

UPACS の重合格子解析における重合境界設定手法について

松村洋祐、東田明宏、村上弘幸（みずほ情報総研）、山根 敬、高木亮治、山本一臣（JAXA 総研本部）

Improvement of the Domain Connectivity Database Tool for Overset Grid Simulations using UPACS

by

Yosuke Matsumura, Akihiro Higashida, Hiroyuki Murakami (Mizuho Information & Research Institute), Takashi Yamane, Ryoji Takaki, Kazuomi Yamamoto (JAXA/ISTA)

ABSTRACT

UPACS (Unified Platform for Aerospace Computational Simulation), which aims to be a common CFD platform, is a solver for compressible flows around complicated geometries using the multi-block structured grid method. In order to ease application to more complicated geometries that are difficult to create structured grid as well as to solve flows parametrically which requires many geometry modifications, UPACS has been modified so that the flow solver can treat the overset grid method and a new program, "createOversetIndex", which automatically generates interpolation information on overset grid boundaries from grid files and some user-defined configuration files, has been developed in the year 2000. However, some problems have been found such as the preparation of complicated configuration files when many numbers of grid blocks are used and glitches which sometimes appear near unstructured block-to-block connections. In order to overcome the problem, a new algorithm that can generate more reliable interpolation information without bothering user's hand has been developed then the program "createOversetIndex" has been substantially modified. In this paper, the algorithm to generate interpolation information is explained, and the numerical simulation result of a film cooling flow model for a turbine blade by the overset grid method is introduced and compared to the result with the boundary fitted structured grid.

1. はじめに

CFD コード共通化プロジェクトである UPACS(Unified Platform for Aerospace Computational Simulation)は、CFD における共通的な基盤コード(プラットフォーム)を確立することを目的として開発された圧縮性流体解析コードである。UPACS では、複雑形状への対応手段としてマルチブロック構造格子を採用している。しかし、それでも複雑な形状を対象とする解析で格子生成が困難な場合がある。また、物体の移動や形状変更を伴うパラメトリック・スタディを行なうには、その都度格子全体を生成しなければならず非常に煩雑である。

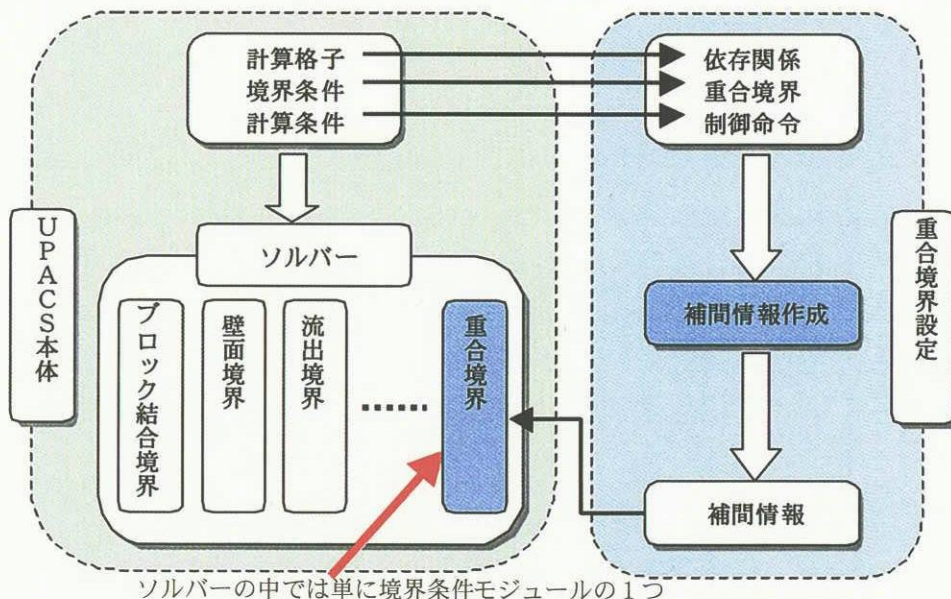
そのため、これらを簡便に行なうことを目的として、2000 年度に重合格子を用いた解析への対応が行われ、重合している格子ブロック間での補間情報をあらかじめ作成する前処理プログラム createOversetIndex が開発された。これは、ユーザが重合している格子ブロック同士を指定する定

義ファイルを記述することで、補間情報を作成するプログラムであった。

しかし、ユーザによる設定の煩雑さや格子ブロックが非構造的に接続しているときの処理などの問題があり、解析対象が多様化していく中で実際の使用に難点が出てくるようになった。

そこで、補間情報作成アルゴリズムの見直しを行い、ユーザによる設定項目を減らした上で、確実な補間情報の作成を可能とするように、プログラムの大幅な改良を行なった。

ここでは、UPACS 重合格子対応機能の改良点について示し、実際の解析への適用例によって補間情報作成アルゴリズムの妥当性を確認する。また、同一の対象に対するマルチブロック構造格子による解析例との比較を行ない、重合格子を用いた解析の有用性を検証する。



ソルバーの中では単に境界条件モジュールの1つ

Fig. 1 UPACS重合格子対応機能システム概要

2. UPACS 重合格子対応機能の概要

Fig. 1にUPACS本体と重合格子拡張部分の関係を示す。UPACSによる重合格子への対応機能は、UPACS本体の今後の改良を鑑みてUPACS本体への影響を少なくするために、補間情報作成部を独立したプログラムとしており、UPACS内部では重合による補間も境界条件モジュールの一つとして扱われるように設計されている。また、マルチブロック構造格子と重合格子(Fig. 2)との併用が可能となっている。

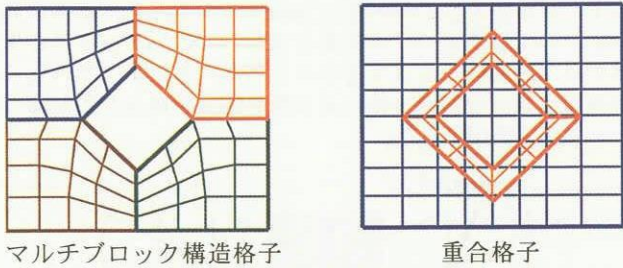
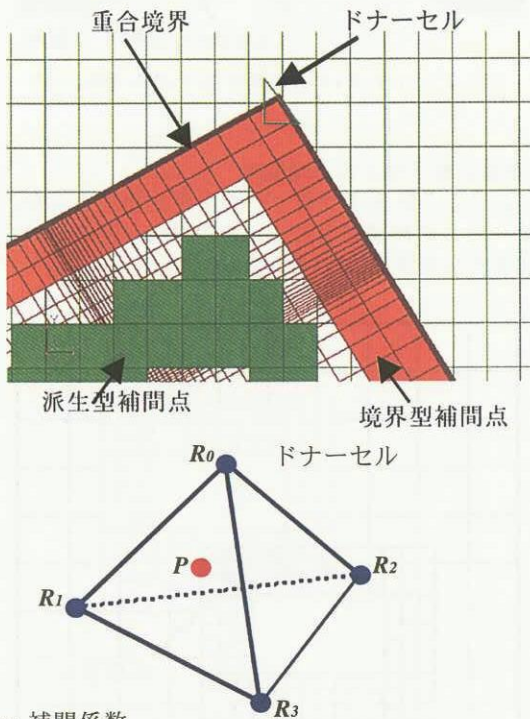


Fig. 2 マルチブロック構造格子と重合格子

Fig. 3にUPACS重合格子対応機能における補間情報を示す。UPACSによる重合格子解析での補間情報は、相手側格子セルから物理量を受け取る補間点のインデックスと、相手側格子セルに物理量を渡すドナーセルのインデックスとその補間係数からなる。補間点は、格子ブロック境界条件での指定によって重合格子側に生成される境界型補間点と、境界型補間点の配置から被重合格子側に生成される派生型補間点に分けられる。ドナーセルは補間点を内部に含む(外挿の場合には補間点に最も近い四面体であり、物理量の補間は線形補間で行なわれる。解析において例外処理なしに差分を行なうためには、補間点は双方とも最低でも二層必要となる。



s, t, u : 補間係数

$$P = R_0 + s \cdot (R_1 - R_0) + t \cdot (R_2 - R_0) + u \cdot (R_3 - R_0)$$

$$q(P) = (1 - s - t - u) \cdot q(R_0) + s \cdot q(R_1) + t \cdot q(R_2) + u \cdot q(R_3)$$

Fig. 3 UPACS 重合格子対応機能における補間情報

3. 改良項目

改良にあたっては、当初の開発時と同じく、UPACS本体への影響を最小限に留めることとした。また、ユーザーによる設定項目の削減と確実に補間情報を作成できるアルゴリズムを採用することを基本方針とした。

主な改良項目について、以下に示す。

(1) 境界型補間点の生成

境界型補間点の生成における問題は、UPACSでは境界条件の設定が格子面に対して行なわれるため、Fig. 4に示すように格子ブロックの接続によって、重合境界条件が設定されていない格子ブロックにも境界型補間点を生成しなければならないことである。これを例外処理によって行おうとすると、境界型補間点の生成が複雑なものとなってしま

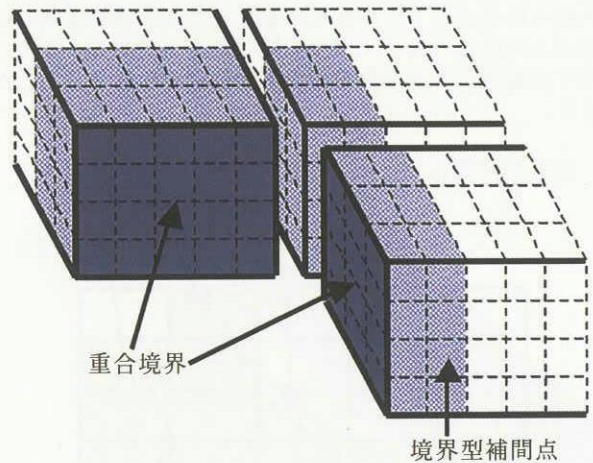


Fig. 4 重合境界条件のないブロックへの境界型補間点生成

そこで、境界情報を格子点オブジェクトにもたせた上で、異なる格子ブロックであっても同一位置の格子点は同一のオブジェクトを指すように改良した。格子セルオブジェクトは格子点オブジェクトへのポインタをもつので、重合境界条件となる格子点をもつ格子セルを境界型補間点とすることによって、例外処理を行なうことなしにすべての境界型補間点を生成することができるようになった。Fig. 5に境界型補間点の生成法を示す。

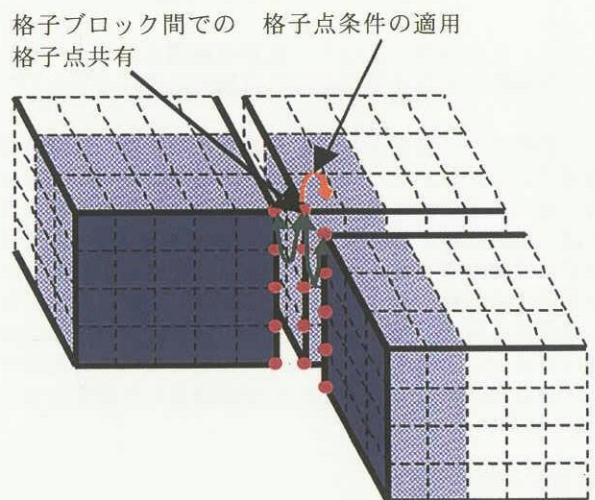


Fig. 5 境界型補間点生成法

(2) 派生型補間点の生成

論理的には、重合格子側の境界型補間点の内側に含まれる被重合格子側の格子セルすべてを補間点とすれば、解析を行なうことができる。しかし、この方法では補間点の数が膨大なものとなってしまい、前処理での補間情報の作成にも解析での物理量補間にも時間がかかりすぎて実際的ではない。重合格子側で領域指定を行なうことで補間点を合理的な数に抑えることは可能だが、各々の格子間隔に違いがある場合、適切な領域指定を行なうことは非常に困難になる。そこで、解析に必要なかつ十分な数の派生型補間点を自動的に生成するために、三角形をベースにした幾何学的方法を用いることとした。

Fig. 6 に派生型補間点の生成法を示す。まず、重合格子側で境界型補間点の一つ内側の格子セルのセル中心を使って三角形パッチを作成する。次に、この三角形パッチと交差する被重合格子側の格子セルを算出する。この交差セルの内側の格子点にフラグをもたせ、そこから境界型補間点の生成と同様の方法で、派生型補間点を生成する。これによって必要かつ十分な数の派生型補間点を生成することができる。

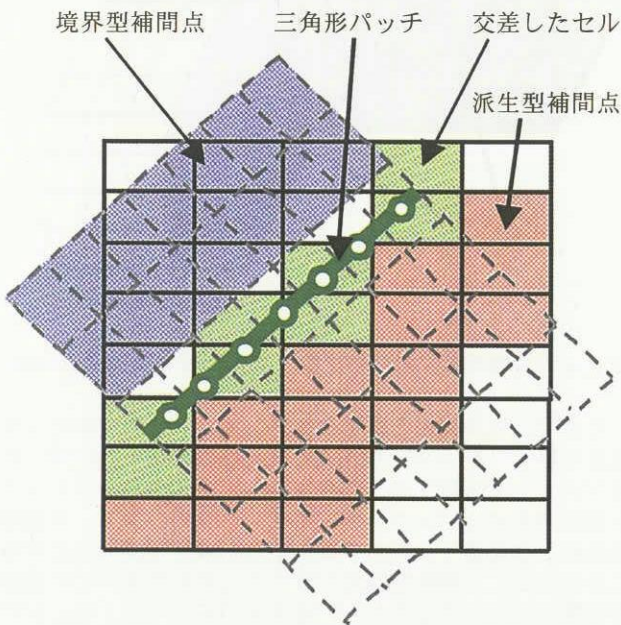


Fig. 6 派生型補間点生成法

また、この方法によって、境界型補間点のドナーセルが派生型補間点となる循環参照も自動的に避けることができる。

一般的に、三角形と格子セルの交差判定は、かなり重い処理である。しかし、三角形パッチは被重合格子ブロック内で途切れることはないため、三角形と格子セルの交差判定は三角形と格子線の交差判定に置き換えることができる。格子線は隣接する格子セルによって共有されているため、交差判定の回数を減らすことができる。また、ある三角形と交差する格子セルは必ず隣接しているため、再帰処理を用いることによって不必要な交差判定をなくすことができる。これらの性質を用いて派生型補間点の生成を高速化した。

(3) ドナーセルの検索

マルチブロック構造格子全体を四面体で分割し、補間点を内部に含む四面体を探せば、少なくともマルチブロック

構造格子に含まれる領域については、どの部分でも内挿となるドナーセルを得ることができる。構造格子を隙間なく四面体に分割することはインデックスの演算のみで可能であるが、UPACS では格子ブロックの非構造的接続を許しているため、この方法のみで全体を四面体に分割することは不可能である。しかし、マルチブロック構造格子全体を Delaunay 分割を用いて四面体分割すると実行時間がかなり長くなることが予想される。

そこで、Fig. 7 に示すように、非構造的接続や形状境界の現われる格子ブロック境界付近についてのみ、隣接する格子セルを使用して局地的に Delaunay 分割し、その他の部分については構造格子の性質を生かしてインデックスの演算のみで四面体を生成するものとした。また、ドナーセルの検索自体も包含直方体による簡易検索を組み合わせることによって高速化した。

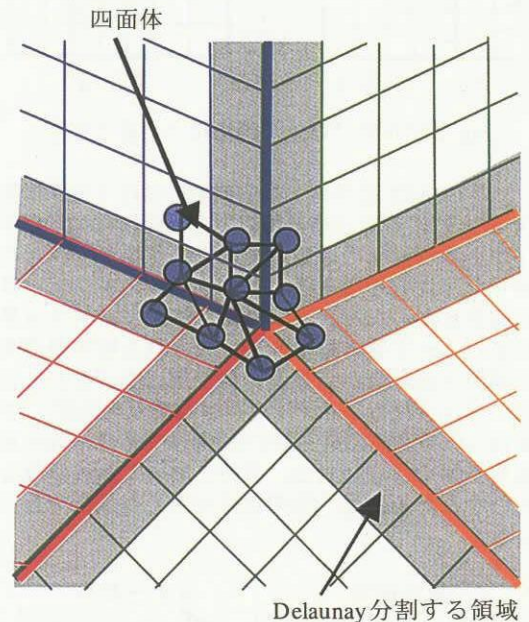


Fig. 7 マルチブロック構造格子の四面体分割

(4) 多重重合格子セルの自動抽出

Fig. 8 のように格子ブロックが多重に重なる場合、複数のドナーセルの候補が生じる。この場合、どのドナーセルを使用するかを決定しなければならない。

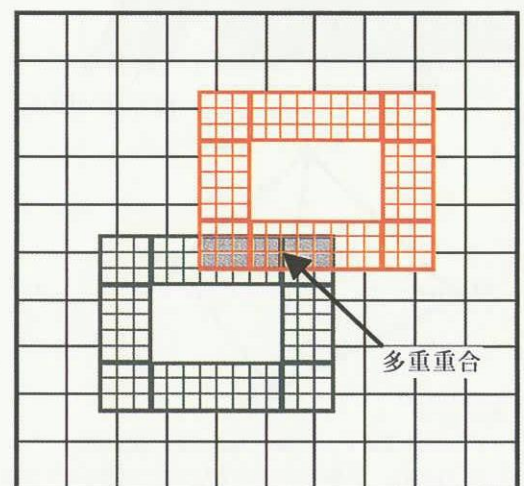


Fig. 8 多重重合の模式図

従来の方法では、ある格子ブロックにある補間点がどの格子ブロックにあるドナーセルを使用するかの優先度をユーザが設定していた。そのため、解析対象が多様化し、格子が多数の格子ブロックから構成されるようになるにつれて設定が煩雑になってきた。格子ブロックをさらに小さな領域に分割し、その領域に対して優先度を設定することもできたが、この分割が六面体領域しか許していなかったため、複雑に重合している場合には非常に多くの領域に分割する必要があった。

そこで、あらかじめ多重重合となる格子セルを探し、これらを重合相手格子ブロックによって分類し、自動的に点群としてグルーピングするようにした。これによってユーザは、多重重合がある場合にのみ、点群に対して、どの格子ブロックを優先するかを設定するだけで補間情報を作成できるようになった。Fig. 9 に優先度の設定に使用するファイルのサンプルを示す。

# block-group	target blocks...
003-001	1 6
003-002	1 8
005-001	1 6
006-001	1 3
006-002	1 5

↑ 点群番号
格子ブロック番号

↑ 包含セルが含まれる
格子ブロック番号
(優先度順)

Fig. 9 優先度設定ファイル

(5) 格子のキメラ化

Fig. 10 のように多重重合が起こっている場合、補間点の一部が計算領域の外側に出ることがある。このような複数の形状が接近している多重重合のケースについても合理的な補間情報が作成されるように、格子の一部を切り取ってキメラ化する機能を追加した。

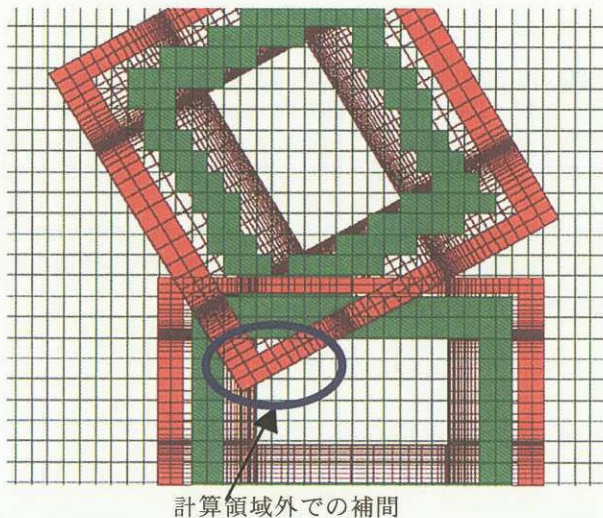


Fig. 10 補間点が計算領域外になる多重重合

格子のキメラ化は、三角形パッチ面を与えることによって行なう。ユーザによって指定された格子ブロックグルー

プ内にあってこの三角形パッチ面と交差する格子セルを求め、内側の格子点にフラグをもたせる。そこから派生型補間点の生成と同様の方法で境界型補間点を生成する。Fig. 11 にこの機能を使用した際の補間点の分布を示す。

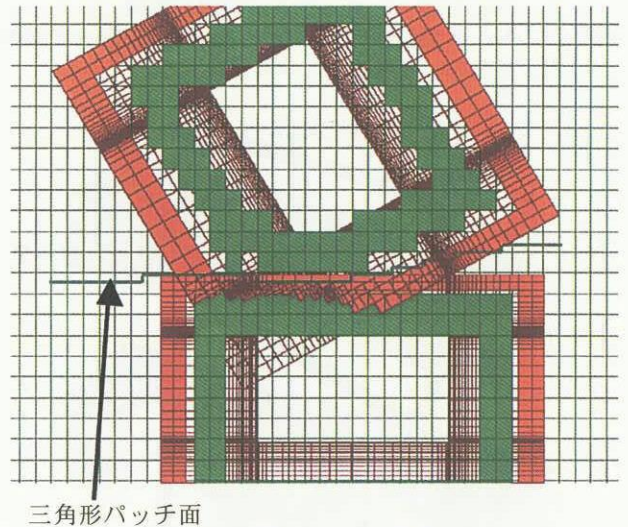


Fig. 11 格子のキメラ化

また、形状が複雑な場合には必要とされる三角形パッチ面を手動で作成することは困難であることが予想される。そこで、三角形パッチ面を自動生成するプログラム createChimeraPatch を別途開発した。このプログラムは、形状を含む領域にデカルト格子を生成し、各々の形状をソースとシンクと見做して拡散方程式を解き、そのコンターに沿った三角形パッチを生成するものである。これによって、各々の構造物からほぼ等距離にある三角形パッチ面を自動的に生成することが可能となる。Fig. 12 に三角形パッチ生成の様子を示す。

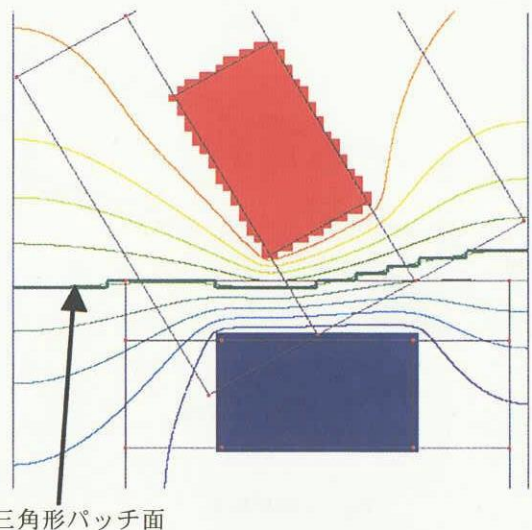


Fig. 12 三角形パッチの自動生成

4. 適用例

改良した重合格子対応機能の適用例として、タービン翼冷却空気流れの解析を重合格子を用いて行なう。補間情報作成アルゴリズムの妥当性を確認する。さらに、マルチブロック構造格子のみを用いて同一対象についての解析を

行なった上で両者の結果を比較し、重合格子解析の有用性を検討する。

Fig. 13 に解析対象となるタービン翼冷却最小単位を示す。一般にタービン翼の外壁は二重になっており、内側壁面のインピンジ孔を通った冷却空気が外壁の裏側にあたって冷却したのち、外壁に開けられたフィルム孔を通じて翼面にフィルムを形成して高温ガスから保護する。

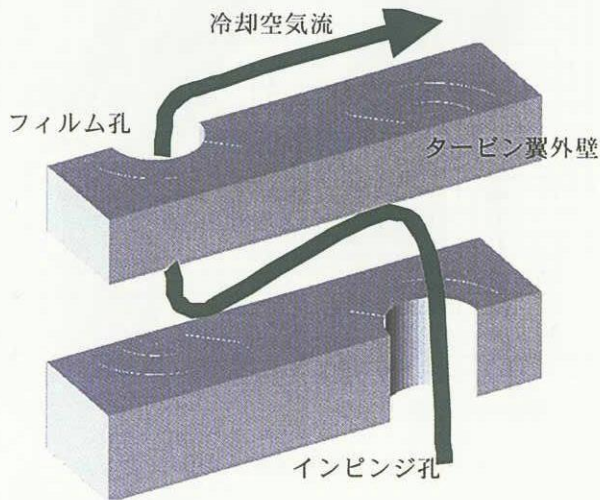


Fig. 13 タービン翼冷却最小単位

Fig. 14 に解析体系を示す。タービン内部を流れる高温ガス流は左から流入して右に流出する。冷却空気は下方から導入される。Fig. 15 に重合格子を用いた解析に使用した格子図を示す。この解析では、高温ガス流、プレート間、冷却空気の導入部の単純な直交格子と、孔の部分にある半円柱状の格子を重合格子とした。孔の部分については、出入口の流れをよりよく捉えるために、孔の径よりも大きい格子を結合させた。この結合させた格子に対して重合境界条件を設定した。

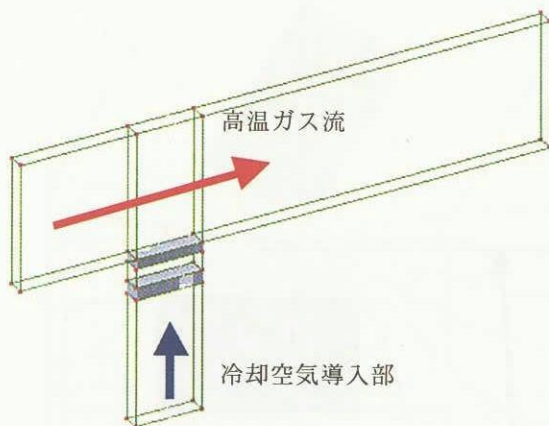


Fig. 14 解析体系

格子ブロック数 : 41ブロック
格子点数 : 約22万点

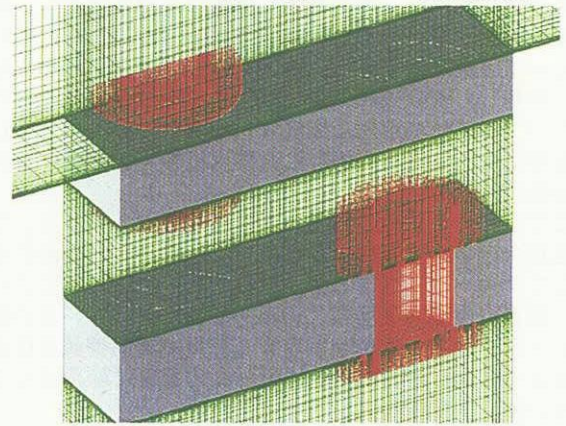


Fig. 15 重合格子図

Fig. 16 に createOversetIndex を使用して求めた補間情報のうち、補間点の分布図を示す。設定された重合境界条件に対応して孔の部分の重合させた格子側に境界型補間点が、直交格子側に派生型補間点が、それぞれ正しく二層生成されている様子がわかる。

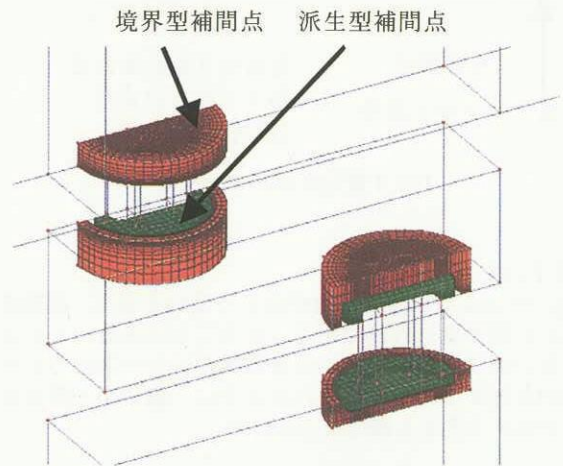


Fig. 16 補間点分布図

Fig. 17 に重合格子を用いた解析におけるフィルム孔およびインピンジ孔の断面位置での Mach 数分布を示す。重合境界付近で値が連続していることより、作成された補間情報による物理量の補間が正しく行なわれていることがわかる。また、インピンジ孔を通過した流れの外壁プレート裏側への衝突やフィルム孔を通過した流れからのフィルムの形成というタービン翼冷却空気流れの特徴的な構造もきれいに捉えられている。

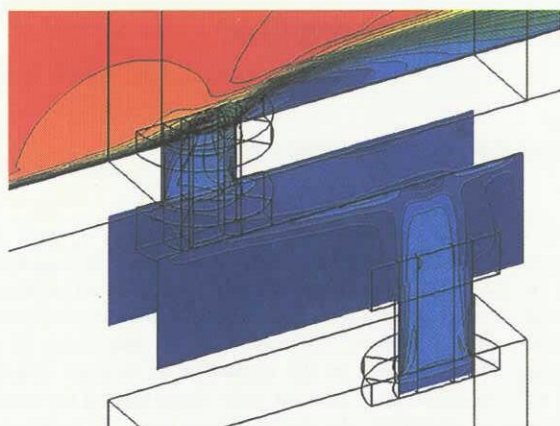


Fig. 17 重合格子解析での Mach 数分布

ここで、Fig. 18 に同一対象についてマルチブロック構造格子のみを用いて解析を行なった結果を示す。Fig. 17 と Fig. 18 を比較して、両者に大きな差異は見られない。このことより、重合格子を用いた解析は、マルチブロック構造格子のみを用いた解析と同様に妥当性があるといえる。

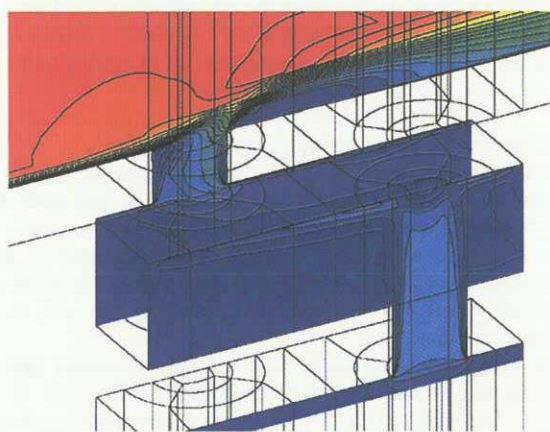


Fig. 18 マルチブロック構造格子解析のみでの Mach 数分布

Fig. 19 にマルチブロック構造格子のみでの解析に使用した格子図を示す。Fig. 15 と Fig. 19 を比較すると、マルチブロック構造格子のみで格子を作成する場合、形状境界の間を滑らかに繋ぐために、多数の格子ブロックが必要となるのがわかる。そのため、重合格子を用いるほうが格子作成が容易なものとなる。また、マルチブロック構造格子のみでは、境界に格子を寄せた際にその影響が遠方にまで届いてしまうため、格子点数も膨大になる。格子点数はそのまま解析実行時間に影響を与えるため、少ないほうが有利である。以上のことより、重合格子を用いた解析の有用性を示すことができる。

また、タービン翼の空気冷却の性能評価には、冷却空気の孔の大きさや位置を変えてパラメトリック・スタディを行なうことが必要となる。このような解析に重合格子を利用することによって格子作成の労力、ひいては性能評価全体にかかる時間を大幅に削減することができる。

格子ブロック数 : 70ブロック
格子点数 : 約38万点

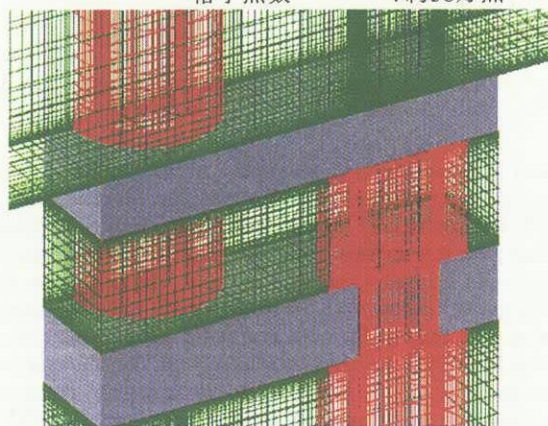


Fig. 19 マルチブロック構造格子図

5. まとめと今後の課題

UPACS 重合格子対応機能について、ユーザの指定によらない自動的かつ確実な補間情報の作成を目的として、補間情報作成アルゴリズムを見直し改良を行なった。また、改良した重合格子対応機能を実問題に適用して、改良したアルゴリズムの妥当性を確認した。さらに、重合格子を用いた解析結果とマルチブロック構造格子を用いた解析結果を比較し、重合格子を用いた解析の有用性を確認した。

今後は、より大規模かつ複雑な形状を扱う問題について、格子のキメラ化を用いた解析を含む実証を行い、本手法の評価と改良を進める予定である。また、解析時間の短縮のため、補間情報作成のさらなる高速化を図る必要がある。高速化は、移動境界問題への適用も視野に入れると必須なものとなる。

さらに、UPACS 重合格子対応機能をより使いやすくするために、インタラクティブな条件設定機能、補間点やドナーセルの可視化機能、重合格子付近での繋がりを考慮した解析結果の可視化機能を含む GUI ツールを整備することも検討している。

参考文献

- 1) 牧田、高木、"UPACS の重合格子対応方法と適用例"、航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2001 論文集(航技研特別資料 SP-53)
- 2) Suhs, N. E., Rogers, S. E., and Dietz, W. E., "PEGASUS 5: An Automated Pre-Processor for Overset-Grid Cfd," AIAA 2002-3186