

# 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 concerning 3D turbulence due  
to wind wave breaking

主任研究員名:水谷 夏樹

分担研究員名:宮島 昌弘

波面上を流れる気流から水面への運動量輸送量をモデル化するに当たって、2012年度は、波面上を流れる気流の圧力によって、風から波面への運動量輸送がどのように影響を受けるのかについて実験的に検討を行った。また、類似の乱流現象である開水路乱流についても別途検討を行い、モデル化に資するためのデータ取得を行った。

2011年度から継続している波面上の気流乱流の計測については、PIV計測を行うことによって気流の流速成分を得ることができる。2012年度は、それらの実験データを圧力のポアソン方程式に代入し、波面上の気流の圧力分布を得る手法の開発を行った。気流によって水面に凹凸が生じると、気流が凹凸に応じて変化するが、このとき気流の持つ圧力の値も時空間的に変化する。これらの圧力変動は、水面を上下に発達させるように作用するため、波の発達には気流が水面をこするせん断応力だけでなく、圧力変動によっても生じることが分かっている。

しかしながら、既往の研究では、圧力の計測は差圧計等を用いたセンサーによる点計測が一般的であり、圧力の空間分布を、時間変動を伴って得ることは極めて困難であった。従来の計測方法では一つの波の頂部と谷部において圧力の値が空間的にどのように分布するのかを知ることとは事実上不可能であった。

そこで2012年度では、流体の基礎方程式であるナビア・ストークス方程式の発散を取って得られる圧力のポアソン方程式を差分化し、実験値であるPIV計測による流速値をポアソン方程式に代入することで、圧力の空間分布を得る実験解析—数値解析のハイブリッド解析手法を開発した。開発した手法は、本来3次元流れである流体を近似的に2次元流体として取り扱うことから、本来考慮しなければならない1つの方向成分(水槽の奥行き方向成分)を無視する。これが誤差となって結果に現れるため、誤差評価を行った。求めたい気流の流速値に対して10%程度、圧力値に対しては、5%程度の誤差が含まれていることが分かった。また、理論で示されたように波頂部で流れが高速化することによる圧力の低下が見られた。一方、理論では取り扱うことのできない気流の剥離によっても圧力が低下することが分かった。

波面に沿って圧力を一波長分積分することによって、波による気流への抵抗力(逆に言えば気流によって波を発達させる力)を求めることができる。その結果、波の前面で気流が剥離することで圧力が負の値となり、波を発達させるように力が作用することが分かった。

これとは別に分担研究者の研究成果としては、波面上の気流乱流に類似した乱流現象として開水路乱流についての検討を行い、開水路乱流における層流および乱流分布が壁面から数

mm 程度の微細な領域においても明確に分かれて存在することが分かった。また、既知の理論である対数則に対しては、乱流領域において良好に一致することが分かった。一方、乱れ強度の分布については、摩擦速度  $u_*$  の取り扱いに議論の余地があり、これについては引き続き検討を行う必要があると考えている。

以上のように、風によって発達する波に対して、主に波面に作用する気流の影響について検討を行った。2013 年度は、こうした一連の現象をモデル化して、海洋モデルへの組み込みについて検討を行う予定である。

# 風波界面上の気流の圧力分布の算出方法の開発と圧力抵抗について

水谷 夏樹(工学部)

本研究課題を実施する上で、気流から波面に対して輸送される運動量をモデル化する必要がある。現在の運動量輸送モデルは、基本的には風速に比例する形でモデル化されているものが多いが、他に波齢(波速と摩擦速度の比であり、波の発達の度合いを示す)や波形勾配による影響を付加されているものもある。こうしたモデル化は、限られた実験データや観測データを基に考えられているもので、全ての条件に当てはまるわけではなく、その理由としては、気流と波面との相互作用のメカニズムが未だに十分に理解されていないことが挙げられる。

その気流と波面との相互作用において理解が十分でない問題として、気流が持つ圧力の影響が挙げられる。理論的には、波の波頂部で気流が高速化することによって相対的に圧力が低下し、低下した分の圧力によって水面が持ち上げられて波が発達するというモデルが考えられているが、気流速度に関する実験結果は数多く存在するもの、気流の圧力に関する実験結果はあまりないのが現状である。

そこで 2012 年度は、波面上の気流速度を可視化実験によって計測し、得られた速度のデータをナビア・ストークス方程式から導かれた圧力のポアソン方程式に代入するという実験値と数値計算のハイブリッド解析によって圧力の空間分布を得ることに成功した。圧力のポアソン方程式は、数値計算を行う上で必ず用いられるものだが、数値計算においては次時刻の速度の発散値(流れの連続式に相当する)を意図的にゼロとして取り扱い、現時刻の速度と圧力場を適宜修正しながら計算を進める手法が用いられている。こうすることで、数値計算上において流れ場が発散することなく、計算を安定的に進めることができる。

本研究では、2次元 PIV データである実験データを用いることで、現時刻も次時刻も速度の発散値をゼロとして取り扱った。実際の気流の流れは 3次元であることから、擬似的に流れ場を 2次元として取り扱うことによる誤差が生じたが、誤差の程度は流速にして 10%程度、圧力場にして 5%程度であることが分かった。また、理論で示されたように波頂部で流れが高速化することによる圧力の低下が見られた。一方、理論では取り扱うことのできない気流の剥離によっても圧力が低下することが分かった。

波面に沿って圧力を一波長分積分することによって、波による気流への抵抗力(逆に言えば気流によって波を発達させる力)を求めることができる。その結果、波の前面で気流が剥離することで圧力が負の値となり、波を発達させるように力が作用することが分かった。

本年度の結果は、限られた条件に対してのみの結果であるため、今後は検討する条件を拡大して、より一般的なモデル化につなげていく予定である。

# 開水路における壁面ごく近傍の乱流特性に関する研究

宮島 昌弘(工学部)

本研究課題の検討対象である波面上の気流乱流や水面下の水流乱流は、微視的には異なる点があるものの、巨視的には壁面乱流の一種であり、水工水理学の基礎的現象である開水路乱流に類似した特性を有していることが分かっている。

一方で、波面上の気流乱流や水面下の水流乱流は、風と波および流れの相互作用によって生じるため、波面が激しく変動することから、現象を長時間継続して捉えることが難しく、時間平均場とそこからの差である乱流量を求めることは非常に難しいのが現状である。本研究では、こうした問題点に対して画像計測という流れ場の空間分布計測法を導入しており、波面近傍の乱流現象と類似した開水路乱流の特性を、画像計測を用いて詳細に把握することは極めて重要であると考えている。同時に、本研究の重要なポイントである「微細領域における流れの可視化計測技術の開発」についても、研究目的を達成する上でその実験ノウハウを蓄積する必要がある。

以上のことから、2012 年度においては、1cm に満たないような極めて小さな水深を持ち、かつ高速な乱流流れである開水路乱流に対して可視化実験を行った。これまで可視化実験に用いていた機器を見直し、微細領域における流れ場の可視化に対応できるようなマクロレンズや接写リングを用いた。また、流れの可視化に用いていたナイロン粒子を 50  $\mu\text{m}$  から 4  $\mu\text{m}$  へと 1 オーダー小さくすることで、これまで撮影が難しかった底面近傍の乱流分布を得ることができた。一部の結果には乱流境界層と壁面の間に生じる粘性底層をも捉えたようなデータが見られるが、これについては今後、さらにデータを蓄積して検証する必要がある。

2012 年度の計測においては、開水路流における層流および乱流分布が壁面から数 mm 程度の微細な領域においても明確に分かれて存在することが分かった。また、既知の理論である対数則に対しては、乱流領域において良好に一致することが分かった。一方、乱れ強度の分布については、摩擦速度  $u_*$  の取り扱いに議論の余地があり、これについては引き続き検討を行う必要があると考えている。

以上のように、2012 年度は、水深が 1cm に満たないような開水路乱流に対し、微細領域における可視化実験を実施した。今後は、これらの流れ場がさらに高速化することで波動場へと遷移する転波列流れを取り扱うとともに、各乱流特性に対するフルード数やレイノルズ数の影響などについて検討を行う予定である。