

GNSS を用いた総合防災ブイシステム

加藤照之

(神奈川県温泉地学研究所)

■ はじめに

「GPS 津波計」という名前を聞いたことがあるでしょうか。海に GPS 受信機を搭載したブイを浮かべておいて、津波が沿岸に襲来する前に検知して住民の早期避難に役立てようとする装置です。これは私が 20 年以上前にアイデアを思いつき、共同研究者と共に開発してきたものです。本稿ではこの装置の開発の歴史を振り返り、今後どのような可能性があるのか、検討したいと思います。GPS は Global Positioning System の略で、米国で開発された、衛星を用いて地上の位置を精度よく決める装置です。1970 年代から開発が始められ、日本でも 1980 年代に入って受信機の導入が進みました。その後、ロシアや EU、中国なども安全保障の観点からそれぞれ独自の衛星測位システムが開発され、日本でも「みちびき」という名称で知られる衛星測位システムが導入されています。そこで、これらの衛星測位システムを総称して GNSS (Global Navigation Satellite System) という名称が改めて付けられました。タイトル及び次節以下では GPS と GNSS を混在させていますが、同じものと考えてください。

■ 「GPS 津波計」開発の歴史 ～三崎市での実験～

私は 2018 年 4 月から温泉地学研究所に在籍していますが、それまでは東京大学地震研究所で GPS を用いた地殻変動の研究を行っていました。最初は津波のことは考えておらず、地上に置いた GPS 受信機の

位置を cm 精度で計測し、それを繰り返すことで地面の動きを知ることを研究課題としていました。これは研究を始めた 1980 年代の当時としては大変新しい技術で、日本列島やプレートが日々計測できるということで大変注目されてきました。

そんな研究をしていたある日、この GPS 受信機を海に浮かべたブイに搭載すれば海面の動きがわかるだろう、それなら津波が来たらそれを検出して海岸にいる人々にデータをリアルタイムに伝送すれば津波からの避難に役立てられるのではないかと、思い立ちました。ですが、自力でブイを設置するなど思いもよらないことだったので、このアイデアは単なる思い付きですぐに忘れしてしまうくらいのものでした。それから何年かたった 1996 年頃のある日、日立造船株式会社技術研究所の方が私の研究室を訪ねてこられて、GPS を

使った応用研究をやりたいのだから何か良い考えはないか、と相談を持ちかけられました。造船会社とえば海で使うものがよい、と考えその時ふと上記のアイデアを思い出して提案してみました。この時訪ねてこられた方は現在に至るまで私と共同で研究が続けられている寺田幸博さんという方です。

大変良いアイデアと賛同していただき、すぐに実験に取り掛かりました。また開発の体制として会社内で数名の方のチームが発足しました。このような機動力は大学ではなかなか実現できません。こうして、まず試作機が作られ、神奈川県三崎市にある東大の臨海実験場敷地内の地震研観測所を基地として小網代湾にブイを浮かべました。図 1 がその時の写真です。数名で持ち上げられるくらいの大きさです。小さいながらもこのブイに GPS 受信機・アンテナ、



図 1 1997 年 1 月小網代湾で最初に使われた GPS ブイ。左：陸上で調整しているところ。右：湾内に浮かべたブイ。長い棒は無線送信アンテナ。短い棒の先についている平たい物体は GPS アンテナ。

バッテリー、無線機などを搭載しています。このブイを湾内に浮かべて、ブイから送られてくるデータを観測所で受けてパソコン上で海面変動をモニターすることに成功しました。この成功で、我々は大いに自信がわいてきました。

～採用されなかったブイ～

図1で示したようなブイですと、海面の変動に伴ってブイが揺れます。ブイの上にGPSのアンテナが設置されているとブイの揺れに伴ってアンテナの位置も揺れてしまいます。津波の計測で最も重要なのは海面の上下変動です（横方向の流れも重要なのですが、ここではとりあえず考えません）が、ブイの揺れが上下動の誤差になってしまえば困ります。そこで、考えられたのはスパー型のブイと言って、縦長の形状を持つものです。これは釣り好きの方ならわかると思いますが、縦長の形状を持つブイで重心位置が海面下のなるべく深いところにあるとブイの先端だけが海面上に出ていることになり、海面が揺れてもブイはそれほど揺れません。釣りであれば、魚の微妙な食いつきがわかるようにするために浮きがそのような形状になっています。ところが、ブイを細長い縦長にしてしまうと受信機や無線機を搭載

するスペースがとれません。そこで、これらを搭載するブイを別途用意し、2つのブイを少し離して設置する、というシステムを考えました。図2がそれです。アンテナを搭載した縦長のブイをセンサーブイ、その他の機材を搭載したブイをサポートブイと呼び、これらをケーブルと浮きで保持しています。これを用いた実験も同じく小網代湾で行い、成功を収めました（Kato et al., 2000）。個人的にはこれでよいと思ったのですが、他の方に言わせると、このシステムは複雑すぎ、これを外洋などに設置すると高波などであつという間にダメージを受けてしまうと言われ、あえなく却下となりました。

～最初の本格的な実験と最初の津波計測～

そこで、単独のブイシステムで開発を進めることにしましたが、機器開発のためには資金が必要です。そこで文部科学省科学研究費補助金の支援を受けることになりました。幸い申請が採択されて、はじめて自前の本格的なブイシステムを作ることができました。同時に、これを用いた試験観測をどこで実施するかということで考えましたが、たまたま日立造船OBの方で大船渡市出身の方がおいでになりました。大船渡市を

含む三陸沿岸一帯は津波の常襲地域です。地元の方々も津波の災害対策に対する意識は大変高く、早速大船渡市の協力の下、大船渡市沖で試験観測をすることとなりました。津波をいち早くとらえて沿岸住民の避難に役立てるためにはできるだけ沖合に設置する必要がありますが、まだ試験観測ということもあり、海岸から1.6km程度のところに設置することとしました。

ところで、データ解析の方法ですが、いわゆるRTK（リアルタイムキネマティック）と呼ばれる方式を採用しました。これは、カーナビなどで使われている単独測位とよばれる方法と異なり、地上でもブイ上と同時にGPS観測を実施し、データをリアルタイムで比較することにより、地上の位置に対するブイの相対的な位置を決定するというやり方です。このような方法によってブイの3次元的な位置、特に上下成分を1秒ごとに数cmの精度で決定することができます。

図3は大船渡に設置されたブイの写真です。全高は8mくらいあり、ブイの直径は2.8mで重さ12tonと、図1のプロトタイプのブイと比べたらはるかに大きなブイになっています。外洋ではこのくらいの大きさでないとだめなのということがわか

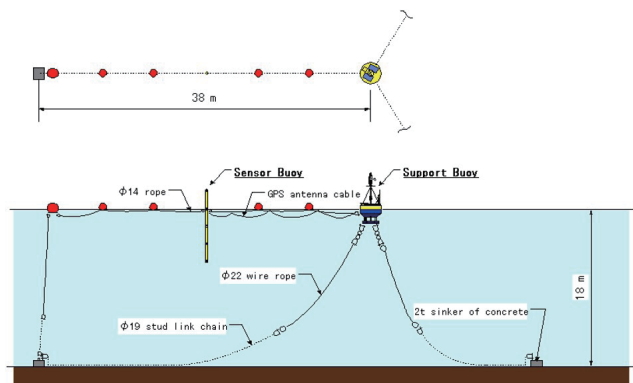


図2a 1999年3月の実験で用いられたGPSブイシステム。センサーブイ（Sensor Buoy）の先端にGPSアンテナが装着され、サポートブイ（Support Buoy）にGPS受信機や無線送信装置が搭載されている。（Kato et al., 2000）

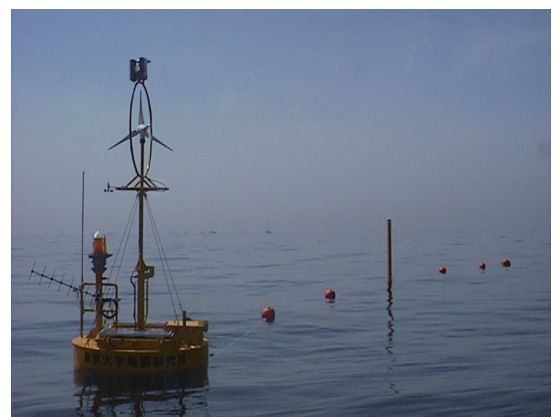


図2b 小網代湾に浮かべた図2aの実験機。



図3 2001年1月に大船渡湾に設置されたGPS津波計。

ります。当然のことですが、海は沖に行くほど深くなります。海底に大きなコンクリートブロックを置いて錨とし、鉄製のチェーンによってブイを係留することになります。係留索が短すぎると、海流によって引っ張られたブイが傾いてしまうことも考えられます。ある程度の長さをもってブイと結び、係留索がゆるやかなカテナリー（懸垂線）を描くようにします。こうすることによりブイが直立するようになります。浮力があるとはいえ、鎖は重いのでブイ＋係留索の重心はかなり海面より低いところに來ますので、大きな波が来てもブイはほとんど傾かないことがわかりました。

ブイは2001年1月に設置されました。ブイからは1秒ごとにデータが無線地上局に送られ、地上局で同時に観測されたデータと比較することで、毎秒のブイの位置が計測されます。このデータは誰でも見ることができるようWeb上で公開されました。地元大船渡市にもご協力いただき、市役所や消防署にもモニターを設置して見ていただくこと

としました。こうして、はじめての外洋実験がはじまりましたが、たまたま同年6月にペルーで発生した地震による津波を捉えることに成功しました。図4にその時のデータを示します。図4aは計測されたブイ上のアンテナ変位データの上下成分です。ブイは津波だけでなく通常の風による波（波浪）によっても動きますから、両方の影響が含まれています。なお、ゆるやかに一日に2回程度変動する成分は月や太陽による潮汐成分です。この時、ペルー地震による津波の振幅は10cm程度でしたが、波浪による変動成分は1m近くにもなっているため元のデータでは津波を目視することができま

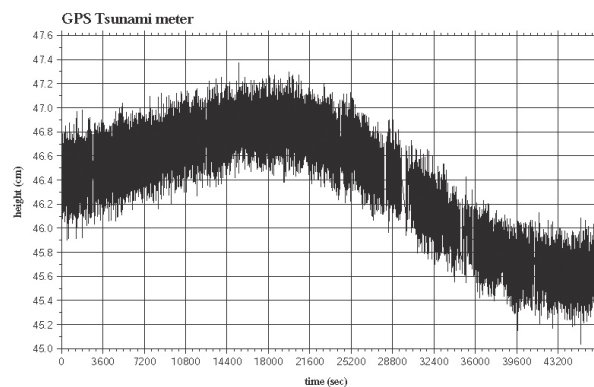


図4a 大船渡実験で得られた2001年6月ペルー沖地震に伴う、地震による津波の変動を含んだ時間のGPS津波計の原記録。大きくて緩やかな変動は潮汐、ぎざぎざとした細かい変動は風などによる波浪。

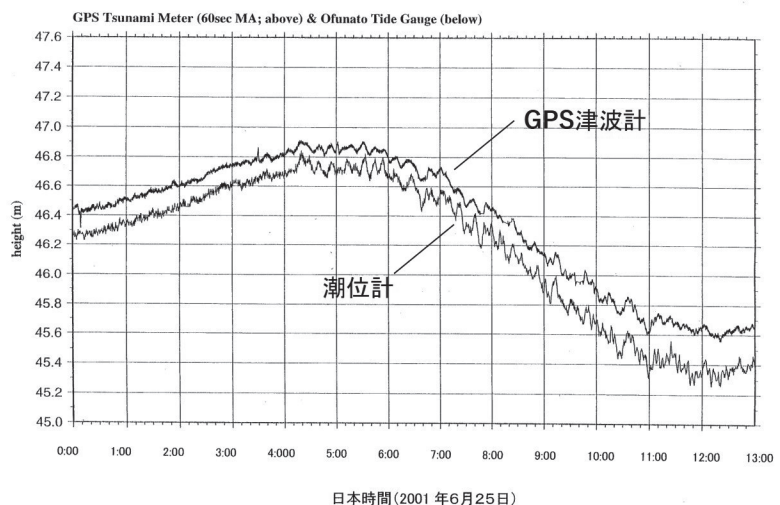


図4b (上) 図4aの記録から60秒移動平均をとることによって風による波浪の成分を取り除いた記録。(下) 大船渡検潮場で得られた海面変動記録。日本時間2001年6月25日4時10分頃に津波の到着が見て取れる。

せん。しかしながら、波浪と津波では波の周期が異なります。津波の周期は数分から長いもので1時間以上の周期帯を持っています。一方、波浪の周期はせいぜい数十秒程度です。そこで、得られた上下動成分のデータに短周期をカットするようなフィルターを作用させたものを図4bに示します。同図にはブイの近くの大船渡港に設置されている潮位計の記録も示してあります。この図を見ると、振幅が10cm程度の波が明瞭に見て取れます。また、その波形は潮位計の記録とよく似ていることがわかります。これがブイに搭載したGPS装置によって計測されたはじめての津波記録となりました。“GPS津波計”の誕生です。

～“GPS津波計”の実用化へ～

大船渡市沖での成功によって、我々は大いに勇気づけられました。この実験は3年程度で終了し、その間に発生した2003年十勝沖地震による津波なども検出することができました。そこで、我々は次のステップとして、より遠くの沖合に設置したブイでの実用化に向けた試験観測

を行うことになりました。場所も、三陸と同じように大きな津波被害を受けてきた四国の室戸岬沖に設置することとしました。ここでも、地元室戸市の多大なる協力をいただくことができました。ブイの設置場所としては室戸岬の沖合13km程度としました。これによって、より早い津波検出が期待され、有効な津波災害軽減効果が期待されました。なお、この実験から、我々のプロジェクトに波浪観測の立場から大きな興味を持ってくださった港湾空港技術研究所の永井紀彦さんにも研究チームに加わっていただきました。

図5aが室戸沖に設置したGPS津波計です。全高16.0m、全幅3.4m、重量16tonと大船渡のブイから一回り大きくなっています。2004年から観測が始まったのですが、早速その年の9月4日に紀伊半島沖で発生した地震による津波を捉えることができました(Kato et al., 2005)。図5bにその時の記録を示します。この時系列には数値シミュレーションによる結果も示されていますが、両者がよく合っていることが見て取れると思います。津波の発生原因な

どを探るために数値シミュレーションが使われます。計算がうまく行っているかどうかを検証するために、それまでは港に設置されている潮位計を主に使っていましたが、このような海岸付近の観測データには津波が海底の摩擦によって減衰するなど、数値計算に使われていた線形長波近似では表しきれない誤差や複雑な海岸線の影響などが含まれてうまくいきません。一方、沖合で津波を計測すると、そのような影響を受けずに済みますので発生原因として与えたモデルがよいものであれば計算値と観測値がよく一致するということがわかった、ということになります。こうして、我々のGPS津波計が学術的にも意義のある計測データを提供できるということが認識されるようになりました。また、最上段には室戸港の検潮記録が示されていますが、津波の到来時刻がブイの記録よりも10分程度遅れていることがわかります。これでブイの記録を津波の早期警戒に使えるそうだとことがわかりました。

このような成功を受けて永井紀彦さんのご尽力により国土交通省の



図5a 2004年4月年室戸岬沖に設置されたGPS津波計。

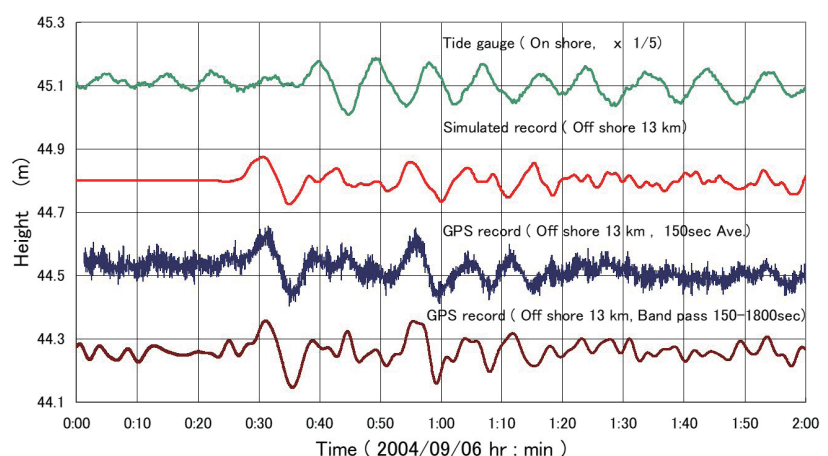


図5b 室戸岬沖で取得された紀伊水道沖地震による津波記録。上から、室戸験潮場で得られた海面変動記録、数値シミュレーションで予測されたGPSブイ位置の海面変動推測値、GPSブイで取得された上下変位記録（原記録に150秒の移動平均操作後のデータ）、及び前記の原記録に150～1800秒のバンドパスフィルターをかけたデータ。

全国港湾海洋波浪情報網ナウファス（英語名 NOWPHAS : Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARbourS）に取り入れてくださることとなりました。このシステムは我が国の沿岸の波浪を観測してリアルタイムで情報を発信するシステムです。それまでは主として海底に置かれて機器によって超音波を用いて波高等を計測していましたが、保守の容易さ等から GPS ブイを一部に導入することになりました。設置は 2008 年頃より開始されました。但し、その目的は波浪監視にありましたので名称は“GPS 波浪計”と呼ばれることとなりました。前節で紹介したように、ブイで計測される海面高変化は波浪も当然含まれます。むしろ波浪は常に観測されていて、津波は波浪に比べれば極めて稀に観測されるだけですから、両方を兼ね備えたシステムとして活用できれば費用対効果が大きくなると期待されるところです。

このようにして、GPS 津波計、いや、GPS 波浪計は 2011 年頃までに全国の沿岸に 15 点程度まで設置されました。そして、このナウファスによって配信されるデータは気象庁による津波の監視にも取り入れられることとなりました。なお、この GPS 波浪計はほとんどの場合沿岸から十数 km 程度のところに設置されています。これには理由があります。前に述べられていますが、このシステムで用いられているのは RTK と呼ばれるシステムです。これは陸地におかれた基準局に対するブイの位置をリアルタイムかつ相対的に決定する方式ですが、リアルタイムで解析を行うため誤差や雑音の影響を取り除くことが十分には行えません。そのため、位置の決定精度は基準局からの距離に依存し、高精度で位置を推定するためにはブイを陸の基準

局からあまり遠くにおけない、という制限が出てきます。cm 精度で海面高さを決定するにはブイの陸からの距離はせいぜい十数 km に設置する必要があります。もちろん、これでも津波がブイを通過してから陸に到達するまで 10 分くらいはかかりますので、情報が効率的に伝達できれば沿岸の人の避難には役に立つと考えられました。また、波浪を測る目的なので、沿岸で漁業や工事などを営む方への情報としては十分遠い沖合だということも考慮に入れていると考えられます。

■ 2011 年東北地方太平洋沖地震・津波の教训

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震では、東日本の太平洋沿岸を巨大な津波が襲い 1 万 8000 人を超える多くの死者・行方不明者を出すことになりました。このことは GPS ブイを使えば津波の被害を防げるだろうと考えていた私にとってはとてつもないショックでした。役に立てると思っていたものが実は全然役に立てなかったのだ、

という事実はあまりにも重いものでした。しかし、ここで立ち止まってはいけなかったのか、を検証し、本当に役に立つものに改良していかななくてはなりません。

図 6 はこの時取得された三陸沖の GPS 波浪計データの一部です。データは津波が沿岸に到達するかなり前に捉えられていたことがわかります。地震が発生したのが 14 時 46 分、津波警報の第一報が出たのが 14 時 50 分でこの時は宮城 6m、岩手 3m というものでした。ところが、15 時過ぎになって沖合の GPS 波浪計に津波が到達し、数 m を超えるような津波が観測され始めました。津波を監視していた気象庁の職員が 15 時 10 分に気づくことになり、15 時 14 分に津波警報が宮城 10m 以上、岩手 6m に更新されました。岩手県の沿岸に津波が到達したのは 15 時 18 分です。しかしながら時すでに遅く、1 万 8 千人を超える多くの方の命が失われました。確かに、津波は海岸への到達よりかなり前に捉えられていたのですが、それが沿

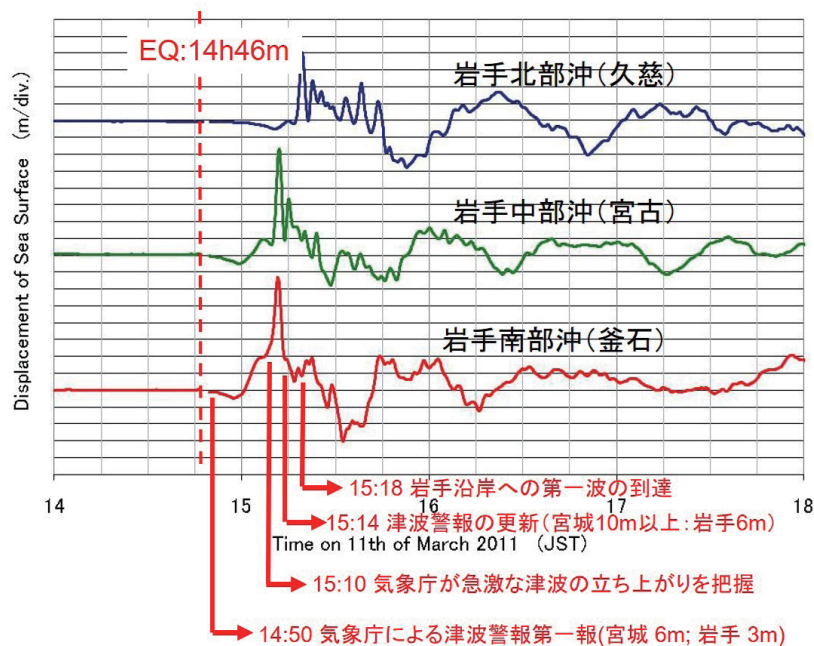


図 6 三陸沖の GNSS 波浪計で記録された 2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震による津波。

岸住民の避難行動にはつなげられなかったのです。

この原因は、ブイが沿岸から十数 km 程度と十分沖合には設置していなかったことが挙げられます。もっと沖合にブイが設置されていればそれだけ早く津波が捉えられ、より早い避難行動につなげられた可能性があります。なお、ここでは示していませんが、実はもう一つの問題がありました。それはリアルタイムでモニターしていたデータが最初の津波のブイへの到来を記録した直後に途切れてしまいました。これは多分、データ伝送の経路上の電源あるいはインターネット回線が切れたことによるのではないかと思います。というのも、現地では観測が続けられており、後日データを現地から回収して図 6 のように津波記録を復元できたのです。

これらのことから、2つの教訓を得ることができました。一つはブイを沿岸からもっと遠くに、例えば 50km 以上に、離さないといけない、ということです。また、海上からのデータを受ける地上局が震源の近くで電源断の影響を受けてはならない、ということです。これらのことから、2つの改善点が考えられました。

まず、測位の方式をそれまでの相対測位から精密単独測位に替えることです。GPS で精密な測位をする方

式としてはそれまで相対測位方式が主流だったのですが、1990 年代の終わりころから単独測位でも cm の精度で測位ができるようになってきました。この方式では、衛星の精密な位置と時計のデータ(精密暦と呼ぶ)が必要になります。それを即時的に入手することは難しかったのですが、衛星データを即時的に解析することやそこから求められた衛星の位置と時計のデータをインターネットから即時的にユーザが入手することが次第に可能になってきました。そこで、我々はこれらのことが可能な、米国で開発された PPP-AR という手法を用いることにしました。

また、沿岸からの距離が遠くなると、データの伝送のために地上の無線を使うことができません。そこで衛星通信を導入することにしました。衛星通信を用いれば震源からの影響を受けない遠くの場所で受けることが可能になり、データ断の恐れがなくなります。測位はブイ上で行うのが良いか、生データを陸上にとってそこで測位を行うのが良いか、という問題がありますが、ブイで取得した生データを 24 時間リアルタイムで陸に送って解析するとすると商用衛星ではデータ通信料が極めて高価になります。そこで、我々はまず陸上で精密測位に必要な衛星の位置と時計のデータを生成し、それを衛星

通信を介してブイ上の計算機に送り、ブイ上の GPS 機器から出力される生データを精密暦を用いて解析し、結果のブイ位置データのみを衛星通信で陸に送り返す、という方式をとることにしました。これですと、双方向の衛星通信が必要になるものの、通信データの量は GPS の生データを送るよりもはるかに少なく済むのです。

実験は、当時使われていた技術試験衛星「きく 8 号」という通信用の衛星を使わせていただくことにしました。これは JAXA が打ち上げた衛星通信用の試験衛星でそろそろ退役しようとしていたものです。この最後のミッションとして我々の GPS 津波計の双方向データ通信の実験を行ったのです。図 7 がその時に取得できたデータです。多少の遅れ(多分 1 秒以内程度)はあるものの、比較的安定して解を得ることができ、この結果をホームページ上でも公開することができました。この実験の成功に力を得て、我々は次のステップに進むこととしました。

■ 新たな展開と総合防災ブイへの挑戦

幸いなことに我々はふたたび科研費の採択を得て平成 28 年度(2016 年)から 5 か年計画で開発を進めることになりました。あいにくこの

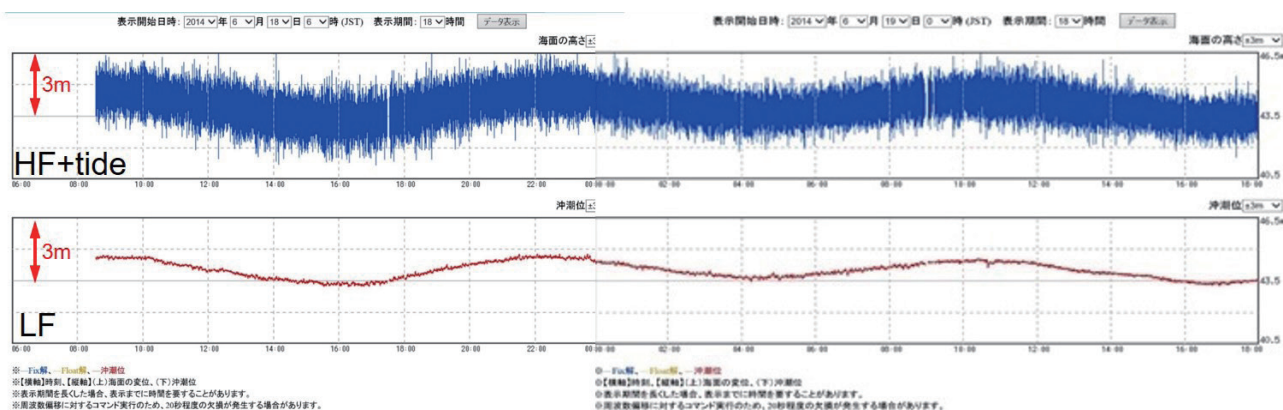


図 7 技術試験衛星「きく 8 号」で取得された GNSS ブイの記録(2014 年 6 月 18 日 6 時から 36 時間)。上段:高周波成分+潮汐。下段:低周波成分+潮汐。

技術試験衛星は最初の年度で基礎的な実験を行った後、軌道を離れて退役することとなりました。そこで、商用衛星による衛星通信を導入することとしました。幸い、Softbank 社には大変なご協力をいただき、格安での衛星通信を提供していただくことになりました。この新たな実験では、高知県のご協力を得て、県が高知県沖に設置している漁礁用のブイである海洋牧場と呼ばれるいくつかのブイのうち一基をお借りすることになりました。最近、海上にブイを設置するとそこに魚が集まってくるという習性を利用して、外洋にいくつかのブイを敷設しその周囲で漁業を行う方式が沿岸漁業のために自治体で次第に導入されつつあるようです。これらのブイに GPS 装置を搭載すれば、日本沿岸に相当高密度な GPS 津波計測網ができあがりそうに思うのですがどうでしょうか。

ともあれ、我々は足摺岬沖約 40 km のところに敷設されている海洋牧場 No.18 のブイを科研費の期間中借用することとなりました。このブイに GPS 装置一式と衛星通信用の設備及び太陽電池と蓄電池を入れた箱などを搭載し、2018 年の 11 月からこのシステムを稼働しはじめました。ところが、開始してすぐにデータが止まってしまいました。どうやら電力不足であったようです。狭いブイの上に GNSS 機器の他、解析用の小型計算機、衛星通信のための装置などを搭載したため、電力が不足したようです。このあと、我々のプロジェクトはいろいろな悪状況が生じてなかなか進まなくなりました。例えば、ブイの周辺の潮流が思いのほか速く、作業しようとしてもなかなか船をつけることができません。そのために数か月も待つてしまうようなこともありました。また、太陽電池を増設したり、充放電制御装置

を入れ替えたりなど様々な手を尽くしましたが、本質的な解決に至りませんでした。どうやら太陽電池が当初の想定通りの発電ができていないのではないか、ということになりました。そこで、再度電源部分を再検討し、太陽光パネルをさらに増強するなどの対策をとりました。ようやく、観測が順調にいくようになったようです。

ところで、これまでは GNSS ブイを用いた津波早期警戒の可能性だけを検討してきたのですが、もし、その観測が海洋のどこでも可能になるとしたらもっと多くの応用技術につながっていくのではないかと考えるようになりました。その第一の応用というのは、海底地殻変動観測への応用です。

これには少し説明が要るようです。1980 年代の初めころ、米国の大学研究者が開発した手法ですが (Spiess et al., 1998)、海底に音響を送受信できる装置 (トランスポンダーなどと呼びます) を 3 基、だいたい正三角形になるように配置します。海上の船からトランスデューサと呼ばれる送受波装置で音波を送出し、海底の 3 基のトランスポン

ダーから戻ってくる音波を記録します。それぞれのトランスポンダーへの音波の送信時刻と受信時刻の差から、船からトランスポンダーまでの距離が計測できます。この計測値からトランスポンダー 3 個で構成される三角形の形が決まります (図 8)。なお、船の位置を正確に決めておく必要がありますがこれは GNSS を使えばできます。ただ、音響を用いた距離の計測では海中の水温や塩分などが時間的に変わることによって見かけの距離がメートルの桁で大きく変わります。そうすると、海面から海底を見た場合、距離が長く計測されれば、トランスポンダーで構成される三角形がより遠くに大きく見え、距離が短く計測されれば、三角形は近くに小さく見えることになります。ですが、海中の水温や塩分がその領域内でそれほど大きく変わらなければ大きい三角形でも小さい三角形でもその重心の位置は変わりません。このような手法を繰り返し観測することで三角形の水平位置の変化を cm 精度で計測することができるのです。GNSS と音響を組み合わせる方式なので、このような手法を GNSS- 音響結合による海底地殻変動

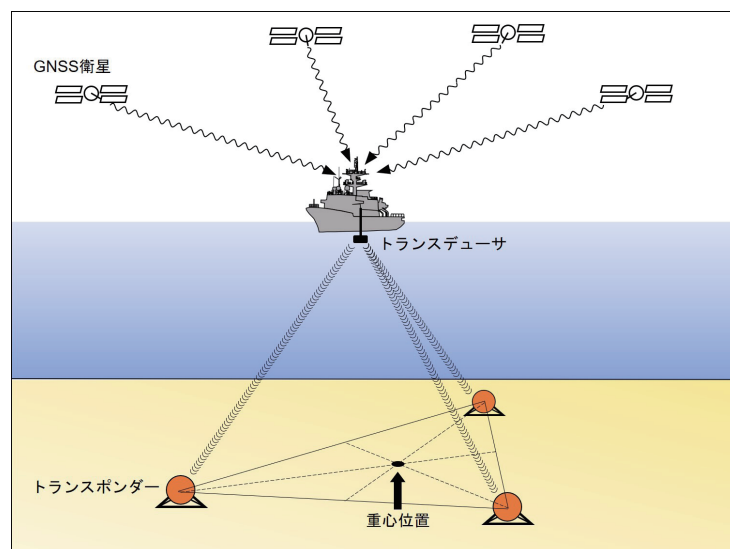


図 8 GNSS-音響システムによる海底地殻変動観測の原理。船の位置を GNSS で計測し、船の位置を基準にして海底に置かれたトランスポンダー 3 基で構成される三角形の重心位置を音波を用いて計測する。

観測などと呼ぶことがあります。この方式の応用について次の節で説明します。

～海底地殻変動連続観測への挑戦～

日本列島ではよく知られているように、太平洋沿岸の沖合いでプレート境界型の巨大地震が繰り返し発生します。震源域は海底ですので、海底での観測はプレート間固着の状態や地震時あるいは地震後の地殻変動を推定するのに極めて重要です。これまで海底での地殻変動観測は水圧観測による上下変動など極めて限られたものしかありませんでした。一方、陸では国土地理院による GNSS 観測網が全国に 1200 点以上はめぐらされていて詳細な地殻変動が日々監視されています。このような陸と海の観測網の違いは大きな問題となってきました。

そこに登場したのが前節の GNSS-

音響結合による海底地殻変動観測です。原理は米国で開発されたのですが、日本の海上保安庁海洋情報部や東北大学、東京大学、名古屋大学などの研究者が大変な努力を重ねて精度が向上し、プレート境界地震の地震時変動や地震の余効変動を検出することに成功しました。このようなことから、日本列島の太平洋沿岸では既に 60 箇所の GNSS- 音響システムを用いた海底地殻変動観測点ができています。2011 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震の際にはこのシステムで海底の 30m を超える変位が観測されました。陸の観測網では最大で 6m 程度の変位でしたので（これでも大変大きいですが）、海底にある震源域直上のデータが得られたことで地震の震源の姿がこれまでになく詳しく明らかにされました。これだけでも、もちろん世界に誇れる素晴らしい観測網だと思いますが、一つの問題点があります。そ

れは、海上でのデータ収集には船舶が用いられていることです。このため、船がその場所に行く場合にだけ観測が行われますので、年間でせいぜい数回しか（最近では頑張って 10 回程度まで）観測ができない、という点です。もし、観測を連続的に（例えば毎日）行うことができれば、より詳細な地殻変動のデータを得ることができ、プレート間で発生する地震やゆっくりすべる現象などが詳しく明らかになるに違いありません。そこで、もし船でなくブイを海上のデータ収集基地に用いることができればこのような連続観測が可能になるのではないのでしょうか。

もちろん、これを可能にするためには技術的にも解決しなくてはならない点が多々あります。現在我々は、足摺岬沖のブイを用いてこのような応用研究も進めています。

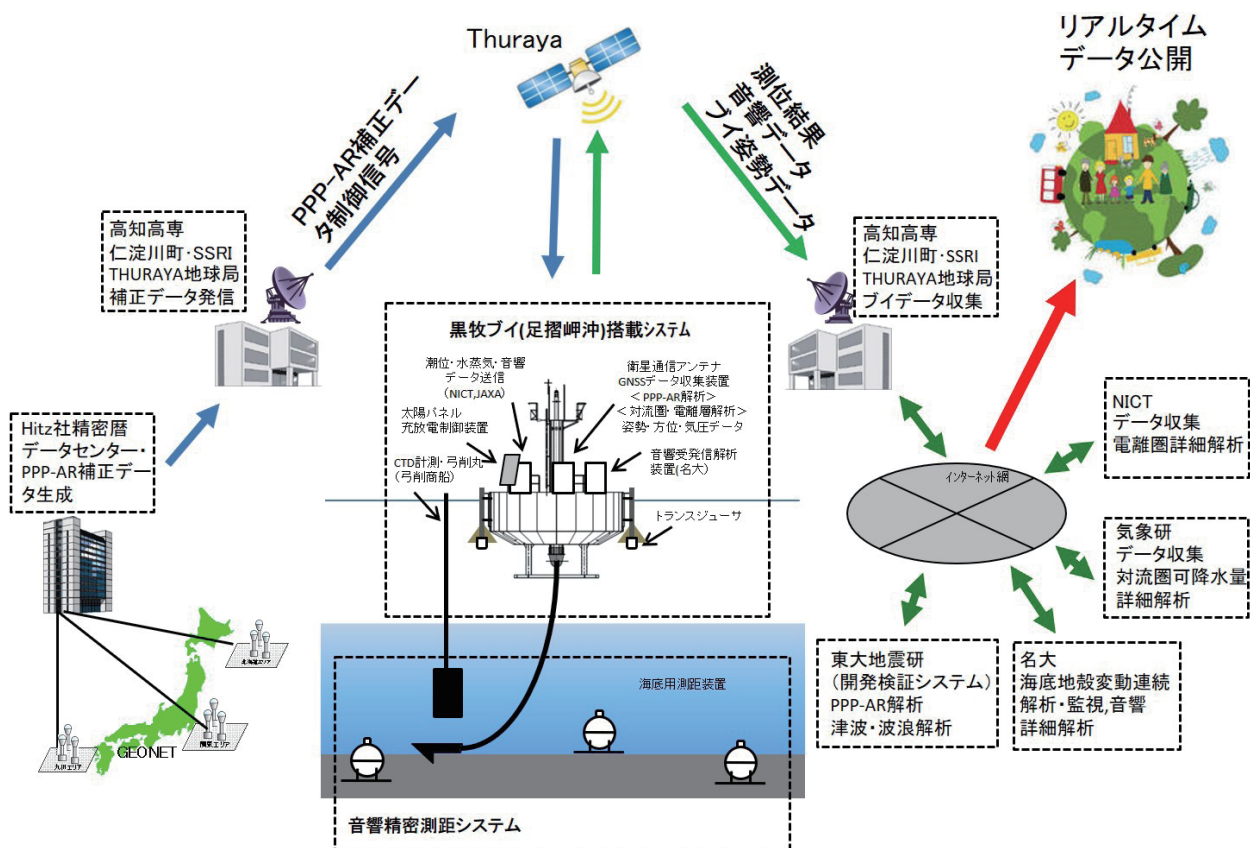


図 9 2016 年から開始した足摺岬沖の GNSS ブイを用いた実験のシステム。衛星通信には Thuraya という衛星を用いている。

～その他の応用～

前節にあげた海底地殻変動の連続観測への応用にとどまらず他にも様々な応用が期待されます。例えば、GNSS 衛星と受信機間の電波の伝搬媒質、すなわち大気と電離層に関する応用です。GNSS による測位においては衛星と受信機間の距離を正確に計測することが重要ですが、距離を正確に測るための誤差要因として伝搬媒質の影響があります。電磁波は光の速度で進みますが、伝搬媒質すなわち大気と電離層の影響で遅延します。これが距離の計測の誤差となります。

大気の影響は電磁波の行路上の水蒸気量に比例します。従ってこれを補正する必要がありますが、逆にそのために求めた水蒸気量は気象学にとって大変重要な量である可降水量 (PWV; Precipitable Water Vapor) に変換することができます。日本列島の GEONET ではこの可降水量をリアルタイムに計測して気象庁に送り、天気予報の精度向上に役立てられています (小司他, 2009)。もし海上で可降水量を計測できれば天気予報の精度向上に寄与することと思えます。特に西方海上に起因する線状降水帯の発生予想や夏季の台風の降水予測などにも役立てられるのではないのでしょうか。

電離層での遅延量は GNSS が用いる電磁波の周波数によって異なります。そこで GNSS では 2 つの周波数の電磁波を用いることで遅延量を推定して補正しています。この遅延量は電波が伝播してくる行路上の電子の総数 (TEC; Total Electron Content) に比例します。こうして GNSS を用いて TEC が計測できることになります。これまでの研究で大きな地震が発生すると電離層に乱れが生じそれが上空に向かって伝播していく様子が捉えられるなど、大変

興味深い研究結果が出ています。日本では情報通信研究機構が世界の GNSS 観測局からインターネットを通じて取得できるすべてのデータを用いた TEC を算出して電離層の擾乱を監視する事業を行っています (Tsugawa et al., 2018)。ところが、これも大気の場合と同じように、観測点が地上にしかないので、太平洋などの上空の電離層の状況がよくわかりません。海上に GNSS 観測局が多数あれば海洋の上空の電離層の状況もよくわかるようになりますと期待されます。

以上のようなことから、我々の GNSS ブイのプロジェクトでも気象の研究者や電離層の研究者の協力も得ながら研究を進めています。課題はブイ上のデータをいかにリアルタイムに精度の良い可降水量や総電子数を推定して研究者の元に遅延なく届けられるか、ということにあります。こうしたことを考えながら、今我々は図 9 に示すようなシステムを構築して研究を進めています。まず、陸上のデータセンターで GNSS 解析に必要な GNSS 衛星の精密暦を生成します。それを通信衛星経由でブイに送ります。ブイでは GNSS 観測が行われているのでそのデータに精密暦を適用してブイの精密な位置を決定します。その際の副産物としてブイ上空の可降水量 (PWV) や総電子数 (TEC) も推定します。一方、ブイに取付けられた音響送受信機 (トランスデューサ) から海底に置かれた 3 台のトランスポンダーに音響を送出して返ってくる音波を捉え、ブイとトランスポンダーの距離を推定します。以上のデータを再度通信衛星を用いて陸上の基地局に送ります。陸上の基地局からは海面変化データをリアルタイムで Web 表示して津波の早期検出を行うと共に、その他のデータは必

要な研究者等に伝達されて応用研究に使われます。

もし、このプロジェクトがうまくいけば、海底地殻変動から津波を含む海面の変動、大気、電離層といった、様々な地球科学的なデータを算出することができます (図 10)。これまで取得することの難しかった海上で多くの新しいデータが地球科学者に提供できると期待できます。

■ 解決すべき課題と将来像

これまで述べてきた技術については、既にその原理がわかっていて解決することはそう難しいことではないと楽観しています。ただ、それでもまだ多くの課題がのこっています。とりわけ、ブイを長い間海面上で安定に保持して各種の機器を運用することにはいろいろな困難が伴います。例えば電力は太陽電池を用いて発電した電気をブイ上の蓄電池に貯めて使いますが、多くの電子機器を搭載したブイ上で余裕をもった電力確保が大変困難です。電力供給システムのどこかに不具合が発生すれば観測やデータ伝送ができなくなります。より効率の高い太陽電池が望まれますが、これはブイだけでなく世界的にも開発が進められていますので遠くない将来には解決ができることを期待しています。また、電子機器にとって厳しい環境での連続稼働が必要とされますので、機器の故障への対応も課題です。機器が故障しても遠い海上にあるものをすぐ

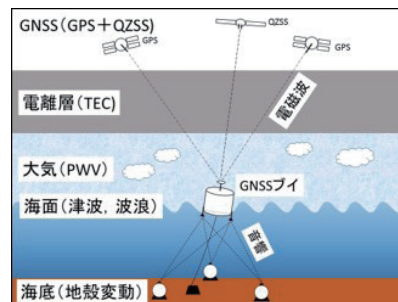


図 10 GNSS ブイを用いた応用研究の事例。

に修理することはできないので、欠測が長く続くことになります。そのため、例えば故障したとしても自律的に修復できるシステムが必要になります。また、ブイそのものも耐久性の問題や海賊、盗難、船舶等の衝突などによるブイの破壊・亡失からの安全性保持などの課題もあると思います。一方、このようなブイを海上に多数設置して運用する場合には衛星通信の費用をどうするのか、また、陸上で集めたデータをどう処理して国民に対する情報提供を行うのか、等の運用体制についても考えておかななくてはなりません。我々は基礎的な技術開発を行っていますので、これを社会に役立つようにするためには別途システム全体の安定的運用を実現する体制を整える必要があります。すぐには解決できない課題が多いと思いますが、これらを少しずつ解決していけば日本を取り巻く広大な海洋に多数のブイを配置することでこれまでにない優れた地球科学インフラになるのではないのでしょうか。例えば図 11 に示すような西太平洋の日本の排他的経済水域に多数のブイを並べてデータをリアルタイムに必要な人に提供できるようなシステムを構築してはどうでしょうか (Kato et al., 2018)。我々はこれを、陸の GEONET になぞらえて“海の GEONET”と呼んでいます。今はまだ夢物語の世界ですが、いつかこのようなシステムができ、我々の安全・安心な社会の構築の一助になることを願っています。

■ 謝辞

高知工業高等専門学校の寺田幸博客員教授と名古屋大学大学院環境学研究科の田所敬一准教授には本稿を呼んでいただき有益なコメントをいただきました。本稿を執筆するにあたっては科学研究費補助金 (課題番

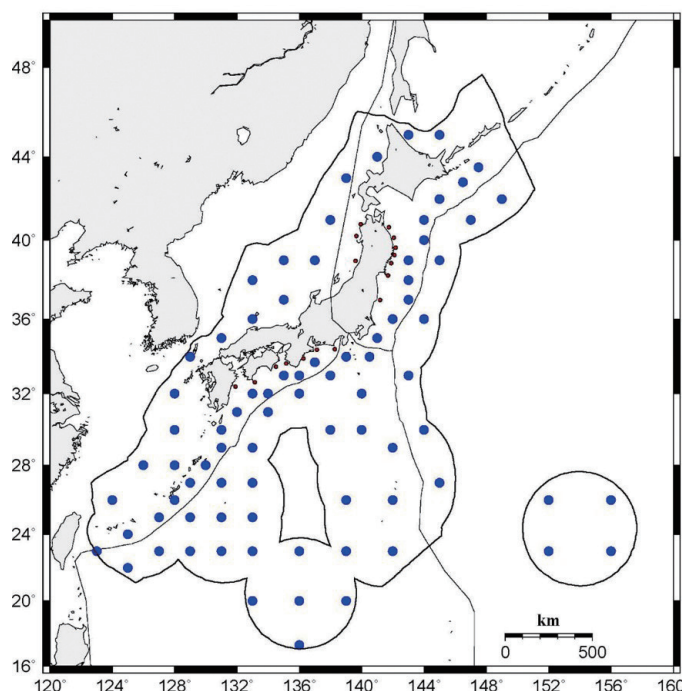


図 11 西太平洋の日本の排他的経済水域に設置する GNSS ブイアレイの概念図。

号 16H06310) の支援を受けました。

■ 参考文献

- Kato, T., Y. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, H. Issiki, M. Matsuishi, A. Yokoyama, and T. Tanno, Real Time Observation of Tsunami by RTK-GPS, *Earth, Planets and Space*, 52(10), 841-845, 2000
- Kato, T., Y. Terada, K. Ito, R. Hattori, T. Abe, T. Miyake, S. Koshimura, and T. Nagai, Tsunami due to the 2004 September 5th off the Kii peninsula earthquake, Japan, recorded by a new GPS buoy, *Earth Planets Space*, 57, 297-301, 2005.
- Kato, T., Y. Terada, K. Tadokoro, N. Kinugasa, A. Futamura, M. Toyoshima, S. Yamamoto, M. Ishii, T. Tsugawa, M. Nishioka, K. Takizawa, Y. Shoji, and H. Seko, 2018, Development of GNSS Buoy for a Synthetic Geohazard Monitoring System, 2018, *J. Disaster Res.*, 13 (3), 460-471.
- 小司 禎教・岩淵 哲也・畑中 雄樹・瀬古 弘・市川 隆一・大谷 竜・萬納寺 信崇, GPS 気象学: GPS 水蒸気情報システムの構築と気象学・測地学・水文学への応用に関する研究, *測地学会誌*, 55(1), 17-38, 2009.
- Spiess, F. N., C. D. Chadwell, J. A. Hildebrand, L. E. Young, G. H. Purcell Jr., and H. Dragert, Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies, *Pys. Earth Planet. Inter.*, 108, 101-112, 1998.
- Tsugawa, T., M. Nishioka, M. Ishii, K. Hozumi, S. Saito, A. Shinbori, Y. Otsuka, A. Saito, S. M. Buhari, M. Abdullah, and P. Supnithi, Total Electron Content observations by dense regional and worldwide international networks of GNSS, *J. Disaster Res.*, 13(3), 535-545, 2018.