

# 粒子法シミュレーションの臓器傷害解析への適用の検討

代表研究者 芝浦工業大学工学部機械機能工学科 准教授 山本創太

## 【まとめ】

本研究では、交通事故傷害解析に応用可能な新しい臓器傷害シミュレータを目指し、粒子法による実質臓器のモデル化を検討した。流体的挙動の再現を特異とする粒子法に、初期配置での隣接粒子間の連結性を考慮するアレンジを加えることで、構造体の変形・破壊挙動の表現への拡張を行った。3次元肝臓形状を再現した粒子モデルを作成し、軟組織の変形挙動を定性的に表現出来た。

## 1. 研究の目的

### 1-1 背景

自動車安全研究の基盤である傷害バイオメカニクス研究分野においては、高精度な人体傷害解析モデルへの要望が高い。一方、多様な拘束形態を持つチャイルドシートや、エアバッグがない後席でのシートベルト使用の義務化により、新たな形態の臓器傷害発生が懸念されており、臓器傷害メカニズムの詳細説明や臓器傷害予測の実現に強い関心が持たれている。しかし、内臓臓器傷害に対しては、その傷害形態を再現し、高精度な予測を可能とするモデルは存在しない。

### 1-2 本研究の目標

本研究は、交通事故における臓器傷害の詳細な生体力学シミュレーション実現のため、新しい傷害シミュレータのための基盤技術を検討した。

具体的には、従来の傷害解析の主流である有限要素法に対し、大変形・流体-構造連成解析に利点を持つ粒子法に着目し、臓器傷害解析への粒子法の適用性についての検討を行った。

## 2. 研究方法と経過

### 2-1 モデルのコンセプト

腹部臓器は肝臓、腎臓などの実質臓器と、腸管の中空臓器からなる。本研究では実質臓器をモデル化対象に選んだ。実質臓器の機能は臓器により異なるが、その構造は膜部に覆われた実質部と内部の血管網からなると捉えることができる。実質臓器の傷害は、膜部の破断、実質部の挫滅、内部血管網の破断による内出血に大別出来る。

以上のことから、臓器傷害シミュレーションは、膜部と血管および実質部の大変形と破壊の解析、および血管内の血液の流動解析を連成できる必要がある。このようなシミュレーションを実現出来る解析手法として、粒子法を採用することとした。

### 2-2 モデル化の方針

これまでに行われてきた粒子法解析は、流体解析への適用が多くみられる。粒子法は連続体の挙動をLagrange的に表現するため、構造解析への適用性があると考えられるが、実施例はあまりない。

そこで、本研究では最も大きい実質臓器である肝臓を粒子法モデルにより再現することを目指した。まず、大変形する固体の変形挙動を表現する粒子法解析を試行した。次に肝臓の3次元形状を再現した粒子モデルを構築し、膜構造と実質部の再現を目指した。

### 2-3 解析プログラム

粒子法解析プログラムは、千葉大学坪田健一准教授開発の赤血球挙動解析プログラムを

ベースに開発した、赤血球挙動解析プログラムは粒子法により流体と流体中の膜構造の動的挙動を表現可能であった。本研究ではこれを構造部を含む解析に適用可能とする拡張を行った。

### 3. 研究の成果

#### 3-1 構造体の圧縮シミュレーション

粒子法による構造体の圧縮解析を行い、粒子法の構造解析への適用性を検討した。

予備的な解析により、離散化された領域を代表する粒子間の距離と相互作用の関係により連続体の力学挙動を規定している粒子法では、構造体を模擬したつもりのモデルに外力を作用しても自然な変形挙動が得られないことが分かった。

そこで、構造体を再現する隣り合う粒子間の連結と相互作用を陽に規定することで、構

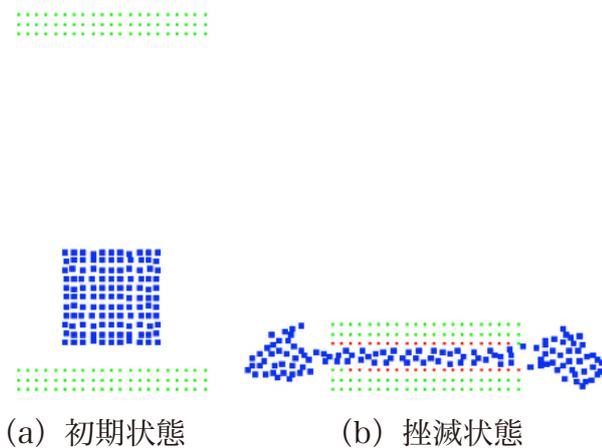


図1 2次元構造体の圧縮破壊解析



図2 2次元構造体への圧子の衝突解析

造体の自然な変形・破壊挙動を再現することを試みた。2次元構造体の圧縮破壊シミュレーションを行った結果を図1に示す。図中の青い粒子は構造体、緑及び赤い粒子は圧子である。この場合、圧子は構造体より幅広であるため、構造体は圧子外側にはみ出るように変形しながら挫滅した。構造体より小さい圧子により圧縮した場合の変形・破壊挙動を図2に示す。圧子により構造体中央部が引き裂かれ、離断する様子が表現出来た。

#### 3-2 肝臓形状の再現

医用画像に基づく肝臓3次元形状データから肝臓粒子モデルを作成した。まず、形状モデルが占める領域内に粒子を配置し、肝臓実質部粒子モデルとした。次に形状モデル表面上に粒子を配置することで膜部粒子モデルを作成した(図3)。

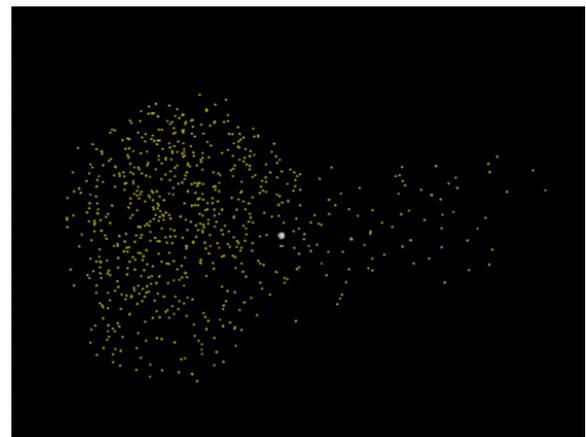
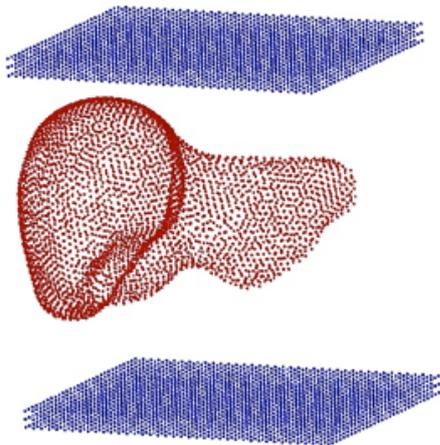


図3 肝臓の3次元粒子モデル

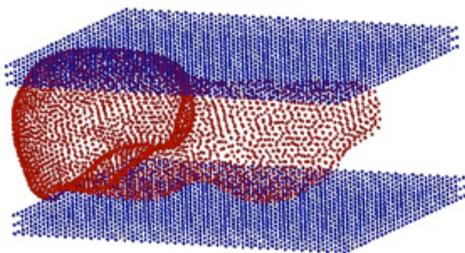
3-1節で述べたように、構造部の隣接する粒子モデルには連結性を定義する必要があるため、単純に領域内に配置した粒子の位置だけでなく、初期状態における周囲粒子との位置関係に関する情報が必要である。そこで、有限要素メッシュ生成ソフトを利用し、ほぼ等辺の四面体1次要素、三角形シェル要素で肝臓形状モデルを離散化した。このときの節点および要素を構成する節点セットの情報から粒子モデルを作成した。

### 3-3 肝臓粒子モデルの3次元構造解析

作成した肝臓粒子モデルにより、圧縮シミュレーションを行った(図4)。肝臓の変形挙動が定性的に表現出来ていることが確かめられた。しかし、膜部と実質部の相互作用や、全体の変形挙動の定量的再現性、破壊挙動の妥当性に課題がある。



(a) 初期状態



(b) 圧縮状態

図4 肝臓粒子モデルの圧縮解析

## 4. 今後の課題

臓器粒子法モデル開発を進めてきた結果、実臓器の粒子モデル作成について、以下の課題がある。

### (1) 構造部モデルの粒子配置の均等性

粒子法では粒子間の相互作用が粒子間距離に依存するため、初期状態ではほぼ等間隔に粒子が配置されている必要がある。本研究で行った有限要素メッシュ作成ソフトを利用した方法では、構造部の粒子は厳密に等間隔には配置されていない。膜部と実質部の界面でも粒子間距離が必ずしも一定ではない。こ

れらのことは、粒子法構造解析時の不安定性、解析結果の挙動の不自然さの原因となっていると考えられる。

### (2) 非線形材料特性の表現

粒子間相互作用を見直し、Melvinら(1973)の実験結果に見られるような非線形変形・破壊挙動を再現出来るよう、改良、調整が必要である。

### (3) 血管、血液モデルの導入

血管、血液モデルを組み込み、臓器障害でよくみられる腹腔内出血や臓器内出血の再現方法を検討する必要がある。

## 5. 研究成果の公表

これまでの研究成果および今後の研究成果については機械工学、自動車工学に関連する国内外の講演会、論文として公表する。