フラクチャー型貯留層を有する堆積盆地解析の試み*

指宿 敦志**・中山 一夫**・国安 稔***・小玉喜三郎****

(平成 2 年 10 月 4 日受付, 2 年 11 月 22 日受理)

Basin Evaluation for the Field with Fractured Reservoirs

By

Atsushi IBUSUKI, Kazuo NAKAYAMA, Minoru KUNIYASU
 and Kisaburo KODAMA

Abstract: Petroleum explorations become more difficult recently, because its target is deeper and the trap types are more complicated. This paper presents discussion about timing between formation of deep-seated fracture reservoir and trapping hydrocarbon (generation, migration and accumulation) in an area of the Hokkaido region.

Tectonic stress is thought to be a main driving force of fracturing. In this tectonic simulation, formation and development of fracture in every sedimentation step is reproduced by using Virtual Basement Displacement Method (KODAMA *et al.*, 1985). The plastic strain that formed fractured reservoir tends to concentrate in the surrounding area of Well A during all the geologic time except a period of depositing e formation. On the other hand, there are not so significant concentration around Wells B and C through the time. It can be thought that Well A and its surrounding area seem to be favorable for forming fractured reservoir.

For the hydrocarbon generation, migration and accumulation simulation, large permeability value is input to a position of large plastic strain observed by the tectonic simulation in order to investigate effect of tectonic fracturing. It is an evidence from the experiments by the model that fluid pressure around Well D should increase without tectonic fracturing whereas no excess pressure would be observed in the case that tectonic fracturing has occurred. This result is supported by the fact that density logging from Well D shows that all the data are plotted on the normal trend and there are no indication for abnormal pressure while drilling. Gas saturation around Well A is also higher as a result of effective flow into the reservoirs by the tectonic fracturing. The peak of generation rate of oil and gas exist during the period of depositing d formation and e formation.

As a conclusion of the study of these simulations, the area has enough hydrocarbon generation potential. However, focusing on formation of the trap (fractured reservoir), Well A and its surrounding area has a possibility of forming fractured oil and gas field.

1. はじめに

近年の石油探鉱は対象層の大深度化および、トラップ

タイプの複雑化の傾向が見られる。このような中で、フラクチャー型貯留層自体はさほど目新しいものではないが、最近、4,000m を越える大深度に発達するフラクチャー型貯留層からの石油・ガスの発見が報告され、探鉱関係者の注目を集めている。

一般に、フラクチャーの形成機構としては、

- 1) 造構応力
- 2) (炭酸塩岩や蒸発岩の) 溶脱による空隙や、空洞内崩壊による角礫化

* 平成 2 年 6 月 14 日第 55 回石油技術協会総会地質・探鉱部門シンポジウム「堆積盆地評価法とその応用」にて講演

** 石油資源開発(株)探鉱部

*** 石油資源開発(株)札幌探鉱所

**** 工業技術院地質調査所燃料資源部

- 3) 流体異常圧
- 4) 上載荷重圧
- 5) 火山岩の冷却

によるものなどが考えられる。

石油・天然ガス鉱床の探鉱をする上で、トラップの形成時期と石油・ガスの生成・移動・集積の時期が、それぞれどのように関連付けられるかというタイミングの問題は、鉱床成立の可能性を探ると言う観点から見て非常に重要である。そして、フラクチャー型リザーバーを有する堆積盆においては、このトラップの形成時期はまさに、フラクチャーの形成・発達時期として捉えることができる。

本稿では、北海道地域で実際に掘削された坑井データに基づき、上述のフラクチャー型貯留層の形成・発達過程に注目して行った堆積盆地解析の試みを紹介する。まずはじめに、現在見られるような地質構造が形成される過程において発生する応力（いわゆる造構応力）に注目し、そのような応力に起因する岩石の塑性歪領域の発生場所や塑性歪の強さの時代に伴う変遷、言い換えればフラクチャーの形成・発達の過程を仮想基盤変位法（KODAMA *et al.*, 1985）を用いて再現する構造解析を行った。さらに、その結果を考慮して、石油・ガスの生成・移動・集積についての堆積盆地解析を行い、フラクチャー型貯留層を有する石油・天然ガス鉱床形成の可能性について考察した。

2. 地質層序

シミュレーション対象地域（第1図）では、現在までに数坑の4,000mを越える坑井が掘削されている。これらの坑井のデータを基に本地域の層序をまとめると、下位から以下になる。

基盤岩：到達した坑井がないため詳細は不明である。

a層：緻密堅硬な礫岩、あるいは含礫粗粒砂岩を主体とし、場所によって（黄）緑灰色の凝灰岩をはさむ。礫は、安山岩、黒色頁岩、灰緑色硬質泥岩、粘板岩、チャート、緑色岩類などが大部

図1 実験断面線および坑井配置

分を占め、フラクチャーを充填する沸石脈が発達する。種々の調査から本地域における主要探鉱対象は深度4,500m以深の本層中の礫岩に発達するフラクチャー型貯留層であることが判明している。

- b層：暗灰～オリーブ灰色シルト岩または泥岩、黄灰～灰白色凝灰岩、明灰色砂岩および石炭の互層よりなる。下位のa層とは整合関係にある。
- c層：暗褐色堅硬な泥岩およびシルト岩よりなり、中部に玄武岩シートが挟在する。下位のb層とは整合関係にある。
- d層：最上部、中部および、最下部の火砕岩類（安山岩質凝灰岩～凝灰角礫岩～火山角礫岩）とこれらの間のオリーブ灰色シルト岩～泥岩よりなるが、地域東側のWell D周辺では暗灰色泥岩中に砂岩や凝灰岩が挟在する岩相が優勢となる。下位のc層とは不整合関係にある。
- e層：暗灰色泥岩（場所によってやや凝灰質）と、同様な色調の硬質泥岩よりなる。シミュレーション

図2 シミュレーション対象地域の地質層序

ン対象地域東側に発達し西に向かって薄化尖滅する。下位のd層とは整合関係にある。

f層：上部は灰色～オリーブ灰色シルト岩よりなり、下部はオリーブ灰色シルト質泥岩を主体として、部分的に石灰質で、全体に硬質である。下位のe層とは整合関係にある。

g層：Well A 近傍では細～中粒砂岩を主体として、上部に軟質なシルト岩および礫岩を挟むが、東方に向かって細粒化する傾向があり、Well B, C 近傍では灰色砂質シルト岩に、また Well D 近傍では灰色～暗灰色シルト岩に移化する。下位のf層とは整合関係にある。

h層：砂・礫、あるいは軟質なシルト岩よりなる。下位のg層とは不整合関係にある。

i層+完新統：砂・礫を主体として軟質な灰色粘土層が挟在する。下位のh層とは整合関係にある。

本地域の層序表を第2図に示す。

3. 地質構造

第3図にシミュレーションの対象とした地域の地質断面図を示す。本地域は、大局的には断面東端に中心(Basin Center)を有する堆積盆の西～南西半を占めている。この中で、Well A および B, C 付近では、特にd層以下の層準でWell A 近傍に極隆部を有する緩やかな箱型の背斜構造を形成している。この背斜はその頂部の2ヶ所で西落ちの逆断層によって切られている。一方、Well D 付近ではe層以上の層準で西翼が東翼に比べてやや傾斜のきつい背斜構造を形成している。

4. フラクチャーの形成・発達過程

4.1 実験方法および実験条件

地層の変形量が大きくなると、ある場所では岩石が塑性的に変形する。このような領域では岩石の破壊に伴う断裂(フラクチャー)が発生し、特に深部においては、これが貯留層の主力になることが期待できる。このことは、現象としては比較的理解しやすいものの、具体的にいつどこでどのようなフラクチャーが発生するかという点について、これを特定するのは困難なことが多い。

今回は、二次元の仮想基盤変位法(KODAMA *et al.*, 1985)を用いてシミュレーションを行った。この実験法は、ある地域の堆積盆の形成はその下位の基盤の構造運動に規制されて行われる、すなわち、ある場所での各地層の層相・層厚変化はその地層が堆積する際の基盤の変形挙動を反映しているという考えに基づいている。この実験法の詳細に関しては、すでに多くの論文で紹介されているので本稿では省略する。詳しくは、KODAMA *et al.*, (1985), 安藤ほか(1985), MORISHITA and KODAMA (1986)などを参照されたい。

実際のシミュレーションでは実験系基底(仮想基盤と呼ぶ)にある変位を与え、その時の最上位層(表層)の変形が実際の地質断面図(復元断面図)から得られたある地層の層厚変化に一致するように仮想基盤の変位を調節する。この操作を各地層堆積時毎に繰り返し、それによって下位層の変形形態、応力、塑性歪の状態を平面ひずみ問題として弾塑性有限要素法を用いて解析した。実験系は南西から東方向に17kmの長さを有し、仮想基盤は、a層基底に設定した。また、ある地層の堆積時の解析が終了して次の堆積ステップに進むと、前のステップ

図3 地質断面図

で堆積した地層は新たに実験系に組み込まれる。すなわち、地層の堆積に伴って実験系は拡大していくことになる。最終ステップでの要素数は916個、接点数は506点である。

各堆積ステップでのシミュレーションモデル最上面(変位基準面)は、初期状態では水平に設定した。また、シミュレーションのコントロールデータである層厚については、堆積後の圧密は考慮せず、したがって層厚の補正は行っていない。さらに地層の水平移動はないものとした。実験系の変位拘束条件としては、系の側面と基底の各接点で水平方向の変位を拘束し、さらに基底には垂直方向の強制変位を与えている。それ以外の接点においては、水平・垂直いずれの方向にも変位を拘束していない。本シミュレーションで採用した地質体のレオロジカル媒体は弾塑性体であり、初期降伏条件は von Mises の条件を採用した。また、シミュレーションに関与する岩石物性値としては以下のような値と式を採用した。

$$\text{ヤング率} : E = -1.0 + 1.3 \times 10^{0.55Z}$$

$$\text{降伏強度} : \sigma_Y = a + b \times 10^{0.55Z}$$

(a, b は定数。値は表1を参照)

$$\text{ダクティリティ} : D = \frac{\sigma_Y}{E}$$

ポアソン比 : (値は表1を参照)

塑性硬化曲線の指数 : $n = 0.0$

塑性硬化曲線の勾配 : $c = 0.0$

ただし、Z : 深度 (km)

なお、ダクティリティ(延性度)の定量的表現方法は種々あるが、ここでは服部ほか(1984)でも述べられているように、HOSHINO *et al.* (1972) にならって HANDIN and HARGER (1975) を DONATH and FAIL (1963) が再定義した方法によって、最大強度点における歪%であらわした。

4.2 実験結果

4.2.1 各層堆積時の塑性歪の分布

シミュレーションによって復元された各層堆積時の復

元断面図を第4図に示す。

1. c 層堆積時 : Well A 近傍, Well B の南西側と東方に塑性歪領域が認められる。
2. d 層堆積時 : Well A 周辺と Well B の南西側, Well C と Well D の間および, Well D 付近に塑性歪領域が認められる。特に, Well A 南西側の深部には強い塑性歪の集中が見られる。これは, Well A の南西側が相対的により沈降して, 背斜構造の西翼部を形成する際に発生したものであることがわかる。また, Well B の南西側および, Well C と Well D の間に発生した塑性歪領域は背斜頂部を切る西落ち逆断層の発生に伴うものである。
3. e 層堆積時 : Well C 東部の深部から浅部にかけて強い塑性歪領域が分布している。これは, 本地域の東側部分に e 層が片寄って堆積することで形成される撓曲構造のヒンジの部分にあたる。この e 層の堆積によって, Well A, B, C 周辺の背斜構造東翼部が形成されると同時に, この地域の堆積盆としての原型ができあがった。
4. f 層堆積時 : 深部では Well A の南西側, 浅部では Well A 周辺に塑性歪領域が認められる。この時期までに, Well A, B, C 周辺の背斜構造はほぼ完成した。
5. 現在 : Well C と Well D の間の深部から浅部にかけて塑性歪領域が認められる。これは, Well A, B, C の周辺と Well D 周辺に差別的に沈降することで生じたものと考えられる。

5. 石油・ガスの生成・移動・集積

5.1 実験方法および実験条件

ここでは、石油・ガスの生成・移動・集積に関して造構応力によってできたフラクチャーがどのような効果を持つのかを検討した。本実験では、中山(1988)の演繹的前進モデル(Forward Model)を用いて、現在までの石油・ガスの生成・移動・集積を再現した。ここで用いた堆積盆解析シミュレーションでは、流体圧の上昇によるフラクチャリングは考慮されているが、造構応力によるフラクチャリングは考慮されていない。したがってフラクチャーの効果については、各地質時代で塑性歪の大きい場所は、その部分の垂直浸透率を強制的に増大さ

表1 各層の岩石物性値一覧

地層名	a	b	Ductility (%)	Poisson 比
a 層	-0.15	0.195	1.5	0.17
b 層	-0.18	0.234	1.8	0.25
c 層	-0.20	0.260	2.0	0.25
d 層	-0.19	0.247	1.9	0.25
d 層 (Pyroc.)	-0.12	0.156	1.2	0.25
e 層	-0.20	0.260	2.0	0.25
f 層	-0.17	0.221	1.7	0.25

図4 変形形状と塑性歪領域の分布

1) c層堆積時 2) d層堆積時 3) e層堆積時 4) f層堆積時 5) 現在

せるという操作を行った。具体的には、前項の実験において塑性歪が15%以上の部分は計算された浸透率の 10^6 倍の値を、塑性歪が15%未満の部分は計算された浸透率の 10^3 倍の値を新たな浸透率として与え、次の堆積ステップを計算する。ただし、変形後も塑性に達しない弾性領域では、計算された浸透率をそのまま用いている。また、比較のために、浸透率を増大させるという操作を全く行わず、フラクチャーによる効果を考慮しないケースについても実験を行った。その他の条件は両ケース共通とした。すなわち、坑井から得られた温度、ビトリナイト反射率、孔隙率および、地層圧力などのデータを用いて、現在の地殻熱流量、過去の地殻熱流量変化率、圧

密定数および、浸透率定数などの入力パラメータのキャリブレーションを行った。根源岩の主体はこの地域の坑井から産出した油の性状、地質状況などを考慮にいれてb層(夾炭層)とし、やや高めのTOC値(8.0%)を入力した。なお、ケロジェンの地化学特性はロックエバルデータから逆算して求め(NAKAYAMA, 1990), その他の入力値は, NAKAYAMA (1987), 中山 (1988) に設定されているデフォルト値を用いた。

5.2 実験結果

5.2.1 異常高圧層の分布

第5図にシミュレーション対象地域における異常高圧層の分布を示す。フラクチャーによる効果を考慮しない

図5 異常高圧層の分布

- 1) フラクチャーによる効果を考慮しないケース
- 2) フラクチャーによる効果を考慮したケース

ケースでは、Well D 周辺から東側にかけての d, e 層中に非常に圧力の高い部分（異常高圧層）が認められる。フラクチャーによる効果を考慮したケースでは、この d,

図6 Well D の密度 (ρ_b) 検層柱状図

e 層中に見られた異常高圧層が消滅している。第6図は、ここで掘削された Well D の地層密度検層柱状図 (ρ_b) である。これを見ると、坑口から坑底まで特に異常な ρ_b の減少は認められず異常高圧層を示唆するようなものはない。また、掘進中の状況からも、異常高圧層に起因すると考えられるような現象は認められなかった。これらの事実からこの場所に生じた異常高圧層は、フラクチャーの発生に伴って圧力が解放されたと考えることができる。

5.2.2 ガス飽和率の分布

第7図はシミュレーション対象地域における飽和率の分布を示したものである。フラクチャーによる貯留層性状の向上により、深度3,000m 以深でのガス飽和率が全般的に向上しているのがわかる。特に、Well A 付近の a 層のガス飽和率が、フラクチャーによる効果を考慮したケースでは、大きく上昇することが判明した。

5.2.3 石油・天然ガスの生成時期

第8図は石油・天然ガスの生成時期を示したものである。これを見ると、油・ガスの生成は、d 層堆積初期から e 層堆積時期にかけてそのピークが存在することがわかる。

6. 考 察

まずはじめに、貯留層としてのフラクチャーの形成・発達地域性について考えてみる。地質時代を通して、Well A 近傍と Well B, C 近傍を比較すると、Well A 近傍は e 層堆積時を除いて塑性歪領域にあるのに対して、Well B, C 近傍は塑性歪があまり集中しない領域にある。d 層堆積時に Well B の南西側に塑性歪領域が分布しているが、この部分の断層は第4図にも示されるとおり逆断層型であり、歪が断層面に沿って局所的に集中して十分な規模のフラクチャーネットワークを形成していないと考えられる。したがって貯留層を形成するフラクチャーと言う観点から見ると、トラップ形成にはそれほど寄与しないと思われる。以上の推論から、Well A, B, C 周辺においては Well A 近傍がフラクチャー型貯留層を形成するのにより適していると考えられる。

次に、このようなフラクチャーの形成・発達に注目した構造解析シミュレーションと、石油・ガスの生成・移動・集積を検討する堆積盆地解析シミュレーションのインターフェースについて考える。一般に造構過程において発生するフラクチャーによる貯留層性状の変化がどのようなものであるのかということは、非常に複雑な問題である。例えば、全くフラクチャーの存在しない岩石が変形して破壊される（つまりフラクチャーが発生する）と、

図7 ガス飽和率の分布

- 1) フラクチャーによる効果を考慮しないケース
- 2) フラクチャーによる効果を考慮したケース

初期的には孔隙率や浸透率などに代表される貯留層性状は向上すると考えられる。しかし、同一の場所が繰り返し応力を受けると、今度は以前に破壊した部位を使って応力を開放することになり、結果として、例えば、断層ガウジを形成しその部分が細粒粘土化して逆に貯留層性状を低下させる可能性が生じる。このように考えると、本実験で行ったように単純に塑性歪の大きい場所に大きな浸透率を与えようというには問題があるように思われる。しかしながら、このような条件下で行ったシミュレーションであっても、異常高圧層の分布に見られるように、実

際に観測された坑井データや掘進状況などと比較的良好に一致することから、このシミュレーションで与えた条件は、一次近似的には妥当であったと言える。

石油・ガスの生成時期と炭化水素トラップ（地質構造あるいはフラクチャー）の形成のタイミングについては以下のように考えることができる。シミュレーション対象地域の地質構造発達史は大きく三つの時期に分けることができる。すなわち、第1期はこの地域が全体的にほぼ一様に沈降する時期で、これはa層からd層までの堆積期間に相当する。第2期は地域の東半が大きく沈降

図8 石油・ガス生成のタイミングチャート

1) 石油 2) ガス

する時期で、これはe層堆積期に相当する。最後の第3期は再び地域全体がほぼ一様に沈降する時期で、これはf層から現在までの堆積期間に相当する。第1期および第3期は基盤が比較的小規模な区画で相対的に差別昇降することによって、背斜などの地質構造形成およびそれに伴うフラクチャーの形成が行われるのが特徴で、このような運動は炭化水素トラップの形成に深くかかわっている。これに対して、第2期の構造形成は、この地域全体の現在の堆積盆としての形態がほぼ完成する時期に相当する。貯留層としてのフラクチャーの形成という観点から、まずWell A近傍を見ると第1期、特にd層堆積時の背斜の形成やその翼部に塑性歪領域（フラクチャーゾーン）などが形成・発達することが、炭化水素トラップの形成を促した。一方、石油・ガスの生成という観点からみると、フラクチャー形成にかかわる基盤の相対的な運動よりも、この地域全体がどのような沈降の歴史をたどったかという面が大きく影響してくる。すなわち、d層堆積時（第1期の最終段階）に根源岩と考えられるb層が、シミュレーション対象地域全体にわたってほぼ3,000m前後の深度に達して（第4図）、第8図で示されている通り石油・ガスが生成されて前述のフラクチャーゾーンにトラップされて鉱床を形成した。これに対して、Well B, C近傍ではd層堆積時にWell Bの深部が一部塑性歪領域になっているが、これはフラクチャーの形

成・発達のところでも述べたように、逆断層の発生に伴うもので貯留層の形成に対する寄与は小さい。またe層堆積時にWell B, C東側で発生した塑性歪領域は当時の地表まで達しており、生成・移動してきた石油・ガスが逸散した可能性が高い。

以上のような結果を考慮すると、d層堆積時のWell A付近の地質状況は炭化水素の集積（鉱床の成立）にとって良好な条件を与えていることが示される。これに対して、Well B, C付近は、炭化水素の生成と言う観点ではWell A付近と同様の条件を満たしているものの、トラップ形成の面、特にフラクチャーの発達という点で、Well A付近に比べてかなり条件が悪い。これは、実際に掘削された坑井の産出テストの結果によっても裏付けられる。

7. 今後の問題点

構造解析および堆積盆地解析の2つのシミュレーションを用いることでフラクチャー型貯留層を有する石油・天然ガス鉱床形成の可能性について考察した。今後の問題としては以下のような点が挙げられる。

1. 今回は、地層の水平移動はないものとして、基盤の垂直方向の運動にのみ焦点をあてて構造解析シミュレーションを行った。しかしながら、地質断面図に見られるように、Well A, B, C周辺には水平方向の運動の結果と考えられる逆断層が認められ、このシミュレーションではこれらの逆断層を十分に表現できたとは言いがたい。今後はこのような水平圧縮場も考慮したフラクチャーの形成・発達過程を検討しなければならない。そして、それらの結果を総合して、実際の構造発達史をさらに詳しく解析する必要がある。
2. 本実験においては、構造解析シミュレーションの結果を堆積盆地解析シミュレーションに反映させる際に、塑性歪の大きい場所の垂直浸透率を強制的に増大させるという操作を行った。しかし、前項でも述べたように、実際はこのような単純なものではないことは明らかである。今後は、岩石の変形・破壊と貯留層性状の関係についての詳細な検討が必要である。また、フラクチャーの方向性やずれのセンス、あるいは規模などを詳細に検討し、このようなフラクチャーの性格をどのように貯留層性状に反映させるかと言う点も重要である。

今後、石油・天然ガスの探鉱はますます大深度を指向し、探鉱作業が困難になることが予想される。こうした傾向の中で、上記のような問題点を克服しつつ、従来各々独立して行われてきた構造解析シミュレーションと堆積

盆解析シミュレーションを連繫して用い、探鉱作業の1手法として有効に活用することで、より精度の高い探鉱が可能となると考えられる。

謝 辞

石油資源開発㈱常務取締役片平忠實博士、荒木直也探鉱部長には資料の公表を許可していただいた。本稿をまとめるにあたり、北海道担当の小椋伸幸主査、掃部 満氏には北海道地域の地質について有益な助言を受け、探鉱部・技術研究所の方々には常日頃から御教示、御討論をいただいた。以上の方々に厚く感謝の意を表する。

参考文献

- 安藤 斌・臼井 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**, 261-275.
- DONATH, F.A. and FAIL, R.T., 1963: Ductile faulting in experimentally deformed rocks (Abstr.). *Am. Geophys. Union Trans.*, **44**, 103-104.
- HANDIN, J. and HARGER, R.V. Jr., 1957: Experimental deformation of rocks under confining pressure: Tests at room temperature on dry samples. *AAPG Bull.*, **41**, 1-50.
- 服部昌樹・星野一男・井波和男, 1984: 火山岩における高圧物性とフラクチャーとの関係。石技誌, **49**, 20-28.
- HOSHINO, K., KOIDE, H., INAMI, K., IWAMURA, S. and MITSUI, S., 1972: Mechanical properties of Japanese Tertiary sedimentary rocks under high confining pressure. *Geol. Surv. Japan Rept.*, **244**, 1-206.
- KODAMA, K., LONG, X.M. and SUZUKI, Y., 1985: Structural Analysis of Deep-Seated Volcanic Rock Reservoirs By Tectonic Simulation. United Nation. *ESCAP CCOP Teck. Bull.*, **17**, 61-79.
- MORISHITA, Y. and KODAMA, K., 1986: Simulation Analysis of the Gold-quartz Vein System in the Kushikino Mine Area, Southern Kyushu, Japan. *Mining Geology*, **36**, 457-485.
- 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.
- NAKAYAMA, K., 1987: Two-dimensional basin analysis for petroleum exploration: Ph.D. Dissertation, Univ. of South Carolina, 225p.
- NAKAYAMA, K., 1990: Determination of Kinetic Parameters for Kerogen Degradation from Rock-Eval Data: *AAPG Bull.*, **74**, 692.