

沖合・沿岸・オンサイト観測を組み合わせた 津波観測網に関する提言

PROPOSAL OF COASTAL TSUNAMI INFORMATION SYSTEM WITH OFFSHORE, NEARSHORE AND ON-SITE NETWORK OBSERVATION EQUIPMENTS

永井紀彦¹・加藤照之²・額田恭史³・泉 裕明⁴・寺田幸博⁵・三井正雄⁶
Toshihiko NAGAI, Teruyuki KATO, Kyoshi NUKADA, Hiroaki IZUMI, Yukihiro Terada, and
Masao MITSUI

¹工博 (独) 港湾空港技術研究所海象情報研究室長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²非会員: 理博 東京大学地震研究所教授 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)

³非会員: 工修 前 (財) 沿岸技術研究センター主任研究員 (〒102-0092 東京都千代田区隼町3-16-6F)

⁴非会員: 環修 (財) 日本気象協会首都圏支社主任技師 (〒170-6055 東京都豊島区東池袋3-1-1-55F)

⁵非会員: 工博 日立造船 (株) 技術研究所室長 (〒551-0022 大阪市大正区船町2-2-11)

⁶正会員: 理修 (株) カイジョーソニック海象グループリーダ (〒205-8607 東京都羽村市栄町3-1-5)

This paper introduces the Japanese experience of the offshore tsunami profile observation. For the tsunami profile detection sensors, newly developed two systems are introduced: one is seabed installed Doppler-typed Wave Directional Meter (DWDM), and the other is the GPS Buoy Tsunami Gauge. Plan of the Round-Japanese-Coasts and Round-Indian-Sea Offshore Tsunami Monitoring Network is also introduced in the paper. Real-time data processing will be conducted at the Data Center. Satellite data communication system with self electric energy supply by the coastal wind-power-generators and battery should be applied to keep the continuous data communication without interruption in case where stable electric power is difficult to be obtained.

Key Words: Tsunami, Observation, Information, Real-time System, NOWPHAS, GPS Buoy

1. はじめに

スマトラ沖地震津波を契機に津波監視網の構築の必要性が強く認識されている。地震波の伝播速度は津波より速いので、津波発生の可能性に関する第1報は地震観測データによらざるを得ない。しかし、地震の揺れと津波とは1:1に対応しないため、いわゆる空振り警報が多く発令され、実際の避難を促しにくい状況が生じているのが現状である。このため、直接観測された津波波形記録を活用し、情報の信頼性を高めることが重要となる。警報解除の判断にあたっては、観測データに基づく合理的な根拠が求められる。本研究は、沖合・沿岸・オンサイトといったさまざまな津波観測機器の特徴を、実際の津波観測データを本に紹介するとともに、これらの観測機器を組み合わせた総合的な津波観測網の構築にあたっての、システムの基本設計を試みるものである。

2. 既存津波観測機器の特徴

巨大津波は、特定海岸に限って考えれば、数十年あるいは数百年といった長い時間間隔をおいて来襲する現象である。このため、津波観測網や情報システムが緊急時に有効に機能するためには、長期間にわたる日常を通じた良好なシステムの運用・維持・管理が必要となる。すなわち、常時においても観測システムが提供する情報が有効に社会に発信され、社会からのシステムに対する正当な認知が継続することが、不可欠となる。従って、津波観測機器は、津波を観測するばかりではなく、波浪・潮汐・高潮などの、津波よりもより頻繁に発生する海象の観測監視にも機能することが必須要件となる。津波観測だけをターゲットとした観測網の維持管理は、長年にわたって継続することは困難である。

表-1 は、観測ポイント毎に想定される津波波形

観測機器の分類を示したものである。津波の観測機器は、水深 50m を超える大水深海域、水深 50m 以下の沿岸浅海域および海岸線近傍のオンサイトポイント（岸壁前面または陸域）といった、観測ポイントによって分類可能である。ここで、水深 50m という基準は、人間による海底作業限界水深であり、定期的に清掃を要する海底設置センサーの設置限界と考えられている水深である。

全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）は、沿岸浅海域における海底設置式波浪計ネットワークとして構築され、近年発生した津波に関して沖合の波形記録の観測に成功している¹⁾。海象計²⁾は、常時波浪の方向スペクトル観測や沖合での潮位観測を単一の海底設置式センサーで実現した、ナウファスネットワークにおける中心的な計測機器である。

大水深海域における津波観測は、かつては困難であると考えられていた。しかし、津波を沖合でいち早く捉えるためには、水深 50m 以下に限定される海底設置式波浪計だけでは、十分とは言えない。このため、1993 年北海道南西沖地震津波の後、海底設置式水圧式津波計が、十勝沖・三陸沖・駿河湾沖などの大水深海域に設置された^{3), 4)}。これらは、数十 km にも及ぶ海底ケーブル工事を伴う高価なシステムである。アメリカ合衆国では、ツナメータと呼ばれる大水深海底の水圧変動計測を行うシステムを開発・展開中である⁵⁾。ツナメータは、長大な海底ケーブルの敷設のかわりに、海底設置水圧計から超音波水中伝送技術を用いて洋上ブイにデータを回収し、無線で陸上基地局にデータ伝送するものであるが、こうした水中における切れ目のない連続的なデータ伝送システムの長期安定性は、まだ十分に示されていない。いずれにしても、大水深海域では常時の波浪による水圧変動は海底まで到達しないので、大水深海底水圧式津波計は、常時波浪観測機能を有しない問題がある。また、気圧・水温・塩分濃度等による圧力変動の影響も大きいので、津波による水位変動を正しく抽出することは容易ではない。このためリアルタイムでの津波監視には、実用上適用が困難である。水圧センサーが老朽化した場合、センサーのメンテナンスや交換ができないため、海底ケーブルを含めてシステム全体の更新が必要となる問題点も残されている。

こうした海底設置式水圧式津波計の問題点を解消したシステムが、GPS 津波計測システムである。RTK法を用いた陸上基地局との比較観測によって、GPS ブイが陸上基地局から 20km 以内に設置されれば、1cm の精度で、毎秒のブイの上下変動を計測することができるので、適切な数値ローパスフィルターによって波浪による短周期成分を除去すれば、リアルタイムで周期数分から数十分の津波波形を検出することが可能であり、大水深海域でのリアルタイム津波監視を可能としたシステムである。潮汐による沖合水位変動や、比較的周期の長い波浪観測にも有効に機能することが、大船渡沖や室戸沖の観測

結果から明らかにされている^{6), 7)}。ただし、係留系やブイ動揺の影響補正が困難なため、周期 5 秒未満の短周期波浪成分や、波浪の方向スペクトル（波向）観測への適用技術は、まだ確立されていない。

岸壁前面または陸域のオンサイト津波観測は、センサーの設置や維持が沖合観測に比べて簡易かつ安価であり、かつ直接的な津波の影響把握ができる長所を有しているため、沖合津波観測に併設して津波監視ネットワークを構築することが望ましい。オンサイト観測の典型的なものは、全国の主要港湾に展開設置されている検潮所である。多くの検潮所では、井戸内のフロートの上下変動を記録するフース型検潮器が採用されている。しかし、検潮井戸は、もともと周期 12 時間以上のゆっくりとした海面変動を捉えることを目的に建設されたものであり、周期の短い波浪による変動成分を取り除くため、細い導水管によって井戸内の海水と外海の海水がつながる仕組みになっている。津波の周期は、波浪と天文潮汐の間に位置するため、検潮所によっては津波による海面変動に応答しきれずに、津波を過小に評価してしまう問題が残されている。こうした問題を解決し、オンサイトにおける津波や津波に伴う越流を直接測定することができるシステムが、空中発射型超音波式潮位計⁸⁾、あるいはオンサイト越波計⁹⁾である。

表-1 想定される津波波形観測機器の分類

設置位置	センサー	計測項目	括弧内の計測項目の課題
大水深(50m以上)	GPSブイ	波浪・津波・高潮・潮位	
	海底水圧計	津波・(高潮)・(潮位)	気圧・水温等補正
浅海域(50m以下)	海底超音波または水圧計	波浪・津波・高潮・潮位	
沿岸(岸壁前面)	井戸内フロート	(津波)・高潮・潮位	井戸周波数応答特性
	超音波または水圧計	前面波・津波・高潮・潮位	
陸域	水圧計またはステップ計	越波・遡上津波	

3. ナウファスによる沖合津波観測

我が国沿岸の津波観測ネットワークのあり方を検討する際、既存観測網の評価が第一歩となる。ナウファス（全国港湾海洋波浪情報網）として運用されている、既存沿岸波浪観測網の適用性と限界を明らかにし、どのような観測網の増強が必要かを明らかにすることが、必要最小限の予算で津波観測網を構築するために、きわめて重要である。

図-1 は、既存の沿岸波浪計が、津波が沿岸に來襲する何分前に沖合での津波波形を捉えることが可能かを、試算した結果である。試算にあたっては、各波浪計の設置水深と離岸距離をもとに、一様海底勾配を仮定した。波浪観測点毎に、丸印の大きさと、波浪計から沿岸に至る津波伝播時間を、5 分未満、5 分以上 10 分未満、10 分以上の 3 段階表示した。

沿岸波浪計の設置水深は 20～50m の範囲に多く、離岸距離（海底ケーブル延長）は 2～5km の範囲が多い^{10), 11)}。こうした、比較的浅海域における波浪観測点においても、遠浅の海岸地形が見られる、紋別、石狩、十勝、酒田、新潟、石巻、小松島、志布

志などでは、既存波浪計で 10 分以上前における津波検知が可能である。また、北関東から福島に至る鹿島港沖（水深 24m）、常陸那珂港沖（水深 30m）、小名浜港沖（水深 24m）の波浪計でも、若干の海底ケーブル延長による沖合へのセンサー移設によって、やはり、既存システムの改良で 10 分以上前における津波検知が可能である。また、東京湾に來襲する津波を考えると、伊豆大島波浮港沖の波浪計は、1996 年イリアンジャヤ地震津波を東京湾口久里浜検潮所よりも 30 分間早く観測した実績がある¹²⁾。離島に陸上観測局を置く津波観測は、津波の事前検知にあたって重要である。

これに対して、急勾配な海底地形を有する北海道南西海岸、三陸沿岸、東海沿岸、紀伊半島沿岸、四国太平洋岸、南西諸島沖縄沿岸などでは、多くの既存ナウファス波浪計では、津波事前検知時間は 5 分未満にとどまり、より沖合に G P S ブイなどの大水深津波計の配置が望まれる。

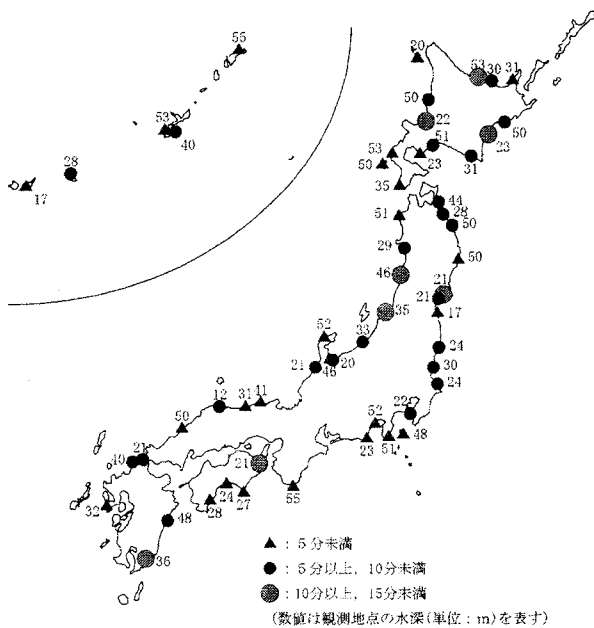


図-1 既設波浪観測点から沿岸への津波伝播時間

図-2 は、高知県室津港を例として、津波の伝播時間を計算し、図-1 より詳しい検討を試みたものである。沿岸の計算起点（ここでは室戸岬検潮所）から各方向に直線を引き、100m 毎の各区間の津波伝播時間を求め、区間伝播時間の和として 5 分前検知線、7.5 分前検知線、10 分前検知線および 12.5 分前検知線を求めたものである。海図をもとに作成した 500m 格子水深データを線形補間した水深を用い、100m の区間内は一樣勾配を仮定し、長波の伝播時間を試算した。但し、既設検潮所と室戸岬漁港港口の間約 500m 区間は、水深 5m の一定水深を仮定した。図には、等深線によって海底地形形状を示すとともに、既設 G P S ブイやナウファス波浪計および気象潮検潮所の位置をあわせて示している。

2004 年 4 月に設置され、ナウファスの一環とし

て沖合での波浪・津波観測に活用されている G P S 津波計は、10 分前と 12.5 分前の津波検知線の間に位置していることがわかる。G P S ブイは、陸上基地局アンテナから 20km 以内に設置されれば、設置水深には制約がなく 1cm 精度で海面昇降を計測することができるので、室戸岬沖のような急勾配大水深ポイントにおいても、沖合でのいち早い津波波形記録の捕捉が可能である。他方、ナウファス波浪計は、5 分前検知線上に位置している。ただし、この図は津波の伝播経路を直線として仮定したものであるので、平面的に屈折する津波の伝播特性を再現しているものではない。

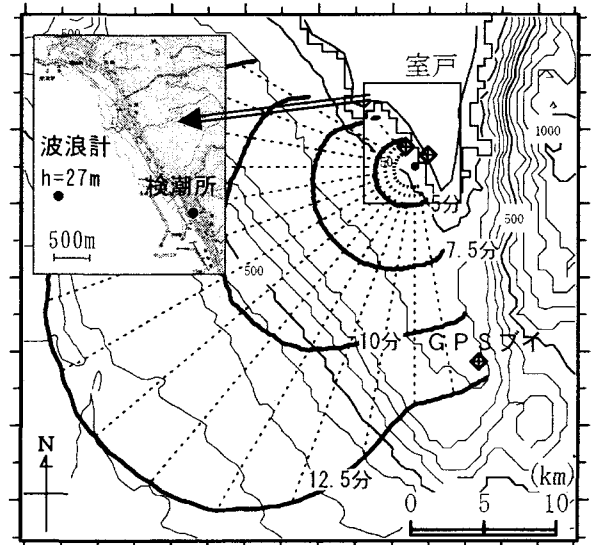


図-2 沿岸から沖合への津波逆伝播の検討例

4. 沿岸・オンサイト観測の組み合わせ

2004 年東海道沖地震津波來襲時の複合観測例を以下に例示する。図-3 は、室戸岬沖 G P S ブイ（水深 100m）、室津港沖ナウファス超音波式波高計（水深 27m）および室戸岬検潮所における、波形記録を、あわせて示したものである。津波の第 1 波の極大偏差を見ると、G P S ブイでは 0:31 に 10cm、海底設置波浪計では 0:32 に 22cm、港内検潮器では 0:40 に 32cm を示し、沖合では港内より 8~10 分程度早く津波を観測することが改めて実測データから示されるとともに、沖合から港内にかけての津波の増幅も明らかにされた。

ただし、試算された時刻差と実測とは、完全に一致しなかった。沿岸波浪計と港内検潮所との津波到達時刻差は、図-2 では 5 分程度と試算されたのに対し、図-3 では 8 分の時刻差があった。他方、G P S ブイと港内検潮所との津波到達時刻差は、図-2 では 11 分程度と試算されたのに対し、図-3 では 9 分であった。こうした、津波到達の推定時刻差と実測との相違の原因は、必ずしも明らかではない。図-2 では、直線的な津波伝播を仮定し、屈折などによる津波伝播方向変化を考慮していないことも、

誤差要因の一つになっていると思われる。今後の数値シミュレーションによる詳細な検討が望まれる。

図-4 は、3 観測点の周波数スペクトルを比較したものである。沖合では双峰型のスペクトル形状が見られたが、検潮所では周期の短い (0.013Hz: 約 8 分周期) ピークの増幅が著しく、スペクトルは単峰型となっている。このことは、室戸岬漁港内においては、周期 8 分程度の海面変動が増幅されやすい共振周期となっていることを意味している。図-4 は、沖合津波観測波形記録から沿岸に来襲する津波を、周波数応答特性を用いて推定できることを意味しているものでもある。沖合・沿岸・オンサイトの観測を組み合わせることによって、津波の特性をより精緻に把握することができることを示す一例である。ただし、既存検潮記録は、固有の井戸周波数応答特性を有しており、周期の短い津波高を過小評価する恐れがあることには注意が必要である。

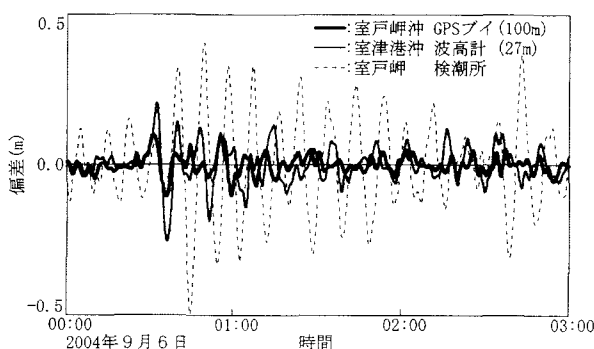


図-3 2004 年東海道沖地震津波波形記録

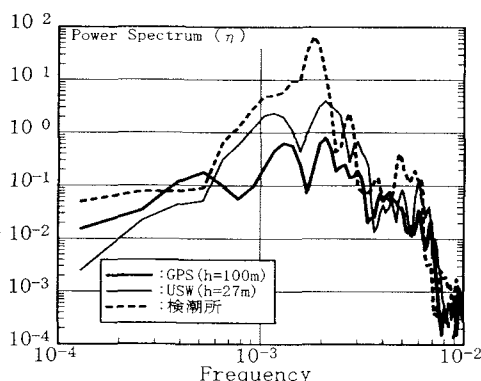


図-4 津波の周波数スペクトル応答

5. 日本沿岸と環インド洋津波監視システム

図-5 は、日本沿岸における沖合津波観測点ネットワークの構想を示したものである。図中には、過去に日本列島を襲った近海地震による津波の初期波源域をあわせて表示している¹³⁾。

津波観測点における観測情報は、ネットワークとしての活用が重要である。例えば、2003 年 9 月 26 日 4:50 に発生した十勝沖地震の津波第 1 波最大偏差は、十勝港沖の海象計では 5:14 に観測されたが、その後、久慈港沖の海象計では 5:31 に、大船渡港沖の GPS ブイでは 5:50 に、石巻港沖の海象計で

は 6:20 になって観測されている¹⁴⁾。すなわち、ある港の沖合津波観測情報が、速やかに全国情報として伝達されることによって、沿岸全域の津波防災に貢献することが可能である。こうした観点からも、沿岸津波観測網はなるべく密に設置されるべきである。観測点の沿岸配置間隔は、想定波源域の 1/2 程度の空間スケールを、めざすこととした。

沿岸を襲う津波には遠地津波もあるので、離島沖合海域は、有効な遠地津波を捉える観測点である。日本近海で大津波が発生すれば、津波は国内沿岸ばかりではなく、周辺諸国の沿岸をも襲うことが懸念される。国際的な防災活動の一環として、離島や岩礁の新たな観測地点としての活用は、21 世紀における国際協力の新しい形態となりうるものである。

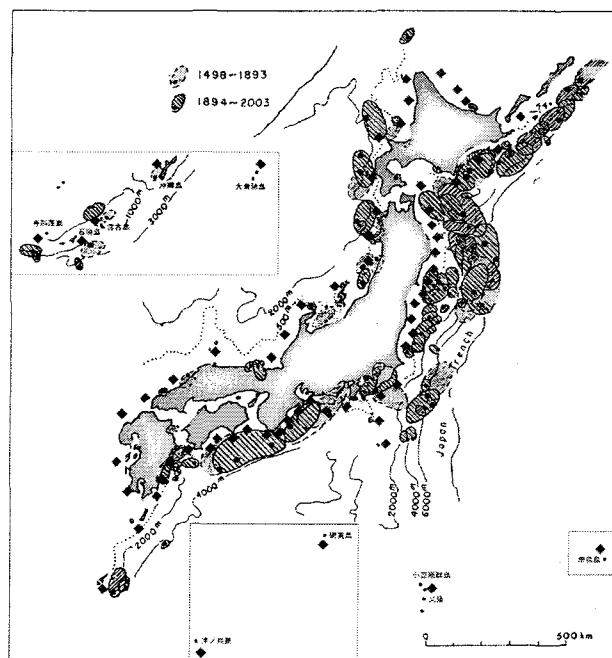


図-5 津波波源域を考慮した沖合津波観測網構想

図-6 は、インド洋沿岸に、こうした考えをあてはめ、沖合津波観測網の提言を試みたものである。2004 年スマトラ沖地震津波は、多くのインド洋沿岸諸国に多大な被害をもたらした。この津波の初期波源域は、1000km にも及ぶと推定されているが、複数の津波波源に波源域が分かれているとの説もある。適切な空間スケールの把握は困難であったが、200-300km 程度の間隔を仮に設定した。

津波情報網の基本設計にあたっては、観測情報の処理・解析・発表に係わる、ハードおよびソフト両面のシステム作りも、また重要である。

図-7 は、津波データセンターのシステムを試設計したものである。図-5 あるいは図-6 で示した各データモニタリング地点には、沖合・沿岸およびオンサイトの津波観測機器が配置される。常時においても波浪や潮汐などのモニタリングとして、データセンターでは 24 時間のデータ監視・管理・配信が行なわれなければならない。商用電源の安定供給が困難な離島や岩礁を活用した観測ポイントでは、風

力や太陽光を活用した、二酸化炭素を排出しない自前による電力供給が望まれる。こうした自然エネルギーは、供給における時間変動が大きいので、蓄電システムと一体として、安定的電源供給がなされる設計をしなければならない¹⁵⁾。

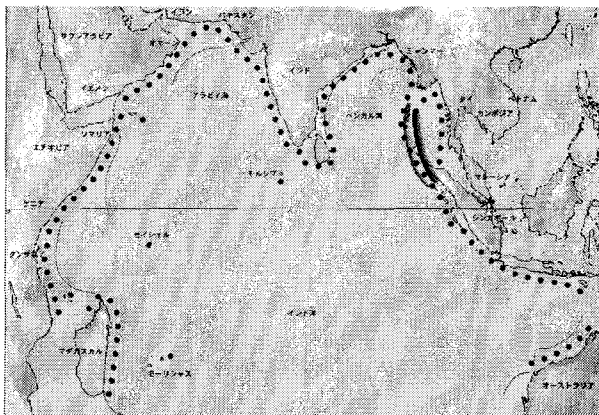


図-6 環インド洋における沖合津波観測網構想

データセンターは、収集とデータ配信を行なうリアルタイム運用を行なう部分と、データバックアップと管理を行なうノンリアルタイム運用を行なう部分とに大別される。前者にはオペレータによる24時間システム監視体制の構築が不可欠である。

データセンターから配信されるリアルタイム情報は、ホームページで一般に公開される他、気象庁や自治体等の防災機関には、より確実な専用端末への配信が必要となる。この際、専用端末では、防災機関担当者が瞬時に観測情報を的確に判断し、いち早く警報発令の有無を判断できるような、わかりやすい情報表示が重要となる。

図-8 は、津波波形記録の観測と情報表示の時間的な経過概念を示したものである。図中の波形観測記録は、数値的なローパスフィルターによって波浪等の短周期成分を除去し、あらかじめ予測可能な天文潮汐成分を除去した、いわゆる潮位偏差成分を示した沖合水位経時変化図を意味している¹⁾。

津波の周期は、初期波源域の空間スケールによって決まるが、マグニチュード8クラスの大型地震の場合、40分を超えることも多い。津波観測波形を完全に把握してからの情報発信では、防災情報としては、遅くなりすぎる。このため、津波データセンターからの津波観測情報の発信は、①偏差が閾値を超えた場合の津波観測第1報、②はじめの極大水位（引き波から始まる津波の場合は極小水位）を検出した時点での第2報、津波波形の第1波の山と谷を捉え、③第1波の波高と周期が明らかになった時点での第3報、というように時間を追って、段階的に精度が高まっていく情報発信法を提案する。

第1報は、言うまでもなく、住民にいち早く危険を知らせるための情報である。津波の高さは正確にはわからなくても、閾値以上の偏差が観測された場

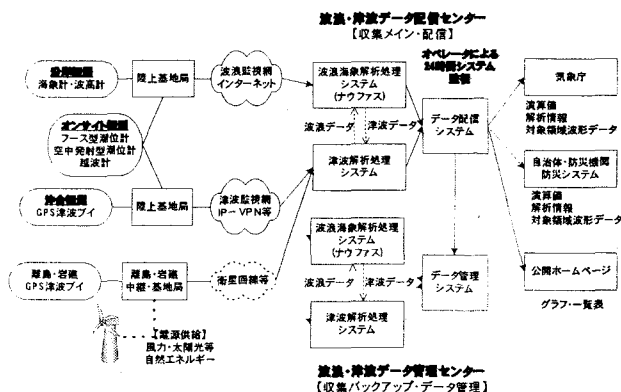


図-7 津波データセンターのシステム

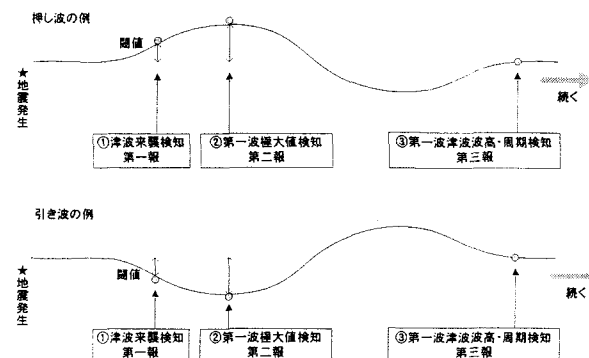


図-8 津波観測データの処理判定フロー

合には、速やかな情報発信が必要である。閾値の設定は、本来は、図-3 や図-4 で示した観測事例からわかるように、沖と沿岸の応答関数を根拠にするべきである。しかし、応答関数は周波数によって異なるため、津波の周期がわかる前には、推定が困難である。このため、この時点では、津波高は水深 $1/4$ 乗に逆比例する断面近似を用いて設定せざるを得ない。津波高が水深の $1/2$ を超えた時点で碎波すると仮定し、沿岸における最大津波高が 1m を超えると予想される場合（すなわち水深 2m で津波偏差が 1m を超えると予想される沖合での偏差閾値とする場合）に第1報を発信するとすれば、

- ・津波計水深が 10m なら 偏差 65cm を閾値
- ・津波計水深が 20m なら 偏差 55cm を閾値
- ・津波計水深が 50m なら 偏差 45cm を閾値
- ・津波計水深が 100m なら 偏差 35cm を閾値
- ・津波計水深が 200m なら 偏差 30cm を閾値

とするような設定が考えられる。ただし、津波伝播過程における屈折等の影響で、津波高は局所的な変化が大きい。このため、上記の閾値は、観測点位置毎に適切な値を検討しなければならない。

第2報の段階でも、やはり、津波の周期はまだわからないが、津波高は水深 $1/4$ 乗に逆比例する断面近似を行なうことによって、沿岸での最大津波偏差の予測が一応可能となる時点である。第1報によって避難を始めた避難者が、どの程度の高所まで避難すればよいかを判断する目安となる情報として、第2報も重要である。

第3報の時点では、津波の周期がわかるので、事前に予測されている応答関数を用いて、沿岸における津波高の予測精度が、高められる。このため、遅滞なく第3報を発信することもまた重要である。さらに、第3報の時点では、オンサイトの津波観測データも得られているであろうから、より精度と信頼性の高い情報となる。避難解除の判断にあたっては、第3報以降のモニタリング情報が重要である。

6. まとめ

(1) 各種津波波形観測機器の特徴と適用範囲をとりまとめた。

(2) 2004年東海道沖地震津波来襲時の複合観測例を述べ、津波到達検出時刻について考察した。

(3) 全国港湾海洋波浪情報網（ナウファス）のシステム運営の現状と改良構想をふまえ、多観測点多項目にわたる津波観測情報の合理的なリアルタイム収集解析表示発信システムを考察した。

(4) これらの検討結果を総合し、沖合大水深津波計・沿岸波浪計・港内検潮機器・オンサイト越波計などを併設する合理的な観測網のあり方をとりまとめた。安定的な電源供給が困難な場合の、風力発電等の独立電源についても言及した。

(5) 観測網から得られる津波波形情報を、いち早く活用するための情報伝達体制について、システムの基本的な要件を整理し、試設計を試みた。

7. おわりに

津波観測網が津波来襲時に有効に機能するためには、データセンターから日常の波浪や潮位などの海象観測情報が有効に発信され、かつ日常の情報が多くの関係者に有効に活用されていることが重要である。日常的に人々の目に触れていないシステムが、緊急を要する津波来襲時にただちに有効に機能するようになることは、きわめて困難であろう。

本稿では、こうした観点から、現存する波浪観測情報提供システムであるナウファスの機能強化という観点から、津波観測網の改良的構築を提言した。何も無いところから新しいシステムを構築するよりは、既に存在するシステムを津波観測に応用する方が、はるかに、予算的にも人間的にも少ない投入によって、必要とされる津波観測情報網を構築できるからである。

本稿のとりまとめにあたっては、(財)沿岸技術研究センターの日本沿岸津波観測網の構築に関する基礎調査検討委員会の委員各位から貴重なご指導およびご助言をいただいた。また、ナウファスは、長年にわたる運輸省（現国土交通省）港湾局関係機関の相互協力の下に構築・運営されてきたシステムである。さらに、ここで紹介したGPSブイシステムは、(独)港湾空港技術研究所が東京大学地震研究所・(財)人と防災未来センターおよび日立造船

(株)とともに、文部科学省の補助金を受け、気象庁・大船渡市・室戸市のご協力を得て、開発したものである。関係各位に改めて謝意を表する。

参考文献

- 1) 永井紀彦・小川英明・額田恭史・久高将信：波浪計ネットワークによる沖合津波観測システムの構築と運用，土木学会，海洋開発論文集第20巻，pp.173-178，2004.
- 2) 橋本典明・永井紀彦・高山知司・高橋智晴・三井正雄・磯部憲雄・鈴木敏夫：水中超音波のドップラー効果を応用した海象計の開発，海岸工学論文集第42巻，土木学会，pp.1081-1085，1995.
- 3) 平田賢治：津波予測—リアルタイム津波予測を中心に—，月刊地球 Vol.27, No.3, (通巻309)号，海洋出版(株)，pp.159-165，2005.
- 4) 馬場俊孝・平田賢治：沖合での海底水圧観測による沿岸津波高の予測，月刊地球 Vol.27, No.3, (通巻309)号，海洋出版(株)，pp.197-201，2005.
- 5) E. N. Bernard・Frank I. Gonzalez・Vasily V. Titov (佐竹健治・平田賢治訳)：ツナメータと米国におけるリアルタイム津波予測，月刊地球 Vol.27, No.3, (通巻309)号，海洋出版(株)，pp.210-215，2005.
- 6) 永井紀彦・小川英明・寺田幸博・加藤照之・久高将信：GPSブイによる沖合の波浪・津波・潮位観測，海岸工学論文集第50巻，土木学会，pp.1411-1415，2003.
- 7) 加藤照之・寺田幸博・越村俊一・永井紀彦：GPS津波計による津波観測，月刊地球 Vol.27, No.3, (通巻309)号，海洋出版(株)，pp.179-183，2005.
- 8) 永井紀彦・菅原一晃・清水康男・高山俊裕・小園みちる：超音波空中発射式潮位計の開発，港湾技研資料 No.998, 17p., 2001.
- 9) 永井紀彦・平石哲也・服部昌樹・安田誠宏・高山俊裕：オンサイト越波計の開発と現地適用性，海岸工学論文集第50巻，土木学会，pp.626-630，2003.
- 10) 菅原一晃・永井紀彦・佐藤和敏・川口浩二：全国港湾海洋海象観測施設台帳（ナウファス施設台帳Ⅲ），港湾技研資料 No.941, 49p. (付録339P.)，1999.
- 11) 永井紀彦・里見茂：全国港湾海洋波浪観測年報（NOWPHAS 2003），港湾空港技術研究所資料No.1094, 89p., 2005. (1970年版から2002年版までの各年の波浪観測年報も港湾（空港）技研資料として既刊)
- 12) 小舟浩治・永井紀彦・橋本典明・平石哲也・清水勝義：1996年イリアンジャヤ地震津波の特性，港湾技研資料 No.842, 96p., 1996.
- 13) 羽鳥徳太郎：日本沿岸における津波波源，津波エネルギー分布，月刊地球 Vol.27, No.3, (通巻309)号，海洋出版(株)，pp.166-170，2005.
- 14) 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.
- 15) 永井紀彦・牛山泉・根本泰行・川西和昭・額田恭史・鈴木靖・乙津孝之：現地実証試験と風況シミュレーションに基づく沿岸風力照明システムの合理的構築：自然エネルギー利用総合セミナーテキスト，足利工業大学総合研究センター，pp.1-10，2004.