

PULL-APART BASIN の概要

Overview of Pull-Apart Basin

加藤 碩一*

Hirokazu kato

Abstract: This paper summarizes characteristics of pull-apart basins so that it may be useful for recognizing pull-apart basins. This is organized into five sections, entitled pull-apart origin (definition of pull-apart basins), tectonic settings of pull-apart basins, geometric features of pull-apart basins, sedimentation in pull-apart basins and volcanic activity in pull-apart basins.

はじめに

堆積盆の発生・発展・消滅の過程や形成機構に関する問題は、地質学における基本的かつ最も興味をひかれる課題の1つであり、すでに数多くの研究がなされてきた。

大陸縁辺や大陸内部における堆積盆の形成機構について従来の研究成果を大まかに集約すると次のようになる(加藤, 1982)。

- 1) 堆積物の荷重によるアイソスタシーの沈降(例えば, Turcotte, 1980参照)
 - ・・・エアリータイプモデル(例: 地溝・断層角盆地の形成モデル)・フレクチャーモデル(例: デルタの形成モデル)
- 2) 熱いマントルの冷却に伴うリソスフィアの沈降(例えば, Sleep, 1971参照)
- 3) プレートが分離する際の地殻ないしリソスフィアの薄化
 - ・・・ストレッチングモデル(例えば, Mckenzie, 1978)・クリーピングモデル(例えば, Bott,

1971)・

クラッキングモデル(例えば, Roydon et al., 1980)

いずれも直接的には垂直方向の運動が卓越する盆地形成機構を主とする。地球表層の重力場における堆積物の集積は、当然のことながら堆積盆地底の沈下と後背地の隆起・浸食による堆積物の供給に起因するからこの意味では盆地形成に際して垂直方向の運動が卓越することは自明であるが、堆積盆地の形成過程においてその発展を規制する盆地縁辺部の断層は必ずしも純然たる dip-slip faults とは限らない。むしろ、近年大陸地域における横ずれ断層やプレート境界のトランスフォーム断層に伴う横ずれ堆積盆の形成が注目されるようになっており、既存の堆積盆形成機構についても再解釈が試みられ、その重要性が認識されはじめている。

こうした断層の横ずれ運動に起因する strike-slip basin は、“pull-apart basin” を始めとして、分岐した断層の交差部に形成される “fault-wedge basin” (Crowel, 1976), 断層トレースに平行に形成される “fault angle depression”

*地質調査書

(Ballance, 1980), 横ずれ断層に関連して逆断層またはスラスト間に形成される“ramp valley”(Willis, 1928; Burke et al., 1982), 及びトランスバースな二次褶曲や正断層間に形成される“fault flank depression”(Crowel, 1976)などより複雑な様々なものがある(Mann et al., 1983). Reading(1980)による横ずれ断層に伴う堆積盆の幾つかの模式例を第1図に示す。

strike-slip basinの典型例の1つとしてのpull-apart basinについてその形成・発達過程がプレートの運動を反映することや石油・天然ガス・熱水鉱床・地熱等のエネルギー天然資源の胚胎に重要な役割を持つこと, さらに地震発生と関連するなどという多方面にわたる認識が広まり, 1970年代後半から現在にかけて地球科学関係研究者の関心が高まってきた。従来, 断層の垂直運動によるとされてきた堆積盆でもプルアパート型盆地であると再解釈されてきて

おり, 我が国でも典型的な横ずれ断層に伴う堆積盆はもとより, 他の堆積盆についても再検討に関心が集まりつつある。

しかしながら, pull-apart basinの用語の定義・発生過程・形成機構・認定基準などについて, とくにわが国では十分な検討が行われていない。本論では, それらについて総括的なレビューを試み, また, 幾つかの問題点について検討を加えたい。

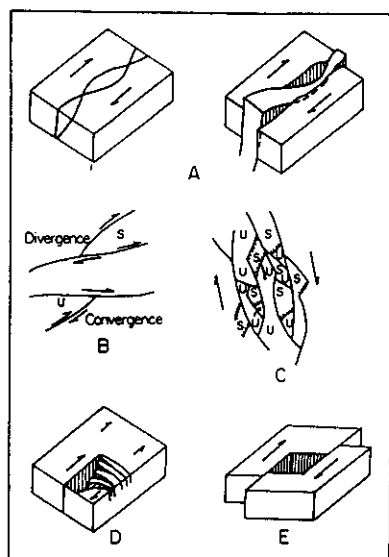
pull-apart origin

従来 pull-apart という用語は, 堆積構造を始めとするごく小規模な変形構造に対して用いられてきた。例えば, 地学事典(地団研地学事典編集委員会, 1970)では, プルアパート構造とは『半固結の泥や砂の層が側方引張を受け, 引きちぎられ, 小板状体にわかれる現象』としている。

この現象を堆積盆, すなわち pull-apart basin ないし rhomb-shaped graben の形成過程として最初に認識したのは, Reches(1987)によれば, Dead Sea Rift のテクトニクスを研究した Quennell(1958)といわれるが, 一般には, これを堆積盆の一成因を示す用語として使ったのは, アメリカの Death Valley の成因を研究した Burchfiel and Stewart(1966)が最初だとみなされている(第2図)。その部分を以下に引用すると,

“We suggest that the central part of Death Valley is related to tension along a segment of a strike-slip fault zone. If this idea is correct, the two sides of Death Valley have been *pulled apart* and a graben produced between them.”となる。(しかし, 現在では Death Valley は, 典型的な pull-apart basin としないのが一般的である。master faults(後述)の解釈も異なってきており, 隣接する Basin and Range Province の多くの地溝の1つにすぎない(Biddle and Christie-Blick(1985a))とさえ言われる)。

現在では, pull-apart basin という用語が一般的であるが, 1950-1970年代にかけては, 統



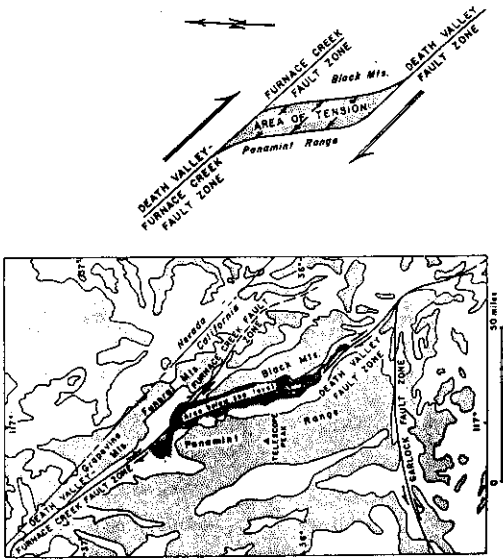
第1図 横ずれ断層に伴う堆積盆模式例(Schubert, 1984; modified after Reading, 1980)

A: オフセット前後のわん曲を伴う断層トレス

B: 発散及び収束断層パターン (U: 隆起, S: 沈降)

C: 網目状断層パターン, D: 片落ち堆積盆,

E: プル・アパート・ベースン



第2図 Death Valleyのいわゆる pull-apart basin (Burchfiel and Stewart, 1966)

一されておらず次のような同義語が混在しており、一部は現在でも用いられている。すなわち，“rhombochasm” (Carey, 1958), “tectonic depression” (Clayton, L., 1966), “wrench graben” (Belt, 1968), “rhomb graben” (Freund, 1971), “rhomb-shaped graben” (Clayton, 1966), “pull apart-graben (Livaccri, 1979), “releasing bend” (Crowell, 1974)などである。

その後、地質学者の関心が高まり、いくつかのシンポジウムの開催や論文集の発行がなされた。例えば1970年代のものではBallance and Reading(1980)の編集による“Sedimentation in Oblique-slip Mobile Zones”, 1980年代前半のものではBiddle and Christie-Blick(1985)の編集による“Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation”などがあげられる。総合的な基本文献としてはReading(1980), Mann et al.(1983)やChristie-Blick and Biddle(1985)のものが代表的である。

pull apart basinは、Biddle and Christie-Blick(1985b)のGlossaryによれば、狭義には、“A basin formed by crustal extension at a releasing

bend or releasing overstep along a strike-slip fault zone” (preferred definition: Burchfiel and Stewart, 1966; Crowell, 1974; Mann et al. 1983), 広義には“Any basin resulting from crustal extension” (Klemme, 1980; Bois et al., 1982)と定義される。しかし、広義では、地溝などとの区別はできない。とはいえ、大規模な盆地は形成機構として pull-apart originが卓越するとしても盆地の沈降には、thermal subsidenceやlithosphereの thinningなどの影響があり、形成機構の点からかなり曖昧な定義とならざるをえない。例えば Newfoundlandと New Brunswick間の St. Lawrence 湾に位置する石炭紀のMagdalen Basinでは伸長が終了した後、thermal subsidenceの影響を受けている (Bradley, 1982; Mann et al., 1983)。また、盆地の発生は横ずれ断層によらず(例えば、正断層による地溝)、その後断層の横ずれ再活動が盆地形成に副次的な役割を果たす場合もある。

ここでは、狭義には「pull-apart basinは、初生的には雁行する strike-slip faults (offsets)間 が引張状態にあるような配置の時、すなわち right-stepping right lateralないし left-stepping left lateralの時、ないし、strike-slip faultが a releasing bendを持つ時その伸長領域において断層に規制されて形成される盆地」をいい、その沈降原因や機構は規定しないこととする。ただし本論ではこれ以外の広義に含まれる pull apart basinも必要に応じて取り扱う。

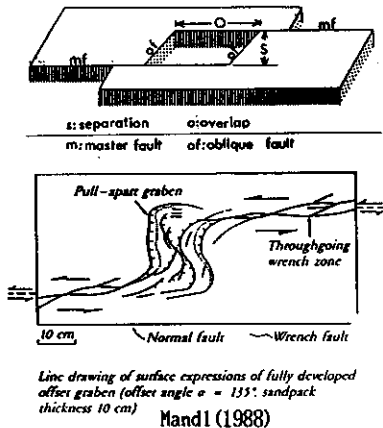
pull apart basinの発生・発展を規定する雁行横ずれ断層は master fault(Mann et al. 1983)と呼ばれ、断層間の距離を separation(basinの幅に相当する)、断層の走向方向の重なりを overlap(basinの長さに相当)と呼ぶことが多い。また、master faultに斜交し、盆地の他の縁を規定する正断層群(一部横ずれ断層)を oblique (median) fault (Mann et al. 1983)とか oblique bridging fault (Bahat, 1983)とか interconnecting diagonal fault (Eyal, et al., 1986)とも称する。両者は50-60°程度で斜交することが多い。もちろん実際には、盆地底部にも oblique 状の断層が幾つも発達することが考

えられる。例えば、extensional duplexes に形成される pull apart basin (Woodcock and Fischer, 1986) である。

典型的な pull-apart basin は、平面的には rhomboidal 形状を呈し、周囲を断層によって隆起した基盤岩からなる後背地によって囲まれており、それらの山頂部と盆地底との比高は数千 m に達する場合もあり、hole と称される場

合もあるほどである(第3図, 第4図)。

こうした pull-apart basin は、現在もその形成が進行しており、従って master fault などが活断層である modern pull-apart basin はもちろん、地質時代にも ancient pull-apart basin としてその存在が証明されつつある。その場合、盆地形成時に横ずれを示したと考えられる master fault に相当する stepping fault の存在と S ないし Z 字状や rhomboidal な独特の盆地の形状が有力な証拠となる。



第3図 Pull-apart basin の模式略図及び実験例(mandle, 1988)

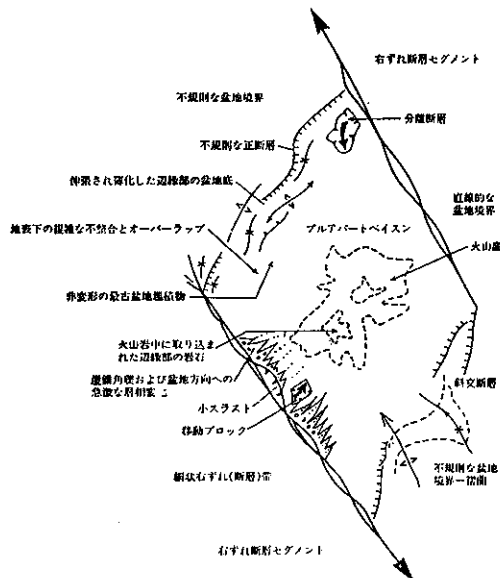
pull-apart basin の Tectonic Setting と幾つかの事例

pull-apart basin の形成は横ずれ断層末端解の1つとして捉えることができる。トランスカレントな横ずれ断層において、その末端は

- 1) 断層末端延長部における歪の漸進的解消(なしくずし型-転移モデル)
- 2) 分岐断層や(横ずれ二次断層卓越型・splay 断層発達型など)
- 3) 二次褶曲や push up の形成による歪の解消
- 4) 断層末端の急激な方向変化に伴う歪の解消(断層変位転換型)
- 5) 雁行配列部における pull-apart basin の形成と cross fault の発達による平滑化などによって消滅していく(第5図)。

もちろん、pull-apart basin はトランスフォーム境界にそっても発達し、例えば Dead Sea 断層系に伴う10以上の pull-apart basin があげられる。この左横ずれトランスフォーム断層系は、紅海からトルコの Taurus 山地まで、Arabian Plate と Sinai-African subplate との境界をなして延び中期中新世以降の累積左横ずれ変位は約 105km である(Freund and Garfunkel, 1976 ; Garfunkel et al., 1981)。

また、カリブプレートと南米プレートの境界をなす左横ずれトランスフォーム断層である北部ベネズエラの Bocono-Moron-El Pilar 断層系に沿う pull-apart basin 群も典型的である。こ



第4図 プル・アパルト・ベースン 模式図(Crowell, 1974)

れらは releasing bend や雁行配列するセグメント間に発達し主に第四紀に形成された、本断層系の Eocene 以降の累積変位量は約 1400km のオーダー (変位速度は 37mm/年) (Sykes et al., 1982) と言われるが、pull-apart basin から推定される断層の累積変位はそれより 1 桁以上も小さい。これは、盆地形成以前に変位の累積があったか、または本断層系北方を大略並走する Oca-Chirions 断層帯の活動によってまかなわれたと推定される (Schubert, 1984) (第 6 図)。このほか、多くの有名なトランスフォーム断層 (例えば San Andreas 断層, Crowell, 1974, a,b; Livaccari, 1979) 沿いにも多くの pull-apart basins が発達することが知られている。

Dewey (1982) によれば、pull-apart basin はプレート・テクトニクス概念の中で横ずれ断層の進展に関連するその固有の複雑さに派生するもので、僅かに伸張した大陸地殻の地溝底からひどく減衰した大陸地殻、さらに大洋底にまでトランジットするという。

Mann et al. (1983) によれば、pull-apart basin の位置する tectonic setting として、1) 大陸プレート間における長い横ずれ境界、2) 活動弧における横ずれ系、3) 収束帯における fault wedge を境する横ずれ系があげられている。

また、Blick and Biddle (1985) は pull-apart basin を含む strike-slip basin の生じる plate-tectonic settings として

- (1) intracontinental and intraoceanic zones
- (2) divergent plate boundaries and extensional continental settings
- (3) convergent plate boundaries and contractional continental settings

をあげている。

pull-apart basin の幾何学

以下に pull-apart basin の規模・形状などの幾何学的特性の一般化・タイプ分けを図る。

(1) Pull-apart basin の規模

堆積学的に意味のある pull-apart basin は、

sag pond なども含めれば、長さ数 10m から数 100km と規模は様々であるが、一般には、数 km から数 10km くらいが多く、広域的な伸長による intracontinental grabens や広域的な短縮による foreland and forearc basin などの堆積盆よりも小さい。

例えば、サン・アンドレアス断層にそって、長さ数 100m、堆積物の厚さ数 m のサグポンドから、長さ 200km、幅 80km、堆積物の厚さ 10km 以上におよぶ Salton Trough までである。例外的には、Cayman Trough のように長さが 1000km 以上に達するものもある。

一般に、伸長を主原因とする典型的な pull-apart basin の規模は大体長さが数 10km 以下であっていえば 50km 以下で、数 100km 程度の規模の盆地は thermal subsidence の影響を受けており単純な pull-apart basin の形成機構とはやや異なる。

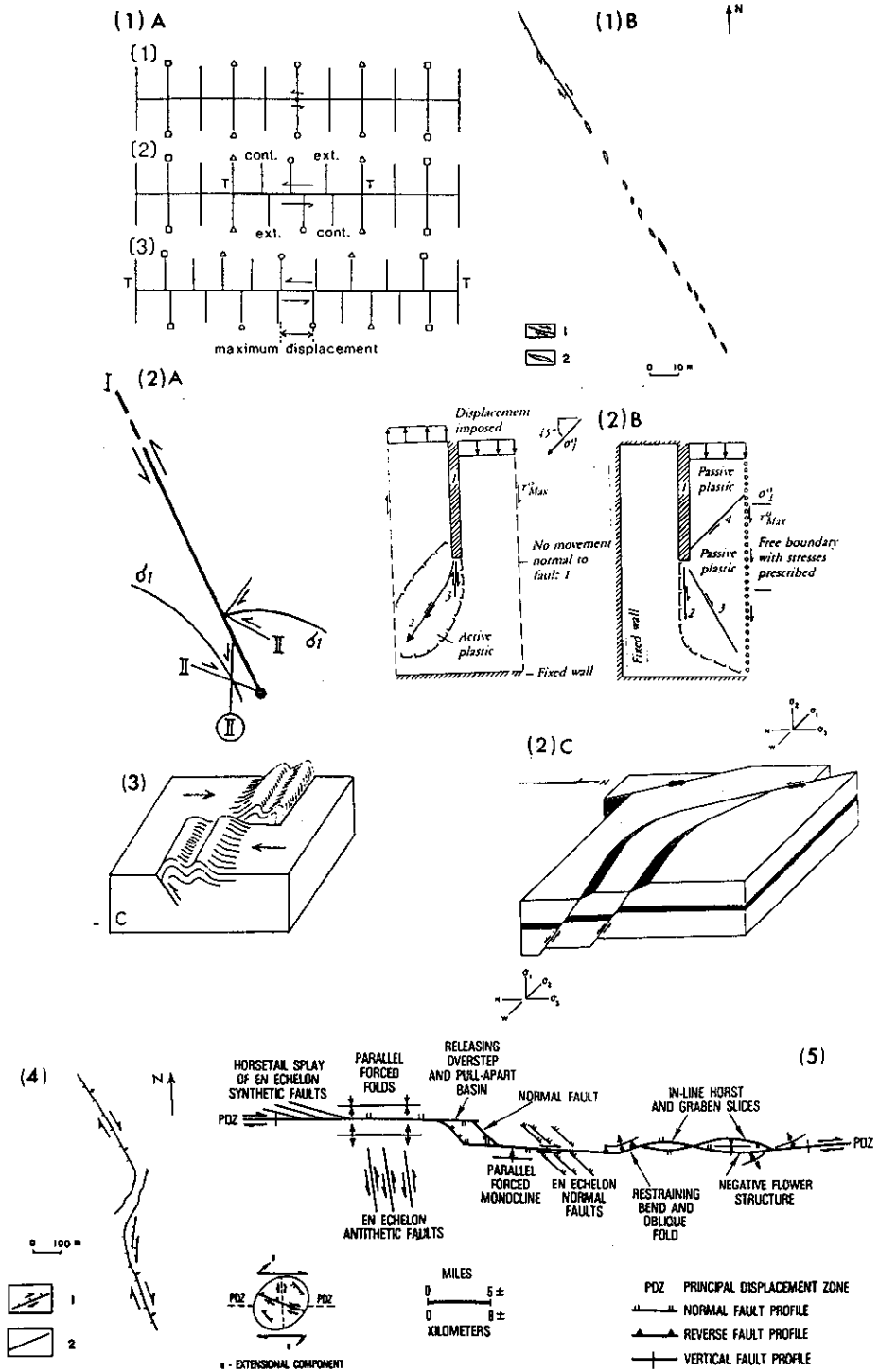
(2) Pull-apart basin の平面形態

pull-apart basin の平面形態は、その発達過程とも密接な関係を有し、また、master fault の平行性や発展後期の堆積盆地の複合や他の副次的断層の発達による変形などによって複雑化しているがその主なことは別途、形成過程の項で後述する。ここでは、pull-apart basin の幾何学的パラメーターとそれらの相互関係について簡単に論じる。

Aydin and Nur (1982) によれば、pull-apart basin の長さとの幅の間には極めて良い相関が知られており、長さ対幅の比は約 3-4 に集中するという (第 7 図)。

こうした堆積盆の幅は横ずれ断層によって規制されるから、その変位が累積していけば堆積盆の長さは当然増加する。それにもかかわらず上述のように長さ対幅の比が一定であることを説明するために彼等は、2つのモデルを提唱した (第 8 図)。

第 1 のモデルは、規則的な配列を示す雁行状にならぶ横ずれ断層に伴って多くの小地溝状 pull-apart basin が形成され、変形の進行に伴ってそれらが重複し、みかけ上大きな pull-apart

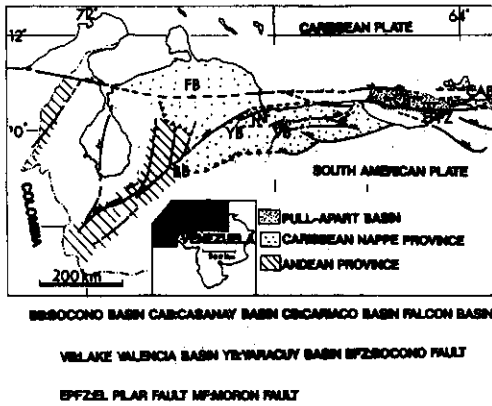


第5図 横ずれ断層末端問題解答例

- (1)断層末端延長部における歪の漸進的解消(なしくずし型—転移モデル)
 - A : 四国上斐生川—鮎喰川断層を例とした転移モデル(村田, 1988)
 - B : 1939 Fuyun earthquake fault の一例 1 : 正断層成分を持つ横ずれ断層
2 : サグ及び引張クラック(Deng and Zhang, 1984)
- (2)分岐断層(横ずれ二次断層卓越型・splay断層発達型など)
 - A : 主横ずれ断層(Ⅰ)末端部における最大圧縮主応力 σ_1 の再配置と二次の共役断層(Ⅱ). 一部 spaly 断層(s)(Jaroszewski, 1984)
 - B : 拘束条件を変えた場合の二次断層形成の数値実験結果例(Mandle, 1988 after Witlox, unpubl. work)
 - C : splaying と bending((2)と(4)の合わさったケース)
- (3)二次褶曲や push up の形成による歪の解消(Biq, 1976)(一部逆断層を伴う場合もある)
- (4)末端の急激な方向変化に伴う歪の解消(断層変位転換型)
1939 Fuyun earthquake fault の一例 1 : 東傾斜の逆断層成分を持つ横ずれ断層, 2 : 正断層又は引張クラック(Deng and Zhang, 1984)
- (5)雁行横ずれ断層間における pull-apart basin の形成(Harding et al., 1985)

basinが形成されるとするもので、南カリフォルニアのGarlock断層上のKoehu Lake Basinが例示されている。また、カリフォルニアのSalton Seaに発達するpull-apart basin群もこのタイプに発展していくと思われる。

第2のモデルは、不規則に配列する横ずれ断層や引張破断が複合するもので西ネバダのOlinghouse断層に伴う小堆積盆が例示されている。また、Boccaletti et al.(1987)が調査したシ



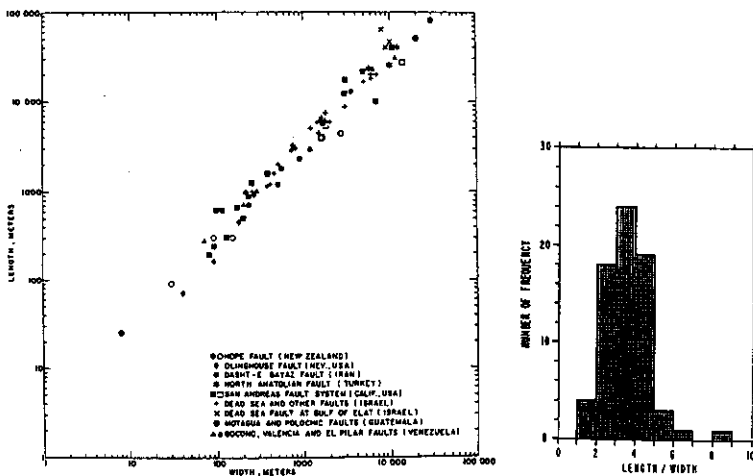
第6図 北部ベネズエラの活断層系(特に、カリブプレートと南米プレート境界をなすBocono-Moron-El Pilar断層沿い)(Schubert, 1984)

リー海峽のMalta Troughをはじめとするpull-apart basin群も全体としてはこの例である。ここでは、NNW-SSE方向の並走する右横ずれmaster faultsとNW-SE方向の正断層であるoblique faultからなるpull-apart basin群が複合し長さ200kmほどの大pull-apart basinとなっている。ただしごく小規模のpull-apart basin群には第1のモデルに相当するものも含む。つまり第1と第2の混合型ともいえる。

しかし、Aydin and Nur(1982)がpull-apart basinと認定したものは、必ずしも厳密にはあてはまらないものも多く、Bahat(1983)の再検討によれば、pull-apart basinの長さとの幅の間には相関はみられないとしている。

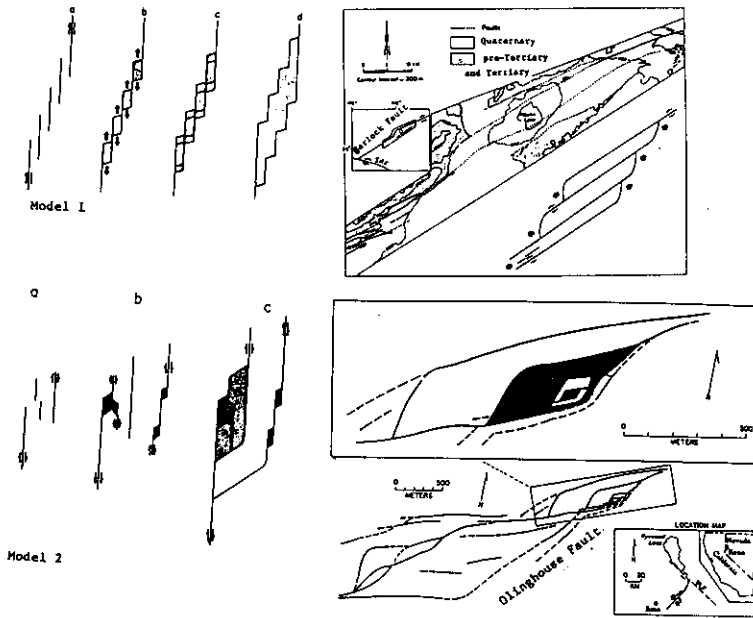
(3) Pull-apart basinの深さと堆積物の層厚

盆地の長さが5-10km程度の場合はその深さは、数100mで、例えば、Cholame valley (Shedlock et al., manuscript in preparation)やBir Zreir (Eyal et al., 1986)などがあげられる。盆地の長さが10km程度以上の大規模な場合はその深さは、数kmに達する。例えば、Ventura Basin (Yeats, 1983), Western Imperial valley (Johnson et al., 1983), Los Angeles Basin (Crowell, 1974)やDead Sea Basin (ten Brink



第7図 横ずれ断層に伴うpull-apart basinやhorstの幅と長さの関係(Aydin and Nur, 1982)

PULL-ARART BASIN の概要



第8図 複合した pull-apart basin の2つのモデル(Aydin and Nur, 1982)

and Ben-Avraham, 1989), Pantelleria-Linoso-Malta Troughs (Boccaletti et al., 1987)などがあげられる(5-3)参照。

しかし、実際には堆積盆の形成過程とも関係して厚さの分布は複雑であることも多い。例えばDead Sea Basinは、海拔-400mの地形的凹所をなし、2つのsubbasinsに区分される。北部のsubbasinが死海で、その底は海拔-725mである。盆地内の堆積層の最下位は、中期中新世ないしそれ以前のHazeva Formationで、陸成の河成ないし湖成堆積物からなり、SenonianやEoceneの基盤上に不整合にのる。ただし、この地層の分布はDead Sea Basin内に限られてはいなかった。さらに上位には、中-後期鮮新世の主に蒸発岩類からなるSedom Formationがのるが、これは盆地内に分布が限られるから、盆地の沈降・形成はこの時期からとみなされる。この平均的な厚さは約1000mである。更新世のAmora Formationは河成ないし湖成堆積物及びevaporitic carbonatesからなり、厚さは最低でも約3500mある。この上位にはWurm Stageの湖成堆積物からなるLisan

Formationがのり、その厚さは約100-150mである(ten Brink and Ben-Avraham, 1989)。

pull-apart basinの深さとmaster faultの変位の関係を最初に指摘したのは、Rodgers(1980)で、かれの数学的モデルは、master faultのoverlapがseparationの2倍以上ある時、盆地の深さは、master faultの変位の約10%であることを示した。

pull-apart basin 発展初期のlazy S・Zタイプの盆地のmaster faultの設定条件、すなわちほとんどoverlapのない雁行配列状態は、Rodgers(1980)の理論的解析の初期条件と等しいから、断層発達パターンなどについてその結果と実例との比較が検討されたことは既にのべた。ここでは、堆積物の厚さすなわち盆地の沈降量・深さととの比較を紹介する。Hanmer Basinの堆積物の層厚と周囲の山地の平均高度をたすと約1800mとなり、Rodgers(1980)のモデルを用いて、これを生ずるために必要なmaster faultであるHope Faultのオフセットを計算すると約12kmである。これは、地形的特徴などから求めたオフセットの約19kmという値より

小さい(Mann et al., 1983). この吟味は充分なされていないが、発展初期段階の盆地の幾何学的パラメーターの測定が困難であることや、基盤や被覆層のレオロジカルな性質の相似が十分でないことなどが原因であろう。

Hempton and Dunne (1984) は、pull-apart basin の長さ と 堆積物の厚さ について検討した。この場合、盆地の長さとして、ancient pull-apart basin の場合は、master fault に平行な方向の堆積物の分布の長さを取り、modern pull-apart basin の場合は、master fault の overlap をとった。第9図に示されているように 両者の間には、直線的な関係が成立し $y=0.08x+0.26$ (y は堆積物の層厚 km, x は盆地の長さ km) という関係式が得られた。相関係数は0.95である。これが成り立つなら modern pull-apart basin の場合は、堆積物の層厚が推定でき、ancient pull-apart basin の場合は、当時の盆地の長さが推定できることになる。現状では、誤差の見積もりは困難であり、堆積作用は様々な要因に影響されるが、第1近似として今後精度

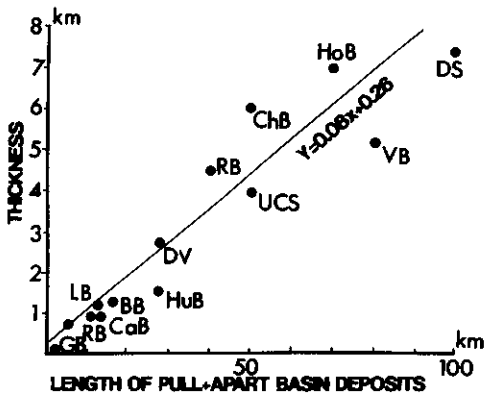
を高めていけば有効な関係式となろう。さらに Hempton and Neher(1986) は、left-lateral, left-stepping に配置した master fault の変位に伴う、pull-apart basin 生成を模式化した粘土モデル実験を試み、master fault の変位量(x)と沈降量(pull-apart basin の深さ, y)との間に $y=0.36x-1.4$ 直線関係が成り立つことを呈示し、pull-apart basin の沈降と地殻の伸張(master fault の横ずれ断層の関数)に相関があるという点については上述の自然の例から導かれた両者の相関関係を支持した。最も、定性的には、master fault に沿う横ずれ変位が増大していけば、pull-apart basin はより長く、より深く従ってより厚い堆積物を持つことは自明であるが、この定量的関係の合理的な意味付けは難しく、今後の問題である。また、大規模な盆地では、thermal subsidence などの影響があるから、この経験式の単純な外挿は避けなければいけない。

堆積速度も、横ずれ断層運動の変位速度と正の相関関係を持つらしいが、例えば、Dead Sea の pull-apart basin は、イスラエルの Hula pull-apart basin と同じ位の横ずれ断層運動の変位速度を持つが、前者の方が遥かに大きい堆積速度を示す。これは、蒸発岩類の堆積速度が加算されるため(Hempton and Dunne, 1984)で、層相の解析も十分吟味して比較しなければならない。

(4) Pull-apart basin の垂直形態

pull-apart basin に限らないが堆積盆地の多くの垂直形態は非対称を示す。この場合、死海の pull-apart basin のように盆地縁を画す横ずれ断層が正隔離を示す場合(Zak and Freund, 1981)、カリフォルニアの Ventura Basin のように逆隔離を示す場合(Yeats, 1983)、同じ盆地で両者が混在する場合など、各盆地固有の形成史に対応して様々である(第10図)。

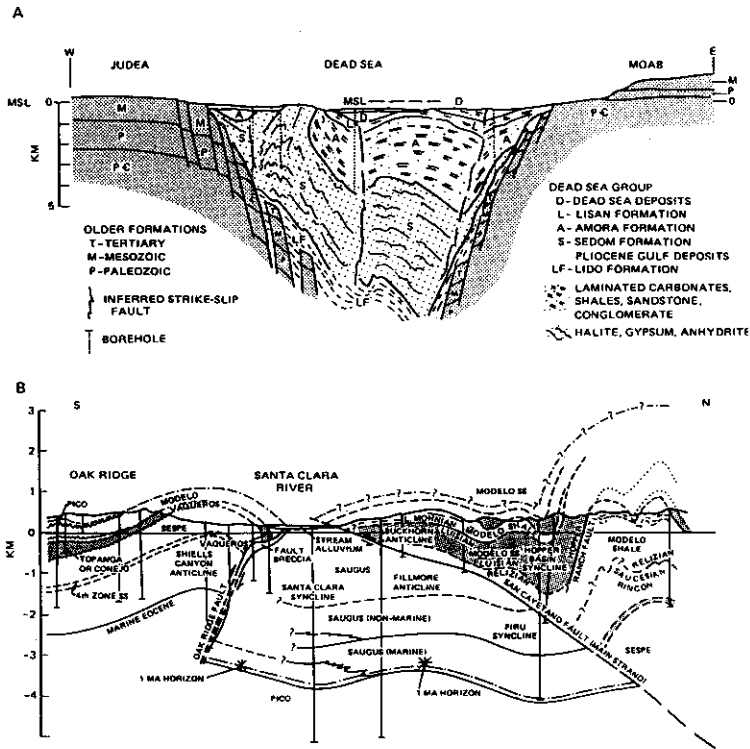
また、基盤を切る master fault を含む横ずれ断層が堆積被覆層中で、上方に向けて分岐したり時にはまた合したりして側方に広がっていく構造が知られるようになった。例えば、King-



PB: Petrockstow Basin, LB: Lefors Basin, BB: Bovey basin, RB: Ridge basin, UCS: Upper Carboniferous basins of Spain, ChB: Chuckanut basin, HoB: Hornelen basin, VB: Vienna basin, GB: Glynnwey basin, HaB: Hanmer Plains basin, CaB: Carrington basin, HuB: Hulu basin, DV: Death Valley basin

第9図 pull-apart basin の大きさと堆積物の厚さの関係 (Hempton and Dunne, 1984)

PULL-APART BASIN の概要



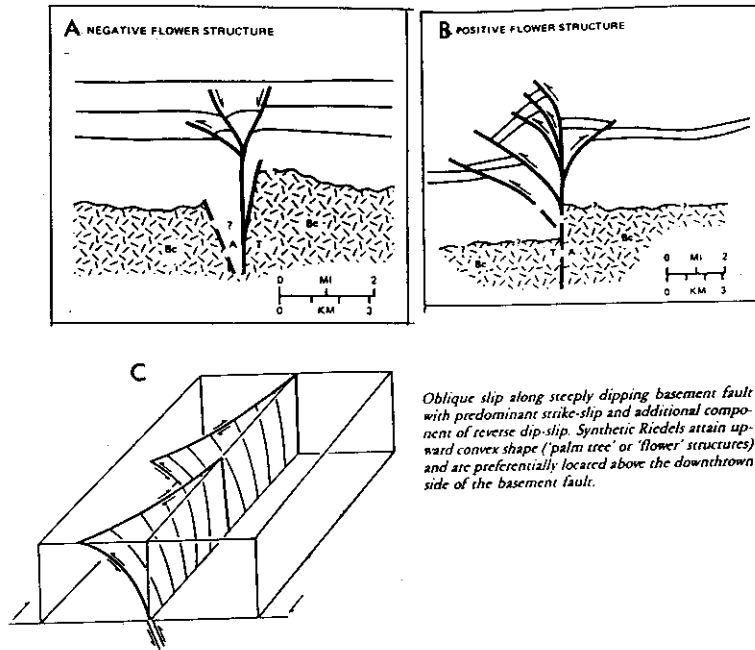
第10図 A：正隔離をもつ断層によって境される死海盆地(Zak and Freund, 1981)
B：逆隔離をもつ断層によって境される Ventura 盆地(Yeats, 1983)

ma (1958) がすでに New Zealand の Eastern Geosyncline で言及している。これを “flower structure” と名づけたのは, Harding and Lowel(1979)によれば, Gregory, R.F.(1970年の私信)で, “palm tree structure” と名づけたのは, Sylvester (1984)によれば, Sylvester と Smith, R.R.である。Emmons(1969)は砂箱実験で, 横ずれ断層の垂直断面で見掛け上正・逆断層がいらまじった形で分岐し, 上述のような構造を呈することを模式的に示している。さらに, transpressional wrench fault にともなって逆隔離が卓越する断層からなるものを “positive flower structure”, transtensional wrench fault にともなって正隔離が卓越する断層からなるものを “negative flower structure” と呼ぶ(例えば, Harding, 1983, 1985)。pull-apart basin の場合後者の構造が予想される(第11図)。しかし, あまり分岐せず, また, 並走する断層がそのま

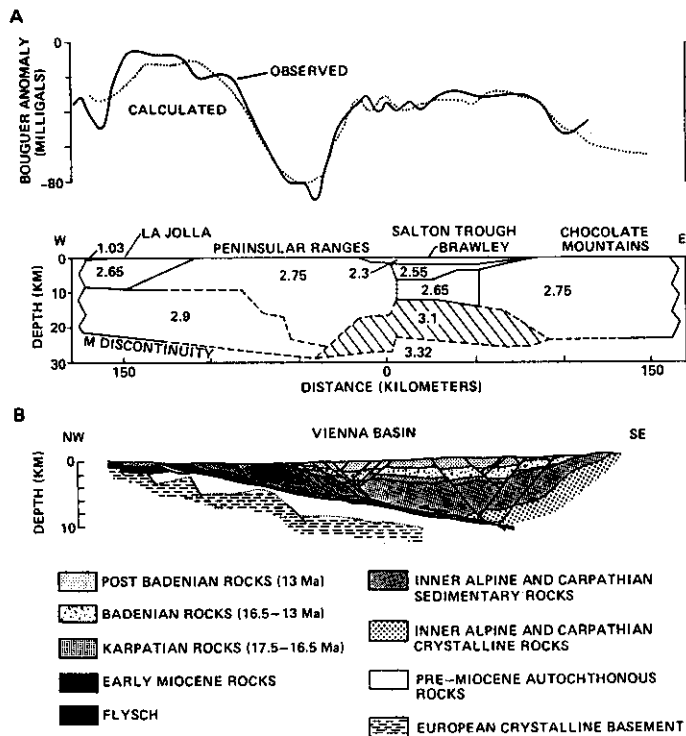
ま深部まで続く場合もあり, “flower structure” が横ずれ断層に固有の断層形態とはいき切れない。

盆地底の形態や構造及び pull-apart basin を画する断層(master fault 及び oblique fault)が地下深部でどのようなになっているかは盆地の形成機構・堆積作用や発達史にも関わる興味ある課題である。近年, 地球物理探査結果の集積にともなって実証的なデータが示されつつある。例えば微小地震の解析から地表断層の雁行配列に対応する震源の不規則性は地下 10km ないしそれ以上まで存在する(Eaton et al. 1970., Bakun et al. 1980., Reasenber & Ellsworth, 1982)。このことは, master faults の深部への延長が少なくともその深さまで続いていることを示唆する。

Christie-Blick and Biddle(1985)は, 深部形態を考慮し, thick-skinned pull-apart basin と



第11図 Flower structure (A and B: Harding, 1985, C: Mandle, 1988)



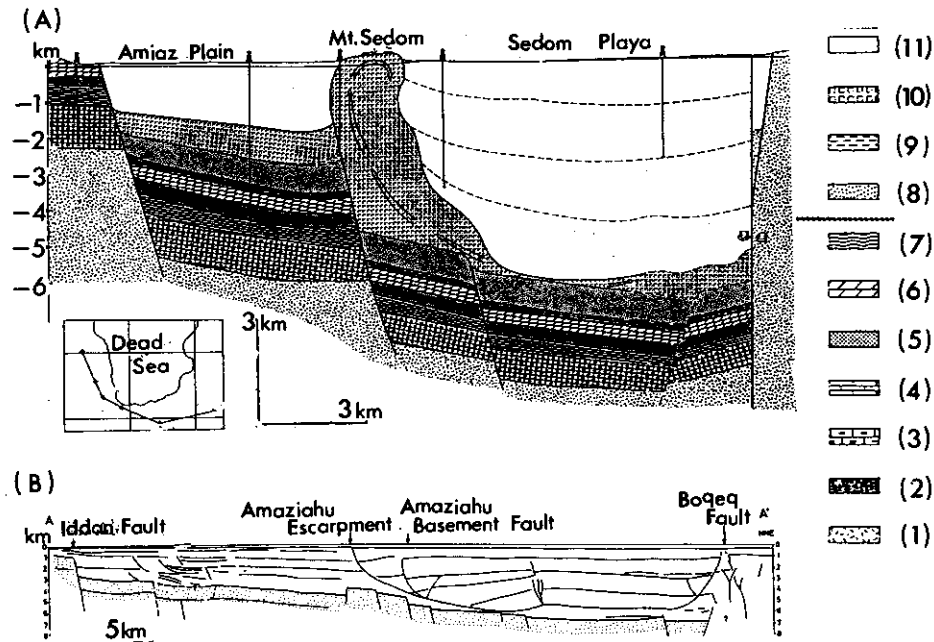
第12図 Thin-skinned 及び thick-skinned pull-apart basins (A: Fuis et al., 1984, B: Royden, 1985)

thin-skinned pull-apart basin を区分し、前者の例としてカリフォルニアの Salton Trough 後者の例としてオーストリアとチェコの Vienna Basin を例示している(第12図)。

また, Martel et al.(1988)は, Death Valley で, ten Brink and Ben-Avraham (1989)は Dead Sea の反射法探査結果から, 盆地基底の構造を明らかにしている。Dead Sea Basin は長さ110km, 幅16km に達する大規模な pull-apart basin で ten Brink and Ben-Avraham (1989)らによる同盆地南半部の反射法探査結果によれば, 盆地南端部で約4 km, 盆地中心部に向けて深くなり, 約7 km に達する。盆地中心の最深部では8-10km に達する可能性がある。盆地長軸方向に沿う断面図で盆地底の形状を見てみると, いくつかの地塁-地溝状のブロック構造を呈する。しかし, これらを境する断層は必ずしも地表部で被覆層を切り master fault に斜交する断層に

対応しているわけではなく, むしろ地表部で master fault に高角で斜交し一部それを切るほどの大規模な断層は, 被覆層内で listric fault となり, 基盤には達しない場合が多い。また, 盆地短軸方向の断面では, master fault は全体としてほぼ垂直に近い急傾斜を示すが, その傾斜の向きは盆地中心だけでなく, 外側に向くものもある。

Arbenz (1984)の deep seismic data の解析などから Dead Sea basin のさらに深い深部構造を見ると南端部を限る oblique fault は北東へ傾斜する幾つかの listric fault からなり, 基盤中の深さ15km 付近で合体してほぼ水平となる。これに対して北半部は南へ傾く緩い flexure をなす。東西の master faults は深さ20km ぐらいまではほぼ垂直でその下は内側(盆地中心部側)に傾斜して合体するように解釈されている (Reches, 1987)(第13図)。



第13図 死海 pull-apart basin の断面 (A: Kashai and Crocker, 1987, B: ten Blick and Ben-Avraham, 1989)

1: Pre-Cambrian, 2: Cambrian, 3: Permo-Triassic, 4: Jurassic, 5: late Cretaceous, 6: Cenoman-Turon., 7: Senonian, 8: Miocene, 9: Upper Miocene (?), 10: Pliocene, 11: Pleistocene (1-7: pre-graben sediments, 8-11: graben fill)

pull-apart basin と堆積作用

pull-apart basin を含む strike-slip basin における堆積相は、他の急激な沈降を示す地溝のそれと本質的にかわるものではない。すなわち、堆積作用の特徴としては、盆地縁辺部の粗粒堆積物と中央部の氾濫原・プラヤ・湖成堆積物、大きな堆積速度、非対称な層序や層相(急傾斜な側に粗粒堆積物、中央部に湖成層や氾濫原堆積物などが分布)、急激な層相の側方及び垂直変化、及び層厚変化などがあげられる(Crowell, 1974.; Hempton and Dunne, 1984)。

Christie-Blick and Biddle (1985) は、strike-slip basins の堆積相の特徴として以下のようにまとめている。なお、下記の Ridge Basin(カリフォルニア)と Hornelen Basin(ノルウェー)は狭義の pull-apart basin には属さない堆積盆である。

1) 堆積盆内部ないし縁辺部における地質学的なミスマッチ

例えばカリフォルニアの San Gabriel 断層沿いの Ridge Basin 南部から Ventura Basin 東部にかけてでは径 1.5m に及ぶようなクラストの構成岩石は、盆地周囲の基盤岩中には見当たらず、master fault の右横ずれ運動によって 35-60km 離れた後背地からもたらされたことが知られている(Crowell, 1982)。

2) 非対称性

堆積相の非対称性は、盆地の側方向と同様軸方向にも著しい。このことは堆積中心の移動をも意味し、例えば死海では、中新世から現世の死海にいたる間に 100km 以上の堆積中心の北方への移動が認められる(Zak & Freund, 1981; Manspeizer, 1985)

3) エピソード的な急激な沈降

横ずれ堆積盆の沈降速度は、多くの地溝や foreland basin の場合よりも大きい。例えば、Ridge Basin では 7 m.y. に 13km (Crowell & Link, 1982)、Vallecito-Fish Creek Basin では 3.4m.y. に 5 km (Johnson et al., 1983)、Ventura Basin では 1 m.y. で約 4 km 沈降している。そしてこの沈降また、偶発的で急に終わることも

ある。

4) 局所的な相変化と不整合

多くの横ずれ堆積盆は地形的な高まりに隣接しているから、盆地縁辺部において粗粒な堆積相を示し、また、急激な側方相変化をする。また、局地的なブロックの垂直運動は、局地的な不整合を生ずる。

5) 同一地域における盆地間の明瞭な差異

地域的な造構規制の違いから同一地域内の堆積盆地間の堆積パターンに明瞭な違いが出てくる。

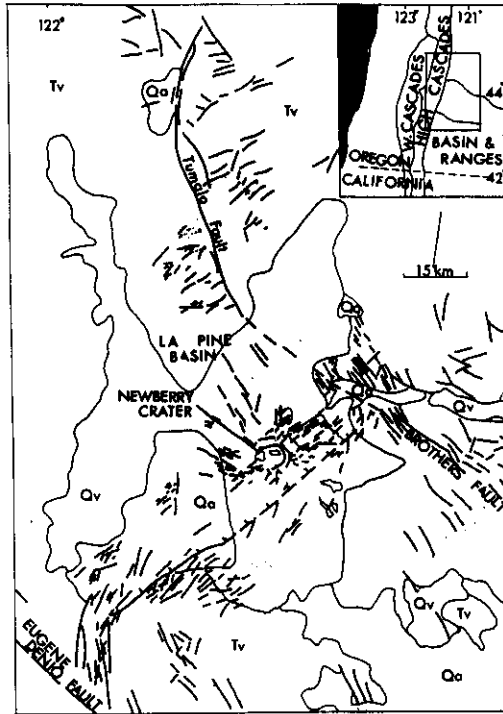
具体的な例としては、カリフォルニアの Ridge Basin (Crowell, 1974; Link & Osborn, 1978)、ノルウェーの Hornelen Basin (Steel & Gloppen, 1980)、スペイン北部の上部石炭紀の盆地 (Heward & Reading, 1980) などの ancient basin があるが、modern pull-apart basin の例としては、Dead Sea Rift (Sneh, 1979)、Salton Basin (Van de Kamp, 1973) や本号で別途後述するように、トルコの Lake Hazar Basin (Hempton et al., 1983) などがあげられる。

pull-apart basins と火山活動

陸域の pull-apart basin の生ずる地域では局部的に地殻ないしリソスフィアの伸長が生じ、その結果、高い熱流量や活発な火山活動が期待されるが、実際には、厚い堆積物によって地下深部の熱やマグマの地表への到達が妨げられるせいか、あまり明瞭ではなく、pull-apart basin と火山活動との関係はよくわかっていない。というよりも 50km 程度以下の盆地形成では heating は早急に終了し、大きな影響を与えない (Pitmann and Andrews, 1985)。ここでは、Salton Sea のような大規模なトランスフォーム境界末端のリフト移行の前段階としての pull-aparting は扱わない。

少数の例外として、トルコ東部の Erzincan Basin とアメリカ・オレゴン州中部の La Pine Basin が知られているが、盆地形成にどのように関与しているかは不明である。前者は master fault 沿いの火山活動で、後者は oblique

PULL-APART BASINの概要



第14図 La Pineの地質略図(Gutmanis, 1989)
 Q_o:第四紀火山岩, Q_o:沖積層, T_v:第三紀火山岩

fault 沿いの火山活動である。

Erzincan Basin については別途後述することにし、ここでは後者について簡単に紹介しておく。

La Pine Basin は、深さ 5 km で、第三紀と第四紀の堆積物や火山岩によって埋積され、NE-SW 方向に長軸をもつ。北東部の master fault は、Brothers-Tumalo Fault、南西部の master fault は、Eugene-Denio Fault で、oblique fault は南東部だけが顕著で Walker Rim Fault と呼ばれている。従って、oblique fault に直交する方向では半地溝状である。この Walker Rim Fault の西側すなわちわずかに盆地内に位置する Newberry Crater は第四紀の楕状火山で中央カルデラを持ち、the Cascade Ranges, the High Lava Plains と the Basin and Range Province の境界近くに位置する。第三紀における master fault の右横ずれが La Pine

Basin の発達する NE-SW 性の伸長領域を規制し、本盆地の主要な発展期は、新第三紀であるが、上述の 3 つの断層とも第四紀の活動の証拠がある。Newberry Crater の位置は、La Pine Basin 形成に伴う断層、特に Walker Rim Fault と Brothers-Tumalo Fault に伴う構造の南方への伸長に規制されている。逆にいえば、La Pine Basin は Newberry Crater の後期更新世や現世の玄武岩や安山岩を含む火山岩類の分布する最も新期の火山活動に関連しているともいえるよう。

問題点

pull-apart basin の形態的な特徴やその造構的な位置についてはかなり明らかとなってきたが、最大の問題である堆積作用との関係がまだ不明である。pull-apart basin が形成されうる

ような伸長条件下であっても、盆地の急激な沈降とそこに運搬される堆積物の供給を可能にするような後背地の隆起、および master fault の横ずれ運動を総合的に説明するモデルは確立されていない。また、さまざまな特徴の比較にあ

たっては典型的な pull-apart basin であるかどうかの再吟味が必要で、どの発達段階にあるかを踏まえて検討する余地がある。

文献略(文献集参照)