

# ボクセル有限要素法による複合材料の損傷進展解析の GPGPU高速化

## GPGPU Acceleration of Damage Development Computation of Composite Materials by Voxel Finite Element Method

永井学志<sup>1)</sup>, 高井陽介<sup>2)</sup>

Gakuji Nagai and Yosuke Takai

1) 岐阜大学 工学部 数理デザイン工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

2) 岐阜大学大学院 工学研究科 数理デザイン工学専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

**Key Words :** 3-D Digital Image, Finite Element Method, FFT, Damage Mechanics

### 1. はじめに

複合材料の3次元応力計算を省力的・効率的に実施する手法として、ボクセル有限要素法がある。この解法は撮影した3次元デジタル画像の膨大な画素を一つ一つ立方体の有限要素とみなすものである。それゆえ、高速かつ大規模な計算を前提とする。筆者らは、複合材料の一種であるセメントペースト硬化体の圧縮強度を予測することを目的として、このボクセル有限要素法に損傷モデルを組み込んだ非線形計算を行っている[1]。本報では、この計算をGPGPU (GeForce GTX580) に実装することで、一般的なPC (Intel Core i7 950, 4コア) での計算に比べて4~5倍高速化できたことを報告する。

### 2. 計算法の概要

本計算法では、立方体の解析領域をボクセルで有限要素分割したうえで、周期境界条件を課してマクロ的な圧縮力を増分的に負荷していく。このとき、領域内の材料不均一性により局所的には引張が作用するので、引張が一定値を超えたボクセル要素を損傷したとみなして、次第に剛性を低下させていく。

この一連の非線形計算は、本質的には疎な係数行列をもつ大規模な連立1次方程式の求解計算の積み重ねに過ぎない。もっとも、対象とする問題の特性を十分に活かすことで、実装視点のみでなくアルゴリズム視点からも計算を高速化することが重要である。そこで筆者らは、連立1次方程式の求解に反復法の一つである共役勾配法 (PCG) を用いることとし、これを構成する要素に次の工夫を行った。

1) 疎行列・数ベクトル積 (SpMV) 部には、Element-by-Element法を用いる。これは、通常のように係数行列を作成しないで、各有限要素レベルで小さな係数行列の作成と廃棄をその場で繰り返すものである。これにより、演算量は約3倍に増えるが、データ転送量を約1/80に減らすことができる。

2) 前処理部には、高速フーリエ変換 (FFT) を用いた高速ポアソンソルバを用いる。これは、矩形領域を規則格子で分割し、かつ周期境界条件を課しているために採用できるものである。

CUDA3.2による実装では、cuFFTやcuBLAS等のライブラリを積極的に用いた。また、前処理部のみを単精度とし、残りの計算は倍精度とした。

### 3. 数値計算例

図1に、次元あたりの要素分割数を変えたときのPCGの演算速度を示す。GPGPU (GeForce GTX580) におけるブロック内のスレッド編成に関わらず、PC (Intel Core i7 950, 4コア) に比べて4~5倍高速化されている。

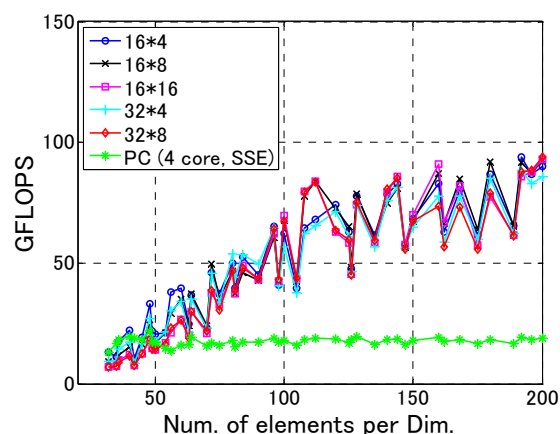


図1 PCGの演算速度 (GeForce GTX580 vs. Core i7)

また、200<sup>3</sup>要素分割において、セメントペースト硬化体モデルの損傷進展計算をおこない、PCでは約1週間要していたものが、GPUでは約1日で終了することを確認した。

### 参考文献

[1] 永井学志, 池田翔太, 胡桃澤清文: 硬化セメントペーストの圧縮強度評価に対する非線形ボクセル有限要素解法とその適用可能性, 計算工学会論文集, 20100012, Vol. 2010 (2010)