

“絶対年令”の利用限界その他の検討

種子田, 定勝
九州大学理学部

<https://doi.org/10.15017/4737384>

出版情報：九州大学理学部研究報告. 地質学之部. 8 (1), pp.41-62, 1965-01-15. 九州大学理学部
バージョン：
権利関係：

“絶対年令”の利用限界その他の検討

種子田 定 勝

Available limit of absolute dating

By

Sadakatu TANEDA

Abstract

The K-A age, Rb-Sr age, U-Pb ages, Pb-Pb ages and Th-Pb age for several co-existing minerals, i.e. biotite, muscovite, K-feldspar, zircon, uraninite, etc., were compared with each other, and the available limit of absolute dating was inspected. So far as the data on the “ordinary” rocks are concerned, the age relations between the co-existing minerals are presumed, as follows:

$$\begin{aligned}
 \text{K-Feldspar K-A age} &= \text{Muscovite K-A age} \times \frac{103 \sim 65}{100} \quad (\text{with a few exceptions}) \\
 \text{〃} &= \text{Biotite K-A age} \times \frac{105 \sim 65}{100} \quad \text{〃} \\
 \text{K-Feldspar Rb-Sr age} &= \text{Muscovite Rb-Sr age} \times \frac{115 \sim 85}{100} \quad \text{〃} \\
 \text{〃} &= \text{Biotite Rb-Sr age} \times \frac{145 \sim 100}{100} \quad \text{〃} \\
 \text{Biotite K-A age} &= \text{Biotite Rb-Sr age} \times \frac{105 \sim 80}{100} \quad \text{〃} \\
 \text{K-Feldspar K-A age} &= \text{K-Feldspar Rb-Sr age} \times \frac{80 \sim 60}{100} \quad \text{〃} \\
 \text{Zircon Pb}^{207}\text{-Pb}^{206} \text{ age} &= \text{Zircon U}^{238}\text{-Pb}^{206} \text{ age} \times \frac{150 \sim 105}{100} \quad \text{〃} \\
 \text{Zircon U}^{235}\text{-Pb}^{207} \text{ age} &= \text{Zircon U}^{238}\text{-Pb}^{206} \text{ age} \times \frac{125 \sim 100}{100} \quad \text{〃} \\
 \text{Zircon Th}^{232}\text{-Pb}^{208} \text{ age} &= \text{Zircon U}^{238}\text{-Pb}^{206} \text{ age} \times \frac{110 \sim 75}{100} \quad \text{〃} \\
 \text{Biotite K-A age} &= \text{Zircon Pb}^{207}\text{-Pb}^{206} \text{ age} \times \frac{102 \sim 63}{100} \quad \text{〃} \\
 \text{Biotite Rb-Sr age} &= \text{Zircon Pb}^{207}\text{-Pb}^{206} \text{ age} \times \frac{103 \sim 68}{100} \quad \text{〃} \\
 \text{〃} &= \text{Zircon Th}^{232}\text{-Pb}^{208} \text{ age} \times \frac{150 \sim 80}{100} \quad \text{〃}
 \end{aligned}$$

When the Biotite K-A age of the rock **a** (Age **a**) is compared with the same isotopic age of the rock **b** (Age **b**), only if the difference of Age **a** from Age **b** is larger than 38 % of Age **a**, we can judge the rock **a** is older than the rock **b** with a high reliability (at least in the Biotite K-A or Rb-Sr age and in the K-feldspar K-A or Rb-Sr age, and in the Zircon ages).

At the present the available limit of the isotopic ages, preassumed by the relations above mentioned, is insufficient for the geochronological use in accuracy. It seems to be true that the isotope mineralogy and petrology should be developed for present preferentially prior to the geological utilization of the isotope dating. (The discussion on (1) the difference of the K-feldspar Rb-Sr age from the co-existing Biotite Rb-Sr age, (2) the ratio of the difference (1) to the difference of U-Pb²⁰⁷ age from the U-Pb²⁰⁶ age for the co-existing zircon, (3) the ratio Sr⁸⁷/Sr⁸⁶ in the rock, (4) the ratio Pb²⁰⁶/Pb²⁰⁷ in the rock, etc. are related to the problems of petrological interest, i.e. mineral crystallization ages and metamorphic history, rock ages, granite magma and basalt magma problems, etc.).

目 次

- | | |
|------------------------------|--|
| I. はじめに (絶対年令問題の2面) | VI. ジルコン年令と黒雲母年令の関係 |
| II. K-A 年令 | VII. ジルコンの U-Pb 年令と黒雲母・カリ長石の Rb-Sr 年令の関係 |
| III. Rb-Sr 年令 | VIII. 地質年代学への利用の限界 |
| IV. K-A 年令と Rb-Sr 年令の関係 | IX. 摘要・今後の課題 |
| V. U-Pb 年令・Pb-Pb 年令・Th-Pb 年令 | X. おわりに |

I. はじめに (絶対年令問題の2面)

年代測定の有効な手段として、放射性同位元素の測定が地質学に導入されたのは、今世紀の初期のことであるが、質量分析装置の改良・測定技術の向上・利用鉱物の種類の増加などは、年代学を急速に発展させた。現在利用されている鉱物は、長石類 (ミクロクリン、カリ長石)、雲母類 (黒雲母、白雲母、鱗雲母、金雲母など)、角閃石類、輝石類、ジルコン、燐灰石、閃ウラン鉱、モナズ石、変曲石、榊石、緑簾石、褐簾石、海緑石、イライト、方鉛鉱、閃亜鉛鉱、黄銅鉱、尖晶石、螢石その他で、これらについて、K-A 法、Rb-Sr 法、U-Pb 法、Pb-Pb 法、Th-Pb 法などが開発されている。このほか、3万年以内の年令測定にはC法がある。これまでに得られた測定結果の大部分は、概略的には従来の地質学に調和するように思われているが、中には、かなりこれまでの考えを改変しなければならない場合もあるし、測定値の意味するものがよくわからない場合も少なくない。

ここに更めて述べるまでもないことであるが、鉱物種により、試料結晶の粒度により、また測定対象である同位元素の種類により、測定結果 (絶対年令) が著しく異なり、測定技術による以上に、鉱物の物性、鉱物・岩石の成因・履歴に関する問題を内蔵していることが明らかである。“火成岩の時代”とは何かという問題とも関連して、岩石の各種鉱物の晶出時期と貫入の時期との関係、各鉱物における温度変化に伴う各種同位元素の逸散・集積関係の変化など、基本的に明らかにされなければならないし、各種変成作用において、同作用が各種鉱物の各種同位元素の挙動におよぼす影響が、それぞれ検討されなければならない。

現在はむしろ絶対年令を、地質学の時間に関する死角をうめてくれるものとして直ちに活用することを目的とする段階ではなくて、やはり、従来の研究にもみられるのであるが、岩石・鉱物における同位元素の挙動を、いわば「同位元素岩石学」的立場で研究することが望ましい。

しかしながら、一方においては、現在においても測定値を年令として、地質学が最大限に利用しようとするのも当然であり、おろそかにされるべきことでもない。とすれば、測定値の年令としての利用限界が明らかにされることが必要となる。そのためには上述のような基礎的研究が大切なのであるが、さし当って、1つの測定値 (絶対年令) がある場合、それをいかに処理したらよいか

ということを検討しておくことも必要である。明らかに熱変成その他の変質・変成をうけたものを除いてであるが、ふつうの(地質・岩石学的に十分にわかっているとはいえない)岩石・鉱物の試料について測定した1つの値を有意義に取扱うためには、異なる鉱物・異なる方法によって従来行なわれた多くの絶対年令測定値相互間の関係を、むしろ機械的に比較しておくことが有用である。

これによって従来の地質・岩石学のレベルにおける、測定値の「一般的利用限界(年令としての)」が見当づけられ、個々の試料に関するある岩石学的・地質学的知識が、この「一般的利用限界」以上に利用度を高めることになる。実際問題としては、一般的限界以上に利用できるように思われる場合も少なくないわけであるが、その限界は定量的に表現できるものではないので、限界以上に扱う危険は極めて多いことを特に注意しなければならない。

絶対年令の測定ならびに測定値に関する基礎的研究と、利用的研究とは表裏一体の関係において発展するものである。

私はこういった観点から、現在の段階においても、異種の鉱物・異種の方法による測定値をいろいろの角度から比較して、それぞれの測定値の年令としての利用限界を見当づけることに意義を認め、同位元素岩石学が果すべき課題や問題点に関心を払うものである。

近年、放射性同位元素の測定が、わが国の地質学に導入され、これが開発に非常な努力が払われている。この教室(九州大学理学部地質学教室)においても、なお多くの困難が予想されつつ、ある程度の期待を持って、この仕事が続けられている。この時に当り、同位元素測定値の意味や利用限界を考察して、問題の所在・取上げ方をを小文に綴ることにした次第である。もちろん、データの増加ならびに一層詳細なる検討によって、今後改変・補訂されるべき点が少なくないが、本稿が、この方面の研究に、ある暗示を与えることになれば幸いである。

本稿の内容については、当教室の吉村豊文教授・鉱物学関係者、ならびに当教室の岩石学関係者の御批判を仰いだ。なお、この研究に要した費用の一部は文部省科学研究費によった。記して謝意を表する。

II. K - A 年 令

概 説

$K^{40}-A^{40}$ 法(カリウム-アルゴン法)は、現在黒雲母・白雲母・鱗雲母・金雲母・カリ長石類・ふつう角閃石・海緑石・イライト・変曲石などについて測定されているが、その値は同じ岩石中の鉱物種によるちがいはもちろん、他の方法(たとえばルビジウム-ストロンチウム法)による測定値とのちがいも大きいのがむしろふつうである。

さて、この測定年令の分散の本質的原因の検討に先立って、同一岩石中の異種鉱物間の K-A 年令の比較を行う必要があるが、従来のデータによると同一岩石中の共生鉱物の間では、一般に熱変成を受けた場合などを除いて、K-A 年令は白雲母が最も大きく、黒雲母がこれにつき、カリ長石が最も小さい。ふつう角閃石年令は黒雲母年令よりも小さい例もあるが、多くは黒雲母年令よりも大きく、共生ジルコンの Pb-Pb 年令よりも大きい場合すらある(Crossnor, N.C. Granite-Gneiss; G.L. Davis, G.R. Tilton & G.W. Wetherill, 1962)。

多くの場合

$$\boxed{\text{Feldspar}} \text{ age} < \boxed{\text{Biotite}} \text{ age} < \boxed{\text{Muscovite}} \text{ age}$$

(鉱物年令)と(異種鉱物間の年令差)との関係

鉱物種により K-A 年令が異なる原因を明らかにするためには、共生している異種鉱物間の年令差が、それぞれの年令といかなる関係にあるか(比例的、逆比例的、あるいは不規則のいずれであ

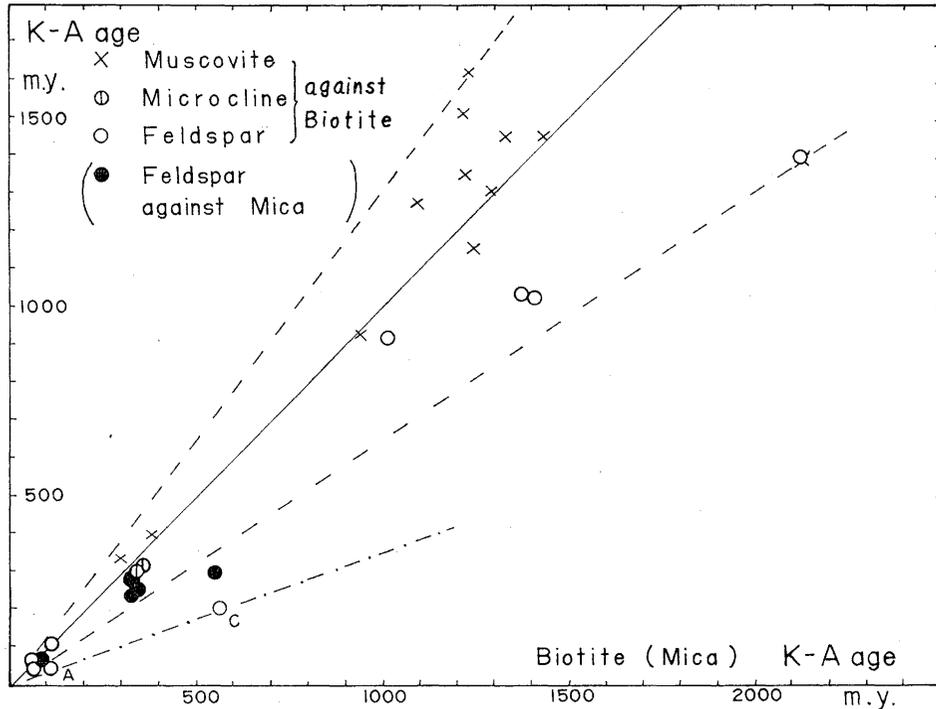


Fig. 1. The Muscovite-Biotite, Microcline-Biotite (Feldspar-Biotite) and Feldspar-Mica relations in the K-A age.

Abbrev. A: Audron Albion contact, C: Cape Town granite.

るか)を検討することも必要である。そこで、黒雲母(雲母類)年令を横軸にとり、共生する他種の鉱物の年令を縦軸にとった関係図(第1図)ならびに、白雲母年令とカリ長石年令との同関係図(第2図)を作成して検討すると、絶対値の大きいほど(一応古いと考えられるものほど)変異量の大きいものが多い(変異量(最大値)は年令のパーセントで表わされる)ことがわかる。

共存する異種鉱物の年令関係

この関係を見るためにも第1図・第2図は利用される。ただし、第1図において、特に変異量の大きいA(Audron Albion contactで特に黒雲母年令が大きい部分)とC(Cape Town granite:黒雲母年令が特に大きく、共存するジルコンのPb-Pb年令よりも大きい)は特異な場合であるから除外する。なお同図には長石-雲母(雲母の種類は不明)関係も黒丸で示してあるが、ここでは取扱わない。

$$(1) \text{ K-Feldspar age} = \text{Muscovite age} \times (103 \sim 65)/100$$

$$(1') \text{ データーの密集している範囲} \quad (85 \sim 75)/100$$

$$(2) \text{ K-Feldspar age} = \text{Biotite age} \times (105 \sim 65)/100$$

$$(2') \text{ データーの密集している範囲} \quad (100 \sim 70)/100$$

$$(2'') \text{ 特異なものも入れると} \quad (130 \sim 45)/100$$

$$(3a) \text{ Muscovite age} = \text{Biotite age} \times (130 \sim 65)/100$$

$$\text{多くの場合*} \quad (130 \sim 90)/100$$

$$(3b) \text{ Biotite age} = \text{Muscovite age} \times (110 \sim 77)/100$$

$$\text{多くの場合} \quad (100 \sim 77)/100$$

これらの関係に矛盾がないかどうかをみるために、(3a)、(3b)を(1)、(2)に代入してみると、次

* 数値で表わすには資料が必ずしも十分でないので、この論文ではすべてこのような表現にしておく。

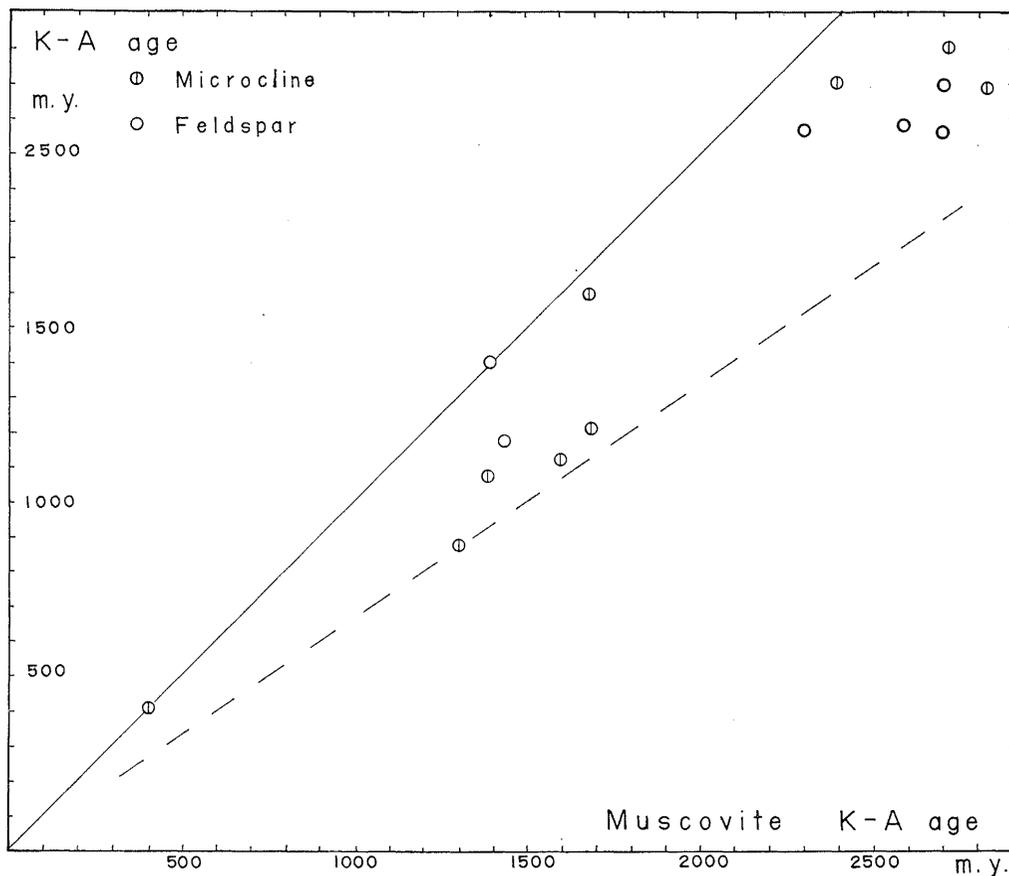


Fig. 2. The Microcline (Feldspar)-Muscovite relation in the K-A age.

の関係式が得られ、矛盾しないと判断される。

$$\begin{aligned}
 \text{K-Feldspar age} &= \text{Muscovite age} && \times (115 \sim 50) / 100 \\
 \text{多くの場合} &&& (100 \sim 54) / 100 \\
 \text{K-Feldspar age} &= \text{Biotite age} && \times (134 \sim 42) / 100 \\
 \text{多くの場合} &&& (110 \sim 67) / 100
 \end{aligned}$$

(1), (2) により特異な場合を除いて、カリ長石の値は黒雲母の値の 105~65% ; 白雲母の値の 103~65% に対応し、分散は約 40% の範囲におよぶ。

試料岩石・鉱物に関する地質・岩石学的知識の増加が測定値の年令としての信頼度(利用度)を高めるとしても、その程度を数量的に表現できないかぎり、約 40% という分散範囲が利用限界を規定する。

分散の原因

現在アメリカ・カナダ・ドイツなどで発表されている多くの測定年代誤差は 1.5~4% 程度とされているから、約 40% の範囲にわたる分散を生ずる原因は、まず、鉱物の物性に関係があると考えられる。たとえば K-A 年令が鉱物によって異なるのは、主として鉱物中からのアルゴンの逸散が、鉱物種により異なることによると考えられるが、“雲母-長石効果”(G.W. Wetherill, L.T. Aldrich & G.J. Davis, 1955; Aldrich et al., 1956) をこの考えで説明しようとすることは、ある程度当を得ている。しかし個々の岩石ごとに、共存する異種鉱物間の年令差が著しく異なる原因は、鉱物・岩石の成因・履歴と特性のちがいにありとみななければならない。著しい放射能元素を含

む鉱物の出す放射線の影響によって、共存鉱物中に A^{38} が生成することによって、測定年令の誤差が大きくなる場合も考えられる。しかし、1 鉱物・1 方法による測定値（絶対年令）だけでは、こういったことを検討することはできない。2 種以上の鉱物・2 種以上の方法による測定が必要となるわけである。

岩石の年令・各構成鉱物の年令の解析などの問題については、ここに触れない。

III. Rb - Sr 年 令

Rb-Sr 法（ルビジウム-ストロンチウム法）は 黒雲母・白雲母・カリ長石（マイクロクリン）などについて行なわれている。同一岩石中の異種鉱物について測定した結果は、一般に長石年令が最

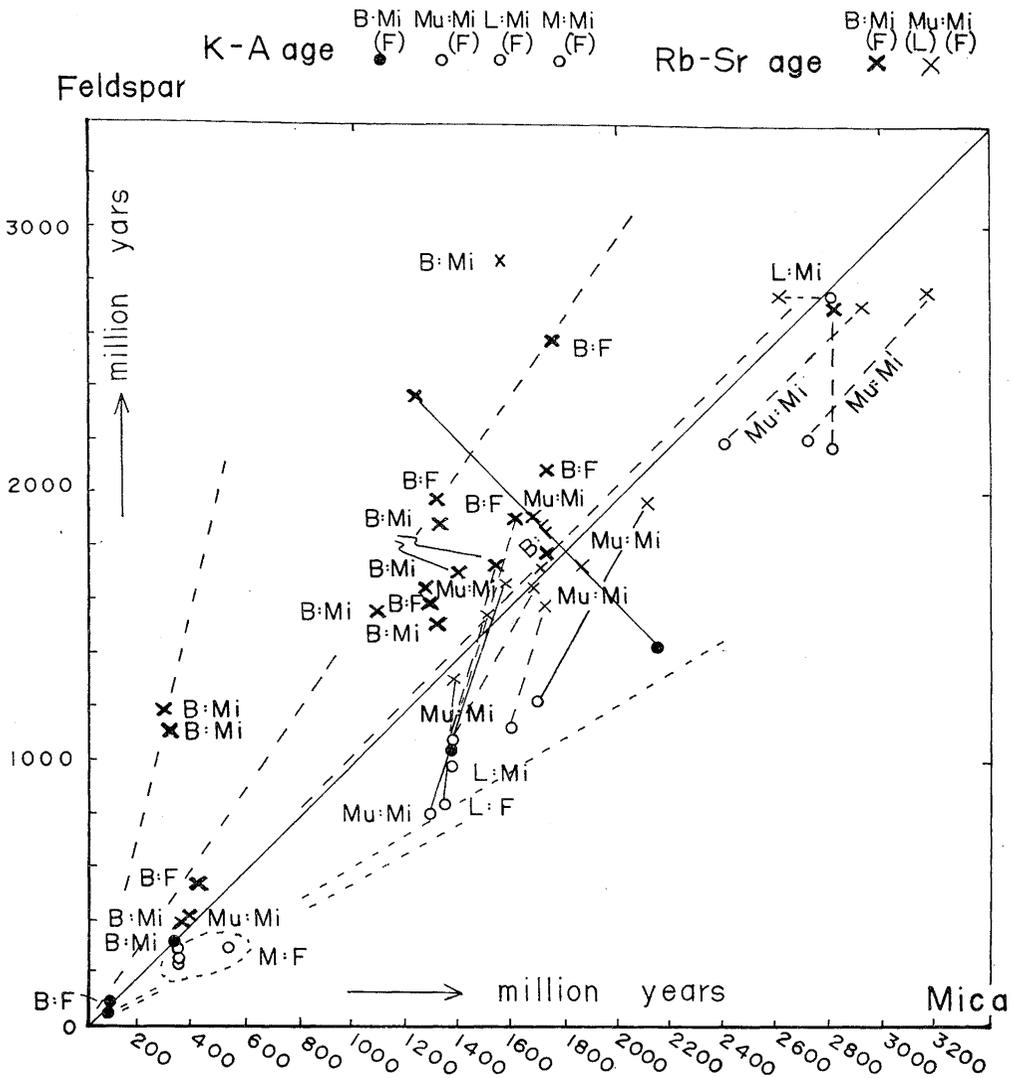


Fig. 3. The Biotite-Microcline (Feldspar), the Muscovite-Microcline (Feldspar) and the Lepidolite-Microcline (Feldspar) relations in the K-A and Rb-Sr ages. Abbrev. B: Biotite, M: Microcline, Mu: Muscovite, L: Lepidolite. The data for the same mineral sample are shown by the connecting line.

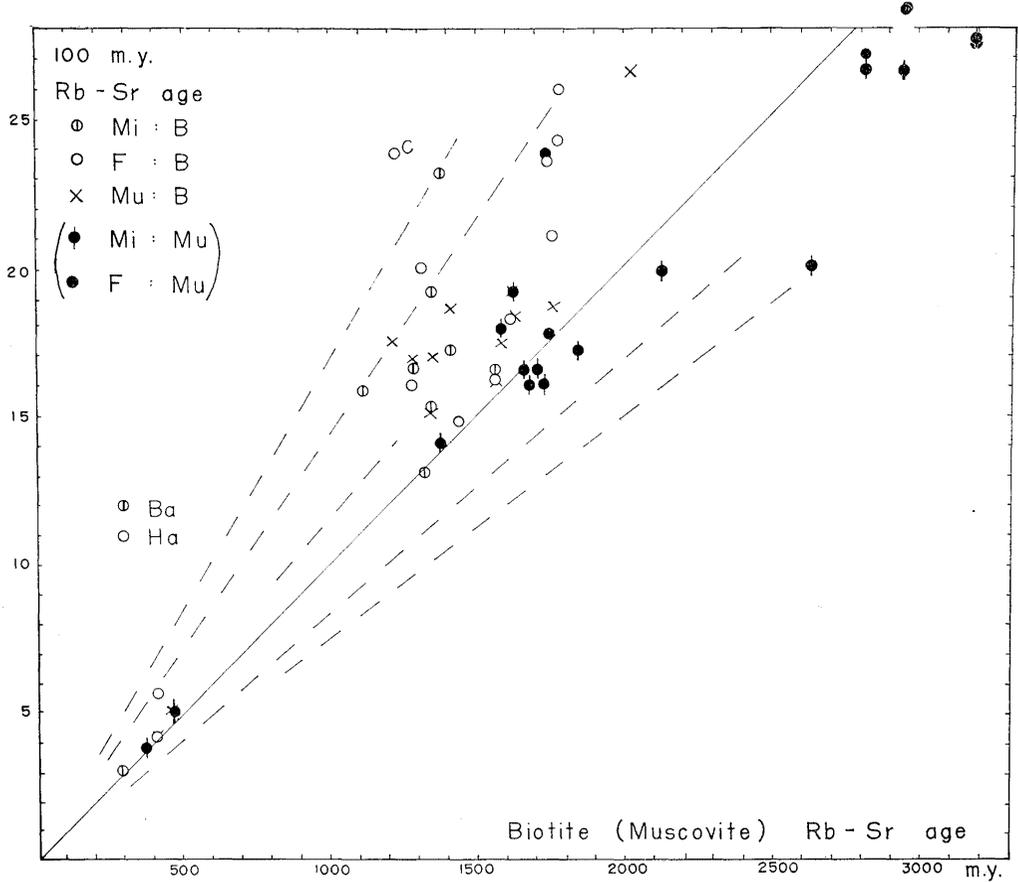


Fig. 4. The Microcline (Feldspar)-Biotite, The Muscovite-Biotite, the Microcline (Feldspar)-Muscovite relations in the Rb-Sr age.

Abbrev. Ba: Baltimore gneiss, Ha: Hartley gneiss-granite, C: Copper Cliff rhyolite; B: Biotite, Mi: Microcline, F: Feldspar, Mu: Muscovite.

大で、黒雲母年令が最小である。そして、この場合も K-A 年令と同様に、変異量は年令におよそ比例している (第4図)。このことは特に注目されるべきである (後述)。

Rb-Sr 法による鉱物年令相互の関係は次のように要約される。ただし、C (Copper Cliff rhyolite), B (Baltimore gneiss: ミクロクリン年令が過大で、ジルコンの Pb-Pb 年令よりも大), Ha (Hartly granite gneiss) など黒雲母の Rb-Sr 年令が過小 (K-A 年令よりも小) で、共存鉱物が特異な絶対年令関係を示すものを除外するものとする。

$$\boxed{\text{Feldspar}} \text{ age} \doteq \boxed{\text{Muscovite}} \text{ age} > \boxed{\text{Biotite}} \text{ age} \quad (\text{例外あり})$$

$$(1) \text{ K-Feldspar age} = \text{Muscovite age} \times \begin{matrix} (140\sim75)/100 \\ \text{多くの場合} \\ (115\sim85)/100 \end{matrix}$$

Feldspar age < Muscovite age の例はペグマタイトに多い。

$$(2) \text{ Muscovite age} = \text{Biotite age} \times (145\sim100)/100$$

$$(3) \text{ K-Feldspar age} = \text{Biotite age} \times \begin{matrix} (150\sim98)/100 \\ \text{多くの場合} \\ (145\sim100)/100 \end{matrix}$$

$$(3') \quad (1) \cdot (2) \text{ から計算すると} \quad (167\sim85)/100$$

カリ長石年令が黒雲母年令より大きくでることの検討

Sr^{87}/Sr^{86} 比が時間とともに増大する度合いが、カリ長石においてよりも、黒雲母において急である (S.R. Hart, 1961; W. Compston & P.M. Jeffery, 1961) ので、閉じた系で、ある程度変成作用を受けた岩石においては当然カリ長石年令が黒雲母年令よりも大きいことが期待される (第5図参照)。次にこの考えの当否を確かめる一つの方法として検討を行なうと、上述のような考

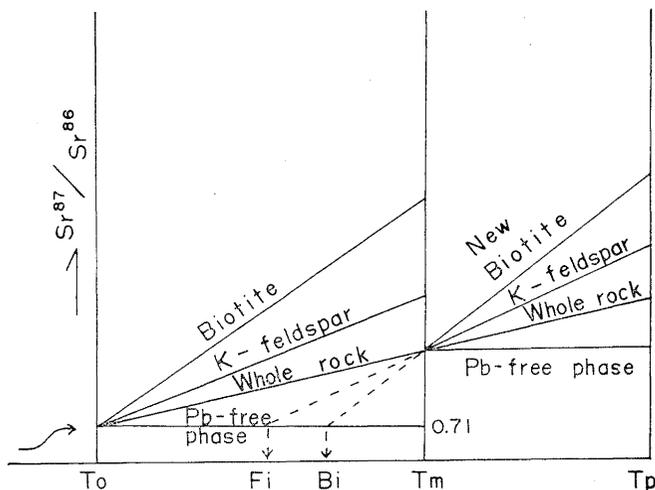


Fig. 5. Schematic radiogenic growth curves showing a metamorphic break in T_m . (Refer S. R. Hart, W. Compston & P. M. Jeffery, 1961).

えによれば、カリ長石年令と黒雲母年令との差は、鉱物の生成期から“変成期*”までの時間 (第5図の T_o-T_m) にほぼ比例するはずであるが、主に花こう岩～片麻岩について現在まで得られたデータでは、むしろ長石年令または黒雲母年令 (第5図 F_i-T_p または B_i-T_p) そのものに正比例的にみえる。これはカリ長石年令が黒雲母年令よりも小さい場合 (ただしペグマタイトの例が多い) があることと共に検討されなければならないことであって、天然の岩石について、詳しいデータの増加をはかって同位元素の挙動に関する各鉱物の特性などを考察する必要があるわけである。

IV. K-A 年令と Rb-Sr 年令の関係

黒雲母、白雲母、カリ長石などについて、K-A 法と Rb-Sr 法を併せて行なった例が多い。それらについて第6図～第10図を作った。大抵の場合、鉱物の Rb-Sr 年令は、その K-A 年令より大きく、両者の差はカリ長石において最大で、白雲母がこれにつき、黒雲母において最も小さい。

一般に、 $Rb-Sr \text{ age} > K-A \text{ age}$

その差 ($Rb-Sr \text{ age} - K-A \text{ age}$) は、一般に Biotite < Muscovite < Microcline

各鉱物の Rb-Sr 年令と K-A 年令の間には、ほぼ次のような関係がある。ただし「多くの場合」という意味は、特異な、珍しい例を除外するということである。例えば B (Baltimore gneiss) は共生するマイクロクリンの Rb-Sr 年令が著しく大きい、混合年令の著例であり、C (Cape Cliff rhyolite) は白雲母ならびに長石の年令に比較して、黒雲母の Rb-Sr 年令が過小であるのに、黒雲母の K-A 年令は大きいし、P (Philadelphia gneiss) は黒雲母年令がジルコン年令より著しく小さいといった特異性を示すので除外する。

$$(1) \text{ Biotite K-A age} = \text{Biotite Rb-Sr age} \times \frac{(175 \sim 75)/100}{(105 \sim 80)/100}$$

多くの場合

* Sr の同位元素が平衡状態になる。

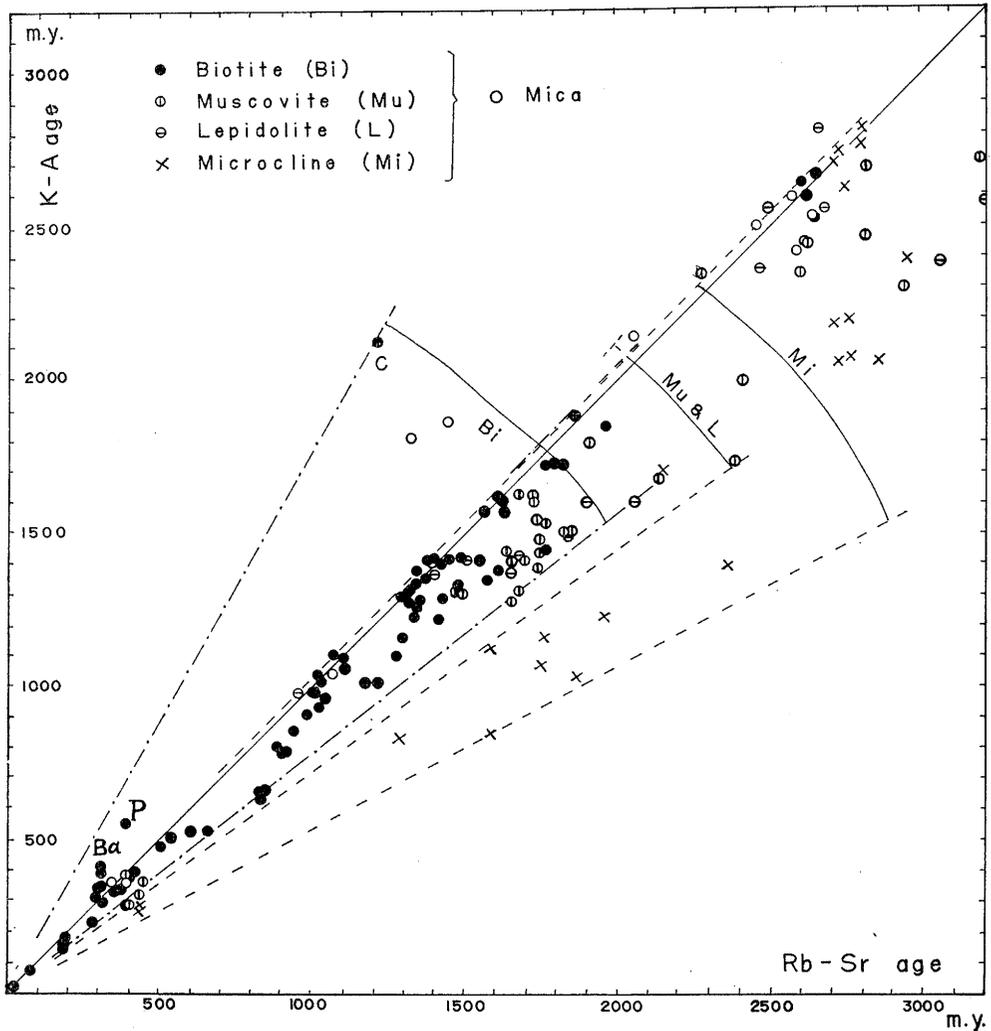


Fig. 6. The relation between the K-A age and the Rb-Sr age for Biotite, Muscovite, Lepidolite and Microcline (K-feldspar).
Abbrev, Ba: Baltimore gneiss, C: Cape Cliff rhyolite,
P: Philadelphia gneiss; Bi: Biotite, Mu: Muscovite,
L: Lepidolite, Mi: Microcline (K-feldspars).

- (2) Biotite Rb-Sr age = Biotite K-A age \times (135~95)/100
 多くの場合 (120~95)/100
- (3) Muscovite K-A age = Muscovite Rb-Sr age \times (105~72)/100
 (& Lepidolite) (& Lepidolite)
- (4) K-Feldspar K-A age = K-Feldspar Rb-Sr age \times (102~52)/100
 多くの場合 (80~60)/100

この関係は2つの鉱物(岩石)の相対的時代関係を求める場合に一応考慮すべきものである(後述, VII. 2)。

稀に Rb-Sr 年令が K-A 年令より、はるかに小さい例がある。これは Rb が K を交代したことに因る可能性がある。

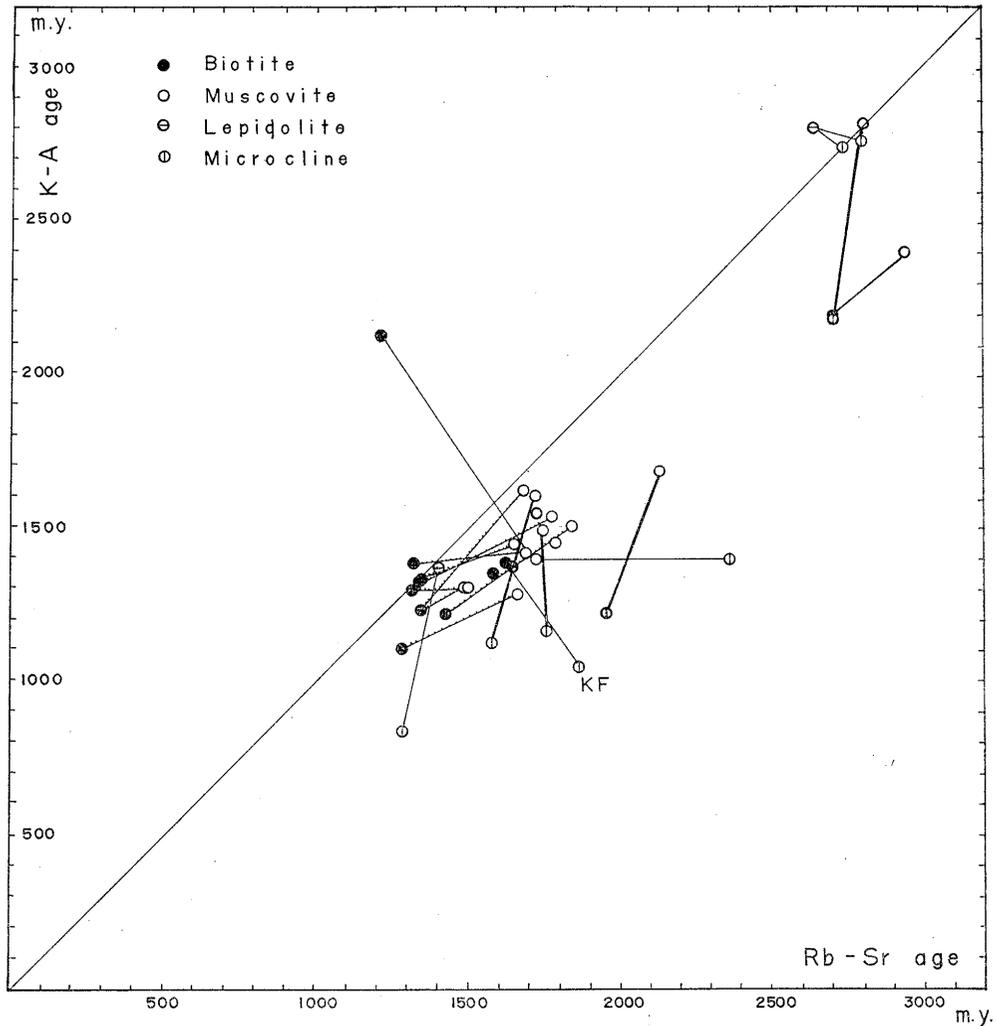


Fig. 7. The relation between the K-A age and the Rb-Sr age for Biotite, Muscovite, Lepidolite and Microcline. The co-existing minerals are shown by the connecting line. Abbrev. K-F: K-feldspar.

V. U-Pb 年令・Pb-Pb 年令・Th-Pb 年令

ジルコン・閃ウラン鉱・モナズ石・透輝石・スピネル・黄銅鉱・閃亜鉛鉱・磁硫鉄鉱などについて、 U^{238} - Pb^{206} 法・ U^{235} - Pb^{207} 法、 Th^{232} - Pb^{208} 法がよく用いられている。ここでは、ジルコンの同じ試料について、U-Pb 法、Pb-Pb 法、Th-Pb 法を用いて測定した年令相互間の関係を検討する。

かりに Pb^{238} - U^{206} 年令を基準にとつて、これと Pb-Pb 年令・Th-U 年令・ Pb^{235} - U^{207} 年令とを比較するために第 11 図を作つた。一般に Pb-Pb 年令が最大で Th-Pb 年令が最小の場合が多い。

一般に $Pb-Pb$ age > $U-Pb$ age > $Th-Pb$ age (例外あり)

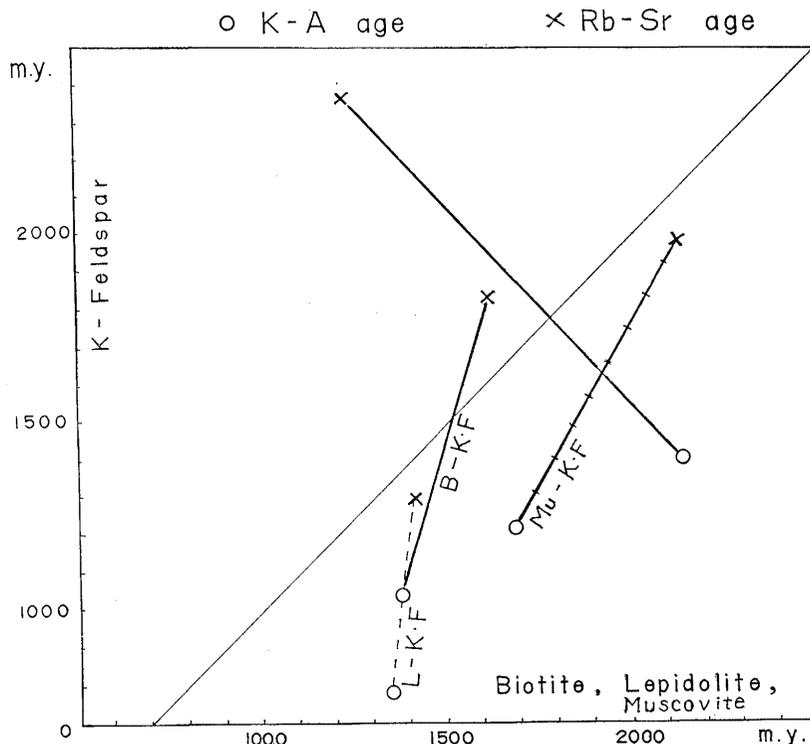


Fig. 8. K-feldspar and co-existing Biotite (or Muscovite, or Lepidolite) relation in the K-A age and Rb-Sr age. A couple of data are shown by the connecting line. Abbrev. B: Biotite, K-F: K-feldspar, L: Lepidolite, Mu: Muscovite.

- (1) $Pb^{207}-Pb^{206}$ age = $U^{238}-Pb^{206}$ age \times (195~77)/100
 多くの場合 (150~105)/100
- (2) $U^{235}-Pb^{207}$ age = $U^{238}-Pb^{206}$ age \times (125~105)/100
- (3) $Th^{232}-Pb^{208}$ age = $U^{238}-Pb^{206}$ age \times (125~55)/100
 多くの場合 (110~75)/100
 (約 11 億年より古いものでは, 多くは(110~90)/100)*

ただし, 第 11 図の B (Bagdad granite), T (Tory Hill granite) のような Th-Pb 年令が著しく小さく, 岩石年令としては明らかに過小であると思われるもの, S (Somp ujärvi) のように $U-Pb^{206}$ 年令と $U-pb^{207}$ 年令の差が著しく大きいもの, Cp (Cape town granite) のように Bi 年令が異常に大きく, 共生ジルコンの Pb-Pb 年令よりも大きいものなど, 著しく「ふつう」でないものは除外してある。

「 $U^{235}-Pb^{207}$ 年令と $U^{238}-Pb^{206}$ 年令の差」と「 $Pb^{207}-Pb^{206}$ 年令と $Th^{232}-Pb^{208}$ 年令の差」の関係, および前者と「 $Pb^{207}-Pb^{206}$ 年令と $U^{235}-Pb^{207}$ 年令の差」の関係は, 第 12 図のとおりであって, 大局的には, 「 $U^{235}-Pb^{207}$ 年令と $U^{238}-Pb^{206}$ 年令の差」が大きいほど, 「 $Pb^{207}-Pb^{206}$ 年令と $Th^{232}-Pb^{208}$ 年令の差」も, 「 $Pb^{207}-Pb^{206}$ 年令と $U^{235}-Pb^{207}$ 年令の差」も大きくなる傾向

* 註 Th-Pb 年令は, 約 11 億年 ($U-Pb^{206}$ 年令) 以上では 変異量がほとんど一定で, $U-Pb^{206}$ 年令に近いデーターしか見当たらない。

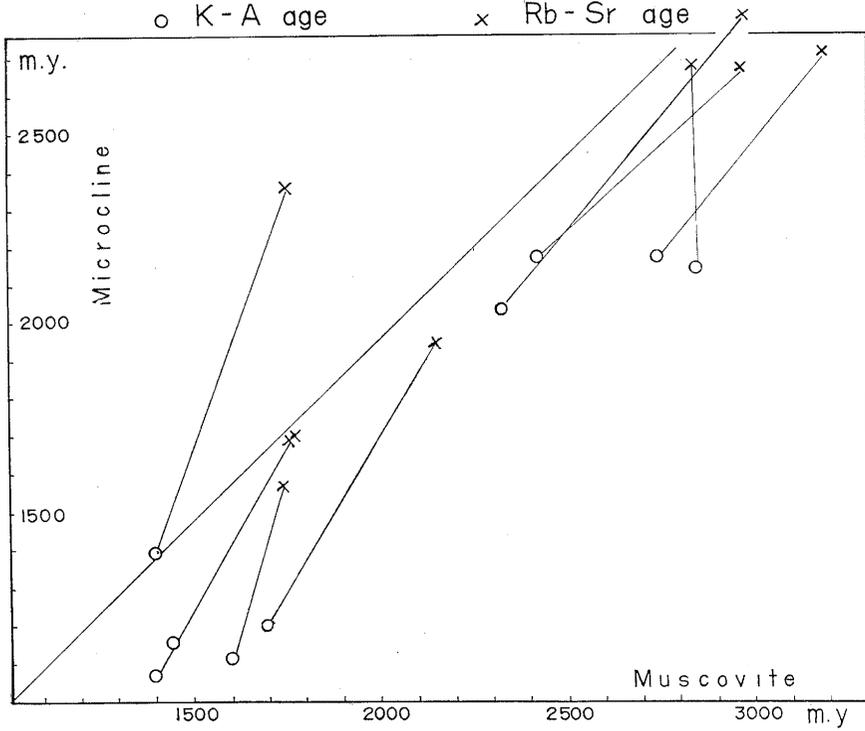


Fig. 9. The Microcline-Muscovite relation in the K-A age and Rb-Sr age. Refer to Fig. 8.

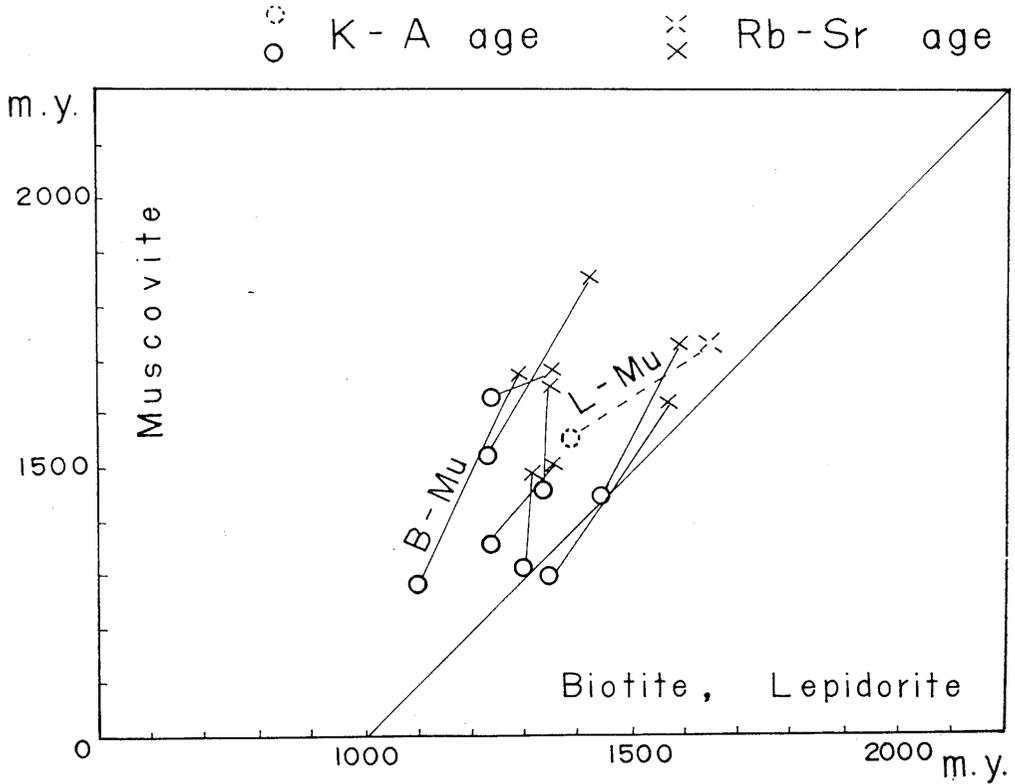


Fig. 10. The Muscovite-Biotite (or Lepidolite) relation in the K-A age and Rb-Sr age. Refer to Fig. 8.

が認められる。第 11 図からもわかるように、一般に「Pb-Pb 年令と Th-Pb 年令の差」の方が「Pb-Pb 年令と U^{235} -Pb²⁰⁷ 年令の差」よりも大きいことは当然であるが、逆の場合も数例ある。また、Pb-Pb 年令や U-Pb 年令が大きいほど、 U -Pb²⁰⁶ 年令と U -Pb²⁰⁷ 年令の差も大きい傾向がみられることも注目されるべきである（後述 VII を参照）。

註 試料結晶の粒度によって測定値が著しく異なる例も知られている。測定値の分散の原因としては、一応 Th の逸散、Pb の逸散、 $U^{235} \cdot U^{238}$ の壊変速度・逸散程度の差異・変化などが考えられるが、そのような差異・変化を生ずる理由（おそらく地質・岩石学的な問題であろう）は簡単なものではないであろう。

火成岩の接触部において「接触効果」が、おそらく Th・U の集積（添加?）、Pb の逸散として表われるために、Th-Pb 年令や U-Pb 年令が Pb-Pb 年令に比較して著しく小さくなる例が知られている（G.L. Davis, et al, 1962-63）。Pb の逸散は Pb²⁰⁷ も Pb²⁰⁶ も大差ないとされているのである。

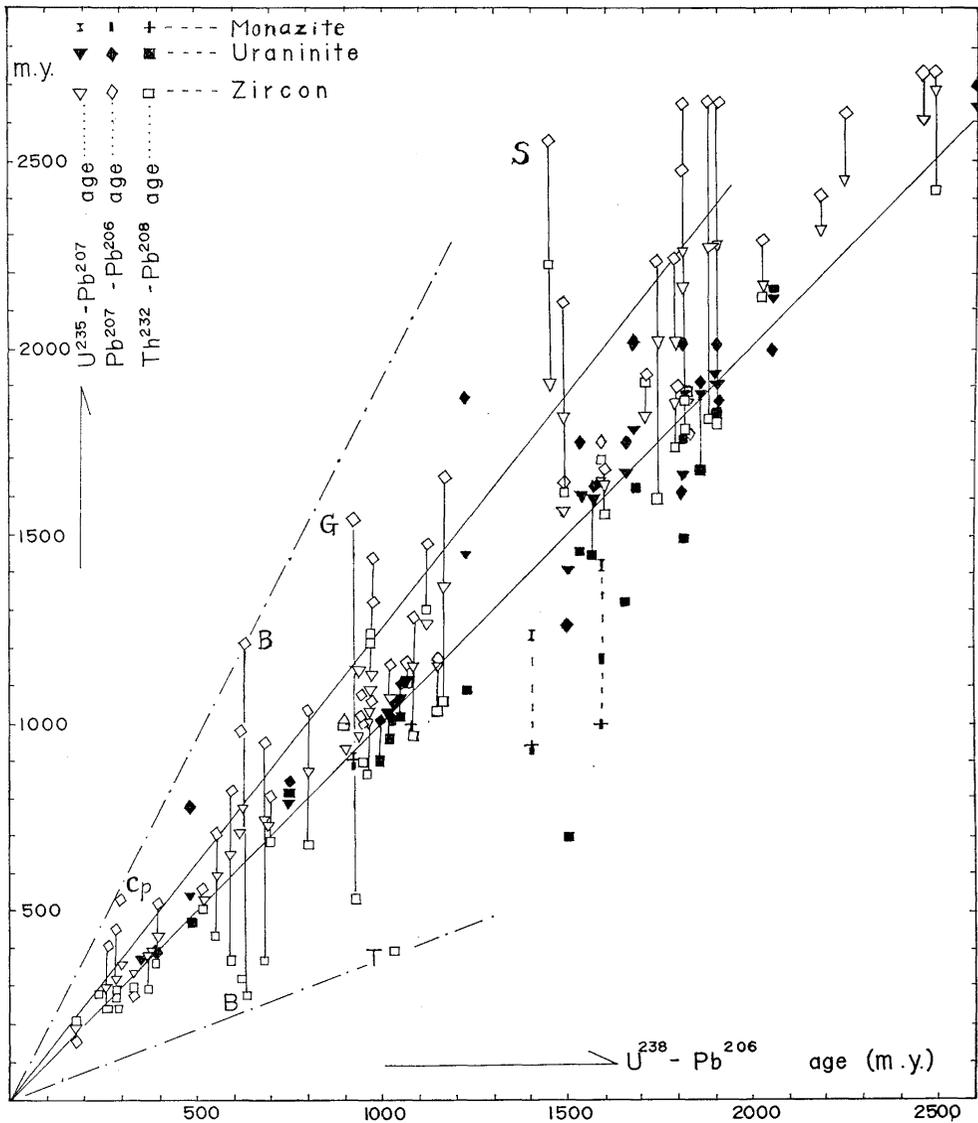


Fig. 11. The comparison of the U -Pb²⁰⁶ age to the U -Pb²⁰⁷ age, Pb²⁰⁷-Pb²⁰⁶ age and Th-Pb age for zircon, uraninite and monazite.

Abbrev. B: Bagdad granite, Cr: Cape Town granite, S: Sompujarvi granite, T: Tory Hill granite.

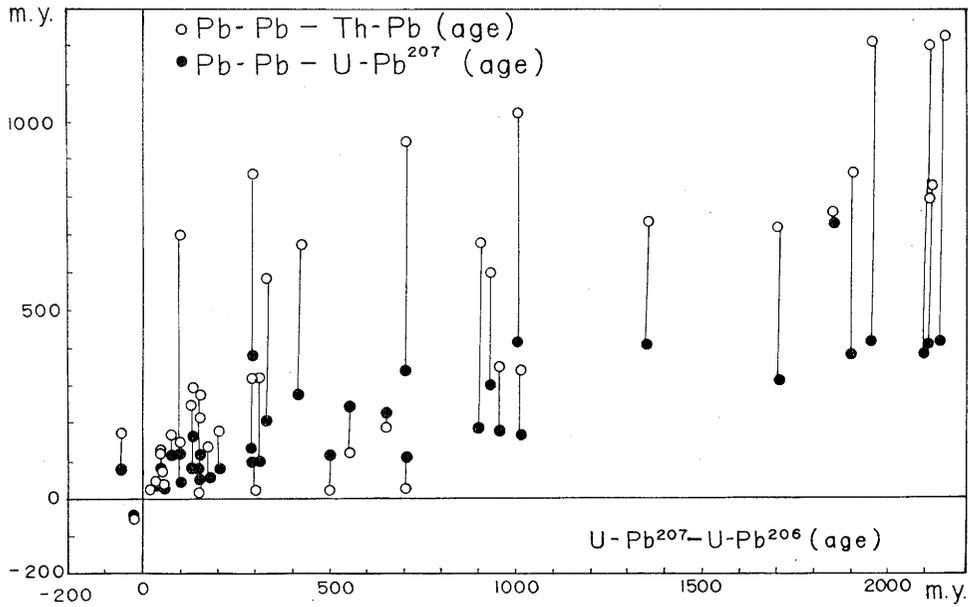


Fig. 12. The relation between the [U-Pb²⁰⁷ age - U-Pb²⁰⁶ age] and the [Pb-Pb age - Th-Pb age] and the [Pb-Pb age - U-Pb²⁰⁷ age] for Zircon.

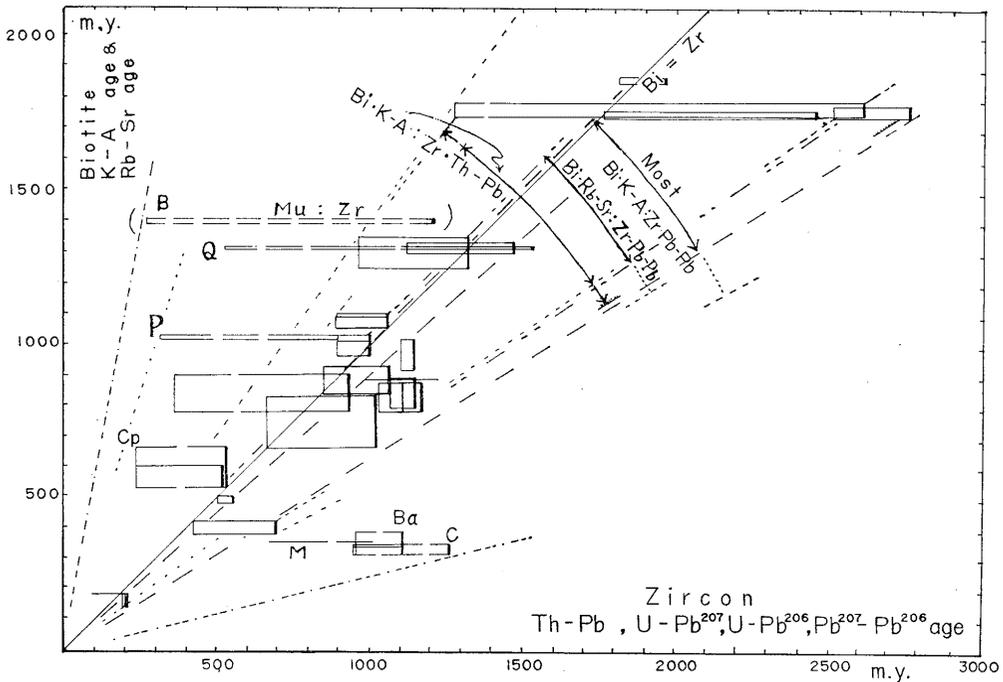


Fig. 13. The relation between the Biotite (K-A and Rb-Sr) ages and the Zircon (Th-Pb, U-Pb and Pb-Pb) ages.

K-A age and Rb-Sr age for biotite, and the Th-Pb age, U-Pb ages and Pb-Pb age for zircon (with a few exceptions).

Abbrev. B: Bagdad granite, Ba: Baltimore gneiss. P: Pike Peak granite, Q: Quartz Creek granite, Cp: Cape Town granite.

VI. ジルコン年令と黒雲母年令の関係

黒雲母については、K-A 法・Rb-Sr 法による測定がひろく行なわれているし、また共存するジルコンについての U-Pb 法・Pb-Pb 法・Th-Pb 法による測定も多いので、両鉱物の測定値を比較した (第 13 図参照)。結果は次のごとくである。

- | | | | |
|--|---|--------------|-------|
| (1) Biotite K-A age = Zircon Pb-Pb age | × | (102~53)/100 | |
| 多くの場合 | | (102~63)/100 | |
| (2) Biotite K-A age = Zircon Th-Pb age | × | (135~65)/100 | |
| (3) Biotite Rb-Sr age = Zircon Pb-Pb age | × | (103~60)/100 | |
| 多くの場合 | | (103~68)/100 | |
| (4) Biotite Rb-Sr age = Zircon Th-Pb age | × | (150~80)/100 | 多くの場合 |
| (5) Zircon Th-Pb age = Biotite K-A age | × | (150~77)/100 | |
| 多くの場合 | | (143~95)/100 | |
| (6) Zircon Th-Pb age = Biotite Rb-Sr age | × | (140~60)/100 | |
| 多くの場合 | | (125~66)/100 | |
| (7) Zircon Pb-Pb age = Biotite K-A age | × | (159~98)/100 | 多くの場合 |
| (8) Zircon Pb-Pb age = Biotite Rb-Sr age | × | (166~97)/100 | 多くの場合 |

第 13 図において、特異な位置を示すものは、他の鉱物・他の方法によって求めた絶対年令 (相互関係) も異常であるので、特異なものとして、ここでは考慮外におく。たとえば Q (Quartz Creek granite) および P (Pikes Peak granite) の黒雲母は K-A 年令が Rb-Sr 年令より大きく、Ba (Baltimore gneiss) のミクロクリンの Rb-Sr 年令はジルコンの Pb-Pb 年令よりも大いとか、Cp (Cape Town granite) はジルコンの Pb-Pb 年令が比較的大きいのに、さらにそれよりも黒雲母年令の方が大きいとか、C (Cranberry gneiss, Dayton Bend) は黒雲母年令がジルコン年令より著しく小さく混合年令を示す(?) といった特異性がある。

変成作用に対する敏感度

一般に黒雲母年令がジルコン年令よりも小さく、殊に片麻岩において、その差が大きい (例; 前項で特異点として除外した Baltimore gneiss, (Davis et al, 1957), Philadelphia gneiss (Tilton et al, 1958) など)。これは、黒雲母年令が変成作用 (特に片麻岩化作用) に対して敏感であることを示すものであると考えられる。

第 14 図に示すように 火成岩貫入体の熱影響が、接触部からかなりの距離の黒雲母ならびに長石に現われ、ジルコンには接触部附近のものを除いては、ほとんど現われない例も知られている (Eldora Colorado (Tilton et al., 1963, Davis et al., 1963))。花こう岩で、ジルコンの Pb-Pb 年令よりも黒雲母の K-A 年令・Rb-Sr 年令の方が僅かばかり大きい例もあることと共に、考察を要する問題である。

VII. ジルコンの U-Pb 年令と黒雲母・カリ長石の Rb-Sr 年令の関係

黒雲母およびカリ長石の Rb-Sr 年令については前に述べたが、ここに再び U-Pb 年令と併せて検討する。

U-Pb 年令については、 $U^{238}-Pb^{206}$ 年令と $U^{235}-Pb^{207}$ 年令が “Concordant” であるならば、鉱物生成以来 Pb について “閉じた系” であったと考えられ、測定値は大体において「真の地質時代

を表わしている」と考えられる。一方 Concordant でない場合には、ある時期に、ある種の変成作用を受けて、Pb:U 関係が再びふり出し (concordant 基準変化経路上の点) に向かって、ある程度復帰したものと考えることができる (G. L. Davis, G. R. Tilton & G.W. Wetherill, 1962).

a) この $U^{235}-Pb^{207}$ 年令と $U-Pb^{206}$ 年令の差の最大値 (第 15 図 Lm 附近に当る年令差) は、鉱物の生成期から変成期までの時間の長さに比例する (第 15 図 LLL は SSS よりも著しく discordant で、 $S'S'' < L'L''$)。データーの数が十分にそろえば、両 $U-Pb$ 年令差が大きい岩石の

属する岩石系列ほど (したがって、両 $U-Pb$ 年令差が大きいほど)、生成期から変成期までの経過時間が長いという傾向も認められるであろう。

b) Rb-Sr 法による黒雲母年令とカリ長石年令の差が、鉱物生成期から変成期までの長さに比例すべき場合が考えられる (前述 III)。

a) および b) が成立するならば、ジルコンの「 $U-Pb^{206}$ 年令と $U-Pb^{207}$ 年令の差の最大値 (第 15 図 Lm に当る年令差)」は、共存する「黒雲母の Rb-Sr 年令と長石の Rb-Sr 年令の差」にはほぼ比例するはずである。この関係は十分に数多くの資料についてみられるべきものであるが、主に片麻岩～花こう岩について作った予察的な第 16 図から a)・b) を認めるべき何らの裏付けも得られないことをここに付記しておく。Sr, U, Pb の同位元素の挙動の変化期としての“変成期”が、同位元素の種類によって多少異なることを示す可能性、ならびに“閉じた系”であるという仮定の成立程度の検討を要請するものであろう。

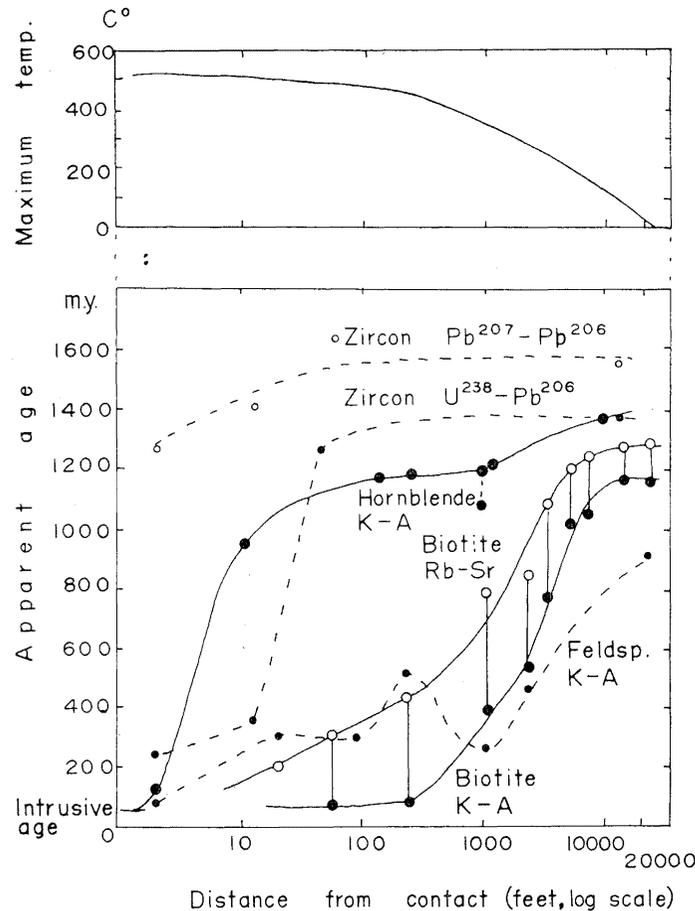


Fig. 14. Variation of apparent ages of minerals as a function of distance from an intrusive contact Eldora, Colorado. Also [shown are the theoretical maximum temperatures.

(Refer Tilton et al, 1963 and Davis et al, 1963).

連続的または断続的な、同位元素類の拡散・逸散特性 (鉱物毎の) も考慮されるべきで、これに関連して、ジルコンの $U-Pb^{206}$ 年令と $U-Pb^{207}$ 年令の差が、Pb-Pb 年令や $U-Pb$ 年令と、ほぼ比例的関係にあること (前述 V) や、黒雲母の Rb-Sr 年令と共存カリ長石の Rb-Sr 年令の差が、それらの Rb-Sr 年令とほぼ比例的関係にあることはきわめて興味深い。

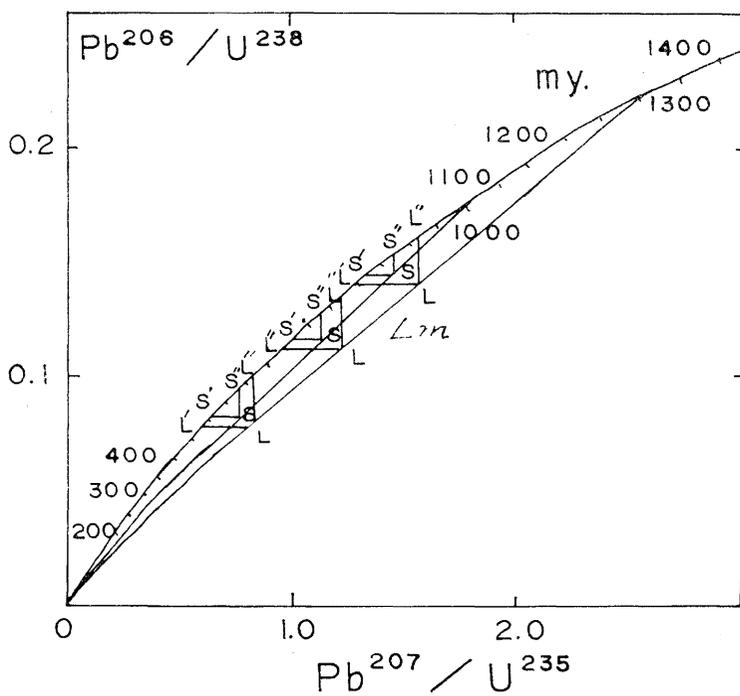


Fig. 15. Daughter-parent (concordia) diagram for zircons with continuous diffusion (discordia) curves, SSS and LLL.
 $LL', LL'', L/LL'' > (SS', SS'', S'S'')$ when $LLL > SSS$ in the deviation from the concordia.

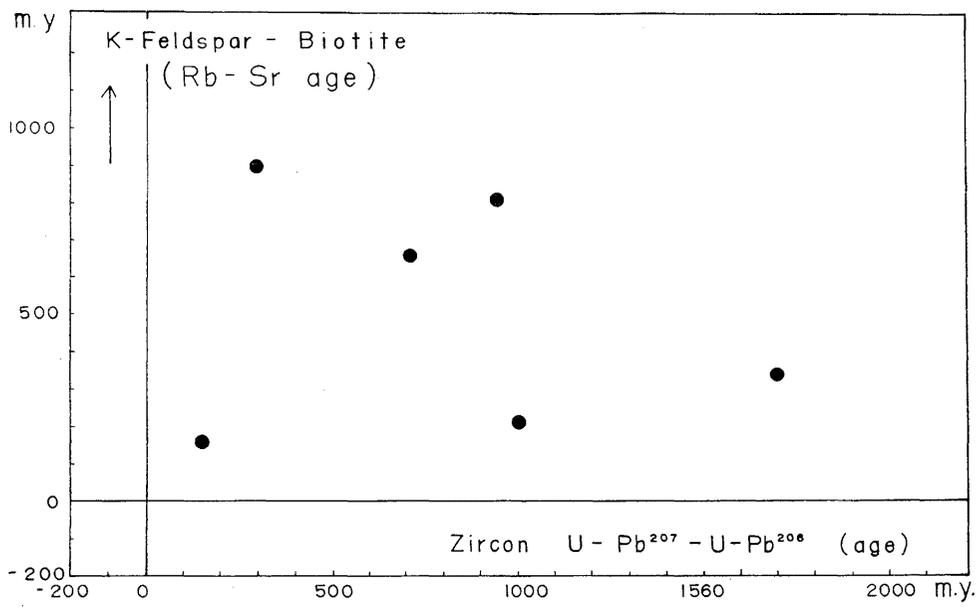


Fig. 16. The relation between the [K-Feldspar age - Biotite age (in the Rb-Sr age)] and the [U-Pb²⁰⁷ age - U-Pb²⁰⁶ age for the co-existing zircon].

VIII. 地質年代学への利用の限界

1. 2種以上の鉱物・2種以上の方法で絶対年令を求めることの必要性

先に述べたことから、一般に1つの鉱物について、1つの方法による同位元素測定値に基づいて絶対年令を求めても、そのままその鉱物の生成期とみなすことができないことは明らかである。鉱物種により測定方法（用いる同位元素の種類）により、著しく異なる結果が得られるのが、ふつうであって、1鉱物・1方法による絶対年令だけでは、その意味するものがよくわからないし、年令としての信頼度を検証することもできない。一般的にいうと少なくとも2つ以上の鉱物・2つ以上の方法によって得られる結果を比較検討することが必要であると思われる。

さらに、できれば黒雲母とカリ長石のそれぞれの K-A 年令と Rb-Sr 年令を求め、ジルコンの Pb-Pb 年令・U-Pb²⁰⁷ 年令・U-Pb²⁰⁶ 年令などを測定して、それらを岩石学的検討の資料に加えるという立場がとられなければならない。しかもこの場合、絶対年令という形でなくて、生の測定値（たとえば Sr⁸⁶, Sr⁸⁷, Pb²⁰⁴, Pb²⁰⁶, Pb²⁰⁷, U²³⁵, U²³⁸ などの）についても検討するのが有効であろう。

2. 相対関係（新旧）の検討に測定値を利用できる限界

厳密に考えると、1つの岩石中の共生鉱物の全種類について、諸方法で絶対年令を求めなければ、鉱物・岩石の生成・履歴・年令を考察することはできない。一般的にいうと、少なくとも2種以上の鉱物・2種以上の方法で測定する必要があることは前述のとおりである。しかしながら比較的簡単な履歴の岩石、たとえば殆んど全く変質・変成されていない火山岩類相互の間の新旧の差は、1鉱物・1方法による絶対年令によって、かなり信頼度の高い判断ができるはずである。この「かなり」を量的な表現にすることができれば、1鉱物・1方法による測定値の利用限界を考察することもできるわけであるが、これは将来の問題である。岩石一般について、この立場で現在得られているデータについて考慮されることの若干を述べると、

(1) 第6図から、岩石 a の黒雲母の K-A 年令が、岩石 b の黒雲母の K-A 年令より大きくて、その差が前者（岩石 a の黒雲母の K-A 年令）の 30%* 以上あれば、黒雲母の Rb-Sr 年令でも、岩石 a の方が岩石 b よりも古い（ $a > b$ と略記する）確率がきわめて高いことがわかる。

同様に両岩類（a・b）の黒雲母の Rb-Sr 年令を測定して、a が b より古い（ $a > b$ ）場合その差が a の黒雲母の Rb-Sr 年令の 30% 以上あれば、K-A 年令でも $a > b$ であるとみなしてよいといえる。

(2) 岩石 a および b のマイクロクリンによる K-A 年令の差（ $a - b$ と略記する）が、a の 25% 以上あれば、Rb-Sr 年令でも、 $a > b$ であり、同様にマイクロクリンによる Rb-Sr 年令の差（ $a - b$ ）が a の 25% 以上あれば、特殊な場合を除いて、K-A 年令でも $a > b$ であるとみなしてよい。

(3) 前述の Rb-Sr 年令についての式、 $\text{Feldspar age} = \text{Biotite age} \times (145 \sim 98)/100$ に従うと、2つの岩石（a, b）の長石類の Rb-Sr 年令差（ $a - b$ ）が a の 32% 以上あれば、特殊な場合を除いて、黒雲母年令でも $a > b$ と考えてよく、逆に黒雲母の年令差（ $a - b$ ）が a の 32% におよぶときは、長石年令でも $a > b$ であるとみなされる。

(4) K-A 年令については、 $\text{Feldspar age} = \text{Biotite age} \times (105 \sim 65)/100$ に従うと、黒雲母年令の差（ $a - b$ ）が a の 38% 以上あれば長石年令も $a > b$ であるとみなされる。長石年令の差（ $a - b$ ）が a の 38% 以上あれば、黒雲母年令でも $a > b$ であると考えるといわけである。

(5) 要するに、岩石 a, b それぞれの黒雲母（またはカリ長石）の K-A 年令（または Rb-Sr

* 註 Most Bi K-A age = Bi Rb-Sr age $\times (105 \sim 80)/100$ によれば 25%、したがって多くの場合約 25% でよいと思われるけれども、それでよいと保証することは困難である。

年令)が, aの方がbより大きくて, その差が, aの38%以上あれば, 共存するカリ長石(または黒雲母)のK-A年令でも, Rb-Sr年令でも(まだジルコンのPb-Pb年令でも(記述省略)) aの方がbより大きいとみてよいわけで, 2種以上の鉱物・2種以上の方法による絶対年令について, aがbより古いという結果を得た場合に当り, 信頼度が(極めて)高いわけである。

38%の差は岩石の新旧判定の一応の(地質・岩石学の従来のレベルの)利用限界を示すものである。

(6) このような測定値のいろいろの処理方法は, 他の鉱物・他の方法による測定値の一般の利用限界を見当づけるのに適用することができる。

さらに詳細なるデータならびに検討を加えて, 利用限界を高める努力も必要である。

IX. 摘 要 ・ 今 後 の 課 題

(1) 同位元素による絶対年令の測定は, その技術的問題と, 試料鉱物が内蔵する問題のために, 真の年令を知ろうという所期の目的を容易に叶えてくれないが, これを最大限に利用しようという立場にたつことも大切である。ここに現在行なわれている, いろいろの鉱物・いろいろの方法による測定結果を比較検討して, それらの年令としての一般の利用限界を見当づけた(個々の試料の地質・岩石学の知識の増加は, この利用限界を高めるはずであるが, その場合, 数量的に表現できなければ効用は極めて少ない)。

例外的場合*を除いて一般に次の諸式が成立っている。

K-Feldspars K-A age	=	Mnscovite K-A age	×	(103~65)/100
"	=	Biotite K-A age	×	(105~65)/100
K-Feldspars Rb-Sr age	=	Muscovite Rb-Sr age	×	(115~85)/100
"	=	Biotite Rb-Sr age	×	(145~100)/100
Biotite K-A age	=	Mnscovite K-A age	×	(110~77)/100
"	=	Biotite Rb-Sr age	×	(105~80)/100
Microcline K-A age	=	Microcline Rb-Sr age	×	(80~60)/100
Zircon Pb ²⁰⁷ -Pb ²⁰⁶ age	=	Zircon U ²³⁸ -Pb ²⁰⁶ age	×	(150~105)/100
Zircon U ²³⁵ -Pb ²⁰⁷ age	=	Zircon U ²³⁸ -Pb ²⁰⁶ age	×	(125~100)/100
Zircon Th ²³² -Pb ²⁰⁸ age	=	Zircon U ²³⁸ -Pb ²⁰⁶ age	×	(110~75)/100
Biotite K-A age	=	Zircon Pb-Pb age	×	(102~63)/100
"	=	Zircon Th-Pb age	×	(135~65)/100
Biotite Rb-Sr age	=	zircon Pb-Pb age	×	(103~68)/100

(2) 1鉱物・1方法による絶対年令を, 地質学が期待する程度に利用できる場合は少ない。

たとえば, 新旧2つのミクロクリンのK-A(またはRb-Sr)年令に, 25%以上の差異がなければ, 両ミクロクリンはRb-Sr(またはK-A)年令でも, 同じ新旧関係にあるとみなすことはできない。

また, 新旧2つのカリ長石のK-A年令の差は, 古い方の年令の約38%以上なければ, 共存黒雲母のK-A年令もRb-Sr年令も, また共存ジルコンのPb-Pb年令も, カリ長石と同じ新旧関係を示すという保証にはならない(例外的場合を除いても, かくのごとくである)。概略的に±20%の変異範囲をみなければならぬわけであるが, これはふつうの場合の, 従来の地質・岩石学のレベルでの, 一般の限界を示すものである。ここに岩石の年令・各構成鉱物の年令の解析の問題も重要であるが, それは将来の課題とする。

* 各共生鉱物の諸方法による絶対年令相互の関係が異常である場合。

(3) 1 鉱物・1 方法による絶対年令だけでは、その年令としての信頼度や、その意味するものを検討することもできない。2 種以上の鉱物・2 種以上の方法による測定値を比較検討することが、年令の考察に直接的に、また間接的に有用であり、岩石学的検討上必要である場合が少なくない。

鉱物の種類により、また測定の方法によって、絶対年令が異なることの原因は、同位元素の挙動に関するそれぞれの鉱物の物性（特性）と岩石・鉱物の生成・履歴に関係がある。

(4) S. R. Hart, W. Compston らなどの考えを拡大して、Rb-Sr 法によるカリ長石年令と共存黒雲母年令との差を、鉱物の生成期から変成期までの年令を推定するのに役立てることも考えられる。ただし Hart らの考え自体も検討される必要がある。

(5) G. L. Davis らの考えを出発点として、ジルコンの U-Pb²⁰⁶ 年令と U-Pb²⁰⁷ 年令の差によって、試料岩石・鉱物の履歴・変成期を推定することも考えられる。Davis らの考え自体も検討される必要がある。

(6) (4)・(5)を組合せて考察することは有効である。変成期の考察においては、この場合岩石・鉱物（変成期以外）は「閉じた系」であるとみなされるので、この条件が充たされた程度を考察するのに役立てることも考えられる。

(7) Rb-Sr 法によるカリ長石年令と黒雲母年令の差も、ジルコンの U-Pb²⁰⁷ 年令と U-Pb²⁰⁶ 年令の差も、それらの年令が大きいほど大きい傾向があることも併せて考察されるべきで、各種鉱物における連続的・断続的な同位元素の拡散・逸散を天然の岩石について詳細に調べなければならない。

(8) Pb²⁰⁶/Pb²⁰⁷, Sr⁸⁷/Sr⁸⁶などを火成岩・変成岩・混成岩の成因・履歴の考察に用いようという試み (K. K. Zhiron & S. I. Zikov, 1956; 牛来, 1960, 1963; G. Faure & P. M. Hurley, 1963 など)も今後発展されるべきであり、その他、火成岩のマグマ生成～貫入～固結の間の消息を知る手がかりとして、外来物・変斑晶・残晶・巨斑晶・(かんらん石など)ノジュールなども同位元素岩石学が取上げるべき問題を蔵している。各種鉱物物性（特性）と絶対年令の関連性といった面から、たとえば黒雲母の緑泥石化・カリ長石生成と“黒雲母・長石効果”との関係といった面まで、基礎的・応用的研究課題は少なくない。

(9) いずれの場合にも、まず基本的研究が進展しなければならないが、岩石・鉱物の絶対年令を決定づける因子は複雑であるから、試料の選択が重要な意味をもつ。最初に、できるだけ簡単な履歴をもつ岩石を十分な数だけ折んで、鉱物の種類ごとに実験的・理論的に知られる同位元素に関する性質と、天然の岩石にみられる事実との間の関係を検討して“標準”を組立て、それを基準にして、ある条件の加わった岩石・鉱物における変異の法則を見出してゆくといった方向の研究が有意義であろう。試料として適当な岩石・鉱物を吟味することが重要であり困難なことである。

X. お わ り に

放射性同位元素による絶対年令測定は、わが国でも開発されつつあるが、測定装置・測定技術に関する困難な問題のほか、絶対年令の意味するものを解説するためのいろいろの検討が進められなければならない。

事新しく述べるまでもないことであるが、莫然と「絶対年令は鉱物・岩石の年令を、概略的には示しているのだ」というような考えは無意味であり、危険である。

基礎的研究として、各種鉱物のそれぞれにおける同位元素の挙動に関する基本的問題に直接的な研究と、適当な天然の岩石・鉱物についての測定値の岩石学的検討とが相共に進められなければならない。

らない。試料に用いる岩石・鉱物の採択は、よく吟味してなされなければならない。

一方において、研究の進歩の段階に応じて、測定値を地質年代学に取り入れてゆく努力も必要である。

本稿で私は、従来の測定値の比較検討を行ない、年令としての一般的利用限界を見当づけるとともに、同位元素岩石学の若干の問題の発掘を試みた次第である。従来のデータは数においても、またサンプリングにおいても不十分な点があるので、測定値の意味に関する詳細なる論議は今後の課題であるが、わが国における絶対年代学・「同位元素岩石学」の困難なる開発期に当って、この小篇が何らかの役に立てばと思い、貴重な紙面を戴いた次第である。

付記 この研究の材料として用いた同位元素分析資料は、すべて外国（主にアメリカ）の文献（References 参照）に求めた。ほとんどすべてが「花こう岩～片麻岩の類とペグマタイト」のかり長石、雲母類、ジルコンその他の鉱物について測定した値である。もっと詳細な検討をなすには、未だ分析資料が不十分であるので、多くの事柄を将来の課題として残しておく。

References (主なもの)

- Aldrich, L. T., Davis, G. L., Tilton, G. R., & Wetherill, G. W. (1956): *Jour. Geophys. Research.* **61**, 215.
- Annual report of the Geophysical Laboratory, 1952-53, 1953-54, 1954-55, 1955-56, 1956-57, 1957-58, 1958-59, 1959-60, 1960-61, 1961-62, 1962-63.
- Compston, W. & Jeffery, P. M. (1961): *Metamorphic chronology by the Rubidium-Strontium method.* *Ann. New York Acad. Sciences*, **91**, art 2, 185-91.
- Davis, G. L., Wetherill, G. W., Tilton, G. R. & Hopson, C. A. (1958): *Age of the Baltimore gneiss.* *Geol. Soc. Amer. Bull.* **69**, 1500.
- Davis, G. L., Tilton, G. R. & Wetherill, G. W. (1962): *Mineral ages from the Appalachian province in North Carolina and Tennessee.* *Jour. Geophys. Res.*, **67**, No. 5, 1987-96.
- Davis, G. L., Tilton, G. R., Aldrich, L. T., Hart, S. R., Steiger, R. H. & Kouvo, O. (1963): *Ann. report Geophys. Laboratory (1962-63).*
- Faure, G. & Hurley, P. M. (1963): *The isotopic composition of strontium in oceanic and continental basalts; Application to the origin of igneous rocks.* *Jour. Petrology.* **4**, 31-50.
- Gorai, M. (1960): *Ultimate origin of granite.* *Earth Science (in Japan.)*, No. 52, 1-8.
- Hart, S. R. (1961): *Mineral ages and metamorphism.* *Ann. New York Acad. Sciences*, **91**, art 2, 192-97.
- Program 1950 Annual Meetings.
- Tilton, G. R., Davis, G. L., Wetherill, G. W. & Aldrich, L. T. (1957): *Isotope ages of zircon from granites and pegmatites.* *Trans. Amer. Geophys. Union*, **38**, 360-71.
- Tilton, G. R., Wetherill, G. W., Davis, G. L. & Hopson, C. A. (1958): *Age of minerals from the Baltimore gneiss near Baltimore, Maryland.* *Bull. Geol. Soc. Am.*, **69**, 1469-1474.
- Tilton, G. R., Wetherill, G. W. & Davis, G. L. (1962): *Mineral ages from the Wichita and Arbuckle Mountains, Oklahoma and the St. Francis Mts., Missouri.* *Jour. Geophys.*

-
- Research, **67**, 4011-19.
- Tilton, G. R. & Hart, S. R. (1963): Geochronology. *Science*, **140**, 357-61.
- Wetherill, G. W. Aldrich, L. T. & Davis. G. L. (1955): *Acta*, **8**, 16.
- Zhirov, K. K. & Zikov. S. I. (1956): On the metamorphism and age of granites by lead isotope Analysis (in Russian). *Geochimya, Akad. Nauk. USSR*, **7**.