

「地殻活動観測データの総合解析技術の開発」

国土地理院
独立行政法人 建築研究所

1. 研究の目的

本研究では平成10年から14年までの5年間で、「地殻の変形のモデル化技術の開発」及び「広域地殻活動シミュレーションモデル」の構築を目的として行った。これらの技術は、「中長期・広域の地殻活動及び地震発生準備過程の最終段階の物理的理解を深めること」並びに「地震発生直前に発生する可能性のある前駆的な現象を効果的に捉えるために必要な地殻活動観測の計画作成」に活用されるもので、このモデルにより地殻活動及び地震発生の予測を行うこととした。また、その構築に当たっては、地殻変動及び地震発生物理過程解明に必要なデータベースの作成を実施した。さらに、この研究によって得られる結果を観測、実験へフィードバックし、地殻活動観測の高度化に資することをめざした。

2. 本研究の概要

2.1 地殻活動連続観測データの統合化技術の開発

三角（辺）測量、水準測量、GPS、連続地殻変動観測、重力、地磁気等、多種類かつ、空間的・時間的分布の異なる地殻変動観測データを地殻活動シミュレーションの入力用データベースとして統合するための技術を開発した。

2.2 地殻活動連続観測データの総合解析技術の開発

GPS、地殻変動連続観測に代表される時間的に連続して実施する観測結果から地殻活動に関する詳細な情報を理解するための技術を開発する。

2.3 地殻変形の評価システムの開発

地殻活動シミュレーション手法を開発し、2.1及び2.2の「断層摩擦構成則、破壊力学実験データの調査・収集」（建築研究所）で収集したデータを用いて我が国周辺で発生している地殻変動を再現し、地殻変動シミュレータの性能・信頼性を評価する。

2.4 効率的な監視手法の開発

2.1、2.2及び2.3で開発したシミュレーションプログラムを用いて日本周辺の地殻活動予測を行うため、日本列島周辺の構造モデルを作成する。次に構造モデルを用いて地殻活動の数値シミュレーションを実施する。その結果に基づいて、我が国周辺で発生する可能性のある地震の前駆的現象など多様な地殻活動を特定・推定し、観測網の最適化に役立てる。

3. 平成14年度の研究成果

3.1 地殻活動連続観測データの統合化技術の開発

3.1.1 地殻活動観測データ総合解析システムの開発

国土地理院では、三角測量、辺長測量、水準測量、GPS、歪計、傾斜計、験潮、重力、地磁気等の他種類かつ時間的・空間的分布の異なる観測データを有しているが、これまではデータの管理がばらばらに行われていた。その現状をふまえ、必要なデータを計算機で読み出すことが可能な形にアーカイブし、多種のデータを一か所に集約したデータベースの構築を行った。さらに、様々な解析ソフトウェアとデータベースのインターフェースを作成し、地殻活動解析のプラットフォームを完成させた。平成14年度は、平成13年度までに開発したシステムを修正・改良し、さらに地殻構造に関する配布用のCD-ROMを作成するとともに、マニュアルを整備して一般公開するための準備を行った。

3.1.2 本システムの特長

ネットワーク経由のデータベース利用。

インターネットエクスプローラー等のブラウザソフトを通じて全ての操作が可能。利用者の端末の機種が限定されず、特別なソフトウェアをインストールする必要がない。

Web の操作により対話型による解析・図の作成が可能。

作成したデータ、図を画面表示及び画像ファイルとしてダウンロード可能。

フリーソフトを利用して構築してあるので、自由に配布が可能。

3.1.3 今年度実施した内容

平成13年度までに作成したシステムに地図表示時の情報追加、地図検索機能の改良、利用者によるデータ追加機能、それに対応した図の更新のためのユーティリティプログラム整備などの改良修正を行った。

機能の追加として、断層運動に伴うクーロン応力変化の計算機能を追加した。データの追加として、GPS、水準測量、験潮などの最新データを追加した。マニュアルの作成として、システムの機能を網羅的に記載したマニュアル及び使用するための最低限の情報を記載した簡易マニュアルの2つを作成した。システム公開のために、配布用CD-ROMを100枚作成した。

3.1.4 システムによる解析結果の例

平成15年7月26日に発生した宮城県北部の地震(M6.2)の際に、地殻変動観測結果から、本総合解析システムにより震源断層のメカニズムを詳細かつ迅速に推定することに成功した。入力した観測データは、電子基準点の水平・上下変位、周辺の三角点・地殻変動観測点の水平変位、水準測量による上下変位、合成開口レーダ(干渉SAR)の結果等である。図の中央にある2つの長方形が推定された断層の位置である。北の断層は西側が東側に乗り上げる逆断層、南の断層は北西側が南東側に乗り上げる逆断層で、これは地震波の解析によるメカニズムとも整合している。

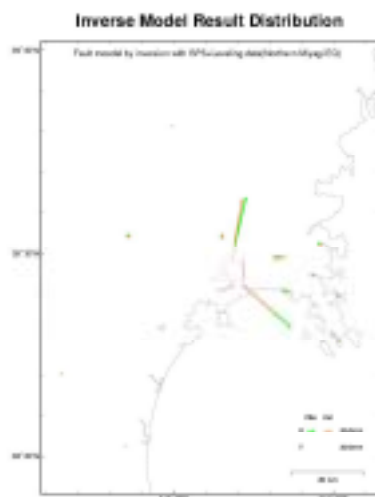


図1-1 断層モデルと水平変位

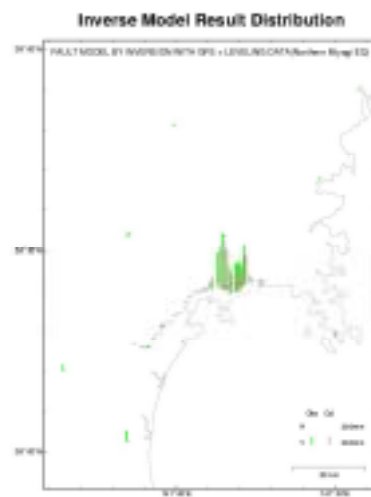


図1-2 断層モデルと上下変位

3.2 地殻活動連続観測データの総合解析技術の開発及び地殻変形の評価システムの開発

時間的に連続して実施する観測結果から地殻活動に関する詳細な情報を理解するための技術としての逆解析手法と、収集したデータを用いて我が国周辺で発生している地殻変動を再現する、地殻変動シミュレーションは、地殻活動の原因と結果をそれぞれ逆方向、順方向に解析する手法として、平行して用いられる。これらの目的の元の開発されたプログラムとその解析結果を示す。

3.2.1 3次元不連続体モデルDFEMの開発

DFEM はひび割れ、剪断すべりなど連続体中における不連続性の成長を追跡するために開発された有限要素法に基づく解析手法である。国土地理院では、この DFEM を日本列島の地殻変動解析に応用することを目的として、平成 9 年度からプログラム開発を続けてきており、平成 10 年度以降は本総合技術開発プロジェクトの一部に位置付けて実施した。

3.2.1.1 DFEM 解析プログラムの機能・特長

- ・破壊面の形成過程を破壊面に関する仮定（位置、方向）をせずに解析することができる。
- ・Mohr-Coulomb の破壊基準を採用。
- ・プリ・ポスト処理に市販の汎用アプリケーション（PATRAN, AVS）を利用可能。
- ・3次元問題の解析。
- ・媒質：弾性・粘弾性（Maxwell モデル）。
- ・大規模解析（100,000 要素程度）可能。
- ・断層変位を境界条件として入力可能。

3.2.1.2 平成 14 年度の実施内容

（1）例題解析

平成 13 年度までに開発したシステムを用いて 1896 年と 1914 年に、東北地方で相次いで発生した M7 級の地震である陸羽地震と秋田仙北地震の力学的因果関係について検討するため数値計算を実施した。東北地方の地殻（弾性）・マントル（粘弾性）構造を現実的に即して仮定し（図 2 - 1）、東から太平洋プレートの沈み込みを与えて応力場を作成する。そこで陸羽地震を発生させた後、地震の余効変動と太平洋プレートの沈み込みによって生じる応力変化を計算し、18 年後に秋田仙北地震を誘発する可能性があるかどうか検討した。2つの地震の震源域周辺に DFEM 要素を仮定し、また水平なデタッチメント断層を既存の弱い断層面として与える（図 2 - 2）ことで、陸羽地震後の粘性緩和によりデタッチメントが活動し、最終的に秋田仙北地震を引き起こす、という仮説を検証した。プレートの沈み込みを与えて内陸部に応力を蓄積したところへ陸羽地震を発生させ、約 20 年後に秋田仙北地震の震源域の周辺で断層の破壊が起きる可能性のある結果は得られたが、パラメータスタディの範囲が狭く、今後さらに多くの可能性をシミュレーション計算する必要がある。

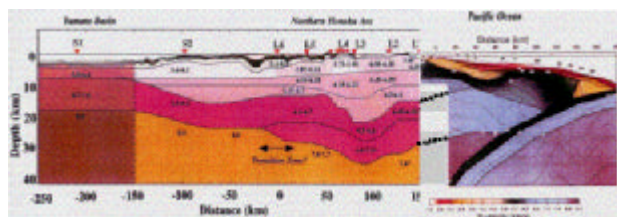


図 2 - 1 東北地方の地下構造断面図

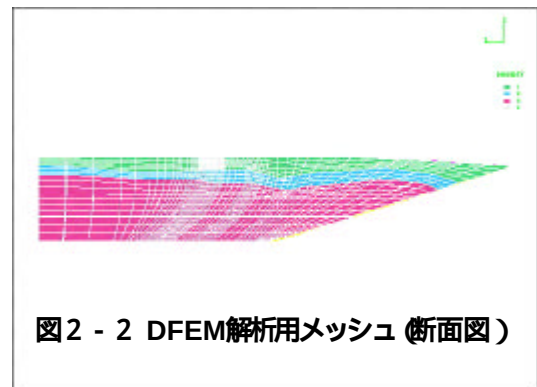


図 2 - 2 DFEM解析用メッシュ (断面図)

（2）マニュアル・配布用 CD-ROM 作成

ソフトウェアの機能を網羅的に記載したマニュアル及び使用するための最低限の情報を記載した簡易マニュアルの 2 つを作成した。また、プログラム本体、マニュアル、例題用のデータなどを含む配布用 CD-ROM を作成した。

3.2.2 地殻活動総合解析のための三次元不連続体解析 FESM プログラムの開発

不連続体解析手法 FESM は、通常の有限要素法では取り扱えない不連続面を取り扱える事ができる。また FESM はブロック構造要素（2次元場においては多角形、3次元場においては多面体）を元にし

ており、地殻変動に対して重要なブロックローテーションモデルを扱うことが容易であり、かつ熱、流体、応力との練成解析も可能となっている。

本研究の成果としては、FESMを使用し、地下構造、摩擦構成則に基づく地震発生シミュレーションにおいて2次元の場合はほぼ目的を達する結果が得られた。従来の多くの解析では、地下構造を取り入れるといった事は殆ど行われておらず、FESMを用いる事によって世界的に見ても数少ない解析を行える事が実証された。3次元の場合には、地下構造まで含めて行われた事例は殆どなく、本研究でもある程度規則的に地震発生をコンピュータ上で起こさせる事はできた。しかし改良すべき点も残されており、今後実際の活動を再現するための計算の繰り返しを行う中でプログラムの改良も必要である。

3.2.2.1 FESMの特徴

要素内と要素間の物理特性を扱えることで地殻の変形と断層でのずれを評価できる。

任意多面体の要素が扱えることで断層の位置、形状、数が容易に変更可能で効率よく解析できる。

断層を explicit に扱えることで断層の交差部の解析が精度良く行える。

破壊基準は要素内に対するものと要素間に対するものを備えているために地殻内の塑性変形と断層内で起きる破壊現象を精度良く評価できる。

粘弾性解析機能を備えているためマントル部の粘弾性特性を考慮した解析が可能。

摩擦構成則を備えているため地震の解析が可能。

要素数が 100,000 程度の大規模解析機能を有するので3次元の地殻変動解析が可能。

3.2.2.2 平成14年度実施内容

平成12～13年度に作成した東海地方の3次元モデルを行い、地震発生サイクルの再現を試みた。東海地方3次元モデルはモホ面、コンラッド面、フィリピン海プレートの形状を用いて要素分割を行っている。用いた形状モデルは、モホ面とコンラッド面について Zhao et al 1992、フィリピン海プレートの形状について山崎・大井田 1985 等を用いた(図3-1)。計算時間を短縮するために、解析範囲は昨年度に比べて、狭い範囲を扱い、要素数は約 900、節点数約 800 のモデル(Tokai2S)を作成した(図3-2)。また同じ領域を 5km で分割したモデル(Tokai4S)も作成した。地殻、マントル、プレートの力学特性はヤング率が共通に $0.648 \times 10^{11}(\text{Pa})$ 、ポワソン比が地殻とプレートで 0.251、マントルで 0.298、密度は共通に $2500(\text{kg/m}^3)$ と設定した。マントルは弾性体として扱っている。

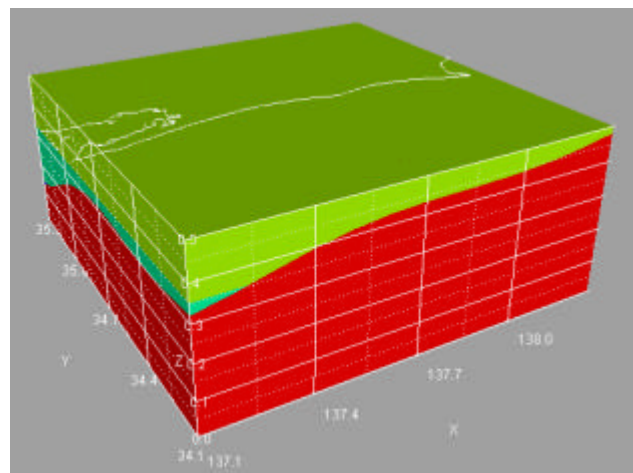
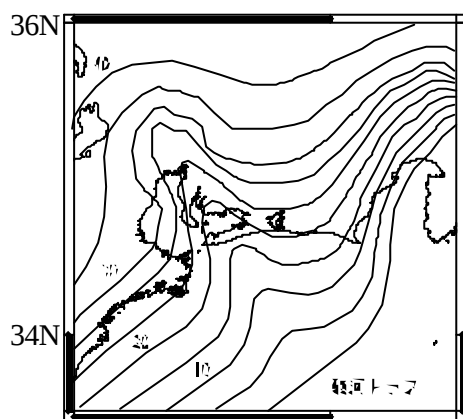


図3-1 フィリピン海プレートの形状

図3-2 Tokai2Sモデルの全体図

(第144回地震予知連絡会名古屋大学資料より) 赤：フィリピン海プレート 緑：上部地殻 青緑：下部地殻

地震発生の解析においては、断層面に摩擦抵抗特性を設定する必要があるが、今回はフィリピン海プレート上面に以下のような設定を行った。すなわち、摩擦抵抗設定の指針として、1)モホ面より浅いところを不安定滑り領域とし、それより深い領域を安定滑り領域とする、2)計算を安定させるために解析領域の端は安定滑り領域とする、3)計算を安定させるために 5km より浅い領域は安定滑り領域とする、とした。また、境界条件としては東、西、南、北面、底面、頂面について、南側面全体、北

側面の地殻とプレート、東側面、西側面の地殻とプレート、頂面については自由条件に、北側面のマントルでは南北方向の自由度だけ固定、西側面のマントルでは東西方向の自由度だけ固定、底面については全てプレートなのでプレートの移動速度 (Grip and Gordom の NUVEL-1 Model, 1994) を設定することとした。

また、地震の構成則は Ruina and Dietrich による次式で与えた。

$$\tau = \sigma [A_1 + \theta + A_2 \ln(V/V_c)] \quad (1)$$

$$\dot{\theta} = (-V/d_c) [\theta + A_3 \ln(V/V_c)] \quad (2)$$

ただし、 τ : 摩擦抵抗力、 σ : 垂直応力、 d_c : 距離定数
 V : ずれ速度、 V_c : ずれ速度定数、

また、 θ は摩擦抵抗力に関する状態量であり、 A_1, A_2, A_3 は構成則のパラメータである

計算に実行に当たっては、距離定数 (d_c) = 0.065m、ずれ速度定数 (V_c) = 0.04m/yr、沈み込み角度 10 度、パラメータ A_2 = 0.002、パラメータ A_3 = 0.004 (不安定滑り領域) または = 0.001 (安定滑り領域) といったパラメータを用いた。

3.2.2.4 解析結果

今回の計算ではセルサイズの限界を考慮して、パラメータ (A_3-A_2) の値を変化させた複数のモデルの計算を行った。結果として、 A_3-A_2 の値を 0.0003 としたモデルで、地震発生の繰り返しを再現することができた。このモデルでは、180 年で 1 回目の地震が発生し、470 年目で 2 回目、660 年に 3 回目、870 年に 4 回目の地震が発生している。図 3 - 3 で速度が急激に大きくなったところが地震の発生である。平均的な繰り返し周期は約 200 年となり、実際の東海・南海地震の発生間隔 90-150 年よりは長い、妥当な結果が得られていると考えられる。(図 3 - 3)

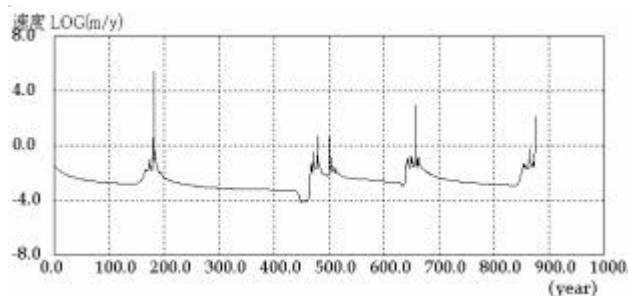


図 3 - 3 繰り返し周期約 200 年のモデル

3.2.3 特定の領域における高精度破壊核形成過程のモデル化に関する研究

建築研究所では、日本列島周辺の地殻活動総合モデルの一部として、断層摩擦構成則や、破壊核(先駆すべりが生じる領域)形成から動的破壊伝播に至る過程のモデル化の研究を行った。そして、実際に東海地域など特定の領域に対して破壊核形成過程を再現し、最適な地殻活動観測網設計への指針を提供することとした。また、スローイベントの物理機構に対する物理的解釈を提示することができた。

3.2.3.1 これまでの研究内容

断層摩擦構成を規定するパラメータの温度、法線応力、水、断層物質などに対する依存性に関する研究の調査。

準静的破壊核形成から高速破壊伝播に至るまでの全過程のモデル化。

地殻変形の評価システムの開発・モデルを使った地殻活動現象の発生・進行過程の計算機上での再現、特に南海トラフなどの特定の領域における海溝型大地震に関して、破壊核形成から高速破壊に至る過程の高精度モデル化。最終的なモデルとしては、以下の機能を有するものとする。

- ・プレート境界の形状を取り入れる。
- ・境界要素法を用いた準静的解析を取り入れる。動的機能も付加することが可能である。

- ・構成関係は、すべり速度と状態に依存する構成関係とすべりと時間に依存する構成則を用いる。
- ・地殻流体や断層物質の効果を取り入れる。
- ・地表における地殻変動計算。

3.2.3.2 今年度の研究内容

スローイベントのモデル化

東海地方で現在進行中のスローイベントについて、固着域下部に対する応力集中とその剥がれを摩擦の遷移的な性質によって再現することを試みた。断層深部における脱水反応→流体圧上昇→すべり→ダイラタンシーハードニングといった過程を示す摩擦構成則として、速度増加に対して摩擦が減少する領域を設定した N-shaped friction (Estrin and Brecht, 1996) を採用した。これは、流動と摩擦滑りが共存する構成則で、低滑り速度に対しては流動、高滑り速度に対しては摩擦の挙動をするものである。

スローイベントと破壊核形成との識別可能性

パラメータスタディーにより、破壊核形成とスローイベントとの違いを検討した。現在のところ、スローイベントは、すべり速度の大きな領域が移動する現象であり、それに対し破壊核形成はすべり速度の大きな領域が拡大するものと解釈出来るようなシミュレーション結果が出ている。特に周辺域の速度が大きいと主破壊に至りやすい。図3 - 4はその状況を示したもので、深さ60 kmにある境界面での滑りの状況の時間変化を左上から右下に縦にたどる系列で追跡できる。薄青色が見えるところがスローイベントでスリップが発生していることを示す。右上が前の地震発生後(約24年経過)で、185年(event1)の時点で、スロースリップが発生している。次のスロースリップは203年(event2)時点で発生している。247年(nucleation)の時点で、大地震発生の震源核が形成され始めているのが確認出来る。震源核が形成されて0.08年(約1ヶ月)で大地震が発生していることが分かる。黄色く見えているところが高速滑りの領域である。

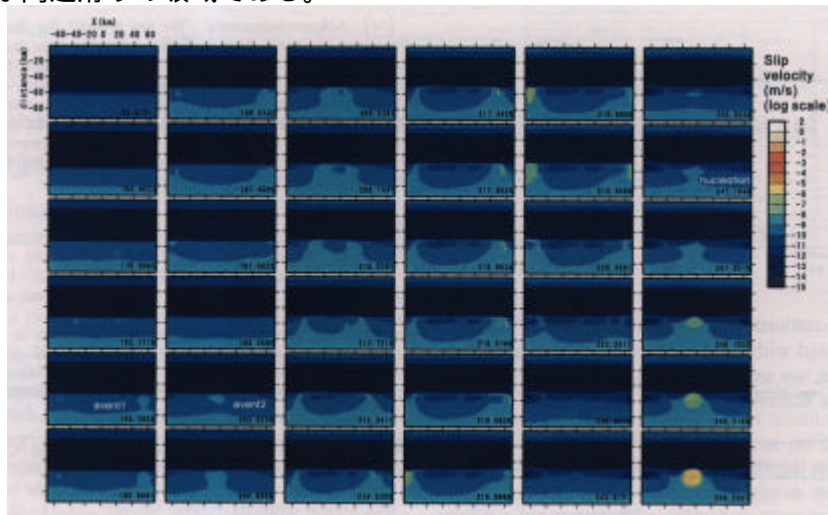


図3 - 4 スロースリップおよび破壊核形成のシミュレーション

3.2.3.3 今後の課題

高速破壊の領域では、熱の取り扱いが重要であるが、今回のシミュレーションでは、まだそれを十分に反映出来ていない。今後はそれも含めたモデル作成が必要である。

4. まとめ

5年間の研究で、地殻活動シミュレーションを行うためのツールとして利用範囲が広い、DFEM、FESM といった手法を開発することができた。今後は、実際の現象を再現するためのシミュレーション計算を精力的に実行していきたい。また、地殻活動総合解析システムは簡便に地殻活動の分析・評価を行うために有効なツールであり、今後も新しい測地データの追加、機能の改良などを続けながら、地殻活動研究・調査に活用していきたい。