

風波による炭酸ガスの取り込み過程の可視化

竹原 幸生*・加藤 明秀**・江藤 剛治***

1. はじめに

海域の環境を考える場合、水表面を通じた気体輸送現象は重要な問題の1つである。例えば、水表面からの酸素や炭酸ガス等の取り込みや水中物質の大気への気散等、水域周辺全体の環境を考える上で避けては通れない問題である。

海域において、水表面を通じた物質輸送を促進する物理的要因の1つに風応力の水表面作用がある。風応力が海面に作用することにより、風波や吹送流が生じ、ときには碎波、white-cap が引き起こされる。これらの現象は水表面を通じた気体輸送現象を促進する。水表面を通じた気体輸送は水面の状況に大きく影響されるため、その輸送量を正確に評価、予測するには、界面近傍の流れ場、気体濃度場を詳細に計測、もしくは数値予測をしなければならない。しかし、水表面は変形や移動があったり、界面活性物質膜等の薄層の存在のため、計測や数値予測は極端に困難となる場合が多い。

これまでの室内実験、もしくは現地観測では、比較的計測が簡単な気-水境界面から離れたバルクな気相側風速、およびバルクな水相側溶存気体濃度変化の関係から気体輸送速度の議論がなされてきた。しかし、実際の海域においては、界面活性物質膜、碎波、white-cap の発生等、様々な要因により海面が変化しており、精度よく気体輸送量を評価、予測するまでには至っていない。

最近、欧米を中心に、最新の技術を用いて、水表面極近傍の詳細な流れ場、気体濃度場を計測する技術が開発されている (Jähne ら, 1995, 1998)。また、それらを用いた室内実験、現地計測等も行われ始め、興味深い結果も得られ始めている。このような計測技術の開発が新たな研究の進展をもたらすものであり、この分野の研究開発が強く望まれている。

本研究の目的は、風応力の水面への作用によってどのように気体が水表面から取り込まれるか、可視化実験により明らかにすることである。まず、そのための計測基

礎技術開発の一環として、炭酸ガスの水中への溶入過程を直接可視化する方法の開発と、その可視化に必要な装置の製作を行った。また、開発された技術・装置を用いて実際に炭酸ガスを水表面上に吹かせ、炭酸ガスが水中へ取り込まれる現象を可視化することに成功した。

2. 蛍光染料を用いた炭酸ガスの溶入過程の可視化法

2.1 炭酸ガスの水への溶入過程の可視化法の開発

水溶性蛍光染料の蛍光強度は、水溶液の pH に依存する (Asher ら, 1989)。水溶液の pH が溶存炭酸ガス濃度に依存することを利用して、炭酸ガス溶入過程の可視化法を開発した。本研究では、水溶性の蛍光染料としてフルオレセインナトリウム (ウラニン) を用いた。

まず、蛍光強度と pH の関係を調べるため、静水槽を用いて、ウラニン水溶液の励起蛍光強度と pH の関係を実験により明らかにした。励起光としてウラニンの最大励起光吸収波長 (494 nm) に近い 488, 514 nm にピークを持つ 200 mw のアルゴンイオンレーザーを用いた。レーザー光をシリンドリカルレンズによりシート光に広げ、2 次元的に照射した。市販のカラー CCD ビデオカメラ (東芝 CCD カメラ IK-C 40 MF) を用いて蛍光を撮影し、コンピュータに 256 階調 (8 bit) デジタル画像として取り込んだ。励起された蛍光は、励起光よりも長波長側に現れるので、カメラレンズ前面に、540 nm より短い光波長をカットする光学フィルターを装着し、蛍光のみを撮影した。

予備実験により、ウラニン水溶液の蛍光強度が最も高くなる濃度は 2.5×10^{-6} mol/l のであることを確かめた。今回の一連の実験も、この濃度条件で行った。ウラニン水溶液の pH は 0.1 N の HCl と NaOH を用いて調整した。

2.2 ウラニン水溶液の pH 依存性

図-1 に、実験により得られた水溶液の pH と蛍光強度の関係を示す。図中の RGB はカラー画像の赤、緑、青画像の輝度値に対応する。

蛍光のみの画像を撮影するために、カメラレンズの前面に 540 nm より短い光波長の光をカットする光学フィ

* 正会員 博(工) 近畿大学講師 理工学部土木工学科
** 門真市水道局
*** 正会員 工 博 近畿大学教授 理工学部土木工学科

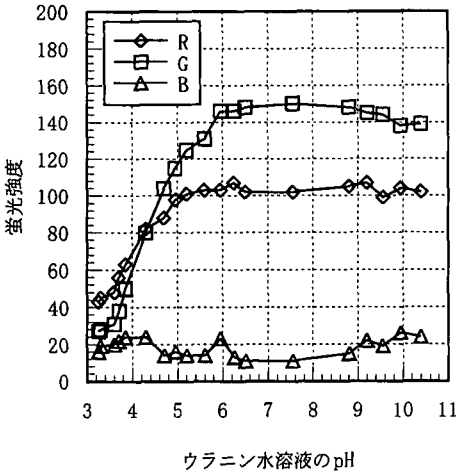


図-1 ウラン水溶液の pH と蛍光強度の関係

ルターを使用し、レーザー光をカットした。よって、全ての pH にわたって、青画像(B)の輝度値に変化がない。ウラン水溶液の pH が 4~6 の間で、pH が減少するに従って、緑、赤画像 (G, B) の輝度値にも大きな減少が観察された。pH が 7 以上では緑、赤画像 (G, B) にも輝度変化がない。一般に水道水の pH は 6.5~8.5 であり、炭酸ガスの溶入により pH は減少するので特別な調整をしなくても、そのまま炭酸ガスの溶入過程を可視化できる。

3. 風波による炭酸ガスの溶入過程可視化実験方法

3.1 実験装置

水面上に高濃度の炭酸ガスを含んだ風を吹かせ、風応力の水面への作用による炭酸ガスの水中への溶入を可視化する。そのため、気体循環式でかつ気密性の高い風洞水槽 (50 cm×50 cm×16 m) を製作した (図-2 参照)。実験に用いた気密性循環式風洞水槽の特性を以下に示す。

- ①送風装置と造波装置で様々な波を造ることができる。
送風装置と造波装置の両方を稼働させた場合、条件によっては、砕波が見られる。
- ②風下側末端の消波装置により反射波を消波する。
予備実験の結果、反射率は最大でも 5% 以下であった。
- ③送風循環パイプで気体を循環できる。
風速は送風装置のインバーターの周波数によって制御されており、送風装置の周波数を変化することで風量を変化させることができる。
- ④波および流れを三次元的に観察するために、測定部の水槽下部もアクリル板とし、四面透明とした(他の部分は 3 面透明)。

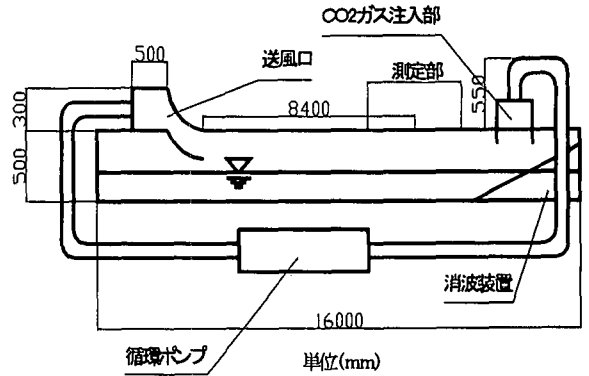


図-2 風洞水槽の概略図

- ⑤炭酸ガス濃度を制御するため、気密性を高めた。

水槽端部、気体循環パイプ接合部や送風装置等の水槽内の気体が漏れそうな箇所の気密性を補強した。

炭酸ガスは、液体炭酸ガスボンベから酸化した後、風洞水槽内に注入した。ガスボンベのバルブは手動式で、最大 25 l/min で炭酸ガスを注入することができる。比較的均一な濃度の炭酸ガスを水槽内に送り込むため、循環ポンプの手前から注入した。

水槽内の大気中炭酸ガス濃度を測定するため、炭酸ガス濃度計を水槽測定部上方に設置する。炭酸ガス濃度計は赤外線吸収式で、測定範囲は 0.00%~20.0% である。

3.2 気中炭酸ガス濃度の制御法

可視化実験を行うに当たって、風洞水槽内の気中炭酸ガス濃度を一定に保つ必要がある。実際には、水中への炭酸ガスの溶入があり、気中の炭酸ガス濃度は減少する。また、気密性を高めた水槽ではあるが、完全に気密性を保つことは難しく、風洞水槽外へ抜け出す分もある。水槽内の炭酸ガス濃度を一定にする手法として、炭酸ガスが減少した分だけ補充する方法を検討した。

まず、風洞水槽内における水中に取り込まれる炭酸ガス量と水槽から抜ける炭酸ガス量を計測した。実験は、水槽内に可視化実験と同じ条件で風を吹かした場合 (水深 32 cm) と、水槽内に水を全く入れない場合 (水深 0 cm) で行った。風速は 18.57 cm/s で可視化実験と同じ条件であった。炭酸ガスを、流量 20 l/min で 30 分間、水槽へ注入した。注入から 30 分を過ぎると炭酸ガスの注入を止めた。炭酸ガスを注入すると同時に、炭酸ガス濃度を計測し始めた。計測は 5 分毎に 210 分間行った。計測した空気中炭酸ガス濃度から炭酸ガスの体積に変換した。

得られた結果を図-3 に示す。これより、以下のことが可能である。

- ①水深 32 cm の場合の体積変化から、水中に溶ける量と水槽から抜ける量が求まる。

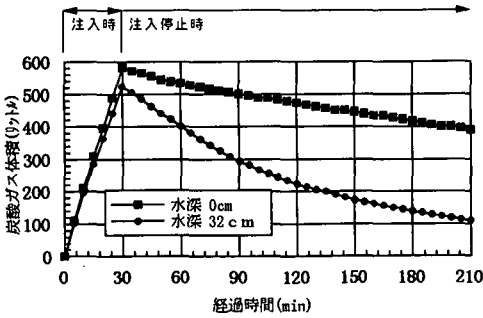


図-3 風洞水槽内の空气中炭酸ガス体積変化

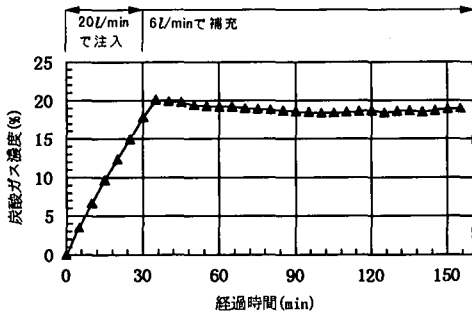


図-4 濃度制御法による空气中炭酸ガスの濃度変化

②水深0cmの場合の体積変化から、水槽から抜ける量が求まる。

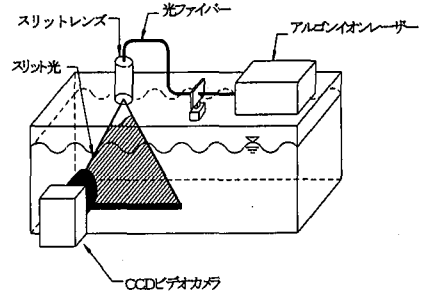
③算出された①と②の結果の差から、水中に溶入する量が求まる。ただし、この方法により算出された溶入量は全体の収支であり、詳細な溶入現象を計測するには水中の炭酸ガス濃度を直接計測する必要がある。

図-3より、炭酸ガスの水中への溶け込み、および水槽から外に抜けることによる減少量は平均2.3 l/minであった。しかし、このケースでは空气中の炭酸ガス濃度が時間とともに減少するため、空气中濃度を一定としたケースより水中に溶け込む量が少ない。空气中炭酸ガス濃度を一定にするために補充する炭酸ガス量を予備的に求めた結果、6 l/minであった。図-4に炭酸ガスを6 l/minの割合で補充した場合の結果を示す。最初の30分間20 l/minで炭酸ガスを注入し、その後6 l/minで補充した。

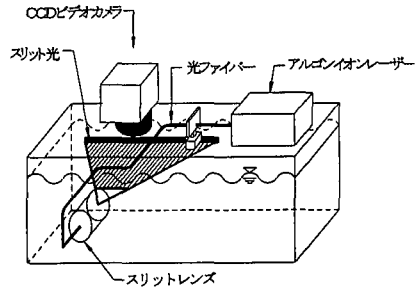
図より分かるように、水槽内の炭酸ガス濃度は19.2±0.8%で変動するが、ほぼ一定の値を示した。30分以降の炭酸ガス濃度の平均値は18.9%であった。この方法により、水槽内の炭酸ガス濃度を±1%以下の変動範囲で、一定に保つことができる。

3.3 炭酸ガスの溶入現象の可視化実験方法

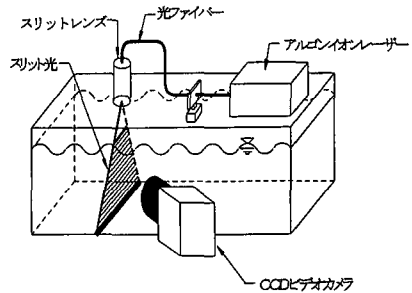
上記の可視化方法の開発と風洞水槽内の炭酸ガスの濃度を制御する方法を用いて、実際に風波による炭酸ガス



(a) case 1



(b) case 2



(c) case 3

図-5 レーザーシート光によって可視化した断面

の水への取り込み過程の可視化を行った。

実験方法および実験条件は以下の通りである。

- ①水槽に水を入れ、水深を32cmにする。風を吹かせ、波を十分に発達させる。風速は18.57 cm/sであった。水にはウラン濃度が 2.5×10^{-6} mol/lとなるように、2.34 gのウランを水に溶かした。
- ②波が十分に発達したら、炭酸ガスを水槽へ注入する。このときの注入量は20 l/minとする。炭酸ガスを注入すると同時に、炭酸ガス濃度を計測し始める。計測は5分ごとに行った。
- ③30分経つと水槽内の炭酸ガス濃度は約17.8%となる。このときに炭酸ガスの注入量を6 l/minに変える。
- ④水槽測定部へのレーザーライトシート光の照射法に関して、次の3ケースで可視化した(図-5参照)。
(a) 風向に平行な鉛直断面に照射 (Case 1)。

水槽側壁から直角方向に CCD ビデオカメラにより撮影する。風波により水面が変動するため、レーザー照射部の水面極近傍の現象が可視化できなくなる。CCD ビデオカメラは水面よりも低い位置に設置する。

(b) 水面直下の水平断面に照射 (Case 2)。

水槽上面より鉛直下向きに CCD ビデオカメラにより撮影する。風波により水面が変動するため、静水面下約 3 mm の位置にレーザーシート光を照射した。

(c) 風向に直角な鉛直断面に照射 (Case 3)。

水槽側壁斜め前方より撮影した。Case 1 と同様、水面よりも低い位置に CCD ビデオカメラを設置する。

4. 風波による炭酸ガスの溶入過程可視化結果および考察

4.1 風向に平行な鉛直断面の可視化結果 (Case 1)

水槽内の炭酸ガス濃度が 7% ぐらいになると、水表面に薄い膜が断続的に現れ始める。この薄い膜の厚さは一様でない。画像から溶入過程が可視化できるのは、炭酸ガス濃度が 15% 程度するときである。このときの可視化例を写真-1(a), (b) に示す。写真は水面より下方から撮影されているため、蛍光が水面に反射した部分が写っている。水面位置は写真中の暗く細線状に写っている部分である。

確認できた溶入過程の様子を以下にまとめる。

- ① 水槽内の炭酸ガス濃度が約 7% のとき (炭酸ガスを注入し始めてから 10 分ほど経過)、薄い (0.2~0.4 mm 程度) 炭酸ガスの膜が形成される。
- ② 炭酸ガスが溶入した層に厚い所 (1~2 mm) と薄い所ができて始める。
- ③ 水表面の厚く膨れた炭酸ガスの膜から斜め下方に炭酸ガスが溶け始める。この現象は断続的に生じる。
- ④ 時折、水表面の厚く膨れた炭酸ガスの層から、小さな渦状の取り込みが確認された。

4.2 水面直下の水平断面の可視化結果 (Case 2)

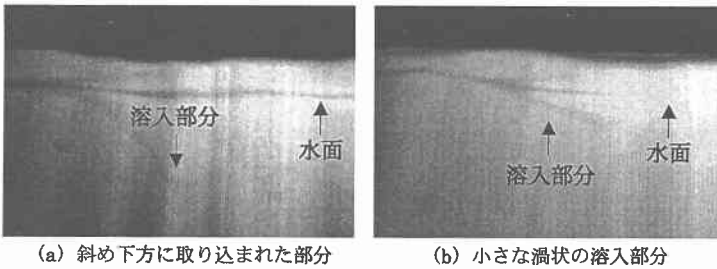
写真-2(a)~(c) に水面直下の水平面の可視化結果の中で、特徴的な画像を示す。風は右から左に吹いている。写真下方が側壁位置で、側壁から約 20 cm の範囲を撮影している。

観察結果より得られた現象を以下に示す。

- ① 風向と平行に細い筋状の溶け込み部分が生じ、蛇行しながら風下側へ移流する (写真-2(a))。
- ② 細い筋状の溶け込み部分が広がり、分裂するケースもある (写真-2(b))。
- ③ 筋状の線が渦を巻くケースもある (写真-3(c))。

4.3 風向に直角な鉛直断面の可視化結果 (Case 3)

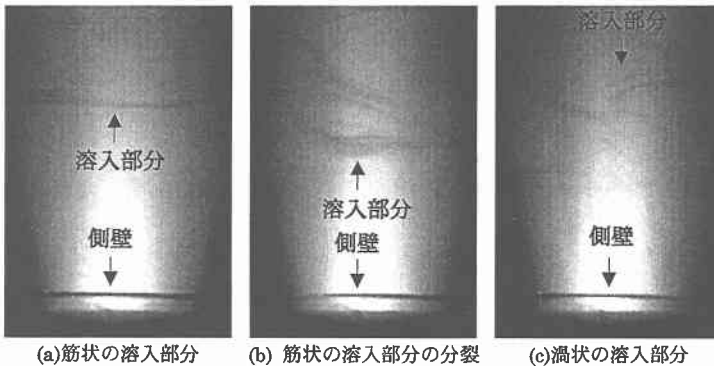
写真-3(a)~(d) に風向に直角な鉛直断面で可視化さ



(a) 斜め下方に取り込まれた部分

(b) 小さな渦状の溶入部分

写真-1 風向に平行な鉛直断面の可視化結果



(a) 筋状の溶入部分

(b) 筋状の溶入部分の分裂

(c) 渦状の溶入部分

写真-2 水面下約 3 mm の水平断面の可視化結果

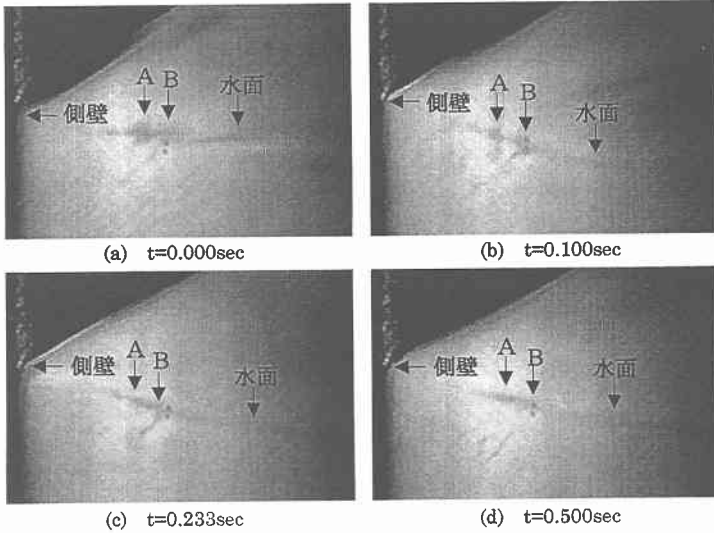


写真-3 風向に直角な鉛直断面の可視化結果

れた一連の現象を示す。写真中の左端の縦の線が水槽側壁である。水面下方から撮影しているため水面に蛍光が反射している。

- ①水表面に炭酸ガスが溶け込んだ層に厚く膨らんだ部分が生じる(矢印A, B)。これは4.2で見られた筋状の部分に対応するものと考えられる。(写真-3(a))
- ②炭酸ガスの溶け込んだ層の厚くなった部分が、水中へ取り込まれる(矢印A)。このとき、水面から尾を引くように取り込まれる部分がある(矢印B)。(写真-3(b))
- ③時間が経過するに従い、下方に取り込まれる。このとき、尾の部分は水面につながっている。(写真-1(c))
- ④更に時間が経過すると水面から尾の部分が剥がれ、更に下方に取り込まれていく。(写真-1(d))

4.4 可視化結果による風波による炭酸ガス溶入現象の構造に関する考察

以上の4.1~4.3の可視化観察結果から、溶け込み現象に関して以下のような特徴が上げられる。

- ①風波による炭酸ガスの溶け込みは2次元的な現象ではなく、3次元性の強い現象である。
- ②まず、風向き方向と平行に、水面にいくつかの筋状の流れ構造ができ、炭酸ガスの濃い層が生じる。
- ③その筋状の炭酸ガスの濃い層がある程度発達すると、流れ方向にある種の不安定が生じ、ある瞬間に水面の1点から剥がれ、水中へ連行される。
- ④取り込まれた炭酸ガスの濃い水塊は水面から尾を引きながら斜め下方に連行されていく。

- ⑤更に下方に取り込まれた水塊は、水面から切り離され、水中で拡散する。

5. ま と め

炭酸ガスの水面を通した溶入過程の直接可視化法を開発した。ウラニウム水溶液の蛍光強度がpHによって変化する特性を利用し、高濃度の炭酸ガスを含んだ空気からの水中への炭酸ガス溶入過程を直接可視化した。実験では、高濃度の炭酸ガスを含んだ空気を吹かせ、アルゴンレーザーにより、ウラニウム水溶液の蛍光を励起した。この方法により、これまで明らかにされていなかった現象を可視化することに成功した。

可視化観察の結果、風波により炭酸ガスが取り込まれる現象についていくつかの新しい知見が得られた。それらの現象はこれまで明らかにされていないものであった(例えばKomoriら, 1993)。

参 考 文 献

- Asher W. E. and J. F. Pankow (1989): Direct observation of concentration fluctuations close to a gas-liquid interface, *Chem. Eng. Sci.*, 44, pp. 1451-1455.
- Jähne, B. and E. C. Monahan, eds (1995): *Air-Water Gas Transfer*, AEON Verlag & Studio, 900 p.
- Jähne, B. and H. Haußecker (1998): *Air-water gas exchange*, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, pp. 443-468.
- Komori, S., R. Nagaosa and Y. Murakami (1993): Turbulence structure and mass transfer across a sheared air-water interface in a wind-driven turbulence, *J. Fluid Mech.*, 249, pp. 161-183.