

【書類名】 明細書

【発明の名称】

GPS 受信体を利用した津波観測システム

【技術分野】

【0001】

本発明は津波の観測に関する。

【背景技術】

【0002】

津波が沿岸に來襲した場合は、目視の他、海岸に設置された潮位計および驗潮儀などを用いて観測が行われている。しかしながら、これらの観測手段は、津波の観測や記録としては役立つが、津波の來襲に対しては、その検知から避難までほとんど時間的猶予が無い。

【0003】

津波を沖合で検知する手段として、海底に設置された水圧計を用いて、津波に伴う海面の鉛直変位による水圧の変化から、津波を観測する方法が開示されている（特許公開 2001-264056）。この方法では、海底に水圧計を設置し、津波に伴う水圧変化の情報を海底ケーブルあるいはその他の手段で処理施設に伝達する必要がある、それを実現するためには多額の費用を要する。この手法は、気象庁でも、海底地震計の装置に付随して用いられており、津波警報などの発表の際に参考として利用されている。また、米国でも津波の検知に同様の水圧計が開発されている。

【0004】

一方、GPS 受信機を搭載した係留ブイを利用する津波計が開示されている（特許公開平 11-63984）。この方式は GPS 搬送波の位相差を利用するリアルタイム キネマチック DGPS (RTK) とよばれるアルゴリズムを用いており、陸上に設置された GPS 参照局と係留ブイの二者における同時的な測位情報を用いて、係留ブイの位置を参照局と相対的に求めるものである。この方式によれば係留ブイの 3 次元的位置を cm の精度で観測することが可能である。この津波計では、係留ブイで得られる測位情報のうち、その鉛直座標の変動を用いて、波浪を観測している。津波の來襲時には、津波による海面変動が波浪に重畳されるが、津波の周期が波浪に比べて長いことなどを利用して、津波の來襲を検知しており、これまで幾つかの観測例がある。しかしながら、この方式では、係留ブイを参照局から 20km 程度以上隔てると、誤差が増大するため、沖合への展開は困難な現状にある。

【0005】

沿岸域に係留された DGPS 方式のブイの鉛直変位を観測し、その周期を解析し、高さがある閾値を超えた場合に津波と見なして、自動的に最適の津波警戒情報を発するシステムが開示されている（特許公開 2007-18291）。この方式も、上記の方式と同様に沖合への展開には限界がある。

【0006】

本発明では、以下に開示するように、ブイなどの浮体が海水と共に自由に鉛直および水平に運動できることを特徴とするものであるが、上記の係留ブイは海底に係留されていることから、この手段をとることは原理的に不可能である。このような浮体の自由な運動を利用した津波の観測手段は開示されていない。

【0007】

近年、多数の漁船や商用の船舶などに GPS が搭載されているが、このような船舶を用いて津波を観測する手段も開示されていない。

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

これまでの沖合における津波来襲の検知あるいは観測を行うことを目的とした方式は、上述のようにすべて海面の鉛直変位に着目して行う手法である。また、水圧計および係留ブイを用いるものである。しかるに、津波の高さは、一般に、外洋ではたかだか 1m 程度であって、波浪に比べて同程度か小さいことから、津波を波浪と識別することは、本来、困難な状況にある。さらに、水圧計および係留ブイによる方法は、設置および維持に多額の経費を要し、特に、両者とも深海での設置は極めて困難である。このため、津波に伴う鉛直変位以外の要素の変動に着目して、しかも出来るだけ沖合の海域で、津波の来襲を検知し、全体像を観測したいという課題がある。また、GPS 受信機能を持つ漂流ブイ、漁船や商用の船舶などを利用して、津波の来襲を検知し、観測できれば、費用が非常に軽減される。

【課題を解決するための手段】

【0009】

本発明は、津波が持つ特有の物理的性質に根拠をおいていることから、まず、その特質について考察する。公知の海洋物理学的知見によれば、津波は、その振る舞いを支配する物理的な微分方程式を線形化し、かつ鉛直 2 次元面内の運動として取り扱っても、その特質は全く変わらないことがわかっている。すなわち、図 1 に示すように、振幅 η_0 、波長 λ 、周期 T を持つ 2 次元の津波が、水深 h が一定の海域を伝播している進行波の場合、任意の時間 t および地点 x における津波の高さ η (津波に伴う鉛直変位と同じ) は、 $\eta = \eta_0 \sin\{(2\pi/\lambda)x - (2\pi/T)t\}$ で表され、実線のように変動する。縦軸は津波の高さおよび水平変位の大きさを示し、横軸は時間あるいは距離を表わす。 π は円周率で約 3.14 である。この時の海水の水平方向の変位 ξ の変化は、 $\xi = \xi_0 \cos\{(2\pi/\lambda)x - (2\pi/T)t\}$ と変換され、破線のように示される。ここで津波の水平変位の振幅 ξ_0 は、 $\xi_0 = \eta_0 \lambda / (2\pi h)$ と表される。

ここにおいて、津波を検知するためには、従前のような津波の高さではなく、GPS 浮体の水平変位を利用できる可能性に気がついた。この津波の振幅と水平変位の振幅を表

す関係式によれば、水平変位の振幅は、鉛直変位の振幅に比べて、 $\lambda / (2\pi h)$ 倍大きくなることを示しており、その値は $0.16\lambda / h$ となる。これは津波の水平波長 λ が水深 h の 16 倍以上あれば、水平変位は鉛直変位より大きいことを意味している。ちなみに、この式によれば、津波の波長 λ が 100km で水深 h が 1000m の場合は、水平変位の振幅は鉛直の振幅の 16 倍となる。また、波長が 10km で水深が 200m の場合は、水平変位は 8 倍となる。さらに、GPS の測位精度は鉛直方向に比べて、水平方向の精度が良いことが利用できるところに気がついた。これらのことは、津波の検知および観測において、GPS 浮体の水平変位に着目することの有利さを如実に物語っている。

したがって、本発明では、先ず、津波の観測手段として、津波に伴う海面の鉛直変位である高さではなく、海水の水平変位を用いる。一方、波浪の場合は、鉛直および水平方向の変位は同程度である。

【0010】

次に、津波は、公知の海洋物理学的な知見によれば、その伝播に際して、水平変位の大きさおよび方向は、海面から海底までほとんど一様であるという特質を持っている。すなわち、海中の深い所でも津波が十分に観測できることを意味している。これに反して、波浪に伴う海水の鉛直および水平変位は、両者とも水深が増加すると共に急速に減衰する性質を持っている。

【0011】

さらに、津波の伝播経路や伝播の位相速度などは、地震発生時の海底の陥没あるいは隆起の形態および伝播海域の海底地形に一義的に依存することが知られている。このことは、津波は、それぞれ固有の伝播経路および固有の波形を持って、当該の海域を伝播することを意味している。

このことから、津波の来襲を検知し、観測するためには、津波に伴う海水の鉛直及び水平変位の時系列が、観測地点において、固有の波形を持つことに着目すればよいことに思い到った。なお、実際の津波の伝播は、必ずしも図 1 に示すような単純な三角関数的な波動ではないため、波形に歪みを持つと考えられる。

【0012】

ここで、本発明の参考のため、2004 年にインドネシア近海で発生した巨大津波についての数値シミュレーション（越村俊一氏：東北大学）で得られた伝播の様子を図 2 に、また、その時、偶然に、人工衛星（Jason-1）が図 2 に示す斜めの線に沿って観測した津波の高さを図 3 に示す。図 2 および図 3 を見ると、波長 300km 程度、振幅 1m 程度の津波が、周囲にリング状に伝播していることが分かる。この辺りの水深を 4000m とすると、上述の式から、10m 程度の水平変位を伴っていたと推測される。

【0013】

いずれにしても、これまでの GPS ブイを利用して津波を観測する手段の中には、上述の津波伝播に伴う海水の変動特性はなんら適用されておらず、波浪と同様に高さのみが対象

とされていることに気がついた。したがって、本発明では、公知の GPS 測位技術を用いるが、ブイを係留して津波の高さを観測するのではなく、逆にブイなどの浮体を波浪、海流、津波と共に自由に漂流させること、あるいは航行船舶あるいはその停船漂流を利用することによって、それらの水平変位成分を解析し、津波を観測する方式を考案した。すなわち、GPS 受信体で得られる測位情報のうち、水平座標における変位である水平変位に着目して、津波を観測することである。ここで GPS 受信体とは、GPS 電波を受信する機能を搭載した浮体を指し、浮体の態様によって、それぞれ GPS 漂流ブイ、GPS 潜水漂流ブイ、GPS 船舶ブイの 3 種類とした。さらに、津波が前述のように観測地点ごとに固有の波形を持つことを利用して、津波を観測する。

【発明の効果】

【0014】

沿岸のみならず外洋において、ブイのほか、既存の船舶を利用して、津波の来襲を早期に検知し、その観測ができるので、住民の避難をはじめ、船舶の退避、交通規制など、種々の防災対策および産業活動の安全性の確保に寄与できる。さらに、海洋開発や地震・津波に係わる学術の進歩に寄与できる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0015】

本発明の実施形態は多数あり得るが、ここではその典型的な実施例を記述する。以下に、図 4 のフロー図を用いて津波の来襲を検知し、観測を行う手段について説明する。なお、文中に現れる () 内の数字は、図 4 に記載の () 内の数字にそれぞれ対応している。

【実施例 1】

【0016】

GPS 漂流ブイ (1) で受信される公知の単独航法あるいは参照局を必要とする DGPS 方式などで得られる測位情報は、通信機能を持った衛星 (4) を介して、あるいは直接に基地局 (5) にテレメータされる。

【0017】

測位時系列データ (6) から、水平座標時系列を作成する (7)。実際は、この時系列は緯度座標および経度座標の 2 者について得られるが、説明の簡明のために、一方向の成分について考える。この時系列は、海流がなく、かつ津波が伝播していない場合は、波浪に伴う短周期的な変動のみであると考えられる。海流がある場合には、これに海流の変動が重なる。さらに津波が伝播中は、波浪および海流による変動に、津波が持つ固有の長周期的な変動が重畳する。なお、津波が伝播する数時間の間は、海流は一定と近似することが許される。

結局、波浪、海流、津波の 3 者が重畳して存在している場合は、それら全体を合成した水平座標の時系列は図 5 のようになる。したがって、これら 3 者が重畳している時系列から、海流に伴う直線的な水平座標の変動部分を差し引く処理 (8) を行うと、残りの時系

列は、図 6 に示すような波浪と津波が重畳した水平変位時系列となる。したがって、この段階でこの時系列は、海流成分が除かれた GPS 漂流ブイの水平変位時系列となる。なお、(8) の処理には、漂流ブイの場合には必要のない後述の実施例 4 の船舶の航行の場合の処理も合わせて図示されている。

【0018】

次に、この水平変位時系列に、波浪による短周期的変動を除去するために、移動平均処理あるいはローパスフィルター処理 (9) を行うと、その残差は図 7 に示すような津波による水平変位の時系列として得られる。したがって、この段階で津波に関する一般的知識を援用することにより、津波が検知、観測される (13)。便宜的にこれを津波の水平変位波形とよぶことにする。なお、一般に津波の波形という用語は、津波の鉛直変位を対象に用いられている。

実際の津波の伝播はこのような単純な周期的変動ではなく、先に示したインドネシア津波の際の図 3 に見られるように、伝播の先端部では図 8 のような歪んだ水平変位波形を持つ津波の来襲が想定される。図 8 では、津波が押しの場合の水平変位波形を示しているが、引きの場合はこれとは逆の関係になる。このような水平変位波形に対して、あらかじめ得られる津波の到達予想時刻、津波の鉛直および水平波形、周期などに関する情報 (10)、(11) を援用して解析を行うことにより、津波の来襲の検知および観測をより適切に行うことができる (13)。

ここでは単一の GPS 漂流ブイの場合を述べているが、適当に近接した複数の GPS 漂流ブイを用いて、同様の処理を行うことにより、当然、より精度の高い津波の検知および観測ができることは自明である。

なお、現在、津波の来襲が予想される場合、気象庁は、あらかじめ作成した簡便な津波の到達予想図を用いて、日本の沿岸への津波到達予想時刻を発表している。一方、津波警報の発表などに際しては、前もって、種々の震源域や規模を想定して、津波予測の物理的モデルを用いて、日本沿岸で予想される津波の高さを計算しておき、それに基づいて津波の高さなどの予測作業を行っている。

したがって、本発明においても、海域の GPS 漂流ブイ観測地点において、このような津波に関する予測情報を参照することは可能であるが、別途、事前あるいは地震の発生後、準リアルタイムにシミュレーションを行うことが可能である。

【実施例 2】

【0019】

実施例 1 において、海流による直線的変動および波浪による短周期変動を除去した水平変位時系列に対して、GPS 漂流ブイ観測地点において当該津波が持つべき固有の周期帯を通過させるバンドパス フィルター処理 (12) を行うことにより、津波に伴う水平変位波形を抽出し、津波の来襲を検知および観測を行うことができる (13)。ここでは単一の漂流ブイの場合を述べているが、適当に近接した複数の GPS 漂流ブイを用いて、同様の処理を

行うことにより、当然、より精度の高い津波の検知および観測ができることは自明である。

【実施例 3】

【0020】

GPS 受信体が GPS を受信する機能を持つ潜水ブイ (以下、GPS 潜水漂流ブイという) (2) である場合は、前述したように、津波の水平変位は海中であっても表面と同じであることを利用し、かつ、波浪は水深が増加するほど減衰することを利用して、波浪の影響が無視できる深度までブイを潜水させて漂流させ、かつブイと海面の GPS アンテナを接続して測位を行う。この場合、GPS アンテナと潜水ブイとの相対運動が起きないように両者を固定する必要がある。

この実施例 3 では、実施例 1 および実施例 2 と同様の手段により、津波の検知および観測を行う。ただし、GPS 潜水漂流ブイは波浪の影響を受けないことから、波浪に伴う短周期変動を除去する過程なしに、津波を観測する。ここでは単一の GPS 潜水漂流ブイの場合を述べているが、適当に近接した複数の GPS 潜水漂流ブイを用いて、同様の処理を行うことにより、当然、より精度の高い津波の検知および観測ができることは自明である。

【実施例 4】

【0021】

GPS 受信体が船舶 (GPS 船舶 (3)) である場合は、その船舶の測位情報をどのように分析するかが課題であるが、以下の手段で処理する。

船舶が津波伝播の海域を航行中は、その水平座標時系列 (6) は、海流、船舶の航行、船舶の海水に対する相対運動成分 (船舶動揺成分)、津波の 4 者の変動が重畳したものとなる。ここで、津波の水平波長が通常数 10 km、周期が数分以上という、津波の持つ伝播特性を考慮すると、津波の伝播する時間内は、船舶の航行による水平座標の変化は、一定と見なすことができる (例えば、進路北東、速度 10 ノット (約時速 20km) のように)。実際の場面では、船舶がどのような海域をどのように航行しているかを識別して、このような基準に外れるものは、適用を除外する必要がある。

【0022】

船舶動揺成分の周期は、長くても 30 秒程度以下であることから、波浪と同様に短周期的変動であることから、実施例 1 における波浪を船舶動揺で置き換えることが許される。

【0023】

したがって、実施例 1 において、波浪部分を船舶動揺成分で置き換え、航行成分を新たに見かけの海流と見なして、同様の処理を行うことにより、津波が検知、観測できる。

【0024】

船舶がエンジンを切って漂流している場合は、実施例 1 の GPS 漂流ブイの場合に還元される。ここでは単一の GPS 船舶の場合を述べているが、適当に近接した複数の船舶を用いて、同様の処理を行うことにより、当然、より精度の高い津波の検知および観測ができることは自明である。

【実施例 5】

【0025】

実施例 1、2、3、4 では、いずれも測位情報を基地局 (5) に電送して、そこで処理を行っているが、本実施例 5 は処理の一部あるいは全てを、GPS 漂流ブイ、GPS 潜水漂流ブイ、GPS 船舶でそれぞれ行う実施形態である。

【産業上の利用可能性】

【0026】

津波の観測システムに関わる装置の製作のほか、津波に関連する分野の産業に波及が期待される。