

# 流体領域の分離融合に対応した 時間積分におけるメッシュ切り替え連成解析アルゴリズム

## Changing Connectivity in Time Step for Fluid-Structure Interaction Analysis of Merge and Devide of Fluid Area

梅谷 信行 (東京大学) 正 久田 俊明 (東京大学)

Nobuyuki UMETANI, Tokyo University, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo  
Toshiaki HISADA, Tokyo University, Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo

**Key Words:** fluid-structure interaction(FSI)analysis, reconnecting, contact analysis, Lagrangian-Eulerian(ALE)method

### 1. 緒言

現在流体構造連成におけるおおまかな流れとして、ALE 有限要素法[1]、DSD/SST 法[2]などに代表される連成面追跡型アルゴリズムと Immersed Boundary Method(IBM)[3]や Fictitious Domain Method(DLM/FDM)[4]などに代表される連成面捕捉型アルゴリズムがあげられる。連成面追跡型アルゴリズムでは鋭い連成面が再現でき、より厳密な連成が可能であるが、メッシュ制御に難があり、構造が大変形する場合はリメッシュが必要となってくる。一方、連成面捕捉アルゴリズムではメッシュ破綻の問題は生じないが、境界面を捕らえるために細かいメッシュを必要とする。本研究では、心臓弁の開閉など、構造同士の接触によって流体領域が分離融合するような高度の連成問題を念頭に置き、ALE 有限要素法と後述する Reconnecting を用いたメッシュの切り替え手法を用いた新たな時間進行アルゴリズムの有効性についての基礎的検討を行う。

### 2. 手法

(1) **時間積分過程におけるメッシュの切り替え** 流体領域が構造接触により分離融合する瞬間を連成面捕捉型アルゴリズムで解析する場合、時間ステップ開始時のメッシュと時間ステップ終了時のメッシュのトポロジーを力学的な平衡が満たされるように変化させる必要がある。そこで時間ステップ進行中にメッシュの切り替えを行う必要があるが、[a]Newton-Raphson 法による解の探索中に状況に応じてメッシュ切り替えを行う、[b]一旦収束させた後メッシュが切り替えが必要かどうかを判断し、必要なら切り替えてそのメッシュ配置と写像された値でさらに Newton-Raphson 法による解の探索を続けるという 2 通りのアルゴリズムが考えられるこの 2 つのアルゴリズムはどちらも収束する時には力学的平衡条件と正しい接触判定、十分なメッシュの質が満たされる。[a]のアルゴリズムでは Newton-Raphson 法が収束しないような極端な場合でも適応可能であるが、[b]に比べ切り替えの回数がやや多い。以下のテスト問題では[b]を用いた。

(2) **流体内で構造接触のモデリング** 流体領域内で構造同士が接触する場合、その接触状態によって接触個所での流体要素の取り扱い及び圧力の連続性は表 1 のように異なってくる。流体要素が必要な場合とは target segment に接触力だけでなく流体からの圧力や剪断力が加わる場合を意味する。

表 1. 接触状態に応じた流体要素の必要の有無と圧力の連続性

接触状態	流体要素	圧力
線と線	必要	連続
面と点	必要	連続
面と線	必要	不連続
面と面	不要	不連続

本手法では流体要素がつぶれずに解ける範囲内の高さ  $g_0$  を設定し、これを接触がおこる高さとする。境界上にあり構造要素と流速節点を共有している流体要素の境界からの高さが  $g_0$  以上なら接触しないと見なし、この要素を流体要素として扱う。またこの高さが  $g_0$  以下である場合はこの要素の高さが  $g_0$  以上となるように式(1)-(3)に示すペナルティ法による接触要素を入れ、周囲のメッシュの配置から、表 1 に従ってこの要素を流体要素として取扱うか、圧力を不連続にするかなどを決める。接触要素の概要を図 1 に示す。

$${}^t f_n^t = -\alpha({}^t g - g_0) {}^t n \quad (1)$$

$$g = {}^t n M {}^t x_c \quad (2)$$

$$M^T d {}^t f_n^t = -\alpha M^T {}^t n {}^t n^T M d {}^t u_c \quad (3)$$

${}^t f_n^t {}^t n M \alpha$  はそれぞれ、target segment 上の節点の等価節点接触力ベクトル、target segment の法線ベクトル、形状関数からなる行列、ペナルティ係数である。

また、構造と構造の間に流体要素が 1 要素分しかない場合は固着条件から流体は構造の間を流ることができない。本研究ではこれを利用して構造接触による流体の遮断を表現する。構造接触が起こる場合 Reconnecting により構造の間が自動的に 1 要素となる。この様子を図 2 に示す。接触状態により圧力を不連続的に変化させる必要がある場合図 3 の例のように圧力節点を加えることで実現した。

本手法では 5/4c 要素を用い SUPG[2]安定化 ALE 流体構造強連成解析を行っている。詳しくは文献[1]を参照されたい。

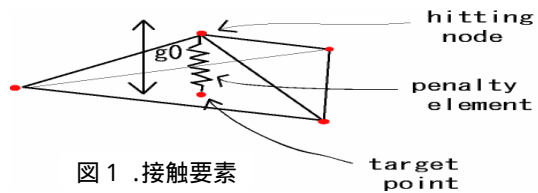


図 1. 接触要素

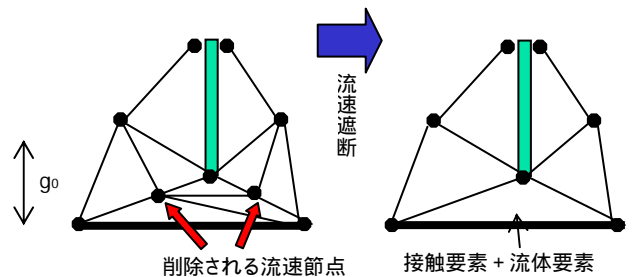


図 2. 接触時における流速の遮断

(固着条件から流体が通り抜けられない)

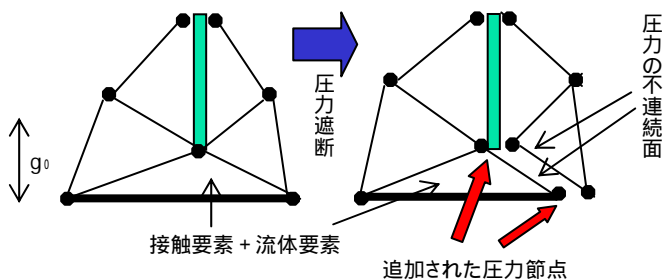


図3 線・面接触における圧力の遮断

(3)Reconnectingによるメッシュの切り替え ALE解析のメッシュ制御において、メッシュの歪みが大きくなると計算が破綻する。また、流体領域が分離融合するような問題を解くことはできない。しかし一般的に計算の収束性にかかわるほど質の悪いメッシュが発生するのは、領域全体のごく一部であるため全体をリメッシュする必要はない。またリメッシュは写像の誤差による解の信頼性の低下をもたらす。更に、本手法では時間積分中に何度もメッシュを切り替える必要があるため高速かつ信頼性の高いメッシュの切り替えが必要である。そこで本研究ではメッシュの節点の位置は変化させず、極く限られた範囲でのみ Connectivity を変化させる。具体的には質の悪いメッシュに対し、角度基準の形状判定と Face/Edge Swapping[5]を組み合わせたものを用いて、この節点配置に対する4面体分割の品質の指標値の最小値を最大にするような Reconnecting を行った。メッシュの品質の指標としては、以下に示す George の式[6]を用いた

$$Q_K = \rho_K / h_{\max} \quad (4)$$

$h_{\max}$  は四面体の最大辺の長さ、 $\rho_K$  は四面体の内接球の半径である。なおこの品質の指標として Delaunay 条件を用いなかったのは、節点配置が均一でない場合に Sliver 要素のような歪んだ要素が生成されてしまうことを回避するためである。また、辺の長さの最大値と最小値を決めて、点の追加や削除もおこなった。

### 3. テスト解析

(1)問題設定 図4に示すようなチャンネル内で薄板がすべり抜ける3次元解析を行った。流体は空気、薄板はサイズ100mm×120mm×0.08mm、ヤング率100MPa、ポアソン比0.32の線形弾性体としDKTシェル要素でモデル化した。薄板は床から10mmはなれた図4のような位置を初期配置とした。境界条件は壁面、床面と薄板表面で固着条件、流入側が流速境界条件、流出側が応力0の境界条件を与えた。流入速度は0.4秒間で0m/sから0.2m/sに線形的に増加させ、その後1.2秒後までは0.2m/sを保った。それ以降は線形的に流入速度を増加させ1.6秒後に流入速度が1.0m/sになるようにし、以降この流入速度を保った。

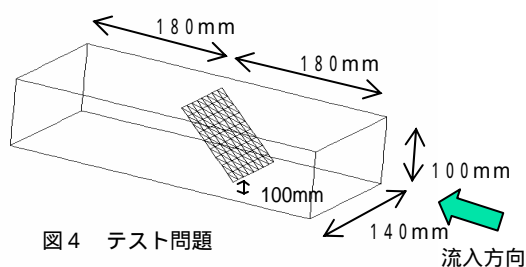


図4 テスト問題

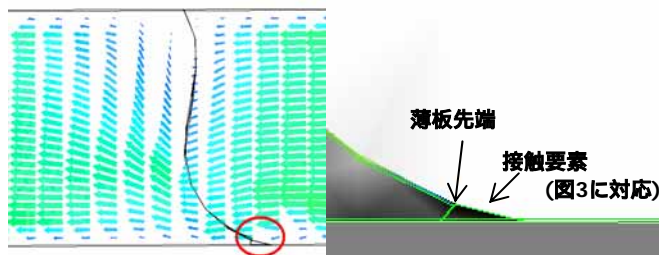


図5 0.5秒後における流速場と薄板の接触部における圧力場

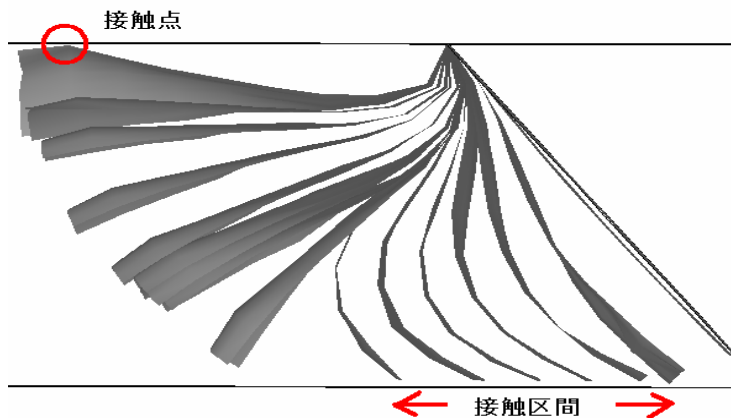


図6 1.7秒後までの薄板の変形図(0.1秒毎)

(2)解析結果 0.5秒後の流れ場と、そのときの薄板の接触部付近での圧力場の様子を図5に示す。薄板は床と面・線接触しているため圧力が不連続に変化していることがわかる。また0秒から1.7秒までのシエルの変形の様子を図6に示す。0.3秒から0.8秒までは点・面の接触と線・面の接触をしながら薄板が床をすべり抜けた。1.2秒後には薄板は定常状態に達し、この状態から流速を1.0m/sまで上げると1.7秒後には天井と接触した。

### 4. 結言

流体領域が構造により分離融合するような困難な流体構造連成問題に対し、時間ステップ進行中に局所的にメッシュを切り替えることで速度、圧力ともに安定な値を保ちつつ、解析を行うことができた。今後は面と面の接触を考慮した流体中での構造接触問題やメッシュ間写像の改善、誤差解析に基づくアダプティブなメッシュ制御などについて取り組む予定である。

### 参考文献

- [1]Q.Zhang and T.Hisada, *Comput. Methods. Appl. Mech. Engreg* **190**, pp.6341-6357
- [2]T.E.Tezuyar, to appear in *Encyclopedia of Comput. Mech...*, John Wiley & Sons, Ltd(2004)
- [3]C.S.Peskin, The immersed boundary method, *Acta Numerica*, pp.1-39(2002).
- [4]R.Glowinski, T.W.Pan, T.L.Hesla, D.D.Joseph, and J.Periaux,, *J.Comput.Phys.***169**, pp.363-426(2001)
- [5]Lori A. Freitag and Carl F. Ollivier-Gooch. *Tetrahedral Mesh Improvement Using Swapping and Smoothing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, v 40 (21), pp 3979-4002, (1997)
- [6]George, Paul Louis. Proceedings, 8th International Meshing Roundtable, South Lake Tahoe, CA, U.S.A., pp.133-141, (1999)