

令和元年5月31日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18772

研究課題名(和文)塩分を含む小規模閉鎖性水域における水温成層逆転のプロセス・メカニズム解明

研究課題名(英文)Clarification of process and mechanism for inversion of thermal stratification observed in closed saline ponds

研究代表者

尾崎 彰則(Ozaki, Akinori)

九州大学・熱帯農学研究センター・助教

研究者番号：40535944

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、塩分を含む閉鎖性水域で発生する可能性がある水温成層逆転現象について、現地観測および室内水理実験により、現象を誘引する環境条件を特定し、発生プロセスおよびメカニズムを解明することを目指した。水温成層逆転現象は、降雨により形成される塩分成層状態が、下層高塩分層、塩分濃度勾配層および上層低塩分層からなる3成層状態となり、かつ、その後の日射による熱エネルギー供給が行われた場合、現象発生の可能性あることを明らかにした。また、水温逆転現象が発達する場合、塩分濃度勾配層が断熱効果を有し、下層高塩分層からの放熱を抑制することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で取り扱った塩分を閉鎖性水域については、塩水養殖池や閉鎖性が強い内湾等の水産養殖現場も含むが、これらの水域においても水域成層条件および熱条件が揃うことにより、水温逆転現象が発生する可能性がある。近年、世界人口に対する食料供給の観点から水産養殖の需要が高まっているが、水産養殖現場では、養殖物の突発的な死病が発生しており、その原因が特定できていないことが多い。本研究で取り扱った水温逆転現象による高水温状態は、これらの未解明な養殖物死病との関連も示唆されることから、本研究による成果は、物理現象の解明のみならず、水産養殖物の生産性問題に寄与できる点で、社会的意義が高い研究成果である。

研究成果の概要(英文)：In closed saline ponds, intermittent rainfall during the rainy season can cause salinity stratification, and strong solar radiation can cause thermal stratification. The combination of these factors may result in thermohaline convection in the ponds. Thermohaline convection in a closed saline pond can in turn induce the inversion of thermal stratification in these ponds. We conducted field observations and test tank experiments to determine how the inversion of thermal stratification in closed saline ponds was influenced by the variation in the weather and water properties. If the pond stratifies into three layers with a salinity gradient in the middle layer, heat storage can occur. The salinity gradient prevents heat from escaping from the lower layer by effectively insulating it from nighttime radiative cooling.

研究分野：環境水理学

キーワード：二重拡散対流 熱塩対流 密度成層 塩分成層 水温成層 水産養殖池 現地観測 水理実験

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

通常の閉鎖性水域では、日中の受熱、夜間の放熱による熱対流の影響を受け、上層が高温、下層が低温の水温成層を形成することが一般的であるが、塩分を含む閉鎖性水域においては、塩分成層とその受熱の状態により、熱塩対流の影響を受け水温成層が逆転することがある。

熱塩対流とは、拡散係数が異なる二つの流体成分によって成層状態にある流体で起こる二重拡散対流の一種であり、塩分成層と水温成層がある場合に熱塩対流と呼ばれる。本研究で対象とする塩分を含む小規模閉鎖性水域においては、降雨が塩分成層、受熱・放熱が水温成層の状態支配要因となり、熱塩対流による水温成層逆転が発生する可能性がある。この現象は、特異的な成層構造を形成し水質を悪化させることに加え、高水温域が水圏微生物の温床となる可能性があることから、水環境管理上極めて重要な問題となる。

そこで本研究では、塩分を含む小規模閉鎖性水域に起こり得る熱塩対流による水温成層逆転について、現象を誘引する環境条件を特定し、発生プロセスおよびメカニズムを解明することを旨とした。

2. 研究の目的

熱塩対流による水温成層逆転現象は、塩分を含む水域に降雨が流入することにより塩分成層が形成され、その後の水域における受熱および放熱により発達すると考えられる。

本研究では、塩分を含む閉鎖性水域に起こる水温成層逆転を形成、発達および解消する気象条件を特定する現地観測と、水温成層逆転に関わる気象条件を実験的に検証する室内水理実験を並行して行うことにより、熱塩対流による水温成層逆転現象について詳細に解明することを目的とした。

現地観測では、塩分成層の形成・発達の要因となる降雨の規模と、水温成層逆転の形成・発達の要因となる日射量、受熱・放熱期間等の気象条件について検討した。一方、室内水理実験では、降雨による塩分成層形成現象と、降雨後の塩分成層に発生する熱塩対流現象について、内部流体状態の計測および内部流体運動の可視化により検討した。

3. 研究の方法

(1) 現地観測

現地観測は、タイ・カセサート大学水産学部クローンワン水産研究所が管理する実験用水産養殖池を実験水域とし、2017年および2018年の雨季期間（6月1日～10月31日）に、気象変動および水環境変動の連続観測を行った。実験水域は、同程度のスケールの池3か所を用い、実験開始前（5月30日）に、近隣の運河より取水した海水を用いて異なる塩分濃度条件を設定した（図1参照）。観測対象の気象変動は、日射量、風速、風向、雨量、気温および湿度であり、10分間隔の自動計測を行った。また、水環境変動は、それぞれの池中央部における水温、塩分濃度の鉛直分布を計測した。水温の鉛直分布は、固定柱に水底から水温計（0.1m間隔）、塩分濃度計（0.4m間隔）および水位計（水底）を配置し、10分間隔の自動計測を行った。なお、観測期間中の塩分調整および水位調整は、観測開始前に行ったのみである。また、観測期間を通して、曝気・循環は行っていない。したがって、観測開始後の水域内塩分濃度変動および水位変動は、気象変動のみに依存する。

(2) 室内水理実験

室内水理実験は、実験水槽内に異なる塩分濃度条件を設定し、降雨による塩分成層形成実験および降雨後の受熱・放熱による熱塩対流形成実験を行った。

塩分成層形成実験では、実験水槽上部に設置した降雨発生用アクリル水槽の底面に雨滴孔を設け、この雨滴孔数と降雨発生用アクリル水槽の水深を変化させることにより降雨量を調整し塩分成層を形成した。実験では、降雨前後の塩分成層状態の計測および塩分成層形成過程の可視化を行い、降雨条件および塩分濃度条件の違いによる塩分成層形成過程および状態の違いについて検討した（図2参照）。

一方、熱塩対流形成実験では、降雨後の塩分成層状態に対し、水槽上部に設置した熱源を用いて、受熱および放熱状態を与えることにより熱塩対流を形成した。実験では、水温成層および塩分成層状態の計測を行い、塩分成層条件および受熱および放熱条件の違いによる熱塩対流形成過程の違いについて検討した（図3参照）。

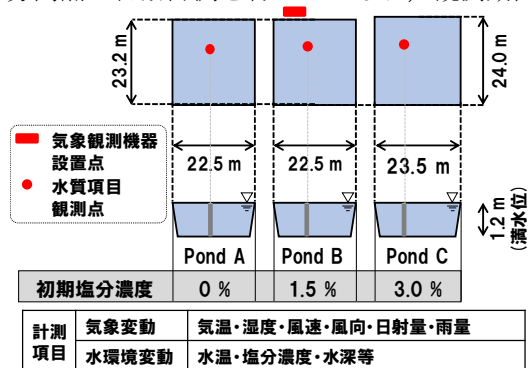


図1 現地観測水域条件

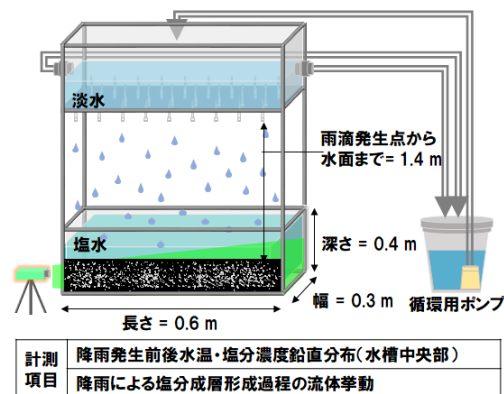


図2 実験装置概要（塩分成層形成実験）

#### 4. 研究成果

##### (1) 水温成層逆転現象の観測（現地観測）

水温成層逆転現象の観測事例として、図4、図5および図6に、2018年8月16日から8月26日までの気象変動、水温鉛直分布変動および塩分濃度鉛直分布変動を示す。

図5より、8月18日から8月23日までのPond Cにおいて、水中の温度が水表面の温度より高い状態が継続していることが確認できる。本研究では、この期間のPond Cで観測された水温状態を水温逆転現象と定義する。Pond Cで水温逆転現象が確認された8月18日前後では、継続的な降雨が発生しており、塩水域であるPond BおよびPond Cでは塩分成層が形成されていることが図6より確認できる。Pond Cにおける水温逆転現象が確認される前の8月17日の水域塩分濃度平均値がPond Bで16.9 PPT、Pond Cで32.4 PPTであったことから、水温逆転現象の出現には、水域塩分濃度が重要であると考えられる。Pond Cの水温状態は、日射が強く降雨が少なかった8月21日から22日にかけて水底から0.6 mの高さまでの水温が非常に高い値で変動しており、日射による受熱により現象が進行したと考えられる。この状態は、8月22日夜にピークを迎え、8月24日には鉛直方向に一樣な水温状態となっており、水温逆転現象は解消されている。

##### (2) 水温成層逆転現象期間の密度成層特性（現地観測）

図7は、各水域12:00におけるブルント・バイサラ振動数 $N^2$ の鉛直分布を示したものである。 $N^2$ は、密度成層の安定度および構造特性を示すパラメータである。

図7より、Pond A： $N^2$ が一部を除きほぼゼロ、Pond B：水底からの高さ0.4 mを境界として、下層でほぼゼロ、上層で正の値、Pond C：水底からの高さ0.4 mまででほぼゼロ、0.4 mから0.6 mで正の値のピーク値を持つ、水表面付近で一定の値に収束、以上のようにそれぞれの水域で異なる特性を持つことがわかる。このことは、それぞれの水域の密度成層状態が、Pond A：非密度成層状態、Pond B：下層高塩分層と密度勾配層からなる密度2成層状態、Pond C：下層高塩分層、密度勾配層および低塩分層からなる密度3成層状態であることを示している。塩水域の蓄熱現象について扱っているソーラーポンドに関する研究では、塩水域に太陽熱が蓄熱される条件として、下層高塩分層、密度勾配層および低塩分層からなる密度3成層状態が必要であり、この密度3成層状態に熱供給が十分にある場合、下層高塩分層に蓄熱が発生することを明らかにしている。本研究による現地観測では、Pond Cがこの3成層状態となっており、継続的な降雨により、塩水域に蓄熱現象が発生するための密度成層条件が出現し、さらにその後の日射による受熱により、Pond Cの水温成層逆転現象が出現したと考えられる。このPond Cにおける $N^2$ が鉛直方向に一樣になっていることから、8月23日以降に解消され、この結果、水温逆転状態も解消されていることが確認できる。この要因としては、8月23日に観測された比較的強い風や、8月23日16時から1時間観測された強い降雨が考えられる。したがって、水域に与えられる擾乱により、蓄熱現象に関わる成層条件が乱され、水域蓄熱が解消されると考えられる。

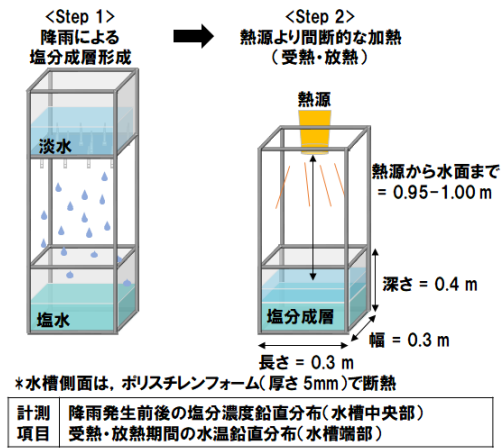


図3 実験装置概要（熱塩対流形成実験）

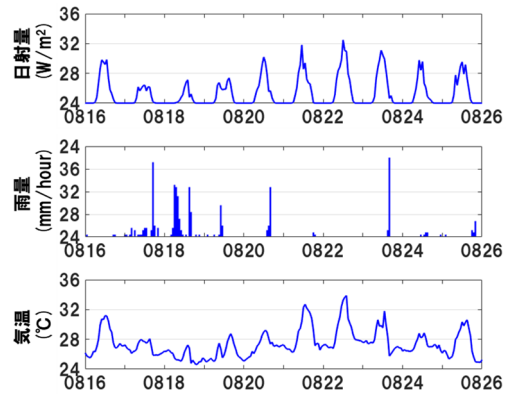


図4 気象変動

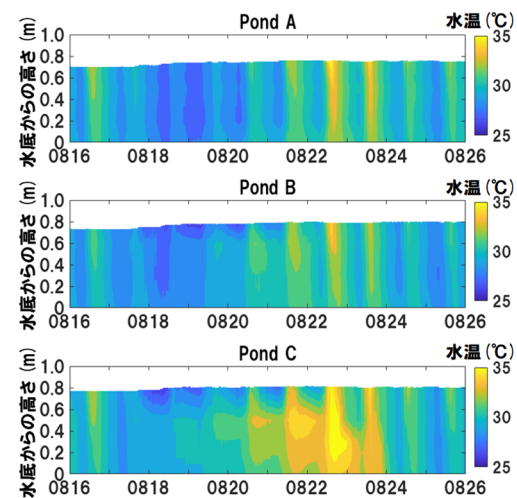


図5 水温鉛直分布変動

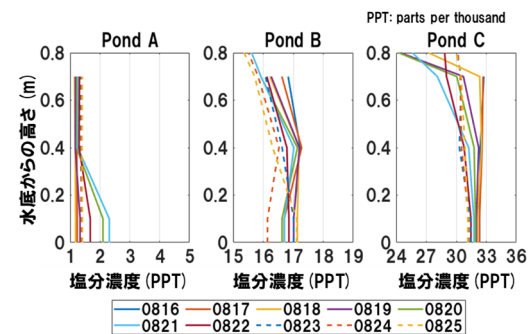


図6 塩分濃度鉛直分布変動

8月23日16時から1時間観測された強い降雨が考えられる。したがって、水域に与えられる擾乱により、蓄熱現象に関わる成層条件が乱され、水域蓄熱が解消されると考えられる。

### (3) 水温成層逆転現象期間の水塊蓄熱特性

(現地観測)

図8は、水底からの高さ0.4 mまでの水塊蓄熱とその時間変化を示したものである。この水底から高さ0.4 mまでは、Pond BおよびPond Cの下層高塩分層に相当する層であり、蓄熱機能を有する層にあたる。

図8より、Pond Aでは水塊蓄熱の時間変化が日中で正、夜間で負となっており、受熱と放熱による日サイクルで変化しているのに対し、Pond BおよびPond Cでは、8月18日から8月22日ころまで、増加していることがわかる。この期間のPond BおよびPond Cでは、夜間の水塊蓄熱の時間変化がほぼゼロで推移しており、水面からの放熱を受けにくい状態であったことがわかる。このことは、ソーラーポンドに関する研究でも明らかにされている、塩分濃度勾配層が有する断熱機能による影響であると考えられる。したがって、水温成層逆転現象は、夜間の放熱期において、下層高塩分層からの放熱が抑制されることにより進行すると考えられる。

### (4) 降雨による塩分成層形成

(室内水理実験：塩分成層形成実験)

図9は、室内水理実験で行った、降雨による塩分成層形成実験の結果であり、降雨発生前と降雨停止10分後の塩分濃度鉛直分布の一例を示したものである。

図9より、降雨停止10分後の塩分濃度鉛直分布は、下層から、初期濃度とほぼ同じ値を持つ塩分濃度安定層、濃度勾配の値が高い塩分濃度遷移層、初期濃度の75~85%程度の塩分濃度を持つ混合層の3成層に分離されていることがわかる。この3成層状態については、現地観測においてPond Cで観測された水温成層逆転が起こる条件である3成層状態に相当するものであり、降雨によって水温成層逆転に必要な成層条件が発生することがわかる。なお、初期塩分濃度の低下に伴い塩分濃度安定層の層厚が薄くなっていることから、降雨発生前の塩分状態についても、3成層出現のための重要な条件になると考えられる。

### (5) 降雨による塩分成層形成過程の可視化

(室内水理実験：塩分成層形成実験)

図10は、降雨による塩分成層形成過程の可視化結果であり、降雨開始後6分後のx方向流速Uおよびz方向流速Wの合成流速ベクトルを示したものである。図10より、同規模程度の降雨が生じた場合、塩分濃度の増加に伴い降雨による流れが下層に到達しにくい状態にあることがわかる。特に、塩分濃度安定層に相当する領域では、流速がほとんどゼロであることから、安定的に初期塩分濃度程度の濃度が保持されていると考えられる。

### (6) 塩分成層加熱による熱塩対流形成実験

(室内実験：熱塩対流形成実験)

図11、図12および図13は、熱塩対流形成実験結果の一例を示したものであり、それぞれ、水温鉛直分布、水面から高さ300 mmの気温および水底から110 mmおよび120 mmの高さの塩分濃度変動を示したものである。なお、図11の縦軸上方の黄色部は気温の計測値である。実験は、水位150 mm、塩分濃度29.2 PPTの実験水槽内塩水に対し、降雨

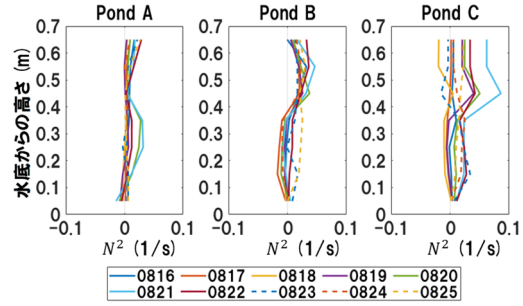


図7 ブルント・バイサラ振動数 $N^2$ の鉛直分布

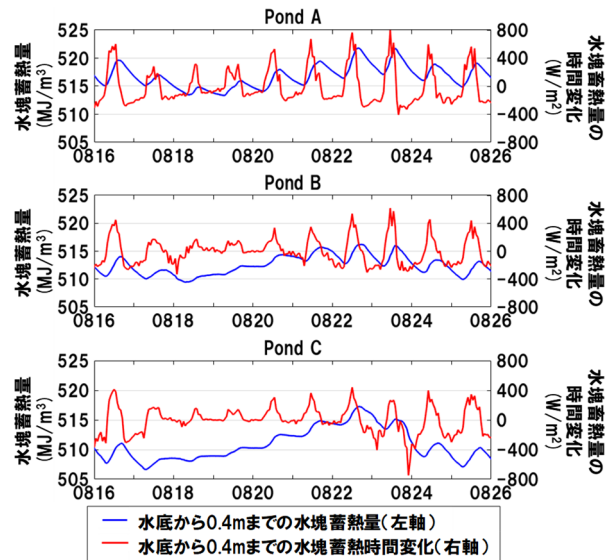


図8 水塊蓄熱量とその時間変化

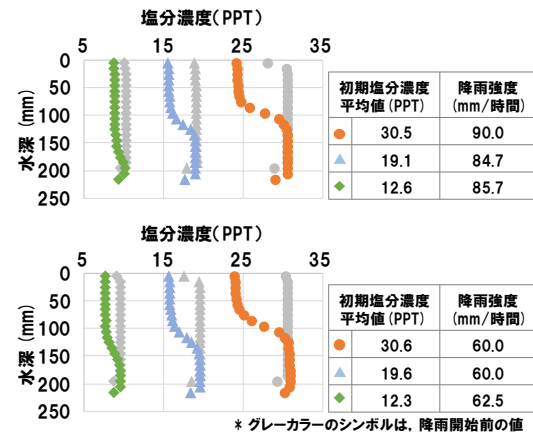


図9 降雨発生前後の塩分濃度鉛直分布 (塩分成層形成実験)

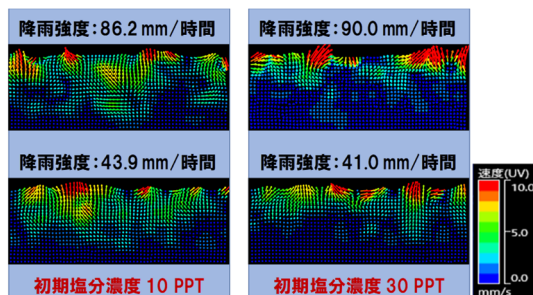


図10 降雨発生6分後のx-z方向流速ベクトル図

強度 21 mm/時の降雨を 1 時間発生させることにより塩分層を形成し、その後、水面から高さ 300 mm の気温が 28℃から 31℃の温度帯で保持することにより、塩分層内に熱塩対流を形成した。それぞれの図の横軸は、降雨開始後からの経過時間を示し、4 日間継続的に計測を行った。

図 11 より、実験開始直後の水温分布は、降雨の影響により鉛直方向に一様な分布となっていることが確認できる。また、降雨停止後の加熱により、水面付近から水温が上昇していることも確認できる。実験開始 6 時間後ごろから、中層から下層にかけて水温が上昇しており、水温逆転状態が進行していることがわかる。実験開始後 24 時間前後には、水面から 50 mm 程度の範囲の温度が 20-22℃で推移しているのに対し、水底から 10 mm 程度の範囲の水温が 26℃前後まで上昇しており、水温逆転現象が発生していることがわかる。

図 13 に示す濃度の変動は、実験開始後 60 時間程度までは、水底から 110 mm と 120 mm の間で一定の濃度差を保ったまま変動しており、塩分濃度状態が安定であったことがわかる。この一定濃度差を保った層は、密度勾配層に位置する層であり、一定濃度差に保たれている期間において、熱塩対流の影響により、下層の熱が上層へ放熱しにくい状態が続いたと考えられる。60 時間経過以降は、双方の塩分濃度が昇降し 72 時間経過後あたりでほぼ同じ値に収束している。これらのことから、実験開始後 60 時間を過ぎたあたりから、加熱による熱対流により塩分層が不安定傾向となり、塩分濃度が一様化される傾向になったと考えられる。また、塩分濃度が一様化傾向になると同時に、特に水槽下層付近の同温帯が減少していることから、塩分層状態の不安定化に伴い、水温逆転現象が解消傾向になることが確認できる。

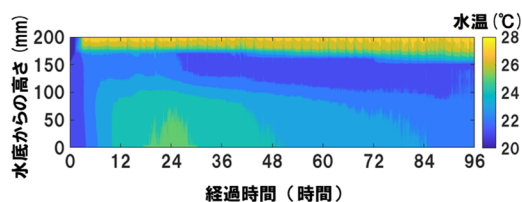


図 11 水温鉛直分布変動 (熱塩対流形成実験)

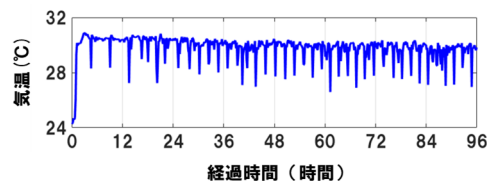


図 12 水面から 300 mm の高さの気温変動 (熱塩対流形成実験)

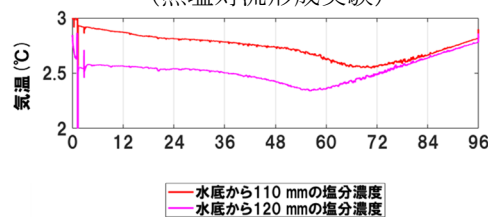


図 13 塩分濃度変動 (熱塩対流形成実験)

#### (7) 水温逆転現象の発生・発達・解消に関わるプロセス・メカニズム

以上の本研究による現地観測および室内水理実験により、塩分を含む小規模閉鎖性水域において水温成層逆転現象が発生することが分かった。現象に関わるメカニズムをまとめると、以下の通りである。

<現象発生の契機>塩水域に発生する降雨であり、降雨によって塩分層状態が、下層高塩分層、塩分濃度勾配層および上層低塩分層の 3 成層状態となる場合、現象発生の可能性が生じる。

<現象発達の条件>3 成層状態に対して、日射によって十分な熱エネルギーが供給される場合、下層高塩分層における蓄熱が生じ水温成層逆転現象が起こる。水温逆転現象の発達メカニズムは、塩分濃度勾配層が熱塩対流の影響により断熱効果を有することにより、下層高塩分層からの放熱が抑制されることによる。具体的には、塩分の拡散が水温の拡散よりおよそ 100 倍遅いことから、塩分勾配層の水塊が受熱あるいは放熱し、密度が増減したとしても水塊が動けない状態となり、また、特に下層高塩分層と塩分濃度勾配層の境界付近における熱フラックスが上層が正、下層が負となることにより下層高塩分層の蓄熱現象が進行する。

<現象解消条件>3 成層状態の解消が最も重要な条件である。最も直接的な解消要因は、風あるいは強い降雨による成層状態破壊が考えられる。また、水域受熱量の低下も、下層高塩分層からの放熱を促進することから、水温逆転現象の解消要因の一つとなり得る。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Monton Anongponyoskun, Akinori Ozaki, Panitan Kaewjantawee, Thermal Stratification in Saline Shallow Water Bodies, Bulletin of Institute of Tropical Agriculture, Kyushu University, 139, pp. 107-11, 査読有, doi.org/10.11189/bit.41.107, 2018 年 12 月

[学会発表] (計 8 件)

- ① Akinori Ozaki, Panitan Kaewjantawee, Monton Anongponyoskul, Nguyen Van Thinh, Masaru Matsumoto, Masayoshi Harada, Kunihiro Hamagami, Takashi Okayasu, Heat Storage Induced by Salinity Stratification in Tropical Saline Aquaculture Ponds, ASABE Annual International Meeting 2019, 2019 年 7 月
- ② Akinori Ozaki, Panitan Kaewjantawee, Monton Anongponyoskul, Nguyen Van Thinh, Takashi Okayasu, Masaru Matsumoto, Heat Storage in Salinity Aquaculture Ponds

Observed in the Tropics, Civil Engineering Conference in the Asian Region CECAR8, 2019, 2019年4月

- ③ 尾崎 彰則, Panitan Kaewjantawee, Monton Anongponyoskul, Nguyen Van Thinh, 岡安 崇史, 松元 賢, 熱帯塩水養殖池に発生する下層高水温現象による水域内蓄熱に関する検討, 平成30年度農業農村工学会応用水理研究部会講演会, 2018年12月
- ④ 尾崎 彰則, Panitan Kaewjantawee, Monton Anongponyoskul, Nguyen Van Thinh, 松元 賢, 岡安 崇史, 熱帯地域の水産養殖地で観測される下層高水温現象に関する現地観測, 平成30年度農業農村工学会全国大会講演, 2018年9月
- ⑤ Akinori Ozaki, Panitan Kaewjantawee, Monton Anongponyoskul, Nguyen Van Thinh, Takashi Okayasu, Masaru Matsumoto, Study on the Clarification of Weather Characteristics the Inducing Inversion of the Thermal Stratification in Aquaculture Ponds in Thailand, ASLO 2018 Summer Meeting, 2018年7月
- ⑥ 尾崎 彰則, パニタン カイウジャンタウィ, モントン アノンポニヤスクル, グエン ヴァン ティン, ミンハズ アハメッド, 塩分を含む閉鎖性水域の降雨によって形成される塩分成層の定量化と可視化に関する研究, 平成29年度農業農村工学会応用水理研究部会講演会, 2017年12月
- ⑦ 尾崎 彰則, グエン ヴァン ティン, ミンハズ アハメッド, 塩分を含む閉鎖性水域の降雨によって形成される塩分成層に関する実験的研究, 平成29年度農業農村工学会全国大会講演会, 2017年8月
- ⑧ Akinori Ozaki, Nguyen Van Thinh, Experimental Study on Formation of Salinity Stratification Induced by Rain in Closed Saline Water Body, 17th International Symposium of River and Lake Environment and 3rd International Symposium on Aquatic Botany, 2017年3月

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等 なし

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者 なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：パニタン カイウジャンタウィ

ローマ字氏名：(Panitan Kaewjantawee)

研究協力者氏名：モントン アノンポニヤスクル

ローマ字氏名：(Monton Anongponyoskul)

※科費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。