

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24860021

研究課題名(和文) 波浪の発生・発達を考慮した港内静穏度解析に関する研究

研究課題名(英文) Research on harbor tranquility analysis method including wind-induced wave growth mechanism

研究代表者

小林 豪毅 (Kobayashi, Hidetaka)

東京大学・生産技術研究所・特任研究員

研究者番号：50621695

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：従来の波浪変形計算法は地形や構造物の影響のみを対象としており、計算領域内の風の影響は考慮されてこなかった。本研究では、数値シミュレーション、水槽実験及び現地観測により風による波浪の発生・発達メカニズムについて検討を行い、風の影響を考慮可能な新しい数値シミュレーションモデルを開発した。本モデルは風と海面の相互作用を直接考慮することができるため、波浪発達を實現に近い形で再現することができる。

研究成果の概要(英文)：The conventional wave deformation models calculate wave deformation by the bottom topography or the structure, and the effect of the wind is not taken into account. In this study, the mechanisms of wave growth are investigated by the numerical simulation, the experiment and the field measurement. A new wave deformation model is developed to calculate wind-induced wave growth. This model contains the interaction of the wind and the sea surface, and further application to the wave prediction model is expected.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学

キーワード：波浪推算 風波 風応力 シミュレーション ブシネスク方程式

1. 研究開始当初の背景

港内静穏度解析は港湾整備や荷役稼働率の算出に不可欠な技術であり、現在では高精度の波浪変形計算モデルであるブシネスク方程式が多用されている。しかし、既往の波浪変形計算モデルは地形や構造物の影響のみを対象としており、計算領域内の風による波浪の発生・発達に着目されてこなかった。実際には港内で発生する波が荷役や小型船舶の航行の障害となる場合があるため、これを考慮可能なモデルが必要である。また、波浪推算という観点から見ると、既往のモデルはエネルギー平衡方程式を基礎方程式とするスペクトル法がほとんどであった。このような位相平均型モデルは広領域の波エネルギー分布を求めるのに適しているが、水面波形を計算することができない。したがって、風と海面の相互作用を直接考慮することができず、風の影響は海面へのエネルギー輸送項として評価される。対して、ブシネスク方程式のような時間発展型モデルは時々刻々の水位や流速が計算できるため、位相平均型モデルより実現象に近い形で風と海面の物理過程を導入できると考えられる。風の影響を考慮したブシネスク方程式モデルが構築されれば、港内静穏度解析や波浪推算等さまざまな方面への応用が期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、風による波浪の発生・発達を再現可能なブシネスク方程式モデルを開発することである。これが開発されれば、外洋からの波と港内発生波を同時に評価することにより、港内波浪をより実現象に近い形で再現することができる。また、非線形な水面波形を直接考慮できるため、従来のスペクトル法よりも拡張性の高い波浪推算モデルを構築できると考えられる。

3. 研究の方法

風の影響を考慮したブシネスク方程式モデルを開発するため、本研究では、数値シミュレーション、水槽実験及び現地観測により検討を行った。数値シミュレーションでは、ナビエ・ストークス方程式により波面上の気流を計算し、海面への風の作用について調べた。水槽実験では、風路付水槽に風を発生させ、風と波の計測を行った。ピトー管により風速の鉛直分布を計測することで摩擦速度を評価するとともに、5台の波高計により波の計測を行い、波浪スペクトルの発達状況を調べた。現地観測では、マイクロ波レーダにより波浪観測を行い、実海域における砕波の発生状況について検討を行った。これらの結果を基に、風応力のモデル化を行い、それを基礎方程式に導入することで風の影響を考慮したブシネスク方程式モデルを構築した。

4. 研究成果

(1) 数値シミュレーション

海面への風の作用を調べるために、数値シミュレーションによる検討を行った。計算には汎用の熱流体解析ソフトであるKeyFlow(株式会社 科学技術研究所)を用いた。数値シミュレーションの概要を図1に示す。波高2m、波長50mの波面上に風速10m/sの風を発生させ、波面への風の作用について計算を行った。この計算では簡便に風の影響を把握するため、波面は固定壁として取り扱っている。圧力分布の計算結果を図2に示す。波面上の圧力分布は、波の峰の風上側で圧力が高く、風下側で低くなる傾向が認められた。したがって、波が風と同じ方向に進んでいる場合、水面が下がりつつある部分で押さえつけ、上がりつつある部分で持ち上げるように風応力が作用する。この作用をブシネスク方程式に導入することにより、波の発達を再現できると考えられる。

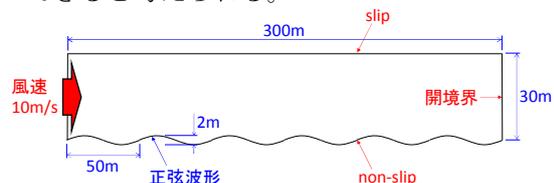


図1 数値シミュレーションの概要

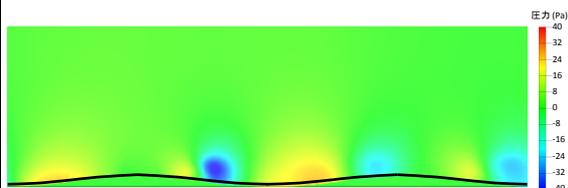


図2 数値シミュレーション結果

(2) 水槽実験

波の発達の基本特性を把握するため、水槽実験を行った。水槽実験には図3に示す東京大学生産技術研究所の風路付水槽を用いた。実験では水面上に風を発生させ、ピトー管で風速の鉛直分布を計測するとともに、5台の波高計により波の計測を行った。水面上の風速の鉛直分布を図4に示す。風速分布はマイルズの理論における仮定と同様に対数分布となった。したがって、風の基本的なパラメータとして摩擦速度を導入することができる。摩擦速度による波浪スペクトルの変化を図5に示す。波のエネルギーは摩擦速度とともに大きくなり、かつ、ピーク周波数が低周波側にシフトしていく傾向が確認された。波の発達の外力は、摩擦速度を普遍的なパラメータとしてモデル化できると考えられる。



図3 実験に使用した水槽

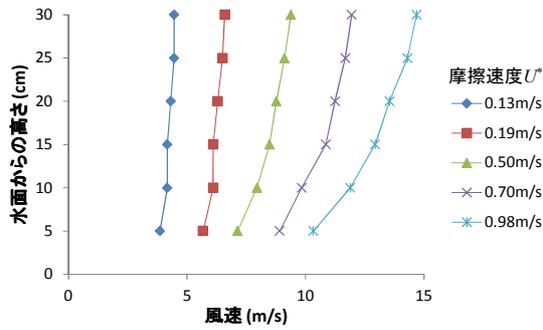


図4 風速の鉛直分布

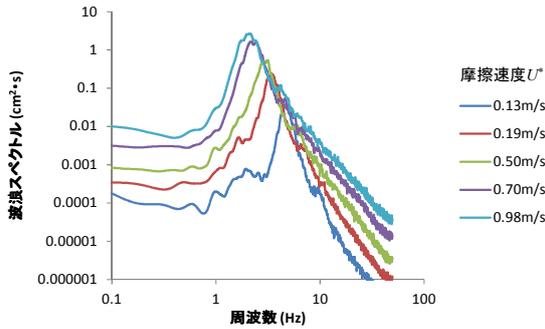


図5 波浪スペクトル

(3) 現地観測

実海域における波浪特性を把握するため、マイクロ波レーダにより現地観測を行った。現地観測は図6に示す平塚沖総合実験タワーで実施した。現地観測の概要を図7に示す。観測に使用したレーダは、周波数9.4GHz、パルス繰り返し周波数1kHz、パルス幅80nsecのパルスドップラーレーダであり、複数点の海面流速をほぼ同時に計測することができる。2013年4月25日1時の海面流速の観測結果を図8に示す。図8の横軸は時間経過、縦軸はレーダからの距離を表している。波は沖合からレーダ方向に伝搬してくるので、波は図の左上から右下に進行し、流速が速いところは波の峰、遅いところは波の谷に対応している。このときの海象条件は風速9.7m/s、風向N、有義波高2.58m、有義波周期8.4sであり、白波砕波が発生している状況であった。波の発達に対しては、風から海面へのエネルギー輸送だけでなく、白波砕波によるエネルギー減衰も重要になる。しかし、現在のところ、白波砕波のメカニズムについては十分な知見が得られていない。砕波が発生している領域では気泡や飛沫より不安定な流速分布となることから、図8中では'C'の領域で白波砕波が発生していたと考えられる。38秒前後のレーダ照射方向の流速分布を図9に示す。砕波領域は3.06sの間に36m伝搬し、伝搬速度は12m/sである。これはほぼ波速に対応する値である。また、砕波時には波の対称性が崩れ、波形が切り立っている様子が確認される。白波砕波は不規則過程、非線形現象、乱流が複合した難解な現象であり、本研究でも物理過程の解明には至らなかった。しかし、レーダという新しい技術により、ほとんど実

態のわからなかった白波砕波のデータが得られたことから、今後、メカニズムの解明と計算手法の開発を進めていく予定である。



図6 現地観測状況

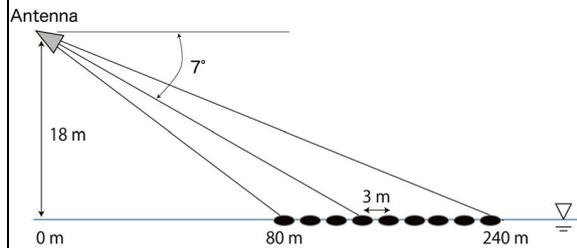


図7 現地観測の概要

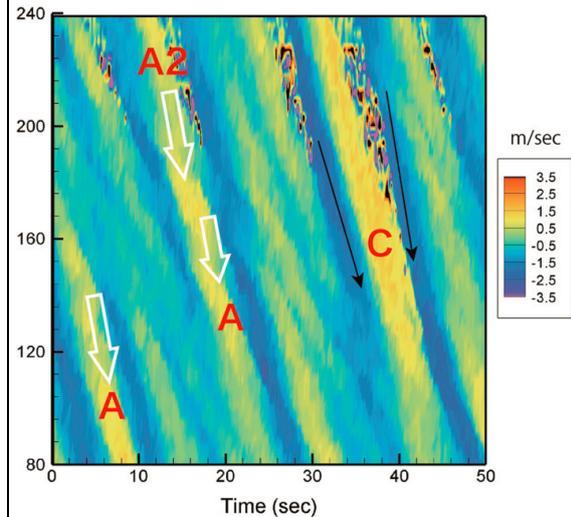


図8 海面流速の現地観測結果

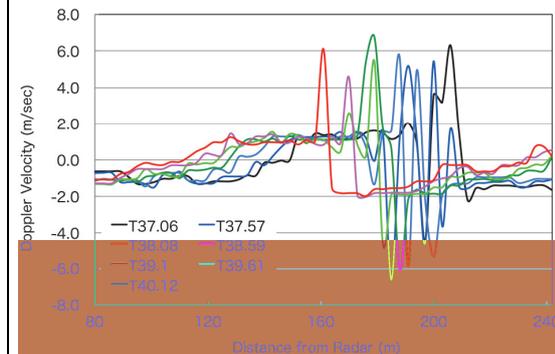


図9 レーダ照射方向の海面流速分布 (図8のC付近)

(4) 波浪発達モデル

① 計算手法

ブシネスク方程式を基礎方程式とした波浪発達モデルを提案する。ブシネスク方程式はもともと Peregrine(1967)により導出された式であるが、適用範囲を拡張するために、いくつかの改良型が提案されている。現在、実務で多用されている式としては、Madsen(1991)らによる修正ブシネスク方程式が挙げられる。また、その後、中嶋ら(2005)により新たなブシネスク方程式が提案されている。Madsenらの式と中嶋らの式の分散特性を微小振幅波理論と比較したものを図10に示す。図10を見ると、Madsenらの式に比べて、中嶋らの式は分散特性が大きく改善されており、 $kh=6$ の深海波条件まで微小振幅波理論と一致していることがわかる。したがって、本研究の基礎方程式としては、中嶋らの式を採用することにした。

数値シミュレーションの結果から、波は波面上の風の垂直応力(圧力)によって発達すると考えられる。いま、風の垂直応力を p_a 、その水頭を $\eta_a = p_a / (\rho_w g)$ と表す。ここで、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度である。中嶋らの式に風の垂直応力の項を導入すると、1次元・一定水深の場合の基礎方程式は次のように表される。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(h + \eta)u] = (B_1 - K_1)h^3 \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} + B_1 h^2 \frac{\partial \eta}{\partial x^2 \partial t} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial (\eta - \eta_a)}{\partial x} = (B_2 - K_2)h^2 \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} + B_2 g h^2 \frac{\partial^3 (\eta - \eta_a)}{\partial x^3} \quad (2)$$

ここで、 t は時間、 x は空間座標、 η は水位、 u は流速、 h は水深である。また、 K_1 、 K_2 、 B_1 、 B_2 は分散項を補正する係数である。

波の発達の外力は、摩擦速度をパラメータとして次式で表す。

$$p_a = \alpha \rho_a U_*^2 \cos \theta \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (3)$$

ここで、 ρ_a は空気の密度、 U_* は摩擦速度、 θ は波の進行方向と風向のなす角である。係数 α は Mitsuyasu & Honda (1982) の実験式を基に以下のように定める。定常状態の場合、波エネルギーの保存則は次式となる。

$$c_g \frac{dE}{dx} = \beta E \quad (4)$$

ここで、 E は波エネルギー、 c_g は群速度である。Mitsuyasu & Honda は、実験結果を基に波の発達率 β として次式を提案している。

$$\frac{\beta}{f} = 0.34 \left(\frac{U_*}{c} \right)^2 \quad (5)$$

ここで、 f は波の周波数、 c は波速である。一方、式(3)の風応力によってなされる仕事 W は次式で表される。

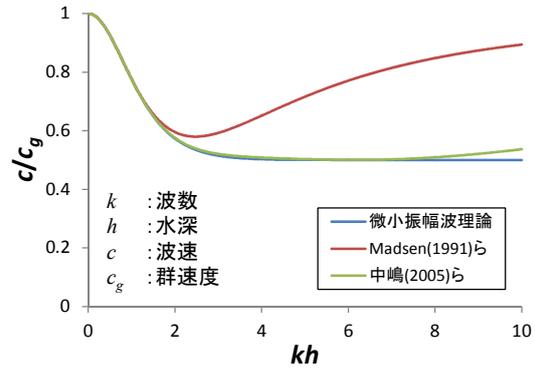


図10 基礎方程式の分散特性

$$W = \frac{1}{L} \int_0^L p_a \frac{d\eta}{dt} dx = \frac{1}{2} \alpha \rho_a U_*^2 \cos \theta k \omega a^2 \quad (6)$$

ここで、 L は波長、 a は波の振幅、 $k (= 2\pi/L)$ は波数、 $\omega (= 2\pi f)$ は角周波数である。式(6)と式(4)の右辺が等しいとすると、 η_a は次式で表される。

$$\eta_a = \frac{0.34}{2\pi g} U_*^2 \cos \theta \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (7)$$

ただし、導出の過程で $\omega^2 = gk$ の関係を用いている。

式(1)、(2)及び式(7)から、摩擦速度 U_* を風のパラメータとして波の発達を計算することができる。

② 計算結果

構築した数値モデルを用いて、風による規則波の発達を計算する。計算条件は Mitsuyasu & Honda の実験条件を基に設定した。Mitsuyasu & Honda は水深 0.335m の風洞水槽に風を吹かせ、そこに造波機で規則波を発生させて波の発達率を測定している。本モデルで計算した規則波の発達の様子を図11に示す。本モデルでは、波の峰の風上側で海面に作用する圧力が高く、風下側で低くなる。したがって、順風の場合、水面が下がりつつある部分で押さえつけ、上がりつつある部分で持ち上げるように風応力が作用する。この作用により、水面波形が指数関数的に増幅することになる。

吹送距離による波高の変化を図12、13に示す。図の縦軸は各地点の波高 H を $x=0$ の波高 H_0 で割って無次元化している。本モデルにより、波の発達率が摩擦速度とともに大きくなり、また、周期の短い波ほど発達しやすいという特性が再現できていることがわかる。

逆風下を波が進行すると、波は減衰していくことが知られている。逆風の条件に対して、本モデルにより計算した結果を図14に示す。逆風の場合、順風と逆の作用により波は減衰することになる。一般に、逆風の場合にはマイルズ機構は働かないと考えられているが、光易らの実験では本モデルの結果と同様にマイルズ機構の変化率と同程度の減衰が生

じている。いまのところ物理過程は不明であるが、波の峰の風上側と風下側の圧力差によって波が減衰していく可能性は考えられる。図-15 に示すように、本モデルでも定量的に水槽実験と同様の結果が得られた。

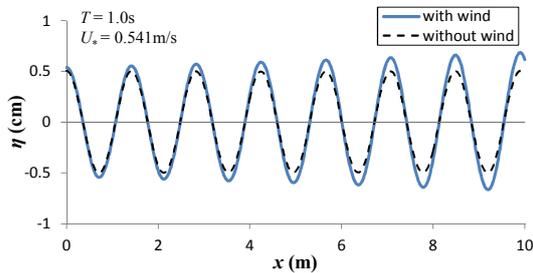


図 11 風による規則波の発達

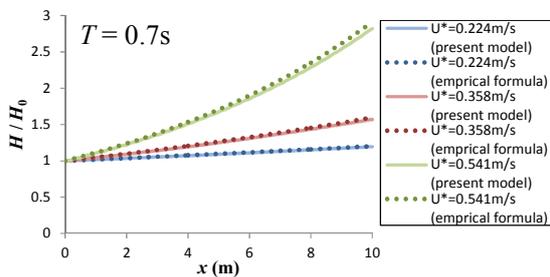


図 12 波の発達率の比較(周期 0.7s)

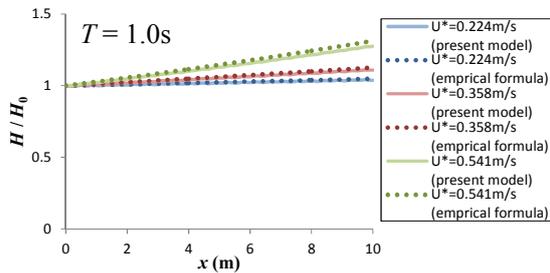


図 13 波の発達率の比較(周期 1.0s)

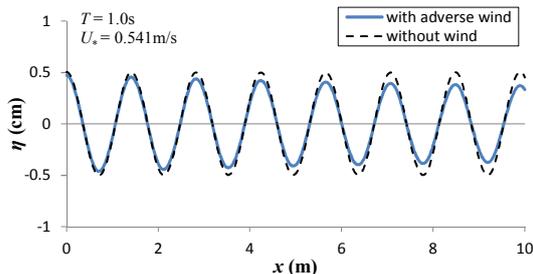


図 14 逆風による規則波の減衰

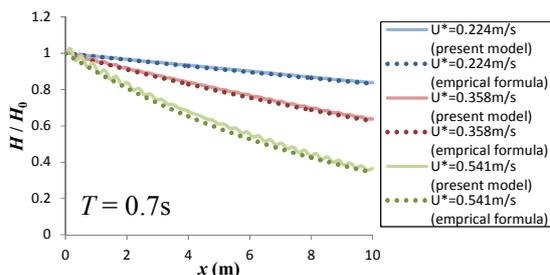


図 15 波の減衰率の比較(周期 0.7s)

不規則な海面上を風が吹くとき、各成分波が独立に風からエネルギーを受け取るかどうかは興味深い課題である。草場・光易(1984)および加藤ら(2001)は二成分規則波の発達について実験的研究を行っている。本モデルにより二成分規則波の計算を行った結果を図 16、17 に示す。波形勾配が小さい場合、二成分規則波のそれぞれの発達率は一成分規則波の場合と同じである。同様の結果が加藤らの実験でも得られており、本モデルは不規則波にも適用可能と考えられる。

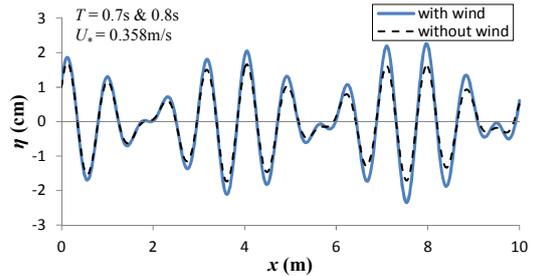


図 16 風による二成分波の発達

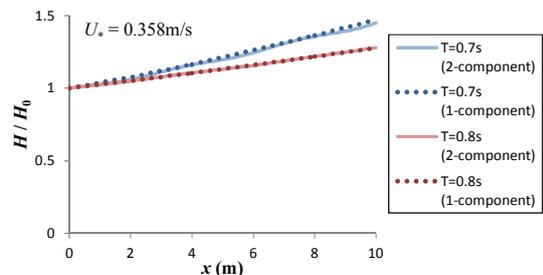


図 17 一成分波と二成分波の発達率の比較

(5) 今後の展望

本研究では、風の影響を考慮したブシネスク方程式モデルを開発した。このモデルは不規則波、平面計算にも容易に拡張可能であり、港内静穏度解析や波浪推算に応用することができる。波浪発達についてはモデルを構築することができたが、白波砕波に伴う波浪減衰については十分に解明することができなかった。今後は現地観測データを蓄積し、白波砕波のメカニズムの解明と計算手法の開発を進めていく予定である。白波砕波は水面形状が不安定になって生じる現象であり、かつ、極めて非線形性の強い現象であるため、スペクトル法によるモデル化にそぐわない。開発したモデルは水面波形を直接計算できることから、実現象に近い形で白波砕波を評価できると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 2 件)

- ① 小林豪毅、ブシネスク方程式モデルを用いた波浪発達モデルの提案、日本船舶海洋工学会平成 25 年度秋季講演会、2013 年 11 月 22 日、大阪府浪速区
- ② 林昌奎、ドップラーレーダによる相模湾平

塚沖における碎波面付近海面流速観測、日本船舶海洋工学会平成 25 年度秋季講演会、2013 年 11 月 22 日、大阪府浪速区

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 豪毅 (KOBAYASHI, Hidetaka)
東京大学・生産技術研究所・特任研究員
研究者番号：5 0 6 2 1 6 9 5

(2) 連携研究者

林 昌奎 (RHEEM, Chang-Kyu)
東京大学・生産技術研究所・教授
研究者番号：7 0 2 7 2 5 1 5