

カリフォルニア, ペニンスラー・レンジ バソリスにおける花崗岩系列

石原 舜 三¹⁾

1. まえがき

シエラ・ネバダ バソリス(本誌526号, 1998 参照)の南方, カリフォルニア州南端部からメキシコ国内にかけて南北1,000 kmに達する巨大な花崗岩体が分布する(第1図). これはカリフォルニア州の南部にあるためにサザン・カリフォルニア バソリス,

あるいはメキシコ領内の半島部(バハ・カリフォルニア)の北部にも広く分布するから, ペニンスラー・レンジ (Peninsular Range) バソリスとも呼ばれてきた. 現在では後者の名前で呼ばれることが多く, ここでもそれに従う.

ペニンスラー・レンジ バソリスの研究はLarsen (1948)とその学生達に始まると言って良い. その後1970-80年代にはG. Gastilに率いられたサンディエゴ州立大, アメリカ地質調査所, L. T. Silverに代表されるカリフォルニア工科大, USLAのD. J. DePaoloなどが多くの業績を残した. 特にG. Gastilとその学生達は日本の清水正明・田結庄良昭らの協力を得て, 花崗岩系列の観点からこのバソリスを広域的に検討した(Gastil, 1990; Gastil et

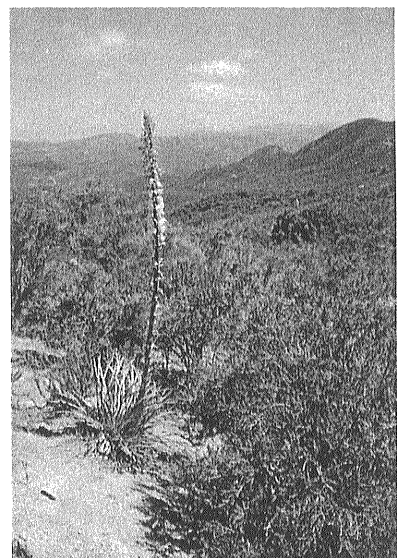
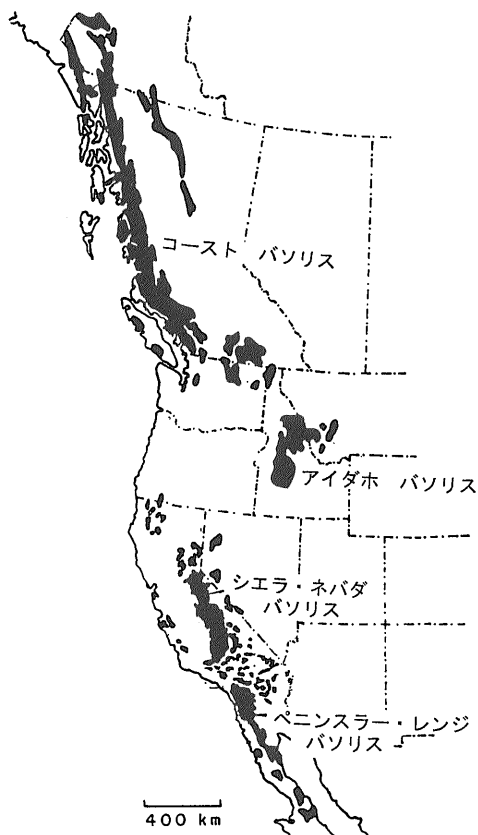


写真1 ペニンスラー・レンジ バソリス (PRB)を代表する花, ユッカ.

1) 地質調査所 顧問

キーワード: ペニンスラー・レンジ, 花崗岩, 斑れい岩, 磁鉄鉱系, チタン鉄鉱系, 帯磁率, ラ・ポスタ岩体

al., 1991, 1994). ここでは主にそれらについて紹介し、この花崗岩類がどのような成因的背景を持つかを概観してみたい。

ペニンスラー・レンジ バソリスは南北に1,000kmを超え、数百以上の直径1-50kmの小岩体から構成される。半島内で南北に伸長して分布するものが狭義のペニンスラー・レンジ バソリス(第2図)であるが、東方のソラ郡下にも小岩体が分布する。これはカリフォルニア湾の拡大以前は同一岩体であったものである。更に東方にも花崗岩類が分布し、南北アメリカ大陸西縁の常として内陸側へ花崗岩類の年代が若くなる傾向があり、その一部にカナネアやラ・カリダードなどの古第三紀ポーフイリー銅鉱床等が付随する。ここでは狭義のペニンスラー・レンジ バソリス、すなわち半島部分の深成岩体群について考察する。バソリスは海岸山脈を形成し、植生は少なく露出状態はよい(写真1~4)、その延

長部はメキシコ・シティ西方のプエルト・バラルタ南東方の海岸山地に現れる。

2. 花崗岩バソリスの概要

ペニンスラー・レンジ バソリスが貫入する岩石類は北側と西側では中生代初-中期の海洋性火山岩類・火山起源碎屑岩類からなる混濁流堆積物(タ

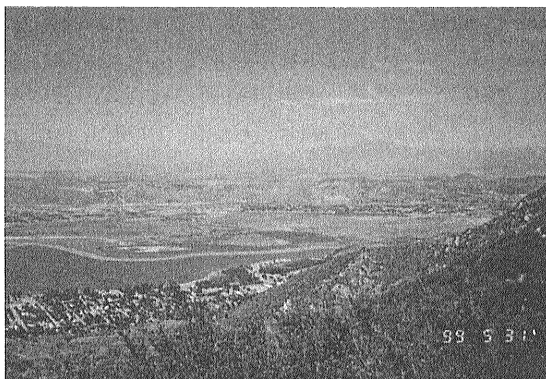


写真2 PRB西北端からの北方展望。遠方の2つの山の間に、サン・アンドレアス断層が走る。

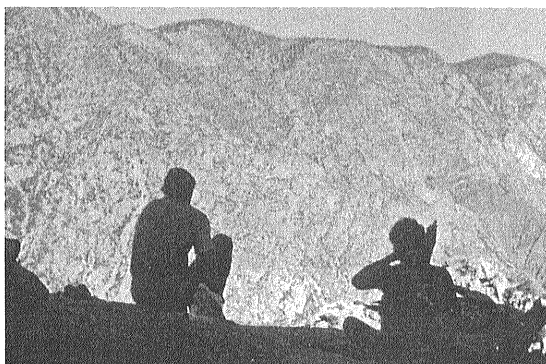
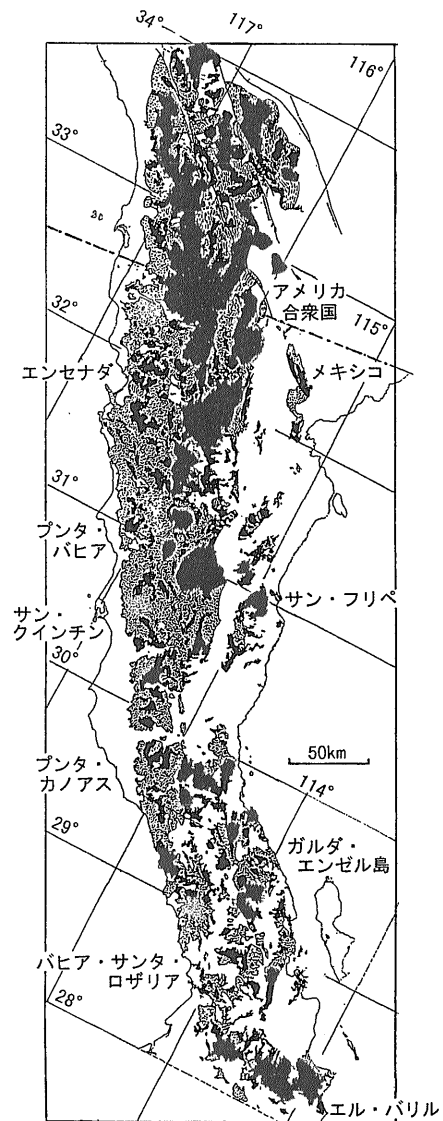


写真3 バハ・カリフォルニアのエル・ディアプロ山地の露岩風景。G. Gastil 提供。



第2図 ペニンスラー・レンジ バソリスにおける深成岩体(黒)の分布。模様は被貫入岩類、白は被覆岩。L. T. Silver手記。

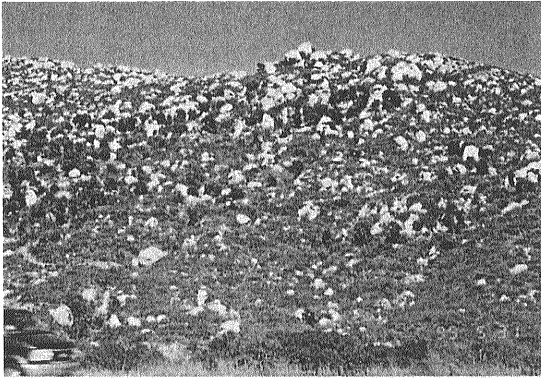


写真4 優白色花崗閃緑岩(西帯)の特征的露岩風景。シリカが多く堅固なため岩塊として残る。帯磁率 $2.0\text{--}3.0 \times 10^3$ SI単位。エル・シノア山地。

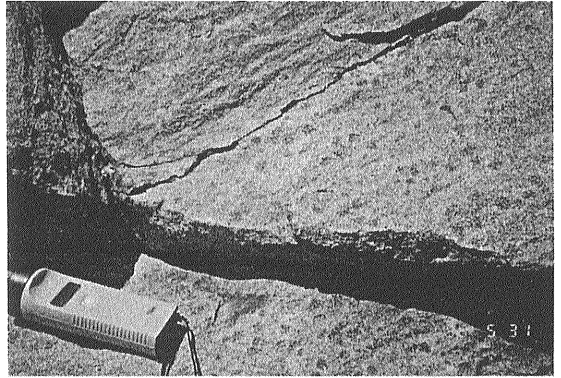


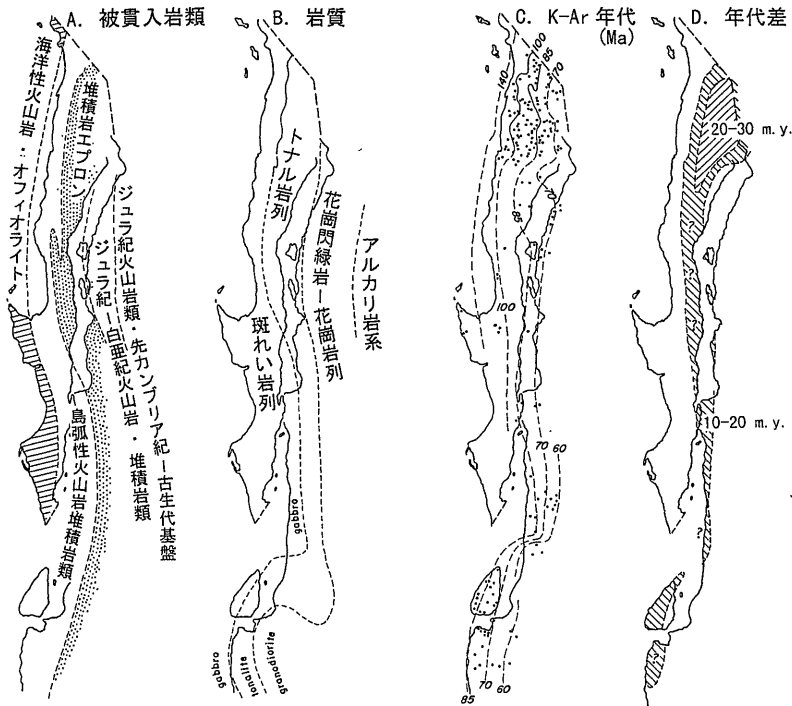
写真5 角閃石(十輝石)の斑晶を持つサン・マルコス斑れい岩(西帯)。帯磁率 $3.8\text{--}8.1 \times 10^3$ SI単位。エル・シノア山地。帯磁率計の長さ19.6 cm。

ービダイト)である(Gastil, 1983)。バソリスの中央から東方にかけては主に古生代-中生代のグレイワッケ、アルコース砂岩、頁岩類からなるが、東側では石英に富む砂岩が増加し、炭酸塩岩類が含まれる。先カンブリア紀の諸岩石は知られていないが、その碎屑物やジルコンなどは堆積岩類に含まれる。更にその東方には先カンブリア紀の基盤岩類が露出する(第3図A)。

これら被貫入岩類の褶曲軸、片磨面、破砕面な

どは一般的にバソリスの伸長方向(N~NW)と平行しており、構造運動と花崗岩質マグマの密接な貫入関係が推察される。花崗岩活動に伴うスカルン、鉍脈型などの鉍床は全く見られず、花崗岩貫入以前のオフィオライトに伴う鉍徴地が僅かにみれるに過ぎない(L.T. Silver, 私信, 1999)。

バソリス形成後の構造運動としては西に傾倒する隆起が急激に生じており、上部白亜紀層が不整合にバソリスを覆っている。隆起に伴う断層が、バソ



第3図
ペニンスラー・レンジ バソリスに見られる帯状配列 (Gastil, 1983)。
Dは同一試料のU-Pb法とK-Ar法との年代差。



写真6 片状構造が著しい ボンシルトナル岩 (西帯). 帯磁率 $5.3-7.1 \times 10^3$ SI 単位.

リスの伸長方向に沿って見られる. 更にカリフォルニア湾の拡大とサン・アンドレアス断層系列の横ずれ断層運動が生じている.

2.1 岩質の帯状変化

ペニンスラー・レンジ バソリス (PRB) は斑れい岩 (写真5) から優白色花崗岩に至る幅広い組成を持つ数百の岩体から構成されるが, 一言で言えばトナル岩 (写真6) で特色づけられる. これらは一般に角閃石類を含み, Iタイプ的である. その代表例はサン・ハシント岩体 (Hall, 1988) であろう. 極く一部にSタイプを伴う提案もある (Todd & Shaw, 1985) が, これは筆者の見学したところによると, 片麻岩に近い花崗岩で特殊である.

各岩体には苦鉄質同生岩脈が含まれることが多く (写真7), 苦鉄質礫状部が不規則に連なる “inclusion train” も多産し, この花崗岩類の苦鉄

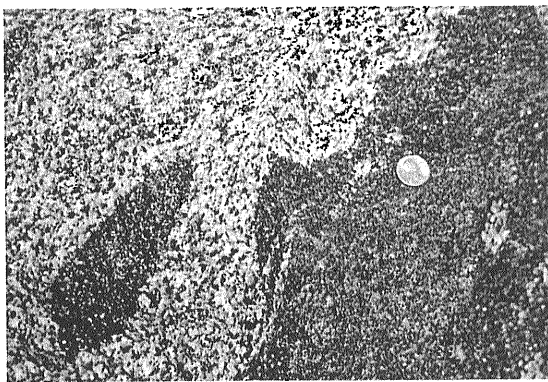


写真8 ロモナ・リング石英閃緑岩の片状構造と苦鉄質エンクレイブ.

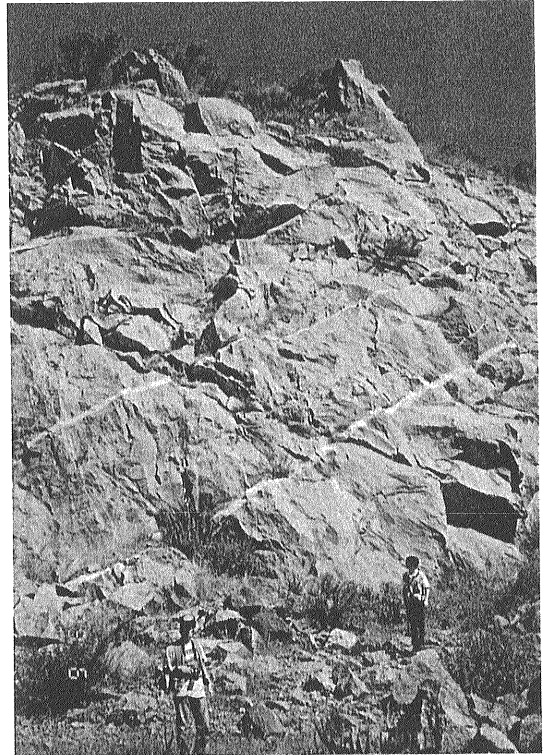


写真7 ロモナ・リング石英閃緑岩の採石場 (西帯). ほぼ垂直の片状構造を持ち苦鉄質エンクレイブ (一部同生岩脈) が多い. 帯磁率 $0.6-0.8 \times 10^3$ SI 単位. 白脈はアプライト-ペグマタイト岩床.

質マグマとの密接な成因的關係が推察される. 苦鉄質エンクレイブは普遍的に産出し, ホストの花崗岩類が片状構造を持つ場合には, それは伸長したレンズ状の形態をとる. 東帯の一部にはミロナイトが産出する.

鉱物の組み合わせとしては全体の90%以上が斜長石・石英・カリ長石・角閃石・黒雲母からなり, かんらん石と輝石は斑れい岩や苦鉄質トナル岩の一部に産出するに過ぎない. 斜方輝石はより稀であり, 両雲母花崗岩は頁岩質のルーフ・ペンダントやスクリーンに関連して東部で部分的に現れる. 累帯配列を持つ岩体は比較的少なく, ラ・ポスタなど東帯で見られ, リング構造を伴う花崗岩は西帯で見られる.

斑れい岩は西帯で卓越し, 東帯では1%以下であり少ない. 斑れい岩は下記のように2分することができる.

- (1) 石英に欠け, 石灰質な斜長石に富み, 石灰質

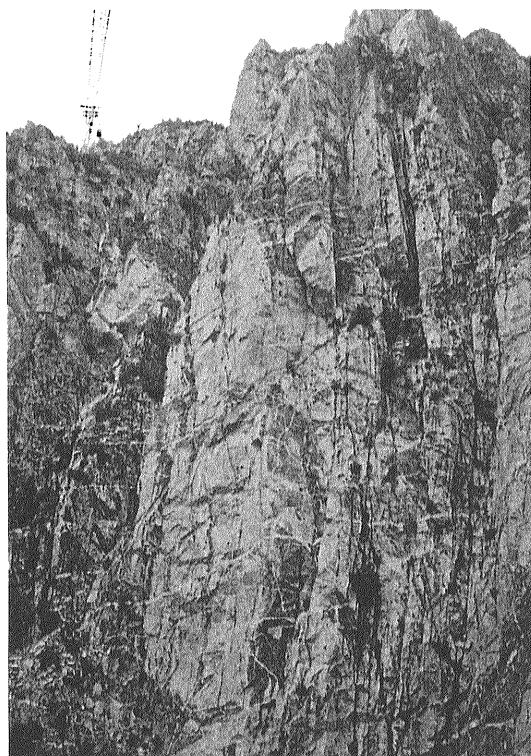


写真9 トラム・ウェイから見たサン・ハシント岩体(東帯)のトナル岩岩壁。

角閃石やかんらん石+単斜輝石+角閃石の苦鉄鉱物の組合せを持つもの。

(2) 石英を含み, Alに富む系列。

トナル岩はLarsen (1948)により古くから指摘されたように, このバソリスで最も卓越する岩相である。その斜長石は An_{45} - An_{38} の組成を持つが, 同時

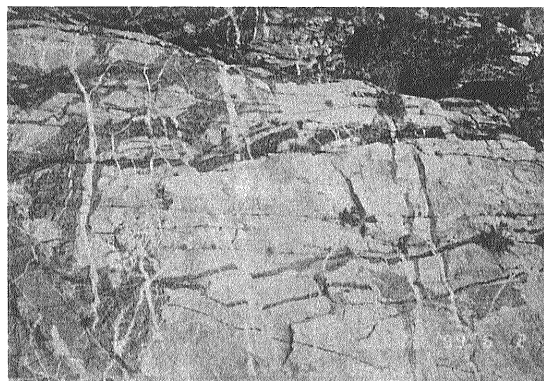


写真10 サン・ハシント岩体(東帯)の同生岩脈のクロウズ・アップ。

第1表 ペニンスラー・レンジ バソリスの平均化学分析値。

元素	全域	西帯	東帯
主成分(%)			
SiO ₂	64.63	63.41	66.05
TiO ₂	0.65	0.64	0.65
Al ₂ O ₃	15.94	15.70	16.23
Fe ₂ O ₃	1.20	1.55	0.78
FeO	3.19	3.60	2.71
MnO	0.08	0.09	0.06
MgO	2.15	2.71	1.49
CaO	5.10	5.70	4.41
Na ₂ O	3.62	3.45	3.82
K ₂ O	1.95	1.69	2.26
P ₂ O ₅	0.13	0.10	0.15
Fe ₂ O ₃ /FeO	0.38	0.43	0.29
微量成分(ppm)			
Ba	641	451	863
Rb	60	49	73
Sr	375	268	501
Pb	10	8	12
Th	7.2	6.0	8.6
U	1.5	1.4	1.7
Z	139	130	150
Nb	6.7	5.1	8.6
Y	19	24	12
La	16	12	20
Ce	35	28	43
Nd	14	13	16
Sc	14	19	8
V	85	115	50
Cr	47	67	24
Mn	587	704	451
Ni	13	18	6
Cu	10	16	3
Zn	76	66	88
Ga	18.3	16.4	20.5
分析個数	323	174	149

(Silver & Chappell, 1988).

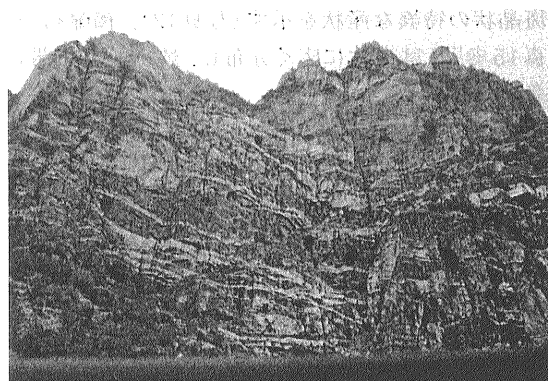
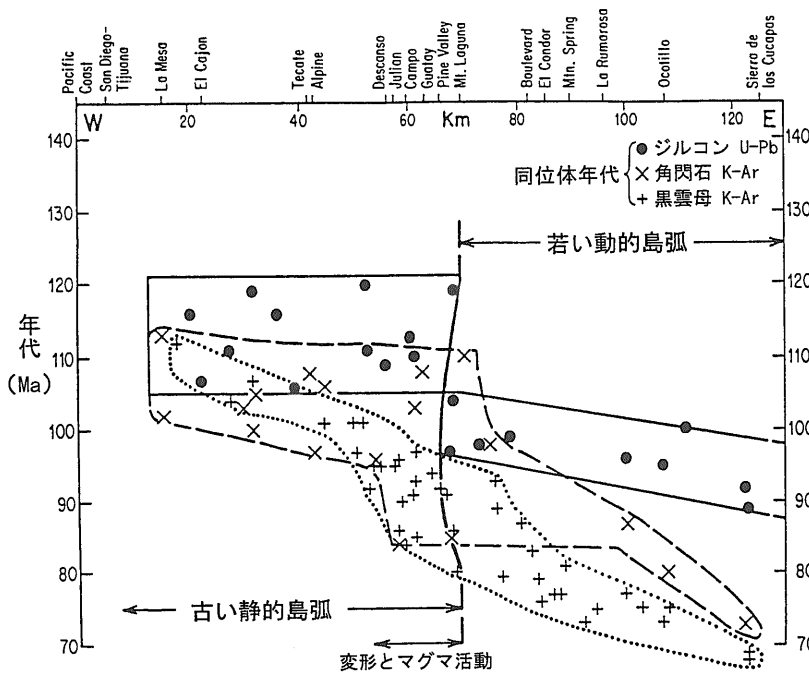


写真11 サン・ハシント岩体トナル岩中のペグマタイト岩床。



第4図
アメリカ/メキシコ国境付近の花崗岩類年代の東西変化 (Silver & Chappell, 1988).

にAn₇₀より大きい石灰質な核を持つ。苦鉄質珪酸塩鉱物は東西で大きく異なり、角閃石は西帯で半自形で見かけ後期晶出の産状を示すのに対し、東帯では自形性が強く、時には長辺が1-2cmの巨晶に達する。黒雲母も同様に東帯で自形性が強い。一般に西帯では花崗岩類が片状構造を持つので(写真8)、この苦鉄質鉱物の半自形性は二次的であった可能性が考えられている。この点はチタン石についても同様で、西側で粒状集合体、東側で自形楔状、早期晶出の外形を示す。サン・ハシント岩体では、自形のチタン石が斜長石に取り込まれる斑晶状の特異な産状を示す(写真12)。褐簾石(写真15参照)は全体に広く分布し、燐灰石は東帯に多い。

次に卓越する岩相は低カリウム花崗閃緑岩(モード比のカリ長石量 = 5-10%)である。カリ長石は斜長石や苦鉄鉱物間隙を充てて産出し、斑晶を構成することは極めて稀である。珪質なものが東西に見られ、例えば西帯ではLarsen (1948)の優白色花崗閃緑岩がこれに相当する。色指数が5%、SiO₂ = 75%に達するトロニウム岩的なものは半島部の西側に多い。これに対し、東帯の優白色岩は分化生成物であるか、あるいは両雲母花崗岩である。

2.2 化学成分の帯状配列

Baird *et al.* (1974)は、バソリス最北部の南北150kmのアメリカ合衆国地内で542個の主成分分析値を総括し、南西から北東方向にSiO₂, Na₂O, K₂O, が増加し、MgO, CaO, Fe₂O₃+ FeOが減少することを示した。Silver & Chappell (1988)は最北部の600kmについて323個の分析を新たに実施し、全体的にCaOに富み、Na/K比が高いことを示した(第1表)。アルカリライム指数は西帯で65%、東帯で62%であり、シエラ・ネバダと較べて著しく石灰質であると指摘した。

東西変化も明白で、東帯は西帯よりもSiO₂, Al₂O₃, Na₂O, K₂Oなどに富み、MgO, Fe₂O₃+ FeO, CaOに富む。Fe₂O₃/FeO比は西帯で0.43、磁鉄鉱系の下限の0.5より低く、東帯では0.28であり、かなり還元的である。

REEパターンは西帯と東帯の花崗岩類で、未分化島弧的火成岩ないし、やや分化(5-20%)した性格を持ち、負のEu異常を伴う。東帯では重希土元素(HREE)に乏しいものから、更に東方へ軽希土(LREE)が富む花崗岩類へ変化する。この点は第1表のCe/Y比に最も良く現れており、同比は西帯の1.2から東帯の3.6へ上昇する。負のEu異常は殆ど存在しない(Gromet & Silver, 1987)。

Sr初生値は岩質に依存することなく、西帯で0.7035より低い、東帯では0.7075より高い。全岩のSr含有量は一般に東方へ増加する(268と501 ppm, 第1表)。全岩の $\delta^{18}\text{O}$ 値は最西部の6パーミル以下から東へ上昇し、最高12パーミルに達する。

2.3 異なる放射性年代

ペニンスラー・レンジ バソリスでは黒雲母、角閃石を用いたK-Ar年代が140-60 Maの値を示すが、主にジルコン、チタン石、一部でモナズ石を用いたU-Pb年代は、バソリスの東西で大きく異なるという興味深い結果が得られている(第3図C-D)。U-Pb年代は貫入の時代を表すが、K-Ar年代は角閃石と黒雲母がそれぞれ $510 \pm 25^\circ\text{C}$ 、 $300 \pm 50^\circ\text{C}$ (柴田, 1990)に冷却した時点での時代と考えられる。

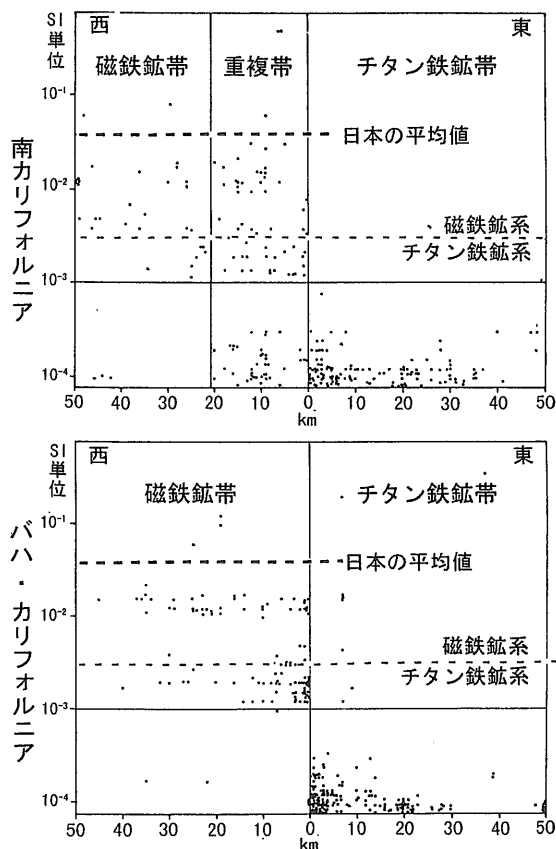
西帯はカリフォルニア半島の西海岸沿いの60-70kmと定義される。ジルコンについて被貫入岩類の火山岩類が125-118Maの限られた年代を示すのに対し、貫入深成岩類が142-105Maを示す。すなわち西帯では火山活動を伴う深成岩活動は限られた期間に生じた、そして深成岩類の角閃石と黒雲母のK-Ar年代はジルコンU-Pb年代より若干若く、それぞれは花崗岩質マグマの貫入と徐冷による固結とで説明される。

一方東帯では被貫入岩類に同時代と思われる火山岩類が認められず、深成岩類のみが分布し、“深成相”的な様相を示す。そのU-Pb年代は105-85 Maであり、基本的に西から東へ10 km/m.y.の比率で若くなる規則的な変化を示す。アメリカ合衆国・メキシコ国境付近の断面を第4図に示す。そこでSilver & Chappell (1988)は西帯は貫入場所が固定していた古い静的な島弧(static arc)で、東帯は新しい地殻の移動・変動が激しい動的な島弧(dynamic migrating arc)活動の結果としてマグマ活動が生じたものと考えた。一方、K-Ar年代は角閃石が15 m.y.程度若く、黒雲母は20-30 m.y.若くなる傾向が東方へ向かってみられ(第3図D)、深所形成の花崗岩類が東西で異なる隆起量を持つことも、非対称変化の一因であったことを示している。

3. 帯磁率の広域的变化

G. Gastilとその学生達はJH-8型帯磁率計を用

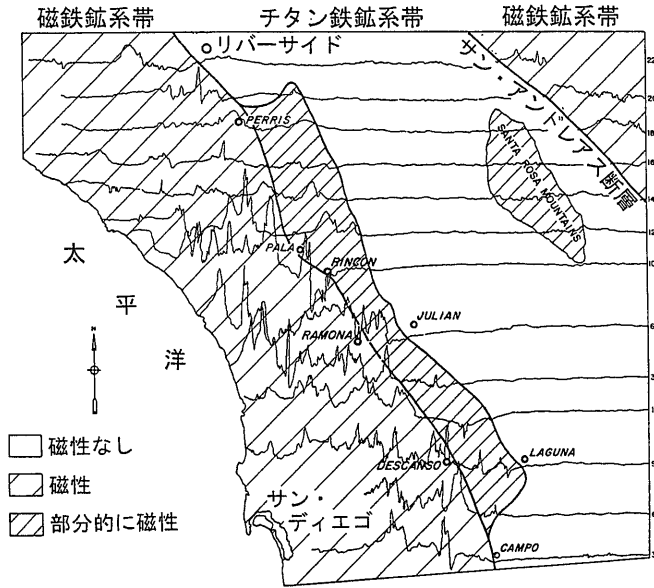
1999年7月号



第5図 南カリフォルニアと半島部カリフォルニアの花崗岩類の帯磁率の東西変化 (Gastil et al., 1990)。

いて広範囲に帯磁率を測定した。第5図はカリフォルニア州最南部とカリフォルニア半島最北部の帯磁率を東西断面にプロットしたものであるが、前者では重複域を伴いながら、西側で磁鉄鉱系の値が、東側でチタン鉄鉱系の値が卓越する。また後者では、重複域を伴うことなく同じ傾向を示す。Gastil et al. (1990)は磁鉄鉱系とチタン鉄鉱系の境界を 1×10^3 SI単位において、それを磁鉄鉱/チタン鉄鉱境界と呼んだ。境界を筆者の 3×10^3 SI単位に置くと、南カリフォルニア断面の磁鉄鉱帯(第5図上)では磁鉄鉱系の試料数が71%、重複域帯では35%、チタン鉄鉱帯では0%、バハ・カリフォルニア断面(第5図下)では磁鉄鉱帯で45%、チタン鉄鉱帯で4%であり、チタン鉄鉱系の比率が高いこと、南北に両者の比率に変化が見られる、などが読みとれる。

筆者のバソリス北部における予察的な測定でも、



第6図
カリフォルニア州南部の
空中磁気図と花崗岩と
の関係 (Gastil et al.,
1990).

西帯では磁鉄鉱系測定地点6に対して、チタン鉄鉱系4地点、東帯では測定8地点全てでチタン鉄鉱系の値を示した。しかも西帯で、典型的な磁鉄鉱系に近い高い帯磁率を持つものは、オーク・リブ石英斑れい岩 $18.6-25.0 \times 10^3$ SI単位、アルパイン苦鉄質トナル岩 $10.0-24.9 \times 10^3$ SI単位、グリーン・バレー苦鉄質トナル岩 $13.1-14.0 \times 10^3$ SI単位、の3測定点に過ぎず、全体的に磁鉄鉱系帯としては磁鉄鉱含有率が低く還元的な印象を受けた。

第5図の内容は次のように纏められる。(1) ペニンスラー・レンジ バソリスの花崗岩類は西側で磁鉄鉱系が多い。(2) しかしチタン鉄鉱系も多く含まれ、パハ・カリフォルニアの西帯では50%をこえる。(3) 日本の磁鉄鉱系花崗岩類の帯磁率平均値は SiO_2 64.4%で 37×10^3 SI単位であり(第5図の点線)、当地のものは低い値が多い。この傾向が第1表の低い $\text{Fe}_2\text{O}_3 / \text{FeO}$ 比にも表れている。ペニンスラー・レンジ バソリスの花崗岩類には、西帯の火山・深成岩類を含めて付随する硫化物金属鉱床が殆どないが、筆者はその還元的な性格に原因の一つがあるのではなからうかと思っている。

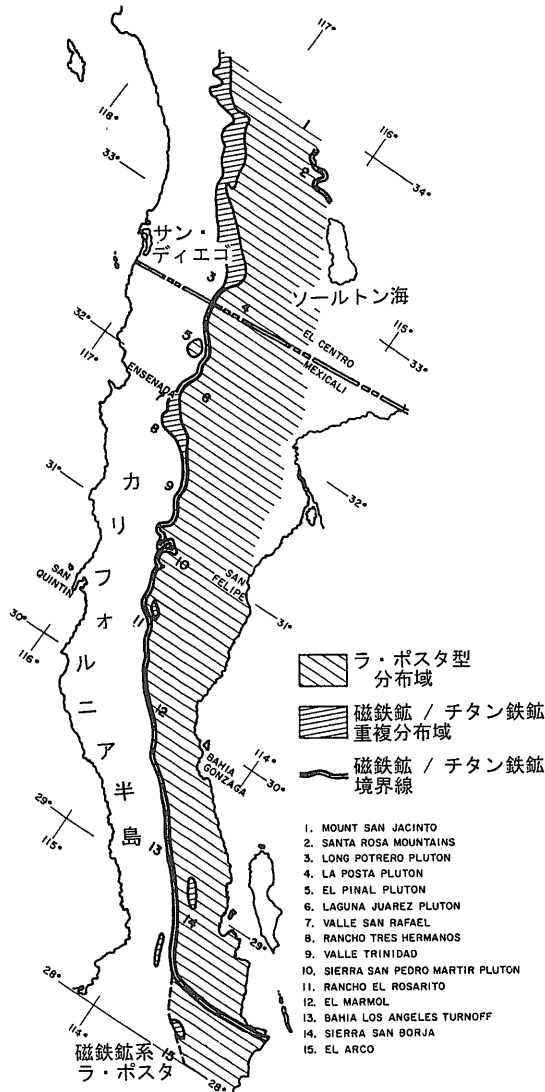
第6図はアメリカ合衆国内のサンディエゴからサンタ・ロッサ山地地域の空中磁気図を示すが、ここでは西から磁鉄鉱系～磁鉄鉱系・チタン鉄鉱系混在部分を経て、チタン鉄鉱系となり、更にサン・アンドレアス断層を挟んで東方が磁鉄鉱系となる。す

なわち、帯磁率に見られる傾向は空中磁氣的にも表れている。

磁鉄鉱量に見られる東西変化はペニンスラー・レンジ バソリスの全域にみられ、そこでGastil et al. (1990)はバソリスに磁鉄鉱/チタン鉄鉱境界線(第7図)を提唱したが、この境界線はラ・ポスタスーパーユニットの分布線の西縁にほぼ一致する。既述の岩石学的特徴と総合すると東西変化は次のように纏められる。

- (1) 西帯で深成岩類は主として磁鉄鉱系であり、且つメタルミナスの特性を持つ。
- (2) 東帯では殆どがチタン鉄鉱系に属し、それは2群に分けられる。すなわち、
 - (a) パーアルミナスで100Maより古い時代を持ち、著しい片状構造を持つもの。これは δ ^{18}O 値とSr初生値も高い。
 - (b) 一般にパーアルミナスで片状構造を持たず、97Maより若い年代のもの。Sr初生値はIタイプに似る。著名なラ・ポスタ貫入岩体はこのタイプに分けられる。

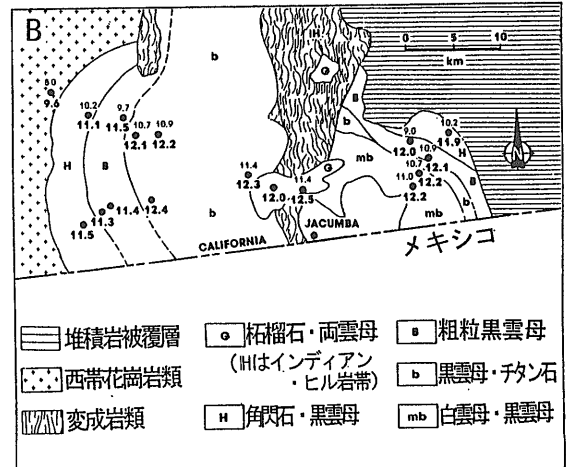
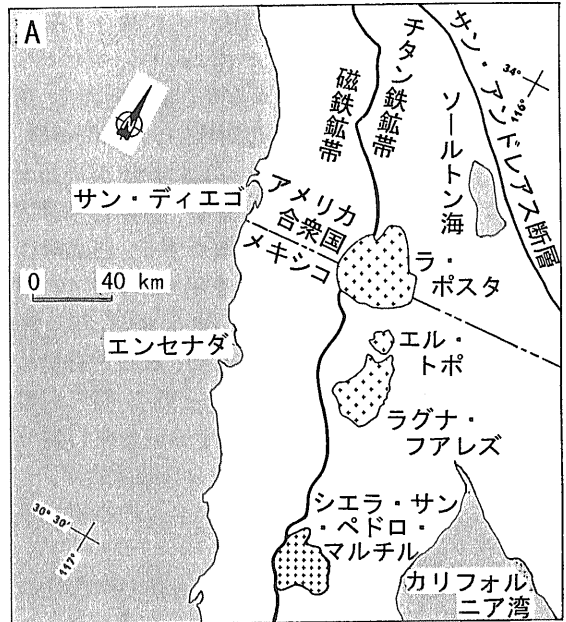
なおチタン鉄鉱系花崗岩帯に混在する斑れい岩は一般にチタン鉄鉱系の帯磁率値を示すに過ぎないが、所によっては2-3桁高い値を示すことがあった。



第7図 磁鉄鉱/チタン鉄鉱境界線とラ・ポスタ型岩体の位置 (Gastil et al., 1990)。

4. ラ・ポスタ型貫入岩体

ペニンスラー・レンジ バソリスの各岩体は、西帯ではサン・ハシント岩体 (Hill, 1988) のような一部の例外を除き直径10 km以下の小規模岩体の集合であるのに対して、東帯では直径40 kmに達する巨大岩体が特徴的に分布する。後者は磁鉄鉱/チタン鉄鉱境界線に沿って東側に分布し、アメリカ合衆国とメキシコ国境にまたがるラ・ポスタ (La Posta) 岩体 (1,400 km²) で代表させてラ・ポスタ型と呼ばれる (第8図)。ラ・ポスタ型は次の特徴を持つ



第8図 ラ・ポスタ岩体の位置 (上) と岩相・酸素同位体比の変化 (下) (Gastil et al., 1990)。Aの数字はSr初生値, Bの数値: 太字は石英, 細字は全岩の $\delta^{18}O$ 値。

(Walawender et al., 1990)。

- (1) 同心円的な累帯配列。トナル岩周縁相から花崗岩閃緑岩またはモンゾ花崗岩の中心相。
- (2) 岩体内部の岩相境界は数十メートルの範囲で漸移する。
- (3) 角閃石・黒雲母は完全に自形であり, 包有物を伴わない。
- (4) 粗粒 (0.5 mm 以下), 自形の蜂蜜ないし鉛色のチタン石の存在。

- (5) 初生白雲母が黒雲母と岩体中心に共存する。
- (6) 片状構造を伴わない。

ラ・ポスタ岩体は周縁部から中心部へ向けて、角閃石-黒雲母花崗閃緑岩、粗粒黒雲母花崗閃緑岩、チタン石-黒雲母花崗閃緑岩、白雲母-黒雲母花崗閃緑岩の累帯配列を示す(第8図)。岩体西半分には角閃石閃緑岩のブロックが散点する。白雲母は1%以下、初生白雲母の産状を示す。上記4岩相のSiO₂含有量は平均値で67.3, 68.6, 69.2, 73.4%である(Walawender *et al.*, 1990)。K₂O含有量は平均値で1.84, 1.95, 2.00, 1.87%と低く、特に白雲母含有相で低い。この他、岩体中心の変成岩類分布域に柘榴石-白雲母-黒雲母モンゾ花崗岩がストック状に貫入する。不透明鉱物は全ての岩相を通じて、チタン鉄鉱である。

シエラ・サン・ペドロ・マルチル岩体(第9図)においてもラ・ポスタ岩体と同様な累帯配列が見られる。ここでは帯磁率が詳細に測定されており、トナル岩の最西縁に低い所があるが、西側のトナル岩相はやや高く見かけ磁鉄鉱系の値を示すものが分布し、中心へ向けて帯磁率が減少する。Gastil *et al.* (1990)は、不透明鉱物について次のように記載している。

- (1) 最外縁の片状の閃雲トナル岩は基本的に不透明鉱物が多いにも関わらず、磁鉄鉱を含まない。
- (2) 鏡下観察によると、磁鉄鉱量は少量含まれるのみであり、その含有量は最西縁を除くと、トナル岩中を西から東へ漸減する。かつ

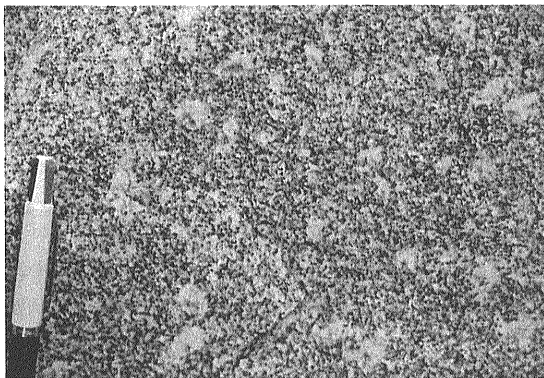
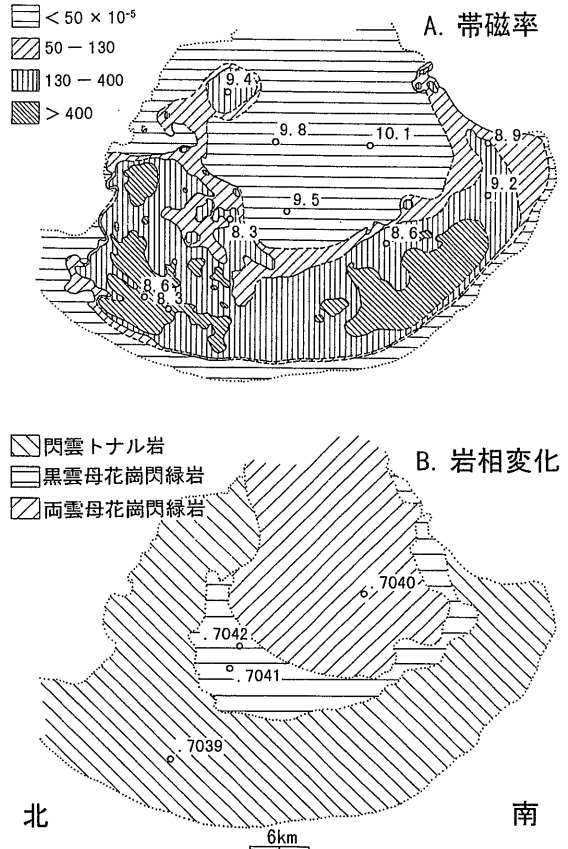


写真12 サン・ハシント岩体ユニット。トナル岩のチタン石を中心を持つ斜長石の斑晶。帯磁率0.1-0.2×10³ SI単位。



第9図 シエラ・サン・ペドロ・マルチル岩体における岩相・帯磁率・Sr初生値・酸素同位体比(Gastil *et al.*, 1990)。Aの数字は全岩 δ¹⁸O値、Bの数値はSr初生値。

- (3) 不透明鉱物量は角閃石-黒雲母含有相から、黒雲母岩相、白雲母-黒雲母岩相へと減少する。

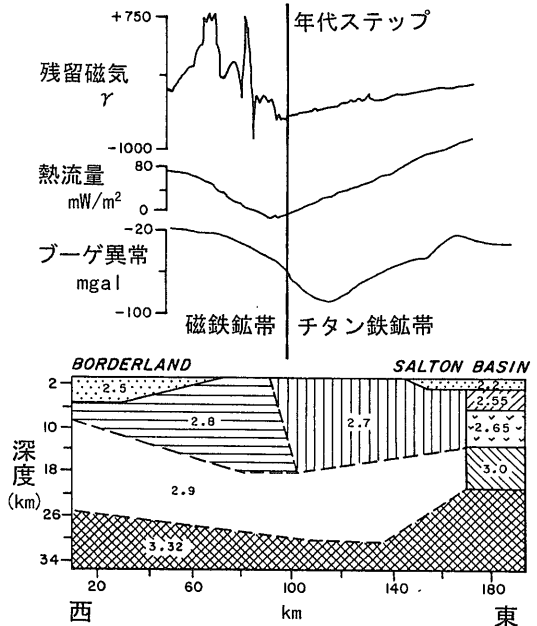
シエラ・サン・ペドロ・マルチル岩体の最外縁のように、磁鉄鉱系岩石が周辺部で磁性を失うことは堆積岩類に花崗岩類が貫入する場合には一般的である(例、日本の北上山地)。当バソリス北東部のドメニゴン谷岩体ではこの点が酸素同位体比によって詳しく研究された(Turi & Taylor, 1971)。この岩体はほぼ均質な花崗閃緑岩からなる8×14 kmの岩体で周辺の変成岩類に非整合的に貫入する。変成岩の全岩 δ¹⁸Oは、泥質岩で18-20%、アルコーズ砂岩で13-15%、一方、花崗閃緑岩はその中心部が均質で低い値(7.2%)を持ち、これがこのマグマの本来の値と考えられる。この岩体の外縁から200m(面積的に8%)はδ¹⁸Oが1.3%高く、中間帯(面積的に60%)はδ¹⁸Oが0.4%高い。

堆積岩の値として16.5%を採用すると、それぞれは13%と4%の堆積岩を同化したことになる。これらの数値は低いので、当地の堆積岩の炭素含有量は高かった可能性が考えられる。

ラ・ポスタ岩体の花崗閃緑岩は、全岩 $\delta^{18}\text{O}$ 値が9.0-11%であり、シエラ・サン・ペドロ・マルチル岩体の花崗閃緑岩は同じく8.3-10.1%であり、非ラ・ポスタ型のドメニゴン谷岩体より大きい値を持つが、Sr初生値はラ・ポスタ岩体で0.7044、シエラ・サン・ペドロ・マルチル岩体で0.7039-0.7042であり、ともに低い。

5. 磁鉄鉱系・チタン鉄鉱系広域変化の成因

ペニンスラー・レンジ バソリスでは、既述のように磁鉄鉱系の西帯とチタン鉄鉱系の東帯に分けられる。両帯の境界線は、年代(105 Ma)、主化学成分、微量化学成分、安定同位体比、ブーゲ異常、熱流量に見られる変化と一致する。それらを含む模式的断面を第10図に示した。この広域的变化の



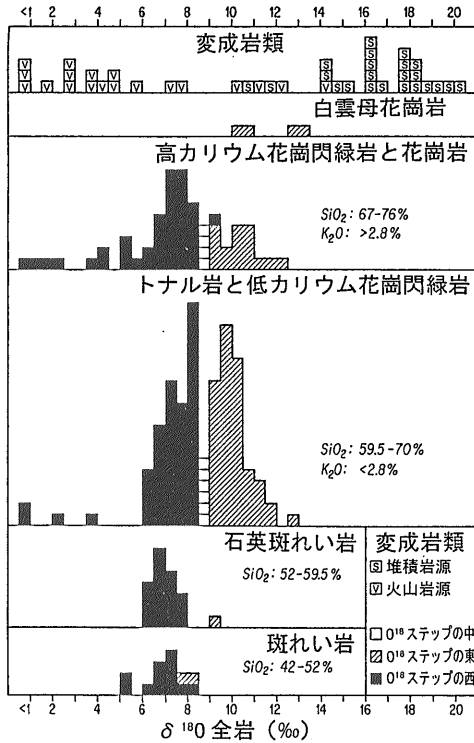
第10図 ペニンスラー・レンジ バソリス東西断面における物性変化 (Gastil et al., 1990).

事実は、その原因が広域的な岩石起源論に根ざしていることを示している。

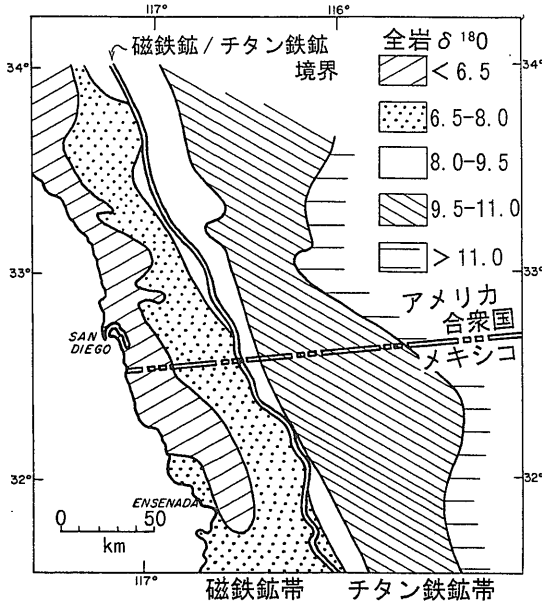
Taylor & Silver (1978) はペニンスラー・レンジ花崗岩類の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) を主岩相について多数の測定を行い、広域的な性格を明らかにした。方法は全岩法であり、ごく一部のサンプルについては鉱物別の測定を実施し、その岩石が同位体平衡を保っていることを確認している。全岩の $\delta^{18}\text{O}$ 値は第11図のように纏められる。

斑れい岩と石英斑れい岩は6-8%の極めて狭い範囲の値を持つ。主要岩相のトナル岩と低カリウム花崗閃緑岩は西帯で6-8.5%、東帯では9-12%であり、この急激に変化する所を著者らは ^{18}O ステップ(step)と呼んだ。高カリウム花崗閃緑岩と花崗岩もトナル岩と低カリウム花崗閃緑岩と同様な値を示すが、低い値がやや多く(Hill et al., 1986)、一般の花崗岩類の $\delta^{18}\text{O}$ が SiO_2 の増加と共に高くなる現象とは逆である。他に両者とも0%に達する低い値を伴うが、これは周辺部のごく一部の花崗岩類が固結後の地表水の循環による同位体交換反応の結果と考えられる。

一方、白雲母含有花崗岩は10.5-13.5%であり、明らかに大きい値を示す。被貫入岩類について



第11図 ペニンスラー・レンジ バソリスにおける $\delta^{18}\text{O}$ 値の頻度分布 (Taylor, 1986).



第12図 ペニンスラー・レンジ バソリスにおける $\delta^{18}O$ 値の広域的变化 (Gastil et al., 1990).

は、火成岩源変成岩類は花崗岩類とほぼ同様な値を持つが、堆積岩源変成岩類は11-20%の大きい値を持つ。白雲母含有花崗岩はこのような堆積岩源変成岩を同化して生じたものと考えられる。

以上、ペニンスラー・レンジ バソリスの主要な斑れい岩～花崗岩の $\delta^{18}O$ 値は岩体・岩相・岩質 (SiO_2 含有量) による変化をほとんど示さず、東西による地域差が非常に明瞭である特色を持つ。その変化は磁鉄鉱/チタン鉄鉱境界線とほぼ一致し



写真13 ラ・ポスタ岩体(東帯)に見られる巨石群.

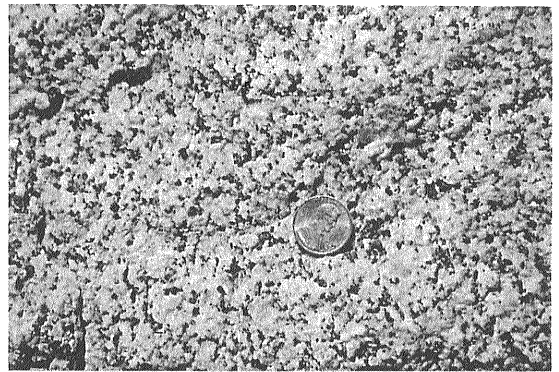
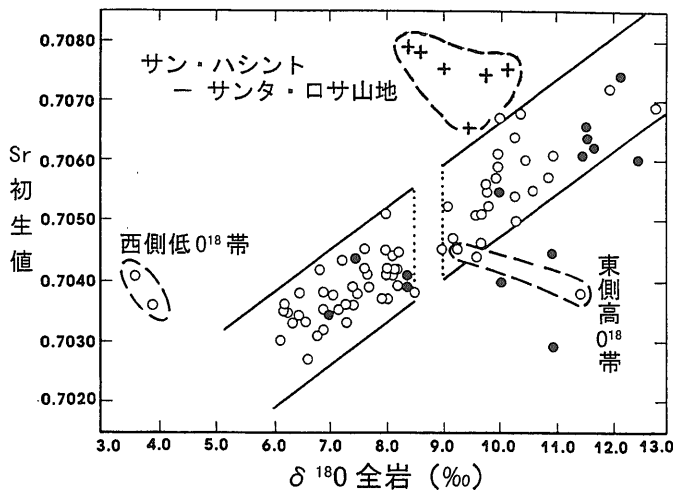


写真14 ラ・ポスタ岩体(東帯)の閃雲トナル岩。角閃石の自形度が強い、チタン石も多い。帯磁率 $0.9-2.5 \times 10^3$ SI単位.

ている(第12図)。Sr初生値についても同様に岩相・岩質による変化よりも東西変化が明瞭である。



第13図 ペニンスラー・レンジ バソリスにおける Sr初生値と $\delta^{18}O$ 値の関係。(Taylor, 1986; Walawender et al., 1990).

すなわち、典型的には西帯における0.7025から、東帯の0.7080へ増大する(Silver *et al.*, 1979)。従って、酸素同位体比との間には綺麗な正の相関関係が認められる(第13図)。Nd同位体比はSr同位体比とは負の相関関係を持ち、東帯でNdはless radiogenicとなる。

以上を総合するとペニンスラー・レンジ花崗岩類は二つのエンドメンバーで構成されていることがわかる。一つは $\delta^{18}\text{O} = 6.0\%$ 、Sr初生値 = 0.703である。他の一つは $\delta^{18}\text{O} = 13.0\%$ 、Sr初生値 = 0.708である。第一の ^{18}O と ^{87}Sr に乏しいものは一般に上部マントル起源と考えられる値である。すなわち西帯の花崗岩類は上部マントルから直接にもたらされたか、海洋地殻化したものが沈み込んで最熔融し上昇したかのいずれかである。さらに斑れい岩から花崗閃緑岩まで同じ値を持つことは、それらが同一起源物質に由来することを暗示しており、非常に興味深い。

第二のエンドメンバーのうち、酸素同位体比を大きくする現象は地表における低温の変質作用であり、従ってチャートや自生粘土鉱物に富む頁岩類は大きい $\delta^{18}\text{O}$ 値を持つ。ペニンスラー・レンジ花崗岩類によって貫入される堆積岩類が同化されれば $\delta^{18}\text{O}$ を大きくすることは可能である。また、被貫入岩類が火成岩の場合には、それが低温の熱水変質作用を受けると同様な効果が期待できる。例えば大洋の海嶺では大規模な熱水変質が生じるが、特に最上部の枕状溶岩は低温熱水変質を広範囲に受けている。Gregory & Taylor (1981)はオーマンの白亜紀オフィオライトの上部2kmは東帯花崗岩類の起源と成り得る $\delta^{18}\text{O}$ とSr初生値を持つと述べている。Sr初生値は海水の値が0.708であるから上記の起源岩類の場合、その上限は限られる。Sr初生値が突発的に高いものは(第13図)Rbに富むか時代が古い先カンブリア時代の基盤岩類を同化したものと考えられる。

ペニンスラー・レンジ花崗岩類の主要部は、結論的に変質した海洋地殻や海洋性堆積物および一部陸源堆積物を起源として生成したものと考えられる。変質海洋地殻は生成マグマの $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 比を高め、陸源堆積物は同比を低める。現在に見る東西変化は起源物質の差を主として反映したものである。

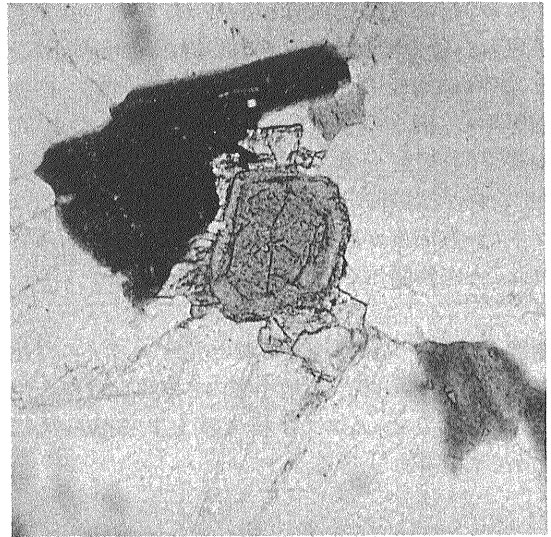


写真15 サン・ペドロ・マルチン岩体に見られる褐簾石と周辺に成長した緑簾石。左右2mm。G. Gastil提供。

むすび

ペニンスラー・レンジ花崗岩類には広域的な岩相や化学的性質変化が見られ、酸化・還元状態も西帯で酸化的な磁鉄鉱系、東帯で還元的なチタン鉄鉱系の性質を示す。すなわち日本列島で代表される島弧の花崗岩活動で特徴的な非対称変化を示す。この非対称変化は起源物質の相違、例えば西帯花崗岩類は変質海洋地殻起源、東帯花崗岩類はそれと大陸地殻の変質火成岩類や堆積岩類の混合起源を持つものと思われる。

西帯における花崗岩類は岩体規模が小さく同時期の火山岩類を伴い、東帯に較べて浅成の様相を呈する。この露出レベルの差も今に見る花崗岩類の酸化・還元状態に影響を与えている可能性がある。しかし、西側の磁鉄鉱帯でも花崗岩類の帯磁率は低く、かつかなりの量のチタン鉄鉱系も産出し、全体的にその酸化度は低いと想定される。これがペニンスラー・レンジ バソリスに金属鉱床が乏しいことの一因かも知れない。本当に酸化的な花崗岩類はバソリスより更に東方のメキシコのソノラ郡下で産出するものと思われる。

ペニンスラー・レンジ バソリスはトナル岩で代表

される“花崗岩類 (granitoids)”が、斑れい岩や石英斑れい岩で代表される“斑れい岩類 (gabbroids)”と $\delta^{18}\text{O}$ 値や Sr 初生値などで地域ごとに同一の傾向を示し、同一の起源を有することを暗示する。この様な傾向は、日本では丹沢岩体などに見られるが、これが広域的に産する点で特異であり、このパソリスが熟成度が非常に低い島弧的環境で形成されたことを物語っている。

謝辞：写真や文献を提供された元サン デイエゴ州立大の G. Gastil 氏、現地を案内されまた資料を用意されたカリフォルニア工科大の L.T. Silver 氏に心からお礼申し上げる。

文 献

- Anderson, J. L. (1990) : Preface for the Nature and origin of Cordilleran magmatism. *Geol. Soc. Amer., Mem.* 174, vii-x.
- Baird, A. K., Baird, K. W. and Welday, E. E. (1974) : Chemical trends across Cretaceous batholithic rocks of southern California. *Geology* 2, 493-495.
- Gastil, G. (1983) : Mesozoic and Cenozoic granitic rocks of southern California and western Mexico. *Geol. Soc. Amer., Bull.* 159, 265-275.
- Gastil, G. (1990) : The boundary between the magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks in Peninsular California. *Univ. Mus. Univ. Tokyo, Nature & Culture*, no. 2, 91-100.
- Gastil, G., Diamond, J., Knaack, C., Walawender, M., Marshall, M., Boyles, C. and Chadwick, B. (1990) : The Problem of the magnetite/ilmenite boundary in southern and Baja California, California. In *The Geology of North America*. *Geol. Soc. Amer., Bull.* 174, 19-32.
- Gastil, G., Kimbrough, D. L., Tainosho, Y., Shimizu, M. and Gunn, S. (1991) : Plutons of the eastern Peninsular Ranges, southern California, USA and Baja California, Mexico. In *Geological Excursions in Southern California and Mexico* (M.J. Walawender & B.B. Hanan edit.). *Guidebook 1991 Ann. Mtg. Geol. Soc. Amer.* 319-331.
- Gastil, G., Kimbrough, D. L., Shimizu, M. and Tainosho, Y. (1994) : Origin of the magnetite boundary in the Peninsular Ranges batholith, southern California, U.S.A. and Baja California, Mexico. *Revista Mexicana Ciencias Geologicas*, v. 11, 157-167.
- Gregory, R. T. and Taylor, H. P., Jr. (1981) : An oxygen isotope profile in a section of Cretaceous oceanic crust, Samail Ophiolite, Oman: evidence for ^{18}O -buffering of the oceans by deep (> 5 km) seawater-hydrothermal circulation at mid-ocean ridge. *J. Geophys. Res.* 86, 2737-2755.
- Gromet, L. P. and Silver, L.T. (1987) : REE variations across the Peninsular Ranges batholith: Implications of batholithic petrogenesis and crustal growth in magmatic arcs. *J. Petrol.* v. 28, 75-125.
- Hill, R. I. (1988) : San Jacinto intrusive complex 1. *Geology and mineral chemistry, and a model for intermittent recharge of tonalitic magma chambers*. *J. Geophys. Res.*, v. 93, 10,325-10,348.
- Hill, R.I., Silver, L.T. and Taylor Jr, H.P. (1986) : Coupled Sr-O isotope variations as an indicator of source heterogeneity for the Northern Peninsular Ranges batholith. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 92, 351-361.
- Larsen, E.S. (1948) : Batholith and associated rocks of Corona, Elsinore, and San Luis Rey quadrangles, southern California: *Geol. Soc. America, Mem.* 29, 182 p.
- 柴田 賢 (1990) : カリ長石の K-Ar 年代と閉鎖温度. *地質ニュース* no.437, p.7-14.
- Silver, L. T., Taylor, H. P., Jr., and Chappell, B. W. (1979) : Some petrological, geochemical and geochronological observations of the Peninsular Ranges batholith near the international border of the U. S. A. and Mexico. In *Abbot P. L. and Todd, V. R. eds., Mesozoic Crystalline Rocks. GSA Annual Mtg. Guidebook*, 83-110.
- Silver, L.T. and Chappell, B.W. (1988) : The Peninsular Ranges Batholith: an insight into the evolution of the Cordilleran batholiths of southwestern North America. *Trans. Royal Soc. Edinburgh: Earth Sci.*, 79, 105-121.
- Taylor, H. P., Jr. (1986) : Igneous rocks: II. Isotopic case studies of Circum Pacific magmatism. *Reviews in Mineralogy*, v. 16, p.273-317.
- Taylor, H. P., Jr. and Silver, L. T. (1978) : Oxygen isotope relationships in plutonic igneous rocks of the Peninsular Ranges batholith, southern and Baja California. *USGS Open-file Rept.* 78-701, 423-426.
- Todd, V. R. and Shaw, S.E. (1985) : S-type granitoids and an I-S line in the Peninsular Ranges batholith, southern California. *Geology*, v. 13, 231-233.
- Turi, B. and Taylor, H. P., Jr. (1971) : An oxygen and hydrogen isotope study of a granodiorite pluton from the southern California batholith. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 35, 383-406.
- Walawender, M. J., Gastil, R. G., Clinkenbeard, J. P., McCormick, W. V., Eastman, B. G., Wernicke, R. S., Wardlaw, M. S. and Gunn, S. H. (1990) : Origin and evolution of the zoned La Posta-type plutons, eastern Peninsular Ranges batholith, southern and Baja California. *Geol. Soc. Amer., Mem.* 174, 1-18.

ISHIHARA Shunso (1999) : Granitoid series in the Peninsular Range batholith, California.

< 受付 : 1999年6月1日 >