

堆積盆構造解析用シミュレータ

小玉 喜三郎 (燃料資源部)
Kisaburo KODAMA

1. はじめに

近年東北地方の日本海沿岸の各地では 深さ 4,000メートル以上にある中新世の火山岩貯留層 (グリーンタフ) から盛んに天然ガスが開発されている。これらは今後とも 我が国における最も重要な石・油・天然ガスの開発ターゲットとされている。

ところがこのような深度の探鉱では 深部の地質構造がしばしば浅部とは異なり非常に複雑であることが多い。また 浅部の火山岩層による強反射のため物理探査の解像度が充分得られないなどの問題が明らかとなり 探鉱上の大きなリスクとなっている。このようなわけで 深部の探査には 新しい地質構造解析の理論と技術の開発が要請されていた。

本シミュレータは 実際の調査や探査で得られた浅部の地質構造のデータを最大限活用し それらが形成された歴史的過程をコンピュータ・シミュレーションで再現させることにより 深部地質構造の最適モデルを求める会話型ワークステーション・システムである。これによって 堆積盆地の深部に発達する断層の規模や分布 褶曲の形成過程などの推定が可能となり 深部探査に1つの指針を与えることができると期待している。

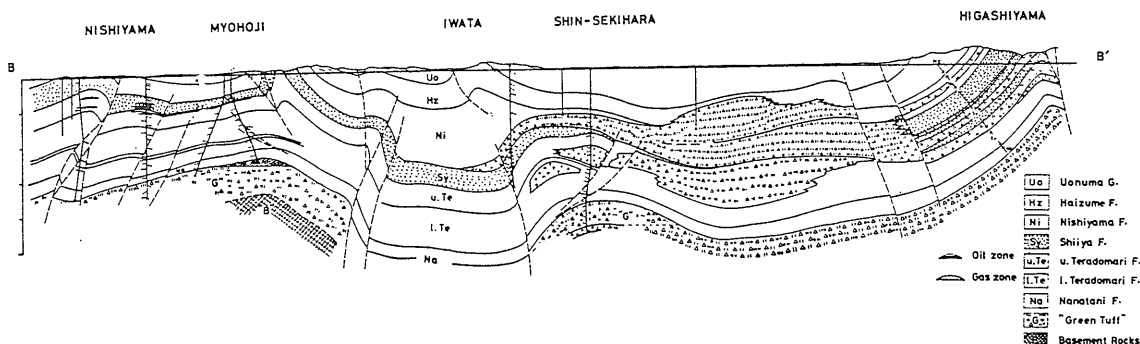
本シミュレータはあとで述べるように 堆積盆資源評価のための総合的な解析システムの一部として現在も開発中のもので なお多くの問題点が残されているが 多

くの方々からご批判を頂ければ幸いである。

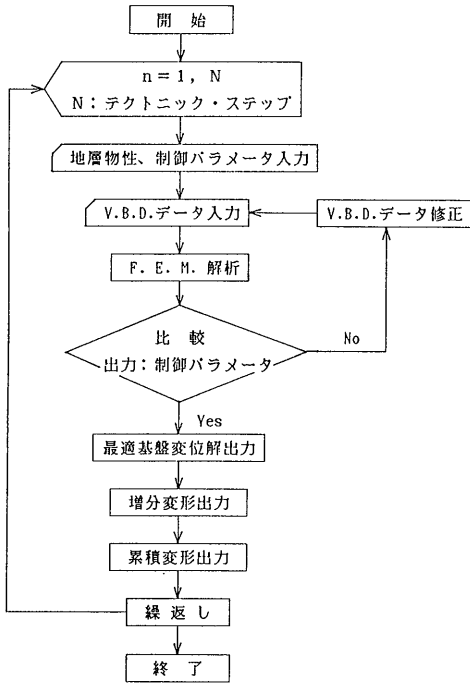
2. 堆積盆深部地質構造の特性

地質断面を作成するために現在でも多く使われている方法は 表層の地層の傾斜を作図的に深部へ外挿するバスク法やキック法 (三井法とも呼ばれる) である。これらの方法は 表層の地質構造と地下の地質構造が相似形をなすと予測される構造には効果的に適用できる。しかし コンパスの半径を大きくして深部を復元しようとすれば分るように 深部では背料と向斜がオーバーラップして 曲率の小さい平らな構造が作図されるという欠点がある。この方法は地下の地質構造と地表の地質構造が同一の変形過程で形成されるような範囲に適用が限定されるもので 表層とは形成の歴史が異なるような深部の構造については適用できない。

近年 秋田や新潟で開発が進められているグリーンタフ貯留層の場合には 探鉱が進展するにつれ 深部構造と浅部構造が非調和的であることや 浅部にはみられない大規模な断層が深部に発達する事が多いなどが明らかとなってきた (第1図)。このような地質構造を 藤田 (1981) や相場 (1982) は “貯留構造の二重性” とよび 一時期の単純な変形応力によって形成されたものではなく 主として中新世から始まった “出羽変動” と第四紀の “魚沼変動” が重なり合うような複雑な歴史過程で形



第1図 西山油田 中央油帯 長岡平野 東山油田地質断面図 (相場 1982)



第2図 仮想基盤変位法のフローチャート

成されたと考えた。いずれにしろこのような複雑な地質構造については、在来の図学的方法では事前に深部を予測する事は不可能であることが分かってきた。

3. 仮想基盤変位法

これらの問題を解決するために、本シミュレータでは「仮想基盤変位法 [V. B. D. (Virtual Basement Displacement) Method] という新たな解析法を考案した(小玉 1984; Kodama et al., 1985)。

この方法では、浅部の地層の構造はそれより下位にある深部の地層の運動で形成されるという、天然の変形機構をコンピュータで再現する。実際には我々は、地層変形の原因になった深部の運動については何も情報を持ち合わせていない。逆に結果として生じた浅層の変形構造については多数のデータをもっている。そこでこの解析では、物理探査等の解析で一般的に用いられている逆問題 (inversion problem) の概念を導入することにした。

第2図のフローチャートで作業の流れをみていただきたい。まず解析の対象地域を特定し構造系を規定する。このときの系の基底を「仮想基盤」と定義する。つぎに対象地域の地質構造発達史を解析し、いくつかの発展段階 (テクトニック・ステップ) に区分する。

岩相等に応じた物性値データを入力したのち、1つのテクトニック・ステップについて、先程の仮想基盤に適当な強制変位 (V.B.D. データ) を与えて弾塑性有限要素法による地層の変形を計算する。この計算で得られた変形のうち、制御データと比較できるものについては、計算結果と制御のデータを比較して差を計算し、それが最小となるまで繰り返し、V.B.D. データを修正する。このようにして最後にこのステップにおける最適基盤変位を求め、その時代に生じた地層の傾動、歪の集中、断裂の分布や方向等の増分変形結果を出力する。

これらの作業を次々とテクトニック・ステップの順に繰返すことによって、地質時代のある時期から現在にかけて形成された累積的な地質構造が復元される。

仮想基盤変位法は、このように基盤運動でもたらされる変形構造の解析にのみ適用される。したがって、基盤の運動とは関係のない重力性地滑りのような構造や圧密によって生じる構造等には適用できない。

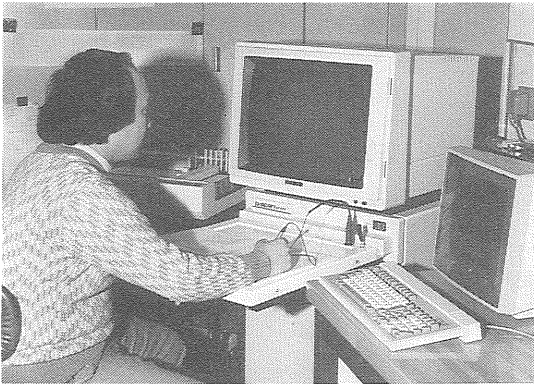
一方、基盤の水平あるいは垂直な運動を直接的あるいは間接的に反映して生じたと考えられる堆積盆底の沈降 (上昇)、地層の堆積 (削剝)、地層の傾動、断層・褶曲の形成などは、全て解析の対象として扱うことが可能である。なお「仮想基盤」は、単に問題解決のために設定した構造系の下限であって、地質学的な意味での基盤を意味しない。以下の例で示すように、解決すべき対象に応じて、地下数百メートルであったり、数キロメートルあるいは数十キロメートルにあるなど様々にとることができる。

4. 会話型ワークステーションの開発

限られた数の分散的な地質構造のデータと比較しながら、効率よく仮想基盤変位を修正して最適基盤変位を抽出するために、高速大型コンピュータと結合した会話型グラフィックワークステーションを開発した (第3図)。これによって、かつては1つの地質断面の4~5テクトニック・ステップを解析するのに2~3週間かかっていたものが、現在は1~2日で解析可能となった。

本システムのワークステーションでは、2次元問題や3次元問題等の複雑な入力データの作成や、様々な表現形式の出力作業が可能な限り自動化されている。このため、作業者は、手元に資料を置いてメニューと会話しながら必要なパラメータをキーインするだけで、目的の入力データを作成したり、ディスプレイやプロッターに図を出力することが可能である。

弾塑性有限要素法による構造解析の計算 (小玉ほか 1976) は、プログラムの規模に応じて、ホストに中型コ



第3図 シミュレータの全景

ンピュータの HP/9000 や大型の FACOM/780 さらにスーパーコンピュータの CRAY X-MP/216 を使い分けて実行したため 作業能率は大幅に向上した。ホストコンピュータとの間は ASCII 形式のデータをファイル転送することによって結合されている(第4図)。またプログラムは全てモジュール化されているため プログラムの部分的改編や 将来のハードウェアの更新にも対応できるようにしている。

5. いくつかの応用例

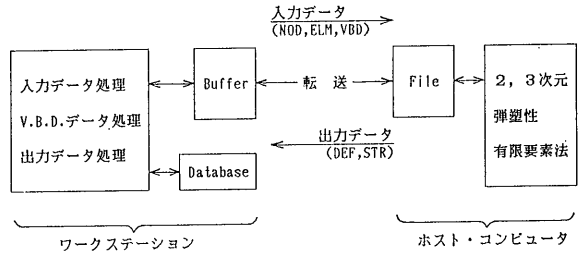
A. 長岡平野の深部火山岩貯留構造の解析

この地域(第1図)では現在もなお盛んに 深度4,000~5,000メートルの七谷層準のグリーンタフを貯留層とする天然ガスの開発が進められている。

この地域の地質構造の発展過程を 椎谷層堆積期以後4つのテクトニック・ステップに区分した。第5図はシミュレータで解析した各ステップの断裂分布(2次元断面)である(Kodama et al., 1985)。図中の十字記号は互いに直交した共役剪断面を表わし 線の大きさと太さは剪断歪量の大きさに比例しているのどどの場所どの程度の断裂が発達したかが視覚的に分る。

各ステップでは その時代に堆積した地層の層厚分布を海底の沈降水量と近似し これを制御パラメータとして計算結果と比較している(第6図上)。このときの仮想基盤変位を第6図下に示した。この例では変位の垂直成分のみ与えているが プログラムでは水平・垂直成分をもつベクトルとして与えることができる。

本地域では 西山層の堆積時期と魚沼層堆積後の2度にわたって著しい造構運動があり 吉井 片貝 東山付近の地下深部に変形が集中した(口絵写真1)。基盤変形の形態は各時代では同じではなかったため 累積された



第4図 データの流れ

深部の地質構造と表層の地質構造とは著しく異なっていることが良く再現されている。とくに 片貝地域をみると 深部の地層構造は片翼ずつ形成されていき その結果 中層部には背斜構造が 表層部には単斜構造が生じたことが分かる。実際の探鉱から復元された地質断面とくらべると良い調和を示している(第7図)。

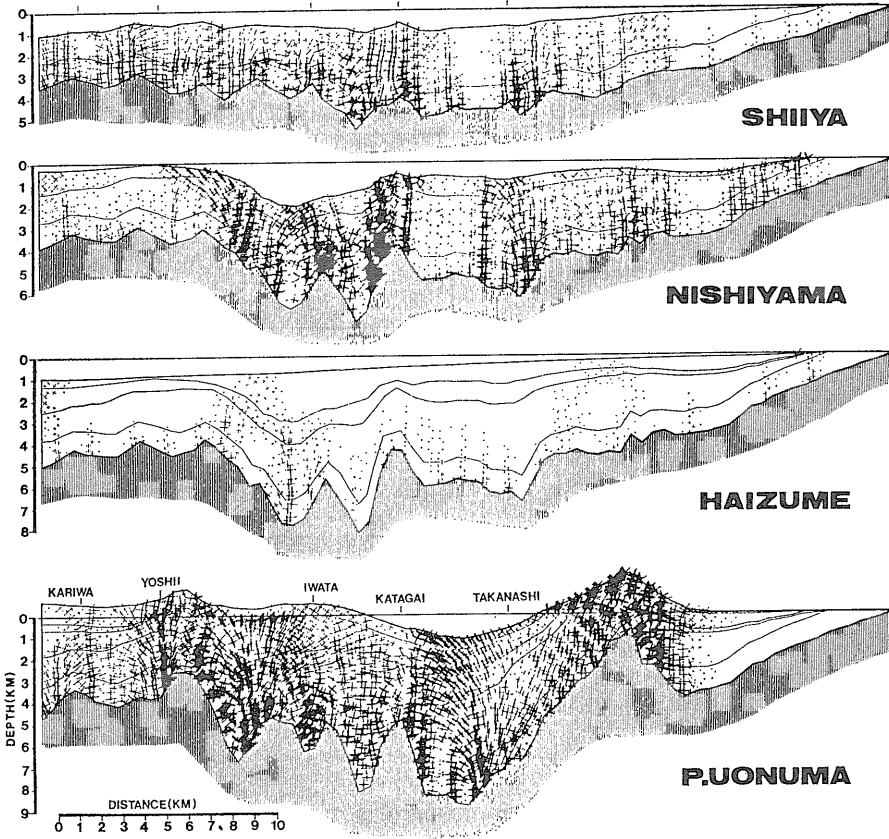
複雑な深部構造は このように比較的単純な基盤運動の繰返しで形成されたことが推定される(口絵写真2)。このようなクセをフィールド毎に知っていれば 表層構造の特性から深部の構造を推定することが可能であろう。また地層や背斜が片翼ずつ徐々に形成されてくることは 地層の埋没史や熱史 有機物の熟成史 さらに石油・天然ガスの移動・集積過程に大きな影響をもたらすものと考えられる。

B. 地熱貯留層の3次元裂か系解析

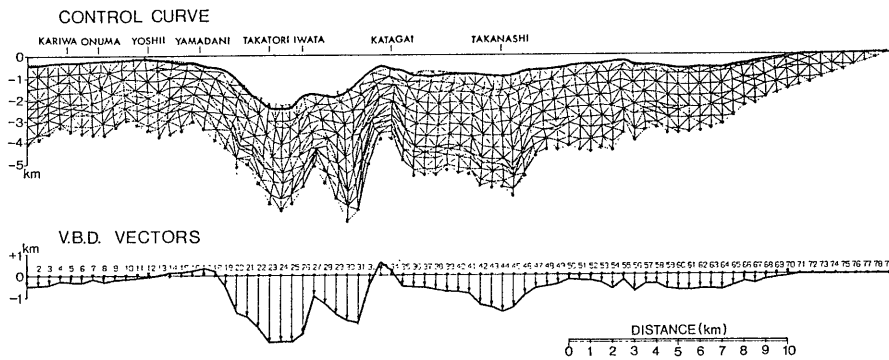
安藤ほか(1985)は 地熱資源の効果的な探査や地熱貯留層の評価において 裂かきの発達部 規模及び性状を明らかにすることは重要な課題と考え 青森県八幡平北部をモデル地域にして 本シミュレータ(3次元)による解析を行なった。西黒沢層 女川層 船川層の堆積(一部隆起)過程と現在の4つのテクトニック・ステップについて 各時代の層厚(削剝量)や現在の地層の傾斜を制御パラメータとして それぞれの時期の最適基盤変位と裂かきの分布を求めた(第8図)。

この結果 計算された各時代の裂か系の位置や方向性はこの地域における既知の情報と一致した。裂か系の位置は時代を通じて同じ場所に現れやすい。また 坑井データより得られた溢水規模と 計算で求められた歪量との間には良い相関がみられた。これらのことから本手法による地下地質構造の推定が透水性の予測などに有効であろうと結論している。

隆起域に生じる裂か系については 千葉県茂原地域の裂か系(口絵写真3.4.5)や串木野地域の鉱脈系を3次的に解析した例もあるので文献を参照して頂きたい(Morishita and Kodama, 1986)。



第5図 長岡平野の地下深部に推定される断裂分布 (Kodama, et al. 1985より)



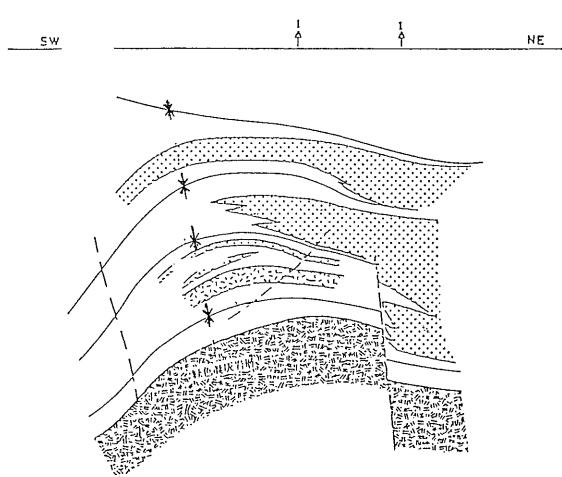
第6図 制御データ (層厚分布) と計算結果とのマッチング (上). 仮想基底変位の与え方 (下).

6. インテグレート・シミュレータ

— BATSシステムの構築 —

本シミュレータは堆積盆資源評価システムの1つとして開発中のBATS (Basin Analysis by Tectonic Simula-

tion) システムの一部として位置づけているものである。BATS システムでは本シミュレータが Tectonic Analysis Process として核部を構成し その周囲に Migration Analysis Process や Maturation Analysis Process などのシミュレータがデータを共有して連結し



第7図 南長岡・片貝深層ガス田の模式断面図 (天然ガス鉱業会編 1986)

ている。

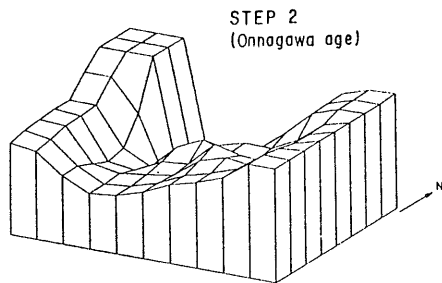
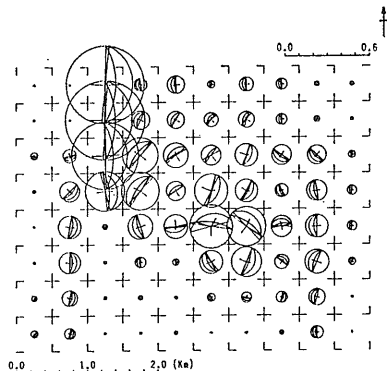
現在各国で 堆積盆中の炭化水素資源の生成 移動集積機構をシミュレートして 総合的な資源評価や探鉱に役立てようといういくつかのシステムが開発されている (Ungerer, et al., 1984; Chenet, et al., 1986; Nakayama, 1988 等). これらのシステムでは 鉱床成立における地質・化学・物理過程をモデル化して deterministic に再現しようと試みている. ただ いずれの場合も地質構造の形成過程は 比較的簡単なバックストリップ法で再現している.

これに対し BATS システムは 我が国のように複雑な構造地質の特性を考慮してテクトニックな過程をまず一義的に規定し 移動や熟成の過程はそれに支配されて進行するとの考えで解析する. まだ開発段階にあり今後大きく改良する予定であるが テクトニックな条件がどの位重要かを 予察的な実験例から示してみよう.

第9図はあるテクトニック・プロセスで地層の圧密排水と断裂形成が同時に生じたとき 断裂や地層の層状構造による透水係数の異方性により 地層圧がどの程度変化し 流速が決定されるかをシミュレートした例である. ダルシー則を用いた定常流問題として 構造解析と同じ要素を用いた有限要素法で解いた.

第9図(上)は このテクトニック・プロセスで生じた断裂系である. K_v , K_h , K_f をそれぞれ地層に垂直 平行 断裂に平行な方向の透水係数としたとき 同(中)は $K_f=K_h=K_v$ つまり 断裂や地層による異方性効果がないとき 同(下)は $K_f=K_h=10*K_v$ つまり異方性効果が顕著なときの地層圧と流速ベクトルの方向を示す. これらより 地層面や断裂帯にそって地層水が排出

1989年8月号



第8図 八幡平地熱調査地域における3次元シミュレーション. 女川時階の仮想基盤変位(下)と裂か分布(上, 上半球ステレオ投影) (安藤ほか 1985)

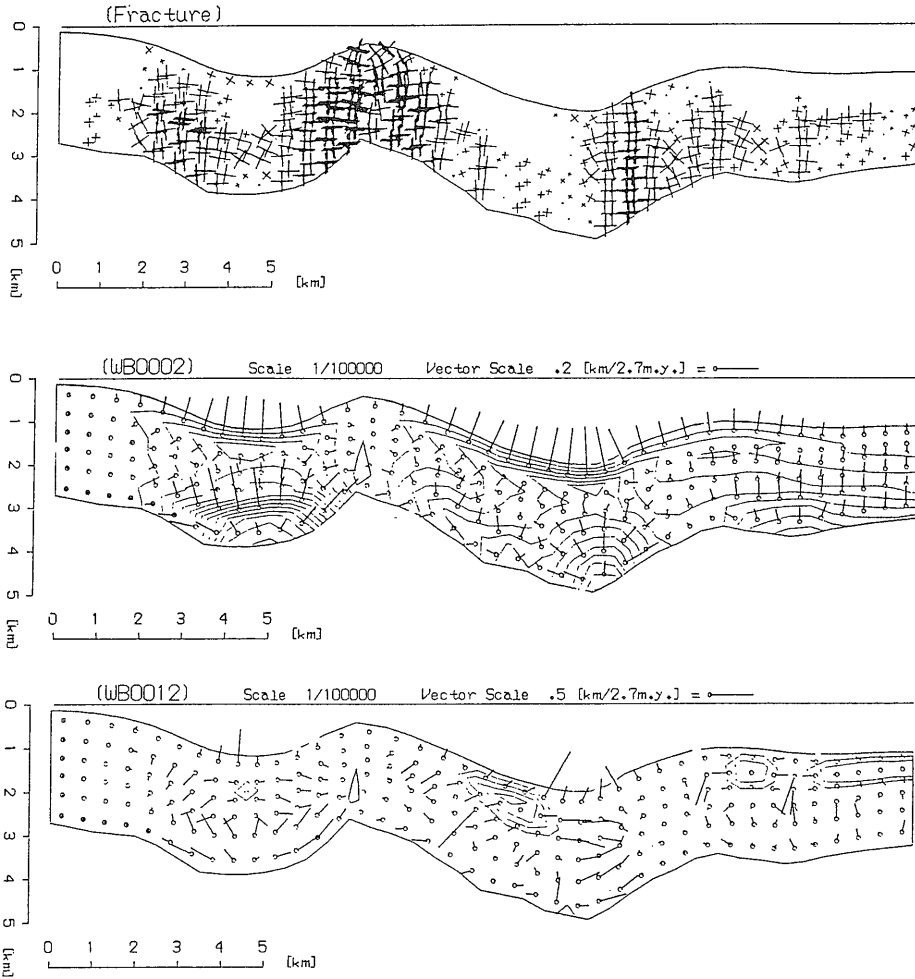
されやすいことが理解される. 深部地層水の移動機構にはさらに温度による対流等も考えなければいけないが これらは今後の課題である.

地層の埋没と地層水の移動に伴って 地層中の有機物はある期間 ある温度にさらされ熟成が進行していく. 口絵写真6は模式的な断面について 地温勾配を過去から現在まで一定 ($3.2^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) としたとき 全ての要素について TTI (Time Temperature Index) の変化を求め 地下の熟成度分布をビトリナイトの反射率 (R_o %) に換算 (小椋 1983) して 示したものである. 現在ほぼ同じ深度にある同じ時代の地層でも 埋没過程の違う部分では R_o の値が大きく異なることが分る. このような解析は 探鉱や開発に際して重要な指針を与えてくれるだろう.

インテグレートド・シミュレータの開発には さらにケロジェンのタイプ 炭化水素生成量 一次移動 水・油・ガス相での二次移動のメカニズムなど多数のファクターを考慮しなければならない. これらについては今後の課題としていきたい.

7. おわりに

このように我が国のような活動的で複雑な地質構造を



第9図

- (上) テクトニック・プロセスで生じた断裂系
- (中) $Kf=Kh=Kv$ のときの地層圧と流速ベクトル分布
- (下) $Kf=Kh=10*Kv$ のときの地層圧と流速ベクトル
 Kf, Kh, Kv については本文参照。

持つ地域で地質構造の成立ちを解釈するためには実際の調査や探査と並行してシミュレーションによる解析が不可欠であると考え、デスクサイドで使えるより簡便なシミュレータの開発が必要だろう。

引用文献

相場淳一 (1982) : 秋田・新潟油田の貯留構造の二重性。地団研専報, 24, 299-308.
 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・北沢修二郎 (1985) : 数値実験による地熱貯留層の裂か系解析の試み。地熱 22, (1), 1-15.
 Chenet etc. 1986 : THEMIS Model, a new tool for hydrocarbon exploration, integrated study of the sedimentary basins from the sedimentation to the hydrocarbon accumulation, Congreso Latinoamericano de Hidrocarburos.
 藤田至則 (1981) : 石油と構造性ガスの貯留構造におけるマグマ性隆起～陥没と島弧変動の役割。「堆積盆中の流体移動」321-333。東海大学出版会。
 小玉喜三郎・本多 進・藤田 仁・新田 潔・鈴木元 (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. 一基盤のブロックの大きさが地表変形に及ぼす影響について。地調月報, 27, 123-134.
 小玉喜三郎・龍 学明 (1984) : 仮想基盤法で復元した深部地質断面。石油 協誌, 49, 254.
 Kodama, K., Long, X. and Suzuki, Y. (1985) : Structural analysis of deep-seated volcanic rock reservoirs by tectonic simulation. ESCAP Tech. Bull., 17, 61-79.
 Morishita, Y. and Kodama, K. (1986) : Simulation analysis of the gold-quartz vein systems in the Kushikino Mine Area, Southern Kyushu, Japan. Min. Geol., 36, 475-485.
 Nakayama, K. (1987) : Hydrocarbon-Expulsion Model. AAPG Bull., 72, 808-821.
 小椋伸幸 (1983) : 石油根源岩有機物熱成度の予測—その2—。石油技協誌, 48, 341-354.
 Ungerer, Chenet, etc. 1984 : Geological and Geochemical models in oil exploration; principles and practical examples. AAPG Memoir 35, 53-78.
 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, 279 p.