



統合国際深海掘削計画 (IODP)
— 2003 年から 10 年の成果 —

科学掘削で解く海底地すべりメカニズム

— 巨大地震による二次的
海底表層破壊現象を探る —

森田 澄人

Submarine landslide mechanism to be solved by scientific drilling: Exploration secondary subseafloor rupturing caused by massive earthquakes

Sumito Morita

もりた すみと : 産業技術総合研究所
地圏資源環境研究部門

津波被害や構造物破壊など、海底地すべりに関わる災害リスクの認識が高まってきた。これを受け、IODP は海底地すべりを新たな科学計画のテーマに掲げた。研究を進めるには層面すべりを対象とすることが理想であり、その例として最近明らかになってきた下北半島沖の大規模海底地すべり群を挙げ、科学掘削の可能性を検討する。

1. はじめに

地球科学界では、近年ますます、その学術的ノウハウをジオハザード対策に適用することが求められる。海底探査技術が目覚ましい向上を遂げるとともに、過去 10 数年の間、世界中の海域で海底地すべりの痕跡とその詳細な様相が次々と明らかになり、海底地すべりがはらむ災害リスクの大きさを私たちは思い知らされることになった。海底地すべりによる浸食は、沿岸都市の生活圏を直接的に脅かしている (Dan *et al.*, 2007 など)。また、海底地すべりは時折海底ケーブルやパイプラインを切断し、掘削リグなどの海洋構造物を破壊する (Hsu *et al.*, 2009 など)。さらに、海底地すべりによる急激な海底地盤の変動は、津波を起こしうる現象として大変な脅威である (Synolakis *et al.*, 2001 など)。

そういった中、2011 年、IODP (当時、統合国際深海掘削計画) は 2013 年 10 月からの新フェーズ (新 IODP : 国際深海科学掘削計画) にむけて「海底地すべりメカニズム」を研究テーマの一つに掲げた (IODP-MI., 2011)。海底地すべりが発生した、または発生しうる現場の海底下性状を直接的に知り得るには、科学掘削が最良の手段である。本稿では海底地すべりメカニズムにせまるべく、その要因について検討し、将来推し進められるべき科学掘削を目的として、近年明らかとなってきた下北半島沖の海底地すべり群を一つの例として紹介する。

2. 海底地すべりとその要因

海底地すべりの要因については、あまり明らかにされていないのが現状である。陸上の地すべりで

は、台風などの大水の際、水頭勾配の変化やそれによる地中の間隙水圧などの変化によって地すべりが生じると考えられる (Iverson and Major, 1987; Terlin, 1998)。ただし、水に浸された海底での地すべり現象について、同様の要因を適用することは容易ではない。海底地すべりの外的要因として取りざたされているものを羅列すると、堆積・浸食・地殻変動による斜面の急峻化、巨大地震、地盤の液状化、海水準変動、海流の変化、メタンハイドレートの分解、大水による海底湧水、沿岸域の開発などが挙げられる。しかし、これらは互いに因果関係として絡み合っているケースが多い。また、一言で要因といっても、重力滑動が起こるときに直接的トリガーと、それに至るまでの地盤の不安定化要因については区別して整理されるべきである。

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震を契機として、日本海溝沿いでは海底地形調査や地質調査、また掘削調査が実施された。その結果、様々なスケールと様式で海底地すべりが繰り返し発生していることが明らかとなった (Kawamura *et al.* 2012 ; Noguchi *et al.* 2012 ; Strasser *et al.* 2013; Fink *et al.*, 2013)。これらの直接的トリガーの物的証拠を得ることは必ずしも容易ではない。しかし、地質学的時間スケールでは決して長くない、数10年から数100年という周期で海溝型巨大地震は繰り返されており、これらが発生する海域において、海底および海底下に残された海底地すべりの痕跡が同様の海溝型巨大地震を直接的トリガーとして記録されたと考えるのは、実に自然のことである。特に地震国である我が国においては、その警戒は海溝域に限定されるものではない。2007年能登半島地震においては、地震に続いて発生した海底地すべりが富山湾に津波を引き起こし、小舟を転覆させた例があり (Abe *et al.*, 2008)、2009年駿河湾地震では海底地すべりの発生とともに深層水パイプが破損した (Baba *et al.*, 2011)。このように、本邦周辺の海底地すべりについては、多くの場合が地震にともなって発生する二次的の海底層破壊現象の可能性がある。

一方、海底地すべりの発生に至る過程において、そのお膳立てとなる地盤不安定化要因については、上述のような外的要因だけで整理しきれものではない。これは如何にしてすべりやすい状況がつけられるかであり、重力滑動に関わる「すべり面」形成のための重要なカギを握っている。

3. すべり面の形成

海底地すべりのすべり面形成における重要なポイントとして、岩相依存による差別的な剪断面位置の選択が第一に挙げられる。まれに陸上で見られるかつての海底地すべり層でその痕跡を認めることができる。陸上露頭で観察できる海底地すべりのほとんどは、乱堆積層が露出しているものの、さらにすべり面を追跡して、変形を伴わない元の地層までが特定できるケースは限られている。しかし、三浦半島の海外 (かいと) 地域に分布する海底地すべり層露頭は、すべり面の元の地層を残しているものとして貴重な例である (図1)。ここでは露頭の西側から東側へ、正確には北西から南東へ (Yamamoto *et al.*, 2000)、層面すべりを起こしたスランプ層が、露頭の西半面では乱堆積層に置き換わり、東半面では衝上断層によってすべり面相当層を含めた元の地層の上位に乗り上げている。ここで重要なのは、厚めのスコリア層に挟まれた凝灰質シルト岩の薄層がすべり面となっていることであり、相対的に強固なスコリア層に対し、薄い火山灰層は剪断を被りやすかったものと理解できる。

一方で、Kokusho (1999) などは流体に関わる興味深い実験を繰り返した。彼らの実験は地震動にともなう液状化モデルを適用し、一般に未固結で透水性のある地層においても、浸透率の異なる、言い換えると排水能力の異なるレイヤーが累重している場合、急激な間隙流体の上方移動が起こると、相対的に低浸透率のレイヤーの直下では流体の滞留が起こり、それがフィルム状の流体層を形成することを示している。これがある程度の規模に拡大すれば、下位層は上位層の支持力を失い、極めてわずかな傾斜でも重力滑動につながる

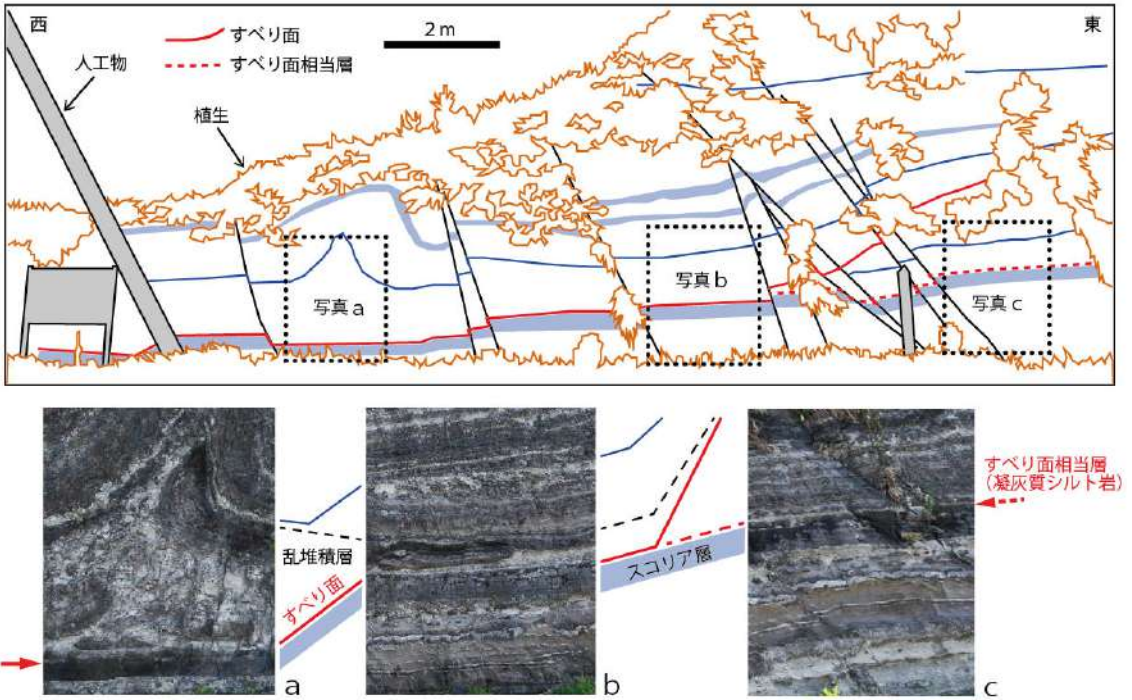


図1 三浦半島, 海外 (かいと) 地域の海底地すべり露頭。層面すべりを起こしたスランプ層が、露頭の西半面で乱堆積層に置き換わり、東半面では衝上断層により元の地層に乗り上げている。厚めのスコリア層に挟まれた凝灰質シルト岩の薄層がすべり面を担っている。

ことを意味する。ここで地盤不安定化要因のお膳立てとなっているのは、液状化を起こしやすい、すなわち衝撃によって再配列と排水をしやすい堆積層が存在すること、相対的に低浸透率の層がその上位に存在することである。したがって、外力が加わった時に地層強度の低い部分が剪断を被るのは当然であるが、流体による効果も無視できず、本来の地層強度とともに排水能力を示す浸透率の相対的变化も重要な要素であることが分かる。

このような剪断面の岩相および物性への依存は、付加体におけるデコルマ形成とも似た点がある。例えば、北部バルバドス付加体におけるデコルマは、摩擦係数の低いスメクタイトに富んだ、孔隙率の高い放散虫層に集中している (Moore, 2000)。また、南海付加体のデコルマについては、一見して様な半遠洋性泥岩中だが、上位のセメント層と下位の非セメント層に挟まれたメカニカルな境界に相当し、デコルマから下位では間隙圧

が上昇している (Ujiie *et al.*, 2003 ; Morgan and Ask, 2004)。このような事実は、浸透率の差異がもたらした効果としてすべり面形成の議論に非常に有効である。

4. 層面すべりの重要性

海底地すべりメカニズムを求めていくにあたり、すべり面形成のプロセスは最も重要な課題である。海底下浅層部の地層を対象とするには、地盤の力学的バランスのモデル構築とその検証が必要である。科学掘削を適用する場合、どのような場所を研究対象とすべきか。自然科学的アプローチにおいては、よりシンプルな現象を対象とし、そこで得た規則性にしたがって単純なモデル構築から始めることが優先される。そのためには上述の海外地域露頭の例のように、層面すべりを対象として評価することが理想である。層面すべりの優位性はそのシンプルな重力滑動の形態にある。

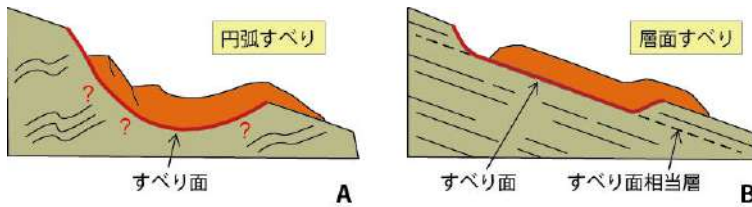


図2 A) 円弧すべりでは、すべり面の形態や、接している岩相の変化も複雑であり、地すべり前にすべり面の形態を予測することは困難。B) 層面すべりでは、すべり面の形態は単純で、特定の岩相や物性境界が期待される。また、層理に沿ってすべり面相当層を追跡できる。

陸上や海底を問わず、一般に地すべりは円弧すべりタイプのモデルが描かれ、検討対象とされることがしばしばであった(図2A)。しかし円弧すべりでは、すべり面の形態や、そこで接している岩相や物性の変化も複雑のため、シンプル且つ汎用的なモデルの構築は容易ではない。さらに、地すべり発生後でなければすべり面がどこに形成されるか分からないという難点もある。一方、層面すべりタイプについて言えば、すべり面の幾何学は比較的単純で、すべり面となる層理面では特定の岩相や物性境界が期待される(図2B)。また、すべり面を層理に沿って追跡することで、すべりに直接関与しなかったすべり面相当層を特定し、評価することが可能である。

5. 下北半島沖の海底地すべり群

今後の科学掘削研究の対象として想定しているのが、下北半島沖の三陸沖海盆北部で顕著に発達する海底地すべり群である。これらは高精度の三次元地震探査(平成20年度基礎物理探査「三陸沖3D」)によって明らかとなった(森田ほか, 2011; Morita *et al.*, 2011)。この海域の海底地すべり層は、かつての海底表層付近の堆積層が未固結の段階で斜面を重力滑動したスランプ堆積層であり、その大部分が層面すべりを示している(図3)。その規模は、解析に利用した三次元地震探査海域を超えるものも含まれ、大きいものは、滑動方向および幅ともに30 km以上と見込まれる。スランプ層が発達する鮮新統および第四系の地層については造構運動による著しい変形は認められず、ほぼ平坦な海底に対して平行な層理が発達している。傾斜が極めて緩やかなことが特徴の一つであり、現在の海底でおよそ 0.6° である。そのため、スランプ層の内部は致命的な崩壊を逃れている。破壊

によって剥ぎ取られた表層堆積層が、重力滑動とともに繰り返すスラスト運動によって切られながら集積し、付加体様の覆瓦構造(Imbrication構造)を形成したと考えられる。そのため、全体として覆瓦構造の断層ブロックが卓越し、わずかなカオティック相のカバーをとまうだけのブロック支持の様相を呈している。また、覆瓦構造の分布に著しく依存した脱水構造が、スランプ層の基底であるすべり面から鉛直に覆瓦構造を切っており、時間断面(Time slice)では平行岩脈状に発達することがわかる(図3Bおよび3C)。脱水構造がスランプ層の上位層を切らないことから、すべり面相当層に滞留していた余剰流体が重力滑動とともに排出されたものと考えられる。層面すべりのため、すべり面相当層(同データでは、概して、ある程度の厚みを持つ弱振幅レイヤーで特徴づけられる)の追跡が可能であり、一部のすべり面相当層については、脱水構造を示すスランプの基底でその厚さを減じているものが認められる(Morita *et al.*, 2011)。これらの特徴は、すべり面形成における流体の重要性を再認識させるものである。

当海域は、その北方延長上の勇払沖海盆とともに炭化水素のポテンシャルあることで知られており(石油公団, 2000; 大澤ほか, 2002)、高いメタンフラックスを示唆する浅いSMI(硫酸塩-メタン境界)も報告されている(小谷ほか, 2007)。地震探査データにおいても、気相を示す反射異常が各所で認められることから(Taira, Curewitz, *et al.*, 2005; 森田ほか, 2011)、すべり面形成に関わった流体には幾分か気相(天然ガス)が含まれていたことが推測される。また気相は、一般に多孔質媒体中で残留ガスとして滞留しやすいため、低浸透率層直下でのフィルム状圧力コンパートメントの形成に寄与した可能性も考えられる。

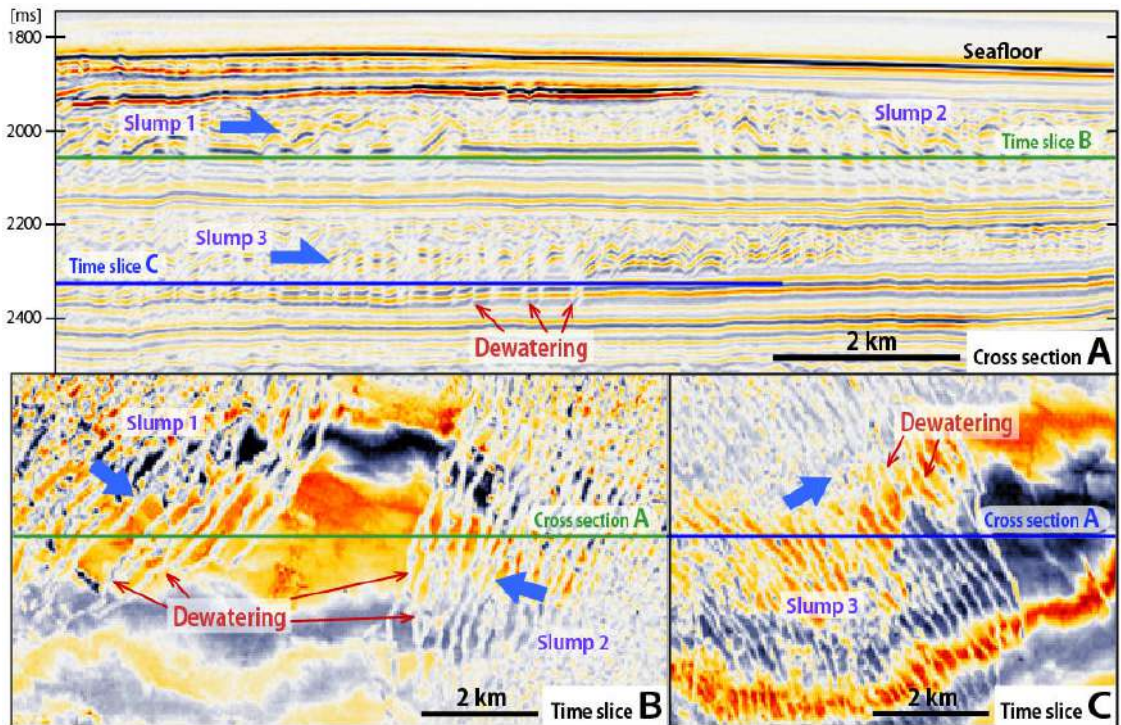


図3 下北半島沖、三陸沖海盆北部の海底地すべり(スランプ)群の一部。層面すべりの結果、覆瓦構造をなしている。また覆瓦構造に依存してすべり面から脱水構造が発達し、時間断面では平行岩脈状の構造を示す。青矢印は重力滑動の向き。鉛直断面(A)と時間断面(BおよびC)は各々図中の線の位置で交差する。Morita and Nakajima (2011) を改編。

2006年、同海域では海洋研究開発機構の地球深部探査船「ちきゅう」の慣熟航海が実施され、地震探査記録からスランプ層と解釈できる地層を実際に掘削している(Higuchi *et al.*, 2009)。地震探査記録から読み取れるスランプ層は、回収されたコア試料による岩相柱状図との対比が可能である。Higuchi *et al.* (2009)によると、スランプ層中も含めておおよそ100%前後のコア回収率であるが、掘削されたスランプ層の基底部、すなわちすべり面相当深度に限って、回収率が0%を記録している。これは、すべり面における堆積物の性状が他の層準と著しく異なっていたことを暗示している。コアリングが実施された海底下365mまでは、薄い火山灰層や砂岩層を挟しながらも、全体にわたって泥岩が卓越している。ただし、回収できなかったすべり面相当深度の直下には8m厚の砂岩層が存在している。これは、比較的剪断に

強い砂層に対し、厚い泥層の最下部付近は最も剪断を被りやすかったことを示しているのかもしれない。また、この砂層に比べ、上位の泥層はある程度の深度に達すると相対的に浸透率が低かった可能性もあり、岩相変化による浸透率の差異が上位層の支持力を失う圧力コンパートメント形成を促したことも考えられる。また同様に、火山灰薄層によるシール効果も重要な岩相依存効果の一つとして考慮しておくべきである。さらに、地震動にともなう粒子の再配列とそれによる排水があれば、また気相の効果もあれば、流体によるすべり面形成への寄与はさらに大きくなったであろう。以上のような推測は、科学掘削の実施によってきちんと検証されるべきである。

6. 将来の海底地すべり層掘削

上述の通り、海底地すべりメカニズムの解明を

目的とした科学掘削の実施にあたっては、層面すべりを基本とした海底地すべり層がその対象に適している。これは、すべり面とその側方延長上のすべり面相当層を追跡することによって、すべり面形成の過程をトレースできるからであり、過去に起こった現象をきちんと捉えることを目的としている。そのため、地すべりの滑動方向に沿って同層準を複数箇所掘削する必要がある。上位層が乱堆積層にすっかり置き換わってしまった部分だけでは不十分であり、剪断を被った上下層の関係がきちんと残されていることが重要である。下北半島の例においては、覆瓦構造が存在すれば複数箇所での掘削によってその剪断の過程の跡を捉えることが可能であり、剪断にともなう脱水過程も記録されていることが期待される。また、剪断に直接関わらなかったすべり面相当層においても、地震動による動揺を繰り返し経験した可能性があるため、すべりそうで、すべらなかった部分では、剪断応力を受けた痕跡である脈状構造が残されているかもしれない。

さらに、科学掘削においては将来起こりうる海底地すべりの予測につなげることも重要となってくる。その可能性を示す現場に出会うことになれば、坑内における原位置観測が求められる。現象が起こりうる場所の性状とその変化の長期的観測が必要であり、それに先行して坑内の地層における剪断強度や浸透率などの物性を押さえておく必要もある。気相が関わる場合には、ガスフラックスやガス組成流体中のガス水比の情報も重要であり、ガス性状の変化を把握するためには地層温度の観測も重要であろう。

また、原位置観測には観測場所の選定が極めて重要である。Morita *et al.* (2011) が使用した高精度地震探査記録は、抽出されたすべり面相当層の音響学的特徴から、ごく浅層部における次のすべり面になり得る層準を高精度な反射法地震探査によって抽出できる可能性を示した。表層の地形に痕跡を残した若い海底地すべり層 (Noda *et al.*, 2013) を参考に精査することもその手段の一つであり、このような高精度調査を広域に拡大してい

くことは、周辺海域の地盤評価を進める意味でも今後重要になってくると予想される。

おわりに：本項をまとめるにあたり、下北半島沖、海底地すべり層の解析と図の掲載には平成20年度基礎物理探査「三陸沖3D」のデータを使用した。

参考文献

- [1] Baba, T., Matsumoto, H., Kashiwase, K., Hyakudome, T., Kaneda, Y. and Sano, M. (2011) Micro-bathymetric Evidence for the Effect of Submarine Mass Movement on Tsunami Generation During the 2009 Suruga Bay Earthquake, Japan. *Submarine Mass Movements and Their Consequences, Advances in Natural and Technological Hazards Research*, 31, 485-495.
- [2] Dan G, Sultan N, Savoye B (2007) The 1979 Nice harbour catastrophe revisited: Trigger mechanism inferred from geotechnical measurements and numerical modelling. *Marine Geology* 245, 40-64.
- [3] Fink, H. G., Strasser, M., Römer, M., Kölling, M., Ikehara, K., Kanamatsu, T., Dinten, D., Kioka, A., Fujiwara, T., Kawamura, K., Kodaira, S., Gerald, W. and R/V Sonne SO219A Cruise Participants (2013) Evidence for mass transport deposits at the IODP JFAST-site in the Japan Trench, *Submarine Mass Movements and Their Consequences, Advances in Natural and Technological Hazards Research*, 37, 33-43.
- [4] Higuchi, K., Ishii, Y., Kaminishi, T., Ibusuki, A., Aoike, K. and Kobayashi, S. (2009) 2006 drilling completion report Shimokita-West. CDEX Technical Report, 6, CDEX, JAMSTEC, Yokohama, 130p.
- [5] Hsu, S. K., Tsai, C-H., Ku, C-Y. *et al.* (2009) Flow of turbidity currents as evidenced by failure of submarine telecommunication cables. Intern Conf on Seafloor Mapping for Geohazard Assessment, Extended Abs, Rendiconti online, Societ? Geologica Italiana 7 : 167-171.
- [6] Integrated Ocean Drilling Program Management International (2011) Illuminating Earth's Past, Present, and Future: Science Plan for 2013-2023, 84p. http://www.iodp.org/doc_download/3160-highnsp.
- [7] Iverson, R. M. and Major, J. J. (1987) Rainfall, groundwater flow, and seasonal movement at Minor Creek landslide, northwestern California : Physical interpretation of empirical relations. *Bulletin of Geological Society of America*, 99, 579-594.
- [8] Kawamura, K., Sasaki, T., Kanamatsu, T., Sakaguchi, A. and Ogawa, Y. (2012) Large submarine landslides in the Japan Trench : A new scenario for additional tsunami generation. *Geophysical Research Letters*, Vol. 39, L05308, doi:10.1029/2011GL050661.
- [9] Kokusho, T. (1999) Formation of water film in liquefied sand and its effect on lateral spread. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.125, No. 10, 817-826.
- [10] 小谷亮介・松本良・石田泰史・蛭田明宏・町山栄章

(2007) 下北半島沖における異常BSRとメタン活動. 堆積学研究, 64, 1117-120.

[11] Terlin, M. T. J. (1998) The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds. *Environmental Geology*, 35, 124-130.

[12] Moore, J. C. (2000) Synthesis of results : logging while drilling, northern Barbados accretionary prism. In Moore, J. C., and Klaus, A. (Eds.), *Proc. ODP, Sci. Results*, 171A, 1-25.

[13] Morita, S., and Nakajima, T. (2012) Fluid circulation from submarine landslides in a high-methane flux sedimentary basin. *Ten Big News Items 2011*, Institute for Geo-Resources and Environment, AIST, p7.

<http://unit.aist.go.jp/georesenv/english/result-e/ten-big-news/2011/2011-7-8.pdf>

[14] 森田澄人・中嶋健・花村泰明 (2011) 海底スランプ堆積層とそれに関わる脱水構造 : 下北沖陸棚斜面の三次元地震探査データから. *地質学雑誌*, 117, 95-98.

[15] Morita, S., Nakajima, T., and Hanamura, Y. (2011) Possible ground instability factor implied by slumping and dewatering structures in high-methane-flux continental slope. *Submarine Mass Movements and Their Consequences, Advances in Natural and Technological Hazards Research*, 31, 311-320.

[16] Noda, A., TuZino, T., Joshima, M. and Goto, S. (2013) mass-transport-dominated sedimentation in a foreland basin, the Hidaka Trough, northern Japan. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14, doi:10.1002/ggge.20169.

[17] Noguchi, T., Tanikawa, W., Hirose, T., Lin, W., Kawagucci, S., Yochida-Takashima, Y., Honda, M. C, Takai, K. (2012) Dynamic process of turbidity generation triggered by the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Q11003, doi:10.1029/2012GC004360.

[18] 大澤正博・中西敏・棚橋学・小田浩 (2002) 三陸～日高沖前弧堆積盆の地質構造・構造発達史とガス鉱床ポテンシャル. *石油技術協会誌*, 67, 38-51.

[19] 石油公団, (2000) 平成 10 年度国内石油・天然ガス基礎調査基礎試錐「三陸沖」調査報告書.

[20] Strasser, M., Kölling, M., dos Santos Ferreira, C., Fink, H. G., Fujiwara, T., Henkel, S., Ikehara, K., Kanamatsu, T., Kawamura, K., Kodaira, S., Römer, M., Wefer, G. and R/V Sonne Cruise SO219A and JAMSTEC Cruise MR12-E01 scientists (2013) A slump in the trench: Tracking the impact of the 2011 Tohoku-oki Earthquake. *Geology*, 41, 935-938.

[21] Synolakis, C. E., Bardet, J-P., Borrero, J. C., Davies, H. L., Okal, E.A., Silver, E. A., Sweet, S. and Tappin, D. R. (2001) The slump origin of the 1998 Papua New Guinea Tsunami. *Proceedings of Royal Society of London A* 2002 458, 763-789.

[22] Taira, A., Curewitz, D., *et al.* (2005) Shimokita area site survey: Northern japan Trench seismic survey, Northern Honshu, Japan. CDEX Technical Report, 2, CDEX, JAMSTEC, Yokohama, 155p.

[23] Yamamoto, Y., Ohta, Y. and Ogawa, Y. (2000) Implication for the two-stage layer-parallel faults in the context of the Izu forearc collision zone: examples from the Miura accretionary prism, Central Japan. *Tectonophysics* 325, 133-144.

☐