

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560607

研究課題名(和文) 衛星リモートセンシングによる非線形波浪の水位分布を考慮した高精度波高推定法の開発

研究課題名(英文) Estimation of Joint Probability Density Functions of Surface Elevation and Slopes for a Nonlinear Random Sea

研究代表者

泉宮 尊司 (IZUMIYA, TAKASHI)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：60151429

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円、(間接経費) 1,290,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、非線形パラメタ skewness と kurtosis との関係を理論的および実験的に調べた。Gram-Charlier 級数を用いた方法および最大エントロピー法を用いた方法のより広範囲な適用性を調べるために、離岸堤による反射波の非線形パラメタおよび水位・水面勾配の結合確率分布に与える影響についても調べた。さらに、非線形変換を利用した水位・水面勾配の結合確率分布を理論的に求め、結合確率分布 $p(x, y)$ と波形勾配との関係を理論的に評価し、実測値と比較した。

研究成果の概要(英文)：Laboratory experiments were conducted to measure the joint distribution of the surface elevation and slopes for nonlinear random waves. A method for estimating the joint distribution of surface elevation and slopes was developed by applying the principle of maximum entropy. The estimated distributions were compared with the measured distributions, the Gram-Charlier series and bivariate Gaussian distributions. The present method was found to produce a similar distribution to that observed. The relationship between skewness and kurtosis was theoretically and experimentally investigated. The effects of reflected waves on the joint distribution of the surface and slopes were also investigated. The theoretical conditional distributions based on a simple nonlinear wave model reproduced the dependence on the representative wave slope and were in good agreement with the laboratory observations.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：非線形波浪 リモートセンシング 結合確率分布 水位分布 波高分布 skewness kurtosis

1. 研究開始当初の背景

高風速時には、波浪の非線形性が有意に影響を及ぼしているにも拘わらず、衛星リモートセンシングによる波高推定には、水位分布に対しては線形波に対して成立すると考えられる Gauss 分布が用いられてきた。さらに、波高分布に関しても狭帯域スペクトルで成立する Rayleigh 分布が成立するものと仮定されてきた。したがって、高風速時には衛星リモートセンシングによる波高推定に有意な誤差が生じている可能性があると考えられる。一般に、海面からのエコー強度は、海面水位だけでなく、水面の空間勾配にも関係し、それらの同時確率分布と関係付けられる。線形波の場合には、比較的容易にその確率分布を算定できるが、非線形波の場合には、キュムラント展開等を用いて、高次モーメントまで求めなければならない。Srokosz(1986)は、波浪の非線形性を考慮すべく、skewness まで考慮した水位、水面勾配との同時確率分布を算定している。しかしながら、波高分布や freak wave の発生により関係の深い kurtosis の効果は考慮されていない。

2. 研究の目的

本研究では、強風速時の波浪を観測し、波高、skewness および kurtosis 等を計測し、非線形性の度合いを計測する。さらに、水位、 x 及び y 方向の水位勾配との同時確率分布を波浪の非線形性を考慮して理論的に導き、マイクロ波高度計で受信される反射信号と skewness および kurtosis との間係を明らかにする。さらにこれらの関係を実際の海面高度計で得られ反射信号と比較することにより、精度の高い波浪計測法を確立することを研究の目的とする。

3. 研究の方法

本研究は、現地波浪の観測による非線形性の解明、および非線形波の水位・水面勾配同時確率分布を考慮した衛星リモートセンシングによる波高分布の高精度推定法の確立

の2つの研究から成っている。前者の研究では、現地沖合い海域において、水位変動と2方向の水面勾配を同時に測定し、それぞれの確率密度分布だけでなく、3次および4次等の多元高次モーメントを算定し、水位・水面勾配の同時確率分布等を評価する。後者の研究では、マイクロ波高度計により海面の状態を観測することを前提に、水位・水面勾配の結合確率分布を用いて、反射信号を評価し、波高だけでなく、非線形パラメタである skewness あるいは kurtosis のいずれかも推定する手法を開発する。平成23年度から平成25年度は、以下の研究計画に従って研究を進める。

- (1) 現地波浪の非線形性が水位・水面勾配の同時確率分布に及ぼす影響を調べるために、GPS および傾斜計を搭載した小型漂流ブイを用いて、水位と2方向の水面勾配を同時に計測する。この測定結果を用いて、個々の確率分布およびパワースペクトルだけでなく、多元高次モーメントを算定する。非線形性の代表パラメタである波形勾配、skewness および kurtosis の値を調べることにより、現地波浪の非線形度を明らかにすることができる。
- (2) 様々な気象・海象条件において、備品に計上の GPS および傾斜計を搭載した小型漂流ブイを用いて、水位・水面勾配の結合確率分布を算定する。この分布は、3次元の分布となるため、安定した分布形状を得るために、関数形を仮定して係数を最尤法等で算定することにより、観測データの結合確率分布を得る。
- (3) 波浪の非線形性を考慮した水位・2方向水面勾配の結合確率分布を理論的に算定するために、多次元キュムラント展開を用いる。また、高次キュムラントと水位等の高次モーメント等との関係を見出す。
- (4) マイクロ波高度計の反射信号を、波浪の非線形性を考慮した水位と海面勾配との

結合確率分布との関係を明らかにする．この関係式を用いて、波高および skewness あるいは kurtosis の算定法を開発する．

- (5) 現地波浪観測の結果を取りまとめ、波浪の非線形性による水位および海面勾配の分布を理論的に推定された分布と比較し、理論の適合性を検証する．
- (6) 前年度の観測結果を参照しながら、GPSブイの設置水深を変化させて、水深変化による非線形性の変化状況を計測する．水位・水面勾配の結合確率分布に関しては、skewness および kurtosis を与えて関数形を評価し、実測値と比較・検討する．
- (7) 線形波浪の波高と水位・水面勾配の結合確率分布との関係を理論的に導く．必要なパラメタを与えて、順問題としてマイクロ波高度計の反射信号を計算し、非線形パラメタである波形勾配、skewness および kurtosis の変化による反射信号の変化特性について明らかにする．水位・水面勾配の結合確率分布に関しては、skewness および kurtosis を与えて関数形を評価し、実測値と比較・検討する．
- (8) 線形波浪の波高と水位・水面勾配の結合確率分布との関係を理論的に導く．必要なパラメタを与えて、順問題としてマイクロ波高度計の反射信号を計算し、非線形パラメタである波形勾配、skewness および kurtosis の変化による反射信号の変化特性について明らかにする．

4．研究成果

本研究では、現地波浪、室内風波実験、非線形波浪の数値シミュレーションを用いた水位および水面勾配の高次モーメントの特性の考察、および高次モーメントを考慮した結合確率分布推定法の開発、および従来法との比較、検討を行った結果、以下の事柄が明らかとなった．

- (1) 現地波浪において、水位の skewness と kurtosis の間に正の相関関係があることが

認められた．一方、室内実験の風波には負の相関関係が見られた．

- (2) 指数関数の積で表わされる結合確率密度関数の推定法を開発した．この方法は、確率密度の非負値性を満たし、かつ高次モーメントの影響が適切に考慮される利点がある．
- (3) 室内実験で観測された風波の水位と水面勾配の結合確率分布より、水位、水面勾配の両方について分布の非対称性が見られた．その実測値との比較により高次モーメントを考慮した結合確率分布推定法は、実測値に見られる分布の非対称性を精度良く表わすことが分かった．また、2次元 Gram-Charlier 級数による分布は一部領域で確率密度の値が負となり、本手法はピーク値がやや過大となる傾向を示していた．
- (4) 非線形波浪シミュレーションから得られた水位と水面勾配のデータから $\eta_x=0$ 近傍の水位 η の分布とその理論値を比較した結果、1変数分布については、高次モーメントを考慮した従来法と本手法が、同程度の精度で分布形状を表現できることが確認された．
- (5) 小型傾斜計の精度を調べるために、時間水位波形から波動方程式を用いて評価した水面勾配と小型傾斜計による結果とを比較したところ、極めてよく一致することが分かった．このことにより、小型傾斜計の計測精度があることが確認された．
- (6) 水位および水面勾配の分布は、Gauss 分布とは異なり、やや尖った分布となった．4次モーメントまで考慮した著者らの方法や Gram-Charlier 級数分布は、比較的実測値とよく一致することが確認された．
- (7) Gram-Charlier 級数分布の正の部分は実測値と分布が比較的類似しているが、負の値が存在する欠点を有している．それに対して、正值性の保証された本研究の

方法による結果は、全体的に実測値の分布に近く、比較的よい精度で結合確率分布を表現できると言える。

- (8) 水位の非線形パラメタの μ_3^2 と μ_4 との関係は、現地観測データと実験室データではやや異なり、実験データの方が非線形度は大きい、ほぼ線形関係にあることが分った。この関係はStokes波列モデルとほぼ同様な関係にあったが、その比例係数は多少小さな値をとることが分った。
- (9) 水面勾配の非線形パラメタの μ_3 と μ_4 との関係は、尖り度 μ_4 の値が大きく、反射波が含まれる場合には、歪度 μ_3 も負の方に推移することが明らかとなった。反射波が共存する場合には、水位の非線形パラメタの μ_3^2 と μ_4 との関係は明確ではなく、進行波成分のみの場合とは異なる結果であった。
- (10) 反射波共存場の水位・水面勾配の結合確率分布は、4次モーメントまで考慮したGram-Charlier級数を用いた方法では分布形状を正確に再現できていないが、著者らの方法では大まかな形状を再現できていることが分った。これは著者らの方法では、4次モーメントまで正確に再現した分布であるためと考えられる。
- (11) 海面高度計による波浪計測では、マイクロ波の反射信号に関する $P(\eta, \eta_x=0)$ の値が重要である。この分布は、非線形度が表れやすく、Gauss分布とはかなり異なる分布であることが分った。実測の分布は、より負の方に偏った分布をしている。本研究の理論分布が最も実測値に近く、非線形度の影響をよりの確に再現できることが分った。
- (12) 非線形変換 $\xi = \xi(Z_1, Z_2)$, $\zeta = \zeta(Z_1, Z_2)$ を用いて、Stokes波列モデルによる水位と水面勾配の結合確率分布を理論的に求める式を提案した。この方法では、変換のJacobianを用いているが、算定結果も非負値である

ため、Gram-Charlier級数を用いた方法のように負値をとることがないという利点を有している。Stokes波の3次近似を用いた場合の波形勾配による $p(\eta, \eta_x=0)$ の変化は、非線形パラメタである波形勾配が大きくなるほどGauss分布とは異なり、負の方へピークが変位する傾向にあることが分った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計12件)

坂井雄太・泉宮尊司: GPS 地殻変位データを用いた東北地方太平洋沖地震津波の波源域の逆推定およびその精度に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読あり, Vol.69, No.2, pp. I 181-I 185, 2013年。

宮嶋祐太・泉宮尊司・石橋邦彦・大谷靖郎・田辺 勝・北井芳典: ADCP の後方散乱強度を利用した底質特性の定量評価に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読あり, Vol.69, No.2, pp. I 1421-I 1425, 2013年。

泉宮尊司・岡村拓昭・石橋邦彦: 非線形不規則波の水位・水面勾配の同時計測およびその結合確率分布に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 査読あり, Vol.69, No.2, pp. I 081-I 085, 2013年。

横川 陽太郎, 泉宮尊司, 石橋邦彦: 高精度方向スペクトル解析による現地波浪の方向スペクトル特性に関する研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 査読あり, Vol.69, No.2, pp. I 646-651, 2013年。

泉宮尊司, 内山 翔太・尾島 洋祐: 領域区分による Gutenberg-Richter 則に基づいた地震津波発生確率の推定法, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 査読あり, Vol.69, No.2, pp. I 431-I 436, 2013年。

松本和記, 泉宮尊司, 石橋邦彦: 石油タンクおよびパイプラインに作用する津波波

力に関する実験的研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 査読あり, Vol.69, No.2, pp. I 293-I 298, 2013.

山下正輝, 泉宮尊司: 非線形波浪の水位および水面勾配の結合確率分布特性に関する研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 査読あり, pp. 804-809, 2012 年.

土門 明, 泉宮尊司, 石橋邦彦: 風, 波と流れによる漂流物の抗力係数および漂流予測に関する研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 査読あり, pp. 1031-1036, 2012 年.

泉宮尊司, 横山侑機, 石橋邦彦: 順風および逆風下におけるうねりと風波の発達特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読あり, 第 67 巻, pp.151-155. 2011.

泉宮尊司, 小林雄一, 坂井実可子: 津波干渉合成法による遠地津波の波形予測に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読あり, 第 67 巻, pp.226-230. 2011.

小林雄一, 泉宮尊司: Deconvolution 法を用いた長周期波の水位波形推定法に関する研究, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 査読あり, Vol.36, pp.859 - 864.2011.

澁谷仁史, 泉宮尊司: N 年最大統計量の適合性を考慮した分布関数の採択基準の提案, 土木学会論文集(海洋開発), 査読あり, Vol.36, pp.930 - 935, 2011.

[学会発表](計 4 件)

坂井雄太, 泉宮尊司: GPS 地殻変位データを用いた逆解析手法による東北地方太平洋沖地震の津波波源域の推定, 第 30 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, pp. 140 - 143, 2012 年 10 月 30 日.

横川陽太郎, 泉宮尊司, 石橋邦彦: 気象条件による現地波浪の方向スペクトルおよび流れの変化特性に関する研究, 第 30 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, pp. 148 - 151, 2012 年 10 月 30 日.

山下正輝, 泉宮尊司: 高精度波高推定のための非線形波浪の水位分布特性に関する研究, 第 29 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, pp.144-147, 2011 年 11 月 22 日.

土門 明・泉宮尊司・石橋邦彦: 吹送流速および波動流速による抗力係数を評価した浮遊漂流物の漂流経路予測に関する研究, 第 29 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, pp.148-151, 2011 年 11 月 22 日.

[図書](計 1 件)

泉宮尊司: 新潟海岸, 日本の海岸, 柴山知也・茅根創編, 朝倉書店, pp. 52 - 55, 2013

6. 研究組織

(1) 研究代表者

(1) 研究代表者

泉宮 尊司 (IZUMIYA TAKASHI)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号: 60151429

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

石橋 邦彦 (ISHIBASHI KUNIHICO)

技術専門職員

山下 正輝 (YAMASHITA MASAKI)

新潟大学・大学院 自然科学研究科・博士前期課程

坂井 雄太 (SAKAI YUTA)

新潟大学・大学院 自然科学研究科・博士前期課程

宮嶋 祐太 (MIYAJIMA YUTA)

新潟大学・大学院 自然科学研究科・博士前期課程

岡村 拓昭 (OKAMURA HIROAKI)

新潟大学・工学部建設学科・卒業研究生

高橋 龍之介 (TAKAHASHI RYUNOSUKE)

新潟大学・工学部建設学科・卒業研究生