

2010 年度 修 士 論 文

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

2011 年 1 月提出

指導教員 磯部 雅彦 教授

副指導教員 柴崎 亮介 教授

086760 寺門 晃弘

Terakado, Akihiro

東京大学大学院新領域創成科学研究科
社会文化環境学専攻

論文概要

1. 序論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 研究の流れ.....	3
2. 近年の津波災害.....	5
2.1 津波.....	5
2.2 津波における過去の被害.....	7
2.2.1 北海道南西沖地震.....	7
2.2.2 チリ沖地震.....	8
2.3 津波への防災対策.....	9
2.4 既往の研究.....	12
3. GPS 津波計と数値フィルターによる津波の早期検出の検討.....	13
3.1 GPS 津波計の概要	13
3.2 対象領域.....	15
3.3 既往の数値フィルター.....	16
3.4 数値フィルターの設計.....	17
3.4.1 計算条件.....	17
3.4.2 数値フィルターを用いた数値実験	22
3.4.3 対象数値フィルター.....	26
3.5 実測値における数値フィルターの検討	32
3.5.1 GPS 津波計の留意点	32
3.5.2 欠損データの処理	33
3.5.3 微風（地震、津波が発生してない時）	34
3.5.4 強風（地震、津波が発生してない時）	40
3.5.5 猛烈な風（地震、津波が発生してない時）	46
3.5.6 津波発生時（強風）	52
3.6 疑似データによる数値フィルターの検討	58

3.6.1 計算条件.....	58
3.6.2 疑似データと実測データを重ね合わせた波（微風）.....	59
3.6.3 フィルターの比較、評価.....	67
3.7 第三章まとめ.....	69
4. 津波成分の抽出.....	70
4.1 津波成分の抽出.....	70
4.1.1 微風（地震、津波が発生していない時）.....	73
4.1.2 強風（地震、津波が発生していない時）.....	76
4.1.3 猛烈な風（地震、津波が発生していない時）.....	79
4.1.4 津波発生時（強風）.....	82
4.1.5 疑似データと実測データを重ね合わせた波（微風）.....	85
4.1.6 津波成分検出に向けた検出方法の比較・評価.....	88
4.2 複数の検出装置を用いた検討.....	91
4.2.1 対象領域.....	91
4.2.2 数値シミュレーションの結果.....	92
4.2.3 複数地点における津波成分の抽出.....	94
4.2.4 段階別予報修正.....	95
4.3 本研究の GPS 津波計における活用方法.....	99
4.4 第四章まとめ.....	100
5. 結論.....	101
参考文献.....	102
謝辞.....	104

1. 序論

1.1 研究背景

我が国は四方を海に囲まれた国であると同時に、世界的に代表される地震大国でもある。故に、海底地震によってもたらされる津波被害を幾度となく経験し、多くの人命を犠牲にしてきた。

津波に対する防災対策として、これまで防潮堤や防波堤の建設など、ハードによる対策が講じられてきた。防潮堤などの既存の防災施設は建設から数十年経過しており、現在改修もしくは更新が必要な段階にある。しかし、これらを整備する上で多額の費用を必要であり、近年の税収の減少下においては、防災施設の維持・管理が滞りつつあるのが現状であり、100%の防災対策は困難である。

ハード対策による課題を解決する方法として、ソフトによる防災対策が考えられる。ソフトにおける防災対策の代表的なものとして津波予測が挙げられる。我が国における津波予測の手法は、気象庁による、地震発生直後に全国約 10 万通りの断層シナリオに対して津波伝播計算を行い、沿岸予測点の津波波高をデータベース化されたものに基づくものである。

2010年2月27日にチリ沖で発生した巨大地震により、28日に我が国に津波が押し寄せ、気象庁は大津波警報、津波警報、津波注意報を発令し、168万人に避難勧告を促した。しかし、図 4.1.1 の新聞記事の通り、実際に避難が確認されたのは 168 万人の 3.8%に過ぎなかった。

その背景として、我が国の国民の多くが津波を実際に体験したことがなく、津波に対する危機意識が低いことが挙げられる。しかし、危機意識だけではなく、気象庁の津波予測精度の低さも原因の一つである。気象庁が予想した最大津波波高は 3m 程度であったにも関わらず、実際の最大津波波高は 1.2m 程度とずれており、これまで幾度となくあった、予想に対する実際の津波波高の低さから、津波予測を信頼せずに避難を怠っている。

これらを解決方法の一つとして、沖合や沿岸域において津波を観測し、実際の津波波高を人々に伝達することにより、確実な津波情報を発信することが考えられる。現在GPS津波計やナウファスの水圧計が開発され、沖合での水面変動を観測することが可能になり、津波予測を正確に人々に伝える際に活用できることを示唆している。

1.2 研究目的

1.1 の研究背景を踏まえ、本研究では GPS 津波計を対象とし、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、より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、GPS 津波計で観測されたデータで数値フィルターを検証するだけでなく、数値シミュレーションによって作成された疑似データにおいても数値フィルターの性能の分析をする。

併せて、選定されたフィルターを用いて、津波成分を含む波形を抽出する方法を検討、分析し、精度の向上を目的として複数地点における検討、分析も行う。

そして、適切な数値フィルターを提案し、本研究で求められた津波成分を含む波形を抽出することで、どのように人々への情報提供として用いられるかについて提案を行うことを目的とする。

1.3 研究の流れ

本研究では現在 GPS 津波計で用いられている移動平均を用いたフィルターの評価を行う。

数値フィルターの設計を行い、任意の規則波、不規則波を用いて数値実験を行い、設計した数値フィルターの評価を行い、特性を考察する。

次に設計されたフィルターの特性を踏まえた上で、GPS 津波計で観測された実測データを用いて、数値フィルターの検証を行う。その際に、異なる風の影響を受けた複数のデータと 2004 年 9 月 5 日に発生した紀伊半島南東沖地震で観測されたデータを用いる。併せて、数値シミュレーションで作成された疑似データによる検証も行う。

先に評価され、選定された数値フィルターを用いて、津波成分の波形の抽出を現在設置されている GPS 津波計だけでなく、数年後の GPS 津波計の技術的進歩を考慮して沖合に設置した場合に対して、複数地点でのデータを用いた精度の向上の分析を行う。そして、数値フィルターによる津波成分を含む波形の抽出結果をどのようにして、防災対策に役立てるかについて提案する。

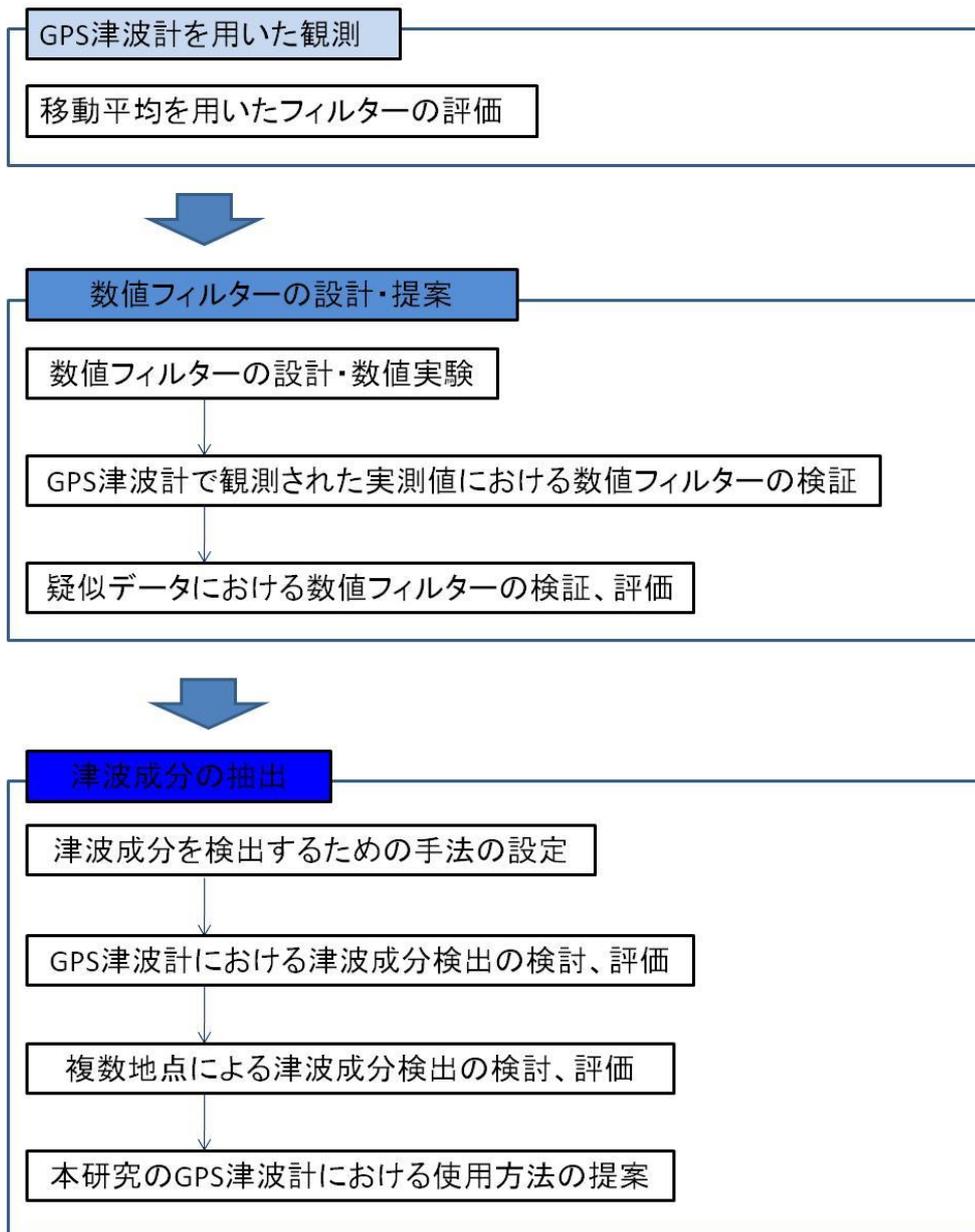


図 1.3-1 研究のフロー図

2. 近年の津波災害と防災対策

2.1 津波

図 2.1-1 は 2004 年のタイにおける津波襲来状況を撮影したものである。津波は、海岸地域で起こる事象（気象を除く）によって発生する、大規模な自然災害である。その主たる発生要因は、断層運動に起因する海底面の鉛直変位、すなわち海底地震である。

地震性の津波は、海域で一定規模以上の地震が起きた時、それに伴う地殻変動が引き起こす海底面の隆起、あるいは沈下によって発生する。

我が国は世界的な地震大国であるだけでなく、四方を海で囲まれているが故に、津波の発生リスクを背負った国でもある。図 2.1-2 は日本列島周辺のプレートの配置を示したものである。我が国はユーラシアプレート、フィリピン海プレート、太平洋プレートの三つに囲まれている。その中でも、フィリピン海プレートはユーラシアプレートの下に沈み込んでいる。両プレートの境界面は、南海トラフから日本列島に向かって深くなっている。この面上では摩擦力が働くため普段は滑り合うことなく、沈みこもうとするフィリピン海プレートが、上に位置するユーラシアプレートの地殻を無理やり引きずり込む。これによって、プレート境界面には年々応力が蓄積し、耐えきれなくなり、境界面では急激なすべりが発生する。この現象により巨大地震が発生し、東海地震、南海地震と言った大規模災害をもたらす。

しかし、プレート境界の滑りによる大規模災害のみが津波を発生させるのではなく、活断層による断層運動によってもたらされる地震によっても津波は発生する。主な断層運動は a から c に示した通りである。

- a).断層面を挟む片側の地盤が滑り落ちる形の正断層型
- b).断層を挟む片側がた方に乗り上げるタイプの逆断層型
- c).断層面を挟んで互いに水平に逆方向へずれ合う形の横ずれ断層型

津波は上記の a,b の断層型で発生し、c では津波はほとんど発生することはない。

このよう海底地震によって発生した津波は周期が数分程度から長いもので一時間程度であり、外洋での波高は数十センチから数メートル程度である。しかし、その波速は数百キロにも及び、到達時にはその波速は減少するものの、グリーンの式（4 章に具体的な計算手法などを述べる）により、津波波高は増大し、数メートルから数十メートルにも達し、

大規模な被害をもたらす。

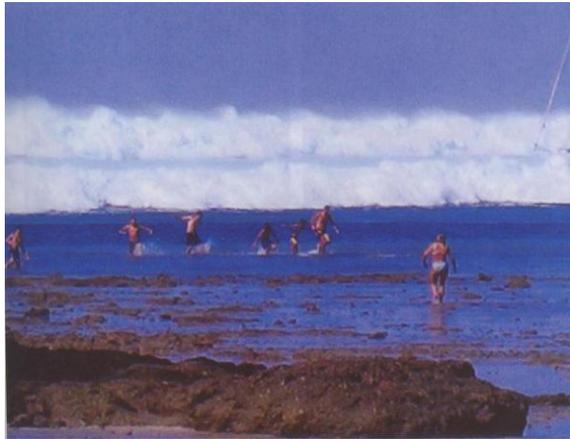


図 2.1-1 津波来襲から逃げる人々

(出典：TSUNAMI 津波から生き延びるために)

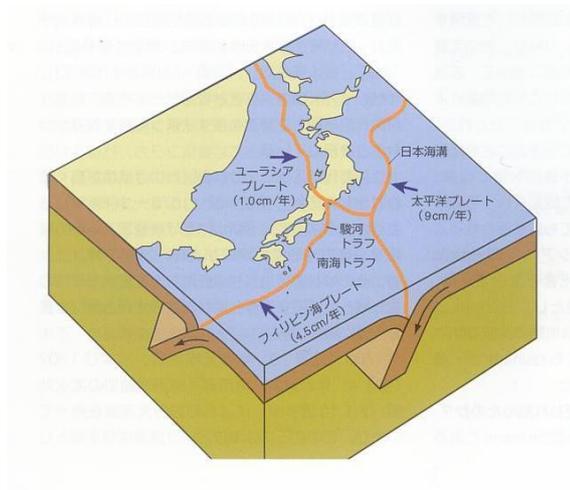


図 2.1-2 日本列島周辺のプレート配置図

(出典：地震・津波と火山の大辞典)

2.2 津波における過去の被害

次に津波による近年の被害状況について説明する。

2.2.1 では日本周辺の海域で発生した津波として、北海道南西沖地震について説明する。この地震では気象庁の津波警報より早く津波が到達してしまっている。

2.2.2 では日本から遠方の地で地震が発生し、時間を経て日本に津波が襲来、多くの人的被害をもたらしたものとして、チリ沖地震について説明する。

2.2.1 北海道南西沖地震

日本周辺の海域で発生した津波について説明する。

1993年7月12日に北海道周辺の日本海海域において、マグニチュード7.8の地震が発生した。同時に津波が発生し、南西方向に60km離れた奥尻島では五分後に津波が観測された。

奥尻島周辺は1/5～1/2の急こう配の海底地形を形成しており、波高が急激に増大する傾向にある。また、図2.2-1に示した通り、青菜岬周辺は奥尻島の南端に位置し、浅瀬があることから、津波が集中し遡上高が増大し、集落は津波の直撃により壊滅的な被害を受けた。

地震発生から五分以内に奥尻島を襲っていた為に、気象庁の津波警報が発令される前に被害を受ける結果となったこと、夜中に地震が発生したことにより高齢者の多くが就寝中であったことにより、多くの人命が犠牲となった。



図 2.2-1 奥尻島の津波による被害の状況

(出典：TSUNAMI 津波から生き延びるために)

2.2.2 チリ沖地震

日本から遠方で発生した地震による津波被害について説明する。

1960年5月22日に南米チリでマグニチュード9.2の地震が発生した。同時に大規模な津波が発生し、チリ海岸を津波が襲っただけでなく、その勢いは日本にまで及んだ。

日本では地震発生から23時間後に到達し、図2.2-2に示す三陸地方はじめとする各地において数メートル規模から五メートル以上にも及ぶ津波が襲った。特に三陸沖での災害は大規模なものであった。その要因として、チリ沖地震による津波の周期は40分から60分程度であったことから、湾内で入射してきた波が共鳴したことで津波波高が増幅し、大規模な被害に繋がったと考えられている。

なお、この地震による被害は、死者・行方不明者を合わせ、合計142人にも及び、遠方での地震に対する津波被害へ人々の注意が向けられるきっかけとなった。

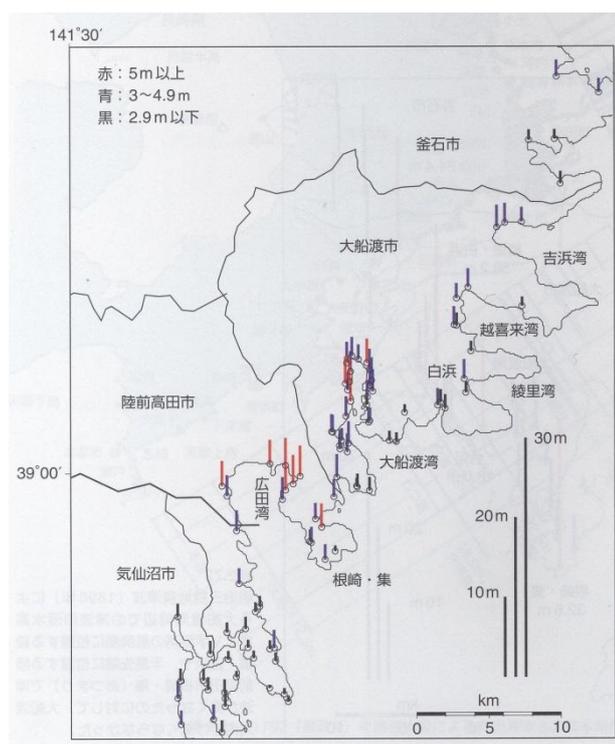


図 2.2-2 三陸地方のチリ沖地震による津波の到達波高
(出典：地震・津波と火山の辞典)

2.3 津波への防災対策

2.1 で述べた津波に対し、2.2 で述べた経験を経て、これまで人々は津波対策を試みてきた。津波への防災対策の主な目的は、津波による人的被害と物的被害を軽減することにある。これらを実現するための対策として、ハード対策とソフト対策の二点が挙げられる。

ハード対策は、出来る限り津波外力の影響を小さくしたり、耐えられる限界を大きくしたりすることで防災機能としての役割を果たしている。i)にハードによる防災対策を示す。

しかし、津波による外力をハード対策のみで人や都市を守ることには限界がある。ある一定以上の限界を超えた時、津波は都市に流れ込み、人的被害や物的被害をもたらす。このことから、ハードによる防災対策は 100%安全ではないといえ、ソフトによる対策も必要となる。また、1.1 で述べたとおり、ハードによる維持には多額の費用を必要とすることから、今後持続可能な沿岸防災を提案していく上で、ソフトによる防災対策は一層重要になっていくと考えられる。ii)にソフトによる防災対策を示す。

i).ハード対策

津波の来襲に対して、侵入を防ぐ方法としてハード対策以外の防災対策はない。ハード対策の代表例として、a から f に示した通りである。

- a. 津波防潮堤（津波が内陸へ流入するのを阻止する）
- b. 津波防波堤（海岸へ押し寄せる波を低減する）
- c. 水門、閘門（回線や内陸へ流入する津波を阻止する）
- d. 河川堤防（河川を遡上する津波が河川堤防を越え氾濫しないようにする）
- e. 防潮林（流入する津波の勢い、遡上範囲を軽減する）
- f. 防浪ビル（背後へ流入する津波を軽減し、被害を軽減する）

しかし、図 2.3-1 の様な津波防潮堤や図 2.3-2 の様な水門などの防災施設としての大規模な構造物は、有効性が明確になっている半面、その施設の規模から多額の費用を必要とする。また、整備に掛かる工期が長期的であることから、周辺地域に多くの影響をもたらす。



図 2.3-1 沼津港周辺の防潮堤（著者撮影）



図 2.3-2 沼津港の水門『びゅうお』（著者撮影）

ii). ソフト対策

ハード対策が津波の外力に対する防災であるのに対し、ソフト対策は津波に対して人々が行動を起こすための防災対策である。ソフト対策の代表例として、a から c に示した通りである。

- a. 津波予測
- b. 津波ハザードマップ
- c. 教育・継承

2.4 既往の研究

GPS 津波計を用いた津波の検出に向けたフィルターの設計については、清水ら(2006)が、津波警報情報発信の基準となる長周期成分波形偏差の閾値についての検討結果を踏まえ、波形記録中の波浪による短周期海面変動成分の除去にあたって、過去に観測された津波の周波数特性を考慮し、情報の即時性を確保できる数値フィルターを選定している。

その際に比較したフィルターは、a)単純移動平均フィルター、b)COS 型フィルター、c) ナウファス長周期波検出フィルター、d)ハミングウィンドウを掛けたフィルターであり、サイドロープ現象が見られず、周期 5 分以下の短周期ノイズを極力除去することができたことから、d)ハミングウィンドウを掛けたフィルターを選定している。

このフィルターを用いた GPS 津波計で観測された実測データでの検証で、短周期成分を除去し津波成分を抽出することを可能にしている。しかし、高波期間中においてはフィルターが高潮偏差を忠実に抽出してしまうことから、機械的に判定すると誤判定の場合も生じてしまうことから、高潮事象と津波との識別は人による確認が必要であると結論付けている。

3. GPS 津波計と数値フィルターによる津波の早期検出の検討

本章では津波の早期検出に向け、津波成分を抽出するための数値フィルターの検討を行う。それに伴い、本研究では津波の早期検出に向けたフィルターの検証を行うために、GPS 津波計（多目的ブイ）で実際に観測されたデータを用いる。

なお、本研究で用いられるデータは、東京大学地震研究所 加藤照之教授、高知工業高等専門学校 寺田幸博らのご厚意により提供していたものである。GPS 津波計で観測された実測値を用いて、本章で設計されたフィルターの検討を行う。

3.1 では本研究で用いられる GPS 津波計に関する概要を説明する。

3.2 では本研究の検証が行われる対象領域を説明する。

3.3 では現在 GPS 津波計で用いられている単純移動平均によるフィルターを用いて、精度の評価を行う。

3.4 では本研究で用いられる数値フィルターの設計、計算式を説明する。

3.5 では 3.4 で求められた数値フィルターを基に、GPS 津波計で観測された実測値における検討を行う。

3.6 では数値シミュレーションによる津波の疑似データを用いて、フィルターの評価を行う。

3.1 GPS 津波計の概要

本章以降、本研究において数値フィルターの検証、津波成分の抽出を行う際に GPS 津波計で観測されたデータを用いた。図 3.1-1 に本研究で用いられた GPS 津波計を示す。

GPS 津波計の基本的原理は、海上に浮かべたブイの最上部に GPS アンテナを取り付け、アンテナの精密測位結果の時系列データを海面高の変位として、風波や津波のデータとすることにある。津波の計測には、数 cm の精度とリアルタイム性が求められることから、RTK 方式が採用されている。

RTK 方式で測位するには、搬送波移送の計測値を用いるため、衛星間の時間差及び GPS 衛星から受信機までの伝播における電離層や大気中の水蒸気に起因する誤差要因を除去する必要がある。これには緯度、経度、標高が既知の基準局を儲け、この計測データを参照地として用いている。図 3.1-2 に GPS 津波計観測システムの概念図を示す。

これにより GPS 津波計は、従来の加速度計を用いたブイ型観測機とは異なり、高精度かつ安定した GPS 位置情報の取得を行っているため、波浪の計測はもとより、これまで

困難であった沿岸・沖合における津波・潮位の観測が可能となっている。



図 3.1-1 GPS 津波計

(提供：東北大学 越村俊一准教授)

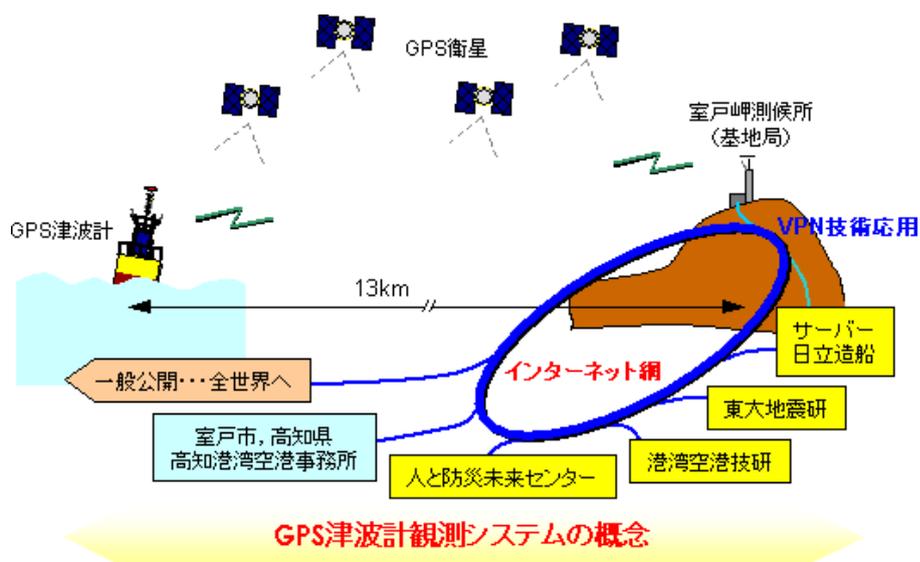


図 3.1-2 GPS 津波計観測システムの概念図

(出典：室戸岬 GPS 津波計沖合実証実験データ公開 website)

3.2 対象領域

図 3.2-1 に本研究で用いられる GPS 津波計の位置を示す。

本研究で用いられる GPS 津波計は、室戸岬沖合南南東約 13km（北緯 33°08'26" 東経 134°12'10"）に設置されており、水深約 100m 地点に設置されているものを用いる。



図 3.2-1 GPS 津波計の位置
Google Earth より抜粋・加筆

3.3 既往の数値フィルター

現在 GPS 津波計で用いられているフィルターは単純移動平均である。単純移動平均の計算式を式 3.3.1 に示す。

$$F_{(t+1)} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N A_{t-j+1} \quad (3.3.1)$$

ここで、

N : 移動平均の計算に使う過去の観測値の個数

A_j : j 回目の観測値

F_j : j 回目の予測値

図 3.3-1 に特定の周期 (6s, 8s, 10s, 12s, 18s) の規則波を重ね合わせた不規則波を青線、理論上抽出される周期 18 秒の規則波を赤線、周期 12 秒以下の周期を除去した結果を緑線で示している。データの時間間隔 Δt は 1s、 $N=120$ とする。

周期 18 秒のみ検出されるのが理想であるが、移動平均を用いたフィルターでは結果の値は大きくずれており、フィルターとして最適とは言い難い。

現在は GPS 津波計における津波の判断を行っているのは人為的なものであり、これらから精度よく津波を検出するために、特定の周期を抽出することが出来るフィルターが必要である。

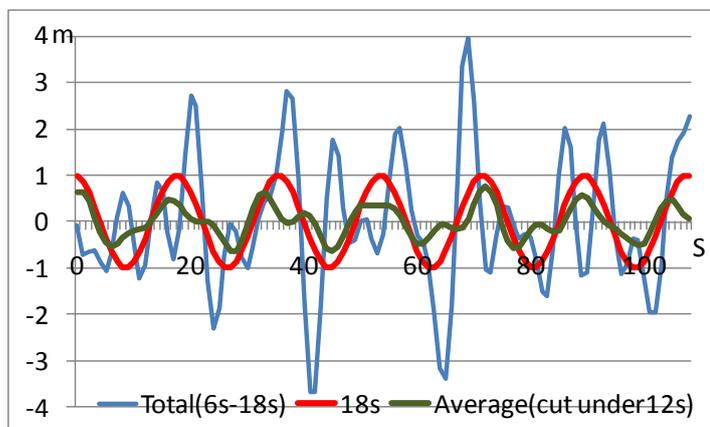


図 3.3-1 単純移動平均を用いたフィルター

3.4 数値フィルターの設計

3.3 では、現在 GPS 津波計で用いられている単純移動平均を用いたフィルターでは求められる波形と大きく異なっており、実測値で用いた場合、波浪やうねりを除去できず、フィルターとしては適していないことが分かった。本章では合理的に短い波浪成分を除去する数値フィルターについて検討を行う。

3.4.1 計算条件

図 3.4-1 にスペクトル解析、帯域制限による数値フィルターと、本検討で用いる数値フィルターのフローの概念図を示す。

通常、波の解析にはスペクトル解析が用いられる。本来であれば、図 3.4-1 の灰色の矢印で示したフローの通り、入力信号 f_I をスペクトル変換し、必要とする帯域を制限、出力信号 f_0 として出力するのが一般的である。しかし、数値フィルターを用いれば、これらの過程を一挙に行うことができる。

そこで、本研究では図 3.4-1 の赤い矢印で示したフローの数値フィルターを用いる。数値フィルターの概念は図 3.4-2 に示す。本研究で用いられる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_z を通すことで、出力信号として、特定の周期を除去した f_0 が出力される。

また、本研究で用いる数値フィルターにおいては、津波を検出する基準に水位変動によるものを用いることを考慮して、出力も水位変動にしてある。

このようにスペクトル解析によるフローではなく、本研究で用いる数値フィルターを用いた処理を行うことで、無駄な作業を行わないという点で、本研究における数値フィルターの優位性がある。計算式を以下に示す。

式(3.4.1)、(3.4.2)によって定義されるそれぞれのフーリエ変換を $F_I(\omega)$ 、 $F_0(\omega)$ とする。

$$F_I(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f_I(t) e^{i\omega t} dt \quad (3.4.1)$$

$$F_0(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f_0(t) e^{i\omega t} dt \quad (3.4.2)$$

ここで、

$f_I(t)$: 入力信号 (本研究の場合実測値)

$f_O(t)$: 出力信号 (本研究の場合フィルター処理後の数値)

伝達関数を $H(\sigma)$ として、それらの間に式(3.4.3)のような関数があるとする。

$$F_O(\sigma) = H(\sigma)F_I(\sigma) \quad (3.4.3)$$

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、変形を行うことで以下の式(3.4.4)となる。

$$\begin{aligned} f_O(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} F_O(\sigma)e^{-i\sigma t}d\sigma \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} H(\sigma) \cdot F_I(\sigma)e^{-i\sigma t}d\sigma \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} H(\sigma) \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f_I(\tau)e^{-i\sigma\tau}d\tau \right] e^{-i\sigma t}d\sigma \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} h(t-\tau) \cdot f_I(\tau)d\tau \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau') \cdot f_I(t-\tau)d\tau \\ &= \frac{\Delta\tau}{2\pi} \cdot \sum_{m=-M}^M h(m\Delta\tau) \cdot f_I(t-m\Delta\tau) \quad (3.4.4) \end{aligned}$$

この時、

$$\begin{aligned} h(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} H(\sigma) \cdot e^{-i\sigma\tau}d\sigma \\ &= 2 \cdot \int_0^{\infty} H(\sigma) \cdot \cos\sigma\tau d\sigma \quad (3.4.5) \end{aligned}$$

である。

つまり、伝達関数 $H(\sigma)$ を設定することで、フィルター $h(\tau)$ を求めることが可能である。

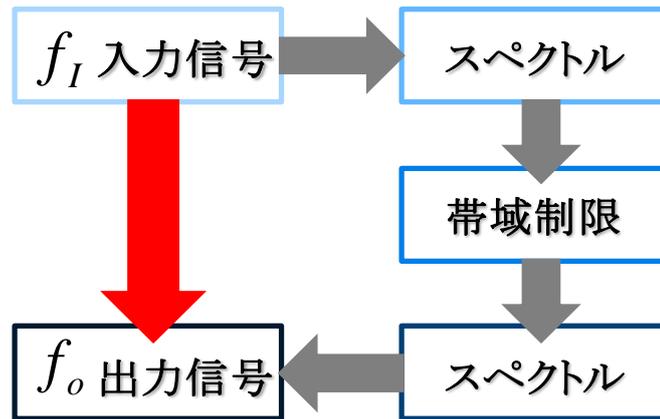


図 3.4-1 フィルターの概念図 1
 (スペクトル解析、帯域制限に対する優位性)

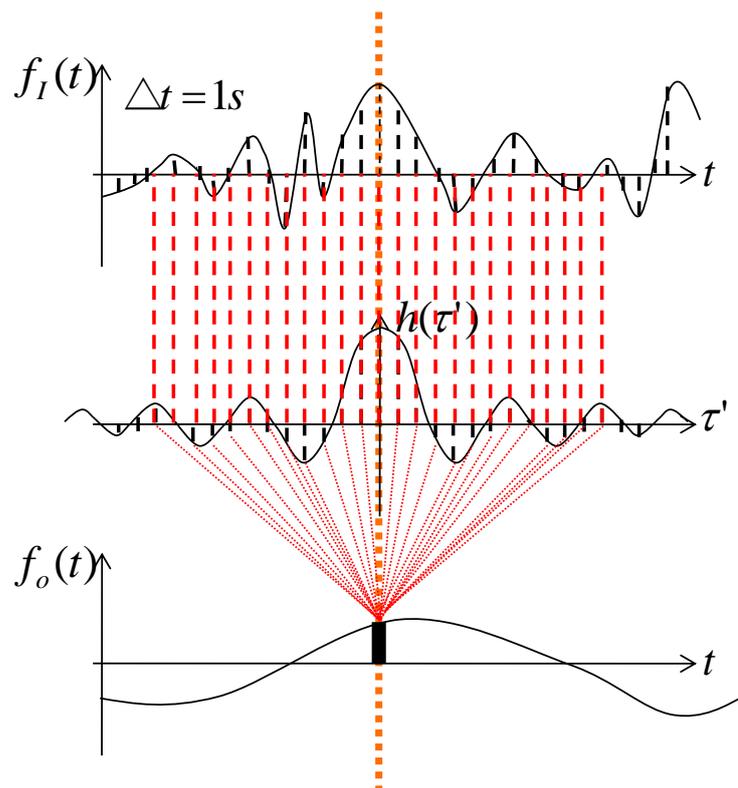


図 3.4-2 フィルターの概念図 2

式(3.4.5)より、伝達関数 $H(\sigma)$ を求めることで、数値フィルタ $h(\tau)$ を求めることが可能であることが分かった。

次に、伝達関数 $H(\sigma)$ を求める式を求める。

図 3.4-3 は伝達関数 $H(\sigma)$ の概念図である。赤線で示した通り特定の周期以下の成分を完全に取り除くことが理想であるが、困難であることから、黒線で示した伝達関数を用いる。

本来であれば、 σ_c で特定の周期を除去することが理想である。しかし、本研究の場合は $(1 + \alpha)\sigma_c = 2\pi/T(s)$ で除去する周期 $T(s)$ を与え、 $(1 - \alpha)\sigma_c = 2\pi/T(s)$ で必要な周期 $T(s)$ を与える。この時、 α は $(1 + \alpha)\sigma_c = 2\pi/T(s)$ 、 $(1 - \alpha)\sigma_c = 2\pi/T(s)$ で与えられた値に依存する。赤(①)、黄(②)、青(③)の各範囲における伝達関数 $H(\sigma)$ の式は下記に示した通りである。

$$\textcircled{1} (0 \leq \sigma \leq (1 - \alpha)\sigma_c) : H(\sigma) = 1 \quad (3.4.6)$$

$$\textcircled{2} ((1 - \alpha)\sigma_c < \sigma < (1 + \alpha)\sigma_c) : H(\sigma) = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left\{ \frac{\pi(\sigma - (1 - \alpha)\sigma_c)}{2\alpha\sigma_c} \right\} \right] \quad (3.4.7)$$

$$\textcircled{3} ((1 + \alpha)\sigma_c \leq \sigma) : H(\sigma) = 0 \quad (3.4.8)$$

ここで、

$$\sigma_c = 2\pi f \quad (3.4.9)$$

式(3.4.6)から(3.4.8)を式(3.4.5)に代入した結果を下記に示す。

$$\begin{aligned} h(\tau) &= 2 \int_0^{\infty} H(\sigma) \cdot \cos\sigma\tau d\sigma \\ &= 2 \int_0^{(1-\alpha)\sigma_c} 1 \cdot \cos\sigma\tau d\sigma \\ &\quad + 2 \int_{(1-\alpha)\sigma_c}^{(1+\alpha)\sigma_c} \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left\{ \frac{\pi(\sigma - (1 - \alpha)\sigma_c)}{2\alpha\sigma_c} \right\} \right] \cdot \cos\sigma\tau d\sigma + 2 \int_{(1+\alpha)\sigma_c}^{\infty} 0 \cdot \cos\sigma\tau d\sigma \\ &= 2 \int_0^{(1-\alpha)\sigma_c} \cos\sigma\tau d\sigma + \int_{(1-\alpha)\sigma_c}^{(1+\alpha)\sigma_c} \left[1 + \cos \left\{ \frac{\pi(\sigma - (1 - \alpha)\sigma_c)}{2\alpha\sigma_c} \right\} \right] \cdot \cos\sigma\tau d\sigma \\ &= 2 \int_0^{(1-\alpha)\sigma_c} \cos\sigma\tau d\sigma + \int_{(1-\alpha)\sigma_c}^{(1+\alpha)\sigma_c} \cos\sigma\tau d\sigma + \int_{(1-\alpha)\sigma_c}^{(1+\alpha)\sigma_c} \left[\frac{\pi(\sigma - (1 - \alpha)\sigma_c)}{2\alpha\sigma_c} \right] \cdot \cos\sigma\tau d\sigma \end{aligned}$$

$$= \frac{2\pi^2}{\tau(\pi-2\alpha\sigma_c\tau)\cdot(\pi+2\alpha\sigma_c\tau)} \sin\sigma_c\tau \cdot \cos\alpha\sigma_c\tau \quad (3.4.10)$$

この時 $\tau = 0$ と $2\alpha\sigma_c = \pi$ は分母が 0 であることから、特異点として $\lim_{\tau \rightarrow 0} h(\tau)$ 、 $\lim_{\tau \rightarrow \pi/2\alpha\sigma_c} h(\tau)$ を求める。

i) $\tau \rightarrow 0$

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{\sin\sigma_c\tau}{\tau} = \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{\sigma_c \cos\sigma_c\tau}{1} = \sigma_c \text{ となることから、}$$

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} h(\tau) = 2\sigma_c \quad (3.4.11)$$

となる。

ii) $\tau \rightarrow \frac{\pi}{2\alpha\sigma_c}$

$$\lim_{\tau \rightarrow \frac{\pi}{2\alpha\sigma_c}} \frac{\cos\alpha\sigma_c\tau}{\pi-2\alpha\sigma_c\tau} = \lim_{\tau \rightarrow \frac{\pi}{2\alpha\sigma_c}} \frac{-\alpha\sigma_c \sin\alpha\sigma_c\tau}{-2\alpha\sigma_c} = \frac{1}{2} \text{ となることから、}$$

$$\begin{aligned} \lim_{\tau \rightarrow 0} h(\tau) &= \frac{2\pi^2}{\pi/2\alpha\sigma_c \cdot (\pi+\pi)} \cdot \sin\left(\sigma_c \cdot \frac{\pi}{2\alpha\sigma_c}\right) \cdot \frac{1}{2} \\ &= \alpha \sigma_c \sin \frac{\pi}{2\alpha} \quad (3.4.11) \end{aligned}$$

となる。よって、

$$h(\tau) = \frac{2\pi^2}{\tau(\pi-2\alpha\sigma_c\tau)\cdot(\pi+2\alpha\sigma_c\tau)} \cdot \sin\sigma_c\tau \cdot \cos\alpha\sigma_c\tau \quad \left(\tau \neq 0, \frac{\pi}{2\alpha\sigma_c}\right) \quad (3.4.12)$$

$$h(\tau) = 2\sigma_c \quad (\tau = 0) \quad (3.4.13)$$

$$h(\tau) = \alpha \sigma_c \sin \frac{\pi}{2\alpha} \quad \left(\tau = \frac{\pi}{2\alpha\sigma_c}\right) \quad (3.4.14)$$

となり、フィルター $h(\tau)$ は、式(3.4.12)から式(3.4.14)の三種類に分類別けされ、本研究

ではこの数値フィルター $h(\tau)$ を用いる。

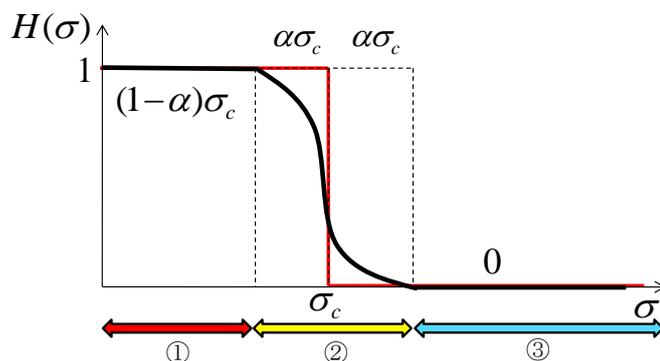


図 3.4-3 伝達関数の概念図

3.4.2 数値フィルターを用いた数値実験

そこで、3.4.1 章で求められた、式 3.4-12 から式 3.4-14 で示された数値フィルター $h(\tau)$ を用いて、数値実験を行った。その際、 τ の範囲は式 3.4.1 を用いることとし、フィルター長を定める $\tau(t)/\tau(0)$ を E と定める。本検討では短時間での津波の検出を目的であることから、 $E=1/10, 1/25$ とする。

$$\tau = \frac{\sqrt[3]{E \cdot \frac{\pi^2}{4\alpha^2}}}{\sigma_c} \quad (3.4.15)$$

i) 規則波による数値実験。

図 3.4-4 から図 3.4-6 は振幅 1m の規則波に対して数値フィルターを掛ける数値実験を行った結果である。本来津波の周期は数分程度から一時間程度であるが、本検討で周期 10 秒、12 秒、18 秒の規則波を用いて検討を行った。ここでは周期 12 秒以下の波を除去することを仮定し、 $\sigma_c = \frac{2\pi}{T(s)} = \frac{\pi}{6(s)}$ を用いるものとする。各データの凡例は図 3.4-7 に示す。

図 3.4-4 は周期 18 秒の波を振幅 1m 程度の波を出力している。図 3.4-5 は周期 12 秒の波を振幅 0.5m 程度の波を出力している。また、図 3.4-5 は波を少しながら出力しているが、数値フィルターによってはその値はもとの値に対し 1/100 以下を示しており、これより本研究で用いられる数値フィルターで理論解を得ることができ、数値フィルターとしての精度が確認された。

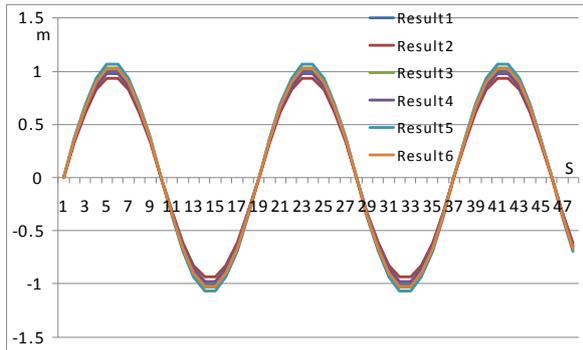


図 3.4-4: 18 秒周期

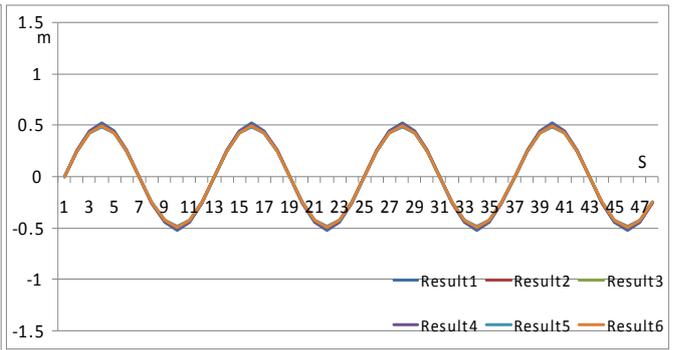


図 3.4-5 12 秒周期

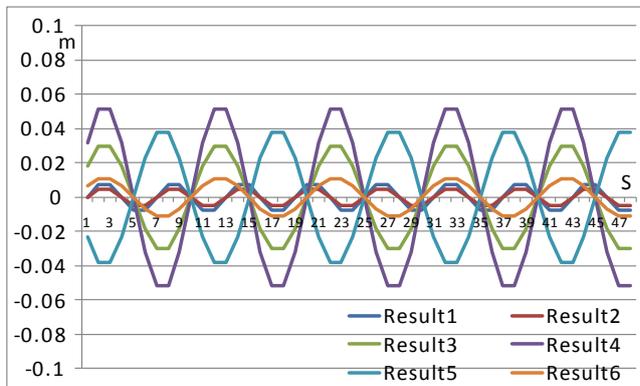


図 3.4-6: 各フィルターの比較

$$\begin{aligned} \text{Result1: } \alpha &= \frac{1}{10}, \frac{h(\tau)}{h(0)} = \frac{1}{10}, & \text{Result2: } \alpha &= \frac{1}{10}, \frac{h(\tau)}{h(0)} = \frac{1}{25} \\ \text{Result3: } \alpha &= \frac{1}{8}, \frac{h(\tau)}{h(0)} = \frac{1}{10}, & \text{Result4: } \alpha &= \frac{1}{8}, \frac{h(\tau)}{h(0)} = \frac{1}{25} \\ \text{Result5: } \alpha &= \frac{1}{6}, \frac{h(\tau)}{h(0)} = \frac{1}{10}, & \text{Result6: } \alpha &= \frac{1}{6}, \frac{h(\tau)}{h(0)} = \frac{1}{25} \end{aligned}$$

図 3.4-7 凡例

ii) 不規則波による数値実験。

次に、不規則波による数値実験を行った。3.4.2 i)で行った規則波を用いた数値実験同様、本来津波の周期は数分程度から一時間程度であるが、本検討では周期 6s、8s、10s、12s、18s の規則波を重ね合わせた不規則波を用いて検討を行った。

図 3.4-8 は、数値フィルター処理後の理論的に求められる値と単純移動平均を用いた結果を示している。3.3 で述べたとおり、単純移動平均を用いた処理方法では、本検討におけるフィルターとして適さない。次に、図 3.4-9 から図 3.4-11 は $\alpha=1/6 \sim 1/10$ における値を代入し求められた結果である凡例は図 3.4-12 に示す。3.4.1 i)における規則波の数値実験同様、周期 12 秒以下を除去することを仮定し、 $\sigma_c=2\pi/T(s)=\pi/6(s)$ を用いるものとする。

図 3.4-9 から図 3.4-10 の各結果においても、単純移動平均の結果と異なり、 τ の値より

ずぼら理論的に求められる値を示していることが分かる。

それぞれの数値フィルターの精度の比較として、数値フィルターの誤差を表 3.4-1、表 3.4-2 に示す。表 3.4-1 は不規則波の数値実験における、周期 18 秒の波を出力した値と理論解のフィルター長を定めた E 別に誤差を求めたものである。本検討では二乗平均誤差を用い、二乗平均誤差の計算式を式 3.4.16 に示す。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum(h_i - f_o)^2}{n}} \quad (3.4.16)$$

ここで、

h_i : 予測値

f_o : フィルター処理された値

表 3.4-2 も表 3.4-1 同様の手法で、周期 12 秒の波を出力下値と理論解のフィルター長を定めた E 別に誤差を求めたものである。赤で示した部分オーダー別で最も誤差が少ないフィルターを示し、青で示した部分が E 別で最も誤差が大きい数値フィルターを示している。

表 3.4-1、表 3.4-2 どちらにおいても誤差の最小部と最大部ではその差は極僅かであることから、ある一定以上のフィルター長においては、数値フィルターの精度はフィルター長に依存していないことが分かった。

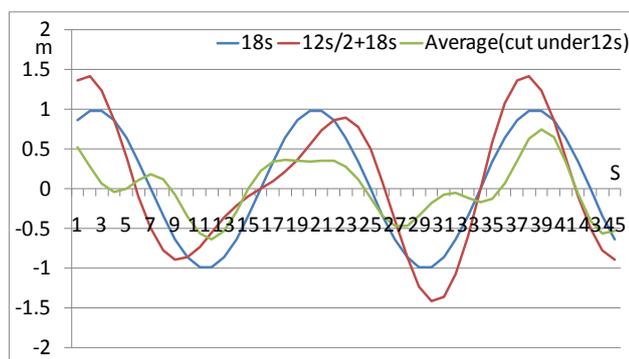


図 3.4-8 単純移動平均と理論解

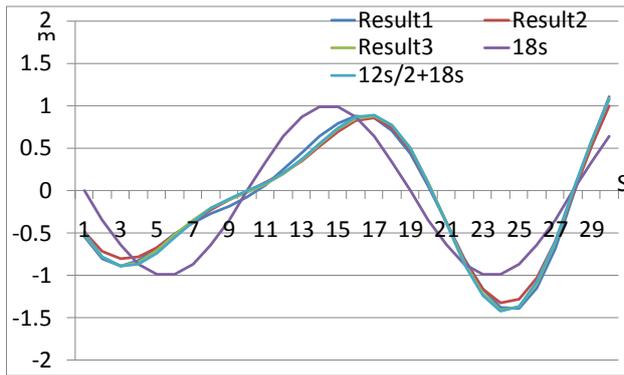


図 3.4-9 $\alpha = \frac{1}{6}$

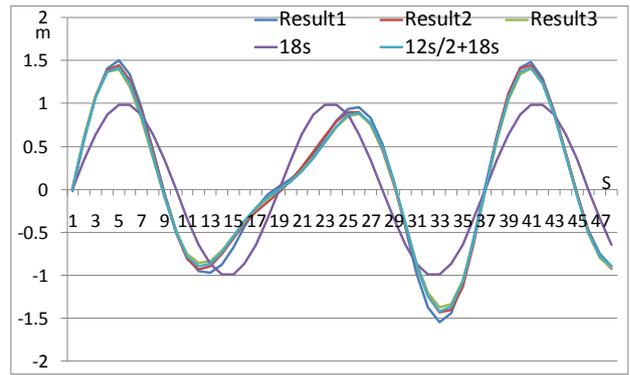


図 3.4-10 $\alpha = \frac{1}{8}$

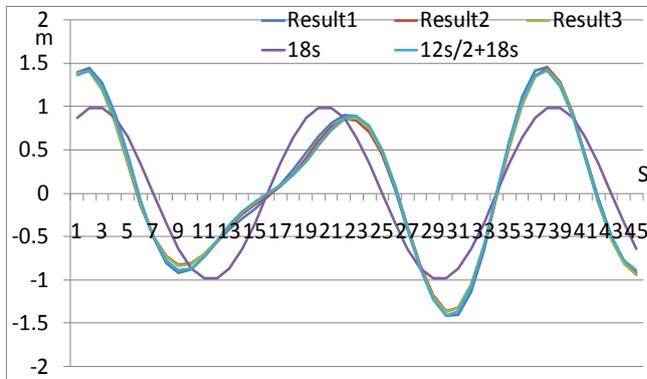


図 3.4-11 $\alpha = \frac{1}{10}$

Result1: $\frac{h(\tau)}{h(0)} = \frac{1}{10}$, Result2: $\frac{h(\tau)}{h(0)} = \frac{1}{25}$, Result3: $\frac{h(\tau)}{h(0)} = \frac{1}{50}$

図 3.4-12 凡例

表 3.4-1 周期 18 秒におけるフィルターの誤差

18s	25	50	75	100
$\alpha = 1/6$	0.03102717	0.01948884	0.04117637	0.02011541
$\alpha = 1/8$	0.01862868	0.02179035	0.00877621	0.01281799
$\alpha = 1/10$	0.04106789	0.00122617	0.01781792	0.01834071

表 3.4-2 周期 12 秒におけるフィルターの誤差

12s	25	50	75	100
$\alpha = 1/6$	0.00034243	0.00584787	0.00541580	0.00008521
$\alpha = 1/8$	0.00651673	0.00494930	0.00428522	0.00407860
$\alpha = 1/10$	0.00543375	0.00428585	0.00379255	0.00339977

3.4.3 対象数値フィルター

次に本研究で用いられる数値フィルターについて議論する。

本研究では、潮汐、長周期重力波、重力波、表面張力波は必要とせず、暴風・地震の作用による波の数分程度から一時間程度の波を抽出するフィルターが必要である。

3.4.2 における数値実験では数値フィルターの検証を行うために高い精度の数値フィルターを採用した。本研究の数値フィルターは α に依存していることから、3.4.2 のように α の値が減少するにつれて、除き切れなかった周期の波を除去することが可能である。

しかし、精度を上昇させることは、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、本研究の目的とは異なる。 $E=1/25$ として計算した場合でもフィルター長の片側が 300s 近い時間を要することから、その時間は検出への遅れとして繋がることからフィルターとして適していないことが分かる。

3.4.2 においてある一定以上のフィルター長において、数値フィルターの精度に影響しないことが分かった。そこで本研究では、 $\tau=0$ における $H(\sigma)$ の値に対して、 $H(\sigma)$ が $1/10$ となる値の $H(\sigma)=0$ となる時までのフィルター長とする。

なお、本研究で対象とする数値フィルターは $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$ ($T=10s, 20s, 30s, 40s, 60s$) と $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s, \pi/60s, \pi/90s, \pi/120s, \pi/150s$ ($T=60s, 120s, 180s, 240s, 300s$) の組み合わせによる 24 種の数値フィルターとする。

図 3.4-13 から図 3.4-36 に本研究で用いる数値フィルターを示す。

表 3.4.3 対象フィルターとフィルター長 (片側)

フィルターの片側長(s)		$(1-\alpha)\sigma_c$				
		$\pi/30s$	$\pi/60s$	$\pi/90s$	$\pi/120s$	$\pi/150s$
$(1+\alpha)\sigma_c$	$\pi/5s$	34	60	80	96	-
	$\pi/10s$	36	68	96	120	160
	$\pi/15s$	36	72	102	130	180
	$\pi/20s$	38	72	106	136	192
	$\pi/30s$	38	74	108	140	200

i) $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

$(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$ における $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s$ と定めた数値フィルターを図 3.4-13 から図 3.4-16 に示す。

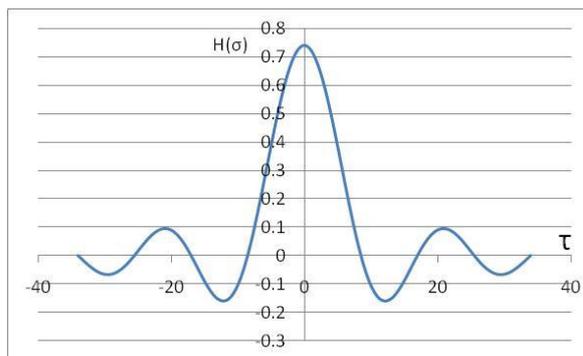


図 3.4-13 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s$

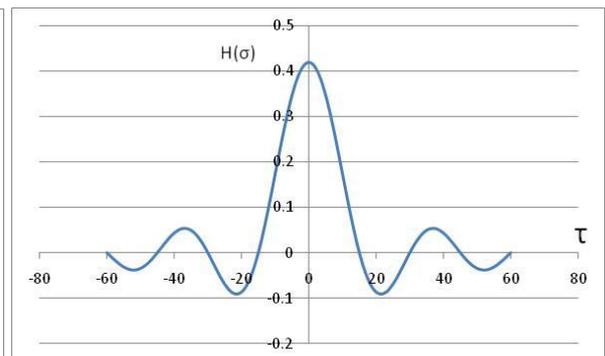


図 3.4-14 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/10s$

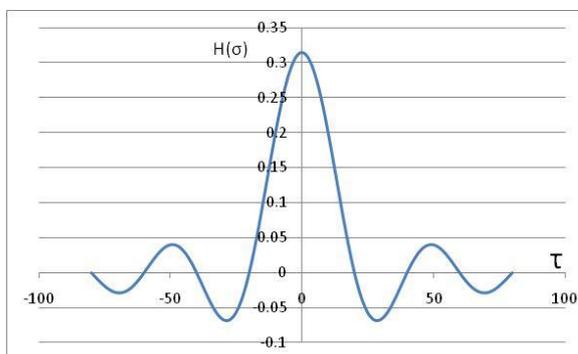


図 3.4-15 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/15s$

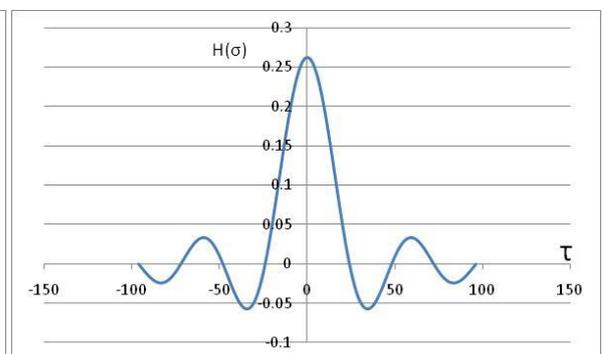


図 3.4-16 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/20s$

ii) $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$

$(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$ における $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$ と定めた数値フィルターを図 3.4-17 から図 3.4-21 に示す。

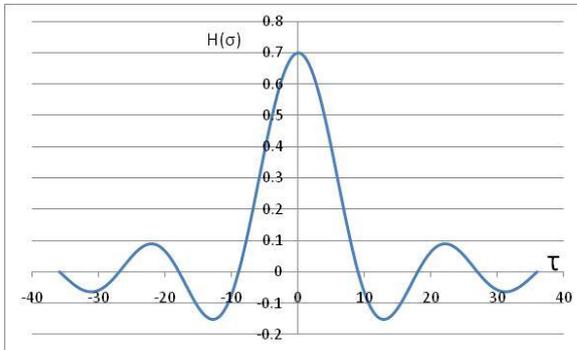


図 3.4-17 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s$

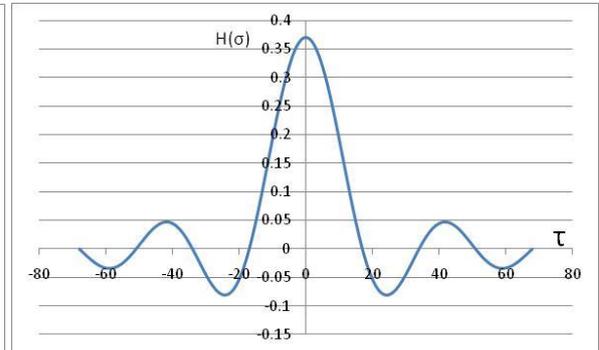


図 3.4-18 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/10s$

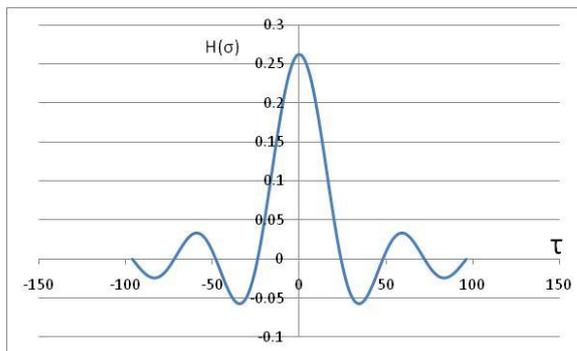


図 3.4-19 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/15s$

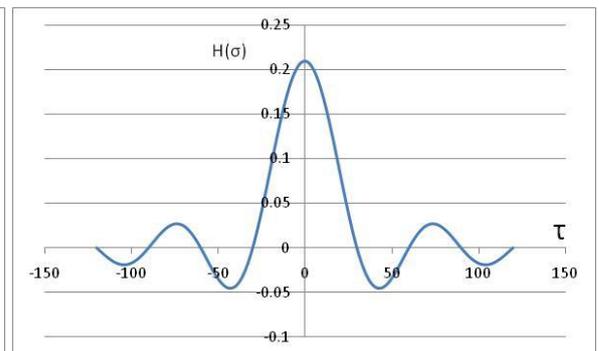


図 3.4-20 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/20s$

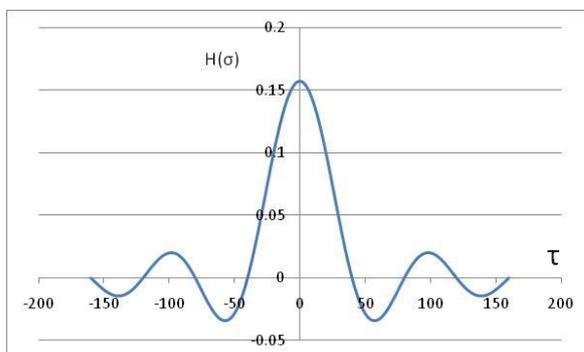


図 3.4-21 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

iii) $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$

$(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$ における $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$ と定めた数値フィルターを図 3.4-22 から図 3.4-26 に示す。

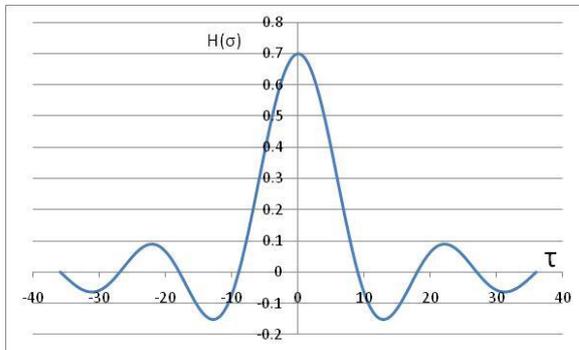


図 3.4-22 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s$

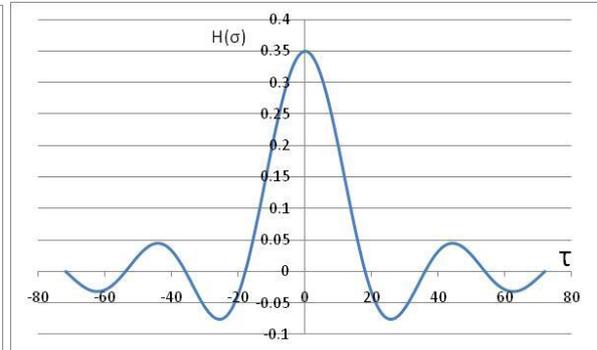


図 3.4-23 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/10s$

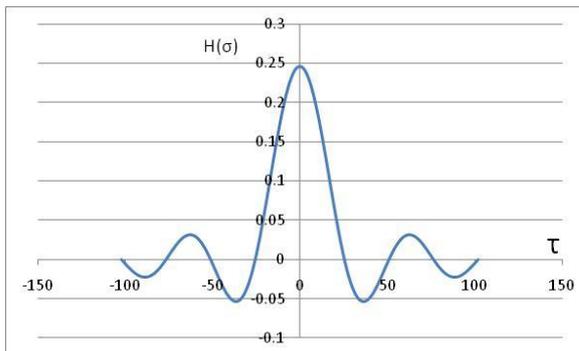


図 3.4-24 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/15s$

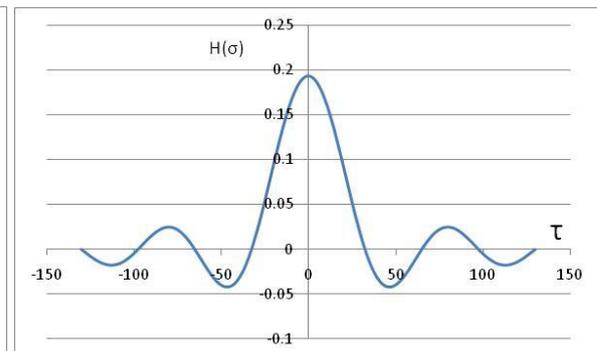


図 3.4-25 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/20s$

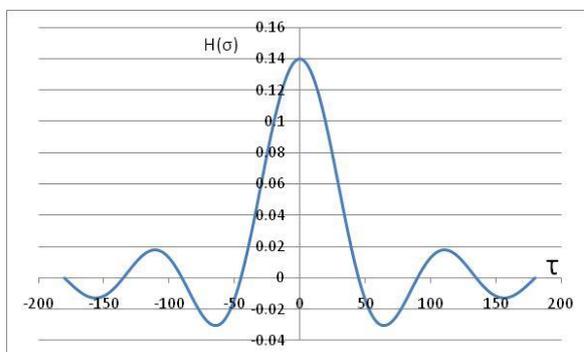


図 3.4-26 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

iv) $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/120s$

$(1-\alpha)\sigma_c = \pi/120s$ における $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$ と定めた数値フィルターを図 3.4-27 から図 3.4-31 に示す。

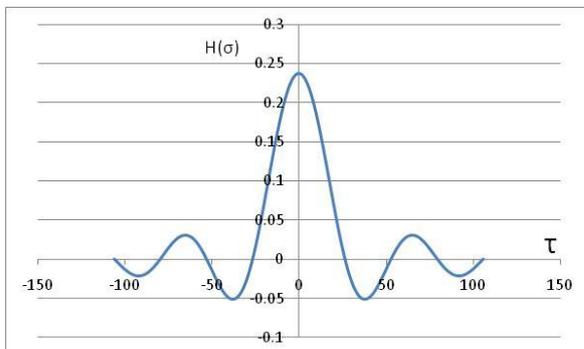


図 3.4-27 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s$

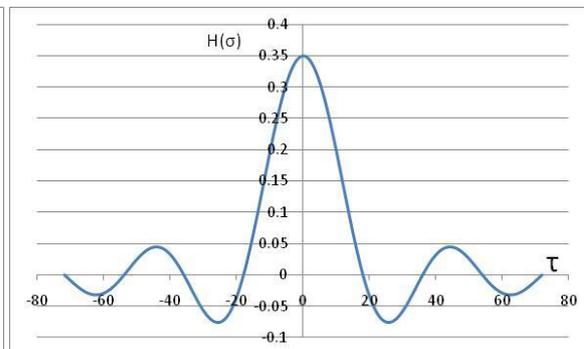


図 3.4-28 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/10s$

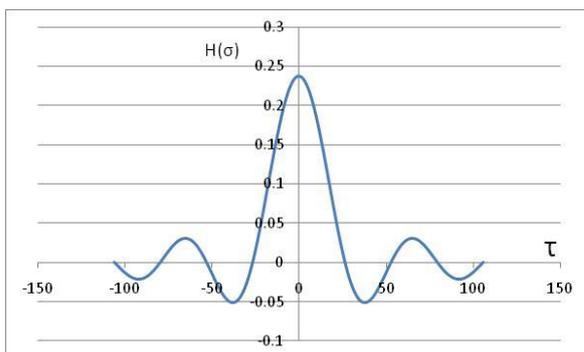


図 3.4-29 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/15s$

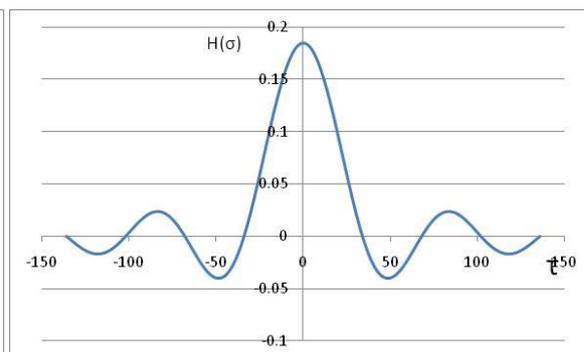


図 3.4-30 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/20s$

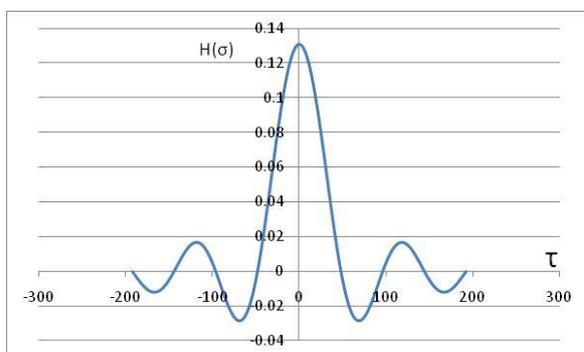


図 3.4-31 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

v) $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/150s$

$(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$ における $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$ と定めた数値フィルターを図 3.4-32 から図 3.4-36 に示す。

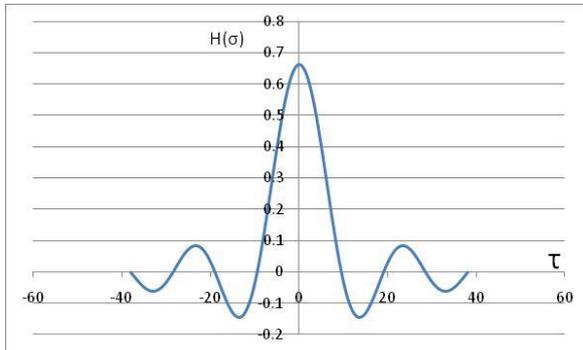


図 3.4-32 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s$

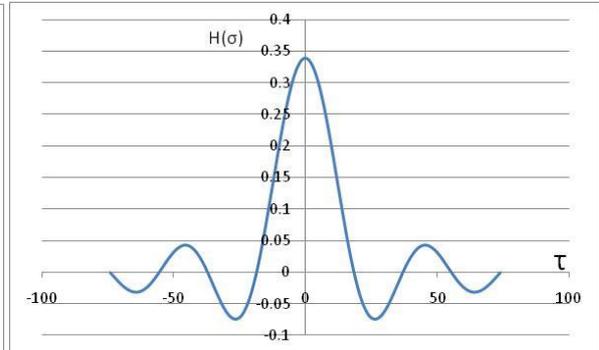


図 3.4-33 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/10s$

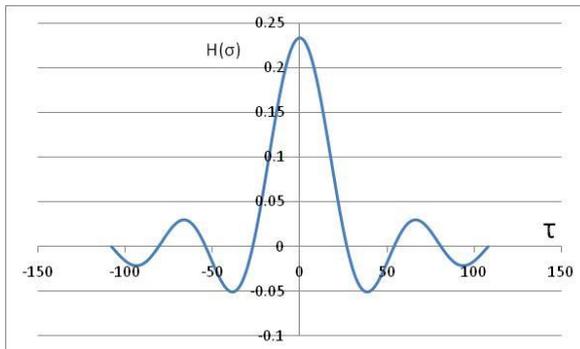


図 3.4-34 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/15s$

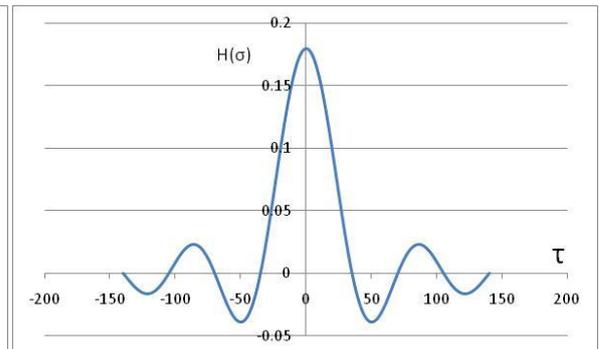


図 3.4-35 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/20s$

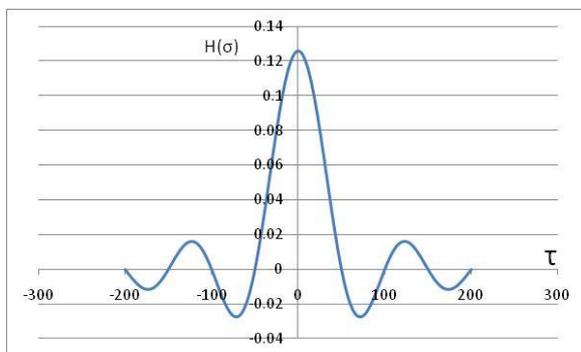


図 3.4-36 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

3.5 実測値における数値フィルターの検討

3.4 では本研究で用いる数値フィルターについて説明した。3.5 では、GPS 津波計で観測された実測値を用いて、数値フィルターの精度について議論する。

本研究で用いる数値フィルターは表 3.5-1 に示された風力階級に応じた観測データを用いるものとし、以下の i から iii の三つとする。

i .微風（風力階級：0～5）

2004 年 7 月 13 日 15:00～17:00

ii .風が非常に強い時（風力階級：8～11）

2004 年 7 月 30 日 22:00～0:00

iii .風が非常に強い時（風力階級：11～12）

2004 年 7 月 31 日 11:00～13:00

また GPS 津波計で実際に東海道沖地震による津波を観測したことから、検討対象とする。検討対象となる日時、風速は iv に示した通りである。

iv .2004 年 9 月 6 日 0:00～2:00

（風力階級：8～11、地震発生時刻：9 月 5 日 23:57）

表 3.5-1 風力階級に応じた風速と予報用語

風力階級	風速(m/s)	予報用語
0～5	10未満	—
5～7	10～15	やや強い風
7～8	15～20	強い風
8～10	20～25	非常に強い風
10～11	25～30	非常に強い風
11～12	30以上	猛烈な風

3.5.1 GPS 津波計の留意点

GPS 津波計で観測された実測値を用いて、数値フィルターの精度について議論する際に、GPS 津波計の観測における留意点について議論する。

GPS 津波計における水位観測において、GPS 津波計、GPS 衛星、陸地の基準局三地点による、誤差の修正などにより、数センチ精度の観測を可能にしている。

しかし、GPS 測位における留意点としてミスフィックスによる誤差、測位不能による欠

損値が挙げられる。ミスフィックスによる誤差は、十数分程度の観測誤差を発生させてしまい、ミスフィックス時の観測値を予測することは困難である。そこで、本研究を行う際に短時間の期間で生じる欠損値を予測する必要がある。欠損データの処理に関して、事項 3.5.2 で述べる。

3.5.2 欠損データの処理

GPS 津波計における観測の際に、図 3.5-1 のように測位不能により欠損値(99.9999m)を生じることがある。欠損値はミスフィックスとことなり、特異点と判断し、99.9999mとして記録することから、識別は瞬時に可能である。

欠損値を処理せず、作業を数値フィルターによる作業を行った場合、値が大きくなりすぎてしまい、津波の検出を困難にする恐れがある。そこで、本研究では欠損値を線形内装する作業を行い、欠損値前後の水位を用いて、欠損値を補う作業を行う。線形内挿によって、欠損値を補った値を、図 3.5-2 に示す。

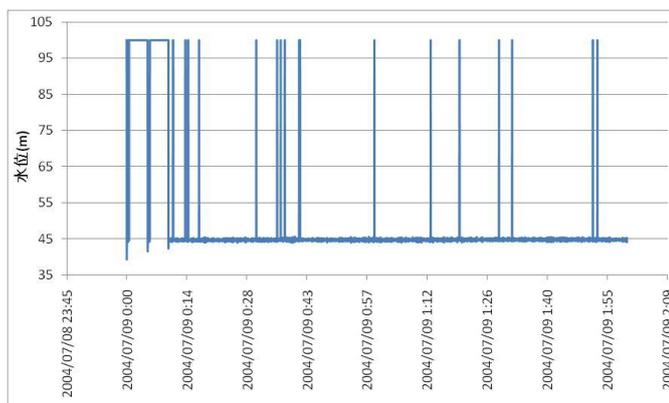


図 3.5-1 欠損値を記録した観測データ

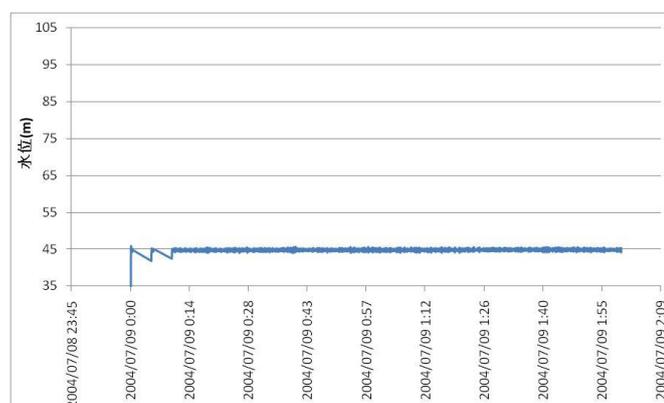


図 3.5-2 線形内装後の観測データ

3.5.3 微風（地震、津波が発生していない時）

図 3.5-3 に示すのが地震、津波が発生していない時における、風が微風における実測データの図である。期間は 2004 年 7 月 13 日 15:00～17:00 である。本データでは、欠損値がないことから欠損値処理を行わないものとする。

フィルター処理後の水位変動をより明確にするために、年間平均水位の 45m を差し引いた後、フィルター処理を行う。フィルター処理後の結果を図 3.5-4 から図 3.5-13 に示す。

その際に、 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s, \pi/60s, \pi/90s, \pi/120s, \pi/150s$ 別に i から v に示し、 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$ におけるフィルター処理後の結果を示しており、全フィルターによるフィルター処理後の結果の比較、各フィルター処理後の結果の順に示す。各フィルターにおいて、その水位変動が数センチ程度に処理されており、フィルター処理によって多くのノイズが除去されたことが分かる。しかし、 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s$ では水位変動が数センチ程度に処理されたにもかかわらず、他の結果に比べて、多くの短周期成分が除去できていないことが見て取れる。

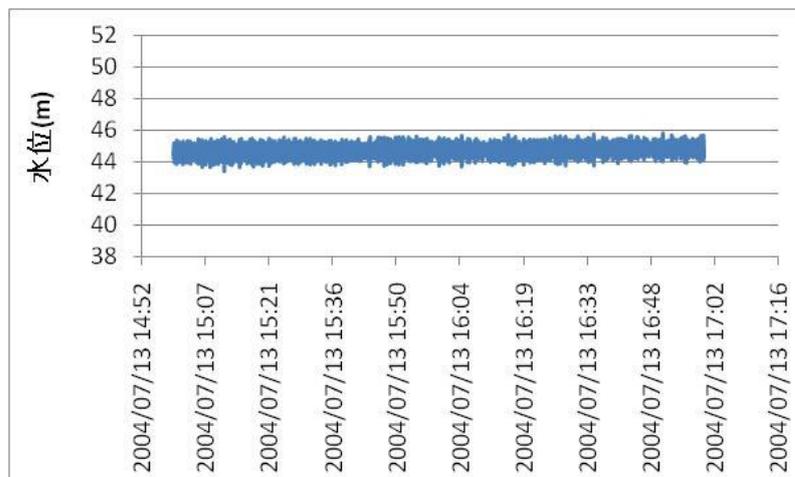


図 3.5-3 実測データ

i). $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

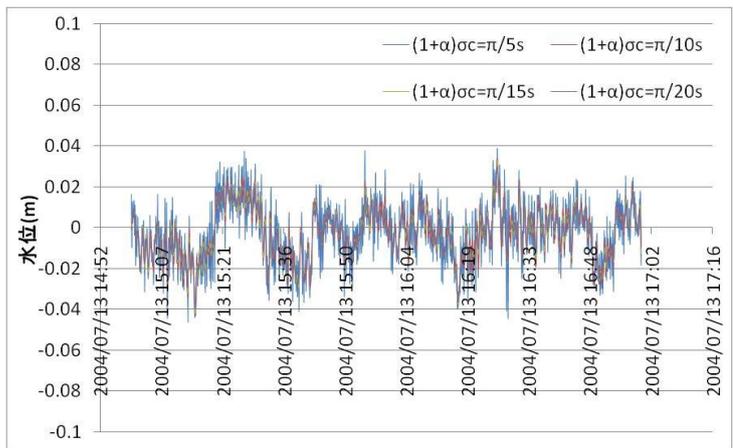


図 3.5-4 フィルター処理後のデータ

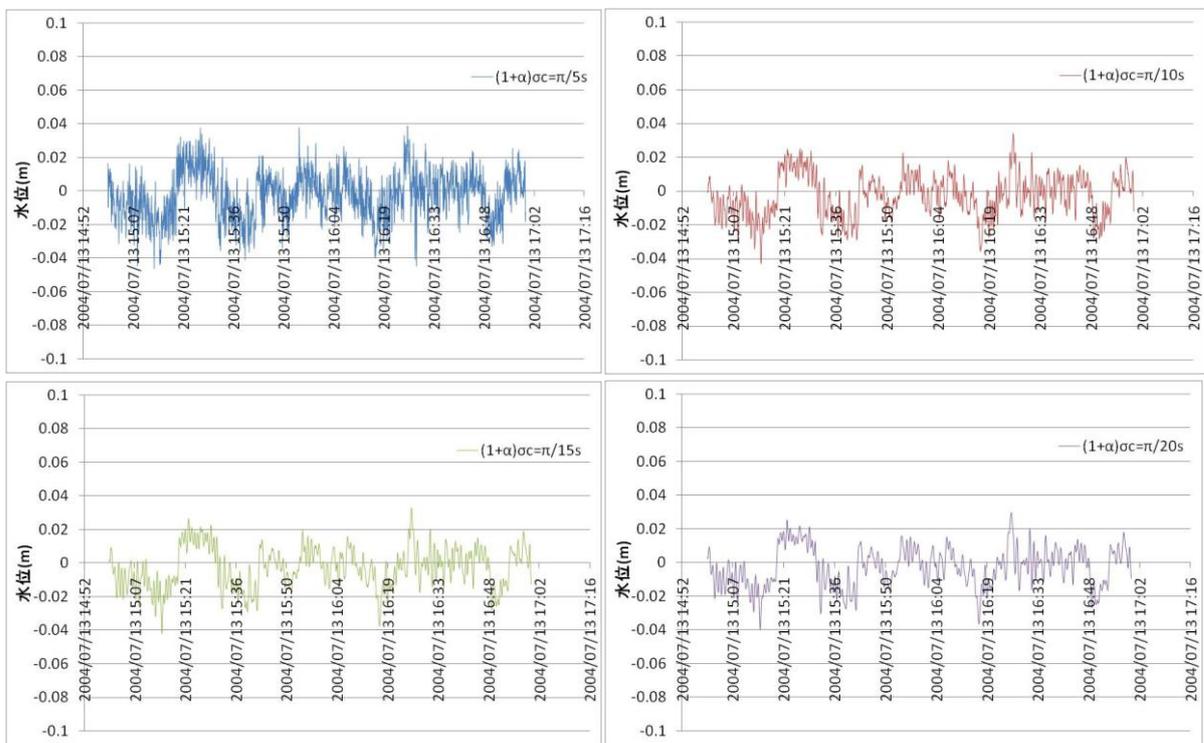


図 3.5-5 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s$)

ii). $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$

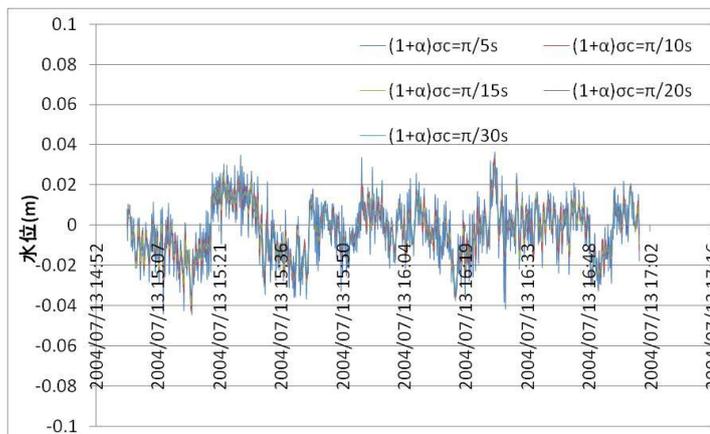


図 3.5-6 フィルター処理後のデータ

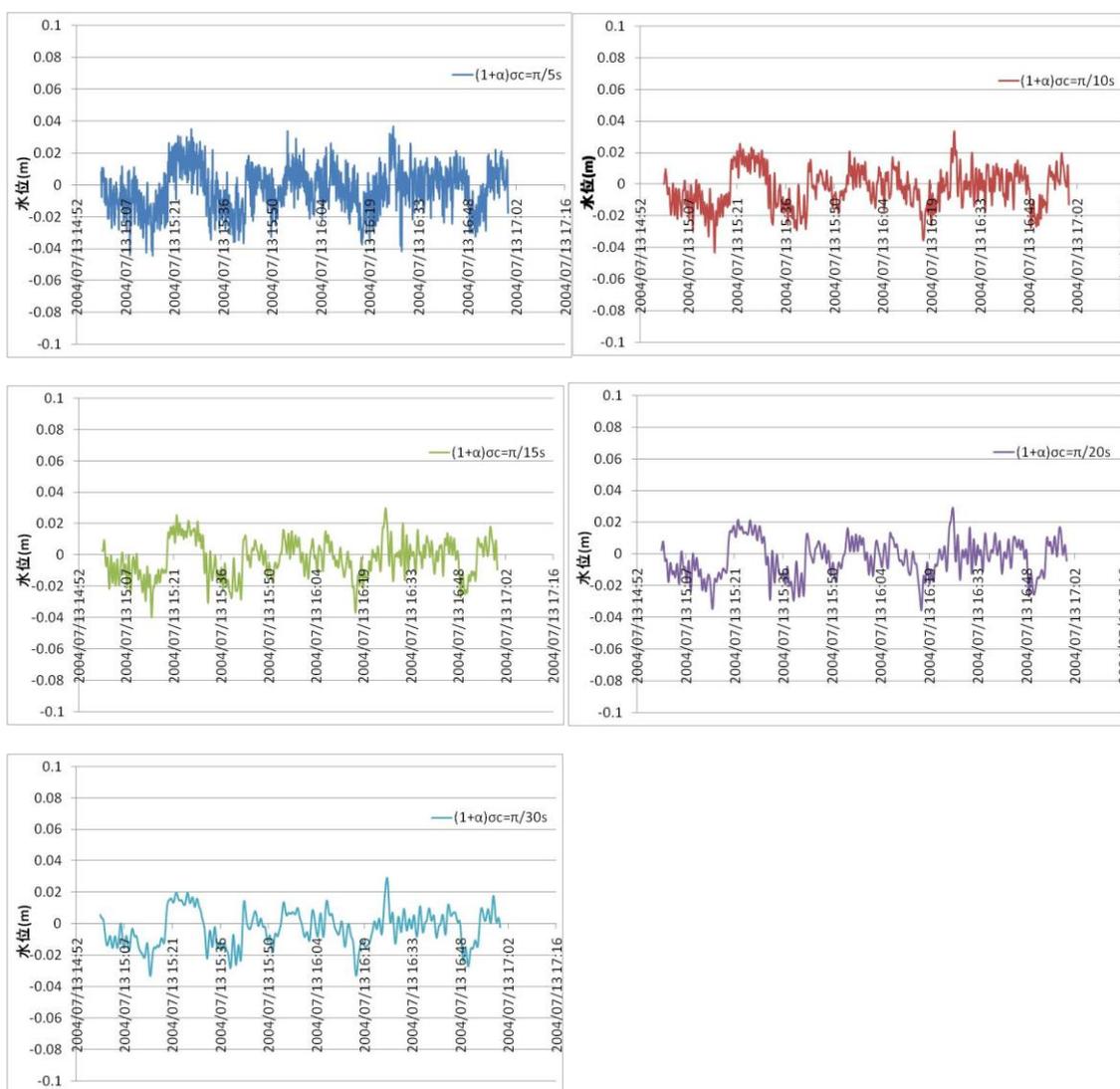


図 3.5-7 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$.)

iii). $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$

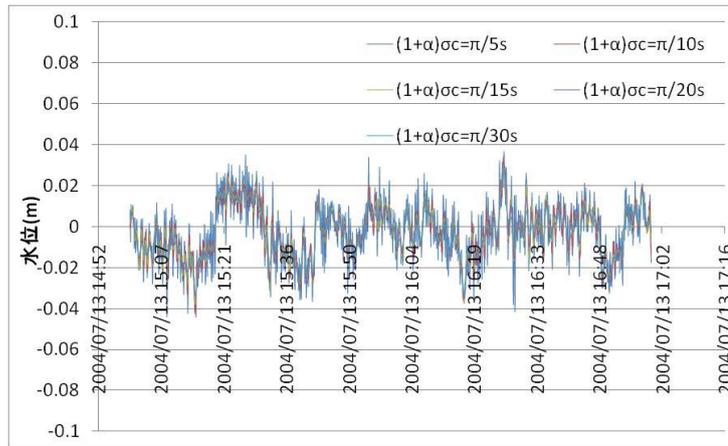


図 3.5-8 フィルター処理後のデータ

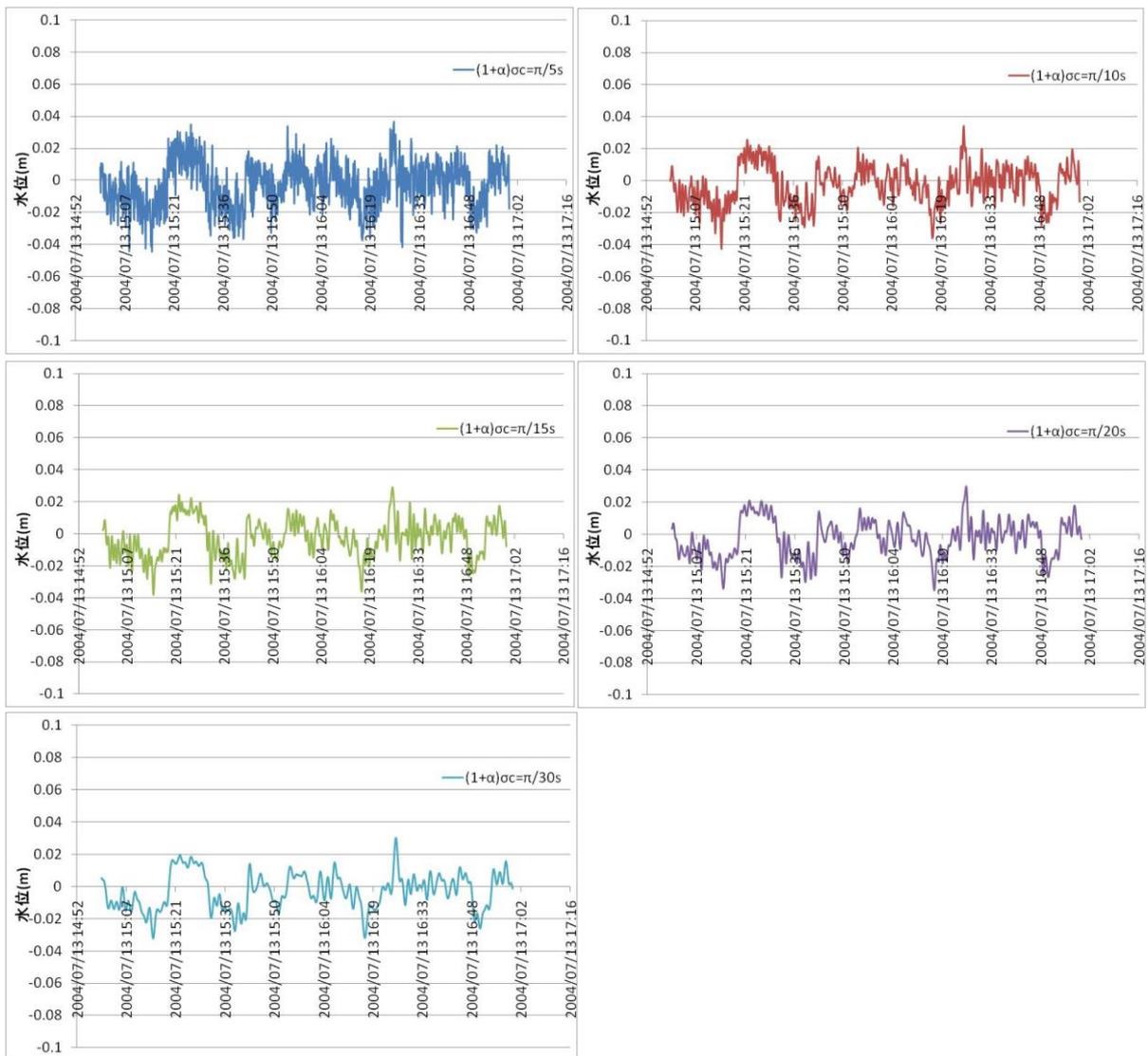


図 3.5-9 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$)

iv). $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/120s$

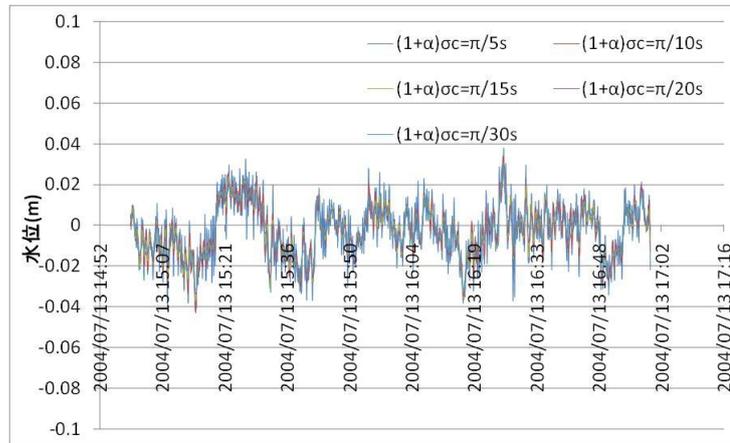


図 3.5-10 フィルター処理後のデータ

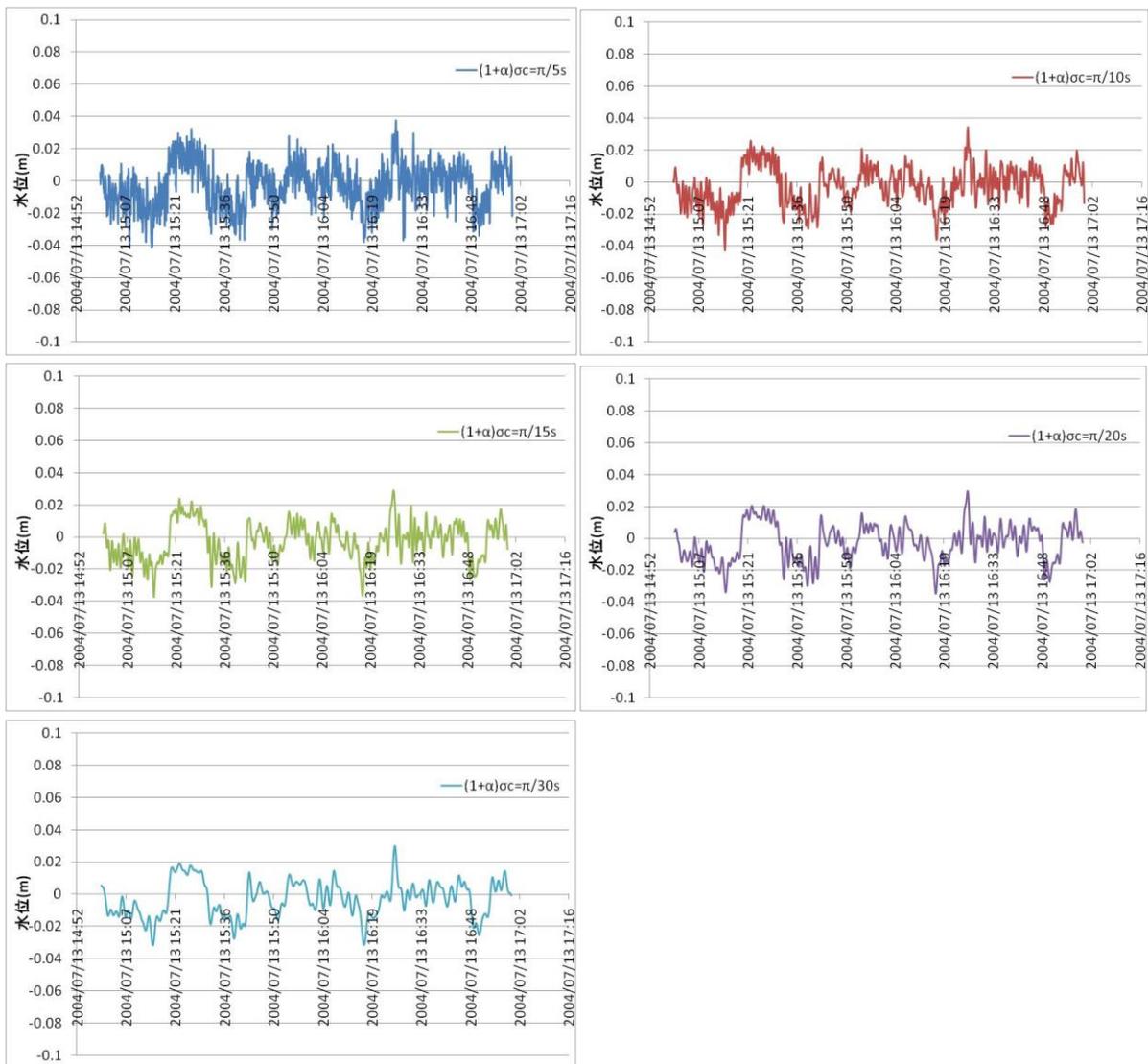


図 3.5-11 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$)

$$v). (1-\alpha)\sigma_c = \pi/150s$$

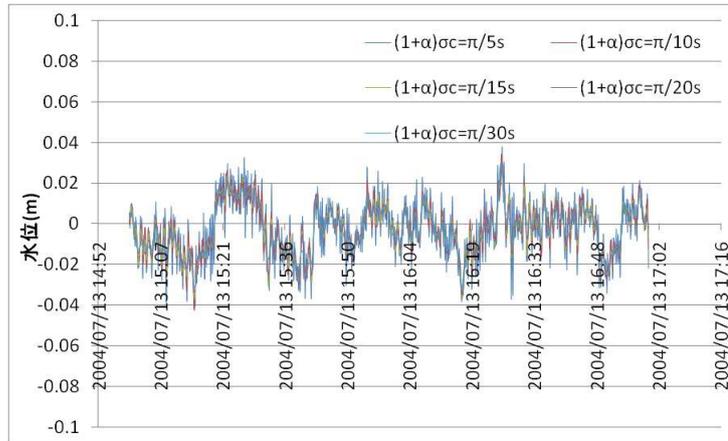


図 3.5-12 フィルター処理後のデータ

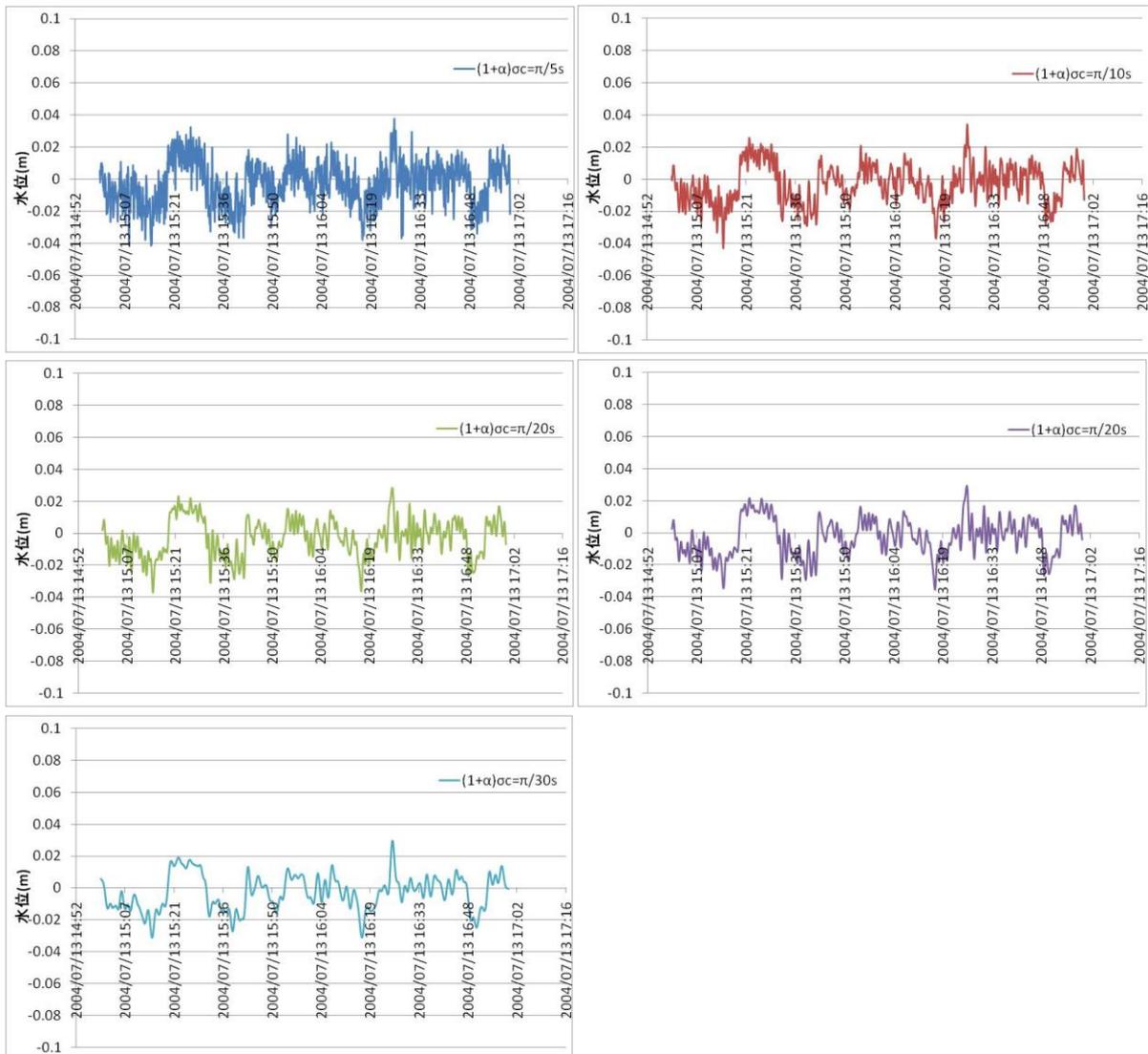


図 3.5-13 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$)

3.5.4 強風（地震、津波が発生してない時）

図 3.5-14 に示すのが地震、津波が発生してない時における、風が強風における実測データの図である。期間は 2004 年 7 月 30 日 22:00~0:00 である。3.5.3 同様、本データでも欠損値がないことから欠損値処理を行わないものとし、フィルター処理後の水位変動をより明確にするために、年間平均水位の 45m を差し引いた後、フィルター処理を行う。フィルター処理後の結果を図 3.5-15 から図 3.5-23 に示す。

その際に、 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s, \pi/60s, \pi/90s, \pi/120s, \pi/150s$ 別に i から v に示し、 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$ におけるフィルター処理後の結果を示しており、全フィルターによるフィルター処理後の結果の比較、各フィルター処理後の結果の順に示す。

各フィルターにおいて、その水位変動が数十センチ程度に処理されており、フィルター処理によってある程度のノイズ除去されたことが分かる。この日は台風 10 号が接近していたことを含めても、 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s$ では水位変動が他のフィルターに比べて十センチ以上も多くの変動を示している。

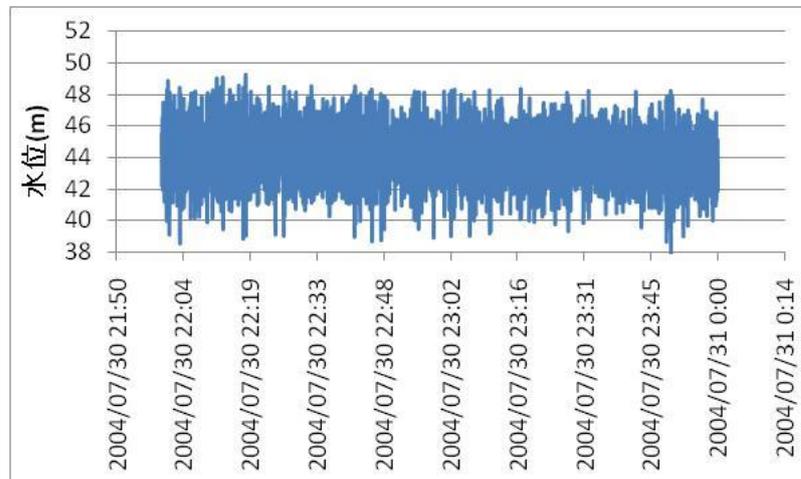


図 3.5-14 実測データ

i). $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

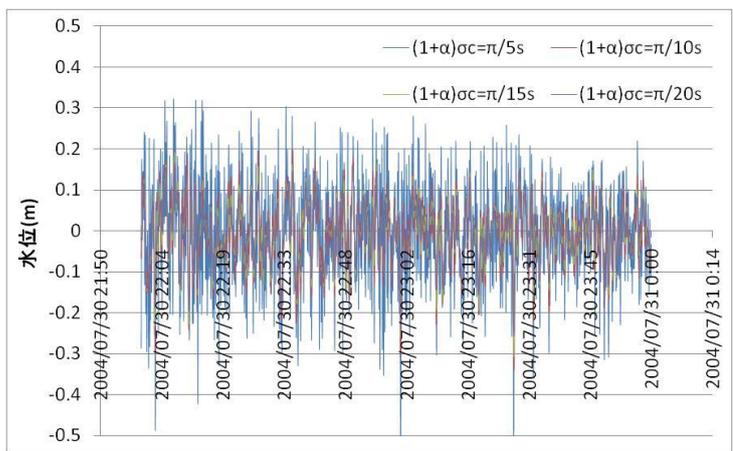


図 3.5-15 フィルター処理後のデータ

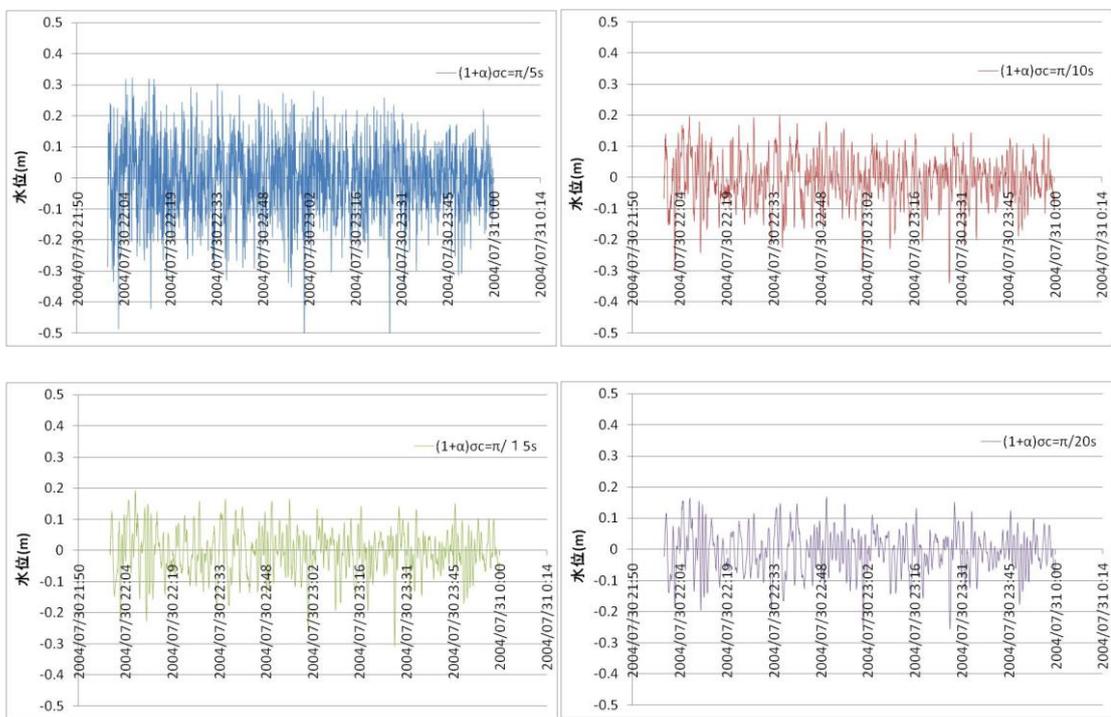


図 3.5-16 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s$)

ii). $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$

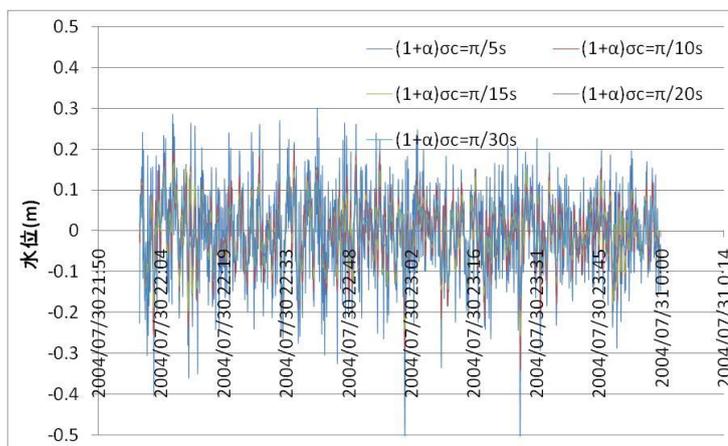


図 3.5-17 フィルター処理後のデータ

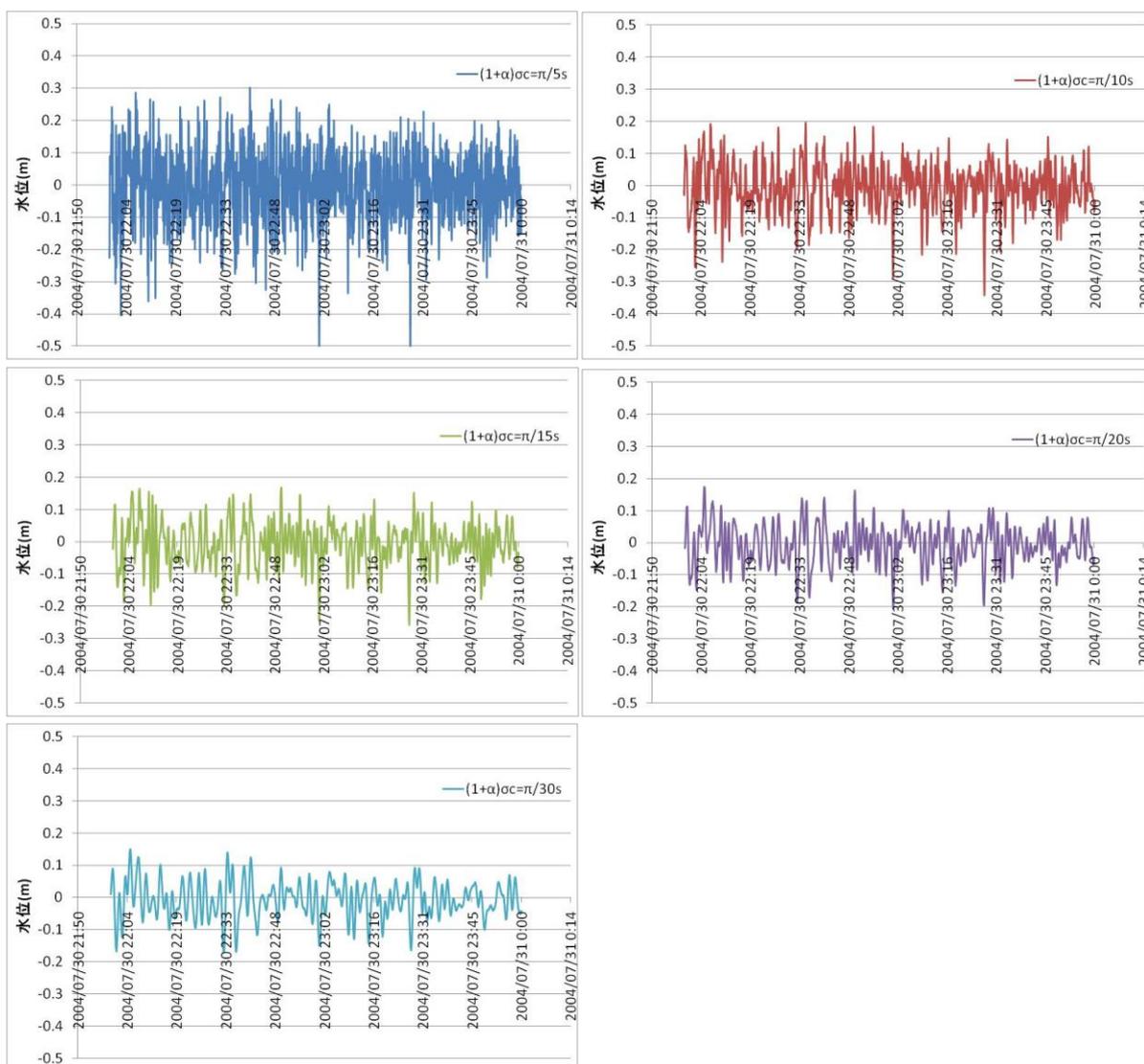


図 3.5-18 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$)

iii). $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$

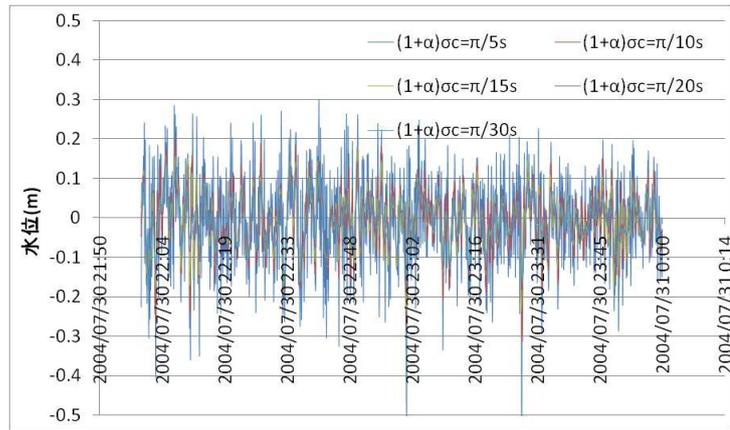


図 3.5-19 フィルター処理後のデータ

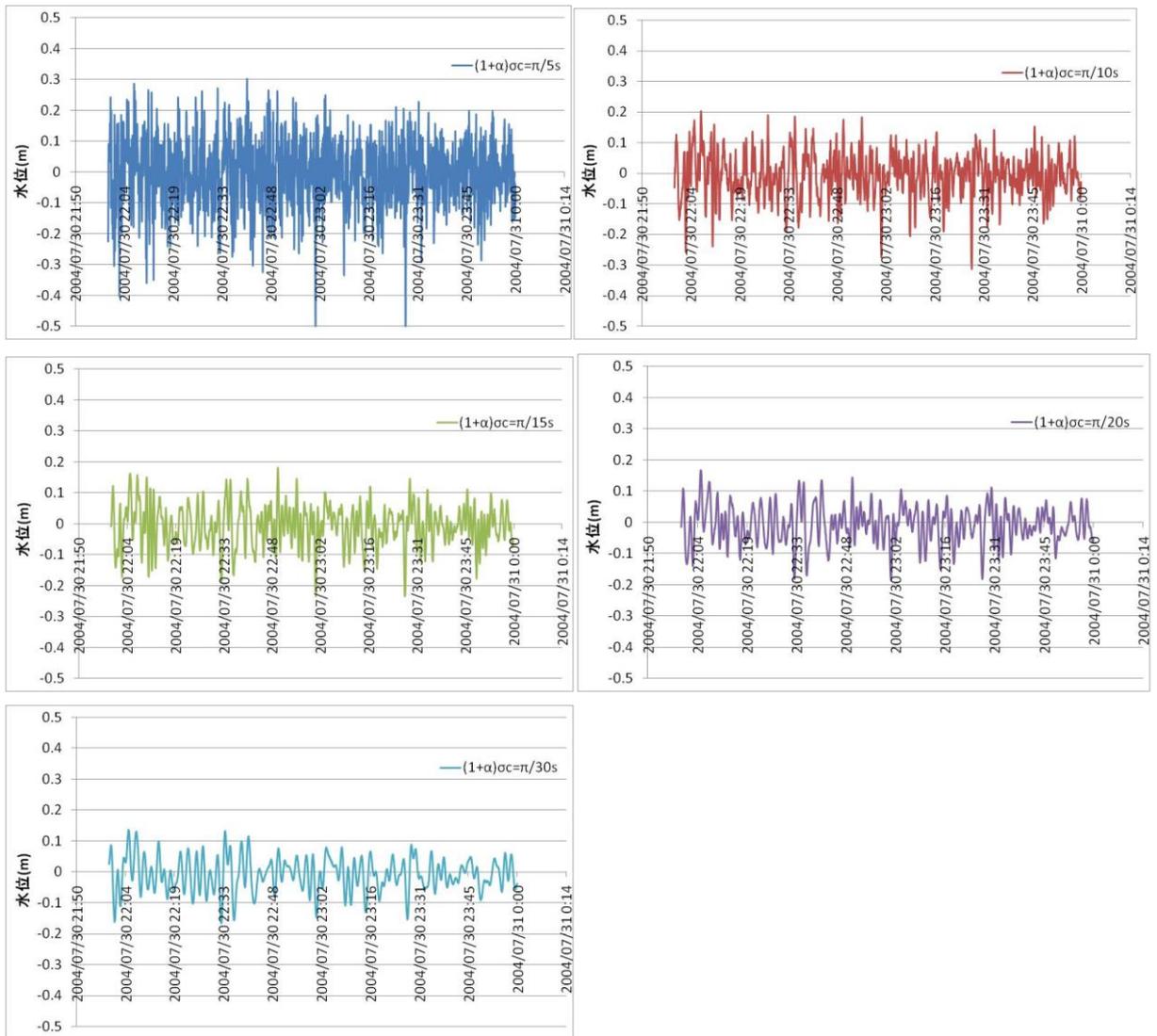


図 3.5-20 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$)

iv). $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/120s$

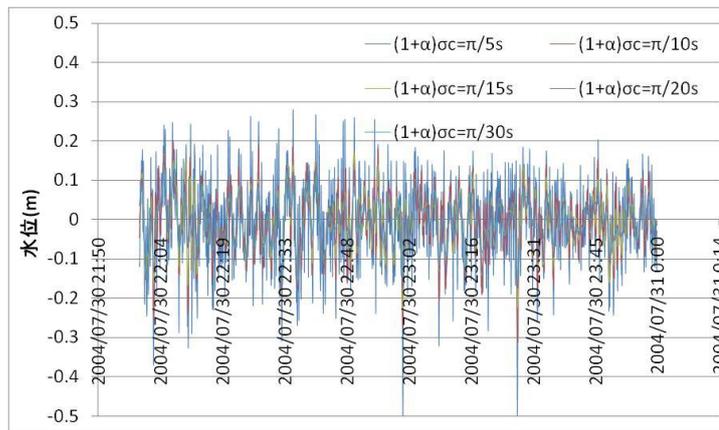


図 3.5-20 フィルター処理後のデータ

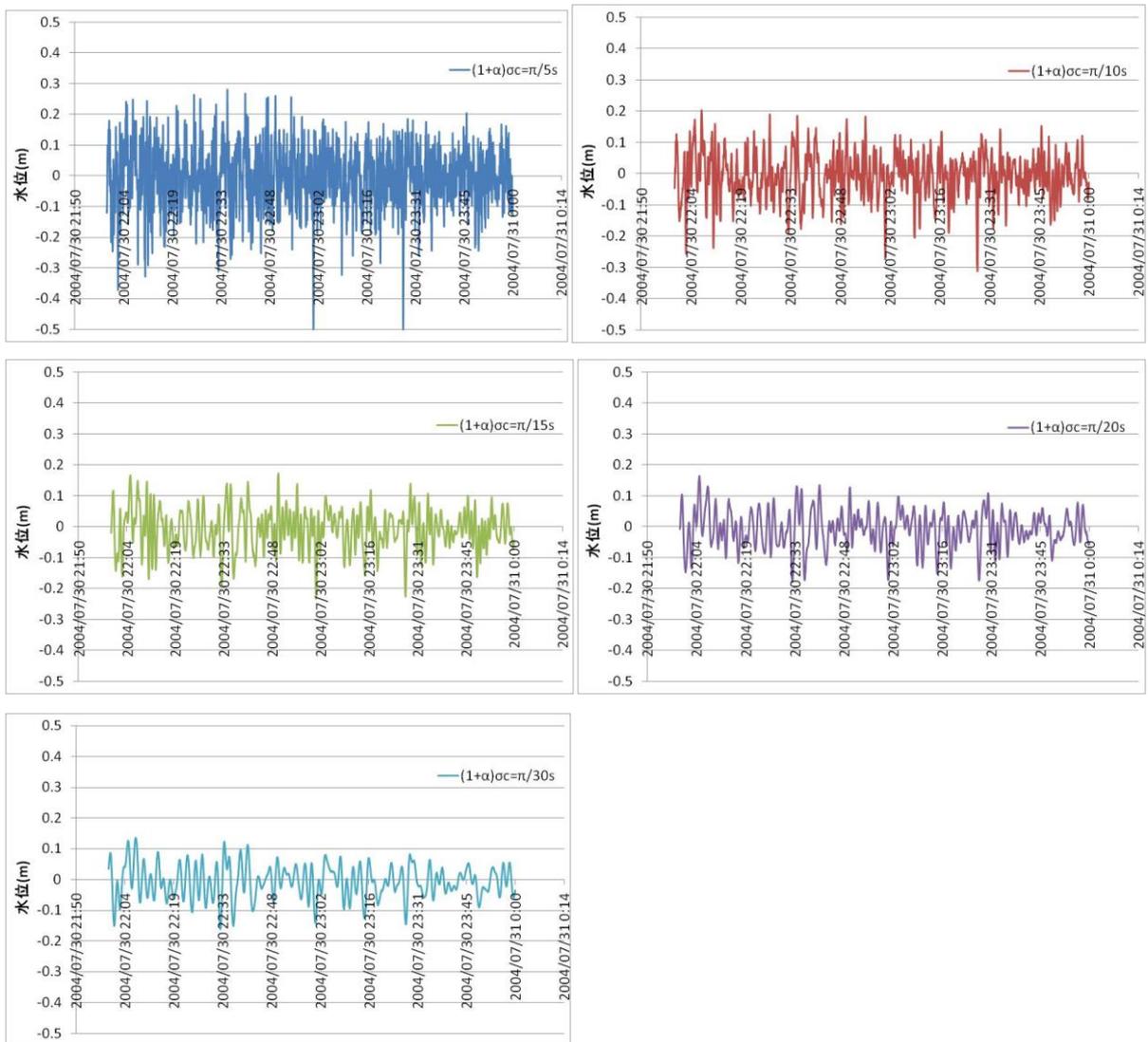


図 3.5-21 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$)

$$v). (1-\alpha)\sigma_c = \pi/150s$$

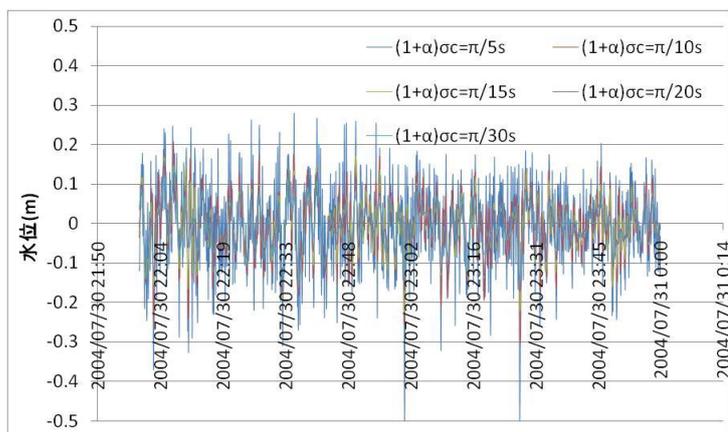


図 3.5-22 フィルター処理後のデータ

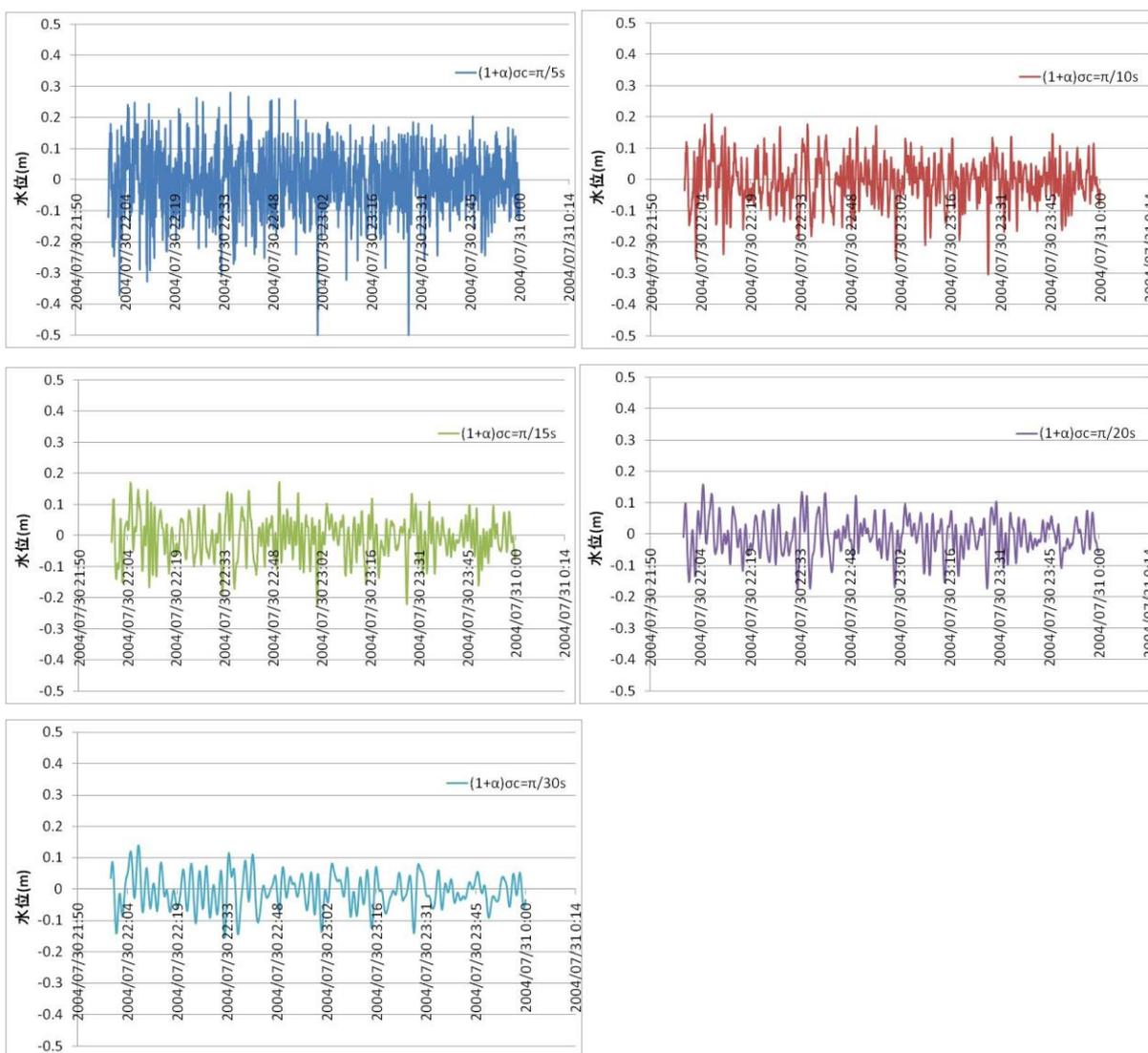


図 3.5-23 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$)

3.5.5 猛烈な風（地震、津波が発生していない時）

図 3.5-24 に示すのが地震、津波が発生していない時における、風が強風における実測データの図である。期間は 2004 年 7 月 31 日 11:00～13:00 である。3.5.3、3.5.4 とは異なり、欠損値を記録していることから 3.5.2 の欠損値処理を行った。フィルター処理後の水位変動をより明確にするために、年間平均水位の 45m を差し引いた後、フィルター処理を行う。フィルター処理後の結果を図 3.5-25 から図 3.5-33 に示す。

その際に、 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s, \pi/60s, \pi/90s, \pi/120s, \pi/150s$ 別に i から v に示し、 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$ におけるフィルター処理後の結果を示しており、全数値フィルターによるフィルター処理後の結果の比較、各数値フィルター処理後の結果の順に示す。

各数値フィルターにおいて、その水位変動が十センチ程度に処理されており、フィルター処理によってある程度のノイズ除去されたことが分かる。この日は 3.5.4 で上述した台風 10 号が通過している最中ではあるが、 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s$ では水位変動が他のフィルターに比べて多くの水位変動を示しており、3.5.3、3.5.4 を考慮して $(1+\alpha)\sigma_c$ の値が大きい数値フィルターは不適切であると考えられる。

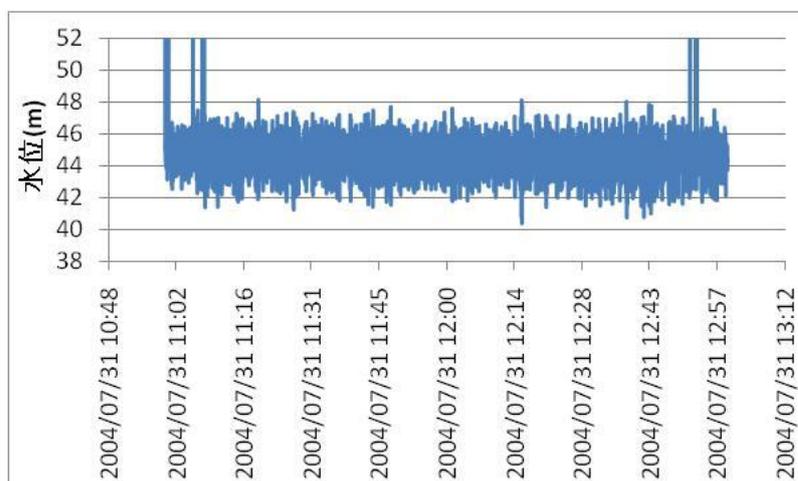


図 3.5-24 実測データ

i). $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

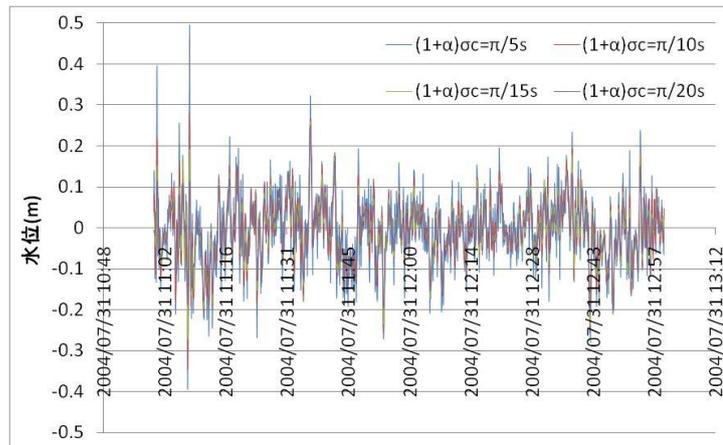


図 3.5-25 フィルター処理後のデータ

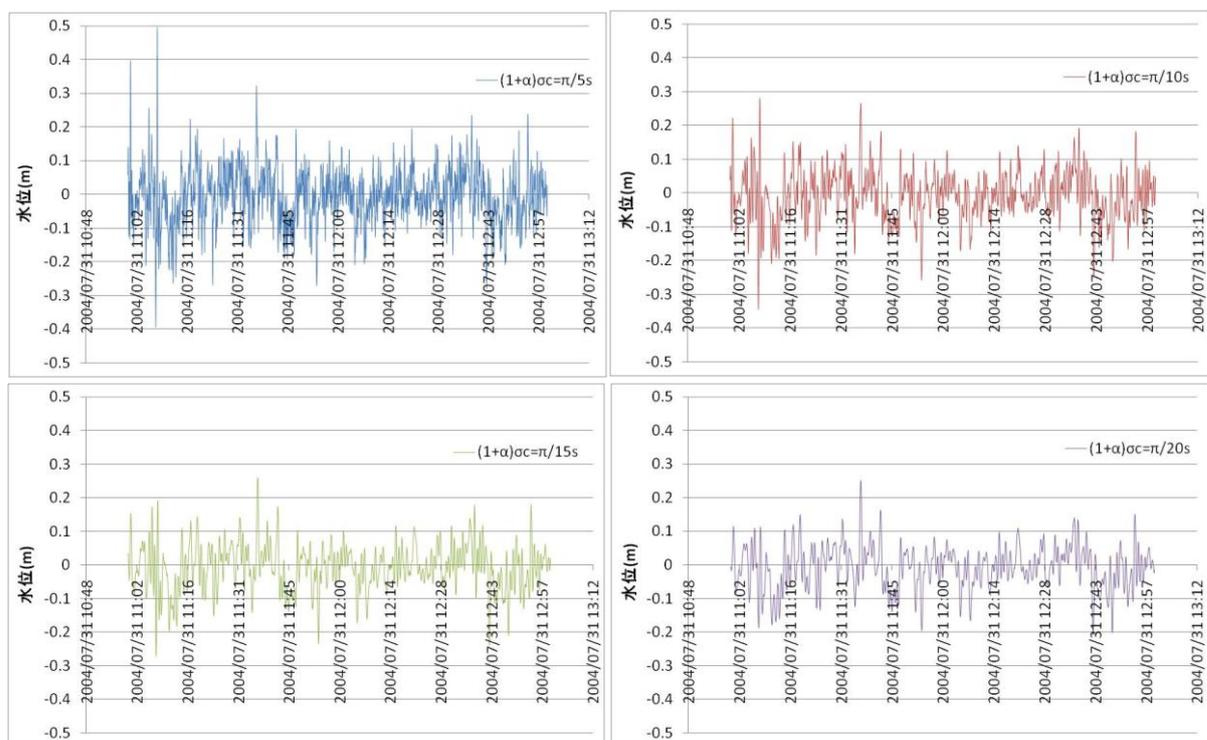


図 3.5-26 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s$)

ii). $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$

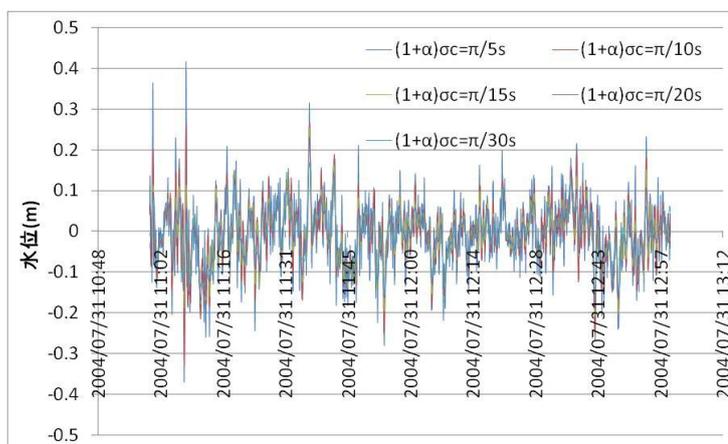


図 3.5-27 フィルター処理後のデータ

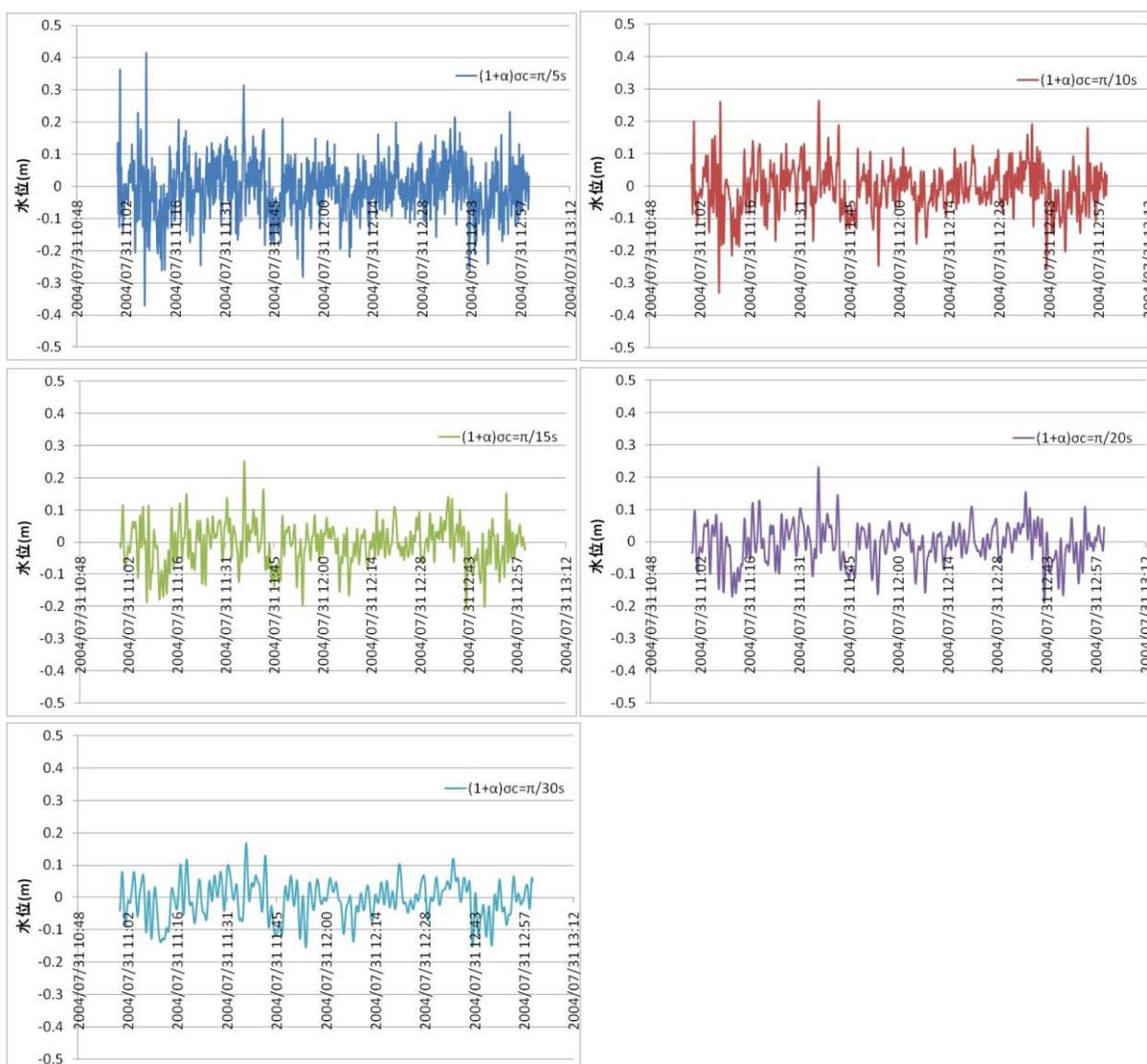


図 3.5-28 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$)

iii). $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$

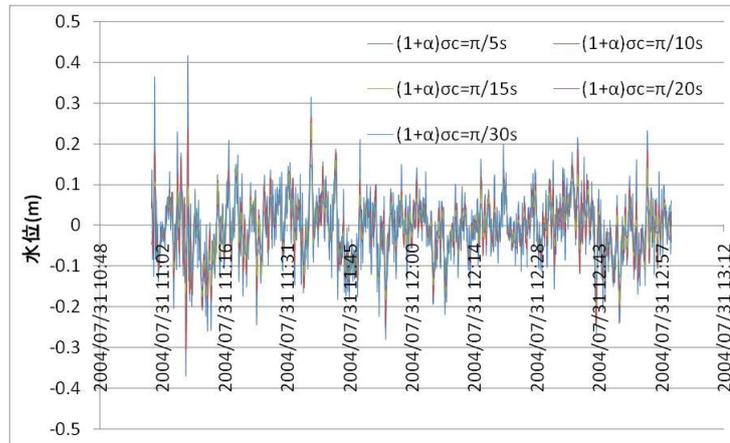


図 3.5-29 フィルター処理後のデータ

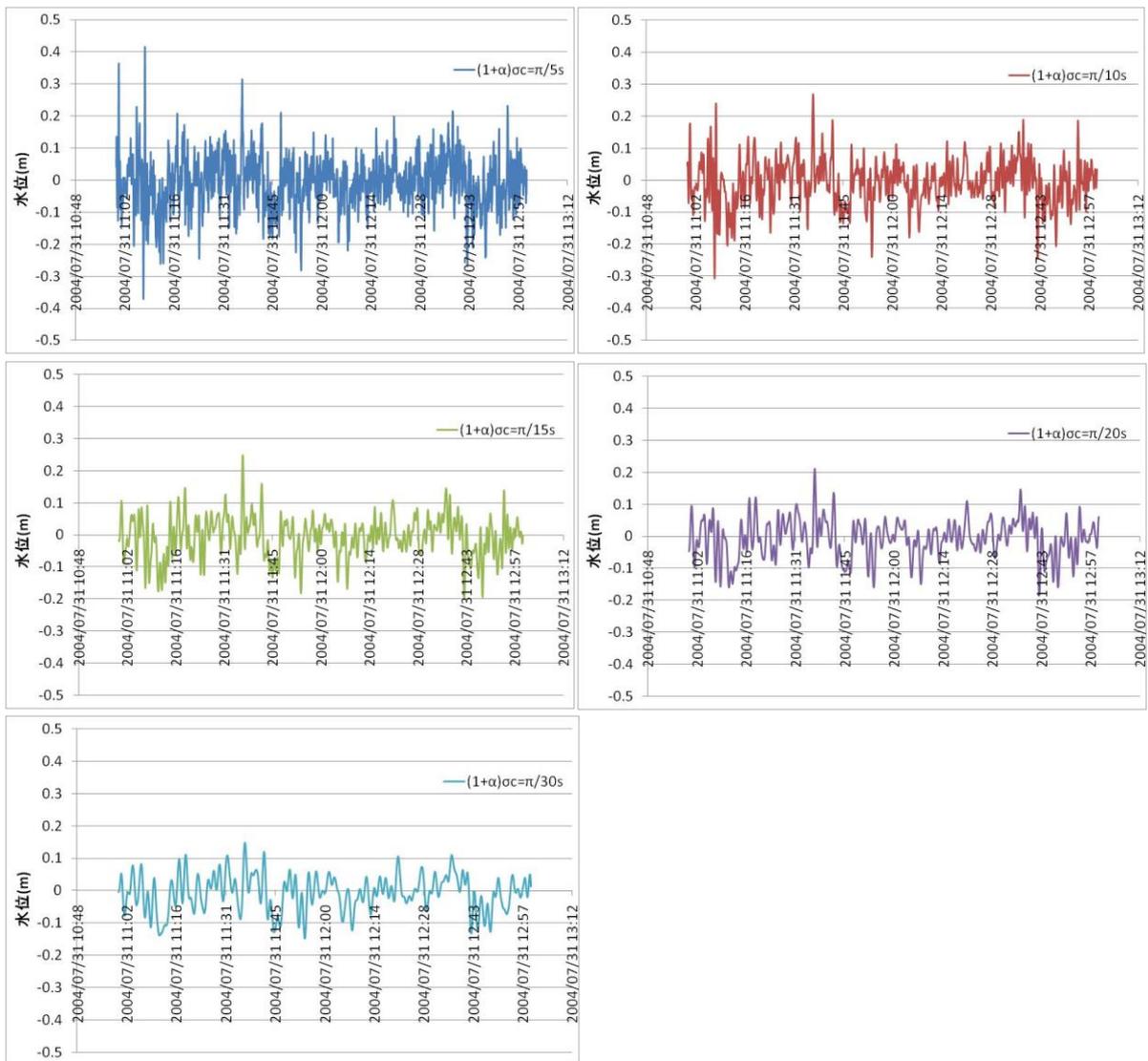


図 3.5-30 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$)

iv). $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/120s$

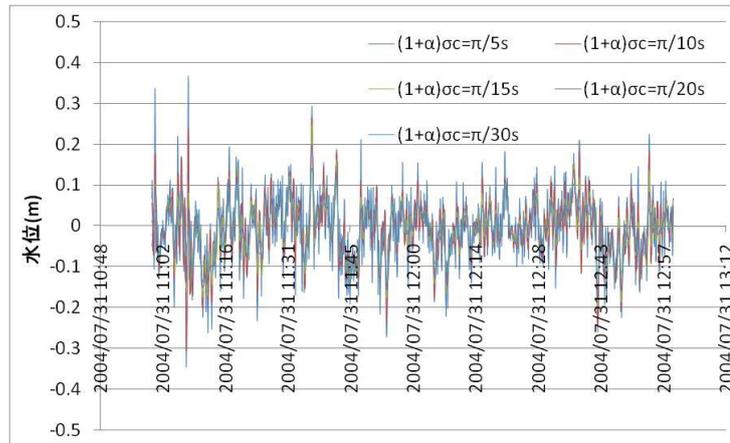


図 3.5-31 フィルター処理後のデータ

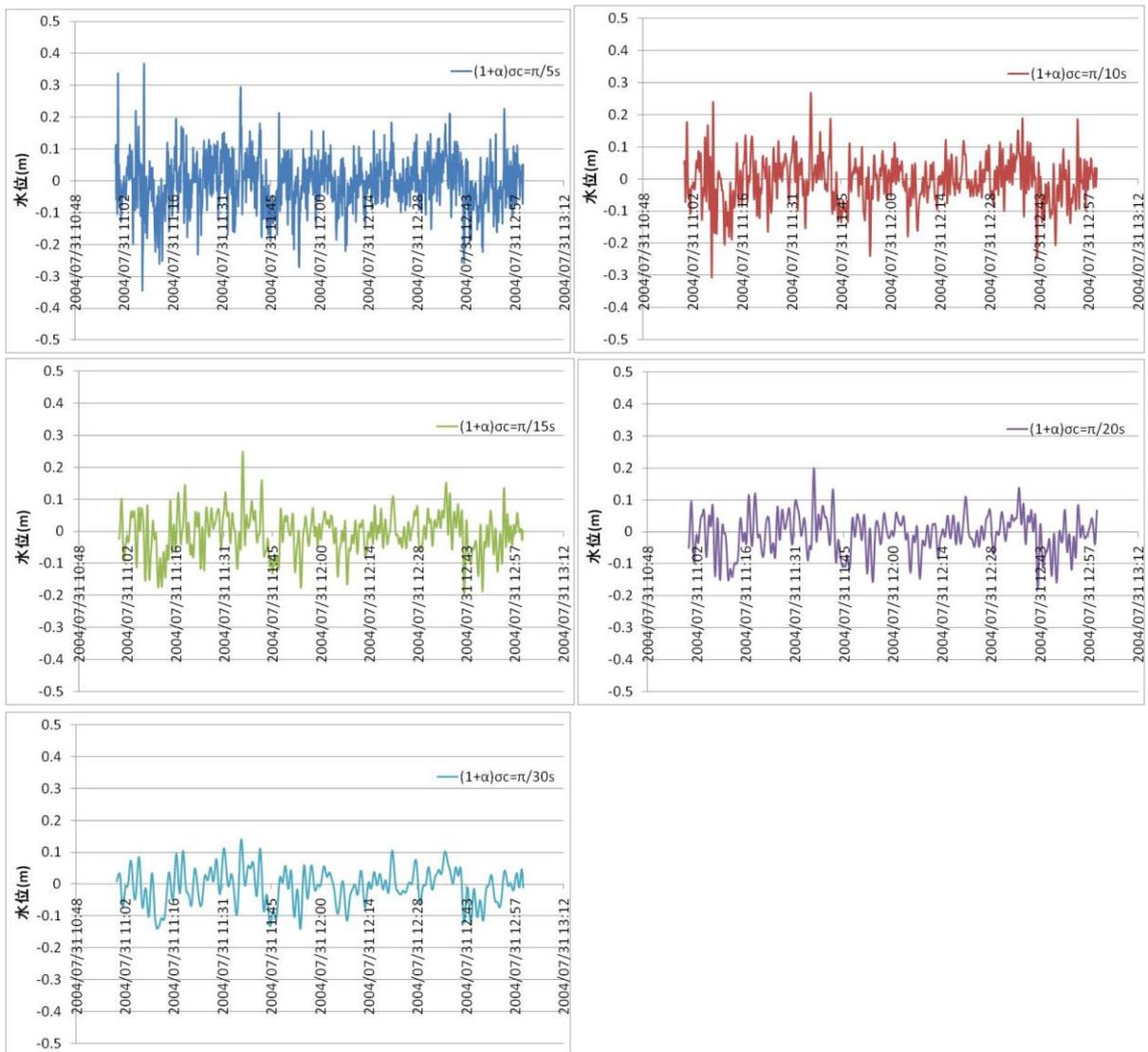


図 3.5-32 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$)

$$v). (1-\alpha)\sigma_c = \pi/150s$$

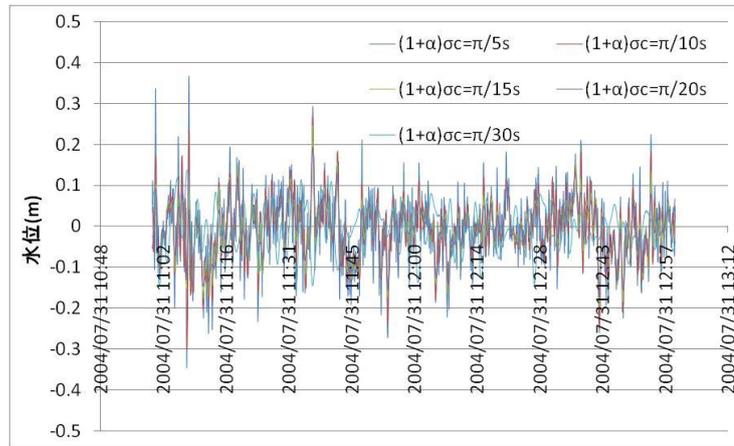


図 3.5-33 フィルター処理後のデータ

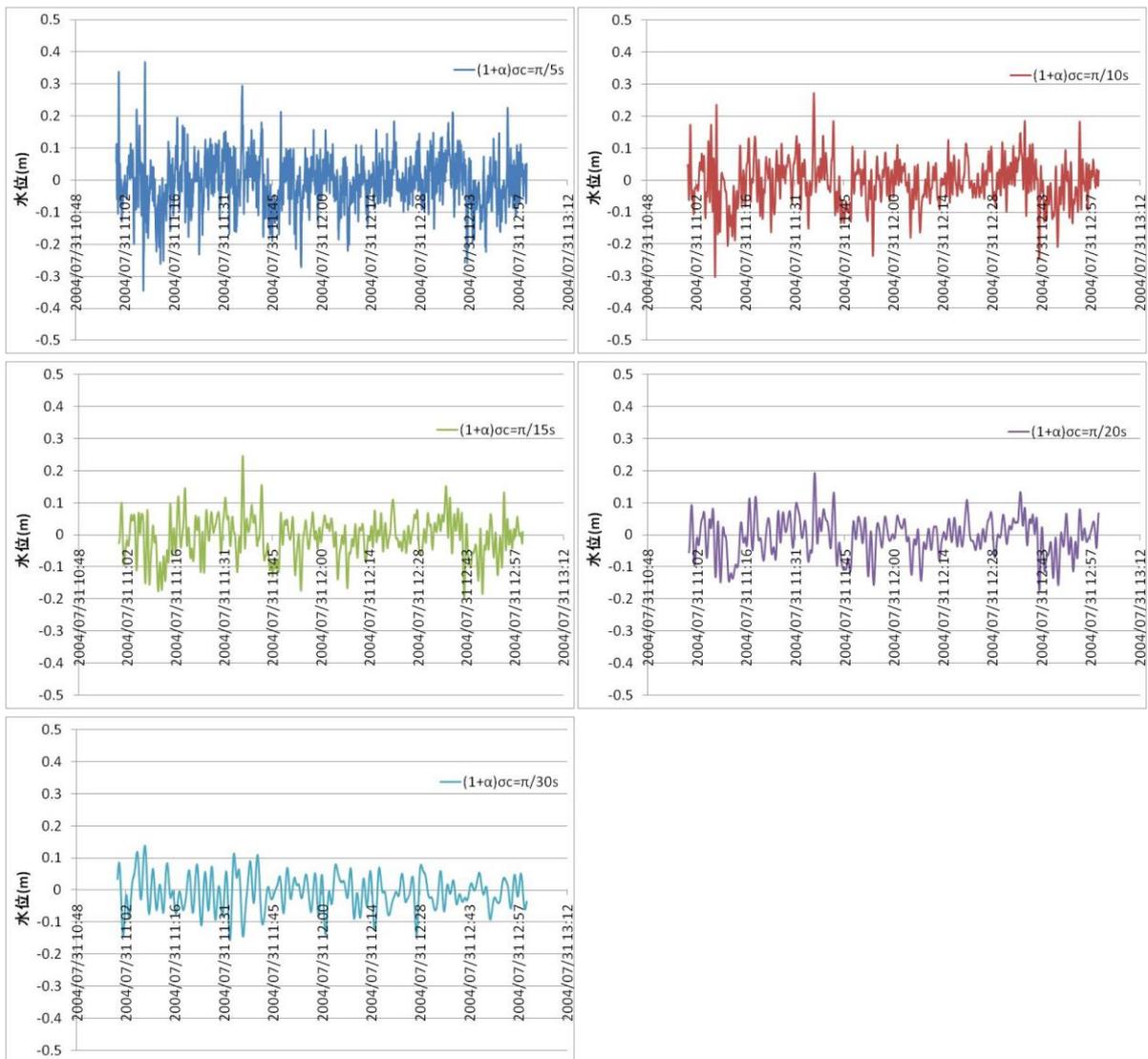


図 3.5-34 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$)

3.5.6 津波発生時（強風）

これまで津波がない場合におけるフィルターの結果を示してきた。図 3.5-35 に示すのが強風下における津波発生時における、実測データの図である。期間は 2004 年 9 月 6 日 0:00～2:00 である。また、観測した津波は、2004 年 9 月 5 日 23:57 に発生した東海道沖地震であり、室戸岬で 0.5m の津波を観測している。地震の概要は下記に示す。

震央：33.03'N , 136.80'E

深さ：44km

マグニチュード：7.4

3.5.5 同様、欠損値を記録していることから 3.5.2 の欠損値処理を行った。フィルター処理後の水位変動をより明確にするために、年間平均水位の 45m を差し引いた後、フィルター処理を行う。フィルター処理後の結果を図 3.5-36 から図 3.5-45 に示す。

その際に $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s, \pi/60s, \pi/90s, \pi/120s, \pi/150s$ 別に i から v に示し、 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$ におけるフィルター処理後の結果を示しており、全数値フィルターによるフィルター処理後の結果の比較、各数値フィルター処理後の結果の順に示す。各数値フィルターにおいて、その水位変動が大きいもので数十センチ程度、多くが十センチ程度に処理されており、フィルター処理によってある程度のノイズ除去されたことが分かる。この日は台風 18 号が接近中であるが、 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s$ を除き 0:32 ごろ津波の第一波が見受けられる。

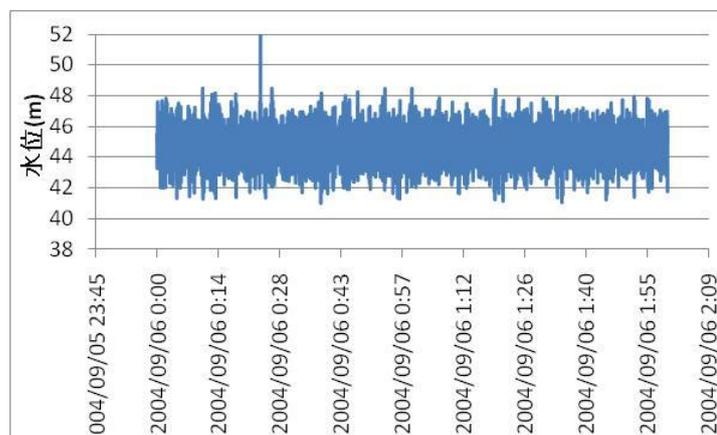


図 3.5-35 実測データ

i). $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

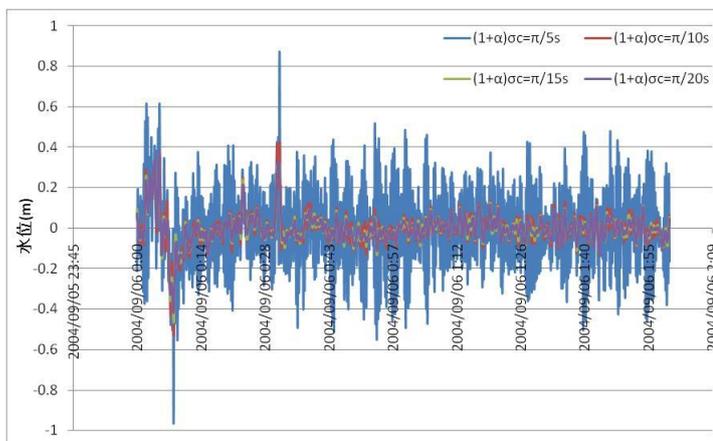


図 3.5-36 フィルター処理後のデータ

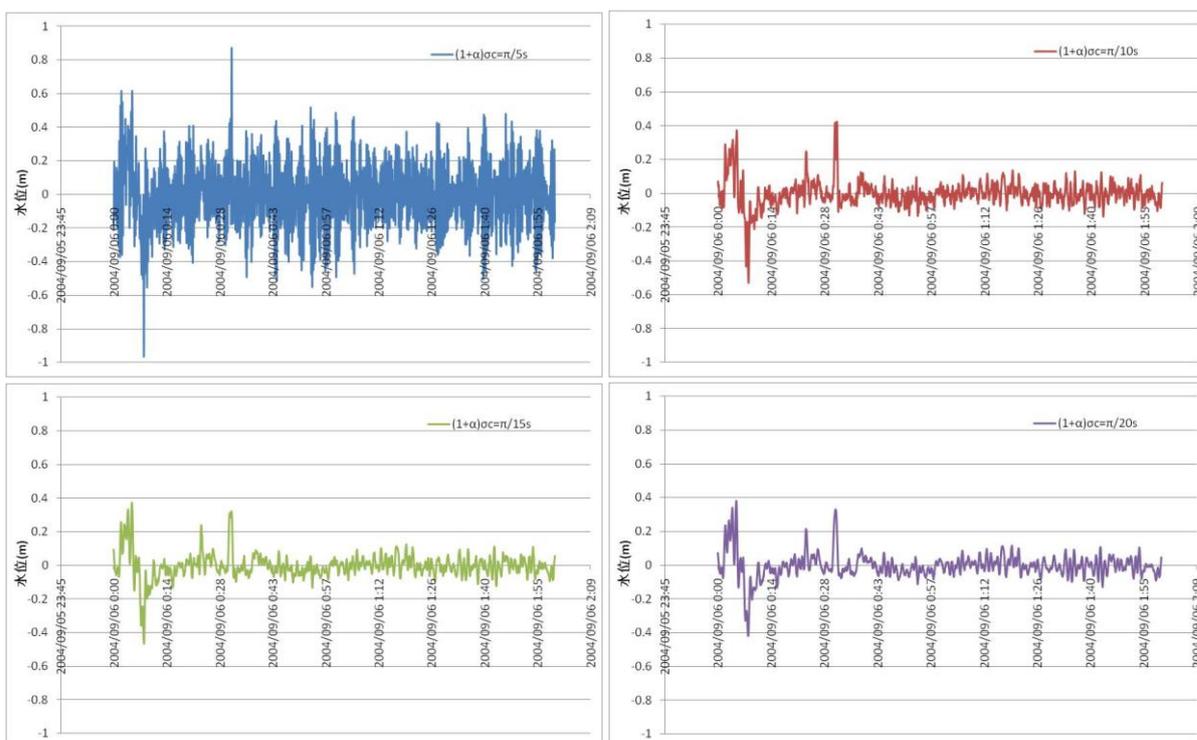


図 3.5-37 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s$)

ii). $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$

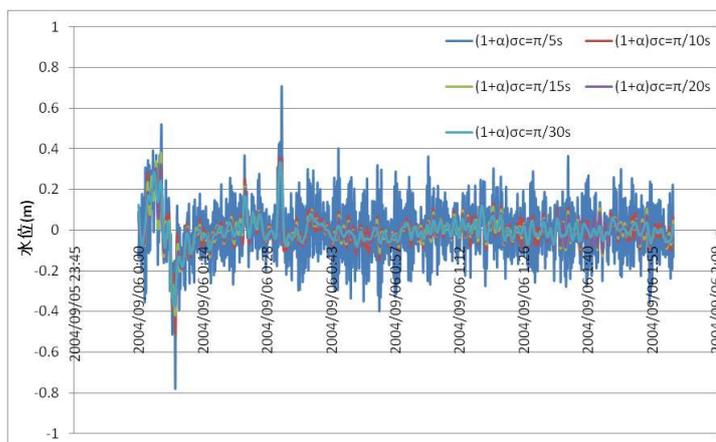


図 3.5-38 フィルター処理後のデータ

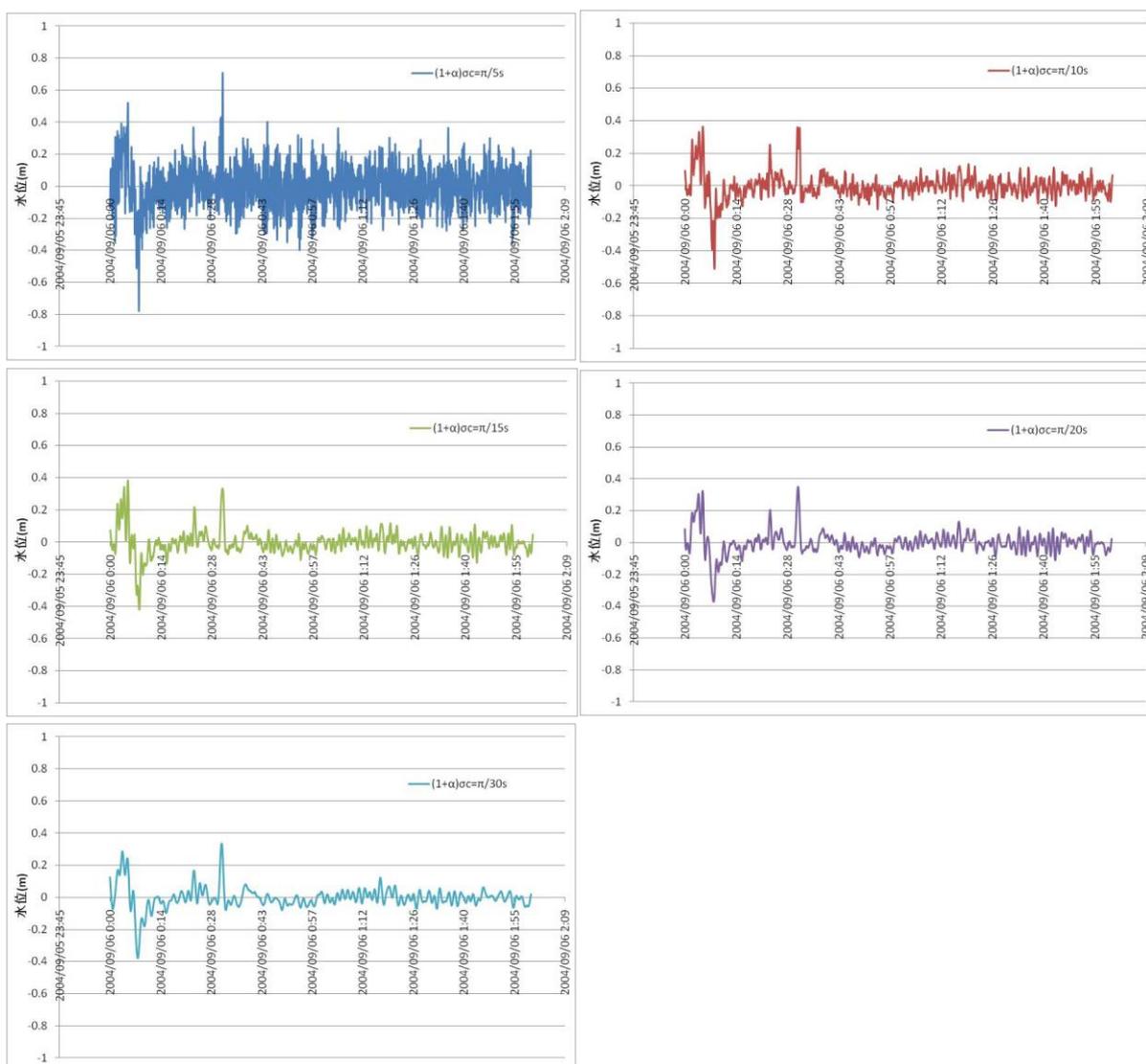


図 3.5-39 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$.)

iii). $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$

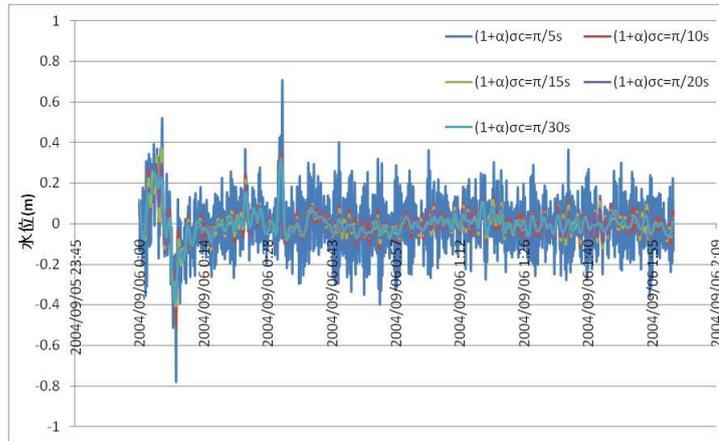


図 3.5-40 フィルター処理後のデータ

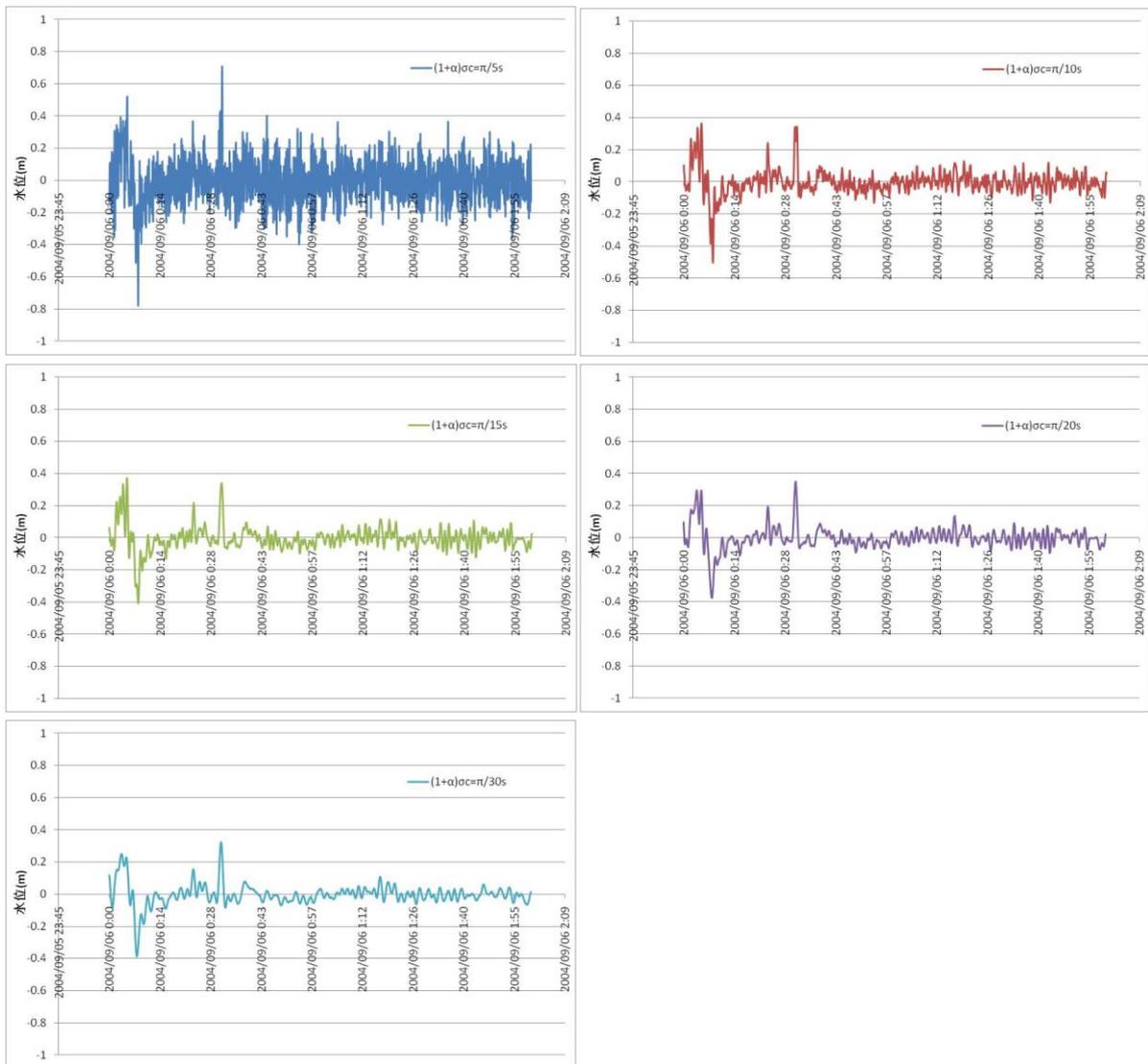


図 3.5-41 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$.)

iv). $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/120s$

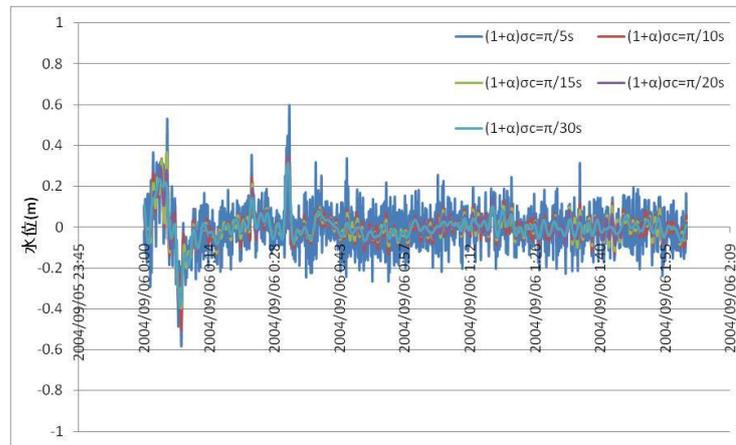


図 3.5-42 フィルター処理後のデータ

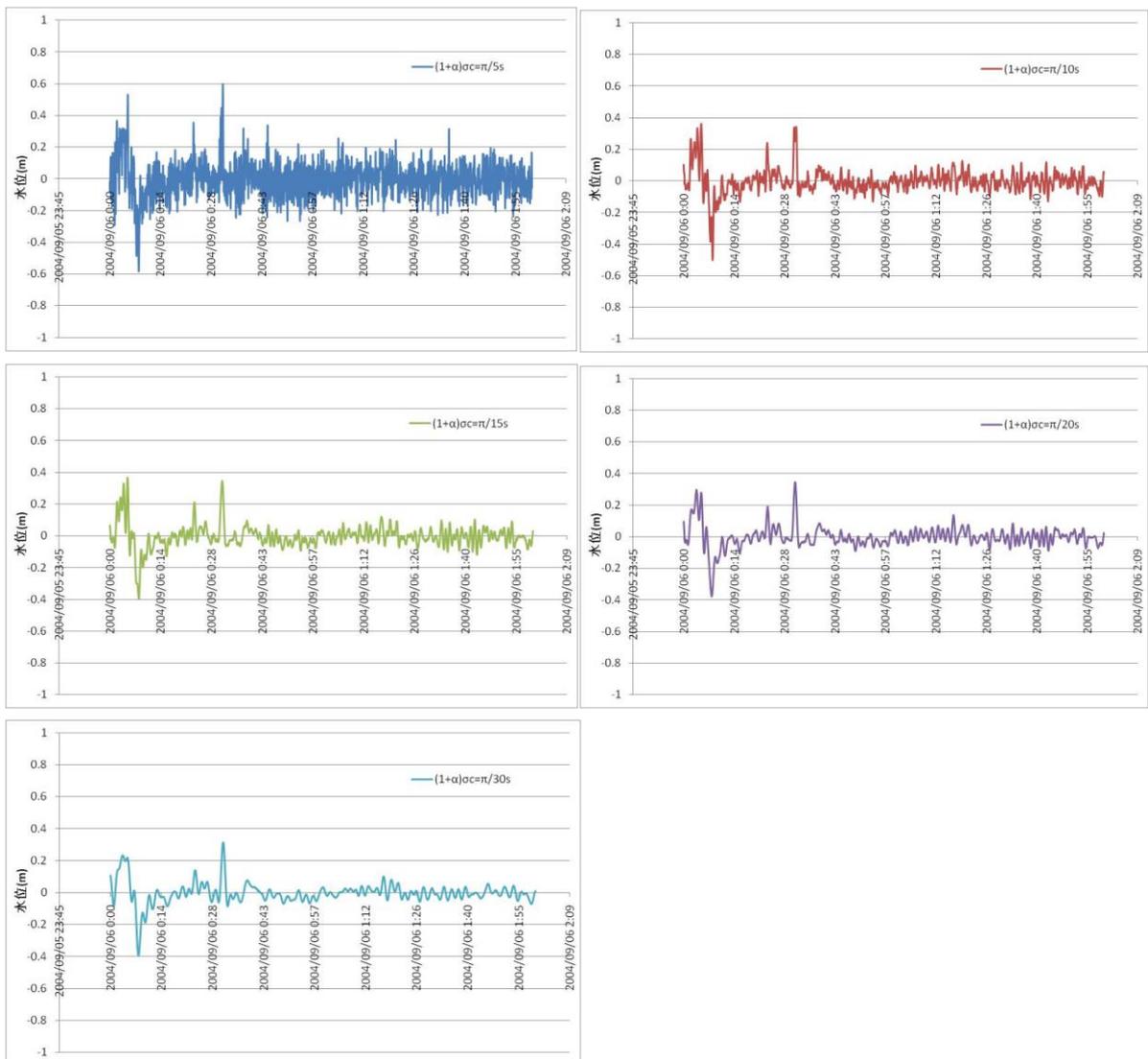


図 3.5-43 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$)

$$v) . (1-\alpha)\sigma_c = \pi/150s$$

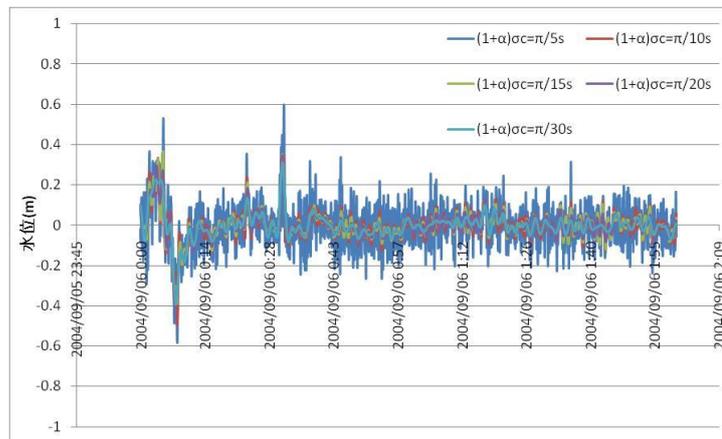


図 3.5-44 フィルター処理後のデータ

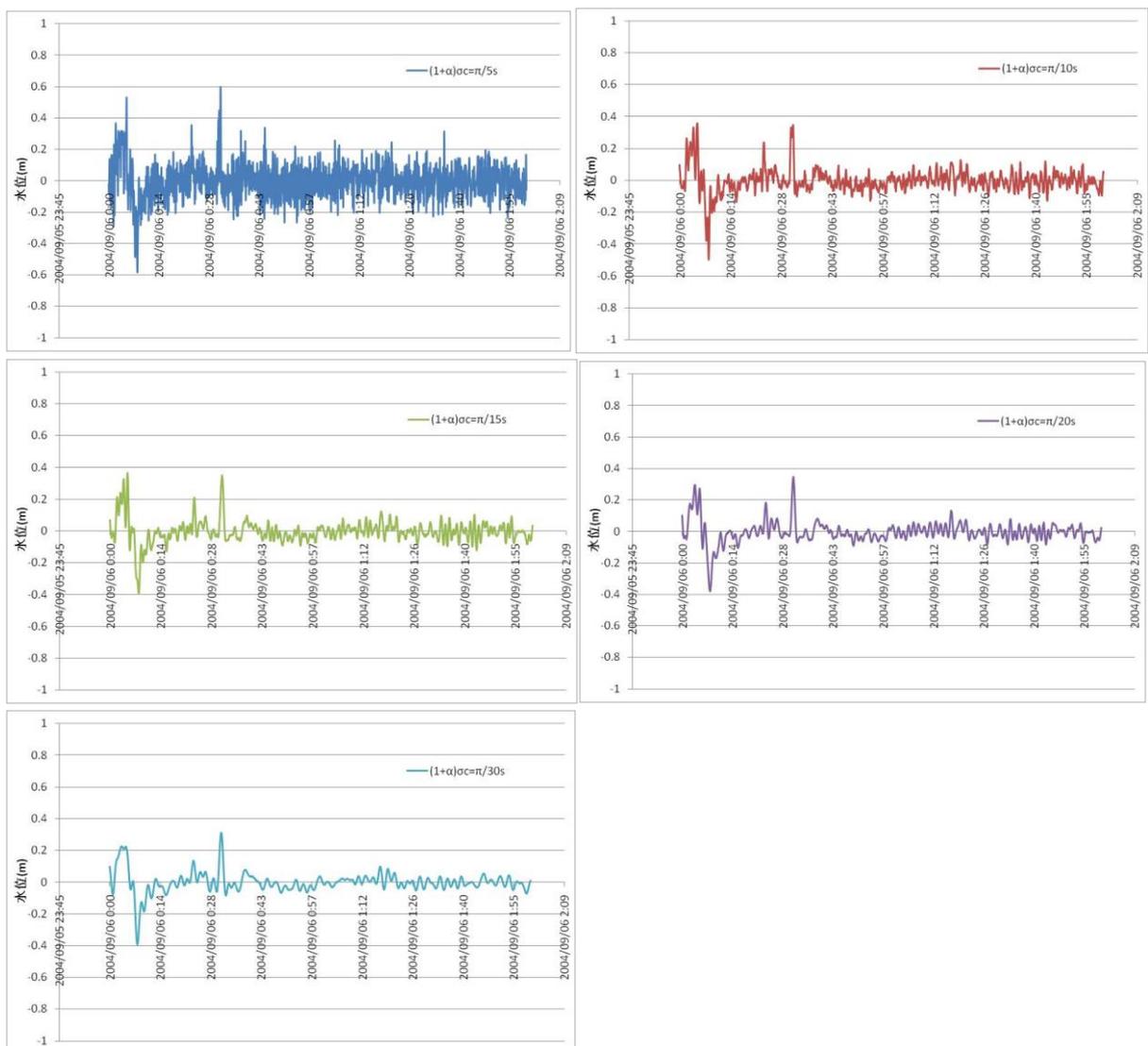


図 3.5-45 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$)

3.6 疑似データによる数値フィルターの検討

3.5 では、実測データにおけるフィルターの検討を行ってきた。しかし、実測データの場合、自然現象であるが故に津波とされる波が、本当に津波であるかを検証する必要であるが、非常に困難である。そこで、3.6 では数値シミュレーションによって疑似データを作成し、ある地震、津波が発生してない時の実測データと重ね合わせ、疑似データを作成する。そして、3.5 同様に数値フィルターを掛けて、疑似データを抽出することで、フィルターの精度を検証する。

また、3.6 以降で用いられる津波の数値シミュレーションは東北大学の今村文彦教授、越村俊一准教授によって作成され、越村氏のご厚意によって提供していただいたものを用いる。

3.6.1 計算条件

i). 計算手法の整理

南海トラフ付近の津波の波源域からの津波の伝播計算は、津波の解析で一般的な非線形長波方程式を基礎式として Leap-Flog 法を用いる。

非線形長波方程式の近似解法としては、差分法と有限要素法があるが、ここでは「津波災害予測マニュアル」（国土庁・消防庁・気象庁、平成 9 年 3 月、pp.53）に準じて差分法を用いるものとし、なかでも Leap-Flog 法を用いる。

ii). 基本的な計算条件の設定

ここでは、計算領域、計算格子間隔、その格子の配置、計算時間、計算時間間隔等の基本的な計算条件を設定する。Leap-Flog 法では、正方格子を用いて解析する。格子間隔は、南海トラフ近傍で発生する津波の伝播および津波の遡上現象を精度よく計算できるように設定する。基本的には、沖合から沿岸域に向かって格子間隔は細かくする。

ここでの格子間隔は、①1350m、②450m、③150m、④50m の組合せを基本とする。室戸岬沖周辺においては、対象領域内の津波の計算は 450m 格子を採用する。

iii). 計算データの作成

津波の予測シミュレーションを行うに際して必要となる以下のデータの作成を行う。データ作成の基本とする資料を以下に示す。

a)水深データ

- ・内閣府中央防災会議使用の水深データ（1350m、450m、150m メッシュ）
- ・大都市大震災軽減化特別プロジェクト作成の水深データ（50m メッシュ）

b)断層モデル

- ・兵庫県津波災害研究会「南海地震の津波被害想定結果（平成13年5月）」

3.6.2 疑似データと実測データを重ね合わせた波（微風）

3.6.2 では 3.6.1 の計算条件において、図 3.6-1、図 3.6-2 で示されている数値シミュレーションを行った。GPS 津波計における疑似データは、図 3.6-3 に示した通りである。t=0s において水位が 0.72m あるのは、対象とする地震の規模、断層が大きいこと、震源地が GPS 津波計から近いことから、地震発生直後に海面上昇をしているため、このような結果が得られた。

図 3.6-3 で得られた疑似データを 3.5.3 で用いられた、地震、津波が発生していない時、微風のデータに重ね合わせた(以下、疑似データの重ね合わせ波とする)。重ね合わせた疑似データを図 3.6-4 に示す。地震、津波が発生していない時、微風のデータに重ね合わせた理由として、3.5.4、3.5.5 で上述した通り、風が強い日は短周期成分の波が一定量で除去されるものの、ノイズとして多く表れ、数値フィルターを検討する上で適さないと判断したからである。

図 3.6-4 で示した疑似データをこれまで用いたフィルターを用いて、同様の処理を行った。これにより、数値シミュレーションで作成された疑似データのみを抽出する。期間は 2004 年 7 月 13 日 15:00~17:00 である。本データでは、欠損値がないことから欠損値処理を行わないものとする。フィルター処理後の水位変動をより明確にするために、年間平均水位の 45m を差し引いた後、フィルター処理を行う。フィルター処理後の結果を図 3.6-5 から図 3.6-13 に示す。

その際に、 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s, \pi/60s, \pi/90s, \pi/120s, \pi/150s$ 別に i から v に示し、 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$ におけるフィルター処理後の結果を示しており、全フィルターによるフィルター処理後の結果の比較、各フィルター処理後の結果の順に示す。

各フィルターにおいて、数値シミュレーションによって作成された疑似データと同様の波形を見受けることができる。しかし、 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/20s, \pi/30s$ では水位変動が他のフィル

ターに比べて過小評価されており、最大で数値シミュレーションで作成された疑似データに対して、0.5mの差が生じている。

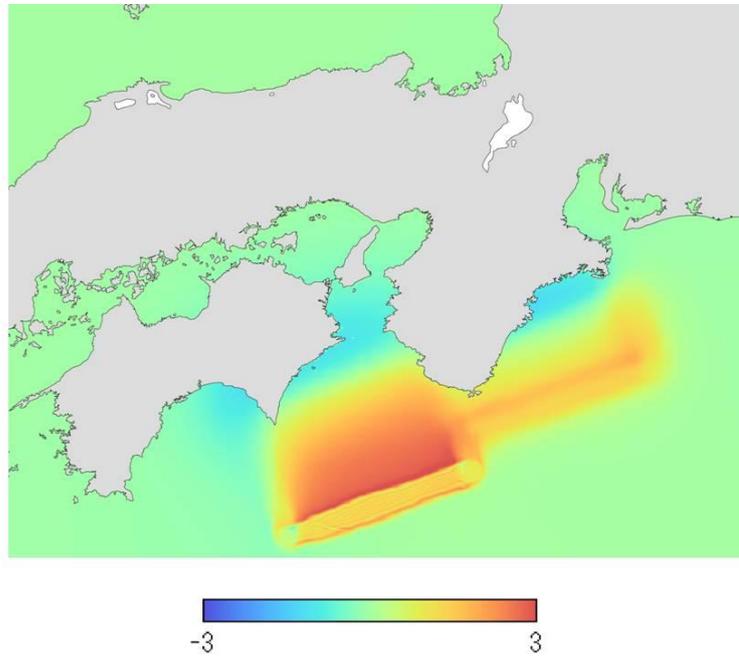


図 3.6-1 地震発生直後の津波高(m) (1350m メッシュ)

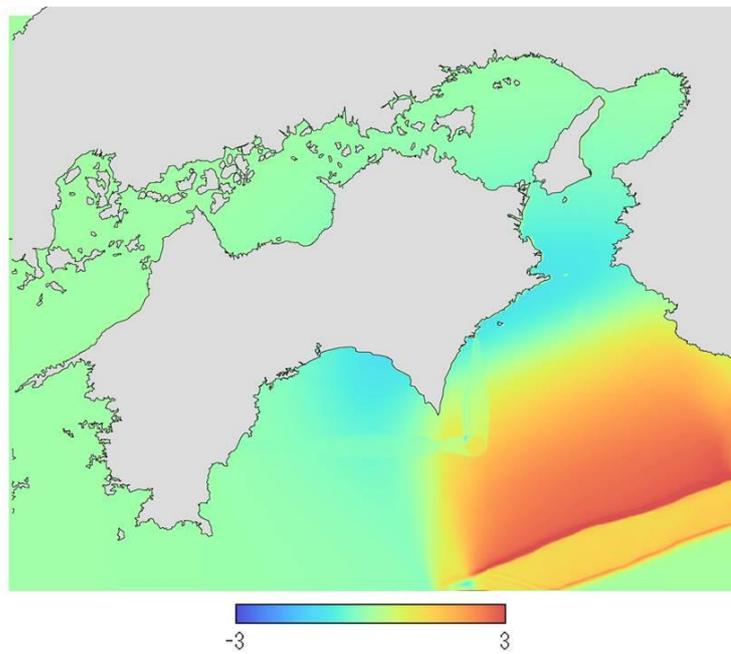


図 3.6-2 地震発生直後の津波高(m) (450m メッシュ)

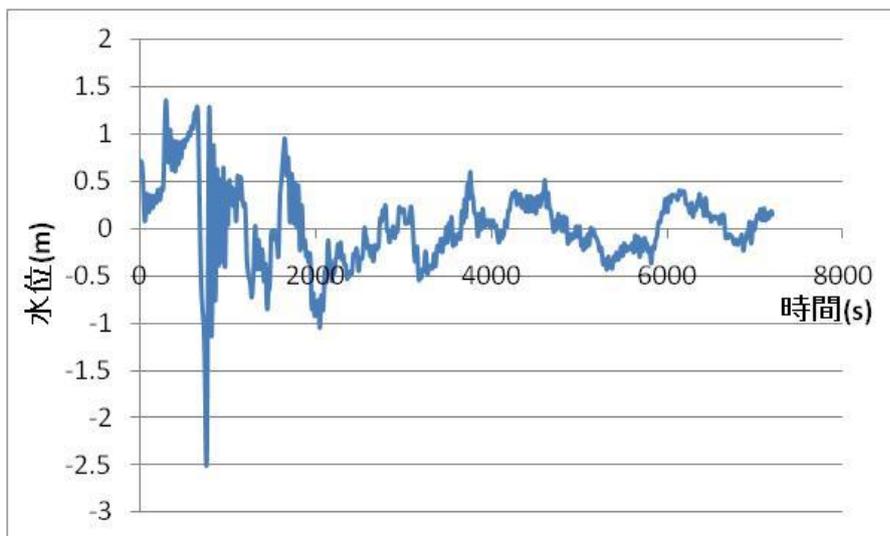


図 3.6-3 GPS 津波計の位置における疑似データ

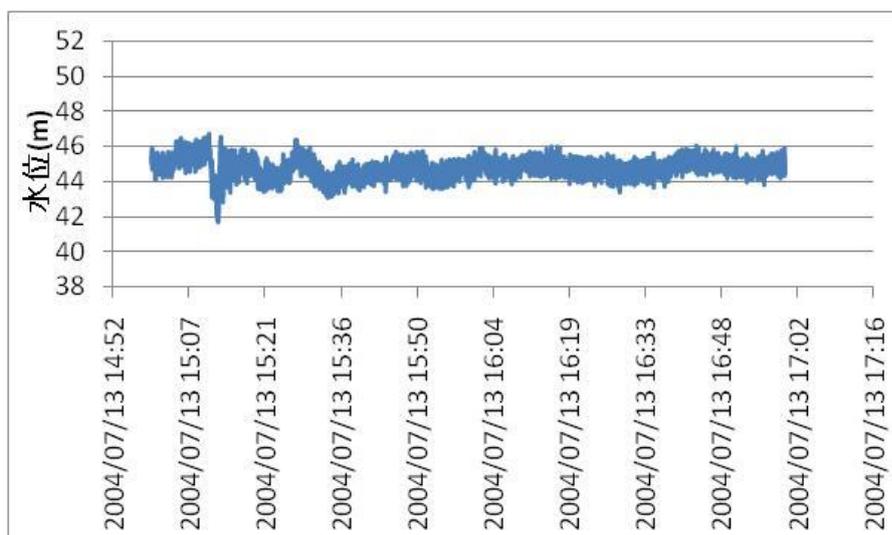


図 3.6-4 GPS 津波計の位置における
疑似データと微風(地震、津波が発生してない時)の重ね合わせ波

i). $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

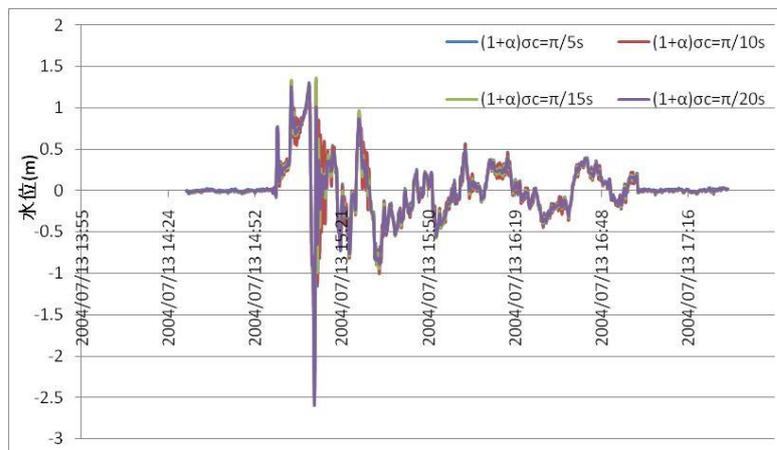


図 3.6-5 フィルター処理後のデータ

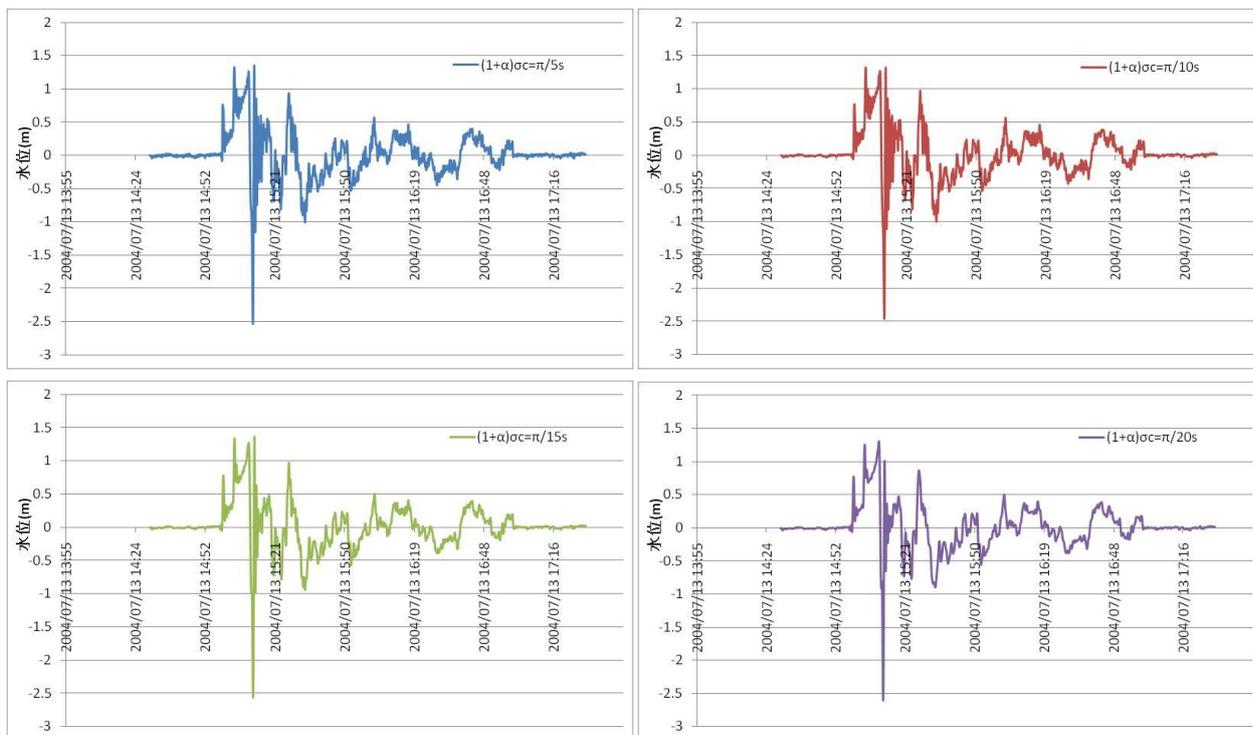


図 3.6-6 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s$)

ii). $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$

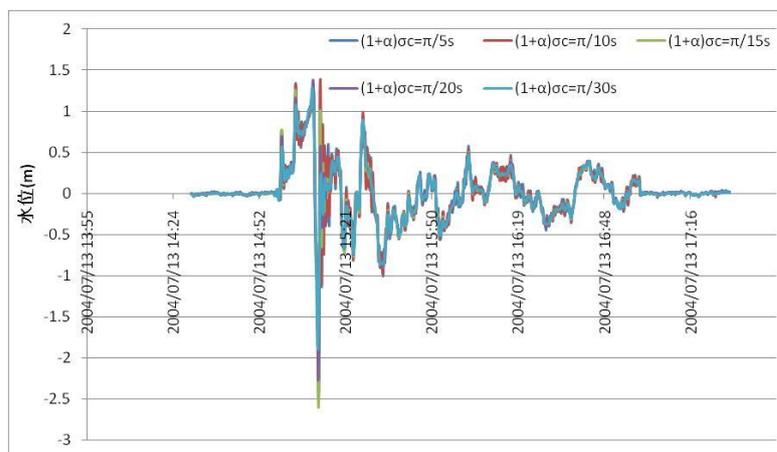


図 3.6-7 フィルター処理後のデータ

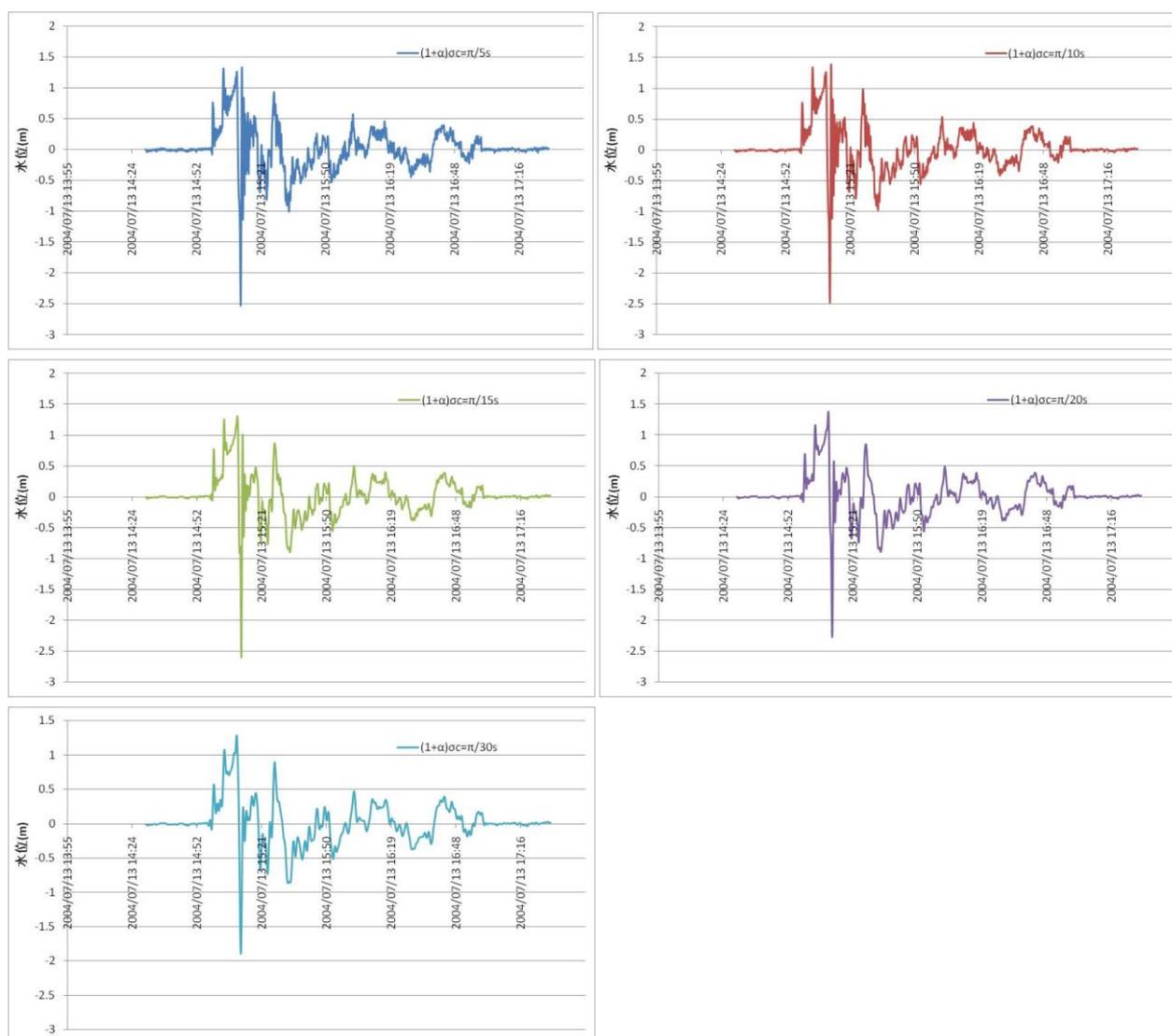


図 3.6-8 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$)

iii). $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$

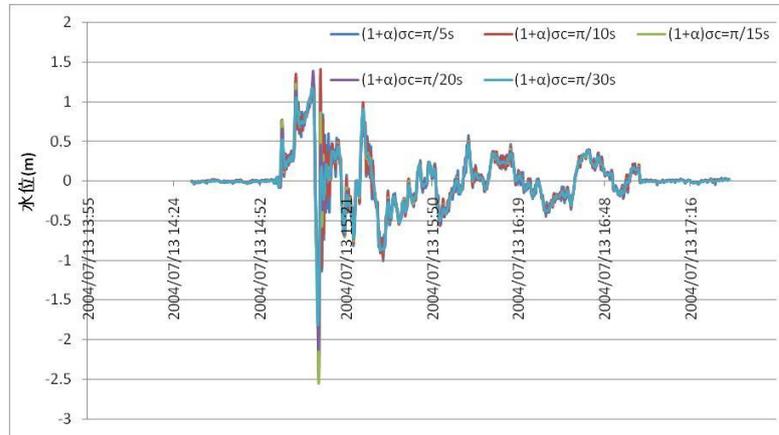


図 3.6-9 フィルター処理後のデータ

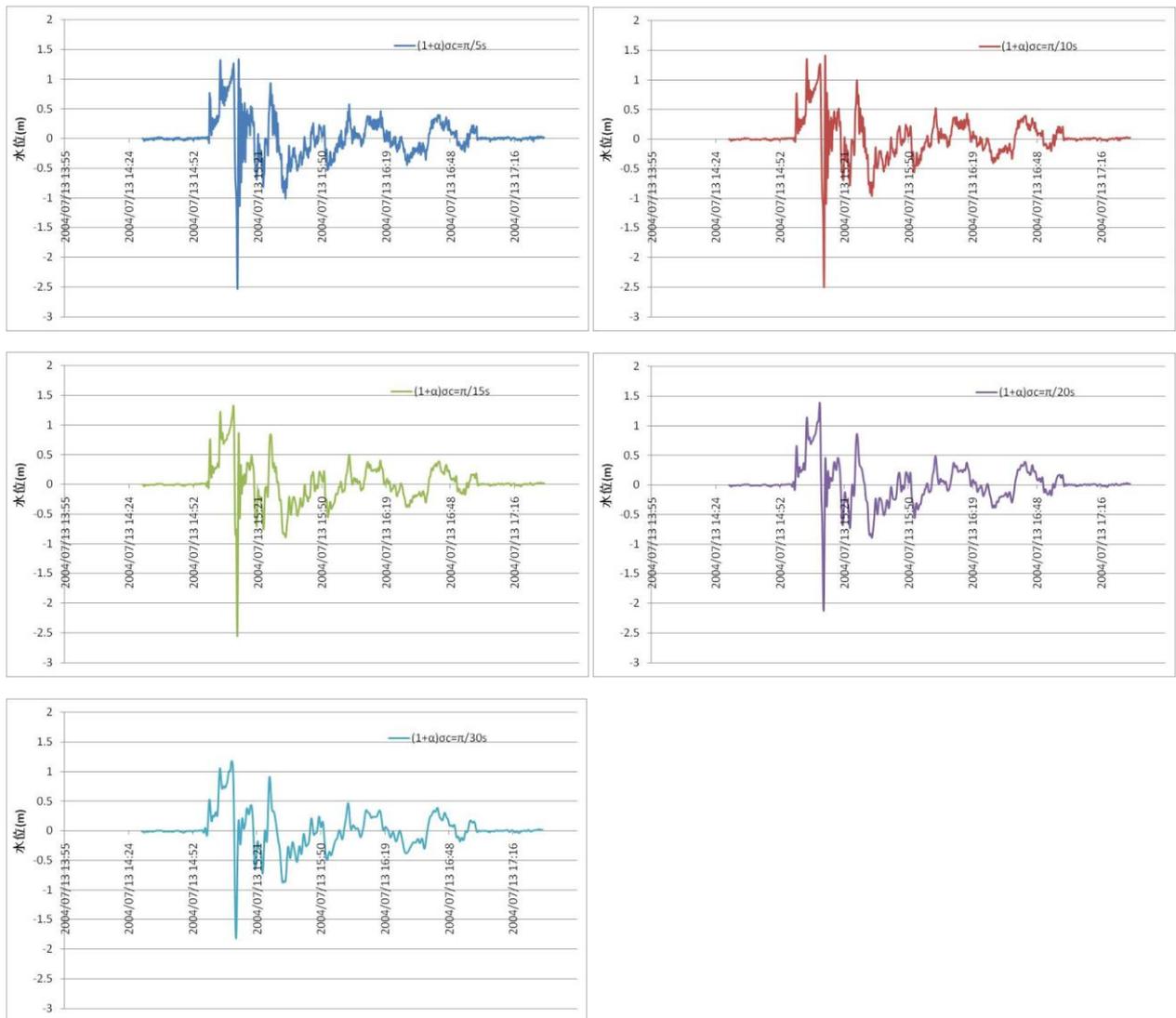


図 3.6-9 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$)

iv). $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/120s$

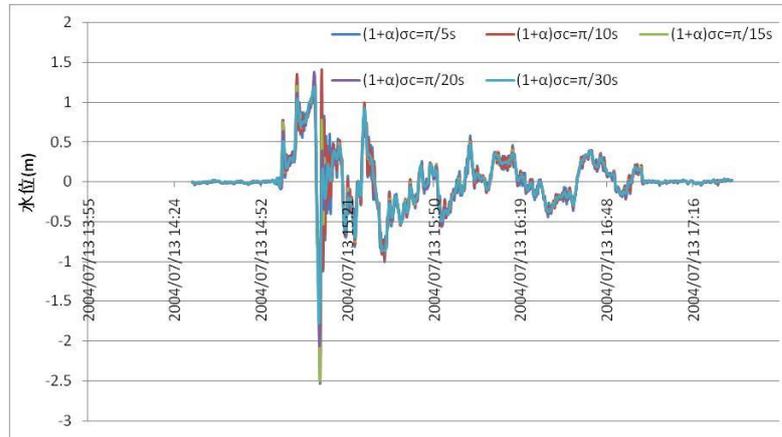


図 3.6-10 フィルター処理後のデータ

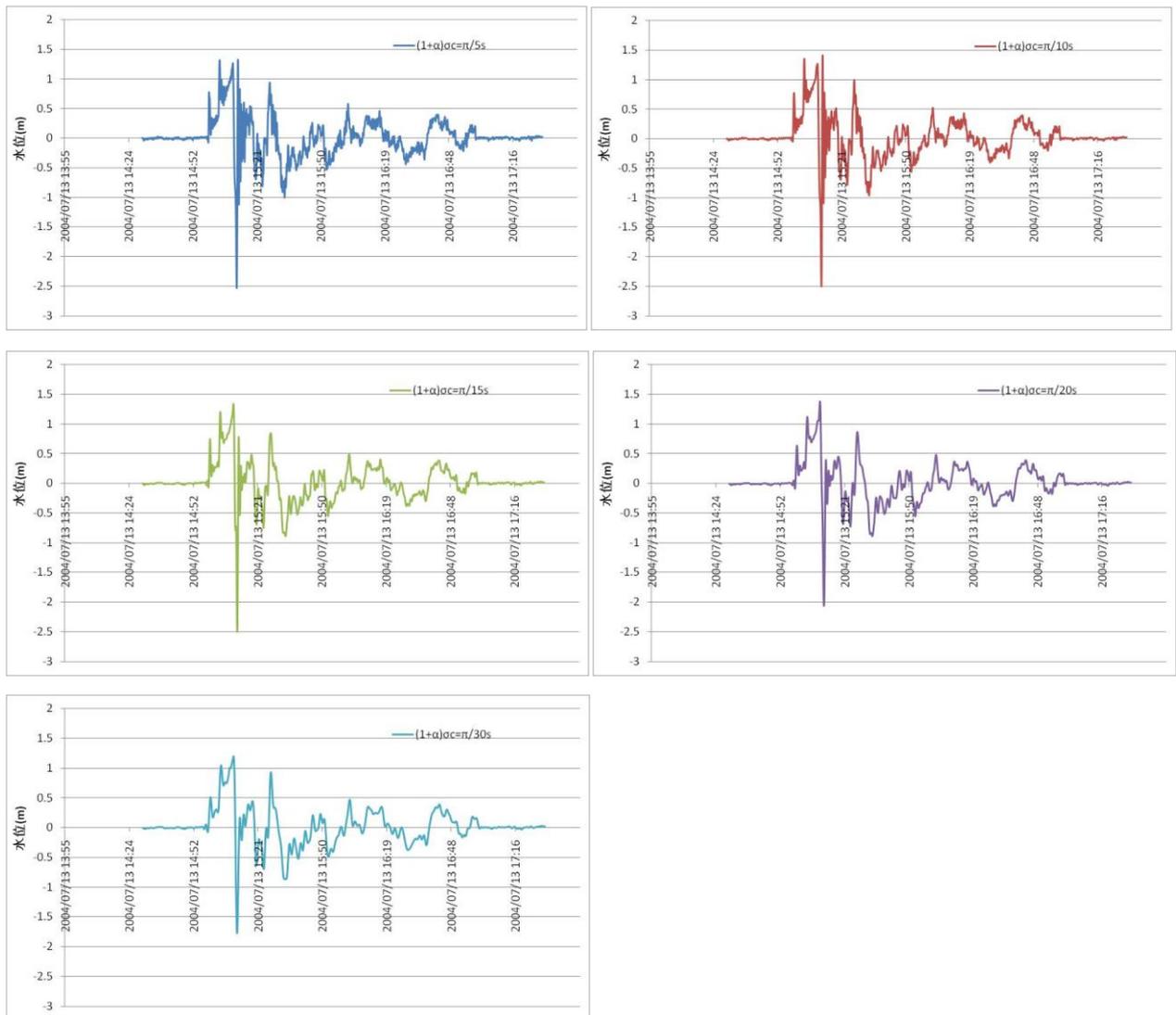


図 3.6-11 フィルター処理後のデータ

(上より $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$)

$$v). (1-\alpha)\sigma_c = \pi/150s$$

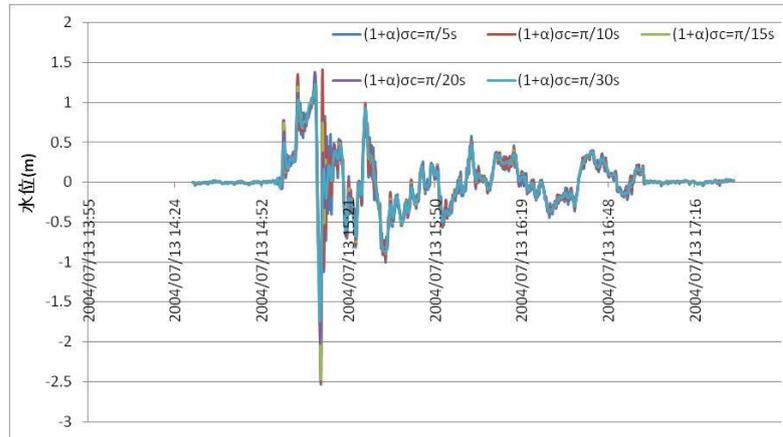


図 3.6-12 フィルター処理後のデータ

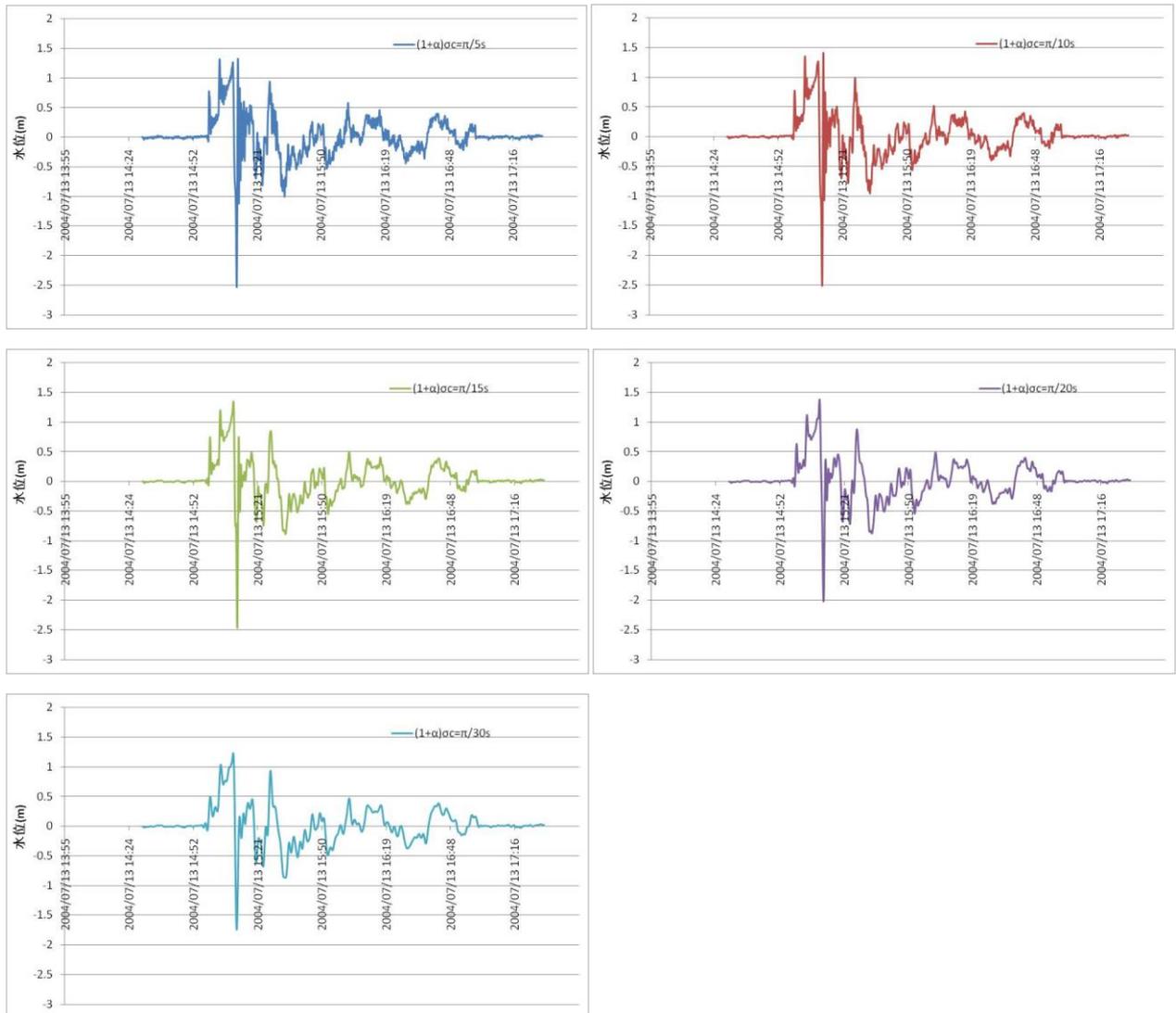


図 3.6-13 フィルター処理後のデータ

(上より $(+\alpha)\sigma_c = \pi/5s, \pi/10s, \pi/15s, \pi/20s, \pi/30s$)

3.6.3 フィルターの比較、評価

3.6.2 では、数値シミュレーションで作成された疑似データと実測データを重ね合わせて作成されたデータを用いて、数値フィルターによる処理を行い、結果を示した。

3.6.3 では、これらの結果を用いてフィルターの評価を行う。

本検討に用いる評価手法は、二乗平均誤差である。比較、検討する方法として、標準偏差で求めるのが一般的である。しかし、標準偏差で求めた場合、残差の散らばりを示すだけとなってしまい、評価していない。二乗平均誤差の場合、別の方法や異なる位置から計測し、その結果を踏まえて評価する。（本研究の場合、数値シミュレーションで作成された疑似データと数値フィルター処理によって求められたデータとの比較）そして、その差を評価する。二乗平均誤差の計算式は式 3.6.1 に示した通りである。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum(h_1 - f_0)^2}{n}} \quad (3.6.1)$$

ここで、

h_1 : 予測値（数値シミュレーションで作成された疑似データ）

f_0 : フィルター処理された値

表 3.6.1 に 3.6.2 で求められたデータと疑似データとの二乗平均誤差の結果を示す。グラフ上では、どのフィルターでも同じような結果が表示されていたものも、二乗平均誤差によって求められた誤差が 0.031m から 0.398m と数値フィルターによってその精度が大きく異なることがわかる。特に、 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$ の全フィルターではその値が大きい。これは、フィルター長が長くなったことにより、数値フィルターの処理後のデータが平滑化されてしまったと考えられる。

このことから、一概にフィルター長が長いものが精度が良いのではなく、条件に応じた数値フィルターが必要であると考えられる。

本研究では、GPS 津波計の GPS の精度が数センチ程度に併せ、二乗平均誤差の値が 0.1m 未満のものをフィルターとして選定した。

これらより、本研究では以下のフィルターは短周期成分を除去し、津波成分を抽出する最適なフィルターとして評価したものを、a から l に示す。

- a. $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s$, $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$
- b. $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s$, $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$
- c. $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s$, $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$
- d. $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/5s$, $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/120s$
- e. $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/10s$, $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$
- f. $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/10s$, $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$
- g. $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/10s$, $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$
- h. $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/15s$, $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$
- i. $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/15s$, $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$
- j. $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/15s$, $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$
- k. $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/20s$, $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$
- l. $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/20s$, $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$

表 3.6-1 二乗平均誤差による数値フィルターの精度の比較

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

3.7 第三章まとめ

この章では、現在 GPS 津波計で用いられている移動平均のフィルターとしての精度の低さから、新たに数値フィルターを設計し、GPS 津波計で観測された実測データと、数値シミュレーションで作成された疑似データと実測データを重ね合わせたデータによって、検証、評価を行った。

3.3 では任意に作成された規則波を重ね合わせた不規則波における、現在 GPS 津波計で用いられている移動平均によって求められる値と、理論上求められる値を比較し、移動平均のフィルターとしての精度の低さを示した。

3.4 では新たに数値フィルターの設計を行い、計算式を示した。また 3.3 同様、任意に作成された規則波を重ね合わせた不規則波における数値実験を行い、ある一定以上のフィルター長はフィルターとしての精度に影響しないことを示した。

3.5 では 3.4 で示された数値フィルターを用いて、GPS 津波計で観測された実測データを用いた検証を行った。風が微風、強い、猛烈と津波を実際に観測したデータを用いた。風が微風においては数値フィルターによって多くの短周期成分が除去できたことが分かった。風が強い、猛烈においては、短いフィルター長のフィルターにおいてノイズを多く検出しまっていることが分かった。また、津波を実際に観測した実測データにおいては、津波の第一波とされる時間に目視ではあるが津波をして見受けられることができた。

3.6 では数値シミュレーションで作成された疑似データと実測データの重ね合わせるデータを数値フィルターによる処理を行い、疑似データを抽出する作業を行った。その結果と、疑似データを二乗平均誤差によって評価を行い、十二種類の数値フィルターを適切なフィルターとして選定した。

4. 津波成分の抽出

本章ではこれまで行ってきた、短周期成分を除去し、特定の周期以上の成分のみを抽出する数値フィルターを用いて、津波成分のみを抽出するフィルターの検討、考察を行う。

4.1 では 3.6.3 で検討した数値フィルターをもとに、フィルター処理後に津波成分のみを抽出することができるか検討を行う。

4.2 では 3.6 では更なる早期検出、精度向上を目的として、GPS 津波計を複数用いた場合の津波成分の検出を検討する。

4.3 ではこれまでの検討を踏まえたうえで、本研究の津波予測への活用方法を論じる。

4.1 津波成分の抽出

3.6.3 で検討した数値フィルターをもとに、フィルター処理後に津波成分のみを抽出することができるか検討を行う。

沖合観測において、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、一刻を争う大規模災害では遅すぎる対応となってしまう。そこで本研究における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という基準を用いるものとする。概念図は図 4.1-1 に示した通りである。

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 から水位変化率を算出する。その水位変化率をもとに、実際の観測データと比較し、設定された水位変化率以上の値を津波と判定する。

短時間における津波の検出の際、津波の周期は未知である。沖から岸への伝播増幅特性を正確に推定することは困難であることから、津波の波高は水深の 1/4 乗に逆比例すると言う、グリーンの式に基づく断面的な変形を仮定する。ここで、津波波高が水深の半分を超えると砕波が生じると仮定した閾値を設けた。グリーンの式の概念図を図 4.1-3、計算式を式 4.1.1 に示す。

$$H_2 \cdot (h_2)^{1/4} = H_1 \cdot (h_1)^{1/4} = H_0 \cdot (h_0)^{1/4} \quad (4.1.1)$$

ここで、

H : 波高(m)

h : 水深(m)

次に検出の閾値の設定である。表 4.1-1 に今村・飯田の津波規模階級の表を示している。本検討では、人々に何らかの被害をもたらす津波波高 1m とした場合の津波成分を検出することにする。

図 4.1-3 のグリーンの式の概念図で示した通り、津波は観測される地点によって波高が異なり、到達波高と沖合で観測される波高は異なり、より沖合方向においては波高が小さくなる。本研究では、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。ここで、津波波高が水深の半分を超えると砕波が生ずると仮定した為、水深 2m で津波波高が 1m となる沖合での波高を求めた。津波波高が 1m となる時、GPS 津波計が設置されている水深約 100m 地点ではグリーンの式から 0.35m と算出され、この値を本検討の閾値とする。

上述したように、津波の波高や周期は地震の規模や地形条件によって異なることから、これらを予測することが困難である。また、波高を把握するためには、津波の 1/4 周期分の観測時間が必要であり、津波の周期が長くなるにつれ、必要となる観測時間が長くなる。波高、周期を把握してからの津波情報の提供では遅い。これは、今回用いる水位変化率でも同様のことが言え、 Δt を長時間に設定した場合の検出では意味を成さない。そこで、本検討では即時性を考慮し、 $\Delta t=60s$ における水位変化量を求めた。

しかし、津波の波高や周期は地震の規模や地形条件によって異なることから、これらを予測することが困難であり、波高と同様に周期を把握するためには 1/4 周期分の観測時間が必要となり、津波の周期が長くなるにつれ、必要となる観測時間が長くなる。よって、津波は周期が不明確であることから、 Δh をあらかじめ設定することが極めて困難である。本検討では、津波の周期を最短で周期 5 分、10 分、最長で周期 60 分と仮定し、それぞれの Δt における水位変化量がある程度になったら津波と判定するという基準により、津波成分を抽出することを試みた。

津波の卓越周期は 5 分以上であるが、気象研究所(1984)の報告書で、近地地震津波の場合に周期 3 分以下の成分も含まれるとされ、本研究では津波の卓越周期以下を捉えるべく、周期 5 分と仮定した。また清水ら(2006)の既往の津波観測の事例で、本研究で用いられる東海道沖地震では周期 8 分程度とされ、比較的小さい津波について検討する上で周期 10 分と仮定した。同様に十勝沖地震、スマトラ沖地震では周期 40 分から 60 分であったことから、比較的大きい津波について検討する上で周期 60 分と仮定した。なお、 Δh は上述し

たグリーンの式から算出したものであり、それぞれ 0.28m、0.12m、0.03m とした。

4.1.1 から 4.1.5 において、第三章で用いた実測データ、疑似データを重ね合わせたデータで検証を行い、示した。なお、津波と判定した際のデータの出力は、図 4.1-4 から図 4.1-63 で出力された結果が、棒グラフに見受けられるが、 $N=7200s$ と長時間のデータについて検証を行ったためであり、抽出された波形が短期間の場合、棒グラフに見えてしまう。実際には、図 4.1.2 に示したような波形を出力する。

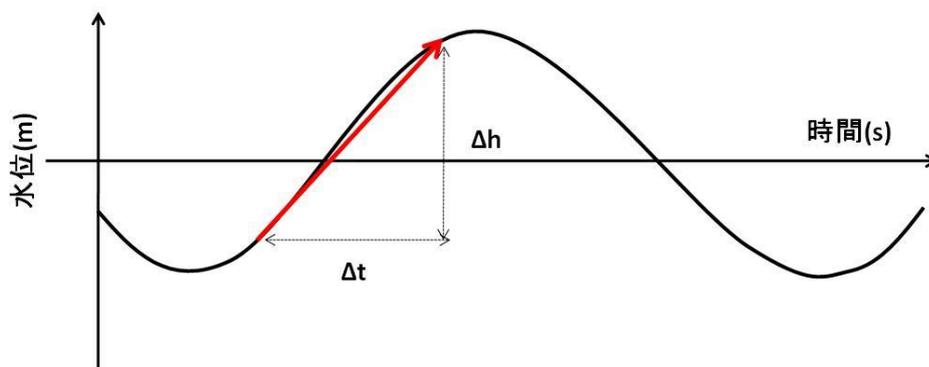


図 4.1-1 津波成分抽出の概念図

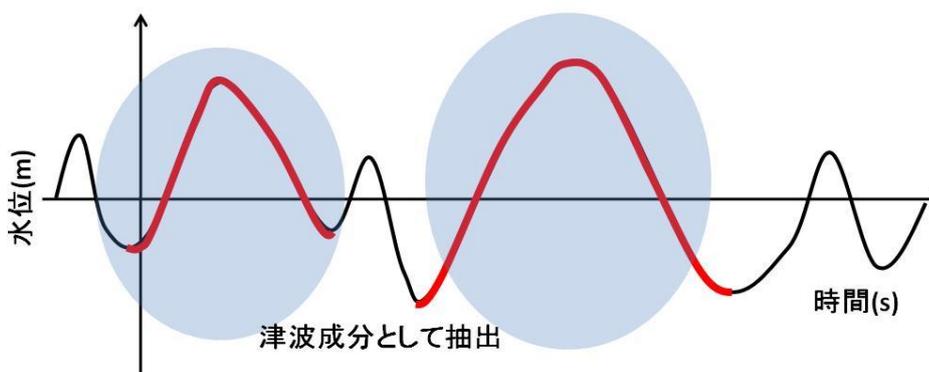


図 4.1-2 水位変化率を用いた津波成分の抽出

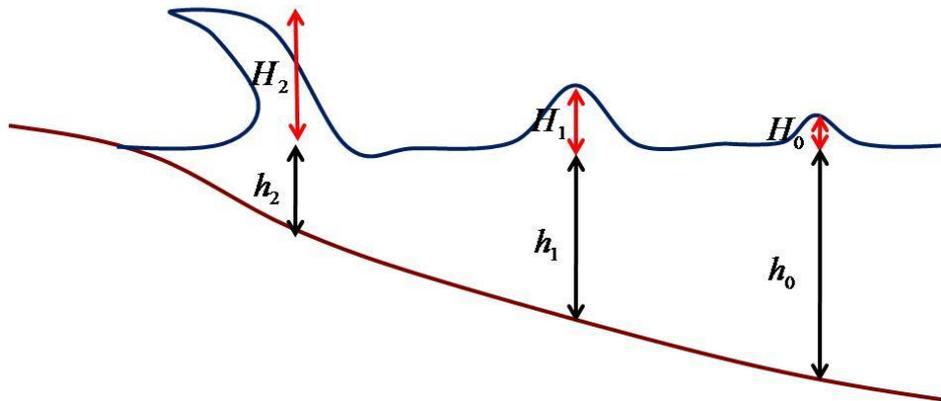


図 4.1-3 グリーンの式の概念図

表 4.1-1 今村・飯田の津波規模階級

規模階級(m)	津波の高さ(H)	被害程度
-1	0.5m以下	なし
0	1m程度	非常に僅かな被害
1	2m程度	海岸及び船の被害
2	4~6m程度	若干の内陸までの被害や人的損失
3	10~20m程度	400km以上の海岸線に顕著な被害
4	30m以上	500km以上の海岸線に顕著な被害

4.1.1 微風（地震、津波が発生してない時）

i から iii に周期 5 分、10 分、60 分における $\Delta t=60s$ での水位変化率によって抽出された波形を、3.6.3 で選定した数値フィルター別に結果を示している。津波は観測される地点によって波高が異なり、到達波高と沖合で観測される波高は異なり、より沖合においては波高が小さくなる。本研究では、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。閾値となる Δh の値はグリーンの式から算出したものであり、それぞれ 0.28m、0.12m、0.03m とした。なお本検討で用いられるデータ総数は、 $N=7200s$ とする。

地震、津波が発生してない時、風が微風の状態の結果を、周期 5 分を図 4.1-4 から図 4.1-7、周期 10 分を図 4.1.8 から図 4.1-11、周期 60 分を図 4.1-12 から図 4.1-15 に示した。なお、本検討で用いられたデータは図 3.5-3 の実測データであり、 $N=7200s$ である。

i と ii の周期 5 分と 10 分を仮定した際の $\Delta t=60s$ における水位変化率では、どの数値フ

フィルターを用いた場合にも、津波として検出することがなかった。これは、水位変化率に用いられた津波と判定するという閾値の値が数十センチであったことも要因ではあるが、数値フィルターにより一定以上の短周期波のノイズを除去できたことにより、このように誤判定をすることがなかったと考えられる。

しかし、iiiの周期 60 分を仮定した $\Delta t=60s$ における水位変化率では、フィルター長が短いものでは約 300 回の津波判定、フィルター長が長いものでも約 50 回程度の津波として判定をしている。これは閾値が i、ii と比べて圧倒的に低かったことによる影響が顕著に出ており、この津として波判定している回数が誤判定となることから、周期 60 分と仮定した $\Delta t=60s$ における水位変化率では津波判定として不適切であると考えられる。

i). 周期 5 分

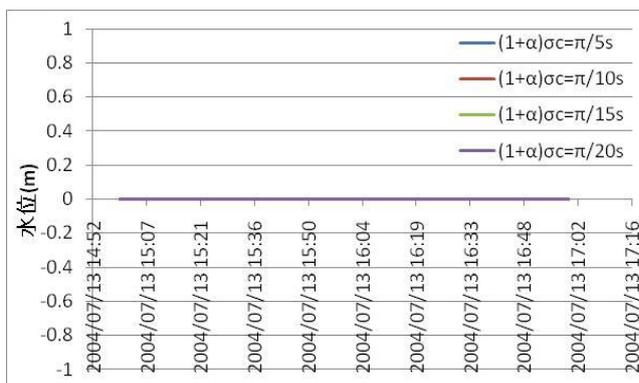


図 4.1-4 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

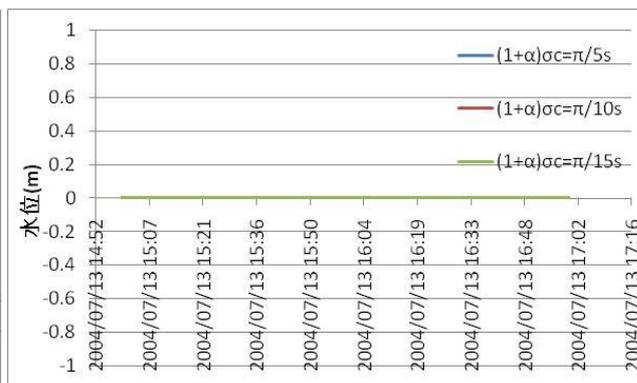


図 4.1-5 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$

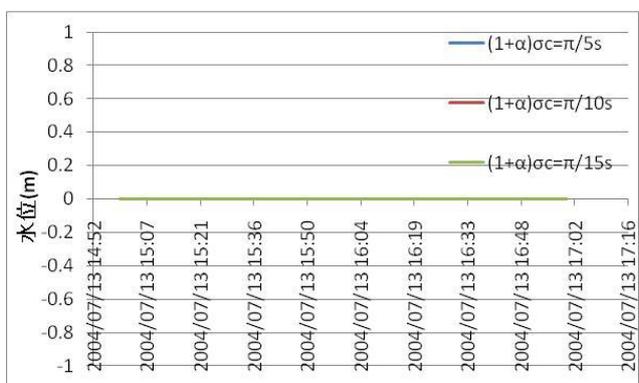


図 4.1-6 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$

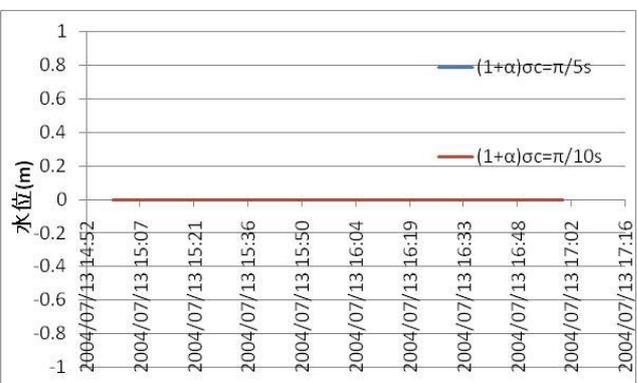


図 4.1-7 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/120s$

ii). 周期 10 分

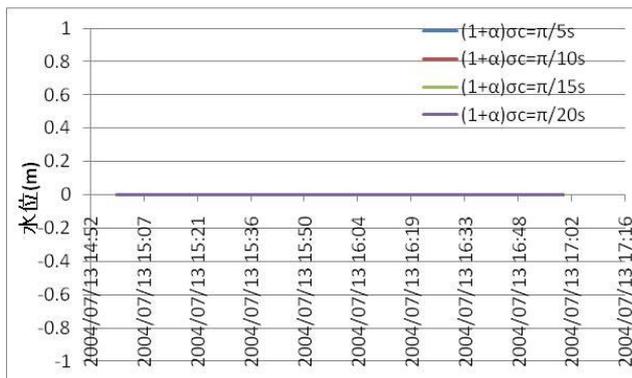


图 4.1-8 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

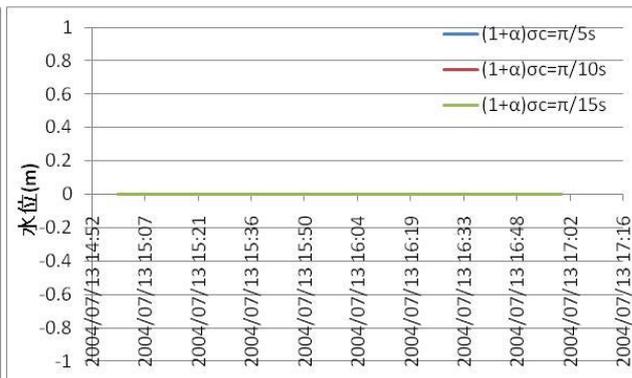


图 4.1-9 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$

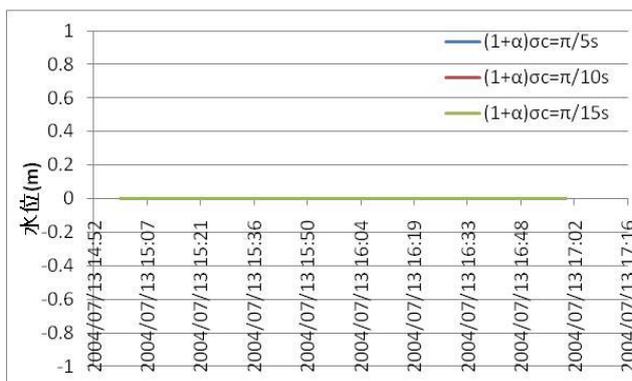


图 4.1-10 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$

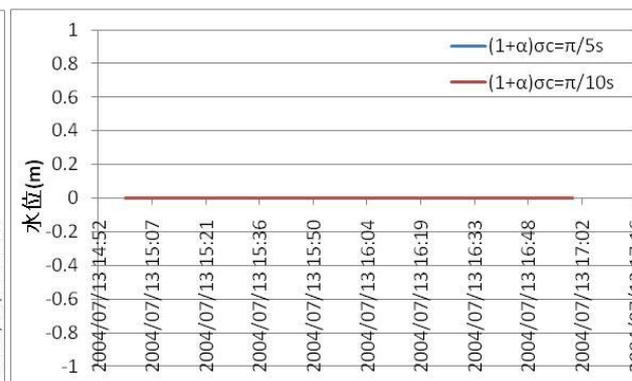


图 4.1-11 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/120s$

iii). 周期 60 分

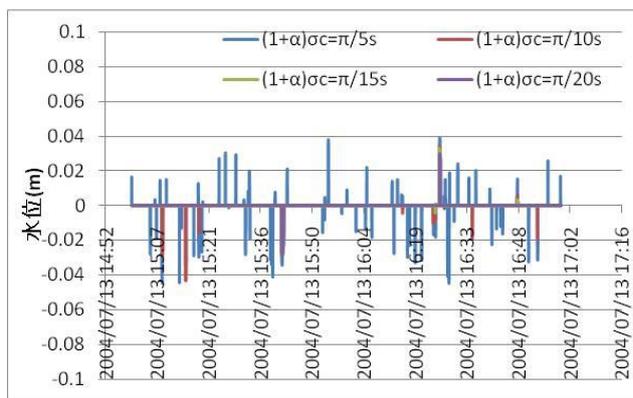


図 4.1-12 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

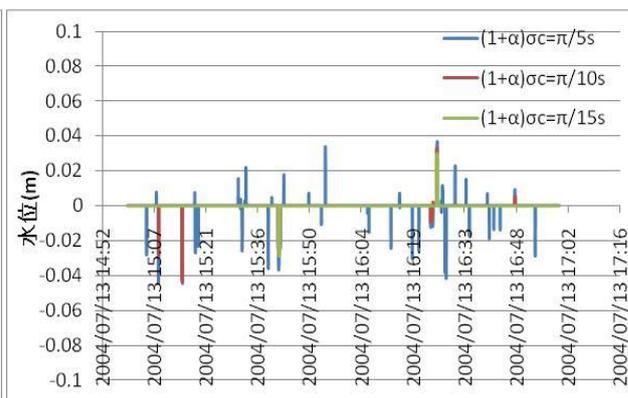


図 4.1-13 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$

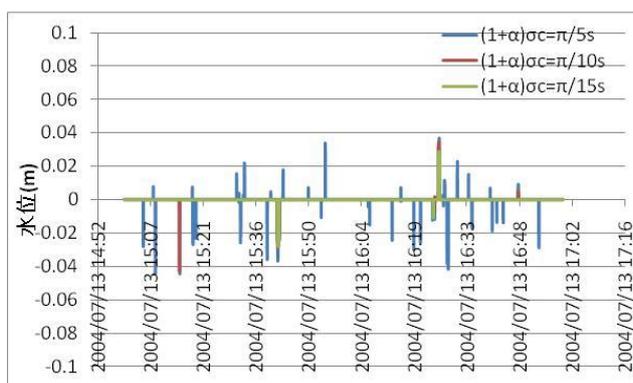


図 4.1-14 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$

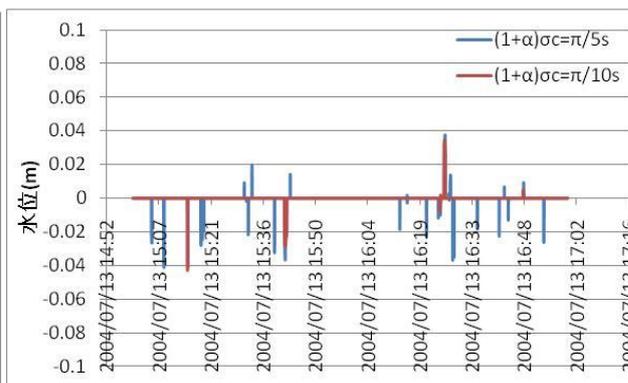


図 4.1-15 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/120s$

4.1.2 強風（地震、津波が発生してない時）

i から iii に周期 5 分、10 分、60 分における $\Delta t=60s$ での水位変化率によって抽出された波形を、3.6.3 で選定した数値フィルター別に結果を示している。津波は観測される地点によって波高が異なり、到達波高と沖合で観測される波高は異なり、より沖合においては波高が小さくなる。本研究では、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。閾値となる Δh の値はグリーンの式から算出したものであり、それぞれ 0.28m、0.12m、0.03m とした。なお本検討で用いられるデータ総数は、 $N=7200s$ とする。

地震、津波が発生してない時、風が微風の状態の結果を、周期 5 分を図 4.1-16 から図 4.1-19、周期 10 分を図 4.1-20 から図 4.1-23、周期 60 分を図 4.1-24 から図 4.1-27 に示し

た。本検討で用いられたデータは図 3.5-14 の実測データであり、 $N=7200s$ である。なお、この日は台風 10 号が接近していたことにより、観測データにおいて非常に大きな水位変動を示していた。

i の周期 5 分と仮定した際の $\Delta t=60s$ における水位変化率では、幾度となく津波と判定しているのが分かる。少ないもので 12 回、多いものでは 1300 回以上津波と判定している。特に、図 4.1-16 のようなフィルター長が短い数値フィルターによる処理を行った場合においては、津波と判定する確立が挙がっており、数値フィルターの精度が顕著に表れた結果であると考えられる。

ii と iii の周期 10 分と 60 分を仮定した時の $\Delta t=60s$ における水位変化率では、5 分周期と仮定した場合と比べ遥かに津波として判定している回数が多いことが分かる。少ないもので 1400 回程度、多いもので 6000 回、津波として判定してしまっている。これは第三章でも述べたが、強風時に発生した高潮を除去しきれていないことが原因であると考えられる。

i). 周期 5 分

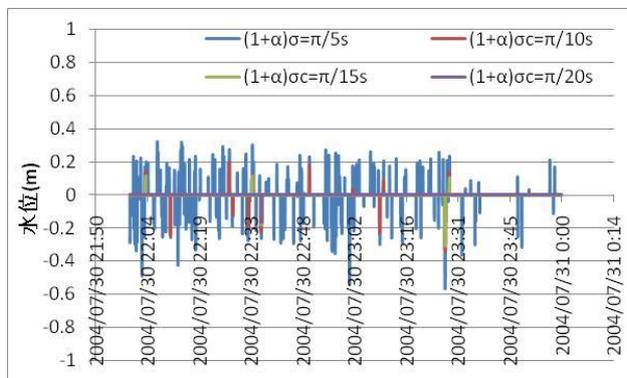


図 4.1-16 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

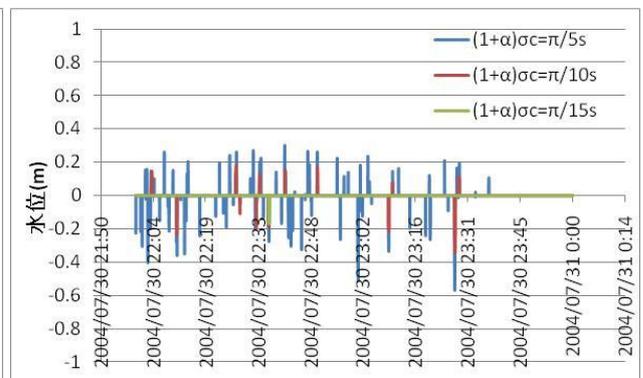


図 4.1-17 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$

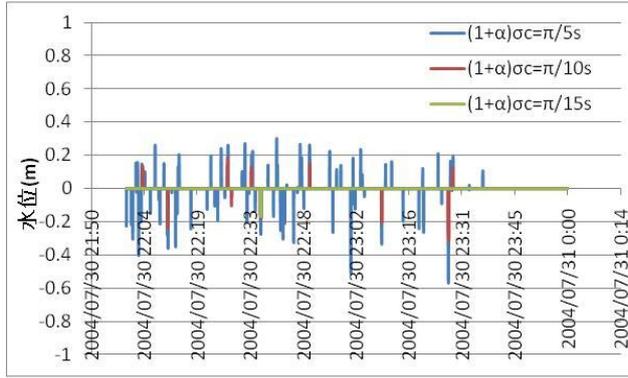


图 4.1-18 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$

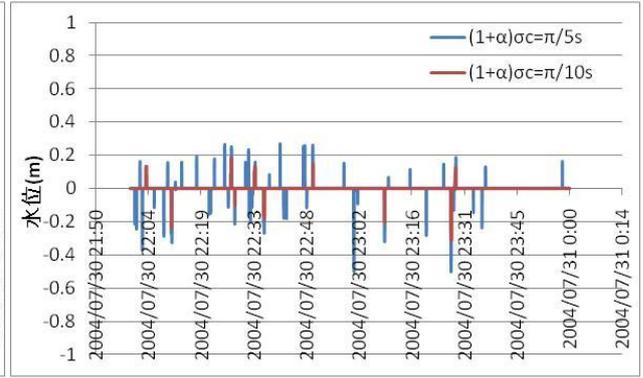


图 4.1-19 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/120s$

ii) 周期 10 分

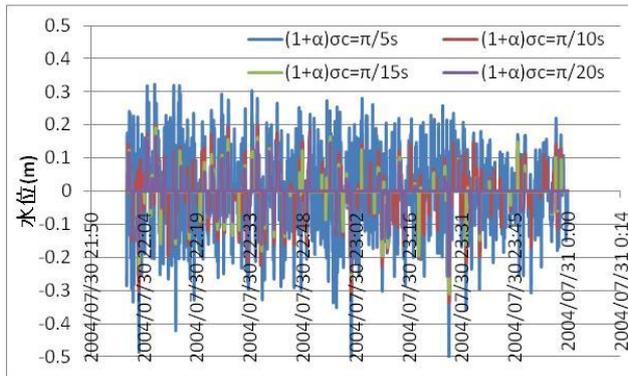


图 4.1-20 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

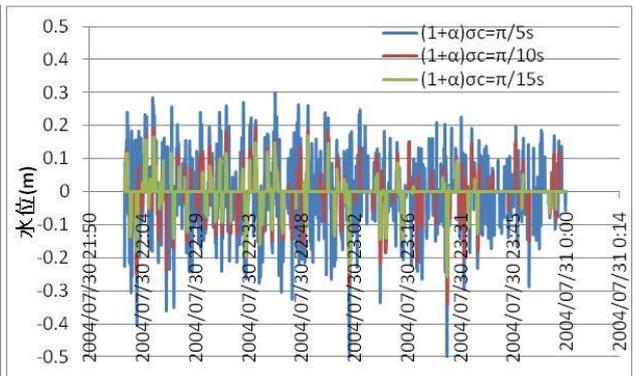


图 4.1-21 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$

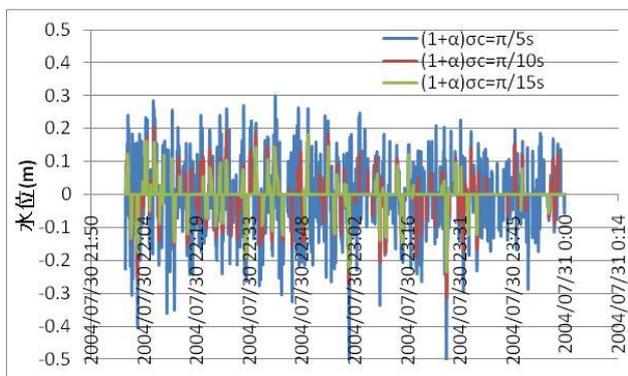


图 4.1-22 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$

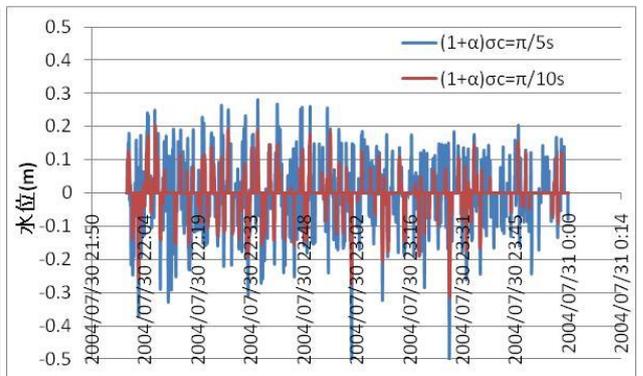


图 4.1-23 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/120s$

iii). 周期 60 分

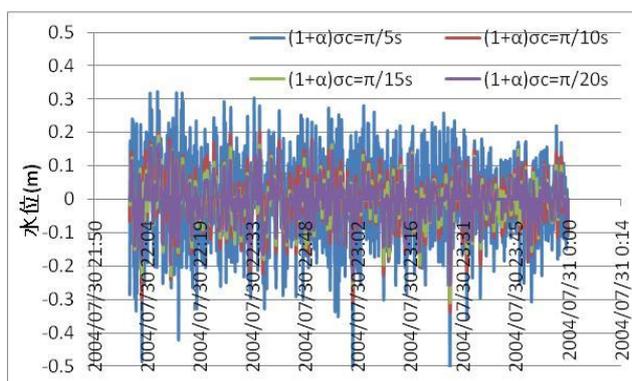


図 4.1-24 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

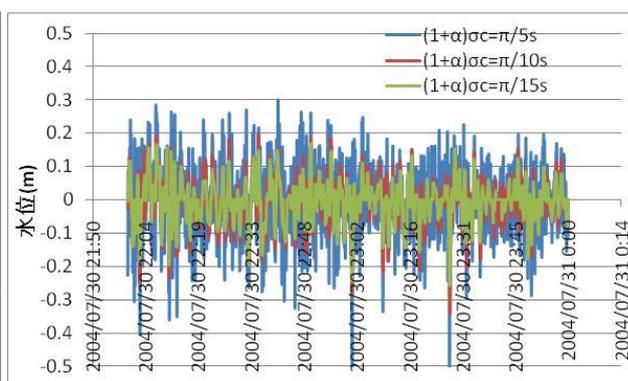


図 4.1-25 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$

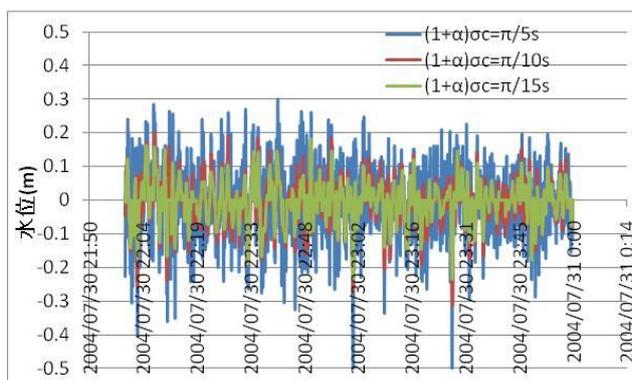


図 4.1-26 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$

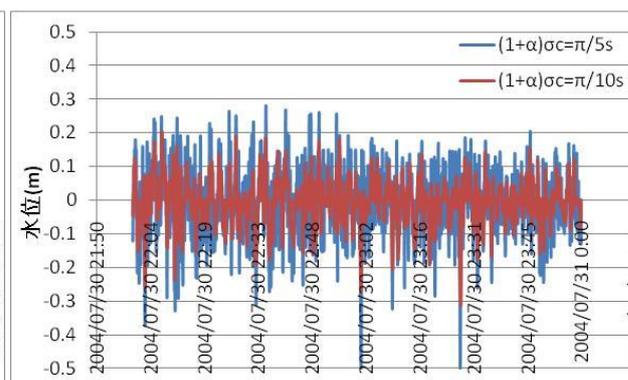


図 4.1-27 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/120s$

4.1.3 猛烈な風（地震、津波が発生していない時）

i から iii に周期 5 分、10 分、60 分における $\Delta t=60s$ での水位変化率によって抽出された波形を、3.6.3 で選定した数値フィルター別に結果を示している。津波は観測される地点によって波高が異なり、到達波高と沖合で観測される波高は異なり、より沖合においては波高が小さくなる。本研究では、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。閾値となる Δh の値はグリーンの式から算出したものであり、それぞれ 0.28m、0.12m、0.03m とした。なお本検討で用いられるデータ総数は、 $N=7200s$ とする。

地震、津波が発生していない時、風が微風の状態の結果を、周期 5 分を図 4.1-28 から図 4.1-31、周期 10 分を図 4.1-32 から図 4.1-35、周期 60 分を図 4.1-36 から図 4.1-39 に示した。本検討で用いられたデータは図 3.5-24 の実測データであり、 $N=7200s$ である。なお、この日は台風 10 号が付近を通過していたことにより、観測データにおいて 4.1.2 同様に非常に高い水位変動を示していた。

強風時同様に i の周期 5 分と仮定した際の $\Delta t=60s$ における水位変化率では、幾度となく津波と判定しているのが分かる。少ないもので 12 回、多いものでは 1300 回以上津波と判定している。特に、図 4.1-16 のようなフィルター長が短い数値フィルターによる処理を行った場合においては、津波と判定する確立が挙がっており、数値フィルターの精度が顕著に表れた結果であると考えられる。

ii と iii の周期 10 分と 60 分を仮定した時の $\Delta t=60s$ における水位変化率では、5 分周期と仮定した場合と比べ遥かに津波として判定している回数が多いことが分かる。少ないもので 1400 回程度、多いもので 6000 回も津波として判定してしまっている。これは第三章でも述べたが、強風時に発生した高潮を除去しきれていないことが原因であると考えられる。

i) 周期 5 分

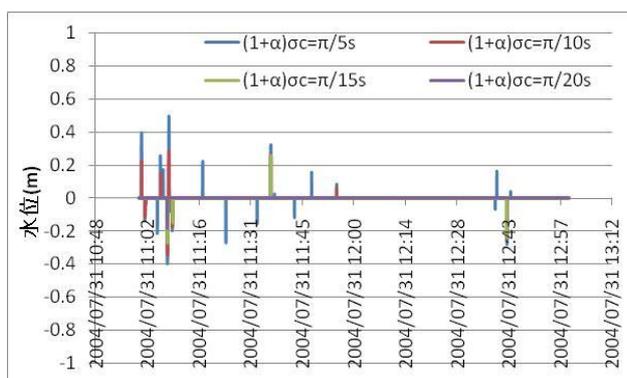


図 4.1-28 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

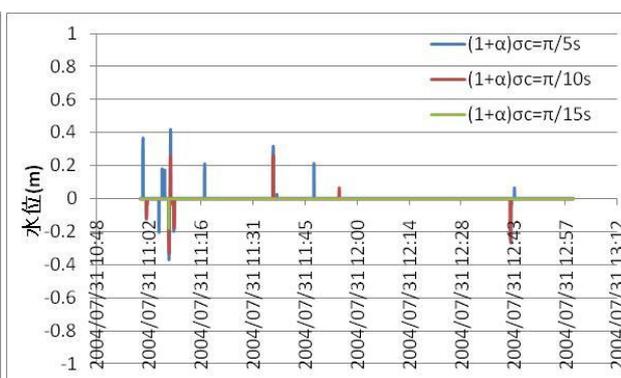


図 4.1-29 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$

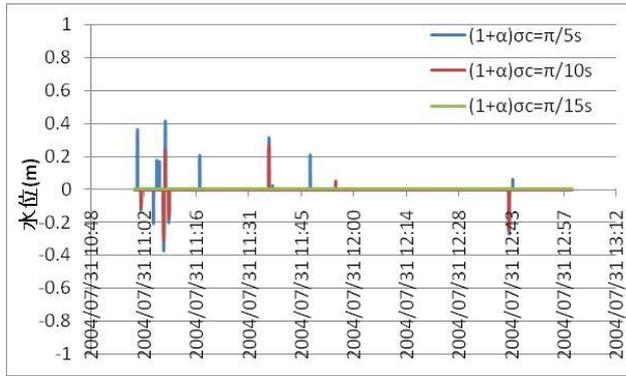


图 4.1-30 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$

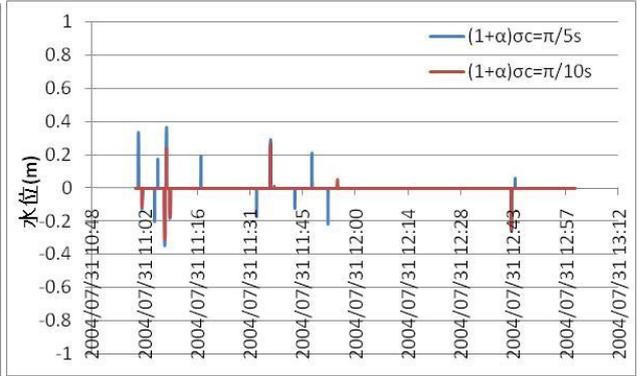


图 4.1-31 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/120s$

ii) 周期 10 分

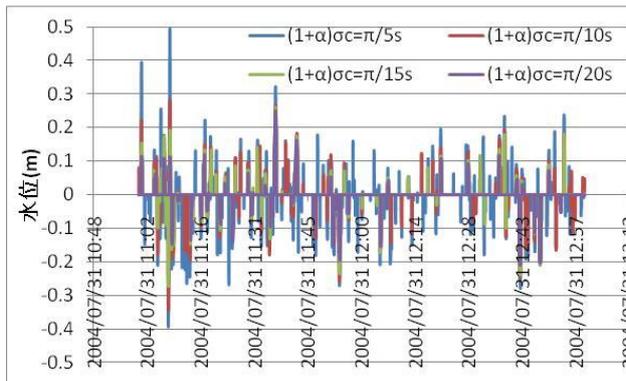


图 4.1-32 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

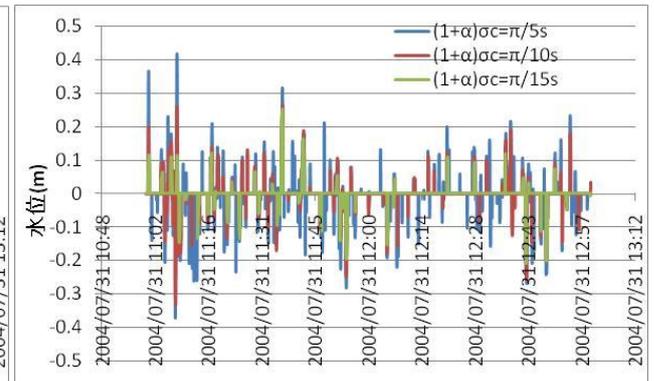


图 4.1-33 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$

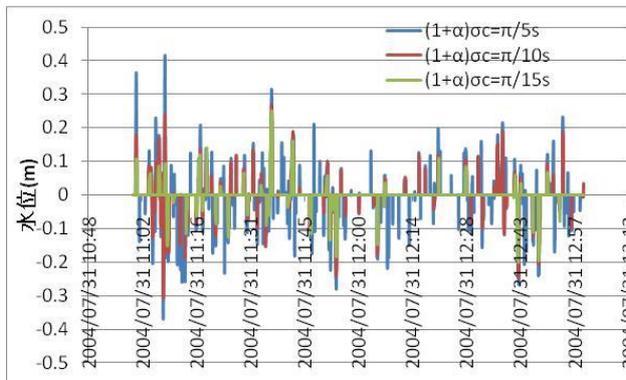


图 4.1-34 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$

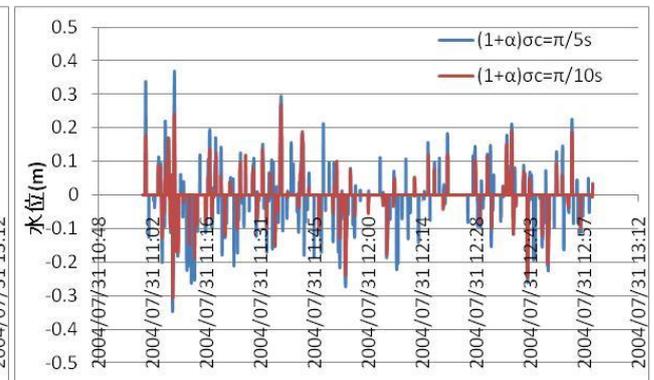


图 4.1-35 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/120s$

iii). 周期 60 分

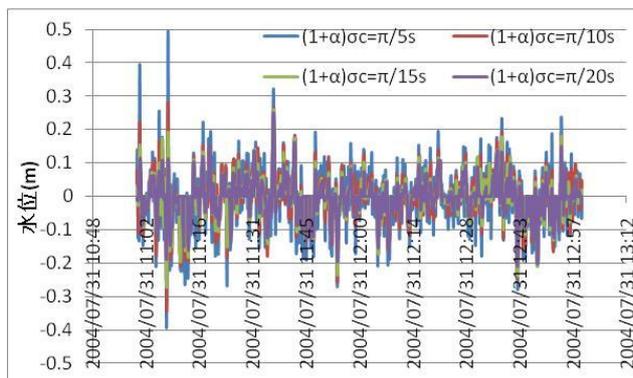


図 4.1-36 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

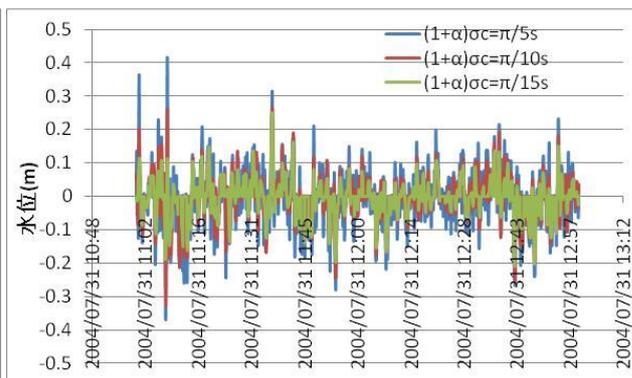


図 4.1-37 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$

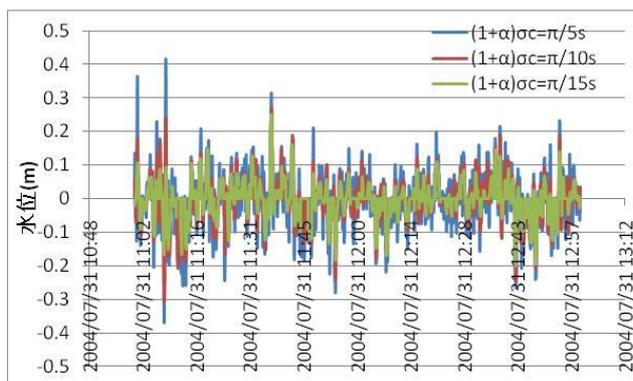


図 4.1-38 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$

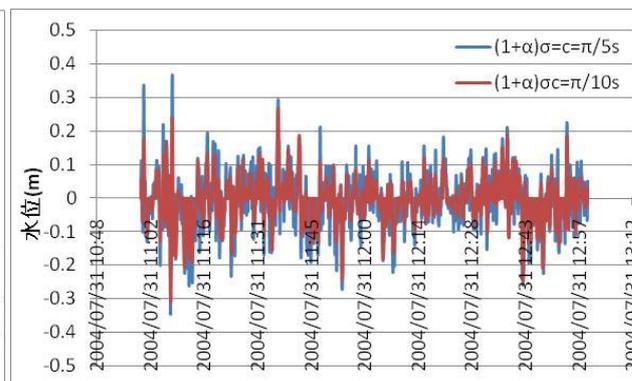


図 4.1-39 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/120s$

4.1.4 津波発生時（強風）

i から iii に周期 5 分、10 分、60 分における $\Delta t=60s$ での水位変化率によって抽出された波形を、3.6.3 で選定した数値フィルター別に結果を示している。津波は観測される地点によって波高が異なり、到達波高と沖合で観測される波高は異なり、より沖合においては波高が小さくなる。本研究では、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。閾値となる Δh の値はグリーンの式から算出したものであり、それぞれ 0.28m、0.12m、0.03m とした。なお本検討で用いられるデータ総数は、 $N=7200s$ とする。

津波発生時、強風の場合の結果を、周期 5 分を図 4.1-40 から図 4.1-43、周期 10 分を図 4.1.44 から図 4.1-47、周期 60 分を図 4.1-48 から図 4.1-51 に示した。本検討で用いられたデータは図 3.5-35 の実測データであり、 $N=7200s$ である。

なお、この日は台風 18 号が付近を通過していたことにより、観測データにおいて 4.1.2 同様に非常に高い水位変動を示していた。

4.1.2 の平常時強風時同様に i の周期 5 分と仮定した際の $\Delta t=60s$ における水位変化率では、幾度となく津波と判定しているのが分かる。特に、図 4.1-40 のようなフィルター長が短い数値フィルターによる処理を行った場合においては、津波と判定する確立が上がっており、数値フィルターの精度が顕著に表れた結果であると考えられる。しかし、どの数値フィルターにおいても、0:32 に前日 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。

ii と iii の周期 10 分と 60 分を仮定した時の $\Delta t=60s$ における水位変化率では、5 分周期と仮定した場合と比べ遥かに津波として判定している回数が多いことが分かる。また、ii と iii においても 0:32 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。

i). 周期 5 分

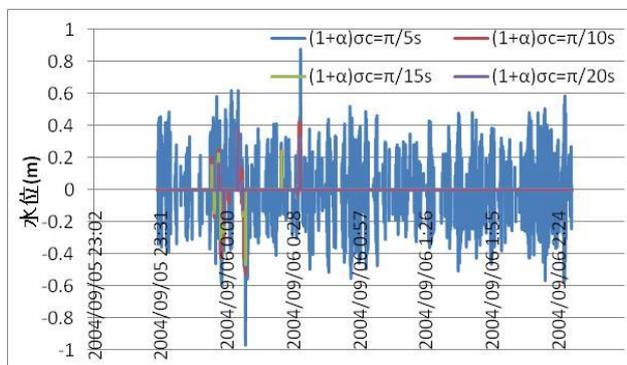


図 4.1-40 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

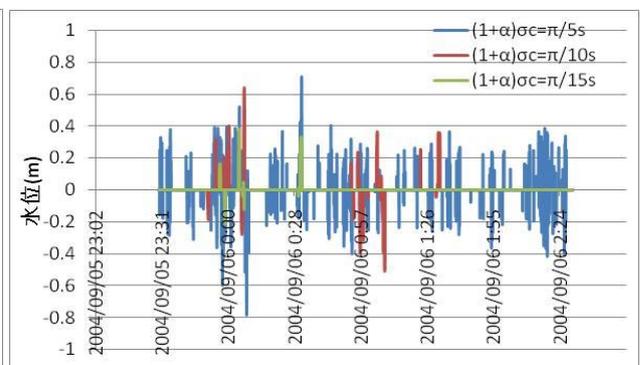


図 4.1-41 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$

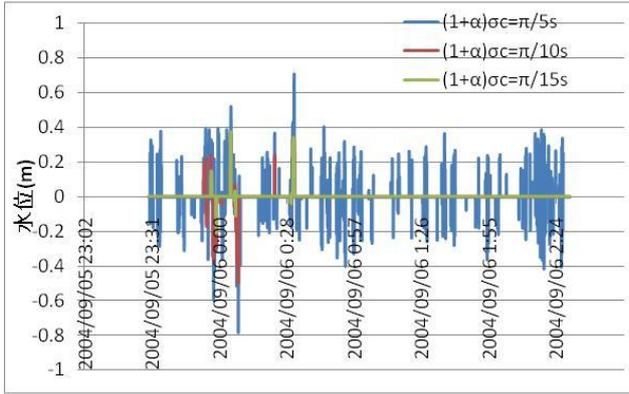


图 4.1-42 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$

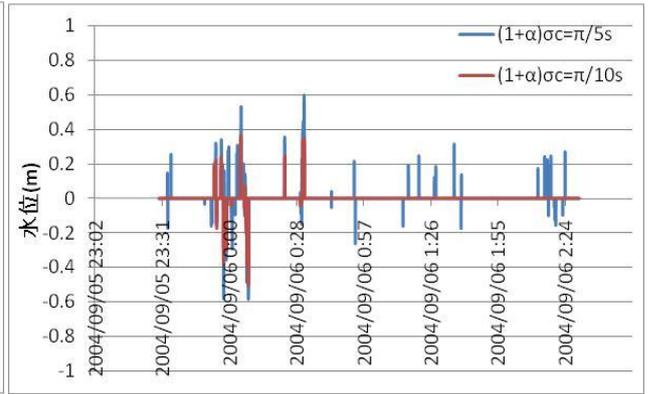


图 4.1-43 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/120s$

ii). 周期 10 分

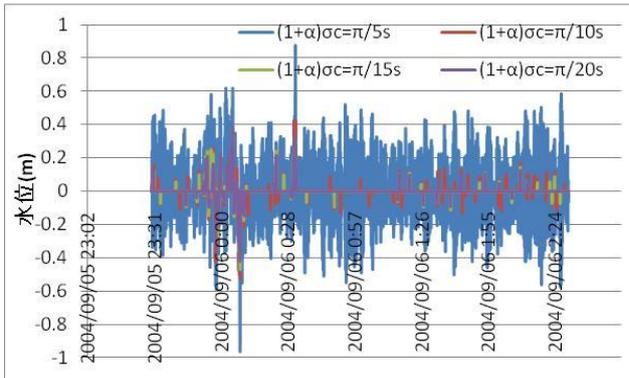


图 4.1-44 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

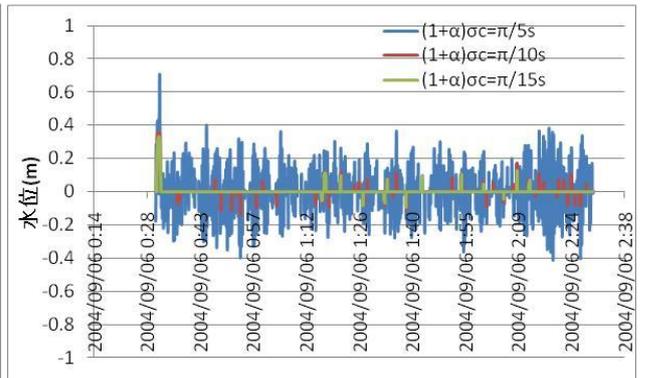


图 4.1-45 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$

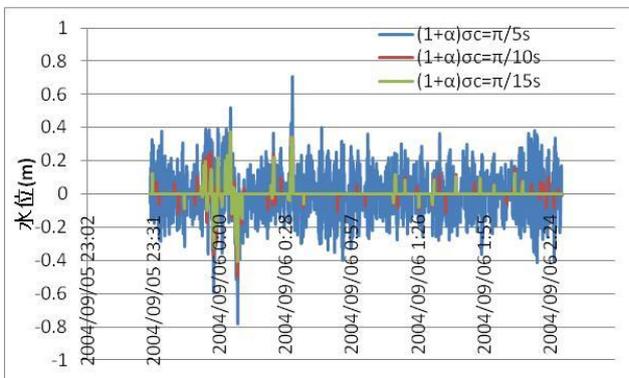


图 4.1-46 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$

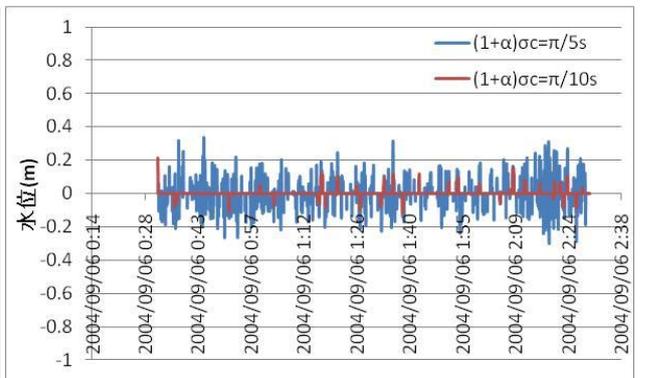


图 4.1-47 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/120s$

iii). 周期 60 分

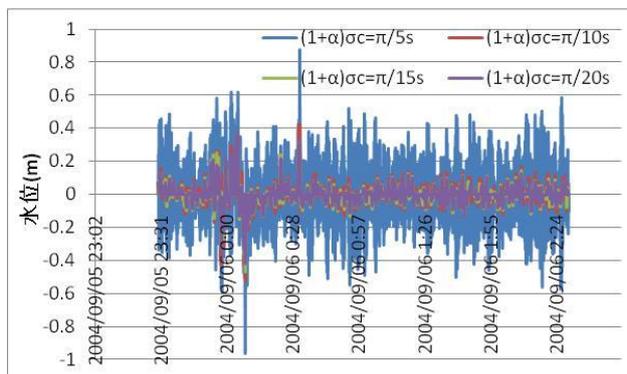


図 4.1-48 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

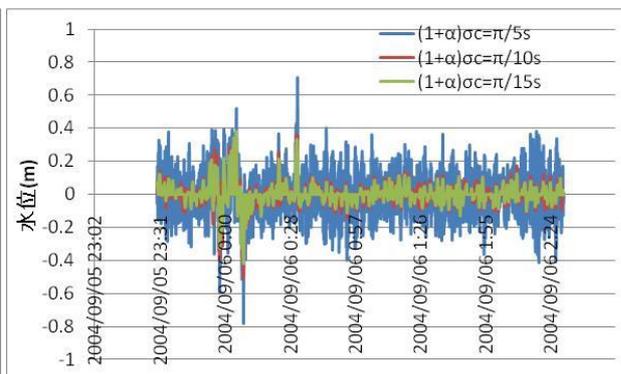


図 4.1-49 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$

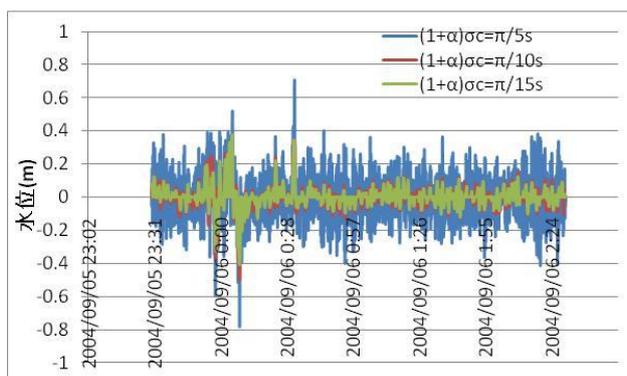


図 4.1-50 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$

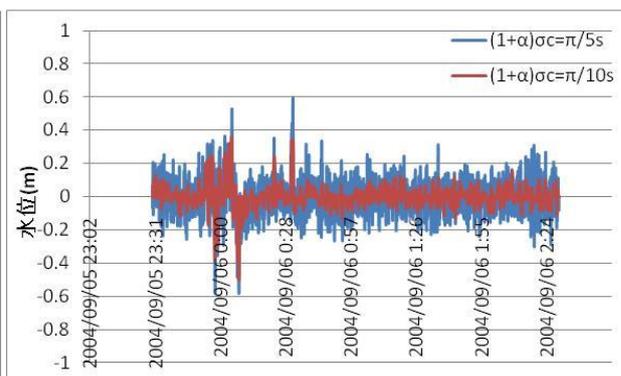


図 4.1-51 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/120s$

4.1.5 疑似データと実測データを重ね合わせた波（微風）

疑似データと実測データを重ね合わせた波（以降、疑似データの重ね合わせ波とする）による水位変化率の結果を以下に示す。疑似データの作成に対する数値シミュレーション、疑似データに関しては 3.6 で用いられたものを用いるものとする。

i から iii に周期 5 分、10 分、60 分における $\Delta t=60s$ での水位変化率によって抽出された波形を、3.6.3 で選定した数値フィルター別に結果を示している。津波は観測される地点によって波高が異なり、到達波高と沖合で観測される波高は異なり、より沖合においては波高が小さくなる。本研究では、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。閾値となる Δh の値はグリーンの式から算出したものであり、それ

ぞれ 0.28m、0.12m、0.03m とした。なお本検討で用いられるデータ総数は、N=10800s とする。

疑似データの重ね合わせ波における津波成分の抽出の結果を、周期 5 分を図 4.1-52 から図 4.1-55、周期 10 分を図 4.1-56 から図 4.1-59、周期 60 分を図 4.1-60 から図 4.1-63 に示した。

i、ii、iiiの周期 5 分、10 分、60 分を仮定した際の $\Delta t=60s$ における水位変化率では、どの数値フィルターを用いた場合にも、疑似データの波形とほぼ同様の波形を描いていることが分かる。これは、重ね合わせた実測データが 4.1.1 で用いた平常時、微風のもと同様であったことも要因である。しかし、i の周期 5 分における $\Delta t=60s$ での水位上昇率における津波成分の抽出の場合、ii と iii の周期 10 分、60 分における $\Delta t=60s$ での水位上昇率に比べて、地震発生から三十分以降から津波しての判定回数が減少しており、津波を過小評価してしまっている。これは、地震発生直後の海面上昇と地震の規模が大きかったことに関連し、初期の津波を観測することが可能であったが、時間の経過に伴い、地形による固有振動周期による周期が短くなり、ある一定の周期の成分が増幅していった波と、検出基準が一致しなかった事によるものであると考えられる。

i). 周期 5 分

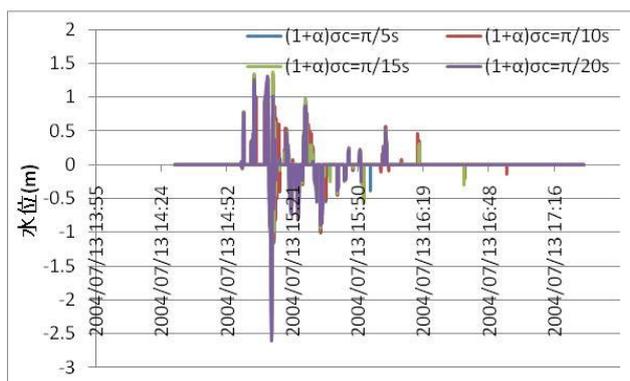


図 4.1-52 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

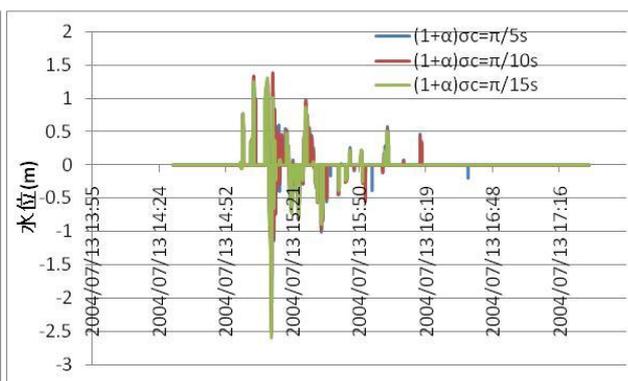


図 4.1-53 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$

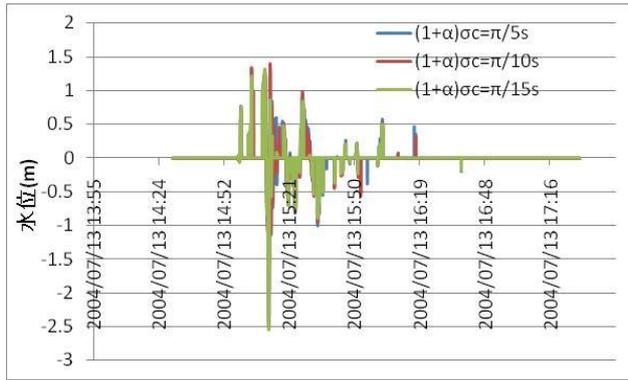


图 4.1-54 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$

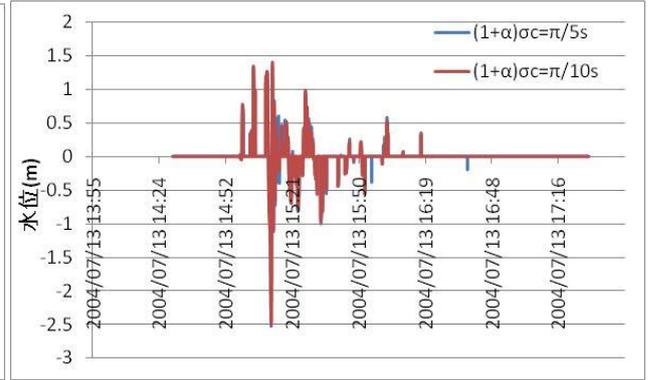


图 4.1-55 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/120s$

ii). 周期 10 分

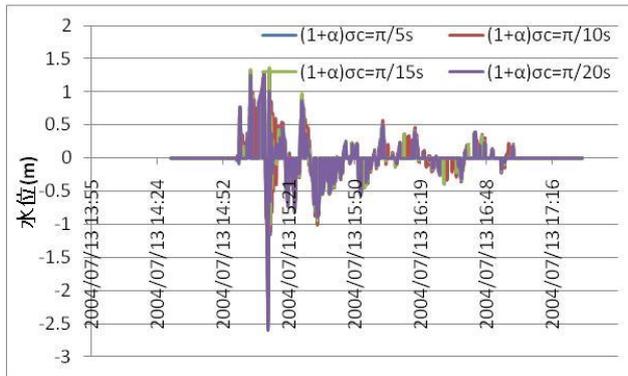


图 4.1-56 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

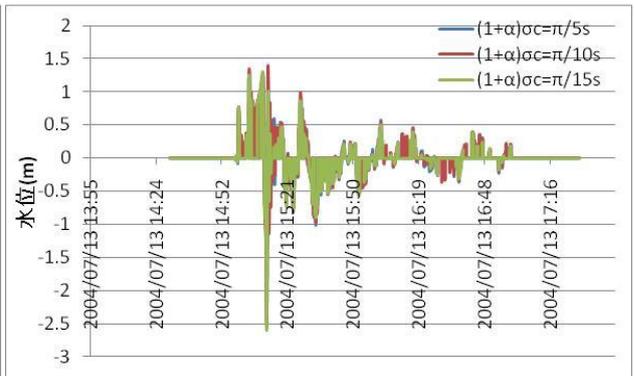


图 4.1-57 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$

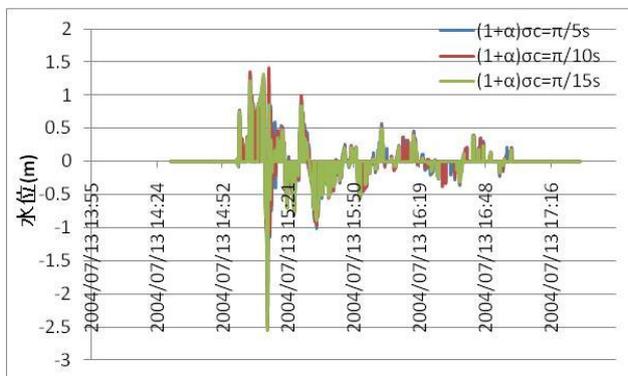


图 4.1-58 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$

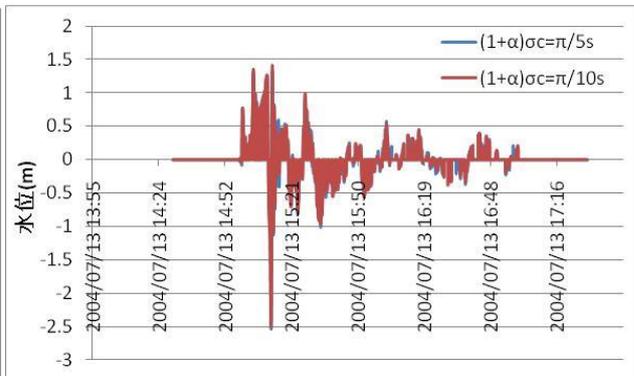


图 4.1-59 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/120s$

iii). 周期 60 分

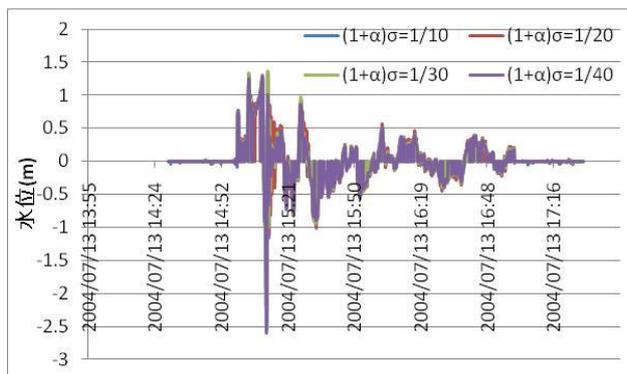


図 4.1-60 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$

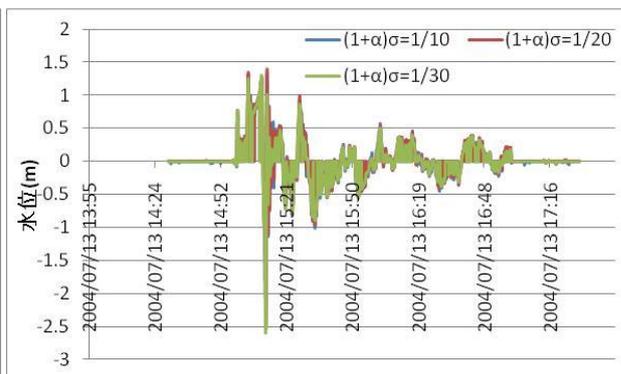


図 4.1-61 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$

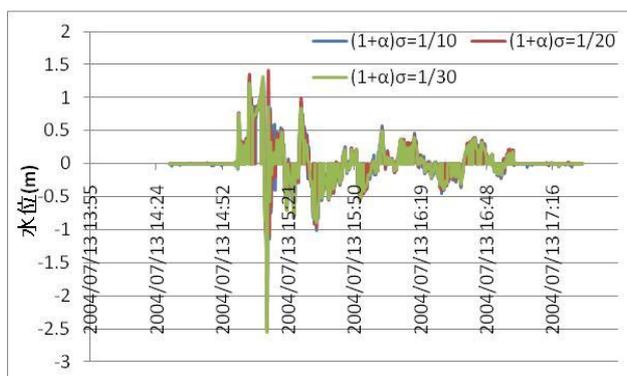


図 4.1-62 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$

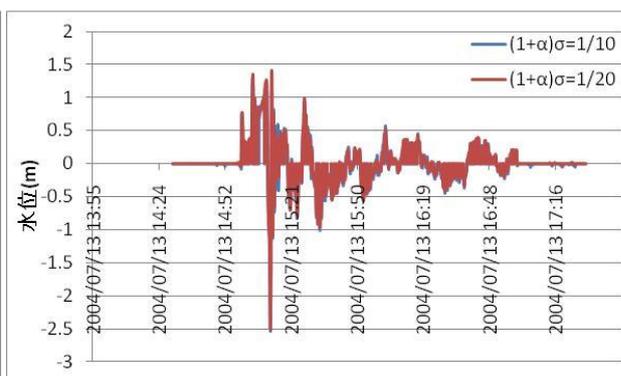


図 4.1-63 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/120s$

4.1.6 津波成分検出に向けた検出方法の比較・評価

4.1.6 では 4.1.1 から 4.1.5 で検証された津波成分を含む波形の抽出における評価を行う。

本検討で用いる評価手法は、津波成分の検出の誤判定率から、フィルターの評価をするものである。地震と津波が発生していない時において、津波成分を含む波形を抽出してしまった回数に応じて、誤判定率を算出するものである。なお用いるデータは a から c に示したものをを用いる。

a). 4.1.1 (微風)

2004 年 7 月 13 日 15:00~17:00

b). 4.1.2 (風が非常に強い時)

2004年7月30日 22:00~0:00

c). 4.1.3 (風が猛烈に強い時)

2004年7月31日 11:00~13:00

このように判断した理由として、津波を津波として判定することは必須事項であり、実際に 4.1.5、4.1.6 で若干の対象とした水位変化率によって差がみられるものの、津波成分を含む波形を抽出することに成功している。

しかし、平常時に津波でない波形を津波と判断することは、一章で述べたように人々の津波予測の精度に対する信頼性の低下に直結することから、本検討では平常時における検討を行った。

表 4.1-2 から表 4.1-4 が a から c における各水位変化率、各フィルター別の誤判定率を示したものである。

表 4.1-4 の周期 60 分と仮定した場合の $\Delta t=60s$ における水位変化を用いた場合、全体的に誤判定が他の周期に比べ圧倒的に高い。風がない（微風）の場合には僅かであるが誤判定を行っている。特に、強い風、猛烈な風の場合には 70%から 80%の確立で誤判定を行っている。これは本検討で用いた数値フィルターでは数センチ程度の短周期波成分を取り除けていないことが要因であると考えられる。

次に表 4.1-2 と表 4.1-3 の周期 5 分と 10 分と仮定した場合の $\Delta t=60s$ における水位変化を用いた場合、どちらも風がない（微風）の場合、誤判定を一度もすることがなかった。風のある場合においても、周期 10 分の場合周期 60 分に比べ誤判定率が大幅に減少しているのが見て取れる。特に周期 5 分の場合は誤判定率が 19%のフィルターがあるものの、多くが 1%前後の値を示している。また、赤で示した $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/15s$ 、 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$ のフィルターにおいては猛烈な風の場合、誤判定率が 0%、強い風の場合でも 0.17%と他のフィルターに比べて遥かに誤判定率が低かった。また、黄で示した $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/20s$ 、 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$ のフィルター、 $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/15s$ 、 $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$ のフィルターも風がある場合における誤判定率において、赤で示したフィルターに次いで低い値となっている。

また、これらのフィルターは東海道沖地震による津波を検出し、疑似データにおいては地震発生直後の海面上昇の変化も観測している。

これらより、津波成分を含む波形を抽出するための数値フィルターとして適しているのは1から3に示したものである。

- 1). $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/15s$, $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$ の数値フィルター
- 2). $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/20s$, $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/30s$ の数値フィルター
- 3). $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/15s$, $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$ の数値フィルター

表 4.1-2 周期 5 分を仮定した水位変化率における誤診断率

5min (1+ α) σ_c	(1- α) $\sigma_c = \pi/30s$				(1- α) $\sigma_c = \pi/60s$			
	$\pi/5s$	$\pi/10s$	$\pi/15s$	$\pi/20s$	$\pi/5s$	$\pi/10s$	$\pi/15s$	$\pi/20s$
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_c	(1- α) $\sigma_c = \pi/90s$				(1- α) $\sigma_c = \pi/120s$			
	$\pi/5s$	$\pi/10s$	$\pi/15s$	$\pi/20s$	$\pi/5s$	$\pi/10s$	$\pi/15s$	$\pi/20s$
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%	-	-

表 4.1-3 周期 10 分を仮定した水位変化率における誤診断率

10min (1+ α) σ_c	(1- α) $\sigma_c = \pi/30s$				(1- α) $\sigma_c = \pi/60s$			
	$\pi/5s$	$\pi/10s$	$\pi/15s$	$\pi/20s$	$\pi/5s$	$\pi/10s$	$\pi/15s$	$\pi/20s$
風なし	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	-
強い風	47.35%	27.18%	21.64%	19.22%	39.18%	25.54%	19.21%	-
猛烈な風	23.08%	19.53%	15.86%	12.51%	22.22%	18.33%	12.25%	-
10min (1+ α) σ_c	(1- α) $\sigma_c = \pi/90s$				(1- α) $\sigma_c = \pi/120s$			
	$\pi/5s$	$\pi/10s$	$\pi/15s$	$\pi/20s$	$\pi/5s$	$\pi/10s$	$\pi/15s$	$\pi/20s$
風なし	0%	0%	0%	-	0%	0%	-	-
強い風	39.19%	24.51%	19.25%	-	37.13%	24.51%	-	-
猛烈な風	22.22%	17.31%	11.92%	-	22.04%	17.29%	-	-

表 4.1-4 周期 60 分を仮定した水位変化率における誤診断率

60min	$(1-\alpha)\sigma_c = \pi / 30s$				$(1-\alpha)\sigma_c = \pi / 60s$			
$(1+\alpha)\sigma_c$	$\pi / 5s$	$\pi / 10s$	$\pi / 15s$	$\pi / 20s$	$\pi / 5s$	$\pi / 10s$	$\pi / 15s$	$\pi / 20s$
風なし	4.38%	1.51%	0.89%	0.71%	2.92%	1.33%	0.71%	-
強い風	86.49%	77.26%	74.82%	75.17%	81.58%	76.57%	61.28%	-
猛烈な風	75.25%	74.61%	69.53%	67.63%	74.64%	72.99%	67.63%	-
60min	$(1-\alpha)\sigma_c = \pi / 90s$				$(1-\alpha)\sigma_c = \pi / 120s$			
$(1+\alpha)\sigma_c$	$\pi / 5s$	$\pi / 10s$	$\pi / 15s$	$\pi / 20s$	$\pi / 5s$	$\pi / 10s$	$\pi / 15s$	$\pi / 20s$
風なし	2.92%	1.08%	0.89%	-	2.21%	1.08%	-	-
強い風	81.58%	76.26%	74.67%	-	81.69%	76.26%	-	-
猛烈な風	74.64%	72.17%	67.47%	-	74.38%	72.17%	-	-

4.2 複数の検出装置を用いた検討

第三章と 4.1 では GPS 津波計の設置地点における、GPS 津波計で観測された実測値と疑似データの重ね合わせ波による、特定の周期を除去するための数値フィルターの評価と津波成分を抽出する際の誤判定による数値フィルターの精度の評価を行ってきた。

しかし、津波の周期 5 分と仮定した場合の最も精度の高い数値フィルターでも、風のない日や気象条件によっては誤判定をしないものの、一部の気象条件によっては極僅かではあるが、誤判定をしている。発生まで長期的な時間が空き、突然発生する津波において、僅かである誤判定も許されない。

また、4.1.6 で述べたとおり、周期 5 分と仮定した場合の $\Delta t=60s$ における水位変化率では、地震発生直後の海面上昇と地震の規模が大きかったことに関連する初期の津波を観測することが可能であったが、時間の経過に伴い、地形による固有振動周期などの、ある一定の周期の成分が増幅していった波を検出することができなかった。

そこで、4.2 では複数の津波計を用いた観測による精度の検討と、沖合の観測計における異なる水位変化率を同時に用いて、段階別に津波成分を含む波形を抽出することを検討した。

4.2.1 対象領域

図 4.2-1 は本検討で対象とする領域と、GPS 津波計と複数地点の検討を行う St1 と St2 を示したものである。

St1 は沖合 100km 地点、St2 は現在 GPS 津波計が設置されている環境と同様の沖合

10km 程度、水深 100m 程度の地点である。

現在運用されている GPS 津波計では精度の関係上、沖合 13km 程度が観測範囲の限界である。しかし、今後 GPS 津波計の観測精度が向上する可能性があり、数年後に 100km ~200km 地点における観測が可能となる。また、第三章の GPS 津波計の概要で、これまで困難であった沿岸・沖合における津波・潮位の観測が可能と述べていることを踏まえ、任意の場所で設置出来る津波計として、本検討における津波計も GPS 津波計を想定する。その際に、本検討で対象とする地域の場合、震源地により近くで津波を観測することを考慮し、沖合 100km 地点の St1 を設定した。St の水深は約 1000m である。

また、これまで現在 GPS 津波計が観測されている地点における検討を行ってきた。そこで、今後 GPS 津波計による津波観測網の整備を考慮し、現在 GPS 津波計が設置されている条件と同等の地点として St2 を設定した。

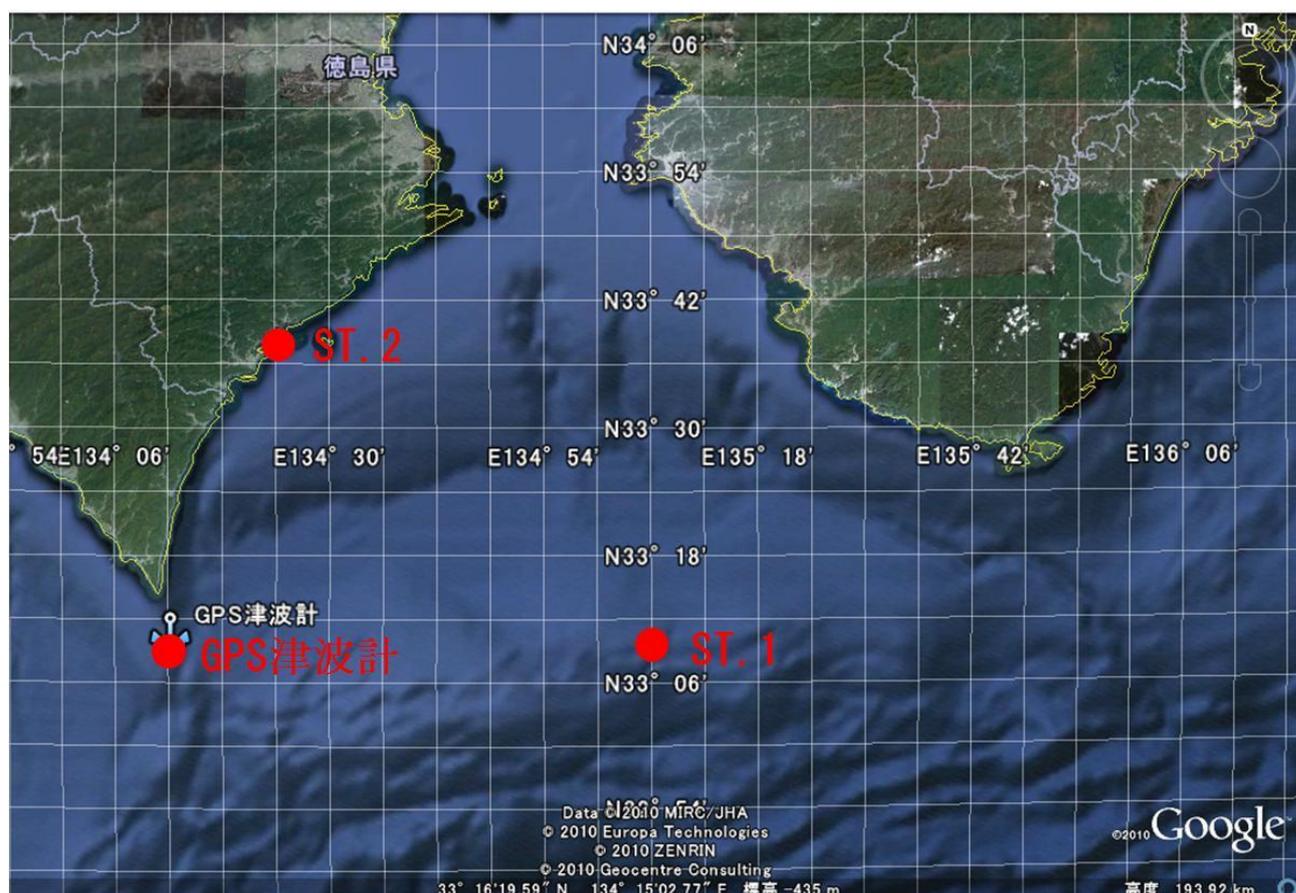


図 4.2-1 GPS 津波計、検証地点の位置

Google Earth より抜粋・加筆

4.2.2 数値シミュレーションの結果

図 4.2-2 から図 4.2-3 は St1、St2 における疑似データを示したものである。また、図 4.2-4 から図 4.2-5 は St1、St2 で得られた疑似データを 3.5.3 で用いられた、平常時、微風のデータに重ね合わせたものである。疑似データの作成に対する数値シミュレーション計算方法などに関しては 3.6 で用いられたものを用いるものとする。

St1、St2 とともに設置地点が震源地のすぐ傍であり、地震発生と同時に、St1 においては海面が上昇、St2 においては海面が下降していることが見てとれる。その後、St1 では水位変動が小さくなっている。それに対し、St2 では地震発生直後の海面の下降以降、1000s 水位が 3m まで到達し、その後も激しい水位変動を繰り返していることが分かる。

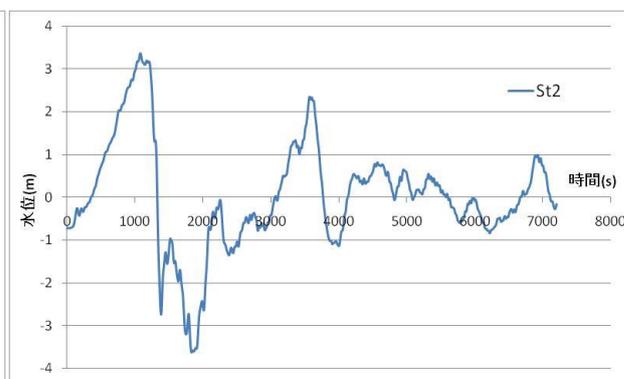
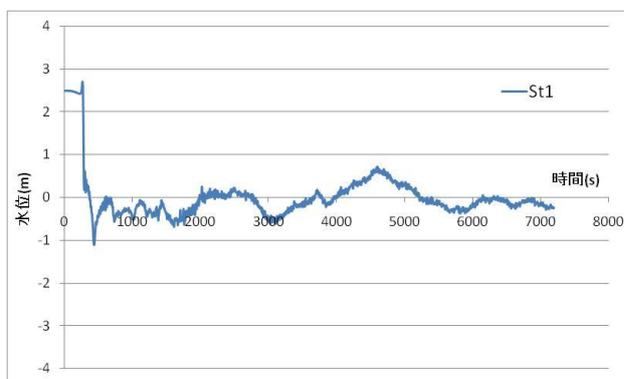


図 4.2-2 St1 における疑似データ 図 4.2-3 St2 における疑似データ

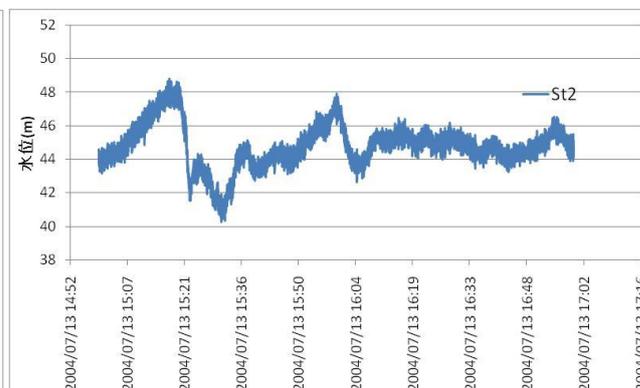
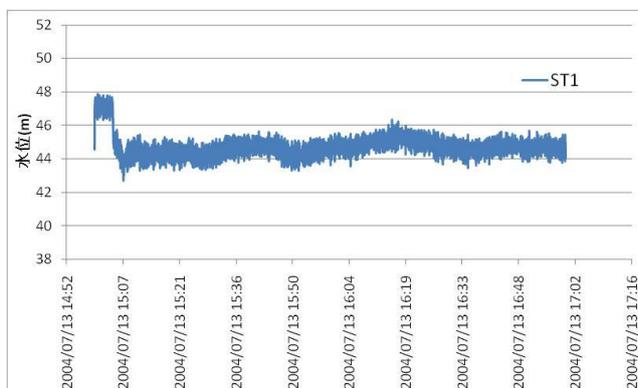


図 4.2-4 St1 における疑似データ
と平常時(微風)の重ね合わせ波

図 4.2-5 St2 における疑似データ
と平常時(微風)の重ね合わせ波

4.2.3 複数地点における検討

図 4.2.4 から図 4.2-5 で示した St1 と St2 の疑似データと平常時の重ね合わせ波を用いて、複数地点に津波計を設置した場合の精度の向上について検討する。

本検討にあたり St1 と St2 のフィルターを以下の通りに設定した。

St1 : $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/15s$, $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/90s$ の数值フィルター

St2 : $(1+\alpha)\sigma_c = \pi/15s$, $(1-\alpha)\sigma_c = \pi/60s$ の数值フィルター

St1 は沖合に設定されていることから、GPS 津波計の設置個所に比べて閾値が低くなってしまい、短周期成分と津波成分の区別がつきにくくなる恐れがある。4.1 で選定された数值フィルターの中で最も精度の高いものを設定した。

St2 は GPS 津波計の設置している箇所と条件が同様であることから、沖合に比べて即時性が求められ、津波の見逃しは許されない。そのことから、4.1 で選定された数值フィルターの中でもっとフィルター長が短いものを設定した。

次に検出の閾値の設定である。表 4.1-1 に今村・飯田の津波規模階級の表を示している。本検討では、人々に何らかの被害をもたらす津波波高 1m とした場合の津波成分を検出することにする。

St1 の閾値について説明する。津波は観測される地点によって波高が異なり、到達波高と沖合で観測される波高は異なり、より沖合においては波高が小さくなる。本検討では、グリーンの式に基づく断面的変形を仮定し、St1 における波高を求める。津波波高が 1m となる時、水深が約 1200m 地点であり、グリーンの式から 0.35m と算出され、この値を本検討の閾値とする。

次に St2 の閾値について説明する。津波は観測される地点によって波高が異なり、到達波高と沖合で観測される波高は異なり、より沖合においては波高が小さくなる。本検討では、グリーンの式に基づく断面的変形を仮定し、St2 における波高を求める。津波波高が 1m となる時、GPS 津波計が設置されている地点と陸との距離、水深が同じ St2 では水深が約 100m 地点であり、グリーンの式から 0.35m と算出され、この値を本検討の閾値とする。

水位観測直後に波高、周期を把握してからの津波情報の提供では遅く、 Δt を長時間に設

定した場合の検出では意味を成さない。そこで、本検討においても即時性を考慮し、 $\Delta t=60s$ における水位変化量を求めた。本検討で用いたデータ総数は $N=10800s$ である。

図 4.2-6 から図 4.2-7 は St1 と St2 における津波成分を含む波形を抽出したものである。St1、St2 ともに地震発生直後の海面の上昇、海面の降下を忠実に捉えている。

また、St1、St2 ともに津波成分と判定した時刻は、地震発生と同時に抽出している。数値フィルターの片側長は遅れ時間を意味する。水位変動率はデータ時間が $\Delta t=60s$ であるが、数値フィルターのフィルター長内で検出可能であること、市販のパソコンによる処理時間では 1 秒もかからなかったことから、津波成分を含む波形の抽出による遅れ時間は無視できるものとする。つまり、St1 では数値フィルターの片側長から 102s で検出でき、St2 では 96s で初期の津波成分を含む波形を抽出することができた。

このように、震源地に近い近地津波においては、周期 5 分と仮定した閾値で初期の津波の波形を抽出することは可能であり、複数で同時に検出したことで、津波の抽出がより正確なものになった。

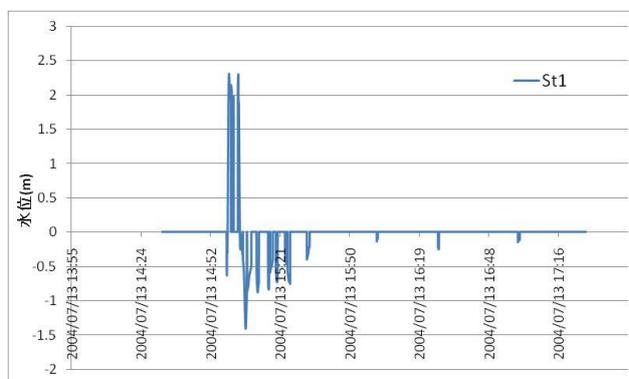


図 4.2-6 St1 の津波成分抽出結果

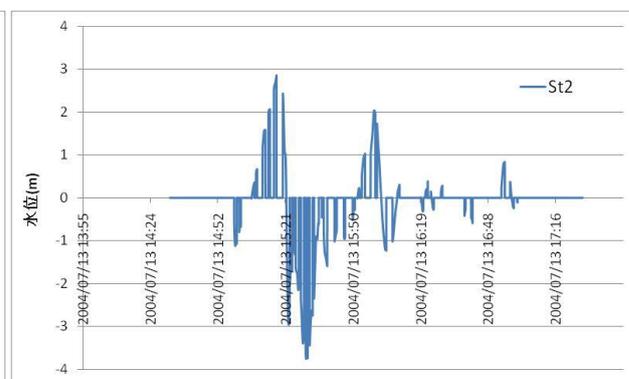


図 4.2-7 St2 の津波成分抽出結果

4.2.4 段階別予報修正

4.2.3 で適用された水位変化率を用いた場合、初期の津波を検出することができるが、図 4.2-6 で示したように図 4.2-3 の疑似データの波形を忠実に抽出することが困難である。4.2.3 において周期 5 分と仮定した場合で初期の検出ができたのは、災害規模の大きさによるものであると考えられる。

4.2.4 では 4.2.3 で仮定した周期 5 分、10 分、60 分における、1/4 波長での水位変化率による津波成分を含む波形の抽出を検討した。閾値は周期 5 分と仮定した場合、 $\Delta t=75s, \Delta h=0.20m$ 、周期 10 分と仮定した場合、 $\Delta t=150s, \Delta h=0.20m$ 、周期 60 分と仮定した場合、 $\Delta t=900s, \Delta h=0.20m$ とした水位変化率によって、津波成分の抽出を行った。結果を図 4.2-8 から図 4.2-9 に示す。

周期 5 分と 10 分と仮定した場合の結果から、初期の津波を検出しているものの、地震発生から 30 分後以降、ほとんど津波成分を含む波形を抽出していないことが分かる。周期 60 分と仮定した場合の結果においては、地震発生から 30 分経過した後も津波成分を含む波形を抽出していることが、図 4.2-2 からも見取れる。

しかし、周期 60 分と仮定して津波成分の抽出を行った場合に用いられる時間は 15 分と、本研究の趣旨から逸れる。

そこで、4.2.4 では段階別の津波成分を含む波形の抽出を提案する。周期 5 分と仮定した水位変化率により初期の津波を予測し、その後周期 10 分、60 分と仮定した場合の水位変化率により情報を修正していくものである。St1 は沖合に設置していることから、津波が到達するまでの時間があることから、段階別の抽出は可能であると考えられる。

図 4.2-10 は周期 5 分、10 分、60 分と仮定場合の水位変化率によって抽出された津波成分を含む波形を重ね合わせたものである。周期 60 分と仮定した場合よりもさらに津波成分が抽出されていることが分かる。

表 4.2-1 は水位変化率別と全水位変化率の合計による抽出結果と疑似データとの誤差を示したものである。検討方法は 3.6 で用いた二乗平均誤差によるものである。周期 5 分と仮定した場合の $\Delta t=75s, \Delta h=0.20m$ 、周期 10 分と仮定した場合の $\Delta t=150s, \Delta h=0.20m$ に比べて、周期 60 分と仮定した場合の $\Delta t=900s, \Delta h=0.20m$ の誤差が小さいことが分かる。しかし、各水位変化率によって求められた結果の合計の誤差が周期 60 分と仮定した場合の $\Delta t=900s, \Delta h=0.20m$ の誤差部比べて値が大きくなっている。

次に、表 4.2-2 は各水位変化率、合計による抽出とフィルター処理後の疑似データとの誤差を示したものである。フィルター処理後の疑似データの場合では、各水位変化率によって求められた結果の合計が最も誤差が低いことが分かる。表 4.2-1 と表 4.2-2 で逆転現象が起こった理由として、フィルター処理後の疑似データと疑似データの二乗平均誤差の値が $0.25m$ であったことから、全体としての値が $0.25m$ ずれてしまったことによるもの

であると考えられる。

しかし、ずれた場合においても水位変動量は変化しておらず、津波成分を含む波形の抽出方法に関しても水位変化量で求めていることから津波成分の検出に関して影響はないと考えられる。表 4.2-3 は各水位変化率と合計別の抽出率を示したものである。各水位変化率に応じて、津波成分の抽出率が上昇しており、段階別に抽出した場合、最終的には津波成分を含む波形の抽出率は 75%となる。

本検討で対象とした震源に近い近地津波において、GPS 津波計の位置、St1、St2 において周期 5 分と仮定した水位変化率の閾値で、初期の津波を検出することは可能である。しかし、時間の経過に伴う固有振動周期や本研究では扱わなかった遠地津波の場合などの長周期の津波に関しては津波として検出することができない。GPS 津波計や St1 の様な岸により近い地域での長時間のデータを必要とする長周期波の観測は不向きである。

長周期波においては岸に近い地点と沖合地点の津波計で初期の津波を検出し、その後沿岸域の津波計では長周期波の津波を周期別に検出することで、精度の高い津波の情報を提供が可能となる。また、複数地点で津波計を運用することで、津波の波速や進路も同時に把握することができるため、より精度の高い津波の到達予測が可能である。

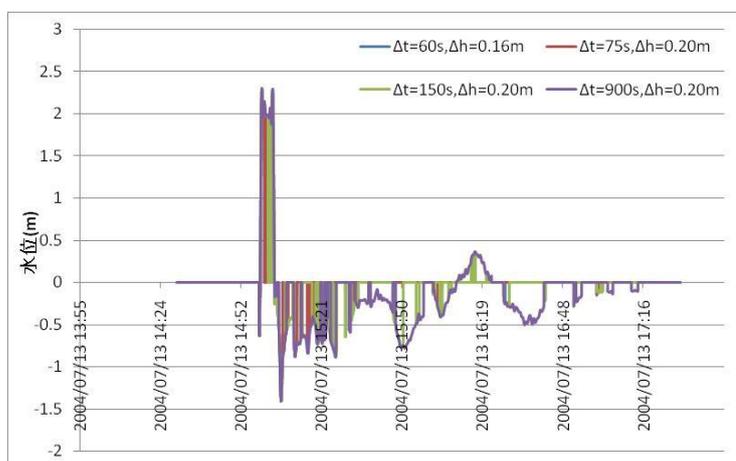


図 4.2-8 St1 の津波成分抽出結果

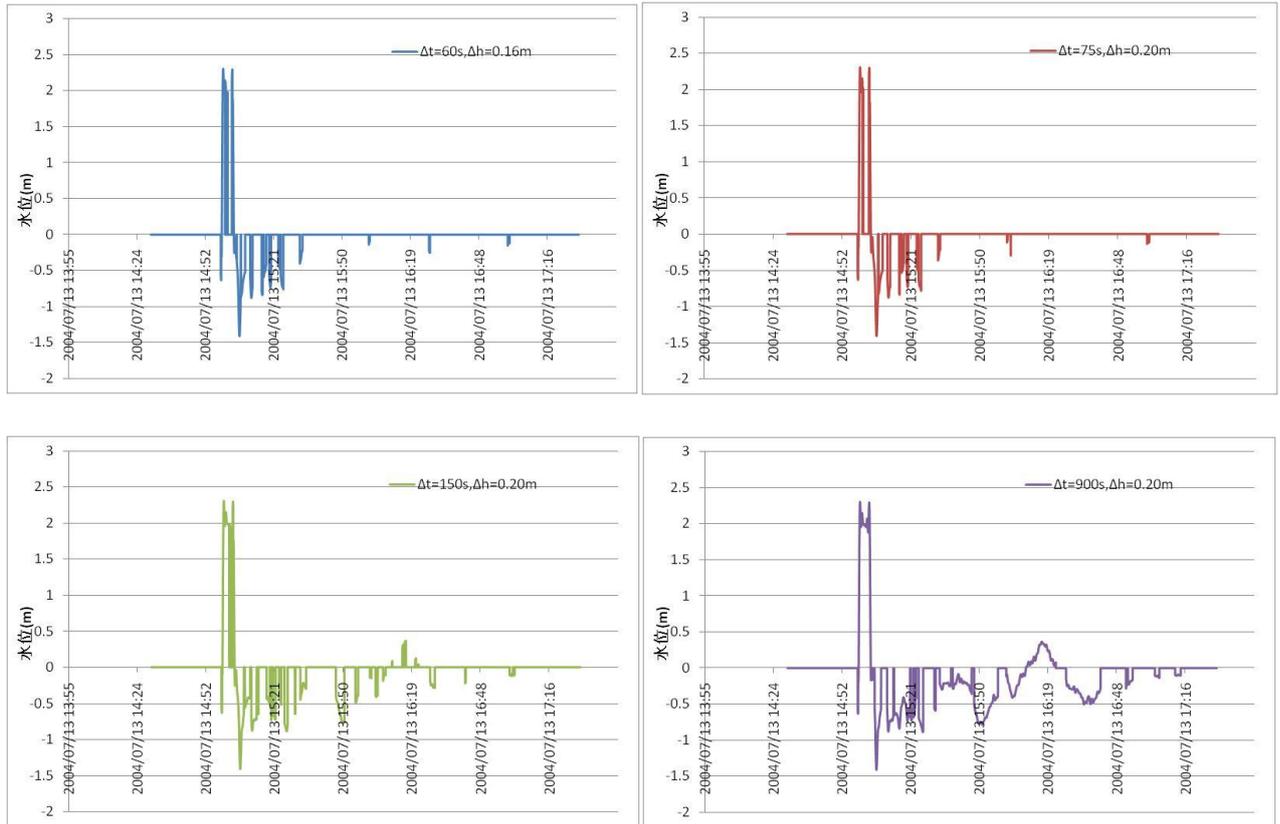


図 4.2-9 St1 の津波成分抽出結果
 (上から $\Delta t=60s, \Delta h=0.16$ 、 $\Delta t=75s, \Delta h=0.20m$
 $\Delta t=150s, \Delta h=0.20$ 、 $\Delta t=900s, \Delta h=0.20m$)

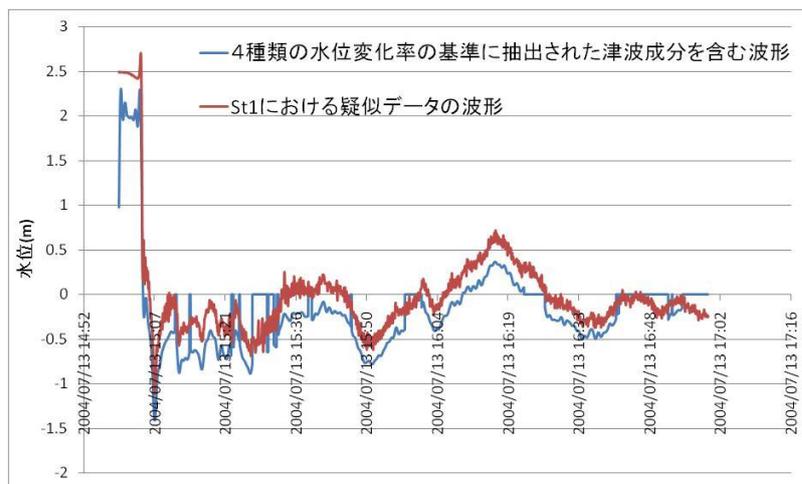


図 4.2-10 各水位変化率の合計の結果と St1 の疑似データの波形

表 4.2-1 各水位変化率、合計による抽出と疑似データとの誤差

平均二乗誤差(m) 疑似データとの比較	$\Delta t=60s, \Delta h=0.16m$	$\Delta t=75s, \Delta h=0.20m$	$\Delta t=150s, \Delta h=0.20m$	$\Delta t=900s, \Delta h=0.20m$	Total
	0.470	0.463	0.372	0.265	0.271

表 4.2-2 各水位変化率、合計による抽出とフィルター処理後の疑似データとの誤差

平均二乗誤差(m) フィルター処理後の疑似データとの比較	$\Delta t=60s, \Delta h=0.16m$	$\Delta t=75s, \Delta h=0.20m$	$\Delta t=150s, \Delta h=0.20m$	$\Delta t=900s, \Delta h=0.20m$	Total
	0.482	0.478	0.385	0.222	0.186

表 4.2-2 各水位変化率と合計別の抽出率

抽出率(%)	$\Delta t=60s, \Delta h=0.16m$	$\Delta t=75s, \Delta h=0.20m$	$\Delta t=150s, \Delta h=0.20m$	$\Delta t=900s, \Delta h=0.20m$	Total
	0.113	0.106	0.258	0.685	0.750

4.3 本研究の GPS 津波計における活用方法

これまで、第三章において現在 GPS 津波計で用いられている移動平均に変わる数値フィルターの設計、評価を行い、4.1 では単体での津波成分を含む波形を抽出するフィルターの評価をし、4.2 では複数地点で津波成分を含む波形の抽出による精度の向上を検討した。4.3 では、これまでの検討、評価を踏まえたうえで、本研究の用いられ方を論ずる。

第三章では本研究で設計された数値フィルターによって、現在 GPS 津波計において用いられている移動平均を用いたフィルターに比べて、特定の周期を取り除くことができ、人為的な津波の判断ができるようになった。

しかし、人為的判断は人々に津波情報を提供するのに遅れを生じさせてしまう。そこで、第四章では水位変化率による津波成分を含む波形の抽出により、短時間で津波として判定することについて検討した。

これらを踏まえたうえで、本研究の GPS 津波計における活用方法を以下に提案する。

本研究の数値フィルターと津波成分を含む波形の抽出により、これまでの GPS 津波計が抱えていた移動平均によるフィルター精度の問題、人為的な津波判定作業をある程度まで解消することができる。その際に、風が弱い気象条件のみならず、気象条件が悪い強風時においても早期かつ精度よく津波判定をすることが可能であり、初期情報の遅れを短縮することができる。

複数地点においては、精度の向上のみならず、段階別に情報を修正しながら津波情報を提供することができ、人々により正確な情報を提供することを可能にできる。

また、地震による揺れが小さいにも関わらず、異常に大きな津波が海岸の襲ってくる場合がある。これを津波地震と言う。1896年に東北地方で発生した地震において、震度2から3程度であったにも関わらず、大規模な津波が三陸海岸を襲い、標高38.2mまで海水が上昇した。このように地震規模に比例しない津波における津波において、津波成分の検出の精度向上により、人々が予想し得ない津波情報を提供することが可能となる。

しかし、複数地点の検出手法によって津波判定の精度が上がっても、4.1において風のある場合の検討において誤判定率が1%を切っていたが、誤判定をしたことには変わらない。より高い精度で、人々に津波情報の信頼性を高めるためには、GPS津波計単体だけではなく、地震計などの地震が発生した情報と併用して用いることが望まれる。

4.4 第四章まとめ

この章では、第三章で選定された数値フィルターを用いて、津波成分を含む波形の抽出の検討、評価を行い、本研究のGPS津波計での用いられ方を提案した。

4.1では第三章で用いられた数値フィルターを用いて、水位変化率に応じた津波成分を含む波形の抽出の検討、評価を行い、津波成分の検出に最適なフィルターを選定した。

4.2では複数地点における検出として、複数地点による精度の向上の検討として、現在GPS津波計が設置されている環境と同等の位置とGPS津波計の精度向上を仮定し、沖合100km地点における検討を行った。

また4.1で用いた津波判定による津波成分を含む波形の抽出に対する過小評価に対する対策を検討した。その結果、沖合における津波成分の抽出を段階別に情報を修正することで、高い精度で津波成分を含む波形を抽出することができた。

4.3では第三章、四章で検討、評価した数値フィルターと津波成分を含む波形の抽出方法のGPS津波計活用方法について提案した。

5. 結論

本研究での主要な成果を以下に挙げる。

1. 現在 GPS 津波計で用いられている移動平均を用いたフィルターに対して、より精度よく特定の周期を除去することができる数値フィルターの設計を行った。
2. 設計された二十四パターンの数値フィルターを用いて、GPS 津波計で観測された実測値と数値シミュレーションによって作成された疑似データにおいて検討、評価した。その結果、十二パターンの適切な数値フィルターであることを見いだした。
3. 評価された数値フィルターを用いてフィルター処理された実測データと疑似データを用いて、水位変化率による津波成分を含む波形の抽出を検討、評価した。その結果、三パターンの適切な数値フィルターを見いだし、99.97%の確率で誤判定をすることなく、初期の津波を判定できることが分かった。
4. 津波成分を含む波形の抽出を用いて、複数地点での検討、評価を行い、沖合での段階的津波予測について検討、評価を行った。その結果、複数地点での津波計の運用により、初期の津波のみならず、固有振動周期による長周期波の津波も検出でき、75%の精度で津波と判定することができるようになった。
5. 本研究で検討、評価された数値フィルターと津波成分を含む波形の抽出方法の GPS 津波計における活用方法について提案し、特記事項として地震計と併用して用いる必要があることを示した。

参考文献

第一章

- ・永井紀彦・小川英明・寺田幸博・加藤照之・久高将信(2003) : 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,pp1411-1415,2003
- ・株式会社朝日新聞社 : 2010 年 3 月 9 日付朝刊

第二章

- ・服部昌太郎(1987) : 海岸工学
- ・藤井敏嗣・額額一起(2008) : 地震・津波と火山の大辞典
- ・財団法人 沿岸技術研究センター 「TSUNAMI」 出版編集委員会(2008) : TSUNAMI 津波から生き延びるために
- ・静岡県沼津市 Website :
<http://www.city.numazu.shizuoka.jp/kurashi/bousai/jisintsunami/tunamimap.htm>
- ・清水勝義・永井紀彦・李在炯・泉裕明・岩崎峯夫・藤田孝(2006) : 沖合水面変動記録を用いた津波成分即時抽出法に関する研究,海洋開発論文集第 22 巻,土木学会,pp523-528,2006
- ・木股文昭・田中重好・木村玲欧 : 超巨大地震がやってきた スマトラ沖地震津波に学べ

第三章

- ・加藤照之・寺田幸博・木下正生・柿本英司・一色浩・森口壽久・神崎政之・高田美津雄・James M Johnson(2001) : 信学技報,2001 年 7 月号,PP46-52,2001
- ・竹内雅彦・越村俊一・目黒公郎(2008) : 多目的ブイを用いたネットワーク型津波警報システムの人的被害軽減効果に関する研究,土木学会海岸工学論文集第 55 巻,土木学会,pp1416-1420,2008
- ・室戸岬 GPS 津波計沖合実証実験データ公開 website :
<http://www.tsunamigps.com/>
- ・財団法人 阪神・淡路大震災記念協会 人と防災未来センター(2004) : 神戸市垂水処理場における津波被害想定調査 業務報告書

第四章

- ・服部昌太郎(1987)：海岸工学
- ・気象研究所(1984)：御前崎南方沖における海底水圧観測,気象研究所技術報告第 9 号,pp9-12,1984

謝辞

本研究を行うに当たり、多くの方々にご指導・ご協力を頂きました。本当にありがとうございます。

指導教官である磯部雅彦先生には、いつも親身にご指導して頂きました。研究活動の過程では数えきれないくらいの悩みがありましたが、ゼミやミーティング、帰宅途中など幾度となくご指導をして頂きました。時には厳しい指導もあり、泣きそうなこともありました。しかし、厳しい指導には必ず優しさがあり、三年間で勉強や人間性など多くのことを吸収することができたと感じています。本当にありがとうございます。

副指導教官である柴崎亮介には、貴重なお休みに時間を設けていただき、数多くの貴重なアドバイスを頂きました。GPSに関することや検討方針など多岐に渡りご指導をして頂きました。

副査である神田順先生にも、数多くの貴重なアドバイスを頂きました。私自身気付かなかったポイントをご指摘、ご指導して頂きました。

また、観測データや数値シミュレーションなど、本研究において多くの検討を行う上で、研究室や専攻を越えた多くの方々にお世話になりました。

東京大学地震研究所の加藤照之先生には、研究活動が駆け出しのころ、GPS 津波計に関して様々のご意見を頂きました。また越村先生や寺田先生のご紹介など、多岐に渡りお世話になりました。

東北大学の越村俊一先生には、津波の数値シミュレーションを提供していただきました。また東北大学の打ち合わせでは、数値シミュレーションや研究に関して様々なアドバイスを頂きました。

高知工業高等専門学校 of 寺田幸博先生には、GPS 津波計の実測データを提供していただきました。またGPS 津波計に関する現状などについてご意見を頂きました。

WESTech の先生方や研究員の方、学生方にも大変お世話になりました。

黄光偉先生にはゼミでご指摘を頂くだけでなく、演習では渡良瀬遊水地などに連れて行って頂き、様々な水環境に触れる機会を作って頂きました。鯉渕幸生先生にもゼミでご指摘を頂くだけでなく、研究室の生活に関してお世話になりました。また、室園さんには研究室で私たち学生が研究活動を円滑に進めら得るよう、様々な場面においてお世話になりました。

博士研究員の佐藤さん、篠原さんには検討方針やプログラミングのなど、様々なご指導をして頂きました。時には厳しく、時には優しく教えていただき、三年間本当にお世話になりました。

博士課程の平塚さん、森田さん、Zhu さんには、社会人経験者、社会人、中国文化という、これまで触れたことのない世界のお話をお伺いでき、色々と勉強になりました。

同期入学の砂原君、多田さん、中村君、一緒に卒業できなかったのは心残りではありますが、三人と過ごせた二年間は何物にも代えられない貴重な時間です。

修士課程二年の遠藤君、岡本君、上代君、公私ともに最後の一年間は苦楽を共にしました。これからは違う道を歩みますが、お互いに頑張っていきましょう。

修士課程二年の石橋さん、熊井君、修士課程一年の比嘉君、古屋君、Masud さん、これからも研究活動頑張ってください。

最後に義務教育終了後も、高校、予備校、大学四年間、大学院三年間と長い学生生活を支えてくれた両親、家族に感謝したいと思います。