単層解析法により広域対比されるタービダイト研究の進展

浦本豪一郎^{1*}・清家一馬²

Progress in the analysis of turbidites over wide areas using bed-by-bed correlation method

Go-Ichiro Uramoto^{1*} and Kazuma Seike²

はじめに

大陸縁辺堆積システムの深海域に発達するタービダイトは、しばしば広域対比が可能な単層の集合体を構成する。広域対比されるタービダイト単層の解析は、その分布形態、構成堆積相の側方変化の実体を理解する基礎研究の一端として重要となる。近年、こうした広域対比されるタービダイト単層の特徴を詳しく理解するための地層解析法である単層解析法が、改めて注目されている。

単層解析法は、1950年代以前にフリッシュ互層を対象とした研究で確立され (Vassoevich, 1948)、タービダイトのみならず火砕流堆積物など広域対比できる堆積物の解析手法として、陸上露頭・現世海底堆積物コアの研究で使われてきた。研究の初期段階にあたる1950年代後半～1980年代前半は、タービダイト・サクセッションの発達過程を理解する一環としてタービダイト単層の形態・堆積構造・粒度の空間変化が詳しく調べられた (例えば、Hesse, 1965; Hirayama and Nakajima, 1977; Tokuhashi, 1979; Ricci Lucchi and Valmori, 1980)。また、現世深海堆積物のコア解析では、タービダイトを形成した混濁流の発生要因として古地震との関連が示され (Kastens, 1984)、古地震履歴の復元に単層解析法が活用されている (Goldfinger et al., 2007)。1980年

代後半～1990年代は単層解析法を適用した公表論文が減少したが、2000年代以降、改めてタービダイト層の発達過程を詳しく理解する上で単層解析法が適用され、タービダイト単層の形態・堆積構造・組成の多様性やその成因に関する認識が深化し (Haughton, 2001; Wynn et al., 2002, 2012; Remacha and Fernández, 2003; Amy et al., 2007; Frenz et al., 2009)、タービダイトを形成させた多様な重力流プロセスの空間変化の推定 (Talling et al., 2004, 2007a; Amy and Talling, 2006) やタービダイト層累重過程の定量的評価 (浦本・清家, 2012, 2013) が行われている。更には単層解析法による実際の地層や堆積物の解析データのみならず、物理探査など異なる手法で得られたデータの比較、さらには水路実験を加えた総合的なタービダイト単層の解析など (Talling et al., 2007b, 2007c)、新たなタービダイト研究の基礎として単層解析法が活用されている。

日本のタービダイト・サクセッションでは、1960年代～1970年代に房総半島に露出する新生界を構成する小規模な海底扇状地システムを対象として単層解析法によるタービダイト研究が実施された (例えば、Hirayama and Nakajima, 1977; Tokuhashi, 1979)。房総半島の研究では地層中に挟在する多数の凝灰岩鍵層を基準としたタービダイト単層の高精度かつ広域的な層序対比により、タービダイト単層の堆積形態や構成堆積相の空間変化の理解に重要な知見をもたらした。日本のフィールドは房総半島の例に見るように詳細な層序対比の枠組みを構築することで、単層解析法による高精度タービダイト研究を遂行するポテンシャルが高い。しかしながら、初期段階以降、研究例が限られているのが現状となっている (例えば、浦本・清家, 2012, 2013)。改めて日本のタービダイト・サクセッションで単層解析法を適用することは、タービダイトを形成させた重力流プロセスの多様性や、小規模な海底扇状地システムの発達過程

受付：2013年9月2日 受理：2014年1月28日

¹ 海洋研究開発機構高知コア研究所
Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Monobe B200, Nankoku, Kochi 783-8502, Japan

² 早稲田大学教育学部地球科学教室
Department of Earth Sciences, School of Education, Waseda University, 1-6-1 Nishiwaseda, Shinjuku, Tokyo 169-8050, Japan

* Corresponding author: G.-I. Uramoto, uramotog@jamstec.go.jp

をより詳しく理解するなど、新たな研究の観点を得る上で重要な役割を果たすと期待される。

単層解析法によるタービダイト研究は以上のような国内外の状況にあり、今後、様々な地域におけるタービダイト研究の一翼を担うものと期待される。ただし、従来の研究では、広域的な単層対比方法を示した研究に限られる (Wynn et al., 2002; Amy and Talling, 2006; Frenz et al., 2009)。手法の適用方法も含めた研究の情報を整理することは、今後、単層解析法によるタービダイト研究を円滑に実施する基礎資料として有用と考えられる。そこで著者らは単層解析法の適用方法を概説すると共に、過去の研究で明らかにされた主要な知見を紹介することを目的として本稿を取りまとめた。なお、単層解析法による古地震履歴の復元を目的としたタービダイト研究は、詳細な年代分析を基に離れた堆積盆間でタービダイト単層が対比されており (Goldfinger et al., 2007)、個々の混濁流イベントによって形成されたタービダイト単層を対比する単層解析法と目的が異なる。本稿はこのような古地震履歴の復元に関する研究を除いて、単層解析法によるタービダイト研究をまとめることとする。

単層の広域対比方法

単層解析法によるタービダイト研究において、近年、精力的に成果を報告している Talling らは、鍵層に対する相対的なタービダイト単層の層序的位置関係と、パターンマッチングを組み合わせることでの広域対比を行っている (例えば、Wynn et al., 2002, 2012; Amy and Talling, 2006; Frenz et al., 2009)。彼らは、タービダイト単層の層厚と鉱物組成の特徴を考慮したパターンマッチングにより、複数の測定地点で単層を対比している。一方、単層解析が実施された初期段階の研究はパターンマッチングのみに基づいて対比が行われていた (例えば、Carozzi, 1957; Grossgeim, 1961)。しかしながら、パターンマッチングのみによる単層解析法は、単層の層厚や組成と独立した情報を対比に用いることができず、層相の側方変化や侵食の影響が認められる場合に、離れた測定地点間の対比を誤る可能性がある。そのため、その後の研究で、まず鍵層を層序対比することで対比の基準面を明確にし、鍵層に対する相対的な各タービダイト単層の位置関係と、タービダイト単層の詳細な記載・分析データに基づいて単層が広域対比される方法が確立された。

鍵層の対比を基準とした単層解析法は、平山や徳橋らによって房総半島に露出する新生界の海底扇状地システムで初めて適用された。彼らは、上総層群大田代層 (平山・鈴木, 1964, 1965, 1968; 平山ほか, 1969; Hirayama and Nakajima, 1977)、三浦層群安野層 (徳橋・岩脇, 1975)・清澄層 (徳橋,

1976a, 1976b; Tokuhashi, 1979) に挟在する多数の凝灰岩鍵層を基準としてタービダイト単層を広域対比した。鍵層を単層対比の基準に利用したことで、タービダイト単層の形態や構成堆積相の空間変化の理解について大きな進展が認められており、この点は次節に記述する。鍵層を基準としたタービダイト単層の広域対比は、近年の研究にも引き継がれている。特に多くの研究が報告されているイタリアの中新統 Marnoso Arenacea 層では炭酸塩に富んだ組成のタービダイト単層が鍵層として識別され (Gandolfi and Paganelli, 1983)、その中でも Contessa Key Bed と呼ばれる極厚層の鍵層を中心とした層準で盛んに研究されている (Talling et al., 2004, 2007b, 2007c, 2012; Amy and Talling, 2006; Muzzi Magalhaes and Tinterri, 2010; Tinterri and Muzzi Magalhaes, 2011)。また、現世海底堆積物コアの研究では、現在の海底面を正確な同一時間面としてタービダイト単層が対比されている (Wynn et al., 2002, 2012; Frenz et al., 2009)。

以上により、単層解析法の適用に際しては、まず鍵層を対比し、その上でタービダイト単層の層厚や組成の特徴を適確に識別したパターンマッチングを組み合わせた段階的な手順を踏むことで単層の広域対比が達成される。タービダイト単層の特徴は、まず、肉眼観察によって堆積構造・粒度・色調の記載と厳密な層厚測定により把握する。薄片・スミアスライド観察によるモード組成、機器分析による化学組成データ、帯磁率などの物理特性データは、後背地の異なるタービダイト単層や凝灰質なタービダイト単層の識別に利用できる (Wynn et al., 2002; Amy and Talling, 2006; Frenz et al., 2009)。こうした総合的なデータ解析を基に行われたタービダイト単層対比の例として Frenz et al. (2009), Wynn et al. (2012) によるモロッコ北西沖アガディール海盆 (Agadir Basin) を構成するタービダイト単層の対比を見てみよう (第1図)。ここでは、海盆底のチャネルを伴わない堆積システムを構成するタービダイト単層が対比され、各単層には上位から下位に AB1-AB14 の識別番号が付されている。対比の手順は以下ようになる: (1) 最初に明瞭に識別される凝灰質タービダイト (第1図の単層識別番号 AB2, AB8, AB14) と、現在の海底面を対比する。これらはこの後の単層対比の基準面として利用され、鍵層の役割を果たしている; (2) 次の段階では、まず組成や層厚において他と識別される特徴的なタービダイトを対比する。具体的には厚層かつ砂質のタービダイト (AB3, AB5, AB11, AB13)、石灰質タービダイト (AB10)、珪質タービダイト (AB1) を識別し、(1) で認識された鍵層との相対的な位置関係から対比する; (3) 最後に (1) (2) の対比された基準面との相対的な位置関係と岩相の特徴から、他の薄層タービダイトを対比する。以上のような対比により Frenz et al. (2009) はアガディール海盆におけるタービダイト単層に

第1図 (A) 単層解析法におけるタービダイト単層の広域対比の手順. (B) 北西アフリカ大陸縁辺のアガディール海盆を構成するタービダイト単層を広域対比した層序断面図. Frenz et al. (2009) と Wynn et al. (2012) を基に作成. 各柱状図の上部に付した番号は挿入地図のコア掘削サイトの番号に対応する.

第2図 房総半島中新統-鮮新統清澄層のタービダイト単層の断面形態と内部構造・粒度の分布 (Tokuhashi, 1979)。

ついて、供給源（大陸縁辺域、海盆周辺の海山や島嶼域）の違いによる単層の層厚分布の特徴を示した。凝灰質タービダイト（AB2, AB8, AB10.5, AB14）は海盆の西方に位置する海山や島嶼域から混濁流が流入し、海盆西部の緩斜面域（第1図の地点⑦～⑫）を中心とした分布となっている。他方、大陸縁辺起源のタービダイトは海盆東部から混濁流が流入し、その多くは海底谷近傍から海盆末端にかけて層厚を徐々に減少ないし尖滅する分布を示す。ただし、海盆内で堆積した体積量の大きいタービダイト（AB5）は大部分が海底谷近傍の急傾斜面域（第1図の地点①～③）をバイパスし、海盆中心部の平坦面域（第1図の地点④～⑥）において層厚が大きい分布を示すことが明らかとなっている。

このように単層解析法による取得データは広域対比されたタービダイト単層の層厚や内部構造の特徴を空間的なデータとして表現できる点で興味深い。これらの研究では、タービダイト単層の層厚分布だけでなく、単層の分布範囲や内部構造、試料の分析による単層の組成データ（粒度・鉱物の組成など）の空間変化が詳しく調べられている。次節ではタービダイト単層の空間データを解析した研究を概観する。

単層解析法によるタービダイト単層の空間データの解析

単層解析法が確立された初期段階において、タービダイト

ト単層の形態や内部構造の空間変化が詳しく調べられた。例えば、内部構造・組成の解析（Hesse, 1965; 平山・鈴木, 1965; Conolly and Ewing, 1967; 平山ほか, 1969）、堆積形態の解析（Bornhold and Pilkey, 1971; Bennetts and Pilkey, 1976; 徳橋, 1976a; Ricci Lucchi and Valmori, 1980）、堆積形態と内部構造・組成の総合的解析（徳橋, 1976b; Hirayama and Nakajima, 1977; Tokuhashi, 1979）が行われた。初期の研究における代表的な成果は、房総半島に露出する上総層群大田代層（Hirayama and Nakajima, 1977）と三浦層群清澄層（Tokuhashi, 1979）の研究だろう。平山や徳橋らは、海底扇状地システム内のチャンネルを伴う堆積システムから、チャンネルを伴わない堆積システムへの空間変化に伴ったタービダイト単層の形態、構成堆積相の空間変化を明らかにした（第2図）。これによってタービダイト単層厚が、上流から下流に単調減少するのではなく、上に凸の堆積形態となることを示した。また、タービダイト単層の内部構成においては、タービダイト単層に認められるタービダイト泥岩の分布が、必ずしもタービダイト砂岩を全体に覆うように分布するのではなく、流れの比較的下流域のみに分布が限られることを示した。このような解析が可能となった背景として、既述した凝灰岩鍵層を基準として単層を対比したことが重要であった。平山や徳橋ら以前の研究におけるパターンマッチングに基づいたタービダイト単層の対比では、層相の側方変化を認識することは困難だった。他方、平山や徳橋らは、タービダイトと独立した鍵層を基準とし

第3図 アガディール海盆のタービダイト単層（第1図の単層 AB5）が示す岩相の側方変化（Talling et al., 2004）. 上流地点では級化層理の認められるタービダイト単層が、下流地点においてデフライトと解釈される厚層の塊状泥質砂をタービダイト砂とタービダイト泥の間に挟在する。

たことで、タービダイト単層の形態や構成堆積相における空間変化の理解に資する重要な知見を得たのである。

近年の研究では、こうしたタービダイト単層の層厚や内部構造の空間変化の認識に加え、タービダイト構成堆積相の成因に関する理解の深化により、新たな研究が展開されている。その好例は、タービダイトを形成した重力流による碎屑物の運搬・堆積過程の空間変化を明らかにした Talling et al. (2004) で、数多くの国際誌論文で引用されており、注目される。この研究では、海盆底に発達した堆積システム（Marnoso Arenacea 層とイギリス・ウェールズ地方に露出するシルル系 Aberystwyth Grits 層群の陸上露頭、モロッコ北西沖アガディール海盆の現世深海堆積物コア）を構成する重力流堆積物の粒度特性の空間変化や古流向の特徴を解析している。その結果、混濁流と土石流という異なる流動特性から形成された重力流堆積物が一回の重力流イベントで形成された重力流堆積物内で認められることを示した（第3図）。Talling et al. (2004) は、こうした堆積物が形成された重力流の流動過程として、(1) 初生的に土石流であった流体が流動過程で周囲流体を取り込み、希釈されることで流れの上部に混濁流が形成される、(2) 初生的に混濁流であった流体が、泥質な海底堆積物を侵食し、流体内に取り込むことで流れの下部が土石流に変化する、(3) 初生的な混濁流から粗粒碎屑粒子が沈降し、相対的に細粒碎屑粒子の濃度が増加し、流体の下部が土石流に変化する、

などのモデルを挙げ、一回の重力流イベントにおいて異なる物理特性の流体が形成された流動過程を検討した。その後の研究の進展で、これらの堆積モデルは更に議論されているが（例えば、Talling et al., 2007a, 2012）、Talling et al. (2004) の重要な点は、タービダイト単層の粒度や堆積構造の空間的な変化を解析することで、堆積物を形成した重力流の流動過程を示したことである。重力流は、本質的に破壊力を保持した流体であることに加え、その発生予測が難しいとされる。そのため、従来の研究で現実に行っている重力流の流動過程を直接観測した例は限られているのが現状である（Xu et al., 2004）。そこで直接観測に代わる方法として、単層解析法によってタービダイト単層の堆積過程を認定することで、深海の重力流の運搬・堆積過程を推定した Talling et al. (2004) は先駆的かつ意義深い研究といえる。Talling et al. (2004) は海盆底を構成するタービダイトを研究対象としたが、今後、こうした検討を他の堆積システムを構成するタービダイト単層の解析に適用することで、深海域における重力流の流動過程の類似点や相違点の議論が可能となる。将来的には、過去の地層の解析により明らかにされた様々な重力流現象の認識を、実際の深海底における重力流の運搬・堆積過程の理解へと還元していくことが重要だろう。

単層解析データの定量解析

近年の地層観測・解析技術の飛躍的な発展により、定量的指標に基づく地層形成過程の解析や解釈が進められると共に、定量的指標の整理が行われている (Paola et al., 2009). 単層解析法は地層の直接観察によってデータを取得するので、タービダイト層の定量解析に有用な基礎データを厳密に得られる。単層解析データの定量解析による地層形成過程の検討は、タービダイト研究の進展を図る上で重要な一翼となろう。

単層解析データを基に定量的な観点から地層累重過程を検討した例として、Straub et al. (2009) による補償累重の定量検出法 (ストラウプ法) を踏まえ、陸上露頭の異なる地点で計測したタービダイト単層の層厚データから単層の累重過程を定量的に検討した浦本・清家 (2012, 2013) がある。補償累重は堆積盆地地形とのフィードバックによる地層累重過程の一つである。地形的低所が選択的に埋積され、堆積盆地内の起伏が緩和・消失されていく過程を表す。ストラウプ法の概念や解析原理は浦本・清家 (2012) を参考いただきたいが、その要点は地層断面から計測される堆積速度と沈降速度の比の標準偏差 σ_{ss} の大きさが計測時間窓の増加に伴って、べき乗則で減少することである。その関数のべき指数 κ は補償指数と呼ばれる補償累重の度合いを示す定量指標となる。 κ は 0 から 1 の間をとり、 $\kappa=1.0$ なら地形的低所を選択した完全な補償累重、 $\kappa=0.5$ なら地形的起伏と関係しないランダム累重、 $\kappa=0$ なら地形的高所を選択した完全な反補償累重を表す。 κ が 1 に近いほど補償累重が卓越する。ストラウプ法は、元々、音波探査断面のような連続性の良い層序データを解析対象として想定するが、適当な改変を施せば陸上露頭や海底掘削コアから取得される離散データの解析にも適用できる。浦本・清家 (2012) は改良したストラウプ法により、房総半島中新統・鮮新統清澄層の海底扇状地チャネルの単層解析データを解析した。その結果、層序断面図に基づいた検討とストラウプ法によって定量的に示された地層累重過程に整合性が認められると共に、地層累重過程の空間変化の検出に成功している。また、ストラウプ法はチャネルによる地層累重機構の存在する堆積システムを対象として解析されているが (Straub et al., 2009; Wang et al., 2011; 浦本・清家, 2012), 地層の層厚分布・連続性の良い同時断面の情報が抽出可能な堆積システムであれば、チャネルを伴わない堆積システムでも補償指数を算出できる。単層解析法は累重するタービダイト単層の層厚や時間軸のデータを地層の直接観察によって厳密に取得するので、解析対象におけるチャネルの有無に関わらず、ストラウプ法の解析に適したデータが得られる。そこで浦本・清家 (2013) は、チャネルを伴わない堆積シス

テムを構成するタービダイト層として、単層解析法により広域対比された海底扇状地システムのシート状タービダイト単層にストラウプ法を適用した。その結果、シート状タービダイト単層の累重においても層序断面図に基づいた検討とストラウプ法で得られた補償指数が示す地層累重過程に整合性が認められている。シート状タービダイト単層の累重は、堆積システム内において累重過程の空間的变化を示さず、チャネルの累重機構と異なる特徴が見出されている。

では、海底扇状地システム以外の堆積システムでは、ストラウプ法によって、どのようにタービダイト単層の累重を理解できるだろうか。ここでは、第 1 図に示したアガディール海盆のタービダイト単層 (Frenz et al., 2009; Wynn et al., 2012) を対象にストラウプ法を適用し、補償指数を求めた (第 4 図)。第 1 図の層序断面で単層 AB12-AB14 は一部でコアの基底を構成し、正確な層厚が一部地点で不明のため検討対象から除外している。

補償指数 κ は第 1 図の全てのコア間、また、海底面の傾斜で分けられている区域 (Wynn et al., 2012), すなわち地点①~③を急傾斜面域 (傾斜 0.05°), 地点④~⑥を平坦面域 (傾斜 $<0.01^\circ$), 地点⑦~⑪を緩斜面域 (傾斜 0.02°) として計測断面ごとに求めた (第 4 図)。全地点間では $\kappa=0.65$, 計測断面を区切って求めた κ は急斜面域で 0.62, 平坦面域で 0.74, 緩斜面域で 0.62 となった。全体の κ 値が計測地点を区切って求めた κ 値を反映した値をとったことは浦本・清家 (2012, 2013) と同様の結果である。また、急傾斜面域や緩斜面域の補償指数が 0.62 となり、平坦面域に比べて相対的にランダムな累重過程が卓越する補償指数を示したことは、チャネルを伴わない堆積システムにおける地形の起伏と関係しないタービダイト単層の累重を表しているであろう。一方、平坦面域で補償指数が 0.74 を示し、他の計測断面に比べ大きな補償指数が得られたことは、相対的に補償累重が卓越し、単層の累重様式が空間的变化を示したことを意味する。これは補償指数を得たことで初めて判明した現象で注目される。この計測断面の単層の累重過程を層序断面図で確認すると、単層の累重ごとに相対的に厚い単層と薄い単層の繰り返す累重様式となっている (第 1 図)。厚い単層と薄い単層の互層は補償累重を特徴づける地層累重様式として知られる (Mutti and Normark, 1987; Piper et al., 1999)。一方、急斜面域や緩斜面域では、補償累重を特徴づける層厚変化は認められない。急斜面域では多くの単層が上流の地点①から下流の地点③へ層厚を減少させる層厚分布を示している。緩斜面域では供給源の異なる様々なタービダイト単層が累重し (Frenz et al., 2009), 単層の累重に伴い、特徴的な層厚分布の傾向を示さない。アガディール海盆の平坦面域は、急斜面域を流下してきた混濁

第4図 海盆底を構成するタービダイト単層の累重過程における計測時間窓の大きさと堆積速度の標準偏差 σ_{ss} の関係。北西アフリカ大陸縁辺のアガディール海盆を構成するタービダイトを対象とした解析例 (Frenz et al., 2009; Wynn et al., 2012)。

流が海底面傾斜の変化に伴い、堆積物粒子を沈降させた堆積場として認識されている (Frenz et al., 2009)。すなわち、急斜面域に対する相対的な地形的低所として、平坦面域で補償累重に伴う地層累重が発達したと考えられる。単層解析法による層序断面の検討を基礎としつつ、試料分析から得られたデータやストラウブ法による補償指数から、地層累重過程の空間変化やその要因をより詳しく議論することが可能となる。

以上のように、単層解析法によって得られるタービダイト単層の実体に関わるデータは、新たな定量指標による地層解析に加え、指標の応用を議論することで、より多様な地層形成過程の議論に繋げることができる。

タービダイト単層の解析データの比較と統合化

近年の研究で、改めて単層解析法が注目されている状況の重要な背景あるいは理由として、水路実験、数値解析、物理探査によるタービダイト研究の進展も見逃せない。これらの研究と単層解析法で得られるデータの比較・総合的な解析を行うことにより、深海域における重力流の流動過

程やタービダイト・サクセッションの発達過程がより詳しく理解できるからである。例えば、水路実験や数値解析は実際の重力流の流動条件に関わるパラメータ (流速、濃度など) の一部を制御して重力流プロセスを発生させる。そのため、単層解析法によって得られるタービダイト単層の形態や内部構造データが現実の重力流プロセスと照らし合わせて、どのような意義を持つか検証する基礎データをもたらす。物理探査は空間的に連続した野外データを取得できるので、空間的に連続したデータを取得できない単層解析法によるデータを補完し、地層の詳細な形態解析を行うための基礎情報となる。ただし、注意しなければならないのは、これらの研究において扱われる現象の規模や解析精度である。水路実験は天然の現象を水路内に縮小化した条件下で行わなければならない、解析規模の制約を伴う。数値解析の精度は解析に用いる理論やアルゴリズムに依存する。また、物理探査は音源の波長から決定される解像度の制約から、原理的に単層レベルで解析する精度の層序データが得られない。

以上のような各手法の特徴や制約はあるものの、異なる手法で得られたタービダイト単層の特徴の共通点・相違点

を見出すことは、タービダイト単層の多様な特徴の探究とその成因の更なる理解へ繋がっていく。その際、地層の直接観察によってデータを取得する単層解析法は、層厚の実測、堆積構造の詳細観察、採取試料の分析を通してタービダイト単層の実体を詳細に把握できるので、様々な手法で明らかとなるデータを集約するための基盤となりうる。こうした点を踏まえ、異なる解析手法により得られたタービダイト単層の空間データを比較した例は Talling et al. (2007b, 2007c) における考察の一環として行われている。ここでは一例として Talling et al. (2007b) を取り上げると、タービダイト単層が示す層厚の空間変化について、両対数グラフを用いて Marnoso Arenacea 層の薄層タービダイト砂岩と水路実験で得られたタービダイト単層の層厚変化を比較している（第5図）。その結果、野外のタービダイト単層の下流方向への層厚の減少率が、水路実験で形成されたタービダイトに比べて極めて緩やかであるという違いが認められている。野外で認められる連続性の良い薄層タービダイト砂岩は、日本の房総半島三浦層群清澄層（徳橋, 1976a）でも見出されており、第5図にデータを示した。清澄層の薄層タービダイト砂岩も、水路実験で得られたタービダイトに比べ、下流方向への層厚の減少率が緩やかである点は Marnoso Arenacea 層の薄層タービダイト砂岩と共通している。このように野外と水路実験で得られた結果が異なる要因として、①自然の重力流プロセスでは、細粒碎屑粒子の沈降が緩やかに進行するため、粒子がより長距離運搬される、②水路実験では流速が小さく、重力流の混濁度合いが自然のプロセスに比べて小さいため、碎屑粒子が長距離運搬されない、③自然のプロセスでは粒子の沈降速度に対して、混濁流の厚さが水路実験よりはるかに大きいことが挙げられている（Talling et al., 2007b）。

ただし、野外データにおいて、清澄層の薄層タービダイト砂岩は Marnoso Arenacea 層の薄層タービダイト砂岩に比して下流方向への層厚減少率が大きいという相違点もある（第5図）。これは、Talling et al. (2007b) は海盆底を構成する泥質タービダイト単層を対比し、他方、徳橋（1976a）は海底扇状地システムを構成する砂質タービダイト単層を対比しており、粒度組成の違いが沈降プロセスに反映されているのであろう。異なる堆積システムから得られた単層データの比較は、現状では限られたデータソースに基づいているので、今後、更なる検証を実施する上で、Marnoso Arenacea 層の砂質タービダイト単層の卓越する層準（Muzzi Magalhaes and Tinterri, 2010; Tinterri and Muzzi Magalhaes, 2011）や、他地域における単層解析法で得られたデータを加味した比較により、野外データの整合性を向上させることは重要である。これを踏まえて、改めて室内データと野外データの比較を行うことで、タービダイト形態変化の特

第5図 水槽実験と陸上露頭のタービダイト単層厚の下流方向への変化（Talling et al., 2007b）。清澄層のタービダイト単層厚データは徳橋（1976a）による。

徴についてより詳しい議論が展開できるだろう。

まとめ

既出版のタービダイトの単層解析法による研究論文をとりまとめ、手法の適用方法、従来の研究で得られた主要な知見を紹介した。単層解析法は、解析対象となるタービダイト層に挟在する鍵層の認定と、タービダイト単層の層厚や組成を適確に識別したパターンマッチングを段階的に組み合わせることで、広域的な単層対比を行う。この手法は、1950年代前半にタービダイトの存在が認識されるようになると、1950年代後半以降、世界各地のタービダイト層において、その適用が試みられてきた。初期の研究では、タービダイト単層の堆積形態と内部構造・組成との対応関係を詳しく検討された。近年は、単層解析によりタービダイトを形成させた重力流体の流動過程の推定や地層累重過程の定量検出の基礎として単層解析法が活用され、新たな観点に基づいた研究が進展している。また、水路実験、数値解析、物理探査などのタービダイト層の解析結果と、単層解析法によるタービダイト層の解析結果の比較・検証によるデータの統合化が試みられている。地層の直接観察によってタービダイト単層の実体を把握する単層解析法は、様々な手法で明らかとなるタービダイト単層の特徴を結びつける基礎研究の一端としてその重要性が増していると言える。

謝辞：初期段階の粗稿を読んで頂いた早稲田大学の平野弘

道教授、産総研の中嶋 健博士、早稲田大学の太田 亨博士の御意見は本稿を改定する上で有益であった。編集委員長の保柳康一教授と匿名査読者から頂いた査読コメントにより本稿が改善された。JAMSTEC 高知コア研究所の稲垣史生グループリーダー、諸野祐樹グループリーダー代理ならびに地下生命圏研究グループ諸氏には浦本が本稿をまとめるにあたって便宜を図って頂いた。本稿をまとめる経費の一部に平成 23 年度深田地質研究助成を用いた。

文 献

- Amy, L.A., Kneller, B.C. and McCaffrey, W.D., 2007, Facies architecture of the Grès de Peira Cava, SE France: landward stacking patterns in ponded turbiditic basins. *Journal of the Geological Society, London*, **164**, 143–162.
- Amy, L.A. and Talling, P.J., 2006, Anatomy of turbidites and linked debrites on long distance (120×30 km) bed correlation, Marnoso Arenacea Formation, Northern Apennines, Italy. *Sedimentology*, **53**, 161–212.
- Bennetts, K.R.W. and Pilkey, O.H., 1976, Characteristics of three turbidites, Hispaniola-Caicos Basin. *Geological Society of America Bulletin*, **87**, 1291–1300.
- Bornhold, B.D. and Pilkey, O.H., 1971, Bioclastic turbidite sedimentation in Columbus Basin, Bahamas. *Geological Society of America Bulletin*, **82**, 1341–1354.
- Carozzi, A., 1957, Tracing turbidity current deposits down the slope of an Alpine basin. *Journal of Sedimentary Petrology*, **27**, 271–281.
- Conolly, J.R. and Ewing, M., 1967, Sedimentation in the Puerto Rico trench. *Journal of Sedimentary Petrology*, **37**, 44–59.
- Frenz, M., Wynn, R.B., Georgiopoulou, A., Bender, V.B., Hough, G., Masson, D.G., Talling, P.J. and Cronin, B.T., 2009, Provenance and pathways of late Quaternary turbidites in the deep-water Agadir Basin, northwest African margin. *International Journal of Earth Sciences*, **98**, 721–733.
- Gandolfi, G. and Paganelli, L., 1983, Petrology and dispersal pattern in the Marnoso-arenacea Formation (Miocene, Northern Apennines). *Journal of Sedimentary Petrology*, **53**, 493–507.
- Goldfinger, C., More, A.E., Nelson, C.H., Gutiérrez-Pastor, J., Johnson, J.E., Karabanov, E., Chaytor, J., Eriksson, A. and Shipboard Scientific Party, 2007, Rupture lengths and temporal history of significant earthquakes on the offshore and north coast segments of the Northern San Andreas Fault based on turbidite stratigraphy. *Earth Planetary Science Letters*, **254**, 9–27.
- Grossgeim, V.A., 1961, On the possibility of a leaf-by-leaf comparison of flysch sequences at great distances (teleconnection). *Izvestija Akademii nauk SSSR. Serija Geologičeskaja*, **1961**, 49–57 (in Russian).
- Haughton, P.D.W., 2001, Contained turbidites used to track sea bed deformation and basin migration, Sorbas Basin, south-east Spain. *Basin Research*, **13**, 117–139.
- Hesse, R., 1965, Herkunft und transport der sedimente im bayerischen Flyschrog. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, **116**, 403–426 (in German with English abstract).
- 平山次郎, 藤井敬三, 中嶋輝允, 1969, フリッシュ型砂泥互層を構成する砂岩単層の粒度組成について. *地質調査所月報*, **20**, 669–684.
- Hirayama, J. and Nakajima, T., 1977, Analytical study of turbidites, Otadai Formation, Boso Peninsula, Japan. *Sedimentology*, **24**, 747–779.
- 平山次郎, 鈴木尉元, 1964, 地層の重なりかた地層の連続性—砂泥互層を中心として—. *地質ニュース*, **127**, 2–7.
- 平山次郎, 鈴木尉元, 1965, フリッシュ型砂泥互層を構成する単層の形態と組織について. *地質調査所月報*, **16**, 79–93.
- 平山次郎, 鈴木尉元, 1968, 単層の解析—その実際と堆積学的意義について—. *地球科学*, **22**, 43–62.
- Kastens, K.A., 1984, Earthquakes as a triggering mechanism for debris flows and turbidites on the Calabrian Ridge. *Marine Geology*, **55**, 13–33.
- Mutti, E. and Normark, W.R., 1987, Comparing examples of modern and ancient turbidite systems: Problems and concepts. In Leggett, J.K., and Zuffa, G.G., eds., *Marine Clastic Sedimentology: Concepts and Case Studies*. Graham and Trotman, Boston, 1–38.
- Muzzi Magalhaes, P. and Tinterri, R., 2010, Stratigraphy and depositional setting of slurry and contained (reflected) beds in the Marnoso-arenacea Formation (Langhian–Serravallian) Northern Apennines, Italy. *Sedimentology*, **57**, 1685–1720.
- Paola, C., Straub, K., Mohrig, D. and Reinhardt, L., 2009, The “unreasonable effectiveness” of stratigraphic and geomorphic experiments. *Earth-Science Reviews*, **97**, 1–43.
- Piper, D.J.W., Hiscott, R.N. and Normark, W.R., 1999, Outcrop-scale acoustic facies analysis and latest Quaternary development of Hueneme and Dume submarine fans, offshore California. *Sedimentology*, **46**, 47–78.
- Remacha, E. and Fernández, L.P., 2003, High-resolution correlation patterns in the turbidite systems of the Hecho Group (South-Central Pyrenees, Spain). *Marine and Petroleum Geology*, **20**, 711–726.
- Ricci Lucchi, F. and Valmori, E., 1980, Basin-wide turbidites in a Miocene, over supplied deep-sea plain: a geometrical analysis. *Sedimentology*, **27**, 241–270.
- Straub, K.M., Paola, C., Mohrig, D., Wolinsky, M.A. and George, T., 2009, Compensational stacking of channelized sedimentary deposits. *Journal of Sedimentary Research*, **79**, 673–688.
- Talling, P.J., Amy, L.A. and Wynn, R.B., 2007c, New insight into the evolution of large-volume turbidity currents: comparison of turbidite shape and previous modelling results. *Sedimentology*, **54**, 737–769.
- Talling, P.J., Amy, L.A., Wynn, R.B., Blackbourn, G. and Gibson, O., 2007b, Evolution of turbidity currents deduced from extensive thin turbidites: Marnoso Arenacea Formation (Miocene), Italian Apennines. *Journal of Sedimentary Research*, **77**, 172–196.

- Talling, P.J., Malgesini, G., Sumner, E.J., Amy, L.A., Felletti, F., Blackbourn, G., Nutt, C., Wilcox, C., Harding, I.C. and Akbari, S., 2012, Planform geometry, stacking pattern, and extrabasinal origin of low strength and intermediate strength cohesive debris flow deposits in the Marnoso-arenacea Formation, Italy. *Geosphere*, **8**, 1207-1230.
- Talling, P.J., Wynn, R.B., Masson, D.G., Frenz, M., Cronin, B.T., Schiebel, T., Akhmetzhanov, A.M., Dallmeier-Tiessen, S., Benetti, S., Weaver, P.P.E., Georgiopolou, A., Zühlsdorff, C. and Amy, L.A., 2007a, Onset of submarine debris flow deposition far from original giant landslide. *Nature*, **450**, 541-544.
- Talling, P.J., Amy, L.A., Wynn, R.B., Peakall, J. and Robinson, M., 2004, Beds comprising debrite sandwiched within co-genetic turbidite: origin and widespread occurrences in distal depositional environments. *Sedimentology*, **51**, 163-194.
- Tinterri, R. and Muzzi Magalhaes, P., 2011, Synsedimentary structural control on foredeep turbidites: An example from Miocene Marnoso-arenacea Formation, Northern Apennines, Italy. *Marine Petroleum Geology*, **28**, 629-657.
- 徳橋秀一, 1976a, 清澄層 Hk 層準フリッシュ型砂泥互層の堆積学的研究 (その 1) —砂泥互層の層厚・岩相変化と砂岩層の形態—. 地質学雑誌, **82**, 729-738.
- 徳橋秀一, 1976b, 清澄層 Hk 層準フリッシュ型砂泥互層の堆積学的研究 (その 2) —砂岩層の堆積機構と堆積環境—. 地質学雑誌, **82**, 757-764.
- Tokuhashi, S., 1979, Three dimensional analysis of a large sandy-flysch body, Mio-Pliocene Kiyosumi Formation, Boso Peninsula, Japan. *Memoirs the Faculty of Science, Kyoto University, Series of Geology and Mineralogy*, **46**, 1-60.
- 徳橋秀一, 岩脇丈夫, 1975, フリッシュ型砂泥互層の面的単層解析. 地球科学, **29**, 262-274.
- 浦本豪一郎, 清家一馬, 2012, ストラウプ法: チャネル堆積層における補償累重の定量検出. 地質学雑誌, **118**, 582-587.
- 浦本豪一郎, 清家一馬, 2013, ストラウプ法によるシート状タービダイト層累重過程の定量検出: 房総半島中新統-鮮新統清澄層の例. 地質学雑誌, **119**, 693-698.
- Vassoevich, N.B., 1948, *Le flysch et les methodes de son etude*. Gostoptekizdat, Moscow, 216 p (in French).
- Wang, Y., Straub, K.M. and Hajek, E.A., 2011, Scale-dependent compensational stacking: an estimate of autogenic time scales in channelized sedimentary deposits. *Geology*, **39**, 811-814.
- Wynn, R.B., Talling, P.J., Masson, D.G., Le Bas, T.P., Cronin, B.T. and Stevenson, C.J., 2012, The influence of subtle gradient changes on deep-water gravity flows: a case study from the Moroccan turbidite system. In Prather, B.E., Deptuck, M.E., Mohrig, D., Van Hoorn, B., Wynn, R.B., eds., Application of the principles of seismic geomorphology to continental-slope and base-of-slope systems: case studies from seafloor and near-seafloor analogues. SEPM Special Publication, **99**, 371-383.
- Wynn, R.B., Weaver, P.P.E., Masson, D.G. and Stow, D.A.V., 2002, Turbidite depositional architecture across three inter-connected deep-water basins on the Northwest African Margin. *Sedimentology*, **49**, 669-695.
- Xu, J.P., Noble, M.A. and Rosenfeld, L.K., 2004, In-situ measurements of velocity structure within turbidity currents. *Geophysical Research Letters*, **31**, L09311, doi:10.1029/2004GL019718.