

部分境界適合直交格子法の高速度化と陽的な格子解像度制御

Explicit Grid Resolution Control for Body-fitted Cartesian Grid Method

- 藤本圭一郎, JAXA/JEDI, 〒 229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1, fujimoto.keiichiro@jaxa.jp
- 藤井孝藏, JAXA/JEDI, 〒 229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1, fujii@flab.eng.isas.jaxa.jp
- Zhi Jian Wang, Iowa State University, Ames Iowa 50011-2271, zjw@iastate.edu

Keiichiro FUJIMOTO, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa 229-8510

Kozo FUJII, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa 229-8510

Zhi Jian WANG, Iowa State University, Ames Iowa 50011-2271, zjw@iastate.edu

In order to improve efficiency of the body-fitted Cartesian grid method and to make it possible to apply a geometry which includes complicated features such as small gaps, an extruded ghost surface is utilized. In the proposed approach, the grid front is generated by Cartesian grid generation over the ghost surface instead of the near-surface cell removal, which results in the faster turnaround and the flexibility to handle complicated geometry. By controlling direction and length of an extrusion displacement vector and by coloring ghost surface faces based on the desired grid resolution, an arbitrarily-shaped grid front can be obtained.

1. はじめに

現在, 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では有人宇宙輸送を含めた多様な宇宙開発の実現に向けて, 次世代ロケットの開発や再使用型宇宙往還機の技術実証試験が進行中である. その中でも, 概念設計の段階から適材適所に数値シミュレーション技術を活用した高信頼性開発手法の確立は我々の大きな課題のひとつである. その一環として設計の中でも概念設計における多分野横断的なシステム検討の重要性に着目し, 時間的コストの面でポトルネックとなっている空力性能評価をの劇的な効率化を目標に, 部分境界適合直交格子 (Body-fitted Cartesian:BFC 法) をベースとした空力解析ツールの開発を本研究では行ってきた [1,2]. BFC 法は, 非構造ハイブリッド法と比して少ないセル数で三次元空間を埋められること, 複雑形状への適合性が高いこと, 解適合格子細分割が格子の質を落とさずにできること, 空間高次精度手法が適応可能であること等の, 初期設計段階で利用する上での多くの利点を持っている.

BFC 法では, Fig. 1 に示すように, まず最初に (A) 計算空間領域に従来の直交格子セルを生成し, (B) 物体近傍の直交格子の除去により物体適合格子を生成するための領域を確保し, (C) 物体最近傍のセルフエッジ面 (Cartesian front) をスムーズに, (D) 最後にその Cartesian front を物体表面へ投影することで境界層格子を生成する. 従来の非構造ハイブリッド格子法では, 表面格子を生成しそれを元に体積格子を生成するため, 表面格子の質が悪くと体積格子がひしゃげて正常に生成できない場合がある. 一方, BFC 法では, Fig. 2 の右図に示すように, セルの細分割と除去処理により入力形状の種類に合わせた任意形状の格子面 (Grid front) を生成することができ, 体積格子のセルがひしゃげる心配もない. したがって, 構造ハイブリッド法と比して複雑形状の適合性が向上されることが期待されるが, そのためには入力形状に応じ, いかにか”適切なセルの細分割と除去”を行うか鍵である. また, BFC 法では, Fig. 1 中の手順 (B) の後の直交格子セルの分布によって最終的な表面格子分布を決定されるため, セルの細分割と除去の際には表面格子分布の考慮も行う必要がある. これまでの BFC 法に関する研究では, 物体近傍セルの除去は, 各セル節点からの物体表面までの距離や [1], 物体側からの指定した層数 [3,4] に基づいて除去するセルを決定することで行われる. しかし, 前者ではスムーズな Cartesian Front が得られるものの, セル節点ごとの物体上の最近傍点探索が必要であり処理時間が増大してしまう課題があり, 後者では高速であるもののスムーズな Cartesian Front が得にくいという欠点がある. さらに, BFC 法を小さい隙間を含む形状に適用する際に, セルの除去幅を隙間部分付

近で小さくなるようにコントロールしないと, Fig. 3 の上図に示すように入力形状全体をカバーする Cartesian front が得られないため正常に格子生成を行うことができない. このような形状に対し BFC 法を適用するためには, 形状の特徴に応じて隙間部分で物体適合格子の厚みをコントロールする必要があるが, 上記に述べた両手法ともに陽的に物体適合格子の厚みをコントロールすることができない問題がある.

そこで本研究では, これらの課題に対しスムーズな Cartesian front が高速に得られ, 陽的な表面格子分布の制御と陽的な物体適合格子の厚みの制御が可能な手法を開発したので, ここに報告する.

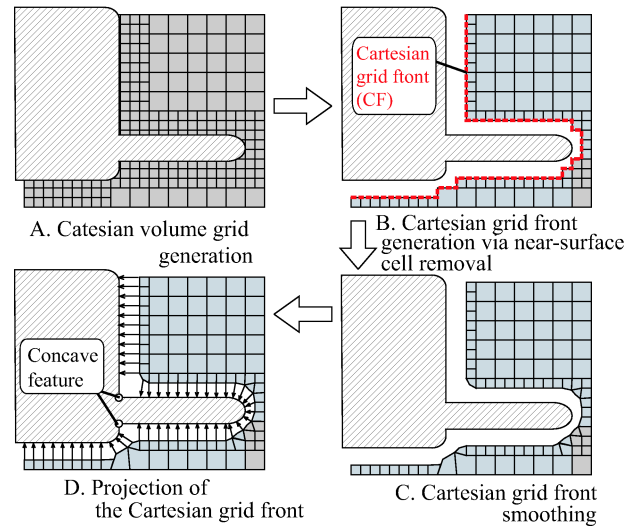


Fig. 1: Process overview of body-fitted Cartesian grid method.

2. ゴーストサーフェスを利用した BFC 法

Figure 4 に, 本研究で提案する BFC 法の手順を示す. 従来法との違いは手順 (A) および (B) による Cartesian front の生成法にある. 本手法では, 空間直交格子の生成前に, 非構造格子法で用いられる手法を用いて [5], 表面のノード上に法線ベクトルを生成しそれを元に, 法線ベクトル方向に入力形状を押し出すことでゴーストサーフェスを生成する. そのゴーストサーフェス周りに直交格子を生成することで, 自動的に入力形状と直交格子の間に物体適合格子を生成するための空間を確保するこ

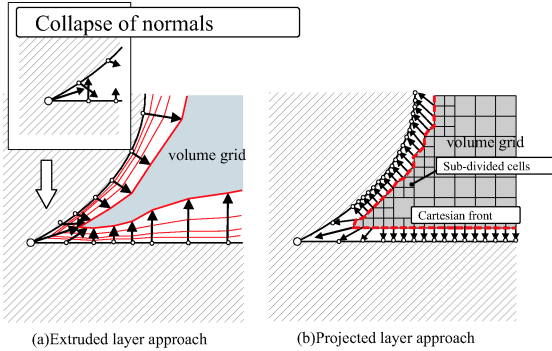


Fig. 2: Comparison of layer grid generation methodology between extruded layer approach and projected layer approach.

とができる. この直交格子の生成には通常の直交格子の生成コードが利用できるためアルゴリズムとしてもシンプルで高速である. また, 前述のような小さい隙間を含んだ入力形状に対しては, 隙間部分でゴーストサーフェス生成時の法線ベクトルの長さを隙間距離よりも十分に小さくし, その周囲に十分に小さい直交格子セルを生成することで Fig. 3 の下図に示すような適切な Cartesian front を得ることができる. 以下に Fig. 3 に示した航空機の高揚力装置を例題に必要な処理の詳細について述べる.

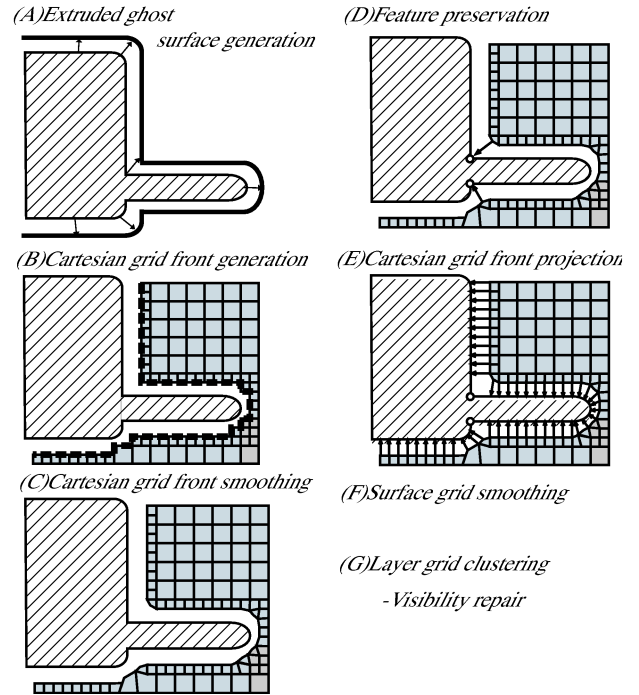


Fig. 4: New body-fitted Cartesian grid method based on an extruded ghost surface.

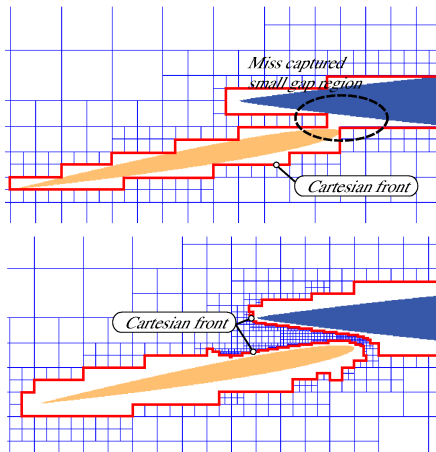


Fig. 3: Small gap treatment for high-lift devices.

2.1 小さい隙間領域の抽出

小さい隙間領域の抽出には, 入力形状の三角形要素の面ベクトルをベースとしたアルゴリズムを用いている. まずはじめに隙間領域であると認識する閾値である間隔 D_{ngap} と, 法線ベクトル同士の角度の閾値である $\theta_{ngap,1}$ と $\theta_{ngap,2}$ をユーザー入力として指定する (デフォルト値は $\theta_{ngap,1} = 120.0$, $\theta_{ngap,2} = 45.0$). 指定した閾値を元に, 二つの三角形要素間で以下の式を用いて評価を行い, $flag=1$ であれば隙間領域としてマーキングすることで Fig. 5 の中央図のような三角形要素がマーキングされる (図中:1st detection).

$$\begin{aligned}
 flag &= |\vec{V}_p| < D_{ngap} \\
 \&\& \text{angle}(\vec{n}_i, \vec{n}_j) < \theta_{ngap,1} \\
 \&\& \text{angle}(\vec{n}_i, \vec{n}_p) > \theta_{ngap,2} \quad (1)
 \end{aligned}$$

ここで \vec{n}_i は, 要素 (i) の法線ベクトルであり, \vec{V}_p は要素 (i) の重心と, その重心からのみ要素 (j) 上の最近傍点から定義されるベクトルである. 更に, 残りの Fig. 5 の中央図において点線で示された三角形要素を抽出するために以下の式を用いてマーキングを行う. ここで, $\theta_{ngap,3}$ と $\theta_{ngap,4}$ は法線ベクトル間の関係性を制約する閾値であ

りデフォルト値として $\theta_{ngap,3} = 87^\circ$ と $\theta_{ngap,4} = 90^\circ$ が用いられる。

$$\begin{aligned}
 flag &= |\vec{V}_p| < D_{ngap} \\
 \&\& \text{ angle}(\vec{n}_i, \vec{n}_p) > \theta_{ngap,3} \\
 \&\& \text{ angle}(\vec{n}_j, \vec{n}_p) < \theta_{ngap,4}
 \end{aligned} \quad (2)$$

Figure 6 に、燃焼室とノズルを含めたロケット形状と高揚力装置の例について隙間部分を抽出した例を示す。この抽出した隙間領域の三角形要素に対して以下に述べるゴーストサーフェス生成時の移動法線ベクトルの長さ制御と、直交格子のセルサイズの制御を行う。

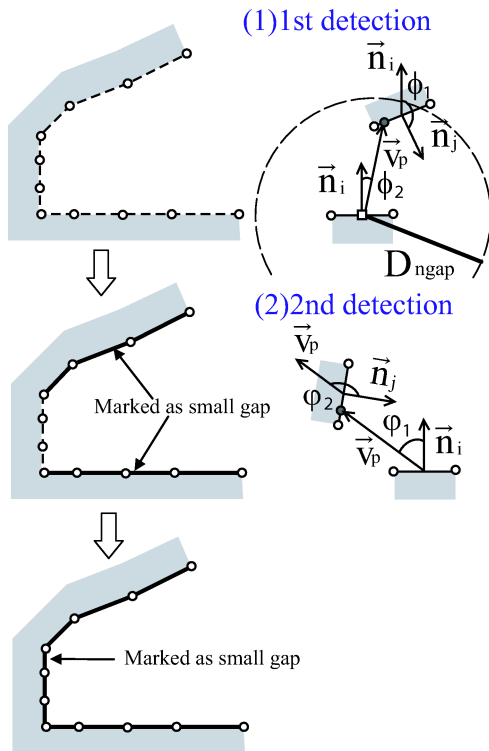


Fig. 5: Small gap detection algorithm.

2.2 隙間を含む形状に対するゴーストサーフェス生成法

隙間を含んだ形状に対し BFC 法を適用するためには、対抗するゴーストサーフェスどうしの干渉を防ぐ必要がある。したがって、上記の手順で抽出した隙間領域について、ゴーストサーフェス生成のための移動法線ベクトル長さを十分に小さく指定することで適切なゴーストサーフェスを生成することができる。高揚力装置に対して、隙間領域を抽出し生成したゴーストサーフェス例を Fig. 7 に示す。対抗するものどうしが干渉しない適切なゴーストサーフェスが得られていることが分かる。現在は、この移動法線ベクトル長さはユーザーが指定しているが、将来的には入力形状のトポロジー情報などを距離関数などを用いて解析することにより処理の自動化も可能であると考えている。

2.3 隙間を含む形状に対する直交格子セルサイズの制御法

本研究で提案する BFC 法では、この上記までの手順で生成したゴーストサーフェス周りに直交格子を作成する。前述したように隙間を含む形状を取り扱うためには隙間に該当する領域で、直交格子セルサイズが十分に小さく

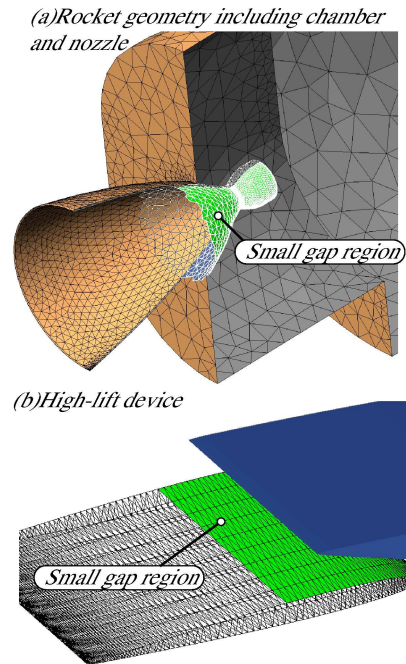


Fig. 6: Small gap detection test cases.

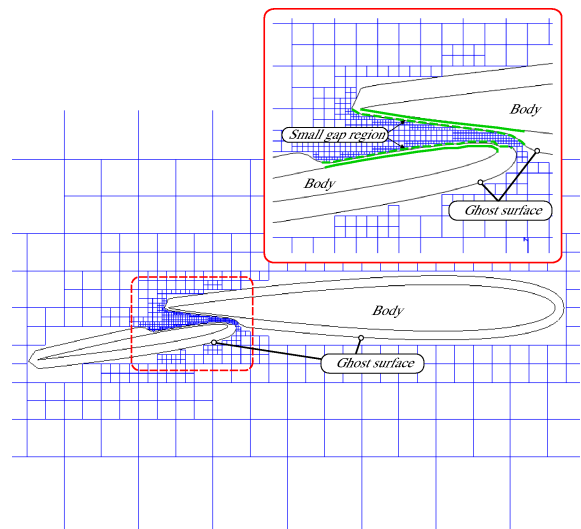


Fig. 7: Small-gap detection and generated Cartesian grid over the ghost surface for high-lift device.

なるように制御する必要がある。現段階では、ゴーストサーフェスの各三角形要素に所望の格子セルサイズに関するフラグを持たせる方法(サーフェスソース)を用いている。Figure 7 の例では、隙間領域として抽出された三角形要素面の集合に対し十分に小さなセルサイズを指定し、その要素と交差するカットセルのサイズを指定したサイズになるまで細分割を続ける処理を行っている。ここで指定するセルサイズが十分に小さければ、Fig. 7 に示すような適切な Cartesian front を得ることができる。

2.4 特徴線保持と境界適合格子の生成

以上の手順を用いることにより小さな隙間を含んだ形状に対しても、高速かつロバストに Cartesian front を生成することができる。その後の処理としては、Fig. 4 に示すように Cartesian front をラプラス型の方程式を用いてスムージングし、抽出した特徴線の保持を行い、最終的に Cartesian front を物体表面に投影することで物体適合格子を生成する。これらの処理の詳細については、参考文献 1, 2 に記載されているので参考にさせていただきたい。

3. 陽的な格子解像度制御法

BFC 法を用いる際の格子解像度のコントロール方法は、大きく物体表面格子に関するコントロール(サーフェスソース)と、空間格子分布に関するコントロール方法(ボリュームソース)があげられる。Figure 4 中の手順(B)のゴーストサーフェス周りに直交格子を生成する際に、物体の曲率情報などを元に直交格子セルの細分割を行うことにより曲率変化の大きい領域に小さな表面格子を生成することができる。さらに、ロケットエンジンのノズル流れ解析のように、曲率変化の関係ない空間部分において十分な格子解像度配置の必要なケースに対しては、直交格子の生成の際に、Fig. 8 及び 9 に示すような球体を作成し、その球に含まれるセルを、指定したセルレベルまで細分割することにより、ユーザーが陽的に格子解像度を容易にコントロールすることができる。Figure 8 のノズル内部流れ解析の例では、ノズル内部では格子サイズが連続的に変化することが望ましいため、ノズルを包含するような球体を作成しある一定のセルレベルまで細分割させることにより、セルレベルがスムーズに変化する空間格子を得ることができる。

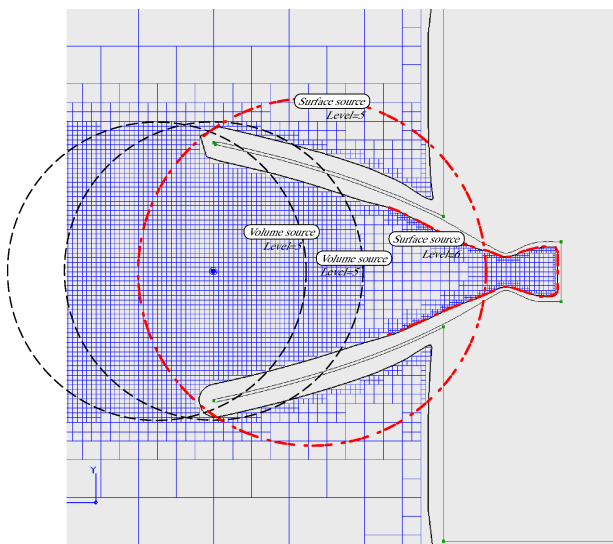


Fig. 8: Explicit grid resolution control by using surface and volume source for rocket geometry.

4. 格子生成例

本研究で提案したゴーストサーフェスをベースとした BFC 法の有効性を確認するために宇宙輸送往還機、航空機および内部流問題の中で小さい隙間を含んだ代表的な

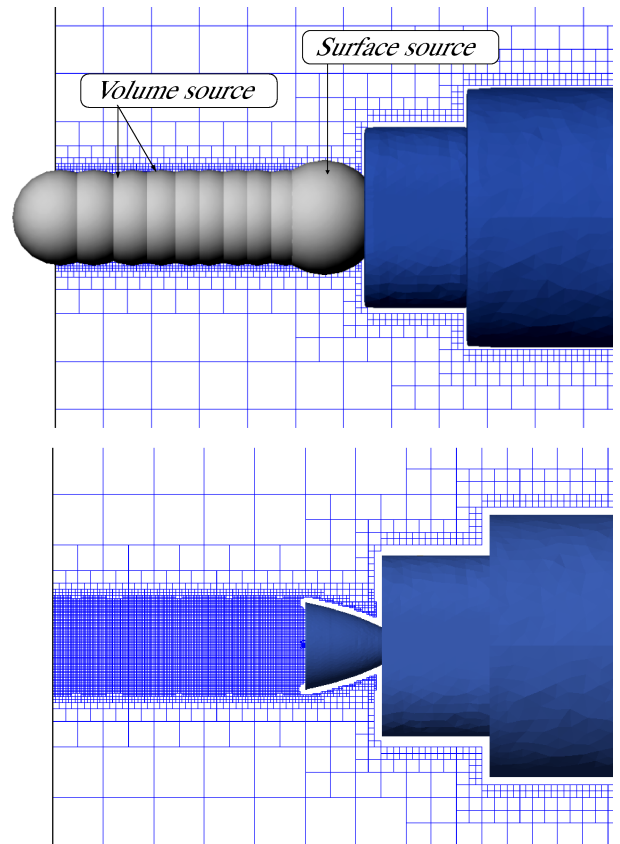
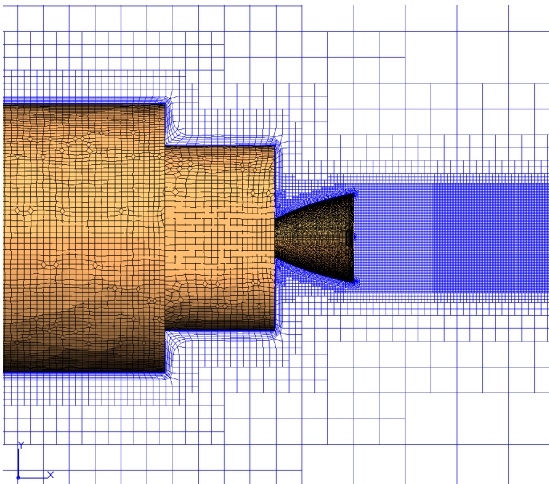


Fig. 9: Explicit grid resolution control by using volume source for external region of rocket geometry.

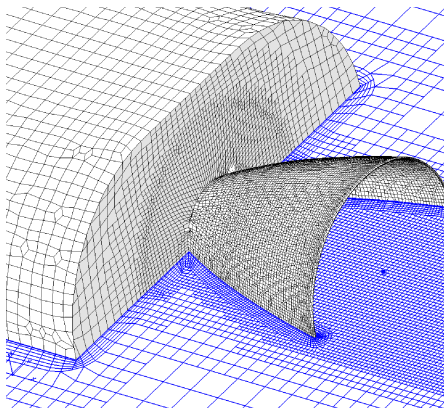
問題に対し、本格子生成手法の適用を試みた。宇宙往還機形状としては小さな隙間としてエンジン燃焼室を含んだロケットエンジン付きロケット形状、航空機形状としては高揚力装置形状を選定した。いずれも、今後の次世代宇宙輸送システム開発および航空機開発においてキーとなる流体解析対象である。

4.1 ロケットエンジン付きロケット形状

この例に関する隙間領域の抽出結果は Fig. 6 に、その領域での直交格子セルサイズの制御の適用結果は Fig. 8 に既出である。適切な Cartesian front のスムージング処理および特徴線保持処理等を行うことにより、ノズル後方の空間領域に格子解像度の集中した格子が得られていることが分かる。



(a) Surface grid and sectional view of the volume grid in the symmetric plane for rocket geometry.



(b) Close-up view of surface grid and sectional view of the volume grid in the symmetric plane for rocket geometry.

Fig. 10: Body-fitted Cartesian grid over the rocket geometry.

4.2 航空機の高揚力装置

航空機形状の小さい隙間を含む例として高揚力装置形状について、本格子生成手法を適用した結果を Fig. 11 に既出である。この例についても、隙間領域の抽出結果は Fig. 6 に、その領域での直交格子セルサイズの制御の適用結果は Fig. 7 に示す。

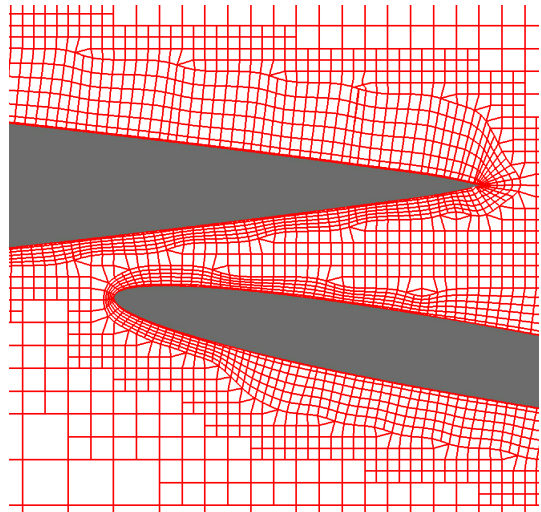


Fig. 11: Sectional view of body-fitted Cartesian grid for high lift device.

5. まとめ

部分境界適合直交格子法の抱える課題である物体近傍セルの除去処理の高速化、および小さな隙間を含んだ形状への適用のために欠かせない陽的な物体適合格子の幅の制御や格子解像度の陽的なコントロール方法を提案し、その有効性を検証した。具体的には、入力形状の各三角形要素を法線方向に押し出すことで生成するゴーストサーフェスを用い、その周囲に直交格子を生成することで Cartesian front を取得する方法を提案した。これによりスムーズな Cartesian front の取得が高速で可能であり、任意の開空間および入力形状付近での格子解像度を陽的にコントロールすることもできる。本格子生成手法を代表的な実ロケット形状、航空機の高揚力装置形状に適用し、その有効性を確認した。

参考文献

1. Fujimoto, K. and Fujii, K., "Study on the Automated CFD Analysis tools for Conceptual Design of Space Transportation Vehicles," FEDSM 2007-37128, Proc. 5th ASME/JSME Joint Fluid Engineering Conference, San Diego, California, July 2007.
2. Fujimoto, K. and Fujii, K., "Optimization-based Robust Feature Preserving Technique for Body-fitted Cartesian Grid Method," 10th International Conference on Numerical Grid Generation in Computational Field Simulations (CD-ROM), Crete, Greece, September 2007.
3. Wang, Z. J., "An Automated Viscous Adaptive Cartesian Grid Generation Method for Complex Geometries," in Proceedings of the 6th International Conference on Numerical Grid Generation in Computational Field Simulations, University of Greenwich, London, England, 1998.
4. Lahur, P. R., "Automatic Hexahedra Grid Generation Method for Component-based Surface Geometry," AIAA Paper 2005-5242.
5. Kallinders, Y., and Ward, S., "Prismatic Grid Generation for 3-D Complex Geometries," *AIAA Journal*, Vol. 21, No. 10, 1993, pp. 1850-1856.