

膨大な量の有機炭素が巨大地震によって超深海底に供給されていた — 日本海溝を例とした地球表層での炭素輸送における巨大地震の役割の理解 —

池原 研¹⁾・喜岡 新²⁾・Tobias Schwestermann²⁾・金松 敏也³⁾・Michael Strasser²⁾

1. はじめに

日本海溝は、太平洋プレートがオホーツク海プレートに沈み込むプレート境界です。日本海溝沿いではプレート境界型地震が繰り返し発生し、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震(以下、2011年東北沖地震と呼ぶ)では地震動と津波により多くの人命が失われ、東日本全体に甚大な被害を引き起こしました。巨大地震や津波によっては海底も大きな擾乱を受け、海底堆積物の再懸濁や再堆積が起きていたこともわかってきています(例えば、池原・宇佐見, 2018)。しかし、水深7 kmを超える日本海溝底でどのくらいの量の堆積物が再堆積して地層を形成したかはわかっていませんでした。なぜなら水深6 kmを超える深海域である超深海は地球上で全海域のわずか2%の面積しか占めていない上、調査が困難で、月や火星よりも探査機会が少ない未知の場所だからです。このため、地球表層での炭素循環やその気候変動や生命圏における役割の理解

は進んできていましたが、有機炭素がどのように、そしてどれだけ超深海に運ばれるかの理解は非常に限られていました。今回、東北海洋生態系調査研究船「新青丸」とドイツの研究調査船「ゾンネ」号(第1図)により2012～2016年に実施された調査結果から、2011年東北沖地震により日本海溝に再堆積した堆積物の体積を計算することが初めてできました。さらに日本海溝から採取された海底堆積物コアの分析結果を合わせると、2011年東北沖地震の際に少なくとも100万トンの有機炭素が海溝底に供給されていたことが明らかになりました。これは、水深が深く、調査が困難な超深海である海溝底で有機炭素の埋没量を計算した初めての報告で、2011年東北沖地震が日本海溝での炭素循環や短期的な底生生物活動に大きな影響を与えたことを示しました。

ここでは、Kioka *et al.* (2019)で報告した内容を中心に、2011年東北沖地震によって日本海溝で起こったことをご紹介したいと思います。



第1図 日本海溝の調査に使われた日本の東北海洋生態系調査研究船「新青丸」(左)とドイツの研究調査船「ゾンネ」号(右)

1) 産総研 地質調査総合センター地質情報研究部門

2) インスブルック大学

3) 海洋研究開発機構 地震発生帯研究センター

キーワード：地震、有機炭素、日本海溝、サブボトムプロファイラー記録

2. 2011年東北沖地震後の日本海溝底の調査とその結果

2011年東北沖地震とその津波の後、様々な機関による海底調査が実施されました。そのうち、日本海溝底とその周辺の調査の中で重要な発見が四つあったと思います。まず最初は地震の前と後の海底地形データを詳細に比較することにより、地震による海底地形の変化を定量的に把握したことです(Fujiwara *et al.*, 2011)。海洋研究開発機構(JAMSTEC)の富士原さんらによって行われたこの検討により、日本海溝の陸側斜面が海溝軸の近くで沖(東南東)向きに50 m、上方に7~10 m程度動いたことがわかりました。次は同じくJAMSTECの小平さんらによって行われた地震の前と後にとられた反射法地震探査記録の比較です(Kodaira *et al.*, 2012)。これにより地震時の滑りが海溝軸近くまで達し、富士原さんたちが見つけた海底地形変化もこのような地震時の地殻変動が引き起こしたと考えられました。その後、この斜面域での海底堆積物採取の結果を踏まえて、海溝軸近くまで達した滑りによって、その先端の斜面が円弧滑りを起こしたこと(Strasser *et al.*, 2013)もわかってきました。三つ目はJAMSTECの小栗さんらによるもので、地震の4ヶ月後に海溝底に採泥器付きの観測装置を下ろして海底を観察したところ、海溝底の底層水が濁っていることを観測し、さらに採取された表層堆積物の最表層に2011年の地震によって形成された堆積層を発見したこと(Oguri *et al.*, 2013)です。さらに四つ目として、2011年東北沖地震の破壊領域近傍の日本海溝底のピストンコアの解析から、コア中に3枚の厚い泥質タービダイト層と十和田山起源の十和田a火山灰層が確認され、仙台平野や石巻平野の津波堆積物層序(例えば、Sawai *et al.*, 2012)と同様なイベント堆積物の層序が日本海溝底に存在することがわかりました(Ikehara *et al.*, 2016)。このことは日本海溝底の堆積物が過去の巨大地震を記録している可能性があることを教えてくれました。これらをまとめると、2011年東北沖地震では海溝付近まで断層滑りが到達し、これによって海底地すべりや海底堆積物の再堆積現象が発生し、海溝底に地震イベント堆積物を形成したこと、そして同様な地震は過去にも起こっていて、それらは日本海溝底の堆積物に記録されていることが分かったと言えます。

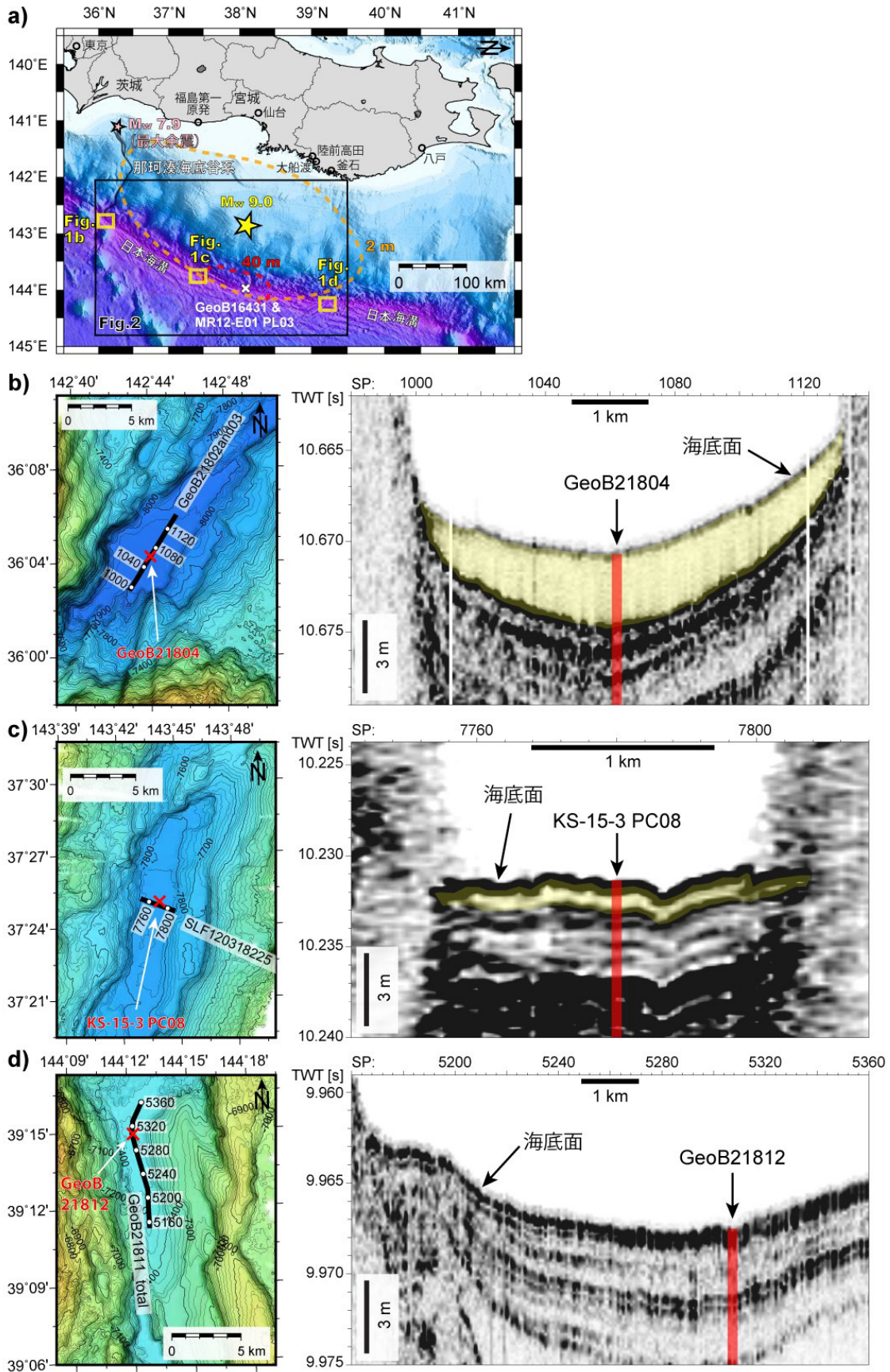
3. 日本海溝の地形と堆積物

以上の発見はいずれも震央近傍の日本海溝底で起こったことでした。2011年東北沖地震によって日本海溝のより広い範囲で起こったことの解明はまず、日本海溝の海底地

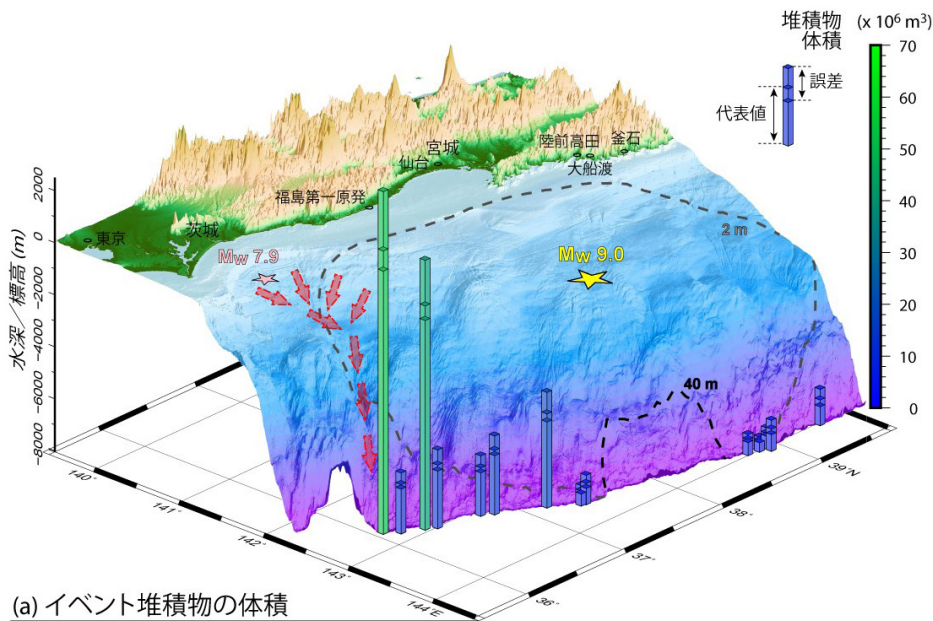
形を詳細に明らかにすることから始まりました。海底の深さは調査船の船底から音波を発射し、音波が海底にぶつかってはね返ってくるまでの時間を測ることで水深を計算します。海底地形の把握は、船底に取り付けられたマルチナロービーム音響測深機により扇形に複数の音波を発射しながら航行し、調査船の真下からある幅で多数の水深値を得ることで行われます。日本海溝において得られた海底地形データを解析すると、日本海溝の海溝軸付近は閉鎖的な小さな海盆の連続であることがわかりました。このような小さな海盆の連続は、日本海溝に沈み込む太平洋プレートの表面構造に影響されたものです。海溝に沈み込む太平洋プレートは沈み込み始め、プレートが折れ曲がるところで少し盛り上がります(アウターライズ)。これより海溝側の太平洋プレートの表面には、正断層で断ち切られたホルスト・グラベン(地塁・地溝)構造が発達しています。太平洋プレートは日本海溝に少し斜交して沈み込んでいるので、低まりのグラベンが沈み込む場所では海盆に、高まりのホルストが沈み込む場所では海盆間の高まりとなります。まず私たちは海底地形からこれら海盆の空間的広がり を明らかにしました。

次に行ったのは、サブボトムプロファイラー記録(第2図)の解析です。サブボトムプロファイラーでは、海底下数十~百m程度までの堆積層の構造がわかります。日本海溝底の小海盆のサブボトムプロファイラーの記録を解析すると、海底面直下の堆積層の最上部に音響的に透明な層が確認されました。いくつかの小海盆から採取された海底堆積物コアと比較すると、サブボトムプロファイラーで確認された最上部の音響的透明層は2011年東北沖地震によって形成されたイベント堆積物に相当することが明らかとなりました。

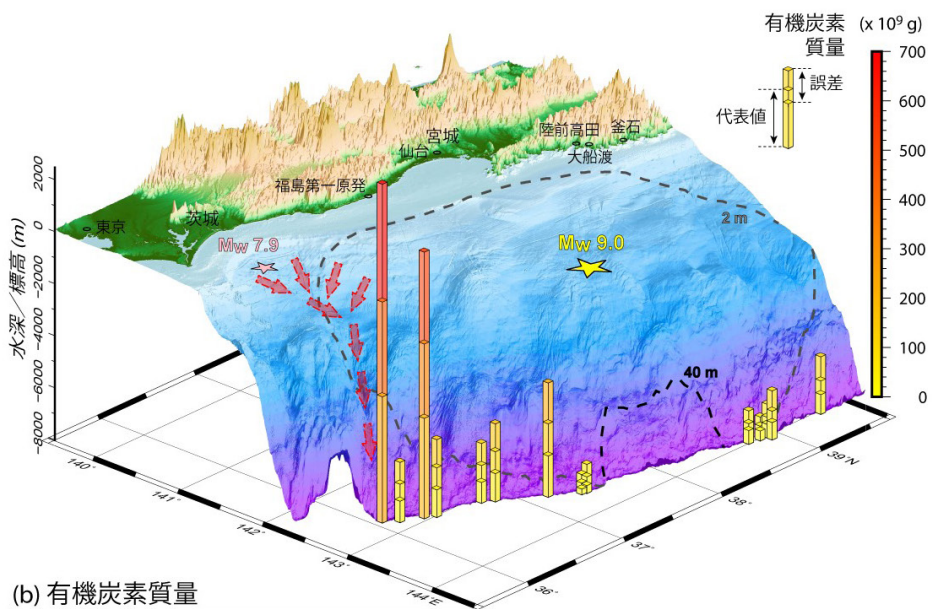
海底地形解析から得られた小海盆の面積とサブボトムプロファイラー記録から得られた音響的透明層(2011年東北沖地震のイベント堆積物)の小海盆内での分布状況から各小海盆を覆ったイベント堆積物の広がりがわかり、さらに音響的透明層の厚さの分布から各小海盆に堆積したイベント堆積物の体積がわかります(第3図)。例えば、日本海溝茨城県沖の小海盆では29 km²もの面積にわたってイベント堆積物が覆っており、その体積は0.054 km³にもなることが計算できました。そして、日本海溝の全ての小海盆に堆積した2011年のイベント堆積物の体積は、少なくとも0.19 km³と計算されました。これは、東京ドーム約150個分に相当する量になります。一方で、小海盆毎に再堆積したイベント堆積物の体積は、2011年東北沖地震の本震のすべり量が大きかった日本海溝中部の小海盆よ



第2図 (a) 日本海溝と調査海域。星印は2011年東北沖地震の本震と茨城沖の最大余震の震央。(b)～(d) 日本海溝に見られる小海盆(海底地形図)と小海盆のサブボトムプロファイラー断面記録の例。断面は地形図の黒線に沿っている。赤の×は海底堆積物コアの採取地点で断面記録では赤線で示している。海底面直下の最上部に音響的透明層(黄色で塗色)が見られる。Kioka et al. (2019)のFigure 1を日本語に改変。



(a) イベント堆積物の体積



(b) 有機炭素質量

第3図

(a) 2011年東北沖地震によって各小海盆に再堆積したイベント堆積物の体積. (b) 2011年東北沖地震によって各小海盆に再堆積したイベント堆積物として固定された有機炭素の質量. なお、面積が1 km²未満の小海盆については、体積、有機炭素質量ともプロットされていない。図中の赤矢印は海底谷を通じた粒子の輸送を示す。Kioka et al. (2019)のFigure 4を日本語に改変。

りも、すべり量の小さかった南部(茨城県沖)の小海盆の方が大きいことが明らかとなりました。これは、日本海溝中部には大きな小海盆がないことが原因と考えています。また、茨城県沖の日本海溝陸側斜面には那珂湊海底谷が存在し、この海底谷の陸側の始点付近では本震の約30分後に最大余震が発生しています。この余震による強振動も茨城県沖の日本海溝底への堆積物の供給に寄与した可能性も考えられます。

4. 2011年東北沖地震で日本海溝底にもたらされた有機炭素の量

海底堆積物コアを用いて測定した有機炭素含有量を用い

て、各小海盆に再堆積した2011年東北沖地震のイベント堆積物中の有機炭素量を計算できます(第3図)。計算の結果、少なくとも1 Tg(テラグラム=100万トン)の有機炭素が2011年東北沖地震で海溝底に供給されたことがわかりました。この値は、世界有数の陸源堆積物の供給量を誇るガンジス・ブラマプトラ川のシステムから海洋に供給される有機炭素量の1/4以上に相当します。このことは、たった一回の巨大地震イベントが、高い炭素フラックスで知られる他の地球表層プロセスに匹敵する規模の炭素輸送を行ったことを示します。したがって、巨大地震が超深海における中～長期的な炭素循環や短期的な生物活動に与える影響は、私たちのこれまでの想像以上に大きいことが示唆されます。

5. おわりに

以上のように、2012～2016年に取得された海底地形、サブボトムプロファイラー記録の解析と海底堆積物コアの分析結果から、2011年東北沖地震によって少なくとも100万トンの有機炭素が海溝底に供給されていたことが明らかになりました。大量の堆積物が急激に堆積すると、堆積後の有機物と海水との接触が阻害されるので、有機炭素が分解されにくくなり、堆積物中に効率的に保存されるようになります。したがって、2011年東北沖地震のような巨大地震が堆積物中への有機炭素の固定にも大きな役割を担っていることがわかりました。また、急激かつ大量の堆積物の堆積は、海溝底に生息する底生生物には非常に大きなインパクトとなったと考えられます。

日本海溝底の堆積物には2011年東北沖地震と同様な巨大地震がイベント堆積物として残されていることがわかってきています(Ikehara *et al.*, 2016)。現在は、採取可能な海底堆積物コアの長さの制約から過去1,500年間の記録が解読されたに過ぎませんが、国際深海科学掘削計画(International Ocean Discovery Program: IODP)の枠組みの中で2020年により長いコアを採取して、過去の地震記録を読み取ろうという研究航海「Expedition 386 Japan Trench Paleoseismology」が予定されています。この研究航海はオーストリア・インスブルック大学のMichael Strasser教授と日本の研究チーム(産総研やJAMSTECなど)を中心とした国際チームによって立案され、実施される予定です。この研究航海によって、日本海溝沿いの数千年以上にわたる過去の巨大地震の時空間分布が解明されることが期待されます。そして合わせて、より長い時間スケールでの巨大地震に関係した炭素固定量や超深海での地球表層プロセス、生命圏の理解が進展すると考えられます。これらは日本海溝のみならず、世界の超深海の研究を加速させるかもしれません。

文 献

Fujiwara, T., Kodaira, S., No, T., Kaiho, Y., Takahashi, N. and Kaneda, Y. (2011) The 2011 Tohoku-Oki earthquake: Displacement reaching the trench axis. *Science*, **334**, 1240, doi:10.1126/science.1211554.

Ikehara, K., Kanamatsu, T., Nagahashi, Y., Strasser, M., Fink, H., Usami, K., Irino, T. and Wefer, G. (2016) Documenting large earthquakes similar to the 2011 Tohoku-oki earthquake from sediments deposited in

the Japan Trench over the past 1500 years. *Earth and Planetary Science Letters*, **445**, 48–56.

池原 研・宇佐見和子 (2018) 海底の地震・津波堆積物：巨大地震・津波による海底の擾乱と擾乱記録を用いた巨大地震・津波履歴の解明. シンセシオロジー, **11**, 12–22.

Kioka, A., Schwestermann, T., Moernaut, J., Ikehara, K., Kanamatsu, T., McHugh, C.M., Ferreira, C. dos Santos, Wiemer, G., Haghypour, N., Kopf, A. J., Eglinton, T. I. and Strasser, M. (2019) Megathrust earthquake drives drastic organic carbon supply to the hadal trench. *Scientific Reports*, **9**, 1553, doi:10.1038/s41598-019-38834-x.

Kodaira, S., No, T., Nakamura, Y., Fujiwara, T., Kaiho, Y., Miura, S., Takahashi, N., Kaneda, Y., and Taira, A. (2012) Coseismic fault rupture at the trench axis during the 2011 Tohoku-oki earthquake. *Nature Geoscience*, **5**, 646–650, doi:10.1038/ngeo1547.

Oguri, K., Kawamura, K., Sakaguchi, A., Toyofuku, T., Kasaya, T., Murayama, M., Fujikura, K., Glud, Ronnie N. and Kitazato, H. (2013) Hadal disturbance in the Japan Trench induced by the 2011 Tohoku-Oki Earthquake. *Scientific Reports*, **3**, 1–6, doi:10.1038/srep01915.

Sawai, Y., Namegaya, Y., Okamura, Y., Satake, K. and Shishikura, M. (2012) Challenges of anticipating the 2011 Tohoku earthquake and tsunami using coastal geology. *Geophysical Research Letters*, **39**, L21309, doi:10.1029/2012GL053692.

Strasser, M., Kölling, M., Ferreira, C. dos Santos, Fink, H.G., Fujiwara, T., Henkel, S., Ikehara, K., Kanamatsu, T., Kawamura, K., Kodaira, S., Römer, M., Wefer, G. and the 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, doi:10.1130/G34477.1.

IKEHARA Ken, KIOKA Arata, SCHWESTERMANN Tobias, KANAMATSU Toshiya and STRASSER Michael (2019) Megathrust earthquake drives drastic organic carbon supply to the hadal trench -a Japan Trench example.

(受付：2019年5月13日)