

タービダイト堆積前進モデリングの動向と探鉱分野 における応用

江川, 浩輔
国際石油開発帝石株式会社

小島, 啓太郎
国際石油開発帝石株式会社

<https://hdl.handle.net/2324/7337611>

出版情報 : Journal of the Japanese Association for Petroleum Technology. 81 (1), pp.46-55,
2016-01. 石油技術協会

バージョン :

権利関係 : © 2016 The Japanese Association for Petroleum Technology



総 説
 Review

タービダイト堆積前進モデリングの動向と探鉱分野における応用*

江川 浩輔^{*,†}・小島 啓太郎^{**}

(Received October 9, 2015 ; accepted December 8, 2015)

Turbidite forward modeling: Research trends and applications for exploration

Kosuke Egawa and Keitaro Kojima

Abstract : Sedimentary forward modeling is an effective and economical approach for exploration of sandstone reservoirs, especially in deepwater settings. Computational fluid dynamics brought innovation to modeling and simulating the behaviors of sediment gravity flows (turbidity currents in most cases) along with the prediction of turbidite distribution pattern. Furthermore, establishment of structural and isostatic balancing technique contributed to quantitative reconstruction of paleo-basin structure and paleo-bathymetry. Recent dramatic improvements of computer operating speed and software performance have allowed us to apply such numerical methods to a three-dimensional (3-D), several ten to hundred kilometer wide dataset. The integration of these sedimentary and structural approaches has finally produced an advanced forward sedimentary model that numerically predicts a turbidite distribution on the reconstructed 3-D paleo-bathymetry. Such an integrated model is powerful and useful for better understanding of lobate turbidite distribution and of turbidite deposition in topographically complicated basins, or confined basins, and also for stochastic determination on input parameters of turbidity current (s) based on a limited number of available well-log data. Combination with seismic geomorphology and seismic attribute analysis can improve the quality and accuracy of geological evaluation in deepwater turbidite play.

Keywords : Deepwater exploration, Turbidity current, Computational fluid dynamics, Turbidite forward modeling, Isostatic and structural balancing, Backstripping, Three-dimensional numerical modeling and simulation.

1. はじめに

大水深域における探鉱活動の魅力は、その膨大な埋蔵量にあると言える。すでに公表されている可採埋蔵量だけでも約 78 bboe (48 bbo および 174 tcf) に達し、デルタ～陸棚域のそれと比べて 1 桁大きい見積もり (~ 1,000 mmboe) が示されている (Weimer and Pettingill, 2007)。ゆえに、大水深域の探鉱は、今後も注目され続けるだろう。しかしながら、一般に海底面下 1,000 m 以深が対象となるこの作業は、陸域や浅海域の探鉱に比べて高コスト・高リスクになる宿命を背負っている。したがって、貯留岩の分布や性状の効率的かつ効果的な把握が、初期探鉱の段階から強く求められる。

このような背景の中、コストとリスクの両方を抑える

手段の 1 つとして、数値解析モデリングおよびシミュレーションによる間接的アプローチが注目されてきた。この手法は、データに乏しい海域における貯留岩分布の補完を行うだけでなく、岩相の不均質性や地質モデルの不確実性などの評価にも有効である。近年のコンピュータ演算速度やソフトウェア性能の飛躍的向上に伴い、現在では広域かつ三次元での高精度モデリングが比較的容易に扱えるようになってきた。これに併せて、震探アトリビュート解析や震探地形学 (seismic geomorphology) の発展も重なり (例えば、高野・西村, 2009)、大水深域の探鉱は一昔前に比べてチャレンジしやすい分野になってきた。

数値解析モデリングのアプローチは、前進モデリング (forward modeling) と逆モデリング (inverse modeling) に大きく分けられる (図 1)。前者は、最初に任意のパラメータを入力した後、数学的モデルや物理理論に基づいて計算を行い、予測データを出力する手法である。一方、後者はこれとは逆のアプローチを採る。すなわち、入力データに基づいて計算が行われ、その結果として予測パラメータが出力される。データがある程度充実していれば逆モデルを採用することが多いが、データに乏しい地域 (ないし海域)

* 平成 27 年 6 月 10 日、平成 27 年度石油技術協会春季講演会地質・探鉱部門シンポジウム「深海成砂岩 – 最新の理解と探鉱開発 –」で講演。This paper was presented at the 2015 JAPT Geology and Exploration Symposium entitled “Deepwater Sandstones – the latest understandings and E&P” held in Tokyo, Japan, June 10, 2015.

** 国際石油開発帝石株式会社 INPEX Corporation

† Corresponding author : E-Mail : kosuke.egawa@inpeco.jp

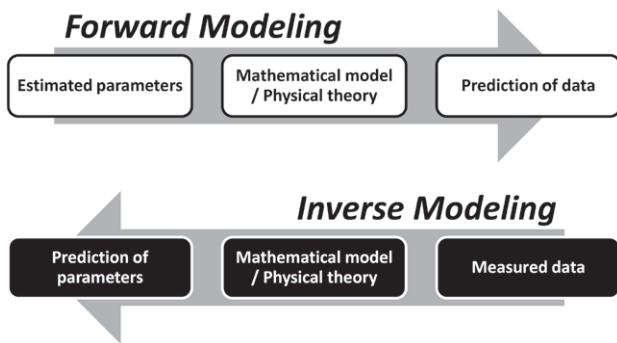


図1 前進モデリングと逆モデリングの概念図

を対象とする場合には、一般に前進モデリングが有効とされる。また、前進モデリングは感度解析のツールとしても用いられ、個々の要素ないし端成分がモデルに及ぼす影響を理解する際にも活用される。近年では、逆問題の解法として、前進モデルのパラメータの非線形最適化を行う逆モデルも提唱されており（例えば、Bertonecello *et al.*, 2013 ; Falivene *et al.*, 2014），これによりモデルの精度や信頼性の向上が図られている。

大水深探鉱の有望な砂岩貯留岩の1つは、タービダイト（turbidite）である。その堆積作用や分布、性状などに関する知見は、これまで露頭観察や物理探査、水槽実験などを通じた数多くの研究報告によって深められてきた。1980年代以降の数値流体力学（computational fluid dynamics）の導入は、数値解析モデル、とりわけ前進モデルの開発に革新をもたらし、タービダイトの形成に最も寄与する混濁流（turbidity current）の挙動やタービダイトの堆積作用・堆積過程に対する理解を大きく前進させた（例えば、Pratson *et al.*, 2000）。

混濁流の数値モデルの開発とほぼ時を同じくして、堆積盆地の構造発達を解析するモデリング技術が目覚ましい発展を遂げた。同手法は、圧密曲線、アイソスタシー理論、曲げアルゴリズム（flexural algorithm）、断層関連褶曲理論などを包括的に取り入れることにより確立され、現在では前進モデルと逆モデルの両方が適用可能である。利用範囲は幅広く、堆積盆地の成長過程の時系列解析を行う剥ぎ取り法（backstripping）（例えば、Roberts *et al.*, 1998）や、成長断層と断層関連褶曲に伴う層序発達を定量的ないし幾何学的に理解する構造バランス法（structural balancing）（例えば、Hesse *et al.*, 2009）などがある。

Waltham *et al.* (2008) は、これらの個別に開発された堆積学系および構造地質学系のモデリング技術を統合させることで、復元された海底地形（古海底地形）の上で混濁流の数値モデリングを実施し、タービダイト分布を予測する新たな手法を提案した。彼らの主な着眼点は、(a) 対象層準が堆積した当時の海底地形を復元できれば、対象層準におけるタービダイトの分布を混濁流の数値解析モデル（すなわち、タービダイトの堆積・分布を再現する前進モデル）から予測できること、および(b) 堆積盆地の構造復元モデリングを適用すれば、三次元の古海底地形モデルが作成可

能であることである。

本稿では、古海底地形復元モデルとタービダイト堆積前進モデルの特徴や開発動向、および国内外の研究事例について紹介しながら、Waltham らが提唱したハイブリッドモデルの大水深探鉱への有効性と課題について述べる。

2. 古海底地形復元モデリング

古海底地形の復元モデルは、堆積盆地構造の復元モデリング（逆モデリング）を応用して作成される。構造復元モデリングは、構造地質学分野を中心に開発が進められてきたが、コンピュータ技術の発展により堆積盆地モデリングや石油システムモデリングに採用されるなど、現在では石油探鉱分野においても広く普及している。同手法は、主に剥ぎ取り法と構造バランス法から成る。下記では、これらについて概説する。

三次元での構造復元モデリングは、Midland Valley Exploration 社製ソフトウェア Move の三次元地質構造解析モジュールである 3D Kinematic Modelling（旧名称は 3D Move）で実施される事例が多い。扱うデータについては、二次元ないし三次元地震探査（震探）データより解釈されたホライゾンデータ（Waltham *et al.*, 2008 ; Aas *et al.*, 2010a ; Egawa *et al.*, 2013），および露頭調査から得られた層序データ（Aas *et al.*, 2010b）の双方が利用可能である。なお、Move は、基本的には地質構造を定量解析するためのソフトウェアであるが、タービダイト堆積モデリング用のモジュール（Sediment Modelling）も別途用意されており、これについては 3.2 章で紹介する。

2.1 剥ぎ取り法

剥ぎ取り法は、堆積（圧密）と沈降に伴う堆積盆地の埋没史を段階的に解読する際に用いられる手法であり（図2）、圧密曲線とアイソスタシーバランス（isostatic balance）によって成り立つ。圧密曲線に基づき、上位層準の堆積荷重（ないし上載荷重）が取り除かれ、下位層準の孔隙率と層厚が堆積時の非圧密状態（decompaction）に復元される。代表的な圧密曲線として、Sclater and Christie (1980) の式が広く用いられている：

$$f = f_0 (e^{-\alpha y}) \quad (1)$$

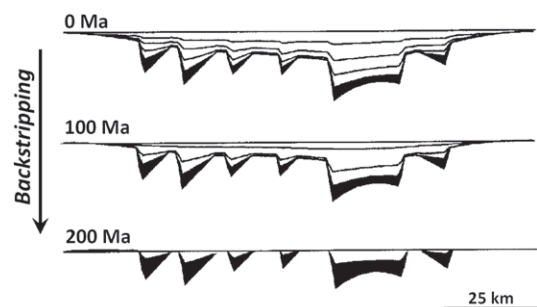


図2 剥ぎ取り法に基づく堆積盆地構造の復元：リフト堆積盆地の例

Roberts *et al.* (1998) を一部改編。

f はある深度における孔隙率, f_0 は表層における初期孔隙率, c は孔隙率-深度係数, y は深度を表わしている。これらのうち, f_0 や c の値は岩相ごとに与えられるため, 岩相タイプごとに異なる圧密曲線が得られる。圧密変化とアイソスタシーバランスが連動することで, 剥ぎ取り時には下位層準の孔隙率と層厚が増加(回復)し, 埋没深度が浅くなる。Sclater and Christie の式以外では, 化学的圧密(chemical compaction)や頁岩優勢層などを対象とした圧密曲線が提案されているが, 紙面の関係から本稿では省略する。

剥ぎ取り法に用いられるアイソスタシーバランスは, エアリーアイソスタシー(Airy isostasy)とフレクシュラルアイソスタシー(flexural isostasy)に大別される。エアリーアイソスタシーは, 従来から知られるアイソスタシーの基本概念である「上部マントルに対する地殻の荷重と地殻にかかる浮力との均衡」を説明する理論であり, 任意の地点における一次元(鉛直方向)のバランスを想定している。これに対し, フレクシュラルアイソスタシーは, 粘弾性理論(visco-elastic theory)に基づく地殻の撓み(lithospheric

flexure)を考慮に入れた二次元および三次元のバランス理論である(Watts *et al.*, 1982)。この理論のもとでは, 堆積後(flexed Moho)と堆積前(backstrip Moho)のモホ面の形状を再現することができる(Watts and Torné, 1992)。

実際に堆積盆地が発達するフィールドでは, 上部マントルと地殻, それらに上載する堆積岩類の3者からなる空間的バランスを検討する必要がある, その意味でフレクシュラル理論の適用は重要である。Roberts *et al.* (1998)やAas *et al.* (2010a)は, 剥ぎ取り法を実施する際にフレクシュラル理論を適用した場合と適用しなかった場合における堆積盆地の構造復元について, 二次元および三次元モデルを用いて比較・検討を行った。彼らの報告では, フレクシュラル理論を適用した場合に比べて, エアリー理論のみを適用した場合は復元される地形や層厚がより誇張される傾向が示されている。石油探鉱では, 実坑井ないし仮想井の位置における一次元石油システムモデリングが頻繁に用いられるが, 通常はエアリー理論のみで剥ぎ取り法が実施される。このため, 同モデリング結果を評価する際には, エアリーアイソスタシーに含まれる仮定の問題点を十分留意す

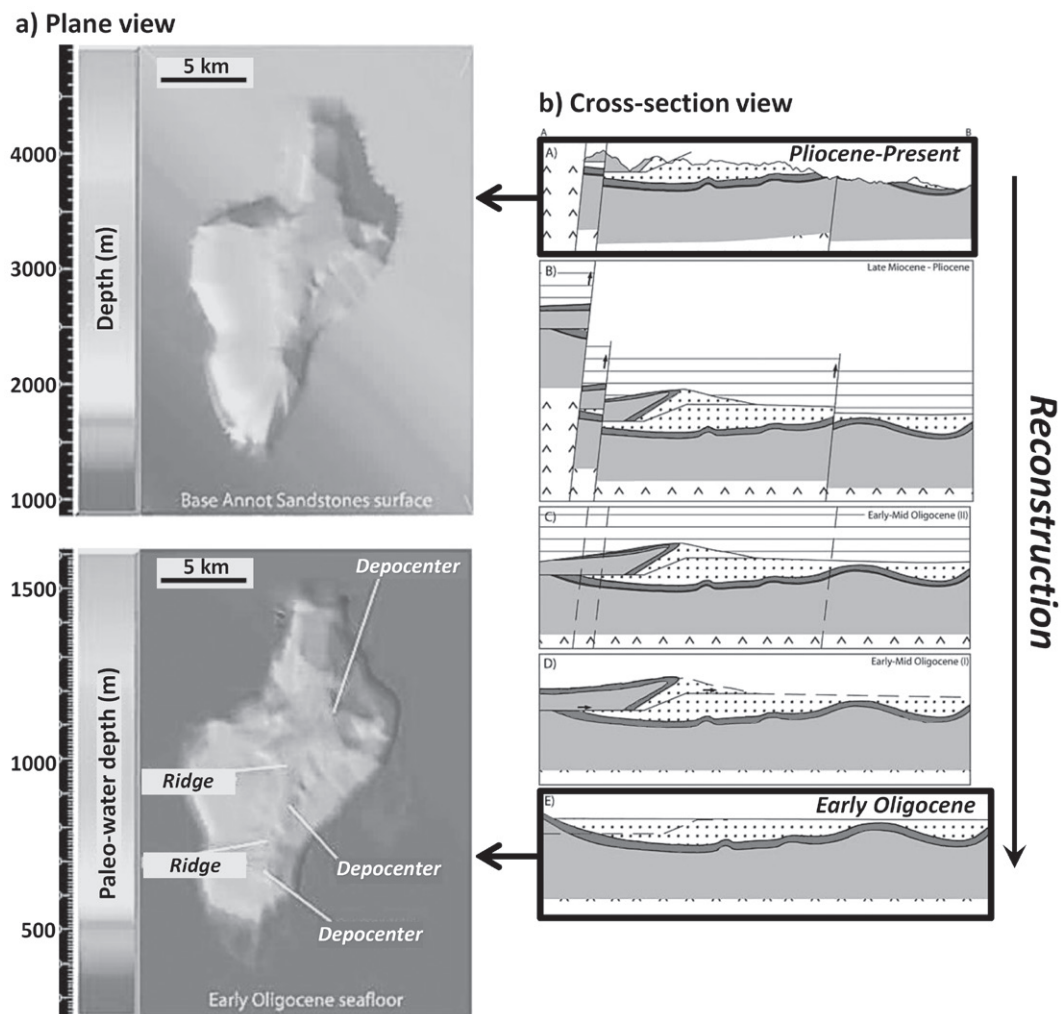


図3 構造バランス法(断層復元)と剥ぎ取り法の併用から復元された堆積盆地構造: Peira Cava 堆積盆地の例
Aas *et al.* (2010b) を一部改編。

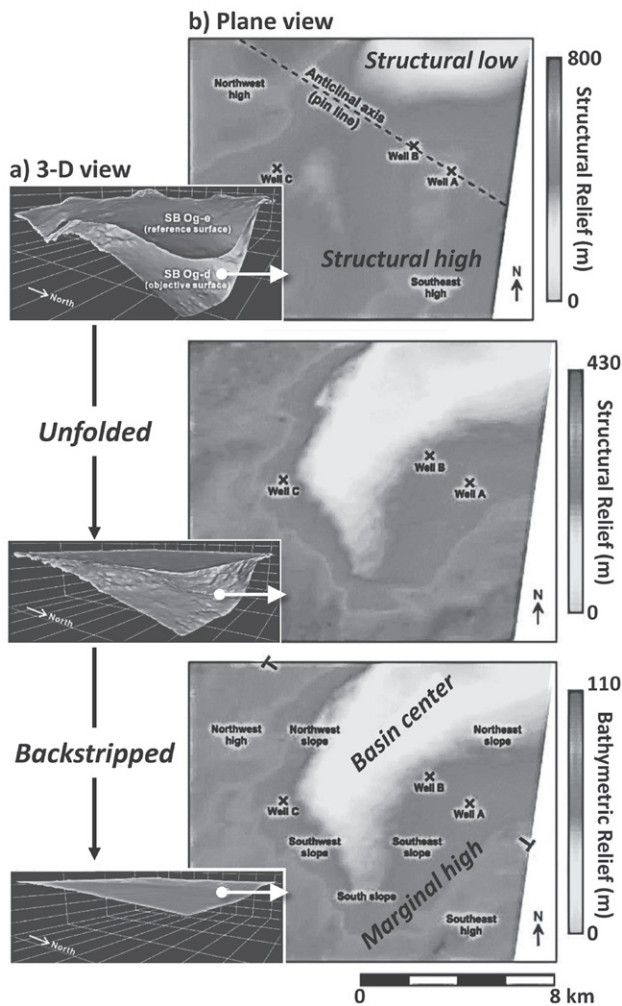


図4 構造バランス法（褶曲復元）と剥ぎ取り法の併用から復元された堆積盆地構造と古海底地形：東部南海トラフ海域の例
Egawa *et al.* (2013) を一部改編。

る必要がある。

Waltham *et al.* (2008) は、剥ぎ取り法を三次元堆積盆地モデルに適用すれば、各層序における段階的な古地形復元（例えば、Roberts *et al.*, 2009）が可能である点に着目した。この古地形復元法をタービダイト層序に用いた際には、タービダイト堆積時の古海底地形が再現される。ただし、復元される古地形の起伏変化は層厚の復元率よりも複雑であるため（Aas *et al.*, 2010a）、上述のフレクシュラル理論を適用するだけでなく、等層厚線図（isopach map）や坑井位置の砂岩ネットグロス比などと比較しながら、復元モデルの妥当性を検証することが重要である（Egawa *et al.*, 2013）。

2.2 構造バランス法

地質構造が比較的単純で、かつ引張場で形成された堆積盆地の場合は、上記の剥ぎ取り法だけで構造発達解析がほぼ完結する。一方、圧縮場で発達し、衝上断層運動や断層関連褶曲作用などの複雑な構造発達を被った堆積盆地の場合は、構造バランス法を施す必要性が生じる。

構造バランス法は、断層や褶曲を伴う地質構造の幾何学

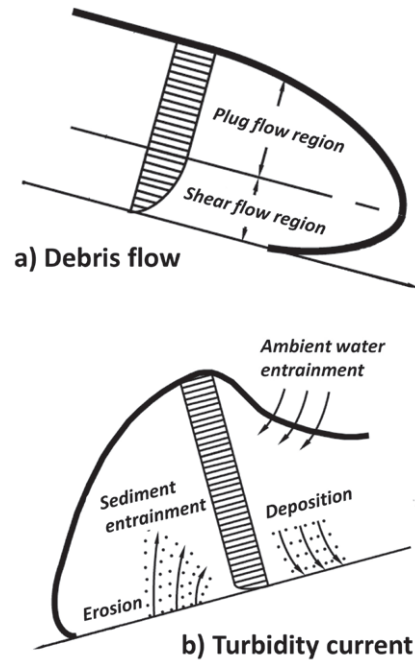


図5 デブリフローと混濁流の概念図
Pratson *et al.* (2000) を一部改編。

的定量解析法として古くから研究が進められ、すでに半世紀以上の歴史を有する。同手法は、とりわけ断層関連褶曲構造の解析において効果的な手法として知られ、これまで断層平行褶曲（fault-parallel fold）、断層折れ曲がり褶曲（fault-bend fold）、断層伝播褶曲（fault-propagation fold）、デタッチメント褶曲（detachment fold）などの解析法が提案されている（例えば、Shaw *et al.*, 2005）。また、褶曲構造の復元（unfolding）についても構造バランス法は有効であり、上述のアイソスタシーバランスと同様に、フレクシュラル理論が適用される（例えば、Rouby *et al.*, 2000）。これは、単純に鉛直方向のみの载荷を考慮した単純剪断（simple shear）モデルでは、褶曲作用を被った地層の内部歪を復元時に解消できないためである。

これらの構造バランス法を剥ぎ取り法と併用することで、より複雑な地質構造を有する堆積盆地においても、その構造発達史を定量的に紐解くことができる（例えば、Lee *et al.*, 2011）。Aas *et al.* (2010b) は、正断層と衝上断層が発達するフランス南東部の Peira Cava 堆積盆地において構造バランス法と剥ぎ取り法を併用し、堆積盆地の初期形態を復元した三次元の古地形モデルを作成している（図3）。また、褶曲構造復元と剥ぎ取り法の併用した三次元モデルの事例として、スコットランド沖（Aas *et al.*, 2010a）や東部南海トラフ海域（Egawa *et al.*, 2013）が挙げられる（図4）。

3. 堆積物重力流モデリング

3.1 デブリフローと混濁流

堆積物重力流（sediment gravity flow）の分類は多様であり、その分類法や定義に関しては現在に至っても依然決着が着いていないが（例えば、Mulder and Alexander, 2001;

Haughton *et al.*, 2009), いずれの分類法においてもデブリフロー (debris flow) と混濁流は堆積物重力流の不可欠な要素と考えられている。デブリフローと混濁流の相違点は、流体の密度と粘土粒子の量比であることが知られている (Middleton and Hampton, 1976)。すなわち、デブリフローは一般に粘土粒子が多く、流体密度も比較的大きく、その流れは下部の剪断流 (shear flow) と上部の栓流 (plug flow) に大きく二分される (図 5)。一方、混濁流はデブリフローに比べて希釈された流体であり、先頭から head, body, tail に三分され、乱流による碎屑粒子の浮遊 (懸濁) が発達する特徴を有する (図 5)。

Pratson *et al.* (2000) によると、デブリフローと混濁流の間には3つの共通項が存在する。すなわち、流体重量 (flow weight), 流体圧 (fluid pressure), および摩擦 (friction) である。一方で、デブリフローには含まれない混濁流固有の特性も存在し、周囲水の取り込み (ambient water entrainment), 削剥と堆積 (erosion and deposition), 乱流運動エネルギー (turbulent kinetic energy), および周囲水に対する抵抗性 (resistance of ambient water) の4点が挙げられる。削剥と堆積の間の過程には、削剥された堆積物

の取り込み (sediment entrainment) が含まれる。これらの営力により、混濁流は堆積物濃度をある一定以上保持し、かつ流速を衰えさせることなく、深海域においても遠隔地まで碎屑物を運搬することができる。詳細については、Pratson *et al.* (2000) や成瀬 (2011) などを参照されたい。

デブリフローと混濁流は、個々に独立した流動現象ではない。これらは、デブリフローから混濁流、そしてまたデブリフローといったように、重力流の性質や形態が不規則に変化することが実地調査から明らかにされている (例えば、Talling *et al.*, 2007; Ito, 2008)。ただし、それぞれ性質が異なる両者を融合ないし統合させた数値解析モデルの構築には依然課題が多く、現時点では混濁流のみを扱うモデルの開発が主流である。

3.2 タービダイト堆積前進モデリング

3.2.1 三次元数値モデル

混濁流の場合、流体中の堆積物濃度は堆積物重力流の中では最も低く、流体の粘性も低いいため、水と同様の動的挙動を示すニュートン流体として扱われる。したがって、流体の運動方程式であるナビエ・ストークス方程式と質量保存式である連続の方程式を連立させて解き、混濁流中の浮遊粒子にかかる応力を求めることで、混濁流に伴う堆積や削剥を計算することになる。ただし、ナビエ・ストークス方程式は一般に解析解の得られない偏微分方程式であるため、数値モデルでは複数の仮定を置く必要がある (例えば、成瀬, 2011)。

混濁流の三次元数値モデルには、水槽実験スケールとフィールドスケールの両方が開発されている。水槽実験スケールの数値モデルについては、単位格子あたりの流体の出入りに着目したオイラーモデル (例えば、Groenenberg *et al.*, 2009) と流体の素点の動きに着目したラグランジュモデル (例えば、Nars-Azadani and Meiburg, 2011) の双方が提唱されており、近年は非常に精緻な混濁流を再現できるようになってきた。このスケールのモデリングは、実際の水槽実験の結果と比較できる点が大きな特徴である。例えば、障害物がある場合における混濁流の挙動やタービダイトの堆積をシミュレートし、実データに基づいてそれらの再現性を検証することができる。一方、アップスケーリングさせるには計算コストが依然として高いため、モデリング結果をアナロジーとして用いることができて、フィールドスケールのモデリングに直接使用することには難がある。

フィールドスケールの数値モデルは、タービダイトブレいの探鉱・開発を主眼として開発されており、水槽実験スケールに比べて、より簡略化された数値モデルに基づいて広域的なタービダイトの堆積・分布を再現している。すでに市販されているソフトウェアとしては、Move of Sediment Modelling (旧名称は4DSediment), FLOW-3D (Flow Science 社製), および MassFLOW-3D (Complex Flow Design 社製) などが挙げられ、それぞれのソフトウェアの有用性については、Waltham *et al.* (2008) および Aas *et al.* (2010a,b; 2014) によって言及されている。これら

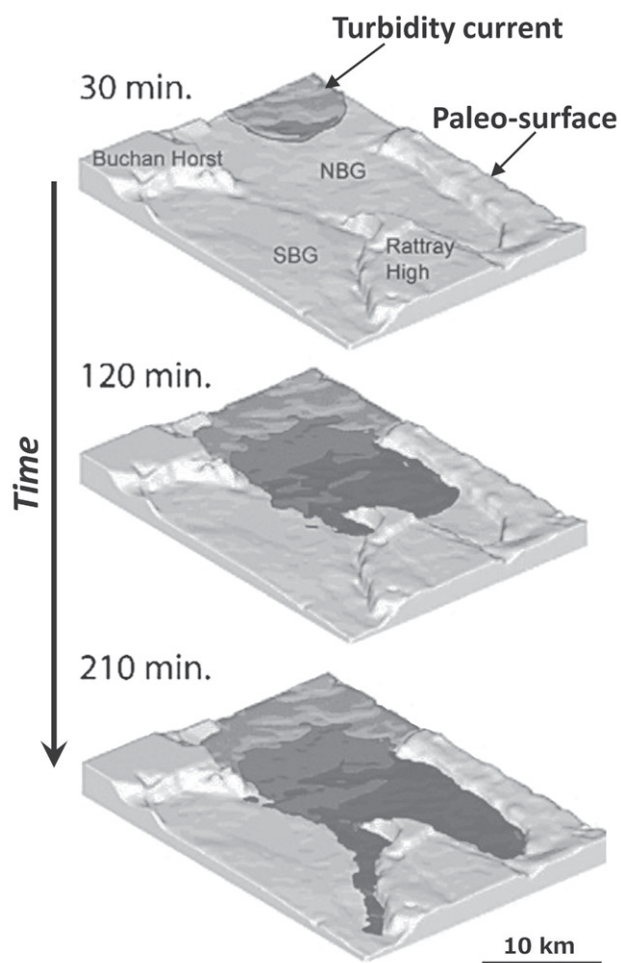


図 6 復元された古海底地形の起伏の影響を受けながら発達する混濁流の前進モデル：スコットランド沖の例
Aas *et al.* (2010a) を一部改編。

のうち、Move と MassFLOW-3D は混濁流専用のソフトウェアとして開発された一方、FLOW-3D は数値流体力学の汎用ソフトウェアである。混濁流の挙動とタービダイトの堆積は、海底地形の起伏に大きく左右されることが知られており（例えば、Kneller and McCaffrey, 1999; Morris and Alexander, 2003）、これらのソフトウェアは、流体挙動や堆積に関わる地形効果をよく再現できる（図 6）。また、チャネル内の堆積が再現可能であるほか（例えば、Janocko *et al.*, 2013）、FLOW-3D には非線形流体（ビンガム流体など）の挙動を計算する機能も備わっている。他方で、チャネル自体を形成する機能までは、いずれのソフトウェアにも用意されていないなどの制限が存在する。

以下では、混濁流専用ソフトウェアである Move Sediment Modelling および MassFLOW-3D について、モデルの支配方程式を概説し、その共通点や相違点を整理する。

3.2.2 Move の堆積モデル

Move モデルでは、(a) 混濁流は単層からなる平面流とする、(b) 混濁流の密度は一定とする、(c) 混濁流への周囲水や碎屑粒子の取り込みは考慮しないなどの仮定を設けている（Waltham *et al.*, 2008; Midland Valley Exploration Ltd., 2015）。これらの仮定に基づいて、連続の式とナビエ・ストークス方程式を下記 2 式のように簡素化している：

$$\sum_{i=1}^2 \frac{\partial H \bar{u}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial t} + \sum_{i=1}^2 \bar{u}_i \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \approx \frac{1}{\rho_w} \left(\Delta \rho g \frac{\partial h}{\partial x_j} + \mu \nabla^2 \bar{u}_j + \tau_j(H) - \tau_j(0) \right) \quad (3)$$

H は混濁流の厚さ、 $\bar{u}_i$ （ないし $\bar{u}_j$ ）は平面座標である i 軸方向（ないし j 軸方向）への混濁流の鉛直平均流速、 ρ_w は水の密度、 $\Delta \rho$ は混濁流と周囲水（海水）の密度差、 g は重力加速度、 h は混濁流の頂部の高さ、 μ は渦粘性係数、 τ_j は j 軸方向への剪断応力を表している。式 (3) の右辺は混濁流にかかる応力を表し、圧力、乱流による摩擦、および剪断応力に分けられる。剪断応力は、混濁流の底部と頂部で表され、頂部剪断応力 $\tau_j(H)$ は底部剪断応力 $\tau_j(0)$ に定数を掛けることで算出される。また、 $\tau_j(0)$ は底部における摩擦速度 u_* から（式 (4)）、 u_* は混合距離理論における底部の境界層の鉛直平均流速 $\bar{u}_b$ から（式 (5)）、 $\bar{u}_b$ は上位の乱流部分の鉛直平均流速 $\bar{u}_t$ と一定比の関係を持つとの仮定からそれぞれ求められる（式 (6)）：

$$\tau_j(0) = \rho u_*^2 \quad (4)$$

$$\bar{u}_b \approx \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z_b}{z_0} \right) - 1 \right] \quad (5)$$

$$\bar{u} = \bar{u}_t (1 - z_b/h) + \bar{u}_b z_b/h = \{(1 - z_b/h)a + z_b/h\} \bar{u}_b \quad (6)$$

k はカルマン定数（水の場合は約 0.41）、 z_b および z_0 は境界層の頂部および基底の高さ、 $\bar{u}$ は混濁流全体の平均速

度、 a は定数を表す。境界層の高さ z_b および z_0 は、底面粗度を参考に設定されるパラメータである。

碎屑粒子の堆積は、混濁流底部において、乱流による鉛直方向の粒子の運動速度が沈降速度よりも低くなった場合に起きる。すなわち、 $v_k > u_*$ （ k は粒度分布と分類数から定義される粒度階、 v_k は粒子の沈降速度、 u_* は底面における摩擦速度）となる場合、堆積量を下記式より算出する：

$$s_k = c_k (v_k - u_*) \quad (7)$$

s_k は時間当たりの堆積量、 c_k は混濁流中の粒子濃度を表している。粒子の沈降速度 v_k は、ストークス則に基づいて粒度、密度、および流体粘性から算出される。また、 $v_k \leq u_*$ となる場合においては、堆積および削剥のいずれも生じないものとしている。混濁流の粒子濃度を一定とする仮定が置かれているため、堆積作用に伴って混濁流中の粒子量が減少すると、混濁流の体積（計算では混濁流の厚さ H ）も減少し、次のタイムステップではこれを反映した形で混濁流の運動が計算される。ただし、混濁流の密度が一定で、かつ底面の削剥や周囲水・堆積物の取り込みなどが仮定されていない Move モデルでは、混濁流の実挙動とは必ずしも一致しないため、モデルを適用する際には、適用可能な地形や結果の再現性に注意すべきである。

上述の支配方程式とは別に、モデルの信頼性向上のため、混濁流パラメータの確率論的最適化を行う逆モデリングの機能を付加している点が、Move モデルのもう 1 つの特徴と言える。この機能は、坑井位置における対象層準の砂岩ネットグロス比に基づいてパラメータの最適化を行うため、対象フィールド中に利用可能な坑井データが存在する際に有効である。計算は、混濁流モデルの全てのパラメータを対象に、乱数を用いたモンテカルロ反復法に基づいて実施される。各坑井位置において、反復計算された砂岩ネットグロス比の二乗平均平方根誤差（root mean square error; RMSE）が 0.01 以下になった場合、モデルパラメータは確率論的に最適化されたと見なされる。ただし、ここで示される RMSE は砂岩ネットグロス比のみに基づく解であるため、実データとモデルデータの比較（砂岩・泥岩の分布域、層厚、粒度分布、淘汰度、尖度など）を行い、モデルの確度や地質学的妥当性を総合的に判断することが重要であろう（Egawa *et al.*, 2013）。

3.2.3 MassFLOW-3D の堆積モデル

MassFLOW-3D の計算式は、FLOW-3D の支配方程式（FLOW-3D, 2009）をベースに構築されている（Aas *et al.*, 2014）。前述の Move モデルでは、混濁流底面における削剥や堆積物の取り込みが省略され、混濁流の密度変化や鉛直方向の流体運動なども簡略化されていた。これに対し、MassFLOW-3D モデルでは、Pratson *et al.* (2000) が示した混濁流の要素のうち、周囲水の取り込み以外の要素が全て網羅されている。これに加えて、掃流堆積物についても計算するモジュールを備えているが、本稿では取り扱わない。

MassFLOW-3D モデルでは、流体と粒子を併せた混濁

流全体の平均速度 $\bar{u}$ は式 (8) のように定義され、ナビエ・ストークス方程式については式 (9) のように設定されている：

$$\bar{u} \equiv (1 - \sum_{j=1}^N f_{s,j}) u_f + \sum_{j=1}^N f_{s,j} u_{s,i} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \bar{u} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \nabla P + g + \nabla(\nu + \nu_T) \cdot \nabla \bar{u} \quad (9)$$

$f_{s,j}$ は粒子 j の体積分率、 u_f は液体の速度、 $u_{s,i}$ は i 軸方向の粒子速度、 P は圧力、 g は重力加速度、 ν は分子粘性係数（ただし、乱流であるため $\nu_T \gg \nu$ ）、 ν_T は乱流による渦粘性係数を表している。Move モデルと異なり、MassFLOW-3D モデルでは、斜面に対して垂直方向の運動も計算する必要があることから、式 (9) の右辺 2 項に重力項が含まれる。また、式 (9) の右辺第 3 項は、Move モデルにおける剪断応力と乱流摩擦力を併せた応力（式 (3) の右辺 2 項から 4 項）に対応する。渦粘性係数は、乱流エネルギー散逸率 ($k-\epsilon$) モデルに基づいて混濁流の速度、密度、分子粘性などから算出されるが、ここでは繰り込み群理論 (renormalization group theory) による修正 $k-\epsilon$ モデルが適用されている (Lyn, 2008)。修正 $k-\epsilon$ モデルは、標準 $k-\epsilon$ モデル（高レイノルズ数の流れに適用）に比べて、急旋回した流れや乱流旋回流などのレイノルズ数の低い流れの計算に適している。

MassFLOW-3D モデルでは、浮遊粒子と混濁流の挙動は区別され、粒子一流体間の相対速度 ($u_{r,i} \equiv u_{s,i} - u_f$) と併せて、微粒子に働く応力に関する下記 2 式から混濁流中の粒子の運動が計算される：

$$u_{r,i} = \frac{g}{K_i} (\rho_{s,i} - \bar{\rho}) f_{s,i} \quad (10)$$

$$K_i = \frac{3}{4} \frac{f_{s,i}}{d_{s,i}} (c_{D,i} \|u_{r,i}\| + 24 \frac{\mu_f}{\rho_f d_{s,i}}) \quad (11)$$

$\rho_{s,i}$ は粒度 i の粒子密度、 $\bar{\rho}$ は混濁流の平均密度、 K_i は粒子 i に働く抵抗係数、 $d_{s,i}$ は粒子の粒径、 $c_{D,i}$ は粒子 i への抵抗係数、 μ_f は流体粘性、 ρ_f は流体密度を表している。

また、MassFLOW-3D モデルでは、混濁流中の粒子の質量保存式（式 (12)）を用いて、混濁流の濃度変化を再現している：

$$\left(\frac{\partial c_{s,i}}{\partial t} \right)_x + \bar{u} \cdot \nabla c_{s,i} = D \nabla^2 c_{s,i} - u_{lift,i} \cdot \nabla c_{s,i} - u_{drift,i} \cdot \nabla c_{s,i} \quad (12)$$

$c_{s,i}$ は粒子 i の濃度、 D は拡散係数、 $u_{lift,i}$ は混濁流の底面における粒子の取り込み速度、 $u_{drift,i}$ は混濁流と懸濁粒子の速度差 ($u_{drift,i} \equiv u_{s,i} - \bar{u}$) を表している。底面からの粒子の取り込み $u_{lift,i}$ は、底面における粒子の平均粒径、粒子密度、底面の傾斜角、混濁流の流れと底面のなす角、安息角などのパラメータを用いてモデル化された結果 (Mastbergen and van den Berg, 2003) に基づいている。以上の式を連立して解くことで、混濁流の運動と濃度変化、

粒子の堆積量や削剥量が計算される。

3.2.4 堆積モデルの比較

上記では、近年開発された 2 つの広域堆積モデルについて、計算の内容、仮定、条件などの特徴を概説した。MassFLOW-3D モデルは、混濁流底部における削剥や碎屑物の取り込み、混濁流中の粒子濃度の変化なども加味することで、Move モデルと比較してより現実に近い混濁流の挙動を再現できる仕様になっている。また、混濁流中の碎屑物量の時間変化について比較すると、Move モデルの混濁流では碎屑物量は減少するのみであるのに対し、MassFLOW-3D モデルでは碎屑物の取り込みと密度変化が考慮されているため、混濁流中の碎屑物量は海底地形の変化に伴って増減する。

したがって、一見すると、MassFLOW-3D モデルではより高精度な堆積モデルが提供されるように思われる。しかしながら、複雑な支配方程式とパラメータから成るモデル設計には幾つか課題が見られ、例えば、削剥量が過大評価される（言い換えれば、初期値よりも堆積物運搬量が大きく増加する）傾向が見られるなどのパラメタリゼーション上の不備が存在する点を、Aas ら自身が指摘している (Aas *et al.*, 2014)。

一方で、Move モデルでは、混濁流の支配方程式が簡易化されている分、パラメータが限られ、混濁流中の碎屑物が初期値から増加することは無いため、MassFLOW-3D モデルに比べてモデルの計算結果を理解しやすい。モンテカルロ法に基づく入力パラメータの非線形的最適化の導入は、MassFLOW-3D には含まれないタービダイト砂岩分布の確率論的推定を可能にしており、モデル精度の向上につながる。同機能を備えていない MassFLOW-3D を実フィールドで使用する際には、パラメータ値の割り振りに試行錯誤が求められる。

MassFLOW-3D のように精緻で再現性の高いモデルの開発が重要である点は言及するまでもないが、そのような数値モデルが石油探鉱の精度やハンドリングのし易さをどの程度向上させ得るのかについては、今後の検討課題であろう。

4. ハイブリッドモデルの事例

Waltham *et al.* (2008) が提唱したハイブリッド手法は、上述した古海底地形復元モデルとタービダイト堆積前進モデルの併用によって成り立っている。同手法を採用した研究成果はこれまで 5 件ほど報告されているが、いずれの事例においても古海底地形モデルの作成は Waltham らが推奨する剥ぎ取り法に基づいており、作成ツールには Move の三次元構造復元モデリングが使用されている。これに対し、堆積モデルに関しては、研究事例ごとに異なるソフトウェアが採用されている。以下では、スコットランド沖、東部南海トラフ海域、およびフランス南東部における事例を紹介し、堆積モデリングの成果と課題について考察する。

4.1 スコットランド沖

スコットランドのマリー湾 (Moray Firth) 付近に分布

する中生界を対象に、Waltham *et al.* (2008) は自身らが提案したハイブリッドモデルの詳細について説明している。すなわち、剥ぎ取り法を利用して古海底地形モデルを作成した後、可能性が高い古流向とそれに伴うタービダイトの堆積分布について Move の堆積モデリングから検討した。彼らは、数坑の砂岩ネットグロスに基づく混濁流パラメータの確率論的最適化から、坑井データと整合的な砂岩分布を再現できる古流向を導き出しており、利用可能な坑井が限られるフィールドにおけるタービダイト分布予測の有用性を示した (図 7)。

一方、Aas *et al.* (2010a) は、マリー湾の沖合に分布す

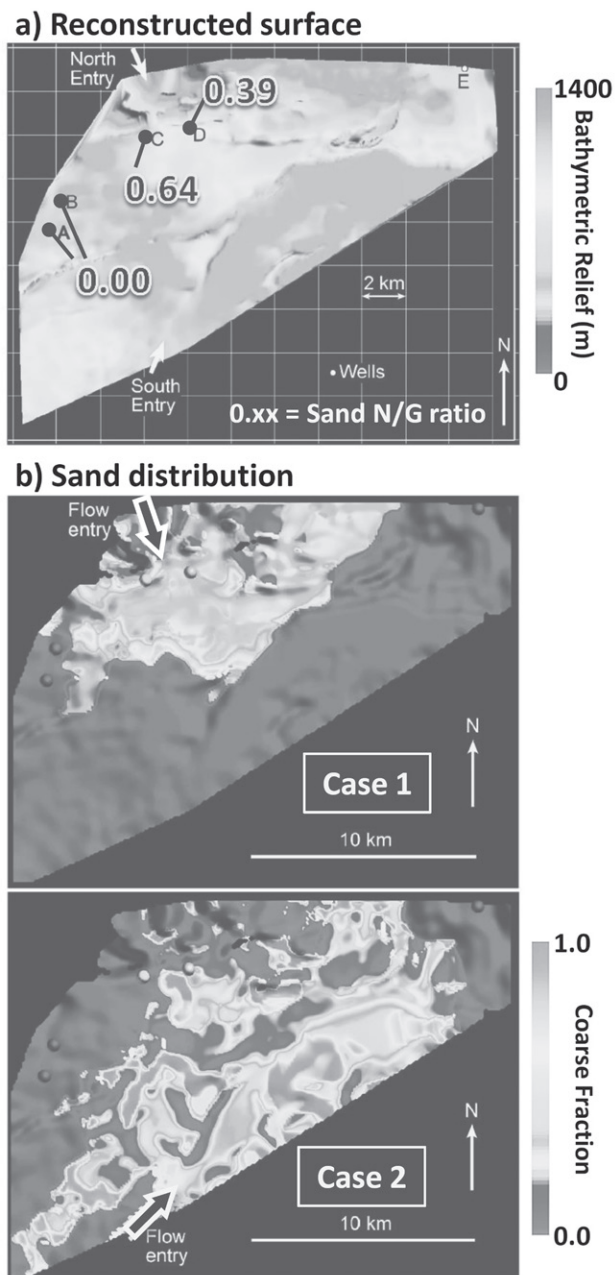


図 7 混濁流パラメータの確率論的最適化の実施したタービダイト堆積前進モデリング：スコットランド沖の例
Waltham *et al.* (2008) を一部改編。

る白亜系 Britannia Sandstone について、FLOW-3D による堆積モデリングを試みている (図 6)。エアリーとフレクシュラルのそれぞれのアイソスタシー理論を採用した古地形復元モデルに基づいて堆積モデリングを行った結果、フレクシュラルアイソスタシーを考慮した古地形の方が実データと整合的な砂岩分布が得られた。ただし、FLOW-3D は混濁流専用のソフトウェアではなく、また Move モデルのような混濁流パラメータの最適化機能は設けられていないため、このモデル結果の妥当性を評価する際には注意を要する。

4.2 東部南海トラフ海域

東部南海トラフ海域では、砂層型メタンハイドレートが胚胎する更新統の小笠層群相当層について、Egawa *et al.* (2013) が Move モデルによるタービダイト分布の推定を行っている。対象層は閉鎖系小盆地 (confined minibasin) に分布しており、先行研究で提示された複数の異なる古流向についてそれぞれ堆積モデルを実施した。上述のスコットランド沖では、混濁流パラメータの多くはデフォルト値が採用されていたのに対し、南海トラフの事例では全てのパラメータについて反復法と乱数による初期値探索が試みられた。モデリングの結果、坑井の実データと整合的な砂岩ネットグロスが得られただけでなく、混濁流の流入付近では、震探アトリビュート解析から明らかになった海底扇状地の形状と調和的なタービダイト砂岩分布が示された。また、小盆地の堆積中心においては、海底地形の起伏がもたらす混濁流の反転 (reflection)、転向 (deflection)、および滞流 (ponding) に伴うタービダイトの堆積が再現され、層厚な粗粒堆積物が分布する結果が得られた (図 8)。これらの事象は、閉鎖系のタービダイト堆積盆地ではよく観察されるほか (例えば、Sinclair and Tomasso, 2002; Lomas and Joseph, 2004)、水槽実験からも報告されている (例えば、Morris and Alexander, 2003)。

4.3 フランス南東部

フランス南東部の Peira Cava 堆積盆地に分布する始新統～漸新統 Annot Sandstone においては、FLOW-3D (Aas *et al.*, 2010b) と MassFLOW-3D (Aas *et al.*, 2014) の堆積モデルが適用されている。特に後者に関しては、近年リリースされたばかりのソフトウェアであることから、その有効性や課題の確認が主目的となっている。同堆積盆地にお

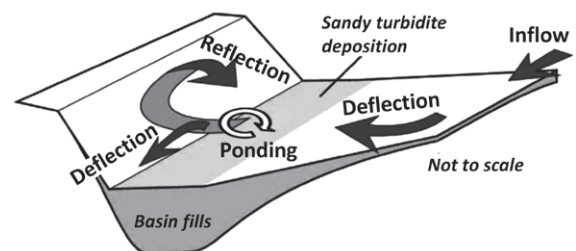


図 8 閉鎖系タービダイト堆積盆地における混濁流の挙動とタービダイトの堆積：東部南海トラフ海域の例
Egawa *et al.* (2013) を一部改編。

る研究の特徴は、古地形復元モデルが露頭調査データに基づいて作成されたことである。これは、三次元震探データから得られたホライゾンデータを用いている上記2地域の事例とは大きく異なる点であり、震探データに乏しい陸上においてもハイブリッドモデルは十分機能することを示唆している。また、堆積モデリングの結果を露頭データと直接比較し、評価することができる点も、陸域調査での利点として挙げられる。

5. まとめと今後の方向性

本稿で紹介した Waltham のハイブリッド手法は、近年高度な発展を遂げた地質構造復元の逆モデリング技術と混濁流の前進モデリング技術を複合し、地質時代のタービダイト分布予測に適用した意欲的な取り組みであり、地質モデルの作成でよく用いられる地球統計学的手法とは異なる。同手法は、従来の震探断面や露頭調査のデータに基づいて堆積盆地構造を把握し、古海底地形を復元することができれば、三次元震探データを入手しづらい陸上においても利用可能である。加えて、混濁流パラメータの確率的最適化は坑井データが限られたフィールドで特に有効であり、モデルの信頼度を向上させるほか、震探アトリビュート解析や震探地形学的解析などと併用することで、より効果的なタービダイトプレートの地質学的評価が期待される。

大水深探鉱では、タービダイトの分布や性状の把握が最優先される傾向があることから、現状では堆積物重力流の中でも混濁流が主なモデル開発対象となっている。本稿で言及した Move や MassFLOW-3D などが示す堆積前進モデルは、支配方程式やパラメータの違いはあるものの、基本的にはタービダイト成ロープの形成や、海底地形の起伏に左右されるタービダイトの堆積を再現する際に有効である。

これらのソフトウェアとは別に、チャンネル・レビーやチャンネル・ロープの形成を取り入れた前進モデルの開発も近年進められており、今後の開発動向が注目される。また、実際の深海域ではタービダイト成砂岩以外の貯留岩も発達していることから、将来的にはデブリフローやハイパーピクナル流なども加味した数値モデルの開発が待たれる。

謝 辞

春季講演会に際し、本講演の機会を頂いた石油技術協会に厚く御礼申し上げる。本稿を出版するに当たり、2名の匿名査読者より有益な指摘を頂いた。Midland Valley Exploration 社、株式会社地球科学総合研究所、株式会社ジオシス、国立研究開発法人産業技術総合研究所、ならびにメタンハイドレート資源開発研究コンソーシアムには、Move を用いて研究活動を行う機会を頂いた。ここに深く感謝の意を表す。

引 用 文 献

- Aas, T. E., Howell, J. A., Janocko, M. and Jackson, C.A-L., 2010a : Control of Aptian palaeobathymetry on turbidite distribution in the Buchan Graben, Outer Moray Firth, Central North Sea. *Mar. Petrol. Geol.*, **27**, 412–434.
- Aas, T. E., Howell, J. A., Janocko, M. and Midtkandal, I., 2010b : Re-created Early Oligocene seabed bathymetry and process-based simulations of the Peira Cava turbidite system. *Jour. Geol. Soc. (London)*, **167**, 857–875.
- Aas, T. E., Basani, R., Howell, J. and Hansen, E., 2014 : Forward modelling as a method for predicting the distribution of deep-marine sands : an example from the Peira Cava Sub-basin. In Martinus, A. W., Howell, J. A. and Good, T. R., eds. : *Sediment-Body Geometry and Heterogeneity: Analogue Studies for Modelling the Subsurface. Geological Society Special Publications 387*, The Geological Society, London, 247–269.
- Bertoncello, A., Sun, T., Li, H., Mariethoz, G. and Caers, J., 2013 : Conditioning surface-based geological models to well and thickness data. *Math. Geosci.*, **45**, 873–893.
- Egawa, K., Furukawa, T., Saeki, T., Suzuki, K. and Narita, H., 2013 : Three-dimensional paleomorphologic reconstruction and turbidite distribution prediction revealing a Pleistocene confined basin system in the northeast Nankai Trough area. *AAPG Bull.*, **97**, 781–798.
- Falivene, O., Frascati, A., Gesbert, S., Pickens, J., Hsu, Y. and Rovira, A., 2014 : Automatic calibration of stratigraphic forward models for predicting reservoir presence in exploration. *AAPG Bull.*, **98**, 1811–1835.
- Flow Science Inc., 2009 : *User Manual of FLOW-3D (Version 9.4)*.
- Groenenberg, R. M., Sloff, K. and Weltje, G. J., 2009 : A high-resolution 2-DH numerical scheme for process-based modeling of 3-D turbidite fan stratigraphy. *Comp. Geosci.*, **35**, 1686–1700.
- Haughton, P., Davis, C., McCaffrey, W. and Barker, S., 2009 : Hybrid sediment gravity flow deposits – Classification, origin and significance. *Mar. Petrol. Geol.*, **26**, 1900–1918.
- Hesse, S., Back, S. and Franke, D., 2009 : The deep-water fold-and-thrust belt offshore NW Borneo: Gravity-driven versus basement-driven shortening. *GSA Bull.*, **121**, 939–953.
- Ito, M., 2008 : Downfan transformation from turbidity currents to debris flows at a channel-to-lobe transitional zone: the Lower Pleistocene Otadai Formation, Boso Peninsula, Japan. *Jour. Sed. Res.*, **78**, 668–682.
- Janocko, M., Cartigny, M. B. J., Nemec, W. and Hansen, E. W. M., 2013 : Turbidity current hydraulics and sediment deposition in erodible sinuous channels: Laboratory experiments and numerical simulations. *Mar. Petrol. Geol.*, **41**, 222–249.
- Kneller, B. and McCaffrey, W., 1999 : Depositional effects of flow nonuniformity and stratification within turbidity currents approaching a bounding slope: Deflection, reflection, and facies variation. *Jour. Sed. Res.*, **69**, 980–991.
- Lee, G. H., Yoon, Y., Nam, B. H., Lim, H., Kim, Y.-S., Kim, H. J.

- and Lee, K., 2011 : Structural evolution of the southwestern margin of the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea) and tectonic implications. *Tectonophysics*, **502**, 293–307.
- Lomas, S. A. and Joseph, P., 2004 : Confined turbidite systems. In Lomas, S. A. and Joseph, P., eds. : *Confined Turbidite Systems, Geological Society Special Publications 222*, The Geological Society, London, 1–7.
- Lyn, D. A., 2008 : Turbulence models for sediment transport engineering. In Garcia, M. H., ed. : *Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modelling, and Practice, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice 110*, American Society of Civil Engineers, 763–825.
- Mastbergen, D. R. and van den Berg, J.H., 2003 : Breaching in fine sands and the generation of sustained turbidity currents in submarine canyons. *Sedimentology*, **50**, 625–637.
- Middleton, G.V. and Hampton, M.A., 1976 : Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity flows. In Stanley, D.J. and Swift, D.J.P., eds. : *Marine Sediment Transport and Environmental Management*, New York, Wiley, 197–218.
- Midland Valley Exploration Ltd., 2015 : *User Manual of Move (Version 2015.1)*.
- Morris, S.A. and Alexander, J., 2003 : Changes in flow direction at a point caused by obstacles during passage of a density current. *Jour. Sed. Res.*, **73**, 621–629.
- Mulder, T. and Alexander, J., 2001 : The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. *Sedimentology*, **48**, 269–299.
- Nars-Azadani, M. M. and Meiburg, E., 2011 : TURBINS: An immersed boundary, Navier–Stokes code for the simulation of gravity and turbidity currents interacting with complex topographies. *Comp. Fluids*, **45**, 14–28.
- 成瀬 元, 2011 : 混濁流のオートサスペンション：その意義と課題, 地質雑, **117**(3), 122–132.
- Pratson, L. F., Imran, J., Parker, G., Syvitski, J. P. M. and Hutton, E., 2000 : Debris flows versus turbidity currents: a modeling comparison of their dynamics and deposits. In Bouma, A. H. and Stone, C.G., eds. : *Fine-grained turbidite systems, AAPG Memoir 72 / SEPM Special Publication 68*, The American Association of Petroleum Geologists and the Society for Sedimentary Geology, 57–72.
- Roberts, A. M., Kuszniir, N. J., Yielding, G. and Styles, P., 1998 : 2D flexural backstripping of extensional basins; the need for a sideways glance. *Petrol. Geosci.*, **4**, 327–338.
- Roberts, A. M., Corfield, B. I., Kuszniir, N.J., Matthews, S. J., Hansen, E.-K. and Hooper, R.J., 2009 : Mapping palaeostructure and palaeobathymetry along the Norwegian. *Petrol. Geosci.*, **15**, 27–43.
- Rouby, D., Xiao, H. and Suppe, J., 2000 : 3-D restoration of complexly folded and faulted surfaces using multiple unfolding mechanisms. *AAPG Bull.*, **84**, 805–829.
- Scrater, J. G. and Christie, P. A. F., 1980 : Continental stretching: An explanation of the post-mid-Cretaceous subsidence of the central North Sea Basin. *Jour. Geophys. Res.*, **85**, 3700–3739.
- Shaw, J. H., Connors, C.D. and Suppe, J., 2005 : *Seismic interpretation of contractional fault-related folds: An AAPG Seismic Atlas, AAPG Studies in Geology 53*, 1–59, The American Association of Petroleum Geologists.
- Sinclair, H.D. and Tomasso, M., 2002 : Depositional evolution of confined turbidite basins. *Jour. Sed. Res.*, **72**, 451–456.
- 高野 修・西村瑞恵, 2009 : 三次元サイズミック地形学 (seismic geomorphology) 手法による貯留層のイメージングと分布解析：海底扇状地タービダイト砂岩を例として, 石技誌, **74**(1), 40–51.
- Talling, P. J., Wynn, R. B., Masson, D. G., Frenz, M., Cronin, B. T., Schiebel, R., Akhmetzhanov, A. M., Dallmeier-Tiessen, S., Benetti, S., Weaver, P. P. E., Georgiopoulou, A., Zühlsdorff, C. and Amy, L.A., 2007 : Onset of submarine debris flow deposition far from original giant landslide. *Nature*, **450**, 541–544.
- Waltham, D., Jaffey, N., Maclean, S. and Zampetti, V., 2008 : Stratigraphic modeling of turbidite prospects to reduce exploration risk. *Petrol. Geosci.*, **14**, 273–280.
- Watts, A. B., Karner, G. D. and Steckler, M. S., 1982 : Lithospheric flexure and the evolution of sedimentary basins. *Phil. Trans. Royal Soc. (London)*, **305**, 249–281.
- Watts, A.B. and Torné, M., 1992 : Crustal structure and the mechanical properties of extended continental lithosphere in the Valencia trough (western Mediterranean). *Jour. Geol. Soc. (London)*, **149**, 813–827.
- Weimer, P. and Pettingill, H.S., 2007 : Deep-water exploration and production: A global overview. In Nilsen, T.H., Shew, R.D., Steffens, G.S. and Studlick, J.R.J., eds. : *Atlas of Deep-water Outcrops, AAPG Studies in Geology 56*, The American Association of Petroleum Geologists, CD-ROM, 29 p.