

港湾における津波防災対策に関する検討業務

技術開発課

1. 概要

本業務は、中部地方整備局管内港湾における津波を対象とした防災対策に関する技術的な課題解決を目的とし、津波によるガレキ等の漂流挙動に関する検討、および、即時的な津波浸水予測に関する検討を行う。

2. 津波漂流物に関する実験

津波による漂流物の挙動および漂流物による流動場への影響について検討するため、平面水槽において、津波により発生するガレキ等の漂流物を対象とした模型実験を行った。

平面水槽には、図 2.1 に示す地形模型が設置されている。ガレキとコンテナの漂流挙動に関する実験においては、既設地形模型の水平床の上にガレキやコンテナの模型を配置して実施した。ガレキ模型は、形状、寸法および比重が異なる全 6 種類、コンテナ模型は 40ft を想定し、空コンテナおよび実入りコンテナを模擬した全 2 種類を使用した。なお、使用したガレキ模型の比重の平均値は、アクリルでは 1.16、木材では 0.51 である。

本実験により得られた主要な結果は以下のとおりである。

- 同一の条件における複数の実験を比較した際のばらつきについては、比重の大きいガレキ模型のケースのばらつきが大きい。
- 同一の形状および同一の比重で大きさが異なるケースを比較すると、小さいガレキ模型は相対的に津波が高くなるため、漂流する距離が長くなる。
- 同一のガレキ模型で津波来襲方向に対する方向が異なるケースを比較すると、漂流状況に大きな差異は認められない。
- 同一のガレキ模型で初期配置の密度が異なるケースを比較すると、密集している場合は漂着位置が大きく広がっており、一方、疎な初期配置の場合は漂着位置が狭い範囲となっている。
- 形状が角柱と円柱のガレキ模型のケースを比較すると、円柱のケースの方は漂着位置が大きく広がっている。
- 同一の段積み数のコンテナ模型で津波来襲方向に対する方向が異なるケースを比較すると、津波来襲方向に対して横方向の場合は漂流する距離が長くなる。
- 段積み数が異なるケースを比較すると、段数が多いケースの方が漂流する距離が少なくなる。
- 同一の段数で空コンテナおよび実入りコンテナのケースを比較すると、実入りコンテナのケースの方が漂流する距離が短くなる。

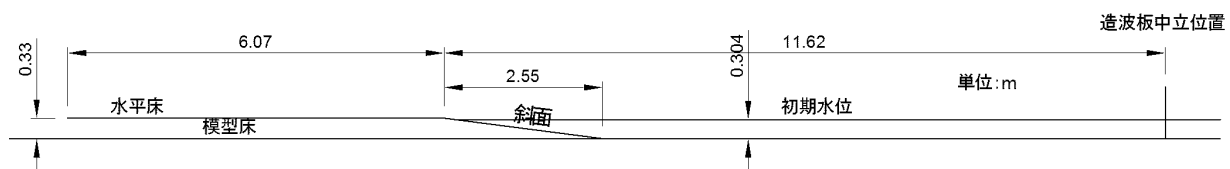


図 2.1 地形模型の断面形状

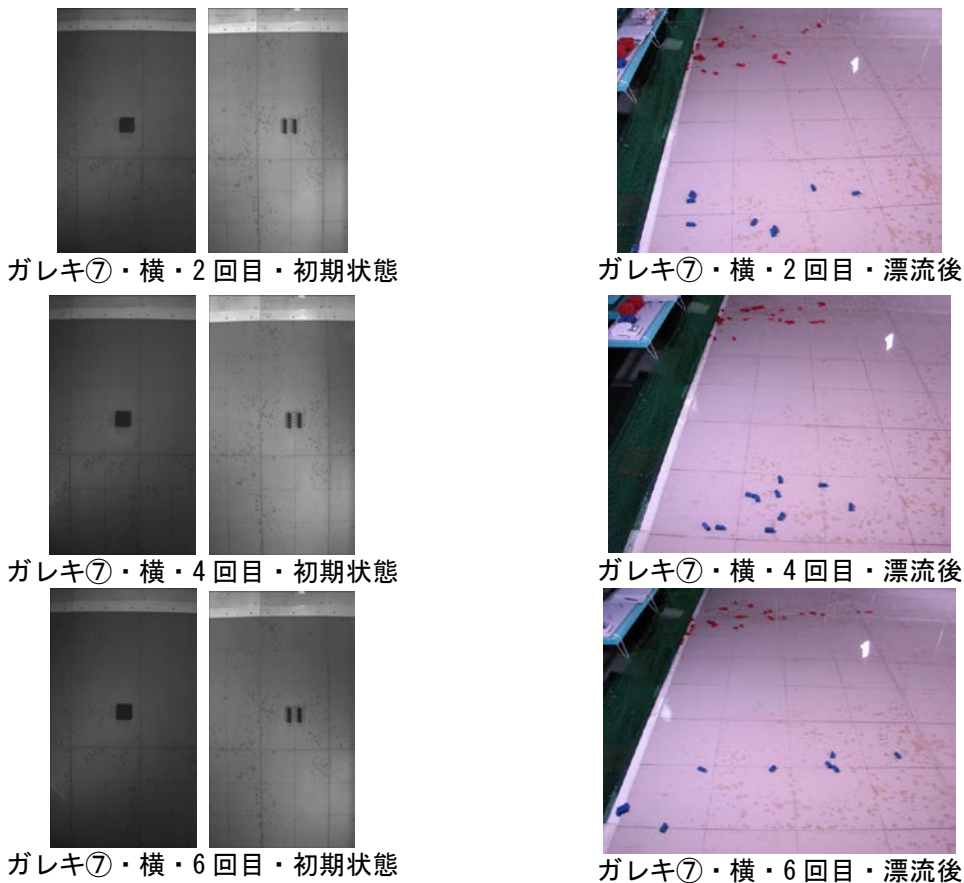


図 2.2 漂流実験におけるガレキ模型の漂流状況（ガレキ⑦・横_2/2）

3. 津波漂流物に関する数値解析

本業務では、津波の初期波源から港湾まで伝播し陸上に浸水する津波を一連に計算し、非静水圧の三次元的な海水流動および多数の漂流物の挙動を解析可能な高潮津波シミュレータ（STOC）を用いて、津波およびガレキ等の漂流物の挙動を推定する手法を検討した。なお、検討に際しては、漂流物による海水流動場への阻害効果およびガレキ等の比重を考慮した。

漂流物挙動を解析する STOC-DM では、水位が漂流対象物の喫水を超えた瞬間に漂流を開始するものと仮定し、また、漂流物が着底した瞬間に漂流物の運動が停止するものと仮定している。そのため、比重が流体よりも重い対象物については、漂流しないものとなっている。しかし、実際には流体力によって対象物が押し流されることもある。そこで、本業務では、既存の STOC-DM において、着底状態の漂流対象物の挙動解析について以下の改良を実施した。なお、着底状態ではない漂流対象物に関しては、既存の STOC-DM の計算手法を用いている。

- 1) STOC-ML による水位の計算結果から漂流対象物に作用する浮力を算出する。
- 2) 自重と浮力から地盤面に作用する垂直抗力を算出する。
- 3) 設定した最大静止摩擦係数および動摩擦係数を用いて、最大静止摩擦力および動摩擦力を算出する。
- 4) 漂流前等の静止している漂流対象物については、作用する流体力と最大静止摩擦力の関係から外力の合力を算出する。
- 5) 移動している漂流対象物については、流体力と動摩擦力から外力の合力を算出する。
- 6) 算出した外力の合力を用いて、漂流対象物の挙動解析を実施する。
- 7) 停止条件として微小な速さを設定し、着底状態の漂流対象物の速さが設定した停止条件を下回った場合に、漂流物を停止させる。

実験において測定した摩擦係数を計算での摩擦力の算出に用いた場合、計算結果は実験結果よりもガレキ模型が非常に長く漂流している。この原因として、実験において測定した摩擦係数は、濡れている状態での水平床とガレキ模型との摩擦係数ではないこと、および、水平床が濡れていることによるガレキ模型との粘着力が作用していることが考えられる。

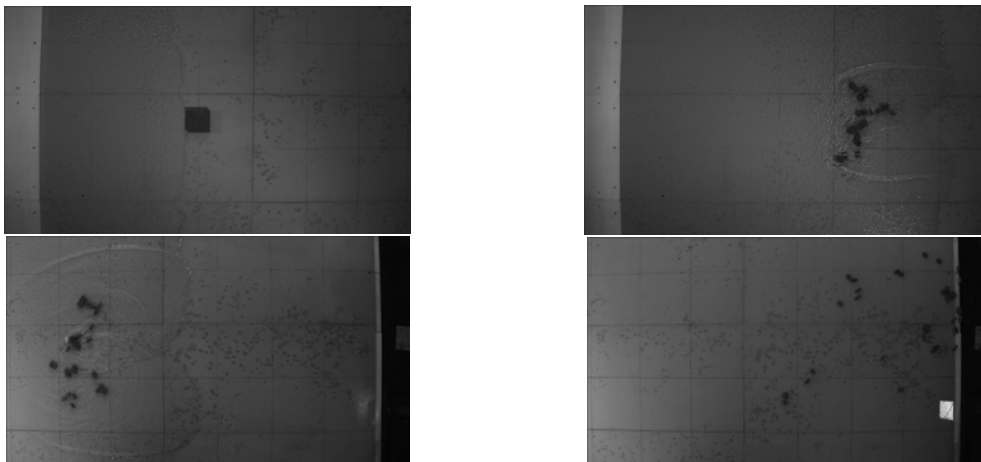


図 3.1 漂流の実験結果（木材、密集）（右下が最終的な漂流位置）

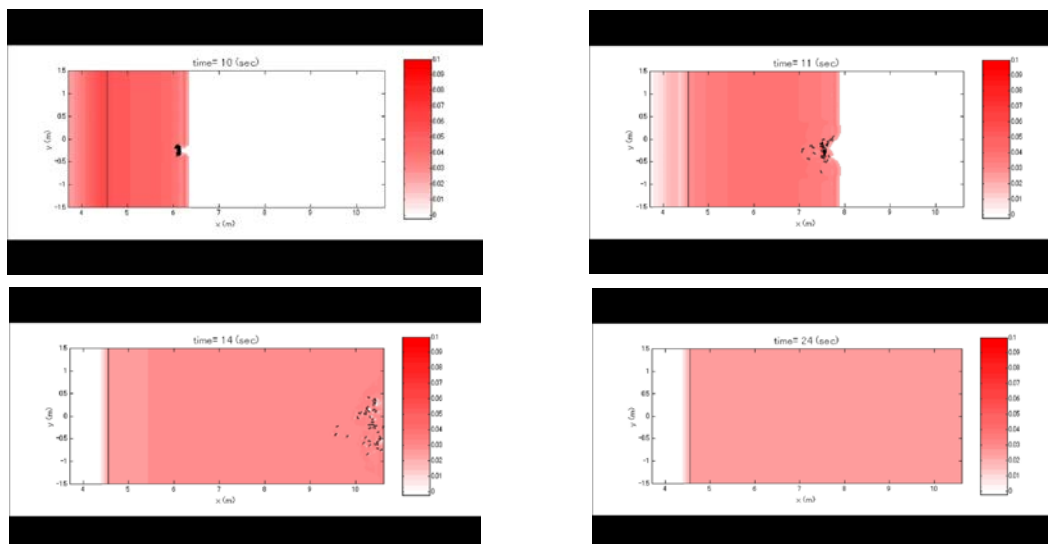


図 3.2 漂流の計算結果（木材、密、摩擦=1 倍）（右下が最終的な漂流位置）

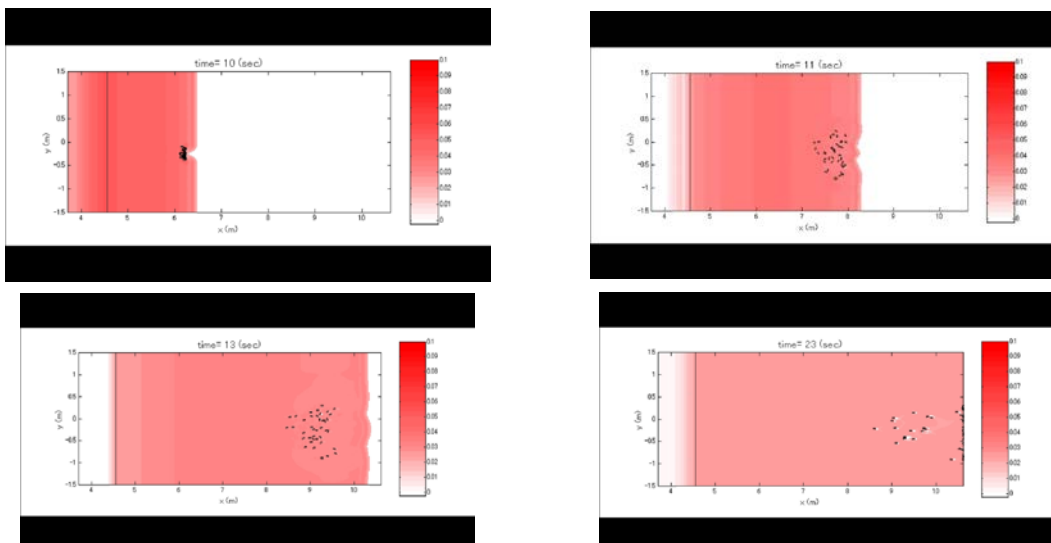


図 3.3 漂流の計算結果（木材、密、摩擦=10 倍）（右下が最終的な漂流位置）

4. 即時的な津波浸水予測に関する検討

本業務では、GPS 波浪計等による沖合津波観測情報の取得時間に応じて、津波の高さ・到達時間・浸水状況の予測情報を随時更新する即時的な津波浸水予測技術において、予測情報の推定誤差を定量化する手法の開発を行った。

4.1. 即時津波浸水予測技術および予測システムの概要

即時津波浸水予測技術は、GPS 波浪計等による(1)沖合津波観測データを用いて津波の初期状態を推定し、(2)津波伝播シミュレーションにより陸上浸水も含めた予測を早期に実施する技術である(図4.1.1)。

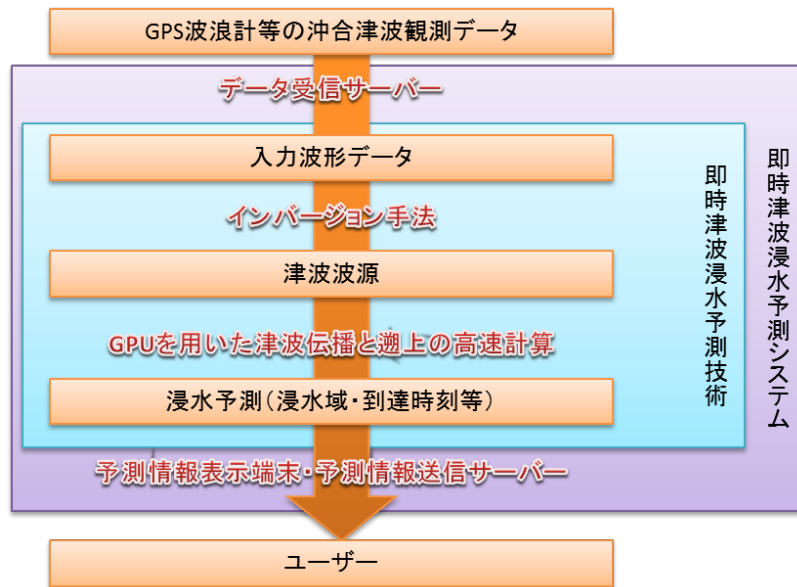


図 4.1.1 即時津波浸水予測技術および予測システムの概要

4.2. 予測情報の随時更新および推定値の信頼区間の推定法

予測情報は波源の推定結果の関数であり、本節では観測データの蓄積に伴う波源推定の随時更新および、推定値の信頼区間推定法について述べる。ここでは Fukuda and Johnson (2008)で提案された断層のすべり量分布の推定法を、津波波源の水位分布の推定に応用し、ベイズの法則にもとづいて津波波源逆推定手法を定式化する。

ベイズ推定では未知パラメーターに関する情報を確率密度関数によって記述する。ここで未知パラメーターのベクトルを \mathbf{x} 、その事前情報に基づく確率密度関数(事前分布)を $p(\mathbf{x})$ とし、観測されたデータのベクトルを \mathbf{d} とする。式1に示すベイズの定理を用いると \mathbf{x} と \mathbf{d} を結びつける物理法則と、観測データに基づき未知パラメーターの確率密度分布を更新することができる。更新された確率密度分布 $p(\mathbf{x}|\mathbf{d})$ は事後分布と呼ばれ、 \mathbf{d} という観測データが得られた場合の \mathbf{x} の条件付き確率密度分布を表す。

$$p(\mathbf{x}|\mathbf{d}) = \frac{p(\mathbf{d}|\mathbf{x})p(\mathbf{x})}{\int_{-\infty}^{\infty} p(\mathbf{d}|\mathbf{x})p(\mathbf{x})d\mathbf{x}}$$

ここで右辺分母の積分は事後分布を正規化する値である。以下では $p(\mathbf{d}|\mathbf{x})$ と $p(\mathbf{x})$ を陽形式で記述し、それらに基づき事後分布 $p(\mathbf{x}|\mathbf{d})$ を推定する方法を示す。式(1)はある時点までに得られたデータに基づく波源の推定結果 $p(\mathbf{x})$ を、その後に得られた観測データに基づいてより精度の高い推定 $p(\mathbf{x}|\mathbf{d})$ に更新するものと解釈することができる。したがって、ベイズの定理に基づく推定方法は、我々が目標とするデータの蓄積ともなって逐次的に未知変数の推定結果をより精度の高いものに更新していくリアルタイム予測システム

ムと親和性が高いと言える。

推定手法においては、波源推定問題を階層ベイズの手法を用いて尤度関数をモデル化し、観測データに基づいて波源の水位分布、観測モデル誤差を同時に推定することが可能である。上記のベイズの法則を用いると事前分布から観測データに基づき推定パラメーターの事後分布が推定される。ここでは事前分布として無情報一様分布を用い、マルコフ連鎖モンテカルロ (MCMC) 法を用いて推定パラメーターの事後分布を推定した。MCMC 法としてはギブスサンプリングの内部でメトロポリス法を利用するハイブリッド手法を用いた。

4.3. 津波波源逆解析問題による手法の検証

波源推定における基本的な提案手法の特性を明らかにするため、単純な矩形断層の逆断層運動による地表変位を津波波源として与える検証例題を設定した (図 4.4.1)。一様水深地形に観測点を 3 点、もしくは 6 点配置し、津波シミュレーションによって各観測点で得られる水位の時系列データを作成した。データに正規分布に従う様々な大きさの人工的な観測誤差を加え、これを観測データとして津波波源の水位分布・観測モデル誤差の推定を行った。真値と推定値の信頼区間を比較することにより本手法の妥当性を検証した。

検証により、次のような結論が得られた。(1) 提案手法により観測誤差を定量的に推定可能であることを示した (図 4.4.2)。(2) 観測誤差と水位分布の信頼区間幅の関係を定量的に明らかにした (図 4.4.3、4.4.4)。提案手法は推定値の不確かさを定量的に示すことができるため、観測精度の向上・観測装置の追加整備・観測装置の配置の変更等により、波源推定における精度の変化を定量的に示すことができ、観測点の最適配置問題などへの応用性が高いと言える。(3) 提案手法で得られる信頼区間の推定値は平均的にやや大きめであることが示された (図 4.4.5)。これは推定結果を予測情報として活用するには非常に重要な性質である。また、やや大きめではあるものの、推定の不確かさを観測データに基いて低減し、信頼区間を客観的かつ定量的に示すことができるのは本手法の大きな利点である。(4) 本手法で得られる波源は複数の標本群として得られるため、これらの標本を用いて津波伝播シミュレーションを多数実施することにより、浸水などの非常に強い非線形をもった現象も確率的な問題として定量的に推定を行うことができるようになる。早期津波予測の観点からも、提案手法は応用性が高いものと言える。

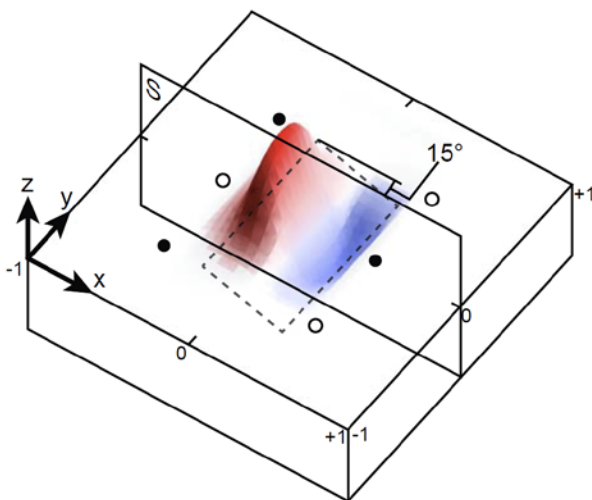


図 4.4.1 検証用の津波波源と観測点配置

3 点観測の場合は白丸地点を、6 点観測の場合は白丸と黒丸の地点を観測点とした。

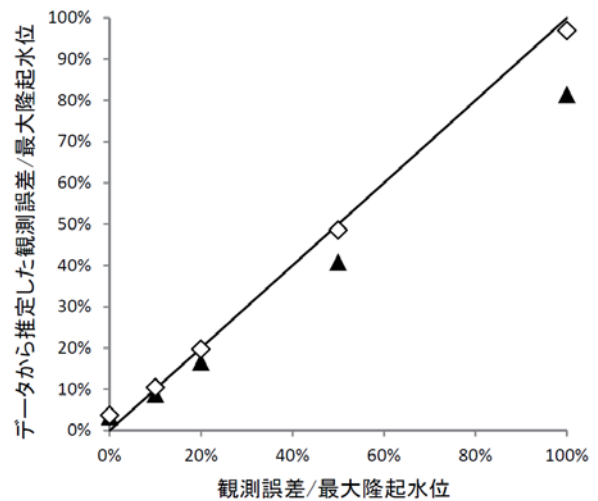


図 4.4.2 人工的に観測誤差を与えた水位の時系列データから観測誤差を推定した結果

(◇ : 6 点観測、▲ : 3 点観測)

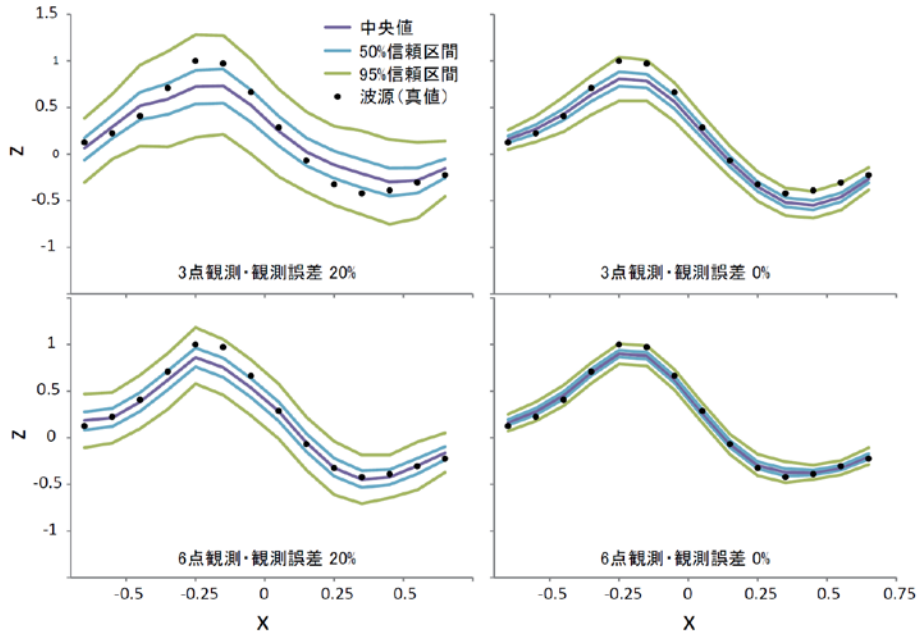


図 4.4.3 断層面の中心を通り走向と直行する断面（図 4.4.1 の S 面）の津波波源水位分布推定結果

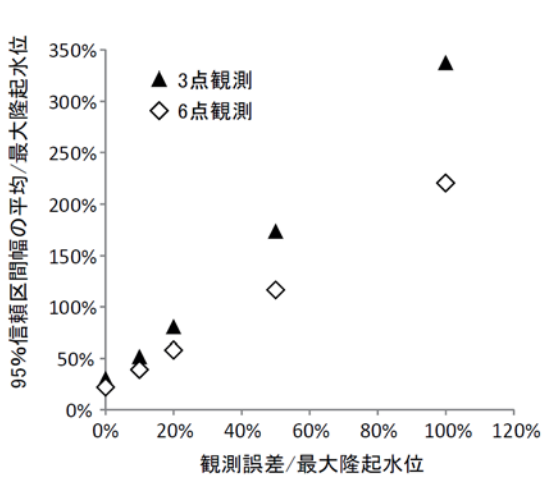


図 4.4.4 観測誤差・観測点数と水位推定における 95%信頼区間の幅の関係

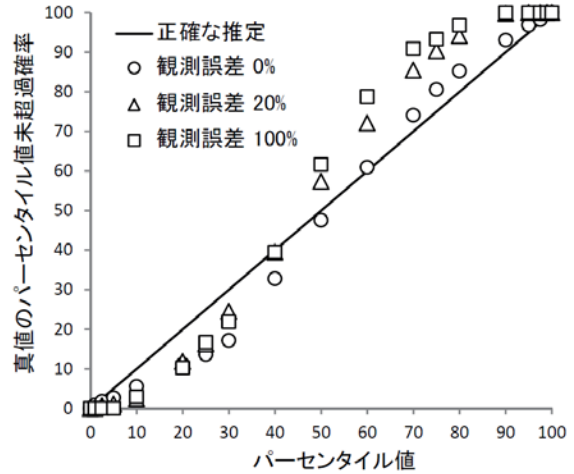


図 4.4.5 推定されたパーセンタイル値とその値を真値が下回る割合の関係（3点観測の場合）

参 考 文 献

- 後藤智明 (1983) : 津波による木材の流出に関する計算、第 30 回海岸工学講演会論文集、pp. 594-495
- 富田孝史・柿沼太郎 (2005) : 海水流動の 3 次元性を考慮した高潮・津波シミュレータ STOC の開発と津波解析への適用、港湾空港技術研究所報告、第 44 巻、第 2 号、pp. 83-98.
- 日向博文・宮野 仁・高尾敏幸(2004) : 風に制御された相模湾への黒潮系暖水流入、国土技術政策総合研究所研究報告、No.17、28p.
- 高川智博・富田孝史 (2012) 時間発展を考慮した津波波源逆解析と観測点地盤変動量のリアルタイム推定、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、第 68 巻、pp. 311-315.
- 辰巳大介・富田孝史 (2008) 震央位置を利用したインバージョン手法によるリアルタイム津波予測、港湾空港技術研究所報告、第 47 巻、第 3 号、55-73.
- 辰巳大介・富田孝史 (2013) 即時的津波浸水予測手法の開発と適用、土木学会論文集 B2 (海岸工学)、Vol. 69、No. 1、34-47.
- 富田孝史・高川智博 (2014) 沖合津波観測データを利用したリアルタイム津波ハザードマップシステムの開発、土木学会論文集 B3 (海洋開発)、投稿中.
- Fukuda、 J.、 and K. M. Johnson (2008) A fully Bayesian inversion for spatial distribution of fault slip with objective smoothing、 *Bulletin of the Seismological Society of America*、 Vol. 98、 No. 3、 pp. 1128-1146.
- Gamerman、 D. (1997). Markov Chain Monte Carlo: Stochastic Simulation for Bayesian Inference、 Chapman and Hall/CRC、 London、 245 pp.
- Hastings、 W. K. (1970). Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications、 *Biometrika* 57、 97-109.
- Jónsson、 S.、 H. Zebker、 P. Segall、 and F. Amelung (2002). Fault slip distribution of the 1999 MW 7.1 Hector Mine、 California、 earthquake、 estimated from satellite radar and GPS measurements、 *Bull. Seismol. Soc. Am.* 92、 1377-1389.
- MacKay、 D. J. C. (2003). Information Theory、 Inference、 and Learning Algorithms、 Cambridge University Press、 New York、 628 pp.
- Metropolis、 N.、 A. W. Rosenbluth、 M. N. Rosenbluth、 A. H. Teller、 and E. Teller (1953). Equation of state calculations by fast computing machines、 *J. Chem. Phys.* 21、 1087-1092.
- Tsushima、 H.、 R. Hino、 H. Fujimoto、 Y. Tanioka、 and F. Imamura (2009) Near-field tsunami forecasting from cabled ocean bottom pressure data、 *Journal of Geophysical Research*、 114、 B06309、 doi:10.1029/2008JB005988.