

Fig. 7-5 Time contour map of the base of No.3 *Globorotalia inflata* bed and the distribution of deep sea fans of Sy-Ik unit. Original data after unpublished geological reports by Idemitsu Oil Development Co.

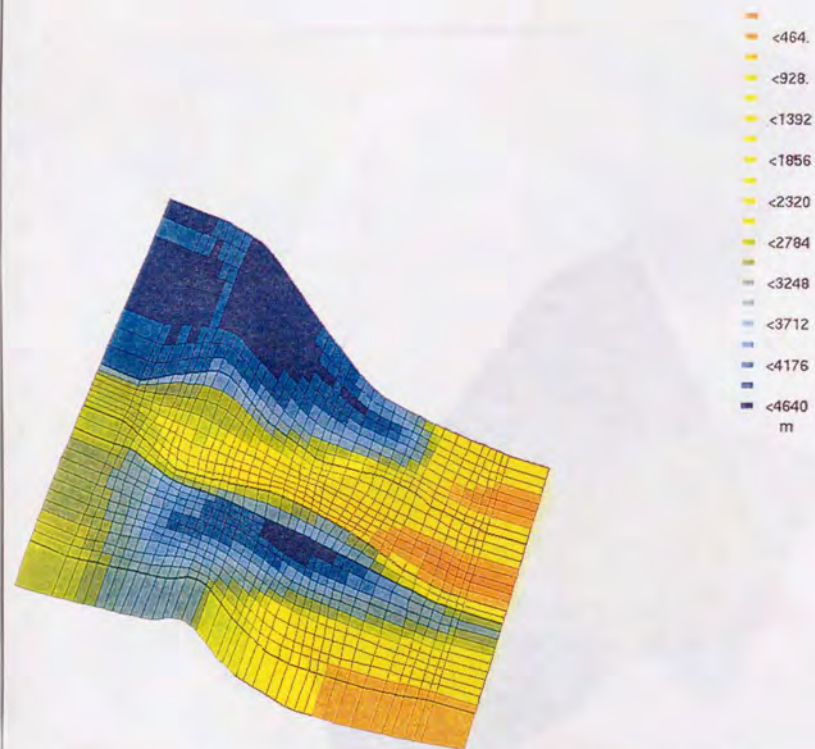


Fig. 7-6 Modelled structural map of the base of No.3 *Globorotalia inflata* bed.

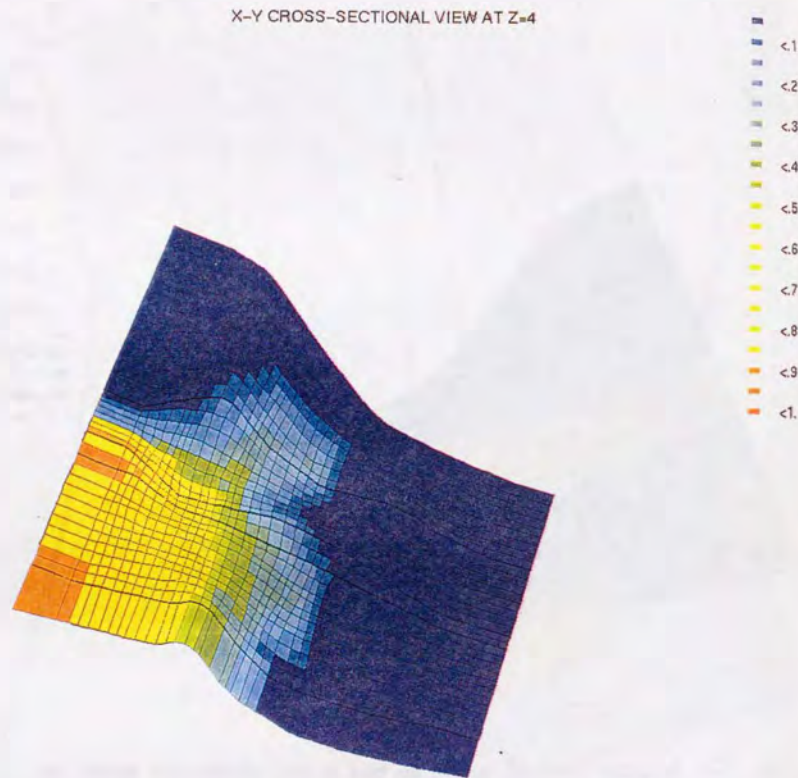


Fig. 7-7 Modelled lithology distribution of Sy-Ik unit.

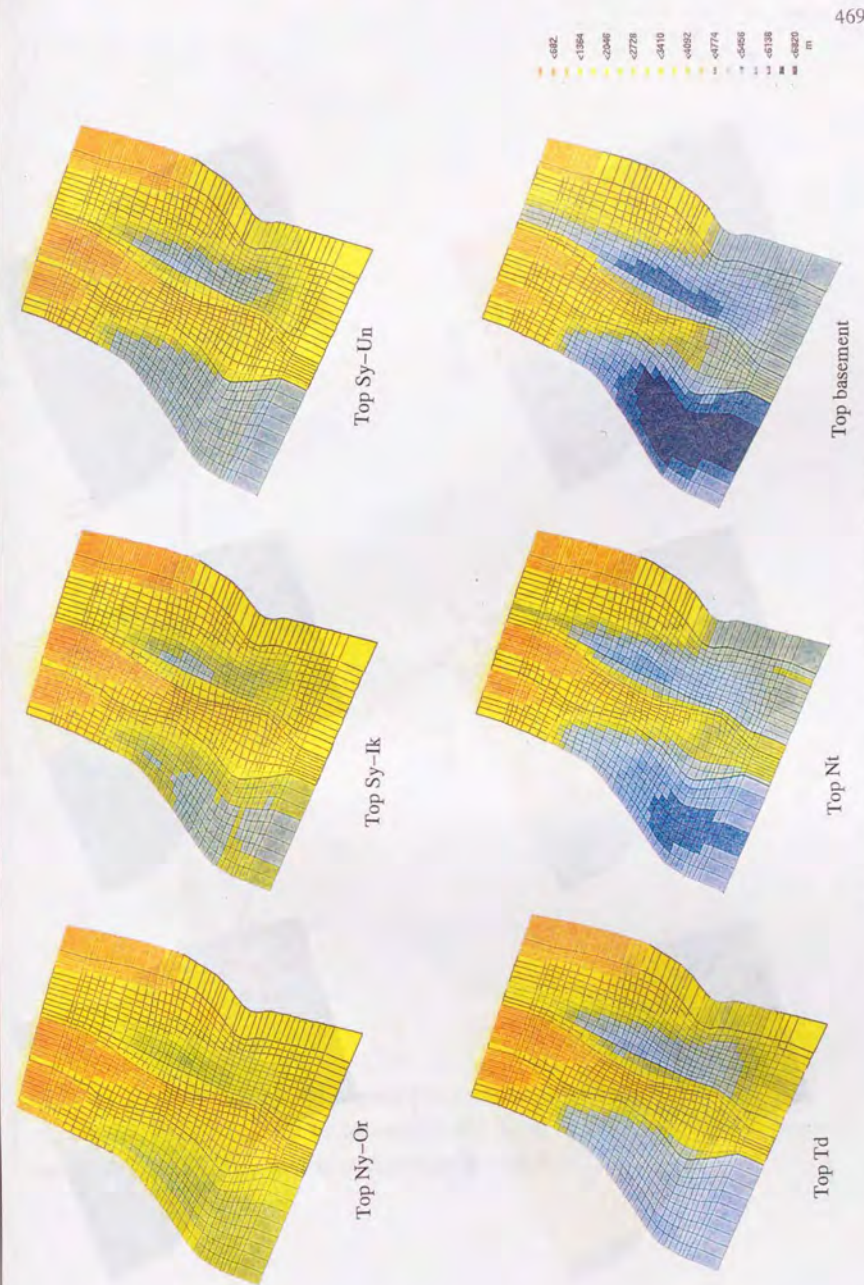


Fig. 7-8 Examples of modelled structural maps.

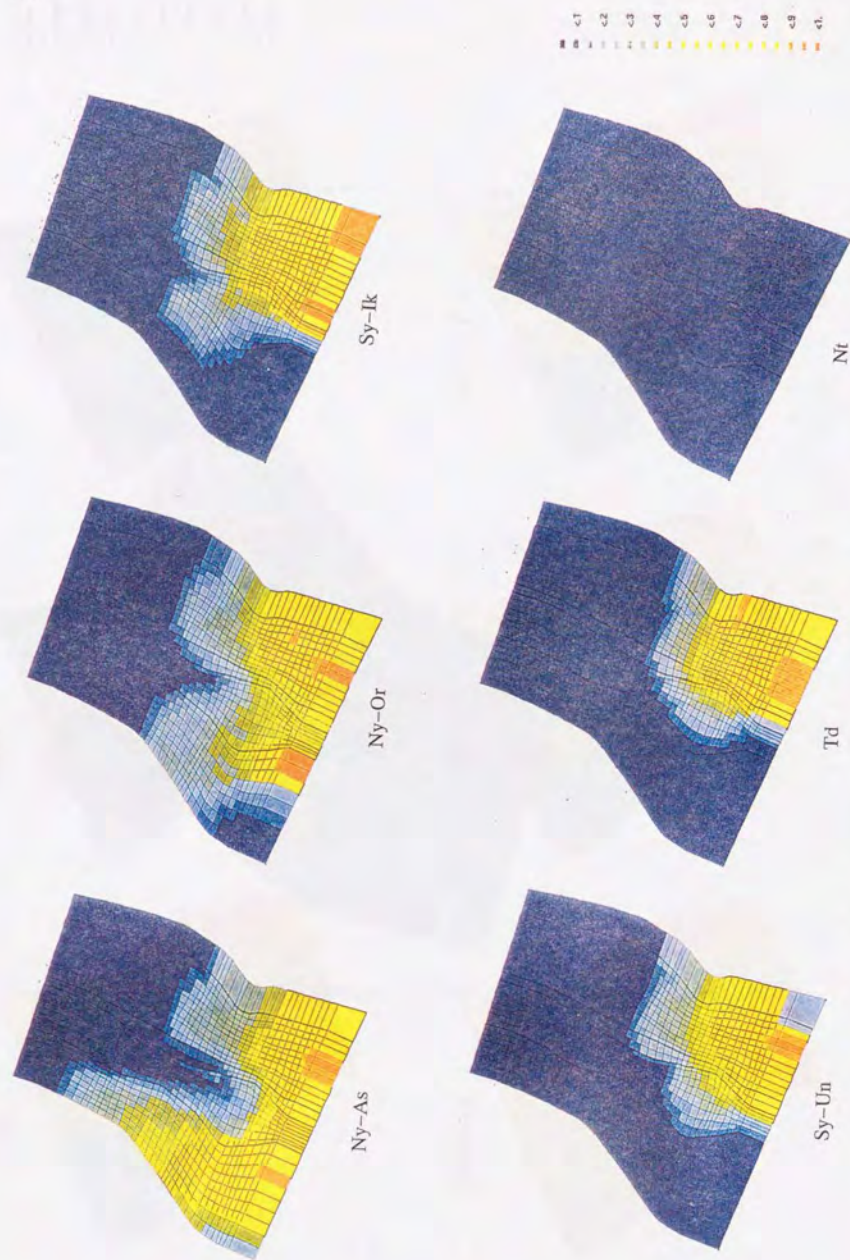


Fig. 7-9 Examples of modelled lithology distributions.

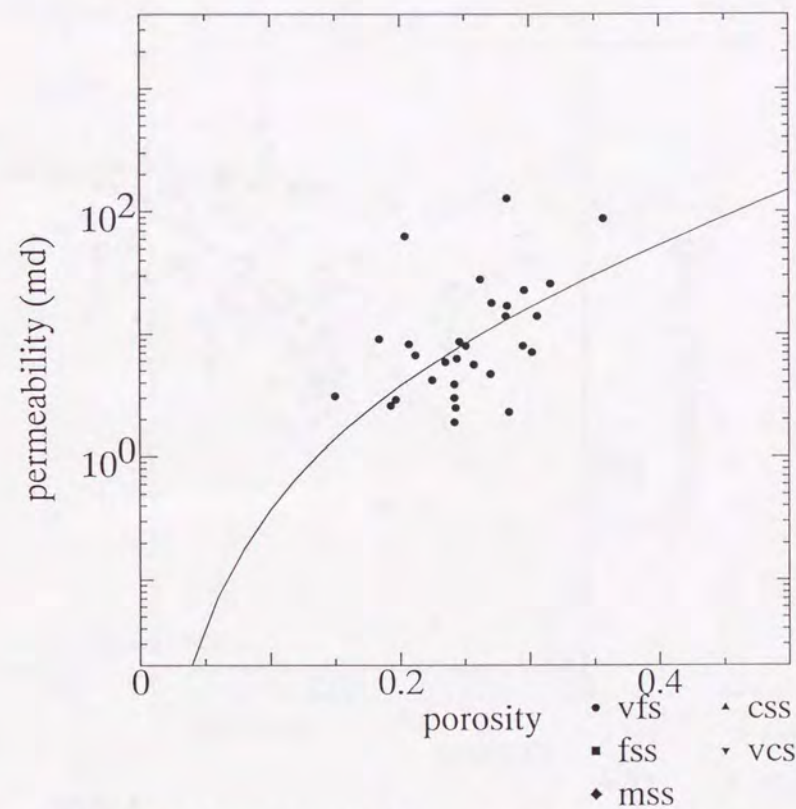


Fig. 7-10 Relationships between porosity and permeability of sandstones. Data after unpublished geological reports by Idemitsu Oil Development Co. Lines indicate porosity-permeability relationships used in BASIN3D2P for this study.

(a) Very fine sandstone.

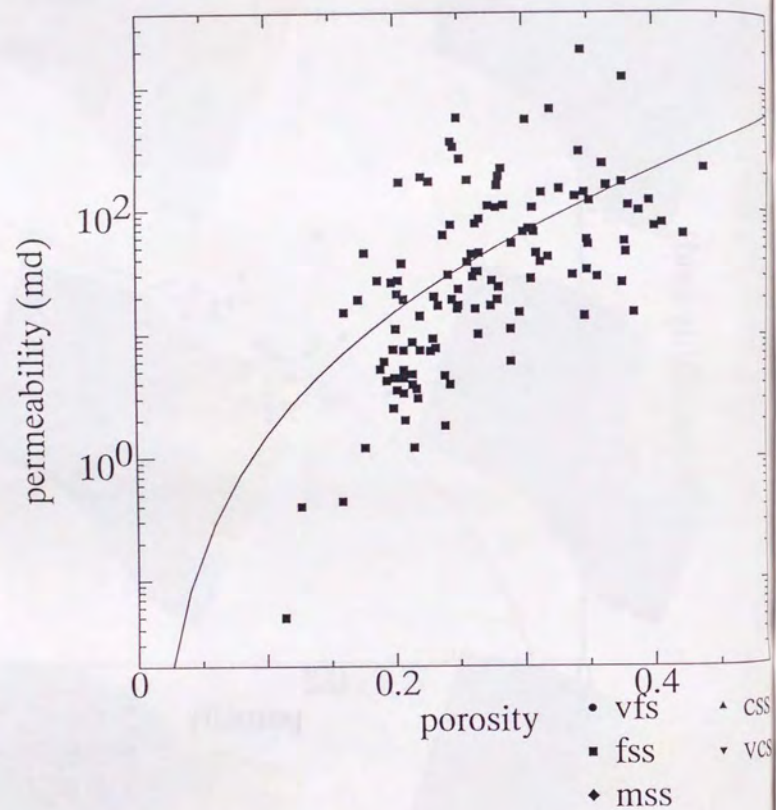


Fig. 7-10 Continued.
(b) Fine sandstone.

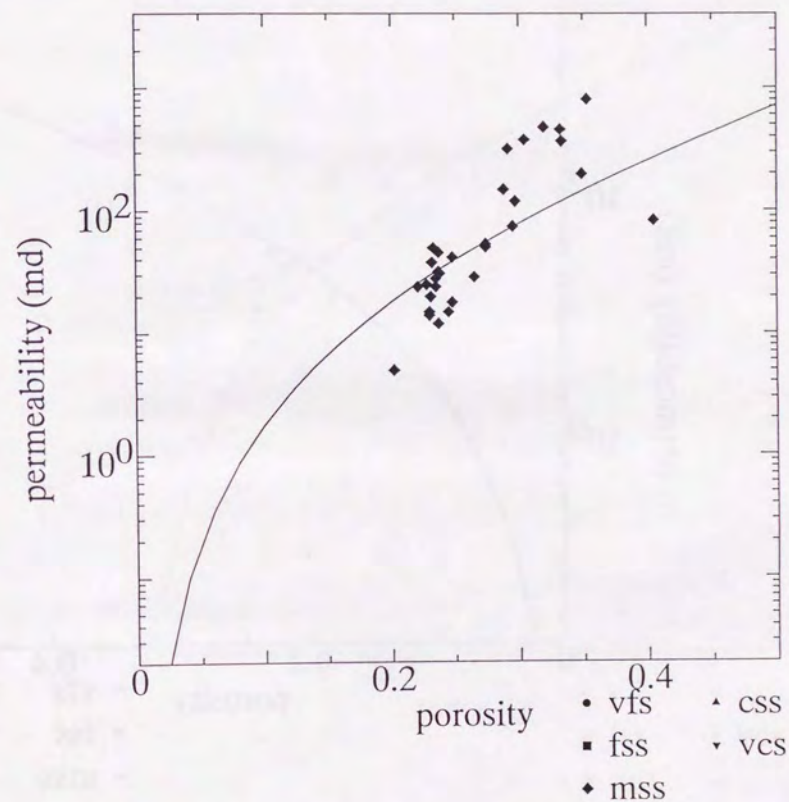


Fig. 7-10 Continued.
(c) Medium sandstone.

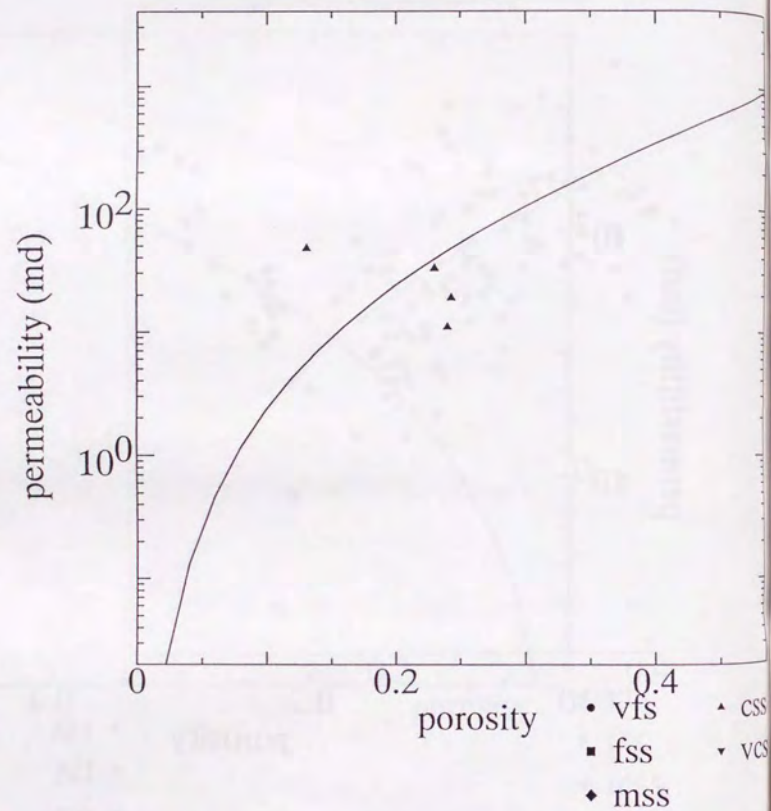


Fig. 7-10 Continued.
(d) Coarse sandstone.

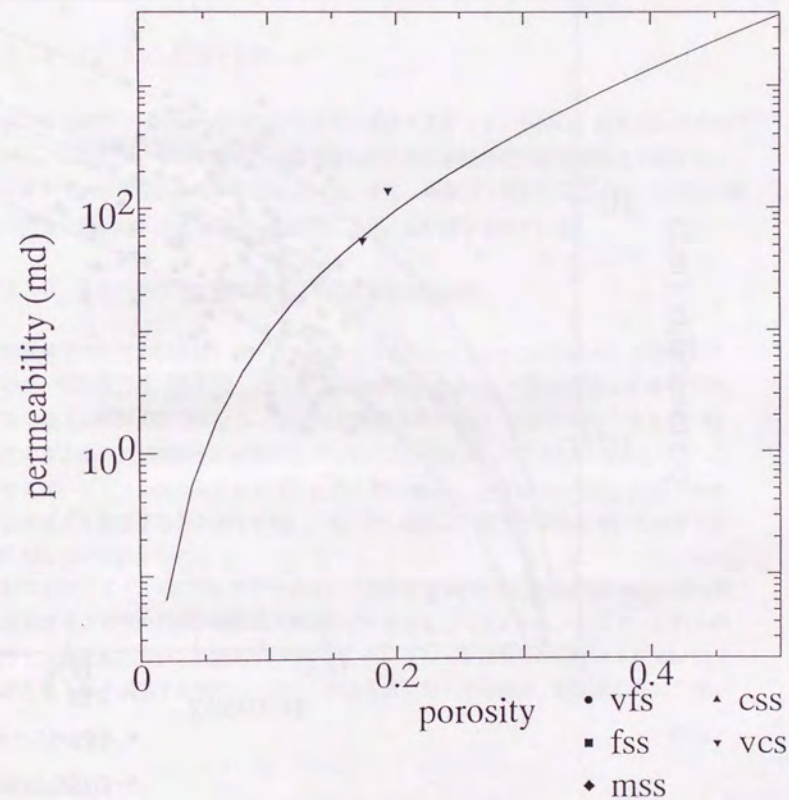


Fig. 7-10 Continued.
(e) Very coarse sandstone.

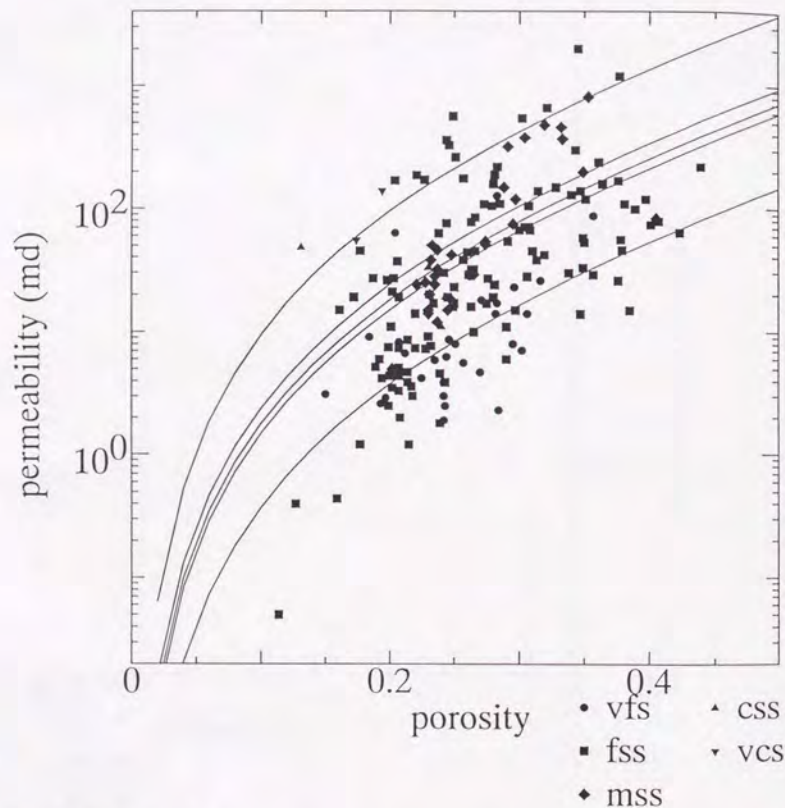


Fig. 7-10 Continued.

(f) Plots of all sandstone data and the models.

新潟堆積盆地は、その大部分は、比較的深い海底で堆積が進行したことが底生有孔虫群集のデータからわかっている。また、日本海の海水の特徴として、深さ200ないし300mから海底までは、非常に均質な水温の海水が分布していることが知られており、その温度は、0.0から0.5°Cである(蒲生, 1995)。従って、堆積開始後、灰爪層の堆積が終了するまでは、海底面温度として0.25°Cを採用し、また、魚沼層群堆積時の海底面温度は現在の温度と同様であるとして、出光石油開発株式会社所有の未公表データより10°Cとしている。

7. 2. 2. 4 ケロジェンに関するデータ

新潟および秋田地域の未熟成石油根源岩の石油生成カイネティック特性は、鈴木ほか(1995)に示されている。ここでは、その中から、今回考察した領域に比較的近い新津付近の下部寺泊層の活性化エネルギー分布を用いている(Fig. 7-11)。また、泥質岩中の有機炭素量は、出光石油株式会社所有の未公表坑井データを用い、各層準ごとに、その値を求めている。

7. 2. 2. 5 圧密平衡状態での圧密方程式と各地層の間隙率

圧密平衡状態での圧密方程式は、各々の岩質について、静水圧分布の領域のデータを用いて決定するのが一般的な方法である(3. 6. 2. 2節参照)。しかし、今回対象とした地域では、DSTによる地層圧力の計測結果(Fig. 7-12)(出光石油開発株式会社, 未公表試料)を見ると、約1000m程度の深さから過剰間隙水圧が発生していることがわかる。今回検討する地域では、この深度よりも浅い部分での間隙率計測がなされていないために、上述の方法では、圧密平衡状態での圧密方程式を決定することができない。そこで、今回は、以下の方法を用いて圧密平衡状態での圧密方程式を決定した。

圧密方程式を決定するために用いたデータは、石油技術協会(1973)とMagara(1968)にのっている新潟堆積盆地の多数の坑井の間隙率と深度のデータ(Fig. 7-13)である。ここで、これらのデータのうち、各深度において間隙率が小さいところにプロットされているデータを用いて、このデータを最も良く表現する間隙率と深度の関係の求めた。その結果、泥質岩に関しては、

$$1/\phi = 1/0.7 + 2.0 \times 10^{-3} z \quad (7.1)$$

となり、砂岩に関しては、

$$\phi = 0.55 \exp(-3.98 \times 10^{-4} z) \quad (7.2)$$

となった。ここに、 ϕ : 間隙率、 z : 圧密平衡状態での埋没深度、である。

各地層での間隙率は、コアデータもしくは、電気検層データを用いて求めるのが一般的であるが、コアデータでは、考慮している層準全体としての平均的な間隙率を求めるにはデータが

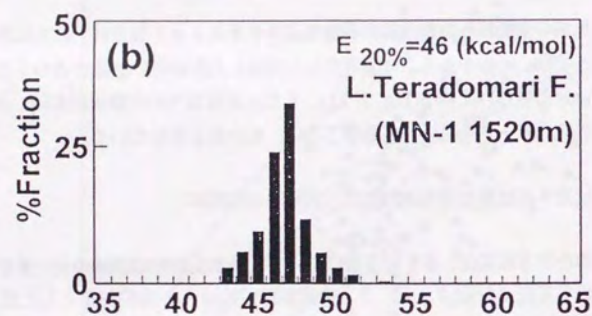


Fig. 7-11 Fraction of generation potential versus activation energy obtained by open system pyrolysis for typical immature potential source rocks from the Niigata Basin. The frequency factor is assumed to be $1 \times 10^{13} (1/s)$ for the optimization (Suzuki et al., 1995).

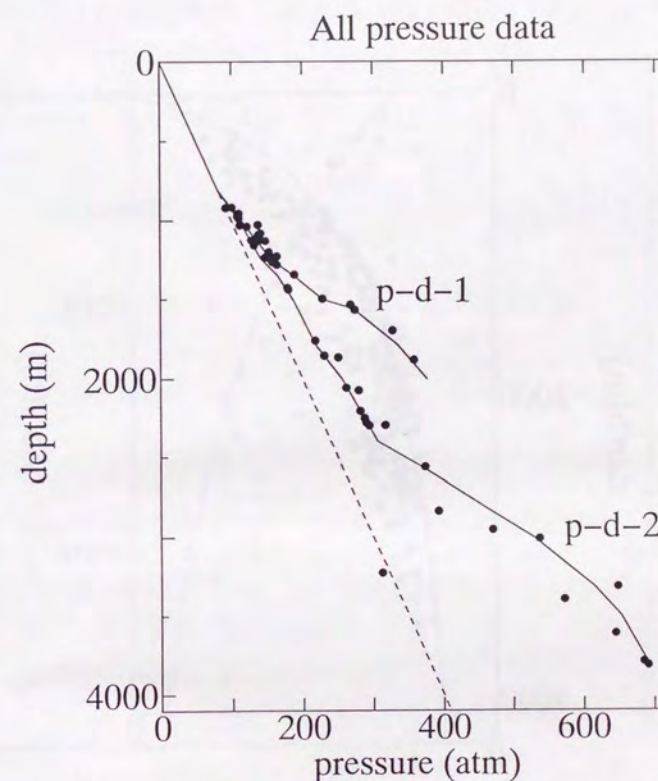


Fig. 7-12 Relationships between pore pressure and depth in the Niigata Basin. Dots indicate measured pore pressure (Idemitsu Oil Development Co., unpublished geological reports), dotted line indicates hydrostatic pressure. Solid lines indicate models of pore pressure–depth relationship in the studied area. See text for details.

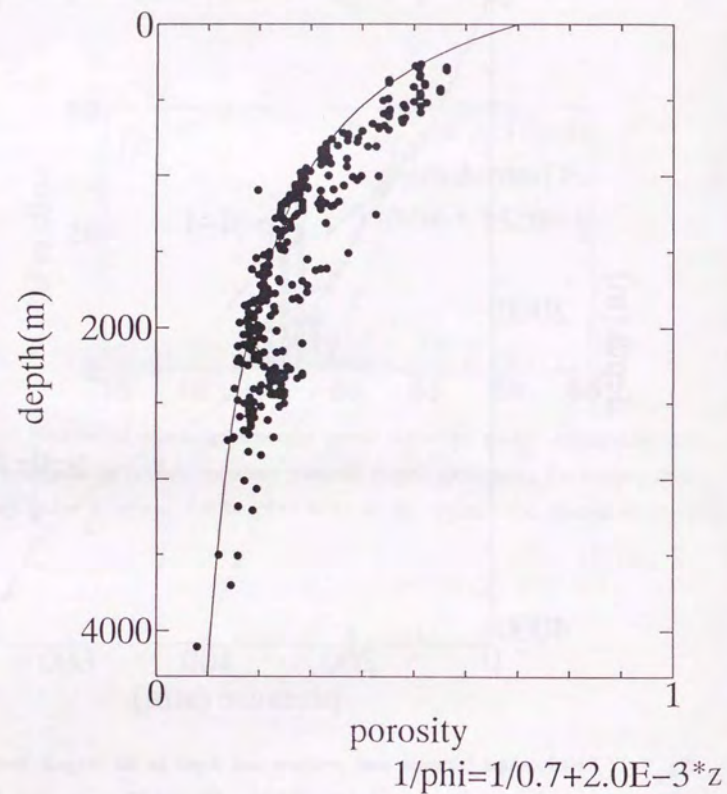


Fig. 7-13 Relationships between porosity and depth in the Niigata Basin. Dots indicate measured porosity (Magara, 1968; The Japanese Association for Petroleum Technology, 1973) and lines indicate porosity-depth relationships at compaction equilibrium used in BASIN3D2P for this study.

(a) For mudstone.

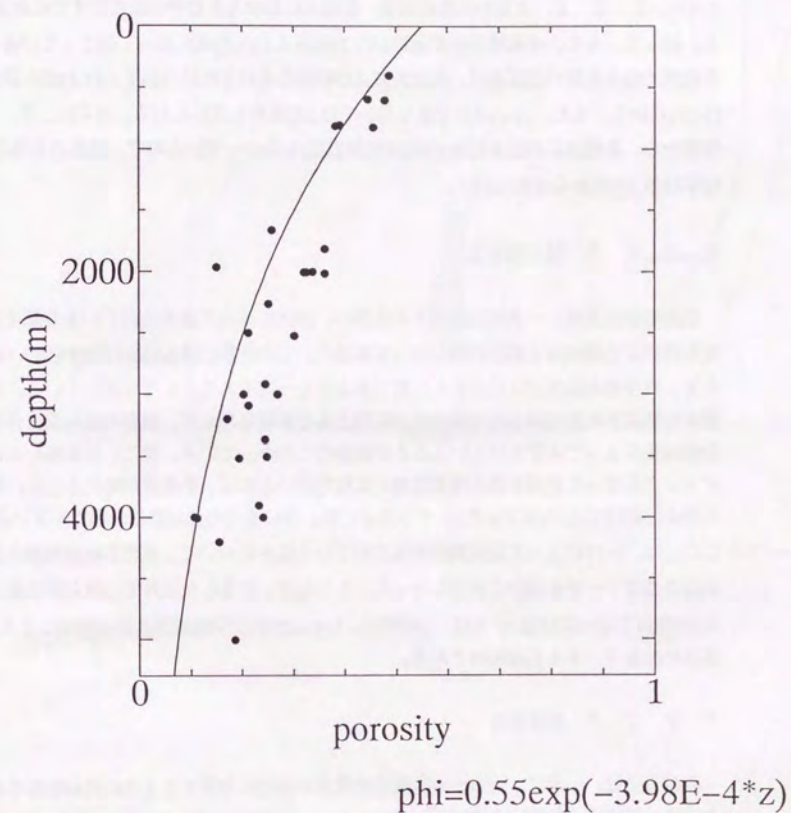


Fig. 7-13 Continued.

(b) For sandstone.

少ない。また、本地域の砂岩は、一般に凝灰質であるために電気検層データの解析結果として得られた間隙率の値の評価が非常に難しいのが実情である(辻行介, 1995私信)。従って、今回は、以下の方法で各地点・各層準の間隙率を推定した。DSTによる間隙水圧と深度の関係は、坑井の位置によって2つのパターンに分けることが可能である(Fig. 7-12)。従って、各地点の間隙水圧の深度方向の分布を、その位置に応じてFig. 7-12に示されるどちらかに決定した(Fig. 7-14)。7. 2. 2. 2節の作業の結果、各地点における各層準の深度はすでに決定されている。従って、もし、本地域の圧密過程が(7.1)式および(7.2)式に従って起こっているとすれば、各深度での各岩質の間隙率は、泥質岩および砂岩のそれぞれについて、(7.1)式の定数を用いて(3.29)式から、また、(7.2)式の定数を用いて(3.28)式から求められる。さらに、7. 2. 2節の作業から、各地点における岩質分布(砂岩泥岩比)もわかっているので、実際の各地点における間隙率は(3.32)式から求められる。

7. 2. 2. 6 現在熱流量

現在の熱流量は、一次元坑井モデルを用い、DSTによって求められている各深度における温度を再現する熱流量を試行錯誤によって求めた。この計算にはBASIN3D2Pを用いている。このとき、計算時の熱流量は設定された値で過去から一定であるとして計算している。ところで、過去の熱流量の変化は現在の温度分布にほとんど影響を与えず、現在の地層温度分布は、現在の熱流量によって決定されていることが経験的にわかっている。特に、日本海のようにリフティングに伴って形成された堆積盆地で比較的若いものは、熱流量が時代とともに減少していくのが一般的であり(次節参照)、その場合には、特に過去の熱流量の影響は小さいようである。ここでは、DSTによって温度測定がなされている坑井について、出光石油開発株式会社所有の未公表温度データを用いて検討を行った。その結果、計算した坑井での現在熱流量は1.42hfUから1.58hfUとなった(Fig. 7-16)。この値は、Uyeda(1972)や地質調査所(1992)による新潟沖の現在熱流量データとも調和的である。

7. 2. 2. 7 熱流量史

熱流量史は、一般に、何らかの有機物熟成度を適切に再現するように試行錯誤を繰り返すことによって求められている(例えば、Waples et al., 1992)。BASIN3D2Pでもこのような手法を用いて熱流量史を決定することを目的として、Easy%Ro法(Sweeney and Burnham, 1990)を採用してビトリナイト反射率の計算ができるようにしている(3. 3. 2. 2節)。現在熱流量は前節の方法では1.42hfUから1.58hfUと求められているので、このデータを拘束条件としてEasy%Ro法を用いてビトリナイト反射率の計算を行った(Fig. 7-16)。しかし、仮に、七谷層堆積時の熱流量が0hfUであったとし、時間と共に線形に熱流量が増加して現在熱流量になったと



Fig. 7-14 Zones of different pore pressure-depth relationships shown in Fig. 7-12. Hatched area indicates the zone modelled by p-d-1 relationship in Fig. 7-12 and remainder the zone modelled by p-d-2. Red lines indicate modelled faults at the Nanatani Formation.

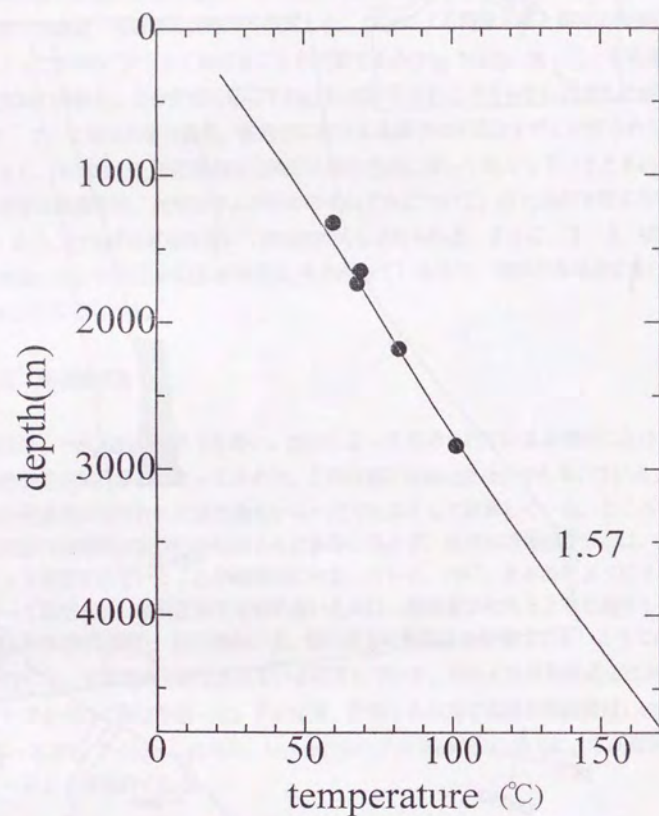


Fig. 7-15 Comparison between calculated present temperature and measured ones. Dots indicate measured temperature (Idemitsu Oil Development Co., unpublished geological reports) and the line indicates calculated results. Basement heat flow is assumed to be constant. The value of the heat flow used are indicated in the figures.

(a) Well No. 2.

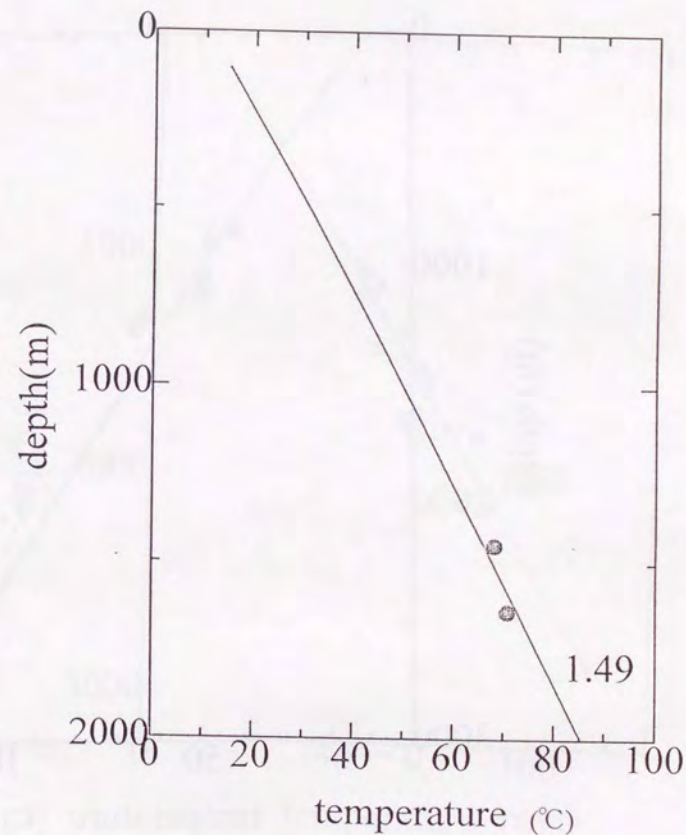


Fig. 7-15 Continued.

(b) Well No. 6.

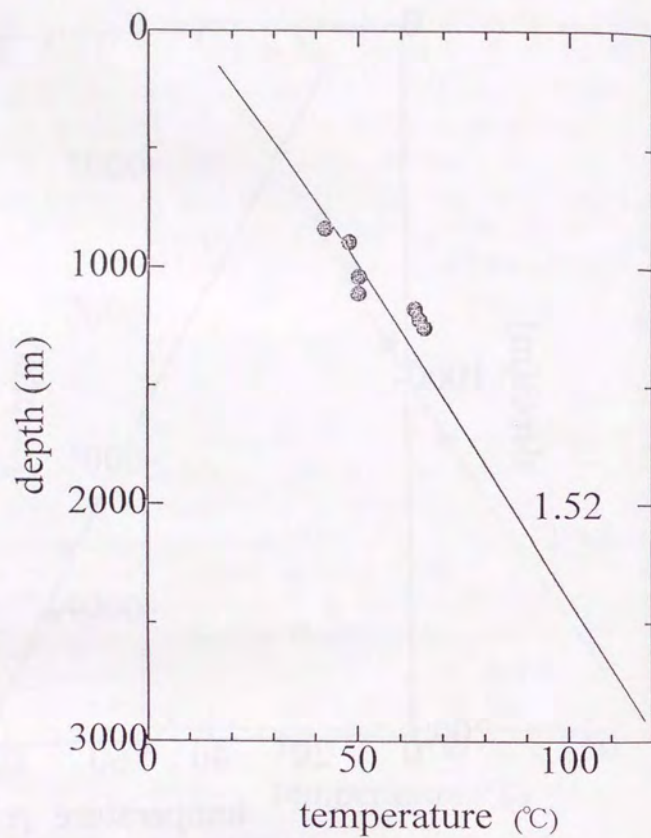


Fig. 7-15 Continued.
(c) Well No. 7.

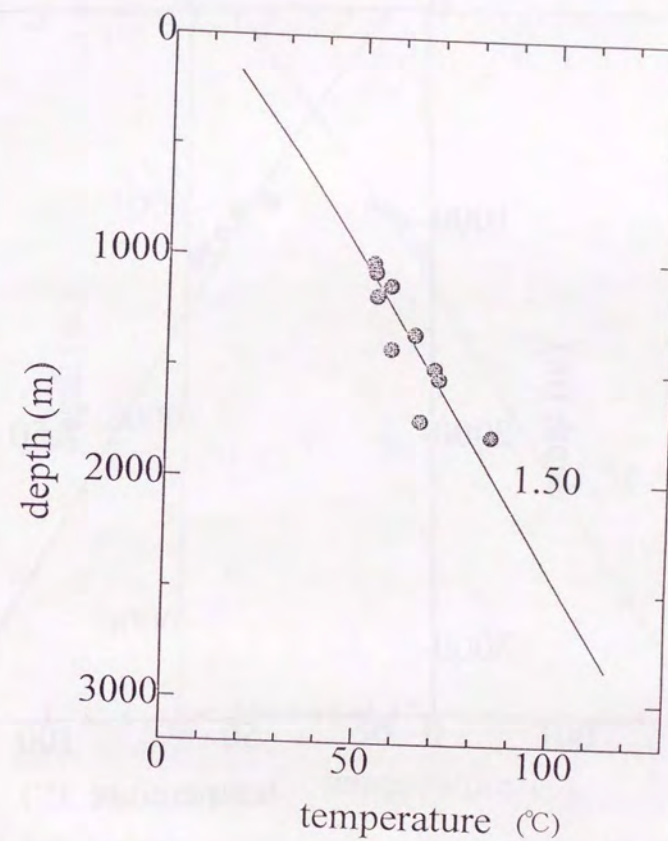


Fig. 7-15 Continued.
(d) Well No. 8.

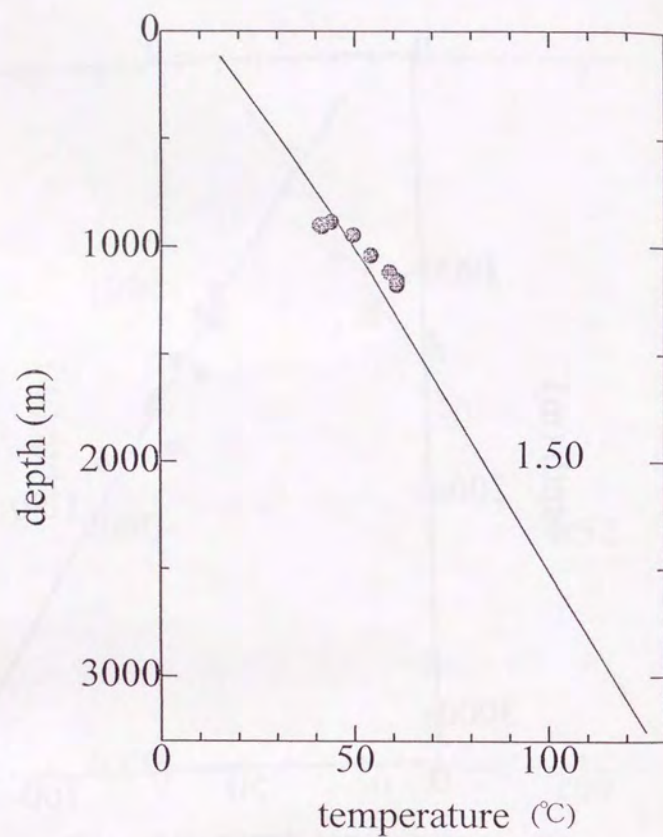


Fig. 7-15 Continued.
(e) Well No. 9.

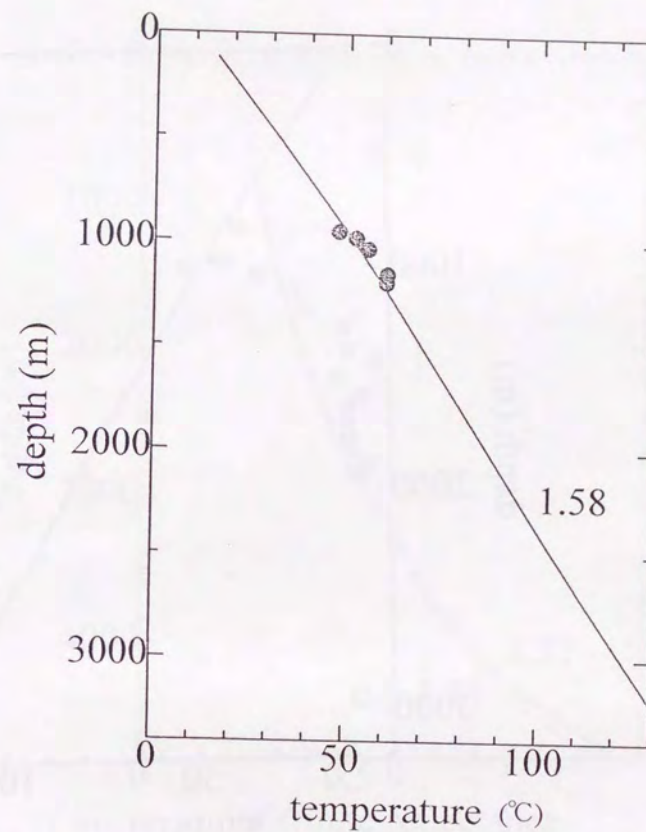


Fig. 7-15 Continued.
(f) Well No. 10.

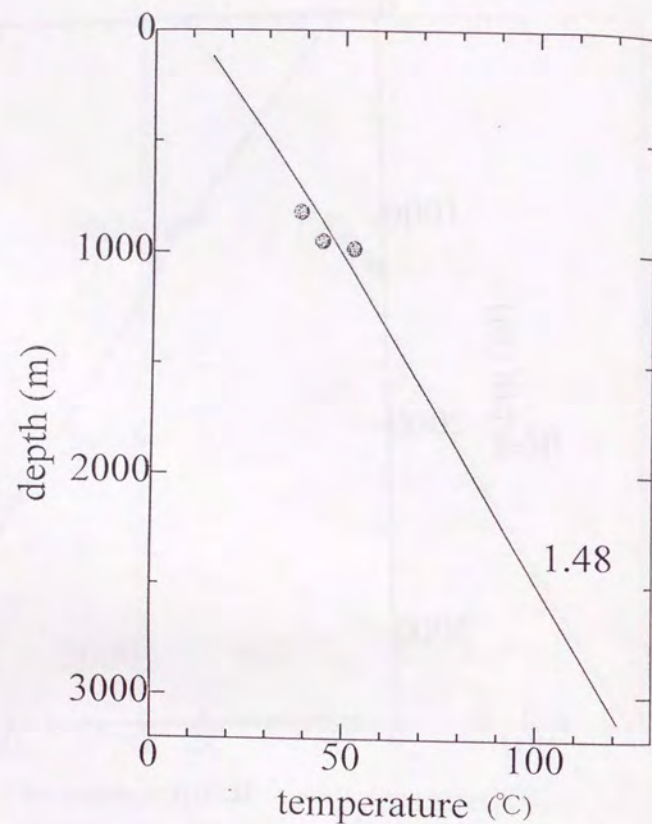


Fig. 7-15 Continued.
(g) Well No. 11.

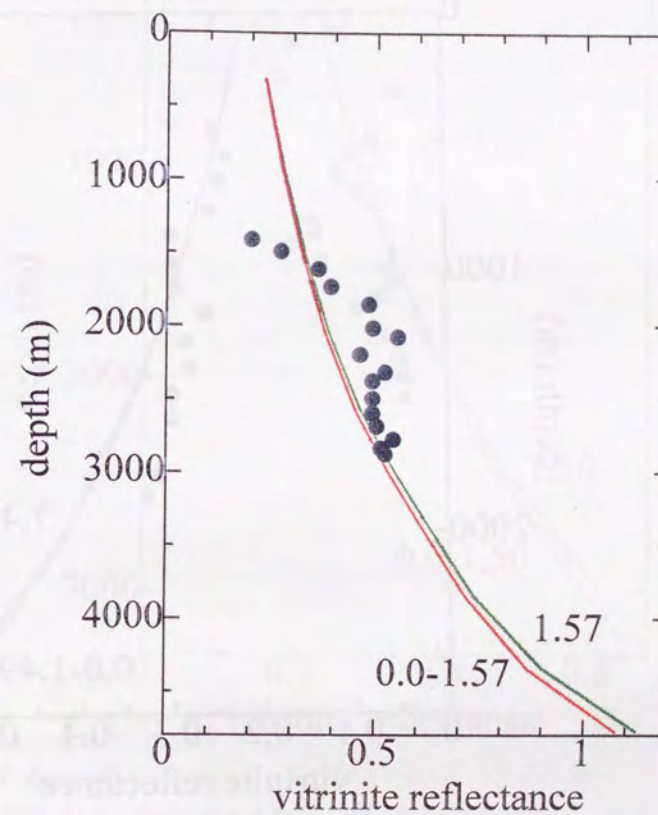


Fig. 7-16 Comparison between calculated vitrinite reflectance and measured ones. Dots indicate measured vitrinite reflectance (Idemitsu Oil Development Co., unpublished geological reports) and the line indicates calculated results.

(a) Well No. 2. Basement heat flow is assumed to be constant at 1.57hfu (green line) and to be linearly increased from 0.0hfu at the initial deposition to 1.57hfu at present (red line).

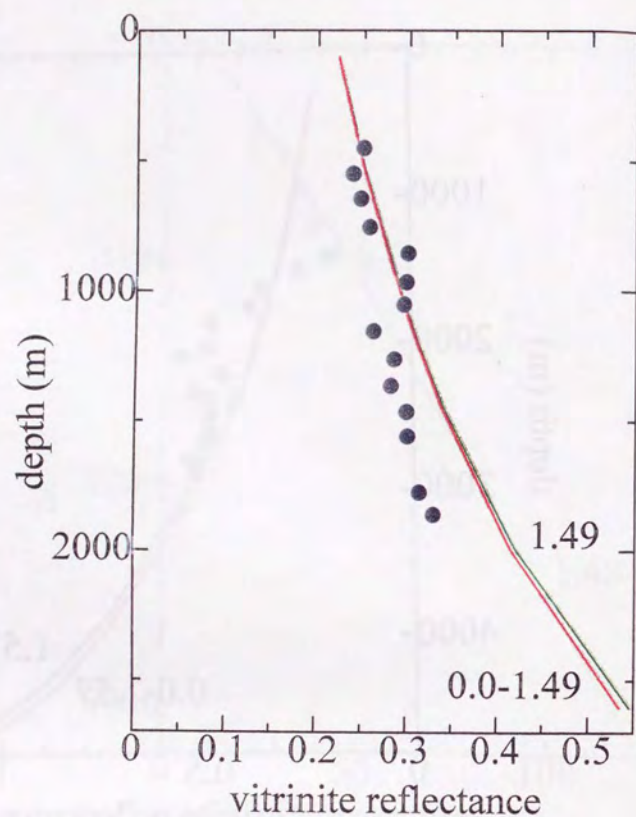


Fig. 7-16 Continued.

(b) Well No. 6. Basement heat flow is assumed to be constant at 1.49 hfu (green line) and to be linearly increased from 0.0 hfu at the initial deposition to 1.49 hfu at present (red line).

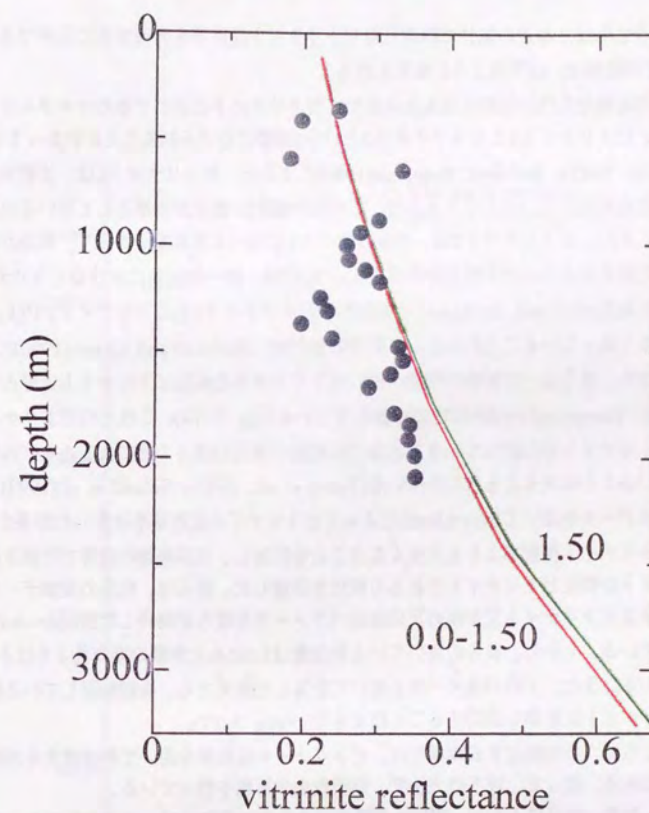


Fig. 7-16 Continued.

(c) Well No. 9. Basement heat flow is assumed to be constant at 1.50 hfu (green line) and to be linearly increased from 0.0 hfu at the initial deposition to 1.50 hfu at present (red line).

した場合にもほとんどの坑井で計測したビトリナイト反射率を再現することができない(Fig. 7-16)。この理由は、以下のように考えられる。

最近の石油地化学的検討によると今までにビトリナイトとされてきたマセラルは、一種類ではなく、ビトリナイト1とビトリナイト2という2種類に分けられることがわかってきた(Buiskool Toxopeus, 1983)。Buiskool Toxopeus(1983)によると、ビトリナイト1は、比較的水素原子が少なく蛍光を発しないビトリナイトで、これが一般的に熟成度指標として用いられてきたものである。また、ビトリナイト2は、ビトリナイト1と比べて水素原子が多く、熟成が進むにつれて蛍光を発するようになる場合がある。Fig. 7-17は、同一の坑井におけるビトリナイト反射率の変化である(Buiskool Toxopeus, 1983)が、ビトリナイト1とビトリナイト2では、反射率の変化が大きく違っていることがわかる。同様の検討は、Buchardt and Lewan(1990)によってもなされており、彼らは、反射率の増加が遅いビトリナイトを抑圧ビトリナイトと呼んではいるが、Buiskool Toxopeus(1983)と同様の結論を得ている(Fig. 7-18)。これらのビトリナイトの違いは、ビトリナイトを形成しているもとの植物の種類が違ふことによってもゲル化の過程が違っていることによっても言われている(Tissot et al., 1987)。Suzuki et al.(1993)は、新潟平野の坑井データを用いてEasy%Ro法によってビトリナイト反射率を計算した結果が実際の測定したビトリナイト反射率よりも大きくなることを指摘し、日本海側の坑井で計測されているビトリナイトが抑圧ビトリナイトである可能性を示唆した。彼らは、坑井の実測データを最も良く説明するビトリナイト反射率の反応論的パラメータを彼らが開発したSimple-Ro法に基づいて求めている。しかし、彼らの用いている熱流量は1.08hfと実際の熱流量よりはかなり小さくなっている。また、そのパラメータを用いて計算した結果でも、今回検討している領域の坑井のビトリナイト反射率を説明することはできない(Fig. 7-19)。

このように、今回検討する地域では、ビトリナイト反射率を用いて熱流量史を再現することは困難である。従って、以下の方法で、熱流量史の再現を行っている。

山路・佐藤(1989)によると、東北本州弧の日本海側の堆積盆は、中期中新世のリフティングにもなって形成されたものであるとされている。彼らは、McKenzie(1978)のモデルを用い、地質学的な検討から得られたパラメータを用いて、東北日本弧の伸展係数 β を推定している。その結果、地質学的な検討から得られる β の値は1.7から2.3と見られた。McKenzie(1978)のモデルでは、リフティングに伴う基盤上限での熱流量の計算を行うことが可能である。ここでは、山路・佐藤(1989)の用いている日本海側のリフティングを計算したときのパラメータとMcKenzie(1978)に用いられているパラメータから、現在熱流量を得るために必要な伸展係数 β を求めてみた。McKenzie(1978)のモデルは以下のようなものである(Fig. 7-20)。時間 $t=0$ の時に、ある基準長さを持っている大陸リソスフェアが β の長さに延ばされたとする。そのために温度の高いアセノスフェアがいたスペースを埋めるために上昇する。この結果として起こる温度の上昇はその後定常状態に移り変わっていき、その過程で温度が下がることによる沈降が起こる。この間には、アシソスタシーが成り立っているとしている。この場合、リフティングが

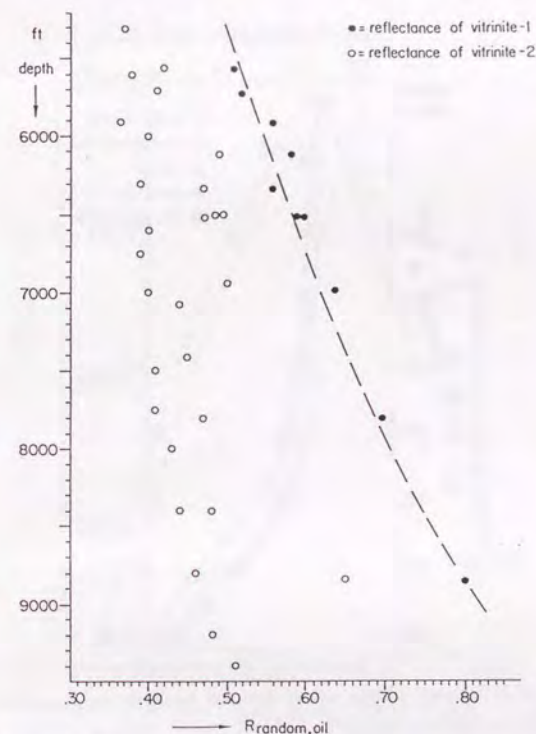


Fig. 7-17 A well-plot showing vitrinite-1 and vitrinite-2 reflectance values of a cutting samples with increasing depth (Buiskool Toxopeus, 1983).

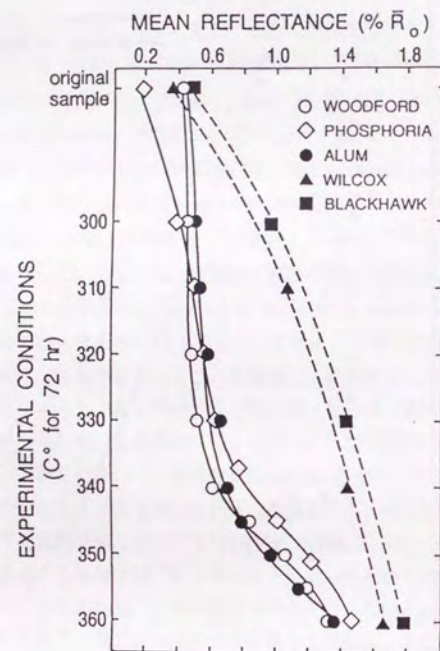


Fig. 7-18 Mean reflectance values versus hydrous pyrolysis temperatures at which aliquot of Woodford Shale, Phosphoria Retort Shale, Alum Shale, Wilcox Lignite, and Blackhawk Coal were heated for 72 hours. Dashed lines represent coal-vitrinite pathways and solid lines represent suppressed-vitrinite pathways (Buchardt and Lewan, 1990).

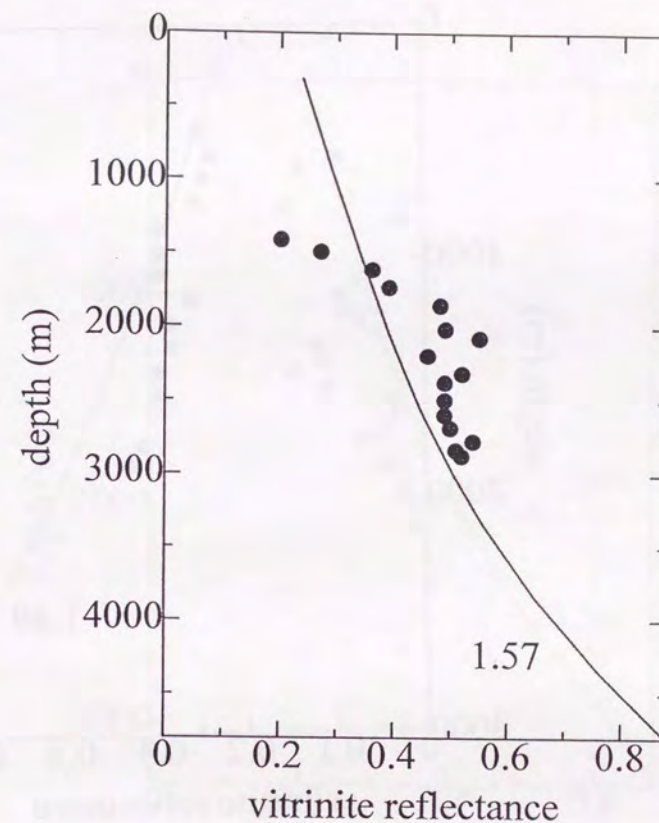


Fig. 7-19 Comparison between calculated vitrinite reflectance using Simple-Ro model (Suzuki et al., 1993) and measured ones. Dots indicate measured vitrinite reflectance (Idemitsu Oil Development Co., unpublished geological reports) and the line indicates calculated results. Basement heat flow is assumed to be constant. The value of the heat flow used are indicated in the figures.

(a) Well No. 2.

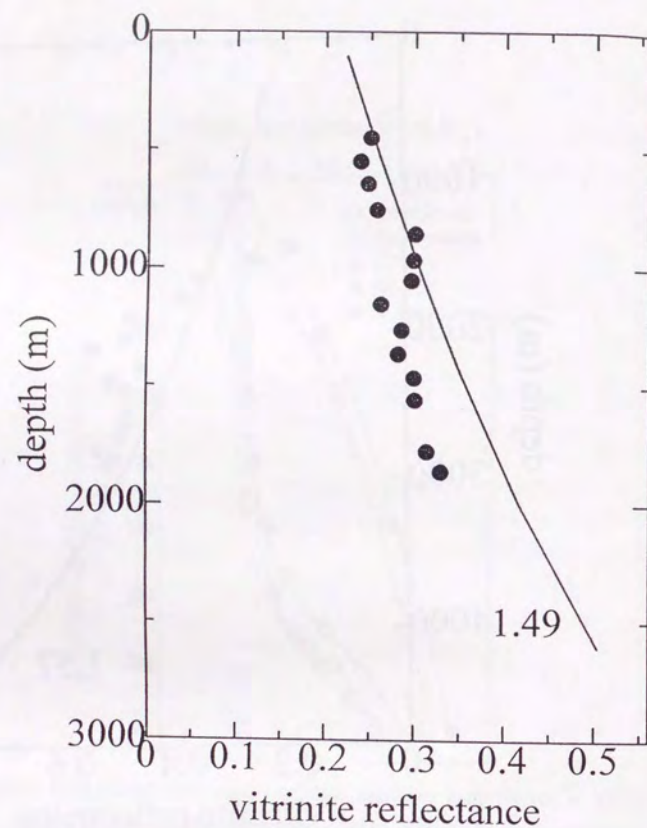


Fig. 7-19 Continued.
(b) Well No. 6.

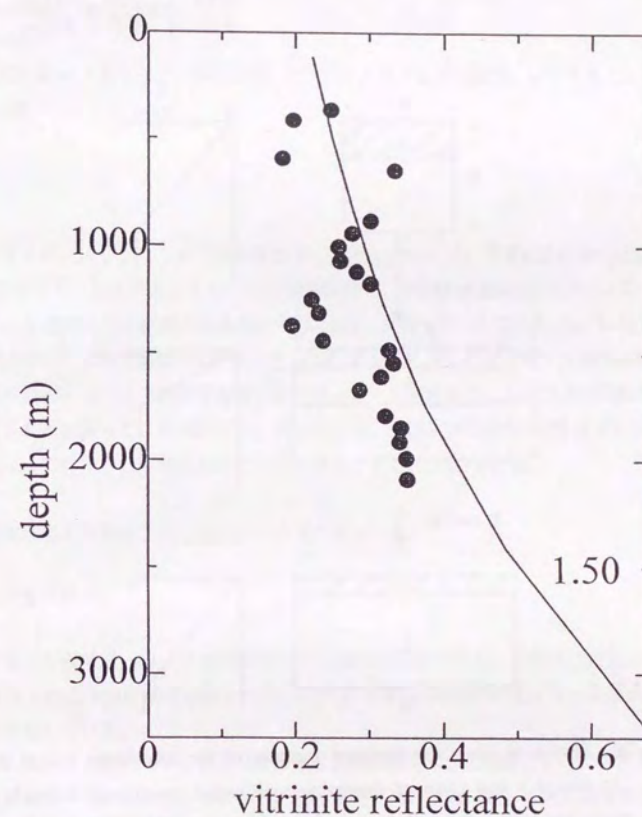


Fig. 7-19 Continued.
(c) Well No. 9.

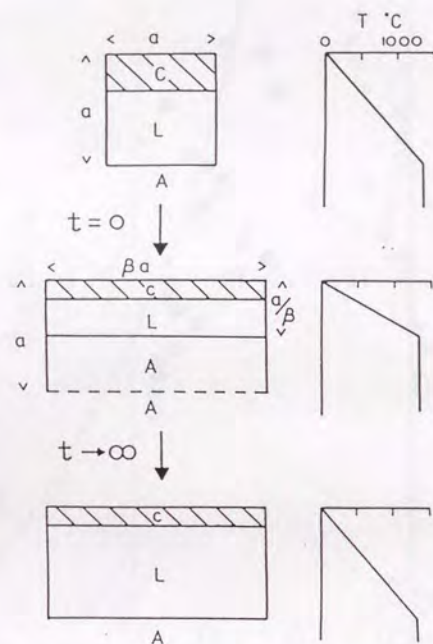


Fig. 7-20 Sketch to show the principal features of the subsidence model (McKenzie, 1978). At time $t = 0$ a piece of thermally equilibrated continental lithosphere is extended by β . Since the temperature of the material remains unchanged during the extension, isostatic compensation causes upwelling of hot asthenosphere. Cooling of this hot material produces subsidence as the temperature perturbation decays. Continental crust is assumed to be conserved during extension and its radioactivity neglected. The discontinuity in the temperature gradient between the lithosphere and the asthenosphere is an artifact of the model which could be removed by considering the details of the convective heat transport in this region. However, the heat flux and subsidence would be little affected.

起こってから時間 t がたった後の基盤上限での熱流量 $F(t)$ は、

$$F(t) = \frac{kT_m}{a} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\beta}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{\beta} \right] \exp \left(-\frac{n^2 t}{\tau} \right) \right\} \quad (7.3)$$

となる。ここに、 k :リソスフェアの熱伝導率、 T_m :アセノスフェアの温度、 a :リソスフェアの厚さ、であり、 τ は、

$$\tau = \frac{a^2}{\pi^2 \kappa} \quad (7.4)$$

と表される。ここに、 κ :リソスフェアの熱拡散率、である。ここで、馬場ほか(1994)による18ないし20Maにリフティングが生じたという記述を採用し、実際には19Maにリフティングが生じたと仮定し、上述のような計算の結果求められた β は、1.50から1.72である(Fig. 7-21)。これは山路・佐藤(1989)の求めた値よりもやや小さくなっている。しかし、山路・佐藤(1989)の求めた値が東北本州弧帯における平均的な伸展係数であることを考えると、この2つの見積は調和的であると考えられる。従って、本検討では、熱流量史は、今回求めた β の中間の値である1.61を用い、それによって計算される熱流量変化を用いることとした(Fig. 7-21)。

7. 3. 新潟堆積盆を対象とした三次元ケーススタディ

7. 3. 1. 計算の設定

今回解析を行った領域は、Fig. 7-14中の黒枠で囲まれた領域である。計算領域内は、南北方向には37、東西方向には30に格子分割されている(Fig. 7-22)。今回の計算における境界条件は以下のように設定している。

- 1) 領域の西側の境界は、新潟沖リッジとの境界をなす変位量の大きな断層とし、その断層は流体を通さない性質を持っているものと仮定して、流体流動・熱の移動に関して共に閉境界とする。
- 2) 領域の南側・東側・北側の境界では、地層が連続的に境界の外側とつながっているものとし、幅が約5kmの格子を解析領域の外側に作成し、その部分の入力データは境界に接している解析領域内の入力値と同じものとする。解析領域の外側に作成した格子に関しては、その境界は流体流動・熱の移動に関して共に閉境界とする(Fig. 7-22)。
- 3) 流体流動に関して基盤岩との境界は閉境界とし、海底面では定圧境界(各タイムステップにおける海底面深度における圧力)を表現するためにダミーセルを設ける。
- 4) 熱の移動に関して、海底面は定温境界とし、基盤岩との境界での熱流量を入力値とする。

また、初期条件として、各タイムステップにおける堆積物に関して、堆積深度に応じた静水

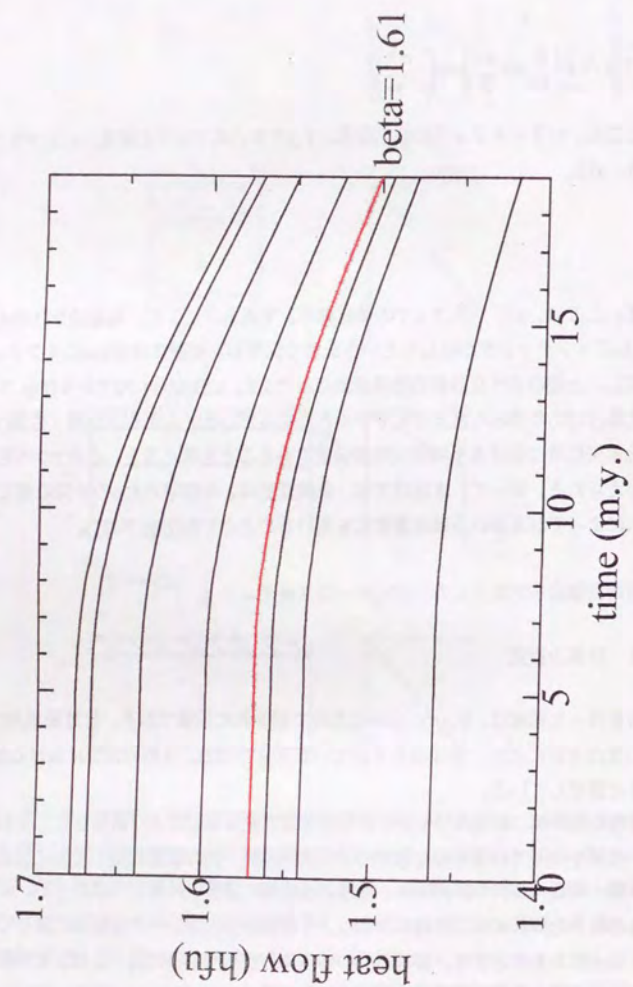


Fig. 7-21 Calculated heat flow history of the Niigata Basin using the McKenzie's model with present basement heat flow. See text for details.

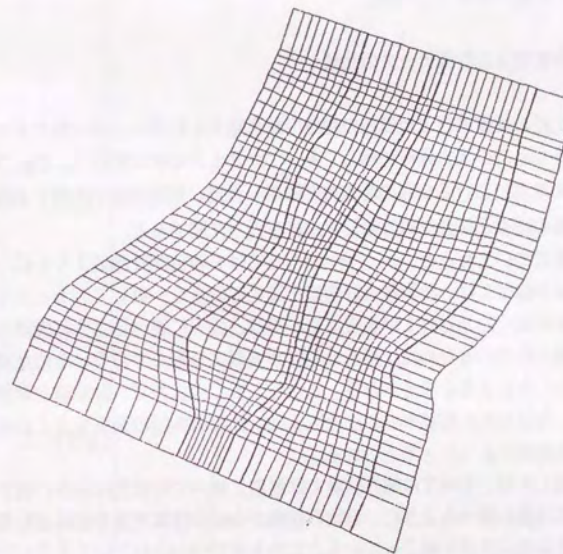


Fig. 7-22 Horizontal grid system of the Niigata Basin in this study.

圧・海水温度を与え、水飽和率に関しては、初期ピチュメン量が0と考え、初期水飽和率を1、としている。

解析領域内には5本の主たる断層が存在することが地震波探査断面から認められている(Fig. 7-14)(出光石油開発株式会社, 未公表資料)。今回の計算では、断層を表現するために、断層が認められた部分に厚さが約100mの格子を作成している。断層の流体流動に関する特性は明らかではないが、Fig. 7-12に見られるように堆積盆内に過剰間隙水圧が発生していることから、少なくとも現時点では流体の流動の主たる通路とはなっていないものと思われる。ここでは、断層とされた格子は流体を通さない性質を持つものと仮定し、その部分に泥質岩の物性を代入することによって計算を行なっている。

7. 3. 2. 計算結果と計測データの比較

ここでは、上述の設定で行った現在の時点の計算結果と坑井から得られたデータの比較を行い、計算を行ううえでの入力条件が適当であったかどうかの検討を行う。Figs. 7-23、7-24、7-25は各々坑井の地点における現在の時点の間隙率-深度、間隙水圧-深度、地層温度-深度について数値計算の結果と坑井での計測値の比較を行った図である。

まず、間隙率について見ると、いくつかの坑井ではその値が計測値よりも低く計算されているが、多くの坑井位置では、計算値と計測値とは比較的良く一致していると見ることができる。ここで、間隙率が低く計算されている理由の一つは、以下に述べるように間隙水圧が計測値よりも小さく計算されているために、圧密の進行が実際より進んでおり、そのために間隙率が小さく見積られたことによると考えられる。しかし、多くの坑井で、計算値と計測値が一致していることより、今回与えた間隙率-深度の関係は、比較的实际の関係を良く表現していると思われる、入力値は適切であったと考えられる。

間隙水圧に関しては、すべての坑井位置で計測値に比べて計算値は小さい値を示している。これは、一つには後に述べるように、石油の移動が今回の計算ではそれほど活発に起こっておらず、実際には石油の集積が起こっているところも水で飽和されているような計算になっているために、石油が存在することによる間隙水圧の上昇が起きてないためと考えられる。もう一つの理由は、泥質岩の間隙率-浸透率の関係が実際よりも浸透率が高いようにモデル化しているために、間隙水圧の拡散が実際よりも効率的に起こり、間隙水圧が高い状態で保持されないという考え方である。しかし、後者の考えに関しては、実際には石油の移動が効率的に行われていないことを考えると、これ以上小さい浸透率を与えた場合には、石油の移動が今回の計算よりも抑制されることになり適切でないと考えられる。従って、間隙水圧に関しては、石油の移動が適切に表現された後に検討すべき問題と思われる、ここではこれ以上の検討は行わない。

温度に関しては、いくつかの坑井では比較的良く再現されているが、多くの坑井では、温度を高めに見積るような計算になっている。これは、堆積盆地のすべての地点において基盤からの熱流量を同じ値として与えていることが理由の一つであり、このような入力を行っている以

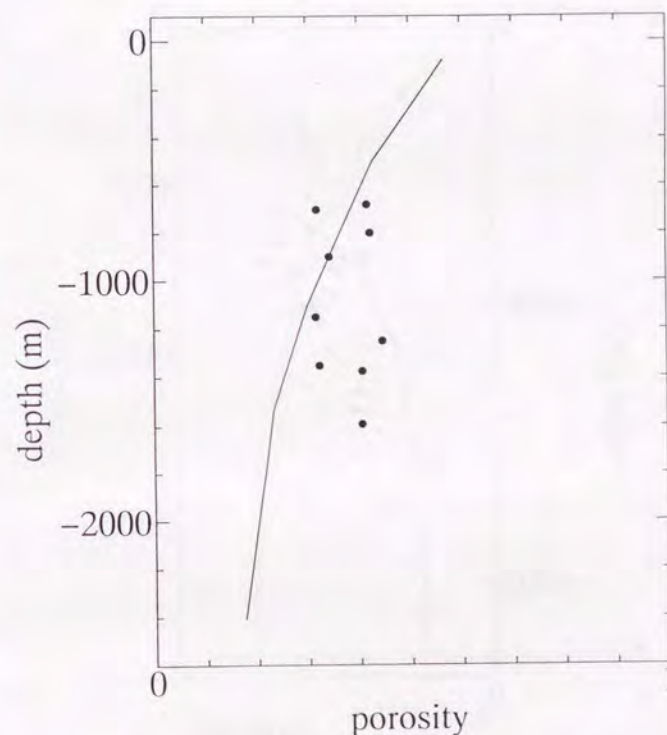


Fig. 7-23 Comparison between measured and calculated porosity at present time.

(a) Well No. 1.

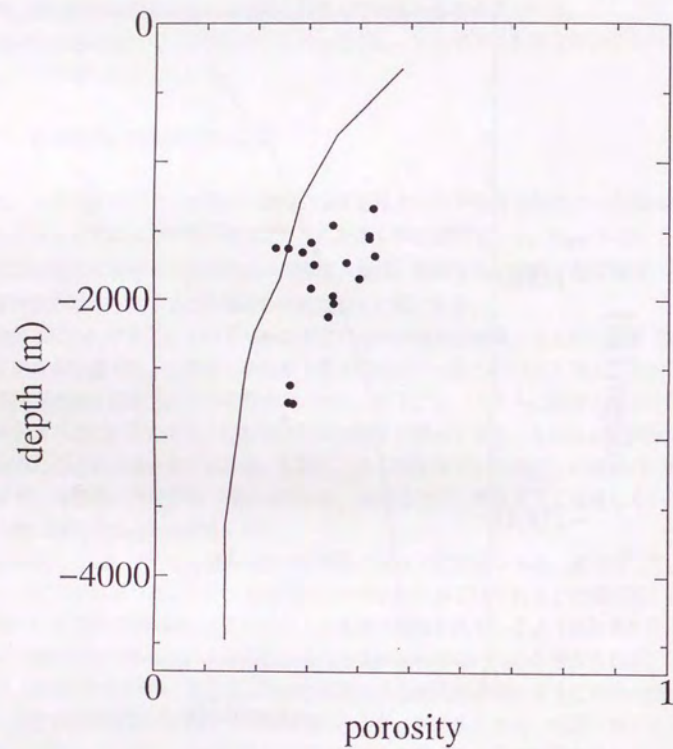


Fig. 7-23 Continued.
(b) Well No. 2.

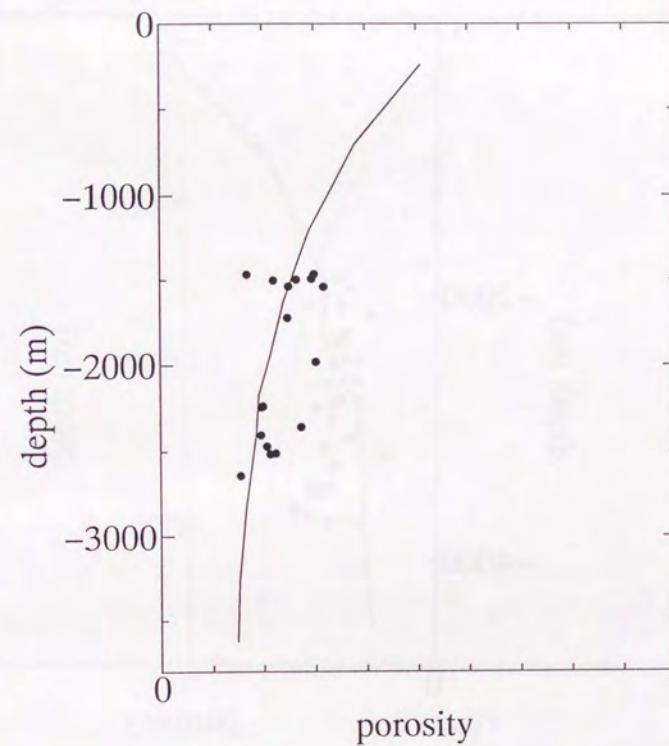


Fig. 7-23 Continued.
(c) Well No. 3.

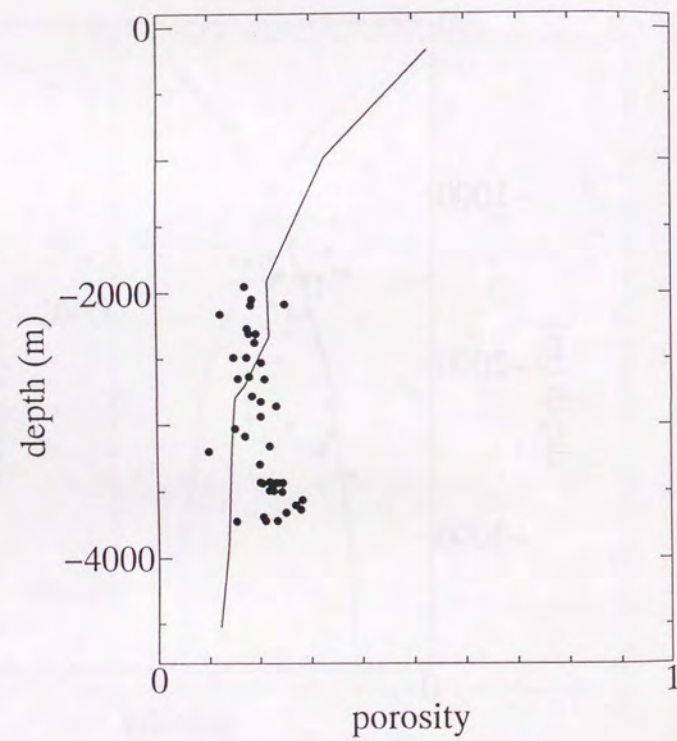


Fig. 7-23 Continued.
(d) Well No. 4.

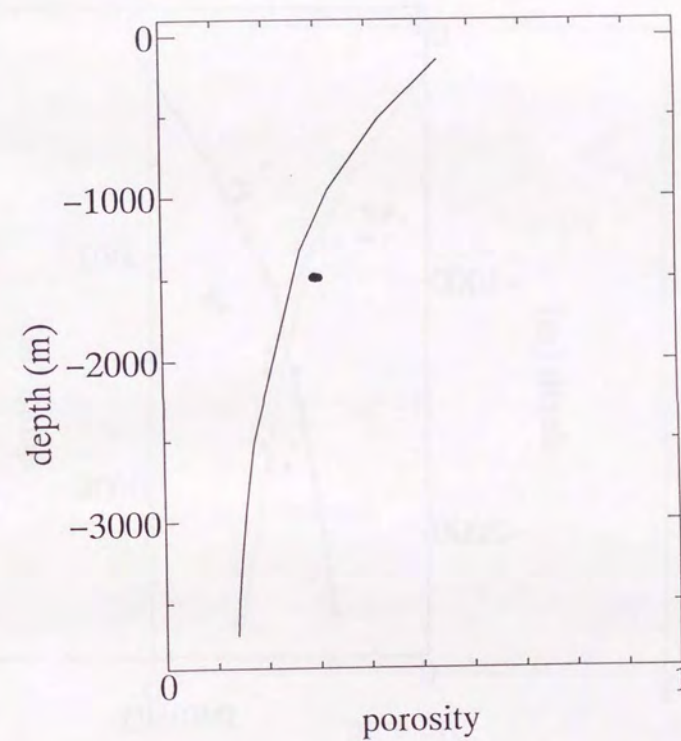


Fig. 7-23 Continued.
(e) Well No. 5.

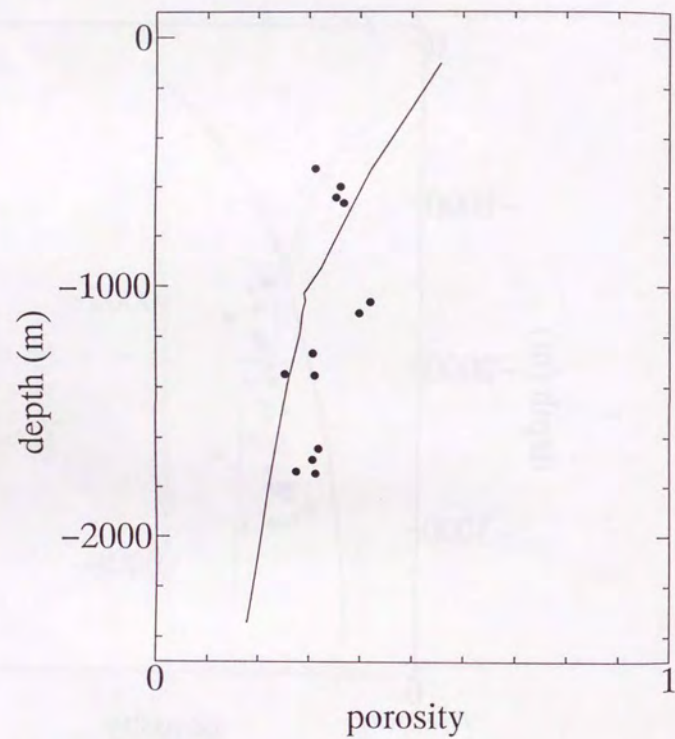


Fig. 7-23 Continued.
(f) Well No. 6.

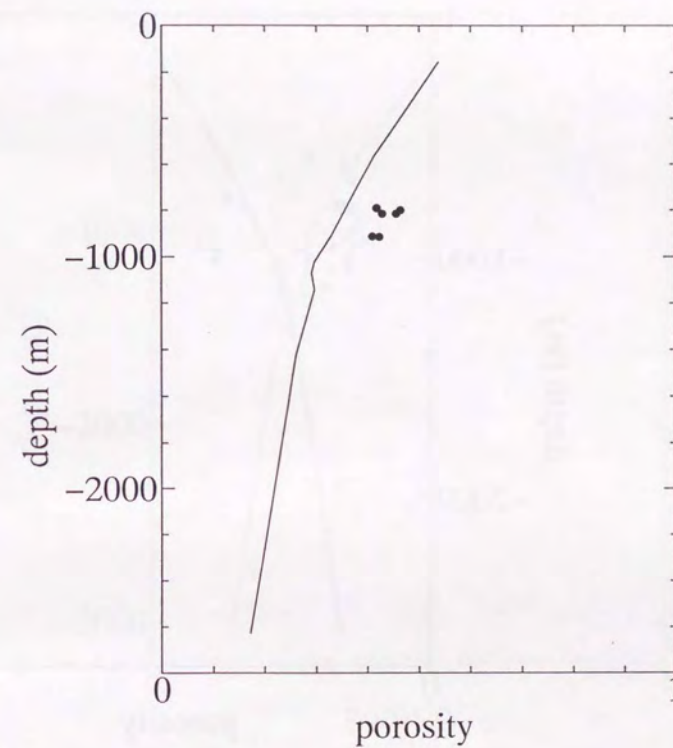


Fig. 7-23 Continued.
(g) Well No. 7.

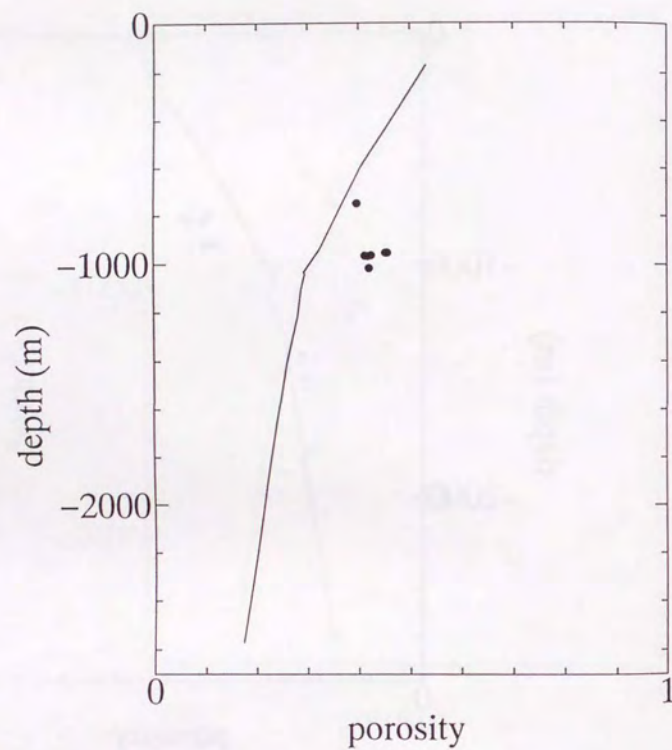


Fig. 7-23 Continued.

(h) Well No. 8.

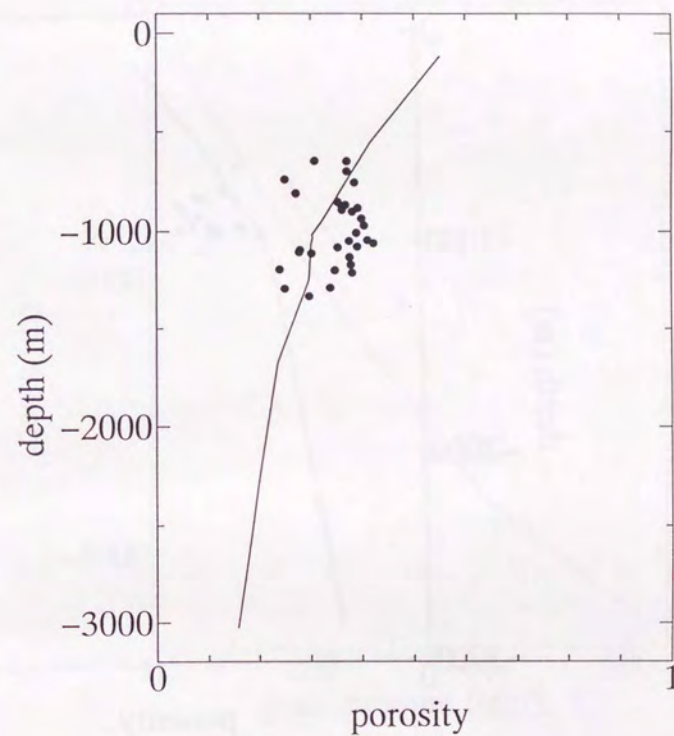


Fig. 7-23 Continued.

(i) Well No. 10.

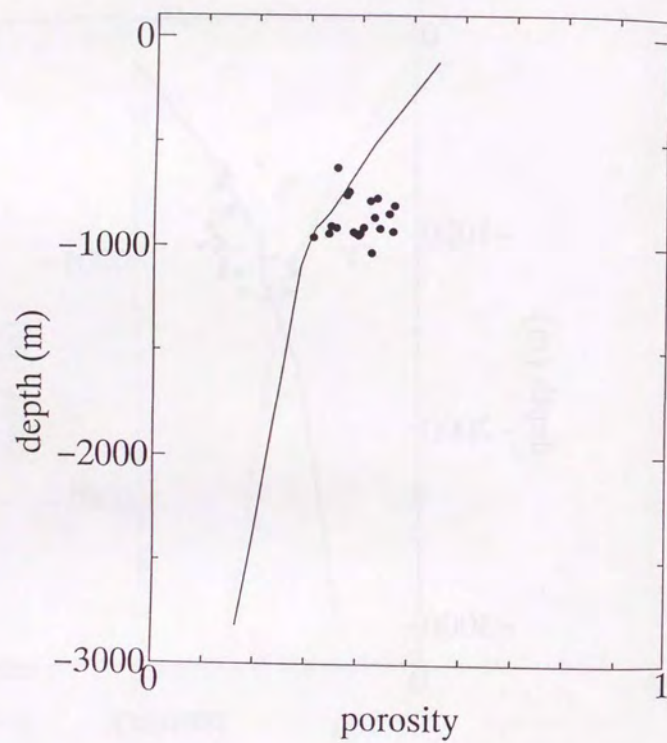


Fig. 7-23 Continued.

(j) Well No. 11.

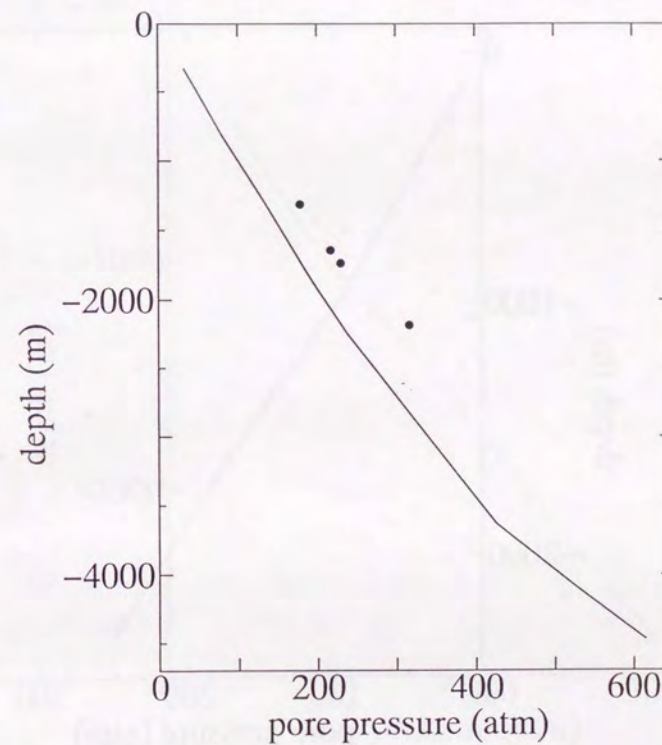


Fig. 7-24 Comparison between measured and calculated pore pressure at present time.

(a) Well No. 2.

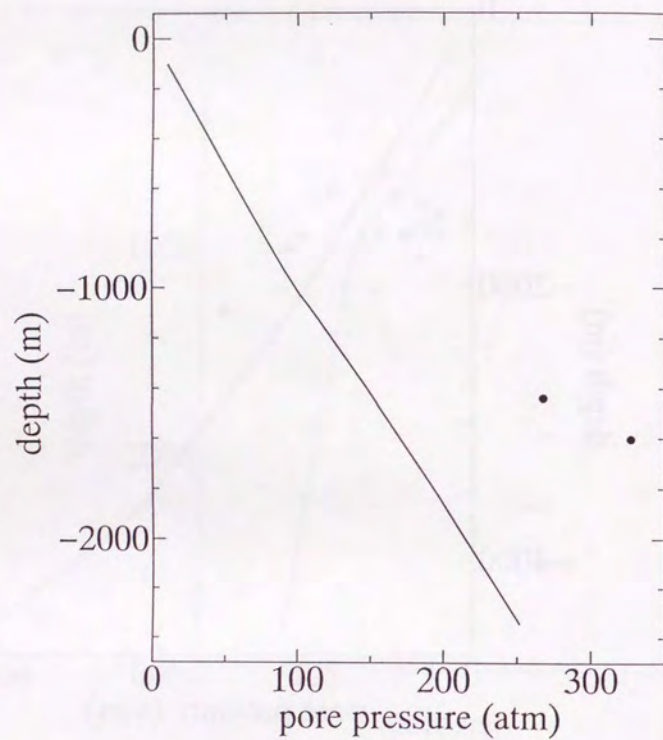


Fig. 7-24 Continued.

(b) Well No. 6.

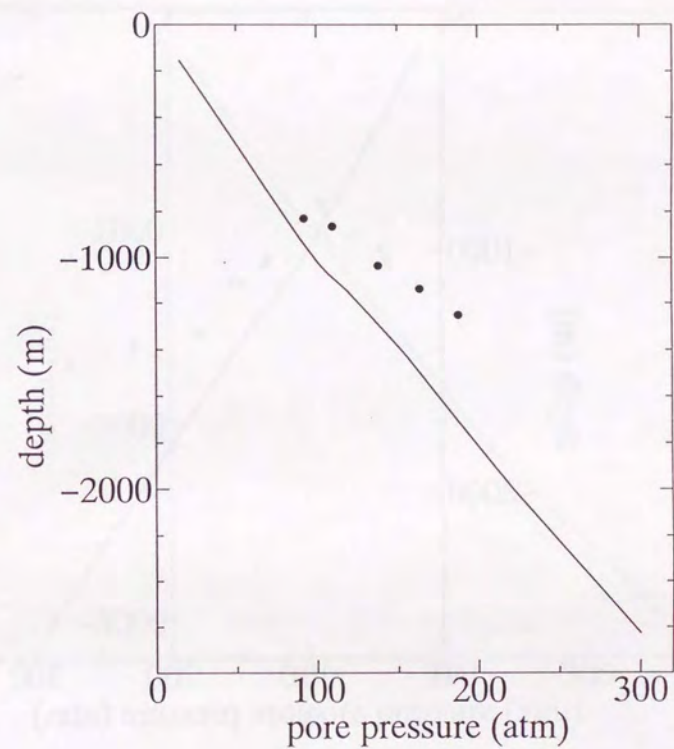


Fig. 7-24 Continued.

(c) Well No. 7.

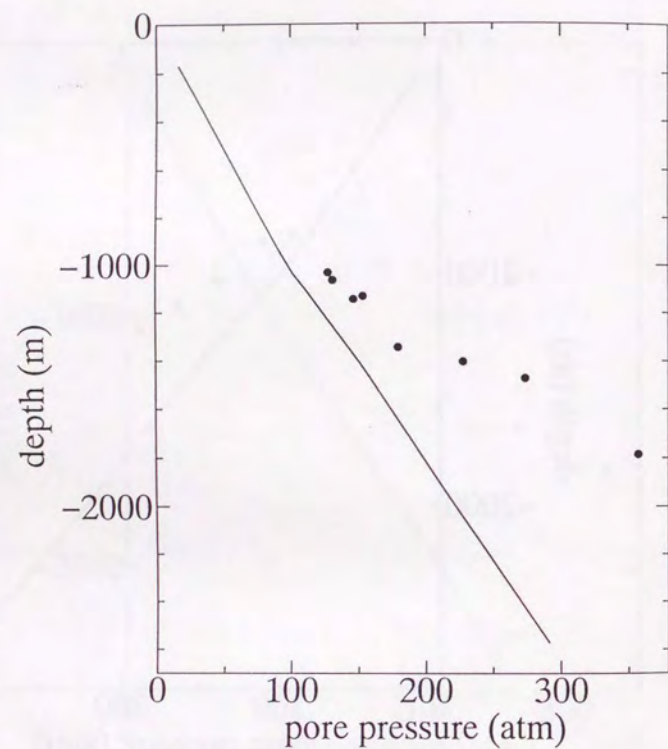


Fig. 7-24 Continued.
(d) Well No. 8.

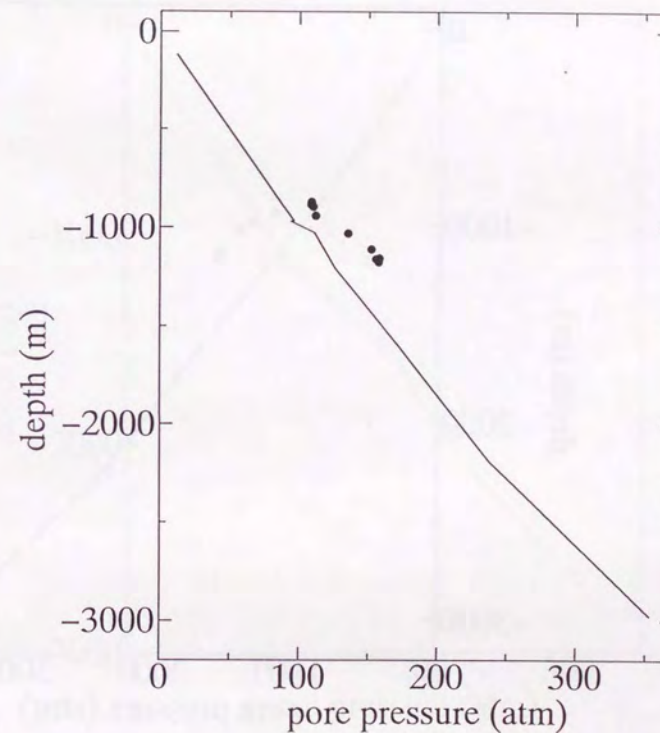


Fig. 7-24 Continued.
(e) Well No. 9.

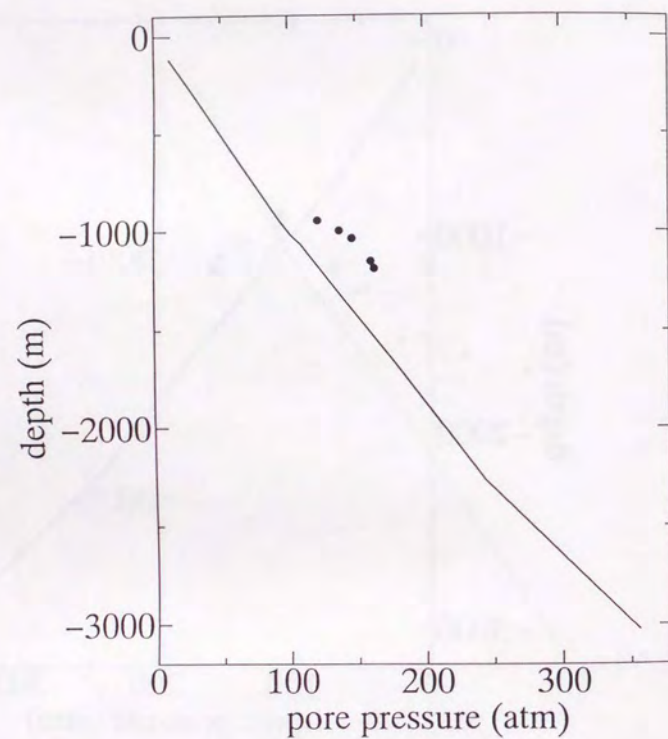


Fig. 7-24 Continued.
(f) Well No. 10.

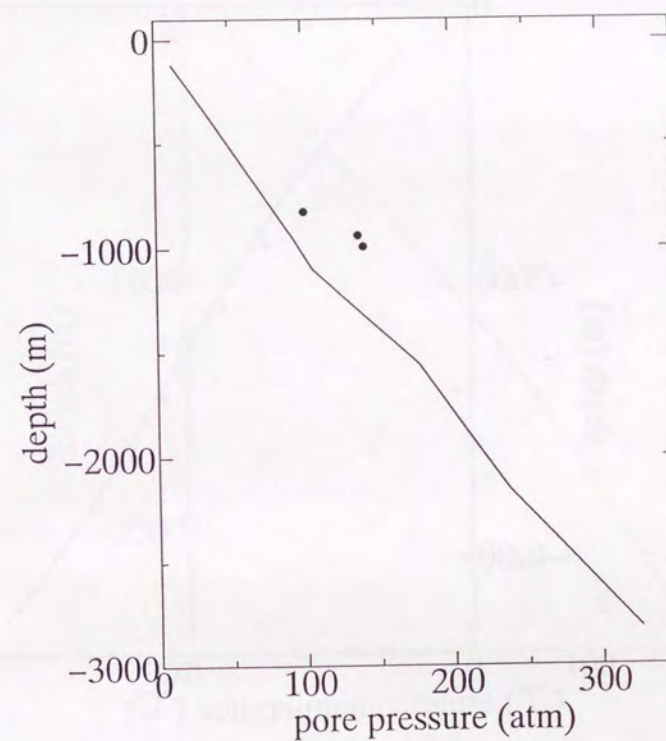


Fig. 7-24 Continued.
(g) Well No. 11.

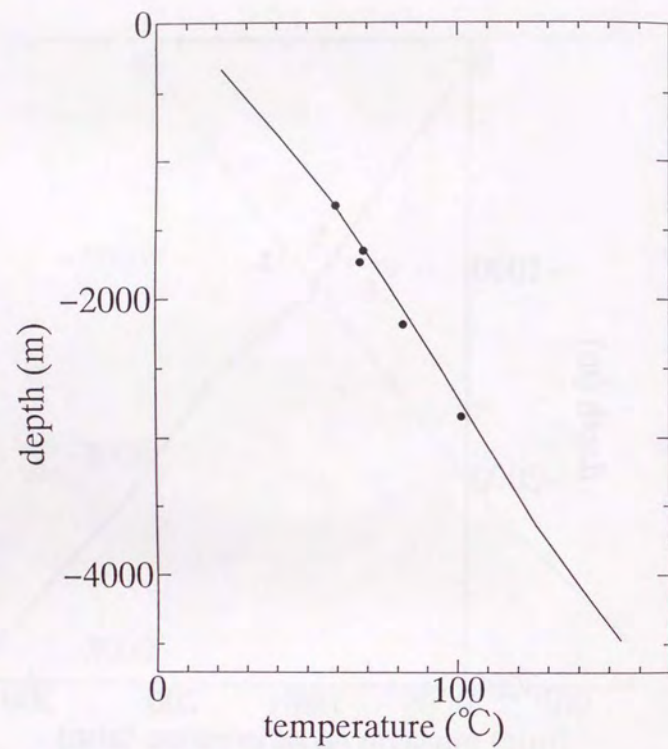


Fig. 7-25 Comparison between measured and calculated temperature at present time.
(a) Well No. 2.

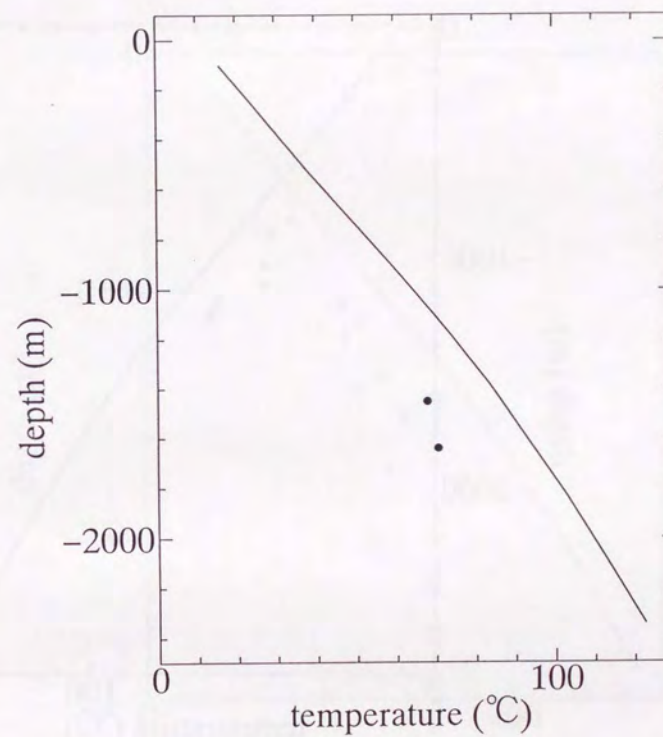


Fig. 7-25 Continued.
(b) Well No. 6.

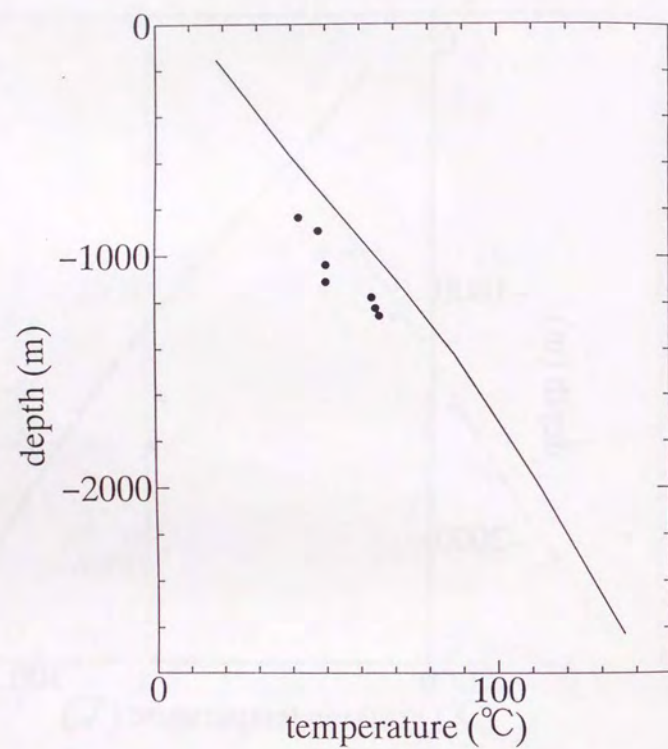


Fig. 7-25 Continued.
(c) Well No. 7.

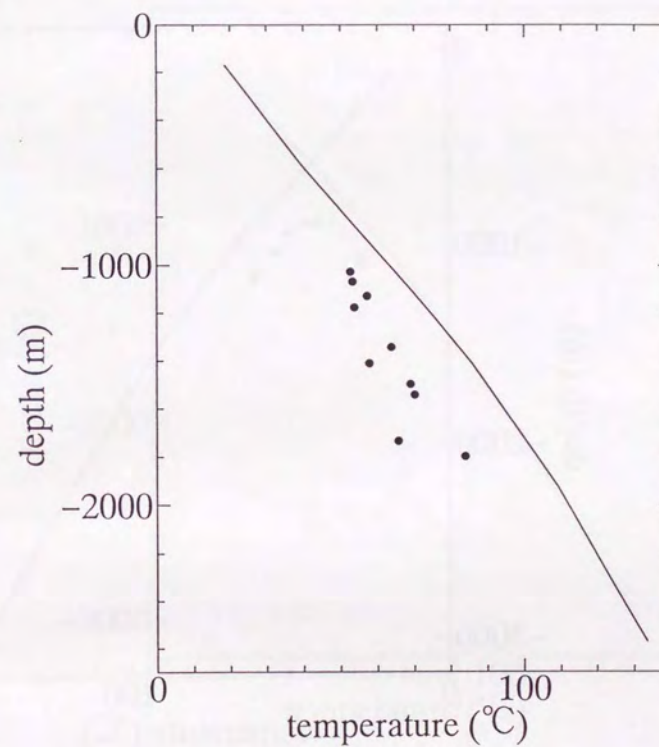


Fig. 7-25 Continued.
(d) Well No. 8.

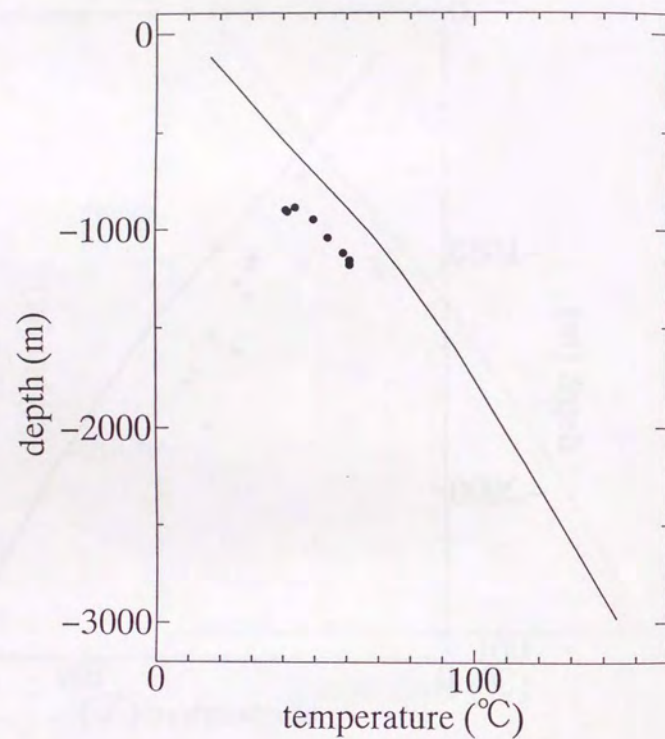


Fig. 7-25 Continued.
(e) Well No. 9.

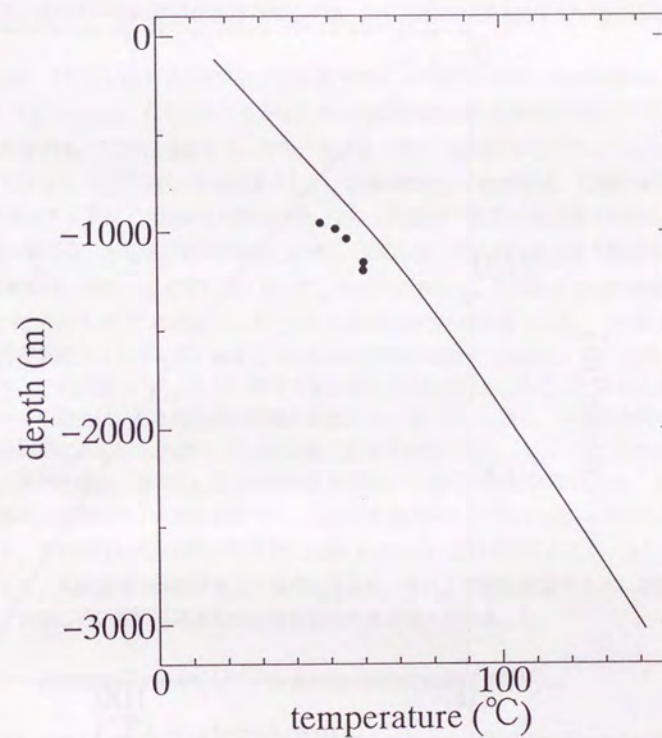


Fig. 7-25 Continued.
(f) Well No. 10.

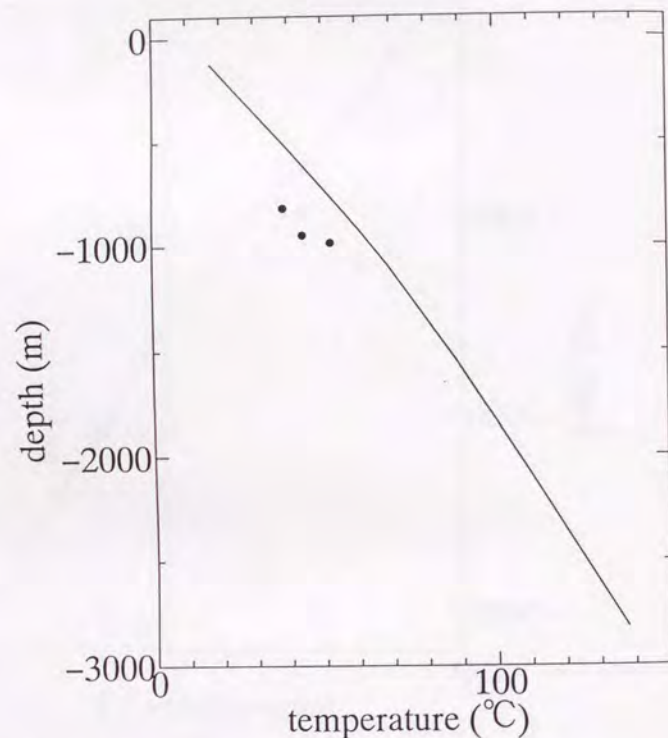


Fig. 7-25 Continued.
(g) Well No. 11.

上、すべての地点での温度を再現することは困難である。また、温度を高く見積った理由としては、地層の熱伝導率が実際よりも小さかったため、熱の拡散が遅れたことも考えられる。しかし、一次元モデルを用いた計算の時には、熱流量の値は、地質学的に求めたそれと調和的であったことより、基準値として採用した熱伝導率の値は、比較的良好な値を用いていると考えられる。従って、多くの坑井で高い温度を見積っていることは、熱流量の値に問題があると考えられる。即ち、少なくとも現在の熱流量に関しては、少し高めの値を入力していることが想定される。

Fig. 7-26は、今回用いた格子分割における阿賀沖構造、阿賀沖北構造、岩船沖構造の位置を示しており、Fig. 7-27は、現在における堆積盆内の水飽和率分布の計算結果の例である。この図からは、現在では、下から4層目まで、即ち、椎谷層上部まで石油が存在するようになっていることが見て取れる。ところで、今回対象としている地域の油田の貯留層は、岩船沖油田は西山層下部(天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992)、阿賀沖北油田は西山層下部から椎谷層上部(天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992)、阿賀沖油・ガス田は西山層下部から寺泊層上部(石油技術協会, 1973)とされている。従って、今回の計算では、石油の移動は貯留層まで起こっていないことになる。この理由としては以下の点が現段階では想定される。一つは、石油の生成量自体が実際よりも少なく、根源岩中の石油飽和率の増加が十分に起こっていないということであり、この原因は、入力した有機炭素量が実際よりも少なかったことによると考えられる。もう一つの理由は、石油の生成の時期が実際よりも遅くなっており、石油が移動するのに必要な油飽和率に達するのが遅れ、石油の移動に必要な時間がなかったということであり、これは、上に述べた理由に加えて、過去の熱流量が実際よりも小さく入力されていたことによると考えられる。実際には、今回の計算では、石油の移動は西山層堆積中(Ny-Piステージ)から始まっており、移動が行われた期間はわずかに1.4m.y.である。これらのことより、少なくとも入力値に関して、熱流量は今回の設定より高めに設定し、また、有機炭素量を多めに設定することが、より実際に近い結果を得るためには必要であると考えられる。

7. 3. 3. 入力値の再評価と新しい入力値を用いた計算結果

以上のように、最初に設定した入力条件では、堆積盆発達過程を適切に再現できていないことがわかった。そこで、ここでは、いくつかの入力値を変化させて堆積盆発達過程を再検討することを試みた。

まず、有機炭素量に関しては、最初の計算では、一般的な石油地化学データから各層準において比較的高い値を入力したが、今回は、各層準で最大値を示す値を代表値として用いることとした。有機炭素量は、坑井から得られたコアやカッティングスを用いて求められるが、ここで求められた値は、そのサンプルに含まれている有機物が熟成し、炭化水素を生成した後の値を求めていることになる。仮に、十分な熟成が起り、さらに、キャリア層との距離もそれほど大きくない場合には、現在計測している有機炭素量は、炭化水素の排出が起こった後の値

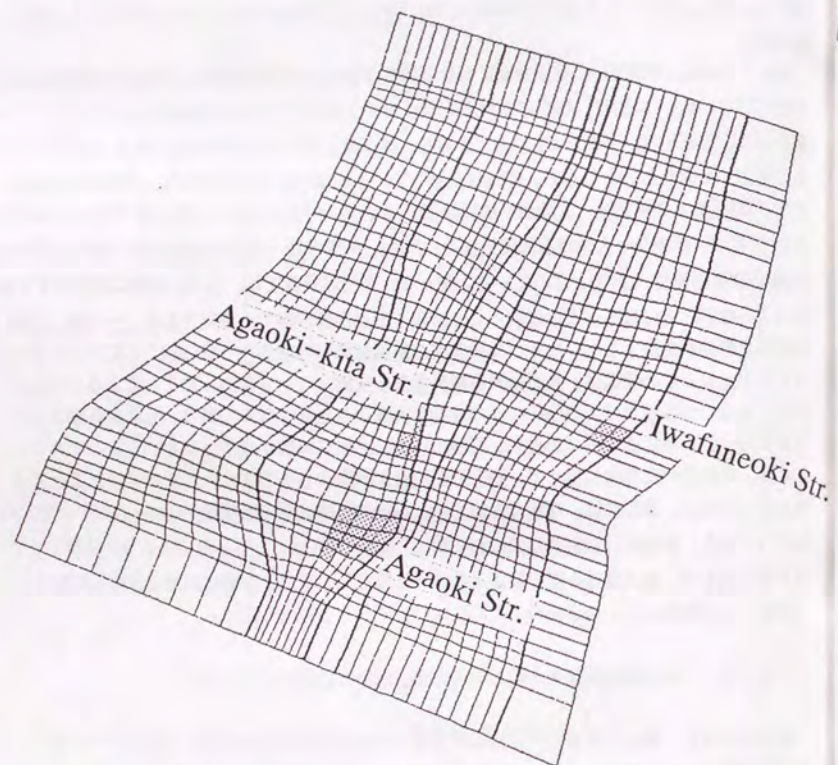


Fig. 7-26 Locality map of the oil fields in the studied area.



Fig. 7-27 Calculated water saturation distribution in the basin at present time.

ということになり、初期の有機炭素量よりも小さな値であると考えられる。今回、新しい入力値で、計測された内の最大値を用いるのは、初期に一樣に有機物が分布していたとした場合、有機炭素量の値が最も大きい地点は、最も排出が効果的に行われず、初期有機炭素量に近い有機炭素を現在も保持していると想定されると考えたからである。ここで、最初の設定における各層準の初期有機炭素量と今回の設定における値はTable 7-3に示されている。

次に、基盤熱流量に関しては、以下のような設定とした。McKenzie(1978)のモデルに従うと仮定した場合、一次元モデルを用いた熱流量史は、各坑井位置においてFig. 7-21のようになる。ここでは、全体の熱流量を前回の計算よりも大きめに設定することと、現在の地層温度が少し高めに計算されていることを考慮して現在熱流量をわずかに小さめに設定することにし、さらに、熱流量の最大値は一次元モデルを用いた再現データの範囲にあるものとして、Fig. 7-28に示されているような熱流量史を用いた計算とすることにした。

さらに、石油の移動自体が、前回の計算では効率的には行われなかったことから、石油の移動を表現する物性に関しても検討を行うことにした。石油の移動を評価する物性としては、毛細管圧力と相対浸透率が挙げられるが、ここでは、特に、相対浸透率を変化させることを試みた。残念なことに、長期の地質現象を適切に表現する相対浸透率がどのようなものであるかを検討した研究は、今までほとんど存在していないが、Tokunaga et al.(1994)が行った予察的な室内実験によると、長期の石油の移動を模擬していると考えられる非常にゆっくりとした石油・水置換の場合には、石油の移動は比較的小さい石油飽和率において始まり、いわゆる油層工学的な実験から得られた相対浸透率曲線では、現象をうまく表現できないことが示唆されている。また、Wilkinson(1986)やBlunt et al.(1992)がインバージョンパーコレーションの手法を用いて求めた同様の現象に対する相対浸透率も、かなり小さい石油飽和率から石油の移動が効率的に起こるような形を示している。したがって、ここでは、石油の移動が始まる石油飽和率の値を、基準値よりも小さくすることとし、Fig. 7-29に示されたような相対浸透率曲線を用いることとした。

上述のような考え方のもとに行った計算の結果は以下のとおりである。現時点での間隙率-深度、間隙水圧-深度、温度-深度に関して、計算結果と坑井での計測結果を比較すると、Figs. 7-30、7-31、7-32のようになる。これらの結果は、前回の設定で行って結果とそれほど大きく変化しておらず、特に、間隙水圧の値に関しては、計算結果は、相変わらずかなり小さな値となっている。温度・間隙率に関しても、前回の結果とそれほど大きく変化しておらず、間隙水圧の値をより計測値に近付けるためには、今回行った入力値の変更以外の操作を行うことが必要となろう。特に、5. 6節、6. 3. 1節で検討したように、浸透率の減少を表現するパラメータは、過剰間隙水圧の発生に大きな影響を与えることが示されており、今後は、このパラメータを本検討地域により適切な値とするための検討を行うことが必要であろう。直感的には、浸透率の減少を表現するパラメータの値を大きくすることが有効であると考えられるが、これは、水圧破碎現象を起こさない場合には、石油の排出の時期を遅らせる効果がある。現状では石油の排出・移動の時期がかなり遅くなる計算結果を得ている点から考えると、このパラメータを

Table 7-3 Input initial total organic carbon (wt%) for each case in this study.

Formation (Unit)	case 1	case 2
Uonuma	1.02	1.80
Haizume	1.17	1.59
Ny-Pc	1.15	1.64
Ny-Pi	0.86	1.05
Ny-As	1.15	1.19
Ny-Or	0.87	0.92
Sy-Ik	1.11	1.15
Sy-Un	0.92	0.92
Teradomari	1.23	1.73
Nanatani	1.22	1.85

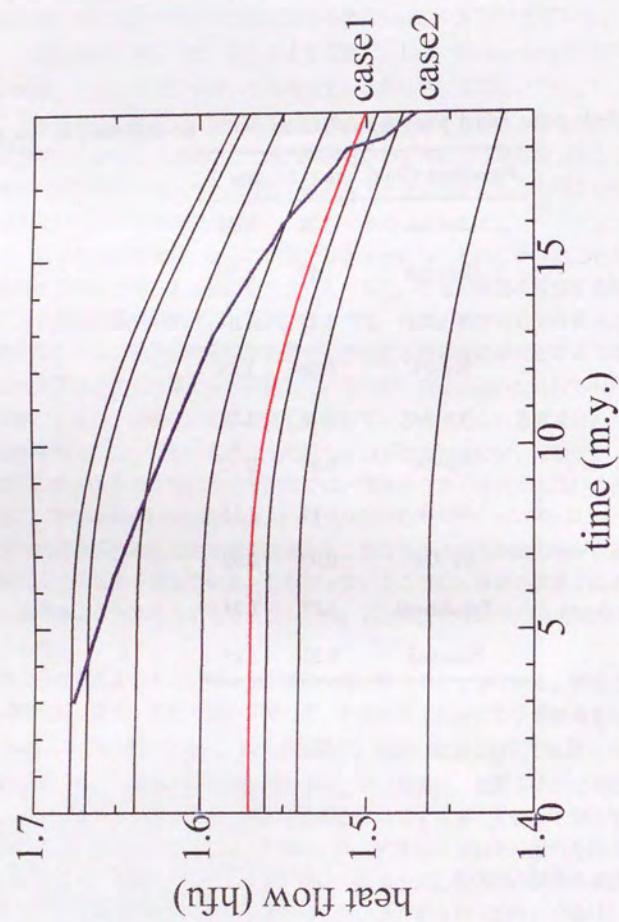


Fig. 7-28 Input heat flow history of the Niigata basin in this study. See text for details.

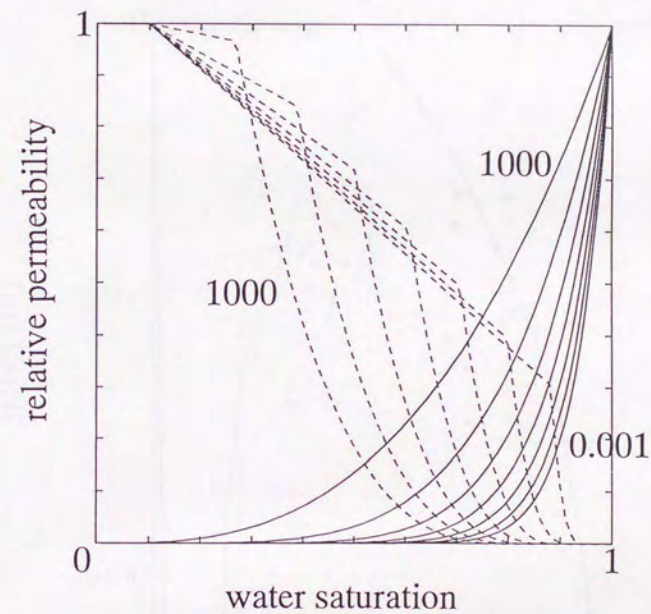


Fig. 7-29 Modified relative permeability curves used in this study. See text for details.

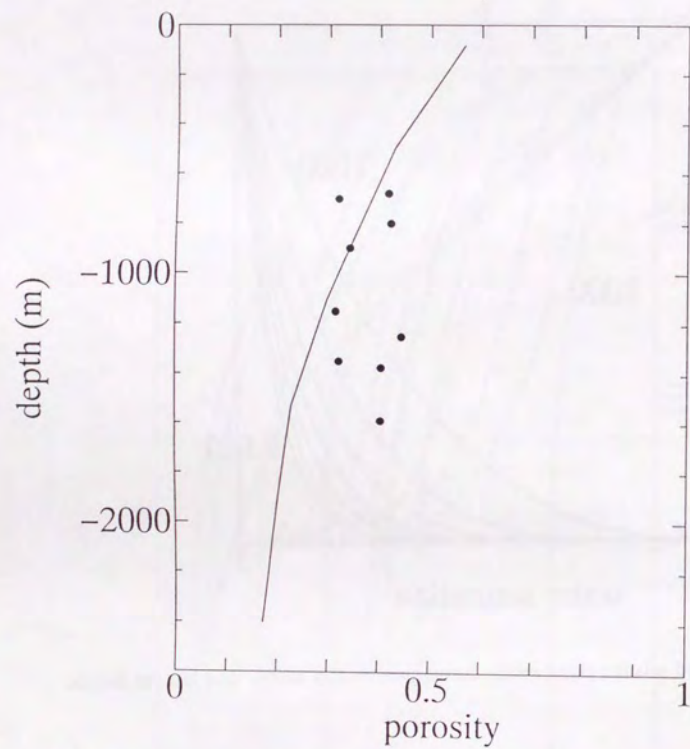


Fig. 7-30 Comparison between measured and calculated porosity at present time by the second run.

(a) Well No. 1.

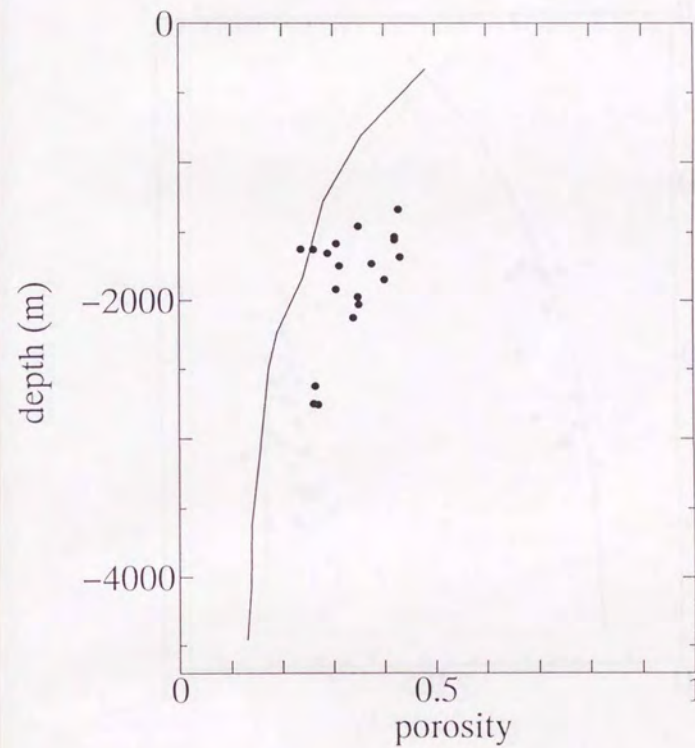


Fig. 7-30 Continued.

(b) Well No. 2.

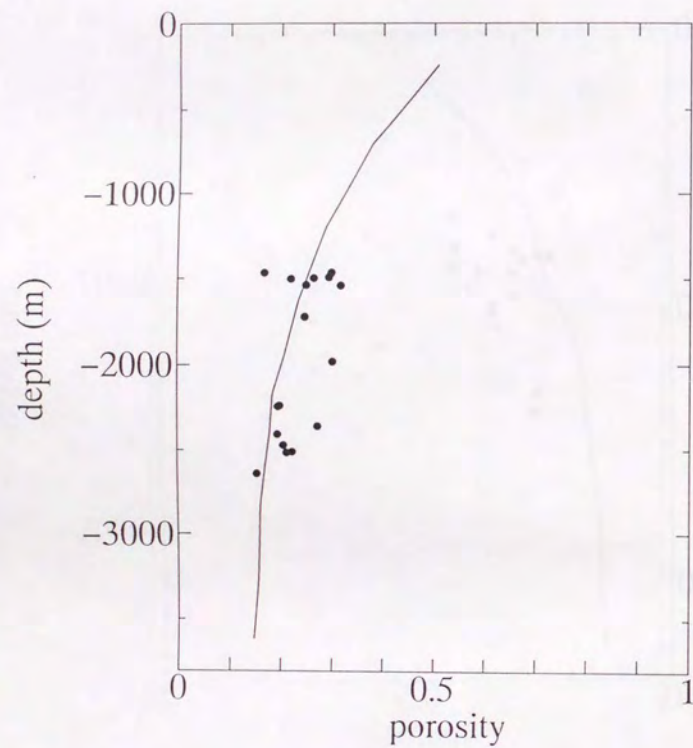


Fig. 7-30 Continued.
(c) Well No. 3.

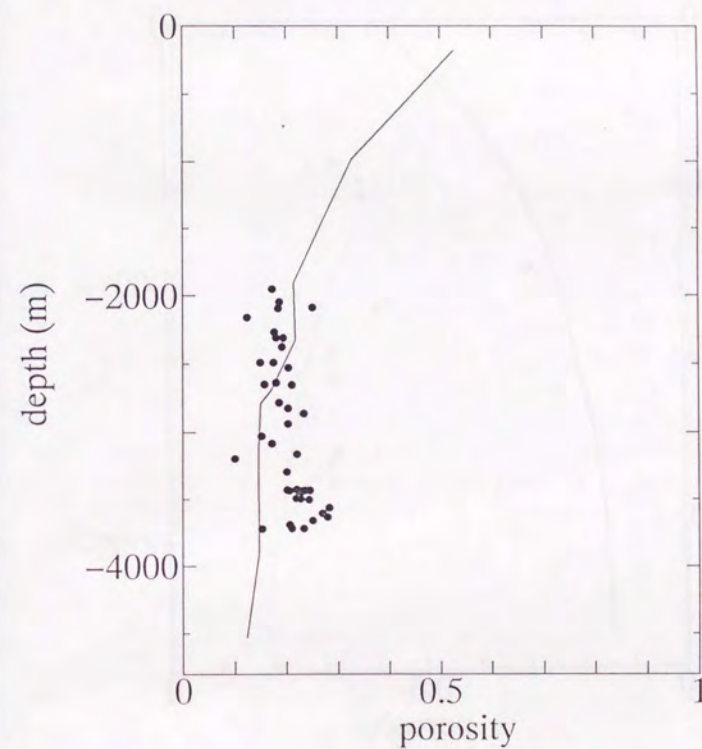


Fig. 7-30 Continued.
(d) Well No. 4.

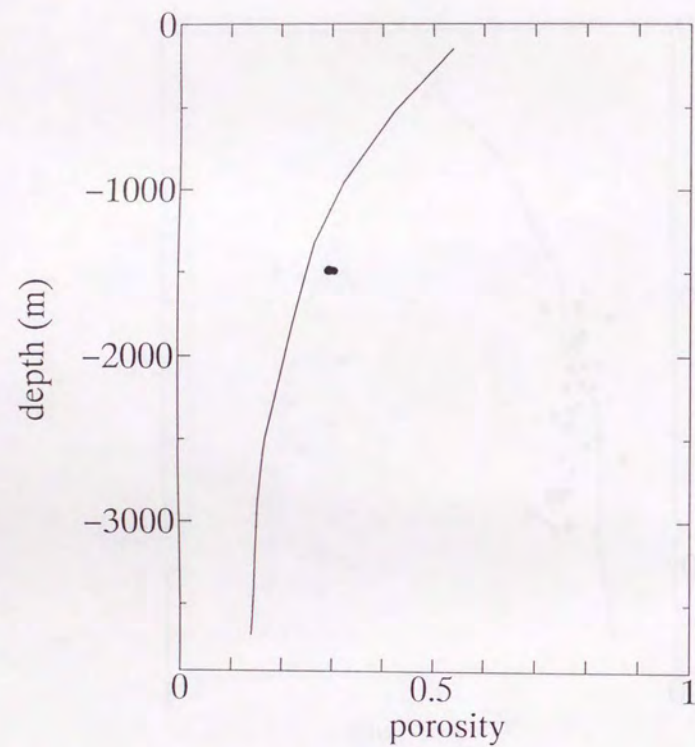


Fig. 7-30 Continued.
(c) Well No. 5.

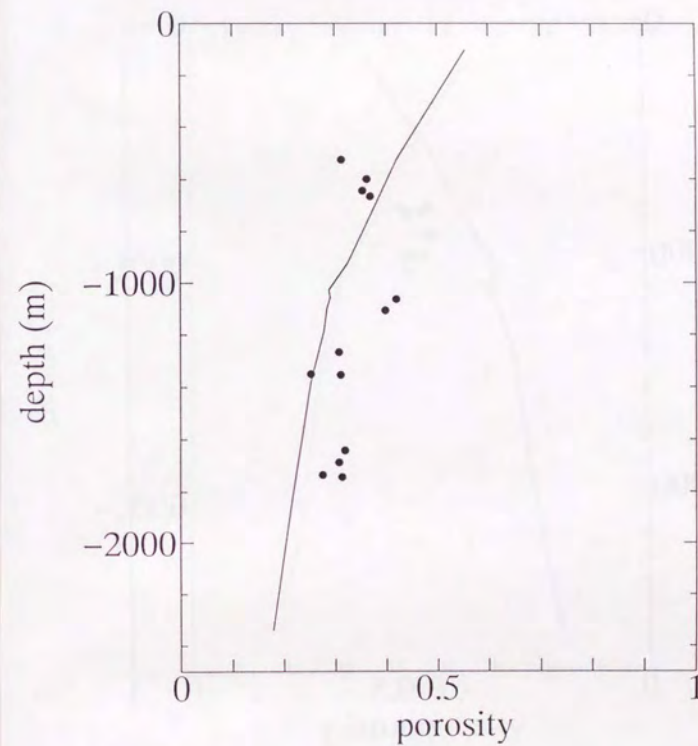


Fig. 7-30 Continued.
(f) Well No. 6.

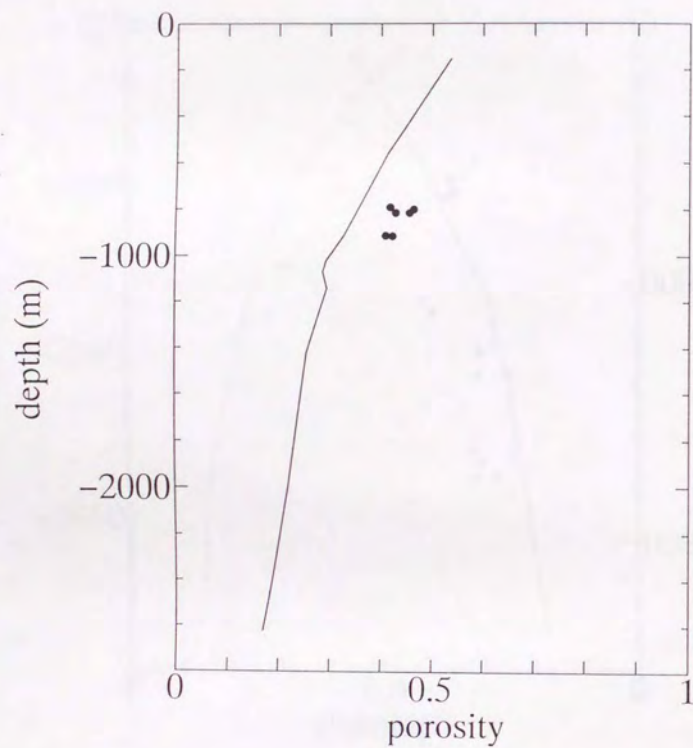


Fig. 7-30 Continued.
(g) Well No. 7.

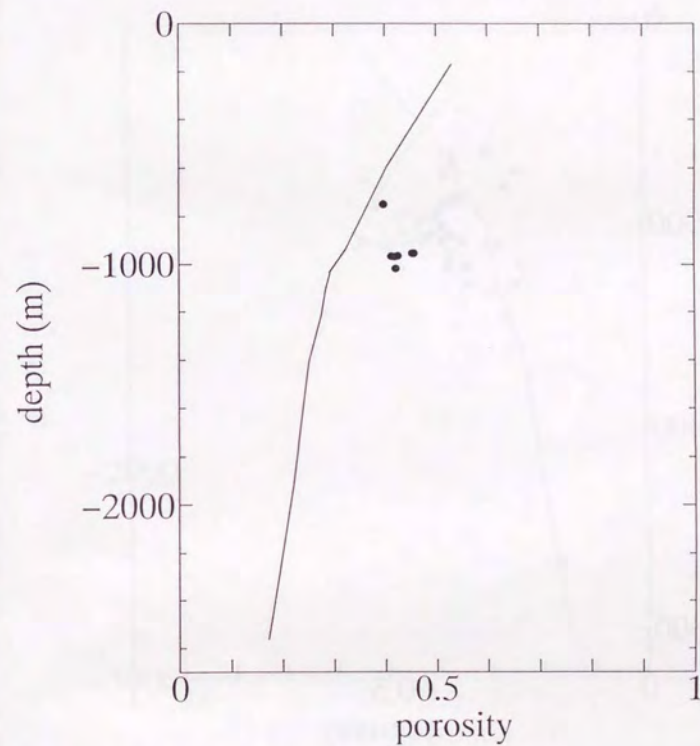


Fig. 7-30 Continued.
(h) Well No. 8.

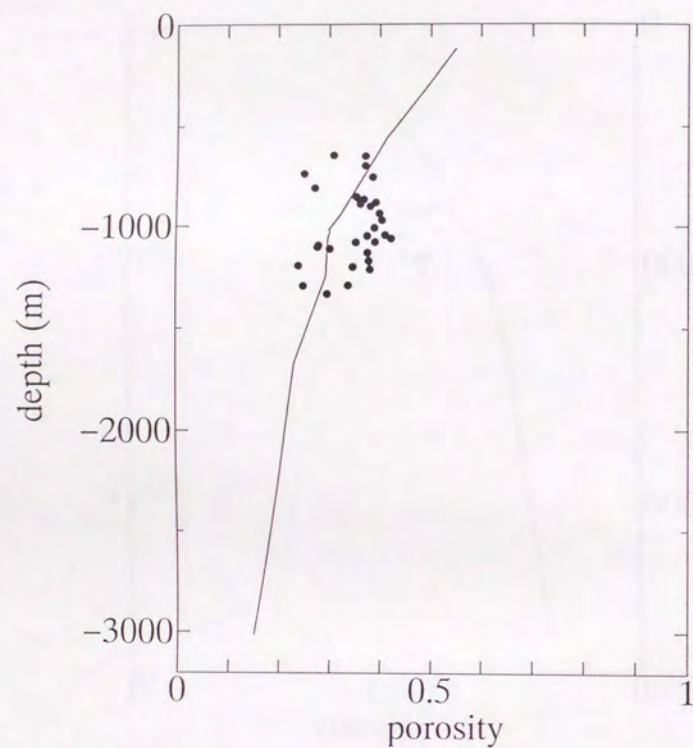


Fig. 7-30 Continued.
(i) Well No. 10.

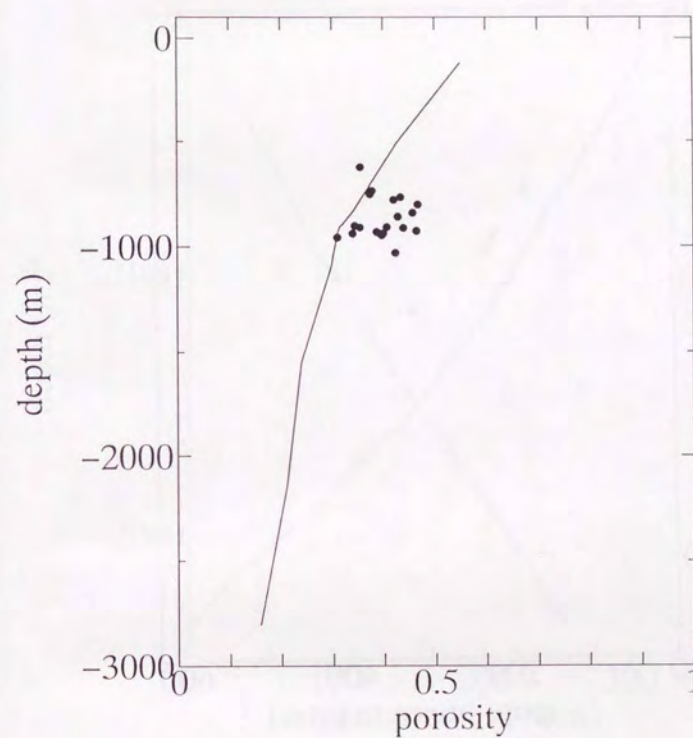


Fig. 7-30 Continued.
(j) Well No. 11.

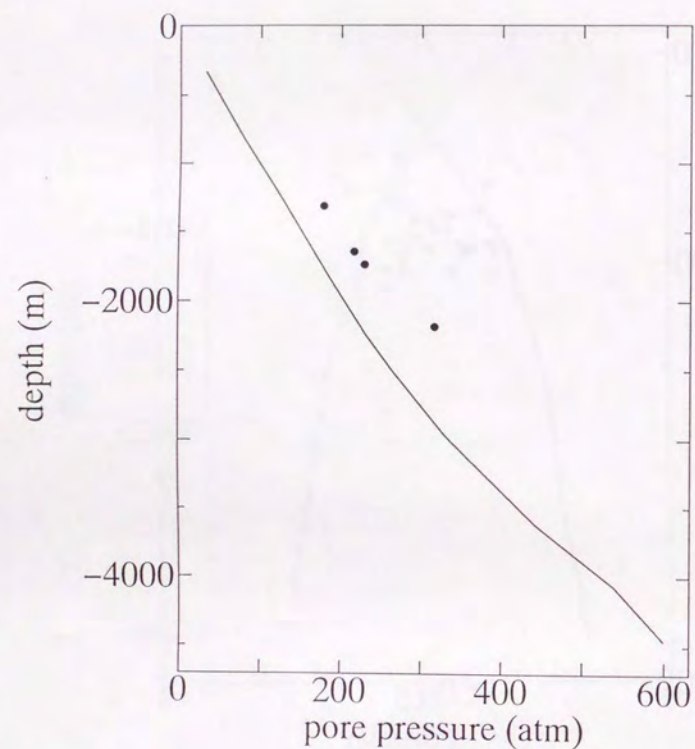


Fig. 7-31 Comparison between measured and calculated pore pressure at present time by the second run.

(a) Well No. 2.

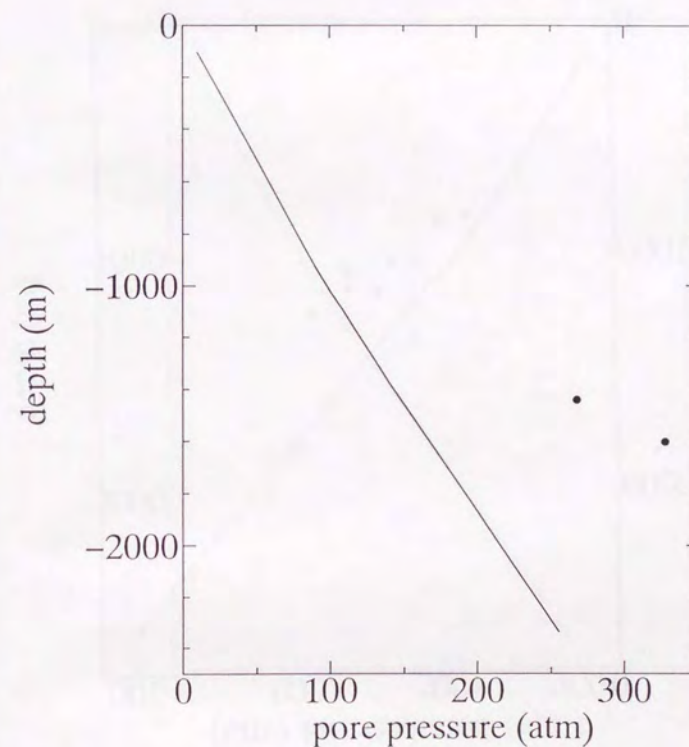


Fig. 7-31 Continued.

(b) Well No. 6.

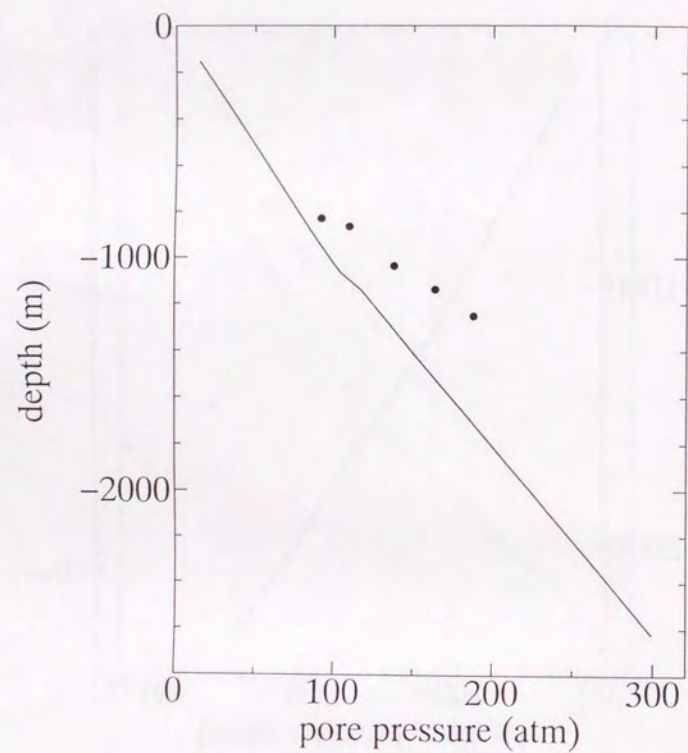


Fig. 7-31 Continued.
(c) Well No. 7.

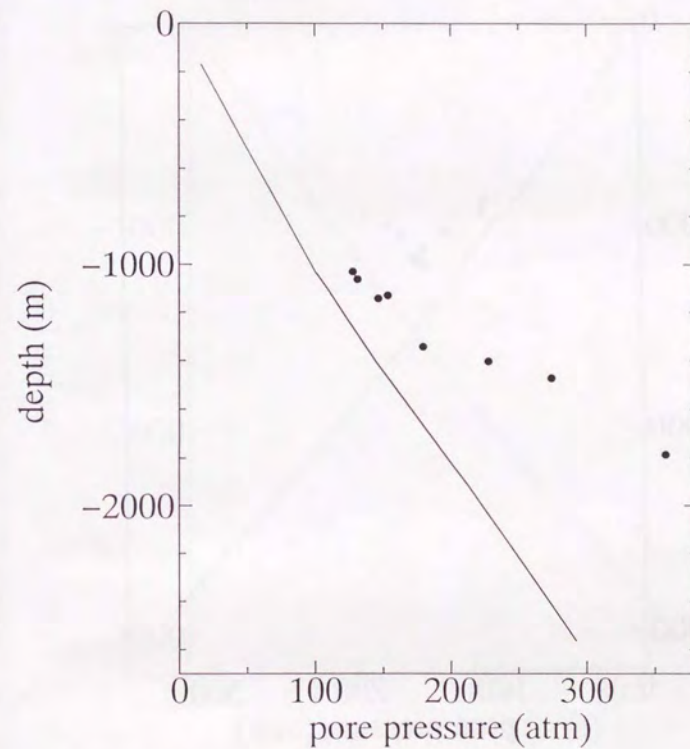


Fig. 7-31 Continued.
(d) Well No. 8.

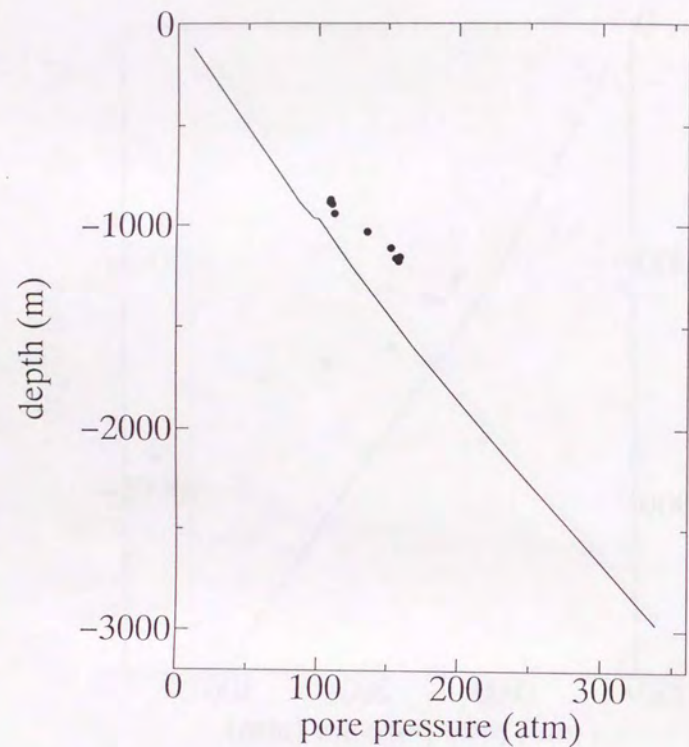


Fig. 7-31 Continued.
(c) Well No. 9.

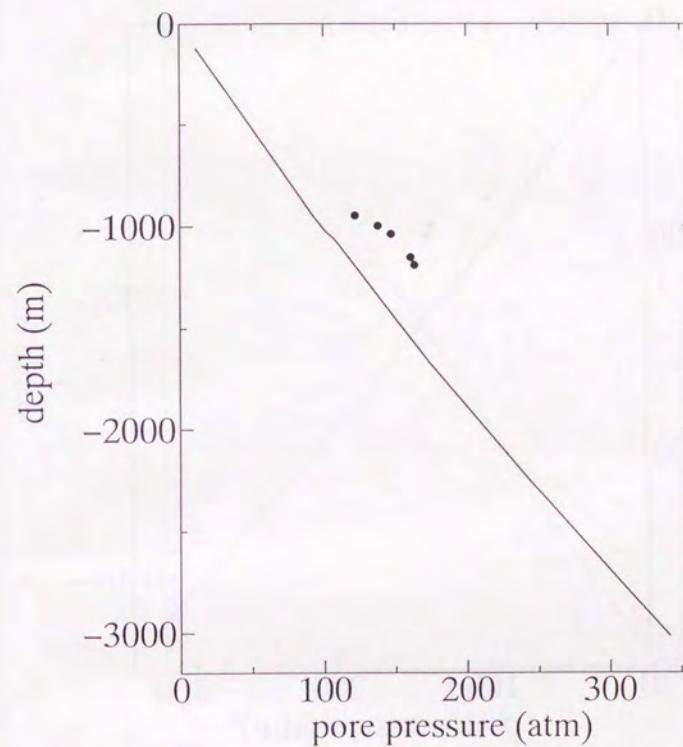


Fig. 7-31 Continued.
(f) Well No. 10.

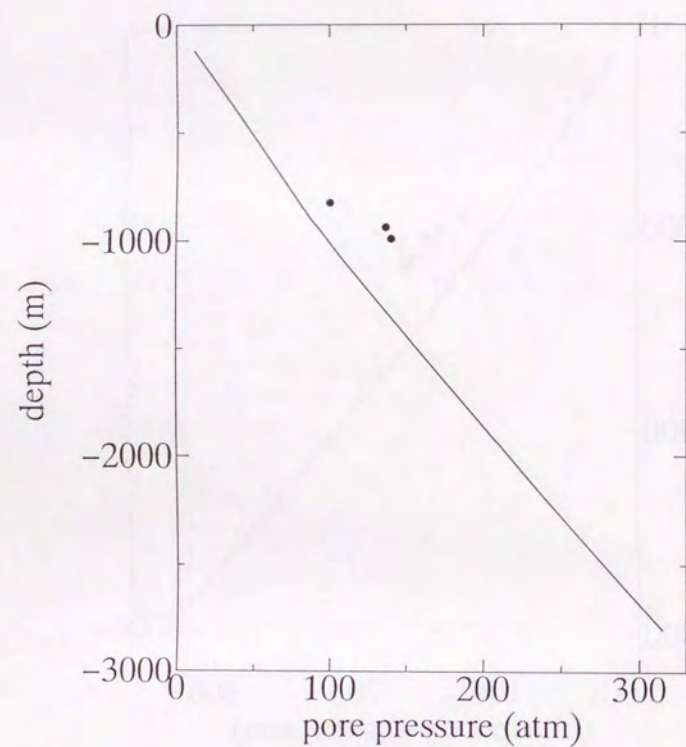


Fig. 7-31 Continued.
(g) Well No. 11.

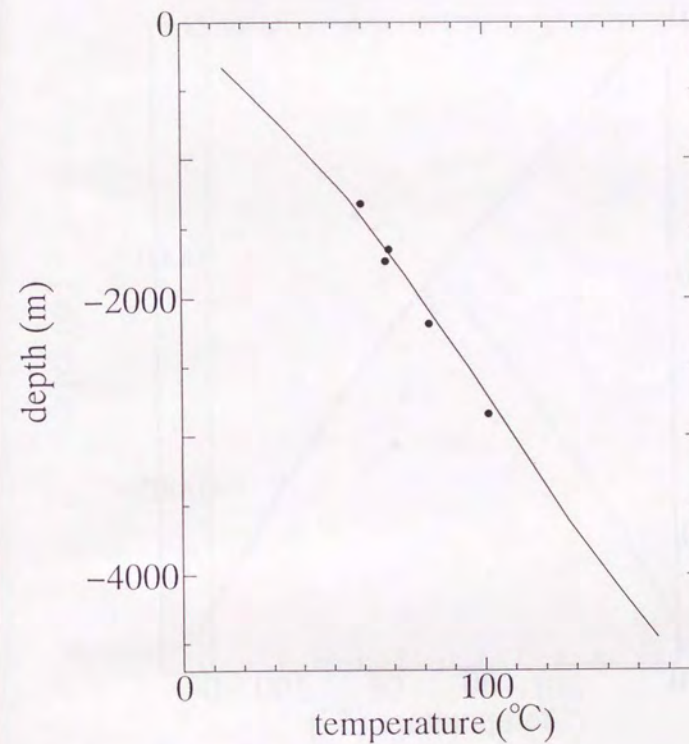


Fig. 7-32 Comparison between measured and calculated temperature at present time by the second run.
(a) Well No. 2.

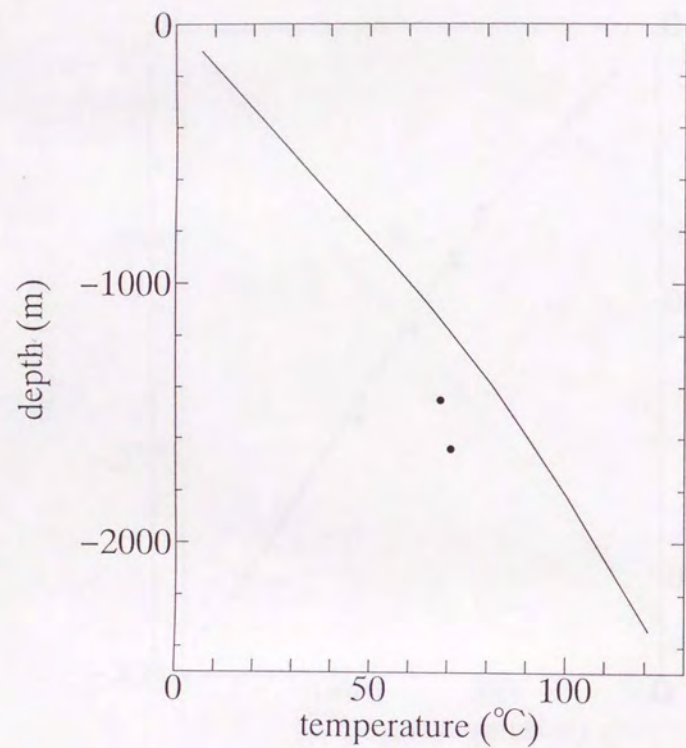


Fig. 7-32 Continued.
(b) Well No. 6.

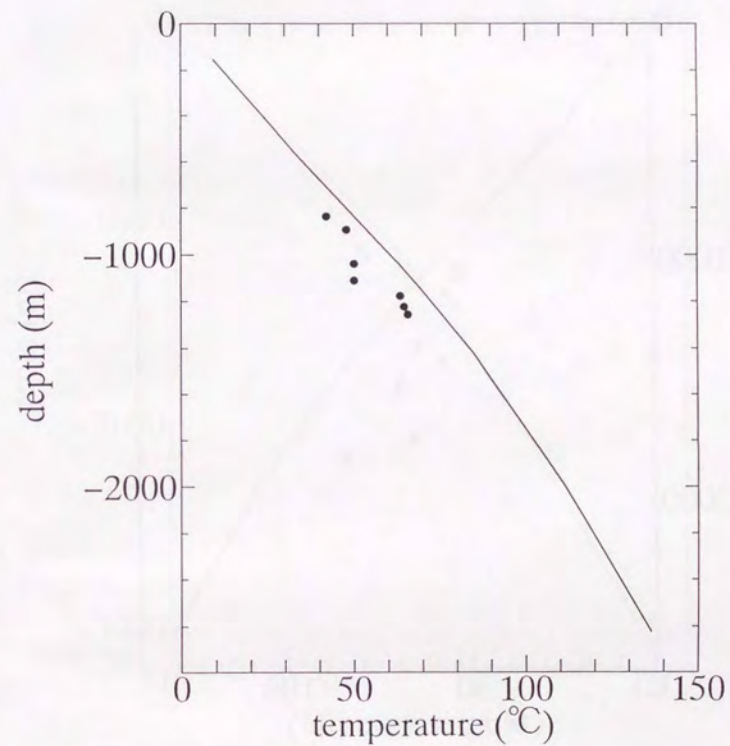


Fig. 7-32 Continued.
(c) Well No. 7.

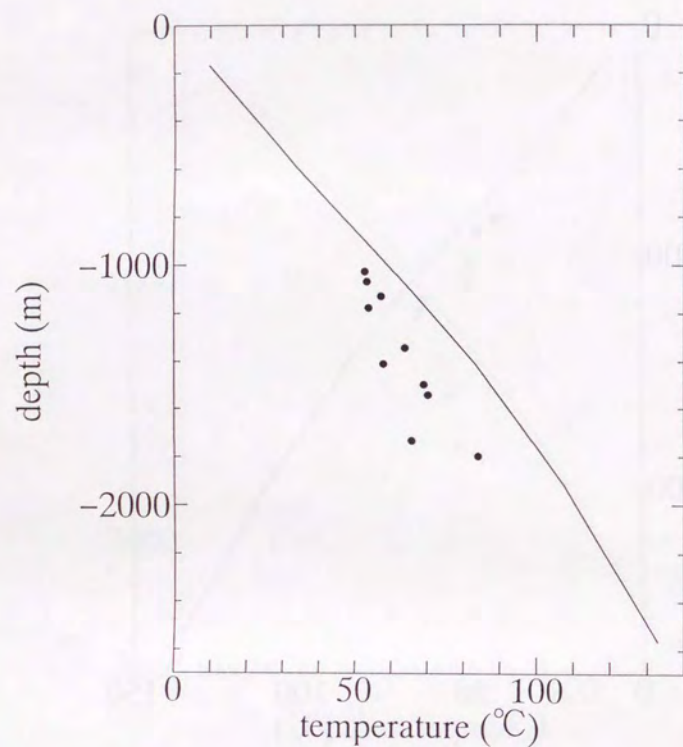


Fig. 7-32 Continued.
(d) Well No. 8.

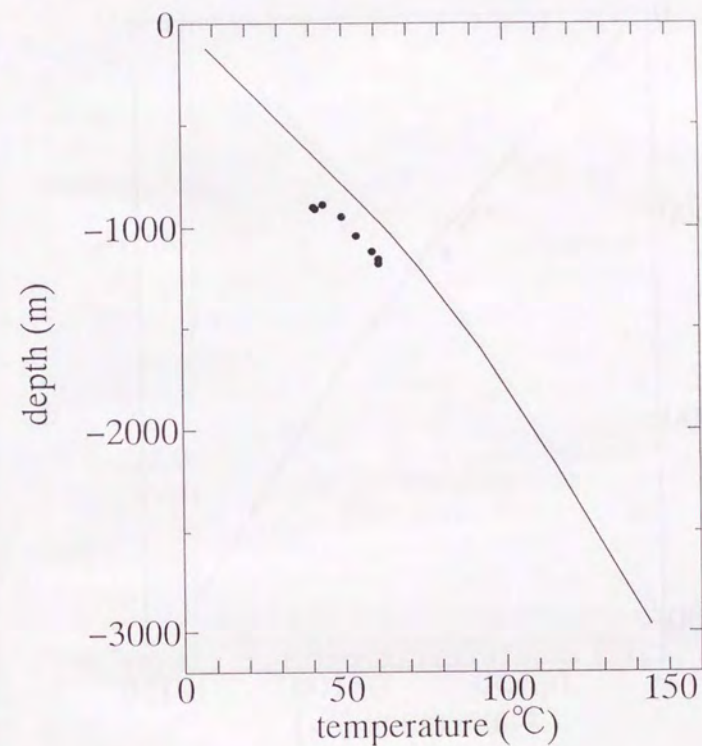


Fig. 7-32 Continued.
(e) Well No. 9.

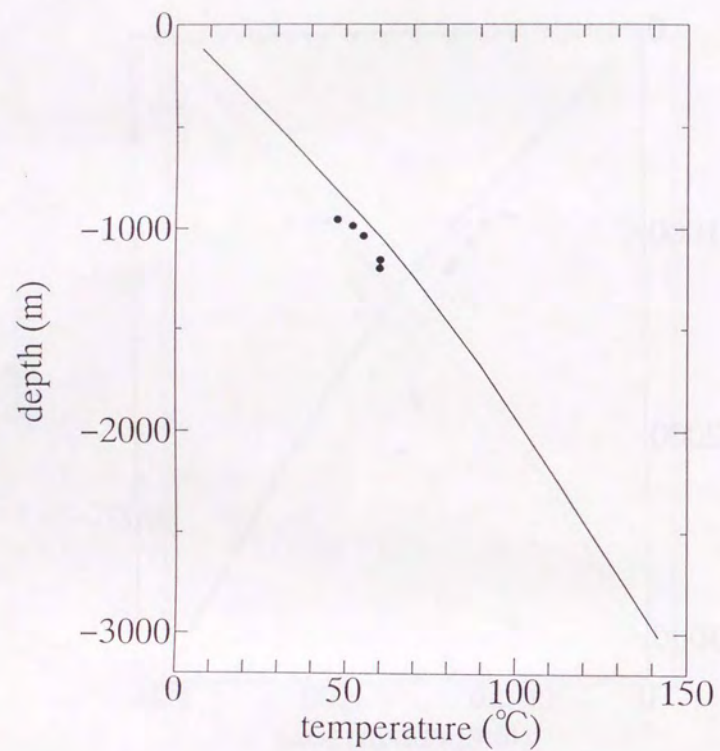


Fig. 7-32 Continued.
(f) Well No. 10.

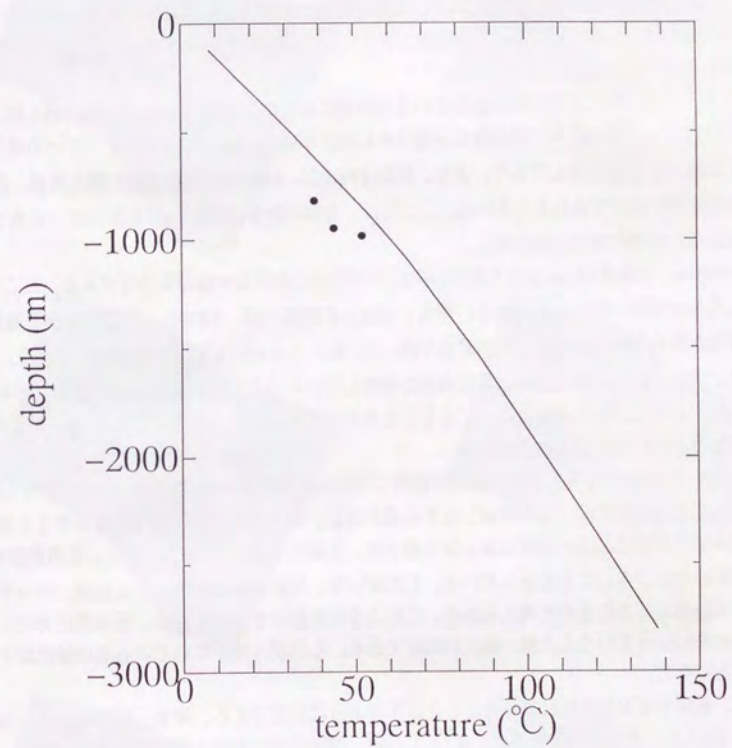


Fig. 7-32 Continued.
(g) Well No. 11.

決定することは、実際には非常に微妙な問題であることが予想される。

Fig. 7-33は、現時点における水飽和率分布を示した図である。これらの図を見てやると、少なくともTdユニットでは、阿賀沖構造、阿賀沖北構造、岩船沖構造のすべての地域において、石油飽和率の増加が起きていることがわかる。また、Sy-Unユニットでは、阿賀沖構造に、わずかながら石油飽和率の増加が起きており、石油の移動がその方向に向かって起こりつつある状況が見て取れる。しかしながら、Sy-Ikユニットでは、現在の油田地域には、ほとんど石油の移動は起こっていない結果となっている。

ところで、一般に地質学的に検討されている年代値には当然誤差が含まれてくる。例えば、高山ほか(1995)は、第四紀の年代を微化石層序から求める場合には、約10万年オーダーの精度で年代が決定されると主張しており、また、尾田(1986)は、6Ma以降現在までに関しては、約0.5Maの誤差で評価ができるとしている。ここでは、全体の計算期間を20万年間増加させることによって、その影響の評価を試みた。

Fig. 7-34は、全体を16.2m.y.とした計算の結果の現在における水飽和率分布である。ここでは、特に岩船沖構造に変化がみられる。即ち、16m.y.の計算では、Tdユニットまでしか石油飽和率の増加が起きなかったが、今回の計算では、Sy-Ikユニットにまで石油が存在している。このことは、少なくとも本地域の油田形成過程を考察していくうえでは、計算期間をどのように設定するか非常に重要な問題となってくることを示している。この問題に関しても、今後十分な検討を行っていく必要がある。

さて、Fig. 7-34を見ても、例えば岩船沖構造での石油飽和率はかなり小さいものとなっている。しかし、これは以下のように評価し直す必要がある。即ち、例えば下部椎谷層を考えた場合、岩船沖構造のすぐ北東の泥質岩からなる格子は、水飽和率が1.0である。即ち、その泥質岩中では石油の生成がないことを示している。したがって、岩船沖構造の地点の石油は、キッチン地域から移動してきたものと考えられる。このように移動してきた石油は、毛細管圧力のために泥質岩中に入っていくことは一般には困難である。したがって、これらの石油は砂岩層中にあることになる。

ここで、砂岩中での石油飽和率を考えると以下のように計算できる。即ち、鉾市中の砂岩層の体積比を s_r とし、各々の間隙率を ϕ_{ss} 、 ϕ_{ms} とすると、間隙全体に対する砂岩層の間隙の割合 ϕ_{rss} は、

$$\phi_{rss} = \frac{s_r \times \phi_{ss}}{s_r \times \phi_{ss} + (1 - s_r) \times \phi_{ms}} \quad (7.5)$$

となる。したがって、砂岩層中の石油飽和率 S_{oss} は、全体としての水飽和率を S_w とすると、

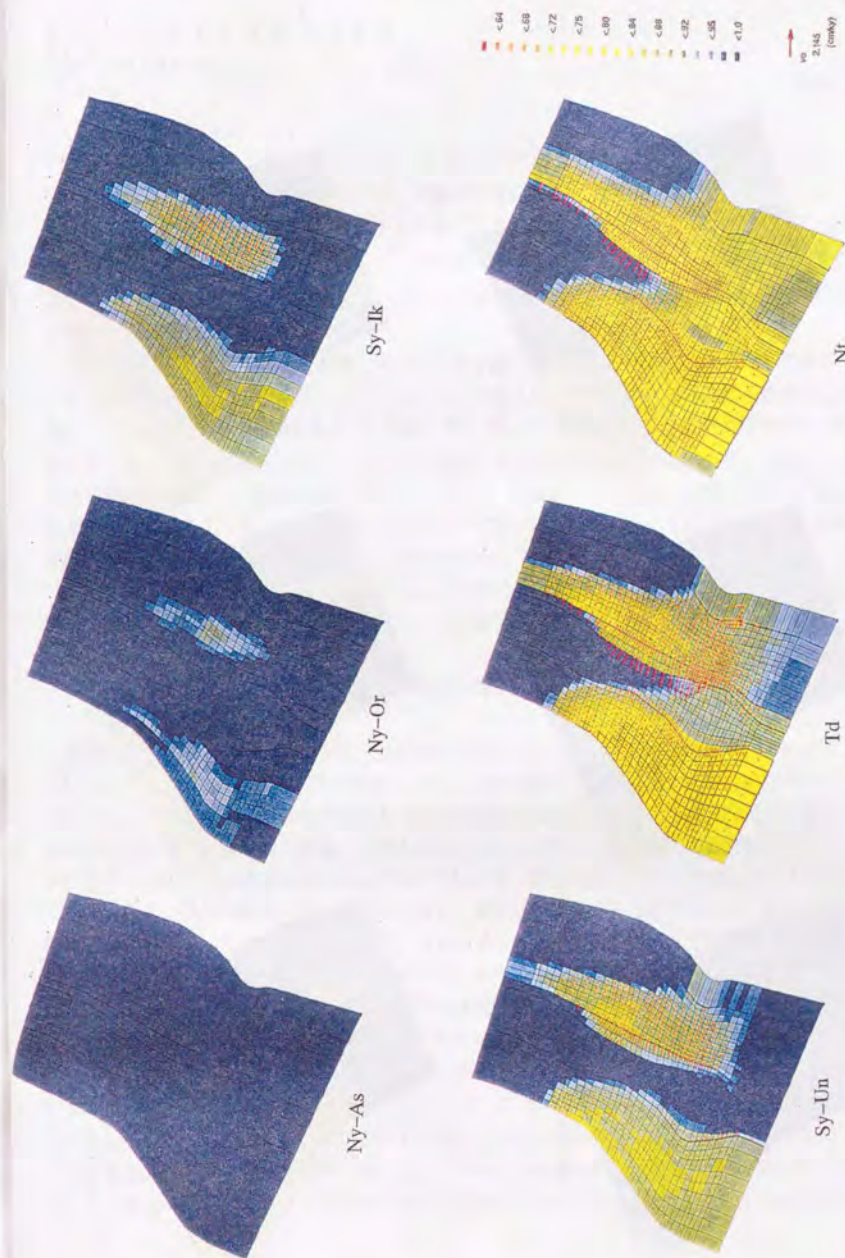


Fig. 7-33 Calculated water saturation distribution at present time.

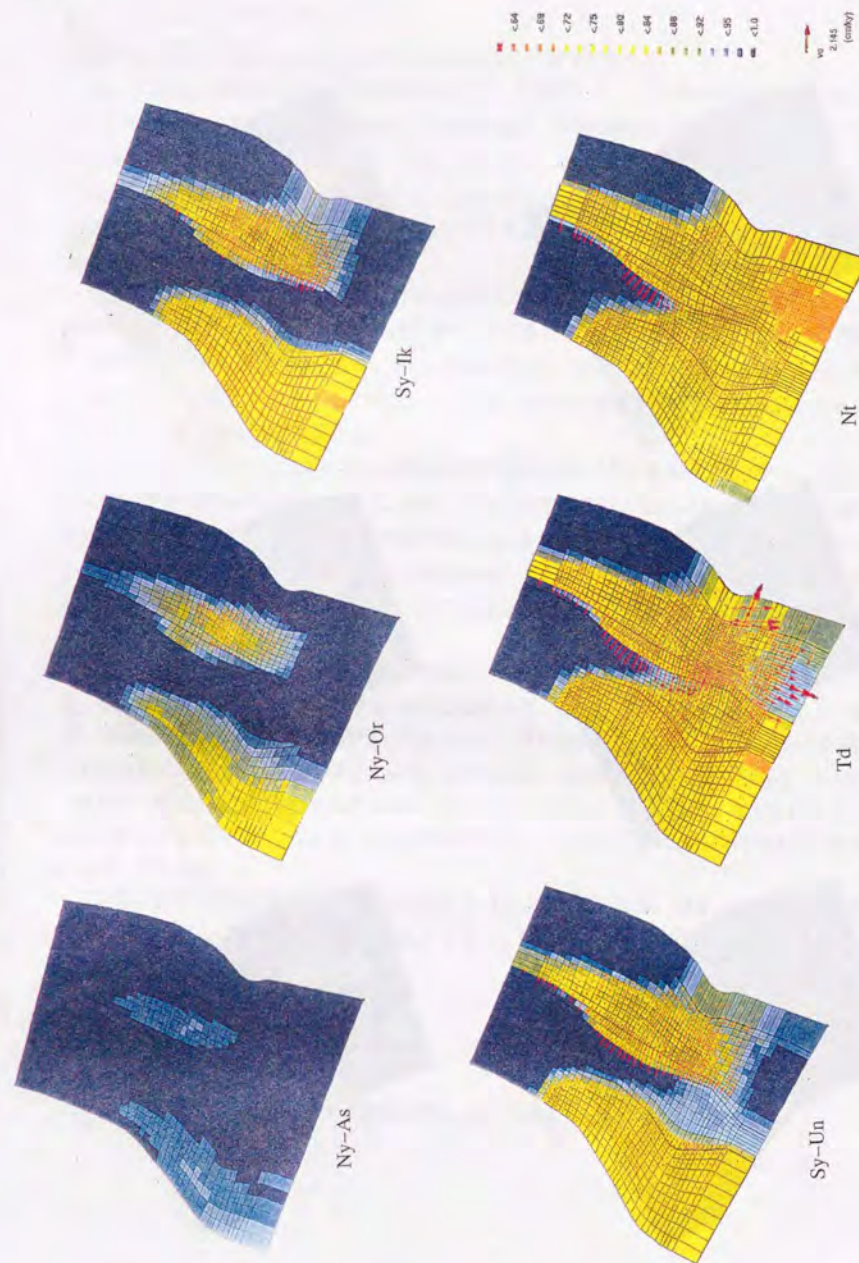


Fig. 7-34 Calculated water saturation distribution at present time by 16.2m.y. calculation.

$$S_{\text{oil}} = \frac{1 - S_w}{\phi_{\text{res}}} \quad (7.6)$$

と求められる。Fig. 7-35は、このようにして求められた砂岩層中の石油飽和率分布である。但し、この図で正しい値を示しているのは、泥質岩中で石油の生成が起きていない地域、即ち、埋没深度の浅い地域であることに注意する必要がある(Fig. 7-8参照)。この図から、今回の計算では、岩船沖構造に関しては、TdユニットからSy-Ikユニットまで、阿賀沖構造および阿賀沖北構造に関しては、TdユニットからSy-Unユニットまで砂岩層中に石油が胚胎するという結果を得たことがわかる。

このような計算結果を、より実際の現在の石油分布に近付けるためには、今後とも様々なパラメータに関する検討を行っていくことが必要となろうが、特に、流体流動を表現するパラメータ(絶対浸透率・相対浸透率・毛細管圧力)に関する検討をすることが重要であると考えられる。ここでは、本研究で行ってきた室内実験に関する検討のみでは不十分で、今回行ったような実堆積盆スケールでの現象を表現するような、非常に大きな時間・空間スケールでの流体流動を表現するようなパラメータをどのような方法で得るべきかという問題についての検討、理論の構築、技術開発を行っていくことが重要であろう。空間スケールのみを考えた場合においても、4. 3節で議論したような疑似関数の問題は、いまだに第一級の問題であり、それを時間スケールをも考慮したものにしていくことは容易ではなく、今後の重要な課題であろう。

7. 4 堆積盆シミュレーションの結果の評価に関する議論

堆積盆シミュレーションの結果は、前節までで議論してきたように、現在の坑井データとの比較を行うことによってその評価を行うのが一般的である。実際には、今回の検討で行ったように、計算結果を現在の坑井データと調和的なものにすることは、特に三次元モデルの場合容易ではない。しかし、今後、このようなシミュレーション技術を、地質技術者以外の人達にも受け入れられるようなものにしていくためには、現在のデータのみでの検討では不十分である。即ち、長期の地質現象としてみた場合、現在の一時点におけるデータが、実際の計測結果と調和的であったとしても、それが、現象が過去から適切な変化の道筋を通ってきた結果としての現時点のデータであることを保証しないからである。炭化水素鉱床の探鉱を対象とした堆積盆シミュレーションの場合には、各層準の温度履歴が非常に重要なファクターになってくることは一般に知られており、それを評価するために、計算結果の有機物熱成熟度、特にビトリナイト反射率と計算によってえられたその値との評価をすることがルーチンとして行われてきている(例えば、Lerche, 1990)。しかし、7. 2. 2. 7節で議論したように、計測されたビトリナイトの中にはしばしば抑圧ビトリナイトが存在する場合があります、このような手法が有効でない堆積盆も少なからずあると思われる。Suzuki et al.(1993)が提唱したような、各ビトリナイトごとにカイネティックパラメータを決定する方法も抑圧ビトリナイトのモデル化には有効であ

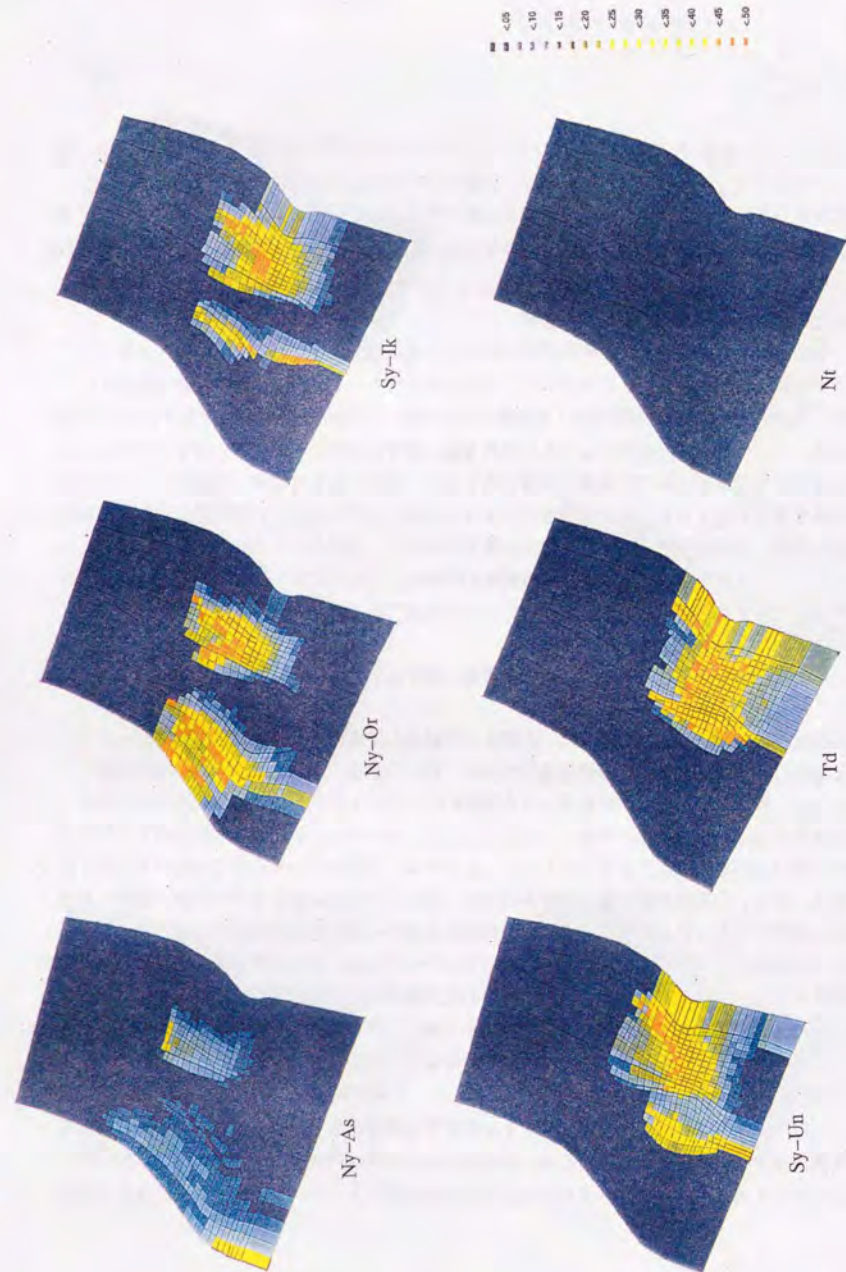


Fig. 7-35 Calculated oil saturation distribution in sandstone beds at present time by 16.2m.y. calculation.

場合があるが、これは、堆積盆地の熱履歴を仮定して、現在のビトリナイト反射率分布を最も良く表現するパラメータを試行錯誤によってきめる方法であり、そのような手法によって求められたパラメータを用いて熱履歴を評価することは、議論が回転する恐れがあり、Suzuki et al.(1993)の方法を熱履歴の評価に用いるには問題がある。

今後、堆積盆シミュレーションの結果の評価を、より妥当なものとするためには、地質現象のトレンド、即ち、物理量の変化の方向をも含めた計算結果の評価を行うことが必要となると考える。油層工学における生産管理の分野では、このようなヒストリーマッチングの手法は一般的に行われている(例えば、Aziz and Settari, 1979)が、このような手法が、堆積盆シミュレーションの評価にも必要になってくると思われる。このような評価を行うためには、過去のいくつかの時刻・場所における物理量(温度・間隙水圧・水飽和率・間隙率等)の取得をする技術が必要になってくる。ここでは、既存の技術の中で、このような手法に用いることができる可能性がある技術について挙げる。

まず、過去における温度と時間を評価する方法としては、隆起傾向にある地域でのfission track法による計測がある。この手法は、構造地質学の分野では、すでに、低変成度の地質体の上昇速度を見積るために用いられている(例えば、Agar et al., 1989)。また、同様に隆起傾向にある地域では、間隙中の自生粘土鉱物のK-Ar年代とその閉鎖温度を用いた過去の温度・時間の推定が可能であるかも知れない。この手法は、すでに花崗岩体の冷却速度を評価するために用いられている(例えば、佐藤ほか, 1990; 田中, 1993)。残念ながら、この手法は、閉鎖温度が堆積盆地内で堆積物が経験する温度よりも高いものが多く、直接用いることは困難であるが、最近では、比較的低温の地質体に対しても、K-Ar年代を用いた手法が適用されており(例えば、Mackenzie et al., 1990)、その妥当性には問題があるものの、検討されるべき問題であろう。上述の手法は、すべて過去から現在に向かって、堆積物の温度が低下してきている様な状態の地域に用いることができる手法であるが、筆者の知るかぎり、今回対象としたような様に堆積が進行しているような地域、即ち、温度が時間と共に上昇していくような地域における温度・時間を見積る方法は、現在のところ開発されていない。今後、大いに検討を行う必要があるが、このように、低温の領域における温度と時間を決定することができる手法の開発が進められれば、堆積盆シミュレーションのような数値解析の結果に関しても、ヒストリーマッチングの手法を適用した評価が可能であると思われる。温度以外の物理量を過去の時点において評価することは、非常に困難であると思われるが、最近、間隙水圧に関して、流体包有物を用いた推定を行った研究例がある(Vrolijk, 1987)。この手法では、その流体が取り込まれた時期を独立に決定する必要があるが、過去の圧力を記憶しているという点からは、検討すべき技術であろう。このほかにも、様々な手法を用いて、過去の時点における物理量を評価することが重要になってくると思われる。特に、この種の長期地質シミュレーション技術の必要性が将来に亘って増すことが予想されるが、その評価を行う場合には、本節で述べたような考え方が重要であろう。

Fig. 7-36は、堆積盆シミュレーション技術として、評価の部分まで入れた流れ図であるが、こ

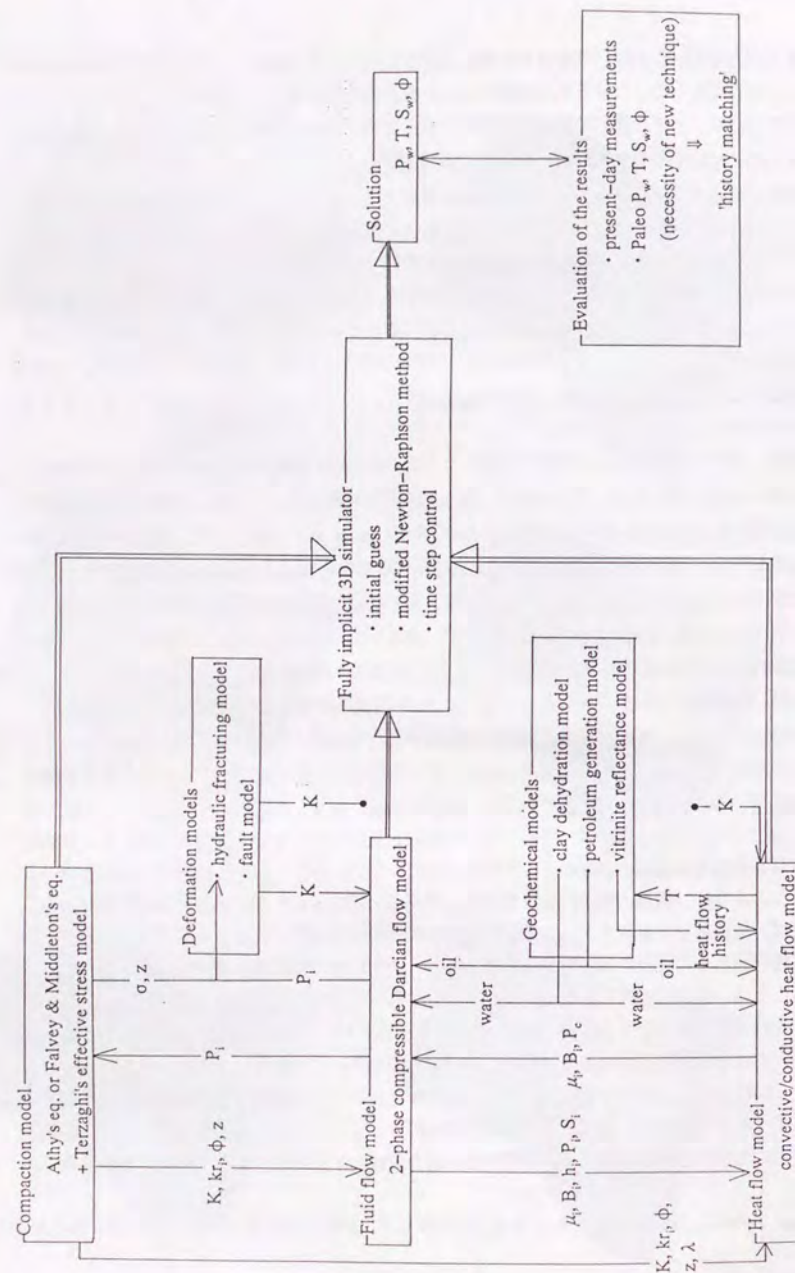


Fig. 7-36 Overall flow chart of the three-dimensional basin simulator.

のような全体系を視野にいれながら、個々の技術開発を行っていくことが望まれる。

7. 5 本章のまとめ

本章では、新潟沖堆積盆地を例として、三次元堆積盆地シミュレータBASIN3D2Pを用いた堆積盆地発達史の数値解析を行った。ここでは、新潟沖堆積盆地の種々のデータを総合的に評価することによって、当該地域の三次元的な地質構造、地層分布等を適切にモデル化した。その過程で、地質モデルを作成するうえでのいくつかの問題について議論した。特に、熱履歴に関して、一般に行われているようなビトリナイト反射率を用いたモデル化が、本堆積盆地に対して適用できないことを示し、ビトリナイト反射率を用いたモデル化の問題点を指摘した。また、BASIN3D2Pによって実堆積盆地を対象とした三次元的な堆積盆地発達史の数値計算が可能であることを示し、いくつかのパラメータに関して、地質学的に妥当な範囲でより適切な値を用いることによって、実際の現象に近い計算結果を得ることが可能であることを示した。また、堆積盆地シミュレーションにおいては、絶対年代をどのように評価するか、即ち、計算期間をどのように設定するかが非常に重要であることが示された。

さらに、長期地質シミュレーションの結果の評価を行ううえで、ヒストリーマッチング的な手法を用いることが重要であることを指摘し、そのためには過去の時点における物理量を推定する技術の開発が重要であることを示した。

今回行った新潟沖堆積盆地の解析結果は、実際の現象を十分に再現しているとはいえず、今後の検討課題が多く残されたが、このような手法は、今後、長期地質現象を評価するうえでは、一つの重要な手法となると考える。

8. まとめ

本研究は、地質学的・石油地化学的知見を基に、地質時間に亘って起こる堆積盆地発達史を数値的に解析する堆積盆シミュレーション技術に関して検討を行ったものである。

この技術は、1980年代から急速に研究が進展してきた分野であるが、多くの点で重要な問題が未解決のままであったために、探鉱用の道具として十分な機能を持つに至っていないという評価をうけていた。本研究では、このような現状に基づいて、大きく2つの方向からこれらの問題に取り組んでいる。1つは、実際の地質現象をより自然に表現するための数値解析的な方法の検討であり、具体的には、シミュレータの三次元化、空間分割法の工夫等である。また、もう1つは、堆積盆シミュレータにおいて重要であると考えられるパラメータの実験的検討であり、ここでは、具体的には泥質堆積物・泥質岩の浸透率の変化に関する検討を行っている。

本論文では、全体を7章に分けて述べたが、以下に各章で得られた成果についてまとめる。

まず、第1章は序論であり、堆積盆シミュレーション技術の必要性について簡単に述べ、また、本論文の内容について概略を説明した。

第2章では、堆積盆シミュレーション技術の現状を取りまとめ、従来の研究における問題点を述べ、本研究の目的を明らかにした。ここでは、堆積盆シミュレーション技術の発達史について概観し、また、一般的な堆積盆シミュレータで採用されている地質現象のモデル化の現状について包括的なレビューを行った。さらに、既存の堆積盆シミュレータの現状についてまとめ、それらの問題点を明らかにした。そのうえで、本研究の目的を明確に示した。それは、1)既存の堆積盆シミュレータの空間次元の問題、2)堆積盆内での現象を堆積盆シミュレータで表現する場合のパラメータセンシビティの問題、3)泥質堆積物中の流体流動物性に関する検討、である。次章以降では、このような問題点を念頭において議論を進めた。

第3章では、今回開発した三次元二相堆積盆シミュレータBASIN3D2Pについて、そこで用いられている地質現象の数値モデルに関する詳細、シミュレータで用いている物性に関する包括的なレビューと物性のモデル、シミュレータの連成解析手法の詳細について述べた。今回開発した三次元シミュレータBASIN3D2Pは、実用的な三次元シミュレータとしては少なくとも筆者の知るかぎりでは世界ではじめて開発されたものである。その後、実際の堆積盆地を対象とした計算を行う場合に必要バックストリッピングの方法について、メキシコ湾の坑井データを用いて説明し、また、そのデータを用いたフォワードモデリングの結果も示した。さらに、BASIN3D2Pの妥当性を評価するために、一様な走向を示す三次元モデルと二次元断面モデルの計算結果を比較し、結果が一致することを確認した。第3章の最後には、BASIN3D2Pが、侵食過程を含むような複雑な堆積盆発達史を示す堆積盆地や、急激な過剰間隙水圧の発生に伴う水圧破砕現象を起こすような条件を示す堆積盆地にも適用可能なことを示し、BASIN3D2Pの広範な適用性を確認した。

第4章では、堆積盆発達史を数値解析的手法で評価する場合に三次元モデルが必要であることを示すために、仮想的な堆積盆地を用いて二次元断面モデルと三次元モデルとの解析結果の比

較を行った。その結果、二次元断面モデルと三次元モデルでは大きく違った結果を示す場合があることが示された。その理由は、油田形成過程において流体の移動方向を考える場合に、二次元断面モデルでは考慮している断面方向のみの流体の移動しか考えられないのに対して、三次元モデルは、自然で起っている現象と同様に三次元的な流れを表現しようという本質的な違いがあることと、ある構造に集積する炭化水素を生成するのに貢献する根源岩の体積の見積りが二次元断面モデルと三次元モデルでは違ってくることに集約される。この結果、一般の堆積盆地の評価を行う場合には、三次元モデルを用いることが重要であることが示された。また、第4章の後半では、地質学的、石油地化学的知見から得られた炭化水素の移動形態を適切に表現するための格子分割法に関する議論を行った。ここでは、地質時間に亘る炭化水素の移動形態に関する地質学的、石油地化学的知見について整理がなされ、計算時間をできるだけ増やさない方向で、かつ今までの知見から得られたパターンと同様の移動パターンを示すような計算結果を得るための格子分割法を提示した。さらに、その格子分割法と細分格子による計算結果との比較を行い、今回提唱した格子分割による空間分割法によって十分良い精度で貯留層内の炭化水素の移動を表現できることを示した。この格子分割法は、既存の堆積盆シミュレータにも容易に適用することができ、汎用的な方法である。

第5章では、泥質堆積物の流体流動物性に関する検討の第一歩として、泥質堆積物の圧密に伴う浸透率の変化について実験的検討を行った。これは、泥質堆積物の流体流動物性は、炭化水素の所謂一次移動に重要な影響を与えるものにもかかわらず、その値、圧密に伴う変化のパターンに関する検討がほとんど行われてきていないからである。ここではまず、泥質スラリーを出発物質として圧密試験・透水試験を組み合わせた方法によって、力学的圧密に伴う泥質スラリーの浸透率の変化を明らかにする実験を行った。その結果、泥質スラリーの浸透率と間隙率の関係は、両対数グラフ上で直線関係を示しながら変化していくことを明らかにした。そのうえで、過去の論文に関する包括的なレビューを行い、それらのデータのほとんどは、今回の実験結果から得られた関係を満たしていることを示した。さらに、両対数グラフでの直線の傾きは、第一近似的には、試料の粘土含有率によって決定されることを実験的に示した。次に、この関係が泥質岩そのものの力学的圧密過程にも適用可能かどうかを評価するために、三軸圧縮試験機を用いたK₀圧密試験を行い、その過程でも泥質スラリーを用いた実験結果と同様の関係を得た。さらに、その傾きに関しても、泥質スラリーを用いたときと同様の関係が得られた。この結果は、泥質岩試料のある圧密段階での浸透率と間隙率を計測し、また、その試料中の粘土含有率を計測することによって、その試料が力学的圧密過程においてどのように浸透率を変化させていくかを推測することが可能であることを実験的に明らかにしたものである。また、泥質岩を用いた実験結果から、上述の関係は、除荷過程、再載荷過程にも適用できることが示された。本章の後半では、これらの結果を実堆積盆へ適用することが可能であるかどうかの検討を行い、基本的には、適用が可能であるとの結論が得られた。しかし、間隙率が小さい領域では、このような関係が成り立たないことが指摘され、その領域での浸透率と間隙率の関係を明らかにするためには、BASIN3D2Pのような堆積盆シミュレータを用いた繰り返し計算が必要であることを示した。また、このような計算の繰り返しによって適切な関係を得るためには、

坑井データの間隙率と間隙水圧とを適切に再現するような関係を得るようすべきであることを数値的に示した。これらの実験結果および数値解析の手法を併用することにより、泥質堆積物の間隙率の変化に応じた浸透率の変化を今までの完全に試行錯誤的な手法よりも適切に決定することができるものと考えられる。

第6章では、堆積盆シミュレータにおける物性の感度解析の例として、堆積盆内の過剰間隙水圧の発生と、石油の所謂一次移動に対する物性の感度の比較を行った。ここでは、泥質堆積物の浸透率-間隙率の関係がどちらの現象に対しても重要であることが示され、第5章で行った実験的、数値解析の手法が本質的に重要であることが再確認された。

第7章では、前章までの結果を実際の問題に適用することを試みた。解析の対象地域は、新潟沖の堆積盆地を選定した。解析に当たり、種々のデータを総合的に評価することによって、当該地域の三次元的な地質構造、地層分布等を適切にモデル化することを行った。特に、熱流量史を再現するに当たって、一般的なビトリナイトを用いた熱流量史再現が本堆積盆地に適用できないことを指摘し、ビトリナイトを用いた手法の問題点を述べた。そのうえで、所謂ジオダイナミックモデルを用いた熱流量史の推定を行うこととし、その手法を詳述した。今回の実堆積盆地を対象とした三次元ケーススタディでは、BASIN3D2Pを用いて実スケールの堆積盆地を対象とした解析が可能であることを示し、また、いくつかのパラメータに関して、地質学的に妥当な範囲でより適切な値を用いることによって、実際の現象に近い計算結果を得ることが可能であることが示された。また、堆積盆シミュレーションにおいては、絶対年代をどのように評価するか、即ち、計算期間をどのように設定するかが非常に重要であることが示された。さらに、長期地質シミュレーション一般にも適用される問題として、計算結果の評価手法についても検討を行った。ここでは、油層工学の分野で行われているようなヒストリーマッチング的な手法が重要であることを指摘し、そのためには、過去の時点における物理量の取得のための技術開発が必要であることを示した。

以上本研究の成果は、今後、探鉱対象が中・小規模油田や既存油田の近傍構造になることから、探鉱上重要なツールの一つになると考えられる三次元堆積盆シミュレータの開発に成功し、それが実堆積盆を対象とした問題にも適用であることを示したことで、このようなシミュレーションを行ううえで本質的に重要である泥質堆積物の浸透率の変化過程を実験的手法と数値解析の手法を用いて推定する方法を明らかにしたことで要約される。

しかし、堆積盆シミュレーション技術に関しては、まだ多くの問題が残されていることも事実である。特に、石油の堆積盆地内の移動の定量化は古く新しい問題として残されており、最近我々も二次移動を対象とした実験、解析を行い始めているところである(Tokunaga et al., 1994; 登坂ほか, 1994)。そのほかにも、1)長期地質現象を表現する物性のモデル化の問題、特に、泥質岩内の多相流体流動を表現するパラメータをどのようにモデル化するかという問題、2)入力値の取得方法の開発の問題、特に、熱流量史再現の手法の問題、初期有機物量、石油生成のカイネティックパラメータ再現の手法の問題、相対的海水準変動の再現の手法の問題、3)数値解析的な技術の問題、特に、計算効率の向上と空間の離散化に伴う数値分散の問題、アップス

ケーリングの程度に応じた物性の評価方法の問題、4)地質モデル自体の検討の問題、特に、ガスの移動を含めた三相系への拡張の問題、横方向の地層の変形や断層に伴う地質体の移動の問題、セメンテーションや圧力溶解-沈殿現象のような化学的現象の評価の問題、カストロフィックな地質現象の評価の問題、は、地質現象を数値解析の手法を用いて評価するという立場を取るうへでは本質的に重要な、しかし、いまだほとんど手を付けられていない問題である。さらに、実用的な面では、三次元的な入力データを簡便に作成するための入力システムの作成や、計算結果の三次元的な表示を行うための出力システムの作成も重要になってこよう。今後とも、堆積盆シミュレーション技術およびその周辺技術開発は精力的に進められていくことが考えられ、より実用的なツールとして発展していくことが望まれる。

謝辞

本研究は、筆者が東京大学工学部資源開発工学科に就職して以来約5年間の研究成果をまとめたものである。本研究をまとめるにあたり、多くの方々の暖かいご助力をいただきました。ここに記して感謝いたします。

東京大学大学院工学系研究科小島圭二教授には、筆者が研究をはじめて以来、常に本研究の内容、方向性全般に亘って有益なご示唆をいただきました。また、東京大学大学院工学系研究科登坂博行助教授には、数値解析に関して全くの素人であった筆者に、数値解析の基礎から丁寧にご教示いただき、数値解析上の個々の問題に関して、適切なご指導をいただきました。両先生には、筆者が研究を行なうに当たって適切な環境を提供していただきました。心より感謝いたします。

東京大学大学院理学系研究科島海光弘教授、多田隆治助教授には、先生方の主催するセミナーでの発表の機会を与えていただき、また、有益な議論をしていただきました。東京大学大学院工学系研究科大久保誠介教授には、水圧破砕現象に関してご教示いただき、また、文献を紹介していただきました。東京大学大学院工学系研究科正路徹也教授、藤田和男教授、増田昌敬助教授には、本論文の多くの部分に対して議論をしていただきました。出光石油開発株式会社奥井明彦氏には、堆積盆シミュレーション技術に関して、常に議論をしていただいています。また、筆者がロンドンで開催された会議に出席するに当たって、様々なご便宜をはかっていただきました。Institut Français du PétroleのJohannes Wendebourg博士には、ロンドンの会議で議論をしていただき、また、堆積盆シミュレーション技術の現状について適切なコメントをいただきました。感謝いたします。

本研究の第5章の内容は、元学生の細谷真一氏(現ダイヤコンサルタント株式会社)との共同研究の成果です。研究成果を本論文に掲載することを快諾していただき、また、実験や解析上で様々な議論をしていただいた同氏に感謝いたします。実験を行なううへでは、東京大学大学院工学系研究科齊藤祐氏、茂木勝郎氏、宮澤政氏、松尾誠治氏には、ご協力いただきました。茂木勝郎氏には、本論文の図を作成するに当たっても非常なご助力をいただきました。また、地質調査所環境地質部高橋学博士には、地質調査所所有の装置の利用を快諾していただき、また、実験上の様々な点に関して議論していただきました。Utrecht大学のChris J. Spiers教授、Colin J. Peach博士には、トランジェントパルス法による浸透率計測に関して議論していただきました。深く感謝いたします。

第7章の新潟堆積盆地のデータを収集するに当たっては、出光石油開発株式会社喜地克之氏、辻行介氏、木田昌宏氏、西塚知久氏には、種々のご便宜をはかっていただきました。特に、西塚知久氏には、地震探査断面の解釈をお願いし、また、普段のデータ処理の上で非常にお世話になりました。北海道大学大学院理学系研究科鈴木徳行博士には、新潟堆積盆地の熱履歴の再現を行なうにあたって議論をしていただきました。深く感謝いたします。

研究を行なうに当たって、ご協力をしてくださいました応用地質第二研究室に在籍された職員、研究員、大学院生、学部学生、研究生の方々に感謝いたします。特に、日鉱探開株式会社山石毅氏、株式会社C.C.S.小林仁氏には、コンピュータの使用を快諾していただきました。感謝いたします。

最後になりましたが、このような研究を行なうに当たって、家庭で過ごすべき多くの時間を割くことを認め、日々、陰となり日向となって激励してくれた妻眞理子に心から感謝します。また、0歳から2歳にかけての大事な時期と一緒に過ごす時間を取れなかったことを長男悠介にわびるとともに、心の支えとなってくれた家族に感謝いたします。

引用文献

1章

- Jerche, I., 1990, Basin Analysis: Quantitative Methods. Volume 1. Academic Press, San Diego, 562pp.
天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992, 改訂版 日本の石油・天然ガス資源. 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 東京, 520pp.

2章

- 秋久国男, 1979, 石油根源岩に関する反応速度論的研究(第5報) 石油根源岩の反応速度論的評価. 石技誌, 44, 86-93.
Ando, M., 1971, A fault-origin model of the Great Kanto Earthquake of 1923 as deduced from geodetic data. Bull. Earthq. Res. Inst., 49, 19-32.
Athy, L. F., 1930, Density, porosity and compaction of sedimentary rocks. Bull. AAPG, 14, 1-24.
Auge, J. J. and Brimhall, G. H., 1989, Geochemical modeling of steady state fluid flow and chemical reaction during supergene enrichment of porphyry copper deposits. Econ. Geol., 84, 506-528.
Baker, E. G., 1959, Origin and migration of oil. Science, 129, 871-874.
Baker, E. G., 1962, Distribution of hydrocarbons in petroleum. AAPG Bull., 46, 76-84.
Baldwin, B. and Butler, C. O., 1985, Compaction curves. AAPG Bull., 69, 622-626.
Bekins, B., McCaffrey, A. M. and Dreiss, S. J., 1994, Influence of kinetics on the smectite to illite transition in the Barbados accretionary prism. JGR, 99, 18147-18158.
Bestougeff, M. A., 1967, Petroleum hydrocarbons. In: Nagy, B. and Colombo, U. (eds.), Fundamental Aspects of Petroleum Geochemistry. Elsevier, Amsterdam, 77-108.
Bethke, C. M., 1985, A numerical model of compaction-driven groundwater flow and heat transfer and its application to the paleohydrology of intracratonic sedimentary basins. JGR, 90, 6817-6828.
Bethke, C. M. and Altaner, S. P., 1986, Layer-by-layer mechanism of smectite illitization and application to new rate law. Clays Clay Miner., 34, 146-154.
Bethke, C. M., Harrison, W. J., Upson, C. and Altaner, S. P., 1988, Supercomputer analysis of sedimentary basins. Science, 239, 261-267.

- Bonham-Carter, G. F. and Sutherland, A. J., 1967, Diffusion and setting of sediments at river mouths: a computer simulation model. *Trans. Gulf Coast Assoc. Geol. Soc.*, 17, 326-338.
- Braun, R. L. and Burnham, A. K., 1987, Analysis of chemical reaction kinetics using a distribution of activation energies and simpler models. *J. Energy Fuels*, 1, 153-161.
- Brennand, T. P., van Hoorn, B. and James, K. H., 1990, Historical review of North Sea exploration. In: Glennie, K. W. (ed.), *Introduction to the Petroleum Geology of the North Sea*. Third Edition. Blackwell Scientific Publ., Oxford, 1-33.
- Brimhall, G. H., Alpers, C. N. and Cunningham, A. B., 1985, Analysis of supergene ore-forming processes and groundwater solute transport processes using mass balance principles. *Econ. Geol.*, 80, 1227-1256.
- Burrus, J., 1994, From basin scale models to reservoir-scale models: up-scaling problems. *Abs. Geol. Soc. Petrol. Grp. Conf. Basin Modelling*, 30.
- Burst, J. F., 1969, Diagenesis of Gulf Coast clayey sediments and its possible relation to petroleum migration. *AAPG Bull.*, 53, 73-93.
- Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1947, *Conduction of Heat in Solids*. 2nd ed. Oxford Univ. Press, London, 386pp.
- Chery, J., Vilotte, J. P. and Daignieres, M., 1991, Thermomechanical evolution of a thinned continental lithosphere under compression: implication for the Pyrenees. *JGR*, 96, 4385-4412.
- Clark, J. A., Pranger, H. S., Walsh, J. K. and Primus, J. A., 1990, A numerical model of glacial isostasy in the Lake Michigan Basin. In: Schneider, A. F. and Fraser, G. S. (eds.), *Late Quaternary History of the Lake Michigan Basin*: Boulder, Colorado. GSA Spec. Pap., 251, 111-123.
- Connan, J., 1974, Time-temperature relation in oil genesis. *AAPG Bull.*, 58, 2516-2521.
- Cordell, R. J., 1972, Depth of oil origin and primary migration, a review and critique. *AAPG Bull.*, 56, 2029-2067.
- Cordell, R. J., 1973, Colloidal soap as proposed primary migration medium for hydrocarbons. *AAPG Bull.*, 57, 1618-1643.
- de Bremaecker, J. C., 1983, Temperature, subsidence, and hydrocarbon maturation in extensional basins: a finite element model. *AAPG Bull.*, 67, 1410-1414.
- Dickey, P. A., 1975, Possible primary migration of oil from source rock in oil phase. *AAPG Bull.*, 59, 337-345.
- Dickinson, G., 1953, Reservoir pressures in Gulf Coast Louisiana. *Bull., AAPG*, 37, 410-432.
- Doré, A. G., Augustson, J. H., Hermanrud, C., Stewart, D. J. and Sylta, Ø., 1993, Basin

- Modelling: Advances and Applications. Elsevier, Amsterdam, 675pp.
- Düppenbecker, S. and Illiffe, J., 1994, Abstracts Volume of the Geological Society Petroleum Group Conference on Basin Modelling. *Geol. Soc. Lond.*, London, 81pp.
- Dutta, N. C., 1986, Shale compaction, burial diagenesis, and geopressures: a dynamical model, solution and some results. In: Burrus, J. (ed.), *Thermal Modeling in Sedimentary Basins*. Éditions Technip, Paris, 149-172.
- Eberl, D. D. and Hower, J., 1976, Kinetics of illite formation. *GSA Bull.*, 87, 1326-1330.
- England, W. A., Mackenzie, A. S., Mann, D. M. and Quigley, T. M., 1987, The movement and entrapment of petroleum fluids in the subsurface. *J. Geol. Soc. Lond.*, 144, 327-347.
- Espitalié, J., Ungerer, P., Irwin, H. and Marquis, F., 1988, Primary cracking of kerogens. Experimenting and modelling C_1 , C_2 - C_3 , C_6 - C_{15+} classes of hydrocarbons formed. *Org. Geochem.*, 13, 893-899.
- Falvey, D. A. and Middleton, M. F., 1981, Passive continental margins: evidence for a prebreakup deep crustal metamorphic subsidence mechanism. *Proc. 26th IGC, Geol. Continent. Margins Symp.*, 103-114.
- Forbes, P. L., Ungerer, P., Kuhfuss, A. B., Riis, F. and Eggen, S., 1991, Compositional modelling of petroleum generation and expulsion. Trial application to a local mass balance in the Smørbukk Sør field, Haltenbanken area, Norway. *AAPG Bull.*, 75, 873-893.
- Foster, J. B. and Whalen, H. E., 1966, Estimation of formation pressure from electron surveys -offshore Louisiana. *JPT*, 18, 165-171.
- Gretener, P. E., 1981, Geothermics. Using Temperature in Hydrocarbon Exploration. *AAPG Course Note Ser.*, 17, 156pp.
- Ham, H. H., 1966, New charts help estimate formation pressures. *Oil Gas J.*, 64(51), 58-63.
- Harbaugh, J. W., 1966, Mathematical simulation of marine sedimentation with IBM 7090/7094 computers. *Kans. State Geol. Surv., Comput. Contrib.*, 1, 52pp.
- Hart, R. D., and John, C. M. St., 1986, Formulation of a fully-coupled thermal-mechanical-fluid flow model for non-linear geologic systems. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abs.*, 23, 213-224.
- Hedberg, H. D., 1936, Gravitational compaction of clays and shales. *Amer. J. Sci.*, 231, 241-287.
- Helland-Hansen, W., Kendall, C. G. St. G. C., Lerche, I. and Nakayama, K., 1988, A simulation of continental basin margin sedimentation in response to crustal movements, eustatic sea level change and sediment accumulation rates. *Mathem. Geol.*, 20, 777-802.

- Henry, P. and Wang, C. -Y., 1991, Modeling of fluid flow and pore pressure at the toe of Oregon and Barbados accretionary wedges. *JGR*, 96, 20109-20130.
- Hermanrud, C., 1993, Basin modelling techniques -an overview. In: Doré, A. G. et al. (eds.), *Basin Modelling: Advances and Applications*. Elsevier, Amsterdam, 1-34.
- Hood, A., Gutjahr, C. C. M. and Heacock, R. L., 1975, Organic metamorphism and the generation of petroleum. *AAPG Bull.*, 59, 986-996.
- Hosoi, H., 1963, First migration of petroleum in Akita and Yamagata Prefectures. *Japan. Assoc. Mineral. Petrol. Econ. Geol. J.*, 49, 43-55; 49, 101-114.
- Howard, J. J. and Roy, D. M., 1985, Development of layer charge and kinetics of experimental smectite alteration. *Clays Clay Miner.*, 33, 81-88.
- Huang, W. -L., Longo, J. M. and Pevcar, D. R., 1993, An experimentally derived kinetic model for smectite-to-illite conversion and its use as a geothermometer. *Clays Clay Miner.*, 41, 162-177.
- Hubbert, M. K., 1940, The theory of groundwater motion. *J. Geol.*, 48, 785-944.
- 市川康明, 1989, 地盤の熱的問題. 5.地盤中の熱伝導と熱輸送の数値解析. *土と基礎*, 37, (11), 81-91.
- Jones, P. B., 1984, Sequence of formation of back-limb thrusts and imbrications: implication for development of Idaho-Wyoming thrust belt. *AAPG Bull.*, 68, 816-818.
- Kappelmeyer, O. and Haenel, R., 1974, *Geothermics with Special Reference to Application*. Borntraeger, Berlin, 238pp.
- Kasahara, J., 1978, Crustal deformation associated with a fault formation estimated by the finite element method. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 53, 339-357.
- Katsube, T. J., Mudford, B. S. and Best, M. E., 1991, Petrophysical characteristics of shales from the Scotian Shelf. *Geophys.*, 56, 1681-1689.
- 河井興三, 1977a, 石油の移動と地層の圧密(序論). *石技誌*, 42, 71-75.
- 河井興三, 1977b, 拙著「石油の移動と地層の圧密(序論)」の補遺. *石技誌*, 42, 313-314.
- 小玉喜三郎, 1989, 堆積盆構造解析用シミュレーター. *地質ニュース*, 420, 11-16.
- Kruse, S., McNutt, M., Morgan, J. P., Royden, L. and Wernicke, B., 1991, Lithospheric extension near Lake Mead, Nevada: a model for ductile flow in the lower crust. *JGR*, 96, 4435-4456.
- Lasaga, A. C., 1981, Rate laws of chemical reactions. In: Lasaga, A. C. and Kirkpatrick, R. J. (eds.), *Kinetics of Geochemical Processes*. Mineral. Soc. Amer., Washington, D. C., 1-67.
- Lasaga, A., 1984, Chemical kinetics of water-rock interactions. *JGR*, 89, 4009-4025.

- Lawrence, D. T., Doyle, M. and Aigner, T., 1990, Stratigraphic simulation of sedimentary basins: concepts and calibrations. *AAPG Bull.*, 74, 273-295.
- Lee, W. H. K., 1965, Terrestrial Heat Flow. *AGU Monogr.*, 8, 276pp.
- Lerche, I., 1990, 前掲(1章)
- Leythaeuser, D., Schaefer, R. G. and Yukler, A., 1982, Role of diffusion in primary migration of hydrocarbons. *AAPG Bull.*, 66, 408-429.
- Lichtner, P. C., 1985, Continuum model for simultaneous chemical reactions and mass transport in hydrothermal systems. *GCA*, 49, 779-800.
- Lichtner, P. C., 1988, The quasi-stationary state approximation to coupled mass transport and fluid-rock interaction in a porous medium. *GCA*, 52, 143-165.
- Lopatin, N. V., 1971, Temperature and geologic time as factors in coalification. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Geol.*, 3, 95-106.
- Mackenzie, A. S., Leythaeuser, D., Muller, P., Quigley, T. M. and Radke, M., 1988, The movement of hydrocarbons in shales. *Nature*, 331, 63-65.
- Magara, K., 1968, Compaction and migration of fluids in Miocene mudstone, Nagaoka Plain, Japan. *Bull. AAPG*, 52, 2466-2501.
- Magara, K., 1980, Comparison of porosity-depth relationships of shale and sandstone. *J. Petrol. Geol.*, 3, 175-185.
- McAuliffe, C. D., 1979, Oil and gas migration: chemical and physical constraints. *AAPG Bull.*, 63, 761-781.
- McKenzie, D., 1978, Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 40, 25-32.
- Meade, R. H., 1966, Factors influencing the early stages of land subsidence in central California. *U. S. Geol. Surv., Prof. Pap.*, 497D, 39pp.
- Meinschein, W. G., 1959, Origin of petroleum. *AAPG Bull.*, 43, 925-943.
- 長島昭, 1978, 移動速度論. コロナ社, 東京, 142pp.
- Nakayama K. and van Sien, D. C., 1981, Simulation model for petroleum exploration. *AAPG Bull.*, 65, 1230-1255.
- Nakayama, K., 1987, Hydrocarbon-expulsion model and its application to Niigata area, Japan. *AAPG Bull.*, 71, 810-821.
- 中山一夫, 1988, 堆積盆評価のための二次元総合モデル. *石技誌*, 53, 41-50.
- 中山一夫, 1991, 一次元堆積盆モデルを用いた根源岩評価 -海外における実例-. *石技誌*, 56, 64-75.
- Neglia, S., 1979, Migration of fluids in sedimentary basins. *AAPG Bull.*, 63, 573-579.

- Neuzil, C. E., 1986, Groundwater flow in low-permeability environments. *Water Resour. Res.*, 22, 1163-1195.
- Neuzil, C. E., 1994, How permeable are clays and shales? *Water Resour. Res.*, 30, 145-150.
- Norton, D., 1984, Theory of hydrothermal systems. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci. Lett.*, 12, 155-177.
- 大塚康範, 1978, 地震断層のずれにともなう地盤・岩盤の変形解析(その1). *応用地質*, 19, 87-96.
- Okui, A. and Waples, D. W., 1993, Relative permeabilities and hydrocarbon expulsion from source rocks. In: Doré, A. G. et al. (eds.), *Basin Modelling: Advances and Applications*. Elsevier, Amsterdam, 293-301.
- Ortenblad, A., 1930, Mathematical theory of the process of consolidation of mud deposits. *J. Math. Phys.*, 9, 73-149.
- Pepper, A. S., 1991, Estimating the petroleum expulsion behavior of source rocks: a novel quantitative approach. In: England, W. A. and Fleet, A. J. (eds.), *Petroleum Migration*. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 59, 9-31.
- Perrier, R. and Quiblier, J., 1974, Thickness changes in sedimentary layers during compaction history. *AAPG Bull.*, 52, 57-65.
- Price, L. C., 1976, Aqueous solubility of petroleum as applied to its origin and primary migration. *AAPG Bull.*, 60, 213-244.
- Proshlyakhov, B. K., 1960, Reservoir properties of rocks as a function of their depth and lithology. *Geol. Nefti Gaza*, 1960(12), 24-29.
- Pytte, A. M. and Reynolds, R. C., 1989, The thermal transformation of smectite to illite. In: Naeser, N. D. and McCulloh, T. H. (eds.), *Thermal History of Sedimentary Basins*. Springer-Verlag, New York, 133-140.
- Rieke III, H. H. and Chilingarian, G. V., 1974, *Compaction of Argillaceous Sediments*. Elsevier, Amsterdam, 424pp.
- Roberson, H. E. and Lahann, R. W., 1981, Smectite to illite conversion rates: effect of solution chemistry. *Clays Clay Miner.*, 29, 129-135.
- Royden, L. and Keen, C. E., 1980, Rifting process and thermal evolution of the continental margin of eastern Canada determined from subsidence curves. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 51, 342-361.
- Royden, L., Sclater, J. G. and von Herzen, R. P., 1980, Continental margin subsidence and heat flow: important parameters in formation of petroleum hydrocarbons. *AAPG Bull.*, 64, 173-187.
- Rubey, W. W. and Hubbert, M. K., 1959, Role of fluid pressure in mechanics of overthrust

- faulting II. Overthrust belt in geosynclinal area of western Wyoming in light of fluid-pressure hypothesis. *Bull. GSA*, 70, 167-206.
- Scheidegger, A. E., 1974, *The Physics of Flow through Porous Media*. 3rd ed. Univ. Toronto Press, Toronto, 353pp.
- Sclater, J. G. and Christie, P. A. F., 1980, Continental stretching: an explanation of the post-mid-Cretaceous subsidence of the Central North Sea Basin. *JGR*, 85, 3711-3739.
- Settari, A., 1992, Physics and modeling of thermal flow and soil mechanics in unconsolidated porous media. *SPEPE*, (2), 47-55.
- Sharp, J. M., Jr., 1976, Momentum and energy balance equations for compacting sediments. *Math. geol.*, 8, 305-322.
- Sharp, J. M., Jr. and Domenico, A., 1976, Energy transport in thick sequences of compacting sediment. *GSA Bull.*, 87, 390-400.
- Slingerland, R., Harbaugh, J. W. and Furlong, K. P., 1994, *Simulating Clastic Sedimentary Basins*. Prentice Hall, New Jersey, 220pp.
- Stach, E., Mackowsky, M. -Th., Teichmüller, M., Taylor, G. H., Chandra, D. and Teichmüller, R., 1982, *Stach's Textbook of Coal Petrology*. 3rd ed. Gebrüder Borntraeger, Berlin, 535pp.
- Stallman, R. W., 1963, Computation of groundwater velocity from temperature data. In: Bentall, R. (ed.), *Methods of Collecting and Interpreting Ground-Water Data*. USGS Water-Supply Pap., 1544-H, 36-46.
- Suzuki, N., Matsubayashi, H. and Waples, D. W., 1993, A simpler kinetics model of vitrinite reflectance. *AAPG Bull.*, 77, 1502-1508.
- Sweeney, J. J. and Burnham, A. K., 1990, Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. *AAPG Bull.*, 74, 1559-1570.
- 田口一雄, 1986, 石油鉱床新論 -最近における石油地化学の進展と石油成因論の新展開-. 田口一雄教授退官記念論文集, 田口一雄教授退官記念会, 1-36.
- Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P. and Leroueil, S., 1983, The permeability of natural soft clays. Part II: permeability characteristics. *Can. Geotech. J.*, 20, 645-660.
- 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992, 前掲(1章)
- Terzaghi, K., 1925, *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage*. Deuticke, Leipzig, 399pp.
- Tezlauff, D. M. and Harbaugh, J. W., 1989, *Simulating Clastic Sedimentation*. Van Nostrand Reinhold, New York, 202pp.
- Tissot, B., 1969, Premières données sur les mécanismes et la cinétique de la formation du

- petrole dans les sediments: Simulation d'un schema réactionnel sur ordinateur. *Rev. Inst. Franç. Petrol.*, 24, 470-501.
- Tissot, B. and Espitalié, J., 1975, L'évolution thermique de la matière organique des sédiments: applications d'une simulation mathématique. *Rev. Inst. Franç. Petrol.*, 30, 713-777.
- Tissot, B. and Welte, D. E., 1978, *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer-Verlag, New York, 538pp.
- Tissot, B. and Welte, D. E., 1984, *Petroleum Formation and Occurrence*. 2nd ed. Springer-Verlag, New York, 699pp.
- 徳永朋祥・登坂博行・小島圭二, 1994, 長期油田形成プロセスのモデリングと三次元堆積盆シミュレータの開発. *石技誌*, 59, 519-530.
- Tokunaga, T., Tosaka, H., Kojima, K., Nakamura, T. and Hosoya, S., 1994, Effect of petrophysical parameters on long term fluid migration: experimental and numerical approach. *Abs. Geol. Soc. Petrol. Grp. Conf. Basin Modelling*, 59-64.
- Tushingham, A. M. and Peltier, W. R., 1991, Ice-3G: a new global model of Late Pleistocene deglaciation based upon geophysical predictions of post-glacial relative sea level change. *JGR*, 96, 4497-4523.
- 内田吉彦・伯野元彦, 1990, 粒状体シミュレーションによる岩屑流・土石流の解析. *地震研彙報*, 65, 321-411.
- Ujiie, Y., 1986, Contact-metamorphic effect on parameters for kerogen maturation. *Org. Geochem.*, 9, 375-378.
- 氏家良博, 1990, *石油地質学概論*. 東海大学出版会, 東京, 128pp.
- Ungerer, P., Burrus, J., Doligez, B., Chenet, P. Y. and Bessis, F., 1990, Basin evaluation by integrated two-dimensional modeling of heat transfer, fluid flow, hydrocarbon generation, and migration. *AAPG Bull.*, 74, 309-335.
- Valentine, G. A. and Wohletz, K. H., 1989, Numerical models of Plinian eruption columns and pyroclastic flows. *JGR*, 94, 1867-1887.
- van Hinte, J. E., 1978, Geohistory analysis -application of micropaleontology in exploration geology. *AAPG Bull.*, 62, 201-222.
- Vasseur, G. and Velde, B., 1993, A kinetic interpretation of the smectite-to-illite transformation. In: Doré, A. G. et al. (eds.), *Basin Modelling: Advances and Applications*. Elsevier, Amsterdam, 173-184.
- Velde, B. and Vasseur, G., 1992, Estimation of the diagenetic smectite illite transformation in time-temperature space. *Amer. Mineral.*, 77, 967-976.
- Wangen, M. and Throndsen, T., 1994, A comparison between 1D, 2D and 3D basin

- simulations. *Abs. Geol. Soc. Lond. Petrol. Grp. Conf. Basin Modelling*, 72.
- Waples, D. W., 1980, Time and temperature in petroleum formation: application of Lopatin's method to petroleum exploration. *AAPG Bull.*, 64, 916-926.
- Waples, D. W., 1991, Innovative methods for quantifying poorly known parameters necessary for numerical basin modeling. *J. Japan. Assoc. Petrol. Tech.*, 56, 96-107.
- Waples, D. W., Kamata, H. and Suizu, M., 1992, The art of maturity modeling. Part 1: finding a satisfactory geologic model. *AAPG Bull.*, 76, 31-46.
- Watts, A. and Ryan, W. B. F., 1976, Flexure of the lithosphere and continental margin basin. *Tectonophys.*, 36, 25-44.
- Weller, J. M., 1959, Compaction of sediments. *Bull. AAPG*, 43, 273-310.
- Welte, D. H. and Yukler, M. A., 1981, Petroleum origin and accumulation in basin evolution - a quantitative model. *AAPG Bull.*, 65, 1387-1396.
- Whitney, G. and Northrop, H. R., 1988, Experimental investigation of the smectite to illite reaction: dual reaction mechanisms and oxygen-isotope systematics. *Amer. Mineral.*, 73, 77-90.
- Wong, P. -Z., 1988, The statistical physics of sedimentary rocks. *Phys. Today*, Dec., 24-32.
- Yukler, M. A., Cornford, C. and Welte, D. H., 1978, One-dimensional model to simulate geologic, hydrodynamic and thermodynamic development of a sedimentary basin. *Geol. Rundsch.*, 67, 960-979.
- Zeng, J. and Lowe, D. R., 1992, A numerical model for sedimentation from highly-concentrated multi-sized suspensions. *Mathem. Geol.*, 24, 393-415.

3章

- Al-Tabbaa, A. and Wood, D. M., 1987, Some measurements of permeability of kaolin. *Geotechnique*, 37, 499-503.
- Amyx, J. W., Bass, Jr., D. M. and Whiting, R. L., 1960, *Petroleum Reservoir Engineering*. McGraw-Hill, New York, 610pp.
- Appleyard, J. R., Cheshire, I. M. and Pollard, R. K., 1980, Special techniques for fully implicit simulators. *Numer. Meth.*, 395-408.
- Archic, G. E., 1950, Introduction to petrophysics of reservoir rocks. *Bull. AAPG*, 34, 943-961.
- Athy, L. F., 1930, 前掲(2章)
- Baldwin, B. and Butler, C. O., 1985, 前掲(2章)

- Bekins, B., McCaffrey, A. M. and Dreiss, S. J., 1994, 前掲(2章)
- Bethke, C. M., 1985, 前掲(2章)
- Blackwell, D. D. and Steele, J. L., 1989, Thermal conductivity of sedimentary rocks: measurements and significance. In: Naeser, N. D. and McCulloh, T. H. (eds.), *Thermal History of Sedimentary Basins*. Springer-Verlag, Berlin, 13-36.
- Burcik, E. J., 1979, *Properties of Petroleum Reservoir Fluids*. IHRDC, Boston, 190pp.
- Burnham, A. K. and Sweeney, J. J., 1989, A chemical kinetic model of vitrinite maturation and reflectance. *GCA*, 53, 2649-2657.
- Clark, Jr., S. P., 1966, Thermal conductivity. *GSA Mem.*, 97, 459-482.
- Demongodin, L., Vasseur, G. and Brigaud, F., 1993, Anisotropy of thermal conductivity in clayey formations. In: Doré, A. G. et al. (eds.), *Basin Modelling: Advances and Applications*. Elsevier, Amsterdam, 209-217.
- Dutta, N. C., 1988, Fluid flow in low permeable, porous media. *Rev. L'Inst. Franç. Petrol.*, 43, 165-180.
- Ervine, W. B. and Bell, J. S., 1987, Subsurface in situ stress magnitudes from oil-well drilling records: an example from the Venture area, offshore eastern Canada. *Can. J. Earth Sci.*, 24, 1748-1759.
- Fairhurst, C., 1965, Measurement of in situ rock stresses, with particular reference to hydraulic fracturing. *Felsmechanik*, II, 129-147.
- Falvey, D. A. and Middleton, M. F., 1981, 前掲(2章)
- Farouq Ali, S. M. and Abou-Kassem, J., 1988, Simulation of thermal recovery processes. *Proc. 1st Intern. Forum Reserv. Simul.*, 25-75.
- Gambill, W. R., 1957, You can predict heat capacities. *Chem. Eng.*, June, 243-248.
- Hahne, E., Song, Y. W. and Gross, U., 1991, Measurements of thermal conductivity in porous media. In: Kakaç, S. et al. (eds.), *Convective Heat and Mass Transfer in Porous Media*. Kluwer Academic, *****, 849-865.
- Haimson, B. C., 1978, The hydrofracturing stress measuring method and recent field results. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abs.*, 15, 167-178.
- Hedberg, H. D., 1936, 前掲(2章)
- 細谷真一・徳永朋祥・高橋学・小島圭二・登坂博行, 1995, 三軸圧縮試験機による堆積軟岩の高圧 K_0 圧密試験. 第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 271-275.
- 石原研而, 1988, *土質力学*. 丸善, 東京, 297pp.
- Issler, D. R., 1984, Calculation of organic maturation levels for offshore eastern Canada - implication for general application of Lopatin's method. *Can. J. Earth Sci.*, 21, 477-488.

- Karig, D. E. and Hou, G., 1992, High-stress consolidation experiments and their geologic implication. *JGR*, 97, 289-300.
- Kaviany, M., 1991, *Principles of Heat Transfer in Porous Media*. Springer-Verlag, New York, 626pp.
- Lambe, T. W. and Whitman, R. V., 1969, *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York, 553pp.
- Lerche, I., 1990, 前掲(1章)
- Lerman, A., 1979, *Geochemical Processes and Sediment Environments*. John Wiley & Sons, ****, 381pp.
- Leroueil, S., Bouclin, G., Tavenas, F., Bergern, L. and La Rochelle, P., 1990, Permeability anisotropy of natural clays as a function of strain. *Can. Geotech. J.*, 27, 568-579.
- Ljunggren, C. and Amadei, B., 1989, Estimation of virgin rock stresses from horizontal hydrofractures. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abs.*, 26, 69-78.
- Luo, X. and Vasseur, G., 1992, Contributions of compaction and aquathermal pressuring to geopressure and the influence of environmental conditions. *AAPG Bull.*, 76, 1550-1559.
- McCain, Jr., W. D., 1973, *The Properties of Petroleum Fluids*. Petroleum Publishing, Tulsa, 325pp.
- Magara, K., 1978, *Compaction and Fluid Migration*. Elsevier, Amsterdam, 319pp.
- Magara, K., 1980, 前掲(2章)
- Matsumoto, Y., 1991, Generalized black oil modeling. Masters report, Stanford Univ.
- Middleton, M. F., 1982, Tectonic history from vitrinite reflectance. *Geophys. J. Royal Astron. Soc.*, 62, 121-132.
- Morgan, J. T. and Gordon, D. T., 1970, Influence of pore geometry on water-oil relative permeability. *J. Petrol. Tech.*, 22, 1199-1208.
- Morrow, D. W. and Issler, D. R., 1993, Calculation of vitrinite reflectance from thermal histories: a comparison of some methods. *AAPG Bull.*, 77, 610-624.
- 日本機械学会, 1981, *日本機械学会蒸気表*. 日本機械学会, 東京, 124pp.
- 日本機械学会, 1986, *伝熱工学資料. 改訂第4版*. 日本機械学会, 東京, 365pp.
- 日本機械学会, 1988, *流れの数値シミュレーション*. コロナ社, 東京, 304pp.
- Okui, A. and Waples, D. W., 1993, 前掲(2章)
- Peach, C. J., 1991, Influence of deformation on the fluid transport properties of salt rocks. Unpublished doctor thesis, Univ. Utrecht.
- Pytte, A. M. and Reynolds, R. C., 1989, 前掲(2章)
- Reiter, M. and Mansure, A. J., 1983, *Geothermal studies in the San Juan Basin and the Four*

- Corners Area of the Colorado Plateau I. Terrestrial heat-flow measurements. *Tectonophysics*, 91, 233-251.
- Rubey, W. W. and Hubbert, M. K., 1959, 前掲(2章)
- Sass, J. H., Lachenbruch, A. H. and Munroe, R. J., 1971, Thermal conductivity of rocks from measurements on fragments and its application to heat-flow determinations. *JGR*, 76, 3391-3401.
- Schowalter, T. T., 1979, Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment. *AAPG Bull.*, 63, 723-760.
- 関口嘉一, 1986, 地殻熱流量測定のための岩石熱伝導率の推定. 田口一雄教授退官記念論文集, 田口一雄教授退官記念会, 187-198.
- 石油技術協会, 1993, 最近の我が国の石油開発. 石油技術協会, 東京, 442pp.
- 石油公団, 1993, 新技術講座「コア試験法」. 石油公団石油開発技術センター油層研究室.
- Shi, Y. and Wang, C. -Y., 1986, Pore pressure generation in sedimentary basins: overloading versus aquathermal. *JGR*, 91, 2153-2162.
- Somerton, 1958, Some thermal characteristics of porous rocks. *JPT*, May, 61-64.
- Somerton, W. H., 1992, Thermal Properties of Temperature-related Behavior of Rock/Fluid Systems. Elsevier, Amsterdam, 257pp.
- Suppe, J., 1985, Principles of Structural Geology. Prentice-Hall, New Jersey, 537pp.
- Sweeney, J. J. and Burnham, A. K., 1990, 前掲(2章)
- 玉井信行, 1989, 水理学1. 培風館, 東京, 256pp.
- Terzaghi, K., 1925, 前掲(2章)
- Tissot, B. and Welte, D. H., 1984, 前掲(2章)
- Tokunaga, T., Hosoya, S., Kojima, K. and Tosaka, H., 1994, Change of hydraulic properties of muddy deposits during compaction: assessment of mechanical and chemical effect. *Proc. 7th IAEG Cong.*, 635-643.
- Tosaka, H., 1989, A study on special techniques for field-scale reservoir simulation. Unpublished doctor thesis, Univ. Tokyo.
- Vinsome, P. K. W., 1976, Orthomin, an iterative method for solving sparse banded sets of simultaneous linear equations. *SPE*, 5279, *SPE-AIME 4th Symp. Numer. Simul. Reserv. Perf.*, Los Angeles.
- 渡辺邦夫, 1983, 岩盤割れ目系の諸地質量を考慮した岩盤浸透流の解析に関する基礎研究. 埼玉大学地盤水理実験施設紀要, 2, 1-247.
- Wilkinson, W. B. and Shipley, E. L., 1972, Vertical and horizontal laboratory permeability measurements in clay soils. In: *Intern. Assoc. Hydraulic Res. (ed.)*, Fundamentals of

- Transport Phenomena in Porous Media. Elsevier, *****, 285-298.
- Woodside, W. and Messmer, J. H., 1961, Thermal conductivity of porous media. I. Unconsolidated sands. *J. Appl. Phys.*, 43, 1688-1699.
- Zierfuss, H. and van der Vliet, G., 1956, Laboratory measurements of heat conductivity of sedimentary rocks. *Bull. AAPG*, 40, 2475-2488.
- 4章
- Catalan, L., Xiaowen, F., Chatzis, I. and Dulien, A. L., 1992, An experimental study of secondary oil migration. *AAPG Bull.*, 76, 638-650.
- Dembicki, Jr., H. and Anderson, M. J., 1989, Secondary migration of oil: experiments supporting efficient movement of separate, buoyant oil phase along limited conduits. *AAPG Bull.*, 73, 1018-1021.
- Dickey, P. A., 1975, 前掲(2章)
- England, W. A., Mackenzie, A. S., Mann, D. M. and Quigley, T. M., 1987, 前掲(2章)
- Frette, V., Feder, J., Jøssang, T. and Meaki, P., 1992, Buoyancy-driven fluid migration in porous media. *Phys. Rev. Lett.*, 68, 3164-3167.
- Leythaeuser, D., Schaefer, R. G. and Yukler, A., 1982, 前掲(2章)
- Mackenzie, A. S., Leythaeuser, D., Muller, P., Quigley, T. M. and Radke, M., 1988, 前掲(2章)
- 中山一夫, 1988, 前掲(2章)
- 石油技術協会, 1993, 前掲(3章)
- Tissot, B. and Welte, D. H., 1984, 前掲(2章)
- 登坂博行, 1988, 油層シミュレーションにおいて空間離散化に調和する擬似関数を自動生成する手法に関して - その1 動的垂直相漸移の概念による方向別擬似関数の自動作成手法. *石技誌*, 53, 348-356.
- 登坂博行, 1989, 油層シミュレーションにおいて空間離散化に調和する擬似関数を自動作成する手法に関して - その2 擬似関数自動生成手法の詳細および離散化誤差と擬似関数に関する一般的議論. *石技誌*, 54, 231-239.
- 5章
- Alpan, I., 1967, The empirical evaluation of the coefficient K_0 and K_{0R} . *Soils Found.*, 7, 31-40.
- Al-Tabbaa, A. and Wood, D. M., 1987, 前掲(3章)

- Bennett, R. H. and Hulbert, M. H., 1986, Clay Microstructure. D. Reidel Publishing, Boston, 161pp.
- Birch, F., 1966, Compressibility; elastic constants. GSA Mem., 97, 97-173.
- Brace, W. F., Walsh, J. B. and Frangos, W. T., 1968, Permeability of granite under high pressure. JGR, 73, 2225-2236.
- Bryant, W. R., Hottman, W. and Trabant, P., 1975, Permeability of unconsolidated and consolidated marine sediments, Gulf of Mexico. Marine Geotech., 1, 1-14.
- Chandler, R. J., Leroueil, S. and Trenter, N. A., 1989, Measurement of the permeability of London Clay using a self-boring permeameter. Geotechnique, 40, 113-124.
- Clukey, E. C. and Silva, A. J., 1980, Permeability of deep-sea clays: Northwestern Atlantic. Marine Geotech., 5, 1-26.
- de Kimpe, C. R., 1984, Effect of air-drying and critical point drying on the porosity of clay soils. Can. Geotech. J., 21, 181-185.
- Delange, P. and Lefebvre, G., 1984, Study of the structure of a sensitive Champlain clay and of its evolution during consolidation. Can. Geotech. J., 21, 21-35.
- Diamond, S., 1970, Pore size distribution in clays. Clays Clay Mineral., 18, 7-23.
- Dutta, N. C., 1988, 前掲(3章)
- Gracia-Bengochea, I., Lovell, C. W. and Altschaeffl, A. G., 1979, Pore distribution and permeability of silty clays. ASCE J. Geotech. Eng. Div., 105, GT7, 839-856.
- Griffiths, F. J. and Joshi, R. C., 1989, Change in pore size distribution due to consolidation of clays. Geotechnique, 39, 159-167.
- Hsieh, P. A., Tracy, J. V., Neuzil, C. E., Bredhoeft, J. D. and Silliman, S. E., 1981, A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of 'tight' rocks -I. Theory. Intern. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abs., 18, 245-252.
- 細谷真一・徳永朋祥・小島圭二・登坂博行, 1994, 高圧圧密透水試験装置を用いた泥質堆積物の透水性評価. 日本応用地質学会平成6年度研究発表会講演論文集, 135-138.
- 細谷真一・徳永朋祥・高橋学・小島圭二・登坂博行, 1995, 前掲(3章)
- 井波和夫・星野一男, 1974, 堆積岩の圧縮係数と圧密について. 石技誌, 39, 357-385.
- 石原研而, 1988, 前掲(3章)
- 石島洋二・薛自求・高橋学, 1991, 新第三紀堆積岩の透水挙動と等価管路モデルによる解釈. 応用地質, 32, 209-220.
- 石島洋二・薛自求・高橋学, 1993, トランジェント・パルス法による岩石の透水特性の測定に関する, 3の基礎的問題. 資源と素材, 109, 511-516.
- 岩本健・斉藤英光・西田和範・田中荘一, 1990, 過圧密な材料の K_0 圧密三軸試験について. 第22回

岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 331-335.

- Karig, D. E. and Hou, G., 1992, 前掲(3章)
- Katsube, J. T., Mudford, B. S. and Best, M. E., 1991, 前掲(2章)
- Kemper, W. D., 1961, Movements of water as affected by free energy and pressure gradients. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 25, 255-265.
- 木山保・高橋学, 1992, Transient Pulse法の勧め! 資源, 4, 687-696.
- Lapierre, C., Leroueil, S. and Locat, J., 1990, Mercury intrusion and permeability of Louisville clay. Can. Geotech. J., 27, 761-773.
- Lawrence, G. P., 1978, Stability of soil pores during mercury intrusion porosimetry. J. Soil Sci., 29, 299-304.
- Lerman, A., 1979, 前掲(3章)
- Leroueil, S., Bouclin, G., Tavenas, F., Bergeron, L. and La Rochelle, P., 1990, 前掲(3章)
- Leroueil, S., Lerat, P., Hight, D. W. and Powell, J. J. M., 1992, Hydraulic conductivity of a recent estuarine silty clay at Bothkennar. Geotechnique, 27, 568-579.
- Little, J. A., Muir Wood, D., Paul, M. A. and Bouazza, A., 1992, Some laboratory measurements of permeability of Bothkennar clay in relation to soil fabric. Geotechnique, 42, 355-361.
- Magara, K., 1978, 前掲(3章)
- McKelvey, J. G. and Milne, I. H., 1962, The flow of salt solutions through compacted clay. Clays Clay Miner., 9, 248-259.
- Mesri, G. and Olson, R. E., 1971, Mechanisms controlling the permeability of clays. Clays Clay Miner., 19, 151-158.
- Michaels, A. S. and Lin, C. S., 1954, The permeability of kaolinite. Indust. Eng. Chem., 46, 1239-1246.
- Morin, R. H. and Silva, A. J., 1984, The effects of high pressure and high temperature on some physical properties of ocean sediments. JGR, 89, 511-526.
- Nagaraj, T. S., Pandian, N. S. and Narasimha Raju, P. S. R., 1993, Stress state-permeability relationships for fine-grained soils. Geotechnique, 43, 333-336.
- Neuzil, C. E., 1994, How permeable are clays and shales? WRR, 30, 145-150.
- Neuzil, C. E., Cooley, C., Silliman, S. E., Bredhoeft, J. D. and Hsieh, P. A., 1981, A transient laboratory method for determining the hydraulic properties of 'tight' rocks -II. Application. Intern. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abs., 18, 253-258.
- 小田美明・三田地利之, 1992, 飽和粘土の三軸 K_0 圧密試験方法について. 土木学会論文集, 448, 45-52.

- 大河内保彦・龍岡文夫, 1983, K_0 値測定法 -三軸セルを用いる方法-. 土と基礎, 31(7), 56-57.
- Olsen, H. W., 1966, Darcy's law in saturated kaolinite. WRR, 2, 287-294.
- Olson, R. E. and Daniel, D. E., 1981, Measurement of the hydraulic conductivity of fine-grained soils. In: Zimmie, T. F. and Riggs, C. O. (eds.), Permeability and Groundwater Contaminant Transport. ASTM Spec. Tech. Publ., 746, 18-64.
- Pane, V. Croce, P., Zindarcic, D., Ko, H. Y., Olsen, H. W. and Schiffman, R. L., 1983, Effects of consolidation on permeability measurements for soft clay. Geotechnique, 33, 67-72.
- Raymond, G. P., 1966, Laboratory consolidation of some normally consolidated soils. Can. Geotech. J., 3, 217-234.
- Reed, M. A., Lovell, C. W., Altschaeffl, A. G. and Wood, L. E., 1980, Frost-heaving rate predicted from pore-size distribution: reply. Can. Geotech. J., 17, 639-640.
- Samarasinghe, A. M., Huang, Y. H. and Dinevich, V. P., 1982, Permeability and consolidation of normally consolidated soils. ASCE J. Geotech. Eng. Div., 108, GT6, 835-850.
- Scheidegger, A. E., 1974, 前掲(2章)
- Schneider, F., Burrus, J. and Wolf, S., 1993, Modelling overpressures by effective-stress/porosity relationships in low-permeability rocks: empirical artifice or physical reality? In: Doré, A. G. et al. (eds.), Basin Modelling: Advances and Applications. Elsevier, Amsterdam, 333-341.
- 新城俊也・小宮康明, 1984, 第三紀層泥岩の高圧圧密特性. 土と基礎, 32(2), 11-16.
- 杉本文男・松本浩二・遠藤修, 1985, トランジェント・パルス法による透水係数測定について. 応用地質, 26, 121-128.
- 高橋学・薛自求, 1989, パルス法を用いて岩石の透水係数を測定する場合の問題点について. 地質ニュース, 421, 46-54.
- 高橋学・薛自求・小出仁, 1991, 稲田花崗岩・白浜砂岩・来待砂岩・新第三紀泥質岩の透水特性について. 地調月報, 42, 305-331.
- Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P. and Leroueil, S., 1983, 前掲(2章)
- Taylor, D. W., 1948, Fundamentals of Soil Mechanics. John Wiley & Sons, New York, 700pp.
- Tokunaga, T., Hosoya, S., Kojima, K. and Tosaka, H., 1994, 前掲(3章)
- Trimmer, D., Bonner, B., Heard, H. C. and Duba, A., 1980, Effect of pressure and stress on water transport in intact and fractured gabbro and granite. JGR, 85, 7059-7071.
- Ungerer, P., Burrus, J., Doligez, B., Chenet, P. Y. and Bessis, F., 1990, 前掲(2章)
- Walder, J. and Nur, A., 1986, Permeability measurement by the pulse-decay method: effects

- of poroelastic phenomena and non-linear pore pressure diffusion. Intern. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abs., 23, 225-232.
- Walker, L. K. and Raymond, G. P., 1968, The prediction of consolidation rates in a cemented clay. Can. Geotech. J., 5, 192-216.
- Wentworth, C. K., 1922, A scale of grade and class terms for clastic sediments. J. Geol., 30, 377-392.
- 山内豊聡・藤原東雄・安原一哉, 1971, 沖積粘土の繰返し圧密特性について. 九大工学集報, 44, 499-504.
- 6章
- Athy, L. F., 1930, 前掲(2章)
- Lerche, I., 1990, 前掲(1章)
- Luo, X. and Vasseur, G., 1992, 前掲(3章)
- McKinstry, H. A., 1965, Thermal expansion of clay minerals. Amer. Mineral., 50, 212-222.
- Nakayama, K., 1987, 前掲(2章)
- Shi, Y. and Wang, C. -Y., 1986, 前掲(3章)
- Skinner, B. J., 1966, Thermal expansion. GSA Mem., 97, 75-96.
- Tissot, B. P., Pelet, R. and Ungerer, Ph., 1987, Thermal history of sedimentary basins, maturation indices, and kinetics of oil and gas generation. AAPG Bull., 71, 1445-1466.
- Tissot, B. P. and Welte, D. E., 1984, 前掲(2章)
- 7章
- Agar, S. M., Cliff, R. A., Duddy, I. R. and Rex, D. C., 1989, Accretion and uplift in the Shimanto belt, SW Japan. J. Geol. Soc. Lond., 146, 893-896.
- 秋元和實・長谷川四郎, 1989, 日本近海における現生底生有孔虫の深度分布 -古水深尺度の確立に向けて-. 地質学論集, 32, 229-240.
- Aziz, K. and Settari, A., 1979, Petroleum Reservoir Simulation. Applied Science Publishers, London, 476pp.
- 馬場敬・峯崎智成・佐藤時幸, 1994, 海水準変動に起因した海底扇状地の発達様式 -新潟県北蒲原郡, 中蒲原郡, 西蒲原郡および阿賀沖海域の椎谷期を例として-(その1). 石技誌, 59, 43-53.
- Blow, W. L., 1969, Late Middle Eocene to Recent planktonic foraminiferal biostratigraphy. Proc. 1st Intern. Conf. Planktonic Microfossils, 1, 199-421.

- Blunt, M., King, M. J. and Scher, H., 1992, Simulation and theory of two-phase flow in porous media. *Phys. Rev.*, 46, 7680-7699.
- Buchardt, B. and Lewan, M. D., 1990, Reflectance of vitrinite-like macerals as a thermal maturity index for Cambrian-Ordovician Alum Shale, Southern Scandinavia. *AAPG Bull.*, 74, 394-406.
- Buiskool Toxopeus, J. M. A., 1983, Selection criteria for the use of vitrinite reflectance as a maturity tool. In: Brooks, J. (ed.), *Petroleum Geochemistry and Exploration of Europe*. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 12, 295-307.
- 地質調査所, 1992, 日本地質アトラス 第2版. 地質調査所.
- 蒲生俊敬, 1995, 日本海の底層循環. *科学*, 65, 316-323.
- 長谷川四郎・秋元和實・北里洋・的場保望, 1989, 底生有孔虫にもとづく日本の後期新生代古水深指標. *地質学論集*, 32, 241-253.
- Lerche, I. 1990, 前掲(1章)
- Magara, K., 1968, 前掲(2章)
- Maiya, S., Saito, T. and Sato, T., 1976, Late Cenozoic planktonic foraminiferal biostratigraphy of Northwest Pacific sedimentary sequences. In: Takayanagi, Y. and Saito, T. (eds.), *Progress in Micropaleontology. Spec. Publ. Micropaleont.*, 395-422.
- Mackenzie, J. S., Taguchi, S. and Itaya, T., 1990, Cleavage dating by K-Ar isotopic analysis in the Paleogene Shimanto Belt of eastern Kyushu, S.W. Japan. *J. Min. Petrol. Econ. Geol.*, 85, 161-167.
- McKenzie, D., 1978, 前掲(2章)
- 日本の地質「中部地方I」編集委員会, 1988, 日本の地質4 中部地方I. 共立出版, 東京, 332pp.
- 尾田太良, 1986, 新第三紀の微化石年代尺度の現状と問題点 - 中部および東北日本を中心として -. 北村信教授退官記念地質学論文集, 297-312.
- Okada, H. and Bukry, D., 1980, Supplementary modification of code numbers to low-latitude coccolith biostratigraphic zonation, (Bukry, 1973; 1975). *Marine Micropal.*, 5, 321-325.
- 佐藤興平・鈴木正男・柴田賢, 1990, アパタイトのフィッショントラック年代からみた丹沢岩体の冷却史と丹沢山地の変成作用. *地質雑*, 96, 69-72.
- 佐藤時幸・高山俊昭・加藤道雄・工藤哲朗, 1987, 日本海側に発達する最上部新生界の石灰質微化石層序 その1:新潟地域. *石技誌*, 52, 231-242.
- 佐藤時幸・高山俊昭・加藤道雄・工藤哲朗・亀尾浩司, 1988, 日本海側に発達する最上部新生界の石灰質微化石層序 その4:総括-太平洋側および鮮新統/更新統境界の模式地との対比. *石技誌*, 53, 475-491.
- 石油技術協会, 1973, 日本の石油鉱業と技術. 石油技術協会, 東京, 430pp.

- Suzuki, N., Matsubayashi, H. and Waples, D. W., 1993, A simpler kinetic model of vitrinite reflectance. *AAPG Bull.*, 77, 1502-1508.
- 鈴木徳行・三瓶良和・松林英樹, 1995, 秋田, 新潟地域における根源岩の有機地球化学的相違. *石技誌*, 60, 62-75.
- 鈴木宇耕, 1989, 日本海東部新第三系堆積盆地の地質. *地質学論集*, 32, 143-183.
- Sweeney, J. J. and Burnham, A. K., 1990, 前掲(2章)
- 高山俊昭・佐藤時幸・亀尾浩司・後藤登美子, 1995, 第四系石灰質ナンノ化石層序と鮮新統/更新統境界の年代値. *第四紀研究*, 34, 157-170.
- 田中和広, 1993, 花崗岩中の割れ目のキャラクターゼーション(その1) - 代表的花崗岩の冷却過程 -. 電中研報告, U92051, 33pp.
- 天然ガス鉱業会・大陸棚石油開発協会, 1992, 前掲(1章)
- Tissot, B. P., Pelet, R. and Ungerer, Ph., 1987, 前掲(6章)
- Tokunaga, T., Tosaka, H., Kojima, K., Nakamura, T. and Hosoya, S., 1994, 前掲(2章)
- Uyeda, S., 1972, Heat flow. In: Uyeda, S. (ed.), *Crust and Upper Mantle of the Japanese Area, Part 1, Geophysics. Japanese Committee for Upper Mantle Project*, 97-105.
- Vrolijk, P. J., 1987, Tectonically driven fluid flow in the Kodiak accretionary complex, Alaska. *Geology*, 15, 466-469.
- Waples, D., Kamata, H. and Suizu, M., 1992, 前掲(2章)
- 渡辺其久男, 1983, 東北裏日本油田地域の年代層序の現状. *石技誌*, 48, 88-92.
- Wilkinson, D., 1986, Percolation effects in immiscible displacement. *Phys. Rev.*, 34, 1380-1391.
- 山路敦・佐藤比呂志, 1989, 中新世における東北本州弧の沈降運動とそのメカニズム. *地質学論集*, 32, 339-349.
- 8章
- ↑ Tokunaga, T., Tosaka, H., Kojima, K., Nakamura, T. and Hosoya, S., 1994, 前掲(2章)
- 登坂博行・徳永朋祥・小島圭二・中村規・高橋輝, 1994, 多孔質媒体中の2相密度差置換に関する研究. 平成6年度石油技術協会春期講演会講演要旨, 164.

