

# 水面変動を考慮した波源モデルを用いた南シナ海の津波伝播予測について

水工学研究室 白井 亮喬  
指導教員 犬飼 直之

## 1. はじめに

### 1.1 研究背景

津波発生の際の要因は地震発生に伴う海底地盤変動である。津波の水位変動が伝播する状況の把握には、一般的には数値計算を用いる。津波の伝播シミュレーションでは、最初に海底地盤の変動を初期水位変動として与える。その理由は水深に対し波源長が大きいため津波現象を長波近似としていることから、地盤変動量=水位変動量と考え、一般的には海底地盤変動を初期水位変動として与え、津波の伝播計算をおこなっているためである。しかしながら、実際には水位上昇過程で、津波の初期変動水位になる段階までにエネルギーが逸散していると推測できることから、海底地盤変動をそのまま初期水位変動として与えると、厳密には実現象との相違が生じていると考えられる。

### 1.2 研究目的

本研究では、上述した水位上昇過程で津波の初期変動水位になる段階までにエネルギーが逸散しているといった問題に対し、より実現象に近い数値計算を行うことのできる数値モデルの作成を目的とした。

### 1.3 研究内容

実現象の隆起を模擬した水理実験をおこない、その結果に対し、水理実験と同じ条件で数値実験をおこなった。数値実験結果から、本研究での数値モデルが実現象を正しく計算できていることを確認した。得られた数値モデルを用いて、水理実験ではない条件で数値計算をおこなった。また実海域として南シナ海を選定し、数値モデルを実海域に適用することで津波の伝播計算をおこない、国連による津波伝播予測結果との比較検討もおこなった。本研究の流れは以下の通りである。

- ①波源域での海底地盤変動を模擬した水理実験装置の作成および実験による水面応答の挙動の把握
- ②水理実験条件に合わせた数値計算をおこない、数値モデルの作成および確からしさの確認
- ③水理実験条件にはない条件に対して拡張実験の実施
- ④南シナ海を計算対象領域とした実海域への数値モデ

ルの適用

- ⑤本研究と国連による仮想津波伝播計算結果の比較・検討

## 2. 水理実験概要

波源域を模擬した水理実験を行うにあたり、実験装置の設計製作を行った。また波速度確認実験および波高計の精度検証実験も事前に行った。水理実験では、水深や隆起量、変位速度等のパラメータを変化させ、水面応答率に対する考察を行った。水深を 5cm、隆起量を 2.5cm、4.0cm、隆起時間を 5.0~10.0cm/s で変化させた。波高計は 2 本用意し、1 本目を波源域右側 10cm の距離に設置し、2 本目を 80cm の距離で設置した。波源域両側には水深を一定に保つための土台も製作し、設置した。実験装置都合上、変位速度は水深によってある程度制限される。式(1)に水面応答率の定義を示す。これらの実験装置を用いて隆起による水面応答を確認し、実現象での隆起を想定した先ほどの条件にて実験を行った。

- ・水面応答率

$$\text{水面応答率(\%)} = \text{水面応答値(cm)} \div \text{隆起量(cm)} \times 100(\%) \quad (1)$$



図-1 水理実験装置(写真)

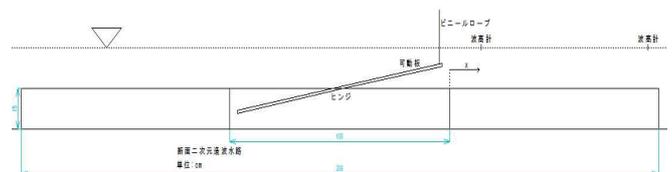


図-2 実験装置概要

## 3. 数値実験概要

地震による初期地盤変動を直接入力して計算することのできる数値モデルを作成し、水理実験の条件にあ

わせて数値実験を行った。以下に数値実験で用いる流れの基礎方程式を示す。なお、水理実験に合わせた数値実験では粘性項、摩擦項は考慮しておらず、実海域を対象とした数値計算では考慮している。本研究ではこれらの運動方程式と連続式を陽的に差分して数値計算を行った

・運動方程式

(a)水平 u 方向

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} - A_h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{g v \sqrt{u^2 + v^2}}{(\xi + h) C^2} = 0$$

(b)水平 v 方向

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial y} - A_h \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{g u \sqrt{u^2 + v^2}}{(\xi + h) C^2} = 0$$

・連続式

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \{ (\xi + h) u \} + \frac{\partial}{\partial y} \{ (\xi + h) v \} = 0$$

ここで、h:水深(m),  $\xi$ :水位 (m),  $A_h$ :渦粘度 ( $m^2/s$ ),  $A_v$ :垂直粘度( $m^2/s$ ), C:Chezy 係数, を表している。

図-3 は本研究で用いた数値計算モデルであり、地震による初期地盤変動を直接入力して計算することができる数値モデルとなっている。従来の数値モデルでは運動方程式の中で水位変動量であることを強制的に与えた。それに対して、本研究での数値モデルは、連続式の中で地盤が変動する変位速度を直接与えている点が大きな違いである。計算条件は、格子間隔を 1cm, タイムステップを 0.01 秒とし、隆起量を 2.5cm, 水深を 15cm, 変位速度を 0.8cm/s, 隆起時間を 3 秒の条件で水理実験での水路に合わせ数値実験をおこない、水面応答の挙動を把握した。

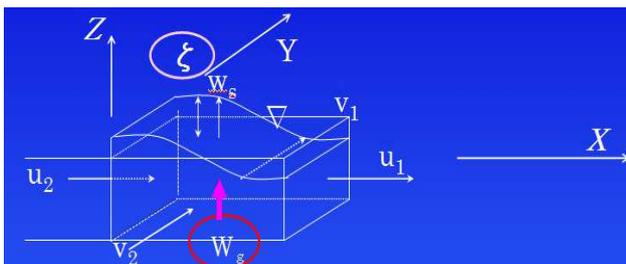


図-3 本研究での数値計算モデル

図-4 に従来の計算手法での計算結果および図-5 に本研究で改良した数値計算手法により得られた計算結果を示す。数値計算結果はともに波源域から 10cm の距離で水面応答がピークの値となった。図-4 に示す従来の計算手法では最大隆起量が 0.4cm, 最大沈降量が 0.4cm となり、本研究での数値計算手法では最大隆起量, 最大沈降量ともに 0.2cm となった。図-4 に示す従来の計算モデルでは隆起時に水位を上昇させている。その直後に流速と水位を計算しており、ピーク値での水面形は極端な水面形となった。一方で図-5 に示す本研究での改良した数値モデルでの計算結果では、エネルギーの逸散が考慮されており、実現象に近い水面形となっている。

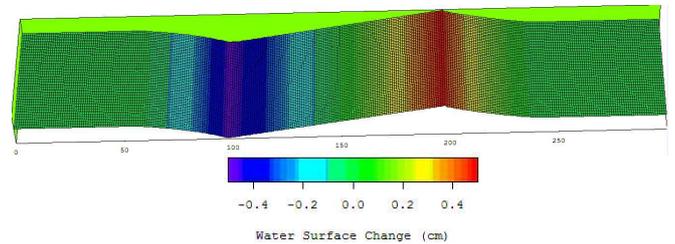


図-4 従来の計算手法での数値計算結果

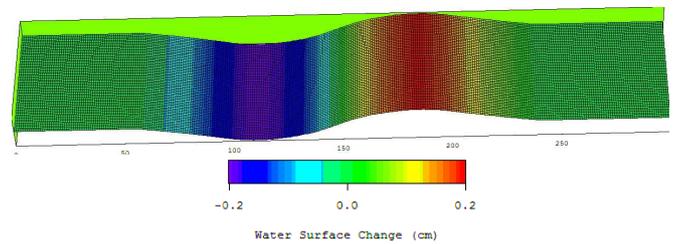


図-5 本研究での数値計算結果

#### 4. 水理実験結果と数値実験結果の比較

ここでは水理実験結果とその条件に合わせておこなった数値計算結果の比較をおこない、数値モデルの有用性を確認した。

図-6 および図-7 に 2 ケースにおける水理実験結果を示す。計算条件は隆起量が 2.5cm, 4.0cm, 水深は 5cm の実験条件である。またそれぞれに、同条件での数値実験結果も併せて示した。隆起量 2.5cm のケースでは水面応答率は 35%~40%の範囲内の値となった。変位速度が大きくなれば、水面応答率も大きくなるといった結果を得た。水理実験結果と数値実験結果は概ね一致しており、実現象を精度よく再現した数値計算であるといえる。隆起量が 4.0cm のケースにおいても水理実

験に対する数値実験は概ね良好な結果を得た。また 2.0cm の隆起量と同様に変位速度の増加に伴い、水面応答率は上がる傾向を示した。これより、数値実験は実現象を精度よく再現していることを確認し、数値モデルの有用性を確認した。

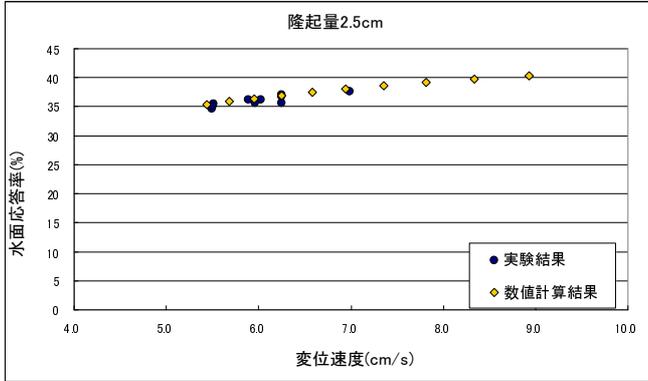


図-6 水理実験および数値計算結果(隆起量 2.5cm)

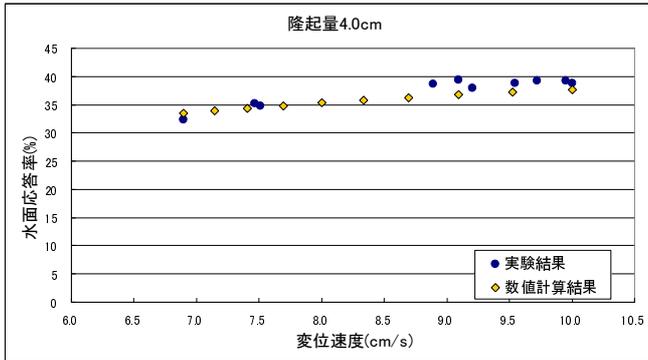


図-7 水理実験および数値計算結果(隆起量 4.0cm)

水深が小さければ相対的に変位速度は大きくなるという結果を得た。また水深が一定の場合、変位速度が大きければ水面応答率も大きくなる。ここでは変位速度を 5.435cm/s~8.929cm/s で変化させた。図-10 は隆起量を 4.0cm とし、数値計算を行った。図-9 で見られた水面応答率の傾向が図-10 でも同様にみられた。ここまでの水理実験結果および数値実験結果から以下の水面応答の挙動を把握した。

- ①水深が小さいほど水面応答率は大きくなる。
- ②水深が等しい場合、隆起速度が大きくなれば水面応答率も大きくなる。
- ③隆起量は小さい方が水面応答率は大きくなる。
- ④波源長は短いほうが水面応答率は大きい傾向にある。
- ⑤水面変位は隆起量と比較した場合、総じて小さくなる。

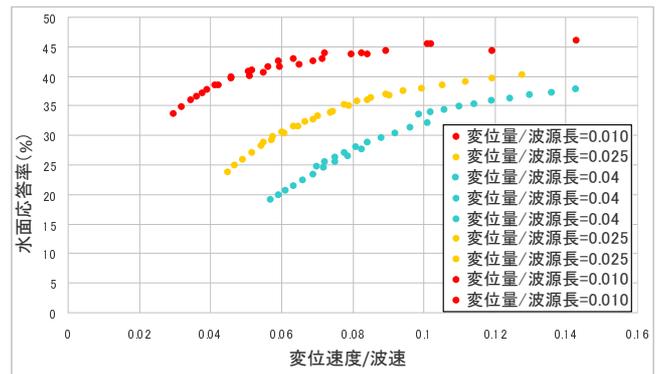


図-8 変位速度/波速を無次元化した場合の水面応答率

### 5. 実験条件を拡張した数値実験および結果

本研究で得られた数値モデルを用いて、水理実験では行うことが困難な条件での数値実験を行い、諸条件を変更した場合の水面応答率を考察した。図-8 に変位速度と波速を無次元化したときの波源長による水面応答率の推移を示した。波源長が小さくなると水面応答率は大きくなり、変位量が大きくなると水面応答率は大きくなるという結果を得た。これは水深が一定の場合での数値実験であり、実現象でも同様の結果が得られるといえる。

変位速度による水面応答率の変化の特徴を把握するため、水深を 5cm, 10cm, 15cm の 3 ケースにおいてそれぞれ変位速度を 10 通り変化させ、水面応答率に着目した。それらの計算結果を、図-9 および図-10 に示す。図-9 は隆起量を 2.5cm とした場合の水面応答率である。

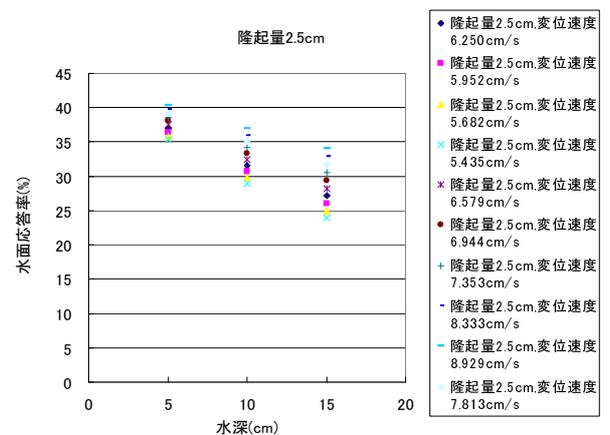


図-9 変位速度による水面応答率(隆起量 2.5cm)

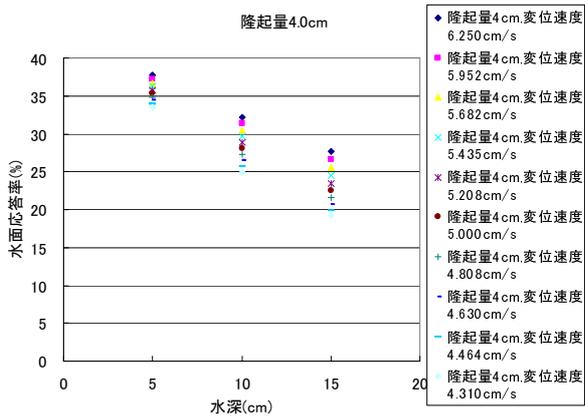


図-10 変位速度による水面応答率(隆起量 4.0cm)

## 6. 南シナ海領域を対象とした津波伝播計算

ここでは、南シナ海を計算対象領域として、仮想津波伝播計算をおこなった。また国際連合(EU)が発表した津波伝播計算結果と本研究で得られた津波計算結果を比較し考察をおこなった。

### 6.1 計算領域および計算条件の決定

2011年3月、国際連合(EU)はベトナム中部への地震による津波被害を危惧しており、その脅威となるのはフィリピン西部の地震帯、マニラ海溝を発生源とするM8以上の地震による津波である。

そこで本研究では計算対象領域を南シナ海、マニラ海溝を震源とするフィリピン西部の地震帯でのM8の地震を想定した津波の伝播計算を行った。図-11に計算対象領域図を示す。津波伝播計算を行うためには隆起量や沈降量、断層長さ等の情報が必要となるが、ここでは既往研究成果(2010 加藤)を用いて求めた。加藤らの研究結果によると、震源の位置と地震エネルギーの規模から、津波伝播計算に必要なパラメータを求めることができる。図-12、図-13に地震エネルギーと最大隆起量および最大沈降量の関係を示す。本研究ではマグニチュード8の地震を想定しているため、図-12および図-13より、最大隆起量は2m、最大沈降量は1mとした。本研究での津波伝播計算に用いた地形データはNOAA's National Geophysical Data Center (NGDC)より提供されている、地球全域の標高・水深を1分間隔の格子情報で表したEtopo1を使用した。本研究では領域にあわせて1500×1560の格子数とした。また、タイムステップはクーラン条件より5秒とした。今回の計算に

用いたパラメーター一覧を表-1に、初期地盤変動状況を図-14に示す。なお、今回の仮想津波計算では震源の向きを海溝の走向に合わせて、震源の向きを北を基準に西側へ15°傾斜させた。

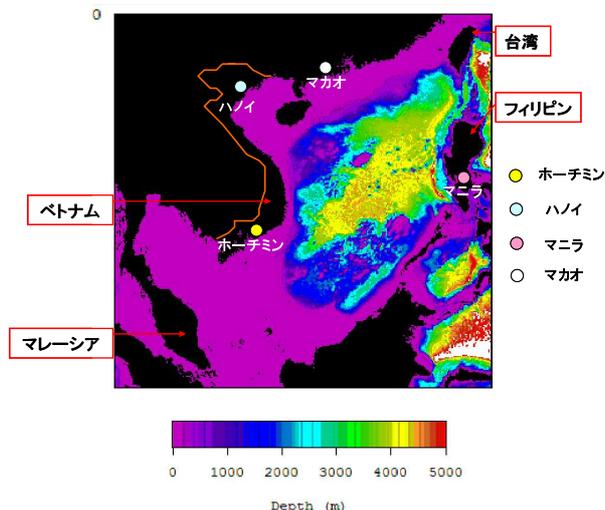


図-11 計算対象領域図

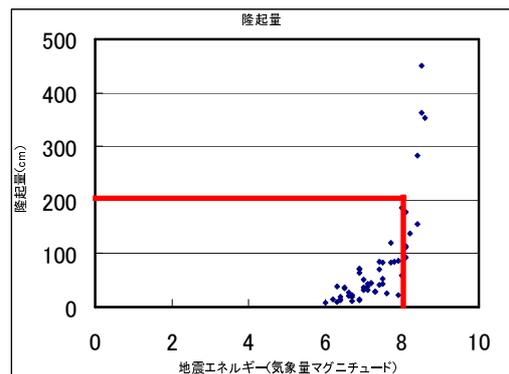


図-12 地震エネルギーと最大隆起量の関係(Mj)  
(加藤ら, 2010)

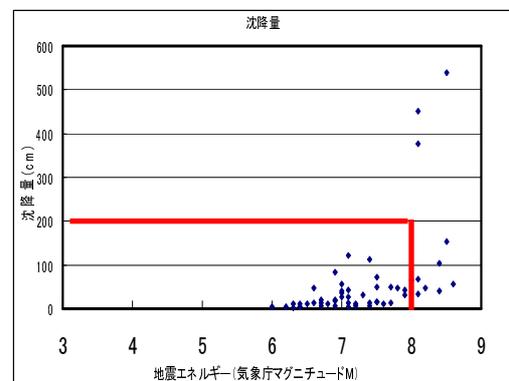


図-13 地震エネルギーと最大沈降量の関係(Mj)  
(加藤ら, 2010)

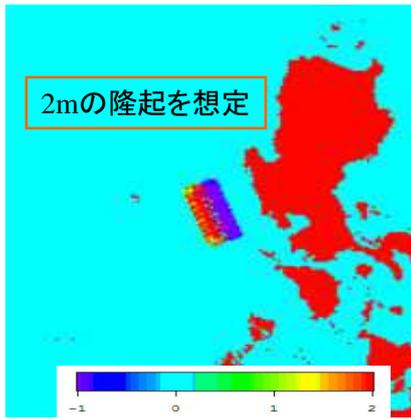


図-14 初期地盤変動

表-1 計算に用いたパラメーター一覧

座標	E119.2, N14.8
地震エネルギー	M8
最大隆起量	2m
最大沈降量	(-)1m
断層長さ	150km
断層幅	80km
走向角	(-)15°

## 6.2 津波計算結果

図-15 に最大水位変動量および図-16 に到達時間の分布図を示す。図-16 は最大で 20 時間後の津波到達時間の分布図である。また図-17 に国連による南シナ海津波伝播予測図を示す。これらの計算結果からベトナム中部やマレーシア、ハノイ、マカオなどへの到達予測時間や最大水位変動量について考察する。また国連による津波到達時間の計算結果と本研究での計算結果を比較・考察した。図-15 では津波発生箇所から瞬間的に最大水位が見られた。水深の浅い領域では津波水位変動は伝わらず、波は落ち着く。水深の深い領域内で最大水位変動を確認できた。また、マカオ方面へ水位変動の挙動が見られた。図-16、図-17 での津波の到達予測時間の結果について考察する。本研究での津波伝播計算ではベトナム中部には 2 時間後に津波が到達するという結果を得た。これは国連の計算結果と一致する。またマレーシアやハノイ、マカオへの到達予測時刻も等しい結果となった。しかし、本研究での計算結果は国連の計算結果に比べて、津波の伝播する様子はきれいな円状とはならず、本研究での到達予測結果は国連の結果に比べて、より詳細な時間毎の津波の伝播の様子を示した。この要因としては用いた地形データが本

研究の方がより詳細な地形データを用いたからであると推測できる。

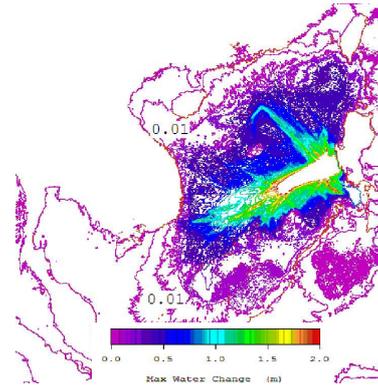


図-15 最大水位変動量

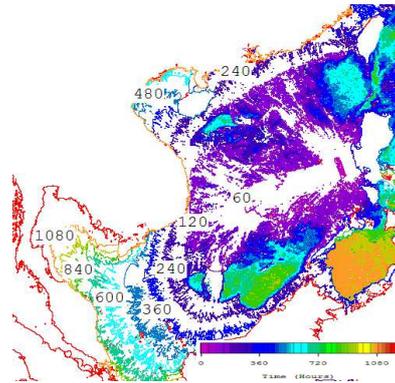


図-16 津波到達時間(20 時間後)

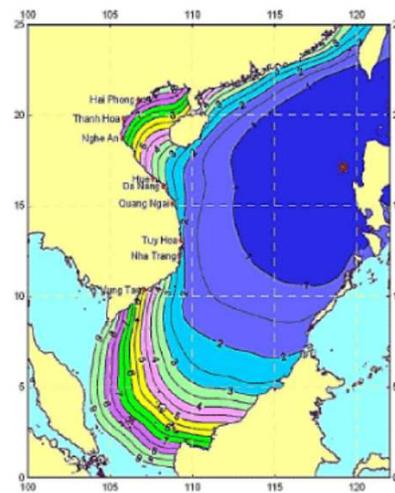


図-17 国連による津波伝播予測図(南シナ海)

## 7. まとめ

本研究の最大の目的である、地盤が隆起する現象を高精度で表現できる津波伝播数値モデルを作成した。そのために水理実験と比較をして数値モデルの計算の妥当性を確認した。また、拡張実験によって水理実験では困難な条件での隆起する現象の挙動を数値実験から得ることができた。作成した津波伝播計算モデルを用

いて、南シナ海でのフィリピン沖で発生する可能性がある地震津波の伝播状況について予測計算をおこなった。その結果、国連の結果よりも詳細地形による伝播時間および最大水位変動量の予測結果を得ることができた。

#### 参考文献

- 1) 松山 昌史 他：海底地盤変動による水面応答特性に関する実験と数値シミュレーション，1995，海岸工学論文集，第42巻，pp.226-230
- 2) 日下部 重幸 他：環境・都市システム系 教科書シリーズ7 水理学 コロナ社，pp161-164
- 3) 加藤 文章：地震津波の発生判断基準および伝播予測手法の開発，長岡技術科学大学学士論文，2010
- 4) 土木学会海岸工学委員会，<http://www.coastal.jp/ja/index.php>
- 5) 土木学会原子力土木委員会 津波評価部会：原子力発電所の津波評価技術，2002
- 6) 国土地理院，<http://www.gsi.go.jp/>
- 7) 犬飼直之，永沢薫"数値計算による東北地方太平洋沖地震津波による岩手県北部での構造物被災状況の把握"，土木学会，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.68, No.2, I\_306- I\_310, 2012.
- 8) 伊藤 正義 他：わかりやすい数理統計の基礎，森北出版