

1. 緒言

近年、流体計測において可視化技術を用いた定量計測が盛んに行われるようになってきた。一般的な流れ場の計測においては市販されている可視化システムに汎用ソフトを用いることで、誰でも高精度なデータの取得が可能になってきている。また、高速度カメラを用いることで、高時間分解能を持つデータが得られることや、数百万画素の高解像度カメラを用いることで、数百点から数千点の空間データを同時に得られること、さらに複数台のカメラを用いることで同時多点の3次元速度情報を得ることも可能になってきており、これまで不明であった現象解明に対する有用性が大いに期待されている。

しかしながら、海岸工学や海洋学で対象とする波動場計測においては、撮影対象内に自由表面が存在する。この自由表面の取り扱いについては数値計算における移動境界問題と同様に様々な問題が生じ、画像の撮影時やデータの後処理において特別な処理を必要とする。また、一般的に波動場における流れは振動流を基本とする不規則な流れであり、砕波などに伴う乱流成分も存在することから、定常流場の計測とは異なる条件を考慮して撮影を行う必要がある。さらに、平均流の取り扱いなど、波動場特有の問題も存在する。

波動場計測において可視化計測技術を用いた研究は、既往の研究においても数多く存在する。流れや渦の様子だけを観察する定性的な可視化技術については、Svendsen(1987)が砕波後のsurface rollerとその後流域への拡散の様子を示し、Okuda *et al.*(1976)は、風による吹送流と風波の発達過程を水素気泡を用いて可視化した。また、波動場の直接計測とは異なるが、日野ら(1984)は水槽底面に粒子を敷き詰めることで、砕波フロントから生じる縦渦の底面への到達によって巻き上がる底質の様子を示し、斜降渦の存在を明らかにした。Kawamura and Toba(1988)は、風波上の気流に煙を流すことで風波と気流の相互作用および気流の中の組織構造について論じている。

一方、後述するPIV計測が周辺機器の発達と共に洗練され、より手軽に、またより高精度に定量計測が可能となってきた。膨大なPIV計測の研究例の一部を挙げると、西村・武若(1988)、小林ら(1992)、宮本ら(1999)による砕波点における波頂部近傍の速度場解析やChang and Liu(1998)による砕波ジェット先端部およびジェット内部の詳細な速度場解析などがある。また、砕波後の乱流場については、Chang and Liu (1999)や水谷ら(2000)、水谷ら(2001)が砕波による気泡が大量に混入する領域の速度場解析を行っており、渡部ら(1998)は、ブラックライトを用いた砕波後の

3次元速度場の解析を行っている。風波については、竹原ら(2000)がSuper Resolution KC法を用いたPTVアルゴリズムを開発して風波の発達過程を可視化計測し、波動場との関連性について述べており、小笠原(2004)や水谷・橋本(2004)が風波発達過程における砕波乱流と吹送流の関係について検討を行っている。さらに風波上の気流のPIV計測も行われており(Kawai, 1982; Reul *et al.*, 1999; Mizutani and Hashimoto, 2001)、風波波頂部の形状が気流の中の組織構造に与える影響について検討されている。

このように、様々なケースの波動場に対して可視化計測が適用され多くの知見が得られているが、同時に課題も多く計測技術として克服すべき問題が存在する。

以上のことから本研究では、波動場計測において可視化技術を用いる上で、いくつかの問題点を挙げ、それらの解決策について述べると共に、これから波動場計測の分野で可視化計測を始めようとする技術者への指標となる資料の作成を行う。

2. PIV計測手法の概要

2.1 概説

流れの様子を理解することは、現象を理解する第一段階として重要なステップであるが、流れそのものは通常は目には見えないものである。これを例えば流れの中にトレーサーと呼ばれるマーカーを挿入することなどによって目に見えるようにする技術が流れの可視化である。この流れの可視化技術に最近のデジタル画像処理技術を加え、流れ場の多点の速度情報を抽出するものがParticle Image Velocimetry (PIV:粒子画像流速測定法)と呼ばれる流速計測技術である。流れの定性的把握と定量測定が組み合わせられた新しい計測技術であり、非定常流れ場の2次元・3次元解析のための強力な流れ解析ツールとして認識されつつある。通常は速度(1秒間に30フレーム)を持つカメラと繰り返し発振するYagレーザーを用いることで3次元計測も可能となっており、最近では高繰り返し周波数(1000Hz)を持つレーザーと2台の高速度カメラを組み合わせることで、時系列3次元PIVと呼ばれる高時間分解能を有した3次元計測も可能となっている。しかしながら、これらの計測は2台のカメラとレーザーの他にもセッティングのための周辺機器が必要になることからコスト面の問題に加え、左右の画像の校正をはじめとして膨大なノウハウを必要とする。このため波動場計測においては、まだ2次元計測が主流である。また、高速な流れ場の瞬間的な構造を捉えることが主目的であったPIV計測が、統計量の算出にも利用され始めており、特に時空間的にも非定常な流れ場である

波動場の計測は長時間平均値が必要になることから、処理量の増大に伴って3次元計測の例はあまり存在しない。

本研究においては、波動場計測特有の問題点を指摘する目的から、3次元計測については特に言及せず、以下では2次元PIV計測について概説する。なお、PIV計測の原理等、詳細については明瞭な参考文献が幾つかあるので、それらを参考にされたい(可視化情報学会, 1998, 2002; Rafell *et al.*, 2000)。

2.2 レーザー

現在のPIV計測においてはデジタルビデオカメラと挿入されたトレーサー粒子を2次元断面内において可視化するための照明装置として各種のレーザーが用いられる。このうちレーザーについては半導体レーザーやArイオンレーザーなどの連続光を発振するレーザーを用いる場合と、パルス光を発振するYagレーザーを使用する場合とに大別できる。連続光を発振するタイプのレーザーを用いる場合、組み合わせるビデオカメラにメカニカルシャッターか電子シャッターを備えたものを用いる必要があり、カメラ側で露光時間の調整を行う。従って、高速シャッターを備えていれば高速度ビデオカメラを用いることができ、高速な流れ場に対して有用な情報を得ることができる。また、連続発振するレーザーにシャッターを装備していない開放型カメラを用いる場合は、スプリッターと呼ばれる周波数設定が可能な遮断器を設置する必要がある。レーザーを発振した後に光学経路の途中で遮断器によるレーザー光の断続的な遮断を行って、用いるカメラの撮影速度に合わせた周波数でシャッターの代替とする。

これに対し、はじめからパルス光を発振するYagレーザーの場合、開放型のカメラを用い、シャッターによる露光時間の調整は行わない。露光時間はレーザーの発光時間に依存するが、一般に用いられているYagレーザーにおいては5nsecと非常に短い発光時間となっているため、理論上は音速気流に対しても対応することが可能である。Yagレーザーを用いる場合、カメラのフレームレートはYagレーザーの発振周期に合わせる必要がある。現在では1秒間に1000回程度の高繰り返し回のYagレーザーも製品化されているもののコスト的な問題で手軽に利用できるものではない。一般に使用されているYagレーザーの場合、1秒間に15回の繰り返し周期で発振され、通常2台のYagレーザーを用いることからカメラについても30fpsのものを用いる必要がある。

2.3 デジタルビデオカメラ

次にデジタルビデオカメラについてであるが、PIVに用

いるカメラとして重要な要素は、解像度、フレームレート、CCD素子の感度、メモリ容量などがある。解像度は、現在最も少ないもので520×480pixel程度であり、主流は1000×1000pixel程度の画素数を持つものが多く、2000×2000pixel程度の画素数を持つカメラも用いられるようになってきている。

波の碎波など瞬間的かつ局所的に高速となる流体を扱う場合は高速度カメラを用いることが有効な手段となるが、これにはフレームレートが重要な要素となる。フレームレートは、1秒間に撮影できるコマ数を表すものである。一般的な高速カメラの場合、フレームレートが高速になると撮影可能な有効画素数を減らして情報の転送速度を上げるような工夫がなされている。従って、ただ単に高速性を求めれば1秒間に数万コマの撮影も可能なカメラは存在するものの、解像度を保ちつつ高速に撮影することのできるカメラはEtoh *et al.*(2002)が開発したものを除いて存在しない(1Mfps)。現在市販されているカメラでは1600×1400pixelの解像度を保ちつつ撮影可能な最高速度は1000fps程度である。また、高速カメラは短時間に画像を大量に撮影することから、画像を保存するメモリ容量も重要となってくる。一般に1000×1000pixelのモノクロ画像を8bit(256階調)で圧縮なしに保存すると1枚あたりおよそ1MBの容量を要する。現在主流のPCの最大メモリが2GBであるので、理論上は2000枚の画像が保存できるはずであるが、OSが占めるメモリ領域も確保しなければならないことから、実際にはこれよりも少ない画像しか保存することができない。仮に2000枚の画像を保存できたとしても、1000fpsの高速カメラを用いた場合は、僅か2秒間の現象しか撮影することができない。結局は、流体現象の高速性と撮影時間とを勘案して最適な機器の選定を行う必要がある。

2.4 トレーサー粒子

次にトレーサー粒子について説明する。トレーサー粒子はPIV計測において極めて重要な要素であり、粒子の選定が撮影される画像の可否を決定すると言っても過言ではない。表-1および表-2は、作用流体が水および空気の場合に用いられるトレーサー粒子をまとめたものである(西野, 1998)。トレーサー粒子の必要条件としては、作用流体に対する追従性が最も重要となる。作用流体が水の場合は、比重が1に限りなく近いものが良く、乱流に対する追従性からできるだけ小さい粒径のものが用いられる。水を作用流体として実験を行う場合、ナイロン12などが代表的であるが、比重1.02で平均粒径が50μm程度の諸元を有する。しかし、これらのトレーサーを用いても、

表-1 トレーサー粒子(水用)

名称	型番	粒子径 [mm]	材質	比重	備考	連絡先
ダイアミド	Z2073S	10～800	ナイロン12	1.03	粉砕形状 粒径分散が大きい 視認性良好	ダイセルヒュルス (株) 052-571-5972 06-263-4871 (本社)
	1101	～400程度				
	3158	～40程度				
ハイブリッド ファインパウダー	SP-500	平均5	ナイロンに酸化チ タンコーティング	1.08	真球粒子	東レ (株) 03-3245-5500
ダイヤイオン	HP20	200～700	スチレンとジビニ ルベンゼンの付加 重合体	1.02	イオン交換用ポラス真球粒 子。粒径35～75, 75～150, 150～300, 200～700と各種あ り。比重0.6～1.0で各種あり。	三菱化成 (株) 03-3283-6531 一般代理店より購入可能
	HP21	150～700				
	SBX-8 SBX-20 SBX-100 SBX-200	8程度 20程度 100程度 200程度				
テクポリマー			架橋ポリスチレン	1.07	真球粒子。透明なので可視化 には余り適さない。	積水化成工業 (株) 0303347-9695
蛍光粒子		200～400	ポリスチレン	1.03	母材は無色透明な真球粒子。 蛍光染料含有。その他着色可 能。	(株) タナックス 0292-67-2167
オルガソール2002	UL-D	5～7	ナイロン12	1.02～1.03	白色ジャガイモ形状 粒径分散は比較的小 視認性良好 ナイロン6, ナイロン11のも もある。	エルファトケムジャパン (株) 03-3288-7120
	EX-D	8～12				
	D	18～22				
	ES-3	28～32				
	ES-4	38～42				
	ES-5	48～52				
リルサン粒子		平均約30～100	ナイロン11	N.A.	塩結晶状の粉砕粒子, 白色, 蛍光色など豊富	
フローセン	UF-1.5	10～20	ポリエチレン	0.922	乳白色, 真球形状	住友精化(株) 03-3230-8565
	UF-4	15～25		0.925		
	UF-20	20～30		0.918		
	UF-80	20～30		0.918		
ポリスチレン球形ペレット		500～1500	ポリスチレン	1.04～1.06	真球粒子, 行程外の副産物, 加 熱処理で比重調整可能	鍾淵化学工業 (株) 06-226-5054
水性ペイント		～20程度			安価, 入手容易	
ラテックス		～数10程度			高価, 粒径が揃っている	
セルスター		50程度	中空ガラスビーズ			
石松子		35程度	松の花粉	1.1	短時間の測定に適する	日本粉体工業技術会 075-761-7123

表-2 トレーサー粒子 (空気用)

名称	型番	粒子径 [mm]	材質	密度 [kg/m3]	備考	連絡先
エクспанセル	DE#551	40～60, 平均40	塩化ビニリデン/	36±4	熱膨張性中空真球粒子 膨張温度: 100～140℃ 100～150℃ 110～150℃ 中空真球粒子 耐熱性(融点1200℃) 不活性安定	日本フエライト(株) 06-227-0729
	DE#461	40～60、平均40	アクリロニトリル	50±5		
	DU#551	5～30, 平均10	同上	1300		
	DU#461					
	DU#051					
フエライト	52/7(FG)	300以下	アルミノシリケート	700		
	200/7	150以下				
	300/7	45以下				
	Z-27	平均63				
セルスター	Z-36	10～120, 平均56	ガラス	240～300	ガラス中空真球粒子 真球度が高い	旭硝子(株) 03-3283-9516
	Z-39	10～120, 平均55		330～390		
	Z-42	10～120, 平均54		360～420		
	Z-45	10～120, 平均52		390～450		
				420～480		
レオロシール	QS-102	100～250	SiO ₂	2200	高純度, 化学的不活性	徳山曹達(株) 03-3597-5121
Nipsil	E-200A	2.5	SiO ₂		耐熱温度1200℃	日本シリカ工業(株) 03-3273-1641
	E-220A	1.5				

撮影する範囲を広く取り、かつカメラの解像度が低い場合は、1画素の中に粒子像が埋没してしまうことから、PIV解析には適さない。このような場合は、もう少し大きな粒子を用いる必要があるが、粒子が大きくなるほど、流体への追従性が悪くなるので注意が必要である。

一方、気流の計測に用いられる粒子としては、一般にオイルミストが用いられる。松ヤニを燃やした煙や食用油を燃やした煙を用いることが多いが、この場合粒径はおおよそ数 μm である。しかし風波上の気流の計測においてトレーサー粒子にオイルを用いた場合、水面にオイルが付着し、表面張力が変化して波の発達現象そのものが変化する恐れがある。従って、粒子には表面張力を変化させない水滴を用いることが必要となる。水滴の発生は超音波加湿器や医療用のネブライザーを多数用いて発生させる方法があるほか、塗装用のスプレー・ガンを用いて発生させる方法もある。スプレー・ガンに比べ加湿器の場合は発生する水蒸気の量が不足しがちであるが、スプレー・ガンは初速を持って粒子を飛ばすことから挿入方法に注意を払わないと計測誤差の原因になる恐れがある。また、両者共に撮影ポイントの上流部から粒子を投入する必要があるが、撮影ポイントの流れ場を乱さないよう投入する方法に細心の注意を払わなければならない。

以上のように、PIV計測に用いるレーザー、デジタルビデオカメラ、トレーサー粒子について概説した。この他にも実際の計測に際しては注意する点が多数あり、実験計測そのものが研究対象になるほどノウハウを必要とする。他の計測機器とは異なり、機器の取り扱いに慣れるだけでは正しい結果を得ることはできない。

2.5 機器の選定

前述したように PIV 計測を行うにあたって機器の選定が必要になるが、PIV のシステムとしては、少なくともデジタルビデオカメラとレーザーおよびトレーサー粒子、それに PC が必要になる。ここでは、それらの組み合わせを選定する上で注意しなければならない事項について説明する。

まずカメラとレーザーについては流れ場の対象によって選定する必要があり、その中でも撮影範囲と流れ場の代表速度が重要になる。

現在、1次元伝播する造波水路を想定した場合、長さが十数メートルから数十メートルのものが一般的であろう。水深は、数十センチメートル程度で波高は数センチから数十センチメートルを扱う場合が多い。この場合、波長は数メートルに及ぶことが多く、1波長を全て撮影範囲の中へ含めることを考えると解像度の点から問題が生じる。

今、仮にカメラの撮影範囲を $1 \times 1\text{m}$ と想定する。現在主流のカメラの解像度が $1000 \times 1000\text{pixel}$ と考え、後述する PIV において相関係数を算出する検査窓のサイズを $64 \times 64\text{pixel}$ と設定すれば、検査窓を 50%ずつ重ねて配置することで 32pixel ごとにおおよそ $30 \times 30 = 900$ 個の速度ベクトルが算出される。1pixel 当たりの実スケールは、

$$1\text{m} \div 1000\text{pixel} = 1\text{mm/pixel}$$

であり、隣り合う速度ベクトル間の間隔は 32mm 離れることになる。この距離は、流れ場全体を概観する場合は問題ないが(実際には検査窓のサイズよりも小さな渦現象は検出できない問題を含んでいるが)、渦度などの微分量を求める際には隣り合うベクトル間が離れすぎている。高々数センチメートルから十数センチメートル程度の波高を持つ波の運動に対し、 32mm 離れた2点間の微分量は許容できる範囲ではない。では、どのくらいであれば許容できる範囲であろうか。この問題は、数値計算に用いるグリッドサイズをどの程度に設定するかという問題と同じである。数値計算のグリッドサイズは、流れ場のレイノルズ数から求められるコロモゴロフ・スケールまで小さくする必要があり、現状ではそれが容易には実現できないことから LES や RANS のような乱流モデルを用いて大きなスケール(グリッドサイズ)の流れ場と乱流スケール(サブグリッドサイズ)の流れ場とを分けて取り扱っている。PIV から求める速度ベクトルは、極めて原始的な画像情報の差分から求められるため、乱流場を考慮するような補正は行われていない。従って、現状においてコロモゴロフ・スケールを満足するサイズは実現不可能であることから、‘十分に小さいサイズ’を用いるとしか設定する方法はなく、最低限カバーしたい(しなければならない)現象の範囲と計測精度との妥協の結果としてサイズが決定されているのが現状であろう。ここでは著者らの経験から、通常の造波水槽で行われる実験スケールの場合、ベクトル間の間隔が数 mm 程度であれば乱流を考慮した数値計算等と比較可能な微分量が得られると考えた。以下では、ベクトル間の間隔をこの範囲内に設定するものとして話を進める。

ベクトル間の間隔をこの範囲内に納める方法については、以下の3つの方法が挙げられる。1つ目は検査窓のサイズを小さくすることである。設定された $64 \times 64\text{pixel}$ の検査窓は一般的に用いられるサイズであるが、現在主流である FFT を用いた解析法との関係から2のべき乗に設定しなければならない。従って、 64pixel の下は 32pixel となる。仮に 32pixel に設定したとしてもベクトル間の間隔は 16mm 程度であり、範囲外となる。数 mm の間隔を実現するには、検査窓を最大でも $16 \times 16\text{pixel}$ にしなければならない。

ない。通常の PIV 解析アルゴリズムを用いる場合は、後述する粒子径との関係があるものの、この解析窓のサイズでは画像の情報量が少なくエラーベクトルが大量に発生する場合が多い。そうするとエラーベクトルを周りの正しいベクトル情報から空間補完する必要が生じ、精度の点から言えば本末転倒と言うことになる。一部のアルゴリズム (Hart, 2000) では、このような小さな検査窓を用いても十分に解析することが可能であるが、流れ場の状況と画像の品質に計算結果が左右されることが多く一般的ではない。

次に検査窓のサイズをそのままに検査窓の重複度を上げ、50%以上オーバーラップさせて速度ベクトルを求める方法がある。しかし、検査窓の重複度を上げることは、速度ベクトルを算出する画像情報を隣り合うベクトルで共有することに相当し、隣り合うベクトルが互いに独立な情報ではなくなる。Raffel *et al.* (2000) は、検査窓の重複度と過度分布の形状との関係を述べているが、過度な重複度を設定することは微量量の推定に誤差を生じさせることを示している。

最後の方法は、撮影範囲を小さくすることである。波動場の実験は 1 波長当たりの平均量を求めることが多いことから、どうしても 1 波長単位で計測を求めたくなる。しかし、上記の問題から 1000×1000 pixel のカメラの場合、最大でも 20×20 cm 程度の撮影範囲しか設定することができないことが分かる。撮影範囲を 20×20 cm とした場合、1 pixel 当たりの実スケールは、 0.2 mm/pixel となり、 64×64 pixel の検査窓を 50% のオーバーラップで配置した場合、ベクトル間の距離が 6.4 mm に保たれる。この間隔が妥当かどうかは流れ場の状況にも左右されるため、より厳密な物理量を必要とする場合は、さらに小さな撮影範囲を設定する必要があるであろう。

さらに撮影範囲の問題は、トレーサー粒子の選定にも関係がある。 20×20 cm の撮影範囲の場合は、前述のように 1 pixel 当たりの実スケールは 0.2 mm/pixel となるが、これは $200 \mu\text{m/pixel}$ である。トレーサー粒子については数 μm から数百 μm のものを用いるのが一般的であるが、画像として撮影された 1 個の粒子像が 1 pixel に埋没してはならず、1 個の粒子像が数 pixel に渡って輝度分布を形成している必要がある。実際には水槽の上部あるいは下部からレーザー光を照射し、側方から撮影するためカメラには側方散乱光が記録される。この側方散乱光は実際の粒子サイズよりも大きくなるのが通常であることから、数百 μm の粒子であってもその数倍は大きく見える。図-1 は、撮影された画像の一部の輝度分布を示したものである。撮影範囲は 15×15 cm であり、使用した粒子は $300 \mu\text{m}$ の塩化ビニル製の粒子を用いている。この程度の撮影範囲と粒子径の関係

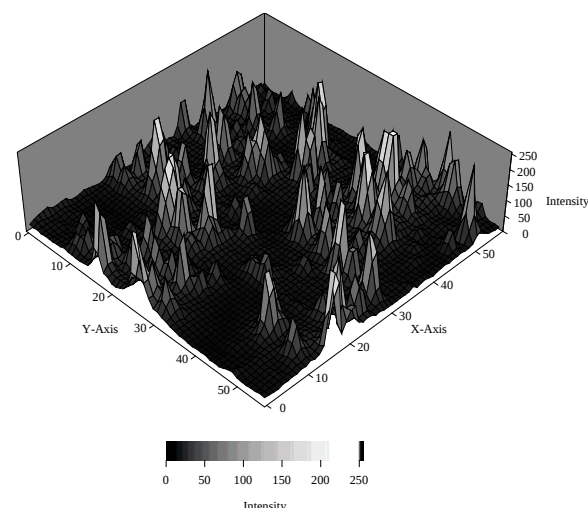


図-1 撮影された粒子画像の輝度分布

ならば、図のように 1 粒の粒子像が複数の画素渡って分布を形成しており、PIV 解析に対して問題はない。

一方、必要以上に大きな粒子を用いることは流体への追従性という観点からも避けなければならない、最大でも数百 μm 程度の粒子を用いなければならないことを勘案しても過剰に大きな撮影範囲を設定することはできない。

次に流体の代表速度と撮影範囲および撮影速度との関係について述べる。砕波を含むような局所的に高速な現象を捉える場合、前述の実験スケールにおいても 1 m/sec 程度の速度が検出される。PIV 計測では連続する 2 時刻間における流体の移動量が設定された検査窓のサイズの $1/4$ 程度になるように設定することが最も精度が高くなると言われている。移動量が $1/4$ より小さい場合は画像の pixel 以下の精度がより重要になることから速度ベクトルの計算精度が低下するもののエラーベクトルは生じにくい。しかし移動量が検査窓のサイズの $1/2$ を超えるようになると、検査窓内の流体塊が平行移動するという仮定が破綻を来し始め、流体塊の回転運動やひずみの影響から、エラーベクトルが生じやすくなる。よって、流体の代表速度は検査窓サイズの $1/4$ 程度に設定する必要がある。 20×20 cm の撮影範囲と 64×64 pixel の検査窓サイズを設定した場合、検査窓サイズの $1/4$ は、 3.2 mm となる。流体の代表速度を 1 m/sec とすると、

$$1 \text{ m/sec} \div 3.2 \text{ mm} = 312.5 \text{ Hz}$$

となり、1 秒間に 300 コマ程度のフレームレート (300fps) を必要とする。従って、30fps の通常速度のカメラでは、条件を満足することができず、高速度カメラが必要になる。現在、入手可能な高速度カメラは 1600×1400 pixel の解像度で 1000fps の性能があり、前述の実験スケールであれば

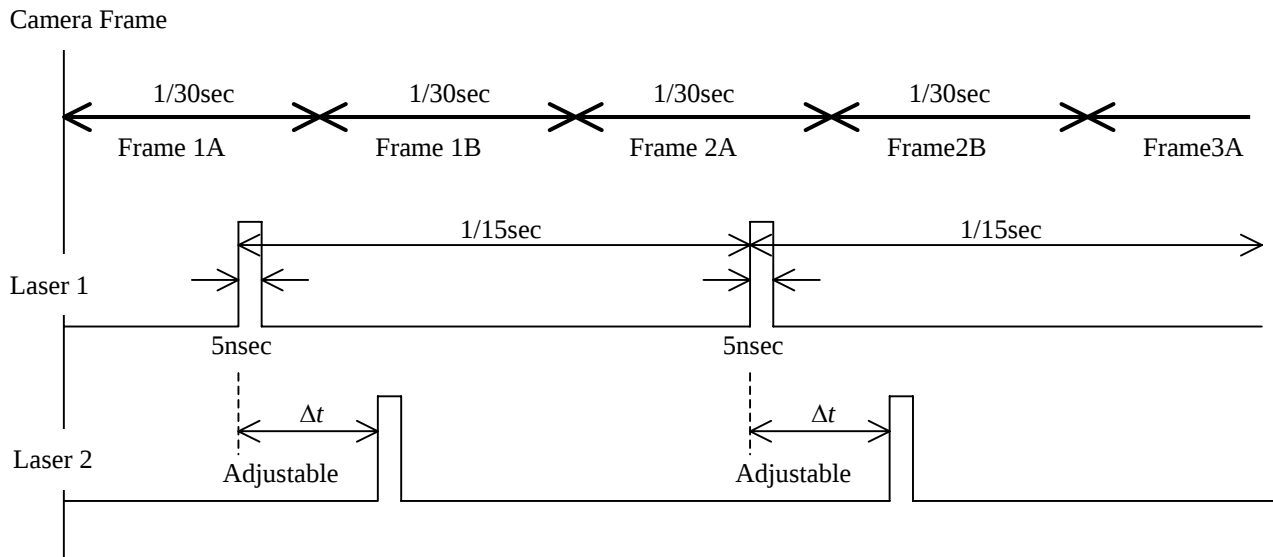


図-2 タイミングチャート

十分に対応が可能である。逆に手持ちのカメラのフレームレートに限界がある場合は、それに合わせた(より大きな)撮影範囲を選択する必要があるが、前述の通り過大な撮影範囲は選択できないことから、結果として現象に合わせたカメラを用意する必要がある。

通常の造波水槽における実験では、最大でも1~2m/sec程度の局所流速が発生するに過ぎず、上記の検討から高速ビデオカメラを用いることで可視化計測が十分に対応可能であることが分かる。しかしながら、風波上の気流の運動を可視化計測するには、代表速度が1桁上がり数m/secから場合によっては20m/sec程度までを計測対象とすることがある。この場合は最低でも10000~20000fps程度のフレームレートが必要となり、現状の市販されている高速ビデオカメラを用いたシステムでは対応することができない。これらの高速な流れ場に対応するにはパルス光を発振するYagレーザーを用いたタイム・ストラドリングと呼ばれる手法を用いる必要がある。図-2にYagレーザーを用いた場合のタイム・ストラドリング・テクニックに用いられるタイミングチャートを示す。PIV解析に用いられる連続する2時刻の画像フレームのうち、第1フレームの終端近くで第1レーザーを発振させ、第2フレームの開始付近で次のレーザーを発振させる。理論的にはこの発光間隔を限りなく短く設定すれば、カメラのフレームレートに関わらず、超高速な現象を抽出することができる。図-3は、Mizutani and Hashimoto(2003)によって行われた風波砕波上の気流の可視化計測の一例である。3組の画像内に気流の渦が明確に捉えられている。しかしながら、この手法では瞬間の現象は捉えられるものの渦の連続的な運動をこれ以上細かく見ることはできない。2回のレーザー

発振間隔を限りなく短くして超高速現象に対応してはいるが、カメラのフレームレートは変更することができないため流体運動を捉える間隔は1/15secのままである。現状でこれらを解決するには高速ビデオカメラと高繰り返し発振可能なYagレーザーを組み合わせたダイナミックPIVと呼ばれる手法を用いるしか方法がない。

2.6 PIV解析手法

次に得られた画像を用いて速度情報を得るための解析手法について簡単に述べる。得られた画像に輝度レベルの最適補正を行い、必要であれば背景ノイズなどのカットを行う。また、撮影に際してカメラに角度を付けて設置した場合は、画像に歪みが生じているため、事前に撮影された校正板などの情報を基に歪みを除去して平面の情報に戻す必要がある。この校正板の情報は、画素情報を実スケールの情報に変換する役目も担っており、PIV計測に際しては必要不可欠な作業となる。

さて、いよいよ画像の解析となるわけであるが、まず、解析画像に対する検査領域のサイズを決めなければならない。検査領域は、相関係数を求めるための領域であるが、前述の通り平均的な流体移動量の4倍程度を設定すると最も精度が高くなると言われている。また、後述するFFT相互関係法を用いる場合は、検査領域を2次元のFFT解析によって解析するため、検査領域の大きさは2のべき乗である必要がある。粒子径と撮影範囲にもよるが、通常は32×32pixelかあるいは64×64pixelを選択するケースが多い。

以上の設定を行った上でPIV解析を行うが、最後に解析アルゴリズムについて説明する。PIVは一般に低濃度PIVと高濃度PIVに分かれる。これらは投入するトレーサー粒

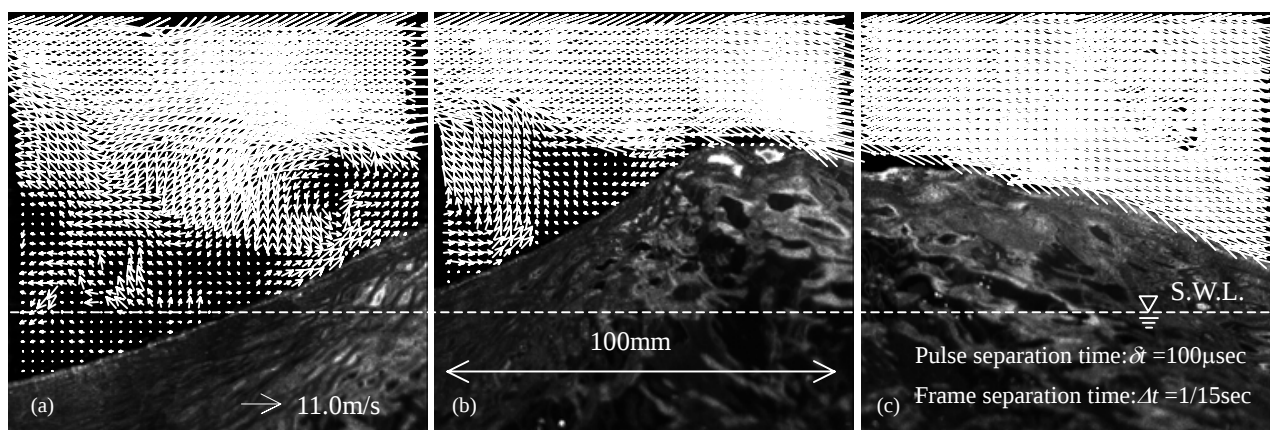


図-3 風波が碎波する瞬間における波頂部から剥離する気流の分布

子の密度によって分かれるが、低濃度PIVはPTVとも呼ばれ個々の粒子の関連づけを行って、それぞれの移動量を求め、個々の粒子に対する速度場を算出する。この方法を用いると、速度ベクトルは粒子位置において算出されるため、渦度などの2次量を算出するにはグリッド上にベクトルを再配置する必要がある。これに対してPIVは高濃度PIVであり、検査領域内の粒子の輝度パターンとのマッチングによって検査領域全体の平均速度を算出するものである。具体的にはPIV解析する2枚の画像のうち、最初の画像内に検査領域を設定し、その中の粒子の輝度パターンが次の画像のどの位置に最もマッチするかを探索する方法である。これを計算する方法として最も簡単な方法は差分法と呼ばれる方法で、第1画像における検査領域内の輝度の値を、第2画像における検査領域内の輝度の値から差し引き、検査領域内の輝度差の総和が最も小さくなった場所が第2画像における検査領域の最も適した場所であるとする方法である。この方法は簡便であるが、画素単位でしか検査領域を探索させることができず、速度ベクトルの分解能に限界が生じる。

この方法を改良したものが、相互相関法である。差分法と同様に第1画像における検査領域内の輝度の値と第2画像における検査領域内の輝度の値による相互相関係数を計算し、その値が最も高くなる場所を求める方法である。検査領域内の輝度分布に対してガウシアンによる内挿を行うことから、画素単位以下の移動に対しても速度ベクトルを求めることができる。しかしながら、各検査領域に対して相互相関係数を求める方法は非常に時間がかかり、大量の画像を解析するには問題が生じる。そこで考案されたのが、FFT相互相関法と呼ばれる方法であり、検査領域内の輝度分布をFFT解析によりスペクトル強度を求め、それに逆FFT解析を行うことで相互相関係数を求めることができる。現在ではこの方法が最も精度が高く、かつ高速に

処理することができると考えられている。

この他にも多くの解析アルゴリズムが提案されており、それぞれ特徴を有しているが、PIV計測の原点はいかに良質な画像を撮影するかにかかっており、そのためには流体現象を詳しく観察し、それに合った適切な機器の選定が最も重要な作業であると言える。

3. 自由表面の問題

3.1 自由表面と可視化計測

波動運動は基本的に水面形が伝播する現象であるから、可視化計測には当然自由表面も対象に入る。容量式波高形や電磁流速計などの従来型の計測装置は、自由表面を横切る形で機器が設置される。計測精度や安定性およびコスト的な問題からこうした方法が現在でも主流であるが、流れ場の中に機器を挿入することで場を乱し、計測器による影響を無視し得ない場合があることも忘れてはならない。ビデオカメラを用いた可視化計測の場合、非接触であり水槽の外側から水槽内の任意の空間情報を抽出することができることに最大の利点がある。特に水槽内に風を吹かせる風洞水槽による実験では、水槽内に計測器を挿入することで下流への影響を無視することができない。そういった意味において可視化計測は流れ場の計測に最適な手法の一つであると言える。

一方、自由表面の問題においても可視化計測は絶対的な利点を持っている。電磁流速計やLDVなどのポイントセンサーによる速度計測は自由表面の近傍で計測することができない。波の波頂部から波谷部の間の領域は、時空間的に気層と液層が交互に存在する空間であり、計測点が間欠的に空中に露出してしまふ。この点、可視化計測ではビデオカメラによる計測であるから、自由表面を含む気層と液層を含めて空間的に情報を抽出することが可能である。風

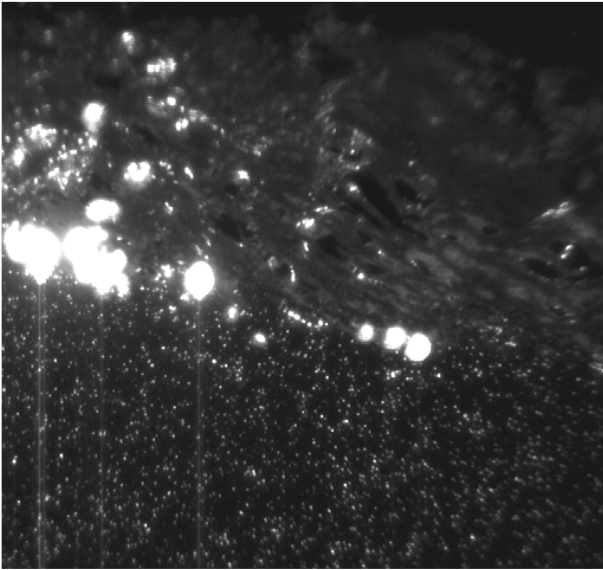


図-4 さざ波によるレーザー光の散乱の様子

による波や流れが駆動される現象は、水面極近傍で運動量の交換が行われる。従来の機器では計測することができなかった領域を計測することで、この分野の研究におけるブレイク・スルーが期待できる。

しかしながら、自由表面が存在することによる可視化計測に対する問題点もいくつか存在する。以下では、これらの問題点について述べる。

3.2 計測時における自由表面の問題

造波実験においてPIV計測を行う場合、前述のようにトレーサー粒子を可視化するためにレーザー光を照射する。このレーザー光が自由表面において乱反射し、周辺のトレーサー粒子の可視化を不可能にするばかりか、あまりに強い散乱光が直接カメラに向かうため、カメラ内部のCCD素子を破損する場合がある。図-4は、風波の実験における水表面でのレーザー光の乱反射を示したものである。水面のさざ波や碎波による気泡界面でレーザー光が強散乱し、カメラ内の電荷転送による縦筋が複数現れている。強散乱

した界面付近はトレーサー粒子の判別が不可能であり、また縦筋の発生は粒子の運動とは全く独立に輝度分布を形成することからPIVの解析時にエラーベクトルを生じさせる原因となる。また、強い光をCCD素子が受光することで受光面にある素子が焼き付きを起こし、以後その場所の素子は光を受けることができなくなり、黒い点となってしまう。

こうした事態を避ける方法として蛍光染料を用いたレーザー光の波長シフトを行う方法がある。LIF法と呼ばれる方法であるが、まずトレーサー粒子を用いるレーザーの波長によって励起される蛍光染料で着色する。Yagレーザーの場合532nmの波長のグリーン光を発振するが、ローダミン系の蛍光染料を用いると着色面はオレンジの散乱光を放つようになる。オレンジの散乱光は励起光であり、およそ590nm程度の光である。自由表面や気泡界面は着色されていないため、レーザー光と同波長の532nmのグリーン光を反射することから、カメラレンズに560nm程度のローパス光学フィルターを取り付けることで自由表面と気泡界面からの強散乱光をカットすることができる。図-5は、碎波後の気泡が大量に発生したフロント域を撮影したものであるが、上記の方法により強い散乱光がカットされ、着色されたトレーサー粒子は鮮明に写っていることが分かる。

しかしながらこの方法も注意しなければならない点がある。いくつかある。まず、オレンジに光る励起光は通常の側方散乱光に比べてかなり弱い。このため水槽の幅が広い場合は撮影面からカメラまでの間で光が減衰してしまい、十分な輝度を得ることができない場合がある。また、関連してレーザーの出力が弱い場合、CCD素子の感度が悪い場合も撮影画像の品質が落ちる場合がある。また、トレーサー粒子への着色が極めて難しい。一般的に用いられるナイロン12を原料とする粒子にはほとんど色が着かない。比較的容易に着色することができるのは表-1で示したイオン交換樹脂であるダイヤイオンである。この粒子は、微細は空隙を持つポーラス構造であることから、染料が空隙に染みこ

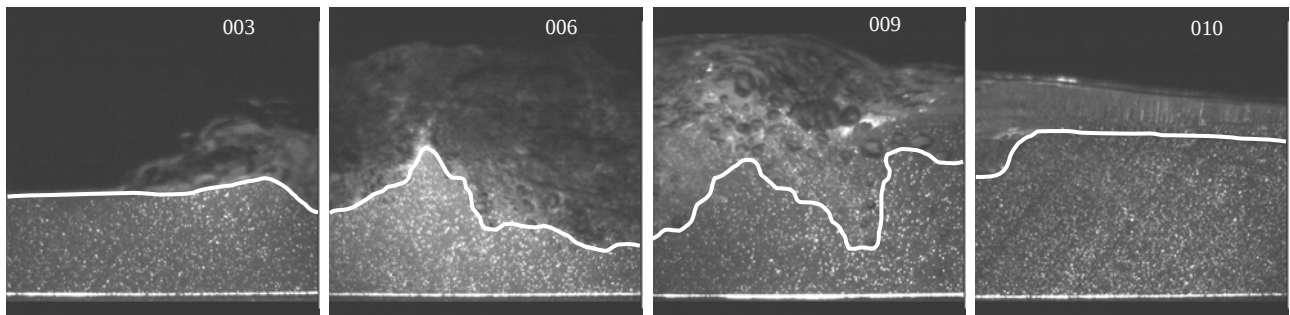


図-5 蛍光染料と光学フィルターで気泡界面からの散乱光をカットした碎波フロントの画像

むことで着色が可能である。この他にも食用のアルギン酸ナトリウムが水中で固化する性質を利用して粒子を生成することから始める研究者もいるが、粒径の小さなものは生成が困難であり、一般的ではない。さらに蛍光染料の一般的な特性として紫外線に当たると励起性能が消滅する。したがって実験の直前に着色し、着色後は速やかに実験を開始しなければならない。最後に最大の注意点であるが、ローダミン系の蛍光染料は発ガン性があるため、その取り扱いには十分に注意を払う必要がある。なお、Arレーザーを用いる場合はフローレッシェン・ナトリウムを蛍光染料として用いる場合が多いが、これは入浴剤にも用いられているように無害である。

3.3 自由表面位置の検出

1次元伝播する造波水槽において造波機で波を造波する場合は、一般的にロング・クレストとなり奥行き方向に一定の水面形が形成される。しかし、構造物周りの流れ場や砕波、奥行き方向にも3次的に波が発達する風波の場合は、レーザーを水槽の中央で照射しても、中央での水面形はそこより手前の水面形(特にガラス面における水面形)と重なるため、真横からは確認することができない場合がある。必然的にカメラを斜め上向きにセットし、平均水面よりも下方から水槽中央部における水面付近を撮影しなければならない。図-6はそのような状況下で風波の水面付近を撮影したものであるが、自由表面を挟んで水面を下側から見た映像と鉛直面であるレーザー面における粒子像が記録されている。この画像からレーザー面における自由表面位置を特定する場合、粒子が存在するか否かを目視で判断せざるを得ず、作業者の主観が介入することや高速度

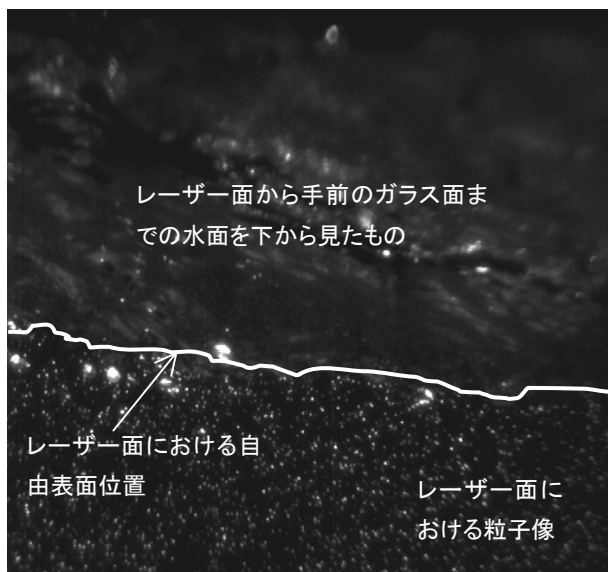


図-6 風波実験における水面付近の撮影画像

ビデオカメラの大量画像を処理することは基本的に難しい。この問題に対して同じ性能のカメラが2台ある場合は次のように利用することができる。今、図-7のように同じ性能のカメラをPIV用と自由表面検出用に設置する。実験を開始する前にレーザー面に設置された同一の座標校正用ボードを2台のカメラに記録しておく。実験を開始すると、PIV用のカメラには図-6のような画像が記録され、自由表面検出用のカメラには図-8のような画像が記録される。レーザー以外の照明を一切遮断すると、図-8のように上方からはレーザー面より奥の画像が全く記録されない。この画像の輝度情報を元に輝度の2階微分を計算することで自由表面の座標を算出することができる。Banner and Peirson(1998)や大塚ら(2004)はこの方法を用いて自由表面の検出を行っている。しかしながら、この方法は自由表面検出用に同性能のカメラを用意する必要があることから

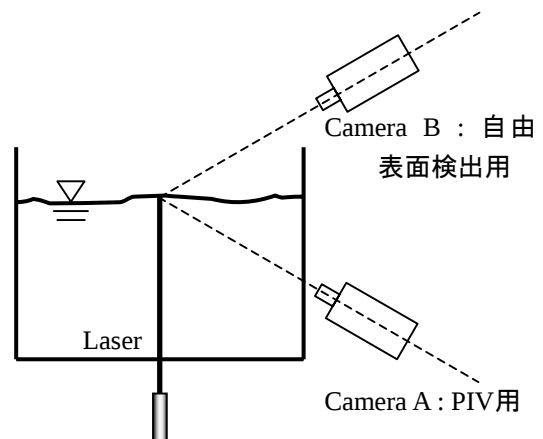


図-7 2台のカメラを用いた自由表面検出法

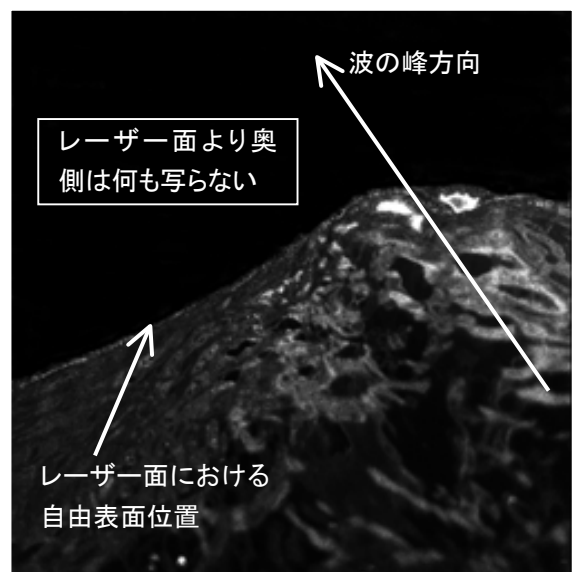


図-8 自由表面検出用カメラで記録された画像