

地震やマグマ活動の発生源にどう迫るか

井田 喜明^{*}, ^{**}, ^{***}

How to Approach the Sources of Earthquakes and Magmatic Activities

Yoshiaki Ida^{*}, ^{**}, ^{***}

地震やマグマ活動の発生源が生み出す変形を計算する目的で有限要素法を用いたプログラムが開発され、基本的な機能がすでに実用に供されている。現在はプログラムを利用しやすくするための GUI の開発や、観測データから発生源の状態を直接計算する逆問題の解法に取り組んでいる。将来はデータ解析に人工知能を用いて発生源の解明を進め、それを地震予知や噴火予知に活用する可能性についても検討を進めていく。

Key word: 有限要素法、断層、マグマ、地殻変動、岩脈、GUI、最適解、地震予知、人工知能

1. はじめに

アドバンスソフト社の研究開発センターは、新しいソフトウェアの開発や関連した研究を比較的自由に取り組める環境にある。著者は大学で地球科学、特に固体地球科学の研究を進めてきたので、社内の他の技術者（菊池愛子、戸田則夫）とともに地震やマグマ活動の発生源に関する研究やプログラム開発を進めてきた。本稿では、現在までにすでに成果が上がった開発（2 節）、それを展開して将来の需要に合わせるために現在進めている開発や研究（3 節）、今後手掛けるべく検討を進めている計画（4 節）に分けて、その概要を記載する。

2. 地震やマグマ活動による変形

工学分野ではデータ解析やシミュレーションに有限要素法を用いることが多いが、地球科学では数値解析の多くの目的に差分法が使われてきた。差分法の方が微分方程式の離散化が容易なためだが、複雑な形状に合わせてメッシュを柔軟に

作成する必要性が地球科学分野では相対的に高くないことも理由である。

しかし、地球科学の問題でも有限要素法が圧倒的に有利な場合がある。その一つは地震を起こす断層の記述である。地球内部を差分法で直方体の格子で分割すると、断層は直方体の任意の位置に切り込んでくるので、断層が変形に及ぼす寄与が簡単には計算できない[1]。それに対して、有限要素法は断層面上に節点ができるようにメッシュを切ることができるので、対応がずっとやりやすくなる。

地球内部に存在するマグマなどの流体を表現する際にも、有限要素法は有利である。マグマと岩石の境界に節点をおき、そのまわりに細かくメッシュを切ることで、マグマを囲む応力場をずっと正確に表現できるからである。

このような点に着目して、私たちのグループは地震やマグマ活動の発生源のまわりの弾性変形を解析する計算プログラムの開発を手掛け、ユニークな解析ツールを完成させた。文部科学省の「革新的シミュレーションソフトウェアの開発」で得られた構造解析プログラム FrontSTR をベースにして、Advance/FrontSTR/GEOS（GEOS と略称）と呼ぶシステムを開発したのである[2]。

^{*} アドバンスソフト株式会社 研究開発センター

Research and Development Center, AdvanceSoft Corporation

^{**} 東京大学 名誉教授

Professor Emeritus, The University of Tokyo

^{***} 兵庫県立大学 名誉教授

Professor Emeritus, University of Hyogo

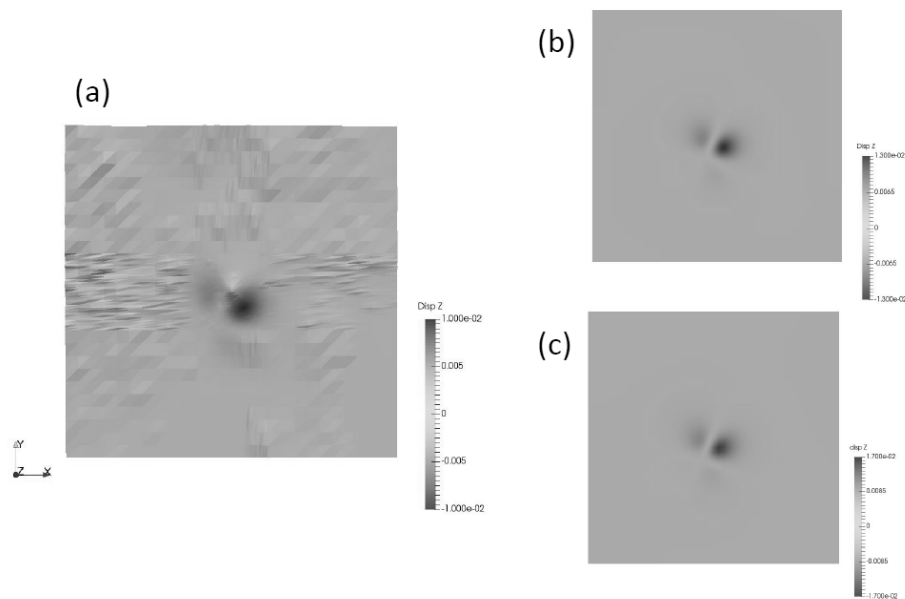


図 1 静岡県東部地震（2011 年）の断層すべりによる地殻変動の解析[2]。地表の地形と内部の弾性定数の 3 次元分布を考慮して地表の上下変動を有限要素法で計算した結果 (a)、弾性定数の分布のみを考慮して有限要素法で計算した結果 (b)、半無限一様弾性体に対する理論解 (c) を比較する。

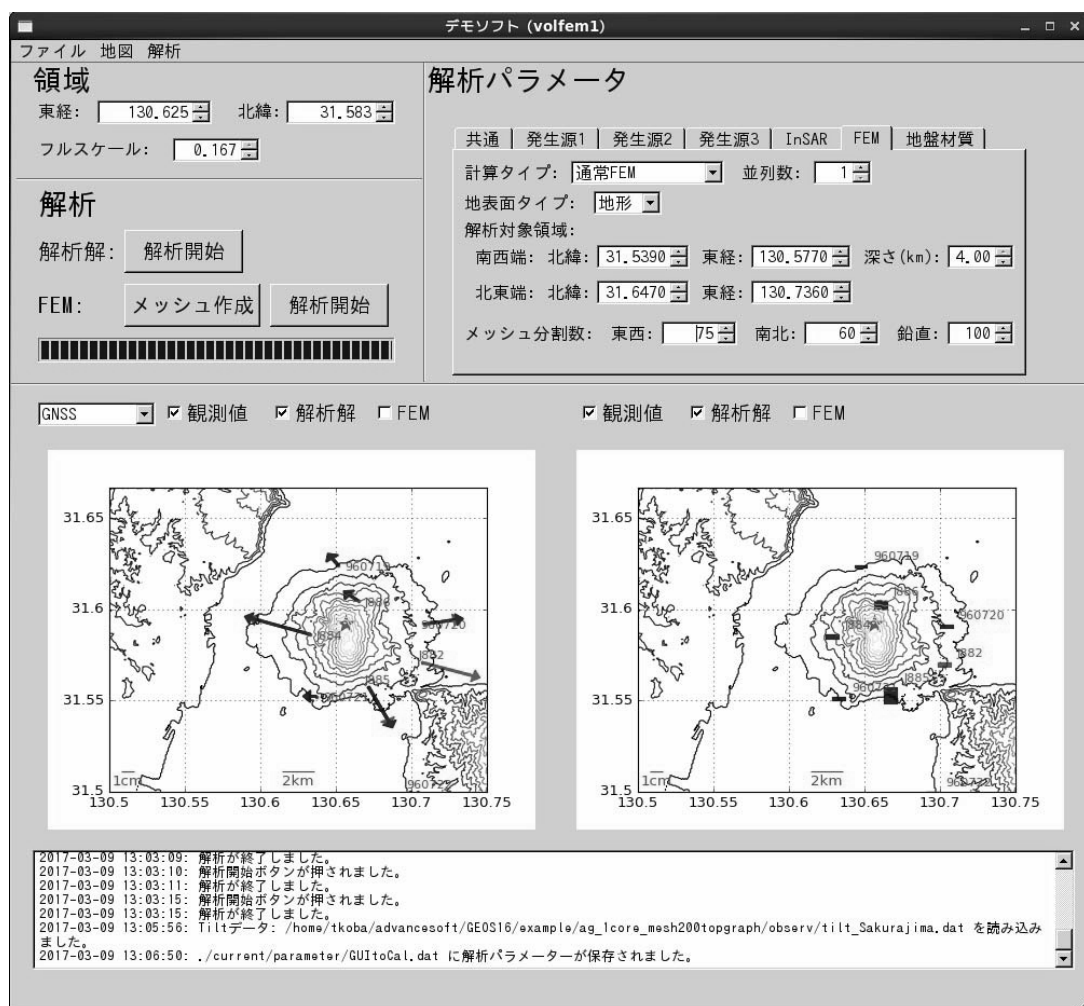


図 2 マグマの活動による地殻変動を解析するために開発された GUI システムの表示例[4]。桜島火山で地下の岩脈を想定して有限要素法で計算された地表の水平変位 (左) と鉛直変位 (右) を GNSS 観測データと比較する。

GEOS で断層を表現する方法の概略は以下の通りである。まず考察の対象とする地球内部の領域を直方体で分割し、その頂点を有限要素法の節点の出発点とする。そこに任意の断層を導入して、断層で切られる直方体で辺との交点に一番近い節点を断層面上に移動する。この操作で著しく変形した要素は、さらに新しい要素に分割して形を整える。

こうして断層が要素の境界にくるようにメッシュを作成してから、断層面上の節点に変位を 2 重に設定する。2 重の変位の一方を断層面上で移動させれば、変位差は地震の原因となる断層すべりを表現する。また、変位差を断層面と垂直にすれば、マグマの貫入で生ずる開口割れ目（岩脈）が表現できる。設定した変位差を保持して、弾性変形で生ずるすべての接点の変位を計算するには、有限要素法の MPC 法を用いる。

断層すべりによる解析例として、静岡県東部地震（2011 年）で生じた地殻の変形（地殻変動）の計算結果を図 1 に示す。断層の位置、形状、大きさ、すべり量は防災科学研究所が観測データから決めたものである。有限要素法の強みを活用して、解析には地表の地形や内部の弾性定数の分布も考慮されている。

図 1 は断層すべりで生じた地表の上下方向の変位を計算した結果である。この計算結果は、地形を無視した計算（b）や半無限弾性体に対する解析解[3]（c）と比較すると、基本的な変形はもちろん一致するものの、地形や弾性定数の分布も結果に有意な影響を及ぼすことが分かる。地形や弾性定数の分布を正確に考慮できる点でも、GEOS は地震やマグマ活動の発生源を解析する有望なツールである。

なお、静岡県東部地震は東北地方太平洋沖地震（2011 年 3 月 11 日に起きた東日本大震災の原因となった地震でマグニチュードは 9.0）の 4 日後に富士山の北西山腹の地下で発生した地震で、東北地方太平洋沖地震の誘発地震と考えられている。

GEOS を用いた計算によれば、静岡県東部地震で解放された応力変化は東北地方太平洋沖地震のために富士山周辺に新たに生じた応力より 100

倍以上大きい。このことから、静岡県東部地震は東北地方太平洋沖地震で生じた応力を解放する地震ではなく、この巨大地震が契機になって付近に元々存在した応力を解放する地震であったと結論づけられる。

3. GUI と逆問題

地震や火山活動の発生源を解析するプログラム GEOS は実用段階に入っているが、その活用を広げるには、解析の方法や精度を向上させるばかりでなく、プログラムの使い勝手をよくする必要がある。そのために現在 2 つの課題に取り組んでいる。

一つは画面上でプログラムを簡単に操作するグラフィック・ユーザー・インターフェイス (GUI) を開発することである。もう一つは、プログラムがほとんどの場合に観測データから発生源の性質を探る目的に使われることを考慮して、発生源の最適解を自動的に計算するシステムを開発することである。

まず GUI について述べる。プログラム GEOS を元の形で利用するには、ユーザーが入力データを準備してから GEOS を実行し、自分の保有する図化ソフトなどで計算結果を確認する手順をとる。この一連の処理は、計算の機能を GUI に組み込めば操作が容易になり、作業も能率化される。一般に、計算科学の分野では広く利用されるソフトウェアの多くが GUI を備えており、GUI はソフトウェアの評価を決める重要な要素になっている。

私たちは国土地理院の受注を受けて、昨年マグマ活動による地殻変動を解析する GUI の開発に着手した[4]。開発は社内の技術者（宮崎利行）の協力を得て、Python 系列の言語 `pyside` で進められた。図 2 は開発された GUI の操作例で、桜島火山で観測された地殻変動を、GEOS を用いて解析したときのものである。

この GUI の操作は次のように要約される。まず画面の上部で計算条件を設定する。次に左中央の「解析」の窓でプログラムの実行を指示する。その指示を受けて計算が実行され、計算結果が観測

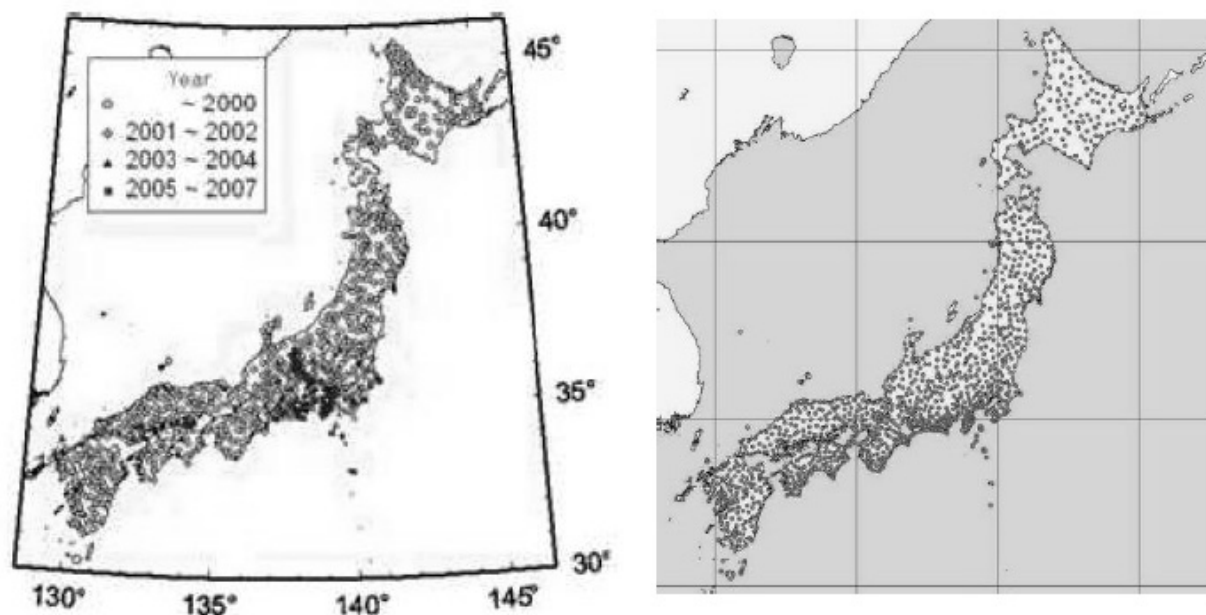


図 3 日本全国にはりめぐらされた地震波形と地殻変動の観測網。高感度地震観測網（左）は防災科学研究所の hi-net である。地殻変動（GNSS）観測網（右）は国土地理院の電子基準点におかれている。

データと比較されながら表示画面に図示される。一連の操作や計算の経過は画面の最下部に記録される。以下にその詳細をみる。

計算条件としては解析の対象とする地域を計算領域として最初に定める。それに対応して国土地理院のデータベースから地形データが得られる。地下の弾性定数には、標準では多数の地震波速度の観測から防災科学研究所によって決められた 3 次元の分布が使われる。比較に使う観測データはメニューからファイル名を選択する。

計算条件の中心は地殻変動の原因となる発生源である。発生源にはタイプ、位置、形状、圧力や変位の大きさなどを画面上で設定する。図 2 の解析例では、発生源のタイプとして岩脈（マグマの貫入で膨張した開口割れ目）が指定されている。岩脈の他に球状や回転楕円体状のマグマだまりの圧力も用いることができ、それらを組み合わせることも可能である。

計算条件をすべて設定し終わったら、「解析」の窓で計算の実行を指示する。GEOS の実行には多少時間がかかるので、計算の進行状況はバーの伸びで時々刻々と示される。解析には GEOS の他に半無限一様弾性体に対する理論解も用いることができる。

計算結果は観測データと比較して表示窓に示される。図 2 で比較されているのは GNSS (GPS) 観測で得られた地表の水平変位（左）と鉛直変位（右）である。比較には、この他に傾斜観測から得られる傾斜の方向と大きさ、干渉 SAR 観測から得られる衛星方向の連続的な変位分布も用いることができる。

さて、GUI を使うことによって計算条件の設定から計算結果の表示までの操作は確かに能率化される。しかし、観測に適合する発生源の位置や性質を見つけるためには、発生源を何度も変えて計算を繰り返す必要があり、それは手間のかかる作業である。観測データに適合するような発生源が自動的に計算できれば、ユーザーの負担はずっと軽減される。

観測から発生源の最適解を計算する問題は、発生源の情報から変形を計算して観測と比較する問題の逆問題にあたる。逆問題を解くためによく使われる方法に最小二乗法があるが、発生源を記述する定数が地表の変形と非線形に関係し合うために、地殻変動の観測データに適合する解は簡単には得られない。

この問題では、発生源の位置、形状、圧力や変位の大きさなどと未定の定数が多数あり、観測量

の制約が必ずしも十分でない場合も多い。また、観測点が地表付近に限られているために、深さ方向の位置や広がりが決まり難い。これらの事情も重なって、逆問題の安定な解はなかなか得られない。

そこで、産業総合研究所からの受注を受けたのを機に、発生源の最適解を決める逆問題の検討に着手した。最適解は観測データと計算結果の二乗和が最小になる条件を満たすものとして、発生源を決める目的に既存の逆問題の解法をいくつか適用し、その有効性を評価した。得られた結論は以下のように要約できる。

共役勾配法は近似解の近傍で発生源の定数の依存性を線形化して解の改善を重ねる方法であるが、近似解の出発値がかなり正確に得られないとうまく機能しない。最も解が安定して得られたのは、定数のサンプル値を選んで解の存在する場所を探すという操作を繰り返して最適解に近づく EGO (Efficient Global Optimization) 法であった。

逆問題は奥の深い問題なので、今後も様々な角度から検討を続けていく。

4. 地震予知に人工知能？

もう少し遠い将来を見据えて、社会に貢献するために地球科学は何を目指すべきだろうか。重要なテーマの一つに地震予知や噴火予知がある[5]。地震や噴火が多発する国々では、予知の実用化は住民の悲願である。しかし、予知に関する研究や開発の長い歴史にもかかわらず、社会の期待に応える予知手法は見つかっていない。

予知の歴史を振り返れば、我が国では 1891 年の濃尾地震を契機に地震予知の検討が始まった。1923 年に関東大震災が発生すると、地震予知の研究を柱とする東京大学地震研究所が設立された。1965 年には地震予知計画が、1974 年には火山噴火予知計画が国家事業としてスタートした。

しかし、1995 年の阪神淡路大震災でも、2011 年の東日本大震災でも、防災に十分に活用できるような予知情報が出されることはなかった。最近では、適切な予知情報が出せないことを前提に、地震や噴火の不意打ちを受けたときにどう災害を食い止めるかが社会の検討課題とされている。こ

れは地震学や火山学の敗北ともいえる。

この状況を打開するために、予知に人工知能が活用できないだろうか。その手がかりになるのは、予知計画などの予算を活用してはりめぐらされた稠密な観測網である。

地震活動を評価するための基礎情報となるのは、地震波形と地殻変動の観測網であり、その観測網を図 3 に示す。地面の揺れや変形のデータは、この高密度の観測網で時々刻々採取されて保存されていく。しかし、防災や研究に実際に活用されるのは膨大なデータのほんの一部であり、ほとんどは将来の活用を期待して黙々と蓄積されていく。

膨大なデータのすべてを検討し尽くすことは人間にはとても無理であるが、人工知能ならばデータを有効に活用することができるだろう。現在色々な分野に活用が進んでいる深層学習 (deep learning) によって膨大なデータを学習し、そこからデータの特徴量が見つけられれば、地震や噴火の性質について新たな知見が得られるだろう。それが予知に新たな展望を開く可能性もある。

とはいえ、現在の人工知能はデータからその特徴量を自動的に見つけられるほど賢くはない。人工知能の能力は、画像認識や音声認識などに特化して急速に高められているものの、多くの問題については学習の仕方や特徴量の見つけ方を細かく指示する必要がある。人工知能と一緒に人間がデータと格闘する段階がまず来るはずである。

最初はデータのノイズを除去するような作業に人工知能を活用することから始めることになりそう。それから、人間がすでに把握している現象の性質を人工知能にどう学習させるかが課題になりそう。予知に挑むのはその先になるだろうが、一步一步確実に検討を進めていきたい。

参考文献

- [1] 井田喜明「自然災害のシミュレーション入門」朝倉書店, 2014.
- [2] 井田喜明、菊池愛子、戸田則夫「有限要素法を用いた断層すべりによる地殻変動の解析」日本地球惑星連合 2016 年大会要旨.

- [3] Okada, Y. “Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space” Bull. Seismol. Soc. Amer., 75, 1135-1154, 1985.
- [4] 小林知勝「地形・地下構造を考慮した地殻変動の分析に関する研究」国土地理院平成28年度調査研究年報、pp110-111, 2017.
- [5] 井田喜明「地震予知と噴火予知」ちくま学芸文庫、2012.

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイルがダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)

研究開発センター長 井田 喜明 紹介

1941 年、東京生まれ、東京大学理学部物理学科卒業、同大学院理学系研究科地球物理学博士課程修了。

マサチューセッツ工科大学、東京大学物性研究所、同海洋研究所、同地震研究所、姫路工業大学（2004 年度から兵庫県立大学）などで研究・教育に携わりながら、日本火山学会会長、火山噴火予知連絡会会長なども務める。現在はアドバンスソフト株式会社研究顧問。東京大学名誉教授。兵庫県立大学名誉教授。

専門は固体地球物理学。

主な論文に、

- Y. Ida, Dependence of volcanic systems on tectonic stress conditions as revealed by features of volcanoes near Izu peninsula, Japan, J. Volcanol. Geotherm. Res., 181, 35-46, 2009.
- Y. Ida, Computer simulation of time-dependent magma ascent processes involving bubbly and gassy flows, J. Volcanol. Geotherm. Res., 196, 45-56, 2010.

主な著書に、

『人類の未来と地球科学』『地球の教科書』（岩波書店）、『図説 地球科学』（編著；岩波書店）、『〈岩波講座 地球惑星科学 14〉社会地球科学』（共著；岩波書店）、『自然災害のシミュレーション入門』（朝倉書店）、『地震予知と噴火予知』（ちくま学芸文庫）、『火山爆発に迫る』（編著；東京大学出版会）、『火山の事典』（編著；朝倉書店）。