

## 水面が被覆された小規模閉鎖水域における風の酸素供給に関する研究

### Research on Oxygenation by Wind in Closed Water with Covered Surface

○尾崎 彰則\*

OZAKI Akinori

#### I. はじめに

閉鎖水域に作用する風の効果は、水域内部の循環を促すとともに、大気からの酸素供給を担うことから、閉鎖水域の水質維持・管理に極めて重要な要素の一つである。水域水面が何らかの形で被覆を受ける場合、風が作用する水域面積が減少することから、風による酸素供給効果が低下する。水面を被覆するものの具体例としては、貯水池やクリークに繁茂する水生植物や、水産養殖池に設置された管理用イカダ等が挙げられる。

閉鎖水域を対象とした風の酸素供給効果に関する既往の研究では、大規模湖沼を対象としたものがほとんどであり、風が作用する水域面積に対して被覆物が占める割合が極めて小さいため、被覆の影響を無視できる場合が多い<sup>(1)</sup>。しかしながら、上述のような被覆物が見られる水域については、比較的小規模なものが多く水域面積が狭いため、風の効果に対する水面被覆の影響を無視できないと考えられる。

以上のことから、本研究では、小規模閉鎖水域に作用する風の酸素供給効果に及ぼす水面被覆の影響について定量的に明らかにすることを目的として、水面を部分的に被覆した条件下における風の溶存酸素供給効果に関する水理実験を行った。

#### II. 実験概要

実験は、長さ 6m、幅 0.3m、深さ 0.4m の水槽とその上部に取り付けた深さ 0.3m の風洞からなる風洞水槽を用いた (Fig.1 参照)。水槽内の試験水は、水道水に亜硫酸ナトリウムを添加することによって脱酸素処理を行い、溶存酸素濃度 (以下 DO 濃度) を低下させた。この試験水に、風洞から送風を行うことによって増加する DO 濃度の時間変化を計測した。なお、送風は代表風速 (風上から 2.75m, 水面から高さ 0.15m) が約 2~8m/s の風速を設定し、試験水の DO 濃度が飽和溶存酸素濃度の 80~90%に到達するまで送風を継続した。DO 濃度の計測位置は、風上から 3m (St.3.0) および 5m (St.5.0) の水深 0.2m である。一方、水面被覆については、厚さ 5mm の発砲スチロール板を用い、実験水槽の両端から水槽長さに対して 0% (被覆なし)、10%、30%の 3 パターンの水面被覆を検討した。実験条件を表 1 に示す。

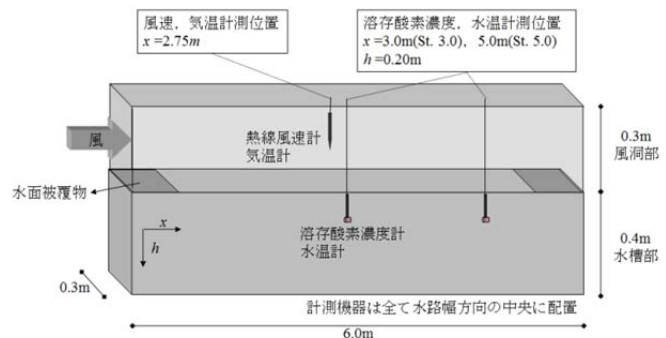


Fig.1 実験装置

Schematic diagram of experimental apparatus

この試験水に、風洞から送風を行うことによって増加する DO 濃度の時間変化を計測した。なお、送風は代表風速 (風上から 2.75m, 水面から高さ 0.15m) が約 2~8m/s の風速を設定し、試験水の DO 濃度が飽和溶存酸素濃度の 80~90%に到達するまで送風を継続した。DO 濃度の計測位置は、風上から 3m (St.3.0) および 5m (St.5.0) の水深 0.2m である。一方、水面被覆については、厚さ 5mm の発砲スチロール板を用い、実験水槽の両端から水槽長さに対して 0% (被覆なし)、10%、30%の 3 パターンの水面被覆を検討した。実験条件を表 1 に示す。

#### III. 実験結果

##### (1) DO 濃度の時間変化

Fig.2 は、DO 濃度の時間変化の一例を示す。水面被覆率が高くなるほど DO 濃度の増加速度が低下しており、飽和溶存酸素濃度が 80~90%に到達するまでの時間が長くなった。しかしながら、水槽中央部 (St.3.0) および水槽後方部 (St.5.0) の間での DO 濃度増加速度の違いは確認できなかった。

\*九州大学熱帯農学研究センター Institute of Tropical Agriculture, Kyushu University

キーワード：溶存酸素濃度、物質移動係数、シュミット数

(2) 再曝気係数と物質移動係数

再曝気係数 $K_2$ は、DO濃度の時間変化から、

$$\frac{dC_t}{dt} = K_2(C_s - C_t) \quad (1)$$

と表せる。ここで、 $C_s$ は飽和溶存酸素濃度、 $C_t$ は時刻 $t$ におけるDO濃度である。式(1)を時間 $t$ で積分すると、

$$K_2 = -\ln D(t)/t \quad (2)$$

となる。

ここで、 $D(t) = (C_s - C_t)/(C_s - C_0)$ であり、 $C_0$ は実験開始時のDO濃度である。一方、物質移動係数 $K_L$ は、通常 $K_2$ を用いて、 $K_L = K_2 \cdot V/A$ で換算される。ここで、 $V$ は完全混合状態にある水塊の体積、 $A$ は水塊と風が接触する面積である。本実験の場合、 $V$ は一定、 $A$ は実験条件により異なるが、被覆物下方の水塊は完全混合状態にないと考え、風が作用する距離を用いて $V/A$ を算出した。すなわち、水深 $h_0$ を用いて $K_L = K_2 h_0$ を換算式とした。

(3) 物質移動係数の推算式

Donald・Andrew<sup>(2)</sup>は、再曝気係数 $K_2$ から換算される物質移動係数 $K_L$ は、シュミット数 $Sc$ を用いて推算できると報告している。 $Sc$ は、

$$Sc = \frac{\mu}{D} \quad (3)$$

で定義される流体の動粘度 $\mu$ と拡散係数 $D$ の比を表す無次元数である。Fig.3に本研究によって得られた $K_L$ と $Sc$ の関係を示す。なお、本研究では、 $D$ が風の影響を強く受けるため、Henderson<sup>(3)</sup>が提案した水面の摩擦速度を用いて鉛直渦動拡散係数を算定する式を参考に、

$$D = 7.0 \times 10^{-6} \kappa U_* z \exp[-k_* z] \quad (4)$$

により $D$ を決定した。ここで、 $\kappa$ はカルマン定数、 $U_*$ は水面の摩擦速度、 $z$ は水深、 $k_*$ は摩擦速度の減衰係数である。Fig.3より、既往の研究<sup>(2)</sup>と同様に $K_L \propto Sc^{-1/2}$ が成り立つことがわかる。この関係を用いて、物質移動係数の推算式をまとめたものを表2に示す。表2より、 $Sc$ 値が同一条件の場合、被覆率が10%、30%と増加することにより、物質輸送力がそれぞれ約80%、60%と低下することが明らかとなった。

IV. まとめ

本研究により、シュミット数を用いた物質移動係数の推算式により、水面被覆を伴う閉鎖性水域に生じる風的作用による再曝気を評価できることが分かった。今回得られた結果をより詳細に検討するためには、詳細な物理量を用いてシュミット数と物質移動係数の関係から得られる定数を評価する必要がある。

参考文献：(1) Jonathan J Cole, et.al (2010). Multiple approaches to estimating air-water gas exchange in small lakes. Limnol. Oceanogr. Methods 8, 2010, pp. 285-293. (2) Donald Mackay and Andrew T. K. Yeun (1983). Mass Transfer Coefficient Correlations for Volatilization of Organic Solutes from Water. Environmental Science and Technology, Vol.17 pp. 211-217 (3) B. Henderson-Sellers (1985). New formulation of eddy diffusion thermocline models. Appl. Math. Modelling, Vol. 9, December. pp. 441-446

表1 実験条件  
Experimental condition

| 被覆率 | 実験番号 | 平均風速 (m/s) | 平均気温 (°C) | 平均水温 (°C) |
|-----|------|------------|-----------|-----------|
| 0%  | A-2  | 1.97       | 28.2      | 27.0      |
|     | A-3  | 2.90       | 28.2      | 26.5      |
|     | A-4  | 3.96       | 25.2      | 24.7      |
|     | A-5  | 5.04       | 17.9      | 15.1      |
|     | A-6  | 5.96       | 30.4      | 27.0      |
|     | A-7  | 7.08       | 15.0      | 15.4      |
|     | A-8  | 7.91       | 29.8      | 25.9      |
|     | 10%  | B-2        | 2.16      | 13.7      |
| B-3 |      | 2.95       | 29.3      | 28.0      |
| B-4 |      | 3.96       | 27.1      | 25.9      |
| B-5 |      | 5.15       | 11.0      | 10.5      |
| B-6 |      | 6.02       | 28.8      | 26.2      |
| B-7 |      | 7.13       | 11.5      | 11.7      |
| B-8 |      | 7.98       | 26.4      | 25.3      |
| 30% |      | C-2        | 2.17      | 13.1      |
|     | C-3  | 2.95       | 29.6      | 28.1      |
|     | C-4  | 3.96       | 28.2      | 26.6      |
|     | C-5  | 5.12       | 12.8      | 13.4      |
|     | C-6  | 5.99       | 29.7      | 26.7      |
|     | C-7  | 7.11       | 10.6      | 12.2      |
|     | C-8  | 7.95       | 28.5      | 26.6      |

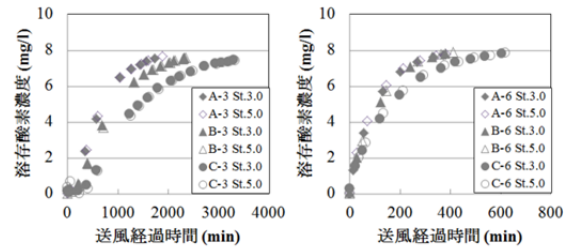


Fig.2 溶存酸素濃度の時間変化  
Variation of dissolved oxygen concentration with time

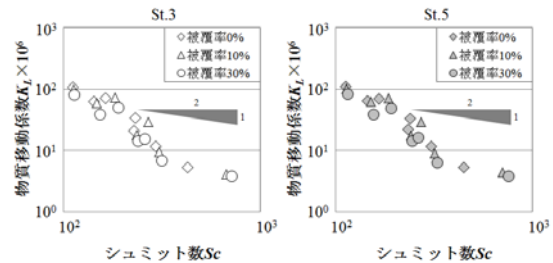


Fig.3 シュミット数 $Sc$ と物質移動係数 $K_L$ の関係  
Relation between Schmidt number and mass transfer coefficient

表2  $Sc$ を用いた $K_L$ の推算式  
Estimation formula for  $K_L$  by  $Sc$

| 被覆率      | 推算式  |
|----------|--|
| 0% St.3  | $K_L = 22.4 \times 10^{-4} Sc^{-1/2} + K_{L0}$ |
| 10% St.3 | $K_L = 18.2 \times 10^{-4} Sc^{-1/2} + K_{L0}$ |
| 30% St.3 | $K_L = 13.7 \times 10^{-4} Sc^{-1/2} + K_{L0}$ |
| 0% St.5  | $K_L = 22.5 \times 10^{-4} Sc^{-1/2} + K_{L0}$ |
| 10% St.5 | $K_L = 18.7 \times 10^{-4} Sc^{-1/2} + K_{L0}$ |
| 30% St.5 | $K_L = 13.9 \times 10^{-4} Sc^{-1/2} + K_{L0}$ |

\* $K_{L0} = 1.0 \times 10^{-6}$ : 無風状態での $K_L$ <sup>(2)</sup>