

不連続体解析手法FESMプログラムによる地殻変動解析 Crustal deformation analysis by Finite Element Spring Model

地理地殻活動研究センター 小沢慎三郎・村上亮
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Shinzaburo OZAWA, Makoto MURAKAMI

株式会社情報数理研究所 中井仁彦
Information and mathematical Research Institute Kazuhiko NAKAI

要 旨

地殻変動の解析においては、活断層等の不連続面の取り扱いが重要となるが、通常の有限要素法はその取り扱いにあまり適していない。本研究では不連続面の取り扱いが容易な不連続体解析手法FESMプログラムを使用し、2次元での地震発生のシミュレーションを行い、周期の異なる地震発生領域の相互作用の特徴を調べた。その結果、条件によって時間と共に2つの異なる周期の地震発生領域が次第に同期していく様子が示された。また3次元での地震発生シミュレーションの試みとして、東海地方の3次元構造モデルを使用した計算結果についても報告する。

1. はじめに

日本列島には非常に多くの活断層が存在し、そのような活断層において、繰り返し、大地震が起きている可能性が指摘されている。ここでいう活断層とは、地殻媒質中における弱面、亀裂に相当し、このような不連続面の取り扱いが、地殻活動のシミュレーションにおいて非常

に重要となってくる。しかしながら、通常の有限要素法では媒質が連続である事を想定しており、活断層のような不連続面の取り扱いにはあまり適していない。これに対して、工学の分野で開発された解析手法である不連続体解析モデルFESM (Finite Element Spring Model) は、通常の有限要素法では取り扱うのが難しい不連続面を取り扱うのに非常に適した解析手法となっている。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、地殻変動解析におい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。このような特徴のため、地殻活動解析の1つの重要な手法として位置付けられ、地殻変動の問題に適用するためのプログラム開発が地殻変動研究室において現在まで行われてきた。その結果、地下3次元構造を取り入れたブロック断層解析、地震解析を現実的な条件下で行えるソフトウェア環境が現在整いつつある。表-1、2にFESM解析手法の特徴と現在までに開発されてきたプログラムの主な機能を示す。

表-1 FESMの特徴

プログラムの特徴	優 位 性
要素内と要素間の物理特性を扱える	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	断層の位置、形状、数を容易に変えることができるのでテンポの速い解析が可能になる。
断層を陽に扱える	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。	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を評価できる。
粘弾性解析機能を備えている	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。	地震の解析が可能。
要素数が 10^5 程度の大規模解析機能を有する	3次元の地殻変動解析が可能。

表-2 FESMプログラムの機能一覧

項目	機能概要
入力データ	制御、幾何形状、材質、拘束条件、外力条件データ
解析項目	静的解析、粘弾性解析、動的解析（それぞれ非線形解析を含む）
要素形状	4面体、3角垂、4角垂、3角柱、6面体、ポロノイ要素、任意角の面
プログラムの制限	節点数=約 10^5 、要素数=約 10^5 （メモリ2Gbyteに対し）
粘弾性のモデル	Maxwel Voigt Burgers
破壊の種類	引っ張り破壊、せん断破壊
プリ処理	複数の断層を考慮した要素分割が可能。
ポスト処理	汎用グラフィックシステムAVSを使用 構造図、変形図、各種分布図、ベクトル図、日本列島の形状表示が可能

本研究では、上記不連続体解析手法FESMによる地殻変動解析の一例として地震発生のシミュレーション結果を2次元、3次元の場合に関して報告する。

2. FESM解析プログラムによる地震発生シミュレーション

地震活動は地質学的な時間スケールで起きるため、その特徴を把握するためには、計算機シミュレーションにより計算機上で地震発生を数百年というオーダーでシミュレートする事が最も有効な解析手法の1つといえる。そのような状況下で、様々な地震発生のシミュレーションが多く研究者によって行われてきた。しかしながら、従来の地震発生シミュレーションは境界要素型解法が主であり、地下不均質構造等を取り入れるといったより現実的な条件下での計算を行うのにあまり適していなかった。これに対し、不連続体解析手法FESMでは地下の不均質構造まで含めたより現実に近い形でのシミュレーションが可能であり、将来的には地震発生シミュレーションの1つの重要な解析手法となっていく可能性を持っている。本章では、精度検証の意味合いも含め、2次元での地震発生解析を実施したのでその結果を以下詳述する。

シミュレーション手法としては、計算機上に、動くブロックと半無限媒質を考え、両者の間に岩石実験で得られている摩擦の法則を与え、ブロックを一定の速度で半無限媒質上を滑らせる。2つの媒質間の接触面では、摩擦が働くためある程度時間が経つと、ブロックの動きに不安定な滑り、地震が発生する事になる。媒質間の摩擦の法則としては、次式のRuina and Dietrichによる構成則 (a Rate- and State-Dependent Friction Law) を使用している。

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

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

または摩擦抵抗力に関する状態量であり、 A_1, A_2, A_3 は摩擦構成則のパラメータである。特筆すべき点は $A_2 - A_3$ が正の時には不安定な滑り、地震は起こらず、負の時に不安定滑り、地震が起きるようになっている。

上記の摩擦の法則を適用して、1種類のブロックを半無限媒質上で動かした場合、及び性質の異なる複数のブロックを繋げた状態で動かした場合に、ブロックの動きに見られる不安定滑り（地震発生）が時間・空間的にどのように変化するかを調べてみた。

2. 1 単一のブロックにおける地震現象

まず図-1に示すようなモデルを用い、単一のブロックにおける地震発生現象を解析した。

図-1に示されるように、領域の大きさとして、1.0 kmの立方体を50個つなげ50kmの長さのブロックを作成し、作成したブロックを不連続面に沿って滑らせるという事を行っている。この際にブロックと半無限媒質間の接触面において上述の摩擦構成則が作用しており、このためにある程度時間が経つとブロックの動きに不安定滑り、地震が起きるようになっている。この不安定滑り、地震がどのような周期で発生し、その発生の仕方にもどのような特徴があるかを解析した。ブロックのヤング率としては2種類扱い、それぞれモデルA、モデルBとしている（表-3参照）。摩擦のパラメータに関しては表-3に示されるように、同一のものを使用している。

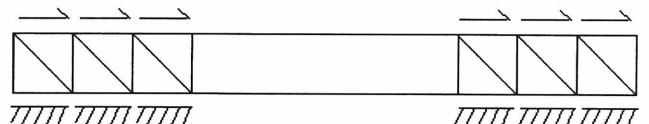


図-1 モデルの模式図

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

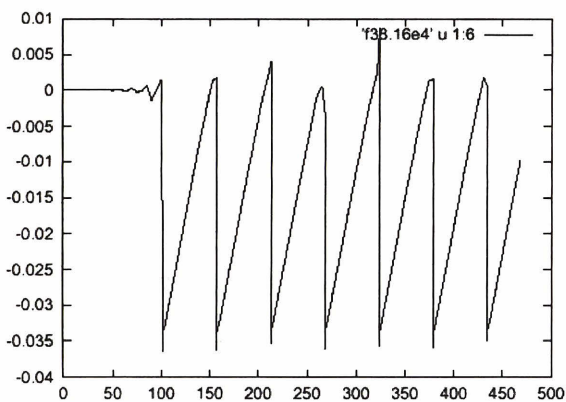
表-3 岩盤特性, 断層パラメータ

		モデルA	モデルB
ヤング率	dyne/cm	1.6×10^{11}	2.0×10^{11}
ポアソン比		0.25	0.25
密度	g/cm ³	2.8	2.8
ずれ速度	cm/年	3.5	3.5
垂直応力	bars	3000	3000
限界変位	cm	6.5	6.5
パラメータA2		0.002	0.002
パラメータA3		0.004	0.004

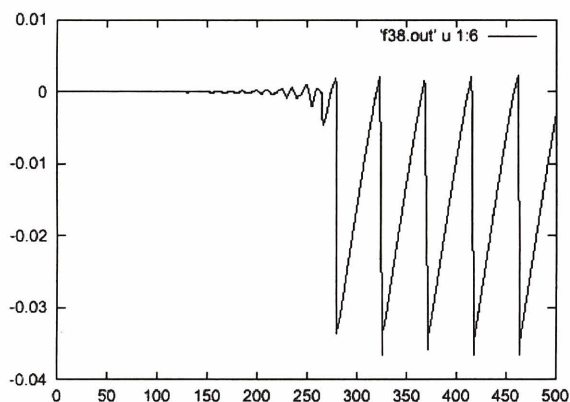
モデルAとモデルBの摩擦抵抗の時間変化を図-2に示す。摩擦抵抗が急激に小さくなっているところで不安定滑り、地震が発生している。ここではブロックの移動速度が3.5cm/年から 10^8 cm/年以上になっている。モデルAでは55年ごとに、モデルBでは45年ごとに地震が起きている。両者の周期の違いは、ヤング率の違いにある。ヤング率が大きいBではブロックが動く量が少なくてもモデルAと同じエネルギーを蓄積できるために、より短い時間間隔で地震を発生させている。

2. 2 異なる性質のブロックが連続した場合の解析

次に前述の2つのモデルが繋がった場合の解析を行った。モデルAとBが繋がった場合 (Case1と呼ぶ) と、AとBがCの緩衝領域を介して繋がった場合 (Case2, Case3) を解析した。Case3ではCase2に比べて、緩衝領域Cを倍の長さに設定してある。緩衝領域Cでは地震が発生しないように、パラメータA₃に0.001を設定しA₂-A₃を正としてある。A, B, Cの特性と繋がり方を図-3に示す。

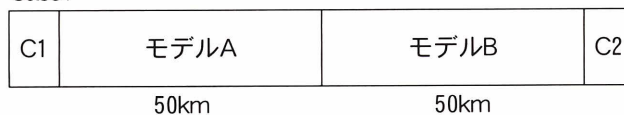


(a) モデルA

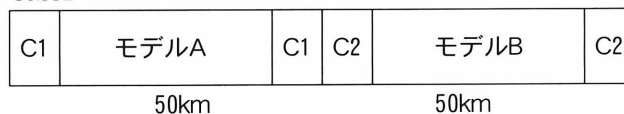


(b) モデルB

Case1



Case2



Case3

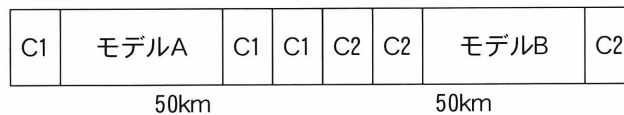


図-3 ブロックのつながり方の模式図

図-2 摩擦抵抗の時間変化 (縦軸:摩擦抵抗, 横軸:年)

表-3 岩盤特性, 断層パラメータ

		モデルA	C1	モデルB	C2
ヤング率	dyne/cm	1.6×10^{11}	1.6×10^{11}	2.0×10^{11}	2.0×10^{11}
ポアソン比		0.25	0.25	0.25	0.25
密度	g/cm^3	2.8	2.8	2.8	2.8
ずれ速度	cm/年	3.5	3.5	3.5	3.5
垂直応力	bars	3000	3000	3000	3000
限界変位	cm	6.5	6.5	6.5	6.5
パラメータA2		0.002	0.002	0.002	0.002
パラメータA3		0.004	0.001	0.004	0.001

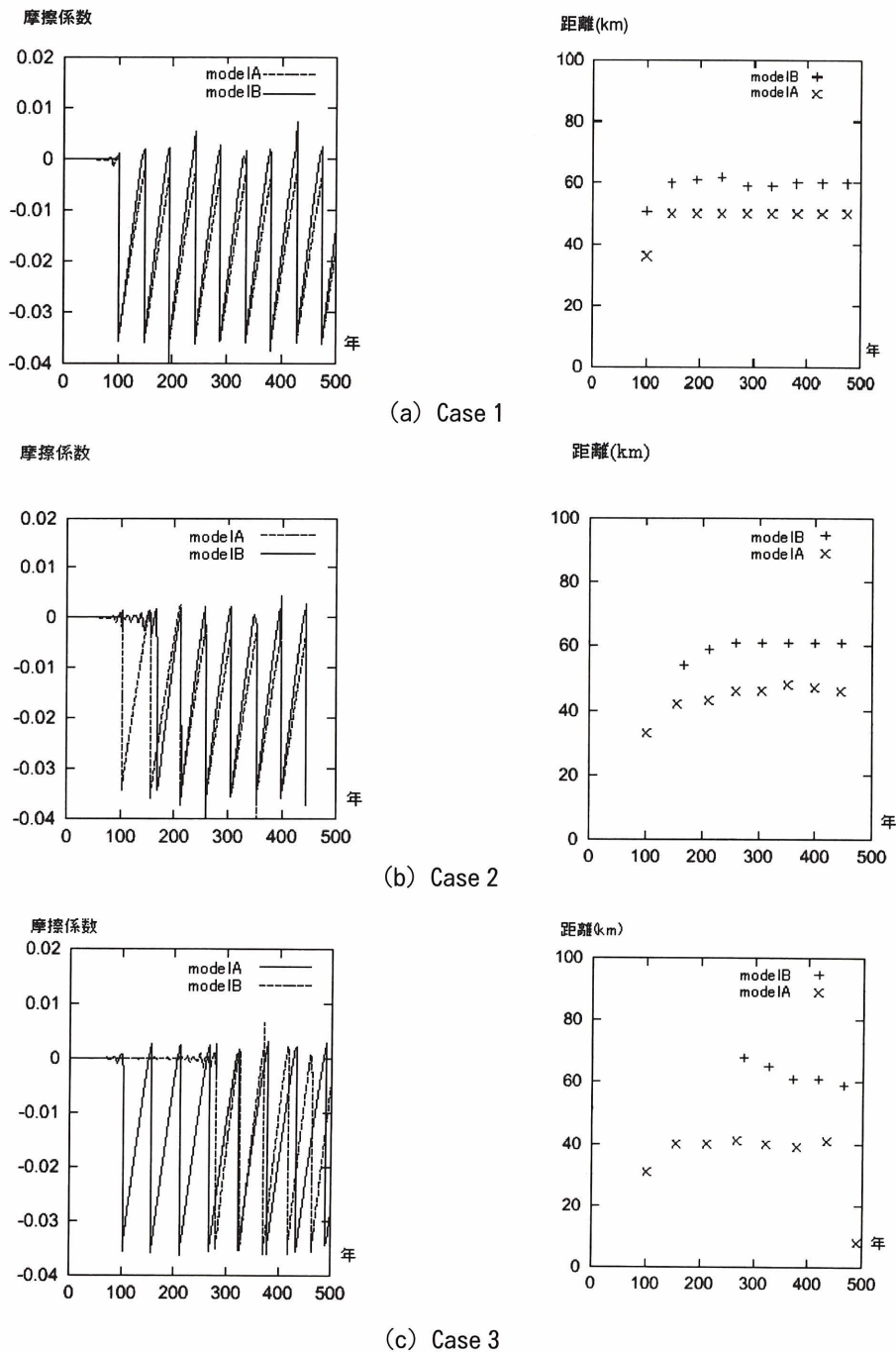


図-4 摩擦抵抗の時間変化 (左図) と地震発生位置の時間変化 (右図)

Case 1, Case2およびCase3の領域AとBの摩擦抵抗係数の時間変化, および地震開始点の位置の時間変化を図-4に示す。Case1では, 地震が同時に起きている。地震の開始時期の早いA領域のほうがまず地震を起こし, B領域に地震の振動が伝わりそのまま地震となっている。その後は地震周期の短いB領域から地震が始まり, A領域に地震の振動が伝わり地震となっている。以後, 地震はB領域で起き, Aに伝わるということが繰り返される。Case2では当初別々の周期で起きていたものが, その後つられて地震を起こすようになっていく。周期の短いB領域で地震が発生し, 片方がつられて地震を起こすのであるが, そこには時間差(約1ヶ月)が存在している。Case3のように緩衝となる領域がCase2に比べて大きい場合は予想されるように, AとBの領域で地震は別々に起きている。震源の位置はB領域ではほぼA領域に近いところで起きているが, A領域では一定でない。この点に関しては計算時間が十分でない可能性も挙げられる。

3. 3次元東海地方大規模構造解析モデルの解析

1854年の東海地震から150年程経過した現在, 東海地方では次の地震発生の可能性が指摘されている。このように地震予知の上で非常に重要な地域である東海地方の3次元モデルのプロトタイプを試作し3次元での地震発生シミュレーションを次に試みてみた。

3. 1 東海地方3次元モデルの概要

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(図-5, 6参照)。モデル作成には表-4の資料を使用している。ただしフィリピン海プレートの形状は, 東海~関東にかけて形状が不明瞭な場所があるため, その区間は滑らかにつながるとしてモデル作成を行った。

表-4 モデル作成に用いた資料一覧表

	著者名	作成年度
モホ面	Zhao etc	1992年
コンラッド面	Zhao etc	1992年
フィリピン海プレート	石田	1992年

地殻, マントル, プレートの力学特性はそれぞれ表-5のように設定した。マントルは粘弾性として扱い, Voigtモデルを使用している。プレート境界(不連続面)の摩擦抵抗特性は表-6のように設定している(図-6参照)。

表-6 摩擦抵抗設定の指針

モホ面より浅いところを不安定すべり領域とし, それより深い領域を安定すべり領域に設定した。
計算を安定させるために, 解析領域の端部は安定すべり領域とした。
計算を安定させるために, -5kmより浅い領域は安定すべり領域とした。

境界条件としては東, 西, 南, 北面, 底面, 頂面をそれぞれ表-7のように設定している。プレートの移動速度はGripp and Gordom(1994)のNUVEL-1Modelを用いて計算している。

プレート間で作用しあう摩擦構成則としてはRuina and Dietrichの式を採用している。解析に用いた値を表-8に示す。A1は θ の初期値であり, $1e^{-8}$ を設定した。

プレートはモホ面, コンラッド面を突きぬける形になっており, プレート面にその交線が描かれる。図中の面の名前は, プレート面との交線を意味している。

表-5 地殻, マントルのプレートの物理特性

	ヤング率 (Pa)	ポアソン比	密度 (kg/m ³)	粘性係数 (Pa sec)	備考
地 殻	0.648*10 ¹¹	0.251	2500	—	弾性体
マントル部	0.658*10 ¹¹	0.298	2500	10 ²¹	粘弾性体
粘弾性体	0.648*10 ¹¹	0.251	2500	—	弾性体

表-7 境界条件の一覧

	境界条件	備考
南側面のプレート	変位速度を設定	プレートの移動速度を設定
南側面の地殻, 南側面のマントル	南北方向の自由度だけを固定 南北方向の自由度だけを固定	
北側面プレート	変位速度を設定	プレートの移動速度を設定
北側面の地殻, 北側面のマントル	南北方向の自由度だけを固定 南北方向の自由度だけを固定	
東側面のプレート	自由	
東側面の地殻, 東側面のマントル	東西方向の自由度だけを固定 東西方向の自由度だけを固定	
西側面のプレート	自由	
西側面の地殻, 西側面のマントル	東西方向の自由度だけを固定 東西方向の自由度だけを固定	
底面	上下方向の自由度だけを固定	
頂面	自由	

表-8 解析に用いた地震のパラメータ

距離定数 (m)	ずれ速度定数 (m/Year)	パラメータA2		パラメータA3
0.065	0.04	不安定すべり領域	0.001	0.002
		安定すべり領域	0.004	

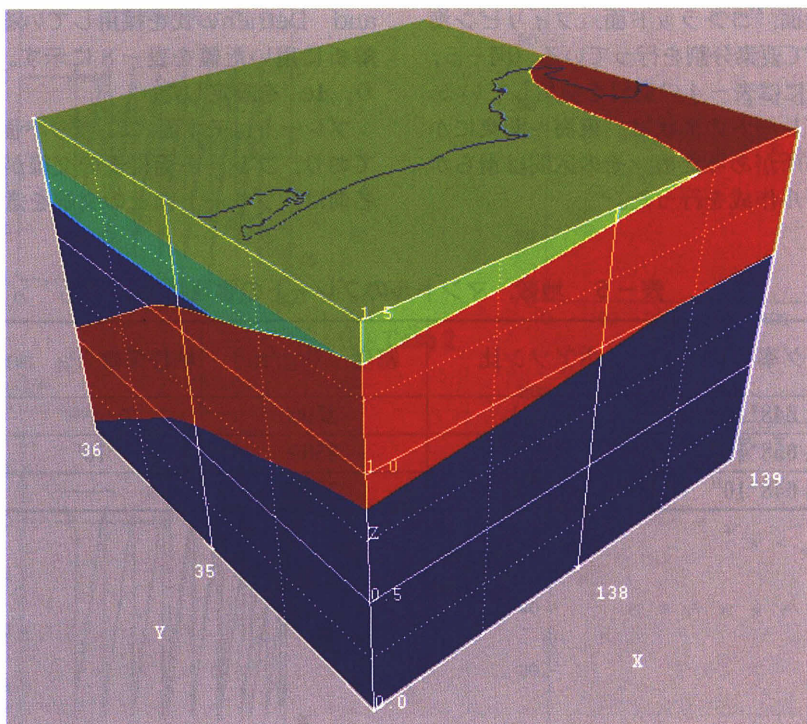


図-5 解析モデルの全体図

赤：フィリピン海プレート 青：マントル
 緑：上部地殻 青緑：下部地殻

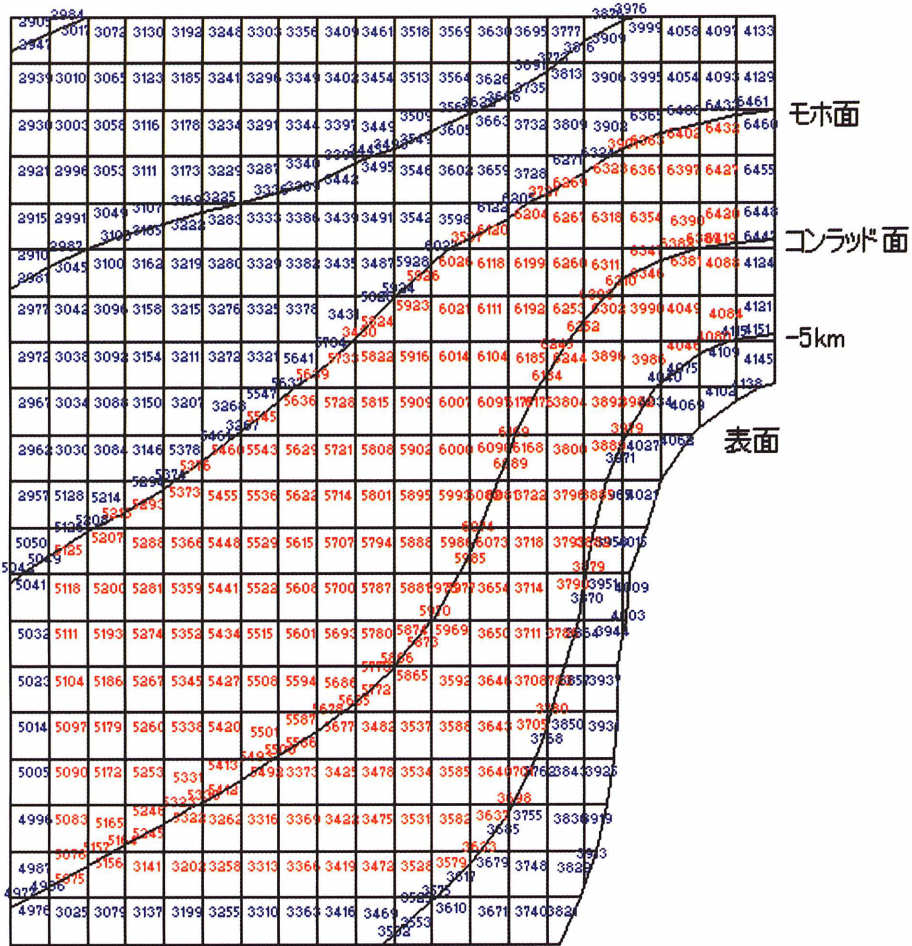


図-6 フィリピン海プレート上面の特性設定図

赤字：不安定すべり領域 $b < a$
 青字：安定すべり領域 $a > b$

3. 2 モデル計算

次に東海モデルにおける計算結果を以下に報告する。プレート上の状態量分布と速度分布の時間変化を図-7と図-8に示す。これらの図は解析を始めて一回の地震発生時の状態量と速度の時間変化を表している。

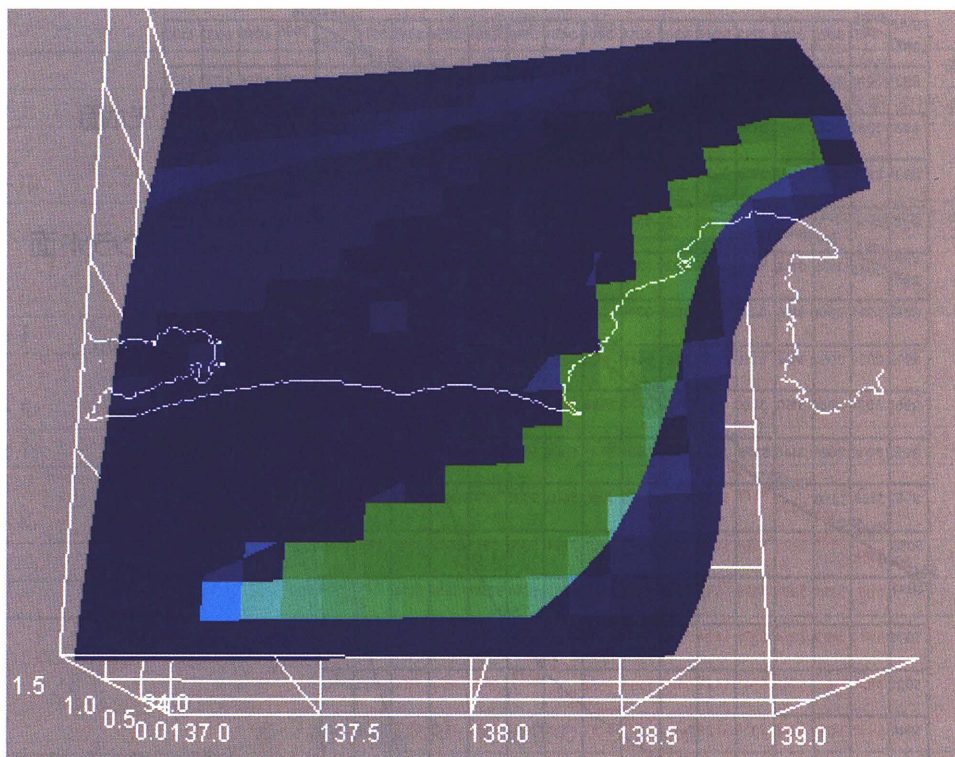
図-7の状態量分布の時間変化図(a)-(c)では、コンラッド面より以浅において4年、9年、11.7年と状態量が蓄積されていくのが読み取れる。コンラッド面より以深においては、蓄積はほとんど見られない。

図-8の速度分布の時間変化図(a)-(c)では、速度の変化はほとんど見られない。12.79年後において、速度定数の約10倍の速度の個所が現れた。この個所の速度は計算を続けるにつれて1,000倍以上に速くなり、地震が発生していると判断される。

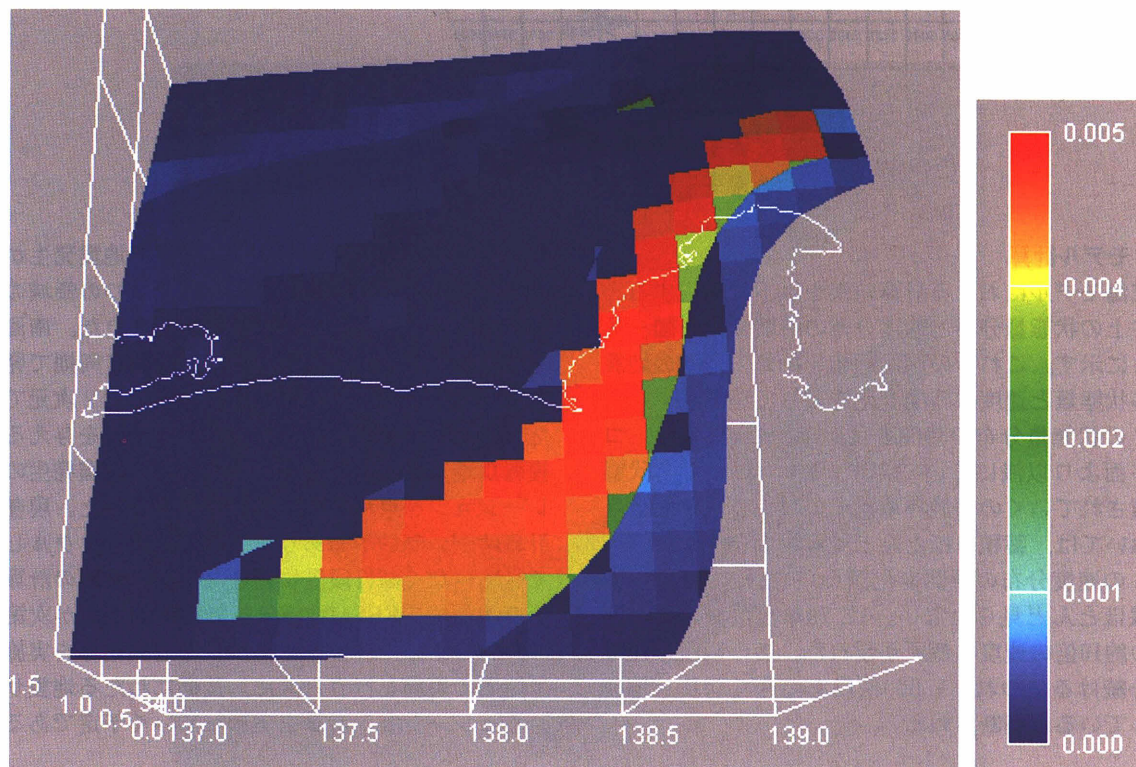
4. 考察と今後の予定

現在までに開発されてきた不連続帯解析手法FESMプログラムを使用して、2次元、3次元での地震発生シミュレーションを行った。2次元の場合には周期の異なる地

震発生領域を接続すると、同じ周期で地震発生が起こるようになること、緩衝領域の存在で2つの領域の地震発生に時間遅れが生じていく様子が示された。南海トラフ地域のような2つの巨大地震がほぼ同じ周期で発生するような場所の地震サイクルを考える上で2次元で行われた今回の解析結果は1つの興味ある示唆を与える。また複雑な地下構造を考慮した3次元での地震発生のシミュレーションを東海地域に関して試みてみた。現在の所、計算時間の制約等もあり、1回の地震サイクルしか計算できていないが試行段階に過ぎないが、今回の計算を通して3次元でのFESM地震解析の技術的な点が次第に確立されつつある。今後プログラムの並列化等を実施し、計算時間の短縮を行うと共に、長期にわたる地震サイクルシミュレーション計算を実施していく予定である。

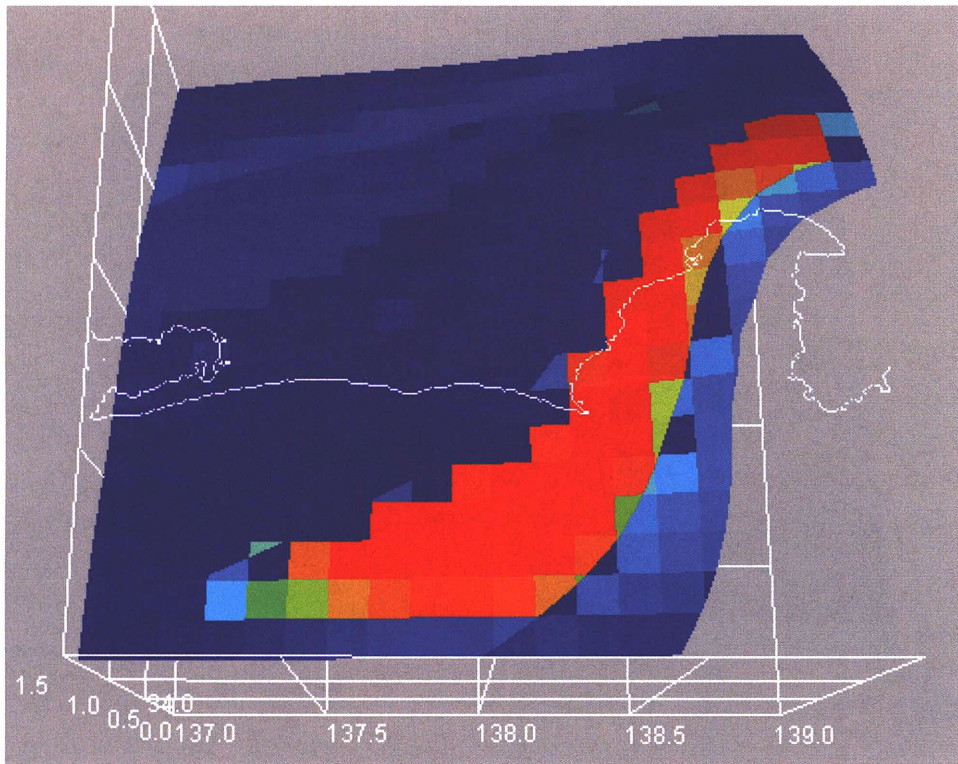


(a) 計算を始めて4年後の状態量の分布

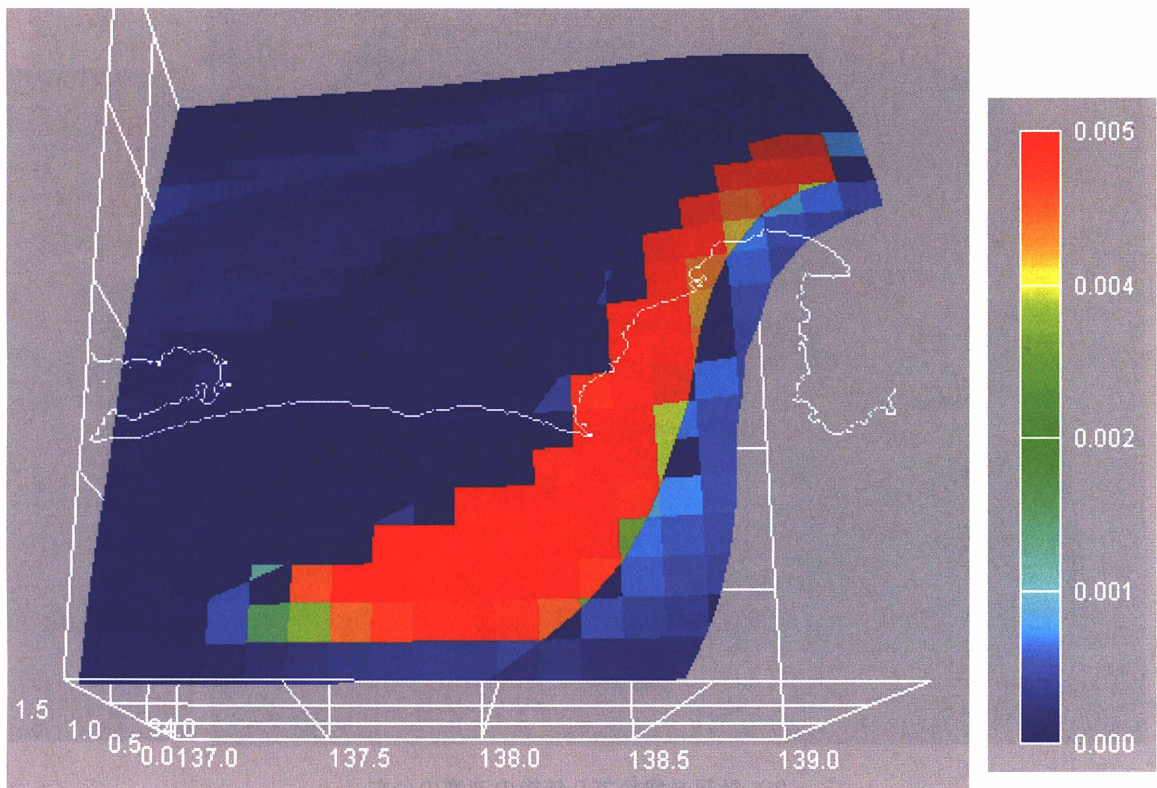


(b) 計算を始めて9年後の状態量の分布

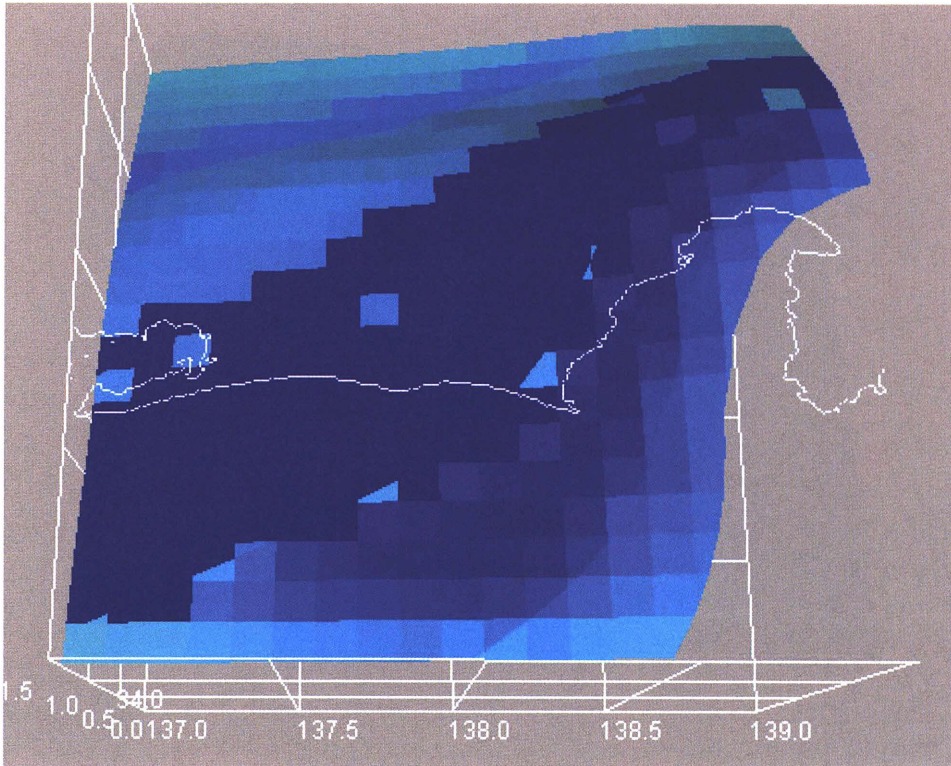
図-7 プレート面上の状態量分布の時間変化図



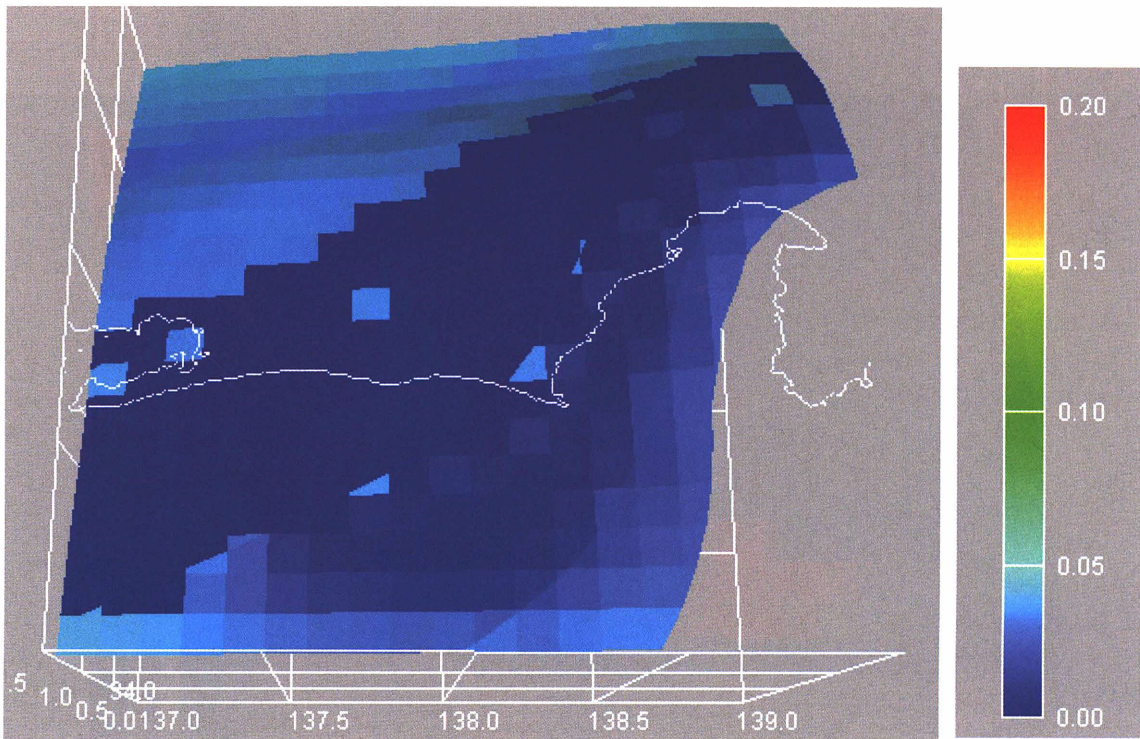
(c) 計算を始めて11.77年後の状態量の分布



(d) 計算を始めて12.79年後の状態量の分布
図-7 プレート面上の状態量分布の時間変化図

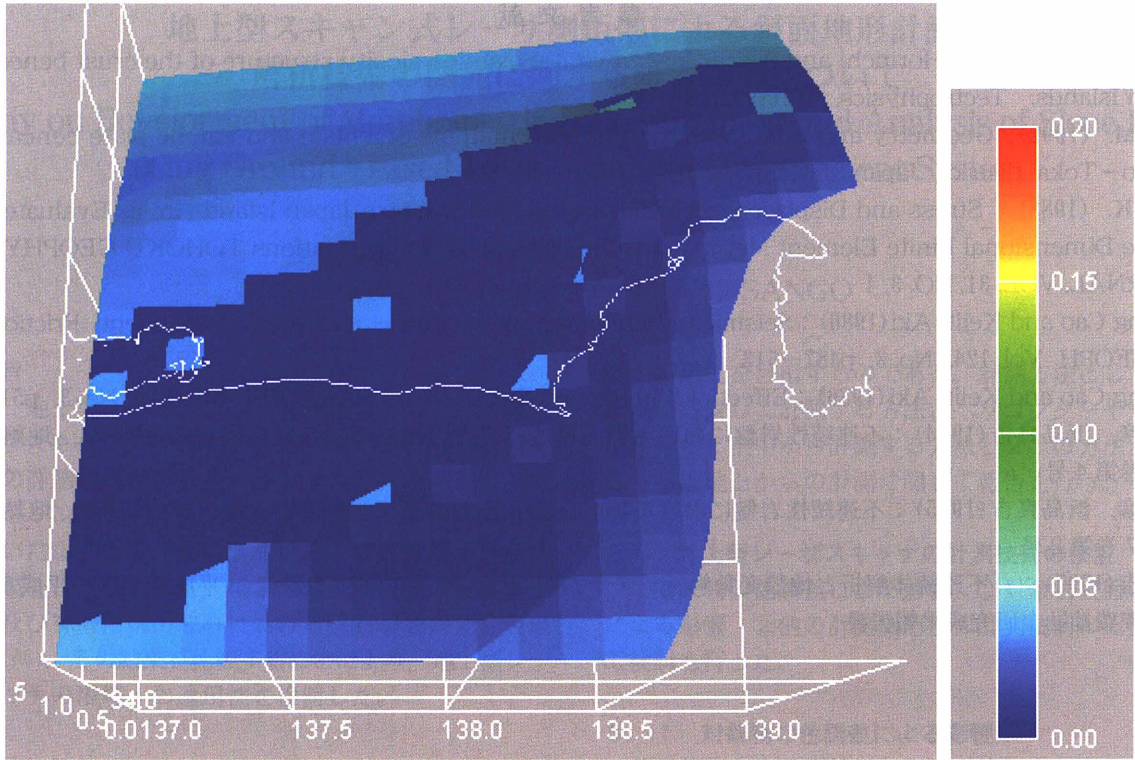


(a) 計算を始めて4年後の速度の分布

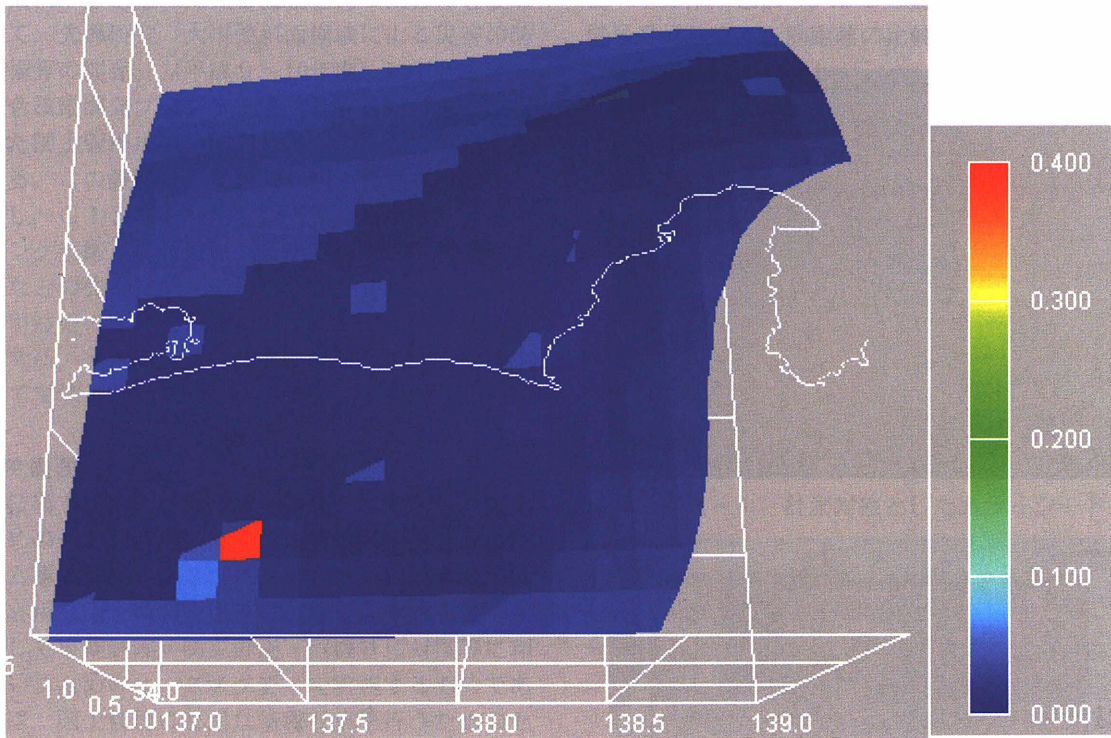


(b) 計算を始めて9年後の速度の分布

図-8 プレート面上の速度分布の時間変化図 (単位 : m/y)



(c) 計算を始めて11.7年後の速度の分布



(d) 計算を始めて12.79年後の速度の分布

図-8 プレート面上の速度分布の時間変化図 (単位: m/y)

参考文献

- Dapeng Zhao, Shigeki Horiuchi and Akira Hasegawa : Seismic velocity structure of the crust beneath the Japan Islands. *Tectrophysics*, 212(1992)289-301
- Ishida M. (1992), Geometry and relative motion of the Phillipine Sea plate and Pacific plate beneath the Kanto-Tokai district, Japan, *J. Geophys. Res.*, 97, 489-513
- SATO, K. (1988) : Stress and Displacement Fields in the Northeastern Japan Island Arc as Evaluated with Three Dimensional Finite Element Method and Their Tectonic Interpretations *TOHOKU GEOPHYSICAL JOURNAL*, VOL. 31, NO. 3, 4
- Tianqing Cao and Keiiti Aki(1986) : Seismicity Simulation with a Rate- and State-Dependent, Friction Law. *PAGEOPH* Vol. 124, No. 3, p487-513
- Tianqing Cao and Keiiti Aki(1986) : Effect of Slip Rate on Stress Drop. *PAGEOPH* Vol. 124, No. 3, p514-529
- 中井仁彦, 浜島良吉(1994) : 不連続性岩盤における熱, 浸透, 応力の連成解析の定式化 (応力解析), *地熱学会誌* 第16巻第4号
- 中井仁彦, 浜島良吉(1995) : 不連続性岩盤における熱, 浸透, 応力の連成解析の定式化 (連成解析), *地熱学会誌* 第17巻第2号
- 浜島良吉(1997) : 「不連続体解析と地殻変動解析システム開発への応用に関する研究」, 平成6年度~平成8年度科学研究費補助金研究成果報告書