回飛行機シンポジウム講演集 1D5 (2003)
(8) 吉本稔ほか，直交格子 CFD による外部搭載物の分離シミュレーション，第 42 回飛行機シンポジウム講演集 2A11 (2004)
(9) Bonet, J. et al., An Alternating Aigital Tree (ADT) Algorithm for 3D Geometric Searching and Intersection Problems, International Journal for Numerical Methods in Engineering., Vol. 31, p. 1-17
(10) Fox, J. H., Generic Wing, Pylon, and Moving Finned Store, NATO RTO-TR-26, Verification and Validation Data for Computational Unsteady Aerodynamics