

## 西南日本の古生代-第三紀砂岩中の碎屑性ザクロ石

寺岡易司<sup>1</sup>

Yoji TERAOKA (2003) Detrital garnets from Paleozoic to Tertiary sandstones in Southwest Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 54 (5,6), p. 171 - 192, 22 figs.

**Abstract:** Garnets are classified into low P/T type, intermediate P/T type (Ia, Ig<sub>1</sub>, Ig<sub>2</sub>), high P/T type, eclogite type and grandite. They are characteristic of low-pressure metamorphic and granitic rocks, intermediate-pressure metamorphic rocks (Ia : up to amphibolite facies, Ig<sub>1</sub> and Ig<sub>2</sub> : granulite facies), high-pressure metamorphic rocks, eclogites and calcareous metamorphic rocks, respectively. Ig<sub>1</sub> and Ig<sub>2</sub> garnets are rich in Mg, and the latter has not been reported from metamorphic rocks in the Japanese Islands, but from those of Archean age in the Asian continent. Garnets exclusive of grandite are collectively called pyralspite.

Detrital garnet analysis was carried out on the basis of the above-mentioned classification of garnets on Devonian to mid Tertiary sandstones in Southwest Japan. The results indicate that assemblage of detrital garnets changed markedly in the following stages : 1) post-Devonian — pre-Permian, 2) latest Middle to mid Late Triassic, 3) mid Cretaceous and 4) Cretaceous / Paleogene boundary. In the time from Permian to stage 2, grandites were predominant in some places and pyralspites in others, whereas after that pyralspites prevailed everywhere with a few exceptions. Entering to the Late Cretaceous, low P/T type garnets began to increase in the Median Zone of Southwest Japan and the Chichibu Terrane as the result of exhumation of the Ryoke Metamorphic and Granitic Rocks in contrast of its decreasing in the Shimanto Terrane, where Ig<sub>2</sub> garnets increased twofold or more at the beginning of the Paleogene.

The most common detrital garnets are intermediate P/T type (Ia, Ig<sub>1</sub>, Ig<sub>2</sub>), followed by low P/T type, grandite, high P/T type and eclogite type in order of abundance on the whole in Southwest Japan. The former three are considered to have been supplied mainly from Precambrian to Paleozoic metamorphic and granitic rocks in the Asian continent with minor derivations from the Japanese Islands. On the other hand, main source of high P/T type detrital garnets must have been the Sangun Metamorphic Rocks.

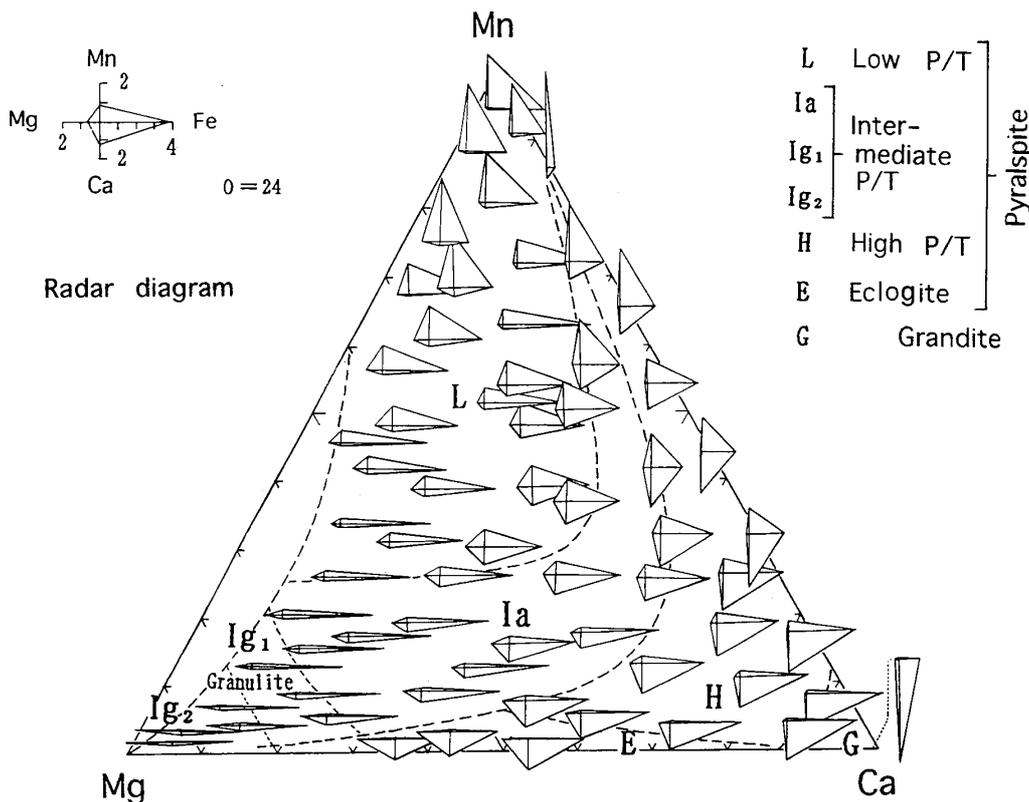
**Keywords:** Asian continent, Southwest Japan, Precambrian, Paleozoic, Mesozoic, Cenozoic, garnet, chemical composition, provenance.

### 要 旨

ザクロ石は低圧型, 中圧型 (Ia, Ig<sub>1</sub>, Ig<sub>2</sub>に細分), 高圧型, エクロジャイト型およびグランダイトとに分けられ, これらはそれぞれ低圧変成岩・花崗岩, 中圧変成岩, 高圧変成岩, エクロジャイトおよび石灰質岩源変成岩に含まれるものである。この分類によると, 西南日本では碎屑性ザクロ石の構成が 1) デボン紀・ペルム紀間, 2) 三疊紀中-後期, 3) 白亜紀中頃および 4) 白亜紀・古第三紀間にかなり著しく変わっている。ただし, これらの変化は必ずしも全域にわたって同じように起こっているわけではない。ペルム系にはグランダイトを主とするグランダイト群集と大部分がその他のタイプからなるパイラルスパイト群集があり, 前者は内帯でラディニアン下部, 秩父帯ではカーニアンまで存続する。デボン系と 2) 後の地層群に含まれるザクロ石は, ごく一部を除くとパイラルスパイト群集に属する。この群集

では多くの場合中圧型が卓越し, 四万十帯においては古第三系になると Ig<sub>2</sub> が急増する。西南日本中軸帯の上部白亜系-第三系にはグランダイトまたは中圧型に富むものもあり, ザクロ石の構成にかなりの地域差はあるが, 概して低圧型が多い。秩父帯でも上部白亜系になると低圧型が増え, 四万十帯では逆に減少している。デボン系以外では高圧型が少なく, エクロジャイト型はまれである。全体としてみると碎屑性ザクロ石としては中圧型が最も多く, 低圧型がこれに次ぐ。これらのなかには日本列島起源のものもあるが, アジア大陸の先カンブリア紀変成岩と古生代以前の花崗岩からのものが主体をなし, グランダイトの場合も日本列島より大陸からの供給のほうが優勢だったと推定される。これに対し高圧型の供給源は三郡変成岩を主とし, 一部は大陸にあったとみなされる。

<sup>1</sup>地球科学情報研究部門(客員研究員)(Institute of Geoscience, GSJ)



第1図 ザクロ石のタイプ分けを示すMn-Mg-Ca図とレーダーダイアグラム。

Fig. 1 Mn-Mg-Ca and radar diagrams showing classification of garnet (slightly modified from Teraoka *et al.*, 1999). Abbreviations L, Ia, Ig<sub>1</sub>, Ig<sub>2</sub>, H, E and G are common in Figs. 1-3, 7, 9, 11-18 and 20-21.

### 1. はじめに

一般に地層を構成する碎屑物は多源的で、様々な岩石や地域からもたらされており、もともと変成岩や一部の火成岩に含まれていたザクロ石の碎屑粒子だけでは後背地の全貌を把握することができない。しかし、ザクロ石粒子の化学組成を検討することによって、これの源岩がどのような種類の岩石であったかを推定することができ、他の資料を加味すれば後背地に関する重要な情報が得られる。したがって日本では碎屑性ザクロ石についての研究が盛んに行われ、これまで多くのデータが蓄積されており、最近竹内 (2000a, b) は中・古生界中のものを総括している。竹内の論文では、ザクロ石をグランダイト、パイロップ≧20%のパイロップ-アルマンディンおよびその他に分け、これら3者の量比がペルム紀末-三畳紀初期、三畳紀後期-ジュラ紀初期および白亜紀中期に大きく変化していることを示し、後背地における地殻変動と関連づけている。

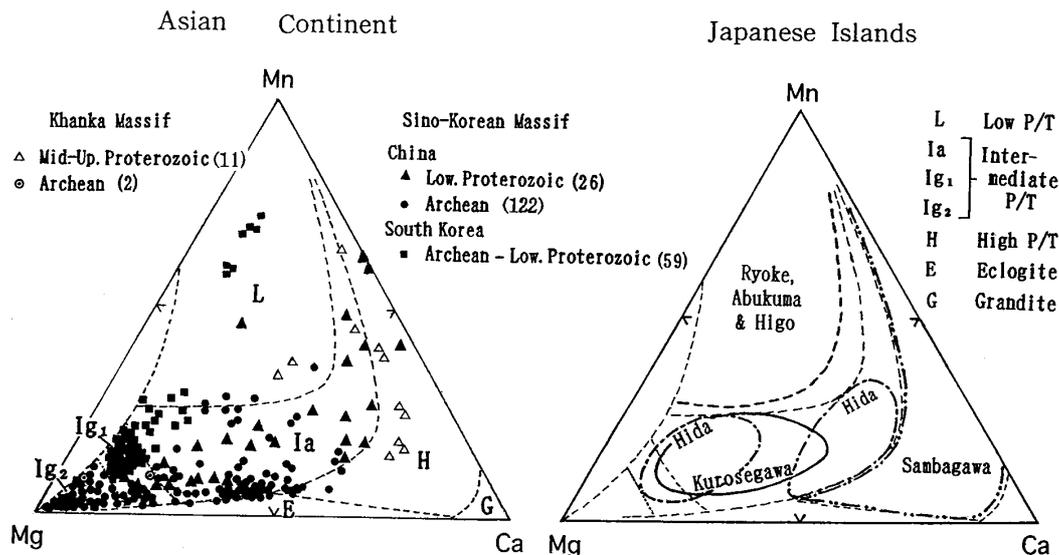
本論文では西南日本の古生代から第三紀中頃にかけての地層群に含まれる碎屑性ザクロ石を対象とし、まず最初に独自のザクロ石分類方式とその有効性について述べ、次いで中国地方西部の内帯や四国・紀伊半島西端部の秩父帯に分布する中・古生界中の碎屑性ザクロ石を記載する。

そしてこれまで報告されている数多くの碎屑性ザクロ石を統一的な基準で分類・整理して、各タイプのものの量比が時代や地域によってどのように変化するかを明らかにし、それぞれの供給源について論述する。

ザクロ石の化学分析は主として広島大学機器分析センターの(故)南朝生技官に、一部は同センターの柴田恭宏技官にしていた。また分析データの処理や図の作成に際しては、広島女学院の川上久美さんの協力を得た。これらの方々に対しここに謝意を表する。

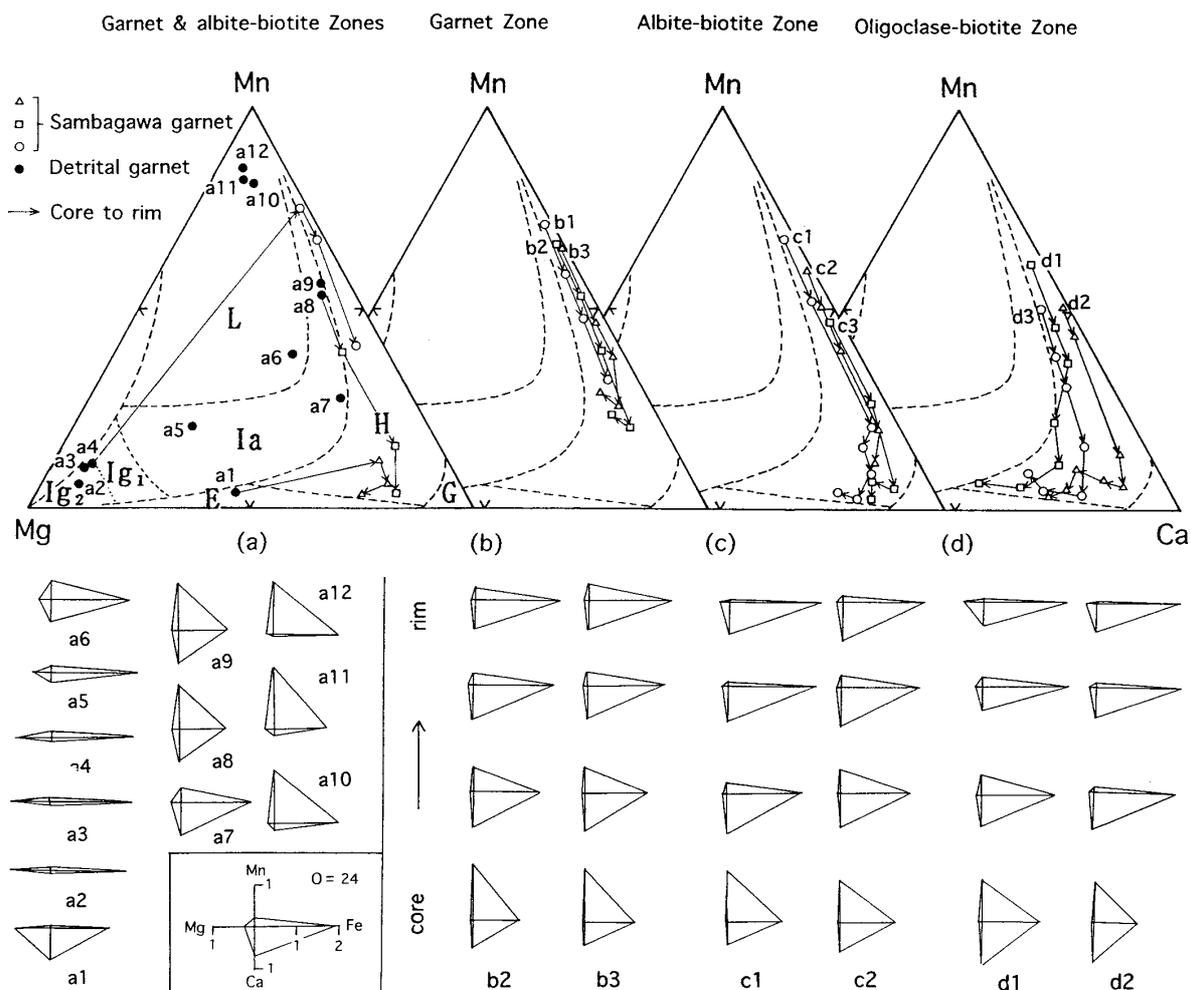
### 2. ザクロ石の分類

ザクロ石は変成岩にごく普通に含まれ、花崗岩類や一部の火山岩にもはいることがある。変成岩の場合はその化学組成が変成条件に支配され、原岩組成によっても違ってくる。したがって碎屑性ザクロ石を記述し、碎屑物の源岩や供給地を論議するに際しては、まず岩石の種類とそれに含まれるザクロ石の化学組成との対応関係に基づき本鉱物を分類しておかなければならない。ザクロ石は  $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mn}, \text{Ca})_3 (\text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ti}, \text{Cr})_2 \text{Si}_3 \text{O}_{12}$  の一般式で表される固溶体であり、その組成は陽イオンまたは固溶体端成分をつかった三角図によって示されるのが普通で



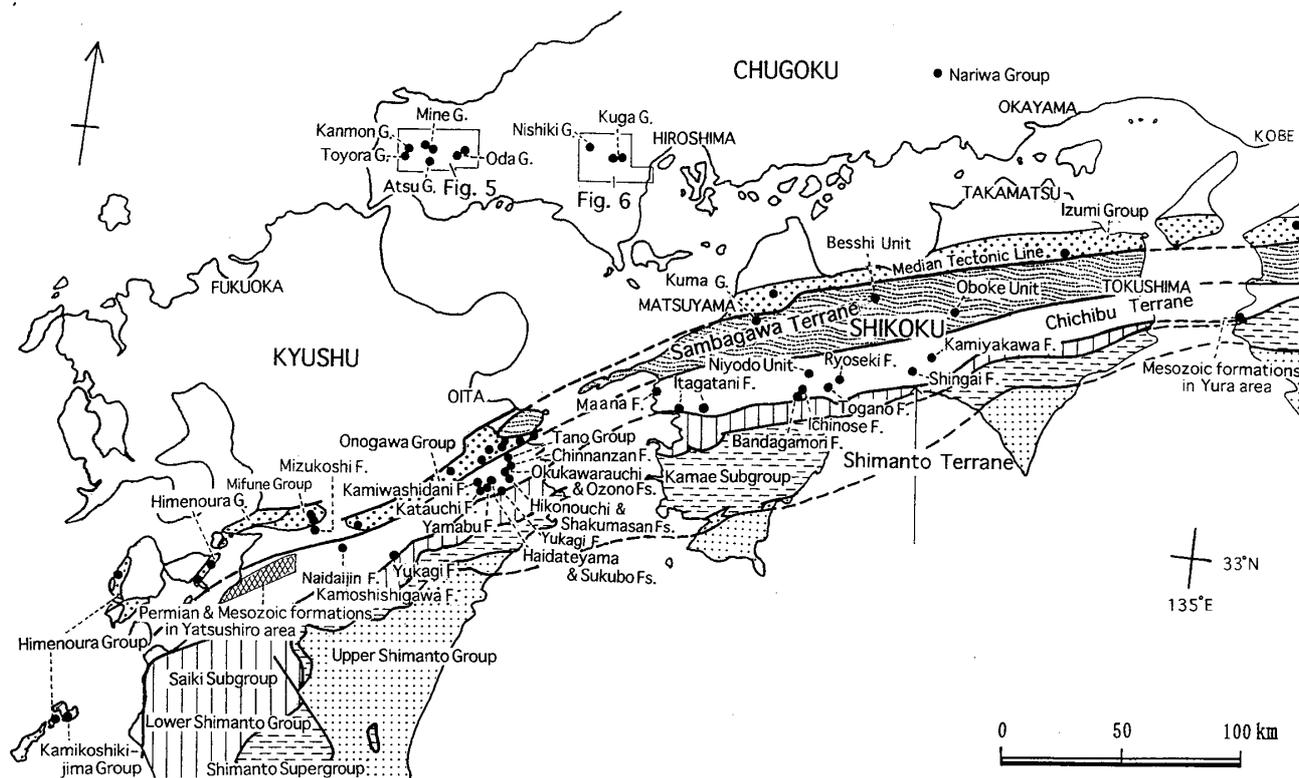
第2図 アジア大陸東部と日本列島の泥質変成岩に含まれるザクロ石。

Fig. 2 Garnets from pelitic metamorphic rocks in the eastern part of the Asian Continent and the Japanese Islands (slightly modified from Teraoka *et al.*, 1998, 1999). Numerals in parentheses indicate number of analysed garnet grains in Figs. 2, 7, 9, 11 and 14-18.



第3図 四国別子地域の三波川変成岩に含まれるザクロ石の累帯構造。

Fig. 3 Compositional zoning of garnets from pelitic schists of the Sambagawa Metamorphic Rocks in the Besshi area, central Shikoku. Sources of data : a. Higashino and Takasu (1982), b-d. Asada (1995).



第4図 碎屑性ザクロ石試料の採取地を示す西南日本西半部の地質概要図。

Fig. 4 Geologic sketch map of the western half of Southwest Japan showing localities of detrital garnet sample (for those in the Shimanto Terrane see Teraoka *et al.*, 1999).

ある。このような図には様々なものがあるが、寺岡ほか(1997)は Mn-Mg-Ca 図を提示し、これと Mn, Mg, Ca および Fe のイオン数を示すリーダーダイアグラムを組み合わせる独自の組成表示法を用いた。そしてその際、種々の変成岩・火成岩中のザクロ石の組成についても検討し、本鉱物のタイプ分けを行って分類図を示した。その後寺岡ほか(1998, 1999)はこの分類図に若干の修正を加え、ザクロ石を低圧型(L)、中圧型(I)、高圧型(H)、エクロジャイト型(E)およびグランダイト(G)とに大別し、中圧型を Ia, Ig<sub>1</sub>, Ig<sub>2</sub> に細分した。本論文でもこの分類にしたがうが、第1図に示す図では従来のものより高圧型の領域を中圧型の側に少し拡げてある。なお、グランダイトはCa-richのザクロ石であり、その他のものはパイラルスパイトとして一括される。

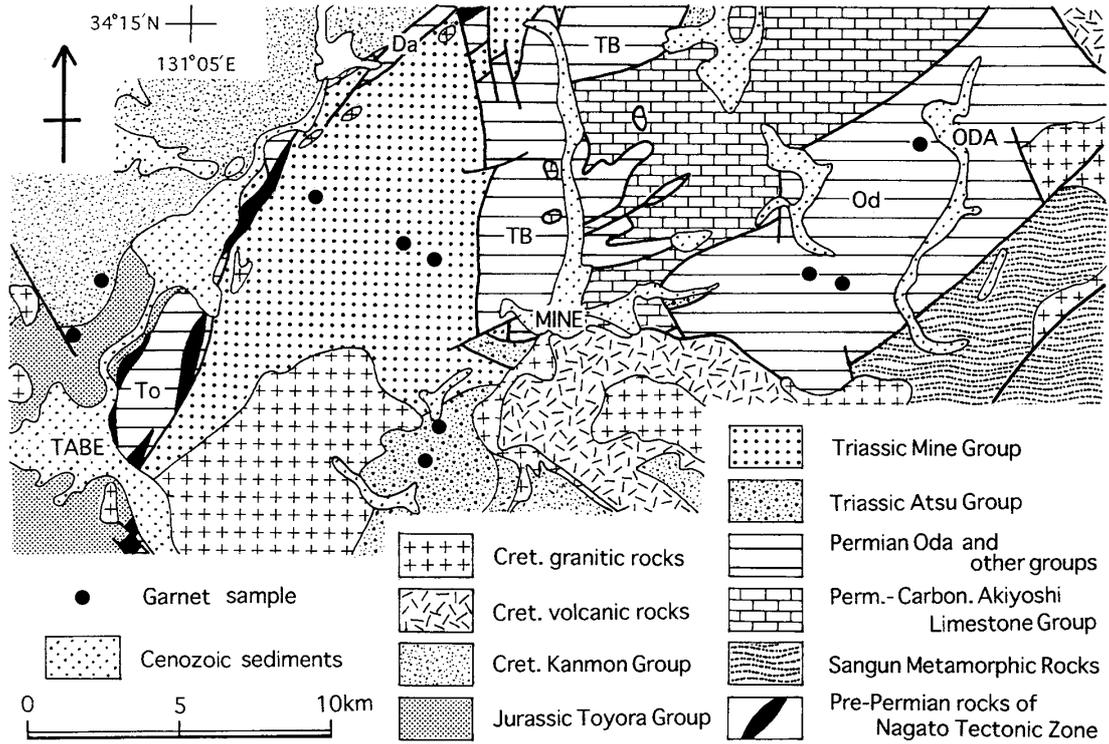
変成岩とザクロ石のタイプとの関係についてみると、記号で L, Ia・Ig<sub>1</sub>・Ig<sub>2</sub>, H, E および G としたものは、低圧変成岩、中圧変成岩(Iaは角閃岩相以下、Ig<sub>1</sub>とIg<sub>2</sub>はグラニュライト相)、高圧変成岩、エクロジャイトおよび石灰質岩源変成岩(ロジンジャイトも含む)にそれぞれ対応する。これらの変成岩のうち前者3者は泥質岩源のものである。Ig<sub>1</sub>とIg<sub>2</sub>の境界値は  $Mg / (Mn+Mg+Ca) = 0.8$  であり、このような細分を行った理由は、Ig<sub>2</sub>のザクロ石がアジア大陸の先カンブリア紀変成岩によく含まれているのに対し、日

本列島の変成岩からはほとんど見いだされていないためである(第2図)。以下では Ig<sub>1</sub>とIg<sub>2</sub>の両方をさす場合には Ig<sub>1,2</sub> とする。花崗岩類を主とする酸性火成岩のザクロ石は低圧型、一部中圧型にはいる。

変成岩中のザクロ石は累帯構造をもつのが普通であるが、それを Mn-Mg-Ca 図とリーダーダイアグラムをつかって示すとどのようになるかを、三波川変成岩別子ユニットの場合を例として述べる。第3図の(a)は碎屑性ザクロ石をコアとし、三波川変成作用の過程で成長した粒子の組成変化(Higashino and Takasu, 1982)を示したものである。この図からみるとコアとしては低圧型、中圧型(Ia, Ig<sub>2</sub>)およびエクロジャイト型のものがはいつているのに対し、それを取り巻く部分は三波川変成作用によって形成された高圧型ザクロ石であり、両者間には明瞭な組成の不連続が認められる。一方、(b)-(d)は三波川変成作用によって形成された高圧型ザクロ石の組成変化をAsada(1995)の分析データをもとに示したもので、コアからリムに向かい、また変成度の上昇にともない Mn が減少し、Ca や Fe, そして Mg が増えていく傾向がよく分かる。

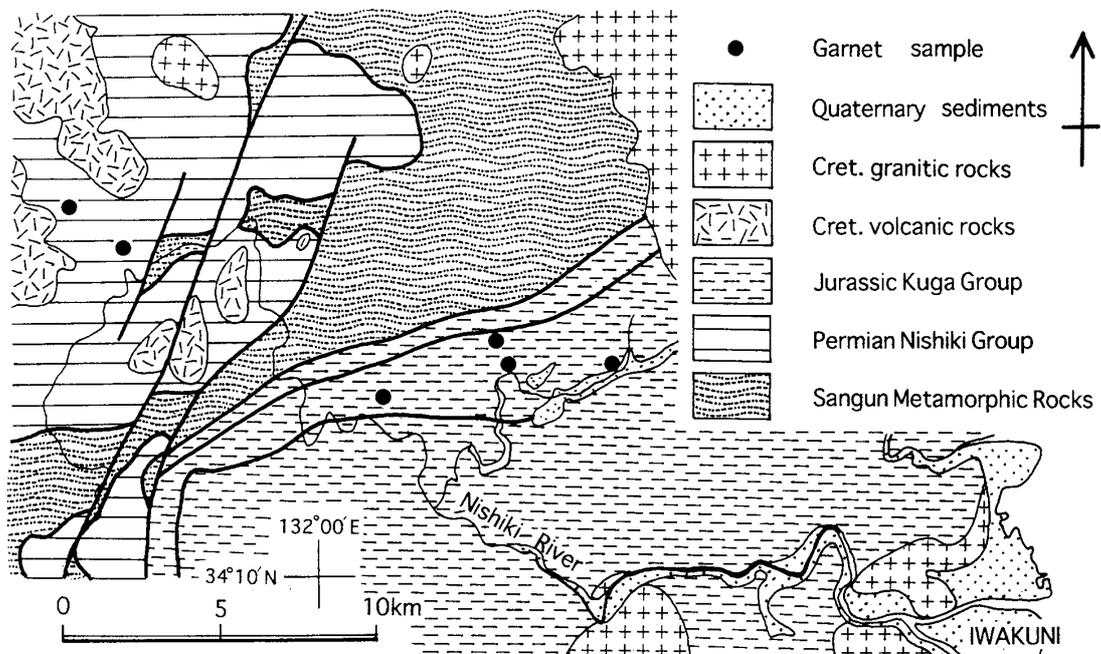
### 3. 中・古生界中の碎屑性ザクロ石

西南日本においては地域によって碎屑性ザクロ石に関



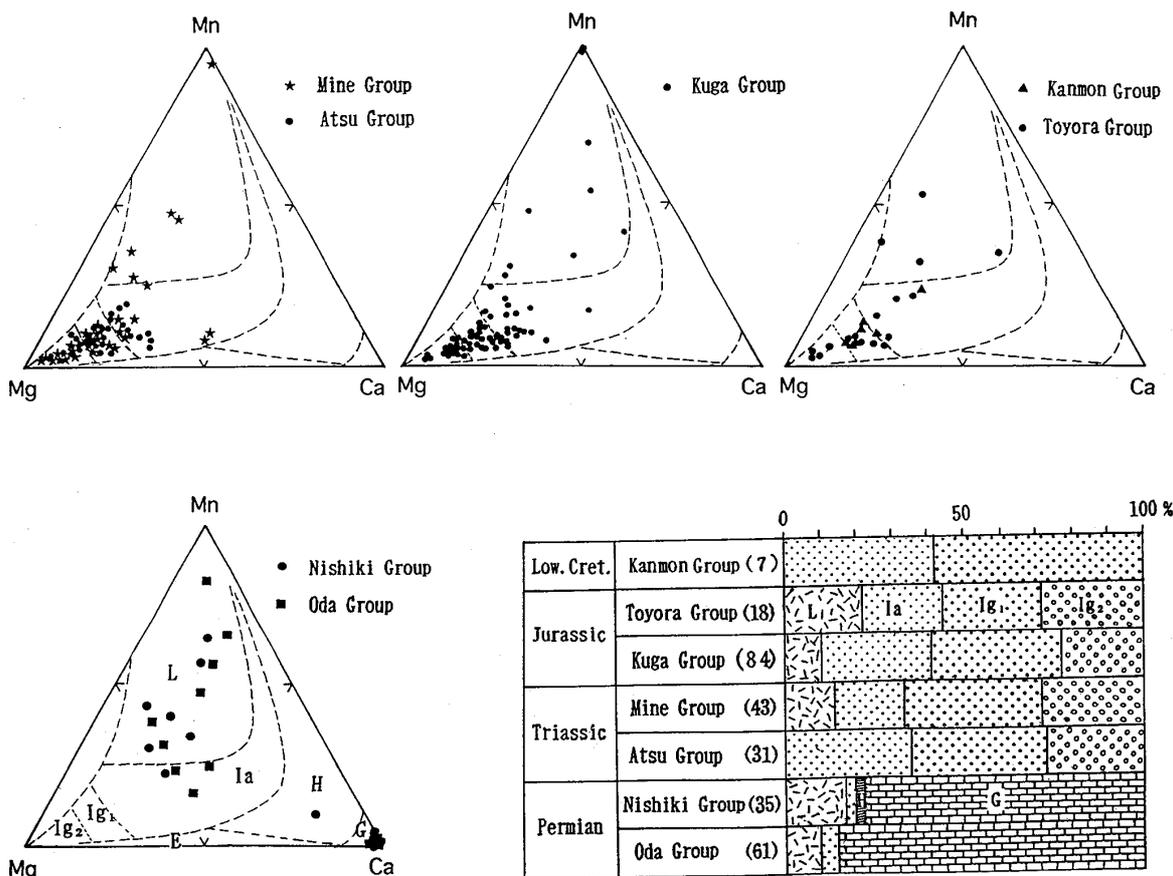
第 5 図 美祢およびその周辺地域の地質図.

Fig. 5 Geologic map of the Mine and adjoining areas, west Chugoku (simplified from Nishimura *et al.*,1995). Od : Oda Group, TB : Tsunemori and Beppu Groups, Da : Dai Group, To : Toyohigashi Group.



第 6 図 岩国-錦地域の地質図.

Fig. 6 Geologic map of the Iwakuni-Nishiki area, west Chugoku (simplified from Nishimura *et al.*,1995).



第7図 中国地方西部のペルム系と中生界に含まれる碎屑性ザクロ石。  
Fig. 7 Detrital garnets from Permian and Mesozoic sandstones in west Chugoku.

する情報量がかなり異なり、中国地方西部の内帯や四国以東の秩父帯の場合は比較的少ない。そこで以下ではこれらの地域の中・古生界から得られた碎屑性ザクロ石について記述する(第4図)。中国地方西部や四国のものについてはデータの一部を寺岡ほか(1998, 1999)で公表している。

### 3.1 中国地方西部の西南日本内帯

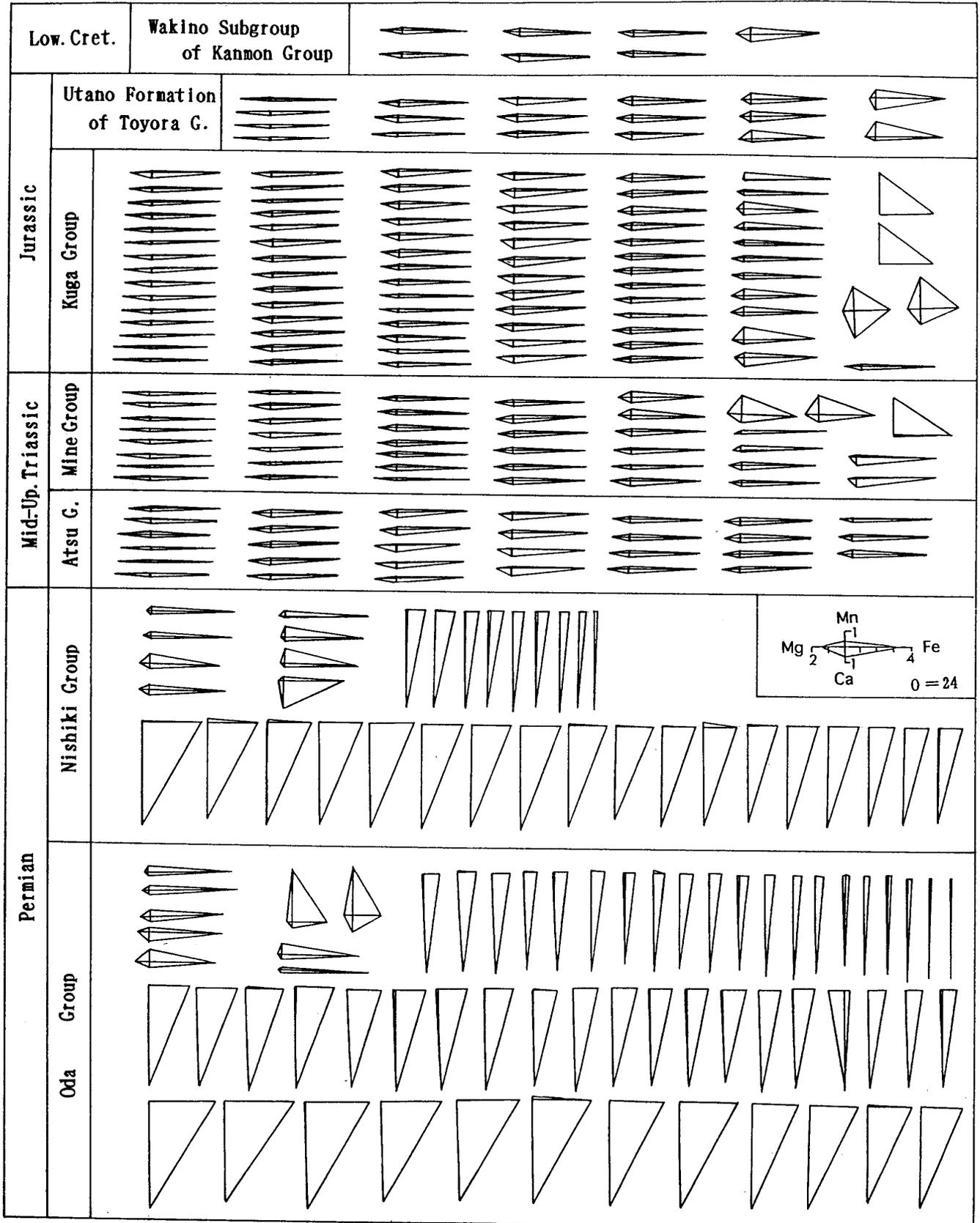
試料は美祢付近のペルム系大田層群、中-上部三畳系厚保層群、上部三畳系美祢層群、下-中部ジュラ系豊浦層群の上部および下部白亜系関門層群脇野垂層群、岩国-錦地域のペルム系錦層群およびジュラ系玖珂層群から採取した(第5, 6図)。分析したザクロ石の粒子数は第7図に示す。なお、各粒子とも分析点の一つだけである(以下同様)。上記地層群のうち厚保・豊浦両層群は浅海成層、美祢層群は浅海-非海成層、脇野垂層群は非海成層、他の3層群は付加体である。

第7, 8図に示すように、ペルム系中のザクロ石にはグランダイトが圧倒的に多く、錦層群では全体の77%、大田層群では85%に達する。パイラスピイトとしては低圧型と若干の中圧型 Ia が含まれ、高圧型はごく少ない。これに対

し厚保層群では中圧型以外のものは認められず、Ia と Ig<sub>1</sub> がほぼ同程度、Ig<sub>2</sub> も26%ちかくはいっている。厚保層群の南側にはこれに対比される非海成の津布田層群が分布しているが、本層群の基底部では砂岩やスカム岩塊のなかにグランダイトがはいっている(渋谷・小松, 1986)。中圧型ザクロ石は上部三畳系やジュラ系でも卓越する。美祢層群においては Ig<sub>1-2</sub> が全体の65%を占め、Ia が減って低圧型がでてくる。亀高(1999)のデータによれば本層群中にはごくわずかながら高圧型やグランダイトも認められる。ジュラ系の浅海成豊浦層群になると低圧型と Ia が増えてそれぞれ20%以上になり、Ig<sub>1-2</sub> の比率が下がる。これに比べ付加体の玖珂層群では低圧型が10%内外と少なく、Ig<sub>2</sub> も減って Ia と Ig<sub>1</sub> が多くなっている。脇野垂層群の場合はザクロ石に乏しく、中圧型の Ia と Ig<sub>1</sub> の存在が認められたにすぎない。

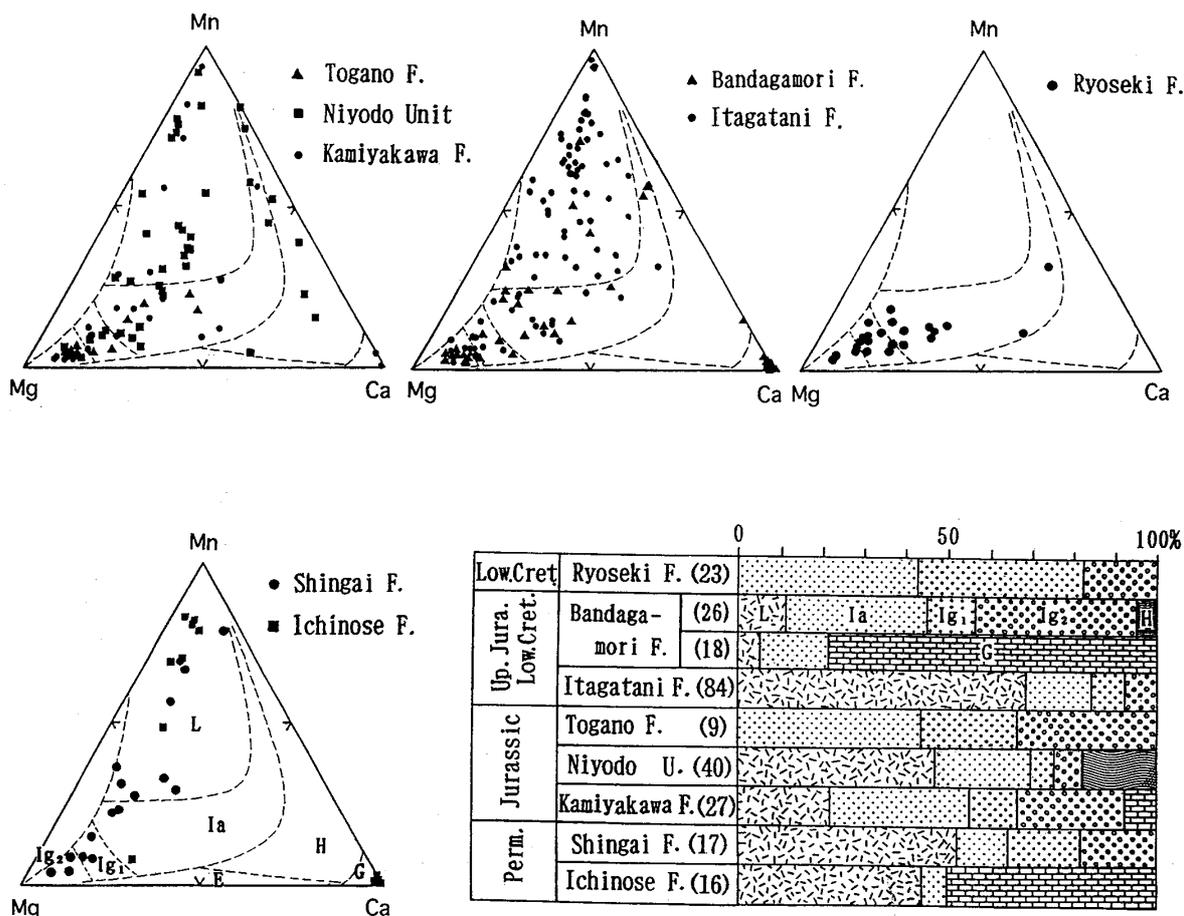
### 3.2 四国の秩父帯

第4図に試料産地、第9図に分析した粒子の数を地層別に示す。ペルム系の市ノ瀬・新改両層と下部白亜系領石層は黒瀬川帯、ジュラ系の上八川層と仁淀ユニットは北帯、ジュラ系斗賀野層は南帯、上部ジュラ系-下部白亜系



第8図 中国地方西部のペルム系と中生界に含まれる碎屑性ザクロ石のレーダーダイアグラム。

Fig. 8 Radar diagrams for detrital garnets from Permian and Mesozoic sandstones in west Chugoku.



第9図 四国の秩父帯のペルム系と中生界に含まれる碎屑性ザクロ石。

Fig. 9 Detrital garnets from Permian and Mesozoic sandstones of the Chichibu Terrane in Shikoku.

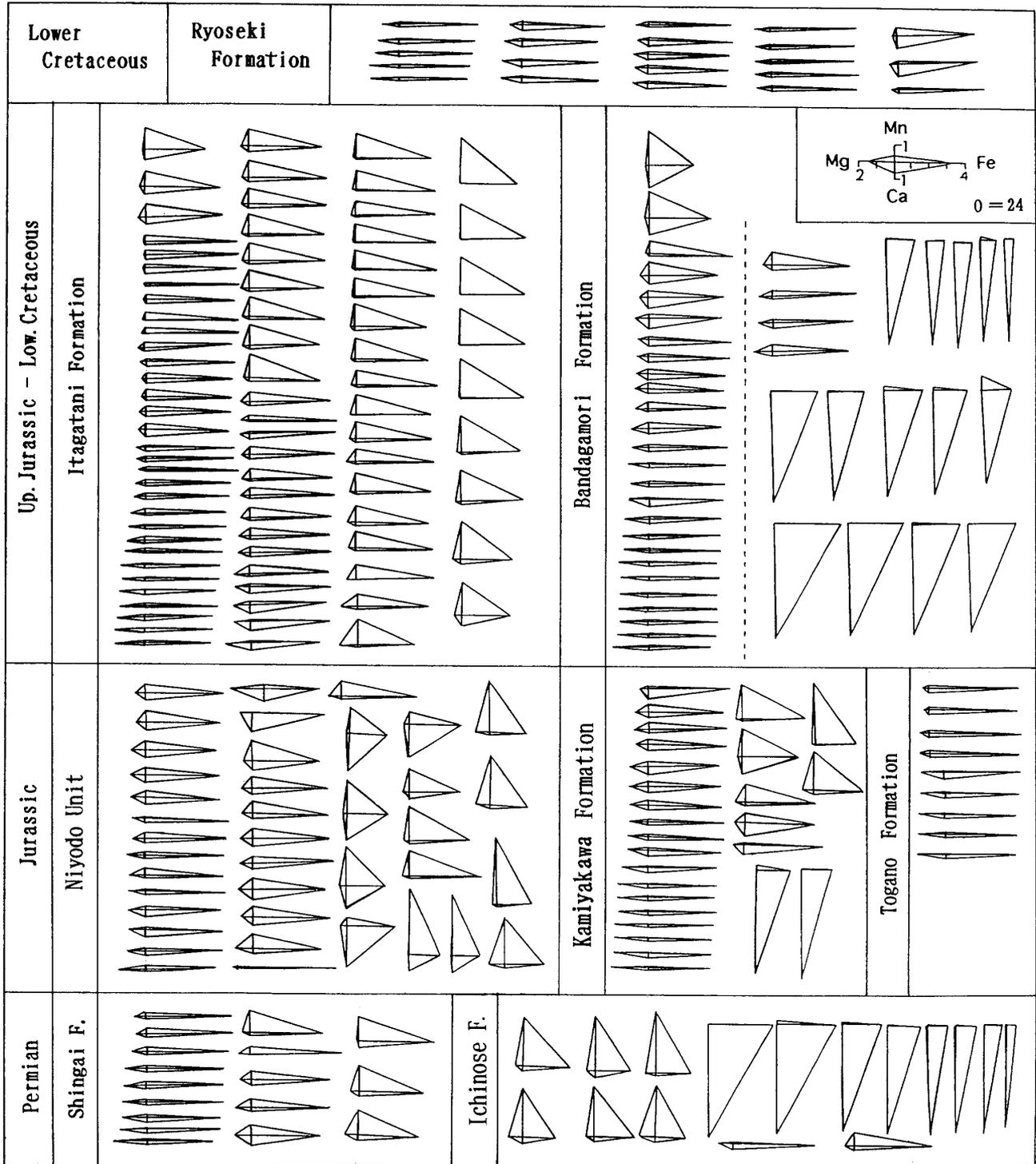
の板ヶ谷・ばん蛇ヶ森両層は三宝山帯にそれぞれ分布し、領石層は陸棚相、その他はすべて付加体である。

ザクロ石各タイプの組み合わせや量的関係をみると、地層によって、また同一層内でもかなりの違いがみられる(第9, 10図)。ただし、市ノ瀬・新改・斗賀野の3層の場合は分析粒子数が少ないので、各タイプの量比の実態が的確に図示されているとはいえない。上記の図でみる限りペルム系の市ノ瀬層ではグランダイトとパイラルスパイトがほぼ同程度認められ、後者の大部分が低圧型である。Miyamoto and Kuwazuru (1993)によれば、本層からのザクロ石45個の95%がグランダイトで、その他のものは低圧型と中圧型にはいる。このデータを盛り込むと市ノ瀬層ではグランダイトが全体の84%を占め、低圧型13%、中圧型3%ということになる。これに対し新改層では低圧型と中圧型がほぼ半々で、中圧型のなかではIa, Ig<sub>1</sub>, Ig<sub>2</sub>の順に多くなっている。竹内(1996, 1998)によれば新改層中には2種類の砂岩があり、一方のザクロ石はグランダイトを主とし、他方のものはほとんどがパイラルスパイト(主にアルマンディン)である。後者は高圧型にはいるものをかなり含んでおり、竹内と筆者のデータを総合すると、この種の砂岩では低圧型

と中圧型がともに42%、残りの16%が高圧型ということになる。

ジュラ系のザクロ石についてみると、上八川層では中圧型を主とし、低圧型とグランダイトを伴っており、IaやIg<sub>2</sub>の比率が高い。仁淀ユニットにおいては低圧型が最も多く、中圧型がこれに次ぎ、高圧型も20%ちかくはいつている。分析数の少ない斗賀野層の場合は中圧型だけが認められ、Ig<sub>2</sub>の割合が大きい。三宝山帯の上部ジュラ系-下部白亜系のうち、板ヶ谷層においては低圧型が異常に多く、ザクロ石全体の70%ちかくを占めており、その他のものは中圧型にはいる。一方、ばん蛇ヶ森層では試料によってザクロ石の構成が異なり、グランダイトを主とするものとパイラルスパイトからなるものがある。後者では中圧型が卓越し、少量の低圧型と高圧型を伴っている。領石層からのザクロ石はすべて中圧型であり、そのなかではIaとIg<sub>1</sub>の比率が高く、Ig<sub>2</sub>は20%以下である。

八幡浜南方の秩父帯には陸棚相の下部白亜系真穴層が分布している(鹿島, 1992)。武田(1995)はこの地層からのザクロ石165個の分析値を図示しているが、それからみると中圧型が圧倒的に多く、低圧型は約10%、その他



第10図 四国の秩父帯のペルム系と中生界に含まれる碎屑性ザクロ石のレーダーダイアグラム。

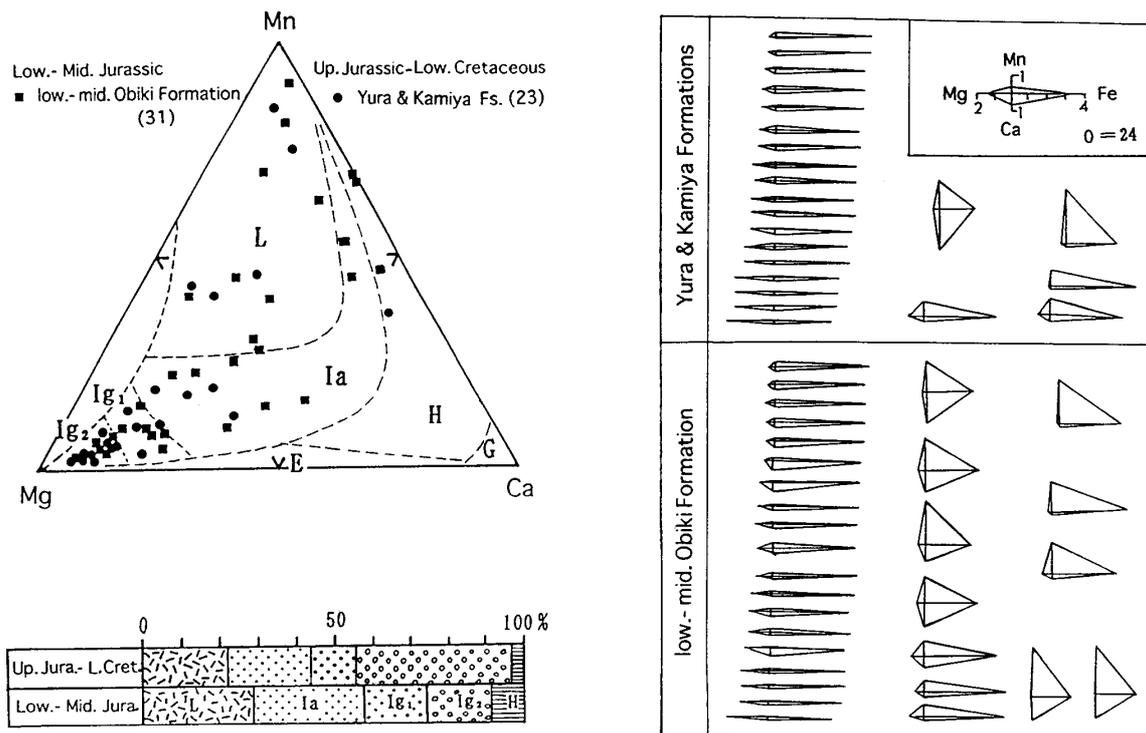
Fig. 10 Radar diagrams for detrital garnets from Permian and Mesozoic sandstones of the Chichibu Terrane in Shikoku.

としてはごく少量の高圧型とグランダイトが含まれている。このような量的関係は九州東部の秩父帯に分布する陸棚相下部白亜系の場合(寺岡ほか, 1997)とよく似ている。

付加体中のザクロ石には中圧型が最も多く、低圧型がこれに次ぎ、少量の高圧型を伴っている(第11図)。層序的には上位に向かって中圧型、とくに  $Ig_2$  が増加して低圧型や高圧型が減る。高圧型のもは比較的Mnに富む。

### 3.3 紀伊半島西端部の秩父帯

由良地域の秩父帯に分布する ジュラ紀-白亜紀前期の



第11図 紀伊半島由良地域の秩父帯中生界に含まれる碎屑性ザクロ石。

Fig. 11 Detrital garnets from Mesozoic sandstones of the Chichibu Terrane in the Yura area, Kii Peninsula.

#### 4. ザクロ石組成図

西南日本の古生界-第三系中の碎屑性ザクロ石についてはこれまで各地で研究され、数多くの報告がなされている。これらの大部分ではザクロ石の組成をFeとMn, Mg, Caを組み合わせた三角図や固溶体端成分をつかった三角図で示してある。これに対しMn-Mg-Ca図で組成表示がなされているのは、寺岡ほか(1997, 1998, 1999)、新井ほか(2000)、別所(2000)、宮本ほか(2002)だけである。したがって、西南日本の碎屑性ザクロ石の総括を行うためには既存の豊富なデータを検討し、できるだけ統一的な分類方式でザクロ石のタイプ分けをしなければならない。問題は分類の仕方であるが、基本的には第1図に示すような方式で行うことにする。

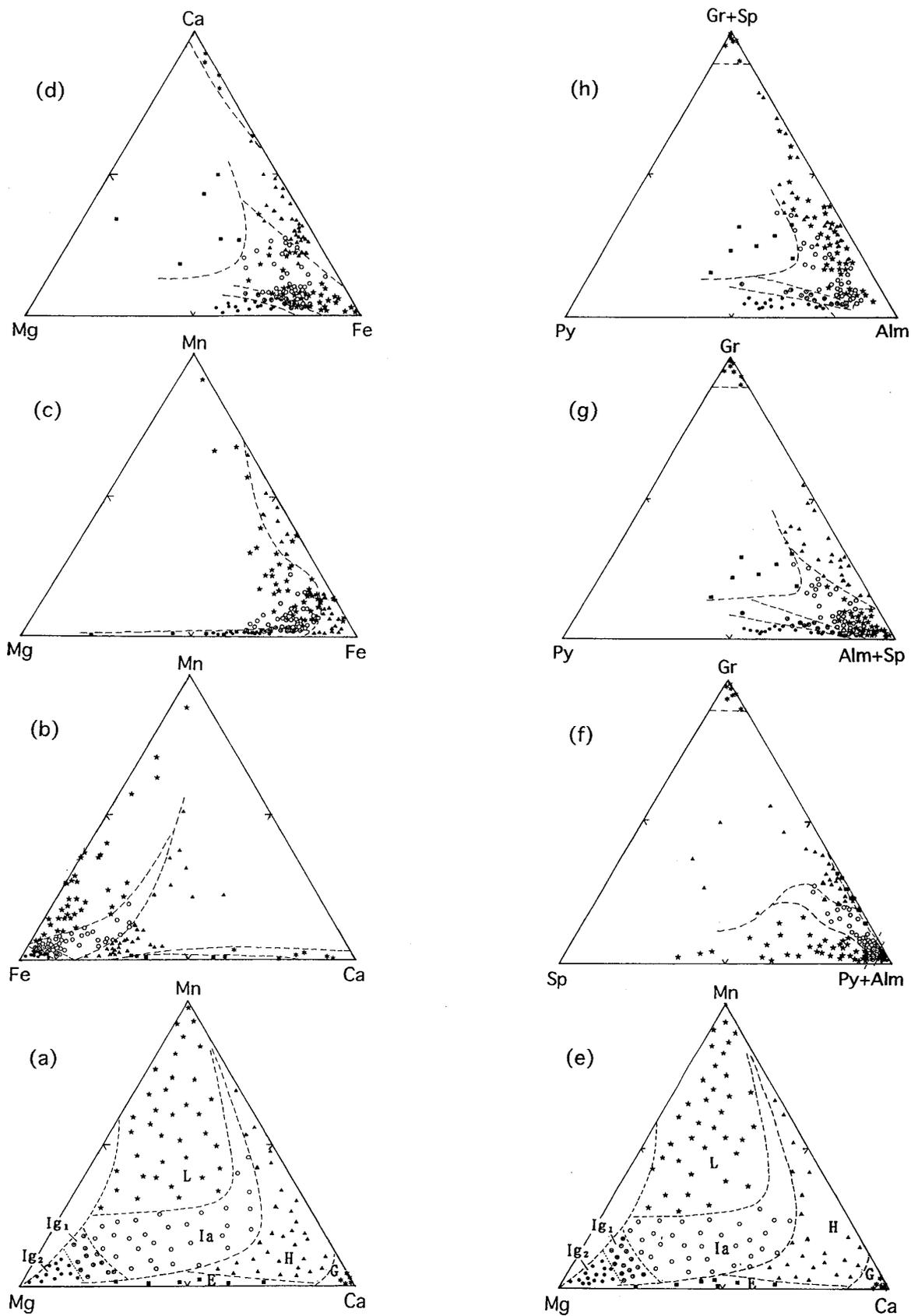
そこでまず低圧型、中圧型など各タイプのザクロ石が従来多用されている組成図ではどのような領域にプロットされるかを明らかにするため、第12図のような対照図をいくつも作成した。本図の(a)-(d)と(e)-(h)では異なる分析値を使用しており、その数はそれぞれ136個で、各タイプのマークは全図共通である。これらの図をみると、(b)や(f)のように各タイプの領域分けが比較的うまくいく場合もあるが、図によっては領域がごく狭かったり、重複したりする。したがってMn-Mg-Ca図以外でタイプ分けを行うには、種類を異にする複数の三角図を併用しなければならない。この点幸いなことに公表されたザクロ石の分析データは2種

類の三角図で示してあるのが普通なので、それらの図から各タイプのおよその量比を算出することができる。ただし、論文によっては分析値が多くて図中のプロットが重なり、その読み取りが困難なこともある。また、未公表データを盛り込み、本論とは異なる方式でザクロ石を分類してそれぞれの量比を図示した論文もある。このような場合には竹内(2000a, b)を参照し、ザクロ石を3分する方式をとり入れた。第12図の(g)や(h)から分かるように、パイロープ≧20%のザクロ石にはエクロジャイト型や中圧型のIg<sub>2</sub>、それにIg<sub>1</sub>のかなりのものがある。

#### 5. 碎屑性ザクロ石の時期的変化

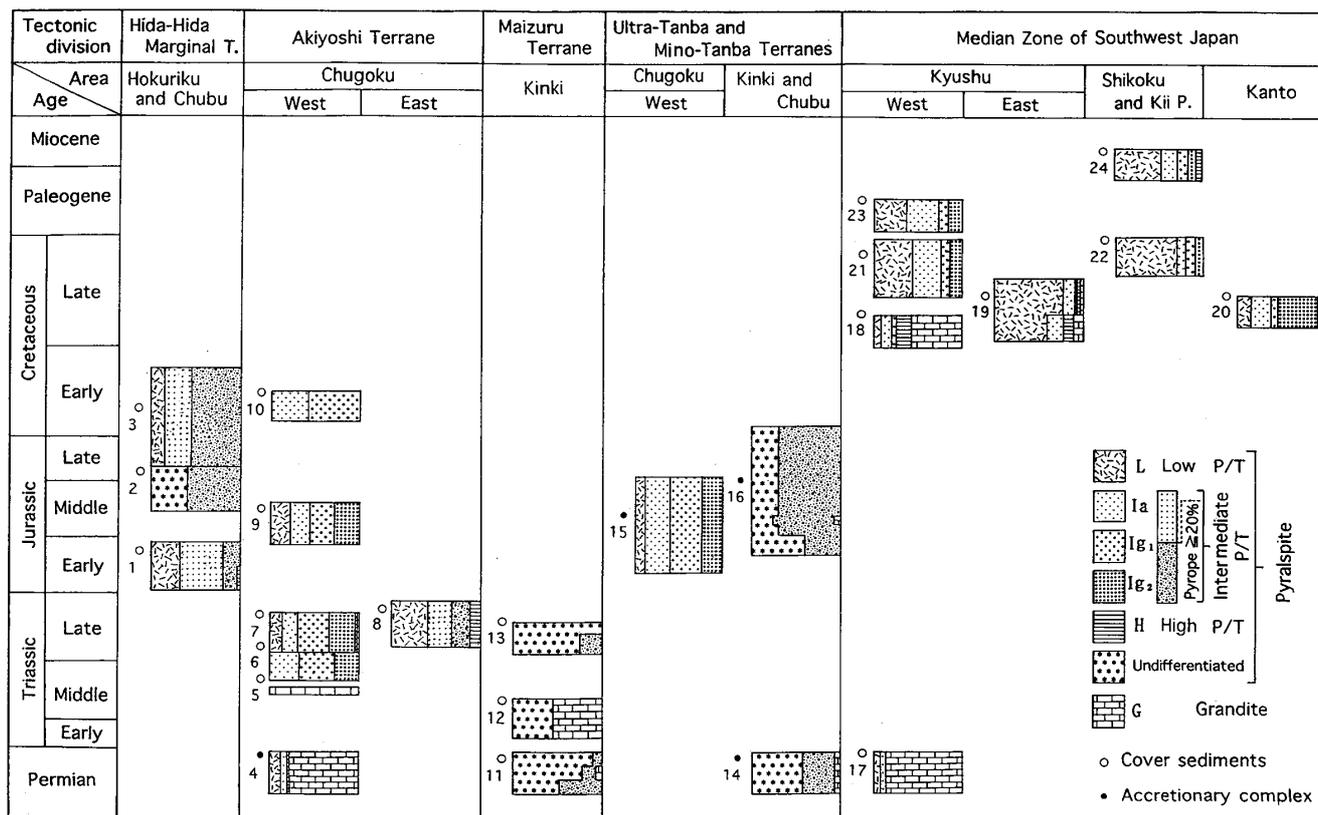
上記の方法によって西南日本各地からの碎屑性ザクロ石を分類しなおし、地域や時代ごとに整理して各タイプの量比をだしてみると第13図のようになる。地層によっては中圧型の3分ができなかったり、またパイラルスパイトの分別が困難な場合もあるので、本図では中圧型をパイロープ成分20%以上とそれ未満のものに2分したり、未区分パイラルスパイトという凡例もつくってある。エクロジャイト型はごく少ないので省略した。

これまで報告された最古の碎屑性ザクロ石は、九州の秩父帯に分布するデボン系内大臣層のものである(宮本ほか, 2002)。これにはエクロジャイト型が11%ちかくもあり、高



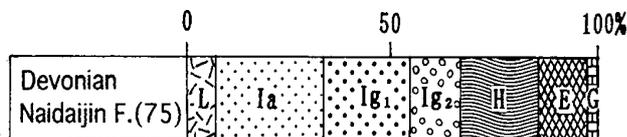
第12図 ザクロ石の組成を示すMn-Mg-Ca図と他の三角図との対応関係.

Fig. 12 Contrast of Mn-Mg-Ca diagrams with other ternary diagrams for chemical compositions of garnet. Py : pyrope, Alm : almandine, Sp : spessartine, Gr : grandite.



第13図 西南日本における碎屑性ザクロ石の時空的变化。

Stratigraphic unit (sources of data) : 1. Kuruma Group (Kumazaki and Kojima, 1996), 2. Kuzuryu Subgroup of Tetori Group (Adachi, 1985a, b; Takeuchi, 2000a), 3. Itoshiro and Akaiwa Subgroups of Tetori Group (Obayashi, 1995), 4. Oda and Nishiki Groups (Teraoka *et al.*, 1998), 5. Basal part of Tsubuta Group (Shibuya and Komatsu, 1986), 6. Atsu Group (Teraoka *et al.*, 1998), 7. Mine Group (Teraoka *et al.*, 1998; Kametaka, 1999), 8. Nariwa Group (Kametaka, 1997), 9. Upper part of Toyora Group (Teraoka, this paper), 10. Wakino Subgroup of Kanmon Group (Teraoka, this paper), 11. Maizuru Group (Torikai, 1990; Hasegawa and Adachi, 1997; Takeuchi, 2000a), 12. Shidaka Group (Adachi, 1991; Hasegawa and Adachi, 1997; Takeuchi, 2000a), 13. Nabae Group (Kawai *et al.*, 1997; Takeuchi, 2000a), 14. Permian formation of Ultra-Tanba Terrane (Musashino and Kasahara, 1986), 15. Kuga Group (Teraoka, this paper), 16. Jurassic formations of Mino-Tanba Terrane (Suzuki, 1977; Adachi and Kojima, 1983; Adachi, 1985a; Musashino and Kasahara, 1986; Tanaka and Adachi, 1999; Takeuchi, 2000a), 17. Mizukoshi Formation (Miyamoto and Kuwazuru, 1993), 18. Mifune Group (Teraoka *et al.*, 1998), 19. Onogawa Group (Teraoka *et al.*, 1997, 1998), 20. Atokura Formation (Arai *et al.*, 2000), 21. Himenoura Group (Teraoka *et al.*, 1998), 22. Izumi Group (Teraoka *et al.*, 1998), 23. Kamikoshikijima Group (Teraoka *et al.*, 1998), 24. Kuma Group (Teraoka *et al.*, 1998), 25. Miyama and Kamoshishigawa Formations (Miyamoto *et al.*, 1992), 26. Kuma and Kozaki Formations (Miyamoto *et al.*, 1992; Miyamoto and Kuwazuru, 1993, 1994; Miyamoto, 1998), 27. Kamiwashidani Formation (Teraoka *et al.*, 1997), 28. Ichinose Formation (Miyamoto and Kuwazuru, 1993; Teraoka, this paper), 29. Shingai Formation (Takeuchi, 1996, 1998);



第14図 九州秩父帯のデボン系に含まれる碎屑性ザクロ石。

Fig. 14 Detrital garnets from Devonian sandstones of the Chichibu Terrane in Kyushu. Source of data : Miyamoto *et al.* (2002).

圧型は約20%で、残りの大部分は中圧型で占められ、少量ながら低圧型やグラウンダイトもある(第14図)。中圧型の中なかでは Ia が最も多く、Ig<sub>1</sub> がこれに次ぎ、Ig<sub>2</sub> もみられる。

ペルム系ではグラウンダイトを主とするグラウンダイト群集と大部分がパイラルスパイトからなるパイラルスパイト群集が認められる。グラウンダイト群集は秋吉帯の大田層群と錦層

群、肥後帯(西南日本中軸帯)の水越層、秩父帯の球磨・小崎・市ノ瀬・新改の諸層にふくまれ、新改層ではパイラルスパイト群集と共存している(宮本ほか, 1992; Miyamoto and Kuwazuru, 1993, 1994; 宮本, 1997, 1998; 竹内, 1998, 2000a, b; 寺岡ほか, 1998)。なお、宮本ほか(2002)によれば秋吉帯東部の帝釈地域や新見地域のペルム系ではグラウンダイトとパイラルスパイトがほぼ同程度はいつている。一方、パイラルスパイト群集を含むのは舞鶴帯や超丹波帯のペルム系、秩父帯の深山・鴨猪川・上鷲谷・新改の諸層である(武蔵野・笠原, 1986; 鳥飼, 1990; 宮本ほか, 1992; 竹内, 1996, 1998, 2000a, b; 長谷川・足立, 1997; 宮本, 1997; 寺岡ほか, 1997; 寺岡, 本論文)。なお、球磨・小崎・水越の3層と舞鶴帯の地層は陸棚相、その他の

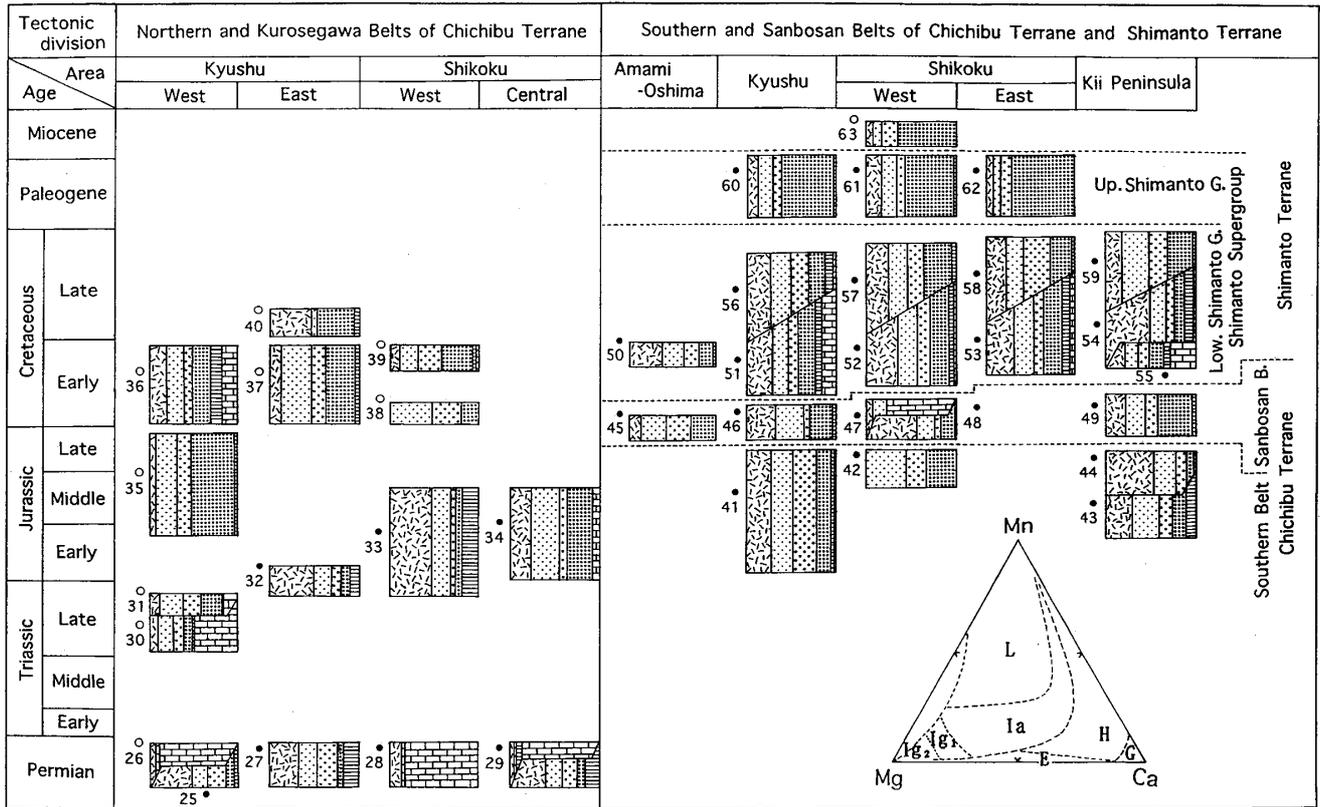


Fig.13 Time/space variation of detrital garnets in Southwest Japan.

Teraoka, this paper), 30. Tanoura and Takagochi Formations (Miyamoto and Kuwazuru, 1993, 1994 ; Miyamoto, 1998), 31. *Monotis* Bed (Miyamoto and Kuwazuru, 1993, 1994 ; Miyamoto, 1998), 32. Katauchi Formation (Teraoka *et al.*, 1997), 33. Niyodo Unit (Teraoka, this paper), 34. Kamiyakawa Formation (Teraoka, this paper), 35. Sakamoto Formation and others (Miyamoto and Kuwazuru, 1993, 1994 ; Miyamoto, 1998), 36. Mitsumineyama and Sotoizumi Groups (Miyamoto and Kuwazuru, 1993 ; Miyamoto, 1998 ; Miyamoto *et al.*, 2000), 37. Yamabu, Haidateyama and Sukubo Formations (Teraoka, *et al.*, 1997), 38. Ryoseki Formation (Teraoka, this paper), 39. Maana Formation (Takeda, 1995), 40. Tano Group (Teraoka *et al.*, 1997), 41. Chinnanzan, Okukawauchi, Ozono, Hikonouchi and Shakumasan Formations (Teraoka *et al.*, 1997), 42. Togano Formation (Teraoka, this paper), 43. Obiki Formation (Teraoka, this paper), 44. Jurassic formation in Takaharagawa area (Takeuchi, 1986), 45. Yuwan Complex (Takeuchi, 1992), 46. Yukagi Formation (Teraoka, this paper), 47. Bandagamori Formation (Teraoka, this paper), 48. Itagatani and Bandagamori Formations (Teraoka *et al.*, 1999 ; Teraoka, this paper), 49. Yura and Kamiya Formations (Teraoka, this paper), 50. Shinkogachi Unit of Saiki Subgroup (Takeuchi, 1992), 51-53. Saiki Subgroup (Teraoka *et al.*, 1999), 54. Yukawa and Terasoma Formations of Saiki Subgroup (Bessho, 2000), 55. Obadani Formation of Saiki Subgroup (Takeuchi, 1986), 56-58. Kamae Subgroup (Teraoka *et al.*, 1999), 59. Miyama and Ryujin Formations of Kamae Subgroup (Bessho, 2000), 60-62. Upper Shimanto Group (Teraoka *et al.*, 1999), 63. Misaki Formation (Teraoka *et al.*, 1999).

ものは付加体である。内帯のパイラルスパイト群集にはグランダイトがはいっているのに対し、秩父帯のものではそれを欠き、高圧型ザクロ石がかなり含まれている。上鷲谷層や新改層では後者の比率が16%内外に達する。また、秩父帯では比較的低压型の比率が高い。

グランダイト群集は三疊紀にはいっても存続し、内帯では舞鶴帯の浅海-非海成志高層群、秋吉帯の津布田層群基底で認められ(渋谷・小松, 1986 ; 足立, 1991 ; 長谷川・足立, 1997), それより上位の中-上部三疊系ではパイラルスパイト群集になる(川井ほか, 1997 ; 亀高, 1997, 1999 ; 寺岡ほか, 1998)。したがって、ザクロ石群集の転換は三疊紀中期のラディニアン時代に起こったことになる。一方、外帯では九州の秩父帯でみ限り、グランダイト

群集からパイラルスパイト群集への移行は三疊紀後期中頃であり、ノリアンの*Monotis*層になると、 $Ig_2$ に富む中圧型ザクロ石が卓越し、グランダイトは15%以下になる(Miyamoto and Kuwazuru, 1993, 1994 ; 宮本, 1997, 1998)。Takeuchi (1994)によれば、東北日本の南部北上帯では上記の転換が三疊・ジュラ両紀間に認められる。津布田層群の場合を除くと、三疊系中のグランダイト群集ではペルム系におけるよりも概してグランダイトの割合が小さい。内帯の浅海-非海成上部三疊系のうち秋吉帯西部の美祿層群では低压型が少なく、下位の厚保層群の場合と同様に中圧型の  $Ig_{1-2}$  がザクロ石全体の約3分の2を占めている。これに対し東部の成羽層群では、亀高 (1997) のデータによると、層序的な違いはあるが層群全体としては

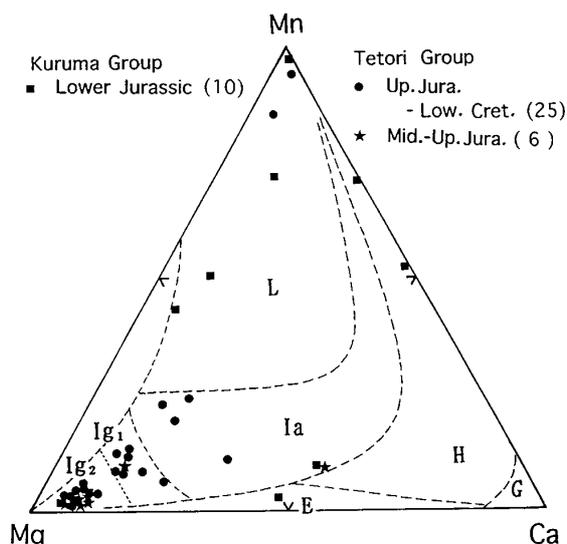
低圧型が40%ちかくを占め、高圧型も10%を超える。パイロープ $\geq 20\%$ のものは22%含まれているだけであり、中圧型の量を考えあわせると同型のなかではIaの比率が最も高いといえる。舞鶴帯の難波江層群はパイロープ $\geq 20\%$ のザクロ石量やグランダイトを欠く点で成羽層群と似ている。

飛騨-飛騨外縁帯には浅海-非海成の下部ジュラ系来馬層群と中部ジュラ系-下部白亜系手取層群が分布し、前者の碎屑性ザクロ石については熊崎・小嶋 (1996)、後者のそれは足立 (1985a, b)、大林 (1995) および竹内 (2000a, b) が報告している。それらによると来馬・手取両層群中のザクロ石は中圧型を主とし、グランダイトを欠いており、高圧型は来馬層群でごく少量みられるだけである。来馬層群には低圧型が30%内外はいつており、手取層群になるとそれが半減する。パイロープ $\geq 20\%$ のザクロ石の比率は来馬層群で20%、手取層群では急増して55%にも達する。上記論文から化学組成が数値で表示されているザクロ石を選びだして第15図に示してあるが、本図をみると来馬層群には低圧型をはじめ様々なタイプのものがいつているのに対し、手取層群では中圧型が圧倒的に多く、Ig<sub>2</sub>が卓越している。

秋吉帯のジュラ系-下部白亜系や美濃-丹波帯の西方延長にあたる玖珂帯のジュラ紀付加体 (玖珂層群) では、碎屑性ザクロ石の大部分が中圧型であり、Ig<sub>1-2</sub>が全体の55%以上を占めている。これらの地層群には低圧型もいつているが、その量は玖珂帯におけるよりも秋吉帯のほうが多い。

美濃-丹波帯に広く分布するジュラ紀付加体中のザクロ石については、鈴木 (1977)、Adachi and Kojima (1983)、足立 (1985a)、武蔵野・笠原 (1986)、田中・足立 (1999)、竹内 (2000a, b) などの報告がある。これらによれば碎屑性ザクロ石の3分の2ちかくがパイロープ成分を20%以上含むものであり、その他としては同成分が20%未満のパイラルスパイトと地域によってはごくわずかのグランダイトがある。パイラルスパイトのなかに低圧型がどの程度はいつているかは明確ではないが、その量は10%内外と推定される。美濃-丹波帯の場合はザクロ石の化学組成に関する数値データがかなり多く公表されている。それらをもとに作成された第16図をみる限り、砂岩や礫岩中のザクロ石はほとんどが中圧型であって、碎屑性のものではIg<sub>2</sub>がIaやIg<sub>1</sub>を量的にうわまわっている。この点は手取層群の碎屑性ザクロ石 (第15図) とよく似ている。

中央構造線沿いの西南日本中軸帯には海成、一部非海成の上部白亜系が帯状に分布しており、その中の碎屑性ザクロ石は九州西部、九州東部-紀伊半島および関東山地の3地区でそれぞれ異なる特徴をもっている (寺岡ほか, 1997, 1998; 新井ほか, 2000)。九州西部の御船層群にはグランダイトが異常に多く、ザクロ石全体の60%ちかくを占め、高圧型と中圧型はほぼ同量あって低圧型が少ない。上位の姫浦層群になると中圧型と低圧型ばかりになり、量的には前者が後者をうわまわる。このような構成は古第三

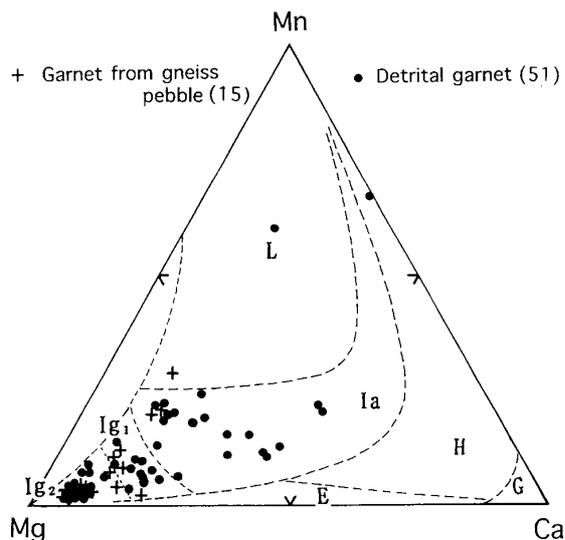


第15図 飛騨-飛騨外縁帯のジュラ系と白亜系に含まれる碎屑性ザクロ石。

Fig. 15 Detrital garnets from Jurassic and Cretaceous sandstones of the Hida-Hida Marginal Terrane. Sources of data: Adachi (1985a, b), Obayashi (1995), Kumazaki and Kojima (1996).

系になっても存続する。一方、九州東部の大野川層群の場合は、御船層群に対比される最下部でグランダイトや高圧型がやや目立つが、全体としては低圧型が圧倒的に多く、これに次ぐ中圧型の比率は15%内外にすぎない。四国から紀伊半島にかけて分布する和泉層群でも低圧型が主体をなし、中圧型を伴う。これに対し関東山地の跡倉層では中圧型が非常に多く、しかもIg<sub>2</sub>の比率が高い。低圧型は約15%しかなく、その他としてはグランダイトと高圧型が少量はいつている。三波川変成岩を不整合に覆う久万層群は長らく始新統とみなされてきたが、最近その大部分は中新統であることが分かってきた (鹿島・武智, 1996; 成田ほか, 1999)。この中新統から得られたザクロ石の構成は、高圧型の存在を除くと和泉層群のものに似ている。四国では三波川変成岩からも碎屑性ザクロ石が見いだされており、別子ユニットのもの (Higashino and Takasu, 1982) については先に述べた (第3図)。金子 (1998) によると、大歩危ユニットの碎屑性ザクロ石にはパイロープ成分20%以上のものが15%ちかく含まれ、グランダイトもみられる。

秩父帯のジュラ系-下部白亜系の碎屑性ザクロ石については、奄美大島で竹内 (1992)、九州西部で宮本ほか (1992, 2000, 2002)、Miyamoto and Kuwazuru (1993, 1994)、宮本 (1997, 1998)、九州東部で寺岡ほか (1997)、四国で武田 (1995)、寺岡ほか (1999)、寺岡 (本論文)、紀伊半島では竹内 (1986)、寺岡 (本論文) によってそれぞれ研究されている。九州西部の黒瀬川帯に分布する陸棚相ジュラ系のザクロ石は大部分が中圧型であり、そのなかでも特にIg<sub>2</sub>が多く、全体の2分の1以上を占めている。

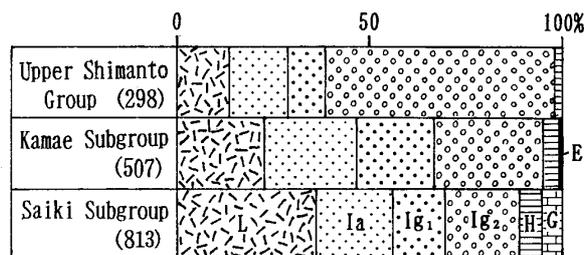


第16図 美濃帯のジュラ系に含まれる碎屑性ザクロ石と片麻岩礫中のザクロ石。

Fig. 16 Garnets from Jurassic sandstones and gneiss pebbles of the Mino Terrane. Sources of data : Suzuki (1977), Adachi (1973, 1985a), Adachi and Kojima (1983), Tanaka and Adachi (1999).

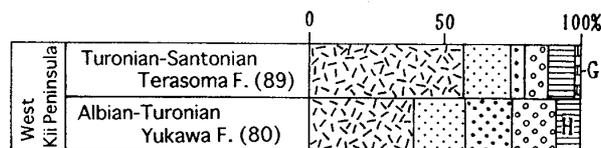
低圧型は数%で高圧型はごく少なく、グランダイトはほとんど認められない。同じような陸棚相であるが下部白亜系になると、九州西部では中圧型が半減し、低圧型や高圧型が増え、グランダイトが10数%もはいつてくる。これに比べ九州東部や四国の場合は低圧型や高圧型が少なく、グランダイトはまれで、中圧型が主体をなす。上部白亜系の碎屑性ザクロ石は九州東部からだけ報告されているが、これには低圧型と中圧型がほぼ同程度含まれ、少量ながら高圧型もみられる。秩父帯北帯と黒瀬川帯のジュラ紀付加体についてみると、九州東部や四国西部では低圧型が中圧型を量的にうわまわり、高圧型がかなりはいつているのに対し、四国中部においては中圧型が卓越して低圧型が少なくなり、グランダイトが数%でてくる。秩父帯南帯と三宝山帯のジュラ紀-白亜紀前期付加体では、四国西部や紀伊半島におけるように低圧型が50%を超えることもあるが、一般的には中圧型が卓越し、低圧型は20-30%、ときに15%以下であり、高圧型やグランダイトはごく少ない。なお、四国西部の三宝山帯のばん蛇ヶ森層中ではグランダイト群集とパイラルスパイト群集が共存している。

四万十帯に分布する四万十累層群は白亜紀から第三紀中頃にかけて形成された付加体であるが、この中の碎屑性ザクロ石に関する研究は、紀伊半島中央部や奄美大島でのもの(竹内, 1986, 1992)を先駆とし、その後九州・四国・赤石山地において行われ(寺岡ほか, 1999)、最近では紀伊半島西部でもなされている(別所, 2000)。寺岡ほか(1999)は四万十累層群を下-上部白亜系佐伯垂群, 上部白亜系蒲江垂群および古第三系-下部中新統上部四万



第17図 九州, 四国および紀伊半島西部の四万十累層群に含まれる碎屑性ザクロ石。

Fig. 17 Detrital garnets from sandstones of the Shimanto Super-group in Kyushu, Shikoku and Kii Peninsula. Sources of data : Teraoka *et al.* (1999), Bessho (2000).



第18図 四国西部と紀伊半島西部の白亜系佐伯垂層群に含まれる碎屑性ザクロ石。

Fig. 18 Detrital garnets from sandstones of the Cretaceous Saiki Subgroup in west Shikoku and west Kii Peninsula. Sources of data : Teraoka *et al.* (1999), Bessho (2000).

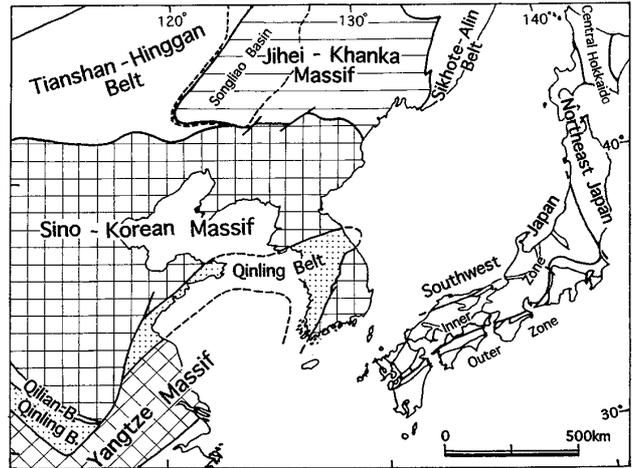
十層群とに大きく3分し、これらの地層群に含まれるザクロ石の差異や地域的変化を論じているので、以下では主としてそれに基づいて記述することにする。なお、下部四万十層群に属する佐伯・蒲江両垂層群は時代的にオーバーラップする。四万十累層群全体としてみると、中圧型が最も多く、これが層序的上位に向かって増加し、低圧型をはじめ他のタイプのものが減っていくという定向的变化が認められる(第17図)。この傾向は上部四万十層群を不整合に覆う下部中新統の三崎層まで続く。九州から紀伊半島西部にかけての地区では、中圧型の平均量が佐伯垂層群で53%、蒲江垂層群で73%、上部四万十層群で85%、三崎層では93%であり、低圧型の場合はそれぞれ36%、23%、13%、7%となる。これらの数字からすれば四万十帯の白亜系-下部中新統ではザクロ石の構成が上位の層準に向かって漸次変わっているように思われるが、中圧型のなかでIg<sub>2</sub>の占める比率の平均をだしてみると、佐伯垂層群36%、蒲江垂層群39%、上部四万十層群70%、三崎層69%となり、白亜・古第三系間に大きなギャップのあることが分かる。高圧型は四万十累層群全体を通じて認められ、その量は普通数%以下、地域によっては10%内外になる。グランダイトは産出がほとんど佐伯垂層群に限られ、その多い九州で約15%、紀伊半島中央部では28%ちかく含まれている。

赤石山地の本垂層群からはまだグランダイトが見いだされていない。佐伯垂層群では低圧型の量も地域によってかなり異なり、奄美大島、四国西部および紀伊半島西部では35%以上はいつている。四国西部と紀伊半島西部の場合は、低圧型が東方に向かって増加する一般的傾向に加え、宇和島地域や寺そま地域に分布する含大型化石上部白垂系中にこのタイプのもが多いためと考えられる(第18図)。蒲江垂層群ではザクロ石の東西変化が顕著であり、西から東に向かうにつれ中圧型が次第に増え、低圧型と高圧型が減っていく。

## 6. 碎屑性ザクロ石の供給源

西南日本に分布する古生代から少なくとも第三紀中頃にかけての地層群中には、日本列島起源の碎屑物だけでなく、後述のようにアジア大陸からのものも含まれているので、まずはじめに東アジアのおおまかな地体構造区分を第19図に示しておく。本図は寺岡・奥村(2002)によるもので、揚子・中朝両地塊の境界をなす三疊紀変動帯の秦嶺帯(Qinling Belt)は山東半島から東方にのび、朝鮮半島では京畿地塊とこれの南北両縁沿いの沃川変成帯やイムジンガン帯をあわせたものがそれに相当する。このことは、中朝地塊で欠如し、秦嶺帯によく発達するデボン系(下部石炭系)がイムジンガン帯に分布し、これとほぼ同時代の地層が沃川変成岩の原岩である可能性が高いこと、京畿地塊変成岩の年代(鈴木ほか,1999)などを考えあわせた結果である。なお、かつて寺岡ほか(1998)は揚子・中朝両地塊の境界が黄海で大きく南に彎曲し、朝鮮半島は全体として中朝地塊に属するとした。第19図の吉黒-ハンカ地塊(Jihe-Khanka Massif)は先カンブリア紀と古生代の変動帯を一括したもので、松遼地塊・ブレア地塊・ハンカ地塊・吉黒褶曲帯などを含んでいる。ハンカ地塊はハンカ湖付近の先カンブリア系分布域であって、吉黒-ハンカ地塊の南東部を占める。

大陸基盤をなす先カンブリア系からの碎屑物の存在がもっともよく分かっているのは美濃帯のジュラ紀付加体である。この中の片麻岩礫の黒雲母は1,500-1,700MaのK-Ar・Rb-Sr年代と2,000Maの全岩アイソクロン年代を示す(Shibata *et al.*, 1971; Shibata and Adachi, 1972, 1974; Adachi, 1973)。このような年代は片麻岩礫や砂岩中のモナザイト・ジルコン粒子のCHIME年代測定でも得られている(Suzuki *et al.*, 1991; Adachi *et al.*, 1992; Adachi and Suzuki, 1994; 田中ほか, 1998)。なお、碎屑物の源岩となった変成岩は先カンブリア紀中期以降、何回も変成・変質作用を受けたとされている。美濃帯の場合とほぼ同じモナザイト・ジルコンCHIME年代は、舞鶴帯の上部三疊系難波江層群や飛騨-飛騨外縁帯の中部ジュラ系-下部白垂系手取層群でも知られている(川井ほか, 1997; Adachi *et al.*, 1992; 大林ほか, 1992)。美濃帯および飛騨-飛騨



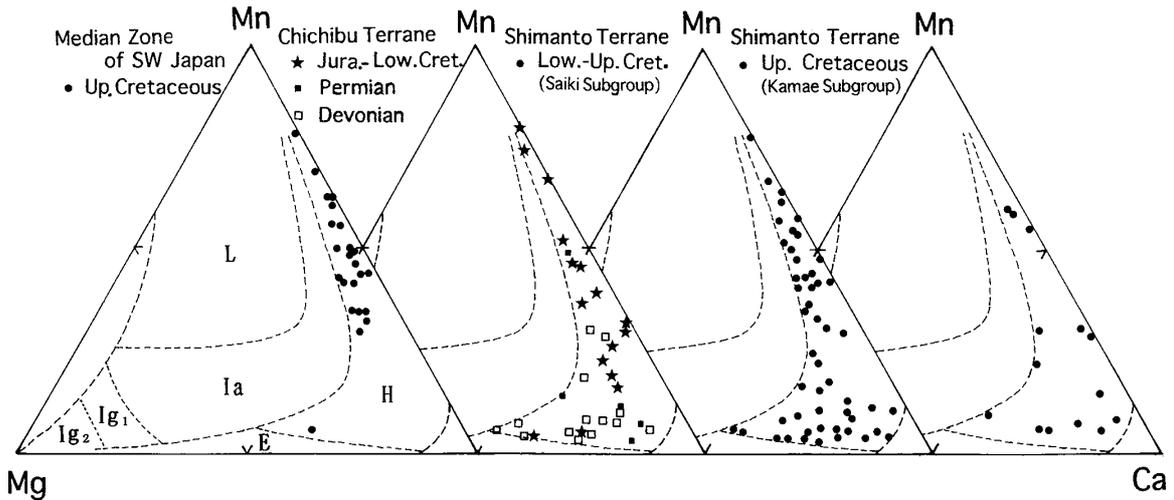
第19図 東アジアの地体構造図。

Fig. 19 Map showing tectonic framework of East Asia (Teraoka and Okumura, 2002).

外縁帯の中生界に含まれるMgに富むザクロ石は、上記の礫や鉱物粒子と同様、先カンブリア大陸からもたらされ、源岩はグラニュライト相に達する高度変成岩であるとされている(鈴木, 1977; Adachi and Kojima, 1983; 足立, 1985a, b; 大林, 1995; 熊崎・小嶋, 1996; 田中・足立, 1999; 竹内, 2000a, b)。このような高度変成岩起源の碎屑性ザクロ石は、舞鶴帯や四万十帯をはじめ西南日本の各地帯からも報告され、その供給源は大陸の先カンブリア系であると考えられている(鳥飼, 1990; 竹内, 1992; 川井ほか, 1997; 長谷川・足立, 1997; 寺岡ほか, 1998, 1999)。しかしながら問題の供給源がどこにあったかという点になると必ずしも明確ではなく、足立・鈴木(1993)、鈴木ほか(1997)は美濃帯の場合のそれを朝鮮半島南部の嶺南地塊北東端にある三陟地域に求め、竹内(1992)は四万十帯、寺岡ほか(1998, 1999)は西南日本内帯から四万十帯にかけてのものについて中朝地塊を主とするアジア大陸東部の広大な地域を想定している。

既述のように西南日本の三疊紀中頃以降の地層群に含まれる碎屑性ザクロ石としては、若干の例外はあるが一般に中圧型のもの比率が最も高く、しかもグラニュライト相変成岩起源とみなされるI<sub>g12</sub>が多い。このことはペルム系中のバイラルスパイト群集についてもいえる。寺岡ほか(1998)によると、日本列島の変成岩からはI<sub>g2</sub>に属するザクロ石の産出報告がなく、これがみられるのは内モンゴル中南部から河北省・遼寧省をへて吉林省南部に至る中朝地塊北部地帯の始生代変成岩中であり、その他ではわずかながら朝鮮半島の京畿地塊北西部やハンカ地塊のそれから報告されている。そうすると碎屑粒子としてはいるI<sub>g2</sub>は始生代の変成岩からということになり、美濃帯などで明らかになっている先述の碎屑物源岩年代(原生代前期-中期初頭)との関係が問題になる。いずれにしてもかつては大陸のどこかに原生代の含I<sub>g2</sub>変成岩も露出していたこと

西南日本の古生代-第三紀砂岩中の碎屑性ザクロ石(寺岡)



第20図 西南日本の中・古生界に含まれる碎屑性高压型ザクロ石.

Fig. 20 Detrital high P/T garnets from Paleozoic and Mesozoic sandstones of Southwest Japan.

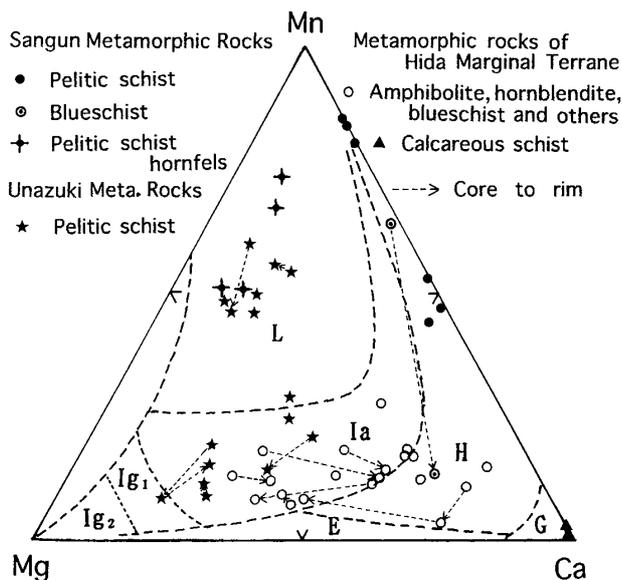
は確かであり、現在ではそれが日本海に没しているのか、または削剥されてほとんど残っていないのかもしれない。

アジア大陸東部の先カンブリア紀変成岩には様々な組成の中圧型ザクロ石が含まれていること、碎屑岩中における Ia, Ig<sub>1</sub>, Ig<sub>2</sub> の量的関係などからして、西南日本の地層群で広く認められる中圧型ザクロ石は主として上記変成岩からもたらされたとみなすのが妥当である。Ia や Ig<sub>1</sub> を含む変成岩は黒瀬川帯・飛騨帯・飛騨外縁帯などにもあるので(第2, 21図)、中圧型ザクロ石のなかにはこれらからきたものもあるであろう。なお、飛騨帯にある宇奈月変成岩のザクロ石は中圧型と低圧型の2グループに分かれるが、これは同変成岩が藍晶石-珪線石型の広域変成作用の後で船津花崗岩による熱変成作用を受けた(Hiroi, 1983)ためと考えられる。手取・来馬両層群は飛騨帯やその近傍に分布しているにもかかわらず、これらの後背地解析によれば同帯からの碎屑物供給は少なかったようである(大林, 1995; 熊崎・小嶋, 1996)。もちろん中圧型をはじめ種々のタイプのザクロ石を含む碎屑物の主要供給源が日本列島内にあったとする見解もあるわけで、例えば宮本ほか(1992)、宮本(1998)などは九州西部の秩父帯中・古生界のそれを黒瀬川帯に、新井ほか(2000)は関東山地の上部白亜系跡倉層のものを古領家帯に求めている。この点で注目すべきはデボン系内大臣層のザクロ石であるが(第14図)、これには中圧型のほか高压型やエクロジャイト型も多く含まれており、他の地層群の場合とは供給源を異にする可能性が高く、黒瀬川古陸のような失われた大陸からもたらされたものかもしれない。内大臣層以外ではエクロジャイト型ザクロ石の産出がまれであり、その供給源を特定することは困難である。

高压型ザクロ石は少量ながらペルム紀以降の地層群にもはいつており、その産出頻度は概して内帯より外帯のほうが高い。このタイプのザクロ石は高压変成岩に由来する

ものであり、その源岩としてまず想起されるのは三波川変成岩と三郡変成岩である。三波川変成岩の場合は古第三紀になってから地表に露出しているのも、同岩からのものがあるとすれば第三系の上部四万十層群・三崎層・久万層群などのなかである。しかしながらこれらの地層群中では高压型ザクロ石がまれであり、三波川変成岩起源のザクロ石があるとしてもその量はごく少ないといえる。第20図は西南日本の中軸帯以南に分布する中・古生界中の高压型ザクロ石を示したものである。中軸帯上部白亜系の御船・大野川両層群や跡倉層に含まれるものは Mn に富み、組成的には三波川変成岩のザクロ石のコア部分に似ており、寺岡ほか(1998, 1999)はその供給源を三郡変成岩に求めている。このような組成のものは秩父帯中生界中の高压型ザクロ石でも卓越している。これに対し同帯古生界の場合は Ca や Mg を比較的多く含んでおり、より変成度の高い岩石からもたらされたと考えられる。四万十帯では白亜系の下部四万十層群に高压型ザクロ石がよくみられるが、これには様々なものがあってこのタイプの組成領域全体にまたがる。

三郡変成岩は変成年代が石炭紀、三疊紀およびジュラ紀の3グループに分けられ、飛騨外縁帯の変成岩は古期グループにはいる(柴田・西村, 1989)。三郡変成岩から報告されているザクロ石をみると(第21図)、中期変成岩のものは Mn に富み、古期変成岩の場合は Mn に乏しい高压型のほか、中圧型にはいるものもかなりある。なお、本図で泥質片岩ホルンフェルスのザクロ石としてあるのは、北九州の白亜紀糸島花崗岩上にループペンダントとしての古期変成岩からのもので(加納, 1981)、これは低圧型にはいる。山口県阿武川地域のペルム系麦谷層に含まれ、古期変成岩起源とされている変成岩礫のザクロ石(西村ほか, 1981)は高压型で Mn に富んでいる。中期変成岩に相当する変成岩の礫は大野川層群にはいつており



第21図 三郡変成岩、宇奈月変成岩および飛騨外縁帯変成岩に含まれるザクロ石。

Fig. 21 Garnets from the Sangun Metamorphic Rocks, Unazuki Metamorphic Rocks and metamorphic rocks of the Hida Marginal Terrane. Sources of data : Sangun Metamorphic Rocks (Hashimoto, 1968 ; Kano, 1981 ; Karakida, 1987 ; Tsujimori, 1998), Unazuki Metamorphic Rocks (Hiroi, 1983), metamorphic rocks of Hida Marginal Terrane (Banno, 1958 ; Ito, 1977, 1979 ; Miyagawa, 1982 ; Nakamizu *et al.*, 1989).

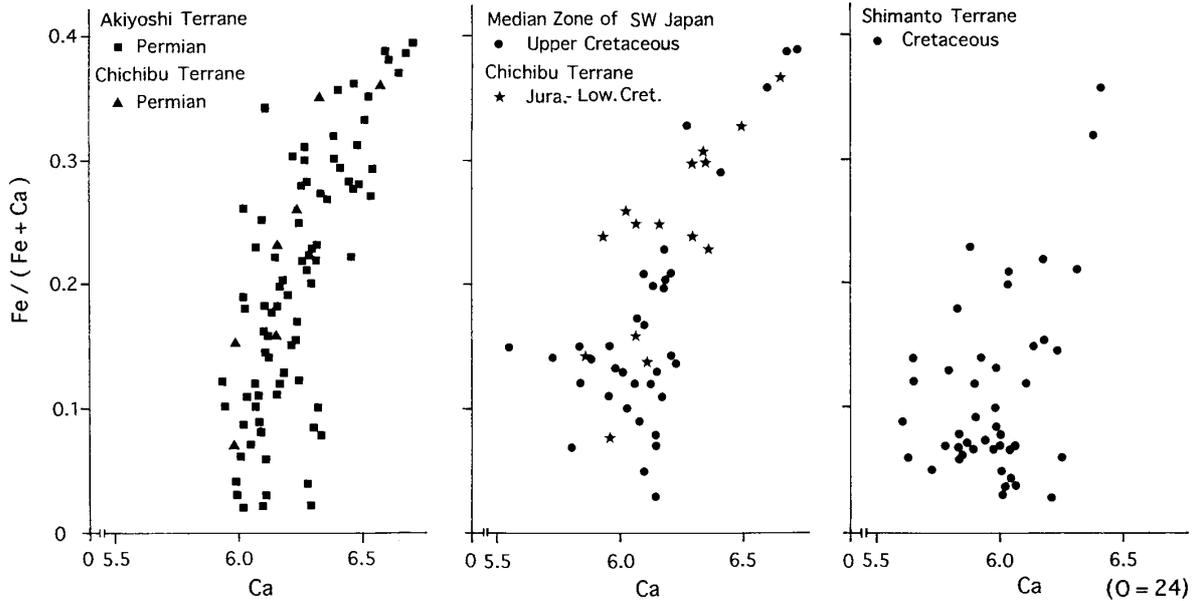
(Isozaki and Itaya, 1989), また九州の上部四万十層群中には年代からして古期変成岩起源と推定される白雲母が認められる(寺岡ほか, 1994)。これらのことからして、ペルム紀以降の地層群に含まれる高压型ザクロ石の主要供給源は三郡変成岩であったと考えられる。このタイプのザクロ石はアジア大陸の先カンブリア紀変成岩からも報告されており(第2図), また石渡・辻森(1999)によるとナホトカ北東でペルム紀-石炭紀の青色片岩が見いだされているということなので、碎屑性高压型ザクロ石のなかには大陸からきたものもあると推定される。

碎屑性の低压型ザクロ石は低压変成岩や花崗岩を主とする火成岩から由来したもので、中圧型のものとともにパイロパイト群集の大部分を構成する。紀伊半島以西の西南日本中軸帯に分布する上部白亜系-第三系中の低压型ザクロ石は、主として肥後帯を含む広義の領家帯の変成岩・花崗岩から供給され、量的には少ないが同源のものは秩父帯以南の白亜紀中頃以降の地層群にもはいつている(寺岡ほか, 1998, 1999)。問題は領家帯・深成作用より古い年代の地層群に含まれる低压型ザクロ石の起源である。先述の宇奈月変成岩や三郡変成岩の場合のように、中・高压変成岩が後で花崗岩貫入による熱変成作用を受けて低压型ザクロ石を含むようになり、それらが供給源の一部をなしていたということはある。一方、アジア大陸東部についてみると、中朝地塊北部地帯の先カンブリア紀変

成岩は大部分が中圧変成岩からなるのに対し、遼寧省南部や朝鮮半島およびハンカ地塊では中圧のものほかに低压変成岩もかなりある(Lee, 1985 ; Dong *et al.*, 1986 など)。また先カンブリア紀や古生代の花崗岩、ときに中生代のものからもザクロ石を産出する(Bur, Geol. Min. Res. Jilin Prov., 1988 ; Bur. Geol. Min. Res. Liaoning Prov., 1989 ; Bur. Geol. Min. Res. Heilongjiang Prov., 1993 ; Peak *et al.*, 1996 など)。これらの事実や碎屑性ザクロ石のなかで占める低压型の割合および中圧型との共存関係などからして、白亜紀前期以前はもちろんのことそれ以降においても、前述の中軸帯の場合を除くと、低压型ザクロ石の主要供給源はアジア大陸にあったとみなすのが妥当である。

グラナイトは石灰質岩を原岩とする熱変成岩(ホルンフェルス, スカルン)や広域変成岩に含まれ、その他ロジンジャイトおよびアルカリ火成岩にもはいつている。ただし、後2者は産出頻度・規模などの点からして碎屑性グラナイトの源岩としてはほとんど問題にならないであろう。西南日本で碎屑性グラナイトがよくみられるのはペルム系、下-中部三畳系および白亜系である。Miyamoto and Kuwazuru (1993, 1994), 宮本(1998), 宮本ほか(2000)などは、肥後帯のペルム系や秩父帯のペルム系-下部白亜系に含まれるグラナイトがスカルンをはじめとする不純石灰岩源の熱変成岩からもたらされたとしている。肥後帯では上部白亜系の御船層群にもグラナイトが多く、その供給源は肥後変成岩とされているが(寺岡ほか, 1998), それにしては共産する低压型ザクロ石の量が少なすぎるようであり、再検討を要する。竹内(2000b)によると、日本列島のペルム系-三畳系中のグラナイトはスカルンに由来し、白亜系の場合は(広域)変成岩起源である。このように時代によって源岩が異なり、大きく2分されるということは第22図からも読み取れる。本図によれば白亜系中のグラナイトは大部分が0.24以下の  $Fe / (Fe + Ca)$  比を示す。これに対しペルム系とジュラ系のもはその比の範囲が0.02-0.40と広く、山口県下の三畳系津布田層群の基底部分から産するスカルン起源のグラナイト(渋谷・小松, 1986)では0.40を超える。要するにペルム系-ジュラ系と白亜系ではグラナイトの供給源に違いがあり、前者のそれは主として石灰質熱変成岩、後者の場合は同質の広域変成岩であるとみなされる。これらの源岩の分布地を特定することは困難であるが、石灰質岩や花崗岩の時代的・地域的な発達状況、共産する他のタイプのザクロ石の起源などを考えあわせると、グラナイトの場合も日本列島よりアジア大陸からの供給のほうが多かったと推定される。

碎屑岩は多かれ少なかれ堆積岩からの碎屑物を含むのが普通なので、碎屑性ザクロ石のなかには既存の地層から洗い出されたものがあるはずである。寺岡ほか(1999)は四万十層群中の再蝕性ザクロ石に言及し、それがあっても量的にはほとんど問題にならないとしている。中



第22 図 西南日本の中・古生界に含まれる碎屑性グラナタイト.

Fig. 22 Detrital grandites from Paleozoic and Mesozoic sandstones of Southwest Japan.

軸帯の上部白亜系大野川・和泉両層群や第三系久万層群の場合は、既述のようにザクロ石の主要供給源が領家帯の変成岩・花崗岩であったが、これらの地層群中には中圧型ザクロ石もあるので、供給源の一部として古期堆積岩も想定しなければならない。宇野・保柳(2000)は長野県北部の北部フォッサマグナに分布する中-上部中新統からの碎屑性ザクロ石について報告しており、それをみると3分の2ちかくが低圧型で、残りの大部分は中圧型にはいる。後者中には少量ながら  $Ig_2$  が含まれており、この事実や日本海拡大時期などからして、少なくとも中圧型ザクロ石のなかには再蝕性のものがあると推定される。なお、日本海が拡大していくと  $Ig_2$  で代表されるような先カンブリア紀変成岩起源のザクロ石がアジア大陸から日本列島へ供給されなくなるわけであり、今後第三系中のザクロ石研究が進めば、それがどの時期に起こり、また地域的な違いがあるのか否かが分かるであろう。いずれにしても碎屑性ザクロ石各タイプの比率を検討し、堆積盆解析のデータを加味すれば再蝕性のものの存在は推定可能である。

## 7. ま と め

1) ザクロ石の分類図を示し、本鉱物を低圧型(低圧変成岩, 花崗岩), 中圧型(中圧変成岩,  $Ia$  は角閃岩相以下,  $Ig_{12}$  はグラニューライト相), 高圧型(高圧変成岩), エクロジヤイト型(エクロジヤイト) およびグラナタイト(石灰質岩源変成岩)とにタイプ分けした。カッコ内は各タイプのザクロ石を含む岩石であり,  $Ig_2$  は日本列島の変成岩から見いだされていない。

2) 中国地方西部の内帯と四国・紀伊半島西端部の秩父帯に分布する中・古生界中の碎屑性ザクロ石について述べた。そしてこれに既報のものを加え、西南日本においてデボン紀から第三紀中頃にかけて、碎屑性ザクロ石がどのように変遷したかを明らかにし、その構成が下記の時期に顕著に変わることを示した。1. デボン紀・ペルム紀間, 2. 三畳紀中-後期, 3. 白亜紀中頃および4. 白亜紀・古第三紀間。1と2の間の時代や白亜紀に地域的にはグラナタイトが卓越する場合もあるが、各時代を通じてみると碎屑性ザクロ石のなかでは中圧型が最も多く、低圧型がこれに次ぎ、グラナタイト, 高圧型, エクロジヤイト型の順に少なくなっている。

3) 碎屑性ザクロ石は日本列島とアジア大陸を含む広大な後背地からもたらされ、中圧型, 低圧型およびグラナタイトの主要供給源は大陸の先カンブリア系・古生界に、高圧型のそれは西南日本内帯の三郡変成岩に求められる。ただし、高圧型以外でも時代によっては局地的ながら日本列島起源のザクロ石が大陸からのものを量的にうわまわることもある。

## 文 献

- Adachi, M. (1973) Pelitic and quartzo-feldspathic gneisses in the Kamiasso conglomerate — A study of Precambrian geology in Japan and East Asia. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **79**, 181-203.
- 足立 守 (1985a) ザクロ石の組成からみた上広瀬礫岩と上麻生礫岩. 瑞浪化石博研報, no. 12, 183-196.
- 足立 守 (1985b) 手取層群の碎屑岩類の岩石学的研究

- とくに碎屑性ザクロ石の組成について—. *MRT Newsletter*, no. 1, 13-16.
- 足立 守 (1991) 京都府舞鶴西方の三疊系志高層群中の Ca-rich ザクロ石. 総研A連絡「変動帯の砂岩—日本列島を例として—」. no. 2, 26-29.
- Adachi, M. and Kojima, S. (1983) Geology of Mt. Hikagedaira area, east of Takayama, Gifu Prefecture, central Japan. *Jour. Earth Sci. Nagoya Univ.*, **31**, 37-67.
- Adachi, M., Kojima, S., Wakita, K., Suzuki, K. and Tanaka, T. (1992) Transect of central Japan : from Hida to Shimanto. 29th IGC Field Trip Guide Book, 1, 143-178.
- 足立 守・鈴木和博 (1993) 上麻生礫岩中の先カンブリア紀片麻岩礫の後背地は韓国東部か? 名大古川総合研究資料館報告, no. 9, 25-45.
- Adachi, M. and Suzuki, K. (1994) Precambrian detrital monazites and zircons from Jurassic turbidite sandstones in the Nomugi area, Mino terrane. *Jour. Earth Planet. Sci. Nagoya Univ.*, **41**, 33-43.
- 新井宏嘉・村上慎二郎・高木秀雄 (2000) 関東山地跡倉層の後背地. 地質学論集, no.56, 123-136.
- Asada, A. (1995) Chemical compositions of garnets from the Sambagawa pelitic schists in central Shikoku, Japan. *Geol. Rept. Shimane Univ.*, **14**, 65-80.
- Banno, S. (1958) Glaucophane schists and associated rocks of the Omi district, Niigata Prefecture, Japan. *Jap. Jour. Geol. Geogr.*, **XXIX**, 29-49.
- 別所孝範 (2000) 紀伊半島四万十帯白亜系砂岩の重鉍物組成とその時代的变化. 地質学論集, no. 57, 195-210.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Heilongjiang Province (1993) Regional geology of Heilongjiang Province. *Geol. Mem.*, ser. 1, no. 33, Geol. Pub. House, Beijing, 734p.\*
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Jilin Province (1988) Regional geology of Jilin Province. *Geol. Mem.*, ser. 1, no. 10, Geol. Pub. House, Beijing, 698p.\*
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Liaoning Province (1989) Regional geology of Liaoning Province. *Geol. Mem.*, ser. 1, no. 14, Geol. Pub. House, Beijing, 856p.\*
- 長谷川智則・足立 守 (1997) 重鉍物からみた舞鶴帯の二疊系 - 中・下部三疊系碎屑岩の後背地. 日本地質学会第104年学術大会講演要旨, 312.
- Dong, S., Shen, Q., Sun, D. and Lu, L. (1986) Metamorphic map of China, scale 1 : 4,000,000, with explanatory notes, 37p. Geol. Pub. House, Beijing.\*\*
- Hashimoto, M. (1968) Glaucophanitic metamorphism of the Katsuyama district, Okayama Prefecture, Japan. *Jour. Fac. Sci., Univ. Tokyo*, ser. II, **XVII**, part 1, 99-162.
- Higashino, T. and Takasu, A. (1982) Notes on petrography and rock-forming mineralogy (13) : Detrital garnets from the Sambagawa pelitic schists in the Besshi area, central Shikoku. *Jour. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, **77**, 362-367.
- Hiroi, Y. (1983) Progressive metamorphism of the Unazuki pelitic schists in the Hida Terrane, central Japan. *Contrib. Min. Petrol.*, **82**, 334-350.
- 石渡 明・辻森 樹 (1999) ロシア沿海州の古生代青色片岩. 地学雑, **108** (2), 口絵 3.
- Isozaki, Y. and Itaya, T. (1989) Origin of schist clasts of Upper Cretaceous Onogawa Group, Southwest Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan.* **95**, 361-368.
- 伊藤正裕 (1977) 飛騨外縁帯, 朝日岳地域より産出する含石英ザクロ石角閃岩中のザクロ石. 名古屋大教養部紀要 B (自然科学・心理学), no. 21, 69-80.
- 伊藤正裕 (1979) 飛騨外縁帯, 朝日岳地域の green mica-chlorite-muscovite-quartz-albite schist. 「日本列島の基盤」加納 博教授記念論文集, 95-100.
- 亀高正男 (1997) 上部三疊系成羽層群の後背地. 地質雑, **103**, 880-896.
- 亀高正男 (1999) 上部三疊系美祢層群の後背地. 地質雑, **105**, 651-667.
- 金子吾朗 (1998) 四国中央部, 三波川帯大歩危地域砂岩片岩中の碎屑性ザクロ石. 日本地質学会第105年学術大会講演要旨, 51.
- 加納 博 (1981) 三郡変成帯飯場・雷山地域の複変成ホルンフェルス中のザクロ石について. 秋田大鉱山学部研報, no. 2, 23-29.
- 唐木田芳文 (1987) 福岡県八女地域における三郡変成岩の角閃石. 西南学院大児童教育論集, **14**, 55-75.
- 鹿島愛彦 (1992) 四国西部白亜系の砂岩組成と堆積環境. 地質学論集, no. 38, 291-297.
- 鹿島愛彦・武智賢樹 (1996) 四国, 石鎚山第三系久万層群の凝灰岩のフィション・トラック年代. 岩鉱, **91**, 196-200.
- 川井奈緒美・鈴木和博・足立 守 (1997) CHIMEモナザイト年代による三疊系難波江層群の後背地解析. 日本地質学会第104年学術大会講演要旨, 313.
- 熊崎直樹・小嶋 智 (1996) 碎屑岩の組成からみた来馬層群(下部ジュラ系)の堆積史および構造発達史. 地質雑, **102**, 285-302.
- Lee, S. M., ed. (1985) Metamorphic map of South and

- East Asia, scale 1 : 10,000,000, with explanatory text, 97p. Comm. Geol. Map of the World.
- 宮川邦彦 (1982) 九頭竜川上流地域における飛騨外縁帯の低度変成岩類. 岩鉱, **77**, 256-265.
- 宮本隆実 (1997) 黒瀬川地帯の中・古生界砂岩中の碎屑性ザクロ石の化学組成からみた供給源の変遷. [九州から発する東アジア・日本のテクトニクス], 九州のテクトニクスワーキンググループ研究連絡誌, no. 1, 51-62.
- 宮本隆実 (1998) 西九州, 黒瀬川地帯の日奈久帯と坂本帯の中・古生界の砂岩組成の比較. 基盤研究(A)研究連絡誌「東アジア変動帯の砂岩組成とテクトニクス」, no.4, 164-170.
- 宮本隆実・安藤秀一・田中 均・高橋 努 (2000) 西九州, 黒瀬川地帯の下部白亜系砂岩の組成. 地質学論集, no. 57, 211-222.
- Miyamoto, T. and Kuwazuru, J. (1993) Detrital garnets in Permian to Cretaceous sandstones of the Kurosegawa Terrane and its geological significance. *Jour. Sci. Hiroshima Univ.*, ser. C, **9**, 724-733.
- Miyamoto, T. and Kuwazuru, J. (1994) Chemical composition of detrital garnets in Permian to Jurassic sandstones of the Kurosegawa Terrane in Kabaya-Nishinoiwa area, western Kyushu, Japan. *Jour. Sci. Hiroshima Univ.*, ser. C, **10**, 181-192.
- 宮本隆実・桑水流淳二・川本英子 (1992) 西九州, 秩父累帯ペルム系の砂岩中の碎屑性ザクロ石. 地質学論集, no. 38, 217-226.
- 宮本隆実・桑水流淳二・富永満生・山元大介 (2002) 西南日本各地帯に分布する古生代砂岩中の碎屑性ザクロ石の特徴. 日本地質学会第109年学術大会講演要旨, 79.
- 武蔵野 実・笠原光徳 (1986) 丹波帯・超丹波帯の碎屑性ザクロ石の組成. 碎屑性堆積物の研究, 碎屑性堆積物研究会, no. 4, 41-47.
- 中水 勝・岡田昌治・山崎哲夫・小松正幸 (1989) 飛騨外縁帯, 青海・蓮華メランジの変成岩類. 地質学論集, no. 33, 21-35.
- 成田耕一郎・山路 敦・田上高広・栗田裕司・小布施明子・松岡數充 (1999) 四国の第三系久万層群の堆積年代とその意義. 地質雑, **105**, 305-308.
- 西村祐二郎・今岡照喜・宇多村 譲・亀谷 敦 (1995) 新編山口県地質図, 1: 150,000. 山口地学会.
- 西村祐二郎・三上貴彦・鈴木盛久・中村栄三 (1981) ペルム系麦谷層中の変成岩礫の岩石記載とK-Ar 年代. 地質雑, **87**, 585-596.
- 大林達生 (1995) 碎屑性ザクロ石の化学組成からみた石川県白峰地域の手取層群の後背地. 地質雑, **101**, 235-248.
- 大林達生・鈴木和博・足立 守 (1992) 碎屑性ザクロ石およびCHIMEモナザイト・ジルコン年代からみた手取層群の後背地. 日本地質学会第99年学術大会講演要旨, 148.
- Paek, R. J., Kang, H. G. and Jon, G. P., eds. (1996) *Geology of Korea*. Foreign Languages Books Pub. House, Pyongyang, 631p.
- Shibata, K. and Adachi, M. (1972) Rb-Sr and K-Ar geochronology of metamorphic rocks in the Kamiaso conglomerate, central Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **78**, 265-271.
- Shibata, K. and Adachi, M. (1974) Rb-Sr whole rock ages of Precambrian metamorphic rocks in the Kamiaso conglomerate from central Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **21**, 277-287.
- Shibata, K., Adachi, M. and Mizutani, S. (1971) Precambrian rocks in Permian conglomerate from central Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **77**, 507-514.
- 柴田 賢・西村祐二郎 (1989) 三郡変成岩の同位体年代. 地質学論集, no. 33, 317-341.
- 渋谷五郎・小松 啓 (1986) 山口県小野田市黒葉山産三疊紀砂岩中の灰鉄ザクロ石の生成環境. 鉱物雑, **17**, 217-224.
- 鈴木和博 (1977) 岐阜県揖斐郡春日村の古生層砂岩中の碎屑性高パイロプざくろ石. 日本地質学会第84年学術大会講演要旨, 17.
- 鈴木和博・足立 守・加藤丈典 (1999) コリア南部の基盤岩類のCHIME年代. 日本地質学会第106年学術大会講演要旨, 7.
- 鈴木和博・足立 守・興語節生 (1997) 美濃帯ジュラ紀砂岩中の碎屑性モナザイトのCHIME年代. 月刊地球, **19**, 135-139.
- Suzuki, K., Adachi, M. and Tanaka, T. (1991) Middle Precambrian provenance of Jurassic sandstone in the Mino Terrane, central Japan : Th-U-total Pb evidence from an electron microprobe monazite study. *Sediment. Geol.* **75**, 141-147.
- 武田賢治 (1995) 四国西端部の真穴層と黒瀬川帯. 日本地質学会第102年学術大会見学旅行案内書, 31-46.
- 竹内 誠 (1986) 紀伊半島中央部, 中・古生界砂岩の碎屑性ザクロ石. 地質雑, **92**, 289-306.
- 竹内 誠 (1992) 南西諸島奄美大島中生界砂岩中の碎屑性ザクロ石の起源. 地質学論集, no. 38, 237-248.
- Takeuchi, M. (1994) Changes in garnet chemistry show a progressive denudation of the source areas for Permian-Jurassic sandstones, Southern Kitakami Terrane, Japan. *Sediment. Geol.*, **93**, 85-

- 105.
- 竹内 誠 (1996) 四国黒瀬川帯, 二畳系新改層中の碎屑性ザクロ石の化学組成. 総合研究(A) 研究連絡誌「東アジア変動帯の砂岩組成とテクトニクス」, no. 2, 19-21.
- 竹内 誠 (1998) 四国黒瀬川帯, ペルム系新改層中に産する二種類の砂岩. 基盤研究 (A) 研究連絡誌「東アジア変動帯の砂岩組成とテクトニクス」, no.4, 49-53.
- 竹内 誠 (2000a) 美濃・丹波帯のジュラ紀粗粒堆積物の起源. 地質学論集, no. 55, 107-121.
- 竹内 誠 (2000b) 碎屑粒子の化学組成からのメッセージ: 碎屑性ザクロ石の化学組成に基づく後背地解析と東アジアの地殻変動. 地質学論集, no. 57, 183-194.
- 田中姿郎・足立 守 (1999) 美濃帯北東部, 沢渡礫岩から産出した高Mgザクロ石を含む片麻岩礫—美濃帯の砂岩中に存在する高Mg碎屑性ザクロ石の起源—. 地質雑, **105**, 193-199.
- 田中姿郎・足立 守・鈴木和博 (1998) 美濃帯北東部, 乗鞍岳地域から産出した含高Mgザクロ石片麻岩礫とそのCHIME年代. 日本地質学会第105年学術大会講演要旨, 49.
- 寺岡易司・奥村公男 (2002) 東アジア地質図. 日本地質学会第109年学術大会講演要旨, 208.
- 寺岡易司・奥村公男・鈴木盛久・川上久美 (1999) 四万十累層群の碎屑性堆積物. 地調月報, **50**, 559-590.
- 寺岡易司・柴田 賢・奥村公男・内海 茂 (1994) 九州・四国西部の四万十累層群の碎屑性カリ長石および白雲母のK-Ar年代. 地質雑, **100**, 477-485.
- 寺岡易司・鈴木盛久・林 武広・川上久美 (1997) 大野川地域の中・古生界砂岩に含まれる碎屑性ザクロ石. 広大学校教育学部紀要, 第II部, **19**, 87-101.
- 寺岡易司・鈴木盛久・川上久美 (1998) 西南日本中軸帯の白亜紀-古第三紀堆積物の供給源. 地調月報, **49**, 395-411.
- 鳥飼成美 (1990) 舞鶴帯の二畳系舞鶴層群砂岩の重鉱物. 日本地質学会第97年学術大会講演要旨, 279.
- 辻森 樹 (1998) 中国山地中央部, 大佐山蛇紋岩メランジュの地質: 大佐山オフィオライトの下に発達した320Ma青色片岩を含む蛇紋岩メランジュ. 地質雑, **104**, 213-231.
- 宇野智博・保柳康一 (2000) 長野県北部に分布する北部フォッサマグナ中新統砂岩の後背地と分散システム. 地質学論集, no. 57, 231-240.
- \* in Chinese with English abstract.
- \*\* in Chinese.

(受付:2003年3月6日;受理:2003年5月8日)