

気体流量輸送係数による沿岸砕波帯気液界面での 気体輸送評価法の提案

角野昇八*・関本武史**・日引 俊***

大気中の二酸化炭素ガスの海洋への溶解の速度などについてはまだまだ未解明の点があり、地球温暖化メカニズムの解明もその面では十分には進んでいない。本研究では、沿岸砕波帯での気体輸送現象の解明を目的とするが、従来の研究におけるように、気体輸送速度相当の気体輸送係数で現象を評価しようとするものではなく、それに曝気面積を乗じた形の気体流量輸送係数で評価することを新たに提案するものである。本研究ではさらに、造波水槽内の緩斜面上での砕波から得られたデータ、および新たに得られた連行気泡特性の種々のデータに基づいてそのことの妥当性を検証し、さらに気体流量輸送係数の実用的評価法を提案する。

1. 緒 言

大気中の二酸化炭素ガスの海洋への溶解の速度(大気/海洋気体輸送速度)あるいはその海洋吸収量などについてはまだまだ未解明の点があり、したがって地球温暖化メカニズムの解明もその面では十分には進んでいない現状にある。この理由から、大気/海洋気液界面での気体輸送現象解明を目的とする研究が様々な側面から盛んに行われている。著者らもこれまで、沿岸域砕波帯における気液界面を対象として、そこでの気体輸送現象には砕波連行気泡が大きく関与しているとの立場に立って、酸素を対象とした一連の実験的研究を行ってきた(たとえば角野ら, 2001)。大気/海洋気体輸送速度はシュミット数を介して正規化できるので、酸素を対象とした成果は他の気体にも応用することが出来る。

この種の研究における究極の目的は、気液界面での気体輸送速度に相当する気体輸送係数 k_L の評価である。この係数は、実験から直接求められるいわゆる再曝気係数 k_2 と

$$k_L = (V/A)k_2 \dots\dots\dots (1)$$

で関係づけられている。ここに V は曝気(に関わる)容積、 A は曝気(に関わる)面積である。したがって、 k_2 から k_L を評価しようとする場合には、曝気面積や曝気容積が正確に見積もられていることが前提となるが、沿岸砕波帯での気体輸送現象の場合には特に曝気面積の評価に困難さがあり、著者らもそれを十分には解決できていない現状にあった。ところで、このことと、沿岸砕波帯での気体輸送現象の特徴を考え合わせると、気体輸送速度(k_L)よりもむしろ気体流量輸送係数($k_L A$)で評価する方が現象に則して合理的であるし、また評価が容易であると考えた。

本研究は、以上のような立場に立って、沿岸砕波帯における気体流量輸送係数の概念を提案するとともに、造

波水槽内の緩斜面上で生じさせた砕波を用いた再曝気係数 k_2 の既往のデータ、および新たに得られた連行気泡特性の種々のデータに基づいて、その妥当性を検証し、またその実用的な評価法を提案するものである。

2. 沿岸砕波帯における気体流量輸送係数の概念と提案

沿岸砕波帯での大気/海中気体輸送現象を考え、さらに気体輸送は連行気泡あるいは砕波によって激しく乱れた水面を介して主として生じていると考えるとき、その曝気面積 A の評価は困難であったとしても、曝気容積 V は砕波線と海底、汀線で囲まれる部分の容積で評価できるとして不合理は生じないであろう。また、取り込まれた気体はさらに、その容積部分をソースとして、砕波線下の面を通して砕波帯の沖側の非砕波域に拡散・移流してゆくと考えることができよう(図-1参照)。

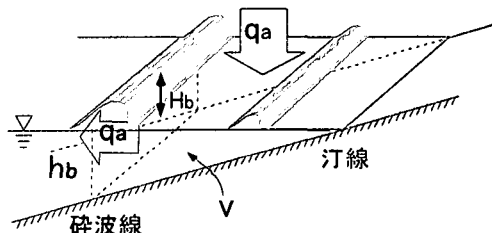


図-1 沿岸砕波帯での気液界面気体輸送

現象のこのような見方が正しいものとなれば、曝気面積を通して輸送される気体の速度そのものよりも、むしろ気体流量輸送係数($Ak_L = V k_2$)を知るほうが有用であり、現象の理解も容易となろう。

3. 模型緩傾斜面上砕波域での気体流量輸送係数の評価

前章の考察より、造波水槽内の緩斜面上で生じさせた砕波から得られた再曝気係数 k_2 の既往の実験データおよび新たに得られた連行気泡特性のデータに基づいて、

* 正会員 工 博 大阪市立大学教授大学院工学研究都市系専攻
** 正会員 修(工) 大阪府寝屋川水系改修工管所
*** 工 博 京都大学原子炉実験所助教

実験的ならびに半理論的に気体流量輸送係数を評価し、両者の比較よりその基本的妥当性を検証する。

(1) 実験値に基づく気体流量輸送係数の値

造波水槽内の緩斜面上で生じさせた砕波から得られた再曝気係数 k_2 の既往の実験データを用い、また式(1)の関係式を用いて気体流量輸送係数 ($Ak_L = V k_2$) の実験値を求めた。ここで、再曝気係数 k_2 には、高さ 60 cm、幅 50 cm、長さ 20 m で、その端部に 1/10 あるいは 1/20、1/30 の勾配を設けた造波水槽内で周期と波高の条件を変えて得た実験値(角野ら, 1996)を用い、また曝気容積 V には砕波線と海底、汀線と囲まれる容積の値を用いた。ただし、砕波波高 H_b と砕波水深 h_b は砕波指標から今回新たに求めなおした。また、実験で用いた水は真水であった。

(2) Eckenfelder の式に基づく気体流量輸送係数の理論値

既報(角野ら, 2000)のように、Eckenfelder (1959) が提案した散気槽内での気泡群による物質輸送係数 k_L を算定するための式を変形すれば

$$k_L = Cl^{2/3} Q_a / Ad_m S_c^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

を誘導することができる。ここに、 C は係数、 l は散気板深さ、 Q_a は混入気泡流量、 A は曝気面積、 d_m は気泡平均径、 S_c はシュミット数である。この式に基づく気体流量輸送係数はしたがって、

$$Ak_L = Cl^{2/3} Q_a / d_m S_c^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

と表すことができる。ここでこの式を沿岸砕波に適用するために、 Q_a を単位時間当たり砕波連行気泡容積とし、また l を砕波高 H_b 程度と評価すると、Eckenfelder の式に基づく気体流量輸送係数の理論式として次式を得る。

$$Ak_L = C' H_b^{2/3} V_o / d_m S_c^{1/2} T \dots\dots\dots (4)$$

ただしここに、 V_o は砕波による一周期間連行総気泡容積であり、 T は波の周期である。また、 C' は比例定数であるが、その値は水底勾配によって変化することが考えられる。

(3) 気泡平均径および連行気泡容積測定のための実験(角野ら, 2003)

式(4)に基づいて気体流量輸送係数を評価するためには、砕波による一周期間連行総気泡容積 V_o および気泡の平均径 d_m が必要となる。これらについては、すでにシングルボイドプローブを用いて測定しているが(角野ら, 2001)、今回新たにダブルボイドプローブを開発して測定した。

a) シングルボイドプローブとダブルボイドプローブ
シングルボイドプローブ(SVP)の原理についてはすでに前論文(角野ら, 2001)で述べている。今回新たに開発したダブルボイドプローブ(DVP)の測定原理の基本はSVPと同じであるが、そのプローブ部が近接した2本で構成されているので、2本のプローブの気泡通過時間差とプローブ間隔より気泡移動速度を測定できる特長を持っている。したがって、SVP使用時に気泡移動速度測定のために必要とされたビデオカメラ等は必要とされず、その使用が困難な現地での測定にきわめて有利となる。

b) 平均気泡径
DVPを用いて、球と仮定した気泡の平均径を求めた。用いた造波水槽は高さ 60 cm、幅 50 cm、長さ 20 m で、

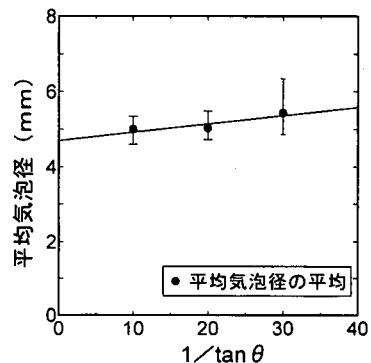


図-2 平均気泡径の平均の水底勾配による変化

表-1 実験条件と実験結果

水底勾配 tan θ	周期 T[s]	沖波波高 H ₀ [cm]	波形勾配 H ₀ /L ₀	破波波高 H _b [cm]	破波水深 h _b [cm]	破波形式	平均径 d _m [mm]	連行気泡容積 V _o [cm ³ /cm]	連行気泡表面積 A _o [cm ² /cm]
1/30	1.0	11.8	0.076	12.0	18.0	崩れ波	5.67	17.57	177.28
	2.0	8.3	0.013	12.2	14.0	巻き波	5.34	13.05	138.89
	1.0	7.8	0.050	8.0	11.7	崩れ波	6.29	6.10	53.71
	1.2	7.0	0.031	9.0	16.4	崩れ波	5.80	16.18	130.68
	1.2	4.3	0.019	6.0	8.4	巻き波	5.55	3.74	26.56
	1.0	6.1	0.039	7.0	8.5	崩れ波	5.07	2.56	19.56
	1.0	9.2	0.059	9.5	13.0	崩れ波	5.50	7.70	69.61
	1.1	7.6	0.040	8.8	13.0	崩れ波	5.02	7.99	74.77
	0.9	8.5	0.067	8.7	15.0	崩れ波	5.05	15.12	165.13
	1.0	10.7	0.068	10.4	17.7	崩れ波	4.94	17.22	166.05

その端部に 1/10 あるいは 1/20, 1/30 の木製勾配を設け、周期と波高の条件を全 18 ケース変えて実験を行った。使用した水は真水である。その条件と結果を表-1 に示す。また、気泡径平均値の水底勾配による変化の様子を図-2 に示した。

表-1 あるいは図-2 より、波浪条件に関わらず平均径はほぼ同じで 5 mm 程度であり、SVP を用いて得られた値 5.5 mm (6 mm から既訂正) とほぼ同じであることがわかる。水底勾配が $\tan \theta = 1/30$ では、その時の平均気泡径の平均は $d_m = 5.4$ mm である。ただ図-2 に示すように、平均気泡径の平均は水底勾配に関してわずかに線形的に変化する傾向が見られる。

c) 連行気泡容積

c-1) 平面局所気泡容積 V_g

連行気泡容積の求め方は基本的に SVP を用いた前回と同様であるが、今回は砕波帯での砕波現象の実態に則してさらに厳密に評価した。

SVP あるいは DVP のデータからは、まず水槽内 2 次元砕波帯の中の VP 設置点での空間局所ボイド率 ϕ'' を求めることが出来る。またこれとは別に、その VP 設置点での気液二相の一波の通過時間 t_t が求まり、さらにそれにその地点での波速 ($C = \sqrt{gh}$) を乗じるにより、VP 設置点での気液二相の一波の通過距離 l_t を求めることが出来る (図-3 参照)。この l_t はまた、水槽幅方向の単位幅、単位高さあたりのその高さでの気液二相一波の筒状容積 V_t でもある。このようにして得られた V_t に先に求めた空間局所ボイド率 ϕ'' を乗じるにより、空間局所的な気泡部容積 V_g を求めることが出来る。すなわち

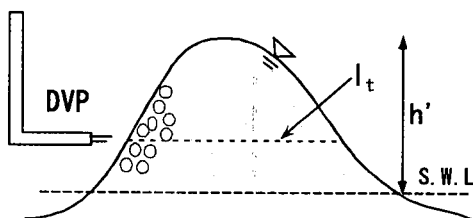


図-3 破波中の DVP

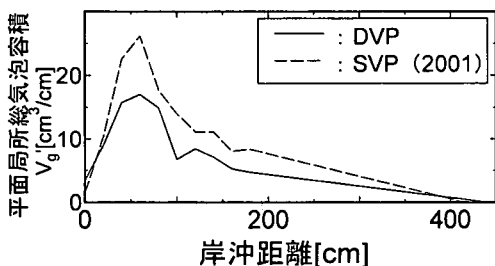


図-4 平面局所総気泡容積の分布 ($T=2.0$ s, $H_0=8.3$ cm)

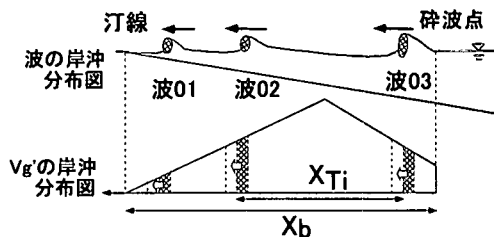


図-5 破波帯での破波と V_g の岸沖分布

$$V_g'' = \phi'' V_t \quad (5)$$

この空間局所気泡容積 V_g'' を鉛直方向に積分することにより、平面局所気泡容積 V_g を求めることが出来る。すなわち、

$$V_g = \int_0^h V_g'' dz \quad (6)$$

静水面以下には気泡部はほとんど認められなかったの、積分は静水面以上水面までの高さとしている。このようにして得られた平面局所気泡容積の砕波点から汀線までの分布の例を示したものが図-4 である。図中には SVP によってすでに得られている値も示した。

c-2) 一周期間総気泡容積 V_g

砕波線から汀線に至る砕波帯には複数の砕波が存在する。たとえば、図-5 に示す状況では、砕波線で砕けだした波 3 は波の一周期間に 2 まで進行し、またその間に、2 にあった波は 1 まで進行する。砕波帯での砕波を介した気体輸送はこれら複数の砕波で行われているはずであり、その総和を考慮する必要がある。また、砕波帯を進行する各砕波はその過程で図-4、あるいは図-5 の下図に示すような平面局所気泡容積の履歴を持つので、それも考慮した評価が必要である。すなわち、波の 1 周期間あたりの平均総気泡容積 V_g は

$$V_g = 1/x_{0-1} \cdot \int V_g dx + 1/x_{1-2} \cdot \int V_g dx + 1/x_{2-3} \cdot \int V_g dx + \dots \quad (7)$$

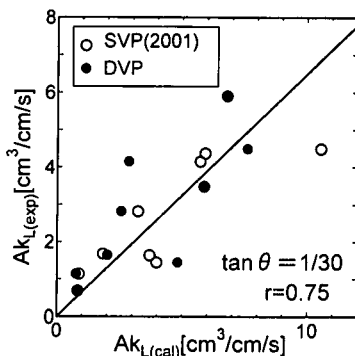


図-6 A_{kL} の計算値と実験値の比較

によらねばならない。ここに積分区間は、図-5 の例では波3から波2まで、あるいは波2から1までであり、また x_{2-3} などは、波2と3の間の距離などである。このようにして求めた V_g の結果も表-1 に示した。

(4) 理論式の妥当性の検証

砕波連行気泡特性の実験値を式(4)に代入して求められる Ak_L の値の妥当性を検討するために、その値と、再曝気実験から求められた k_2 および V とから式(1)を介して求められる Ak_L と比較した。図-6 は、水底勾配が $\tan \theta = 1/30$ の場合の $C' = 1$ とした式(4)による値 $Ak_{L(cal)}$ に対する式(1)による値 $Ak_{L(exp)}$ を表す。ただし、 $S_c = 500$ とし d_m は平均径の平均値(5.4 mm)を用いた。図中には SVP による結果も示した。図-6 に示すように、両者の間には多少のばらつきが見られるものの、ほぼ線形的な関係が認められ、式(4)によって Ak_L を評価できていると見ることができる。この結果より水底勾配が $1/30$ の場合には $C' = 0.65$ と決定することができる。またその関係は以下ようになる。

$$Ak_L = 0.65 H_b^{2/3} V_g / d_m S_c^{1/2} T \dots\dots\dots (8)$$

4. 実用化に向けた理論式の改良

式(8)によって Ak_L を評価できることを示せたが、式(8)の算定のためには一周期間連行総気泡容積 V_g を知る必要があり、そのままでは実用的ではない。そこで V_g を波浪条件のみによって評価できるかどうか確認した。

(1) 一周期間総気泡容積 V_g と波浪条件との関係

図-7 は、 $1/10$, $1/20$, $1/30$ の水底勾配と種々の波浪条件の下で、砕波高 H_b と砕波線と汀線で囲まれる面積 A_p の積 ($H_b \times A_p$) に対する V_g の関係を示したものである。両者の間には明確な線形関係が認められ、 V_g を H_b と A_p の積で表すことができることがわかる。 A_p はさらに、単位幅あたり $h_b / \tan \theta$ (h_b は砕波水深) でもあるので、図-7 に示される関係は

$$V_g = 3.1 \times 10^{-3} H_b h_b / \tan \theta \dots\dots\dots (9)$$

と表すことが出来る。

結局、気体流量輸送係数は、水底勾配が $\tan \theta = 1/30$ の

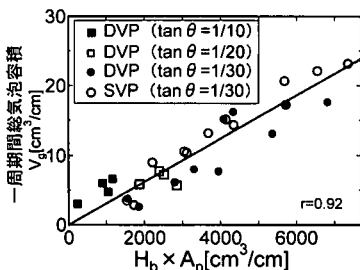


図-7 V_g と $H_b \cdot A_p$ の関係

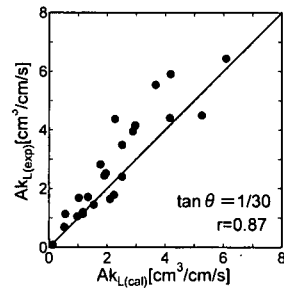


図-8 Ak_L の実用計算式による値と実験値の比較 ($\tan \theta = 1/30$)

場合

$$Ak_L = 2.02 \times 10^{-3} H_b^{5/3} h_b / (T d_m S_c^{1/2} \tan \theta) \dots\dots (10)$$

と表されることになる。

(2) 改良理論式の妥当性の検証

$1/30$ の水底勾配で、種々の波浪条件にある既往の k_2 データによる気体流量輸送係数と、同条件にある式(10)による同値の比較を図-8 に示す。ただし、ここでも d_m は $d_m = 5.4$ mm とし、 $S_c = 500$ とした。図-8 によれば、計算値は実験値をわずかに過小評価する傾向にあることが認められる。このように若干の差が生じた理由は、図-6 においては、SVP あるいは DVP による V_g の特性が明らかになっているケースのみについての比較であったのに対して、図-8 では k_2 データが得られている全

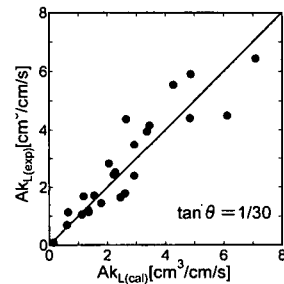


図-9 Ak_L の修正実用計算式による値と実験値の比較 ($\tan \theta = 1/30$)

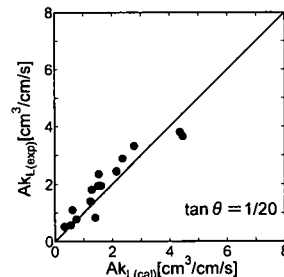


図-10 Ak_L の修正実用計算式による値と実験値の比較 ($\tan \theta = 1/20$)

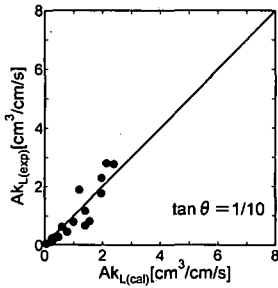


図-11 Ak_L の修正実用計算式による値と実験値の比較 ($\tan \theta = 1/10$)

ケースについて比較したためであると考えられる。そこで、式 (10) の係数を改めて図-8 のデータにベストフィットするように定めた。その結果、式 (10) は

$$Ak_L = 2.35 \times 10^{-3} H_b^{5/3} h_b / (Td_m S_c^{1/2} \tan \theta) \quad \cdots (11)$$

となった。また、他の水底勾配のデータについても全データを検討した結果、水底勾配が $1/20$ ($d_m = 5.0$ mm) の場合、

$$Ak_L = 2.38 \times 10^{-3} H_b^{5/3} h_b / (Td_m S_c^{1/2} \tan \theta) \quad \cdots (12)$$

であり、 $1/10$ ($d_m = 5.0$ mm) の場合、

$$Ak_L = 2.74 \times 10^{-3} H_b^{5/3} h_b / (Td_m S_c^{1/2} \tan \theta) \quad \cdots (13)$$

となった。これらの水底勾配別の推算値と実験値の合致の程度を図-9～図-11 に示す。

これらの図において実験値と計算値を比較したとき、その合致の程度が良いのは当然のことであるが、計算式による値と全実験データは偏ることなく合致していて、その妥当性と有用性が示されているといえよう。また、図-12 は、3 種の水底勾配の全データに対してベストフィットするように係数を決定し、

$$Ak_L = 2.33 \times 10^{-3} H_b^{5/3} h_b / (Td_m S_c^{1/2} \tan \theta) \quad \cdots (14)$$

で算定した計算値との比較である。ただし、 $d_m = 5.2$ mm としている。実験条件内の水底勾配に関係なく、式 (14) で Ak_L 値の全体的な評価が可能なが示されている。また、この図から、酸素の流量輸送係数は、本研究の実験条件下では数 $\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$ 程度であることがわかる。

5. 結 言

本研究では、沿岸域砕波帯における気体輸送量の評価を目的として、気体流量輸送係数の概念を提案するとともに、その妥当性を検証した。ここで提案の気体流量輸送係数による評価によれば、シュミット数と気泡平均径のほか、海底勾配と波の周期、砕波高および砕波水深の海底断面と波浪条件のみによって対象の沿岸域から沖合

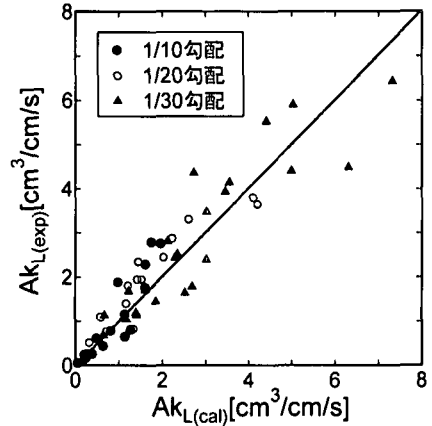


図-12 Ak_L の修正実用計算式による値と実験値の比較 (全ケース)

いに移流・拡散する気体の流量相当量を算定できることになり、実用上有用な式ではないかと思われる。ただし、本研究では塩水/淡水の違いによる影響、あるいは縮尺影響などが考慮されていないので、そのまま直ちに現地海岸へ適用するにはまだ無理がある。しかしながら、これらの点が解決できれば、気体流量輸送係数の概念を適用することにより、たとえばある湾域での年間平均再曝気ポテンシャルあるいは二酸化炭素ガス吸収量などの算定が可能となり、現象解明に大きな足がかりとなるものと考えられる。

なお、本研究は文部科学省科学研究費補助金 (課題番号 12305031) の補助を受けて行われた。ここに記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 角野昇八・杉田智行・合田 巧 (1996): 海底勾配の影響を考慮した海浜砕波の酸素取り込み機能に関する総括的考察, 海岸工学論文集, 第 43 巻, 1211-1215.
- 角野昇八・館川徹也・竹村健治・山岸達也 (2000): 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, 海岸工学論文集, 第 47 巻, 136-140.
- 角野昇八・山岸達也・日引 俊・関本武史 (2001): ボイドプローブを用いた砕波連行気泡特性の解析とそれに基づく気体輸送現象の解析, 海岸工学論文集, 第 48 巻, 71-75.
- 角野昇八・鈴木琢磨・関本武史・日引 俊 (2003): 砕波連行気泡特性測定のためのダブルボイドプローブの開発とその適用性の検討, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 1406-1410.
- Eckenfelder Jr., W. W. (1959): Absorption of Oxygen from Air bubbles in Water, J. Sanitary Eng. Div., Proc. ASCE, 89-99.