

粒子・流体シミュレーション

数理科学・先端技術研究分野 技術研究員 西浦泰介

世の中には固体粒子群と流体の運動が影響を及ぼしている地質学的現象が沢山有る。たとえば、地震の原因である大陸プレートと海洋プレートの摩擦現象についても、固体粒子が集合した塊であるプレート同士が滑る時に、プレート間の境目に存在する水が摩擦力に何等かの影響を与えていると考えられている。また、このプレート自体がつくられる起源についても、固体粒子群と流体が深く関係している。海洋プレートは固体結晶粒子と熔融メルトや気泡などが混ざってできているマグマが、海底深くから噴き出し冷え固まってつくられる。そのため、ドロドロに溶けている状態のメルトと冷え固まった固体粒子群が混ざった状態で進行するマグマの流動現象が、プレート内の固体粒子群の分布状態すなわち密度構造に影響していると考えられている。さらに、マグマと聞いて身近に感じる現象として火山の噴火を思い浮かべる人も多いであろう。噴火の規模などその様式はマグマのレオロジーつまり流動様式によって大きく変わり、そのレオロジーにはマグマ中に含まれる固体結晶粒子やメルト、水分、気泡といった様々な物質の運動が非常に強く影響している。そして、噴火して地表に流れ出したマグマはやがて冷えて固まり火成岩になるが、火成岩の構造を顕微鏡で観察してみると図1の様な面白い模様が見られることがある。斜長石などの結晶粒子とメルトが均一に混ざった状態ではなく、分離した状態で火成岩がつくられているのである。この火成岩構造ができる原因にはマグマのレオロジーが深く関わっており、この関係を明らかにすることが過去の噴火様式を明らかにするためにも重要となっている。ところが、地表に湧き出て1000°C近い高温状態で流れるマグマの中で、小麦粉と大して変わらない大きさの固体結晶粒子が岩石構造を形成する様子を直接観察することは非常に難しい。この様な現場観察やアナログ実験では観察が難しい場合に代わる有効な手法として、数値シミュレーションが有る。そこで、マグマが流動しながら内部に特異的な構造を形成する現象に対して、微視的観察を可能にする数値シミュレーション方法について紹介することにする。

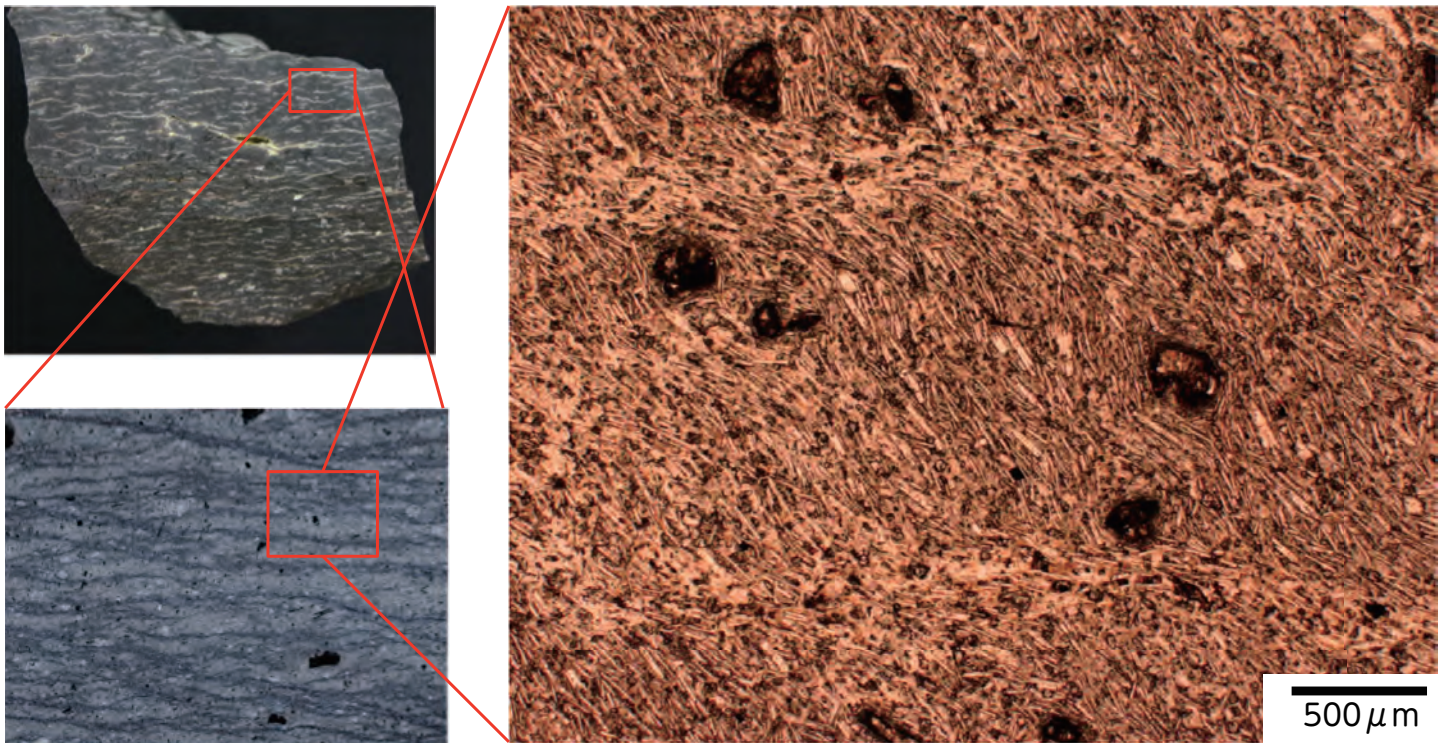
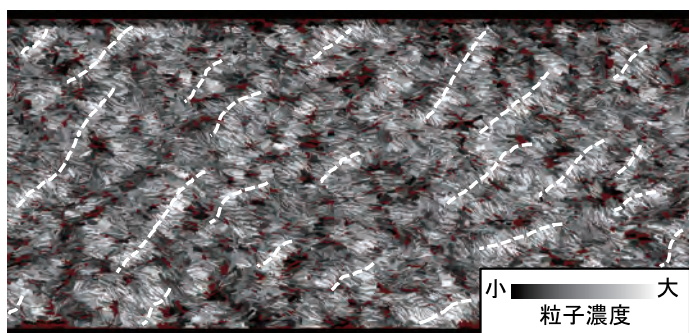


図1 火成岩の微構造

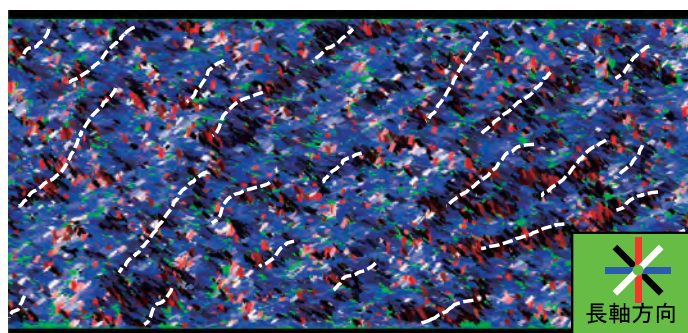
地表に噴出したマグマは内部に速度分布を持った状態で流動する、いわゆる剪断流動状態にあり、マグマ中に含まれる結晶粒子と熔融メルトが相互作用しながら冷え固まっていく。このような現象をシミュレーションするためには、結晶粒子と熔融メルト、すなわち固体粒子の運動と流体流れをコンピュータ上で数値的に計算する方法が必要となる。そこで、固体粒子の運動を計算する手法として個別要素法について紹介する。個別要素法は粒子間の接触によって生じる反発力や摩擦力などの作用力を考慮して個々の粒子運動をニュートンの運動方程式を用いて計算する方法で、土木工学や粉体工学の分野で広く用いられている計算手法である。また、流体の運動方程式であるナビエ・ストークス式と質量保存式を連立して数値的に解くことで、流体流れを計算することができる。さらに、固体粒子と流体の相互作用力を粒子と流体の運動方程式それぞれに考慮して計算することによって、結晶粒子と熔融メルトが混ざったマグマの流動をシミュレーションすることが可能になる。

そのシミュレーション方法を用いて火成岩の構造形成過程を再現計算した結果の一例を動画1に示す。斜長石の様に板状の形をした結晶とメルトが均一に混ざった状態のマグマを剪断流動させると、みるみるうちに結晶とメルトが分離する様子が再現できている。そして結晶が濃集している領域とそうでないメルトが多い領域では、結晶の長軸の向きも異なることがわかる。また、結晶粒子間の力や歪みが集中している領域も結晶の濃集領域と関係していることが見て取れる。このような構造はいつもできるわけではなく、粒子の形状や摩擦特性、メルトの物性によっては結晶粒子がほとんど濃集しない場合もある。そのため、粒子やメルトの特性を様々に変化させて岩石の構造形成メカニズムに及ぼす影響を詳しく調べる必要があり、この様に条件を細かく変化させながら現象のメカニズムを調べることを得意とする数値シミュレーション手法が有効に利用されている。

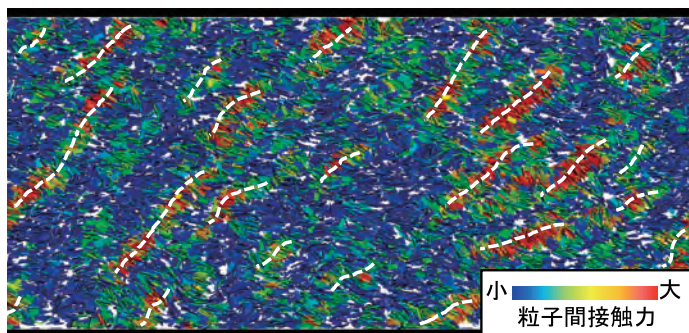
動画



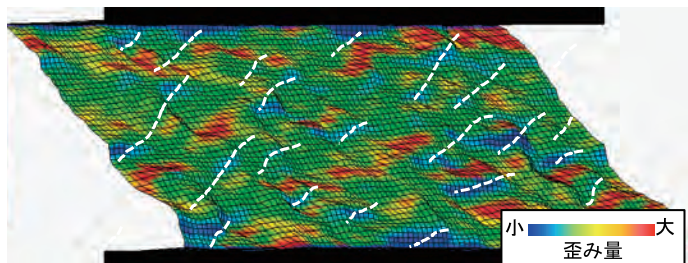
(a) 結晶の濃度分布



(b) 結晶の向き



(c) 結晶間の接触力



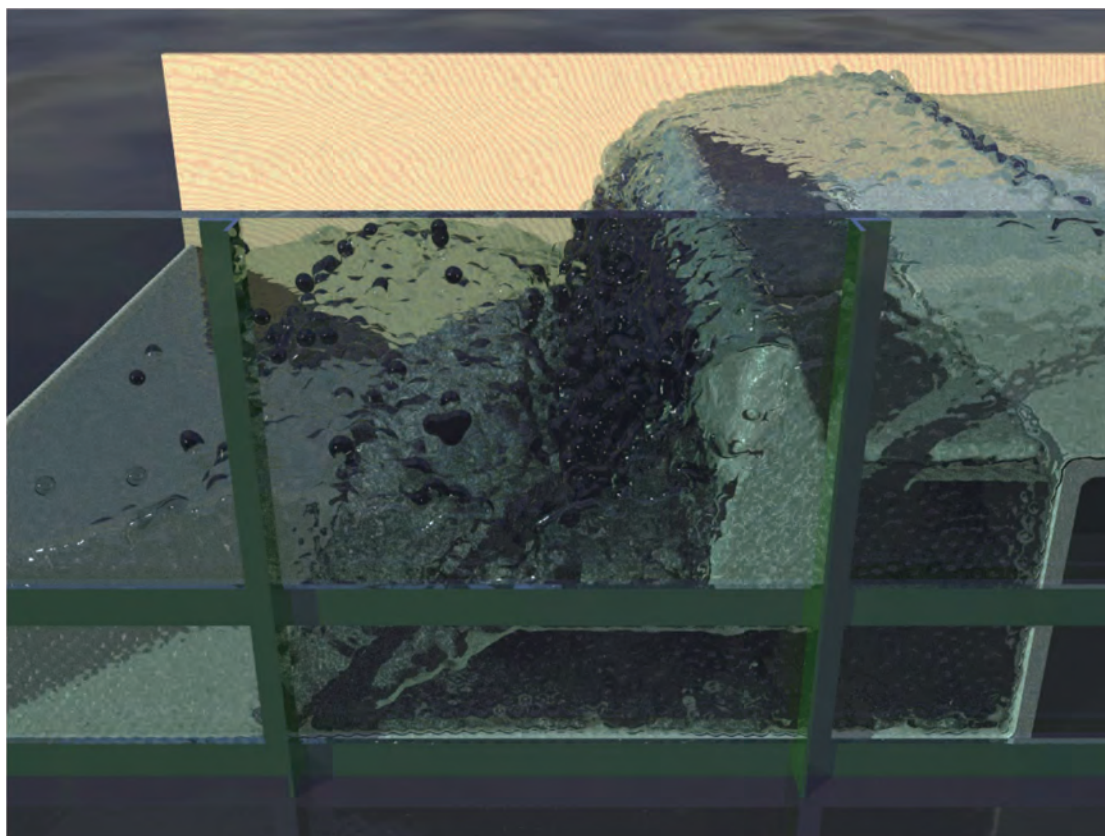
(d) 歪み量分布

動画1 火成岩の構造形成シミュレーション

さらに現在、このような粒子・流体シミュレーションは土砂崩れや地盤液状化、津波など様々な災害

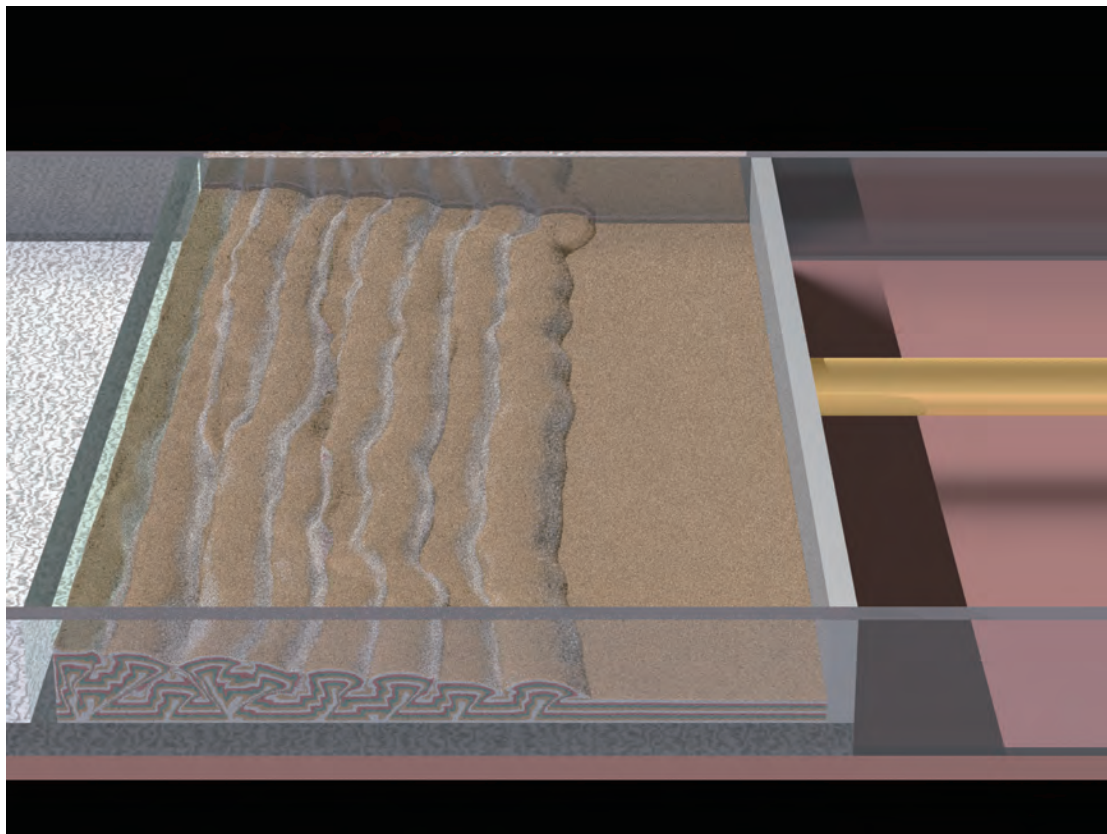
の防災・減災のためにも活用されている。東日本大震災では津波によって大きな被害が生じ、津波を防ぐはずだった堤防が次々になぎ倒された事実もまだ記憶に新しいところであろう。そのため、津波に強い堤防の新しい施工方法が求められており、そのような現場でも粒子・流体系シミュレーションが用いられている。動画2は津波によって堤防が転倒する現象をシミュレーションした結果で、堤防自体と堤防を支えているマウンド粒子を個別要素法で計算し、津波流れをSPH法という流体シミュレーション手法で計算している。越流してきた津波の流体力によってマウンド粒子が流され、支持力を失った堤防が転倒する現象を良く再現している。

動画



動画2 津波による堤防の倒壊シミュレーション

最後に、現時点で世界最大規模の粒子シミュレーションを用いた、付加体形成シミュレーションを紹介したいと思う。付加体は、海洋プレートが大陸プレートの下に沈み込む際に、海洋堆積物が大陸プレートによって剥ぎ取られ、それらが大陸プレートに付加して形成される地質構造である。プレート境界に形成される付加体は地震の発生とも深く関係しており、また、様々な構造の付加体が各地に存在する事が知られている。たとえば、南海トラフの様にトラフ軸方向に複雑に屈曲・分岐した構造が有れば、南米チリ沖には直線的な構造を有した付加体が存在する。その様な付加体構造の違いが生じる要因を調べるために、1m四方の箱に億単位の粒子を均質に敷いて、3次元的な付加体の形成シミュレーションを行った。動画3は、敷いた砂を右から左に押すことによって付加体が形成される様子を個別要素法シミュレーションによって再現した結果である。この様に、粒子法の大規模計算手法の開発と最新の計算機を利用することにより、ある大きさの屈曲を有しながらトラフ軸方向に次々と断層が成長して行く様子を調べられるようになった。さらに現在では、破壊や不連続挙動を扱うことを得意とする粒子法の利点を生かして、断層形成の予兆を示す不連続な微小変位や応力の変動を粒子単位で詳しく調べることが可能となり、地震の予兆との関連性についても検討が進められている。



動画3 付加体形成シミュレーション

この様に、粒子法シミュレーションは地球規模で起きている現象を詳しく解明するために有効な方法として、現場観察やアナログ実験とともに様々なところで活用されている。