

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 20 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22360195

研究課題名(和文) ストーム時の波群性と長周期波を考慮した入射波モデルの作成

研究課題名(英文) TRANSFORMATION OF WAVE GROUPS IN A DIRECTIONAL SEA

研究代表者

喜岡 渉 (KIOKA, Wataru)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10135402

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円、(間接経費) 4,260,000円

研究成果の概要(和文)：不規則な波群中の個々の波の累積効果がより重要になる海岸工学の諸問題に対して、設計波に入射波群を用いる方法を提案することを目的とし、任意のスペクトル下で浅海に伝播して来る不規則波の波群特性の評価方法を確立した。入射波群の方向スペクトルを初期値として、緩勾配を仮定した斜面上での波列のゆっくりとした空間変動を記述する3次の離散型ザハロフ式を新たに提案し、高波浪時の現地波浪データの解析結果と比較検討することにより、モデル方程式の妥当性を検証した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to determine wave group evolution by investigating the transformation of multi-directional spectra at constant depth and on a sloping beach. The transformation of wave groups can be evaluated by computing multi-directional nonlinear waves based on the third-order Zakharov equation. Initial conditions for numerical simulation were characterized by the Gaussian spectrum for several values of significant wave heights and water depths. The numerical results show that the distribution of the energy processes affects the evolution of the wave groups, and the characteristics of directional wave groups can be reproduced through the Zakharov equation model. Finally, field observation data at Akabane beach were used to demonstrate the transformation of wave groups in a real directional sea.

研究分野：海岸工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：不規則波 波群 波の非線形干渉 波の反射 長周期波

1. 研究開始当初の背景

(1) 高波浪時に海岸に来襲する波は不規則性ととも強い非線形性をあわせ持つ。一般に、海岸施設の設計に用いられる波浪情報は、単一の有義波や最高波の波高、周期および波向であり、これらは波浪観測、波浪推算、および極値統計解析によって決めている。海岸施設の設計に性能設計法を用いるようになれば、設計に必要とされる波浪情報は確率波高に留まらず、波高分布や波高・周期結合分布などの来襲波の様々な波浪情報が要求されるようになり、非線形で不規則な波の特性を捉えた設計波算定法の開発が急務となる。確率波高として算定される有義波高は来襲波の諸特性がある程度集約された代表量としての意味を持つものの、海浜や構造物への波の打上げ、遡上、護岸の越波量、防波堤ケーソンの滑動量、港内の静穏度、沿岸流などの工学的に問題となる波浪状況では不規則な波群中の個々の波の累積効果がより重要になり、来襲する波の連なりと波高、周期が時間・空間的にどのように結びついているのかを定量的に評価する必要性がある。

(2) 不規則波の波群特性に関する研究は、これまで主として高波の連なりを統計的手法により評価することが行われ、現地波浪に対する適用性の検討も行われてきた。波群を力学的に捉えて定量的に評価しようとする研究も数多く行われており、3次の非線形 Schrödinger 方程式、KdV 方程式、高次のスペクトル法、強非線形ポテンシャルモデル、Zakharov 方程式による非線形波動理論に基づいた考察が行われている。これらの研究の積み重ねにより、不規則波の波群諸量に及ぼす波の非線形干渉や浅水化の影響、および波群特性と波高分布との関係についても明らかにされつつあるが、任意のスペクトル下で浅海に伝播して来る不規則波の波群特性の評価方法については何ら提案されないままとなっている。

2. 研究の目的

(1) 海岸施設の設計には、確率波高や波高・周期結合分布などに留まらず、来襲する波の連なりと波高、周期が時間・空間的にどのように結びついているのかなど様々な波浪情報が必要とされており、非線形で不規則な波の特性を捉えた設計波算定法の開発が急務となっている。本研究では、ストーム時に来襲する波の持つ波群性とそれに伴う長周期波を合理的に算出する方法を確立する。そのためには、データの蓄積が十分ではない深海～中間水深、浅海、遡上と打上げの各プロセスにおける不規則波群の伝播変形特性を系統的な現地観測を実施し調べるとともに、不規則波群の砕波変形や打上げについては水理模型実験によっても調べる。波成分間の相互作用に加えて風と波の相互作用の最新の知見を取り込んだ非線形波浪モデルを集中的

に実施することにより、沖波のスペクトルが与えられれば入射波群とそれに伴う長周期波を算定できるようにする。

(2) 波群の反射や遡上については、申請者が低近似の理論解に基づく考察を行っているが、非線形性の強い高波浪時の波群の反射・越波特性、砕波後の遡上特性については不明のままである。2成分合成波を用いた波群の鉛直壁前面における波形では、3つ目の波群の最大峰高は入・反射波群の相互干渉により入射波群のもの実に4.7倍に達している。本研究では、新たに現地で観測された不規則波群を入射波群とする水理模型実験を実施するとともに、高波浪時の現地防波堤前面、現地海浜における打上げおよび遡上波形データを取得し、特に入射波群の緒元が反射・遡上特性に及ぼす影響について明らかにする。

3. 研究の方法

(1) ① 3波干渉および4波干渉を考慮したフリーモードの変動を計算するために、2次および3次オーダーの Zakharov 方程式を時間・空間発展型に書き換え、さらに海底勾配に緩勾配の仮定を設けたモデル方程式を作成する。過去に取得した現地の方向スペクトル(ただし、方向スペクトルの算定は線形理論による)を入力し、エネルギー散逸項を入れて中間水深から浅海へのスペクトルの変形を計算する。初期位相情報を入力すれば、直接、波群特性の再現性も調べることができる。入力条件を変えた系統的な数値計算を行い、白波砕波による波高減衰項を加えて、さらに詳細を検討する。② Zakharov モデル方程式に修正を加え、水深約30mの地点の中間水深から砕波帯に至るまでの2次元スペクトルおよび波群特性の変化を計算により再現する。初期の位相情報を与えなくても、ランダムで数値的に与えた初期位相を用いて、現地の波群特性が再現できるかどうかを確認する。

(2) 改良型超音波波高計1台と現有の波高計1台を渥美半島太平洋側の赤羽根沖合い6km、水深約30mの地点と1km、水深約15mの地点に設置し、高波浪時の水位変動と気泡層変動を計測する。同時に砕波帯付近に現有の波高計を2台設置し、砕波点付近の波形記録も取得する。

(3) 2次元造波水槽に水平床を設け鉛直岸壁模型を設置して、現地の高波浪時の波群を入射させ、岸壁での打上げおよび入射波と反射波の相互干渉重複波を詳しく調べる。水深は数種類に変化させる。鉛直岸壁では、そこでの水深が常に固定されているため、長時間発展の干渉波の影響が現れやすいと考えられる。

(4) 局所周期を実際の周期と同等と見なすことに起因する従来理論の欠点を改良して、最終的に得られる分布関数を応用する上で簡

単に扱えるような数式表現として新たに提案する。この分布は、結合分布というより、条件付き分布として導かれるので、周辺分布となる波高分布にベータ・レーリー分布を適用することも可能である。

4. 研究成果

(1) 波形勾配が大きく重複波の碎波限界に近い強非線形波が鉛直壁により反射するとき、鉛直壁前面の重複波動場における波の緒元について再検討した。一様水深において、波形勾配が比較的緩やかな弱非線形波の重複波については有限振幅波理論でうまく説明できるが、波形勾配がさらに大きくなると、入射波の波列は一様でも鉛直壁前面の重複波動場では非周期性の波列が現れる。また、一様水深下で2成分合成波による規則的な波群が完全反射するとき、入射波群の最大波の2倍以上の波高をもつ波群重複波が生じることが明らかになった(図1参照)。こうした入・反射波の非線形干渉による振幅変調は、斜面の影響(水深変化の影響)を強く受けると予想されることから、斜面上で入射波の波形勾配を種々に変化させた規則波および2成分合成波を用いた造波水槽実験を行い、鉛直壁前面における波の周波数および振幅変調について詳しく調べ、強非線形波の反射特性について明らかにした。

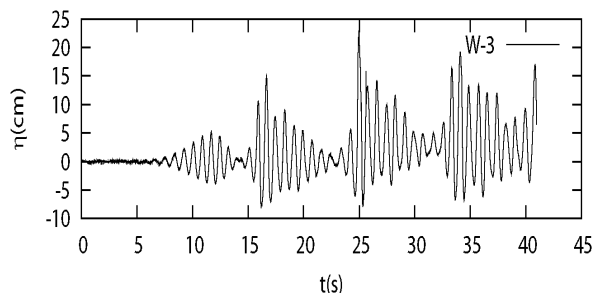


図1 鉛直壁への波群の打上げ

(2) 入射波の波形勾配が大きく重複波の碎波が生じるケースには基本的には弱非線形の波動方程式である Zakharov 式を適用することができない。そこで従来の VOF 法に粒子法の柔軟性をあわせ持つ新たな数値波動水路の開発を目指し、格子ボルツマン法 (LBM) による解析コードを作成して反射実験に対する適用性について検討を加えた。長波を除き波動場への LBM 適用例は見当たらないことから、基本的な問題である越波の PIV 測定値と比較することにより計算法の妥当性を確かめた。

(3) 中間水深から浅海に至る不規則波群の伝播変形を Zakharov 式により調べた。相対水深 kh では 1.2 から 0.6 間の方向スペクトルの変形と不規則波群の特性を、成分数 $N=1550$ による数値解析を通して明らかにしようと試みた。その結果、波の非線形干渉により方向分散が浅海においても強調され、加えて白

波碎波によるエネルギー逸散も波群の尖鋭化を抑えるように働き、浅海で碎波限界水深に達する前に波群は扁平化することがわかった。

(4) 深海から中間水深を経て浅海へと伝播していく波群の変形特性について、主に周波数・波向がガウス分布型の方向スペクトルを持つ波に対して数値シミュレーションによって調べ、個々波の波形勾配が大きく非線形性の強い波群は、相対水深 kh が 1.36 より小さい海域ではスペクトルの広帯化とともに包絡波が扁平化することが明らかになった(図2参照)。高波浪時の現地波浪データの解析結果を数値シミュレーション結果と比較することにより、波群個々波の有義波の伝播に伴う波高変化は、浅水変形・屈折変形・波高減衰から予測される波高比よりかなり小さくなる時間帯があり、波成分間の非線形干渉に起因する変形特性であることがわかった。有義波高のピーク値前後では、平均的に見ると波群個々波の振幅の変動は小さくなり、波群包絡波はやや扁平化する。

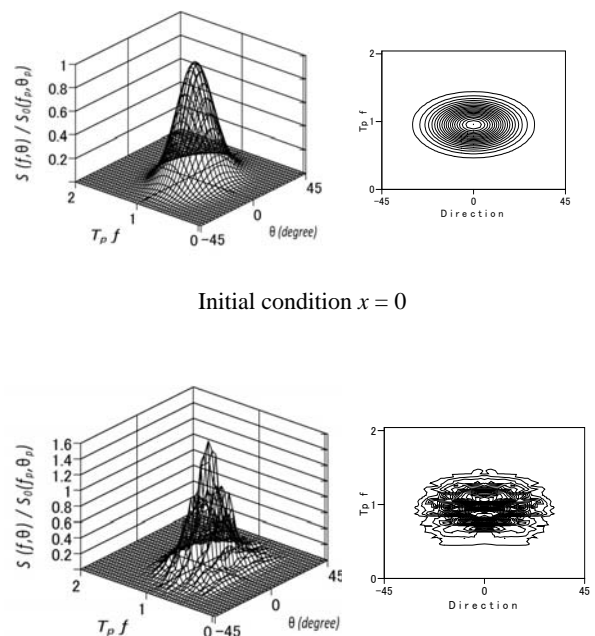


図2 方向スペクトルの伝播変形(波形勾配 $ak_p = 0.13$, 相対水深 $k_p h = 1.0$)

(5) 高波の極値頻度解析における歴史資料の取扱いについて検討を加え、ベイズ統計にもとづき近年データから得られる推定結果を事前分布に用い、歴史データを加えることで、推定結果を更新する解析手法について調べた。定常モデルを対象にすれば、極値資料に独立かつ均質を要求されるゆえに、従来の極値解析では、そもそも近年データと歴史データを区別する時間の概念が導入されていない。しかしながら、経験度を拡張したモデルの耐久性(あるいは、データの鮮度)を用いれば、定常モデルに対しても、時間の経過を

明確にした取扱いが可能となることがわかった。

(6) 長周期成分を含む波群下における漂砂に対しても適用可能な数値モデルを新たに開発した。3次元 LBM モデルを自由表面流下の掃流粒子群のシミュレーションモデルに拡張し、小規模移動床実験条件での従来の実験や数値解析の結果と比較することにより、その適用性を確認した。この LBM モデルにおいては、実験値等を参考に半経験的に決める係数値を基本的に入力値に必要とせず、数値計算上の閾値を除けば、乱流モデルにおける Smagorinsky 定数 についてのみである。本数値モデルは並列計算にきわめて適したアルゴリズムであるため、波群下の 3次元数値移動床への拡張も比較的容易である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① 賀 露露・岡島雅史・喜岡 渉・北野利一, 3次元 LBM 数値移動床の開発と掃流粒子群の挙動シミュレーション, 土木学会論文集 B2, 査読有, Vol.69, 2013, 546-550.
- ② 北野利一・信岡尚道・喜岡 渉, 観測期間長の曖昧な伝説的記録を含む水域外力の極値統計解析, 土木学会論文集 B2, 査読有, Vol.69, 2013, 111-115.
- ③ Pujianiki N.N., Kitano W., Transformation of Wave Groups in a Directional Sea, J. JSCE, Ser.B2, 査読有, 2013, 133-144.
- ④ 北野利一, 中島 涼, 喜岡 渉, 高橋倫也, 高波の極値頻度解析における歴史資料の取扱い, 土木学会論文集 B2, 査読有, Vol.68, 2012, 96-100.
- ⑤ 喜岡 渉, 岡島雅史, Pujianiki Ni Nyoman, 北野利一, 斜面上の鉛直壁による強非線形波の反射, 土木学会論文集 B2, 査読有, Vol.67, 2011, 1-5.
- ⑥ 喜岡 渉・北野利一・肥後克紀, 鉛直壁による波群の反射について, 土木学会論文集 B2, 査読有, Vol.66, 2010, 6-20.
- ⑦ 北野利一・喜岡 渉・高橋倫也, 気象指数を共変量とする水域外力の極値モデルに対する外れ値の感度分析, 土木学会論文集 B2, 査読有, Vol.66, 2010, 141-145.

[学会発表] (計 7 件)

- ① Pujianiki N.N., Kitano W., Nonlinear Evolution of Wave Groups in Directional Sea, 7th International Conference on Asian and Pacific Coasts, 2013 年 9 月, インドネシア・

バリ

- ② Kitano, T., Kioka, W., Takahashi, R., OUTLIER SENSITIVITY ON THE SEA EXTREMES BY THE TEMPORAL AND CLIMATE INDEX COVARIATIONS, International Conference on Coastal Engineering, 2012 年 6 月, スペイン・サンタンダー
- ③ Kitano, T., Kioka, W., Takahashi, R., Degree of Experience and Durability — Indices for Two Types of Extrapolating Sea Extremes, Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference, 2012 年 6 月, ギリシャ・ロドス島
- ④ Kioka, W., T. Kitano, M. Okajima, N. Miyabe, Steep standing waves against a vertical wall on a sloping beach, International Conference on Asian and Pacific Coasts, 2011 年, 香港
- ⑤ Kitano, T., W. Kioka and R. Takahashi, Diffractive uncertainty toward the future estimation of return wave height, Coastal Structures, 2011 年 9 月, 横浜
- ⑥ Kitano, T., R. Takahashi and W. Kioka, Degree of Experience as an Index for Practical Use of Extremes, Environmental Risk and Extreme Events, Workshop, 2011 年 11 月, スイス・アスコナ
- ⑦ Kitano, T., Kioka, W., Takahashi, R., Trend Model of Sea Extremes, International Conference on Coastal Engineering, 2010 年 7 月, 上海

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

喜岡 渉 (KIOKA, Wataru)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：10135402

(2) 研究分担者

北野 利一 (KITANO, Toshikazu)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00284307