

## 三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システム 釜石陸上局舎の再建

田中伸一<sup>\*†</sup>・宮川幸治<sup>\*</sup>・八木健夫<sup>\*</sup>・荻野 泉<sup>\*\*\*</sup>・  
山田知朗<sup>\*\*\*</sup>・酒井慎一<sup>\*\*\*</sup>・卜部 卓<sup>\*\*\*</sup>・篠原雅尚<sup>\*\*\*</sup>

### The rebuilding of the Kamaishi land station of the optical cable type ocean bottom seismometer & tsunami meter system off the Sanriku coast

Shinichi S. TANAKA<sup>\*†</sup>, Koji MIYAKAWA<sup>\*</sup>, Takeo YAGI<sup>\*</sup>, Izumi OGINO<sup>\*\*\*</sup>,  
Tomoaki YAMADA<sup>\*\*\*</sup>, Shinichi SAKAI<sup>\*\*\*</sup>, Taku URABE<sup>\*\*\*</sup>  
and Masanao SHINOHARA<sup>\*\*\*</sup>

#### 1. はじめに

東京大学地震研究所では、三陸沖で発生する地震や津波の情報を収集するため、平成 10 年度に三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムを構築し、平成 11 年度に運用を開始した。このシステムは 3 台の加速度型 3 成分地震計 (OBS1~3) と 2 台の水晶発振方式津波計 (TM1, 2) を光海底ケーブルで結んだもので、光ケーブルの終端である釜石陸上局舎は岩手県釜石市八木浜に設置された。図 1 に釜石陸上局舎の位置、同システムの設置概念図を示す。海底地震計/津波計の座標は表 1 を参照されたい。それぞれのデータは陸上局舎より専用線を用いて東京大学地震研究所のサーバーに蓄積されていた。

表 1. 地震計および津波計の設置座標

観測装置	緯度	経度	水深
TM2	39° 14.759'N	142° 26.687'E	1,013m
OBS3	39° 14.531'N	142° 30.098'E	1,057m
TM1	39° 13.696'N	142° 46.320'E	1,618m
OBS2	39° 12.001'N	142° 59.278'E	1,840m
OBS1	39° 09.828'N	142° 14.571'E	2,480m

2014 年 11 月 17 日受付, 2015 年 1 月 9 日受理.

<sup>†</sup> sst@eri.u-tokyo.ac.jp

<sup>\*</sup> 東京大学地震研究所技術部総合観測室

<sup>\*\*</sup> 2013 年 3 月 31 日に退職

<sup>\*\*\*</sup> 東京大学地震研究所観測開発基盤センター

<sup>\*</sup> Technical Supporting Section for Observational Research, Earthquake Research Institute, University of Tokyo.

<sup>\*\*</sup> Retired on March 31, 2013

<sup>\*\*\*</sup> Center for Geophysical Observation and Instrumentation, Earthquake Research Institute, University of Tokyo.

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う巨大な津波は、東北・関東の沿岸部に壊滅的な被害をもたらした。特に、リアス式海岸地域および隆起海岸域は津波高が増す傾向にあり、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループの報告によると、大船渡市綾里湾では遡上高およそ 40m という記録が残っている (東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ Web サイト)。三陸沖光ケーブル式津波観測システムはこの津波を鮮明に捕らえており、貴重なデータを記録したが、その後、データ伝送が途絶した。

平成 23 年 4 月 12 日に釜石局舎の現状を確認したところ、八木浜にも津波が到来した痕跡があり、標高およそ 18m にある釜石陸上局舎の基礎から上が完全に流失していた (図 2 (左))。一方で、埋設していた光ケーブルは一部露出がみられる (図 2 (右)) ものの損傷は見当たらず、光パルス試験機 (Optical Time Domain Reflectometer, OTDR) を用いた調査の結果、3 台の地震計と 2 台の津波計を繋ぐ光ケーブルに断線が生じていないことを確認した。次に、独立行政法人防災科学技術研究所から光ケーブル式海底地震・津波計の簡易送受信装置を借用し、平成 23 年 7 月 18 日に動作試験を行なった。同時期は余震が頻発しており、地震計、津波計で得た情報を解析したところ、全て正常に稼動することが確かめられた。これらの調査結果を受けて、三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムの釜石陸上局舎を再建することとなった。

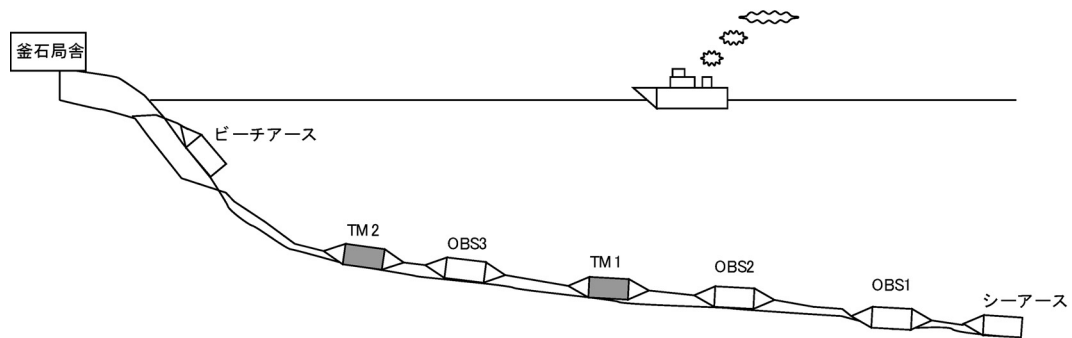


図 1. 三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムの釜石局舎位置（上）及び海底地震・津波計の設置イメージ（下）



図 2. 平成 23 年 4 月 12 日における釜石局舎付近の調査，局舎は完全に流失し，通信アンテナ用のマストもへし折れている（左）。また，海岸付近は津波で大きく土壌がさらわれ，光ケーブルの一部が露出していた（右）。



## 2. 陸上局舎付近の土地の造成と光ケーブルの再埋設

釜石陸上局舎再建に向けての協議が進む中、平成 23 年 9 月に勢力の強い台風 15 号が東北地方を襲い、局舎付近

にも土砂崩れの被害がでた。その際、埋設していた光ケーブルが露出してしまい、応急対策としてロープで光ケーブルのたるみを引っ張りあげた（図 3）。以前に比べて、局舎近辺の土壌が脆弱になっているとのことで、造成工事に伴って地形を大きく変更することとした。具体的には、土砂



図 3. 平成 23 年の台風 15 号の影響で八木浜は土砂崩れを起こし、埋設した光ケーブル/ビーチアースケーブルが露出した（左）ため、応急処置としてロープでたるみを支えた。



図 4. 土砂崩れを起こした部分を大幅に造成した。石を入れた布団かごの下には光ケーブルが埋設されている。

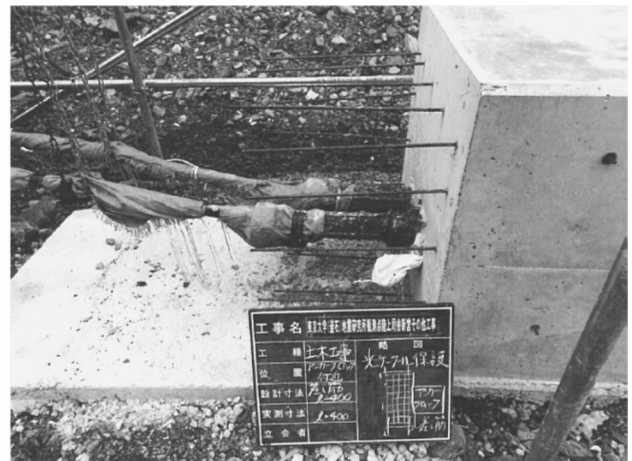


図 5. 海岸に近い部分は光ケーブルに防護管をかぶせてコンクリートで埋めた

が大きく流失した部分に盛土をし、傾斜をなるべくゆるやかにし、最大斜面部分には、崩落防止のため石を詰めた布団カゴを敷設した。また、土が露出した部分に芝を植え、土壌の流失防止と景観の向上を図った(図4)。海岸から釜石局舎までの光ケーブルの埋設は3つの部分で異なるタイプの工事を行った。まず海岸から急斜面までは、波や漂着物によるケーブルのダメージが懸念されるため、光ケーブルに防護管をかぶせコンクリートに埋め込んだ(図5)。布団カゴを敷いた急斜面部分と一部の緩斜面はエフレックス管に光ケーブルを通して埋設した(図6)。今後、新しい光ケーブル式海底地震・津波観測システムを増設することを想定し、空のエフレックス管1本を追加している。釜石局舎付近においては、新システムの追加などで複数回掘り起こすことが想定される。そこで、コンクリート製のU字溝とフタを用意して、その中にエフレックス管を通すことで、重機によってエフレックス管やケーブルが痛まないよう保護した(図7)。



図6. 布団カゴを敷いた急斜面と一部の緩斜面は光ケーブルをエフレックス管で防護し埋設した。

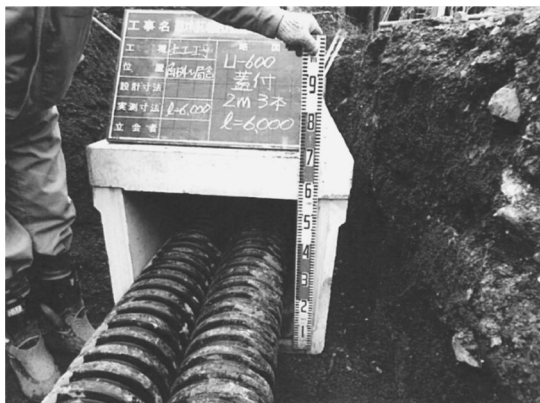


図7. 釜石陸上局舎付近は、新システム増設時に重機によって複数回掘り出されることが想定されるため、エフレックス管をコンクリート製のU字溝で防護した。

### 3. 新陸上局舎の設計と建築

釜石陸上局舎はリアス式海岸特有のV字谷に設置されているため、津波による被害のみならず周囲からの土砂崩れによる被害の危険性も無視できないが、局舎近傍は2基の砂防堰堤によって守られている。一方で、津波により流失した旧陸上局舎はプレハブタイプの建屋を使用していたため、津波の被害に対して脆弱であった。そこで、新局舎は旧局舎に隣接する西側に建築することとし、「津波に対して高い耐性を持つ建屋」を念頭において設計することとした。

新局舎の設計施工の基礎的資料として、地質地盤状況を調査した。新局舎建築予定箇所のV字谷をほぼ直行する南北2点において、機械ボーリングを用いて掘削孔径 $\phi 66$  mmのコアボーリングを行った。次に、土の軟硬あるいは締め具合の相対値を知るために標準貫入試験を行い、 $N$ 値を求めた。 $N$ 値とは、重量 $63.5 \pm 0.5$  kgのハンマーを76

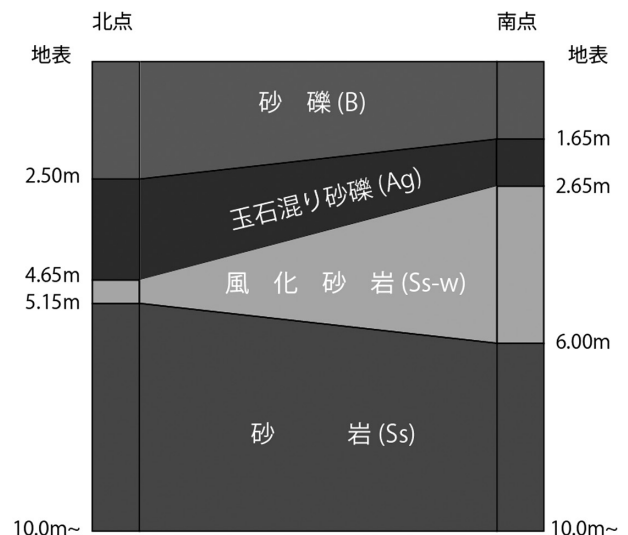


図8. ボーリングによる新釜石陸上局舎下の地盤調査結果





±1cmの高さから自由落下させ標準貫入試験用サンプラーを30cm打ち込むのに要する打撃回数と定義づけられている。地質調査およびN値測定結果を図8および表2に示す。埋土層(B)は砂岩風化帯を母材とする砂礫層であり、礫径φ10~40mm程度の亜角礫を主とし礫間は風化粘土により充填されている。全体に雑然とした地質であり、N値は6~15程度でありやや固い。現河川氾濫堆積物(Ag)は埋土層下に分布し暗灰色を呈す玉石混り砂礫より成り、礫径φ10~40mm程度を主とする砂礫に直径60~150mm程度の玉石(砂岩)が混入している。N値は全て50以上の極大値を記録したが、いわゆる“礫当り過大値”と判断され、正確な値ではない。砂岩帯は調査地一帯を構成する基盤である。岩盤等級区分により風化帯(Ss-w)と弱風化帯(Ss)に細分された。砂岩風化帯(Ss-w)は現河川氾濫堆積物下に分布し、礫混り粘土~角礫状を主とする。N値は71相当であり、風化帯といえども高値を記録した。砂岩弱風化帯(Ss)は砂岩風化帯下に深く分布し、亀裂の多い硬岩相当であるため、標準貫入試験の対象外である。従って、N値が50を超える砂岩風化帯以深が強固な地盤であるといえる。より頑丈な基礎を作るため、地上高マイナス2.5mまで掘り進め、厚さ1.5mの強固なコンクリートの耐圧版を設けると同時に、長さ約15mの強靱な地盤アンカーを8セット用意し、砂岩弱風化帯に打ち込むこととした。

津波対策の参考として、東北地方沿岸部津波被害地域において基礎および壁面が残っている建屋を調査したところ、その壁の厚みは、おおよそ200mmであった。この結

果を基に、設計会社と協議し、コストを勘案してコンクリートの壁面厚を500mmとした。使用するコンクリートは対衝撃性の高い材質を選んだ。また、コンクリートをしっかり支えるため、鉄筋は1辺10cmの格子状に組み上げることとした。光ケーブルは地下に埋設して津波の影響を最小限に抑えている。そこで、局舎に地下ピットを設けて、光ケーブルを地上に露出させることなく引き込むこととした。建屋は鉄筋とコンクリートで構成され、窓は設けていない。出入口は1箇所とし、鋼製の水密扉を設置した。以上を盛り込んだ簡易設計図を図9に示す。シミュレーションによって新局舎の耐震評価を実施したところ、東日本大震災時の地震動の3倍の揺れと3倍の津波高に耐えられることがわかった。

建築工事は平成25年6月中旬より開始された。まず敷地内を約2.5m掘って整地し、アンカーを計8箇所打ち込み、捨てコンクリートを打設して墨出しをし、鉄筋の正確な配置を決めた。その後、格子辺10cmになるよう鉄筋を組み上げ(図10)、型枠を設置して耐圧版、基礎、コンピューター室(1階)、屋根の順にコンクリートを打設していった。コンクリートが固まった後に、高強度超速硬化ウレタン複合密着工法にて屋根を防水処理した。完成した

表 2. 地層区分表

地層区分		区分表記	構成土質	N値
現世	埋土層	B	砂礫	6~15
第四系	現河川氾濫堆積物	Ag	玉石混り砂礫	50以上
三畳系	砂岩帯	風化帯	風化砂岩	50/21~50/0
		弱風化層	砂岩	-

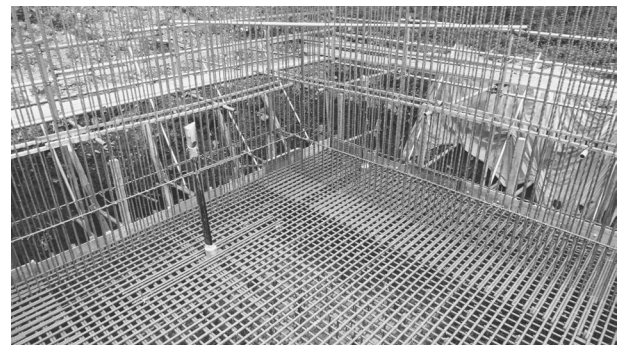


図 10. 鉄筋の組み上げ風景。床面は耐圧版部である。

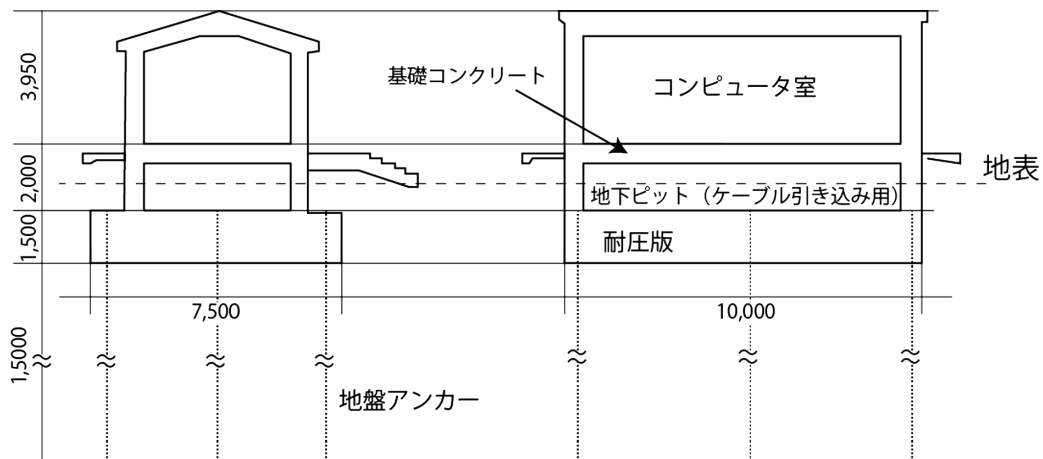


図 9. 新釜石局舎の設計寸法の単位はミリメートル (mm) である。

新局舎の外観写真を示す（図 11）。

#### 4. 新陸上局舎の内装や機能

地下ピットの役割は、海底地震・津波観測システムの光ケーブル及びビーチアースケーブルの引き込み（図 12）、商用電源線、電話線やエアコン用配管の引き込み、集水用釜場に溜まった水を排水ポンプにて排出することである。地下ピットの写真を図 13 に示す。局舎から水深約 200 m



図 11. 完成した新釜石陸上局舎。

の海底までの光ケーブルは、波浪や漁具などの外的要因によって機械的に破損する可能性が非常に高いため、それらからケーブルを防護するための鉄線外装を 2 重に施し、結果 40 トンの引張力に耐える構造になっている。ピットの壁面はパイプで外部と繋がっており、光ケーブルを引き込んだ後の根元部分は浸水防止処理を施している（商用電源等も同様）。光ケーブルの末端は外装を剥いてコンピューター室に引き込んだ。コンピューター室には結露防止のため除湿機を設置しており、その排水は釜場に一度溜められる。水がある一定量溜まると、ウキが浮き上がり逆流防止機能付き排水ポンプのスイッチが作動する仕組みである（図 13 右）。ポンプは 2 基設置されており、通常時は交互に作動するが、万が一外部からの大量の浸水があって釜場の水位が上がった場合は、自動的に 2 基が作動して全力排水を行なう。また、ピット内の浸水検知用のウキも設置しており、浸水が検知されると後述するシステムによって地震研究所に警報が届くようになっている。

コンピューター室には、配電盤、ノイズカットトランス、ビーチアース・局舎アースの接続口、エアコンディショナー 2 基、除湿機、今回新たに設計されたコントロールユニットが設置されている。配電盤への入力商用電源電力



図 12. 新局舎地下ピットへの光ケーブル・ビーチアースケーブルの引き込み風景

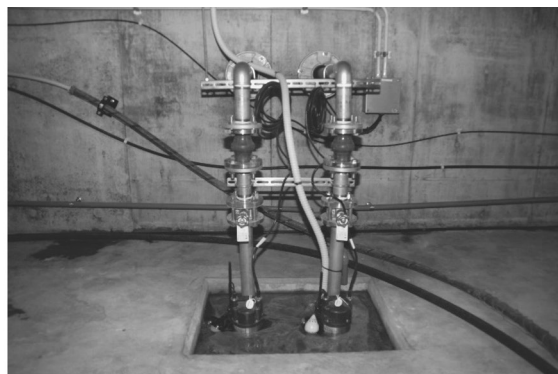


図 13. 新局舎地下ピットの風景（左）と釜場および排水ポンプ（右）



に加え、停電対策として局舎より高所に設置された発動発電機からの電力も入力される。商用電源が停電すると、30秒以内に発動発電機が起動し給電を始める仕組みになっている。バックアップできる日数はおよそ4日間である。また、商用電源復電後は自動で発動発電機が停止する。

### 5. コントロールユニットの概要

コントロールユニット(図14)は、写真下より①無停電電源、②海底地震計・津波計へ給電する電源、③スイッチングHUB、④光受信装置、⑤地震・津波データ変換装置(ワークステーション)、⑥ディスプレイ、⑦時刻信号発生・分配装置、⑧GPS受信/信号発生装置、⑨光信号発生装置、⑩警報監視装置で構成されている。コントロールユニットは、光ケーブルを介して海底地震計および津波計に電力やGPSクロック情報を送る。この時、⑧GPS受信/信号発生装置で受信したGPS時刻情報は⑦時刻信号発生・分配装置に送られ、その時刻情報と同期したクロック信号をCMI

(Code Mark Inversion) 符号化して海底地震計/津波計に届けている。海底地震計/津波計は電力を得て作動し、受信したGPSクロック信号に地震/津波の情報を乗せてコントロールユニットに送り返す。その情報は④光受信装置に入力され、⑦時刻信号発生・分配装置からの信号と比較してズレがないことを確認させている。その後、地震データは8kHz、津波データは10Hzのレートで、LAN経由にて⑤ワークステーションに入力される。なお、海底地震計からは微小地震から巨大地震までの波形を得るために、低感度( $\pm 1.66$  V/G)と高感度( $\pm 500$  V/G)の地震データが出力されており、地震データはワークステーション上でそれぞれデシメーションフィルタにかけられ、100Hz、20bitまで間引きされる。津波データは1分間平均値を計算して出力する。これらのデータはWINパッケージ化され東京大学地震研究所のサーバーにリアルタイムで伝送/蓄積される。図15は同システムで得られた地震/津波のデータである。上の図は、平成26年7月8日21時52分ごろに39.1253°N、142.9588°E、深さ23.6kmにて発生したM4.1の地震による

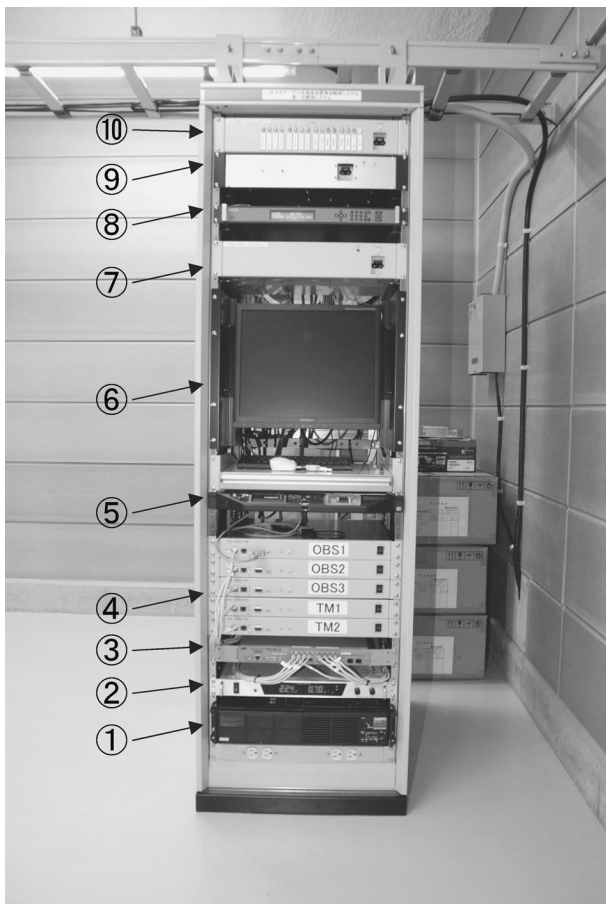


図14. 新たに設計された三陸沖光ケーブル式地震・津波観測システムのコントロールユニット。①無停電電源、②海底地震計・津波計へ給電する電源、③スイッチングHUB、④光受信装置、⑤地震・津波データ変換装置(ワークステーション)、⑥ディスプレイ、⑦時刻信号発生・分配装置、⑧GPS受信/信号発生装置、⑨光信号発生装置、⑩警報監視装置。

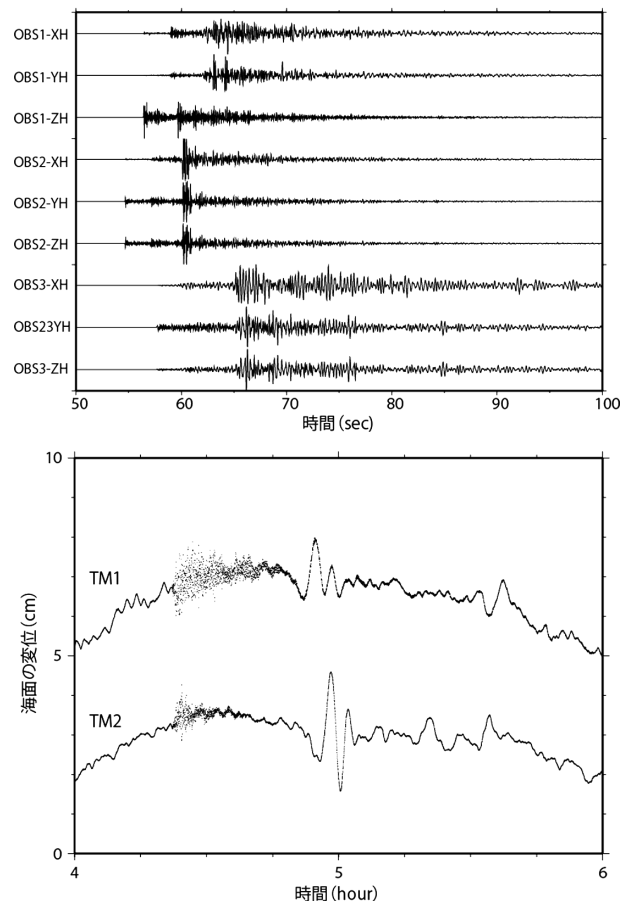


図15. (上図)平成26年7月8日21時52分ごろに39.1253°N、142.9588°E、深さ23.6kmにて発生したM4.1の地震による地動の波形。(下図)平成26年7月12日4時22分ごろに37.0500°N、142.3208°E、深さ33.0kmにて発生したM7.0の地震による津波の波形。

地震動を OBS1~3 (High ゲイン, サンプリングレート 100 Hz, フィルターなどの補正はかけていない) で捉えたものである。震源は OBS2 に最も近く, OBS2, 1, 3 の順に P 波が到達している様子を鮮明に捉えている。なお, この地震計は, ケーブルの方向が X 軸で, おおよそ東西方向であるが, Y 軸と Z 軸は, それに直交するというだけなので, どちらが鉛直方向なのかは, 重力加速度の値と比較して計算する。実際に, OBS1 の Z 軸は鉛直方向とほぼ同じであるため, Z 軸の P 波部分の振幅が圧倒的に大きい。一方で, OBS2 の Z 軸は鉛直方向からおおよそ 45° 傾いているため, Z 軸と Y 軸の P 波部分の振幅がほぼ同じ加速度を示している。ただし, 地震計の形状が円筒型なので, 大きな揺れで回転してしまう。実際に, 東日本大震災の前後で, 向きが変化してしまった事例もあり, 解析には注意が必要である。図 15 の下図は, 平成 26 年 7 月 12 日 4 時 22 分ごろに 37.0500°N, 142.3208°E, 深さ 33.0km にて発生した M7.0 の地震による津波を TM1.2 (サンプリングレート 10Hz をそのままプロットしている) で捉えたものである。地震発生直後より 20 分程度は津波計が地震波や海面反射波などに揺らされてデータがばらついている。その後, 水深 1,618m の TM1 に周期おおよそ 5 分, 最大振幅 1.6cm の海面変動が見られた。その 1 分 20 秒後に水深 1,013m の TM2 に周期約 5 分, 最大振幅 3.0cm の海面変動が見られた。⑩警報監視装置は, ラック内の各装置およびエアコン, 除湿機, 配電盤, 水密扉からの警報を受け取り, 前面パネルの LED ランプにて状態を示すと共に, 警報状態をステータス信号パケットとして地震・津波データ変換装置に送り 1 分毎に動作状況 WIN パケットを生成して, 地震研究所のサーバーに伝送/蓄積される。

## 6. 保 守

新陸上局舎が建設された八木浜地区一帯は無人のため, 定期的に保守作業を実施して維持, 管理に努めている。商用電源および発動発電機の稼動試験については東北電気保

安協会と契約し 1 か月に 1 回の頻度で実施している。台風や豪雨などが発生した場合は, 地元の施工業者である及川工務店の協力のもと現況調査を行っている。海岸から数メートルより先は光ケーブルが露出しており, 波浪による被害を受けやすいため, ダイバーによる目視調査と写真/動画撮影を年に 1 回程度の頻度で実施する (図 16)。図 17 は平成 26 年 8 月に新釜石局舎を保守した際のメンバーである。

## 7. 最 後 に

東日本大震災において八木浜地区にも津波が到来し, 瓦礫などの痕跡により, 標高約 25m まで津波が遡上していたと推定される。同地区に居住されていた住民の方々も現時点において行方不明である。我々はこの大災害を忘れぬため, また将来の防災のため, 到達点付近に大津波記録碑を設けた (図 18)。

東日本大震災から 3 年後に再稼動した三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムは平成 26 年 11 月現在において正常に稼動しており, 研究に必要なデータを取得し続けている。また, 津波のデータは平成 26 年 7 月より気象庁の津波警報システムに活用されており, 防災の分野にお



図 17. 平成 26 年 8 月に新釜石局舎の保守を実施



図 16. ダイバーによる光ケーブル沿岸部の状況調査





図 18. 平成 26 年に大津波記録碑を建てる.

いても活躍している。東京大学地震研究所技術部総合観測室では、平成 26 年度 11 月現在で 3 名の職員が同システムの保守を担当しており、万が一トラブルが発生しても即応できる体制を整えている。今後は、最新式の光ケーブル式海底地震・津波観測システムが新釜石陸上局舎に増設される予定であり、研究や防災に対する更なる貢献が期待される。

謝 辞：三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システム新釜石局舎は「設備災害復旧経費（光ケーブルテレメトリ式海底地震観測設備（陸上部分）」の予算で再建されました。釜石局舎は民地を借用しており、地主の梅津紳一郎氏には、長期利用にあたり格別のご理解とご配慮をいただきました。及川工務店の合田弘司氏には、釜石局舎の施工に関してレクチャーを頂きました。地震研究所テレメータ室の出川昭子氏には同システムのデータ/警報伝送に対して多大なるご協力を頂きました。また、本稿を改善するにあたり、査読者の岩崎貴哉教授と新谷昌人准教授には有益なご助言をいただきました。記して深く感謝いたします。

#### 文 献

東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ Web サイト <http://www.coastal.jp/ttjt/index.php>（最終更新日平成 24 年 12 月 29 日）