津波の早期検出における精度向上のための津波計の観測手法の検討

Tsunami detection strategy using GPS tsunami gauge for an escape time securement

学籍番号　86760

氏　　名　寺門 晃弘（Terakado, Akihiro）

指導教員　磯部　雅彦 教授

1. 研究背景

津波のような巨大災害に対して、ハード整備での 100%の防災は極めて困難であり、ソフトによる防災対策が必要である。ソフト対策の一例とし、津波予測が挙げられる。しかし、現在の津波予測は不正確であることから、人々が信用せず、避難を怠る要因になっている。解決方法の一つとして、沖合で津波を観測し、確実な津波情報を提供することが挙げられる。現在 GPS 津波計やナウファスの水圧計の開発で、沖合での水面変動を観測することが可能になり、津波予測情報を正確に提供できる可能性がある。

2.研究目的

本研究では GPS 津波計を対象とする。現在 GPS 津波計で用いられている移動平均のフィルターに比べ、任意の周期帯を除去することが可能となる数値フィルターの設計を行い、適切な数値フィルターを提案し、津波成分を含む波形を早期かつ正確に抽出することが目的とする。

3.数値フィルターによる津波の早期検出

3.1 GPS 津波計

本研究では、GPS 津波計で観測されたデータを用いて検討を行う。GPS 津波計は、GPS 位置情報の取得により観測される津波計である。これまで困難であった沿岸・沖合における津波・潮位の観測を可能とし、観測手法は水位変動を用いた方法である。

3.2 数値フィルターの設計

図 3.2-1 にスペクトル解析、帯域制限によるフィルターと、本検討で用いるフィルターの概念図を示す。本研究でスペクトル変換せず直接出力信号を出力する計算式の設計をする。数値フィルターの概念は図 3.2-2 に示す。本研究で設計された数値フィルターは線形フィルターであり、入力信号を実測値 f_I とし、数値フィルター h_τ を通すことで、出力信号として、特定の周期を除去したf_Oが出力される。式 3.2.1、3.2.2 に定義されるそれぞれのフーリエ変換を$F_I(\sigma)$、$F_O(\sigma)$を示す。伝達関数を$H(\sigma)$ として、それらの間に式(3.2.3)のような関数があるとする。

$$F_I(\sigma) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} f_I(t)e^{i\sigma t}dt \qquad (3.2.1)$$

$$F_O(\sigma) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} f_O(t)e^{i\sigma t}dt \qquad (3.2.2)$$

$$F_O(\sigma) = H(\sigma)F_I(\sigma) \qquad (3.2.3)$$

出力信号$f_O(t)$は$F_O(\sigma)$のフーリエ逆変換によって求められ、以下の式 3.2.4 となる。

$$\begin{aligned} f_O(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} F_O(\sigma)e^{-i\sigma t}d\sigma \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} H(\sigma)\cdot F_I(\sigma)e^{-i\sigma t}d\sigma \\ &= \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} h(t-\tau)\cdot f_I(\tau)d\tau \\ &= \frac{\Delta\tau}{2\pi}\cdot\sum_{m=-M}^{M} h(m\Delta\tau)\cdot f_I(t-m\Delta\tau) \qquad (3.2.4) \end{aligned}$$

この時、

$$\begin{aligned} h(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} H(\sigma)\cdot e^{-i\sigma t}d\sigma \\ &= 2\cdot\int_{0}^{\infty} H(\sigma)\cdot\cos\sigma\tau d\sigma \qquad (3.2.5) \end{aligned}$$

である。つまり、伝達関数H(σ) を設定することで、h(τ)を求めることが可能である。

次に、伝達関数H(σ) を求める式を求める。図 3.2-3 は伝達関数H(σ)の概念図である。①から③の各範囲における伝達関数H(σ)を式 3.2.5 に代入した式を式 3.2.6 に示す。

$$h(\tau) = 2\int_0^{\infty} H(\sigma)\cdot\cos\sigma\tau d\sigma$$

$$= \frac{2\pi^2}{\tau(\pi-2\alpha\sigma_c\tau)\cdot(\pi+2\alpha\sigma_c\tau)}\sin\sigma_c\tau\cdot\cos\alpha\sigma_c\tau \quad (3.2.6)$$

なお、τの範囲は、τ(t)/τ(0)を E とし、式 3.2.7 に計算式を示す。

$$\tau = \frac{\sqrt[3]{E\cdot\frac{\pi^2}{4\alpha^2}}}{\sigma_c} \quad (3.2.7)$$

3.3 対象数値フィルター

本研究では、風の作用によって発生する短周期波を除去する数値フィルターが必要である。しかし、精度を向上させることは、フィルター長に影響する。すなわち、津波を検出する時間に遅延が生じる。本研究では、表 3.3-1 に示した 24 種類のフィルターを用いて検討を行った。なお、τ=0 のH(σ)に対して、H(σ)が 1/10 以下のとなる値のH(σ)=0 となる時までのフィルター長とする。

3.4 実測データを用いた検討

本研究で用いるデータは風力階級に応じた実測データと東海道沖地震の津波を含む実測データも用いる。ここでは 3.6、4.1 で評価の高かったフィルターを用いた結果として、図 3.4-2 に東海道沖地震の津波を含む実測データを用いたフィルター処理後のデータを示す。図 3.4-1 では台風の影響により実測データでは水位変動が数 m 程度あったが、10cn 程度に処理され、0:32 に津波の第一波が確認できた。

3.5 数値フィルターの評価

図 3.5-1 に南海地震を想定した数値シミュレーションで作成された疑似データを示し、実測データと重ね合わせたデータを作成し、図 3.5-2 に示す。3.4 同様に数値フィルターにより、疑似データを抽出し、数値フィルターの精度を評価する。評価手法は

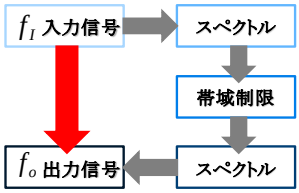

図 3.2-1 フィルターの概念図 1
(スペクトル解析に対する優位性)

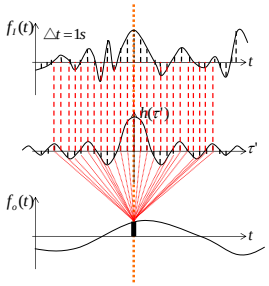

図 3.2-2 フィルターの概念図 2

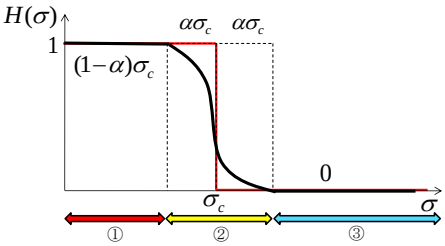

図 3.2-3 伝達関数の概念図

表 3.3-1 対象フィルターとフィルター長

フィルターの片側長(s)		(1−α)σ c				
		π /30s	π /60s	π /90s	π /120s	π /150s
(1+α)σ c	π /5s	34	60	80	96	−
	π /10s	36	68	96	120	160
	π /15s	36	72	102	130	180
	π /20s	38	72	106	136	192
	π /30s	38	74	108	140	200

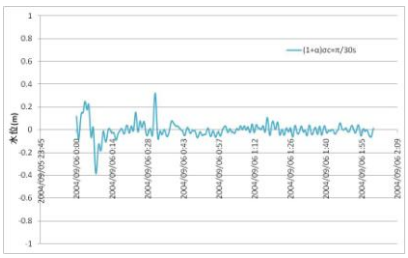

図 3.4-1 東海沖地震よる津波を含む実測

二乗平均誤差とし、計算式は式 3.5.1 に示す。

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum(h_I - f_O)^2}{n}} \qquad (3.5.1)$$

表 3.5.1 に二乗平均誤差の結果を示す。二乗平均誤差によって求められた誤差が数値フィルターによって大きく異なることがわかる。本研究では、GPS 津波計の精度に併せ、二乗平均誤差が太枠で囲まれた誤差 0.1m 未満のものをフィルターとして選定した。

4.津波成分の抽出

4.1 津波成分の抽出

津波の波高・周期を完全に把握してからの津波情報の提供では、対応が遅すぎる。本研究の津波成分の抽出方法は、水位が最大値となる前に、水位変化率がある程度になったら津波と判定する基準を用いる。図 4.1-1 に概念図を示す。図 4.1-2 に示した通り、任意の期間 Δt における水位変動 Δh から求められた水位変化率をもとに、設定された水位変化率以上の値を津波と判定する。閾値はグリーンの式に基づく断面的変形を仮定し、GPS 津波計における波高を求める。津波波高が 1m となる時、GPS 津波計の設置地点では 0.35m と算出され、この値を本検討の閾値とする。津波の卓越周期は 5 分以上であるが、近地地震津波の場合に周期 3 分以下の成分も含まれ、卓越周期以下を捉えるべく周期 5 分と仮定した。また津波観測の事例から、比較的小さい津波について検討する上で周期 10 分と仮定し、同様に大きい津波については検討する上で周期 60 分と仮定した。ここでは周期 5 分と仮定した際の Δt=60s における水位変化率の結果を示す。図 4.2-1 は、3.4 で示したフィルター処理後のデータに上記の閾値を用いて津波成分を抽出した結果である。図 4.1-3

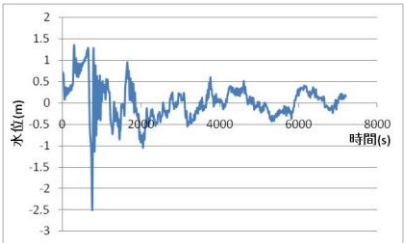

図 3.5-1 南海地震で予想される津波

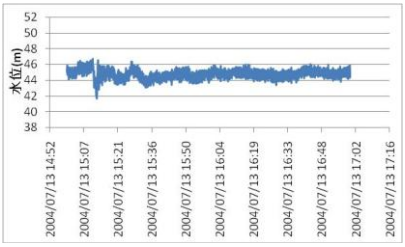

図 3.5-2 疑似データと実測値の重ね合わせ

表 3.5-1 数値フィルターの精度の比較

二乗平均誤差(m)		(1+α)σc				
		π/30s	π/60s	π/90s	π/120s	π/150s
(1−α)σc	π/5s	0.031	0.033	0.067	0.097	−
	π/10s	0.031	0.042	0.094	0.116	0.138
	π/15s	0.031	0.05	0.099	0.124	0.143
	π/20s	0.031	0.05	0.103	0.128	0.144
	π/30s	0.398	0.398	0.389	0.383	0.381

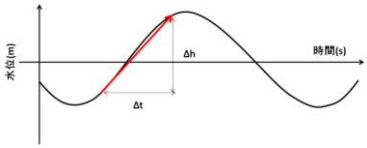

図 4.1-1 津波成分抽出の概念図

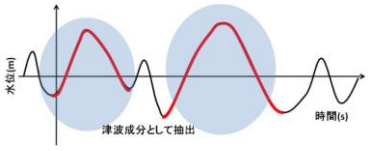

図 4.1-2 水位変化率を用いた津波成分抽出

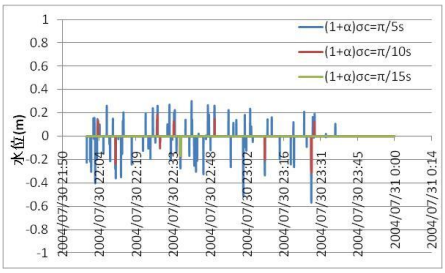

図 4.1-3 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$津波成分抽出

より津波の第一波の到達以前より、津波と誤判定しているのが分かる。また、0:32 に

9月5日23:57に発生した東海道沖地震で発生した津波の第一波の波形を抽出している。

4.2 津波成分抽出方法の比較・評価

表 4.2-1 は周期 5 分と仮定した時の水位変化率を閾値とした場合の、地震・津波が発生していない際の誤判定率である。東海道沖地震による津波は全検討で検出していたため、地震・津波がない状態で評価する。周期 10 分、周期 60 分と仮定した場合の水位変化率の誤判定率は非常に高く、ここでは周期 5 分を示す。周期 5 分と仮定し、Δt=60s における水位変化を用いた場合、風力階級が低い時に、誤判定をすることがなかった。また $(1+\propto)\sigma_c = \pi/15s$, ・$(1-\propto)\sigma_c = \pi/90s$のフィルターにおいては猛烈な風の場合 0%、強い風の場合でも 0.17%と誤判定率が低く、本検討では周期 5 分と水位変化率による、表 4.2-1 で色付けした三つのフィルターを選定した。

4.3 複数の検出装置を用いた検討

3.5 で用いた数値シミュレーションにより、GPS 津波計の精度向上を考慮し沖合 100km 地点と GPS 津波計から数十 km 離れた同等の条件の地点で 4.2 で選定されたフィルターと水位変化率によって、津波を即時検出した。ここでは複数地点による精度の向上について説明する。4.2 で選定されたフィルターを用いて、周期 5 分、10 分、60 分の水位変化率による津波成分の抽出を検討した。図 4.3-1 各水位変化率の合計と疑似データを比較した結果を示す。Δt は各周期の 1/4 波長、Δh は 4.2 と同じ閾値とする。図 4.3-1 より疑似データと同様の波形を抽出していることが分かる。表 4.3-1 は書く水位変化率と合計の津波成分の抽出率を示したものである。本検討で用いた近地地震津波の場合、短周期の水位変化率により初期の津波が抽出できる。しかし、時間経過した際に発生する固有振動を抽出するには長周期の水位変化率に依存する。このことから、即時に初期の津波成分を抽出するだけでなく、沖合という特性を用いて、長いデータ量を用いた長周期による変化率を用いることで、情報を修正し、より正確な津波情報を提供することが可能である。

表 4.2-1 誤判断率(周期 5 分)

5min	(1−α)σ c=π /30s				(1−α)σ c=π /60s		
(1+α)σ c	π /5s	π /10s	π /15s	π /20s	π /5s	π /10s	π /15s
風なし	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
強い風	8.26%	1.85%	0.76%	0.24%	5.26%	1.82%	0.24%
猛烈な風	1.53%	1.18%	0.51%	0.03%	1.06%	1.08%	0.03%

5min	(1−α)σ =π /90s			(1−α)σ =π /120s	
(1+α)σ c	π /5s	π /10s	π /15s	π /5s	π /10s
風なし	0%	0%	0%	0%	0%
強い風	19.19%	1.39%	0.17%	3.89%	1.39%
猛烈な風	1.06%	0.93%	0.00%	1.29%	0.93%

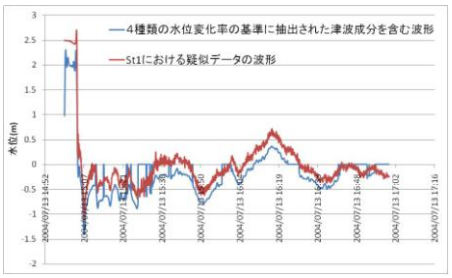

図 4.3-1 各水位変化率の合計と疑似データ

表 4.3-1 各水位変化率と合計の抽出率

	Δ t=60s, Δ h=0.16m	Δ t=75s,Δ h=0.20m	Δ t=150s, Δ h=0.20m	Δ t=900s, Δ h=0.20m	Total
抽出率(%)	11.3%	10.6%	25.8%	68.5%	75.0%

4.4 本研究の GPS 津波計での活用方法

設計された数値フィルターで気象条件よらず初期の津波情報を提供し、複数地点の観測による予測精度の向上で、人々に正確な情報を提供できる可能性を示した。人為的な作業がなく津波として判定できることで、津波地震など人々が予想していない小規模な地震の大津波に対しても、津波情報を提供できる可能性がある。しかし、GPS 津波計単体だけで誤判定の可能性があり、地震計などの地震が発生した情報と併用することで津波の早期検出に活用できる。