

風波気液界面におけるガス交換係数の評価

杉原裕司*・高崎敦彦**・松永信博***・児玉真史****

1. はじめに

大気海洋境界面を通しての物質輸送を定量的に評価することは、環境変動の予測手法を確立する上で重要である。気液界面における炭酸ガス、酸素等のフラックスをバルク式として表示した場合の輸送係数が、ガス交換係数 k_L である。ガス交換研究における工学的課題は、この k_L をいかに精度良く評価するかという問題に帰着する。

海洋の表面には一般に風波が存在するため、風波気液界面における k_L のパラメタリゼーションは、従来から多くの研究者によって試みられてきた (例えば, Jähne・Haußecker, 1998 ; Jähne・Monahan, 1995)。しかしながら、現在提案されている k_L の評価式の多くは、海上風速もしくは気流の摩擦速度で表示されており、実海洋における多様な波浪条件下のガス交換量を精度良く予測する上で問題がある。特に、海洋にはうねりが普遍的に存在するにも関わらず、うねりが k_L に及ぼす効果についてはほとんど調べられていないのが現状である。

本研究の目的は、風洞付造波水槽を用いてガス交換過程の波浪依存性を実験的に調べ、うねりの存在が風波気液界面でのガス交換係数に及ぼす効果について検討することである。また、うねりによって風波や水中の乱れのスペクトル特性がどのように変化するかについても考察する。

2. 実験装置および実験方法

図-1 に、本研究で用いた実験装置の概略図を示す。実験水槽は、長さ 6.2 m, 高さ 0.46 m, 幅 0.15 m の矩形断面を有する小型の風洞付造波水槽で、送風により発生する風波場に造波による規則波を入射させることによってうねりを起こした。

表-1 に風波のみのケースにおける実験条件を示す。ここで、 U_r は基準風速、 u_{*0} は気流の摩擦速度、 f_p および σ_p はそれぞれ風波のピーク周波数および角周波数である。また、 R_B については 4 節で述べる。造波による規

則波を付加したケースの実験条件が表-2 に示されている。ここで、 T , H_0/L_0 はそれぞれ、規則波の周期と波形勾配である。本実験では、風速分布の測定にベーン式風速計を用いているが、うねりの存在する場合に波面近傍の風速分布を正確に計測することは困難であった。そのため、規則波を入射したケースにおいては、摩擦速度は算定されていない。水深 h は全てのケースにおいて 20 cm に固定された。波高および水中での流速の測定にはそれぞれ、容量式波高計と電磁流速計を用いた。波高計と流速計の出力信号は、サンプリング周波数 100 Hz で AD 変換され、16384 個のデータが取得された。

ガス交換係数はトレーサーガスにより変化するが、それらは互いにシュミット数によって変換できると考えられる。溶存酸素 (DO) に対しては精度の良い電極型のセンサーが開発されていることから、本研究ではトレーサーガスとして酸素を用いた。予め、窒素ガスを曝気することにより、水槽内の DO を 2~3 mg/l 程度まで低下させて、DO の復元する時間変化をセンサーにより測定した。また、水槽内の水をサンプリングすることにより DO 滴定も併せて行った。測定された滴定値は DO センサーの検定に用いられた。

3. 風波および流速変動のパワースペクトル特性

図-2 は、入射する規則波の波形勾配を変化させた場合に、風波のパワースペクトルがどのように変化するかを示したものである。ここで、造波周期、基準風速はそれぞれ、 $T=1.0$ s, $U_r=9.71$ m/s に固定されており、図中の実線が風波のみのケースの結果を示す。スペクトルには、風波の成分と規則波の高調波成分が重なり合っていることがわかる。また、風波のピーク周波数付近におけるスペクトルのパワーが、波形勾配の増大とともに低下する。このような機構の説明として、Banner・Phillips (1974) の理論がある。この理論によると、うねりのような長波にのった風波はその碎波限界振幅が小さくなり、風波成分のパワーが相対的に減少する。阪井他 (1994) は、本実験よりも大きな風洞水槽を用いて、うねりと風波の相互作用について調べている。図-2 のスペクトル

* 正 会 員 工 修 九州大学大学院助手 総合理工学研究科
** 学生会員 九州大学大学院 総合理工学研究科修士課程
*** 正 会 員 工 博 九州大学大学院助教授 総合理工学研究科
**** 学生会員 工 修 九州大学大学院 総合理工学研究科博士後期課程

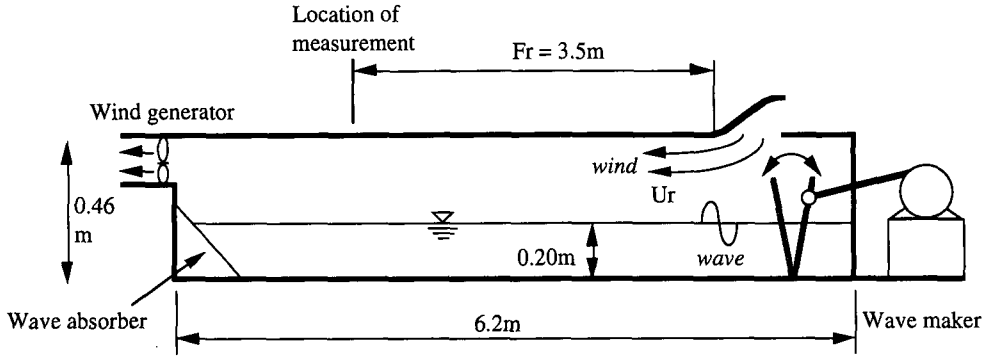


図-1 実験装置の概略図

表-1 風波のみのケースにおける実験条件

Run	U_r (m/s)	u_{*0} (m/s)	f_p (Hz)	σ_p (1/s)	R_b	k_L (m/s)
W-1	6.63	0.327	4.11	25.8	276	6.53×10^{-5}
W-2	7.07	0.346	4.01	25.2	317	7.66×10^{-5}
W-3	8.30	0.398	3.80	23.9	443	9.74×10^{-5}
W-4	8.64	0.423	3.48	21.9	546	1.30×10^{-4}
W-5	9.71	0.439	3.22	20.2	635	1.27×10^{-4}
W-6	10.2	0.474	3.18	20.0	750	1.76×10^{-4}
W-7	11.4	0.495	2.92	18.3	891	1.89×10^{-4}
W-8	11.9	0.517	2.74	17.2	1035	2.25×10^{-4}
W-9	13.2	0.553	2.62	16.5	1239	2.35×10^{-4}

表-2 風波+規則波のケースにおける実験条件

Run	U_r (m/s)	T (s)	H_0/L_0	k_L (m/s)
S-1	6.63	0.8	0.0619	1.15×10^{-4}
S-2		1.0	0.0257	8.42×10^{-5}
S-3	8.30	0.8	0.0619	1.64×10^{-4}
S-4		1.0	0.0257	1.23×10^{-4}
S-5	9.71		0.0218	1.89×10^{-4}
S-6		0.8	0.0386	2.09×10^{-4}
S-7			0.0619	1.97×10^{-4}
S-8			0.0101	1.40×10^{-4}
S-9		1.0	0.0179	1.85×10^{-4}
S-10			0.0257	1.57×10^{-4}
S-11	11.4	0.8	0.0619	2.57×10^{-4}
S-12		1.0	0.0257	2.16×10^{-4}
S-13	13.2	0.8	0.0619	2.96×10^{-4}
S-14		1.0	0.0257	2.51×10^{-4}

の変化は、阪井らの実験結果と定性的に一致している。

図-3に、規則波の波形勾配を変化させた場合の、 $z = -4$ cmにおける水平流速変動のパワースペクトルを示す。ここで、 z は静水面から上向きに取られた鉛直座標である。図中のケースにおける規則波の周期、基準風速はそれぞれ、 $T = 1.0$ s、 $U_r = 9.71$ m/sに固定されてい

る。流速変動のスペクトルにおいても、規則波の波形勾配の増大とともに、風波のピーク周波数付近におけるエネルギーの低下が明らかである。また、うねりが存在する場合でも、風波成分のピーク周波数はうねりの波形勾配にほとんど依存しないことがわかる。注目すべき特徴は、うねりが存在する場合には、風波スペクトルピーク

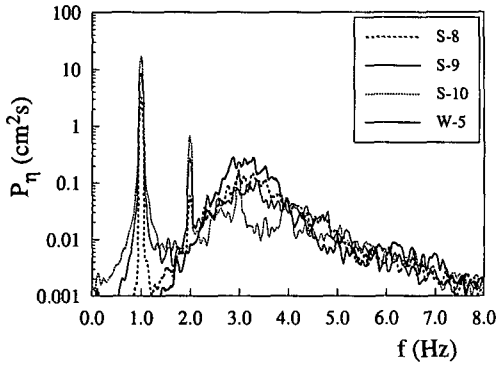


図-2 風波のパワースペクトルとうねりの波形勾配の関係

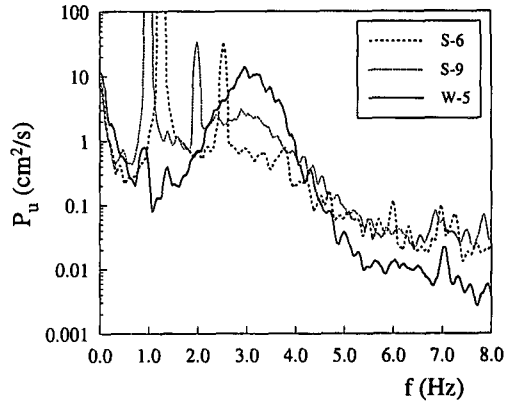


図-4 水平流速変動のパワースペクトルとうねりの周期の関係

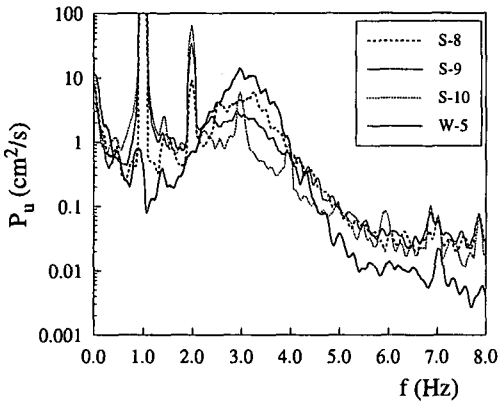


図-3 水平流速変動のパワースペクトルとうねりの波形勾配の関係

の高周波帯域においてスペクトルの増大が見られることである。これは、風波変動成分の運動エネルギーが砕波により散逸し、乱れに転化されたエネルギーが高周波帯域へ分配されたものと考えられる。このような砕波機構は、ガス交換におけるうねりの効果を議論する上で重要である。ミクロスケールの表面更新渦は、このような機構によってエネルギーを効率的に受け取ることができ、うねりの存在はガス交換を促進させる効果をもつことが予想される。

図-4に、規則波の周期を変化させた場合の、 $z = -4$ cmにおける水平流速変動のパワースペクトルを示す。ここで、基準風速は $U_r = 9.71$ m/s に固定されている。高調波成分のピークは規則波の周期に応じてシフトするが、風波成分のピーク周波数はうねりの周期の影響を受けない。またこの場合も、規則波の周期が短くなるにしたがって、風波のピーク周波数付近においてスペクトルのパワーが低下し、高周波帯域においてエネルギーが増大する。

4. ガス交換係数の波浪依存性

図-5に、風波水槽内のバルク領域におけるDOの時間変化の一例を示す。ここでは、基準風速を一定とし規則波の周期 T のみを変化させた場合の結果を示している。図中の D_* は、次式で定義された規格化濃度である。

$$D_* = (C(t) - C_s) / (C(0) - C_s) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $C(t)$ および C_s は、それぞれ時刻 t におけるDO濃度と飽和濃度を示す。この図より、うねりの存在はガス交換を促進し、その効果はうねりの周期が短いほど大きくなるのがわかる。このことは、前節で予想されたうねりによるガス交換の促進機構を支持する結果となっている。

ガス交換係数は次式から算定することができる。

$$-\ln D_* = k_L(A/V)t \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 A は気液界面の曝気面積、 V は曝気容積である。角野他 (1995) によって指摘されているように、波面での A は静水面のそれよりも大きくなるものと思われるが、ここでは簡単のため静水面の曝気面積を A とした。

図-6に、入射する規則波の波形勾配の変化に対するガス交換係数 k_L の依存性を示す。ただし、 k_L はうねりの存在しない場合の値を用いて規格化されている。この図より、ガス交換係数はうねりの存在によって増大することがわかる。また、 k_L は、波形勾配とともに単調に増加せず、ある波形勾配で極大値をもつように見える。極大値を与える波形勾配はうねりの周期に依存している。

図-7に、基準風速と造波周期の変化に対するガス交換係数 k_L の依存性を示す。この図より、基準風速の増大とともに、 k_L が単調に増加することがわかる。また、全ての風速において、うねりの周期が短いほど k_L は大きくなる。

図-8に、摩擦速度と造波周期の変化に対するガス交

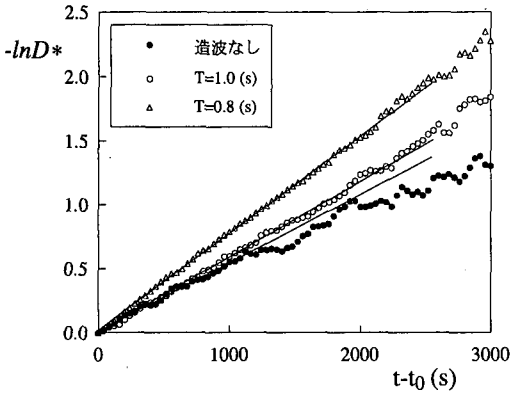


図-5 DOの時間変化

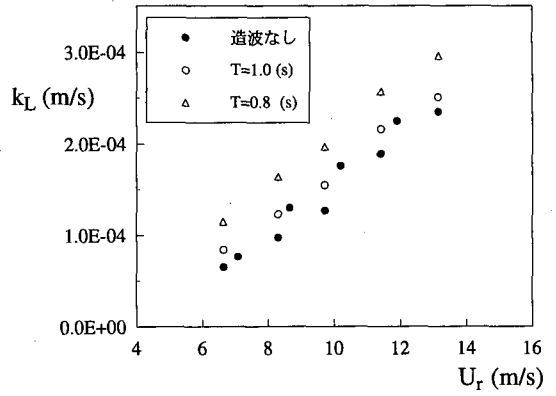


図-7 U_r に対する k_L の依存性

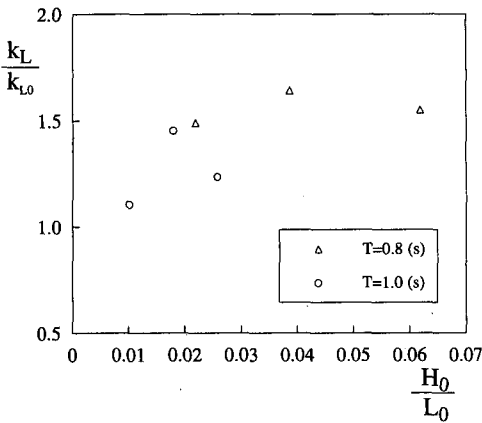


図-6 H_0/L_0 に対する k_L の依存性

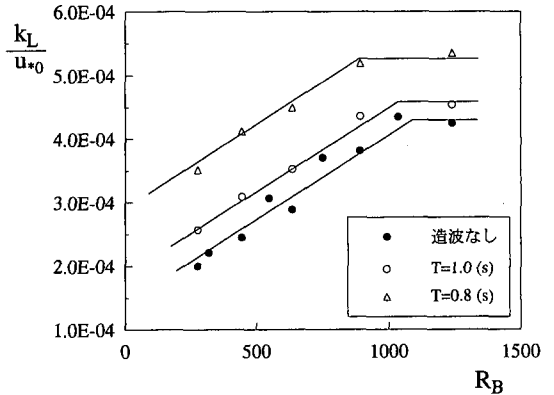


図-8 R_B に対する k_L の依存性

交換係数 k_L の依存性を示す。ここでは、造波しない場合に風波界面に作用する摩擦速度 u_{*0} を用いて k_L が規格化されている。横軸の R_B は $u_{*0}^2/\nu\sigma_P$ で定義される無次元パラメータであり、 g および ν はそれぞれ重力加速度と空気の動粘性係数を示す。 R_B は、Toba・Koga (1986) によって提案されたパラメータであり、海水滴の生成や白波被覆率を定量化する上で重要なものと考えられている。この図より、 k_L は低風速時には R_B に比例し、風速が大きくなると R_B に依存しなくなることがわかる。また低風速時の比例係数はうねりの周期によらずほぼ一定である。図-8において、 k_L は普遍表示されていないが、 R_B が k_L のパラメタリゼーションにおいて有効であるか否かについては、うねりの効果を含んだ摩擦速度による定量化から判断すべきであり、より詳細な検討が必要である。

5. おわりに

風洞付造波水槽を用いて、風波気液界面におけるガス

交換係数について実験的に調べた。本研究で得られた結果をまとめると以下のようなになる。

1) うねりの存在により、風波スペクトルピーク付近の流速変動のエネルギーは低下し、逆に高周波帯域ではエネルギーを獲得する。

2) うねりは風波気液界面でのガス交換を促進させる。その効果はうねりの周期が短いほど大きい。ガス交換係数は低風速時には R_B に比例し、風速が大きくなると R_B に依存しない。

3) ガス交換係数は、うねりの波形勾配とともに単調に増加せず、ある波形勾配で極大値をとる傾向がある。

本研究の一部は、平成10年度および11年度の文部省科学研究費補助金(奨励研究(A)代表者:杉原裕司ならびに基盤研究(B)(1)代表者:角野昇八)の援助の下で行われたことを付記し謝意を表します。

参考文献

角野昇八・斎藤満・山西和也 (1995): 海浜の砕波による酸素取り込み機能に関する実験的考察, 海岸工学論文集, 第42巻,

- pp. 1181-1185.
- 阪井淳子・草場忠夫・増田章 (1994): うねりと風波の相互作用に関する実験的研究, 九州大学応用力学研究所報, 第76号, pp. 123-142.
- Banner, M. L. and O. M. Phillips (1974): On the incipient breaking of small scale waves, *J. Fluid Mech.*, Vol. 65, pp. 647-656.
- Jähne, B. and H. Haußecker (1998): Air-water gas exchange, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 30, pp. 443-468.
- Jähne, B. and E. Monahan, eds. (1995): *Air-Water Gas Transfer*, Selected papers from 3rd Int. Symp. Air-Water Gas Transfer, Aeon.
- Toba, Y. and M. Koga (1986): A parameter describing overall conditions of wave breaking, whitecapping, sea-spray production and wind stress, In *Oceanic Whitecaps*, Monahan, E. and G. Mac Niocaill (eds.), D. Reidel, pp. 37-47.
-