

GPS 波浪計の長周期波形観測値による沿岸津波換算値を活用した津波即時情報

林 豊*

Real-time Tsunami Information by Utilizing Equivalent Coastal Tsunami Height Defined by a Long-period Wave Component of GPS Buoy

Yutaka HAYASHI*

Abstract

The ratio of an initial tsunami height observed at a coastal tidal station to that at its nearby offshore wave station of the Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARbourS (NOWPHAS) is approximately proportional to the value derived from the Green's law; fourth root of the ratio of the sea-bottom depths to the mean sea level at the offshore and the coastal station. This approximation can also be applied to maximum tsunami amplitudes; in addition, it can be applied to two cases of tsunami detection by real-time kinematic global positioning system (RTK-GPS) buoys, which are being installed at deep-sea at two to twenty kilometers off the coast. Then new real-time tsunami information service provided by Japan Meteorological Agency can be prepared by using equivalent coastal tsunami heights defined by real-time application of these relationships to tsunami initial heights detected from long-period wave components measured by offshore RTK-GPS buoys.

キーワード：グリーンの法則，全国港湾海洋波浪情報網，津波即時情報，GPS 波浪計，津波警報

Key words：Green's law, NOWPHAS, real-time tsunami information, RTK-GPS buoy, tsunami warning

1. はじめに

2009年4月に地震調査研究推進本部によって「新たな地震調査研究の推進について—地震に関

する観測，測量，調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策—」(地震調査研究推進本部，2009)が策定された。この中で，国内の研究

* 気象研究所地震火山研究部
Seismology and Volcanology Research Department,
Meteorological Research Institute

本論文に対する討論は平成23年5月末日まで受け付ける。

関係である。Baba *et al.* (2004) は遠地津波の観測事例が式 (1) をほぼ満たすことを示した。

$$H_c = 2H_o h^{1/4} \quad (1)$$

ここで、 H_c と H_o はそれぞれ海岸の検潮所と沖合観測施設での津波の最大振幅、 h は沖合の観測施設の場所の水深 (m 単位)。式 (1) は、Green (グリーン) の法則のうち、波高が水深の 4 乗根に反比例する浅水長波の波高増幅の効果と、自由端とみなせる海岸で反射波との重複で波高が 2 倍になる効果を考慮に入れた換算式に相当する。その際、暗黙に海岸での水深を一律 1 m と仮定し、水路幅の違いによる波高増幅効果を無視したことになる。さらに、高山 (2008) はケーブル式水圧計一検潮所の観測点の個々の組合せについて、最大波高の関係を表す経験式群を系統的に求めた。水圧計と観測点の組合せによっては、震央距離や地震の規模で補正を行なう方がより観測値を適切に説明できることが示された。

もう一つは、港湾空港技術研究所が運用している全国港湾海洋波浪情報網 (ナウファス) の各観測施設とその近傍の海岸の検潮所における津波第一波偏差および最大津波振幅の関係を調べたもので、Hayashi (2010) は、沖合観測点と検潮所での観測値の関係を示す経験式 (2)、(3) を求めた。

$$H_{c, \text{init}} = 1.065 H_{o, \text{init}} (h_o/h_c)^{1/4} \quad (2)$$

$$H_{c, \text{max}} = 1.170 H_{o, \text{max}} (h_o/h_c)^{1/4} \quad (3)$$

ここで、 H_c と H_o は海岸の検潮所と沖合観測施設での津波の第一波偏差あるいは最大振幅、 h_c は海岸の検潮所周辺の平均海水面から測った平均水深、 h_o は沖合観測施設の位置での水深。添字の *init* は第一波偏差、*max* は最大振幅を示す。簡単のため、本稿では、式 (2) または (3) の右辺の計算値を「沿岸津波換算値」という。

ナウファスは、波高計 61 箇所と GPS 波浪計 11 箇所構成されている (2010 年 1 月現在)。このうち GPS 波浪計は、国土交通省港湾局により 2007 年 4 月以降に順次設置され、2008 年からは津波早期検知への活用のために加工された観測データ (津波の周波数帯域の波高を抽出するフィル

ター処理をした長周期波高) が、気象庁にリアルタイム配信されている。

ケーブル式水圧計は数十～数百 km、GPS 波浪計はおおむね 2～20 km 海岸から離れた場所に設置される (図 1)。GPS 波浪計の観測値から津波の信号をリアルタイムに抽出できれば、海岸に津波が到達するあるいは海岸で津波が高まる以前に、海上で津波を検知できる可能性があると考えられている (Kato *et al.*, 2000 など)。さらに、将来これらの沖合観測施設が稠密に設置されれば、リアルタイム津波観測成果を活用して、津波予報の段階的修正に有効活用する手法があることを、大垣・他 (2006) は数値実験により示した。

気象庁は、リアルタイムに受信する沖合の GPS 波浪計の長周期波形から津波の観測成果が得られた場合に、それを用いて各 GPS 波浪計に対応する海岸での津波の高さの推定値を津波情報 (図 2) に含めて発表する業務を、2008 年 7 月 1 日に開始した。現在の作業手順では、事前に数例の数値計算から実験的に導かれた GPS 波浪計と海岸での津波の高さの関係に基づいて、全国一律の換算表が作られ (Nakata *et al.*, 2008)、それが適用されることになっている。しかし、換算表は実際の津波事例に基づくものではなく、その根拠の妥当性には疑問がある。

本稿では、海域での津波観測データを即時に利用する津波即時予測のうち、GPS 波浪計の長周期波形で津波の観測値をリアルタイムに取得できた場合に限って論じる。その際、ナウファスの各観測施設とその近傍の海岸の検潮所における津波第一波偏差の統計的な関係 (Hayashi, 2010) が、過去の津波観測成果から既に導かれているので、これを活用して観測事実の津波予報の修正する簡易な方法を提案する。

2. GPS 波浪計と検潮所の津波観測波高の関係

ナウファスの沖合波浪観測施設 (GPS 波浪計を含む) とその近傍の港湾の検潮所での観測値との関係式は、Hayashi (2010) により導かれている (第一波偏差は式 (2)、最大振幅は式 (3))。そ

津波情報（津波観測に関する情報）

平成 xx 年 xx 月 xx 日 18 時 05 分 気象庁地震火山部

[各地の検潮所で観測した津波の観測値]

場所によっては検潮所で観測した津波の高さよりさらに大きな津波が到達していることが考えられます。

今後、津波の高さはさらに高くなることも考えられます

xx 日 18 時 05 分現在、検潮所での観測値は次のとおりです

岩手釜石沖* 第一波 xx 日 18 時 00 分 (不明)

宮城金華山沖* 第一波 xx 日 18 時 00 分 (不明)

[現在津波予報を発表している沿岸]

現在津波予報を発表している沿岸は次のとおりです

<大津波>

北海道太平洋沿岸中部、岩手県、宮城県

<津波>

北海道太平洋沿岸東部、北海道太平洋沿岸西部、青森県太平洋沿岸、福島県、茨城県、

千葉県九十九里・外房

<津波注意>

青森県日本海沿岸、千葉県内房、伊豆諸島、小笠原諸島、相模湾・三浦半島、静岡県、

愛知県外海、三重県南部、和歌山県、徳島県、高知県、種子島・屋久島地方、

奄美大島・トカラ列島

これ以外の沿岸でも、若干の海面変動があるかもしれませんが、被害の心配はありません

[震源、規模]

きょう xx 日 17 時 40 分頃地震がありました

震源地は、三陸沖(北緯 39.1 度、東経 145.1 度、宮古の東南東 280km 付近)で、震源の深さはごく浅い、地震の規模(マグニチュード)は 8.1 と推定されます

[*印の沖合の GPS 波浪計で観測した津波の観測値]

(本文中では、沖合での津波の観測値と、沿岸での検潮所による観測値との混同を避けるため、すべて(不明)と標記されます。詳細は以下の通り)

岩手釜石沖* 第一波 xx 日 18 時 00 分 (+) 1.0m

最大波 xx 日 18 時 03 分 1.0m

宮城金華山沖* 第一波 xx 日 18 時 00 分 (+) 1.0m

最大波 xx 日 18 時 03 分 1.0m

上記は沖合での観測値であり、沿岸では津波はさらに高くなります。

[*印の沖合の GPS 波浪計付近の沿岸で推定される津波の高さ]

沿岸での津波の高さは以下の通りと推定されます

[到達時刻(推定)・津波の高さ(推定)]

到達時刻(推定) 津波の高さ(推定)

岩手県釜石付近 xx 日 18 時 05 分～18 時 20 分 1m～4m

宮城県金華山付近 xx 日 18 時 05 分～18 時 20 分 1m～4m

早いところでは、すでに津波が到着していると推定されます

津波情報 x 号

図 2 GPS 波浪計で津波が観測された際に発表される津波情報の想定文例

気象庁の web サイトでの解説「GPS 波浪計で津波が観測された際の津波情報に関する留意事項」(http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/tsunamiinfo/gps_haro_notes.html)を基にして作文した。

これらの関係式を求めるためのデータには、沖合波浪観測施設とそこから20 km 以内にある検潮所の両方で第一波偏差または最大振幅の観測値が得られたものが採用され、2008年までの8津波事例の観測値（第一波偏差はのべ26対、最大振幅はのべ53対）から、以下の結果が導かれている。

- ケーブル式水圧計と検潮所の観測値の関係式（式（1）：Baba *et al.*, 2004）をナウファスの沖合波浪観測施設（GPS 波浪計を含む）の観測値に拡大適用すると、換算値が明らかに過大になる。
- 第一波偏差・最大振幅の沿岸津波換算値（式（2）または（3）の右辺の計算値）は、検潮所での観測値をおおむね説明できる。これは、グリーンの法則において、海岸での自由端反射の項を加えず、また、検潮所近傍の水深に現実的な値を用いたことに相当する。
- 式（2）に用いる検潮所周辺の水深には、水路に沿って検潮所から100 m 以内の場所での海底の深さ（平均海水面を基準）の平均値を用いることが妥当である。
- 検潮所での津波の観測値は、沿岸津波換算値に対してばらつくが、第一波振幅では73～136%，最大振幅では68～148%の範囲（標準偏差の範囲）に概ねおさまる。

特に、GPS 波浪計で津波記録が得られた2例（2003年十勝沖地震津波の大船渡（永井・小川，2004）と2004年東海道沖地震津波の室戸（永井・里見，2005））も、GPS 波浪計の長周期波形による津波観測値（第一波偏差・最大振幅）の沿岸津波換算値と近傍港湾の検潮所での観測値の関係が、式（2）、（3）から大きく外れることなくうまく説明できた（図3）。

3. GPS 波浪計観測値の沿岸換算津波高

図3の沿岸津波換算値と近傍港湾の検潮所での観測値の関係は、長周期波形から得られる津波観測値（津波第一波偏差および最大波高）が、GPS 波浪計からの2つの値もナウファスの他の波浪観測器（波高計や海象計）による値と同様の性質を持つとみなして、検潮所での津波と比較可能であ

ることを示唆している（Hayashi, 2010）。これは、近傍の検潮所での津波を予測する目的で、GPS 波浪計の長周期波形から得られる津波第一波偏差の観測値を用いて、式（2）を適用できると考えられることを意味する。

2009年12月現在、国土交通省港湾局が運用中のGPS 波浪計の位置とその近傍の検潮所の位置は、

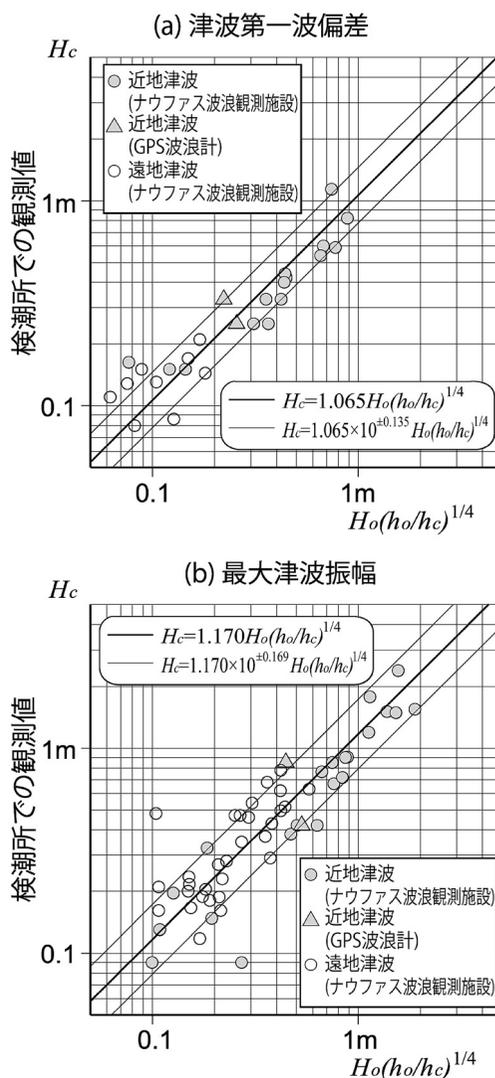


図3 ナウファス観測施設の長周期波形から求めた沿岸津波換算値と検潮所での実測値の関係 Hayashi (2010) の図を和訳した。

図4のとおりである。

近傍の検潮所付近の水深については、発行済みの最大縮尺（多くは1万分の一）の海図を用いて、検潮所から水路に沿って100m以内の海域の平均水深を読み取った。ただし、いずれも水深の基準は2節c)と同様に、略最低低潮面ではなく平均海面とした。読み取った水深値を式(2)に代入した結果、GPS波浪計からその近傍の検潮所の津波（第一波偏差および最大振幅）への増幅率は表1のとおり見込める。

4. 津波即時情報への活用

4.1 沿岸津波換算値を活用した速報

GPS波浪計の長周期波形で津波第一波の山（または谷）をリアルタイムに検出できた場合、第一波偏差の値と表1の増幅率をもとに、沿岸津波観測値を算出し、対応する海岸での津波の高さを推定できる。例えば、岩手釜石沖のGPS波浪計で+1mの津波第一波が得られた場合は、釜石検潮所では+2.73m程度（標準偏差分の誤差を考慮す

れば+2.38~+3.07m）の第一波偏差になることが見込める。

気象庁では、2008年7月1日から各GPS波浪計に対応する海岸での津波の高さの推定値を津波情報に含めて発表する業務を開始した。本稿執筆時点では、GPS波浪計の津波観測値を活用した具体的な発表事例はまだないが、仮に成功すれば、地震調査研究推進本部（2009）が基本目標の中で示した「緊急地震速報と同様な仕組みで、発生直後に震源に近い海域で観測された津波データを即時に利用すること」を初めて実現する画期的な津波情報になる。

現状では、上述の津波情報の発表に用いるべきGPS波浪計での観測値から沿岸の津波の高さへ換算する方法は、実際の津波観測事例に基づいたものではなく、根拠の妥当性が低い。しかし、沿岸津波換算値を表1の増幅率を用いてリアルタイムに求めるように改めれば、将来発表される津波情報が、より適切なものになるように改善できる。

一方で、津波注警報の制度上の制約もある。一

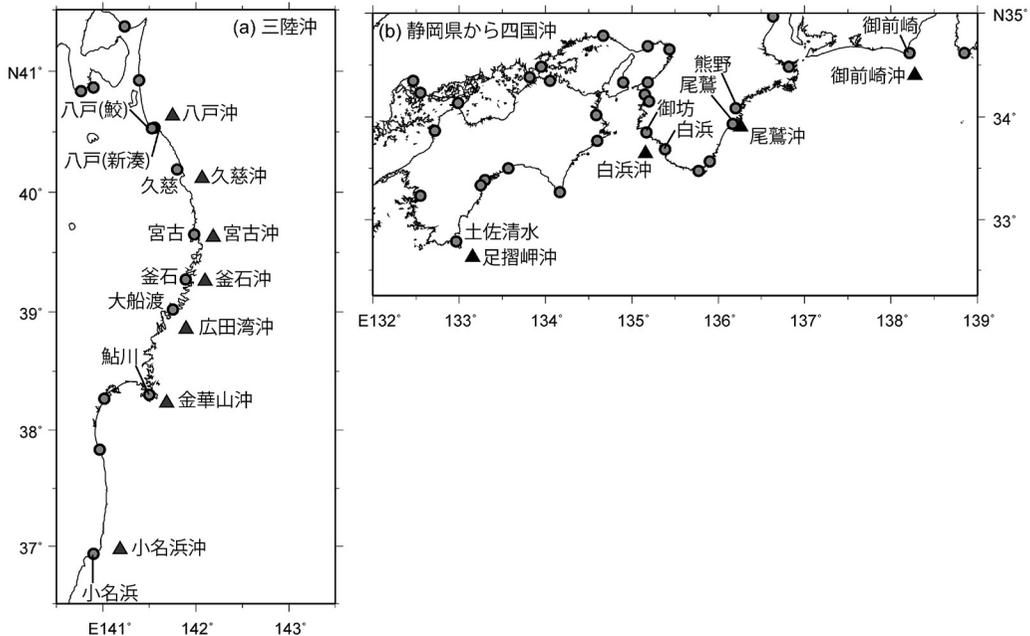


図4 GPS 波浪計とその付近の検潮所の位置

2010年3月時点で、観測データが供用中のGPS波浪計と、気象庁にリアルタイムに水位データが配信中の検潮所を示した。

表1 GPS 波浪計に対する近傍検潮所での津波の増幅率

GPS 波浪計*1			近傍の検潮所*2			増幅率*3	
観測地点名	水深 (m)*4	離岸距離 (km)*5	観測地点名	所属津波予報区	水深 (m)*6	津波第一波偏差	最大振幅
八戸沖	87	18	八戸 (新湊)	青森県太平洋沿岸	6.9	2.01(1.75~2.26)	2.21(1.89~2.52)
			八戸 (鮫)	青森県太平洋沿岸	3.1	2.45(2.14~2.76)	2.69(2.30~3.08)
久慈沖	125	17	久慈	岩手県	5.4	2.34(2.04~2.63)	2.57(2.20~2.94)
宮古沖	200	13	宮古	岩手県	7.3	2.44(2.13~2.75)	2.68(2.29~3.07)
釜石沖	204	11	釜石	岩手県	4.7	2.73(2.39~3.08)	3.00(2.57~3.44)
広田湾沖	160	18	大船渡	宮城県	7.9	2.26(1.97~2.55)	2.48(2.12~2.84)
金華山沖	144	10	鮎川	宮城県	4.8	2.49(2.18~2.81)	2.74(2.34~3.14)
小名浜沖	137	19	小名浜	福島県	10.2	2.04(1.78~2.30)	2.24(1.92~2.56)
御前崎沖	120	22	御前崎	静岡県	2.7	2.75(2.40~3.10)	3.02(2.58~3.46)
尾鷲沖	210	5	尾鷲	三重県南部	6.0	2.59(2.26~2.92)	2.85(2.43~3.26)
			熊野	三重県南部	9.4	2.32(2.02~2.61)	2.54(2.18~2.91)
白浜沖	201	17	白浜	和歌山県	6.5	2.51(2.19~2.83)	2.76(2.36~3.16)
			御坊	和歌山県	3.8	2.87(2.51~3.24)	3.16(2.70~3.61)
足摺岬沖	309	16	土佐清水	高知県	3.4	3.29(2.87~3.71)	3.61(3.09~4.14)

*1 国土交通省港湾局が所管する観測点。
 *2 八戸 (鮫)、久慈は港湾局、釜石は海上保安庁、他は気象庁が所管する観測点。
 *3 式 (2)、(3)から推定する津波第一波偏差および津波最大振幅の増幅率、カッコ内は誤差として標準偏差分を考慮した範囲。
 *4 国土交通省港湾局の観測点一覧に記された水深 (略最低低潮面を基準にした水深値)。
 *5 地形図から読み取り。
 *6 平均海面を基準にした深さ。原則として検潮所から水路に沿って100m以内の範囲の平均値を海図から読み取り。

つは、経験式 (2) と (3) は GPS 波浪計の近傍の検潮所での津波第一波振幅と最大振幅を推定するために適用されるべき式であり、全国が66に分けられた各予報区内の海岸他の場所での津波の推定は、換算式の適用範囲を超える可能性がある点である。もう一つは、量的津波予報 (Tatehata, 1997; 館畑, 1998) において、津波の高さを離散値 (現在は、0.5m, 1m, 2m, 3m, 4m, 6m, 8m, 10m 以上のいずれか (表2)) で発表している現状の枠組みに適合させる必要がある点である。

また、現行の量的津波予報では、津波の高さが津波注意報等のグレードと対応している (表2) ので、沿岸津波換算値を根拠にした海岸での津波の高さの推定は、当該予報区のグレード変更を伴う場合がありうる。例えば、津波注意報 (「高いところで0.5m程度の津波が予想されますので、注意してください」) から津波警報 (津波) (「高いところで1m程度の津波が予想されますので、警戒してください」) など、津波警報の内容を津波から大津波 (「高いところで3m程度以上の津波が予想

表2 気象庁の津波予報・注警報における津波の高さと種別・グレードの対応

津波の高さの予報値	グレードと予報・注警報の種別	
	—	津波なし
—	若干の海面変動	
0.5 m	津波注意	津波注意報
1 m	津波	津波警報
2 m		
3 m		
4 m		
6 m		
8 m		
10 m 以上		

されますので、厳重に警戒してください」など) ということ切り換えである。

GPS 波浪計の津波観測値を活用した際の津波情報文として用意されている文例 (図2) にあるように、GPS 波浪計による観測値に関係する情報は津波情報文中で注釈として記される箇所がほとんどである。これは、従前の津波情報との書式の整合性や、津波情報発表に係るシステムの都合か

ら、現状では複雑な情報文とならざるを得ないためである。情報利用者との対話等を通じて、短時間で理解できる分かりやすい情報文にするための書式改良を進めることは、近い将来に津波情報に改善を加える必要がある点といえる。

ところで、現状のキネマティック GPS 技術の観測誤差と沿岸の波浪による影響などが制約となり、理論津波走時と大きく異なる時刻に第一波が出現した場合や、第一波偏差が数 cm と小さい場合は、津波をリアルタイムに検出できる可能性は低くなる。また、海況が時化している場合、磁気嵐が発生している場合にも津波の検知力が低下することが避けられない。しかも、GPS 波浪計を展開している海域は、三陸沖と紀伊半島から四国沖に限定されている(図4)。このため、実際に図2のような津波情報を発表できる津波は、検潮所で津波が観測される津波事例のうちの一部に限られる。

さらに、GPS 波浪計の陸上基地局を地殻変動域に含む地震が発生する場合もありえる。例えば、尾鷲と土佐清水(図4)は、それぞれ1944年東南海地震と1854年南海地震の震源域内(地震調査研究推進本部地震調査委員会編, 2009)にあると推定されている。陸上基地局が地震に伴って水平または上下に移動すれば、GPS 波浪計の観測値に影響が及ぶため、この場合、式(2)、(3)を適用した検潮所での津波の高さの推定の精度が低下すると考えられる。

4.2 しきい値を用いた津波予報の運用の可能性

2003年十勝沖地震津波においては、ナウファスの観測施設である十勝港沖の水圧計と流速計で、津波第一波の波高偏差から長波の理論で計算される流速の極大値に比べて、はるかに小さい流速が観測結果として得られている。これは、津波が沖合の水圧計の位置で、すでに進行長波の性質を失い、海岸へ向かう波と海岸から反射された波が重なった重複波の性質を持っていたためだと推定されている(永井・小川, 2004)。また、沖合の水圧計が津波第一波の極大偏差を記録する時刻以前に、すでに検潮所に津波が到達していたことも、

この推定を支持している。他の津波事例でも同様の報告がある。津波波形の観測事例を図5に示す。

ナウファスの沖合波浪観測施設の位置での津波が岸からの反射波との重複波の性質を持つということは、一般には、沖合と海岸の観測施設での第一波の極大偏差(山または谷)の出現時刻差が、第一波の到達時刻の差に比べて小さくなることを意味する。第一波の極大偏差の検出を確認後に沿岸津波換算値を算出する方法では、すでに、近傍の海岸に津波第一波が到達していると考えられる。このため、リアルタイム津波予測の立場からは、情報発表から現象発生までの猶予時間(情報のリードタイム)が稼げない欠点があるといえる。

一方、GPS 波浪計で津波が観測され、リアルタイムに式(2)を適用可能な場面の大半は、すでに量的津波予報を発表済みだと考えられる。そのため、沿岸津波換算値は、主として津波の高さに関する追加的な情報の提供や、津波注警報の種別変更の必要性を判定する材料として用いられることになる。

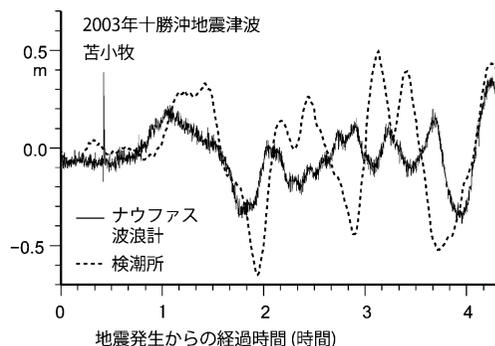


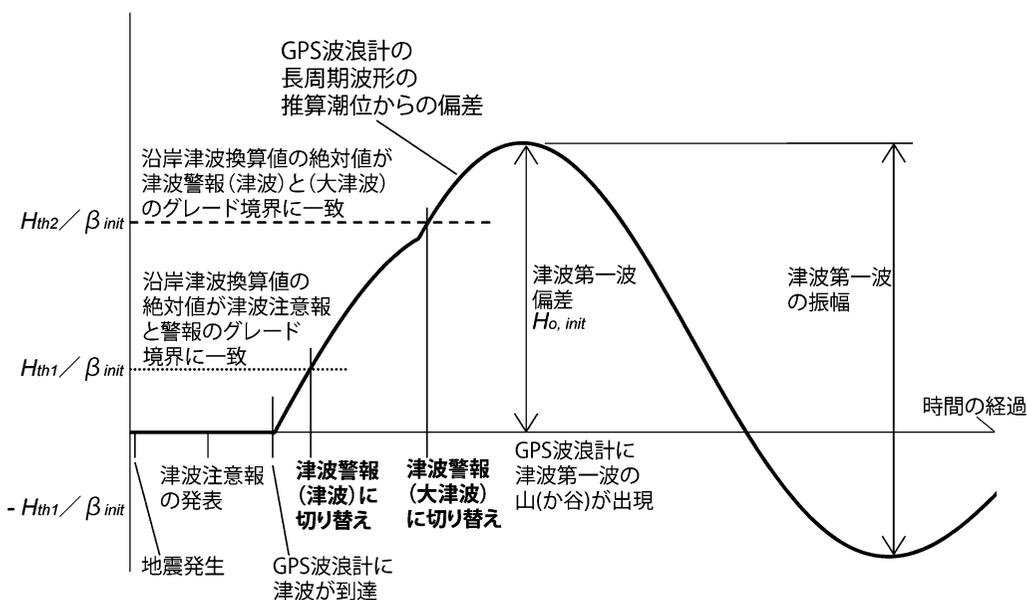
図5 海岸の検潮所と沖合の波浪計での津波観測波形の比較例

Hayashi (2010) の図を和訳した。2003年9月26日に釧路沖で発生した十勝沖地震(マグニチュード8.0; 気象庁, 2005)における津波波形で、離岸距離4.0 kmの苫小牧港沖のナウファス波浪観測施設で観測された津波波形(長周期波形)とその近傍の苫小牧西港の検潮所の津波波形(永井・小川, 2004)を比較した。波形データは、<http://www.pari.go.jp/bsh/ky-skb/ks-jyo/kaisy/> から取得した。

そこで、GPS 波浪計の長周期波形で津波第一波の山または谷の検出を待つのではなく、式(2)による沿岸津波換算値が注警報のグレード境界値(表2)に一致するようなGPS 波浪計の津波観測波高を予め逆算しておく方法を提案する。逆算した値を予め閾値に設定し、津波発生時にはGPS 波浪計の長周期波形をリアルタイムに監視し、その波形で平時の水位からの偏差が閾値を超える度に、必要に応じて当該予報区の注警報のカテゴリを変更する運用方法の提案である(図6)。このように運用すれば、高い津波が押し寄せるごく直前の注警報のグレード変更で見逃しを防げる可能性が高まる。また、GPS 波浪計による津波第一波偏差の観測値を確定するまで待つよりも、少しでも長いリードタイムでの津波警報発表ができる可能性が期待できる。

ただし、津波予報区内の海岸での津波の高さに

対する、検潮所での津波の高さの代表性に起因する問題は残されている。つまり、GPS 波浪計の近傍検潮所での津波の高さが予報区内の海岸での津波の高さに比べて低い場合には、本論文で提案した方法では、高い津波が押し寄せるごく直前の注警報のグレード変更ができず、依然として高い津波を見逃してしまう場合がある。逆に、岩手県のように複数のGPS 波浪計がある予報区(表1)では、予報区内での津波の高さにばらつきがあることが分かったとしても、同一津波予報区内のいずれかのGPS 波浪計の観測値を根拠にして、注警報のグレードが切り上げられる場合がある。この場合、津波予報区の一部の海岸に対しては、わざわざ過大評価する方向にグレード変更を生じる結果となるが、もし、津波予報区を細分すればある程度は解決できる課題だといえる。



H_{th1} : 津波注意報と津波警報(津波)の境界の目安となる津波の高さ($0.5m < H_{th1} < 1m$)
 H_{th2} : 津波警報(津波)と津波警報(大津波)の境界の目安となる津波の高さ($2m < H_{th2} < 3m$)
 β_{init} : 海岸でGPS波浪計の津波の高さが何倍になるかを示す第一波振幅の増幅率(表1)
 $H_{o,init}$: 津波第一波偏差(第一波の津波の高さに正負の符号を付したもの)

図6 GPS 波浪計での津波第一波の成長過程を活用した津波警報の発表方法のイメージ
 個々の観測点における増幅率は表1、グレードと津波注警報の種別の関係は表2のとおり。

5. まとめ

Hayashi (2010) に基づけば、GPS 波浪計の長周期波形で観測される第一波偏差・最大振幅は、ナウファスの他測器による観測値と同様に、グリーンの法則から派生した関係式(式(2),(3))を適用して、沿岸津波換算値を求めることができる(図3)。また、過去の津波事例から標準偏差分を考慮すれば、検潮所での観測値は沿岸津波換算値に対して、第一波偏差では73~136%、最大振幅では68~148%になると見込める。すなわち、GPS 波浪計の長周期波形で津波第一波の山または谷をリアルタイムに検出し、第一波偏差の値との増幅率(表1)をもとに沿岸津波換算値を求めることで、対応する海岸の検潮所(図4)での津波の高さを、津波が到達前あるいは津波が高まる前に、推定可能な場合があることを示した。また、増幅率と沿岸津波換算値は、第一波の山または谷の到達前に、津波注意報から警報への切り換え等の判断に活用する方法があることも示した(図6)。

GPS 波浪計の実用化によって、海域で観測された津波データをリアルタイムに利用して、対応する海岸での津波の高さの推定値を含めた津波情報を発表できる準備が整ってきた。まだ実際の発表事例はないものの、このような津波情報が近い将来に災害軽減に貢献できるものと期待している。

謝辞

本研究の一部は、(独)日本学術振興会(科学研究費補助金20510173)から研究助成を受けて実施したものです。気象庁地震火山部の高山博之氏、中田健嗣氏、ならびに、気象研究所の平田賢治氏との議論は、本論文をまとめる上で有意義でした。一部の図は、Generic Mapping Tools (Wessel and Smith, 1998) を用いて準備しました。記して、ここに関係各位に謝意を表します。

参考文献

Ablain, M., J. Dorandeu, P.-Y. Le Traon, and A. Sladen: High resolution altimetry reveals new characteristics of the December 2004 Indian Ocean tsunami, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L21602,

doi:10.1029/2006 GL027533, 2006.

Baba, T., K. Hirata, and Y. Kaneda: Tsunami magnitudes determined from ocean-bottom pressure gauge data around Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L08303, doi:10.1029/2003 GL019397, 2004.

Godin, O.A., V.G. Irisov, R.R. Leben, B.D. Hamlington, and G.A. Wick: Variations in sea surface roughness induced by the 2004 Sumatra-Andaman tsunami, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **9**, 1135-1147, 2009.

González, F.I., E.N. Bernard, C. Meinig, M.C. Eble, H.O. Mofjeld, and S. Stalin: The NTHMP tsunameter network, *Nat. Hazards*, **35**, 25-39, 2005.

Hayashi, Y.: Extracting the 2004 Indian Ocean tsunami signals from sea surface height data observed by satellite altimetry, *J. Geophys. Res.*, **113**, C01001, doi:10.1029/2007 JC004177, 2008.

Hayashi, Y.: Empirical relationship of tsunami height between offshore and coastal stations, *Earth Planets Space*, **62**, 269-275, doi:10.5047/eps.2009.11.006, 2010.

地震調査研究推進本部：新たな地震調査研究の推進について—地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策—, 23p., 2009.

地震調査研究推進本部地震調査委員会編：日本の地震活動—被害地震から見た地域別の特徴—第2版, 496p., 2009.

Kato, T., Y. Terada, M. Kinoshita, H. Kakimoto, H. Isshiki, M. Matsuishi, A. Yokoyama, and T. Tanno: Real-time observation of tsunami by RTK-GPS, *Earth Planets Space*, **52**, 841-845, 2000.

気象庁：平成15年(2003年)十勝沖地震調査報告, 気象庁技術報告, no.126, 231p., 2005.

気象研究所地震火山研究部：海底地震常時観測システムの開発, 気象研究所技術報告, no.4, 233p., 1980.

永井紀彦：ナウファス(全国港湾海洋波浪情報網)の現況と今後の課題, 土木学会論文集, **VI-41** (no.609), 1-14, 1998.

永井紀彦・小川英明：平成15年(2003年)十勝沖地震津波波形の特性, 港湾空港技術研究所資料, no.1070, 92p., 2004.

永井紀彦・里見 茂：2004年東海道沖地震津波の観測結果, 港湾空港技術研究所資料, no.1096,

- 22p., 2005.
- Nakata, K., Y. Nishimae, K. Hirano, Y. Igarashi, and Y. Hasegawa: Utilization of GPS buoy data for Tsunami Information of JMA, *Programme and Abstracts for the 7th General Assembly of Asian Seismological Commission and The 2008 Fall meeting of Seismological Society of Japan*, paper no.Y3-238, 2008.
- 大垣圭一・安間友輔・越村俊一・今村文彦：リアルタイム観測情報を利用した津波予報の段階的修正法, 海岸工学論文集, **53**, 216-220, 2006.
- Plag, H.-P., and M. Pearlman ed.: *Global Geodetic Observing System: Meeting the requirements of a global society on a changing planet in 2020*, Springer-Verlag, Berlin, 332p., 2009.
- 首藤伸夫・今村文彦・越村俊一・佐竹健治・松富英夫編：津波の事典, 朝倉書店, 350p., 2007.
- 高山寛美：沖合と沿岸の津波の最大波高の統計的關係, 気象研究所研究報告, **59**, 83-95, doi:10.2467/mripapers.59.83, 2008.
- Tatehata, H.: The new tsunami warning system of the Japan Meteorological Agency, Hebenstreit, G. ed., *Perspectives on tsunami hazard reduction — Observations, theory and planning*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp.175-188, 1997.
- 館畑秀衛：津波数値計算技術の津波予報への応用, 月刊海洋, 号外 no.15, 23-30, 1998.
- Wessel, P., and W.H.F. Smith: New, improved version of Generic Mapping Tools released, *Eos Trans. AGU*, **79**, 579, 1998.

(投稿受理：平成21年12月24日
訂正稿受理：平成22年6月9日)