付加体形成過程のモデル実験*

Analogue model experiments on the formation of accretionary prism

山田泰広¹

Yasuhiro Yamada¹

受付: 2006年6月30日

受理: 2006年7月28日

* 日本地質学会第113年学術大会(2006年・高知)
見学旅行(J班)案内書

¹ 京都大学工学研究科社会基盤工学専攻
Department of Civil and Earth Resources
Engineering, Kyoto University, Kyoto
615-8540, Japan.
E-mail: yama@electra.kumst.kyoto-u.ac.jp.
Website: <http://earth.kumst.kyoto-u.ac.jp/yamada/>

概要

スケールアナログモデル実験(以下モデル実験と略)は, 地質構造の形態やその形成過程を検討するための優れた手法である。自然現象である地質構造形成過程を縮小して, それと物理学的に等価な現象を実験室で再現するためには, 相似律と呼ばれる理論に基づいてサイズや物性を変更する必要がある。上部地殻の岩石変形挙動を脆性破壊で近似した場合, 相似律によると実験材料を乾燥粒状体(砂やガラスビーズなど)にする必要がある。今回のミニスクールでは, 実験理論である相似律と実験材料の物性に関して概略を説明した後, 実際に乾燥砂を使ったモデル実験を行って, モデル化した付加体形成過程を観察する。

Key Words

モデル実験, 付加体, 構造形成過程, 相似律

analogue model experiments, accretionary prism, deformation process, scaling theory, similarity condition

1. はじめに

乾燥砂などの実験材料を用いるモデル実験は, ある地域での地質構造がどのように形成されてきたのかという問題に答える優れた解析手法である。この手法が地質学分野に初めて応用されてから約100年が経過したが, 特に最近20年間に解析手法としてのモデル実験は劇的に進化した。これは, 石油開発会社が油ガス田探査のために深部地質情報を取得する目的で物理探査を実施し, そのデータを解釈するためにモデル実験による知見を用いるようになったことによる。代表的なモデル実験例として, 伸張応力場における実験(Horsfield, 1977, 1980; McClay and Ellis, 1987a, b)や, 横ずれ断層に伴う変形構造(Naylor et al., 1986; Richard et al., 1995), スラスト構造(Colletta et al., 1991; Huiqi et al., 1992; Lallemand et al., 1992), インバージョン構造(Koopman et al., 1987; Buchanan and McClay, 1991; Yamada and McClay, 2003a, b, 2004), 岩塩流動に対する被覆層の変形(Vendeville and Jackson, 1992a, b; Jackson and Vendeville, 1994; Alsop, 1996)などが挙げられる。最近では, 短縮性横ずれ断層に伴う変形構造(Richard and Cobbold, 1990)や物性異常層を含む地質構造(Yamada et al., 2006)など, より複雑な地質構造の解析にも用いられるようになった。

地質構造の形成には数万年から数百万年あるいはそれ以上の時間が必要であり, そのサイズも数百mから数千

kmと大規模である。そのため, 実験室内でこれらをモデル化した現象を再現する場合には, 時間やサイズなどを縮小する必要がある。この縮小作業の際には, 相似律(相似則とも言う)と呼ばれる規則を実験条件を満たしているか慎重に検討する必要がある。相似律を満たしていないモデル実験は, たとえ自然現象に似た結果が再現されたとしても, それを使って議論を進めることは危険である。後で述べるように, 上部地殻における岩石の脆性破壊は乾燥砂などの粒状体材料でもっともよくモデル化でき, かつ相似律を満たすことが可能なため, 乾燥砂を用いたモデル実験, 通称砂箱実験が中心的な役割を果たしてきた。

今回のミニスクールでは, モデル実験を行うために必要な相似律理論やモデル実験手法について概略を学んだ後, 実際に付加体形成過程を題材としたモデル実験を行って, 実験結果を南海トラフ付加体などに見られる地質構造の形態と比較する。

2. 相似律と実験材料

(1) 相似律

自然現象を縮小して行われるモデル実験の結果を実際の地質構造(プロトタイプと呼ぶ)に応用するためには, 相似律と呼ばれる実験条件を満たす必要がある。Hubbert(1937, 1951)によると, モデル実験の設定(単にモデルと呼ばれる)は, 幾何学的(geometrically)のみならず運動学的(kinematically)および動力学的

(dynamically) にプロトタイプに相似である必要がある．以下ではHubbert(1937, 1951)に基づいて，モデル実験で必要な相似律理論について解説する．なお，垣見・加藤(1994)による解説も併せて参照されたい．

a. 幾何学的相似性

モデルとプロトタイプにおいて，対応する全ての長さの比と角度が同一であるとき，両者は幾何学的に相似である．このとき，両者の長さ比 R_l は以下の式で定義される．

$$R_l = l_m / l_p \quad (1)$$

ここで l_p はプロトタイプにおける任意の部分の長さ， l_m はそれに対応する部分のモデル中での長さである．これを用いると面積比は以下のように表現される．

$$A_m / A_p = R_l^2 \quad (2)$$

ここで A_m と A_p はそれぞれモデル中のある部分とプロトタイプ中のそれに対応する部分の面積である．同様に体積比は以下のように表現される．

$$V_m / V_p = R_l^3 \quad (3)$$

ここで V_m と V_p はそれぞれモデル中のある部分とプロトタイプ中のそれに対応する部分の体積である．

b. 運動学的相似性

モデルがプロトタイプと長さ比 R_l で幾何学的相似性を保ち，かつモデルの変形に要する時間がプロトタイプ中のそれに対応する変形時間に対してある比を保つとき，そのモデルはプロトタイプに対して運動学的に相似である．時間比 R_t は以下のように定義される．

$$R_t = t_m / t_p \quad (4)$$

ここで t_m と t_p はそれぞれモデルにおける時間（たとえば変形に要する時間）とプロトタイプにおいてそれに対応する時間である．

モデルがプロトタイプに対して運動学的に相似であるとき，両者において対応する地点の速度と加速度はある比を示すはずである．速度比 R_v は以下のように表される．

$$\begin{aligned} R_v &= v_m / v_p \\ &= (l_m / t_m) / (l_p / t_p) \\ &= R_l R_t^{-1} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで v_m と v_p はそれぞれモデルとプロトタイプにおいて対応する地点の速度である．同様に加速度比 R_a は以下のように表される．

$$\begin{aligned} R_a &= a_m / a_p \\ &= (l_m / t_m^2) / (l_p / t_p^2) \\ &= R_l R_t^{-2} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで a_m と a_p はそれぞれモデルのある部分とプロトタイプ中のそれに対応する部分の加速度である．

c. 動力学的相似性

モデルとプロトタイプが動力学的に相似であるためには，まず両者において微小な単位体積 dV を設定し，この部分に作用する力（例えば，重力，慣性力，弾性力，摩擦力など）が両者で相似である必要がある．両者において運動学的相似性が保たれているとき，微小体積 dV の質量を dm とすると力は dm に比例する．したがって両者における力を相似にするためには，両者における質量分布を相似にする必要がある．モデル中のある部分の単位体積の質量を dm_m ，プロトタイプ中のそれに対応する部分の質量を dm_p とすると，質量比 R_m は以下のように定義される．

$$R_m = dm_m / dm_p \quad (7)$$

動力学的相似性は以下の条件を満たした場合に成立する．

- ・プロトタイプ中の微小体積の質量 dm_p に作用する力 F_p に対応して，モデル中の微小体積の質量 dm_m に作用する力 F_m が存在する．
- ・ F_p と F_m の方向が同一である．
- ・以下の式で定義される F_p と F_m の絶対値の比 R_f がモデルとプロトタイプ中で常に一定である．

$$R_f = F_m / F_p \quad (8)$$

上記をまとめると，相似律の一般的な条件とは，二つの比較対象が幾何学的・運動学的に相似であること，両者の質量（密度）分布がある比で保たれている（相似である）こと，両者に作用する全ての対応する力が同じ方向で同時にある比を保つ（相似である）こと，となる．

d. 各比率の関係

力学では，全ての量は質量・長さ・時間の組み合わせで記述することが可能である．従ってモデルで使用する全ての力学量のプロトタイプとの比は，質量比 R_m と長さ比 R_l ，時間比 R_t によって表現可能である．例えば，上記した R_f は以下のように表現される．

$$R_f = R_m R_l R_t^{-2} \quad (8')$$

また，実験材料とプロトタイプ(岩石)の密度比 R_d は以下のように表現される．

$$R_d = R_m R_l^{-3} \quad (9)$$

実験材料とプロトタイプの強度比 R_s は，以下に示すように応力比と同一式で表現される．

$$R_s = R_m R_l^{-1} R_t^{-2} \quad (10)$$

これは密度比 R_d を用いて以下のように書き換えが可能である。

$$R_s = R_d R_l^2 R_t^{-2} \quad (11)$$

遠心装置などを使わずにモデル実験を通常の重力環境下において実施する際には、モデルとプロトタイプ間の重力加速度比 R_g は 1 である。この重力加速度比 R_g は加速度比 R_a と同一であることから以下のように記述できる。

$$\begin{aligned} R_g &= R_a \\ &= R_l R_t^{-2} \\ &= 1 \end{aligned} \quad (12)$$

これから以下の関係が導かれる。

$$R_l = R_t^2 \quad (13)$$

(11) 式と (13) 式から次式が導かれる。

$$R_s = R_d R_l \quad (14)$$

実験材料の密度は実際の岩石密度と大きく変わらない場合が一般的であることから、この式は実験材料の強度を長さ比 R_l に従って縮小する必要があることを示している。

(2) 相似律のモデル実験への応用と実験材料

モデル実験は上記した相似律に従って行われなくてはならない。すなわち、実験材料の物性は相似律が求める条件に基づいて、プロトタイプから縮小されたものでなくてはならない。

最初に検討すべき項目は、プロトタイプの変形挙動である。変形挙動は解析対象とする地質体の岩相や変形速度によって異なるが、本論では上部地殻に一般的に存在する岩相が $10^{-13}/\text{sec}$ 程度（数 km 程度の地質体に対して年間数 cm 程度）の変形速度で変形する場合を対象とする。泥岩や蒸発岩類などによる流動変形の寄与が小さい場合には、この条件での変形挙動は一般に脆性破壊と近似できる。そこで、以下の議論ではプロトタイプの変形挙動を「脆性破壊」のみによって支配されると仮定し、粘性の影響を無視した。したがって、実験材料は主として脆性破壊によって変形挙動が近似できるものを選択する必要がある。

次に長さ比 R_l を検討する。一般的な実験装置のサイズは、高さ 10 - 20 cm、幅 20 - 60 cm、長さ 40 - 150 cm 程度である。一方、脆性破壊で変形挙動が近似できる上部地殻（プロトタイプ）の厚さは鉱物組成と温度勾配、変形速度によって変化するが、ほぼ 10 - 20 km 程度である。したがって一般的な実験装置における長さ比 R_l は、以下に示すように 10^{-5} 程度となる。これは、モデル中の 1 cm がプロトタイプ中の 1 km に相当することを示して

いる。

$$\begin{aligned} R_l &= (\text{ca. } 15 \text{ cm}) / (\text{ca. } 15 \text{ km}) \\ &= 10^{-5} \end{aligned} \quad (15)$$

もちろん検討対象とする地質体のサイズが小さく、モデル中の 1 cm がプロトタイプ中の 100 m 程度に相当する場合には、長さ比 R_l は 10^{-4} となる。

式 (14) において $R_d = 1$ とすると、実験材料の強度を長さ比 R_l に応じて減少させる必要がある。そのためには、以下の二つの条件を満たす必要がある。

1. 実験材料の固着強度が、プロトタイプの固着強度に比べて、長さ比 R_l に従って縮小した値であること
2. 実験材料とプロトタイプの内部摩擦角が同一であること

上部地殻を構成する岩石の固着強度をほぼ 5.0 MPa 程度とする (Horsfield, 1977; Jaeger and Cook, 1979; Mandl, 1988) と、実験材料の固着強度を 50 Pa 程度とする必要がある。これは 0.5 g/cm^2 に相当する非常に小さい値である。これを満たすような非常に小さな固着強度を持つ物質として、乾燥砂などの粒状体材料が挙げられる。また、剪断試験によって取得された乾燥砂の内部摩擦角は約 30 - 40 度程度と一般的な岩石の内部摩擦角とほぼ同一である。実際に重力環境下における乾燥砂と上部地殻の一般的な剪断強度プロファイルと比較すると、両者が相似であることが読み取れる (第 1 図)。なお、上部地殻プロファイルの縦軸は km 単位で深度 10 km まで、乾燥砂層プロファイルの縦軸は cm 単位で深度 10 cm まで表示してある。砂層の深度 1 cm (長さ比 10^{-5} に従うと 1 km に相当) 程度以浅では乾燥砂の内部摩擦角がやや大きいことから強度は少々過大となるが、それ以深ではこの効果による影響は減少する。

粒状体材料の変形挙動は一般に脆性破壊によって近似できることから、プロトタイプの変形挙動と同一である。

第 1 図. 乾燥砂と上部地殻の剪断強度プロファイル (McClay, 1990)。

このことは、粒状体材料を使用することによって相似律を満たしたモデル実験を行うことが可能であることを示している。

なお式(13)によると、長さ比 R_L を 10^{-5} とした場合には時間比 R_t は 3×10^{-3} 程度となることから、数万年程度の変形時間を要した構造変形を再現するためには数百年程度の実験時間を要することとなる。しかし、上記した脆性破壊挙動は応力依存であるが、歪み速度には依存しないため、乾燥砂などの粒状体実験材料の変形挙動も歪み速度には依存しないと考えられている。このため、実験材料に加速度を与えないように設定した「静的」なモデル実験を行う限り、実験時間が数時間程度となるように歪み速度をある程度調整して実験を行うことが可能である。

プロトタイプが異方性を持つときには、実験材料にも同様の異方性を持たせる必要がある。特に堆積層について大縮尺の解析を行う際に、プロトタイプの岩石物性（内部摩擦や密度）が各層準によって大きく異なる場合には、それに対応して数種類の実験材料を準備する必要がある。しかし固着強度については、相似律によって非常に小さい値が推奨されるため、粒状体材料を使用する限りいずれにせよ問題とはならない。また粒状体材料は一般的な実験条件ではあまり圧密されないため、内部摩擦・材料密度はともに実験中ほぼ一定である。

岩塩層や泥岩層の流動など粘性流動が卓越する構造変形をモデル実験によって解析する場合には、相似律（特に歪み速度）をより詳細に検討する必要がある。流動変形をモデル化するための実験材料として、現在ではPDMSなどのシリコンポリマーが使われることが一般的である（Vendeville and Jackson, 1992a, bなど）。

3. 付加体形成のモデル実験

(1) 付加体形成過程のモデル化

付加体は、海洋プレートが沈み込む際にプレート上の堆積物がはぎ取られ、陸側に付加されることによって形成される。この形成プロセスは、ブルドーザーが土砂などを押しのけることと似ているため、付加体形成モデルとして一般的に「ブルドーザーモデル（von Huene and Scholl, 1991）」が使用される。それによると、付加体形成は「堆積物に壁を衝突させてはぎ取り・短縮変形させる」ことでモデル化できる。このモデルを用いて実験を行う際には、可動壁を用いて堆積物を短縮させる場合（fixed-wall model）と堆積物を移動させて固定壁に衝突させる場合（moving-wall model）の2種類のデザインが可能である（第2図）。Schreurs et al. (2006) の比較実験によると、両者の結果はほぼ同様となることから、この実験設定は実験結果に深刻な影響を与えないことが分かる。

(2) 実験装置と準備

今回使用する実験装置は高さ20cm、幅50cm、長さ150cmの金属製の箱である。ただし側板は透明アクリル板を用いており、それを通して内部の変形形態を観察可

a. fixed-wall model

b. Moving-wall model

第2図．ブルドーザーモデルによって付加形成モデル実験を行う際に可能な二つの実験設定。

能である。この実験装置を用いることで、前項で述べた実験デザインの両方が実施可能であるが、今回は前者のデザイン（fixed-wall model）に従って実験を行う。まず、底板の上に強化ビニール製のシートを設置し、その一端を金属壁の下端部に設けたスリットを通して箱の外に取り出した後、電動ドラム式の回転装置に固定する。電動ドラムを回転させることによって箱内のシートを一定速度で排出することが可能である。

次に実験材料を準備する。今回は粒径200 μm 程度の乾燥砂を使用するが、モデル中に不要な弱面をあらかじめ形成させないため、実験材料を空中落下法で実験装置の中に堆積させる。また、変形の様子が透明アクリル側壁を通して観察できるように、あらかじめ着色した砂を用いてマーカー薄層を適宜挟んでおく。実験材料を成形する際には、局所的な圧密などを生じさせないように留意する。

電動ドラムを回転させると、箱内のシート上に設置した実験材料が金属壁に衝突し、短縮変形する。なお、今回は毎分1cmの変位速度（シートの排出速度）を採用するが、これまでの検討によると変位速度を遅くしても実験結果に基本的な変化はない。

実験中に側壁を通して観察される変形形態は、三脚などで固定したデジタルカメラを用いて記録する。今回実施するモデル実験は、二次元平面歪みを想定した二次元実験であるため、実験中に実験材料上面の変形形態も併せて監視し、想定外の三次元変形が生じていないことを確認する。実験後にアニメーション作成や画像解析による詳細な検討を行うため、実験中には絶対にカメラを移動させてはならない。

(3) 実験中の観察事項

実験によって形成される変形形態について、特に以下

a. model result

b. interpretation

第3図．付加体モデル実験結果，実験材料は初期厚さ3cmの乾燥砂．図中のFTは前縁地に向かう方向の衝上断層で，BTは逆向き衝上断層．詳細は本文参照．

の事項について観察する．

a. 断層の形態と方向

実験によって大きく2種類の衝上断層が形成される(第3図)．一つははぎ取り変形を発生させている壁から離れる方向(前縁地に向かう方向)の衝上断層(第3図中のFT)で，一般に壁方向に25-30°傾斜する．もう一つは変位・傾斜ともに逆方向(後背地に向かう方向，ただし傾斜角はほぼ同一)の断層で，これを逆向き衝上断層と呼ぶ(第3図中のBT)．一般に変形先端部では衝上断層(FT1)と逆向き衝上断層(BT1)が同時に形成し，逆二等辺三角形の隆起帯(ポップアップ構造)を形成する．衝上断層は一般にその後も活動を継続し，規模の大きい断層に成長する．一方逆向き衝上断層は比較的短時間で活動を休止し，さらにその下盤側に新たな逆向き衝上断層が形成するため，最終的には数条の小断層が形成されることが多い(例えばBT1a, BT1b, BT1cの順に形成)．最終的な断面形態は複数の断層活動によって複雑な形態となるが，切断関係に注目することで断層の新旧関係を復元できる．

b. 断層形成の間隔(時間間隔と距離)

比較的規模の大きなFT系断層の形成間隔はほぼ一定である．注目すべきこととして，BT1aやBT2aなどの逆向き衝上断層群の初期形成位置は1世代前の衝上断層先端部にほぼ一致することが挙げられる．例えば，BT1aの表面到達位置はほぼFT2の表面先端位置に一致する．このことと断層系の傾斜角がほぼ一定であることから，

断層系の形成間隔は堆積物の厚さによって決定されることが読み取れる．実験における短縮速度をほぼ一定としていることから，断層形成の時間間隔もほぼ一定となる．このことは，実際のプレート沈み込み速度がほぼ一定と近似できる場合には，新規断層系の形成間隔がほぼ一定となることを示している．

c. 断層の活動/休止時期

実験によって形成されるFT系衝上断層の活動性に注目すると，一般に変形先端部の断層(第3図中ではFT1)のみが活動しており，ほかの断層系は活動を休止している(Yamada et al., 2006)．また逆向き衝上断層系については，先端部の断層系の中でもっとも最後に形成されたもの(第3図中ではBT1c)のみが活動している．つまり，付加体で観察される断層は先端部に位置するとき主として活動し，その後は付加体の一部として受動的に変形する．このことは，堆積物に加えられた短縮変位が主として先端部の断層系が活動することで消費されていることを示している．

d. 付加体全体の隆起形状

付加体全体の隆起形状は，固定壁近傍(第3図中では左側)がもっとも隆起量が大きく，変形先端部(第3図中では右側)に向かって小さくなるため，全体としては緩やかな三角形(楔形)となる．この形態から，付加体は英語でprismとかwedgeなどと呼ばれている．

(4) その他

最近, 実験結果を画像処理することでより詳細な断層活動を解析することが行われている。特にPIV (Particle Image Velocimetry) と呼ばれる手法は, 時間間隔において取得された画像を比較して微小領域ごとの移動速度を計算することが可能なため, モデル実験への応用が始まっている。Adam et al. (2005) やYamada et al. (2006) などの解析によると, モデル実験における付加体内の断層も一般に休止 - 再活動のサイクルを繰り返していることが読み取れる。付加体内において断層が再活動する条件に関する知見は, 付加体構造の発達過程やそれに伴う流体移動を議論する際に特に重要である。

付加体の断面形態に関しては, Davis et al. (1983) などによるcritical taper理論が広く知られている。この理論では, 付加体に作用する力のバランスを検討することによって, 付加体の表面傾斜角と底面の傾斜角 (一般に沈み込む方向に数度程度傾斜している), 堆積物の内部摩擦係数と底面の摩擦係数の関係について説明する。

文 献

- Adam, J., Urai, J.L., Wieneke, B., Oncken, O., Pfeiffer, K., Kukowski, N., Lohrmann, J., Hoth, S., van der Zee, W. and Schmatz, J., 2005, Shear localisation and strain distribution during tectonic faulting - new insights from granular-flow experiments and high-resolution optical image correlation techniques, *Jour. Struct. Geol.*, 27, 283-301.
- Alsop, G.I., 1996, Physical modelling of fold and fracture geometries associated with salt diapirism. In Alsop, G.I., Brundell, D.J. and Davison, I. eds., *Salt Tectonics*, Geol. Soc. Spec. Pub., 100, 227-241.
- Buchanan, P.G. and McClay, K.R., 1991, Sand box experiments of inverted listric and planar fault systems. *Tectonophysics*, 188, 97-115.
- Colletta, B., Letouzey, J., Pinedo, R., Ballard, J.F. and Bale, P., 1991, Computerized X-ray tomography analysis of sandbox models: Examples of thin-skinned thrust systems. *Geology*, 19, 1063-1067.
- Davis, D., Suppe, J. and Dahlen, F.A., 1983, Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges, *Jour. Geoph. Res.*, 88, 1153-1172.
- Hubbert, M.K., 1937, Theory of scaled models as applied to the study of geological structures. *Bulletin of Geological Society America*, 48, 1459-1520.
- Hubbert, M.K., 1951, Mechanical basis for certain familiar geological structures. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 62, 355-372.
- Horsfield, W.T., 1977, An experimental approach to basement controlled faulting. *Geologie en Mijnbouw*, 56, 363-370.
- Horsfield, W.T., 1980, Contemporaneous movement along crossing conjugate normal faults. *Jour. Struct. Geol.*, 2, 305-310.
- Huiqi, L., McClay, K.R. and Powell, D., 1992, Physical models of thrust wedges. In McClay, K.R. ed., *Thrust tectonics*, Chapman and Hall, London, 71-81.
- Jackson, M.P.A. and Vendeville, B.C., 1994, Regional extension as a geologic trigger for diapirism. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 106, 57-73.
- Jaeger, J.C. and Cook, N.G.W., 1979, *Fundamentals of rock mechanics* (3rd ed.) Chapman and Hall, London, 593pp.
- 垣見俊弘・加藤碩一, 1994, 地質構造の解析 - 理論と実際 -, 愛智出版, 274pp.
- Koopman, A., Specksnijder, A. and Horsfield, W.T., 1987, Sand box studies of inversion tectonics. *Tectonophysics*, 137, 379-388.
- Lallemant, S.E., Malavieille, J. and Calassou, S., 1992, Effects of oceanic ridge subduction on accretionary wedges: Experimental modelling and marine observations. *Tectonics*, 11, 1301-1313.
- Mandl, G., 1988, *Mechanics of Tectonic Faulting*. Elsevier, The Netherlands, 407pp.
- McClay, K.R., 1990, Deformation mechanics in analogue models of extensional fault systems, In Rutter, E.H. and Knipe, R.J. eds., *Deformation mechanisms, rheology and tectonics*. Geol. Soc. Spec. Publ., 54, 445-454.
- McClay, K.R. and Ellis, P.G., 1987a, Analogue models of extensional fault geometries. In Coward, M. P., Dewey, J. F. & Hancock, P. L. eds., *Continental Extensional Tectonics*. Geol. Soc. Spec. Publ., 28, 109-125.
- McClay, K.R. and Ellis, P.G., 1987b, Geometries of extensional fault systems developed in model experiments. *Geology*, 15, 341-344.
- Naylor, M.A., Mandl, G. & Sijpesteijn, C.H.K., 1986, Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states. *Jour. Struct. Geol.*, 7, 737-752.
- Richard, P., and Cobbold, P., 1990, Experimental insights into partitioning of fault motions in continental convergent wrench zones. *Annales Tectonicae*, 4, 35-44.
- Richard, P.D., Naylor, M.A. and Koopman, A., 1995, Experimental models of strike-slip tectonics. *Petrol. Geosci.*, 1, 71-80.
- Schreurs, G., Buiter, S.J.H., Corti, G., Costa, E., Hoth, S., Koyi, H., Kukowski, N., Lohrmann, J., Schlische, R., Withjack, M.O., Boutelier, D., Cavozi, C., Cruden, A., Daniel, J-M., DelVentisette, C., Brady, J.E., Hoffmann-Rothe, A., Mengus, J-M., Montanari, D., Nilforoushan, F., Ravaglia, A. and Yamada, Y., 2006, Analogue benchmarks of shortening and extension experiments. In Buiter, S. and Scherurs, G. eds., *Numerical and Analogue Modelling of Crustal-Scale Processes*. Geol. Soc. Spec. Publ., 253, 1-27.
- Vendeville, B.C. and Jackson, M.P.A., 1992a, The rise of diapirs during thin-skinned extension. *Marine and Petrol. Geol.*, 9, 331-353.

- Vendeville, B.C. and Jackson, M.P.A., 1992b, The fall of diapirs during thin-skinned extension. *Marine and Petrol. Geol.*, 9, 354-371.
- von Huene, R. and Scholl, D. W., 1991, Observations at Convergent Margins Concerning Sediment Subduction, Subduction Erosion, and the Growth of Continental Crust, *Rev. Geophys.*, 29, 279-316.
- Yamada, Y. and McClay, K., 2003a, Application of Geometric Models to Inverted Listric Fault Systems in Sandbox Experiments. Paper-1: 2D Hangingwall Deformation and Section Restoration. *Jour. Struct. Geol.*, 25, 1551-1560.
- Yamada, Y., and McClay, K., 2003b, Application of Geometric Models to Inverted Listric Fault Systems in Sandbox Experiments. Paper-2: Insights for Possible Along Strike Migration of Material during 3D Hangingwall Deformation. *Jour. Struct. Geol.*, 25, 1331-1336.
- Yamada, Y. and McClay, K., 2004, 3D Analogue Modelling of Inversion Thrust Structures. In McClay, K.R. ed., *Thrust Tectonics and Hydrocarbon Systems*. AAPG Spec. Publ., 82, 276-301.
- Yamada, Y., Baba, K. and Matsuoka, T., 2006, Analogue and numerical modelling of accretionary prisms with a decollement in sediments. In Buiter, S. and Scherurs, G. Eds., *Numerical and Analogue Modelling of Crustal-Scale Processes*, Geol. Soc. Spec. Publ. 253. 169-183.