土木学会論文集 No. 656／II-52, 269-287, 2000. 8

水表面での気体輸送に関する研究の最新の動向

角野昇八[1]・細井由彦[2]・竹原幸生[3]・朝位孝二[4]・杉原裕司[5]・中村由行[6]・
吉岡洋[7]・平口博丸[8]・江藤剛治[9]・中山忠暢[10]

[1]正会員　工博　大阪市立大学教授　工学部土木工学科（〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138）
[2]正会員　工博　鳥取大学教授　工学部社会開発システム工学科（〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101）
[3]正会員　博(工)　近畿大学講師　理工学部土木工学科（〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1）
[4]正会員　博(工)　山口大学講師　工学部社会建設工学科（〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1）
[5]正会員　博(工)　九州大学大学院助手　総合理工学研究科（〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1）
[6]正会員　工博　運輸省港湾技術研究所室長　海洋環境部海水浄化研究室（〒239- 0826 横須賀市長瀬3-1-1）
[7]正会員　理博　京都大学助手　防災研究所水災害研究部門（〒611-0011　宇治市五ヶ庄）
[8]正会員　工博　（財）電力中央研究所　環境科学部（〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646）
[9]正会員　工博　近畿大学教授　理工学部土木工学科（〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1）
[10]正会員　博(工)　環境庁国立環境研究所　水土壌圏環境部水環境工学研究室（〒305-0053　茨城県つくば市小野川16-2）

日本における水表面での気体輸送に関する最新の研究成果を取りまとめ，この分野の研究の現状を報告した．また，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」で発表された論文を分類し，国際的な研究の動向を明らかにした．

Key Words : gas transfer, reaeration, water surface, state-of-the-art

1. はじめに

水表面における気体，物質，運動量，エネルギーなどの輸送現象に関する研究は，今後益々重要な研究課題になるものと思われる．著者の一部は既に標記の課題に関するstate of the artを報告した[1]．その後もこの分野の研究は着実に発展しているが，欧米に比べ日本では研究者の層も薄く，研究態勢は万全とは言い難い．したがって著者らは近年の研究の動向を改めてstate of the artとしてとりまとめて報告することにより，この分野に興味を持っておられる国内の研究者の参考に供したいと考える．

土木工学分野においても，水表面を通した気体輸送に関する研究が，河川の自然浄化問題に関連する再曝気係数の推定のため，20年程前に活発に行われた．当時は，計測上の問題から，主に水流主流部の酸素濃度変化と乱れ特性から，マクロな酸素輸送量を推定することに目標が置かれた．その結果，種々の予測式が提案され，実用に供されてきた．しかし，水表面を通した気体輸送現象には水表面近傍の種々の要因が影響しており，これまで提案された再曝気係数の予測式による酸素輸送量の推定値と実測値の間には大きなばらつきがある場合が多い．

近年，地球規模での温暖化ガスの増加問題に伴い，海洋での温暖化ガスの収支を正確に見積もる必要性が高まってきた．このため，海洋における気体輸送係数の推定に関する研究が欧米を中心に活発に行われている．特に，計測技術の発達により，実験室レベルから現地観測まで，最新の技術を用いた水表面近傍の詳細な計測法の開発が行われ始めている．また，その計測法を用いた実験や現地観測も行われ始めている．最近，土木関連分野でも最新の技術を用いた計測が行われており，その結果を基に，新たなモデル化も試みられている．

この研究分野の世界動向については，世界各国の研究者が一同に会する「水表面での気体輸送に関する国際シンポジウム」により知ることができる．このシンポジウムは過去3回行われてきた．第1回が1983年にコーネル大学で行われ[2]，第2回が1990年にミネソタ大学で行われている[3]．第3回のシンポジウムは1995年に独国のハイデルベルグ大学で行われた[4),5]．さらに，2000年6月には米国のマイアミで第4回のシンポジウムが開催された．

本報告の目的は，土木関連の水表面での気体輸送に関する研究の最新の現状を取りまとめて紹介し，今後の研究の動向を展望することである．また，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」の講演論文集をもとに，国際的な研究の動向を明らかにする．さらに，最近行われた第3回のシンポジウム講演論文集から興味あるトピックスを紹介する．

第2章では，これまで3回の論文集において発表された論文をいくつかの角度から分類し，水表面での気体輸送に関する研究の動向を明らかにする．第3章では，第3回のシンポジウム講演論文集の中で特に注目される

表-1 水表面での気体輸送に関する国際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 (所属)	論文数	論文集名 (出版社)
第1回	1983年 6月13日 ～15日	米国 (Cornell Univ.)	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 (Univ.of Minnesota)	S.C.Wilhems (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 (Univ.of Heidelberg)	B. Jähne (Univ.of Heidelberg) E.C.Monahan (Univ.of Conneticut)	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)		

トピックスについて紹介する．第4章では気体輸送の最新の計測法に関する研究を紹介する．第5章では日本の土木工学関連分野における最新の研究成果を取りまとめて紹介する．第6章では日本において研究を推進するための今後の課題について述べる．

2. 世界における研究の推移

(1) 本章の概要

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」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，湖沼等）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．

(2) 「水表面での気体輸送に関する国際シンポジウム」の推移

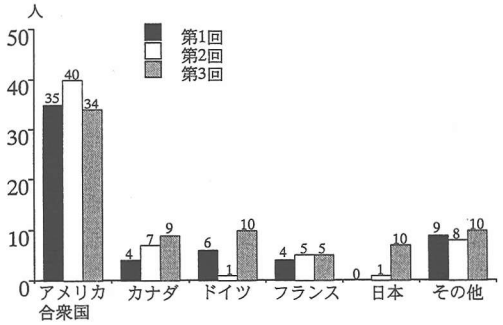
本シンポジウムにおける過去3回の論文分類の推移を**図-1** に示す．3回通して最も参加者が多い国は米国であり，第1，2回は米国だけで約6割の参加者があった．第2回では第3回の主催国であるドイツはわずか1編であった．3回を通じて，アジアからの参加が少ない．

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からと考えられる．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．

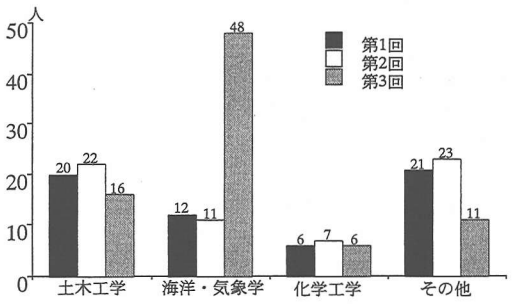
現象別分類に関しては，第2回から第3回にかけて，水中の乱れに関する研究が減り，風波に関する研究が急に多くなった．また第1，2回では数編しかなかった気泡に関する研究がほぼ倍になっている．第3回では，研究施設の紹介セッションが設置され，各研究機関間の共同研究を呼びかけている．

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 (k_Lの説明については3.(1)参照) 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．

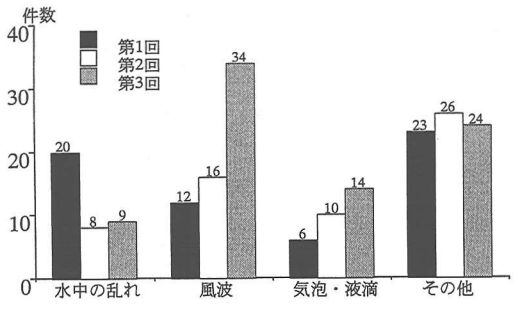
対象水域別分類に関しては次のことが言える．土木工学分野に関係の深い湖沼，河川，人工的施設の割合は第1，2回に比べて，第3回では減少している．一方，海洋を対象とした研究が増加している．また，第1回では対象水域を限定しない基礎的な気体輸送に関する研究が多く含まれている．



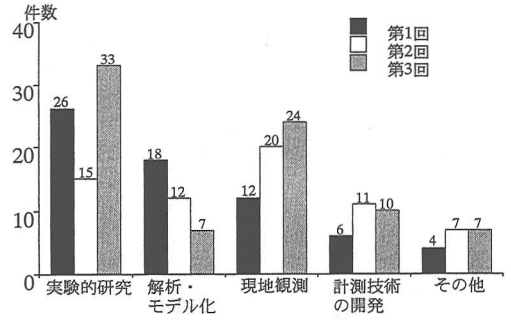
(a) 参加者国別分類



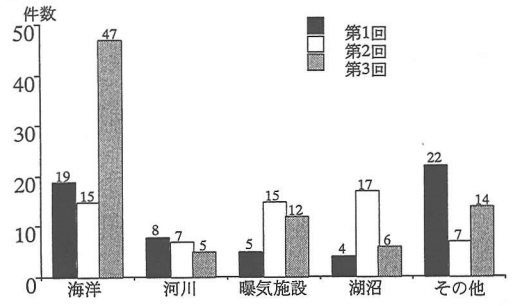
(b) 専門別分類



(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国際シンポジウム」講演論文集の分類

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．

3. 国際的な研究トピックス－第3回シンポジウム－

(1) 概要

「第3回水表面での気体輸送に関する国際シンポジウム」講演論文集に掲載された論文の中で特に重要と思われるトピックスについて紹介する．ここでは，「海洋における気体輸送」，「沿岸域における気体輸送」，「河川における気体輸送」，「人工装置における気体輸送」，「その他」について紹介する．

まず，本報告で用いる気体輸送係k_Lについて補足する．気体輸送係数k_Lは，一般的には液相側の気体輸送係数として用いられている．しかし，気体輸送量を厳密に規定する総括輸送係数kは以下の式で表される．

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_L} + \frac{1}{Hk_G} \tag{1}$$

ここで，k_Gは気相側の気体輸送係数，Hはヘンリー法則定数である．本報告で対象としている気体(O_2，CO_2，N_2等)は，$k_L \ll Hk_G$の関係を満足するので，$k \simeq k_L$と見なせる．ここで紹介する論文のいくつかは，kとk_Lの区別を明確に述べていないものもあるが，本報告では統一してk_Lと表記する．

(2) 海洋における気体輸送

a) 本節の概要

海洋での気体輸送に関する研究は，風波および砕波による気泡の取り込みによるものが主流である．海表面に作用する主な外力は風であり，海面上の風速と気体輸送係数との関係がこれまで議論されてきた．しかし，実海域では，種々の現象が絡み合っており，風速だけで気体輸送係数を規定するには無理が生じる．最近，詳細な海面近傍の計測やモデル化が試みられている．特に，whitecapによる気体輸送に関する現地計測，および室内実験も精力的に行われており，いくつかの新たな知見が報告されている．

本章では，「風波」，「砕波による乱れ，気泡」について取りまとめて紹介する．

b) 風波

海洋における気体輸送には風の影響が大きく，これまで種々の研究において風速あるいは風による摩擦速度と気体輸送速度との関係が報告されてきた．両者の間には正の相関があり，とくに砕波が生じ始めると気体輸送が著しく促進されることが示されてきた．本シンポジウムにおいても，最新の計測技術や実験装置を用いて，風とガス輸送の関係を，水面付近の乱れや気泡の存在の影響にまでふみこんで検討した研究が発表されるようになってきた．

Frew ら[4]は円形風波水槽を用いて，水面における界面活性物質(Triton-X-100, polyethylene glycol p-tert-octylphenyl ether)による汚染を極力取り除いた実験を行い，摩擦速度と気体輸送係数は線形関係にあることを示した．界面活性剤(Triton-X-100, polyethylene glycol p-tert-octylphenyl ether)をより多く添加するほど，規準風速に対する気体輸送係数の増加が抑えられるようになり，両者の関係の非線形性が強くなることが明らかにされた(**図-2** 参照)．

Komori and Shimada[4]は炭酸ガス輸送と2成分LDVを使用した表面流速場の測定を行った．その結果，境界層外縁の風速が5m/sより小さいところでは表面張力波が見られ，風速が増加すると炭酸ガス輸送係数は急激に増加した．しかし風波が急速に発達する5m/sから12m/sの間の高風速域においては，気体輸送係数は落ちつく傾向にあった．さらに高速域（12m/s以上）になると砕波が現れ，炭酸ガス輸送係数は再び急激に増加し始めた(**図-3** 参照)．この輸送係数の状況は，風速に対する表面更新渦の発生頻度の変動と関連づけられた．また，海水に対する炭酸ガス輸送係数は，淡水の50％まで低下することを示した．

Banner and Peirson[4),14)]はPIV(Particle Image Velocimetry)を用いて，風の作用によって発生した波直下の粘性底層について調べた．その結果，風による応力が全て水面におけるせん断応力として伝えられるのではなく，水面に対する法線方向の応力の重要性を指摘している．

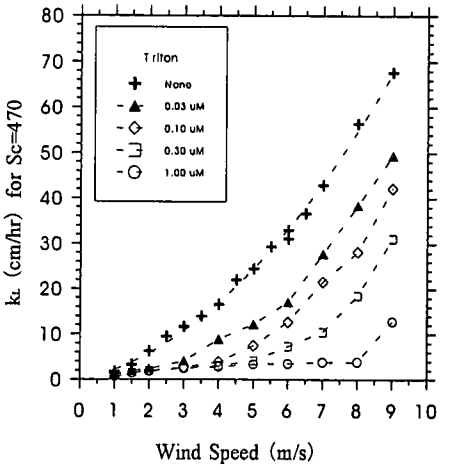


図-2 Frew らの結果
Scはシュミット数，風速は気相部中央高さにおいて計測．

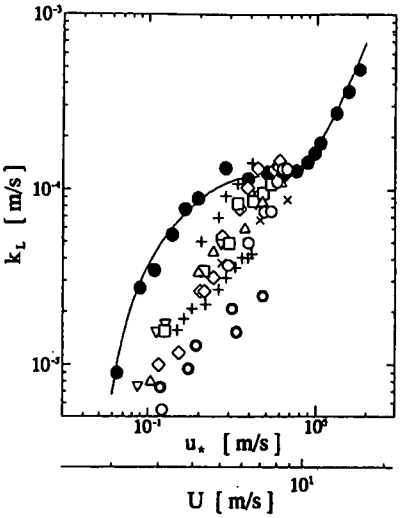


図-3 Komori and Shimada の結果(●)
大規模な実験装置の結果，＋；Broecker ら[6)]，□；Merlivat and Memery[7)]，△；Sivakumar[8)]，○；Jähne ら[9)]．
小規模な実験装置の結果，◎；Liss[10)]，×；Mackay and Yeun[11)]，◇；Plate and Friedrich[12)]，▽；Jähne ら[13)]．
風速Uは境界層外縁での計測値．摩擦速度u_*は界面領域において計測されたReynolds応力により推定．

Toba and Kawamura[4),74)]は，Yoshikawa ら[15)]による風波の室内実験データを再検討し，風波の直下に風波と直結した特別な乱流境界層(Downward-Bursting Boundary Layer(DBBL))が存在することを明らかにした．Langmuir cell が気泡雲の鉛直輸送に寄与するかもしれないとしばしば考えられてきたが，この深さを予測するための理論はまだなく，彼らはその深さがDBBL

の深さにより規定されているかもしれないと指摘している．

Haraら[4]は，Heidelberg大学（UH）とWoods Hole海洋研究所（WHOI）で行った実験結果から気体輸送係数が風波の平均波形勾配の平方根のベキ乗に比例することを見いだした．しかし，その比例係数は実験装置により異なっており，このことはk_Lが波形勾配だけでパラメタリゼーションできないことを示している．また，波数スペクトル解析の結果から，小さな波が輸送速度と直接関係していることが示唆された．

c) 砕波による乱れ，気泡

前節で紹介したKomori and Shimada[4]の研究では，LDVによる表面近傍の流速計測により，直接表面更新渦を評価することが行われている．このように計測や実験の技術の発展により，これまではモデル的な概念であった表面更新渦等を直接計測することが試みられている．

Woolf[4]は，砕波によるエネルギー逸散とガス交換について，これまでの種々の研究をもとに検討を行い，砕波直後のwhitecapだけではなく，乱れが減衰しながら広がっていく過程もガス交換にとっては重要であることを述べている．

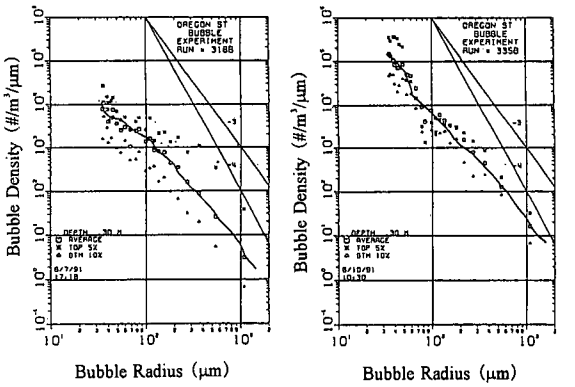
Asherら[4]は，水槽上部から水面に向けて，所定の水量を所定の時間間隔で落下させることによってwhitecapを人工的に作り出すWhitecap Simulation Tank(WST)を使って，whitecapがガス輸送速度へ及ぼす影響を調べている．また，気泡プルームの被覆率(coverage)，シュミット数，ガスの溶解度をパラメータとした気体輸送係数の評価式を提案した．

Frewら[4]やKomori and Shimada[4]の研究の中でも指摘されているように，ガス輸送には風の影響とともに，界面の物理化学的特性を支配する物質の影響も大きい．McGillisら[4]は全ガスフラックスF_{tot}を，次式のように波による直接的な寄与，気泡による水面の乱れ，気泡との間のガス交換の3つの要素に区別して検討を行った．

$$F_{tot} = k_w(C - C_s) + k_t(C - C_s) + k_b(C - C_b) \quad (2)$$

ここで，k_wは波による気体輸送係数，k_tは気泡が引き起こす水面乱れによる気体輸送係数，k_bは気泡-水間の気体輸送係数である．CはCO_2のバルク濃度，C_sは水面でのCO_2濃度，C_bは気泡内のCO_2濃度である．

海水では，淡水の場合より気泡が小さくなるために，k_bが淡水の場合より大きくなる．また，自然の海水中に含まれる溶解有機成分の影響で表面の乱れや波が抑制されるため，k_w，k_tが淡水の場合より小さくなることが明らかにされた．界面活性剤の添加によっても，表面の乱れや波が抑制され，k_w，k_tが減少することがわかった．



(a) 淡水　　(b) 塩水

図-4 Su and Cartmillの結果(水深0.3m)

海水の化学的組成が砕波によって形成される気泡径の分布にどのような影響を与えるかという問題は，実海洋における気体輸送と室内実験の結果をリンクさせる上で重要である．Su and Cartmill[4]は，同一砕波条件下の海水と淡水の両方における気泡径スペクトルとボイド率を測定することにより，化学的組成の効果の定量化を試みている．彼らは，淡水と30‰塩水を用いて大型造波水槽による実験を行った．その結果の一例を図-4に示す．34～1200μmの気泡径の範囲においては，塩水におけるスペクトル密度は淡水の場合の10倍にもなる．この大きな違いの厳密な物理機構についてはまだ明らかになっていない．一方，ボイド率に関しては両者の間には有意な差は認められなかった．

気泡が比較的大きい場合の塩水と淡水における径分布の比較については，Lowenら[4]が調べている．デジタルビデオカメラにより撮影された砕波峯のすぐ背後の画像を解析することによって，気泡径が得られている．この画像技術は，気泡半径が0.8mm以上のものについて有効であった．この気泡径範囲においては，Su and Cartmill[4]の結果とは異なり，塩水と淡水の気泡径スペクトルの間に明確な差異は確認されなかった．彼らはまた，大きな気泡のかなりの数が小さなスケールの砕波（～1.5 mの波長，～10cmの振幅）により連行されていることから，大きな気泡による大気-海洋間のガス輸送が海表面が比較的静穏なときに重要な過程になるかもしれないことを指摘している．

(3) 沿岸域における気体輸送

Hosoi and Murakami[4]は透過性防波堤における再曝気を記述するモデルを開発した．再曝気のモデル化には防波堤付近における乱れによる酸素の取り込みと，酸素濃度の高くなった水塊の周辺水との交換を考慮する

必要がある．この両者を記述する数学モデルを作成し，水槽実験を行い，その有効性を検討した．

Kakuno ら[4]は静水面，非砕波波面，砕波帯面を通した気体輸送現象の解明に関する実験を，造波水槽中の曝気容積，および曝気面積を制御して行った．造波水槽中の波面での再曝気に関する実験で，精度の良い気体輸送係数を得るには曝気容積と曝気面積に注意を払う必要があることを示唆した(第5章参照)．

(4) 河川における気体輸送

直接河川工学に関連するものではないが，気体輸送一般に関係するものとして，George ら[4]の研究が挙げられる．George らは，「風の作用」，「自由落下水膜」，「撹拌水槽」，「自由落下水滴」，「気泡流」の５つの現象に対する水表面を通した気体輸送量の実験式の再整理を行っている．特に，液相側界面の乱れエネルギーk_Iを用いた速度スケール$\sqrt{k_I}$で，気体輸送係数k_Lを規格化することを試みている．水表面を通した気体輸送には，液相の水表面近傍の水平渦が大きく影響しており，界面活性物質が混入すると水平渦の形成が押さえられ，輸送量が減少するとしている．また，水滴の場合，液相中での渦が形成されにくく，輸送量は小さい．それに対して，気泡流では，液相中に渦が形成されやすく，輸送量も大きくなると結論づけている．

Moog and Jirka[4]は，これまで提案されている再曝気係数k_2の予測式のいくつかは誤差が大きく，その原因が平均的な流れのパラメータ，例えば，水路床勾配，流速，水深と関係づけられているためだとしている．実験的研究ではsmooth bed を対象としているが，実河川では底面の摩擦抵抗だけでなく，macro-roughness の抵抗が影響している．彼らは，一様可変勾配水路にmacro-roughness がある場合とない場合の実験を行い，その影響を調べた．macro-roughness として，高さ5.7 cm のレンガを用い，水深を2.5cm～20cm の範囲で実験を行った．レンガはランダムに配置され，レンガの配置密度が18.2%と9.1%の２つのケースで実験が行われた．得られた結果はsmall eddy model(Lamont and Scott[16])の予測値と比較された．これらの比較をもとに，エネルギー散逸率の評価式が修正され，macro-roughness の場合でも適用可能な修正small eddy model が提案された．

Moog and Jirka[4]は，河川に対して，これまで提案されている再曝気係数k_2の11個の予測式と９個の観測値を対象にその性能評価を行っている(**表-2**)．表中のKO，CM，TK, SM が予測能力が高いことを示した．

Gulliver and Tamburrino[4]はpliolite particle をトレーサーとして写真撮影を行うことにより，自由水面の水平方向２次元乱流速度ベクトルを求め，これをもとに鉛直方向乱れの鉛直勾配とそのスペクトルを求めている．さらにこれをもとに，表面更新率を表面乱流特性と関係づけることを試みている．

(5) 人工装置による気体輸送

Weiss and Gulliver[4]は中空糸膜を使った酸素エアレーション法を検討している．中空糸膜を使ったエアレーション法は，微小気泡の水中滞在時間が長いことや，窒素による阻害がないこと等により，コストパフォーマンスの高い曝気技術として期待されている．彼らは，湖用と河川用の２つのモジュールを開発して，流れの状態や酸素供給圧の酸素輸送係数に対する影響を室内実験で調べた．さらに汚れ（fouling）の状況を調べるために河川水中に数週間設置した．流速が小さい場では，糸膜表面に生物膜の形成による汚れが顕著であったが，高速域ではせん断力のため汚れは見られず，能力の低下も緩やかであった．中空糸膜によるエアレーションは低コストの方法として期待されているが，コストパフォーマンスはfouling速度と劣化によるモジュールの取り替え頻度に依存してくる．今後，実用化に向けて，fouling速度と劣化を最小限にすることが必要である．

貯水池の水質改善を図るため，曝気法による検討が行われている．そのうち，深層曝気は，貯水池の成層構造を保ちながら深層水の溶存酸素濃度を高めることを目的としている．そのため，比較的小さな空気流量で高い曝気効率が求められる装置の性状を工夫する必要がある．例えば，Ashley ら[35),36)]は，微細孔径の多孔体を用い，１つのdiffuser 当たりの空気流量，オリフィス直径，水槽の水表面積を変化させて，曝気効果を調べた．特に，１つのdiffuser 当たりの空気流量を減らした方が効果的で，水槽の水表面積，オリフィスのサイズは効率に影響を及ぼさないことを示した．本手法は下水処理場における曝気にも有効である．

(6) その他

大気-海洋間のCO_2交換に及ぼす海洋生物学的および化学的影響について研究が行われている．

Yakushev and Mikhailovsky[4]は数学モデルにより高緯度域における大気-海洋間のCO_2移動に対する海洋生物の影響について検討している．植物プランクトンのブルーム期間における炭酸塩のバランスの変化による，炭酸ガスフラックスの変化について述べている．

Jasper ら[4]は北大西洋において，炭素同位体分析により，氷河期-間氷期の分圧pCO_2の変化の推定を行っている．

Emerson[4]は，炭酸ガスの輸送係数に対する化学的な影響について検討している．陽イオン及び陰イオン濃度の異なる種々の湖において，物理的な因子である

表-2 河川に対して，これまで提案されている再曝気係数k_2の予測式と観測値

研究者	再曝気係数式(day $^{-1}$ at 20 °C)	用いられたデータ
O'Connor and Dobbins(OD)[17]	$k_2 = 3.90V^{0.5}H^{-1.5}$	Parker and Gay[27]
Churchill et al.(CH)[18]	$k_2 = 5.01V^{0.969}H^{-1.673}$	Parker and DeSimone[28]
Krenekel and Orlob(KO)[19]	$k_2 = 173(SV)^{0.404}H^{-0.66}$	Ruhl and Smoot[29]
Owens et al.(OW) [20]	$k_2 = 5.35V^{0.67}H^{-1.85}$	Smoot[26]
Langbein and Durum(LD)[21]	$k_2 = 5.14VH^{-.067}$	Stedfast and Draper[30]
Cadwallader and McDonnell(CM)[22]	$k_2 = 186(SV)^{0.5}H^{-1.0}$	Wilcok[31]
Thackston and Krenkel(TK)[23]	$k_2 = 24.9(1+F^{0.5})u_*H^{-1.0}$	Genereux and Hemond[32]
Parkhurst and Pomeroy(PP)[24]	$k_2 = 23.0(1+0.17F^{2.0})(SV)^{0.375}H^{-1.0}$	Shindala and Truax[33]
Tsivoglou and Neal(TN)[25]	$k_2 = 31,200SV \quad Q < 0.28m^3/s$	NCASI expert system
	$k_2 = 22,500SV \quad Q > 0.28m^3/s$	(Whittemore[34])
Smoot(SM)[26]	$k_2 = 543S^{0.6236}V^{0.5325}H^{-0.7258}$	
null model	$k_2 = 4.46$	

ここで，k_2は再曝気係数(1/day)，Vは流速(m/s)，u_*は摩擦速度(m/s)，Hは水深(m)，Sは水路床勾配，Qは流量，Fはフルード数である．

境界層厚さとpHが炭酸ガスの移動に影響を及ぼすことを示している．また，海洋においては$^{12}CO_2$と$^{13}CO_2$の水酸イオンとの反応速度が異なることから，これらの存在率の違いの重要性を指摘している．

4. 気体輸送の計測法に関する研究

(1) 概要

気液界面での気体輸送のメカニズムや気体輸送係数を調べるために様々な計測装置の開発が報告されている．室内計測・現場計測とも共同研究が多く目立つことも今回の会議の特色であろう．海洋などにおける大規模な現場観測は一研究者や研究機関では限界があり，今後益々共同研究・共同プロジェクトは増えていくものと思われる．

また，今回の学会のオーガナイザーであるJähne[4]は，小スケールの大気-海洋相互作用の研究に対する，可視化および画像計測技術のインパクトについてレビューしている．**表-3** はJähneの論文から各画像化技術と研究者を分類したものである．Jähneは近い将来さらに進歩が望まれる分野として以下のことを挙げている．

(1) 波動水表面上の時空間的な風応力分布の計測技術の開発
(2) 波動水表面上の3次元速度場の計測技術の開発
(3) 流れ場，濃度場，波動場の同時計測法の開発

この章では，「計測基礎技術の開発」，「室内実験施設」，「現地計測」，「リモートセンシング」について紹介する．

(2) 計測基礎技術の開発

a) 光を利用した計測技術

水表面でのレーザー光の屈折を利用して表面張力重力波 (capillary gravity wave) の勾配を計測するLSG(Laser Slope Gauge)は単一レーザー光を用いているため局所的な情報しか得られない．一方，SLSG(Scanning Laser Slope Gauge)は単一レーザー光を走査させることにより面的な情報を得る手法である(Haraら[43])．Hwang[4]はSLSGを波による動揺の影響を避けるためブイに取り付け，大西洋で観測を行った．

気泡の背後から照射した光は気泡により散乱し，カメラに気泡の暗像が捕らえられる．この暗像のぼやけを利用して焦点平面から気泡までの距離を評価することができる．これらの手法を利用してGeiβler and Jähne[4]は単一気泡の径を測定する光学センサーを開発した．

Duke and Hanratty[4]はレーザー誘起蛍光法 (Laser Induced Fluorescence, LIF) を用いた気液界面直下の酸素の2次元濃度場の計測法について述べている．

最近，Roesgenら[44]は，2次元のマイクロレンズアレーを用いた面的な水表面の勾配を計測する手法を開発した．「すばる」等の天体望遠鏡で応用されているAdaptive Optical Systemの制御で用いられている大気のwave frontを検知する“Hartmann-Shack”センサーの原理を，水面の形状を計測する手法に拡張したものである．計測にはCCDを使い，水面形状の変化によるマイクロレンズを通した水面画像の変化から水面形状を推定している．

Okamotoら[45]は，マイクロレンズを使う代わりにレーザーのスペックルパターンを利用する方法を開発した．まず，水底からレーザースペックルパターンを上方に照射し，水面を通して画像をCCDで撮影する．撮影された画像から水面形状の変化によるスペックルパターンの移動量を計測し，水面形状を推定している．

b) 気体輸送過程の直接可視化法の開発

Münsterer ら[4]，およびMünsterer and Jähne[46]はハイデルベルグ大学(UH)の環状風洞水槽を用いて，溶存

表-3 画像計測技術の現状

対象	代表的技術	研究
風波の可視化	光学的手法	Cox[37], Keller and Gotwols[38]
		Jähne[39], Jähne and Riemer[40], Jähne ら[41]
	Scanning Laser Slope Gauge	Bock ら[4], Hwang[4]
	Imaging Slope Gauge	Klinke and Jähne[4]
水表面近傍の流れ場	PIV, PTV	Banner and Peirson[4], Cowen ら[4], Dieter ら[4]
		Etoh and Takehara[4], Gulliver and Tamburrino[4],
		Hering ら[4]
気泡	光学的手法	de Leeuw and Cohen[4], Loewen ら[4],
		Geiβler and Jähne[4], Asher ら[4]
気体輸送係数	赤外線による手法	Jessup[4], Hauβecker ら[4]
		Hauβecker and Jähne[4]
	Infrared Spectral Radiometry	McKeown[4]
溶存気体濃度場	蛍光を利用する方法	Hiby[42], Duke and Hanratty[4], Münsterer ら[4]

NH_3ガス，および溶存酸素の鉛直分布と水表面近傍の液層側の境界層の微少な乱れについて計測を行った．前者は蛍光物質の酸性反応を利用した計測（Fluorescein Technique）であり，後者はPBA(Pyrene Butyric Acid)を使用した計測（Oxygen Quenching Technique）である．PBAは溶存酸素濃度によって蛍光強度が変化する．彼らは，この手法を用いて境界層の一部がバルク領域に取り込まれる様子を観察した．

Etoh and Takehara[4]はフルオレセイン水溶性蛍光染料の蛍光強度がpHに依存することを利用して，炭酸ガスが水中へ溶け込む過程を直接可視化する手法を開発した．2.5×10^{-6} mol/l濃度のフルオレセン水溶液を水槽に満たし，水表面上に炭酸ガスを充填させて実験を行った．水中の乱れのモデルとして，単一の渦輪を水槽の底から発生させ，その渦輪が水面に衝突した場合に，どのように水表面から炭酸ガスを取り込むかを可視化することに成功した．

c) 画像処理

気液界面の気体輸送は界面近傍の乱流構造に強く関係している．このため水表面直下の流れ場を画像処理で解析する試みが報告されている．

Banner and Peirson[4]，および Dieter ら[4] は PIV (Particle Image Velocimetry) を，Hering ら[4]はPTV(Particle Tracking Velocimetry) を用いて風波の流れ場を解析している．特に，Dieterらは画面に対する1ステップ間の移動距離が大きい場合に対するPIVアルゴリズムとして“Multi Grid Algorithm”を提案している．“Multi Grid Algorithm”は基本的に相関法である．この手法では，効率的に大きな移動量を求めるために，まず広い検索領域で大まかな移動量を推定し，その後狭い検索領域で細かなマッチングを行う．

Cowen ら[4]は，彼らが開発したDPTV(Digital Particle Tracking Velocimetry) で開水路流れの水表面近傍の乱れ場を解析した．DPTVは粒子の追跡の検索過程をガイドするために相互相関法に基づくPIVの結果を利用する手法である．水表面直下の流速分布だけでなく渦度分布，レイノルズ応力分布，散逸率分布をDPTVで測定することが可能であると述べている．

Etoh and Takehara[4]は，彼らが独自に開発した高速ビデオカメラを用いて，液滴の水表面の衝突，気泡の破裂の観察を行った．開発された高速カメラはフルフレーム(256 × 256 画素) で1秒間に4,500枚撮影が可能である．さらに，セグメントフレーム撮影により，最高で1秒間に40,500枚(64 × 64 画素) の撮影が可能となる．また，MCP型イメージインテンシファイアーを内蔵しており，微光量下でも撮影できる．彼らはその高速ビデオカメラを用いて，直径約2mmの気泡が水表面で崩壊する過程を詳細に観察した．また，直径4.6mmの水滴を水面上から自由落下させ，水表面衝突によりどのように水面近傍が乱れるかを観察した．特に，落下距離を変化させた場合の現象の変化を明らかにしている．

d) 熱を利用した計測技術

McKeown[4]は気液界面での温度勾配を測定する新しいRadiometric techniqueをガスフラックス研究への適用例とともに提示している．水分子の固有放射特性は2.2～3.8μmの波長領域で吸着係数に変動を引き起こす．この変動は水面下からのある周波数の放射を許すことになり，その放射は気液界面近傍の温度勾配の尺度になる．

表面更新渦の特性時間は砕波などで壊れた熱境界層の回復時間と等しいことから，Jessup ら[4]は赤外線画像解析を行い熱境界層の回復時間の検討を行った．彼らは回復時間は熱フラックスや乱れに依存することを確認した．

Hauβecker ら[4]は液層側の物質境界層を通しての輸送過程を調べるためにCFT (Controlled Flux Technique)

を用いた．CFTはトレーサーとしてガスの代わりに熱を用いて，手早く局所的な気体輸送係数を計測する手法である．これは，熱輸送現象が基本的に気体輸送現象と同じであり，シュミット数の比のべき乗で関係付けられるという仮定に基づいている．実際には，CO_2レーザーのような赤外線照射装置により，水表面に人工的に熱を加え，赤外線ビデオカメラ等を用いて加えられた水面近傍の温度を計測する．計測された温度変化により，熱の輸送係数を求め，気体輸送係数に変換する．彼らは気体輸送係数計測に関する3つの異なる方法，定常状態法，減衰法，時空間温度変動法について検討を行った．さらに，彼らは現地計測用にCO_2レーザーを組み込んだ計測装置を開発し，米国西海岸での現場計測に適用した例を示している．

また，Jähne[4]はレビュー論文において，CFTの問題点は溶存ガスのシュミット数に比べて熱のプラントル数が2オーダー低いことであり，シュミット数の大きいトレーサーを用いたCFTと同様な手法の開発が待たれることを述べている．

(3) 室内実験施設

いくつかの研究機関の実験施設の紹介論文が掲載されているが，ここではハイデルベルグ大学(UH)の大型環状風洞水槽を紹介する．

大型環状風洞水槽の外観を**図-5**に示す．外径は4m，水路の幅は30cmである．水槽上部のパドル(図中A)をパドルホィール(図中B)に取り付け，そのホィールを回転させることにより風を起こす．パドルホィールは，リニアモーターにより，外部から遠隔操作される．よって，水槽内の気体は，全く外気と遮断することができ，気体輸送現象を計測するのに適している．

この水槽の特徴は以下の通りである．

(1) パドルホィールを回転させることにより0〜12m/sの風速を作ることができる．
(2) 一様で半無限の吹送距離条件を作ることができる．
(3) 気密性が高いので，酸性ガスを含む種々の化学物質を用いた実験に適している．

この実験装置を用いた研究のいくつかが報告されている．Frewら[4]は，界面活性物質の存在が気体輸送に大きな影響を与えているという最近の研究結果を受けて，WHOIの実験風洞水槽とUHの環状風洞水槽で，界面の粘弾性係数と気体輸送速度について調べている．

(4) 現場計測

現場計測法としては，デュアルトレーサー法，^{222}Rnや^{14}C等の同位体を計測する方法等がある．

デュアルトレーサー法は，水表面で気散するトレーサーガスと不揮発性のトレーサーを同時に水域に投入し，移流拡散の影響を考慮せずに，双方の濃度差から気体輸送係数を算出できる方法である(例えば，細川[47])．最近，シュミット数Scの違う2種類の気体(一般的に^3HeとSF_6が使われる)をトレーサーとして，気体輸送係数を推定する方法が用いられている(Clarkら[4])．

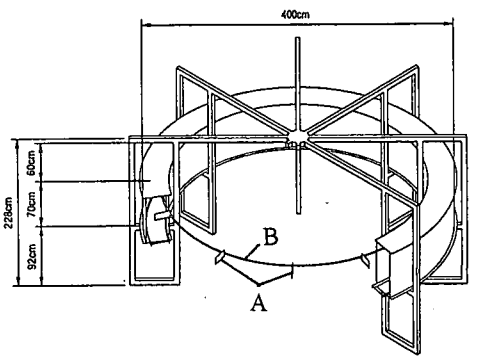


図-5 ハイデルベルグ大学の大型環状風洞水槽の概略図

海洋での計測では，自然界に存在する^{222}Rnや^{14}C等の同位体を計測することにより気体の輸送係数を算出する方法がある．また，核実験等により大気中に生じた^{14}Cと安定同位体の^{12}Cの濃度比から気体輸送係数を算出する方法がある．

^3HeとSF_6を用いたデュアルトレーサー法や^{222}Rnの測定結果は数日の時間スケールを反映しているのに対し，^{14}Cの測定結果は数年に起こる現象に対応している．このため，双方の結果を直接比較することはできない(Liss and Duce[48]参照)．

現地観測については，現在種々の共同大型プロジェクトが進行している．今回の会議ではその結果の多くが報告されている．今回報告されたプロジェクト研究をまとめて**表-4**に示す．ここでは1993年に行われたAir Sea Gas Exchange Experiment（ASGASEX'93）と呼ばれるプロジェクトについて紹介する．

ASGASEX'93は海洋におけるCO_2フラックスの国際的測定プロジェクトであり，オランダの海岸の9km沖のMeetpost Noordwijkに観測プラットホームを建設し，観測が行われた．**表-5**はASGASEX'93に参加した研究機関の一覧表である．また，**表-6**は測定項目と測定担当の研究機関を示している．

このプロジェクトの目的は，大気-海洋間のCO_2交換に影響を及ぼす要因の確認と定量的な評価，渦相関法(Eddy Correlation Method)で評価された気体輸送係数と他の手法で評価されたそれとの不一致の解明である．

Oostら[4]は上記の不一致の原因は，ライン川から流入する河川水と海水によって生じる密度内部境界面の

表-4 プロジェクト研究一覧

名称（略称）	実施国	実施年	実施場所	観測点
Air Sea Gas Exchange Experiment for Marine Aerosol and Gas Exchang (ASGASEX, ASGAMAGE)	オランダ カナダ	1996	北海 オランダ沿岸9km沖	観測塔
Coastal Ocean Processes program (CoOP program)	アメリカ	1995	カリフォルニア沖	ブイと船舶
Marine Boundary Layers Accelerated Research Initiative (MBL ARI)	アメリカ	1995	カリフォルニア沖	ブイ
Joint Field Experiment of CoOP and MBL AR (MBL/CoOP)	アメリカ	1995	カリフォルニア沖	ブイと船舶
Ocean Margin Exchange program (OMEX program)	不明	1995	北太平洋	船舶
Lolland I, II	不明	1994,1995	バルト海	不明
Kustennahe Stoff-und Energie Flusse project (KUSTOS project)	不明	1994	北海，ドイツ沿岸沖	船舶
BUBBLES I	不明	1994,1994	北太平洋	不明
North Atlantic Winter experiment (ASREX experiment)	アメリカ	1993, 1994	北太平洋 ウッズホール沖	ブイ
Wave Basin Experiment (WABEX-93)	アメリカ	1993	カリフォルニア沖	不明
Marine Aerosol Properties and Thermal Imager Performance (MAPTIP)	オランダ	1993	北海	観測塔
Air Sea Gas Exchange Experiment (ASGASEX'93)	オランダ	1993	北海 オランダ沿岸9km沖	観測塔
(BITEX study)	国際間	1993	琵琶湖	不明
Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS)	国際間	1987以降		
Humidity Exchange over the sea program (HEXOS program)	不明	1986	北海 オランダ沿岸9km沖	観測塔
(GEOSECS)	不明	1979以前	南極近くの太平洋 および大西洋	船舶

存在にあると考えた．その内部境界面で熱や塩分の鉛直混合が抑制されるようにCO_2の鉛直輸送が抑制されているものと考えた．しかし，この仮説を裏付けるにはデータが不足していることも指摘した．1993年に引き続き1996年に'96 ASGASEX MAGE experiment (MAGE=Marine Aerosol and Gas Exchange) が行われた．このプロジェクトの結果は次回の会議で発表されることになるであろう．

(5) リモートセンシグ

海洋大循環モデル（Ocean General Circulation Model, OGCM）を用いたグローバルな物質循環シミュレーションを行うためには，気体輸送係数を広域的にマッピングする必要がある．そのようなマッピングにおいては，人工衛星を利用したリモートセンシングが有効と考えられる．また，シミュレーションの予測精度の向上のためには，モデルに取り込む気体輸送係数式の妥当性や海洋生物が物質循環に及ぼす影響についても十分検討されなければならない．

Suntharalingam and Sarmiento[4]は，グローバルなN_2Oフラックス分布の解析を行い，Wanninkhof[49]が提案した気体輸送係数式とLiss and Marlivat[50]が提案した式の比較を行った．解析は，測定データに基づいた多変量解析モデルとOGCMに組み込んだN_2O循環モデルの２つのモデルで行っている．その結果，海洋のN_2Oフラックス分布を推定する上ではWanninkhof式を用いる方がより妥当な結果を与えることが示された．

Wangら[4]は衛星観測によるマイクロ波の輝度温度から，whitecapの被覆率および気体輸送係数を直接評価する方法を検討している．彼らは，平面造波水槽を用いて，砕波によるマイクロ波の輝度温度計測とビデオによる砕波形態の計測を同時に行っている．また，whitecap被覆率の計測にも２台のビデオカメラを用いて計測している．マイクロ波の輝度温度と気体輸送係数の関係の計測では，HeとSF$_6$を使い，11点で計測した．

結果として，マイクロ波の輝度温度とwhitecap被覆

表-5 ASGASEX'93への参加

参加機関	略称	国名
Bedford Institute of Oceanography	BIO	Canada
Dalhousie University, Halifay	DAL	Canada
Physics and Electronics Laboratory, TNO	TNO-FEL	The Netherlands
Royal Netherlands Meteorogical Institute	KNMI	The Netherlands
Netherlands Institute for Sea Research	NIOZ	The Netherlands
Department of Harbours and Public Works	RWS	The Netherlands
Southampon University, Dept. of Oceanography	SUDO	UK
University College Galway, Dept. of Oceanography	UCG	Ireland
Institute of Oceanographic Sciences, Deacon	IOSDL	UK

表-6 ASGASEX'93での計測項目

計測項目	計測機関
CO_2フラックス	
(渦相関法)	BIO, KNMI, TNO-FEL
(勾配法)	NIOZ
大気および海水中の N_2O, CH_4	NIOZ
大気および海水中の pCO_2	NIOZ, BIO, DAL
海水中の全CO_2	NIOZ
大気温度	KNMI, BIO, TNO-FEL, RWS
入射短波放射	TNO-FEL
海水温度	KNMI, RWS, NIOZ
顕熱スラックス	KNMI, BIO, TNO-FEL
湿度	KNMI, BIO, TNO-FEL, RWS
湿度フラックス	KNMI, BIO, TNO-FEL
アルカリ度	NIOZ
流速, 流向	RWS
ラングミュア循環流	SUDO, UCG, IOSDL
運動量フラックス	KMNI, BIO, TNO-FEL
風速	KNMI, BIO, TNO-FEL, RWS
雨量	KNMI, TNO-FEL
波高	NIOZ, RWS
ホワイトキャップ	KNMI
エアロゾル	TNO-FEL
気泡	SUDO, UCG, IOSDL, TNO-FEL

率の相関は砕波形式には依存しない．また，whitecapが部分的に生じている場合は，whitecap部分とそれ以外の部分の気体輸送係数を用いて比例計算が可能であるという結果より(Asherら[51])，直接，マイクロ波の輝度温度と気体輸送係数を結びつけている．

現在，大気-海洋間のCO_2交換に及ぼす化学的な影響に関する実験が殆どなく，今後実験的研究が必要であると指摘している．

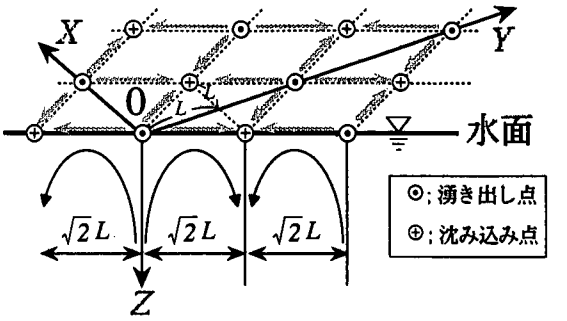


図-6 中村らにより提案された表面渦構造モデルの模式図
Lは表面渦の長さスケール．

5. 日本の土木工学関連分野における最近の研究

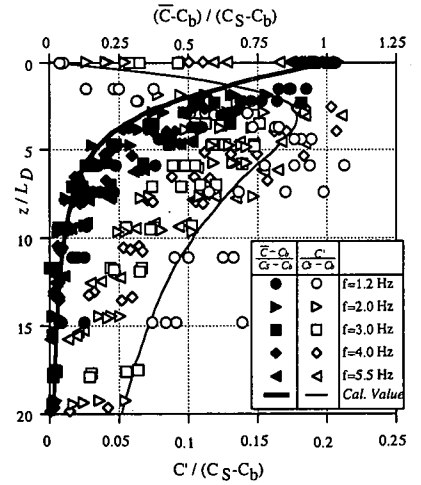
(1) 概要

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[52),53),54)]．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」，「河川における気体輸送」，「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．

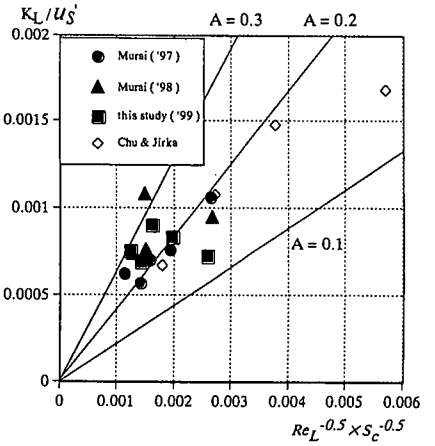
(2) 表面近傍の乱れによる気体輸送

中村ら[55),56)]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[55)]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10μm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小な領域（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・村井[56)]は，浸透説的な機構を基礎に，水表面近傍



(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-7 中村ら実験結果

$\overline{C}$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．

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-6**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乗に比例し，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-7(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化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-7(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[57]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 Jirka[58]の実験結果と一致することがわかった．

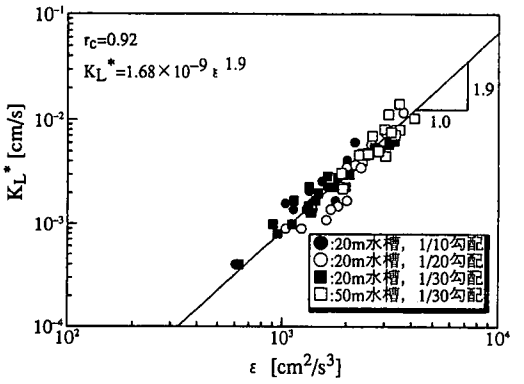
(3) 河川における気体輸送

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[59]は撹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[60]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．

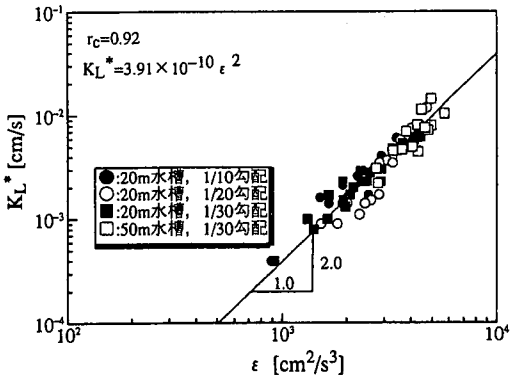
山西ら[61]は実河川において水表面から大気中へのN_2Oのガスフラックスを実測した．彼らはサーキット型チャンバーを水面に浮かべて曝気面積を固定しチャンバー内濃度の時間変化からフラックスを評価した．

(4) 沿岸域における気体輸送

角野ら[62),63]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，



(a) 灘岡らのモデルによる



(b) 岡安らのモデルによる

図-8 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

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[64]．これに引き続き，種々のモデルによる砕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-8(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[65]．

細井ら[66),67)]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．

$$k_2 = 1.35 \times 10^{-2}(DgH_0)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\epsilon TB}{\nu V_d}\right)^{\frac{1}{4}}\frac{1}{h} \qquad (3)$$

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

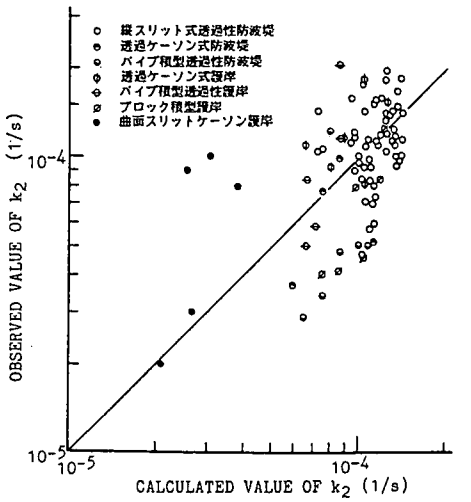


図-9 再曝気係数の計算値と実験値との比較(細井らによる)

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-9** 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．

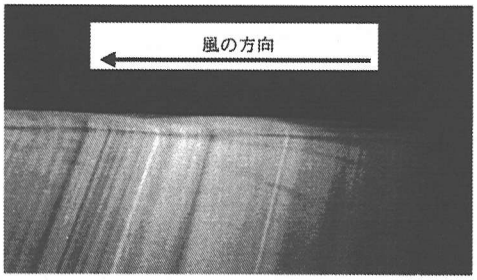
(5) 海洋における気体輸送

a) 風波

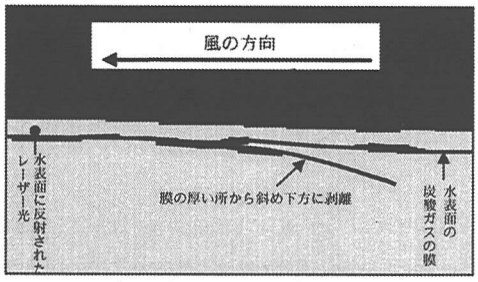
嶋田ら[68)]は海水のガス交換に対する影響を明らかにするため，振動格子乱流水槽，および風波水槽を用いて，自然海水を含む何種類かの水を対象にガス輸送の実験を行っている．その結果，崩れのない安定な気液界面の場合，海水に対する炭酸ガスの輸送係数が真水の場合の値よりも50%減少することを明らかにした．これは，通常の洗浄では除去できない極微量な界面活性物質が気液界面に存在し，分子拡散係数に及ぼす電解質の効果を見かけ上大きくするためであるとしている．ただし，界面が激しく崩壊する場合には，両者の間にはほとんど差がなくなる．

禰津ら[69),70)]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部で計測している．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[71)]は，フルオレセイン水溶液の蛍光強度がpH

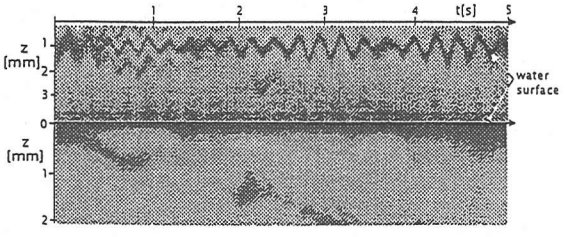


a) 炭酸ガスの溶入過程の写真



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 Hauβecker 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

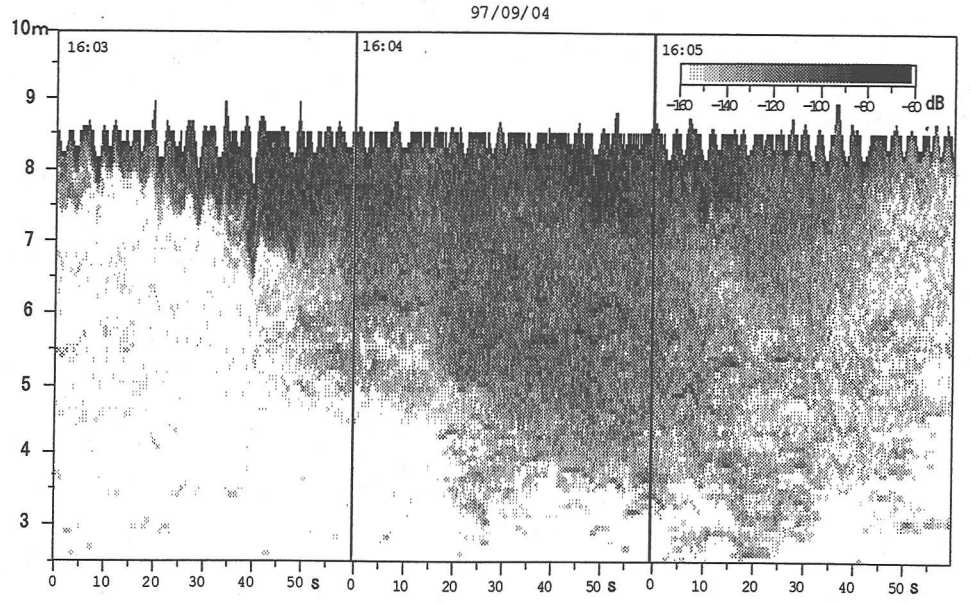
に依存する特性を利用した炭酸ガスの水への溶入過程の直接可視化法を利用して，風波による炭酸ガスの溶入過程の可視化に成功した．実験には0.5m × 0.5m × 16mの空気循環式気密性風洞水槽を用い，炭酸ガスを充填し，高濃度の炭酸ガスを水面上に吹かせた．フルオレセインの最大励起光波長が494nm当たりにあるため，励起光として，488nmと514nmに出力ピークを持つ，アルゴンイオンレーザーを用いた．レーザー光はシリンドリカルレンズにより，シート光に変換され，風向に平行に水面上方から照射された．得られた可視化画像の一例を**写真-1(a)**に示す．画像は水槽側面よりやや下方より撮影しているため，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 Hauβecker[72]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)．

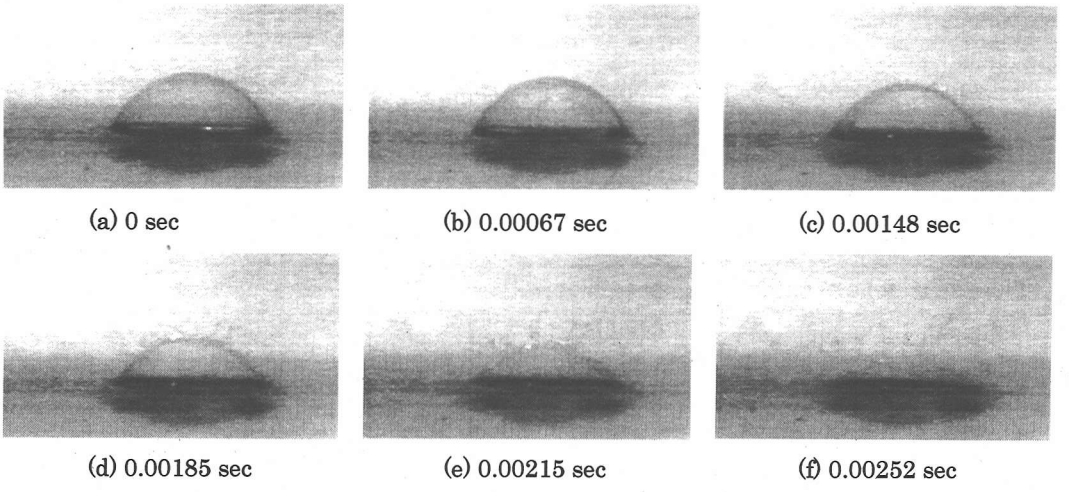
b) 砕波による乱れ，気泡

吉岡ら[73]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2.5 mから約40 m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7.5 c m，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 μ 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-10**），Toba and Kawamura[4),74)]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[15),74)]．大気ー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 Kawamura[74)]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[75)]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



図–10 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)



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)

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 Mori[76]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，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[77]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．

c)　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[78]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（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

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てみた(図-11参照)．

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ー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もなう気泡の発生，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

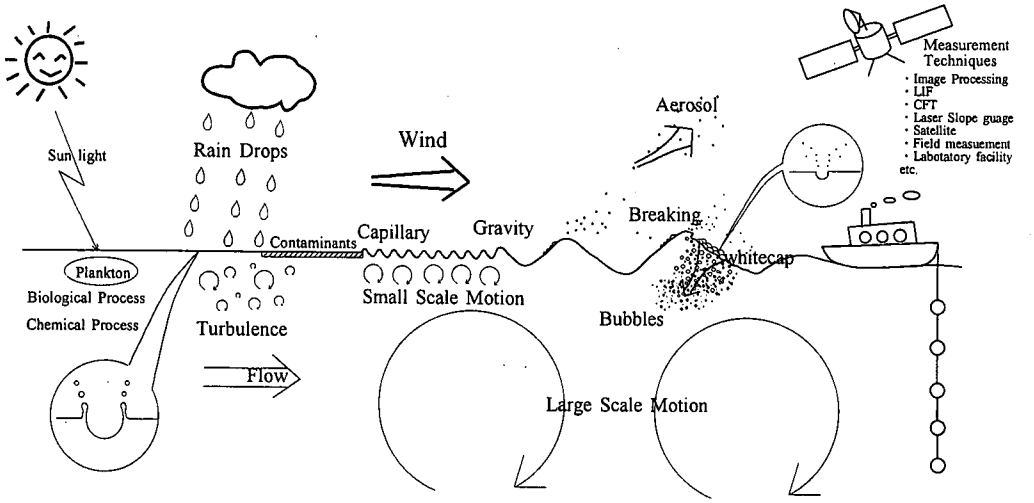


図-11 水表面での気体輸送に関する研究課題

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．

謝辞： 本研究は文部省科学研究費補助金(基盤研究10450185，代表者:角野昇八)の補助を受けた．記して謝意を表す．

参考文献

1) 竹原幸生，江藤剛治：水表面での気体輸送に関する研究の現状，土木学会論文集，No.461/II-22, pp.1-10, 1993.
2) Brutsaert, W. and Jirka, G. H.(edrs): Gas transfer at water surfaces, D. Reidel Publishing Company, 639pp., 1983.
3) Wilhelm, S. C. and Gulliver J. S.(edrs): Air water mass transfer, ASCE, 797pp., 1991.
4) Jähne, B. and Monahan, E.C.: Air-Water Gas Transfer, AEON Verlg & Studio, 888pp. 1996.
5) 小森悟：3rd Int. Symposium on Air-Water Gas Transferに参加して，ながれ，第15巻，第1号，p.70, 1996.
6) Broecker, H.-C., Petermann, J. and Siems, W.: The influence of wind on CO_2-exchange in a wind/wave tunnel, including the effects of monolayers, J. Mar. Res., 36, pp.595-610, 1978.
7) Marlivat, L. and Memery, L.: Gas exchange across an air-water interface, experimental results and modeling of bubble contribution to transfer, J. Geophys. Res., 88, pp.707-724, 1983.
8) Sivakumar, M.: Reaeration and wind induced turbulence shear in a contained water body, in Gas Transfer at Water Surfaces, edited by W. Brutsaert and G.H. Jirka, Reidel, pp.369-377, 1984.

9) Jähne, B., Wais, T., Memery, L., Gaulliez, G., Merlivat, L., Münnich, K.O. and Coantic, M.: He and Rn gas exchange experiments in the large wind/wave facility of IMST, J. Geophys., Res., 90, pp.11989-11997, 1986.
10) Liss, P.S.: Processes of gas exchange across an air-water interface, Deep-Sea Res., 20, pp.221-238, 1973.
11) Mackay, D. and Yeun, A.T.K.: Mass transfer coefficient correlations for volatilization of organic solutes from water, Environ. Sci. Technol., 17, pp.221-217, 1983.
12) Plate, E.J. and Friedrich, R.: Reaeration of open channel flow, in Gas Transfer at Water Surfaces, edited by W. Brutsaert and G.H. Jirka, Reidel, pp.333-346, 1984.
13) Jähne, B., Huber, W., Dutzi, A., Wais, T. and Ilmberger, J.: Wind/wave tunnel experiments on the Schmidt number and wave field dependence of air-water gas exchange, in Gas Transfer at Water Surfaces, edited by W. Brutsaert and G.H. Jirka, Reidel, pp.303-309, 1984.
14) Banner, M.L. and Peirson, W.L.: Tangential stress beneath wind-driven air-sea interfaces, J. Fluid Mech., vol.364, pp.115-145, 1998.
15) Yoshikawa, I., Kawamura, H., Okuda, K. and Toba, K.: Turbulent structure in water under laboratory Wind waves, J. Oceanogr. Soc. Japan, 44, pp.143-156, 1988.
16) Lamont, J.C. and Scott, D.S.: An eddy model of mass transfer into the surface of a turbulent liquid, A.I.Ch.E.J., 16, pp. 513-519, 1970.
17) O'Connor, D.J. and Dobbins, W.E.: Mechanism of reaeration in natural streams, ASCE Transactions, 123, pp.641-684, 1958.
18) Churchill, M.A., Elmore, H.L. and Buckingham, E.A.: The prediction of stream reaeration rates, J. Sanitary Engrg. Div., Proc. ASCE, 88, pp. 1-46, 1962.
19) Krenkel, P.A. and Orlob, G.T.: Turbulent diffusion and the reaeration coefficient, J. Sanitary Engrg. Div., Proc. ASCE, 88, pp.53-116, 1962.
20) Owens, M., Edwards, R.W. and Gibbs, J.W.: Some reaeration studies in streams, Int. J. Air Water Polln., 8, pp.469-486, 1964.
21) Langbein, W.B. and Durum, W.H.: The aeration capacity of streams, U.S.G.S. Circular, 542, 1967.
22) Cadwallader, T.E. and McDonnell, A.J.: A multivariate analysis of reaeration data, Water Res., 3, pp.731-742, 1969.
23) Thackston, E.L. and Krenkel, P.A.: Reaeration prediction in natural streams, J. Sanitary Engrg. Div., Proc. ASCE, 95, pp.65-93, 1969.
24) Parkhurst, E.L. and Pomeroy, R.D.: Oxygen absorption in streams, J. Sanitary Engrg. Div., Proc. ASCE, 98, pp.101-124, 1972.
25) Tsivoglou, E.C. and Neal, L.A.: Tracer measurement of reaeration: partt III- predicting the reaeration capacity of inland streams, Water Poll. Ctrl. Fed. J., 48, pp.2669-2689, 1976.
26) Smoot, J.L.: An examination of stream reaeration coefficients and hydraulic conditions in a pool-and-riffle stream, pH. D. Thesis, Virginia Poly. Inst. and State Univ. Blacksburg, VA, 1988.
27) Parker, G.W. and Gay, F.B.: A procedure for estimating reaeration coefficients for Massachusetts streams, U.S.G.S. Report WRI 86-4111, 1987.
28) Parker, G.W. and DeSimone, L.A.: Estimating reaeration coefficients for low-slope streams in Massachusetts and New York, 1985-88, U.S.G.S. Report WRI91-4188, 1992
29) Ruhl, K.J. and Smoot, J.L.: Mean velocity, longitudinal dispersion, and reaeration characteristics of selected streams in the Kentucky river basin, U.S.G.S. Report WRI87-4179, 1987.
30) Stedfast, D.A. and Draper, R.E.: Reaeration coefficients of six streams in New York, U.S.G.S. Report WRI85-4028,1986.
31) Wilcock, R.J.: Study of river reaeration at different flow rates, J. Env. Engrg., 114, pp. 91-105, 1988.
32) Genereux, D.P. and Hemond, H.F.: Determination of gas exchange rate constants for a small stream on walker branch watershed, Tennesse, Water Res. Resch., 28, pp.2365-2374, 1992
33) Shinadala, A. and Truax, D.T.: Reaeration characteristics of small streams, prep. For Miss. Dept. of Nat. Res., Bureau of Pollution Ctrl. Jackson, Miss., 1980.
34) Whittemore, R.C.: Development of an expert system for estimating stream reaeration rates, Air-Water Mass Transfer, ASCE, pp.378-385, 1991.
35) Ashley, K.I., Mavinic, D.S. and Hall, K.J.: Effect of orifice size and surface conditions on oxygen transfer in a bench scale diffused aeration system, Environmental Technology, Vol.11, pp. 609-618, 1990.
36) Ashley, K.I., Hall, K.I. and Mavinic, D.S.: Factors influencing oxygen transfer in fine pore diffused aeration, Wat. Res., Vol.25, No.12, pp.1479-1486, 1991.
37) Cox, C.: Measurement of slope of high-frequency wind waves, J.Marine Res., 16, pp.199-255, 1958.
38) Keller, W. and Gotwols, B.L.: Two-dimensional optical measurementof wave slope, Appl.Opt, 22, pp.3476-3478, 1983.
39) Jähne, B.:On the transfer processes at a free air-water interface, Habilitation thesis, Faculty of Physics and Astronomy, Univ. Heidelberg, 1985
40) Jähne, B. and Riemer, K.S.: Two-dimensional wave number spectra of small-scale water surface waves, J. Geophy. Res., 95, pp.11,531-11,546, 1990.
41) Jähne, B., Klinke, J. and Waas, S.: Imaging of short ocean wind waves:a critical theoretical review, J.Optical Soc. Amer. A, 11, pp.2197-2209, 1994.
42) Hiby,J.W.: The chemical indicator:a tool for the investigation of concentration fields in liquids, Ann.N.Y.Acad.Sci, 404, pp.348-349, 1983.
43) Hara, T., Bock, E.J. and Lyyzenga, D.: In situ measurements of capillary-gravity wavespectra using a scanning laser slope gauge and microwave radars, J. Geophys. Res., 99, pp.12593-12602, 1994.
44) Roesgen, T., Lang, A. and Gharib, M.: Fluid surface imaging using microlens array, Experiments in Fluids, 25, pp.126-132, 1998.
45) Okamoto, K., Tanaka, G. and Madarame, H.: Measurement of free surface inclination using speckle-gram, Proc. 9th Int. Symp. Application of Laser Tech. to Fluid Mech., pp.26.1.1-26.1.6, 1998.
46) Münsterer, T. and Jähne, B.: LIF measurements of concentration profiles in the aqueous mass boundary layer, Experiments in Fluids, 25, pp.190-196, 1998.
47) 細川恭史：ガストレーサーを用いた流水の再曝気係数の測定，港湾技術資料，No.562，pp.1-23，1986.
48) Liss, P.S. and Duce, R.A.: The sea surface and global change, Cambridge University Press, pp. 15-18, 1997.

49) Wanninkhof, R.H.: Relationship between gas exchange and wind speed over the ocean. J. Geophy. Res., 97(C5), pp.7373-7381, 1992.
50) Liss, P.S. and Marlivat, L.: Air-sea gas-exchange rate; Introduction and synthesis, in The Role of Air-Sea Exchage in Geochemical Cycling, edited by Buat-Menard, pp.113-129, D. Reidel, Hingham, Mass., 1986.
51) Asher,W.E., Farley, P.J., Wanninkhof, R., Monahan, E.C. and Bates, T.S.: Laboratory and field measurements on the correlation of fractional area whitecap coverage with air/sea gas transport, In Presipitation Scavenging and Atmosphere-Surface Exchange, Volume 2, S.E. Schartz and W.G.N. Slinn, eds, Hemisphere, pp.815-828, 1992.
52) 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.
53) 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.
54) 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.
55) 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.
56) 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.
57) 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.
58) 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.
59) 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.
60) 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.
61) 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.
62) 角野昇八，仲田義弘，斉藤　満，中谷成智，芳田利春，小田一紀：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.
63) 角野昇八，斉藤　満，山西和也：海浜の砕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.
64) 角野昇八，杉田智行，合田　巧：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，pp.1211-1215, 1996.
65) 角野昇八，Douglas B. Moog，舘川徹也，新谷尚弘，重松孝昌：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, 1998.
66) 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.
67) 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.
68) 鳴田隆司，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.
69) 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.
70) 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.
71) 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.
72) Jähne, B. and Hauβecker: Air-water gas exchange, Annu. Rev. Fluid Mech., 30, pp.443-468, 1998.
73) 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.
74) 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.
75) 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.
76) Imamura, M. and Mori, N. : The Influence of Solubility on Bubble Mediate Gas Exchange, OS41A-11, American Geophysical Union, Western Pasicif Meeting, 1998, Taipei.
77) 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.
78) 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.

(1999. 6. 28 受付)

THE STATE-OF-THE-ART ON GAS TRANSFER AT WATER SURFACES

Shohachi KAKUNO, Yoshihiko HOSOI, Kohsei TAKEHARA, Koji ASAI, Yuji SUGIHARA, Yoshiyuki NAKAMURA, Hiroshi YOSHIOKA, Hiromaru HIRAKUCHI, Takeharu ETOH and Tadanobu NAKAYAMA

The recent studies on gas transfer at water surfaces are summarized. The contents of proceedings of the International Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces, which were held three times in the last few decades, are classified depending on subjects in order to analize the movement in the research field. Some interesting topics in the proceedings of the Third International Symposium held at Heidelberg in Germany are presented. Research activities in Japan are also briefly summarized.