



SYMPOSIUM

沈み込み帯—そのテクトニクス—/8

古地磁気から見た中部アンデスの折れ曲がり

日置 幸介

へき こうすけ
東京大学理学部地球物理学科
(現在、郵政省電波研究所鹿島支所・第三宇宙通信研究室)

浜野 洋三

はまの ようぞう
東京大学地質研究所 助教授

河野 長

こうの まさる
東京工業大学理学部応用物理学科 教授

原稿受理：1984年8月4日(編集部).....

ある地域の垂直軸のまわりの回転運動を定量的に論じるには、古地磁気偏角を用いるのが最も効果的である。我々は中部アンデスの南緯 18 度付近の折れ曲がりに関するオロクライン仮説 (Carey 1955) を評価するべく古地磁気調査を行なった。2 回にわたる調査で採取された試料の測定の結果、ペルーアンデス中生代岩石の偏角が東部安定地塊に対して反時計まわりに数 10 度のずれを示し、ペルー地域の大規模な回転運動が明らかになった。

1. はじめに

1950 年代において古地磁気学は大陸移動の検証等に華々しい成果をあげたが、そこで使われた岩石は所謂安定地塊内のもので、その結果が大陸全体の代表として扱われた。一方造山帯においては、より小規模の移動や変形があったことが期待されるが、これらの造山帯を古地磁気調査し、その結果を安定地塊の結果と比較する事により、移動や変形の有無及び量を議論することができる。一般的に古地磁気方位には偏角と伏角の 2 つの情報が含まれているが、これらが安定地塊のデータから期待される値と有意な相違を示した時、偏角異常は回転運動を、伏角異常は緯度変化を安定地塊に対してそれぞれ与える。

詳しく古地磁気調査の行なわれた造山帯地域としては北米西縁が挙げられる。この地域の岩石が示す残留磁化方位は、東部の安定地塊のそれに比べて異常に浅い伏角と時計まわりにずれた偏角を示すことが知られている (Beck 1980)。現在与えられている説明は、この地域が海洋プレートに乗って北上、北米西縁に漂着し回転運動を伴いながら衝突付加した、複数の地塊から構成されているというもので、更にこのような付加テクトニクスがコルジエラ型の造山運動に極めて重要な役割を果たしてきた事も最近では示唆されている (Jones *et al.* 1982)。

北米東部では、古生代の造山帯であるアパラチア山脈において活発な古地磁気調査が行なわれてきた。この山脈には数カ所の走向の変化点があり、山脈全体が緩やかな曲線を描いているが、色々な地点における残留磁化の偏角が山脈の向きに沿って系統的に変化するかどうかを調べれば、この曲線が山脈が誕生した後に

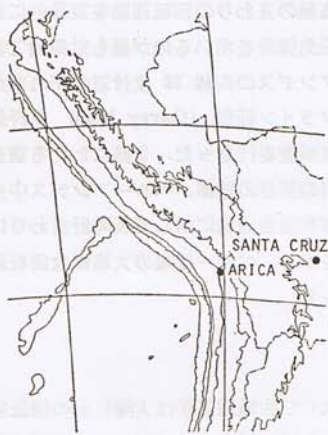


図1 中部アンデスの折れ曲がり(アリカ・デフレクション又はサンタクルース・デフレクション)。黒丸はアリカ、サンタクルース両都市の位置を示す。

折れ曲がったことを物語るのか(オロクライン仮説)、或いは堆積盆の本来の形を反映しているのにすぎないかが判断できるわけである。この地域は古くから数々の古地磁気調査が行なわれてきたが、現在までの結果はどうかオロクライン仮説に否定的なようである(Schwarz & Van der Voo 1983)。

南米には、大陸西縁を南北に貫く巨大なアンデス山脈があるが、ここでもいくつかの興味深い古地磁気の報告がなされている。南部アンデス(パタゴニアアンデス)では、南米最南端のフエゴ島に向かって南下するにつれて山脈の走向が南北から東西へ次第に折れ曲がっていくのが知られるが、中生代岩石の残留磁化の偏角は、この山脈の走向変化に沿って系統的に変化し(Burns *et al.* 1980)、かつてまっすぐであった南部アンデスが中生代以降に折れ曲がった事を示唆する。北部アンデス(カリビアンアンデス)でも、これに類似した古地磁気結果が報告されている(Skerlec & Hargraves 1980)。

今回研究対象とした中部アンデスは、アンデス山脈中赤道からチリのペニャス湾までの部分に相当する。中部アンデスで最も注目に値するのは、西北～南東の走向を持った北半分(ペルーアンデス)と、ほぼ南北に走る南半分(チリ、アルゼンチンアンデス)の境にあるスケールの大きな折れ曲がりである(折れ曲がり地点の都市の名にちなんでアリカ・デフレクション、或いはサンタクルース・デフレクションと呼ばれる(図1))。

オーストラリアの Carey (1955) は、この折れ曲がり山脈形成後の変形によるものであるという仮説を提唱し、ボリビアン・オロクラインと名づけた。我々の研究のおもな目的は、この仮説を古地磁気の立場から吟味することである。より具体的に言えばペルーアンデスの岩石の残留磁化方向とチリ/アルゼンチンアンデスのそれを比較し、それらを東部安定地塊の結果と比べる事により回転運動の有無を検出し、山脈の走向との相関を調べようというわけである。

中部アンデスにおけるこれまでの古地磁気データは、北米や欧州に比べると極めて乏しいが、アリカ・デフレクション以南、即ちアルゼンチン/チリアンデスのデータは比較的豊富である。なかでも Palmer *et al.* (1980) のチリ最北部アリカ地方のジュラ系岩石の古地磁気調査は、本研究と同じくオロクライン仮説の検証を意図したもので、折れ曲がりの真下にあたる同地方の東部安定地塊に対する数10度の反時計まわりの回転を初めて明らかにした。

しかしながら、仮説を十分に検証するにはペルーアンデスのデータが現在まったく欠けており、同地域の古地磁気調査がどうしても必要である。これらの観点から我々は、ペルーアンデスに重点をおいて古地磁気調査を行なった。

2. 試料

試料採集は昭和55・56年の2カ年にわたって行なわれた。調査ルートと試料採取地点を図2に示す。試料採取地点数は約100カ所、総試料数は600個を超えた。中部アンデスを更に細分すると、主に中生代の岩石から成る西コルジエラと主に古生代の岩石から成る東コルジエラ、及びそれらを覆って分布する新生代の岩石(主に火成岩)に分けられる。調査地域はペルーアンデスからチリ北端部アリカ地方に及ぶが、以下にペルー側、チリ側に分けて詳述する。

ペルーの西コルジエラは、海岸寄りに位置する火成岩と堆積岩の両方から成る主地向斜帯と、陸寄りに位置する堆積岩から成る副地向斜帯に分けられる。前者、すなわち海岸地方では、白亜系カスマ層群に属する火山岩を12地点試料採取した(CM 20, AC 02~14, HM 01~04, NZ 01—図2)。試料は安山岩質及び玄

武岩質の溶岩又は岩脈である。後者からは、ペルー北部カハマルカ近辺の石灰岩を2層 (CM 10, 13), またバグア近辺で石灰岩を1層 (BG 01) サンプルした。岩石の年代は白亜紀のアルビアン, セノマニアン各階に相当する。

中部アンデス, アルチプラノには新生代の火山岩が広く分布するが, 中南部ペルーにおいて層序学的に最上部を占めるペロソ火山岩類中に岩脈群を発見し, オクロス岩脈群と名づけ, 調査を行なった (Ui *et al.* 1984). 岩脈群の年代は現時点で必ずしも明らかでないが, 少なくとも中新世以降である。残留磁化の測定用に岩脈を29枚, 母岩の溶岩流を3枚それぞれサンプルした (OC 01~29)。

チリ最北部アрика地方には, 中生代の火山岩及び堆積岩が広く分布する (ジュラ系アрика層群及び白亜系ヴィラコヨ層群)。アрика層群からア리카市街地に露出する頁岩 (AR 01) で数層準, 及びア리카地方とピサグア地方の境界に位置する安山岩質及び玄武岩質の岩脈群 (クーヤ岩脈群, CY 01~26) から25枚の岩脈を採取した。ヴィラコヨ層群からはヴィトール狭谷に露出する赤色砂岩 (AR 24) 及びイグエラ狭谷に露出する砂岩層を貫く19枚の岩脈 (ア리카岩脈群, AR 31~49) を採取した。

ペルー, チリ, ボリビアにまたがるアルチプラノには, 新鮮な火山地形を示す第四紀火山が多数存在する。それらからも数カ所試料採取を行なったが, それらについては本稿では取り扱わない。なお, 1地点あたりの試料数は火山岩で5~7個, 堆積岩の場合は一層準4~5個の試料採取を1メートル毎に数層準行なった。なお, 試料採取及び方向づけは総てハンマーとクリノメーターによって行なった。

3. 残留磁化測定及びその結果

採取試料は実験室内で整形し, 残留磁化測定に供した。磁化強度の極めて弱い石灰岩には UCSB 及び国立極地研究所の超伝導磁力計を, 他の試料には東京大学理学部のスピナー磁力計を用いた。全試料に6ステップ以上の段階交流消磁を施し, 更に赤色砂岩等保磁力が極めて大きい試料には段階熱消磁も行なった。各試料についての段階消磁の結果は, ジダーベルト図に

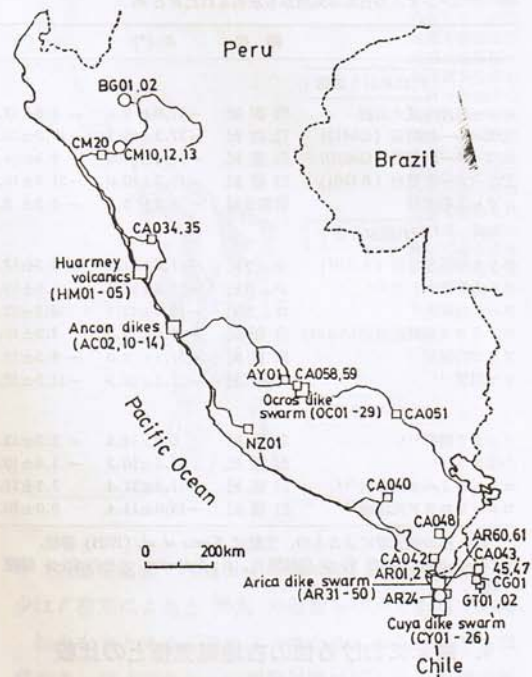


図2 本研究で調査したルート及び総ての試料採取地点。○印は堆積岩, □印は火山岩を示す。各地点については本文参照のこと。

投影され安定な一次磁化と考えられる成分が取り出された。更に得られた各試料の残留磁化方向から地点毎の平均を計算した。

堆積岩の残留磁化方向は, それ自体長期間の地球磁場の平均方向であると考えられるので, 磁化方向と試料採取地点の位置から計算された極の位置は, そのまま古地磁気極として取扱った。一方, 火山岩は岩石が形成された当時の地球磁場を瞬間的に記録しているだけなので, 永年変化をキャンセルして当時の平均的な磁場方向を知るには, 十分な数の独立な溶岩流乃至岩脈の残留磁化方向を平均しなければならない。

本研究では, 12の溶岩流及び岩脈から成るペルー海岸地域の白亜系火山岩試料の残留磁化方向から求められた12の見かけ上の地磁気極を平均し, 白亜紀のペルー地域の古地磁気極とした。オクロス, クーヤ及びア리카各岩脈群についても同様の手続きを行なった。これらの各々についての実験手続き及び結果の詳細は, 他の論文 (Heki *et al.* 1984-a~d) を参照されたい。

表 中部アンデスの古地磁気極から求められたRとF.

	時代	R (°)	I _s (°)
折れ曲がり北側			
ペルー海岸地域火山岩	白亜紀	-21.0±9.8	-8.6±17.3
北部ペルー堆積岩 (CM13)	白亜紀	-37.2±13.7	-10.0±18.5
北部ペルー堆積岩 (CM10)	白亜紀	-51.4±10.0	-8.5±16.3
北部ペルー堆積岩 (BG01)	白亜紀	-19.5±10.0	-21.9±16.4
オクロス岩脈群	新第三紀	-14.2±5.5	-6.3±8.4
折れ曲がり直下			
アフリカ層群堆積岩 (AR01)	ジュラ紀	-11.8±13.3	-0.5±17.5
アフリカ層群火山岩 ⁽¹⁾	ジュラ紀	-24.0±14.2	0.0±19.4
クアヤ岩脈群	ジュラ紀	-18.0±15.1	16.8±22.2
ヴィラコヨ層群堆積岩(AR24)	白亜紀	-13.6±9.5	7.9±13.0
アフリカ岩脈群	白亜紀	-11.1±9.0	-8.5±13.2
サヤ層群 ⁽¹⁾	古第三紀	-27.2±16.5	-11.5±12.1
折れ曲がり南側			
ビルグア層群 ⁽¹⁾	白亜紀	6.8±14.4	-2.3±13.0
中部チリ ⁽¹⁾	白亜紀	11.8±10.5	-1.8±10.5
セロ・ルミバヤ火山岩 ⁽¹⁾	白亜紀	-1.3±11.4	7.3±11.6
セロ・コロラド火山岩 ⁽¹⁾	白亜紀	-15.0±11.4	0.0±10.6

(1): 他の研究者によるもの。文献は Kono et al. (1984) 参照。
R: rotation とその 95% 信頼限界, F: flattening とその 95% 信頼限界。

4. 南米における他の古地磁気極との比較

南米の顕生代全体にわたる極移動曲線は Greer (1970), McElhinny (1973) や Vilas (1981) がまとめているが、それらに共通するのは、古生代前期には南米の東側低緯度地域にあった極がその後急速に南下し、古生代後期にはほぼ現在の南極の位置に達した後顕著な極移動が見られないことである。次に本研究に直接関係のあるジュラ紀、白亜紀以降の極についても少し詳しく見てみよう。

前述の文献では、南米大陸の極移動曲線を得る為に、南米東部の安定地塊から求めた古地磁気極と大陸西縁アンデス地域から求めた古地磁気極を同等に扱って平均を求めているが、この方法は、本研究のように造山帯地域の安定地塊に対する運動を求めるという目的にはいささか不適当である。従って本研究では、既存の南米大陸の古地磁気極移動曲線を使用せずに、南米全体のデータの中からアンデス以外の安定な地域の古地磁気極のみを選んで平均し、アンデス地域の古地磁気結果と比較するべき基準とした。

こうして求められたジュラ紀及び白亜紀の南米安定地塊の極とその 95% の信頼限界は、それぞれ (85.8° S, 230.0° E, $\Lambda_{95}=11.9^\circ$) 及び (88.7° S, 42.6° E,

$\Lambda_{95}=8.0^\circ$) である。両者とも誤差の範囲で現在の地理的極に一致する。ジュラ紀、白亜紀内の個々の古地磁気極は各データの場所的、時間的な広がりにかかわらず良く一致し、その時代以後の安定地塊内の相対運動(変形)やその時代の間の見かけ上の極移動が殆んど存在しないことがわかる。なお、オクロス岩脈群の年代に対応する新第三紀の南米の古地磁気データについては十分とは言えないが、いくつかの理由から、当時の南米の見かけ上の極は現在の極とほぼ同じ位置にあったと考えて構わないようである (Heki et al. 1984b)。

安定地塊の極を基準として造山帯のそれと比較し、伏角と偏角の異常から変動帯の安定地塊に対する運動を知ることができるということは1節で述べた。本研究では伏角の異常を F (Flattening), 偏角の異常を R (Rotation) と表記し (Beck 1980), F は伏角が浅くなる方を正とし, R は時計まわりを正とした。造山帯内のある地点で観測された (Observed) 古地磁気伏角と偏角を (I_s, D_s), 基準の極から期待される (Expected) その地点における伏角と偏角を (I_x, D_x) とすると, F と R は次の式で与えられる。

$$F = I_x - I_s \quad (1)$$

$$R = D_s - D_x \quad (2)$$

基準の極及び造山帯の古地磁気極の 95% の信頼限界から、それぞれ (I_x, D_x), (I_s, D_s) の信頼限界が計算され、それらから更に F と R の信頼限界も求められる。

今回得られたペルーアンデス及びチリ北端部の古地磁気極から導出された R と F 及びその信頼限界を表に示す。又現在までに報告されているチリ及びアルゼンチンのアンデス地域のデータからも R と F を求め、表に加えてある。表から明らかなように、 F については特別な傾向は見られず、信頼限界の範囲内でおおむねゼロである。一方、 R はデフレクションの南側のチリ・アルゼンチン側のデータは顕著な特徴を示さずほぼゼロであるのに比べて、ペルーアンデス及びチリ北端のデータは総て有意な負の値(反時計まわり回転)を示す。回転角はチリ北端部アフリカ地方で $10^\circ \sim 20^\circ$ であり、ペルーアンデスについては更に大きく $20^\circ \sim 50^\circ$ である。又新第三紀のデータであるオクロス岩脈

群は、他の中生代のペルーアンデスのデータに比べて反時計まわりの回転角の値は少なく約 15° であるが、それについては6節で詳しく述べる(図3)。

5. ペルーブロックの回転

表の値から次のようにまとめられる。

- 1) ペルーアンデスは東部安定地塊に対して白亜紀以後 $20^\circ \sim 50^\circ$ の反時計まわりの回転をした。
- 2) デフレクション直下チリ北端アフリカ地方は東部安定地塊に対して、やはり白亜紀以降に $15^\circ \sim 20^\circ$ の反時計まわりの回転を行なった。
- 3) 中部アンデス南半部(デフレクション以南)は、中生代以降の東部安定地塊に対する回転は見られない。
- 4) 東部安定地塊に対する緯度変化を伴う移動は中部アンデスには見出されない。

ある比較的大い地域にこのような系統的な回転を引き起こす原因としては、その地域を構成する比較的小さなテクトニック・ユニット毎の独立な回転、又はその地域のひとつのブロックとしてのコヒーレントな回転の2種類が考えられる。前者は北米西縁等に代表され、ユニット毎の回転角がまちまちであり、又伏角の異常を伴うことが多い。後者はその地域が1つのブロックとして回転するので、そのブロック内で回転角がほぼ一律で伏角の異常は普通見られない。図3に示されるように中部アンデスの場合は、ペルーアンデス内において回転角はあまり変わらず、ペルー地域がひとつのブロックとして回転し、その結果として現在見られるペルーチリ境界の中部アンデスの折れ曲がり形成されたと考えるのが自然である。

これは次の事からも示唆される。中部アンデスの走向を地形図等から読みとると、中部アンデスは図4(左上)のような折れ線で表わすことができる。ここで図4(右上)のように折れ曲がりをもとに戻して(Unbending)中部アンデスをまっすぐにすると、古地磁気極はどうなるであろうか。図4(下・左右)に示されるように、中部アンデスの古地磁気極はペルーアンデスの反時計まわりの偏角のズレを反映して、全体として比較的大きなバラツキを持つが、折れ曲がりをもとに戻してやると、これらの古地磁気極は現在の極のまわりに集まりバラツキは減少する。この処理によるバラツ



図3 中部アンデス内の各地点の与える古地磁気極と東部安定地塊の基準極との比較から求められた各地点の回転角及びその95%の信頼限界(表参照)。回転角は地理的な南の方向を基準として表わされている。斜線の施してあるのは第三紀で他は総て中生代のものである。

キ(角標準偏差: Angular Standard Deviation)の減少はF検定によると95%の信頼レベルで有意である。

以上をまとめると次のようになる。中部アンデスは最初まっすぐであり、白亜紀以降に何らかの機構で折れ曲がり、現在見られるアフリカ・デフレクションが形成された。以降、アフリカ・デフレクションを Carey (1955) に従ってポリビアン・オロクラインと呼ぶ。次節ではオロクラインの形成時期について議論する。

6. オロクラインの形成時期

前節までに、中生代のデータに基づいて白亜紀以後に中部アンデスの折れ曲がり起こった事を示した。次に折れ曲がりいつ起こったのかについて考察してみよう。この問題の鍵を握るのは第三紀の古地磁気結果だが、表からわかるように第三紀の中部アンデスの古地磁気極は現在2個だけ求められている。1つは新第三紀のオクロス岩脈群であり、もう1つは最近公表されたところのポリビアの古第三紀サヤ層群の堆積岩から求められた古地磁気極である(Hayashida et al. 1984)。

サヤ層群が示す反時計まわりの回転は 25° 以上で(図3)、同地域に近接するアフリカ地方の白亜紀、ジュラ紀の古地磁気極が示す回転角と誤差範囲内で同等である。同層群は始新世の年代を示し、折れ曲がりはその

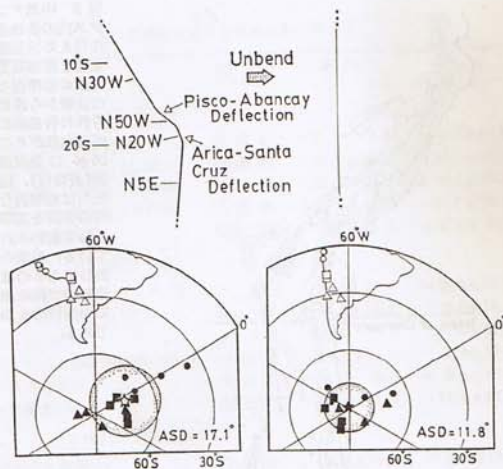


図4 折れ線として表わした中部アンデスと各直線分のおよそ走向(左下)とその unbending(右下) unbending に伴う古地磁気極のパラッキの変化を示す。図中の円は角標準偏差(Angular Standard Deviation)である。○・□・△印は、ポリビアン・オロクラインのそれぞれ北側、直下及び南側をあらわす。黒印は古地磁気極の平均位置を示す。

れ以降に起こった事を示唆する (Hayashida *et al.* 1984)。一方、新第三紀オクロス岩脈群の示す反時計まわり回転は 15° 以下で、ペルーアンデスの白亜系岩石の示す回転角に比べて有意に小さい。現在第三紀のデータが少ないので確実ではないが、オクロス岩脈群の回転角がペルーブロックを代表すると仮定すれば、その有意に小さい回転角は、岩脈群が折れ曲がりの途中(約半分曲がり終わった頃)に貫入したと考えると説明できる。いずれにせよ、中部アンデスにおける第三紀の古地磁気データは非常に不足しており、次回以降の調査では第三紀の岩石に重点をおいて、折れ曲がりの時期の詳細を明らかにするのがメイン・テーマである。

現在の中中部アンデスを形成した造山運動は、時間的に3回にわたるパルスから成る事が知られている (Bellido 1979)。それらは古い順から、白亜紀末から古第三紀にかけてのペルー造山期、始新世から漸新世にかけてのインカ造山期、中新世のケチュア造山期となるが、最も激しい褶曲運動はインカ造山期に生じている。これらの造山運動が終了したあと、鮮新世～更新世に巨大な地塁のような隆起運動が起こり、現在平均海拔4000メートルを超えるアルチプラノが形成された。ポリビアン・オロクラインの形成がこれらの造山運動のいずれかとシンクロナイズして起こったのか、或いはそれらと無関係に起こったのかは、その原因を考える上で大変興味深い問題である。

はそれらと無関係に起こったのかは、その原因を考える上で大変興味深い問題である。

7. プレートテクトニクスから見たポリビアン・オロクライン

何らかの原因で山脈或いは島弧が中部アンデスのように折れ曲がると、それらが所属するところのプレートは当然大きな影響を受ける。すなわち折れ曲がりに伴う山脈や島弧の水平移動をもたらす影響が、何らかの手段で補償されなければならない。仮に折れ曲がるものが周囲を海洋リソスフェアで囲まれた島弧であるとする、問題は比較的簡単に解決する。プレートテクトニクスの原理によると海洋リソスフェアは海嶺における海洋底拡大で生産され、又海溝で沈み込みによって消費される。この場合、島弧の折れ曲がりに伴うプレートの変形は、既にあるプレートの消費と新しいプレートの生産という形で吸収してしまえる。例えば、仮に本来直線的であった日本列島が折れ曲がって現在のような弓型を示すようになったとすると、その時日本列島の背後に生ずるべき変形は背弧海盆の形成(日本海の拡大)という形で補償されたと考えることができる。ところが、中部アンデスのように大陸プレートに所属する陸弧の折れ曲がりに関しては事情が変わってくる。プレートテクトニクスの基本的な考えに基づくと、大陸プレートは海洋プレートと違って密度が小さい為海溝で沈み込むことができない。また、大陸プレートは海嶺における海洋底拡大によって生産することもできない。これは陸弧の折れ曲がりに伴う水平方向の変位が、陸弧の背後の大陸プレートの塑性的な伸張や短縮によって吸収されるべき事を意味する。

さてプレートテクトニクスの本質的な仮定は、プレートは大まかな意味において剛体であるということである。言い換えれば、大規模な変形はプレート境界のごく狭い帯状の地域に限られ、それ以外のプレート内部はほぼ非変形であるということである。これをそのまま受けとれば、大陸プレート内の陸弧の大規模な折れ曲がりは現実には不可能である。これを逆に言えばポリビアン・オロクラインは南米大陸内においては古典的なプレート非変形の原則が成立しないという証拠で

あるとも言える。では次に、実際どうい变形が(伸張, 短縮など)起こったのかを他の証拠から考えてみよう。

南米大陸の变形を考える上で最大の制約条件となるのは, 南米及びアフリカ両大陸の形状的整合性である。すなわち, 南米東部のアマゾン河口付近から南米南端までの大陸の形状はアフリカ西側の形状とうまく整合することから (Bullard et al. 1965), 少なくともこの部分は中生代に西ゴンドワナ大陸が南米とアフリカに別れて以降は非変形であると考えられる。しかし厳密に言えば, この制約条件は形状の一致する範囲のみに適用されるべきものであり, 大陸の内側や西縁に变形があったか否かはわからない (図5)。

もうひとつの制約条件は古地磁気学によるものである。大まかに言って大陸内のある離れた2地点における同時代の古地磁気極が一致すれば, その時代以降の2地点の相対的位置は変わっていないと考えられる。例えば, 南米大陸内の複数の離れた地点の与えるある時代の古地磁気極が一致すれば, それはその範囲内における大陸の非変形を示唆する。しかし1節で述べたように, 古地磁気学は緯度変化と垂直軸のまわりの回転の情報しか与えないので, それらを伴わないただの経度変化(東西の平行移動)は検出されないことに注意しなければならない。この不確実性は単なる同時代の極の一致だけでなく, 2地点で独立に求められた十分な長さの古地磁気極移動曲線の一致を調べれば防げるが, 南米において比較的データの豊富なのは中生代以降であり, その時代の古地磁気極はほぼ現在の位置と同じであるので, この不確実性は除くことができない。結局現在の経度変化, つまり東西方向の平行移動は極の一致からは何とも言えないことになる。こういう意味において中生代の古地磁気データから制約条件を受けるのは, ギアナ及びブラジルのシールド地域, 及びボリビアン・オロクライン以南のアンデス地域である (図5)。

以上の制約条件を満たす変形はどのようなものであるべきかを考えると, 図6に示すAとBの2つの極端な例を考えることができる。AとBはどちらも上に挙げた2つの制約条件を満たすが, アンデスの背後にあたる地域に仮定する変形の種類が異なる。モデルAは

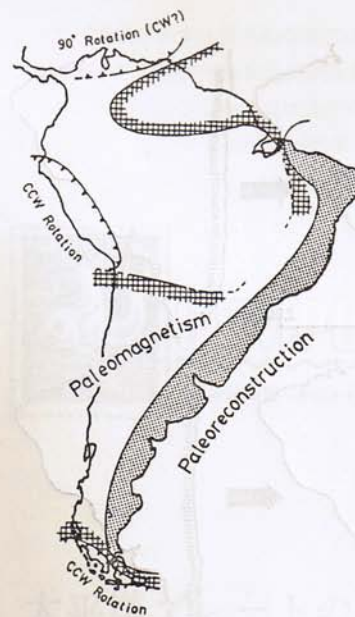


図5 南米大陸の变形に関する制約条件の及ぶ範囲。“Paleoreconstruction”は南米東縁とアフリカ西縁の形状の整合性から非変形が保証され“Paleomagnetism”は同時代の古地磁気極の一致からくる制約条件の及ぶ範囲。アンデス地域内で, 古地磁気学によって安定地塊に対する回転運動の知られている部分も図示している (CW: clockwise, CCW: counterclockwise)。

ブルーブロックがその北端を中心に反時計まわりの回転をするもので, オロクライン以南のアンデスの背後の地域の東西方向の 1000 km 程度の短縮を必要とする。一方, モデルBはブルーブロックが南端を中心に反時計まわりに回転するもので, この場合背後の変形は短縮ではなく, ベルーアンデスのうしろ側の伸張になる。伸張の量はブルーブロック北端の背後で最大となりおよそ 1000 km である。現実の変形はAとBのミックスチャーであると考えられるが, いずれが支配的であるかは, アンデスの背後の地域にAやBから期待されるような短縮或いは伸張を示す地質構造が存在するか否かを調べれば良い。

もしモデルAから期待されるような東西方向の短縮があるならば, 地殻の短縮を示す低角の逆断層等の地質構造がアンデス背後, 特にオロクライン以南に見られるはずである。アンデス東縁のいわゆるサブアンデス帯においては, 中部アンデス全体を通じてこのような地質構造が見られることが知られているが, それらはいずれもたかだか数 10 km の地殻短縮を示すに過ぎず, モデルAから期待される 1000 km もの短縮はどこにも見られない。これからモデルAから期待されるような変形は, ほとんど寄与していない事が示唆さ

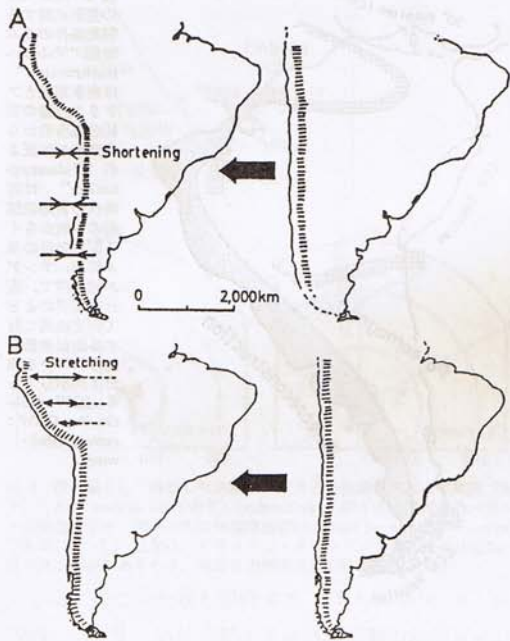


図6 ポリビアン・オロクラインを引き起こすに必要な変形の2つのモデル。モデルAはアンデス背後の短縮 (shortening) が主体で、モデルBはアンデス背後の伸張 (stretching) が主体である。

れる。一方、モデルBから期待されるのはペルーアンデス背後の東西方向の伸張であるが、この地域はちょうどアマゾン盆地のジャングル地域であり、現時点ではこの地域に大規模な地殻の伸張を示すような地質構造があるか否かは断定できない。又地殻の伸張にはリソスフェアの薄化が伴うはずであるが、熱流量・地震波速度構造等の地球物理学的調査が今後進めば少なくともそれらの点は明らかになるであろう。

中部アンデスを広範にカバーする古地域のデータから、中部アンデスが白亜紀以後おそらくは新第三紀に折れ曲がり、現在見られるポリビアン・オロクラインを形成したらしいということを示唆した。又この折れ曲がりには大陸プレートの大規模な水平方向の塑性変形が伴い、それにはペルー後背部、アマゾン盆地の東西方向の伸張が考えられるという可能性も示した。

以上の事柄は、アンデスだけでなく南米全体の地史を論ずる上で非常に重要な事件である事は明らかである。中部アンデスには、いまだにそのメカニズムが良くわかっていないいくつかの事柄がある。代表的なものを挙げると、最近に始まり現在なお続いているアル

チブラノの急速な上昇、現在サブダクションを行なっているナスカプレートが沈み込み角度の異なる複数のセグメントに分かれていること及びそれに伴う陸側の活火山の有無等 (Barazangi & Isacks 1979) がある。これらの種々の現象が、アンデスの折れ曲がりとは何かの関係があるのか、又あるとしたらどのような関係にあるのかは明らかでないが、今後考えていくべき課題である。

8. おわりに

中部アンデスの折れ曲がり地点であるリカ地方の少し北側、ペルー南部海岸には先カンブリア代の基盤を持つ素性未詳のいわゆるアレキパ地塊があるが、これについてはブラジル楕状地のアンデス越しの延長上にあるという説 (Shackleton *et al.* 1979) と、衝突付加した異地性岩体とする説 (Nur & Ban-Avraham 1982) がある。もし後者が正しければ、今後これら異地性岩体の衝突とアンデスの折れ曲がり結びつけた議論が可能になり、非常に興味深い。昭和59年度も数人のメンバーによる中部アンデス、特にペルー地域の現地調査と古地磁気試料採集が予定されており、諸問題の解決が期待されている。

参考文献

- [1] Barazangi, M. & B. L. Isacks : Subduction of the Nazca plate beneath Peru, evidence from spatial distribution of earthquakes, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **57**, 537-555 (1979).
- [2] Beck, M. E., Jr. Paleomagnetic record of plate-margin tectonic processes along the western edge of North America, *J. Geophys. Res.*, **85**, 7115-7131 (1980).
- [3] Bellido, B. E. : Sinopsis de la geología del Perú, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico Bol., **22**, pp. 54 (1979).
- [4] Bullard, E., J. E. Everett & A. G. Smith : The fit of the continents around the Atlantic, *Phil. Trans. R. Soc.*, **A258**, 41-58 (1965).
- [5] Burns, K. L., M. I. Rickard, L. Belbin & F. Chamalaun : Further Paleomagnetic confirmation of the Magellanes orocline, *Tectonophysics*, **63**, 75-90 (1980).
- [6] Carey, S. W. : The orocline concept in geotectonics, *Proc. R. Soc. Tasmania*, **89**, 255-288 (1955).
- [7] Creer, K. M. : A palaeomagnetic survey of South American rock formations, *Phil. Trans. R. Soc.*, **A267**, 457-558 (1970).
- [8] Hayashida, A., Y. Nogami, L. A. Rodrigo & A. Saavedra : Fission track dating and paleomagnetic study of the Cenozoic continental deposits at Salla, Bolivian Andes, in Kyoto University Overseas Research Report of New World Monkeys, Kyoto University Primate Research Institute (1984).
- [9] Heki, K., Hamano, Y., Kinoshita, H., Taira, A. & Kono, M. : Paleomagnetic study of the Cretaceous rocks of Peru, South America, evidence for the rotation of the Andes, *Tectonophysics*. (in press 1984 a).
- [10] Heki, K., Y. Hamano, M. Kono & T. Ui : Palaeomagnetism of Neogene Ocores dyke swarm, the Peruvian Andes : implication for the Bolivian orocline, submitted to *Geophys. J. R. astr. Soc.* (1984b).
- [11] Heki, K., Y. Hamano & M. Kono : Paleomagnetic study of

- the Cretaceous Atajana Formation and the Arica dike swarm, the northernmost Chile, submitted to *J. Geomag. Geoelectr.* (1984c).
- [12] Heki, K., Y. Hamano, M. Kono, K. Nomura, N. Morikawa & H. Kinoshita : Paleomagnetic study of the Jurassic shales in the Arica Group and Cuya dike swarm, to be submitted to *J. Geomag. Geoelectr.* (1984d).
- [13] Jones, D. J., A. Cox, P. Coney & M. Beck : The growth of western North America, *Sci. Amer.*, **247**, 50~64 (1982).
- [14] McElhinny, M. W. : *Palaeomagnetism and Plate Tectonics*, Cambridge Earth Science Series, pp. 358, Cambridge University Press, London (1973).
- [15] Nur, A. & Z. Ben-Avraham : Oceanic plateaus, the fragmentation of continents, and mountain building, *J. Geophys. Res.*, **87**, 3644~3661 (1982).
- [16] Palmer, H. C., A. Hayatsu & W. D. MacDonald : The Middle Jurassic Camaraca Formation, Arica, Chile, palaeomagnetism, K-Ar age dating and tectonic implications, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **62**, 155~172 (1980).
- [17] Schwartz, S. Y. & R. Van der Voo : Paleomagnetic evaluation of the orocline hypothesis in the Central and Southern Appalachians, *Geophys. Res. Lett.*, **10**, 505~508 (1983).
- [18] Shackleton, R. M., A. C. Ries, M. P. Coward & P. R. Cobbold : Structure, metamorphism and geochronology of the Arequipa Massif of coastal Peru, *J. Geol. Soc. Lond.*, **136**, 195~214 (1979).
- [19] Skerlec, G. M. & R. B. Hargraves : Tectonic significance of paleomagnetic data from Northern Venezuela, *J. Geophys. Res.*, **85**, 5303~5315 (1980).
- [20] Ui, T., M. Kono, Y. Hamano & F. Monge : Paleovolcanology of Ocos dike swarm, Central Andes, to be submitted to *J. Volcanol. Soc., Japan* (1984).
- [21] Vilas, J. F. A. : Palaeomagnetism of South American rocks and the dynamic process related with the fragmentation of Western Gondwana, in *Paleoreconstruction of the Continents*, edited by M. W. McElhinny and D. A. Valencio, 115~128, American Geophysical Union, Washington (1981).
- [22] Kono, M., K. Heki & Y. Hamano : Paleomagnetic study of the Central Andes, counterclockwise rotation of Peruvian Block, submitted to *J. Geodynamics* (1984).