

## 28. 画像解析を応用した水理模型実験における越波量計測手法の開発

村上 邦宏

## 1. 目的

防波堤や護岸で生じる越波は一波毎に大きく異なり、近年では、沿岸防災を考えるうえで、越波流量などの時間平均量だけでなく、個別波の越波量や打上げ高を把握することの重要性が指摘されている。過去に、水理模型実験で個別波の越波量を計測した例がいくつかあるが、一般的に個別波の越波量の計測は困難であり、確立された計測手法はない。著者らは、これまでに可視化実験と画像解析によって一波毎の越波量と打上げ高を計測することを試みてきた<sup>1)</sup>。しかし、瞬間的に水面形状が大きく変化し、且つ、水塊や飛沫が発生する極めて複雑な現象を精度よく計測することは容易ではなかった。本研究では、一波毎の越波や打上げをこれまで以上に精度良く計測することを目的に、可視化手法の改良を試みるとともに、画像解析結果からの適切な越波量の算定法について検討した。

## 2. 内容

## 2.1 越波量計測手法の概略

本研究における越波量の計測手法は、断面二次元水路に設置された護岸模型の前面での流体運動（波の打上げや越波）を可視化し、高速度カメラで撮影して、その記録から PIV（Particle Image Velocimetry）により流速ベクトルを求め、それをもとに越波量を算出するというものである。この方法は、護岸背後に越波枡を設置して、流入する水量を計測する従来多用されている方法とは違い、単に越波量を求めるだけでなく、構造物前面での流体運動そのものを計測するもので、得られた流速ベクトルから、例えば、天端から打ち上がる水量、海に落ち込む水量、打ち上がる水塊や越波水の速度などを算定できる。

## 2.2 実験内容

実験には図-1 に示す断面二次元造波風洞水路（長さ 28m、高さ 0.5m、幅 0.3m）を使用した。この水路は、越波や飛沫の発生状況をよく観察できるように、一部に広いガラス面（観察部）を有している。この水路内に、縮尺 1/70 で海底斜面および直立堤の模型を作成した。

ビデオ撮影には高速度カメラを使用し、事前の検討の結果、フレームレートを 400fps、シャッター速度を 1/500s に設定した。撮影範囲は堤体前面の天端付近であり、図-2 および図-3 に示すように、背景となる黒い板を設置し、ミラーを利用してグリーンレーザーシートをマウンドの下から照射して護岸前面に混入したトレーサーを発光させた。撮影は、反射波の影響を含まないように、造波開始後に定常となった最初の 3 波について行った。これらの可視化とビデオ撮影に加え、堤体背後に大きな越波枡を設置した。枡内の 2 か所および護岸壁面の 1 か所を含む水路内の計 8 か所で波高計により水面変動を記録した。

本研究では、画像解析を用いた越波量計測手法の開発を目的としているため、計測精度の検証が容易

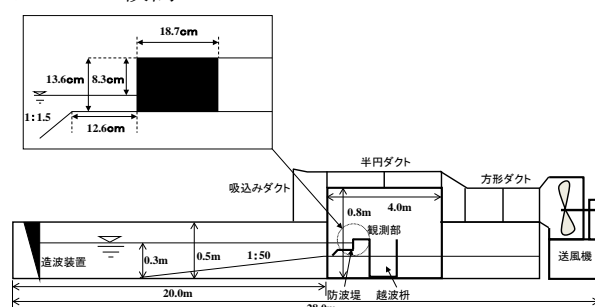


図-1 断面二次元造波風洞水路

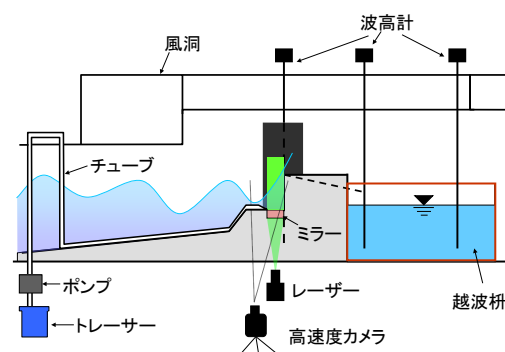


図-2 実験装置の概略

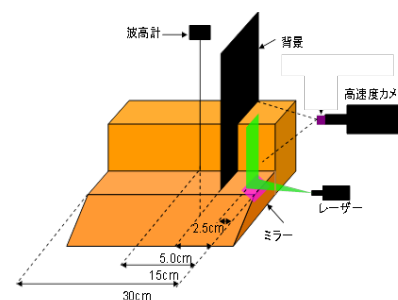


図-3 堤体前面部の撮影

に行えるよう、入射波は規則波とし、周期  $T$  を 1.0s, 波高  $H$  を 4cm から 8cm まで変化させた。

### 2.3 トレーサーの検討

PIV によりできるだけ正確な流速ベクトルを得るためには、解析に適した画像を得ることが最も重要である。画像の質にはカメラ等の機材はもちろん、可視化のためのトレーサーも強く影響する。本研究ではまずトレーサーについて検討した。検討対象のトレーサーは表-1 に示す 5 種類である。

写真-1 に幾つかのトレーサーを示す。表-1

のダイヤイオン（三菱化学㈱製）はイオン交換樹脂の微小粒子で蛍光染料を染み込ませて使用する。また、フルオスター（EBM 社製）は、可視化実験（特に PIV 解析）用の蛍光トレーサーとして市販されているものである。これらの蛍光トレーサーは、一般的な流体（液体）運動の可視化によく利用されている。しかし、自由水面の大変形や水塊、飛沫の飛散など極めて激しい現象を可視化するためには、これらのトレーサーを大量に投入しても輝度を十分に確保することは困難であった。微小気泡はより輝度を得るため試用したものであるが、上昇速度が速く、また、合一して大きな気泡となるため適していない。これに対しマイクロバブルは直径が数  $10\mu\text{m}$  以下の気泡で、非常に小さいためほぼ球形であり、浮上速度が遅いなど通常の気泡とは異なる性質を持つ。本研究では、写真-2 に示す金属アスピレーターを用いて簡易的にマイクロバブルを発生させた。金属アスピレーター内を水が流れる際に、その構造によって水中に取り込んだ空気を破碎、攪拌することによってマイクロバブルが発生する。この様に生成されたマイクロバブルは負の電荷を帯び、互いに反発する性質があり<sup>2)</sup>、このことがトレーサーとして非常に有利な点である。また、淡水（水道水）と海水では同じ発生方法でも、マイクロバブルの発生量が大きく異なり、海水では淡水の 5、

6 倍程度、高密度に生成される。図-4 は市販の蛍光トレーサーと人工海水によるマイクロバブルを使用した場合の PIV 解析結果の比較で、両者の違いは一目瞭然である。これらのトレーサーの比較の結果、高密度に生成でき高い輝度を確保できる人工海水によるマイクロバブルが本可視化実験のトレーサー

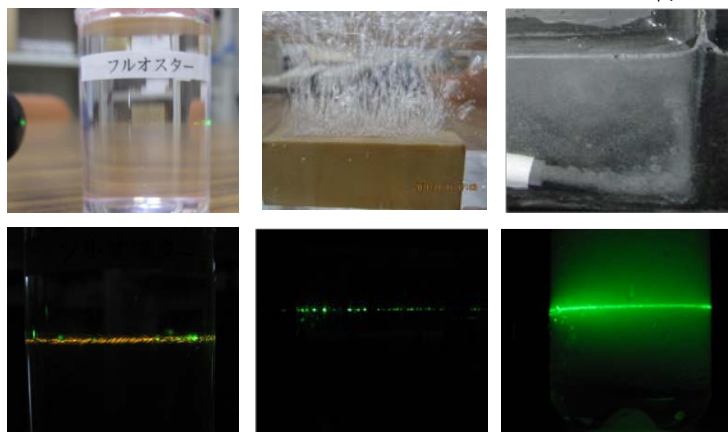


写真-1 トレーサーの比較  
(上段：照明下 下段：暗所でのレーザー照射時 左：蛍光トレーサー 中：微小気泡 右：マイクロバブル(人工海水))

表-1 トレーサーの比較

トレーサー	粒径・比重	特徴
ダイヤイオン+蛍光染料	250-600 $\mu\text{m}$	オレンジ色に発光 粒子が大きく沈降する
フルオスター	15 $\mu\text{m}$ 1.1g/cm <sup>3</sup>	オレンジ色に発光 比重が水とほぼ同じ
微小気泡	0.1-数 mm	気泡が光を反射 上昇速度が速く合一する
マイクロバブル(淡水)	10 $\mu\text{m}$ 以下	非常に小さな気泡 上昇速度が非常に遅く合一しない
マイクロバブル(人工海水)	10 $\mu\text{m}$ 以下	淡水に比べ 5-6 倍の密度で生成



写真-2 金属アスピレーター

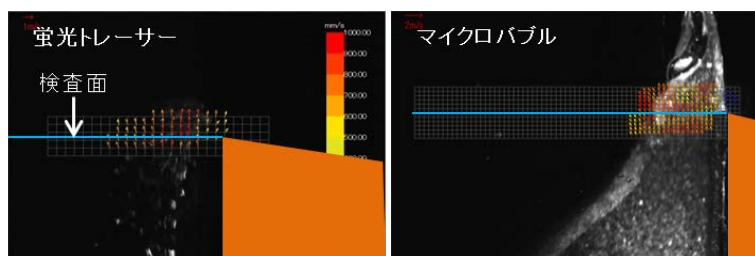


図-4 PIV 解析例

(左：市販の蛍光トレーサー、右：海水マイクロバブル)

高密度に生成でき高い輝度を確保できる人工海水によるマイクロバブルが本可視化実験のトレーサー

として適していることが分かった。実験におけるマイクロバブルの生成は、写真-3に示すように、ポリバケツ内の人工海水を金属アスピレーターを付けたポンプで循環させて発生させる。そして別のポンプによりマイクロバブルを吸い上げ（写真-4）、細いホースを通して護岸前面に注入する。なお、ホースの途中に水量の調節弁を取り付けており、波動に大きく影響を与えない程度の量に調節しながらマイクロバブルを注入した。

## 2.4 護岸前面の流体運動に及ぼすマイクロバブルの影響

本可視化実験では、水路内の淡水中に海水のマイクロバブルを混入することになる。そこで、護岸前面の流体運動に及ぼす海水マイクロバブルの影響について調べた。図-5は護岸壁面の波高計で計測した水面変動で、マイクロバブルを混入しない場合と混入した場合の比較である。図より、水面変動はほぼ同じであることから、特に越波や打上げといった激しい現象については、海水マイクロバブルの影響は無視できるものと判断した。

## 2.5 越波量の算定方法

越波量の算定方法は、まず可視化画像をもとにPIV解析を行う。なお本研究でのPIV解析には市販のソフトウェア（株ライブラリー製 Flow-PIV）を使用した。図-6に示すように、天端高さに検査面を設け、検査面上の鉛直流速  $V_i(t)$  を抽出する。この鉛直流速に解析点の間隔  $\Delta x$  を掛けて足し合わせ、さらに一周期間で積分すれば越波量 ( $\text{m}^3/(\text{m 波})$ ) が得られる。また越波量のある時間で割れば、時間平均量である越波流量 ( $\text{m}^3/(\text{ms})$ ) が得られる。なお、検査面を上向きに横切る流速のみで積分すれば打上げ水量が求まり、下降する流速のみで積分すれば海に落下する水量が求まる。越波量の算定式を以下に示す。

$$Q = \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n V_i(k) \Delta x \Delta t \quad \dots (1)$$

$V_i(k)$  は  $i$  点の鉛直流速、 $\Delta x$  は解析点間隔、 $\Delta t$  は時間間隔、 $n$  は検査面上の解析点数、 $m$  は一周期間の流速のデータ数である。

## 2.6 鉛直流速の補正

図-7に  $H=6\text{cm}$  の場合について、検査面上のある1点でのPIV解析結果（鉛直流速）を示す。トレーサーにマイクロバブルを利用することで可視化の程度が向上し、蛍光トレーサーの場合（図中の緑のライン）に比べて、より妥当な鉛直流速が得られていることがわかる。しかしながら、PIV解析の結果には欠測や誤りが含まれる。ベクトルの欠測については、トレーサーを追跡しきれていないなどの原因が考えられ、誤ベクトルについては、水路壁面のガラスに付着した水滴等を検出してしまうことなどが理由と

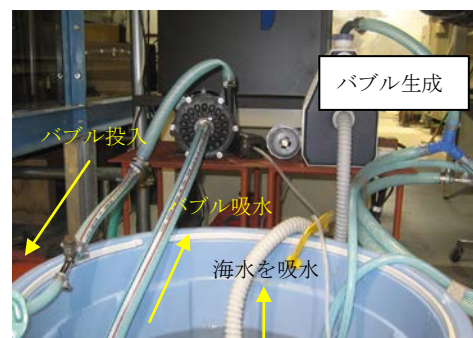


写真-3 マイクロバブルの作成

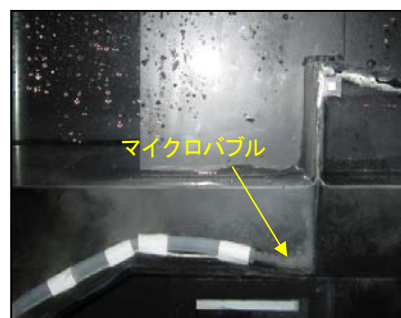


写真-4 護岸前面の様子

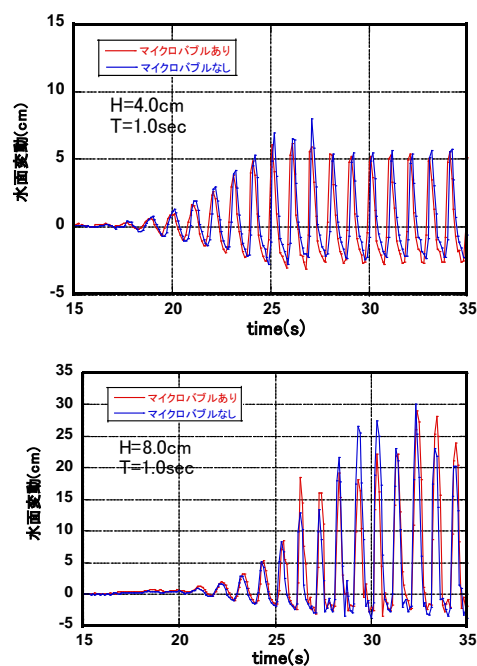


図-5 護岸壁面での水位変化の比較

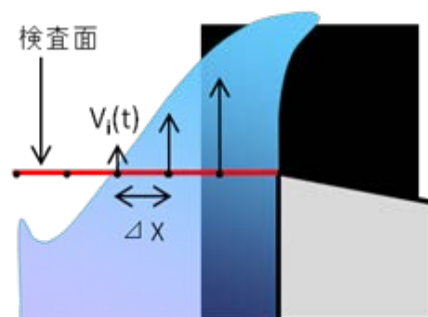


図-6 越波量算定の概略

思われる。このような欠測や誤りを完全に無くすことは困難であり、したがって得られた流速データに何らかの補正が必要となる。本研究では次のような補正を行った。まずPIV解析を行った映像に対して、**図-8**に示すような輝度解析を行い、検査面上の流速解析点における輝度の時系列データを得た（**図-7**の黒のライン）。この輝度データと流速データを照合し、輝度が低い（流体が存在していない）ときに検出されている流速を誤った流速とし削除した。ついで、護岸直前で計測した水面変動の記録から、ゼロアップクロス法により越波した波のゼロクロス点および周期を算出し、その期間内で流速が大きく変動する部分について、流速が直線的に変化するとして補正し、且つ、欠測データを補間した。

### 2.7 越波量の計測精度の検証

越波量の計測精度を検証するため、従来の越波枡を用いた方法でも比較的良い精度で越波量を計測できる簡単な条件において実験を行い、画像解析による結果と越波枡による結果の比較を行った。**図-8**に越波量の比較を示す。なお、越波枡による計測では、3波による越波水を護岸直背後に設置した越波升により集水し、平均越波量( $\text{m}^3/(\text{m 波})$ )を算出した。同様に、画像解析についても3波の平均越波量を求めた。図より、波高が小さい場合は差が大きく、最も波高が小さい  $H=4\text{cm}$  のケースでは、画像解析の結果が越波枡の結果の4倍弱となっている。しかし、波高が大きくなるにつれ、両者は非常に近い値を取っている。波高が小さい場合の越波は、護岸に沿って上昇する流れが非常に薄く、また、護岸前面に落下する水はほとんど水滴の状態であって、PIV解析の精度を確保することが難しいことが過大評価の原因と考えられる。一方、波高が大きく、それなりの水量が検査面を上下に横切るときには、比較的精度の良いPIV解析結果が得られ、さらに前述の流速の補正と補間によって、越波量が適切に算定されていると考えられる。

### 3. 結論

可視化実験と画像解析手法を応用した、水理模型実験における越波量の新たな計測手法を開発した。可視化実験においては、一般的な蛍光トレーサーでは激しい越波現象を可視化することが難しく、高密度なマイクロバブルがトレーサーとして有効であることがわかった。また、本計測手法は、画像解析結果を適切に補正・補間することによって、越波の検討に十分な適用範囲と考えられる  $10^{-4}(\text{m}^3/(\text{m 波}))$ 以上の越波について精度良く計測できることを示した。なお、本手法は非接触の計測法であることから、これまで、越波量の計測が難しかった、風洞水路による波と風を同時に作用させた場合の実験において、非常に有効な計測手法となることが期待される。

<参考文献>

- 1)東和弥(2011): 越波・打上げの可視化実験と画像解析, 土木学会西部支部論文
- 2)大成博文(2006): マイクロバブルのすべて, 日本実業出版社

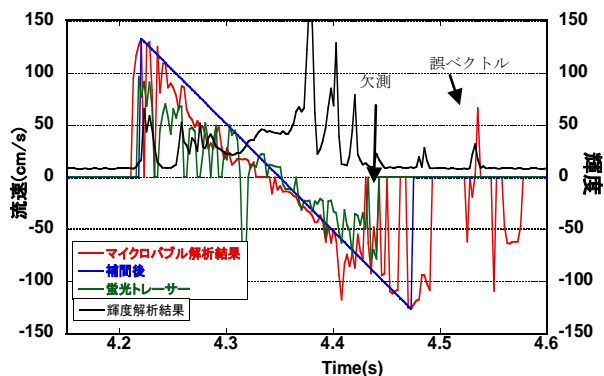


図-7 速度ベクトルの補正

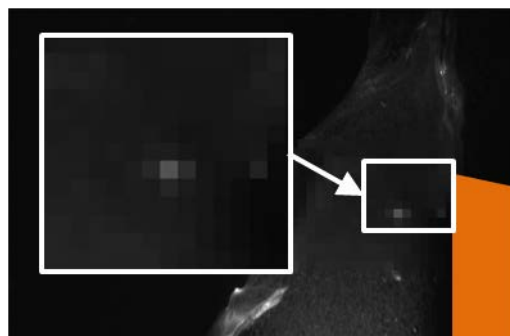


図-8 輝度解析の様子

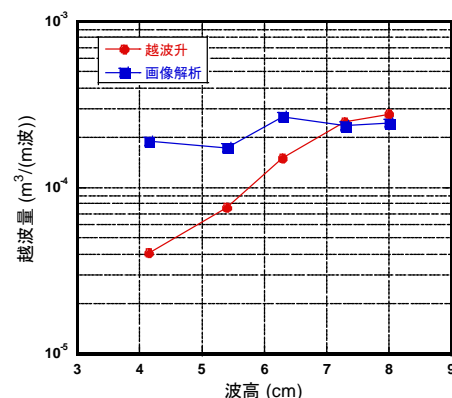


図-9 越波量の比較