論 文

アナログモデル実験で再現された付加体構造に対する 反射法地震探査記録の合成

白石 和也*・山田 泰広*・松岡 俊文*

(Received July 10, 2006 ; accepted March 9, 2007)

Synthetic seismic sections of an accretionary prism reproduced by 3D sandbox experiment

Kazuya Shiraishi, Yasuhiro Yamada and Toshifumi Matsuoka

Abstract : The aim of this study is to construct database of interpretation templates by synthesizing the seismic responses on the complex geologic structures reproduced by scaled analogue modeling. We combine such “analogue geological modeling” and “seismic modeling” to obtain clear seismic responses of complex geological structures.

The procedure starts with an “analogue geological modeling” that uses granular materials to reproduce a three-dimensional geological model of thrust-and-fold belt type of deformation. Then the detailed digital structural geometry is reconstructed by digitizing the stratigraphic boundaries of the model sections. The 3D geometry is then used to execute “seismic modeling”, and the synthetic seismic record is obtained. The complex wave field recognized in the synthetic seismic sections shows the influence of the three-dimensional structure. Seismic data generated by the modeling are processed with 2D migration technique to make depth images. These sections can be adopted for investigation of the interpretation pitfall by comparing inline and cross line data sets.

The features of the synthetic seismic sections are commonly observed on the actual seismic profiles at the Nankai Trough area. This fact suggests that the analogue model experiments are valid and our approach is effective. We are going to apply this approach to other geological structures, and construct data base of templates that can be used for the interpretation work in the future. Such database will help improving efficiency of petroleum explorations, which will be carried out in more and more complex geology.

Key words : geological modeling, seismic modeling, thrust structure, interpretation

1. はじめに

地下深部に存在する地質構造の形態を正確に把握するため、これまでさまざまな技術開発が進められてきた。なかでも反射法地震探査は世界中の堆積盆地において石油探鉱と開発のために広く実施され、非常に有効な手法として評価が確立している。しかし、地震探査によって得られたデータから地質構造の形態を一義的に決定することは容易でない。このため、地質構造に対応して地球物理学的な構造モデルを設定し、地震波応答を調べる「サ

イスミックモデリング」もあわせて実施されてきた(村山, 1987; 佐藤ほか, 1998)。また、これらとは別のアプローチとして、地質現象を実験室で再現することで地質構造の形態と、形成過程を詳細に検討する「地質構造モデリング」も、地下深部の構造形態を把握する目的で広く行われている(山田・松岡, 2004; Yamada and McClay, 2004)。

本研究では、上記した2つの手法である「サイスミックモデリング」と「地質構造モデリング」を組み合わせ、複雑な地質構造における地震波応答を明らかにするとともに、地質構造モデルと合成地震記録が組となった解釈テンプレートを作成することを目的とする。採用した解析手順では、まず「地質構造モデリング」によって実際

*京都大学工学研究科社会基盤工学専攻 Department of Civil & Earth Resources Engineering, Kyoto University

の構造に近い地質構造を実験室で再現し、この構造形態を三次元的に把握する必要がある。次に、これに対応する三次元数値構造モデルを構築し、これをもとに「サイスミックモデリング」を実施することによって、反射法地震波データを合成する。以上の手順によって、任意の地質構造における地震探査データの合成が可能となる。この作業をさまざまな地質構造に適用することによって、それぞれに対する擬似的な地震探査データが合成され、データベース化が可能となる。この結果は、今後ますます複雑な地質構造を対象とする石油探鉱において、地震探査データの処理とその解釈作業におけるテンプレートとして利用できる。

2. 対象とする地質構造

今回はスラスト帯の褶曲構造群を解析対象とした。スラスト帯は重要な石油貯留構造の1つであり、実際の含油構造として、イラン・ザクロス褶曲帯、パキスタン・スレイマン褶曲帯、パプアニューギニア褶曲帯、北米・ロッキー山地、南米アンデス山地など数多くの例が知られている (McClay, 2004)。これらスラスト帯の地質構造は、これまで褶曲軸に直交する方向に作成した二次元断面形態で解析されてきたが、探鉱開発対象となる地質構造は一般に複雑な三次元形態を持つことが分かっている (Yamada and McClay, 2004)。この原因として、短縮の方向が必ずしも地域的な褶曲軸方向と直交していないために、小規模な横ずれ変形が短縮変形に重なっていることなどが挙げられる (山田・松岡, 2004)。このような褶曲軸に対する斜め方向の短縮は上記したすべての褶曲帯で見つかり、一般的な現象と考えられる。

西南日本の太平洋側には、フィリピン海プレートの沈み込みに伴って島弧側に付加された海洋底堆積物が衝上断層を伴いながら楔状に積み重なった付加体と呼ばれる構造体が形成されている。付加体はスラスト帯に見られる褶曲構造と基本的に同一の形態を示し、形成メカニズムも同様と考えられている。また、大陸縁辺における大陸性地殻の成長過程において重要な役割を果たすのみならず、海洋メタンハイドレートが集積しやすい流体移動メカニズムを有する地質構造体としても付加体は注目を集めている (Shipley *et al.*, 1979 など)。

本研究では、室戸岬沖南海トラフ付加体の前縁部を対象としたモデル実験を行った。南海トラフ付加体では、陸側においては付加変形が進行した複雑な地質構造となっているが、付加体前縁部では傾斜および間隔がほぼ一定の断層群によって変形した比較的単純な地質構造となっておりモデル化が容易である。また、この地域では地震探査が実施されているため (例えば Stoffa *et al.*,

1992)、構造形態を実験結果と比較することが可能である。

3. アナログモデル実験

3.1 実験条件

地質構造モデリングの一手法であるスケールアナログモデル実験は、スケーリング則に基づいて自然現象を縮小し、脆性破壊で近似される上部地殻の変形挙動を物理的等価に実験室内で再現できるため、スラスト構造や付加体における付加および変形のメカニズムを検討するために広く実施されてきた (McClay, 1990; Lohrmann *et al.*, 2003 など)。スケールモデルを設定する際には、構造形成に要した時間や応力、岩石物性などについて実際の値と実験室での値を、スケーリング則を用いて詳細に検討する必要がある (Hubbert, 1937)。変形挙動を脆性破壊と仮定すると、数百 m ～数 km 程度の規模の地質構造を数 cm 程度 (1 万分の 1 ～ 10 万分の 1) に縮小した実験を行うためには、実験材料の固着強度を岩石の 1 万分の 1 ～ 10 万分の 1 程度とする必要があることと、密度と内部摩擦角が岩石と実験材料でほぼ同一であることがスケーリング則から求められる (山田, 2006)。これによると、岩石の固着強度は一般に 50–200 MPa であるため、実験材料の固着強度を 0.5–2 kPa 程度とする必要がある (山田ほか, 2006)。乾燥砂やガラスビーズなどの粒状体材料は、固着強度がこの範囲内にあり、内部摩擦角が上載荷重の変化に対してほぼ一定であるため、一般にスケールアナログモデルの実験材料として好適である (McClay, 1990)。

付加体形成過程の代表的なモデルとして、ブルドーザーモデルが提唱されている (von Huene and Scholl, 1991)。このモデルでは、陸側や島弧側に固結した岩体が剛性を有する支持体としてバックストップを形成し、その下に沈み込む海洋底堆積物の上部を剥ぎ取ってその前面に付加することで付加体成長を説明している。なお、このモデルについて実験を行う際には短縮変形を発生させる方法として、バックストップを変位させる方法と実験材料を変位させてバックストップに衝突させる方法の 2 つがある。Schreurs *et al.* (2006) によると、実験結果には両者による本質的な違いは認められなかった。本研究では上記のうち、後者を採用して実験を行った。まず、透明アクリル製の長さ 150 cm × 高さ 20 cm × 奥行き 50 cm の箱を製作し、その底部に水平方向に可動するビニール製の薄いシートを設置した。その上に実験材料として用いる乾燥砂 (粒径 200 μ m) とガラスビーズ (同 40–50 μ m) をしきつめた (Fig. 1(a))。ビニールシートの直上には摩擦係数の小さなガラスビーズを、さらにその上に乾燥砂をしきつめた。このとき、構造変形を観察しや

Fig. 1 A schematic drawing of the three-dimensional analogue model shortening experiment.

(a) Glass beads and dry sands are spread out on a vinyl sheet in an acrylic box (150 cm × 20 cm × 50 cm), and a wall is fixed on the left end. Structural shortening is realized by rewinding the sheet with an electric motor. (b) In 3D experiment, the wall is fixed obliquely (20°) to shortening direction.

すいように色付けされた砂とされていない砂を交互にしきつめ互層とした。箱の左端に固定されたバックストップとして機能する壁（固定壁）の下からシートを箱の外に速度1 cm/分で引き出すことによって、シートの上に整形させた実験材料に水平圧縮応力を加えた。また実験では、褶曲帯で一般的に観察される斜め圧縮変形を再現するため、短縮の方向（シートを引き出す方向）と斜交する方向（20°）に固定壁を設置して実験を行った（Fig. 1(b)）。

3.2 実験結果

アナログモデル実験において形成された変形構造の断面形態と平面形態をその変形過程において観察した。二次元および三次元実験のいずれにおいても、断面形態からは固定壁の下端部から右上方向に向かって延びる衝上断層（Fig. 2 波線）が順に形成されることが観察された。また、この衝上断層のフラットからランプへ屈曲する点から右傾斜の逆向き衝上断層が発生し（Fig. 2 鎖線）、ポップアップ構造が形成された。これらは一般的なスラスト帯の特徴と一致する（例えば Yamada *et al.*, 2006 など）。本実験におけるモデル上面からの観察（Fig. 3(a)～(e)）では、固定壁に平行（短縮方向と斜交する方向）にスラスト構造が形成され（Fig. 3(a) 矢印）、その後、短縮方向とほぼ直交する方向の凹地が形成され（Fig. 3(b) および(d)の白丸）、さらに短縮が進むと短縮方向と斜交する異なる2つの断層をつなぐ新たな断層が形成されることが観察された（Fig. 3(e) 白丸）。これは、斜め短縮によって内部構造が三次元的となっていることを示唆している。なお、側壁近傍では端面の影響を受けた変形構造が見られる。また、Fig. 3(f)は78 cm短縮時の側壁から20 cm（Fig. 3(e)一点鎖線）の断面を示しており、水平圧縮応力に伴う衝上断層群を確認することができる。

モデル内部の三次元的な構造を観察するため、実験終了後（78 cm変位）にモデルを1 cm間隔で切断し、そ

Fig. 2 A schematic drawing of deformation process of a prism model through the transparent side wall.

The broken lines are thrust faults inclined to the left and dashed lines are back thrust faults inclined to the right. These fault systems form pop-up structures at the deformation front.

の断面形態を記録した。なお、端面の存在による変形構造が観察されたため、本研究では側壁の影響がないと考えられる中央部（手前側壁から奥行き10～40 cm部分）のみを使用し、各断面をデジタルカメラにより撮影した（Fig. 4）。この断面形態を観察すると、左傾斜する衝上断層と右傾斜する逆向き衝上断層が観察される。また、各断面での形態を比較すると奥行き方向に断層数やその形態が三次元的に変化している様子が観察できる。

Fig. 3 (a)–(e) Development of the deformation structures from above, and (f) a section sliced at 20 cm from the side wall after 78 cm of shortening.

4. 数値構造モデルの作成

サイスミックモデリングに用いる三次元数値構造モデルは、アナログモデル実験結果における互層の境界をデジタル化して与えた。数値構造モデルの速度値については、今回は領域全体で一定速度となるモデルとした。その理由は、今回の研究の主目的が反射法で観測される反射面の形態と、複雑な地層境界の形状との関係を明らかにすることであったためである。各地質単元にそれぞれ異なった速度値を与えた速度構造モデルは、次の段階で検討を加える予定である。数値構造モデルの作成において具体的には以下のような作業手順を採用した。

まず、三次元アナログモデル実験後（78 cm 短縮時）に 1 cm 間隔で切り出された全 31 断面において、6 つの地層境界面（Fig. 4(b)）をマニュアルピックし境界面の座標値を取得する。今回は地層境界のみを数値構造モデルとして抽出しており、逆断層群は明示的に与えていない。各境界の抽出された点群を Fig. 5 に表示する。断層の奥行き方向への変化を追跡することができ、構造変

化に富む三次元構造であることがよく分かる。次に、ある地層境界面を構成する点群を奥行き方向に三次元スプライン補間により結んで、奥行き方向に密な地層境界面を求める。これらの地層境界は、後のサイスミックモデリングにおいて爆発反射面モデルの震源位置として用いる。奥行き方向に補間された地層境界面を Fig. 6 に示す。境界面の三次元的な補間はおおむね良好にできたが、不自然な補間箇所は、境界面のピックアップの精度と三次元補間時の点のずれによるものと考えられる。これらは、 $x = 0 \sim 30$ cm において見られ、また、この付近は変形が進みモデル内部の構造が複雑すぎることもあり、サイスミックモデリングに利用しなかった。サイスミックモデリングを行うにあたり、Fig. 6 において赤実線で示す直方で囲まれた部分（ $x = 39 \sim 64$ cm, $y = 23 \sim 33$ cm）を抜き出して利用した。このとき計算モデルを実際の地質スケールとするため、モデル実験における 1 cm が実際の 250 m に対応するように 25,000 分の 1 と縮尺を設定した。この場合、計算領域は x 方向（短縮方向）には 6.25 km, y 方向（短縮方向と直交する方向）に 2.5

Fig. 4 (a) Sliced sections (10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm) after 78 cm of shortening, (b) enlarged picture for the section at 20 cm and the numbered arrows showing stratigraphic boundaries.

Fig. 5 Structural features of each stratigraphic boundary picked manually on digital images of the sliced sections in Fig. 4. The horizon numbers with circle correspond to the number in Fig. 4 (b).

Fig. 6 Interpolated surfaces of each boundary in Fig. 5. A rectangular parallelepiped with red line shows the sub-area of geological model to be used in the seismic modeling.

km, 深度方向に 1.25 km となる。最後に、モデルに速度値を与える。今回は P 波速度を 4,000 m/s の一定値とした。

5. サイスマックモデリング

5.1 爆発反射面モデル (exploding reflector model)

サイスマックモデリングは爆発反射面モデル (Loewenthal *et al.*, 1976) に基づき、反射法地震探査で得られる重合記録の合成を行った。爆発反射面モデルによるサイスマックモデリングでは、地層境界面に震源を配置するため、境界からの反射に対する応答を得ることができる (佐藤ほか, 1998)。地層境界面上に稠密に並べられた仮想的な震源から同時に発生した波を、地表に並べた受振点で観測する状況を考える。地層境界から発生した波は波面を形成し、この波面はゼロオフセット記録 (震源と受振点が同じ場所) で観測される波がたどる波線と同じ波線に沿って伝播し、地表の受振点へ到達する。ただし、波はこの波線経路を 1 回しか伝播しないため、走時は実際の反射記録の半分となっている。このように爆発反射面モデルでの記録はゼロオフセット記録となっており、一度の計算で、大きなモデルに対してゼロオフセット記録を得ることができるので有効である。また、ゼロオフセット記録は CMP 重合記録とほぼ同一の記録

断面となり (Yilmaz, 2001)、したがって、計算で得られた結果は走時に対する補正後、CMP 重合断面とみなすことができる。

5.2 地震波モデリング

スタaggered 格子時間領域有限差分法 (Virieux, 1986) を用いて、音響波による波動シミュレーションを行った。計算に関するパラメータは空間格子間隔 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 5$ m, 格子数は $1,251 \times 501 \times 251 = 157,314,501$ 格子, 計算の際の時間刻みは $\Delta t = 0.0005$ 秒とし記録長は 0.5 秒とした。震源関数にはピーク周波数 120 Hz のリックウエーブレットを用いた。具体的な計算は、地層境界面にあるすべての格子点において、圧力を一斉に変化させ仮想震源として与える。モデルの表面にアナログモデル実験における短縮方向 (x 軸方向) とそれと直交する方向 (y 軸方向) に、それぞれ 50 m, 125 m の間隔で 49 測線ずつ設置した。各測線には 5 m 間隔で受振点 (x 軸方向測線 1251ch, y 軸方向測線 501ch) を配置し圧力値を記録した。計算には京都大学学術情報メディアセンターのスーパーコンピュータ HPC2500 を利用し、自動並列化機能、32CPU を用いた計算により約 2 時間 30 分を要した。

5.3 合成反射波記録

爆発反射面モデルによる計算結果から合成された擬似反射法地震探査記録（擬似重合記録）は、時間と震源周波数の補正、さらにリサンプリングを行い0.004秒サンプリング、1秒間の記録、震源周波数は60 Hzの記録となった。Fig.7はx軸方向測線の受振記録、Fig.8はy軸方向測線の受振記録例を示す。Fig.9に全受振点における記録の時間スライスを示す。x方向（短縮方向）のみならず、y方向（短縮方向と直交方向）にも構造が大きく変化しているのがよく分かる。また、時間スライスには円形の回折波を見ることができ、それらが反射波や他の回折波と複雑に重なり合っており、三次元構造の影響を受けて、観測される波動場がとても複雑であるのが分かる。

5.4 合成反射波記録からのイメージング

次に上で得られた合成記録に対して、キルヒホッフ型深度マイグレーションを施し、イメージングを行った。直交するx軸とy軸それぞれの方向に設置された各測線について、二次元マイグレーションを行った。二次元マイグレーション断面に現れる三次元構造の影響や、三次元マイグレーションの有効性についてはFrench (1974)により古くから指摘されている。本モデリングにおいても、三次元的な構造の影響により、測線の側方に存在する反射面からの波が二次元断面上に偽像として出現することが予想される。

Fig.10からFig.11は、x方向測線とy方向測線それぞれの合成記録に対するマイグレーション結果、Fig.12はx軸方向の全測線のマイグレーション結果を深度でスラ

Fig. 7 Synthetic reflection responses in x-direction.

Fig. 8 Synthetic reflection responses in y-direction.

Fig. 9 Synthetic reflection responses in time slice.

Fig. 10 Migrated sections in x-direction. White broken lines show the true boundaries. Block arrows indicate the ghost events.

Fig. 11 Migrated sections in y-direction. White dotted lines show the true boundaries. Block arrows indicate the ghost events.

イスしたもの示す。図中の白線および白点は数値構造モデルにおける真の境界面の位置を示している。x 軸方向にとられた測線においては、おおむね良好なイメージング結果が得られており、衝上断層や褶曲の様子が解釈できる。これらの構造は、複数測線を用いることで y 軸方

向への変化を追跡可能である。しかし、測線間の関係を追跡すると三次元的な構造の影響が現れ、正しい位置に三次元的にマイグレーションされなかったエネルギーが二次元断面に残っていることがある (Fig. 10 矢印)。また、形成された構造は短縮方向である x 軸方向への変化が著

Fig. 12 Depth slice constructed from migrated sections in x direction. White dotted lines show the true boundaries.

しいため、y 方向測線では測線側方からの反射波の影響がさらに顕著に表れる (Fig. 11 矢印)。しかし、同じく y 方向測線では、断面において水平方向 (y 軸方向) に深度の変化する衝上断層を確認することができ (Fig. 11 左図)、固定壁を短縮軸に対して斜交して設置したことによる断層発達三次元性を観察することができる。

6. 南海トラフ域反射法地震探査記録との比較

Fig. 13 および Fig. 14 は、合成された重合断面およびそのマイグレーション断面を、南海トラフで実施された反射法地震探査の結果と比較したものである。比較に用いたのは、1987 年テキサス大学他により南海トラフで実際に行われた反射法地震探査 (Stoffa *et al.*, 1992) における付加体前縁部での重合断面および時間マイグレーション断面である。重合断面では、付加体前縁部での反射波応答について、両者で極めてよく似た特徴を有していることが確認できる。また、マイグレーション断面においても、衝上断層群やポップアップ構造が同様にイメージングされている。これらの比較は、付加体構造を

模擬した粒状体材料による地質構造モデリングの妥当性を示すとともに、さらに、それを基にしてサイスミックモデリングによって反射波応答の特徴を知る本研究の意義を示すものである。

7. ま と め

本研究は、実験室で再現された複雑な地質構造に対する地震探査記録をシミュレーションによって合成し、それを解析することで地震探査データの処理や解析の高精度化を図り、さらに解釈テンプレートの作成を目的として行われた。まず、「地質構造モデリング」によって主要な石油貯留構造として知られるスラスト帯の褶曲構造群の三次元の地質構造、今回は中でも大陸縁辺における付加体構造を例として実験室で再現した。今回は、粒状体材料を用いたモデル実験において固定壁を短縮の方向と斜交する方向に設置することで、斜め圧縮を受けた三次元スラスト構造を再現できた。次に、切り出された断面の解釈をもとに、詳細な数値構造モデルを構築し、構造内部の三次元的な構造変化を観察できた。それをもとに「サイスミックモデリング」を実施し、擬似重合記録の作成を行った。これらの結果から、三次元構造の影響を受けた複雑な波動場が観測されることを確認した。それらの記録に対して、直交する二方向に等間隔に配置された測線の記録に対して二次元マイグレーションを施しイメージングを行った。南海トラフ付加体において実施された実際の反射法地震探査記録と比較したところ両者は共通の特徴を有しており、モデル実験の妥当性を示すとともに本研究のアプローチが有効であることを示すものであった。

今後は、さらに多くの地質構造モデルに対して本研究で示したアプローチを適用し、解釈作業に利用できる二次元および三次元の解釈テンプレートのデータベース構築を目指したい。地質構造モデルと合成記録のセットで構成される解釈テンプレートのデータベースを構築することにより、フィールドでとられた地震探査記録を解釈する際に、テンプレートとの共通点や相違点などをもとに地下構造形態解釈の信頼度向上が可能となる。今後ますます複雑な地質構造を対象とする石油探鉱において、このようなデータベースの構築は探鉱開発の効率化という点で極めて重要である。

謝 辞

本研究は、平成 16 年度石油・天然ガス開発・利用促進型大型研究 (『三次元スラスト構造に対するサイスミックモデリングの研究』) により実施された。研究内容の公表を快諾していただいた石油天然ガス・金属鉱物資源

Fig. 13 Comparison of stacked sections between synthetic data and real survey in Nankai Trough (modified from <http://www.ig.utexas.edu/sdc/>).

Fig. 14 Comparison of migrated sections between synthetic data and real survey in Nankai Trough (modified from <http://www.ig.utexas.edu/sdc/>).

機構に謝意を表します。

引用文献

French, W. S., 1974 : Two-dimensional and three-dimensional

migration of model-experiment reflection profiles. *Geophysics*, **39**, 265–277.

Hubbert, M. K., 1937 : Theory of scaled models as applied to the study of geological structures. *Bull. Geol. Soc. Am.*, **48**,

- 1459–1520.
- Lohrmann, J., Kukowski, N., Adam, J. and Oncken, O., 2003 : The impact of analogue material properties on the geometry, kinematics, and dynamics of convergent sand wedges. *Journal of Structural Geology*, **25**, 1691–1711.
- Loewenthal, D., Lu, L., Roberson, L. and Sherwood, J., 1976 : The wave equation applied to migration. *Geophys. Prosp.*, **24**, 380–399.
- McClay, K.R. (ed.), 2004 : *Thrust Tectonics and Hydrocarbon Systems*. American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Memoir 82.
- 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*, 445–454, Geological Society Special Publication 54.
- 村山隆平, 1987 : 地震探査モデリング. 物理探査, **40**, 409–422.
- 佐藤岳彦・玉川哲也・松岡俊文・佐伯龍男, 1998 : 地震波シミュレーションが地下構造探査に果たす役割. 石技誌, **63**, 20–29.
- 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*, 1–27, Geological Society Special Publication 253.
- Shipley, T.H., Houston, M.H., Buffler, R.T., Shaub, F.J., McMillen, K.J., Ladd, J.W. and Worzel, J.L., 1979 : Seismic reflection evidence for the widespread occurrence of possible gas-hydrate horizons on continental slopes and rises, *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **63**, 2204–2213.
- Stoffa, P. L., Wood, W. T., Shipley, T. H., Moore, G. F., Nishiyama, E., Taira, A., Tokuyama, H., Botelho, M. A. B. and Suyehiro, K., 1992 : Deepwater high-resolution expanding spread and split spread seismic profiles in the Nankai Trough. *J. Geophys. Res.*, **97** (B2), 1687–1713, 10.1029/91JB02606.
- Virieux, J., 1986 : P-SV-wave propagation in heterogeneous media : Velocity-stress finite-difference method. *Geophysics*, **51**, 889–901.
- von Houné, R. and Scholl, D. W., 1991 : Observations at convergent margins concerning sediment subduction, subduction erosion, and the growth of continental crust. *Reviews of Geophysics*, **29**, 279–316.
- 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*, 169–183, Geological Society Special Publication 253.
- 山田泰広, 2006 : 付加体形成過程のモデル実験. 地質学雑誌, **112**, 153–159.
- 山田泰広・兼田 心・松岡俊文, 2006 : アナログモデル実験における材料物性の影響. 材料. 岩石力学特集号, **55**, 452–457.
- 山田泰広・松岡俊文, 2004 : 地質構造モデリングによる小断層の形態と断層再活動ポテンシャルの推定. 物理探査学会第 110 回学術講演会論文集, 117–120.
- Yamada, Y. and McClay, K., 2004 : 3-D Analog Modeling of Inversion Thrust Structures. In McClay, K.R. (ed.), *Thrust Tectonics and Hydrocarbon Systems*. American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Memoir 82. 276–301.
- Yilmaz, O., 2001 : *Seismic data analysis*, SEG.