

フィッション・トラック法を用いた若い年代試料測定を試みと問題点

—房総半島上総-下総層群中の火山灰層を対象として—

徳橋秀一* 檀原 徹** 遠藤秀典*** 磯田邦俊† 西村 進††

TOKUHASHI, Shuichi, DANHARA, Tofu, ENDO, Hidenori, ISODA, Kunitoshi and NISHIMURA, Susumu (1983) Some experiments and problems on fission-track dating of geologically younger-age samples: with special reference to several volcanic ash layers in Kazusa and Shimosa Groups, Boso Peninsula, central Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 34 (5), p. 241-269.

Abstract: A grain by grain method (NISHIMURA, 1977; MATSUDA and YOKOYAMA, 1979), one of methods for fission-track dating, is known as a useful one to identify and eliminate the derived zircon grains, which are often observed in volcanic ash samples, in the dating process. But, HAYASHI (1981b) pointed out some statistical problems which occur when the method is applied to the dating of the zircon grains in geologically younger-age samples because of their very small mean values of spontaneous fission-track number observed on each grain surface. The method of fission-track dating of younger-age samples is not adequately established by now.

The dating results of six volcanic ash layers intercalated in the middle Pleistocene upper Kazusa and lower Shimosa Groups, which are composed almost of marine clastic sediments and are distributed in the northern part of the Boso Peninsula, are demonstrated on the basis of grain by grain method by using some thirty zircon grains for each sample and discussed from some statistical points of view. Main results are as follows:

1) External detector method (GLEADOW *et al.*, 1976) is partly modified in order to mount zircon grains in a teflon sheet apart from each other with one surface of each grain exposed to the air. The laborious works with grain by grain method are substantially reduced by the new mounting method.

2) Excepting undoubtedly derived grains, the observed occurrence probability of numbers of spontaneous fission-tracks on individual grain surfaces of each sample coincides with the theoretical occurrence probability based on the Poisson distribution with the levels of significance from 75% to 5% in terms of χ^2 test.

3) Each age of six samples is calculated based on the ratio of total number of spontaneous fission-tracks to that of induced fission-tracks of all counted grains, including grains with no spontaneous fission-tracks on their counted surfaces but excluding undoubtedly derived grains. Calculated ages of six samples in descending order are as follows:

TE-5 : 0.51 ± 0.09 Ma (1σ for error)
 Ks11 : 0.57 ± 0.17 Ma
 Ks18 : 0.62 ± 0.14 Ma
 Ks22 : 0.49 ± 0.07 Ma
 Ch3 : 0.91 ± 0.21 Ma
 Ka1 : 1.3 ± 0.3 Ma (only a reference value)

4) Calculated value of age of Ks22, including few derived grains and showing the largest mean value of spontaneous fission-track number on each grain surface ($m=1.9$) among the six samples, most closely coincides with the geologically estimated value of age based on MACHIDA *et al.* (1980). Calculated values of other samples are all more or less older than those geologically estimated ages.

5) The grain by grain method is proved to have much capacity of dating geologically younger-age samples. A substantial increase of number of grains for counting for each sample, and more strict and more multiple statistical analyses are demanded to solve the unsolved problems and to get more reliable values of age.

* 大阪出張所 ** (株)京都フィッション・トラック *** 環境地質部 † (株)土質工学研究所 †† 京都大学

要 旨

フィッション・トラック法の一つの測定法である個体識別法(西村, 1977; 松田・横山, 1979)は, 測定粒子ごとの年代値の頻度分布を知ることができ, 古い粒子の混入を直接的にチェックできることから, 特に火砕岩の年代測定には大変有効な方法である。しかし最近, 平均核分裂片飛跡数の非常に小さい若くてウラン濃度の低い試料の場合には, 従来の個体識別法の適用にはいくつかの問題があり, 複雑な個体識別法よりはポピュレーション法の方が優れているという見解が示された(林, 1981b)。このように, 特に若い年代試料のフィッション・トラック法による年代測定法はまだ充分に確立されておらず, 測定結果の報告も大変少ない。このような段階では, 種々の立場から年代測定を試み, 具体的な測定結果を基礎にして議論することは大変重要である。

本論文では, 層序学的関係のはっきりしたいいくつかの平均自発核分裂片飛跡数の小さい試料について, 個体識別法による測定結果を示すとともに, 種々の統計的検討を実施した。測定試料は, 房総半島北部に分布する中部更新統上総層群上部から下総層群下部に含まれ, 地域的な鍵層としてもよく知られている6つの火山灰層(下から, Ka 1, Ch 3, Ks 22, Ks 18, Ks 11, TE-5)である。1試料当たり, 無作為に選んだ30数個のジルコン粒子について測定を実施した。主な内容は次の通りである。

1) GLEADOW *et al.* (1976) による EDM 法を改良し, 自然面のみを露出させて結晶粒子をテフロン板に埋込む技術を開発し, 個体識別法の一つの欠点とされた個体識別の際の複雑さを大幅に軽減させた。

2) 個体識別法により明らかに古い異種ジルコンを排除した各試料の粒子ごとの自発核分裂片飛跡数の出現確率は, それぞれ χ^2 検定で, 有意水準75-5%でポアソン分布に従っていることが明らかとなった。

3) 各試料の粒子ごとの自発核分裂片飛跡数がポアソン分布を示すことから, 自発核分裂片飛跡数が0の粒子も含めた自発及び誘導核分裂片の総数比から, 各試料の年代値を求めたところ, 次のような値を得た。

TE-5: 0.51 ± 0.09 Ma (誤差は1 σ 。以下同じ)

Ks 11: 0.57 ± 0.17 Ma

Ks 18: 0.62 ± 0.14 Ma

Ks 22: 0.49 ± 0.07 Ma

Ch 3: 0.91 ± 0.21 Ma

Ka 1: 1.3 ± 0.3 Ma (参考値)

4) 粒子ごとの自発核分裂片飛跡数の平均値が最も大きく ($m=1.9$), かつ年代値頻度分布図上で最もよいま

とまりを示す Ks 22 が, 町田ほか(1980)から求めた地質学的参考値と最も近い値(地質学的参考値の約0.9倍)を示すのに対して, 他の5つの試料は, TE-5・Ks 11・Ks 18の場合に1.2-1.4倍, Ch 3の場合に1.6倍, Ka 1(参考値)の場合に2.1倍と, いずれも地質学的参考値より古い値を示す。

5) 今後, さらに高い精度の年代値を得るとともに, 地質学的参考値と大きくずれた場合の原因を究明するためには, 1試料当りの測定粒子数を大幅に増大し, 粒子ごとの面積やウラン濃度の変動の影響及び誘導核分裂片飛跡数のばらつきをも考慮したよりきめ細かい統計的検討が必要である。

1. はじめに

筆者のうち徳橋・遠藤は, 5万分の1「姉崎」図幅調査に伴い, 房総半島北部に分布する中部更新統上総層群上部から下総層群下部にかけての層準における放射年代値の空白を埋めるの必要を感じ, 今回の共同研究を企画した。しかしながら, 自発核分裂片飛跡数の少ない若い年代試料を対象とした場合のフィッション・トラック年代測定法は未だ充分に確立されていないのが実情であることから, 本論文の趣旨は, 同法の一層の開発・確立を旨とした一つの基礎資料及び検討材料を呈示することにある。したがって, 今回得られた年代値そのものの意味・評価については今後の課題とし, 将来の検討に委ねることとする。本論文における作業分担は以下のごとくである。測定対象である火山灰層の識別と採取を徳橋・遠藤が, つぎに具体的な年代測定作業を檀原・磯田が行い, 結果の検討を西村を中心として全員で行った上で, 徳橋・檀原が中心となってまとめた。

謝 辞

地質調査所環境地質部長垣見俊弘氏, 同部地震地質課長衣笠善博氏は, 「姉崎」図幅調査に関連して本研究を実施することに積極的な支持を与えてくださるとともに, 垣見俊弘氏には粗稿に目を通していただき有益な意見をいただいた。大阪出張所長宮村 学氏は, 終始激励と積極的な協力を惜しまれなかった。京都大学理学部地質学鉱物学教室大学院生(当時)の上田 薫氏は, テフロン板埋込み技術についてご教示くださり同法の開発に大きく寄与された。最後に, 試料の熱中性子照射を依頼した武蔵工業大学原子力研究所助教授平井昭司氏には, 照射に際して多くの便宜をはかっていただいた。これらの方々には心から謝意を表わしたい。

2. 問題点の所在

最近, 若い年代試料のフィッション・トラック年代測定に個体識別法(西村, 1977; 松田・横山, 1979)を適用する場合, 統計上注意が必要なことが林(1981a, b)やTAMANYU (1981)により指摘された。特に林(1981b)は, 1粒子当りの自発核分裂片飛跡数の平均値が3以下の試料では, 飛跡の現われない粒子がかなり存在し, その出現頻度はポアソン分布にしたがうことが予想されること, この場合に飛跡数0の粒子を無視すると古い年代が得られてしまうという測定上の重要な問題点を指摘した。従来, 個体識別法を用いた場合のこの問題を克服する方法としては, NISHIMURA(1981)などにより実施されてきた, 1粒子当りの自発核分裂片飛跡数が少なくとも5以上できれば10以上出現するウラン濃度の高い粒子を多くの粒子中から選別する方法がある。すなわち, 飛跡計数を多くして1粒子ごとの測定値の誤差を小さくし, 信頼度の高い粒子年代を多数測定することにより上述の問題を解決しようとするものである。しかしながら, この測定には, 通常非常に大きな労力が必要となる上, 試料の量が限定される場合には, 高ウラン濃度をもつ粒子が抽出できないか抽出できても少数のため結果的に徒労に終わる場合も多い。

これに対して林(1981a)は, 粒子ごとの計数面積を一定とする定面積母集団法を提唱し, この方法を用いれば, 簡便で信頼度の高い測定が可能であるとしている。この定面積母集団法とは, 基本的にはポピュレーション法を応用したもので, 試料中の標準的なウラン濃度をもつ粒子を対象とするため, 特に高いウラン濃度をもつ粒子を選別する労力は不要となり, 加えて, 測定結果の統計的な検定を実施することにより, 時代の異なる異種粒子の混入の有無も判定できるとしている。

本研究に先だち, 筆者のうち檀原・磯田は, 個体識別法を用い飛跡数が0の粒子も無視することなく測定を実施した場合, 1粒子当りの自発核分裂片飛跡数が小さい試料では, 飛跡数の出現頻度がポアソン分布にかなりよく一致する例を予察的に得ていた。これが事実とすれば, 以下のような展望が開かれる。すなわち, 試料中の粒子集団内に外来性の異種粒子が混入していないとすると, 個体識別法を用いて粒子ごとの飛跡数を計数した場合, その出現頻度はポアソン分布に従うはずである。さらに異種粒子が混入しているならば, 飛跡数の出現頻度は乱されてポアソン分布からはずれるのであろう。したがって, 測定された粒子ごとの飛跡数の出現頻度がポアソン分布することが証明されれば, その粒子集団は1つの

年代値をもつ1集団とみなすことができよう。またこの方法は, 測定対象とする全粒子の自発及び誘導核分裂片飛跡数の比からポピュレーション法的に算出した年代値の妥当性についても有効な検証手段となるとともに, 異種粒子と本質粒子とを識別する有力な根拠と手がかりを与えてくれよう。

このように, 自発核分裂片飛跡数が限られている若い年代試料の年代測定については, その方法が未だ十分に確立されるに至っていないのが実情である。本論文では, 層序関係のはっきりした6つの火山灰層を試料として, ジルコンを対象とした個体識別法による測定結果の資料をできるだけ詳細に示した。次に, これらの資料の統計的検討を行い, 従来の個体識別法とは異なる新しい方式で年代値を算出した。更に, 得られた年代値や測定資料の適合性を, 町田ほか(1980)による地質学的参考年代値や林(1980b)の提唱した統計的検定法との関連で論じ, 今回の算出法の問題点と今後の課題について言及した。

3. 測定試料

房総半島の中・北部には, 主に第四系からなる上総層群及び下総層群が広く分布する。これらの地層は, ほぼ連続的に堆積した海成層を主体とする地層であり, 貝化石をはじめとして種々の化石を多数含むことから, 南関東のみならず日本の第四紀の地史を編む上でも重要なデータ・バンクとなっている。ところで, 上総層群・下総層群には数多くの火山灰層がはさまれているにもかかわらず, 放射年代値の測定報告は極めて少ない。南関東全体としては, 黒曜石を用いたフィッション・トラック年代値がいくつか紹介されている(町田・鈴木, 1971; 杉原ほか, 1978; 町田ほか, 1980)が, これらは30年より若いものに限定されている。またその試料採取地点も, 主に給源火山に近い箱根火山から大磯丘陵の地域に限られている。そしてジルコンを用いたフィッション・トラック年代値となると, ほぼ皆無に等しい¹⁾。このようにジルコンを用いたフィッション・トラック年代の報告が欠除している原因の一つは, 先に示したような若い年代試料の測定方法が確立していないことに起因しているものと考えられる。このような段階では, 系統的に行われた測定結果をできるだけ生に近い形で公表し, その場合の問題点を明らかにして, さらに有効な測定方法確立へ向けてのたたき台とすることも大変重要なことと思われる。

1) 以前より何人かの研究者によって, 上総層群及び下総層群の火山灰層についてフィッション・トラック法による年代測定が試みられているにもかかわらず, その結果は公表されていない。

第1表 測定試料(火山灰層)一覧

各火山灰層の層準・組成上の特徴などについては、右側の参考文献に詳しい。

試料名 (火山灰層)	層名	採取地点	採取地点での厚さ (cm)	参考文献
TE-5	地藏堂層	市原市山田久保 E140°7'25", N35°23'25"	40	杉原ほか(1978)
Ks 11	笠森層	長生郡長柄町針ヶ谷東部 E140°12'42", N35°25'47"	20	河井 (1952) 石和田ほか(1971) 町田ほか(1980)
Ks 18	"	長生郡長南町今泉 E140°14'35", N35°24'52"	15	"
Ks 22	"	長南町本台 E140°15'3", N35°24'50"	10	"
Ch 3	長南層	長南町朝日 E140°13'33", N35°20'55"	30	"
Ka 1	柿ノ木台層	長南町永沼 E140°14'12", N35°20'55"	30	"

る。特に、上総層群や下総層群のようにほぼ連続して堆積した地層中には含まれる火山灰層の場合には、お互いの層序学的関係が明らかであり、得られた年代値相互の比較・検討が可能なることから、測定方法を確立するための試料としても大変有用であると考えられる。

今回測定の対象としたのは、上総層群上部の柿の木台層から下総層群下部の地藏堂層までに含まれる6つの火山灰層であり、これらはいずれも地域的な鍵層としてよく知られているものである(第1表)。これらの火山灰層の選定にあたっては、十分な数のジルコン結晶が得られる必要から、ジルコンを含みかつ大量の試料採取が可能であることの2点を考慮した。したがって、年代測定作業に入る前に、まず、数多くの火山灰層について50-200gの試料を水洗・篩別して重鉱物分析を行い、ジルコンを含んでいるかどうかの検討を行った。選定した6つの火山灰層については、それぞれ10-20kgの試料を処理し今回の測定に供した²⁾。なおこの6つの火山灰層以外に、笠森層最上位の火山灰鍵層として知られるKs 5火山灰層についても大量処理を試みたが、十分なジルコン数を得るに至らず、今回は測定を断念した。

4. 測定方法

今回用いた個体識別法は横山ほか(1980)にほぼ準拠し、第1図に示す流れ図にしたがって測定を実施した。今回は測定方法そのものを論じることを目的としないため、ここでは、従来の個体識別法と大きく異なる点について詳述するのに止める。流れ図に示されるよう

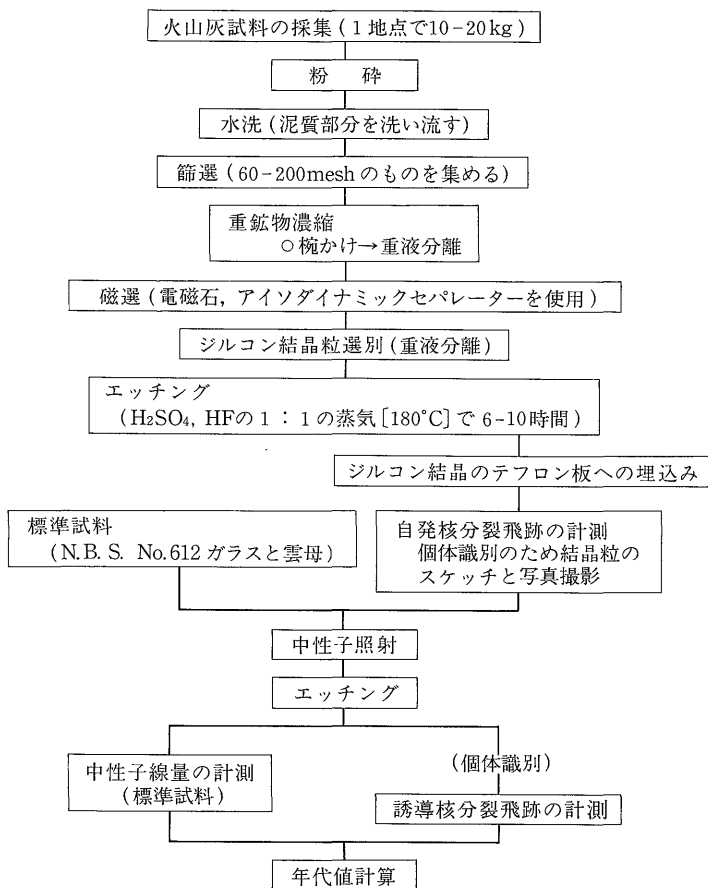
に、今回の測定では、最初のエッチング後にジルコンをテフロン(六沸化テフロン)板に埋込む手順を加えた。これは、ジルコンのような粒状試料の取扱い及び誘導核分裂片飛跡数の計数作業の際、結晶面の同定を容易にするために採用した。ただしGLEADOW *et al.* (1976)のEDM³⁾法と異なるのは、結晶の表面1面のみを露出させ、他の部分をすべてテフロン板に埋込む方法を採用していることである。

この埋込みは双眼実体顕微鏡で行うが、その要領は次の通りである。まずスライドガラスに50-100粒のジルコン粒子を載せる。次に1滴のアルコールをその上にたらし、直径10mm程度の範囲内で各粒子ができるだけ接しないよう分散させる。このスライドガラスを305-310°Cに保ったホットプレート上に載せ、その上に一辺10mmで厚さ0.5mmの四角いテフロンシートをかぶせる。そこであらかじめ加熱しておいた別のスライドガラスをさらにテフロンシートの上から載せ、テフロンが透明になるまで数秒間待つ。次にピンセットで軽く加圧した後、試料をはさんだスライドガラスをそのまま冷所に移し放置する。最後に完全に冷却したことを確認して、2枚のスライドガラスからテフロンを取りはずす。

以上の処理過程は、測定作業を簡単にさせるとともに次のような意味をもつ。第1に、EDM法では研磨によりジルコン粒子の内部面を観察するが、これは人工的に面を平滑に仕上げるために計数しやすくなる反面、様々な方向で結晶が切られることで、格子方向の違いによるエッチング効率の差が生じる。第2に、火砕岩のように古い年代を示す異種ジルコン粒子が混入する可能性のあ

2) 6つの火山灰層は、いずれもよく成層し、上下の層界面は明瞭である。試料採取にあたっては、生痕のある部分を除去し、均質な部分のみを採取するよう注意を払った。

3) External detector method の略で、外部検出材を用いて誘導核分裂片飛跡数を測定する方法。



第1図 年代測定の手順を示す流れ図

横山ほか (1980) を一部修正

る場合、人工的に結晶内部面を出したのでは、各結晶の自形性や表面状態(たとえば融蝕跡など)を観察することができず、測定結果を解析する際に重要な情報を棄て去る恐れがある。その点、今回の埋込み方法を用いれば上述の2つの問題点は解決される。

また今回の試みでは、各粒子ごとの計数面積は、結晶中に包有物があっても特に計数に支障のない限り原則として1結晶面の全面とした。この点では、定面積母集団法では1粒子当りの測定面積を一定にするので、後の統計的処理が容易である。しかし、今回定面積母集団法を採用しなかったのは次の理由による。すなわち定面積母集団法では、計数面積設定にあたり平均的な粒子の約2分の1を目安とする一定面積を、結晶面から約12 m μ 以内のいわゆる2 π ジオメトリーの部分及び包有物や傷の多い部分を避けて設定する。この場合グリッドの設定は、飛跡が鮮明でない状態で行うべきであり、飛跡の分布から判断して人為的に移動すべきではないとする。こ

れは理論的には非常に合理的であるが、実際に実行するとなると容易ではなく、加えて、エッチング前後の測定位置の同定作業が、自発及び誘導核分裂片飛跡数計数の際の2回必要となる。したがってこの方法を用いると、測定操作があまりに繁雑となり、少なくとも現段階では実際的でないと判断したからである。

今回の測定では、各試料とも、無作為に抽出した30数個のジルコン結晶粒を測定対象とした。具体的には、鏡下でテフロン板を左から右、右から左へと平行移動させつつ、左下端から右上端方向へ1個づつ順々に測定していき、30数個に達したところで測定を終了した。

なお、飛跡数の計数に用いた顕微鏡はNikonバイオフィットVBD-VWT-3型で、総合倍率1,000倍(対物レンズdry 100倍、接眼レンズ10倍)を用いた。各測定粒子の面積は、粒子の顕微鏡写真を横河ヒューレットパカード社製HP9815A型CalculatorとHP9864A Digitizerにより測定し、写真スケールで補正を加え求めた。また試料

の熱中性子照射は、武蔵工業大学原子力研究所(トリガII型原子炉)に依頼し、照射溝にて約10分の照射を行った。熱中性子線量の測定は、National Bureau of StandardsのNo. 612 glass(U濃度 37.38 ± 0.08 ppm)にdetectorとして密着させた白雲母を、48% HFで室温にて30分エッチング後顕微鏡写真撮影(1,000倍)を行い、写真上で1,000個以上の飛跡数を測定し求めた。

5. 測定結果とその検討

まず今回の測定結果をまとめたものを第2-4表に示し、各試料における粒子ごとのみかけの年代値の頻度分布図を第2図A-Fに示す。また測定結果を正確に記録するため、各試料における粒子ごとの詳細な測定値の試料を、中性子照射前の各粒子の顕微鏡写真とともに、付録として掲載した(各試料の結晶番号と写真番号は同じである)。

第2表は、NISHIMURA(1981)などのまとめ方により測定結果を示したものである。ただし今回は各試料とも自発核分裂片飛跡数が0の粒子を多数含むため、粒子ごとの年代値の平均値をもって求める年代値とする方法の適用は不相当であり、その計算は行っていない。今回の場合、明らかに異種の年代を示す粒子は除外したものの、その他の粒子は、年代値頻度分布図上でみかけ古い年代値を示す粒子も含めて、すべて同一起源の本質粒子とみなして一括し、これらの粒子の自発及び誘導核分裂片飛跡数の総和の比から年代値を計算した。これは、今回の試料のように自発核分裂片飛跡数が少ない場合、粒子ごとの年代値は、大きな誤差を伴うみかけにしか過ぎないからである。

第2表に示された各試料の参考年代値は町田ほか(1980)から求めたものである。町田ほか(1980)は、BRUNHES-MATUYAMA地磁気境界(約70万年前)以降の上総層群及び下総層群各累層の年代について、酸素同位体比変動・海水面変動・古水温変動などの諸資料に、著者らのテフクロロジーの成果を取り入れて、現段階で最も詳しい議論を展開してまとめていることから、そこから導き出された値を、ここでは地質学・層序学的な側面からの一つの目安すなわち参考年代値として採用している。以下本文で地質学的な参考値というときはこの値を示しているものとする。

第3表は、NAESER *et al.* (1979)の提案に準拠して測定結果をまとめたものである。

第4表は、各試料における1結晶面中にn個の自発核分裂片飛跡数をもつ粒子の出現確率の実測値と、それらの出現確率がポアソン分布すると仮定して計算した理論

値とを比較したものである。この表中Ka1試料については、自発核分裂片飛跡数が10未満という集団(24個)で両値を比較した場合の適合度は低いが、自発核分裂片飛跡数が3以下の集団(21個)で比較した場合にはよく一致したことから、参考までに示した。

ただしこの場合、測定粒子ごとの面積及びウラン濃度の変動については一切考慮されていないことに注意を要する。このことは、測定粒子を人為的に取捨選択せず、また結晶粒子の自然面で測定しているという今回の測定方法の延長上にあるものであり、人為的な操作を極力少なくした上での測定結果の検討を意図したからである。理論的には、平均自発核分裂片飛跡数の少ない試料の場合には、粒子ごとの面積やウラン濃度の変動の影響はほとんど無視できるという林(1981b)の指摘を前提にしているといえよう。各試料ごとの面積やウラン濃度に関する各種統計値及び今回の測定結果との関連については、後で、林(1981b)による検討の際に触れる(第5・6表参照)。

次に各試料ごとの測定結果について述べる。

TE-5

測定した粒子群の平均自発核分裂片飛跡数は1.0で、みかけの平均ウラン濃度は110 ppmとやや高い。粒子ごとの自発核分裂片飛跡数の実測確率(第4表参照)は、 χ^2 検定で有意水準10%(危険率 $\alpha=0.10$)でポアソン分布に従うと判定される。みかけの年代値頻度分布図(第2図A)にみられるように、粒子ごとの年代値はかなりばらつく。このうち、No. 24結晶はみかけの年代値が2.5 Maと他粒子と比較して飛び離れて古いことから、第2, 3表中の年代値はこの粒子を除いて計算した。

なお第2図Aにおいて、自発核分裂片飛跡数が0のものも含め(図中ではNs=1と仮定した位置に描いている)⁴⁾、0.30-0.85 Maの範囲に測定粒子の約3分の2が集中している。この集団のみの自発核分裂片飛跡数の確率分布を理論値と比較すると必ずしもよい一致は示さないが、この集団のみを対象として単純に自発と誘導核分裂片飛跡数の総数比から年代値を算出すると、 0.33 ± 0.08 Maが得られる。この値は第2表の地質学的な参考値(0.37 Ma)と比較的良好一致を示すが、その意味は現状では不明である。なお、この試料中のジルコン結晶中

4) Ns=0の粒子をNs=1と仮定した位置に描いているのは、こうすることによって、Ns=0の粒子のNs値の変動をも、みかけの年代値頻度分布図上に反映させようとする意図(試み)によるものである。年代値頻度分布図上であくまでNs=0の位置に描くか、あるいは、Ns=1ではなくNs=0.5と仮定した位置に描くのがより妥当であるのかは、今後更に検討すべき課題である。ただし今回の議論で、ポアソン分布の検定や年代値の算出の際には、Ns=0の粒子はあくまでNs=0として扱っていることはいうまでもない。

第2表 各試料のフィッシュン・トラック年代値一覧 ($\lambda_f = 7.03 \times 10^{-17} \text{ y}^{-1}$)

試料名	鉱物名	全自発核分裂片飛跡数 $\sum N_s$		全誘導核分裂片飛跡数 $\sum N_i$		熱中性子線量 Φ		年代値 ¹⁾ T (Ma)	誤差 ²⁾ $\pm \varepsilon$ (Ma) (ε/T %)	結晶数 n	相対誤差 ³⁾ \bar{s}' (%)	ウラン濃度 ⁴⁾ U (PPM)	参考年代値 ⁵⁾ T (Ma)
		飛跡数/cm ²	飛跡数	飛跡数/cm ²	飛跡数	中性子数/cm ²	飛跡数						
TE-5	ジルコン	1.92×10^4	32	8.45×10^5	1411	0.38×10^{15}	1121	0.51	0.09 (18.1%)	31	7.7	110	0.37
Ks11	ジルコン	9.91×10^3	11	3.95×10^5	438	0.38×10^{15}	1121	0.57	0.17 (30.7%)	32	14.6	52	0.45
Ks18	ジルコン	1.08×10^4	20.5	3.94×10^5	745	0.38×10^{15}	1121	0.62	0.14 (22.6%)	30	12.7	52	0.51
Ks22	ジルコン	2.02×10^4	51	1.09×10^6	2752	0.44×10^{15}	1565	0.49	0.07 (14.4%)	27	9.3	140	0.53
Ch3	ジルコン	1.68×10^4	19	4.20×10^5	475	0.38×10^{15}	1121	0.91	0.21 (23.6%)	31	20.2	55	0.57
Ka1	ジルコン	1.97×10^4	16	3.88×10^5	315	0.44×10^{15}	1565	1.3 ⁶⁾	0.3 (25.8%)	21	7.1	51	0.61

1) $T = 5.96 \times 10^{-8} \Phi \cdot \frac{\sum N_s}{\sum \bar{N}_i}$; Ma は100万年の略。

2) $\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{\sum N_s}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{\sum \bar{N}_i}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{\sum N_\phi}}\right)^2}$

3) $\bar{s}' = \frac{\sqrt{\frac{\sum (N_i - \bar{N}_i)^2}{n(n-1)}}}{\bar{N}_i} \times 100$; $\bar{N}_i = \frac{\sum N_i}{n}$

4) $U = 5 \times 10^{10} \frac{\rho_i}{\Phi}$

5) 町田ほか(1980)の第5図による。数字はこの図から読み取った値。Ks 22 については、この図に内挿して得た値。

6) 参考値。

第3表 NAESER ほか(1979)の提案による各試料の年代値一覧 ($\lambda_f = 7.03 \times 10^{-17} \text{y}^{-1}$)

試料名	鉱物名	自発核分裂片 飛跡密度 ρ^s		誘導核分裂片 飛跡密度 ρ^i		熱中性子線量 Φ		年代値 ¹⁾ T (Myr)	誤差 ²⁾ $\pm 2s$ (Myr)	結晶数 n	相対誤差 ³⁾ \bar{s}^2 (%)	ウラン 濃度 ⁴⁾ U (PPM)
		飛跡数/cm ²	飛跡数	飛跡数/cm ²	飛跡数	中性子数/cm ²	飛跡数					
TE-5	ジルコン	1.92×10^4	32	8.45×10^5	1411	0.38×10^{15}	1121	0.51	0.16	31	7.7	110
Ks11	ジルコン	9.91×10^3	11	3.95×10^5	438	0.38×10^{15}	1121	0.57	0.29	32	14.6	52
Ks18	ジルコン	1.08×10^4	20.5	3.94×10^5	745	0.38×10^{15}	1121	0.62	0.23	30	12.7	52
Ks22	ジルコン	2.02×10^4	51	1.09×10^6	2752	0.44×10^{15}	1565	0.49	0.12	27	9.3	140
Ch3	ジルコン	1.68×10^4	19	4.20×10^5	475	0.38×10^{15}	1121	0.91	0.34	31	20.2	55
Ka1	ジルコン	1.97×10^4	16	3.88×10^5	315	0.44×10^{15}	1565	1.3 ⁵⁾	0.5	21	7.1	51

1) $T = 5.96 \times 10^{-8} \Phi \cdot \frac{\sum N_s}{\sum N_i}$; Myr は100万年の略.

$$2) s = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{\sum N_s}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{\sum N_i}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{\sum N_\phi}}\right)^2 - 2 \times \frac{1}{\sqrt{\sum N_s}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\sum N_i}}}$$

$$3) \bar{s}^2 = \frac{\sum (N_i - \bar{N}_i)^2}{n(n-1)} \times 100; \bar{N}_i = \frac{\sum N_i}{n}$$

$$4) U = 5 \times 10^{10} \frac{\rho^i}{\Phi}$$

5) 参考値.

第4表 各試料における1結晶面中の自発核分裂片飛跡数 (Ns) の実測値とポアソン分布¹⁾ 理論値との比較一覧

n	TE-5 m=1.0		Ks11 m=0.3		Ks18 m=0.7		Ks22 m=1.9		Ch3 m=0.6		Ka1 (Ns<10) m=1.4		Ka1 (Ns≤3) m=0.76	
	fm(n) fm(n)·Σkn	kn/Σkn kn	fm(n) fm(n)·Σkn	kn/Σkn kn	fm(n) fm(n)·Σkn	kn/Σkn kn	fm(n) fm(n)·Σkn	kn/Σkn kn	fm(n) fm(n)·Σkn	kn/Σkn kn	fm(n) fm(n)·Σkn	kn/Σkn kn	fm(n) fm(n)·Σkn	kn/Σkn kn
0	0.368 11	0.323 10	0.741 24	0.656 21	0.497 15	0.500 15	0.150 4	0.111 3	0.549 17	0.581 18	0.247 6	0.458 11	0.468 10	0.476 11
1	0.368 11	0.484 15	0.222 7	0.344 11	0.348 10	0.367 11	0.284 8	0.333 9	0.329 10	0.258 8	0.345 8	0.208 5	0.355 7	0.333 5
2	0.184 6	0.065 2	0.033 1	0.000 0	0.122 4	0.100 3	0.270 7	0.296 8	0.099 3	0.129 4	0.242 6	0.167 4	0.135 3	0.143 4
3	0.061 2	0.097 3	0.003 0	0.000 0	0.028 1	0.033 1	0.171 5	0.148 4	0.020 1	0.032 1	0.113 3	0.042 1	0.034 1	0.047 1
4	0.015 0	0.032 1			0.005 0	0.000 0	0.081 2	0.074 2	0.003 0	0.000 0	0.039 1	0.000 0	0.007 0	0.000 0
5	0.003 0	0.000 0					0.031 1	0.000 0			0.011 0	0.042 1		
6							0.010 0	0.037 1			0.003 0	0.042 1		
7											0.000 0	0.042 1		
χ ² 検定	有意水準10%でポアソン分布に従うと考えられる。		有意水準5%でポアソン分布に従うと考えられる。		有意水準75%でポアソン分布に従うと考えられる。		有意水準75%でポアソン分布に従うと考えられる。		有意水準50%でポアソン分布に従うと考えられる。		有意水準10%でポアソン分布に従うと考えられる。		有意水準50%でポアソン分布に従うと考えられる。	

1) ポアソン分布: 平均飛跡数mのとき, 1結晶面にn個の飛跡が出現する確率で, 次式で求められる。

$$f m(n) = \frac{m^n}{n!} \cdot e^{-m}$$

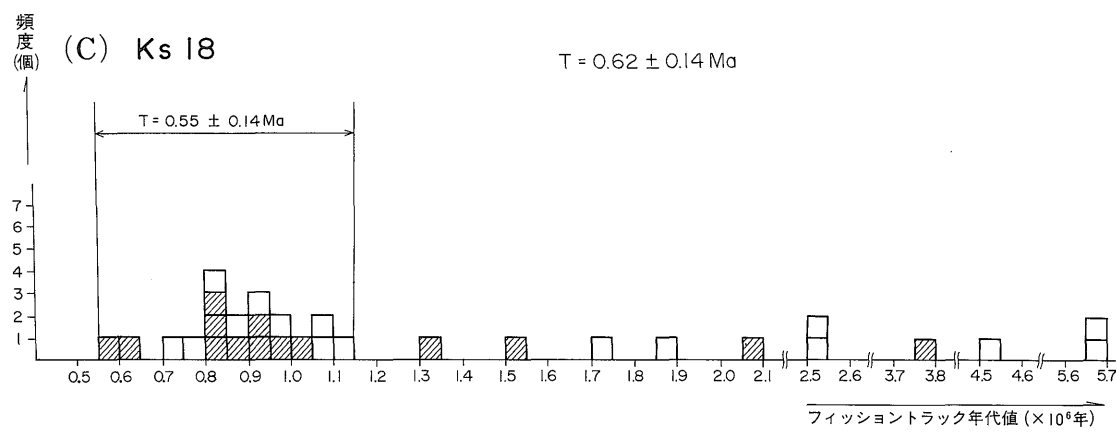
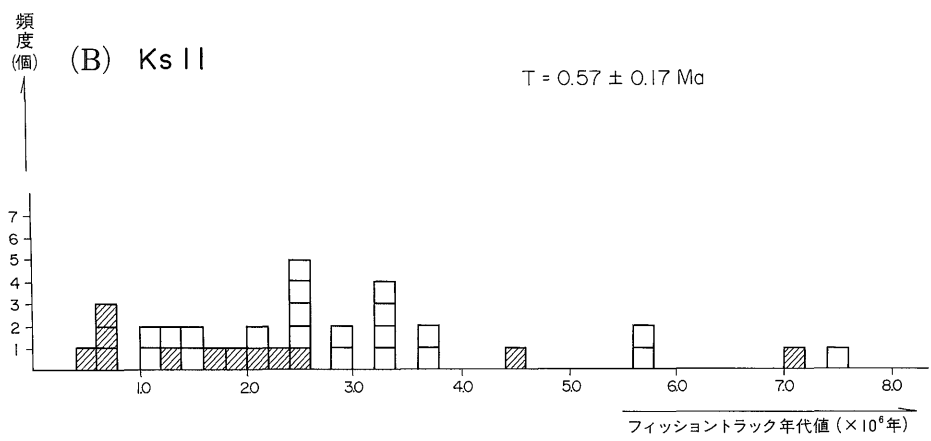
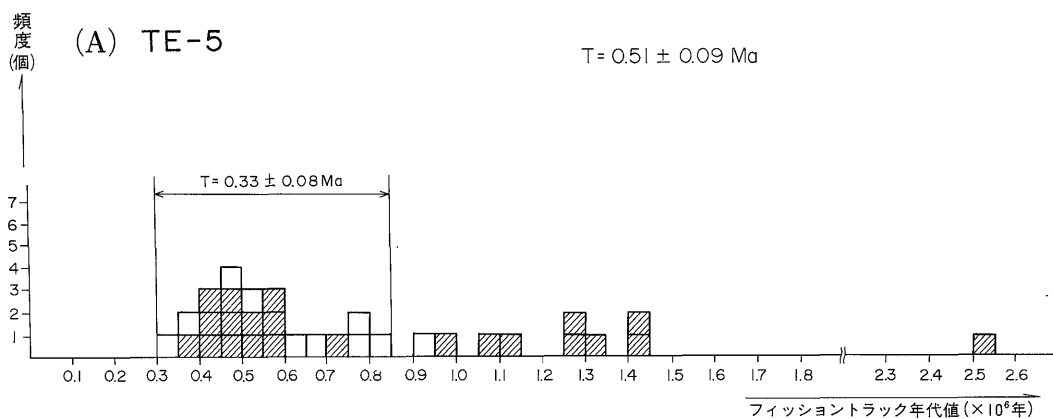
n個の飛跡をもつ結晶数: kn

全結晶数: Σkn

全飛跡数: Σn·kn = ΣNs

平均飛跡数: $m = \frac{\sum Ns}{\sum kn}$

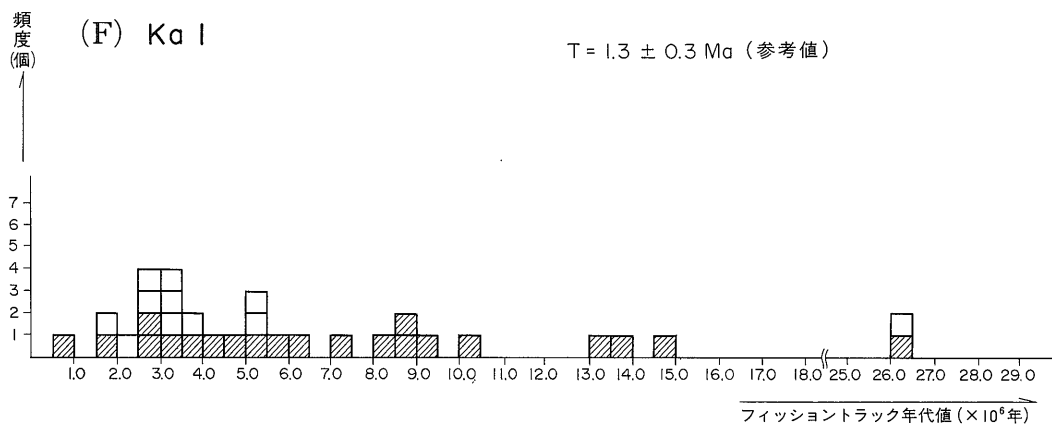
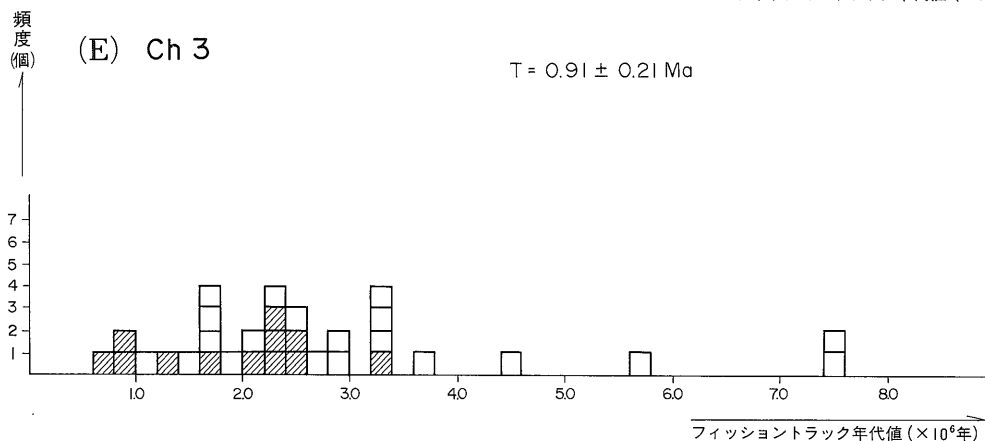
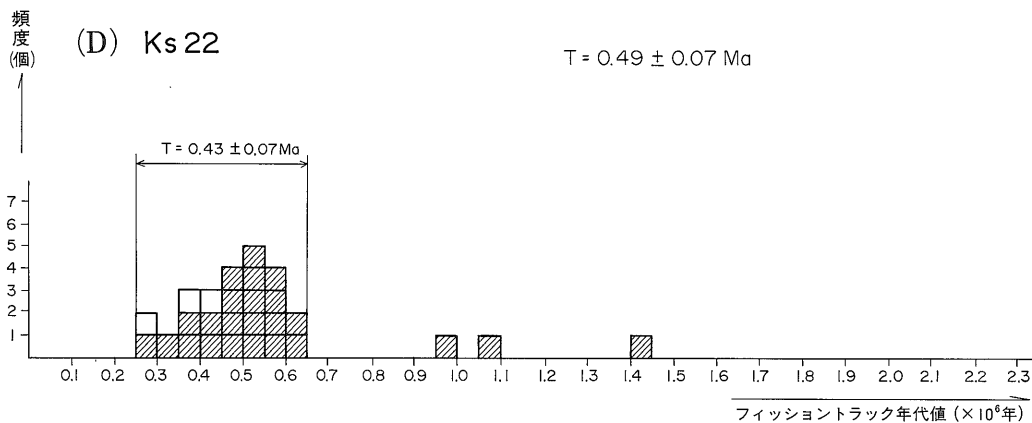
▨ : 実測値
 □ : Ns=0をNs=1とした年代値(参考値)



第2図 各試料のジルコン1粒子ごとのみかけの

▨ : 実測値

□ : $N_s=0$ を $N_s=1$ とした年代値(参考値)



フィッシュン・トラック年代値頻度分布図

には多くの空晶を含むものがあり、テフラの同定においては一つの特徴となろう。

Ks 11

測定した粒子群の平均自発核分裂片飛跡数は0.3と6試料中最も小さく、平均ウラン濃度は52 ppmと低い。粒子ごとの自発核分裂片飛跡数の出現確率の実測値は、 χ^2 検定で有意水準5%(危険率 $\alpha=0.05$)でポアソン分布に従うと判定されるが、ポアソン分布とのずれは比較的大きい。粒子ごとの見かけの年代値頻度分布図(第2図B)に明らかなように、粒子ごとの年代値は非常にばらつく(横軸の年代尺のとり方がTE-5試料より広がっていることに注意)。このうちNo. 18結晶は、自発及び誘導核分裂片飛跡数がそれぞれ58及び183で年代値は7.2 Maと他粒子と全く異なり、自形度も悪いため異種粒子として除外できよう。

Ks 18

平均ウラン濃度は52 ppmと低いが、粒子群の平均自発核分裂片飛跡数が0.7と前述のKs 11の2倍以上であるのは、粒子群の平均結晶面積がKs 11と比較して2倍以上あるからである。粒子ごとの自発核分裂片飛跡数の出現確率の実測値は、 χ^2 検定で有意水準75%(危険率 $\alpha=0.75$)でポアソン分布に従うと判定され、両者はよく一致するといつてよい。各粒子の自形度はよく同一起源の印象を受けるが、みかけの年代値頻度分布図(第2図C)にみられるように、粒子ごとの年代値は非常にばらつく。ただしこの試料でみかけ上古い年代値が得られている粒子は、自発核分裂片飛跡数が大きいのではなく、逆に小さいことが注目される。このことは、自発核分裂片飛跡数がポアソン分布とよく一致することとやや矛盾するが、この検定法では検出不能なウラン濃度の低い古い年代値をもつ異種粒子が混入しているのかもしれない。なお第2図Cにおいて、前述のTE-5と同様に、0.55-1.15Maの範囲に測定粒子の約3分の2が集中している。この粒子集団のみの自発核分裂片飛跡数の出現確率は理論値と決してよい一致をみせないが、この集団のみを対象として単純に自発及び誘導核分裂片飛跡数の総数比から年代値を算出すると、 0.55 ± 0.14 Maの値が得られる。この年代値も、TE-5の場合と同じく、第2表の地質学的な参考値(0.51 Ma)とよい一致を示すが、その意味については不明である。

Ks 22

測定粒子群の平均自発核分裂片飛跡数は1.9、みかけの平均ウラン濃度は140 ppmと6試料中最も高い。粒子ごとの自発核分裂片飛跡数の出現確率の実測値は、 χ^2 検

定で有意水準75%(危険率 $\alpha=0.75$)でポアソン分布に従うと判定され、両者はよく一致するといつてよい。各粒子の自形度はよく、全体に均質な印象を受ける。みかけの年代値頻度分布図(第2図D)に示されるように、粒子ごとの年代値は0.25-0.65Maの範囲に全粒子の90%が集中し明瞭なピークを形成する。ここで全粒子を対象として自発及び誘導核分裂片飛跡数の総数比から年代値を計算すると、 0.49 ± 0.07 Maが得られる。これは第2表の地質学的な参考値(0.53 Ma)とよく一致するといつてよい。ただし、0.25-0.65 Maの範囲の年代値をもつ粒子のみを対象として年代値を求めると、 0.43 ± 0.07 Maが得られる。この値は参考値よりかなり若い値だといつてよい。したがってKs 22試料においては、前述のTE-5、Ks 18試料における議論は適用できず矛盾が生じる。

なおこのKs 22試料は、今回測定した6試料中で平均面積・平均ウラン濃度が最も大きく(第5表参照)、結晶表面状態も良好で、飛跡数の計数も最も高い精度で行い得た。したがって、Ks 22の測定結果は他試料の測定結果を判断する一つの鍵となるものと考えられよう。

Ch 3

粒子群の平均自発核分裂片飛跡数は0.6で、みかけの平均ウラン濃度は55 ppmと低い。粒子ごとの自発核分裂片飛跡数の実測値は、 χ^2 検定で有意水準50%(危険率 $\alpha=0.50$)でポアソン分布に従うと判定され、両者はほぼ一致するといつてよい。ただし粒子の自形度は全体によくなく、結晶の形態的な観察からは異質粒子の混入の可能性も考えられる。みかけの年代値頻度分布図(第2図E)に示されるように、粒子ごとの年代値は大きくばらつく。このうち、明らかに異種粒子と判断できるNo. 5、No. 7の両粒子を除いた粒子群を対象として総飛跡数比から年代値を算出すると、 0.91 ± 0.21 Maが得られる。この値は、第2表の地質学的な参考値(0.57 Ma)よりかなり古い値で誤差範囲内におさまらない。この原因としては前述の異種粒子の混入の可能性が考えられるが、今後の課題としてさらに追求すべき問題である。

Ka 1

付録の生データに明瞭に示されるように、複数の異種粒子群を含む試料である。このうち、5 Ma以上の古い年代を示すとともに自発核分裂片飛跡数が10を越える粒子を明らかに古いものとして除去すると24粒子が残る。それらを対象とした粒子群の平均自発核分裂片飛跡数は1.4で、平均ウラン濃度は56である。第4表に示されるように、粒子ごとの自発核分裂片飛跡数の出現確率の実測値と理論値は大きく異なる。したがって異種粒子の混

入を予想し、さらに、自発核分裂片飛跡数が5, 6, 7の粒子(結晶 No. 27, 28, 33)を除いた結果も示した(第4表)。この21粒子の平均自発核分裂片飛跡数は0.76, 平均ウラン濃度は51 ppm であり、粒子ごとの自発核分裂片飛跡数の実測値は、 χ^2 検定で有意水準50%(危険率 $\alpha=0.50$)でポアソン分布にほぼ従うと判定される。みかけの年代値頻度分布図(第2図F)に示される粒子ごとの年代値は大きくばらつくが、前述のように明らかに古い年代値をもつ異種粒子を除いた残りの21粒子は、1.0-5.0 Ma の間にほぼ集中する。これらの粒子について自発及び誘導核分裂片飛跡数の総数比から年代値を算出すると、 1.3 ± 0.3 Ma の値を得る。この値は第2表の地質学的な参考値(0.61 Ma)を大きく上回り、参考値の約2.1倍に相当する。

以上、測定に供したジルコン粒子の特徴と測定結果について、試料ごとに検討してきた。ここで今回の計算年代値と第2表に示した地質学的な参考年代値との関係をまとめると、測定試料中平均自発核分裂片飛跡数が最も大きく、年代値頻度分布図上での集中度も最も良く、粒子ごとの自発核分裂片飛跡数のポアソン分布との適合度も高い Ks 22試料の場合に両者がよく一致しているのに対して、他試料は、TE-5, Ks 11, Ks 18の場合に1.2-1.4倍、Ch 3の場合に1.6倍、Ka 1の場合に2.1倍と、すべて計算値が地質学的な参考値より古い値を示していることになる。

6. 考 察

6.1 林(1981b)の検定法との適合性

ここでは測定結果として示したこれまでの数値の適合

性を判定するために、第5表に各試料の粒子ごとの面積及びウラン濃度とそのばらつきを示す。第6表には、林(1981b)の提唱する方法で計算した各種の変動係数・期待値・F検定値の一覧を示した。その結果得られた数値は変化に富み、残念ながら安易な傾向性の指摘を許さない。しかしながら林(1981b)に従えば、少なくとも以下の検定には適合しているといえる。まず、誘導核分裂片飛跡数の変動係数 $Eo(i)$ は、通常その平均値におけるポアソン分布の変動係数 $Ep(i)$ とほぼ等しいか大きくなければならないが、今回の結果はすべてこれを満足している。ただし Ch 3, Ka 1 の2試料の $Eo(i)$ 値が1を超え、他と比較して明らかに大きい。次に、自発核分裂片飛跡数の変動係数は、Ks 22 試料が $Eo(s) = 0.73 \div Ep(s) = 0.72$ と $Eo(s)$ と $Ep(s)$ がほぼ一致し、他の4試料 TE-5, Ks 18, Ch 3, Ka 1 は $Eo(s) > Ep(s)$ で矛盾はない。ただし Ks 11 の場合には、 $Kp(s) = 1.71 > Eo(s) = 1.41$ でこの関係が大きく逆転する。このような結果が生じた場合、林(1981b)は、自発核分裂片飛跡数の違いにより測定に用いた粒子と用いないものを選別した結果であることを推定している。しかし、今回の測定では粒子の選別は行っていないため、Ks 11 において $Ep(s) > Eo(s)$ が生じた理由としては、自発核分裂片飛跡数が0, 1の2種の粒子しか測定されず、平均自発核分裂片飛跡数が0.3とあまりに小さかったことが考えられよう。したがって、自発核分裂片飛跡数の変動係数にも全体としては大きな矛盾はないと判断される。第3に、実験精度と異質粒子の混入の有無の判定基準となるとするF値(自発核分裂片飛跡数の変動係数の期待値 $Ec(s)$ と観測値 $Eo(s)$ との二乗比)について検討すると、Ka 1 が $F = 2.25$ と大きな

第5表 各試料測定粒子の平均面積及び平均ウラン(重量)濃度一覧

試料名	結晶数 n	面積 S					ウラン(重量)濃度 U			
		全面積 $\sum S$ (cm^2)	平均面積 \bar{S} ($\times 10^{-6} \text{cm}^2$)	標準偏差 $\sigma(s)$ ($\times 10^{-6} \text{cm}^2$)	変動係数 $\bar{\sigma}(s)^{1)}$ ($\times 10^{-6} \text{cm}^2$)	相対変動係数 $\bar{\sigma}'(s)^{2)}$ (%)	平均濃度 \bar{U} (PPM)	標準偏差 $\sigma(U)$ (PPM)	変動係数 $\bar{\sigma}(U)^{3)}$ (PPM)	相対変動係数 $\bar{\sigma}'(U)^{4)}$ (%)
TE-5	31	1.67×10^{-3}	5.39	2.81	0.50	9.3	120	44	7.9	6.6
Ks11	32	1.11×10^{-3}	3.46	1.90	0.34	9.8	52	26	4.6	8.8
Ks18	30	1.89×10^{-3}	6.29	4.34	0.79	12.6	58	36	6.6	11.4
Ks22	27	2.52×10^{-3}	9.33	5.54	1.07	11.5	150	71	13.7	9.1
Ch3	31	1.13×10^{-3}	3.65	1.77	0.32	8.8	57	48	8.6	15.1
Ka1 (Ns \leq 3)	21	8.11×10^{-4}	3.86	2.81	0.61	15.8	44	42	9.2	20.9

1) $\bar{\sigma}(s) = \frac{\sigma(s)}{\sqrt{n}}$

2) $\bar{\sigma}'(s) = \frac{\bar{\sigma}(s)}{\bar{S}}$

3) $\bar{\sigma}(U) = \frac{\sigma(U)}{\sqrt{n}}$

4) $\bar{\sigma}'(U) = \frac{\bar{\sigma}(U)}{\bar{U}}$

第6表 各試料ごとの変動係数・期待値・F値の一覧(林, 1981bによる)

試料名	Eu(i)	Ep(i)	$\frac{Eus}{(\sqrt{Eu^2+Es^2})}$	Ep(s)	Eu(s)	Ec(s)	F
TE-5	0.43	0.15	0.40	0.98	1.02	1.06	1.08
Ks11	0.82	0.27	0.77	1.71	1.41	1.88	1.78
Ks18	0.70	0.20	0.67	1.21	1.26	1.38	1.20
Ks22	0.48	0.10	0.47	0.73	0.72	0.86	1.43
Ch3	1.12	0.26	1.09	1.28	1.38	1.68	1.48
Ka1 (Ns≤3)	1.49	0.26	1.47	1.15	1.24	1.87	2.25

Eu(s), Ep(i): 観測された自発及び誘導核分裂片飛跡数の変動係数(標準偏差値を平均値で割った値).
Ep(s), Ep(i): 自発及び誘導核分裂片飛跡数のポアソン分布による変動係数.

Eus, Eu, Es: ウラン濃度と測定面積, ウラン濃度のみ, 測定面積のみの場合のそれぞれの変動係数.

$$Eu = \sqrt{Eu(i)^2 - Ep(i)^2 - Es^2} \text{ より } Eu^2 + Es^2 = Eu(i)^2 - Ep(i)^2$$

Ec(s): 自発トラック数の変動係数の期待値.

$$Ec(s) = \sqrt{Ep(s)^2 + Eu^2 + Es^2}$$

F: F値. 年代測定の実験精度と異種粒子の混入の有無を判定する値.

$$F = \frac{Ec(s)^2}{Eu(s)^2}$$

(またはこの逆数で, 1より大きい値)

値を示し異常と思われる以外, 数値そのものの大小と年代値の適合性との間の関連性については, 現状では判定基準が不明瞭で今後の課題としたい.

6.2 年代値頻度分布図の問題点

次に, 個体識別法を用いた今回の測定値で興味深い, 粒子ごとのみかけの年代値頻度分布図について述べる. 今回のように, 自発核分裂片飛跡数の少ない若い年代試料を粒子を選別することなく測定すると, 第2図に示したようにみかけの年代値は非常にばらつくとともに, 自発核分裂片飛跡数が0のものの存在が目立つ. このような場合林(1981b)も指摘しているように, 非常に離れた年代値をもつ粒子の識別は容易であるが, たとえば今回の試料のように数十万年の年代を示すと考えられる粒子群の中に, 百万年とか二百万年の年代の粒子が混入していた場合, その識別は容易ではなく, 今後に残された大きな課題である.

しかし一方, 頻度分布図中最も若いピークをもってその試料の年代値とすることも, 当然慎重な検討を必要とする. この点に関して, 前章でも触れたように, 将来の検討材料として以下の点を指摘しておきたい. すなわち, 第2図A, C, Dに示したTE-5, Ks 18, Ks 22の3試料の頻度分布図で, 測定粒子の多くが集中するゾーンの粒子群(自発核分裂片飛跡数が0の粒子も含む. 傾向としてはみかけのウラン濃度のばらつきが少ない集団となる)を対象として, 自発及び誘導核分裂片飛跡数の総数比から年代値を求めると, TE-5とKs 18では地質

学的な参考値とよい一致を示す. ところがKs 22の場合には, 地質学的な参考値よりかなり若い年代が得られる. もちろん, 個々の参考値を過度に信頼することは問題であるが, 層序学的関係や他の地質学的事象との関係から, 一つの相対的な目安となることは間違いないであろう. ここでKs 22試料は, 平均自発核分裂片飛跡数が1.9と6試料中最も大きく, 粒子ごとの年代値も6試料中最もよくまとまり, 結晶の表面状態も良好な上に, 自発核分裂片飛跡数の出現確率が高い有意水準でポアソン分布に従うという結果からは, 少なくとも現段階では, 全粒子から得られた年代値がより合理的な値と考えられる. したがって, TE-5やKs 18にみられるみかけの年代値が集中するゾーンの形成は, 今回のように自発核分裂片飛跡数の出現確率がポアソン分布するのに加えて, ウラン濃度や粒子面積が変化する条件下にあっては, 林(1981b)の指摘するように, 時代の異なる粒子が混入する場合のモデルを設定して, さらに細かく吟味・検討する必要を物語っているのかもしれない. その際, これまでは自発核分裂片飛跡数が比較的多く古い年代値をもつ粒子を異種粒子として排除するケースが多かったが, Ks 18試料で指摘したように, ウラン濃度の低い古い粒子の混入の可能性も忘れてはならない. したがってこれらの粒子の混入をチェックするためには, 自発核分裂片飛跡数とともに誘導核分裂片飛跡数のばらつきをも明確にする必要がある.

7. ま と め

若い年代試料のフィッシュン・トラック法による年代測定の一つの試みとして、自発核分裂片飛跡数の少ない試料でも測定粒子を人為的に選別せず計数を行う手法を個体識別法に導入することにより、同法の欠点を補うとともに、今後有力な測定方法として確立するための問題点を探った。本論文の主な内容をまとめると次の通りである。

1) EDM 法を改良し結晶表面(自然面)のみを露出させて結晶粒子をテフロン板に埋込む技術を開発し、個体識別法の一つの欠点であった識別の繁雑さを飛躍的に軽減させ、ポピュレーション法との比較において処理時間を短縮した。

2) 従来放射年代測定値の報告がなされていない房総半島北部に分布する中部更新統上総層群上部から下総層群下部にはさまれる火山灰試料を用い、フィッシュン・トラック年代値を測定した。測定に用いた火山灰層は、いずれも地域的な鍵層として知られている6試料(上位より TE-5, Ks 11, Ks 18, Ks 22, Ch 3, Ka 1)で、それぞれ1試料当り30数個のジルコン粒子を測定し、次のような結果を得た。

- (i) 個体識別法により明らかに古い異種ジルコン粒子を除いた各試料の粒子ごとの自発核分裂片飛跡数の出現確率は、それぞれ χ^2 検定で有意水準75-5%でポアソン分布に従っていると判定される。
- (ii) 各試料の粒子ごとの自発核分裂片飛跡数がポアソン分布を示すことから、自発核分裂片飛跡数が0の粒子も含めた自発及び誘導核分裂片飛跡数の総数比から、各試料の年代値を求めたところ次のような値を得た。

TE-5: 0.51 ± 0.09 Ma

Ks 11: 0.57 ± 0.17 Ma

Ks 18: 0.62 ± 0.14 Ma

Ks 22: 0.49 ± 0.07 Ma

Ch 3: 0.91 ± 0.21 Ma

Ka 1: 1.3 ± 0.3 Ma (参考値)

- (iii) これらの年代値のうち、平均自発核分裂片飛跡数が最も大きく($m=1.9$)、年代値頻度分布図上で最もよいまとまりを示す Ks 22 が、町田ほか(1980)から求めた地質学的な参考値と最も近い値(参考値の約0.9倍)を示すのに対して、他の5つの試料は、TE-5・Ks 11・Ks 18の場合に1.2-1.4倍、Ch 3の場合に1.6倍、Ka 1(参考値)の場合に2.1倍と、いずれも地質学的な参考値より古い値を示す。

3) このように、自発核分裂片飛跡数が少ない試料に対しても、飛跡数の多少による粒子選別をせずに個体識別法による測定を行えば、その測定結果に適切な統計的処理を加えることによって、比較的容易に精度の高い年代測定ができる可能性を示した。特に純度の高い試料の場合には、かなり確度の高い年代値が得られることが明らかにされた。

8. 今 後 の 課 題

今後、残された問題をさらに解明しより高い精度の年代値を得るためには、測定粒子数を大幅に増大させ、よりきめ細かい統計的検討を行うことが必要である。たとえば、測定粒子ごとの面積及びウラン濃度の変動の影響については、測定値のF検定(林, 1981b)の中に盛り込まれているとはいえ、今回の場合平均自発核分裂片飛跡数がいずれも小さいことから、特に前もって考慮しなかったが、今後より厳密な統計的検討を行うためには、粒子ごとの面積及びウラン濃度の自発核分裂片飛跡数への影響を具体的に検討しておくことが必要であろう。また今回の議論では、個体識別法による年代値頻度分布図から、明らかに古い異種ジルコンについては、それを識別しそれらの年代値への影響を排除することができたが、数倍程度以下の古い粒子群の混入の有無の判定と、それらが混入している場合のその影響の大きさの評価をどのようにするのかは、今回明らかにされた今後の重要な問題であり、そのためには、自発核分裂片飛跡数のみならず誘導核分裂片飛跡数のばらつきをも統計的に検討することが必要になってこよう。このようなきめ細かい検討を行うためには、1試料当りの測定粒子数を大幅に増やすことが必要である。

今回の研究で、Ks 22 試料は、平均自発核分裂片飛跡数が比較的高い上に、異種ジルコンの混入も少ない純度の高い試料であることが期待され、年代測定上好適な試料であることが明らかになったことから、測定粒子数の増大によってさらに信頼度の高い年代値が得られるとともに、その測定結果の細かい検討は、他の試料の測定結果の解析や解釈に重要な手がかりと根拠を与えてくれることが期待される。今後、Ks 22 のような年代測定に好適な火山灰試料をできるだけ多く見出し、信頼度の高い年代値を増やしていく努力も重要である。

最近ソビエトでも、基本的には筆者らの今回の研究と同じような目的・方法で研究をすすめて、成果を上げつつあることが明らかとなった(KASHKAROV *et al.*, 1982; KOSHKIN *et al.*, 1982)。今後、今回開発された方法をさらに発展させ、より適切な統計的検定法を用いて、若い年

代試料のフィッション・トラック法による年代測定法を確立することが急務であると思われる。

文 献

- GLEADOW, A. J. W., HURFORD, A. J. and QUAIFFE, R. D. (1976) Fission track dating of zircon: improved etching technique. *Earth Planet. Sci. Letters*, vol. 33, p. 273-276.
- 林 正雄(1981a) 定面積母集団法によるフィッション・トラック年代測定. 地質雑, vol. 87, p. 307-313.
- (1981b) Grain by grain 法によるフィッション・トラック年代測定法の問題点. 岩鉱, vol. 76, p. 233-238.
- 石和田靖章・三梨 昂・品田芳二郎・牧野登喜男編(1971) 日本油田・ガス田図10「茂原」. 地質調査所.
- KASHKAROV, L. L., KOSHKIN, V. L. and VERNADSKY, V. I. (1982) Fission track dating of volcanic ashes. *Abstr. 5th Internat. Conf. Geochron., Cosmochron. Isotope Geol.*, Nikko, Japan, p. 179-180.
- 河井興三(1952) 茂原ガス田西方周辺地域(茂原-鶴舞地域)の地質及び天然ガス. 石油技協誌, vol. 17, p. 1-21.
- KOSHKIN, V. L., KASHKAROV, L. L. and VERNADSKY, V. I. (1982) Mathematical treatment of fission track dating results. *Abstr. 5th Internat. Conf. Geochron., Cosmochron. Isotope Geol.*, Nikko, Japan, p. 189-190.
- 町田 洋・新井房夫・杉原重夫(1980) 南関東と近畿の中部更新統の対比と編年—テフラによる一つの試み—. 第四紀研究, vol. 19, p. 233-261.
- 町田 洋・鈴木正男(1971) 火山灰の絶対年代と第四紀後期編年—フィッション・トラック法による試み—. 科学, vol. 41, p. 263-270.
- 松田高明・横山卓雄(1979) ジルコンによる個体識別法で行ったフィッション・トラック年代. 放射線の固体飛跡検出法短期研究会報告, p. 35-38.
- NAESER, C. W., GLEADOW, A. J. W. and WAGNER, G. A. (1979) Standardization of fission-track data reports. *Nucl. Tracks*, vol. 3, p. 133-136.
- 西村 進(1977) フィッション・トラック年代決定法の問題点. 九十九地学, no. 12, p. 1-10.
- NISHIMURA, S. (1981) On the fission-track dating of tuffs and volcanic ashes. *Nucl. Tracks*, vol. 5, no. 1-2, p. 157-167.
- 杉原重夫・新井房夫・町田 洋(1978) 房総半島北部の中・上部更新統のテフロクロロジー. 地質雑, vol. 84, p. 583-600.
- TAMANYU, S. (1981) Evaluation of potential for geothermal energy by means of fission-track dating method in Hohi geothermal area, Kyushu, Japan. *Nucl. Tracks*, vol. 5, no. 1-2, p. 215-222.
- 横山卓雄・松田高明・竹村恵二(1980) 東海層群のフィッション・トラック年代(その1). 第四紀研究, vol. 19, p. 301-309.

(受付: 1982年8月2日; 受理: 1983年1月6日)

付 録

結晶 1 粒ごとの年代一覧表と図版

結晶 1 粒ごとの年代一覧表 (TE-5)

$$\Phi = 0.38 \pm 0.01 \times 10^{15} / \text{cm}^2$$

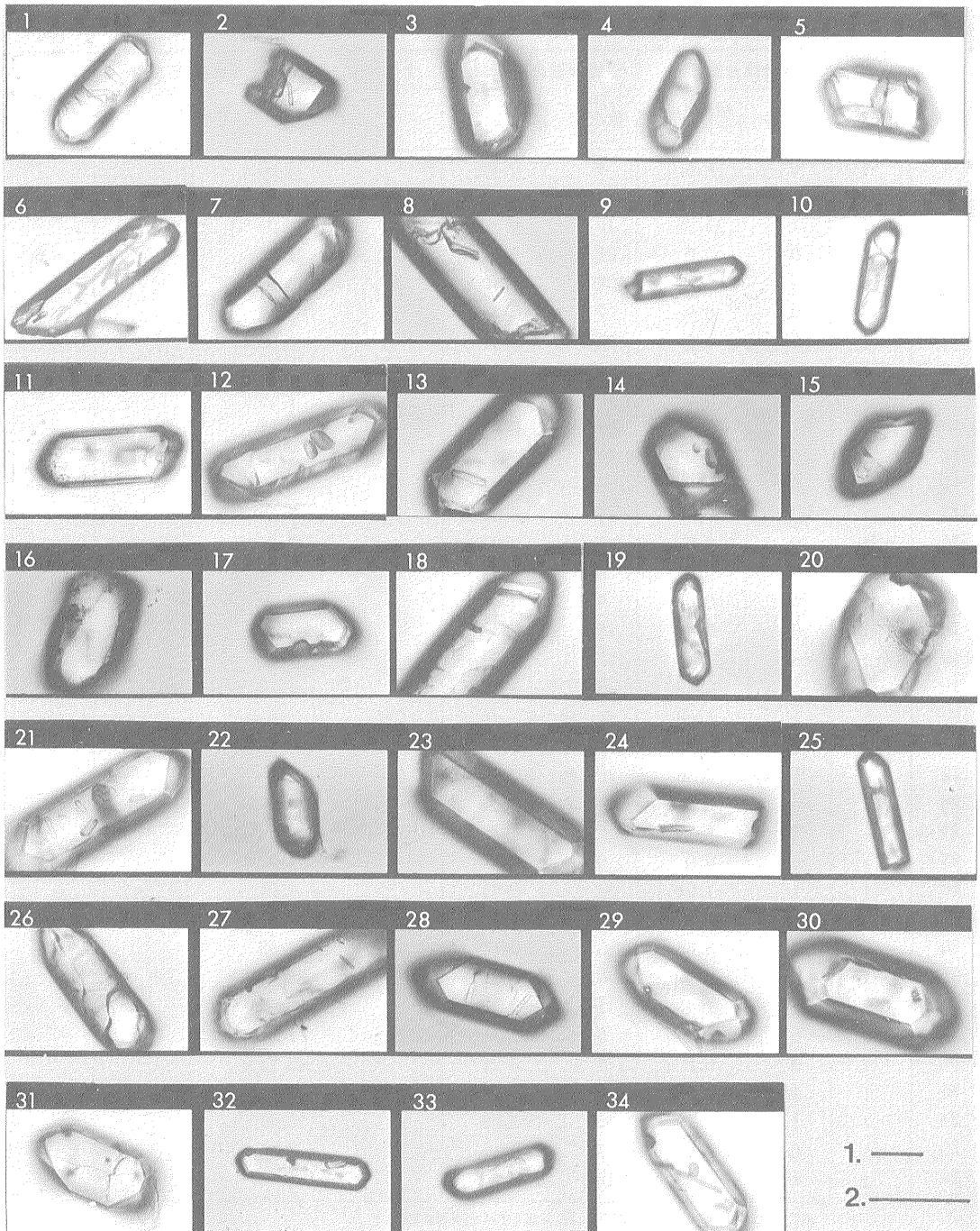
結晶 番号	結晶 面数	自発核分裂飛跡		誘導核分裂飛跡		フィッシュン・トラック年代 (Ma)	分析者
		数 (Ns)	密度 (ρ_s) [$\times 10^4 \text{ cm}^{-2}$]	数 (Ni)	密度 (ρ_i) [$\times 10^8 \text{ cm}^{-2}$]	$\lambda_t = 7.03 \times 10^{-17} \text{ y}^{-1}$	
1	1	0	0.0	29	0.73	0.78 >	檀 原 徹
2	1	1	8.13	18	1.46	1.26	
3	1	1	3.34	21	0.70	1.08	
4	1	0	0.0	61	0.76	0.37 >	
5	1	1	2.99	16	0.48	1.42	
6	1	3	1.71	97	0.55	0.70	
7	1	4	8.66	72	1.56	1.26	
8	1	1	1.58	52	0.82	0.44	
9	1	0	0.0	35	0.61	0.65 >	
10	1	1	1.33	39	0.52	0.58	
11	1	2	4.04	95	1.92	0.48	
12	1	1	2.11	44	0.93	0.51	
13	1	3	5.47	52	0.95	1.31	
14	1	1	3.41	40	1.37	0.57	
15	1	0	0.0	38	1.37	0.60 >	
16	1	1	2.95	23	0.68	0.98	
17	1	0	0.0	24	0.98	0.94 >	
18	1	2	3.56	40	0.71	1.13	
19	1	1	1.75	43	0.75	0.53	
20	1	0	0.0	45	0.63	0.50 >	
21	1	1	1.50	51	0.77	0.44	
22	1	1	1.57	62	0.97	0.37	
23	1	1	2.16	48	0.75	0.47	
24	1	3	8.98	27	0.81	2.52	
25	1	0	0.0	71	1.16	0.32 >	
26	1	3	6.47	48	1.03	1.42	
27	1	1	1.70	53	0.90	0.43	
28	1	1	2.60	39	1.02	0.58	
29	1	0	0.0	28	0.74	0.81 >	
30	1	1	2.71	状態不良		—	
31	1	1	2.05	46	0.94	0.49	
32	1	0	0.0	50	0.62	0.45 >	
33	1	1	1.25	状態不良		—	
34	1	0	0.0	31	0.76	0.73 >	

状態不良粒子と No. 24 結晶を除くすべての結晶の Ns, Ni より

$$T = 5.96 \times 10^{-8} \times 0.38 \times 10^{15} \times \frac{32}{1411} = 0.51 \pm 0.09 \text{ Ma}$$

また頻度分布図に示した比較のまとりの良い結晶集団の年代値は

$$T = 5.96 \times 10^{-8} \times 0.38 \times 10^{15} \times \frac{16}{1097} = 0.33 \pm 0.08 \text{ Ma}$$



測定結晶(ジルコン)1粒ごとの中性子照射前の顕微鏡写真 (TE-5)

写真の上の番号と結晶番号は同じである (以下同じ)。スケールは、No. 22, 25, 33 粒子が1.のバー、他は2.のバー。バーの長さはいずれも 100 μ 。

結晶 1 粒ごとの年代一覧表 (Ks11)

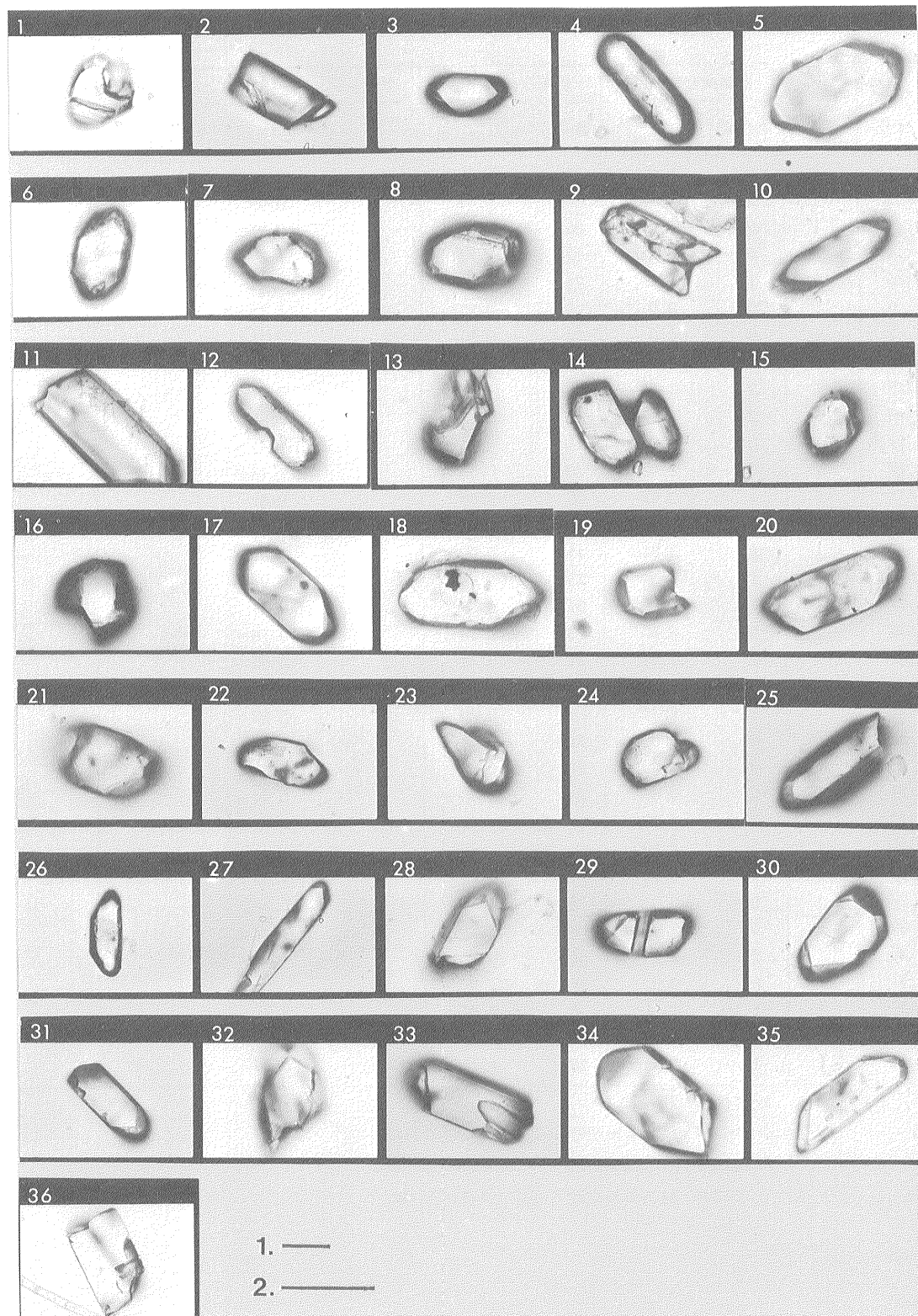
$$\Phi = 0.38 \pm 0.01 \times 10^{15} / \text{cm}^2$$

結晶 番号	結晶 面数	自発核分裂飛跡		誘導核分裂飛跡		フィッション・トラック年代 (Ma)	分析者
		数 (Ns)	密度 (ρ_s) [$\times 10^4 \text{cm}^{-2}$]	数 (Ni)	密度 (ρ_i) [$\times 10^6 \text{cm}^{-2}$]	$\lambda t = 7.03 \times 10^{-17} \text{y}^{-1}$	
1	1	0	0.0	4	0.30	5.66>	檀 原 徹
2	1	0	0.0	8	0.23	2.83>	
3	1	1	5.75	12	0.69	1.89	
4	1	0	0.0	21	0.67	1.08>	
5	1	1	1.24	32	0.40	0.71	
6	1	0	0.0	7	0.25	3.24>	
7	1	0	0.0	11	0.41	2.06>	
8	1	1	3.60	9	0.32	2.52	
9	1	0	0.0	19	0.83	1.19>	
10	1	1	2.86	13	0.37	1.74	
11	1	0	0.0	18	0.21	1.26>	
12	1	0	0.0	6	0.24	3.77>	
13	1	0	0.0	4	0.30	5.66>	
14	1	0	0.0	6	0.37	3.77>	
15	1	0	0.0	9	0.47	2.52>	
16	1	0	0.0	9	0.55	2.52>	
17	1	0	0.0	16	0.30	1.42>	
18	1	58	83.1	183	2.62	7.18	
19	1	1	4.83	10	0.48	2.26	
20	1	1	1.48	状態不良		—	
21	1	0	0.0	15	0.36	1.51>	
22	1	1	3.56	状態不良		—	
23	1	0	0.0	7	0.31	3.24>	
24	1	1	3.44	状態不良		—	
25	1	0	0.0	9	0.29	2.52>	
26	1	1	1.91	32	0.61	0.71	
27	1	0	0.0	8	0.22	2.83>	
28	1	1	3.65	5	0.18	4.53	
29	1	0	0.0	9	0.44	2.52>	
30	1	1	2.49	11	0.27	2.06	
31	1	0	0.0	3	0.11	7.55>	
32	1	0	0.0	7	0.24	3.24>	
33	1	1	2.38	38	0.90	0.60	
34	1	1	1.19	55	0.66	0.41	
35	1	0	0.0	7	0.16	3.24>	
36	1	1	2.25	18	0.40	1.26	

明らかに異質と考えられる結晶 No. 18 を除くすべての Ns, Ni より

$$T = 5.96 \times 10^{-8} \times 0.38 \times 10^{15} \times \frac{11}{438}$$

$$\approx 0.57 \pm 0.17 \text{ Ma}$$



測定結晶 (ジルコン) 1 粒ごとの中性子照射前の顕微鏡写真 (Ks11)

スケールは, No. 26 粒子が 1. のバー, 他は 2. のバー. バーの長さはいずれも 100 μ .

結晶 1 粒ごとの年代一覧表 (Ks18)

$$\Phi = 0.38 \pm 0.01 \times 10^{15} / \text{cm}^2$$

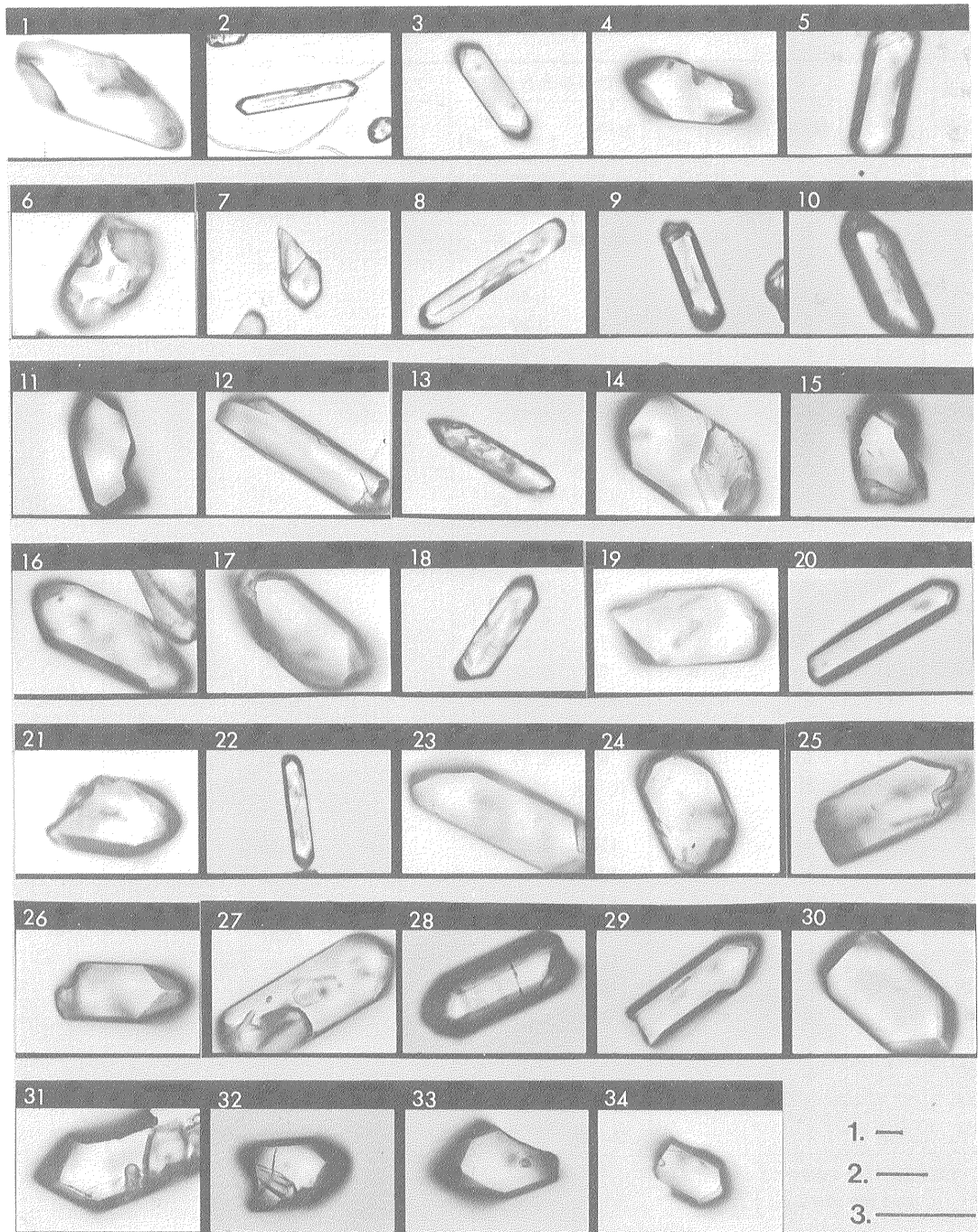
結晶 番号	結晶 面数	自発核分裂飛跡		誘導核分裂飛跡		フィッション・トラック年代 (Ma)	分析者
		数 (Ns)	密度 (ρ_s) [$\times 10^4 \text{cm}^{-2}$]	数 (Ni)	密度 (ρ_i) [$\times 10^6 \text{cm}^{-2}$]	$\lambda t = 7.03 \times 10^{-17} \text{y}^{-1}$	
1	1	0	0.0	9	0.10	2.52 >	檀 原 徹
2	1	3.5	1.50	80	0.34	0.99	
3	1	0	0.0	26	0.30	0.87 >	
4	1	0	0.0	12	0.32	1.89 >	
5	1	1	3.19	24	0.77	0.94	
6	1	0	0.0	5	0.22	4.53 >	
7	1	0	0.0	32	0.81	0.71 >	
8	1	2	1.31	55	0.36	0.82	
9	1	2	3.94	56	1.10	0.81	
10	1	1	1.98	41	0.81	0.55	
11	1	0	0.0	13	0.32	1.74 >	
12	1	0	0.0	20	0.29	1.13 >	
13	1	1	2.02	26	0.53	0.87	
14	1	0	0.0	状態不良		—	
15	1	1	3.31	15	0.50	1.51	
16	1	1	1.59	25	0.40	0.91	
17	1	1	1.58	37	0.59	0.61	
18	1	0	0.0	29	0.28	0.78 >	
19	1	1	1.26	11	0.14	2.06	
20	1	0	0.0	23	0.68	0.98 >	
21	1	1	2.34	4	0.09	5.66	
22	1	0	0.0	21	0.39	1.08 >	
23	1	0	0.0	27	0.32	0.83 >	
24	1	0	0.0	24	0.38	0.94 >	
25	1	2	2.73	状態不良		—	
26	1	2	4.50	状態不良		—	
27	1	1	1.31	17	0.22	1.33	
28	1	0	0.0	4	0.17	5.66 >	
29	1	0	0.0	9	0.21	2.52 >	
30	1	2	2.28	45	0.51	1.01	
31	1	0	0.0	状態不良		—	
32	1	1	4.61	6	0.28	3.77	
33	1	0	0.0	21	0.51	1.08 >	
34	1	1	4.31	28	1.21	0.80	

すべての結晶の Ns, Ni より

$$T = 5.96 \times 10^{-8} \times 0.38 \times 10^{15} \times \frac{20.5}{745} = 0.62 \pm 0.14 \text{ Ma}$$

また頻度分布図に示した比較的まとまりの良い結晶集団の年代値は

$$T = 5.96 \times 10^{-8} \times 0.38 \times 10^{15} \times \frac{15.5}{640} = 0.55 \pm 0.14 \text{ Ma}$$



測定結晶(ジルコン)1粒ごとの中性子照射前の顕微鏡写真(Ks18)

スケールは, No. 2, 22 粒子が 1. のバー, No. 8, 9, 10, 13, 18, 20, 28 粒子が 2. のバー, 他は 3. のバー, バーの長さはいずれも 100 μ .

結晶 1 粒ごとの年代一覧表 (Ks22)

$$\Phi = 0.44 \pm 0.01 \times 10^{15} / \text{cm}^2$$

結晶 番号	結晶 面数	自発核分裂飛跡		誘導核分裂飛跡		フィッション・トラック年代 (Ma)	分析者
		数 (Ns)	密度 (ρ_s) [$\times 10^4 \text{ cm}^{-2}$]	数 (Ni)	密度 (ρ_i) [$\times 10^6 \text{ cm}^{-2}$]	$\lambda f = 7.03 \times 10^{-17} \text{ y}^{-1}$	
1	1	0	0.0	99	0.82	0.26 >	檀
2	1	1	2.33	51	1.19	0.51	
3	1	0	0.0	状態不良		—	
4	1	1	0.51	24	0.12	1.09	
5	1	1	1.75	84	1.46	0.32	
6	1	2	1.83	95	0.87	0.55	
7	1	6	11.1	159	2.94	0.99	
8	1	1	1.59	100	1.59	0.26	
9	1	1	1.92	74	1.42	0.35	
10	1	2	—	状態不良		—	
11	1	4	—	状態不良		—	
12	1	1	—	状態不良		—	
13	1	4	1.79	234	1.04	0.45	
14	1	2	2.03	105	1.07	0.50	
15	1	2	1.80	96	0.86	0.55	
16	1	3	4.30	152	2.18	0.52	
17	1	0	0.0	71	1.60	0.37 >	徹
18	1	2	2.19	85	0.93	0.62	
19	1	2	4.18	117	2.44	0.45	
20	1	1	1.87	72	1.35	0.36	
21	1	1	0.48	62	0.30	0.42	
22	1	3	—	状態不良		—	
23	1	1	—	状態不良		—	
24	1	3	1.88	157	0.98	0.50	
25	1	4	2.88	191	1.37	0.55	
26	1	3	3.66	123	1.50	0.64	
27	1	1	4.41	46	2.03	0.57	
28	1	2	3.55	114	2.02	0.46	
29	1	2	9.66	37	1.79	1.42	
30	1	1	1.78	58	1.03	0.45	
31	1	3	2.10	156	1.09	0.50	
32	1	0	0.0	59	0.71	0.44 >	
33	1	2	1.80	132	1.21	0.40	
34	1	1	—	状態不良		—	

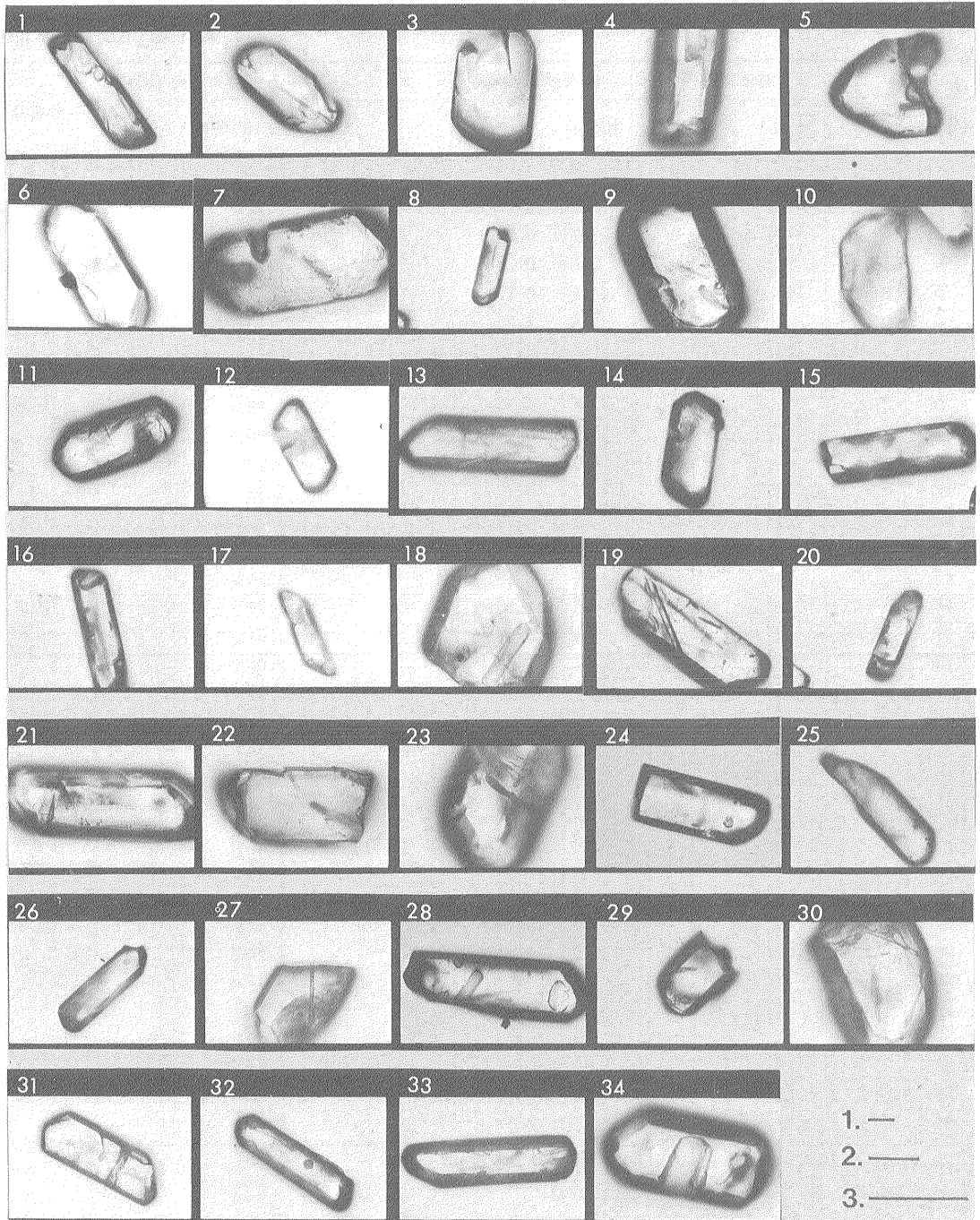
状態不良粒子を除く全粒子による年代値 T は

$$T = 5.96 \times 10^{-8} \times \Phi \times \frac{\sum N_s}{\sum N_i}$$

$$= 5.96 \times 10^{-8} \times 0.44 \times 10^{15} \times \frac{51}{2752} = 0.49 \pm 0.07 \text{ Ma}$$

また頻度分布図に示したままとりの良い結晶集団の年代値は

$$T = 5.96 \times 10^{-8} \times 0.44 \times 10^{15} \times \frac{42}{2532} = 0.43 \pm 0.07 \text{ Ma}$$



測定結晶(ジルコン)1粒ごとの中性子照射前の顕微鏡写真(Ks22)

スケールは, No. 12, 20 粒子が1.のバー, No. 1, 4, 8, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 24, 25, 31, 32, 33 粒子が2.のバー, 他は3.のバー. バーの長さはいずれも100 μ .

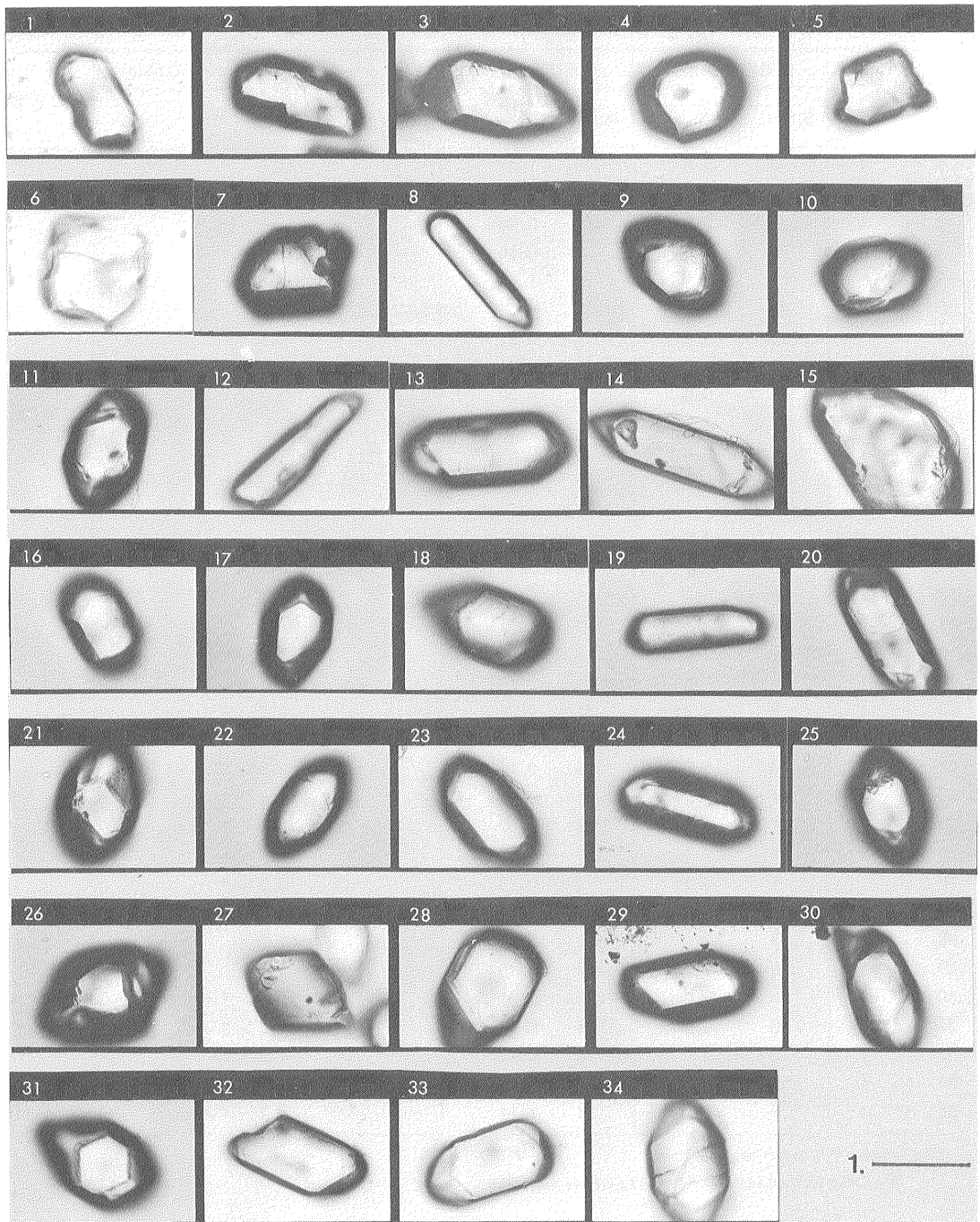
結晶 1 粒ごとの年代一覧表 (Ch3)

$$\Phi = 0.38 \pm 0.01 \times 10^{15} / \text{cm}^2$$

結晶 番号	結晶 面数	自発核分裂飛跡		誘導核分裂飛跡		フィッション・トラック年代 (Ma)	分析者
		数 (Ns)	密度 (ρ_s) [$\times 10^4 \text{ cm}^{-2}$]	数 (Ni)	密度 (ρ_i) [$\times 10^6 \text{ cm}^{-2}$]	$\lambda t = 7.03 \times 10^{-17} \text{ y}^{-1}$	
1	1	2	6.80	46	1.56	0.98	檀 原 徹
2	1	0	0.0	9	0.26	2.52>	
3	1	0	0.0	8	0.22	2.83>	
4	1	1	3.94	7	0.28	3.24	
5	1	145	446	23	0.71	143	
6	1	3	4.83	93	1.50	0.73	
7	1	80	286	44	1.57	41.2	
8	1	0	0.0	10	0.35	2.26>	
9	1	0	0.0	8	0.33	2.83>	
10	1	0	0.0	11	0.44	2.06>	
11	1	1	3.88	10	0.39	2.26	
12	1	2	5.17	19	0.49	2.38	
13	1	0	0.0	12	0.22	1.89>	
14	1	1	1.66	23	0.38	0.98	
15	1	0	0.0	13	0.13	1.74>	
16	1	2	8.93	26	1.16	1.74	
17	1	0	0.0	16	0.83	1.41>	
18	1	1	3.42	11	0.38	2.06	
19	1	0	0.0	7	0.20	3.24>	
20	1	0	0.0	3	0.08	7.55>	
21	1	1	5.75	10	0.57	2.26	
22	1	1	3.97	9	0.36	2.52	
23	1	0	0.0	7	0.20	3.24>	
24	1	0	0.0	4	0.20	5.66>	
25	1	0	0.0	5	0.28	4.53>	
26	1	0	0.0	3	0.15	7.55>	
27	1	0	0.0	6	0.10	3.77>	
28	1	1	2.24	14	0.31	1.62>	
29	1	0	0.0	13	0.39	1.74>	
30	1	1	4.02	状態不良		—	
31	1	1	4.48	9	0.40	2.52	
32	1	2	3.51	35	0.62	1.29	
33	1	0	0.0	21	0.44	1.08>	
34	1	0	0.0	7	0.14	3.24>	

明らかに異質と考えられる No. 5, No. 7 を除くすべての Ns, Ni より

$$T = 5.96 \times 10^{-8} \times 0.38 \times 10^{15} \times \frac{19}{475} \div 0.91 \pm 0.21 \text{ Ma}$$



測定結晶(ジルコン) 1粒ごとの中性子照射前の顕微鏡写真 (Ch3)
スケールはすべて1.のバー (100 μ).

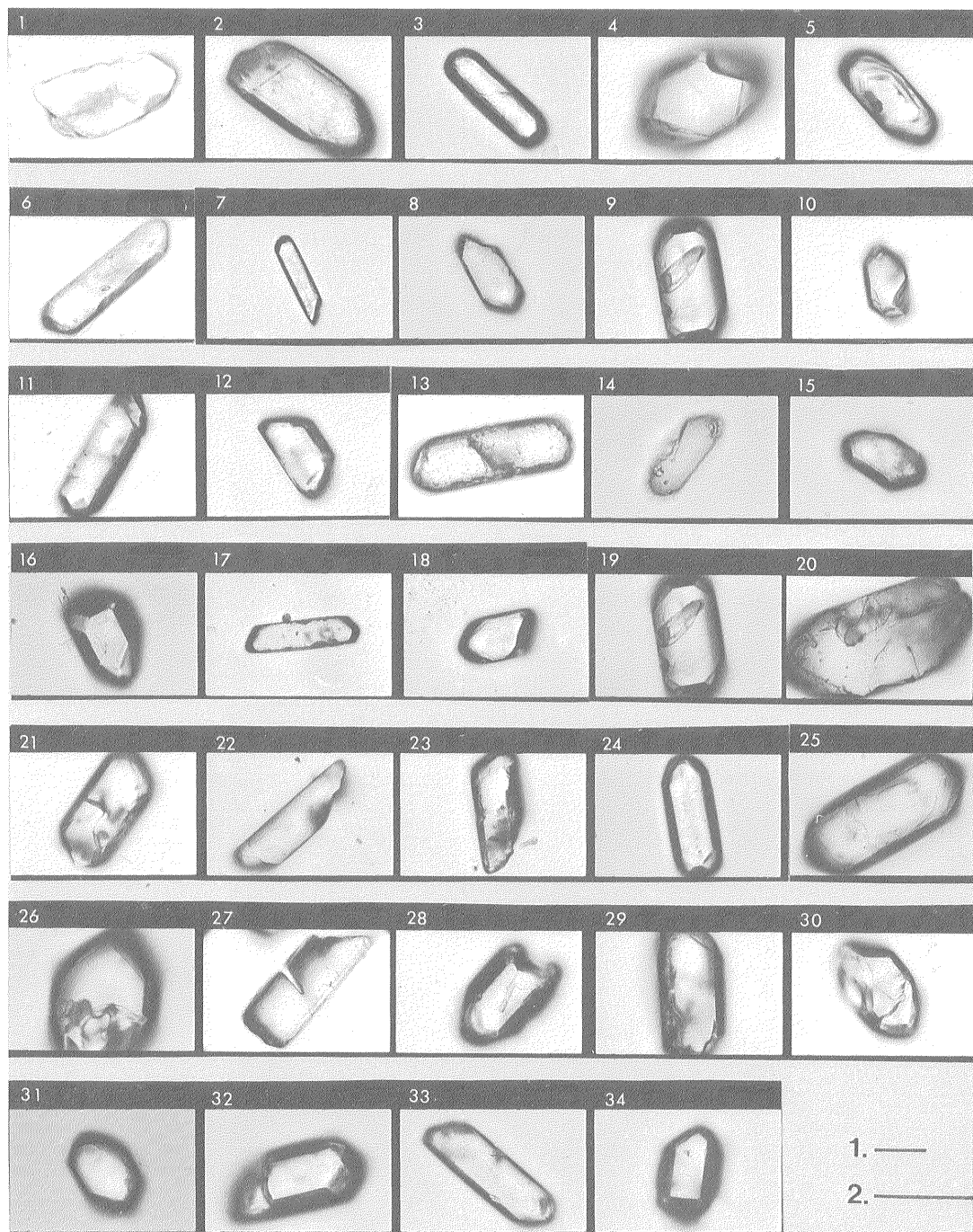
結晶 1 粒ごとの年代一覧表 (Kal)

$$\Phi = 0.44 \pm 0.01 \times 10^{15} / \text{cm}^2$$

結晶 番号	結晶 面数	自発核分裂飛跡		誘導核分裂飛跡		フィッション・トラック年代 (Ma)	分析者
		数 (Ns)	密度 (ρ_s) [$\times 10^4 \text{ cm}^{-2}$]	数 (Ni)	密度 (ρ_i) [$\times 10^6 \text{ cm}^{-2}$]	$\lambda f = 7.03 \times 10^{-17} \text{ y}^{-1}$	
1	1	58	75.8	105	1.37	14.5	檀
2	1	2	2.66	11	0.17	4.8 *	
3	1	0	0.0	10	0.48	2.6 > *	
4	1	0	0.0	8	0.16	3.3 > *	
5	1	2	14.5	20	1.45	2.6 *	
6	1	37	89.2	139	3.35	7.0	
7	1	35	85.4	92	2.24	10.0	
8	1	0	0.0	7	0.33	3.7 > *	
9	1	0	0.0	8	0.20	3.3 > *	
10	1	1	6.25	1	0.06	26.2 *	
11	1	16	58.0	80	2.90	5.2	原
12	1	16	66.1	45	1.86	9.3	
13	1	134	243	計測不能		—	
14	1	0	0.0	状態不良		—	
15	1	0	0.0	12	0.48	2.2 > *	
16	1	0	0.0	5	0.29	5.2 > *	
17	1	159	204	492	6.31	8.5	
18	1	1	5.81	7	0.41	3.7 *	
19	1	No.9と同じ(写真ミス)					
20	1	3	2.33	31	0.24	2.5 *	
21	1	2	3.91	33	0.65	1.6 *	
22	1	0	0.0	8	0.18	3.3 > *	
23	1	1	5.59	6	0.34	4.4 *	
24	1	1	3.34	2	0.07	13.1 *	
25	1	2	2.44	105	1.28	0.5 *	
26	1	1	2.44	8	0.20	3.3 *	
27	1	54	92.8	105	1.80	13.5	
28	1	5	21.1	22	0.93	6.0	
29	1	6	14.7	19	0.46	8.3	
30	1	0	0.0	5	0.21	5.2 > *	
31	1	0	0.0	1	0.04	26.2 > *	
32	1	0	0.0	18	0.71	1.5 > *	
33	1	0	0.0	9	0.18	2.9 > *	
34	1	7	38.0	21	1.14	8.7	

Ns ≤ 3の結晶 (*印) 21個の Ns, Ni より

$$T = 5.96 \times 10^{-8} \times 0.44 \times 10^{15} \times \frac{16}{315} \div 13 \pm 0.3 \text{ Ma (参考値)}$$



測定結晶(ジルコン) 1粒ごとの中性子照射前の顕微鏡写真 (Kal)
 スケールは, No. 7, 17, 28, 32 粒子が 1. のバー, 他は 2. のバー. バーの長さはいずれも 100 μ.