

概 報

断層系活動度解析数値シミュレータの開発 —地殻変動数値シミュレーションの研究—

村上 裕¹

Yutaka MURAKAMI (2000) Development of a numerical simulator of fault system activity analysis -Research on the numerical simulation of crustal deformation-. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 51 (9), p. 421-427, 8 figs.

Abstract: Elasto-plastic finite element program Plasto-Slip is developed in order to analyze the activity of an active fault system. This software uses the same finite element mesh as the Bird simulator (Bird and Kong, 1994), which is well-known as the fault system analysis software, so that an exact comparison can be made between the results of both simulators. Numerical examples of both simulators for the case of Kinki fault system are shown.

要 旨

断層系の活動度を解析するための弾塑性有限要素法プログラム Plasto-Slip を開発した。本ソフトウェアは、断層系解析ソフトウェアとして知られている Bird シミュレータ (Bird and Kong, 1994) と、同じ有限要素メッシュを用いて計算できるようにし、両者の計算結果を詳細に比較することが可能とした。近畿地域の活断層系をモデル化した有限要素メッシュを作成し、Plasto-Slip と Bird シミュレータを用いて実施した計算結果例を報告する。

1. はじめに

日本列島はユーラシアプレートの東端に位置し、その下に沈み込む太平洋プレートやフィリピン海プレートとの相互作用のもとに、複雑な地殻変動をおこしている。その変動に伴い、日本内陸に存在する数多くの活断層が活動し、地震が発生する。地質調査所では、第7次地震予知計画の一環として、日本列島に分布する活断層・活構造の分布、活動性、活動履歴等を明らかにすることにより、各地域の地震発生危険度の定量的な評価を推進するため、平成6年度から工業技術院特別研究「活断層等による地震発生ポテンシャル評価の研究」をすすめている。近畿三角地帯の活断層については、平成10年度までにほぼ主要な活断層の一次調査が終了し、その調査結果と地震危険度について、杉山他 (1999) にまとめられて

いる。

また、1995年の神戸の地震をきっかけとして、GPS による測位連続観測の全国高密度展開が急速にすすみ、我が国の地表面の水平・垂直方向の変動データが、詳細に収集されるようになった (多田他, 1997)。

これらのデータの集積が進んでいるのに対し、これらの観測データを用いて日本列島の変形を説明し、地震の発生を予測する力学的なモデルは、いまだ確立されていない。地殻変動を定量的に説明するモデルがあつて初めて、観測データを用いた逆解析を行うことができ、モデルを規定するパラメータ (媒質の物性や断層の強度など) を決定することにより、モデルに基づく地殻変動の予測を行うことができる。

必要とされる力学モデルは、地殻の物性を的確に表現するだけでなく、断層系の働きを含むものでなければならない。複雑なネットワーク状に形成された断層系における断層同士の連結度や、個々の断層の折れ曲がり具合などが、断層の活動性に大きな役割を果たしていることが知られている (佃, 1990)。断層の複雑な形状を考慮するためには、有限要素法のような数値解析技術を用いた包括的なシミュレーション技術の開発が必要である。

そこで、前述の工業技術院特別研究「活断層等による地震発生ポテンシャル評価の研究」の一環として、平成9年度より3年計画で「地殻変動数値シミュレーションの研究」を実施し、断層系の活動度を解析するための数値シミュレータの開発を行った。

Keywords: Numerical simulation, Fault system, Crustal deformation, Active fault, Finite element method

¹ 地質調査所地殻物理部 (Geophysics Department, GSJ)

2. 数値シミュレータの開発

地殻変動の数値シミュレーションとは、地殻変動の力学的モデルを構築することであるが、複雑な地殻変動を定量的に説明するモデルの構築は、前途多難な試みである。吉岡(1992)は、日本列島の応力場、歪場について、数値シミュレーションから得られた知見についてまとめている。Hashimoto and Jackson(1993)は、日本列島を多数のブロックに分割して、各ブロックの運動と、ブロック間のすべり速度をインバージョン解析で求めることにより、日本列島の地殻変動の解析を行った。

Bird and Kong(1994)は、詳細な活断層系の形状を組み込んだ有限要素法シミュレータを開発し、カリフォルニアの活断層系の解析を行った。

Lundgren *et al.*(1995)は、詳細な活断層系の形状を組み込んだ有限要素法計算により、アラスカの地殻変動の数値シミュレーションを実施した。彼らの方法によるアラスカの活断層系の活動度評価の結果を第1図に示す。

Bird(1996)は、Bird and Kong(1994)の方法を用いて、アラスカの地殻変動の数値シミュレーションを実施した。Bird(1996)の用いた計算メッシュを第2図に、アラスカの活断層系の活動度評価の結果を第3図に示す。

有限要素法を用いて断層の複雑な形状を考慮することにより断層系の活動度のシミュレーションを行った研究は、Lundgren *et al.*(1995)とBird and Kong(1994)の二つの研究が初めてである。また、Lundgren *et al.*

(1995)とBird(1996)の二つの研究は、ほぼ同一の領域を解析したものであり、相互比較することができれば、より知見を拡大することが可能である。しかし、使用した有限要素法メッシュや、活断層の形状、さらには与えた境界条件が異なるため、個々の活断層の活動度の計算結果に対する直接的な比較は困難である。

そこで、本研究においては、複雑な断層形状を考慮して断層系の活動度のシミュレーションを行ってきたこれら二つの研究に着目し、それらを統合的に取り扱うための方策について検討した。

Bird(1996)は、Bird(1989)およびBird and Kong(1994)の方法に基づいた計算手法であり、有限要素法のジョイント要素を用いて、断層系のモデリングを行っている。Bird(1996)で使用したソフトウェアはソースコードが公開されており、ユーザーの環境下で、自由に利用することができる。公開されているBirdソフトウェアのことを、以後、Birdシミュレータとよぶ。

Lundgren *et al.*(1995)は、Melosh and Williams(1989)のslippery node法に基づいて断層系を組み込んだ有限要素法計算手法である。slippery node法は、隣接する有限要素メッシュの接線方向の変位の不連続を許

す手法であり内部に切れ目の入った物質の変形挙動の計算に使用することができるユニークな方法である。Lundgren *et al.*(1995)が用いたソフトウェアは、公開されていない。

そこで、本研究において、Melosh and Williams(1989)の方法に基づく有限要素法シミュレータを新たに開発することとし、計算条件を可能な限り共通にして、両者の方法の比較研究が可能となることを目指した。

Lundgren *et al.*(1995)は、有限要素法の要素として四角形一次要素を用いているが、Birdシミュレータは三角形二次要素を用いている。そこで、開発するシミュレータでは、四角形要素および三角形要素の両方に対応させることにした。この結果、本研究で作成した有限要素法メッシュを、Birdシミュレータでも利用することが可能となる。しかし、断層系の取り扱いに関しては、手法が全く異なるため、節点番号や要素番号をつけかえを伴う変換作業の必要はさげられない。

次に、Lundgren *et al.*(1995)とBirdシミュレータの物性モデルの違いを説明する。Lundgren *et al.*(1995)の物性は弾性モデルであるのに対し、Birdシミュレータは粘性モデルを用いている。本研究では、弾性モデルを拡張させて、弾塑性モデルによる数値シミュレータを開発することとした。

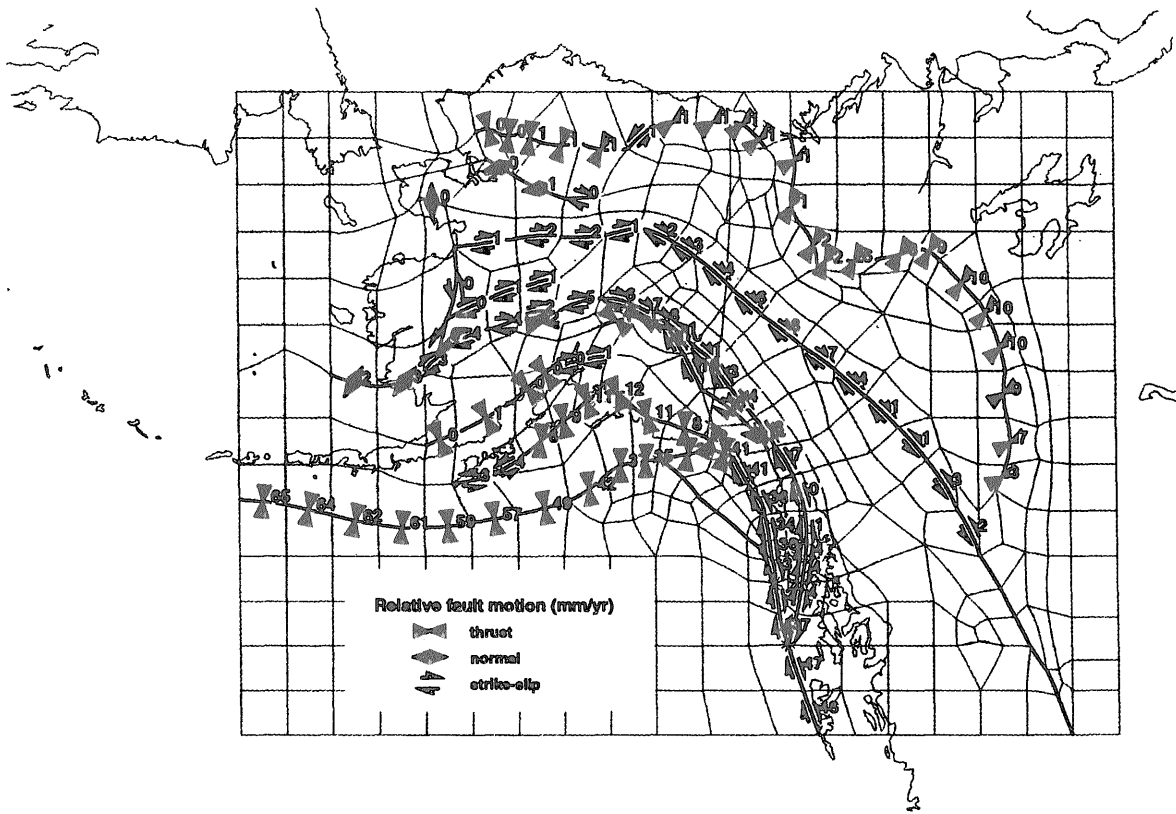
弾塑性コードとして、Owen and Hinton(1980)の開発したPlastoというコードを利用した。このため、開発したシミュレータをPlasto-Slipと命名した。

さて、Lundgren *et al.*(1995)の弾性体モデルを、弾塑性体モデルに拡張した理由は、断層変位による変形においては、粘性ないしは塑性と呼ばれる非可逆変形を無視することはできず、非可逆変形を許さない弾性モデルによる解析には限界があるためである。今回の拡張により、断層ネットワーク解析において用いられているBirdシミュレータが採用した粘性体モデルとの比較検討が、可能となった。また、応力の増大による地殻構成物質の降伏という現象を組み込むことができるようになった。降伏の問題は、従来の弾性体ないしは粘性体モデルでは取り扱うことのできなかつた現象である。

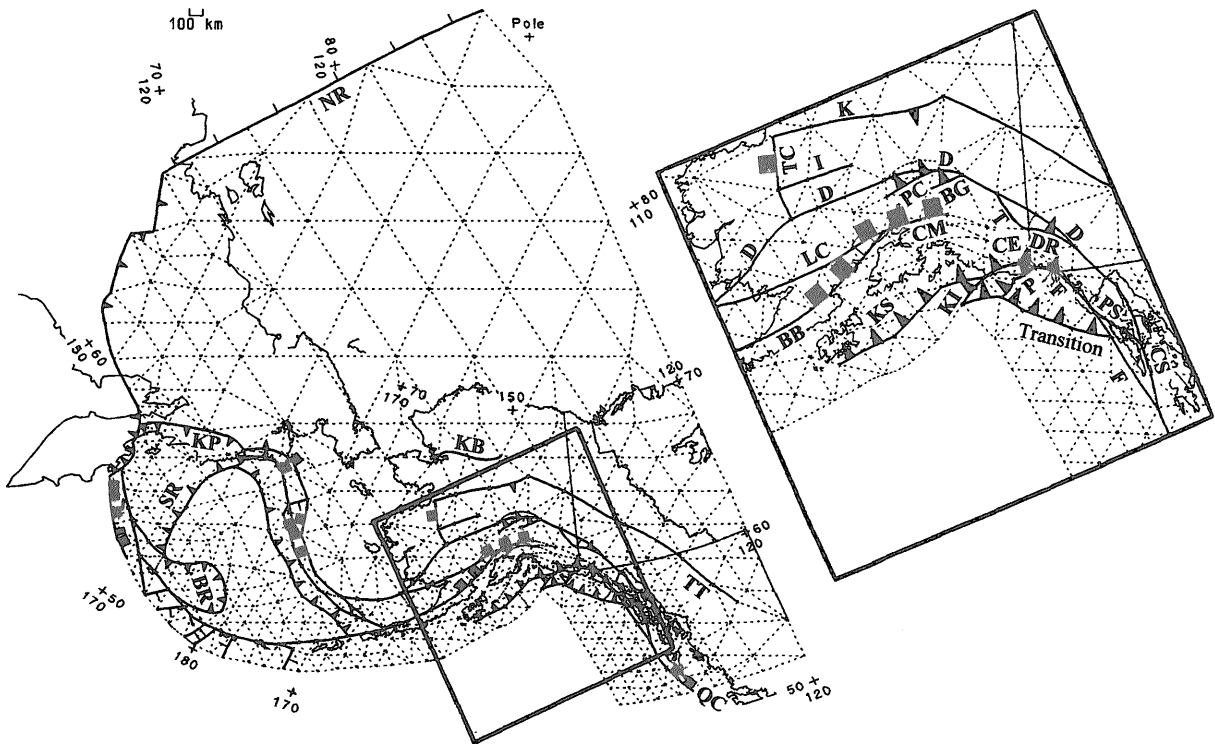
第4図に、本研究でとりあげた近畿地域の範囲と、モデル化した活断層系の配置を示す。第5図に、この領域に対して作成した有限要素法メッシュを示す。

このメッシュに対し各種の境界条件におけるシミュレーションを実施し、活断層系の活動度を計算することができる。計算で得られる活動度を、観測で得られる活動度と比較し、もっとも合致のよい場合の境界条件をもとに、近畿地域がどのようなテクトニクス応力の影響下に變形しているかを推測し、推定されたモデルにより断層の活動性の予測を行うことができる。

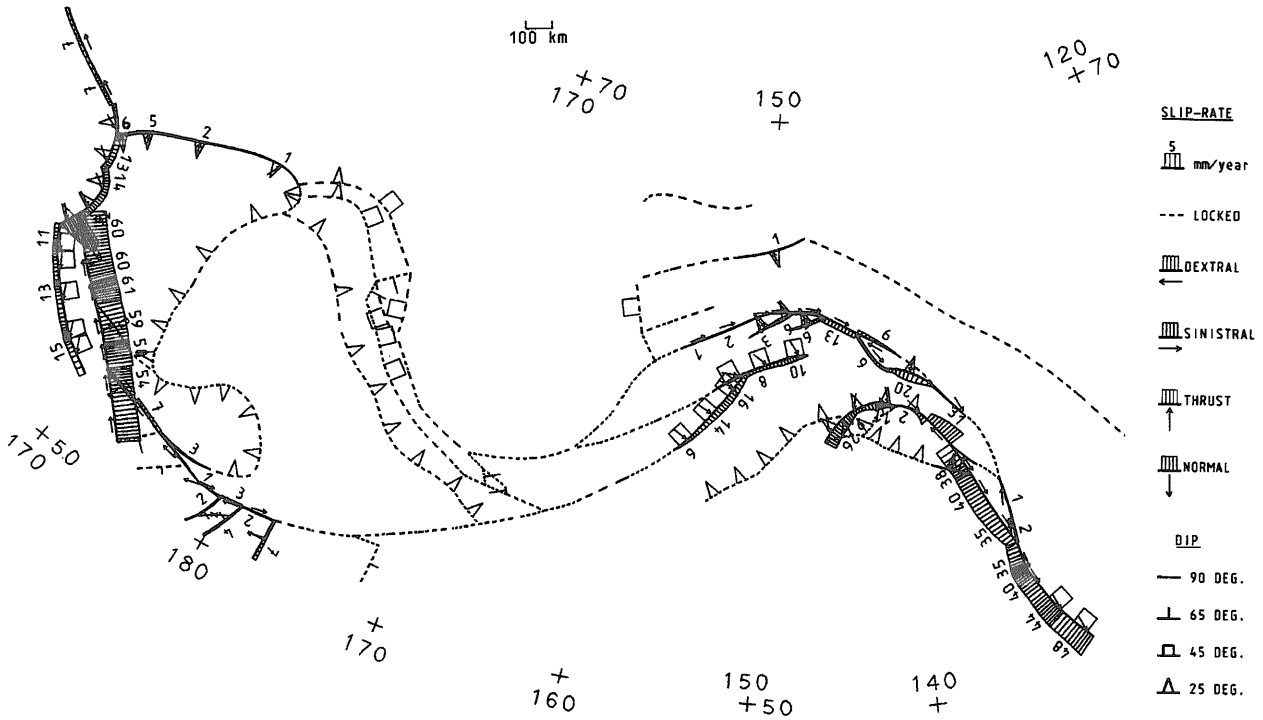
第6図に、東西短縮境界条件における近畿地域モデルの地殻変動のシミュレーション結果を示す。与えた境界



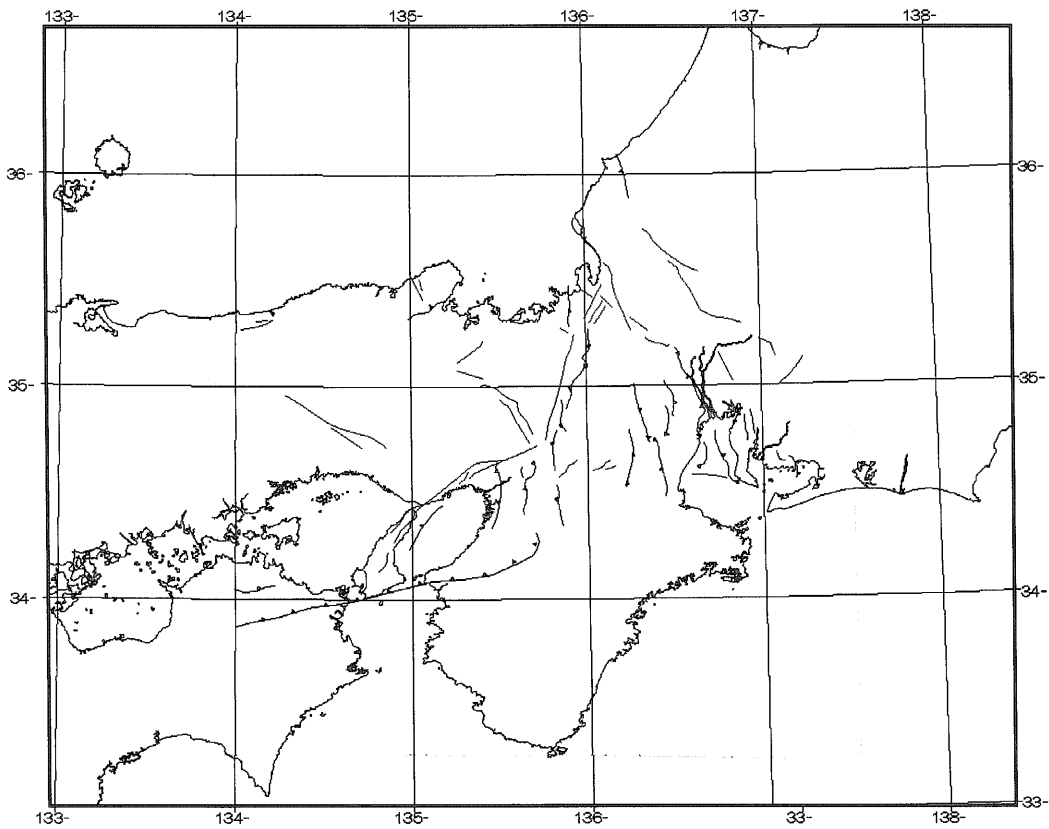
第1図 Lundgren *et al.* (1995) による断層系活動度解析.
 Fig. 1 Fault system activity analysis by Lundgren *et al.* (1995).



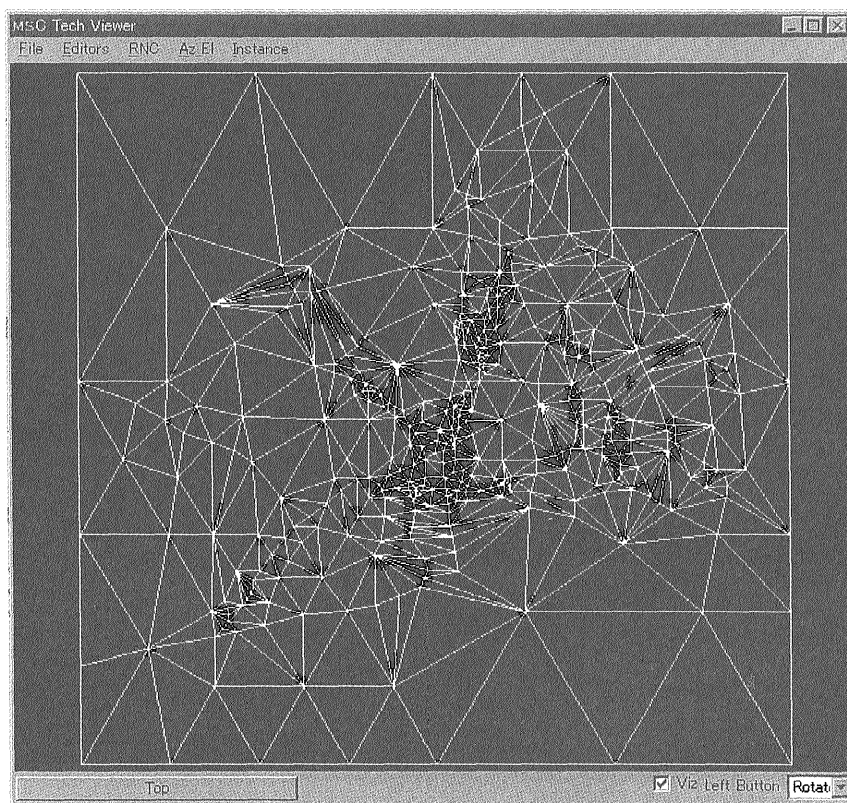
第2図 Bird (1996) が使用した有限要素法メッシュ.
 Fig. 2 Finite element mesh used by Bird (1996).



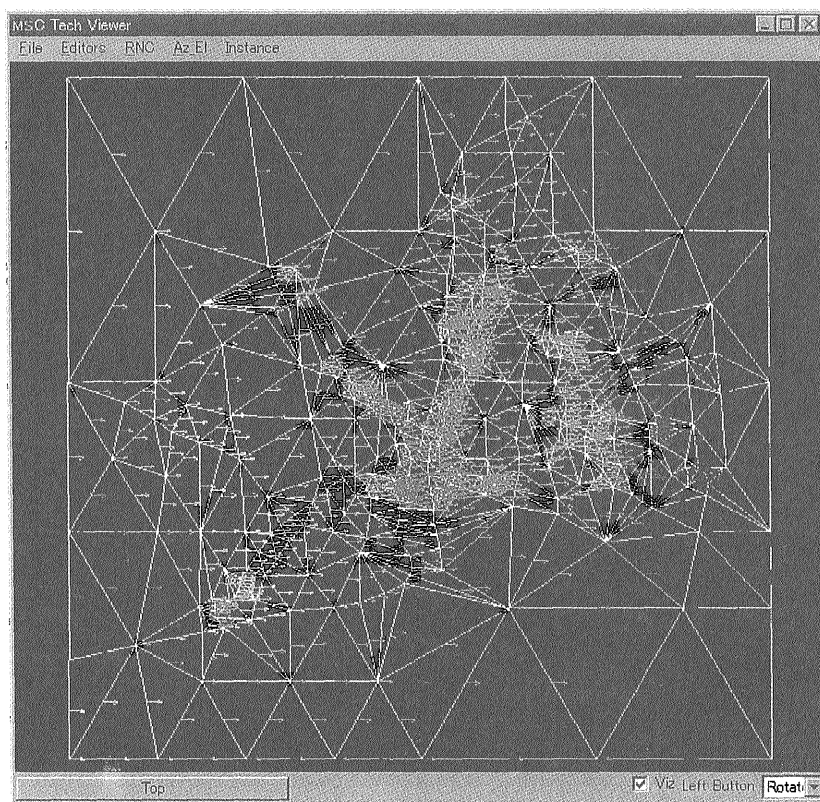
第3図 Bird (1996) による断層系活動度解析。
 Fig. 3 Fault system activity analysis by Bird (1996).



第4図 近畿地域解析範囲と活断層形状。
 Fig. 4 Analysis range of Kinki region and configuration of active faults.

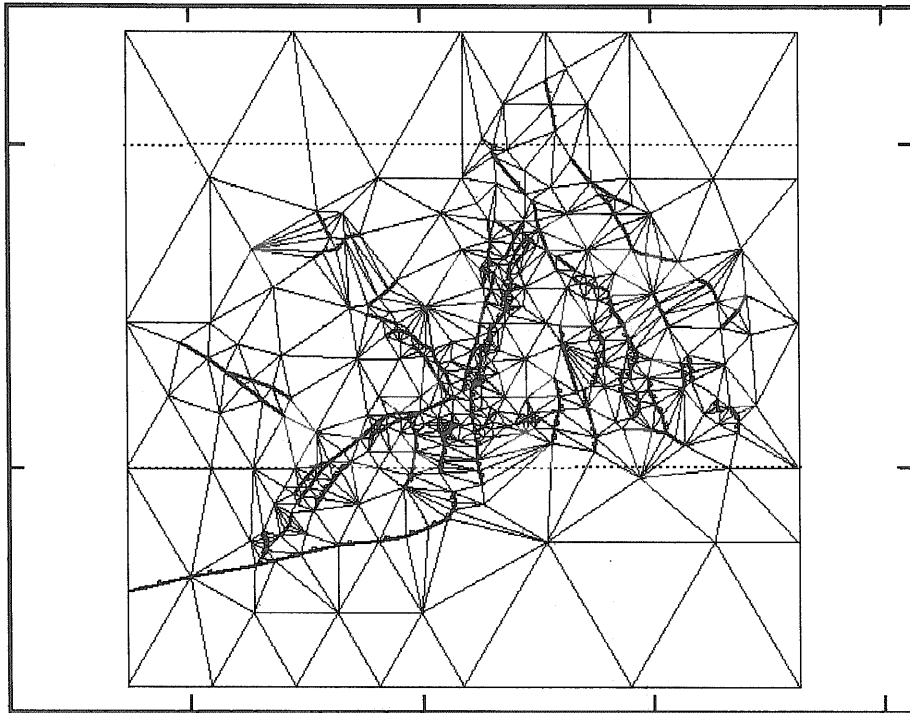


第 5 図 Plasto-Slip 解析用に作成した近畿地域活断層系の有限要素メッシュ。
Fig. 5 Finite element mesh of the active fault system of the Kinki region made for Plasto-Slip analysis.

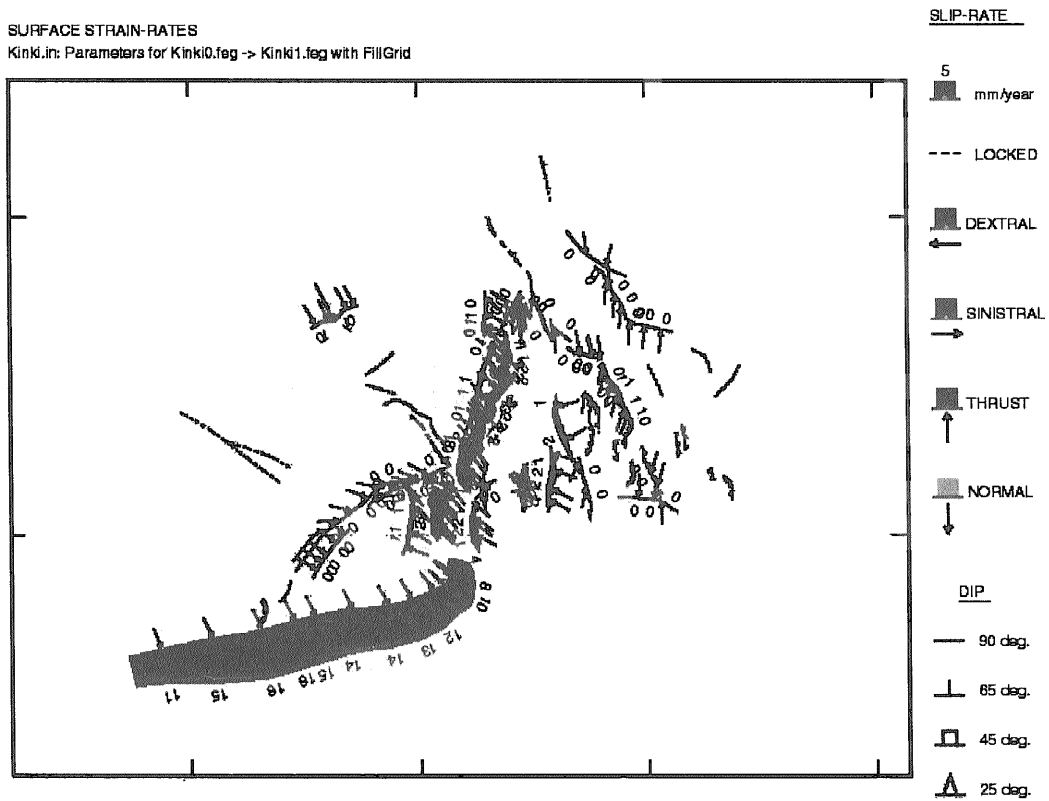


第 6 図 東西短縮条件における変形のシミュレーション結果例。
Fig. 6 Simulation example of deformation due to the east-west shortening.

FINITE ELEMENT GRID
KINKI



第7図 Birdシミュレータ用の近畿地域活断層系の有限要素メッシュ。
Fig. 7 Finite element mesh of the active fault system of the Kinki region made for a Bird simulator.



第8図 Birdシミュレータによる断層系活動度の解析結果例。
Fig. 8 Simulation example of fault system activity by means of a Bird simulator.

条件は、北端と南端境界では、東西方向のみの変位を許し、東端境界では変位を拘束した。西端境界に東向きの変位を与えて、短縮変形状態を生成した。中央構造線の北側の変位を、南側よりも大きく与えることにより、断層系のすべりを発生させている。以下に示す Bird シミュレータによる解析から、境界条件としては東西短縮だけでは不十分であることがわかっているので、今後、フィリピン海プレートの動きを反映した境界条件等、複数の境界条件での計算を実施する必要がある。

さて、今回作成した近畿地域メッシュを、Bird シミュレータで処理した結果を示す。第 7 図は、Bird シミュレータに取り込まれた有限要素メッシュであり、第 5 図と全く同じメッシュである。

第 8 図は、Bird シミュレータを用いて各種の境界条件における活断層の活動度の比較検討をした一例である。境界条件として東西短縮だけを考えた場合、解析される活断層系の動きは必ずしも現実の動きを再現しないので、フィリピン海プレートによる押しを考慮したモデルなど各種の境界条件を用いてシミュレーション計算を実施して、境界条件の違いによる各断層系の活動度の変化を整理中である。

今後の課題として、Plasto-Slip の計算結果から、各断層系の活動を第 8 図のように、わかりやすく表示するソフトウェアを開発することが必要である。

3. ま と め

Slippery node 法 (Melosh and Williams, 1989) による断層ネットワーク解析を、弾塑性モデルに適用した有限要素法プログラム Plasto-Slip を開発した。

Plasto-Slip は、Bird シミュレータと同じ有限要素メッシュでの計算ができるので、両者の計算結果の詳細な比較が可能となった。今後、近畿地域を例として、さまざまな境界条件を与えて、Plasto-Slip の弾塑性体モデルと、Bird シミュレータの粘性体モデルの応答の違いを比較し、断層系ネットワークの挙動解析シミュレーションを発展させることが必要である。

文 献

- Bird, P. (1989) New Finite Element Techniques for Modeling Deformation Histories of Continents with Stratified Temperature-dependent Rheology, *J. Geophys. Res.*, **94**, 3967-3990.
- Bird, P., and Kong, X. (1994) Computer simulations of California tectonics confirm very low strength of major faults, *Geological Society of America Bulletin*, **106**, 159-174.
- Bird, P. (1996) Computer simulations of Alaskan neotectonics, *Tectonics*, **15**, 225-236.
- Hashimoto, M., and Jackson, D. D. (1993) Plate tectonics and crustal deformation around the Japanese Islands, *J. Geophys. Res.*, **98**, B9, 16149-16166.
- Lundgren, P., Saucier, F., Palmer, R., and Langon, M. (1995) Alaska crustal deformation: Finite element modeling constrained by geologic and very long baseline interferometry data, *J. Geophys. Res.*, **100**, 22,033-22,045.
- Melosh, H. J., Williams, Jr. C. A. (1989) Mechanics of graben formation in crustal rocks: A finite element analysis, *J. Geophys. Res.*, **94**, B10, 13,961-13,973.
- Owen and Hinton (1980) Finite elements in plasticity, Pineridge Press Limited. 翻訳 塑性の有限要素法-材料非線形有限要素法-, 科学技術出版社。
- 杉山雄一・他13名 (1999) 近畿三角地帯における主要活断層の調査結果と地震危険度, 地質調査所速報, no. EQ/99/3 (平成10年度活断層・古地震研究調査概要報告書), 285-309.
- 多田 堯・鷺谷 威・宮崎真一 (1997) GPS でみた変動する日本列島, 科学, 67, 12, 917-927.
- 佃 栄吉 (1990) 地震断層の形態と断層破壊過程, 構造地質 (構造地質研究会誌), **35**, 103-112.
- 吉岡祥一 (1992) 日本列島応力場のシミュレーション, 月刊地球, 号外 No. 4, 46-53.

(受付: 2000年 6月12日; 受理: 2000年 7月26日)