

粒子法－有限要素法連成解析手法の開発

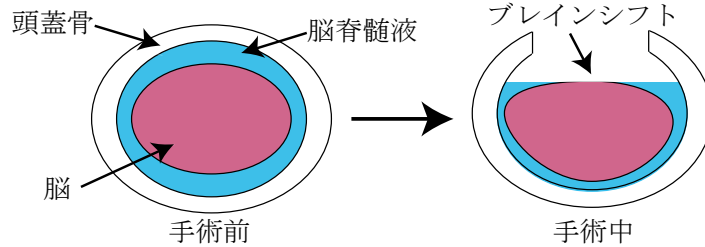


図1 ブレインシフト

脳神経外科手術では，手術中の脳脊髄液流出や病変部摘出により，手術の進行につれ，手術前に撮影した医用画像と実際の脳の位置がずれてくるブレインシフトと呼ばれる脳変位（図1）によって病変部を見失うことが問題となっていた．そのため，モデルによりブレインシフトを予測し，手術者に提示する手術支援システムを開発中である．そのためには脳脊髄液により脳が受ける浮力の影響を精度良く解く必要がある．

本研究は，流体中の弾性体の挙動解析を行うため，粒子法で流体の挙動を模擬し，有限要素法で弾性体の挙動を模擬，境界面での相互作用は弱連成を仮定した流体－構造連成解析法を開発することを目的としている．

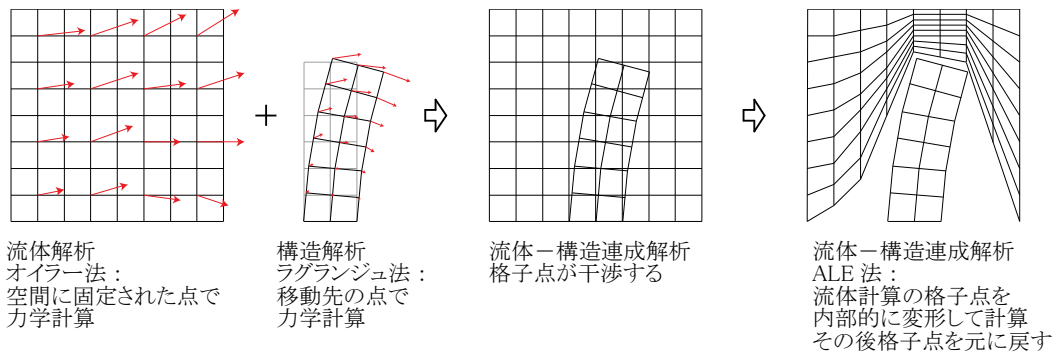


図2 従来の流体－構造連成解析手法

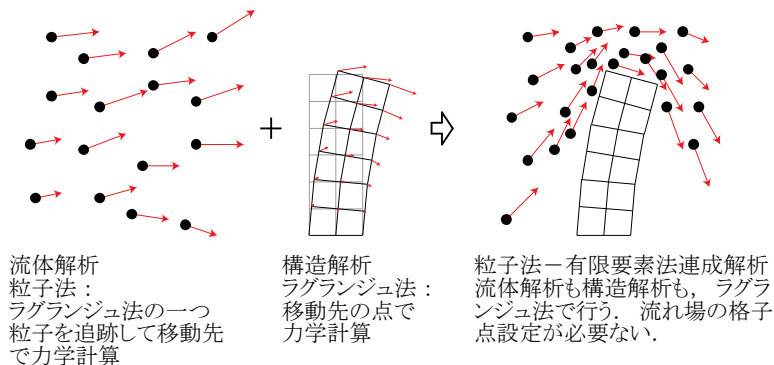


図3 粒子法－有限要素法連成解析

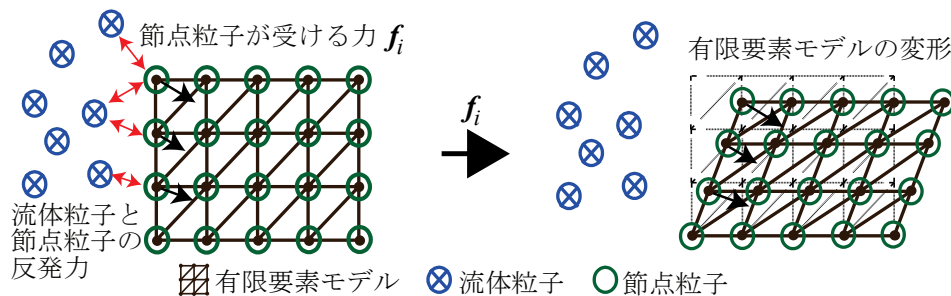


図 4 粒子法—有限要素法連成解析概念

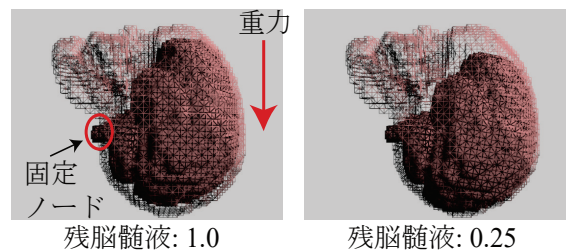


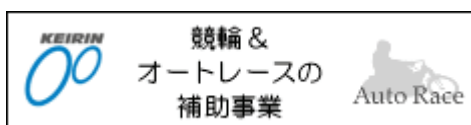
図 5 ブレインシフト推定シミュレーション

流体力学では空間に固定された点（格子）で力学を計算するオイラー法が，構造解析は構造と共に変位する節点で力学を計算するラグランジュ法が主流となっている．流体—構造連成解析（FSI）では，計算点の異なる二つの手法の整合性を取るために Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) 法（図 2）が用いられてきた．ALE 法は，流体計算の格子点を内部的に変形して計算した後，その格子点を元に戻す方法である．しかし脳脊髄液に浸された大脳のように流体中の構造物が複雑な形状の場合は界面が自由に変化し，このような問題に ALE 法を適用することは困難であった．近年，流体を粒子の集合体と考え，粒子を追跡して移動先で力学計算を行う粒子法が注目を集めている．粒子法は移動先で力学計算を行うラグランジュ法の一つであり，そのため構造解析との親和性が良い（図 3）．粒子法では，陽解法の Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)法と半陰解法の Moving Particle Semi-implicit (MPS)法が代表的である．本研究では MPS 法の一つである Explicit MPS (E-MPS)法と有限要素法の連成解析手法を開発した．

図 4 に，提案する粒子法—有限要素法連成解析の概念を示す．有限要素法では剛体や弾性体を四面体などの小要素に分割し，節点に作用する力の釣り合いを計算する．まず，有限要素モデルの各節点に節点粒子を配置する．節点粒子は節点の位置を初期位置とし，一旦，自由に移動できると仮定する．E-MPS 法で節点粒子が流体粒子から受ける力ベクトル \mathbf{f} を計算する．ここで計算された力ベクトル \mathbf{f} が節点に作用する力とし，有限要素法で弾性体の変形を計算する．弾性体の変形を計算した後，変形により移動した節点 i に節点粒子 i を再配置する．この節点粒子の再配置は，節点粒子を自由移動した先から節点へ強制変位を与えていることになり，この位置エネルギーの変化が有限要素法から E-MPS 法への作用となる．この計算を繰り返すことで連成解析を行う．図 5 に，この手法を用いてブレインシフトを計算した結果を示す．

成 果

- [1] 白井, 陳, 佐瀬, 小水内, 辻田, 近野, 脳神経外科手術支援ブレインシフトAR 表示, 第19回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, pp. 134-138, 2018. **優秀講演賞受賞**
- [2] X. Chen, R. Shirai, K. Masamune, M. Tamura, Y. Muragaki, and A. Konno, Presenting a Simple Method of Brain Shift Estimation for Neuronavigations and Considering its Practicality, Proc. of IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2019), pp. 112-117, 2019.
- [3] X. Chen, K. Sase, T. Tsujita, and A. Konno, Numerical Model of Connective Tissue for Splitting Brain Fissure Simulation, Proc. of IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2019), pp. 118-123, 2019.
- [4] 佐瀬一弥, 有限要素解析ソフトウェアを用いたやわらかいウサギモデルをなでることができる実時間変形シミュレーション, 学都「仙台・宮城」サイエンス・デイ, 2018年7月15日, イベント来場者数 10,666人 (デモ展示)
- [5] 佐瀬一弥, 有限要素解析ソフトウェアをタッチパネル液晶と組み合わせた写真の猫のおなかを触るとプルプル変形する実時間変形シミュレーション, 東北電力グリーンプラザ 夏休み特別イベント「7つのふしぎとグリーンプラザ科学基地」2018年7月31日～8月12日, イベント来場者数延べ 約14,000人 (デモ展示)
- [6] 佐瀬一弥, 有限要素解析ソフトウェアを用いた柔軟物モデルを触ることができる実時間変形シミュレーション, 東北学院大学機械TG会第27回通常総会講演会, ホテル仙台ガーデンパレス, 仙台, 2019年5月27日, 講演会参加者約30名 (講演・デモ展示)
- [7] K. Ebina, T. Abe, S. Komizunai, T. Tsujita, K. Sase, X. Chen, M. Higuchi, J. Furumido, N. Iwahara, Y. Kurashima, N. Shinohara and A. Konno, A measurement and skill evaluation system for laparoscopic surgical procedures, Proceedings of SICE Annual Conference 2019 (SICE2019), pp. 1099-1106, 2019. (発表者の海老名が International Award 受賞)
- [8] R. Shirai, X. Chen, K. Sase, S. Komizunai, T. Tsujita and A. Konno, AR Brain-Shift Display for Computer-Assisted Neurosurgery, Proceedings of SICE Annual Conference 2019 (SICE2019), pp. 1113-1118, 2019.
- [9] 佐瀬一弥, VRによる安全安心社会への貢献 ～手術支援・防災教育への応用～, 東北学院大学工学総合研究所公開講座, 2019年9月18日, 講演参加者42名
- [10] X. Chen, M. Hashimoto, K. Sase, T. Tsujita, and A. Konno, Vessel Dissection Simulation for Neurosurgery Simulators Considering Subarachnoid Space Structure, 2019 IEEE International Conference on Cyborg and Bionic Systems (CBS2019), Paper No. 006, 2019. (CBS2019 Best Conference Paper Finalist)
- [11] 佐瀬一弥, 触覚のバーチャルリアリティ, 夢ナビライブ2019 仙台会場ミニ講義, 夢メッセみやぎ, 2019年10月5日, イベント来場者数延べ10,134名 (講演)
- [12] 佐瀬一弥, 有限要素解析ソフトウェアを用いた柔軟物モデルを触ることができる実時間変形シミュレーション, テクノ青葉60第382回例会講演会, 産総研仙台青葉サイト, 2019年10月10日, 講演参加者約15名 (講演・デモ展示)
- [13] 佐瀬一弥, 実時間弾性体シミュレーションと力覚提示, 日本VR学会ハプティクス研究会主催 触覚講習会2019, キャンパスプラザ京都, 2019年10月30日, 講習参加者79名 (デモ展示)
- [14] A. Konno, N. Shido, K. Sase, X. Chen, and T. Tsujita, A Hepato-Biliary-Pancreatic Deformable Model for a Simulation-Based Laparoscopic Surgery Navigation, Proceedings of 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2020), pp. 39-44, 2020.
- [15] X. Chen, K. Sase, T. Tsujita, and A. Konno, A Simple Deformation and Reaction force Numerical Calculation Method for Nonlinear Brain Tissues, Proceedings of 2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2020), pp. 1388-1393, 2020.
- [16] 佐瀬一弥, VR空間における柔軟物体に対する力覚インタラクションの実現, **令和元年度トーキン財団奨励賞 受賞**, 2020年3月12日
- [17] K. Ebina, T. Abe, S. Komizunai, T. Tsujita, K. Sase, X. Chen, M. Higuchi, J. Furumido, N. Iwahara, Y. Kurashima, N. Shinohara and A. Konno, Development and validation of a measurement system for laparoscopic surgical procedures, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 13, No. 4, pp. 191-200, July 2020.



この研究は、公益財団法人 JKA 平成 30 年度 粒子法－有限要素法連成解析手法の開発 補助事業 (2018M-156) の助成を受けて行われました。