

**投稿論文** (和文報告)

**TECHNICAL  
REPORT**

# 国際会議報告

## 水表面での気体輸送に関する研究の現状

竹原幸生\*・江藤剛治\*\*

「第2回水表面での気体輸送に関する国際シンポジウム」の講演論文集である「AIR-WATER MASS TRANSFER」の要約を通して水表面での気体輸送に関する海外の研究の現状を紹介する。講演論文集には2つのキーノート講演と58の論文が含まれている。

**Keywords:** state of the art, gas transfer, water surfaces

### 1. はじめに

1990年9月11日から14日までの4日間、アメリカ合衆国ミネソタ大学において「第2回水表面での気体輸送に関する国際シンポジウム」が開催された。講演には83編が寄せられ、2編のキーノート講演が行われた。昨年、講演論文集<sup>(1)</sup>が刊行されたが、掲載されたのは60編(キーノート講演を含む)であった。日本からの参加者は筆者の1人(竹原)1名であったので、この論文集の要約を通じて水表面における気体輸送に関する海外の研究の現状を紹介する。

第2章では講演論文集の全ての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背景を明らかにすることを試みている。第3章では以後の説明の前置きとして水表面を通じた気体輸送に関する基礎的な理論を紹介する。第4章では水表面での気体輸送に関する種々の現象に対して新たに開発された計測手法について説明する。以下、現象を固定し、風波による気体輸送(第5章)、乱れによる気体輸送(第6章)、気泡による気体輸送(第7章)、液滴による気体輸送(第8章)、その他(第9章)に関する研究の中から興味ある研究成果を紹介する。第5~9章の基本構成は、概況、実験的研究、現場計測、理論的研究の順で説明しているが、これらの項目の内のいくつかは抜けている章もある。

### 2. 論文の分類

#### (1) シンポジウム参加者

論文の第1筆者の国別分類を行った。開催地であるアメリカ合衆国の参加者が最も多く40名で、次いでカナダの7名であった。ヨーロッパからはフランス5名、ス

イス2名で、その他、デンマーク、旧西ドイツ、旧ソ連から各1名ずつであった。その他の地域としてブラジルから2名、日本から筆者1名であった。

#### (2) 現象別分類

水表面での気体輸送に影響を及ぼす素過程の面から、論文を次の5つに分類した(図-1(a))。

(1) 風による波、(2) 水中の乱れ、(3) 水中に放出される気泡、(4) 水表面に衝突する液滴(雨滴)、(5) その他。

(1)の風波による気体輸送については、現在最も活発に研究が行われていることがわかる。

この問題はさらに次の3つに分類される。

- (a) 表面に波がほとんど生じない場合
- (b) 表面に波が生じる場合
- (c) whitecapが生じる場合

(2)の水中の乱れによる気体輸送に関しては理論解析、数値計算等は少なく、実験的な研究が多い。

(5)のその他として、ダム等からの放水による跳水や、水工構造物における曝気効果、ポンプによる下層水と表層水の交換等、現場計測や設計法に関するものが報告されている。また、近年中空のファイバーの小孔(0.02~0.05 $\mu\text{m}\phi$ )を通して気泡の発生なしで酸素を供給する技術を貯水池や下水処理場等における曝気に応用した例も報告されている。

以上のうち、(1)、(2)の風波や乱れによる気体輸送についての研究では、水表面近傍の微細な水理学的構造が大きな影響を持つことが明らかになってきた。このような微細な構造に与える水表面の汚染による表面張力等の変化の影響等について、先駆的な研究が精力的に進められている。

#### (3) 研究手法別分類

研究手法の面から次の4つに分類した(図-1(b))。

(1) 現地観測、(2) 解析、数値計算、モデル化等、(3)

\* 正会員 工修 近畿大学助手 理工学部土木工学科  
(〒577 東大阪市小若江3-4-1)

\*\* 正会員 工博 近畿大学教授 理工学部土木工学科

風波(16)	水中の乱れ(8)	気泡(7)	液滴(3)	その他(26)
--------	----------	-------	-------	---------

(a) 現象別分類

現地観測(20)	実験的研究(15)	解析、数値計算、モデル化(12)	実験手法の開発(11)	その他(7)
----------	-----------	------------------	-------------	--------

(b) 研究方法別分類

湖(沼, 湿地を含む)(17)	海洋(港湾等を含む)(15)	河川(7)	人工的な曝気施設(15)	その他(6)
-----------------	----------------	-------	--------------	--------

(c) 対象水域別分類

図-1. 論文の分類

( )内の数字は論文数である。

実験的研究, (4) 実験手法の開発等。

1つの論文中に2つにまたがるものがあれば両方に数を加えている。ただし(4)については実験手法の開発のみを目的とした論文だけをカウントした。

(4) 対象水域別分類

次に, 対象水域別に論文数を分類したのが図-1(c)である。分類としては以下に行った。

(1) 湖(沼地, 湿地を含む), (2) 海洋(港湾等も含む), (3) 河川, (4) 人工的な曝気が行われる場所(下水処理, 発電装置における問題, 化学工学における応用, ダムの放水等を含む)。

(1)の湖に関する研究は自然を対象とした場合, 最も多い論文数である。風や雨による影響が大きく, 特に風に関した論文数が多い。

(2)の海洋に関する研究もほぼ同じ数である。

(3)の河川に関する研究が少ない。過去においてこの分野では土木工学環境工学の分野で活発な研究が行われてきた。

その他, 1編ではあるが地下水に関する報告があり, 今後研究の対象となると思われる。

本報告の目的は, 以上の分類に基づきこの講演論文集に含まれる最新の研究成果を取りまとめ, 水表面での気体輸送に関する研究状況を報告することである。

3. 既往の理論の概説

以下の概説は論文集編集者である Gulliver<sup>A-1)</sup>の解説論文, および平山ら<sup>A-2)</sup>(1980)を参考にしてまとめた。

界面を通したあらゆる化学物質の正味のフラックスは Fick の法則により表現される。

$$F = -D(dC/dz) \dots\dots\dots (1)$$

ここで,  $F$  は単位面積当たりの正味のフラックス,  $D$  は

水もしくは空気中の化学物質の拡散係数,  $C$  は濃度,  $z$  は境界面からの距離である。正味のフラックスがない場合(平衡状態), 空気中と水中の濃度の比はヘンリー法則定数  $H$  と等しくなる。

$$H = C_a/C_w \dots\dots\dots (2)$$

ここで,  $C_a$  は空気中の濃度,  $C_w$  は水中の濃度である。以下, 添え字  $a$  は気相を表し, 添え字  $w$  は水相を表す。

この場合, ヘンリー法則定数  $H$  は無次元となる。大気中の濃度を分圧で表現する場合, ヘンリー法則定数  $H$  は圧力/濃度の次元を持つ。 $H$  は気体の溶解特性, 温度, および水の塩分濃度等の関数である。

これまで,  $O_2, N_2, CO_2$  などの一般的な気体についてはかなり研究が行われている。しかし, より複雑な成分の気体, あるいは水質条件に対する研究は不十分である。この  $H$  に関するデータは Gerrard<sup>B)</sup>(1980) により集められている。

多くの応用, とくに乱流場においては次のような表記法が便利であり, 一般的に用いられている。

界面から十分離れた場所では一様濃度であり, その濃度を用いて

$$F = k(C_a/H - C_w) \dots\dots\dots (3)$$

と表す。ここで,  $k$  は総括輸送係数(bulk transfer coefficient)もしくは単に物質輸送係数と呼ばれる。 $k$  の逆数は物質輸送に対する抵抗と考えることができる。

$$1/k = 1/k_L + 1/(Hk_G) \dots\dots\dots (4)$$

ここで,  $k_L$  は液相膜の物質輸送係数,  $k_G$  は気相膜の物質輸送係数である。多くの化学物質に対しては  $Hk_G \gg k_L$  であり,  $k = k_L$  となる。殺虫剤や除草剤のように気相側でコントロールされるように設計されたものも数多くある。この場合は  $Hk_G \ll k_L$  となる。また, アンモニア, ベンゼン, ピフェニル, アルデリン, ナフタリン, DDT, クロロホルムのような両相にコントロールされるものもある。この場合, 物質輸送係数  $k$  の決定は式(4)を使わなければならない。

多くの研究においては, この  $k, k_L, Hk_G$  などを決めることが主な目的となる。

乱流における気相-水相の物質輸送に対する初めての理論は境膜説(Nernst<sup>B)</sup>(1904), Lewis と Whitman<sup>B)</sup>(1924)である。この理論は次のようなものである。

表面には静止膜(これは定常であり, 輸送されない)が両相の境界にそれぞれ存在する。その境膜内において濃度分布は線形であり, 境界を通した輸送は定常状態である。このとき物質輸送係数は次式で表せる。

$$k_G = D_a/\delta_a \text{ or } Sh_a = k_G \delta_a/D_a = 1 \dots\dots\dots (5)$$

$$k_L = D_w/\delta_w \text{ or } Sh_w = k_L \delta_w/D_w = 1 \dots\dots\dots (6)$$

ここで,  $D_a, D_w$  は化学物質の拡散係数,  $\delta_a, \delta_w$  は静止膜の厚さ(濃度境界層),  $Sh_a, Sh_w$  は Sherwood 数で

ある。

実際の乱流では境膜は時間とともに変化する。

表面更新説 (Danckwerts<sup>B1</sup>(1951)) は Higbie<sup>B1</sup>(1935) によって提案された Penetration 説を概念的に拡張したものである。表面の流体は下層の流体によって確率的に更新される。つまり、乱流渦が水表面にランダムに衝突する。境界には境膜は存在するけれどもその厚さは時間的、空間的に変化する。表面更新説は本質的に境膜の厚さよりも表面更新の周期の方が気相-水相の物質輸送には重要であるとしている。

表面更新説により物質輸送係数は次式のようになる。

$$k_L = \sqrt{D_w r_w} \quad (\text{水相側}) \dots\dots\dots (7)$$

$$k_G = \sqrt{D_a r_a} \quad (\text{気相側}) \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $r$  は表面更新率である。

Dobbins<sup>B1</sup>(1964) は Danckwerts の表面更新の考え方を取り入れ、境膜の存在も仮定したモデルを提案している。彼のモデルにより得られた物質輸送係数は次式のようになる。

$$k_L = \sqrt{D_w r_w} \coth(r_w \delta_w^2 / D_w)^{1/2} \dots\dots\dots (9)$$

式 (9) より

$$\left. \begin{array}{l} r_w \rightarrow 0 \text{ のとき, } k_L \rightarrow D_w / \delta_w \\ r_w \rightarrow \infty \text{ のとき, } k_L \rightarrow \sqrt{D_w r_w} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

となる。更新率が小さくなる、つまり表面での乱れの時間スケールが大きくなると物質輸送係数は境膜説によるものに近づく。更新率が大きくなる、つまり表面での乱れの時間スケールが小さくなると表面更新説によるものに近づく。

Levich<sup>B1</sup>(1962) は境膜説に表面張力の影響を考慮したモデルを提案している。表面張力が流れ構造に影響を及ぼす層を考え、物質輸送係数  $k_L$  が

$$k_L = D / \delta_w \sim D^{1/2} \rho^{1/2} v_{ST}^{3/2} \sigma^{-1/2} \dots\dots\dots (11)$$

という結果を得ている。ここで、 $\rho$  は水の密度、 $\sigma$  は表面張力、 $v_{ST}$  は表面張力が影響を及ぼす層内での速度スケールである。

以上紹介したモデルにおいては以下のようなものがパラメーターとして残る。

- (1) 2重境膜説：境膜厚さ  $\delta_a, \delta_w$
- (2) 表面更新説：表面更新率  $r$
- (3) Dobbins のモデル：表面更新率  $r$ 、境膜厚さ  $\delta_w$
- (4) Levich のモデル：表面張力  $\sigma$ 、速度スケール  $v_{ST}$

Danckwerts の表面更新説以来、多くの概念的な理論が提案されてきた。これらは Bennett と Rathbun<sup>B1</sup>(1972), Theofanous<sup>B1</sup>(1984), 平山<sup>A-21</sup>(1980) によってまとめられている。今回の会議でもこれらのパラメータを波や乱れの運動から理論的に説明しようとした研究が報告されている (5. (5) 参照)。

Mackay<sup>A-11</sup> はキーノート講演でヘンリー法則定数に関して詳細な解説を行っている。筆者らはこの論文を理解するだけでの化学的な知識を持たないためここで紹介することはできないが、このような基礎的な問題についても未解決の問題が数多く含まれているようである。

#### 4. 計測手法

##### (1) 概況

計測手法の開発においては特に実験室での計測技術の進歩が著しい。主に水表面近傍での水運動と気体輸送のメカニズムの関係の解明に力が注がれている。

この章においては計測技術に関して特徴的な点や工夫された点のみを紹介する。その結果についてはそれぞれ関連する章で紹介する。

##### (2) 水表面での気体輸送の局所的かつ時間的計測

気体輸送係数  $k_L$  の計測については現在まで用いられてきた手法では下層の一樣濃度の水を採水し、長時間の濃度変化から  $k_L$  を算出しているのでマクロな  $k_L$  の値しか計測できなかった。最近、 $k_L$  の局所的かつ時間的変化の計測法の開発や、現象を直接可視化する試みが始められている。

###### a) 蛍光による表面更新の計測

Asher と Pankow<sup>A-11</sup> は蛍光物質を用いて、振動格子乱流における水表面極近傍の表面更新と  $\text{CO}_2$  の水中への輸送現象およびそれらにおよぼす表面張力の効果を実測することに成功した。

- (1) 蛍光強度が最大となるように pH を調整しておく
- (2)  $\text{CO}_2$  の吸収で pH が下がり、蛍光強度が低下する。
- (3) 空中から水面をレーザーで照射して蛍光を発生させるが、レーザー光の照射は水表面の薄層に限られるようにする。このため、水に光源レーザー波長の光を効果的に吸収する染料を溶かす。レーザーが入射し得る深さは Beer の法則に従い、水表面の極薄い層に限られる。
- (4) レーザー光はフィルターでカットし、蛍光強度の変化のみを高感度のフォトディテクターでモニタリングする (ただし点計測)。これにより  $\text{CO}_2$  が表面から吸収された状態と下方からの水により表面が更新された状態とを蛍光強度の変化で感知できる。

Wolff<sup>A-11</sup> は蛍光物質として PBA (pyrenebutyric acid) を使用し、溶存酸素濃度を計測している。PBA は溶存酸素量に反比例して蛍光の寿命が短くなる。

Jähne<sup>A-11</sup> も pH 変化により蛍光強度が変わる物質を用いて、HCl の輸送を計測している (2 次元計測)。

###### b) 熱移動による気体輸送の推定

Jähne<sup>A-11</sup> は熱移動計測から局所的な気体移動係数を推定している。水表面から与える熱フラックスを制御し、かつ水表面の温度だけを測ることににより熱移動速度を計測し (CFT: Controlled Flux Technique), これ

を気体移動係数に換算する方法である。この計測法では精度は少し劣るが時空間的に、局所的な  $k_L$  を計測することができる。

また、Jähne らは水面でのレーザー光の屈折より局所的な水面勾配を求めている (LSG: Laser Slope Gauge)。

### (3) 水表面極近傍の流速と溶存酸素濃度の同時計測

Chu と Jirka<sup>A-1)</sup> は、超小型の熱膜流速計と溶存酸素計を用いて振動格子乱流での水表面付近の乱流と溶存酸素濃度の同時計測を行った。

実験には直径 0.153 mm、長さ 1.3 mm の split-film 型の熱膜流速計を回転アームに取り付け、円周 0.76 m 上を 60 mm/s の速さで回転させている。また、流速センサーから 1.0 mm の間隔をおいてポーラログラフィー電極の溶存酸素計 (tip size 5.0  $\mu\text{m}$  以下、応答速度は 10 ms 以下) を設置し、同時計測を行っている。水深方向のデータサンプリング間隔は 10  $\mu\text{m}$  であった。

### (4) 現場における気体輸送量の計測

現場計測法の開発に関する報告としては、トレーサーガス法の改良、whitecap のレーダーによるリモートセンシング、溶解性フロートによる水表面での気体輸送量の推定法などがある。以下それらについて説明する。

トレーサーガス法は現地観測でよく用いられている。トレーサーガス法では水表面で気散するトレーサーガスと保存性トレーサーを用いて計測を行う。つまり、トレーサーガスは流れにより希釈、混合され、さらに表面で気散する。保存性トレーサーは希釈、混合されるが表面での気散がない。これらの差から水表面でのトレーサーガスの気散量を求め、酸素の溶入量に換算する。トレーサーガスとしてプロパン、放射性クリプトン、 $\text{SF}_6$  等、保存性トレーサーとしてロードミン WT、トリチウム等が一般的に用いられている。

Tsivoglou ら<sup>B)</sup> (1965, 1968, 1976) は、クリプトン-85 と蛍光染料により初めて幅の狭い河川 (1 次元) での計測を行っている。Holley と Yotsukura ら<sup>B)</sup> (1984) はプロパンガス法を幅の広い河川 (2 次元) に適用している。

トレーサーガス法に及ぼす以下の影響について検討する必要がある (Macdonald ら<sup>A-1)</sup>)。

- (1) 水表面の汚染物質による影響
- (2) 水質の影響
- (3) その他の化学物質、もしくは生物反応による影響

今回もトレーサーガス法の改良がいくつか提案されている。その例を以下に示す。

Holley ら<sup>A-1)</sup> はテキサス海岸の Lavaca 湾での気体輸送速度の計測にプロパンガス法を適用している。この湾は比較的浅く簡単に成層化してしまう。彼らは図-2 に示すようなトレーサーガス噴入箱を考案し、成層を壊すことなく成層上層にガスを噴入している。

Wanninkhof ら<sup>A-1)</sup> は  $\text{SF}_6$  を用いて 5 つの湖 (0.13~

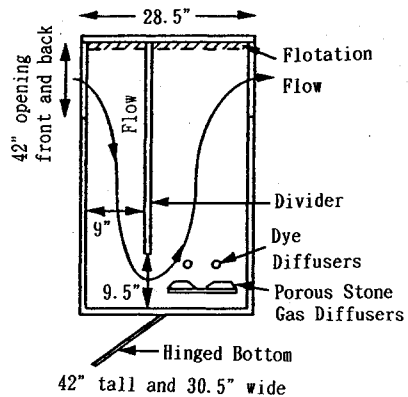


図-2 Holley らのトレーサーガス噴入箱

450  $\text{km}^2$ ) での  $k_L$  の計測を行っている。 $\text{SF}_6$  は温度界面の下から入れた。湖に対して  $\text{SF}_6$  を利用する利点は、

- (1) レベルが低くても感知することができる。
- (2) 水中において長期間安定である。
- (3)  $\text{SF}_6$  を含む水のサンプルに圧力をかけることができる。
- (4) 分析が簡単である。

水で覆われた河川に対する気体輸送の測定はほとんど行われていない。Macdonald ら<sup>A-1)</sup> は水で覆われた河川での気体輸送をトレーサーガス法により計測した。

Wanninkhof ら<sup>A-1)</sup> はレーダーの後方散乱と気体輸送係数の関係を実験により求めている。レーダーの後方散乱はほとんど Bragg 散乱であり、波長が 0.5~5.0 cm の表面張力波、表面張力波-重力波によるものである。これと気体輸送を直接結び付け、リモートセンシングできるといふ考えに基づいている。

Schulz と Giorgetti<sup>A-1)</sup> は現場での簡易的な計測法として水表面に浮かべた薄い円盤状のフロートが溶けて軽くなるのを測定し、これと  $k_L$  を結び付けている。

### (5) 実験水槽

Grisenti と George<sup>A-1)</sup> は乱れの発生源として、振動格子や回転羽の代わりにマイクロジェットを用いて実験を行っている。利点として以下のような点を上げている。

- (1) 水表面が波立つほどの強い乱れを生じさせることができる。このとき水表面付近の乱れ特性は水表面が平らな場合と大きく変わる。
- (2) 機械的な振動による卓越低周波が生じない。
- (3) 微生物等の実験を行う場合、細胞を著しく壊すことなく強い乱れを生じることができる。

これらの水槽では主流のない理想化された乱れを対象にしたものである。Tamburrino と Gulliver<sup>A-1)</sup> は、剪断流による乱れの影響を調べるため、ベルト状の水槽床が 1 方向に動くことによって生じる大規模な乱流構造が気体輸送に及ぼす影響について実験を行っている。彼ら

表一 風波による気体輸送に関する既往の研究

分類	研究者	内容
実験的研究	Deacon(1977)	気体輸送係数 $k_L$ が界面の水の摩擦速度 $u_*$ に比例するとし、 $k_L = 1/\beta Sc^{-n} u_*$ を提案し、固体表面の場合 $n = 2/3$ , $\beta = \text{const.}$ という結果を実験から得ている。
	Broeckerら(1978), Jähneら(1985, 1987), McCreadyとHanratty(1984)	自由表面で風の剪断力により波が生じる場合の実験を行っている。結果として、 $n = 2/3 \rightarrow 1/2$ , $\beta$ は減少する。
	Broeckerら(1978), Broeckerら(1986)	同じ風の剪断力で表面活性剤の有無による影響を調べている。表面活性剤が存在すると $k_L$ は1/5になる。
	KromerとRoether(1983)	風速が一定の場合と風速が大きく変化する場合の実験を行い、比較している。一定風速よりも風速変化が大きい場合の方がかなり多くの気体輸送が起こる。
理論的研究	HassとLiss(1980), McCreadyとHanratty(1984)	小さいスケールの波(表面張力波程度)が気体輸送に大きく影響を及ぼす。
	Coantic(1986)	表面張力波によるオービタルモーションと風の剪断による表層流れの非線形の相互作用が乱れを増大し、これが気体輸送に大きく影響。
	BackとMcCready(1988)	表面張力波の存在により風の剪断応力が風向き方向に変化し、かなり強い流れを生じる。これが気体輸送に大きく影響。
	Kitaigorodskii(1984)	大きなスケールの波の不安定、特に砕波が水表面近傍に強い乱れのパッチを形成する。この乱れが水表面近傍の乱れの主な成分であり、気体輸送を規定している。
	Csanady(1990)	風波の下にできるローラーにより水表面にdivergenceとconvergenceが生じ、これが表面更新を行っている。
現地観測	LissとMarlivat(1986)	経験式を提案している。この式は広く用いられており、CO <sub>2</sub> の地球規模での $k_L$ のマッピングに用いられている。
	BroeckerとPeng(1974)	<sup>14</sup> C法を用いて計測を行った結果CO <sub>2</sub> の輸送速度は20cm/hrであった。Liss-Marlivatの式から得られ結果の約1.8倍であった。
	BroeckerとPeng(1974), GloverとReeburgh(1987), KromerとRoether(1983)	ラドン不足量からの推定法で計測を行っているが、風速と $k_L$ の良い相関は得られていない。
	Pengら(1979), Smethie(1985)	

は組織だった乱流構造が水表面の更新を支配しているという考えに基づきモデル化を行っている。

Asherら<sup>A-1)</sup>はWhitecapによる影響を調べるため以下のような水槽を開発した。水槽の上部の容器から垂直に水を投入し、形成された泡に覆われた場合の $k_L$ の増加について計測する(WST: Whitecap Simulation Tank)。

### 5. 風波による気体輸送に関する研究

#### (1) 概況

現在までに行われた研究を表一に示す。実験のおよび理論的研究から色々な予測式や物理的なモデル化が試みられているが、それを検証するデータは十分ではない。

#### (2) 実験的研究

Jähne<sup>A-1)</sup>らは風波による気体輸送の予測式を確立するためにハイデルベルグ、マルセーユ、デルフト、カールスルーエの大風洞水槽を用いて、種々のスケール、条件で実験を行っている。波の条件として造波のみから、造波と風、風のみまで、また規則波とJONSWAP型の不規則波の条件で実験を行っている。計測にはCFT(4.(2)b)参照)を用いており、熱の移動量から気体輸送量を推定している。波型勾配はLSG(4.(2)b)参照)を使用している。

実験結果は次のようである。

- ① 表面張力波を含む小さいスケールの水位変動のスペクトル密度特性と気体輸送は無関係である。デルフトでの実験において偶然ある表面汚染物質が実験の途中で混入し、表面張力波のスペクトル密度が減少したが、 $k_L$ の変化は生じなかった。この結果はCoantic<sup>B)</sup>(1986)やBackとMcCready<sup>B)</sup>(1988)の結果と逆である。
- ② 規則波とランダム波との違いにより気体輸送には変化がない。ただし、砕波がある場合は $k_L$ は大きくなる。
- ③ 波動場の安定性のみ(おそらく波形勾配が支配的指標になる)が気体輸送に関係がある。ただし、これは風波が不規則波の場合のみであり、造波されている場合の波の安定性とは関係がない。
- ④ メカニズムに関しては現在まだよくわかっていない。

以上の結果によれば、風速が小さい場合でも $k_L$ がある程度以上の値になるには、風速が速い場合よりも頻度は少ないが不安定な波が生じている必要がある。そこでJähneとRiemer<sup>B)</sup>(1990)が画像を使った風波の空間的な計測を行い、3m/s程度の風の場合でもときどきスケールは小さいが波型勾配の大きい波が存在し、波峰の風下側に表面張力波の連なりを伴う不安定現象が生じていることを指摘している。よって体積気体輸送係数 $k_{La}$

表—2 Wanninkhof らの観測対象湖および条件

観測湖名	観測期間	面積 (km <sup>2</sup> )	表層水温度 (°C)	温度躍層までの平均深さ(m)	標高 (m)	水の性質
Rockland Lake, NY	Nov. 10 to Dec. 10, 1983	1	5~10	30	30	淡水, 富栄養
Crowley Lake, CA	July 19 to Aug. 29, 1984	20	19~20	10	2200	淡水, 藻類繁殖
Mono Lake, CA	July 26 to Sept. 2, 1984 Sept. 4 to Dec. 12, 1984	200	19~21	12~14	1900	過塩水(8%, pH=9.8)
ELA Lake 302 N, Canada	June 25 to Sept. 25, 1987	0.13	16~20	5	370	淡水, 貧栄養(pH=5.5)
Pyramid Lake, NV	July 27 to Sept. 23, 1988	450	19~23	14~24	1200	塩水(0.4%, pH=8.9)

の増大も局所的な不安定砕波であることを予想し、現在実験を継続中である。

Cauliez<sup>A-1)</sup> もこれまでの理論的モデルを実証するために、風波による水相の乱れ場のデータ不足を補う必要があるとしている。結論として小さい波でも Okuda ら<sup>B)</sup> (1976, 1982) の比較的スケールの大きい波の観測結果と同様な Roller が生じている様である。このことにより現在最もよい理論モデルは Csanady<sup>B)</sup>(1990) のものであろうと述べている。

(3) 現場計測

Wanninkhof ら<sup>A-1)</sup> は SF<sub>6</sub> を用いて 5 つの湖での気体輸送係数  $k_L$  を実測し、整理している。

彼らは普遍的な経験式を提案するために、面積が 0.13~450 km<sup>2</sup> で種々の水質をもつ 5 つの湖で計測を行っている。計測した湖の条件および観測期間を表—2 に示す。

温度差、水質の違いによりシュミット数が増加するため、データ整理はシュミット数を 600 に換算した場合の  $k_L(600)$  で行っている。また、風速としては 10 m 上空での風速  $u_{10}$  を用いている。観測結果から次式を提案している。

$$k_L(600) = 0.45 u_{10}^{1.64} (600/Sc)^{-1/2} k_i \dots\dots\dots (12)$$

$$u_* = (6.1 + 0.63 u_{10})^{0.5} u_{10} \dots\dots\dots (13)$$

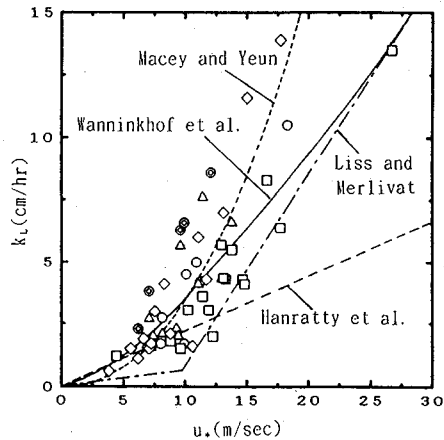
ここで、 $k_i$  は温度  $P$  °C のときの気体輸送係数である。また、観測結果と他の提案式と比較するため (13) 式を使い  $u_{10}$  を  $u_*$  に変換した。

観測結果とこれまでに提案された式を図—3 に示す。

Hanratty らの実験によって得られた式は観測値からかなり外れていることがわかる。よく使われる Liss と Merlivat<sup>B)</sup>(1986) の式は観測値の下限に沿う。

以下は Wanninkhof らの結果である。

- (1) 小さいきれいな湖においては  $k_L(600)$  は大きく、汚れた大きい湖においては小さい。界面活性剤と風の吹送距離 (fetch) の影響が考えられる。
- (2) Mono Lake は塩分濃度が高く、CO<sub>2</sub> の溶解度が高いという報告があるが、SF<sub>6</sub> ではこの傾向はみられない。
- (3) 風速の変化を考慮するため 1 分平均の風速から  $k_L$  を補正すると 30% 程度誤差が小さくなる湖もある。



図—3 Wanninkhof らの観測結果  
○: Mono Lake, △: Crowley, □: Rockland Lake,  
◇: Lake 302 N, ◎: Pyramid Lake  
図中の実線は式 (12) を表す。一部筆者らが加筆。

海洋での現場計測法としてラドンの不足量から気体輸送量を推定する方法があるが、これにより得られた結果と風速ではよい相関が得られない。この原因としてラドンによる手法の問題点と風速以外のパラメーター (上記の例, whitecap 等) の影響が考えられる。

海洋のマイクロ波を測定する方法として、次のようなものがある。飛行機や地球観測衛星に取り付けた Scatterometer から、経験的な関係式より風速を推定している (Jones ら<sup>B)</sup>(1976), Wentz ら<sup>B)</sup>(1986)). Etcheto と Merlivat<sup>B)</sup>(1988) はこの手法を用い、風速—Scatterometer—気体輸送速度の関係を求めている。

Wanninkhof ら<sup>A-1)</sup> はレーダーの後方散乱と気体輸送量を実験により関係づけた。結果は以下の通りである。

- (1)  $u_*$  が小さいとき造波があると slope スペクトルが変わり、 $k_L$  が大きくなる。
- (2) 砕波が起これば  $k_L$  が大きくなる。
- (3) Wallop Island より Delft の  $k_L$  の方が 23% 大きくなる。(これはおそらく fetch の影響であろう)
- (4)  $k_L \sim Sc^{-1/2}$  はよく成り立っている。
- (5) レーダー後方散乱と気体輸送係数  $k_L$  の関係は次式で表される。

$$k_L = a 10^{bA_0} \dots\dots\dots (14)$$

ここで  $a, b$  は係数,  $A_0$  は Scatter である。

#### (4) whitecap による気体輸送

海洋では砕波などにより生じた whitecap が気体輸送係数に大きく影響する。しかし whitecap の影響についての既往の研究は少なく、ほとんど分かっていないのが現状である。既往の研究として以下の様なものが上げられる。

Monahan と Spillane<sup>B)</sup>(1984) はトータルな  $k_L$  として、

$$k_L = (1 - w_c)k_T + w_c k_w \dots \dots \dots (15)$$

というモデルを提案している。ここで  $w_c$  は whitecap が覆っている割合、 $k_w$  は whitecap 部分の気体輸送係数、 $k_T$  は whitecap 以外の部分の気体輸送係数である。

$w_c$  の現地の値を測定するために、最近衛星からマイクロ波を計測することにより推定する方法が検討されている。これは whitecap がマイクロ波の放射を促進することによりその部分を判別するという原理である。

whitecap について次のような実験室における検討も進められている。

Asher<sup>A-1)</sup> は whitecap の影響を実験により調べるため、Battelle の海洋科学研究所の WST (4, (5) 参照) を用いて実験を行っている。これより次のようなことがわかった。

- (1) 水の場合、泡で覆われた部分の割合  $w_c$  と  $k_L(600)$  ( $\text{CO}_2$  に対する真水  $20^\circ\text{C}$  での  $Sc=600$  の場合の  $k_L$ ) の関係は  $\text{He}$ 、 $\text{O}_2$  と  $\text{SF}_6$  の場合と同様にほぼ完全な線形である。
- (2) 海水の場合少しばらつくがほぼ線形関係がある。
- (3)  $w_c > 0.3$  では線形関係の勾配が小さくなる。
- (4) 境界層厚さ  $\delta_c = D/k_w$  は  $0.05 \times 10^{-6} \text{ m}$  と非常に小さい。通常は  $60 \times 10^{-6} \text{ m}$  程度である (Asher と Pankow<sup>B)</sup>(1986), Brumley と Jirka<sup>B)</sup>(1988))。

Monahan と Torgersen<sup>A-1)</sup> も同様な実験装置で実験を行っている。彼らは whitecap を 2 つの領域に分けている。

- (1) Spilling 波の波峰 → 発達途中の whitecap (A 領域)
  - (2) 泡のバッチ → 発達しきった whitecap (B 領域)
- これらを考慮すると  $k_L$  の値は Liss と Merlivat<sup>B)</sup>(1986) の結果より十分大きな値となる。

以上 2 つの実験では静水中に鉛直上方から水を落下させて whitecap を生じさせているため、実際の砕波によって生じる whitecap の場に直接適用することはできない。しかし、whitecap の占める割合とトータルな  $k$  がほぼ線形関係であるので、海洋での whitecap の割合から実際のトータルな  $k$  が評価できる可能性がある。

現在、地球規模の  $\text{CO}_2$  循環量評価において計算上トータルな  $\text{CO}_2$  量がバランスしておらず、余剰分がどこに存在するのかわからない。現在のところ海洋に吸収され

ているという考え方が有力である。上記の研究はこの問題に 1 つの解答を与える可能性がある。

#### (5) 理論的研究

Csanady<sup>A-1)</sup> は風による水表面の divergence が Dankwerts のモデルでの表面更新に対応することを示し、水表面での divergence が最も大きい風波発達初期のメカニズムを既往の実験結果をもとに理論的に解析している。

Csanady<sup>B)</sup>(1990) は波とともに移動する座標系では波の下にローラーが形成しており、このローラーにより波の運動量が表面剪断層の運動量に輸送されるという考えを提案している。

ある波の波峰で剥離した気流が水面に再附着し、局部的に大きな剪断力 (剪断応力スパイク) を生じることが報告されている (Okuda<sup>B)</sup>(1976, 1982))。今回の論文では以下のようなモデルを提案している。

気流の粘性底層中のスケールが小さく、勾配が大きい波は気流に剥離を生じさせる。それが風下側の次の波の抵抗と剪断応力スパイクの原因になり、水相側にも剥離と剪断応力の分布が生じる。これにより表面に divergence と convergence が生じるとしている。Csanady は  $k_L$  を水表面における水平方向の divergence  $b$  と分子拡散係数  $D$  より  $k_L \sim \sqrt{Db}$  で表している。

ここで、剪断応力スパイクが波の運動量、表面剪断層の運動量のどちらに直接的に作用するのかが重要な問題である。波の運動量に作用する場合、表面の divergence は波に伴う水の運動のみによって生じる。表面剪断層内の運動量に作用する場合、その層内に加速の不均一が生じ、前者に比べかなり大きい divergence を発生させる。Csanady は風による剪断流れと波動成分が線形的重ね合わされると仮定し、後者の結果を導いている。

風波発達初期における波の特徴として、剪断流による大きな渦度を持ち、しかも与えられた波数に対しては free wave と同じ波速になる。これは自由剪断流の初期に生じる乱流渦と似ている。よって Csanady はこの剪断不安定を "wavulence" と呼ぶことを提案している。

Hanratty<sup>A-1)</sup> は水表面が movable と nonmovable の 2 つの条件で循環流パターンを仮定し、非定常質量平衡方程式により気体輸送の評価を行っている。

結果は以下の通りである。

(a) 風波は小さい、または界面活性剤により波の発生がない場合 (nonmovable),

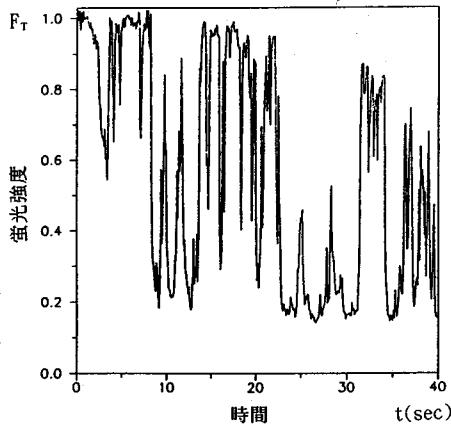
$$k_L/u_* \sim Sc^{-0.7} \dots \dots \dots (16)$$

(b) 風波が大きい場合 (movable),

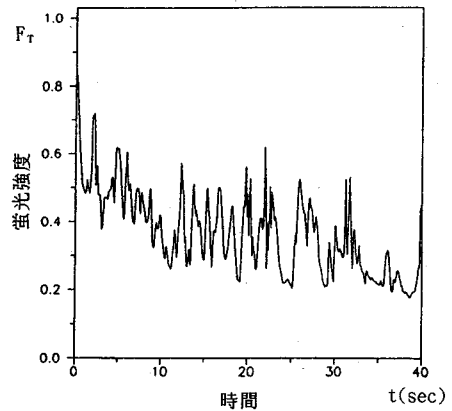
$$k_L/u_* = 0.15 Sc^{-1/2} \dots \dots \dots (17)$$

この他、Hanratty や MaCready らは小さいスケールの波 (表面張力波程度) が気体輸送に大きく影響するという理論も提案している。





(a) 水表面が清浄な場合



(b) 水表面に単分子膜が存在する場合

図—4 Asher らによる蛍光強度と表面更新の関係：蛍光強度  $F_T$  は初期蛍光強度で正規化されている。

## 6. 乱れによる気体輸送に関する研究

### (1) 実験的研究

乱れによる気体輸送に関する実験的研究としては、主に主流を持たない乱れだけの理想化された場のものが多い。

Asher と Pankow<sup>A-1)</sup> は蛍光物質により水表面での表面更新を詳細に調べている (4. (2) a) 参照)。水表面が清浄にされた場合と単分子膜で覆われている場合の2つのケースに対する蛍光発光強度 ( $F_T$ ) の時系列変化の例を図—4 に示す。実験においては  $\text{CO}_2$  が溶け込んでいない初期の状態では蛍光強度が大きく、 $\text{CO}_2$  が溶け込めば蛍光強度が減少するように設定されている。図—4 (a) は水表面が清浄な場合で、実験開始時の蛍光強度が  $\text{CO}_2$  の溶け込みにより一旦減少するが、実験開始後約 20 秒間は表面更新により初期の蛍光強度に回復しているのがわかる。図—4 (b) は水表面に単分子膜が存在している場合で、もとの蛍光強度にまでは回復していないのがわかる。

また、彼らは  $F_T$  から濃度に関する境界層深さ ( $Ze$ ) の推定方法を提案している。結果は以下の通りである。

#### (1) 水表面が清浄な場合

$Ze=0$  が起こり得る。このとき表面更新がある。

強い乱れの場合： $\overline{Ze}=30 \mu\text{m}$ ,  $\delta_c=19 \mu\text{m}$

弱い乱れの場合： $\overline{Ze}=75 \mu\text{m}$ ,  $\delta_c=69 \mu\text{m}$

#### (2) 単分子膜が存在する場合

$Ze=0$  が起こり得ない。

強い乱れの場合： $\overline{Ze}=93 \mu\text{m}$ ,  $\delta_c=100 \mu\text{m}$

弱い乱れの場合： $\overline{Ze}=195 \mu\text{m}$ ,  $\delta_c=240 \mu\text{m}$

ここで、 $\delta_c=D/k_L$  で Whitman と Lewis の境界膜厚さである。

単分子膜が存在する場合、 $\delta_c$  に関する実験結果は

Jirka と Ho<sup>B)</sup>(1990) や Luk と Lee<sup>B)</sup>(1982) の結果とよく一致している (Jirka らや Luk らの実験では Asher らほどに水表面を清浄にできなかったと推測)。 $Ze$  と  $\delta_c$  は乱れの強さや水表面の単分子膜のあるなしに関わらず線形の相関関係がある。これより  $Ze$  の結果から  $k_L$  を評価できる。

Chu と Jirka<sup>A-1)</sup> は熱膜流速計と DO-マイクロプローブを用いて、水表面極近傍の乱流と溶存酸素濃度の同時計測を行った (4. (3) 参照)。彼らの結果は以下のようである。

(1)  $c'/(c_s-c_b)$  の平方根自乗平均値の最大値は、 $z/z_0$  が 1~3 の間で生じる。ここで、 $z_0$  は実験によって求める濃度境界層の長さスケール (thickness constant),  $c'$  は水面からの  $z$  の深さでの濃度の変動成分である。

(2) 4 種の乱れ条件においても  $\delta$  と  $z_0$  はよく一致している。

(3)  $k_L/U_{HT} \sim R_L^{-0.44}$  となり Fortescue と Pearson<sup>B)</sup> (1967) の  $k_L/u' \sim R_L^{-0.5}$  の結果とよく一致している。ここで、 $u'$  は乱れ強度、 $U_{HT}$  は Hopfinger と Toly<sup>B)</sup>(1976) が振動格子の実験より求めた速度スケール分布の式より求めた水表面での速度スケールである。

(4) 濃度および速度の鉛直方向成分の積分長さスケールは、水表面の近くでばらつきが大きくなる。

(5) 鉛直方向の速度変動と濃度変動のコスペクトルにより、積分長さスケールの運動とコルモゴロフの最小渦径程度の運動のどちらが気体輸送により影響を及ぼすかを比較した。その結果、積分長さスケール程度の運動がより支配的であるという結果を得ている。

Grisenti と George<sup>A-1)</sup> は乱れの発生源として振動格子ではなく、マイクロジェット (4. (5) 参照) による実験を行った。水表面に剪断がない場合、気体輸送速度  $k_L$  を規定する量として摩擦速度  $u_*$  の代わりに乱れエネルギー

ギー  $E_i$  を用いるべき (Magnaudet ら<sup>A-1)</sup> であるとして次のような実験式を提案している。

$$k_L = 0.03 Sc^{-1/2} \sqrt{E_i}, Sc = 430 \dots \dots \dots (18)$$

以上の報告は主流のない乱れのみに関するものである。乱流の組織構造と気体輸送に関するこれまでの他の研究について以下に述べる。

Gulliver と Halverson<sup>B)</sup>(1987) は水深規模の組織だった構造による上昇流と気体輸送を関係づけている。

Rashidi と Banerjee<sup>B)</sup>(1988) は水深がパーストのオーダー (100~600× $H^*$ (= $hu_* / \nu$ ,  $h$  は水深,  $u_*$  底面の摩擦速度,  $\nu$  は水の粘性係数) 程度, つまりパーストの1~6倍程度と小さく, かつレイノルズ数が $10^4$ 程度と比較的小さい場合の実験を行っている。

Komori ら<sup>B)</sup>(1988, 1989) は Rashidi らと同様な実験を行い, パーストと表面更新渦の関係を求めている。表面更新渦のサイズは流れ方向, 鉛直方向, 横方向でそれぞれ水深の2.0, 1.5, 1.0倍であるとしている。

今回, Tamburrino と Gulliver<sup>A-1)</sup> はベルト状の水深が動く水槽を用い, 水深が600~4800× $H^*$ 程度の大きい場合の実験を行っている (4. (5) 参照)。彼らは流速を次のように分離し, 大規模渦の解析を行っている。

$$u(t) = U + U'(t) + U''(t) \dots \dots \dots (19)$$

ここで,  $U$  は平均流速,  $U'(t)$  は流れ方向渦の速度成分,  $U''(t)$  は壁面のパーストかそれよりも小さい速度成分を表す。時間平均により  $U''(t)$  が消える程度の時間間隔で平均をとり  $U'(t)$  を検出している。これにより, 乱れ強度と水深の関係を Nezu ら<sup>B)</sup>(1977) と比較している。結果によれば, 風による Langmuir cell とほとんど同じ構造ができ, それが表面更新を支配しているとしている。

## (2) 現場計測

Friedmann と Blanc<sup>A-1)</sup> はプロパンガス法を用いてマサチューセッツの Assabet 川の1185 m (内計測は800 m) の区間で計測を行っている。下水処理場の設計時の  $k_L$  の評価に O'Connors の式を用いているが, 測定結果によればこの  $k_L$  の値に対して2~3倍大きい値を示している。よって下水処理場からの BOD 負荷を増加することが出来る。

Macdonald ら<sup>A-1)</sup> は水で覆われた河川での気体輸送をトレーサーガス法により計測している (4. (5) 参照)。対象河川はカナダの Athabasca 川であり, 1400 km の内約58 km の区間で測定を行っている。水で覆われた河川に対する気体輸送係数  $k_L$  はほぼ0であった。

Whittmore<sup>A-1)</sup> は米国の200河川の1300近くの  $k_L$  の測定例をデータベース化している。データとしては  $k_L$  と共に水の温度, 流速, 水深, 勾配, 流量が入っている。問題点として以下のような事項がある。

- (1) 実測値の多くは100 ft<sup>3</sup>/s以下の水路のものである。
- (2) 他の要因, 例えば, 川幅, 水路の性質, 蛇行, 河床状態等の情報が入っていない。
- (3) それぞれのデータの不確かさの程度がわからない。

## 7. 気泡による気体輸送に関する研究

Tsang<sup>A-1)</sup> はポイントソースによる気泡の発生ではなく, 面的に気泡が発生する場合の理論式を立てている。現場実験によれば面的に気泡が発生する場合の方が点発生する場合よりも効果的であるという結果を得ている。

Michelsen ら<sup>A-1)</sup> は地下水への酸素供給を行うためのマイクロバブルについて実験を行っている。マイクロバブルの占めている体積は5.4~59%の範囲で行われた。体積気体輸送係数  $k_{LA}$  は0.01~0.09 hr<sup>-1</sup>であった。間欠的なマイクロバブルの放出の場合  $k_{LA}$  はより高い値を示す。

## 8. 液滴による気体輸送に関する研究

Belanger と Korzun<sup>A-1)</sup> は, 降雨による気体輸送への影響について検討している。降雨の影響に関する定量的評価は少なく, Van Dorn<sup>B)</sup>(1953) 以来行われていない。

彼らの実験結果によれば降雨強度と気体輸送速度にはよい直線性がある (相関係数  $r=0.97$ )。また, 30分間の降雨が1.3 cm の実験 (これを, フロリダでの2年に1度の3.5時間平均降雨強度である) では, 初期濃度3 mg/h から6 mg/h となり, 雨滴自身が飽和していると考えた場合に雨滴そのものが水中に持ち込む気体量に比べて輸送される気体量はかなり大きい。この場合の降雨による水表面の乱れによる取り込みは約83%程度と見積もられる。

酸性雨や酸性霧が深刻な問題となっている。Causade と Saboni<sup>A-1)</sup> は, 基礎的研究として数値計算により単一の水滴が静止状態から  $Re (=ud/\nu, u$  は水滴の落下速度,  $d$  は水滴の直径,  $\nu$  は水の動粘性係数) が400までの間の水滴内の水運動と水滴への気体輸送を計算し, Walcek ら (1984) の実験および計算結果と比較している。水滴中の流れの計算としては  $N-S$  方程式と連続の式を曲線座標系で表示し, 流れ関数と温度を変数として計算している。また, 気体輸送の計算は液滴表面に境界膜がある場合, ない場合について計算を行っている。

## 9. その他

### (1) 水工構造物による気体輸送

ASCE の水工構造物における気体輸送に関する技術委員会の task committee<sup>A-1)</sup> は種々の水工構造物における気体輸送に関する研究の現状を詳細に報告している。

現在、気体輸送に関する研究は影響を及ぼすパラメータを規定する段階である。基礎的研究は気体輸送量の定式化を行うために続けられるであろうが、現場での経験的な結果が当分用いられるであろうとしている。

Macaitis<sup>A-1)</sup>は Side Elevation Pool Aeration (SEPA) Station の設計に関して得られた情報の報告を行っている。この SEPA はシカゴの Cal-Sag Channel や Calumet River 等の水を汲み上げ、公園内を自由落下させることにより、水質改善するために行われた。

Favre<sup>A-1)</sup>はディープシャフトを用いた処理場での効率を評価している。ディープシャフトの平均継続時間は 26 時間で生化学的活動の低下率は 70~95% であった。

また、Favre<sup>A-1)</sup>はスイスの 3 つの富栄養化した湖における曝気装置の構造を紹介し、その効果を報告している。N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, P の調査の他、湖底の堆積物の変化もダイバーにより調査し、大きな水質改善効果があることを確認している。

## (2) 海洋での CO<sub>2</sub> 取り込み

地球規模での CO<sub>2</sub> のバランスの推定のため、Peng<sup>A-1)</sup>は海洋での C<sup>14</sup> の動態推定から海洋の CO<sub>2</sub> 取り込み量を評価している。

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) の報告の他、ほとんどの報告は Oeschger ら<sup>B)</sup>(1975) の Box-Diffusion (BD) モデルを用いている。

Broecker ら<sup>B)</sup>(1985) は Lateral-Transport (LT) モデルを提案している。これは核爆弾によって生産された C<sup>14</sup> の地球規模での分布のバラツキを説明するのに用いられた。

Peng らは人工的な CO<sub>2</sub> の海洋での uptake と CO<sub>2</sub> 濃度の未来予測のため LT モデルの修正を行った。彼らの計算によれば海洋は平均 2.4~2.6 Gt/year 炭素を 1980 年代に取り込んでいる。一方、Tans ら<sup>B)</sup>(1990) が推定した結果は 1 Gt/year 以下であった。このことより、IPCC で使われている BD モデルより LT モデルの方が海洋での CO<sub>2</sub> 取り込みの評価に効果的であるとしている。

この LT モデルを用いて大気中の CO<sub>2</sub> 濃度の未来予測を 4 つのシナリオについて行った。結果は IPCC の値より相当小さい値となった。

## (3) 膜による水への気体輸送

Semmens ら<sup>A-1)</sup>は 0.02~0.05 μmφ の小孔の多数あいた膜フィルターを通して気泡が発生しない範囲での酸素供給法を現場に適用している。材料は小さい孔のあるポリプロピレンの中空繊維の膜で、手術中の人工肺の研究や化学工学における応用を目的として開発されたものである。現地試験は、ミネソタ市の Vadnais 湖 (ミシシッピー川の水を貯水) の下水処理場で行われた。

## 10. まとめ

1990 年 9 月にアメリカ合衆国ミネソタ大学において開催された「第 2 回水表面での気体輸送に関する国際シンポジウム」の講演論文集の要約を通して水表面での気体輸送に関する研究の海外における現状を紹介した。

今回の要約で明らかとなった今後進めるべき研究課題を以下に列挙する。

- (1) 水表面極近傍での気体輸送に関するメカニズムの解明
- (2) whitecap による気体輸送の解明
- (3) IPCC による地球規模での CO<sub>2</sub> 循環の計算における問題点の解明
- (4) リモートセンシング、レーダー等の現地計測への応用
- (5) 気体輸送に関する資料のデータベース化

## 参考文献

- A-1) Steven C. Wilhelms and John S. Gulliver (eds) : AIR WATER MASS TRANSFER, ASCE, 1991.
- A-2) 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，17 巻，197 号，pp.21~30，1980.
- A-3) 江藤剛治・竹原幸生：水表面での気体輸送に関する研究の現状，近畿大学水工学研究室，1992.
- 注 1) A-1) については筆者らで手分けして，60 編の論文のうち約半数については全文を読み，残り半分は概要と結論部のみを読んだ。
- 注 2) 本文中の添え字 A) は筆者らが直接読んだ論文であり，添え字 B) は孫引きによるものである。
- 注 3) 本報告は文献 A-3) の報告をさらに要約したものである。本報告ではページ数の関係で引用した全論文名を上げることはできなかった。また，重要と思われる説明についても割愛した部分が多い。これらについては A-3) の報告を参照して頂ければ幸いである。

(1992.8.3 受付)

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

Kosei TAKEHARA and Takeharu ETOH

The proceedings of the second international symposium on gas transfer at water surfaces, 'AIR-WATER MASS TRANSFER', which contains two keynote lectures and fifty eight technical papers, is summarized to present the state of the art on the subject.