

機関番号：17102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21880036

研究課題名（和文）閉鎖性水域における富栄養化・貧酸素化の予測・制御に関わる基礎的研究

研究課題名（英文）Fundamental Study on Prediction and Control for Eutrophication and Hypoxia in a Closed Water

研究代表者

尾崎 彰則 (OZAKI AKINORI)

九州大学・大学院農学研究院・特任助教

研究者番号：40535944

研究成果の概要（和文）：

本研究では、受熱期および多雨期における閉鎖性水域の密度流現象および水質輸送現象に着目し、富栄養化および貧酸素化と密接に関わる密度成層構造の発生条件を特定すること、さらに密度成層構造を解消する方法としての曝気装置および吹送流の効果を検証することを目的として、現地観測および水理実験を行い検討した。本研究結果から、強風帯での吹送流の成層解消効果が曝気装置稼働時と同様の程度であることが確認できた。また、吹送流の成層解消効果を水理実験により検討した結果、成層解消効果には吹送流による乱れエネルギーの供給と輸送が重要であることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：

In this study, it was our aim to identify several original conditions of density stratification which was closely related to eutrophication and hypoxia in a closed water environment and to look at effect of aerator and wind-induced flow on density stratification as elimination method for density stratification. We focused on density flow and water quality transport of closed water in the hot and rainy season and conducted field observations and hydraulic experiments. From the results, it was confirmed that wind-induced flow which was stimulated by strong wind had stratification eliminating potential similar to a running aerator. In addition, it was clarified that supply and transport of turbulent energy induced by wind was important for elimination of density stratification.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2009年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 2010年度 | 940,000 | 282,000 | 1,222,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,040,000 | 612,000 | 2,652,000 |

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学，農業土木学・農村計画学

キーワード：閉鎖性水域，水質成層，密度流，曝気装置

1. 研究開始当初の背景

閉鎖性水域では、水域貯水量に対して流入・流出が少なく流れの停滞性が強いために、水温成層や水質成層といった密度成層が形

成されやすい環境にある。特に、上層水温が温められる夏季の受熱期や、集水域からの流量が増大する多雨期には、安定した密度成層が発生しやすく、成層の発達に伴い形成され

る密度躍層が、水質物質の鉛直輸送能力を低下させ、水域内の生産層と分解層との間での酸素供給が乏しくなり、富栄養化および貧酸素化を拡大させると考えられる。このことから、閉鎖性水域における富栄養化および貧酸素化の発生メカニズムを解明するためには、閉鎖性水域における成層構造の発達および解消に関わる条件を把握し、密度流現象と水質現象を関連付けて検証する必要があると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、特に受熱期および多雨期における閉鎖性水域の密度流現象および水質輸送現象に着目し、富栄養化および貧酸素化と密接に関わる密度成層構造の発生条件を特定すること、さらに密度成層構造を解消する方法としての曝気装置および吹送流の効果を検証することを目的として、現地観測および水理実験を行い検討した。

(1) 受熱期および多雨期における閉鎖性水域成層状態の観測

受熱期および多雨期における閉鎖性水域の気象変動（風速・気温・湿度・日射量）と水域密度成層（水温・溶存酸素）の発達・解消の関係性を解明することを目的として、小規模閉鎖性水域における気象変動および水質変動の連続観測を行った。

(2) 曝気装置による成層解消効果の検討

閉鎖性水域の成層状態を解消する手法として、装置を用いた機械的循環の効果を検証することを目的として、パドル式および散気式曝気装置稼働下における水域密度成層変動の連続観測を行った。

なお、後述の観測結果において、装置稼働条件を「装置非稼働」とするものが上述(1)の成層状態の観測、「装置24時間連続稼働」とするものが、(2)の曝気装置の成層解消効果検討のものにあたる。

(3) 吹送流による密度成層構造解消効果の検討

上述(1)の観測により、吹送流現象による密度成層構造解消効果が確認された。そこで、この効果を詳細に検討するために、密度成層流体を用いた水理実験を行った。

3. 研究の方法

(1) 現地観測による受熱期・多雨期の閉鎖性水域成層状態特性の解明

小規模閉鎖性水域において、水質変動および気象変動の連続観測を行った。観測対象池の概略図を図-1に示す。観測対象池は、受熱期および多雨期の閉鎖性水域の成層構造を集中的かつ効率的に観測するために、熱帯モ

ンスーン地域に属するタイ国・サムットソクラーン県における実験用貯水池を用いた。計測項目は、気象項目として気温、湿度、風速、風向、日射量、および水質項目として水温および溶存酸素濃度の鉛直分布である。計測間隔は、溶存酸素濃度が3時間間隔、それ以外の項目は2時間間隔で行った。観測期間は、受熱期間として2010年3月21日～23日および多雨期期間として2010年10月12日～15日の期間で行った（表-2参照）。

(2) 曝気装置による成層解消効果の検証

上述(1)の観測と同じ実験用貯水池を用い、パドル式および散気式曝気装置をそれぞれ設置した貯水池において、曝気装置稼働下における水質変動および気象変動の連続観測を行った。装置は、24時間連続稼働し、装置稼働による成層解消効果を検証した。

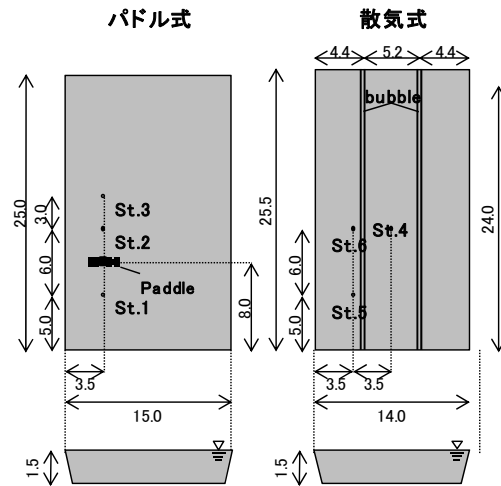


図-1 観測対象池概略図

表-2 観測期間

| 季節 | 期間 | 装置稼働条件 |
|---------|--|------------|
| 受熱期(乾季) | 2010年3月21日18時00分- 2010年3月22日15時00分 | 装置非稼働 |
| | 2010年3月22日16時00分- 2010年3月23日15時00分 | 装置24時間連続稼働 |
| 多雨期(雨季) | 2010年10月12日12時00分- 2010年10月13日9時00分 | 装置非稼働 |
| | 2010年10月14日12時00分- 2010年10月15日9時00分 | 装置24時間連続稼働 |

(3) 吹送流による密度成層解消効果の検討

水理実験は、風洞水槽を用い、下層に塩水、上層に淡水の密度2成層場を作成し、吹送流による上層の流速変動計測を行った。流速変動の計測はX型ホットフィルム流速計を用い、100Hzで20秒間計測した。流速変動の計測位置は、水槽中央部の風上から3m地点と、風下末端から手前20cmの2点について計測を行った。実験装置の模式図を図-2に示す。この流速変動計測結果を用い、密度成層場における乱流エネルギー輸送機構のモデル化を行った。

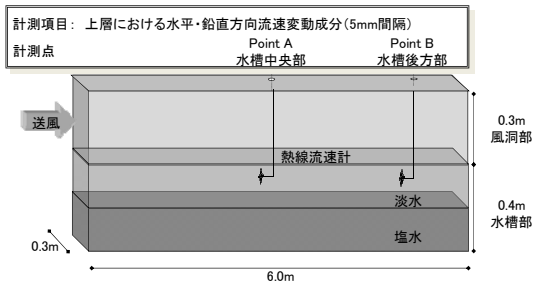


図-2 実験装置模式図

4. 研究成果

(1) 受熱期における成層構造形成過程 (装置非稼働期間の観測結果)

受熱期における気温・風速変動の観測結果を図-3に示す。観測期間における貯水池周辺の気象変動の特徴として、①日中と夜間の温度差が大きく一日の気温差が約8℃と高いこと、②14時ころから深夜にかけて風速10m以上が継続すること、③風向は南から北へ向けて常に一方向であること、以上の3点が挙げられる。

図-4に受熱期における水温変動の観測結果を示す。水温変動は、上述の気象変動の特徴を捉え、日昇とともに形成される水温成層が、日没とともに放射冷却および強い風速の影響を受け解消されることが分かる。日射による水温への影響は、水深65cm程度まで見られるが、水深95cm以深では見られなかった。

図-5に受熱期における溶存酸素変動の鉛直分布を示す。両貯水池ともに、夜間における水生生物の呼吸の影響により、日昇前の6時が最小となり、日昇とともに溶存酸素量が増加している。溶存酸素濃度は18時でピークとなっていることから、植物プランクトンの光合成による酸素供給に加え、吹送流現象による酸素供給も行われていたと考えられる。一方、溶存酸素濃度の鉛直方向の差異については、水底付近で溶存酸素濃度が低下している以外は、ほぼ一様の分布となっており、成層状態は確認されなかった。これについても、強い吹送流の効果により溶存酸素が鉛直方向に一様化された結果であると推察される。

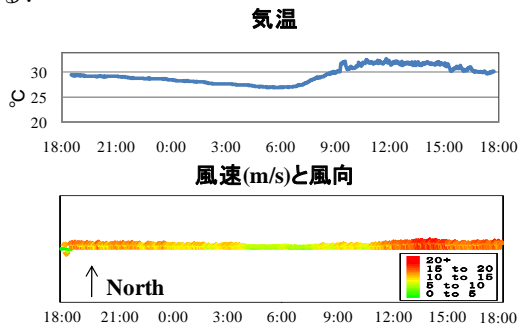


図-3 受熱期における気温・風速変動
(装置非稼働期間)

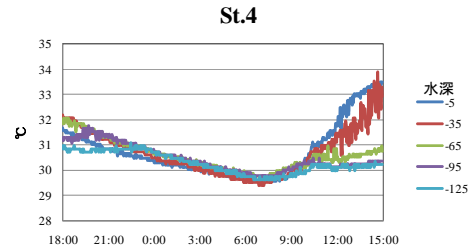
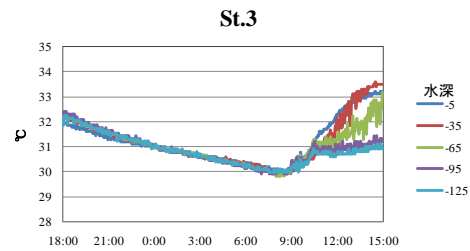


図-4 受熱期における水温変動
(装置非稼働期間)

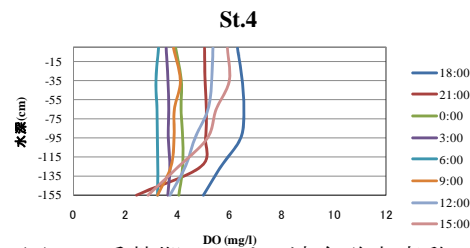
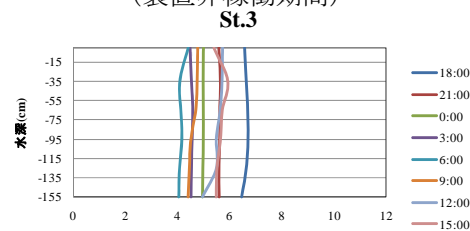


図-5 受熱期における溶存酸素変動
(装置非稼働期間)

(2) 多雨期における成層構造形成過程 (装置非稼働期間の観測結果)

多雨期における気温・風速変動の観測結果を図-6に、観測期間前後の雨量を表-2に示す。一日の気温差については、約10℃と受熱期期間よりも高かった。一方、風速については受熱期における観測結果とは異なり、15時から18時にかけて風速が若干強い時間帯がある以外は微風状態であった。

図-7に多雨期における水温変動の観測結果を示す。受熱期の結果とは異なり、夜間においても水温の鉛直方向による差異があり水温成層が形成されていることが分かる。これは、一日を通して風速が微風であったことから、吹送流による鉛直循環流形成効果が乏しく、水温を鉛直方向に一様化できなかったと考えられる。一方、特徴的な水温変化として、St.4の水深-135cmの計測値が全時間帯を通して他の水深より水温が高いことが確認された。この傾向については、今回観測を行ったサットソクラン県一帯が塩田

地帯であることから、降雨により流出した塩水が貯水池底層へ潜り込み、淡塩密度2成層が形成された結果であると推察される。なお、この傾向が St.3 で見られなかったのは、パドル装置を設置した St.3 の貯水池においては、実験開始前にパドル装置の試験稼働を行ったため、淡塩密度2成層が解消されていたと推察される。

図-8 に多雨期における溶存酸素変動の鉛直分布を示す。水温鉛直分布同様、溶存酸素鉛直分布も受熱期における観測結果とは異なり、鉛直方向に一様化されておらず、上層から下層にかけて溶存酸素が減少する分布となっており、特に底層ではほぼゼロに近い値となった。

以上の受熱期および多雨期における観測結果から、水温および溶存酸素の鉛直分布に対して、吹送流による鉛直循環流の効果が強く影響することが明らかになった。また、サムットソクラーン県で確認されたように、塩水等、水の密度を変化させる物質が降雨の影響により貯水池に流入する場合、この降雨の影響により流入する水が、貯水池密度構造を大きく変化させることが明らかになった。

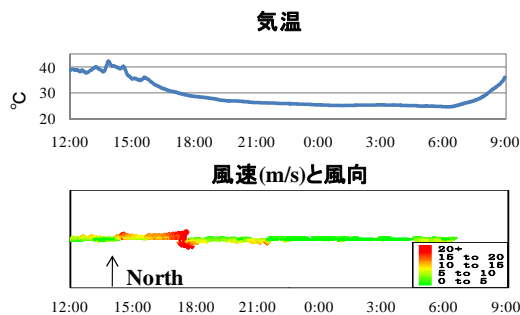


図-6 多雨期における気温・風速変動 (装置非稼働期間)

表-2 観測期間前後の雨量

| 日時 | 降雨量 (mm) |
|--------------------|----------|
| 10月12日 8:50-11:15 | 0.2 |
| 10月13日 17:30-17:42 | 0.004 |
| 10月14日 5:10-6:00 | 0.9 |
| 10月14日 9:43-11:00 | 0.16 |
| 10月15日 | 0 |

(2) 曝気装置による成層解消効果の検証 (受熱期および多雨期における装置 24 時間連続稼働時の観測結果)

受熱期および多雨期における装置 24 時間連続稼働時の気温・風速変動の観測結果を図-9 に示す。受熱期、多雨期ともに装置非稼働時とほぼ同じ特徴を持った気象変動であった。

図-10 および図-11 に受熱期および多雨期の装置 24 時間連続稼働下における水温変動の観測結果をそれぞれ示す。受熱期および多雨期ともに、装置を稼働することにより水温成層が解消され、水深方向にほぼ一様な水温

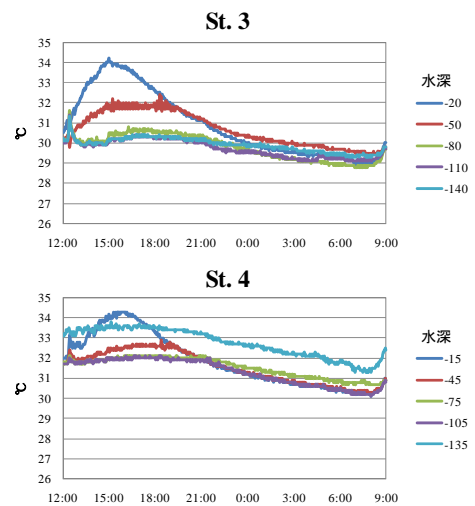


図-7 多雨期における水温変動 (装置非稼働期間)

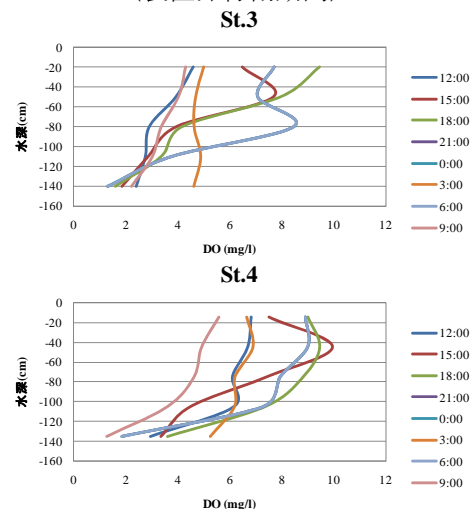


図-8 多雨期における溶存酸素変動 (装置非稼働期間)

となった。装置非稼働期間の散気式装置を設置した貯水池 St.4 で見られた淡塩密度2成層についても、装置を稼働させることにより解消された。しかしながら、パドル式および散気式のそれぞれの装置の違いによる成層解消効果に差異は見られなかった。

図-12 および図-13 に受熱期および多雨期の装置 24 時間連続稼働下における溶存酸素変動の鉛直分布を示す。パドル式に比べ散気式を稼働させた貯水池の溶存酸素の時間変動幅が大きい結果となった。また、受熱期および多雨期ともに、鉛直方向に溶存酸素濃度が一様化されているものの、装置非稼働時に比べ溶存酸素総量は減少していることが分かる。これらのことから、曝気装置を稼働することにより攪拌される底泥により、溶存酸素が消費されていた結果であると推察される。このことから、装置を稼働させる場合、底泥を攪拌させない程度の出力で稼働させることが必要であると考えられる。

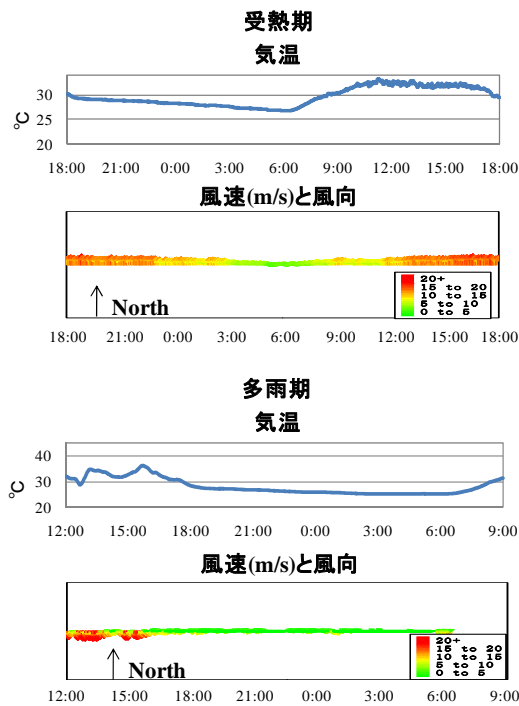


図-9 受熱期および多雨期における
気温・風速変動
(装置 24 時間連続稼働期間)

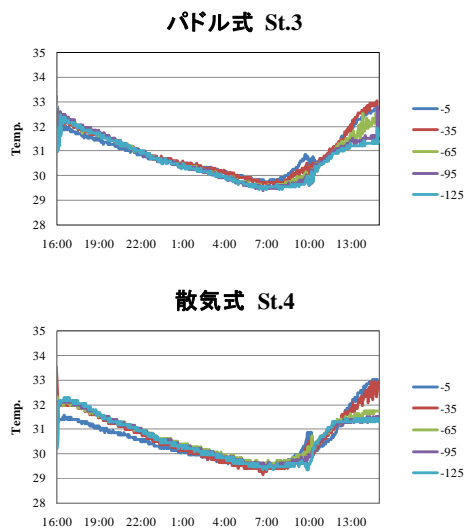


図-10 受熱期における水温変動
(装置 24 時間連続稼働期間)

(3) 吹送流による密度成層変動現象のモデル化

吹送流による密度成層解消効果について検討することを目的として行った水理実験結果に基づき、吹送流による密度成層変動現象をモデル化した。図-14 に吹送流による密度成層変動現象を模式化した図を示す。

水表面の流速 U_s の時間 dt における仕事により、密度界面が dh 低下する現象を考える。この場合、時間 dt におけるポテンシャルエネルギー E_p の増加は、時刻 t における上下層間の密度差を $\Delta\rho(t) = \rho_l(t) - \rho_u(t)$ として、

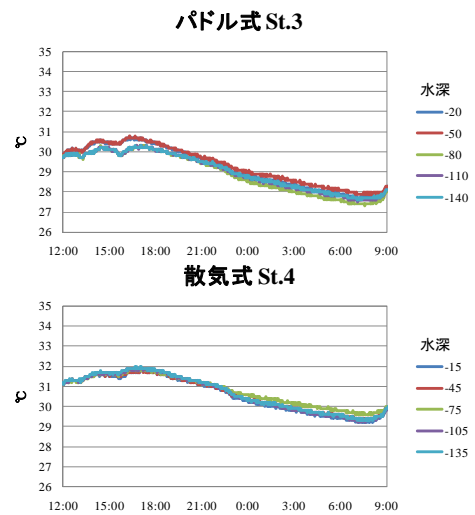


図-11 多雨期における水温変動
(装置 24 時間連続稼働期間)

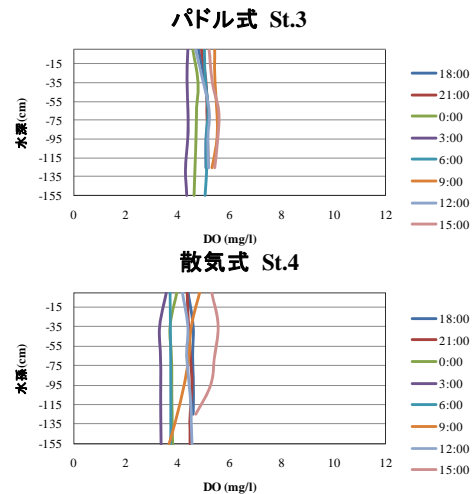


図-12 受熱期における溶存酸素変動
(装置 24 時間連続稼働期間)

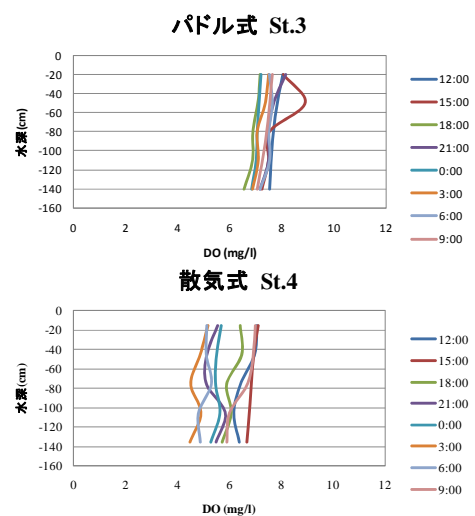


図-13 多雨期における溶存酸素変動
(装置 24 時間連続稼働期間)

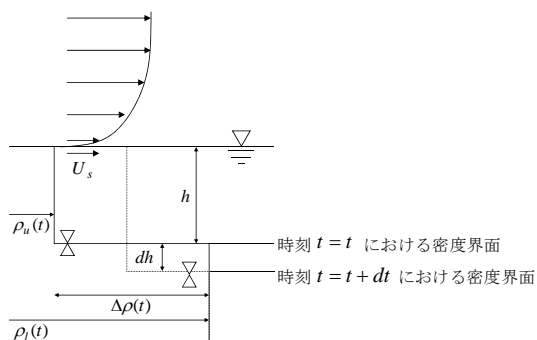


図-14 吹送流による密度成層変動現象の模式図

$$\frac{dEp}{dt} = \frac{1}{dt} \times \frac{1}{2} \Delta\rho(t)ghdh \quad (1)$$

となる。また、時間 dt における風の作用によって加えられた仕事 Ek は、

$$\frac{dEk}{dt} = \tau_s U_s = \rho_a U_{*a}^2 U_s \quad (2)$$

となる。ここに、 ρ_a は空気の密度、 U_{*a} は空気の摩擦速度である。時間 dt におけるポテンシャルエネルギーと仕事の比をとると、

$$\frac{dEp}{dEk} = \frac{1}{2} \times \frac{\Delta\rho(t)ghdh}{\rho_a U_{*a}^2 U_s dt} \quad (3)$$

となる。この式中において、

$$\frac{\Delta\rho(t)gh}{\rho_a U_{*a}^2} = R_{ia} : \text{リチャードソン数および}$$

$$\frac{dh}{dt} \times \frac{1}{U_{*a}} = E : \text{連行係数であることから、}$$

$$\frac{dEp}{dEk} = \frac{1}{2} ER_{ia} \frac{U_{*a}}{U_s} \quad (4)$$

となる。さらに既往の研究により $R_{ia} < 100$ において、

$$\frac{dEp}{dEk} \propto R_{ia}^{-1/2} \quad (5)$$

となることが明らかにされていることから、最終的に

$$E = \alpha \frac{U_s}{U_{*a}} \times R_{ia}^{-3/2} \quad (6)$$

を得る。ここに α は比例定数であり、密度界面に作用する乱れ強度スケール、積分スケール、組織渦スケールおよび界面変動の卓越波の波高および波長に規定され、乱れの効果を表す乱れ係数 T として

$$T = \left(\frac{U'}{U_M} \right)^4 \cdot \left(\frac{l}{h} \right)^{-3/2} \quad (7)$$

と定義される。ここに、 U' は乱れ強度、 U_M

は上層の平均的な流速、 l は乱れの積分スケール、 h は上層水深である。

一方、密度成層変動現象について密度界面の位置の変化に着目した密度界面の連行現象に関する既往の研究では、実験値から得られる連行係数とリチャードソン数の関係式を用いて、

$$E = KR_{ia}^{-3/2} \quad (8)$$

と表現しており、比例定数 K は、鉛直混合の規模を表現するとしている。すなわち、実験的に得られる (8) 式の比例定数 K は、理論的モデル表現から得られる (6) 式の $\alpha \cdot U_s / U_{*a}$ に相当することから、鉛直混合の規模が、密度界面に作用する極めて小さな乱流現象で表現されることを意味する。このことより、閉鎖性水域において吹送流による鉛直輸送現象が起こる場合、極めて小規模な乱れエネルギーの供給と輸送が重要であると言える。

(4) 研究成果総括

以上、本研究の成果から、富栄養化および貧酸素化を誘因しうる密度成層の形成過程を確認できた。また、密度成層を解消する効果として、曝気装置の有効性が確認できたとともに、強い吹送流についても同様に成層解消効果が確認できた。この吹送流の効果については、乱れエネルギーの供給と輸送が重要であることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

尾崎 彰則, 閉鎖性水域における吹送流現象に及ぼす浮葉植物水面占有率の影響, 査読有, Journal of Rainwater Catchment System, Vol.16/No.2/ pp. 53-59

Akinori Ozaki, Wind-Induced Phenomenon in a Closed Water Area with Floating-Leaved Plant, International Journal of Environmental and Earth Sciences, 査読有 1:2 2010, pp. 67-75

[学会発表] (計 1 件)

Akinori Ozaki, Wind-Induced Phenomenon in a Closed Water Area with Floating-Leaved Plant, World Academy of Science, Engineering and Technology, 71, pp. 126-134, 2010

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾崎 彰則 (OZAKI AKINORI)

九州大学大学院農学研究院・特任助教

研究者番号: 40535944