人為影響により潟口部が常時開口したスリ ランカ南部の潟湖における塩分成層

FIELD INVESTIGATIONS ON SALINITY STRATIFICATION OF COASTAL LAGOON WITH PERMANENTLY OPENED MOUTH IN SRI LANKA

古里 栄一¹・田中 規夫^{2,3}・G. P. Amarasekara⁴, T. Priyadarshana⁴
Eiichi FURUSATO, Norio TANAKA, G. P. Amarasekara, T. Priyadarshana

¹正会員 博 (工) 埼玉大学大学院助教 理工学研究科(〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)

²正会員 工博 埼玉大学大学院教授 理工学研究科(同上)

³正会員 工博 埼玉大学総合研究機構教授 環境科学研究センター (同上)

⁴Faculty of Fisheries and Marine Sciences & Technology, University of Ruhuna

Field investigations were conducted on 22 November 2011 during rainy season and 16 March 2012 during dry season to estimate the present state of density stratification of Koggala Lagoon, Sri Lanka. The variation of salinity, water temperature and dissolved oxygen were measured vertically at the neap tide condition. Koggala lagoon exhibits an entirely different mixing state depending on the season. In rainy season, lagoon water was brackish and in weak mixing state. On the other hand, in dry season, water in both the lagoon mouth and inside the lagoon exhibit the state of strong mixing and high salinity. In both seasons, high temperature, high salinity and, low dissolved oxygen at the deep layer of water were found in the central part of the lagoon. The salinity level at the bottom was higher than the estimated level based on water budget analysis.

Key Words : Koggala lagoon, rainfall, stream stratification, high salinity bottom layer

1. はじめに

スリランカでは近年経済発展に伴い活発な社会資本整備が行われており、潟湖環境が激変しつつある^{1), 2), 3)}。コッガラ潟湖はスリランカ全体で計43存在する沿岸潟湖の1つであり、南部主要都市のゴールから約10km東に位置する。本潟湖では河口砂州の除去や突堤建設によって沿岸漂砂動態の変化が近年生じ、潟口が常時開口するようになった。その結果、潟湖塩分が上昇し、淡水性の種が多かった潟湖内の動植物の多くが確認できなくなった。同時に流域水田の塩化や潟湖での漁獲量の減少が生じ、潟湖の生態系だけでなく自然資源に依存した地域経済に深刻な影響を与えている¹⁾。

これまでに埼玉大学とルフナ大学との共同研究としてコッガラ潟湖の水文特性の研究が実施されてきた^{4), 5), 6)}。潟口形状の適切な改良により塩水浸入量や交換率等が近年の潟口開口以前の状態に近づく可能性があることが明らかになっている⁴⁾。今後のコッガラ潟湖の水環境をより適切に修復・管理する上では、水文特性に加えて潟湖開口後の水理・生態系の現状に関する更なる総合的理解

が必要である。

潟湖の水環境は沿岸域の生態系を構成する諸生物のハビタットとして、生活史の一部あるいは全てを構成する重要な場であるとともに、漁獲・観光資源を育むなど社会経済的な価値も有している。潟湖において生じる様々な水理現象の1つに塩分成層がある。潟湖の塩分や混合度は潟湖に応じて異なるだけでなく、同一潟湖においても潮汐や淡水流入量に応じて変動する。潟湖の生態系はこうした時空間的に微妙なバランスの汽水環境を基盤として成立しており、塩分成層は塩分と並んで潟湖の水環境に対する人為的圧力を評価する上で重要な要素の一つである。しかも塩分成層は密度流が支配的となる汽水域における流れを規定する要素でもある。すなわち、水文学的特性や密度流現象と生態学的過程は塩分成層特性を通じて関連している。今後のコッガラ潟湖の望ましいあり方を検討するためには、既往研究における水収支バランスに基づく塩分に関する議論⁷⁾を発展させる上で成層状態の実態把握は急務である。なお、本研究は潟口の開口状態と潟湖成層状態との関係に着目しているが、これを十分に評価できる開口前のデータが存在しないことか

図-1 コッガラ潟湖の形状および現地調査地点（図中記号、地点名）
 ((a) 全域 コンター線は0.5m毎の水深を示す。(b) 潟口拡大写真（1985年スリランカ沿岸保全省） グレー線は突堤を示す。

図-2 コッガラ潟湖近傍の雨量（ゴール観測所）

ら、こうした研究の端緒として現状の成層状態の実態把握を主たる目的としたものである。また、今後の数値解析等による開口と成層の関係評価に資するものである。

本報はコッガラ潟湖の塩分成層の実態および特性について現地調査を実施して検討するとともに、本潟湖の修復方策を検討するために必要な課題抽出を目的としたものである。

2. コッガラ潟湖における潟口部の地形変化

図-1 (b) に潟口の常時開口前の衛星写真を示す。開口前の1985年には、東から西方向への沿岸漂砂が形成した砂州によって潟口閉塞が生じている。写真には周辺流域の浸水防止のための掘削により幅10m程度の開口部が形成されている様子も確認できる。こうした潟口閉塞は年間約7～8ヶ月間生じていた¹⁾。近年、潟口部の砂州除去（1992年）によって生じた国道橋の橋脚部の侵食抑制のために潟口外部での突堤建設（1997年および2005年）が実施された。その後、以前は雨季の開口時のみに幅55m、水深0.5mの断面形状であった潟口は、常時開口状態となり断面も幅85m、水深3mへと拡大した⁷⁾。これは従前は砂州を形成しつつ動的平衡状態であった東方からの沿岸漂砂動態が突堤により変化して、砂州が形成されなくなったためである¹⁾。

3. 調査方法

図-1にコッガラ潟湖の形状や位置および調査地点を示す。コッガラ潟湖の流域面積は約55 km²であり、このうち約 15% を潟湖が占めている¹⁾。潟湖の水深は、1.0 から3.7 mであり⁸⁾、淡水は潟湖北西部の4つの小河川から流入する(図-1)。潟湖の南東に位置するPol-oyaは唯一の流出河川であり、約300 m の水路を通じてインド洋と接続する。現地調査地点は、淡水および塩水の潟湖へ影響を考慮して主たる流入河川としての3地点(W-1, H-1, K-1)および潟湖内地点として縦断的な数地点(L-1, 2, 3, 3')とした。流入河川においては、各河川に設置されている小規模堰の下流部で調査を行った。潟口部は侵入する海水の混合や潮汐の影響により複雑な現象が生じると想定されることから約300mの潟口水路長範囲に4地点設定した(M-1, 2, 3, 4)(図-1)。なお、浸入する海水の塩分濃度の評価のために海域でも2地点で調査を行った(O-1, 2)。

図-2に、コッガラ潟湖から西方向約10kmに位置するゴール観測所の降雨量を示す。スリランカには5月から9月の南西モンスーンと10月から2月の北東モンスーンが存在する。ゴールでは5月および10月をピークとして年2回の雨季がある。この降雨特性を踏まえ、2011年11月22日（雨季）および2012年3月16日（乾季）の午前10時から午後5時まで潟口から上流水域方向に現地調査を実施した（以後雨季調査、乾季調査とする）。なお、潟口開口以前においては、11月は最低塩分が、3月は最高塩分が観測された時期である⁹⁾。潮汐条件は、塩水の残存による潟湖の成層の有無を評価することを念頭に置き、両日ともに小潮期の下げ潮時に実施した。なお両調査の前日まで潟湖周辺では降雨がみられた。

現地測定は多項目水質測定装置(YSI Model 55)を用いて、水温、塩分、溶存酸素(DO)の鉛直分布を0.5mピッチで測定した。

4. 調査結果

(1) 雨季調査

図-3に2011年11月に雨季調査として実施した調査結果を示す。潟口エリア(図-3上)においては、上流側に向けて塩分の低下(10から20pptの範囲)に加えて、混合度が弱くなる傾向があった。水温およびDOの鉛直分布も塩分と同様の傾向であった。M-4地点においては底層に低DO高水温層が確認されたことから、本水塊は一定時間混合せずに底層に停滞していたと推定される。

潟湖内部の測定結果を、比較のため潟口水域の上流地点(M-4)と主たる流入河川地点(W-1)とあわせて示した(図-3下)。各項目の鉛直分布および測定値は全調査地点において類似した傾向を示した。表層塩分は約10pptであり、水深約1m付近に形成された塩分躍層付近では、水温およびDOの双方とも躍層が形成されていた。注目されるのが、最深部水域(L-1)において確認された高水温

図-3 雨季(2011年11月22日)における潟口(上)および潟湖内部水域(下)の鉛直分布測定結果(凡例は調査地点名を示す(図1参照)).

低DO濃度の底層水塊である。これは、水温上昇とDO低下の生じる一定時間、底層と表層とが混合していないことを示している。なお、他の流入河川はW1地点とほぼ同様な傾向であったために掲載は省略する。

(2) 乾季調査

図-4に2012年3月16日に乾季調査として実施した各地点の調査結果を示す。

潟口エリアでは下げ潮期間においては、全測定項目の値は鉛直および流程方向に均一であった。したがって本調査時期における潟口水域は、強混合状態であったと推定される。

潟湖内地点における各測定項目の鉛直分布測定結果を、比較のために潟口水域の最上流端地点(M-4)と代表的な流入河川地点(W-1)とあわせて示す。塩分の鉛直分布は各地点において同様であり、約30 pptであった。ただし潟湖中央部の最深部(L-1)においてのみ、水深2m以深の底層に数ppt高い塩分が観測された。この底層は表層に比べ低DO高水温であった。したがって、乾季においても雨季と同様に一定期間底部の水塊は表層と混合することなく滞留していると推定される。

流入河川においては、雨季調査結果と同様に塩分および水温成層が全3地点で確認された(図-4下)。ただし塩分レベルは各河川において異なっていた。

(3) 降雨量の異なる時期の表層塩分空間分布

図-5に表層塩分の縦断分布を雨季および乾季で比較して示す。先述したように、乾季におけるコッガラ潟湖の塩分は海水と同レベルであり、流入河川表層でのみ10ppt以下の低い塩分が観測された。これに対して雨季は全く異なった縦断分布傾向であり、潟口水域は300m長の潟口水路部で約30pptから10pptへ減少し、潟湖内表層塩分は10pp強であり顕著な縦断分布は見られない。したがって、潟湖水域は雨季乾季に関わらず流れ方向の塩分勾配はほぼ存在していなかった。なお、これらは共に小潮での傾向であることから、潮汐の影響が大きくなる

大潮時期においては、雨季において海水の影響が更になる可能性がある。

(4) 現在のコッガラ潟湖の塩分成層

以上の現地調査結果および考察に基づき、現在のコッガラ潟湖の塩分成層の実態に加えて、これを生じていると推定される水理学的諸過程について雨季および乾季別に概念図で示した(図-6)。現在のコッガラ潟湖は、降雨量の違いに応じて塩分および混合状態の空間分布は全く異なった傾向がある。雨季における潟湖は緩混合であり塩分は汽水レベルであった。潟口域は塩分濃度が下流ほど高くなるとともに、混合状態も緩混合から強混合へと変化する。なお、潟湖最深部では底層水が一定時間滞留していると推測された(図-6(a))。各流入河川では表層の淡水と下層の汽水から形成される塩分成層が確認された。表層淡水は降雨に由来すると考えるのが妥当であろう。一方、汽水については潟湖内と同レベルの塩分であったことから密度流として潟湖から遡上した水塊であったことが考えられる。この場合、コッガラ潟湖は、潟口水域だけでなくラグーン流入河川の双方に緩混合域が存在していることになる。ただし、現在は流域の水田が塩化していることに加えて耐塩性の弱い種のマングローブが流域で減少している¹⁾ことを考えると、既に流域からの基底流出分が汽水化している可能性もあり、流入河川部の汽水動態については今後の研究課題である。いずれにしても、流入河川の表層淡水レベルは潟湖上流部水域のL-3地点でも測定されなかったことから、表層密度流として潟湖に流入した淡水塊は潟湖内で風応力等により潟湖汽水と混合していると考えられる。

一方、乾季における潟湖の塩分空間分布は雨季と全く異なった様相を示した(図-6(b))。潟湖全域において塩分は海水レベルであり混合形態は強混合であった。現在のコッガラ潟湖は、乾季においては潟湖ではなく湾に類似した状況となっている。流入河川は雨季と同様に塩分成層が生じていた。しかしながら雨季とは異なり、下

図-4 乾季(2012年3月16日)における潟口(上), 潟湖内(中)および流入河川(下)水域の測定結果(マーカーは各測定地点を示す(図1))

層汽水の塩分濃度が河川によって異なっていたことに加えて、これらは潟湖の塩分よりも明らかに低かった(図-4下)。この下層汽水の起源については雨季と同様に流域および潟湖内部からの遡上水の双方の可能性がある。これは現在のコッガラ潟湖の水収支および塩分動態の評価における課題である。

Gunaratne^{4,7)}は水収支の推定結果に基づいてコッガラ潟湖の塩分に流入河川水量の季節変化が強い影響を与えていることを指摘した。本調査結果は、こうした季節変化が塩分だけでなく混合状態に対しても強い影響を与えていることを示している。

本調査は流入河川水量の影響が相対的に大きい小潮時を対象に実施した。逆に潮汐の影響が大きくなる大潮時であれば、雨季の塩分空間分布は本調査結果とは異なる傾向が生じる可能性がある。たとえば図-5に示した縦断方向の塩分分布は、大潮時は陸方向に高い塩分の範囲が広がると推測される。なお、雨季および乾季両調査において最深部で観測された高塩分水の起源としては、調査実施前的大潮時に流入した海水が一定期間以上残存したと考えるのが妥当である。これは、この下層水の水温が表層以上であること、調査時の本地点の透明度が1.2mであったことからからも裏付けられる。ただし、この現象が生じるためには、大潮時の遡上海水が高い塩分を維持しながら潟口部を通過して潟湖最深部に到達する必要がある。小潮時に実施した本調査ではそうした高密度水の貫入状況は確認されなかった。今後明らかにすべき重要な課題の一つである。なお、乾季は流入淡水量が少ない

図-5 表層塩分の流程方向の変化

ために小潮条件と同様な塩分の空間分布が大潮条件においても生じると推測される。

5. 考察

(1) 潟口部の閉塞特性の変化による水環境への影響

Gunaratne⁷⁾は、コッガラ潟湖の潟口開口前後における塩分の変化に関して、水収支の推定結果に基づいた様々な水文学的なパラメーターによる評価を行っている。開口により潟口断面積が約10倍に増加したことに加えて年間約8ヶ月間閉塞していた潟口が常時開口したことにより、満干時の潮位差にもとづく潟湖容積に相当するタイダルブリズムは $0.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ から $1.7 \times 10^6 \text{ m}^3$ に約2.4倍に増加した。 $9.4 \times 10^6 [\text{m}^3]$ の潟湖容積および約 $8 \text{ m}^3/\text{s}$ の総淡水流量の推定値を用いて、開口の影響について、潟湖容積や陸域からの流入量とのバランスから評価するとともに、潟湖平均塩分が9から24pptに増加したことを説明した。こうした既往研究により現在および過去のコッガラ潟湖

図-6 潟口開口後のコッガラ潟湖における雨季(a)と乾季(a)の塩分成分層状態の模式図(小潮下げ潮条件)。

の水収支特性については明らかとなっている。

一般的に、潟湖を含む汽水域における塩分の混合形態には強混合から弱混合の幅があり、それに応じた塩分の平面・空間分布が汽水域内で形成される。その分布は同一箇所においても潮汐や降雨量に応じて時間的に変動する。本調査において、現在のコッガラ潟湖における時空間的な塩分の不均一性に加えて、雨季における最深部(図-3)や乾季の潟湖全域(図-4)において海水レベルの塩分水塊の存在が確認された。

Silvaらは1981年4月から1年間潟湖内の流軸方向4地点で実施した現地調査結果から、最も塩分濃度が高い傾向のある潟口付近における塩分季節変化として、乾季(3月および8月)に塩分が高く(約18ppt)、雨季(11月)には低下し0.5pptであったことを報告している⁹⁾。こうした塩分上昇は潟口付近に限られ、流入河川付近の上流地点では乾季に観測された年間最高塩分は8pptであった⁹⁾。ただし、これらは表層観測値であり、開口前の塩分成分層状況は不明である。

Priyadarshanaら¹⁾は、潟口の開口に伴い1995年に15種確認された淡水あるいは汽水性の水生植物が、2007年には3種のみとなったことを報告している。開口前に潟湖全域に分布していた水生植物の開口後の消失は、ヨシやガマ等の抽水植物に加えて浮葉・沈水植物の全ての水生植物

タイプで生じた。残存植物の1種であるカワツルモ(*Ruppia maritima*)は、70pptまでの高塩分でも耐性があることが報告されている¹⁰⁾。一方、消失した12種には、スリランカの他の潟湖で最大28pptまで塩分が一時的に増加する箇所でも生育しているイバラモ(*Najas marina*)も含まれている¹¹⁾。本調査で雨季に観測された表層濃度は15ppt弱であり、これは開口前の塩分の範囲内であった⁹⁾。ただし同時期の底層では30pptの高塩分底層水の存在が確認された。潟口から海水性海草の分布域が近年拡大している¹⁾ことを含めれば、Gunaratne⁷⁾が平均的な水収支から推測した現在の塩分である24pptよりも、高い塩分水塊が季節あるいは場所に応じて生じた結果、一定の耐塩性のあるイバラモですら消失したと考えられる。すなわち、現在のコッガラ潟湖の深部は年間を通じて海水レベルの塩分となっていると考えられる。なお、本論文では流軸に沿った調査結果を用いて植生の消長に関する議論を行った。植生の開口前後の変化は全域的に生じたこと、流軸横断方向に比べて長い流軸方向でも潟湖内塩分は平面的に顕著な差は確認できないことから、限られた本論文のデータからでもこの議論は可能であると考えられる。

現在生じている底層の高塩分水塊は成層強度も増加させ、鉛直混合の抑制および下層水の滞留に繋がる。ハビタットとしての底層塩分環境の時間変動を評価するため

には、上述したような生育生物を指標とした間接的な塩分環境の推測だけでなく、混合の頻度を水理学的に解析する必要がある。Gunaratneら^{4,7}は新たな突堤により潟口部の開口面積および漂砂動態を制御することにより潟湖の淡・塩水の水収支バランスの状態が開口前に近づく可能性を指摘している。しかしながら、潟湖の水環境や生態系保全を工学的に進めてゆくためには、局所のおよび時間的な塩分や変動特性についても現状把握と過去の推定を行った上で、望ましい将来像について議論する必要がある。

(2) 今後の課題

コッガラ潟湖における生態系基盤としての塩分成層特性について評価する上で、流入河川から潟口部までの各水域における以下の課題を抽出した。本調査で確認された特徴的な現象である底層低DO水塊の起源や輸送・動態については、更なる調査や解析で明らかにする必要がある。

もう一つの課題が流入河川水量の見積もりである。本調査によって、流入河川が塩分成層化していることが初めて確認された。Gunaratneら⁴⁾はコッガラ潟湖の水文学的評価において、流入河川水を淡水とし、流入水量を表層流速のみから推測している。本調査で確認された流入河川の塩分成層が、潟湖からの遡上水によるものか、あるいは既に塩化した流域からの流入水として扱うべきなのかについて明らかにする必要がある。

今後のコッガラ潟湖の環境修復においては、潟湖の水環境と潟口形状の関係について、塩分に加えて塩分成層に着目した研究を実施する必要があると考えられる。

6. 結論

- 1) コッガラ潟湖において塩分成層の実態に関する現地調査を実施した結果、雨季は汽水レベルの緩混合汽水水域であるのに対して、乾季は海水レベルの塩分の強混合潟湖であることがわかった。
- 2) いずれの時季においても、流入河川における塩分成層に加え潟湖最深部において底部に滞留時間が長いと考えられる高水温高塩分低DO水塊が確認された。
- 3) これらの調査結果に基づいて、潟口開口後における塩分の空間分布特性を把握し、現在生じている諸過程について検討するとともに、既往研究における水収支特性や動植物相の開口前後の変化に基づいて、開口による塩分成層への影響を考察した。
- 4) 今後のコッガラ潟湖における塩分環境の改善に向けた課題について明らかにした。

謝辞

本研究の実施にあたっては、アジア・アフリカ学術基盤形成事業(コーディネータ・田中規夫)経費の一部を使用した。現地調査の実施に当たっては埼玉大学大学院生

(当時)・安田智史氏の協力を得た。また、3名の査読者からは有益な意見を頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Priyadarshana, T., Manatunge, J. and Wijeratne, N.: Impacts and consequences of removal of the sand bar at the Koggala lagoon mouth & Rehabilitation of the lagoon mouth to restore natural formation of the sand bar, Practical Action, Sri Lanka, 2007.
- 2) Rathnaweera, E: Report on A case study on the impact of the Kapuhenwela causeway on the Rekawa lagoon & lagoon fishery, Practical Action, Sri Lanka, 2005.
- 3) Smakhtin, V. U. and Piyankarage, S. C.: Simulating hydrologic reference condition of coastal lagoons affected by irrigation flows in southern Sri Lanka, *WETLANDS*, 23, pp. 827-834, 2003.
- 4) Gunaratne, G. L., Tanaka, N., Amarasekara, G. P., Priyadarshana, T. and Manatunge, J.: Impact of rubble mound groyne structural interventions in restoration of Koggala lagoon, Sri Lanka; numerical modelling approach, *J Coast. Conserv.*, 15, pp.113-121, 2011.
- 5) Furusato, E., Amarasekara, G.P., Priyadarshana, T. and Tanaka, N. : The Current Status of Density Stratification of Koggala Lagoon, Symposium Proceedings of ACEPS (International Symposium on Advances in Civil and Environmental Engineering Practices for Sustainable Development), pp. 176-189, 2012.
- 6) Amarasekara, G. P., Priyadarshana, T., Manatunge, J., and Tanaka, N.: Impact on *Etroplus suratensis* (Pisces: Cichlidae) population attributed on human induced hydrological modifications to the Koggala lagoon, Sri Lanka.Proceedings of an International Sympocium of Urban lake monitoring and management. University of Peradeniya, Sri Lanka, pp. 1-9, 2012.
- 7) Gunaratne, G.L.: Restoration of Koggala Lagoon, Sri Lanka: An investigation of physical processes and morphometric parameters using field data and numerical models and proposing management alternatives, MS thesis, 2010.
- 8) IWMI (International Water Management Institute), Sri Lanka Wetlands Database, <http://dw.iwmi.org/wetland/wetlandsinfo-options.aspx?wetlandname=Koggala%20Lagoon&wetland/> (accessed February 10, 2011), 2006.
- 9) Silva, E.I.L.: Water quality of Sri Lanka, a review on twelve water bodies, Institute of Fundamental Studies, Peradeniya, 1996.
- 10) Kantrud, H.A.: Wigeongrass (*Ruppia maritima* L.): A literature Review. US Fish and Wildlife Survey, Fish and Wildlife Research, No. 10. p. 58, 1991.
- 11) Amarathunga, A.A.D., Sureshkumar, N. Weerasekara, K. A.W.S., Wickramaarachchi, W.D.N. and Azmy, S. A. M.: Study the effect of salinity and nutrients for the growth of *Najas marina* and its impact to aquatic biodiversity in Madu Ganda Ramsar wetland in Sri Lanka, Proceedings of the 15th International Forestry and Environment Symposium, pp. 26-27, 2010.

(2012. 9. 30受付)