累進的エクロジイト (Prograde eclogites)

Prograde eclogites

高 須 晃 (Akira Takasu)*

It has been known that eclogites have a diversity in the mode of occurrence and petrology. In this paper, eclogites and eclogitic rocks are divided into two types, i.e., prograde and retrograde eclogites, based on the P-T paths of the equilibration leading to the eclogite facies mineralogy. The prograde eclogite was recrystallized from hydrous phases, and the retrograde eclogite is defined by its formation from higher temperature anhydrous phases.

The following features help to identify the prograde eclogites:

I. Regional distribution of eclogite facies

a) Mapping of prograde mineral zones to reveal the dehydration reaction to form eclogites.

b) Mapping of the progressive thermal gradient in the zone of the eclogite facies.

II. Presence of such hydrous minerals as epidote, amphibole, chlorite and micas as the inclusions in the eclogitic garnet and omphacite.

III. Progressive zonal structure of the eclogitic garnet and omphacite.

Based on these criteria, the eclogites from New Caledonia, Tauern Window and Sesia Lanzo zone in the Alps, Caledonian belt in Norway, and Sebadani in the Sambagawa metamorphic belt are classified into the prograde eclogite. At least two metamorphic facies, the glaucophane schist and epidote amphibolite facies, are confirmed for the pre-eclogite stage of the prograde eclogite. The transition from the glaucophane schist facies to the eclogite facies has been described in the New Caledonia and Sesia Lanzo zone, while that from the epidote amphibolite facies to the eclogite facies is observed in the Tauern Window, Norway and the Sambagawa metamorphic belt. The nature of the metamorphic facies on the lower grade side of the eclogite facies depends on the pressure, and the higher pressure prefers the glaucophane schist to the epidote amphibolite facies.

I. はじめに

エクロジイトという岩石名が Häuy (1822) によって単斜輝石と柘榴石を主成分とする Sau Alpe の岩石に対して初めて与えられて以来、エクロジイトは今日まで多くの研究者に関心をもたれ、数多くの研究がなされてきた。

エクロジイトは Eskola (1939) によって産状に基づく分類がなされたのをはじめ、これまでに地質学的・岩石学的観点から種々の分類がなされている (Coleman *et al.*, 1965; Banno and Matsui, 1965; Essene and Fyfe, 1967 など)。ここではエクロジイトを累進的エクロジイト (prograde eclogite) と後退的エクロジイト (retrograde eclogite) に区分することを試みる。累進的エクロジイトとは、変成作用

の温度上昇のもとに形成されたエクロジイト、後退的エクロジイトとは逆に温度降下時に形成されたエクロジイトと定義する。

累進的エクロジイトと後退的エクロジイトとを区分することは、エクロジイトの変成履歴を明らかにすることを意味し、エクロジイトを産出する変成帯の成因を考えるうえで重要である。とくに累進的エクロジイトは、変成帯がエクロジイトを形成するような高圧場へもたらされる過程を解明するうえで貴重な資料を提供する。ところが、次章に述べるような理由で、これまで累進的エクロジイトはあまり注目されなかったばかりか、その存在に対しても否定的な見解が述べられていた。

最近、四国中央部別子地域の三波川変成帯より、緑れん石角閃岩相の塩基性片岩がエクロジイト化され

* 京都大学理学部地質学鉱物学教室

ている例が見いだされた(Takasu, 1984a)。これは、累進的エクロジイトの典型例のひとつである。これを機に、ここでは世界各地の変成帯から記載されているエクロジイトを再検討し、累進的エクロジイトと考えられるものを紹介する。また、累進的エクロジイトの地質学的・岩石学的性質についての若干の総括をおこなう。

II. 累進的エクロジイトと後退的エクロジイト

累進的エクロジイトと後退的エクロジイトの区分はエクロジイトの成因的分類である。累進的エクロジイトとは、累進変成作用下に形成されたエクロジイトで、その形成過程の少なくとも一部を岩石中に残しているものをいう。一方、後退的エクロジイトは、逆に後退変成作用下に形成されたエクロジイトとする。

一般にP-T図上でエクロジイト相の低温側には藍閃片岩相や角閃岩相があると考えられている(Turner, 1968; Hyndman, 1972; Ernst, 1973など)。累進的エクロジイトの形成は、これらの含水鉱物相の脱水反応により達成されることになる。したがって、累進的エクロジイトの定義である、「累進変成作用下のエクロジイトの形成」は、「含水鉱物組合せの脱水反応によるエクロジイトの形成」ともっと具体的に言い換えることができる。

Coleman *et al.* (1965)のエクロジイトの分類でGroup BとCのエクロジイト、すなわち、ミグマタイト質片麻岩地域あるいはアルプス型造山帯の変成岩中の層状またはレンズ状岩体としてのエクロジイト、の少なくとも一部は地表付近で形成された塩基性岩が周囲の変成岩の原岩とともに高圧(高温)の変成場へもたらされることによって形成された累進的エクロジイトであると考えられる。しかし、一方ではこれらのエクロジイトの産状が、変成岩中にブロック状またはレンズ状に含まれていることが多いところから、エクロジイトはマントル起源であり、周囲の変成岩に対して異質の構造岩塊であるという考え方もある。

エクロジイトのマントル起源説を支持するものとして、Fry and Fyfe (1969)に代表される考え方がある。第1図にFry and Fyfe (1969)による P_{H_2O} -T図上でのエクロジイトの安定領域を示す。彼等は計算により角閃岩からエクロジイトを形成する反応を求め、それをD-Z線で示した。これに、それまでに公表

第1図 Fry and Fyfe (1969)によるエクロジイトの安定領域(Z-K-Hの範囲)。

されている実験の結果(Green and Ringwood, 1967; Yoder and Tilley, 1962; Lambert and Wyllie, 1968)をあわせて、 $P=P_{H_2O}$ 条件下では、Z-K-Hの範囲の温度、圧力のもとでのみエクロジイトは安定とし、およそ50 kbを越える高圧条件下で角閃岩のエクロジイト化が生じるとした。この圧力条件は明らかに地殻の条件ではなく、地殻内でのエクロジイトの形成は無水条件下でのみ達成されるとした。

Fry and Fyfe (1969)に代表されるような考え方は最近に至るまでエクロジイト研究に強い影響を与えてきた(Champhess *et al.*, 1974; Lappin, 1974; De Wit and Strong, 1975)。そういう訳で、これまで累進的エクロジイトに注目した研究はあまりおこなわれてこなかった。以下に世界各地の変成帯から記載されているエクロジイトのうち、累進的エクロジイトと判断されるものを中心に紹介する。

III. 世界の累進的エクロジイト

1. ニュー・カレドニア

ニュー・カレドニアの北部には $170 \times 25 \text{ km}^2$ にわたって広域的に高圧型結晶片岩が露出している。最も変成度の低いパンペリー石-アクチノ閃石組合せの結晶片岩は、変成帯の西部(大陸側)にあり、東方(大洋側)へむかって藍閃片岩を経てエクロジイトへと移りかわる(Brothers, 1974; Black, 1977)。累進的な変成度の変化は種々の岩相、すなわち石灰岩, aluminous sediment, 塩基性及び中性熔岩, 酸性凝灰

New Caledonia		Low grade zone	Lawsonite zone	L.E.T. zone	Epidote zone	Omphacite zone
Pelite	Lawsonite			---		
	Epidote			---		
	Omphacite					---
	Na-amphibole		---			
	Hornblende					---
	Spessartine		---	---		
	Almandine			---		
	Phengite					
	Paragonite	---	---			
	Chlorite					
	Albite					
	Quartz					
	Graphite					
	Sphene					---
	Rutile					---
Metabasite	Pumpellyite		---			
	Lawsonite		---	---		
	Epidote			---		
	Omphacite		---			
	Na-amphibole		---			
	Actinolite				---	
	Hornblende					---
	Almandine					
	Phengite		---			
	Paragonite					---
	Chlorite					---
	Stilpnomelane	---	---			
	Albite	---	---	---	---	---
	Quartz	---	---	---	---	---
	Sphene					---
	Rutile					---

第2図 ニュー・カレドニア高压変成帯の泥質岩及び塩基性岩の鉱物共生関係 (Brothers and Yokoyama, 1982)。LET、ローソン石-緑れん石漸移帯。実線は主要鉱物、破線は微量鉱物を示す。

岩、泥質岩において認められる。そして、この地域の変成帯は泥質片岩中のアイソグラッドに基づいて (Brothers and Yokoyama, 1982)、ローソン石帯、漸移帯、緑れん石帯、そしてオンファス輝石帯の4帯に区分される (第2図)。

ニュー・カレドニアの高压変成岩の変成温度・圧力条件は、緑れん石アイソグラッドが 390°C, 10.5 kb, オンファス輝石アイソグラッドで 430°C, 12 kb, そして最も変成度の高い部分で 550°C, 11 kb と推定されている (Yokoyama *et al.*, in press)。エクロジャイトの形成はオンファス輝石アイソグラッドをもって始まる、つまり、その温度・圧力条件は 430°C, 12 kb 程度ということになる。

このように、ニュー・カレドニアの高压変成帯ではローソン石片岩から藍閃片岩を経てエクロジャイトへと累進的な広域分布を示し、藍閃片岩の脱水反応によりエクロジャイトが広域変成作用で *in situ* に形成されたことを示している。また、普通エクロジャイトの全岩組成は塩基性であるが、ニュー・カレドニアのオンファス輝石帯では泥質岩組成の結晶片岩にもオンファス輝石とアルマンディンよりなるエクロジャイト

組合せが広域的に出現し、この地域全体がエクロジャイト相の変成作用を受けたことを示している。

2. アルプス変成帯

アルプス変成帯におけるエクロジャイトの産出は、ペニン帯とその相当層及び Sesia-Lanzo 帯である。このうち、Tauern Window とアルプ・アラミ地域 (Leopontine Alps), 及び Sesia-Lanzo 帯において累進的エクロジャイトが認められる。

(1) Tauern Window の累進的エクロジャイト

Tauern Window は東アルプスの一つの構造単位であり、ここでは地窓としてペニン帯の岩石が地表にあらわれている。

Tauern Window 中央部付近の Grossvenediger 地域では雲母片岩、石英片岩、大理石などとともに、枕状溶岩、ハイアロクラスタイト、またははんれい岩の組織を残す塩基性変成岩が分布している (Miller, 1974, 1977; Holland, 1979a)。枕状溶岩起源の変成岩の存在は、これらの変成岩がもともと地殻起源であることを示している。これらの塩基性変成岩の微量及び主要元素組成は海洋底玄武岩に似ることが指摘されている (Miller, 1974; Abraham *et al.*, 1974; Raith *et*

al., 1977)。

Grossvenediger 地域の塩基性変成岩は低温部から高温部へむかって、緑色片岩、柘榴石緑色片岩、柘榴石角閃岩そしてエクロジャイトへと果進的な分布を示している (Raith *et al.*, 1977)。

Miller (1977) は Tauern Window のエクロジャイトの変成史を6つのステージに区分した(第3図)。それによると、

ステージ1: 最初の変成ステージであり、エクロジャイトの柘榴石の core の包有鉱物の示す緑れん石角閃岩相の鉱物組合せ。

ステージ2: 柘榴石の rim 及びオンファス輝石の鉱物組合せによって示される粗粒の変はんれい岩質エクロジャイトとでもよぶべき岩石。

ステージ3: 鉱物組合せはステージ2と大体同じであるが、カタクラスティックなエクロジャイトとなる。

ステージ4~6: エクロジャイトが後退変成作用を受けるステージで、緑れん石角閃岩相を経て緑色片岩相へ移り変わる。

ステージ1~3は果進変成作用、ステージ4~6は後退変成作用を示している。先エクロジャイトステージ(ステージ1)の鉱物組合せは主に緑れん石、パロウ閃石、曹長石からなる曹長石緑れん石角閃岩相である。この

ことは、Raith *et al.* (1977)によって示されたように、エクロジャイトの両側(低温側と考えられるところ)に分布する柘榴石角閃岩が曹長石緑れん石角閃岩相を示すことと調和的である。

つぎに、Tauern Window のエクロジャイトの形成条件について検討する。柘榴石-オンファス輝石間の Fe^{2+} -Mg 分配 (K_D) は 9-14 (Holland, 1979a), また Miller (1977)による 30 個の柘榴石-オンファス輝石の組についての K_D の平均値は 14.6 ± 1.2 である。平衡圧力の推定は難しいが、ゾイサイト+藍晶石+石英の安定領域で、ひすい輝石+石英の安定領域よりも低圧の圧力範囲と考えられる。また、柘榴石+藍晶石+滑石+石英の組合せの存在、オンファス輝石中のひすい輝石分子含有量、玄武岩-エクロジャイト転移実験などのデータをもとに Miller (1977) は 10 kb が最低圧力と見積っている。これらを総合して Tauern Window のエクロジャイトの平衡条件は、10-15 kb, 500-600°C と考えられている。

これに対して Holland (1979a) は、オンファス輝石と magnesite が平衡に存在すると考え、エクロジャイトの平衡最低圧力は 600°C で 17 kb と見積り、他の研究者 (Miller, 1977; Raith *et al.*, 1977 など) よりも高圧の条件を考えた。しかし、Tauern Window のエ

	METAMORPHIC STAGES					
	1	2	3	4	5	6
	ECLOGITE				PRASINITE	
PLAGIOCLASE	An 4-10				An 0-3	
GARNET		Py 33 Gr 20	Py 37 Gr 18			
OMPHACITE		Jd 34 Ac 12	Jd 47 Ac 4			
Ca-CLINOPYROXENE				Di 85 Ts 3		
KYANITE						
TALC						
RUTILE						
SPHENE						
ORES	ilm ± mt ± pyr	pyr ± pyrrhotite			pyr ± mt ± ilm	
PARAGONITE	Ph 3 Mg 3			Ph 6 Mg 2		
PHENGITE				Pg 7-12		Pg 5
Na-AMPHIBOLE				Glc ± crossite		
Ca-AMPHIBOLE	Fe - Barr				Barr ± Sc	Akt
ZOISITE-EPIDOTE	Ep		± Ep ± Zo		Ep	
CHLORITE					chloritoid	
BIOTITE-PHLOGOPITE						

第3図 Tauern Window のエクロジャイトのステージ区分とその鉱物共生関係 (Miller, 1977)。実線はすべての塩基性変成岩に出現することを示し、破線は出現しない場合のあることを示す。

第4図 アルプ・アラミかんらん岩体中の塩基性岩の鉱物共生関係(Ernst, 1977)。実線はすべてのサンプル中の出現を示し、破線はまれに出現することを示す。

クロジャイト産出地域の変成岩からは、いかなる岩相にもひすい輝石と石英の組合せは報告されていない。エクロジャイト中のオンファス輝石のひすい輝石分子の最大含有量は50%程度である。これらのことを考えあわせると、Holland (1979a) の圧力推定は高压すぎるように思える。

(2) アルプ・アラミ (Lepontine Alps) 地域のエクロジャイト

アルプ・アラミ地域の柘榴石レールゾライト中にエクロジャイトが存在することについてはよく知られている (Möckel, 1969; Ernst, 1977 など)。アルプ・アラミ岩体は長径約1 kmの主にかんらん岩からなるレンズ状岩体で、岩体の中央部には柘榴石レールゾライトが、岩体周縁部には角閃岩とエクロジャイトが分布している。エクロジャイトの鉱物組合せは第4図に示した。エクロジャイトは柘榴石+単斜輝石+ルチル+藍晶石の組合せが、普通角閃石+斜長石(オリゴクレス)+斜ゆうれん石という含水鉱物組合せに後退変成されている (Dal Vesco, 1953; Ernst, 1977)。

Ernst (1977) は、このアルプ・アラミ岩体中のエクロジャイトの成因に関して、マントル起源で、エクロジャイト相以前に含水鉱物組合せの時期を経たこととはないと考えた。しかし、Möckel (1969) はこの岩体中に titanoclinohumite がかんらん石によって置換される組織を報告し、含水鉱物組合せの脱水反応により、累進変成的にエクロジャイトも形成されたと考えた。さらに、彼はベニン帯の超塩基性岩体に広く titanoclinohumite がかんらん石形成以前に存在したことを指摘した。また、Evans *et al.* (1979) は、この付近のベニン帯のエクロジャイト-変ロジン岩は、アルプ・アラミの柘榴石レールゾライト岩体をも含めてエクロジャイト相の変成以前に含水鉱物組合せの時期があったこと

を主張した。

Heinrich (1982) は、この地域北部の Vals から南部の Arami へむかってエクロジャイトの形成温度・圧力に勾配が存在することを示した。

N	Vals	450-550 °C	9-13 kb
↑	Trescolmen	>550 °C	>15 kb
↓	Gagnone	>650 °C	>15 kb
S	Arami	>800 °C	>20 kb

このことより Heinrich (1982) は、この地域には広域的にエクロジャイト相の変成作用があり、北から南への連続的な変成温度勾配が存在することを提案した。

このように、アルプ・アラミ地域のエクロジャイトの成因については、マントル起源の後退変成作用説と含水鉱物組合せからの累進変成作用説が対立している。

(3) Sesia-Lanzo 帯の累進的エクロジャイト

Sesia-Lanzo 帯はアルプス変成帯中にあり、南東側の Ivrea 帯と北西側の Piemonte 帯にはさまれた長さ120 km、最大幅約20 kmの地帯である。Sesia-Lanzo 帯の変成作用は、まずヘルシニア期の高圧型変成作用、ついで Early Alpine 期 (90-60 m.y.) の高圧型変成作用、最後に一部地域での Lepontine 期 (35-30 m.y.) の緑色片岩相の変成作用が重複している。ここでは主に Reinsch (1979) の Val Chiusella 地域のエクロジャイトを中心に紹介する。

Val Chiusella 地域の塩基性変成岩として柘榴石藍閃石岩、オンファス輝石-柘榴石藍閃石岩、藍閃石エクロジャイト、エクロジャイト、オンファス輝石岩などが分布する。これらの変成岩を藍閃石、ゾイサイト及びオンファス輝石のモード比にしたがって並べると、藍閃石岩からエクロジャイトへの連続的な配列となる (第5図)。これらの岩相間で全岩化学組成のうえで系統的な差は認められない。

オンファス輝石-柘榴石藍閃石岩中のオンファス輝石は斑状変晶をなし、主に斜ゆうれん石によって形成されている片理と斜交し、かつそれを包有して成長している。包有された斜ゆうれん石の配列 (Si 片理) は基質部の片理に連続している。

これらのことより Reinsch (1979) は藍閃石岩からエクロジャイトへの変化は累進変成作用の結果であると考えた。しかし、第5図に並べられた順序は鉱物のモード比によるものであり、分布にしたがったものではない。したがって、これらの変成岩は *in situ* のもの

第5図 Sesia-Lanzo 帯 Val Chiusella 地域の塩基性変成岩の鉱物モード組成(Reinsch, 1979)。藍閃石、ゾイサイト(斜ゆうれん石)、オンファス輝石の合計を100%にしてある。サンプルは藍閃石のモードの多いものから少ないものへ並べてある。石英、白雲母、柎榴石は大部分のサンプルにおいてほぼ同量含まれている。

ではなく、藍閃石岩～エクロジャイトを形成した高压変成作用の後に、変成度の異なるスライスが Alpine nappe pile の中にまき込まれる際に構造的に接するようになったものの可能性もある。

このエクロジャイトの形成条件は以下のように推定されている。エクロジャイトと共存する変酸性岩中にはひすい輝石+石英の組合せが出現し、このことより圧力の下限が設定される。また、柎榴石とオンファス輝石間の Fe^{2+} -Mg 分配を Råheim and Green (1974) の温度計で見積ると、藍閃石岩及びエクロジャイトは、最低圧力を 17 kb としたとき、それぞれ 400-450°C, 550-600°C となる(第6図)。この温度の推定は、これまでに Sesia-Lanzo 帯でなされたものと調和的である(Desmons and Ghent, 1977; Desmons and O'Neil, 1978; Compagnoni, 1977)。

上述の 400-450°C, 550-600°C の温度について、Reinsch (1977) と Compagnoni (1977) はエクロジャイトから藍閃石岩への後退変成作用を示すものであると考えた。しかし、すでに述べた藍閃石岩からエクロ

ジャイトへの岩石組織の観察結果は、これらが累進変成作用で形成されたことを支持するものである。また、Desmons and Ghent (1977) はエクロジャイトの柎榴石の累帯構造を研究し、その多くが core から rim へむかって Fe と Mg が増加し、Mn が減少するものであることを明らかにした。柎榴石とオンファス輝石の core-core 及び rim-rim 組の K_D は core から rim への温度の上昇を示すものである。さらに、ローソン石の仮晶にゾイサイトとパラゴナイトが形成されている組織が報告されており(Compagnoni, 1977)、これもエクロジャイトの形成が累進変成作用によるものであることを支持する。

3. ノルウェーのカレドニア帯

ノルウェーのカレドニア帯からは以下に示すような種々の産状のエクロジャイトが知られている。i) 片麻岩中のレンズ状及び層状岩体としてのエクロジャイト, ii) 超苦鉄質岩体中のエクロジャイト(Lappin, 1974; Carswell, 1968a, b, 1973; Medaris, 1980a, b), iii) 斜長岩に伴うエクロジャイト(Eskola, 1921;

第6図 Sesia-Lanzo 帯 Val Chiusella 地域の藍閃片岩からエクロジャイト形成の温度圧力条件 (Reinsch, 1979)。黒矢印は湿式化学分析により $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ の決定された K_D を示し、白矢印は計算により求められた $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ より決定された K_D 値を示す。藍閃石岩の K_D 値はエクロジャイトに比べて高く、エクロジャイトのものは $K_D=20$ 以下である。藍閃片岩相からエクロジャイト相への変化は約 500°C (13 kb) で起こる。

Griffin, 1972), そして iv) 片麻岩を貫く変ドライト岩体としてのエクロジャイト (Griffin and Råheim, 1973)。

ノルウェーのエクロジャイトの成因については古くから“Norwegian eclogite problem”として、それらが地殻起源かマントル起源かということが議論されてきた。このことは、エクロジャイトが果進的エクロジャイトであるか後退的エクロジャイトであるかの議論に等しい。エクロジャイトの成因論として以下の3つに大別できる。a) すべてのエクロジャイトはマントル起源であり、それが地殻内に固体貫入したものである (O'Hara and Mercy, 1963; Lappin, 1966, 1974, 1977; Carswell, 1968a, b, 1973, 1974; Brueckner, 1974 など), b) すべてのエクロジャイトは地殻内の変成作用で *in situ* に形成されたものである (Gjelvik, 1952; Hernes, 1954; Bryhni, 1966; Bryhni *et al.*, 1969, 1970; Skjerlie, 1969; Råheim, 1972; Mysen and Heier, 1972; Griffin and Råheim, 1973; Krogh, 1980a, b; Cuthbert *et al.*, 1983 など), そして c) 超苦鉄質岩体に伴うエクロジャイトはマントル起源であり、片麻岩中のエクロジャイトは地殻起源である (Brueckner, 1977; Medaris, 1980a, b)。この議論で、

超苦鉄質岩体中のエクロジャイトの研究者の多くは a) のマントル起源論者であり、片麻岩中のエクロジャイトの研究者の多くは b) の地殻起源論者である。そんな訳で、これまでのところ両者で論争はされているが議論がかみあっているとはいえない。

上述のエクロジャイトの産状のうち、i) の片麻岩中のものについてはその多くが果進的エクロジャイトに属すると考えられる。以下に、いわゆる Basal Gneiss Complex 中のエクロジャイトについて紹介する。

Basal Gneiss Complex はノルウェーの南西部に露出し、周囲には構造的に上位のナップ群が分布している。Basal Gneiss Complex 中のエクロジャイト岩体は普通径数 10 cm から数 10 m のレンズ状岩体をなすが、Hareid 地域のエクロジャイトは幅 200–1,500 m で延長約 6 km にわたって分布する (Mysen and Heier, 1971)。エクロジャイト岩体と周囲の片麻岩とは調和的關係であることが多く、Molde Peninsula では厚い大理石層がエクロジャイトをはさみ、両者の漸移的關係が観察されている (Hernes, 1954)。また、Råheim (1972) は Kristiansund 地域のエクロジャイトがしばしば周囲の変成岩と互層することを示した。しかし、エクロジャイトと片麻岩との関係が断層であることも少なくない (Binns, 1967; Krogh, 1980a)。

エクロジャイトの岩石学的特徴は、後に述べるように Basal Gneiss Complex の分布の地域により連続的に変化するが、まず、Krogh (1980a) の記載にもとづいて南西部の Sunnfjord 地域のエクロジャイトを紹介する。

Sunnfjord 地域では Naustdal, Kvineset, Erdal, Sande のエクロジャイトが詳細に研究された。岩石の組織より、この地域のエクロジャイトの変成史は少なくとも 5 つのステージに区分できる。すなわち、

ステージ I: Pre-eclogitic amphibolite stage (柎榴石斑状変晶の core の包有鉱物の組合せ)

ステージ IIA: Early eclogitic stage (柎榴石斑状変晶の rim の包有鉱物の組合せ)

ステージ IIB: Late eclogitic stage (基質部分の鉱物組合せ)

ステージ III: Post-eclogitic amphibolite stage (ステージ IIB の鉱物を置換する鉱物の組合せ)

ステージ IV: Greenschist stage (ステージ III の鉱物を置換する鉱物の組合せ)

PARAGENESIS	STAGE I	STAGE IIA	STAGE IIB	STAGE III	STAGE IV
MINERAL					
Garnet	Mn-rich		Mg-rich	-----	
Clinopyroxene		Ca-rich	Na-Al-rich	Diopsidic	
Na-amphibole		omphacite	omphacite	-----	
Na-Ca-amphibole	Ca-rich	Na-rich	Na-rich	Ca-rich	
Biotite					-----
Phengite		Si-rich	Si-rich	Si-poor	
Epidote/Cl. zoisite					
Plagioclase					
Chlorite					
Rutile					
Ilmenite					
Magnetite					
Sphene					

第7図 ノルウェーSunnfjord 地域 Kvineset のエクロジャイトの鉱物共生関係 (Krogh, 1980a)。実線は基本的にすべての岩石に出現する鉱物を示し、破線は出現する場合としない場合のあることを示す。

であり、各ステージの鉱物組合せは第7図に示したとおりである。これは、すでに述べたアルプス変成帯 Tauern Window において Miller (1977) によってなされたエクロジャイトのステージ区分 (第3図) にきわめてよく似た結果になっている。

柘榴石中の包有鉱物はエクロジャイト形成以前の含水鉱物組合せを示している。Sunnfjord 地域の大部分のエクロジャイトの先エクロジャイト・ステージは緑れん石角閃岩相であるが、Kvineset などの一部のサンプルでは藍閃片岩相である。

Sunnfjord 地域各地のエクロジャイトの形成条件は、温度は Ellis and Green (1979) の温度計、圧力は下限をひすい輝石分子 45% のオンファス輝石、上限を曹長石の安定領域 (Holland, 1979b) を用いて推定された。結果は以下のとおりである。

Naustdal

IIB $630 \pm 35^\circ\text{C}$ ($K_p = 9.3-11.3$) 15.0 ± 2.5 kb
Kvineset

IIA $490-510^\circ\text{C}$ ($K_p = 19.6-19.9$) 11.5 ± 2.5 kb

IIB $540 \pm 35^\circ\text{C}$ ($K_p = 12.4-14.8$) 12.5 ± 2.5 kb
Sande

IIB $510-525^\circ\text{C}$ ($K_p = 18.1-20.3$) 12.0 ± 2.5 kb

この結果は、Basal Gneiss Complex 中に広範に分布するエクロジャイトの平衡温度が、南東から北西方向へむかって高温になる (第8図) というこれまでの指

摘 (Krogh, 1977; Bryhni *et al.*, 1977) と基本的に調和的である。

Krogh (1980a) は Kvineset 地域の累進的エクロジャイトの形成過程と後退変成作用について、Ernst (1973, 1976) の P-T grid 上に模式的に示した。すなわち、藍閃片岩相からエクロジャイト化し (第9図の VP の破線に近い経路をとる)、その後の後退変成作用によって角閃岩相、緑色片岩相と温度を低下させたことを示した。しかし、Ernst の P-T grid を使うかぎり、Sunnfjord のエクロジャイトの大部分を占める緑れん石角閃岩相からのエクロジャイトの形成は別の経路をたどったことになる。最近の Krogh (1982) によるエクロジャイトの形成を示す P-T 図 (第9図) では、藍閃片岩相からのエクロジャイト化と角閃岩相からのエクロジャイト化の2つの経路が描かれている。同様の2つの P-T 経路は Cuthbert *et al.* (1983) によっても示された。しかし、彼等はこれらのエクロジャイトは周囲の片麻岩とともに *in situ* の変成作用で形成されたと考えており、2種の経路が存在することはこの主張と矛盾する。

藍閃石を含むエクロジャイトの産出は、これまでのところ Kvineset などの一部のサンプルに限られており、また、同じ Kvineset のサンプルでも別のサンプルでは藍閃石は認められず、角閃石はバロワ閃石である。ノルウェーのエクロジャイトの累進変成過程は、

第8図 ノルウェーのエクログジャイトの示す柎榴石-単斜輝石間の Fe-Mg 分配 (K_D) (Krogh, 1977)。等 K_D 値は規則的に分布する。すなわち、 K_D 値は北西方向の海岸線にむかって減少する。 K_D 値のあるものは、同一地域の小岩体の値の平均値である。

Takasu (1984a)によって提案された P-T grid を用い、藍閃片岩相と緑れん石角閃岩相の境界付近を通る一つの経路を考えることによって説明できる (第10図)。

これまで述べてきたように、ノルウェーの Basal Gneiss Complex 中のエクログジャイトの多くが累進的エクログジャイトであることには疑いはない。しかし、これらが *in situ* に周囲の片麻岩とともに累進変成作用を受けたかどうかは問題である。片麻岩の変成作用の研究はエクログジャイトに比べて少ないが、一部に高压の鉱物組合せが報告されている。

たとえば、Sunnfjord の片麻岩中の柎榴石とオンファス輝石の組合せはエクログジャイトと調和的な温度

条件を示すことが明らかにされている (Krogh, 1980a, b)。同様に Kristiansund では、柎榴石+単斜輝石+石英+緑れん石+斜長石+角閃石+ルチルの組合せより、 18.5 ± 3.0 kb, $750 \pm 50^\circ\text{C}$ の平衡条件が求められている (Krogh, 1980b)。

このように片麻岩中の高压を示す鉱物組合せはまれではない。しかし、エクログジャイトに比べて高压組合せの出現が少ないことは、エクログジャイト相から角閃岩相への後退変成作用がより進行したためと考えられる (Cuthbert *et al.*, 1983)。

4. 三波川帯

三波川帯のエクログジャイトの産出は大部分が四国中央部別子地域からである。例外的に四国西部の八幡浜

第9図 ノルウェーFramarsvik (IB-3), Verpeneset (VP), Romsdalshorn (RH)エクロジャイトの累進及び後退変成過程 (Krogh, 1982)。Verpeneset エクロジャイトには実線と破線の2つの累進変成過程が考えられている。I~IV は変成ステージを示す (原論文参照のこと)。

地域の川舞変はんれい岩-かんらん岩体中の柎榴石-単斜輝石岩 (石本, 1973; 大貫・石本, 1980) と, 四国東部高越地域のエクロジャイト (加治, 1984) が知られている。

別子地域のエクロジャイトの大部分は変はんれい岩体またはかんらん岩体に伴うものである。すなわち, 五良津変はんれい岩体 (坂野ら, 1976; 坂野・横山, 1977; Enami *et al.*, 1979; Takasu, 1984b), 東平変はんれい岩体 (上阪・鳥海, 1984), 瀬場谷変はんれい岩体 (Takasu, 1984a), 東赤石かんらん岩体 (Suzuki, 1930; 堀越, 1937; 番場, 1953; Yoshino, 1961, 1964; 坂野, 1968; Ernst *et al.*, 1970; Mori and Banno, 1973 など), 肉沢かんらん岩体 (Yokoyama, 1980) の岩体である。これらのエクロジャイトはいずれも後退のエクロジャイトであると考えられている (Kunugiza *et al.*, in press)。

別子地域瀬場谷中流部の緑れん石角閃岩相の三波川変成岩の分布地域には瀬場谷変はんれい岩体が貫入し

第10図 ノルウェーBasal Gneiss Complex 中のエクロジャイトの累進および後退変成過程の総括。RE, Gossen Island の Reset; RH, Nordfjord の Romsdal; V, Molde 半島 Horøysund; IB, Sunnfjord の Framarsvik; K, Sunnfjord の Kvineset; S, Sunnfjord の Sande; L, Lien; GLAUC, 藍閃片岩相; GS, 緑色片岩相; ECL, エクロジャイト相; AMP, 角閃岩相; GRAN, グラニュライト相。破線矢印は緑れん石角閃岩相と藍閃片岩相の境界付近からのエクロジャイト形成の累進変成過程。Lien の実線矢印は core-core 組合せから rim-rim 組合せへの累進変成過程。その他の実線矢印は各エクロジャイトの後退変成過程を示す。

ている。この岩体の原岩は層状はんれい岩体で, その後高温のエクロジャイト (720-750°C, 12-20 kb), そして現位置に固体貫入して三波川変成作用下で低温のエクロジャイト (610-630°C, 10-17 kb) を経た後, 含水鉱物組合せの緑れん石角閃岩相になったものである (Takasu, 1984a)。岩体周囲の塩基性片岩は高温のエクロジャイトの状態であった瀬場谷岩体の固体貫入による高圧下での接触変成作用 (high-pressure contact metamorphism) で幅数 10 m にわたってエクロジャイト化が起きている。この岩石の柎榴石とオンファス輝石はしばしば斑状変晶を形成し, 顕著な片理をなす緑れん石角閃岩相の鉱物 (緑れん石, パロウ閃石など) を Si 片理を保ちつつ包有している。

柎榴石とオンファス輝石について Fe^{2+} -Mg 分配を

第11図 三波川帯瀬場谷の累進的エクロジイト (Eclogitic basic schist) と後退的エクロジイト (Sebadani mass) の柎榴石-オンファス輝石間の Fe^{2+} -Mg 分配 (Takasu, 1984a)。

とると, core-core 組合せから rim-rim 組合せへと K_D の値は小さくなり, 温度の上昇のもとにこれらの鉱物ができたことを示している (第11図)。Rim-rim 組合せの K_D は9-12 (平均10.8) であり, Ellis and Green (1979) の温度計によって示される 630-650℃ は瀬場谷変はんれい岩体の低温のエクロジイトの平衡温度と似ている。

これらの事実は, 瀬場谷変はんれい岩体の周囲に形成されているエクロジイトは緑れん石角閃岩相の鉱物組合せの片理形成後, これらの鉱物が脱水反応することによってできた累進的エクロジイトであると考えられる。

IV. 考 察

変成作用の温度上昇のもとで形成されたエクロジイトを累進的エクロジイトと定義し, 世界各地の変成帯より産出するエクロジイトを検討した。その結果, 最初に予測したとおり, Coleman *et al.* (1965) の Group B と C に属するエクロジイトのかかりのものが累進的エクロジイトであることがわかった。また, Fry and Fyfe (1969) に代表されるような, 含水鉱物組合せからの累進変成作用に伴うエクロジイトの形成は 50 kb 以上の高圧条件でのみしか起こらないという主張は否定されたことになる。

これまでの記述をもとに, 累進的エクロジイトの

認定は以下にあげるような地質学的・岩石学的性質を確認することによって可能である。

- 1) エクロジイト相の広域的分布
 - a) 含水鉱物組合せからエクロジイト相に至る累進変成作用を示す岩石の広域的分布
 - b) エクロジイト相内の累進変成作用の地質学的分布
- 2) 柎榴石及びオンファス輝石中の包有鉱物
- 3) 柎榴石及びオンファス輝石の累帯構造

1) エクロジイト相の広域的分布

含水鉱物組合せからエクロジイト相に至る累進変成作用の過程が地質学的に広域分布する典型例は, ニュー・カレドニアの高圧変成帯である。また, アルプス変成帯 Tauern Window でも, 緑色片岩から柎榴石緑色片岩, 柎榴石角閃岩を経てエクロジイトに至る広域的な変成相の累進変化が認められる。

ノルウェー南西部のカレドニア帯及び Lepontine Alps のアルプ・アラミ地域では広大な地域にわたって多数のエクロジイト岩体が存在する。これらのエクロジイトにおいて推定された平衡温度・圧力条件は, エクロジイト分布地域内で連続的な変化を示している。このことは, 個々のエクロジイト岩体が周囲の変成岩に対して *in situ* であるかどうかは今後の詳細な検討が必要であるが, 広域的なエクロジイト相の変成作用の存在を予測させるものである。

三波川帯瀬場谷では, 緑れん石角閃岩相の塩基性片岩が, 熱源である瀬場谷変はんれい岩体の周縁部でエクロジイトを形成している。

2) 柎榴石及びオンファス輝石中の包有鉱物

エクロジイトの主要構成鉱物である柎榴石及びオンファス輝石中の包有鉱物を検討することにより, エクロジイト形成以前の含水鉱物組合せが推定できる。

ノルウェーの Sunnfjord 地域のエクロジイトの一部やフランスカン帯のエクロジイト (Coleman *et al.*, 1965) には藍閃片岩相を示す鉱物が柎榴石に包有されている。一方, 大部分のノルウェーのエクロジイト, アルプスの Tauern Window 及び三波川帯瀬場谷のエクロジイトは柎榴石の包有物として緑れん石角閃岩相の鉱物組合せをもっている。瀬場谷エクロジイトではオンファス輝石の斑状変晶も柎榴石の場合と同種の鉱物を包有している。

3) 柎榴石及びオンファス輝石の累帯構造

累進的エクロジイトの柎榴石は多くの場合顕著な

第12図 ノルウェー, Lien かんらん岩体中のエクロジャイト (A) と岩体周囲の片麻岩中のエクロジャイト (B) の柎榴石の累帯構造 (Medaris, 1980b)。

累帯構造を示す。たとえば、ノルウェーのエクロジャイトの例でも明らかなように、比較的低温のエクロジャイトの柎榴石は Mn に富む core から Fe に富む rim へと変化する。一方、比較的高温のエクロジャイトでは Fe に富む core から Mg に富む rim へと変化する。すなわち、変成度の上昇とともに、柎榴石の化学組成は Mn に富むものから Fe に富むものを経て、Mg に富むものへと変化する。変成度の上昇に伴うこのような化学組成の変化や累帯構造は、エクロジャイトに限らず、一般の累進変成作用のもとでしばしば観察されている。たとえば、三波川累進変成作用で形成された柎榴石については Banno *et al.* (1986) などによって同様の累帯構造が詳しく記載されている。

ノルウェーの Lien 地域及び三波川帯瀬場谷では、それぞれ Lien かんらん岩体、瀬場谷変はんれい岩体中の後退のエクロジャイトの柎榴石は core から rim へと Fe/Mg が増加する累帯構造を示す。一方、これらの岩体の周囲にある片麻岩及び結晶片岩中の累進のエクロジャイトの柎榴石は rim へむかって Fe/Mg の減少する累帯構造をしている (第11, 12図)。

累進変成作用下で形成されたと考えられる累帯構造をもつ柎榴石はアルプス変成帯の Voltri Group のエクロジャイト (Ernst, 1976) や Piemont 地域のエクロ

第13図 ノルウェー, Sunnfjord の Framarsvik エクロジャイトの柎榴石に包有されるオンファス輝石の累帯構造 (Krogh, 1982)。

ジャイト (Dal Piaz and Ernst, 1978) などでも認められる。これらのエクロジャイトは他の地質学的・岩石学的性質からは累進的か後退的かは不明であるが、柎榴石の累帯構造をみる限り累進的形成過程を経た可能性がある。

オンファス輝石の累帯構造については、これまであまり記載されていないが、ノルウェーの Sunnfjord Framarsvik のエクロジャイト中のオンファス輝石は core から rim へと Fe/Mg が増加し、同時にひすい輝石分子が増加する累帯構造を示す (第13図) (Krogh, 1982)。これは、オンファス輝石に認められる累進変成作用を示す累帯構造といえる。

累進的エクロジャイトでは、柘榴石及びオンファス輝石の累帯構造を反映して、core-core 組合せから rim-rim 組合せへ Fe^{2+} -Mg 分配は K_D が減少するように変化する (第 6, 11 図)。

以上に述べてきたように、世界各地の変成帯に出現するエクロジャイトのかかりのものが累進的エクロジャイトであることが明らかになった。エクロジャイトを形成する累進変成作用において、エクロジャイト以前の変成相 (エクロジャイトの低温側の変成相) には、少なくとも緑れん石角閃岩相の場合と藍閃片岩相の場合の 2 種類が存在する。

緑れん石角閃岩相からエクロジャイト化する例としては、アルプス変成帯の Tauern Window, ノルウェーのカレドニア帯、そして三波川変成帯の累進的エクロジャイトがあげられる。一方、藍閃片岩相からのエクロジャイト化は、ニュー・カレドニア、アルプス変成帯の Lepontine Alps 及び Sesia-Lanzo 帯、フランシスカン変成帯が例としてあげられる。緑れん石角閃岩相からのエクロジャイト化のおこる変成帯は、高圧中間群あるいは中圧型の変成相系列 (Miyashiro, 1961) を示す地帯であり、藍閃片岩相からのエクロジャイト化の認められる地帯の多くはひすい輝石+石英の組合せの出現する高圧型変成相系列を示す変成帯である。これらのことより、エクロジャイト化の 2 種の経路のちがいは、変成帯のおかれている圧力のちがいに基づいているものと考えられる。すなわち、藍閃片岩相からのエクロジャイト化は緑れん石角閃岩相からのエクロジャイト化に比べて高圧条件下で達成されたものと考えられる。

謝 辞 稿を終るにあたって、原稿を読んで有益な助言と討論をしていただいた京都大学の坂野昇平教授に心から感謝するしだいである。

引用文献

- Abraham, K., Hormann, P.K. and Raith, M. (1974), Progressive metamorphism of basic rocks from the southern Hohe Tauern area, Tyrol (Austria). *N. Jb. Mineral. Abh.*, **122**, 1-35.
- 番場猛夫 (1953), 東赤石山橄欖岩体 (超塩基性岩にともなわれる尖晶石の研究 その 2). 地質雑, **59**, 437-445.
- 坂野昇平 (1968), 愛媛県東赤石山のエクロジャイトの結晶温度についての一考察. 岩鉱, **59**, 1-8.
- Banno, S. and Matsui, Y. (1965), Eclogite types and partition of Mg, Fe, and Mn between clinopyroxene and garnet. *Proc. Japan. Acad.*, **41**, 716-721.
- 坂野昇平, 横山一己, 岩田修, 寺島進世意 (1976), 四国中央部三波川変成帯の緑れん石角閃岩体の成因. 地質雑, **82**, 199-210.
- 坂野昇平, 横山一己 (1977), 四国中央部の超塩基性一塩基性岩体. 秀 敬編 三波川帯, 57-68, 広島大学出版会, 広島.
- Banno, S., Sakai, C., and Higashino, T. (1986), Pressure-temperature trajectory of the Sanbagawa metamorphism deduced from garnet zoning. *Lithos*, **19**, 51-63.
- Binns, R.A. (1967), Barroisite-bearing eclogite from Naustdal, Sognog Fjordane, Norway. *J. Petrol.*, **8**, 349-371.
- Black, P.M. (1977), Regional high-pressure metamorphism in New Caledonia; Phase equilibria in the Ouegoa district. *Tectonophysics*, **43**, 89-107.
- Brothers, R.N. (1974), High-pressure schists in northern New Caledonia. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **46**, 109-127.
- Brothers, R.N. and Yokoyama, K. (1982), Comparison of the high-pressure schist belts of New Caledonia and Sanbagawa, Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **79**, 219-229.
- Brueckner, H.K. (1974), "Mantle" Rb/Sr and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios for clinopyroxenes from Norwegian garnet peridotites and pyroxenites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **24**, 26-32.
- Brueckner, H.K. (1977), A crustal origin of eclogites and a mantle origin for garnet peridotites: Strontium isotopic evidence from clinopyroxene. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **60**, 1-15.
- Bryhni, I. (1966), Reconnaissance studies of gneisses, ultramafics, eclogites and anorthosites in outer Nordfjord, eastern Norway. *Norges Geol. Unders.*, **264**, pp. 67.
- Bryhni, I., Bollingberg, H.J. and Graff, P. (1969), Eclogites in quartzo-feldspathic gneiss of Nordfjord, West Norway. *Norsk Geol. Tidssk.*, **49**, 193-225.
- Bryhni, I., Green, D.H., Heier, K.S. and Fyfe, W.S. (1970), On the occurrence of eclogite in Western Norway. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **36**, 12-19.
- Bryhni, I., Krogh, E.J. and Griffin, W.L. (1977), Crustal derivation of Norwegian eclogites: a review. *N. Jb. Mineral. Abh.*, **130**, 49-68.
- Carswell, D.A. (1968a), Possible primary upper mantle peridotite in Norwegian basal gneiss. *Lithos*, **1**, 322-355.

- Carswell, D.A. (1968b), Picritic magma-residual dunite relationships in garnet peridotite at Kalskaret near Tafjord, southern Norway. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **19**, 97-124.
- Carswell, D.A. (1973), Garnet pyroxenite lens within Ugelvik layered garnet peridotite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **20**, 347-352.
- Carswell, D.A. (1974), Comparative equilibration temperatures and pressures of garnet lherzolite in Norwegian gneisses and in kimberlite. *Lithos*, **7**, 113-121.
- Champness, P.E., Fyfe, W.S. and Lorimer, G.W. (1974), Dislocations and voids in pyroxene from a low-temperature eclogite: Mechanism of eclogite formation. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **43**, 91-98.
- Coleman, R.G., Lee, D.E., Beatty, L.B. and Brannock, W.W. (1965), Eclogites and eclogites: Their differences and similarities. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **76**, 483-508.
- Compagnoni, R. (1977), The Sesia-Lanzo zone: High pressure-low temperature metamorphism in the Austroalpine continental margin. *Rend. Soc. Ital. Mineral. Petrol.*, **33**, 335-374.
- Cuthbert, S.J., Harvey, M.A. and Carswell, D.A. (1983), A tectonic model for the metamorphic evolution of the Basal Gneiss Complex, Western South Norway. *J. Metamorphic Geol.*, **1**, 63-90.
- Dal Piaz, G.V. and Ernst, W.G. (1978), Areal geology and petrology of eclogites and associated metabasites of Piemonte ophiolite nappe, Breull-St. Jacques area, Italian Western Alps. *Tectonophysics*, **51**, 99-126.
- Dal Vesco, E. (1953), Genesie metamorfosi delle rocce basiche e ultrabasiche nell'ambiente mesozonale dell'orogene Pennidico. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, **33**, 173-480.
- Desmons, J. and Ghent, E.D. (1977), Chemistry, zonation and distribution coefficients of elements in eclogitic minerals from the eastern Sesia unit, Italian Western Alps. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, **57**, 397-411.
- Desmons, J. and O'Neil, J.R. (1978), Oxygen and hydrogen isotope compositions of eclogites and associated rocks from the Eastern Sesia zone (Western Alps, Italy). *Contrib. Mineral. Petrol.*, **67**, 79-85.
- De Wit, M.J. and Strong, D.F. (1975), Eclogite-bearing amphibolites from the Appalachian mobile belt, northwest Newfoundland: Dry versus wet metamorphism. *J. Geol.*, **83**, 609-627.
- Ellis, D.J. and Green, D.H. (1979), An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **71**, 13-22.
- Enami, M., Iwata, O. and Banno, S. (1979), Notes on petrography and rock-forming mineralogy (6) Glaucophane in the Iratsu amphibolite in the Sanbagawa belt in central Shikoku. *J. Japan. Assoc. Min. Petr. Econ. Geol.*, **74**, 332-338.
- Ernst, W.G. (1973), Interpretative synthesis of metamorphism in the Alps. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **84**, 2053-2078.
- Ernst, W.G. (1976), Mineral chemistry of eclogites and related rocks from the Voltri Group, western Liguria, Italy. *Schweiz. Miner. Petrogr. Mitt.*, **56**, 293-343.
- Ernst, W.G. (1977), Mineralogic study of eclogitic rocks from Alpe Arami, Lepontine Alps, southern Switzerland. *J. Petrol.*, **18**, 371-398.
- Ernst, W.G., Seki, Y., Onuki, H. and Gilbert, M.C. (1970), Ultramafics and associated rocks from Higashi-akaishi-yama, Shikoku. In Comparative Study of Low-Grade Metamorphism in the California Coast Ranges and the Outer Metamorphic Belt of Japan., *Geol. Soc. Amer. Memoir*, **124**, 109-122.
- Eskola, P. (1921), On the eclogites of Norway. *Vidensk. Selsk. Skr. I. Mat.-Naturv. Kl.*, No. 8, 1-118.
- Eskola, P. (1939), Die Metamorphen Gesteine. In Die Entstehung der Gesteine by Barth, T.F.W., Correns, C.W. and Eskola, P., 263-407. Julius Springer, Berlin.
- Essene, E.J. and Fyfe, W.S. (1967), Omphacite in Californian metamorphic rocks. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **15**, 1-23.
- Evans, B.W., Trommsdorff, V. and Richter, W. (1979), Petrology of an eclogite-metaroddingite suite at Cima di Gagnone, Ticino, Switzerland. *Amer. Mineral.*, **64**, 15-31.
- Fry, N. and Fyfe, W.S. (1969), Eclogites and water pressure. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **24**, 1-6.
- Gjelsvik, T. (1952), Metamorphosed dolerites in the gneiss area of Sunnmore on the West Coast of Southern Norway. *Norsk Geol. Tidsskr.*, **30**, 33-134.
- Green, D.H. (1969), On the mineralogy of the Norwegian eclogites. *Contrib. Phys.-Chem. Petrol.*, **1**, 37-44.
- Green, D.H. and Ringwood, A.E. (1967), An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applica-

- tions. Dept. Geophysics and Geochemistry, Australian National Univ., Pub. 444, 1-59.
- Griffin, W.R. (1972), Formation of eclogites and the coronas in anorthosites, Bergen Arc, Norway. *Geol. Soc. Amer. Memoir*, **135**, 37-63.
- Griffin, W.R. and Råheim, A. (1973), Convergent metamorphism of eclogites and dolerites, Kristiansund area, Norway. *Lithos*, **6**, 21-41.
- Häty, R.J. (1822). *Traite de Mineralogie*. 2nd ed.
- Heinrich, C.A. (1982), Kyanite-eclogite to amphibolite facies evolution of hydrous mafic and pelitic rocks, Adula nappe, Central Alps. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **81**, 30-38.
- Hernes, I. (1954), Eclogite-amphibolite on the Molde Peninsula, Southern Norway. *Norsk Geol. Tidsskr.*, **33**, 163-184.
- Holland, T.J.B. (1979a), High water activities in the generation of high pressure kyanite eclogites of the Tauern window, Austria. *J. Geol.*, **87**, 1-27.
- Holland, T.J.B. (1979b), Experimental determination of the reaction $\text{paragonite} = \text{jadeite} + \text{kyanite} + \text{H}_2\text{O}$, and internally consistent thermodynamic data for part of the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$, with application to eclogites and blueschists. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **68**, 293-301.
- 堀越義一(1937), 愛媛県別子付近の岩石地質概報, 地質雑, **44**, 121-140.
- Hyndman, D.W. (1972). *Petrology of Igneous and Metamorphic Rocks*. pp. 533. McGraw-Hill, New York.
- 石本詔久(1973), 四国西部, 八幡浜地域の變成岩, 岩鉱, **68**, 383-394.
- 加治敦次(1984), 高越山南面よりエクロジヤイトの産出と四国東部三波川帯の貫入岩帯について, 日本地質学会関西支部報, No. 97, 13-14.
- 上阪佳史, 鳥海光弘(1984), 東平角閃岩体の變形と再結晶, 日本地質学会第91年學術大会講演要旨集, 456.
- Krogh, E.J. (1977), Evidence of Precambrian continent-continent collision in Western Norway. *Nature*, **267**, 17-19.
- Krogh, E.J. (1980a), Geochemistry and petrology of glaucophane-bearing eclogite and associated rocks from Sunnfjord, Western Norway. *Lithos*, **13**, 355-380.
- Krogh, E.J. (1980b), Compatible P-T conditions for eclogites and surrounding gneisses in the Kristiansund area, Western Norway. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **75**, 387-393.
- Krogh, E.J. (1982), Metamorphic evolution of Norwegian country-rock eclogites, as deduced from mineral inclusions and compositional zoning in garnets. *Lithos*, **15**, 305-321.
- Kunugiza, K., Takasu, A. and Banno, S. (in press), The origin and metamorphic history of the ultramafic and metagabbro bodies in the Sanbagawa metamorphic belt. *Geol. Soc. Amer. Memoir*, **164**.
- Lambert, L.B. and Wyllie, P.J. (1968), Stability of hornblende and a model for the low velocity zone. *Nature*, **219**, 1240-1241.
- Lappin, M.A. (1960), On the occurrence of kyanite in the eclogite of the Selje and Aheim districts, Nordfjord. *Norsk Geol. Tidsskr.*, **40**, 289-296.
- Lappin, M.A. (1966), The field relationships of basic and ultrabasic masses in the basal gneiss complex of Stadlandet and Almklov dalen, Nordfjord, Southwestern Norway. *Norsk Geol. Tidsskr.*, **46**, 439-495.
- Lappin, M.A. (1973), An unusual clinopyroxene with complex lamellar intergrowths from an eclogite in the Sunndal-Grubse ultramafic mass, Almklov dalen, Nordfjord, Norway. *Mineral. Mag.*, **39**, 313-320.
- Lappin, M.A. (1974), Eclogites from the Sunndal-Grubse ultramafic mass, Almklov dalen, Norway and the T-P history of the Almklov dalen masses. *J. Petrol.*, **15**, 567-601.
- Lappin, M.A. (1977), Crustal and in situ origin of Norwegian eclogites. *Nature*, **269**, 730.
- Medaris, L.G. Jr. (1980a), Convergent metamorphism of eclogite and garnet-bearing ultramafic rocks at Lien, West Norway. *Nature*, **283**, 470-472.
- Medaris, L.G. Jr. (1980b), Petrogenesis of the Lien peridotite and associated eclogites, Almklov dalen, Western Norway. *Lithos*, **13**, 339-353.
- Miller, C. (1974), On the metamorphism of the eclogites and high-grade blueschists from the Peninic terrane of the Tauern Window, Austria. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, **54**, 371-384.
- Miller, C. (1977), Mineral paragenesis recording the P, T history of Alpine eclogites in the Tauern Window, Austria. *N. Jb. Mineral. Abh.*, **130**, 69-77.
- Miyashiro, A. (1961), Evolution of metamorphic belts. *J. Petrol.*, **2**, 277-311.
- Möckel, J.R. (1969), Structural petrology of the garnet-peridotite of Alpe Arami (Ticino, Switzerland). *Leid. Geol. Med.*, **42**, 61-130.
- Mori, T. and Banno, S. (1973), Petrology of peridotite and garnet clinopyroxenite of the Mt. Higashi-Akaishi mass, central Shikoku, Japan

- Subsolidus relation of anhydrous phases. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **41**, 301-323.
- Mysen B.O. and Heier, K.S. (1971), A note on the field occurrence of a large eclogite on Hareid, Sunnmøre, Western Norway. *Norsk Geol. Tidsskr.*, **51**, 93-96.
- Mysen, B.O. and Heier, K.S. (1972), Petrogenesis of eclogite in high grade metamorphic gneisses, exemplified by the Hareidland eclogite, Western Norway. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **36**, 73-94.
- O'Hara, M.J. and Mercy, E.L.P. (1963), Petrology and petrogenesis of some garnetiferous peridotites. *Trans. Roy. Soc. Edinburgh*, **65**, 251-314.
- 大貫 仁, 石本詔久 (1980), 三波川帯, 八幡浜地域のざくろ石-単斜輝石角閃岩類-川舞岩体についての予報一, 岩鉱特別号, No. 2, 209-215.
- Råheim, A. (1972), Petrology of high grade metamorphic rocks of the Kristiansund area. *Norges Geol. Unders.*, **270**, 1-75.
- Råheim, A. and Green, D.H. (1974), Experimental determination of the temperature and pressure dependence of the Fe-Mg partition coefficient for coexisting garnet and clinopyroxene. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **48**, 179-203.
- Raith, M., Hormann, P.K. and Abraham, K. (1977), Petrology and metamorphic evolution of the Penninic ophiolites in the Western Tauern Window, Austria. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, **57**, 187-232.
- Reinsch, D. (1977), High pressure rocks from Val Chiusella (Sesia-Lanzo zone, Italian Alps). *N. Jb. Mineral. Abh.*, **130**, 90-102.
- Reinsch, D. (1979), Glaucophanites and eclogites from Val Chiusella, Sesia-Lanzo zone (Italian Alps). *Contrib. Mineral. Petrol.*, **70**, 257-266.
- Skjerlie, F.J. (1969), The Pre-Devonian rocks in the Askvoll-Gaulan area and adjacent district, Western Norway. *Norsk Geol. Unders.*, **258**, 325-359.
- Suzuki, J. (1930), Petrological study of the crystalline schist system of Shikoku, Japan. *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. Ser. IV*, **1**, 27-111.
- Takasu, A. (1984a), Prograde and retrograde eclogites in the Sambagawa metamorphic belt, Besshi district, Japan. *J. Petrol.*, **25**, 619-643.
- Takasu, A. (1984b), Geology and petrology of the Sambagawa metamorphic belt in the Besshi district, central Shikoku, Japan. Dr. Sc. Thesis of Kyoto Univ., 1-174. (MS)
- Turner, F.J. (1968), Metamorphic petrology. pp. 403, McGraw-Hill, New York.
- Yoder, H.S. and Tilley, C.E. (1962), Origin of basaltic magmas: An experimental study of natural and synthetic rock systems. *J. Petrol.*, **3**, 342-532.
- Yokoyama, K. (1980), Nikubuchi peridotite body in the Sambagawa metamorphic belt; Thermal history of the 'Al-pyroxene-rich suite' peridotite body in high pressure metamorphic terrain. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **73**, 1-13.
- Yokoyama, K., Brothers, R.N. and Black, P.M. (in press), Regional eclogite facies in the high-pressure metamorphic belt of New Caledonia. *Geol. Soc. Amer. Memoir*, **164**.
- Yoshino, G. (1961), Structural-petrological studies of peridotite and associated rocks of the Higashiakaishi-yama district, Shikoku, Japan. *J. Sci. Hiroshima Univ., Ser. C*, **3**, 343-402.
- Yoshino, G. (1964), Ultrabasic mass in the Higashiakaishiyama district, Shikoku, Southwest Japan. *J. Sci. Hiroshima Univ., Ser. C*, **4**, 333-364.