

固体地球シミュレーションのための個別要素法型計算コードの開発

Development of a numerical code based on the discrete element method for solid earth simulation

岩瀬 康行[1], 松田 裕也[2], 五十嵐 裕[3]
Yasuyuki Iwase[1], Yuya Matsuda[2], Hiroshi Igarashi[3]

[1] 防大・地球海洋, [2] 広大・理・地球惑星シス, [3] 防大・理工研・地球科学
[1] Dept. Earth & Ocean Sci., National Defense Acad., [2] Earth and Planetary Syst. Sci., Hiroshima Univ., [3] Geoscience, National Defense Academy

コンピュータの発達に伴い、固体地球ダイナミクスの研究に数値シミュレーションは欠くことのできない手法となっている。地球（型惑星）を構成する岩石や地殻等は多くの場合、（粘）弾性体と近似することができるので、これらを対象とするシミュレーションはある限られた領域内で固定した座標に対する運動方程式を解くオイラー的な計算手法（有限差分法や有限要素法）が多く用いられている。これらの手法は対象物が連続体であり、形状が大きく変化しない場合において有効な手法である。しかし、一方で、断層形成や褶曲等の大変形を伴うあるいは不連続体の数値解析には対象物を多数の粒子（要素）で構成されるとし、個々の要素の運動を追跡するラグランジュ的な計算手法が適していると考えられる。粒子法を用いて連続体を扱う場合、粒子（要素）の運動の自由度が高く複雑な変形を伴う問題にも容易に対応できる反面、高分解能な計算を行うためには要素数を多くしなければならず要素間の相互作用の計算にコストがかかり、多数の要素を用いた計算は困難であるという問題があるため、固体地球シミュレーションには多く用いられてはいない現状である。

そのような背景の中で、本研究では個別要素法(Cundall 1971)による固体地球シミュレーションの可能性を考察する。個別要素法はラグランジュ的な計算手法でありながら、要素間の法線、剪断方向の相互作用を考慮することにより、要素の並進と回転の運動を追跡する手法である。粒子法の欠点である計算コストをかけることなく、比較的少ない要素数でも物理現象を正確にとらえられる可能性を持つ。特に、要素の形状を球(3次元)ないし円(2次元)とすることで要素間の相互作用の計算に要する時間を飛躍的に軽減することができ、土砂や粉体等の不連続体解析に広く用いられている。しかし、個別要素法は本来不連続体解析のために開発された手法であり、連続体への適用は確立していない。そこで、本研究では個別要素法を拡張し、不連続体・連続体の両方に適応するためのコード開発を行った。本研究では、従来の個別要素法(Cundall 1971)に以下の拡張を行った。

1. 粘着力と破壊基準の導入

接合している要素間に引力（粘着力）を導入した。粘着力はクーロンモールの破壊基準を満たすと粘着力が失われ、圧縮に対してのみ反発するようにした。このような拡張はすでにいくつかの研究で行われていて、例えば、Matsuda and Iwase(2002)ではこれらの導入により岩石の一軸破壊実験で室内実験と類似した結果を得ている。

2. 2つの回転モードの導入

従来の球(円)形要素を用いる個別要素法では接する2要素は互いに反対方向へのみ回転可能であるとしている。しかし、隣接する2つの要素に剪断応力が加わったときに、結合している要素（連続体状態）は同方向へ回転する。また、独立した要素（不連続体状態）でも法線応力によるモーメントが剪断応力によるモーメントよりも大きい場合は同方向に回転することが期待される。本研究ではこの2つの回転モードを考慮した。さらに接線方向応力を並進と回転成分に分解し、2つの回転モードが実現される条件を付加することで、正しく剪断変形を扱えるようにした。

以上の拡張を行った個別要素法の数値シミュレーションコードを開発し、いくつかの基本的なテストを行った。まず、2次元剪断変形テストについて述べる。半径の等しい要素を正形状に配置し、その上下面に壁を設置し、上面を水平方向に一定速度で移動させた。要素数は1から256(16×16)で計算を行ったが、要素数によらずに外形と回転角度は解析解とほぼ一致し、剪断変形を正確に表現できることが示された。次に、2次元片持梁問題でテストを行った。長さ/高さ比が10の板を水平に配置し、一方の辺を壁に固定し、重力下でのたわみが発生する様子をシミュレーションした。この問題でも要素数を10(10×1)から2560(160×16)まで要素のサイズを変えて計算を行った。また、初期配置を変えた計算も行った。全ての計算でたわみの解析解と良く一致した。

比較のために行った要素間の法線方向相互作用しか考慮しない一般的な粒子法では剪断方向と回転成分を無視しているので、近似精度を上げるためには多数の粒子を用いる必要があり、また、結果は初期配置に強く影響を受ける。本研究で開発した個別要素法の拡張コードでは少ない要素数でも物体の変形を正確に捉えることが可能で、

固体地球シミュレーションの有効な手法となり得ることが示された。