



ケーブル式海底観測システムの水圧データ解析から 世界に先がけて、津波が 生まれる瞬間の姿を捉えた

2003年9月26日早朝に起きた十勝沖地震は、北海道沿岸各地に地割れや沈降、津波の爪痕を残したが、同時に海溝型地震の研究に寄与するたくさんのデータが収集された。特に海洋科学技術センター（現：海洋研究開発機構）が設置したケーブル式海底観測システムは、今回の地震の震源域に位置し、世界で初めて海溝型大地震の震源域で貴重なデータを得た。深海研究部の平田研究員は、海底観測システムの水圧計のデータを解析し補正を加えることで、地震によって海底が隆起し津波が発生した経過を正確に捉え、いくつかの「世界初」の研究成果を携えて国際学会で発表。大きな反響を呼んだ。

平田 賢治 研究員
深海研究部



スキーとバイクと放浪旅行が趣味、アウトドア派の平田研究員だが、最近は仕事に追われてなかなか時間が取れないという。

Blue Earth編集部(以下BE) 十勝沖地震についての研究をサンフランシスコの学会で発表されたそうですね。

平田 はい。でも全体像を理解してもらうために、まず2003年の十勝沖地震津波の現地調査と、1952年の十勝沖地震津波との比較から説明しましょう。1952年には釧路の東から霧多布までの間で4m以上の津波があり大きな被害が出ました。2003年の地震では、北海道広尾町に2mを超える津波の第一波が押し寄せました。大津漁港では漁船が打ち上げられ、花咲漁港では車が水没するなどの被害が報告されています。

僕が大学連合調査チームの現地調査で行った大津港では岸壁奥に設置されていた20フィートコンテナのところまで漁船が打ち上げられていました。大学の先輩研究者と協力してかなり精度の高い測定儀で津波の痕跡高を測ったのですが、大津港の他の地点はみな津波の跡が同じ高さを示すのに、このコンテナだけ40cm低い。「おまえのポールの持ち方が悪いんじゃないか」と何度も測り直しをさせられました。でも、よくよく観察してみたら、もとはコンテナの四隅に厚さ10cmのコンクリートブロックが4枚ずつ積んであったらしいんです。それが津波が引くときに引っ張られて外れた。

BE 津波が引いていくときの力はかなりのものなのですね。



写真1 襟裳の西側の様子(さまに)漁港は、十勝沖地震の影響で22cm沈降し、岸壁を超えて海水が道路まで来ていた。



写真2 豊頃町の海岸で津波痕跡高の測定をする平田研究員と北海道大学の西村氏。ばらばらだった木っ端くすが津波によって再配列され、きれいに並んでいる。



写真3 十勝港。水が引くときに海に向かってなぎ倒された道路際の草。よく見ると、根っこごと引き抜かれているのがわかる。

平田 それはもうすごいです。津波の2日後に調査に行った十勝港の道路では、何百mにもわたって道端の草が枯れていました。現地調査の結果を見ると(図1)、津波痕跡が高かったのは襟裳岬の百人浜や晩成温泉で約4m。それから釧路に向かってだんだん落ちていく。襟裳岬の西側では3m以下で西に向かっていたら落ちていくのが特徴です。

1952年の大地震の時に津波痕跡高の測定をしています。襟裳岬の西側では今回の大地震とそれほど違いがないのに、東側では明らかに違う。1952年の地震では昆布森から霧多布の間で3m以上、場所によっては6mを超えています。ところが今

回の地震では同区間は2m以下です。もう一つ違うのが百人浜で、1952年のときはすいぶん低い。

今回、日本中の地震学者が注目しているのは、1952年とまったく同じ地震が繰り返したのかということです。私は「違う」と考えています。

BE それはどのようなことからわかるのですか。

平田 まず海岸線にある検潮所(井戸を設けて潮の高さを測っているところ)・全24観測点のデータをまとめてみました。襟裳岬の庶野ではあまりに急激に水位が上昇して浮きが井戸を越えてしまい、それ以降のデータはありません。十勝港でも伝送系のト

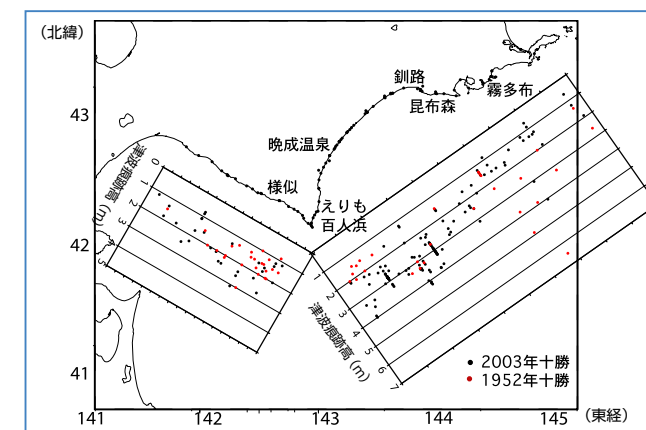


図1 2003年十勝沖地震の津波痕跡高分布(大学等合同調査チーム,2003)
1952年の津波痕跡高と比較すると、二つの地震の津波の様相が異なっていることがわかる。

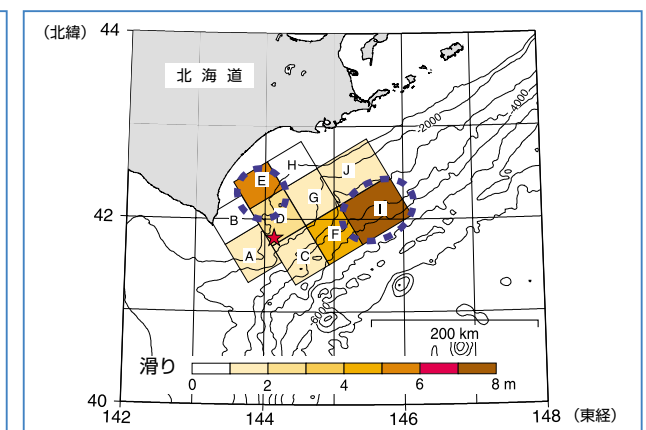


図2 1952年十勝沖地震：平田他モデル(Hirata et al., 2003, JGR)
断層が大きく滑ったところが2箇所(青い波線)あり、海底の強い隆起域と重なる。



写真4 検潮所の井戸。下から海水を取り入れ、そこに浮きを浮かべてその高さを測る。上は潮位を示すインジケータ。

ラブルが起きましたが、熱心な職員の方が地震後すぐに事務所に出てきて、伝送系とは別に表示されている電光インジケータの時刻と津波の高さを1分おきに書き写していたんです。その記録をもとに完全なデータを復元できるわけです。僕はこれらの記録から、津波の第一波到達時刻を読み取り、計算機上で各検潮所から仮想的な津波を起こしてみました。仮想的津波は各検潮所から外側に伝わっていきます。例えば、宮城県の鮎川検潮所には5時56分に津波の第一波が到達していますから66分かかった。つまり5時56分に鮎川に到達した津波の発生源は、この66分前に津波波源域のどこかの端になければいけない。各検潮所を起点とした津波逆伝播波面を結んでいく

と、津波の波源の境界がわかります。さらに1952年の十勝沖地震を解析し海底の隆起や沈降を計算した結果、西と東に強い隆起域がひとつずつあることがわかりました。しかし今回の地震では1952年の津波の発生源の西側でだけ津波が発生しているように見えるんです。

そこで1952年の十勝沖地震の震源域をいくつかのブロックに分けて、海底下の断層が平均何m滑ったのかを求めると、大きく滑った所が2箇所あります(図2)。だから津波の波源も2箇所あるのです。そこで私は10月の地震学会で「2003年十勝沖地震は1952年の西側半分だけ割れた可能性がある」という仮説を提唱しました。これから検証されていくと思います。

データ解析で初めて明らかになった津波の姿

BE 今回の十勝沖地震では海洋科学技術センター(現:海洋研究開発機構)が設置したケーブル式海底観測システムのセンサーPG1とPG2(図3)で直にデータを捉えることができたのですね。

平田 当時僕はこのシステムの開発チームにいましたが、とてつもなくたいへんだし

た。福島県沖に設置する予定だったのを土壇場で断念せざるを得ず、代替設置地を求めて全国行脚。北海道に的を絞ってからは毎週3〜4日間くらい北海道に出張する期間が8ヶ月くらい続きました。毎週朝5時起きで釧路に飛んでレンタカーで海岸線を回り、漁協と交渉です。人が少ないのにやるべきことは膨大でした。途中で当時計画管理課の関係者の方達にも地元との交渉を助けてもらいました。それでも今振り返るとそれぞれの項目で決して満足いくものでなかったような気がします。漁協等との地元交渉に力を入れざるを得ず、その結果、メーカーとの技術面での打ち合わせがおろそかになってしまった等反省点はつきません。設置直前の原因不明のノイズ対策とか、設置直後に海のケーブルと陸側の電線を接合するケーブルマンホールが設計ミスで2度も引っこ抜けたりなど、苦労話には事欠きません。あまりに出張が多いし、出張していない日でも深夜遅くにしか帰れず、女房にはかなり愛想つかされました(笑)。

今回の発表では主に水圧計の観測結果について話をしました。地震の前後のデータを見ると、地震が起こったところで変位している。これは地震によって海底が隆起したことを示します。理論的に計算した海洋潮汐を観測データから引いた残差圧力(pressure residual)で見るともっとはっきりします。これを捉えたのは世界初です。地震の後の1ヶ月半、1ヘクトパスカルの水圧を深さ1cmとすると1日に約4mm水深が減っています。上に乗っている水の高

さが減ったということですが、海水量は変わりませんからその後も海底がジワジワ隆起していることを示しています。PG1とPG2の誤差の限界が0.2mm/日以下なので、4mm/日の水圧変化は有意です。これは既に共同研究者が論文を書き、投稿しました。

地震の直後の隆起はどうかというと、PG1では一見すると水深にして30〜40cm相当分減っています。しかし温度も同時に下がっている。そうするとこのデータは素直には解釈してはいけません。PG1とPG2は水晶式の水圧計で、その周波数は温度によっても変化するからです。

BE 水圧のデータが温度の影響を受けている可能性があるのですね。

平田 ええ、10分かからずに温度が0.1℃変化しており、釧路沖のケーブル式観測システムで観測を始めて以来最大の温度変化です。これをきちんと評価しなければなりません。

観測システムの流れを説明しますと、ほんとうに測りたいのは水圧(P)と海水の温度(T)ですが、直接は無理なので円筒形の圧力容器の中での水圧(P₀)と温度(T₀)を測ります(図4)。これらは圧力によって変化する周波数(f₀)と、温度によって変化する周波数(f_T)としてケーブルで陸上に送られます。電信柱があるのは、直前になってある漁協からケーブル敷設ルートの変更を申し入れられたためです(笑)。周波数のデータは陸上局で圧力に変換します。この変換式には温度も入っており、これを便宜的に「静的な温度補正」といいます。

ですが今回よく見ると、静的な温度補正をした後でも温度の影響を完全に排除できていないことがわかりました。温度の影響を厳密に評価しないと海底が何cm隆起したのかわかりません。そこで、残差圧力がさらに「地殻変動や津波によって生じた圧力変化」、「過渡的(時間とともに進行する)熱的応答」、「温度」、「海洋内部重力波」、「その他の要素」に分解できると仮定した式を作りました。この式に基づいてPG2の過渡的熱的応

答を求め、温度の変化にかけてグラフにしてみると残差圧力とほぼ合っている。さあ実際の十勝沖地震に当てはめましょう、ということになったのです。

BE 補正を終えて、いよいよ津波のほんとうの姿に迫れるわけですね。そこから何がわかりますか。

平田 本震時に隆起した「地震時の海底隆起量」を水圧計から

求めたい。ただ、水圧計は固体の海底の上に置いてあっても、その上に流体層が乗っています。海底が隆起すると海水も一緒に隆起して等ポテンシャル面よりも高くなって津波の源となり、そこから水が逃げていきます。ですからその影響が収まるまでわからない。しかし津波の影響をゼロにしながら、なるべく本震に近いところで測りたいわけです。そこでモデル計算を行い、津波振幅がほぼ0になると予想される時刻をとって求めました。PG2のデータでは過渡的熱的応答の補正をする前は15cmだったのに、補正後はたったの3cmしか隆起していないという結果になりました。

BE たった3cmの海底隆起であれだけの被害が出たのですか。

平田 出たんですよ。この間サンフランシスコで「たった3cmの海底隆起だった」と話したらみんな「オーツ」といっていましたね。

最後に、これが世界で初めて津波の波源域で捉えられた津波誕生の瞬間の「絵」です(図5)。私は一番最初に、夜中の自分の机のパソコン画面でこれを見ることができました。また僕の2つ後に発表したNOAA/PMEL(太平洋海洋環境研究所)所長のエディ・バーナードが、僕の発表直後に飛んできて、「kenji、お前の最後の『津波誕生』の瞬間のスライドを貸してくれ!」と。彼の発表では、最初に僕のスライドを使って「さきほど日本の賢治・平田によって驚くべき発表がなされましたが…」といってくれました。システム開発段階からいろいろ苦労してきましたが、少し報われたかな?でも今から

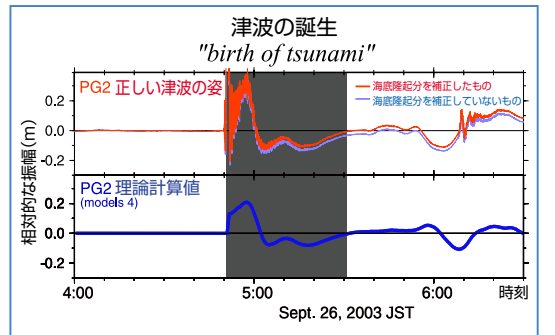


図5 水圧変化から見える津波誕生の瞬間(上図の橙色)。沿岸からの反射波が入っていない部分(グレーの背景)が本来の波源での津波の動きを示す。

はデータ解析に力を注いでいきます。とにかくあのような巨費を投じる観測システムの開発は2、3人が汗を掻いたくらいではとてもできるものではありません。そういう意味で人的資源の配置も見極めた上で今後とも実行すべきですね。

BE 観測システムを設置した真上で地震が起こって研究者としては幸運でしたね。

平田 あれだけ苦労しても何も起きない可能性も当然あったわけです。確率的には確か今後30年以内で60%の発生確率と言われていました。現に、気象庁が1980年に東海地震のために設置した同様の観測システムは、まだ東海地震が発生しておらず、そろそろ耐久年数に近づいてきました。また大地震は必ず被害を伴います。住民の方達に不幸なことが起きるのです。でも、我々のメシの種なのです。地震学者のジレンマですね。この十勝沖地震に関しては、しゃぶり尽くすようにデータ解析をするつもりです。またアフタースリップ(本震後の滑り)による海底隆起はまだ続いています。隆起が終焉するまで見てみないと、結局自然現象として何が起こったのかはわかりません。地震は人間の寿命に比べて、その繰り返し間隔が長い現象です。場所にも依りますが、日本では生きているうちに、多くても1回か2回しか大地震に出会わないと思います。だから、このような長期観測に基づく地震研究も簡単には結果がでませんが必要なものです。研究者以外の周囲のみなさんにもそのような覚悟で見守ってもらいたいですね。

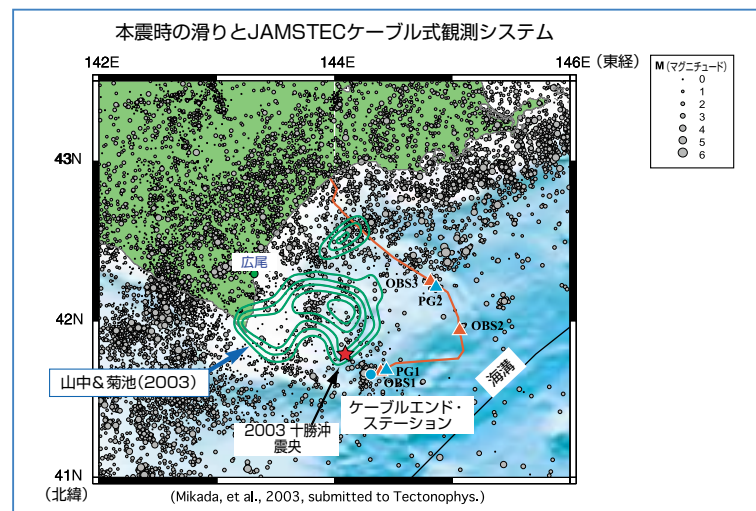


図3 2003年十勝沖地震の滑りの大きさの分布(Yamanaka and Kikuchi, 2003, submitted to EPS) および観測システムのケーブルルート図(Mikada et al., 2003, submitted to Tectonophysics.)。等値線間隔は1mで、真ん中で5m滑ったことを示す。

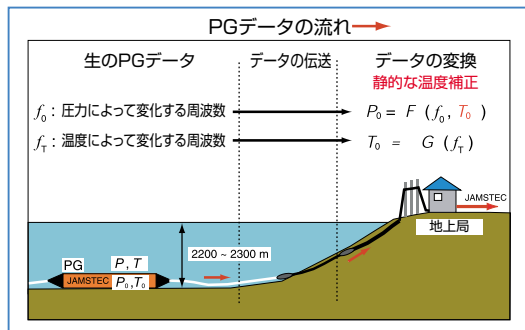


図4 PGデータの流れ 海底の水圧計からケーブルを通じてデータが送られ、陸上局でデータの補正が行われる。