論 文

基礎試錐「富倉」におけるアパタイトのフィッション・トラックの アニーリング

—粘土鉱物から見た上昇削剥との関連—*

大平 寛人**・大久保 進***・高須 晃**・渡辺公一郎****・吉村 尚久*****

(Received April 30, 2004 ; accepted November 5, 2004)

**Fission track annealing in apatite from the MITI-Tomikura well drilled at the Kubiki district,
NE Japan and relation to denudation inferred from clay mineral transitions**

Hiroto Ohira, Susumu Okubo, Akira Takasu, Koichiro Watanabe and Takahisa Yoshimura

Abstract : Fission track (FT) annealing has been examined in apatites from the MITI-Tomikura well, which was drilled in the axis of the Tomikura anticline in the Kubiki district of NE Japan. Fission track densities were too low to measure confined fission tracks, and consequently direct measurements of semi-track lengths were made instead. Mean lengths, frequency distributions and measurable numbers of semi-tracks decrease below 3,300m depth. The apatite FT annealing zone in the MITI-Tomikura borehole is shallower than that previously reported from the Shin Yahiko-1 well, 4,600 m, which suggests a relatively simple subsidence on its burial history. Large scale uplift and denudation associated with formation of the Tomikura anticline probably caused the apatite FT annealing in the shallower levels of the MITI-Tomikura borehole. Sudden decrease in the numbers of semi-tracks observed at around 3,400m depth may be correlated with complex denudation events and overprinting of present-day and fossil annealing. Clay mineral transitions and homogenization temperature of fluid inclusions suggest an approximate paleo-geothermal gradient of 3.0 °C /100 m and 1,300m of denudation. This result is concordant with the uplift inferred from apatite FT annealing.

Key words : fission-track, fission track, FT, apatite, annealing, denudation, MITI-Tomikura, Niigata, thermal history

1. はじめに

フィッション・トラック (FT) は鉱物中に記録され

た ^{238}U の核分裂飛跡であり、地質時代を通して形成され、被熱による温度上昇に伴って短縮・消滅 (アニーリング) する。熱による FT のアニーリングは温度と時間の関数として表現されることから、種々の地質試料の熱履歴解析に応用されている。特に、アパタイトの FT のアニーリングは比較的低温域で起こることから、石油探鉱に関連した堆積盆やその基盤岩、あるいは鉱床形成の熱的セッティングの評価などにも応用されている (Arne, 1996 ; 姫野ほか, 1997 ; Himeno *et al.*, 1999 ; Petmecky *et al.*, 1999 ; Barbarand *et al.*, 2001 ; Hu *et al.*, 2001 ; Suchy *et al.*, 2002 など)。アパタイトに比べて熱安定性の高いジルコン中の FT についても同様の応用が可能であり、国内では北アルプス花崗岩の冷却速度についての研究などがある (山田・西村, 1995 ; 山田, 1996)。これらの研究

* 平成 8 年 6 月 6 日、平成 8 年度石油技術協会春季講演会地質・探鉱部門・個人講演にて一部講演 This paper was presented at the 1996 Technical Meeting of JAPT held in Akita, Japan, June 6.

** 島根大学総合理工学部地球資源環境学科 Department of Geoscience, Shimane University

*** 石油資源開発株式会社 JAPET Research Center, Japan Petroleum Exploration Co., Ltd.

**** 九州大学大学院工学研究院地球資源システム工学部門 Department of Earth Resources Engineering, Kyusyu University

***** 新潟大学理学部自然環境科学科 Department of Environmental Science, Niigata University

においては、対象鉱物中のFTの長さを confined fission track 長 (Wagner and Van den Haute, 1992; 詳細については後述する) として計測し、トラック長の分布状態から熱履歴を明らかにしようとするものである。

一方、国内のグリーンタフ期以降の堆積盆における坑井試料については、その地質時代が測定対象として若いために、アパタイトのFT密度が極めて小さく、年代測定はもとより、FTの長さの測定すら困難な場合が多い。さらに少量のコア試料では、十分量のアパタイトの抽出が困難である場合がほとんどである。そのような状況においても鉱物中のFTを坑井の熱履歴または熟成指標として利用する試みが報告されている。例えば大平ほか (1997) は、新弥彦-1号井において深度の増加に伴うアパタイトのFTのアニーリングの変化を調べ、坑井の熱履歴または熟成指標としての可能性を述べた。一方、檀原 (1997) は、アパタイトよりもFTの熱安定性の高いジルコンを用いて、結晶外面と内部面のFTのアニーリング特性の違いを利用し、基礎試錐「本庄沖」などにおいて局所的熱イベントの時代と温度の推定に関して成果を得ている。

今回、基礎試錐「富倉」の坑井試料を用いて、アパタイトのFTのアニーリングを深度ごとに調べ、既報の坑井データとの比較を行い、上昇・削剥などの地質現象との関連について考察したので報告する。

2. 地質概要

対象とした坑井は、「第7次国内石油及び可燃性天然ガス資源開発5ヵ年計画」の一環として通産省 (現経産省) 資源エネルギー庁により計画・掘削された基礎試錐「富倉」である。本試錐は新潟県の頸城地域南部、新井市東南方約7kmの富倉背斜上において掘削された (Fig. 1)。本坑井の地質については石油公団 (1995) に詳しく述べられている。ここではその概要について述べる。本坑井の地質は、下位から七谷層、難波山層、下部寺泊層、上部寺泊層一椎谷層に対比される (Fig. 2)。七谷層は5,072mから掘止深度6,000m間で認められ、主に砂岩泥岩から成る互層で、まれに細粒の凝灰質砂岩を挟む。難波山層は深度1,782.5～5,072m間に分布し、下位の七谷層と同様に砂岩泥岩互層から成り、上部は砂岩が優勢、下部は泥岩が優勢である。下部寺泊層は深度1,192～1,782.5m間で、泥岩を主体とし、まれに砂質凝灰岩を挟在する。1,192m以浅の上部寺泊層も泥岩を主体とし砂質凝灰岩を伴う。底生有孔虫から推定された堆積環境は、坑井全体を通して半深海性で変化に乏しい。また、深度1,630～1,670m間にはドレライト、2,100～2,300m付近には安山岩の存在が確認されている。深度3,000m

Fig.1 Locality of the MITI-Tomikura borehole and geological map of the surrounding area (modified from JNOC, 1995). W-E dotted line corresponds to the cross section in Fig.2.

以浅にはいくつかの断層が存在し、層序の繰り返し認められる。難波山層中には、周辺地域における鍵層として多くの坑井においても確認されているSタフ、Tタフ (鈴木宇耕, 1989) が分布する。

3. 測定

3.1 試料および測定試料作成方法

深度1,800mおよび3,200～5,200mまで200m間隔で8～10kgのカッティングスを採取した。試料を入念に洗浄し掘削泥水を完全に洗い流し、色調の異なる岩片などを入念に除去した後、径1mm～1cmのカッティングス片のみを分取した。試料を乾燥後、粉碎、ふるい分け (75～250μm)、重液分離、磁選、ハンドピッ

Fig.2 Simplified E-W cross section of the MITI-Tomikura borehole (modified from JNOC, 1995).

キングを経て、各深度ごとに 100 ~ 150 粒子のアパタイトを抽出した。アパタイトはエポキシ樹脂 (Struers 製 Specifix20) に埋め込み、ダイヤモンドペースト (3, 1, 0.25 μm) で研磨後、7% HNO_3 (25°C) で約 40 秒間エッチングを行った。

3.2 フィッション・トラック長の測定

エッチングされたアパタイトの模式断面図 (Wagner and Van den Haute, 1992) を Fig.3 に示す。鉱物中の FT の長さはアニーリングの影響を受けない限りよく集中する。観察面 (研磨面) に露出する FT (Semi-track; Fig.3) は、研磨することによって、本来の FT の長さよりも短くなる。通常の FT 長解析には、このような効果を避けるために、観察面に露出していない FT (Confined-track; Fig.3) が用いられる。しかしながら、FT 密度が低い試料では、エッチングを行っても Confined-track が出現しないため、その長さの解析が困難である。ただしそのような場合でも、Semi-track の長さを統計的に検討することにより、Confined-track を用いるのと同様の検討が、ある程度までは可能である。なお Confined-track 長と熱履歴との関連については、角井 (1988) などにも述べられている。

本研究においてはアパタイトの FT 密度が著しく低く、Confined-track 長の測定は不可能であったため、Semi-track 長 (Fig.3) を測定した。Semi-track 解析では、前述したように測定されるトラック長は研磨による影響を個々に被るため、被熱を受けていない試料であっても Semi-track 長の頻度分布はブロードな形を示し明瞭なピークを示さない。しかしながら自発トラック密度の小さい試料に対しては極めて有効な手段とされる (粕谷ほ

Fig.3 Schematic longitudinal section of etched apatite. The semi-track length is obtained by measuring its projected length (L) and depth (D) corrected by refractive index of apatite.

か, 1992)。

Semi-track の長さの測定は生物顕微鏡 Nikon Eclipse E600 (対物ドライ 200x) にカラー 3CCD カメラ (Victor KY-F58) を組み合わせ、モニター (Sony-PVM14M4J) 上で行った。Semi-track の投影長 (Fig.3 の L) の測定にはビデオメジャー計測器 (Olympus VM-50) を、Semi-track 先端までの見かけの深さ (Fig.3 の D) の測定には Keyence 製のレーザー変位計 (LC-2420) を用い、アパタイトの屈折率によって補正を施した (大平ほか, 1997)。

3.3 EPMA による組成解析

これまでアパタイト ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$) の Cl 組成と FT の熱安定性との関連についての研究が報告されている (例えば Green *et al.*, 1986; Crowley *et al.*, 1991; Carpena, 1998; Barbarand and Pagel, 2001)。具体的なアニーリング温度については、例えばエンドメンバーの F-アパタイトの FT が、坑底温度 92°C で完全にアニールしているとの報告がある (Green *et al.*, 1989)。また、Durango アパタイトのような (0.4 wt% Cl 程度の) 試料では 95 ~ 100°C で FT がアニールするが、Otway

Basin 産の Cl 含有量の高いアパタイト (～2.2 wt% Cl) では 124℃まで FT を保持するとの報告もある (Green, 1995)。このように、アパタイト中の FT のアニールにかかわる温度は、アパタイトの固溶体組成によって異なることが知られている (Ketcham *et al.*, 1999 などに詳しくまとめられている)。したがって、温度指標としてアパタイト中の FT を用いる場合には、個々の試料についての固溶体組成を求める必要がある。本研究の場合、検討対象とするアパタイトは、砂岩中などに含まれる碎屑性の粒子であり、同一層準に含まれるものであっても、同一の火成岩由来であるとは限らないため、粒子ごとに固溶体組成を求めるべきであろう。

このような背景から今回、アパタイトの F, Cl 組成を EPMA (JEOL-8800M) を用いて検討した。測定条件は加速電圧 15 kV, 試料電流 2.0×10^{-8} A, ビーム径 20 μ m であり、補正は Bence and Albee (1968) にしたがった。Semi-track 長を測定した試料 (エポキシマウント) をそのまま炭素蒸着したので、C 軸直交方向からビームが照射された状態である。標準試料は、F については Durango apatite (Roder *et al.*, 1987), Cl については Cl-hastingsite (Suwa *et al.*, 1987) を使用した。分析は Fe, Ca, Na, Al, Si, P, F, Cl について行い、Cl および F のピークカウント時間はそれぞれ 30 秒, 60 秒とした。

3.4 粘土鉱物および流体包有物分析

粘土鉱物の同定は石油資源開発㈱の X 線回折装置を使用して行われ、結果は石油公団 (1995) に示されている。おおむね 50 m の深度毎に採取されたカッティングスを洗浄・乾燥後に粉碎し、一部を試験管中で超音波ホモジナイザーによって分散させ、しばらく放置した後、上澄みをスライドガラス上で自然乾燥させたものを定方位用試料とした。定方位試料をエチレングリコール (EG) を充満させたデシケータ中に一晩放置し EG 処理試料とした。測定された両試料の X 線プロファイルからイラストメクタイト混合層鉱物の判定を行った。一方、流体包有物の均質化温度は、深度 5,400 m から採取されたカッティングスに含まれる方解石を用いて測定された。最終的にアルミナ (0.3 μ m) 仕上げによる両面研磨チップを作成した後、Fluid inc. 社製ガスフロー (USGS) 型流体包有物測定装置を用いて測定された。

4. 結 果

4.1 基礎試錐「富倉」における Semi-track 長分布

典型的なアパタイトの FT (深度 1,800 m) のエッチング像を Fig. 4 に、深度ごとの Semi-track 長の頻度分布を Fig. 5 に示した。1 粒子あたりの測定面積は 6×10^{-5} cm² ～ 1.5×10^{-4} cm² であったが、試料の平均自発 FT 密度

Fig.4 Representative etched apatites from 1,800 m depth (a); and photographs focused on the pit and the end of the same semi-track (b).

は坑井全体を通じて 5×10^3 /cm² 以下であり、深度 1,800 m の試料においてもアパタイト粒子の約半数は FT を有していない。深度 1,800 m, 3,200 m ではそれぞれ 70 個, 56 個の Semi-track が観察され、平均長はそれぞれ 6.8 μ m, 6.2 μ m であった。両試料とも約 140 粒子のアパタイトを観察しているが、深度 3,200 m においては、観察される Semi-track の個数が少なく、Semi-track 平均長もやや短い。深度 3,400 m では他の深度に比べて観察した粒子数が 88 と少ないが、同深度以深において、Semi-track 平均長は 5.7 μ m (3,400 m), 5.5 μ m (3,600 m), 3.4 μ m (3,800 m) と、一見次第に短くなるようにも見える。深度 4,000 m および 4,200 m においては 6 μ m よりも長い Semi-track が認められるが、Semi-track 平均長はそれぞれ 4.7 および 4.1 μ m であり、浅部 (1,800 m) の試料に比較すると明らかに短い。

坑井全体から見ると、深度 3,400 m の粒子数が少ないことを考慮しても、同深度以深において観察される Semi-track 数が急激に減少してしまう。少なくとも 3,600 m 以深の試料においては、Semi-track 長に関する詳細な

Fig.5 Semi-track lengths distributions of apatites from depths sampled in the MITI-Tomikura borehole.

議論を行うことは困難である。

4.2 アパタイトの Cl, F 組成

アパタイト粒子ごとの F および Cl 組成の関係を Fig6 に示した。F 含有量は全試料を通して約 3.5% と安定した値であるが、Cl 含有量は深度あるいは粒子によって大きく異なる (Fig6)。深度 1,800 m, 3,200 m, 3,400 m ではほとんどの粒子で約 1% 前後の Cl を含む。それに対し、深度 3,800 m, 4,000 m, 4,200 m では Cl 含有量が 0.5% 以下の粒子が卓越する。4,600 m 以深で再び約 1% の粒子を含むようになる。また、深度 4,200 m の試料においては、極端に Cl に富む粒子 (Cl=1.5% <) もわずかに含

Fig.6 Cl vs. F concentration in apatites. Apatite grains with extremely low Cl concentrations between 3,800-4,200 m probably reflect a change of characteristics in the hinterland, and the annealing behaviors of these samples differs from other depths. For the samples from 1800m to 3,600 m, semi-tracks were measured mainly from apatite grains with Cl contents greater than 0.8%.

まれる。アパタイトのCl組成は深度によって大きく変化するが、Semi-track長の測定は、深度3,400 mまではCl組成が1%前後の粒子を用いて行われている。

なお、坑井全体からみても、本坑井の深度3,800, 4,000および4,200 mにおいてCl含有量が0.2%以下あるいはClをほとんど含まない粒子が卓越し、Cl/F比も0.1以下と他の深度に比較して極端に低い値を示す。

4.3 変質分帯と均質化温度

X線粉末回折データの検討の結果、本坑井におけるスメクタイト→スメクタイト/イライト混合層→イライトの変質分帯の深度は、それぞれ深度1,650 mおよび2,750 mに存在すると判断された。深度5,400 mの方解石脈からは合計38個の気液2相の流体包有物の均質化温度が測定された。均質化温度は185℃から292℃の範囲の値を示す。このうち、高温の値を示すものは、ネッキングなどの二次的な形態変化が認められるため、それらを除いた平均値は、218℃であった。

5. 考 察

5.1 試料および各種温度指標の問題点について

前述したようにアパタイトのFTの熱安定性は主にCl組成によって変化する。本坑井の深度3,400 mまでは主としてCl組成が1%程度の粒子群が卓越するため、粒子ごとのCl組成の差異による熱安定性の差異は考慮する必要はないだろう。この深度よりも深部ではCl組成が大きく変化する。特に、深度3,800～4,200 mのCl組成の極端に低い粒子群は、他の層準のものとは特に異なった起源を有していると考えられるが、FTの熱安定性も他の深度に比べて低いと考えられる。

粘土鉱物の変質分帯による温度見積りについては、特にイライト/スメクタイト(I/S)混合層の取り扱い方(定義)によって結果が異なる(鈴木舜一, 1989)。多くの研究ではEG処理での17 Åの底面反射をスメクタイト、膨潤層混層率40%以下をI/S混合層として扱っていると推定されている(小田ほか, 1985)。Aoyagi and Kazama (1980)は国内の深掘井における第三系および白亜系泥質岩の分析から、スメクタイト、I/S混合層鉱物およびイライトの分帯の境界がそれぞれ104℃と137℃とした。しかし同時に、この手法の問題点として、自生鉱物の形成が温度以外の物理的因子(圧力や時間)と化学的因子(流体の化学的性質)に影響されるため、坑井ごとに若干のばらつきを生じると述べている。I/S混合層構造におけるR(Reichweite)は、続成が進行するにしたがってR0, R1, R3の順に変化するとされる(吉村, 2003)。本坑井においても同様の試みが報告されている(土田ほか, 1998)。最新のコンパイル結果によれ

ばR0の形成が60～90℃、R1の形成が100～120℃と推定されている(大久保・洲崎, 印刷中)。しかし、基礎試錐「富倉」が掘削された当時にはこのような粘土鉱物の構造を詳しく検討するためのデータがなく、次節で述べる変質分帯による温度の見積もりには、ある程度の誤差が含まれる。

流体包有物マイクロサームメトリーによる温度見積りについても対象試料の物性や形成時期などに起因する問題がある。例えば、方解石や硬石膏などの比較的変形しやすい鉱物の場合、埋没過程で流体包有物の内圧と被圧との差異がホスト鉱物の耐圧を超えれば、鉱物は変形(ストレッチングやデクレピテーション)を起こす。この場合、流体包有物は変形により新たな温度圧力条件に適合するため再平衡する(笹田, 1989; 高木ほか 2001)。また、本研究で測定した試料(方解石脈)は深度5,400 mから採取されたものであるが、埋没過程のいつの時期に形成された脈であるのかという問題もある。このような温度推定にかかわる不安定要素が残されている一方で、粘土鉱物の変質分帯からみた古地温と方解石の流体包有物の均質化温度が調和的であるという結果もいくつかの坑井で報告されている(例えば基礎試錐「三島」; 大久保, 1998)。

さらに、本研究では現場におけるカッティングスの採取から洗浄に至る過程においては可能な限りの注意を払っているが、カッティングスを使用している以上は、坑内あるいは坑壁からの浅部由来の岩石片に含まれるアパタイトがごくわずかに深部に混入する可能性も完全には否定できない。このように使用した試料の特性にかかわる不安定要素も存在する。

5.2 基礎試錐「富倉」と新弥彦-1号井との比較

基礎試錐「富倉」において観察されるSemi-track平均長は、6.8 μm (1,800 m), 6.2 μm (3,200 m), 5.7 μm (3,400 m)と、深度とともに短くなるように見える。坑井全体を通して見てみると、3,400 m以深において観察されるFTが極端に少なくなる。同深度で実験に供したアパタイト粒子が少ないことを考慮しても、深度3,200～3,600 mのわずか400 m程度の深度幅で急速にSemi-trackの観察が困難となる。少なくとも本坑井の3,600 m以深においては、Semi-track長の変化についての詳細な検討は不可能であり、Semi-track長解析の有効性についての議論は断念せざるを得ない。

しかし、本坑井と同様の研究例である新弥彦-1号井においてはFT密度の急激な減少を伴わずに、深度ごとにSemi-track長が変化する様子が検出され、ツールとしてのSemi-track長解析が極めて有効であった。新弥彦-1号井は基礎試錐「富倉」よりも北東約90 km、新潟堆

積盆（蒲原平野）西縁部で掘削された坑井であり（Fig.1）、過去数 Ma の間の比較的単純な埋没を経ており、現在の地温が過去の最高古地温に相当している可能性が高い。この坑井における顕著な FT のアニーリングは、深度 4,600 m（地層温度約 145°C）以深において認められ、アニーリングの顕著なゾーンは、地温にして 35°C 以上の幅を持つと報告されている（Fig.7；大平ほか，1997）。

今回の研究対象である基礎試錐「富倉」において、Semi-track 長が深度 3,200 ~ 3,600 m の狭い深度幅（400 m 以内）で急激に減少するという測定結果はいかなる理由によるものであろうか。このことは、おそらく本坑井の地質学的特性に関連するものと考えられる。背斜軸部に掘削された本坑井の場合、褶曲作用に伴って対象層準が上昇したことによって、各層準の現在の地温が地質時代を通じた最高地温でないことが、このような現象の理由ではないだろうか。坑井データや震探断面によれば、本坑井付近では 1,000 m を超える上昇削剥が推定されている（Fig.2）。

このような地質条件を考慮し、Semi-track 長の測定に基づいた両坑井の FT のアニーリングを比較した模式図を Fig.8 に示す。FT のアニーリングは温度と時間との関係下で連続的に起こるため、アニーリングゾーンの上限深度を厳密に決めること難しい。そこで、Fig.8 には Semi-track 平均長が $6\mu\text{m}$ よりも短くなると予想される深度を基準に、アニーリングゾーンをグレーの領域で示した。両坑井のアニーリングゾーンの上限は、新弥彦-1 号井では約 4,600 m、基礎試錐「富倉」では約 3,300 m に存在すると考えられ、後者の方が約 1,300 m 相対的に浅い。仮に両坑井の地温勾配が地質時代を通して等しければ、約 1,300 m の深度差は、およそ基礎試錐「富倉」の上昇・削剥量に相当すると考えられる。

基礎試錐「富倉」においては、過去の埋没時に形成されたアニーリングゾーン（fossil annealing zone；Fig.8 中の（a））が、上昇削剥によって浅部に移動したのと考えられる（Fig.8 中の（b））。また現在の地層温度に対応したアニーリングゾーンはより深部に存在すると予想

Fig.7 Shin Yahiko-1's data (Ohira *et al.*, 1997). The length of mean semi-tracks decrease clearly and progressively with increasing temperature and depth below 4,600 m, and the FT annealing zone occurs in an interval of less than 1,500 m, and 40°C in temperature.

Fig.8 Schematic illustration of the causal relationship between uplift/denudation and fossil FT annealing for MITI-Tomikura. The uplifted fossil annealing zone (b) probably occurs in depths below 3,300 m.

される (Fig.8 中の (c))。上昇の結果、現在観察される Semi-track 長プロファイルは、これらふたつのアニーリングゾーン (Fig.8 中の (b) および (c)) がオーバープリントされ、より複雑なものになると予想される。本坑井の 3,400 m 以深において観察される Semi-track 数が急激に減少してしまうことは、坑井の複雑な上昇スタイルに加えて、このようなアニーリングゾーンのオーバープリントも少なからず影響していると考えられる。

なお、対象鉱物こそ異なるが、本坑井と類似した坑井データが報告されている。ドイツの KTB drill-hole においては、アパタイトやジルコンよりも FT の熱安定性の高いチタナイトの FT の現在のアニーリングゾーンが、深度 9,000 m 以深に推定されるのに対して、坑井を切る断層活動によって上昇した部分のアニーリング (fossil annealing) が、浅部の深度 4,500 m 付近で観察されている (Coyle and Wagner, 1998)。

5.3 粘土鉱物の変質分帯からみた上昇削剥との関連

前述したように、粘土鉱物や流体包有物による温度推定には少なからず問題点を伴う。本来ならばこれらの温度見積もりにかかわる不安定要素を検討する必要があるが、今回は比較的簡単に古地温情報を得ることができる

Aoyagi and Kazama (1980) の変質分帯の形成上限温度を用い、定性的な古地温や上昇削剥量を検討し、Semi-track データとの関連を調べた。

本坑井において観察されたスメクタイト→I/S 混合層→イライト変化の深度はそれぞれ 1,650 m および 2,747.5 m である。変質分帯の出現温度 (Aoyagi and Kazama, 1980) はそれぞれ 104°C および 137°C であるので、これらの結果から推定されるおおまかな古地温勾配は 3°C / 100 m である (Fig.9)。また、流体包有物の均質化温度の平均値 (218°C, 5,400 m) も、変質分帯からみた古地温勾配の延長線上に調和的にプロットされる (Fig.9)。

一方、青柳 (1979) の方法に従って古地温勾配を外挿することにより推定される削剥量は、地表温度を 15°C と仮定した場合、約 1,300 m である (Fig.9)。なおこの削剥量は、堆積盆が最大埋没に達した後単純な上昇削剥を被ったと仮定したものであり、本坑井の浅部において認められるスラストなどの構造形成 (Fig.2) は考慮していない。変質分帯から推定された約 1,300 m という上昇削剥は、基礎試錐「富倉」と新弥彦-1 号井とのアニーリングゾーンの深度差 (約 1,300 m ; Fig.8) と極めて調和的な値でもある。

Fig.9 Paleo geothermal gradient and denudation for the MITI-Tomikura borehole inferred from transition zones of clay minerals, corresponding transition temperatures (Aoyagi and Kazama, 1980) and homogenization temperatures of fluid inclusions in calcite.

次に、基礎試錐「富倉」のアニーリングゾーン上限の古地温および現在の地層温度から上昇量を検討してみる。なお、本研究で述べる地層温度は検層時に測定された最高温度をホーナープロットすることにより求めている。上昇削剥を被った基礎試錐「富倉」のアニーリングゾーンの上限（約 3,300 m）の現在の地層温度は約 115°C、古地温は約 150°C であり、両者には約 35°C の差異がある（Fig.8）。仮に最大埋没以降の単純な上昇削剥を仮定し、その間、地温勾配が 2.45°C/100 m ~ 3.0°C/100 m の範囲にあったと仮定すれば、推定されるおおまかな上昇量は 1,150 ~ 1,450 m となる。この結果は、変質分帯から求めたおおまかな上昇量（約 1,300 m）と大きくは矛盾しない。

地質断面図（Fig.2）から明らかのように、基礎試錐「富倉」においては深度 2,000 m 以浅に存在するいくつかのスラストの影響のため浅部ほど上昇量が大きく、椎谷一寺泊層中の機織タフの分布を見る限りその量は 2,000 m を超えると推定される。一方、坑井深部における相対的な上昇量については、坑井データや震探断面から推定された七谷-難波山層境界（Fig.2）などからおおまかに判断すれば 1,000 m をわずかに超える程度であろう。アパ

タイトの FT のアニーリングや粘土鉱物の変質分帯からみた上昇量は後者と調和的である。

6. まとめ

- (1) グリーンタフ地域のアパタイトの FT 密度は著しく低く、FT の長さの測定には困難を伴うが、Semi-track の長さを測定することにより、アパタイトの FT のアニーリングを捉えることができる。基礎試錐「富倉」では、およそ深度 3,300 m（地層温度 115°C）以深で FT のアニーリングが顕著となり、また観察される Semi-track 数が急激に減少する。既報の新弥彦-1 号井（4,600 m, 145°C）と比較するとアニーリングゾーンの上限はおよそ 1,300 m 浅い深度に存在する。
- (2) 本坑井で観察されるアパタイトの FT のアニーリングは、最大埋没時に形成されたアニーリング（fossil annealing）が背斜の形成に伴う上昇削剥によって浅部へ移動したものと考えられる。観察される Semi-track 数の急激な減少は、アニーリングゾーンの移動やオーバープリントにも関連すると考えられる。
- (3) 粘土鉱物の変質分帯や流体包有物の均質化温度からみた本坑井の大まかな古地温勾配は約 3°C/100 m であり、埋没後の単純な上昇を仮定した場合の上昇削剥は約 1,300 m である。FT から推定される大まかな上昇削剥も 1,300 m 前後であり、粘土鉱物から見た結果と調和的である。いずれの結果も、スラストの影響の少ない坑井深部における上昇を反映している。

謝 辞

基礎試錐「富倉」の坑井試料および関連資料を提供、公表を許可していただいた資源エネルギー庁、石油天然ガス・金属鉱物資源機構および石油資源開発株式会社に感謝いたします。石油資源開発株式会社探鉱部深沢 光氏には現場での試料採取に便宜を図っていただいた。同社、長岡鉱業所の皆様には試料の採取・処理方法についてご教示いただいた。石油天然ガス・金属鉱物資源機構、石油開発技術センターの土田邦博氏には試料処理に協力をいただいた。同センター姫野 修氏には粗稿について貴重な指摘を賜った。アパタイトの EPMA 分析方法に関しては信州大学理学部の山口佳昭先生にご教示いただいた。英文要旨は島根大学のバリーローザ氏に校閲いただいた。匿名の 2 名の査読者には極めて建設的な指摘を賜った。以上の方々心より感謝いたします。なお本研究の一部に日本学術振興会科学研究費補助金 No.16340155 を使用した。

引用文献

- Aoyagi, K. and Kazama, T., 1980 : Transformational changes of clay minerals, zeolites and silica minerals during diagenesis. *Sedimentology*, **27**, 179-188.
- 青柳宏一, 1979 : 堆積岩中の自生鉱物を用いた古地温の解析法. 石技誌, **44** (6), 367-371.
- Arne, D., 1996, Thermal setting of the Cadjebut Zn-Pb deposit, Western Australia. *J Geochem Explor.* **57**, 45-56.
- Barbarand, J., Lucazeau, F., Pagel, M. and Seranne, M., 2001 : Burial and exhumation history of the south-eastern Massif Central (France) constrained by apatite fission-track thermochronology. *Tectonophysics*, **335**, 275-290.
- Barbarand, J. and Pagel, M., 2001 : Importance of the chemistry to characterize apatite fission track annealing. *Comptes Rendus de l' Academie des Sciences -Series IIA- Earth and Planetary Science.* **332**, 259-265.
- Bence, A.E. and Albee, A.L., 1968 : Empirical correction factors for the electron-microanalysis of silicates and oxides. *J. Geol.*, **76**, 382-403.
- Carpena, J., 1998 : Uranium-235 fission track annealing in minerals of the apatite group : an experimental study. *Advances in Fission-Track Geochronology* (Van Den Heute and De Corte Eds.), 81-92.
- Coyle, D.A. and Wagner, G. A., 1998, Positioning the titanite fission track partial annealing zone. *Chem. Geol.*, **149**, 117-125.
- Crowley, K.D., Cameron, M. and Schaefer, R.L., 1991, Experimental studies of annealing etched fission tracks in fluorapatite. *Geochim. Cosmochim. acta*, **55**, 1449-1465.
- 檀原 徹, 1997 : FT 法の最近の成果と石油探鉱へのジルコンの応用, 石技誌, **62** (1), 25-34.
- Dodson, M.H., 1973 : Closure temperature in cool geochronological and petrological systems. *Contrib. mineral. Petrol.*, **40**, 259-274.
- Green, P.F., 1995 : AFTA Today. *On Track*, **5**, 8-10.
- Green, P.F., Duddy, I.R., Gleadow, A.J.W., Laslett, G.M. and Tingate, P.R., 1986 : Thermal annealing of fission tracks in apatite : 1. A qualitative description. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)* **59**, 237-253.
- Green, P.F., Duddy, I.R., Laslett, G.M. Hegarty, K.A., Gleadow, A.J.W. and Lovering, J.F., 1989, Thermal annealing of fission tracks in apatite 4. Quantitative modeling techniques and extension to geological time scales. *Chem. Geol.*, (Isot. Geosci. Sect.), **79**, 155-182.
- Himeno, O., Grist, A. M. and Watanabe, K., 1999 : Comparison of cooling histories constrained by two different fission track inversion models. *Fission Track News Letter* **12**, 21-30.
- 姫野 修・渡辺公一郎・大平寛人・江原幸雄・中村祐之, 1997 : 中国東北地方大興安嶺山脈に産する花崗岩類のフィッション・トラック年代と熱履歴解析. フィッション・トラックニュースレター, **10**, 21-30.
- Hu, S., O' Sullivan, P.B., Reza, A. and Kohn, B.P., 2001 : Thermal history and tectonic subsidence of the Bohai Basin, northern China : a Cenozoic refted and local pull-apart basin. *Physics of the Earth and Planetary Interiors.* **126**, 221-235.
- 粕谷正雄・山下 透・岩野英樹・檀原 徹, 1992 : アパタイトのアニーリングと3次元トラック長測定. フィッション・トラックニュースレター, **5**, 37-43.
- Ketcham, R.A., Donelick, R.A. and Carlson, W.D., 1999 : Variability of apatite fission-track annealing kinetics : III. Extrapolation to geological time scales. *American Mineralogist*, **84**, 1235-1255.
- 大久保 進, 1998 : 基礎試錐「三島」において発見された炭化水素包有物の産状およびマイクロサーモメトリの検討. 石技誌, **63** (3), 205-215.
- 大久保 進・洲崎照夫, 2005 : 石油探鉱の視点からみた碎屑岩の続成作用, 鉱物温度計および孔隙の変化. 地球科学 (印刷中).
- 大平寛人・磯野陽子・榊原正幸・吉村尚久, 1997 : 新弥彦-1号井で観察されたアパタイトのフィッション・トラックの消失とその意味. 石技誌, **62** (6), 544-553.
- 小田幸人・鈴木舜一・大山良彦, 1985 : 十和田湖東南地区における中新統中の雲母 / スメクタイト混合層鉱物. 岩石鉱物鉱床学会誌, **80**, 526-536.
- Petmecky, S., Meier, L., Reiser, H. and Littke, R., 1999 : High thermal maturity in the Lower Saxony Basin : intrusion or deep burial?. *Tectonophysics* **304**, 317-344.
- Roder, P.L., MacArthur, D., Ma, X. and Palmer, G.R., 1987 : Cathodoluminescence and microprobe study of rare-earth elements in apatite. *Am. Mineral.*, **72**, 801-811.
- 笹田政克, 1989 : 流体包有物による堆積岩の熱履歴の解析. 月刊地球, **11**, 657-660.
- 石油公団, 1995 : 平成6年度基礎試錐「富倉」地質検討会資料, 66p.
- Suchy, V., Dobes, P., Filip, J., Stejskal, M. and Zeman, A., 2002 : Conditions for veining in the Barrandian Basin (Lower Paleozoic) , Czech Republic : evidence from fluid inclusion and apatite fission track analysis. *Tectonophysics*,

- 348, 25-50.
- 角井朝昭, 1988: FTD (Fission track dating) 法を用いる石油熟成度評価法および堆積盆解析. 地質ニュース, 402, 50-63.
- 鈴木舜一, 1989: 東北日本の新生代熱史. 地質学論集, 32, 321-337.
- 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.
- Suwa, K., Enami, M. and Horiuchi, T., 1987: Chlorine-rich potassium hastingsite from West Ongul Island, Lutzow-Holm Bay, East Antarctica. *Mineralogical Magazine*, 51, 709-714.
- 高木 博・前田俊一・藤野敏雄・真田和之・林 正雄・田口幸洋・堀越孝昌・村岡洋文, 2001: 流体包有物均質化温度のオーバーヒーティングに関する実験的研究. 日本地熱学会誌, 23, 263-272.
- 土田邦博・牛 犇・吉村尚久・大久保 進・深沢 光, 1998: 基礎試錐「富倉」にみられるイライト/スメクタイト混合層鉱物の続成変化と異常高圧層の関係. 石技誌, 63 (3), 221-228.
- Wagner, G.A. and Van den Haute, P., 1992: *Fission-track dating*: Stuttgart, Enke Verlag, 285p.
- 山田隆二・西村 進, 1995: F T法による温度履歴解析: 黒部川花崗岩類におけるケーススタディ. フィッション・トラックニュースレター, 8, 35-40.
- 山田隆二, 1996: ランダムモンテカルロ法による温度履歴定量解析モデリング. フィッショントラックニュースレター, 9, 1-12.
- 吉村尚久, 2003: ー粘土基礎講座Iー続成作用と粘土鉱物. 粘土科学, 42, 167-173.