

# 2次元直交格子を用いた shock-fitting 法の基礎的研究

## Fundamental Study on the Shock-Fitting Method Using 2D Cartesian grid

○ 西尾朋人, 東大, 東京都文京区本郷 7-3-1, E-mail: nishio-tomohito048@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

今村太郎, 東大, 東京都文京区本郷 7-3-1, E-mail: imamura@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

Tomohito NISHIO, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

Taro IMAMURA, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

Abstract must be 100 – 150 words using 9pt Times font. This is a simple example of how to prepare the paper for CFD39. The headings should appear as above. The instruction is written in the main body. Abstract must be 100 – 150 words using 9pt Times font. This is a simple example of how to prepare the paper for CFD39. The headings should appear as above. The instruction is written in the main body.

### 1. 序論

### 2. 手法

#### 2.1 Shock-Capturing 法 Euler 方程式ソルバー

圧縮性 Euler 方程式を直交格子有限体積法 (FVM) で解く。セル内物理量の再構築には MUSCL 法を用いる。物理量の勾配計算は WLSQ(G) 法により行い、制限関数として Van Albada リミッターを用いる。近似 Riemann ソルバーとして AUSM 族 SLAU スキームを使用する。時間積分は陽解放の 3 次精度の TVD Runge-Kutta 法で行う。CFL 条件は各セルの幅  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ , 流体速度  $u_{i,j}$ ,  $v_{i,j}$ , 音速  $a_{i,j}$  を用いて、式 (1) で定める。

$$\Delta t = \frac{\text{CFL}}{\max \left( \frac{|u_{i,j}|}{\Delta x} + \frac{|v_{i,j}|}{\Delta y} + a_{i,j} \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}} \right)} \quad (1)$$

直交格子に沿わない物体境界での境界条件には、埋め込み境界法 (Immersed Boundary Method, IB 法) を用いる。

#### 2.2 不連続領域の判定・抽出

##### 2.2.1 圧縮性の顕著なセルの特定

セルごとの圧縮性の定量的な評価法として、速度場の発散を用いる。SC 法 CFD の計算結果から、各セルで速度の発散を計算し、その 2 乗平均平方根 (RMS) を算出する。速度の発散がこの RMS より大きいセルを、圧縮性が顕著なセルとし、不連続領域と特定する。

##### 2.2.2 Connected Component Labeling

[2.2.1] で評価した圧縮性の顕著なセルは、数値的な速度発散に基づく定義であるため、物理的に意味のない領域 (ノイズや離小島) を含む場合がある。これらの不要な領域を自動的に除去し、物理的に意味のある高圧縮性領域のみを抽出するために、Connected Component Labeling (CCL) によるクラスタリング処理を適用する。[2.2.1] で評価された圧縮性の顕著なセルについて、同様のセルを縦横斜め 8 近傍に持つ場合に、それらを同一グループとしてクラスタリングしていく。得られた各クラスターごとにそのサイズ (属するセル数) を計算し、計算領域の全セル数に対して一定割合未満の小さい連結グループをノイズとして除去対象とする。こうして、対象となる比較的大きなクラスターのみを残し、物理的に意味のある領域を選別可能とした。この処理には Python の数値処理ライブラリ NumPy および SciPy の `ndimage.label` 関数を用いる。

##### 2.2.3 不連続領域の Skeleton 化

Python の `skimage.morphology.skeletonize` 関数を用いて、[2.2.2] で得たクラスターの主要骨格をセル 1 ピ

クセル幅で取得する。この結果を Python の `networkx` を用いて処理する。本研究では干渉のない一つの衝撃波を扱うため、主要骨格セルの中の最長経路を特定する。`networkx` は分岐や経路処理に強いので、今後衝撃波干渉や分岐などを扱うにあたって、この手法は応用性が高いと考えた。

##### 2.2.4 衝撃波面の Spline 近似

[2.2.3] で得た不連続領域の最長骨格に対し、SciPy.interpolate の `splprep`, `splev` 関数を用いて spline 補完を行う。ここで、ユーザー任意のサンプリング点数の shock-points を任意の滑らかさで用意できる。

#### 2.3 Shock-Fitting 法

[2.1],[2.2] で、SC 法 CFD の計算結果と初期衝撃波位置、shock-points が用意される。ここで、直交格子のセルは各 1 つの物理量を持つのにに対し、shock-points は衝撃波直前と直後の 2 つの値を持つ。Shock-Fitting 法 (SF 法) では、はじめに不連続領域を除く衝撃波上流と下流で独立して SC 法 CFD を行い、タイムステップを  $\Delta t$  進める。次に、その情報を shock-points に外挿し、Rankine-Hugoniot 条件を課すことで、shock-points での上流・下流の 2 つの物理量と shock-points の速度が決定される。これにより、不連続領域でもタイムステップを  $\Delta t$  進めることができる。この情報をフィードバックし、再び不連続領域を除く衝撃波上流と下流で独立して SC 法 CFD を実行する。このプロセスの繰り返しにより、直交格子のセルと shock-points での物理量、shock-points の位置が時間発展する。

##### 2.3.1 衝撃波面と交差する Blanked cells のラベリング

##### 2.3.2 Adjoining Boundary cells, Surrogate Boundary cells のラベリング

##### 2.3.3 上流セル・下流セルの識別

##### 2.3.4 不要な Shock Nodes の除去

##### 2.3.5 SC 法ソルバーによる計算領域での CFD の実行

##### 2.3.6 衝撃波法線ベクトルの計算

### 2.3.7 Surrogate Boundary cells から Shock Nodes への値の外挿

### 2.3.8 Shock Nodes での Rankine-Hugoniot 条件の適用

### 2.3.9 時間積分による Shock Nodes の進行

### 2.3.10 Shock Nodes から Adjoining Boundary, Blanked cells への値の外挿

## 3. 結果

### 3.1 1 次元非定常垂直衝撃波

### 3.2 2 次元定常斜め衝撃波

### 3.3 2 次元定常角柱離脱衝撃波

### 3.4 2 次元定常円柱離脱衝撃波

## 4. 結論

## 参考文献

- (1) 荒川, 谷口, “論文の書式について,” 第 17 回数値流体力学講演論文集, 1 (2003), pp. 1-1.
- (2) Arakawa, C. and Taniguchi, N., “How to prepare the paper,” Proc. 17th CFD Symp., 1 (2003), pp. 1-1.