

大学が整備した ケーブル式海底地震・津波観測網と その課題および今後の展望



篠原雅尚

東京大学地震研究所

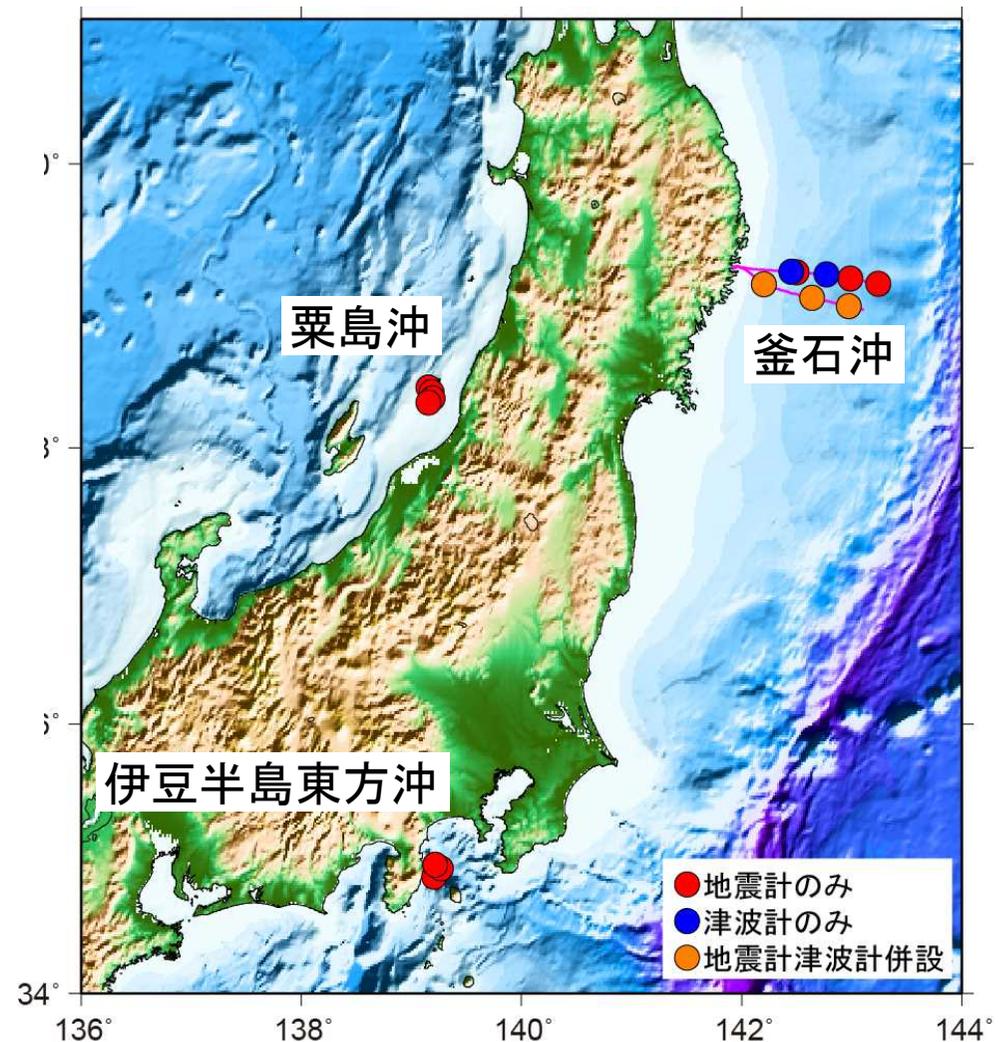
地震調査研究推進本部政策委員会
第77回調査観測計画部会
平成28年7月8日

大学が展開したケーブル式海底地震計・水圧計

■ 設置したシステム

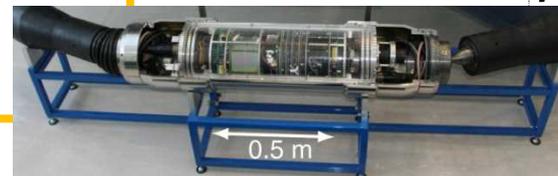
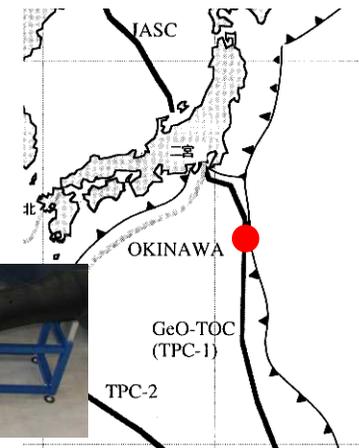
- 伊豆半島東方沖(1993年設置)
地震計3台
- 日本海溝釜石沖(1996年設置)
地震計3台、津波計2台
- 新潟県栗島近海(2010年設置)
地震計4台
- 日本海溝域釜石沖(2015年設置)
地震・津波計3台

設置規模は小さいが、海域における地震・津波観測に有効な地域に設置されているだけでなく、設置時点での最新技術を用いたプロトタイプ的性格を併せ持つシステム



ケーブル式海底地震津波観測システム

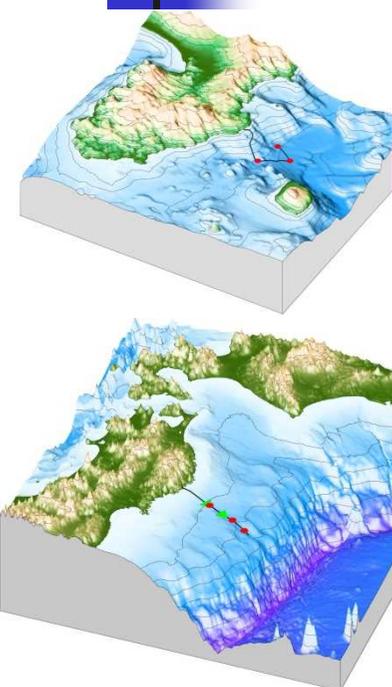
- 電信電話技術によるデータ伝送・部品レベルでの信頼性確保・同軸銅線(アナログ)(第1世代)
 - 1980年代より
 - 通信海底ケーブル技術を全面的に利用
 - 気象庁房総沖・御前崎沖、TPC1



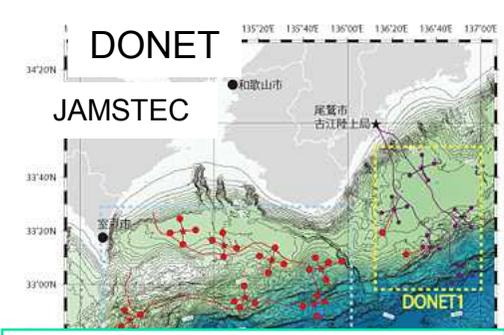
- ### 伊豆半島東方沖システム
- 光ファイバーを用いた日本では最初のデジタルシステム
 - 1993年に設置
 - センサーは地震計



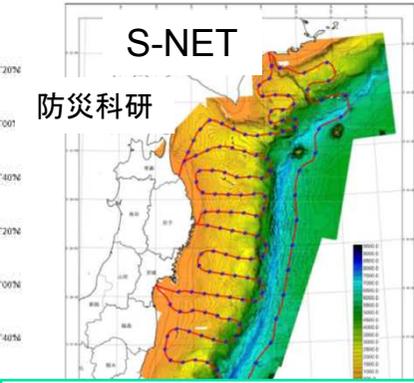
- 電信電話技術によるデータ伝送・部品レベルでの信頼性確保・光ファイバー(デジタル)(第2世代)
 - 光ファイバー利用による容量拡大・通信安定性
 - 1993年地震研伊豆半島沖ケーブルが最初
 - 現在主流の海底ケーブル観測システム
 - DONETやS-NETによる大規模化



- ### 釜石沖システム
- 光ファイバーを用いた地震津波観測システム
 - 1996年に設置
 - 東北沖地震の解明に寄与したが、津波により、陸上局が被災、復旧



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



- 第2世代システム
- インライン式による広域展開

地震研究所が新規開発したケーブル式観測システムのコンセプト - 広域・高密度・柔軟性 -

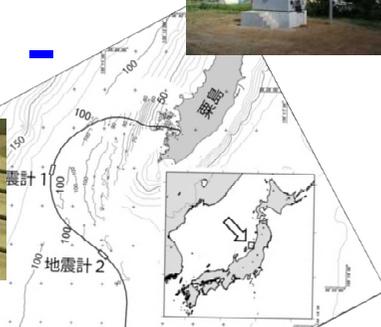
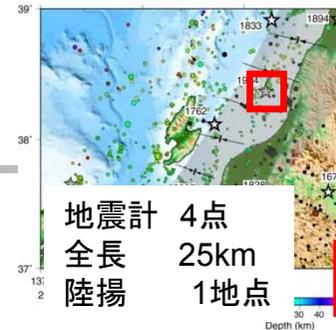
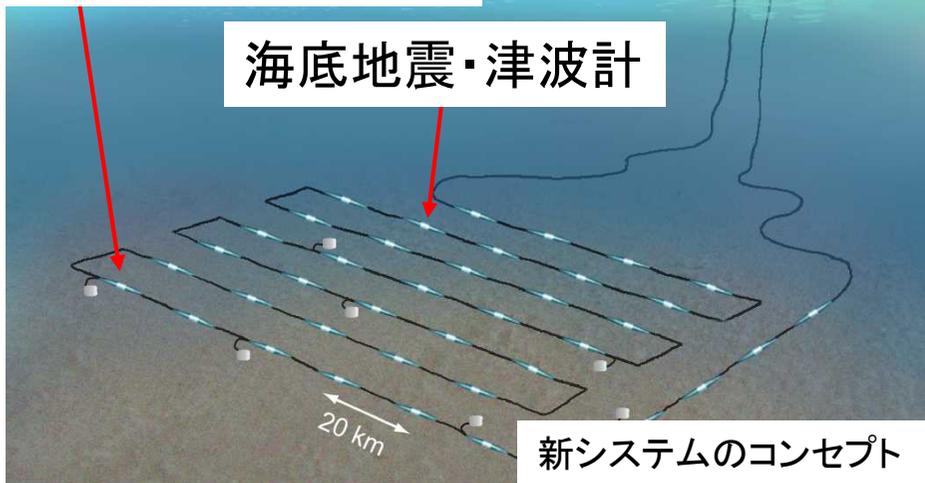


第3世代システムをめざして

地震計+拡張ポート

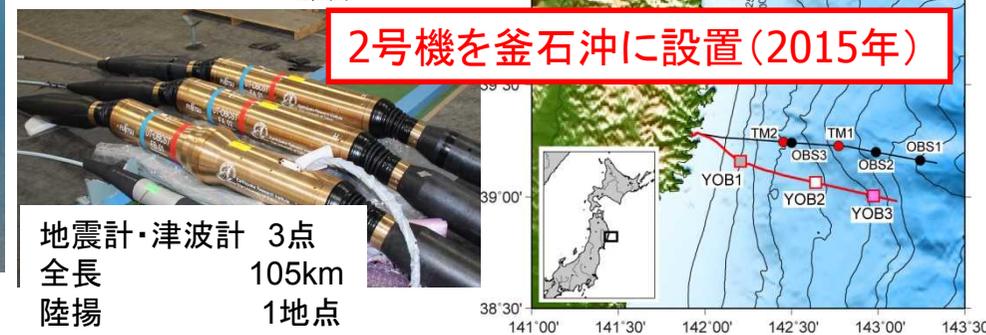
Landing Station
Data Center

海底地震・津波計



1号機を日本海に設置(2010年)

2号機を釜石沖に設置(2015年)



- 広域に展開
- より空間的に高密度な観測網
- メンテナンス性・拡張性



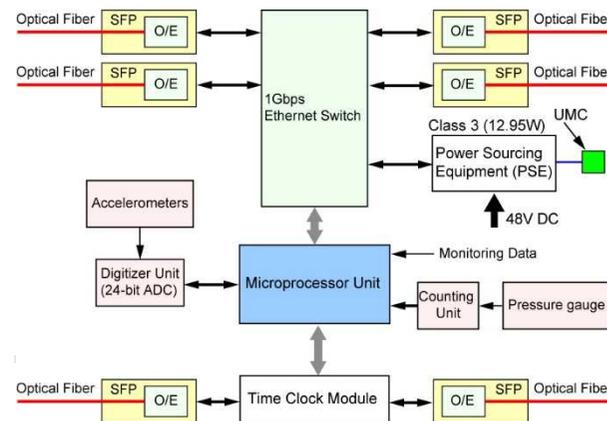
- システム全体のコストダウン
- 多数の観測点が接続可能
- 拡張ポートや計測の変更可能

- コストおよび設置の迅速性を考慮し、インライン式を採用
- 小型化とともに汎用技術を用いるが、信頼性は下げない
- ソフトウェアベースのシステムとして、設置後の状況変化にも対応

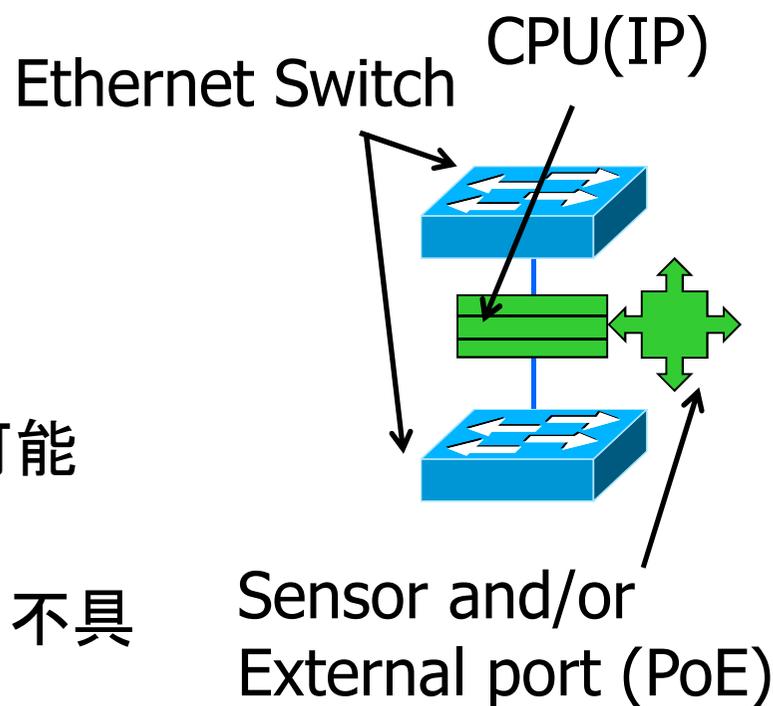
最新エレクトロニクス技術・ICT技術の導入

ICT導入の利点

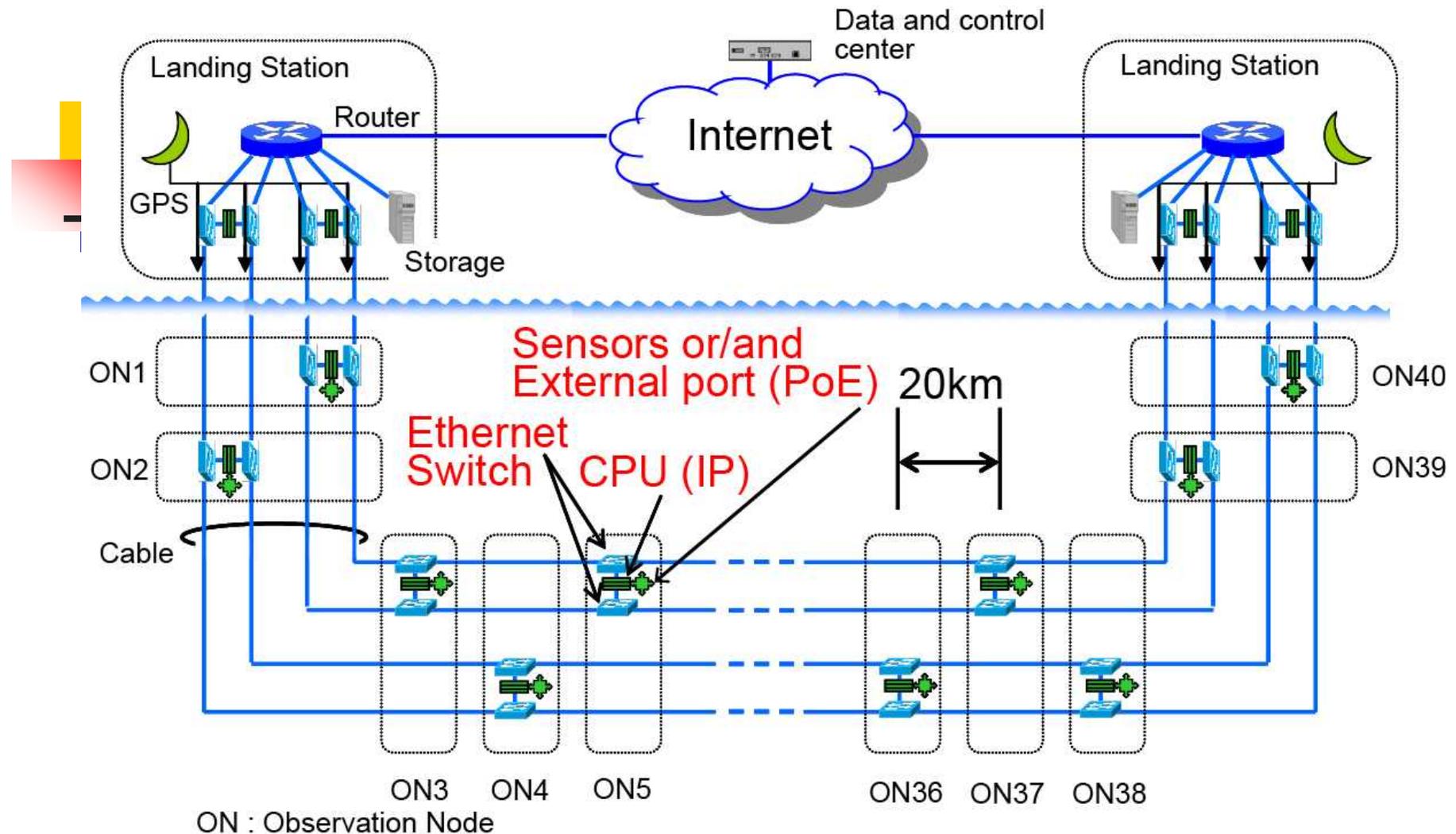
- 小型化
 - ハードウェアの処理を、ソフトウェアにより実現することで可能
 - 設置時の損傷リスク回避
- 低コスト化
 - CPUとLSIIにより、回路とパーツ数を削減
 - 冗長構成で信頼性を確保する
- IPアクセス
 - 観測ノードとの様々な通信が可能
 - 冗長構成が容易
 - 拡張ポートの装備も容易
- ソフトウェアアップグレード可能
 - 観測パラメータを変更することが可能
- 容易なメンテナンス
 - ソフトウェアで観測ノードを監視し、不具合回避対応が可能



マイクロプロセッサとFGPA
を、観測ノードに導入



ICTを用いたケーブルシステムの構成

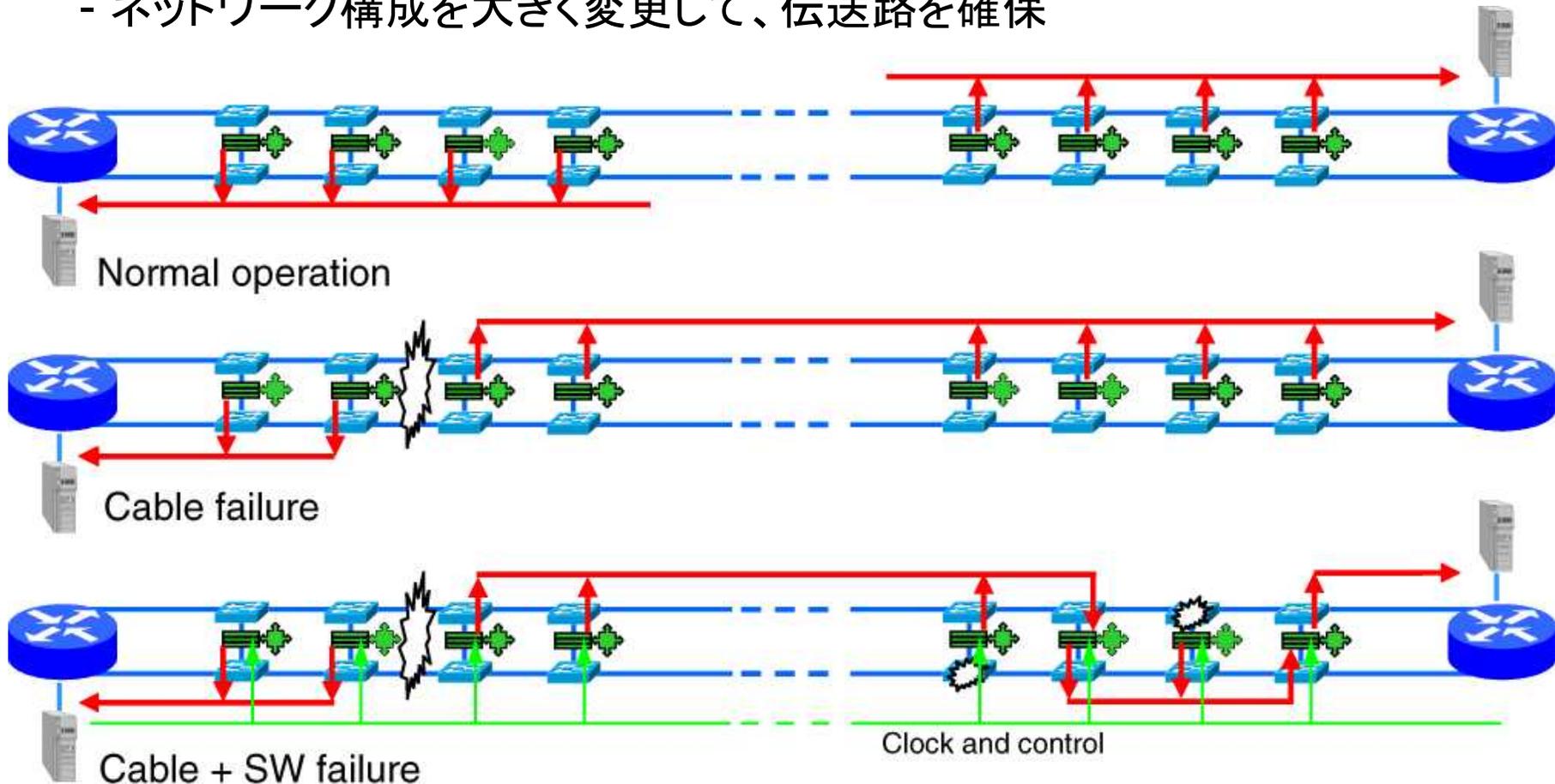


システムの信頼性確保とコストパフォーマンスの向上

1. リング構成のイーサネットワーク
2. 2重リング構成により40台以上の観測ノードを接続可能
3. 観測ノードの制御にソフトウェア (UNIX) を導入

ネットワーク運用

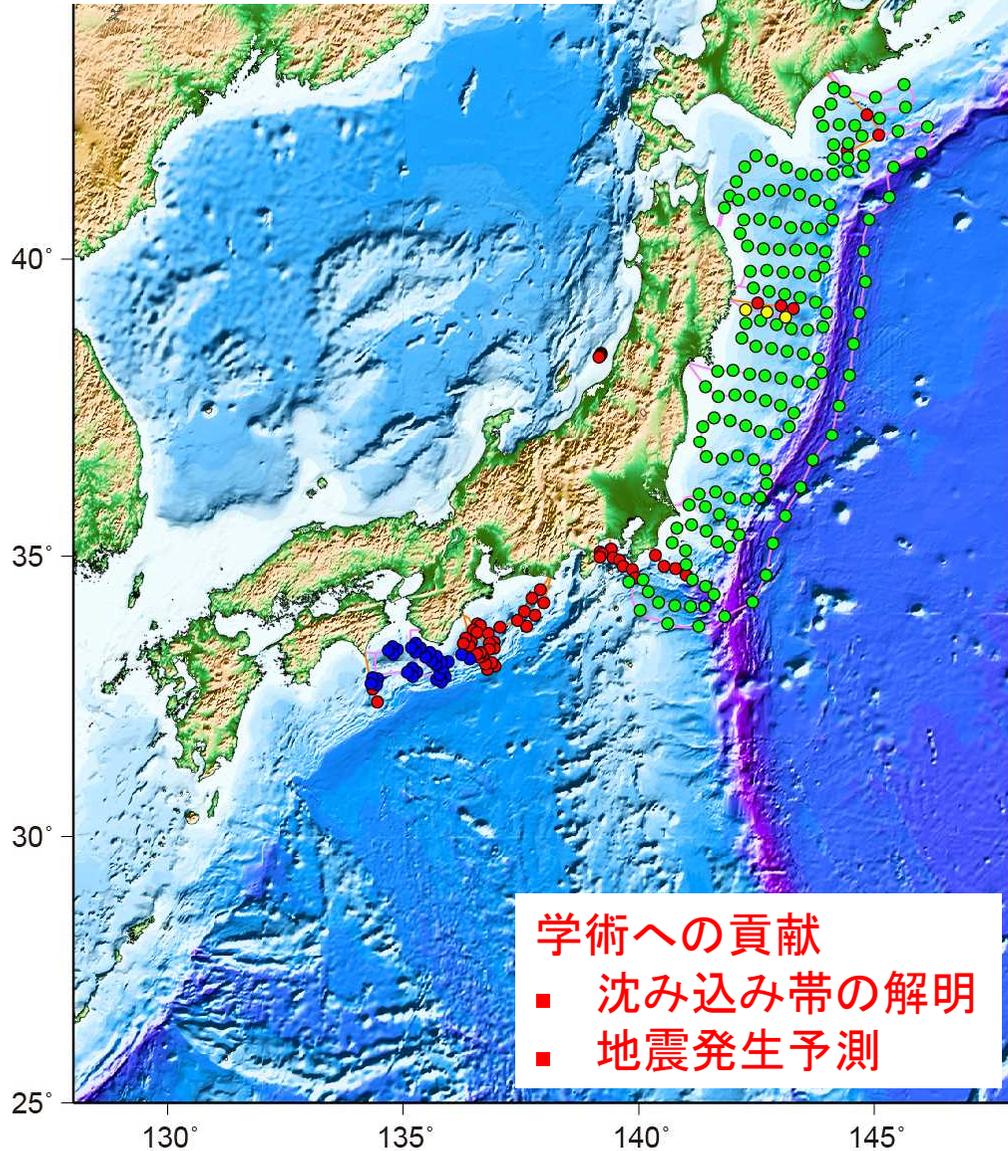
- 通常運用時
 - 各観測点からのデータは、ネットワーク負荷を考慮して、経路を選択
- 海底ケーブルの故障時
 - 故障箇所を回避する経路を設定
- 海底ケーブルに加えて、イーサネットスイッチの故障時
 - ネットワーク構成を大きく変更して、伝送路を確保



社会への貢献

- 緊急地震速報の高度化
- 津波に関する即時警報
- 現状把握の高度化

4!



学術への貢献

- 沈み込み帯の解明
- 地震発生予測

これまでの観測網展開 とこれからの課題

- 最初のシステムは、気象庁による御前崎沖・房総沖システム
- 1990年代から、大学を中心として、システム開発が行われ、第2世代システムに移行
- その後、S-netやDONETなどの大規模システムが展開された
- 大学は、2000年代からICT技術を用いた次世代システムを、開発・設置

- 観測網が存在しない領域がまだ存在する
- 大規模システムが展開された領域でも、空間的な観測点密度は、陸上に比べるとまだ低い
- 多様化・複合化する観測に対応するシステムが必要
- ICTシステムに対する実績

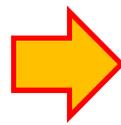
今後の展望・提案(その1)

■ 観測システムの技術開発

- 防災的な観点と、地震発生予測研究の観点からの観測・システム開発
- これまでに展開された各システムの長所を活かした新しい観測システム開発

開発すべきシステムのコンセプト

- 性能・信頼性などは下げずに、コストを下げる



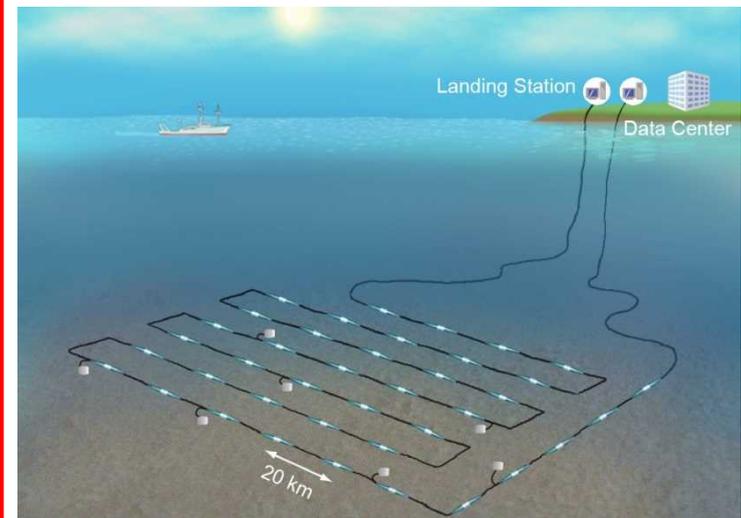
- 空間的に高密度な観測
- 多数の領域に設置可能
- 設置後の観測継続性

■ 観測システムの技術開発

- 最適な観測センサーの評価・選択・開発
- ICT化・ソフトウェアベース化による海底部システムの低消費電力化、低コスト化、多点化
- 上記に伴う陸上装置の小型化、低コスト化

■ 設置・回収・メンテナンスなどの海洋技術開発

- より大規模な展開が可能となる技術開発
- 容易な設置・回収・メンテナンス技術の開発



大学・研究機関・企業の研究者・技術者で議論を行い、次期システムの技術的仕様を策定する体制

今後の展望・提案(その2)

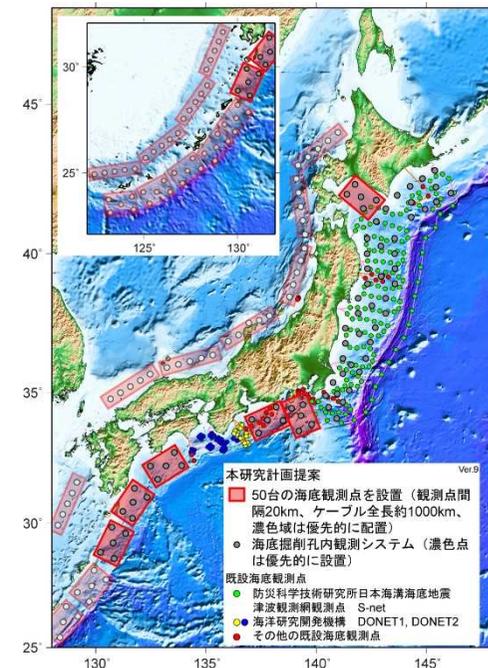
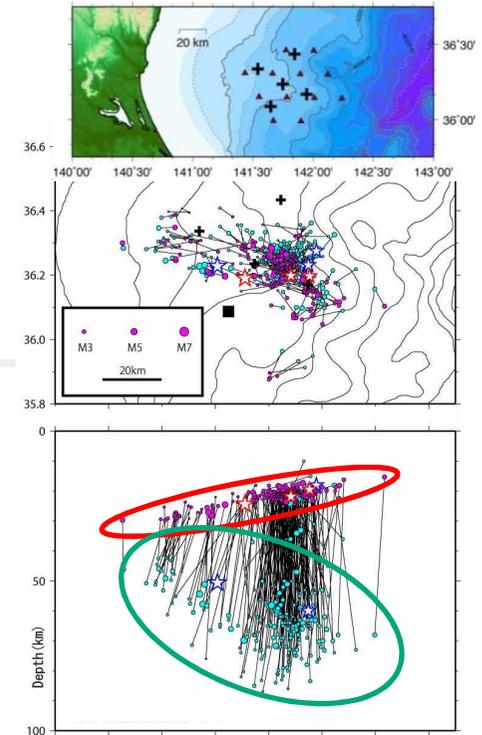
■ データ解析技術の開発

- 海陸データを統合して、正確な震源、震源解を迅速に求める技術開発
- 津波のリアルタイム監視・即時予測を行う解析技術開発
- 即時でなくてもよいが、リアルタイム性を生かした解析技術の開発も、学術としては、重要

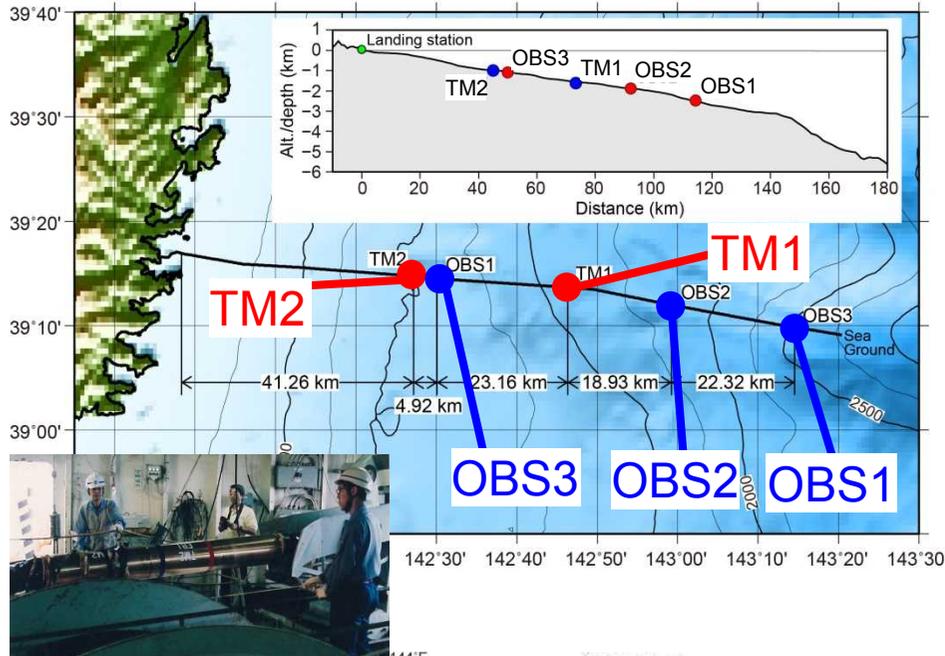
解析技術開発については、大学・研究機関による(学術的な)研究を、技術移転する体制が期待される

■ 観測システムの日本沿岸全域への展開

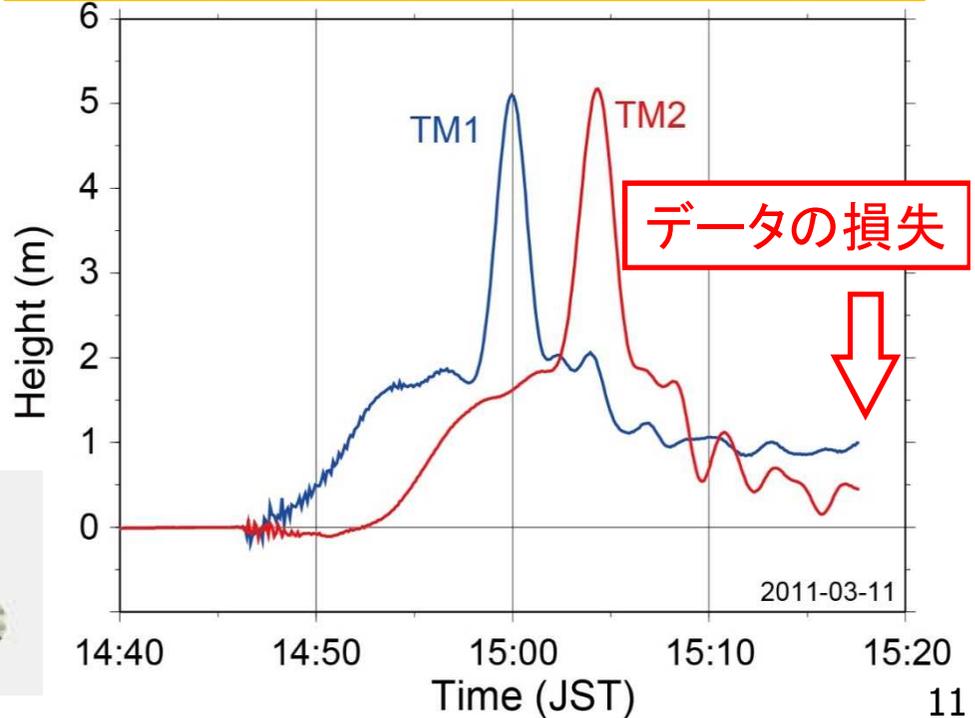
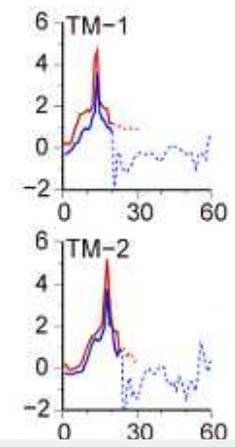
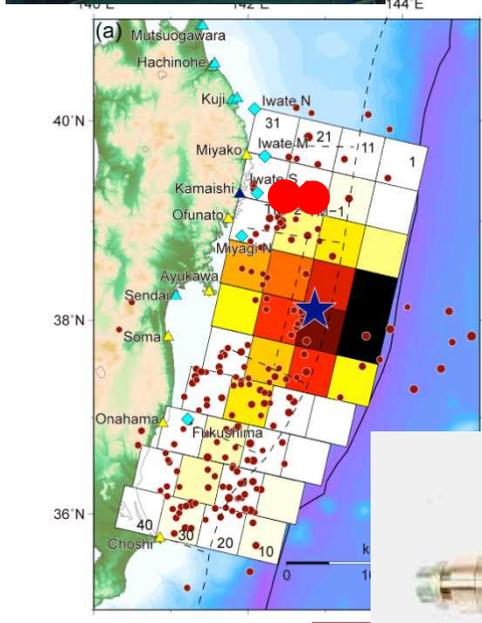
- 北海道沿岸、東海沖、四国沖から日向灘への観測システム設置
- 日本海側や南西諸島についても、設置が望ましい
- GNSS/A観測網や海底掘削孔を用いた測地観測網との積極的な組み合わせ



三陸沖海底地震・津波観測システム



- 従来技術(ITU-T G.704)を用いた3台の地震計と2台の津波計による観測
- 1996年設置、全長120km
- 震源決定精度の向上・高精度津波観測
- 東北地震の津波波源域の位置推定に大きな寄与
- 津波により陸上局が被災



Fujii et al., 2011

システム復旧および観測再開

観測システムの復旧

1. 陸上局舎の再建
2. 既存システムの受信装置
3. 更新ケーブルの新規設置

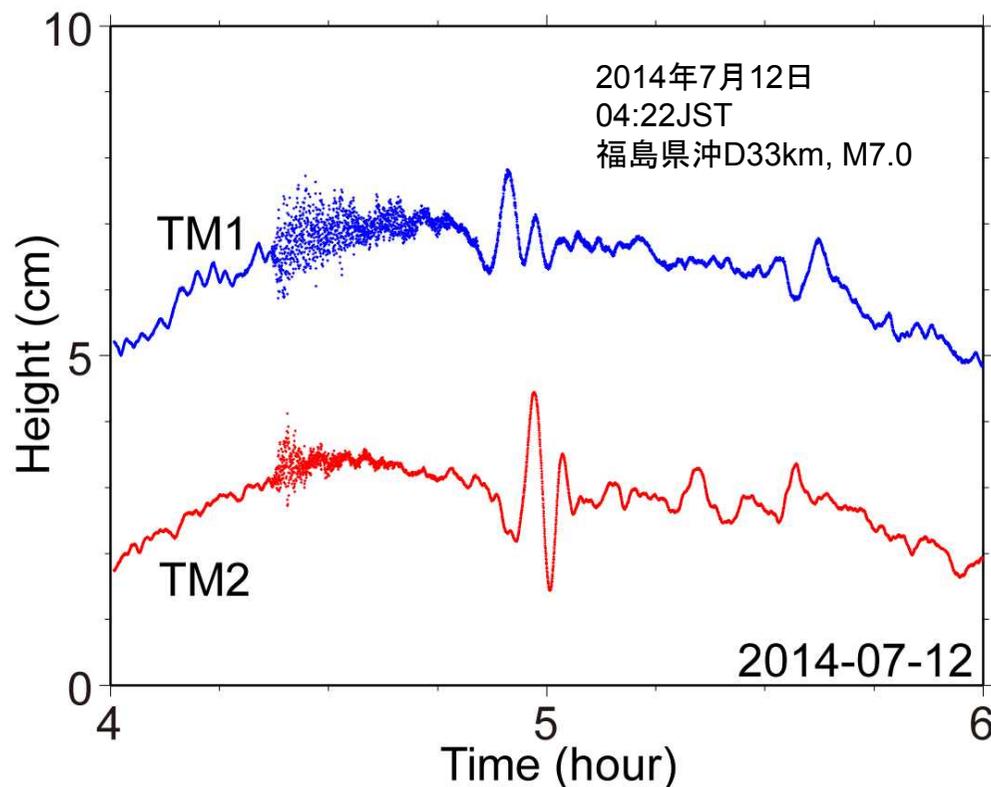
局舎再建

- 今回の津波と同規模の津波でも流失しない頑強性
- 鉄筋コンクリート平屋
- 海水の浸入を極力防ぐ
- 既存システムと更新システムの受信装置を収納



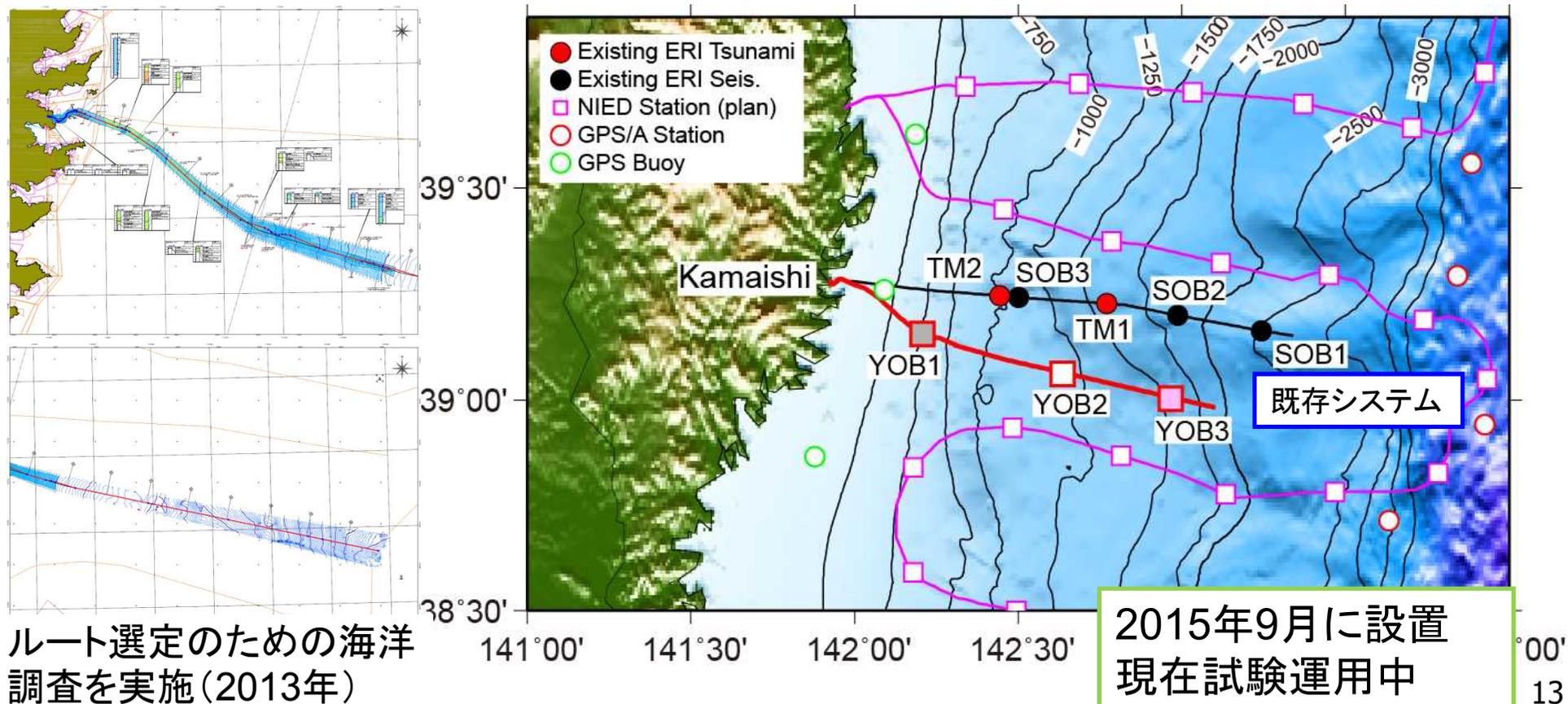
2013年12月竣工

- 2014年3月22日に内部機器を局舎に設置し、調整を開始した
- 2014年4月7日に調整が完了し、データの受信、観測を開始
- 以降連続観測実施、データ流通網にもデータを試験的に供給
- 2014年6月11日より、気象庁津波警報へのデータ活用も開始



三陸釜石沖ケーブル観測システム (ICTシステム)

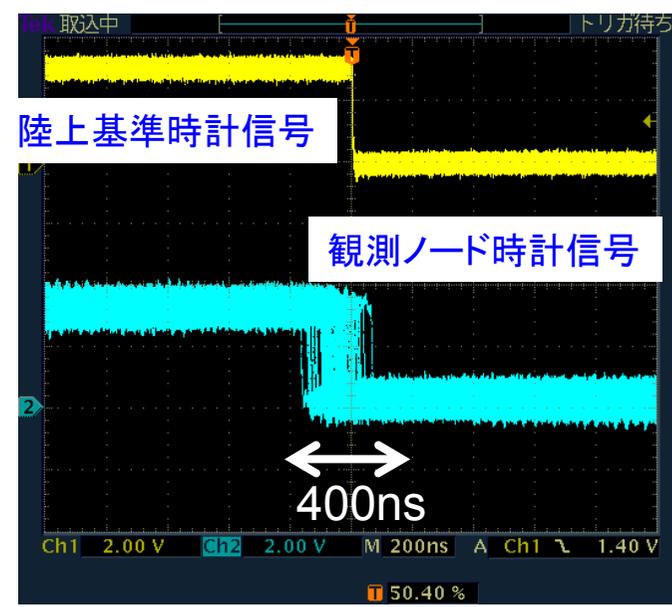
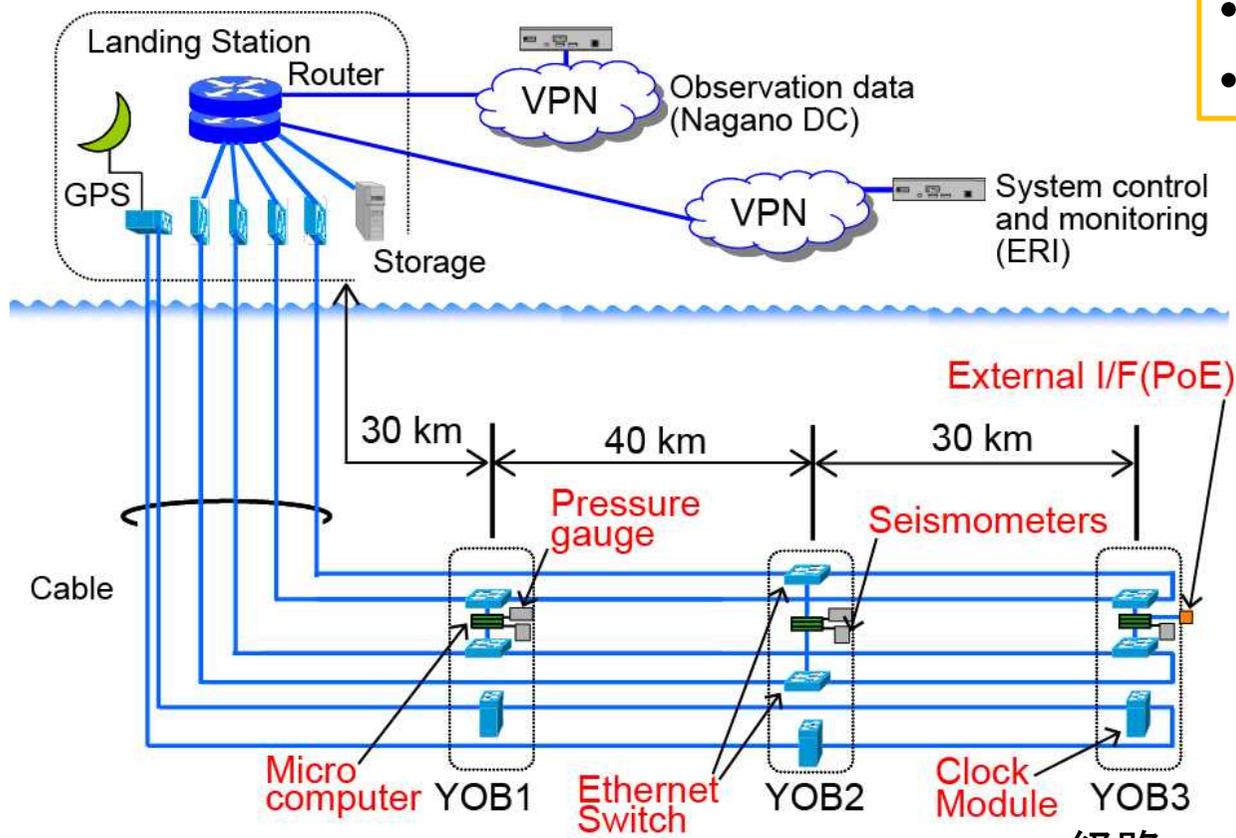
- TCP/IP方式 (粟島システムの高度化システム)
インライン、TCP/IPの積極的な利用による低コスト高信頼システム
- 観測ノードには3成分加速度と圧力計 (YOB1, YOB2) または3成分加速度とPoEポート (YOB3) を搭載
- ケーブル長は105km、陸揚げは既存システムと同一



ルート選定のための海洋調査を実施(2013年)

ICTシステムネットワークと機能

- 水圧計I/F、PoE機能搭載
- IEEE1588(時刻同期)
- ギガビット、WDMの導入



クロック専用線もループ形状

経路
折り返し

IEEE1588によるネットワーク
経由での時刻同期

信頼性の確保とコストパフォーマンスの向上

- PoE Interface
- TCP/IP インターフェイス 伝送速度 10Mbps
- 供給電力 12W程度
- 水圧計、広帯域地震計などを接続可能

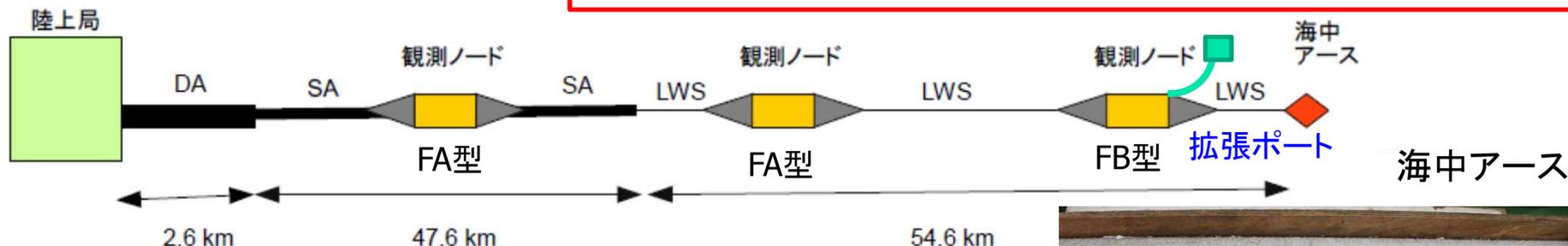
- 現在は、RS232C出力の精密水圧計が接続され、観測中である
- 陸上局サーバに直接接続されているように見える

ICTシステム全体

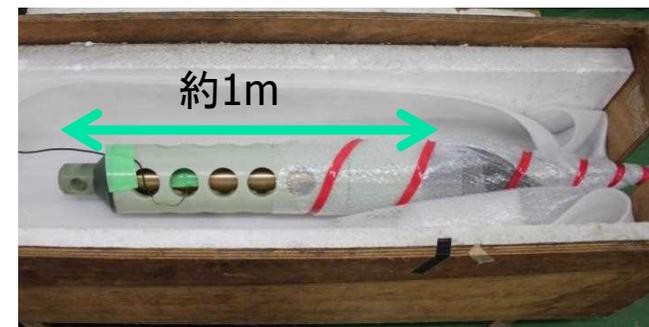
光海底ケーブル総長105km

観測センサー

- 3成分加速度計(すべてのノードに装備)
- 高精度水圧計(FA型)または、PoEポート(FB型)

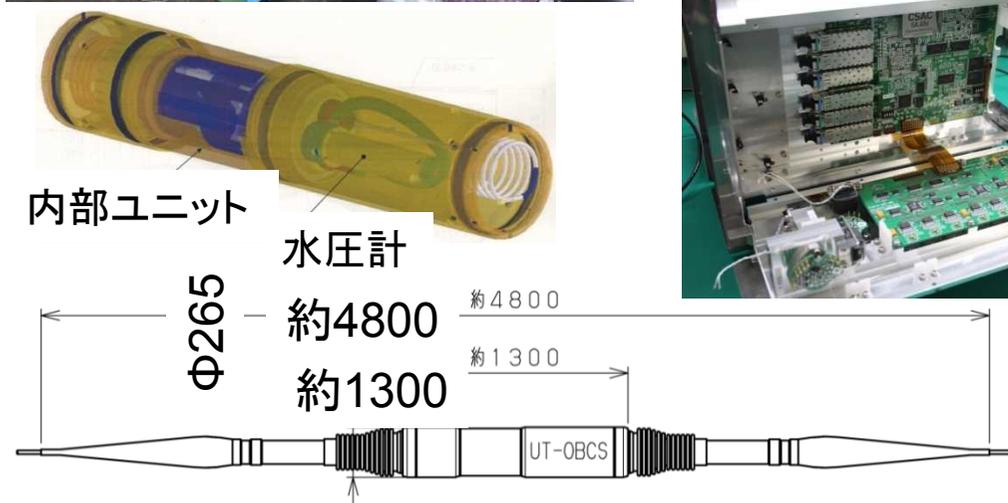
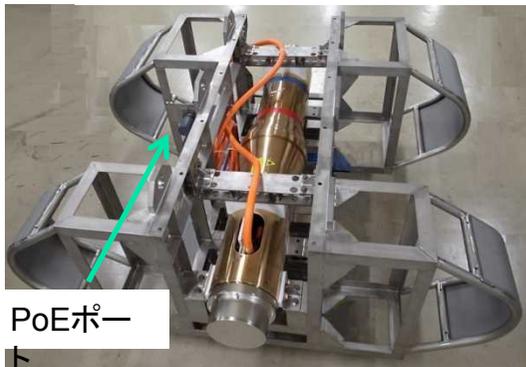
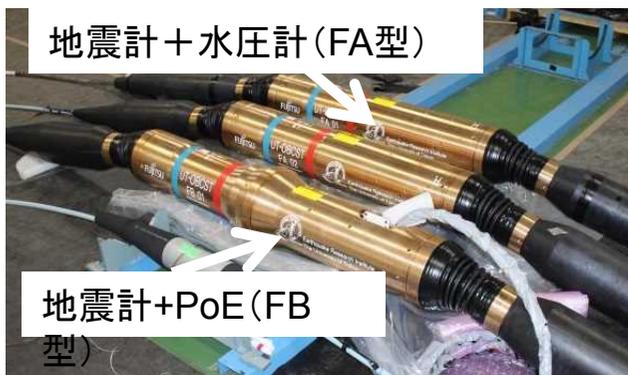


PoE観測ノードのフレーム構造

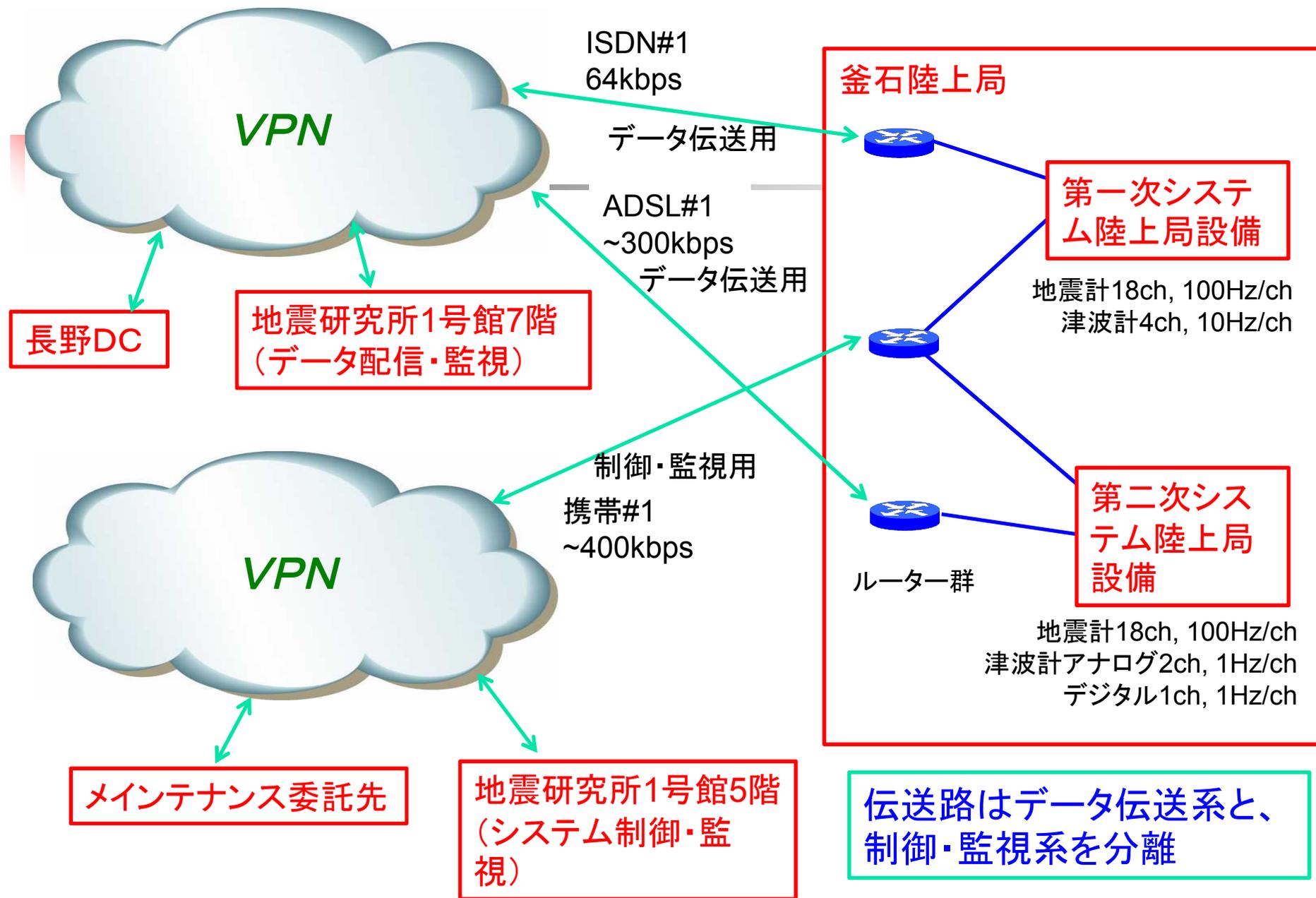


デジタル出力水圧計をPoEポートに取り付けた状態で敷設

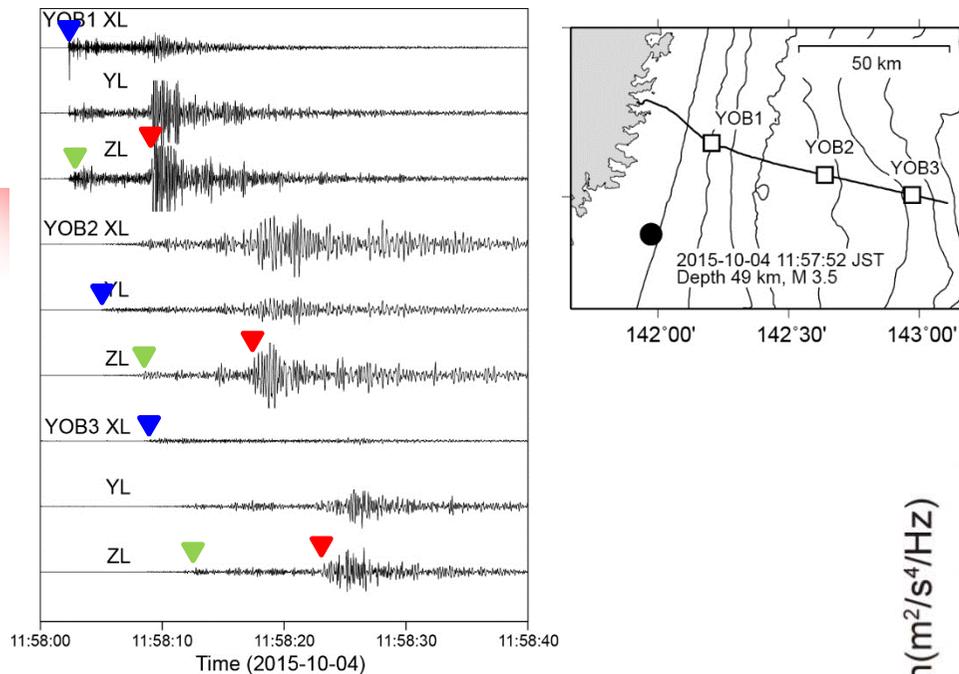
- ### 観測ノード筐体の新設計
- 中継器用規格化筐体を利用
 - 溶接封止の導入
 - フィードスルー方式の導入
 - 精密圧力計またはUMCの搭載



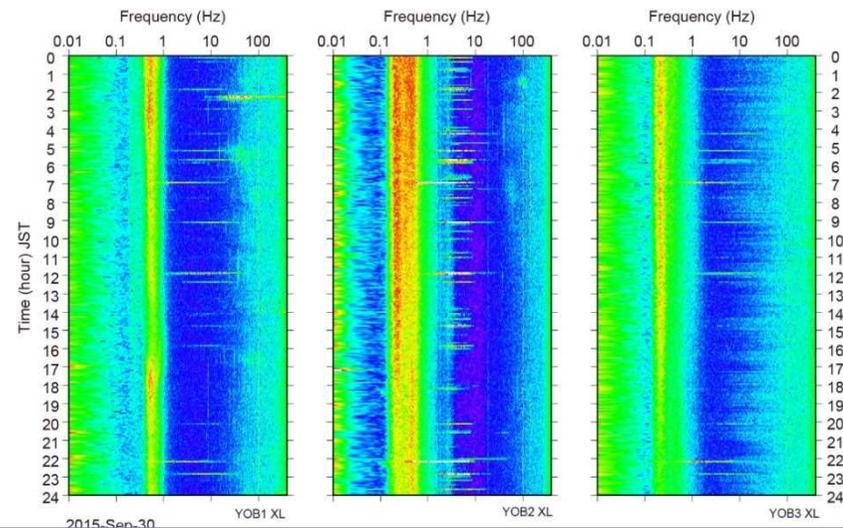
三陸システム陸上ネットワーク



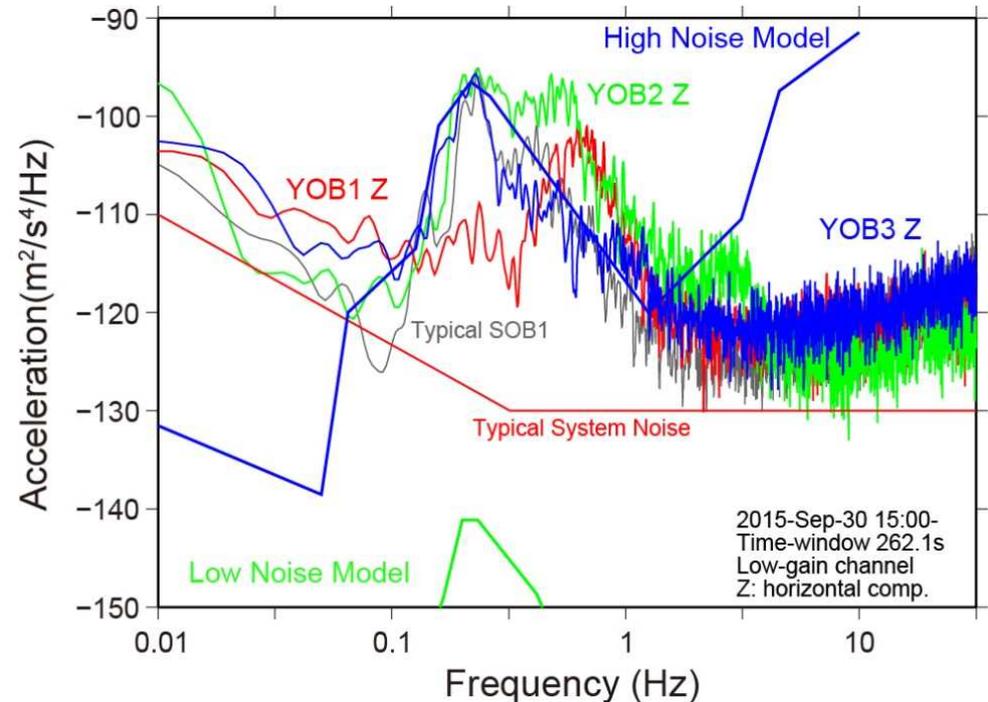
記録された地震データ



- センサー JA-5TypeIII
- A/D 24 bits Δ - Σ 方式、1kHz
- センサー直結と25秒HPFの10倍増幅の2チャンネルを取得
- 最小ステップ $4 \times 10^{-6} \text{m/s}^2$ 、フルスケール2.5GのA/D変換
- 陸上局で、100Hzに変換し、伝送



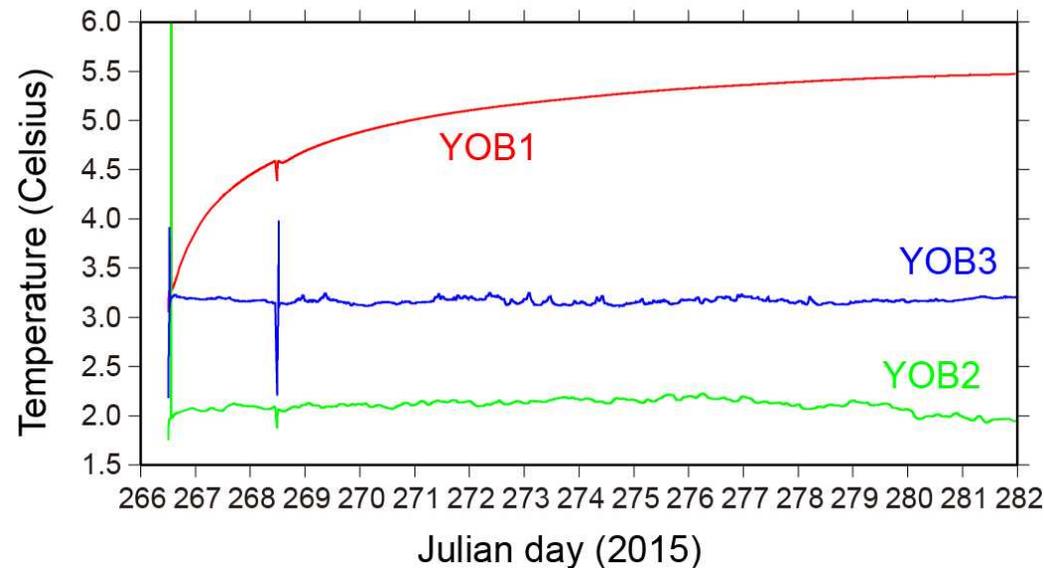
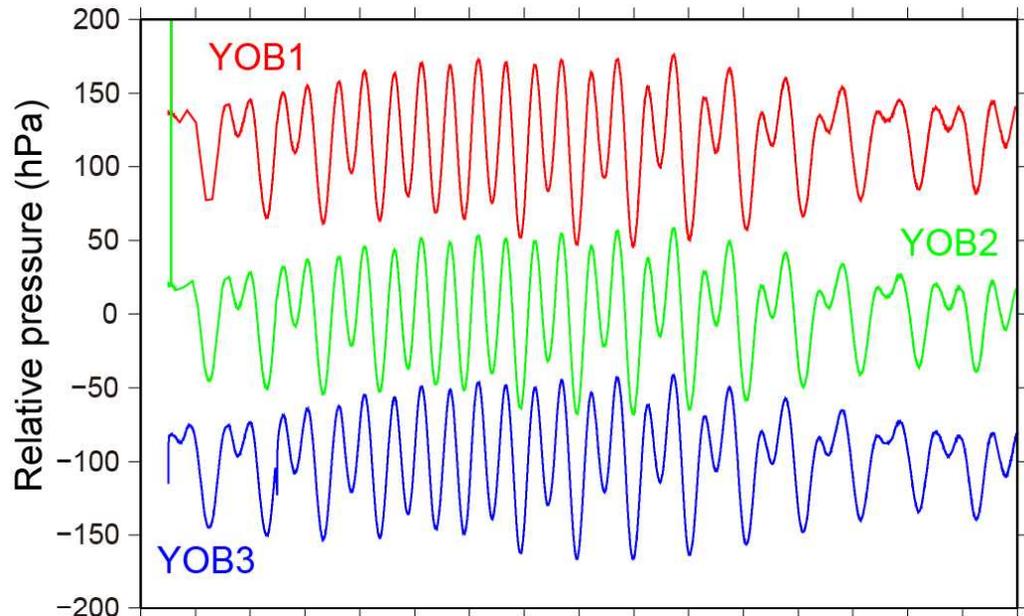
- 2015年9月30日の1日間のランニングスペクトル
- 埋設した観測点が最もノイズが小さい



地震学的ノイズスペクトル

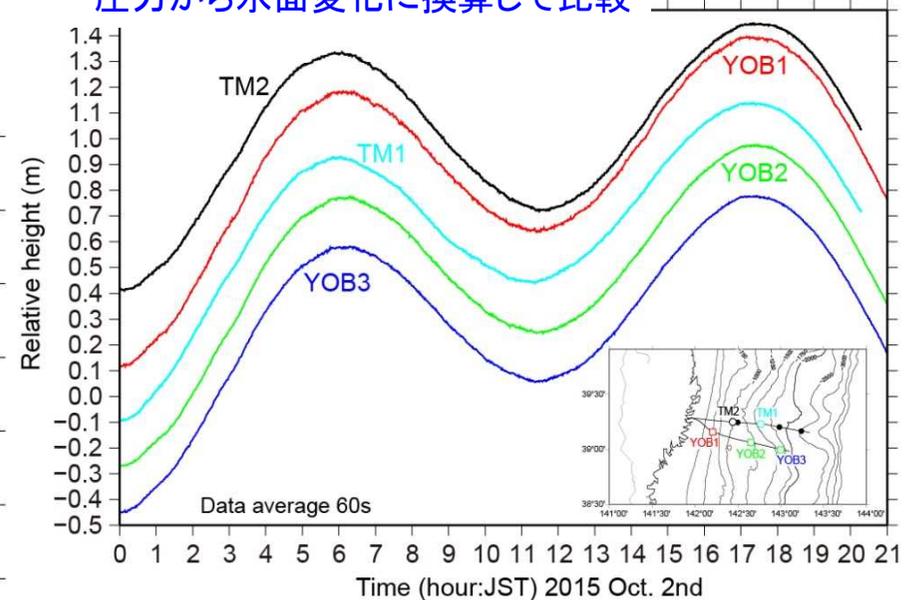
- 既設システムと同等のノイズレベル
- 埋設した観測点では、脈動のレベルが20db程度低くなる

記録された水圧データ



1秒データから、60秒間平均を計算

圧力から水面変化に換算して比較



- センサー 8B2000-285
- カウンターの基準クロックは10MHz
- 約1kHzのサンプリング
- 圧力出力を、温度出力を使って補正
- 陸上局で1Hzとし、圧力変換後、伝送

水圧計の記録

- 埋設水圧計の温度は地震と共に増加するが、短時間の時間変化は小さい
- 海底の水圧計の温度は、海水の温度変化に起因すると思われる変動がある。
- 埋設した観測点の水圧計の感度が、海底面の水圧計に比べて、著しく変化しているとは認められない。