

# 超 高 圧 変 成 岩

平 島 崇 男<sup>1)</sup>

## 1. はじめに

1983年9月にアメリカ合衆国ワシントン州の Bellingham で開かれた高压変成岩に関するペンローズ会議でフランスの C. Chopin は西アルプス産のパイロープ単結晶(直径 20 cm!)を展示し, 参加者の興味を引きつけた。私自身, 最初は模型のざくろ石かと勘違いしたほど自型性の良い12面体の見事な結晶であった。しかし, 会議参加者をもっと驚かせたのは, パイロープの中にコース石が包有されているという Chopin の発表であった。

石英の高压相であるコース石は1953年に Coes によってはじめて合成された。コース石の形成には 600°C で 27 kbar 以上, 下部地殻から上部マントルに相当する圧力が必要である。コース石は1960年に天然の岩石から最初に見つかったが, それはアリゾナの隕石孔からだった。その後, キンパーライト由来の岩石から見つかり, ついに Chopin (1984) や Smith (1984) が地殻物質起源の高压変成岩から発見した。Chopin 達の発見までは, 地殻物質起源の変成岩としては, 西アルプスのひすい輝石を含む変成花崗岩 (15kbar; Compagnoni, 1977) や東アルプスの石英エクロジイト (19kbar; Holand, 1979b) 等がもっとも高压を示すと考えられていた。コース石の発見は複雑な鉱物共生関係の解析を必要とせずに, 地殻物質が約100km程度, つまりマントル上部で再結晶したことを直接的に示すものであった。

その後, 高压変成岩からのコース石の発見はしばらく途絶えていたが, 1989年になって, 中華人民共和国東部の揚子地塊と中朝地塊の境界部の造山帯(蘇魯一大別山変成帯), ソ連邦ウラル山脈および天山山脈に産するエクロジイトから相次いで発見された(Wang et al., 1989; Enami and Zang, 1990; Okay et al., 1989; Yang and Smith, 1989; Hirajima et al., 1990; Sobolov & Shatsky, 1990; Tagiri & Bakirov, 1990)。ウラル山脈の超高压変成岩はダイヤモンドさえ含んでおり, 超高压変成岩の研究

は学問的にも経済的にも注目を集め始めている。学術的には超高压変成岩の上昇プロセスの解明が重大な関心事であり, 経済的理由は言わずもがなであろう。この小論では, 岩石学的興味から, 超高压変成岩の最近の研究状況を紹介する。

## 2. 超高压変成岩とは

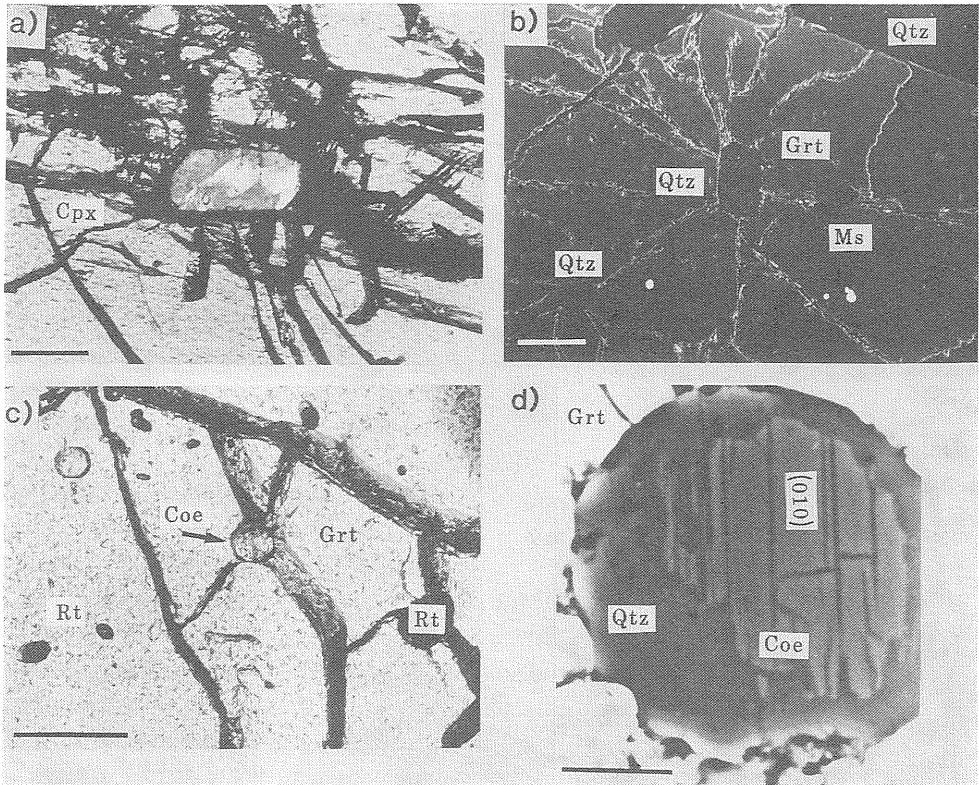
コース石を含む変成岩, あるいはコース石と同程度の高压条件下で形成された地殻物質起源の変成岩は英語では very (あるいは ultra) high pressure metamorphic rock と記述されている。小論ではそれらを超高压変成岩と訳す。

超高压変成岩のもっとも直接的な指標はコース石の出現である。しかし, 低压下ではコース石は不安定で石英に転移してしまう。事実, たいていの超高压変成岩のマトリクスに存在しているシリカ相は石英である。しかし, コース石がほかの珪酸塩鉱物に包有されている場合, ホスト鉱物があたかも压力容器のように作用し, コース石は完全に分解することなく, シリカ包有物の中心に残存していることがある(第1図)。このようなコース石はその周囲を多片双晶状の石英で取り囲まれたり, コース石包有物を中心にして, ホスト鉱物に放射状のクラックが発達することが多い(第1図)。ホスト鉱物の破壊はコース石-石英転移の際の体積増加のためである。コース石は残っていないとしても, 上記の特徴を示す石英包有物はコース石仮像と判断されている(Smith, 1988)。コース石あるいはその仮像はざくろ石や単斜輝石に含まれていることが多く, 希に藍晶石や緑簾石にも含まれる。

現在までに, コース石(仮像のみの場合は除く)やダイヤモンドを含む超高压変成岩は第1表にまとめた4地域から報告されている。これらの地域のエクロジイトは藍晶石を含む中温型であり(Carswell, 1990), Na, Al に富んだ特殊な角閃石(Nyboeite,  $\text{NaNa}_2\text{Mg}_3\text{Al}_3\text{Si}_7\text{O}_{22}$ )

1) 京大大学院地質学鉱物学教室:  
〒606 京都府京都市左京区北白川追分町

キーワード: 超高压変成岩, エクロジイト, ダイヤモンド,  
コース石, アルプス変成帯, カレドニア変成帯,  
ウラル造山帯, 蘇魯一大別山変成帯



第1図 中国東海産コース石とコース石仮像 (Hirajima et al., 1990; 原図). a) 単斜輝石中 (Cpx) のコース石仮像. コース石は完全に石英に置換しているが, 多片双晶を示す事と, 仮像の周囲のクラックの発達から, かつてコース石だったと判断できる. クロスニコル. b) シリカ包有物 (Qtz) の周囲に発達する放射状クラック. ホスト鉱物はざくろ石 (Grt). 白雲母包有物 (Ms) の周囲にはクラックは発達しない. 反射電子線像. c) ざくろ石 (Grt) 中のコース石 (Coe). オープンニコル. d) c) の拡大図. 反射電子線像. 中央のへき開の発達した部分がコース石. その周囲は石英に分解している. a), b), c) のスケールは 100  $\mu\text{m}$ . d) は 10  $\mu\text{m}$ .

第1表 世界の超高压変成岩

	超高压鉱物	母岩	分布	年代・造山運動
WGR	Ky-エクロジヤイト	片麻岩	20×100km	400Ma
Norway	Nyboeite Al-Sphene Magnesite-Diopside		の範囲に点在	Collision North America-Baltic
Dora	Pyrope	藍閃片岩相	5×10km	120Ma
Maira	Ellenbergierite	石英エクロジヤイト		Collision
ALPS	Ky-エクロジヤイト Jd-Ky			Africa-Europa
Urals	Diamond	片麻岩	60000km <sup>2</sup>	530Ma
Tien Shan	Al-Sphene	amphibolite-	の一部	(peak of meta.)
USSR	High K <sub>2</sub> O-Cpx	granulite		Collision Siberia-Baltic
East China	Ky-エクロジヤイト Nyboeite Al-Sphene Mg 十字石	片麻岩	延長 1000km の範囲に点在	Archean? collision 中朝一揚子

(OH)<sub>2</sub>, Al に富んだスフェーンなどが見つかっている。また、テクトニックな環境としては大陸衝突が起こった場所という点で共通している。しかし、超高压変成岩の形成年代は先カンブリア紀—白亜紀にわたり多様であり、超高压変成岩の周囲の岩石が低圧ないし中圧型の片麻岩である地域もあれば、低温高压型の広域変成岩の時もある(第1表)。Smith (1988) はノルウェーや中国の超高压変成岩を産出する地域を“コース石エクロジャイト岩石区”と呼んだが、その地域の岩石がすべて超高压変成作用を受けたか否かが、今もっとも重要な問題である。以下、各地の超高压変成岩地域の地質・岩石学的特徴をまとめる。

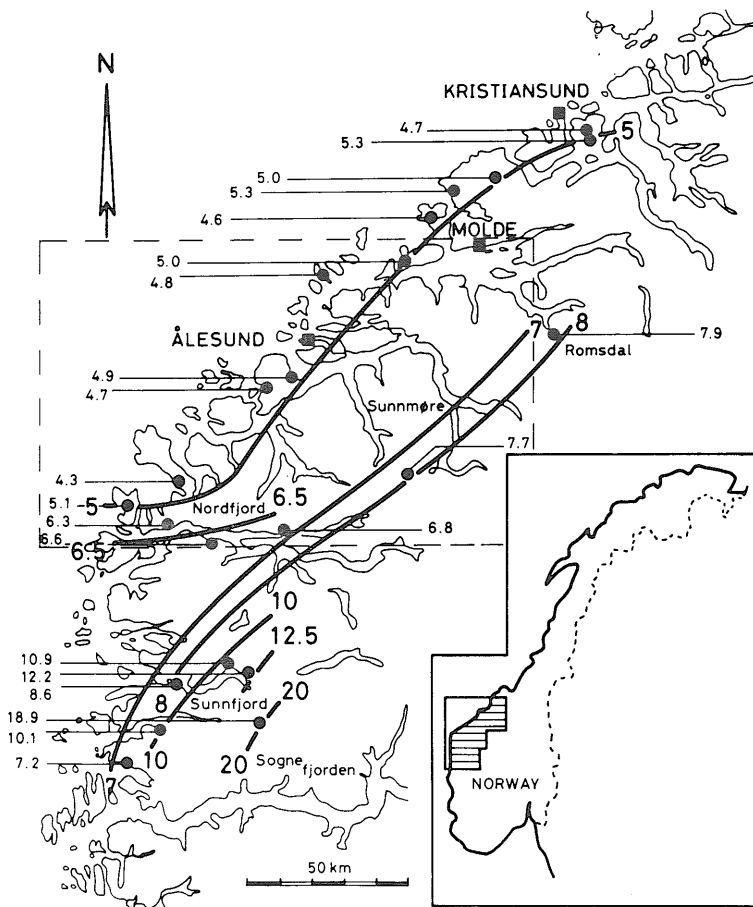
### 3. ノルウェーの超高压変成岩

Smith (1948) や Smith and Lappin (1989) はノルウ

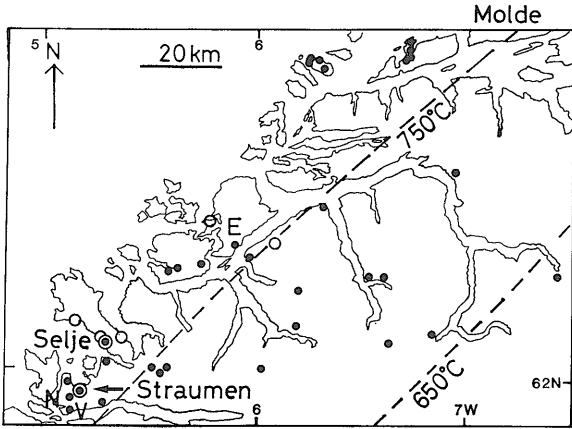
ェー西海岸の西部片麻岩地域 (Western Gneiss Region) のエクロジャイトのザクロ石やオンファス輝石からコース石包有物を見いだした(第2図)。西部片麻岩地域はノルウェーのカレドニア造山帯の中軸部をなし、片麻岩・斜長岩・ペリドタイト・ガブロ・ラパキビ花崗岩などで構成されている。一般にエクロジャイトは片麻岩中にレンズ状に産したり、ペリドタイト中に層状に産出する。大半の片麻岩は角閃岩相の鉱物共生を示し、西部片麻岩地域では、周囲の中圧/低圧の片麻岩中に高压型のエクロジャイトが岩塊状に産出している。そのため、エクロジャイトが周囲の母岩に対して、“異地性”であるか、“現地性”であるか、ホットな論争が展開されてきた (Bryhni et al., 1985; Smith 1980, 1988; Cuthbert & Carswell, 1990)。

異地性派の根拠の一つはエクロジャイトと周囲の片麻岩のみかけの変成度があまりにも異なっている点である。それに対して、現地性派が示した重要な野外事実は、エクロジャイト中のざくろ石—単斜輝石間の Fe/Mg 分配で推定した温度が、北西部の海岸線から南東の内陸部に向けて、800℃から500℃に連続して減少することである(第2図)。エクロジャイト形成条件の広域変化を構造岩塊モデルで説明するのは難しい。一方、現地性派の最大の弱点は周囲の母岩に典型的な高压鉱物組み合わせが欠けている点にある。

さて、Smith 達がコース石を見いだしたのはノルウェーの西海岸 Selje と約 15km 南西の Straumen のエクロジャイトからである(第3図)。これら以外にもコース石仮像を含むエクロジャイトは海岸部の 20×100 km の範囲に点在している(第3図)。Smith (1988) はこれらの岩石が一連のナップを形成していると考えた。コース石エクロジャイトの形成条件はマグネサイト—透輝石の共生、コース石の存在、ザクロ石—単斜輝石温度計などから、27kbar 以上、750 ±150℃と見積もられている (Smith and Lappin, 1989)。コース石エクロジャイトからは、Nyboeite, Al に富むスフェーン、Mg に富む十字石などの特異な鉱物も見いだされている



第2図 ノルウェー Western Gneiss Region のエクロジャイト中のざくろ石—単斜輝石間の Fe/Mg 分配 (Krogh, 1977)。一般に分配係数が1に近いほど高温を示す。破線内の地域を第3図に示す。



第3図(左)

Western Gneiss Region でのコース石エクロジャイト(◎), コース石仮像エクロジャイト(○), その他のエクロジャイト(●)の産出地点. Smith (1988) 原図を簡略化した. E: Eikisundahl eclogite (Jamtveit, 1987), V: Verpeneset eclogite (Krogh, 1982), N: Nybø eclogite pod.

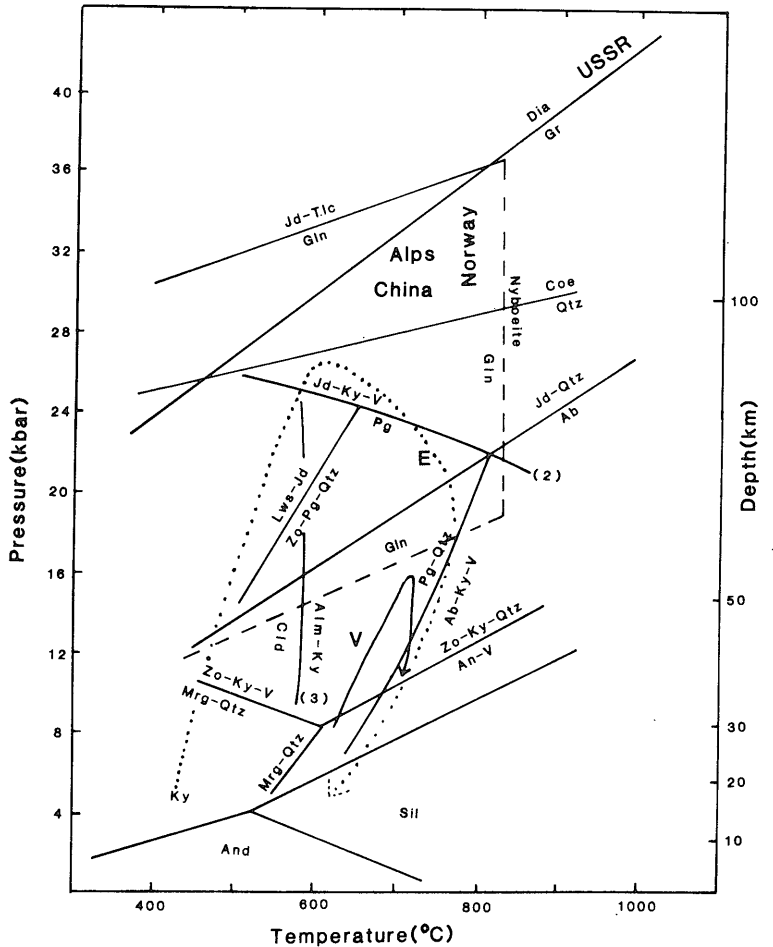
第4図(下)

超高压エクロジャイトの形成条件. Norway, Alps, China のコース石エクロジャイトはほぼ同様の圧力領域で形成されている. USSR; ソ連. E, V: Eikisundahl エクロジャイト(点線)と Verpeneset エクロジャイト(実線)の温度圧力履歴(第3図参照). (2)(3)は本分中の反応式に対応している.

Ab: アルバイト, Alm: 鉄ざくろ石, An: アノーサイト, And: 紅柱石, Cld: クロロイトド, Coe: コース石, Gln: 藍閃石, Jd: ひすい輝石, Ky: 藍晶石, Lws: ローソン石, Mrg: マーガライト, Pg: パラゴナイト, Qtz: 石英, Sil: 珪線石, Tlc: 滑石, V: H<sub>2</sub>O, Zo: ゾイサイト.

(Smith, 1988). Nyboeite は藍閃石に NaAl ⇌ Si 置換が加わった組成で, その理想式は Na Na<sub>2</sub> Mg<sub>3</sub> Al<sub>2</sub> Al Si<sub>7</sub> O<sub>22</sub> (OH)<sub>2</sub> である. この角閃石端成分はかつては Miyashiroite (Phillips and Layton, 1964) と提案されていたが, Ungaretti et al. (1981) が西部片麻岩地域の Nybø エクロジャイト・ポッドからこの端成分に近い角閃石をはじめて見だし, Nyboeite と再定義した. 合成実験によると純粋な Nyboeite は藍閃石の高温分解物であり, 15-35kbar, 800°C 以上で安定である (Carman and Gilbert, 1983).

コース石エクロジャイトは西部片麻岩地域の最高温部から産出する. その形成温度は現地性派のエクロジャイトの広域変化と調和的である. しかし, コース石エクロジャイト岩石区のコース石を含まないエクロジャイトの形成条件は, Verpeneset エクロジャイトで 14-16 kbar 以上, 650-700°C (Krogh, 1982; ざくろ石-オンファス輝石-藍晶石-ゾイサイト-白雲母-石英組み合わせ), Eikisundahl エクロジャイトでは最高圧力が 650°C で 22-24 kbar (ざくろ石コアと単斜輝石包有物との間の Fe/Mg 分配と斜方輝石コアの Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含有量) と推定



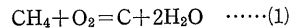
されている (Jamtveit, 1987: 第4図)。これらエクロジャイトの形成温度はコース石の出現に関わらず、藍閃片岩に伴う石英エクロジャイトよりは高温である。

#### 4. ソ連の超高压変成岩

ソビエト連邦のロシア楯状地とシベリア楯状地に挟まれたカレドニア造山期のウラルーモンゴル褶曲帯には藍閃片岩やエクロジャイトが散在している (Sobolev et al., 1986)。Sobolev and Shatsky (1990) は Novosibirsk 西方の Kokchetav 岩体のエクロジャイトや片麻岩中のジルコンからダイヤモンド包有物を発見した (第5図)。この岩体は約 60,000 km<sup>2</sup> の広がりを持ち、岩体の65%以上は花崗岩類で占められている。花崗岩以外は、片岩・片麻岩・エクロジャイト・輝石グラニュライト・角閃岩・珪岩・大理石などの角閃岩相からグラニュライト相の岩石である。岩体東部に産するエクロジャイトの形成条件は600-700℃, 12-14kbarと見積もられていた (Sobolev et al., 1986)。

ダイヤモンドを含むエクロジャイトや片麻岩は、岩体中央部の黒雲母片麻岩や黒雲母片岩中に産す。ダイヤモンドの平均粒径は12μm で正四面体ないし正八面体でジルコン中に包有されている。一部は自形の石墨と共にざくろ石中に包有されている。炭素鉱物以外のざくろ石中の包有物は白雲母・ルチル・単斜輝石・藍晶石・ジルコンなどである。ざくろ石はCaに富みFe/Mgは小さく、グロスピダイトやキンバーライト中のある種のざくろ石の組成に近い。輝石はCa, Feに富むが、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> やひすい輝石成分に乏しい。含炭酸塩エクロジャイト中のある単斜輝石はK<sub>2</sub>Oを1wt%近くも含んでおり、高压下での成長を示している。スフェーンもAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 11wt%を含み、Al:Ti=1:1程度になっている。

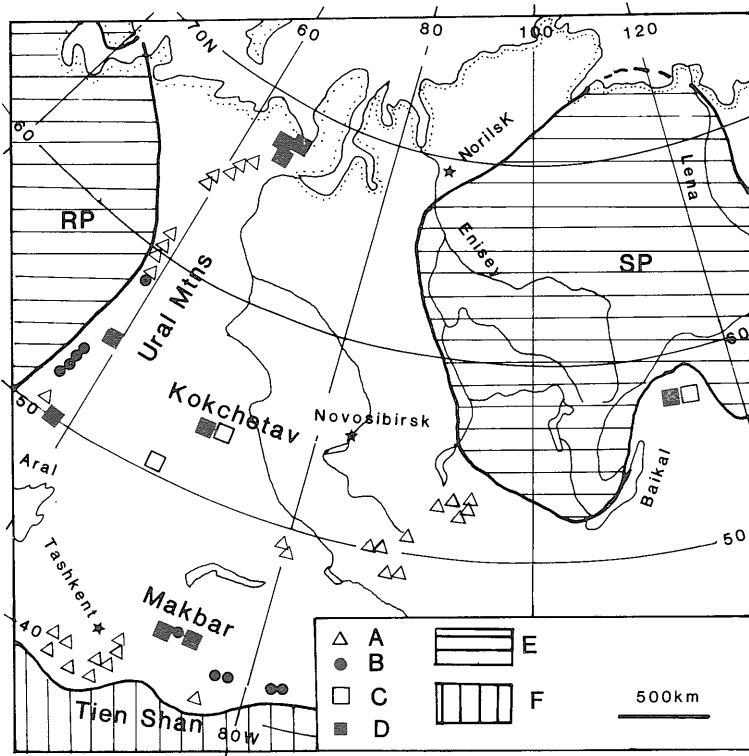
ダイヤモンド・エクロジャイトの形成条件はざくろ石-単斜輝石温度計 (Ellis and Green, 1979) で900-1000℃, 40kbar (地下120-130kmに相当) であり、ざくろ石-単斜輝石のSm-Nd年代は533Ma±20Maを示す。ざくろ石中にはメタンが流体包有物として含まれており、高压下で



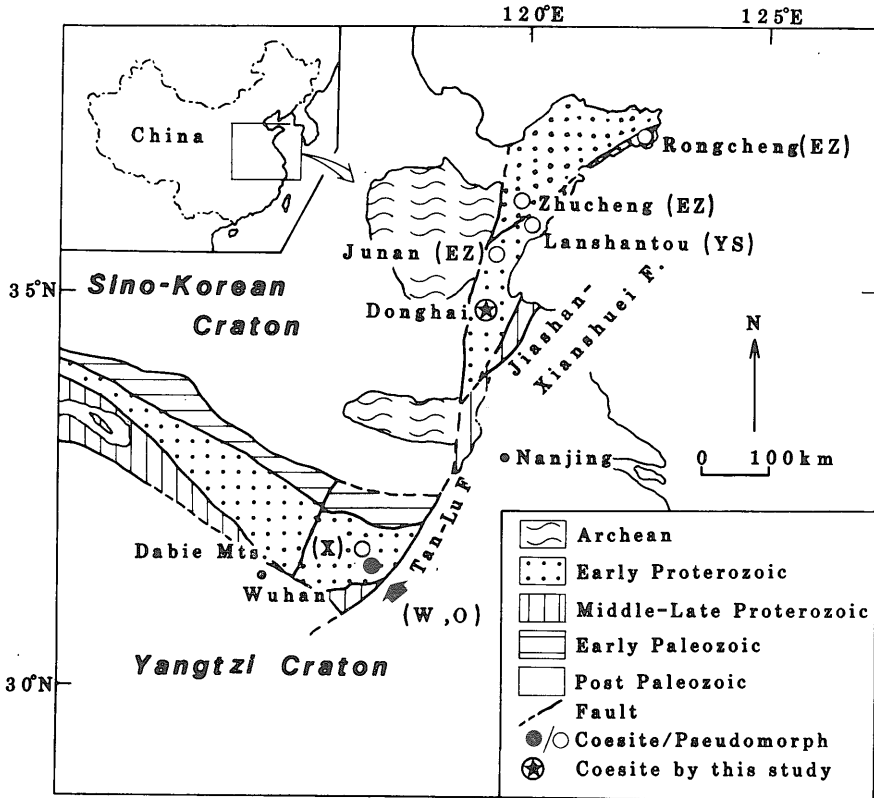
の反応を経てダイヤモンドに変化したと考えられている。

Kokchetav 岩体の漂砂鉱床のマイクロダイヤモンドの炭素同位体比 (-8から-24‰) は変成岩中のマイクロダイヤモンドの炭素同位体比 (-9から-19‰) とよく似ている (Sobolev et al., 1991)。ヨーロッパ楯状地南東部の漂砂ダイヤモンド (-8から-25‰) も同様の値を示しており、これらは超高压変成岩起源である可能性が強い。

Tagiri and Bakirov (1990) はキルギス共和国北天山山脈の Makbar 岩体 (第5図) のざくろ石-クロリトイド-滑石片岩中のざくろ石からコース石仮像を報告している。この岩石の形成条件は周囲のエクロジャイトの形成温度とクロリトイド-石英組み合わせの安定領域。フェンジャイトのSi含有量などから600℃, 24kbar以上と推定されている。



第5図 ソ連の(超)高压変成岩の分布。A: 藍閃片岩。B: 藍閃片岩とエクロジャイト。C: マイロナイト帯に産するエクロジャイト。D: 片麻岩中に産するエクロジャイト。E: ロシア盾状地 (RP) とシベリア盾状地 (SP)。F: 中生代以降の褶曲帯。超高压変成岩は Kokchetav と Makbar で見つかっている。Sobolev et al. (1986) 原図を簡略化。



第6図  
中国東部のコース石（コース石仮像）エクロジヤイトの産出地点 (Hirajima et al., 1990).

## 5. 中国東部

中華人民共和国東部の中朝地塊 (Sino-Korean Craton) と揚子地塊 (Yangtzi Craton) との境界部の衝突帯は東の山東 (Shandong: 魯地方) 半島から東海 (Donghai: 蘇地方) 一 大別 (Dabie) 一 桐柏 (Tongbai) をへて西の秦嶺 (Qinling) までの2000kmにおよぶ (第6図)。これらの地域は断層に境された広域片麻岩地域で、コース石あるいはコース石仮像を持つエクロジヤイトは山東半島北東部から大別山までの延長約1000kmの範囲に分布している。

山東半島の地質体は中生代以降の郟廬 (Tan-Lu) 断層の左横ずれ運動を被っており、それ以前は大別山のコース石エクロジヤイト地域に連続していたのだろう。山東半島のエクロジヤイトは大理石中のレンズとして出現したり、あるいは超塩基性岩にともなって出現することもあるが、大半のものは片麻岩中にレンズ状に産す。エクロジヤイト周囲の片麻岩は黒雲母を含む低圧・中圧の鉱物共生を持っている。山東半島ではコース石以外に Mg に富んだ十字石 (Enami and Zang, 1988), や Nyboeite (Smith et al., 1990; Hirajima et al., 1992) が見いだされている。これらの点はノルウェーの西部片麻岩地域

の超高压エクロジヤイトの産状によく似ている。山東半島のコース石エクロジヤイトの形成温度は 650–800°C の値を示すが、ノルウェーの西部片麻岩地域で確認されたようなエクロジヤイト形成条件の広域変化は認められていない。エクロジヤイトの形成年代に関しては地質学的に中生代とされていたが (Lin et al., 1986), 最近報告された白雲母 K-Ar 年代測定は先カンブリア紀から中生代までの値を示す (石渡ほか, 1990)。

大別山地域のエクロジヤイトについては Wang et al. (1990) が詳しい。彼らは大別山地域の原岩を太古代フリッシュ堆積物と推定した。大別山地域の片麻岩の変成度は北西から南東に向かって変化している。北西では高度角閃岩相—グラニュライト相で塩基性岩に両輝石—斜長石の組み合わせ、泥質岩に珪線石が出現する。中部地域の大部分は角閃岩相で角閃石—ざくろ石—斜長石—石英、黒雲母—ざくろ石—アルカリ長石などの鉱物共生が認められ、その変成条件は 475–530°C, 6kbar である。南東部では低度角閃岩相/緑色片岩相になる。

エクロジヤイトは地域全域から出現し、その産状と鉱物共生から次のタイプに区別されている。

Type I : 超塩基性岩中に産し、斜方輝石やコース石仮

像を持つ (550-630°C, 26 kbar 以上).

Type II : 超塩基性岩中に産し, 褐色角閃石を含む (13 kbar で 800-900°C).

Type III : 80 km × 数 km 幅のメランジエ中に産す. 周囲の母岩は角閃石片麻岩か黒雲母片麻岩である. コース石はこの型のエクロジャイト中に産す (600-610°C, 27 kbar 以上).

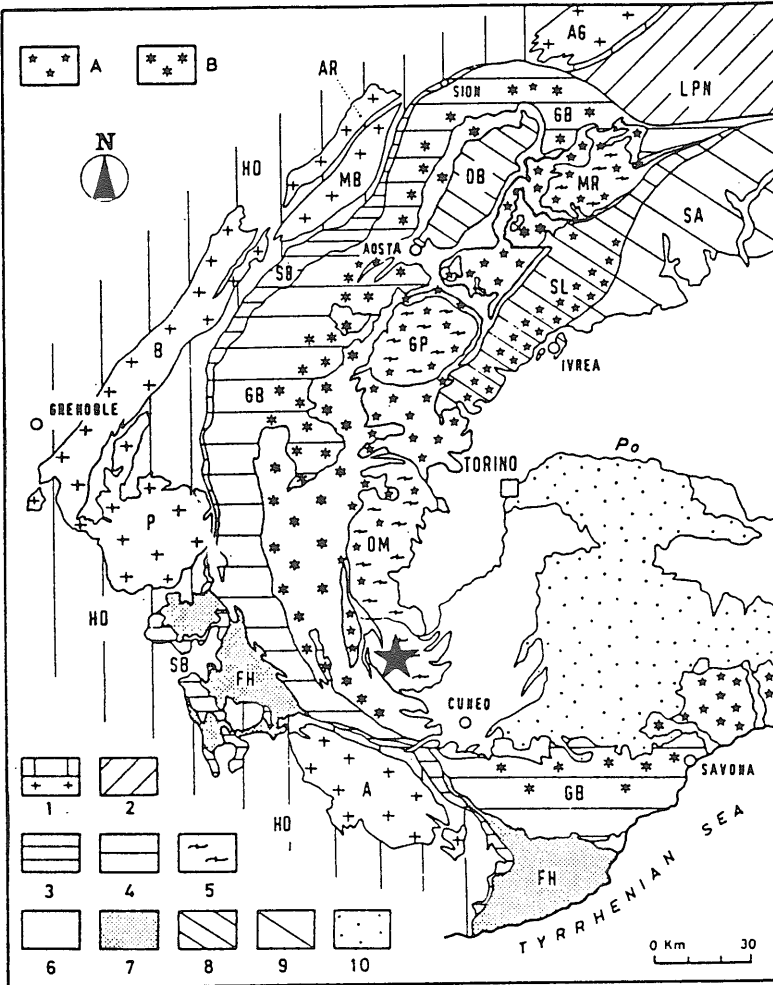
Type IV : 角閃岩中に層状岩体として産す. 藍晶石-緑簾石を含む (500-550°C, 22kbar). エクロジャイトは角閃岩化が著しい.

片麻岩に伴うエクロジャイトのざくろ石と片麻岩中のざくろ石の組成は大別山北部では均質で, 南部では複雑な累帯構造を示すがそのパターンが同じである. Wang et al. (1991) は片麻岩からもコース石を見だしており, エクロジャイトと周囲の片麻岩は一緒に超高压変成作用を被ったことを示している. 従って片麻岩に認められる角閃岩相の鉱物共生は後生的なものである.

### 6. 西アルプスの超高压変成岩

#### 6.1 アルプス変成帯

アルプス変成帯はアフリカ・プレートとヨーロッパ・プレートの取れん地域に発達した白亜紀から第三紀にかけての造山帯である. その中でもスイス・フランス・イタリアの国境地帯は西アルプスと呼ばれ, 白亜紀の高圧変成岩が広く露出している. 高圧変成岩の原岩は, かつてアフリカとヨーロッパの間に広がっていたテーチス海の堆積物やオフィオライト, テーチス海縁辺の大陸地殻物質などである (第7図). 変成度は一般に西から東へ向かって増加する. 西アルプス弧の内側に位置する Sesia 帯, ペニン帯基盤岩類 (Internal Crystalline Massif), および, Piemonte オフィオライト・ナップには石英エクロジャイト相の鉱物組み合わせが広く出現し, その形成条件は450-600°C, 15-18kbarと推定されている (Droop et al., 1990). 石英エクロジャイト相地域の西側には藍閃片岩相の鉱物組み合わせが出現する (第7図). Chopin (1984) はペニン帯基盤岩類の Dora Maira 岩体南部からコース石を発見した. 含コース石岩の形成条件は700°C, 28kbar 以上 (Droop et al., 1990) で, 他の西アルプスの石英エクロジャイトとは形成条件が異なっている. 以下, Dora Maira 南部の地質と鉱物組み合わせを中心に紹介する.



第7図 西アルプスの地質概略図. 1) ヘルベチック帯, 2) 下部ペニン・ナップ, 3) サブ・ブリアンソネ帯, 4) グラン・サン・ベルナルド・ナップ, 5) ペニン帯基盤岩類ナップ, DM: ドラ・マイラ岩体, 6) ピエモンテ・オフィオライト・ナップ, 7) ヘルミントイド・フリッシュ, 8) セシアラランゾ (SL) ナップ, ダン・ブランシュ (DB) ナップ, 9) 南部アルプス, 10) 第三紀層.

A: エクロジャイト, B: 高度藍閃片岩相, ★: コース石エクロジャイト. Droops et al. (1990) 原図に加筆.

## 6.2 Dora Maira 南部の超高压変成岩

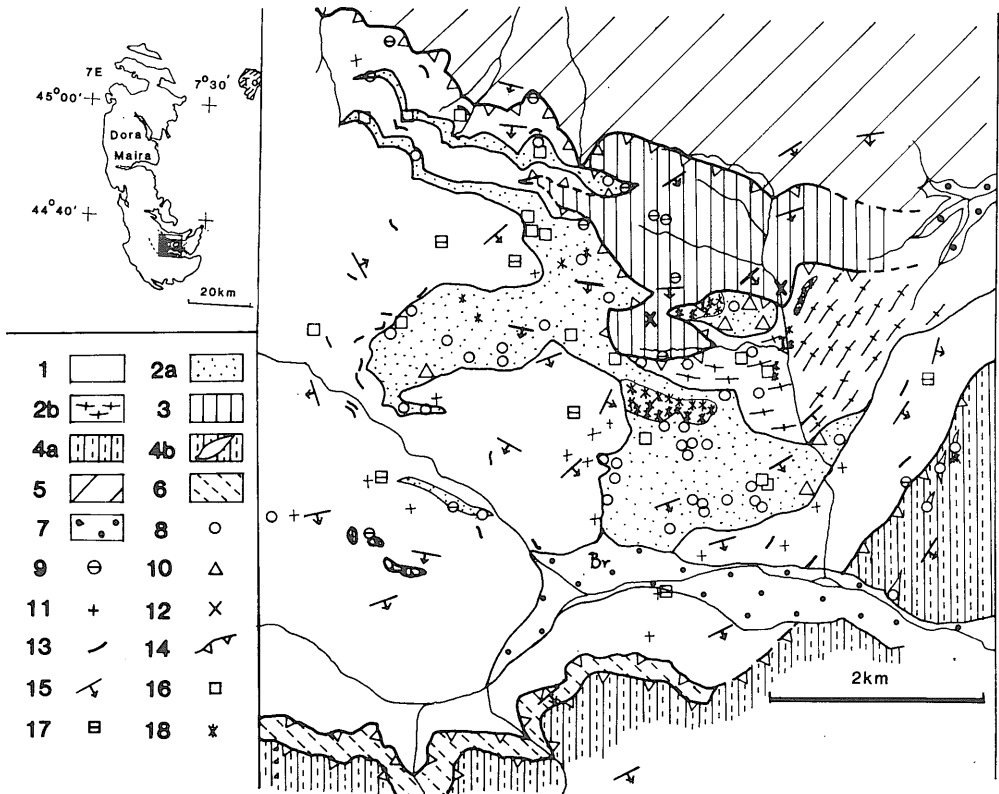
Dora Maira 岩体はイタリア北西部トリノ市の南西に位置し、70×25kmの広がりでも南北に長く露出している。アルプス変動以前には、ペンニン帯基盤岩類は古ヨーロッパ大陸の南東端を構成していたとされている。Dora Maira 岩体の主要な構成岩類は古生代後期の堆積岩、後期石炭紀以前の変成岩、それらを貫くヘルシニア期の花崗岩類で、その中に塩基性岩や大理石がレンズ状に散在している。Vialon (1966) は Dora Maira 岩体を3つのナップに区分した。パイロープやコース石などの超高压変成鉱物は、Vialon の複変成 (polymetamorphic) ユニットの南部の限られた地域から見いだされた (Chopin, 1984; Kienast et al., 1991)。

Dora Maira 南部の超高压変成岩地域の地質構造やその広がり最近までよく判っていなかったが、1991年3月にフランスのStrasbourgで開かれたEuropean Geological Union (EGU) 例会でHenry et al. (1991) と

Compagnoni and Hirajima (1991) が詳細な地質を報告した。彼らの地質構造は大筋で一致しており、それは以下の通りである。

Dora Maira 南部の複変成ユニットは主に眼球状片麻岩ないし正片麻岩で構成されており、一つのユニットと考えられていた。しかし、このユニットは下位の超高压変成岩ナップと上位の石英エクロジャイトナップに区分できる。

超高压変成岩ナップは10×5 kmの広がりを持ち、その厚さは1 km以下である(第8図)。超高压変成岩ナップの指標は、パイロープの出現、コース石かその仮像の出現、泥質岩でのひすい輝石—藍晶石—ざくろ石組み合わせ、藍晶石エクロジャイトの産出等である。コース石はパイロープ石英片岩 (Chopin, 1984) 以外に、エクロジャイトや泥質片岩にも含まれている。パイロープ石英片岩の露頭をはじめて訪れた人は、パイロープ巨晶(直径10cm以上)を採集しがちだが、それらにはまずコース石



第8図 ドラ・マイラ岩体南部のコース石産出地域の地質図 (Compagnoni and Hirajima, 準備中). 1・2: 含コース石ユニット, 3・4: 石英エクロジャイトユニット, 5・6: 藍閃片岩相ユニット, 7: 沖積層, 8・9: エクロジャイト, 10: 先アルプス・ホルンフェルス, 11・12: 先アルプス未変形花崗岩類, 13: パイロープ石英片岩, 14: 衝上断層, 15: 走向傾斜, 16: ひすい輝石—藍晶石組み合わせ, 17: ひすい輝石, 18: 大理石.



は含まれていない(もともとシリカ包有物に乏しい)。コース石はマトリクスがシリカ鉱物(現在は石英)に富んでいる部分の、小さなパイロブ結晶(直径1cm以下)によく含まれている。

泥質片岩のひすい輝石-藍晶石組み合わせはパラゴナイトが高圧下で不安定になり分解する際に生じる鉱物組み合わせ(700°Cで23kbar以上)である。

パラゴナイト=ひすい輝石+藍晶石+H<sub>2</sub>O ……(2)

この組み合わせは泥質片岩が超高压変成作用を被った際の際のよい指標である(第4図)。

石英エクロジャイト相ナップのエクロジャイトは角閃石を含むがコース石や藍晶石は含まない。その形成温度も15-20kbarで550°C(Henry et al., 1991)である。泥質片岩の鉱物共生はクロリトイド-ざくろ石で、藍晶石とざくろ石は共存していない。クロリトイドは超高压変成岩ナップのざくろ石のコアには含まれているが、リムや岩石のマトリクスには含まれていない。クロリトイドの消滅は

クロリトイド=藍晶石+ざくろ石 ……(3)

の温度依存性の強い反応が進行したからである。

超高压変成岩ナップの約1/4は主に泥質片岩からなる地層である。この地層と眼球状片麻岩の境界部付近にはホルンフェルス組織やミグマタイト組織が残っており、泥質ホルンフェルスのざくろ石は希にアルプス変成作用以前の組織と組成を保っている(Compagnoni and Hirajima, 1991)。超高压変成岩ナップを構成する眼球状片麻岩のなかには未変形で火成岩組織を残した変成花崗岩がある。超高压変成作用時に斜長石はひすい輝石になり、黒雲母と斜長石の境界部にはざくろ石コロナができていく。以上のことは、超高压変成岩類の原岩は、先アルプス変成岩類とそれに貫入した花崗岩類、つまり古ヨーロッパ大陸東端の大陸地殻であったことを示す。このような原岩組織は他のペンニン帯基盤岩類で普通に認められている。

Dora Maira 南部も他の西アルプスの例にもれず Lepontine 期(約40Ma)の低圧変成作用の影響を受けている。正片麻岩では緑色片岩相の鉱物組み合わせ(斜長石-黒雲母-緑簾石)に変化していることが多い。この鉱物組み合わせは東西性の軸を持つタイトな等斜褶曲の翼部によく見られる。

### 6.3 超高压変成岩の年代

Monie (in Chopin, 1987) はパイロブ・コース石・白雲母片岩と藍晶石エクロジャイトから分離したフェンジャイトの <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 測定を行い 105 Ma を得た。Paquette et al. (1989) はジルコンの U-Pb 法で 121 Ma を、Rb-Sr 法的全岩フェンジャイトアイソクロンで 96

Ma の値を得た。U-Pb 法の年代は、700-750°C に達した変成作用のために、Pb 同位体はその時期に開放系になったためと考えた。

Chopin and Monie (1984) はペンニン帯基盤岩類の他の岩体で石英エクロジャイト相のフェンジャイトの <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 測定を行い、110Ma の plateau 年代を、Lepontine 期に再結晶の進んだ石英片岩のフェンジャイトからは同じ方法で 37 Ma の plateau 年代を得ている。以上のことから、ペンニン帯基盤岩類の高圧ならびに超高压変成作用は 120-95Ma の間にクライマックスに達し、その後直ちに上昇冷却したと考えられる。

西アルプスの Sesia 帯の石英エクロジャイトが形成された最高温度時が120-90Ma、350°C程度に冷却した時代が80-60Maと推定されている(Hurford and Hunziker, 1985; Oberhansli et al., 1985)。超高压変成作用の最高温度時は Sesia 帯の高圧変成作用と概ね同じ時代と見なせるが、上昇時期が早かったのかもしれない。

### 6.4 超高压変成岩のテクトニクス

Dora Maira の超高压変成岩の特徴は、多様な原岩に超高压鉱物が出現し、それらが一つのナップを形成している点にある。超高压変成岩ナップは石英エクロジャイト相ナップと構造接触関係にあり、それらは主に東西性の等斜褶曲の軸を共有している。褶曲に伴いよく変形した岩石では緑色片岩相の再結晶が進行しているので、この変形時期はアルプス変動後期の Lepontine 期と考えられる。超高压変成岩ナップはアルプス高圧変成作用の初期にすでに上昇(120-100 Ma)に転じ、その途中で石英エクロジャイト相ナップと一体化したのだろう。この運動は、地殻物質の沈み込みと高圧変成作用、その後のナップ単位での上昇開始、変成度の異なるナップの合体、Lepontine 期の低圧変成作用の重複、地表への上昇というアルプス変動の枠組で説明できる。アルプスの超高压変成岩は周囲の母岩と全く無関係な構造岩塊がテクトニクに貫入したものではない。

## 7. ま と め

Chopin (1984) や Smith (1984) による超高压変成岩の発見は、変成岩研究者に大きな衝撃を与えた。それは地殻物質が地下100kmにまで潜り込んだという事もさることながら、何故超高压変成鉱物を保持したまま地表に戻ってきたかの問題を提議した。彼らの発見以来、これまでに世界の4地域から確実な超高压変成作用の証拠が発見された。これらの地域では、コース石やダイヤモンドのような典型的な高圧鉱物以外に、藍晶石エクロジャイト(600°C以上)、Alに富んだスフェーン、Nyboeiteな

どを産出する点が共通している(第1表)。ドイツ東部のパリスカン造山帯の *Erzgebirge* 山脈でもコース石仮像の存在が知られていたが、エクロジヤイトはやはり650°C以上で形成されていた(Schmadicke et al., 1991)。藍晶石エクロジヤイトを産する地域では、超高压変成作用の可能性を再検討する必要がある。

第1表にまとめた超高压変成岩は大陸衝突が起こった場所に出現している。しかし、アルプスでヨーロッパ大陸とアフリカ(あるいはアドリア)大陸が衝突を開始したのは漸新世であり、超高压変成岩は白亜紀の沈み込みに関連して形成されたと考えられている(例えば Platt, 1987; Polino et al., 1990)。England and Thompson (1984) や Thompson and England (1984) は大陸衝突に伴う地殻の厚化で、低温高压変成岩を形成するモデルを提案しているが、彼らのモデルはアルプスの高压変成岩の形成には適用できない。彼らのモデルのもう一つの重要な点は、高压変成岩が上昇する課程で、地温勾配の回復にもなう加熱を被ることである。そのため、多くの高压変成岩は低圧ないし中圧の鉱物組み合わせに再結晶すると説明された。彼らのモデルはノルウェーの様に、高压変成岩が中圧・低圧の片麻岩中に分布する地域の説明に適している。Jamtveit (1987) は彼らのモデルと整合的な右廻りの P-T-t 史を示す例をノルウェーで見つけている(第4図のE)。しかし、ノルウェーでも高压変成岩の形成は大陸衝突に先立つ沈み込みによって形成されたという考えもある(Cuthbert and Carswell, 1990)。現在の地殻の厚さは概ね 30-60 km である。一般に楯状地で 30-40km、現在の衝突帯であるチベット高原で60-70km である。また地殻の厚さは海岸に近づくると薄くなることが多い(都城, 1979)。ノルウェー・ソ連・中国の超高压変成岩地域では、現在の地理から楯状地同士の衝突が想定できる。これらの楯状地の厚さが前記の程度であるならば、大陸衝突による単純な地殻厚化で、地殻物質を地下100kmまで持ち込むのは難しい。これらの地域でも、地殻物質を上部マントルまで押し込んだのは、大陸衝突に先立つ沈み込みなのであろう。

比重の大きな超高压変成岩を地表に持ち上げるプロセスについてはまだよくわからない。アルプスやノルウェーでは超高压変成岩や高压変成岩はナップとして上昇してきたと考えられている。アルプスの超高压変成岩ナップは小さなものであるが、ノルウェーでは超高压変成岩 60km を越える範囲に分布し、中国やソ連の超高压変成岩はノルウェーよりさらに広い範囲に出現する。これら片麻岩地域のテクトニクスを理解するために、地質構造の解明が待ち遠しい。それは、エクロジヤイトの現地性一異地性問題に決定打を与える近道でもある。

謝辞：京都大学理学部地質教室の坂野昇平教授・Simon Wallis 博士と金沢大学理学部地質教室の石渡明博士には原稿について有益な助言・討論をしていただいた。

#### 文 献

- Bryhni, I. and Sturt, B. A. (1985): Caledonides of south-western Norway. In the Caledonide Orogen-Scandinavia and Related Areas (eds. Gee, D. G., and Sturt, B. A.), 89-108. Jhon Wiley, Chichester.
- Carman, J. H. and Gilbert, M. C. (1983): Experimental studies on the glaucophane stability. *Amer. Jour. Sci.*, **283A**, 414-437.
- Carswell, D. A. (1990): Eclogites and the eclogite facies: definitions and classification. Edited by D. A. Caswell. 1-13. Blackie, London.
- Chopin, C. (1984): Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps: a first record and some consequences: *Contrib. Mineral. Petrol.*, **86**, 107-118.
- Chopin, C. (1987): Very-high pressure metamorphism in the Western Alps: implications for subduction of continental crust. *Phil. Trans. R. Soc. Rondon*, **A321**, 183-197.
- Chopin, C. and Monie, P. (1984): A unique magnesiochloritoid-bearing, high-pressure assemblage from the Monte Rosa: a petrologic and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar study. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **87**, 388-398.
- Compagnoni, R. (1977): The Sesia-Lanzo zone: high pressure-low temperature metamorphism in the Austroalpine continental margin. *Soc. Itali. Mineral. Petrol.*, **33**, 353-374.
- Compagnoni, R. and Hirajima, T. (1991): Geology and petrology of the Brossasco-Isasca complex, Southern Dora-Maira massif, western Alps. *Terra abstracts*, **3**, 84.
- Cuthbert, S. J. and Carswell, D. A. (1990): Formation and exhumation of medium-temperature eclogites in Scandinavia Caledonides. In *Eclogite Facies Rocks*. Edited by D. A. Carswell. 180-203, Blackie, London.
- Droop, G. T. R., Lombardo, B. and Pognante, U. (1990): Formation and distribution of eclogite facies rocks in the Alps. In *Eclogite Facies Rocks*. Edited by D. A. Carswell. 225-259, Blackie London.
- 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. and Zang, Q. (1988): Magnesian staurolite in garnet-corundum rocks and eclogite from the Donghai district, Jiangsu province, east China. *Amer. Mineral.*, **73**, 48-56.
- Enami, M. and Zang, Q. (1990): Quartz pseudomorphs after coesite in eclogites from Shandong province, east China. *Amer. Min.*, **75**, 381-386.

- England, P.C. and Thompson, A.B. (1984): Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism I. Heat transfer during the evolution of region of thickened continental crust. *Jour. Petrol.*, **25**, 894-928.
- Henry, C., Chopin, C. and Michard, A. (1991): Metamorphic and structural evolution of a coesite-bearing unit, southern Dora-Maira, western Alps. *Terra abstracts*, **3**, 84.
- Hirajima, T., Ishiwatari, A., Cong, B., Zhang, R., Banno, S. and Nozaka, T. (1990): Coesite from Mengzhong eclogite at Donghai county, northeastern Jiangsu province, China. *Min. Mag.*, **54**, 579-583.
- Hirajima, T., Zhang, R., Li, J. and Cong, B. (1992): Petrology of the nyböite-bearing eclogite in the Donghai area, Jiangsu province, eastern China. *Min. Mag.*, **56**.
- Holland, T.J.B. (1979a): High water activities in the generation of high pressure kyanite eclogite of the Tauern window, Austria. *Jour. Geology*, **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 applications to eclogites and blueschists. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **68**, 293-301.
- Hurford, A.J. and Hunziker, J.C. (1985): Alpine cooling history in the Monte Mucrone eclogites (Sesia-Lanzo zone): fissiontrack evidence. *Schweitz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, **60**, 181-213.
- Ishiwatari, A., Cong, B., Zhang, R., Itaya, T. and Nishina, K. (1990): K-Ar ages of coesite-eclogites and gneisses from Shandong and Jiangsu Province, China. *Abst. Ann. Meeting of Geol. Soc. Japan*, Toyama. p.480. (In Japanese).
- Jamtveit, B. (1987): Metamorphic evolution of the Eiksundahl eclogite complex. Western Norway, and some tectonic implications. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **95**, 82-99.
- Kennedy, C.S. and Kennedy, G.C. (1976): The equilibrium boundary between graphite and diamond. *Jour. Geophys. Res.*, **81**, 2467-2470.
- Kienast, J.R., Lombardo, B., Biino, G. and Pinardon, J.L. (1991): Petrology of very high pressure eclogitic rocks from the Brossasco-Isasca complex, Dora Maira Massif, Italian Western Alps. *Jour. Metamorphic Geol.*, **9**, 19-34.
- Krogh, E.J. (1977): Evidence of Precambrian continent-continent collision in Western Norway. *Natury*, **267**, 17-19.
- 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.
- Lin, J.L., Fuller, M. and Zhang, W. (1986): Preliminary Phanerozoic polar wander paths for the north and south China blocks. *Nature*, **313**, 444-449.
- Liu, R.X., Ma, B.L., Zhang, Z.Z., Zhang, Z.M. and Yang, H.M. (1989): Geologic features of the tectonic melange in northern Jiangsu-southern Shandong region and lithologic column. *Seism. Geol.*, **11**, 47-54. (in chinese)
- 都城秋穂 (1979): 岩波講座地球科学16, 世界の地質, 岩波書店.
- Oberhansli, R., Hunziker, J.C., Martinotti, G. and Stern, W.B. (1985): Geochemistry, geochronology and petrology of Monte Mucrone: an example of Eo-Alpine eclogitization of Permian granitoids in the Sesia-Lanzo zone, western Alps, Italy. *Chem. Geol.*, **52**, 165-184.
- Okay, A.I., Xu, S. and Sengor, A.M.C. (1989): Coesite from the Dabie Shan eclogites, central China. *Eur. Jour. Mineral.*, **1**, 595-598.
- Paquett, J.L., Peucat, J.J. and Chopin, C. (1989): U-Pb zircon, Rb-Sr and Sm-Nd geochronology of high-to very-high pressure meta-acidic rocks from the Western Alps. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **101**, 280-289.
- Phillips, R. and Layton, W. (1964): The calciferous and alkali amphiboles. *Min. Mag.*, **33**, 1097-1109.
- Platt, J.P. (1987): Dynamics of orogenic wedges and uplift of high-pressure metamorphic rocks. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, **97**, 1037-1053.
- Polino, R., Dal Piaz, G.V. and Gosso, G. (1990): Tectonic erosion at the Adria margin and accretionary processes for the Cretaceous orogeny of the Alps. *Mem. Soc. geol. France*, N.S., **156**, 343-367.
- Schmadicke, E., Okrusch, M. and Schmidt, W. (1991): Quartz pseudomorphs after coesite in eclogites from the Saxonian Erzgebirge and some genetic consequences. *Terra abstracts* **3**, 84-85.
- Smith, D.C. (1984): Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implications for geodynamics. *Nature*, **310**, 641-644.
- Smith, D.C. (1988): A review of the peculiar mineralogy of the "Norwegian coesite-eclogite province", with crystal-chemical, petrological, geochemical and geodynamical notes and an extensive bibliography. Chapter 1. 1-206. In Smith, D.C., ed., *Eclogites and Eclogite Facies Rocks*, Amsterdam, Elsevier Science Publishers.
- Smith, D.C. and Lappin, M.A. (1989): Coesite in the Straumen kyanite-eclogite pod, Norway. *Terra Research*, 47-56.
- Smith, D.C., Yang, J., Oberti, R. and Previde-Massara, E. (1990): A new locality of nyboeite and taramite, the Jianchang eclogite pod in the "Chinese Su-Lu coesite eclogite province" compared with the nyboeite- and taramite-bearing Liset eclogite pod in the "Norwegian coesite-eclogite province". *Abstract of IMA meeting in Beijing, China*. 889-890.

- Sobolev, N. V., Dobretsov, N. L., Bakirov, A. B. and Shatsky, V. S. (1986): Eclogites from various types of metamorphic complexes in the USSR and the problems of their origins. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, **164**, 349-364.
- Sobolev, N. V. and Shatsky, V. S. (1990): Diamond inclusions in garnets from metamorphic rocks: a new environment for diamond formation. *Nature*, **343**, 742-746.
- Sobolev, N. V., Shatsky, V. S. and Vavilov, M. A. (1991): Inclusions of microdiamond and coexisting minerals in garnets and zircons from metamorphic rocks of Kokchetav Massif, USSR. *Terra Abstracts*, **3**, 83.
- Tagiri, M. and Bakirov, A., (1990): Quartz pseudomorph after coesite in garnet from a garnet-chloritoid talc schist, northern Tien-Shan, Kirghiz, SSR. *Proc. Japan. Academy*, **66**, 135-139.
- Thompson, A. B. and England, P. C. (1984): Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism II. Their inference and interpretation using mineral assemblages in metamorphic rocks. *Jour. Petrology*, **25**, 929-955.
- Ungaretti, L., Smith, D. C. and Rossi, G. (1981): Crystal-chemistry by X-ray structure refinement and electron microprobe analysis of a series of sodic-calcic to alkali-amphiboles from the Nybø eclogite pod, Norway. *Bull. Mineral.*, **104**, 400-412.
- Vialon, P. (1966): Etude geologique du Massif cristallin Dora-Maira (Alpes cottiennes internes-Italie), *Trav. Lab. Geol. Grenoble*, **4**, 293 pp.
- Wang, X., Jing, Y., Liou, J. G., Coleman, R. G., Eide, E., Ernst, W. G. and S. Maruyama, S. (1991): P-T path of coesite-bearing eclogites from the Dabie Mountains and evidence for regional ultra-high pressure metamorphic terrane in central China. *Terra Abstract*, **3**, 85.
- Wang, X., Jing, Y., Liou, J. G., Pan, G., Pan, G., Liang, W., Xia, M. and S. Maruyama, S. (1990): Field occurrences and petrology of eclogites from the Dabie Mountains, Anhui, central China. *Lithos*, **25**, 119-131.
- Wang, X., Liou, J. G. and Mao, H. K. (1989): Coesite-bearing eclogite from the Dabie Mountains in central China. *Geology*, **17**, 1085-1088.
- Yang, J. and Smith, D. C. (1989): Evidence for a former sanidine-coesite-eclogite at Lanshantou, eastern China and the recognition of the Chinese "Su-Lu coesite-eclogite province", *Terra Abstracts*, **1**, 26.
- 
- HIRAJIMA Takao (1991): Ultra high pressure metamorphic rocks.
- 

<受付: 1991年5月27日>