

日時：2022年1月24日（月）15時～18時

場所：オンライン

資料2

## 海洋科学技術分野における 防災・減災への貢献に必要な 取り組みについて

小原一成（東京大学地震研究所）

## 論点

- ・海洋科学技術分野として防災・減災分野へどのような貢献が考えられるか。
- ・防災・減災分野に貢献するために現状不足している研究開発・研究基盤・データは何か。
- ・それらのデータをどの程度の時空間分解能で取得していくべきか。
- ・効果的・効率的なデータ取得に向けて必要な研究基盤、強化すべき取組にはどのようなものがあるか。

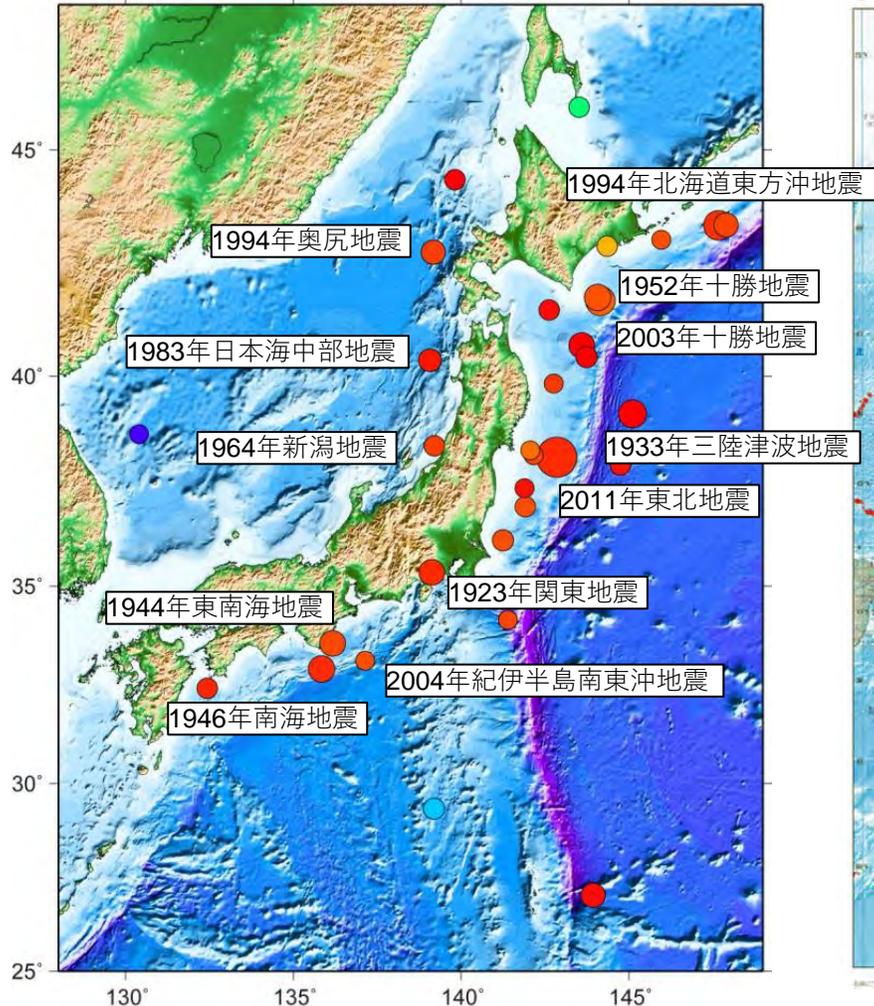
## 概要

1. 地震防災の観点における「海洋」
2. 地震防災における海域観測の理学的重要性
3. 海洋における調査観測・研究の現状と課題
4. 今後に向けた期待

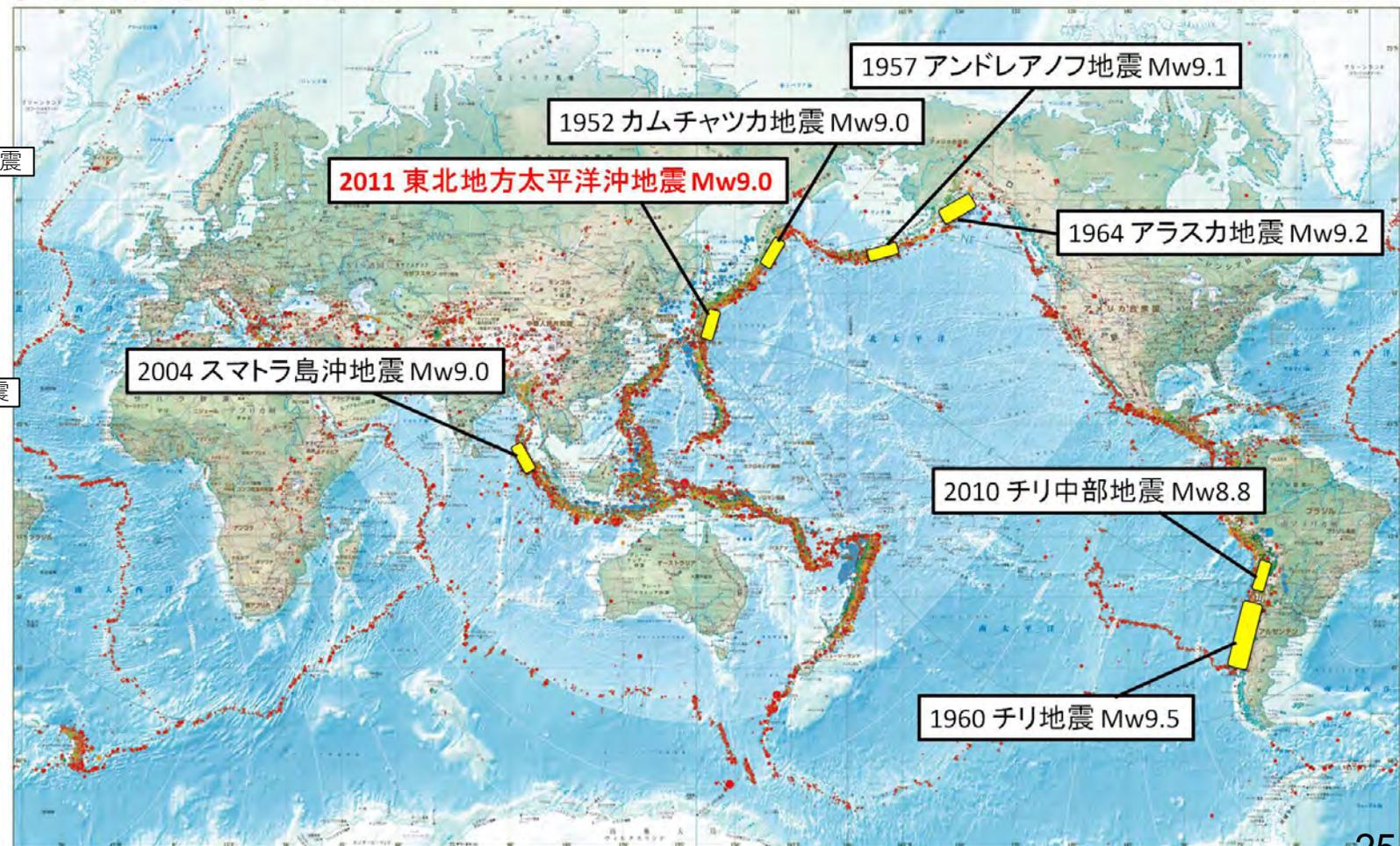
# 1. 地震防災の観点における「海洋」

「海洋」 = プレート沈み込みに伴う巨大地震発生の場合

日本周辺の大地震 (1923年以降、M7.4以上)



世界の震源分布 (2010年版)



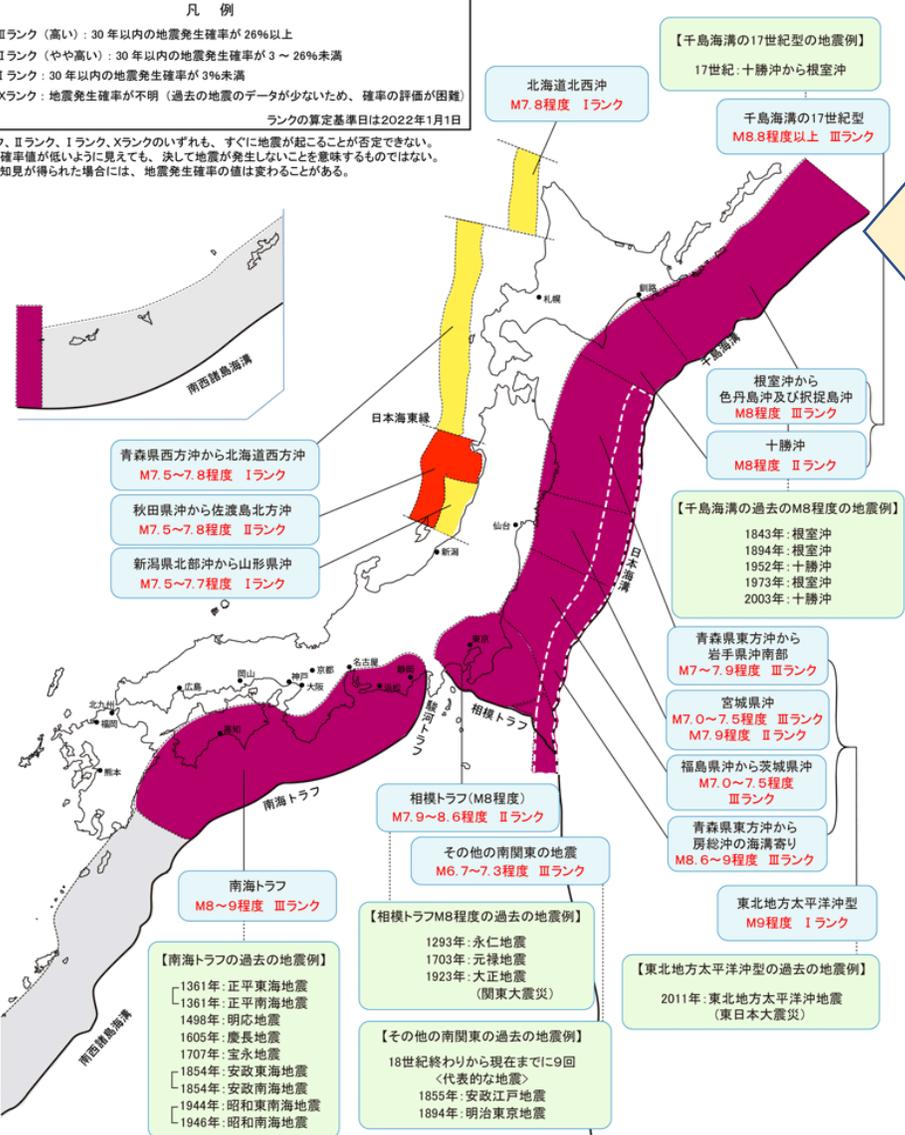
東京大学 地震研究所

# 1. 地震防災の観点における「海洋」

2022年1月13日公表

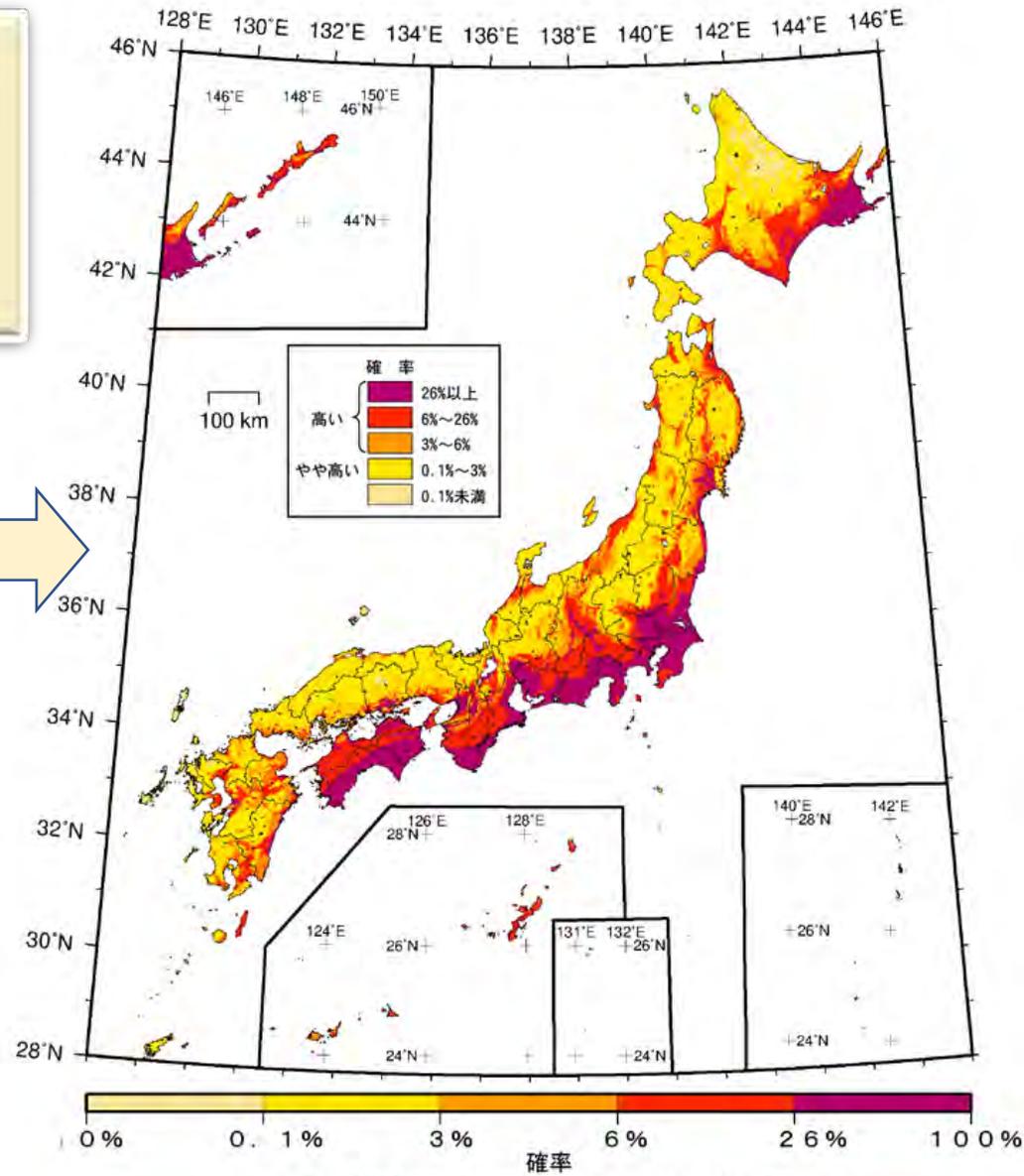
- 凡例
- Ⅲランク (高い): 30年以内の地震発生確率が26%以上
  - Ⅱランク (やや高い): 30年以内の地震発生確率が3~26%未満
  - Ⅰランク: 30年以内の地震発生確率が3%未満
  - Xランク: 地震発生確率が不明 (過去の地震のデータが少ないため、確率の評価が困難)
- ランクの算定基準日は2022年1月1日

Ⅲランク、Ⅱランク、Ⅰランク、Xランクのいずれも、すぐに地震が起こることが否定できない。また、確率値が低いように見えても、決して地震が発生しないことを意味するものではない。新たな知見が得られた場合には、地震発生確率の値は変わることがある。



主な海溝型地震の評価結果

全国地震動予測地図 2020年版



○ ランク分けに関わらず、日本ではどの場所においても、地震による強い揺れに見舞われるおそれがあります。

政府地震調査研究推進本部のホームページ  
[https://www.jishin.go.jp/evaluation/evaluation\\_summary/#kaiko\\_rank](https://www.jishin.go.jp/evaluation/evaluation_summary/#kaiko_rank)

# 1. 地震防災の観点における「海洋」

## 南海トラフ地震防災対策推進地域の指定

### 指定基準の概要

- 震度6弱以上の地域
- 津波高3m以上で海岸堤防が低い地域
- 防災体制の確保、過去の被災履歴への配慮



## 南海トラフ地震対策

## 南海トラフ地震津波避難対策特別強化地域の指定

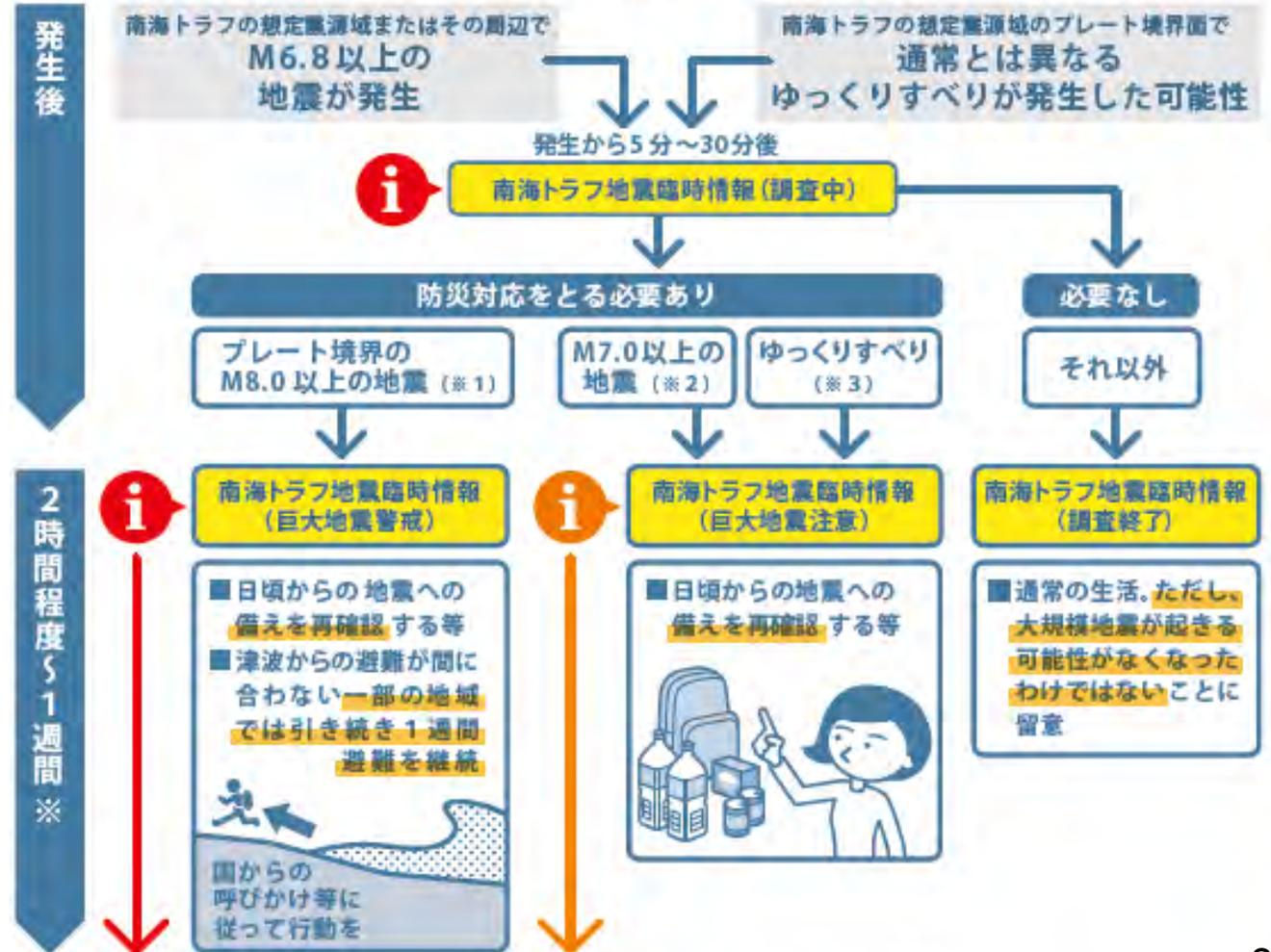
### 指定基準の概要

- 津波により30cm以上の浸水が地震発生から30分以内に生じる地域
- 特別強化地域の候補市町村に挟まれた沿岸市町村
- 同一府県内の津波避難対策の一体性の確保
- ※浸水深、浸水面積等の地域の実情を踏まえ、津波避難の困難性を考慮



## 南海トラフ地震臨時情報

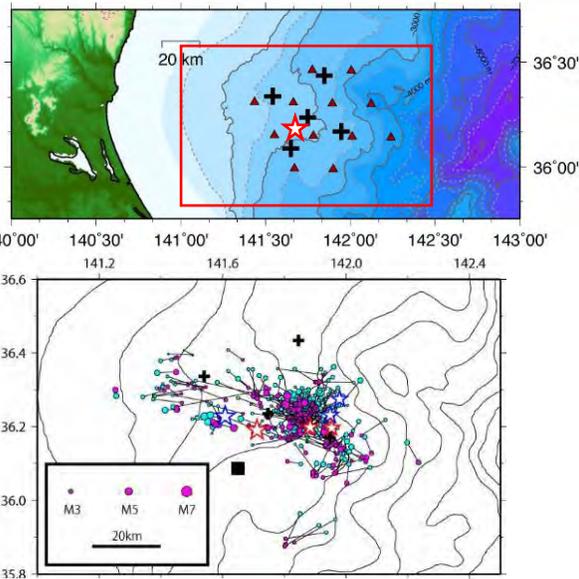
### 地震発生後の防災対応の流れ



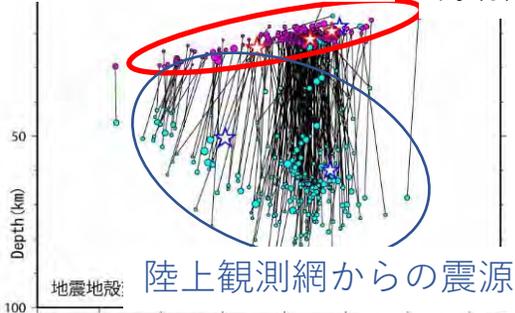
# 1. 地震防災の観点における「海洋」

海底観測の必要性 ← 現象理解のため現象近傍での観測が重要

## 正確な震源位置

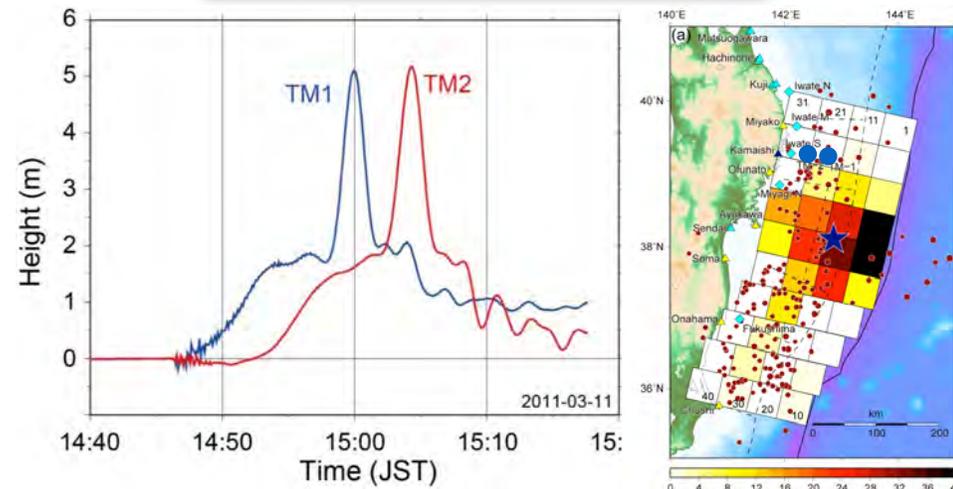


海底地震計による震源



陸上観測網からの震源

## 正確な津波波高

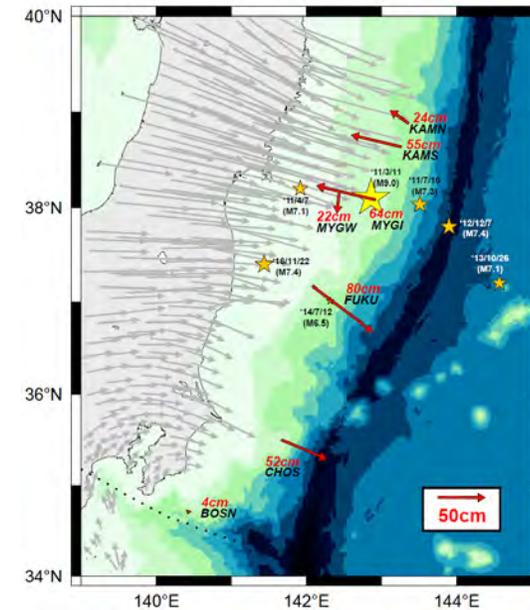


Fujii et al., 2011

海底津波計により、巨大な津波をリアルタイムで把握。また、海溝付近の大きな滑りの推定が可能。

海底地震計により、本震余震がプレート境界に沿って発生していることを実証。

## 正確な地殻変動



第218回地震予知連会海上保安庁海洋情報部資料より

- 北部海底では、西向きの変動  
→本震時の動きと逆向き
- 陸上の変動はすべて同じ向き  
→本震時の動きと同方向

海底の音響GNSSで観測された宮城県沖の西向きの変動は、プレート境界の滑りではなく、マンツルの粘性で説明。

## 2. 地震防災における海域観測の理学的重要性



種類

内容

必要な情報

地震発生予測

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

即時予測

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）

ハザード評価

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

正確な震源位置

正確な津波波高

正確な地殻変動

## 2. 地震防災における海域観測の理学的重要性



種類

内容

必要な調査観測

地震発生予測

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

- ・地震活動や地殻変動の現状把握
- ・プレート間固着の時空間変化
- ・過去の地震や津波発生履歴（歴史資料、地質、津波堆積物）

即時予測

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）

- ・海陸のリアルタイム地震観測網
- ・海域のリアルタイム津波観測網
- ・即時データ処理伝達技術
- ・即時予測情報を理解し活用するためのリテラシー向上

ハザード評価

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

- ・強震動や津波生成域の評価
- ・地震破壊過程の評価
- ・3次元地下構造の把握
- ・地盤構造の把握

# 3. 海洋における調査観測・研究の現状と課題

## 地震・津波観測



- ● **自己浮上式海底地震計(オフライン)**
  - 1980年頃に実用化された。2000年ごろから、1年間程度連続観測可能な長期観測型が開発され、多種のセンサーが利用可能。
- ● **ケーブル式地震・津波計(リアルタイム)**
  - 1970年後半に実用化され、2005年ごろから高度化及び低コスト化が進み、急速に進展。地震・津波だけでなく、他項目の観測も可能。
- **係留ブイシステム(リアルタイム)**
  - 長期間にわたるブイの確保が難しく、現在も技術開発中。

## 海底地殻変動観測



- ● **GNSS音響結合方式地殻変動観測システム(準リアルタイム)**
  - 1990年代から開発が始まり、2000年代後半には、実用化。
- **自己浮上式海底水圧計(海底上下変動観測)(オフライン)**
  - 高精度水圧計の導入により、2000年代後半から観測に使用。
- ● **歪・傾斜・基線長観測**
  - 現在も開発が行われている。

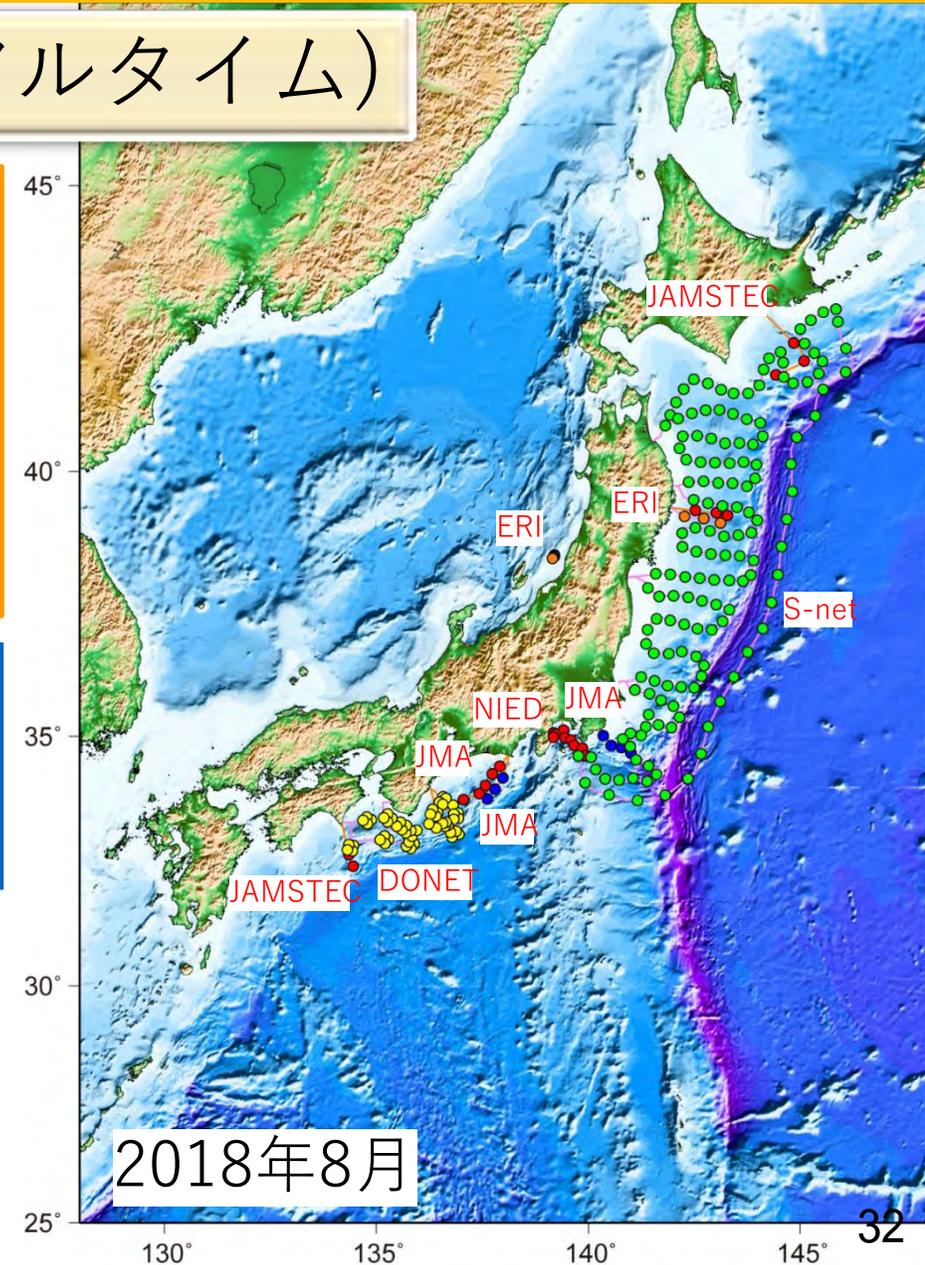
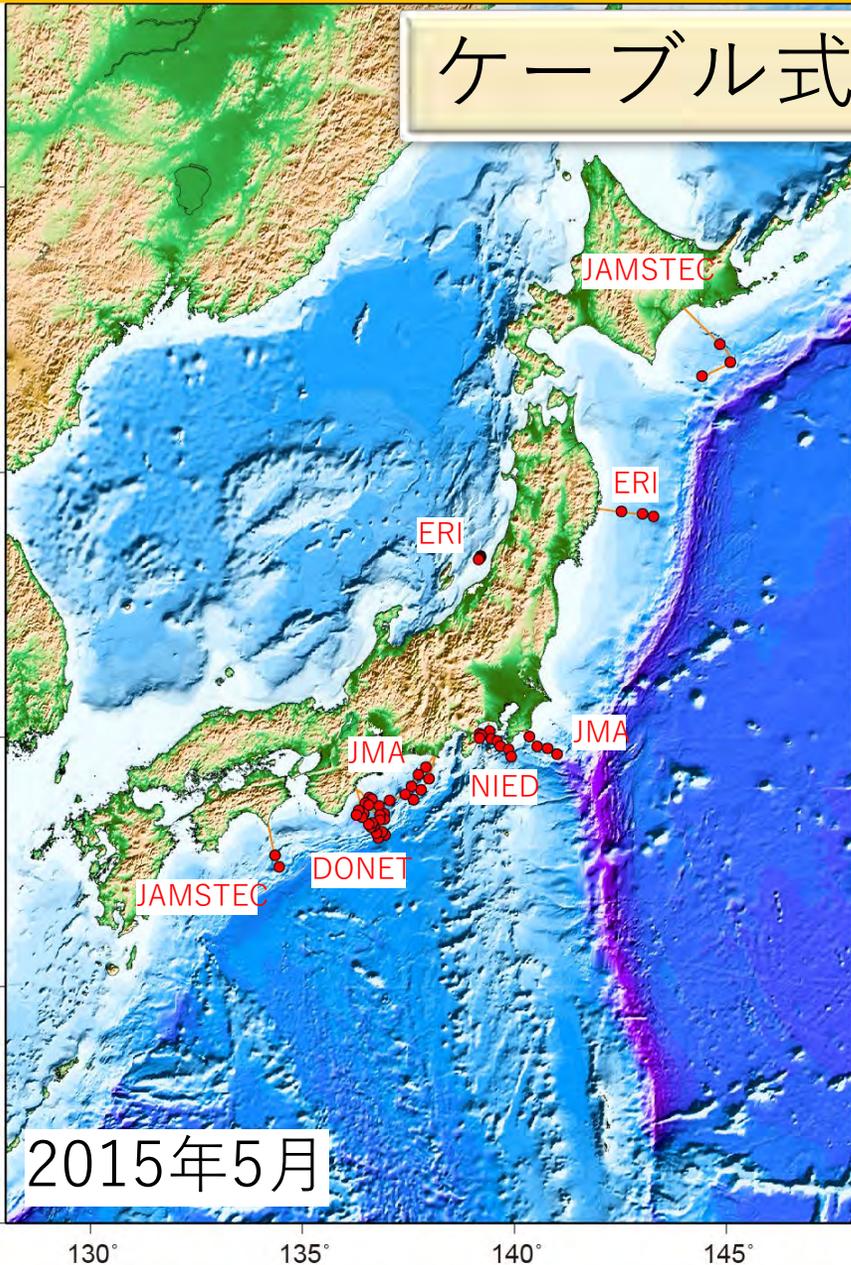
# 3. 海洋における調査観測・研究の現状と課題

## ケーブル式地震・津波計(リアルタイム)

### 観測の目的

- 地震活動の現状評価
- 地震発生予測の基礎データ
- 地震発生メカニズム・発生予測に関する研究
- 地震・津波発生 of 即時的把握と即時予測

2010年代後半に点数が増加(現在、地震津波観測点200点以上)



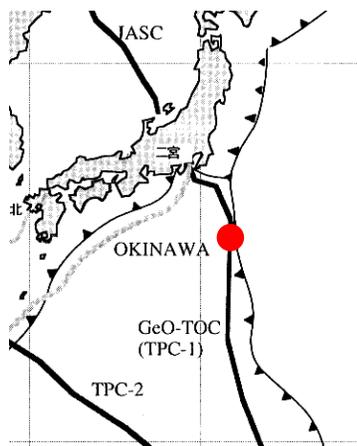
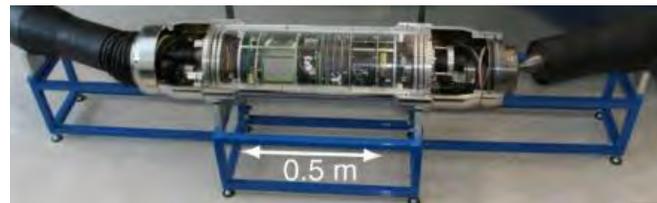
# 3. 海洋における調査観測・研究の現状と課題

## ケーブル式観測システムの変遷

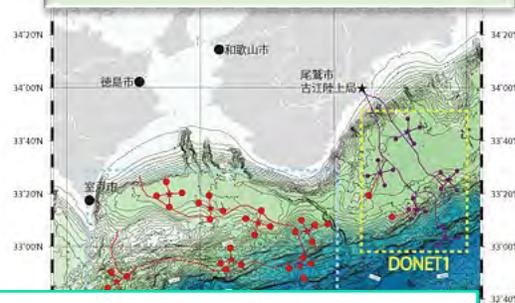
- 電信電話技術によるデータ伝送・部品レベルでの高信頼性・同軸銅線（アナログ伝送）
  - 1980年代の通信海底ケーブル技術を全面的に利用
  - 気象庁房総沖・御前崎沖、TPC1

- 電信電話技術によるデータ伝送・部品レベルでの高信頼性・光ファイバー（デジタル伝送）
  - 光ファイバー利用による容量拡大・通信安定性
  - 1993年地震研伊豆半島沖ケーブルが最初
  - 現在主流の海底ケーブル観測システム
  - DONETやS-netによる大規模化

- インターネット技術によるデータ伝送・冗長構成による高信頼性確保・光ファイバー（IP伝送）
  - コストおよび設置後の状況変化を考慮し、より大規模展開をめざしたソフトウェアベースのシステム
  - 小型化・低消費電力化のために、最新半導体技術を用いるが、信頼性は下げない
  - 地震研究所で開発し、2010年に新潟県粟島沖に1号機を設置、2015年9月に2号機を三陸沖設置

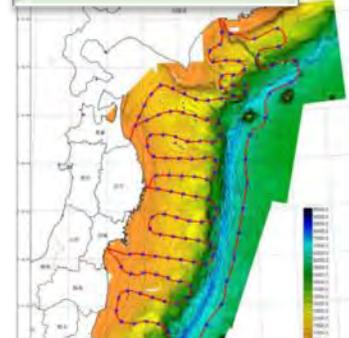


DONET by JAMSTEC/NIED

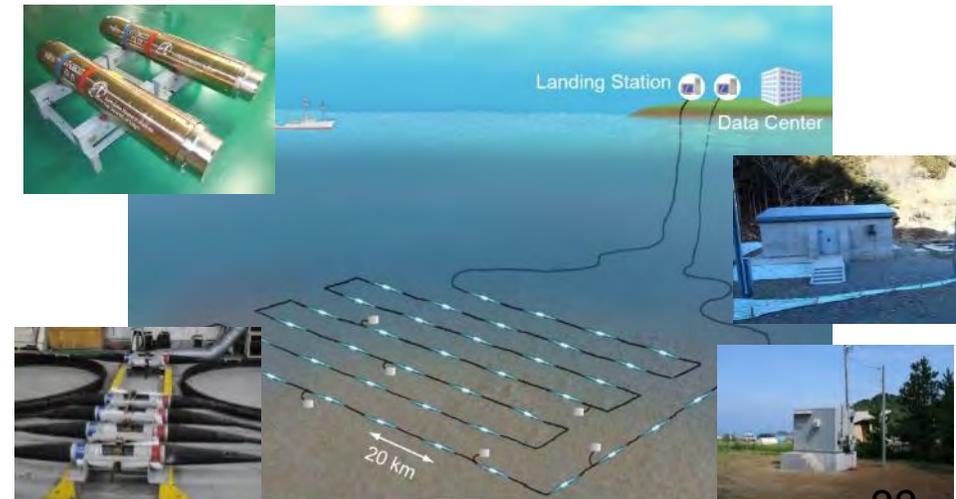


- 基幹ケーブル伝送システムは第2世代
- ノードによる拡張性
- ROVによるケーブル展開

S-net by NIED



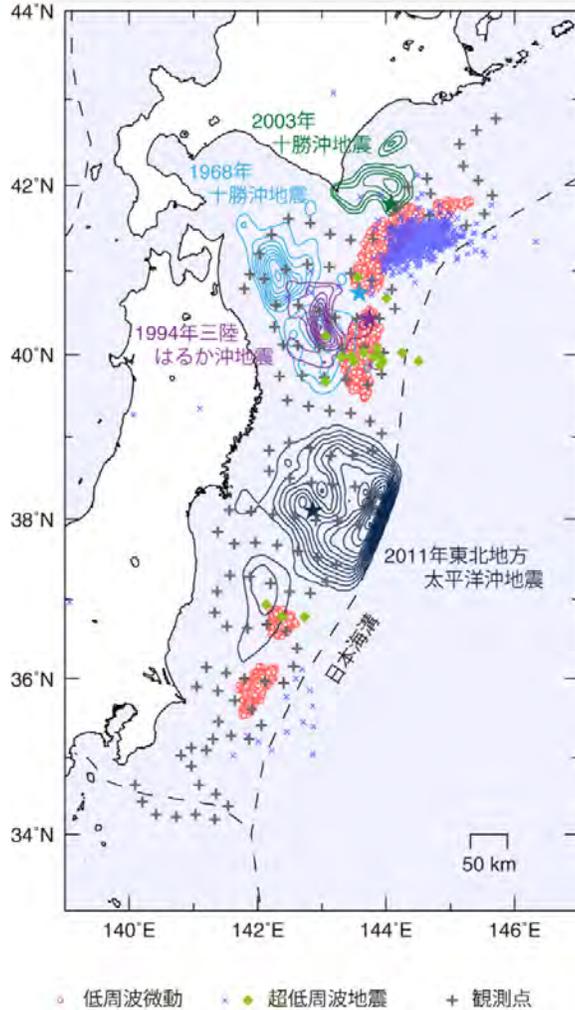
- 第2世代システム
- インライン式による広域展開



# 3. 海洋における調査観測・研究の現状と課題

## ケーブル式海底地震・津波計観測システムによる研究成果

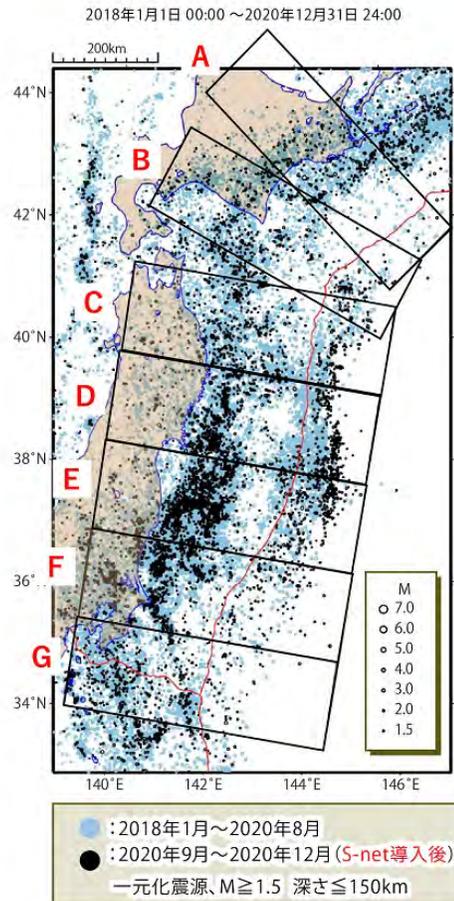
新たなスロー地震の検出



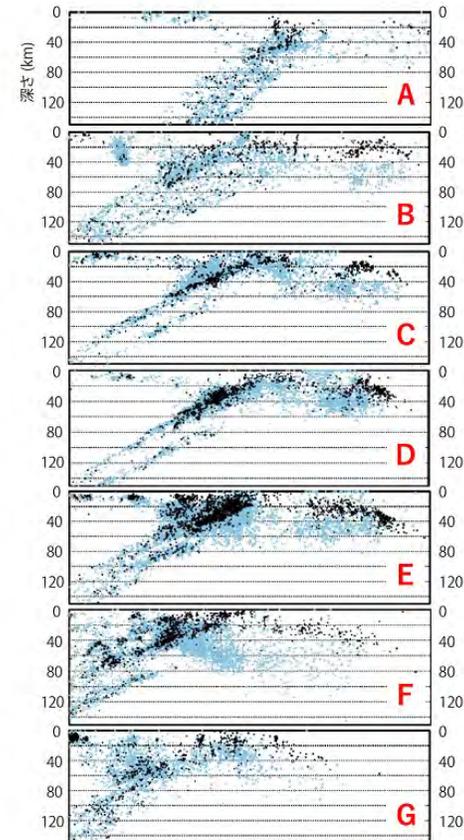
(Tanaka et al., 2019)

海域における地震の正確な位置決定

S-net導入前後の震源分布の比較



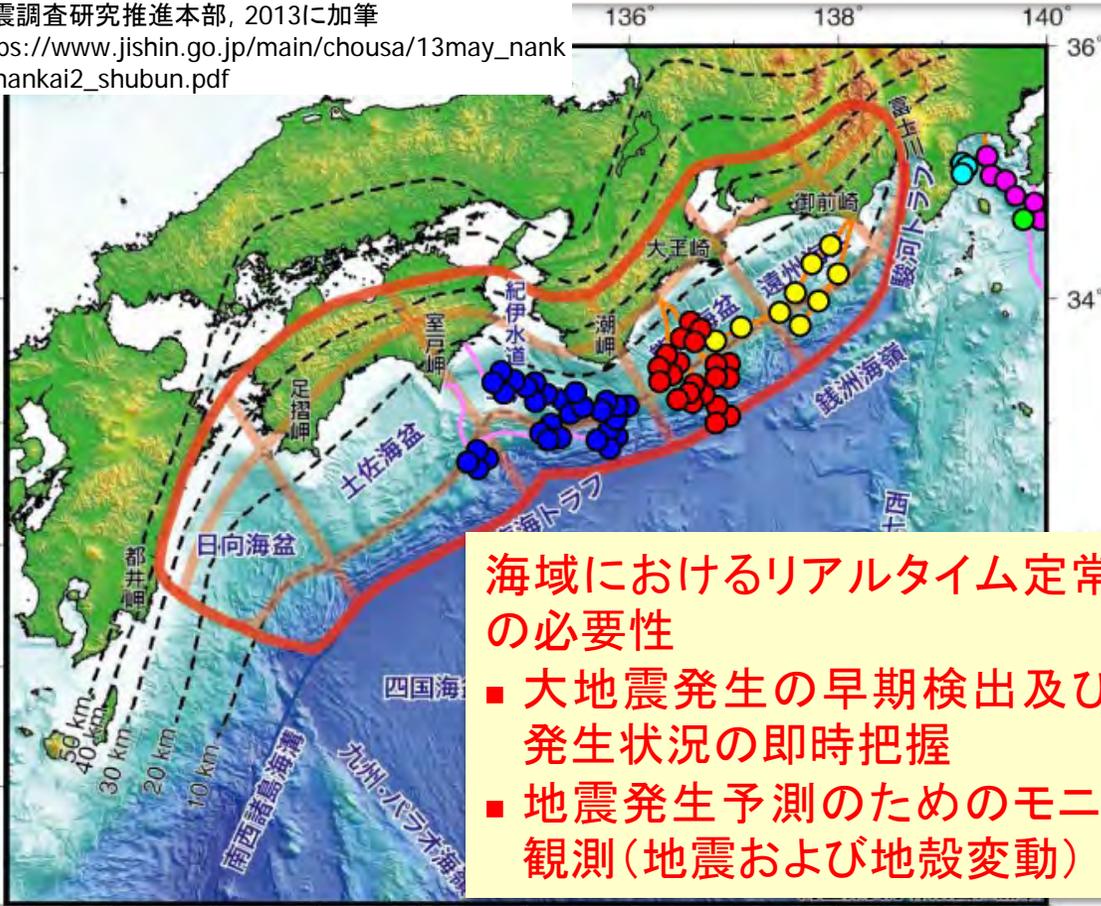
各矩形領域の断面図(長辺投影)



# 3. 海洋における調査観測・研究の現状と課題

## N-net 南海トラフ西部域におけるケーブルシステム

地震調査研究推進本部, 2013に加筆  
[https://www.jishin.go.jp/main/chousa/13may\\_nankai/nankai2\\_shubun.pdf](https://www.jishin.go.jp/main/chousa/13may_nankai/nankai2_shubun.pdf)



### 海域におけるリアルタイム定常観測網の必要性

- 大地震発生の早期検出及び津波の発生状況の即時把握
- 地震発生予測のためのモニタリング観測(地震および地殻変動)



南海トラフ海底地震津波観測網(N-net)イメージ図

地震計、水圧計等を組み込んだマルチセンサーを備えたリアルタイム観測可能な高密度海域ネットワークシステムの開発・製作

- 防災の観点から広範囲かつ空間的に均等
- ケーブル設置後のセンサー追加や観測パラメータ変更に対応

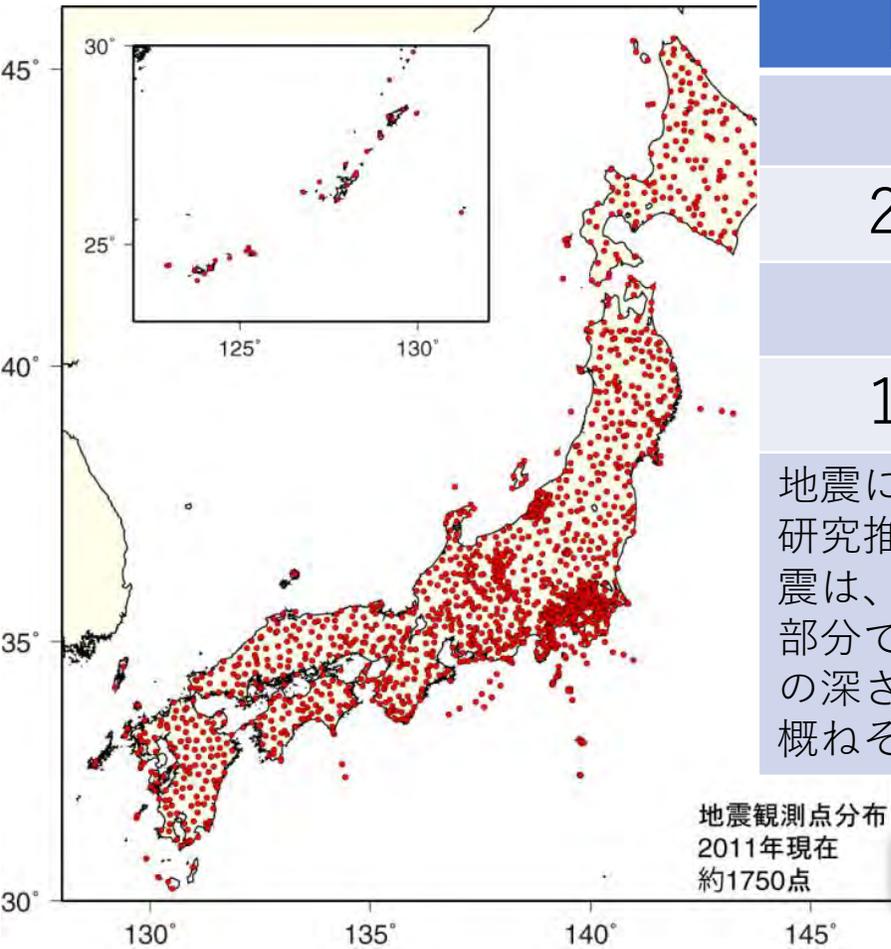
南海トラフ地震想定震源域の西側にある高知県沖～日向灘にかけて、観測網を敷設

- 想定南海トラフ地震の震源域内東部には、気象庁東海・東南海沖ケーブル式観測システム及びDONETが常時観測を実施
- 想定震源域内西部には定常観測は整備されていない

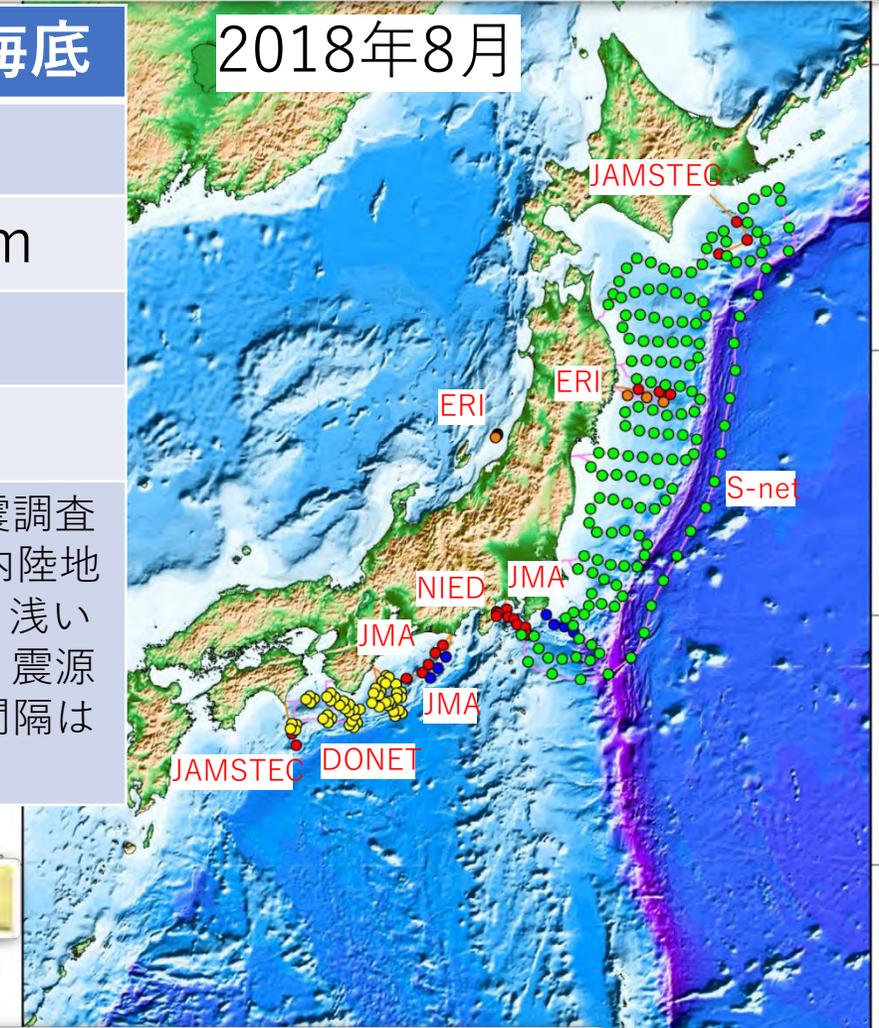
# 3. 海洋における調査観測・研究の現状と課題

陸域高感度地震観測網(Hi-net)

ケーブル式海底地震・津波計



陸域観測	ケーブル式海底
観測点間隔の現状	
20~30 km	20~100 km
対象地震の発生深さ	
10~20 km	5~30 km
地震に関する基盤的調査観測計画（総理府地震調査研究推進本部：平成9年8月29日）「通常の内陸地震は、経験的に陸域地殻上部の15~20 kmより浅い部分で発生することが知られている。一般に、震源の深さを正確に求めるためには、観測施設の間隔は概ねその深さ程度が望ましい」	

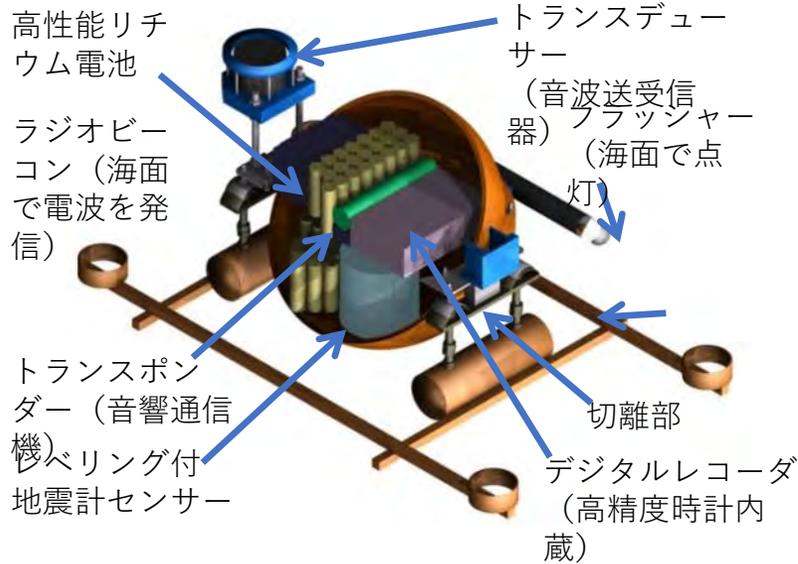


海域では5 km間隔の観測網が望ましい

**課題：海域で発生する地震を正確に把握するためには、観測点が少なすぎる**

# 3. 海洋における調査観測・研究の現状と課題

## 長期観測型自己浮上式海底地震・水圧計



チタン合金製球型耐圧容器に観測装置を收容し、1年間以上海底において連続観測が可能、2000年代初め頃から実用化

自己浮上式海底圧力計  
観測方法は地震計とほぼ同じ  
観測期間は1-3年間

長期観測型自己浮上式海底観測測器を同一地点に繰り返し設置回収することにより、モニタリング観測が可能に

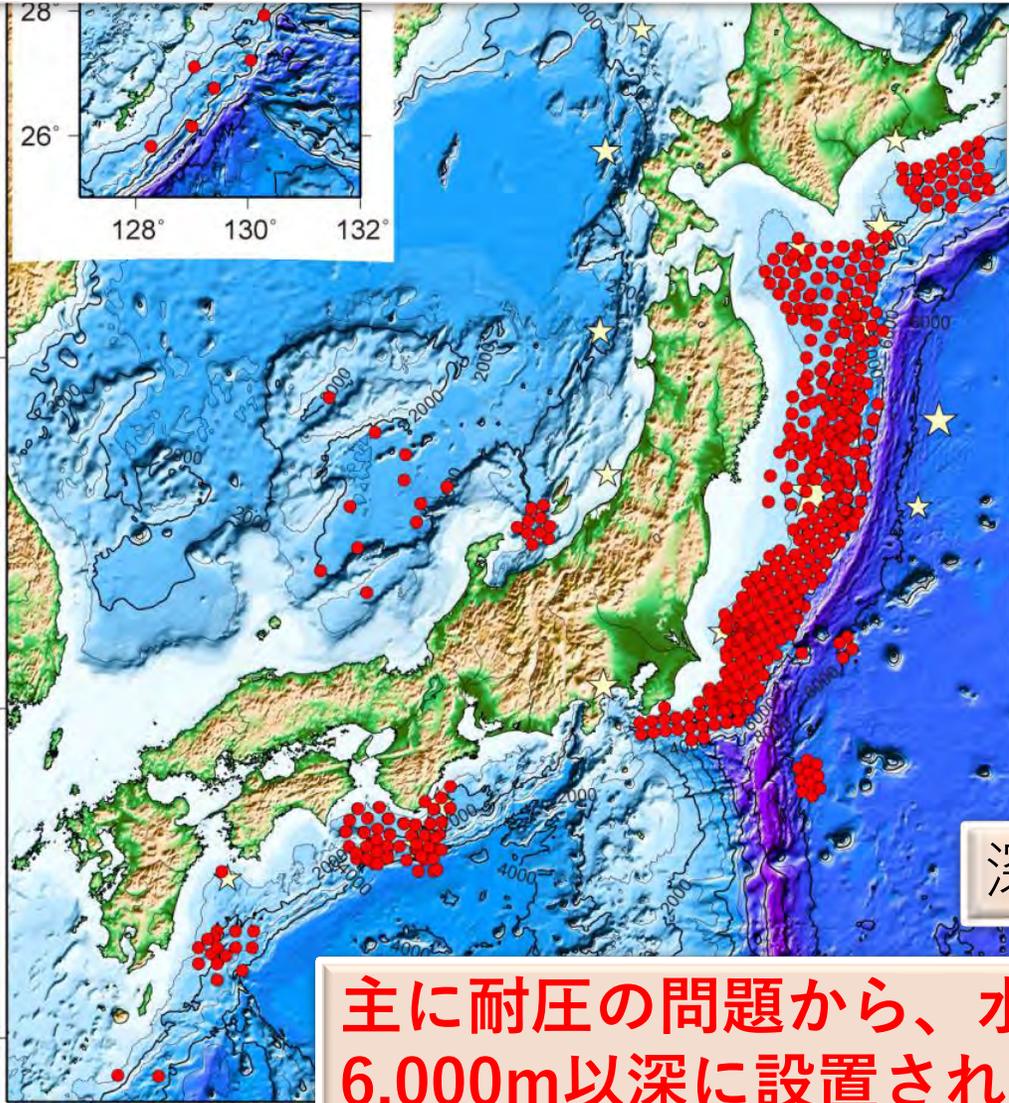
- 自己浮上式測器はコストが低く、数多くの測器を利用可能
- データが測器回収後にしか得られない

センサーには、3成分1Hz速度計、サーボ型加速度計、20秒または120秒広帯域地震計、360秒広帯域地震計 (65cm球のみ) を選択可能

# 3. 海洋における調査観測・研究の現状と課題

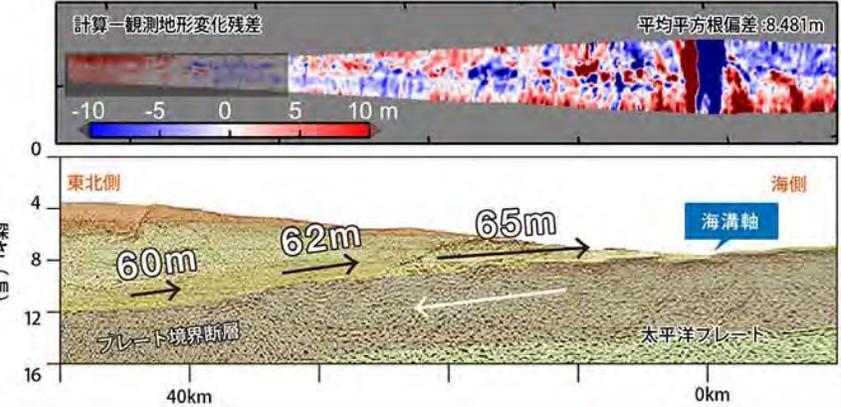
過去に展開した長期観測型海底地震計

ケーブル式海底地震・津波計



東北地震では日本海溝(水深10,000m)まで断層滑りが及んだ

2018年8月



海洋研究開発機構ホームページ  
[http://www.jamstec.go.jp/j/about/press\\_release/quest/20170111/](http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/quest/20170111/)

深海底での調査観測が必要

主に耐圧の問題から、水深6,000m以深に設置されていない



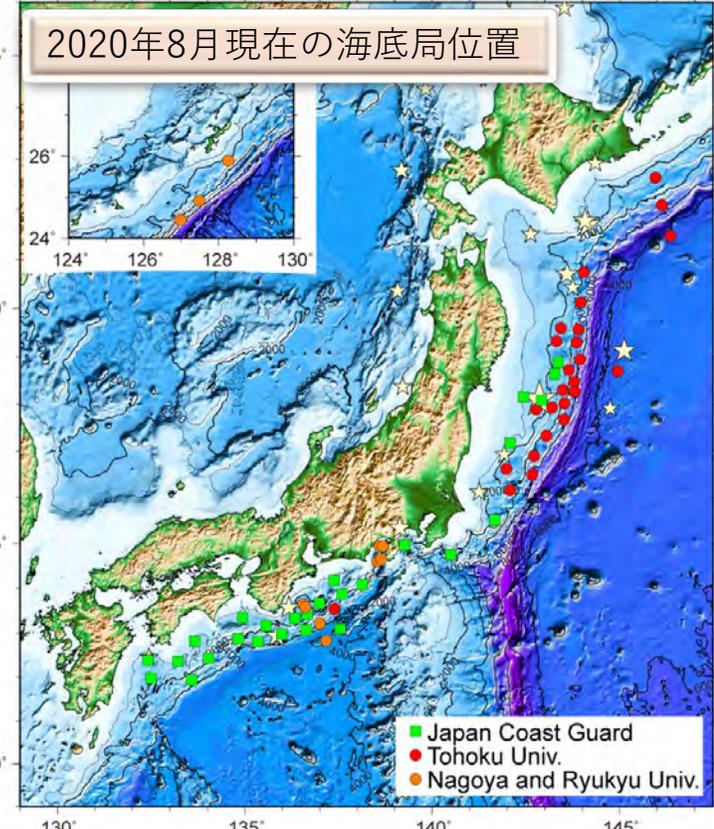
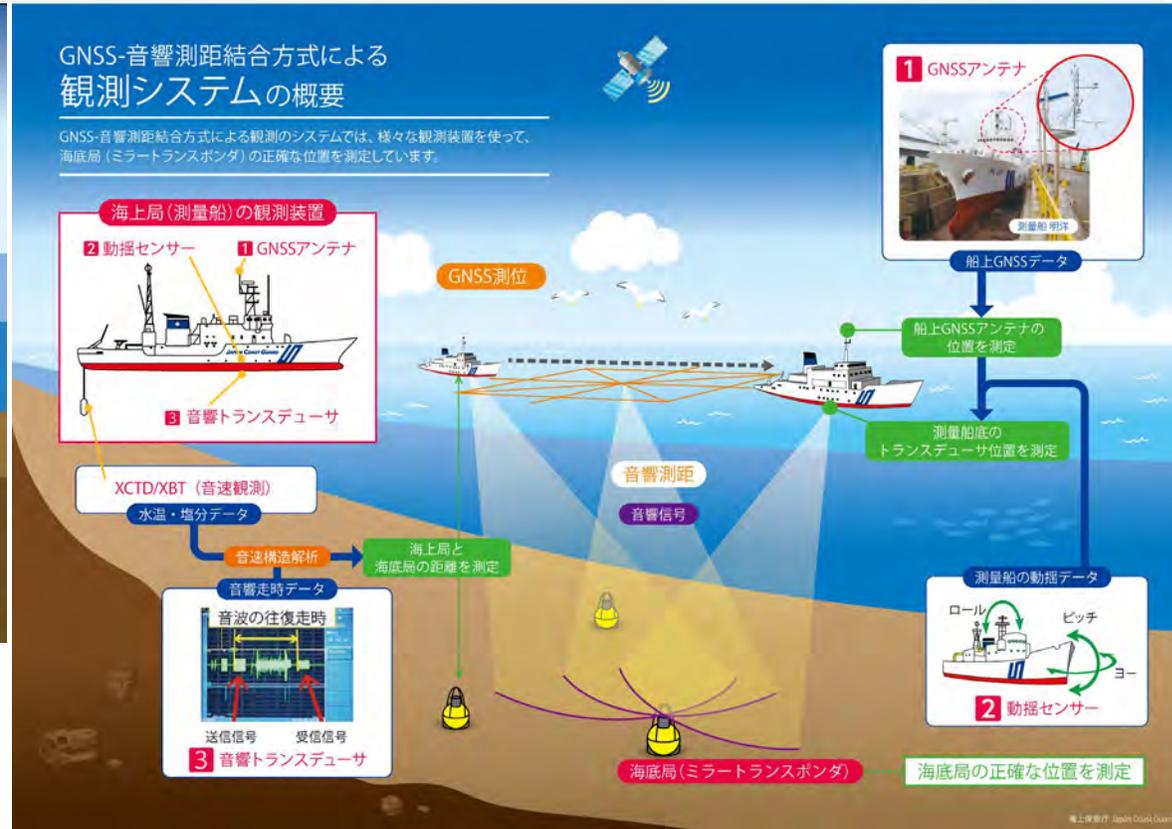
深海底（日本海溝・千島海溝）の観測点は少ない

# 3. 海洋における調査観測・研究の現状と課題

## 海底地殻変動観測（GNSS/A観測）



海上保安庁海洋情報部ホームページ  
<https://www1.kaiho.mlit.go.jp/KOHO/chikaku/kaitei/sgs/detail.html>



- 海中音速場の空間不均質を推定可能な観測・解析により精度が大幅に向上
- 近年は船舶による観測が**ほぼ毎月**実施
- ウェーブライダーやブイを用いた観測が**開発中**

**課題：高頻度観測、長期間連続観測、遠隔自動観測**

# 3. 海洋における調査観測・研究の現状と課題

## 海底地殻変動観測（GNSS/A観測）の成果

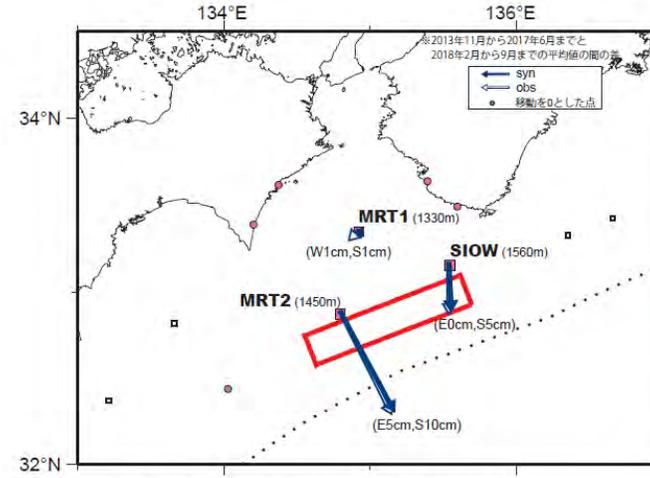
2017-2018年の紀伊水道沖スロースリップの検出事例（海上保安庁資料）

紀伊水道沖の非定常変動（深部音速傾斜推定解）を説明する断層モデル

### 現状と課題

- 時空間的に離散したデータ
- スロースリップの大雑把な断層形状が推定
- どこにどのような力が再配分されるかを知るためには、すべりの時空間発展を**高い時空間分解能でモニタリング**する必要がある
- **観測網の高密度化と、測定の高頻度化**が必要不可欠
- **海底局の電池寿命が10~15年と短い**

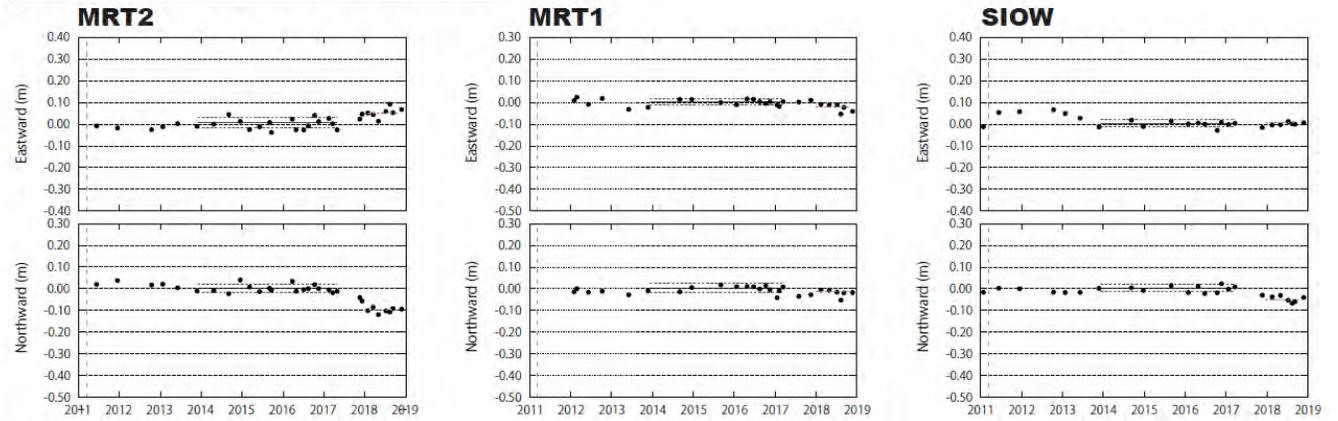
**最終的には、ケーブルに繋いで完全リアルタイム化が望ましい**



時系列は深部音速傾斜を推定する手法 [Yokota et al., 2018, MGR] により推定した。観測結果を説明するSSEモデルをグリッドサーチにより推定した。推定には Okada [1992, BSSA] を用いた。矩形断層モデルは Kodaira et al. [2002, GJI] に準拠して設定されている。

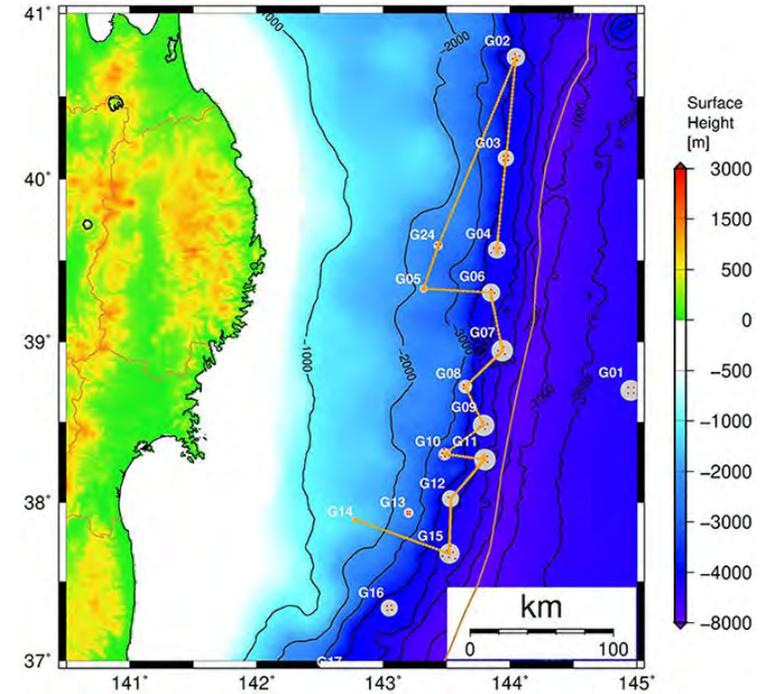
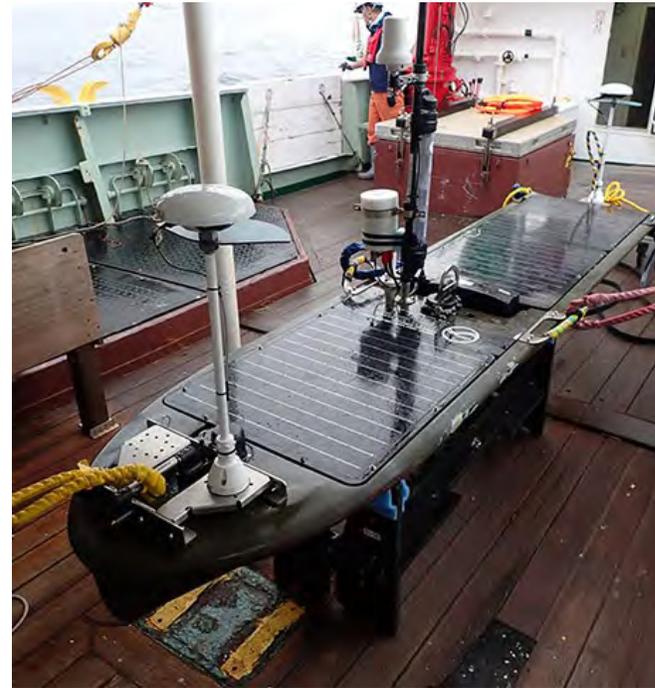
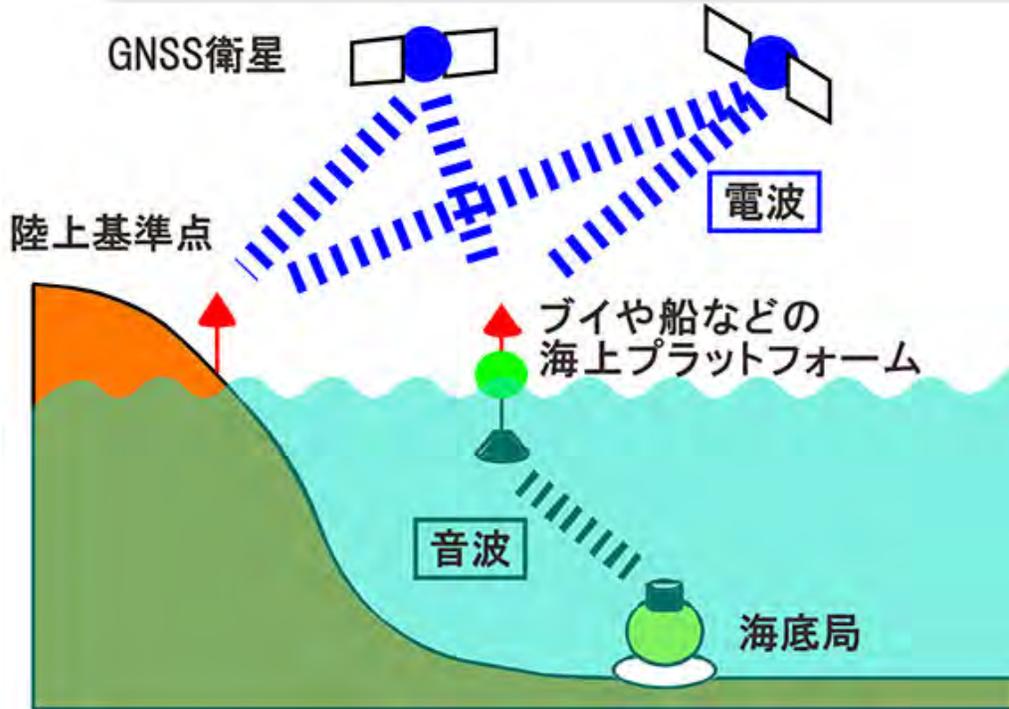
Grid search area	Best fit
Lat: 32.6 ~ 33.4	Lat: 32.92
Lon: 135.0 ~ 136.0	Lon: 135.74
depth: Kodaira et al. 2002 GJIに準拠	depth: 5.1 km (from MRT2)
length: 40 ~ 120 km	length: 116 km
width: 6 ~ 56 km	width: 20 km
dip: Kodaira et al. 2002 GJIに準拠	dip: 1
strike: 249	strike: 249
rake: 80 ~ 120 (間隔 10)	rake: 100
slip: 10 ~ 50 cm	slip: 43 cm
Poisson ratio: 0.25	rigidity: 10 GPa
	<b>Mw 6.6</b>

2013.5-2017.5の期間のトレンドを除去した時系列



# 3. 海洋における調査観測・研究の現状と課題

## GNSS/Aにおけるウェーブライダーの適用と課題



海洋研究開発機構ホームページ [https://www.jamstec.go.jp/j/about/press\\_release/20200930/](https://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20200930/)

**効果：自動・無人による観測による高頻度化やコスト削減**

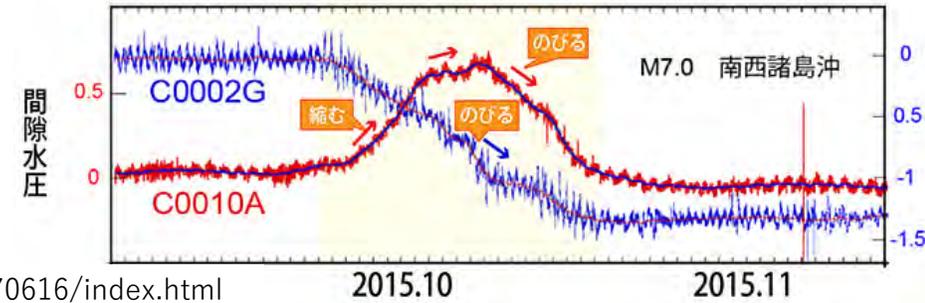
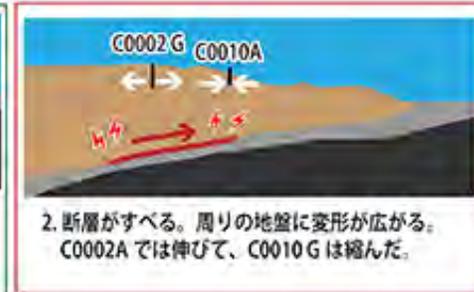
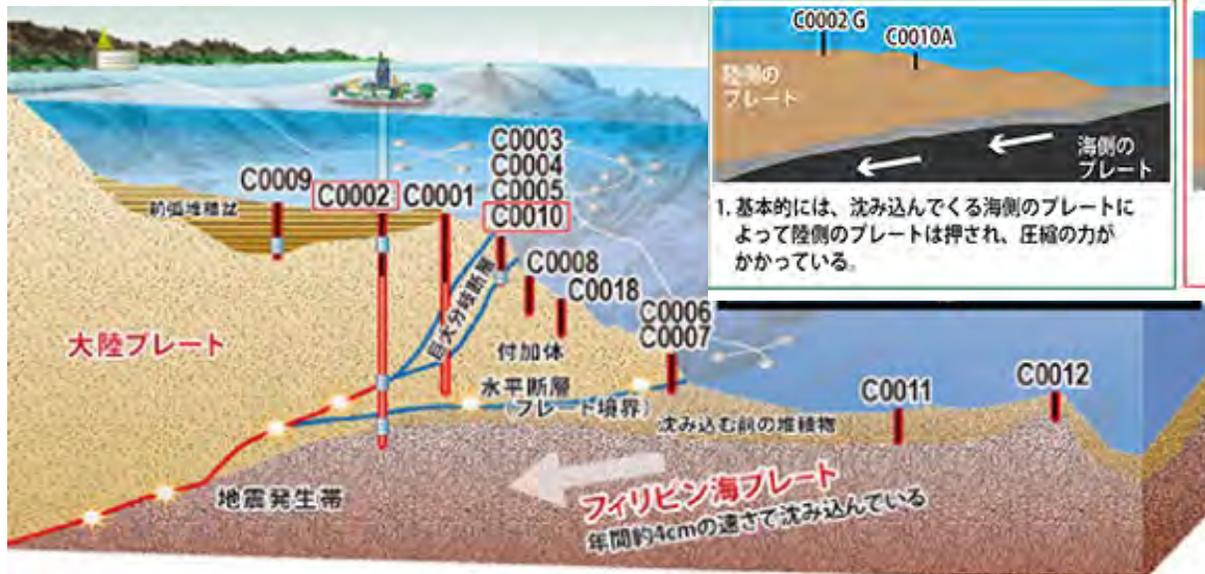
**課題：航行能力の限界（電力不足、強い海流による離脱等）**

# 3. 海洋における調査観測・研究の現状と課題

## 掘削孔を利用した間隙水圧計、傾斜・ひずみ計観測

海底を「ちきゅう」で掘った孔に設置する長期孔内観測装置

(上) 2015年10月のゆっくり滑りのときにかかった力の状態の変遷  
(下) その時の2地点における間隙水圧変化



海洋研究開発機構ホームページ [http://www.jamstec.go.jp/j/about/press\\_release/quest/20170616/index.html](http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/quest/20170616/index.html)

- プレート境界のスロースリップ（ゆっくり滑り）をリアルタイムで把握
- 気象庁南海トラフ地震検討会や文科省地震調査委員会等に重要な情報を提供

**課題：高密度多点観測、機器、掘削・設置・維持手法の改良**

# 3. 海洋における調査観測・研究の現状と課題

## 掘削孔を利用した間隙水圧計、傾斜・ひずみ計観測の成果

2020-2021の紀伊半島南東沖スロースリップの検出事例 (JAMSTEC資料)

### 課題

- スロースリップの時空間変化を推定
- 現象の発生深度が非常に浅いため、**現在の観測網では不十分**

### JAMS02 海底広域変動観測研究：令和二年度成果

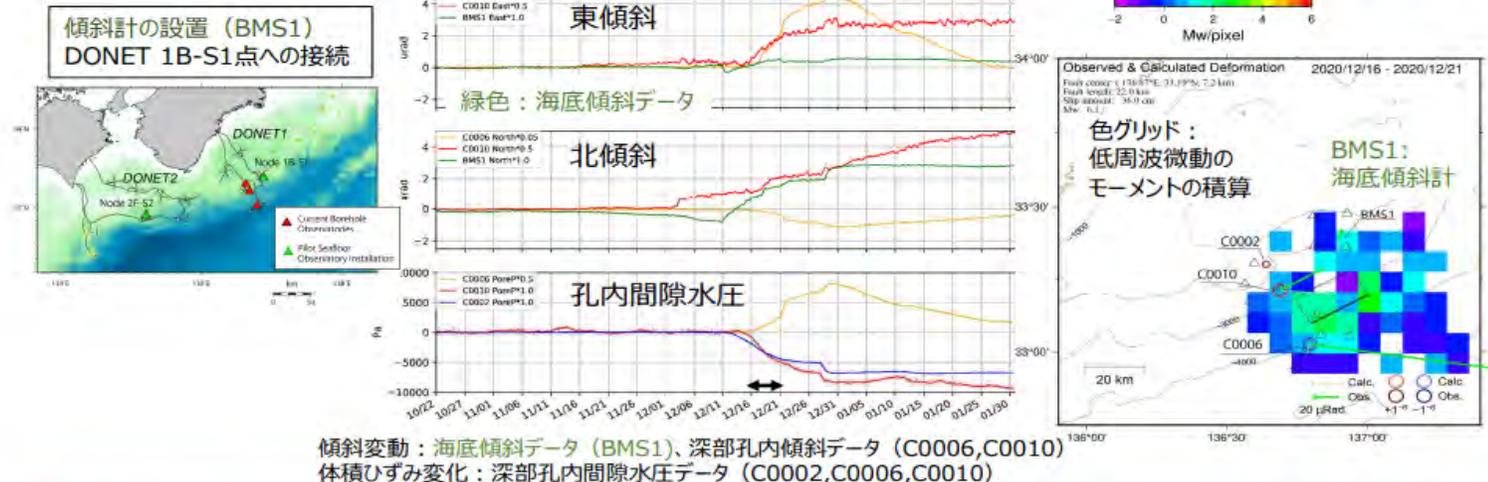
#### 海域観測による地震発生帯の実態把握：海底孔内傾斜計による地殻変動の把握

成果：海底下6mに設置した**傾斜計**によって、2020/12-2021/1にかけて発生した「浅部ゆっくりすべり」の検出に成功した。

技術開発の背景：南海トラフのゆっくりすべりは、トラフ近傍に設置した高感度センサーで観測することが重要である。

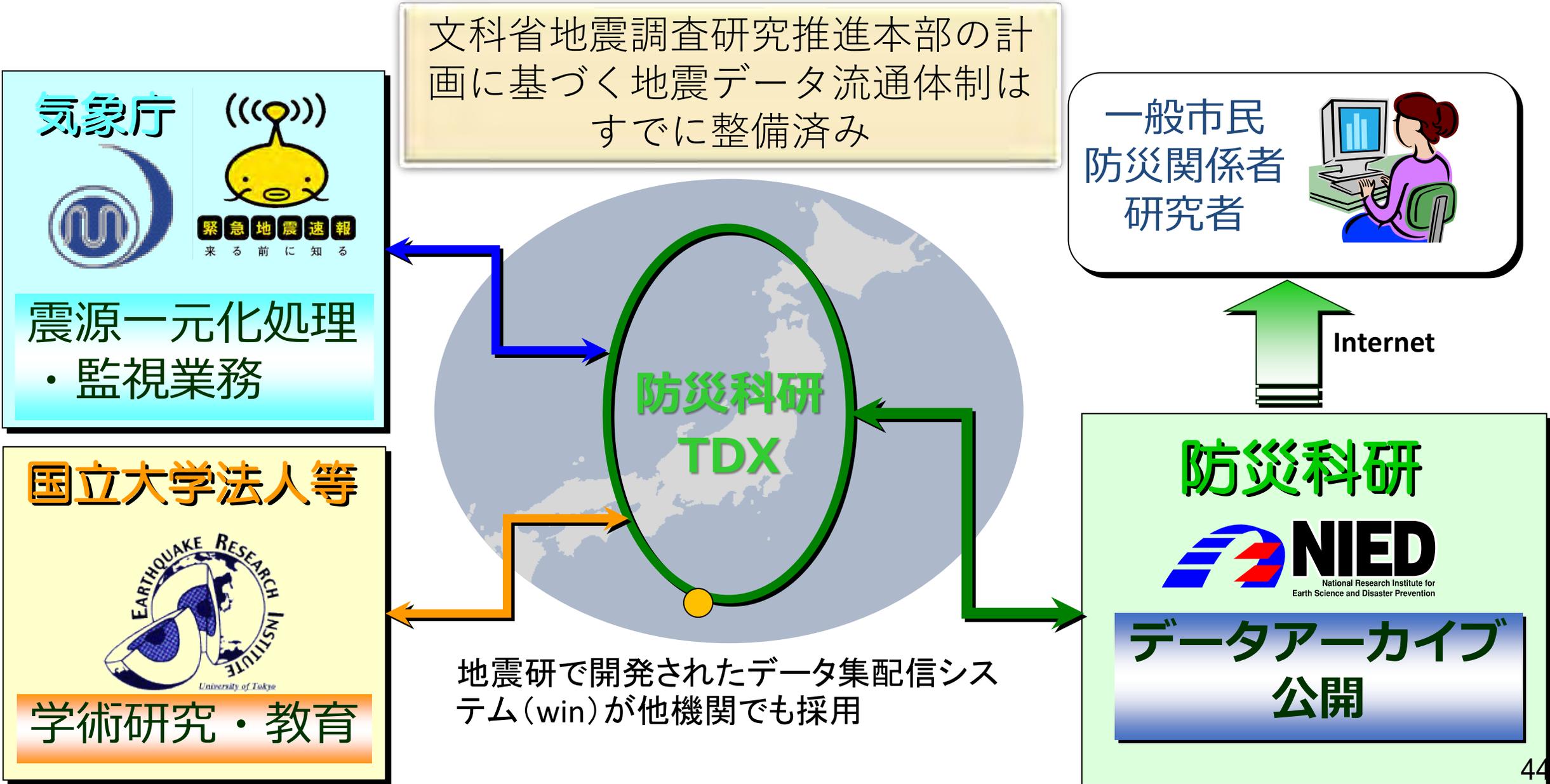
✓ **本海底傾斜記録**、3点の深部掘削孔内の観測記録を用いプレート境界面のすべりモデル推定を行い、地震調査委員会他に報告した。

✓ **多点の連続的海底地殻変動観測データ**が得られたことによって、**海溝部**に向かい伝播する**浅部ゆっくり滑り**の全貌をとらえることができた。



今後、様々なアプローチ (高感度傾斜計、水圧観測技術、光ファイバ歪計) でプレートの固着・すべりをリアルタイムに把握する。

# 3. 海洋における調査観測・研究の現状と課題



# 4. 今後に向けた期待

## 次期海域観測網のコンセプト

- 測地帯域から地震帯域までの広帯域観測
- 従来を大きく超える空間的密度
- リアルタイム観測を基本とする

ケーブルシステムを基幹とした観測網の展開

インライン式地震計・水圧計

GNSS-A方式地殻変動観測システムの高度化

DAS計測による超高密度地震・測地観測

海底掘削孔を用いた歪・傾斜等の測地リアルタイム観測

2点間音響測距モニタリング観測

長期観測型自己浮上式測器を用いた集中モニタリング観測

ノードシステムを用いた多種多様なセンサーによる観測

# 4. 今後に向けた期待

## 海域における観測技術開発

- ケーブルシステム（インライン式 ノードシステム）
  - 南海トラフ西部域におけるハイブリッド型であるN-netの開発・製作・構築
- 海底掘削孔を用いた観測
  - 傾斜および歪観測の高度化などの広帯域な観測
- 長期観測型自己浮上式測器
  - センサー埋設可能な自己浮上式測器の開発
  - 海底における傾斜観測
  - 観測目的に応じた使用センサーの多様化
- DAS計測による超高密度観測
  - モニタリング観測のための連続収録システム
  - 長周期計測を可能とすることによる地殻変動(歪)観測
- 2点間音響測距観測
  - ケーブルシステムを利用したリアルタイムモニタリング観測
- GNSS/A地殻変動観測
  - 係留ブイシステムとケーブルシステムを利用したリアルタイム長期観測

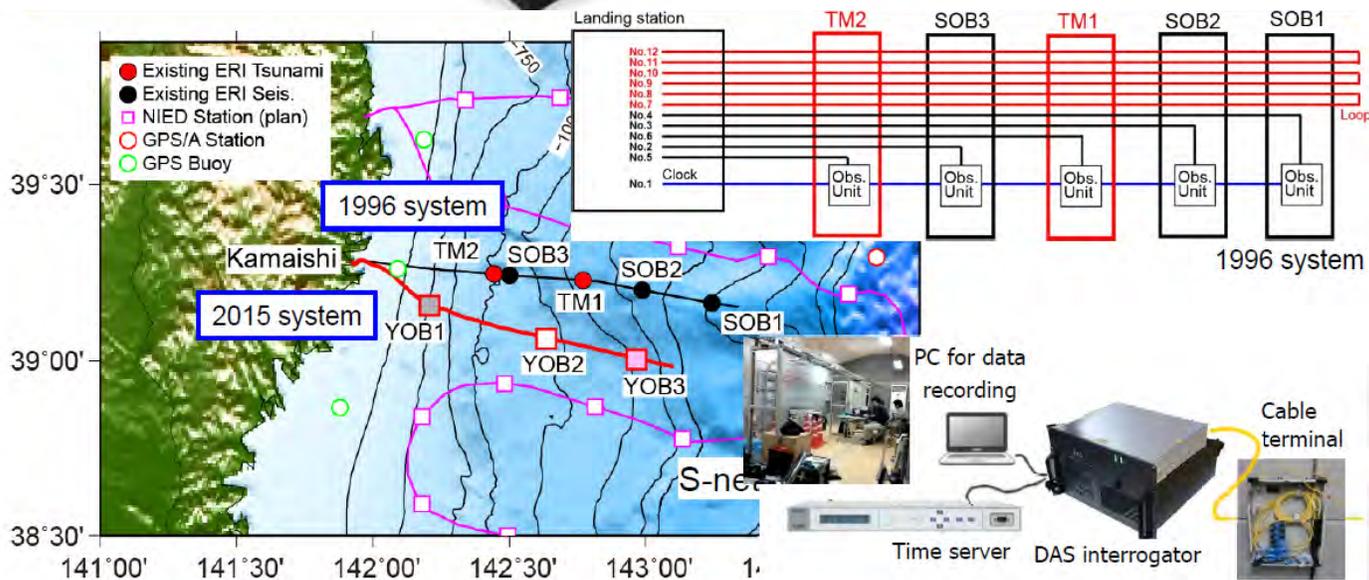
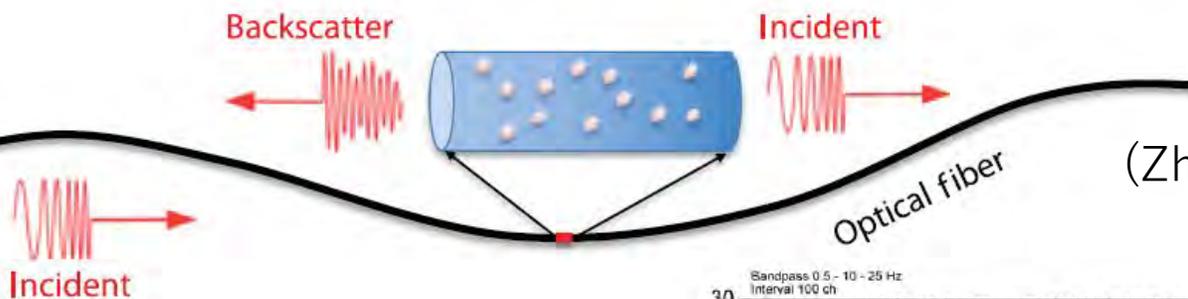
# 4. 今後に向けた期待

## 光ファイバセンシング（地震観測）

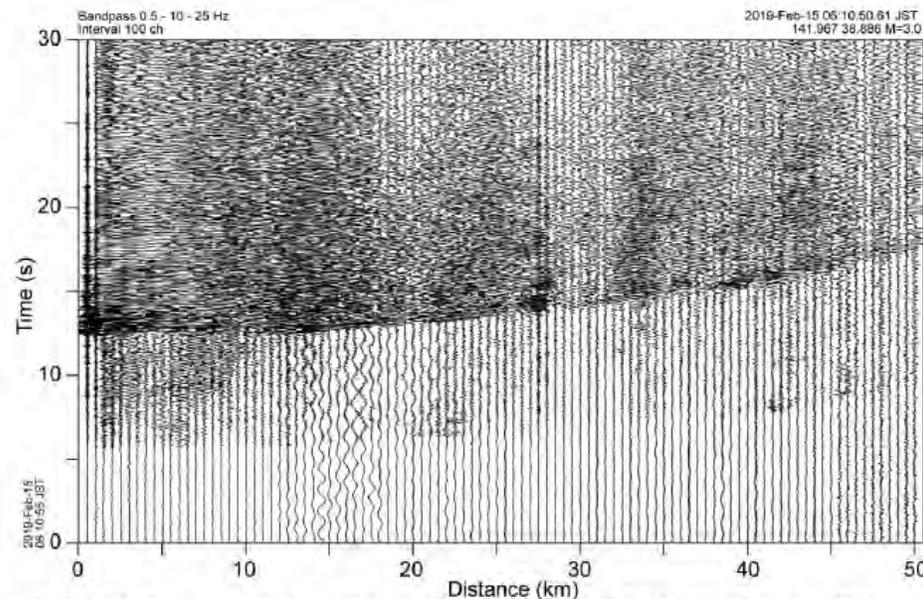
### 分散型音響計測（Distributed Acoustic Sensing : DAS）

(a) DAS interrogation unit

Laser + Computer + Storage



篠原 (2020, 地震予知連絡会)

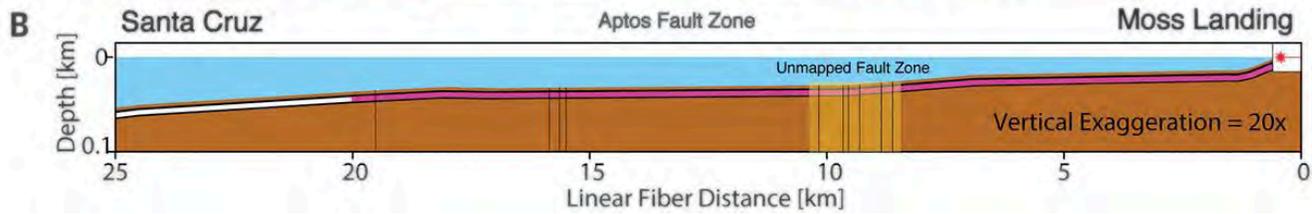
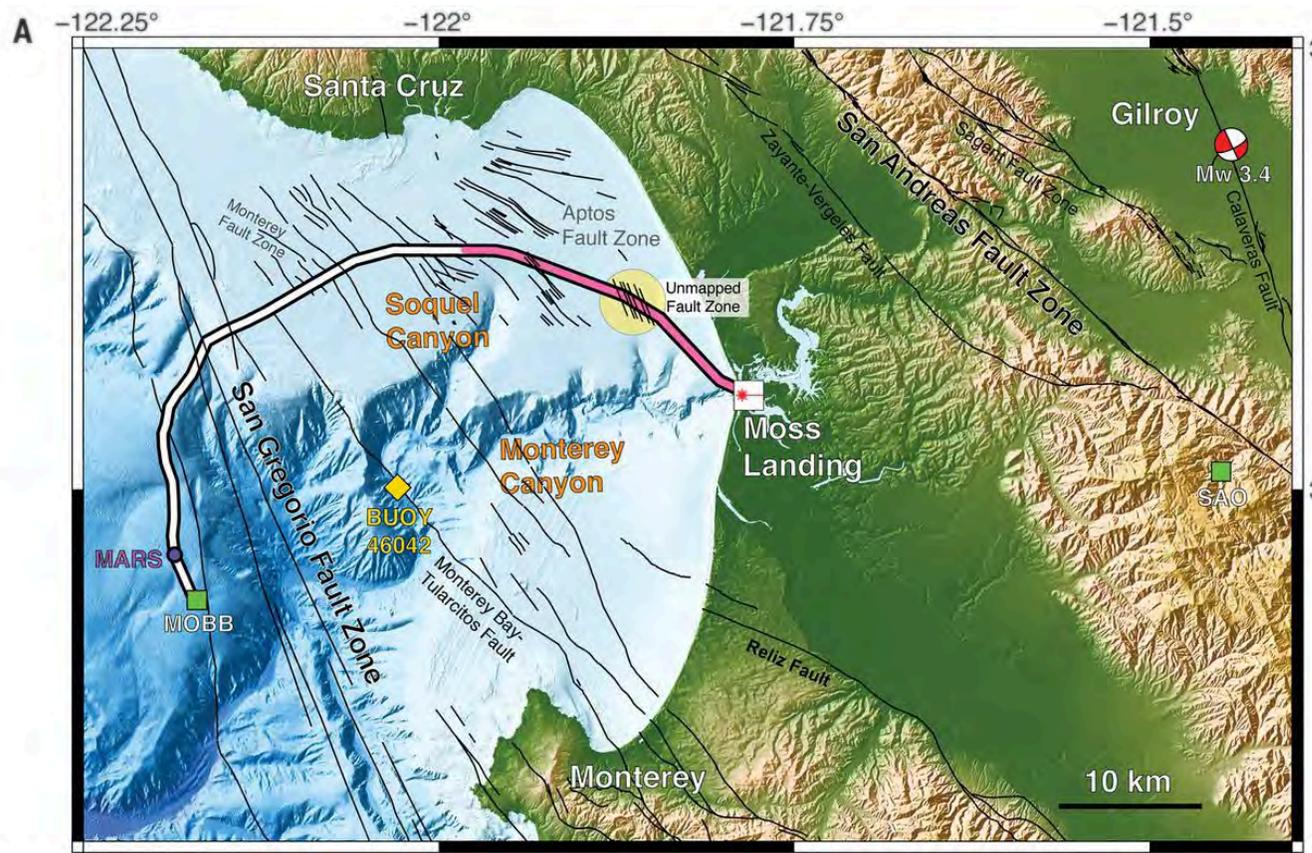


DAS計測による地震記録例(ケーブル近傍M3.0の地震)

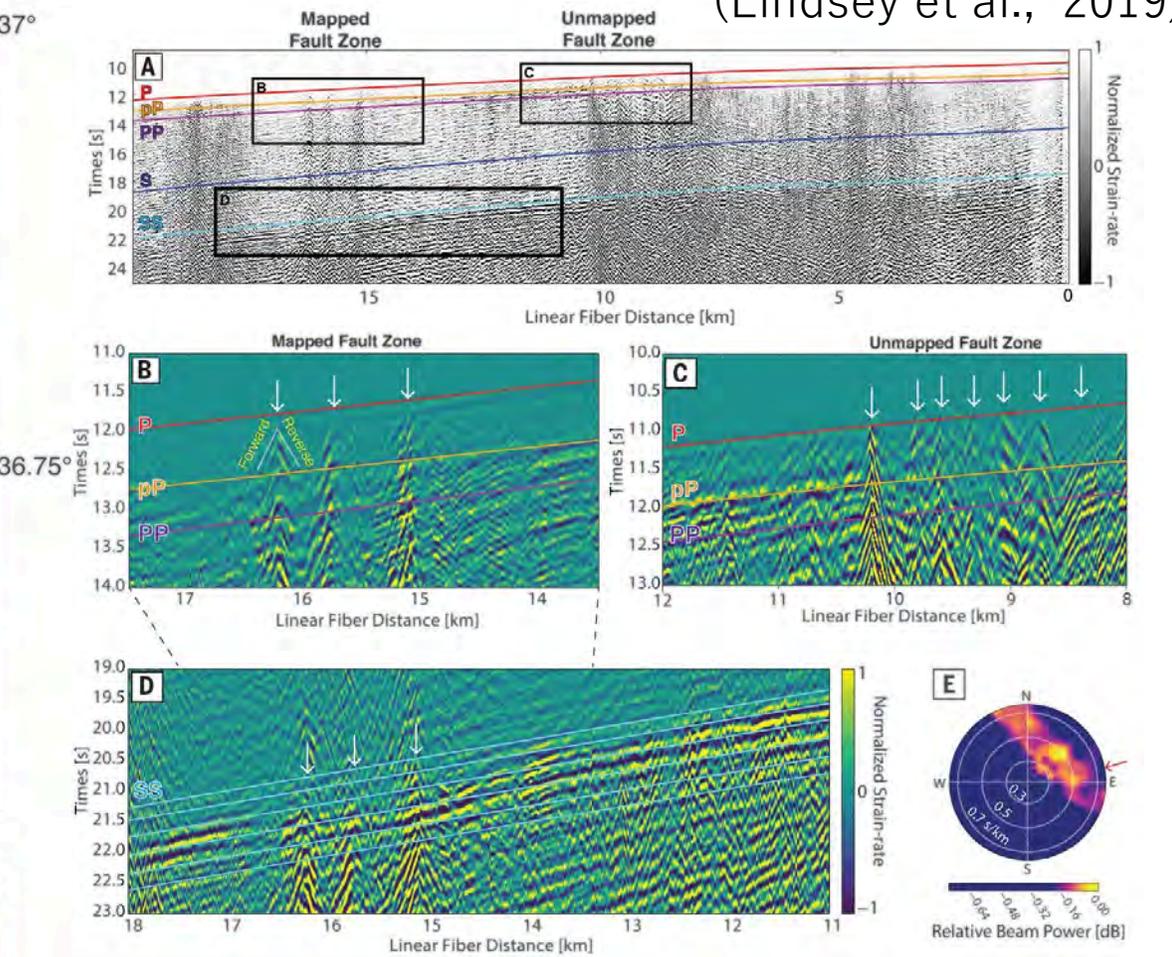
■全20,001チャンネルから100チャンネルを表示

# 4. 今後に向けた期待

## 光ファイバセンシング (海底構造探査)



(Lindsey et al., 2019)



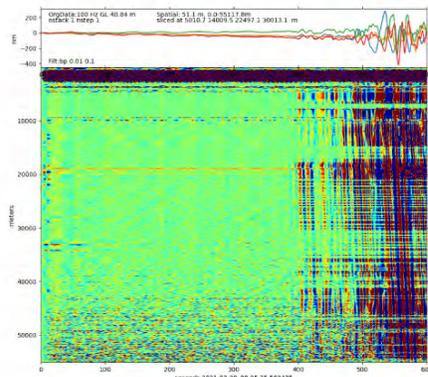
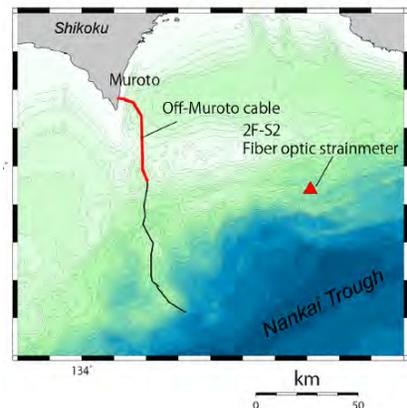
未知の断層発見

# 4. 今後に向けた期待

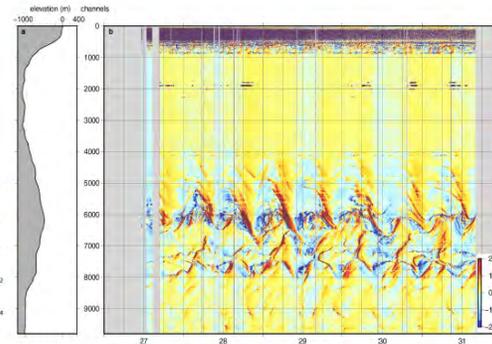
## 光ファイバセンシング（地殻変動観測）

### 海底光ファイバケーブルのセンサーとしての利用

- 海底に展開された光ファイバケーブルをセンサーとした稠密な観測によって海域の巨大地震発生帯の動態を把握する試みが始まっています。それは地震などの短周期の現象だけでなくゆっくり滑りや年単位のプレート収束による海底変形をも検出しようとするもので、室戸沖などの海底ケーブルを用いた試験的な取り組みが始まっています。



DASにおける長周期観測ノイズの低減手法(荒木・横引、地震学会2021)



室戸沖海底光ファイバケーブルDAS記録にみられる海底の温度変化 (Ide, Araki, Matumoto, EPS, 2021.)

### 学術変革領域「Slow-to-Fast地震学」におけるマルチスケール観測技術開発

- ・スロースリップも含む地震現象を検出するための、100年にもわたる高い安定性、精度を持つ光ファイバセンシング技術
- ・時間分解を飛躍的に改善した海底地殻変動計測及び海溝近傍の超深海におけるスロー及びファスト地震の計測技術

海洋音響学会ワークショップ「海底ケーブルの科学的利用と関連技術に関する将来展望」海洋研究開発機構荒木英一郎資料

<http://seasat.iis.u-tokyo.ac.jp/WS20211209/1.%E8%8D%92%E6%9C%A8%E5%85%AC%E9%96%8B%E8%B3%87%E6%96%99.pdf>

### 課題

- DAS機器のレーザーの安定性
- 長期観測実用化のための大量データ処理技術・データ解析手法の開発

# 4. 今後に向けた期待

## 次世代深海観測・調査技術の必要性

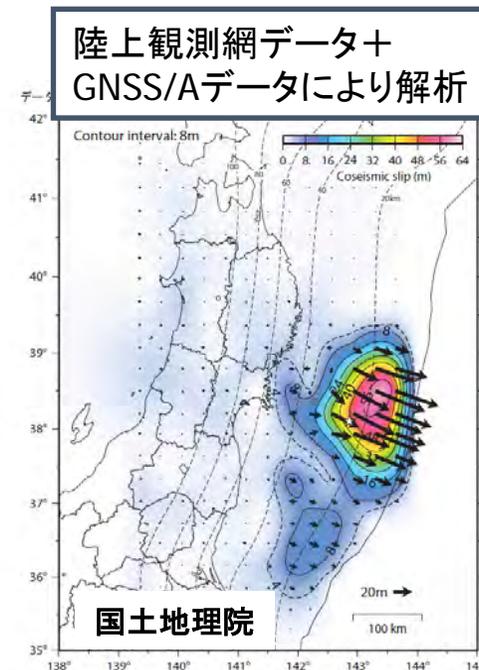
- 東北沖地震以前は、海溝付近のプレート境界においては、堆積物のために、プレート間カップリングが強くなく、地震時以外にも滑っているために、大地震時には大きく滑ることはないと考えられていた。
- 東北沖地震により、大地震時には、海溝付近の浅部プレート境界は大きく滑ることが明らかとなった。



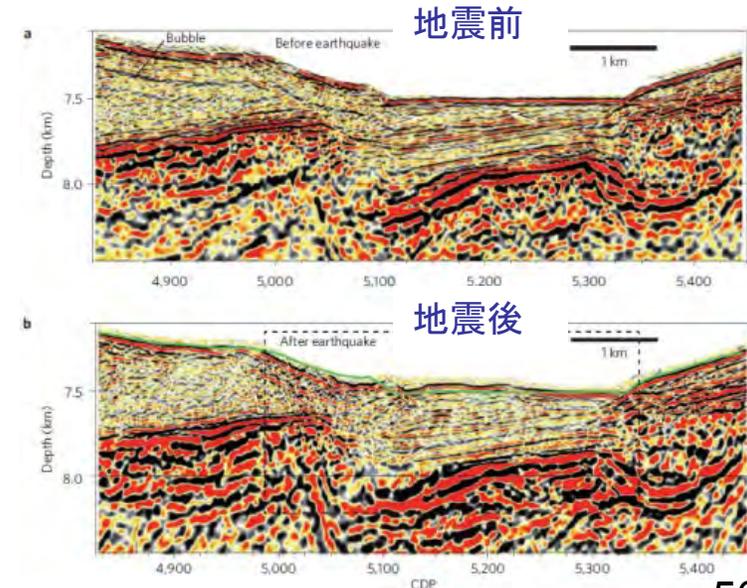
- 深海である海溝底付近の観測は、学術的にも、防災のためにも重要。
- 海溝底には、大地震震源断層が浅部に達し、さらにはこれまでの大地震の履歴が記録されている可能性がある。

6,000mを超える水深においても、海底における観測・調査技術が必要

最大すべり域が海溝寄りに求まる



地震による断層変形が海溝域まで達する



# 4. 今後に向けた期待

## 次世代深海観測システム

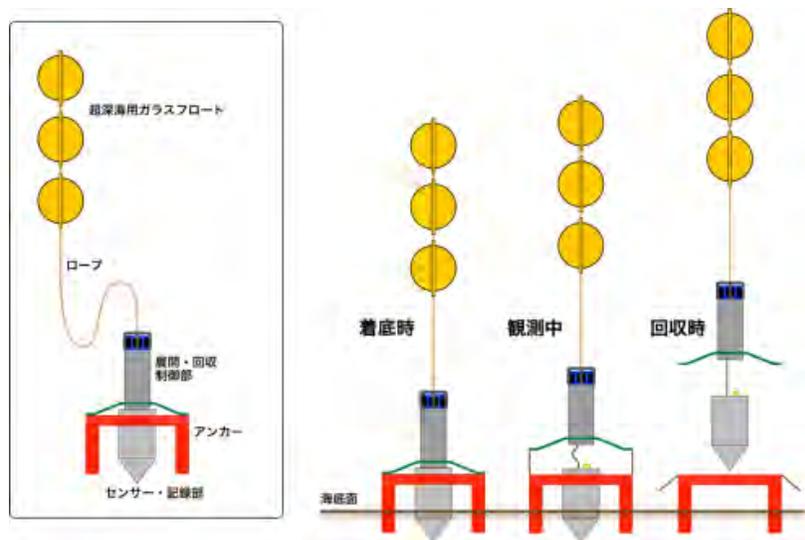
水深6,000mをこえる深海で、地震・津波・地殻変動観測を安定実施できるシステム  
 海底地震計・海底水圧計・GNSS/A地殻変動観測海底局

- 耐圧性能の強化
- 音響通信距離の拡大

これまでの海底観測技術の  
 延長線として開発が進行中



従来の海底地震計構造と異なる超深海型海底地震計の試作機。交代圧かが難しい水中ケーブルを使用しない構造。センサー埋設による高性能化も行う



従来の海底地震計構造を踏襲した超深海型海底地震計の試作機。

# 4. 今後に向けた期待

## 次世代深海サンプリングシステム

海溝底に、地震時に滑るプレート境界地震断層が達していれば、直接断層のサンプルを採取することにより、断層活動履歴が明らかにできる可能性がある

陸上で行われている活断層調査が対応

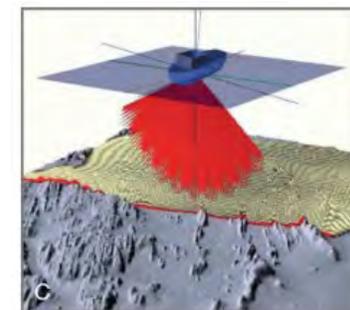
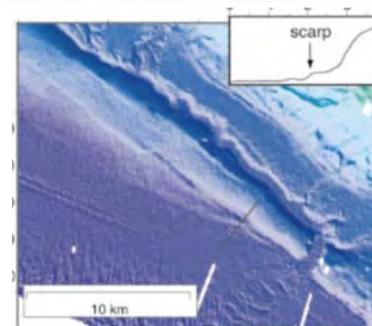
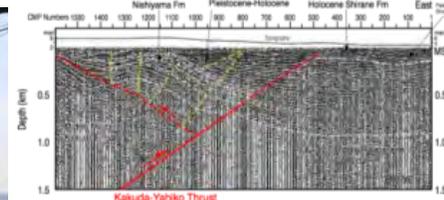
断層から直接サンプルを採取できなくとも、周辺部からサンプルが採取できれば、履歴を明らかにできる可能性

陸域や深海底以外の海域で行われているピストンコアの採取等による履歴調査が対応

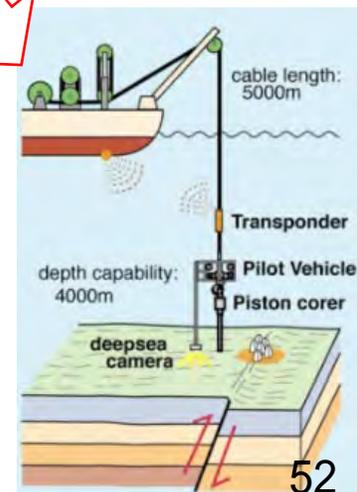
日本海溝などの深海海溝底付近において、地震・津波履歴調査を行える技術

- 深海AUVによる精密地形調査・浅部高分解能地下構造調査(事前調査)
- 上記の調査に基づき、深海において、正確に位置制御可能なサンプル採取技術

新しい技術  
開発が必要



採取位置を数m程度で制御して、サンプリング



深海で航行可能なAUVにより、地形と海底下浅部構造を広範囲に把握し、サンプル採取に適した場所を特定

## 論点

## まとめ

海洋科学技術分野として防災・減災分野へどのような貢献が考えられるか。

・巨大地震震源域近傍の地殻の状態を正確に把握することで地震発生予測、ハザード評価、即時予測に貢献

防災・減災分野に貢献するために現状不足している研究開発・研究基盤・データは何か。

・時空間的高分解能サンプリングを可能とする海洋技術  
・深海底における耐圧観測技術  
・陸域と遠洋を連続的につなぐ沿岸域での調査観測

それらのデータをどの程度の時空間分解能で取得していくべきか。

**【時間分解能】** ・オンライン・リアルタイム化が理想  
・自動無人航行による高頻度化  
・現象の時定数に応じた頻度が必須  
**【空間分解能】** ・現象深度に応じた水平間隔が必須  
・さらなる空間頻度でより高精度化

効果的・効率的なデータ取得に向けて必要な研究基盤、強化すべき取組にはどのようなものがあるか。

・観測研究、予測研究、技術開発各分野の融合研究基盤  
・融合研究開発に対する予算措置