

Death Valley 地域のテクトニクス

Tectonics in the Death Valley area, California.

尾崎 正紀

Masanori Ozaki

Abstract: The (central) Death Valley developed in late Miocene through Holocene as east-tilted half graben. There had been considerable discussions regarding fault block movement for the basin subsidence of the Death Valley. They are mainly classified into translation and rotation movement. Former produces a pull-apart basin along an oblique segment of right stepping en echelon right-lateral strike slip faults, latter results in a fault-angle basin accompanying imbricate listric normal faults or detachment faults. COCORP deep seismic reflection data in the vicinity of the Death Valley area, however, combined with the surface geological data, reveal that the Death Valley has been formed by the result of the simultaneous translation and rotation of the upper-crust fault blocks by large-scale continental extension in the NW-SE direction.

はじめに

Death Valley はカリフォルニア州南東部, Basin and Range 地域の南西部に位置する(第1・2図). 西側を Panamint Range (最高峰 Telescope peak の標高は約3367m)と Owlshhead Mts., 東側を Black Mts. (Amarugosa Range) に囲まれた北北西—南南東に伸びる長さ約70kmの地溝である(最深部は-85m). Death Valley 周辺地域は北北東及び北北西走向の正断層群と北西及び東西走向の横ずれ断層群が共存し, 新生代後期以降多くの地溝・地壘が形成されている.

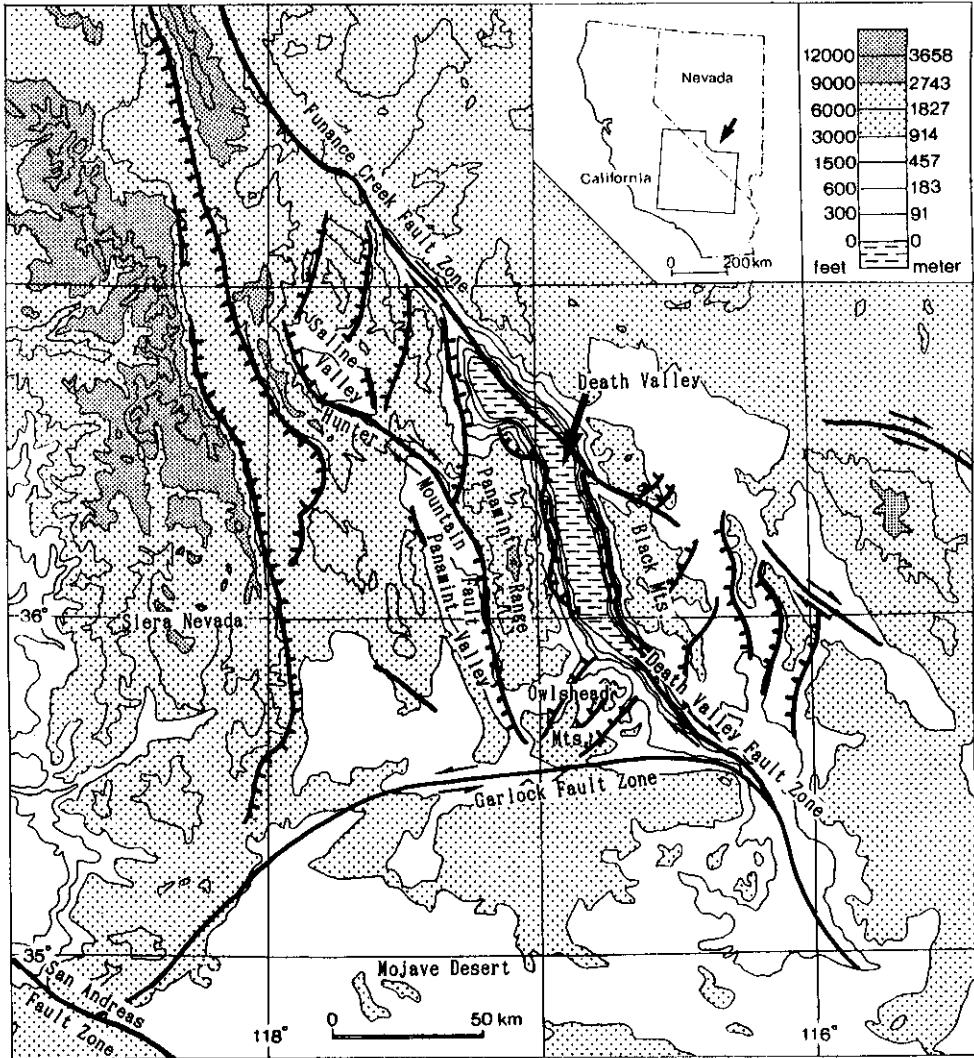
Pull-apart basin という名称はこの特殊な地形の形成メカニズムとして考えだされ, その後の横ずれ断層に伴う堆積盆の研究に大きな影響を与えた. しかし, Basin and Range 地域の研究が進められるにつれて, Death Valley は典型

的な pull-apart basin ではないとの研究成果が多く出され, 最近では大陸地殻の伸張モデルの問題で議論の集中する地域となっている.

小論では, Death Valley 形成論の変遷を辿ると共に, 低角正断層群と横ずれ断層群との共存する Basin and Range 地域における大規模な伸張(crustal pull-apart)テクトニクスでの basin 形成の例として Death Valley を紹介する.

Pull-apart basin の誕生

Death Valley の特異な地形の研究は古くから行われていた(Gilbert, 1874; Noble, 1941; King, 1959; Hunt & Mabey, 1966 など)が, Death Valley は横ずれ断層運動によって作られた伸張場に形成されたと最初に指摘したのは Burchfiel & Stewart(1966)であった. 右横ずれ変位を示す Furnace Creek 断層帯と(Southern)

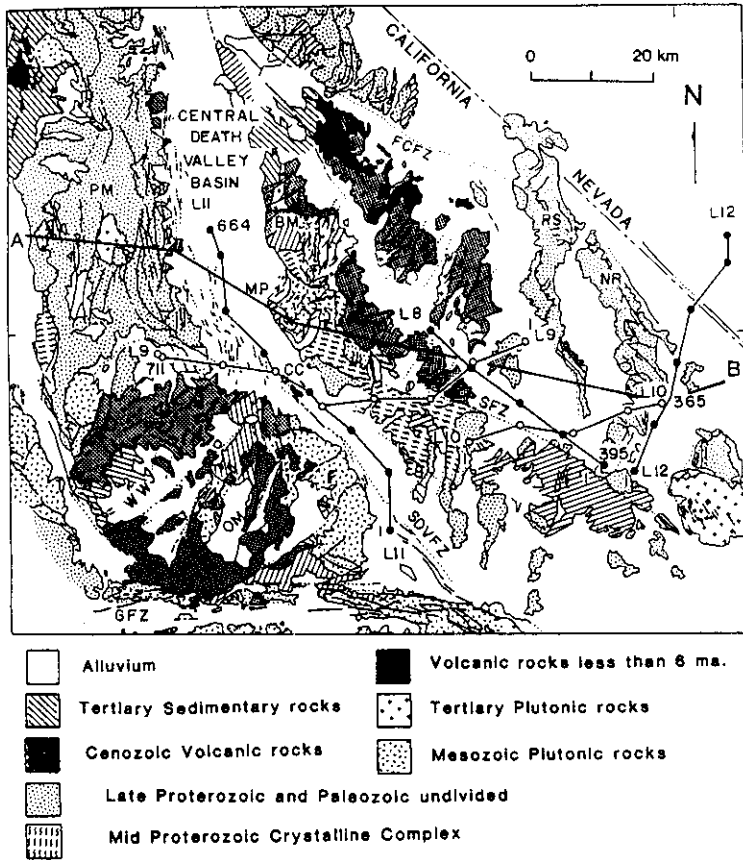


第1図 Death Valley及び周辺地域の地形と主な断層。断層はStewart(1983), Cemen et al.(1985), Burchfiel(1989)を, 地形はThe Times atlas of the world(1985年度版)を簡略化して作成。

Death Valley断層帯の間であってPanamint RangeとBlack Mts.のブロックが引離される(pull-apart)ことによって形成されたと説明し(第3図B), 始めてpull-apartという名称が使われた。今日でいうright stepping en echelon right-lateral strike-slip faultsによるpull-apart basinである。

同じ時期にHill & Troxel(1966)も, 2つの

断層帯の間の地域が第三紀始めに北東—南西方向に短縮することによって, Death Valleyに特徴的に見られるTurtleback surface, Chaos, Amargosa Thrust(現在は低角正断層)の構造の形成を説明した(第3図A)。その後, Mann et al.(1983)もSan Andreas断層沿いに発達するpull-apart basin群の1つとしてDeath Valleyを扱っている。



第2図 Death Valley 及び周辺地域の地質概略図(Wright & Troxel, 1973)とCOCORP反射法地震探査測線8-12の位置図(白丸及び黒丸は振動地点を示す)(Serpa et al., 1988). CC=69万年前の噴石丘(玄武岩), MP=Mormon Point turtle back surface, DVFZ = 南部 Death Valley 断層帯, FCFZ = Furnace Creek 断層帯, SFZ = Sheephead 断層帯. A-B=第4図の地質断面線.

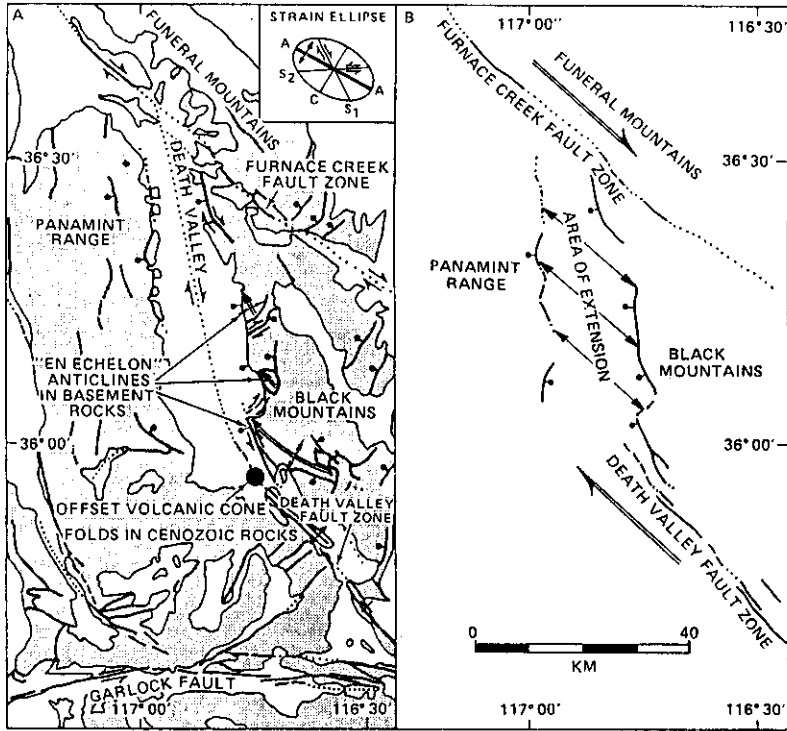
Pull-apart basin に対する疑問

一方, Basin and Range 地域の新生代テクトニクスの研究から, Death Valley は低角の正断層群による傾動地塊盆地であって, 典型的な pull-apart basin ではないとの研究報告も多くあった.

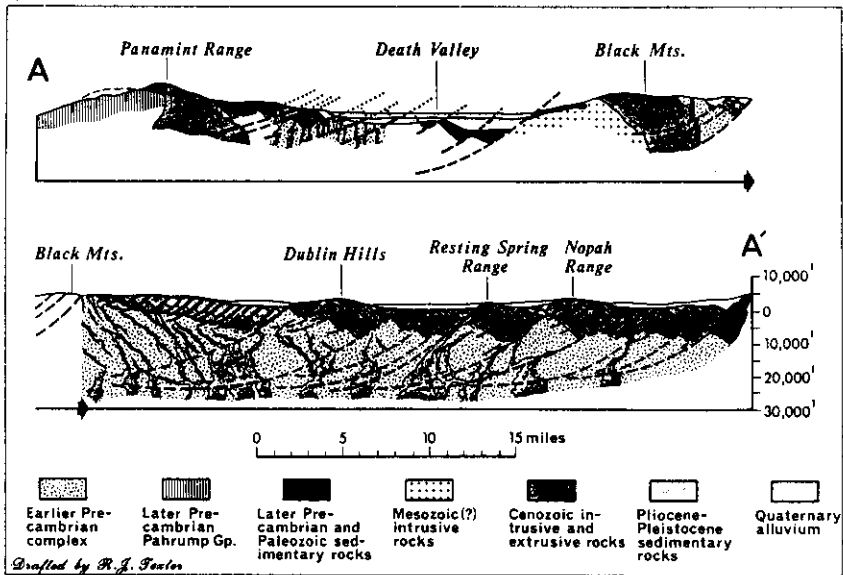
Wright & Troxel(1973)は, 回転を伴う西落ちの正断層群によって Death Valley の沈降運動を説明した(第4図). これら断層群の傾斜の多くは45度以下で, 深部ほど緩やかになる傾向があり, shallow-fault と呼ばれた. 断層群によ

て挟まれたブロックは東へ大きく傾動しており, 古い時代の地層ほど傾斜は急となる. 断層群の多くは先新生界で尖滅しているが, 一部は上部地殻の深さ9kmまで達すると推定した. 今でいう深さ9kmの detachment に収束する imbricated listric normal faults といったものである.

Eaton(1982・1984)は, 火成活動や古応力場などのデータから Basin and Range 地域は漸新世以降中新世中期までは Farallon plate のサブダクションにより intra-arc ないし back-arc spreading によって伸張の場(最小主応力軸は北



第3図 (A)Death Valley 地域のテクトニクスの概要(Hill & Troxel, 1966)と伸張領域の形成と(B)横ずれ運動との関係(Burchiel & Stewart, 1966)(Christie-Blick, 1985より).

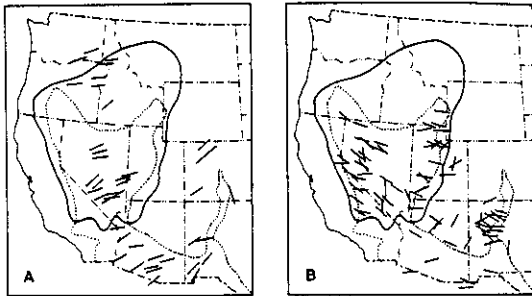


第4図 Death Valley 地域の東西地質断面図(Wright & Troxel, 1973). 断面の位置は第2図に示す.

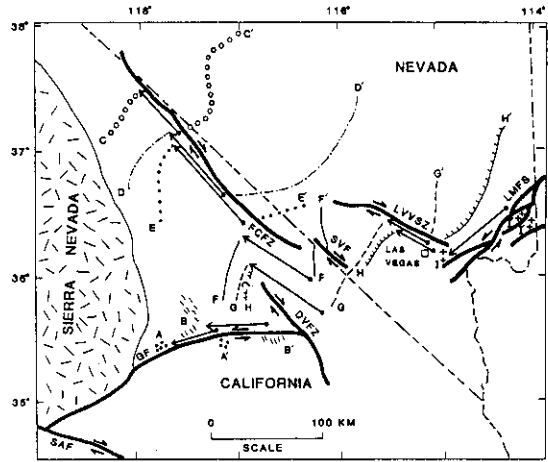
東—南西方向で、正断層や横ずれ断層が発達)であったが、中新世後期以降は Pacific plate の北西への移動のため、斜めトランスフォームによる伸張の場(最小主応力軸は西北西—東南東)となったと考え、Death Valley を後者で形成された正断層群による地溝に含めた(第5図)。

Stewart(1983)は、Furnace Creek 断層帯沿いの後期カンブリア界と古生界の食い違い(第6図)などを基に、新生代後期に Furnace Creek 断層帯と Garlock 断層帯の横ずれ運動によって、Wernicke(1981)の大陸地殻の伸張モデル(simple shear)に類似した低角西傾斜の detachment fault のような断層系が形成され、Black Mt. ブロックと重なっていた Panamint Range ブロックが80km 北西へ平行移動したと考え、その中の1つの地溝として Death Valley を位置づけた。

Cemen et al.(1985)は、Furnace Creek 断層帯沿いの堆積物の堆積相とその変形に基づき、Death Valley の pull-apart basin 構造は北西走向の高角断層と北東走向の正断層による right-stepping 関係によって生じた垂直変位の卓越する運動による二次的な堆積盆と結論づけた。



第5図 合衆国西部における最小主応力軸の方向(Eatow, 1984)。岩脈群、火口丘の配列、正断層、地溝、地層の傾動方向、地震より求められている。A: 漸新世—中新世(Robinson, 1970; Swanson et al., 1979; Zoback et al., 1981)。B: 中新世—現在(Zoback et al., 1981)。

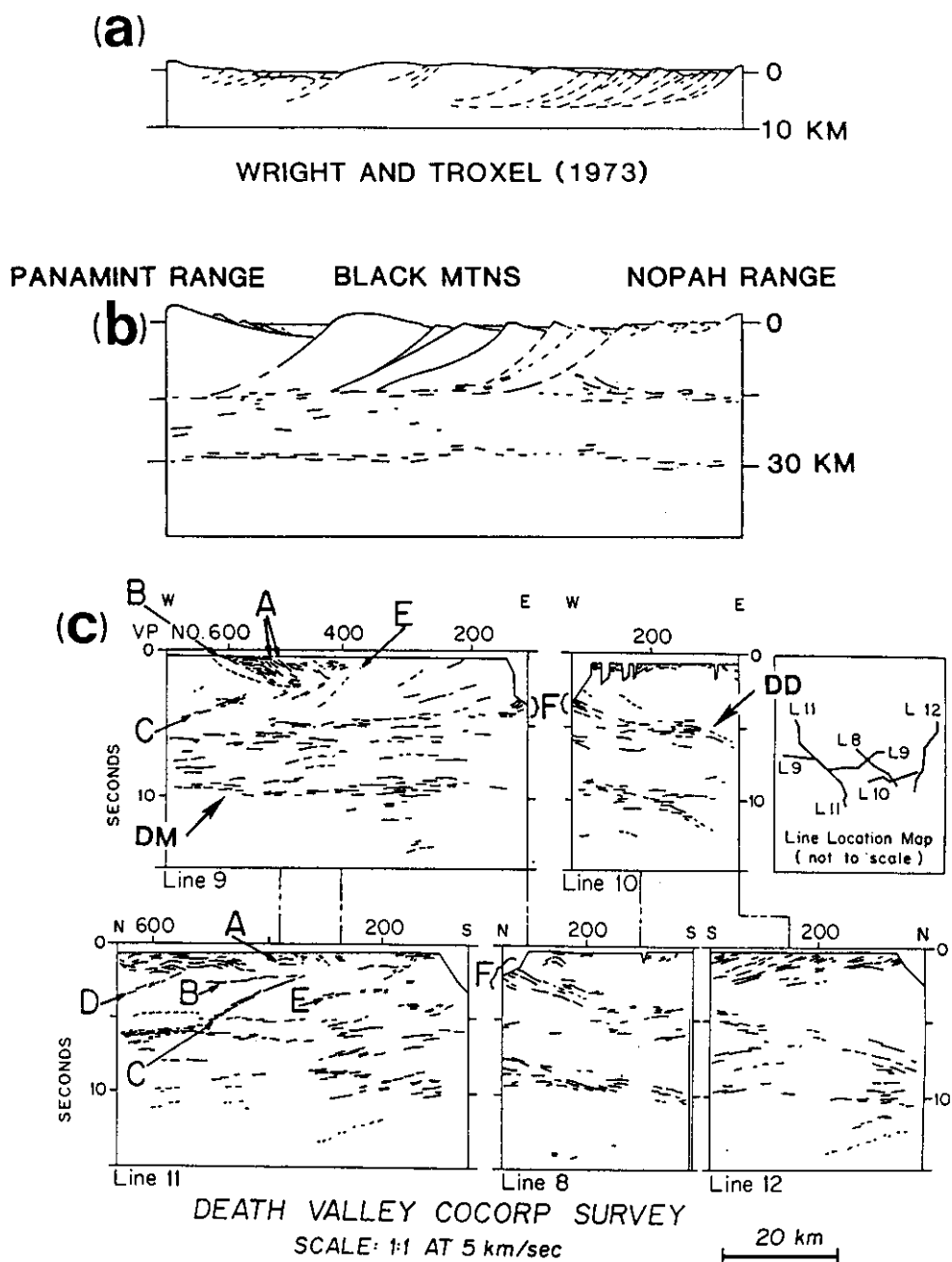


第6図 カリフォルニア州東部とネバダ州南部の主な横ずれ断層と地質学的なトレンドのオフセット(Stewart, 1983)。A-A' = 古生代の変堆積岩(Smith & Ketner, 1970), B-B' = 中生代の岩脈群(Smith, 1962), C-C' = 下部カンブリア系 Harkless 累層と Zabriskie 珪岩の岩相境界(Stewart, 1967), D-D' = 下部ミシシッピ系の石灰岩層の西縁(F.G. Poole, in Stewart et al., 1968), E-E' = 上部オルドビス系の100m等層厚線(Miller & Walch, 1977), F-F' = 下部カンブリア系 Zabriskie 珪岩の150m等層厚線(Stewart, 1970を一部修正), G-G' = 原生界 Z Stirling 珪岩(Stewart et al., 1970), H-H' = 上部ミシシッピ系の頁岩の南西縁(F.G. Poole, in Stewart et al., 1968を修正), I-I' = 中生界及び第三系(Bohannon, 1979)。SAF = San Andreas 断層, GF = Garlock 断層, FCFZ = Furnace Creek 断層帯, DVFZ = Death Valley 断層帯, SF = Stewart Valley 断層, LVVSZ = Las Vegas Valley 剪断帯, LMFS = Kake Mead 断層系。

反射法地震探査による Death Valley 地域の構造解析

Serpa et al.(1988)は、COCORP(The Consortium for Continental Reflection Profiling)の地震反射波データを既存の地表での地質学的資料を組み合わせることによって、Death Valley の形成機構の解明を試みている(第2・7図)。

地震反射波の解析から Death Valley 地域の

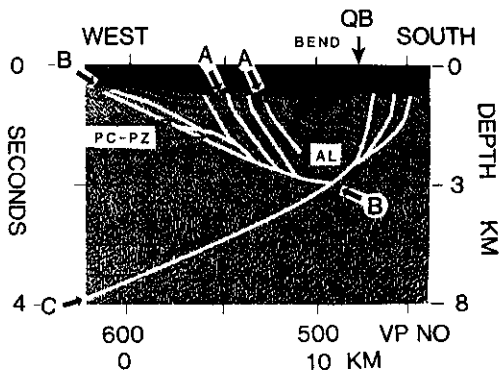


第7図 反射法地震探査の反射断面と地質学的解釈断面(Serpa et al., 1988のFig. 4とFig. 11より作成)。(a)測線9, 10の北側5~20kmの間の地表地質データを基に描かれた地質断面図(第4図(Wright & Troxel, 1973)を簡略化), (b)表層の地質データと反射法地震探査の解析から求められる地質断面図, (c)Death Valley地域の測線8-12の反射断面と解釈(A, B, Cなどの記号は本文参照)。

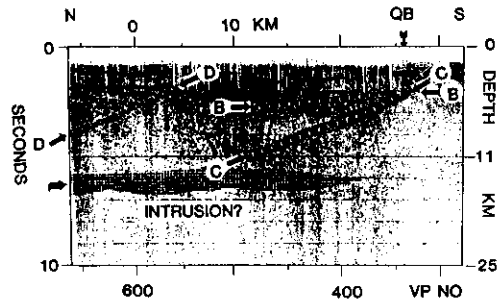
地下構造は上部・中部・下部の3つの反射帯に区分され、上部地震反射帯(深度0~15km)は断層や堆積盆が認められる境界を示す上部地殻の弾性変形領域、中部(15~30km)は下部地殻の可塑性変形領域、下部(30km~)は上部マントルでその上限はモホ面と解釈された(第7図b・第11図).

上部地殻のなかで測線9(東西断面)と測線11(南北断面)が重なる地域の3kmより浅い部分(第7c・8・9図)は、Burchfiel & Stewart(1966)がcentral Death Valley pull-apart basinとした地域に一致する。測線9の断面(第8図)から地層は東へ傾斜(深部ほど傾斜角を増す)が読み取れるのに対して、測線11の断面(第9図)ではほぼ平行であることから、この地域には東へ傾動したhalf graben構造が発達していることが確かめられた。これは、Mabey(1963)がブーゲー異常のデータから、Death Valleyの東縁沿いに最も厚く最大3kmの新生代後期の地層が埋積しているhalf grabenが存在すると推定したことに一致する(第10図)。

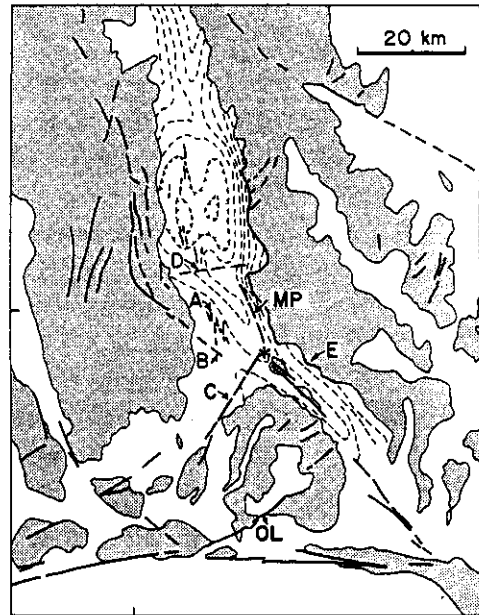
上部地殻の15kmより浅い部分の傾斜する地震波解析におけるevent(A~F)(第7c・8・9図)(計算から求められる実際の傾斜は約30



第8図 測線9の深度断面と地質学的解釈(Serpa et al., 1988を簡略化)。QBは69万年前の噴石丘の地表の位置を、A-Cは本文参照。白線は断層及び堆積盆の下底を太線は堆積盆内の反射帯を、PC-PZは堆積盆の下底と断層で接する先カンブリア代~古生代の堆積岩(推定)の位置を、ALは後期新生界の分布を示す。



第9図 測線11の深度断面図と地質学的解釈(Serpa et al., 1988を簡略化)。QBは69万年前の噴石丘の地表での位置を、湾曲した矢印は推定マグマ体(magma body)(本文参照)の位置を示す。太線は堆積盆の大きな反射帯を、破線は断層と堆積盆下底を、網目部分は貫入部分を示す。



第10図 中央Death Valleyの推定断層(太い破線)及び堆積盆の特徴(Serpa et al., 1988)。太線は地質断層、網目部分は山地を表す(Wright & Troxel, 1973を部分修正)。堆積盆地内の細い破線はMabey(1963)による5mgalの等重力線を示す。OLはOwl Lake断層、MPはMormon Point turtle back断層を示す。A-Dは本文参照。

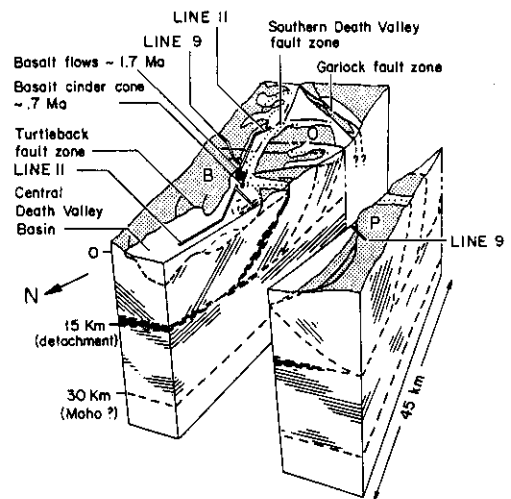
度)は地表で確認された断層や推定される断層(第10図)に連続し、Aはhalf graben内に発達する南北走向で東傾斜のlistric fault, BはPanamint Rangeで新生代後期の堆積盆と基盤岩類が境する断層に一致する。CはPanamint RangeとOwlshead Mts.を分けるWingate Wash断層帯に連なる。Death Valley地域で最も若い火山体(約69万年前の玄武岩(hawaiites)の噴石丘など)がこのcの断層沿いに存在し(第10図の*), しかも上部地殻下限(深さ約15km)のbright spot(部分溶融していると考えられる部分)へ連なる(第9図)ことから、Cはマグマの通り道になっていることが推定されている(de Voogd et al., 1986)。DはMabey(1963)の重力異常から読み取れる東西方向の傾斜ずれ断層, EはBlack Mts.の西縁沿いに分布する正断層, FはWright et al.(1987)がDeath Valley地域が伸張域になる以前に形成された detachmentの名残であるとされたSheephead断層帯(第2図のSFZ)に一致する。

Panamint Rangeブロックの新生代後期以前の位置については、盆地が形成される以前は両ブロックは近接していた(Noble & Wright, 1954; Wright & Troxel 1973)と前述のようにBlack Mts.ブロックの上に直接Panamint Rangeが重なっていた(Stewart, 1983; Wernicke, 1987a・b)という2つの考え方があった。COCORPのデータからみれば、Panamintブロックの厚さは少なくとも15kmあり、Stewart(1983)が推定した detachmentによる上部地殻の薄化は認められず、またPanamintとBlack Mts.の両方のブロック(上部地殻)下限の反射帯は連続している(第7図)ことから、Wright & Troxel(1973)の断層ブロックによる detachmentモデル(第4図)がCOCORPのデータに最も一致する。

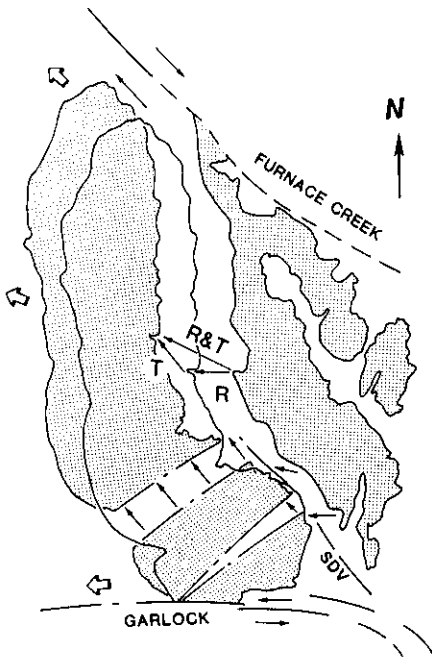
以上のことからSerpa et al.(1988)は、東へ傾斜する回転運動と北西への並進運動の2つの運動の組合せによってDeath Valleyの構造は形成されたと結論づけた(第11・12図)。すなわち、回転運動によってPanamint RangeとOwlshead Mts.ブロックがBlack Mts.ブロック

に対して相対的に西へ変位(R)し、Black Mts.西側の前面沿いに傾斜すべり変位が生じた。この運動はGarlock断層帯の変位(48~64km左横ずれ)(Davis & Burchfiel, 1973)方向にほぼ一致する。北西への並進による変位(T)は、Wingate Wash断層帯などの北東-南西走向の傾斜ずれ断層の発達で示され、Furnace Creek断層帯の運動(40-100kmの右横ずれ)(Stewart, 1983)に一致する。また、Panamint RangeブロックがOwlshead Mts.ブロックから離れることによって、Owlshead Mts.とBlack Mts.ブロックとの間に相対的に右横ずれ変位が生じ(southern)Death Valley断層帯(8 km以下の右ずれ)(Stewart, 1983)が形成された。

以上のように、Death Valleyの形成メカニズムとして、これまで並進(translation)すなわちparallel strike-slip faultのright steppingによって生じた伸張領域としてのpull-apart basinと、回転(rotation)すなわち detachmentに収束する



第11図 中央Death Valley盆地南端のブロックダイアグラム(Serpa et al., 1988)。地震波と地表の地質学的データの組み合わせによる主な地殻の地質学的特徴を示す。細い線は上部及び下部地殻の反射帯を、深部15km付近の網目は推定されるmagma plumbing systemを、地表の網目は山地を表わす。B=Black Mts., P=Panamint Range, O=Owlshead Mts..



第12図 中央 Death Valley 地域における断層ブロック運動の復元(Serpa et al., 1988). 小さな矢印は個々の断層に交差する地表と地震データによる運動方向を示す。R は断層ブロックの回転による運動を、T は断層ブロックの並進による運動を、R&T は同時に起こった回転と並進の組合わさった運動を示す。大きな矢印は本地域の断層群すべてに直交する変位の結果から推定される断層ブロック運動の方向を示す。

傾動を伴う listric な正断層群による傾動地塊盆地という2つの考え方があった。しかし、地震反射波データを既存の地表地質データを結び付けた結果、並進と回転の運動が同時に、すなわち Furnace Creek 断層帯と Garlock 断層帯による non-parallel strike-slip system の pull-apart basin として形成されたものと結論づけられた。

Basin and Range 地域の伸張テクトニクスと Death Valley

Death Valley 周辺地域で狭義の pull-apart basin としては、Death Valley 西方に右横ずれ

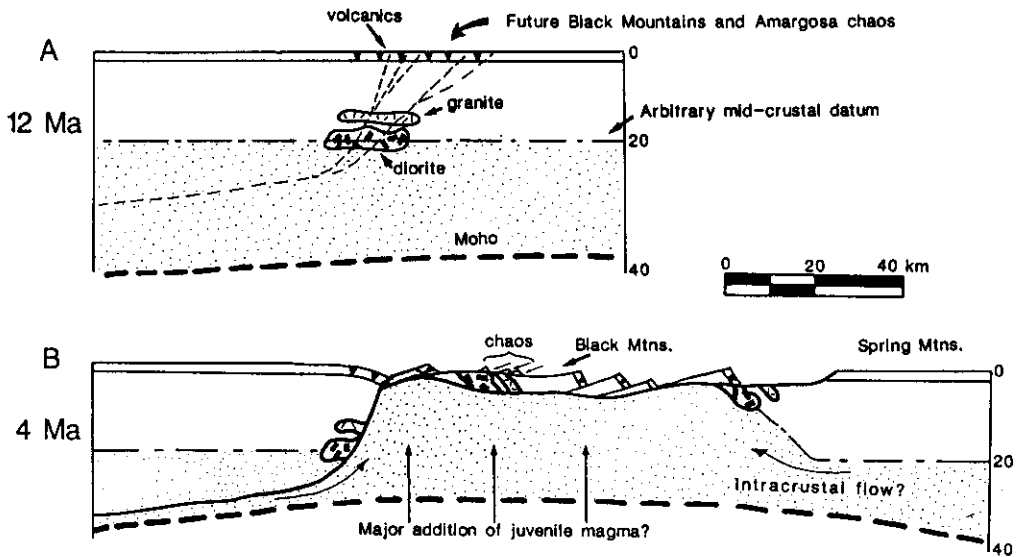
(約 8 km) の Hanter Mountain 断層による対の pull-apart basin である Panamint Valley (6–9 km の伸張が認められる) と Saline Valley がある (3–4 Ma 以降の形成と考えられている) (Burchfiel et al., 1987) (第 1 図)。しかし、これら対の pull-apart basin も Death Valley と同様 Basin and Range の伸張テクトニクス、すなわち中新世後期以降の上部地殻(厚さ約 15 km)における、北西–南東方向に最小主応力軸を持つ伸張域(crustal extension)として低角正断層群と横ずれ断層群が共存して発達する crustal fragmentation の副次的現象にしかすぎないと考えられている(Burchfiel et al., 1989 など)。

Holm & Wernicke (1989) は、Death Valley 西側の Black Mt. は地殻深部 10–30 km の間の断面が露出していると推定した。更に、Asmerom et al. (1990) は放射年代とストロンチウム比から、Black Mt. ブロックの地表に露出する閃緑岩(Willow Spring Diorite) (かつて先カンブリア紀と考えられていた) は中部地殻において 12 Ma 頃マントル起源のマグマと地殻の物質の混合によって形成され、Black Mt. 地殻のブロックの上昇に伴って 5 Ma 以降地表に露出したものであることを明らかにした(第 13 図)。Asmerom et al. (1990) の断面図は、正断層運動によって大陸地殻中部が下盤側として回転上昇し、それと同時に上盤側に低角正断層群が形成され現在見られる chaos などが形成されたと解釈されている。

Basin and Range 地域には低角正断層が広く発達するにもかかわらず、発震機構を見る限り高角の正断層しか期待できない。これに対する伸張テクトニクスのモデルがこれまで幾つか考え出されているが、そうした中で Asmerom et al. (1990) の断面図は Buck (1988) の低角正断層形成モデルに類似しており、大陸の伸張テクトニクスを考える上で Death Valley は目の話せないフィールドとなっている。

おわりに

このレビューは 1989 年夏の勉強会での内容に



第13図 (A)Black Mt.ブロックの伸張以前の構造配置(中部地殻の層準に閃緑岩が形成されている)と、(B)大規模な伸張に伴うブロックの断片の配置(地殻均衡を保とうとする下部地殻の頂部に地殻断片がdetachmentから連続して乗り上げた(stranding)結果、西傾斜の正断層に沿って隆起したと解釈できる)。AとBの下部地殻の容積の違いは地殻へのマグマの付加あるいは周辺の下部地殻の流動によって説明される(Buck, 1989)。

その後発表された論文を加えてまとめたものである。当初 pull-apart basin の代表例として Death Valley を紹介しようとしたものであるが、現在では狭義の pull-apart basin とは考えられておらず構造地質36号の特集内容とは必ずしも合致していないが、pull-apart basin のテクトニクスを大きな枠組みで考えていくという観点から掲載させていただいた。機会を頂いた編集委員会の方々に感謝します。

文献

Asmeron, Y., Snow, J.K., Holm, D.K., Jacobsen, S.B., Wernicke, B.P. and Lux, D.R., 1990 : Rapid uplift and crustal growth in extensional environments: An isotopic study from the Death Valley region, California. *Geology*, v.18, 223-226.

Buck, W.R., 1989 : Flexural rotation of normal faults. *Tectonics*, v.7, 959-973.

Burchfiel, B.C., Hodges, K.V., and Royden, L.H., 1987 : Geology of Panamint Valley-Saline Vally pull-apart system, California: Palinspastic evidence for low-angle geometry of a Neogene range-bounding fault. *J. Geophys. Res.*, v.92, 10422-10426.

-----, Quidong, D., Leigh Royden, P.M., Yipeng, W., Peizhen, Z. and Weiqi, Z., 1989 : Intracrustal detachment within zones of continental deformation. *Geology*, v.17, 448-452.

----- and Stewart, J.H., 1966 : "Pull-apart" origin of the central segment of Death Valley, California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v.77, 439-442.

Cemen, I., Wright, L.A., Drake, R.E. and John-

- son, F.C., 1985 : Cenozoic sedimentation and sequence of deformational events at the southeastern end of the Furnace Creek strike-slip fault zone, Death Valley region, California: In Biddle, K.T., and Christie-Blick, N., eds., Strike-Slip Deformation, Basin Formation, and Sedimentation. Soc. Economic Paleont. Mineral. Spec. Publ., no.37, 127-141.
- Christie-Blick, Nicolas, and Biddle, K.T., 1985 : Deformation and basin formation along strike-slip faults: In Biddle, K.T., and Christie-Blick, N., eds., Strike-Slip Deformation, Basin Formation, and Sedimentation. Soc. Economic Paleont. Mineral. Spec. Publ., no.37, 1-13.
- Davis, G.A. and Burchfiel, B.C., 1973 : The Garlock fault: An intracontinental transform structure, southern California. Geol. Soc. Am. Bull., v.84, 1407-1422.
- de Voogd, B., Serpa, L., Brown, L., Hauser, E., Kaufman, S., Oliver, J., Troxel, B.W., Willemin, J. and Wright, L., 1986 : Death Valley bright spot: A midcrustal magma body in the southern Great Basin, California?. Geology, v.14, 64-67.
- Eaton, G.P., 1982 : The Basin and Range Province: Origin and tectonic significance. Ann. Rev. Earth and Planet. Sci., v.10, 409-440.
- , 1984 : The Miocene Great Basin of western North America as an extending back-arc reagon. Tectonophysics, 102.274-295.
- Gilbert, G.K., 1874 : U.S. Geog. and Geol. Surveys, West of the Hundredth Meridian (Wheeler), Progress Report, 48-52.
- Hill, M.L. and Troxel, B.W., 1966 : Tectonics of Death Vally region, California. Geol. Soc. Am. Bull., v.77, 435-438.
- Holm, D.K. and Wernicke, B.P., 1989 : Are the Black Mountains, Death Valley, California: A 15-30km crustal section?. Geol. Soc. Am. Abs. with Programs, v.21, A353.
- Hunt, C.B. and Mabey, D.R., 1966 : Straigraphy and structure, Death Valley, California: U.S. Geol. Survey Prof. Paper 494-A, 162p.
- King, P.B., 1959 : The evolution of North America. Princeton Univ. Press, 190p.
- Mabey, D.R., 1963 : Complete Bouguer anomaly map of the Death Valley region, California. U.S. Geol. Survey Geophys. Inv. Map GP-305.
- Mann, P., Hempton, M.R., Bradley, D.C. and Burke, K., 1983 : Development of pull-apart basin. J. Geol., v.91, 529-554.
- Noble, L.F., 1941 : Structural features of the Virgin Spring area, Death Valley, California. Geol. Soc. Am. Bull., v.52, 941-1000.
- and Wright, L.A., 1954 : Geology of the central and southern Death Valley region, California. Calif. Div. Mines Bull., no.170, 143-160.
- Serpa, L., de Voogd, B., Willemin, J., Oliver, J., Hauser, E. and Troxel, B.W., 1988 : Structure of the central Death Valley pull-apart basin and vicinity from COCORP profiles in the southern Great Basin. Geol. Soc. Am. Bull., v.100, 1437-1450.
- Stewart, J.H., 1983 : Extensional tectonics in the Death Valley area, California: Transport of the Panamint Range structural block 80 km northwestward. Geology, v.11, 153-157.
- Wernicke, B., 1981 : Low-angle normal faults in the Basin and Range province: Nappe tectonics in an extending orogen. Nature, v.291, 645-648.

-----, 1987a : Basin and Range extensional tectonics at the latitude of Las Vegas, Nevada. Geol. Soc. Am. Abs. with programs, v.19, 887.

-----, 1987b : Neogene extensional tectonism in the Basin and Range province at the latitude of Las Vegas, Nevada [abs.]. Late Cenozoic Evolution of the Southern Great Basin. A Workshop.

Wright, L.A., Serpa, L. and Troxel, B.W., 1987 :

Tectonic-chronologic model for wrench fault related crustal extension, Death Valley area, California. Geol. Soc. Am. Abs. with programs, v.19, 898-899.

----- and Troxel, B.W., 1973 : Shallow-fault interpretation of basin and range structure, southwestern Great Basin: In Dejong, K. A. and Scholten, R. eds, Gravity and tectonics. New York, Jhon Wiley and Sons, 397-407.

(図の説明文中の文献は一部省略)