

アメリカ西部の金鉱床を訪ねて(3) デタッチメント断層型鉱床について (その1 - 断層の概念と鉱化作用の特徴)

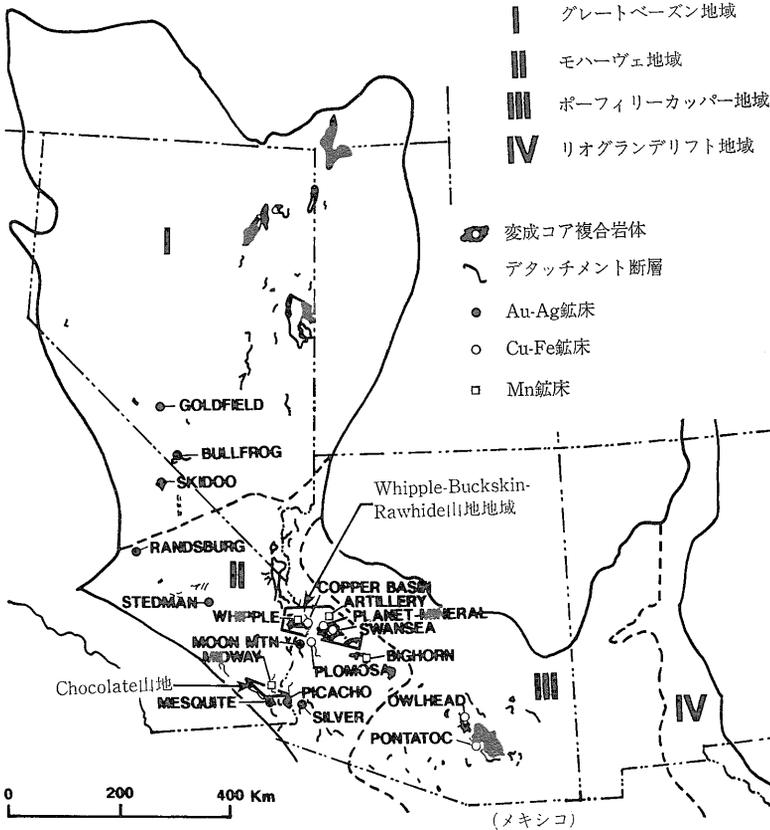
富樫幸雄¹⁾・中村光一²⁾

1. はじめに

これまで2度にわたり本誌で御紹介したネバダ州の堆積岩はい胎・鉱染型(「カーリン型」)金鉱床は Basin and Range 地域^{プロビン}の広域的な地殻伸張運動と密接に伴って形成された。このタイプの鉱床は Basin and Range 地域の北部を構成する Great Basin 地域^{プロビン}に主として分布し、多くの場合、中新世以降に形成された高角正断層群が鉱化作用を規制していることはすでに述べた通りである

(富樫, 1988a, b).

さて, Great Basin 地域の南方延長には, アリゾナ州西部とカリフォルニア州東南部を含む地域が, Basin and Range 地域の一部として, 伸張的な地殻運動の場として知られている。この地域は, 一般にモハーヴェ(Mojave)地域^{プロビン}と呼ばれている(第1図)。Mojave 地域は第三紀半ばに, Great Basin 地域に先立って広域的な伸張運動の場となったが, 形成された断層の多くは, 時に数10キロもの水平ずれを伴うきわめて低角の正断層

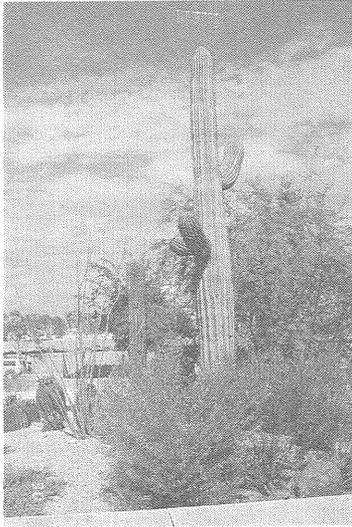


第1図

Basin and Range 地域の4区分, およびデタッチメント断層系とそれに伴う主要な鉱化作用の分布. 変成コア複合岩体 (metamorphic core complex) については本文(第2節)を参照のこと. 記された鉱床のうち, Goldfield, Bullfrog, Stedman などは, 低角断層に伴うものの, 火山活動に関連した浅熱水性のものであると考えられている. (Wilkins, 1984に加筆)

1) 地質調査所 鉱物資源部
2) 地質調査所 海洋地質部

キーワード: 金鉱床, アメリカ西部, デタッチメント断層



第2図 モハーヴェ沙漠のシンボル，サボテン。
(アリゾナ州西部にて)

であった。このタイプの断層は上盤側と下盤側では明らかに岩層が分離されることから、デタッチメント（「分離す」の意）断層 Detachment fault と呼ばれる。一般に、デタッチメント断層の下盤側岩層は断層付近がマイロナイト化ないし角礫化した深成岩類と変成岩類からなり、一方、上盤の岩層は急傾斜でシャベル状に湾曲した正断層 (listric normal fault) 群により分断された堆積岩類、火山岩類、結晶質岩類からなっている。

さて、カリフォルニア州とアリゾナ州の境界部一帯には、デタッチメント断層系に沿って銅、鉄、マンガン、金などの鉱化作用が伴われ、近年、デタッチメント断層型鉱床と呼ばれている（第1図）。1987年秋に、筆者の内、富樫は、デタッチメント断層型と考えられているカリフォルニア州東南部のメスキート (Mesquite)、ピカチョ (Picacho) 両金鉱床を、中村はネバダ、アリゾナ両州の伸張的地質構造を、それぞれ見学する機会を得た（第2図、第3図）。ここに、これら金鉱床の現況や地質と鉱化作用の概要を御紹介するとともに、日本人地質家には余りなじみのないデタッチメント断層について、その概念と研究史、それに伴う鉱化作用の特徴なども一緒に御紹介したい。ただし、順次述べるように、鉱化作用と地質構造の関係については、今なお議論が収束しておらず、ここで紹介する論点も一般的見解とはいいい難い部分があることを御承知おきいただきたい。なお、本文は1、4、5節を富樫が、2、3節を中村が、それぞれ担当した。



第3図 巡検の朝のあわただしい出発風景。場所は、我が国の某プロ球団のキャンプ地として名高い(?)アリゾナ州ユマである。

2. Basin and Range 地域の伸張テクトニクス の研究の進展とデタッチメント断層

1980年代に伸張テクトニクス (extension tectonics) という言葉を冠する論文が大量に書かれたが、その中において、Basin and Range 地域は伸張テクトニクス下における大陸地殻の構造を大規模に見せる地域として重要な役割を果たしてきた。

Basin and Range 地域とは元来、自然地理学的 (地形学的) に北米大陸を区分した際にでてくる名称で、字義通り、ほぼ平行する高い山地 (range) とその間にある堆積物に埋積された盆地 (basin) の連なる地域を指す。全体に乾燥した気候で、南部に行くとも沙漠となる。地域的特徴により、いくつかの小地域に分けて論ずることが多い。例えば、南部の沙漠地帯はカリフォルニア州とアリゾナ州を境するコロラド川で、カリフォルニア側の Mojave 沙漠とアリゾナ～メキシコ側の Sonora 沙漠に分けるのが通例である。

Basin and Range 地域の特異な地形は、早くから地質家の注目するところとなり、Gilbert や Nolan 等によって正断層群によってできる地形であることが今世紀前半にわかっていった。それ故、この地形に由来する basin-range structure という言葉ができるとともに、正断層群が発達することから、大陸地殻が伸張した場合の典型的な構造と考えられて来た。元来、高い山々に囲まれて、外に出る河川系を持たないネバダ州を中心とする地域を Great Basin と呼ぶが、Basin and Range 地域と総称される地域と Great Basin はほぼ同義であったものが、同様な地形、地質的特徴を持つ地域を包含して拡大してきた。それ故、現在、Basin and Range 地域と言う時、またその中を小区分する時、ほとんどの部分は

明確な地形的な差異で境されている中に、ガーロック断層のような、あまり大きな地形の差を作っていない地質学的境界も地理学的区分に導入されるというような事態も生じている。また、一方、研究の進展につれて Basin and Range 地域の外にも basin-range structure が見出されている。

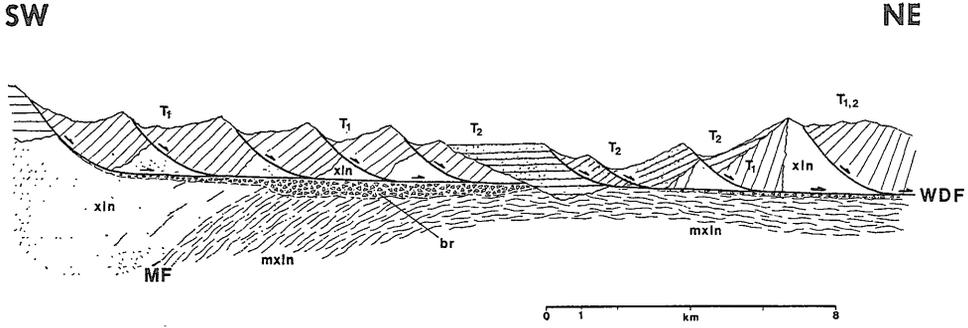
basin-range structure は Basin and Range 地域にあっては現在の地形として見られ、また Great Basin の東縁 (Wasatch front) や西縁 (Walker Lane) では正断層型の発震機構を持つ地震が起こることから活動的な構造と見られてきた。盆地の部分はほとんど中新世より新しい時代の堆積物で埋積されているために山地に見られる先カンブリア紀から新生代までの地層とは対照をなす。盆地の堆積物は basin-range structure の一環として研究されても、山地の方の研究は basin-range structure を作る前の地質や構造を研究する対象として考えられてきた。山地に見られる地質は、北米クラトンの縁辺に堆積し、コロラド高原で見られる先カンブリア紀から後の堆積物の西方延長と考えられる炭酸塩岩や碎屑岩の sequence であり、古生代末期の Antler 造山運動や中生代の Sonoma 造山運動と呼ばれる短縮変形の構造であり、白亜紀～古第三紀の大量の ash-flow tuff を放出した火成活動の産物であった。故に山地の地質に関する研究といえば、1970年代半ばまで、それらの古い堆積物の sequence や短縮変形の構造 (例: Roberts Mountain thrust) を盆地をまたいでつないで復元することに主眼が置かれていたし、今日においてもこの地域の重要なテーマである。勿論山地にも多くの正断層が発達しているが、それらは Basin and Range 地域の大きな地形を作っている構造に比して、変位量の小さな二次的構造と見なされてきた。

こうした状況が大きく変わったのが、1977年5月に行われたペンローズ会議 'Tectonic significance of metamorphic core complexes in the North American Cordillera' (Crittenden et al., 1978) であり、その成果をまとめた Geol. Soc. Am. Memoir 153 (Crittenden et al., eds., 1980) の出版は広い範囲の人々に影響を与えた。そこでは、山地の中に見られる短縮変形に伴う構造と見なされていたものの中に伸張変形に伴う構造がある。つまり、低角衝上断層 (thrust) と考えていたものの中に正断層 (傾斜が小さい: 低角正断層, low-angle normal fault) があり、それらが第三紀に活動したものであることが明確になったのである。このことはこの地域の地質を考える上で様々な影響を与えた。例えば、basin-range structure から見積もられる地殻の伸張率は数10%位で大きくはない。ところが、地球物理学的に求めた地殻の厚さ

から求められる伸張率は大きく、この間の矛盾が解け、Basin and Range 地域は大きく伸張していることが確かになった。

この研究の転回点を作った metamorphic core complex とは、山地の中に先カンブリア紀の片麻岩と考えられるものがあり、花崗岩などとともに複雑に変形、変成しており、カレドニア造山帯などに見られる mantled gneiss dome と同種のものと考えられていたものである。上位は低角の断層で若い時代の地層と接しており、多くが衝上断層と考えられていた。ところが1960年代になって、断層に沿う岩石の放射年代を求めて見ると、第三紀の年代が得られる。また、被覆する第三系との関係も、その年代と矛盾のないことが多いことがわかってきた。1960年代の終わりごろにはこの断層は metamorphic core complex の上昇に伴う重力滑動 (gravity sliding) の産物と考える人々もいた。そうした状況の中で Armstrong (1972) が、ネバダ・ユタ州境近くの構造を low-angle (denudation) fault として再解釈した。同じ頃、ネバダ州南部の第三系を研究していた Anderson (1971) も深くなるほど傾斜のゆるくなる断層 (彼はそう言っていないが listric normal fault) が非常に多く発達することを示した。また、ネバダ州西部では Yerington 鉱床の膨大なデータに基づいて Proffett (1977, 発表は1971) が正断層群によって地塊が回転していることを示した。このような低角な断層は今世紀はじめから地質調査によって知られていた。あるものはただ断層の線が描かれていたが、断層の性質については何も記載されていなかったり、不整合とされていたり、また、衝上断層とされていた。中には Longwell (1945) のように低角正断層として記載している例もあるが、広く受け容れられることにならなかったのは、岩石力学の教えるところでは、引張応力場で、水平面に対して高角な破断面 (高角正断層) を容易に作る事ができて、低角な破断面を作ることは脆性的な領域では難しく、世界の他の地域にそのような断層の記載がなかったからである。様々な事実と研究の積み重ねがあって、米国西部の地質家達は、低角正断層の認識に進み、その概念の下、地質図を作るようになった。しかし、この岩石力学との矛盾は、後述するように再び1980年代に論争の種となる。

低角正断層は第三系の中にも多く観察され、metamorphic core complex を伴わない場合も多い。しかし、典型的な metamorphic core complex の要素の組み合わせは、第4図のようなものである。低角正断層があって、そこから分岐した正断層群によって回転した上盤の若い地層群があり、主断層に沿っては破碎された岩石が様々な程度に変質して分布する。下盤にはマイロナ

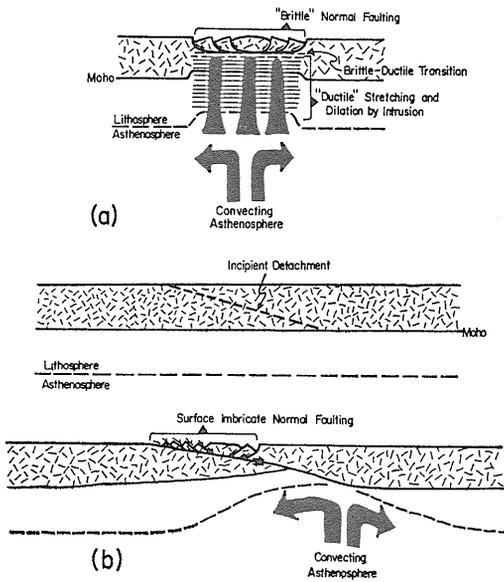


第4図 コロラド川に面する Whipple 山地に見られる metamorphic core complex の模式断面 (Davis et al., 1980). WDF: Whipple detachment fault, T₁, T₂: 第三系, T₁の方が古い, xln: 下盤の変成岩, 貫入岩, mxln: マイロナイト化したxln, MF: mylonitic front, xlnとmxlnの境, br: WDFに伴う破碎岩.

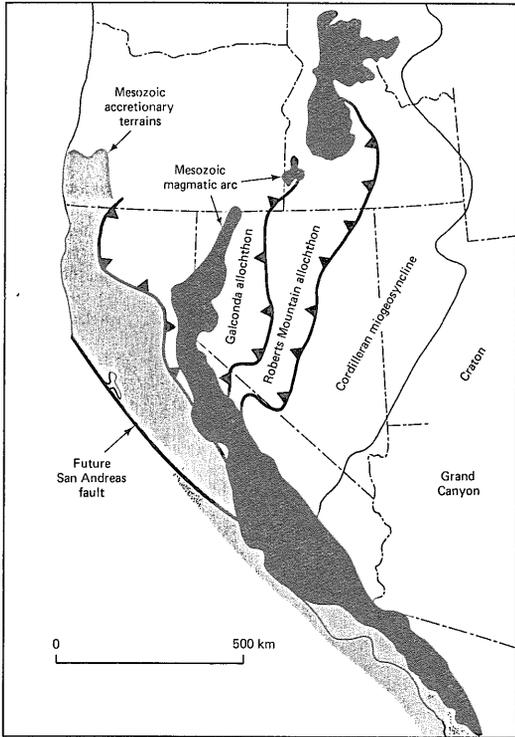
イトがあるが, metamorphic core complex の中心部に行くともイロナイト組織が見られなくなるというのが一般的で, この図のように, mylonitic front で境されて直下の下盤にもマイロナイト化していない岩石がある場合もある. Davisはこのようにマイロナイトや破碎岩と密接に関係する低角正断層に限ってデタッチメント断層と呼んでいる. しかし, detachment という用語は古くから décollement と同義に使われていたこともあり, 現状では米国西部の研究者においても用法は微妙に異っている. 後述する Wilkins や巡検案内者の Frost はデタ

ッチメント断層という言葉をはほとんど低角正断層と同義に使っている.

metamorphic core complex の研究を進めた主な地質家は, このマイロナイト組織は地殻の伸張に伴う, 水平方向の pure shear (純粋剪断) によって生ずる, つまり, foliation の面は pure shear による flattening の結果と考えていた. ところが1981年4月に開催されたマイロナイトについてのペンローズ会議で pure shear ではそうした組織が作り得ないことが指摘された. 同時にマイロナイトの組織の研究から, 様々な変形の段階の情報を得ることが可能であることが示された. そうした状況の下, Great Basin 南部, ユタ州とネバダ州の境界付近を調べていた Wernicke (1981, 1985) が低角正断層はリソスフェア全体を低角で切るような断層 - shear zone の一部であるという考えを出した. つまり, 大陸地殻 (及びリソスフェア) の伸張は simple shear (単純剪断) によっているという考えを示した (第5図). これは1978年に示された大西洋西岸のスペインのビスケー湾の listric 正断層群 (de Charpal et al., 1978) と合わさって, 大陸の中にできたリフト帯から海底拡大へ移行する時期に大陸地殻が伸張する際の構造モデルとして多くの人の受け容れるところとなった. 特に Gibbs (1984) が simple shear モデルで北海の古いリフトの地震探査断面を解釈したことはより多くの人をこの考え方に引き入れた. また, この頃 McKenzie (1978) が示した, 伸張したリソスフェアはアイソスタシーによって堆積盆を作るとともに, 持ち上げられたアセノスフェアが冷却することにより, 堆積盆は更に沈降するというモデルが, 大量に公表された石油試掘井のデータに基づいて検証され, またモデルが精密化した. これらの地質学的事実の集積, 理論の発展は, 大規模反射法地震探査の発展とあいまって, 1980年代に伸張テクトニクスの研究のブームを形成



第5図 大陸リソスフェア伸張の2つのモデル (Wernicke, 1985). (a) pure shear (b) simple shear この中間形態は色々あると考えられている.

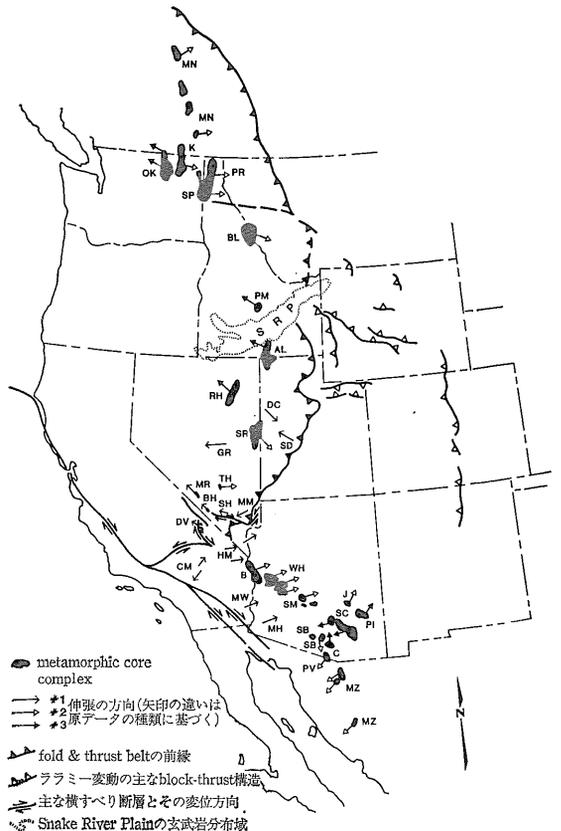


第6図 古生代の構造のトレンドと Mesozoic truncation (Suppe, 1985)

研究された地域にある規模の小さな鉱床の検討を経て、概念化され進められてきた。Mesquite 鉱床については解釈が流動的であるが、以上概括してきたようにデタッチメント断層そのものについても解釈が流動的であるので、フィールド作業をやらずに適確に現況を紹介するのは困難である。

3. Mojave 地域の地質の諸問題

Great Basin では主な構造は南北に連なり、岩相もよく連続している。ところが、それはシエラ・ネバダ山脈を構成する中生代の火成活動や構造によって切られてしまう(第6図)。この構造は Hamilton and Myers (1966) の指摘以来、Mesozoic truncation と言われ、様々な議論がある。この構造は基本的には次のようなシナリオの中の問題として捉えられている。パンゲア超大陸が成立していた時期には現在の北米と南米大陸は現在の中米を介さずに、メキシコ湾を閉じさせる形でつながっていた



第7図 米国西部の metamorphic core complex の分布 (Wust, 1986)

した。

metamorphic core complex は地殻の伸張に伴う地殻中の脆性-延性流動漸移 (brittle-ductile transition) 付近の現象を地表で観察できる例として、現在重要視されているが、単純にデタッチメント断層に沿って上昇した訳ではないらしい。第4図はデタッチメント断層がほぼ平面として描いてあるが、実際にはドーム状に盛り上っている。そうした事実は多くの metamorphic core complex で観察されており、デタッチメント断層は最初はより高角であった可能性が指摘されている。また、Jackson (1987) は世界中の大きな正断層に伴う地震の発震機構をまとめて、活動的な正断層は 30° より小さな傾角を持たないことを示した。こうした事実を踏まえて、1980年代の最後になって、一つのデタッチメント断層に基づく大陸地殻の伸張、薄化についてのモデルの見直しが始まりつつある (Davis & Lister 1988, Lister & Davis 1989)。

ここで紹介するデタッチメント断層に伴う鉱化作用の研究と探査は、1980年代初めの「新しい」解釈に基づいてちょうどその頃研究と開発が進んでいた Picacho 鉱床の再解釈と、metamorphic core complex としてよく

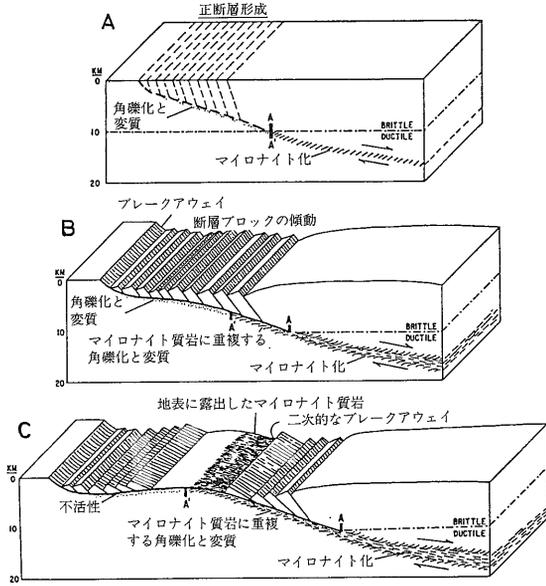
問題があり、アメリカ・メキシコ国境付近の地質は近年盛んに議論されている。Mojave 地域はその真中であって後述する Orocopia schist や Chocolate Mountains thrust の位置づけは議論が分かれている。

また第7図に見られるように、コロラド高原の南西側には多くの metamorphic core complex があって Colorado River extensional corridor (Howard and John, 1987) と呼ばれるほど、中新世の伸張テクトニクスが発達している上に、更に、その後のサンアンドレアス断層のトランスフォーム境界からカリフォルニア湾の海嶺境界へ続く新しい構造が切って走っているため、新生代の地質構造発達史とその位置づけをめぐっても議論の盛んなところである(例えば Stock and Hodges 1989)。

米国西部の地質家たちの間には古い概念と新しい概念が混在しており、多くの地質家は新しい考えになっているのに、ある地域の大部分の地質をまとめた老大家が古い考えで仕事を続けていたり(その様子は脇田(1989)に伺える)、新しい考えに基づく仕事が全くされていない地域があったりするので、論文だけからコンパイルすることは極めて難しい。

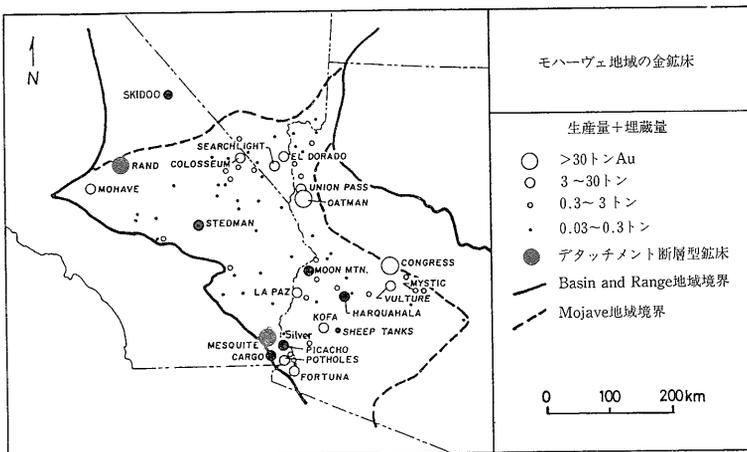
4. デタッチメント断層に伴う鉱化作用

さて、すでに述べたように、デタッチメント断層は大規模な地殻伸張運動に伴って形成されるため地殻深部まで達するものである。また、断層上盤側には多数のわん曲断層 (listric fault) はじめ急傾斜の正断層が発達する(第8図)。従って、地殻中の流体がきわめて動き易い場となり、かつ、その流体もしばしば高温、かつ、大量であると考えられる。このことから、デタッチメント断層系の角礫化帯とその上盤側には活潑な熱水活動が行わ



第8図 デタッチメント断層の発達モデル。A-A' のバーは断層のずれを示すためのマーク (Reynolds, 1987)

と考えられる。その際、メキシコやユカタン半島の地塊は現在と異った形で北米と南米の間に挟み込まれていた。それが大西洋の拡大に伴って北米と南米が別々に移動し、現在の太平洋側のプレートが両アメリカ大陸に沈み込むようなプレート配置が始まることを示すのが Mesozoic truncation event である。このシナリオの中で中生代の火成活動によって隠されている北米クラトンの縁辺堆積物の延長はどうつながっていたか(例えば Walker, 1988)、メキシコが現在の配置になるまでの間、カリブプレートの発達過程と合せて、どういう復元をするか(例えば Anderson and Schmidt, 1983) など様々な



第9図 モハーヴェ地域の金鉱床の分布。デタッチメント断層型以外では浅熱水性脈状のタイプが多い。(Wilkins, 1984 に加筆)

第1表 モハーヴェ地域の主なデタッチメント断層関連金鉱床

鉱床名	州	既生産量+埋蔵量		鉱化時期
		Au(t)	Ag(t)	
Skidoo	CA	4.8	6.7	第三紀
Mesquite	CA	70.2		中新世
Rand	CA	26.0	177	18m. y. (?)
Cargo Muchacho	CA	18.5	6.4	中新世
Picacho	CA	13.9		中新世
Stedman	CA	7.8	5.6	20m. y.
Moon Mountain	AZ	12.4		15—18m. y.
Harquahala	AZ	4.4	2.8	中新世
Sheep Tanks	AZ	1.6	9.0	中新世
Silver District	AZ	0.1	1,028	20—25m. y.

州名：AZ アリゾナ州，CA カリフォルニア州
 位置は第9図参照。ゴシックは今回見学した鉱床。

(Wilkins, 1984 を編集)

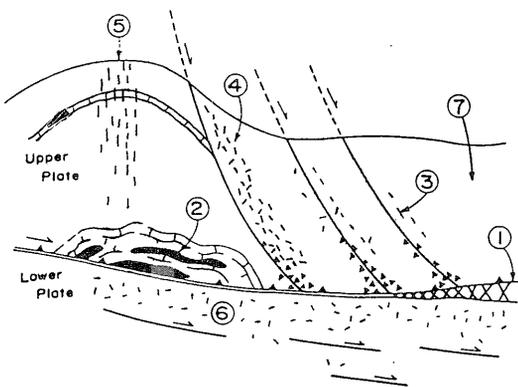
れ、ときには金属鉱化作用が伴われることになる。

鉱化作用のタイプ

デタッチメント断層系の形成に関連した鉱化作用には、今までのところ、鉱種別に次の3つのタイプが知られている：

- (1) Cu-Fe 鉱化作用
- (2) Mn 鉱化作用
- (3) Au-Ag 鉱化作用

このうち、Cu-Fe と Mn の鉱化作用はカリフォルニア州とアリゾナ州にまたがる Whipple, Buckskin, Rawhide などの山地一帯に分布している(第1図)。この地域はまた、デタッチメント断層の模式地の一つで、従って、これらの鉱化作用はデタッチメント断層型鉱化作用



第10図 デタッチメント断層に伴う鉱化作用の位置と産状を示すモデル。①断層帯に沿う部分、②反応性岩層(石灰岩など)の交代鉱床、③裂傷脈(gash vein)、④listric断層の角礫岩、⑤褶曲軸の脈、⑥緑泥石角礫岩、⑦裂け断層(tear fault)(Wilkins ら, 1986)

の典型的な例として知られてきた。

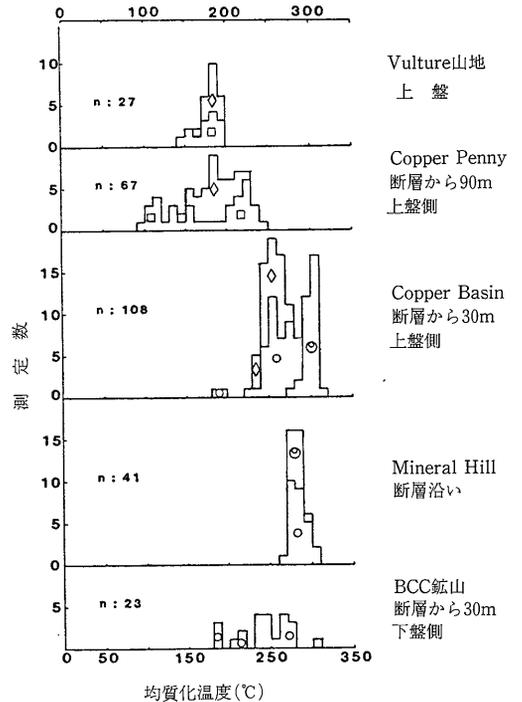
一方、Au-Ag 鉱化作用は、Whipple-Buckskin-Rawhide 山地地域ではほとんど認められないが、約150km程南のChocolate山地(第1図)周辺で知られ、大規模鉱床の発見により近年注目を浴びている。次稿で御紹介する Mesquite, Picacho 両金鉱床はこの地域における代表的な鉱床である。

第9図に Mojave 地域のデタッチメント断層関連金鉱床の分布を示す。また、第1表にそれらに伴う金属量を示す。

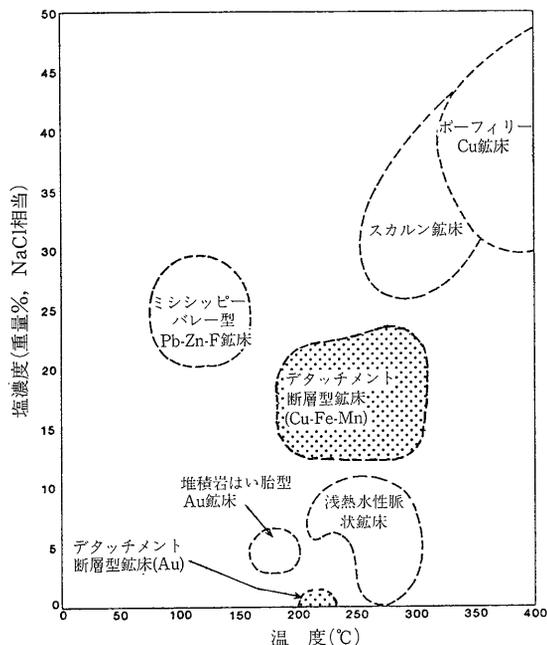
以上の鉱化作用は、いずれも広域的な低角正断層(デタッチメント断層)系に伴うマイロナイト化帯、角礫化帯、断層上盤側の高角正断層などに沿って、層状、脈状、鉱染状などに産する(第10図)。鉱石鉱物としては、密接に酸化物を伴うことが特徴的で、鉱石ないし母岩の多くは微破砕構造を示している。鉱化帯には緑泥石化が普通に伴われるが、見かけ上、熱水変質の程度は強くはない。

鉱化流体とメタルの起源

流体包有物や安定同位体の研究はデタッチメント断層



第11図 Whipple-Buckskin-Rawhide 山地地域のデタッチメント断層との相対的位置関係で見た流体包有物の均質化温度(Wilkins ら, 1986)。断層沿いで最も高温、上下両盤側へ離れるにつれて低温となる。(◎早期石英、○後期石英、□方解石、◇螢石)

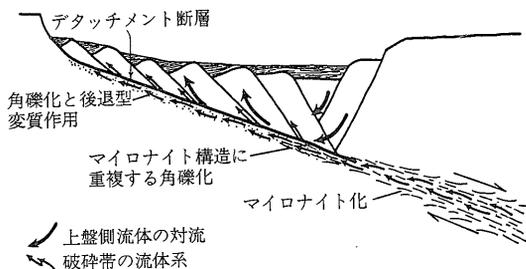


第12図 デタッチメント断層型鉱床に伴う流体包有物の温度と塩濃度。(Wilkins ら, 1986 に加筆)

型鉱化作用の模式地としての Whipple-Buckskin-Rawhide 山地地域の Cu-Fe-Mn 鉱化作用について最も良く進められてきた。それによると、均質化温度は200~325°Cで、断層沿いの部分が最も高温であり、上下両盤側へ離れるほど低温となる(第11図)。塩濃度は比較的高く、12~23重量% (NaCl 相当) に集中する(第12図)。また、流体の酸素同位体組成 ($\delta^{18}O$) は-4~+4%を示す。これらのデータを Roddy ら (1988) は総合的に解釈し、傾動した上盤側ブロックが半グラベンを形成し、それを埋めた堆積物の層間水(フライン)が鉱化流体の起源であったとしている。ただし、従来は、酸化物が普遍的に伴うことから、デタッチメント断層の破砕帯を通じて地殻深部から上昇してきた還元的な流体が上記の酸化的な層間水とそう遇したとする二元的な起源を想定する考え方 (Beane ら, 1986; Reynolds and Lister, 1987; Kerrich and Rehrig, 1987, など) が一般的であった(第13図)。

Cu, Fe, Mn などのメタルの起源については、断層上盤を構成する堆積岩類や火山岩類がカリウム交代作用をこうむった結果、岩石中に含まれていた金属が流体中に放出されたとする考え (Reynolds, 1987; Roddy ら, 1988) や、緑泥石化した断層破砕帯周辺の角礫化岩にその起源を求める考え (Wilkins ら, 1986; Kerrich, 1987) がある。

一方、Chocolate 山地の Au 鉱化作用については、明確にデタッチメント断層と関連することを結論づけられ



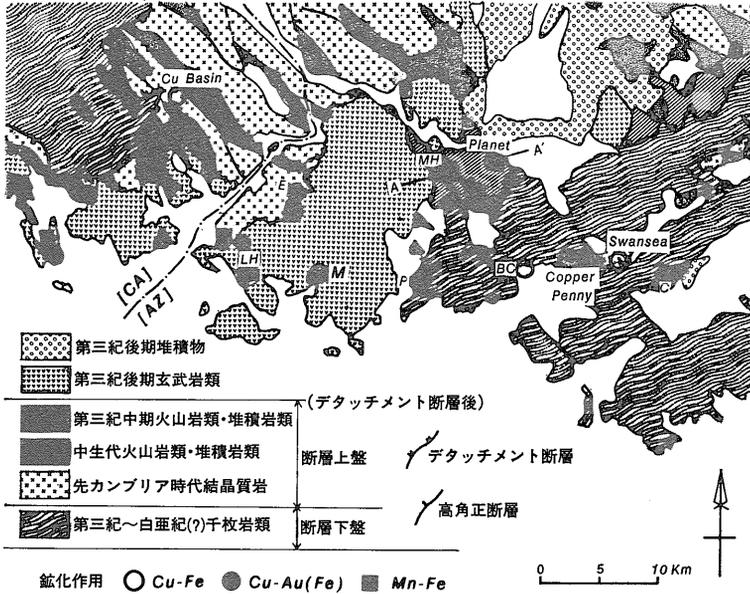
第13図 デタッチメント断層系に伴う流体の経路を示す模式図。(Reynolds and Lister, 1987)

ていない鉱床もあるものの、最近、徐々にデータが集積されつつある。それによると、流体包有物の均質化温度は全体に210~230°Cと、Cu-Fe-Mn 鉱化作用の場合より低く、塩濃度 (NaCl 相当) も1重量%以下と、きわめて低い(第12図)。双方の鉱化作用とも、赤鉄鉱などの酸化物を伴うこと、変質作用は緑泥石化が主であること、などの共通点はあるものの、上記のように鉱化作用の物理化学的条件はかなり異っていることは確かで、第12図では相互に不連続的であるようにすら見える。

ただし、本稿の冒頭でお断わりしたように、デタッチメント断層系と鉱化作用の関係はまだ解っていないことが多く、上記の2つのタイプの鉱化作用の相互関係についても、論議そのものが始まっていない。この問題は、特に、この地域一帯での Au 鉱床の探査方針を確立するためにはきわめて大切なことであろう。従来、「デタッチメント断層型鉱化作用」と呼ばれていた概念が、Chocolate 山地の Au 鉱化作用との関連を明確化し、より普遍性の高い概念として定着するためには、まだしばらくは研究の進展を待たなければならないようである。



第14図 横断中のパスの窓からみたコロラド川。この付近では荒れ果てた汎ら原が広がるだけで、河流はほとんど見えない。



5. Whipple-Buckskin-Rawhide 山地地域の Cu-Fe-Mn 鉱化作用

カリフォルニア州とアリゾナ州の間は大河コロラド川が州境となっている (第14図)。この川をはさんで東西に連なる Whipple 山地や、その東方延長である Buckskin, Rawhide などの山地は、従来デタッチメント断層の標式地の1つとして知られるとともに、それに伴う Cu-Fe 鉱床や Mn 鉱床の分布地としても有名であった。これらの鉱床はかつて盛大に採掘されたが、現在はこの地域で稼行されている鉱床はない。

この地域一帯では、先カンブリア時代～中生代の結晶質岩と、それを原岩とするマイロナイト質片麻岩がデタッチメント断層の下盤を構成している。一方、上盤側は

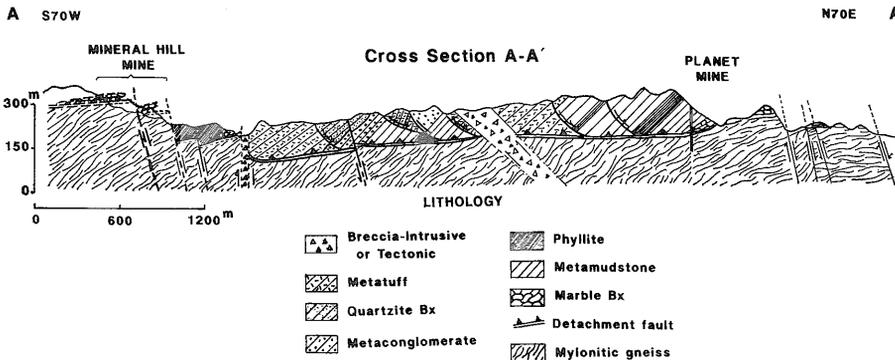
古生代から第三紀にかけての火山岩類や堆積岩類からなっている (第15図, 第16図)。

銅-鉄鉱床

この地域の Cu-Fe 鉱床の最大のもは Swansea 鉱床と Planet 鉱床である。

Swansea 鉱床はデタッチメント断層に接する上盤側の大理石礫岩中の交代鉱床で、鏡鉄鉱, クリソコラ, 石英, 方解石の組合せで産する。生産量は Cu 12,000 t (平均品位 2.1%Cu) であったが, Au は16kg, Ag は1,026 kg を生産したにすぎない (Spencer and Welty, 1986)。

Planet 鉱床はデタッチメント断層と、上盤中の破砕帯に沿ってはい胎する。Cu は炭酸塩, 珪酸塩, 硫化物などとして産し、これに石英, 方解石などが伴われる。Fe は交代性の塊状鏡鉄鉱として産する。生産量は Cu



第16図 アリゾナ州中西部 Buckskin 山地における Cu-Fe 鉱化帯の模式断面。断面線は第15図に示す。(Frost ら, 1987)

第2表 Whipple-Buckskin-Rawhide 山地地域のデ
タッチメント断層関連鉱床からの金属生産量

鉱種	金属生産量合計
銅	24,571 t
鉛	137 "
亜鉛	10 "
マンガン	54,027 "
金	774kg
銀	2,522 "

(Spencer and Welty, 1986 より計算)

8,854 t (平均品位 0.9% Cu), Au 12kg, Ag 19kg であった (Spencer and Welty, 1986).

マンガン鉱床

Mn 鉱床として主なものは Artillery 鉱床 (生産量 Mn 43,100 t, 平均品位 17.7% Mn) と Lincoln Ranch 鉱床 (同 10,900t, 15.9% Mn) である。ともに、上盤の第三紀中期の堆積岩類中に層状に、あるいは、断層破砕帯沿いに脈状に、それぞれはい胎する。鉱石鉱物は Mn 酸化物 (サイロメレン、クリプトメレン、パイロルーサイトなど) として産し、重晶石、方解石、螢石、石英などを伴う。

これらの Mn 鉱床は低品位であるため、現在は稼行されていないが、アメリカ国内では最大の Mn 鉱床である。アメリカは目下需要の 100% を輸入に頼っているので、これらの鉱床は Mn という戦略鉱物資源の最も重要な自国保有資源となっている。

この地域から報告された金属生産量の合計を第2表に示す。銅とマンガンについては生産実績は大きいものの、金と銀は乏しく、この点が Chocolate 山地付近の鉱化作用とは対照的である。

今回は Chocolate 山地南縁の Mesquite, Picacho 両金鉱床を御紹介する。

引用文献

ANDERSON, R.E. (1971): Thin skin distension in Tertiary rocks of southeastern Nevada. *Geol. Soc. Am. Bull.*, vol. 82, p. 43-58.

ANDERSON, T.H. and SCHMIDT, V.A. (1983): The evolution of Middle American and the Gulf of Mexico-Caribbean Sea region during Mesozoic time. *Geol. Soc. Am. Bull.*, vol. 94, p. 941-966.

ARMSTRONG, R.L. (1972): Low-angle (denudation) faults, hinterland of the Sevier Orogenic Belt, eastern Nevada and western Utah. *Geol. Soc. Am. Bull.*, vol. 83, p. 1729-1754.

BEANE, R.E., WILKINS, J., Jr. and HEIDRICK, T.L. (1986): A geochemical model for gold mineralization in the

detachment fault environment. *Arizona Geol. Soc. Digest*, vol. 16, p. 222.

CRITTENDEN, M.D., Jr., CONEY, P.J. and DAVIS, G.H. (1978): Penrose Conference Report: Tectonic significance of metamorphic core complexes in the North American Cordillera. *Geology*, vol. 6, p. 79-80.

CRITTENDEN, M.D., Jr., CONEY, P.J. and DAVIS, G.H., eds. (1980): Cordilleran Metamorphic Core Complexes. *Geol. Soc. Am. Mem.* 153, 490p.

DAVIS, G.A., ANDERSON, L.J., FROST, E.G. and SHACKLEFORD, T.J. (1980): Mylonitization and detachment faulting in the Whipple-Buckskin-Rawhide Mountains terrane, southeastern California and western Arizona. In CRITTENDEN, M.D., Jr., CONEY, P.J. and DAVIS, G.H., eds., Cordilleran Metamorphic Core Complexes. *Geol. Soc. Am. Mem.* 153, p. 79-129.

DAVIS, G.A. and LISTER, G.S. (1988): Detachment faulting in continental extension; Perspectives from the Southwestern U.S. Cordillera. In CLARK, S.P., Jr., BURCHFIELD, B.C. and SUPPE, J. eds., Processes in Continental Lithospheric Deformation. *Geol. Soc. Am. Spec. Paper* 218, p. 133-195.

DE CHARPAL, O., MONTADERT, L., GUENOC, P. and ROBERTS, D.G. (1978): Rifting, crustal attenuation and subsidence in the Bay of Biscay. *Nature*, vol. 275, no. 5682, p. 706-711.

FROST, E.G., OKAYA, D.A., MCEVILLY, T.V., HAUSER, E.C., GALVAN, G.S., MCCARTHY, J., FUIS, G.S., CONWAY, C.M., BLOM, R.G. and HEIDRICK, T.L. (1987): Crustal transect: Colorado Plateau-Detachment terrane-Salton Trough. Field Trip Guidebook, 99th Ann. Mtg., Geol. Soc. Am., Phoenix, Arizona, Oct. 26-29, 1987, p. 398-422.

GIBBS, A.D. (1984): Structural evolution of extensional basin margins. *J. Geol. Soc. Lond.*, vol. 141, p. 609-620.

HAMILTON, W. and MYERS, W.B. (1966): Cenozoic tectonics of the Western United States. *Rev. Geophys.*, vol. 4, p. 509-549.

HOWARD, K.A. and JOHN, B.E. (1987): Crustal extension along a rooted system of imbricate low-angle faults: Colorado River extensional corridor, California and Arizona. In COWARD, M.P., DEWEY, J.F. and HANCOCK, P.L. eds., Continental Extensional Tectonics. *Geol. Soc. Lond., Spec. Publ.*, no. 28, p. 229-311.

JACKSON, J.A. (1987): Active normal faulting and crustal extension. In COWARD, M.P., DEWEY, J.F. and HANCOCK, P.L. eds., Continental Extensional Tectonics. *Geol. Soc. Lond., Spec. Publ.*, no. 28, p. 3-17.

KERRICH, R. (1987): Fluid-metasomatic regimes in metamorphic core complexes. Extended Abstracts of '87 BMR Symp. on Applied Extension Tectonics, 24-26 November 1987, Canberra, p. 218-221.

KERRICH, R. and REHRIG, W. (1987): Fluid motion

- associated with Tertiary mylonitization and detachment faulting: $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ evidence from the Picacho metamorphic complex, Arizona. *Geology*, vol. 15, p. 58-62.
- LISTER, G. S. and DAVIS, G. A. (1989): The origin of metamorphic core complexes and detachment faults formed during Tertiary continental extension in the northern Colorado River region, U. S. A. *J. Struct. Geol.*, vol. 11, p. 65-94.
- LONGWELL, C. R. (1945): Low-angle normal faults in the Basin-and-Range Province. *Trans. Am. Geophys. Un.*, vol. 26, p. 107-118.
- MCKENZIE, D. P. (1978): Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 40, p. 25-32.
- PROFFETT, J. M., Jr. (1977): Cenozoic geology of the Yerington district, Nevada, and implications for the nature and origin of Basin and Range faulting. *Geol. Soc. Am. Bull.*, vol. 88, p. 247-226.
- REYNOLDS, S. J. (1987): Continental extension and related igneous history in the Basin and Range Province, USA. Extended Abstracts of '87 BMR Symp. on Applied Extension Tectonics, 24-26 November 1987, Canberra, p. 10-15.
- REYNOLDS, S. J. and LISTER, G. S. (1987): Structural aspects of fluid-rock interactions in detachment zone. *Geology*, vol. 15, p. 362-366.
- RODDY, M. S., REYNOLDS, S. J., SMITH, B. M. and RUIZ, J. (1988): K-metasomatism and detachment-related mineralization, Harcuvar Mountains, Arizona. *Geol. Soc. Am. Bull.*, vol. 100, p. 1627-1639.
- SPENCER, J. E. and WELTY, J. W. (1986): Possible controls of base- and precious-metal mineralization associated with Tertiary detachment faults in the lower Colorado River trough, Arizona and California. *Geology*, vol. 14, p. 195-198.
- STOCK, J. M. and HODGES, K. V. (1989): Pre-Pliocene extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the Pacific Plate. *Tectonics*, vol. 8, p. 99-115.
- SUPPE, J. (1985): *Principles of Structural Geology*. 537p. Prentice-Hall.
- 富樫幸雄 (1988 a): アメリカ西部の金鉱床を訪ねて。地質ニュース, no. 411, p. 44-59.
- 富樫幸雄 (1988 b): アメリカ西部の金鉱床を訪ねて(2), 代表的な堆積岩はい胎・鉱染型 (「カーリン型」) 鉱床の鉱化作用。地質ニュース, no. 412, p. 27-43.
- 脇田浩二 (1989): 旅は未知ずら, 夜はなあ……酒! (アメリカ地質学会100周年記念大会巡検記)。地質ニュース, no. 420, p. 43-53.
- WALKER, J. D. (1988): Permian and Triassic rocks of the Mojave Desert and their implications for timing and mechanisms of continental truncation. *Tectonics*, vol. 7, p. 685-709.
- WERNICKE, B. (1981): Low-angle normal faults in the Basin and Range Province: nappe tectonics in an extending orogen. *Nature*, vol. 291, no. 5817, p. 645-648.
- WERNICKE, B. (1985): Uniform-sense normal simple shear of the continental lithosphere. *Can. J. Earth Sci.*, vol. 22, p. 108-125.
- WILKINS, J. Jr. (1984): The distribution of gold-and silver-bearing deposits in the Basin and Range Province, western United States. *Arizona Geol. Soc. Digest*, vol. 15, p. 1-27.
- WILKINS, J., Jr., BEANE, R. E. and HEIDRICK, T. L. (1986): Mineralization related to detachment faults: A model. *Arizona Geol. Soc. Digest*, vol. 16, p. 108-117.
- WUST, S. L. (1986): Regional correlation of extension directions in Cordilleran metamorphic core complexes. *Geology*, vol. 14, p. 828-830.
-
- TOGASHI Yukio and NAKAMURA Ko-ichi (1990): Gold deposits in the western United States (3). —Mineralization associated with detachment faults—.

<受付: 1989年12月16日>