

水流の可視化に必要な関連技術の開発 —比重整合・屈折率整合・多波長計測—

江藤剛治¹・竹原幸生²・横山雄一³・井田康夫⁴

¹正会員 工博 近畿大学教授 理工学部土木工学科 (〒577 東大阪市小若江3-4-1)

²正会員 工修 近畿大学助手 理工学部土木工学科 (同上)

³HOYA (株) ビジョンケアディビジョン児玉工場開発課 (〒367-02 埼玉県児玉郡児玉町共栄南共和 350-7)

⁴正会員 工博 大阪工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒535 大阪市旭区大宮 5-16-1)

水の流れ場を可視化計測するための新技術を開発した。開発した技術は、1) 水とトレーサー粒子の比重整合、2) 特に、比重、比熱が水と等しいトレーサー粒子、3) 透明体と水の屈折率マッチング法、4) 溶存気体の濃度場や温度変動場の可視化計測のための多波長計測技術である。計測技術の開発、計測に必要な基礎データを実験により調べた。

Key Words: flow visualization, microcapsule, tracer particle, density matching, refractivity matching, CO₂ concentration measurement

1. はじめに

水運動の2~3次元運動、とくに組織運動の観察・計測には可視化計測が有効である。定量的な計測では、その中でもとくに、水中のトレーサー粒子の運動を1個づつ追跡するPTV (Particle Tracking Velocimetry) が有効である。PTVを実用化するためには、単に計算機アルゴリズム等を開発するだけでは不十分である。様々の関連技術を並行して開発できてはじめて実用的な手法となる。小林・佐賀ら^{1)~3)}、西野・笠木ら^{4),5)}、宇民・上野ら⁶⁾、植村ら⁷⁾、著者らはPTVの実用性を高めるために、系統的に関連する技術の開発を行ってきた。

著者らが開発してきた技術は、高速ビデオカメラ⁸⁾、カルマンフィルタと χ^2 検定を組み合わせた新しいPTVアルゴリズム⁹⁾、水とトレーサーの比重整合、水と水中透明体との屈折率整合、光の波長変化を利用した温度場や炭酸ガスの濃度場等の可視化計測技術、等である。

本報告ではそのうち、比重整合(第2節)、屈折率整合(第3節)、光の波長変化を利用した可視化計測技術(第4節)について報告する^{10),11),18),24),30),44)}(補遺I参照)。これらは個別の技術であるが、とりまとめることにより利用者にとって、より有効な情報提供ができると考えられる。よって1つの論文として一括して報告することにした。また、他の研究者による成果についても、できる限りとりまとめて報告している。

2. 水と比重の等しいトレーサー粒子

(1) 本節の概要

PTVでは、トレーサー粒子が極近傍の水と計測精度の範囲内で同じ動きをすること、および水運動場に影響を与えないことが前提条件となる。水流に対するトレーサーの追従性については理論的な研究が進められている¹²⁾。さらに与えられた照明に対して撮影に支障がないだけの反射散乱光を発生することが必要である。小さな粒子は水流への追従性は高まるが光の反射面積が小さくなるので、反射散乱光強度が小さくなる。このように、PTVにおいてはトレーサーの開発が重要な課題の1つである。

本研究では新たに、内部が水で、比重1の薄いプラスチックの膜で覆われた直径数100 μm のマイクロカプセルをトレーサーとして使うことを提案している。この場合非常に精度良く比重を1に近づけることができるばかりでなく、周囲の水の温度が変化しても内部の水温が十分早く追従するので(2.(3)c)で後述)、水温の変化を伴うような水理現象の実験にも安心して使うことができる。このように流体と流体中の物体の比重を合わせることをDensity-Matching(比重整合)と呼ぶことにする。

さらに内部の水や膜に種々の物質を分散させることにより、蛍光等による可視性や、温度・水中溶存気体濃度測定機能等、付加機能を持った高機能性トレーサーを作ることについても検討している。

以下、2.(2)節では、トレーサーに要求される諸条件を示す。もっとも重要な追従性については、比重整合

表-1 トレーサーの追従性

	一般的に無視できる効果	比重整合により無視できる効果	両方により無視できる効果
(力学的効果) 浮力 遠心力 速度差 (加速) (振動流) 揚力		○ ○ △ ○	○ ○ △ ○ ○
(熱的効果) 温度変動と浮力 温度勾配中の熱泳動 ブラウン運動 シュリーレン効果	○ ○ ○	□	□ ○ ○ ○

注) 文献12)で個々に文章で説明されたものを著者が表にまとめた。

により、これらのうちの多くが満たされることを示す。さらにマイクロカプセル型トレーサーの、周囲水への温度追従性について定量的に検討した結果も示す。

2.(3)節では本研究で用いたマイクロカプセルの製法である界面沈澱法を紹介する。また、できたマイクロカプセルの粒径分布等の基本的な特性を示す。

2.(4)節では、より高機能のマイクロカプセルトレーサーを作るための試みの例を示す。

計測の用途によっては、本論文で提案するマイクロカプセルより、これまで使われてきたトレーサーを選択の方が実用的な場合がある。よって2.(5)節ではこれまで水運動のトレーサーとして使われてきた粒子とそれらの特性について要約する。この中で、発泡スチロールを短時間温めて比重を1に調整する方法が良く使われてきた。これに対して、加熱温度と加熱時間および比重が1の粒子の収率の関係について実験を行い、最適な加熱温度・時間の関係等を示した。

(2) トレーサーの条件

a) 比重整合とトレーサーの追従性

これまで流れの可視化に使われてきたトレーサーと、それらの使用上の注意、ノウハウについては参考文献12)に詳しく説明されている。その中でトレーサーの追従性についても理論式を導いて詳細に検討している。この文献中の検討項目を整理し、さらに「温度変動と

浮力」等の項目を付け加えて表にしたものが表-1である。

「速度差」の効果のうち、「加速」には、初速0の粒子を流体中に注入し、周囲の流体の速度と同一になるまでの遅れ時間、距離を問題にする場合と、流れと同一速度で運動している粒子を含む流れ(初速度差なし)が加速される場合とがある。

「揚力」は、流れと直角方向に速度勾配がある流れに粒子を置くと粒子のまわりの循環流のために揚力が生じる効果である。

「温度変動と浮力」は、熱対流の実験等において、初期温度下では比重を整合させていても、流体中の温度差により、粒子と流体に密度差が生じる現象である。

「熱泳動」は、低温域から高温域への分子拡散に伴う移動である。

「シュリーレン効果」は流体中の温度むらにより、屈折率が変化することで生じる画像上の粒子の移動を意味する。

文献12)中には、各効果の影響の大きさを定量的に評価するための考え方と式が示されている。さらにこの式に実際に使われるであろう範囲の粒子の特性値(粒径、密度等)を代入し、定量的な影響評価を行っている。この結果、一般的に見て影響が小さいと考えられるものについては、表-1中の「一般的に無視できる効果」の欄に○印を付けて示した。揚力、熱泳動、ブラウン運動等がそれである。

b) その他の特性

残りの効果のうち、式に係数として、流体と粒子の密度差($\rho_f - \rho_p$)、もしくはそれと等価な項を乗ずる形になっているものは、比重整合により影響を無視することができる。ここで ρ_f は流体の密度、 ρ_p は粒子の密度である。表-1に示すとおり、比重整合によりさらに4~5項目の影響が無視できることになる。加速については、初速差が無い場合のみ、比重整合でこの問題が回避される。このため△印を付している。

シュリーレン効果については、評価式に問題があると考えられるので、後節(c))で実験的な検討を行った結果により○印としている。

表-1からわかるように、比重整合により、トレーサー粒子の追従性の問題はほとんど解決される。とくに「温度変動と浮力」の問題は、マイクロカプセルトレーサー技術以外では解決困難であるので、□印でそのことを示している。

追従性の他の注意すべき条件を表-2に整理して示した。

例えば、材料によっては疎水性の強いものがある。この場合、一緒に混合するには、少量の界面活性剤を添加する必要がある。表面張力波を伴うような流れでは

表-2 トレーサー粒子として要求される特性

分類	検討項目	備考	
取扱い上の注意事項	追従性	表-1参照	
	散乱光の方向性	粒子形状依存	アルミ粉(鱗片状)のせん断方向への偏向, 等
		光の波長依存	感温液晶の撮影方向による色変化, 等
	分散性	親水性	界面活性剤, 電子流プラズマ等による表面改質
		付着性	材質による粒子同士の付着, 壁面への付着, 等
		電気的性質	電気的引力, 斥力等
	安定性	機械的強度	流れへの投入方法, ポンプの種類, 等
		保存性	材質の経時変化, 等
		溶解性	溶解によるトレーサーの変化, 等
		浸水性	粒子中の内容物が溶け出す, 等
毒性	毒性	刺激物, 中毒性薬品, 発ガン性物質等の排水処理	
付加機能	可視性	反射散乱光強度の向上	金属コーティング, 蛍光, 等
		マーキング	燐光, フォトクロミック, 等 (パルス光によりタイムラインを計測)
	水質等の測定	反射散乱光強度の利用	温度計測や酸素, 炭酸ガスの濃度計測等 (反射散乱光強度の水質依存性を利用)
		波長選択	波長分離による水質の同時計測 (反射散乱光スペクトルの水質依存性を利用)
経済性	価格	単価	特注のトレーサー等による高価格化
		再利用の可能性	トレーサー回収によるコストダウン

表面張力が変わるので界面活性剤も使えない。このような場合、表面コーティングや電子流やプラズマの照射による表面改質技術を使う必要がある¹³⁾。表面改質は反射性の増強等にも効果がある¹⁴⁾。

c) シュリーレン効果に関する補足実験

温度むらによって生じるシュリーレン効果により画像上で粒子位置がどの程度変動するかは、倍率、撮影距離等の撮影条件や加熱法等の実験条件によって変化する。とくに、拡大撮影する場合には大きな影響を及ぼす。また、温度差の大きなサーマルブリュームがターゲットの前を通り過ぎると周囲水との屈折率差が大きくなり、変動も大きくなる。

シュリーレン効果による変動が測定において無視できる程度であるかどうかを知るために簡単な実験を行った。

水槽(長さ10cm, 幅10cm, 深さ15cm)の底面をヒーターにより加熱し、水槽中に設置した平板上のターゲットの画面上の変動を調べた。実験中の温度変化は15か

ら50℃であった。ターゲットは直径1mmの点を平板に張り付け、水槽の奥行き方向9.65cmの位置に設置した。撮影には東芝製 CCD ビデオカメラ (IK-32M) を使い、50mmのレンズに5mmの接写リングを取付け、拡大撮影した。撮影領域は約5.0×5.0cmである。

画像上での変動量を水槽中の平板上の実空間での変動に変換した。図-1a), b) には観察により計測時間内で、サーマルが観測点の前を通過した時の最も大きく変動した部分をピックアップして時系列で示した。

図-1a) には水平方向の変動成分、図-1b) には鉛直方向成分の変動成分を示している。また、図-1c) には計測時間内の温度変化を示す。

これらの図より次のようなことがわかった。

- ① 水平方向の変動に比べ、鉛直方向の変動が大きい。
- ② 今回の実験条件では、変動(実際の水槽中の距離)の標準偏差は、水平方向で0.014mm、鉛直方向で0.092mmであった。また、最大変位は0.25mm程度

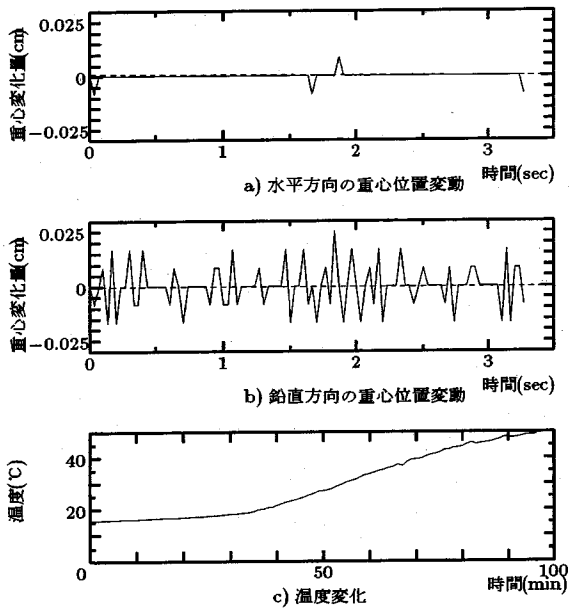


図-1 シュリーレン効果による見かけ上の変動

(鉛直方向)であった。

以上のことより、深さ 15cm 程度の水槽の熱対流の測定においては、シュリーレン効果で水平方向で 0.01mm 程度、鉛直方向で 0.1mm 程度の誤差が生じる。

(3) マイクロカプセルトレーサー

a) 界面沈澱法

マイクロカプセルの一般的製法に関しては文献¹⁵⁾等に詳しく説明されている。

製法には大別すると、化学的方法、物理化学的方法、および物理機械的方法がある。今回用いられた方法は、物理化学的方法の中の界面沈澱法と呼ばれるものである。この製法について以下に述べる¹⁵⁾。一般的な書き方ではややわかりにくいので、今回用いた材料を例にして、具体的に説明する。

- ①ジクロロメタン (沸点 40.21 °C, 比重 1.33) 中に、ポリスチレン (比重 1.03~1.04) を溶かす。
- ②この中に水を非常に小さい粒子として分散させる (W/O 型エマルジョン)。
- ③水を分散させ、ポリスチレンの溶け込んだジクロロメタンを、多量の水の中に粒子として再分散させる ((W/O)/W 型エマルジョン)。
- ④この水をかき混ぜながら、約 40 °C に保つと、水中のジクロロメタン粒子中のジクロロメタンのみが蒸発し、ジクロロメタン中のポリスチレンが、ジクロロメタン中に分散した水の回りに沈着して、内部が水

表-3 マイクロカプセル作成時の条件 (温度条件は表-4)

芯物質となる水 (ml)	7.0
5%ポリスチレン・ジクロロメタン溶液 (ml)	20.0
1%ゼラチン水溶液 (ml)	1000.0
攪拌速度 (rpm)	1400

表-4 温度条件の変化に対する生成個数

温度 (°C)	30	20	10	0
個数	861	506	255	28

の小さな球形粒子を形成する。これが多量の水の中に浮遊し、マイクロカプセルになる。

- ⑤内部に水を含まなかったものは、非常に小さなポリスチレンのかたまり (マイクロパーティクル) となる。これらや大きなポリスチレンの膜の切れ端となったものを取り除くために、1.0 mm および 150 μ m のメッシュでふるい分け、この範囲の粒子 (ほとんどマイクロカプセル) を抽出する。

溶媒、溶質ともに別の物質を用いても原理は同じである。また水や、有機溶媒中に、蛍光物質等、親水性あるいは疎水性物質を混入させ、マイクロカプセルに新たな機能を付加することもできる。大きな粒子を作るには、内部の水粒子に構造性を持たせるために、数%のゼラチン等を溶かす場合もある。

界面沈澱法によるマイクロカプセルは、芯物質の水の回りに、高分子繊維がそっと沈澱している状態であり、力学強度は低い。これを強化するために電子ビームを照射し、繊維間に架橋作用を起こさせる方法もある。

b) 生成条件とマイクロカプセルの特性

濃度条件

ポリスチレン、ジクロロメタンを用いる場合について、できたマイクロカプセルの特性や生成条件等について検討した結果を示す。他の物質を用いる場合もこの検討結果が参考になる。

用いる試料の量の設定においては椿原¹⁶⁾の教示を参考にした。

ジクロロメタン中のポリスチレンの濃度については、7~4%まで変化させた。濃い方が安定的にマイクロカプセルができるが、膜厚が厚くなり重くなる。最小 5%程度まではマイクロカプセルができるので、以後はポリスチレン濃度を 5%とした。

外部の水、内部の水ともに、少量のゼラチンを溶かす方が安定的にマイクロカプセルが生成する。ただし

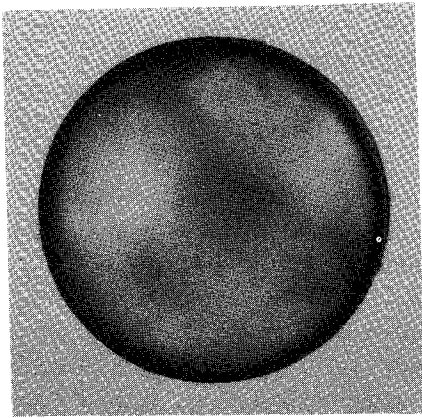


写真-1 マイクロカプセルの顕微鏡写真

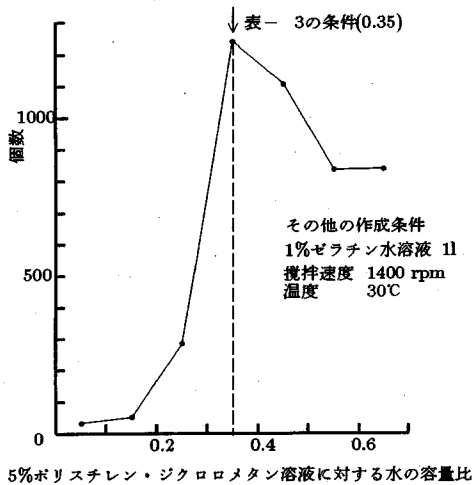


図-2 水とジクロロメタンの比率に対する生成個数

内部にゼラチンを溶かすと、マイクロカプセルが重くなるので、基本的に内部は水のみにする。この場合、生成条件がやや厳しくなるので、混入や攪拌のタイミングに熟練を要する。できたマイクロカプセルの顕微鏡写真の例を写真-1に示す。

ジクロロメタン中に分散させる水と、ジクロロメタンの比に対するマイクロカプセルの生成個数について調べたものの例が図-2である。図中の生成個数は次のようにして数えたものである。

1.0 mm と 250 μ m の 2 種のメッシュを通した後、残ったものを 200cm³ の水に分散させ、良く攪はんしたのち、5 cm³ の水を採取し、その中のマイクロカプセルの個数を調べた。得られた個数を 40 倍し、200 cm³ 中の個数とした。よって図-2 の 200cm³ 当たり何個かという絶対的な数は意味はないが、生成効率の相对比较には問題ない。

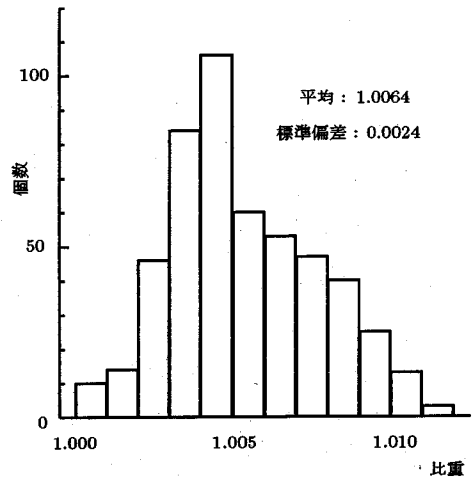


図-3 マイクロカプセルの比重のヒストグラム

図より水量(比)が増えるに従って、生成個数は増えるが、ポリスチレン・ジクロロメタン溶液に対する水(芯物質)の比が55%以上では逆に減る傾向になる。ただし35~45%では大きな差は無い。

温度条件

定温で湯煎してジクロロメタンを蒸発させるときの温度とマイクロカプセルの生成個数について調べた。温度以外の条件は表-3に示している。温度設定は0 $^{\circ}$ C、10 $^{\circ}$ C、20 $^{\circ}$ C、30 $^{\circ}$ Cの4つの条件で行った。各温度条件に対して3回の実験を行った。結果を表-4に示す。表-4の個数は3回の測定結果の平均値を用いている。

表-4より温度が高くなるにつれて生成しやすくなっているのがわかる。40 $^{\circ}$ C以上になると急激に泡が生じる。これはジクロロメタンが沸騰するためと考えられる。その後の経験で30~40 $^{\circ}$ Cでは生成率には大差はないが、40 $^{\circ}$ Cに近い方が蒸発に要する時間が短縮されるので、より好ましい条件であることがわかった。

マイクロカプセルの比重と粒径

生成条件は表-4と同じで、湯煎温度は30 $^{\circ}$ Cとした。なお自然の水温は14 $^{\circ}$ C、比重(4 $^{\circ}$ Cの水に対する)は0.998であった。

マイクロカプセルの比重は次のようにして測定した。塩水により検定液を比重0.001間隔で作り、その検定液を比重1.000から1段階づつ重くするごとに表面に浮いたマイクロカプセルの個数を数えた。

径の測定法としては、顕微鏡写真にマイクロスケールとマイクロカプセルを写し、長さの比により算出した。

図-3にマイクロカプセルの比重のヒストグラムを示す。比重の間隔の中央値を用いて計算した平均値は1.0064、標準偏差は0.0024であった。

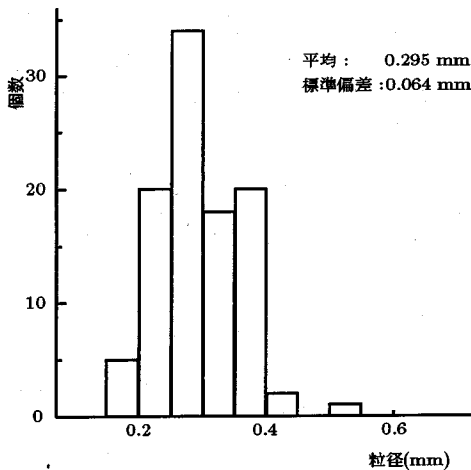


図-4 マイクロカプセルの粒径のヒストグラム

ちなみに現在、トレーサー粒子として良く用いられるプラスチック粒子の比重を示すと、ポリスチレンは1.03~1.04、ナイロン12は1.02、ポリエチレンは0.91~0.97である。また、2%ゼラチン水溶液を芯物質としたマイクロカプセルの比重は約1.01であった。

図-4にマイクロカプセルの直径のヒストグラムを示す。径の平均値は295 μ mと、かなり大きいものを作ることができた。標準偏差は64 μ mであった。マイクロカプセルの径はエマルションを形成するときの攪拌速度に大きく依存する。これ以下の径のものを作るには攪拌速度を上げてやればよく、比較的簡単に作ることができる。

膜厚

膜がポリスチレンのみでできていると仮定すると、比重、粒径から膜厚が推定できる。

水、ポリスチレンの比重を0.998、1.035とし、マイクロカプセルの平均比重を1.0064、平均粒径を295 μ mとすると平均膜厚は12.1 μ m、直径に対する膜厚比は0.041となる。

ただし、製法から見て、膜は粗なポリスチレン繊維の沈積でできており、膜にも水が含まれていると考えられるので、実際の厚さはもう少し大きくなると考えられる。

c) 水を芯物質とするマイクロカプセルの温度応答性

比重を1に調整したマイクロカプセルトレーサーは、周囲の水温の変化に追従して内部の水温も変わり、温度変化があっても常に比重が周囲の水と等しく保たれるという極めて優れた特性がある。このため従来測定困難であった熱対流の実験等にも不安なく使える。

それを確認するために、マイクロカプセルの温度応

答特性について検討した。

均質な球状物体の周囲の温度が変わったときの、熱拡散による内部の温度変化については理論式が導かれている¹⁷⁾。これを用いて温度応答を調べる。次の仮定をおく。

- ①膜厚は無限度で、水のみでできたカプセルとする。
- ②カプセル内での水の流動による混合効果は無視し、伝熱は分子拡散のみによるものとする。

膜厚比が小さいこと、カプセルの粒径が小さく、十分水の粘性が効くことなどを考慮すれば、上記の仮定による誤差は小さい。また、膜物質を通っての伝熱、内部の水の運動による伝熱ともに、温度応答を高めるので、上記の仮定の上に立つ応答性の推算は安全側(遅目)となる。

水の熱拡散係数は0.00144(cm²/sec)(水温4℃のとき)とする。

以下の定義を用いる。

- ①周囲の温度が急変したとき、カプセルの中心温度が変化分の90%になるまでの時間をもって遅延時間とする。
- ②遅延時間の逆数が応答周波数となる。

図-5に結果を示す。図中の t_c はカプセル中心と周囲の温度差、 t_a はカプセル平均温度と周囲温度との差、 T は計算初期に与えられたマイクロカプセルと周囲の温度差である。図より、粒径が大きくなると加速度的に温度応答が低下することがわかる。粒径100, 200, 500 μ mに対して、応答周波数はそれぞれ189, 47.4, 7.59 Hzとなる。400 μ m以下のマイクロカプセルは10Hz以上の温度応答性がある。図-4の粒径分布から見て約9割のマイクロカプセルが400 μ m以下であり、10Hz程度の温度変動のある場の計測に用いることができる。

d) 比重1のマイクロカプセル

比重を1/1,000以下の精度で1に合わせるには膜物質の比重を1に近づける必要がある。ポリスチレンをベースにするとすれば、比重が1よりやや小さいプラスチック材料をポリスチレンに混入すれば良い。

比重1以下の一般的なプラスチックとしてはポリエチレン(比重約0.91~0.97)、ポリプロピレン(比重0.98)等がある。ただしこれらは比較的化学的安定性が高く、ジクロロメタンに溶けない。

種々のプラスチックを検討した結果、ある種のエチレン酢ビコポリマー(EVA150)が比重0.95で、ジクロロメタンにも溶けることがわかった。プラスチック同士はうまく溶け合わないことが多い。ポリスチレンとEVAについても十分混合するためには、両ペレットを混合し、前もって80~100℃程度に加熱して、良く練っておくと良いことがわかった。

EVA150とポリスチレンを1:1の割合で混ぜたもの

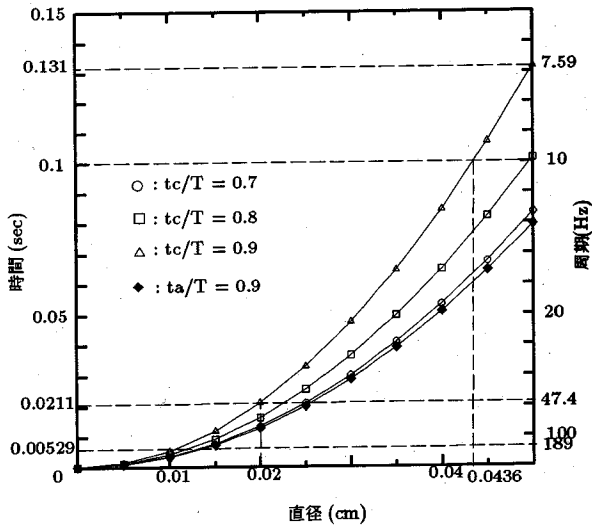


図-5 マイクロカプセルの温度応答性
 t_c : マイクロカプセル中心と周囲の温度差
 t_a : マイクロカプセル平均温度と周囲の温度差
 T : 初期のマイクロカプセルと周囲の温度差

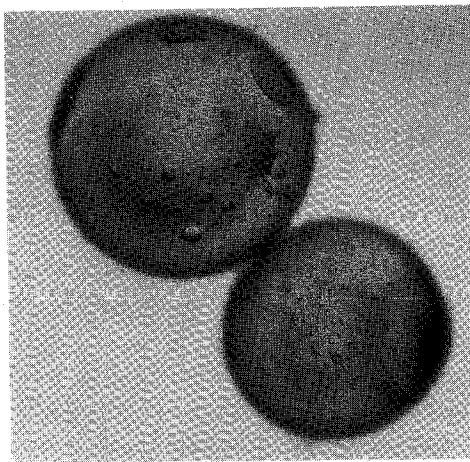


写真-2 膜物質がEVA150とポリスチレンのマイクロカプセル

を用いて作ったマイクロカプセルの顕微鏡写真を写真-2に、攪はん後10分静置した後のマイクロカプセルを浮遊した水の写真を写真-3に示す。写真に示すように、多くの粒子が10分後も水中に浮遊していることがわかる。浮遊している粒子の移動速度は0.05mm/sec以下である。これより相対密度誤差は0.05%以下である(補遺II参照)。

顕微鏡写真からわかるように、ポリスチレンとEVA

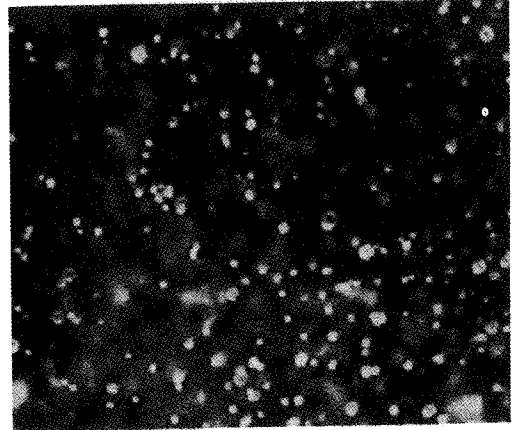


写真-3 比重1のマイクロカプセル(静置後10分間)

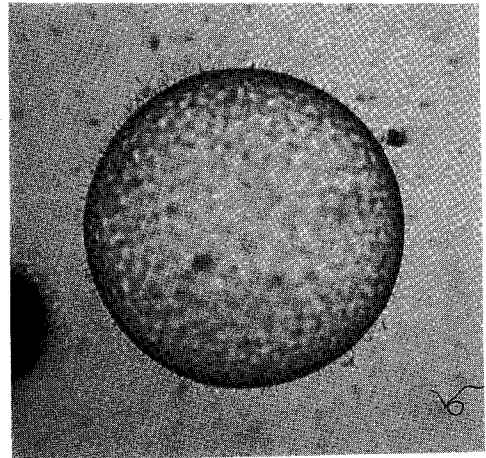


写真-4 膜物質がポリプロピレンのマイクロカプセル

は溶け合わず、別々にくっついたものになっている。必ずしも収率は高くはないが、写真-3よりわかるように実用上完全に比重1のマイクロカプセルを作ることができる。

参考のために写真-4に、ポリプロピレンとベンゼン(沸点80.1℃)を用いたマイクロカプセルの顕微鏡写真を示す。表面が細かい亀甲模様で、表面に小さな毛が鞭毛のように付いた構造になっている。

2種のプラスチックを融合するかわりに、ポリスチレンに膜厚(10μm程度)と同程度かそれ以下の直径のプラスチック微粒子を混合する方法も試みた。写真-5は、直径6μmのポリエチレン微粒子(比重0.918)をポリスチレンに混合したものを膜にした例である。この方法では今のところ、ポリエチレン微粒子がポリスチレンの10%以上になるとマイクロカプセルができ難

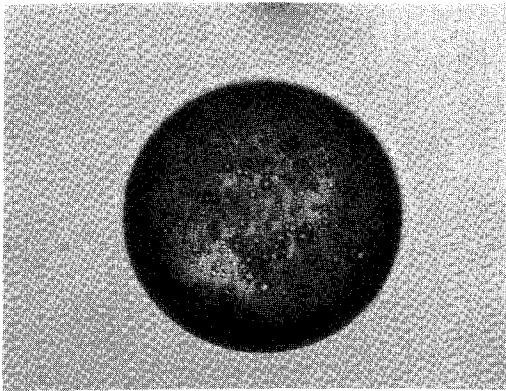


写真-5 膜物質がポリスチレンとポリエチレン微粒子のマイクロカプセル

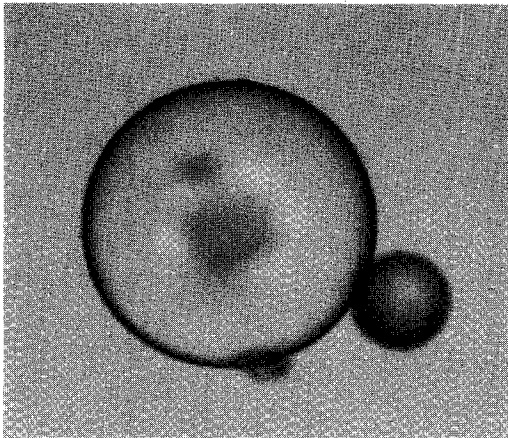


写真-6 マイクロカプセルとマイクロパーティクル

くなる。内部の水中にポリエチレン微粒子を分散させる方法や、感温液晶マイクロカプセル(比重が1よりやや大きい)にポリエチレン微粒子を分散させ、比重を1に調整する方法も検討中である。

e) マイクロパーティクル

写真-6 にメッシュを通す以前の試料の顕微鏡写真を示す。写真中、大きな粒子がマイクロカプセルである。小さな粒子はポリスチレン中に芯となる水を含んでいないマイクロパーティクルである。75 μm 程度のメッシュを通すと、これらを分離することができる。

マイクロパーティクルをトレーサーとする方が良い場合もある。例えば、水表面から水中への気体の溶入時に、分子拡散により生じる濃度境界層の厚さは数10 μm である¹⁸⁾。濃度境界層が水中に取り込まれる過程の可視化等においては、濃度境界層厚以下の直径の粒子をトレーサーとする必要がある¹⁹⁾。

微粒子を作る手法も色々開発されているが、上記の

a) 項で述べた界面沈澱法も、特別な装置無しに作れるという意味で有効な方法である。はじめからマイクロパーティクルを作る場合は、(O/W)エマルジョンを作るだけで良いので簡単である。

(4) 高機能マイクロカプセルトレーサー

高機能化の目的は次の2種に大別できる(2.(2)の表-2参照)。

- ① 可視性をより高くする。
- ② 流れ場以外の場の可視化測定機能を付加する。

可視性を高めるには、表面コーティングにより反射性を高める方法や、芯の水中に微量の蛍光物質を溶かしレーザーなどにより発光させる方法などがある。とくに後者では光学フィルターにより、光源レーザーの波長の光をカットすれば、粒子以外を照らす反射・散乱項を消して、粒子のみを撮影することができる。

写真-7 に、光源レーザー波長の光をカットした場合としない場合の撮影例を示す。これはフルオレセイン $2.5 \times 10^{-6} \text{mol/l}$ 水溶液を芯物質とするマイクロカプセルをアルゴンイオンレーザーシートで照明したものである。写真-7a)で中央に縦長に写っているのは、温度測定のための温度計である。写真-7b)ではこれが消えている。

最大の問題点はポリスチレンの透水性である。比較的短時間でカプセル中の蛍光物質がカプセル外に流出し、レーザーを当てても光らなくなる。今後改良の必要がある。

流れ場以外の場としては、温度場、各種溶質の濃度場などがある。温度場は液晶や蛍光物質などの感温物質(温度により光学特性が変化する)をカプセル中に分散させることで計ることができる。

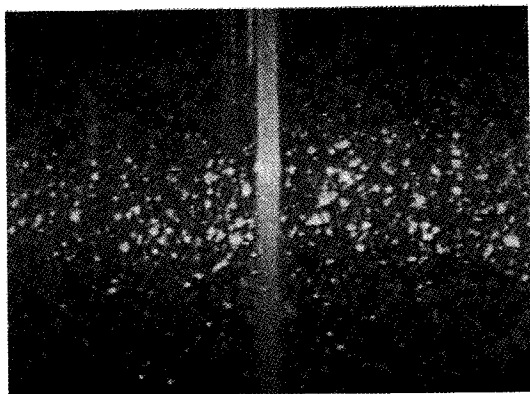
温度場以外の溶質の濃度測定技術については現在開発中である。よって以下では考え方の例だけを紹介する。

酸素濃度はpyrenebutyric acid(PBA)の酸素消光性を利用して計れる可能性がある²⁰⁾。PBAは疎水性であるので膜中に分散させると、膜厚が10 μm 程度であり、膜は透水性もあるので、酸素は十分早く膜中に拡散し、十分な時間応答性が確保できるものと考えられる。

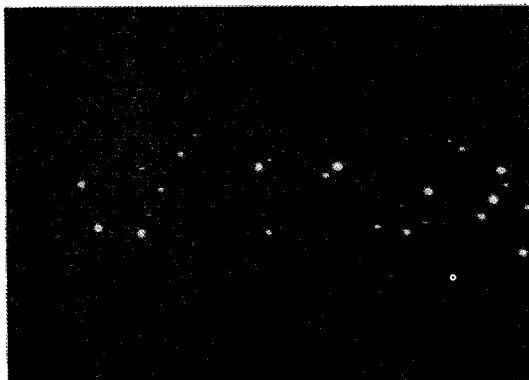
(5) 比重調整されたトレーサーの例

a) 比重1のトレーサー

古くから水と比重に近いトレーサー粒子の開発が試みられてきた。用途によっては、著者らの提案したものより、これらからトレーサーを選択する方が便利な場合もあろう。また速い乱れや、高精度を必要としない実験等では、比重が0.1程度異なっても実際上問題にならない場合もある。とくに長い水路を用いた1方



a) レーザー光をカットしない場合



b) レーザー光をカットした場合 (蛍光のみ)

写真-7 蛍光染料を含むマイクロカプセル

向流れの実験等では、結果的に大量のトレーサーを連続投入する必要があり、経済的に見て高精度の特注トレーサーを使うことは実用的でない。よって表-2に経済性の項目を設け、検討を行っている。

発泡スチロールベレット (小球) を適当な時間加熱し、わずかに発泡させて比重が約1になった粒子を集めるという方法もある。著者らのヒアリング調査の範囲では鳥羽らが最初に開発した²⁷⁾(1975年)。鳥羽らはこれを風波の水表面直下の水運動の観察に用い、表面せん断層や風波に伴う乱流境界層を研究した²⁸⁾。なおポリスチレンはプラスチックとしては親水性が高く、これも水流トレーサーとしては望ましい性質である (表-2参照)。

木下は比重約1.04~1.05の発泡スチロールベレットを一旦発泡させ、比重を1以下にした後、塗料を何度も塗り、比重を1に調整している。得られた中立粒子は、蛇行水路の実験における水運動のトレーサーとして用いている²¹⁾。

比重が1以上と以下の有機溶媒を混合して比重1に調整し、注射針から油的として放出するという方法もある (四塩化炭素とキシレン等)。多くの場合毒性があったり、水槽の清掃に困難をきたすなどの問題がある。

b) 比重1でないトレーサーの例

海水や塩水の実験では、比重が1.01~1.04の範囲で変わる。精密な実験においては、同じ塩水を芯物質とするマイクロカプセルを用いれば良い。そうでない場合には2種のプラスチック材料を混合して作ったマイクロパーティクルを使うか、精度を必要としない場合は、表-1等を参考にして、比重差が比較的小さいプラ

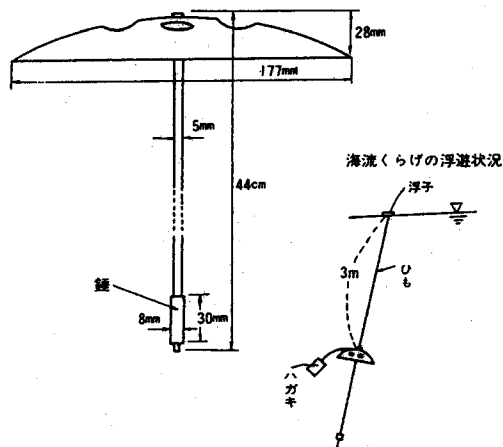


図-6 人工クラゲ (角湯²²⁾による

スチックベレットを用いれば良い。逆に、本来淡水の実験であるが塩を溶かして水の比重を上げ、比重1.02~1.03程度のプラスチックトレーサー粒子の比重に合わせることもできる。この場合は実験装置や実験室の防錆の問題がある。

現地実験でユニークな例として、角湯²²⁾による人工クラゲ (図-6参照) がある。これは汽力発電所の冷却水取水に伴いプランクトン等が取り込まれる領域を実海域で観測するために使用したものである。もともと深海での流れを観測するために作られたものである。プラスチック材料の人工クラゲを浮子と重りで所定の水深になるようにセットし、観測していたが、浅海域で

は海面に浮きを浮かべそれより紐で所定の水深に浮遊するようにして観測している。

水中の小粒子では最終沈降（浮上）速度は、粒子径の2乗に比例する。空気中ではレイノルズ数が大きくなるので1乗に比例する¹²⁾。よって粒径を小さくすることで比重整合と同等の効果がある。この場合、粒子の輝度の問題が生じる。強いレーザーシート光源を使う等の方法の他、酸化チタンや比重調整も兼ねてポリエチレン粒子を金属膜等でコーティングする方法が用いられている²³⁾。アルミ粉法でもアルミニウムの光沢を保つために、薄いステアリン溶液に分散させて保存した粒子を用いる。ただしアルミ粉は扁平な形状なので、定量計測には適さないのは良く知られている。

次節に述べる、水と水中透明体の屈折率を合わせる問題では、現状では水にヨウ化ナトリウム等の溶質を溶かして、水の屈折率自体も上げざるを得ない。この場合には濃度によって、溶液の比重も大きくなる。この場合、例えば井田ら²⁴⁾はポリ塩化ビニル（比重1.4、平均径30 μm ）をトレーサー粒子として計測を行っている。

大気の流れの観測においてはヘリウムバルーンなども用いられる。実験室用としては最近界面活性剤の膜の気泡（直径0.5~1.0 mm程度）を発生する機械が作られている²⁵⁾。また、塩化ビニリデンとアクリルニトリルのコポリマーの膜のマイクロバルーンにイソブタンの気体が封入されたトレーサーを気流の可視化計測に用いた例もある²⁶⁾。

c) 発泡スチロールペレットの最適加熱条件

2.(5)a)で述べたように比重を1に調整する方法として、発泡スチロールペレット（小球）を適当な時間加熱し、わずかに発泡させて比重が約1になった粒子を集めるという方法がある。著者らも目的によってはこの方法を用いている。このため、発泡スチロールの最適加熱条件を検討した。会社や製品によってこの条件は多少変わると思われるが、ここで示す数値は一つの目安になる。実験の方法は以下のとおりである。

定温湯煎槽に、水の入った大きめのピーカーを漬け、発泡スチロールペレットを投入し、数分加熱した後、網で掬い直ちに常温の水で冷やしておく。これらを100個、常温の水の入った目盛り付きピーカーの中層に入れ、一定時間後に下記の条件の範囲内にあるものを数える。

中立条件は沈降（浮上）速度が2.0 mm/sec以下のものと定義した。これは平均流速10 cm/sの乱流を想定し、乱れ流速を、その20%程度として、誤差が乱れ流速の10%程度に納まるという条件で設定したものである。

図-7は粒子の粒径分布を示す。

図-8は、77℃で加熱した例を示す。横軸は加熱時

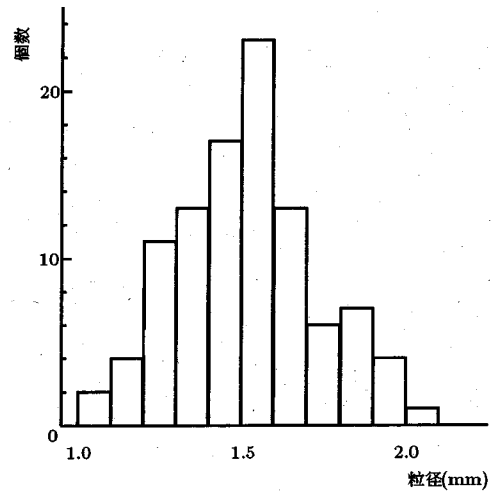


図-7 ポリスチレン粒子の直径のヒストグラム

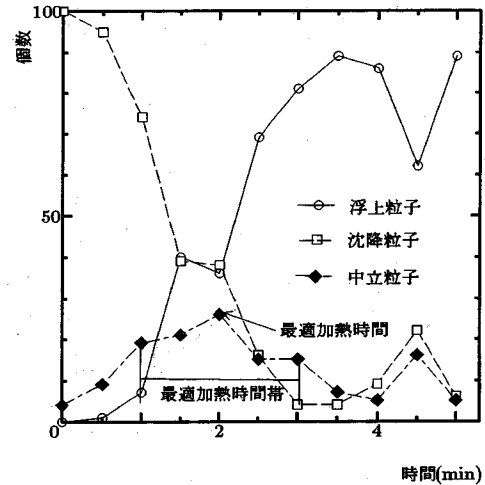


図-8 加熱温度77℃における浮遊・中立・沈降粒子の割合

間である。この場合、1.5 ~ 2.0 分間加熱すると、浮上するもの約40%、沈降するもの約40%、中立粒子が約20%となる。それ以下の時間では沈降するものが多く、長くなると浮上するものが多くなる。最も中立粒子の収率の高い最適加熱時間は2.0分である。中立粒子が10%以上の収率のある加熱時間は1.0~2.5分である。この時間幅を以下では最適加熱時間帯と呼ぶ。

温度を上げると、最適加熱時間は短くなるが、操作が忙しくなり、あまり短いと中立粒子の収率が下がる。

温度を変えて検討した結果、図-9のような結果が得られた。

横軸が加熱温度、縦軸がそれに対する最適加熱時間

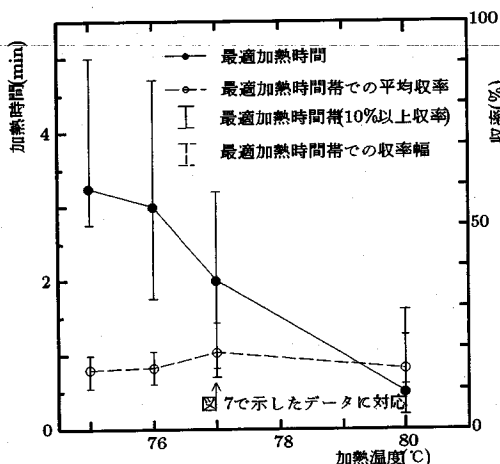


図-9 加熱温度と最適加熱時間の関係

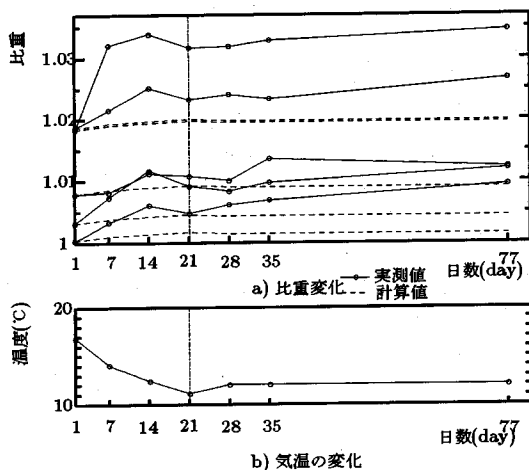


図-10 加熱した粒子を水に漬けて放置した場合の比重変化

を示している。●印は各加熱温度での最適加熱時間、縦実線幅で最適加熱時間帯を示している。

同図に縦軸に収率、横軸に加熱温度の図を重ねて表示している。○印は最適加熱時間帯での平均収率、縦点線幅で最適加熱時間帯での中立粒子の収率の幅を示している。

これにより加熱温度75~80°Cの間で、数分~1分の加熱で18~20%の中立粒子が得られることがわかる。

図-10は一旦できた中立粒子を長期間保存し、ガス抜け等による比重変化がないか検討したものの例である。同時に気温変化も示している。図-10より以下のことがわかる。

- ①当初2週間は徐々に重くなる傾向にある。
- ②2週間以上経つとほぼ一定となる

11週間程度の試験期間に亘って、比重変化は0.0093程度であった。図-10中の点線は加熱前の発泡スチロールの温度膨張係数を用いて²⁹⁾、温度変化による体積変化を計算して比重を計算した結果である。体積変化による比重変化に比べて実測の比重変化が大きい。その理由として次のことが考えられる。

①ガス抜け等の影響

②少し発泡したことによる温度膨張係数の変化

②の理由が捨てきれないのは、図-10の温度変化と比重変化が逆相で非常に良く一致しているからである。

(6) 適用例

著者らは、ポリスチレンとEVAの混合物(比重1)を膜物質とするマイクロカプセルをトレーサー粒子として使い、熱対流による乱れ計測を行った⁹⁾。粒子画像の追跡による速度場の計測には、文献9)で述べた、カルマンフィルターと χ^2 検定を用いた自動粒子追跡法を用いた。

結果はAdrian³¹⁾らがLDVを用いて行った計測結果と概ね一致し、既往の乱流モデルでは、境界近傍の水平乱れ成分等がうまく表現されないことなどが明らかになった。

3. 水と透明体の屈折率整合

(1) 開発の経緯

透明性が高く、水と屈折率の等しい材料で水中物体を作れば、光が直進し、物体に遮られることなく、物体の向こう側の水や他の物体の運動も可視化計測することができる。点計測でもレーザ流速計のような光学計測においては、水と水中物体の屈折率を合わせることができれば非常に有効な実験手段となる。著者らは、このような技術をRefractivity-Matching(屈折率整合)と呼んでいる。

当初、屈折率が純水の屈折率1.333に等しい透明固体材料に関する文献調査を行ってきたが、これまでのところ実用性の高い材料は見つかっていない。水に薬品を加えれば通常屈折率は上がる。それでも純粋石英ガラスの屈折率1.458以上にするには困難である。石英ガラスは通常のガラスの中では屈折率が最も低い。プラスチック材料やある種の結晶の中には透明で屈折率が1.4前後の比較的低いものがある。現在のところ、水と物体の屈折率を合わせようとすれば、低屈折率透明材料を用いると同時に、水に薬品を加えて屈折率を上げるという方法を用いざるを得ない。

水に薬品を加えれば屈折率だけでなく、密度、粘性等の他の物性も変わる。波高計などの計測器を併用するためには、電気伝導度や誘電率などが大きく変化する

るので、抵抗器やコンデンサーなどを変える必要がある。ほとんどの薬品は実験後そのまま放流すれば汚染の原因となる。屈折率についても、温度や光の波長依存性があり、わずかの差でも物体の周辺部を接線方向から見るときに不都合を生じる。このように、単に水と水中透明体の屈折率を合わせる技術であっても、実際に水理実験に適用するには、多くの情報やノウハウを集積しておく必要がある。

光弾性等の研究分野では、屈折率の高いオイルと、ガラスや透明プラスチックを用いた実験が行われてきた。最近では、小長井ら³²⁾により、液体中の透明粒状体の力学（例えば地震時の安定性）の研究にもこの方法が適用されるようになってきた。屈折率整合は簡単なコンセプトのようであるが、実際にやってみると、ガラスの表面部の結晶欠陥、残留応力、溶液と透明材料の屈折率の温度および波長依存性の違いなどのために、粒子像の周辺部で光の直進性が阻害されるなど、解決すべき問題が多いことがわかってきた。

本章では、水理実験のための屈折率整合を目的として、低屈折率透明材料と屈折率を上げた高屈折率水溶液について、これまで収集した情報、および著者らの試験結果をとりまとめた。

(2) 高屈折率水溶液

a) 溶質

手近な溶質としては塩化ナトリウム、しょ糖、グリセリン等がある。

しょ糖やグリセリン水溶液は粘性が高くなる。粘性を上げた水溶液の運動を可視化計測するような場合には使えるが、通常は高粘性が実験の障害になる。例えばレイノルズ数の低下により、乱流場を作ることが困難になる。またポンプの負担が過重になる、気泡の混入などの問題も生じる。

飽和塩化ナトリウムの屈折率は1.381である。低屈折率透明材料の屈折率は1.4前後であるから、塩化ナトリウムを屈折率整合に適用することは困難である。

現在のところ、ヨウ化ナトリウム、またはヨウ化カリウムの水溶液が良い。これらの水溶液の粘性は大きく変化しない。屈折率も最高（飽和時）で石英ガラスの屈折率1.458に近い高い値を得ることができる。

液々混相流では水とシリコンオイルの混合物を用いることもできる。

以上より、これらの溶液について水理実験に直接関係があると考えられる物性についてとりまとめた。

b) 試験法と結果

本研究では、屈折率はナトリウムランプのD線(589.29nm)の屈折率で定義する(補遺 III)。屈折率は、温度、圧力、電場、磁場などにより変わる。高精

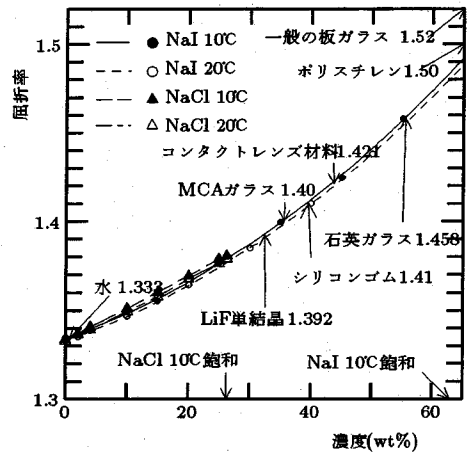


図-11 NaI および NaCl の濃度に対する屈折率の変化

度を要しない屈折率の測定は、アッペ屈折率計を用い、著者らが測定した。溶液の屈折率の温度依存性を調べる場合を除いて、物性試験中は周囲の温度は10℃、もしくは20℃前後に保つように努力した。

文献調査および著者らの計測結果の例を表-5、および図-11に示す。

これらの図表より次のようなことがわかる。

- ① 塩化ナトリウムの飽和水溶液では屈折率1.38程度までしか上がらず、LiF単結晶(1.392)よりも小さく、実用上屈折率整合には使えない。
- ② ヨウ化カリウム、ヨウ化ナトリウム、ヨウ化リチウムの飽和水溶液の屈折率は高く、石英ガラスまではカバーできる。ただし、ヨウ化リチウムは白濁するため可視化計測には使えない。
- ③ ヨウ化カリウムを水に溶かすと吸熱、ヨウ化ナトリウム、ヨウ化リチウムでは発熱が生じる。
ヨウ化ナトリウム、ヨウ化カリウムを用いる場合の2~3の注意事項を述べておく。
- ① 比較的濃い溶液を1~数日放置すると淡黄色に着色する。これはヨウ素が分離するためである。長期間使用すると水槽も着色する。分離したヨウ素には殺菌性(当然弱い毒性)がある。着色溶液を無色透明にもどすには極少量のチオ硫酸ナトリウムを加え、分離ヨウ素を中和すれば良い。
- ② 実験終了後溶液を排水するときの水処理にも気をつける必要がある。
- ③ 水道水を用いる場合に比べて金属の腐食性が大きくなるので、器機の選択、器機や実験室の管理においては塩水を用いる場合と同様の防錆に対する考慮が必要である。
- ④ 電気的な特性が大きく変わるので、電気的なセンサー

表-5 溶液の飽和時の屈折率

化合物名	飽和時の屈折率	飽和濃度 (wt%)	溶解時の水溶液	
			色	熱
ヨウ化カリウム	1.453 (1.456)	57.6	透明, 40%付近 から黄濁	吸熱
ヨウ化ナトリウム	1.484 (1.496)	62.8		発熱
ヨウ化リチウム	(1.490)	61.1	白濁	発熱
塩化ナトリウム	1.381	26.31	透明	なし
シロ糖(サッカロース)	(1.490)		透明	なし
グリセリン	(1.474)		透明	なし

注1) 飽和濃度は化学便覧による10°Cでの値である。

注2) 飽和時の屈折率は、著者らが実測した点を最小2乗法で近似した式に化学便覧による飽和濃度を当てはめて求めた値である。

注3) ()内の数値は化学便覧による。

を用いた計測器を併用する場合はコンデンサーや抵抗器などを変える必要がある。

(3) 低屈折率透明材料

a) 屈折率による材料の分類

屈折率の高さをランク分けしておくとう便利である。本報告では、純水(1.333)、飽和塩化ナトリウム水溶液(1.381)、石英ガラス(1.458)の屈折率をランク分けの基準とする。

固体材料の屈折率が飽和塩化ナトリウム水溶液のそれより小さければ、溶質として塩化ナトリウムが使える。また本報告では低屈折率ガラス(低屈折率透明材料)とは、石英ガラスの屈折率より低い屈折率を持つガラス(透明材料)と定義する。

これらを基準として、今後使える可能性のある透明材料を抽出し、問題点などを整理しておく。

b) 検討結果の要約

著者らの文献調査や試験の結果わかった既存の低屈折率透明材料について、文献11)に要約している。また図-11中に(溶液の屈折率の図)も書き入れている。

残念ながら今のところ、水と屈折率の等しい透明材料は、フッ化ベリリウムを主成分とする2~3相ガラスしかない。フッ化ベリリウムには強い毒性、吸湿性などがあり、今のところ実用に供するのは難しい。

本節では、実用可能と考えられる材料について簡単に紹介する。

① シリコンゴム

ある種のシリコンゴムは屈折率が約1.4、整形が簡単、透明度が高い、化学的安定性も比較的高い、等の特徴を持つ。現状ではこの材料が一番使いやすい。

ただし、比重が1前後で高屈折率水溶液中では浮く、力学強度が小さい(もろい消しゴムのような感じ)などの欠点もある。

② メタクリル酸メチル

通常は屈折率1.48程度で、ヨウ化ナトリウムの飽和屈折率程度になり、使いにくい。ただし類似化合物でもう少し屈折率の低いものを作ることができる。これらはハードコンタクトレンズに使われており、強度も大きい。

ただし、固化時に収縮を起こすので、固化後整形する必要がある。

③ フッ化リチウムの結晶

屈折率1.392である。1×1cm程度の結晶を作ることができる。

欠点は1個作るのに30時間程度かかることである。

長所は結晶面に沿って割ることができ、正確な立方体、直方体を作ることができることである。表面の結晶欠陥も少ないので、立方体等の周りの流れ等の正確な測定に使えると考えられる。

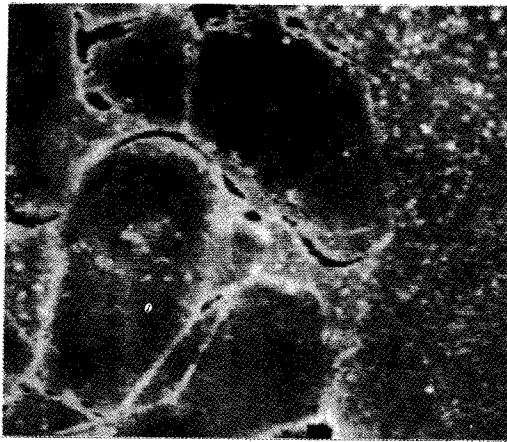
(4) 適用例: 振動流によるテトラポッド周辺の流れと乱れの計測

a) 実験目的と概要

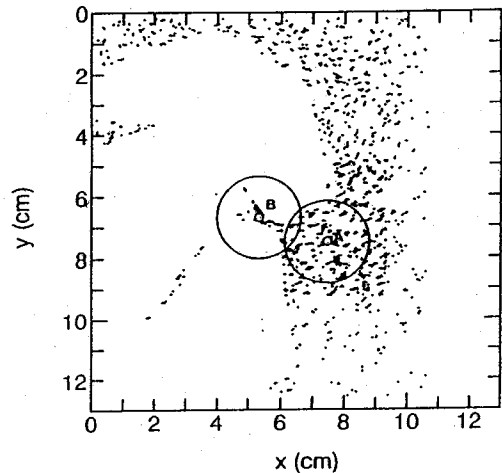
下記の例は継続中の実験である。実験中に多くの問題点が明らかになってきた。実験技術の開発という観点からは、最終的な実験結果よりは、実験中に蓄積されたノーハウや問題点の方が重要である。以下ではこれらを中心に紹介する。

目的はテトラポッドによる波の減衰機構、漁礁としてのテトラポッド周辺の流れ場の計測、水質保全機能等を調べることである。

アクリル製4面透明振動流水槽(測定部のサイズ20×15×70cm)中に模型のテトラポッド群を入れ、可視化計測により、テトラポッドの周りの流速の周期変動成分と乱れ成分を計測する。今回は振動流方向の鉛直2次元場で計測した。



a) 撮影画像



b) 計測結果の一例

図-12 テトラポッド周辺の流れ

溶質はヨウ化ナトリウム、透明材料はメタクリル酸メチルを用いた。実験に当たって実際問題になったことを要約する。

- ①使用したメタクリル酸メチルの屈折率を計ったところ 1.48 程度であった。このため大量のヨウ化ナトリウムを必要とした。それでも飽和屈折率に近かったので(図-11 参照)、屈折率を完全に合わせることはできなかった。
- ②メタクリル酸メチルが固化したとき表面がザラザラとして白濁するので透明になるまで磨く必要があった。
- ③硬いので型枠からははずすとき、無理をすると壊れるものがあった。
- ④水中で浮くので全体を金網できちっと固定し、動かないようにした。それでも往復流により左右に少し振動する場合があります。実験後、画像解析するとき、原点の移動など、面倒な付加的作業が必要になる場合があった。
- ⑤水位計測にはサーボ式水位計の電気抵抗を変えて用いたが、センサーの触針が電気分解により早く消滅し、早めの取り替えが必要であった。

b) 実験装置と計測器機の概要

- ①4面アクリル水槽の片側にピストンがついており、その上下で振動流を起こす。
- ②アルゴンイオンレーザシートで鉛直面(厚さ 5 mm 程度)を照明する。
- ③トレーサとして、溶液の比重が大きいため、ポリ塩化ビニル(比重約 1.4, 平均粒径約 30 μm)を用いた。
- ④撮影には MCP 内蔵高速ビデオカメラを用いた。撮影速度は 750 pps (枚/秒)であった。

- ⑥解析には著者らの開発した粒子自動追跡 (PTV) ソフト⁹⁾を用いた。

実際の解析においては次のような問題点があった。

- ①画像枚数が多く、電子計算機へのデータの取り込みに非常に長い時間がかかった。
- ②屈折率が完全に合っていなかったため、テトラポッド模型の周辺が光って写り(図-12a)、画像処理でこれを取り除くのに手間がかかった。またテトラポッドのごく近傍の粒子を追跡することができなかった。

c) 結果の概要

図-12b) に流速計測結果の例を示す。

現在、テトラポッドをシリコンゴム製(屈折率 1.41)に変えて屈折率を下げ、実験を継続中である。

4. 溶存気体の濃度場・温度場の可視化計測

(1) 測定方法と技術開発の現状

a) 定量計測と波長による画像選択

本節では、光の波長変化を利用した溶存気体濃度および温度場の可視化計測技術について述べる。

以下ではまず、溶存気体濃度場および温度場の画像計測法について測定原理、既往の研究を紹介する。次に著者らが行った水中の炭酸ガス濃度場の可視化例について述べる。

定性的な観察では、目で見えた画面の明暗変化や色調変化によって、濃度分布や温度分布の大体の傾向を知ることができる。定量的な計測のためには、何らかの基準や物差しが必要になる。

例えば輝度情報を用いる場合、水槽の光源に近い側と遠い側を比べると、同じ濃度や温度であっても、近

表-6 蛍光物質の依存性

溶液の性質	蛍光物質
温度	ローダミンB, エオシン等
pH	ナフチオン酸, クマリン, フルオレセイン, サリチル酸, アクリジン, ウンベリフェロン等
溶存酸素濃度	ナフタレン, アントラセン, PBA等

い側の輝度が大きく、遠い方が小さい。これを基準化するには、画面内の各部分に届いている光源光強度を知り、それとその部分の出力輝度の比を取れば良い。例えば蛍光を輝度検出用に使う場合は、通常、光源である励起光と出力である蛍光とは波長(帯)が異なるので、光学フィルターにより、2種の光を分離して、2枚の画像に撮影し、画面の各部分ごとにそれらの比を取れば良い。

また、著者らは、アルゴンイオンレーザーで水中に分散した感温液晶マイクロカプセルスラリーを照明し、488 nmの青い光と514 nmの緑の光による画像を分離して、それらの比から温度を測定することを提案している。

いずれにしても、画像を波長ごとに分解する機器が必要になる。著者らは図-13に示した光3分割装置を作って、この用に供している(補遺IV参照)。すなわち、対物レンズ系④から入射した画像を、2/3、1/2プリズム⑤で同一の3画像に分け、フィルターホルダー⑥に入れた光学フィルターによって、各波長の光の画像を得る。

カメラ取付部は小型の通常のCCDビデオカメラもしくは著者らの開発した高速ビデオカメラが付けられるようになっている。

b) 計測原理と既往の研究

蛍光強度は温度、pH等の溶液の性質に依存することが知られている^{33),34)}(表-6)。このうちこれまで最も良く使われてきたのは温度依存性である。水流では同一画像内の温度の相対変化が1℃程度なので蛍光強度が大きく変化せず、精度良く温度換算するのが困難であった。このため気流の測定への応用が先行した^{35),36)}。最近、Nakajimaら³⁷⁾、亀井ら³⁸⁾は十分注意深い実験をすればローダミンB等を用いても、温度幅20℃程度、精度±0.5℃程度の温度測定が可能であることを示し、これを水の安定成層や乱流自然対流場の温度計測に適用している。

AsherとPankow³⁹⁾は、2',7'-ジクロロフルオレセインのpH依存性に着目し、炭酸ガスの水表面を通した水中への溶入過程を計測している。彼らは点計測であったが、2次元計測ではないが、世界で初めて振動格子乱流による水表面の濃度境界層の水中への取り込み過程の

計測に成功している。

Jähne⁴⁰⁾は、同様にフルオレセインと塩素ガスを用いて、気体の水表面を通した水中への溶入過程を計測している。

Wolffら²⁰⁾はPBAの蛍光が、酸素濃度により消光することを利用して、酸素の水中への取り込みを可視化することを試みている。

温度測定には感温液晶がより直接的に使える。これはコレステリック液晶のピッチ(光の波長程度)が温度により、伸縮するためと言われている^{41),42)}。小沢⁴³⁾らはシリコンオイルの自然対流場に温度幅3℃の感温液晶を用いて温度の画像計測を行い、多くの美しい写真を撮っている。ただし、液晶からの反射光の光量不足や、色調変化を起こす温度幅が最小でも2℃程度で、分解能は最高でも0.2℃程度とやや大きい、等の理由により、対流による乱れ計測等に成功した例は無い。

(2) 炭酸ガス濃度場の可視化の例

a) フルオレセイン水溶液のpH依存性

著者らはフルオレセイン水溶液のpH依存性を利用して、水表面に衝突した単一の渦輪によって、水表面に静置した炭酸ガスが溶入して水表面直下に生じた濃度境界層が、水中に取り込まれる過程を可視化した⁴⁴⁾。

pH依存性を調べた結果を図-14に示す。フルオレセイン水溶液の濃度は 2.5×10^{-6} mol/lである。光源はアルゴンイオンレーザーをシート光にして用いた。光源光は520μm以下の光をカットするフィルターを通して撮影した。ビデオカメラは東芝IK-M32(カラー)を使った。画像処理装置NEXUS6510を用いて、各pHに対して、画面内であらかじめ指定した領域内のR, G, Bそれぞれの成分の平均輝度を求めた。

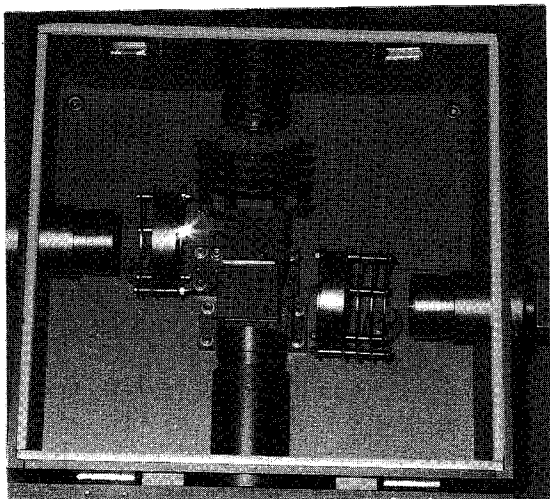
数値は画像処理装置の出力であり、光学フィルターも撮像素子に付いていたものを使用したもので、結果は相対的なものである。

図より、pH6.0よりアルカリ性側では蛍光強度はあまり変化せず、6.0以下ではpHに依存して減少することがわかる。特にG光の依存性がよい。

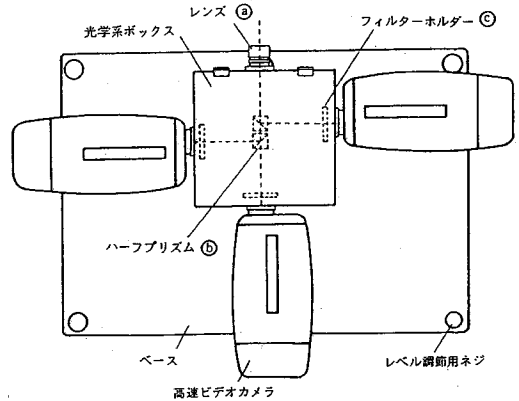
なおB光に対して出力が小さく、pH依存性も現れていないのは、撮影時に520nm以下の青い光を光源レーザー光とともにカットしたためである。

b) 水表面での炭酸ガス取り込み過程の可視化

渦輪の水表面衝突による水表面炭酸ガス濃度境界層の取り込み過程を写真-8に示す。この実験では渦輪の外縁に沿って濃度境界層が取り込まれていくことがわかる。



a. 装置の写真



b. 装置の概略図

図-13 光3分割撮影装置

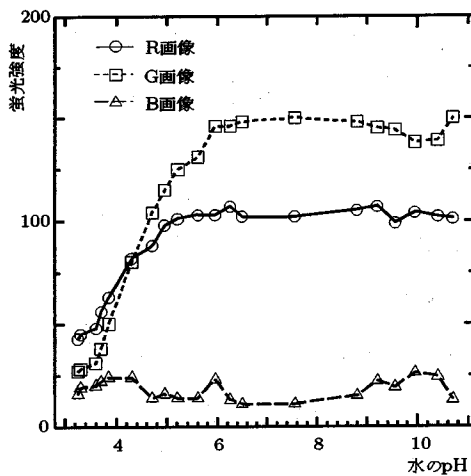


図-14 フルオレセイン水溶液の pH と蛍光強度の関係

5. おわりに

本報告では水流の可視化計測に関連した技術を紹介した。本報告では、読者の便に供するように他の研究者による成果についても要約・紹介している。以下ではこのうち、著者らがオリジナルに開発した技術および適用結果をとりまとめて示す。

第2節では水とPTV用トレーサー粒子の比重整合に関する研究成果を示した。次のような成果が得られた。

- ①PTV用トレーサーとして望ましい性質を整理して示した。
- ②このうち水運動への追従性に影響する要因を整理し

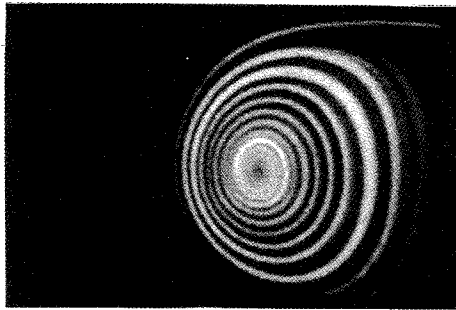
て示し、これらのほとんどが比重整合により解決すること示した。

- ③トレーサーとして内部が水、薄膜が比重1に調整されたマイクロカプセルを用いることを提案し、その利用、作成に関して必要な情報を文献および実験により収集整理して示した。
- ④③のマイクロカプセルの製法に関して、生成時の最適温度条件、および芯物質となる水と膜物質を溶かしたジクロロメタンの最適比を実験的に明らかにした。
- ⑤③のマイクロカプセルの周囲の水の温度変動に対する追従性を計算により明らかにした。400 μ m以下のものでは、10Hz以上の温度変動があっても追従できることを示した。
- ⑥さらに、温度計測、酸素濃度計測等の付加機能を持つマイクロカプセルトレーサーの可能性を検討した。
- ⑦他の比重整合法として発泡スチロールの加熱による比重整合法について最適な加熱温度と加熱時間の関係を実験的に明らかにして示した。

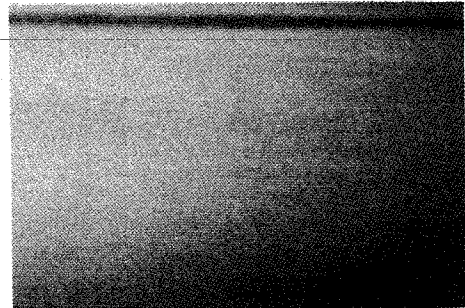
第3節では水と水中透明体の屈折率整合に関する研究成果を示した。水と透明体の屈折率整合法について文献調査、実験を行った。実用的には低屈折率透明体と薬品により屈折率を上げた高屈折率水溶液を用いるを得ないことがわかった。

次のような成果が得られた。

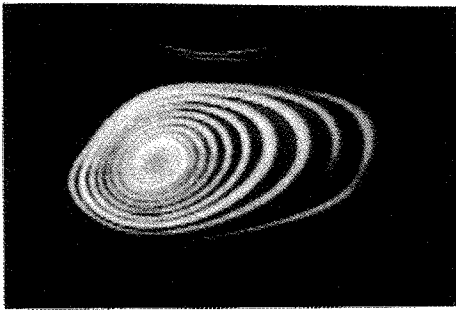
- ⑧低屈折率透明体材料と高屈折率水溶液のための薬品に関して文献調査、実験を行い、薬品濃度と透明体材料の屈折率との関係を明らかにした。
- ⑨現時点では低屈折率透明体として加工が簡単なシリコンゴム(屈折率1.41)とヨウ化ナトリウム39%の水



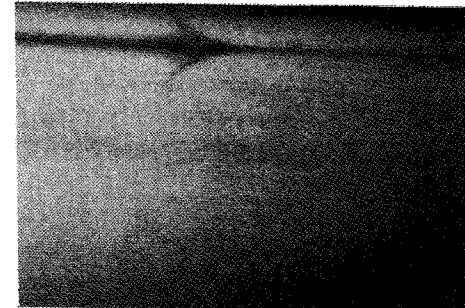
t=0 sec



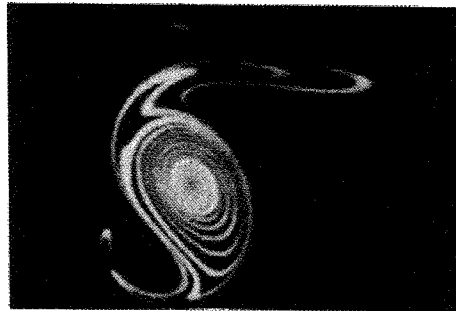
t=0 sec



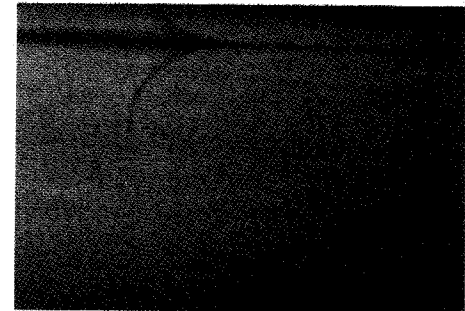
t=0.66 sec



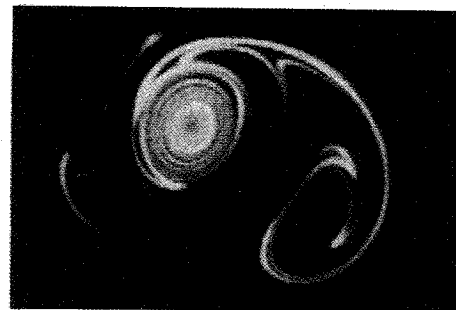
t=0.66 sec



t=1.33 sec

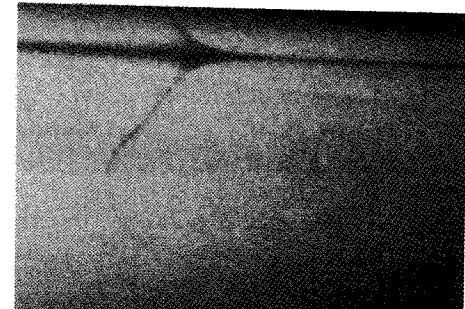


t=1.33 sec



t=2.66 sec

a. 渦輪



t=2.66 sec

b. 水表面の炭酸ガス濃度境界層の取り込み

写真-8 渦輪の水表面への衝突による水表面の炭酸ガスの濃度境界層の取り込み過程の可視化

溶液を用いるのがよい。

⑩⑨の場合、トレーサーとしてポリ塩化ビニル(比重1.4)を用いると比重整合も同時に満たされる。

⑪振動流中の透明体のテトラポッド模型周辺の流れと乱れ計測の実験に適用した。その際、実際に計測に適用して生じた問題点、注意事項等を整理して示した。

第4節では溶存気体濃度場、温度場の可視化計測法に関する研究成果を示した。次のような成果が得られた。

⑫フルオレセイン水溶液のpH依存性を実験により明らかにした。

⑬⑭の特性を利用して、水表面の炭酸ガス濃度境界層の渦輪衝突による水中への取り込み過程を可視化した。

本研究で使用した化学薬品の中には毒性のあるもの、実験装置や器具を腐食するもの、不注意に廃棄すると環境汚染につながるものなど(蛍光物質、ヨウ化物、ジクロロメタン、ベンゼン等)があり、取扱いに注意を要する。

謝辞: 本研究は約6年の研究成果を取りまとめたものであり、数多くの方々の援助および補助金を受けた。また、本研究は文献(9), (46)と一連の研究であり、ご協力頂いた方々の氏名、補助金等をまとめて表-7に示した。記して深甚の謝意を表する次第である。

補遺 I 本報告について

本報告は文献(10), (11), (18), (24), (30), (44)の報告をとりまとめ、その後の成果を付け加えたものである。

補遺 II 比重1のマイクロカプセルの沈降速度と相対密度誤差

写真-3の水深は5.0cm程度であり、中心にあったマイクロカプセルが10分間で沈降(浮上)する距離を最大で2.5cmとすると、移動速度は0.042mm/secとなる。ストークスの式より、沈降(浮上速度) u_p は次式で表される。

$$u_p = \frac{1}{18} \left(\frac{\rho_p}{\rho_f} - 1 \right) g \frac{d^2}{\nu_f} \quad (\text{II.1})$$

上式に重力加速度 $g=980 \text{ cm/sec}^2$ 、動粘性係数 $\nu_f=0.01 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、粒子の直径 $d=0.04 \text{ cm}$ 、沈降(浮上速度) $u_p=0.0042 \text{ cm/sec}$ 、水の密度 $\rho_f=1 \text{ g/cm}^3$ を代入して、マイクロカプセルの密度 ρ_p を求めた結果、 1.00048 g/cm^3 であった。よって、相対密度差は0.048%である。これを直接測定するのは困難である。

補遺 III 屈折率に関する参照波長⁴⁵⁾

物質の屈折率は光の波長により変化し、一般に波長が短くなれば屈折率は大きくなり波長が長ければ小さくなる。物質の屈折率を比較するためには基準となる波長の光が必要となる。

参照基準波長としてアメリカや中国ではナトリウムD線(589.29nm)、日本やイギリス、インドではヘリウムd線(587.56nm)、ヨーロッパ諸国を中心として水銀e線(546.07nm)を採用していた。

国際標準化機構(ISO)は参照基準波長の統一化の努力を行い、1998年以降全ての光学機器に対する参照基準波長を水銀e線に一本化することが合意された。このことを受け、日本においても1998年以降水銀e線を参照基準波長にすることになっている。

補遺 IV 光3分割装置

光3分割装置はもともと3台の高速ビデオカメラの有効利用のために作った。このときの目的は次のようなものであった。

- ①RGBフィルターによる高速カラー撮影
 - ②任意の3種の波長帯による高速撮影
 - ③フィルター無しの高解像度高速撮影
 - ④3台のカメラのMCPのゲーティング機能の遅延同期による10,000,000枚/秒までの超高速3枚連続撮影。
- ①～③は完全同期による。④は遅延同期による。

参考文献

- 1) 小林敏雄, 佐々木伸夫, 石原智男, 佐賀徹雄, 上村康幸: 可視化技術と画像処理技術の円柱まわりの流れへの適用, 流れの可視化, Vol.2, Suppl., pp.41-46, 1982.
- 2) 小林敏雄, 佐賀徹雄, 瀬川茂樹: 流跡画像の解析による速度場の計測, 流れの可視化, Vol.9, No.34, pp.379-382, 1989.
- 3) 津田宜久, 小林敏雄, 佐賀徹雄: 画像処理を用いた高Re流れの可視化システムの開発, 可視化情報, Vol.11, Suppl. No.1, pp.181-184, 1991.
- 4) 西野耕一, 笠木伸英, 平田賢, 佐田豊: 画像処理に基づく流れの三次元計測に関する研究, 日本機械学会論文集(B編), Vol.50, No.510, pp.404-412, 1989.
- 5) 西野耕一, 笠木伸英: 3次元画像処理流速計による二次元チャンネル乱流の乱流統計量の測定, 日本機械学会論文集(B編), Vol.56, No.525, pp.1338-1347, 1990.
- 6) Utami, T. and Ueno, T.: Visualization and picture processing of turbulent flow, *Experiments in Fluids*, 2, pp.25-32, 1984.
- 7) 植村知正, 山本富士夫, 幸川光雄: 二値化相関法-粒子追跡法の高速画像解析アルゴリズム-, 可視化情報, Vol.10, No.38, pp.58-64, 1990.
- 8) 江藤剛治: 4,500枚/秒の高速ビデオカメラ, テレビジョン学会誌, Vol.46, No.5, pp.543-545, 1992.
- 9) 竹原幸生, 江藤剛治, 村田滋, 道奥康治: PTVのための新アルゴリズムの開発, 土木学会論文集, No.533/II-34.

表-7 一連の研究にご協力頂いた方々、および補助金

◎高速ビデオカメラの製作に際して、ご指導、ご協力頂いた方々					
松岡祥浩教授、青山昌里助教授、山本全男助教授、久武勝保助教授、沖幸男講師、辻合秀一講師、仲幸彦講師(以上、近畿大学) (株)フォトロン、日立製作所、浜松ホトニクス(株)(個人名は割愛させて頂いた。)					
◎高速ビデオカメラの撮影に際して、ご指導、ご協力頂いた方々					
蘆丸谷政志教授(室蘭工業大学)、出口一郎助教授(大阪大学)、小松利光教授、松永信博助教授(以上、九州大学)、樋田操教授(日本文理大学)山口博司教授(同志社大学)、井田民男講師(熊野工業高等専門学校)、川尻みどりさん					
◎自動粒子追跡アルゴリズムの開発に関して、ご指導、ご協力頂いた方々					
小松信雄先生(大阪府立大学)、島崎正則氏(元神戸大学院生、現三菱重工)					
◎トレーサの比重整合に関して、ご指導、ご協力頂いた方々					
久保宇市教授、椿原啓教授(以上、近畿大学)、中西祐啓氏(元近畿大学助手、現大本組)鳥居寛氏(元近畿大学学生、現建設省)、清本英治氏(元近畿大学学生、現日本コンテック)					
◎透明体の屈折率整合に関して、ご指導、ご協力頂いた方々					
西川泰治教授、椿隆行教授、丹羽健夫助教授(以上、近畿大学)山下博志氏、北村直之氏(以上、通産省大阪工業試験所)					
◎溶存炭酸ガスの可視化に関する実験において、ご協力頂いた方々					
宮原和仁氏(元近畿大学院生、現東洋建設)、岸田義広氏(元近畿大学院生、現奈良県)中川勝広氏(元近畿大学学生、現京都大学院生)					
補 助 金	平成2年度文部省私学助成金(高速ビデオカメラの開発)				
	近畿大学理工学部大型器機助成および土木工学科内助成金				
	科 学 研 究 費 補 助 金	種 目	代 表 者	課 題 番 号	期 間
		試験研究(B)	箕 源 亮	01850122	平成元年度～平成2年度
		重点領域研究	高橋 保	02201121	平成2年度～平成4年度
		一般研究(C)	江藤剛治	04805051	平成4年度～平成5年度
		試験研究(B)	江藤剛治	06555152	平成6年度～平成7年度
		奨励研究(A)	竹原幸生	03750442	平成3年度
		奨励研究(A)	竹原幸生	04750505	平成4年度
		奨励研究(A)	竹原幸生	07750605	平成7年度
近 畿 大 学	近 助 金	奨励研究助成	竹原幸生	GG20	平成2年度
	大 金	一般研究助成	江藤剛治	GG18	平成3年度
	学	奨励研究助成	竹原幸生	GG36	平成5年度
		奨励研究助成	竹原幸生	GG09	平成7年度

- 10) 江藤剛治, 竹原幸生: トレーサ粒子としてのマイクロカプセルの試作, 可視化情報, Vol.11, Suppl. No.1, pp.71 - 74, 1991.
- 11) 江藤剛治, 竹原幸生: 水と屈折率の等しいガラス粒子の試作, 可視化情報, Vol.13, Suppl. No.2, pp.131 - 134, 1993.
- 12) 流れの可視化学会編: 新版 流れの可視化ハンドブック, 朝倉書店, pp.158 - 164, 1986.
- 13) Adrian, R. J.: Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 23, pp.261 - 304, 1991.
- 14) Binnington, R. J., Troup, G.J. and Boger, D.V.: A low cost laser-speckle photographic technique for velocity measurement in slow flows, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, Vol.12, pp. 255 - 265, 1983.
- 15) 近藤保, 小石真純: 新版マイクロカプセル, その製法・性質・応用, 三共出版, 1987.
- 16) 椿原啓, 久保宇市: レーザ核融合用多重PMBターゲットの開発, 近畿大学理工学部研究報告, 第16号, pp.119 - 125, 1981.
- 17) Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C.: *Conduction of heat in solids(second edition)*, Oxford Science Publications, pp.230 - 237, 1959.
- 18) 江藤剛治, 竹原幸生, 宮原和仁: 渦輪の衝突による水表面薄層の水中之への進行現象の可視化, 水工学論文集, 第36巻, pp.701 - 704, 1992.
- 19) 竹原幸生, 江藤剛治: 水表面での気体輸送に関する研究の現状, 土木学会論文集, 第461号/II-22, pp.1 - 10, 1993.
- 20) Wolff, L. M., Liu, Z-C. and Hanratty, T. J.: A fluorescence technique to measure concentration gradients near an interface, *Air-Water Mass Transfer*, ASCE, pp.210 - 218, 1991.
- 21) 木下良作: 「写真測量法」による河川および模型水路流速測定, 流れの可視化, Vol.1, No.3, pp.36 - 43, 1981.
- 22) 角湯正剛: 確率論的な手法を用いた冷却水取水に伴う浮遊体取り込みの研究(大阪大学博士学位論文), 1984.
- 23) 中田雅子, 大場謙吉, 鈴木岐宜: 柔軟な弾性円筒周りの流れ場の実験, 日本機械学会第6回バイオエンジニアリング学術講演会講演論文集, pp.88 - 90, 1994.
- 24) 井田康夫, 樺本亨, 須貝輝博: 超高速ビデオカメラを用いた透過性構造物内部の流体運動可視化に関する実験, 海洋開発論文集, Vol. 10, pp.307 - 312, 1994.
- 25) 理化精機工業株式会社: シャボン玉発生器カタログ
- 26) Adachi, T., Nishino, K. and Torii, K.: Digital PTV measurements of a separated air flow behind a

- backward-facing step, *Journal of Flow Visualization and Image Proceeding*, Vol. 1, pp. 317 - 335, 1993.
- 27) Toba, Y., Tokuda, M. and Kawai, S.: Forced convection accompanying wind waves, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol. 31, pp.192 - 198, 1975.
- 28) Okuda, K., Kawai, S., Tokuda, M. and Toba, Y.: Detailed observation of the wind-exerted surface flow by use of flow visualization methods, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol. 32, pp.53 - 64, 1976.
- 29) 日本化学会編：化学便覧，基礎編I，丸善，1984.
- 30) 竹原幸生，江藤剛治，道奥康治：粒子追跡法による流れ計測のための新技術の開発，水工学論文集，第38巻，pp.689 - 696，1994.
- 31) Adrian, R. J. et al: Turbulent thermal convection in wide horizontal fluid layers, *Experiments in Fluids*, Vol. 4 pp.121 - 141, 1986.
- 32) Konagai, K., Tamura, C., Rangelow, P. and Matsushima, T.: Laser-aided tomography: a tool for visualization of changes in the fabric of granular assemblage, *Proc. of JSCE*, No. 455/I-21, pp.25 - 35, 1993.
- 33) 平木敬三，西川泰治：けい光指示薬を用いる酸・塩基滴定（示差滴定），分析化学，Vol.30, No.1, pp.45 - 50, 1981.
- 34) 西川泰治，平木敬三：蛍光・りん光分析法，共立出版，1984.
- 35) 新美智秀，藤本哲夫，若山敏二，石田敏彦： I_2 -PLIFによる希薄気体流の二次元温度場の可視化（最適な吸収線の選択），可視化情報，Vol.13, Suppl. No.1, pp.39 - 42, 1993.
- 36) 井上雅弘，益田光治，古川雅人，村石隆，高橋康宏：レーザー蛍光法によるスイープランプ付きダクト内三次元遷音速流れ場の温度測定，可視化情報，Vol.13, Suppl. No.2, pp.143 - 146, 1993.
- 37) Nakajima, T., Utsunomiya, M., Ikeda, Y. and Matsumoto, R.: Simultaneous measurement of velocity and temperature of water using LDV and fluorescence technique, *5th International Symposium on Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics and Workshop on the Use of Computers in Flow Measurements*, 1990.
- 38) 亀井泰造，笠木伸英：レーザー誘起蛍光法による流体温度計測の不確かさ評価，可視化情報，Vol.14, Suppl. No. 1, pp.89 - 92, 1994.
- 39) Asher, W. and Pankow J. F.: Direct observation of concentration fluctuations close to a gas-liquid interface, *Chem. Eng. Sci.*, Vol.44, No.6, pp.1451 - 1455, 1989.
- 40) Jähne, B.: From mean fluxes to a detailed experimental investigation of the gas transfer process, *Air Water Mass Transfer*, ASCE, pp. 244 - 256, 1991.
- 41) 佐藤進：液晶とその応用，産業図書，1984.
- 42) 日本学術振興会情報科学用有機材料第142委員会・液晶部会編：液晶辞典，倍風堂，1989.
- 43) Ozawa, M., Müller, U., Kimura, I. and Takamori, T.: Flow and temperature measurement of natural convection in a Hele-Shew cell using a thermo-sensitive liquid-crystal tracer, *Experiments in Fluids*, Vol. 12, pp.213 - 222, 1992.
- 44) 竹原幸生，江藤剛治，岸田義広：水表面からの炭酸ガスの輸送に関する可視化実験，水工学論文集，第37巻，pp.821 - 824, 1993.
- 45) 日本眼光学学会：別冊「基準波長統一特集号」，視覚の科学，第15巻，pp.1 - 31, 1994.
- 46) 江藤剛治，竹原幸生：高速ビデオカメラの現状と水工学分野への適用，土木学会論文集，No.533/II-34, 1996.

(1995. 4. 10 受付)

DEVELOPMENT OF SUPPORTING TECHNOLOGIES FOR WATER FLOW VISUALIZATION - DENSITY MATCHING, REFRACTIVITY MATCHING AND MULTI-SPECTRUM MEASUREMENT -

Takeharu ETOH, Kohsei TAKEHARA, Yuichi YOKOYAMA and Yasuo IDA

Various new techniques for water flow visualization developed by the authors are presented. They are (1) microcapsules as tracer particles for PTV which have the same gravitational and thermal characteristics as those of water, (2) refractivity matching technology of transparent materials and water, (3) simultaneous measurement techniques of flow field and temperature or CO₂ gas concentration field. Their concepts and data for their practical applications are summarized.