

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

姫野 修*・渡辺公一郎**・大平寛人***・江原幸雄**・中村祐之****3

Fission track dating and thermal history analysis of granitic rocks in the Dahinganling Mountains, Northeast China

Osamu Himeno*, Koichiro Watanabe**, Hiroto Ohira***, Sachio Ehara**
and Hiroyuki Nakamura ****

Abstract : Northeast China locates along the eastern margin of the Asian continent and is a part of continental margin accompanying subduction of oceanic plates. The interaction between the continental and the oceanic plates constrains the evolution of crustal and thermal structure in the area since the Mesozoic period. Fission track thermochronologic analysis including zircon and apatite fission track dating, apatite track length measurements and thermal history inversion analysis are performed for the granitic rocks in Dahinganling Mountain Ranges in NE China to clarify the thermo-tectonic history.

Zircon cooling ages determined in this study have a good agreement within errors and their over all weighted mean age is 116 ± 6 (one standard error) Ma. Apatite cooling ages concentrate around 95Ma excluding a sample which may have high chlorine content in apatite crystals. The detailed cooling history in low temperature range (below 210°C) of the granitic rock body in the Dahinganling Mts. is proposed through the zircon fission track dating and inversion analysis with apatite track length measurement. The estimated cooling rates significantly change around 100Ma and become considerably slow after this period.

Key words: fission track, thermal history, Northeast China, Dahinganling Mountain Ranges, inversion analysis

1. はじめに

中国東北地方 (Fig. 1) の中央部に位置する松遼 (Songliao) 盆地は、上部ジュラ～上部白亜系の堆積岩よりなり、当時の大陸縁辺域での広範囲にわたる構造発達史を記録していると考えられる (Liu et al., 1993)。また、周辺にはいくつかの山脈が連なり、盆地西部の大興安嶺 (Dahinganling) 山脈域においては、時代によって、その活動規模が変化するものの、ジュラ紀後期から白亜紀中頃までの長期に渡るカルクアルカリ岩系の大規模なマグマ活動があったことが知られ (高橋, 1984)、多数の花崗岩体が露出している。盆地東部においては、張広才嶺 (Zhangguangcailing) 山脈域において主にジュラ紀以前の変成帯を形成する花崗岩、花崗片麻岩が広く分布している (Zhao and Li, 1988)。

現在、東アジアに分布した古海溝の横断方向における大陸縁辺域のマントル構造を明らかにするため、満州里

(Manzhouli) -スイブンカ (Suifenhe) 測線 (以下、M-S測線と略す) に沿ったGGT (Global Geoscience Transect) プロジェクトが進行中であり、種々の地球物理学データが得られている (Jin et al., 1995)。しかし、本地域の地殻発達史については、火成岩の放射年代値をはじめ公表データが少なく、十分に理解されているとはいえない。また、松遼盆地の形成プロセスを大規模な地殻・マントルの相互作用で説明するモデル (Liu et al., 1993) も提唱されているが、これらの構造モデルを検証するための情報、例えば周辺山脈の冷却史や、上昇史の関係についての直接的なデータは非常に少ない。

本研究の目的は、活動的大陸縁辺域に相当する当地域の地殻および熱構造の発達史を解明することである。このため松遼盆地西部の大興安嶺山脈域に産する花崗岩類から分離したジルコン、アパタイトについてフィッション・トラック (FT) 法を用いた年代測定およびアパタイト

1997年3月26日受付, 1997年7月1日受理

3)*九州大学大学院工学研究科資源工学専攻 Graduate School of Engineering, Kyushu University, Fukuoka 812, Japan

**九州大学工学部資源工学科 Department of Mining, Kyushu University, Fukuoka 812, Japan

***島根大学総合理工学科 Department of Geoscience, Shimane University, Matsue 690, Japan

****九州大学理学部応用原子核実験室 Department of Physics, Kyushu University, Fukuoka 812, Japan

のトラック長測定を行った。さらに得られたデータを用い調査地域の岩体が被った低温度域 (およそ 210℃以下)

での冷却史の熱履歴解析を行った。

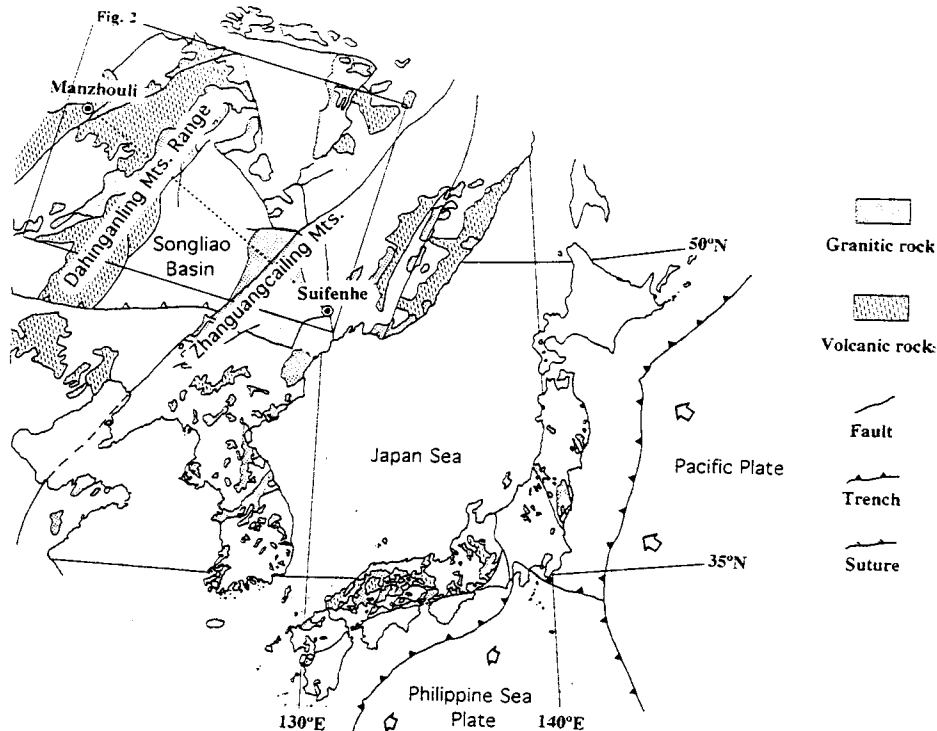


Fig. 1. The simplified distribution map of Mesozoic igneous rocks in east Asia.

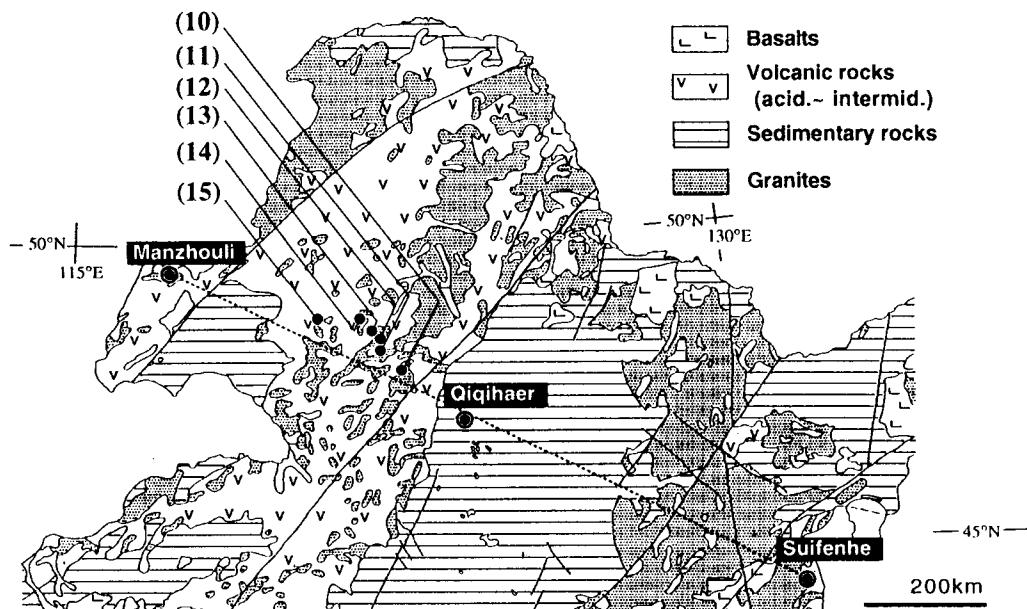


Fig. 2. The simplified geologic map of NE China. Solid circles show sampling localities and their sample codes. The Manzhouli-Suifenghe GGT is also attached with dotted line in the figure.

2. 地質概説

中国東北地方は、アジア大陸の東縁に位置し、中生代

以降種々の海洋プレートが時代により角度、速度を変えて沈み込みを行った地域である。当地域における海洋プ

レート沈み込みは、遅くともジュラ紀の中ごろ以降、東側のみで行われていたと考えられている (Maruyama et al., 1989; Erkin et al., 1992)。Fig. 1に東アジアにおける中生代の火成岩類の分布を示す。そのほとんどがNE-SW方向に配列しており、東側から沈み込む海洋プレートと大陸プレートとの相互作用が、当地域の地殻および上部マントル構造の発達史を大きく規制している可能性がある。Fig. 1には、現在進行中であるGGTプロジェクトのM-S測線も示されている。

Fig. 2に、調査地域の地質図を示す。調査地域の中心域には、およそ幅300km、長さ800kmのNE-SW方向に伸長した松遼盆地が分布している。大慶 (Daqing) 油田など大規模石油鉱床が知られ、2万本を越えるボーリング掘削が行われているが、盆地の埋没史などに関する公表文献は乏しく、現段階では当時の沈降-堆積史を詳しく考察できるデータはごく限られている。Liu et al. (1993) によると松遼盆地の地質は、深部が浅湖成堆積物および断層沿いにみられる火砕岩類よりなる上部ジュラ系~下部白亜系で構成され、さらにその上部に浅・深湖成堆積物およびタービダイト堆積物、一部に海成堆積物を含む下部白亜系~上部白亜系が分布している。盆地の沈降様式はジュラ紀末から白亜紀初めにかけての地域的な断層に規制された沈降ステージと、主に白亜紀中ごろの盆地全域の沈降ステージに分けられる。盆地中央部では堆積物の総厚が、5000mを越えるところもある (Yang et al., 1985)。

松遼盆地周辺には、西部大興安嶺山脈域において、時代によってその活動規模が変化するものの、ジュラ紀後期から白亜紀中頃までの長期間に渡る大規模なマグマ活動があったことが知られている。これらは、カルクアルカリ岩系を主体とする酸性から中性の火山岩類 (安山岩が全体積の60%を占める)、およびI-type・磁鉄鉱系列の花崗岩質貫入岩類よりなる (Takahashi et al., 1980)。白亜紀以降にアジア大陸東縁に形成された付加体や海洋プレートの移動に伴い衝突した島弧などを除き、当時の海溝の位置を復元した場合、このマグマ活動帯は古海溝から1000km以上も大陸内部に位置していたことになる。高橋 (1984) は東アジアにおけるマグマ活動の時空分布を示し、このマグマ活動を大陸内部型に分類した。

松遼盆地の東部域においては、張広才嶺山脈およびその南東に位置する長白山 (Changbaishan) 山脈域において、また北部域においては小興安嶺山脈域において、主にジュラ紀やそれ以前のものと考えられる変成帯を形成する花崗岩、花崗片麻岩が広く分布している。この地域についても、一部においては高橋 (1984) により大興安嶺山脈域同様に大陸内部型に分類されたジュラ紀後期から白亜紀中頃までのマグマ活動が起こっていたかも知れない。いずれにしても時代区分の分解能という点で公表データに非常に乏しいのが現状である。

さらに本地域には、新生代大陸内玄武岩の活動も知られる。Miyashiro (1986) は、中国東北地方を中心に、西をバイカル湖、内モンゴルまで含めた地域を "hot region" と呼び、マントル上昇流との関連を指摘した。Jin et al. (1995) は、以下、M-S測線に沿って地殻熱流量の測定を行い、松遼盆地域においておよそ90mW/m²という異常に高い値を得ている。この値は現在、活発なリフト活動の知られるバイカル地域において得られている値 (澤田・河

野, 1996) とほぼ等しいものである。

Fig. 2に、FT年代測定に用いた中生代花崗岩類サンプル位置とその番号を示す。サンプル採取および現地調査を1993年、1995年に実施した。サンプル採取位置は、GPS (Global Positioning System) を用いて決定した。サンプル採取位置の海拔高度は、全て800~1000mの範囲にある。

年代測定に用いた花崗岩試料の蛍光X線分析結果をTable 1に示す。サンプル (13) を除いてSiO₂量は、69~77%である。サンプル (13) は、SiO₂量が、60%と低く、Cl含有量が1%以上と他の試料に比べ非常に高い特徴もっている。

Table 1. Chemical composition of granitic rock samples used for age determination.

	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
(%)						
SiO ₂	68.57	77.26	71.28	59.32	70.11	74.32
TiO ₂	0.39	0.13	0.31	0.55	0.37	0.16
Al ₂ O ₃	14.98	12.85	13.72	15.07	14.73	14.05
FeO*	3.10	0.88	2.14	4.76	2.80	1.29
MnO	0.10	0.07	0.08	0.08	0.09	0.03
MgO	0.70	0.11	0.53	3.24	0.89	0.17
CaO	2.07	0.27	1.20	4.17	1.89	0.69
Na ₂ O	4.77	4.40	4.35	3.89	3.53	3.74
K ₂ O	3.60	4.18	3.98	2.43	4.36	5.22
P ₂ O ₅	0.15	0.02	0.12	0.18	0.15	0.05
(ppm)						
S	51	74	67	108	61	69
Cl	143	1229	125	13112	85	51
Rb	97	201	159	109	189	184
Sr	370	57	324	805	409	118
Ba	1107	201	670	561	647	285
Zr	215	102	177	77	186	144
Ga	30	25	17	17	23	24
Cu	47	46	36	17	46	30
Zn	55	27	44	36	87	29
Pb	25				28	22
Y	24	27	19	25	28	26
Ni			18	42		

3. 測定方法

3-1. FT年代測定

FT年代測定には、ジルコン、アパタイトを用いた。測定鉱物の分離は、数kgの岩石試料粉碎後、磁選、重液分離、ハンドピッキング等により行った。年代測定には、結晶内部面の自発トラックを計数し、誘発トラックを外側ダイテクターで計数する方法 (ED1法; Gleadow, 1981) を用い、またゼータ値による較正 (Hurford, 1990) を行った。柱面の発達の良いジルコン、アパタイト結晶、150粒子をそれぞれ330℃、140℃に加熱したホットプレート上でPFAテフロンシート、塩化ビニールシートに埋んだ。これらの埋め込み作業は1~2分以内に行われており、鉱物中に蓄積されたFT長に影響を与えない。さらに径3μmおよび1μmのダイヤモンドペーストを用いて結晶内部面 (4π面) が得られるまで研磨した。ジルコンのエッチングは、230℃に保った等モルKOH-NaOH溶液の中で10~20時間行った。アパタイトについては、室温 (22℃) で0.6% HNO₃を用いて210~250秒間行った。ゼータ値算出用の年代標準試料 Fish Canyon Tuff についても同様の処理を行った。これらのマウントシートに誘

発トラック計数のため、ウランをほとんど含まないマイカを密着させ、線量計数用標準ガラス (SRM612) とともにパッキングした。ジルコン、アパタイト両試料の中性子照射は立教大学原子炉, TRIGA MARK II (100kW) の回転試料棚において、各々15分および120分間行った。サンプル (10), (11) より分離したアパタイト試料については、ウラン含有量が著しく低いために、360分間照射を行った。この際のゼータ値算出は、標準試料にDurango Apatiteを用いた。線量計数用、誘発トラック計数用のマ

イカのエッチングは46%HF (25°C) により、それぞれ25分間、15分間行った。全てのFT計数は光学顕微鏡下で行い、アパタイト試料では、対物レンズ×100を用い、自発トラック密度が非常に高いと考えられるジルコン試料については、すべて対物レンズ×200を用いた。総合倍率はそれぞれ×1500倍、および×3000倍である。Table 2にジルコン、アパタイトの年代測定に用いたゼータ値算出時のトラック計数データを示す。

Table 2. Fission track count data for zircon and apatite zeta value determination.

Sample code	No. of crystals	Spontaneous ρ_s (Ns)	Induced ρ_i (Ni)	Dosimeter ρ_d (Nd)	r	Zeta $\pm 1\sigma$
Zircon		$\times 10^6 \text{cm}^{-2}$	$\times 10^6 \text{cm}^{-2}$	$\times 10^4 \text{cm}^{-2}$		
FCT-1	20	5.29 (1,363)	2.70 (696)	7.35 (1,493)	0.93	387 \pm 21
FCT-2	20	6.20 (1,642)	3.24 (857)	7.35 (1,493)	0.92	395 \pm 20
FCT-3	20	6.20 (1,604)	3.23 (835)	7.35 (1,493)	0.82	394 \pm 20
Over all weighted mean:						392 \pm 12
Apatite		$\times 10^5 \text{cm}^{-2}$	$\times 10^5 \text{cm}^{-2}$	$\times 10^5 \text{cm}^{-2}$		
FCT-1	28	2.08 (228)	5.18 (568)	4.57 (3,021)	0.64	304 \pm 24
FCT-2	26	2.55 (453)	5.06 (453)	4.56 (3,021)	0.68	297 \pm 27
FCT-3	20	1.87 (125)	4.57 (306)	4.55 (3,021)	0.76	300 \pm 32
Over all weighted mean:						301 \pm 16
Durango-1	1	1.71 (865)	13.6 (3,439)	15.7 (3,726)		319 \pm 13
Durango-2	1	1.80 (911)	13.9 (3,530)	15.8 (3,726)		309 \pm 13
Over all weighted mean:						314 \pm 9

Note:(i) ρ and N denote track density and number of tracks counted, respectively.

(ii) Analysis was made by the external detector method using geometry factor of 0.5.

(iii) r is the correlation coefficient between ρ_s and ρ_i .

3-2. アパタイトのトラック長測定

FTは、ウラン含有鉱物中に地質学的時間を通して蓄積し、熱アニーリングによって短縮、消滅する。トラック長の短縮率は温度と時間の関数であり、1本、1本のトラック長短縮はそれらが存在した温度と被熱時間に応じて起こる。得られたFT年代値は、トラックの部分的な短縮に影響を及ぼす温度域 (Partial annealing zone; 以下PAZ) を通過して冷却する間に生じて短縮を受けたトラックと、PAZ以下の温度域に冷却後に生じたために短縮を受けていないトラックの時間情報が混在した結果を表している。母岩が、PAZあるいはそれ以下においてたどった冷却史について詳細な熱史を検討するために、アパタイトについてトラック長の測定を行った。得られた年代値とトラック長分布を用いた熱履歴逆解析については後述する。逆解析を行う際のアニーリングカイネティクスは Laslett et al. (1987) を用いたため、100本以上の confined track長を測定するように努めた。ジルコン試料についてのトラック長測定は、自発トラック密度が高すぎる (ca. $>10^7/\text{cm}^2$) ために不可能であった。

本研究では測定可能な confined track 密度を強制的に増やすため、シートに埋め込んだアパタイト柱面に対して垂直方向に重イオンの照射を行った (Watanabe et al., 1991)。重イオン (Ni^{12+} または Cu^{11+}) の照射は、九州大学のタンデム加速器を用い、重イオンの照射密度はおおよそ $2 \times 10^7/\text{cm}^2$ とした。これにより confined track を効果的に検出することが可能となった。この手法により自発トラック密度がおおよそ $10^6/\text{cm}^2$ の試料に対して重イオン照射を

行った場合、100粒子のアパタイト結晶では少なくとも100本の confined track長を測定することができることがわかった。

重イオントラックおよび confined track のエッチングは、20°C の 0.6% HNO_3 を用いて 300~480分間行った。トラック長測定は、光学顕微鏡にビデオカメラをつなぎ、TVモニター上で対物レンズ×200倍、中間レンズ×5倍を用いて、総合倍率おおよそ×6500倍にて行った。長さの測定は、0.1 μm 単位で行った。研磨された結晶柱面にほぼ平行な horizontal confined track についてのみ全長を測定した。

4. 測定結果

Table 2に示したゼータ値を用いて得られたジルコン、アパタイトのFT年代値および年代値算出時のトラック計数データをTable 3に示す。FT年代測定および、アパタイトについてのトラック長測定結果をTable 4に示す。得られた4つのジルコンFT年代は、112~121Maと誤差範囲でよい集中を示し、その加重平均値は $116 \pm 6 (1\sigma)$ Maとなった。アパタイトについてのFT年代値は、119Maとやや古いサンプル(13)を除いて4つが86~101Maと比較的よくまとまっている。サンプル(13)は、後述のようにトラック長分布パターンも他と著しく異なっており、この試料を除いたアパタイトFT年代値の加重平均値は、 $94.5 \pm 4.2 (1\sigma)$ Maである。これらの年代値は、同一岩石試料においては、常にアパタイトのFT年代の方がジルコンFT年代よりも若い。

Table 3. Fission track count data for zircon and apatite age determination.

Sample code	No. of crystals	Spontaneous ρ_s (Ns)	Induced ρ_i (Ni)	Dosimeter ρ_d (Nd)	r	Age $\pm 1\sigma$
Zircon						
		$\times 10^6 \text{cm}^{-2}$	$\times 10^6 \text{cm}^{-2}$	$\times 10^4 \text{cm}^{-2}$		
(10)	7	10.0 (794)	1.26 (100)	7.36 (1,493)	0.73	114 \pm 12
(11)	10	16.8 (1,269)	2.16 (163)	7.36 (1,493)	0.89	112 \pm 10
(12)	15	9.91 (1,795)	1.18 (213)	7.37 (1,493)	0.79	121 \pm 9
(14)	5	17.1 (505)	2.09 (62)	7.37 (1,493)	0.96	117 \pm 16
Apatite						
		$\times 10^5 \text{cm}^{-2}$	$\times 10^5 \text{cm}^{-2}$	$\times 10^5 \text{cm}^{-2}$		
(10)	12	1.60 (51)	4.07 (130)	14.5 (3,726)	0.82	88.6 \pm 14.7
(11)	17	2.50 (135)	5.81 (314)	14.6 (3,726)	0.80	97.7 \pm 10.2
(13)	17	9.20 (558)	5.04 (306)	4.40 (3,021)	0.78	119 \pm 9
(14)	11	10.2 (395)	7.83 (303)	4.39 (3,021)	0.81	85.7 \pm 6.7
(15)	16	11.2 (540)	7.27 (350)	4.38 (3,021)	0.84	101 \pm 7

Note:

(i) ρ and N denote track density and number of tracks counted, respectively.

(ii) Analysis was made by the external detector method using geometry factor of 0.5.

(iii) r is the correlation coefficient between ρ_s and ρ_i .

(iv) All ages were calculated using a dosimeter glass NBS962.

(v) Zircon ages were calibrated with ζ -value of 392. Apatite ages were calibrated with ζ -value of 314 for sample (10) and (11), and 301 for the others.

Table 4. Fission track dating and length measurement results for the Dahinganling Mts. region in this study.

Sample code	FT age		Apatite track length measurement		
	Zircon (Ma) ($\pm 1\sigma$)	Apatite (Ma) ($\pm 1\sigma$)	Mean length (μm) ($\pm 1\sigma$)	No. of tracks (n)	S.T.D.V. (μm)
(10)	114 \pm 12	88.6 \pm 14.7	11.9 \pm 0.4	39	2.7
(11)	112 \pm 10	97.7 \pm 10.2	12.3 \pm 0.3	87	2.6
(12)	121 \pm 9	-	-	-	-
(13)	-	119 \pm 9	13.0 \pm 0.3	101	2.6
(14)	117 \pm 16	85.7 \pm 6.7	12.2 \pm 0.2	102	2.3
(15)	-	101 \pm 7	12.8 \pm 0.2	102	2.0

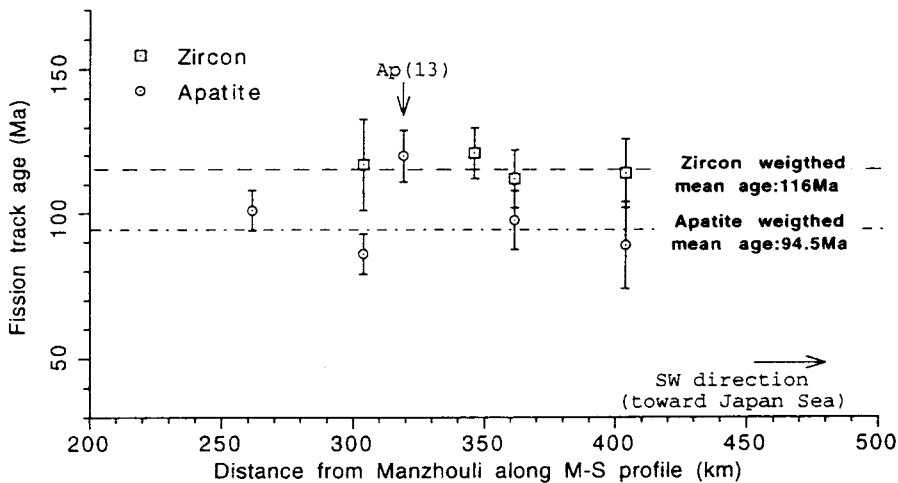


Fig. 3. Fission track ages plotted versus distance from Manzhouli along the M-S GGT (error bars indicate one standard error). Sample (13) were excluded for apatite weighted mean age calculation. See the text for descriptions.

得られた年代値を M-S 測線の上に落としたのが Fig. 3 である。ジルコン、アパタイトについての冷却年代値とサンプル位置との間には、大興安嶺山脈横断方向に150kmの広い範囲にわたり地域的な差異や傾向が見られない。

このため得られた値は、局地的な2次的加熱の影響を受けておらず、この横断面周辺の大興安嶺山脈地域を代表した値として扱うことが可能であることを示している。

トラック長分布パターンとサンプル採取位置を Fig. 4に

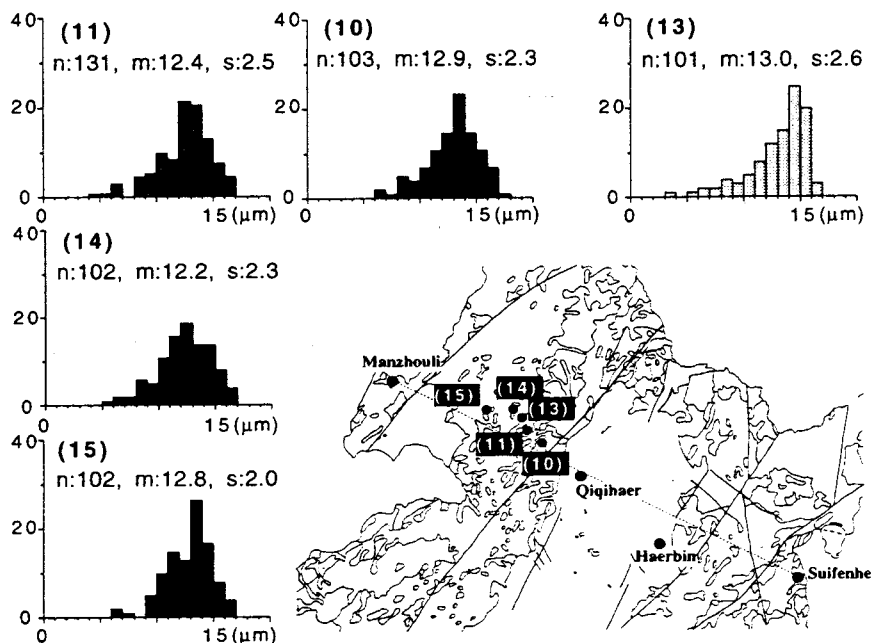


Fig. 4. Apatite track length distributions for the Dahinganling Mts. region. The numbers in each distribution with n, m and s correspond to number of track length measurements, mean length and one sigma errors, respectively.

示した。サンプル(13)を除くと、得られたトラック長は直線的に徐冷した際に見られる分布パターンに比べ短縮したトラックが多く見られる。このことは当岩体がアパタイトのPAZ(120~50°C)に長い期間とどまっていたことを示している。サンプル(13)についてのトラック長分布パターンは、年代値と同様に明らかに他と異なっている。試料の採取海拔高度等について他の試料と比較し、サンプル(13)に有意の差異は見られない。アパタイト中のFTの短縮率はアパタイト結晶中の塩素含有量に影響され、塩素含有量が高い程、短縮されにくいことが知られる(e.g. O'Sullivan and Parrish, 1995)。前述のようにサンプル(13)は、母岩の化学組成が他と異なっており、特に塩素含有量が1%以上と高いことが分かっている。アパタイト結晶中の塩素含有量も高いことが予想され、これが当試料のFT短縮率に影響した結果を表しているのかも知れない。

アパタイトのアニーリング特性は、室内実験データをもとに数式化された(Laslett et al., 1987)。これにより、ある熱史に対応するFT年代値とトラック長分布を、forward modelingにより得ることが可能となった(e.g. Green et al., 1989)。さらにランダムモンテカルロ法を用いて、コンピューター上で熱史をランダムに発生させ、各々の熱史に対してforward modelingを行い、これを実測年代値、トラック長分布と比較統計的に適合する熱史を描かせる熱履歴逆解析プログラムが開発された(e.g. Corrigan, 1991)。今回、テキサス大学のR. Ketcham氏による逆解析プログラム(AFT SOLVE v. 6.1)を使用し、大興安嶺山脈に適用した。これにより本調査地域の花崗岩体がたどった、アパタイトのPAZ(120~50°C)から現在

の温度に至る、詳細な冷却史の検討が可能となった。

このプログラムで用いられている基本的なアルゴリズムは次のものである(R. Ketcham 私信)。(1)時間-温度パスを分離したステップに分ける。(2)時間についてはCorrigan(1991)とは逆に現在から過去に戻って行き、それぞれの時間ステップにおいて形成されたFTのアニーリングの合計を計算する。(3)トラック発生のためのウランの量とその減少、アニーリングにより消滅するFTの効果、さらに異なる長さを持つFTの理論的な観察時のバイアスなどを考慮に入れた加重平均を用いて、それぞれのトラック母集団を合計する。種々の長さを持つhorizontal confined trackの観察・測定される確率は、トラック長が長いほど大きくなる(Laslett et al., 1982)。アニーリングカイネティクスを求めたデータセットはすでにこの関係によってバイアスがかかっている。一本一本に補正を加えるのではなく、全体にバイアスがかかっているものとして取り扱う。(4)それぞれのトラック長の短縮や、トラック長短縮とトラック密度の減少の関係にもとづいて年代値を計算する。これらの手順によりforward modelingが行われる。アニーリングカイネティクスは、Durango Apatiteについて数式化したLaslett et al. (1987)を用いている。

さらに逆解析に関しては(1)ランダムモンテカルロ法を用いて、コンピューター上で無数の熱史をランダムに発生させる。発生させる熱史はいくつかの温度・時間節点を結ぶ線分によって表現されており、時間方向には不動で、温度を乱数によって決定している。(2)各々の熱史に対して、forward modelingを行いFT年代値とトラック長分布を求める。(3)これらを実測により得られた年代値、ト

トラック長分布と比較し、統計的に適合する熱史を描かせる。年代値およびトラック長分布パターンの近似度は、Kolmogorov-Smirnov テストによって評価している。実測年代値・トラック長分布と、発生させた熱史のforward modeling結果により得られる年代値・トラック長分布を比較し、これらが異なっているという帰無仮説が有意水準5%で棄却される熱史から得られる最も広い温度範囲をつなぐ線分で示した領域を "Good fit" とし、統計上もっとも実測値に適合する熱史を "Best fit" とした (Fig. 5)。

大興安嶺山脈に産する花崗岩類に対して逆解析を行う際の初期値は、実測年代値およびトラック長平均値を考慮して150Maに120~200℃さらに現在の温度を20℃とし、1万の熱史をランダムに発生させた (R. Ketcham 私信)。実際に逆解析を適用する前に解析時の精度を吟味しておく必要がある。そのため、本研究で得られた年代、トラック長分布データを意識した種々の人工熱史についてforward modelingを行い、その結果について逆解析を行った。その結果、後に示す大興安嶺山脈の花崗岩類についての逆解析結果は、およそ100Maより古い範囲ではほとんど制約を持たないことが明らかになった。

5. 考察

アパタイトのFT逆解析結果と同一地域のジルコン年代を加味し、松遼盆地西部の大興安嶺山脈域に産する花崗岩体について210℃前後からの冷却史を示したのがFig. 5である。前述のように人工データを検討した結果、逆解析結果はおよそ100℃以上の100Ma以前では、集中が悪く制約を持たないために除いている。FT法を用いたジルコン年代の閉鎖温度は、種々報告されているが175~250℃程度である (Wagner and Van den haute, 1992)。これらの温度は、ジルコンがPAZへの二次的な再加熱を受けていないときの値であり、それぞれ50℃程度の誤差を含んでいる。ここではWagner and Van den haute (1992) による閉鎖温度、 210 ± 40 ℃を用いた。ジルコン年代値は、研究地域を代表する値として加重平均値である 116 ± 6 (1 σ) Maを用いた。

アパタイトの冷却史逆解析の結果、サンプル (13) を除く残りの4試料がほぼ同一の冷却史をたどっていることが分かる。サンプル (13)の母岩の化学組成、特に塩素含有量が他と著しく異なるため、アニーリングカイネティクスが Laslett et al. (1987) のものと有意に異なると考え除いている。得られた熱史は、およそ50~100Maの間では、60~100℃の範囲に収まる。この間での冷却は、およそ0.5℃/m.y. になっている。一方で、40Ma前後から現在の温度までの冷却過程については集中がよく、これらの花崗岩体が、40~50Maに、50~90℃から20℃まで冷却したことを示している。これらをまとめると、もっとも可能性が高いと考えられる冷却史は次のようになる。

- (1) 115Maに210℃前後から100Maの90℃前後まで比較的速く (およそ8℃/m.y.) 冷却した。
- (2) その後、100Maの90℃前後から50Maの60℃前後まで、非常にゆっくり (およそ0.5℃/m.y.) 冷却した。
- (3) さらに50Maの60℃前後から現在の温度 (20℃) まで冷却した。

大興安嶺山脈域における火成活動時期は、160~130Maとされる (高橋, 1984)。これらの時期に花崗岩体が地下

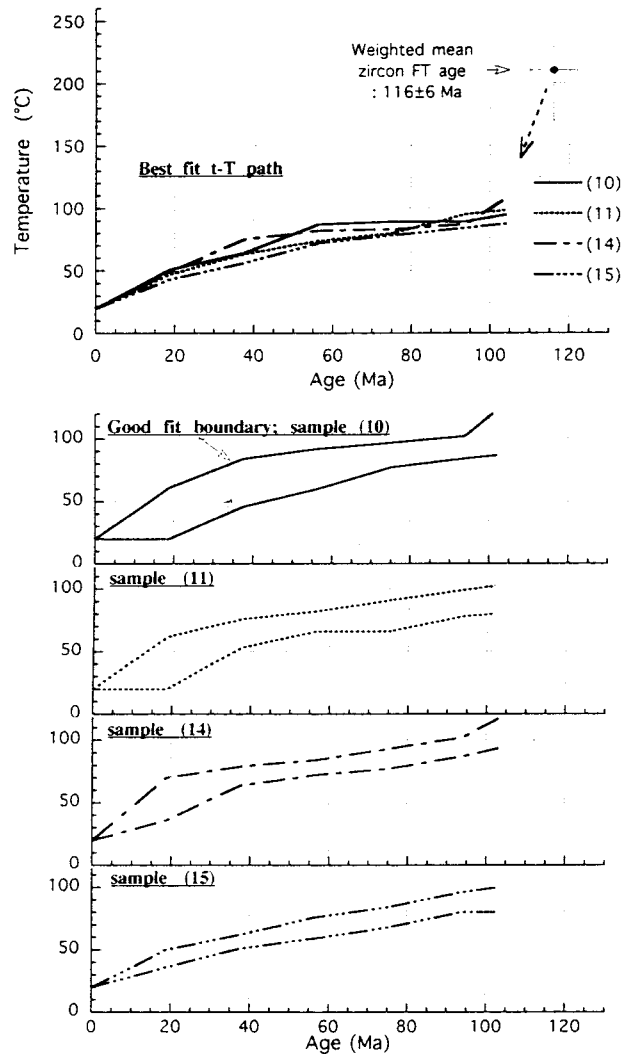


Fig. 5. Possible cooling history of granitic rock bodies in the Dahinganling Mts. region. Error bar with zircon weighted mean age indicates one standard error. Time-temperature paths derived from apatite inversion analysis showing best fit and good fit boundary for each samples. See the text for the detail.

深部 (e.g. 20~10km深) に貫入・固結後、同一深度での周囲環境と調和的な温度まで冷却し、さらに冷却を進める要因としては、上部の削剝に伴うアイソスタティックな準定常的な岩体の上昇に加え、周辺テクトニクスを反映した非定常的な岩体の上昇、または地温勾配の減少が考えられる。ここで、当岩体の210℃から90℃までの速い冷却の原因を、単純に岩体の上昇に起因すると考え、大陸地殻の平均的な地温勾配である30℃/km (e.g. Moore et al., 1986) を仮定した場合、115~100Maにおよそ地下6.3kmから2.3km深まで上昇したことを示している。これらの上昇量 (およそ0.3km/m.y.) が大きすぎると考えられる場合は、岩体上昇速度とともに当地域の古地温勾配がジルコンの冷却年代値である115Ma以前やその前後で高かったと考える必要がある。これとは逆に100~50Maの非常に冷却の遅い部分に関しては、岩体の上昇速度が遅

かったとの解釈が可能となる。

今後、これらの低温域の冷却史に関する情報を用いて、大興安嶺山脈の上昇史やその周辺テクトニクスとの関連を検討する際には、花崗岩体貫入年代や松遼盆地の構造発達史、時代的に比較可能な他地域の花崗岩体の冷却パターン等の情報を総合的に考える必要がある。

6. まとめ

中国東北地方大興安嶺山脈域に産する花崗岩類のジルコン、アパタイトのFT年代測定を行った。ジルコンFT年代は、112~121Maと誤差範囲内により集中を示し、その加重平均値は、 116 ± 6 (1σ) Maである。アパタイトについてのFT年代値は、119Maとやや古いサンプル(13)を除いて4つが、86~101Maと比較的よくまとまっており加重平均値は、 94.5 ± 4.2 (1σ) Maである。重イオン照射を用いて効率的に測定されたアパタイトのトラック長分布パターンは、単純な徐冷の際に見られるものに比べ短縮したものを多く含み、アパタイトのPAZ (120~50°C) に長い期間とどまっていたことを示している。これらに加えアパタイトの熱履歴逆解析プログラムを用いた解析を行い、これまで情報が得られていない当地域の花崗岩体の低温域 (およそ 210°C 以下) の冷却史に、強い束縛条件を与えることが可能となった。

大興安嶺山脈域に産する花崗岩類は、160~130Maとされる火成活動の後、およそ115~100Maでは岩体の冷却速度がおよそ8°C/m.y.と大きく、その後0.5°C/m.y.前後と著しく減少することが明らかになった。

謝辞

本研究は著者の一人、姫野が修士論文として行った研究の一部をまとめたものである。九州大学工学部の井澤英二教授には終始ご指導頂いた。花崗岩試料の採取に関して、中国長春地質学院の金旭教授には、多大なるご協力を頂いた。中性子照射の際には、立教大学原子力研究所の戸村健児教授に多くの便宜を図って頂いた。重イオン照射の際には、九州大学理学部原子核実験室の御手洗志郎、池田伸夫、杉光強の各博士に、大変お世話になった。テキサス大学のR. Ketcham氏にはアパタイト熱履歴逆解析プログラムを使用させて頂いた。地質調査所の角井朝昭、京都大学の山田隆二の両氏には、本論の査読をしていただき、多くの貴重なコメントを頂いた。以上の方々に、厚く御礼申し上げます。

引用文献

- Corrigan, J., 1991, Inversion of apatite fission track data for thermal history information. *J. Geophys. Res.*, **16**, 10347-10360.
- Erkin, R. J., Yang, Z., Chen, Y. and Courtillot, V., 1992, Paleomagnetic constraints on geodynamic history of the major blocks of China from the Permian to the present. *J. Geophys. Res.*, **97**, 13953-13989.
- Gleadow, A.J.W., 1981, Fission-track dating method: What are the real alternatives? *Nucl. Tracks*, **5**, 3-14.
- 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. Quantitive modeling techniques and extension to geological timescales. *Chem. Geol.*, **79**, 155-182.
- Hurfurd, A.J., 1990, Standardization of fission track dating calibration: Recommendation by the Fission Track Working Group of the I.U.G.S. subcomision on Geochronology. *Chem. Geol.*, **80**, 171-178.
- Jin, X., Ehara, S. and Xu, H., 1995, Preliminary report of heat flow in the GGT profile from Manzhouli to Suifenhe, northeast China. *CCOP Technical Bulletin*, **25**, 79-88.
- Laslett, G.M., Kendall, W.S., Duddy, I.R. and Gleadow, A.J.W., 1982, Bias in measurement of fission-track length distributions. *Nucl. Tracks*, **6**, 79-85.
- Laslett, G.M., Green, P.F., Duddy, I.R. and Gleadow, A.J.W., 1987, Thermal annealing of fission tracks in apatite; 2. A quantitive analysis. *Chem. Geol.*, **65**, 1-13.
- Liu, Z., Wang, D., Liu, L., Liu, W., Wang, P., Du, X. and Yang, G., 1993, Sedimentary characteristics of the Cretaceous in the Songliao Basin. *ACTA GEOLOGICA SINICA*, **6**, 167-179.
- Maruyama, S., Liou, J.G. and Seno, T., 1989, Mesozoic and Cenozoic evolution of Asia. In: Z. Ben-Avraham (Editor), *The evolution of the Pacific Ocean margins*, Oxford Univ. Press, Oxford, 75-99.
- Miyashiro, A., 1986, Hot regions and the origin of marginal basins in the western Pacific. *Tectonophysics*, **122**, 195-216.
- Moore, M.E., Gleadow, A.J.W. and Lovering, J.F., 1986, Thermal evolution of rifted continental margins: new evidence from fission track in basement apatites from southern Australia. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, **78**, 255-270.
- O'Sullivan, P.B. and Parrish, R.R., 1995, The importance of apatite composition and single-grain ages when interpreting fission track data from plutonic rocks: a case study from the Coast Ranges, British Columbia. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, **132**, 213-224.
- 澤田明宏・河野芳輝, 1996, Bikal rift の温度構造発達史. 地球惑星関連合同学術大会講演要旨, 639.
- Takahashi, M., Aramaki, S. and Ishihara, S., 1980, Magnetite-series/Ilmenite-series vs. I-type/S-type granitoids. *Mining Geology Spacial Issue*, **8**, 13-28.
- 高橋正樹, 1984, 東アジア後期中生代~初期新生代マグマ活動の時空分布と広域テクトニクス. 海洋科学, **16**, 1, 46-56.
- Wagner, G.A. and Van den Haute, P., 1992, Fission-track dating, *Kluwer Acad., Solid Earth Sciences Library*, **6**, 1-285.
- Watanabe, K., Izawa, E., Kuroki, K., Honda, T. and Nakamura, N., 1991, Detection of confined ²³⁸U fission tracks in minerals and its application to geothermal geology. *Annual Rep. Tandem Acccelator Lab.*, **3**, 151-155.
- Yang, W., Li, Y., Gao, R., 1985, Formation and evolution of nonmarine petroleum in Songliao Basin, China. *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bul.*, **69**, 7, 1112-1122.
- Zhao, C. and Li, Z., 1988, Granitoid and tectonic transport. *J. of Changchun Univ. Earth Sci.*, **18**, 1, 35-42.