

界面を通した物質輸送過程の解明に関するワーキンググループ中間報告

代表 運輸省港湾技術研究所 中村 由行

1. メンバー

代表者 中村由行(運輸省港湾技術研究所室長)
朝位孝二(山口大学工学部講師)
井上徹教(九州大学大学院工学研究科助手)
江藤剛治(近畿大学理工学部教授)
角野昇八(大阪市立大学工学部教授)
重松孝昌(大阪市立大学工学部講師)
杉原裕司(九州大学大学院総合理工学研究科助手)
竹原幸生(近畿大学理工学部講師)
辻本剛三(神戸市立高専助教授)
中山忠暢(環境庁国立環境研究所)
東野 誠(大分高専土木工学科助手)
細井由彦(鳥取大学工学部教授)
平口博丸((財)電力中央研究所主任研究員)
吉岡 洋(京都大学防災研究所助手)

2. 目的

水域の環境を考える上で、栄養塩、溶存酸素、有機物等の各種物質量を正確に評価、予測する必要がある。近年、電子機器や光学機器等の進歩により、水中の流動場や物質の移動現象を精度良く数値計算、もしくは計測できるようになってきた。しかし、それらの精度に比べ、境界条件となる水・堆積物の界面や水表面等の界面を通した物質輸送現象に関する予測値、計測値の精度は遙かに劣るのが現状である。

本ワーキンググループは、界面を通した物質輸送現象の解明を目的として、各種水域に対して、計測技術の開発、実験的研究、現地観測およびモデル化を包括的に行うことめざしている。

3. 活動状況

平成10年～11年度、角野を研究代表者として「沿岸域砕波面での大気-海洋気体輸送機構の解明とそのモデル化に関する研究」に対して文部省科学研究費補助金(基盤研究(B))を受けた。さらに平成12年度～14年度の予定で、角野を代表者として「砕波混入気泡と気泡連行乱れによる砕波気液界面でのガス交換機構の実態解明」に対し文部省科学研究費補助金(基盤(A))の交付が決定している。

本WGでは、水表面での気体輸送に限らず、底泥等の界面での物質輸送も含めた、種々の界面での物質輸送に関して調査、研究を行う。現時点では、界面を通した物質輸送に関する研究の1つとして、水表面の気体輸送に関して研究の現状調査を行った。これまでの研究の国際的な動向、および日本国内の土木関連分野における最新研究状況を取りまとめた。

今後、種々の界面に対する物質輸送現象の解明のため、メンバーの拡充も含めて発展させていく予定である。

4．研究の動向「水表面での気体輸送に関する国際シンポジウム」の推移

近畿大学 竹原 幸生

表-1にこれまで行われた「水表面での気体輸送に関する国際シンポジウム」^{1),2),3)}の年度，開催地，オーガナイザー，論文数をまとめて示している．本章では，まず過去3回のシンポジウムについて，いくつかの角度から掲載された論文の分類を行った．論文の第一著者の国別，専門別分類，および論文アブストラクトから対象としている現象（乱流，風波，気泡等），研究手法（現地観測，実験，解析等），および対象水域（海洋，河川，湖等）による分類を行った．ある1つの論文に対して，複数の項目に入るものは，すべての候補の項目にカウントした．よって，トータルの数にはばらつきがある．また，講演論文集には，全シンポジウム講演者のうち34件が掲載されていないので，実際のシンポジウム講演者数には対応していない．

本シンポジウムにおける過去3回の論文分類の推移を図-1に示す．3回通して最も参加者が多い国は米国であり，第1，2回は米国だけで約6割の参加者があった．第2回では第3回の主催国であるドイツはわずか1編であった．3回を通じて，アジアからの参加が少ない．

専門別分類については，第1，2回では土木工学が最も多く，第3回では海洋・気象学が最も多い．これは地球温暖化問題に関連して，対象水域が河川・湖沼等から海洋へ移ったものと考えられる．オーガナイザーも第1，2回が土木工学関連の研究者であったのに対し，第3回では海洋学関連の研究者へ変わっている．また海洋・気象学，土木工学に次いで多いのは，3回通して化学工学関係の研究者であった．

現象別分類に関しては，第2回から第3回にかけて，水中の乱れに関する研究が減り，風波に関する研究が急に多くなった．また第1，2回では数編しかなかった気泡に関する研究がほぼ倍になっている．

第3回では，研究施設の紹介セッションが設置され，各研究機関間の共同研究を呼びかけている．

研究手法の推移については，3回を通して実験的研究，現地観測の割合が大きい．特に，回を追う毎に現地観測が増えている．一方，解析・モデル化については年々減少し，第1，2回に比べて，第3回では1/3～1/2に減っている．従来の多くの研究では海洋における気体輸送係数 k_L を風速との関係だけで議論してきた．しかしながらwhitecap（白波）等による気泡の海水中への取り込みや水滴の大気中への放出などが k_L に大きな影響を与えることが指摘されてきたために，現地観測や実験により現象をよ

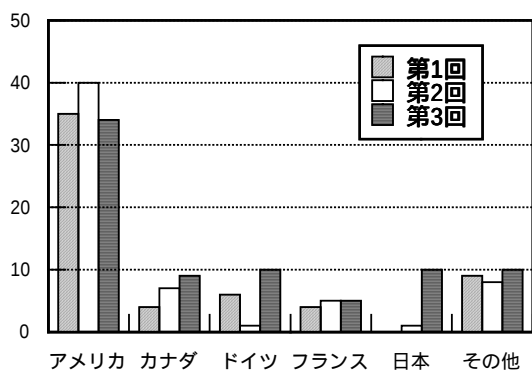
表-1 過去3回のシンポジウムの概要

シンポジウム	開催年月日	開催場所 (会場)	オーガナイザー	論文数	論文集名 (出版社)
第1回	1983年 6月13日～15日	米国 (Cornell University)	W. Brutsaert (Cornell Univ.) G.H. Jirka (Cornell Univ.)	59	Gas Transfer at Water Surface (D. Reidel Publishing Company)
第2回	1990年 9月11日～14日	米国 (University of Minnesota)	S.C. Wilhelms (U.S. Army Eng.) J.S. Gulliver (Univ. of Minnesota)	60	Air Water Mass Transfer (ASCE)
第3回	1995年 7月24日～27日	独国 (University of Heidelberg)	B. Jahne (Univ. of Heidelberg) E.C. Monahan (Univ. of Connecticut)	81	Air-Water Gas Transfer (AEON Verlag and Studio)
第4回	2000年 6月5日～8日	米国 (Eden Roc Resort & Spa)	M. Donelan (Univ. of Miami) R. Wanninkhof (AOML/NOAA)		

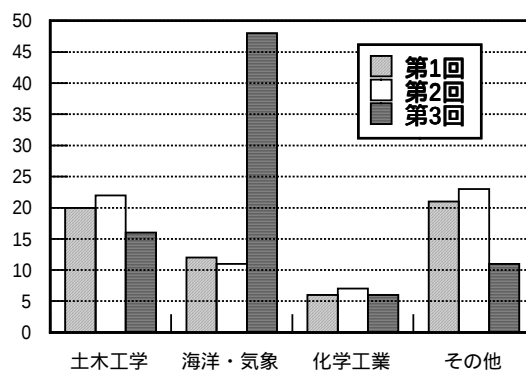
り詳細に理解することが急務となったためと思われる。

対象水域別分類に関しては次のことが言える。土木工学分野に関係の深い湖沼，河川，人工的施設の割合は第1，2回に比べて，第3回では減少している。一方，海洋を対象とした研究が増加している。また，第1回では対象水域を限らず基礎的な気体輸送に関する研究が多く含まれている。

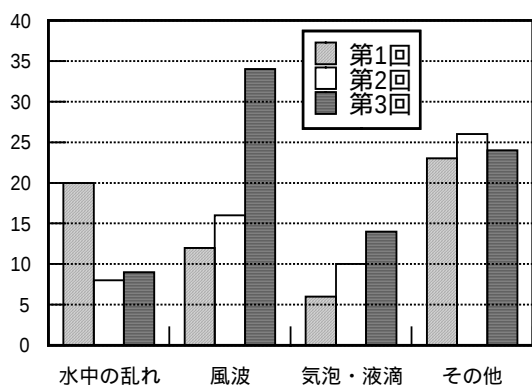
以上まとめると，研究の対象水域が河川，湖沼等から，地球規模の環境問題に直接関係する海洋に移ってきたため，シンポジウム参加研究者数の割合も，土木分野から海洋・気象学に移っている。また，海洋での気体輸送に関しては，これまでの風のみによる気体輸送ではなく，whitecap，Langmuir cell等による大規模循環，および気泡崩壊等により生じるエアロゾルが大きく影響しているという結果から，現地観測，実験等の研究が増えているのが特徴と言える。



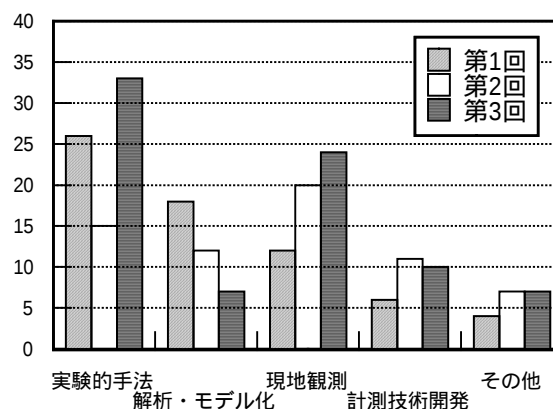
(a)参加者国別分類



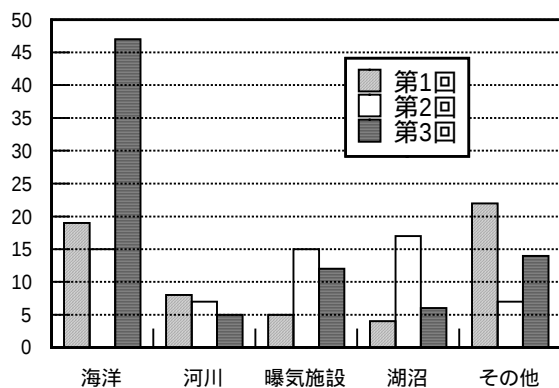
(b)専門別分類



(c)現象別分類



(d)研究手法別分類



(e)対象水域別分類

図-1 過去3回の「水表面での気体輸送に関するシンポジウム」講演論数の分類

5. 日本の土木工学関連分野における最近の研究

山口大学 朝位孝二

5.1 概要

日本の土木工学分野では20年程前，衛生工学関係の研究者により活発に研究が行われた^{4),5),6)}．最近では海岸工学や水工学関係の研究者が再び研究を始めている．この節では最近の研究例を簡単に紹介する．ここでは，「表面近傍の乱れによる気体輸送」，「河における気体輸送」，「沿岸域における気体輸送」，「海洋における気体輸送」に分類して紹介する．

5.2 表面近傍の乱れによる気体輸送

中村ら^{7),8)}は，実験及びモデル化の両面から基礎的なガス交換機構の研究を行っている．まず，実験的研究⁷⁾としては，平均流が存在しない振動格子乱流場において，LDVとプローブの径が $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下の微小酸素電極を用いて，水表面近傍の乱流諸量と濃度の鉛直構造を詳細に計測した．実験は水面が波立たない比較的乱れの小さい範囲（乱流レイノルズ

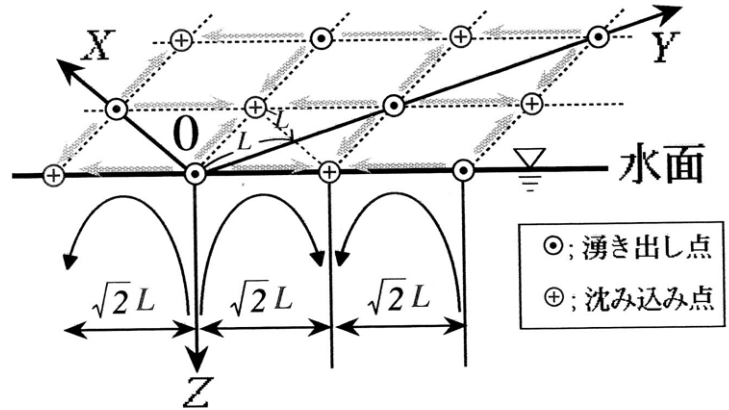
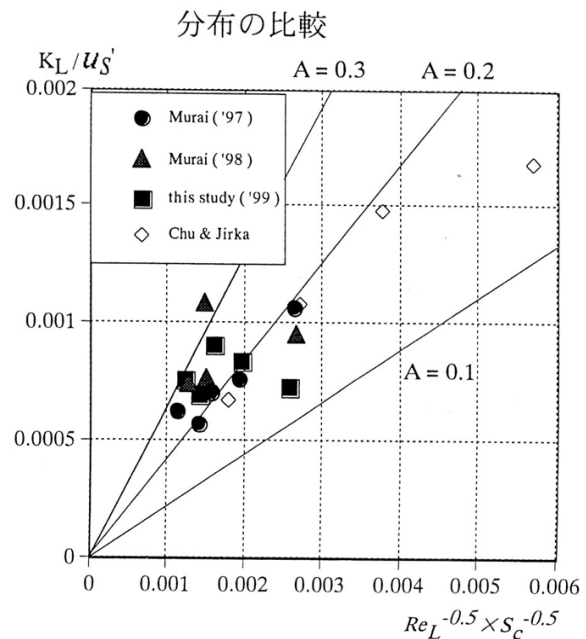
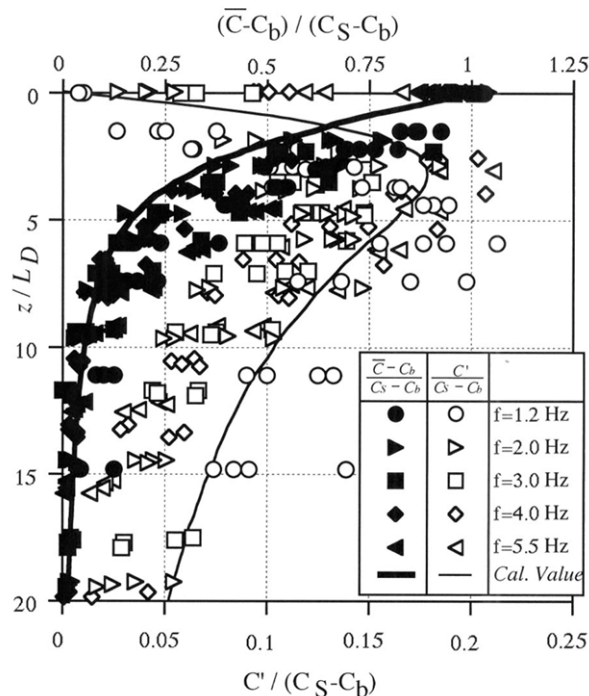


図-2 中村らにより提案された表面渦構造モデルの模式図 L は表面渦の長さスケール．



(a)DO 濃度の平均値および濃度変動成分の鉛直分布 (b)気体輸送係数の Re 数および Sc 数依存性

図-3 中村ら実験結果

$\bar{C}$ はセル内での水平面内の平均濃度， C_s は飽和濃度， C_b は bulk 濃度， C' は濃度変動成分， L_D は濃度境界層スケール， u_s' は水表面での水平方向乱れ速度， Re_L は積分長さスケールと u_s' で定義される Reynolds 数， Sc はシュミット数， A は表面更新率を規定するパラメータである

数が1,000以下)で行われた。実験の結果、溶存酸素の時間平均濃度は水面から指数関数的に減少するのに対して、濃度変動成分は水面下で極大値をとることが示された。濃度分布は水面下1mm以下という、Kolmogorovの最小径より小さな極微細な領域(濃度境界層)で生じていた。この条件下では、境界層厚さおよび気体輸送係数 k_L はそれぞれ乱流レイノルズ数の $-1/2$ 乗に比例していることから、気体輸送がlarge eddyによって支配されていることが示唆された。

従来提案されてきた気体輸送に関する概念的モデル(浸透説や表面更新説)は、モデルのパラメータである水塊の表面滞在時間あるいは更新頻度を、流れの乱流量とどのように関連付けるかという問題があった。中村ら⁸⁾は、浸透説的な機構を基礎に、水表面近傍の3次元的な渦運動の影響を直接取り込んだ流体力学的なモデル化を行い、溶解物質濃度の鉛直分布や気体輸送係数 k_L に対する解析解を得た。図-2は、モデル化した表面渦構造の模式図である。理論解は表面渦の代表的な速度および長さスケールをモデルパラメータとして含むが、それらのスケールがlarge eddyによって支配されている場合には気体輸送係数 k_L が乱流レイノルズ数の $-1/2$ に比例し、small eddyに依存している場合には $-1/4$ 乗に比例するという従来の知見をうまく説明する。また、理論解析の結果は、振動格子乱流において計測された溶存酸素の時間平均濃度や濃度変動成分の鉛直分布、さらに気体輸送係数のシュミット数およびレイノルズ数依存性を良く説明し、実験範囲においては気体輸送がlarge eddyによって支配されていることを示した。図-3(a)に、振動格子実験における溶存酸素の時間平均濃度および濃度変動成分の鉛直分布をモデル計算と比較した結果を示す。さらに、図-3(b)に、気体輸送係数のパラメータ依存性を実験とモデルで比較した結果を示す。

杉原ら⁹⁾は応力方程式モデル(Launder・Reece・Rodiモデル)を用いて、振動格子乱流場における水表面近傍の乱流構造が気体輸送に及ぼす影響について数値実験的に検討した。その結果、応力方程式モデルによって算出された気体輸送係数の乱流レイノルズ数依存性は、Chu and Jirka¹⁰⁾の実験結果と一致することがわかった。

5.3 河川における気体輸送

気液界面での物質移動のモデルには、Kolmogorovスケールの最小渦が支配的とするsmall eddy modelとエネルギー保有渦(energy-containing eddy)が支配的とするlarge eddy modelがある。平山ら¹¹⁾は攪拌槽での気体輸送係数 k_L の温度依存性を調べることによりどちらのモデルが妥当であるのかを検討し、large eddy modelの方が妥当性が高いという結論を得ている。さらに平山ら¹²⁾は実験水路で得られている k_L を再整理しlarge eddy modelの有効性を論じており、また実河川での k_L を推定する式を提案している。

山西ら¹³⁾は実河川において水表面から大気中への N_2O のガスフラックスを実測した。彼らはサーキット型チャンバーを水面に浮かべて曝気面積を固定しチャンバー内濃度の時間変化からフラックスを評価した。

5.4 沿岸域における気体輸送

角野ら^{14),15)}は、海浜斜面上での砕波や海岸構造物周辺波浪による大気中の酸素の海水中への取り込み機能に関する実験的研究を行っている。彼らは造波水槽を用いる実験においては、造波水槽固有の配慮すべき点があることを指摘した。その解決策の一つとして、砕波線の沖合にビニール膜を設置して曝気容積(ビニール膜と汀線で囲まれる容積)を確定する方法があることを示した。再曝気係数 k_2 から気体輸送係数 k_L を算定するには曝気面積が必要である。角野らは曝気面積を砕波線から汀線の間の静水面面積の n 倍であるとし、 n をBreaker Type Indexに反比例する形として仮定すれば、気体輸送係数 k_L は波の周期や波高、砕波形態、緩斜面の勾配の値に関わりなく一義的に波の特性で表されることを見いだした。また、波の特性で最も相関が高かったのは $(H_0/T)^2$ であることを見いだすとともに、波の特性が与えられたときの海浜での酸素取込機能を示した¹⁶⁾。これに引き続き、種々のモデルによ

る碎波帯での単位質量あたりのエネルギー逸散率 (ε) と酸素取込機能との間の関係を調べた。そして、両者の間には強い相関関係が見いだされること、なかでも、 H_b/T の関数として表される灘岡ら、あるいは岡安らによるモデルによる値との相関が最も強く、そのとき、気体輸送係数 (k_L) は ε のほぼ2乗に比例する形で表されることを示した(図-4(a)および(b)参照)。また、 k_L が ε の1/4乗に比例する形で表される small eddy model とは異なり、ほぼ2乗に比例する理由として、気泡の働きが考えられることを指摘した¹⁷⁾。

細井ら^{18),19)}は海岸構造物周辺での曝気に表面更新モデルを適用した。表面更新率が消波により逸散する波のエネルギーと粘性により表されると考えて、次のような再曝気係数 k_2 に関する予測式を導いた。

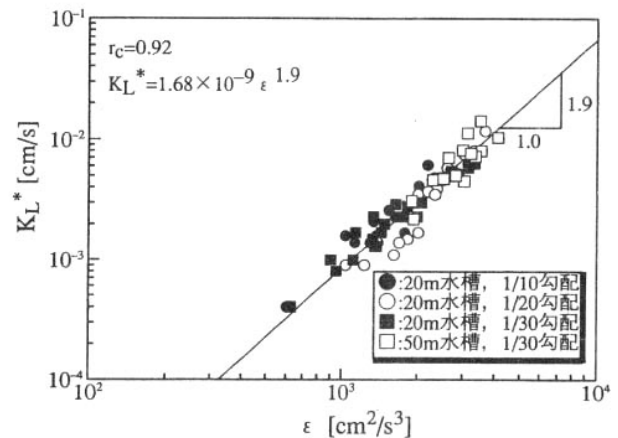
$$k_2 = 1.35 \times 10^{-2} (DgH_0) \left(\frac{\varepsilon TB}{\nu V_d} \right) \frac{1}{h}$$

ここで、 D 、 g 、 H_0 、 T 、 B 、 V_d 、 h 、 ε 、 ν は、それぞれ分子拡散係数、重力加速度、入射波の沖波波高、周期、消波に関わる構造物の長さ、消波に関わる構造物体積、水深、エネルギー逸散率、動粘性係数である。種々の水槽実験における様々なタイプの構造物に関する再曝気係数の実測値を用いて検証を行った結果が図-5である。幅広い範囲の再曝気係数をほぼ予測し得ている。さらに、この式を緩傾斜の護岸に適用した場合は係数の値が1オーダー大きくなった。このことから傾斜護岸では直立型の構造物よりも曝気の効果が大きくなるものと考えられた。

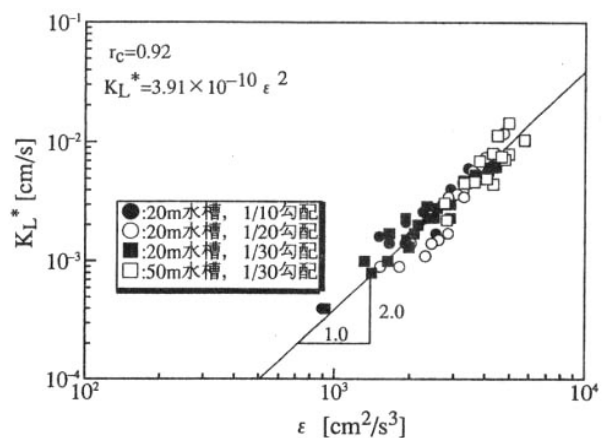
5.5 海洋における気体輸送

5.5.1 風波

嶋田ら²⁰⁾は海水のガス交換に対する影響を明らかにするため、振動格子乱流水槽、および風波水槽を用いて、自然海水を含む何種類かの水を対象にガス輸送の実験を行っている。その結果、崩れのない安定な気液界面の場合、海水に対する炭酸ガスの輸送係数が真水の場合の値よりも50%減少することを明らかにした。これは、通常の洗浄では除去できない極微量な界面活性物質が気液界面に存在し、分子拡散係数に及ぼす電解質の効果を見かけ上大きくする



(a) 灘岡らのモデルによる



(b) 岡安らのモデルによる

図-4 角野らによる気体輸送係数とエネルギー散逸率との関係

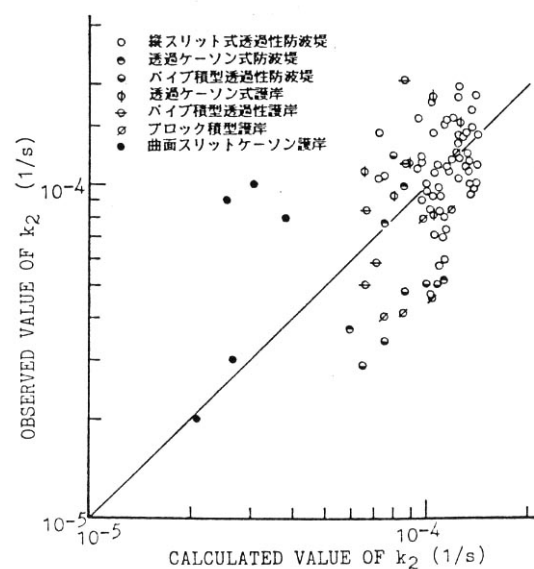


図-5 再曝気係数の計算値と実験値との比較 (細井らによる)

ためであるとしている．ただし，界面が激しく崩壊する場合には，両者の間にはほとんど差がなくなる．

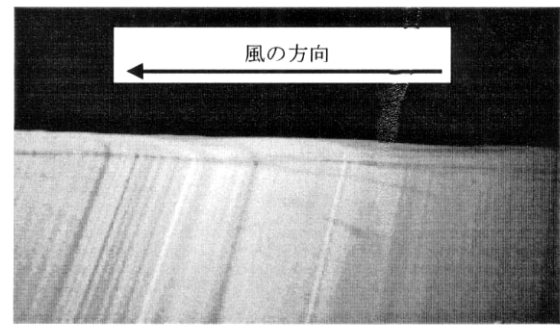
禰津ら^{21),22)}は，風波による乱流場の詳細な計測を行っている．500mWの4ビーム後方散乱型2成分レーザー流速計により，水相と気相の両側の流速分布を水路中央断面で計測している．また，水相側の流速計測時では，同時に分解能が0.1mmの超音波波高計により，水面変動を計測している．これにより，線形フィルタリング手法(LFT)を用いて，波成分と乱れ成分の分離を行い，乱れおよびエネルギーの構造を詳細に議論している．

竹原ら²³⁾は，フルオレセイン水溶液の蛍光強度がpHに依存する特性を利用した炭酸ガスの水への溶入過程の直接可視化法を利用して，風波による炭酸ガスの溶入過程の可視化に成功した．実験には0.5m×0.5m×16mの空気循環式気密性風洞水槽を用い，炭酸ガスを充填し，高濃度の炭酸ガスを水面上に吹かせた．フルオレセインの最大励起光波長が494nm当たりにあるため，励起光として，488nmと514nmに出力ピークを持つ，アルゴンイオンレーザーを用いた．レーザー光はシリンドリカルレンズにより，シート光に変換され，風向に平行に水面上方から照射された．得られた可視化画像の一例を写真-1(a)に示す．画像は水槽側面よりやや下方より撮影しているため，蛍光が水表面に反射している部分が写っている．画像中央部に黒い線が炭酸ガスの溶入によって生じた蛍光の低下であり，水面に対応する．写真から分かるように，水面から斜め下方に炭酸ガスが溶け込んでいるのが分かる．

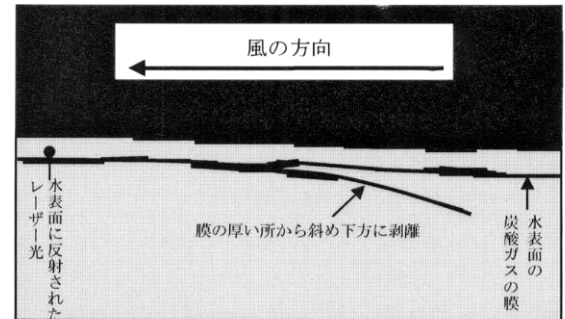
最近，Jähne and Haußecker²⁴⁾も，同様に，水溶性蛍光染料の蛍光のpH依存性を利用して，HCl気体の風波による水中への溶け込み過程を可視化している．彼らは励起レーザービームを水表面上方から，水底方向に照射し，ビームに沿った鉛直方向の濃度境界層を計測している．得られた鉛直1次元のHCl濃度境界層の分布を時間方向に広げて，模擬的な2次元HCl濃度分布を図示している(写真-1(b)参照)．

5.5.2 砕波による乱れ，気泡

吉岡ら²⁵⁾は，現地で砕波や乱れの状態を気泡分布から追跡する気泡観測装置を開発し，和歌山県田辺湾の高潮観測塔に設置して観測した．装置は市販の水中発射型超音波波高計(200kHz)に特別な信号処理回路を組み込んで，波高とともに海底から海面にいたる間(トランスデューサー直上2.5mから約40mの距離まで)の超音波反射強度(受信波包絡線検波電圧)を計測し，鉛直分解能7.5cm，時間分解能4サイクルでデジタル記録するものである．砕波時には観測塔から海面をビデオ撮影して，海面の

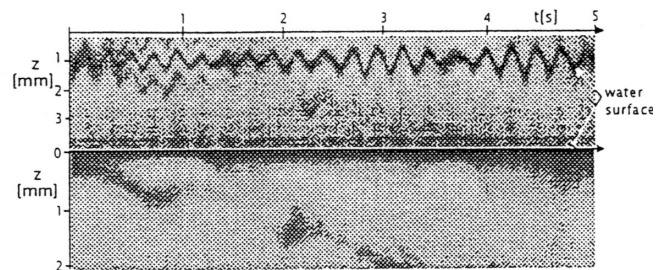


a) 炭酸ガスの溶入過程の写真



b) 炭酸ガスの溶入過程略図

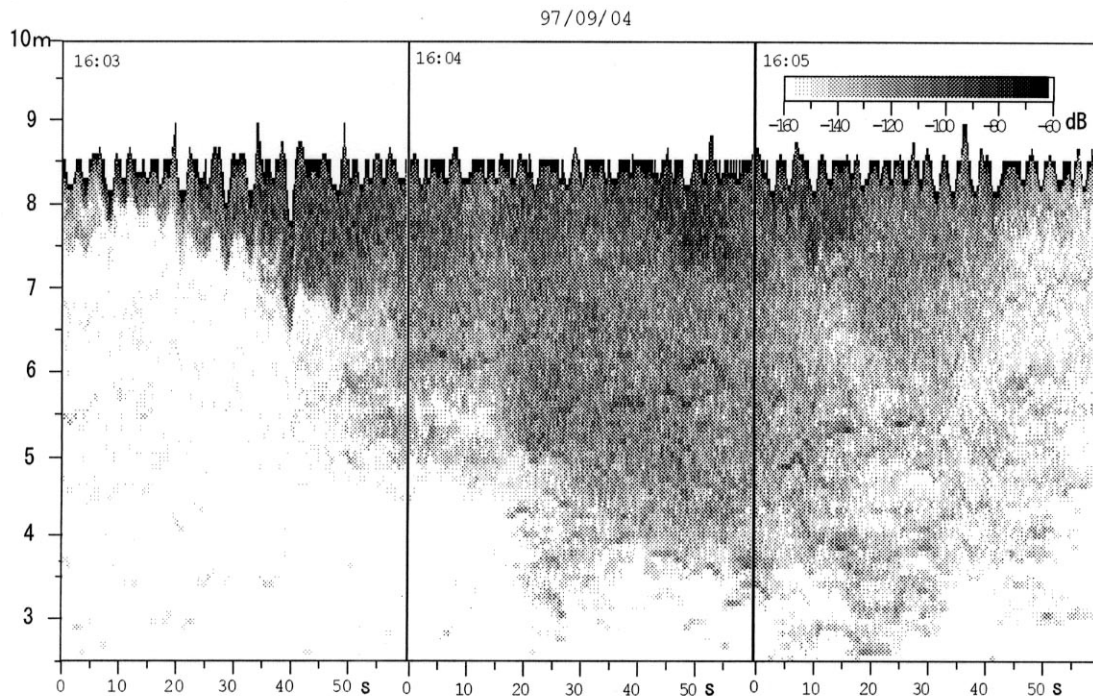
(a)竹原らの可視化結果



(b)Jähne and Haußecker の可視化結果

写真 - 1 風波による気体輸送現象の可視化結果

写真から分かるように，水面から斜め下方に炭酸ガスが溶け込んでいるのが分かる．

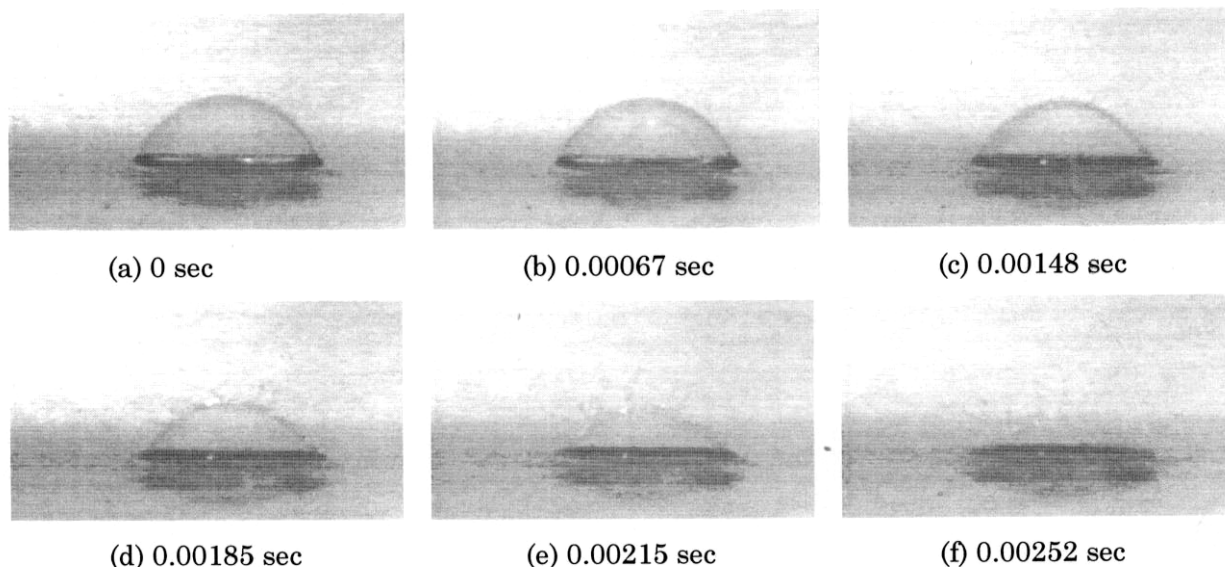


図—6 超音波を用いた海面境界層の現地観測(風波による気泡の取り込み, 吉岡らによる)

ホワイトキャップと反射強度にみられる気泡検知の対応を調べ, 気泡の侵入深度と有義波高の関係を解析した. 波高が1mを越す頃から砕波による気泡を示す高反射領域が水面直下に間欠的に発生し, 時には波高以上の深さまで大量に発生するが, 単発の砕波で生じた気泡は4~5波程度の期間存続しては消失した. ほとんど気泡の上昇が見られないところから, 気泡は直径が $100\mu\text{m}$ 以下と予想できる. 内部気泡層と海面の間に低反射層(気泡が存在しない層)が割り込んでいる例も多く見られ, 内部気泡は表層から混合で到達したものでなく, 砕波で出現と同時に内部に貫入したことをうかがわせている. 十分に発達した風波の状態では, 定常的に気泡層が表面から波高の4~5倍の深さまで存在するようになり(図-6), Toba and Kawamura²⁶⁾が提唱した風波と直結した特殊な乱流境界層 Downward Bursting Boundary Layer (DBBL) の特性と一致している. しかし周期の長いうねりを含んだ波が砕波しているケースでは気泡は有義波高の2倍程度しか達していない. これは, 有義波高に代表されるうねりが砕波するのでなく, その上に載っている風波が砕波しているためであろう.

風波直下における乱流境界層は低周波の乱流バーストによって特徴づけられている. 大気-海洋間の運動量輸送やガス交換はこの境界層を介して行われることから, その特性を明らかにすることは工学的にも重要である. Toba and Kawamura²⁶⁾は, 風波スペクトルピークの低周波帯域における乱流特性量の鉛直分布が, 有義波高およびピーク波のストークスドリフトにより規格化できることを, 局所平衡下の風波の相似則に基づいて示した. 杉原ら²⁷⁾は, 乱れ強度, レイノルズ応力, 乱れエネルギー, 乱れエネルギーフラックスの鉛直構造について, 彼らの議論が妥当であるか否かを検証する研究を行った. その結果, 有義波高とストークスドリフトを用いて規格化した場合, いずれの特性量の分布についても風速に依存せずに普遍的に表わせることが確認された. これより, 風波下における乱流境界層の特性が局所平衡領域の風波の相似則の枠組みで捉えられるという, Toba and Kawamuraの主張は妥当であるものと結論された.

Imamura and Mori²⁸⁾は, 単一気泡における N_2O ガスのガス交換係数についてカラム実験を行い, 逐次サンプリングおよびヘッドスペース法によりガス交換係数と気泡径の関係を求めた. その結果,



写真— 2 水表面での気泡崩壊過程の観察結果の一例(直径約 20mm, 鍋坂による)

1-4mm 径の単一気泡ではガス交換係数が気泡径に対して線形の関係にあることを明らかにしている。

鍋坂²⁹⁾は、気泡が水表面で崩壊することによって生じる水滴が気体輸送に及ぼす影響に着目し、まず、気泡崩壊による水滴生成メカニズムを高速ビデオカメラを用いて詳細に観察した。彼らは表面張力と動粘性係数の変化が、気泡の水表面での崩壊現象へ及ぼす影響を実験的に明らかにした。エタノール水溶液の濃度を調節することにより、水溶液の動粘性係数を固定したまま、表面張力を変化させたり、表面張力を固定して動粘性係数のみを変化できることを利用し、詳細に実験を行っている。写真-2に水表面での気泡崩壊現象の1例を示す。

5.6 地球規模の気体収支

現地観測結果を基に、亜熱帯赤道域における N_2O の鉛直分布などを検討した例として森ら³⁰⁾の研究がある。彼らは、1998年1月～2月および1998年12月～1999年1月の2度に渡り実施された赤道上海洋(太平洋)での水質・気象・海象観測結果をもとに、 N_2O の鉛直分布およびその変動特性について検討を行い、これらに及ぼす風速・波高等の気象・海象条件の影響について明らかにしている。

6. 今後の課題：「界面水理学」確立の必要性

大阪市立大学 角野 昇八

酸素や二酸化炭素など、各種気体の水面での輸送現象の実態解明は、地球温暖化防止の観点のみならず生態系を含めた水環境保全の観点、汚染物質の大気-水中循環過程の解明の観点などから重要な課題となっている。現在、土木のみならず、機械、化学、生物、海洋物理、気象などの広範な研究分野において精力的な取り組みが始められている。以下には、著者らが、この分野の研究の現状を取りまとめた段階で抱いた課題と今後の展望を取りまとめた(図-7参照)。

まず河川流においては、その水表面での気体輸送係数の評価のために従来より多くの経験式が提案されているが、室内実験と野外実験とで統一した解釈に至っていないのが現状である。その理由は、室内実験と野外実験それぞれが固有の問題を抱えていることにある。開水路実験の場合、実験水路の長さの制約と循環部分の水表面での気体輸送の取り扱いが問題になっている。また、野外実験では、便宜上および計測機器の精度の制約から、水深平均レベルでの評価しか通常なされていないことに問題がある。このことは、河床に大きな粒径粗度が存在する開水路流れのような場合に特に問題となろう。この場合、粗度背後に発生する剥離も水面近傍でのmicrolayer(輸送現象が生じている界面近傍の極めて薄い層)に大きな影響を及ぼすと考えられ、水深平均レベルでの評価だけでは現象の正確な実態解明には不十分であると考えられる。今後、レイノルズ数、フルード数といったような断面平均レベルでの指標に加えて、乱れの水面近傍での詳細な計測と数学的なモデル化などに基づく新たな指標の導入が必要と思われる。また、流れと風が共存する場での現象についての研究も必要である。さらに、跳水や段落ち流れのように激しい気泡を伴う流れについても、河川環境の改善の一環として気体輸送の観点から再評価されることが望まれる。

一方、海洋においては、表面での気体輸送係数は風速だけで従来定式化されてきたが、実態はそのような単純なものではないことが明らかである。しかしながら、風速の他にどのようなパラメータを

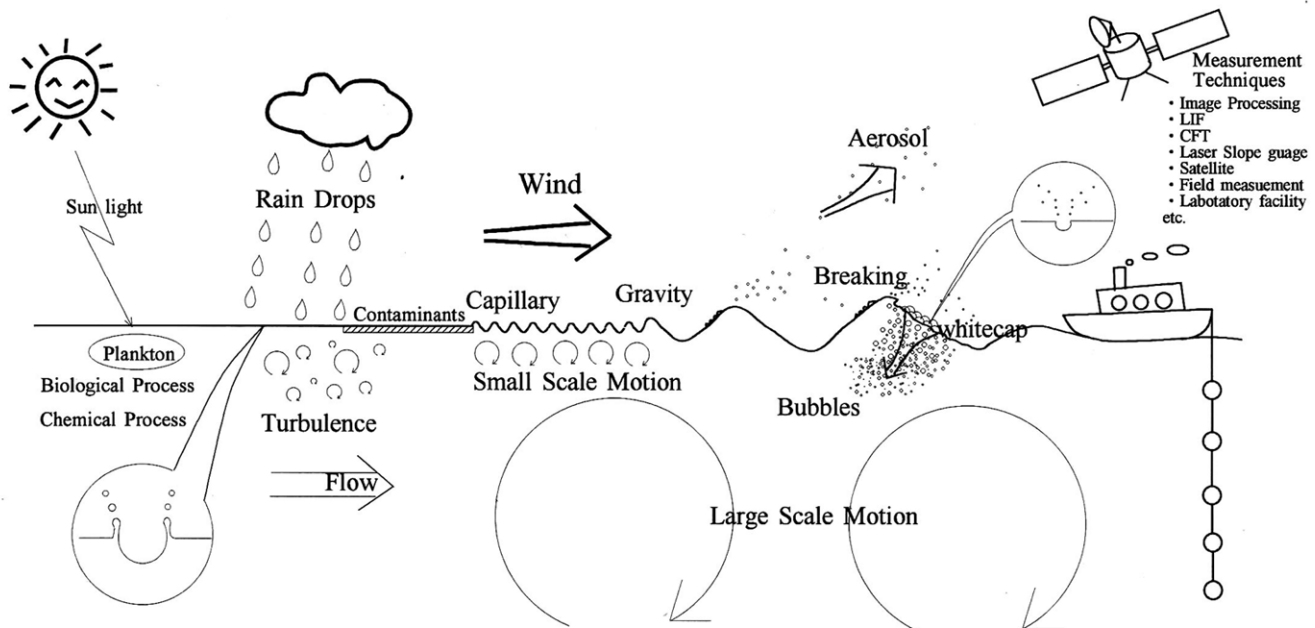


図 - 7 水表面での気体輸送に関する今後の研究課題

どのように用いればよいのかはまだ明確にはされていない．その理由は，whitecap，microscale breakingなど界面で発生する現象や水表面上に存在する界面活性剤などの化学的物質が気体輸送に与える影響に関する知見の蓄積がまだ不十分だからである．今後，界面で複雑な要因が絡み合って発生する現象とそれらが気体輸送に及ぼす影響を観測・実験で明らかにしていくことが急務である．

さらに最近，砕波による気泡が気体輸送にどの程度寄与しているのかを明らかにするために，海洋物理分野を中心に関連の研究が精力的に進められている．しかし現状では，気泡量，気泡径スペクトル，滞留時間，侵入深さといった諸特性に関する知見も不十分であり，気体輸送係数のパラメタリゼーションにおいて気泡の特性量がどのように寄与するのかについてもよくわかっていない．また，気泡の生成には塩分や界面の汚れ等がかなり影響するものと考えられているが，この点についても明確な結論を得るにはさらに多くの基礎研究が必要とされよう．現在，現地での気泡分布を音響分析や画像解析から解明する試みが活発になされているが，それらの情報と気体輸送係数を結び付けるためには，基礎的な室内実験が重要な役割を果たすように思われる．砕波，気泡，乱れが相互作用する複雑流体系での物質輸送を明らかにするためのアイデアと洗練された実験システムの開発が期待される．

界面輸送現象に関する新たな知見を得るための強力な手段として数値計算がある．最近のコンピュータの発達はめざましく，今後ますます気体輸送現象の数値解析が増えていくものと思われる．今後重要と思われる課題の1つは砕波およびそれにとまなう気泡の発生，気相-液相間の相互作用まで考慮した砕波に関する一連の現象の再現およびその定量的評価と考えられる．しかしながら，その計算は極めて困難である．計算格子を用いないメッシュレス法をはじめ，新たな数値計算法の開発・応用が期待される．

計測技術の開発は気体輸送現象の解明に新たな手がかりを与えるものとして大きな期待が寄せられている．第4章でも述べたとおり，まず水表面極近傍の気体輸送現象を理解することが現段階での大きなテーマの1つである．これまで，気体輸送係数と流れ場の関係はバルクな計測値で関連づけられてきたが，どうしてもばらつきが大きく，気体輸送を直接規定している水表面のmicrolayer内の流れ場の構造を解明することが急務である．室内実験では，水表面近傍の気相，水相の流れ場，および気体輸送過程の関係を明らかにするため，可視化技術(LIF等)および画像計測技術(PIV等)を利用した計測技術の開発が進められている．今後さらに詳細な計測が行われるであろう．また，界面における輸送現象はmicrolayerの中で発生する物理現象であるため，応答特性に優れ，プローブのサイズが微小なセンサーなど計測機器の進展が強く望まれる．現地計測では，トレーサー法や同位体による気体輸送係数の推定法が用いられているが，どうしてもある期間の平均的な量しか計測できないため，気体輸送を規定している現象を同定することが困難である．今後，渦相関法やコントロールフラックス法等などの直接フラックス計測法の精度向上や新たな計測技術の開発が望まれる．気泡混入による気体輸送現象に関しては，現在，精力的に現地計測技術の開発が進められており，音波や画像計測による気泡分布の計測が計測可能になってきたが，今後，正確な気体輸送フラックスの計測技術の開発が必要である．海洋表面での諸量の計測については，現在，衛星データを用いたグローバルな計測も始められており，ミクロな場からグローバルな場までの計測技術の開発が必要になると思われる．

以上に述べたように，気液界面での気体輸送現象は，地球温暖化など地球レベルまでの現象に大きく関わる一方，分子レベルでの微細構造に強く影響を受けるとみられる現象であり，また，物理現象である一方，化学的影響を受け，ときに生物的影響も受ける．さらに，気液2相にわたる現象でもある．このように，この現象は重層的かつ複合的であり，したがってその解明のためには理学-工学の垣根を越えた学際的な研究姿勢が必要とされる．すなわち，界面での物質輸送過程をそこでの力学過程との関連で解明することをめざした「界面水理学」とも称されるべき新しい学問・研究分野の確立が必要となる．またこの研究分野が確立されれば，気液界面での気体輸送現象に関する多面的な議論と

研究がより活発化するのみならず，水・底泥界面などの他の界面での物質輸送現象なども範疇に入れた，統一的な理論体系の構築も可能とすることが期待できる．計算技術と計測技術の急速な進展にともなって，「界面水理学」関連の研究が今後ますます盛んになることが大いに期待される．

参考文献

- 1) Brutsaert, W. and Jirka, G. H.(edrs): Gas transfer at water surfaces, D. Reidel Publishing Company, 639pp., 1983.
- 2) Wilhelm, S. C. and Gulliver J. S.(edrs): Air water mass transfer, ASCE, 797pp., 1991.
- 3) Jähne, B. and Monahan, E.C.: Air-Water Gas Transfer , AEON Verlg \& Studio, 888pp. 1996.
- 4) 例えば，平山公明，今岡正美，松尾友矩：表面ばっ気における酸素吸収，下水道協会誌，第17巻，第197号，pp.21 - 30，1980.
- 5) 例えば，村上 健：河川における再曝露，第6回衛生工学研究討論会講演論文集，pp.45 - 82，1970.
- 6) 例えば，栗谷陽一，敷田和久：開水路流れにおける表面ばっ気速度について，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.193-194, 1973.
- 7) 中村由行，村井大亨，小松利光，油島栄蔵，井上徹教，柴田敏彦：微小酸素電極を用いたガス交換機構に関する実験的研究，海岸工学論文集，第44巻，pp.1236-1240，1997.
- 8) 中村由行，村井大亨：水表面におけるガス交換の流体力学的モデル化とガス輸送機構について，海岸工学論文集，第46巻，pp. 111-115, 1999.
- 9) 杉原裕司，松永信博，本地弘之：水表面近傍の乱れが気体輸送速度に及ぼす効果，九州大学大学院総合理工学研究科報告，第19巻，第1号，pp.55-60，1997.
- 10) Chu, C.R. and Jirka, G.H.: Turbulent gas flux measurements below the air-water interface of a grid-stirred tank, Int. J. Heat Mass Transfer, 35, pp.1957-1968, 1992.
- 11) 平山公明，松尾友矩，今岡正美，平山けい子：温度係数の適合性にもとづく再ばっ気モデルの比較，土木学会論文集，No.485/II-26, pp.121-126, 1994.
- 12) 平山公明，松尾友矩，今岡正美，平山けい子：乱れ強度モデルに基づく河川の再ばっ気係数の推定式，土木学会論文集，No.521/II-32, pp.181-191, 1995.
- 13) 山西博幸，原田智彦，楠田哲也，大石京子：水表面から大気中へのガス輸送に関する研究，第53回年次学術講演会講演概要集VII，pp.476-477，1998.
- 14) 角野昇八，他：海岸構造物の曝気能に関する実験的考察，海岸工学論文集，第41巻，pp.1036-1040，1994.
- 15) 角野昇八，他：海浜の碎波による酸素取り込み機能に関する実験的再考察，海岸工学論文集，第42巻，pp.1181-1185，1995.
- 16) 角野昇八，他：海底勾配の影響を考慮した海浜碎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，pp.1211-1215，1996.
- 17) 角野昇八，他：エネルギー逸散率の各種モデルに基づく海浜碎波の酸素取り込み機能の解析，海岸工学論文集，第45巻，pp.66-70，1998.
- 18) 細井由彦，村上仁士，三井宏：各種海岸構造物の曝気効果と再曝気係数の予測式，海岸工学論文集，第35巻，pp.812-816, 1988.

- 19) Hosoi, Y., Murakami, H. and Mitsui, H.: Reaeration due to wave breaking at coastal structures, *Coastal Engineering in Japan*, Vol.33, No.1, pp.89-100, 1990.
- 20) 嶋田隆司, 三角隆太, 小森悟: 気液界面を通しての炭酸ガスの物質移動係数に及ぼす海水の効果, *日本機械学会論文集(B編)*, 第64巻621号, pp.186-193, 1998.
- 21) 禰津家久, 中山忠暢: 水槽風洞波が乱れ成分に及ぼす影響に関する研究, *水工学論文集*, 第43巻, pp.407-412, 1999.
- 22) 禰津家久, 中山忠暢, 井上理恵: 風波発生下における水・空気界面での乱流構造に関する研究, *水工学論文集*, 第43巻, pp.413-418, 1999.
- 23) 竹原幸生, 加藤明秀, 江藤剛治: 風波による炭酸ガスの取り込み過程の可視化, *海岸工学論文集*, 第46巻, pp. 101-105, 1999.
- 24) Jähne, B. and Hau β ecker: Air-water gas exchange, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 30, pp.443-468, 1998.
- 25) 吉岡洋, 芹沢重厚, 高山知司: 超音波による海面境界層の観測(風波砕波による気泡の取り込み), *海岸工学論文集*, 第45巻, pp.71-75, 1998.
- 26) Toba, Y. and Kawamura, H.: Wind-wave coupled downward-bursting boundary layer (DBBL) beneath the sea surface, *J. Oceanography*, Vol.52, pp.409-419, 1996.
- 27) 杉原裕司, 高崎敦彦, 松永信博: 風波下における乱流境界層の構造, *海岸工学論文集*, 第46巻, pp. 96-100, 1999.
- 28) Imamura, M. and Mori, N.: The Influence of Solubility on Bubble Mediate Gas Exchange, OS41A-11, American Geophysical Union, Western Pacific Meeting, 1998.
- 29) 鍋坂誠志: 気泡崩壊現象に対する表面張力と粘性の影響, 近畿大学修士学位論文, 1999.
- 30) 森信人, 今村正裕, 下島公紀: 亜熱帯赤道域における N_2O の分布特性と気象・海象条件の関係, *海岸工学論文集*, 第46巻, pp.1256-1260, 1999.