

画像データで流れシミュレーション

Let image data drive flow simulation

大島 伸行¹⁾, 中道 信人²⁾

Nobuyuki Oshima and Nobuto Nakamichi

1) 工博 北海道大学工学研究院 教授 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目, E-mail: oshima@eng.hokudai.ac.jp)

2) 北海道大学工学院修士課程 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目, E-mail: nakamichi.nobuto.n7@elms.hokudai.ac.jp)

Let's try a flow simulation using image data? Immersed Boundary Navier Stokes equation (IB-NS) makes it possible. This report introduces how to classify various formats of image data that express 2D and 3D shapes and to extract the object shape information (level set function on the computational grid) required for flow calculations from them, as well as examples using 2D photographs and 3D data such as CAD, point clouds and binary images.

Key Words : Flow simulation, Image data, Immersed boundary Navier-Stokes, Level-set

1. はじめに

工学設計において、目標とする流れを実現する一般的な方法は、特定の境界形状（物体形状）を与えることである。この目標のために、飛行機翼、回転機械、管路、ノズルなどの様々な流体装置が、主に経験的知見によって設計されている。しかし、流れのもつ非線形性のために、境界形状の変化から生じる流れを推定することは困難であり、一般には数値シミュレーションに頼ることとなる。

この過程を形式的に考えて、入力である境界形状に対して、出力となる流れ分布を対応させる「手順」と見なせば、工学設計が求めることは目標となる出力（流れ分布）から入力（境界形状）を推定する「逆手順」となる。この目的のために様々な最適化手法が工夫されるが、流れシミュレーションをそこに組み込む際の要点は、入力データと出力データをいかに規格化するかにある。これらを少ないパラメータに集約できるならば最適化は容易に導入される。たとえば、入力データを数式化した翼モデル、出力データを揚抗力に限定すれば、比較的少數のデータベースから設計が可能となる。

より一般的な規格化を考えるとき、入力（形状）を与える計測（あるいはCAD）と、出力となる数値シミュレーションをいすれも「画像データ」を見なすことができる。たとえば、規格化された格子点、特にその最も単純なものとして等間隔デカルト座標格子による数値シミュレーションを想定すると、その結果出力はTVやCTなどのデジタル画像と共にフォーマットで規格化されている。よって、数値シミュレーションは「（入力）画像データ」から（出力）画像データ」を与える手順であり、設計はその「逆手順」を求める作業となる。

上記目的に沿ってデジタル画像により境界形状を定義する方法としてレベルセット法が一般に適用できる。一方、レベルセットで表された境界形状より流れ分布を与

える方法として、Oshimaによる境界埋め込み流れ方程式（Immersed Boundary Navier-Stokes equation：以下IB-NS）が提案されている。これらから工学設計（＝逆手順）を記述する最初のステップとして、まず、「手順」を明らかにしておくことを本研究の目的としたい。

以下では、入力としていくつかの代表的な2次元、3次元「画像データ」を取り上げ、出力として流れ分布を「画像データ」として得るための具体的な「手順」を記述して、それらの一般化を試みる。

2. 境界埋め込み流れ方程式

始めに、OshimaによるIB-NSの定式と計算方法を簡単に示しておく[1][2]。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \mathcal{E}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathcal{E} \mathbf{v} &= 0 & \square \text{ wall model} \\ \frac{\partial \rho \mathcal{E} \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathcal{E} \mathbf{v} \mathbf{v} + \mathcal{E} \nabla p - \nabla \cdot \mathcal{E} \Sigma - \mathcal{E} \mathbf{f}_w &= 0 & (1) \\ \Sigma &= \mu_1 (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^t) + \mu_2 (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} \end{aligned}$$

非圧縮性流れでは密度一定となり、上記を基礎式として速度ベクトルと圧力が求まる。赤枠□が従来ナビエ・ストークス方程式との差異であり、固体境界の効果を境界条件の替わりに記述する。

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= \frac{1}{2} \left\{ \tanh \left(\frac{\xi}{\Delta} \right) + 1 \right\} & \xi : \text{符号付き距離関数} \\ \mathbf{f}_w &= -\alpha \mu_1 \left\{ \frac{\mathcal{E}(1-\mathcal{E})^2}{\Delta} \right\} \mathbf{v} & \alpha = 0 \text{ (slip)}, 32 \text{ (noslip)} & (2) \end{aligned}$$

ここで、 \mathcal{E} はレベルセット関数として固体境界近傍の有限厚み領域を定義する。その数値は流体部で1、固体部で0となるように符号付き距離関数 ξ の関数として与えられ、物

理的には流体占有率（多孔率）を意味する。

上記 IB-NS モデルの解には物体形状の影響が「埋め込まれ」ているので、壁面に境界条件を必要としない。よって、境界条件に適合させる格子生成も不要で、計算効率を優先考慮して等間隔デカルト格子が一般に使用できる。このとき、境界領域の厚さパラメータ Δ は格子幅 dx と同オーダー ($\Delta=1.5dx$ 程度が推奨される) に与えることで、境界形状が解像度に応じた精度で評価される。

本報事例では非圧縮性流れに対してコロケート格子 MAC 法を適用した。圧力ボアソン式は以下となる。

$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla p) = \frac{\partial D}{\partial t} - \nabla \cdot \mathbf{f} + \nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{f}_w) \quad (3)$$

$$\mathbf{f} = \nabla \cdot \rho \varepsilon \mathbf{v} \mathbf{v} - \nabla \cdot \varepsilon \mathbf{\Sigma}, \quad D = \nabla \cdot \rho \varepsilon \mathbf{v}$$

時間離散化は MAC 法アルゴリズムに従い、修正された連続条件はオイラー陰解法で評価される。

$$\bar{D} = -\frac{\rho \varepsilon^{k+1} - \rho \varepsilon^k}{dt}, \quad \bar{D} \cong (\nabla \cdot \rho \varepsilon \mathbf{v})^{k+1} \quad (4)$$

(境界静止 : $\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} = 0$ なら $D \rightarrow 0$)

これらの離散化系は境界条件を考慮しない従来ナビエ・ストークス方程式と同等の条件

$$CFL = |\mathbf{v}| dt / dx < 1, \quad Pe = \rho |\mathbf{v}| dx / \mu_i < 2 \quad (5)$$

で安定解を与える。

3. 画像データで駆動する流れシミュレーション

(1) 境界面 (STL) データ

最初に従来の境界条件設定との対比として、表面 CAD に広く用いられる STL データによって固体境界が与えられる事例をとりあげる。計算の「手順」は以下となる。

入力画像データの設定 :

- 物体境界を含む計算領域を定義し等間隔デカルト格子を設定
- STL データに対して幾何計算により格子点での符号付き距離を算出

画像データからレベルセットデータへの変換 :

- 厚さパラメータ Δ を定めて距離関数から格子点上のレベルセット関数 ε を算出

レベルセットデータから解析データへの変換 :

- 物体境界以外の境界条件（流入・流出など）の設定
- MAC アルゴリズムに従い IB-NS 方程式を求解
- IB-NS 方程式の離散化解（速度および圧力）を画像データとして格子点に表示出力

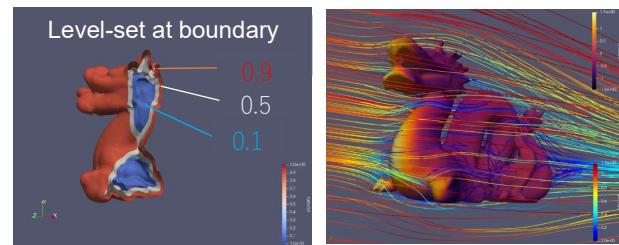


図-1 三次元 STL データより変換されたレベルセット、および、流れシミュレーション可視化（サンプルデータとして Stanford dragon[3] を参照）

ここで、最後の手順は「流れシミュレーション」を選択すると全ての入力データに共通である。よって、前段 2 つの手順が従来の境界条件を与える解析法での「計算格子生成」に対応する。以下では、様々な入力データに対しての手順を例示する。

(2) 二次元カラー画像データ

容易に入手可能なデジタル画像として 2 次元カラー画像をとりあげる。これは一般に、等間隔デカルト格子上に配置された色輝度データで与えられる。これに対する計算の「手順」例を示す。

入力画像データの設定 :

- 画像より不要な情報を削除（平滑化）
- 画像解像度を求める精度に調整
- 画像データを計算領域に拡張し格子点を定義

画像データからレベルセットデータへの変換 :

- 色輝度を境界抽出可能なグレースケールに変換
- 境界値を定めて二値化または多階調データに変換
- 拡散処理により連続分布画像 ε に変換

レベルセットデータから解析データへの変換 :

- 前項と同じ（以下省略）

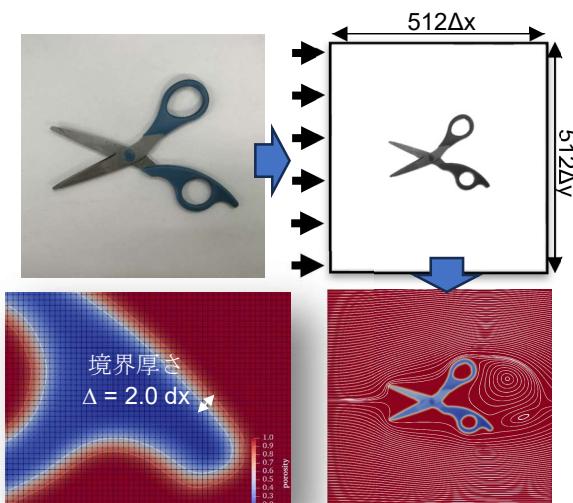


図-2 二次元画像によるシミュレーション駆動
左上：元画像、右上：計算領域とグレースケール化、
左下：レベルセット（拡大）、右下：流線可視化[4]

ここでは、格子点上に連続分布をもつレベルセット関数 ϵ 近似として画像の拡散フィルター処理を用いた。入力画像が境界抽出を目的としたものや単調（単色）イラストのように元画像の境界輪郭が鮮明であれば、適切な拡散フィルター処理のみで必要とするレベルセット関数 ϵ が算出できるであろう。上記手順が定める画像変換を予め確定して画像取得の際に考慮設定できれば、特定目的画像（たとえば、医療レントゲン画像）から数値シミュレーション駆動の自動化が期待できる。

（3）三次元二値化データ

本手法の三次元応用例として、単純画像である二値化データを入力した手順例を示す。

入力画像データの設定：

- 物体境界を含む計算領域を定義し等間隔デカルト格子を設定
- 格子点上の二値化データを入力

画像データからレベルセットデータへの変換：

- 拡散処理により連続分布画像 ϵ に変換

レベルセットデータから解析データへの変換：

- 前項と同じ（以下省略）

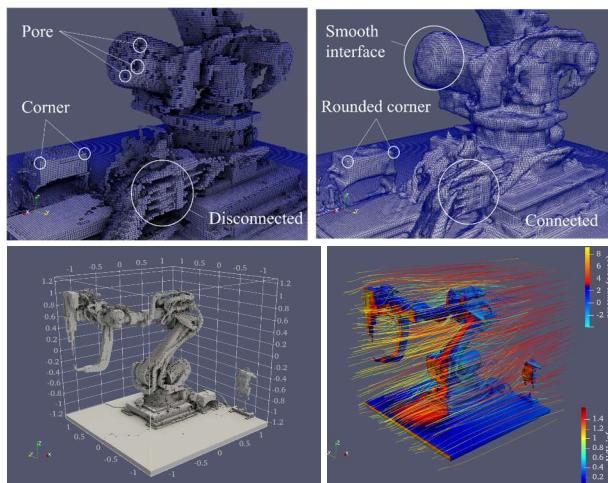


図-3 三次元二値画像によるシミュレーション駆動

左上：元画像、右上：レベルセット（等値面）

左下：計算条件、右下：流線可視化 [5]

近年普及が著しい3次元計測では各計測法に応じた「二値化」処理が開発研究されており、それを入力として用いれば画像駆動シミュレーション手順の多くが「二値化データ」に集約され簡略化される。一方、シミュレーションの解像精度は元になる「二値化」画像に制約される。ここでは、工作機械を被写体にレーザースキャナーにより取得された三次元二値化画像データによる事例を示す。

等間隔格子上の二値化データ（あるいはグレースケールデータ）は、3次元CADや医療CTの標準フォーマットの一つであり、また、3次元プリンタによる実物造形とも共有できる。面データを扱う従来CAD（たとえば、STL）と比べてデータサイズが大きくなりがちであるが、数学的

構造が単純でデータ処理の標準化や並列高速化が容易であることは対象領域と解像精度が固定された条件下では大きな利点となろう。画像駆動シミュレーションの「逆手順」構築に適している。

（4）三次元点群データ

カメラやレーザースキャナーによる3次元計測では「点群データ（ポイントクラウド）」が自由度のデータフォーマットとして一般化されている。ここでは、スマートホンアプリケーション Scanivers により取得した画像データを用いた事例を示す。このアプリケーションには、取得画像から境界面をSTLデータとして抽出する機能があり、これを入力データとして用いると、上述（1）境界面（STL）データに基づく「手順」が適用できる。

本例（什器、人物を含む事務室）の複雑な境界形状に対しては3次元物体形状表現として整合したSTLデータが得られおり、最終手順での「流入・流出の設定」以外に付加的処理を必要としなかった。ただし、STLデータ抽出の「手順」は非公開のため、現時点ではこれを明示し改良することは困難である。

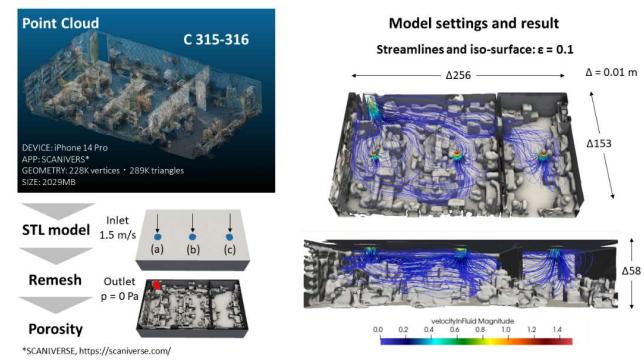


図-4 三次元点群データによるシミュレーション駆動

左上：元画像、左下：画像変換手順と計算条件

右上下：流線可視化とレベルセット（等値面）[6]

実際の応用では計測条件に制約（カメラ位置、計測時間、撮像距離など）があるときには物体形状を十分な解像精度で再現するデータが得られない場合もあり、アプリケーション提供の自動化STLデータに不整合を生じる[*]。また、「逆手順」構築には全ての「手順」を明示化することが重要であり、関連する画像処理技術の標準化が望まれる。

画像変換として「点群データ」から「レベルセットデータ」を与える一般的方法としては、

- 幾何計算による符号付き距離の算出
 - 拡散過程など物理理解を模擬した反復計算
- の異なる2つのアプローチが想定され、数値精度には前者、手順の標準化には後者に利点があると考えられる。今後、具体的対象に応じた比較検討を通して、「手順」の一般化を目指したい。

4. まとめ

本報では、OshimaによるIB-NSを基盤として、現時点での比較的入手が容易な画像データより流れシミュレーションを駆動する「手順」を例示紹介して、それらで検討すべき課題や展開方法について述べた。「手順」の明示化のため敢えて「まわりくどい」説明を示したが、「画像データが駆動する流れシミュレーション」の可能性にご関心いただければ幸いである。

ここでは詳しく触れていないが、画像処理に関しては有用なオープンソフトウェアが充実している。また、規格化された格子データを扱うことによりGPUやスーパーコンでの流れシミュレーションの並列高速化[7]、移動境界問題への適用なども比較的容易に実装される[8]。今後、様々な用途への実装が期待される。

設計開発や研究教育の日常ツールとみなすならば、まさに「**習うより慣れよ**」アプローチをお勧する。ご関心あれば、著者らの既報や公開プログラムを利用されたい。

Let's try !

謝辞: 本研究の一部は北海道大学f3プログラムのfSTEP事業の支援を受けて実施されたことを謝して記す。

付録: 公開ソフトウェア

北海道大学成果コレクション成果 [Software] 固体境界が埋め込まれた改良ナビエ・ストークス方程式の解法

<https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/handle/2115/89344>

参考文献

- [1] Oshima, N.: A Novel approach for wall-boundary immersed flow simulation: proposal of modified Navier-Stokes equation, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 18, No. 4 (2023) p.23-00192, doi.org/10.1299/jfst.2023jfst0034.
- [2] Oshima, N.: A Novel approach for wall-boundary immersed flow simulation (part 2: modeling of wall shear stress), *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 19, No. 3 (2024) doi.org/10.1299/jfst.2024jfst0026
Errata 訂正 doi.org/10.1299/jfst.2024jfstE01.
- [3] The Stanford 3D Scanning Repository
<https://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/>
- [4] 大島伸行, 中道信人, ジョヨンファ: 物体の2次元画像データを直接用いた新しい流体シミュレーションのアプローチ, 第37回数値流体力学シンポジウム, (2023)
- [5] Nakamichi, N., Cho, Y. and Oshima, N.: Image-data-driven Simulation of Fluid Dynamics: Proposal and Evaluation, *Mechanical Engineering Journal*, Vol.11 (2024) doi.org/10.1299/mej.24-00196
- [6] 中道信人, ジョヨンファ, 大島伸行: 3次元画像データを直接用いた流れシミュレーション, 第52回可視化情報シンポジウム (2024)
<https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/handle/2115/93764>
- [7] 大島伸行, 中道信人, 白井信裕: マルチカラー法によるポアソン方程式SOR解法の加速化と境界埋め込みナビエ・ストークスへの適用, 第38回数値流体力学シンポジウム, (2024)

- [8] 中道, Laeron, Cho, 大島: 境界埋め込みナビエ・ストークス方程式による移動境界流れ解析, 第38回数値流体力学シンポジウム, (2024)
<https://eprints.lib.hokudai.ac.jp/dspace/handle/2115/93762>