

沿岸砕波における混入気泡容積特性と その再曝気現象に与える効果

角野昇八*・館川徹也**・竹村健治***・山岸達也****

1. 緒 言

沿岸域を含む海洋海面において、空中から水中に取り込まれた酸素などの気体が沿岸域などの生態系を含めた水環境保全に重要な役割を果たしているという事実はいうまでもない。また、大気中の二酸化炭素の海洋中への輸送量の正確な評価は、地球温暖化のメカニズム解明にとって必要不可欠な事柄である。さらに、各種有毒ガスの水面を通した水中への、あるいは水中からの輸送量の正確な評価も環境評価にとって重要な課題となる。以上の観点から、沿岸域を含む海洋海面における酸素などの気体の取り込み現象の解明がローカルに、あるいは全球的に重要な課題となっている。しかしながら、沿岸域を含む海洋における気液界面を通した気層から液層への物質輸送の実態解明は、開水路表面におけるそれに比べて十分には進んでいない現状にある。また、解明のために解決されるべき種々の課題も残されている(角野ら, 2000a)。

沿岸域を含む海洋海面における気体取り込みに関する現象のなかで、とりわけ最近注目されているのは、砕波による連行気泡の気体輸送への寄与のメカニズムとその定量的評価であり、海洋物理分野を中心に精力的に研究が進められている。しかし現状では、気泡量、気泡径スペクトル、滞留時間、侵入深さといった気泡特性に関する知見が不十分であり、気泡の特性量がどのように気体輸送に寄与するのかほとんど明らかになっていない現状にある。また、気泡の生成に与える塩分や界面の汚れなどの影響についても十分に明らかにされていない。

本研究では、このような中で、砕波、特に沿岸斜面上での強制砕波に着目し、それによって連行・混入される気泡の容積特性を実験的に解析することを目的としている。特に、砕波帯での物質輸送速度(k_L)が砕波での単位質量当たりのエネルギー逸散率(ϵ)と強い相関を持つことが著者らの既往の研究によって明らかになっていることより、気泡の容積特性と ϵ の関連に注目して解析する。

また、両者の関係を自由落下水についても検討するための実験も行った。このようにして気泡の容積特性と ϵ の関係を明らかにした後、気泡容積特性の物質輸送速度に与える影響を検討するために、散気層内気泡での輸送速度に関する既往のモデル式を適用して検討を加える。なお、本研究は緩斜面上での強制砕波に関する結果であり、それを深海洋上の砕波や *white cap* にそのまま適用するには無理があるかもしれないが、基礎的知見を与えるものと期待できよう。

2. 沿岸砕波における再曝気特性に関する研究

著者らは数年来、沿岸砕波による再曝気(気相から液相への酸素の輸送)現象に着目し、その物質輸送速度(k_L)の実態を明らかにするための一連の実験的研究を行ってきた(たとえば、角野ら, 1998)。その結果、海底勾配の影響を Breaker Type Index (Galvin, 1968) によって導入すれば、沿岸砕波帯での物質輸送速度は、海底勾配や砕波形式、波の特性の如何に関わらず、砕波における単位質量あたりのエネルギー逸散率(ϵ)のほぼ2乗に比例する形で表されることを明らかにした。また、その ϵ の評価は、灘岡ら(1986)および岡安ら(1989)によるモデルによるものをもっとも相関が高いことも見いだした。また、これに引き続き、比較的大きな規模の砕波を用いて同様の実験を行い、図-1に示すように、波のスケールが大きくなれば k_L は ϵ のほぼ3.5乗に比例することを見いだしている(角野ら, 2000b)。

ところで、開水路の流れの水面での再曝気現象の解析

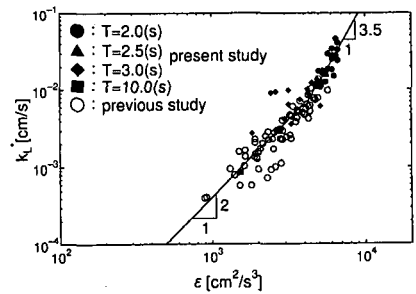


図-1 物質輸送係数と単位質量あたりエネルギー逸散率の関係

* 正 会 員 工 博 大阪市立大学教授 土木工学科
** 工 修 日立造船(株)(元大阪市立大学大学院生)
*** 運輸省第三港湾建設局(元大阪市立大学学生)
**** 学生会員 大阪市立大学大学院 工学研究科

のうち、いわゆる小渦モデル (Lamont・Scott, 1970) によれば、 k_L は ε の $1/4$ 乗に比例することが知られている。また、気泡の影響を考慮しない洋上砕波に関する研究においても同様の結果が得られている (たとえば、Woolf, 1995)。本研究での主目的は、この ε への依存程度の違いは、沿岸砕波においては水中に混入する気泡群の影響が大きいためであるとの視点から、その効果を連行気泡の容積特性を実験的に求めることで確認することにある。

3. 自由落下水塊に伴う混入気泡容積特性に関する実験

静水面に自由落下する水塊によって連行された気泡群の容積特性は、現象の単純さから解析が容易であると考えられる。渡辺ら (1999) もこの理由から、砕波による気泡生成の解明の前に自由落下水塊を対象として、その気泡生成・運動機構、流体運動機構を PIV により解明することを試みている。本研究においてもまず、自由落下水塊に伴う混入気泡容積特性と自由落下水の有する単位質量あたりエネルギー逸散率の関係を調べる実験を実施した。

(1) 実験方法

実験は、図-2 に示すような縦・横 173 cm、高さ 189 cm の三面ガラス張り水槽を用い、その中の一定水深の静水面にホースから水道水を自由落下させ、ホースからの落下水によって連行される気泡容積を超小型カラー画像センサー (KEYENCE 社製 CV-300) によって計測した。このカラー画像センサーは特殊ビデオカメラであり、画面中の指定色の画素数をカウントできるので、水槽の背後に赤色板を置き、画面中の白色部分を気泡部として認識させた。カラー画像センサーの設置位置は、水塊の落下位置からの距離がほぼ一定となるようにした。測定項目は、気泡相当画素数 Q_a のほか、放水流量 Q_w と落下高さ h_w および円柱状となった気泡群の先端深 l_a と直径 D_a である。そして、落下高さを 50 cm から 110 cm まで 7 ケース変化させつつ放水流量を 70 ケース変化させて実験を行った (l_a および D_a 測定のための実験は 30 ケー

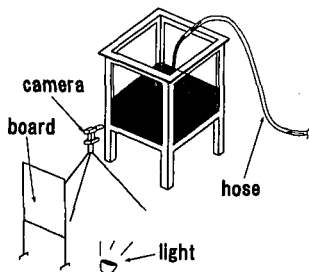


図-2 実験装置の概要 (自由落下水連行気泡)

ス)。実験値は 10 回の実験の平均値とした。それらの実験条件は館川 (2000) に詳しい。また、連行気泡群の詳細形状を観察するために、高速ビデオカメラ (PHOTRON 社製 FASTCAM-NET) で現象を撮影した。

(2) 実験結果の解析法

単位質量当たりのエネルギー逸散率を求めるためには、落下水のもつエネルギーを求める必要がある。落下水のもつ全エネルギー E_T は、静水面を基準とした放水口の高さでの位置のエネルギー E_p と放水部での運動エネルギー E_k の和と考えた。すなわち、単位時間当たりの全エネルギーは

$$E_T = E_p + E_k = \rho g Q_w h_w + (1/2) \rho Q_w^2 / A_w \dots \dots (1)$$

ここに、 ρ は流体の密度、 g は重力加速度、 A_w はホースの断面積である。式 (1) に表される E_T はまた、水面に落下直前の運動エネルギーに等しいはずであるので、

$$E_T = (1/2) \rho Q_w v_2^2 \dots \dots (2)$$

ここに、 v_2 は落下直前の水粒子速度である。

単位質量あたりエネルギー逸散率は、式 (1) に示される量をエネルギー逸散に関わる質量で除せば求めることができる。またその質量は、連行気泡群の容積内の水の質量 M に比例すると考えられるが、その容積形状は高速ビデオの撮影結果よりほぼ円柱体であると見なすことができた。すなわち、

$$M \propto \rho \pi D_a^2 l_a / 4 \dots \dots (3)$$

したがって水塊の落下に伴う単位質量あたりエネルギー逸散率 ε は、

$$\varepsilon = \frac{E_T}{M} \propto \frac{\rho g Q_w h_w + (1/2) \rho Q_w^2 / A}{\rho \pi D_a^2 l_a / 4} = \frac{(1/2) \rho Q_w v_2^2}{\rho \pi D_a^2 l_a / 4} \dots \dots (4)$$

で表されることになる。

(3) 気泡容積特性と ε の関係

式 (4) によって単位質量あたりエネルギー逸散率を評価するためには、円柱状の連行気泡群の先端深 l_a と直径 D_a を知らねばならない。図-3 は、流量 Q_w と高速ビデオカメラ画像から読みとった気泡群直径 D_a の関係を示したものである。図示のように、直径と流量の比例関係がわずかに認められるが、ほぼ一定とみなすことがで

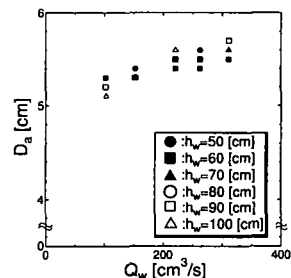


図-3 Q_w と D_a の関係

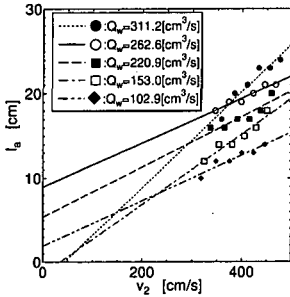


図-4 v_2 と l_a の関係

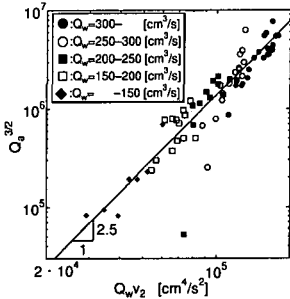


図-5 気泡相当画素数と単位質量あたりエネルギー逸散率の関係

きる。一方、先端深 l_a については、既に社河内ら(1996)による研究があり、そこでは、先端深は水面衝突速度に線形的に比例するとの実験結果が得られている。本研究でも高速ビデオカメラ画像から読みとった気泡群先端深 l_a と水面衝突速度 v_2 の関係を図-4 に示した。ここに v_2 は式(1)と式(2)によった。社河内らと同様に、両者の間には線形関係が得られていて、しかも流量によらずほぼ一定の傾きをもっているのが分かる。そこで、式(4)中の D_a を一定とみなし、また l_a を v_2 程度とみなして、すなわち $\varepsilon \propto Q_w v_2$ として ε に対する(気泡相当画素数 Q_a)^{3/2} の関係をみたものが図-5 である。画素数の 3/2 乗をとったのは、得られた画像が円柱体の投影面を撮影しているものと考え、容積はその 3/2 乗に比例すると考えたからである。図示のように、ほぼすべてのデータが流量に関係なく $Q_w v_2$ に強く依存し、そのほぼ 2.5 乗に比例しているのがわかる。

4. 砕波帯における混入気泡容積特性に関する実験

自由落下水を用いた基礎実験により、自由落下水連行気泡の容積特性はそこでの単位質量あたりエネルギー逸散率で決定され、そのほぼ 2.5 乗に比例することが結論づけられた。そこで、造波水槽内の緩斜面上での強制砕波によって連行される気泡の容積特性(2次元的であるので面積特性)についても同様の検討を加える。画像解

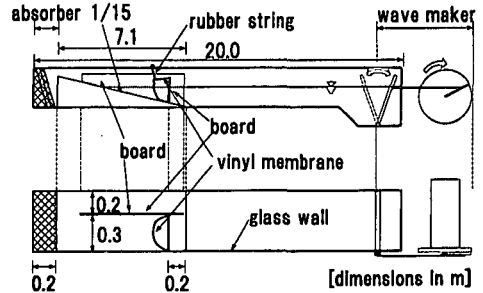


図-6 実験装置の概要(砕波連行気泡)

析を利用した関連の研究として、渡辺ら(1995)や宮本ら(1998)、陸田(2000)、山田・滝川ら(1999)がある。これらのほとんどの研究は砕波の運動学的特性や力学的特性の解析に主眼がおかれている。ただし、陸田は高速ビデオカメラの使用と画像処理によって気泡領域面積を求めているが、系統的な解析は行っていない。

(1) 実験方法

実験は、図-6 に示すように、長さ 20 m、幅 50 cm、高さ 50 cm の 2 次元造波水槽内の端部に 1/15 勾配の斜面を設け、その上で巻き砕波と崩れ砕波を発生させて行った。水槽内の隔壁は画像センサーによる撮影が斜め側面からとなることを避けるために設置した。また、砕波帯の着色水が沖側の無着色領域に移流・拡散するのを防止するために、極めて柔らかいビニール膜を砕波点沖に緩く張って色が薄くなるのを防いだ。砕波連行気泡面積特性は、自由落下水実験と同じく、カラー画像センサーによった。ただし、先の実験とは異なり、水槽背面を赤色に着色するとともに水は青色に着色し、画像中の総画素数から赤色および青色以外の色を気泡面積相当量とした。測定は、波頭が 2 cm づつ進んだときの各画像において気泡領域相当画素数を求めることによって行った。波頭がほぼ画面端に達したときには、そのつどカラー画像センサーを岸方向に 10 cm~20 cm 移動させ、その点で同様の操作を繰り返した。このようにしてガラス壁との間の距離を一定(50 cm)に保ちながらカラー画像センサーを移動させ、砕波点から汀線付近までの気泡混入領域を撮影した。この移動撮影は 3 回繰り返し、その平均値を最終データとした。

実験ケースは計 19 ケースであり、造波した波の周期は $T=0.89\text{ s}\sim 1.32\text{ s}$ 、沖波波高は $H_0=2.3\text{ cm}\sim 10.2\text{ cm}$ で、水深は $h=31\text{ cm}\sim 36\text{ cm}$ に変化させた(館川, 2000 参照)。

(2) 実験結果

a) 砕波進行に伴う気泡相当画素数の変化

図-7(a) および (b) は、このようにして得られた結果の例であり、ほぼ同じ砕波高をもつ巻き砕波と崩れ砕

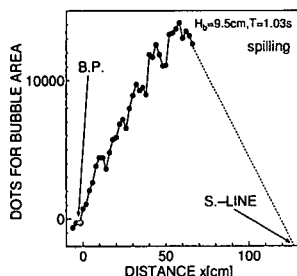


図-7(a) 砕波進行に伴う気泡相当画素数の変化

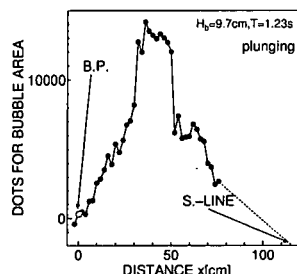


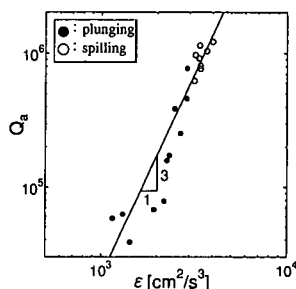
図-7(b) 砕波進行に伴う気泡相当画素数の変化

波の1組(2ケース)を示した。なお、汀線(S-LINE)付近では、進行する波頭の形が不明瞭となってそれらを認識することが困難となったため、その付近では計測を行っていない。ただし、気泡の存在は認められたために、汀線との間を直線で結んだ。

これらの図からは、いずれの場合も、砕波点(B.P.)をすぎた頃より気泡相当画素数が急激に増え、ピークに達した後、減少していくのがとらえられている。また、巻き砕波と崩れ砕波を比較した場合、明確ではないが、崩れ砕波の場合には砕波開始とともに徐々に増大する気泡量で特徴づけられるのに対して、巻き砕波の場合には砕波点からしばらく後に現れる鋭いピークで特徴づけられ、目視観察される砕波現象に対応した現れ方となっている。

b) 気泡相当画素数の積分値と一周周期平均値

図-7に示したように、気泡相当画素数は砕波点後に増大してピークに達し、その後汀線まで減少し続けるが、その変化の様子は後に続く砕波によって繰り返される。そこで、一波中の平均的な単位時間当たり気泡相当画素数を見るために、図-7のグラフで示される画素数を砕波点から汀線まで積分し、それを波の周期で割った値を求め、単位時間気泡相当画素数(Q_a)とした。そして著者らの既往の研究で物質移動係数 k_L と最も高い相関が認められた灘岡らおよび岡安らのモデルのうち、岡安らによるモデルによる単位時間当たりエネルギー逸散率 ϵ との相関をみたのが図-8である。図示のように、巻き砕

図-8 ϵ と気泡相当画素数積分値との関係

波あるいは崩れ砕波によらず、 Q_a は ϵ のほぼ3乗に対して強い相関をもち、沿岸砕波での混入気泡容積も ϵ でほぼ律則されていることが結論づけられる。

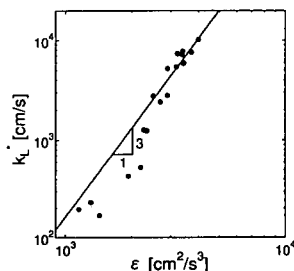
5. 再曝気現象に与える気泡容積特性の効果

以上のように、自由落下水塊によって連行される気泡群容積も、砕波によって連行される気泡群面積も、連行主体の単位質量あたりエネルギー逸散率によって律則され、そのほぼ2.5~3.0乗に比例することが明らかとなった。残された課題は、気泡の容積特性と物質輸送速度(k_L)との関係に関する考察である。

気泡表面での物質輸送を扱った文献はいくつか見られるが、その複雑な現象ゆえにまだ十分には明らかになっていない現状にある。その中で、Kawase and Moo-Young (1992)は、気泡径や流れの状況によらず気泡面での k_L は一定であるとの結論を得ている。これに対して、Eckenfelder (1959)は、散気(曝気)槽内での気泡群での物質輸送速度を算定するための式として、

$$k_L = \frac{C l^{2/3} Q_a}{A D_a S_c^{1/2}} \dots \dots \dots (5)$$

を提案している。ここに、 C は係数、 l は散気板設置水深、 Q_a は混入気泡流量、 A は曝気面積、 D_a は気泡平均径、 S_c はSchmidt数である。すなわち、気泡表面での物質輸送速度は気泡流量に比例し、気泡平均径に反比例、気泡移動距離(散気板設置水深)の2/3乗に比例する形をもつものとしている。

図-9 ϵ と物質輸送係数の関係

本研究では、この算定式を採用することとし、また沿岸砕波を対象とする本研究では、 l , A , Q_0 以外の C , S_0 それに D_0 をとりあえず一定量とみなすことにする。そして、気泡移動距離は砕波波高に比例するとの仮定をおく。すなわち、

$$l \propto H_b \dots\dots\dots (6)$$

また、曝気面積 A はこれまでの著者らによる研究におけるのと同様に、砕波点から汀線までの静水面面積 A_0 の n (実水面係数) 倍にあるものと考え、その n は従来と同様、

$$n = \alpha / B_t \dots\dots\dots (7)$$

とする。ここに α は係数であり、便宜的に $\alpha=1$ とする。

また、 B_t は Breaker Type Index (Galvin, 1968) であり、

$$B_t = H_b / g T^2 \tan \theta \dots\dots\dots (8)$$

である。さらに、 Q_0 としては、先に求められた砕波帯での単位時間気泡相当画素数を代入して k_L を求めた。

このようにして求めた物質輸送速度 k_L を ε の関数として表したものが図-9 である。図中の直線の勾配は 3 乗の傾きを示している。図示のように、実験で求められた連行気泡面積相当画素数を式 (5) に代入することによって求められた物質輸送速度は、図-1 に示される実験的に求められた物質輸送速度と同様に、 ε のほぼ 3 乗で表されることが示されている。それゆえ、沿岸砕波の気体輸送は混入気泡容積によって大きく律則されていることが結論づけられよう。

6. 結 言

沿岸砕波における混入気泡面積特性および自由落下水によって連行された気泡容積特性をカラー画像センサー画像の解析により明らかにすることができた。結果をまとめれば以下ようになる。

- 1) 自由落下水によって連行された気泡の単位時間気泡領域相当画素数は、落下水の単位質量あたりエネルギー逸散率によってほぼ律則されており、その 2.5 乗に比例する。
- 2) 緩斜面上の砕波によって連行された気泡の単位時間気泡領域相当画素数は、砕波での単位質量あたりのエネルギー逸散率によってほぼ律則されており、その 3 乗に比例する。
- 3) 散気槽内の気泡群での物質輸送速度を算定するための Eckenfelder の式を沿岸砕波現象に適用・修正し、沿岸砕波における物質輸送速度評価式を提案した。
- 4) それによれば、物質輸送速度は砕波における単位質量あたりのエネルギー逸散率のほぼ 3 乗に比例する。
- 5) この結果は、既往の著者らによる研究成果と一致し、沿岸砕波における気体輸送は混入気泡容積で律則さ

れていることを結論づけることができる。

今後は、気泡径などの影響を考慮した考察が必要である。

本研究に関わる研究費の一部は平成 10 年度、11 年度文部省科研費補助金 (基盤研究 (B) (1)) によった。ここに記して深甚の謝意を表する。

参 考 文 献

- 岡安章夫・磯部雅彦・渡辺 晃 (1989): 砕波帯におけるエネルギー収支と戻り流れのモデリング, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 31-35.
- 角野昇八・Douglas B. Moog・館川徹也・新谷尚弘・重松孝昌 (1998): エネルギー逸散率の各種モデルに基づく海浜砕波の酸素取り込み機能の解析, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 66-70.
- 角野昇八・細井由彦・竹原幸生・朝佐孝二・杉原裕司・中村由行・吉岡 洋・平口博丸・江藤剛治・中山忠暢 (2000a): 水表面での気体輸送に関する研究の最新の動向, 土木学会論文集, 印刷中.
- 角野昇八・竹村健治・館川徹也 (2000b): 砕波帯での酸素取込機能に関する大縮尺実験, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, 印刷中.
- 社河内敏彦・秋田朋宣・上島達也・太田春夫・佐藤新二 (1996): 水面に衝突する水噴流の流動特性, 第 15 回混相流シンポジウム論文集, pp. 101-104.
- 館川徹也 (2000): 海浜砕波の再曝気現象における混入気泡の効果に関する実験的研究, 大阪市立大学修士論文, 55 p.
- 灘岡和夫・広瀬文人 (1986): 砕波の物理過程に基づいた砕波帯内の拡散係数のモデル化, 第 33 回海岸工学講演会論文集, 第 33 巻, pp. 26-30.
- 宮本恭交・長尾昌朋・新井信一・上岡充男 (1998): 可視化手法を用いた砕波帯での水面形と流速分布の同時計測, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集, pp. 264-265.
- 陸田秀美 (2000): 大規模砕波による気液混相流体場における高精度数値計算手法の開発, 岐阜大学学位請求論文, 198 p.
- 山田文彦・滝川 滔・高山浩介 (1999): 画像解析による砕波変形過程の内部特性と砕波形式および空間波形との関係, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 135-139.
- 渡辺靖憲・佐伯 浩 (1995): 画像処理による砕波帯内の運動機構に関する考察, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 116-120.
- 渡辺靖憲・大塚厚一・佐伯 浩 (1999): 自由落下水塊に伴う気泡の生成・運動機構, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 116-120.
- Eckenfelder Jr., W. W. (1959): Absorption of Oxygen from Air Bubbles in Water, J. Sanitary Engrg. Div., Proc. ASCE, pp. 89-99.
- Galvin, C. J. Jr., (1968): Breaker Type Classification on Three Laboratory Beaches, J. Geoph. Res., 73, 12, pp. 3651-3659.
- Kawase, Y. and M. Moo-Young (1992): Correlations for Liquid-Phase Mass Transfer Coefficients in Bubble Column Reactors with Newtonian and Non-Newtonian Fluids, Can. J. Chem. Engrg., Vol. 70, pp. 48-54.
- Lamont, J. C. and D. S. Scott (1970): An eddy cell model of mass transfer into the surface of turbulent liquid, A. I. Ch. E. J., 16, pp. 513-519.
- Woolf, D. K., (1995): Energy dissipation through wave breaking and the air-sea exchange of gases, Air-Water gas Transfer, Jahne, B. and Monahan, E. C. Edts., AEON Verlag, pp. 577-587.