

第2回海洋科学掘削委員会

我が国における海洋科学掘削の取組について ～社会的視点（防災・減災）～

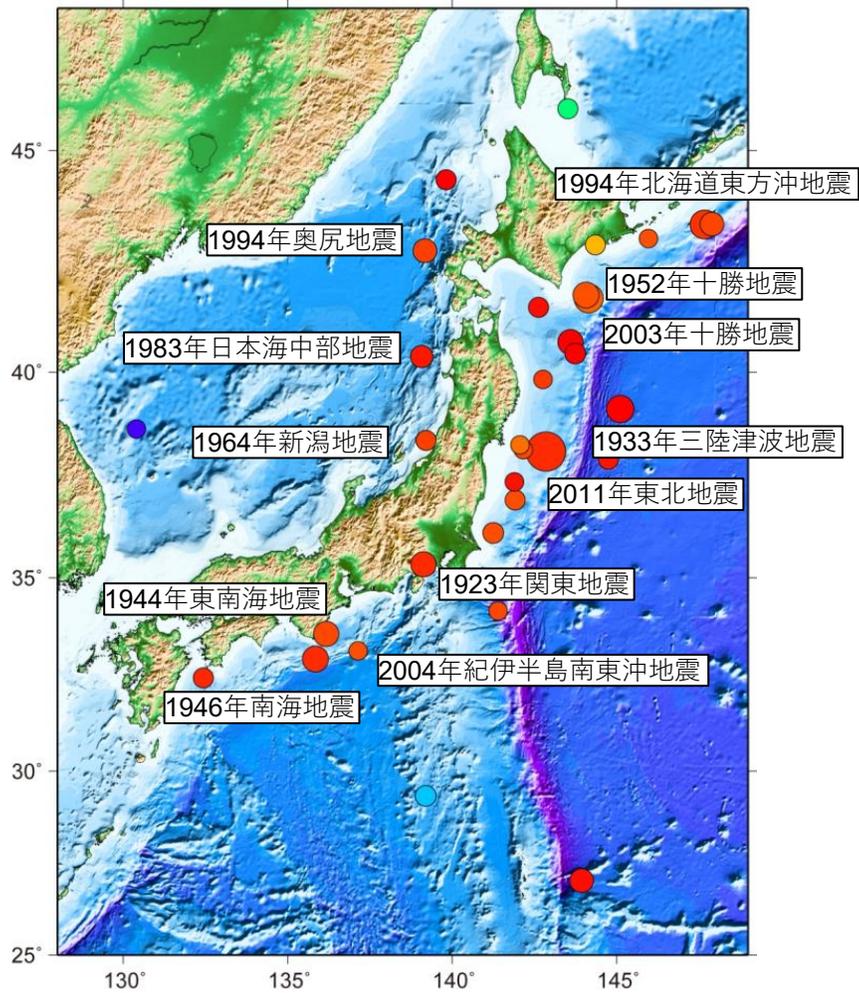
小原一成（東京大学地震研究所）

- ・はじめに
- ・掘削試料等を用いた物質科学的成果
- ・孔内観測による地球物理学的成果
- ・その他の関連した成果
- ・これまでに達成できていないこと
- ・海洋科学掘削に対する今後の期待
- ・まとめ

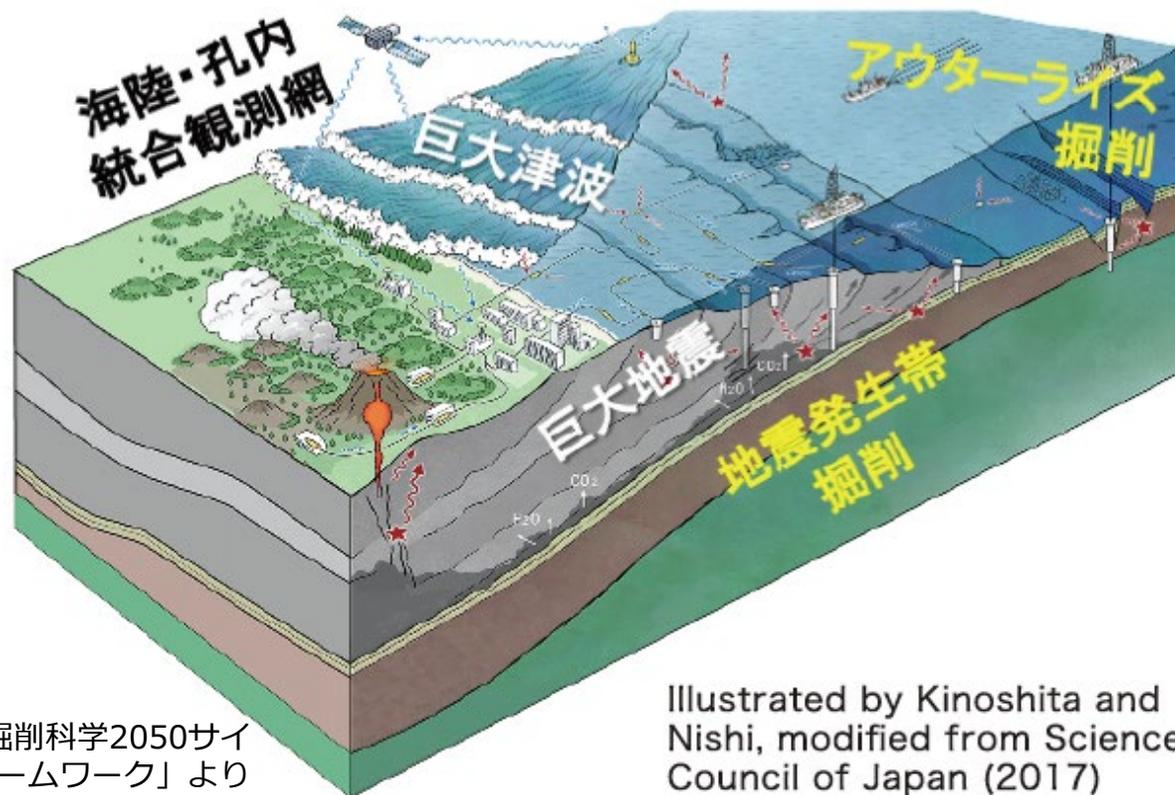
はじめに

① 海洋科学掘削の社会的（防災・減災）な意義

日本周辺の大地震（1923年以降、M7.4以上）



海洋科学掘削 → 巨大地震の発生場を直接理解
→ 防災・減災へ貢献



J-DESC「掘削科学2050サイ
エンスフレームワーク」より

Illustrated by Kinoshita and
Nishi, modified from Science
Council of Japan (2017)

はじめに

② 「防災・減災への貢献」に対する具体的イメージ

地震・津波・火山などの自然災害に関する研究

【基礎研究】
現象解明研究

【基礎・応用研究】
現象発生予測研究

【基礎・応用研究】
災害誘因予測研究

【応用・開発研究】
即時情報伝達研究

活用

海陸観測網の構築・整備・運用

反映

様々な知見を国民・社会に普及、防災リテラシーの向上、防災・減災対応に活用

行政機関等における防災・減災のための施策

地震活動・メカニズム等の理解

大地震発生を長期的（数10年スケール）に予測

地震発生時の地震動や津波波高などのハザードを事前に評価

地震発生直後に、地震動や津波波高などを即時的に予測し伝達

南海トラフ評価検討会・地震調査委員会等での現状評価
【気象庁・文科省・国土地理院等】

主な海溝型地震評価、主要活断層評価
【文科省】

震源断層を特定した地震の強震動予測、確率論的津波評価
【内閣府、文科省】

緊急地震速報（PLUM法）、津波警報（REGARDの適用）
【気象庁・国土地理院】

南海トラフ地震臨時情報
【気象庁・内閣府】

相対的に地震発生の可能性が高まった場合に発出

地震動予測地図
【文科省】

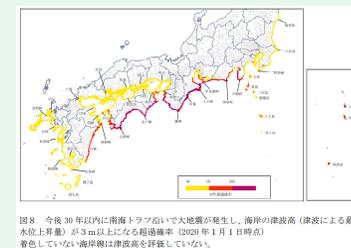
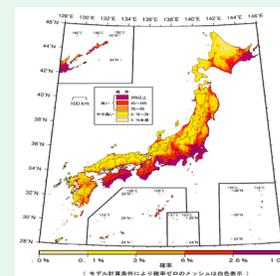
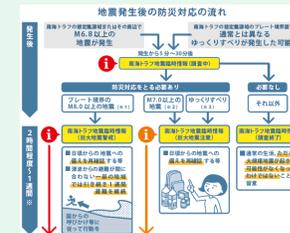
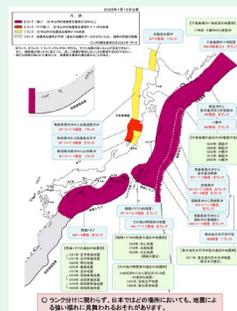


図8 今後30年以内に南海トラフ沿いで大地震が発生し、海岸の津波波高（津波による最大水位上昇量）が5m以上に達する超過率（2020年1月1日時点）
青色していない海岸線は津波波高を評価していない。

貢献

安心・安全で災害に強い社会の実現

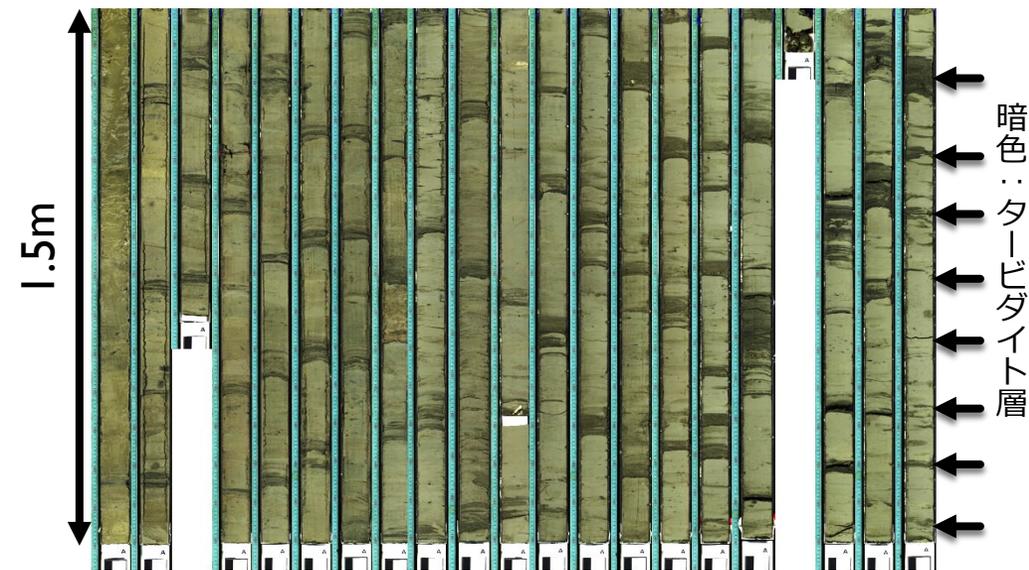
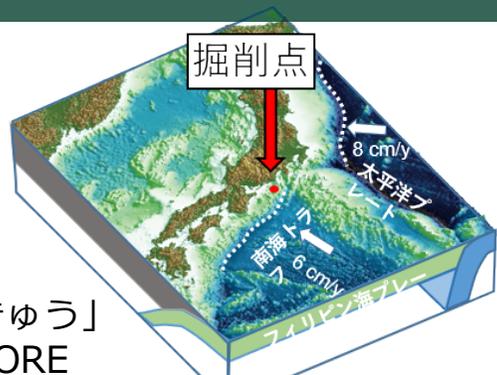
防災基本計画【中央防災会議】

掘削試料等を用いた物質科学的成果

①南海トラフ掘削による巨大地震発生履歴の解明



「ちきゅう」
SCORE



目的：海底堆積物の採取・解析により長期にわたる地震発生履歴情報を得る。

海底に残る巨大地震の痕跡（タービダイト）調査掘削

成果：東海沖で過去数万年に相当する地質試料の取得に成功、巨大地震が繰り返し発生したことを示す約200枚の地震性タービダイト層を確認。

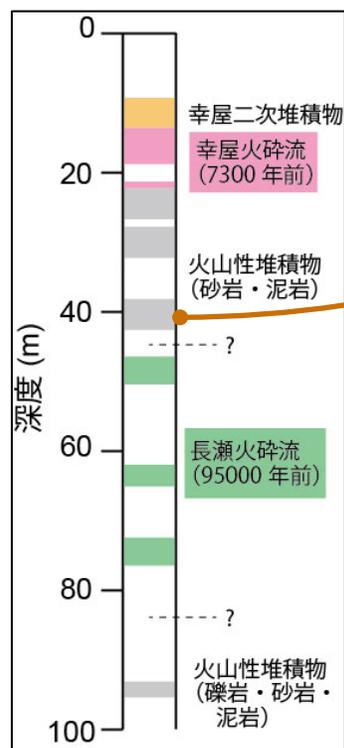
今後年代決定を進めることにより、これまでにない長期間にわたる地震履歴情報が得られる。

評価：今後の地震発生長期評価に貢献

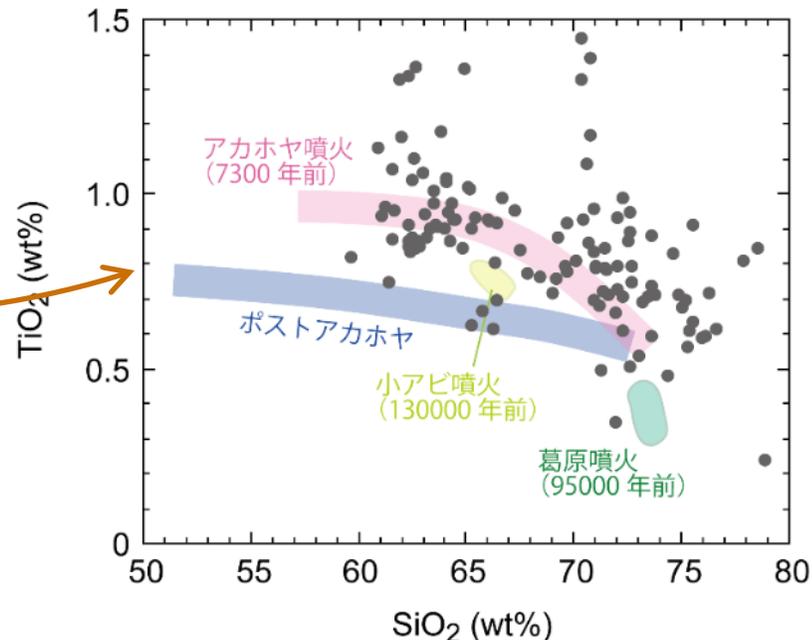
掘削試料等を用いた物質科学的成果

②鬼界カルデラ掘削による大規模火山噴火履歴の解明

カルデラ外縁部での掘削試料



レーザーアブレーションICP-MSによる局所分析



95000年前噴火の前後で2種類のマグマ (緑と赤) が存在した

目標：海底火山活動の観測、調査、地質試料の採取・分析による、活動履歴、噴火様式、活動の現状把握

成果：ちきゅうSCORE掘削で得られたコア試料の解析から、鬼界カルデラ約10万年間の大規模噴火活動履歴が判明

溶岩および火山灰の化学分析の結果、起源の異なるマグマの存在が明らかになった。これは、95000年前の大規模噴火 (左下図の緑部) が終了して以降、7300年前噴火の玄武岩質マグマの供給が比較的初期から始まっていたことを示し (左図の灰色部)、大規模噴火前後でマグマ供給システムが変化した (左図の緑ラインと赤ライン) ことを示唆する。

今後、大規模噴火の前駆現象を見つけ、火山活動の長期予測を進める。これらのデータ・知見は原子力規制庁や自治体等への提供を進める。

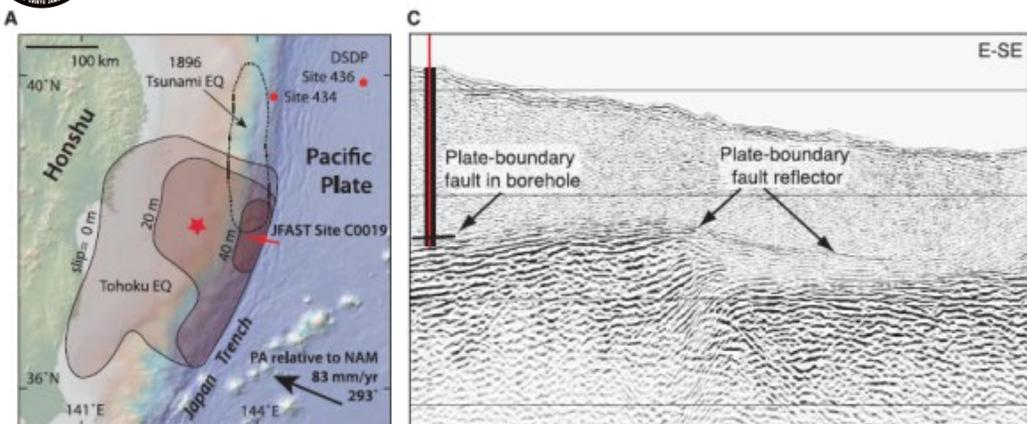
評価：今後の大規模火山噴火予測に貢献

掘削試料等を用いた物質科学的成果

③東北地方太平洋沖地震発生メカニズムの解明



Exp.343: 東北地方太平洋沖地震調査掘削(JFAST)



A) 掘削地点 (C0019), 震央 (赤星印), 本震時の断層滑り量分布。
 C) 掘削地点の反射断面. 掘削地点は、沈み込む太平洋プレートが変形受けた地塁(horst)の上で、遠洋性堆積物 (黄色) は薄くなっている。

目的：東北地震発生直後の掘削によって、今回のM9クラスの地震・大津波を引き起し日本海溝付近にまで及んだ地震断層と巨大化したメカニズムを明らかにする

- ✓震源海域のプレート境界断層浅部から地質試料を採取
- ✓断層運動で生じた残留摩擦熱の直接計測に成功

「プレート境界断層浅部では地震性滑りは起きない」という従来の常識を根本から問い直す、極めて重要な結果

主な発見 1：断層の構造、組成

厚さは薄く (5m以下) 周囲に比べ弱い地層 (Chester et al. 2013, Science)

主な発見 2：断層が滑りやすくなった理由

強度の弱い粘土から構成され、摩擦発熱で滑りやすくなった (Ujiie et al. 2013, Science)

主な発見 3：断層先端部の断層摩擦熱の検出

東北地震時の断層摩擦熱 (Fulton et al. 2013, Science)

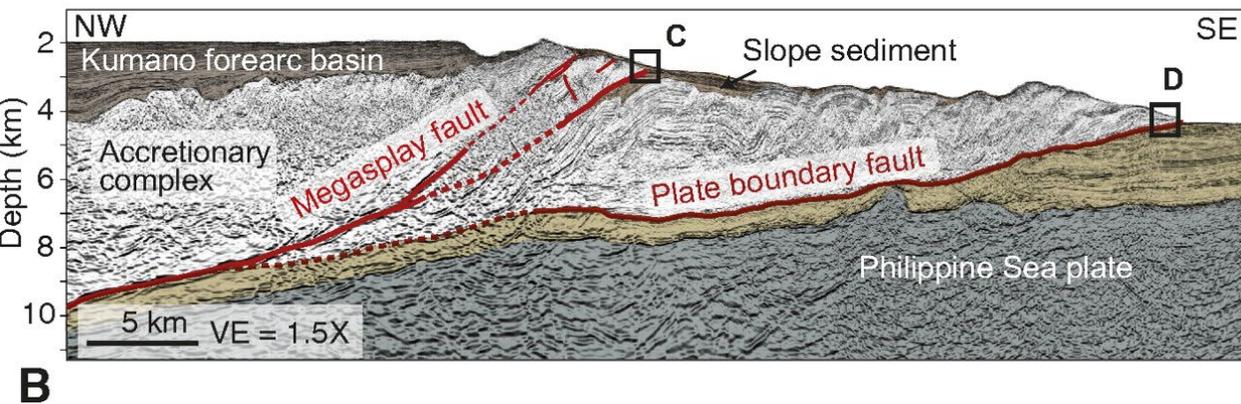
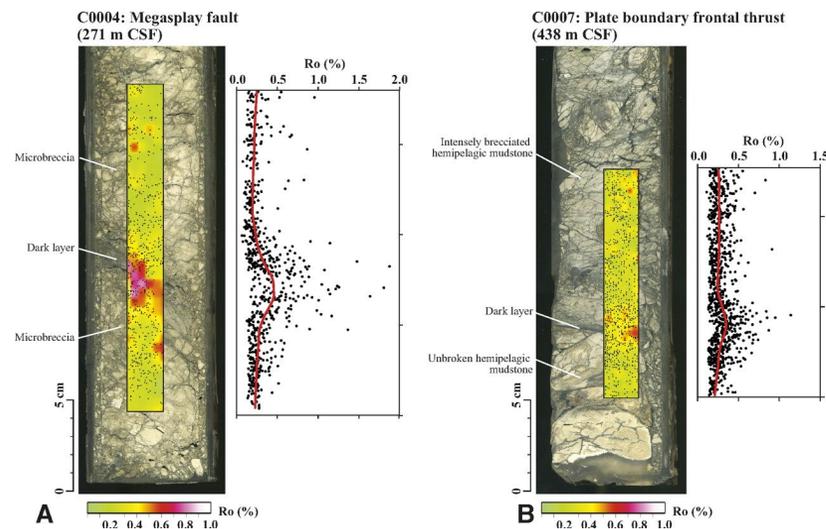
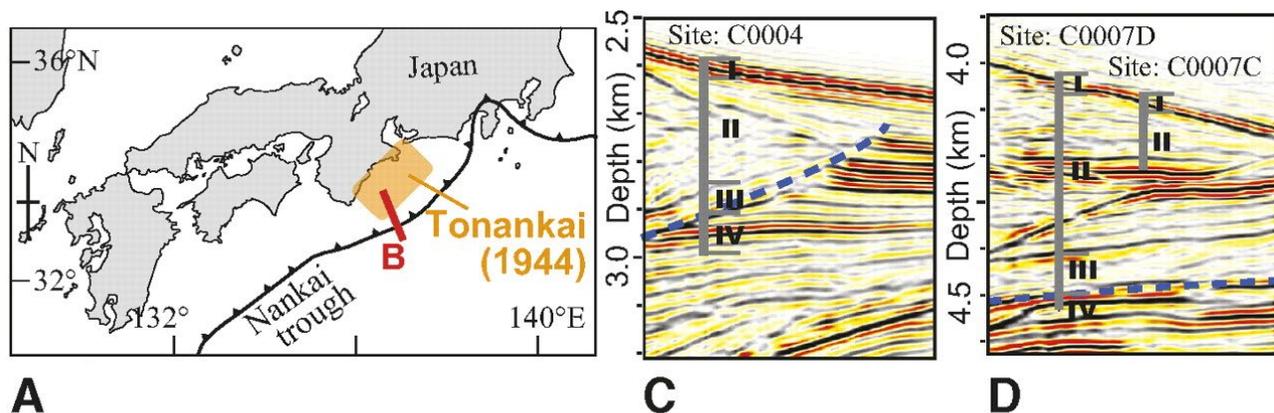
評価：地震発生予測や強震動評価に貢献



- 水深6889.5m海底下648から844.5 mにかけてのコア試料採取に成功
- ここで採取されたコアにはプレート境界断層およびその上部に同定された断層が含まれる

掘削試料等を用いた物質科学的成果

④南海トラフ近傍における津波断層の活動痕の発見



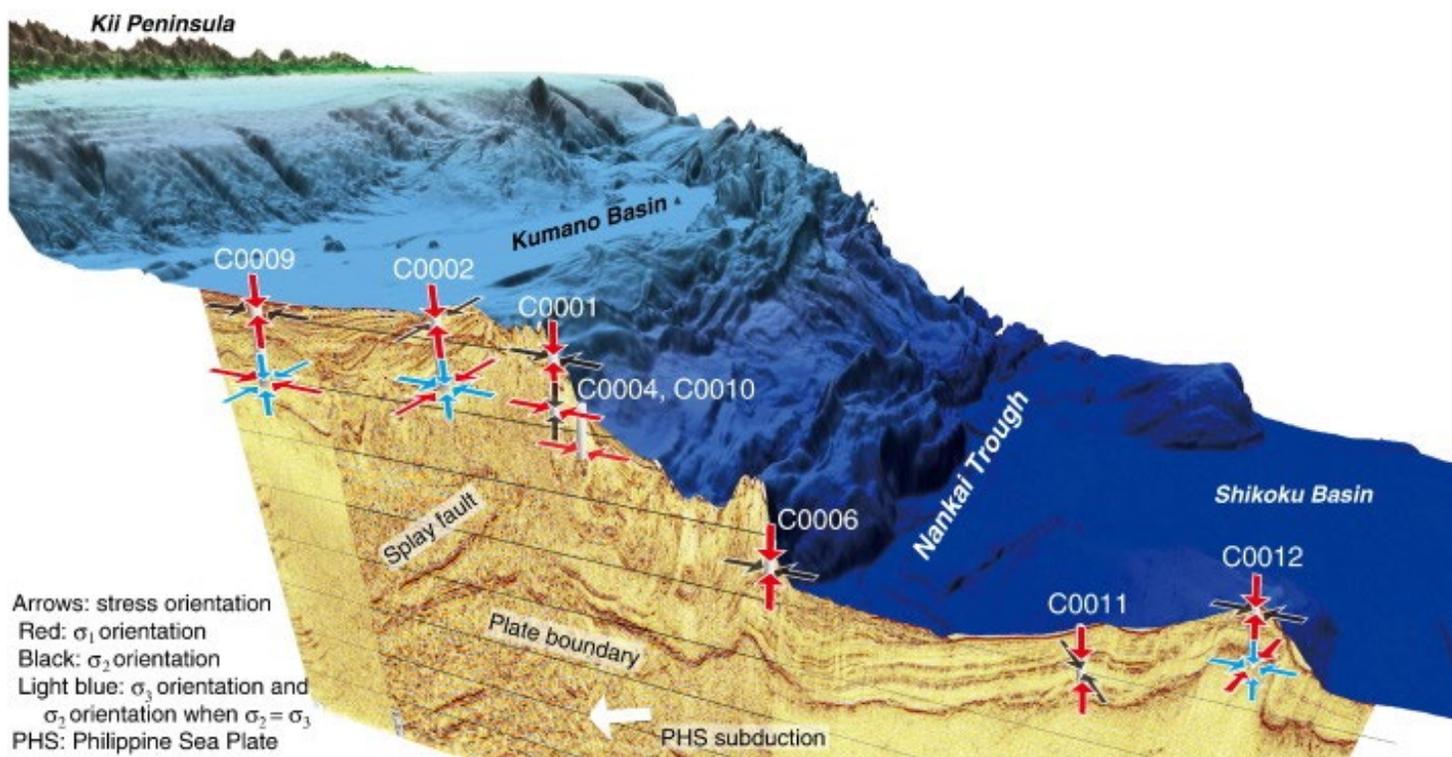
Sakaguchi et al. (2011)

巨大地震分岐断層の浅部先端と海溝軸のプレート境界断層の断層面が摩擦溶融した痕跡を発見
 →海溝軸までの地震性高速すべりの証拠

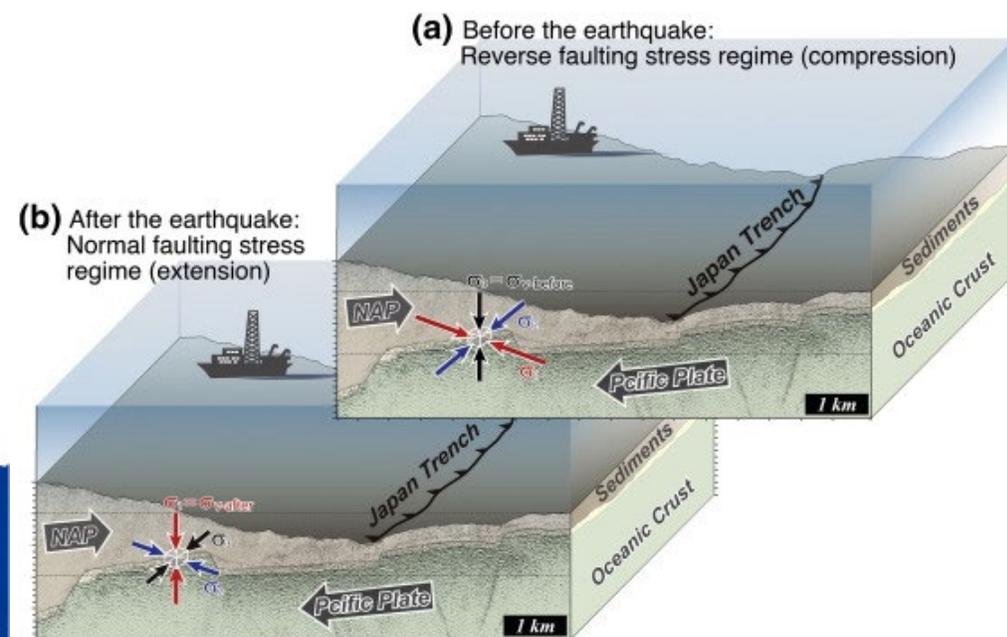
評価：大地震による強震動・津波評価に貢献

掘削試料等を用いた物質科学的成果

⑤南海トラフ・日本海溝近傍における力学的特性の理解



Lin et al. (2016)



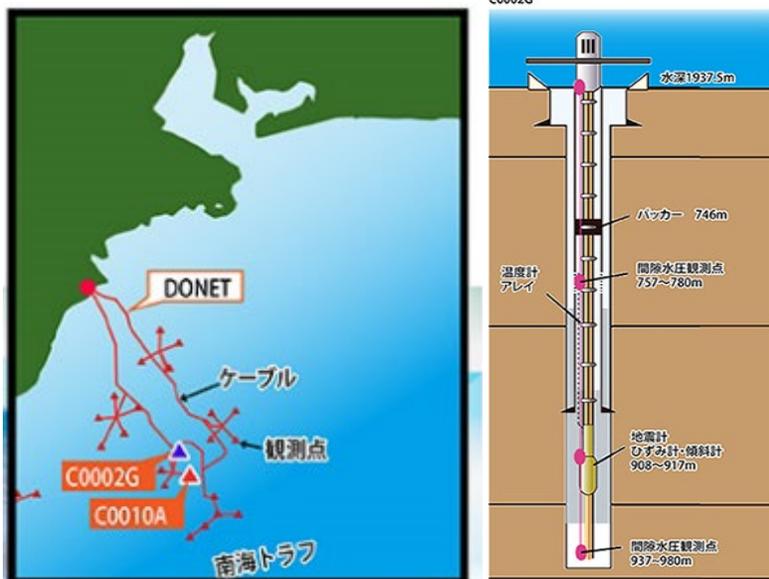
海溝軸近傍における力学的な特性と状態（岩石強度・摩擦特性・応力状態）の理解の深化

評価：地震発生予測への貢献

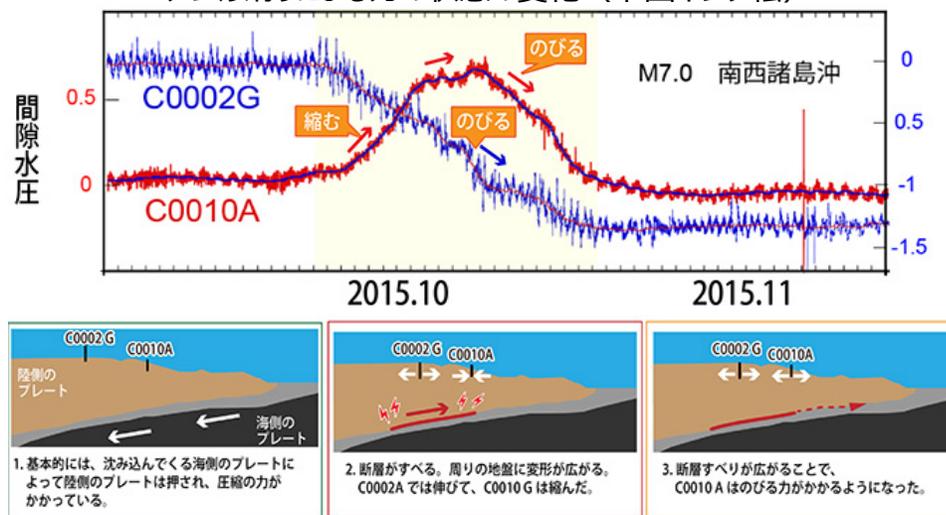
孔内観測による地球物理学的成果

①浅部スロー地震の発見

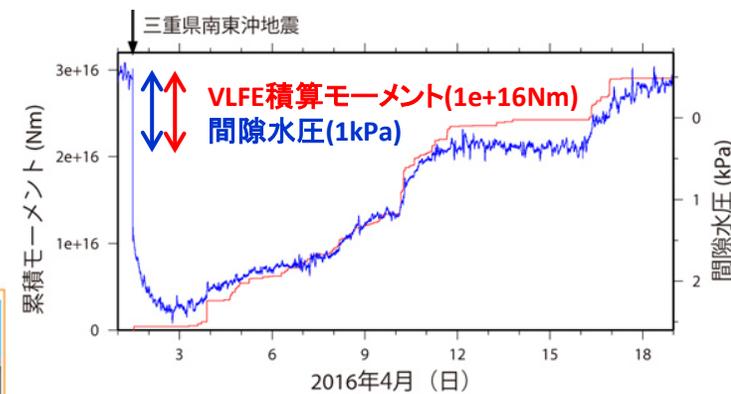
DONET及び長期孔内観測装置の位置 長期孔内観測装置の構成



2015年10月の間隙水圧変化（上図）と ゆっくり滑りによる力の状態の変化（下図ポンチ絵）



2016年4月の間隙水圧変化と超低周波地震（VLFE）の積算モーメント変化との比較



Araki et al. (2017, Science)

海洋研究開発機構 話題の研究謎解き解説「南海トラフでゆっくり滑りが繰り返し発生」
https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/quest/20170616/02.html

Nakano et al. (2018, Nature com.)

海洋研究開発機構 プレスリリース「南海トラフで発生する浅部超低周波地震と浅部スロー
 スリップは共通のプレート境界断層滑りによる現象」
https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20180314/?tw

- ・南海トラフ近傍における浅部スロースリップイベント（SSE）の発見と超低周波地震・微動活動との定量的な一致性
- ・一連のスロー地震が共通したプレート境界断層滑りによる現象
- ・深部スロー地震と同様のメカニズムであることの証明

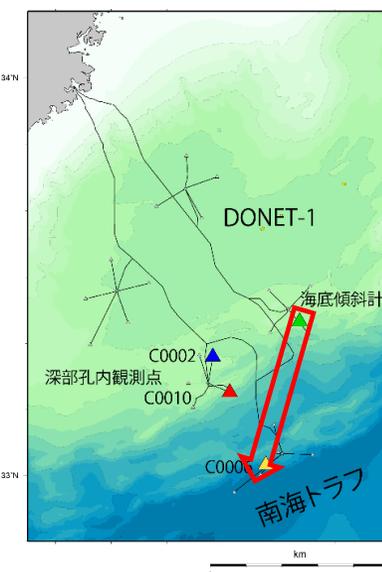
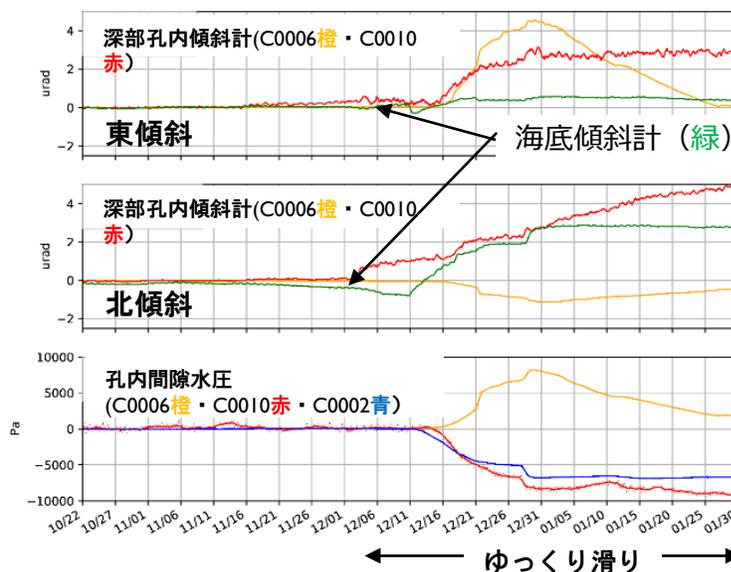
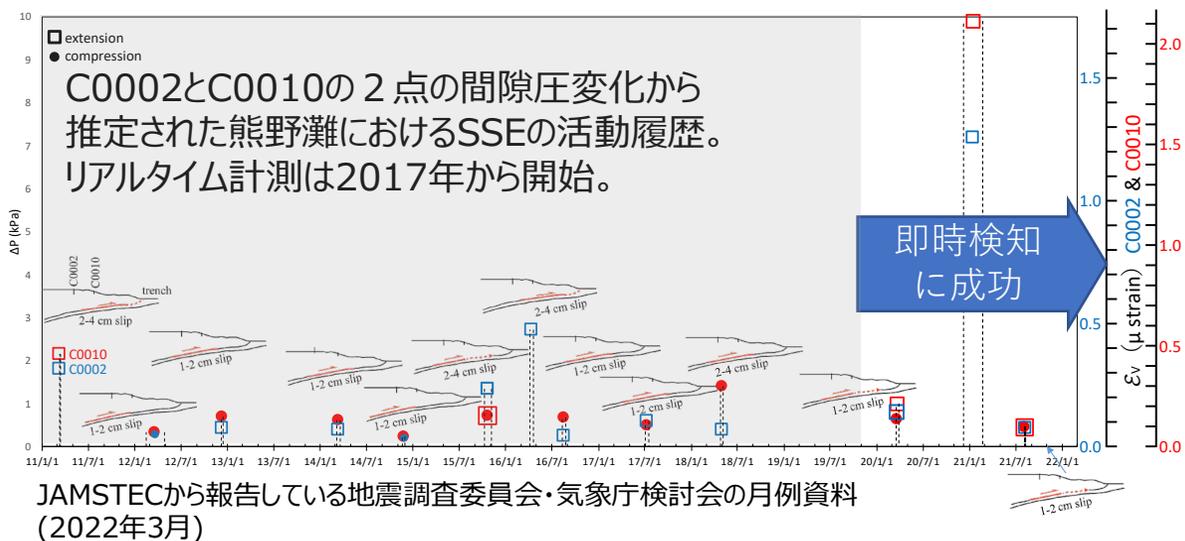
評価：プレート境界現象の理解、地震発生予測に貢献 62

孔内観測による地球物理学的成果

②浅部スロー地震の常時モニタリングと行政機関への定例報告

孔内観測で得られたSSE解析結果を気象庁等に定例報告

長期孔内観測装置以外の海底傾斜計でSSEを検出



2020年12月に大きな間隙圧変化が生じたが、これまでの超低周波地震の活動履歴（積算モーメント）から、2009年3月と同程度の規模であることから、当該イベントに対して客観的に評価することが出来た。

DONET-1 Bノードに接続された海底傾斜計が最初に変動をとらえた。次第にDノード、沖合のCノードの孔内に変動が拡大する様子がとらえられた。

傾斜変化の移動方向：ゆっくり滑り断層の拡大方向を示唆

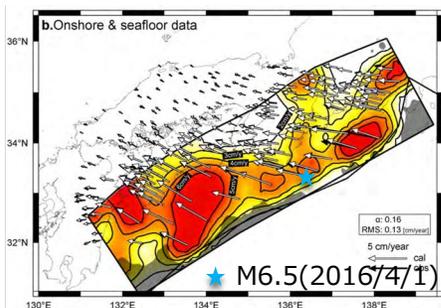
評価：政府委員会への定例報告に基づき、海域における地殻活動の現状評価に大きく貢献

海底傾斜計の多点設置によるモニタリング精度向上が期待

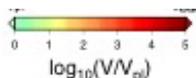
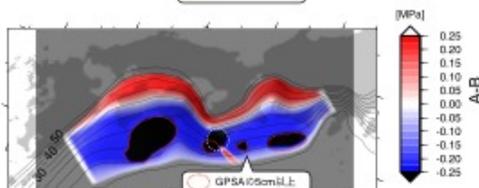
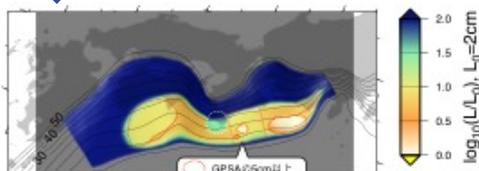
その他の関連した成果

①地震発生シミュレーションによる起こり得るシナリオ

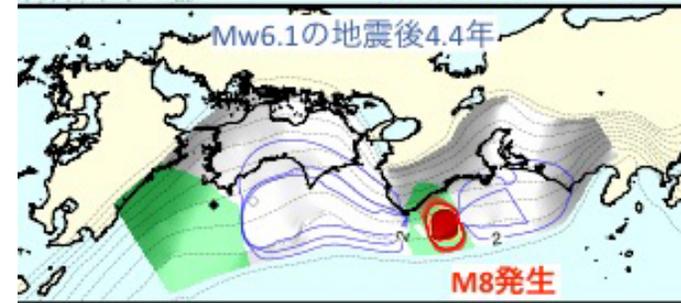
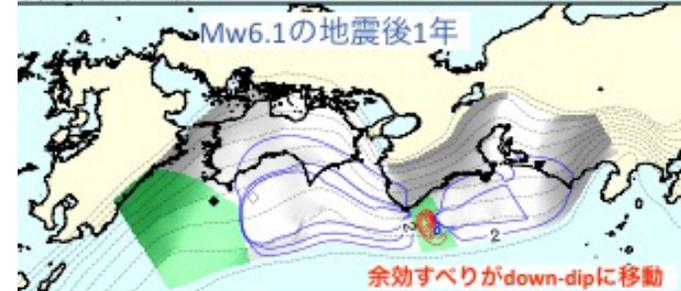
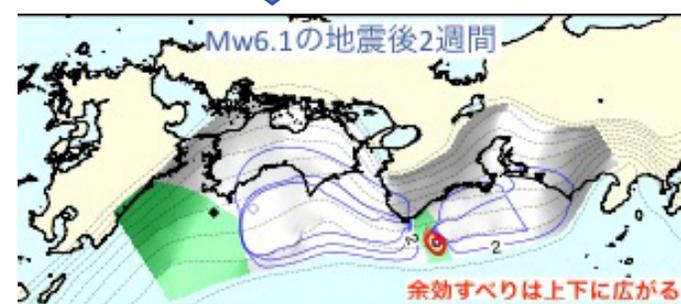
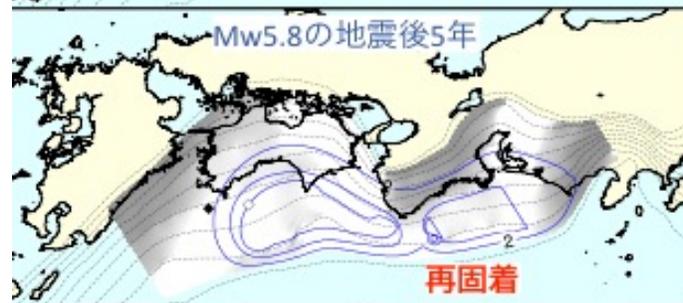
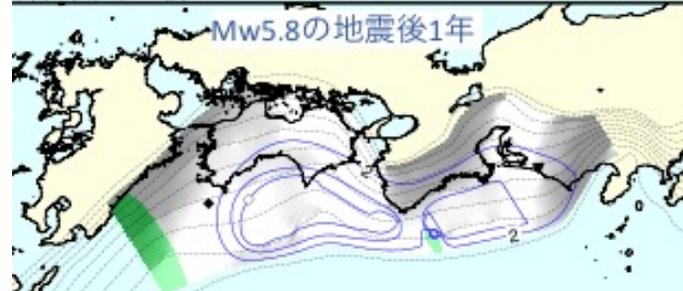
プレート境界すべり欠損分布



上の結果を考慮した摩擦パラメタ分布



同じパラメタのシミュレーションの別のタイミング



2016.4.1の際は
左側に近い現象

右側のようなシナリオ
もあり得る

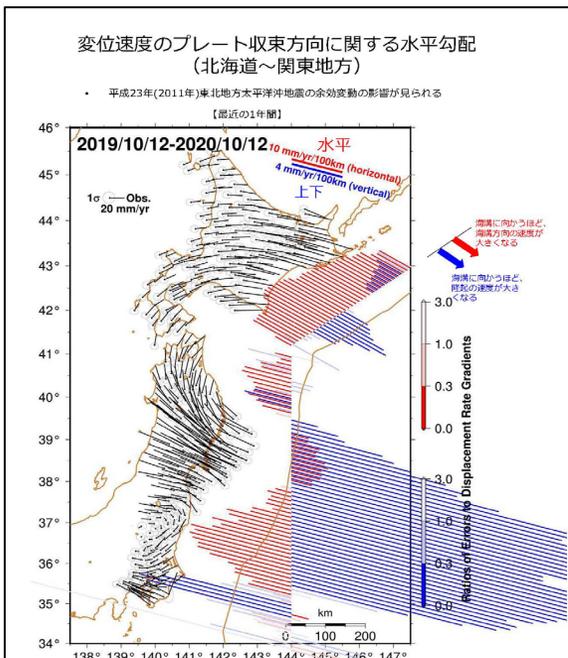
孔内観測等で精度
良いデータが得られ
れば、シナリオの確
度が向上

その他の関連した成果

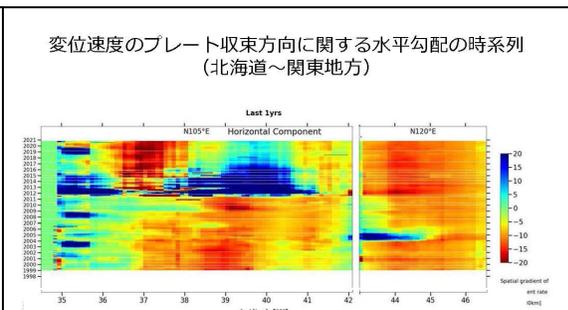
②プレート境界固着状態把握手法の開発

成果：変位速度場の空間勾配に基づいてプレート境界での固着状態の時空間変化を自動モニタリングするシステムを構築。現業官庁の国土地理院が運用開始。

成果：地震時・地震後の断層すべりによる地表変位と粘弾性緩和による地表変位を高精度に分離する手法を開発。地震後に増設された海底地殻変動観測点のデータ活用により地震時すべり分布の解像度向上が可能なことを実証。

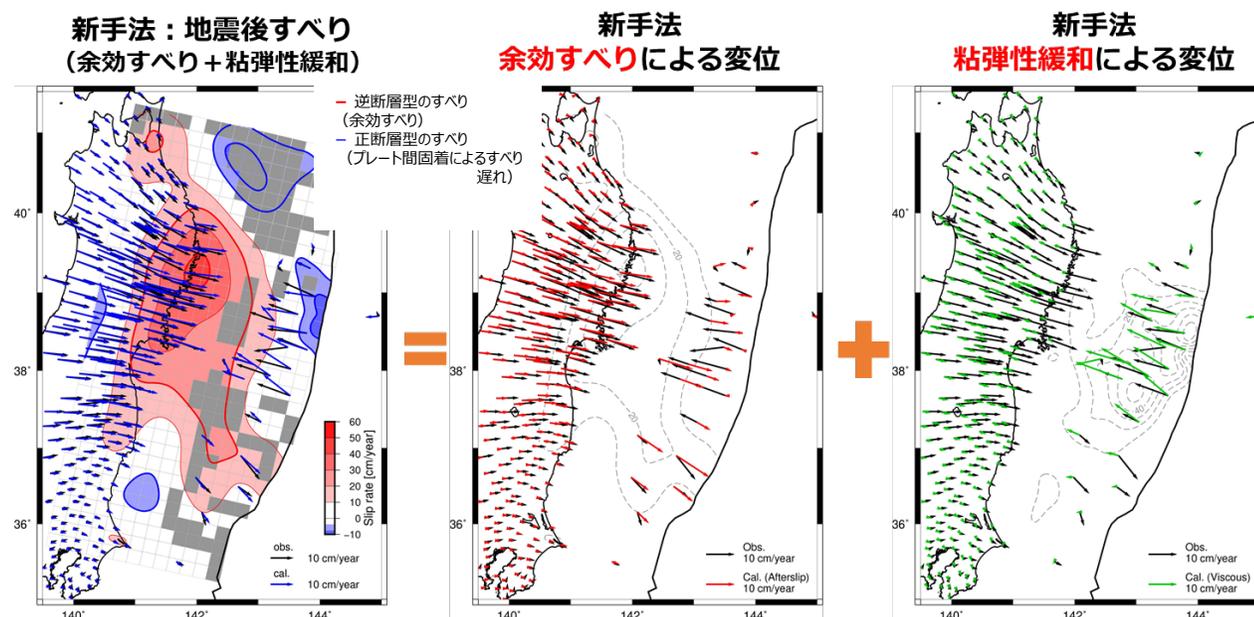


最近1年間の変位速度場の空間勾配分布。赤棒は水平、青棒は上下の変位速度の空間勾配値を示す



変位速度場の空間勾配値の時空間変化の水平成分。横軸房総沖から北海道沖の緯度（左が南）、縦軸は'99-'21年。色は空間勾配値（寒色系が正、暖色系が負）

プレート間固着が強ければ、水平・上下とも負の値となる。東北沖地震震源域では水平・上下両方とも正。プレート固着が地震前の状態に戻っていないことを示す



断層の余効すべりによる変位と地震時の断層すべりに起因するマンツルの粘弾性緩和による変位のより高精度な分離に成功 (Tomita et al., 2020)

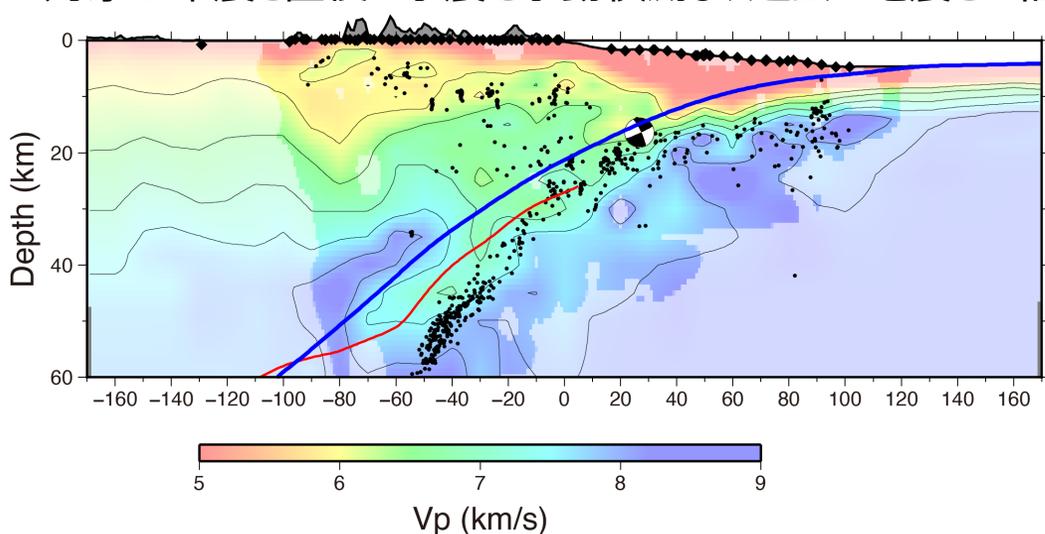
今後、国土地理院による運用・地震予知連絡会での定例報告に南海トラフも含まれるようになる。また、巨大地震後のデータに含まれる、余効すべりやプレート間の固着による変位と粘弾性緩和による変位とを分離して、プレート間の固着・すべり状態の現状把握を精確に行うことができるようになる

その他の関連した成果

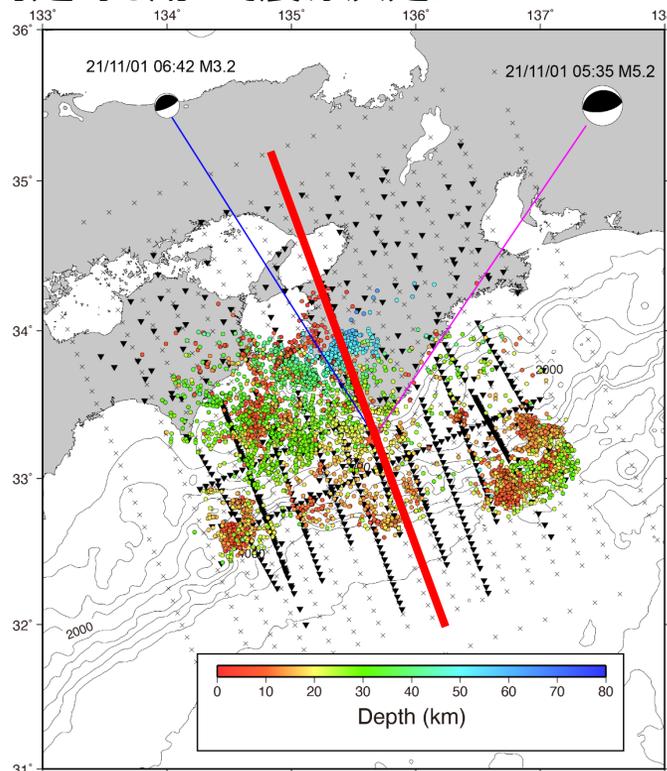
③3次元地震波速度構造の活用

3次元構造を活用した2021年11月1日 和歌山県南方沖地震の震源決定により、プレート境界地震であることが判明

- DONETデータを活用した3次元構造 (Yamamoto et al. 2021JpGU)
- 対象：本震と直後の余震を手動検出し、過去の地震との相対走時も用いて震源決定。



右図赤線におけるP波速度断面。P波極性によるメカニズム解（断面図はM5.2のみ表示）●は2016年～2019年のDONET観測地震（同時に再決定を実施）。青線はNakanishi et al. (2018)のプレート境界、赤線はShiomi et al. (2006)によるスラブモホ面。



- プレート構造モデル (Nakanishi et al. 2018)は、防災科研にも共有されている
- 両機関における速報的な震源決定がプレート境界面上に求まった
- 気象庁検討会・地震調査委員会での地震評価の判断根拠として活用された。

孔内観測等で精度良いデータが得られれば、3次元構造及び震源決定精度が向上

これまでに達成できていないこと

達成出来た場合に期待されること

南海トラフでは
プレート境界に
達していない

プレート境界付近の
掘削コア採取

地震発生帯の物質同定
とその摩擦特性の解明

・大地震発生時の破壊過程の推定に
基づく強震動事前予測

プレート境界周辺の
掘削同時検層等

プレート境界断層近傍
の応力状態の解明

・地震動予測地図の高精度化
・地震発生可能性の長期評価
・地震発生シミュレーションの高精度化

日本海溝では
長期孔内観測
が行われていな
い

プレート境界近傍に
おける長期孔内観測
(地震・ひずみ・温
度・間隙水圧など)

地震発生帯近傍におけ
るリアルタイムモニタリング
による現状把握

・現状評価精度の向上
・データ同化による将来予測
・臨時情報発出への貢献
・大地震直前過程の検出の可能性
・緊急地震速報・津波速報の迅速化
への貢献

海洋科学掘削に対する今後の期待

①南海トラフ浅部スロー地震広域リアルタイム観測

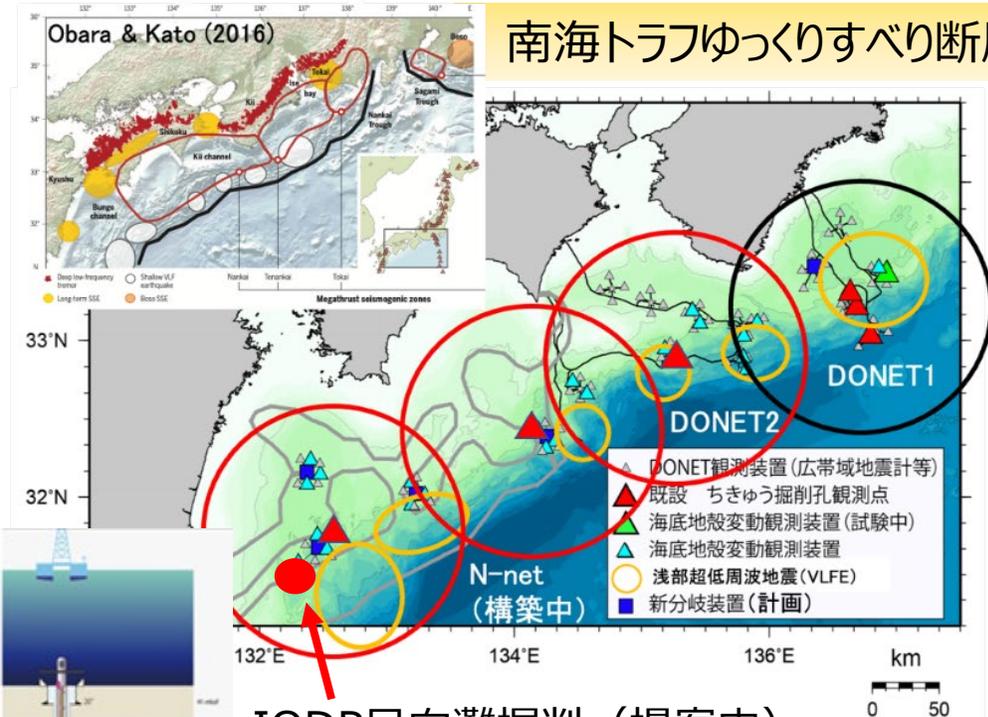
南海トラフゆっくりすべり断層観測監視計画（R4年度～R7年度）【防災科学技術研究所との連携事業】

R7年度までにDONET2及びN-net敷設域に3観測点設置

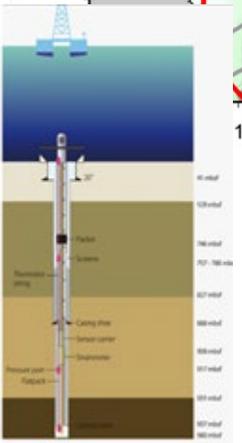
【紀伊半島東方沖（熊野灘）での実績】

- ・2018年までに3基の海底下観測監視装置を熊野灘に設置。
- ・世界で初めて海底下の浅部ゆっくりすべりの状況把握に成功。
- ・断層のゆっくりすべり運動がリアルタイムに観測可能。
- ・気象庁「南海トラフ沿いの地震に関する評価検討会」へ提供。
- ・沿岸自治体等が南海トラフ地震臨時情報を発信するかどうかの検討に際して重要な情報を提供。
- ・半割れ地震後の地震活動に関する情報発信はその後の復旧・復興計画の意思決定、被害軽減に活用。

【本計画】広域かつ面的に海底下の動き（プレート間固着・すべりの状況やスロースリップ現象）をリアルタイムで観測監視を行い、沿岸域自治体へ情報提供を行う。



IODP日向灘掘削（提案中）
（物質学的観点からスロー地震を探る）



Real-time borehole observation



中央防災会議「防災基本計画」（令和3年5月）に基づく整備

海洋科学掘削に対する今後の期待

②地震発生メカニズムの解明とその貢献

プレート内地震

【今後の計画】

・現在中米コスタリカ沖と北西太平洋域の2 か所において、アウターライズ掘削にかかる予備掘削提案が国際深海科学掘削（IODP）に申請中

【期待する点】

・後者はアウターライズ地震が繰り返し起きていることが知られている東北沖
・掘削に基づくプレート屈曲断層の物質・物理特性の解明により、アウターライズ地震のメカニズムの解明、及びその成果を活用した地震本部が公表する「地震発生可能性の長期評価」「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ）」への貢献

プレート境界地震

【今後の計画】

・平成30年度に当初目的未達成のまま完了した南海トラフ地震発生帯掘削計画による海溝型地震のプレート境界断層の掘削
・IODPにおいて本提案書が承認された日本海溝掘削（JTRACK）による東北地方太平洋沖地震時の大きく滑った領域及び小さな滑りが生じた領域の掘削

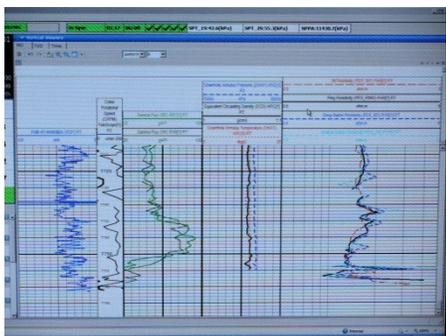
【期待する点】

これらの実施により、地震発生帯で何が起きているか、何が起こったかを把握し、海溝型地震の地震・津波発生メカニズムの解明に貢献
・これら成果も地震本部が公表する「地震発生可能性の長期評価」「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ）」への貢献

海洋科学掘削に対する今後の期待

③ 巨大地震発生直後の緊急掘削

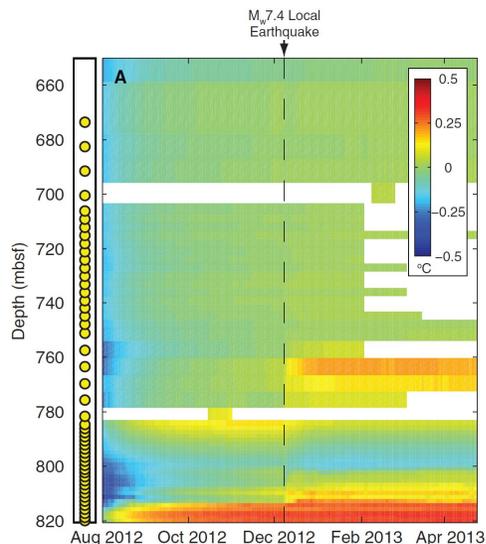
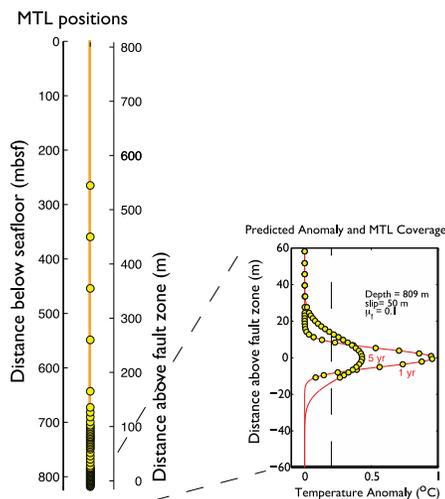
1. 掘削同時検層 (LWD)



2. コア採取



3. 温度計設置



(Fulton et al., *Science*, 2013)

- 震源断層周辺の地質試料の採取、調査
- 断層運動で生じた残留摩擦熱の直接計測

- 巨大地震の摩擦エネルギー、発生メカニズム、震源過程の解明
- 断層物質や流体の影響の解明、巨大津波生成機構の解明

- 震源断層付近での長期孔内観測装置の設置

- 余効変動のin-situ観測
- 地震発生後の活動推移予測
- 巨大地震サイクル全過程の理解

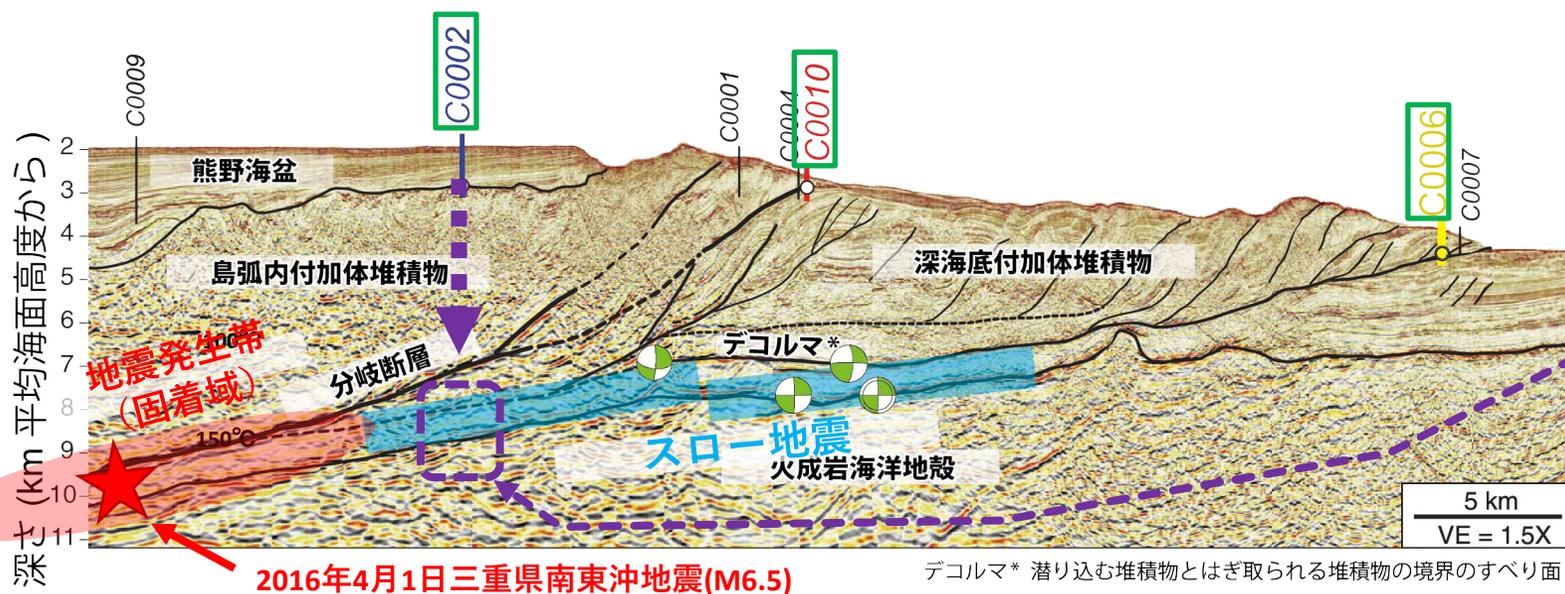
世界で発生する次の巨大地震に備える

まとめ

①紀伊半島南東沖南海トラフにおける掘削科学成果の社会的貢献

- 長期孔内観測装置設置(DONET接続)によってゆっくりすべりを検出
- プレート境界断層上盤(ひずみ蓄積域)での応力状態の解明
- 掘削コアから地震性すべりが海溝近傍まで達していたことを確認

- リアルタイムモニタリング結果の政府委員会への報告で、現状評価や地震発生リスク評価の精度向上に貢献
- 地震予測シミュレーションの初期条件の絞り込みに伴う地震発生長期評価の精度向上に貢献
- 中央防災会議での南海地震想定規模の改定や強震動・津波ハザード評価の精度向上に貢献



- 浅部プレート境界の摩擦特性・応力場の解明
- **地震性高速すべり**と**スロー地震**が同じ断層で発生していたことを確認
- **地震予測モデルの幾何学的拘束条件**

- 【未達成】
- 地震発生帯の物質同定とその摩擦特性
 - プレート境界断層近傍の応力状態
 - 地震発生帯近傍における長期孔内観測(地震・ひずみ・温度・間隙水圧)

海域のひずみ計も気象庁「南海トラフ地震に関連する情報」に活用されることで、南海トラフ臨時情報に対する多大な貢献が期待

まとめ

②海洋科学掘削研究分野が果たす防災・減災への貢献

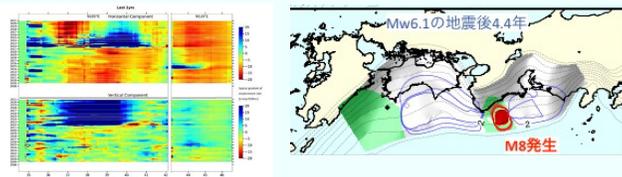
掘削コア試料解析
掘削同時検層
海底堆積物掘削

- 断層の構造や組成の解明
- 断層物質の摩擦溶融、摩擦特性、水理特性の解明
- 過去の大規模地震や火山噴火履歴の解明

活用

地震・火山現象の解明・予測研究

- 地震発生メカニズムと発生場のさらなる理解
- 地震発生モデルの高度化
- 地震発生予測シミュレーション
- プレート境界固着状態の推移予測
- ハザード事前評価、地震発生長期予測、地震津波即時予測の手法の高度化



活用

長期孔内観測 【ひずみ、地震、水圧等】

- プレート境界の固着状態のリアルタイムモニタリング
- スロー地震の時空間発展の即時推定
- 周辺の海域地震・地殻変動観測網と併せて高精度化

報告

様々な知見を防災・減災対応に活用、リテラシーの向上

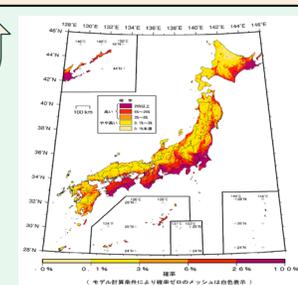
防災基本計画、行政機関等における防災・減災施策

ハザード事前評価 【内閣府、文科省】

地震が発生した場合の地震動や津波波高などのハザードを予め評価



地震動予測地図 【文科省】



地震発生長期予測 【文科省】

地震発生前に、切迫度などを長期的（数10年スケール）で評価



地震津波即時予測 【気象庁】

地震発生直後に、地震動や津波波高などを即時的に予測し伝達（緊急地震速報など）

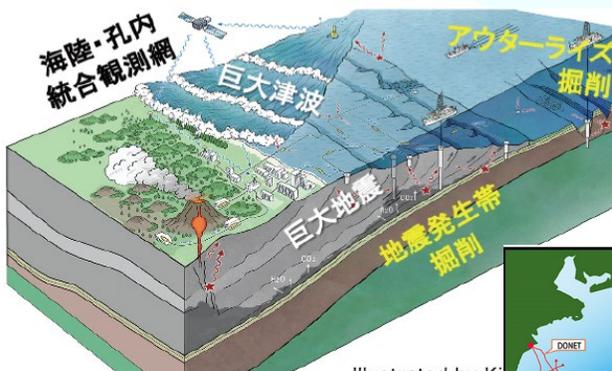
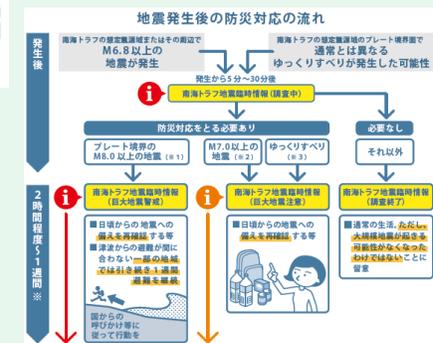
南海トラフ地震臨時情報 【気象庁・内閣府】

相対的に地震発生の可能性が高まった場合に発出

地殻活動現状評価 【気象庁・文科省・国土地理院】

貢献

安心・安全で災害に強い社会の実現



J-DESC「掘削科学2050サイエンスプラットフォームワーク」より