B－68 生物動態を考慮した物質収支モデルによる諫早湾干拓調整池の水質改善の検討

○横山 佳裕[1]*・吉次 祥子[1]・藤井 暁彦[1]・中嶋 雅孝[1]*・内田 唯史[1]・中西 弘[2]

[1]一般財団法人 九州環境管理協会（〒812-0004 福岡市東区松香台1-10-1）

[2]山口大学名誉教授（〒759-0206 山口県宇部市東須恵987-18）

* E-mail: *yokoyama@keea.or.jp*

1. はじめに

諫早湾干拓調整池 (図-1，容量：$2.9\times10^7m^3$，面積：$2.6\times10^7m^2$) [1)] では，1997年の潮受堤防設置以降，水質のCOD，T-N，T-Pが環境保全目標値を上回る状態が続き，その改善が求められている[1)]．この改善対策には，底泥の巻き上げ抑制のための潜堤やヨシ進出促進工の整備，周辺流域の下水道整備や創出された干拓地の施肥管理等の流入負荷対策が計画・実施されている[2)]が，現在まで環境保全目標の達成には至っていない[1)]．

国内における他の閉鎖性水域では，水質改善対策として，前述の流入負荷対策等に加え，沈水植物群落や動物プランクトンのミジンコ等の生物を利用した方法 (バイオマニピュレーション) が試みられ，一定の効果は得られているが[3)]，調整池ではこれら生物利用による水質改善対策の推進やその効果に関する検討は行われていない．

本研究では，調整池の生物動態を考慮した簡易なモデルにより窒素 (N)・リン (P)の物質収支特性を把握し，流入負荷対策等による水質改善対策を行った場合の水質改善の程度から，水質改善手法の方向性を検討した．

2. 検討方法

物質収支モデルは，調整池の生態系を主に構成する植物・動物プランクトンや底生生物，魚類等の４つで生物群に加え [4)]，植物プランクトンの増殖に律則となる栄養塩類 (DIN，DIP) や生物の死骸等が元となる有機物 (ON，OP) を調整池における物質循環の構成要素とした (図-2)．

物質収支モデルの作成では，まず，これら４つの生物群の現存量を，既存の調査結果 [5,6)]と知見 [1,7,8)]より求めた．この現存量をもとに，図-2 に示す N・P の水質・底質・生物群間の移動・輸送速度を算出した．水中への栄養塩類等の流入には，流域からの流入と底泥からの巻き上げ・溶出を考慮した．さらに，潮受堤防の北部・南部排水門からの定期的な排水に応じて，水中の栄養塩類等が系外へ流出するとした．そのほか，生物生産量 (成長量) や死亡量等の算出は，以下の条件に基づいた．

1) 生産量は，現存量に成長速度を乗じて求め，排泄・排糞等の生物代謝に伴う N・P の移動は考慮しない．
2) 現状の生物量や栄養塩量は定常であるとし，生物群それぞれの被食量と死亡量の合計値は生産量に等しい．また，池内への流入水量と系外への流出水量は等しい．
3) 魚類等による捕食では，低次にある３つの生物群から，それぞれ等量で摂取する．

これらの条件に基づく計算結果から，調整池における生物を介した物質収支を求め，他湖沼の物質収支と比較し，調整池の物質収支特性を把握した．

また，物質収支モデルを用いて，栄養塩類削減等に伴う水質改善効果の計算結果及びその費用等から，諫早調整池における効果的な水質改善手法の方向性を考察した．

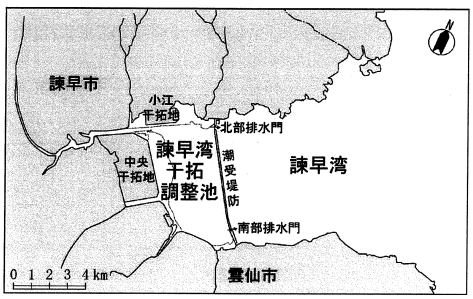


図-1 諫早干拓調整池

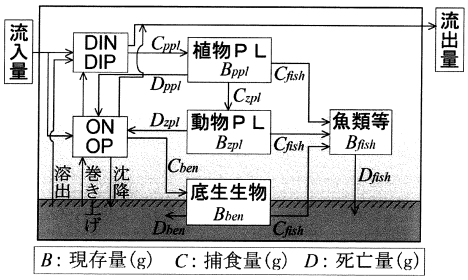


図-2 諫早湾干拓調整池における生物動態の構造図

3. 生物動態を考慮した物質収支モデルの作成

(1) 各生物群の現存量の算出

植物・動物プランクトンの数は，2004 - 2010年度の平均値[5]に調整池容量[1]を乗じた1.1×10^{18}cells，1.7×10^{13}ind.である．これらに優占種の*Skeletonema subsalsum*の1cellの容積（ϕ5μm×10μmの円筒形）及びワムシ類の1ind.の容積（ϕ300μmの球形）をそれぞれ乗じて体積を求め，比重を1として重量に換算し，その5%を有機物量とした．植物プランクトンのN・P現存量は，*S. subsalsum*と同属の*S. costatum*の1cellのN・P含有量[7]を現存数に乗じて，動物プランクトンは有機物量にRedfield比を乗じて求めた．

底生生物の現存量は，2004 - 2010年度の平均値[5]に調整池面積[1]を乗じた4.1×10^{7}gとし，魚類等は既存の調査結果（1.3×10^{8}g）[6]を用いた．これらにアサリ，コノシロのN・P含有率[8]を乗じて，N・P現存量を求めた．

求めた各生物群のN・P現存量を表-1に示す．

(2) 生物間の窒素・リンの移動速度の算出

植物プランクトンの成長速度は，*S. costatum*の増殖が活発化した時の値（2.3 - 4.28day^{-1}）を参考に0.25day^{-1}とし，動物プランクトンでは，ワムシ類の日間増殖率（20 - 60 %・day^{-1}）の最小値（20 %・day^{-1}）とした．底生生物では，年間に3世代のイトミミズ類（優占種）が繁殖・成長する速度（1.2倍・month^{-1}）とし，魚類等は，2倍・year^{-1}とした[6]．

各生物群の成長速度より求めた生産量と捕食・死亡等の関係（図-2）から，被食量と死亡量を求めた（表-2）．

(3) 調整池の窒素・リン収支の特徴

各要素のN・P現存量とN・P収支を図-3に示す．

栄養塩類に回帰する流域からの流入負荷・底泥からの溶出・有機物の分解のうち，流入負荷の寄与はN・Pそれぞれ約84%，約70%と，水中の栄養塩類に対する流入負荷量の影響は大きい．その栄養塩類の多くは，生物生産等を通じて植物プランクトン，動物プランクトンへと順次取り込まれる．栄養塩類への回帰量に対する動物プランクトンへの取込量の割合はNで約54%，Pで約38%と高い．さらに，プランクトンが死亡し，有機物となる量は，底泥からの巻き上げによる供給量とほぼ等しい．一方，これら動植物プランクトンを介した物質移動量と比べて，底生生物や魚類等への移動・輸送量は，栄養塩類への回帰量に対してごくわずかである．このように，調整池の生物動態を考慮した栄養塩類の移動では，水中－池底とプランクトンを介した流れが主体となっている．

印旛沼では流入負荷量に対する湖沼内での正味のリン蓄積量は約57%であり[9]，手賀沼では，流入負荷量に対する正味のN・P蓄積量はそれぞれ約40%，約52%といわれている[10]．一方，調整池では，流入負荷量に対する池内での正味のN・P蓄積量はそれぞれ約18%，約0%と(図-3)，上記の他湖沼よりも小さかった．これは，調整池は他の指定湖沼よりも水深が浅いため，沈降に伴い蓄積された池底への有機物が，巻き上げにより水中へ再回帰しやすいためと考えられる．したがって，N・P収支からみると，池内での一次生産に伴う有機物の沈降量を抑えること，もしくは底泥に蓄積される有機物の巻き上げによる回帰を抑制することが，水中へのN・P供給量を抑制する一つの方法と考えられる．

また，琵琶湖西の湖における底生生物・魚介類による窒素摂取量は約1.8×10mg・m^{-2}・day^{-1}，約4.4mg・m^{-2}・day^{-1}といわれている[11]．一方，調整池の底生生物・魚類等による窒素摂取量はそれぞれ約2.4×10^{3}mg・m^{-2}・day^{-1}，約2.5×10^{3}mg・m^{-2}・day^{-1}であり．調整池における底生生物や魚類等のN・P摂取量は，西の湖より2-3桁程度小さい．これは調整池の魚類や底生生物の現存量が少ないためであり，生物を増やして利用した水質浄化の改善を行っても，水質改善の大きな効果は得られにくいと考えられる．

表-1 調整池における各生物群の窒素，リン現存量

生物群	T-N [t]	T-P [t]
植物PL	2.98	0.51
動物PL	3.16	0.437
底生生物	8.9×10^{-3}	7.6×10^{-4}
魚類等	2.2×10^{-2}	4.3×10^{-3}

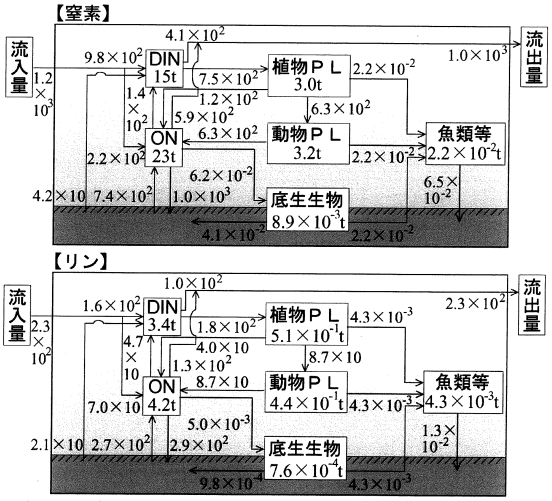
表-2 各生物群の成長速度・年生産量等の計算結果

【T-N】

生物群	現存量 [t]	成長速度 [day^{-1}]	生産量 [kg・day^{-1}]	被食量 [kg・day^{-1}]	死亡量 [kg・day^{-1}]
植物ＰＬ	3.0×10^{3}	1.25/日	7.5×10^{2}	6.3×10^{2}	1.1×10^{2}
動物ＰＬ	3.2×10^{3}	1.4/日	1.3×10^{3}	2.2×10^{-2}	6.3×10^{2}
底生生物	8.9	1.007/日	6.2×10^{-2}	2.2×10^{-2}	4.1×10^{2}
魚類等	2.2×10	1.003/日	6.5×10^{-2}	-	6.5×10^{-2}

【T-P】

生物群	現存量 [t]	成長速度 [day^{-1}]	生産量 [kg・day^{-1}]	被食量 [kg・day^{-1}]	死亡量 [kg・day^{-1}]
植物ＰＬ	5.1×10^{2}	1.25/日	1.8×10^{2}	8.7×10	4.0×10
動物ＰＬ	4.4×10^{2}	1.4/日	8.7×10	4.3×10^{-3}	8.7×10
底生生物	7.6×10^{-1}	1.007/日	5.0×10^{-3}	4.3×10^{-3}	9.8×10^{-4}
魚類等	4.3	1.003/日	1.3×10^{-2}	-	1.3×10^{-2}



注）図中の矢印の単位：kg・day^{-1}

図-3 諫早湾干拓調整池における窒素・リン収支

4. 水質改善の方向性

(1) 水質改善の利用に適した生物群とその手法

調整池のN・P収支は，動植物プランクトンを介した移動量が大きいため，調整池内の動植物プランクトンの除去はN・Pを除去することになり水質改善につながる．

ただし，一般的な水質浄化装置の処理能力は数十m^3・day^{-1}と，1台あたりの年間処理量は調整池容量[1)]の0.1%程度と少ない．このため，局所的に発生した赤潮の除去の効果はみられる可能性があるが，池全体の水質改善効果には，設備コストうあランニングコストに課題がある．

(2) 水質改善のための底質由来栄養塩の抑制手法

調整池では底質を介したN・P移動量も多いことが特徴にある．そのため，底泥の巻き上げや溶出の抑制は，N・P供給の抑制となり，水質改善につながる．

例えば，底泥の巻き上げを25 - 100%抑制した場合，物質収支モデルによる試算では，現状のN現存量から8 - 34%減少する (図-4)．Pについてもほぼ同様の結果であり，巻き上げの抑制により，N・P現存量が改善される．

ただし，調整池の面積[1)]は広いため，この巻き上げ・溶出抑制対策を実際に行うには，抑制効果の持続性とそれに係る費用の面で課題がある．

(3) 水質改善のための流入栄養塩バイパス放流

調整池のN・Pには，流入負荷の寄与が最も大きい．そのため，流入するN・Pを抑制させる，もしくは植物プランクトンによる取り込み前に調整池の外へ流出させると有機物生産が抑えられ，水質の改善につながる．

例えば，流域から調整池への窒素流入負荷量の25～100%をバイパスさせ，調整池外へ放流させた場合，物質収支モデルによる試算では，現状のN現存量から19～75%減少し(図-4)，池内の水質改善につながる．

流域より流入するN・Pを抑制については，既に計画・実施されており[2)]，流域内の面源負荷対策を新たに行わない限り，これ以上の抑制対策は難しいと考えられる．一方，流入負荷をバイパスにより，速やかに流出させる方法は，初期の施設整備に費用を要するが，維持費用は，流入負荷抑制対策等の施設と比べて有利である．

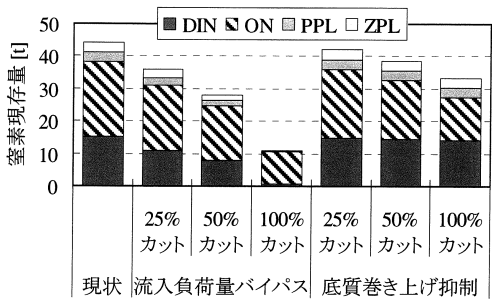


図-4 調整池への窒素流入負荷量除去率及び底泥からの巻き上げ抑制率とそれに対する窒素現存量の比較

流入負荷は洪水時に増大し，平水・低水時には調整池内の水質より低い傾向にある[1)]．このため，系外放流については，洪水時にバイパスさせ，平水時には希釈効果を期待して，系内に導入する等，降雨状況等に応じて，対策実施の有無を変えていくことが重要と考えられる．一方，洪水時に流入する負荷を全て系外へとバイパスさせることは防災面等の面から難しいと想定されることから，防災上の調整池の水位管理と洪水時の排水門からの放流可能な量を検討する必要があると考えられる．

5. おわりに

本検討では，諫早調整池における生物動態を考慮した物質収支モデルによる水質改善の手法について一定の方向性を示すことができた．一方，計算にあたっての条件やモデル構造には改良が求められる点が残り，今後はモデルの精緻化や改善手法の実効性を確かめる必要がある．

謝辞：本研究にあたっては農林水産省九州農政局の貴重なデータを使用した．ここに記し，感謝の意を表します．

参考文献

1) 諫早湾干拓調整池等水質委員会：諫早湾干拓調整池等水質委員会検討結果の取りまとめ，九州農政局ホームページ，2007.
2) 長崎県：第2期諫早湾干拓調整池水辺環境の保全と創造のための行動計画，長崎県ホームページ，2008.
3) 国土交通省河川局河川環境課：自然浄化力を利用した新たな水質改善手法に関する資料集(案)，国土交通省ホームページ.
4) 九州農政局諫早湾干拓事務所：諫早湾干拓調整池の自然環境，長崎県ホームページ，2008.
5) 九州農政局北部土地改良調査管理事務所：平成 24 年度農業生産基盤保全管理等推進環境調査環境モニタリング解析業務報告書，2013.
6) 九州農政局諫早湾干拓事務所：諫早湾干拓事業諫早湾地域生物等評価検討委託事業 報告書，2002.
7) T.R. Persons，高橋正征，B. Hargrave (高橋正征，古谷研，石丸隆監訳)：生物海洋学 1 プランクトンの分布/化学組成，pp.59-73，東海大学出版会，1996.
8) (財) 九州環境管理協会有明研究会：有明海の物質収支と環境変動研究報告書，2003.
9) 湯浅岳史，雨宮由佳，吉田正彦：印旛沼の水収支および物質収支の算出，平成 17 年度第 40 回日本水環境学会年会講演要旨集，2006.
10) 細見正明，須藤隆一：手賀沼における窒素およびリンの収支，水環境学会誌，Vol.15，No.2，pp.105-112，1992.
11) 中田喜三郎：第 19 回琵琶湖研究シンポジウム記録①湖沼沿岸域および内湖の物質循環，琵琶湖研究所所報，No.19，pp.84-96，2000.