

# UPACS の重合格子対応方法と適用例

牧田光正、高木亮治（航技研）

## Implementation of Overset Grid Method in UPACS and its Application

by

Mitsumasa Makida, Ryouji Takaki (NAL)

### ABSTRACT

In the UPACS project, which aims to be a common CFD platform, development of generalized methods for application to complicated geometries is one of the main objectives, and thus far, multi-block structured grid method is adopted. But for some application cases, such as (1) with more complicated geometry, (2) with moving or deforming boundaries, and (3) parametric study with changing geometries, the multi-block method is not sufficient enough. To solve these cases, we modified the UPACS to also supports overset connection, at which calculation grids can overlap each other. In this modification, considering extension of UPACS in the future, we designed not to induce drastic change in the main part of the UPACS. The procedure to make interpolation index information on overset connections is separated from main solver of the UPACS, and prepared as a preprocessing tool. After setting overset connections in boundary conditions, this tool makes interpolation information on these connections. A statistical checking tool, which is also prepared in this study, checks this information, and if necessary, that is corrected in detail by using tuning methods, including a GUI tool. Repeating this procedure, optimized index information for the overset connections is generated. Then according to this information, overset connections are treated as one of the boundary conditions in the calculation procedure, without paying specific attention for the overset connection. Some examples are shown, applied for a parametric study with changing object angles, a model of the film-cooling hole on a turbine blade, and an overall plane model ONERA-M5.

### 1. はじめに

CFD コードの共通化プロジェクトである UPACS (Unified Platform for Aerospace Computational Simulation)においては、共通的な基盤コード（プラットフォーム）を確立すると共に複雑形状への汎用性を高めることも課題の1つとしており、その手段としてマルチブロック構造格子を採用している<sup>(1)-(4)</sup>。しかしながら、計算対象によってはマルチブロックでは対処しきれない場合も生じ、それを補う手段として Steger ら<sup>(5)</sup>によって提案された重合格子機能の導入が検討されてきた。一般的にも CFD における複雑形状への適用の必要性は高く、重合格子を用いた計算例も数多く存在する。当研究所でもいくつかの成果をあげており<sup>(6)-(7)</sup>、そのうちの1つ「NAVI3D」を基にして UPACS に重合格子機能を組み込む試みが行われた<sup>(8)</sup>。しかし、この段階では物体周りの格子と背景格子との間みの比較的簡単な重合格子状況が想定されていたため、機能的な制限が多かった。その後 UPACS のソルバーの機能拡張が行われ、計算対象も多様化してくる中で、より汎用的な重合格子機能が求められるようになってきた。

そのため本研究では、UPACS において重合格子を使用する際の簡便性・実用性に重点を置きつつ、格子生成に有る程度の自由度を持たせられるように機能拡張を行った。その際に UPACS 本体の今後の拡張性を鑑みて、本体の変更を最小限に抑える工夫を行った。ここでは、UPACS にお

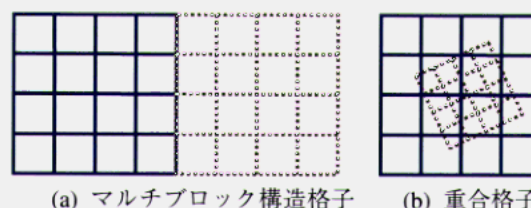


Fig. 1 マルチブロック構造格子と、重合格子の比較

る重合格子機能の特徴と、実際の作業過程、及び幾つかの適用例を紹介する。

### 2. 重合格子対応機能の実装方法

UPACS においては複雑形状の計算対象を扱う手段として、計算精度と格子生成の容易さを両立させることを狙い、マルチブロック構造格子(Fig.1 (a))を用いている。これに比べて、重合格子(Fig.1 (b))を用いた場合には格子ブロック間での値の受け渡しの過程で空間補間が行われるため、計算精度をある程度犠牲にせざるを得ない。それでも以下のような計算対象を扱う場合には、敢えて重合格子を用いる有用性があると考えられる。

- (1) 形状が複雑で、マルチブロックのみによっては格子生成が困難な場合。
- (2) 物体の配置が変化、若しくは変形する場合。

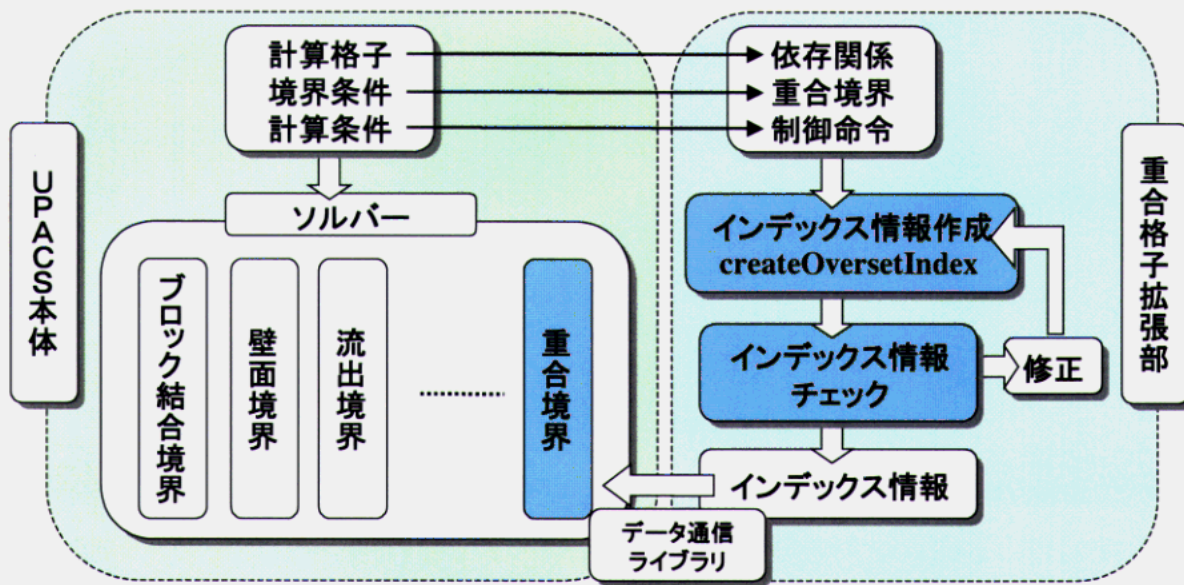


Fig. 2 UPACS におけるソルバー本体と重合格子拡張部分の関係

(3) 形状の一部を変更しつつ、パラメトリックスタディを行う場合。

このため、UPACS を重合格子へ対応させることとしたが、あくまでもマルチブロック法を補完する為の機能として組み込み、ソルバー本体の中では境界条件モジュールの1つとして扱い、他のモジュールへの影響を最小限に抑える方針で拡張を行った。

具体的には、格子群から補間先のインデックスと補間係数情報（以降、インデックス情報と呼ぶ）の作成を行う過程を、ソルバーとは独立させて前処理ツール (createOversetIndex)として用意し、UPACS 本体の方では、データ通信処理ライブラリを利用してインデックス情報に基づいてデータを補間する境界条件モジュールを追加するだけで、重合格子に対応出来るようにしている。Fig.2 は UPACS 本体と重合格子機能拡張部分との関係を示している。具体的な作業手順としては、

- (1) Fig.3 に示したように、UPACS の境界条件ファイル中で重合格子としたい部分を"overset"と指定する。
- (2) createOversetIndex によって、指定された境界に対しインデックス情報を作成し、可視化ツールやインデックス情報チェックツールで、インデックス分布を確認・

```
# ID Block Face Window start-(i,j,k)end-(i,j,k) bcType
1 1 I_min 1 1 1 1 26 51 entry_subsonic
2 1 I_max 111 1 1 111 26 51 exit_subsonic
3 1 J_min 1 1 1 111 1 51 mirror
4 1 J_max 1 26 1 111 26 51 wall
5 1 K_min 1 1 1 111 26 1 wall
6 1 K_max 1 1 51 111 26 51 wall
7 2 I_min 1 1 1 1 50 25 overset
8 2 J_min 1 1 1 11 1 25 mirror
9 2 K_min 1 1 1 11 50 1 wallz
```

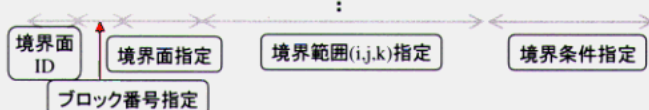


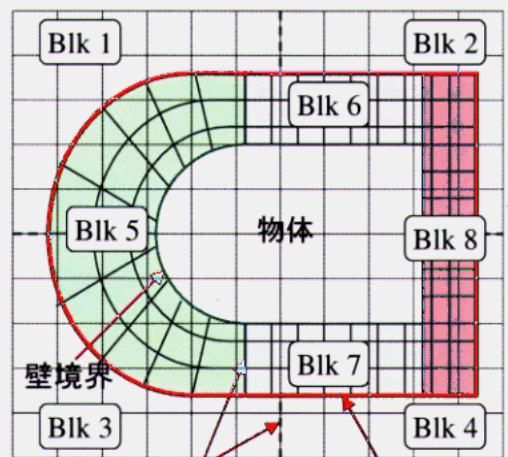
Fig. 3 境界条件設定ファイル中での重合格子指定

修正する。  
(3) UPACS 本体で、重合格子と指定された箇所に対して前述のインデックス情報を読み込み、境界条件モジュールにおいて重合格子処理を行う。

となる。この過程で用いられるインデックス情報を如何に的確に作成できるかが重合格子法の要点となる。ここでは、createOversetIndex の機能を充実させることにより重合格子の扱いを簡便にする方針をとっており、以下にその特徴を示す。

### 3. UPACS の重合格子法の特徴

マルチブロック格子との併用が可能で、UPACS 本体の利点をそのまま生かすことが出来るようにするとともに、可能な限り汎用性を持たせるために、今回の重合格子法では、次のような特徴を有するように基本設計を行った。



Group1 : Blk1 ~ Blk4  
Group2 : Blk5 ~ Blk8

Fig.4 グループ機能の使用例



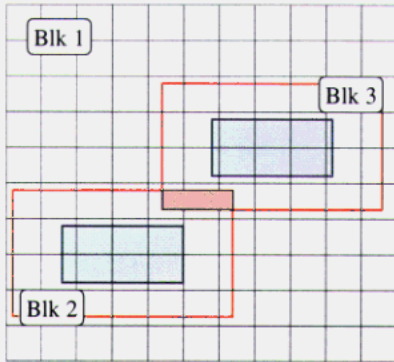


Fig.5 多重重合の模式図

(1) グルーピング機能

マルチブロック格子法と組み合わせた利用が容易になるように、幾つかのブロックをまとめてグループ指定し、グループ単位で重合関係の設定が行えるようにした。Fig.4では、背景のマルチブロック格子 Blk1~4 を Group 1、物体周りのマルチブロック格子 Blk5~8 を Group 2 とまとめて、Group 1 と 2 の間の重合関係を設定するようにしている。このように、対象物体周りにマルチブロック接合で格子グループを形成しておけば、物体の配置が変化した場合にも、他のグループとの間の重合情報を作成し直すだけで対応できる。さらに、場合によっては同じグループ内のブロック同士が重合する事も可能としている。このようなグループは幾つでも設定可能である。

(2) 多重重合機能

以前の UPCAS 重合格子対応版では、重合関係は物体周りの格子と背景格子との間の 2 重重合に制限されていたが<sup>(8)</sup>、今回の改良では Fig.5 のように、2 つ以上のブロックと重なっている領域(斜線部分)がある場合を想定し、重合の度合いに制限を設けない多重重合が可能になるようにした。すなわち、ある領域において重合するブロックやグループの候補が複数ある場合には、インデックス作成部による補間先の検索を補助するために、重なり優先順位を設定できるようにした。例えば Fig.5 では、Blk3 に対する優先順位としては、Blk1 よりも Blk2 の方を高く設定し、重なっている斜線領域では Blk2 の値を採用させている。このような設定は、Fig.6 に示すブロック優先順位設定ツールを用いて行うことができる。例えば Fig.5 の例に対しては、Blk2 の内部をさらに分割し、Blk2-1~Blk2-4 の小さな領域ごとに優先順位を設定することも可能となっている。

(3) インデックス情報のチェックツール

生成されたインデックス情報の妥当性を調べるための手段として、Fig.7 に示す補間点の破れである“孤立補間点”や、値の受け渡しの矛盾が生じる“循環参照点”の有無等の統計情報を出力する簡易チェックツールが用意されている。これと、インデックス情報の空間分布の可視化による確認を併用することにより、インデックス情報の修正を効率的に行うことを可能としている

上記(1)、(2)によりブロック間の重合関係を設定した後に

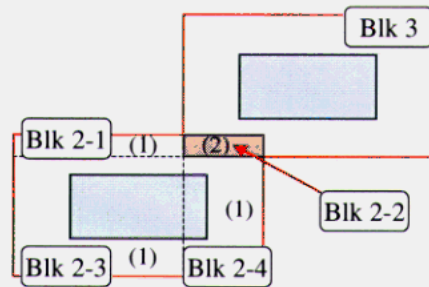
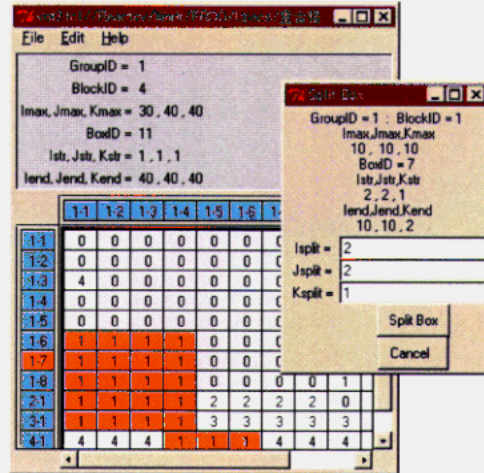


Fig.6 ブロック優先順位設定ツールと設定例

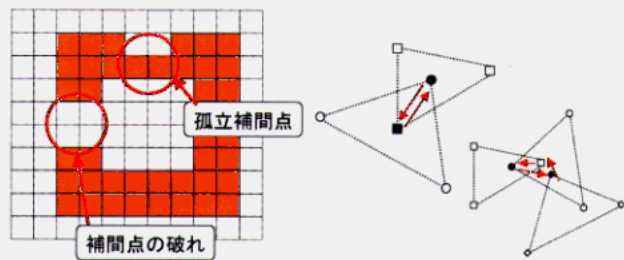
各補間点に対するインデックス情報を検索・作成する具体的な方法については、参考文献<sup>(8)</sup>等に習っているのでそちらを御参照願いたい。

4. 適用例

重合格子法の適用例として、計算対象物体の配置が変わる場合と、冷却孔内部流に適用した場合のインデックス情報と計算結果の例を示し、実形状への適用例として風洞試験用機体に適用した場合のインデックス情報の作成例を紹介する。

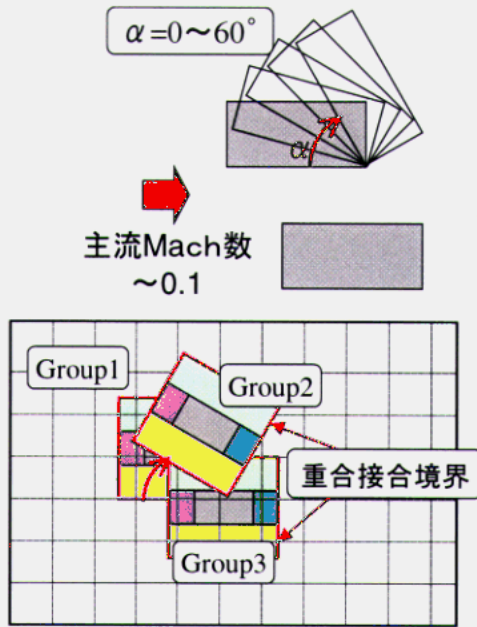
(1) 配置が変化する場合への適用

まず、重合格子の簡単な利用例として、計算対象物体の配置を変更しつつパラメトリックスタディを行う場合を示す。ここでは Fig.8 (a)のように、マッハ数 0.1 の気流中で 2 つの矩形物体の一方を傾けていくケースを想定している。

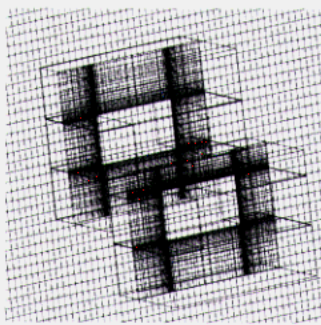


(a) 孤立補間点 (b) 循環参照点

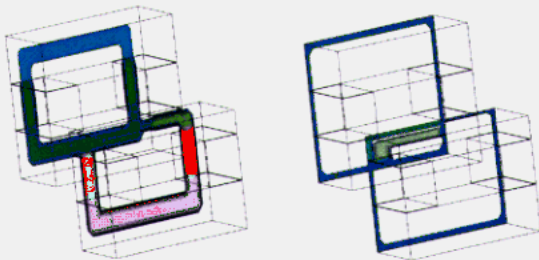
Fig.7 インデックス情報のチェック対象



(a) 計算例の模式図とグルーピングの設定



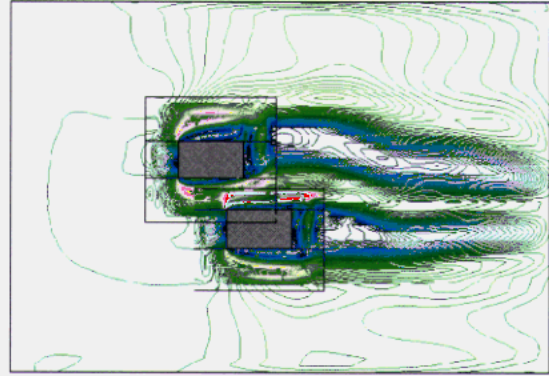
(b) 計算格子の配置



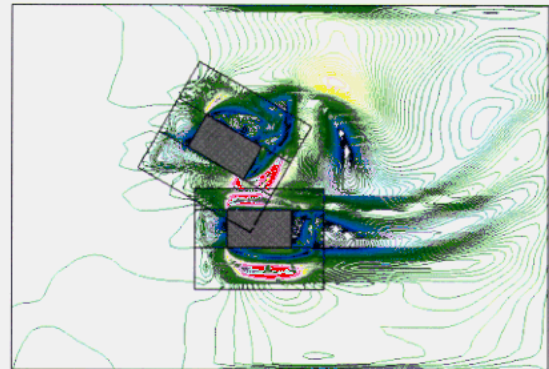
(c) 各グループに生成されたインデックス情報分布

Fig.8 配置が変化する場合の計算例

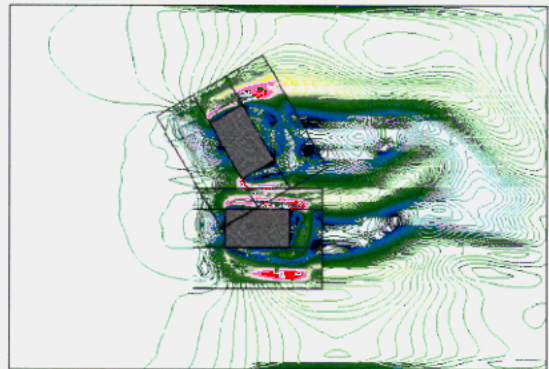
例えば物体の傾きが  $\alpha=0^\circ$  の場合には、Fig.8 (b)に示すように2つの物体周りにそれぞれ4つのマルチブロック格子を配置して、それぞれを Fig.8 (a)のように Group2,3 とグルーピングを行い、全体を覆う背景格子も Group1 として、それぞれの間の重合関係を設定し、Fig.8 (c)のインデックス分布を生成した。その際、Group2,3 が重なっている部分については Fig.6 のツールを用いて優先順位の設定を行う必要が生じた。後で  $\alpha$  の値を変えた場合にも Group2 の格子のみを回転させ、同様にインデックス情報を作り直せば良い。これらのインデックス情報を用いて UPACS 本



(1)  $\alpha=0^\circ$



(2)  $\alpha=30^\circ$



(3)  $\alpha=60^\circ$

Fig.9 配置が変化した場合のマッハ数分布

体で計算を行い、得られた各  $\alpha$  におけるマッハ数分布を Fig.9 (1)~(3)に示す。矩形物体まわりの流れの剥離や後流が滑らかにつながっており、重合境界における補間計算が正しく行われていることが判る。

このように物体の配置が変わる場合には、対象の格子を移動してインデックス情報を作り直すだけで対応できるので、同様のパラメトリックスタディを行う際には、本研究の手法が有用であることが判る。応用としては、翼面と舵面の位置関係を変えながら揚抗比の変化を見るような問題への適用が考えられる。

(2) タービン翼のフィルム冷却孔流れへの適用

実問題への適用例として、まずフィルム冷却孔流れへの適用例を示す。航空エンジンのタービン翼は燃焼器の下流に位置し、高温高圧ガスのエネルギーを回転エネルギーに変換するが、その際、その際のガス温度は 1500℃以上にもなる。そ



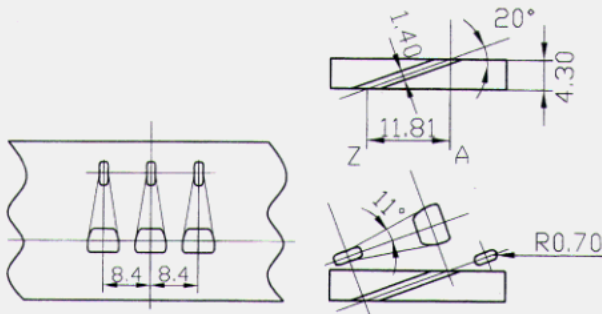


Fig.10 タービン翼フィルム冷却孔モデル

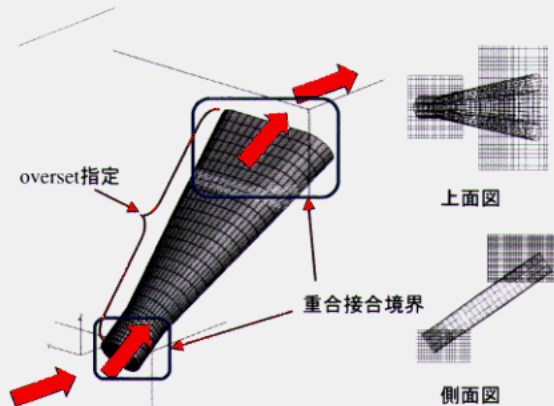


Fig.11 フィルム冷却孔流れ計算用の格子

のためタービン翼表面の冷却法の開発は高効率なエンジンを開発する際の重要な課題となる。ここでは、現在広く利用されているフィルム冷却法について、冷却孔形状の違いがどのように冷却効率に影響するかを調べることを目的とした流れの解析に、今回開発した手法の有用性を確認するための計算を実施した。

Fig.10 は計算対象としたフィルム冷却孔のモデルである。タービン翼表面を模擬した平板の内側から低温の気流が冷却孔を通して外側へ向けて流れるようになっている。今回は重合格子法の課題に注目して計算するために、平板の内部と外部の計算領域は小さくとり、Fig.11 に示す格子を作成し、冷却孔は10個のマルチブロック格子で構成した。この場合、冷却孔の外壁全面を境界条件設定ファイル中で“overset”と指定してcreateOversetIndexを通すことにより、Fig.12 のように冷却孔用格子と平板用格子が重なっている部分のみにインデックスが作成される。Fig.13 はこのインデックス情報をもとに計算した流線図であり、重合接合面でのデータの補間が正しく行われていることが判る。

冷却孔の形状や取り付け角度を変更した場合にも、(1)の例と同様に、冷却孔用の格子を移動・変形させてインデックス情報を作り替えるだけでよいので、今後の冷却孔形状の最適化のためのパラメトリックスタディにも有用であると考えられる。

### (3) ONERA-M5 全機周り流れへの適用

実問題の複雑形状への適用例として、航空機全機模型 ONERA-M5 を採用した。この形状は風洞試験の標準模型として作成されており、計測データも比較的豊富なため、CFD

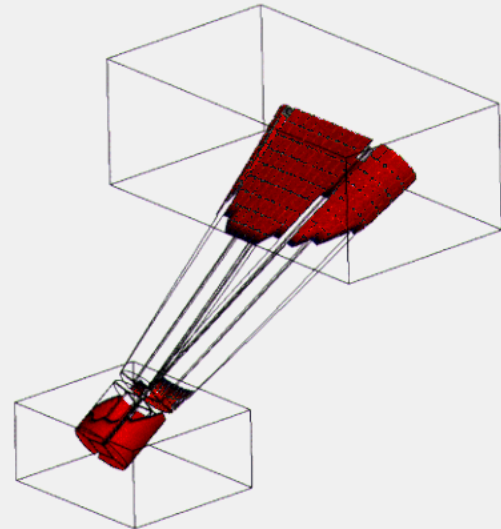


Fig.12 接合境界上のインデックス情報分布

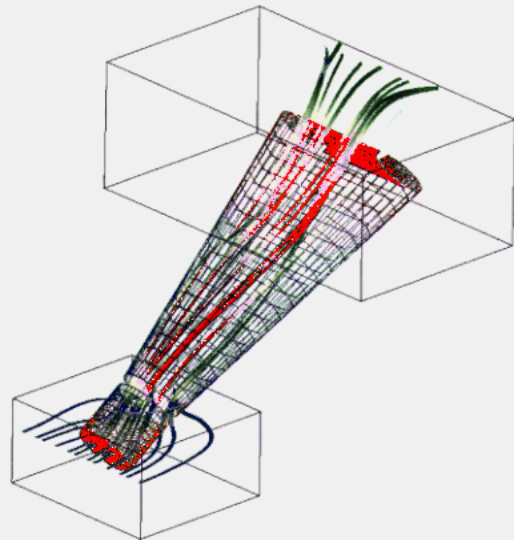


Fig.13 フィルム冷却孔流れの計算結果

を複雑形状へ適用した場合の検証例としても用いられることが多い。本シンポジウムにおける Workshop の課題としても用いられており、本稿の他にも UPACS のマルチブロック法を用いた計算の報告を行っている<sup>(9)</sup>。

このような形状を計算対象とする場合、境界層の効果を正しく見積もるために機体胴体や翼の付近に格子点を集める必要があるが、マルチブロック法を用いた場合、遠方の領域の格子点数もそれに伴って増加する傾向にあり、それを避けるための複雑なブロックトポロジーを構成する必要がある。その労力を軽減する手段として、ここでは重合格子法の適用を試みた。まず胴体・翼表面上の格子を作成した後に、Fig.14 に示すように胴体表面上の格子から遠方に延ばして背景格子を生成し、翼付近に作成した格子の境界を重合境界と設定して、両者の中でのインデックス情報の作成を行った。

重合状態としては、翼格子と背景格子との間の単純な 2 重重合であるが、前述のように両格子ともマルチブロック

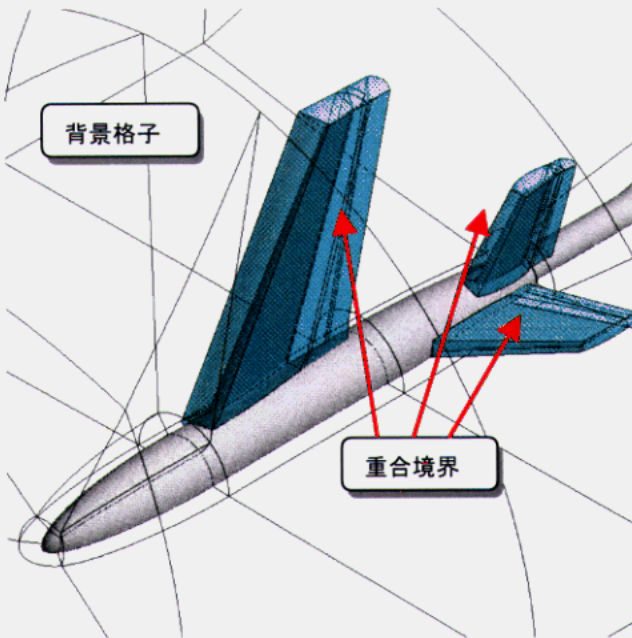


Fig.14 ONERA-M5 における背景格子と重合格子の位置関係

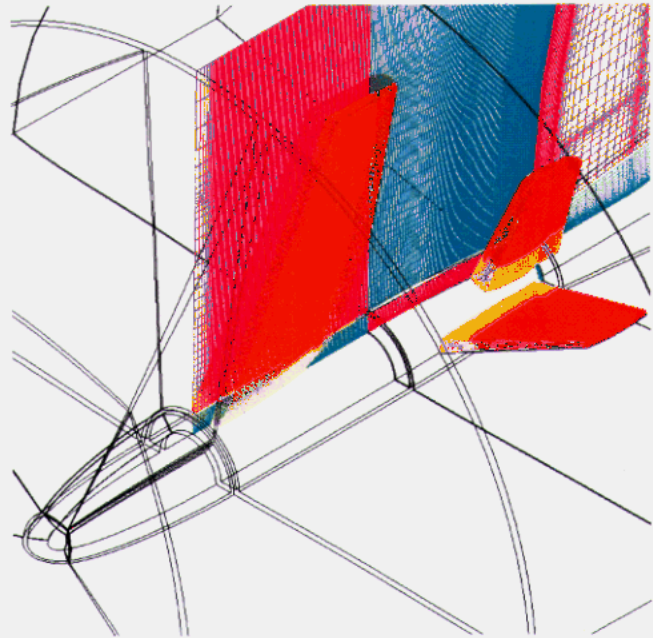


Fig.15 背景格子との重合状況と翼格子上のインデックス情報分布

接合した状態で重合しており、接合面の扱いに留意する必要がある。Fig.15 に作成されたインデックス情報の分布と背景格子の関係を示すが、ここでは背景格子の接合状況を把握しやすいように色分けしてある。重合境界上のインデックス情報も背景格子に対応して変わっており、接合面を含んだ場合でもインデックス情報が正常に作成されていることが判る。計算は残念ながら本稿には間に合わなかったが、後ほど別の機会に報告を行う予定である。

#### 4. まとめと今後の方針

UPACS に、高い汎用性を意識した重合格子法を取り入れるために、ソルバーの拡張と前処理ツールの開発を行った。計算の精度やインデックス作成ツールの使い勝手等について、さらに調査・改良すべき課題は残されているが、格子の配置や形状を変化させてパラメトリックスタディを行う場合や、境界の一部が重合している場合、複雑形状を扱う場合の格子生成の簡便化等への適用については、十分な可能性を示すことができた。

今後、今回は示せなかった重合格子法による ONERA-M5 の計算結果とマルチブロック法で計算した場合の結果の比較等を行って計算制度の検証を進め、またさらに多くのアプリケーション事例の解析に利用し、本手法の評価と改良を進める予定である。

また、今後 UPACS において GUI を積極的に取り入れた境界条件設定等の前処理を行うツールを整備する予定であり、その中での重合境界に関する一連の作業をインタラクティブに行えるように仕様を決定して行く必要がある。これに関連し、設定作業がスムーズに行われるように、アルゴリズムの見直し等によるインデックス作成部の高速化も検討している。

#### 参考文献

- (1) 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.
- (2) Enomoto, S., "A Structured Grid Method in Simulating Flow around Supersonic Transports", Proceedings of 2nd SST-CFD Workshop, 2000.
- (3) 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, 航技研特別資料 SP-46, pp45-50, 2000.
- (4) 山本一臣 他, "CFD 共通基盤プログラム UPACS の開発", 第 14 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, 2000.
- (5) Steger, J. L., Dougherth, F. C., and Benek, J. A., "A Chimera Grid Scheme", Advances in Grid Generation, Ghia, K. N. and Ghia, U., ASME FED-5, pp.59-70, 1983.
- (6) 小川哲 他, "複雑形状物体まわりの数値計算法について", 第 7 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, 航技研特別資料 SP-10, pp279-284.
- (7) 小川哲 他, "複合格子による数値計算", 第 9 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, 航技研特別資料 SP-16, pp21-26.
- (8) 山崎裕之 他, "並列 CFD 計算プラットフォーム UPACS の重合格子対応化", 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, 航空宇宙技術研究 SP-44, pp.357-362, 1999.
- (9) 山本一臣 他, "UPACS による ONERA-M5 全機形態まわりの流れの解析", 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2001, 2001.