

青色片岩からローソン石エクロジャイトへ

From blueschist to lawsonite eclogite: An essay

辻 森 樹

Tatsuki Tsujimori

Department of Geological and Environmental Sciences, Stanford University, Stanford, California 94305, U.S.A.

現所属: 金沢大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー

Present address: Venture Business Laboratory, Kanazawa University, Kanazawa 920-1192, Japan

<http://homepage.mac.com/~tatsukix>

1. はじめに

近年, 地球物理学的手法による沈み込み帯断面の温度構造のモデリングは, 東北日本やトンガのような古い海洋プレートが定常的に沈み込む場合, 火山フロント直下(約 100-150 km)において, 沈み込む海洋地殻付近の低温部分が約 350°C に満たず (例えば, Kirby *et al.*, 1996; Peacock and Wang, 1999; Abers *et al.*, 2006), 超低地温勾配 (約 5 °C/km 以下) が普遍的に存在することを予測した. 一方, 超低地温勾配域での変成再結晶を示唆する超高压ざくろ石かんらん岩の研究 (Liou *et al.*, 2000 参照) を初め, α -PbO₂ 型構造の TiO₂ 相を含んだ地殻物質起源の超高压変成岩の発見 (Wu *et al.*, 2005) や天然のローソン石エクロジャイトの研究 (Usui *et al.*, 2003; Zack *et al.*, 2004; Usui *et al.*, 2006; Tsujimori *et al.*, 2005; Tsujimori *et al.*, 2006a) も超低地温勾配域の存在を決定的に裏付けた. これは従来の造山帯表層の高压型変成岩の研究が想定してきた 'forbidden zone' (=超低地温勾配域) の概念が適切ではなかったことを示唆する.

一般に, 海洋プレートの沈み込みによって, その玄武岩質の海洋地殻は沈み込み帯のマントル深度でエクロジャイトと呼ばれる主としてざくろ石と Ca-Na 単斜輝石から構成される変成岩石に相転移する. 超低地温勾配域では, 沈み込みスラブのエクロジャイト化が進行しても, その環境で安定に存在可能な含水鉱物 (ローソン石, フェンジャイト, クロリトイド, 滑石など) が水の貯蔵庫としての役割を果

たし, 最も効率よく水をマントル深度に供給する (例えば, Kerrick and Connolly, 2001; Connolly and Kerrick, 2002; Hacker *et al.*, 2003a; Hacker *et al.*, 2003b; Liou *et al.*, 2003; Rüpke *et al.*, 2004; Ohtani, 2005). そして, 含水鉱物の脱水反応により放出された水は島弧火成活動や低周波地震など, 沈み込み帯の地球物理を制約する重要な要素となる.

- ・ 定常沈み込み帯の超低地温勾配環境下で何が起きているか?
- ・ 沈み込む海洋地殻 (変質玄武岩) は超低地温勾配域でどのようにエクロジャイト化していくのか?
- ・ 超低地温勾配域の沈み込みスラブの脱水反応が定常沈み込み帯の物理現象とどうリンクするか?

太平洋型造山帯に注目すれば, 最近までの三波川帯の研究が示すように, 高压変成帯の多くは海嶺沈み込みなどの非定常的な現象を引き金に造山帯に取り込まれた「熱い」特殊な変成スラブであって (例えば, Aoya *et al.*, 2003; Uehara and Aoya, 2005), 定常沈み込みに伴う超低地温勾配域での現象を直接解析することは根本的に不可能である. 著者とその共同研究者らは, 上述の 3 つの論題を踏まえて, グアテマラの広域ローソン石エクロジャイト (造山帯表層から入手可能な最も冷たい変成スラブ) の研究を行っている. 本稿では著者らが中心となって進めているローソン石エクロジャイトの研究について, その研究に至った背景などを回想する.

2. ローソン石エクロジイトへの転機

1990年代, 著者は主として西南日本の古生代変成帯(蓮華帯)のローソン石を含む低温の青色片岩の研究を行っていた(例えば, 辻森, 1998; Tsujimori and Itaya, 1999). その頃, 世界ではローソン石の高圧高温安定限界が超高压実験によっていくつか報告され(例えば, Schmidt, 1995; Pawley *et al.*, 1996; Schmidt and Poli, 1998), ローソン石がマントルへの水を供給するキャリアとして注目されはじめていた. 前述のように, ローソン石($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$)は11.5重量%の水を含み, さらに, 海嶺玄武岩質の青色片岩やエクロジイトにおいては, Sr, REE, Pbを他の鉱物よりも濃集する. 日本でもOkamoto and Maruyama (1999)により「海嶺玄武岩+水」系でローソン

石の超高压実験が行われ, 日本国内の学会でも「ローソン石エクロジイト」という言葉を目にするようになる. しかし, この頃, 著者にとってローソン石エクロジイトはもっとも想像が困難な岩石であった. 当時, 著者が十分に「冷たい」と考えていた蓮華帯の藍閃石-緑れん石エクロジイト(Tsujimori, 2002; Tsujimori and Liou, 2005)でも, 安定なCa-Al含水珪酸塩鉱物はローソン石より高温で安定な緑れん石であった. そのため, 著者には単純にローソン石がエクロジイト相で安定な様子をイメージすることができなかった. それから数年後, 天然のローソン石エクロジイトの標本を米国で手にすることになる. 当時, 通勤時間にPSION(パームトップ型コンピュータ)にまとめていた日記には次のように記されている.

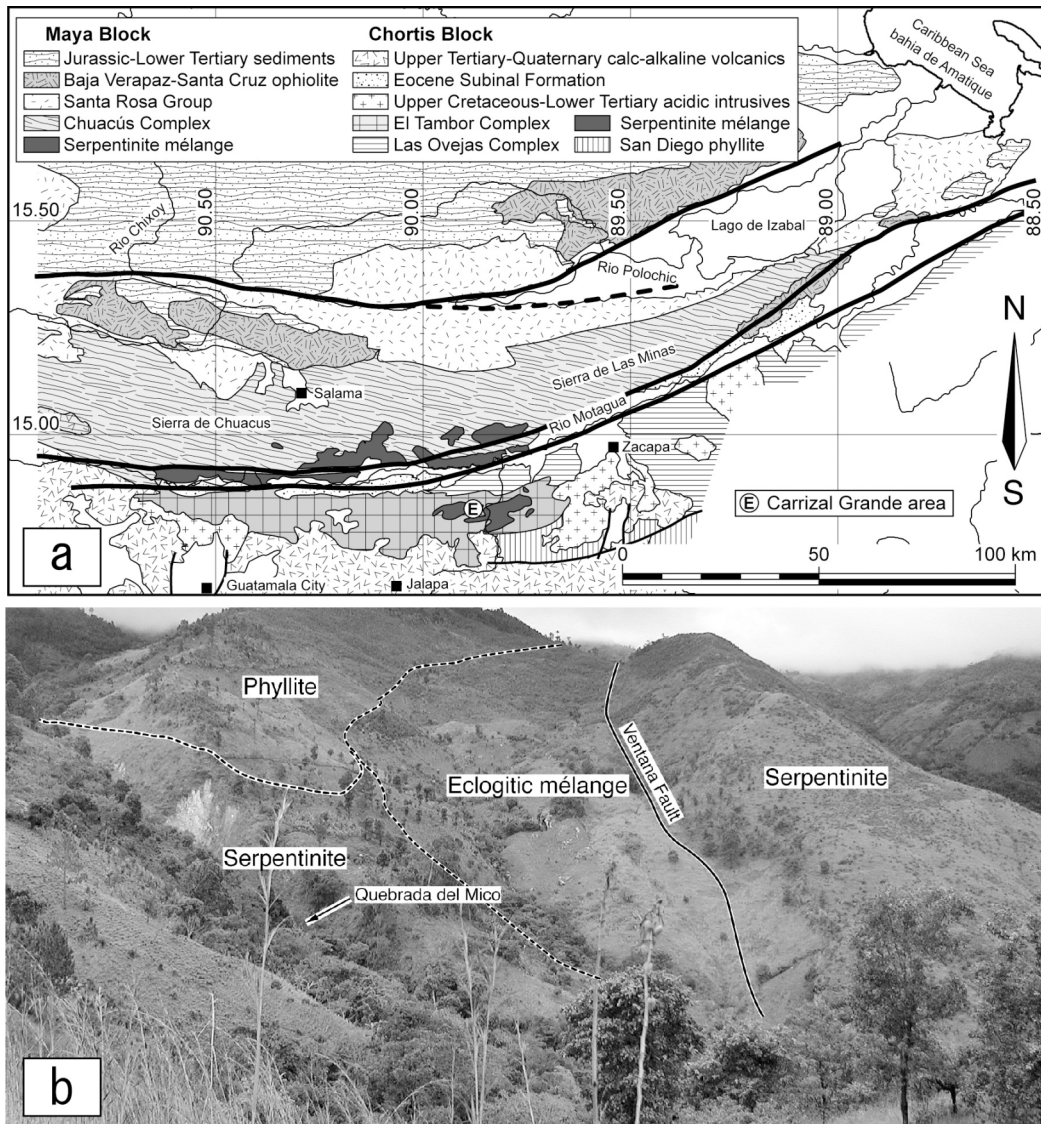


図 1. (a) グアテマラ中央部モタグア断層帯の地質図. Tsujimori *et al.* (2006a) を改図. (b) モタグア断層帯南部カリザルグランデ地域のローソン石エクロジイトを含む蛇紋岩メランジュの風景.

2003年3月6日(木) 渡米222日目
 7時, 起床. 7時53分のカルトレインでパロアルトへ. <中略>午後, ボブが尋ねてきてくれた. グアテマラ産翡翠のコンサルティングの話聞いた. 翡翠と一緒に産するローソン石を含むというグアテマラの粗粒なエクロジヤイトの標本もらった. <後略>

2003年4月8日(火) 渡米255日目
 6時半, 起床. 7時12分のカルトレインでパロアルトへ. <中略>依頼していたグアテマラの標本の薄片が手元に届いた. 完璧なローソン石エクロジヤイトだった. こんな岩石が世の中に存在するのかと驚いた. <後略>

これを機に, 研究の関心が一気に中米グアテマラへと向けられた. 同じ年の9月と11月には, 日本地質学会(静岡大会)と米国地質学会(シアトル大会)で手持ちの標本から得た先行研究の成果を発表し(辻森ほか, 2003; Tsujimori *et al.*, 2003), 12月には米国の鉱山会社の援助を受け, 現地を訪れた. それがローソン石エクロジヤイトのメッカ「カリザルグランデ」である(図1).

グアテマラでの最初のローソン石エクロジヤイトの記載は1960年代に遡る. McBirney *et al.* (1967)によって, モタグア断層帯からひすい輝石岩の転石と一緒にローソン石エクロジヤイトの転石が記載された. これは世界で最初のローソン石エクロジヤイトの記載であった. しかし, この論文が記載したローソン石エクロジヤイトはひすい輝石岩ほど注目されてこなかった. おそらく, その記載が転石であったことと, 現地へのアクセスが容易でないこと, さら

に, ローソン石がエクロジヤイト相で安定だとは考えられなかったことなどが原因かも知れない.

北米プレートとカリブプレートの境界, 左横ずれのトランスフォーム断層, それがモタグア断層帯である. 1998年10月末, 中心気圧905 mhPa・最大瞬間風速81.9 mの20世紀最大のハリケーンが, 中米を襲い約1万1000人もの死者を出した. ハリケーン「Mitch (ミッチ)」である (<http://www.nhc.noaa.gov/1998mitch.html>). このハリケーンが「カリザルグランデ」の谷底を大量のローソン石エクロジヤイトとひすい輝石岩で埋め尽くす大規模な土砂崩れを引き起こしたのである. その後, この産地が地元の翡翠ハンターに発見され, 米国の何人かの科学者や鉱山会社の関係者が現地を訪れることになった. モタグア断層帯を東西に走るハイウェイ(CA-9)沿いと違い, モタグア断層帯南部の山岳地帯のカリザルグランデまでのアクセスは容易ではない. 2002年, 米国自然史博物館・ライス大・スミソニアン研究所のグループが, この地域の研究のプロポーザルを準備し始めた時期に, 一足遅れる形で, 著者はスタンフォード大を拠点に鉱山会社のコンサルティングを兼ねカリザルグランデの試料の研究に取り組みはじめた. その後, 鉱山会社がグアテマラの翡翠ビジネスから撤退することになったが, それぞれのグループが個別に論文を発表した後(Harlow *et al.*, 2003; Harlow *et al.*, 2004; Tsujimori *et al.*, 2005), 2005年1月に大雪のニューヨークに関係者が結集した研究集会でコンプリメンタリ(補完関係的)に研究を進めようということになった. Tsujimori *et al.* (2006a, 2006b) 論文にはそういう背景がある.

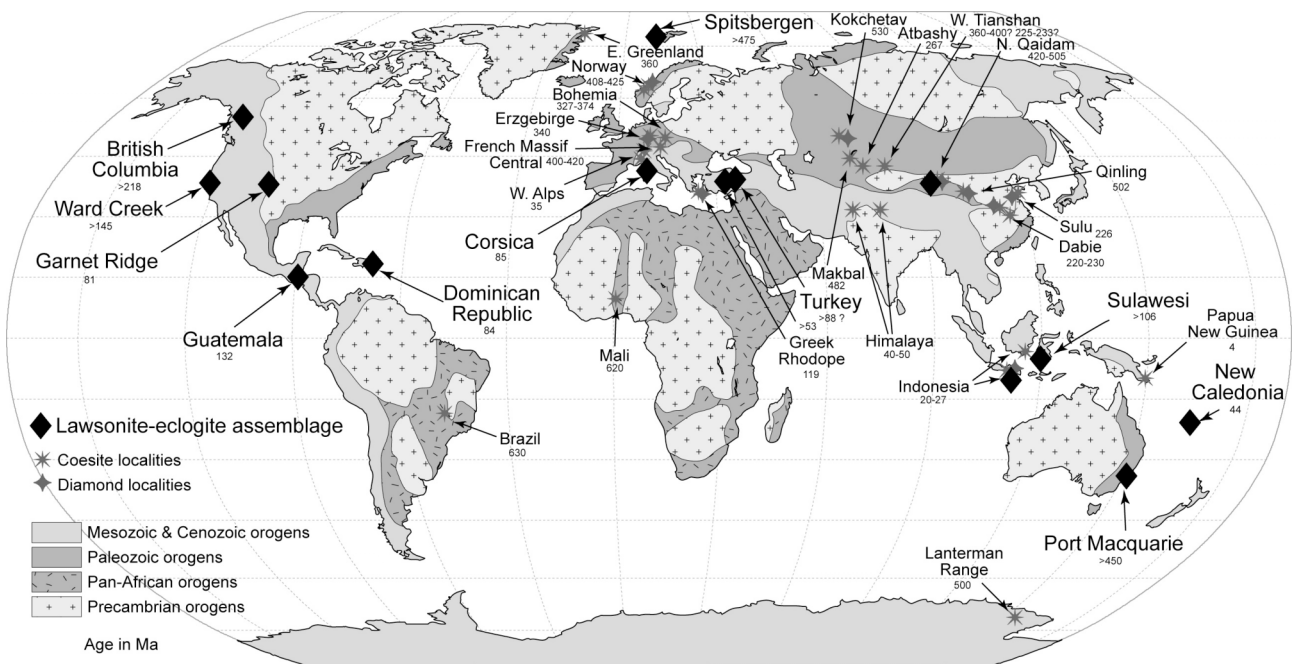


図2. 世界のローソン石エクロジヤイト相の鉱物組み合わせを持つ変成岩の産地 (Tsujimori *et al.*, 2006b).

3. 世界のローソン石エクロジヤイト

現在までに世界の造山帯で約 10 箇所の産地でローソン石エクロジヤイト相の鉱物組み合わせが報告されている (Tsuji-mori *et al.*, 2006b) (図 2). (1) グアテマラ・モタグア断層帯 (McBirney *et al.*, 1967; Harlow *et al.*, 2004; Tsujimori *et al.*, 2005; Tsujimori *et al.*, 2006a), (2) ドミニカ共和国・サマナ半島 (Zack *et al.*, 2004), (3) 地中海・コルシカ島 (Caron *et al.*, 1981; Caron and Péquignot, 1986), (4) トルコ (Altherr *et al.*, 2004; Whitney and Davis, 2006), (5) オーストラリア・ニューイングランド褶曲帯 (Och *et al.*, 2003), (6) カナダ・ブリティッシュコロンビア (Ghent *et al.*, 1993), (7) 北米フランシスカン帯・ワードクリーク (Maruyama and Liou, 1988; Oh *et al.*, 1991; Shibakusa and Maekawa, 1997), (8) インドネシア・スラウェシ島 (Parkinson *et al.*, 1998), (9) ニューカレドニア・パム半島 (Clarke *et al.*, 1997), (10) 北極圏・スピッツベルゲン島 (Hirajima *et al.*, 1988).

さらに, 超高压変成帯の試料のいくつかからローソン石の仮像と考えられる緑れん石+藍晶石+石英の集合結晶が知られている (Castelli *et al.*, 1998; Mattinson *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2004). また, コロラド平原のダイアトリーム中の捕獲岩としてのローソン石エクロジヤイトが知られており (Helmstaedt and Schulze, 1988), このローソン石エクロジヤイトからはコース石が報告されている (Usui *et al.*, 2003). しかし, 多くの産地では, ローソン石エクロジヤイト相の鉱物組み合わせからより温度の高い緑れん石を含む鉱物組み合わせへの過渡的状态を保存しており, ローソン石は残晶として産することが多い. Tsujimori *et al.* (2006b) は, ローソン石エクロジヤイトから緑れん石エクロジヤイトへの過渡的状态を記憶するタイプを E タイプと呼び, これに対し, ローソン石安定領域のみでの記憶を保持するタイプを L タイプとして区分した (表 1). L タイプのローソン石エクロジヤイトはより低い地温勾配を記憶している. そしてその L タイプの代表が, カリザルグランデ産のローソン石エクロジヤイトである.

表 1. 世界のローソン石エクロジヤイト (Tsuji-mori *et al.*, 2006b を改変).

Location	Age (Ma)	Pressure (kbar)	Temperature (°C)	Mineral Assemblage	Crystal Size (μm)	Texture	Notes
Guatemala, Motagua	10-15	10-12	500-600	Lawsonite + Epidote + Quartz	10-20	Equigranular	McBirney <i>et al.</i> , 1967
Dominican Republic, Samaná	10-15	10-12	500-600	Lawsonite + Epidote + Quartz	10-20	Equigranular	Zack <i>et al.</i> , 2004
Mediterranean, Corsica	10-15	10-12	500-600	Lawsonite + Epidote + Quartz	10-20	Equigranular	Caron <i>et al.</i> , 1981
Turkey	10-15	10-12	500-600	Lawsonite + Epidote + Quartz	10-20	Equigranular	Altherr <i>et al.</i> , 2004
Australia, New England	10-15	10-12	500-600	Lawsonite + Epidote + Quartz	10-20	Equigranular	Och <i>et al.</i> , 2003
Canada, British Columbia	10-15	10-12	500-600	Lawsonite + Epidote + Quartz	10-20	Equigranular	Ghent <i>et al.</i> , 1993
USA, Franciscan	10-15	10-12	500-600	Lawsonite + Epidote + Quartz	10-20	Equigranular	Maruyama and Liou, 1988
Indonesia, Sulawesi	10-15	10-12	500-600	Lawsonite + Epidote + Quartz	10-20	Equigranular	Parkinson <i>et al.</i> , 1998
New Caledonia, Pam	10-15	10-12	500-600	Lawsonite + Epidote + Quartz	10-20	Equigranular	Clarke <i>et al.</i> , 1997
Arctic, Spitzbergen	10-15	10-12	500-600	Lawsonite + Epidote + Quartz	10-20	Equigranular	Hirajima <i>et al.</i> , 1988

* - 2006b, 2006c - Addition to the main of paper

4. 青色片岩からローソン石エクロジヤイトへ

青色片岩相からエクロジヤイト相への漸移は、藍閃石-緑れん石エクロジヤイトやそれを含む広域変成帯に記憶されている場合がある。例えば、飛騨山地の青海蛇紋岩メランジュには、青色片岩相からエクロジヤイト相に至る昇温度時期の過程を保持した藍閃石-緑れん石エクロジヤイトが産する(辻森ほか, 2000; Tsujimori, 2002; 辻森, 2006; 辻森・松本, 2006)。変成ピークはざくろ石+オンファス輝石+藍閃石+緑れん石の鉱物組み合わせで特徴づけられ、ざくろ石-オンファス輝石-フェンジャイト地質温度圧力計(Krogh Ravn and Terry, 2004)を用いると、温度約550-600°C, 圧力>1.8GPaが推定される。同様の鉱物組成・共生関係は、中国山地の蓮華帯の青色片岩の残晶鉱物組み合わせとして記載されており、蓮華帯のエクロジヤイト相を特徴づけている(Tsujimori and Liou, 2005)。このような藍閃石-緑れん石エクロジヤイトはどのような沈み込み変成作用を代表するであろうか?

一般に、藍閃石-緑れん石エクロジヤイトは、約8°C/km程度の地温勾配を記録し、‘冷たい’そして‘沈み込み速度の速い’海洋プレートの沈み込みを経験したと考えられてきた(例えば, Miyazaki *et al.*, 1996; Clarke *et al.*, 1997)。しかし、図3が示すように青海の藍閃石-緑れん石エクロジヤイトに推定される昇温時期の圧力温度経路は、Peacock and Wang (1999)が計算した現在の西南日本の沈み込み帯に相当するような‘暖かい’沈み込みに近い。一方、Tsujimori *et al.* (2006a)はグアテマラのローソン石エクロジヤイトから推定した変成条件を、現在の東北日本直下の沈み込み帯の温度構造(Peacock and Wang, 1999)に対比させた。図4に示すように、グアテマラのローソン石エクロジヤイトは東北日本直下の温度構造や約300-400°Cでエクロジヤイト化するというHacker *et al.* (2003b)の前進モデリングによる岩石学的構造とおおよそ一致する。‘冷たい’沈み込み帯を特徴づけるローソン石エクロジヤイトの圧力温度経路は、藍閃石-緑れん石エクロジヤイトのそれとは大きく異なる(図3)。

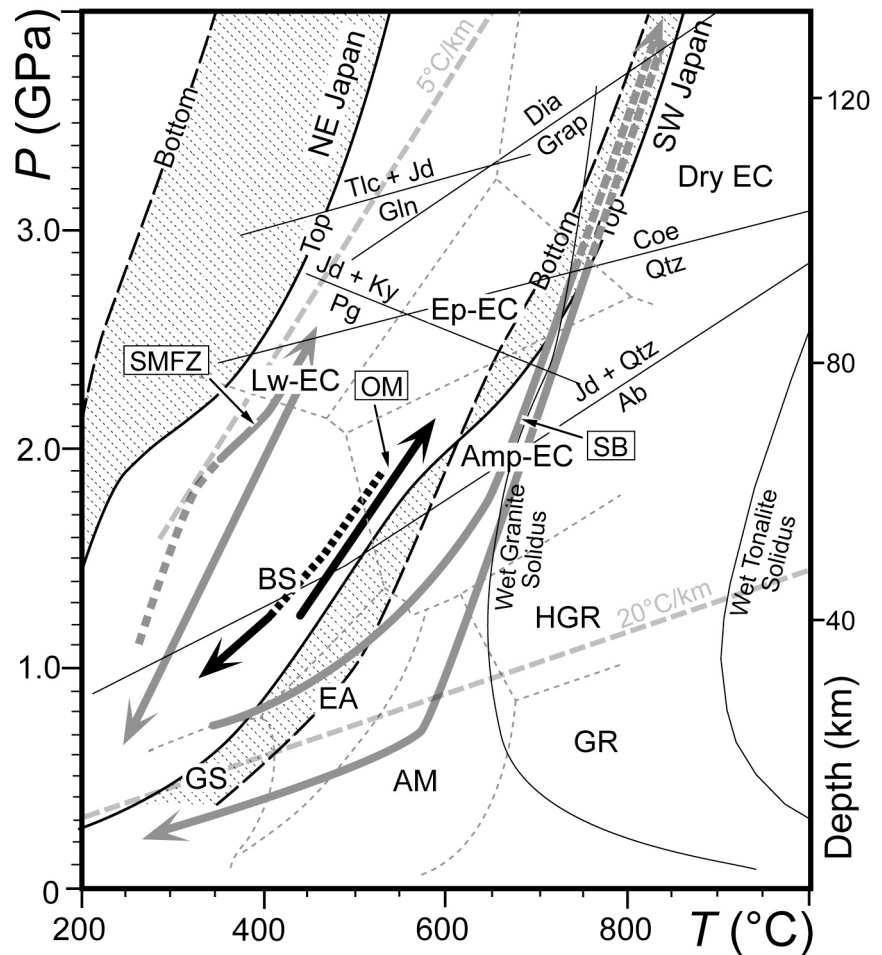


図3. 青海(OM)の藍閃石-緑れん石エクロジヤイトの変成経路を示した圧力(P)-温度(T)図(辻森・松本, 2006)。比較のためモタグア断層帯のローソン石エクロジヤイト(SMFZ: Tsujimori *et al.*, 2006a), 及び三波川帯のエクロジヤイト(SB: Ota *et al.*, 2004)の変成経路を示した。変成相の略号とその境界線, 及び主要な反応曲線の位置はLiou *et al.* (2004)による。斜線の領域は現在の東北日本と西南日本に沈み込むスラブ上面・下面に予測される温度構造(Peacock and Wang, 1999)を表す。

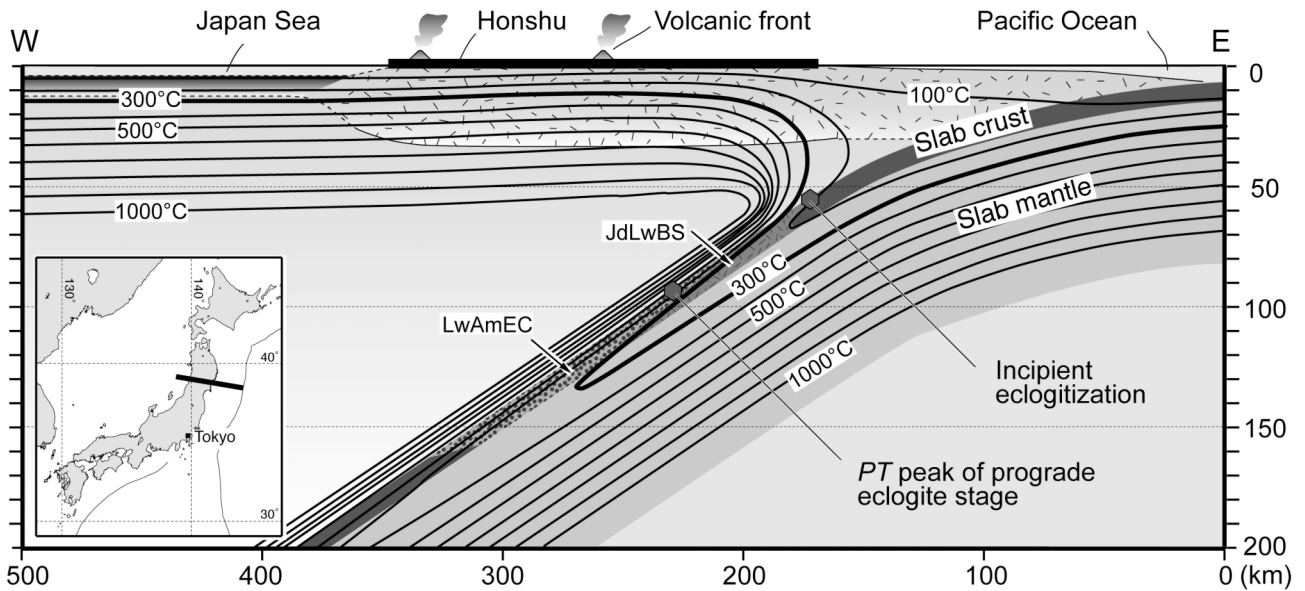


図 4. 現在の東北日本直下に予測される温度構造とモタグア断層帯のローソン石エクロジヤイトから推定されるエクロジヤイト化と変成ピークの圧力・温度の位置関係. Hacker *et al.* (2003a) の前進モデリングによる岩石学的構造も示した.

青色片岩はローソン石エクロジヤイトへ相転移するだろうか? 既存の変成相区分図を見ると, ローソン石エクロジヤイト相はその低温側で青色片岩相 (ローソン石青色片岩相) と接する (例えば, Okamoto and Maruyama, 1999; Liou *et al.*, 2004). ところが, その境界の定義は曖昧である. 玄武岩質の全岩組成を用いた CNFMASH 系 (CaO- Na₂O- FeO- MgO- Al₂O₃- SiO₂- H₂O 系) の *P-T* シュードセクションの計算において, Carson *et al.* (1999) はざくろ石+オンファス輝石+藍閃石+ホルンブレンド+ローソン石が安定な自由度 2 の二変数 (trivariant) 領域 (一変数曲線で囲まれる *P-T* 領域) の低温部分にざくろ石のモード・ゼロ線で定義されるオンファス輝石+藍閃石+ホルンブレンド+ローソン石が安定な自由度 3 の三変数 (divariant) 領域 (二変数領域に囲まれた *P-T* 領域) を示した. Hoschek (2001) は, ざくろ石+オンファス輝石+藍閃石+ローソン石が安定な三変数領域の低温側にざくろ石のモード・ゼロ線によりオンファス輝石+藍閃石+ローソン石が安定な自由度 4 の四変数 (quadrivariant) 領域を示した. これらは青色片岩相とローソン石エクロジヤイト相の境界に相当するのであるだろうか?

Tsujimori *et al.* (2006a) は, グアテマラのローソン石エクロジヤイトの岩石学的研究において, 昇温期の藍閃石が極めて稀なこと, 及び, 昇温期の緑泥石が一般的なこと, さらに, 昇温期のローソン石がパンペリー石の残晶を保持していることを見出した. さらに, 約 300°C 以下でもローソン石エクロジヤイト化が始まることを明らかにした. これは, 冷たい沈み込み帯では, 緑泥石+パンペリー石を含む変質玄武岩が直接, ローソン石エクロジヤイト化する仮説を導いた. Hirajima (1983) は青色片岩相の亜相として,

藍閃石を欠き, ローソン石+透輝石+緑泥石の鉱物組み合わせを特徴的に含む圧力温度領域を提案した. この鉱物組み合わせは, 中国山地の蓮華帯のローソン石青色片岩の, 特に玄武岩質の部分 (枕状溶岩のコアなど) にしばしば観察される (Tsujimori and Liou, 2006). 普通輝石+緑泥石+ローソン石+パンペリー石+曹長石という鉱物組み合わせの緑泥石と曹長石がざくろ石とオンファス輝石のひすい輝石成分に分解すれば, ローソン石エクロジヤイトとなるだろう. もし, 超低地温勾配域では沈み込む玄武岩質岩は青色片岩相を経ることなく, 直接, ローソン石エクロジヤイト化するという仮説が正しければ, これまでの沈み込み帯の研究が考えていたような沈み込み玄武岩質スラブのエクロジヤイト化に伴う藍閃石類の脱水反応は冷たい沈み込み帯では存在しないことになる. さらに, ローソン石エクロジヤイト化は, 連続的な緑泥石の脱水分解と共に, ローソン石を形成するための加水反応が必要である. この加水過程は, 沈み込み含水かんらん岩スラブの脱水反応 (二重地震面の下面付近) により上方 (沈み込み玄武岩質スラブ側) に放出された流体の関与により説明できるかもしれない.

前述のように, 著者の研究の主体は, 青色片岩からローソン石エクロジヤイトへと移行した. しかし, 冷たい沈み込み帯では, 青色片岩からローソン石エクロジヤイトへ転移することはなく, 変質玄武岩が直接ローソン石エクロジヤイト化するというのが現在の作業仮説である.

5. あとがき

蒜山地質年代学研究所設立 10 周年記念誌の原稿をまとめ

ている期間中、フランシスカン帯の論文をまとめた (Tsuji-mori *et al.*, 2006c). サンフランシスコ市街から車で 30 分程のティブロン半島のリングマウンテンの緑れん石- 藍閃石エクロジヤイトについての原稿であり, そこは Ransome (1894) が初めてローソン石を記載したローソン石の模式地でもあった. ローソン石模式地のローソン石は, エクロジヤイトなどを切る脈として産する. もちろん, ローソン石はエクロジヤイト相の産物ではないが, 親指ほどの大きさの見事なローソン石の自形結晶も観察できる. ふと, このローソン石の論文が公表されて 110 年経過していることに気がついた. これから 100 年後に蒜山地質年代学研究所はちょうど設立 110 周年を迎える. 100 年後, 何がどこまで解明されているだろうか? ^{63}Ni が β 崩壊して ^{63}Cu になる時の半減期が 101.1 ± 1.4 年ということだ (Colle and Zimmerman, 1996).

謝 辞

青色片岩からローソン石エクロジヤイトの研究に至る過程の 1 年間, 著者は(株)蒜山地質年代研究所及び岡山理科大学の板谷徹丸教授からのサポートに研究者生命を救われた(それがなければ著者のローソン石エクロジヤイトの研究など無かったであろう). 郷津知太郎博士と八木公史博士には原稿を校閲していただき改善意見を頂いた. ここに記して感謝します.

文 献

- Abers, G. A., van Keken, P. E., Kneller, E. A., Ferris, A. and Stachnik, J. C. (2006) The thermal structure of subduction zones constrained by seismic imaging: Implications for slab dehydration and wedge flow. *Earth and Planetary Science Letters*, **241**, 387– 397.
- Altherr, R., Topuz, G., Marschall, H., Zack, T. and Ludwig, T. (2004) Evolution of a tourmaline-bearing lawsonite-eclogite from the Elekdag area (Central Pontides, N Turkey): evidence for infiltration of slab-derived B-rich fluids during exhumation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **148**, 409– 425.
- Aoya, M., Uehara, S., Matsumoto, M., Wallis, S. and Enami, M. (2003) Subduction-stage P-T path of eclogite from the Sambagawa belt: prophetic record for oceanic-ridge subduction. *Geology*, **31**, 1045–1048.
- Caron, J.-M., Kiénast, J.-R. and Triboulet, C. (1981) High-pressure/low-temperature metamorphism and poly-phase Alpine deformation at Sant' Andrea di Cotone (Eastern Corsica, France). *Tectonophysics*, **78**, 419– 451.
- Caron J.-M. and Péquignot, G. (1986) The transition between blueschists and lawsonite-bearing eclogites based on observations from Corsican metabasites. *Lithos*, **19**, 205– 218.
- Carson, C. J., Powell, R. and Clarke, G. L. (1999) Calculated mineral equilibria for eclogites in $\text{CaO-Na}_2\text{O-FeO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$: application to the Pouébo Terrane, Pam Peninsula, New Caledonia. *Journal of Metamorphic Geology*, **17**, 9– 24.
- Castelli, D., Rolfo, F., Compagnoni, R. and Xu, S. T. (1998) Metamorphic veins with kyanite, zoisite and quartz in the Zhu-Jia-Chong eclogites, Dabie Shan, China. *The Island Arc*, **7**, 159– 173.
- Clarke, G. L., Aitchison, J. C. and Cluzel, D. (1997) Eclogites and blueschists of the Pam Peninsula, NE New Caledonia: A reappraisal. *Journal of Petrology*, **38**, 843– 876.
- Colle, R. and Zimmerman, B. E. (1996) ^{63}Ni Half-Life: a New Experimental Determination and Critical Review. *Applied Radiation and Isotopes*, **47**, 677– 691.
- Connolly, J. A. D. and Kerrick, D. M. (2002) Metamorphic controls on seismic velocity of subducted oceanic crust at 100–250 km depth. *Earth and Planetary Science Letters*, **204**, 61– 74.
- Ghent, E. D., Stout, M. Z. and Erdmer, P. (1993) Pressure-temperature evolution of lawsonite-bearing eclogites, Pinchi Lake, British Columbia. *Journal of Metamorphic Geology*, **11**, 279– 290.
- Hacker, B. R., Abers, G. A. and Peacock, S. M. (2003a) Subduction Factory 1. Theoretical mineralogy, densities, seismic wave speeds, and H_2O contents. *Journal of Geophysical Research*, **108**, 10.1029/2001JB001127.
- Hacker, B. R., Peacock, S. M., Abers, G. A. and Holloway, S. (2003b) Subduction Factory 2. Intermediate-depth earthquakes in subducting slabs are linked to meta-morphic dehydration reactions. *Journal of Geophysical Research*, **108**, 10.1029/2001JB001129.
- Harlow, G. E., Hemming, S. R., AvéLallemant, H. G., Sisson, V. B. and Sorensen, S. S. (2004) Two high-pressure-low-temperature serpentinite-matrix melange belts, Motagua fault zone, Guatemala: A record of Aptian and Maastrichtian collisions. *Geology*, **32**, 17– 20.
- Harlow, G. E., Sisson, V. B., AvéLallemant, H. G., Sorensen, S. S. and Seitz, R. (2003) High pressure, metasomatic rocks along the Motagua Fault Zone, Guatemala. *Ophioliti*, **28**, 115– 120.
- Helmstaedt, H. and Schulze, D. J. (1988) Eclogite-facies ultramafic xenoliths from Colorado Plateau diatreme breccias: Comparison with eclogites in crystal environments evaluation of the subduction hypothesis, and implications for eclogite xenoliths from diamondiferous kimberlites. In: *Eclogite and eclogite facies rocks* (ed. Smith, D. C.), 387– 450. Elsevier Science, New York.
- Hirajima, T. (1983) The analysis of the paragenesis of glaucophanitic metamorphism for a model ACF system by Schreinemaker's method. *Journal of the Geological Society of Japan*, **89**, 679–691.
- Hirajima, T., Banno, S., Hiroi, Y. and Ohta, Y. (1988) Phase petrology of eclogites and related rocks from the Motalafjella high-pressure metamorphic complex in Spitsbergen and its significance. *Lithos*, **22**, 75– 97.
- Hoschek, G. (2001) Thermobarometry of metasediments and metabasites from the Eclogite zone of the Hohe Tauern, Eastern Alps, Austria. *Lithos*, **59**, 127– 150.
- Hwang, S.-L., Shen, P., Chu, H.-T. and Yui, T.-F. (2000) Nanometer-size α - PbO_2 -type TiO_2 in garnet: A thermo-barometer for ultrahigh-pressure metamorphism. *Science*, **288**, 321– 324.
- Kerrick, D. M. and Connolly, J. A. D. (2001) Metamorphic devolatilization of subducted oceanic metabasites: implications for seismicity, arc magmatism and volatile recycling. *Earth Planetary Science Letters*, **189**, 19– 29.
- Kirby, S. H., Stein, S., Okal, E. O. and Rubie, D. C. (1996)

- Metastable mantle phase transformations and deep earthquakes in subducting oceanic lithosphere. *Review of Geophysics*, **34**, 261–306.
- Krogh Ravana, E. and Terry, M. P. (2004) Geothermobarometry of UHP and HP eclogites and schists – an evaluation of equilibria among garnet-clinopyroxene-kyanite-phengite-coesite/quartz. *Journal of Metamorphic Geology*, **18**, 211–219.
- Li, X.-P., Zheng, Y.-F., Wu, Y.-B., Chen, F., Gong, B. and Li, Y.-L. (2004) Low-T eclogite in the Dabie terrane of China: petrological and isotopic constraints on fluid activity and radiometric dating. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **148**, 443–470.
- Liou, J. G., Ernst, W. G. and Ogasawara, Y. (2003) Petrochemical and Tectonic Processes of UHP/HP Terranes II: Preface. *Journal of Metamorphic Geology*, **21**, 513–514.
- Liou, J. G., Hacker, B. R. and Zhang, R. Y. (2000) Into the forbidden zone. *Science*, **287**, 1215–1216.
- Liou, J. G., Tsujimori, T., Zhang, R. Y., Katayama, I. and Maruyama, S. (2004) Global UHP metamorphism and continental subduction/collision: The Himalayan model. *International Geology Review*, **46**, 1–27.
- Maruyama, S. and Liou, J. G. (1988) Petrology of Franciscan metabasites along the jadeite-glaucophane type facies series, Cazadero, California. *Journal of Petrology*, **29**, 1–37.
- Mattinson, C., Zhang, R. Y., Tsujimori, T. and Liou, J. G. (2004) Epidote-rich talc-kyanite-phengite eclogites, Sulu terrane, eastern China: P-T-f_{O2} estimations and the significance of the epidote-talc assemblage in eclogite. *American Mineralogists*, **89**, 1772–1783.
- McBirney, A., Aoki, K. and Bass, M. N. (1967) Eclogites and jadeite from the Motagua fault zone, Guatemala. *American Mineralogists*, **52**, 908–918.
- Miyazaki, K., Zulkarnain, I., Sopaheluwakan, J. and Wakita, K. (1996) Pressure-temperature conditions and retrograde paths of eclogites, garnet-glaucophane rocks and schists from South Sulawesi, Indonesia. *Journal of Metamorphic Geology*, **14**, 549–563.
- Och, D. J., Leitch, E. C., Caprarelli, G. and Watanabe, T. (2003) Blueschist and eclogite in tectonic melange, Port Macquarie, New South Wales, Australia. *Mineralogical Magazine*, **67**, 609–624.
- Oh, C. W., Liou, J. G. and Maruyama, S. (1991) Low-temperature eclogites and eclogitic schists in Mn-rich metabasites in Ward Creek, California; Mn and Fe effects on the transition between blueschist and eclogite. *Journal of Petrology*, **32**, 275–301.
- Ohtani, E. (2005) Water in the Mantle. *Element*, **1**, 25–30.
- Okamoto, K. and Maruyama, S. (1999) The high-pressure synthesis of lawsonite in the MORB+H₂O system. *American Mineralogists*, **84**, 362–373.
- Ota T., Terabayashi M. and Katayama I. (2004) Thermobaric structure and metamorphic evolution of the Iratsu eclogite body in the Sanbagawa belt, central Shikoku, Japan. *Lithos*, **73**, 95–126.
- Parkinson, C. D., Miyazaki, K., Wakita, K., Barber, A. J. and Carswell, D. A. (1998) An overview and tectonic synthesis of the pre-Tertiary very-high-pressure metamorphic and associated rocks of Java, Sulawesi and Kalimantan, Indonesia. *The Island Arc*, **7**, 184–200.
- Pawley, A. R., Redfern, S. A. T. and Holland, T. J. B. (1996) Volume behavior of hydrous minerals at high pressure and temperature: I. Thermal expansion of lawsonite, zoisite, clinozoisite, and diasporite. *American Mineralogists*, **81**, 335–340.
- Peacock, S. M. and Wang, K. (1999) Seismic consequences of warm, versus cool subduction metamorphism: examples from Southwest and Northeast Japan. *Nature*, **286**, 937–939.
- Ransome, F. L. (1894) On lawsonite, a new rock forming mineral from the Tiburon Peninsula, Marin County, California. *University of California, Berkeley, Department of Geological Science Bulletin*, no. 1, 301–312.
- Rüpke, L. H., Morgan, J. P., Hort, M. and Connolly, J. A. D. (2004) Serpentine and the subduction zone water cycle. *Earth Planetary Science Letters*, **223**, 17–34.
- Schmidt, M. W. (1995) Lawsonite: Upper pressure stability and formation of higher density hydrous phases. *American Mineralogists*, **80**, 1286–1292.
- Schmidt, M. W. and Poli, S. (1998) Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation. *Earth Planetary Science Letters*, **163**, 361–379.
- Shibakusa, H. and Maekawa, H. (1997) Lawsonite-bearing eclogitic metabasites in the Cazadero area, northern California. *Mineralogy and Petrology*, **61**, 163–180.
- 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: 大江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. *地質学雑誌*, **104**, 213–231.
- Tsujimori, T. (2002) Prograde and retrograde P-T paths of the late Paleozoic glaucophane eclogite from the Renge metamorphic belt, Hida Mountains, southwest Japan. *International Geology Review*, **44**, 797–818.
- 辻森 樹 (2006) [2.2.3] 青海地域湯ノ谷の高圧型変成岩類: 古生代に沈み込んだスラブ物質のエクロジイト化の記録 ([2.2] 飛騨外縁帯: 日本最古の付加体とそれを覆う古生代堆積物)]. 日本地質学会編集「日本地方地質誌4 中部地方」, 朝倉書店. 東京, 158–159.
- 辻森 樹・石渡 明・坂野昇平 (2000) 西南日本内帯蓮華変成帯, 青海町湯ノ谷のエクロジイト質藍閃石片岩について. *地質学雑誌*, **106**, 353–362.
- Tsujimori, T. and Itaya, T. (1999) Blueschist-facies metamorphism during Paleozoic orogeny in southwestern Japan: phengite K-Ar ages of blueschist-facies tectonic blocks in a serpentinite melange beneath Early Paleozoic Oeyama ophiolite. *The Island Arc*, **8**, 190–205.
- Tsujimori, T. and Liou, J. G. (2005) Eclogite-facies mineral inclusions in clinozoisite from Paleozoic blueschist, central Chugoku Mountains, SW Japan: Evidence of regional eclogite-facies metamorphism. *International Geology Review*, **47**, 215–232.
- Tsujimori, T. and Liou, J. G. (2006) Significance of the Ca-Na pyroxene-lawsonite-chlorite assemblage in blueschist-facies metabasalts: An example from the Renge metamorphic rocks, SW Japan. *International Geology Review*, **48**, in press.
- 辻森 樹・Liou, J. G.・Coleman, R. G. (2003) ‘Forbidden Zone’ 環境 (超低地温勾配域) への窓: 広域ローソン石エクロジイトの研究. 日本地質学会第110年学術大会(静岡大学), 講演要旨.
- Tsujimori, T., Liou, J. G. and Coleman, R. G. (2005) Coexisting retrograde jadeite and omphacite in a jadeite-bearing lawsonite eclogite from the Motagua fault zone, Guatemala. *American Mineralogist*, **90**, 836–842.
- Tsujimori, T., Liou, J. G., Coleman, R. G. and Rohrt, W. (2003) Eclogitization of a cold subducting slab: Prograde evolution of lawsonite-eclogites from the Motagua Fault Zone, Guatemala. *Geological Society of*

- America Abstract Program*, **35**, 639.
- 辻森 樹・松本啓作 (2006) 青海蛇紋岩メンランジュ産の藍閃石-緑れん石エクロジヤイトの圧力温度シュードセクション: 予報. *地質学雑誌*, **112**, 407-414.
- Tsujimori, T., Sisson, V. B., Liou, J. G., Harlow, G. E. and Sorensen, S. S. (2006a) Petrologic characterization of Guatemalan lawsonite eclogite: Eclogitization of subducted oceanic crust in a cold subduction zone. In: *Ultrahigh-Pressure Metamorphism: Deep Continental Subduction* (eds. B.R. Hacker *et al.*), **403**, 147-168. GSA Special Paper.
- Tsujimori, T., Sisson, V. B., Liou, J. G., Harlow, G. E. and Sorensen, S. S. (2006b) Very low-temperature record in subduction process: a Review of worldwide lawsonite-eclogites. *Lithos*, in press.
- Tsujimori, T., Matsumoto, K., Wakabayashi, J. and Liou, J. G. (2006c) Franciscan eclogite revisited: Reevaluation of the P-T evolution of tectonic blocks from Tiburon Peninsula, California. *Mineralogy and Petrology*, in press.
- Uehara, S. and Aoya, M. (2005) Thermal model for approach of a spreading ridge to subduction zones and its implications for high-P/high-T metamorphism: Importance of subduction versus ridge approach ratio. *Tectonics*, **24**, doi:10.1029/2004TC001715.
- Usui, T., Nakamura, E., Kobayashi, K. and Maruyama, S. (2003) Fate of the subducted Farallon plate inferred from eclogite xenoliths in the Colorado Plateau. *Geology*, **31**, 589- 592.
- Usui, T., Nakamura, E. and Helmstaedt, H. (2006) Petrology and geochemistry of eclogite xenoliths from the Colorado Plateau: Implications for the evolution of subducted oceanic crust. *Journal of Petrology*, **47**, 929- 964.
- Whitney, D. L. and Davis, P. B. (2006) Why is lawsonite eclogite so rare? Metamorphism and preservation of lawsonite eclogite, Sivrihisar, Turkey. *Geology*, **34**, 473- 476.
- Wu, X.-L., Meng, D.-W., and Hanm Y.-J. (2005) α -PbO₂-type nanophase of TiO₂ from coesite-bearing eclogite in the Dabie Mountains, China. *American Mineralogist*, **90**, 1458- 1461.
- Zack, T., Rivers, T., Brumm, R. and Kronz, A. (2004) Cold subduction of oceanic crust: Implications from a lawsonite eclogite from the Dominican Republic. *European Journal of Mineralogy*, **16**, 909- 916.