

# 地殻変動の数値シミュレーション

村上 裕<sup>1)</sup>

## 1. 変動する地殻

我々の住んでいる大地は、動かざること大地のごとくと喩えられるように、日常的な我々の目にその動きを殆ど見ることはできない。しかし、大地は、極めてゆっくりではあるが動いており、変形を続けている。もし、標高500mの山が年に1mmずつ上昇しているとしよう。この上昇が1万年の間続けば、10mの上昇となる。もし、100万年続けば1,000mの上昇という驚異的な値となってしまふ。

このように地殻の変動が、長期間にわたり一定のパターンをもって継続すれば、累積されて極めて大きな変形となる。山脈や高地を作る造山運動や、堆積盆地を作る沈降活動は、このような累積現象の代表例である。

上下方向の動きとしては年間1mmという値が典型的な値であるが、水平方向の動きには、もっとずっと大きい値がある。太平洋プレートは、日本に対して年に8cmというびっくりするような相対速度で動いており、日本の下に沈みこんでいる。日本列島の内陸部に入ると、地殻の水平方向の変形は、活断層の横ずれの速度として現れる。日本の代表的な活断層の活動度は、1,000年あたり数mのものが多い。これは年間数mmの平均変位速度に相当する。最近、国土地理院による連続GPS観測網の展開が急速に進んだ。何年かのデータが蓄積されてくると、地震による突発的な変動以外に、連続的に変動している地殻の姿がはっきり見えてくるであろう。

地殻は、その内部で断層が形成され地震動が伝播することからもわかるように、弾性体としてふるまう。百年、千年、万年という時間スケールの地殻変動において弾性歪みが蓄積されてゆくが、弾性歪みはせいぜい1%程度のオーダーまでであり、ある限界を越

えると破壊が生じてしまう。このとき蓄積されていた弾性エネルギーは一挙に解放されて地震を起こす。地震予知のための地殻変動の観測は、この弾性的な変動を対象とする。

弾性的な変形は、基本的に可逆であり、加えられた力が消えればもとの状態に戻るが、破壊が発生したことにより、永久的な変形成分も生じる。破壊された面は時間の経過とともに再び癒着し、強度をとりもどしてゆく。このような地震の繰り返しにより、永久変形は累積し、結果的に大きな地殻の変動を生じる。

一万年、十万年、百万年という長時間作用する力に対して、地殻やマントルは非可逆的な永久変形を行う。我々の目には固体としてみえる地殻やマントルは、地質学的な長い目でみると、水飴に代表される粘性体のような性質を示すことになる。粘性という性質は、力がかかっている間はずっと変形を続ける。

地殻が圧縮応力下にあると、長い時間の間に、その弱い部分が粘性的に流動変形して、水平方向に短縮し上下方向に成長して、地殻の厚化が起こる。厚化した地殻はアイソスタシーを保ちながら上昇し、山脈や高地をつくる。逆に、形成された山脈には、常につぶれて平らになろうとする作用が働いており、押し力が無くなると沈降に転じる。

## 2. 地殻変動の学問分野

地殻変動の研究には、測地学・地球物理学の立場から行うものと、地質学・自然地理学の立場から行うものがあり、これらの研究は独自の手法に基づき別個に行われてきた。しかし、今世紀に入って、特にその後半期になって、両者の間の関連が意識される

1) 地質調査所 地殻物理部

キーワード：地殻変動、数値シミュレーション、造山帯、活断層

ようになり、融和の試みがなされるようになっていく(笠原・杉村, 1991)。

地質学のなかで、地質構造の形態や発達過程、さらにはその原因を明らかにしようとする分野を構造地質学 (structural geology) とよんでいる。また、地質構造の形成機構を物理学的に明らかにしようとする学問分野を構造物理学 (tectonophysics) とよんでいる。両者の間にも、やはり、明確な境界があるわけではない(垣見・加藤, 1994)。構造物理学やテクトノフィジックスという言葉は、まだ、日本でポピュラーになっているとはいえないが、この言葉をタイトルにした有名な研究誌がある。

このように手法は異なっても、研究対象が地球のテクトニクス、すなわち変動の歴史であるとき、地殻変動の力学的なモデルの構築が共通の目標として浮かびあがってきて、両者の境界は曖昧となる。構築されるべき変動モデルが、力学的な定量モデルであり、それが時間スケールにおいても、空間スケールにおいても同じスケールのものであれば、できあがったモデルは互いに矛盾してはいけいない。山登りにおいて、同じ山に登るなら、道は違っていても、最後には同じところにたどりつくのと同じである。

従って、定量的なモデルの作成段階においては、学問分野の境界を越えた、総合的な取り組みが必要となっている。これは、境界領域の学問の一つの例であり、学際的な研究によって、大いに発展の必要な分野である。

### 3. 数値シミュレーションの役割

地球の長期的な変動現象を観測ないしは測定し、数値データとして定量的に求めるためには、測地学的な手法や地質学的な手法があり、それぞれの分野で調査研究が行われる。信頼性の高い変動データを集積することは、学問として極めて重要なことであるが、データを集積するだけでなく、データを解釈して、地殻変動の定性的さらには定量的なモデルを作成することが、次の目標である。

数値シミュレーションは、定量的モデルとほぼ同義語であるが、シミュレーションすなわち模擬という言葉を使うため、計算結果が実際と合わなければ役立たずと考えられがちである。しかし、気象の数値予

報と同じく、相手とする自然は極めて複雑であるので、満足なシミュレーションができるには、まだまだ時間が必要であり、永久にできないかもしれない。

数値シミュレーションや定量モデルは、最終モデルが構築されるまでのモデルの改良作業において、極めて重要な役割を果たす。モデルはその妥当性を検証しなければならない。定性モデルは、考え方を示すものであるが、考え方だけでは正しいか間違っているかを判定するのは困難な場合がある。例えば、「風が吹けば桶屋が儲かる」というモデルがあり、上手に説明されればなるほどと思わせてしまうことができる。

少し才覚があれば、これと同じレベルのモデルをいくつでもたてることができるが、こういう都合のいいモデルは、定量的に検証することが必要である。つまり、秒速何mの風が吹くと、何々が起こって、その結果として桶屋が何円儲けるといふモデルにまで組み上げると、モデルの不備がみえてくるものである。

従って、数値シミュレーションは、シミュレーションが完成する前の段階においても、数値実験、思考実験の手法として極めて重要なものである。

### 4. 地球システムの全体像

地殻がどのようなメカニズムで変動しているかを理解し、定量的なモデルを構築して、変動を数値的に説明することが我々の目標である。しかし、地球は極めて複雑なシステムであり、ある一つの単純な原理に基づいたモデルで、地球の変動を説明することはできない。

地球システムは、時間スケールや空間スケールの異なる様々なシステムが互いに影響しあっている極めて複雑な系である。応力と歪みの関係を扱う力学の問題だけでもすでに複雑であるのに、温度による物性の変化が絡んでくると、温度構造を求める問題と連成を考えなければならない。水の挙動が問題となると、間隙水圧の問題や、結晶水の挙動の問題と連成しなければならない。

これらは、どの問題をとってみても重要な問題であるが、実際の地殻構造の形成にどれだけ寄与しているかは、全体の系に組み込んでみないと理解できない。複雑な系への、各問題の組み込みは、これら

の問題を連成させた数値シミュレーションによって初めて可能となる。

しかし、固体地球におけるこれら複雑な諸過程を組み込んだシミュレータは、まだ殆ど開発されておらず、これからの課題である。ここでは、地殻変動の数値シミュレーションのなかでは、最も複雑なモデルを開発してきたBird博士の研究を、以下の5.と6.に紹介する。また、彼のモデルが弾性を無視しているのに対し、弾性を考慮した地殻の変形問題を扱っている研究も多く存在する。ここでは、この方向の研究における新しい動きを示している例として、最近発表された2つの研究を7.と8.に紹介する。

1. で述べたように百年、千年といった時間スケールで蓄積される弾性歪みがあり、これを取り扱う数値シミュレーションの開発が、地震予知研究のためにすすめられている。しかし、ここではもっと長時間スケールでの地殻の変動の研究の紹介に焦点を絞ることとする。

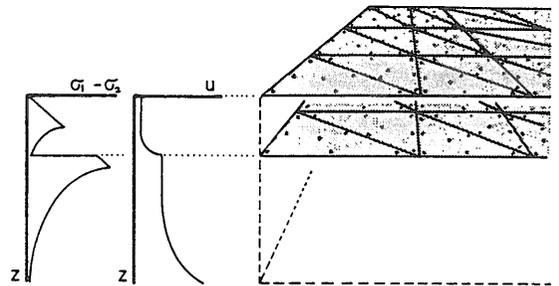
## 5. 造山帯

ヒマラヤ山脈やチベット高原は、約40～50Maに始まったインド大陸とユーラシア大陸の衝突の結果、形成されたものである。この期間にインドはユーラシアに向かって2,000kmも北進した。このような長時間をかけての地殻の変形において、弾性成分は無視し、粘性成分だけを考慮すればよいと考えられる。そこで地殻を粘性流体の薄い板 (thin sheet) とみなした二次元有限要素法による数値シミュレーションが行われてきた。

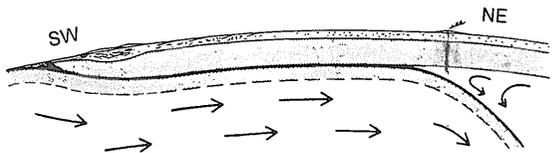
この問題に、多くの研究者が挑戦してきたが、ここではカリフォルニア大学 (UCLA) のBird博士の研究を紹介する。多くの研究者は、用いた有限要素法の詳細について論文の中で余り多くを語らないが、Bird博士は1989年の論文で、シミュレーションのために開発した技術内容を詳細に説明しただけでなく、プログラムのソースコード全体を公開したところに、大きな特徴がある。かつては、希望者にフロッピーディスクを送付する形での公開であったが、インターネットの時代にあわせて、世界中からFTPやWWWを用いて、自由にプログラムを入手できるようになっている。

Bird博士のlaramyと名付けられたプログラムの最大の特徴は、第1図に示すように、下部地殻と上部マントルの2つの薄板を考慮していることにある。2つの層はその速度差により、互いに影響を与えあう。

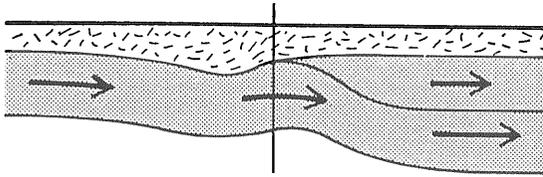
Bird博士は、1984年の論文で、ロッキー山脈を形成したララマイド造山運動における地殻の厚化 (thickening) を扱っている。北米大陸の下には、ファロン (Farallon) プレートと呼ばれる海洋プレートがほぼ水平に沈み込んでいることがプレートテクトニクスの研究から推定されている。第2図に示すような二次元断面によって定性的な概念モデルが提示されている。左端から沈み込んだ冷たい海洋プレートはしばらく水平に移動し、北米プレートの底面に影響を与えるが、ついに下向きに沈み込み始める。このとき海洋プレート上面の水分に富む変成堆積物は、熱いアセノスフェアに接触して内陸の火山活動



第1図 二重薄板モデル。Bird (1989) より。左側2図は、大陸リソスフェアの強度と水平速度を表す概念図。強度は最大主応力と最小主応力の差で定義する。地殻物質とマントル物質は深度が増すにつれ温度上昇により強度が減少し、上部地殻と上部マントルの2つの強い層が分離する。各層内では水平速度はほぼ一定で、層境界にデタッチメントが形成される。右図は二重薄板モデル。



第2図 北米プレート西側断面の模式図。Bird (1984) より。水平に沈み込むFarallonプレートが下向きに屈曲する所で、内陸の火山活動が形成される。



第3図 ララマイド造山運動の地殻厚化モデル. Bird (1989)より.

の原因となる.

ロッキー山脈では確かに地殻の東西短縮が観察されるが、それは5%とか10%という値であり、ララマイド造山運動期間中の33から55km以上の地殻の厚化を説明できる量ではない.

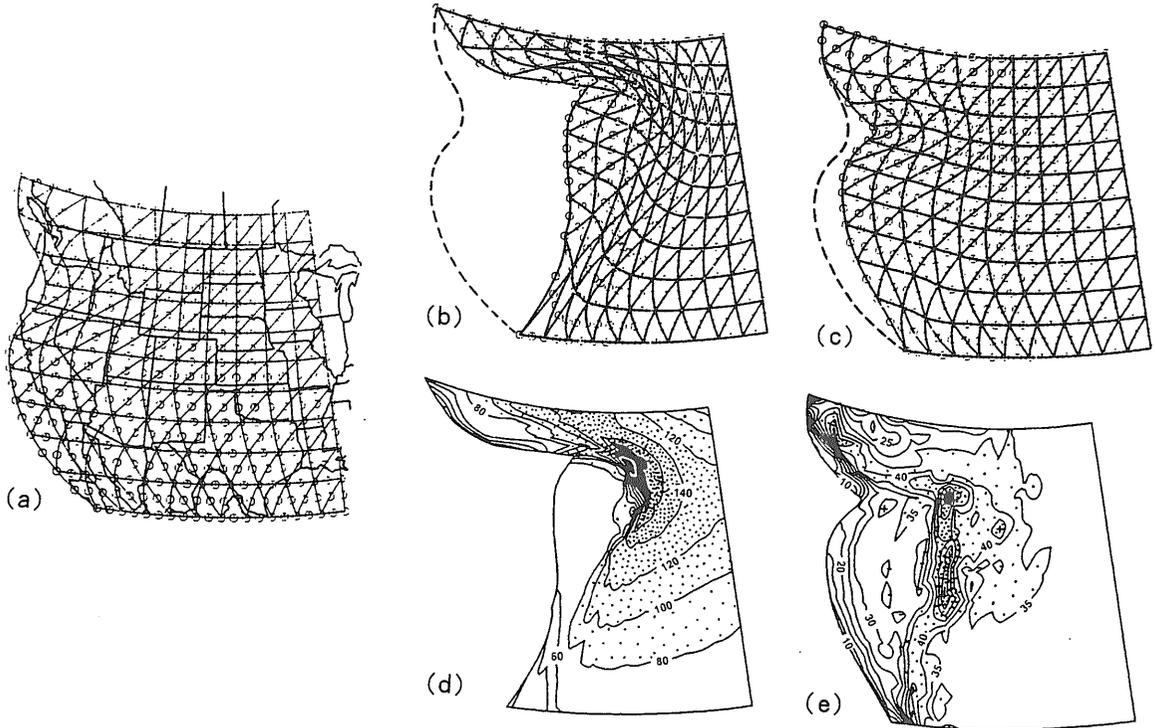
Bird博士は、第3図の断面図に示す概念モデルを用いて、数値計算を実施した. 冷たい海洋プレートは、図の左半分で北米プレートのマントルリソスフェアをはぎ取ってしまい、地殻の底面に接触して、その引きずりにより左側で薄化、右側で厚化をもたらす. 第4図に示す計算結果において、右下の地殻の厚さ分布図は、もともと33kmの一様の厚さであった地殻が、西端で10km、中央で60kmの厚さとなり、

ララマイド造山運動の地殻の厚化の説明に成功している.

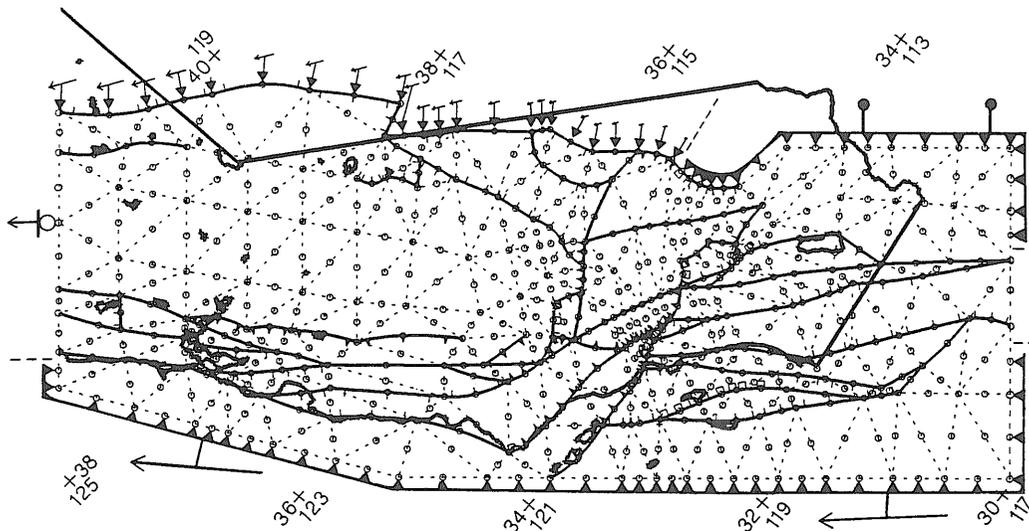
以上がBird博士がパレオテクトニクスの解析のために開発したシミュレーション研究の概要である. 本来、三次元として扱うべき現象を二次元のシミュレーションで扱おうとするところにいささか無理があり、他人に分かりにくい研究になっているきらいがある.

## 6. 内陸活断層

地殻の変形において、水平横ずれ断層は大きな役割を果たす. 米国カリフォルニア州のテクトニクスを扱う上で、サンアンドレアス断層の影響を無視することはできない. Bird博士は、1994年の論文で、従来の薄板を用いた有限要素法のプログラムに断層ネットワークを組み込むように改良を加え、California地域の地殻変動のモデリングに適用し、断層の活動度や広域応力分布などを計算した. 断層を考慮せず地殻は連続した物体であるとするモデルを連続体モデルと呼ぶのに対し、断層等により媒質の不連続性を考慮しようとするモデルを不連続



第4図 ララマイド造山運動のシミュレーションテストの1例. Bird (1989)より. (a)は変形前のメッシュ, (b)と(c)は変形開始後1,600万年のマンタル, 地殻の変形メッシュ, (d)と(e)は変形した薄板の厚さ分布.



第5図 カリフォルニア地域の有限要素メッシュ. Bird (1994)より.

体モデルと呼ぶ。

有限要素法で断層を扱うには、ジョイント要素と呼ばれる幅の狭い要素が用いられる。しかし、断層に沿う変位が大きくなるにつれて、いろいろと数値的な不安定の問題が発生するため、Bird博士の faults というプログラムにおいては、時間的な変形を追跡して行くことができない。すなわち計算を開始した最初の時点の一こまだけの解析しか行えないので、スナップショット解析と呼んでいる。

モデルには、地形標高、熱流量、地殻の厚さ等、従来の薄板モデルに用いられていたパラメータの他に、滑り率が年1mm以上のすべての断層が組み込まれている。第5図にカリフォルニア州をモデル化した有限要素法メッシュを示す。6節点三角形要素を用いており、節点を丸印で示す。実線で示した要素境界は断層線である。境界条件は速度型とし、NUVEL-1と呼ばれるプレートモデルやベースアンドレンジの速度を与えた。

Bird博士は、モデルの良し悪しを、次の3種の公表データと比較することにより判定した。(1)地質学的調査から得られる断層の平均滑り率データ79個、(2)主応力方向データ221個、(3)測地基線の永年変化データ841個(三角測量とVLBI)。断層の摩擦係数の値を変えたいいくつかのモデルにおいて、モデルの予測値と観測値の残差の二乗和から定義される

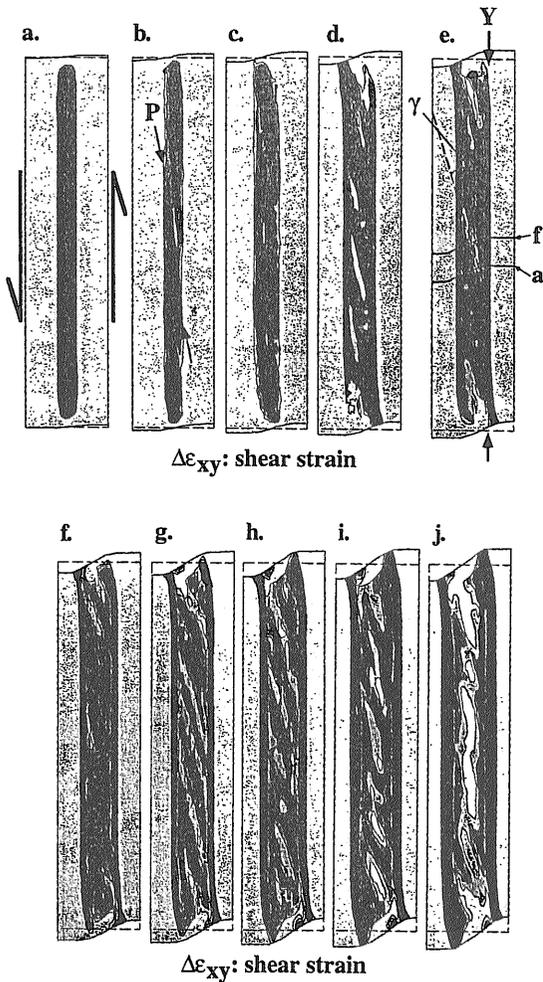
得点を計算する。各モデルの得点を比較すると、断層の摩擦係数が0.17-0.25という低い値のとき成績が良いことがわかった。これはサンアンドレアス断層系の摩擦強度が、極めて弱いことを示すものである。

第6図に最良モデルが与える、活断層系の活動度を示す。最良モデルはすべてのデータをRMS誤差3mm/年以下(相対プレート速度の6%)で説明するので、地震災害予測に用いることができる(少なくともデータの無い断層において)。

以上のシミュレーション研究により、非常に低い摩擦が、沈み込み帯だけでなく、水分を含んだ堆積層の underthrust があまり無い横ずれ断層系にも存在することが推定され、かつて沈み込んだ水がマントルから戻り、微細粒子のガウジ内に化学的・物理的に結合することが、この低摩擦の説明として可能かもしれないとBird博士は結んでいる。

以上のBird博士の研究は、二次元平面内の現象を扱うものであり、極めてわかりやすいものである。しかし、弾性を無視し、断層がクリープ的に常時滑っているというモデルは、断層が滑ってはくっつき、また滑ってはくっつく繰り返しにおける平均値を示すものであり、断層がくっついていて、弾性歪みが蓄積されていくという現時点の状態とは、ずれがあることに注意すべきである。



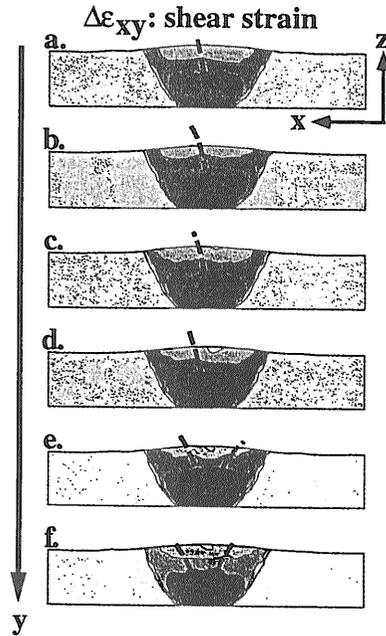


第8図 基盤の横ずれの進展に伴い、地表面に発達する剪断歪みの分布図。Braun (1994)より。

心部のaからfに至る断面の剪断歪みの分布を示すものである。黒い部分の歪みは11%以上である。これらの結果は、新しい有限要素法技術による地殻の変形のシミュレーションが、大きな可能性をもつことを示すものである。

### 8. 褶曲に伴う歪み

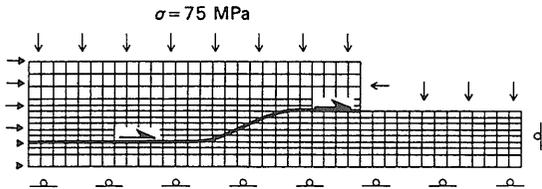
Ericksonほか(1995)は、逆断層の発達に伴い上盤と下盤が大きく変位したときに発達する歪みの分布を計算するために、2次元断面の弾粘塑性解析プログラムを開発した。物質特性として粘性と塑性を用いており、粘性は圧力溶解クリープ (pressure



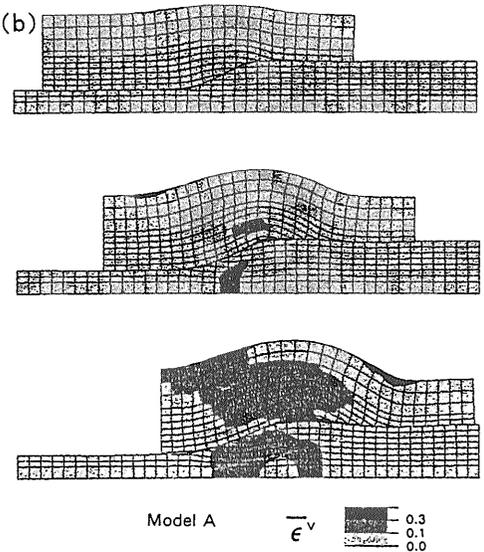
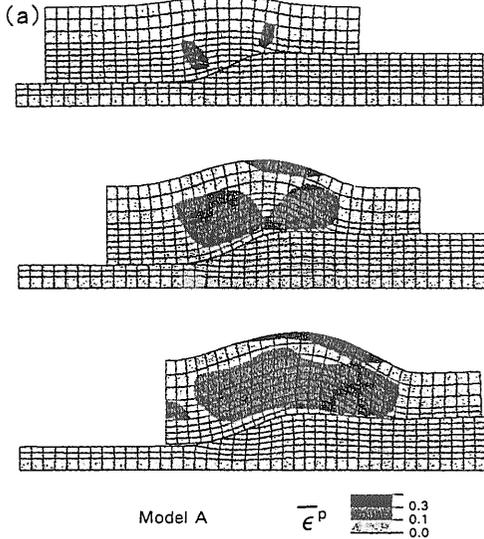
第9図 剪断歪み分布の断面図。Braun (1994)より。

solution creep)を扱うために、塑性はカタクレシス (cataclasis)を扱うために導入したのであるが、彼らのプログラムにおける粘性と塑性が、何を表し、どう違うかを説明するためには、やや込み入った説明が必要となるので、ここでは省略する。彼らのモデルの特長は、二次元ではあるが、断層を考慮し、断層に沿って大きく変位する問題を扱うことができることにある。従って、彼らのプログラムによれば、上盤物質と下盤物質は断層面に沿って大きく相対変位するときに、断層傾斜面 (ランプ)の存在により生成するフォールトベンド (fault-bend) 型の褶曲を扱うことができる。彼らの研究目的は、石油などの流体の移動様式であり、圧縮テクトニクスにおいて、どこにどのように歪みが発達するかを研究するものである。

第10図に、設定したモデルの有限要素メッシュを示す。上盤には下向きに75MPaの力で押さえつけながら、左から押して、下盤の上を移動させる。第11図に、上盤が右方向に移動する3つの段階における、要素の変形と、等価塑性歪みと等価粘性歪みの分布を示す。第11図(a)で、塑性変形は主にランプヒンジの上で発生するが、上盤がランプヒンジを通り過ぎると、塑性歪みの大きい帯状域が上盤下部に



第10図 fault-bend型の褶曲の有限要素モデル。  
Erickson et al. (1995)より。



第11図 要素の変形と歪みの分布。Erickson et al. (1995)より。(a) 塑性歪み, (b) 粘性歪み。

広がっている。第11図(b)で、粘性変形は上盤背斜のバックリム(backlimb)とヒンジ下部及び下盤のランプ下で卓越し、そこで塑性変形は小さい。圧力溶解クリープとカタクレシスに起因するフォールトバンド褶曲の相対的及び絶対な変形量は、構造における位置と歴史の関数として変化することがわかる。

### 9. おわりに

数値シミュレーションは、他の多くの学問分野ですざましく発達している。航空機の飛行特性の設計や、自動車の衝突時の破壊特性など極めて複雑な問題が数値計算によって計算できるようになり、モデル実験を不要にすらしめている。プラスチックや金属の粘塑性変形の数値シミュレーション技術も、大きく発展している。

しかし、同じく、地下構造の力学を扱う土木の地盤力学や岩盤力学においては、他の分野の数値計算の発展からみると、遅れているといわざるをえない。地殻変動の数値シミュレーション技術はさらに遅れているが、おそまきながらこれらの発展の影響を受けて、大きく変革するときに来ているといえよう。

#### 参考文献

垣見俊弘・加藤碩一(1994): 地質構造の解析—理論と実際—, 愛智出版。  
 笠原慶一・杉村新編(1991): 変動する地球—現在および第四紀—, 岩波書店。  
 Bird, P. (1984): Laramide crustal thickening event in the Rocky mountain foreland and great plains, *Tectonics*, 2, 741-758.  
 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.  
 Braun, J. (1994): Three-dimensional numerical simulations of crustal-scale wrenching using a non-linear failure criterion, *J. Struct. Geol.*, 16, 1173-1186.  
 Erickson, S. Gregg, and Jaimson, W. R. (1995): Viscous-plastic finite-element models of fault-bend folds, *J. Struct. Geol.*, 17, 561-573.

YUTAKA Murakami (1996): Numerical simulation of the crustal deformation.

<受付: 1996年9月10日>