

深部断裂型貯留構造評価のための総合解析システムの 開発—特にテクトニック・フラクチャーの解析とその 流体移動に及ぼす効果について—

小玉喜三郎*

KODAMA Kisaburo (1994) The integrated modeling system for appraisal of the deep-seated fracture reservoir : the analysis of tectonic fractures and their evaluation. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 45 (12), p. 715-728, 6figs.

Abstract : Several types of basin model have been developed for the purpose of reducing risks on the exploration and development of oil and gas reserves. The modeling of tectonic fractures formed during geologic process of the basin has been one of the mostly complicated modeling, even though their distributions and orientations are considered to extremely control the permeability properties.

A deterministic simulation system (BATS : Basin Analysis by Tectonic Simulation - system) was developed for predicting the occurrence of tectonic fractures and appraising their effects on the migration. Tectonic process analysis is based on the concepts of Virtual Basement Displacement method (Kodama *et al.*, 1985). Their concepts and applications to the idealized cross section in the Yurihara Oil and Gas Field are described here.

要 旨

石油・天然ガス開発のリスク軽減を目的に, さまざまな堆積盆モデリングの研究が進められているが, 堆積機構, 地質構造形成機構のモデル化は最も困難で開発が遅れている。特に, テクトニック・フラクチャーは発生・移動・集積の全ての機構に影響を与えるが, 解析が複雑なためモデル化に成功してこなかった。本研究では, 「仮想基盤変位法」を軸に, 地質構造, フラクチャー, 熟成, 移動機構をモデル化した総合的な解析システム (BATS システム) を構築した。本報告は, そのうち, フラクチャーの解析, フラクチャー透水係数の算出手法を解説し, これらが地層中の流体移動に及ぼす効果について, 秋田県由利原油・ガス田における模式的な断面を例に図示した。

1. はじめに

近年, 石油や天然ガス鉱床の対象が小規模構造や深部

構造に限定されるにつれて, 探鉱や開発に関するリスクが急速に増大する傾向が生じてきた。このためにさまざまな新技術・新探鉱理論の導入が要請されている。石油・天然ガス堆積盆のモデリングの研究は, 堆積盆地の形成・発展に伴う有機物の熟成過程, 炭化水素の生成・移動・集積過程を総合的に解析する目的で行われる。このような解析を探鉱へ応用する技術が確立されれば, 探鉱精度の一層の向上と探鉱リスクの低減に役立つと期待されている (Poelechau and Mann, 1989 ; Welte, 1989 ; Waples, 1991)。

堆積盆のモデリングでは, 堆積機構のモデル化, 地層の埋没や熱移動のモデル化, 有機物の熟成と炭化水素の生成のモデル化, 一次移動あるいは二次移動・集積機構のモデル化, そして地層の変形と地質構造形成機構のモデル化など, 地質時間スケールでのさまざまな現象のモデル化が課題とされている。これらのメカニズムは, 一

Keywords : basin modeling, tectonic fracture, fracture permeability, tectonic simulation

* 首席研究官

つの堆積盆地においては相互に密接に関連しあっていることから、いずれのモデル化が欠けても問題の総合的な解決には大きな障害となる。このため多方面で精力的な研究が進められているが、この中で最もモデル化が困難とされてきたのが、地質時間スケールでの地質構造形成機構のモデル化と言われている(Waples, 1991; 奥井・水津, 1992)。

地質構造の形成機構は、上記のさまざまなモデリングの中では他の機構から影響される度合いが比較的少ない、言わば独立した現象である。したがって、総合的なモデリングではそのフレームワークを構成すると考えられるが、このモデル化が大きな課題とされている。

筆者はこれまで、堆積盆地の発達とテクトニック・フラクチャーについて、発生のタイミング、場所、分布、規模、方向性を地層の堆積や堆積盆の地質構造発達過程と関連させて解析するシミュレーション手法「仮想基盤法」を開発してきた(小玉・龍, 1984; Kodama *et al.*, 1985; Kodama, 1992)。しかし、テクトニック・フラクチャーの意義は、特に炭化水素の移動・集積に及ぼす効果と関連して評価することが必要だと考え、テクトニクスに加えて熟成や移動の機構を同時に評価する堆積盆モデリング手法を構築し、これを BATS (Basin Analysis by Tectonic Simulation) システムと名付けて開発してきた(小玉, 1989)。本報告では、BATS システム全体を紹介するゆとりはないが、上述したように最もモデル化が必要で本システムの核となる、テクトニック・フラクチャーの生成とその流体移動に及ぼす効果に関するモデル化を中心に報告する。

2. フラクチャーとそれに沿った 流体移動機構モデル化の意義

上述のように、堆積盆地の発達過程でテクトニックに形成されるフラクチャーは、石油や天然ガスの一次・二次移動や集積機構を大きく規制する可能性が議論されてきた。すなわち、まず第一に、フラクチャーを通して地層水や炭化水素が移動する規模が桁違いに大きいことによる(Aguilera, 1980; du Rouchet, 1981; Nelson, 1985; Waples, 1991)。次に、地層構造や温度・圧力など、堆積盆モデリングに係わる多くのパラメーターが、本来、基本的には深度に依存して変化する水平構造を示すのに対して、テクトニック・フラクチャーはこのような水平構造を縦に貫く垂直構造を形成し、その結果、油・ガスの二次移動の経路と集積場所に決定的な影響を与えるからである。更に、堆積の初期の段階で生じたフラクチャーは地層水の排出経路を規定し、孔隙率の分布

や熱構造条件を規制することも無視できない(Cathles and Smith, 1983; Bethke and Marshak, 1990; 安藤ほか, 1985)。このようにテクトニック・フラクチャーは、炭化水素の生成、移動、集積の全過程を通して、モデルの境界条件に本質的な影響を与えると考えられている。実際に油・根源岩対比の研究などからも、微小なフラクチャーを利用して生成された油が移動した経路が議論されている(du Rouchet, 1981; 重川, 1985; 早稲田・重川, 1990)。

現在地下に分布するフラクチャーについては、物理探査や坑井観測・コア分析によって直接解析するさまざまな技術が開発されている(Nelson, 1985)。しかし、堆積盆モデリングで必要なのは、鉱床が成立する過程、すなわち、堆積盆地が生成・発展した過去の地質時代に、テクトニックなプロセスでフラクチャーがいつ、どこに、どの程度発生したかを定量的に解析することであり、これが、このような断裂のモデル化を大変難しいものにしてきた(Waples, 1991)。

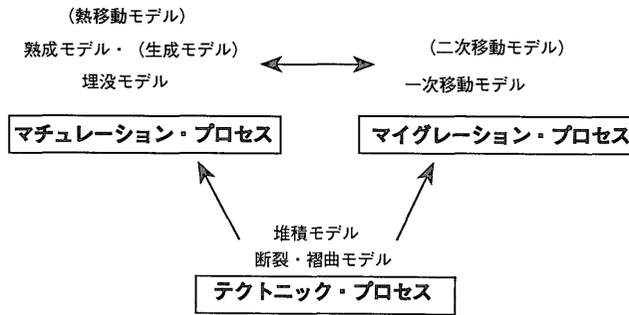
そこで BATS システムにおいては、地質的な時間を軸として、堆積盆の形態、大きさ、深さが時代とともにどう発展し、どのようなタイミングでテクトニック・フラクチャーが形成されたか、有機物の熟成や移動との関係でどのような効果を及ぼすかを解析することを課題とした。

3. BATS システムの構成

BATS システムは堆積盆地の地質構造発達過程を軸とした炭化水素鉱床成立機構の解析・評価システムである。その構成は、大きく以下の三つのカテゴリーに分けられる。(1)テクトニック・プロセス解析、(2)マチュレーション・プロセス解析、(3)マイグレーション・プロセス解析。通常、解析はまず(1)から、ついで(2)―(3)、あるいは(3)―(2)と進められる。

それぞれのプロセスには、データ入力モード、計算モード、表示モードがあり、基本となる地質構造・物性・年代等に関するデータはプロセス間で共有されている。具体的には、堆積盆地の発達過程に対応したステージの区分年代、その間の地層の厚さ、岩相、物性などはすべてのプロセスやモードにおいて共有されている。この関係を第1図に示した。

以下に、各プロセスの解析原理と手順を概説するが、本報告ではテクトニック・プロセス解析及びマイグレーション・プロセス解析を中心に紹介する。マチュレーション・プロセス解析については略述するに留めた。



第1図 BATSシステムの構成

3つのプロセスの相互関係。テクトニック・プロセスは、他のプロセスから独立性が高い。()内は関連するモデルだが現バージョンのシステムには含まれていないことを意味している。

4. テクトニック・プロセス解析

堆積盆のテクトニック・プロセスの解析として通常最も広く用いられている方法はバックストリップ法である。この方法は埋没や隆起に伴う地層の垂直方向の移動を一次的に再現し、それらを二次元又は三次元的に並べて地層の構造形態の変遷を幾何学的に復元する。この方法は、簡便で坑井データや他のモデルとの適合性に優れているため、地層の埋没史や熱史、有機物の熟成や炭化水素の生成・移動機構を解析する多くのモデリング技術に適用されてきた(例えば、Waples, 1991; 小椋, 1983; Nakayama, 1987; Nakayama and VanSilen, 1981)。

しかし、バックストリップ法は地層の埋没過程を幾何学的に再現するが、地層の歪みや応力分布、断裂の発生やその規模・方向といった力学的解析を行うことができない。この問題を解決するため、バックストリップ法の改良も試みられた。例えば、Larson et al. (1993)は、隣接するコラム間の垂直方向の相対変位から、地層の変形を擬似的に純剪断変形と仮定して歪み量を計算し、断裂発生の条件を議論した。この方法は、断裂がほぼ垂直な深部断裂の場合には成功していると考えられるが、あくまでも擬似的で一般的な力学場での解析を行うことはできない。

地層の変形と破壊の機構を力学的に再現する方法としては、さまざまなスケールモデル実験や数値実験が実施されてきた。それぞれに長所や短所をもっているため標準化された手法は知られていない。これらの中で有限要素法による数値解析は多様なモデルに対応できることや、複雑な境界条件の設定も容易であるなどの理由から、地質構造の解析には最も適していると考えられている。ただしこれまでは、大容量の高速計算機が必要であったり、

データの入出力が煩雑であるなどの理由で、実用化には多くの問題があるとされてきた。しかし、この問題も近年のハードウェアの急速な進歩により解決されつつある。

筆者は、これまでに共同研究者とともに、弾塑性有限要素法を用いた仮想基盤変位法(Virtual Basement Displacement法; 以下ではVBD法という)と呼ぶ数値実験を開発し(小玉・龍, 1984; Kodama et al., 1985, Kodama, 1992), 石油・天然ガス資源や地熱資源、鉍脈型鉍床を胚胎する堆積盆地の深部構造や断裂構造の解析など、さまざまな実験を実施してきた(安藤ほか, 1985; Morishita and Kodama, 1986; 国安ほか, 1990; 指宿ほか, 1991, 内藤・小玉, 1993)。BATSシステムでは、これまでに開発したVBD法を軸として解析する。本研究では、解析の操作性向上を目指してデスクトップ型ワークステーションによるソフトウェアを開発し、大型コンピュータシステムから完全に独立した環境で実用的に解析する手法を開発した。特に、データ作成時及び結果の出力時のいくつかの課題について改良を加えた。

VBD法の詳細については、これまでに多くの文献で報告しているので、以下にはその概念と、改善されたいいくつかの点についてのみ概説する。

4.1 VBD法の概念と作業の流れ

堆積盆地の中に堆積した地層の変位や変形には以下の三つの要素が含まれる可能性があると想定される。

① 地殻や堆積盆地全体が沈降したり傾動したりする広域的な変位・変形、② 堆積盆地の基盤の差別的な運動によって生じる変形、③ 地層の圧密や表層の地滑りによる変位・変形。このうちの①と②は、いわゆるテクトニックな変形であり、ここで採用しているVBD法での解析対象とする。③も背斜やドームの形成などの貯留構造を形成する場合があるが(Parker, 1989など)、VBD

法では解析していない。

このように、VBD法では堆積盆地の中の地層のテクトニックな変形について、「堆積盆地内の地層の変位や変形は、盆地基盤の変位によって決定される」という条件で解析する。ただし、実際には変形の原因である基盤の変位や、基盤自体の実態が不明であることが多く、逆に変形の結果である浅層部の地質構造が明らかであることが多い。そこでVBD法では逆解析問題(Inversion problem)の概念を導入し、実際には未知の基盤を仮想的に規定して「仮想基盤」とし、これに変形の原因となる変位境界条件を「仮想基盤変位」として与えて、上に重なる被覆層の変形を弾塑性有限要素法で解析する。

VBD法解析の作業フローの概略は以下のようである(第2図)。

- ① あらかじめ解析する対象地域の地質構造発達史をいくつかのイベントで区切ってテクトニック・ステージとし、それぞれのステージごとに既知の浅部の地層の変形データを測定して「制御データ」とする。
- ② ステージごとに以下の③—⑥を繰り返す。
- ③ 仮想基盤上の節点において「制御データ」に見合った仮想基盤変位を仮想的に与え構造計算を試行する。

④ 上記の計算結果と制御データを比較して、両者間の誤差が大きい場合には仮想基盤変位を修正し、再度③—④を繰り返す。

⑤ 誤差が最小になったとみなした場合に基盤変位条件を「最適基盤変位」とする。⑥この条件で被覆層内の全ての位置における増分変形・歪み・応力を求め、それから断裂の分布・規模・方向などを出力する。

⑦ ②—⑤の作業をすべてのテクトニック・ステージについて繰り返し、それぞれの増分変形を累積した累積変形を出力する。

⑦ 終了

4.2 VBD法の入力データ

VBD法で必要とする主な入力データを以下に示す。これらの多くは、実際には近似的にしか設定できないものが多い。中には現在のバージョンのプログラム上の制約のあるものもある。これらの問題点も含めて以下に記す。

- ① テクトニック・ステージの区分年代
- ② 制御データ：各テクトニック・ステージについて、堆積盆地全体にわたり得られる変形の制御データとして各イベント間の堆積盆地の表面の沈降をその時代に堆積した地層の厚さから求める。地質断面図などからテクトニック・ステージを限るイベント層準をマークし、その間の地層の層厚を直接測定して堆積盆地の沈降量を近似的に求める。

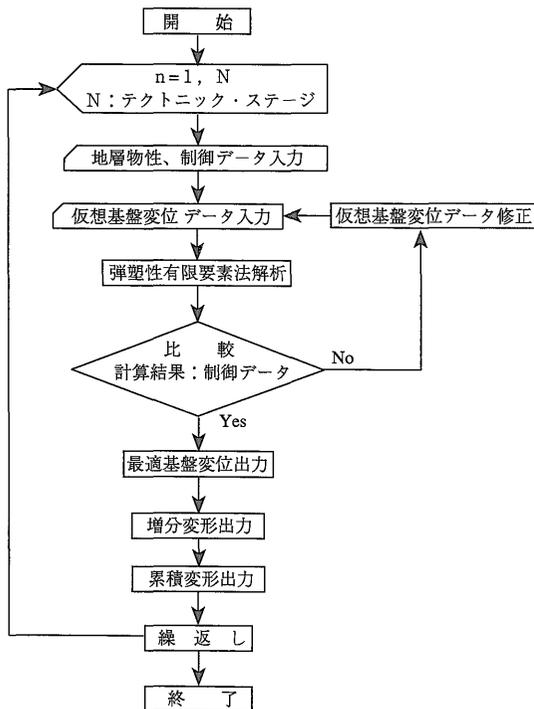
なお、測定した地層の厚さは、地層の圧密効果を補正していないので、堆積盆の表面の沈降量は実際より少なく見積られる。この結果、制御データとしては沈降量の振幅が小さく復元され、その結果は歪みの規模の差に誤差として現れると考えられる。ただし、最大沈降部や最大隆起部の位置に誤差は生じないから、歪み集中帯の場所や主応力パターンに大きな差違はないと想定される。

③ 地層物性

構成される地層や岩体ごとに、後述する弾塑性変形に対応した弾性常数(E)、降伏強度(Y)、ポアソン比(ν)、塑性硬化指数(n)、及び地層が埋没していくにつれ圧密を受け、これらの値が深さとともに変化していく率を入力する。

4.3 弾塑性有限要素法と降伏条件

VBD法では断裂の発生をある広がりの中での相対的な弾塑性的連続変形として扱う。地層の変形を巨視的に見た場合、その一部に発生する断層群は相対的に微小破壊とみなされ、全体としては連続的な弾塑性変形をすると解釈できる。岩石の物性試験において試験中に発生した場合でも、相対的に変形量が少ない初期の段階では、



第2図 VBD法の作業フロー

応力と歪みの間に一定の対応関係が示される。応力と歪みの関係は歪みが小さいときは線形性を示すが、歪みが大きくなると非線形に移行する。線形から非線形に移行する点の強度を降伏強度という。モデル化された地層では降伏強度以下の地層は弾性変形、以上では塑性変形するとして扱う。そこで降伏点を弾性限界、その歪み率をダクティリティーとも呼ぶ。

地層中のある点での応力値が降伏強度を超えた場合に、その地層は降伏して塑性変形をし、その変形は永久変形として地層中に残留すると解釈する。降伏条件の判定には、ある点での応力テンソルの各成分から、相当する応力値(軸相当応力値；スカラー量)を計算し、その値が降伏強度を超えたかどうかで判断する。これには von Mises や Tresca, Coulomb-Mohr の判定式がよく用いられるが(Jaeger, 1962；スミス, 1984；Nelson, 1985), 堆積盆中のさまざまな応力条件下で一般的に適用される条件として、von Mises の判定式を採用した。

von Mises の条件では、任意の座標系(O-xyz)におけるある点の応力テンソル成分を($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \tau_{zx}$)としたとき、

$$f = [1/2\{(\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2\} + 6(\tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 + \tau_{xy}^2)]^{1/2} = \bar{\sigma} \text{ (軸相当応力)} \quad (1)$$

で表されるスカラー値 f が、降伏強度(Y)に相当する一定の値を超えたとき降伏すると判定する。

本研究のプログラムでは、重力による地層中の標準応力状態を静岩圧として扱っているため、付加応力が作用していない場合には f はゼロである。すなわち、圧密変形など、重力に起因する変形はテクトニックな変形として扱わない。一方で降伏強度 Y は、前節で述べたように深度が増すにつれて変化する物性値として扱っている。

以上の解析を弾塑性有限要素法で解析した。有限要素法では構造の各単位を要素に区分し、要素を代表する有限個の節点について変位解を計算する。要素としては3節点で囲まれた単純な三角形要素から4, 6, 8節点などさまざまな近似方法があるが(スミス, 1984), 本研究では2次元(平面歪み)問題については三角形要素を、三次元問題については四面体を要素とした。実際の計算は山田(1972)による弾塑性有限要素法のプログラムを元に、堆積盆地用に境界条件を特定したほか、断裂の表示などの入・出力の自動化など、本研究の目的にあわせた改良を施した(小玉, 1976)。

4.3 歪みの進行過程

弾塑性変形では歪みの増分量が物性を規定する。弾性変形の歪みは応力と歪みの各成分についての線形関係式に従って計算されるが、軸相当応力値が降伏強度に達した段階以降は塑性硬化曲線に沿って歪みが計算される。地質学的な変形は可逆的な弾性変形成分を除いた塑性歪みで計算する。個々の点における塑性歪みのテンソル成分と共に、軸相当歪み量 ϵ を以下の式で求め、その点の変形状態を表現する。

$$\epsilon = [\{ (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2 + (\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2 + \gamma_{xy}^2) \}]^{0.5} = \bar{\epsilon} \text{ (軸相当歪み)} \quad (2)$$

4.4 断裂系の表現

計算結果の表現はシステムの重要なポイントである。2次元の場合には軸相当歪み量に比例した大きさで最大剪断面を直交した十字線で表現する。三次元問題の場合には、同じく軸相当歪み量に比例した大きさのステレオ投影で主応力軸及び二つの共役剪断面を表現する。このようにすることによって視覚的に断裂の発達する場所、断裂の向き、断裂の規模の大きさを知ることができる。

5. マチュレーション・プロセス解析

マチュレーション・プロセスの解析はBATSシステムの重要な構成要素であるが、本論ではテクトニック・プロセスの関連の点についてのみ簡単にふれるに留める。本システムでの熟成度算定には、Lopatinの方法にもとづいてWaples (1980)が解説した埋没した地層中の有機物の熟成度解析法を使用した。すなわち、温度10°Cの上昇によってケロジェンが炭化水素に変わる反応速度がほぼ2倍になるという経験則を用いて、反応速度比を時間で積分することによって求められるTTI (Time-Temperature Index)が有機物の熟成度と同じ意味をもつことに着目して熟履歴から熟成度を求める。実際のTTIは、Waples (1980)の方法を更に改良した小椋(1983)の式を用いて積分した。各時代の基盤及び地表部の古地温をあらかじめ設定し、前章で述べたテクトニック・プロセスで計算された地層の埋没変形から幾何学的に比例させて求めた。地層の埋没履歴は、各有限要素ごとに、その重心の深度で求めた。次に、小椋(1981)が示した坑井試料で実際に測定される各深度のTTIとビトリナイトの反射率 R_0 との相関式を用い、要素の埋没履歴ごとに計算で求めたTTIから R_0 を算出した。坑井に沿った特定の要素について実際の坑井サンプルの R_0 とのキャリブレーションを行うことによって定数を規定した。

解析する堆積盆地についてはその定数を堆積盆全体に適用し、実測データのない他のすべての要素についても R_0 を算出した。

各要素の R_0 の値は1%ごとに色分けして画面表示されるようにプログラムされている。なお、本稿では、これらの結果は省略している。

6. マイグレーション・プロセスの解析

ここではテクトニック・フラクチャーを通して地層中の流体がどのように移動するかのフラクチャー・パーミアビリティの効果を検討した。その意味でこれは炭化水素の発生から集積までを連続的に追跡する厳密な意味での移動機構ではない。しかし、テクトニック・イベントの変化に伴って移動のポテンシャルがどのように変わるかを解析できる。具体的な解析手法は以下の通りである。

6.1 単一開口面のフラクチャー・パーミアビリティ

テクトニックな歪みで発生したフラクチャー面に沿ったパーミアビリティの評価についてはコアなどの観測データがある(Nelson, 1985)。一方、個々の破断面に沿う流体の流れ易さについては渡辺・小島(1980)の研究がある。

ここでは、テクトニック・プロセスで解析した要素の歪み量とフラクチャーの方向から、その要素の透水係数テンソルを算出する手法を述べる。

一般に媒体中の層状異方性をもった面の透水テンソルは、面の法線の基準座標系にたいする方向余弦を $(\cos \alpha, \cos \beta : 2 \text{次元})$ とすると次式で与えられる(渡辺・小島, 1980)。

$$|K| = k \begin{vmatrix} \cos^2 \beta & \pm \cos \alpha \cos \beta \\ \pm \cos \beta \cos \alpha & \cos^2 \alpha \end{vmatrix} \quad (3)$$

ここで k は面に平行な透水係数で、地層面については

$$k_b$$

複数のフラクチャー面の場合には、それぞれ

$$k_{r1}, k_{r2}, \dots$$

とする。

層状異方性は地層面や複数のフラクチャーが重なりあって構成されるから、それぞれの透水テンソルを

$$\text{地層面} \quad : |K_b|$$

$$\text{フラクチャー} : |K_{r1}|, |K_{r2}|, \dots$$

とすると、全体の面の透水係数テンソルはそれらの和

$$|K_T| = |K_b| + |K_{r1}| + |K_{r2}| + \dots \quad (4)$$

で与えられる。

渡辺・古田島(1981)は、平均開口幅 (t) が数ミリメートル程度に開口したフラクチャーの平均間隔が S_c のフラクチャー群の全体透水係数 (k_{rT}) は、次式で定式化するのが妥当であることを透水係数試験から検証して提案した。

$$k_{rT} = gt^3 / \{12\nu S_c(1+0.12t-0.6)\} \quad (5)$$

ただし、 $S_c = a/N$; a は考えている系の幅、 N はフラクチャーの総数、 g は重力加速度、 ν は動粘性係数。

6.2 フラクチャーの規模別頻度分布の評価

フラクチャーは規模に応じて出現頻度がフラクタルに変化する。実際に野外において同一の応力場で発生した一群のフラクチャー群を対象に、規模別の頻度分布を測定すると、次式のようなべき関数分布することが明らかになった(垣見・小玉, 1974; 小玉, 1974)。

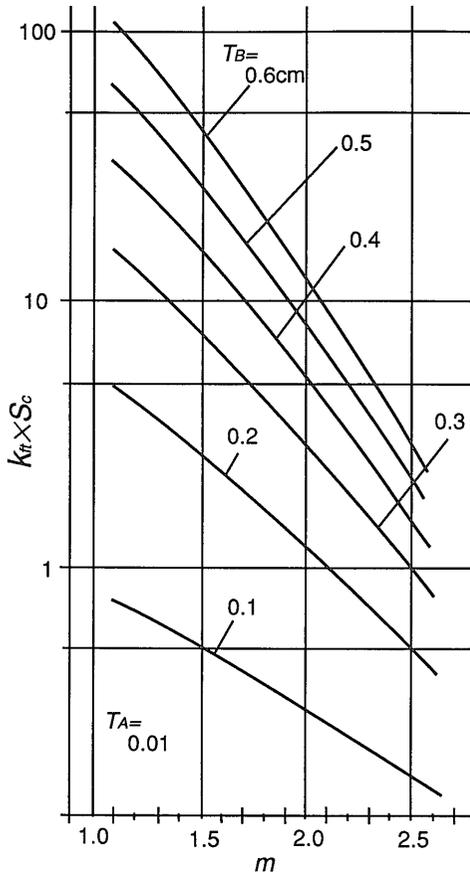
$$N(t)dt / N = Kt^{-m}dt \quad (6)$$

ここで、 N はフラクチャーの総数、 dt は規模(この場合は落差)の階級幅、 $N(t)dt$ は規模(落差)が t と $t+dt$ の間にあるフラクチャーの数である。 K, m は定数で、このうち m は規模によるフラクチャーの出現傾向を示す。 m 値が大きくなると、規模の小さいフラクチャーが相対的によく発達し、逆に m 値が小さくなると、規模の大きいフラクチャーが相対的によく発達する傾向を示す。実際に南関東の例では m は 1.4—2.4 程度で(垣見・小玉, 1974; 小玉, 1974)、地殻の変形形状と対応して有意な差があることが示されている(小玉, 1974)。

渡辺・古田島(1981)は、フラクチャーの開口幅の規模についても同様の関係を導入し、開口幅の小さいフラクチャーは、開口幅の大きいフラクチャーよりも密に分布すると仮定すれば、フラクチャーの間隔もこのような規模に応じてべき関数分布を考えると、上式の K, m を導入したときの全体透水係数 k_{rT} を以下のように定式化した。

$$k_{rT} = \frac{gK}{12\nu \cdot S_c} \int_{T_A}^{T_B} \frac{t^{-3m}}{(1+0.12t-0.6)} dt \quad (7)$$

ここで、 T_A, T_B は考えている最小及び最大のフラクチャー幅である。実際に T_A を 0.1mm 程度としたときの上式の性質を T_B をパラメータにとって調べたものが第3図である(渡辺・古田島, 1981)。この図は、 m, T_B, S_c という具体的に計測可能な量によって、特定方向に卓越したフラクチャー系の全体透水係数 k_{rT} を導くこと



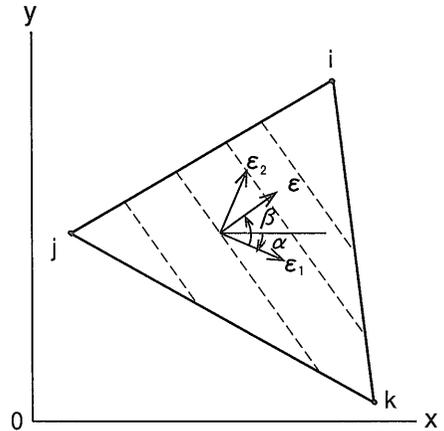
第3図 フラクチャー間隙の頻度指数 m とフラクチャー系の全体透水係数 k_{ft} と平均スペース間隔の関係式(5)の性質を示した(単位cm). (渡辺・古田島, 1981)より.

ができる点で実用的にも優れている。図を見ると m が大きくなると $k_{ft} \cdot S_c$ が小さくなる。これは、規模の小さいフラクチャーが密に (S_c は大きい) 発達しても、全体透水係数 k_{ft} の現象が著しいため $k_{ft} \cdot S_c$ が小さくなることを示している。

6.3 歪み量とフラクチャー・パーミアビリティ

BATSシステムのテクトニック・プロセスでは有限な広がりをもった要素ごとに、各テクトニック・ステージにおける歪み量を算出する。歪み量は(2)式の軸相当歪値で表現されるが、その算出のもとになる歪みテンソルの成分が要素ごとに求められる。

いま、ある要素において、第4図のようにフラクチャー面の方向、主歪 (ϵ_1, ϵ_2) の値と方向が与えられると、この面における法線方向の歪み量 ϵ は次式で算定



第4図 要素の主歪み (ϵ_1, ϵ_2) からフラクチャーの法線歪み (ϵ) を計算する方法

される。

$$\epsilon = \epsilon_1 \cos \beta + \epsilon_2 \sin \alpha \quad (8)$$

ここで、 α は ϵ_1 軸の全体座標系からの角度、 β は法線の ϵ_1 軸に対する角度である。要素の大きさは決まっているので ϵ から総法線変位量が算出され、もしそれが開口性の場合には、 T_A, T_B を設定することによって m, S_c が定まり、これらより k_{ft} を算定する。 T_A, T_B や m は実際には坑井データやコアの観察などから、部分的には実測することが可能であり、その見積もりの妥当性を検証することができる。

7. 計算結果例

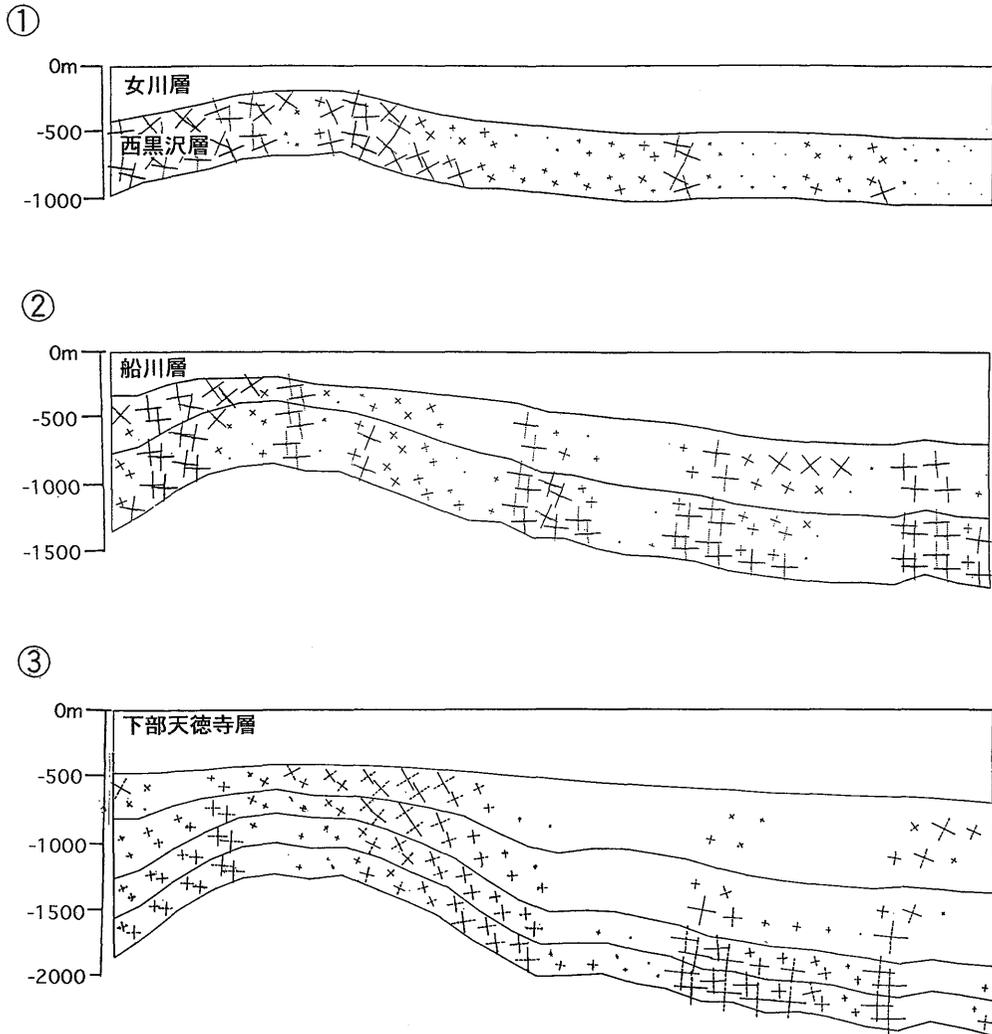
以上の各解析プロセスを、ここでは秋田県由利原の模式的な断面(天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1986)において具体的に適用した。

7.1 テクトニック・プロセス解析

第5図には各テクトニック・ステージを

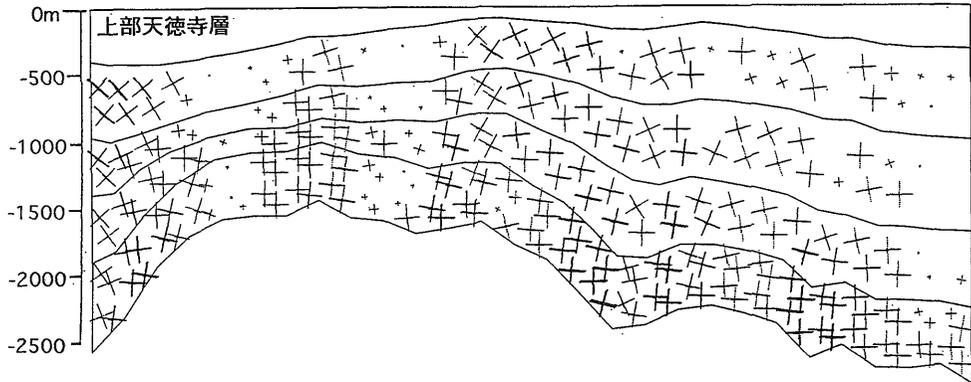
- ① 女川層堆積期(15Ma—13Ma)
- ② 船川層堆積期(13Ma—8Ma)
- ③ 下部天徳寺層堆積期(8Ma—4.5Ma)
- ④ 上部天徳寺層堆積期(4.5Ma—2.5Ma)
- ⑤ 笹岡層堆積後(2.5Ma—現在)

としたとき、この期間に堆積した地層の厚さの分布を堆積盆地の沈降量を示す制御データとしたときの最底基盤変位を求めた。そして地層中の各要素の主応力分布から、剪断面角を90度としたときの直行する二つの共役剪断面の方向を直線及び破線の十字線で表現した。実線は左回りの剪断のセンスを、破線は右回りの剪断のセンスを

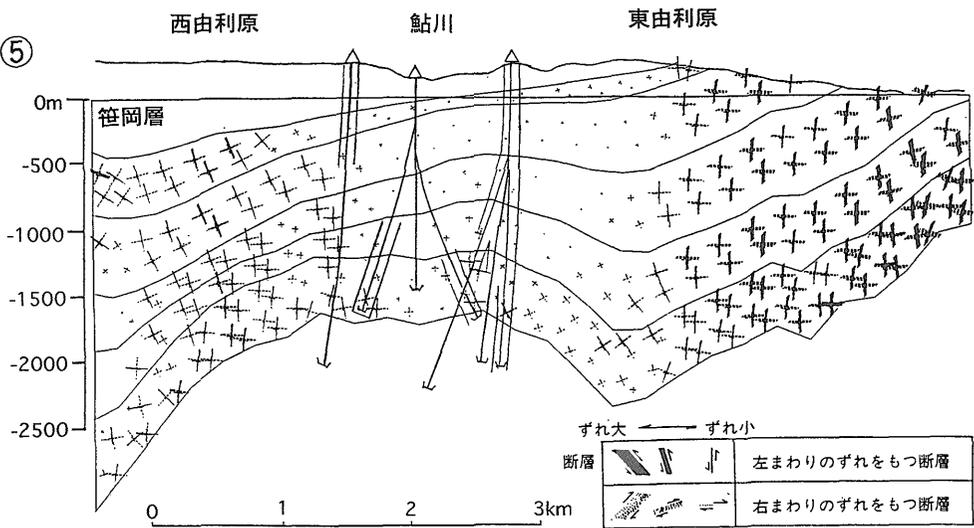


第5図 テクトニック・プロセスの解析による各ステージのフラクチャー分布
 共役剪断面の方向を直交する十字線で示した。十字線の太さと大きさ、及び点線と破線の違いは、それぞれ、軸相当歪み量の大きさ、及び剪断のセンスの違いを示す。③の断面は天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会(1986)による。

④



⑤



第5図 (続き)

示す。また、(2)式から軸相当歪み $\bar{\epsilon}$ を求め、その大きさに比例して十字線の本数及び長さを表した。なお、ここで示した軸相当歪みは、各ステージ終了時の累積歪みを示しており、ステージの途中やステージにまたがる歪みを示していないことに注意が必要である。言わば、そのステージ期間に新たに生じた新規フラクチャー系の歪みのみを示しているといえる。前の段階のステージで生じた古期フラクチャー系の評価については、次の8章で議論したい。

第5図より、下部及び上部天徳寺層堆積時期には、現在の背斜の翼に相当する部分に新規のフラクチャーが多数形成されたことが分かる。その後、笹岡層堆積以後はこの部分には新規フラクチャーは形成されなかった。これらの条件は本地域の鉱床が成立するためには有利な条件になったと判断される。

7.2 マイグレーション・プロセス解析

第6図は、地層が埋没するにつれ圧密収縮するとき排出される間隙水が、相対的なフラクチャー・パーミアビリティの異方性によってどのように移動するかを、前記の第3のテクトニック・ステージにおいて検討したものである。

いまある要素がテクトニック・プロセスで解析した量だけ沈降したとき、この要素は標準圧密曲線に沿って収縮し、その分だけ間隙水が排出したと仮定する。また、フラクチャーの方向と歪み量はテクトニック・プロセスで解析した値を用いる。6-aからcでは、層面に平行な透水係数 K_{mh} と垂直な透水係数 K_{mv} の比が全てに共通で10:1だが、6-aはフラクチャーに平行な透水係数 K_{fh} が0、6-b、6-cはそれぞれ相対的に規模の小さなフラクチャーが多数発達したと考えた場合と、規模の大きなフラクチャーが少数発達したと考えた場合に相当する。いずれに対しても流体の移動速度ベクトルでその差違を示す。あくまでも相対的だが、a, b, cを比べると、フラクチャーの効果が大きいb, cほど、地層圧の分布を大きく規制することが示されている。特に、フラクチャーの影響がない6-aの場合、地層圧の等高性はより水平で、流体は上方ないし地層に平行に浅部へ移動するのに対して、フラクチャーの影響が大きい6-cの場合には、背斜の翼部のフラクチャーが効果的に排出経路となるために、地層圧の勾配は低く、主として背斜に向かって流体が移動し易いことが示されている。

なお、この計算はあるテクトニック・ステージに限って、それ以前の全ての状態をリセットした条件で、新たに地層圧分布が変わると仮定しており、フラクチャー・パーミアビリティを見積もる歪み量としては、

そのステージの最終(最大)累積量から計算している。実際には変形とともに歪みが増大し、透水係数も変化していくが、ここではそのような解析を行っていない。計算結果を相対的に見比べるのが妥当と思われる。

8. BATS システムの今後の課題

以上のように、本研究では、地質過程で生じるテクトニック・フラクチャーとその評価について、特に流体移動に及ぼす効果を中心に検討した。しかし、複雑な地質過程の現象の中で、モデル化に際しては多くの基本的な条件を仮定して解析せざるを得ず、それが本質的な問題を未解決に残すことになっていると思われる。この章ではこれらの問題点を列挙し、今後の課題を整理しておきたい。

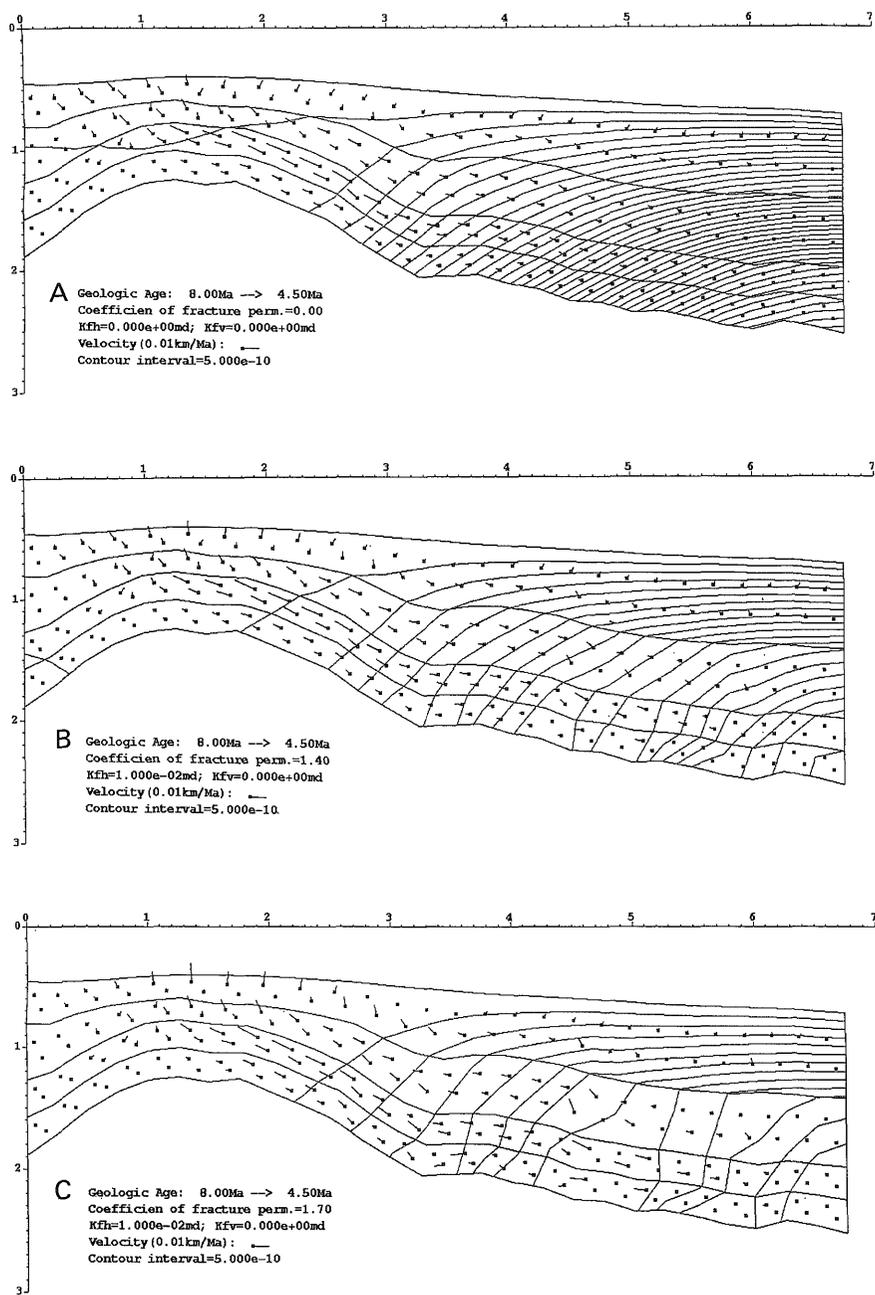
8.1 フラクチャーの再活動と充填作用について

テクトニック・プロセスの解析ではテクトニック・ステージごとに要素の歪み量を新たに累積していった。すなわち、それ以前のステージで生じた歪み量は考慮していない。既存の古期フラクチャーは新規フラクチャーの発達に影響を与えるように考えがちだが、これについては次のように考えた。古期フラクチャーが次のステージで再活動するとしたら、そのステージに堆積する地層の層厚分布などにその運動が現れるなどの影響を及ぼすと考えられる。もし、VBD法の制御構造になら変動が見られない場合には、たとえ前のステージで活動したフラクチャーが弱帯を形成していたとしても、そのステージでは活動しなかったと解釈することができる。このように、VBD法で求められる歪み量はそのときどきの活動性を示していると理解することができる。

しかし、古期フラクチャーは再活動しなくても、フラクチャー・パーミアビリティには影響を与えることを考えなければならない。今回の方法では、フラクチャーの透水性をひずみ量に比例させて見積もったが、フラクチャーの意義がその透水性にあるとすると、歪み量だけでなく、Larson *et al.* (1993)が検討したように、物質の充填や時間経過に伴う開口部の閉塞などの条件を、透水性の減少効果と関連させて導入する必要があるだろう。

8.2 精度の高いデータとさまざまなフラクチャーの検証

モデリングの成功の可否は、モデル化によってそのシステムを支配している基本的なパラメータを抽出することと、そのパラメータについて、精度の高い測定・検証を行うことである。本システムでは、それはVBD法の制御データである堆積時の隆起・沈降量であり、BATSシステムではフラクチャーの実態が鍵である。いずれにしても、過去の地質時代のことであるから直接測定する



第6図 テクトニックフラクチャーの流体移動に及ぼす効果

第5図の③下部天徳寺層堆積期(8Ma-4.5Ma)ステージにおけるテクトニック・フラクチャーに沿ったさまざまな透水テンソルに対する地層水の排出圧力分布と動水ベクトルを示す。A: フラクチャーに平行な透水係数 K_a がゼロの場合, B: K_a は0.01md, 微小なフラクチャーが密に発達した場合, C: K_a は0.01md, 規模の大きなフラクチャーがまれに発達した場合。第5図のフラクチャー分布の密な部分では動水勾配が小さくなっていることに注目。いずれの場合も, 各層の透水係数は地層に平行な方向が垂直水平より10倍となっている。

ことができないが、さまざまな解析を駆使して、必要なデータの精度を向上させるシステムが必要である。

堆積時の変形については、圧密補正、堆積深度を加味することが必須であるし、フラクチャーについては、成因の異なるさまざまなフラクチャー・システムが混在して発達している実態を観察し、それらの系統分けと、前述した割れ目の規模と頻度分布係数(m)を具体的に規定することが必要である。また、地表露頭においても、形成時期や形成機構の異なる複数のフラクチャー・システムの発達している現象が観察されている(小玉, 1968)から、それらについて透水性という観点からの検討が必要であろう。

9. おわりに

本研究では、堆積盆地のテクトニックな変形を軸として、地層の埋没による熟成過程の評価や、特にフラクチャーの形成によるパーミアビリティの評価に関する総合的なシステムとしてのBATSシステムを開発した。

はじめにも述べたように、堆積盆地のモデリングにはさまざまな要素が取り入れられなければならない。とりわけ、そのフレームワークとしてのテクトニック・プロセスをいかに実用的にモデル化するかが課題とされてきた。本システムはそれらを解決する数少ない試みであり、未だ多くの仮定の上で解析を行うなど未完成の部分が多い。しかし、さまざまな現象に本質的な影響を与えられと思われるフラクチャーの構造を発達史的に取り入れることができる手がかりを開発した意義は大きいと考えたい。今後は、具体的なさまざまな課題に適用すると同時に、更に簡便で実用的な方法への改善と、指摘したあらたな課題について改良を加えていきたい。

謝辞：本研究は、工業技術院特別研究「資源評価のための三次元モデリング手法の研究(昭和63年度—平成4年度)」で実施した。研究を進めるにあたり、帝国石油株式会社の今村哲己、佐藤修一の各氏、石油資源開発株式会社の指宿敦志・国安 稔・中山一夫の各氏、石油公団石油開発技術センターの奥井明彦、Daglas Waples、水津雅裕の各氏にはモデリングに関するさまざまなご指導・ご討論を頂いた。地質調査所の鈴木祐一郎、徳橋秀一、渡部芳夫、高橋 誠、鈴木尉元、宮崎光旗、花岡尚之の各氏からは有益なご討論・ご批判を頂いた。これらの方々に記して感謝を申し上げる。

引用文献

Aguilera, R. (1980) *Naturally Fractured Reser-*

voirs. Penn Well Pub. Co., Tulsa, 703p.

安藤 斌・白井 泉・静川賢次郎・松山一夫・小玉喜三郎・前田孝雄・小関武宏・北澤修二郎(1985) 数値実験による地熱貯留層の裂か系解析の試み. 地熱, vol. 22, p. 261-275.

Bethke, C. M. and Marshak, S. (1990) Brine migrations across North America — the plate tectonics of groundwater, Annual Rev. *Earth and Planet. Sci.*, vol. 18, p. 287-315.

Cathles, L. M. and Smith, A. T. (1983) Thermal constraints on the formation of Mississippi Valley-type lead-zinc deposits and their implications for episodic basin dewatering and deposit genesis. *Economic Geol.*, vol. 78, p. 983-1002.

du Rouchet, J. (1981) Stress fields, a key to oil migration. *A. A. P. G. Bull.*, vol. 65, p. 74-85.

指宿敦志・中山一夫・国安 稔・小玉喜三郎(1991) フラクチャー型貯留層を有する堆積盆解析の試み. 石油技術協会誌, vol. 56, p. 86-107.

Jaeger, J. V. (1962) *Elasticity, Fracture and Flow*. 208p, Metuen & Co. Ltd, London.

垣見俊弘・小玉喜三郎(1974) 断層の落差別頻度分布と、地殻ひずみ及び地震活動との関連性について. 地調月報, vol. 25, p. 75-87.

川上和夫・小玉喜三郎(1989) 佐渡・鶴子鉦床群形成の場の仮想基盤変位法による解析. 鉦山地質, vol. 39, p. 261-272.

小玉喜三郎(1968) 城ヶ島における小断層解析. 地質雑, vol. 74, p. 265-278.

———— (1974) 断層の発達と地殻の変形—南関東の南北性正断層の発達機構. 関東地方の地震と地殻変動, ラテイス刊, p. 71-86.

———— (1976) 背斜ヒンジ部に発達する正断層の形成機構. 新潟大研究報告, 4 (西田彰一教授退官記念論文集), p. 415-421.

————・本多 進・藤田 仁・新田 潔・鈴木尉元(1976) 基盤のブロック状変形に伴う断層形成の数値実験(その1) —基盤ブロックの大きさが地表変形に及ぼす効果について. 地調月報, vol. 27, p. 123-134.

———— (1989) 堆積盆地地質構造解析シミュレー

- ター. 地質ニュース, no. 420, p. 11-16.
- Kodama, K. (1992) Analytical study of geologic structure in the cover sediments by Virtual Basement Displacement method. M. J. Rickard *et al.* (eds.), *Basement Tectonics*, Kluwer Acad. Pub., Netherlands, 9, p. 151-160.
- 小玉喜三郎・龍 学明(1984) 仮想基盤変位法で解析した深部地質断面 (演旨). 石油技協誌, vol. 49, p. 254.
- , Long, X. M. and Suzuki, Y. (1985) Structural analysis of deepseated volcanic rock reservoirs by tectonic simulation. *United Nation ESCAP / CCOP Tech. Bull.*, vol. 17, p. 61-79.
- 国安 稔・根岸 悟・小玉喜三郎・加藤 進(1990) 北海道苫小牧沖海域の地質構造形成過程の特性. 地質学論集, vol. 34, p. 187-197.
- Larson, K. W., Waples, D. W., Fu, H. and Kodama, K. (1993) Predicting tectonic fractures and fluid flow through fractures in basin modelling. In: Dore, A. G., *et al.* (eds), *Basin modelling: Advances and Application*, NPF Special Publication, Elsevier, Amsterdam, 3, p. 373-383.
- Morishita, Y. and Kodama, K. (1986) Simulation analysis of the gold-quartz vein system in the Kushikino Mine area, southern Kyushu, Japan. *Min. Geol.*, vol. 36, p. 475-485.
- 内藤 耕・小玉喜三郎・丸山裕一・久保田喜裕 (1993) 菱刈鉱山の鉱脈群の形成場. 資源地質, vol. 43, p. 435-446.
- Nakayama, K. (1987) Hydrocarbon-expulsion model for petroleum exploration. *A.A.P.G.*, vol. 71, p. 810-821.
- and VanSilen, D. C. (1981) Simulation model for petroleum exploration. *A.A.P.G.*, vol. 65, p. 1230-1251.
- Nelson, R. A. (1985) *Geologic Analysis of Naturally Fractured Reservoirs*. Gulf Pub. Co., Houston, 320p.
- 小椋伸幸(1981) Lopatin 法による熟成度の推定(要旨). 石油技協誌, vol. 46, no. 267.
- (1983) 石油根源岩有機物熟成度の予測 (その2) 新潟油・ガス田地域における熟成度履歴の予測. 石油技協誌, vol. 48, p. 341-354.
- 奥井明彦・水津雅裕(1992) 堆積盆評価技術. 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会編: (改訂版)日本の石油天然ガス資源, p. 378-389.
- 重川 守(1985) 炭化水素同位体組成による原油と根源岩の対比—新潟平野油・ガス田地域におけるケーススタディ. 石油技協誌, vol. 50, p. 9-16.
- Parker, G. S. Jr. (1989) Gravitational compacton, A neglected mechanism in structural and stratigraphic studies: New evidence from Mid-Century, USA. *A. A. P. G. Bull.*, vol. 73, p. 641-657.
- Poelchau, H. S. and Mann, U. (1989) Evolution of sedimentary basins — the integrated modeling approach. *Geologische Rundschau*, vol. 78, p. 1-5.
- スミス, I. E. (戸川隼人訳)(1984) 有限要素法のプログラミング—構造・流体・地盤への応用. ワイリー・ジャパン (啓学出版), 東京, 421p.
- 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会編(1986) 日本における最近の石油探鉱. 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 東京, 281p.
- Waples, D. W. (1980) Time and temperature in petroleum formation; Application of Lopatin's method to petroleum exploration. *A. A. P. G.*, vol. 64, p. 916-926.
- Waples, D. (1991) Innovative method for quantifying poorly known parameters necessary for numerical basin modelling. 石油技協誌, vol. 56, p. 96-107.
- 早稲田 周・重川 守(1990) 由利原原油・ガス田における炭化水素の生成・移動・集積. 石油技協誌, vol. 55, p. 233-244.
- 渡辺邦夫・小島圭二(1980) 断層・割れ目系岩盤中の地下水流れと関与する地質量の計測と評価. 昭和55年日本応用地質学会シンポジウム論文集, no. 2, p. 17.
- ・古田島信義(1981) 割れ目系岩盤における透水係数算定の基礎的考察. 応用地質, vol. 22, p. 1-8.

Welte, D. H. (1989) The changing face of geology and future needs. *Geologische Rundschau*, vol. 78, p. 7-20.

山田嘉昭(1972) 「塑性・粘弾性」, 日本鋼構造協会

編, コンピュータによる構造工学講座, II-2, 培風館, 240p.

(受付: 1994年9月2日; 受理: 1994年11月8日)