OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	流体構造連成問題の数値シミュレーション
Author(s)	梶島, 岳夫; 竹内, 伸太郎
Citation	サイバーメディアHPCジャーナル. 2012, 2, p. 7-11
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/70528
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

流体構造連成問題の数値シミュレーション

梶島　岳夫、竹内　伸太郎
大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻

1. はじめに

計算流体力学（Computational Fluid Dynamics, 以下CFD）の発展の初期段階においては、計算手法の多くはデカルト座標系で考案され、物体形状は直方体の計算格子の合成で表現された。したがって、曲面は階段状の凹凸で近似される。原理的には、計算格子を細かくすれば流れ場の再現精度が向上することは期待できる。しかし、一般に流れは物体表面のごく薄い境界層内で大きく変化し、その領域に格子を集中する方が効率的である。そこで、少ない格子数で境界を精度よく表現するため、物体形状に沿った一般曲線座標において境界適合格子（boundary-fitted coordinate）を生成する技法が特に航空工学分野で盛んに研究された。さらに、より複雑な形状、多数の物体を含む流れ場に対応するため、流れ場を多面体で座標にとらわれず自由に埋め尽くす非構造格子（unstructured grid）法が発展し、現在では市販CFDソフトウェアの主流となっている。

この間、格子の品質は計算結果に及ぼす最大の影響因子であり続け、同時に格子生成コストが計算コストに占める割合は増加してきた。一方、本稿で話題にする流体構造連成（Fluid-Structure Interaction, 以下 FSI）解析のように複合現象の扱いが主要テーマとなり、物体の運動・変形・トポロジー変化を伴う移動境界に応じて時々刻々と格子を生成することの負担が深刻になってきた。

そこで、再び固定デカルト格子の利用が見直されている。ただし、境界を、前述のような凹凸ではなく、必ずしも境界に適合しない格子の中でスムーズに表現できる埋め込み境界（Immersed Boundary Method, 以下IB）法が注目されている。なお、IB法という用語の定義や範囲は明確ではなく、かなり任意に用いられている。ここでは、筆者らの独自の解法と、それに様々な機能を組み込んだ方法による計算例を紹介する。

2. 計算方法

2.1　固定直交格子を用いる流れの計算法

Peskin [1]による当初のIB法は、Lagrange的に求められる弾性体上の節点群とEuler的な流体計算格子について近似デルタ関数を介して相互作用させる方法で、その後にGoldstein [3]によるフィードバックスキームなどの改良が加えられた。大変形する固体境界を有する生体内の流れの解析[4]における著しい成果が知られている。さらに、デルタ関数の近似の高度化[5, 6]、効率的なフィードバック手法[7]、完全陰解法の導入[8] など多くの提案により、精度や効率の改善とともに、より強い連成問題への適用範囲の拡大が続いている。

直接強制力法は、固体表面に近接する流体計算格子において外力を作用させ、必ずしも格子点を通るわけではない固体境界の影響を表現する方法である。外力は、境界が横切る位置に速度を外挿または内挿した値が境界条件を満たすように与える。Verzicco, Mohd-Yusof ら[9]は流体側の近接格子点で処理する方法を提案した。これに対して、Choi ら[10]は固体内の境界に近接する格子点で処理して連続の式を満たす改良を行い、Ikeno-Kajishima[11] は境界での圧力に不整合が発生しない方法を開発するなど、強制力法についても多くの進展がある。

2.2　体積力型埋め込み境界法

筆者らは前節とは別の形式で、流体計算用 Euler的固定格子と固体計算用Lagrange的移動格子を結合させる体積力型IB法を開発し[12, 13]、その概念をVelocity-field Overridden by Immersed Solid (VOIS)と表現している。その手順は次のようである。まず、固定格子の全てのセルで流体・固体にかかわらずそ

の速度を与え、流れの支配方程式である Navier-Stokes 式を固定 Euler 格子で計算して時間進行を行う。 次に、固体が存在する領域においては、固体の運動と変形を移動 Lagrange 格子で計算し、固体の速度を（流体と固体が共存する Euler セルにおいては固体の体積率を乗じて）上書きする。この上書きによる変更は固定 Euler 格子における体積力として表現される。この方法の著しい特長は、Lagrange 格子で求めた結果で決まる体積力が Euler 格子に使用されることにより、(その大きさに多少の誤差があっても）流体と固体の間の運動量交換には漏れが発生しない Conservative Momentum Exchange (CMX)が実現されることである。

体積力型 IB 法は計算スキームが非常に簡便であることから、多数の物体が混在する固体・流体二相流の解析に適している。開発当初、1000 個以上の球形剛体粒子が周囲の流れや後流に放出する渦列によって相互作用しながら流動する集団現象[12,13]に適用された。さらに、任意形状の物体を含む流れ[14]だけでなく、固体の変形を有限要素法（Finite-Element Method, 以下 FEM）で扱うことにより大変形する柔軟構造物を含む流れ[15]など、固体構造を扱う様々な方法との親和性に優れた体積力型 IB 法の特性を活かした多機能化が進んでいる。

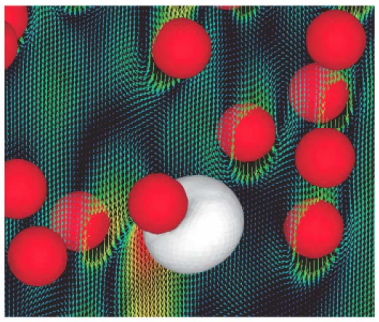
3. 計算例

本稿では、固体には可変形性、流体には多成分性を考慮した計算結果を紹介する。複雑な運動に伴う相間の運動量交換に漏れがない特性を重視し、FSI の基盤として第 2.2 節で述べた体積力型埋め込み境界法（VOIS-CMX）を選択する。流体の流れに対する差分解法と固体の変形に対する FEM についてはそれぞれ確立された方法、さらに多数の球形剛体粒子を扱う FSI 法 [12, 13]に本質的な変更を加える必要なく、親和性の高い計算アルゴリズムを形成することができた。

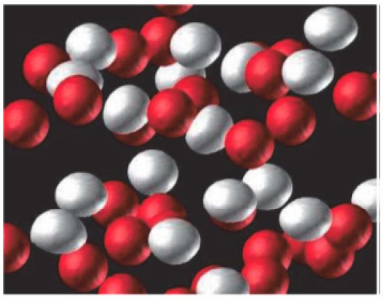
3.1 固気液流動

気液または不溶性 2 液体に対して Volume of Fluid（以下 VOF）法を用い、多相流体の流れの計算に固体を埋め込む方法[16,17]法によって三相流の解析が可能となる。

固体粒子を含む液中を上昇する気泡のふるまいを調べる目的で実施された計算例を図 1 に示す。固液二相媒体や懸濁液の中を気泡が上昇する場は、バイオリアクター、浮遊選鉱、エアリフトポンプなど広範囲な工業装置で見られ、その性能は気泡の上昇速度や固気の接触頻度に大きく依存する。図 1 では、1000 個あまりの球形剛体粒子群が沈降する中を気泡が上昇する流れ場の三次元解析におけるスナップショットである。気泡周りの流れの観察から、気泡が誘起する剪断流れの中で固体粒子の回転運動による揚力が粒子分布や気泡との位置関係に対して最も影響が大きい場合があることがわかった。



(a) 気泡や粒子の周りの流れ



(b) 気泡群と粒子群の配置

図 1 ：気泡（白）と固体粒子（赤）が相互作用

3.2 可変形粒子の流れ

固体の変形を FEM によって求めることにより、大変形する柔軟な固体構造物を含む流れ場を解析することができる。最近では固体も流体も共通の固定格子で扱う full Euler 法[17-20]も研究されている。しかし、必要とされる時空間の解像度は物質の力学特性

が大きく依存する。そこで、われわれは固体と流体のそれぞれに適した手法を用いる分離解法を採用している。すなわち、流体には固定 Euler 格子、固体には移動 Lagrange 格子を用い、それぞれに確立された解法を適用して連成させる[15]。流体計算格子に作用する体積力を固体の FEM ノードに反映させる際に運動量交換の漏れを生じない制約を与える以外には、前述の体積力型 IB 法には特別の変更を加える必要がなく、効率的な計算が実現される。ただし、固体の力学特性には、幾何学的非線形性を考慮するなど、大変形しても支障のないモデルを導入することは不可欠である。

可変形粒子群が相互作用しながら流動する場の計算例を図 2 に示す。この段階では二次元計算である。柔らかい粒子は、継続的な回転運動をしにくい、粒子どうしが衝突しにくいなど、固液間や固体間の相互作用が剛体粒子とは異なり、結果として粗密分布に有意な差が生じ、流体内の移動速度も大きく変化する。なお、流体の計算格子幅は無負荷時の粒子径の 1/20 とかなり粗いが、粒子周りの流れはスムーズに求められている。粒子内部の応力分布を十分な解像度でとらえる FEM を工夫し、並列計算を活用すれば、多数の三次元粒子への適用は困難ではない。

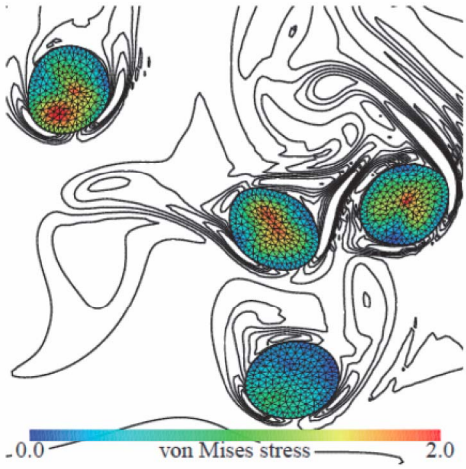


図２：可変形粒子群の流れ

(色スケールは von Mieses 応力、等値線は渦度)

三次元計算として、一様な流れの中で一端が固定された弾性板の自励振動を解析した例を図 3 に示す。有名な Tacoma Narrows 橋の崩落や航空機翼の振動の原因となるフラッター現象は FSI 解析の古典的な課題である。図 3 では、自身が放出する渦により大変形を伴って振動している様子を表している。なお、事前に実施した二次元弾性梁の問題で、振幅や周期が参照データによく一致することを確認している。

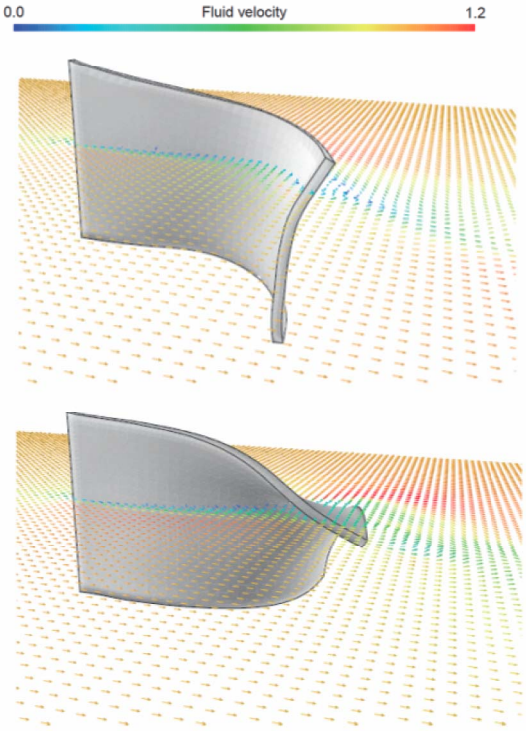


図３：一様流中にある柔軟な板のはためき運動

3.3　声帯を模擬した流路の流れ

発声メカニズムの理解や発声補助機器の開発に関連して、声帯や気道を弾性体で模擬した流路における FSI 解析[21]を行った結果の一例を図 4 に示す。この計算では、声帯の開閉部分を堅い body と柔らかい cover の二層モデルを採用した。しかし、生体組織の力学的特性には不明の点も多い。その一方、任意に特性を与えることができる数値シミュレーションの利点を活かせば、ある機能を発現するための支配因子を分析的に見いだすことも可能である。実際に、気道部分を剛体やヤング率の異なる弾性体で模擬して結果を比較したところ、声帯の振動数にはその影響が無視できないことがわかった。

この課題では、両側の境界が重なり合わずに接触することを有限の時間刻みで実現しなければなら

ず、高周波数で開閉する部分の取り扱いに特別の注意を要した。そこで、Lagrange の未定乗数法で接触モデルを考案し、接触後には固体間の滑りの有無を考慮できる工夫も加えた。二次元計算ではあるが、レイノルズ数 1500 の気流に対して 250Hz で開閉し、概ね知られている人の声域（男性 100～150Hz、女性 200～300Hz）に対応する挙動が再現された。また、図 4 では噴流は渦運動により強いエネルギー散逸を伴っている様子も観察される。

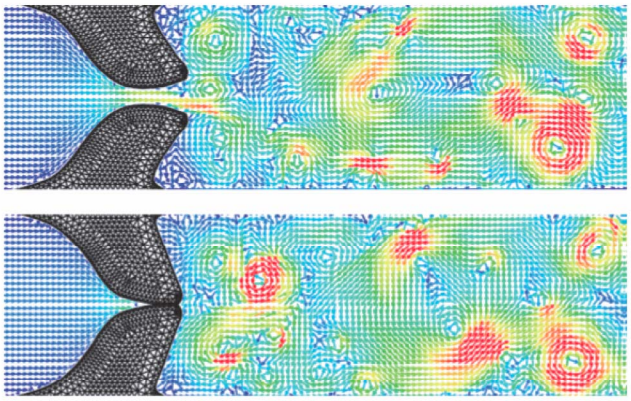


図4: 声帯を模擬した二次元流路内の流れの時系列変化

4. おわりに

工業装置や生体内の熱および物質の輸送には多くの場合、流体が関与している。そのため、熱も含めた界面現象（界面張力、濡れ性、相変化、物質移動など）や反応など、より複合的な現象の扱いは必須である。また、境界のトポロジー変化については、前述の例でも開閉の問題に言及したが、付着、合体、分裂だけでなく、その刹那に固体間に介在する流体膜の潤滑効果はきわめて重要な課題である。それらは単に力任せの大規模計算で押し切れる問題ではないので、理論、実験あるいはミクロなスケールでのシミュレーションなど、FSI を多機能化するための物理モデルの構築を目的とした研究テーマは無尽蔵であると言えるだろう。

謝辞

本文に掲載した計算例は岩田隆一博士、上山篤史博士、宮内優君をはじめ多くの学生の貢献によるものである。

参考文献

(1) C. S. Peskin, J. Comput. Phys., **25**-3, 220-252, (1977).

(2) R. Mittal, and G. Iaccarino, Annu. Rev. Fluid Mech., **37**, 239-261, (2005).

(3) D. Goldstein, R. Handler, and L. Sirovich, J. Comput. Phys., **105**-2, 354-366, (1993).

(4) C. S. Peskin, Acta Numerica, **11**, 479-517, (2002).

(5) C. S. Peskin and D. M. McQueen, SEB Symposium on Biological Fluid Dynamics (1994).

(6) R. Cortez and M. Minion, J. Comput. Phys., **161**, 428-453, (2000).

(7) W.-X. Huang and H.-J. Sung, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., **198**, 2650-2661, (2009).

(8) Y. Mori and C. S. Peskin, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., **197**, 2049-2067, (2008).

(9) R. Verzicco, J. Mohd-Yusof, P. Orlandi, and D. Haworth, AIAA J., **38**-3, 427-433, (2000).

(10) J.-W. Kim, D.-J. Kim and H.-C. Choi, J. Comput. Phys., **171**-1, 132-150, (2001).

(11) T. Ikeno and T. Kajishima, J. Comput. Phys., **226**-2, 1485-1508, (2007).

(12) T. Kajishima, S. Takiguchi, H. Hamasaki and Y. Miyake, JSME Int. J., Ser.B, **44**-4, 526-535, (2001).

(13) T. Kajishima and S. Takiguchi, Int. J. Heat Fluid Flow, **23**-5, 639-646, (2002).

(14) Y. Yuki, S. Takeuchi and T. Kajishima, J. Fluid Sci. Tech., **2**-1, 1-11, (2007).

(15) S. Takeuchi, Y. Yuki, A. Ueyama and T. Kajishima, Int. J. Num. Meth. Fluids, **64**-10/12, 1084-1101, (2010).

(16) R. Iwata, S. Takeuchi and T. Kajishima, Multiphase Sci. Tech., **22**-3, 233-246, (2010).

(17) K. Sugiyama, S. Ii, S. Takeuchi, S. Takagi and Y. Matsumoto, J. Comput. Phys., **230**-3, 596-627, (2011).

(18) S. Ii, K. Sugiyama, S. Takeuchi, S. Takagi and Y. Matsumoto, Int. J. Num. Meth. Fluids, **65**-1/3, 150-165, (2011).

(19) N. Nagano, K. Sugiyama, S. Takeuchi, S. Ii, S. Takagi and Y. Matsumoto, J. Fluid Sci. Tech., **5**-3, 475-490, (2010).

(20) K. Sugiyama, S. Ii, S. Takeuchi, S. Takagi and Y. Matsumoto, Comput. Mechanics, **46**-1, 147-157, (2010).

(21) S. Miyauchi, T. Omori, S. Takeuchi and T. Kajishima, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference, AJK2011-20009, (2011).