

風波砕波による 3 次元乱れを考慮した新しい海洋モデルの開発

Development of new ocean model considering 3D turbulence due to breaking wind waves

主任研究員名:水谷 夏樹

分担研究員名:宮島 昌弘

1. はじめに

2014 年の夏は日本の各地で豪雨災害が頻発した夏であった。「南から暖かい湿った空気が流れ込み...」という説明を、気象予報士の解説で聞いた人も多いと思う。このように海水温や水蒸気の量が天候に大きな影響を与えていることは多くの人が知っていることであるが、同時に強い風や気圧の変化は海洋に対し、波、流れ、乱れを発生させ、時には高波や高潮として沿岸部に甚大な被害を発生させる場合も少なくない。

こうした大気側の現象と海洋側の現象は、どちらか一方からもう一方へ影響を与えるだけでなく、相互に影響を及ぼすことから、地球科学や大気海洋学においては、「大気海洋相互作用問題」として古くから研究が行われている。本研究は、このうち海洋側の現象を取り扱う海洋モデルを構築しようとするものである。

海洋モデルは大きく分けて波浪モデルと海流モデルに大別できる。同じ海洋で同時に発生する波と流れも当然ながら相互に作用を及ぼし合う関係にある。しかし、これらを分けなければならない理由は、一つにそのスケールの違いがある。波は一般に波の峰から隣の波の峰まで水平方向に数百 m 程度であることから、これをコンピュータ上で再現するには少なくとも数十 m 程度の解像度(格子)を有した数値モデルが必要となる。一方、海洋における大規模な流れは数 km～数百 km のスケールを持っており、波の大きさに比べると現象のスケールが三桁も大きくなる。したがって、これらを同時に扱うことは現状では大変困難であるが、相互に作用し合うものを分けて取り扱わなければならないことが、海洋現象の再現を困難にしている原因であると言える。

2. 流れの海洋モデル

本研究で取り扱う流れの海洋モデルは、海面上を吹く風の作用によって生じる海洋表層の流れ(これを吹送流という)を取り扱うモデルである。吹送流の具体的な現象としては、日本の南を常に流れている黒潮という海流があるが、本研究ではもう少し沿岸近くの、特に大阪湾のような内湾に生じる高潮を対象とし、水面の上昇と同時に表層に強い流れが生じるような現象を対象としている。

高潮は、台風などの低気圧の通過に伴って生じる海面の上昇現象であるが、上空の気圧の低下によって水位が上昇する「吸い上げ」という現象と、強風によって生じる表層の強い流れが沿岸部に集められて水位が上昇する「吹き寄せ」という現象が重なったものである。吸い上げについては、単純に低気圧の中心気圧と周囲との気圧差から流体力学的に計算が可能な量であ

り特に問題はない。一方、吹き寄せについては海面に風が吹くことでせん断力が生じ、それに駆動される形で海流が生じる。しかしながら、海面の状態は鏡のように平面ではなく風によって波が立っている。当然ながら凹凸のある海面に生じる風のせん断力は平面に対するそれとは異なるが、前述の通り、波と流れは分けて取り扱われているため、海流モデルにおいては波の情報が欠如しているのが普通である。これでは海面の凹凸の状況が分からず、海面に作用する正しいせん断力を与えることが出来ない。そこで、本研究では風の状態に対する波浪の状況を室内実験の結果から推定し、モデル化することで海流モデルに対して正しいせん断力を与えることを研究目的とした。

また、一般的に風速に応じて波は大きくなるが、どこまでも大きくなるわけではなく、ある程度のところで波は砕けて乱れとなる。乱れのスケールは波のスケールよりさらに小さく、数 mm から数十 cm 程度でこれを正確に再現するには、非常に高解像度の乱流計算モデルを必要とするが、海洋モデルにこれらを直接組み込むことは不可能である。しかしながら、これほど小さな乱れであっても大規模な海流の鉛直分布には非常に大きな影響を与えることが分かっており、砕波の乱れによる鉛直混合は、海流モデルの再現性に重要な要素であると言われている。本研究では砕波による水中の乱れについても検討を行い、海洋モデルの開発に組み入れることを考えた。

以上を踏まえ、本研究では風の状態に応じた海面せん断力の推定と砕波による乱流を考慮した新しい海洋モデルの構築を研究目的とした。

3. 波面上の気流の分布特性

研究を遂行するにあたり、まずは室内実験水槽において風を吹かせて風波を発生させた。発生した波面上の気流の速度を 3 次元 PIV システムによって計測を行い、3 成分の平均速度、乱流強度およびレイノルズ応力の鉛直分布について求めた。図-1 は、室内実験水槽において計測された波面上の気流の主流方向平均速度の鉛直分布と対応するレイノルズ応力の鉛直分布の一例である。

一般的に波面上の気流は、固定壁面上の流れと同様に底面付近に乱流境界層が発達し、平均速度分布は対数則分布となる。また、そこでは一定せん断応力層が形成されるものと考えられている。図-1 の右図を見ると、下層からレイノルズ応力の値が一定となる領域(図中の矢印)が現れている。一方、左図を見ると右図の一定せん断応力層に対応する下層の○印で表された領域

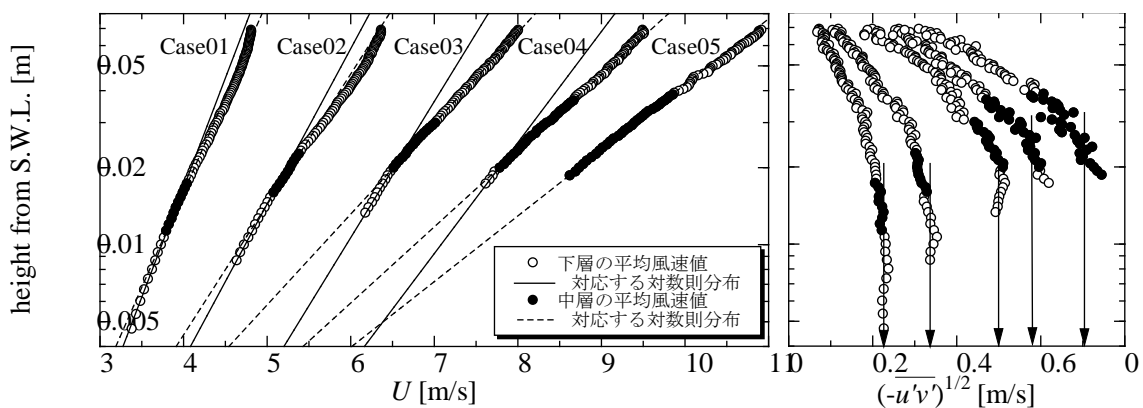


図-1 室内実験水槽内における波面上の気流の平均速度の鉛直分布と対応するレイノルズ応力の鉛直分布

には対数則分布となる領域が現れている。しかしながら乱流境界層理論では、この対数則分布の傾きから求められる摩擦速度は、一定せん断応力層のレイノルズ応力の値と一致すると考えられているが、本研究の結果では、レイノルズ応力の値と一致するのは、左図の●印で示される中層領域に現れた対数則分布であることが分かった。一般に海洋上でレイノルズ応力を求められるような高精度の計測が実施されることは少なく、平均風速分布の傾きから摩擦速度を求めることが多い。この方法は乱流境界層理論が成り立っていることが前提となる。海洋観測や室内実験で海面せん断応力の計測が数多く行われているが、バラツキが多く一般的なモデル化が困難であると言われており、乱流境界層理論の破綻が原因の一端である可能性がある。

4. 波面上の気流の剥離と圧力の空間分布

前述の乱流境界層理論では、流れの中の乱れは壁面からの距離に比例して大きくなるとモデル化されている。その比例定数を κ として扱い、通常は0.41とされている。

しかしながら、図-2 に示すように、波面上の気流の場合は、波面の形状によって剥離が生じ、波面に近づくほど乱れが大きくなることが知られている。

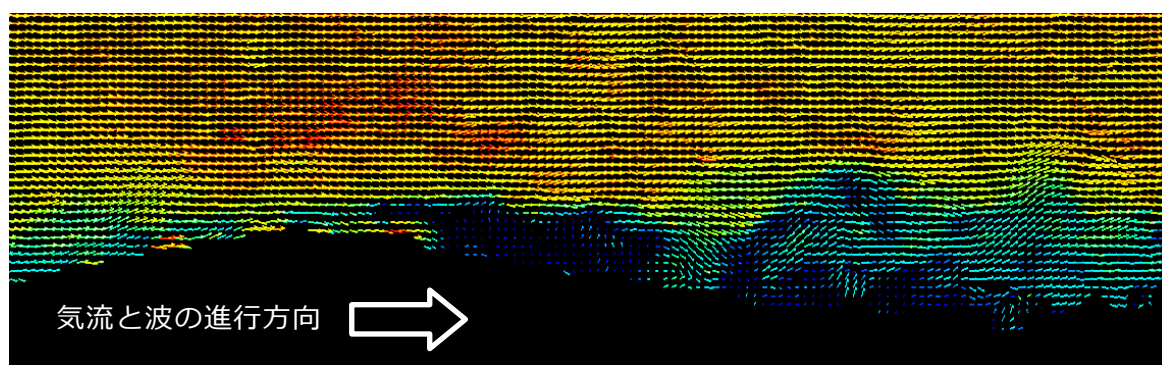


図-2 2D-PIV 計測された波面上の気流の剥離の様子

この気流の剥離は乱れの大きさだけでなく、波面に作用する圧力分布にも影響を与えると考えられる。波面の前後で圧力差が生じれば波面は力を受けることになり、より発達することから、圧力の空間分布を得ることは非常に重要となる。そこで本研究では、2D-PIV の実験データを基に圧力のポアソン方程式を数値的に解くことで圧力分布を得る手法を開発した。

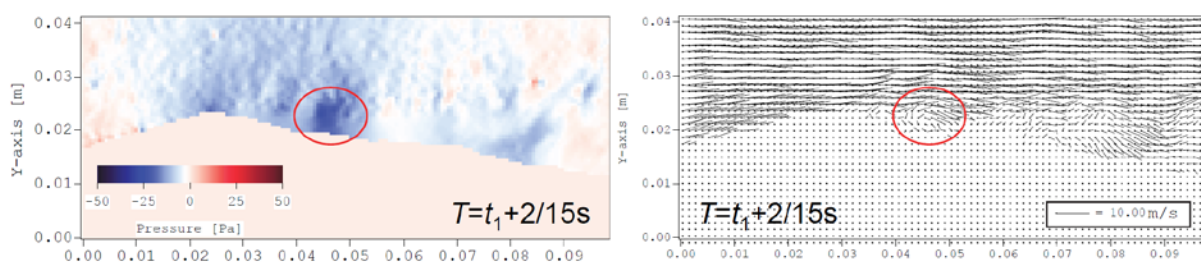


図-3 波面上の気流の圧力分布と波頂部から気流が剥離する様子

図-3 は、波頂部から気流が剥離する様子(右図)とそれに対応する圧力の空間分布(左図)で

ある。波面の下流側に剥離渦が形成されそこに負圧が生じている様子が確認できる。波頂部を挟んで前後でも正負の圧力分布があり、波浪の発達に対して圧力分布が重要であることがわかる。

5. 水面下の乱流境界層

本研究では波面上の気流乱流だけでなく、水面下の乱流境界層についても検討を行った。風によって水側の表層に現れる流れとそれによる乱流は、水面で最も強く、水深方向に減衰する乱流境界層になることが知られている。また、平均流速分布についても対数則分布になると言われている。しかしながら、強風時においては波が発達し、それが砕波することで水面下には気泡が混入する。本研究で用いたレーザー光は、気泡界面で非常に強く反射することから CCD カメラを焼き付かせることがあり、計測は極めて難しい。

そこで、通常の開水路乱流を別途水路で発生させ、平均流速分布や乱流の分布について検討することで水側の乱流境界層に対する実験データの取得を行った。

6. 二層流海洋モデルの開発

多くの実験データに基づいて海面せん断応力のモデル化や海洋表層の乱流分布について検討を行った。研究の最終段階として、これらを統合する海洋モデルの開発を行った。一般的な高潮モデルについては、海洋側を一層とし、鉛直積分型の支配方程式を用いてこれを解く。海洋の表層には、外力として海面せん断応力を与え、砕波等による乱流を考慮して流速を求めてく。しかしながら、本研究で求めてきた実験結果を統合するには、海洋表層に波浪による影響が卓越する層を別途設ける必要がある。表層の流れや乱流強度の強い層とそれ以下の比較的ゆっくり流れる層の二層に分けることで、より現実的なモデルに近づけた。

開発中の海洋モデルにおいては、表層の卓越した現象を取り込むことができるようになったが、第一層と第二層の接続については不明な点が多く、現状では一層モデルより計算精度が落ちる結果となっている。今後、問題点を明らかにし、モデルの改良を行っていきたい。

7. おわりに

本研究では、多くの実験データに基づいて波面上の気流乱流に関し様々な知見を得ることができた。また、水流側の乱流境界層についても高精度な実験データを得ることができた。モデルの統合化については、まだ途上に有り、今後も引き続き開発を行っていきたい。

研究成果(査読付き論文)

水谷夏樹, 鍛冶允啓, 宮島昌弘(2013):PIV 計測データに基づいた風波波面上の気流の圧力分布, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_1401-I_1405.

水谷夏樹, 鍛冶允啓, 宮島昌弘(2012):波面上の気流分布に対する対数則分布の適用性に関する考察, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp.I_46-I_50.

水谷夏樹, 鍛冶允啓, 宮島昌弘(2011):砕波を伴わない風波の自己調整機能に対する気流の剥離の役割について, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.67, No.2, pp.I_56-I_60.

波面上の気流乱流の計測とそのモデル化

水谷 夏樹（工学部都市創造工学科）

本研究は、内湾を対象として高潮のような表層の強い流れを再現できる海洋モデルの開発を目指すものである。特に波面上の気流の乱流場と波浪の砕波による水面下の乱流場を実験データからモデル化し、より高精度に流れ場を再現しようとするものである。

分担研究では、まず波面上の気流の乱流場の計測を行った。計測データから波面上の気流の乱流場に対して既存の乱流境界層理論を直接適用できないことが分かった。既存の乱流境界層理論では、乱れのスケールは壁（この場合は波面）からの距離に比例して大きくなるとモデル化されている。つまり壁に近づくほど乱れのスケールは小さくなるが、風によって発達した波面では、波頂部から気流が剥離し、大規模な渦が発生するため、乱れのスケールが逆に大きくなっていることが分かった。この結果、既存の乱流境界層理論に基づくモデル化では、海面に適切なせん断応力を与えることが出来ないことが分かった。

また、2D-PIV の流速データから圧力の空間分布を計算する方法について開発を行った。圧力のポアソン方程式を数値的に解くことで、流速の実験データに基づいた圧力場の測定が可能になった。波面上の気流乱流場に対してこれを適用し、気流に伴う大規模な渦については負圧が生じていること、波頂部の前後で正負の圧力差が生じていることなど、波浪の発達に対して気流の圧力場が大きく影響していることが分かった。

本研究では、共同研究者が別途、水側の乱流場について検討を行い、これをモデル化して組み込んだ海洋モデルの開発を行った。従来の海洋モデルは、水側を一層として取り扱い、鉛直積分型の支配方程式を用いて、水面に外力として風の海面せん断応力を与えるモデルが一般的であった。本研究ではこれを二層とし、波面による影響が顕著に出る上層と海底摩擦の影響が大きい下層を設定した。モデルの検証のため、潮汐計算を行っていくつかの観測データとの比較を行った結果、現状では既存の一層モデルを超える精度を得ることは出来なかった。原因として、上層と下層を分けたことによる、上下層を接続する物理機構に問題があると考えられる。具体的には、上下層の間で水流の運動量が伝わりすぎることから、下層の流速場が過剰に大きくなってしまふことが問題となった。

今後は、実験データのさらなる解析を進めるとともに、海洋モデルの改良を進め、再現性の高い海洋モデルの開発を継続していく予定である。

開水路における乱流特性に関する研究

宮島 昌弘(工学部都市創造工学科)

本研究は、波面上の気流乱流と砕波による水側の表層乱流を海洋モデルにおいて取り扱い、高精度な海流の流れ場や水位の変動を再現できるモデルを開発しようとするものである。分担研究では、開水路乱流を取り扱うものであるが、乱流現象はどんな現象でも非常によく似た性質を示す相似性をもつ部分と現象によって性質が異なる部分とがある。したがって、波面近傍の砕波による乱流現象が非常に難しい場合、より計測しやすい開水路乱流現象をモデル化することで、間接的に乱流現象を再現することが可能となることから、分担研究ではこれを研究目標とした。

分担研究では、傾斜度を大きくした開水路に水を流し、水深を非常に薄く(数 mm 程度)することで水深に対して流れが高速となる高フルード数流れを形成した。高フルード数流れは水路底面の摩擦と水面の不安定から開水路の流れであっても連続した波面を形成することが知られており、「転波列」と呼ばれる現象が生じる。本研究では、この転波列に対して PIV 計測による流速の計測を行い、水面および水路底面近傍の乱流現象の計測を行った。

多くの実験ケースを解析した中で、流れ場が層流の状態から乱流の状態へ遷移する過程において、既存の乱流理論では取り扱うことが出来ない流速場になることが分かった。流速をさらに大きくすると、水深が非常に浅いことから水路底面近傍から乱れが発達し、それが水深全域に分布する。発達した乱流境界層内に水面が入ってしまうことから、水面による弱い壁効果と乱流境界層とが相互干渉しているものと考えられ、これによって連続した波面となる転波列へ遷移する可能性も考えられるが、これについては不明な点も多く、今後さらに検討を行う必要がある。

既存の開水路乱流に関する理論では、水路底面から発達する乱流境界と水面との相互干渉は取り扱われない。水面は内部の渦や圧力場に応じてその形が変化するが、水の密度が大きいことから完全に自由に変形するわけではない。したがって、水面は変形可能な弱い壁として存在することから、水面近傍においては乱れを抑制することが考えられる。一方、大きな乱れは、大きなスケールの渦に等しいことから水面を変形させる効果があると考えられる。水深より大きな渦は発生し得ないが、水深に対する流速を変化させることでレイノルズ数に変化し、それに対応して渦スケールが変化することから、今後は、渦スケールと波面変動の関係など、乱れと水面との相互干渉に対して検討を行っていく必要がある。