

CFD 共通基盤プログラム UPACS の開発 Development of Common CFD Platform UPACS

山本一臣, 高木亮治, 山根 敬, 榎本俊治,
山崎裕之, 牧田光正, 岩宮敏幸
航空宇宙技術研究所, 〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1
E-mail: upacs@nal.go.jp

Kazuomi YAMAMOTO, Ryoji TAKAKI, Takashi YAMANE, Shunji ENOMOTO,
Hiroyuki YAMAZAKI, Mitsumasa MAKIDA, Toshiyuki IWAMIYA
National Aerospace Laboratory, 7-44-1 Jindaiji-Higashi, Chofu, Tokyo 182-8522, JAPAN

UPACS, Unified Platform for Aerospace Computational Simulation, is a common CFD platform program developed at National Aerospace Laboratory since 1998. The project to develop UPACS aims not only to overcome the increasing difficulty in recent CFD code programming on parallel computers for aerospace applications which includes complex geometry problems and coupling with different types of simulations such as heat conduction in materials and structure analysis, but also to accelerate the development of CFD technology by sharing a common base code among research scientists and engineers. Currently the first version of UPACS for compressible flows with multi-block structured grids is complete and further improvements are planned and being carried out.

1. はじめに

計算流体力学 (CFD) の計算法と、並列計算機の進歩により、高い計算精度と信頼性が要求される航空宇宙分野でも複雑な非定常流や化学反応流などの大規模計算、航空機、宇宙往還機やエンジンの複雑形状についての流れ解析、構造や伝熱との連成解析や、設計の最適化などが可能となってきた。

しかしながら、このような複雑な物理現象のモデル化とともに大規模な並列計算を行うためには、プログラムのデータ構造やアルゴリズムの複雑化は避けられず、これまで適用分野ごとに開発が進められてきたプログラムの単純な拡張では発展に限界が見えてきている。したがって開発の効率化を図るためには、CFD 基盤技術の共有化や標準化を進め、それらをシステムとして整備する必要がある、基盤となる技術の汎用化、拡張性のあるシステム化、データ形式の標準化などが課題となる。

たとえば、並列計算への対応として、太田⁽¹⁾は C++を用いたオブジェクト指向によるフレームワークを提案しており、また、ドイツ航空宇宙センター (DLR) の Engel ら⁽²⁾は、ターボ機械流れを対象とした並列計算コード TRACE を開発している。これらを参考に、航空宇宙技術研究所では 1998 年度より、CFD 共通基盤プログラム UPACS (Unified Platform for Aerospace Computational Simulation) を開発するプロジェクトを進めてきており⁽³⁾⁻⁽⁷⁾、これを土台として、より複雑な解析を実現可能にするとともに、系統的な CFD の検証作業や、シミュレーション技術の共有化を狙っている。

これまでの進展により、複雑形状まわりの圧縮性完全気体

流れの並列計算を行えるプログラム UPACS ver.1.0 を整備し、2000 年 10 月より条件付で所外にも無償配布している。

今回の発表では、UPACS プログラムの基本設計の特徴、現在の解析レベル、および現在進められている拡張と今後の予定について紹介する。

2. UPACS の特徴

UPACS は多数の研究者・専門家が協力して開発を進められるように、つぎのような基本設計を行った。

(1) 並列計算とソルバーの分離

並列計算法には CFD 計算の考え方に適用しやすい空間領域分割法を採用した。Fig.1 のように並列計算のデータ通信部は、ソルバーの詳細に立ち入る必要が無いので、それぞれを分離することができ、独立に拡張可能になるという利点を持つ。さらに、Fig.2 のように、伝熱解析ソルバーなど異なるソルバーをブロックごとに切り替えることで、複雑な連成計算にも対応可能になる。また、並列処理には標準的になりつつある MPI⁽⁸⁾ を利用し、移植性 (ポータビリティ) を持たせている。

(2) マルチブロック構造格子法

複雑形状への対応に関しては、まず Fig.3 のようなマルチブロック構造格子法を採用した。非構造格子法の方が形状適合性は高いが、計算精度や信頼性の点では構造格子を組み合わせて用いるマルチブロック法の方が有利なため、非構造格子法ソルバーは、後の拡張において導入することにした。

マルチブロック構造格子は Fig.3(a) のようにブロックどうしの接続に特異性 (非構造型) を持たせることにより、ゆがみの大きな形状や、複雑形状への適応性を高めることができ

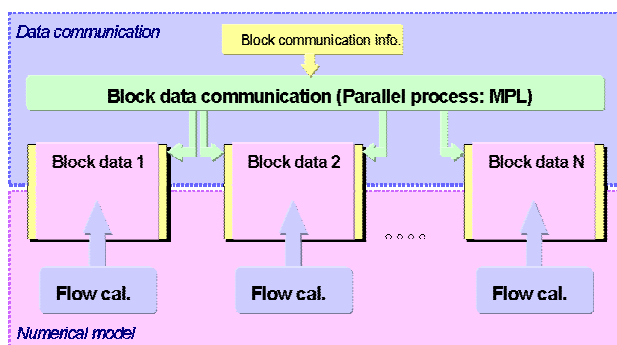


Fig. 1 Zonal approach for parallel computation

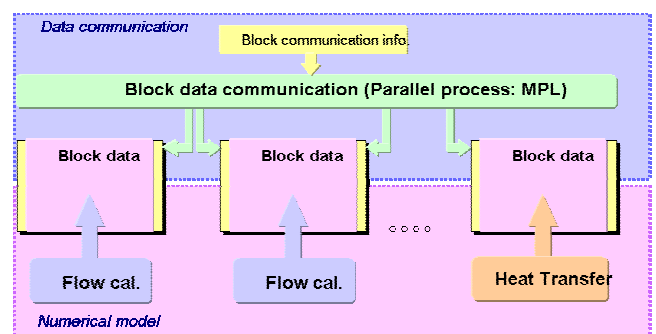
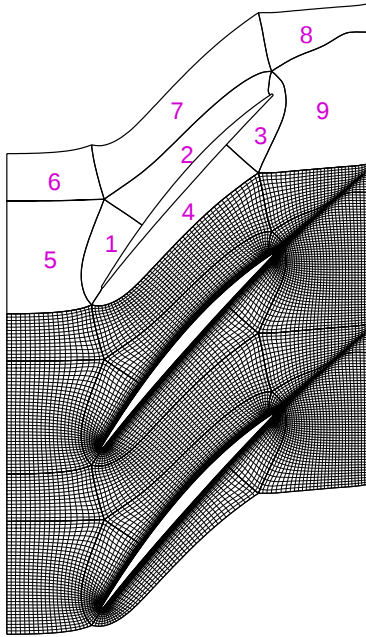
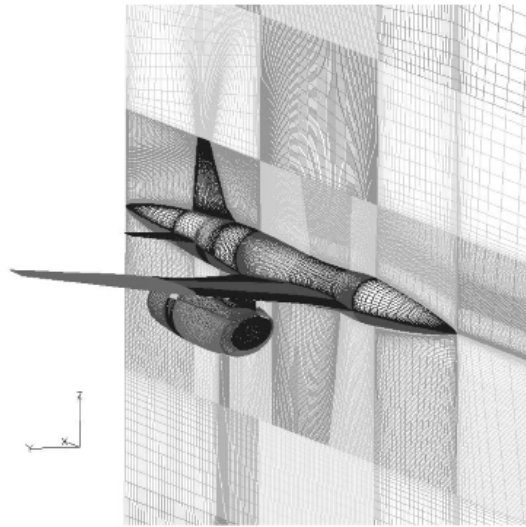


Fig.2 Solver coupling for multi-physics problem (under development)



(a) Grid around a compressor cascade
Fig.3 Multi-block grid examples



(b) Grid around NAL experimental SST

る。ブロック接続に関する情報を手作業で準備することは、ブロック数が 10 個以上になれば、ほぼ不可能であり、格子生成プログラムに依存することになるが、標準的なフォーマットが無い場合、格子データから直接に接続情報を調べる前処理プログラム createConnect3d を作成した。現在の計算手順では、ブロック数は 1000 個程度までを想定している。

(3) プログラムの階層構造

上記のような概念を実際のプログラムで実現するためには、Fig.4 のように基本構造を少なくとも 3 階層にする必要がある。上層は、初期化や繰返し計算を制御するメインプログラムであり、一般の CFD のプログラムと特に変わりはないが、それより下の中間層は、ブロック間のデータ通信やブロックの管理を行うマルチブロック層、下層が CFD 等ソルバーの計算を行い、ブロック内部のデータを変更するシングルブロック層になる。

UPACS では、データもこれにあわせた階層性を持たせており、中間のマルチブロック層のプログラムをソルバーの開発者が一種のライブラリのように、ブラックボックスとして扱うことが可能になるようなプログラミングをしている (Fig.5)。下層のシングルブロック層では、1 ブロックの計算を行うため、従来と同様の単純な CFD のプログラミングになる。

(4) カプセル化

開発者が並行して作業を進め、効率の良い拡張を可能にするため、上記のような階層構造に加え、オブジェクト指向技術の一つであるカプセル化の概念を積極的に利用した。カプセル化であれば、Fortran90 の module を用いることでも可能であるため、これまでの Fortran77 のプログラムからの移行を考慮して、言語には Fortran90 を用いている。

カプセル化により、Fig.4 の中間層と下層は完全に独立して開発することが可能になっている。また、ソルバーにおいても、Flux の計算、境界条件の計算、時間積分の計算など、概念的に分けることが可能な部分も極力独立した拡張が可能ないように module で分離している。

(5) パラメータ管理モジュール

大きな汎用的プログラムになると、パラメータの数が非常に多くなり管理が難しくなる。しかも、ソルバーに拡張が行

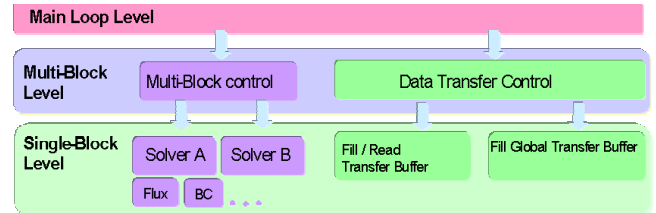


Fig.4 Hierarchical Structure of UPACS

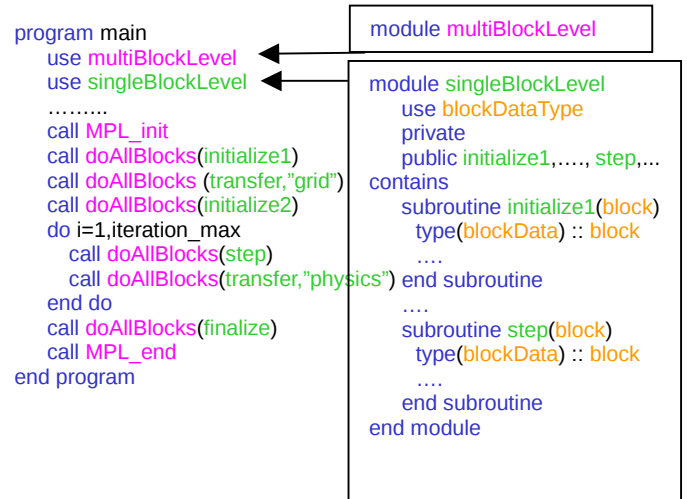


Fig.5 Structure of source program

われれば、必要なパラメータも次第に増える上、当然ソルバーが違えばパラメータは異なる。このような状況に対処するために、パラメータの管理もカプセル化し、専門に行うデータベース・モジュールを作成した。

現状ではすべてのパラメータはタグによって一様に管理され、タグによる呼び出しによって、プログラム内部で取得される。したがって、新たなパラメータの追加はプログラムの必要な箇所において局所的に行うことができ、拡張性を損なうことがない。また、パラメータの依存関係などの管理は実際には UPACS のプログラムとは別に作成するパラメータ

定義ファイルによって行われ、この定義ファイルを読み込む、GUI ツール pdbEditor によってパラメータの入力を支援している。

3. CFD ソルバーの現状

現在、UPACS ver1.0 として整備したプログラムでは、完全気体の圧縮性粘性流れを計算できるようにソルバーを作成した。セルセンター法を用いた有限体積法によって離散化を行い、対流項 Flux には、MUSCL 法を用いて高精度化した Roe スキームと AUSMDV スキームを利用できる。拡散項には通常の 2 次精度中心差分を用いており、時間積分にはルンゲクッタ法による陽解法と MFGS 法⁽⁹⁾による陰解法を、乱流モデルには Baldwin-Lomax の代数モデルと、Spalart-Allmaras の 1 方程式モデルを導入している。

Fig.6, Fig.7 に計算例を示す。Fig.6 は航技研の超音速実験機のまわりの流れを 105 ブロックを用いて計算した例⁽⁴⁾であり、静圧分布を示している。現在、実験機の開発のために、飛行実験の事前評価、機体構造の変形予測などを目的として、計算が進められている。また、Fig.7 は、航技研の CFD ワークショップの課題として、翼型失速角予測のシミュレーションを行ったときの計算例⁽⁶⁾⁽⁷⁾である。層流はく離泡を伴う薄翼のケース以外は、比較的良く実験と合う結果を得ることができ、UPACS の信頼性の確認を行うことができた。今後、適用範囲の拡大とともに、このような信頼性確保のための検証作業を順次進めていく予定である。

4. 今後の開発予定とソースプログラムの公開

現在、次のような改良、拡張作業を進めており、2000 年度内に完了する予定である。

- ・ 定常・非定常ターボ機械流れ
- ・ 対流項計算スキームの追加
- ・ 重合格子法
- ・ 異種ソルバー（熱伝導解析）との連成
- ・ ベクトル性能、並列性能の評価・改良

また、現在すでに着手しているものも含めて、今後数年内に行う拡張作業として計画されているものは、

- ・ 乱流モデルの追加（2 方程式乱流モデル、LES）
- ・ 非構造格子法
- ・ 化学反応流、燃焼流
- ・ 低マッハ数流れ
- ・ Adjoint 法による最適化問題への適用
- ・ 構造解析との連成
- ・ 格子生成プログラムの追加

また、UPACS の開発では、共通的な基盤コードを核として系統だった CFD コードの検証や、ノウハウの蓄積を効率的に実現できるようにすることを目標の一つとしている。そのために、航技研内部のみならず、大学や民間企業などで広く利用してもらい、その結果を反映させて、信頼性と利用しやすさを高めていきたいと考えている。そこで、ユーザー会という形式を取り、会員には学術的目的の範囲で無償で利用してもらえるようにしている。ユーザー会については <http://www.nal.go.jp/fluid/jpn/upacs/index.html> を参照されるか、upacs@nal.go.jp に問い合わせいただきたい。

参考文献

- (1) 太田高志, "並列流体計算のためのオブジェクト指向フレームワーク," 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム'98 論文集、航技研特別資料 SP-41, 1999. 2
- (2) Engel, K., et. al., "Numerical Investigation of the Rotor-Stator

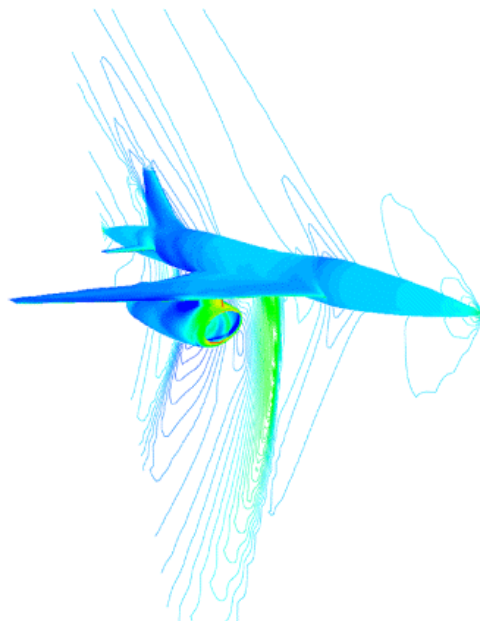


Fig. 6 Static pressure around NAL experimental SST

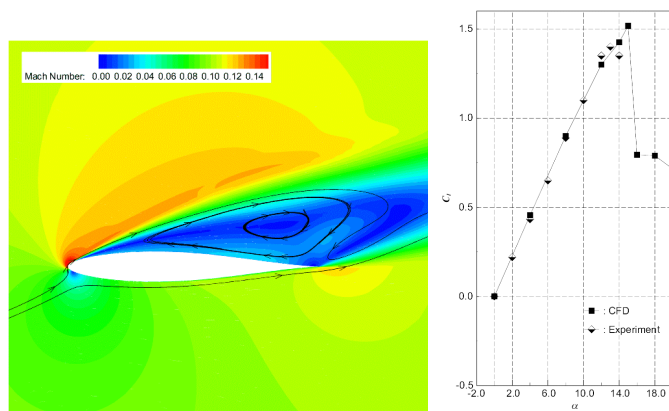


Fig.7 Simulation of stall characteristics of airfoils (NACA631-012)

Interaction in a Transonic Compressor Stage," AIAA Paper 94-2834, 1994. 6

- (3) 山本一臣, 他, "並列計算プラットフォーム UPACS について," 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム'99 論文集、航技研特別資料 SP-44, pp351-356, 1999. 12
- (4) Enomoto, S. "A Structured Grid Method in Simulating Flow around Supersonic Transports," Proceedings of 2nd SST-CFD Workshop, 2000
- (5) 山根 敬, 他, "CFD コード共通化プロジェクト UPACS の現状航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2000 論文集, 2000. 12 発刊予定
- (6) 廣瀬直樹, 他, "CFD ワークショップ課題募集: CFD は翼型失速角を予測できるか?" 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム'99 論文集、航技研特別資料 SP-44, pp41-45, 1999. 12
- (7) 高木亮治, 他, "UPACS を用いた 2 次元翼型失速特性の数値シミュレーション," 第 32 回流体力学講演会講演集, pp235-238, 2000. 10
- (8) "The Message Passing Interface (MPI) standard", <http://www-unix.mcs.anl.gov/mpi/index.html>
- (9) 嶋英志, "構造/非構造格子 CFD のための簡単な陰解法," 第 29 回流体力学講演会講演集, pp325-328, 1997. 9