

超音速機高揚力装置形態に関する格子自動生成

○永田 靖典(株式会社 菱友システムズ), 雷 忠(宇宙航空研究開発機構 航空プログラムグループ)

Automatic Grid Generation for a Supersonic Transport Configuration with High-Lift Devices

Yasunori Nagata (Ryoyu Systems Co., Ltd.) and Zhong Lei (Japan Aerospace Exploration Agency)

Key Words : High-lift device, Automatic Grid Generation, CFD

Abstract

An automatic grid tool for a supersonic transport configuration with leading- and trailing-edge flaps was developed. It employed the commercial software Gridgen to modify the shape and grid for different combination of flap deflection angles. With the automatic tool, time cost for shape modification and grid generation is dramatically reduced. In this paper, the automatic process of shape modification and grid generation are described, and examples of the generated grid and computational result are presented.

1. はじめに

近年、計算機性能の飛躍的な進捗によりCFD (Computational Fluid Dynamics) 解析と最適化手法を組み合わせることによって形状を最適設計することが実用的になりつつある。非線形性を織り込んだCFD解析によって、より高いレベルの最適化を実現できると考えられる。この手法は従来の風洞試験を中心とする手法に対して時間、経費を大幅に短縮、削減することが可能な技術である。

一方、CFDを用いた設計には設計パラメータ数と最適化手法によって、数十から数百ケースの形態を解析することが必要であり、形態変更の際に形状作成や、計算格子の生成などの前処理に多大な労力を要する。これは実機設計に適用するCFD最適化設計にとって、大きな障害になっている。設計期間を短縮し、コストを低減するために、より高性能な計算機と計算手法の改善が要求され、それと同時に形状作成と格子生成を自動化にすることが必要となる。

宇宙航空研究開発機構航空プログラムグループは次世代超音速旅客機の研究開発を進めてきた。超音速機の離着陸性能を改善するために、高揚力装置は不可欠である[1]。本研究では、比較的簡単な機構により実現できる前・後縁フラップを採用した。この前縁フラップは、翼前縁の一部を下方へ折り曲げることによって、翼前縁から剥離の形成を抑制する装置である。翼に働く抵抗力を低減させ、揚抗比が改善される。後縁フラップは内翼後縁付近にヒンジ・ラインを軸にして翼の一部だけを下方へ折り曲げることで揚力を増加させ、離着陸時に必要な揚力を得る装置である。フラ

ップによる空力性能向上の効果はフラップの形状と折り曲げる舵角に大きく依存する。CFDを用いた最適化設計システムは前処理 (形状生成と計算格子生成) と性能評価 (CFD解析) と最適化プロセスにより構成される。フラップ効果を最大限に得るためには、設計パラメータを組み合わせた多くの解析が必要となる。パラメータを変更すると、機体形状とCFD解析に必要な計算格子の修正を行わなければならない。多数の形状について計算を行う必要があるため、格子生成に非常に多くの時間が割かれることになる。

本研究では、形状と格子生成に要する時間を短縮するために、主翼の前・後縁にフラップを有する超音速機形態まわりの自動格子生成ツールを開発することを目的とする。米国POINTWISE社が開発したGridgen [2]を利用して、フラップを操舵させた際に超音速機高揚力形態について形状と計算格子を自動修正する手法を述べる。

2. 機体形状

図 1に本研究の対象である超音速機の高揚力形態を示す。以降、この形状についてフラップ操舵していない状態を基本形態と呼ぶ。基本形態の平面形は、宇宙航空研究開発機構航空プログラムグループで進められた小型超音速ジェット実験機の第01次形状として採用された機体の翼胴形態を8%に縮小したものである。寸法緒元は、全長1.36[m]、翼幅 $b=0.419$ [m]×2、翼面積 $S_w=0.292$ [m²]、主翼のアスペクト比 (AR)=2.42、空力平均コード長0.459[m]である。基本形態の主翼は厚さ30[mm]を持つクランクド・アロー平板翼であり、

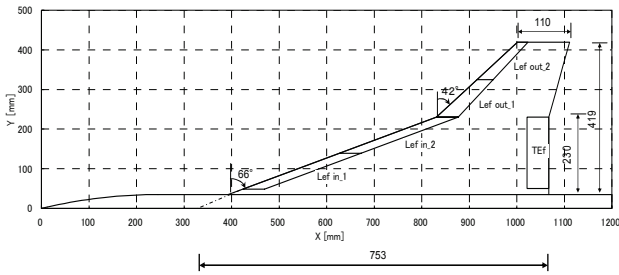


図 1 JAXAジェット実験機01次形状高揚力形態

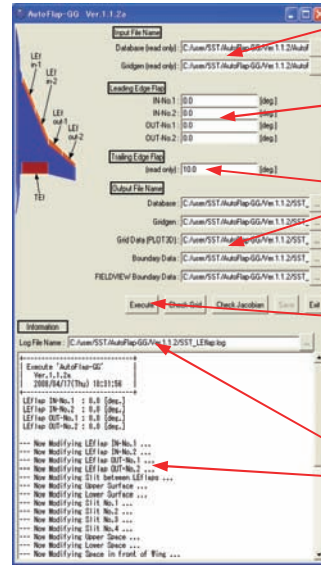
前・後縁および翼端を30° 頂角で尖らせたものである。主翼の平面形には、超音速巡航時 ($M=2.0$) で設計した結果としてArrow型が採用され、内翼が後退角 $\lambda=66[\text{deg.}]$ を持つ亜音速前縁であり、低速と遷音速性能の改善を考慮して外翼が後退角 $\lambda=42[\text{deg.}]$ を持つ形状である。機体軸から翼端方向にsemi-spanの55%位置をキंकとして内翼と外翼がつながる。

高揚力装置には、効果的かつ実用的と見られる簡素な前縁フラップと後縁フラップを採用した。各フラップはフラップの平面形状を固定し、単にヒンジ・ラインまわりに下方に折り曲げる簡素な構造である。内翼前縁、外翼前縁にそれぞれ2枚、後縁に1枚、計5枚のフラップを取り付ける。内翼と外翼の前縁フラップはセグメント2枚ずつで構成される。それぞれのフラップセグメントに個別に舵角を設定する。前縁フラップのヒンジ・ライン（回転軸）は内翼と外翼で異なり、前縁に対して平行にとっている。フラップ間には操舵時に互いに重なり合うのを避けるため、隙間を設けている。

3. 格子自動生成ツールAutoFlap-GGの概要

AutoFlap-GG (Automatic Flap deflection-Grid Generator) は、前節で述べた超音速機高揚力形態についてフラップ操舵に伴う形状と計算格子の自動修正を行うツールである。格子はマルチ・ブロック構造格子を対象とする。本ツールは、市販格子生成ソフトGridgen V15.10を用いてあらかじめ作成した基本形態の形状・格子に対して、形状と格子の修正を行う。フラップ操舵に伴う形状・格子の修正についてはGridgen独自のスクリプト言語であるGlyphを用いて作業を自動化した。Gridgenは格子生成が主な機能であるが、形状データを編集する機能もいくつか搭載しており、それらを用いて形状修正を行っている。

GlyphはTcl/Tkをベースとしたスクリプト言語であり、Tkを用いてGUI (Graphical User Interface) を実装することが可能である。そのため本ツールもGUIを実装している。図 2にAutoFlap-GGのパラメータ設定用



- 基本形態データファイル名
 - Geometry Data
 - Grid Data
- 前縁フラップ舵角
 - LEf in-1, 2
 - LEf out-1, 2
- 後縁フラップ舵角
- 舵角変更後の出力ファイル名
 - Geometry Data
 - Grid Data
 - Boundary Data
- 実行ボタン
 - 舵角変更処理の実行
 - 格子の確認
 - 処理後の格子の保存
 - 終了
- 実行履歴出力ファイル名
- 実行経過

図 2 パラメータ設定用GUI

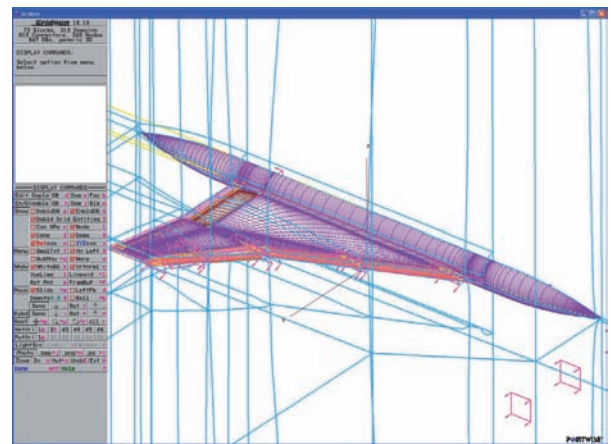


図 3 Gridgen実行画面

GUIを示す。このGUIは、基本形態データファイル名表示欄、パラメータ入力欄、実行ボタン群、および実行経過表示欄で構成される。基本形態データとして形状と格子の2つのファイルがあり、これらのファイル名が基本形態データファイル名表示欄に表示される。パラメータ入力欄には、前縁フラップセグメント4枚の各舵角と出力ファイル名を入力する。出力ファイルには、形状・格子データのファイルに加えて、CFD解析に必要な境界条件データファイルが含まれる。パラメータ入力後、実行ボタンを押すことで形状・格子の修正が自動的に行われる。図 3は自動処理中の実行画面を示しており、処理の経過とともに形状・格子が変化していく様子を確認することができるようになっている。処理の経過は実行経過表示欄にメッセージとして表示される。ここに表示される内容はそのまま実行履歴ファイルにも出力され、後日舵角等を確認する際にこのファイルは有用である。正常に格子が生成さ

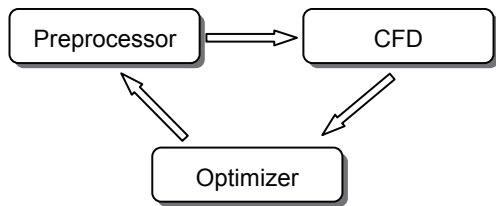


図 4 最適化設計ループ

れたのを確認後、保存ボタンを押すことで結果がファイルに出力される。なお、現時点で後縁フラップの操舵については未対応であり、今後対応していく予定である。

本ツールは高揚力装置の最適化設計システムに組み込む予定である。図 4に示すような、本ツールと CFD解析ソルバー、Optimizerを組み合わせたシステムを構築することで、高揚力装置の設計に要するコストの削減が期待できる。このような場合に対応するため、本ツールは人が GUIを用いて行うことと同じ処理を、バッチ処理によって自動的に行わせることも可能となっている。これにより、様々な設計パラメータの組み合わせに対して、自動的に形状と格子を生成することができる。

図 5に AutoFlap-GGの処理の流れを示す。起動スクリプトによって Gridgenが起動し、続けてパラメータ設定用 GUIが表示される。GUI上の実行ボタンが押されると、入力されたパラメータがパラメータファイルに書き出され、その後形状・格子修正の自動処理部に入る。バッチ処理時には、あらかじめパラメータファイルを用意しておき、バッチモードで AutoFlap-GGを起動することで、GUIを表示せずそのまま自動処理部に入る。このように、パラメータファイルを介して自動処理部に舵角等のパラメータを渡すことで、GUI使用時、バッチ処理時ともに共通のコードを自動処理部で使用できるようにしている。自動処理部では、まずパラメータファイルから舵角や出力ファイル名を読み込み、基本形態の形状・格子データファイルを読み込む。次に、基本形態データに対して形状・格子の修正処理を行う。生成された格子に対して、品質チェックとしてセル体積に相当する座標変換のヤコビアン の値を調べる。格子の品質チェックでは、他にセルのねじれやアスペクト比なども調べる必要があるが、ここでは取り扱わない。ヤコビアン の値が全ての格子点に関して正であれば、ブロックを分割し、データをファイルに出力する。ここでブロックの分割は、CFD計算時の並列計算効率を高めるために行っており、計算効率を考慮して、あらかじめ決められた分割位置でブロックを分割する。

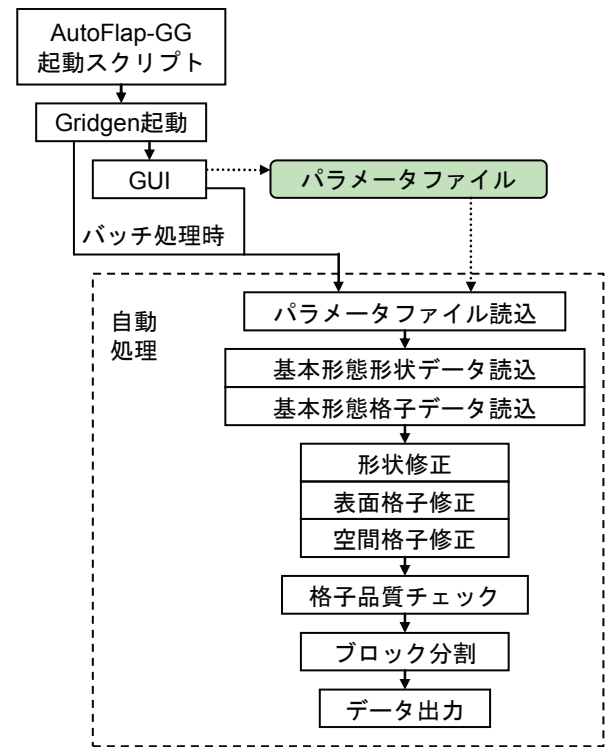


図 5 AutoFlap-GGの処理の流れ

4. 形状・格子生成の流れ

3次元マルチ・ブロック構造格子を生成するには多くの手順を踏まなければならない、これらを一から全てコードに組み込むことは困難である。また、格子点数や格子間隔の変更にも柔軟に対応できるツールが望ましい。そこで AutoFlap-GGでは、フラップ操舵前（舵角 = 0[deg.]）の基本形態格子に修正を加えることによって、フラップ操舵後の格子を自動生成している。基本形態格子のトポロジーや格子点数、格子間隔等は操舵後の格子にそのまま反映されるようにしている。そのため、AutoFlap-GGのコードを修正すること無しに、基本形態格子を変更することによって、生成後の格子をある程度変更できるようになっている。格子生成処理の手順は Gridgenにおける一般的な格子生成の流れと同じである。すなわち、

1. 形状修正
2. 表面格子修正
3. 空間格子修正

の順に処理を行っている。

4.1. 形状修正

まず、格子作成の基準となる機体表面形状の修正を行う。フラップ操舵に必要な処理は、

1. サーフェイスの回転
2. 回転によって生じるギャップの修復

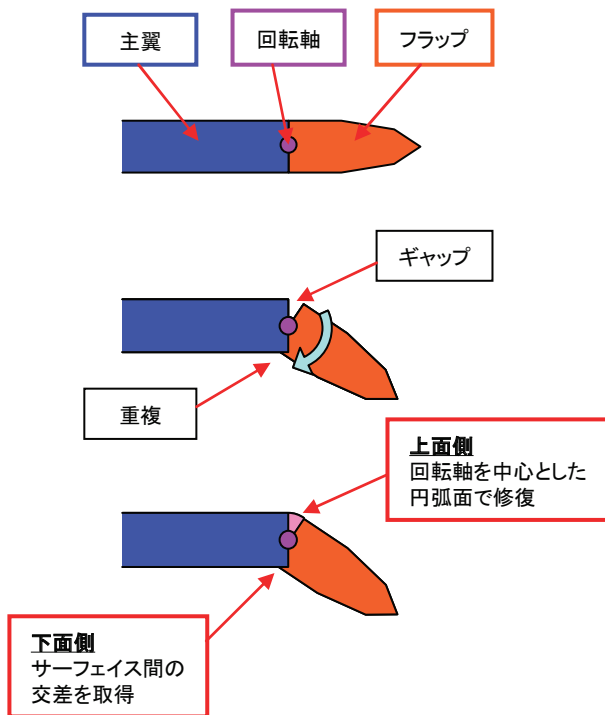


図 6 形状修正処理

3. 回転させたサーフェイスと翼下面との交差線の取得

である。このときの概念図を図 6 に示す。これらは比較的単純な処理であるが、交差線の取得については鈍角の大きさによって、交差線の数が変わることがあるため注意を要する。これは次の表面格子修正の処理にも影響する。ここでは、Gridgen 内での交差線の ID の順番が変わらないよう、交差を一度にはとらず、順番にとるようにした。ギャップの修復の方法は様々なものが考えられるが、ここでは単純に、ヒンジ・ラインを中心とした円筒面を用いて修復を行った。以上の処理を全てのフラップに対して行う。

4.2. 表面格子修正

表面格子は物体形状を正確に再現するために重要である。Gridgen では面格子 (surface grids) をドメイン、ドメインを囲む曲線状の格子 (curve grids) をコネクタと呼んでいる。ブロックは体積格子 (volume grids) であり、ドメインで囲むことによって作成される。

修正した形状に合わせてコネクタを修正し、その後ドメインの修正を行う。表面格子修正の流れを図 7 に示す。サーフェイス上もしくは交差線上のコネクタの位置は3次元座標系ではなく、図 8 に示すようなパラメトリック座標系で全て指定した。これによりコネクタが確実に形状上に乗ることが期待でき、形状データ

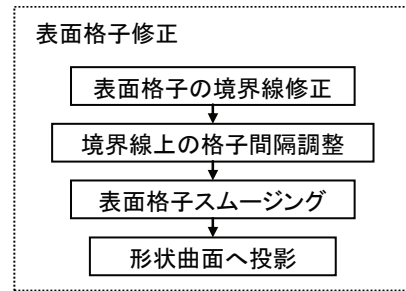


図 7 表面格子修正の流れ

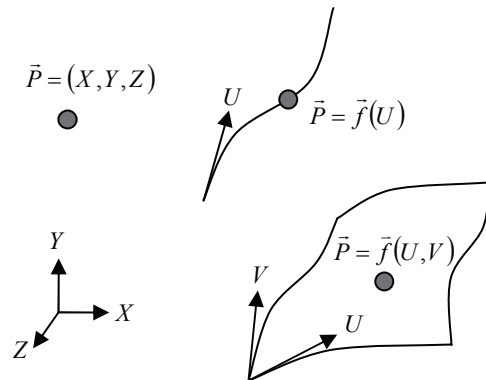


図 8 3次元座標系とパラメトリック座標系

が正しく作られていれば形状を正しく再現できることになる。また、コネクタは既存のものに修正を加えるのではなく、新しいコネクタを作成し、その後古いものと置き換えるようにした。このとき格子点数や分布は元のをコピーして、新しいものに反映させている。既存のコネクタに修正を加えた場合、処理の内容によっては他のコネクタやドメインに変更が加えられてしまう可能性がある。また、中間点の有無など、それぞれのコネクタに合った処理ルーチンを組み合わせる必要がある。それに対してコネクタを新たに作成する場合には、既存のコネクタの状態に依存せず、各点の座標がわかればよいので、処理ルーチンを一般化することができる。

コネクタ修正後、ドメインの修正を行い、格子点を機体表面上へ投影移動させる。Gridgen では代数型格子生成法 (TransFinite Interpolation, TFI) を用いて格子を生成し、楕円型格子生成ソルバー (elliptic PDE solver) を用いてスムージングを施すことができる。フラップ面上のドメインなど、多くの箇所はTFIだけで良好な格子を得ることができ、比較的領域の広い翼面上のドメインについてはスムージングを施した。スムージングを施すことによって、ドメイン内部の格子が滑らかになるだけでなく、境界付近の格子も隣接するドメインと滑らかにつながるように修正される。

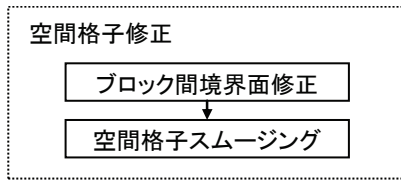


図9 空間格子修正の流れ

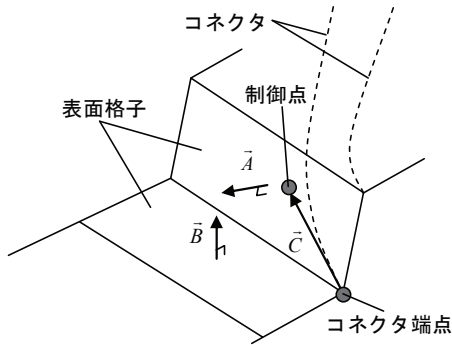


図10 空間中のコネクタ修正

4.3. 空間格子修正

空間格子の品質は、計算精度に影響を与える。空間格子修正の流れを図9に示す。トポロジーの関係から、フラップ間の隙間に位置するブロックは舵角が大きくなるとひずんでしまうが、同一のトポロジーで格子を生成するため、ここでは問題とはしない。ただし、ヤコビアン値は正になるよう調整した。空間格子の修正は主に機体表面から外に向かうコネクタを修正することで対応している。コネクタはBezier曲線で表現することができ、制御点を修正することで、格子の直交性をある程度制御可能である。制御点の位置はコネクタ端点に隣接する表面格子の法線ベクトルを用いて決定し、このときの概念図を図10に示す。制御点位置を決めるためのベクトル \vec{C} は以下の式で求めた。

$$\vec{C} = w_A \vec{A} + w_B \vec{B} \tag{1}$$

ここで、 \vec{A}, \vec{B} は隣接する表面格子の法線ベクトル、 w_A, w_B はそれぞれのベクトルの重みである。 w_A, w_B は試行錯誤を繰り返して、適切な値を求めた。フラップ舵角が大きくなると \vec{C} の主翼に垂直な成分が小さくなり、格子を適切に生成することができないため、さらに \vec{C} の値に制限を設けるなどで対応範囲を拡げた。

コネクタ修正後、ドメインとブロック内部の格子点はTFIを用いて修正した。舵角の組み合わせによっては、形状が複雑であるためにブロック内部の格子線が交差し、ヤコビアン値が負になる場合がある。ヤコビアンが負の場合には、ブロックを適切な位置で分割し、分割によってできたそれぞれのブロックに対してTFIを施すことで、格子の不具合を解消するようにし

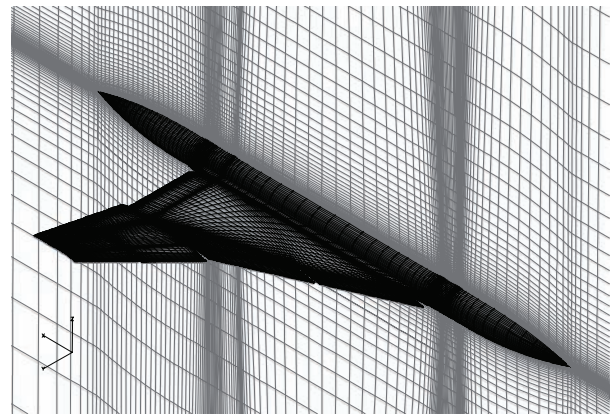
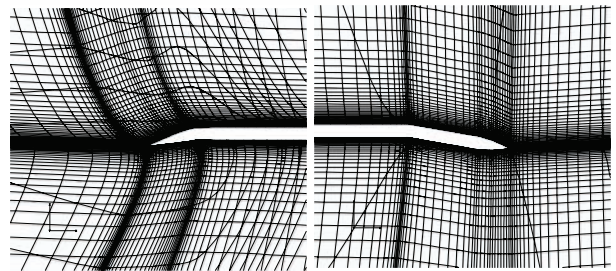
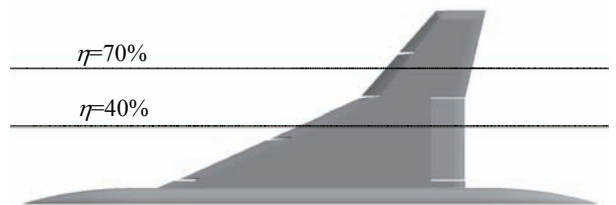
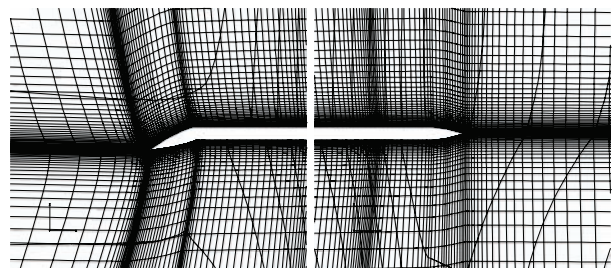


図11 AutoFlap-GGを用いて生成した格子



(a) η=40%



(b) η=70%

図12 翼断面格子

た。

5. 格子生成結果と計算例

本ツールで生成したフラップ操舵後の格子の一例として全体図を図11、前・後縁フラップを操舵した際の内、外翼断面の形状および格子を図12に示す。格子点数は約430万点である。格子トポロジーはH-H型格子を使用し、フラップ間に一個のブロックを配置している。計算効率を考慮して、最終的に計算格子は72個のブロックに分割される。従来の手作業による格子生成

表 1 計算例の入力値

フラップ	舵角[deg.]
LE-in_1	29.00
LE-in_2	31.00
LE-out_1	23.30
LE-out_2	26.70
TE	10.00

表 2 計算パラメータ

支配方程式	RANS方程式
乱流モデル	Menter's SST
一様流マッハ数	0.088
迎角	12 [deg.]
レイノルズ数	0.945×10^6

では1ケースで約1週間程度の期間を要するが、本ツールでは数分だけで完了する。

JAXA超音速機チームが独自に開発したCFD解析ツールを用いて、機体まわりの流れを解析した。図13に代表的な解析結果を示す。このときの形状パラメータを表1に、計算条件を表2に示す。図13のコンターは機体表面の圧力係数 C_p 分布を、等値線は総圧を示している。このような大きな後退角を持つ翼の場合、前縁剥離渦が発生するが、前縁フラップを操舵することによって前縁剥離渦が小さくなり、剥離が抑制されて、空力性能が向上することが期待される。

6. まとめ

高揚力装置として前縁・後縁フラップを採用した超

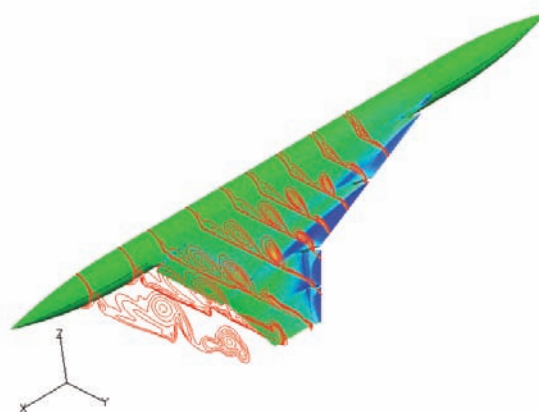


図13 CFD解析結果

音速機に対して、フラップ操舵後の形状と計算格子の自動生成を行うツールを開発した。市販格子生成ソフトGridgenを利用し、Gridgen独自のスクリプト言語であるGlyphを用いて、超音速機高揚力形態のフラップ操舵に伴い発生する形状作成と格子生成の操作作業を自動化した。従来の手作業に比べ、このツールを用いることで、格子生成に要する時間を飛躍的に短縮できるようになった。

今後、生成される格子品質のさらなる向上を図るとともに、パラメトリックスタディおよび最適化設計に本ツールを適用し、超音速機高揚力装置の設計を行う予定である。

参考文献

1. 雷忠, “超音速機高揚力装置に関する数値解析及び考察”, 宇宙航空研究開発機構報告, JAXA-RR-07-050.
2. Pointwise Inc., “Gridgen User Manual,” Version 15, 2006.