

## 高精度可視化計測のための基礎技術の開発に関する研究

竹原, 幸生

<https://doi.org/10.11501/3123113>

---

出版情報 : 九州大学, 1996, 博士 (工学), 論文博士  
バージョン :  
権利関係 :

## 第5章 水表面での気体輸送に関する可視化実験への適用

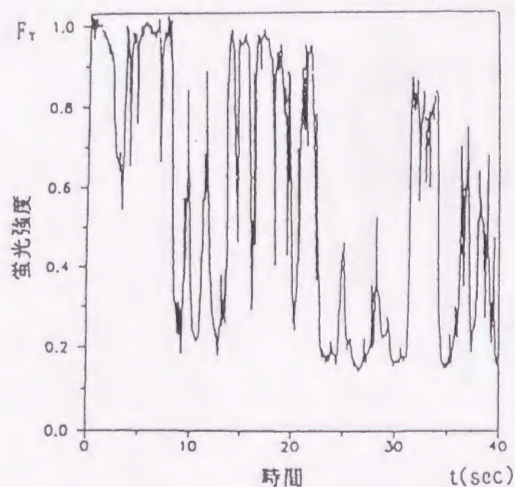
### 5.1. はじめに

水表面を通しての大気・水域間の物質輸送量を定量的に評価することは、大気・水域環境問題を解決する上で極めて重要である。しかしながら、物質交換メカニズムにおいては未だ不明な点が多く、輸送量を正確に予測・評価するまでには至っていない。現在、環境科学の立場から大気・水域間の物質輸送において最も注目されている問題に、i) 地球温暖化評価・予測において重要な大気・海洋間の炭酸ガス交換率の正確な算定、ii) 水域からの有害物質や臭気物質等の放散量を評価する上で重要な放散メカニズムの解明、iii) 湖沼等の閉鎖性水域における生態系の急激な変化と酸素や炭酸ガスの輸送量の関係解明等が挙げられる。

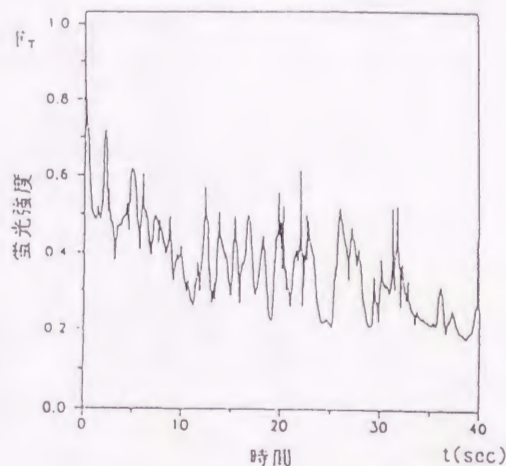
水表面における気体輸送を規定する重要な因子として、水中の乱れの水表面衝突、風の作用による水面の乱れ、水滴の水表面衝突、水表面での気泡の破裂等が考えられる。水表面近くの乱れによる気体輸送に関しては、これまで多くの研究がなされている。しかしながら、その大部分は再曝気係数をマクロな気体濃度と乱流特性量に基づいて整理したものであり、気体輸送のメカニズムが明かにされたとは言い難い。風と水面の相互作用に関連した研究は光易<sup>1)~3)</sup>や鳥羽<sup>4)~6)</sup>をはじめ多くの研究者達によって行われてきたが、それらはもっぱら風波の発生・発達に関する研究であって、気体輸送の観点から水面変動を取り扱った研究はほとんどなかったように思われる。最近、Jähneら<sup>9)</sup>、Hanrattyら<sup>10)</sup>、小森ら<sup>11)</sup>等により、風波による気体輸送メカニズムの解明に向けて研究が始められている。水滴の衝突と気泡の破裂という現象はお互いに関連して生じることが多い。例えば、降雨や砕波等により水滴が水表面に衝突すると水中に気泡が巻き込まれ、気泡は水表面で破裂すると多量の微細粒子を大気中に放出する。気泡の破裂による水滴の放出のメカニズムや、水滴粒径に関する基礎的研究は鳥羽ら<sup>7)~8)</sup>によって行われているが、水滴による気体輸送に関する詳細な研究はほとんど行われていないのが実状である。

水表面での気体輸送量は、水表面極近傍で形成される10~100 $\mu\text{m}$ 程度の非常に薄い濃度境界層内での流体運動に大きく支配される。例えば、2重境界膜説をはじめ提唱したLewis & Whitman<sup>19)</sup>は彼らの論文中でAdeney & BeckerやBeckerによる水表面の膜の厚さに関する研究を引用している。そこでは、水温15 $^{\circ}\text{C}$ の静水状態において、 $\text{O}_2$ と $\text{N}_2$ に対して水表面の境界膜の厚さは1700 $\mu\text{m}$ であり、また、水にある強さの乱れを与えた場合、境界膜の厚さは45 $\mu\text{m}$ となると記述されている。従って、水表面での気体輸送メカニズムを解明するには、濃度境界層内での流体運動と輸送された気体の動きを直接計測する技術を開発することが必要である。最近では欧米の研究者を中心に水表面極近傍の流れおよび溶存気体濃度の計測技術の開発が活発に行われている。

本章では開発された可視化計測技術を水表面における気体輸送に関する実験に適用した例を示す。§5.2においては1990年アメリカ合衆国ミネソタ大学で開催された「水表面での気体輸送に関する国際シンポジウム」で発表された計測開発に関する論文を紹介する。§5.3では乱れによる水表面からの気体の取り込み過程を解明するための基礎的実験として、単一の渦輪を水表面に衝突させた場合の水表面を通しての気体の連行について可視化実験を行った。水表面近傍の流体運動の可視化には直径が数10 $\mu\text{m}$ のマイクロカプセルが用いられ、一方炭酸ガスの輸送過程は、フルオレセイン水溶液の蛍光強度が水のpHに依存することを利用して可視化されている。§5.4では水滴が水表面に衝突する過程および単一気泡が水表面で破裂する様子が高速ビデオカメラで撮影されている。



(a) 水表面が清浄な場合



(b) 水表面に単分子膜が存在する場合

図-5.1 Asher らによる蛍光強度の変化と表面更新の関係: 蛍光強度  $F_T$  は初期蛍光強度で正規化されている

## 5.2. 既往の研究

1990年9月11日から14日までの4日間、アメリカ合衆国ミネソタ大学において「第2回水表面での気体輸送に関する国際シンポジウム」が開催された。シンポジウムでは83件の一般講演が行われた。講演論文集<sup>12)</sup>が刊行され、60編(キーノート講演を含む)の論文が掲載された。中でも水表面近傍での流体運動と気体輸送の関係を明らかにするための研究が活発に行われており、そのために開発された計測技術も多数報告された。これまで気体輸送係数  $k_L$  の算定においては、下層の一樣な濃度の水を採取し、長時間の濃度変化から  $k_L$  の値を評価する手法が用いられてきたため、 $k_L$  のマクロな値しか計測できなかった。最近では、 $k_L$  の局所的かつ時間的变化を求めることのできる計測法の開発や、現象を直接可視化する試みが始められている。以下では、実験室における気体輸送に関する計測技術の開発のうち主要なものについて紹介する。

Asher と Pankow<sup>13)</sup> は蛍光物質を用いて、振動格子乱流における水表面極近傍の表面更新と  $\text{CO}_2$  の水中への輸送現象、およびそれらにおよぼす表面張力の効果を実測することに成功した。彼らの計測手法を具体的に述べる。蛍光強度が最大となるように水の pH を調整しておき、 $\text{CO}_2$  の吸収で水の pH が下がると、蛍光強度が低下することを利用する。空中から水面をレーザーで照射して蛍光を発生させるが、レーザー光の照射は水表面の薄層に限られるようにする。このため、光源レーザー波長の光を効果的に吸収する染料を水に溶かす。レーザーが入射し得る深さは Beer の法則に従い、水表面の極薄い層に限られる。レーザー光は光学フィルターでカットし、蛍光強度の変化のみを高感度のフォトディテクターでモニタリングする(ただし点計測)。これにより  $\text{CO}_2$  が表面から吸収された状態と下方からの水により表面が更新された状態とを蛍光強度の変化で感知できる。

水表面が清浄にされた場合と単分子膜で覆われている場合の2つのケースに対する蛍光発光強度 ( $F_T$ ) の時系列変化の例を図-5.1に示す。図-5.1(a) は水表面が清浄な場合で、実験開始時の蛍光強度がその後の  $\text{CO}_2$  の溶解込みにより一旦減少するが、実験開始後約20秒間は表面更新により初期の蛍光強度に回復しているのがわかる。図-5.1(b) は水表面に単分子膜が存在している場合で、もとの蛍光強度にまで

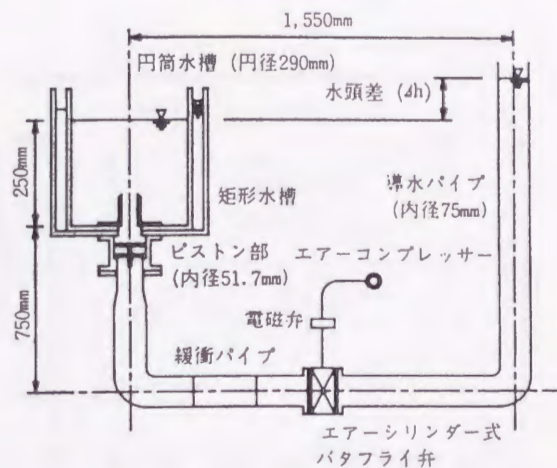


図-5.2 渦輪発生実験装置の概略図

は回復していない。

また、彼らは  $F_T$  から濃度に関する境界層深さ ( $Z_e$ ) の推定方法を提案している。結果として、水表面が清浄な場合、 $Z_e = 0$  が起こり得ることがわかった。つまり、このときに表面更新が生じていることになる。強い乱れの場合には、 $\bar{Z}_e = 30\mu\text{m}$ 、 $\delta_c = 19\mu\text{m}$  程度であり、弱い乱れの場合には  $\bar{Z}_e = 75\mu\text{m}$ 、 $\delta_c = 69\mu\text{m}$  程度である。水表面に単分子膜が存在する場合、 $Z_e = 0$  は起こり得ず、表面更新は生じていない。強い乱れの場合には  $\bar{Z}_e = 93\mu\text{m}$ 、 $\delta_c = 100\mu\text{m}$  程度であり、弱い乱れの場合には  $\bar{Z}_e = 195\mu\text{m}$ 、 $\delta_c = 240\mu\text{m}$  程度である。ここで、 $\delta_c = D/k_L$  で Whitman と Lewis の境膜厚さ、 $D$  は拡散係数である。

単分子膜が存在する場合、 $\delta_c$  に関する実験結果は Jirka と Ho<sup>14)</sup> や Luk と Lee<sup>15)</sup> の結果とよく一致している (Jirka らや Luk らの実験では Asher らほどに水表面を清浄にできなかったと推測される)。 $Z_e$  と  $\delta_c$  の間には乱れの強さや水表面の単分子膜のあるなしに関わらず線形の相関関係がある。これより  $Z_e$  の結果から  $k_L$  を評価できる。Wolff ら<sup>16)</sup> は蛍光物質 PBA (pyrenebutyric acid) の蛍光寿命が溶存酸素量に反比例して短くなることを利用して溶存酸素濃度を計測している。Jähne ら<sup>17)</sup> も pH 変化により蛍光強度が変わる物質を用いて、HCl の輸送を計測している (2次元計測)。

Jähne ら<sup>17)</sup> は熱移動計測から局所的な気体移動係数を推定する手法を提案している。水表面から与える熱フラックスを制御し、かつ水表面の温度だけを測ることにより熱移動速度を計測し (CFT: Controlled Flux Technique)、その結果を気体移動係数に換算する方法である。この計測法では精度は少々劣るが、時空間的に局所的な  $k_L$  を計測することができる。また、Jähne らは水面でのレーザー光の屈折より局所的な水面勾配を求めている (LSG: Laser Slope Gauge)。

Chu と Jirka<sup>18)</sup> は超小型の熱膜流速計と溶存酸素計を用いて、振動格子乱流場での水表面付近の乱流と溶存酸素濃度の同時計測を行っている。実験には直径 0.153mm、長さ 1.3mm の split-film 型の熱膜流速計を回転アームに取り付け、円周 0.76m 上を 60mm/s の速さで回転させている。また、流速センサーから 1.0mm の間隔をおいてポーラログラフィー電極の溶存酸素計 (tip size 5.0 $\mu\text{m}$  以下、応答速度は 10ms 以下) を設置し、同時計測を行っている。水深方向のデータサンプリング間隔は 10 $\mu\text{m}$  であった。

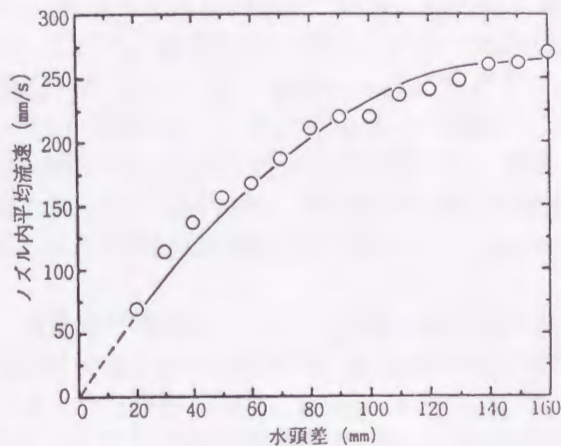


図-5.3 水頭差とノズル内平均流速の関係

### 5.3. 水表面に衝突する渦輪の可視化実験

単一の渦輪を発生させる方法として水頭差を駆動源としたピストン方式のものを自作した。その渦輪発生装置の概略図を図-5.2に示す。水槽は内径290 mm、高さ300 mmの透明アクリル製円筒水槽を用いた。観察における歪みをできるだけ小さくするために、円筒水槽の外側に矩形の透明アクリル製水槽を設置し、その内部も水で満たした。円筒水槽の底面の中心から水塊を放出させるため、先端が刃型となっているノズルをつけた。図-5.2に示すように、 $\Delta h$ の水頭差を与えておき、弁を開けることにより、ノズルより水塊が放出されるしくみになっている。ノズルを付け替えることにより、ノズルの内径、長さを変えられる。またピストン部を調節することにより、放出される水塊の量を変えられる。放出される水塊の速度は水頭差で変えられる。一定速度で弁を開閉させるため、電磁弁で制御できるエアシリンダ式バタフライ弁を用いている。バタフライ弁を開けるときに生じる振動を観測部の水槽にできるだけ伝えないようにするために、水槽とバタフライ弁の間に緩衝パイプを設置した。摩擦損失をできるだけ小さくするため、この部分のパイプは大きいものを使っている(内径75 mm)。

今回行った実験において、ノズルは内径25 mm、長さ100 mmのものを用いた。水面からノズル先端までの水深を150 mm、ノズルから放出される水塊の量を約27 cm<sup>3</sup>に固定した。図-5.3には水頭差に対するノズル内平均流速の関係を示す。今回の実験では水頭差を20~120cmの間で変化させて渦輪を発生させた。また、渦輪の可視化には白色ポスターカラーを用いた。渦輪の水表面衝突による水表面薄層の水中への取り込みの可視化では、比重0.95、直径75 $\mu$ m以下の微細な粒子および蛍光染料(フルオレセイン)を用いる可視化法を試みた。撮影にはCCDビデオカメラおよび高速ビデオカメラを用いた。

#### (1) 水表面衝突による渦輪の崩壊過程の可視化

単一の渦輪が水表面に衝突したときの水表面からの気体の連行について調べるには、水表面に衝突する渦輪自身の挙動を正確に知っておく必要がある。よって、この点について実験を行い、Cerra and Smith<sup>20)</sup>による観察結果と比較した。実験は通常のCCDビデオカメラを2台用いて鉛直上方からと側面から同時に撮影し、3次元的に観察を行った。トレーサー染料として十分薄めた白色ポスターカラーを用い、照明にはメタルハライドランプを用いた。

進行している渦輪の運動は単純であるが、水表面に衝突するとその挙動は複雑になる。ここでは、2次

渦輪の形成が明瞭で、かつ、現象があまり速くない水頭差 20mm の場合を例として述べる。

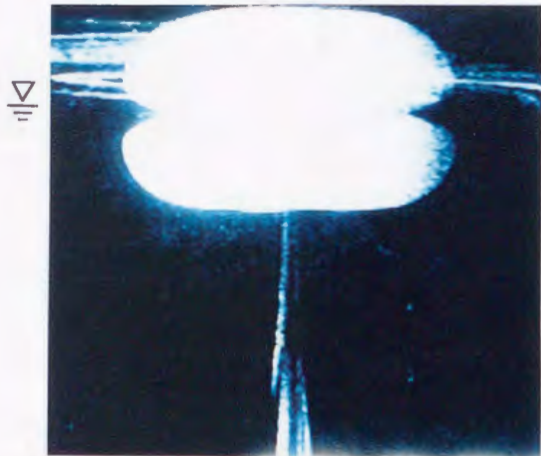
水表面に衝突した渦輪の崩壊過程を水平および鉛直上方から観察した。その一連の崩壊過程を写真-5.1 に示す。観察結果は次の通りである。

写真-5.1a) は渦輪が水表面に到達した直後の写真である。その後、写真-5.1b) に示すように、水表面に衝突した渦輪は水平方向に広がり、鉛直方向に縮む。また、渦輪の周辺部には逆回転の 2 次渦輪の形成が確認される。渦輪は鉛直方向に縮んだ後、写真-5.1c) に示すように鉛直下方に跳ね返る。この時点で 2 次渦輪が明瞭に確認される。写真-5.1d) では跳ね返った渦輪が、再び鉛直上方に反転しているのがわかる。この時点では、2 次渦輪が元の渦輪に巻き込まれている。写真-5.1f) は、2 次渦輪の発生、巻き込みを繰り返しながら回転を保っていた渦輪が、ある瞬間を境に突然無秩序な乱れに遷移することを示している。本実験によって得られた渦輪の特徴は基本的には Cerra and Smith<sup>20)</sup> の観察結果と一致していることが確認された。

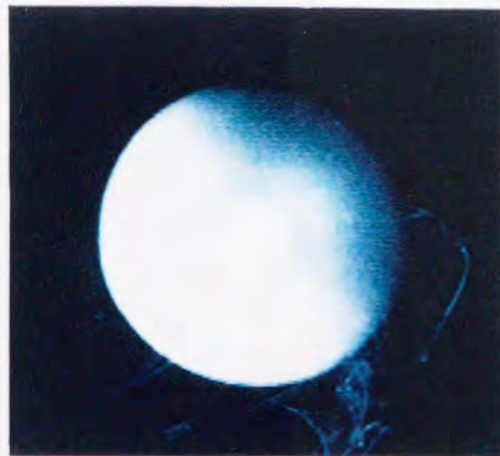
水表面の状況については、水頭差が増すにつれて、渦輪が水表面に衝突すると水表面が盛り上がり、水表面に波動が生じる。水頭差が 30mm 以内であれば、水表面は乱れない(写真-5.2)。水表面に衝突した渦輪は水表面をスリップするような挙動を示す。Cerra and Smith は、これは表面張力が原因であるとしている。しかし、この点についての証明は行われていない。水頭差が 40mm 以上になると水表面が乱れ、水表面に波動が生じ始める。水頭差がさらに大きくなると、水表面は著しく乱れる。これは、渦輪が水表面に衝突したときの衝撃ならびに渦輪自身の回転によるものと考えられる。水頭差 120mm の場合の水表面の乱れを写真-5.3 に示す。水面に波紋が生じているのがわかる。

元の渦輪の外縁に沿って形成される 2 次渦輪が元の渦輪に巻き込まれることにより、2 次渦輪のリングは小さくなる。その際、2 次渦輪のリング直径は圧縮され、円周方向によじれた構造をした不安定な波動を示す。写真-5.4 と写真-5.5 に水頭差が 20mm と 80mm の場合の不安定な波動の形状の違いを示す。水頭差 20mm の場合に比べ、水頭差 80mm では不安定な波動が細かく波打っている。

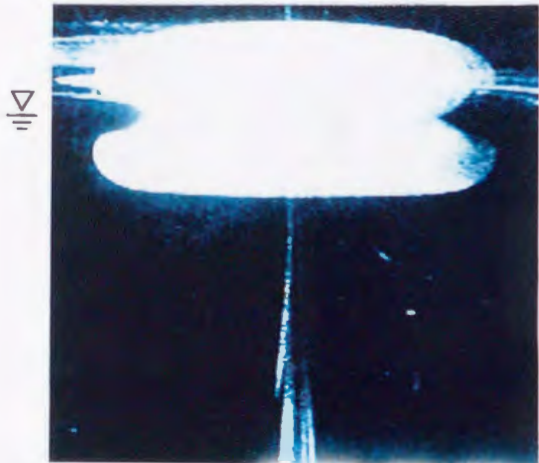
以上のことより、渦輪の衝突により水表面が乱れるかどうかの限界は、水頭差が 30~40mm であることがわかる。また、よじれた構造をした 2 次渦輪は水頭差が小さい場合、滑らかな不安定波動を示すが、水頭差が大きくなると、不安定な波動は細かな縦縞を示すことがわかった。



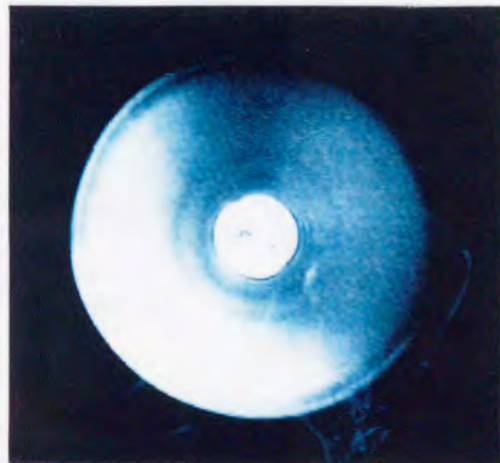
(a)  $t = 0.00 \text{ sec}$



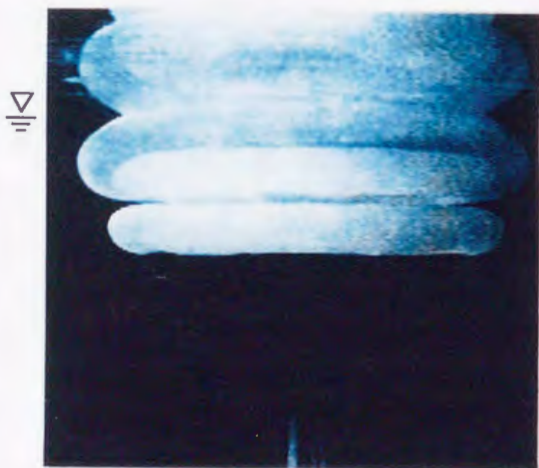
(a)  $t = 0.00 \text{ sec}$



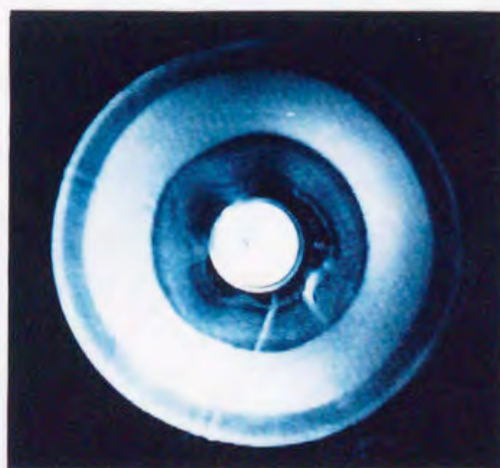
(b)  $t = 0.17 \text{ sec}$



(b)  $t = 0.17 \text{ sec}$



(c)  $t = 0.70 \text{ sec}$

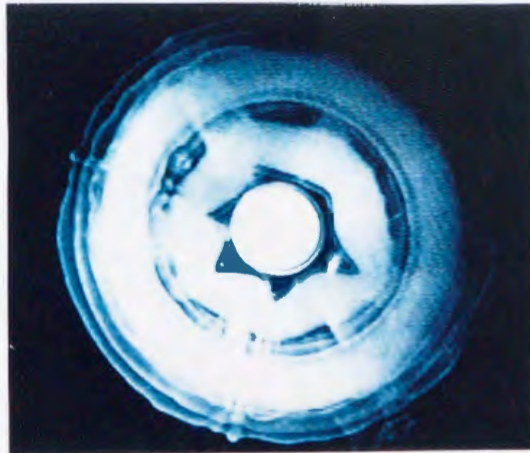


(c)  $t = 0.00 \text{ sec}$

写真-5.1 水表面に衝突する渦輪の崩壊過程 (水頭差 20mm)



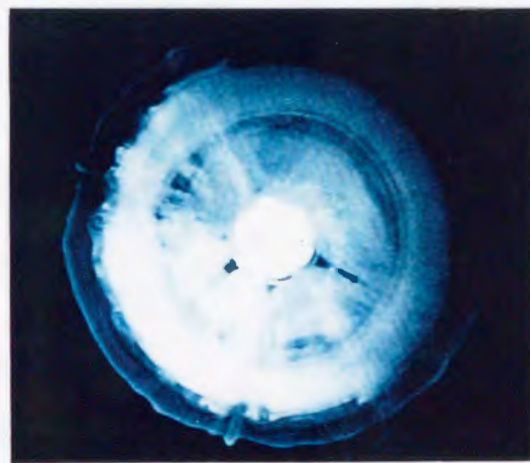
(d)  $t = 1.87$  sec



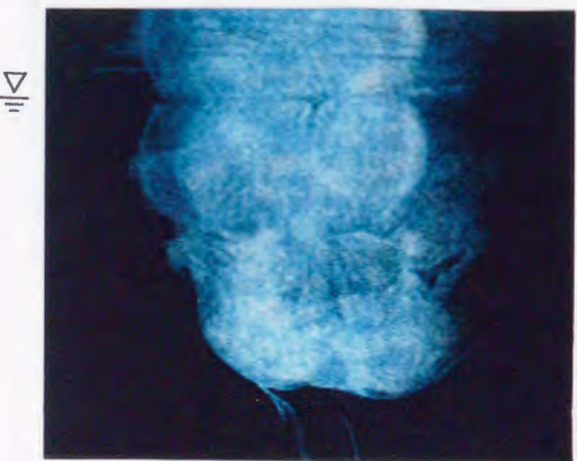
(d)  $t = 1.87$  sec



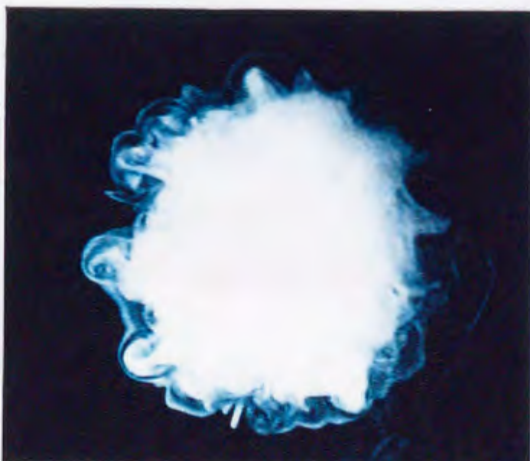
(e)  $t = 2.47$  sec



(e)  $t = 2.47$  sec



(f)  $t = 3.80$  sec



(f)  $t = 3.80$  sec

写真-5.1 水表面に衝突する渦輪の崩壊過程 (水頭差 20mm)





(a)  $t = 0.0 \text{ sec}$

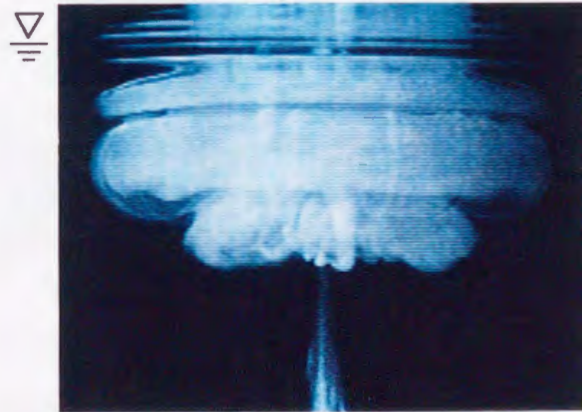


(b)  $t = 1.43 \text{ sec}$

写真-5.2 渦輪衝突による水表面変動(水頭差20mm)



(a)  $t = 0.0 \text{ sec}$



(b)  $t = 0.40 \text{ sec}$

写真-5.3 渦輪衝突による水表面変動(水頭差120mm)

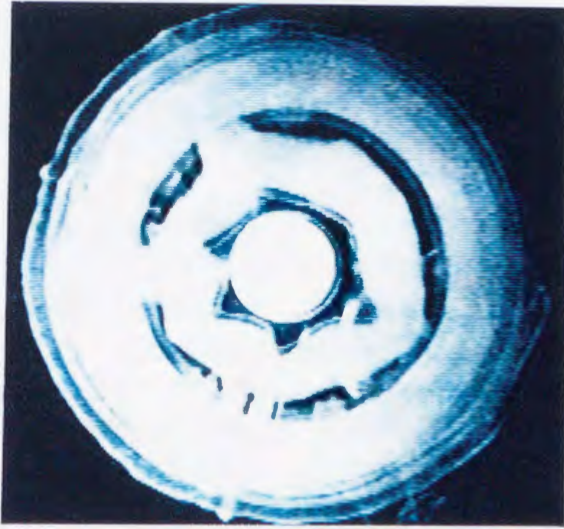


写真-5.4 2次渦輪の不安定形状(水頭差20mm)

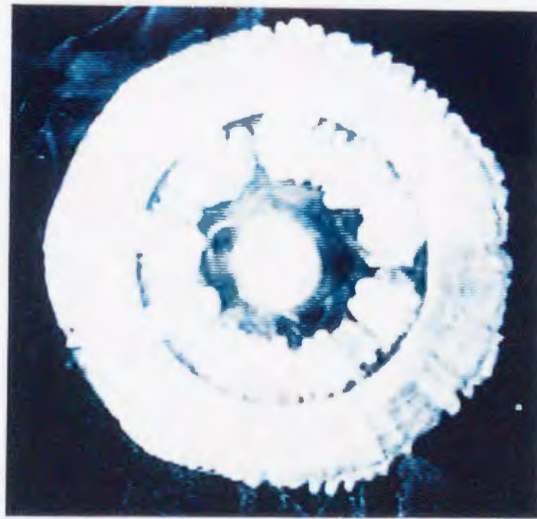


写真-5.5 2次渦輪の不安定形状(水頭差80mm)

## (2) EVA マイクロパーティクルによる表面水の連行の可視化

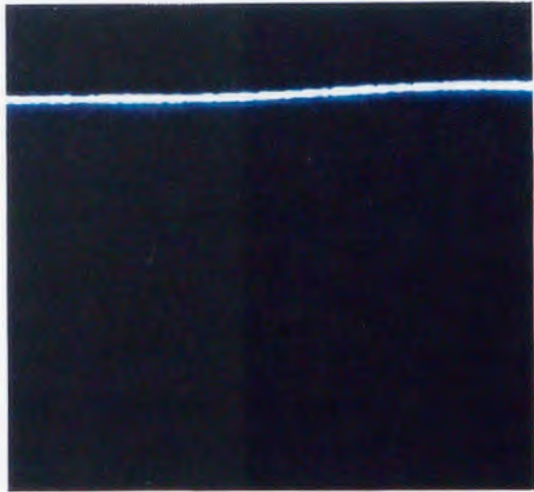
水の乱れによる気体の連行現象の解明の第1段階として、水表面極近傍にある水の内部への取り込み過程を可視化する。本実験では、水表面にエチレン酢ビコポリマー (EVA) の微細な粒子 (マイクロパーティクル, 第4章参照) を浮遊させる。粒径は  $75\ \mu\text{m}$  以下のものを用いた。その粒子を静かに水槽内に注入した後完全に水表面に分散させるため一晩静置する。EVA の比重は 0.95 であり、粒径は  $75\ \mu\text{m}$  以下であるから、実際には水表面の数  $10\ \mu\text{m}$  の薄層中に各粒子の体積の大部分が没している。

粒子の分散した水表面に渦輪を衝突させたときの水表面の状況を観察した。ズームアップレンズを装着した CCD ビデオカメラにより、渦輪の進行軸を通るレーザー光シートで切断した  $5.5 \times 4.0\ \text{cm}^2$  の領域を撮影した。実験は、水表面に渦輪を衝突させ、浮遊している粒子だけを散乱光により可視化する方法と、蛍光染料により色付けした渦輪と水表面に浮遊している粒子を同時に可視化する方法で行われた。水頭差は 20, 40, 80mm の3ケースとした。

写真-5.6 に水頭差 80 mm の場合に渦輪の衝突により水中に連行される粒子の一連の挙動を示す。粒子と渦輪の挙動を対応付けるため、写真-5.7 に同じ条件で、ほぼ同じ状態の渦輪と粒子の挙動を同時に撮影した一連の写真を示す。いずれの水頭差に対しても Cerra and Smith によりまとめられた観察結果が確認された。水頭差 20 mm では全く表面水は連行されず、表面の持ち上がりも観察されない。40 mm ではごく少量の粒子が連行され、80 mm では急激に多くの粒子が連行された。

水頭差 80mm の場合の水表面の観察結果を詳細に述べる。写真-5.6a), 写真-5.7a) に示すように、渦輪が水表面に近づくと水面が持ち上がる。水表面に衝突した渦輪は直径を広げながら、元の渦輪と水表面との相互作用により元の渦輪の回転と反対方向の2次渦輪を形成し始める。このときまでは、粒子の連行は観察されない。一時、水表面の粒子像が画面から消えるが、その理由は不明である (写真-5.6b), 写真-5.7b))。写真-5.6c), 写真-5.7c) に示されているように2次渦輪が十分に形成された後、粒子は間欠的に連行され始める。間欠的に連行された粒子は一塊の粒子として、渦輪の外郭に沿って2次渦輪の運動とともに元の渦輪の中に巻き込まれる (写真-5.6d), 写真-5.7d) 中の白く写っている塊)。2次渦輪を元の渦輪の中に巻き込んだ後、ある時点で水中に連行される粒子数は飛躍的に増える (写真-5.6e), 写真-5.7e) で花火のように一斉に入っている)。連行される場所は渦輪の外郭の端部のみである。その後、組織だった渦輪が無秩序な乱れに変わる。水中に連行された多数の粒子が、ほぼ一様に、無秩序な乱れの範囲に分布する (写真-5.6f), 写真-5.7f))。

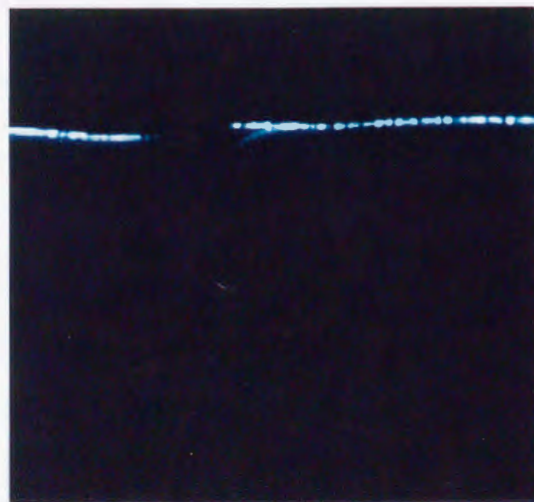
写真-5.8 には、乱れが治まった後の水表面の写真を示している。渦輪の当たったところは粒子が消え、その中心部には粒子が残っていることがわかる。



(a)  $t = 0.00 \text{ sec}$

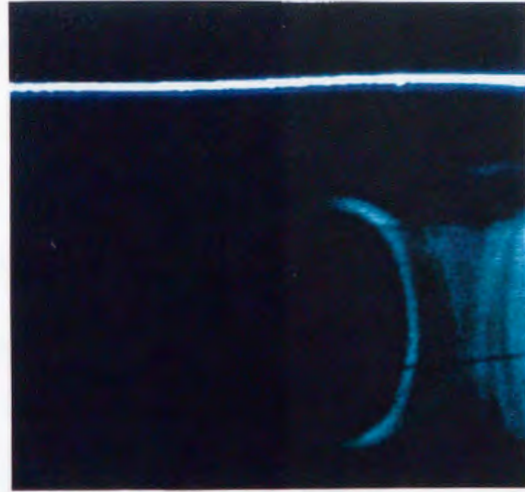


(b)  $t = 0.20 \text{ sec}$

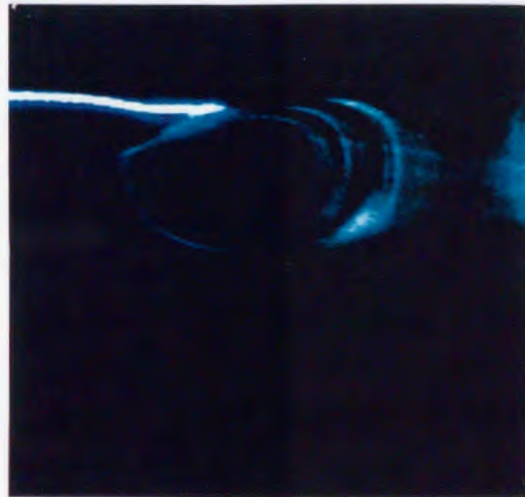


(c)  $t = 0.27 \text{ sec}$

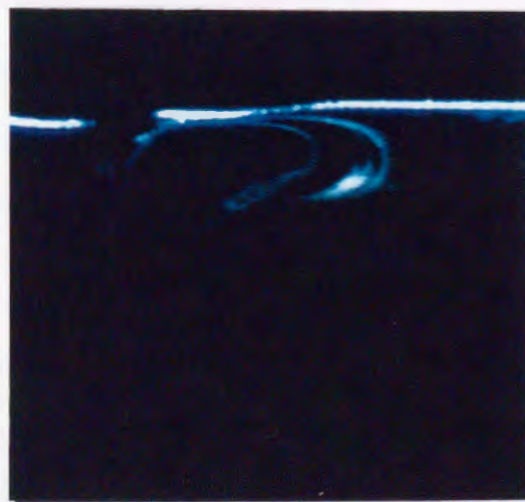
写真-5.6 渦輪衝突による水表面薄層の連行過程の可視化(水頭差 80mm, マイクロパーティクルのみ)



(a)  $t = 0.00 \text{ sec}$

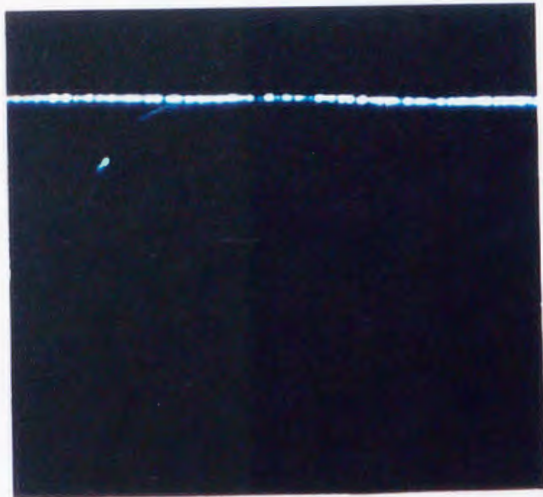


(b)  $t = 0.20 \text{ sec}$

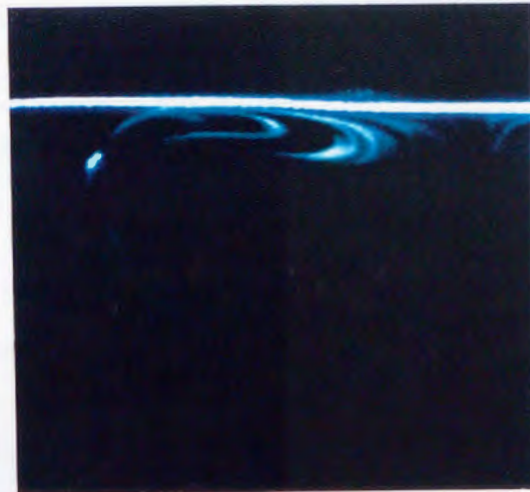


(c)  $t = 0.27 \text{ sec}$

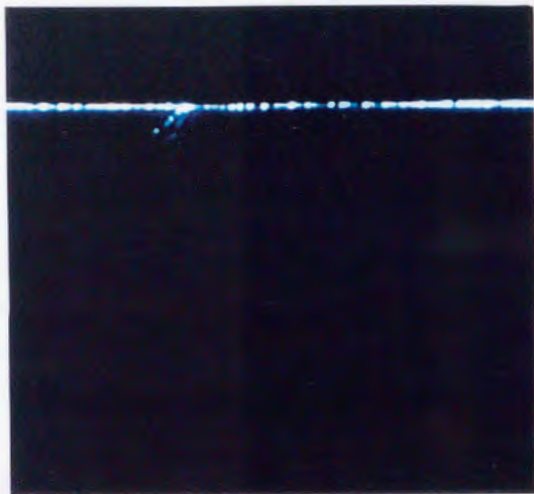
写真-5.7 渦輪衝突による水表面薄層の連行過程の可視化(水頭差 80mm, マイクロパーティクル+蛍光染料)



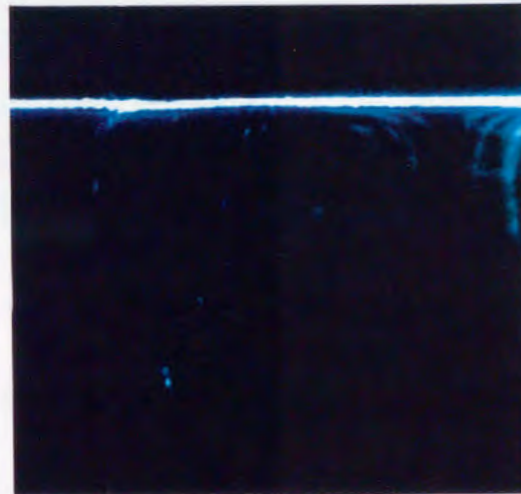
(d)  $t = 0.33 \text{ sec}$



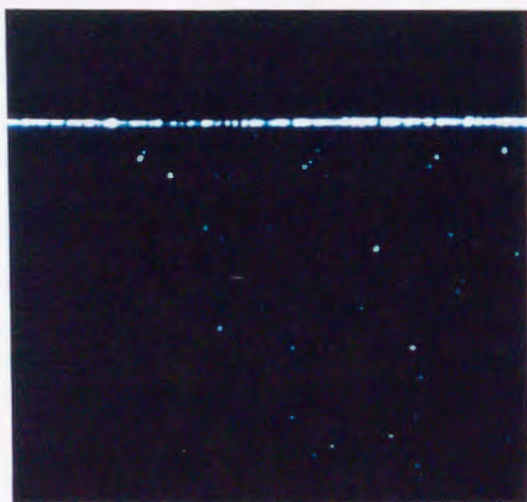
(d)  $t = 0.33 \text{ sec}$



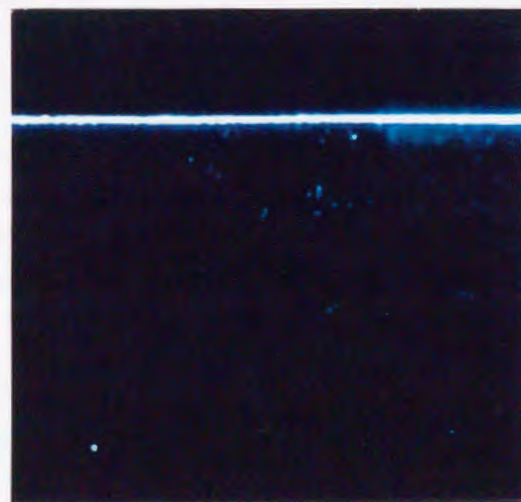
(e)  $t = 1.07 \text{ sec}$



(e)  $t = 1.07 \text{ sec}$



(f)  $t = 2.27 \text{ sec}$



(f)  $t = 2.27 \text{ sec}$

写真-5.6 渦輪衝突による水表面薄層の連行過程の可視化(水頭差 80mm, マイクロパーティクルのみ)

写真-5.7 渦輪衝突による水表面薄層の連行過程の可視化(水頭差 80mm, マイクロパーティクル+蛍光染料)

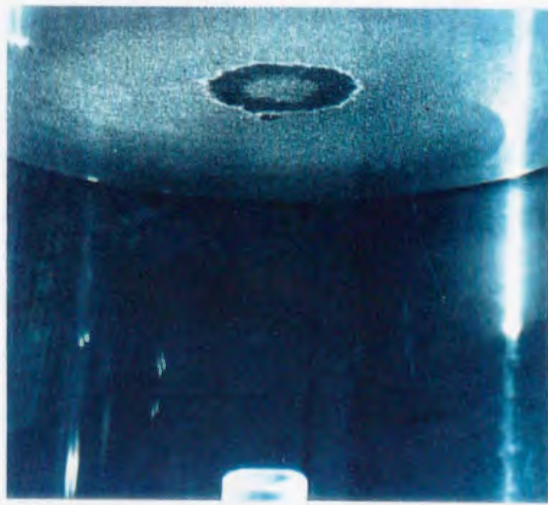


写真-5.8 乱れが治まった後の水表面

### (3) フルオレセインによる炭酸ガス濃度場の可視化

フルオレセイン水溶液のpH依存性を利用して、水表面に接する炭酸ガスが輸送されて生じた水表面直下の濃度境界層が、水表面に衝突した単一の渦輪によって、水中に取り込まれる過程を可視化した。

pH依存性を調べた結果を図-5.5に示す。フルオレセイン水溶液の濃度は $2.5 \times 10^{-6} \text{ mol/l}$ である。蛍光の励起光はアルゴンイオンレーザーをシート光にして用いた。520  $\mu\text{m}$ 以下の光波長をカットする光学フィルターを通して撮影し、励起光をカットした。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それぞれの光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しないが、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以下の青い光をカットしたためである。

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-5.8に示す。渦輪の外縁に沿って水表面の炭酸ガス濃度境界層が水中に取り込まれているのがわかる。

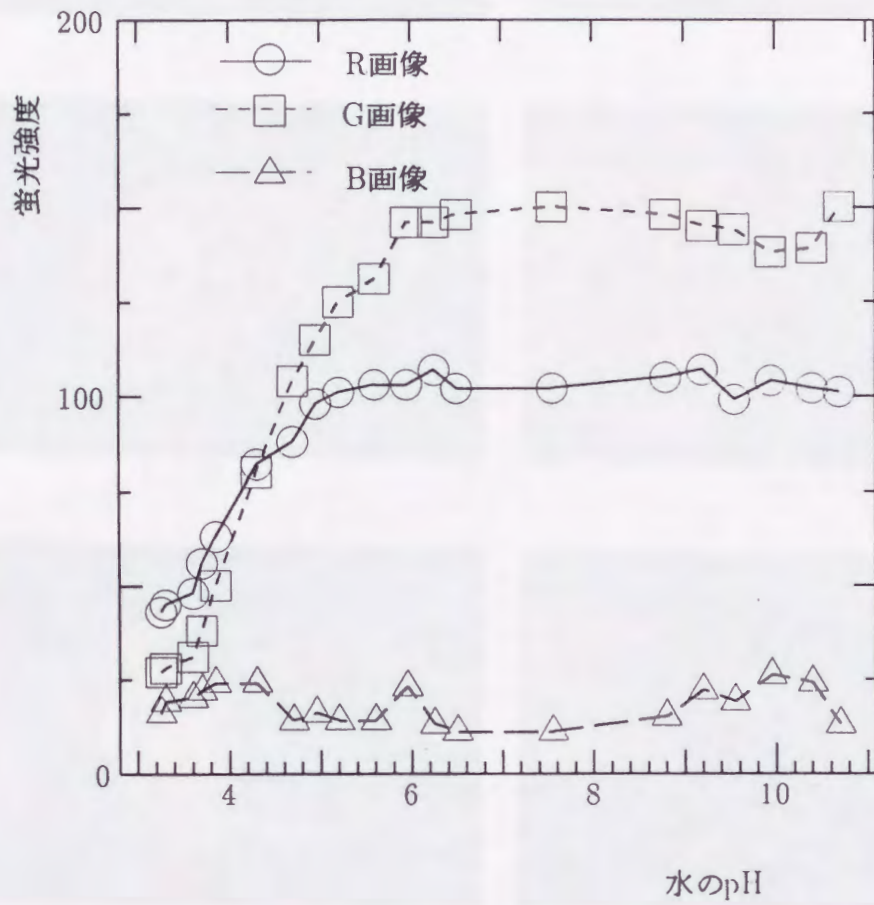


図-5.4 フルオレセイン水溶液のpHと蛍光強度の関係

注) 蛍光強度(縦軸)はビデオ信号を8bit(256階調)でAD変換した値(0~255)である。



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



t=2.66 sec

a. 渦輪

b. 水表面の炭酸ガス濃度境界層の取り込み

写真-5.9 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



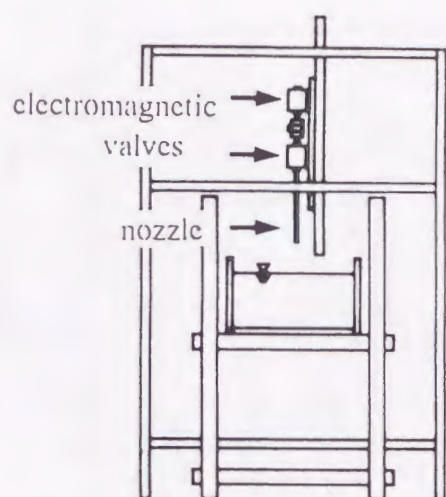


図-5.5 水滴発生装置の概略図

#### 5.4. 水表面での水滴の衝突および気泡の崩壊過程の可視化

##### (1) 水表面に衝突する水滴

水滴発生装置は管内に水をとどめ、2つの電磁弁の開閉時間差を利用して、管内の水を自重で滴下させる構造とした。実験装置の概略図を図-5.5に示す。市販されているメスピペットを加工し、ノズルを作成することにより滴下した水の量が分かるようにした。ノズル内に一定量の水をとどめることができるように三方コックを2つの電磁弁の間に接続した。撮影には高速ビデオカメラを用いて撮影条件に合ったレンズを装着して撮影した。作製した水滴発生装置によりできる水滴の径は高速ビデオカメラで撮影した画像およびメスピペットの目盛りを用いて計測した。水滴の直径の平均値は4.6mmであり、繰り返し発生させた場合の誤差は約1%であった。

液滴を構成している水の水表面衝突による運動を可視化するため、白色のポスターカラーを水滴の水に希釈した。よって、液滴の粘性、表面張力等は真水に比べて変化している。水滴の比重は水槽の水より約0.002大きい。水滴の温度および水槽の水温は15℃であった。実験では、直径約4.6mmの水滴を、1~45cmの高さから自由落下させ、水表面付近の水運動を観察した。

水滴の落下距離と水面衝突速度の関係を図-5.6に示す。水滴の水表面衝突速度は高速ビデオカメラを用い、4,500ppsの撮影速度で水面真上の0.5~1.0cmの間隔を通過する水滴を撮影し、通過時間を計測することにより求めた。図中の○印は測定値、実線は空気との摩擦抵抗を無視した理論値 $\sqrt{2gh}$ である。今回得られた実験値はすべて理論値より小さくなっている。

水滴の落下距離と水滴の水表面衝突時に形成されるくぼみの大きさの関係を、高速ビデオカメラで撮影した画像から計測した。くぼみの大きさの代表スケールとして最大くぼみ深さとそのときの幅の2つの量について調べた。計測は同じ条件で3回行い、その平均値を用いた。実験結果を図-5.7に示す。同図をよく観察すると落下距離に関して0~12cm、12~30cm、30cm以上の3つの部分に分けられる。これはそれぞれの範囲に対して生起する現象が異なっていることを示唆している。くぼみの深さは落下距離が0~12cmの範囲で増加すると振動しながら急勾配で増加する。また、落下距離12~30cmでは2次曲線的に増加しており、30cm以上では直線的に増加している。くぼみの幅に着目すると、0~5cm、5cm以上の2つに大きく分けられ、くぼみの直径は0~5cmの間で急激に増加し、それ以上では緩やかに増加していく傾向が認められる。

高速ビデオで撮影された落下距離45cmのときの画像の例を写真-5.10に示す。時刻 $t$ は水滴が水表面に衝突した時刻を0としている。水表面に衝突した水滴はくぼみを生じさせ、そのくぼみは半球状に広

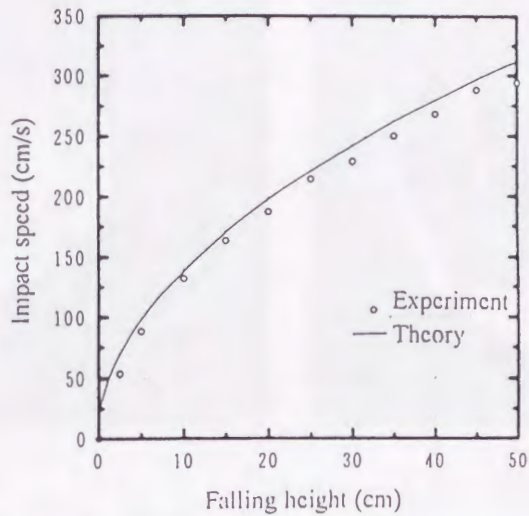


図-5.6 水滴の落下距離と水表面衝突速度の関係

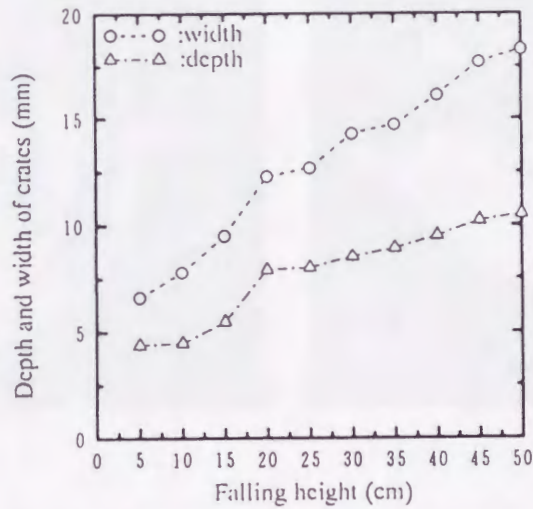


図-5.7 水滴の落下距離と水面のくぼみの大きさの関係

がる。白いポスターカラーで着色されたもとの水滴がくぼみの底部に広がり、何らかの不安定要因により、くぼみに縦縞が発達する。くぼみの上縁から底に向かって表面張力波と見られる円周方向の波動が底に向かって伝搬していく。同時に底が盛り上がり water column を形成する。底部に複数の突起が生じ、これが水中に尾を引きながらとけ込む。また、底が盛り上がる時平になり、側面と底との交線が角ばり、底に向かって伝搬していく波動との相互作用により、そこからも水滴を構成していた水が巻き込まれる。

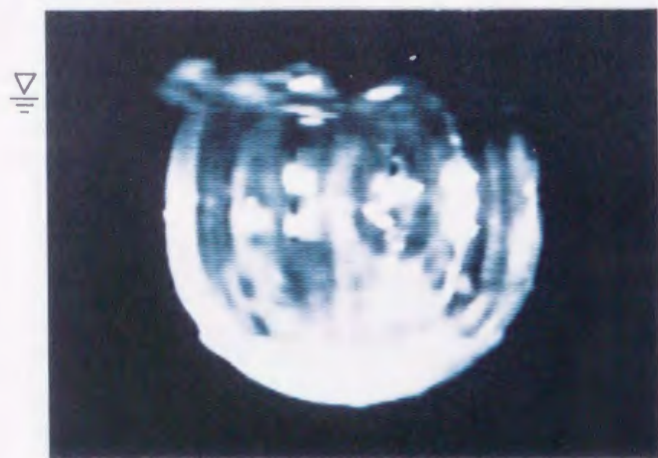
落下距離15cmのときの画像の例を写真-5.11に示す。水滴が水表面に衝突すると広い半楕円状のくぼみが水平方向全体に広がる。1つの波動が水表面からくぼみの底部に向かって伝搬し、くぼみは下方に伸び始める。くぼみの底部には水滴を構成していた水が溜まり、くぼみの最下部に下向きの突起物が生じる。くぼみがすり鉢状に変形し、くぼみの底は小さくなり、突起物はくぼみの底部が切り離され、下方に押し出される。切り離された水滴は渦輪状を呈しながら水中を落下する。切り離された水滴を除いては water column の一部として水表面上に突出する。



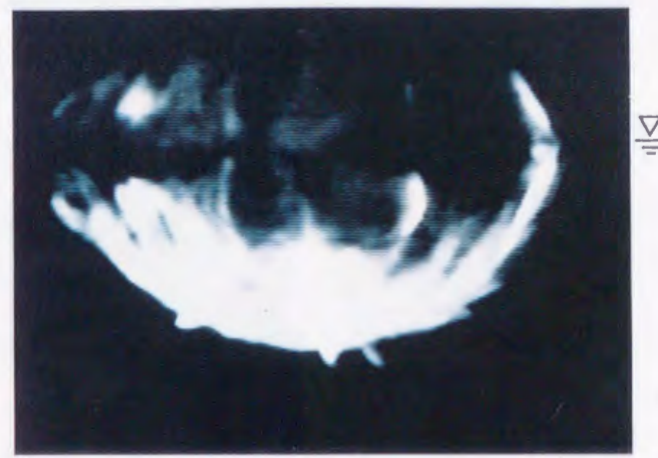
a.  $t=0.004$  sec



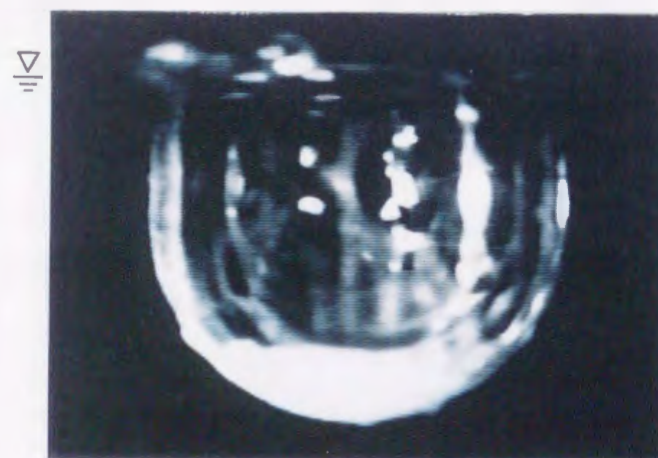
d.  $t=0.024$  sec



b.  $t=0.011$  sec



e.  $t=0.034$  sec



c.  $t=0.017$  sec

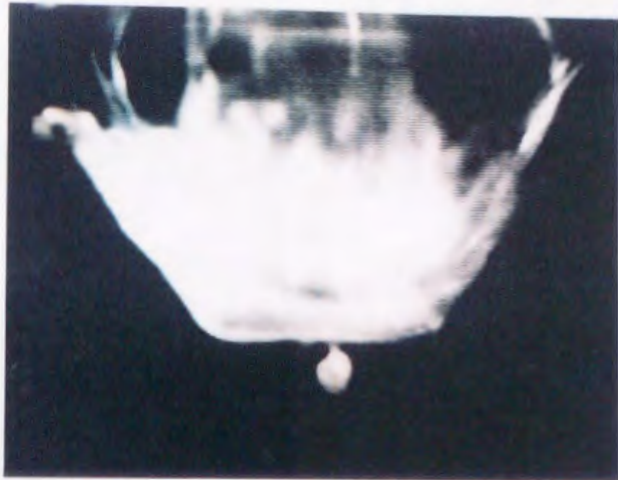


f.  $t=0.040$  sec

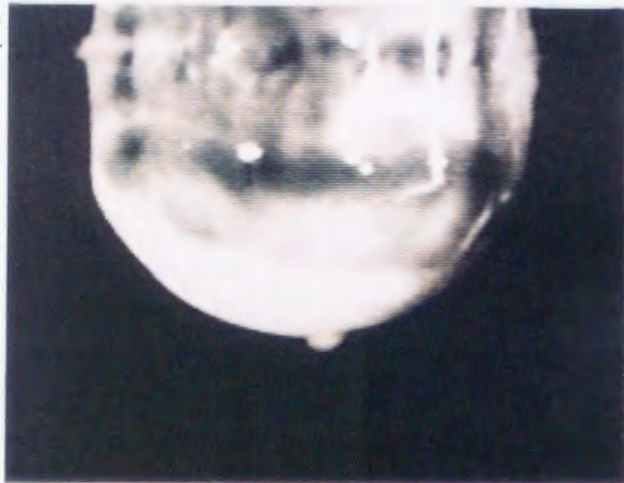
写真-5.10 液滴の水表面衝突(落下距離45cm)



a.  $t=0.004$  sec



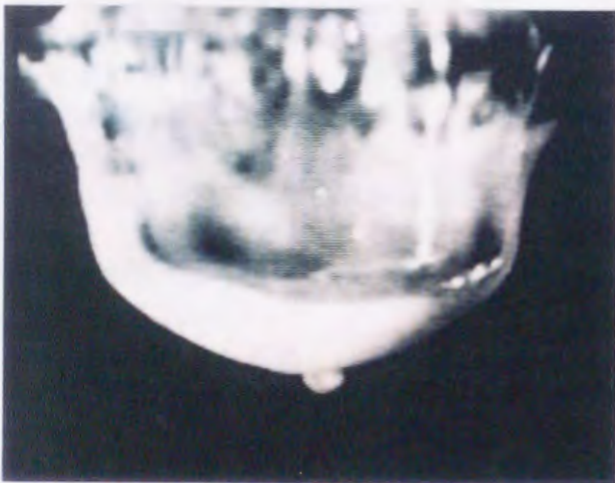
d.  $t=0.024$  sec



b.  $t=0.010$  sec



e.  $t=0.031$  sec



c.  $t=0.017$  sec



f.  $t=0.037$  sec



写真-5.11 液滴の水表面衝突(落下距離15cm)

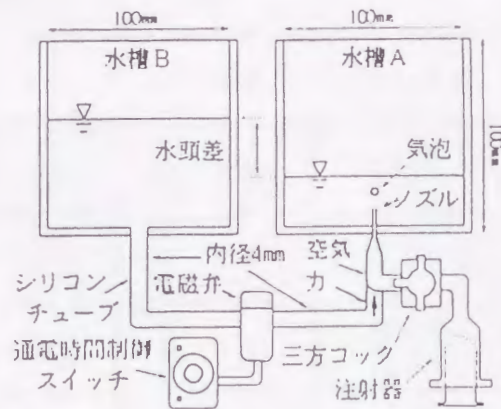


図-5.8 気泡発生装置の概略図

## (2) 水表面で崩壊する気泡

装置を製作するにあたり、直径が2~3mmの範囲にある気泡を単一で発生させることができるように設計した。基本的には、ノズル内の一定量の空気に一定の力を与えることにより気泡を発生させる方法である。今回製作した気泡発生装置の概略図を図-5.8に示す。注射器から送られた空気をノズル下に溜め、水槽Aと水槽Bの水頭差を気泡放出の駆動源とする。電磁弁の開閉時間を調整することにより単一気泡を発生させる。水槽A、Bの寸法は100mm×100mm×100mm、シリコンチューブは外径6mm、内径4mmである。三方コックは注射器に空気を溜めやすくするためである。ノズル内に溜める空気量を一定にするために注射器を利用した。ノズル位置は水槽の中心で、内径を0.4mmとした。弁は単一の気泡を発生させるためには非常に微妙な時間で開閉させる必要があるので電磁弁を利用した。電磁弁は通電状態で弁が開く構造で、最小開閉時間は0.3secである。電磁弁の開閉時間を制御するため通電時間を0.01sec単位まで調整できるスイッチを利用した。装置はノズル内に空気を溜めてから連続して10数個まで発生させることができる。

完成した装置で気泡を撮影し、画面上で体積の測定を行った。今回は1,3,5,7,9個目の気泡にしほり、それぞれ10回ずつ撮影し体積を計測した。計測結果を表-5.1に示す。気泡の大きさは1個目9.51mm<sup>3</sup>から9個目7.88mm<sup>3</sup>へと順次減少し、後に発生する方が小さくなるが、長さ精度は1個目1.15%から9個目0.55%と上がる。

気泡崩壊現象を高速ビデオカメラにより撮影した。その一例を写真-5.12、写真-5.13に示す。写真-5.12の時刻は気泡が割れる瞬間を0とした。写真-5.13の気泡が割れる瞬間は正確に観察できなかったので(a)を0として以下時刻を書いた。写真-5.12は水面より少しだけ高い位置から水平下向きに水表面に焦点を合わせ、写真-5.13は水面の横から水中に焦点を合わせて撮影したものである。水中から表面に衝突した気泡はすぐには崩壊せず数回バウンドし(写真-5.13a)、静止した後崩壊する。崩壊時における気泡の水膜の詳細な破壊現象は高速ビデオカメラでも撮影が困難なほど速い(写真-5.13b))。崩壊後、水表面はすりばち状になり中央部が垂直方向に盛り上がる(写真-5.12b))。中央の盛り上がりの先

表-5.1 気泡発生装置の精度

	体積平均 $\mu_v$ ( $\text{mm}^3$ )	標準偏差 $\sigma_v$ ( $\text{mm}^3$ )	体積精度 $\epsilon$ (%)	長さ精度 $\epsilon/3$ (%)
1 個目	9.51	0.33	3.46	1.15
3 個目	8.79	0.22	2.43	0.81
5 個目	8.72	0.25	2.91	0.97
7 個目	8.28	0.18	2.14	0.71
9 個目	7.88	0.13	1.65	0.55

端から小さな水滴がジェットのように飛び出し(写真-5.12c), 小さな水滴を追うように第2の水滴が盛り上がりの先端に発生する(写真-5.12d)。中央の盛り上がりはなくなり波紋が同心円状に広がる(写真-5.12e)。



a.  $t=0.0$  sec



b.  $t=0.00241$  sec



c.  $t=0.00422$  sec

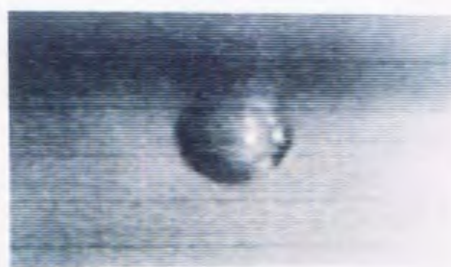


c.  $t=0.00689$  sec

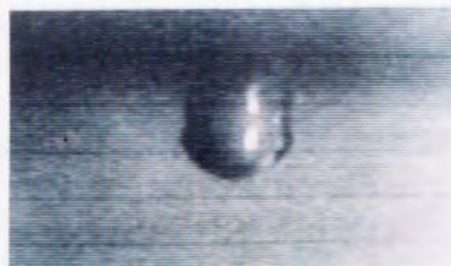


c.  $t=0.01244$  sec

写真-5.12 水表面での気泡の崩壊  
(水面上方から撮影)



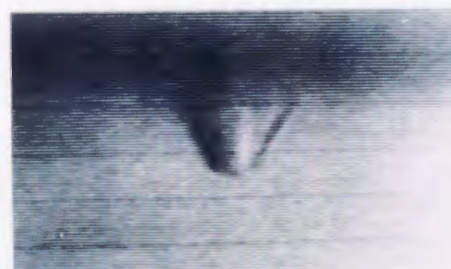
a.  $t=0.0$  sec



b.  $t=0.00044$  sec



c.  $t=0.00088$  sec



c.  $t=0.00132$  sec



c.  $t=0.00220$  sec

図 - 5.13 水表面での気泡の崩壊  
(横から撮影)

## 5.5. まとめ

本章では、本研究で開発された可視化計測法を用いて、水表面での気体輸送に関する現象の可視化実験を行った。水表面の乱れのモデルとして、単一の渦輪の水表面衝突、単一の水滴の水表面衝突、および単一の気泡の水表面での崩壊を選んだ。

以下に、単一渦輪の水表面への衝突現象の可視化実験によって得られた結果を示す。

- ①表面水は、ある限界値以上の強度をもつ渦(多分水表面を变形させうる渦)によってのみ連行される。
- ②渦輪が水表面に衝突した直後は、表面水は水中に連行されない。
- ③2次渦輪の小さい鋭い渦の動きで生ずる大きな局所的せん断力により間欠的に表面水が巻き込まれる。
- ④2次渦輪を元の渦輪の中に巻き込んだ後、水中に連行される粒子数は飛躍的に増える。
- ⑤炭酸ガスの水表面からの輸送過程の直接可視化がフルオレセイン水溶液により可能となることがわかった。

単一の水滴が水表面に衝突した場合、および単一の気泡が水表面で破裂した場合の可視化実験から得られた結果を以下に示す。

- ⑥直径4.6mmの水滴を発生させる装置を開発した。繰り返し発生させた場合の誤差は長さ精度にして約1%となった。
- ⑦落下距離とくぼみの大きさの関係は、落下距離で0~12cm, 12~30cm, 30cm以上の3つの部分に分けられる。これはそれぞれの範囲に対して生起する現象が異なっていることを示唆している。
- ⑧落下距離が45cmと15cmの場合の水滴の水表面衝突現象の詳細な観察を行った。
- ⑨直径2.1mmの単一の気泡を発生させる装置を開発した。再現性は長さ誤差にして約1%程度であった。
- ⑩直径2.1mmの気泡が水表面で破裂する現象の詳細な観察を行った。
- ⑪気泡水膜の崩壊過程は、今回開発した高速ビデオカメラでは速度不足のため撮影できなかった。水膜の観察にはより高速なビデオカメラの開発が必要である。

本実験における観察はまだ不十分であるが、少なくとも本研究に示した手法により水表面極近傍での気体輸送過程を可視化できることがわかった。今回の実験では詳細な機構を明らかにするまでには至っておらず、今後さらに検討していく必要がある。

## 参考文献

- 1) 光易恒：海洋波の物理，岩波書店，1995。
- 2) Mitsuyasu, H.: A note on the momentum transfer from wind to waves, *J. Geophys. Res.*, 90 C2, pp.3343 - 3345, 1985.
- 3) Mitsuyasu, H. and Honda, T.: Wind-induced growth of water waves, *J. Fluid Mech.*, 85, pp. 703 - 730, 1982.
- 4) 鳥羽良明 編：大気・海洋の相互作用，東京大学出版会，1996。
- 5) Toba, Y.: Local balance in the air-sea boundary processes I, On the growth process of wind waves, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 28, pp.109 - 120, 1972.
- 6) Toba, Y.: Local balance in the air-sea boundary processes III, On the spectrum of wind waves, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 29, pp. 209 - 220, 1973.
- 7) Toba, Y.: Drop production by bursting of air bubbles on the sea surface(II). Theoretical study on the floating bubbles, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 15, pp. 121 - 130, 1959.
- 8) Toba, Y.: On the giant sea-salt particles in the atmosphere. I, General features of the distribution, *Tellus*, 17, pp. 365 - 382, 1965.
- 9) Jähne, B. and Riemer, K. S.: Two-dimensional wave number spectra of small-scale water surface waves, *J. Geophys. Res.*, 95, pp.11531 - 11546, 1990.



- 10) 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.
- 11) 小森悟, 永翁龍一, 小林寛樹, 村上泰弘: シアーを持つ波動気液界面を通しての物質移動機構, 第23回乱流シンポジウム講演論文集, pp. 312 - 316, 1991.
- 12) Wilhelm, S.C. and Gulliver, J.S.: *Air-Water Mass Transfer*, ASCE, 1991.
- 13) Asher, W.E. and Pankow, J.F.: The effect of surface films on concentration fluctuations close to a gas/liquid interface, *Air-Water Mass Transfer*, pp.68 - 80, 1991.
- 14) Jirka, G.H. and Ho, A.H-W.: Measurements of gas concentration fluctuation at water surface, *J. Hydraulic Eng.*, 116, pp. 835 - 847, 1990.
- 15) Lee, Y.H. and Luk, S.: Characterization boundary layer in oxygen absorption, *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 21, pp.428 - 434, 1982.
- 16) Wolff, L.M., Liu, Z-C. and Hanratty, T.J.: A fluorescence technique to measure concentration gradients near an interface, *Air-Water Mass Transfer*, pp. 210 - 218, 1991.
- 17) Jähne, B.: From mean fluxes to a detailed experimental investigation of the gas transfer process, *Air Water Mass Transfer*, ASCE, pp.244~256, 1991.
- 18) Chu, C.R. and Jirka, G.H.: Turbulent velocity and gas concentration measurements in the near-surface layer, *Air-Water Mass Transfer*, pp. 160 - 172, 1991.
- 19) Lewis, W. K. and Whitman, W. G.: Principles of gas absorption, *Ind. Eng. Chem.*, Vol.16, pp.1215 ~1220, 1924.
- 20) Cerra Jr., A. W. and Smith, C. R.: Experimental observations of vortex ring interaction with the fluid adjacent to a surface, Rep. FM-4, Lehigh University, 1983.
- 21) 江藤剛治, 竹原幸生, 岸田義広: 水表面に衝突する液滴の可視化, *可視化情報*, Vol12, Suppl. No. 1, pp.215~218, 1992.
- 22) 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*, No.461/II-22, pp.1 ~10, 1993.
- 23) 江藤剛治, 竹原幸生: 高速ビデオカメラの現状と水工学への適用, *土木学会論文集*, No.533/II-34, pp.9~20, 1996.

## 第6章 結論

### 6.1. 本研究の成果

本論文では高精度可視化計測法の開発について述べてきた。本章では、本研究で得られた結果を要約する。また、今後の可視化計測法の動向を展望し、結論とする。

第1章では、高精度可視化計測法の開発の必要性、重要性を示し、本論文の構成を示した。

第2章では、水流の可視化計測を目的として、4,500 pps の高速ビデオカメラを開発し、流体運動の可視化だけでなく様々な高速現象を撮影することを試みた。そこで得られた経験を土木工学への適用例を中心としてとりまとめた。問題点も明らかとなり、改良の方向性を示した。また、既存および開発中の高速撮影機器を簡単に紹介し、今回開発した高速ビデオカメラの位置づけを明らかにした。さらに、より高速の連続撮影装置として自動トリガー付き画素内メモリー型撮影装置を提案した。

第3章では、これまでに提案されている画像解析流速測定法(IV)の分類を行い、それらの長所、短所を明らかにした。また、計測における誤対応の検出法とその修正法に関する既往の研究を取りまとめて紹介した。カルマンフィルターと $\chi^2$ 検定により画像中の多数の粒子を自動的に追跡できるPTV新アルゴリズムを提案した。本アルゴリズムは従来より提案されているアルゴリズムと違って、確率、統計学的基礎に基づいており、同一粒子の対応付けに経験的な判断基準を用いず、客観的に判断できるのが特徴である。また、2次元シート光照明で問題となる粒子の出入りに対して、ドゥローネ三角形網を用いた粒子情報の推定法を提案した。開発されたPTVアルゴリズムをさらに3次元計測へ拡張するために、まず画像計測による3次元位置計測法に関する既往の研究を取りまとめて表に示し、残された問題点を明らかにした。そして空気、透明平面壁、水の屈折率の違いを考慮した水中粒子3次元位置計測法を開発した。ビデオ画像から位置計測を行う場合、カメラ内部定数に縦横比を加えることを提案した。また、複数のビデオカメラで得られた画像間での同一粒子の対応付けに、粒子位置だけでなく粒子の大きさや輝度等の情報も含めて $\chi^2$ 値を評価規準とすることも提案した。2次元場計測の適用例として、熱対流乱流場の計測を行った。得られた結果はAdrianらの結果とよい一致を示した。3次元場への適用例として回転棒上のマーカーの追跡を行った。

第4章では、まず水と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。水とトレーサーの比重整合法として、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。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。周囲水の温度変動に対するマイクロカプセルの追従性を計算により明らかにし、直径が400 $\mu\text{m}$ 以下のものでは、10Hz程度の温度変動があっても追従できることを示した。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。その他の比重整合法として発泡スチロールの加熱による方法について、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た。また、水理構造物周りの可視化計測を目的とした、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。文献調査ならびに実験を行い、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水溶液を用いざるを得ないことを示した。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%の水溶液を用いるのがよいと思われる。振動流中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。また、実際の計測に際して生じた問題点、注意事項等を整理して示した。温度場の可視化計測法に関する既往の研究を取りまとめて示し、可

視化計測における多波長計測の可能性を示した。

第5章では、本研究で開発された可視化計測法を水表面における気体輸送に関する実験に適用した例を示した。計測対象として、水中に生じた渦輪の水表面衝突、水表面に衝突する水滴および水表面で崩壊する気泡を選んだ。水中に生じた渦輪は水中の乱れのモデルであり、その渦輪が水表面に衝突する場合の水表面での気体輸送に関する可視化実験を行った。表面水は、ある限界値以上の強度をもつ渦によってのみ連行される。渦輪が水表面に衝突した直後には、表面水は水中に連行されず、2次渦輪の小さく鋭い動きで生ずる局所的な大きなせん断力により、間欠的に表面水が巻き込まれることを明らかにした。また溶存炭酸ガス濃度と流れ場の同時多波長計測法のために、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、一例として水表面の炭酸ガス濃度境界層が渦輪衝突により水中へ取り込まれる過程を可視化した。雨滴のモデルとして単一の水滴を水表面に衝突させた場合の水表面付近の可視化実験を高速ビデオカメラを用いて行った。直径約4.6mmの単一の水滴を精度よく発生させ、水表面に衝突させる装置を開発し、落下距離と水滴衝突後の水面の変形の関係を計測により明らかにした。水表面で破裂する気泡の一連の現象を可視化計測した。直径約2.1mmの単一の気泡を精度よく発生させる装置を開発し、気泡が水表面で破裂する現象を詳細に観察した。肉眼では観察することができない、water columnの発生を確認することができた。気泡膜の崩壊過程は今回開発した高速ビデオカメラでも速度が十分でなく、撮影できなかった。気泡膜の観察にはより高速なビデオカメラの開発が必要であることが明らかとなった。

本研究により、高精度可視化計測法の基礎部分となる主要な技術はほぼ開発され、これまでの可視化計測法に比べ、より高精度な計測が可能となった。今後、開発した個々の技術をシステムとして構築し、実用に幅広く耐え得るだけの装置にしていく必要がある。

## 6.2. 今後の課題

現時点での全般の可視化計測技術は、すぐに一般的な流れ場へ適用できる程の水準までには至っていない。さらに高精度の可視化計測法の開発が必要である。今後開発が必要とされる技術を以下に述べる。

### ①高解像度、高感度の高速ビデオカメラの開発

水流の可視化計測においては、今回開発された高速ビデオカメラにより多くの現象を観察することができる。しかし、解像力が $256 \times 256$ 画素と高くなく、通常のビデオカメラ(約 $500 \times 500$ 画素)の1/4程度でしかない。最近ではハイビジョンカメラ(約 $1500 \times 1000$ 画素)のビデオカメラによる可視化計測も始められている。また、感度に関しては、開発された高速ビデオカメラはMCP型IIを内蔵し高感度ではあるが、ダイナミックレンジが狭く、輝度の変化が大きい場合には対応できない。さらに高精度の計測を行うには、より高解像力、高感度の高速ビデオカメラを開発する必要がある。

### ②高機能トレーサー粒子の開発

実際の計測では、流れ場と温度や濃度場等の同時計測のニーズが生じる。これらに対応できるトレーサー粒子の開発が必要である。

### ③高精度粒子情報抽出法の開発

現在の画像処理では画素単位でしか粒子情報(粒子重心位置、粒子径、中心輝度等)を得ることができない。また、3次元計測では奥行き方向にもトレーサー粒子が分布するため、粒子同士が重なり合ったりピンボケの粒子画像が得られたりする。現在の画像処理アルゴリズムでは、これらの粒子画像から全ての粒子情報を抽出することは困難である。より高精度で粒子画像を抽出できるアルゴリズムを開発する必要がある。

### ④動的な認識を取り込んだ粒子追跡アルゴリズムの開発

現在の粒子追跡法では各時刻の静止画像から粒子情報を抽出し、その情報をもとに各画像間で同一粒子を同定し、粒子の移動を計測していく。人間が連続する静止画像をもとに判断する場合(コマ送り

でビデオを再生)と動画として判断する場合(通常のスPEEDで再生30pps)では、動画として判断する方が多くの粒子を追跡できる。このように、人間の動的な認識過程を粒子追跡アルゴリズムに取り込むことを検討する。

また、実際に計測してみると個々の実験に応じて種々の問題が生じてくる。今後、可視化計測技術を開発していく上で必要なことは、これらの問題点およびその対処法について技術の開発者とユーザーが密に情報交換し、それらの技術をユーザー全体で所有・蓄積していくことである。

## 謝 辞

本論文の作成に当たって、九州大学工学部建設都市工学科小松利光教授にはご多忙中にもかかわらず、貴重なお時間を割いていただき、懇切、丁寧にご指導いただきました。また、院生時代から色々な面でお世話をお掛けしました。ここに、深甚なる感謝の意を表します。

九州大学工学部機械エネルギー工学科井上雅弘教授、建設都市工学科神野健二教授、化学機械工学科小森悟教授には、本論文を取りまとめるにあたり、多くの貴重なご助言をいただきました。ここに、心より感謝の意を表します。また、九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻松永信博助教授には、本論文の作成ばかりでなく、院生時代より現在に至るまで公私にわたりご指導、ご鞭撻をいただきました。ここに、改めて感謝の意を表します。

本研究は近畿大学理工学部土木工学科江藤剛治教授のご指導のもとに行われた研究であります。平成元年近畿大学に着任して以来、公私にわたり暖かいご指導、ご鞭撻をいただきました。謹んで謝意を表します。

九州大学粟谷陽一名誉教授、九州工業大学工学部設計生産工学科浦勝教授、秋山壽一郎助教授には学生時代より終始暖かいご支援をいただきました。心から御礼申し上げます。

本研究は計測技術の開発に関する研究であり、数多くの方々のご協力を得て遂行することができました。ご協力をいただいた方々が多数にのぼるため、表に記して謝意を表します。また、近畿大学理工学部土木工学科の諸先生方には日頃から暖かいご支援をいただきました。記して感謝の意を表します。

九州工業大学工学部旧開発土木工学科水工学研究室、九州大学工学部旧水工土木学科応用水理学研究室、および近畿大学理工学部土木工学科水工学研究室内の諸先輩・同輩・後輩の方々には暖かい励ましをいただきました。厚く感謝の意を表します。

ご協力いただいた方々のご芳名表

◎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，青山邑里教授，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，（株）日立製作所，浜松ホトニクス（株）（個人名は割愛させていただきます）

◎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

薮丸谷政志教授（室蘭工業大学），出口一郎助教授（大阪大学）  
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

道奥康治助教授（神戸大学），村田滋助教授（京都工芸繊維大学）  
小松信雄助教授（静岡理工科大学），島崎正則氏（元神戸大学院生，現三菱重工（株））

◎トレーサーの比重整合に関して、ご指導、ご協力頂いた方々

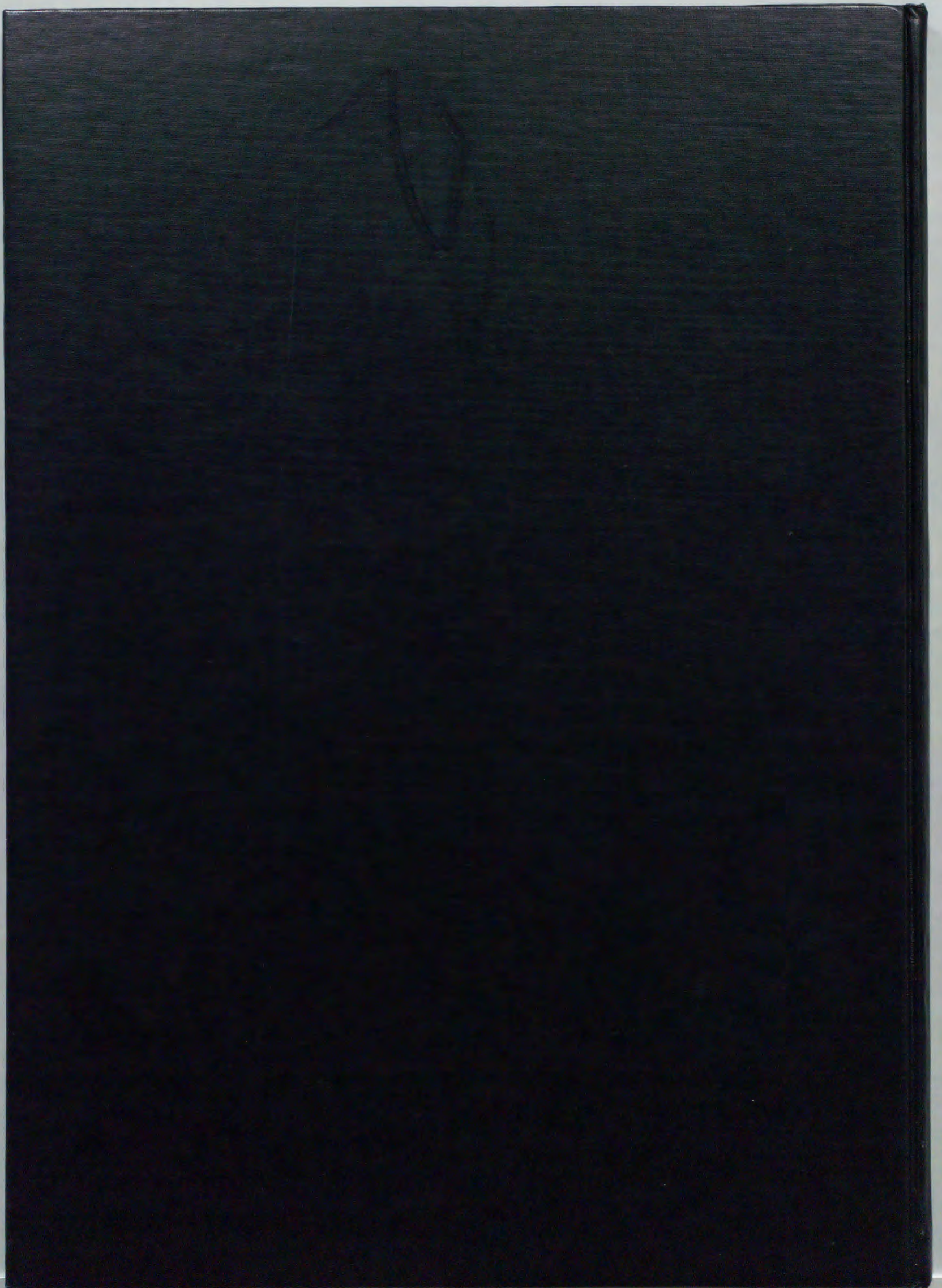
久保宇市教授，椿原啓教授（以上，近畿大学），中西祐啓氏（元近畿大学助手，現（株）大本組）  
以下，元近畿大学学生，鳥居覚氏（建設省），清本英治氏（日本コンテック（株））

◎透明体の屈折率整合に関して、ご指導、ご協力頂いた方々

横山雄一氏（HOYA（株）），井田康夫助教授（大阪工業大学）  
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，通産省大阪工業技術研究所）

◎溶存炭酸ガスの可視化に関して、ご協力頂いた方々

細井由彦教授（鳥取大学），角野昇八助教授（大阪市立大学），  
朝位孝二先生（通産省中国工業技術研究所），杉原裕司助手（九州大学），  
以下，元近畿大学学生，宮原和仁氏（東洋建設（株）），松原智樹氏（佐藤工業（株）），  
岸田義広氏（奈良県），中川勝広氏（京都大学院生），高橋祐二氏（阪神高速道路公団），  
岸田憲一氏（（株）日興設計事務所）



Inches 1 2 3 4 5 6 7 8  
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

# Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak



# Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

