

# 気液界面での気体輸送に与える砕波連行気泡の効果に関する研究

河海工学研究室

関本 武史

## 1. はじめに

大気・海洋界面での気体輸送の評価は、生態系を含めた水環境保全、二酸化炭素濃度上昇による地球温暖化問題などの観点から必要不可欠である。しかし、沿岸域における物質輸送の実態解明は、開水路や海洋波面におけるそれに比べて十分に進んでいない。本研究では、種々の気体の取り込みが最も激しく、また大規模に行われていると考えられる沿岸域の砕波面における物質輸送の現象の解析を目的とする。研究内容は、砕波混入気泡の効果に着目して、既往の研究のデータに基づいて再解析するとともに、気体輸送に関する式を提案することである。

## 2. 緩斜面での砕波の酸素取り込み機能に関する既往実験

本研究室では、波動はほぼ完全に伝達させるが物質は全く透過させないような材質と構造の薄膜（ポリエチレン膜）で主要曝気源である砕波域を沖側水域から遮断し、砕波域から（あるいは砕波域へ）の溶存酸素の移流が生じないようにさせて、曝気に関わる容積（曝気容積）を特定した状態で、溶存酸素の時間変化を測定する実験を行ってきた。実験は、1995年～2000年まで、波の周期および波形勾配、砕波形式、水底勾配、規模など種々変化させた計105ケースに対して行われた。この実験より得られる再曝気係数  $k_2$  から

$$k_2 = (A/V)K_L \quad (1)$$

の関係を通して物質移動係数  $K_L$  を求めることができる。ただし、斜面上での砕波現象では、真の曝気面積  $A$  は静水面での面積でなく、砕波面の乱れや水中に連行された気泡の存在の影響などによって大きくなっていることが考えられるので、実際の曝気面積は静水面での面積  $A_p$  に割増係数  $n$  をかけた  $nA_p$  となっているものと考え、式(1)を

$$K_L = (V/nA_p)k_2 \quad (2)$$

のように変形して考えた。なお、割増係数  $n$  の形は、後述のように Calvin<sup>7)</sup> による Breaker Type Index( $B_r$ ) を用いて、

$$n = \alpha(1/B_r) = \alpha(gT^2 \tan\theta/H_b) \quad (3)$$

としたものが、水底勾配、砕波の形態、波の周期、波高の特性によらず一義的に関連付けられることが明らかになっている。ここで、 $g$  は重力加速度、 $T$  は周期、 $\tan\theta$  は水底勾配、 $H_b$  は砕波波高を表す。 $\alpha$  は比例定数を示し、既往の研究では  $\alpha = 1$  として扱ってきた。

## 3. 既往の研究におけるエネルギー逸散率と物質移動係数

Woolf<sup>8)</sup> は、開水路流れ水面での表面更新モデルを深海域での砕波に適用し、物質移動係数をエネルギー逸散率との関係で示している。一方、館川<sup>9)</sup> は、沿岸域砕波面におけるエネルギー逸散率  $\epsilon$  を種々のモデルより算定し、 $\epsilon$  と物質移動係数の関係を導いた。

彼の研究の過程では、エネルギー逸散率  $\epsilon$  は、岡安<sup>10)</sup> あるいは灘岡らのモデルに基づいた式との対応が最もよいことがわかった。両モデルは基本的には同じであり、岡安モデルではそれは、

$$\epsilon = \frac{3gH_b}{8T} \quad (4)$$

と表される。このエネルギー逸散率  $\epsilon$  と物質移動係数  $K_L$  との関係より、物質移動係数  $K_L$  とエネルギー逸散率  $\epsilon$  の間には  $\epsilon = 4000$  までは2次の相関性があり、それを超えると3次の相関性があることがわかっている。

## 4. 気体輸送に与える気泡特性の効果

沿岸砕波による酸素取り込み現象には、砕波によって生じる多量の連行気泡群が大きな影響を与えていると考えられる。そこで、館川<sup>9)</sup> は、カラー画像センサーを用いた画像解析によって、山岸<sup>5)</sup> は、シングルボイドプローブ（以下、SVPとする）を用いて、気泡特性の測定を行った。しかしSVPによる解析では、気法特性算出に必要な気泡速度の測定に、ビデオによる算出を行う必要があった。そこで今回は、その必要のないダブルボイドプローブ（以下、DVPとする）を開発した。

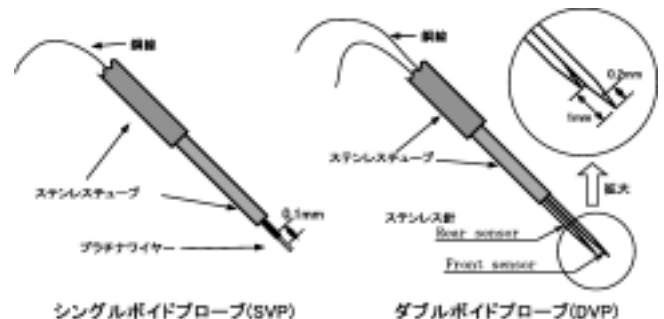


図-1 SVPとDVP

### (1) ボイドプローブを用いた実験

図-1にSVPおよびDVPの概要図を示す。両装置は、回路の一端であるシングルボイドプローブを水中の測定地点に固定し、他端を同じ水域内の任意地点に設置して直流電流を流して電気回路を構成するものである。ボイドプロー

ブ先端と他端がともに水に触れていて回路が閉じている場合には電流が流れ、逆にプローブ先端が気泡に接触・貫入した時に電気回路が遮断されることを利用して気泡の有無が判定できるとともに、気泡通過時間が測定できる。また、気泡通過時間と水塊通過時間との比からボイド率が測定され、DVPではプローブ先端のズレ幅と感知時間の差により気泡速度も測定できる。また、この気泡速度と気泡通過時間の積より気泡径を求めることができる。

(2) ボイドプローブの結果を用いた再分析

a) 割増係数  $n$  の再分析

ボイドプローブを用いた実験の結果より、また、気泡は球形と仮定し、かつセンサーが球の中心を通ると仮定することで、気泡の表面積の鉛直和  $A_p'$  を求めることができる。 $A_p'$  は砕波点から  $x$ cm のところに波が1つあるときに存在する気泡の表面積のことであり、 $A_p'$  の岸沖分布を示したのが図-2、模式的に示したのが図-3の下である。実際は図-3の上に示すように、波は複数個存在するため、気泡の総表面積は、波それぞれが持つ気泡の表面積の鉛直和  $A_p'$  を合計した総気泡表面積  $A_p$  となる。気体輸送が行われる曝気面積は、気泡の総表面積  $A_p$  と考えられるため、 $A_p$  を直接求めることができ、割増係数  $n$  を  $B_T$  を用いることなく表すことができる。そこで、 $A_p/A_p'$  で表した割増係数  $n$  と、式(3)の  $1/B_T$  の関係を図-4に示す。

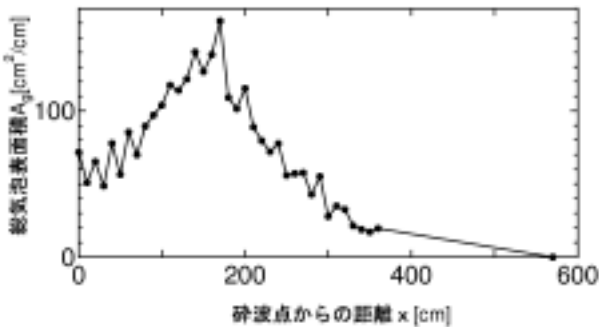


図-2 総気泡表面積の岸沖分布 ( $T=1.0s$ ,  $H_0=11.5cm$ )

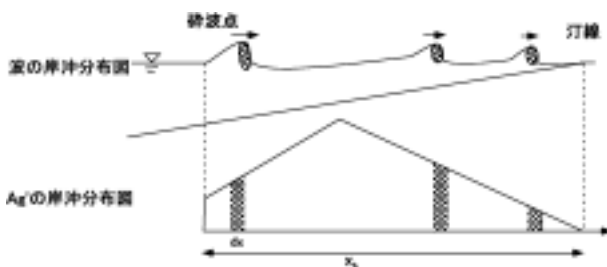


図-3 気泡表面積算定の模式図

図-4より、割増係数  $n$  と  $1/B_T$  の間には相関性がないように見える。これは、データ整理において、2cm程度以上の void は気泡と見なしていないため、巻き砕波で見られるチューブなどの空隙は、気泡ではないと無視していることが原因として考えられる。もし、チューブを気泡と考えれば、 $1/B_T$  の値が大きな領域(巻き砕波)で割増係数  $n$  は大きくなり、割増係数  $n$  と  $1/B_T$  の間に比例関係が生まれるの

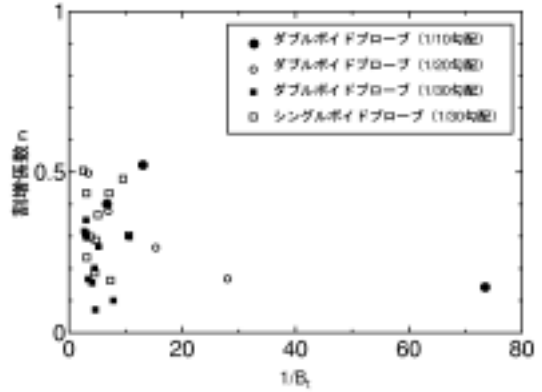


図-4 割増係数  $n$  と  $1/B_T$  の関係

ではないかと考えられる。

b) 物質移動係数とエネルギー逸散率の再分析

館川<sup>4)</sup>は、Eckenhof<sup>5)</sup>が提案した散気槽内の気泡群表面での物質移動係数  $K_L$  を算定する式より、

$$K_L = \frac{C^{2/3} Q_a}{A d_m S_c^{1/2}} \quad (5)$$

を誘導した。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、 $d_m$  は平均気泡径、 $S_c$  は Schmidt 数である。

山岸<sup>5)</sup>は、式(5)を砕波帯に適用するために、 $Q_a$  として単位時間あたりの気泡容積  $V_{Bf}/T$  ( $V_{Bf}$  は1周期あたりの総気泡容積)を代入し、また曝気面積として  $nA_p$  をとり、さらに  $l$  は波の回転運動に伴う水粒子の移動距離に比例すると考え  $nH_b$  程度として、下記の式を得た ( $S_c$  は一定とした)。

$$K_L \propto \frac{(nH_b)^{2/3} V_{Bf}/T}{nA_p d_m} \quad (6)$$

式(6)にシングルボイドプローブおよびダブルボイドプローブを代入して求めた物質移動係数  $K_L$  と岡安ら<sup>6)</sup>のモデルから算定されたエネルギー逸散率  $\varepsilon$ (式(4))の関係を、図-5および図-6に示す。図-5は割増係数  $n$  に  $A_p/A_p'$  を、図-6は割増係数  $n$  に  $1/B_T$  を用いたものである。

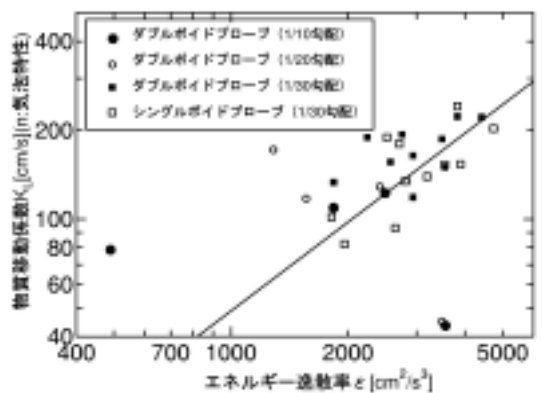


図-5  $K_L$  と  $\varepsilon$  の関係 ( $n = A_p/A_p'$ )

曝気面積は気泡の表面積  $A_p$  であると考えられるにも関わらず、図-5はあまり相関性を示さなかった。それに対して曝気面積に  $A_p/B_T$  を用いた図-6は、2.5 次の非常に高い相関性があることがわかる。

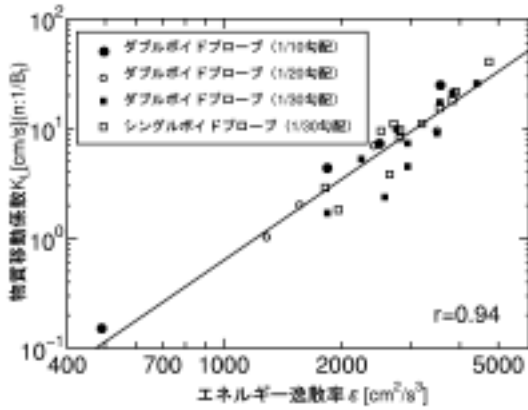


図-6  $K_L$  と  $\varepsilon$  の関係 ( $n = 1/B_1$ )

c)  $K_L \propto \varepsilon^{2/3}$  となる理由

曝気面積は、気泡の表面積  $A_B$  と考えられるにも関わらず、 $A_B/B_1$  としたほうが相関性がよいことが図-5、図-6 からわかった。また、既往の研究からも、曝気面積を決定する割増係数  $n$  を  $1/B_1$  とすることで、水底勾配、砕波の形態、波の周期、波高の特性によらず一義的に関連付けられることが明らかになっている。そこで、割増係数に  $1/B_1$  を用いた物質移動係数がエネルギー逸散率の2乗から3乗に比例する理由について、検討を行った。式(6)において、 $n$  に  $1/B_1$  を、 $A_B$  には砕波点と汀線間の距離である  $x_b$  と単位幅  $l$  とをかけた  $x_b \times l$  を代入すると、式(7)と表すことができる。

$$K_L \propto \frac{\pi^{2/3}}{g \tan \theta} \cdot \frac{H_b^{5/3}}{T^3} \cdot \frac{V_{gr}}{x_b d_m} \quad (7)$$

ここで、気泡の総容積  $V_B$  は気泡の総表面積  $A_B$  のときと同様の方法で求めることができ、1周期間積分することで、1周期あたりの総気泡容積  $V_{gr}$  を求めることができる。このようにして求めた  $V_{gr}$  は、気泡の総容積の鉛直和  $V_B^*$  を砕波点から汀線まで積分したものと一致する。この  $V_{gr}$ 、および、平均径  $d_m$  は、ボイドプローブの実験より、波浪条件、水底勾配と、図-7、図-8のように関係付けることが出来た。この関係を式で表したものが、式(8)、式(9)である。

$$V_{gr} = 0.36 H_b x_b \quad (8)$$

$$d_m = 0.47 + 2.2 \times 10^{-3} / \tan \theta \quad (9)$$

式(8)、式(9)を式(7)に代入すると式(10)になる。

$$K_L \propto \frac{\pi^{2/3}}{g \tan \theta (0.47 + 2.2 \times 10^{-3} / \tan \theta)} \cdot \frac{H_b^{8/3}}{T^3} \quad (10)$$

エネルギー逸散率は、 $\varepsilon = \frac{3}{8} \frac{M_b^3}{T}$  で与えられるため、式(10)は式(11)と表すことができる。

$$K_L \propto \varepsilon^{2/3} \quad (11)$$

式(11)より、割増係数  $n$  に  $1/B_1$  を用いたとき、物質移動係数  $K_L$  は、エネルギー逸散率  $\varepsilon$  の2乗から3乗に比例することがわかり、既往の研究および図-6の関係を説明することが出来た。

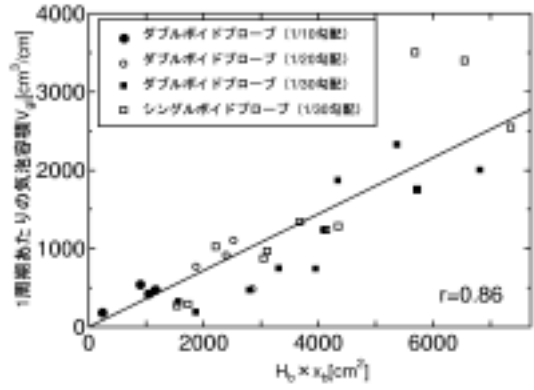


図-7  $V_{gr}$  と  $H_b \times x_b$  の関係

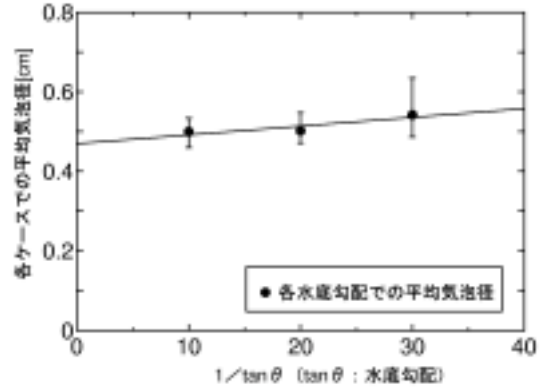


図-8 平均径  $d_m$  と海底勾配の関係

## 5. 物質移動流量の定式化

本研究室において、既往の研究は、気液界面での気体輸送の速度である物質移動係数  $K_L$  を求めることを目的として進められてきた。しかし、4.2)に示したように、曝気面積を決めるのは難しく、正確に評価するには至っていない。そこで、物質移動係数  $K_L$  の定式化をする前に、物質移動係数  $K_L$  に曝気面積  $A$  をかけたものを物質移動流量と名付け、物質移動流量  $AK_L$  の定式化を行うこととする。物質移動流量は、気体の溶け込む速度に気液界面の面積をかけて求めることより、単位時間に気液界面を通して吸収される気体の容積を示すものと考えられる。砕波帯で物質移動流量を採用すると、砕波点から汀線までおよび、その方向に直角方向に単位長さを考えた面で取り込まれる気体の容積を、海岸線の長さをかけることで、海岸全体で取り込まれる気体の容積を求めることができるため、非常に便利な値であるといえる。

$AK_L$  は、実験で求められる再曝気係数  $k_2$  と式(1)より、式(12)のように示すことができる。

$$AK_{L(k_2)} = V k_2 \quad (12)$$

一方、Eckenfelderの式より算出した  $AK_L$  は、式(6)を変形させることにより、式(13)と示すことができる。

$$AK_{L(Ecken)} \propto \frac{(\pi H_b)^{2/3} V_{gr}}{d_m T} \quad (13)$$

斎藤<sup>1)</sup>、合田<sup>2)</sup>の  $k_2$  の実験結果を式(12)に代入したのから求められる  $AK_L$  を横軸に、山岸<sup>3)</sup>、および今回の実

験値から求められる  $V_{gI}$  および  $d_m$  を式 (13) に代入したものを縦軸にとったものが図-9である。

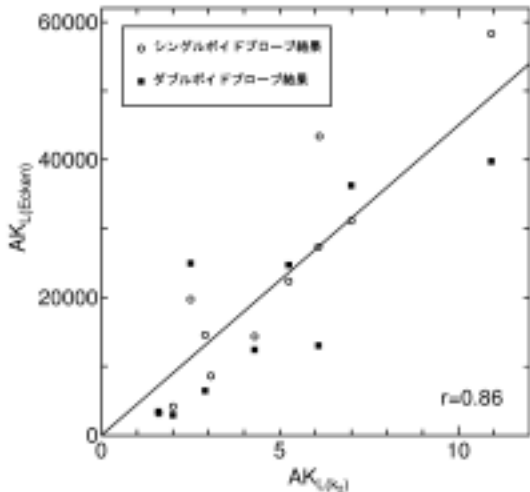


図-9  $AK_{L(ks)}$  と  $AK_{L(Ekman)}$  の関係

図-9より、 $AK_{L(ks)}$  と  $AK_{L(Ekman)}$  の間には、式 (14) に示すような関係があることがわかる。

$$AK_{L(ks)} = \frac{1}{4.5 \times 10^3} AK_{L(Ekman)} = \frac{(\pi H_b)^{2/3} V_{gI}}{4500 d_m T} \quad (14)$$

ここで、1周期あたりの気泡容積  $V_{gI}$  に式 (8) を代入し、平均気泡径  $d_m$  に式 (9) を代入すると、式 (14) は式 (15) のようになる。(  $x_b$  は  $h_b/\tan\theta$  である。)

$$AK_L = \frac{1.72 \times 10^{-4}}{(0.47 + 2.2 \times 10^{-3}/\tan\theta)} \cdot \frac{H_b^{5/3} h_b}{T \tan\theta} \quad (15)$$

斎藤、合田の実験での  $k_2$  と曝気容積を式 (12) に代入した値を縦軸に、斎藤、合田が行った実験での砕波波高、砕波水深、周期、海底勾配を式 (15) に代入した値を横軸にとったものが図-10である。ただし、砕波波高、砕波水深には、砕波指標から算定したものを使用している。

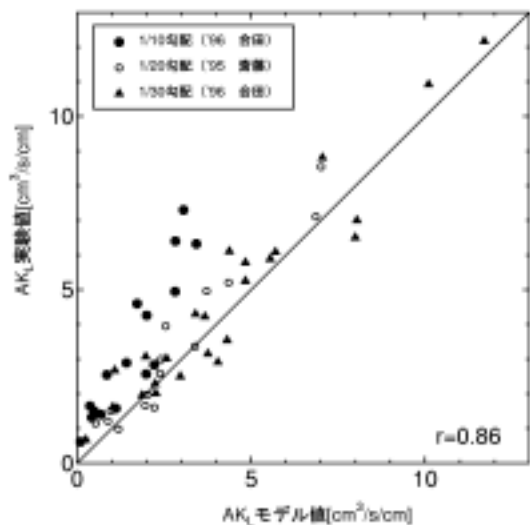


図-10  $AK_L$  のモデル値と実験値の比較

図-10より、 $AK_L$  のモデル値と実験値はほぼ同じ値をとっていることがわかり、式 (15) は物質移動流量のモデル式として妥当であると考えられる。

また、式 (14) において、平均気泡径  $d_m$  に式 (9) を代入したが、図-9からわかるように、水底勾配の影響は非常に小さく、ほぼ一定値を取るとの見方もできる。よって、 $d_m$  に実験から求められた平均気泡径 0.534cm を代入し、整理したものを式 (16) に示す。

$$AK_L = 3.22 \times 10^{-4} \frac{H_b^{5/3} h_b}{T \tan\theta} \quad (16)$$

式 (16) を用いたときも、図-10 とほぼ同様の結果が得られた。しかし、式 (16) は式 (15) より単純であることより、物質移動流量  $AK_L$  のモデル式として、式 (16) を提案する。

## 6. 結言

本研究において、以下の結論を得た。

1. 気体輸送に与える気泡特性の効果について検討した
2. 割増係数  $n$  は既往の研究で用いていた  $1/B_1$  の値と大きく異なっており、曝気面積を決めることが出来なかった
3. 曝気面積を考慮せず気体輸送を評価できる物質移動流量  $AK_L$  という値を提案した
4. 海底勾配の影響も考慮した、物質移動流量  $AK_L$  を表す式を作成した

## 参考文献

- 1) 斎藤満：海浜の砕波による再曝気に関する研究，大阪市大修士論文，1995。
- 2) 合田巧：海浜における砕波による再曝気に関する実験的研究，大阪市大卒業論文，1996。
- 3) 館川徹也：海浜砕波の酸素取り込み機能に関する研究，大阪市大卒業論文，1998。
- 4) 館川徹也：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，大阪市大修士論文，2000。
- 5) 山岸達也：特殊センサーを用いた海浜砕波の混入気泡特性に関する実験的研究，大阪市大修士論文，2001。
- 6) 岡安章夫・磯部雅彦・渡辺晃：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，第36回海岸工学論文集，pp.31-35，1989。
- 7) Cyril J. Galvin, Jr.: "Breaker Type Classification on Three Laboratory Beaches."，Journal of Geophysical Research Vol.73, Num.12, pp.3651-3659, 1968.
- 8) W.Wesley Eckenfelder Jr.: Absorption of Oxygen from Air Bubbles in Water, Journal of the Sanitary Engineering Division Proceedings of the American Society of Civil Engineers, pp.89-99, 1959.
- 9) Woolf, D. K.: Energy dissipation through wave breaking and the air-sea exchange of gases, Air-Water gas Transfer, Johns, B. and Monahan, E. C. Edts., AON Verlag, pp.185-195, 1995.