

海底地殻変動観測

～ 海底の動きを捉える ～



ここから
海洋情報Webページに
アクセスできます！



海上保安庁 海洋情報部 海洋調査課 海洋防災調査室



研究協力：東京大学 生産技術研究所 横田研究室

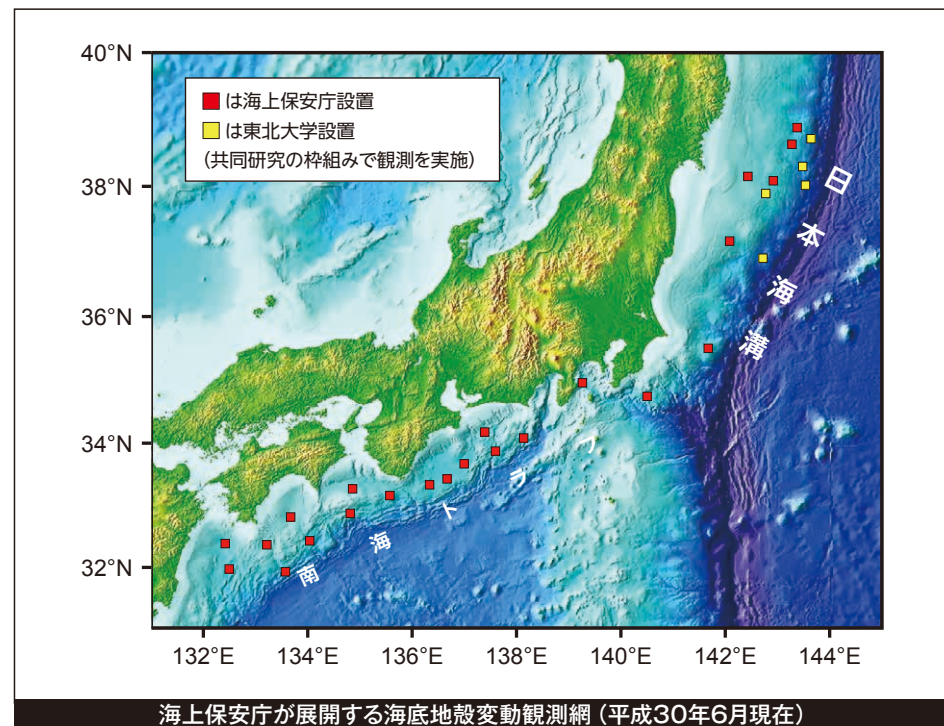
2019年6月作成

海上保安庁における 海底地殻変動観測の概要

海上保安庁では、“GNSS-音響測距結合方式 (GNSS-A)” による海底地殻変動観測を実施し、日本周辺の海底の動きを測定しています。この観測は、日本海溝や南海トラフで発生する巨大地震の発生メカニズムの解明に向けた貴重なデータを提供し、地震防災に役立つことが期待されています。

1 海底地殻変動観測網

2011年の東北地方太平洋沖地震や将来の発生が懸念される南海トラフ巨大地震の震源域に観測網を展開し、海底地殻変動観測を定期的の実施しています。



地殻変動観測

地殻変動観測は、地面の下で起こっている現象を知るために行われています。地球の中の比較的浅い場所で起こる現象は、地表に何らかの影響を与えます。例えば、地中をマグマが移動して地面が膨張したり、地震が起こって地表が動いたりします。こういった地面の動きを観測によって捉えます。

2 GNSS-音響測距結合方式による海底地殻変動観測

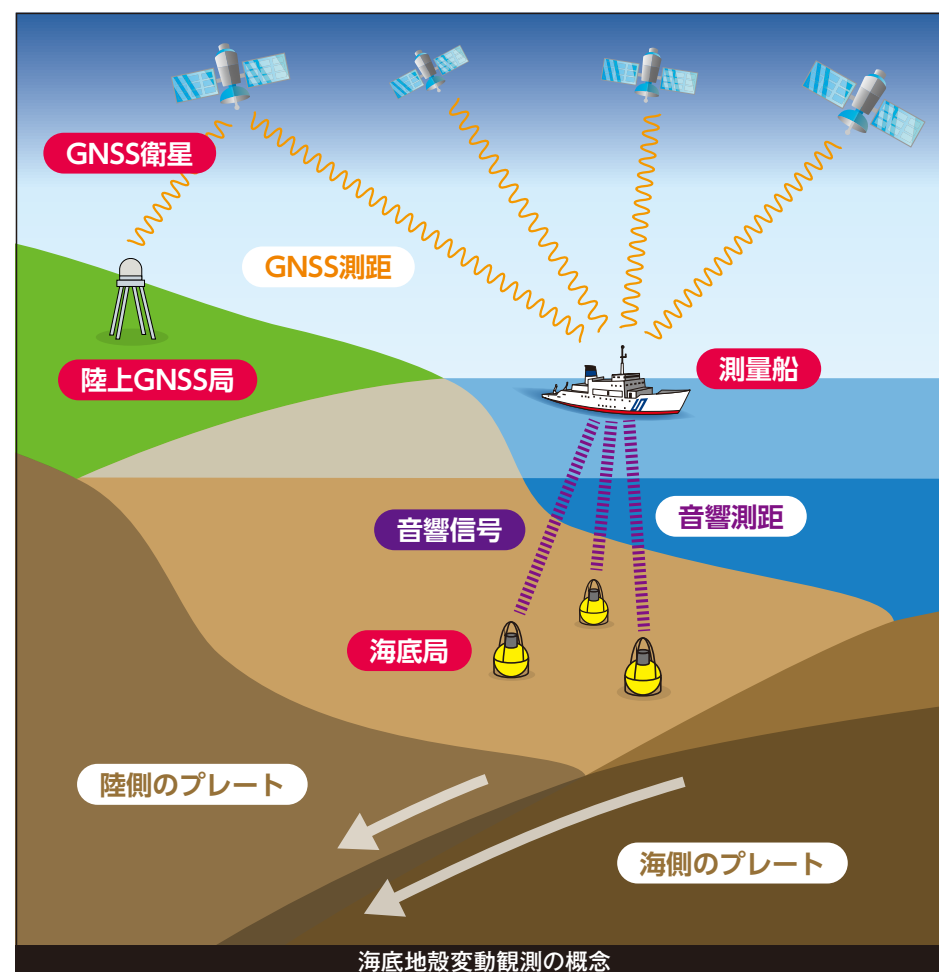
GNSSの普及により陸上では地面の動きを1cm以下の精度で精密に測定できるようになりました。しかしながら、GNSS衛星からの電波は海底まで届かないため、GNSSによって海底の動きを直接測定することはできません。

海上保安庁では、これまで海図製作のために培ってきた海底調査や地殻変動観測のノウハウを活かし、東京大学生産技術研究所と共同で海底の動き（地殻の変動）を測るための研究開発を重ね、

① GNSSで測量船の位置を決定し (GNSS測位)

② 音波で測量船と海底にあらかじめ設置してある海底局との距離を図る (音響測距)

というように電波と音波を組み合わせることで海底の位置の精密測定を実現する観測システム (GNSS-音響測距結合方式) を実用化しました。



海上保安庁における 海底地殻変動観測の目的

海上保安庁で行っている海底地殻変動観測では、日本海溝や南海トラフ沿いの陸側の海底（陸側のプレート上）の動きを調べています。

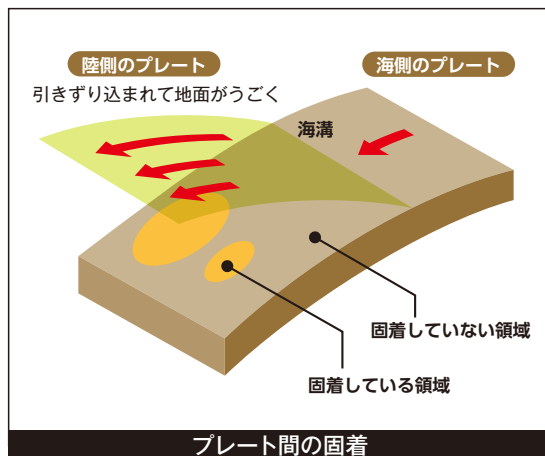
これによって、プレート間の固着具合、地震時のすべり分布などを推定し、地震メカニズムの解明に必要なデータを提供することを主な目的としています。



1 プレート間の固着状態の把握

海溝型の地震は、ある程度決まった場所で繰り返し発生します。これは、海のプレートが陸のプレートの下に沈み込む時に、プレート間の固着具合にムラがあるからです。

しっかりと固着している領域では、陸のプレートが海のプレートに引きずり込まれてひずみが蓄積し、それが一気に解放されると巨大地震となります。一方、固着の弱い領域では海のプレートが比較的スムーズに沈み込むため、ひずみの蓄積は小さいと考えられています。この固着の強弱の分布を正確に知ることができれば、海溝型地震の持つ性質をよりよく知ることができるようになり、将来発生が予想される地震に対して、より効果的な防災対策を進めることができますと期待されます。



プレート

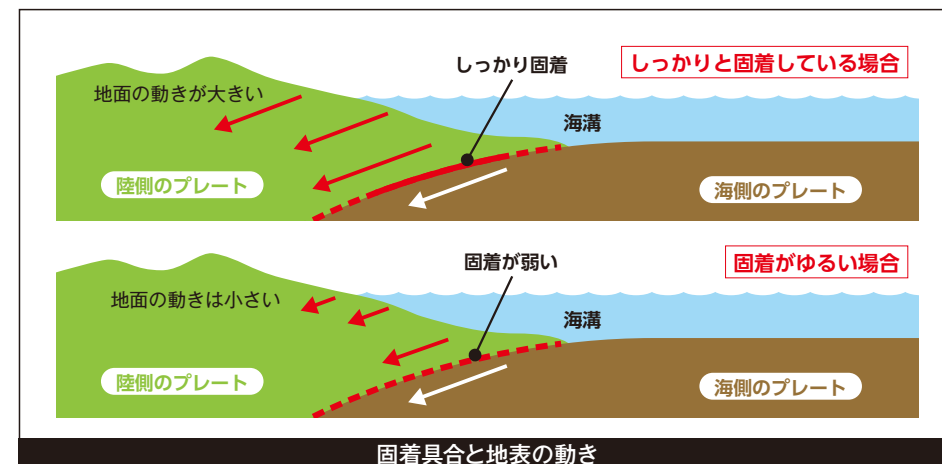
地球の表面を覆うかたい岩盤のこと。プレートがぶつかり合うプレート境界では地震が頻発します。地表面の動きを観測することで地震の起こり方、大陸や山の形成過程を知ることができます。

海溝型地震

海溝の近くのプレート境界で発生する地震のことで、マグニチュード8以上の巨大地震の多くはこのタイプの地震です。内陸で起こる地震よりも広い領域が震源になりやすく、規模も大きくなりやすい傾向があります。

固着の強弱の分布を推定する強力な道具の一つが地殻変動観測です。地下で起こっている動きは地表に影響を与えます。単純には、地面の動きは、陸側のプレートの引きずり込みが大きければ大きく、小さければ小さくなります。このように地表の動きを調べることで、地下の動きを推定することができます。陸上では国土地理院による稠密なGNSS観測網による地殻変動観測がなされており、成果を上げています。

しかしながら、海溝型地震の震源域のほとんどは海域にあります。そのため、陸だけでなく海底の動きを捉えることが、固着具合の分布のさらなる正確な推定のために必須となります。



GNSS

Global Navigation Satellite System の略称。人工衛星と電波通信を行うことで位置を精密に測定するシステムのこと。アメリカの GPS (Global Positioning System)、ロシアの GLONASS (GLObal'naya NAvigationnaya Sputnikovaya Sistema)、日本のみちびきなどの複数のシステムがあります。

2 観測結果の還元

海底地殻変動観測で得られた成果は、地震防災に関係する政府の委員会等に定期的に提出しています。地震に関する調査および研究を行っている関係機関の結果と合わせて、地震・防災の総合的な評価を行うための重要なデータとなっています。

地震調査委員会

地震調査研究推進本部の下にある委員会で、地震に関する観測、測量、調査又は研究を行う関係行政機関・大学等の調査結果等を収集、整理、及び分析し、並びにこれに基づいた総合的な評価を行っています。

地震予知連絡会

地震の予知・予測に関する調査・観測・研究結果等の情報の交換とそれらに基づく学術的な検討を行っています。

南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会

気象庁が毎月開催する検討会で、東海地域を対象とした地震防災対策強化地域判定会と一体となって南海トラフ全域の地震発生の可能性の評価を行っています。

海上局(測量船)の観測装置

② XCTD/XBT
ランチャ

④ 音響トランス
デューサ

水温・塩分データ

音速構造解析

音響走時データ

音波の往復走時

送信信号 受信信号

4 音響トランスデューサ

GNSS測位

1 GNSSアンテナ

船上GNSSデータ

GNSS陸上基準局

※陸上GNSSデータは、
国土地理院より提供。

陸上GNSSデータ

船上GNSSアンテナの
位置を測定

測量船底の トランスデューサ位置を測定

測量船の動揺データ

A diagram of a ship illustrating roll and pitch motions. The ship is shown from a side profile. Two green curved arrows above the ship indicate roll (labeled 'ロール') and pitch (labeled 'ピッチ'). The ship's hull is white with a red stripe along the bottom and a blue stripe on the side. The ship is tilted upwards at the bow, and a green curved arrow indicates the pitch motion. The ship is tilted to the left, and a green curved arrow indicates the roll motion.

2 動揺センサー

音響測距

音響信号

海上局と 海底局の距離を測定

海底局(ミラートランスポンダ)

海底局の正確な位置を測定

GNSS-音響測距結合方式による 観測システムの詳細

1 音響測距観測

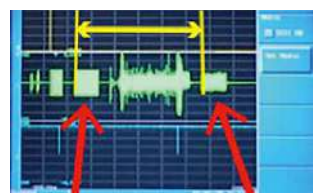


船内での音響測距観測の様子



船底トランスデューサ

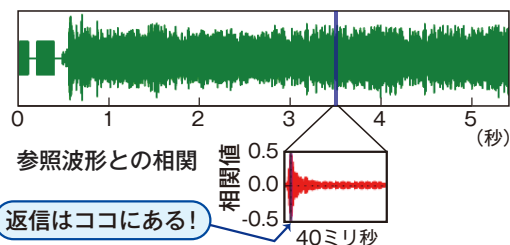
海中では電波が遠くに伝わらないため、音波によって距離を測定します（音響測距観測）。海底局はミラートランスポンダと呼ばれる音響装置で、測量船の船底に備え付けてある音響トランスデューサ（音波の送受信を行う機器）から発信される音波を受信したら、そのまま測量船に向けて音波を送り返す機能を持っています。海底局から返ってきた音波は船底のトランスデューサで受信され、音波の往復時間が測定されます。



送信シグナル 受信シグナル

観測した音響測距波形
(送受信の時間差から距離を測定)

受信波形



受信信号の相関処理

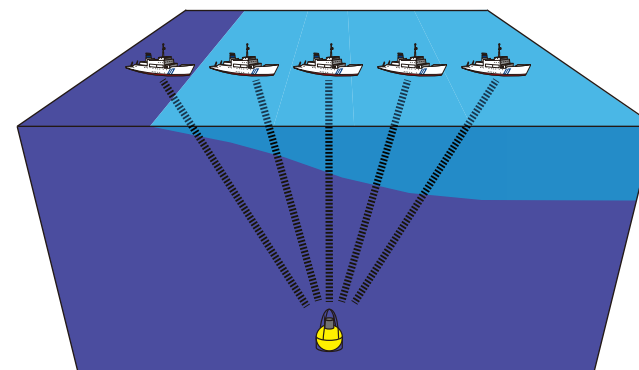
音波は数千mの深海底を往復することで、信号強度が弱まるとともに波の形が変形します。往復時間を数マイクロ秒という高精度で測定するために、波形相関法というノイズに埋もれた微細な信号を検出する手法を用いた解析処理を行っています。

2 海中音速度測定

音響測距観測で測定した音波の往復時間から海上局と海底局との間の距離を求めるためには、海水中を音波が伝わる速度を正確に知る必要があります。海水中の音速度は、海水温や塩分によって大きく変化するため、観測中は数時間ごとに水温や塩分の測定を行い、音速度の変化を把握しています。



船尾甲板から水温・塩分測定器を海中に投入している様子



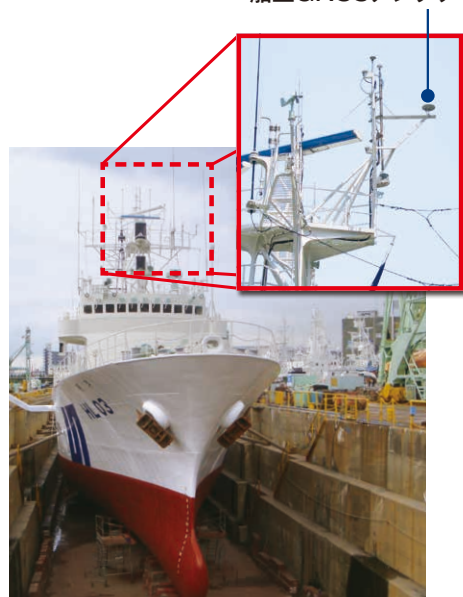
場所・時間によって音速度が大きく変わるため、海中音速度の把握は重要です

海中音速度の影響

3 船上GNSS測位

GNSS衛星と海底局をつなぐ中継点としての海上局である測量船の位置を決定するため、測量船のマストに高精度測位用のGNSSアンテナを取り付け、測量船の位置を0.5秒ごとに数cmの精度で測定しています。最終的には、マストのGNSSアンテナの位置から音波を発射する船底のトランスデューサの位置を求める必要がありますが、そのためには、測量船の傾きのデータが必要となります。測量船の傾きは3種類の回転で表すことができ、船内に備え付けの動揺計測装置によって波に揺られ続ける測量船の傾きを常時計測しています。

船上GNSSアンテナ

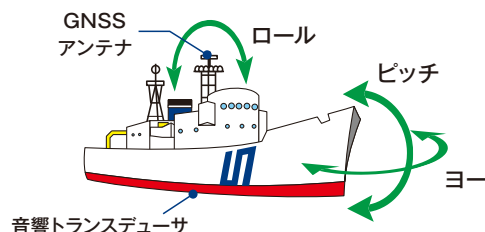


測量船「明洋」のマストに設置された
GNSSアンテナ



GNSSアンテナ 船底音響トランスデューサ間
位置測定の様子

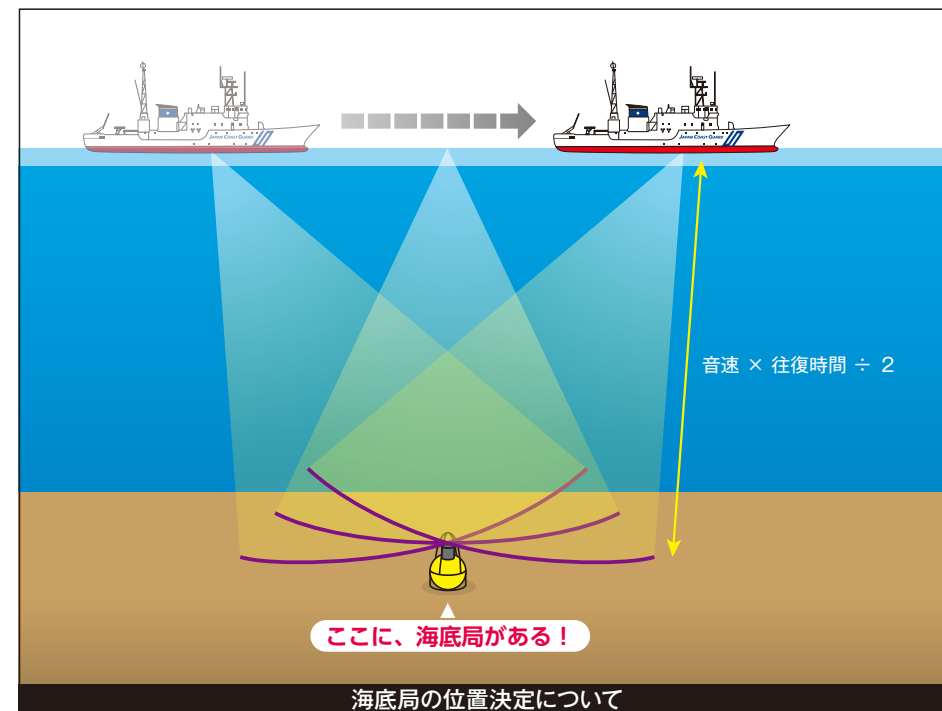
動揺計測装置を用いて、常に波に揺られ続ける測量船の傾きを計測しています。船の傾きは3種類の回転で記述されます。これらの回転を把握することによって、GNSSアンテナのあるマストに対する音響トランスデューサの正確な位置が決定でき、音響信号の送受信源の位置を正確に決定することができます。



船の傾きを表す3つの回転

4 海底局位置の測定

音響測距観測と海中音速度測定によって測定された海上局と海底局の間の距離と、GNSS観測で測定された海上局の位置を組み合わせることで、海底局の精密な位置が測定されます。



観測が始まった2000年代初めは④の写真のように、船の後部でGNSSアンテナと音響トランスデューサのついたポールを横抱きにして観測していました。④の写真では長いポールを出港時に折り曲げている様子がわかります。

⑤の写真はポールを横抱きにする作業風景です。現在（2008年以降）では、船底にトランスデューサが装備されており、このような観測前的大がかりな作業はなくなりました。



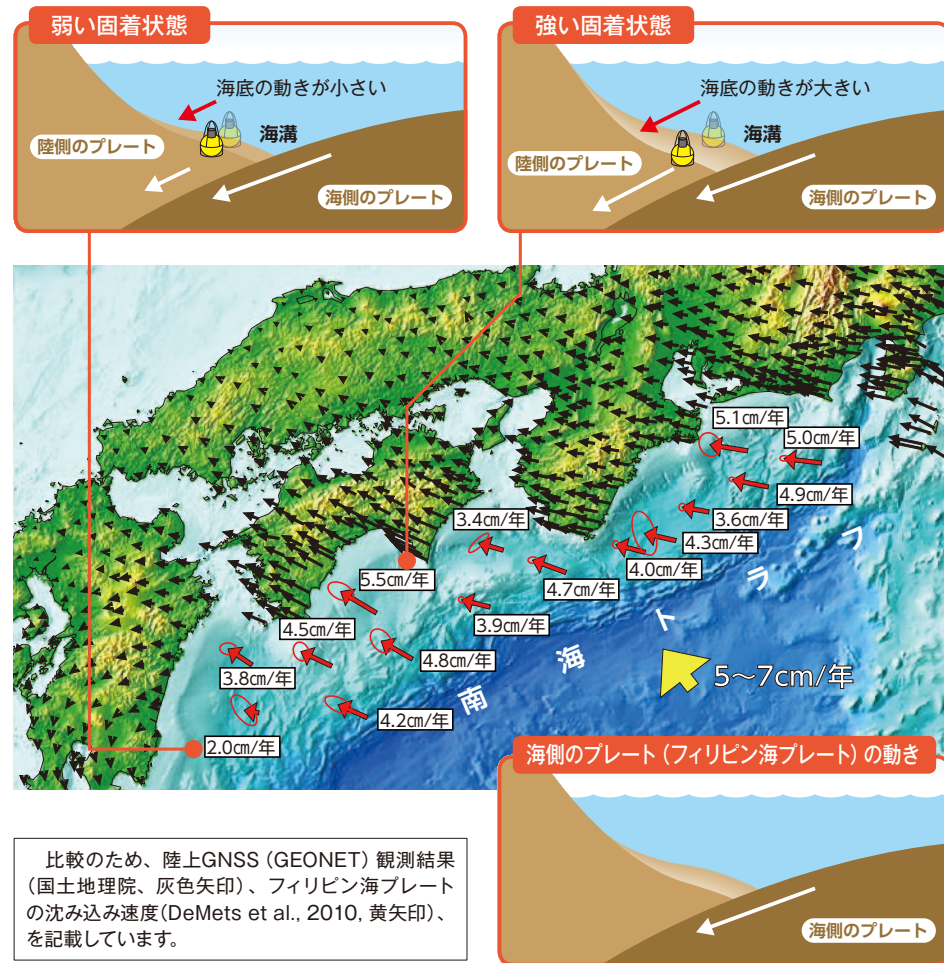
昔の風景

海上保安庁における 海底地殻変動観測の成果

1 南海トラフ沿いの海域における海底の動き

海上保安庁では、大規模な地震の発生が危惧されている南海トラフ沿いの海域において、GNSS-音響測距結合方式による観測を継続的に行ってきました。

観測の結果から、プレート間の固着状態の強弱の分布が初めて明らかになりました。

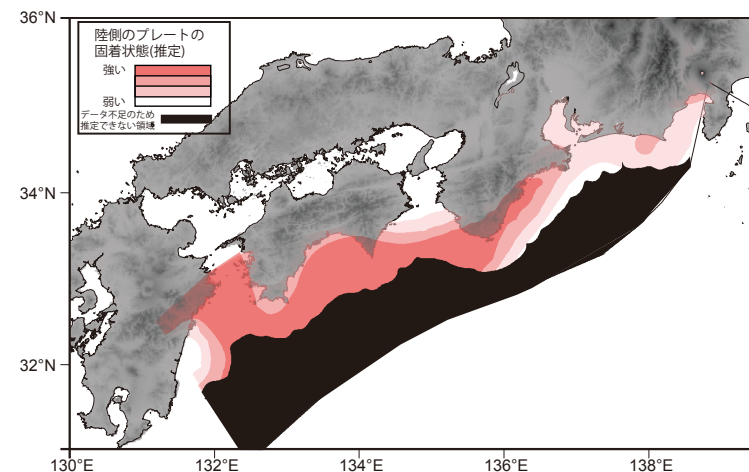


Y. Yokota, T. Ishikawa, S. Watanabe, T. Tashiro and A. Asada (2016), Nature, doi:10.1038/nature17632.

2 海底の動きから推定されるプレート境界の固着状態

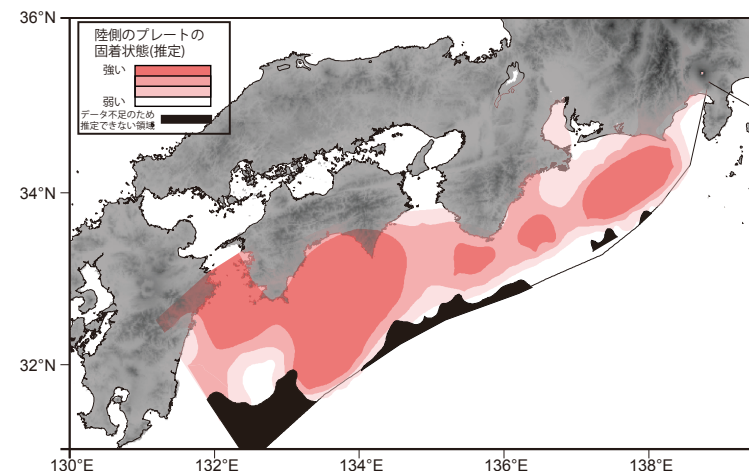
2.1 陸域の動きから推定される固着状態

GNSS観測網によって観測される陸域の動きからプレート境界の固着状態を推定すると、この図のように海域の半分くらいを推定できません。これは観測点が海底下のプレート境界まで遠すぎるのが原因です。



2.2 海底の動きから推定される固着状態

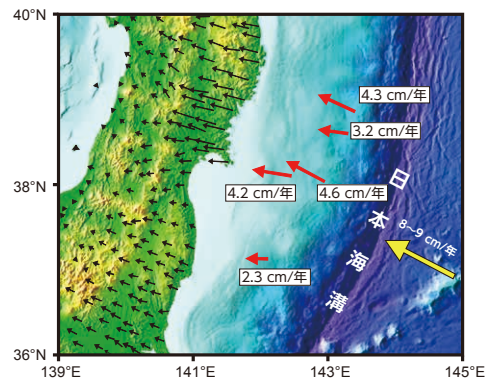
陸域の動きのデータに海底の動きを加えて推定するとこの図のように海底下の広い領域の固着状態を推定できるようになります。これまで謎だった南海トラフの広域の固着状態が初めてわかるようになりました。しかし、巨大津波発生域と考えられている沖合の南側の領域はまだまだ観測されていません。



3 東北地震の前後の海底の動き

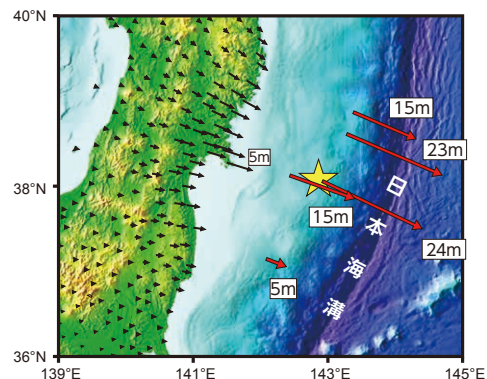
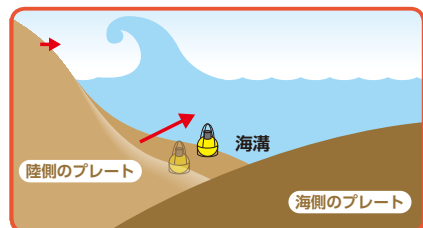
3.1 東北地震前

プレート境界での固着状態を示しています。



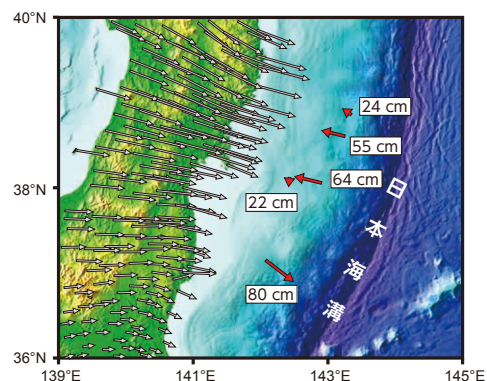
3.2 東北地震時

海底で24mという巨大な動きが観測されました。動きの違いから宮城県の沖合に震源があることがわかります。



3.3 東北地震後

地震後の複雑な動きが続いています。動きの違いは、プレートだけではなくマントルにも原因があると考えられています。



M. Sato, T. Ishikawa, N. Ujihara, S. Yoshida, M. Fujita, M. Mochizuki, and A. Asada (2011), Science, doi:10.1126/science.1207401.
S. Watanabe, M. Sato, M. Fujita, T. Ishikawa, Y. Yokota, N. Ujihara, and A. Asada (2014), GRL, doi:10.1002/2014GL061134.

