

非対称プル・アパート堆積盆の擬似モデル実験

Analogue model experiments of asymmetric pull-apart basins

岩本正人*・宮田隆夫**

Masato IWAMOTO* and Takao MIYATA**

Abstract: Mechanism of the evolution of asymmetric pull-apart basins has become clear, based on its analogue model experiment. The experiment utilizes a sand-model set upon a stationary bended plastic plate at a slant of 30° , 60° , 90° , respectively. To simulate the pull-apart basin process, the sand-model is made to move parallel to the plastic plate at a constant rate. The material of the sand-model is essentially dry sand which possesses a low cohesive strength relative to the commonly used scale ratio of 10^{-5} to 10^{-6} . The following results are obtained: 1) The secondary fault forms roughly parallel to the master fault, and a pull-apart basin is generated between the master fault and the secondary fault; 2) Further increasing the movement of the sand-model generates younger secondary fault between the older secondary fault and the master fault, and a next subsidence is formed close to the releasing bend of the master fault. The maximum subsidence (depoenter) migrates relatively to the releasing bend. 3) When the dip angle of the master fault is more gentle, the basin center of pull-apart basin is generated away from the releasing bend of the master fault. These observations in the case of the steep angle of the master fault are in close agreement with the inferred basin formation of the Izumi sedimentary basin (Miyata, 1990).

はじめに

プル・アパート堆積盆は横ずれ断層の releasing bend, あるいは releasing overstep における, 局所的な地殻の伸張によって生じる (Crowell, 1974). プル・アパート堆積盆の中

には, 中央構造線に沿う和泉堆積盆 (Miyata, 1990) や, Dead sea Transform に沿う堆積盆 (Zak and Freund, 1981) のように堆積中心が一方方向に移動し, 非対称な構造をもつものがある. しかし, このような非対称プル・アパート堆積盆の形成機構についてはまだ十分解明されてい

1993年10月12日受付. 1994年1月21日受理.

*神戸大学大学院自然科学研究科

Graduate School of Science and Technology, Kobe University

**神戸大学理学部地球惑星科学科

Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Kobe University

ない。さらに諸地域の研究により示されたブル・アパート堆積盆の形成モデルにおいては、releasing bendあるいはreleasing overstepのできる2次的断層の方向やパターンについて見解が異なっている。例えば、田老断層に沿う久慈堆積盆(山内・箕浦, 1986)と棚倉破碎帯に沿う堆積盆(Amano, 1990)とは異なる。本論では、擬似モデル実験を用いて、2次的断層の形成様式を明らかにし、合わせて非対称ブル・アパート堆積盆の形成機構についても検討する。

実験のためのモデル化

擬似モデル実験は、地質学的な長い時間スケールでおこる現象を室内で短時間に再現できるという利点をもつ。一方、断層のような不連続面が生じる変形については、有限要素法を用いた数値実験の方法は確立されておらず、複雑に断層が発達して生じるブル・アパート堆積盆の再現には不向きである。また、擬似モデル実験は、システムを支配する物理法則が完全に数式化されていなくても、物理法則のパラメータについて相似性を考慮しながら実験をおこなうことができる(小室・藤田, 1980)。以上の理由により、ブル・アパート堆積盆の再現には、擬似モデル実験がきわめて有効であると思われる。

しかしながら、擬似モデル実験の結果が地質学的に意味あるものとするためには、適当な地質現象のモデル化、および十分な相似則の検討が必要となる(Hubbert, 1937)。実験をおこなうにあたりブル・アパート堆積盆の形成モデルを次のように単純化した。

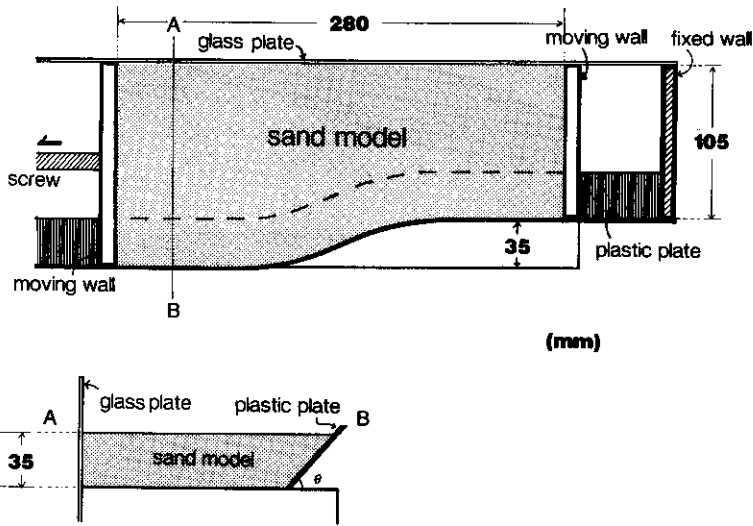
左横ずれをするmaster faultは、走向方向に向かって左になめらかに屈曲するreleasing bendを持ち、master faultのseparationは10kmとする。これらはすべて、奈良県五條市付近の中央構造線にあわせており、master faultの曲率についてもほぼ同じにする。master faultの傾斜角については、それぞれ 30° ・ 60° ・ 90° の3つのケースを設定し、地下10kmですべてdetachmentに移行するものと仮定する。また、

detachmentより上部の地殻は、完全に脆性変形をするものとする。master faultによって分けられる2つの地塊のうちの一方は剛体的にふるまい、master faultの変位によって変形しないものとする。

実験装置と実験手順

第1図に実験装置の平面図と縦断面図を示す。実験装置はなめらかに曲げられたプラスチック・プレート、ガラス板、固定壁に囲まれた細長い箱型をしており、その中にスクリウムを取り付けた可動壁ともうひとつの可動壁の間にsand-model($105 \times 280 \times 35\text{mm}$)を設置した。スクリウムの回転により2つの可動壁とそれにはさまれたsand-modelは一体となって同一方向に移動する。プラスチック・プレート、ガラス板、および底面とsand-modelの間には可動壁に固定された薄いプラスチック・シートをはさむことによって、2つの可動壁を同時に動かしたときに生じるsand-modelと装置の間の摩擦効果を取りのぞいている。sand-modelはほぼ一定の速度 $6.7 \times 10^{-3}\text{cm/s}$ でゆっくり一方向に移動する。プラスチック・プレートは水平面に対する傾斜角を 30° ・ 60° ・ 90° として装置に固定し、それぞれについて実験をおこなった。同じ条件の実験は3回以上おこない、実験結果の再現性を確認した。

実験手順は、(1)圧密しないように十分注意しながら、褐色の標準砂でsand-modelを装置内部に設置し、表面を平らにする。(2)モデル物質より細粒の珪砂(粒径 $80\mu\text{m}$ 以下)でsand-modelの表面を薄くコーティングして、マーカーを引く。(3)sand-modelをゆっくり移動させ、1cm変位したら停止させる。sand-modelの表面を装置上方・側面からカメラおよび8mmビデオにて撮影する。側方から目視で最大沈降部の位置とその沈降量を測定する。(4)sand-modelの表面にできた沈降部を、圧密しないように注意しながらモデル物質で埋めて、平らにする。堆積物をはっきり識別するために、褐色の標準砂と白色の珪砂を交互に用いる。(2)~(4)



第1図 実験装置の模式図。上図，平面図；下図，A-B縦断面図。θ，プラスチック・プレートの傾斜角。

の手順を7回繰り返す、合計7 cmの変位を与える。実験終了後、sand-modelの垂直断面を一定間隔ごとにとり、堆積物の厚さを測定した。なお(2)の手順は、sand-modelの表面にマーカをはっきりと記すためにおこなっており、この手順を省略した実験との比較によって、(2)の操作が実験に与える影響は無視できることを確認した。

モデル物質とモデル比

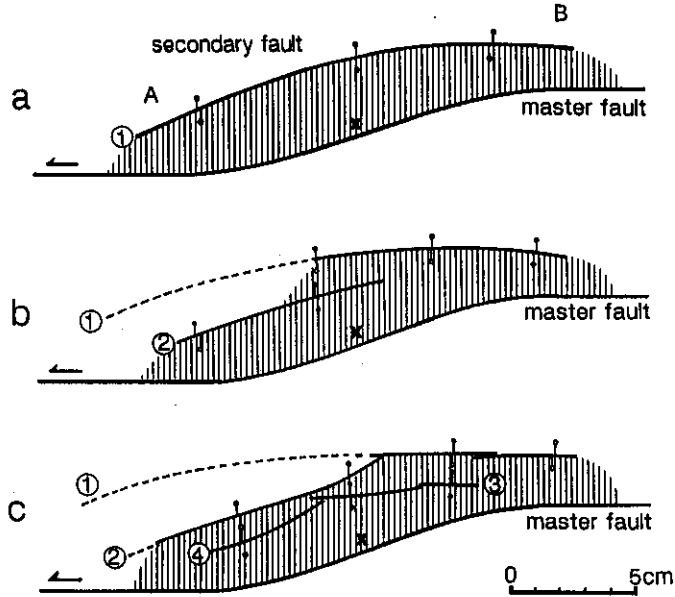
モデルと天然の長さの相似比を 3.5×10^{-6} とすると、モデルでの35mmは、実際の10kmにあたる。実験は、天然と同じ重力場でおこなうことから、モデル物質は長さの相似比と密度の相似比に合わせて、強度の非常に小さいものを用いる必要がある。乾燥した砂は、その破壊条件の式がNavier-Coulombの直線関係で示され、粘着力は非常に小さい(例えば、Ellis and McClay, 1988; Krantz, 1991)。以上の理由により、地殻上部での脆性変形のモデルを扱う擬似モデル実験において、乾燥した砂は相似の条件

を非常によく満たすものとして広く使用されている(Horsfield, 1977; Naylor et al., 1986; Koopman et al., 1987; McClay and Ellis, 1987; Marshak and Wilkerson, 1992)。ブル・アパート堆積盆は地殻上部での脆性変形によって形成されると考えられるので、この実験では平均粒径を $250 \mu\text{m}$ 程度にそろえた乾燥した珪砂と標準砂をモデル物質として使用した。モデル物質の層厚は35mmで、エッジ効果が無視できる程度に長さも幅をもたせた。

実験結果

1. プラスチック・プレートの傾斜角 90° のとき(第2図・第4図A)

1) sand-modelの表面にあらわれる2次的断層系 sand-modelの移動にともなって、sand-model中にはプラスチック・プレート(第2図のmaster fault)とほぼ平行にsecondary fault(第2図aの断層①)が発生し、この断層とプラスチック・プレートの間が沈降する(ステージa)。sand-modelの変位の増大とともに、断層①のA側が



第2図 sand-model 実験結果の例. plastic plate(master fault)の傾斜角が 90° のとき. 実線, 活動的断層; 破線, 非活動的断層; X, 各ステージごとの最大沈降部; 縦線部, 沈降部; 丸付き線, マーカー; ステージ a, sand-model の変位量 2 cm のとき; ステージ b, sand-model の変位量 4 cm のとき; ステージ c, sand-model の変位量 6 cm のとき.

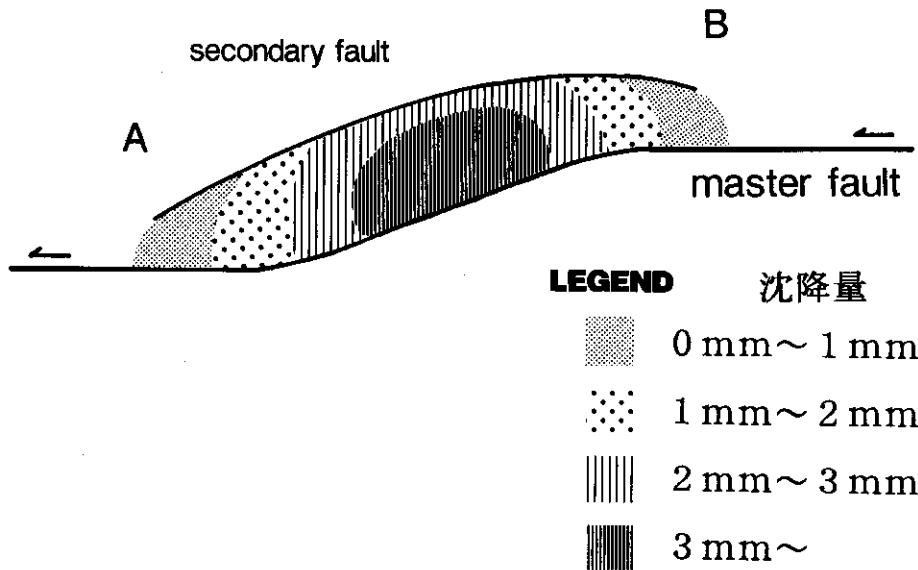
プラスチック・プレートの屈曲部から離れるように相対的に移動し, この断層の垂直方向の変位は徐々に減少する. さらに sand-model の変位が増大すると, 断層①とプラスチック・プレートの間に新たな secondary fault (b の断層②) が発生する (ステージ b). 新しい secondary fault の垂直変位が大きくなると, 外側の断層の一部 (断層①の A 側) は活動が停止する. この断層②も sand-model の変位の増大に伴い, プラスチック・プレートの屈曲部から離れるように相対的に移動する. さらに sand-model の変位が増大すると, 断層②は断層①に収斂し, その断層とプラスチック・プレートに次の新たな断層③, ④が発生する (ステージ c).

secondary fault は, プラスチック・プレートの屈曲部付近でプラスチック・プレート側が落ちる縦ずれ成分をもっているが, 屈曲部から両

側に離れるにしたがって縦ずれ成分は小さくなり, 横ずれ成分 (第2図の断層①の A 側で左横ずれ, B 側で右横ずれを示す, マーカー参照) が卓越してくる.

2) 沈降部と沈降量

プラスチック・プレートの屈曲部に沿い, secondary fault とプラスチック・プレート間に沈降部が生じる (第3図). sand-model の変位 1 cm あたりの沈降量は, プラスチック・プレートの屈曲部の中央付近がもっとも大きく (最大沈降部 x), そこから両側に離れるにしたがって小さくなっている. sand-model の移動に伴って secondary fault はプラスチック・プレートから離れるように移動するので, 沈降部の面積は広がるが, 沈降部の全体の沈降量は小さくなる. secondary fault とプラスチック・プレート間に新たな secondary fault が発生すると,



第3図 sand-model 実験で形成された沈降部の形状. sand-model の変位量 1 cm のとき.

新しい断層とプラスチック・プレートの間の沈降量が大きくなり、プラスチック・プレートの屈曲部から離れた古い secondary fault の活動が停止すれば、沈降部は新しい secondary fault とプラスチック・プレートの間に移る。(第2図のステージ a からステージ b)。最大沈降部 x とプラスチック・プレートの屈曲部との相対的位置は変化しないので、sand-model の変位 1 cm ごとに堆積物に記録される最大層厚部 (depocenter) は、古いものほど深く、またプラスチック・プレートの屈曲部から離れている。

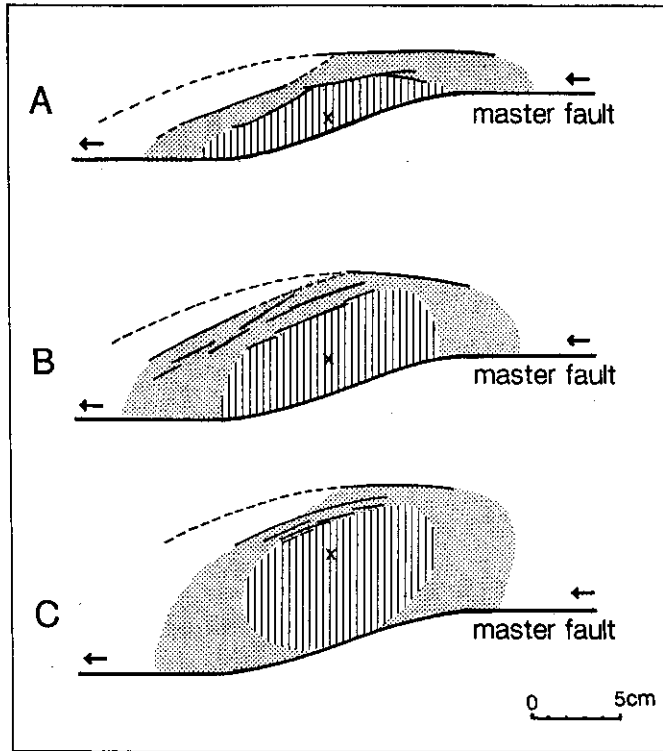
2. プラスチック・プレートの傾斜角が 60° のとき(第4図B)

sand-model の変位に伴い、プラスチック・プレートとほぼ平行に secondary fault が発生し、その形状やずれのセンスは傾斜角 90° のとき(第4図A)と変わらない。また傾斜角 90° のときと同様に、sand-model の変位の増大とともに secondary fault はプラスチック・プレートから離れ、断層の垂直変位が小さくなる。さらに sand-model の変位が増大すると、secondary

fault とプラスチック・プレートの中に新しい secondary fault が発生し、沈降部は新しい secondary fault とプラスチック・プレートの間に移動する。プラスチック・プレートの傾斜角が 90° のときと比較すると、secondary fault は相対的にプラスチック・プレートから離れた位置に発生し、その断層の垂直変位も小さい。また、沈降部の面積は広くなるが、sand-model の変位 1 cm あたりの沈降量は小さくなる。最大沈降部は相対的にプラスチック・プレートより離れた位置にできる。

3. プラスチック・プレートの傾斜角 30° のとき(第4図C)

プラスチック・プレートとほぼ平行に発生する secondary fault の形状やずれのセンス、および sand-model の変位に伴う secondary fault の相対的移動、新たな secondary fault の発生などは、傾斜角 90° 、 60° のとき(第4図A・B)と変わらない。しかし、secondary fault はプラスチック・プレートからさらに離れた位置に発生し、その断層の垂直変位も小さくなる。また、沈降部の面積もさらに広くなり、sand-model の



第4図 sand-model 実験結果の例. sand-model 変位量 7 cm のとき. A, plastic plate(master fault)傾斜角 90° のとき. B, plastic plate(master fault)傾斜角 60° のとき. C, plastic plate(master fault)傾斜角 30° のとき. 点部, 沈降量 2 mm 以下. 縦線部, 沈降量 2 mm 以上. X, 最大沈降部.

変位 1 cm あたりの沈降量はより小さくなる. 最大沈降部(x)は上記のプラスチック・プレートの傾斜角が 60° のときより, プラスチック・プレートからさらに離れた位置にできる.

実験結果の考察

実験装置は薄いプラスチック・シートを挟むことによって, sand-model とプラスチック・プレートの間の摩擦の効果を取りのぞいている. このことにより, 実験における sand-model の移動は, 非常に小さな摩擦抵抗をもつ横ずれ断層の変位に伴う地殻の変形を再現している. さらに, master fault の形状は一定で, 片側の地塊は剛体であると仮定している. これは master fault の変位の増大によって異地性の

block と接し, master fault の両側で地殻に強度差があり, 一方の block にのみ変形が生じるモデルを示している. したがってこの実験では, releasing bend をもつ master fault の変位に伴って成長するプル・アパート堆積盆を再現できると考えられる.

実験結果は, 次のようなプル・アパート堆積盆の形成機構を示している.

- (1) releasing bend をもつ master fault の変位に伴って, master fault とほぼ平行に secondary fault が発生し, これらの 2 断層の間が沈降して, プル・アパート堆積盆が形成される.
- (2) master fault の変位の増大につれて, secondary fault は releasing bend から離れるように相対的に移動し, それとともに断層の活動が衰える. そして, secondary fault と master fault の間に

新しい secondary fault が発生すると、沈降部はこの新しい secondary fault と master fault の間に移動する。こうしてプル・アパート堆積盆は master fault の releasing bend に向けてその堆積物が新しくなるように、一方向に成長する。(3)低角の傾斜角をもつ master fault に沿って発生するプル・アパート堆積盆は、その面積が広くなり、depocenter は master fault からより離れた位置にできる。

実験結果と和泉堆積盆との比較

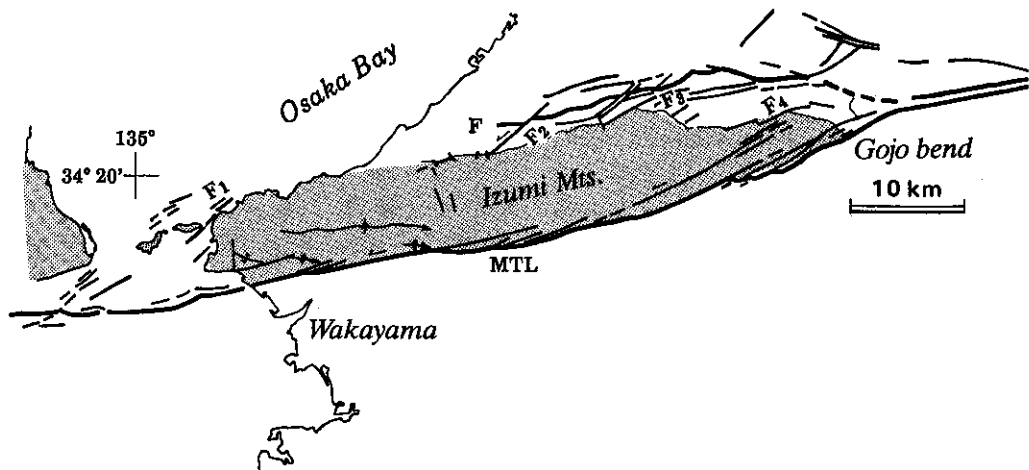
四国西部から紀伊半島和泉山脈まで約300kmの区間に上部白亜系和泉層群が分布しており、その分布域は和泉堆積盆と呼ばれている。和泉山脈地域の和泉堆積盆は、中央構造線の左横ずれ運動によって形成されたプル・アパート堆積盆と考えられている(Miyata, 1990)。和泉堆積盆の東端の奈良県五條市付近で中央構造線は走向方向にみて左に屈曲し、堆積当時には releasing bend になっていたと考えられる。この付近の中央構造線の断層系(第5図)と実験結果を比較して、和泉堆積盆の形成機構について考察する。中央構造線の約12km離れた和泉山脈北側には、E-W方向の断層系とNE-SW方向の断層系がよく発達している。またNE-

SW方向の断層(第5図, F_2 , F_3)は左横ずれを示している。これらの断層系は、実験であらわれた secondary fault と非常に調和的であり、中央構造線の変位に伴う和泉堆積盆の形成過程で発達したと考えられる。和泉堆積盆は堆積中心が段階的に東進するモデルによって説明されているが、これは非対称プル・アパート堆積盆は相対的な沈降部の移動によって一方向に成長するとした実験結果(2)とよく調和している。以上より、secondary fault はプル・アパート堆積盆の形成に重要な役割を果たしていると考えられる。

実験結果(3)は releasing bend が存在すれば master fault の傾斜角によらずプル・アパート堆積盆が形成されること、および master fault の傾斜角が低角になるにつれて secondary fault や堆積盆の depocenter の位置が master fault から離れることを示している。和泉山脈地域の和泉堆積盆の depocenter は中央構造線のすぐ北側に位置しており、この実験結果は和泉堆積時の中央構造線の傾斜角が基本的に低角ではなく、高角であった可能性を示唆している。

おわりに

プル・アパート堆積盆の形成機構についてよ



第5図 和泉山脈地域の中央構造線の断層系(Miyata et al., 1992による)。MTL, 中央構造線; F, 領家主帯南限の境界断層; F_1 - F_4 , 分岐断層; 点領域, 和泉層群。

り定量的な議論を行うために, secondary fault の変位量, 沈降量の測定を精度よく行なえる測定装置の取りつけが可能で, コンピューター制御のできる大型の実験装置を製作して, 現在検討中である. この装置によって, 堆積盆がどのくらいまで沈降するのか? とか, master fault の変位量と沈降量の関係などの議論が可能になると期待している.

謝辞 大阪大学の増田富士雄教授には sand-model 実験に関して有益な御教示をいただいた. ここに記して感謝する.

文 献

- Amano, K., 1990, Tectonics and sedimentation of strike-slip basins in an island arc related to opening of a marginal sea. *13th International Sedimentological Congress Abstracts*, 19-20.
- Crowell, J. C., 1974, Origin of late Cenozoic basins in southern California. In Dickinson, W. R., ed., *Tectonics and Sedimentation. Spec. Publ. Soc. Econ. Paleont. Miner. Turso*, **22**, 190-204.
- Ellis, P. G. and McClay, K. R., 1988, Listric extensional fault systems results of analogue model experiments. *Basin Res.*, **1**, 55-71.
- Horsfield, W. T., 1977, An experimental approach to basement-controlled faulting. In Frost, R. T. C. and Dikkers, A. J., eds., *Fault Tectonics in NW Europe. Geologie Mijnb.*, **56**, 1459-1520.
- Hubbert, M. K., 1937, Theory of scale models as applied to the study of geologic structures, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **48**, 1459-1520.
- 小室裕明・藤田至則, 1980, グリーンタフ造山における陥没盆地の発生機構—陥没形成のメカニズムに関するスケールモデル実験—. *地質雑*, **86**, 327-340.
- Koopman, A., Speksnijder, A. and Horsfield, W. T., 1987, Sand-box model studies of inversion tectonics. *Tectonophysics*, **137**, 379-388.
- Krantz, R. W., 1991, Measurements of friction coefficients and cohesion for faulting and fault reactivation in laboratory models using sand and sand mixtures. In Cobbold, P. R., ed., *Experimental and Numerical Modeling of Continental Deformation. Tectonophysics*, **188**, 203-207.
- Marshak, S. and Wilkerson, M. S., 1992, Effect of overburden thickness on thrust belt geometry and development. *Tectonics*, **11**, 560-566.
- McClay, K. R. and Ellis, P. G., 1987, Geometries of extensional fault systems developed in model experiments. *Geology*, **15**, 341-344.
- Miyata, T., 1990, Slump strain indicative of paleoslope in Cretaceous Izumi sedimentary basin along Median tectonic line, southwest Japan. *Geology*, **18**, 392-394.
- Miyata, T., Nishimura, T., Maejima, W. and Tanaka, J., 1992, Cretaceous strike-slip basin along the Median Tectonic Line. *29th IGC Field Trip B06*, 213-223.
- Naylor, M. A., Mandl, G. and Sijpesteijn, C. H. K., 1986, Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states. *J. Struct. Geol.*, **8**, 737-752.
- 山内 仁・箕浦幸治, 1986, 久慈地域の久慈層および野田層. *Sci. Rep. Hirosaki Univ.*, **33**, 96-120.
- Zak, I. and Freund, R., 1981, Asymmetry and basin migration in the Dead Sea rift. In Freund, R., and Garfunkel, Z., eds., *The Dead Sea Rift. Tectonophysics*, **80**, 27-38.