

混濁流の発生と成長 ～深海での堆積物の動き～

京都大学大学院理学研究科准教授 成瀬 元

1. はじめに

混濁流(乱泥流ともよばれる)とは、深海底でときおり発生すると考えられている、堆積物を含んだ水の流れである。平成24年度から高等学校の「地学Ⅰ・Ⅱ」が「地学基礎・地学」にかわるにあたって、堆積物の移動や堆積が起こるメカニズムについての記述が増えた。その中でも、新課程「地学」では、混濁流の流れの特徴や堆積構造(級化構造)の形成について詳細な解説が行われるようになった。「地学基礎」においても、混濁流が海底で長距離移動することについては記述がある。これは、混濁流が深海底において主要な堆積物の輸送プロセスとなっているからである。日本列島の基盤を形作る「付加体」の大部分も、混濁流から堆積した砂層(タービダイトとよばれる)によって構成されている。すなわち、混濁流は、地層の形成について解説する際には欠かせない自然現象である。実際に野外に出て地層を観察する際にも、日本で最も目にしやすい堆積物はタービダイトであろう。また、タービダイトは石油・天然ガスを貯留する岩石でもあり、近年になって注目されている。そのため、地下資源探鉱の分野では、古くから盛んにタービダイトの研究が行われてきた。新課程の教科書においてもエネルギー資源についての記述はそれほど多くはないが、今後の社会を生きる学生にとって、地下資源の問題はいずれ避けては通れないだろう。

さて、これまでと比べて大幅に記述が充実した混濁流であるが、この流れがどのように発生するのかについてはそれほど記述がない。また、混濁流の規模(例えば流れの厚さや流れ下る距離)や流速についても、まったく記述が見られない。これは、深海で起こっているプロセスを直接観測することが困難なため、混濁流の実態がほとんどわからなかったことが原因であるかもしれない。かつては、混濁流はいわば想像上の存在に近いものだったのである。

実は、混濁流は近年になって急速に観測事例が積み重ねられている。もちろんその実態にはいまだに

わからないことが多いとはいえ、以前に比べると多くのことが明らかになってきた。例えば、これまで数百年に一度しか発生しないまれな現象と考えられてきた混濁流だが、地域によっては年に数回という高い頻度で発生していることが明らかになっている。また、混濁流が発生する原因はこれまで考えられていたような地震に伴う海底地すべりだけではなく、津波・嵐・洪水など、じつに多様なプロセスによって発生することもわかってきた。加えて、水槽実験や数値シミュレーションなどにより、混濁流がいったん発生すると、深海底で巨大化していくというプロセスも明らかになりつつある。ここでは、最近の研究結果に基づいて、混濁流という現象について少し掘り下げて解説し、実際の指導にあたって考えてほしい点について述べてみたい。

2. 混濁流と海底地形

海底には、まるで陸域のような地形が発達している。陸では、侵食作用によって生じたV字谷を通じて堆積物が運搬され、山地のふもとから海浜へかけて堆積することで、扇状地や平野が形成されている。陸上で堆積物を運搬しているのはおもに河川のはたらきであり、特に平野には蛇行する河川地形がよく発達する。一方、海浜から浅海域(～140m以浅)には大陸棚とよばれる平坦な地形が見られるが、この大陸棚には、しばしば海底谷とよばれる地形が発達している。海底谷は深さ2000m以上にも及ぶこ

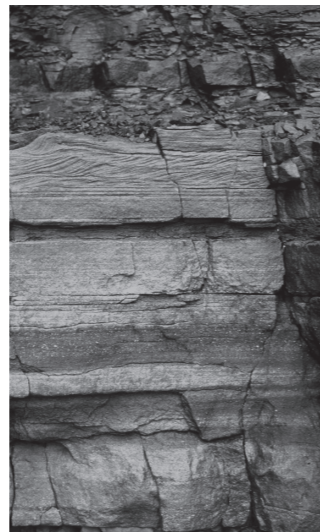


図1 混濁流から堆積した砂層と、深海中で平常時に降り注いでいる泥層が交互に重なった地層(北海道東部に分布する白亜系～古第三系根室層群)

とがあるものの、地形だけを見れば陸上のV字谷とよく似ている。日本近海では、天竜川の沖合に発達する天竜海底谷や、釧路川の沖合に発達する釧路海底谷などが有名であり、世界的には、アメリカ・カリフォルニア沖の Monterey 海底谷などの研究が進んでいる¹⁾。これらの海底谷は直線的な形状をしていることもあるし、蛇行していることもある。

陸上で河川が担う侵食・運搬・堆積作用を深海底で担っているのが混濁流である。教科書に記述がある通り、混濁流とは、重力によって駆動される密度流の一種である。陸上では、砂埃が舞い上がってもすぐに砂粒は地面に落ちてしまい、短い時間で砂煙は消えてしまう。それに対して、水中では浮力と水の粘性があるため、ひとたび海中に砂や泥が充満した懸濁が生じると、堆積物はなかなか沈降しない。そして、いったん生じた懸濁液は周囲の流体よりも浮遊している堆積物の分だけ密度が高いため、重力に引かれて斜面下方向へと流れ始める。これが混濁流である。

さて、海底谷から流れ出した混濁流は、陸上の河川と瓜二つの地形を深海底に築き上げる。このような深海の河川地形を海底チャネルとよぶ。海底チャネルは両側を自然堤防で囲まれており、大きく蛇行することが多い。自然堤防は流路からあふれ出した細粒な砂・泥で形成されており、流路の中には比較的粗粒な砂や礫(石ころ)が堆積している。海底チャネルの下流端では、混濁流が放射状に広がって、舌状の盛り上がりを示す地形が作られる。このような舌状地形はロープもしくはフロントルスプレイとよばれている。ロープは比較的粗粒な砂で形成されており、表面には小規模な流路構造が見られることもある。海底チャネルやロープは、全体として陸上の扇状地とよく似た地形を作り出すため、混濁流によって作られる地形全体は海底扇状地とよばれる。

表1 これまでに観測された代表的な混濁流の流速と規模

地域	グランドバンク(カナダ)	スクリップス海底谷(アメリカ)	オアフ島沖(アメリカ)	モンテレイ海底谷(アメリカ)	東北地方沖(日本)
日付	1929-11-18	1968-11-24	1983-11-23	2002-12-20	2011-03-11
傾斜(%)	0.13	7.9	8.7	2.96	2.35
中央粒径(mm)	0.05-0.13	0.15	0.16-0.2	?	?
流れの厚さ(m)	?	< 5	?	32-53	?
流れの持続時間(hr)	?	0.5	0.5	5-8	> 5
流速(m/s)	7.8	1.9	3.0	1.1	2.3-8.0
報告者	Shepard ⁴⁾	Inman ¹²⁾	Dengler ¹³⁾	Xu(ほか) ¹⁾	Arai(ほか) ⁵⁾

海底チャネルは陸上の河川地形と非常によく似ているものの、いくつか相違点も見られる。その中でも特に顕著な違いは、海底チャネルがしばしば「天井川」となっていることである。「天井川」とは、平野に比べて河床が高い位置にある河川のことであり、陸上では人為的な堤防によって形成される。通常、河川は洪水氾濫の際により低い土地へ流路を変えるため、自然状態では天井川が生じることはない。ところが、深海の河川地形である海底チャネルは、しばしば平野部よりも高い位置を流れる天井川となる。なぜこのような違いが生じるかについては、いまだによくわかっていない。

3. 混濁流の発生

地形はよく似ているものの、深海のプロセスが陸上と大きく異なるのは、海底では常に混濁流が流れているわけではないという点である。例えば、房総半島に分布する地層(安房層群)の調査結果から、タービダイトが堆積する頻度はおおよそ400～1000年に1回程度と見積もられている²⁾。プレート沈み込み帯における巨大地震や津波の発生頻度も同じように数百年に1回という頻度であり、混濁流の発生と地震活動の関連性は古くから研究されてきた。そもそも、世界で初めて混濁流が発見されたきっかけも、地震に伴う海底地すべりであった。1929年にカナダ・ニューファウンドランド島沖で地震に伴う海底地すべりが発生したのち、13時間以上にわたって海底通信ケーブルの連続破断事故が起こった。ケーブル破断の時間間隔から見て、流れの流速は平均で秒速7.8m/s(時速約30km)程度であったことが推定されている³⁾。この時、混濁流が流れた距離は、少なくとも600km(東京・大阪間の距離に匹敵)以上にも及んでいる。この混濁流は、海底地すべり体から巻き上がった砂や泥が海底斜面上で

混濁流へと発達したものと推定されている。

今年になって、2011年東北地方太平洋沖地震津波に伴って混濁流が発生した事例も報告された⁴⁾。津波の発生から3時間後に、水深約1000mの深海底に設置されていた海底圧力計が突然1kmも移動したのである。さまざまな証拠から、この圧力計の移動はおおよそ流速2.4-7.1m/s程度の混濁流が引き起こしたことが推定されている。おそらく、津波によって浅海域で巻き上がった堆積物から混濁流が発生し、海底斜面を流れ下って圧力計を移動させたものと考えられる。実際に津波から深海底で流れが起こっていた証拠が得られたのは世界でもこれが史上初めてのことである。

このように、混濁流の発生は、巨大地震・津波に伴う数百年に一度の出来事と考えられてきた。しかし、実際には混濁流はこれまで考えられてきたよりもはるかに頻繁に起こっているのかもしれない。近年になって、カリフォルニア沖のMonterey海底谷やHueneme海底谷では、1年に2回もの頻度で混濁流が発生していることが観測された¹⁾。水深820-1440mの海底に係留された音響ドップラー流速分布計(ADCP)が、混濁流をとらえたのである。この海域では、2002～2008年に合計で6回の混濁流が記録されている。流速計の計測結果から、混濁流の最大流速は1.1～1.9m/s(時速7km以下)と比較的遅いが、流れの厚さは50m前後と大規模である。また、混濁流が5～8時間という比較的長時間にわたって流れ続けることも、観測から初めて明らかになった。混濁流の発生したタイミングだが、そのうち2回は周辺海域で嵐が起こった時期と一致している。また、1回は人間が港の浚渫で採取した堆積物を破棄したタイミングと一致する。おそらく、嵐による強い波浪や人間の投棄によって生じた懸濁物が斜面を流れ下ることで混濁流が生じたのであろう。そのほかに3回発生した混濁流の引き金は不明だが、すべて地震とはまったく関係がない。

嵐や人為的原因だけではなく、洪水も混濁流の発

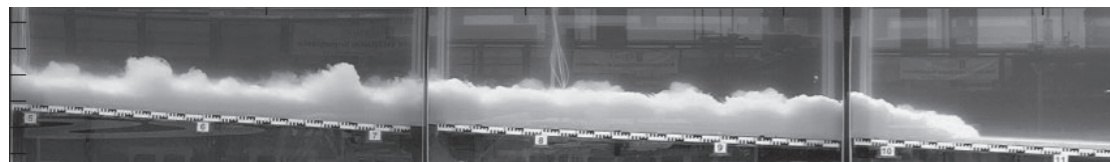


図2 混濁流の水槽実験のようす。水槽内の堆積物を侵食し、混濁流はしだいに加速している。

生原因となりうる。洪水時の陸上河川が大量の堆積物を海へもたらすことで、台湾では、1979年から1998年の間に11の河川で合計100回もの混濁流が発生したと推定されている⁵⁾。これらの結果をふまえると、嵐・洪水のような、巨大地震と比べて「日常的」なプロセスによって、混濁流が従来考えられてきたよりもはるかに高い頻度で発生しうることが確からしい。

それでは、地層から従来推定されてきた「数百年に1回」という混濁流の発生頻度と、観測から明らかになった「1年に数回」という頻度のギャップは、どのように考えたらよいのだろうか。地層中に残されているタービダイト(混濁流堆積物)の堆積のタイミングは、しばしば巨大地震や津波の発生頻度とよく一致することが報告されている⁶⁾。もし、やはり地震・津波が地層中のタービダイトの起源として一般的なのだとすると、もしかして嵐・洪水によって日常的に起こっているような混濁流は、地層中で認識できる砂層を残すには規模・濃度が小さすぎるのかもしれない。この謎を解決するためには、流れの観測と地層形成プロセスをより緊密に照らし合わせる研究が今後は求められるだろう。

4. 混濁流の成長と持続

混濁流は、驚くほど長距離を流れ下る。例えば、インド洋に発達するベンガル海底扇状地では、約2800kmにわたって混濁流が流れている⁷⁾。これは、北海道から沖縄までの日本列島の全長にほぼ匹敵する。混濁流はなぜこれほど長距離を減衰せず流れ続けるのだろうか。

混濁流が長く維持されるのは、流れの侵食・自己加速作用によるものである⁸⁾。流れ始めた混濁流の流速が十分に速いと、流れの中にある渦が海底面の堆積物を巻き上げて、浮遊堆積物の濃度を増加させる。濃度が増加すると流れの密度も増加するため、流れは加速してさらに底面の堆積物を侵食する。すなわち、混濁流が十分な流速・濃度で発生すれば、

体もタービダイトで構成されている。深海底で起こっている現象を伝えるには、陸上との類似点と同時に相違点もきちんと説明した方がよいだろう。

ここまで述べたように、混濁流が引き起こす現象については未解明の点が多い。これも、やはり深海底という環境を観測することの限界からきている。しかし、近年の観測技術や実験・数値シミュレーションの進歩によって、深海底の現象にもしだいに光が当てられるようになってきている。深海は資源探査に関しても人類のフロンティアであり、ますますの研究の進展が望まれる。

参考文献

- Xu, J. P., Swarzenski, P. W., Noble, M., & Li, A. (2010). Event-driven sediment flux in hueneme and mugu submarine canyons, southern california.
- 石原与四郎, 宮田雄一郎, & 徳橋秀一. (1997). Time-series analysis of turbidite sequence in the upper part of the Awa Group in the Boso Peninsula, central Japan.
- Shepard, F. P. (1963). Importance of submarine valleys in funneling sediments to the deep sea.
- Arai, K., Naruse, H., Miura, R., Kawamura, K., Hino, R., Ito, Y., Inazu, D., Yokokawa, M., Izumi, N. and Murayama, M., in press, Tsunami-generated turbidity current of the 2011 Tohoku-Oki Earthquake.
- Milliman, J. D., & Kao, S. J. (2005). Hyperpycnal discharge of fluvial sediment to the ocean: Impact of Super-Typhoon Herb (1996) on Taiwanese rivers.
- Goldfinger, C. (2011). Submarine paleoseismology based on turbidite records.
- Bouma, A. H., Normark, W. R., & Barnes, N. E. (1985). Submarine fans and related turbidite systems.
- Parker, G., Fukushima, Y., & Pantin, H. M. (1986). Self-accelerating turbidity currents.
- Naruse, H., Sequeiros, O., Garcia, M. H., Parker, G., Endo, N., Kataoka, K. S., ... & Muto, T. (2007). Self-accelerating turbidity currents at laboratory scale.
- Blanchette, F., Strauss, M., Meiburg, E., Kneller, B., & Glinsky, M. E. (2005). High-resolution numerical simulations of resuspending gravity currents: Conditions for self-sustainment.

侵食と加速を繰り返して、流れは雪だるま式にみずから成長するのである。この過程を混濁流の自己加速とよぶ。これが、わずかな懸濁物から始まった流れが巨大な海底谷・海底扇状地を形成する原因である。混濁流にとって、海底面の堆積物はいわば途中で補充される燃料である。底面の堆積物から位置エネルギーを補充して、混濁流はきわめて長い距離を流れ下ることができる。

混濁流の自己加速は1970年代末から理論的に予測されてきたが⁸⁾、実験・シミュレーション・観測によって確認されたのは2000年代に入ってからである。混濁流の自己加速現象は室内実験によって確かめられた⁹⁾。長さ15mの水路(傾斜約2.9°)の中にプラスチック粒子を敷き詰め、混濁流を流したところ、流れが底面を侵食しながらしだいに加速するようすが再現された。また、数値シミュレーションによっても混濁流の自己加速は確認されている¹⁰⁾。さらに、前述のMonterey海底谷での観測結果から、下流地点ほど混濁流の流速が速くなるようすがとらえられている¹⁾。流れが堆積物の侵食によって成長していくというプロセスは、陸上の河川ではありえない混濁流ならではの現象である。

5. おわりに

混濁流は地形・地層の形成を考える上で重要な現象だが、深海底で起こっているため、直接観察してイメージをつかむことが難しい。河川や波といった陸上・浅海の現象は多くの人が直接目にしたことがあるだろう。陸上の土石流や氷河も、テレビなどの映像メディアで見る機会が豊富である。これに対して、混濁流は人目にふれる機会はほとんどなく、一般によく知られた現象とはいえない。このようなプロセスを説明する際には、わかりやすいものからの類推に頼らざるをえないだろう。例えば、教科書では陸上の土石流との類似性から混濁流を説明している。また、海底地形も陸上地形との比較から説明すると、その特徴が伝えやすい。

しかしながら、このような類似性を強調しすぎると実態を見誤るおそれもある。混濁流は陸上土石流と比べて信じがたいほど長距離を流れ下り、陸上の扇状地よりもはるかに巨大な地形を築き上げる。だからこそ、日本周辺の海溝・トラフは混濁流によって広く埋積されており、日本列島の骨格を作る付加