

PULL-APART BASIN の形成過程

Evolution of pull-apart basin

加藤 碩一*

Hirokazu Kato

Abstract: This paper refers the formational process of pull-apart basins, which is divided into three stages: the initiation stage of pull-apart basins, developed stage and extinction stage. The developed stage can be subdivided into early, middle and late substages. Though most of pull-apart basins whether they are modern or ancient ones do not always evolve in the simple process like this, and in fact some basins has extremely complex history, this classification of stages is useful to understand the development of pull-apart basins.

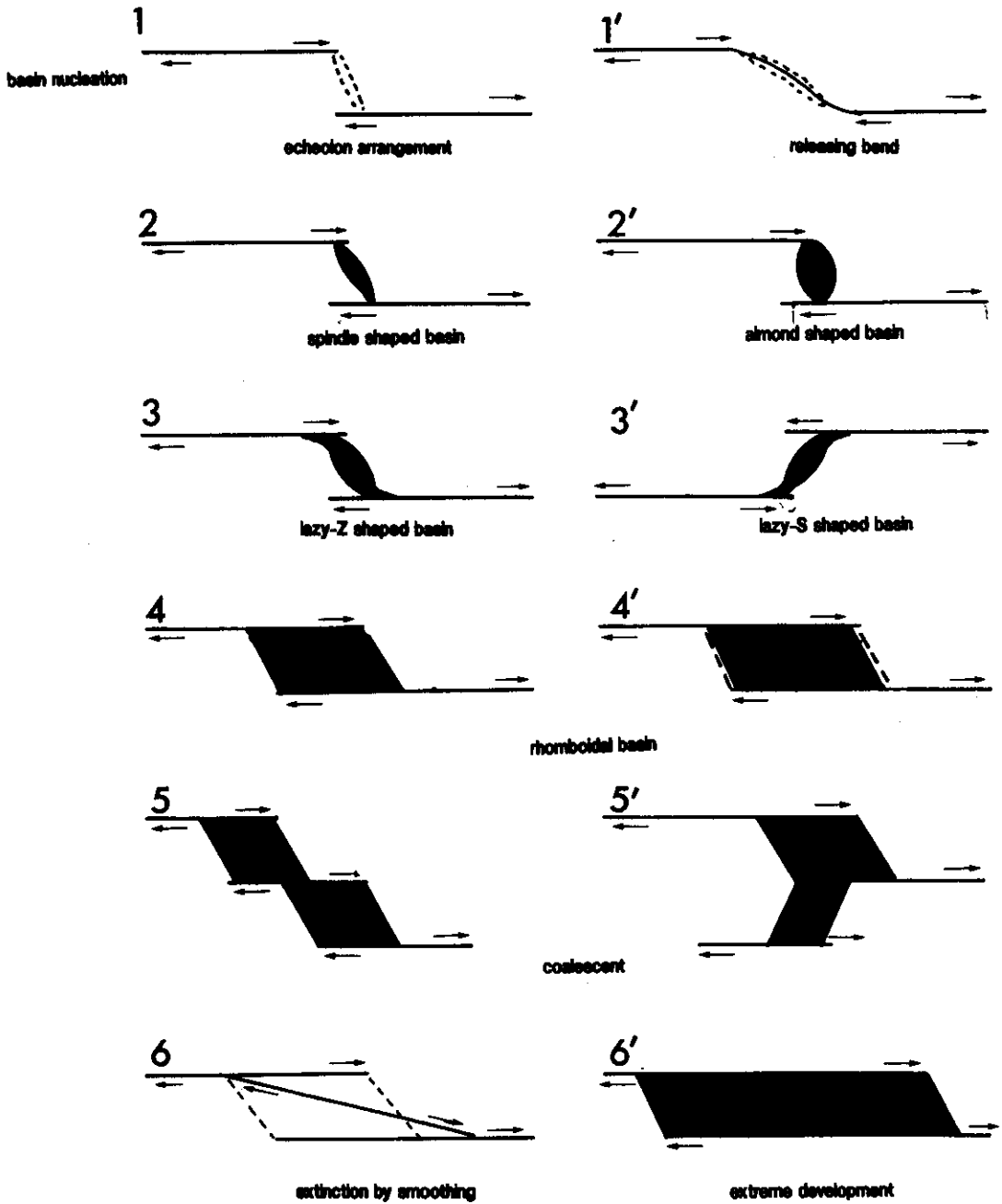
はじめに

pull-apart basin を含む strike-slip fault basin は、局地的な地殻の伸長や短縮によって形成される。しかも数千—数百万年間のタイムスケールにおいては、隣接ブロックの運動の変化によって伸長・短縮を交互に受けたり、一方向ないし一部分で伸長、他で短縮を受けることもある。また、雁行する横ずれ断層セグメント間の伸長場において形成される pull-apart basin においても水平方向の引張だけでなく、急激な堆積による厚い堆積物によって示される垂直方向の変位・運動を伴う。これはまた後背地の急激な浸食・すくなくとも相対的な隆起とも関連する。また、堆積盆の発達に伴う堆積中心の移動も見られる。

さらに最も単純な strike-slip basin (Christie-Blick and Biddle 1985., Crowell 1974a, b の pull-

apart hole や sharp pull-apart basin に当たる) においては境界ブロックはねじれに対して剛体的であり、端部でのみ変形する。そして、沈降は断層の広域的な走向に平行な方向にのみ伸長することによる。しかし実際には、master fault のパターンや地殻のレオロジカルな性質の違いによってその発達は種々の影響を受ける。このように他の地質構造と同様に pull-apart basin も必ずしも単純な形成過程を示すものではなく、これらを統一的に説明できるモデルはまだ呈示されていないが、フィールドでの各種の pull-apart basin の事例研究や不完全ではあるがモデルの設定及び実験・若干のシミュレーションおよび定性的な解析を通して検討が進められているのが現状である。ここでは pull-apart basin の形成過程を幾つかに区分して、各形成過程における共通性に注目しながら以下にレビューを試みる(第1図)。

*地質調査書



第1図 pull-apart basin の模式的形成過程

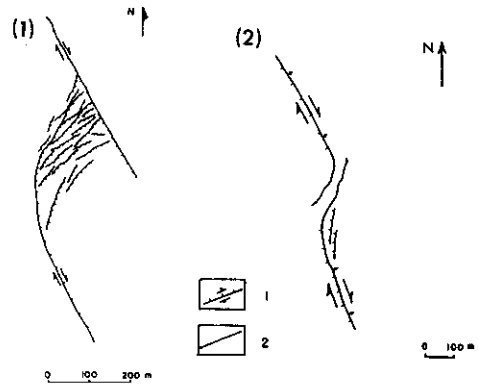
1・1'：盆地発生期，2-3'：盆地發展初期，4・4'：盆地發展中期

5・5'：盆地發展後期，6・6'：終期-消滅期

pull-apart basin の発生期

(1) Pull-apart basin 発生の必要条件

overlap していない平行断層セグメントが存在しても両者間の距離すなわち separation が大きすぎておたがいに干渉しない場合(例えば、セグメント間の距離—separationが、セグメントの長さよりも大きい場合)には、各々のセグメントが独立して発達し平行断層が発達するだけで両者間に pull-apart basin は生じない。この separation の限界値は第一義的には、断層の長さとな一般的な応力系による(Aydin and Nur, 1985)が、これは地下深部(基盤)における主横ずれ断層とその末端である地表部(被覆層)の断層セグメントの位置関係の問題と等価である。もちろん被覆層の断層形成に関する物性も関与するがこれらの点に関する十分な考察はまだなされていない。separation の限界値内に位置する平行断層セグメント間では、そこが引張領域にあるような断層の変位センスの配置があれば、pull-apart basin が生じる可能性があるが、それだけでは充分ではない。たとえば1931年に中国北西部で生じたFuyun地震(M8.0)に伴う地震断層は右横ずれで最大水平ずれ変位14.5mを示し、全長180kmに及ぶが、地表では長さ数100m程度の雁行セグメントからなる。これらのうちpull-apart basin の形成が期待される配置をなしている場合でも、第2図に示されているようにmaster faultに斜交する落差が一方のみ卓越する階段状の正断層が数多く発達する場合や、master fault 末端からそれに斜交し互いに並走する断層が発達しmaster faults をなす断層セグメントのそれ以上の発達を止めてしまう場合などがあり、いずれもoblique faultとはならずpull-apart basin は形成されない(Deng and Zhang, 1984)。これらの例が数10km オーダー以上の大規模な盆地形成に関与する断層セグメントにあてはまるかどうか検討されていないが、pull-apart basin の形成には、たんに水平方向の応力配置だけでなく、盆地形成想定域の沈降と急激な堆積物の集積をさせるような後背地の隆起を可能にする三次元



第2図 1931 Fuyun地震の断層セグメント(Deng and Zhang, 1984)

(1)セグメント間に階段状正断層が発達する例

(2)セグメント末端の急激な走向変化の例

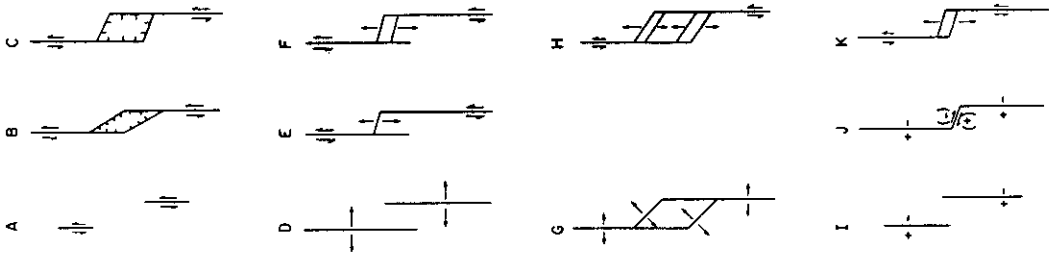
1: 東傾斜で逆断層成分を示すもの、2: 正断層または引張クラック

的な応力場を考察する必要がある。

さて、pull-apart basin が形成される場合でもセグメントはpull-apart basin 以前から雁行するstrike-slip faultである場合と雁行するdip-slip faultや節理がstrike-slip faultに転化する場合など形式的には幾つか考えられるが(第3図)、節理やextension fractureが転化するケースは極小規模な露頭規模のものは別にして、数10km オーダーの盆地の形成を可能にするとは考えにくい。基本的には、right-stepping right lateralないしleft-stepping left lateralな配置をする横ずれ断層セグメントによって形成される。

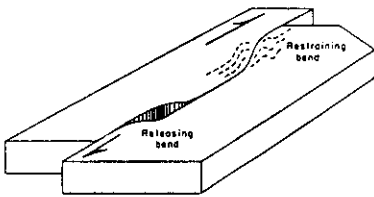
(2) pull-apart basin 発生のタイプ

Crowell(1974)は長大で全体として直線的な横ずれ断層が局所的に緩くカーブすると、変位の進行につれてreleasing bendとrestraining bendが形成され、前者にはpull-apart basinが発達することを示唆した(第4図)。また、pull-apart basin 発生期においてMann et al. (1983)もreleasing bendの形成が重要であることを強調し、様々なtectonic setting下で可能であることを示した(第5図)。この場合いわゆる



第3図 pull-apart basin 発生期の模式例(Aydin and Nur, 1985)

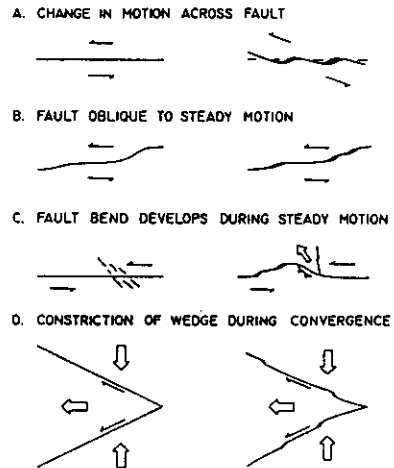
- A) Laterall propagation of non-colinear shear faults
- B, C) Formation of stepovers and pull-apart basins
- D) En echelon joints, E) Initiation of horizontal slip across the en echelon joints and formation of a diagonal joint connecting the two faults, F) Pull-apart opening as horizontal slip increases, G) En echelon joints connected by two diagonal joints at the closer tips of the en echelon joints, H) Occurrence of horizontal slip and formation of two openings, I) En echelon dip-slip faults connected by a shorter dip-slip fault or a strike-slip fault, K) Formation of pull-apart basin as a result of reactivation of dip-slip faults as strike-slip faults.



第4図 右横ずれに伴う double bends (Crowell, 1974)

oblique fault は master fault と同様な横ずれ成分の卓越した断層となる。

ハイチの Enriquillo-Plantain Garden Fault Zone 沿いでは pull-apart basin に発達すると考えられる left-stepping 配列をする 4 つの releasing bend がある(第6図)。separation は 0.5km 以下で oblique segment と master fault のなす角度は 30-40° である。master fault の走向は数度異なり完全に平行ではない。西側の 3 つの盆地では沖積堆積物及び沖積扇状地堆積物があるが東端の盆地は隆起山塊上にあり堆積物はない(Mann et al., 1983)。この場合広域応力場のスリップベクトルの方向と pull-apart basin の発達方向は異なる。他の pull-apart basin 発生 of 重要な前提は、a sharp bend (Crowell, 1974)すなわち、雁行する横ずれ断層



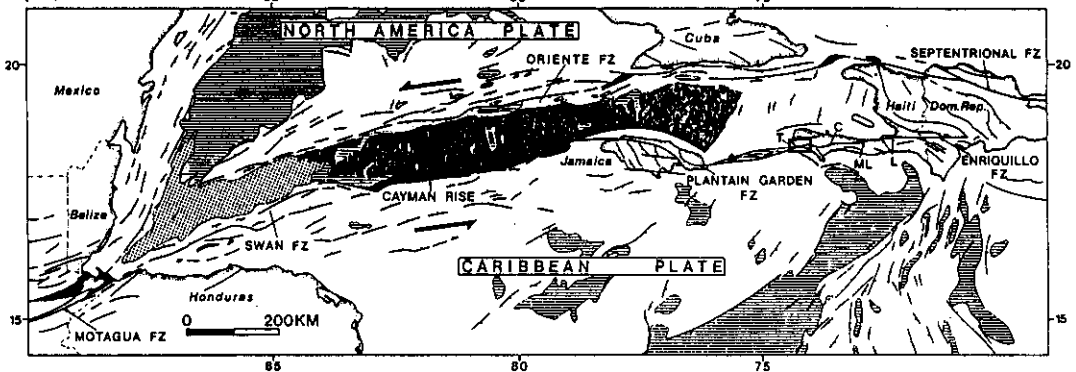
第5図 プレート間のスリップベクトルと横ずれ断層のトレースの間に生ずる pull-apart basins 発生を可能にする divergent のメカニズム(Mann et al., 1983)

(master fault) に伴う pull-apart basin 発生である。この場合 oblique fault は正断層成分が卓越することが期待され、暫定的に次のようなタイプ分けができる(第6図)。

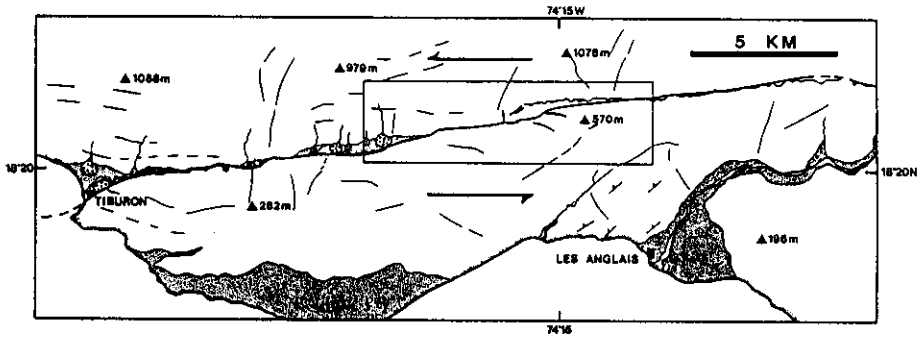
第1のタイプは、片方の master fault の活動が releasing bend に進行していきそれと斜交す

PULL-APART BASINの形成過程

(1)



(2)



第6図 (1) 北米—カリブプレート境界の左横ずれに伴う active pull-apart basins (Mann et al., 1983 modified from Case and Holcombe, 1980)
 L: Leogane 南方の断層セグメント, ML: Mirogoane Lakes, C: Clonard Basin, T: Tiburon 断層セグメント
 (2) Enriquillo-Plantain Garden Fault Zone 沿いの left-stepping releasing bends (Mann et al., 1983)位置は(1)の T.

る正断層 (Reches, 1987の cross fault) ないし extension fracture を形成し, 他の master fault の活動に転移し, さらに master fault の横ずれの進行に伴って引き離され盆地縁を画する oblique fault になるケースである. この時期の pull-apart basin のアナロジーとして, いわゆる小構造にみられる dilatational (fault) jog (Sibson, 1985, 1989) があげられる (第6図). d, e 及び f はこのタイプに相当する. このタイプは, 次の段階では lazy S または lazy Z タイプの pull-apart basin に発展する. また, 発展段階にある pull-apart basin で master fault の変位量が著しく異なる場合 (例えば Death Valley)

など発生期の形成機構はこのタイプなのかも知れない. しかし, Gamond (1987) によって紹介された Xiaohan (1983, unpublished) の石灰岩中のスティロライトと雁行配列する master fault に相当する横ずれ破断との関係を見ると, 初期には, 明確な oblique fault は生じず, master fault が overlap する領域に多くのスティロライトが形成され, それぞれ master fault と高角度で斜交する. この領域が pull-apart basin の形成領域である. そして後期になって雁行配列する master fault に相当する横ずれ破断をつなぐ cross fault に相当する破断が形成される. つまり, みかけ上の cross fault は pull-apart basin

発生期に生ずる oblique fault と後述するように pull-apart basin 消滅期に発生する斜交断層の両者を意味するから、ここでは cross fault は後者の意味で用いる。

第2のタイプは、master fault 端部付近に無数の横ずれ断層ないし shear fracture 及び extension fracture が相互に蜂の巣状に発達し、連結して、全体として rhomboidal 状になって雁行する master fault 間を繋ぐものである。これは力学的なモデルとしては第1のタイプと等価である。現実の地震時の雁行横ずれ地表断層と余震分布にはこの例が見られる。例えば Sibson (1985) は、San Andreas Fault 沿いの 1966年 Parkfield 地震 (M_L 5.5)、1979年 Coyote 地震 (M_L 5.9) 及び 1979年 Imperial Valley 地震 (M_L 6.6) で余震が master faults 間に rhomboidal に分布し、その大部分の発震機構が横ずれ断層に対応することを示している (第7図)。

第3のタイプは、master fault の横ずれの進行に伴って、master fault 端部から oblique fault が発生し、ついには master fault を連結し、盆地縁を画していくケースである。

Segall and Pollard (1980) は、二次元弾性体において雁行する master fault 間の相互作用的な応力場の解析を行った (第6図)。平均主応力 $(\sigma_1 + \sigma_2)/2$ は master fault の内側すなわち pull-apart basin 側に小さくなり、最大剪断応力 $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$ は、master fault 端部で最大となり、外側へわずかに増加する。Rodgers (1980) も二次元弾性体において、master fault の応力場への影響をかさねあわせる手法を用いて解析しほぼ同様の結果を得ている。

Hempton and Neher (1986) は left lateral, left-stepping な master fault を想定した粘土モデル実験を行い、破断の発達や沈降の進展を検討した。破断のパターンは上記の理論解よりもはるかに複雑で、Riedel shear, conjugate Riedel shear, tension gash の発達領域は変形の進行につれて広がる。conjugate Riedel shear は反時計回りに回転しながら伸張し S 字状をなす。Riedel shear は時計回り及び反時計回りに回転するが、前者は tension gash に発展していく。

また、tension gash は Riedel shear, conjugate Riedel shear の合する所でも形成される。変形した粘土中の歪のコンターは雁行配列した master faults 間のステップオーバーした領域で非対称な Z 字状を呈する。変形の初期段階では、歪は変形が拡大進行していく領域全部に分布するが、後期段階では幅の狭い中央ゾーンに集中分割する。

Reches (1987) は、媒質が brittle な場合と ductile な場合について検討した。brittle な媒質は、引張強度が小さく、ductile な媒質は引張強度と圧縮強度が等しい。brittle な媒質では、正断層と横ずれ断層からなる oblique fault が平均主応力のより小さい領域に進行し、ductile な媒質では、逆断層と横ずれ断層からなる oblique fault が大きな最大剪断応力の領域に進行する。従って後者の場合、oblique fault は master fault の外側に進行していくことになり、master fault 間に沈降域は形成されるものの明瞭な rhomboidal の形状は示しにくい。Reches (1987) は、window putty を用いた模型実験を行い上述の予想を確かめたが、その1つの実験結果では、まず最初に、overlap した master fault 間に非断層性のくぼ地が形成され、断層の変位の進行に伴って、そのくぼ地の真ん中に引張破断を生じ、沈降と同時に引張破断が開口していった。

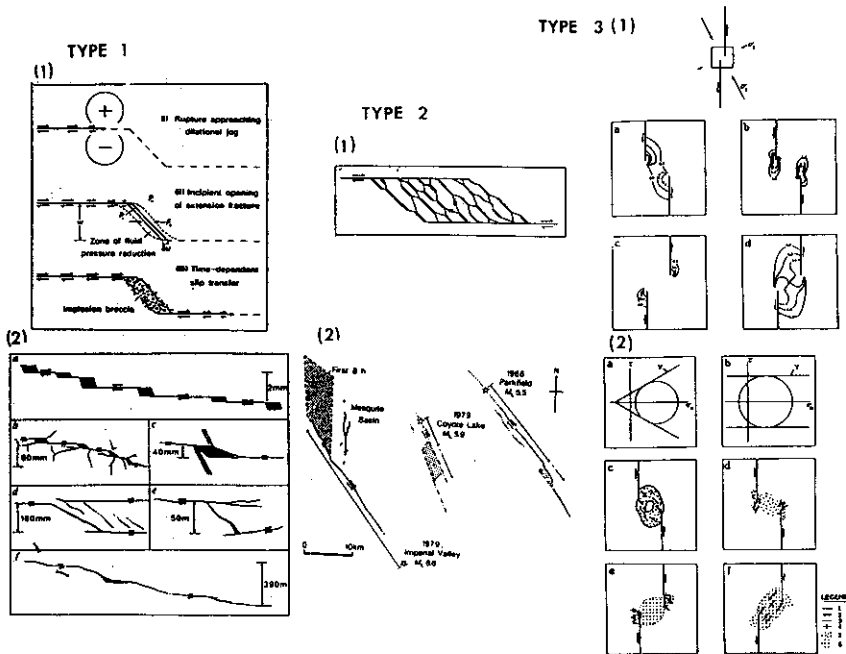
以上の実験や理論的研究は、モデルを単純化して設定してあり (master fault は平板状、平行で垂直、地殻は均一で線型弾性を仮定など)、自然の例とモデルとの間の相似率を考慮していないから、どれがより現実的なモデルなのか現状では判断しがたい。また、これらのタイプを区別することは実験やシミュレーションの初期条件として設定する場合は別にして、現実の pull-apart basin においては困難であり、今後の課題として残されている。

pull-apart basin の発展期

(1) 発展初期

master fault にオーバーラップがほとんどな

PULL-APART BASINの形成過程



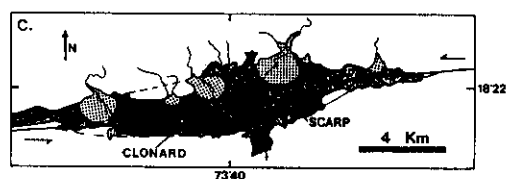
第7図 pull-apart basinsの発生機構

- Type 1: (1) Schematic representation of a dextral rupture with fields of compression (+), and dilatation (-) at the rupture tip en-countering a dilatational jog consisting of a single linking extension fracture (Sibson, 1985)
 (2) Dilatational jogs in various rocks on a range of scales from natural fault systems. Black areas represent infillings of hydro-thermal minerals or cemented breccias (See Sibson, 1985)
- Type 2: (1) Mixed extensional-shear fracture mesh model linking echelon fault segments across a dilatational jog (Sibson, 1985)
 (2) Seismotectonic sketches illustrating the geometry of strike-slip earthquake ruptures within the San Andreas Fault (See Sibson, 1985)
- Type 3: (1) The local stress field near a step between two left-lateral faults due to slip along the faults. Upper diagram indicates general geometry, σ_1 and σ_2 are maximum and minimum compressive stresses, respectively; a. Contours of reduced mean stress near a dilatational jog, b. Contours of increased shear stresses near a dilatational jog, c. Contours of reduced mean stress near anti dilatational jog, d. Contours of increased shear stresses near anti dilatational jog (Segall and Pollard, 1980)
 (2) Predicted structures at dilatational and anti dilatational jogs.
 a. Yield envelope of an idealized brittle material
 b. Yield envelope of an idealized ductile material
 c and e. Predicted structure of a dilatational jog and anti dilatational jog, respectively, in a brittle material
 d and f. Predicted structure of a dilatational jog and anti dilatational jog, respectively, in a ductile material
 1: strike slip fault, 2: reverse-strike-slip fault, 3: normal strike-slip fault, 4: fold axis, 5: subsidence area, 6: uplifted area

い時期の典型的な pull-apart basin の形態は almond-shaped または, spindle-shaped とでも称される幅が狭くみかけの盆地の長軸が master fault に斜交する盆地をなす。ここではこれを pull-apart basin の発展初期という。この場合 master fault 間のオーバーラップはない。

例えば、長大な剛体プレート間の横ずれ境界に沿うこの型の pull-apart basin としては、北米プレートとカリブプレート間の左ずれを示す Enriquillo-Plaintain Garden Fault Zone に沿う Clonard Basin (Mann et al. 1983, from Johnson and Hadly, 1976, 第 8 図) や背弧の横ずれ断層系に沿うスマトラの Siabu Basin (Tija, 1977) などがあげられる。

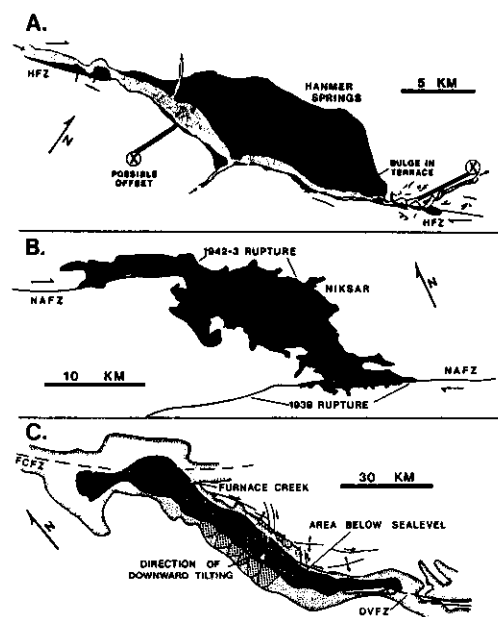
さらに、これよりやや進んだ段階の例として、左横ずれの master fault に伴う lazy S タイプ、右横ずれの master fault に伴う lazy Z タイプがあり、master fault が非平行でその separation が 10km の場合特に顕著に発達することが期待される (Mann et al., 1983)。このタイプの盆地では沖積被覆層は master fault と 30-50° で斜交する oblique fault によって切られていない例がほとんどであるが、現在では発展後期にある Cayman Trough (第 5 図) では、oblique fault の形成は、master fault のオーバーラップのほとんどない盆地の opening 初期と考えられている。また、この時期は master fault に沿って分布する沖積被覆層によって盆地の形状が誇張されている。Mann et al. (1983) の言うように次の段階の rhomboidal basin への漸移段階であるとしても、必然的なものではなく、発展初期の pull-apart basin のバリエーションの 1 つとみ



第 8 図 発生期の spindle (almond) shaped pull-apart basin の例
Clonard Basin, Haiti (Mann et al., 1983)

なすべきで、almond-shaped または, spindle-shaped basin から直接 rhomboidal basin へ移行するものもある。

lazy Z タイプの例としては、ニュージーランドの Hope Fault Zone 沿いの Hanmer Basin (Freund, 1971) やトルコの北アナトリア断層に沿う Niksal Basin 及びカリフォルニアの Death Valley などがあげられるが (第 9 図)、次にのべるように各盆地間で若干の相違点がある。Hanmer Basin では、第四紀の盆地堆積物内の断層崖は多かれ少なかれ盆地端部を規定しているが、oblique な断層崖は、盆地東端部に発達するのみである。また、ここには、第四紀の段丘中に buldge が発達し、非平行な master fault 間での盆地の opening に起因する overlap 領域として解釈されている。右横ずれの offset は 19km (Freund, 1971) - 20km (Freund, 1974) である。しかし、盆地の長さは 13km である。一般には、盆地の長さは断層の横ずれ変位量より大きいのにたいして逆の関係にある。このこと



第 9 図 発生期の lazy Z-shaped pull-apart basin の例
A: Hanmer Basin, New Zealand (Freund, 1971)
B: Niksal Basin, Turkey (Seyman, 1975)
C: Death Valley, U.S.A. (Hooke, 1967)

から master fault である Hope Fault の盆地南縁部における曲がり、後生的なもので、Hope Fault は初生的には直線的であったとする意見 (Freund, 1974) もある。Niksal Basin も oblique な断層崖によって 2 分されてはおらず (ただし正断層が伏在すると推定されているが沖積層に被覆されている)、master fault はほぼ平行であるが、1939 及び 1942-3 年の地震断層が master fault の延長上で盆地堆積物内を通る点が他と著しく異なっている。もし、地震断層を master fault の延長部分とみなすならその overlap は約 20km となり、master fault に overlap がほとんどない時期の pull-apart basin としての lazy Z タイプとしては矛盾する。あるいは、master fault の変位の成長が盆地の拡大より早いのかかもしれない (Mann et al., 1983)。しかし、こうした点からも前述したようにこのタイプは almond-shaped または、spindle-shaped basin と (master fault の overlap を除けば) 本質的には異ならないと思われる。Death Valley では、前二者と異なり盆地東端及び中央部を顕著な右横ずれを示す oblique fault が発達し沖積扇状地や volcanic cone が変形している (Hill and troxel, 1966; Hooke, 1972)。

いずれにしても発展初期の盆地の形状は、沖積層に覆われているため厳密に決定しがたく例えばニュージーランドの Hope Fault Zone に沿う modern pull-apart basin の 1 つである Glynnwye Lake Basin の長さとは幅は、おのおの 300m, 90m (Aydin and Nur, 1982), 2,000m, 600m (Freund, 1971); 1,000m, 600m (Clayton, 1966) と著しく異なり、またこの時期の pull-apart basin の形状は、当然 master fault の overlap よりも separation の方が大きいから (実際には overlap はほとんどないのが普通)、盆地の幅の方がその長さより大きいことになる。従って、後述するような典型的な pull-apart basin の形状の議論からは除外すべきである。Segall and Pollard (1980) の解析的研究によれば、master fault 間にオーバーラップがなくむしろ両者がその長さの 1/10 程度離れている場合には、master fault とその間に形成される伸

張性の構造とのなす角は 45 度以下であり、また、オーバーラップが separation 程度の大きさならその角度は 55-60° 程度となることが示されている。しかし、この解析は、変形のごく初期に限定された物性条件下で成り立つもので野外の事例との直接の比較は難しく、この時期の盆地形状の議論には向かない。

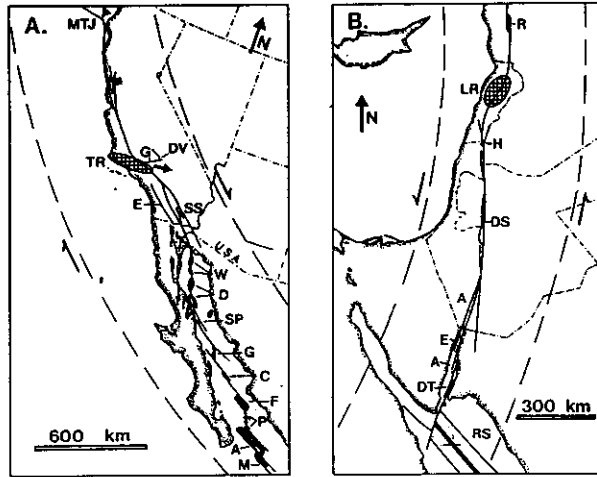
(2) 発展中期

典型的な rhomboidal shaped pull-apart basin の形成期である。pull-apart basin の代りに rhomb graben (Freund, 1971) や rhomb-shaped graben (Garfunkel, 1981) の用語が用いられるほどである。ancient, modern とともに実例は多い (例えば第 10 図)。

盆地発展初期に比較して想定される oblique fault と master fault とのなす角が増大し盆地の平面形状は、狭長な菱形から平行四辺形状となることが期待される。盆地縁を画す oblique-fault も初期には単純な一組の正断層であっても、master fault のオーバーラップの増加とそれに伴う盆地拡大に伴って盆地底で盆地最外縁の oblique-fault に平行する正断層群が発達し、盆地底は中心に向かって階段状に落ち込むケースもある。

共通した特徴としては (1) overlap した master fault は盆地縁辺に沿う明瞭な断層崖を作ることが多い、(2) 盆地端部の海淵 (最深部) は sill (2 つの海盆を分ける海底隆起部中の低所) によって分けられ、大体円状をなし (master fault とほぼ平行な盆地底の) 断層で境界される。複数の海淵はしばしば対角位に配列している (Mann et al., 1983)。

例えば、Enriquillo-Plantain Garden Fault Zone 沿いの Mirogoane Lakes Basin (第 11 図 A) では、南北両縁は master fault と平行するいくつかの断層によって明瞭に規定され、盆地内には 4 つの凹地があり対角位に配列している。また、ベネズエラの Moron and El Pilar Fault Zones (Schubert, 1982) 沿いの Cariaco Basin でも、1 km もの隆起をともなって盆地へ急傾斜で傾く master fault の断層崖によってシャープに規



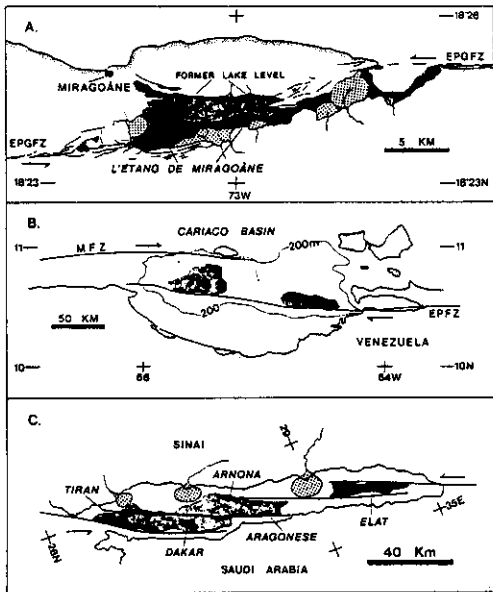
MTJ Mendocino Triple Junction; TR Transverse Ranges push-up block (shown in cross hatching) along dextral San Andreas Fault Zone; DV Death Valley Basin; G sinistral Garlock Fault Zone forming the northern edge of the triangular Mohave Block (black arrow shows general direction of block displacement); E Lake Elsinore Basin along Elsinore Fault Zone; SS Salton Sea pull-apart area at a right-step between dextral San Andreas and Imperial Fault Zones; W Wagner Basin (separated by a short transform fault) in northern Gulf of California; D Delfin Basin (separated by a short transform); SP San Pedro Martir Basin; G Guaymas Basin (separated by a short transform); C Carmen Basin; F Farallon Basin; P Pescadero Basin Complex (separated by several short transforms); A Alarcon Basin; M Mazatlan Basin. Sources of data include: Crowell (1981); Henyey and Bischoff (1973); Bischoff and Henyey (1974); and Niemitz and Bischoff (1981). Many smaller pull-aparts are omitted from compilation map. B. Arabia and Sinai (Levant) Plate Boundary Zone—dashed lines are theoretical interplate slip lines from LePichon and Francheteau (1978) and abbreviations are: R Er Rharb (Gharb) Basin; LR Lebanon Ranges push-up block (shown in cross hatching) along Sinistral Dead Sea Fault Zone; H Hula Basin; DS Dead Sea Basin; A Arava Fault Trough; E Elat Basin in northern Gulf of Aqaba (Elat); A Arnona-Aragonese Basin; DT Dakar-Tiran Basin; RS Red Sea. Sources of data include: Garfunkel (1981) and Ben-Avraham et al. (1979). See Muehlberger (1981) for alternative interpretation of Er Rharb (Gharb) Basin.

第10図 典型的な発展中期の modern pull-apart basin の例(See Mann et al., 1983)

- A: San Andereas Fault 沿いの pull-apart basin
- B: Dead Sea Fault 沿いの pull-apart basin

定されており、1400mの深さに達する壺円状の海淵部は900m以浅の sill によって2つにわけられ、やはり15km離れて対角位に配列している。また、紅海北部のGulf of Aqaba (Elat)では左ずれのDead Sea Fault Systemに沿っていくつもの pull-apart basinが発達し、いずれも東西境界を内側に傾く直線的な master fault にシャープに規定されている。このうち3つは sill によって分けられているが、南の2つは合体し次に述べる発展後期の pull-apart basin に属する。いずれにしてもやはり海淵部は対角位に配列している。さて、aincent pull-apart basin の例としては western Carpathians の中新世のVienna Basin (Royden et al., 1982; Royden, 1985)がある。中新世層基底をもとにした isopach map はオーバーラップしている

master fault がほとんど垂直で、盆地の南東・北西縁を直線的に画していることを示している。master fault を横切ると、堆積物の層厚が1 km 以下から3-4 km に急変する。盆地底には、5 km 以上厚さの堆積物をもつ2つの壺円状の堆積中心があり、やはり対角位に配列している。そして Cariaco Basin と同様に堆積中心の端は master fault に平行な盆地底の断層に規定されている。こうした pull-apart basin 内における海淵部や堆積中心の存在はオーバーラップした master fault による均一な伸長という単純なモデルでは説明できない。また、それらの配置は Rodger (1980) のモデルで予測されたものとも異なる。本号の別稿で述べたように地殻の性質や3次元的な応力分布など考慮してよりモデルの近似度を高める必要がある。



第11図 典型的な発展中期の rhomboidal pull-apart basin の例
 A: Mirogoane Basin (Mann et al., 1983)
 B: Cariaco Basin (Schubert, 1982)
 C: Gulf of Aquaba (Elat) (Ben-Avraham et al., 1979)

(3) 発展後期

master faultの横ずれ運動がさらに進行していくと、盆地の幅がほとんど変わらず盆地の長さが増大していく場合、すなわち盆地幅(separation)/盆地の長さ(overlap)が1:10以上になるほど引き延ばされるケースと、隣接する盆地どおしが複合してみかけの盆地幅を増大していく場合すなわち盆地幅(separation)/盆地の長さ(overlap)が1:3程度で一定する場合とがある。

前者の例としては、北アメリカーカリブプレート境界に位置するCayman Troughがあげられる(Mann et al., 1984)。Cayman Troughは現在Mid-Cayman Riseに沿う海洋底拡大によって延びており、そしてそれは、左ずれのmaster faultであるOriente and Swan Fault Zones (Holcombe et al., 1973)の不連続端部に連結する。この盆地の形成開始期はLate Eocene- Early Oligoceneで現在の平均深さは約5 kmで

ある。Mid-Cayman Riseにおける伸長による基盤の南北配列とmaster faultとの直交関係は大略平行なmaster fault間における単純なpull-apart basinであることを示唆し、トラフ東端における基盤の北東-南西配列はほとんどoverlapのない盆地拡大開始初期のoblique faultと解釈される。しかし、そのoverlapは1400km, separationは100-150kmと桁はずれに大きく、従ってトラフの長さとの比は約14にも達し、次に述べるAydin and Nur(1982)の合体モデルには適合しない。この場合は、platesの相対的な運動が十分長期にわたってコンスタントに保たれていたためであろう。

後者の例は、Aydin and Nur(1982)によって提唱されたもので、幾つかのpull-apart basinが複合してより大規模なものになっていく過程で、本号の別稿で前述したようにいくつかのパターンが挙げられている。また、別途後述するようにトルコの北アナトリア断層に関連するエルジンジャン盆地ではmaster faultに高角度で斜交する二次的なstrike-slip faultの発達によって盆地形状が変化する例もある。

pull-apart basinの消滅期

master faultの変位の進行の停止に伴ってpull-apart basinは隆起浸食を受け消滅していく。これにも幾つかのタイプが知られている。例えば、New BrunswickのCarboniferous Moncton Basinはデボン紀最後期にrhomboidal pull-apart basinであったがmaster faultにほぼ平行する横ずれ断層群によって3つのスライスにされ消滅していった(Bradley and Rowley, 1983)。

Zhang et al.(1989)は、中国の代表的な左横ずれ活断層系の1つであるHaiyuan断層に沿うpull-apart basinの調査から、その幾つかが消滅期にあり2つのタイプに分類されることを呈示した。第1のタイプは、雁行配列するmaster fault間をそれらと低角度で斜交し連結する横ずれ断層の発生によるもので、pull-apart basinを含む雁行配列する各セグメントからなる断層系全体が直線化(straighten)して

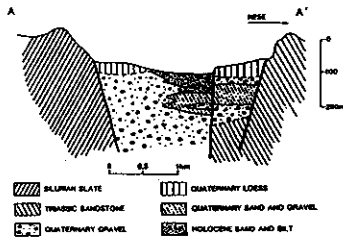
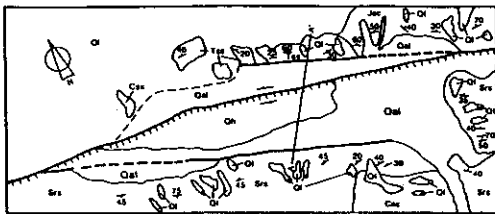
いく過程である(第12図 Type 1). 第2のタイプは、雁行配列する master fault に並走する横ずれ断層が盆地中心寄りに形成され、pull-apart basin が縮小消滅していく過程である(第12図 Type 2).

第1のタイプの例としては、Dayinshui 盆地があげられる。本盆地は Haiyuan 断層の西方セグメントに位置し、平行する master fault の走向は N65°W である。master fault の断層崖は現在地形的には見られず、断層を横切る河川もオフセットされていない。また、oblique fault もレスに覆われ不明瞭である。さらに、1920年の Haiyuan 地震断層もこれらの断層に沿って形成されなかった。むしろ最も活発で顕著な断層は東西性で盆地を斜交し(master fault と 30°以下で交わる)、Haiyuan 断層と同じセンスを持つ南傾斜の左横ずれ断層(diagonal strike-slip fault)である。高さ1-2mの低断層崖は明瞭で、本断層を横切る河川の最大左横ずれのオフセットは190mに達する(Chen and Deng, 1985)。1920年の Haiyuan 地震断層はこの断層に沿って生じ、約1.5mの左横ずれ変位が測定

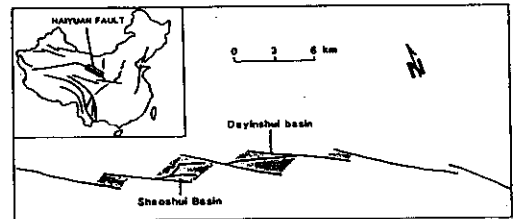
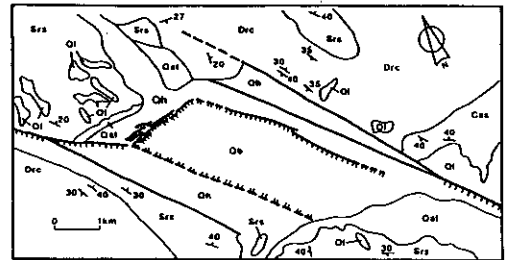
された。盆地内の最新期の堆積も本断層に規制されており、砂とシルトからなる完新世堆積物(第11図 Qh)は、本断層に沿ってその南西側に狭く分布する。diagonal strike-slip fault の発達による Haiyuan 断層の直線化によって Dayinshui 盆地は消滅していく。

しかし、San Andreas Fault 沿いの地震断層は、時として master fault(?)に発達して、雁行の部分でジャンプしないで終わってしまう例がある(Sibson 1985)。Segall and Pollard(1980)や Gamond(1983)などによる実験・理論的研究結果によれば、master fault にあたる雁行配列する横ずれ断層間に二次的な共役剪断断層が生じていることが示されている。その一組は diagonal strike-slip fault に相当する。もちろんこの結果は厳密には変形の初期(微小変形)にしか適用できないが、上述した実例に見られるように、すくなくとも第1近似的には、変形末期にまで外挿できる。第2のタイプの例としては、同じく Haiyuan 断層に関連する Shaoshui 盆地があげられる。本盆地北縁部には master fault に相当する3つの横ずれ断層が発達する。最も

TYPE-1 Dayinshui Basin

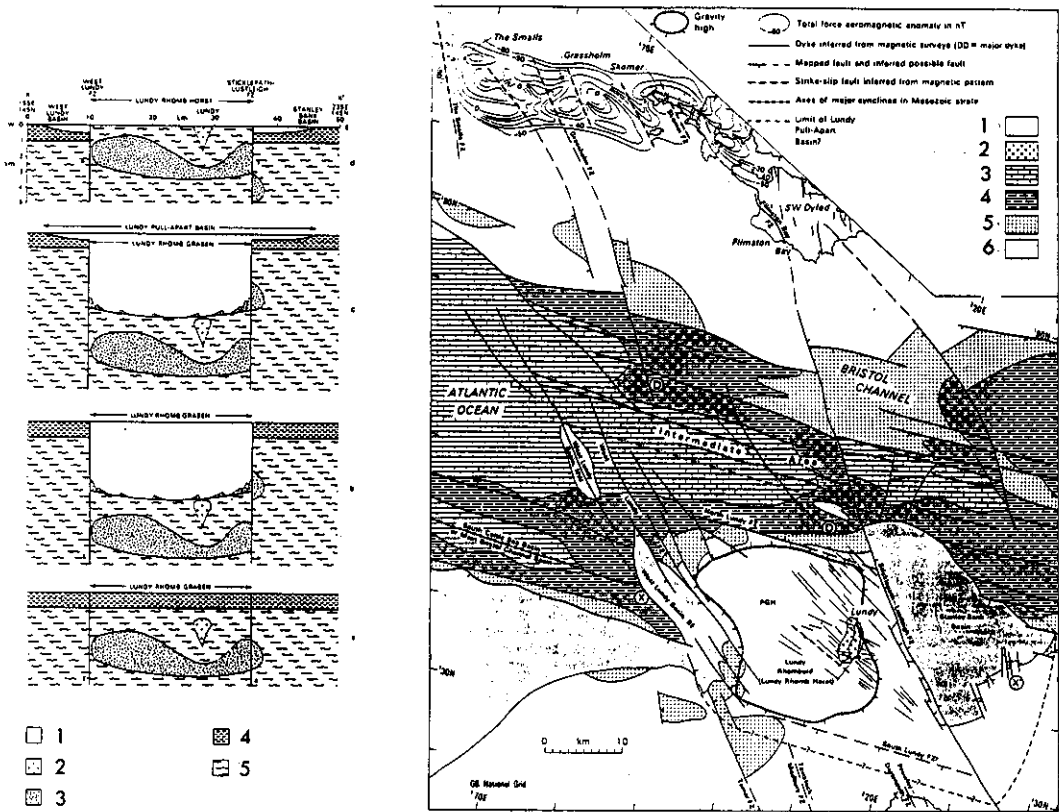


TYPE-2 Shaoshui Basin



第12図 pull-apart basins の消滅の2形式(Zhang, et al. 1989)

PULL-APART BASIN の形成過程



第13図 複雑な形成過程を示す pull-apart basin の例
 Lundy Pull-Apart Basin(イギリス)(See Arthur, 1989)
 left: 1. Sediments, 2. Granite, 3. Basic igneous complex (1-3: Tertiary)
 4. Mesozoic strata, 5. Paleozoic strata
 right: 1. Tertiary strata, 2. Lundy Granite (Tertiary), 3. Cretaceous strata, 4. Jurassic strata, 5. Triassic strata, 6. Pre-Triassic rocks

北側の断層はデボン紀砂岩と第四紀下部層を境するが、断層崖や断層を横切る河川のオフセットは存在しない。その南側の断層は盆地南東端部で前述の断層から分岐しており、盆地内を走り、第四紀下部層を切っている。明瞭な断層崖をもち、断層を横切る小規模なリッジのオフセットも見られるが、1920年の Haiyuan 地震断層はこの断層沿いには生じなかった。最も南寄りすなわち盆地中心寄りの断層は、より明瞭で比高の大きい断層崖を持ち、本断層を横切る河川の最大左横ずれのオフセットは70mに達する (Chen and Deng, 1985)。1920年の Haiyuan

地震断層はこの断層沿いに生じ、約1.2mの左横ずれ変位が測定された。盆地南縁部の断層群も同様で、最も南の横ずれ断層は、シルル紀礫岩と第四紀下部層を境するが、活断層である証拠はない。その北側すなわち盆地中心寄りの断層は、不連続な断層崖を持ち、人為的改変によって不明瞭となっているが、1920年の Haiyuan 地震断層がこれにそって左横ずれ変位を示したことが知られている。盆地北西縁部で想定される oblique fault に並走してやはり盆地中心寄りに1920年の Haiyuan 地震時に形成された正断層崖と引張破断が発達する。以上のことは、いずれ

もより新期の断層活動が盆地中心部に移動していることを示しており、それに伴って盆地が縮小していることを意味する。この形成機構についてはよくわからずまた、実例も乏しいので今後の検討が待たれる。

複雑な構造発達史をもつ pull-apart basin

さらに、pull-apart basin の形成過程をその地域の地史と関連させて検討することも重要である。例えば、ウェールズの Lundy 地域では、関連する断層群の変位センスが左ずれから右ずれに逆転し、それに伴って graben が pull-apart basin に、さらに horst (push up swell) に転換

していくプロセスなどの例がある(第13図)

ニュージーランド南島の Alpine 断層系の分岐断層でも late Oligocene には応力場が compression から subduction に変わり、Miocene には dip-slip block faulting, Pliocene-Early Pleistocene には oblique slip normal faulting そしてその変位のセンスが late Pleistocene-Holocene に oblique slip reverse faulting と変化することが知られており、pull-apart basin ではないが fault-angle depression の形成に影響を与えている (Prebble, 1980).

文献略(文献集参照)