

いのである。少なくとも、応力レベルごとの頻度分布情報をよりどころに解析される疲労予測などの手法によってはこれだけでは無力である。最大ひずみ記憶センサーが総リスク減少に寄与するためには、最大値情報の有効な解析方法が確立されなければなるまい。

ふくらむ夢

とはいえ、TRIP 鋼のような知能材料を応用した計測システムは、大きな可能性を秘めている。最大ひずみ記憶センサーは地震時の最大ひずみを従来よりもはるかに安価に計測できる。システムのメンテナンスも容易で、きわめて信頼性が高い。発明者らのつくったアメリカのベンチャー企業では、このセンサーを個人住宅につけようと考えている。地震時の最大変形情報を地震災害保険の料率に反映しようというアイデアらしい。ピーク値の大きさによって何かの警報をだすようなシステムも容易に考えられる。磁性量がある限界以上に達したとき変色するとか、スイッチが入る（切れる）とかの装置もできよう。構造材料自身がある種の知能的な特性を備えるということは、さらにさまざまな可能性を予感させる。航空機用のボルトやファイバージャケット繊維を TRIP 鋼でつくる試みはすでに紹介した。TRIP 鋼を粉末状にして塗料に混ぜるとなができるだろう、などと考える。

この塗料で塗装された自動車が衝突事故を起こす。これまで解析不能だった衝突時の様子が鮮明になり、あるいは自動車のあらたな改良がなされるきっかけになるかもしれない。自動車メーカーの技術者のお話では、実験場での衝突試験では追いきれない「リアルワールド」な現象というのは、まだまだいろいろあるのだそうである。

「はかる！」。つまるところ、それはそれぞれの技術分野ごとに有効な、現場情報の収集手段である。現場計測が建設技術の発展に寄与した功績は改めていうまでもない。ところでこの技術の発展はだれが担ってきたことだろう。センサーも、システムも、そのハードウェアのほとんどは、電気やコンピュータなど建設分野以外の技術の恩恵でもある。新しい夢が数々の知能材料とそこから得られる新しい情報。これもまた、広汎な技術の融合によって成熟していくものと思われる。

参考文献

下見成明・松井義昌・新川秀一・中泉義政：「最大ひずみ記憶センサーを用いた橋梁の診断技術」、土木学会「第3回耐震補強・補修、耐震診断に関するシンポジウム」講演論文集、1999.7

Tminaga.M, Thompson.L, Westermo.B: Passive Peak Sensor Technology: Development and Applications, International conference on current and future trends in bridge design construction and maintenance, pp.482-493, 1999.10

「海底」ではかる 海底地震計の開発

金沢敏彦 Toshihiko KANAZAWA

工博 東京大学地震研究所教授 地震地殻変動観測センター

海底の観測窓をあけること

地球表面の3分の2をしめる海底は地球内部を覗く窓である。しかしこの観測窓はまだ十分に開いてはいない。海域の大部分は地震観測の空白域として残されたままである。まずは地震をはかるために海底まで着って見ることにしよう。当たり前だが海底の上は海水である。日本周辺には水深8000mを越える極深海もあるほどで、海底で地震をはかるということは数百気圧に耐えることである。電源コンセントが見つからない。電波が届かない。電話がない。なだらかな海底は表面を柔らかな堆積物におおわれ一面田んぼともいった状態だ。岩盤は急な崖にしかない。このないないづくしをなんとかしないと海底で地震をはかることはできない。しかし、「海は広いな

大きいな」というわけで、好きに場所を選んで地震をはかることができるのは大きな利点である

。また、10 km 程度の距離であれば周波数 10・20 kHz の水中音波を利用して、海底にある観測機器を船上から遠隔制御したり、距離をはかったりすることができるのは、大きな助けである。

海底で地震をはかるための観測装置が海底地震計（Ocean-bottom seismometer 略して OBS）である。大きく分けて、ないないづくしにめげず一定期間を現地で収録する地震計と、自前の海底ケーブルを利用して給電とデータ伝送を行うオンライン・リアルタイム観測の地震計の2種類がある。

地震をはかる

テレメータ観測網で地震をはかる

日本では固定地震観測点のデータをテレメータし、地震の規模を示すマグニチュード0位の小さな地震までその活動が時々刻々と調べられている。観測点からの地震波形データは無線、専用回線、衛星通信を利用して大学や官庁関係機関のセンターに集められ、震源位置、マグニチュード、地震メカニズムなどが即時に決定されているのである。国によってすすめられている地震調査研究の基盤となる地震観測網は約1000点の観測点で日本列島全体を覆おうとしており、その地震観測点の間隔は20km前後となる。

海底ケーブルを利用する地震計は、このような陸上観測網が特定の海域にはり出したものと位置づけることができる。海底観測点からリアルタイムで陸上に送られたデータは陸上観測網データと合わせて処理され利用されている。東北の三陸沖海底は歴史的に津波被害をとまなう巨大地震が発生してきた現場であり、海底光ケーブルを利用する地震・津波観測システムが平成8年から観測を開始している、観測システムについてはあとで述べる。

機動的に地震をはかる

テレメータ観測網が規模の大きい地震や群発地震活動などをキャッチすると、現地収録型の観測装置の出番である。機動的な観測がなぜ必要か、毎年のように繰り返し発生してきている伊豆東方沖の群発地震活動を例にして見てみよう。

この地域の群発地震活動は、10km程度の深さですまは活動がはじまりその後時間とともに2-3kmの深さまで活動が浅くなっていくパターンがある。地下の流体移動によるものと考えられているが、活動がより浅くなると、1989年の手石海丘の海底噴火のような事態が予想されることになる。このような震源の移動を精度よく追

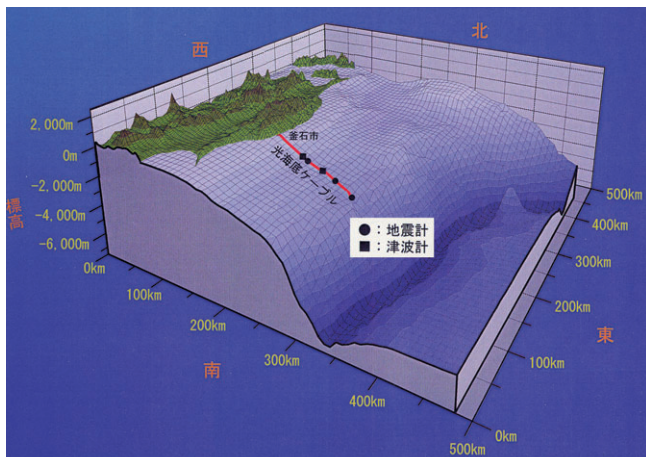


図-1 光ケーブルの敷設ルートと測器の設置位置

跡しようとする、地震の深さと同程度の2-3kmの間隔で観測点が必要となる。

機動的な観測はこのような高密度な観測を実現するための重要な地震のはかりかたであり、テレメータ観測網とは車の両輪の関係にある。

海底で地震をはかる

海底光ケーブルを利用する地震・津波観測システム

海底ケーブルを利用する地震計は御前崎の沖合海底に設置されているものが日本最初であり、その後房総沖、伊東沖、相模湾、三陸沖、室戸沖と設置されてきた。4年前に敷設された伊東沖のシステムから光ケーブルが使われている。

ここでは、三陸沖のシステムについて紹介する。三陸釜石から12心ファイバーの海底光ほぼ真東に日本海溝に向かって120km沖合まで敷設されている。ケーブルの途中に割り込む形で地震計3台と津波計2台が設置され、光ファイバーコアを取り囲む銅パイプをとおして陸側から定電流給電されている(図-1)。高い信頼性を保つためシステムにはいろいろな工夫がある。海底部装置の一つが故障した場合でも、他の観測データは収集できるように各装置毎に専用のファイバーを割り当てている。地震動センサーにはジャイロ用の小型3成分加速度計を使用して、機械的な可動部を必要とするセンサ-姿勢制御装置を排除している。アナログ・デジタル変換器は高信頼性の16ビット精度であるが、センサー信号の増幅率に300倍の差をつけた低倍率と高倍率の記録チャンネルを用意することでダイナミックレンジの層の拡大をはかっている。津波計のセンサーは温度補償型の水晶圧力計である。陸側からセシウム発振器による高精度基準信号を専用光ファイバーを通して各津波計の周波数カウンタに送り込むことで、水柱換算1mm(数千メートルの水深で水位の変化をミリメートルの分解能で測定できる)という高い感度を達成した。海中に突入直前の地震計を写真-1に示した。地震計の耐圧容器の両端から光ケーブルが出ている。表-1にはシステムの主要な仕様を示した。

表-1 三陸沖の海底光ケーブル式地震・津波観測システムの主な仕様

観測点数	5か所(地震観測点3か所、津波観測点2か所)
地震観測装置	加速度型地震計(3成分) 周波数帯域(低感度:DC-200Hz) (高感度:0.05-200Hz)
津波観測装置	津波計センサ(1成分) 周波数帯域(DC-0.1Hz)
海底伝送方式	光ケーブル伝送方式、海底長約120km
給電方式	直流定電流給電(約0.4A)
テレメータ方式	衛星通信を利用して東京大学地震研究所に伝送

本システムにより三陸沖の地震モニタリング精度は画期的に向上し、ケーブル先端近くで昨年が発生したM6.3の地震では、本震発生後に余震活動が時間とともに空間的に広がっていく様子がみてとれた。また、2台の津波計はこの地震に伴う津波高1cm程度の微小津波をみごとに捉えた。世界で最初である。地震に伴ってどのように津波が発生し伝搬するのかそのメカニズムの解明につながるデータであり、今後の観測例の積み重ねが期待される。

機動型の広帯域海底地震計

地震波は震源から観測点に到達するまでの伝播経路の情報をもっている。地震をはかることは、地震という現象を知ることのほかに、地球内部の構造の不均質を知ることでもある。全地球の構造不均質を調べ地球内部の運動を明らかにするために、高精度な広帯域地震計を1000 - 2000 km 間隔で全地球表面に配置し世界中で発生する地震からの波を観測しようとしている。このような研究計画を進めるうえで、地球表面の3分2をしめる海域でのデータが不可欠である。このため開発を進めてきたのが、海底設置型の広帯域地震計であり、また海底ポアホールを利用する広帯域地震計である。陸上の

地震観測と同様に、前者による機動型観測と後者による固定点観測は相互に補完する関係にある。写真-2に海底設置型の広帯域地震計の外観を、写真-3に房総鋸山で試験観測に入るためクレーンで吊り上げられた海底ポアホール用センサー群を示す。これらセンサー群は、三陸沖の海底光ケーブル式地震・津波観測システムのケーブル先端部付近に掘削されたポアホール内に、この8月にモルタル固定された。将来的には三陸沖の光ケーブルに接続しリアルタイム観測することが計画されている。

ここでは写真-2に示した海底設置型の広帯域地震計についてその仕様を紹介する。海底観測の特殊事情をクリアしながら開発されてきたものであり、現在、北西太平洋と三陸沖海底の2か所で観測中である。この地震計の原型は日本で開発されたもので、油制動の自由ジンバル（水平姿勢制御装置）にのせた固有周期4.5 Hzの速度型地震センサーを利用する自己浮上式の機動型海底地震計である。水深6700 mの海底で使用することのできる直径42 cmのガラス球に、センサー、増幅器、記録器、時刻信号発生器、電池を収容する。観測船上から海中に投げ込み、自由落下方式で海底に設置される。1 - 2か月の観測をおこなった後は、船上からの水中音波による命令を受けて重りを強制電蝕で切り離して軽くなり、浮力で海面まで毎秒1 mの速さで浮上する。海面に顔を出した地震計は、電波を発信しストロボを発光する。観測船は、この信号を利用して目視で発見して地震計を回収する。これまでに日本周辺のプレート沈み込み帯での観測を主として、アイスランド周辺の海嶺、ノルウエー周辺の大陸縁辺部、インド洋の海嶺、東太平洋海嶺など世界中の海で、地殻の地震波速度構造の調査と自然地震の観測に使われてきた。延べ観測点数は優



写真-1 海中に突入直前の地震計の外観（両端から光ケーブルがでている）

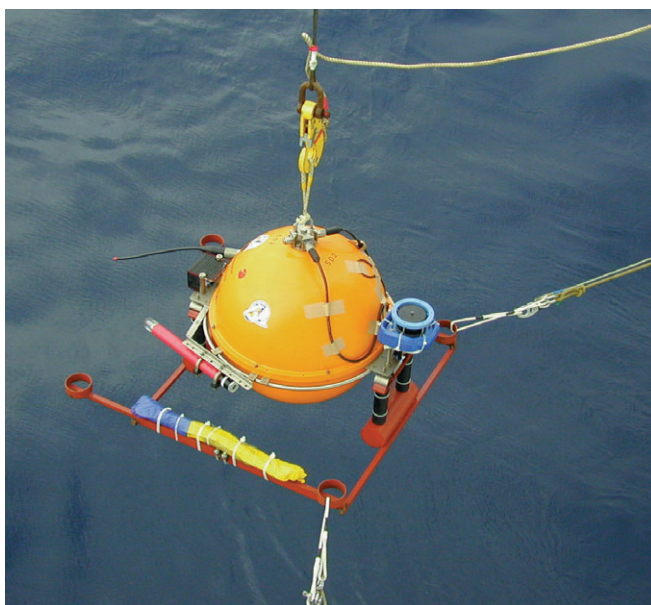


写真-2 開発された海底設置型の広帯域地震計の外観

表-2 海底設置型広帯域地震計の主な仕様（400日記録用）

センサー	CMG-1 T型3成分広帯域地震計 周波数帯域 0.003-50Hz
ジンバル 記録方式	海底面傾斜の補正（±20度まで） 20ビット・128Hzサンプリング・3成分の連続 記録
記録媒体	2.5インチハードディスク6.5GBを4台
電源	リチウム1次電池（3.6V，2 280Ah）
浮上方式	超音波トランスポンダー命令によるおもりの 切り離し
耐圧容器	直系65cmのチタン球（耐圧6 000m以上） 空中重量90kg，余剰浮力70kg）
寸法・重量	1.2m × 1.2m × 0.7m 空中重量190kg，浮上時の余剰浮力30kg

に1 000点を越える．今も現役バリバリの海底地震計である．新たに開発された海底設置型の広帯域地震計についての仕様を表-2にまとめた．1年程度の20ビット精度のデジタル連続記録が可能である．開発のキーとなる技術は，システムの低消費電力化，水中音響通信による地震計システムの制御と時刻信号発生器の精度較正，耐腐食性，データ回収のための自己浮上機能の信頼性の向上，広帯域地震センサーをのせて姿勢制御するジンバル機構の開発等である．

土木技術への期待

最後に，海底で強震動をはかろうとする試みはまだされていない．海底強震計もまだない．強震動を高精度に観測するには計器を海底に固着させることが必要となり，ただ海底に置くということにはならないであろう．海底ポアホールを利用することが考えられるが掘削費用



写真-3 海底ポアホール田センサー群の外観

の点で多数の観測点は無理である．地盤改良を施した海底に固着させるか適当な構造物を海底に建設して設置するのか，海底で地震をはかるために近い将来に土木技術の利用が必須となるのではなかろうか．