

京都大学	博士 (工学)	氏名	MALEMBEKA FREDERICK PAUL
論文題目	FUNDAMENTAL CHARACTERISTICS OF THERMAL CONVECTION UNDER THE CONDITION OF COOLING PERIOD IN THE NORTHERN PART OF LAKE BIWA (琵琶湖北湖冷却期の条件下での熱対流の基本特性に関する研究)		
(論文内容の要旨)			
<p>近年、最深部の水深が約 100m の琵琶湖北湖において、富栄養化や温暖化による冬期気温の上昇等に起因した底層水貧酸素化の進行が懸念されている。本論文は、底層水貧酸素化に関連する溶存酸素 (以後 DO と略記) 等の鉛直混合メカニズムの一つとして冷却期の熱対流現象を取り上げ、その基本的特性について簡易な鉛直 1 次元モデル、及び熱対流の 3 次元数値解析モデルを用いて考察するとともに、森林ギャップモデルと類似の確率モデルによる数値解析結果の解釈について検討したものである。</p> <p>第 1 章は序論であり、本研究課題を取り上げた動機と研究の目的、ならびに論文の構成について記述している。</p> <p>冷却期の DO 鉛直分布は、水温躍層内に極小値が存在する特徴的な形状となることが知られている。第 2 章では、水温躍層内に極小値が存在する鉛直分布形の形成メカニズムについて考察している。まず、従来の簡易鉛直 1 次元水理・生態モデルを用いた解析結果に基づいて DO 消費項、生成項と拡散係数の鉛直分布形を簡略化した DO 輸送方程式の数値解析を行い、消費項の値や消費項と拡散係数分布のずれによって、水面から底層に向かって単調に減少する定常分布、あるいは躍層内に極小部が発生しその値が時間的に減少を続ける非定常分布の 2 パターンが存在することを示した。すなわち、躍層内の拡散係数と DO 消費項の鉛直分布形がずれている (消費項は躍層内の水温分布に対応して減少するが拡散係数は成層効果のため躍層の上部で減少する) ことが極小値を発生させる要因であることを示した。この結果は、水温躍層内における極小部は上層・下層両方向からの DO フラックスの吸い込み部になることから、躍層内での人為的 DO 供給により極小部を消滅させ表層から底層に向かって単調に減少する分布形に変換することが底層水貧酸素化対策の一つとなることを示唆している。</p> <p>続く第 3 章では、琵琶湖北湖における冷却期の諸条件を想定して熱対流の 3 次元数値解析を行い、その結果をもとに熱対流の基本的な時空間特性を考察している。対象とする流れ場の領域として単純な直方体の水槽を考え、水温の初期条件や熱収支式の表面境界条件は琵琶湖北湖の 12 月頃の状況を基本として、水面での冷却速度を何通りかに変化させた数値解析を実施した。その結果の考察から下記のような特性を指摘している。</p> <p>1) 従来の衛星画像解析で得られた 1 月の水面水温分布にみられるように、水面の水温分布は空間的に変動し、熱対流は水面で局所的に冷却された水塊が不規則に分散して落下するような形態で生じ、落下水塊の周辺では逆に上昇流が生じること。2) 落下水塊は水温が不連続な境界面より下方に侵入できず、境界面で界面波を発生させることで成層界面付近の混合を促進し界面位置を低下させること。3) 水平面で切断した平面内の鉛直方向流速コンター図は森林格子モデルのギャップやイジングモデルのスピン配置平面分布図と類似していること。4) 鉛直下方流速の大きさを閾値として定義された落下水塊の存在確率は冷却速度の増加とともに増加し 0.2 程度の一定値に漸近し、大きさの頻度分布にはべき乗則の領域が存在すること。</p> <p>さらに第 4 章では、上述した落下水塊の平面分布図と森林格子モデルのギャップやイジン</p>			

グモデルのスピ配置分布図の類似性に着目して、森林ギャップ等の特性を再現するために提案された確率モデルと類似の確率モデルを用いて、対象としている熱対流の基本特性を表現することが可能かどうか検討している。すなわち、一つの冷水セルに注目して、その上下前後の冷水と温水セルの配置パターンに依存した冷水セルの落下確率（落下後、冷水セルは温水セルに変換される。）と、冷却による温水セルから冷水セルへの変換確率を導入した確率モデルを提案した。冷水セルの落下確率とセル配置パターンの関係については、熱対流の数値解析モデルを用いた検証を行っている。

確率モデルに対して平均場近似を導入し、モデルに対応する平均場近似方程式を導くとともに、その平衡解と3章の数値解析結果を比較した。その結果、森林ギャップモデルでは考慮されていない冷水セル割合の増加に伴う冷水から温水への変換確率の増加を考慮することで、平衡解は数値解析結果に適合することを示した。

近江今津沖の湖底付近における水温、DOの観測結果には、DOが不連続に増加する直前に水温、DOの大きな時間変動が記録されている。この要因の一つとして湖岸から最深部に向かう斜面の存在が考えられたため、第5章では斜面を考慮した熱対流数値解析を行い、斜面の存在が鉛直混合に及ぼす効果について考察している。斜面勾配を二通りに変化させた数値解析を実施し、流速や水温分布の側面図を基に対流混合や斜面上の密度流発生状況を検討した。斜面上の密度流に関しては、斜面上部の水面近傍の水温が低くなることから、その領域を供給源とした定常的な密度流が発生しているが、本数値計算の範囲では成層を破壊するような間欠的で強い密度流の発生を確認することはできなかった。底面付近での水温の時間変化をみると、成層界面が上部に存在する場合よりも底面に到達するときに大きな変動が観察され、これは水面で冷却された水塊が斜面に落下後流下したり成層界面に妨げられずに底面に直接到達することで生じる変動であると考えられたが、観測結果にみられるような非常に大きな変動は発生しておらず、メカニズムのより詳細な研究の必要性を指摘した。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

近年、最深部の水深が約 100m の琵琶湖北湖において、富栄養化や温暖化による冬期気温の上昇等に起因した底層水貧酸素化の進行が懸念されている。本論文は、このような底層水貧酸素化に関連する溶存酸素（以後 DO と略記）等の鉛直混合メカニズムとして冷却期の熱対流現象を取り上げ、その基本的特性について簡易な鉛直 1 次元モデル、及び熱対流の 3 次元数値解析を用いて研究するとともに、森林格子モデルと類似の確率モデルにより解析結果を解釈しようとしたものであり、得られた主な結果は次のとおりである。

1. 冷却期の DO 鉛直分布は、水温躍層内に極小値が存在する特徴的な形状となることが知られており、水温躍層内に極小値が存在する鉛直分布形の形成メカニズムについて考察した。まず、従来の簡易鉛直 1 次元水理・生態モデルを用いた解析結果に基づいて DO 消費項、生成項と拡散係数の鉛直分布形を簡略化した DO 輸送方程式の数値解析を行い、消費項の値、消費項と拡散係数の分布形のずれによって、水面から底層に向かって単調に減少する定常分布、あるいは躍層内に極小部が発生しその値が時間的に減少を続ける非定常分布の 2 パターン存在することを示した。さらに、水温躍層内における極小部は上層・下層両方向からの DO フラックスの吸い込み部になることから、躍層内での DO 供給により極小部を消滅させ表層から底層に向かって単調に減少する分布形に変換することが底層水貧酸素化対策の一つとなる可能性を示唆した。

2. 琵琶湖北湖における冷却期の諸条件を想定して熱対流の 3 次元数値解析を行い、その結果をもとに熱対流の基本的な時空間特性を考察して下記のような結果を得た。

1) 従来の衛星画像解析で得られた 1 月の水面水温分布にみられるように、水面の水温分布は空間的に変動し、熱対流は水面で局所的に冷却された水塊が不規則に分散して落下するような形態で生じること。2) 落下水塊は水温が不連続な境界面より下方に侵入できず、境界面で界面波を発生させることで成層界面付近の混合を促進し界面位置を低下させること。3) 水平面で切断した平面内の鉛直方向流速コンター図は森林格子モデルのギャップやイジングモデルのスピ配置分布図と類似していること。4) 鉛直下方流速の大きさを閾値として定義された落下水塊の存在確率は冷却速度の増加とともに増加し 0.2 程度の一定値に漸近し、大きさの頻度分布にはべき乗則の領域が存在すること。

3. 上述した森林ギャップ等の確率モデルと類似のモデルを提案し、対象としている熱対流の基本特性を解釈することの可能性を検討した。すなわち、一つの冷水セルに注目して、その上下前後の冷水と温水セルの配置パターンに依存した冷水セルの落下確率と、冷却による温水セルから冷水セルへの変換確率を導入した確率モデルを提案した。冷水セルの落下確率とセル配置パターンの関係については、熱対流の数値解析モデルを用いた検証を行っている。提案した確率モデルに対して平均場近似を導入し、モデルに対応する平均場近似方程式を導くとともに、その平衡解と熱対流の数値解析結果を比較した。その結果、森林ギャップモデルでは考慮されていない冷水セル割合の増加に伴う冷水から温水への変換確率の増加を考慮することで、平衡解は数値解析結果に適合することを示した。

4. 近江今津沖の湖底付近における水温、DO の観測結果には DO が不連続に増加する直前に大きな時間変動が記録されている。この要因として湖岸から最深部に向かう斜面の存在が考えられたため、斜面を考慮した数値解析を行い斜面の効果について考察した。数値解析結果を基に対流混合や斜面上の密度流発生状況を検討し、斜面上部の水面近傍を供給源とした定常的な密度流が存在するが成層を破壊するような間欠的で強い密度流ではないこと、底面付近での水温の時間変化には成層界面が底に到達するときに大きな変動が観察され、これは水面で冷却された水塊が斜面に落下後流下したり底面に直接到達することで生じる変動であると考えられたが、観測結果にみられるほどの大きな変動ではなくより詳細な研究の必要性を指摘した。

要するに本論文は、琵琶湖北湖の底層水貧酸素化に関連する溶存酸素等の鉛直混合メカニズムとして冷却期の熱対流現象を取り上げ、その基本的特性について鉛直 1 次元モデル、熱対流 3 次元数値解析モデル、確率モデルを用いて研究するとともに、実用的な応用について検討したもので、学術上、実際に寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 23 年 8 月 1 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。