

近畿大学 江藤剛治, ○竹原幸生

## 1. はじめに

1990年9月11日から14日までの4日間、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>が発行された。掲載されたのは60編(キーノート講演を含む)であった。日本人の参加者は筆者の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の気体輸送に関する海外の研究の動向を紹介する。

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。ただし、筆者らは理論的研究を完全にフォローする力がないので式の展開については追っていない。

本報告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、講演論文集の要約を通じて得られた現在の海外での研究の動向を概説する。

## 2. 論文の分類

### 2.1 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(図-1(a))。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。開催地であるアメリカ合衆国およびその隣国であるカナダが多いのは当然であるが、そのことを考慮しても気体輸送に関する研究はアメリカやヨーロッパを中心に研究が行われていることが分かる。一方、アジア地域からの参加者はほとんどない。日本の土木工学の分野でも十年程前までは活発に研究が行われたテーマであるが、現在、このテーマを研究している研究者は少ない。

第1筆者の専門分野別に分類を行った(図-1(b))。複数の専門にまたがる場合は両方にカウントしている。土木工学、環境工学が多く、海洋学も比較的多かった。また、化学工学に関しては予想していたよりも少なかった。これは特定の地域から地球規模までの規模の大きい環境問題が重要視されていることを反映していると考えられる。

その他、地質学、物理学や農学等があった。

### 2.2 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(c))。

(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。風波は閉鎖水域、例えば湖、貯水池等において気体輸送を促進させる主な要因の1つであり、このような水域の水質および生態系に大きな影響を及ぼす。地球温暖化で問題となっている海洋でのCO<sub>2</sub>の収支は正確に把握されておらず、これもこの分野の研究が活発に行われている1つの原因であろう。

この問題は次の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予想していたよりも論文数が少ない。理論解析、数値計算等は少なく、実験的な研究が数多く行われている。乱れに関するモデル化、理論解析は、現在までに数多く提出されているが、実験的研究、特に水表面極近傍の水理学的構造の解明はさほど進んでおらず、現在精密な実験が活発に行われている。また、このための計測手法の開発も進みつつある。

|             |            |             |            |             |            |
|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| アメリカ合衆国(40) | カナダ<br>(7) | フランス<br>(5) | スイス<br>(2) | ブラジル<br>(4) | その他<br>(4) |
|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|

(a) 国別分類

|          |              |             |             |             |            |
|----------|--------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| 土木工学(22) | 環境工学<br>(14) | 海洋学<br>(11) | 化学工学<br>(7) | 流体力学<br>(4) | その他<br>(5) |
|----------|--------------|-------------|-------------|-------------|------------|

(b) 専門分野別分類

|         |                  |           |           |         |
|---------|------------------|-----------|-----------|---------|
| 風 波(16) | 水中の<br>乱れ<br>(8) | 気泡<br>(7) | 液滴<br>(3) | その他(26) |
|---------|------------------|-----------|-----------|---------|

(c) 現象別分類

|          |               |                          |                     |            |
|----------|---------------|--------------------------|---------------------|------------|
| 現地観測(20) | 実験的研究<br>(15) | 解析,数値<br>計算,モデル<br>化(12) | 実験手法<br>の開発<br>(11) | その他<br>(7) |
|----------|---------------|--------------------------|---------------------|------------|

(d) 研究手法別分類

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

(e) 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。

(3)の気泡による気体輸送は、人工的な曝気法として有効な手段であり、水処理施設や化学工学の分野で広く用いられている。

(4)の水表面に衝突する液滴(雨滴)による気体輸送に関するものは全般的に数少ない。長期間の水域の気体収支を考える場合、この機構が支配的になる場合は少ないからである。しかし、多雨域や短期間(週, 日単位)の収支を考える場合は、降雨時の気体輸送が大きな割合を占める場合があることが報告されている。

(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 $\mu\text{m}\phi$ )を通して気泡発生なしで血液中に酸素を供給する人工肺の研究が医療分野で行われてきた。この工学分野への応用例として、貯水池や下水処理場等における曝気の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。

(1),(2),(3)については水中への酸素の取り込み(曝気)を対象として多くの研究がなされており、これら进行评估するための数多くの式がすでに提案されている。しかし現地観測データを満足いく精度で表す式はない。また実際の気体輸送のメカニズムも把握されておらず、評価すべき要因についても良くわかっていない部分が多い。今後気体輸送のより詳細なメカニズムの解明が必要である。また、それに基づく工学的設計法についても整備すべき点が多い。

### 2.3 研究手法別分類

研究手法の面からは次の4つに分類した(図-1(d))。

(1)現地観測, (2)解析, 数値計算, モデル化等, (3)実験的研究, (4)実験手法の開発等。

ただし、1つの論文の中に2つにまたがるものがあれば両方に数を加えている。(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。

## 2. 4 対象水域別分類

次に、対象水域別に論文数を分類した(図-1(e))。分類としては以下のように行った。

(1)湖(沼地、湿地を含む)、(2)海洋(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。閉鎖性水域であるため水質等は外的要因に大きく左右される。風や雨による影響が大きく、とくに風に関連した論文数が多い。

(2)の海に関する研究も湖に関する研究とほぼ同じ数である。

(3)の河川に関する研究が少ない。過去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。すでにある程度の成果が上げられているが十分といえるものではなく、計測技術の向上を考えれば今後更に研究が進められるであろう。

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。

## 3. 海外での水表面の気体輸送に関する研究の動向

今回の要約で得られた海外における水表面の気体輸送に関する研究の主な動向のいくつかを以下に上げる。

- (1)水表面を通じた気体輸送メカニズムの解明
- (2)実験および現場での計測技術の開発
- (3)whitecapの気体輸送に及ぼす影響
- (4)リモートセンシング、レーダー等の現場計測への応用
- (5)現在までに実測された気体輸送に関する資料のデータベース化
- (6)水工構造物の気体輸送に及ぼす影響

(1)は水表面極近傍での水運動および気体輸送過程の直接計測が精力的に行われている。またこれに伴い、(2)に関する技術もかなり進歩している。例えば、pH変化や溶存酸素濃度により蛍光特性が変化する蛍光染料で水表面での気体輸送メカニズムを詳細に計測する手法が開発されている。この手法でAsherとPankow<sup>2)</sup>は表面が汚染されていない場合と汚染されている場合の乱れによる表面更新過程がどのように変化するかを明らかにしている。

(3)については現在ほとんど手付かずの状態である。whitecapは海洋において気体輸送をかなり促進させる現象であるが、その気体輸送に及ぼす影響に関する知見はほとんど得られていない。実験室レベルでwhitecapを再現させる試み等も始められている。

(4)は、海洋でのwhitecapや風波の状況を観測し、得られた情報から気体輸送量を推定するものである。しかし、上述のようにwhitecapや風波が気体輸送に及ぼす影響を明らかにしなければ、その推定量はかなりの誤差を含むことになる。

(5)はUSGSが以前からアメリカの多くの河川について気体輸送係数や気体輸送に関係のありそうな水理量についてデータを収集している。これにより、ある河川の水理量または設計中の水工構造物付近の予測水理量が得られれば収集されたデータの中から最も類似の河川の気体輸送に関する情報が得られる。

(6)について、ASCEは「水工構造物による気体輸送に関する技術委員会」を設置し、水工構造物が気体輸送に及ぼす影響の解明を積極的に推進している。

## 参考文献

- 1)Wilhelms, S. C. and Gulliver, J. S.(eds)(1991): AIR-WATER MASS TRANSFER, ASCE.
- 2)Asher, W. E., and Pankow, J. F.(1991): The effect of surface films on concentration fluctuations close to a gas/liquid interface, AIR-WATER MASS TRANSFER, ASCE, 68-80.