論 文

南長岡ガス田における断裂分布の予測
—応力分布および岩石物性変化からみた断裂の発達様式—*

今 村 哲 己**

(Received October 13, 1995; accepted November 29, 1995)

Prediction of fracture distribution in the Minami Nagaoka gas field:
Development patterns of fractures implied by stress distribution
and mechanical properties of rocks

Tetsumi Imamura

Abstract: In the Minami Nagaoka gas field, north-northeast to south-southwest trending break-out dominate. The trend of maximum horizontal stress is vertically crossing the break-out that means west-northwest to east-southeast. The minimum horizontal stress value estimated from hydraulic fracturing method is slightly smaller than overburden pressure. The maximum horizontal stress is 1.58 times larger than the minimum horizontal stress. The Green Tuff in this field is expected to be in a strike-slip faulting regime, and the estimated differential stress at the depth of 4,300m is about 490 ksc. The Green Tuff exposed to tectonic stress largely exceeding the horizontal stress of a standard overburden pressure state. Therefore the dominant trend of opening fractures is assessed to be controlled by subsurface stress and to be parallel to the maximum horizontal stress.

The results of triaxial compression test show that different lithofacies exhibit different stress-strain profile. This implies that the Green Tuff has the inner stress distribution controlled by lithological variation. Therefore, it is highly possible that the difference in deformation behavior, such as brittleness or ductility of the lithofacies in reservoir creates the environment in which remnant stress and local opening fractures are maintained in the Green Tuff reservoir.

The combination of the regional tectonic stress and local stress distribution caused by lithofacies's variation is likely to control the distribution of opening fractures and therefore quality of the Green Tuff reservoir.

Key words: Minami Nagaoka gas field, Green Tuff reservoir, breakout, hydraulic fracturing, horizontal stress, stress regime, stress distribution, opening fracture, mechanical property of rock, stress-strain curve, deformation behavior, remnant stress

* 平成 7 年 6 月 7 日, 平成 7 年度石油技術協会春季講演会地質・探鉱部門シンポジウム「最近の探鉱技術—新規油・ガス田の発見をめざして—」にて講演 This paper was presented at the 1995 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled "Advanced technology of exploration for discovering new oil or gas fields", held in Makuhari, Chiba, Japan, June 7, 1995.

** 帝国石油機械技術研究所 Technical Research Center, Teikoku Oil Co., Ltd. (現在: 探鉱部)

1. はじめに

南長岡ガス田(図 1)では, 詳細な火山岩類の記載や検鏡結果に基づいて地質モデルの構築がなされており, 良好な貯留岩としての孔隙性及浸透性が主に岩質・岩相に起因していることが判明している(佐藤, 1984; 島津, 1982)。一方, 本ガス田での圧力解析の結果は, 坑井能力の違いのみならず, いわゆるフラクチャータイプ

図1 南長岡ガス田の位置図

の生産挙動を示す坑井とそうでない坑井の存在を示し、それらの坑井がホルスト状構造のいろいろな箇所 に偏在して分布することから、自然亀裂（ナチュラルフラクチャー）の影響が推定されている。しかし、良好な貯留岩の分布予測や自然亀裂の発達状況（成因や分類、形成時期などを含む）については、著しい岩相変化や複雑な産状によっていまだ十分な規則性や法則性を見いだすに至っていない。

自然亀裂が浸透性の向上に寄与する効果的なフラクチャーであるための必要条件は開口性と連結性であるが、火山岩貯留岩の中には多くの自然亀裂が初生的・二次的に発生していることから、開口性に関してはその成因よりも地下応力状態の影響に支配されている可能性が高いと考えられる。

本稿では、南長岡ガス田における応力状態をブレイクアウトと水圧破砕のデータから推定し、コア試料での三軸圧縮試験結果から得られた岩石物性変化に基づいてガス田内部における応力状態を考察することで、生産性に寄与できるフラクチャーの成立条件、特に開口性亀裂の

図2 ブレイクアウトと水圧破砕

分布（方向性や存在しうる環境）予測について議論する。

2. 坑井を用いた地下応力状態の推定法

坑井を用いた地下応力状態の推定法には、ブレイクアウト（Zoback et al., 1985；Bell, 1990；塚原, 1990；木下, 1990；伊藤, 1993；ほか）と水圧破砕法（Hubbert and Willis, 1957；池田, 1980；ほか）が知られており、ブレイクアウトから最小水平応力の方向を、水圧破砕法から最小水平応力の大きさをそれぞれ求めることができる。すなわち、ある応力状態にある地層内に穴がかけられたとき、坑壁周りに生じる応力集中により、最大水平応力と直交する側に圧縮応力が働く。その応力が坑壁周りの岩石の圧縮強度にまさるとき、剪断破壊が生じ坑壁が崩れ落ちる。その結果生じる拡大がブレイクアウトであり、その方向は最小水平応力の方向に対応することになる（図2、A点）。

一方、坑壁周りの応力集中のうちで最も大きな引張応力が生じるのは図2におけるB点であり、この部分には破断による亀裂が生じ、その伸長方向は最大水平応力の方向と一致する。

2.1 ブレイクアウト

ブレイクアウトは4極ディップメーターツールズ（主にSHDT）のキャリパーログを用いて認定することができる。坑壁の水平断面が円形の場合には、通常はツールスが回転することが多い。その回転が止まり、キャリパーの開きが片側インゲージ、もう一方が拡大している箇所をブレイクアウトとして認定し、その拡大の方位をブレイクアウトの方位とした（図3）。ブレイクアウトの規模は多くの場合、十数メートルから数十メートル程度である。

南長岡ガス田ではこれまでに合わせて19坑の試掘井と探掘井が掘削された。これらの坑井位置および各坑井において認められたブレイクアウトを図4に示す。この図ではグリーンタフ層準上限の地下構造図上に、各坑井の坑口位置から坑底位置まで坑跡を示し、さらにグリーンタフ層準内に認められたブレイクアウトの平均的方位（坑壁の拡大方位）を表示した。ブレイクアウトの方位には、ややゆらぎのようなばらつきがあるものの、坑跡方位とは関係なく、ほぼ北北東-南南西の方向が卓越して認められる。

ブレイクアウトの検出箇所の深度分布は、グリーンタフ層準付近の坑跡を概略投影して、その上に表示した（図4右側）。ブレイクアウトは、グリーンタフ層準内のおよそ3,500～5,000 mの区間で、浅部・深部の偏りない深度で発生しており、発生箇所と岩相分布の間にも規

図3 4極ディップメーターツールズにより認められるブレイクアウト（前田-1号井）

則性は認められない。また、深度の変化（増減）に対応してブレイクアウトの方位が変化する傾向はほとんど認められない。

このことから、グリーンタフ内部は浅部・深部を問わず、ほぼ東北東-西南西の方向の最大水平応力下にあると推定される。

2.2 水圧破砕法

水圧破砕法によって観測されるフラクチャー閉合圧力は最小水平応力に相当すると考えられている（池田, 1980）。南長岡ガス田においては、これまでに北朝日原-1号井と岩野原-1号井の2坑で水圧破砕が実施されており、平成3年度までのフィールドテストに関しては、杉山・井上（1992）によりその概要が報告されている。

北朝日原-1号井で観測されたフラクチャー閉合圧力は800～1,000 kscである（表1）。このフラクチャー閉合圧力値には200 kscもの開きが存在しているが、大きな閉合圧力値は自然亀裂あるいは坑壁近傍の乱れた応力

図4 南長岡ガス田における坑壁のブレイクアウト方位と発生箇所

表1 南長岡ガス田水圧破砕法による測定値

坑 井 名	北朝日原-1号井	岩野原-1号井
実施深度区間 (m)	4,290~4,337	4,202~4,347
フラクチャー閉合圧力 (ksc)	858~1,013	788~ 851
フラクチャー伸長圧力 (ksc)	1,160	900

図5 北朝日原-1号井における地下応力状態

状態により発生する迂回路に起因した圧力損失が含まれている可能性が高い(帝石社内資料)。似かよった条件下のもとで、ほぼ同じ深度で実施された岩野原-1号井での観測値が800~850 kscであり、この値が北朝日原-1号井での小さい方の測定結果とほぼ一致することから、フラクチャー閉合圧力として信頼度の高い値は深度約4,300 mでおおよそ850 ksc程度と推定される。

3. 南長岡ガス田における応力分布

図5では、北朝日原-1号井および岩野原-1号井で得

られたフラクチャー閉合圧力(最小水平応力)に、静水圧および北朝日原-1号井での掘削時の泥水比重と坑井密度検層から積算した累積荷重のトレンド、さらに水圧破砕実施時の地層圧(地層内孔隙の流体圧力)を合わせて示した。

岩石の見掛け密度を積算した曲線で累積荷重を代表させれば、深度4,300 mでの垂直荷重はおおよそ1,000 kscと見積られる。一方、フラクチャー閉合圧力から最小水平応力が約850 kscと推定されることから、最小水平応力と垂直応力との関係は、

最小水平応力 (σ_h) < 垂直応力 (σ_v)

の状態にあると考えられる。この結果は、南長岡ガス田でのグリーンタフ層準の応力配置状態がいわゆる逆断層型ではなく、正断層型か、あるいは走向移動断層型のいずれかであることを示唆している。

応力の配置状態が正断層型と走向移動断層型のいずれであるかを区別するためには、最大水平応力の値を見積る必要がある。坑壁の応力集中域において地圧と泥柱圧のバランスが崩れるとブレイクアウトや水圧破砕が発生することから、坑内での安定領域は坑内での泥柱圧、地層強度、地層圧、および最大・最小水平応力と密接に関係している(塚原, 1990)。したがって、水圧破砕法の実施により求められた最小水平応力値や水圧破砕時の坑内圧力、さらに対象層での地層圧の実測値と岩石強度から、おおよその最大水平応力の値を見積ることができる。

図6は北朝日原-1号井でのデータに基づいて坑壁の安定領域を推定したものである。坑壁の安定領域は岩石の引張強度や圧縮強度が増加することで拡大する。水圧破砕の発生は岩石の引張強度に関係するが、坑壁近傍で

の実際の岩石強度は、岩石の不均質性などから正確に値を特定することは難しい。そのため、図6では引張強度を100 kscから300 kscまでの幅を持たせた表示をしている。なお、圧縮強度の大きさはブレイクアウトの発生に影響するが、ここでは後述する三軸圧縮試験から得られた中間的な圧縮強度値である2,000 kscに仮定した。地層圧は水圧破砕実施時に約560 kscと測定されており、坑内圧力は水圧破砕時にはフラクチャー閉合圧力にほぼ等しいと見做すことができる。図6から、約850 kscのフラクチャー閉合圧力から、約1,240~1,440 kscの最大水平応力の存在が見積られた。

最小水平応力、累積荷重、最大水平応力の大小関係(図5)から、南長岡ガス田の深度約4,300 m付近は、走向移動断層型の応力配置にあり、最大と最小水平応力の差(差応力)はおおよそ490 ksc ($=1,340-850$)であり、平均水平応力は約1,095 ksc、最大/最小の比率は約1.58、最小/最大の比率は約0.63になる。これは標準静岩圧状態から推定される水平応力値をはるかに超えた最小・最大の水平応力であり、かなりの造構応力あるいは残留応力が存在していることを示唆している。ただ

図6 坑内の安定領域と最大および最小水平応力の関係(塚原, 1990に測定データを代入して作成)

し、前述のように、観測されたフラクチャー閉合圧力に開きがあることや、垂直応力とした累積荷重も場所により積算誤差やばらつきが存在することを考慮すれば、最小水平応力と垂直応力の大小関係は、最大水平応力値との比較に比べかなり小さい傾向にあることが考えられる。

このような応力配置状態に置かれたガス田の内部では、効果的なフラクチャーとしての開口性亀裂は、最大水平応力に平行する西北西-東南東の方向が卓越すると推定される。

4. 岩石の変形挙動からの検討

岩石物性と地下応力分布やフラクチャーとの関係は、これまでに星野 (1970)、星野・井波 (1977) で精力的に研究されてきた。また、火山岩類での研究は服部ら (1984) で詳細に論じられており、本稿においても、三軸圧縮試験結果から岩質・岩相の違いが変形挙動に明瞭に現れていることがわかった。

本稿では主に各岩相ごとに得られた応力-歪み曲線に基づいて、曲線の形状が示す変形様式から、定性的に開口性亀裂の存在環境を検討した。

4.1 三軸圧縮試験結果

試験に用いた試料は佐藤 (1984) の岩質岩相区分にほぼ対応した代表的なコアから計48個を選定した。試料は縦 50 mm、直径 25 mm に成型し、オープンで48時間以上105℃で乾燥させたのち、有効周圧を与えて試験した。試験の結果、各岩相で得られた応力-歪み曲線のうち代表的なものを選び、図7に示した。

図7 各岩相の応力-歪み曲線からみた変形挙動の変化

塩基性岩ラバー相および流紋岩質ラバー相は非常に脆性的な変形挙動を示し、流紋岩質ハイアロクラスタイト相もやや脆性的であった。それに対して、流紋岩質ピロープレッチャ相は延性的な挙動となり、さらに3つのタイプに分けることができた。

良好貯留岩相であるピロープレッチャ A 相は、ラバー相とピロープレッチャ B 相 (A より高い GR 値で特徴づけられ、浸透性に乏しい) の間にあって、脆性/延性の中間的な変形挙動をして、ヤング率も中間的である。また、不明瞭ながらも降伏点が認められて、かつ延性的な変形をする傾向にあると言える (タイプ-2, 3)。このことは、ピロープレッチャ A 相は、完全な弾塑性変形に近いピロープレッチャ B 相 (タイプ-1) よりも破壊を生じやすいと言えるのかもしれない。

コアでのハイアロクラスタイトの産状は、細かな粉砕物の集合が塑性流動を起こしたような模様を示しており、見掛け上は非常に延性的な変形をしてきたように見える。しかし、現在のハイアロクラスタイトは著しい粘土化と珪化によって非常に固結し、有効孔隙に乏しいため三軸圧縮効果がやや脆性的となっている。一方、ピロープレッチャ相が相対的に延性的である理由は、孔隙率が比較的大きいことと、角礫状の産状を呈し淘汰が悪く不均質であることが考えられる。

4.2 残留応力発生モデル

一般に、繰返し荷重を行った際の応力と歪みの関係は応力-歪み線図で表される。ここで、異なる変形挙動を有する物体が同じ外力を受け、弾性変形領域以上に歪まされたと仮定する。それぞれの物体には外力を取り除いても永久歪みが残るが、それらの量は異なっている。もし、これらの物体が互いに密着し、境界面において滑りが生じないものと仮定すれば、2つの物体は合わさった強度の変形をし、中間的な歪みを残すであろう。この際、2つの各々の物体内部にはそれぞれで全体の残留歪みに応じた内部応力をもって釣り合う状態になる。つまり、物体内部には圧縮および引張応力が共存した残留応力の状態が発生する。この状態を図8に2つのモデルでの応力-歪み線図を用いて模式的に示した。両モデルは開口性亀裂発生が存在環境をそれぞれの岩相に対して、見方をかえてモデル化している。

図8の左図および図9は、層状に分布するラバーとピロープレッチャのモデルである。外力が取り除かれたとき、脆性的なラバー相が破壊に至る前のほぼ弾性変形状態であるのに対して、延性的なピロープレッチャ相では顕著な永久歪みが生じている。この場合、ラバーの弾性が延性的なピロープレッチャ相にマイナスの残留応力 (引張応力) を生じさせ、開口性亀裂が存在しやすい環

図8 応力-歪み曲線から推定される変形挙動と発生する残留歪みおよび内部残留応力の関係を示す模式図

図9 開口性亀裂の存在環境(モデル1: 図8左に対応)
1: 黒色のピストン(剛体)により, 2: 矢印方向の外力が加えられて歪みが生じ, 3: 外力が取り除かれる。
1~3は各層間が密着しない場合を示した。4は各層間に滑りが生じない場合での開口性亀裂の卓越状態を模式的に表現した。

境を造り出す。ただし、この開口性亀裂の伸び方向は層状構造に直交し、その開口方向は外力に反している。つまり、このモデルでの開口性亀裂は3章で導かれた方向と完全に直交するため、実際には存在するのは困難であるかもしれない。

図8の右図と図10は、強度と変形様式の異なるピロープレッチャが互層状に分布するモデルである。この場合、図10に示すごとく相対的に延性的でなく強度の大きい層(ピロープレッチャA)がより延性的な層(ピロープレッチャB)の永久歪みによって変形したままで保たれようとする。その際、図10に模式的に示しているような自然亀裂がすでに存在したとすれば、相対的に延性的でないピロープレッチャA相に圧縮応力が残留し、最大応力の方向と一致した開口性亀裂の存在環境が生じる。

この状態は、先のモデルでのラバーに対して同様に扱え、ラバー内に開口性亀裂が生じやすい環境が作りだされていることも考えられる。また、どちらのモデルにおいても、岩石学的に良好な貯留岩相を示すピロープレッチャA相が開口性亀裂を生じさせるのに適応した中間的な物性にあることは興味深い。

なお、これらのモデルから導かれる存在環境は、延性体での永久歪み量に規制される一方で、弾性体での強度の大きさが重要な要素となることが推定される。すなわち、ラバーやハイアロクラストとピロープレッチャAおよびB相の各層での厚さが岩体としての強度を変

図10 開口性亀裂の存在環境(モデル2：図8右に対応)

1~4の説明は図9を参照。

化させ、さらにそれらの互層の頻度に関係して、2つのモデルでの存在環境がさまざまに混在する状態が予測される。

問題点として、これらのモデルの成立には、岩相が層状に分布して互いに滑りを生じないことや、ある外力の付加と解除が存在することなど、多くの仮定が必要になる。

また、実際には岩石や岩体全体がどのような歪みの過程を経たのかも、現在どのくらい歪んでいるのかも不明である。三軸圧縮試験では約1%前後の歪みで降伏に達し、その圧縮強度は数千kscであり、差応力にして490ksc程度と推定された外力より、1桁大きいオーダに相当する。

したがって、現在の小さな応力値では岩石はお互いが弾性変形の状態にあり、永久歪みを生じさせることができない。弾性係数の差などを比較して残留応力を定量的に考慮したり、地質時代を通じての構造運動の累積を考察すべであるが、その場合でもモデルで表現されている開口性亀裂の異方性は変わらないことが予想できる。

5. まとめと今後の課題

南長岡ガス田は新潟堆積盆地にあって、理論上導きだ

される標準静岩圧の水平応力をはるかに超える造構応力にさらされている。グリーンタフ層準での応力配置は西西北-東南東の方向の最大水平応力軸をもった走向移動断層型である可能性が高い。

したがって、さまざまな断裂や弱線を初生的あるいは後生的に有する火山岩貯留岩中では、生産性に寄与する開口性亀裂は、大局的にはほぼ最大水平応力の方向に卓越すると推定される。

また、南長岡ガス田での貯留層の岩相による変形挙動の違いは、前述の造構応力の存在と相俟って、各々の岩相での強度、ダクティリティ、および弾性・塑性変形などの変形挙動の違いと岩相の不均質性ゆえに内部に残留応力を生じさせ、局所的に開口性亀裂を存在させる環境を作り出している可能性が高い。

ただし、本稿の検証には、定方位コアやプレッシャー・コアの採取、地下応力測定などが必要であり、またこれまでに採取されたコアを用いての開口性亀裂に対する統計的・定量的な研究を進めなければならない。

今後も大深度低浸透性の火山岩類貯留岩層を対象とする開発と新規探鉱には、地下応力と岩石物性の異方性を知ることが重要と考えられる。

謝 辞

この研究を進めるにあたり、信州大学理学部の塚原弘昭博士には基礎的なことから終始にわたりご指導とご教示をいただいた。石油公団石油開発技術センター油層研究室の岡津弘明室長からは貴重な共同研究資料の使用を許可していただき、また、地質調査所の小玉喜三郎博士、地熱技術開発株式会社の鈴木尉元博士、埼玉大学の三梨昂博士には、応力と断裂の発達に関して多くのご助言をいただいた。

帝国石油株式会社の岩橋弘常務取締役、渡邊亨取締役技術研究所長、福島賢一取締役探鉱部長、相岡雅俊理事技術部長には資料の公表を許可していただき、同社の技術研究所、技術部、削井部、探鉱部の方々には常日頃らご教示、ご討論をいただいた。以上の方々に心からお礼を申し上げる。

引 用 文 献

- Bell, J. S., 1990 : Investigating stress regimes in sedimentary basins using information from oil industry wireline logs and drilling record. *Geological Society Special Publication*, 48, 305-325.
- 服部昌樹・星野一男・井波和男, 1984 : 火山岩類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.
- Hubbert, M. K. and Willis, D. G., 1957 : Mechanics of

- hydraulic fracturing. *SPE*, **210**, 153-166.
- 星野一男, 1970: 石油地質学と岩石物性学—堆積盆地の
静岩圧分布について—. 石技誌, **35**, 179-186.
- 星野一男・井波和男, 1977: 物性変化からみた圧密の進
行について. 石技誌, **42**, 90-99.
- 池田隆司, 1980: 地殻応力測定のための水圧破壊とその
応用. 月刊地球, **2**, 648-655.
- 伊藤久男, 1993: 間隙水圧と破壊—ハイドロフラクチャ
リングとブレイクアウト—. 月刊地球, **15**, 645-648.
- 木下肇, 1990: 孔内計測の科学的応用. 月刊地球, **12**,
606-615.
- 佐藤 修, 1984: 火山岩貯留岩の岩相と孔隙—特に南長
岡ガス田における流紋岩について—. 石技誌, **49**, 11-
19.
- 杉山広巳・井上望, 1992: 深部グリーンタフ層に対する
水圧破碎について. 石技誌, **57**, 579-587.
- 島津光夫, 1982: いわゆるグリーンタフの貯留岩の地質学
的, 岩石学的諸問題. 石技誌, **47**, 277-287.
- 塚原弘昭, 1990: 深層ボーリングによる地殻応力測定.
月刊地球, **12**, 624-628.
- Zoback, M. D., Moos, D. and Mastin, L., Anderson, R.
N., 1985: Well bore breakouts and in situ stress.
Journal of Geological Research, **90**, 5523-5530.