

## プルアパート堆積盆の形成機構

### Mechanism for pull-apart basins

宮田 隆夫\*

Takao Miyata

#### はじめに

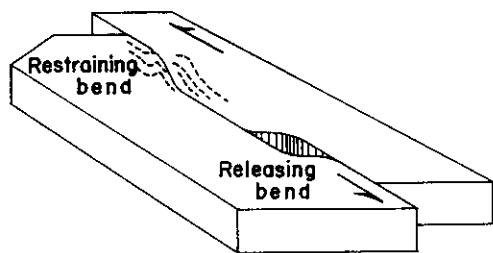
横ずれ堆積盆(strike-slip basin)はトランスフォーム断層あるいはトランスカレント断層(両者を横ずれ断層という (Silvester, 1988))に伴う堆積盆であり, その幅は一般に狭い(< 20km). 横ずれ堆積盆の中で, 横ずれ断層の releasing bend (第 1 図) あるいは releasing overstep における局所的な地殻の引張により形成された堆積盆を pull-apart basin (PAB) と呼んでいる (Biddle & Christie-Blick, 1985 の狭義). これに対して, 横ずれ断層に沿う局所的な地殻引張による堆積盆とする広い定義もあるが, ここでは狭義の PAB を対象に, PAB の発展初期における比較的単純な形成機構(単純モデル)と大きく成長・進化した複雑なもの(進化

モデル)とに分けて説明する. なお, 広義の PAB および PAB の諸特徴については, 加藤 (1991, 本号) を参照されたい.

#### PAB の単純モデル

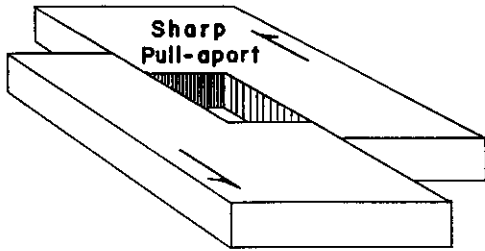
Christie-Blick & Biddle (1985) は, PAB の形成モデルを堆積盆で得られた地質情報・地球物理情報からつくられる経験モデル(empirical model: 例 Crowell, 1974a, b; Aydin & Nur, 1982; Mann et al., 1983; Nilsen & McLaughlin, 1985; Deng et al., 1986) と, リソスフェアの物性および断層形態を比較的単純化し, 計算した理論モデル(theoretical model: 例 Rodgers, 1980; Segall & Pollard, 1980; Guiraud & Seguret, 1985) とに分けている.

Crowell (1974b) は, 右横ずれ断層が水平面上で直線的ではなく, 緩やかに右に曲がる(releasing bend) 場合と, 左に曲がる(restraining bend) 場合に, これらの屈曲部にプルアパートと隆起・変形とがそれぞれ生じ, 前者が堆積盆に, 後者が山地にそれぞれなることを示唆した. 第 1 図は左横ずれ断層の場合を示す. 横ずれ断層の屈曲が鋭角であると, sharp pull-apart (第 2 図) が形成される. 彼はカリフォルニア湾とソルトン・トラフの地質・地球物理の調査結果にもとづいて, PAB の特徴を概念図で初めて示した(加藤, 1990 本号参照). モデル化され



第 1 図 屈曲をもつ左横ずれ断層(Crowell, 1974b を改変). Releasing bend でプルアパートが, Restraining bend で隆起・変形が生じる.

\*神戸大学教養部地学教室  
神戸市灘区鶴甲 1-2-1



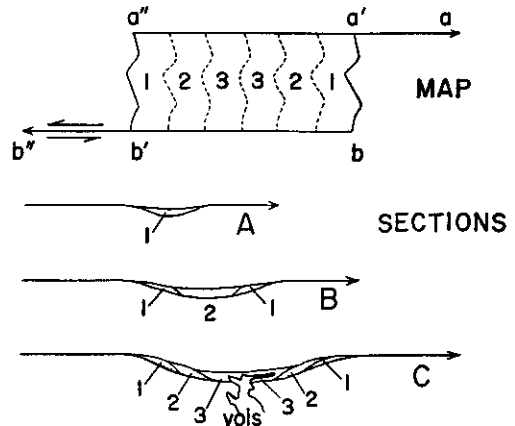
第2図 左横ずれ断層に沿う sharp pull-aport basin (Crowell, 1974bを改変).

たPABはややひし形で、その両側には方向の異なる正断層が発達するが、中央部に spreading center をもち、ほぼ対称な構造形態をもつ(第3図)。彼はPAB形成に伴う地殻引張をリソスフェアの厚さの5-10%と推定した。さらに、Deng et al.(1986)によると、PABはmaster faultの深さ(D)がmaster faults間の幅(S)やmaster faultsのオーバーラップの長さ(O)に比べ十分に大きい場合に形成される。彼らは、PABの形態が $S/O \geq 1$ の場合と $S/O < 1$ の場合に、それぞれ単一の堆積中心をもつ rhombic なタイプと2つの堆積中心をもつ偏長な rectangular なタイプができることを示した。

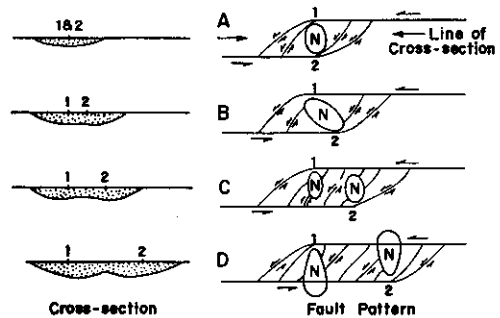
他方、単純なPABあるいは発展初期のPABについて、理論モデルがいくつか示されている(例Rodgers, 1980; Segall & Pollard, 1980; Guirud & Seguret, 1985; Reches, 1987)。そのうち代表的な3つの例を説明する。

(1)Rodgers(1980)は、Chinnery(1961, 1963)の弾性変位理論を用いて、おもに雁行断層の overlap した2次元モデルで releasing overstep における水平面の鉛直変位を計算し、releasing overstepの内側にPABが、master faultsの断層端の外側に隆起部が形成されることを示している。PABの最大深度についてはmaster faultsのオフセットの約10%と試算している。PABはmaster faultsのoverlapの増加(第4図のAからD)に伴って変化し、正断層の形成領域が移動していくので、堆積盆の構造がより複雑になっていく。

(2)Segall & Pollard (1980)は、雁行クラック



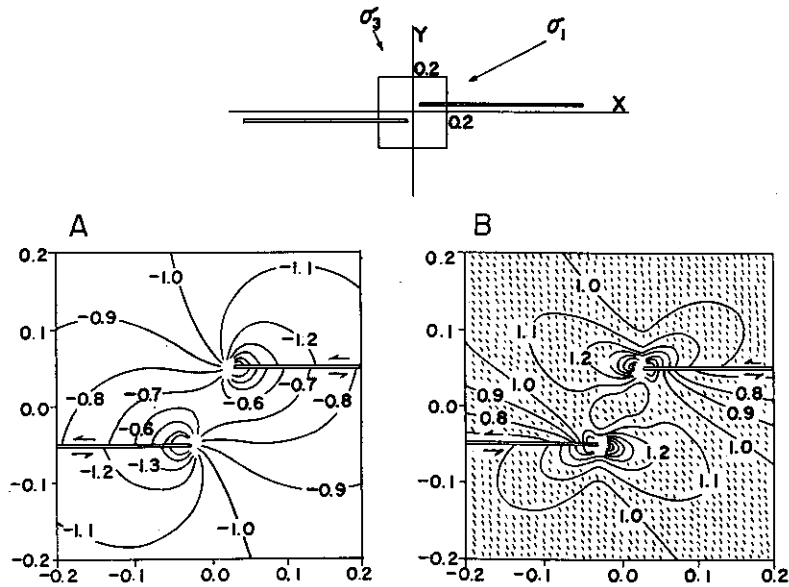
第3図 単純なプルアポート・モデル(古典的モデル) (Crowell, 1974bを改変)。a-a'', b-b'' : トランスフォーム断層, a'-b, a''-b' : 不規則な方向の正断層, 数字 : 形成順序, vols : spreading centerに沿う火山岩。



第4図 プルアポート堆積盆の発達(Rodgers, 1980を改変)。A: master faultsのoverlapない場合、堆積中心に2次的な正断層(N)が、堆積盆の両側に2次的な横ずれ断層が形成される。B-D: master faultsのoverlapがある場合。

(以下、master faultsという)がoverlapしない2次元モデルで、弾性体を用いて、一様な作用応力下でmaster faults周辺の応力状態を計算している。releasing overstepの場合、中間応力 $((\sigma_1 + \sigma_3)/2)$ がmaster faultsのステップの外側では作用応力値より増大( $>1.4$ 倍)し、ステップの内側ではそれが約0.6倍以下に減少することを示した(第5図A)。これはRodgersの結果と類似している。またmaster faultsの先

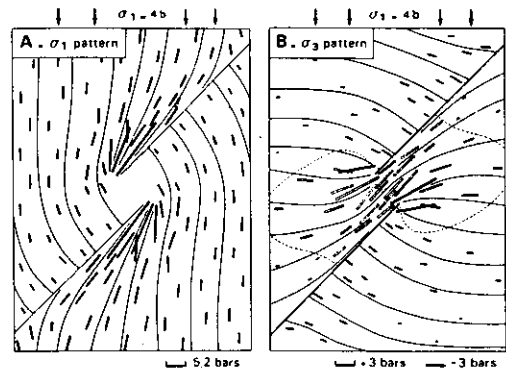
ブルアパート堆積盆の形成機構



第5図 雁行断層付近の応力状態(Segall & Pollard, 1980を改変). 上図は左雁行断層と作用応力の関係を示す. X方向に対して $\sigma_1$ 方向は $30^\circ$ の角度をもつ. 正方形はA図およびB図の位置を示す. A: 中間応力の分布, B: 最大剪断応力の分布. 短線: 最小圧縮主応力軸の方向.

端では、最大剪断応力( $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ )が増大することも示した(第5図B). それらの応力状態のもとで、ステップ間に形成される2次の断層として、次の2つの可能性を取り上げている. 一つはステップの内側に引張り破壊(tensile fracturing)が生じ、引張り破壊の方向と同じ方向に2次的正断層が成長し、master faultsをつなげていく. 他は、剪断破壊(shear fracturing)がステップの内側やmaster faultsの先端に生じ、それが2次的なシンセティック横ずれ断層として成長し、master faults間を連結する.

(3)Liu Xiaohan (Guiraud & Seguret, 1985参照)は有限要素法を用いて、releasing stepにおける応力分布(第6図)を示している. ステップの内側で、最小圧縮主応力はmaster faultsとほぼ平行であり、tensional stressが生じている. 一方、master faultsの断層端の外側では、最大圧縮主応力がmaster faultsとほぼ平行になる. この結果等をもとに、Guirud & Seguretは非対称なreleasing solitary overstep basin modelを



第6図 雁行断層付近の応力分布(Guiraud & Seguret, 1985). A: 最大圧縮主応力の分布, B: 最小圧縮主応力(正と負)の分布

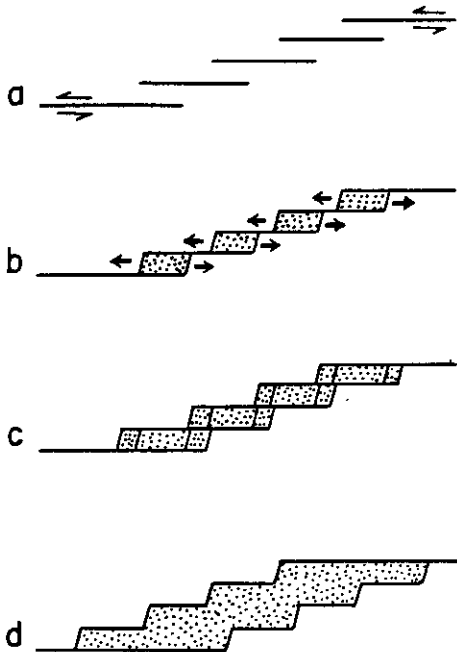
示した.  $\sigma_1$ の方向とmaster faultsとのなす角度が $45^\circ$ であり、若干大きいために、そのモデルでは堆積盆の形状がrhomboidalではなく、sharpである.

上記の理論モデルは、横ずれ雁行断層におけ

るPABの形成をシュミレーションしたものであり、横ずれ変位に伴う堆積盆の形成過程を解析するには有益である。しかし、それらのモデルは長期にわたる変形の進行や地質体の不均質性、非弾性的挙動、深部への応力状態の変化、深部での断層形態の変化、より複雑な形状をもつ断層帯に対して、答えるにはいたっていない。

### PABの進化モデル

最近の経験モデルは、前述のCrowell modelを踏襲しながら、単一の横ずれ断層あるいは横ずれ雁行断層の変位の増大に伴い発展し、大きく成長した複雑な堆積盆についての形成機構を議論している(Aydin & Nur, 1982; Mann et al., 1983; Crowell, 1985)。Aydin & Nurは横ずれ雁行断層の変位が増大するに伴い、おのおのPABが合体(coalescence)してより大きなPABに成長する(第7図)ことを提唱し、合体したPABは長さとともに幅も大きくなることを指

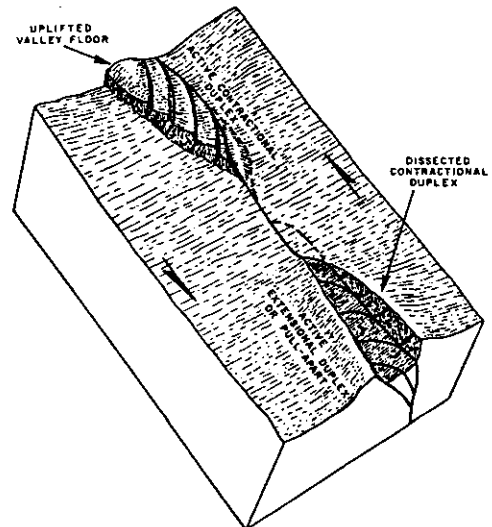


第7図 横ずれ雁行断層の変位の増大に伴うプルアパルト堆積盆の合体(Aydin & Nur, 1982を改変)。

摘している。一つのPABの成長・拡大については、次の3つの考え方が提唱されている。

(1) spreading centerの拡大によるPAB: Crowell(1985)によると、ソルトン・トラフのトランスフォーム断層に沿うPABは、堆積盆の中央部にひし形のspreading centerをもっており、spreading centerが拡大するために、その両側にほぼ同じような堆積盆が成長する。同様に、カリブ海のトランスフォーム断層に沿う長さ1300kmもの細長いケイマン・トラフがある(Mann et al., 1983)。この場合、堆積盆の幅(separation)は100-150kmもあり、PABとリフティングに伴う堆積盆との区別が問題となってくる。

(2) strike-slip duplexによるPAB: 横ずれ断層のreleasing fault bendには、横ずれ変位によるextensional strike-slip duplexが発達する(Woodcock & Fischer, 1986)。strike-slip duplexが段階的に形成されると、それに伴い堆積盆が一方方向に成長・移動する。例として、東太平洋中央海膨北部におけるClipperton transformに沿うPAB(Rarany & Karson, 1989, 第8図)や中央構造線に沿う和泉堆積盆(Miyata, 1990)があげられる。



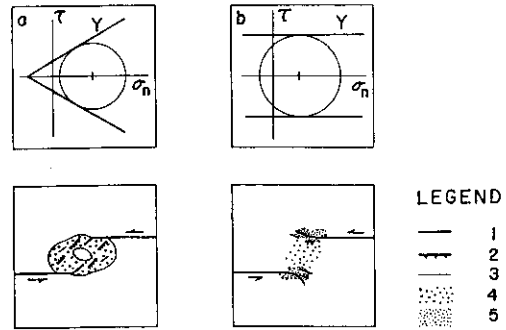
第8図 海洋トランスフォーム断層に沿う strike-slip duplexを示す概念図(Rarany & Karson, 1989)。

(3) normal fault collapseによるPAB:横ずれ断層のreleasing bendあるいはreleasing overstepで段階的に派生した正断層と、それが収斂する地下深部の低角度なextensional detachmentとにより、PABが成長・拡大する(例 Manspeizer, 1985; Reches, 1987)。

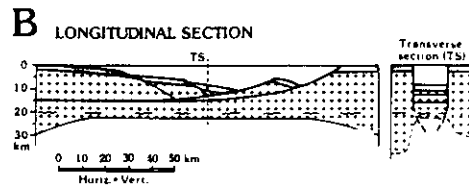
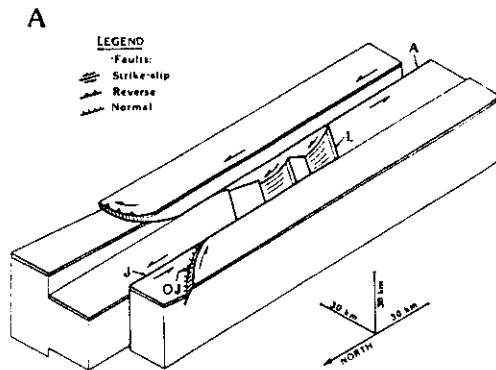
Reches (1987)は、brittleな物質とductileな物質について、ステップ間の変形を検討し、前者は引張強度が小さく、正断層と横ずれ断層からなる斜めずれ断層が中間応力の小さい領域に成長するのに対し、後者は引張強度と圧縮強度とが等しくなり、逆断層と横ずれ断層からなる斜めずれ断層が大きな最大剪断応力の領域に成長することを示した(第9図)。またductileな物質では、2次の断層がmaster faultsの外側に成長し、master faultsの内側は2次の断層の形成を伴わず沈降していく。このように物質のレオロジカルな性質の違いによって、彼はPABの変形様式が異なることを指摘している。この様な観点から、Dead Sea Basin(第10図)は地下15kmのdetachmentに収斂するlistric normal faultsにより発達したと考えられている。しかし、第10図に示すDead Sea Basinのモデルは地下の地震波のデータとは必ずしも一致しておらず(ten Brink & Ben-Avraham, 1989)、まだ問題を残している。

おわりに

PAB形成のモデルをみてきたが、releasing bendあるいはreleasing overstepにできる2次の断層は、正断層、横ずれ断層あるいは両者の成分をもつ斜めずれ断層なのか、見解が異なっている。これは、2次の断層がシンセティック横ずれ断層(あるいはリーデルシア)なのか、リストリック正断層なのかという問題でもある。いずれにしても、2次の断層はPABの発展段階や断層で接する地質体のレオロジー、地表・深部での断層形態と密接に関係する問題であり、今後、形成規模も時代も異なるPABの事例研究を蓄積するとともに、深部構造に関する地球物理情報(重力、マルチチャンネルの地震波、



第9図 横ずれ断層のオーバーステップにおける変形構造(Reches, 1987)。a:理想的な brittle material, b:理想的な ductile material, 1:横ずれ断層, 2:逆断層と横ずれ断層からなる斜めずれ断層, 3:正断層と横ずれ断層からなる斜めずれ断層, 4:沈降域, 5:隆起域。



第10図 Dead Sea Basinの断層構造の概念図(Reches, 1987)。A:ブロック・ダイアグラム, L: listric faults, A: Arava fault, J: Jordan Valley fault, OJ:Aoj'a fault system, B:地質断面図。

地殻レオオジーなど)とも合わせて検討していく必要がある。

**謝辞** この研究の一部は文部省科学研究費(一般研究C, 研究課題番号01540629)によった。加藤碩一博士(地質調査所)にはPABについては有益な助言を頂いた。構造研事務局の方々には粗稿の校閲をして頂いた。記して感謝します。

**文献**: 本号の文献リストにあげられている文献は大部分省略した。

Chinnery, M.A., 1961: The deformation of the ground around surface. *Bull.seismol. Soc. Am.*, v.51, 355-372.

Chinnery, M.A., 1963: The stress changes that accompany strike-slip faulting. *Bull. seismol. Soc. Am.*, v.53, 921-932.

Crowell, J.C., 1985: The recognition of transform terrane dispersion within mobile belts. In Howell, D.G., ed.: *Tectonostratigraphic Terranes of the Circumpacific Region*, 51-61, Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Houston, Texas.

Guiraud, M. and Seguret, M., 1985: A releasing solitary overstep model for Late Jurassic-Early Cretaceous (Wealdian) Soria strike-slip basin (Northern Spain). In Biddle and Christie-Blick, eds.: *Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation*, Soc. Econ. Paleont. Miner. Spec. Publ., no.37, 159-175,

Tulsa.

Manspeizer, W., 1985: The Dead Sea Rift: impact of climate and tectonism on Pleistocene and Holocene sedimentation. In Biddle and Christie-Blick, eds.: *Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation*, Soc. Econ. Paleont. Miner. Spec. Publ., no.37, 143-158, Tulsa.

Miyata, T., 1990: Slump strain indicative of paleoslope in Cretaceous Izumi sedimentary basin along Median tectonic line, southwest Japan. *Geology*, v.18, 392-394.

Nilsen, T.R. and McLaughlin, R.J., 1985: Comparison of tectonic framework and depositional patterns of the Hornelen strike-slip Basin of Norway and the Ridge and Little Sulphur Creek strike-slip Basins of California. In Biddle and Christie-Blick, eds.: *Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation*, Soc. Econ. Paleont. Miner. Spec. Publ., no.37, 79-103, Tulsa.

Rarany, I. and Karson, J.A., 1989: Basaltic breccias of the Clipperton fracture zone (east Pacific): Sedimentation and tectonics in a fast-slipping oceanic transform. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v.101, 204-220.

Sylvester, A.G., 1988: Strike-slip faults. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v.100, 1666-1703.