石狩川河跡湖周辺地域の土地利用と湖水環境

Water Environment of Oxbow Lake and Landuse of its Watershed in the Ishikari River Basin

山本忠男*・神戸敏光**・長澤徹明*・井上 京*

YAMAMOTO Tadao*・KANBE Toshimitsu**・NAGASAWA Tetuaki*・INOUE Takashi*

(*北海道大学大学院農学研究科, **農林水産省)

(*Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, **Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries)

I はじめに

石狩川流域に点在する河跡湖は地域独特の景観要素であるばかりでなく、農業用水源や排水の受け皿¹⁾、循環灌漑の中間貯留池²⁾などの機能を有している。さらには、水辺の生態空間形成やレクリエーション等の親水機能が期待されるなど、河跡湖は重要な地域資源と位置づけられている³⁾。

一方、閉鎖性水域の形態をとる河跡湖は、さまざまな外部因子により影響を受けやすい状況におかれている。とくに水質悪化は、河跡湖の直接的な利用や生態的側面において、地域資源の価値を低下させるおそれがある。そのため、河跡湖の持続的な利活用には、水質保全に対する十分な配慮が必要である。本研究では、河跡湖水質と影響要因との関わりを定量的に評価することで河跡湖の水質形成機構を明らかにし、そこで得られた知見をもとに、河跡湖の水質保全に資する地域の土地利用、管理について検討を加えた。

藤沼は農業用水源として利用されている石狩川河跡湖のなかでも、全窒素濃度(T-N)が比較的高い河跡湖である。沼の集水面積は107haであり、その内訳は水田64.5ha(60%)、畑地28.7ha(27%)、その他13.8ha(13%)である。伊藤沼集水域の農地には、伊藤沼(2箇所)と菱沼(1箇所)に設置されたポンプで揚水され、パイプラインによって灌漑用水が供給されている。菱沼掛りの農業用水は伊藤沼と産化美唄川に排出される。伊藤沼掛りの農業用水は、伊藤沼に還元されるものと、美唄川に排出されるものに分けられる。産化美唄川は美唄川と合流し、その後、美唄川は石狩川に合流する。また、伊藤沼には樋門が1箇所あり、樋門からの流出水は美唄川を経由して石狩川に流入する。

図1 調査地の概要

II 調査

1. 調査地概要

河跡湖の水質と集水域の土地利用との定量的な関係を明らかにするため、石狩川下流域の美唄市に位置する伊藤沼で調査を実施した(図1)。伊

2. 調査方法

調査期間は2002年4月～2003年11月までの、主に積雪期を除いた期間である。2002年度は、灌漑期に約10日間隔、非灌漑期には約1カ月間隔の頻度で伊藤沼(④、⑤)、沼に流入する排水路(①～③)、沼から流出する排水樋門地点(⑥)にて採水した。また、非灌漑期には不定期に降雨時にも採水した。2003年度には、沼(④)に自動採水器を設置して、灌漑期に12時間間隔、非灌漑期に24時間間隔で採水した。排水路(①～③)、排水樋門(⑥)での採水は、灌漑期には約10日間隔、非灌漑期には約2週間間隔で実施した。また不定期に、田面水、水田からの暗渠流出水、菱沼(⑦)、および降雨を採水した。水質分析項目は、全窒素(T-N)、硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素($\text{NH}_4\text{-N}$)、全リン、リン酸態リン、浮遊物質、化学的酸素要求量、主要イオン(K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} など)である。なおOrg-NはT-Nから $\text{NO}_3\text{-N}$ 、亜硝酸態窒素、 $\text{NH}_4\text{-N}$ を差し引いて求めた。また、伊藤沼(④)、排水路(①～③)、排水樋門(⑥)に水位計を設置し、10分間隔で連続的に水位データを記録した。各種気象データは美唄観測所のAMeDASデータを用いた。

なお、本来、積雪・融雪期は非灌漑期に含まれるが、本文中では区別し、非灌漑期は積雪・融雪期間を含まない期間(おおむね9～11月)とした。

Ⅲ 伊藤沼の水質水文環境

1. 伊藤沼の水文環境

伊藤沼の水位は灌漑期に高く、非灌漑期に低い傾向が見られた(図2)。とくに、灌漑期から非灌漑期に移行する8月下旬から9月上旬にかけては、急速な水位低下が認められた。伊藤沼は灌漑期に農業用水源や中間貯留池として機能させるため、水位を高く調節し、非灌漑期には洪水調節機

図2 伊藤沼の水位変動

図3 伊藤沼の窒素変動(2002年)

能を目的として、水位を下げるように、樋門を操作している影響である。その後、秋雨に伴う水位の上昇が見られるが、11月上旬から11月中旬にも急速な水位低下が認められた。非灌漑期のこのような水位変動は、融雪水の流入に備えた樋門操作が原因と考えられる。

2. 伊藤沼の水質環境

窒素の濃度変動を図3に示す。T-Nは代かき前(5月上旬)から高濃度であり、移植前の排水によってさらに上昇した後、濃度が低下する。その後の普通期は低濃度で推移し、10月下旬頃から再び濃度が上昇する。窒素の成分割合(図4)は、春期には $\text{NO}_3\text{-N}$ の割合が高く、夏季に向けて徐々に低下している。そして $\text{NO}_3\text{-N}$ の低下に伴いOrg-Nの割合が上昇する。夏季以降は、Org-Nの割合の低下とともに、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の割合が上昇している。このような窒素成分の変動は、ため池を対象とした既往の研究^{4,5)}と類似した挙動である。夏季の $\text{NO}_3\text{-N}$ の低下とOrg-Nの上昇は、脱窒によ

図4 窒素の構成割合 (2002年)

表1 各排水の流量加重平均濃度

	2002		2003	
	灌漑期	非灌漑期	灌漑期	非灌漑期
排水①	0.89	4.26	0.85	4.56
排水②	0.97	7.67	1.02	7.31
排水③	0.79	4.22	0.80	4.22

(mg/L)

る影響と沼内の窒素が藻類に取り込まれ、有機懸濁態窒素として存在形態を変えることに起因すると推察できる。

閉鎖性水域の水質保全をはかるためには、流入水の水質濃度とともに負荷量 L を考慮することが重要である。集水域から伊藤沼に流入する各排水路での $T-N$ の $L-Q$ 関係からもとめた流量加重平均濃度(表1)より、各排水路とも灌漑期に低濃度であり、伊藤沼の $T-N$ 濃度の希釈に寄与していると推察できる。一方、非灌漑期は伊藤沼の $T-N$ 濃度より高く、伊藤沼の濃度上昇の一因になっている。排水路の $T-N$ 濃度が灌漑期と非灌漑期で異なる要因は、施設管理用水の有無による希釈割合の違いと考えられる。

IV 水質モデルの構築

水質保全計画の策定にあたっては、湖沼集水域の諸特性と湖沼水質とを関連づけるモデルの構築が有効である。そこで本研究では、集水域から伊藤沼への負荷流出モデル、伊藤沼での内部モデル、積雪・融雪モデルのサブモデルからなる伊藤沼の

図5 タンクモデルによる水位変動シミュレーション

水質水文モデルの構築を試みた。

1. 負荷流出モデル

負荷流出の基本となる水収支解析には、複合タンクモデルを用いた⁶⁾。伊藤沼は農村地帯に位置し、集水域内の土地利用は水田や畑地が卓越することから、水田と畑地のタンクを設定した。タンクモデルのパラメータは、2003年の排水路流量の実測値をもとに、試行錯誤法で同定した。判定基準は、 χ^2 を小さくするもので、実測値-推定値の相関が有意なものとした。伊藤沼の水位のシミュレーション結果を図5に示す。灌漑期には誤差もみられるが、非灌漑期では概ね一致した。灌漑期に誤差が生じた原因は、ポンプ操作などの人為的影響によるものと考えられる。

集水域から伊藤沼への負荷流出については、表面流出や畦畔浸透は排水路を介するとして排水流量に $L-Q$ 式を適用した。排水路を介さない地下流出は溶存成分が主であることから、タンクモデルで分離された地下流出水量に濃度係数を乗じて負

図6 推定脱窒速度（内部モデル）

荷流出を推定した。水田タンクの濃度係数は、灌漑期は定期的に採水した田面水の T-N 濃度（0.36～1.31mg/L）を、非灌漑期には暗渠排水中の T-N 濃度（1.32mg/L）を用いた⁷⁾。いずれの値も集水域内の実測である。畑地タンクでは、農地への過剰な窒素が年降水量の半分の水で浸透流出するとした仮定⁸⁾にもとづいて推定した。なお施肥量の実態⁹⁾（11.5kg/10a）と適正量⁹⁾（7.0kg/10a）の差を過剰窒素量とした。

2. 内部モデル

湖沼内部での物質変化に関しては生態系モデルがよく用いられる。しかし、生態系モデルには、非常に多くのパラメータをいかに決定するかという課題がある。そこで本研究では、伊藤沼内部での物質変化を単純化するために、窒素（脱窒）によって検討することにした。底質では無機化された窒素のほとんどが脱窒によって取り除かれ、湖沼全体では硝酸消失の 20～80%は脱窒によると報告されている^{10,11)}。今回の調査では、脱窒速度を実測していないので、大清水池を事例とした既往の研究成果¹²⁾に、水温による速度低下を勘案した補正係数¹³⁾（0.6）を乗じて伊藤沼での脱窒速度を推定した（図6）。ただし、伊藤沼は大清水池にくらべて低温であり、また窒素濃度も低いことから、脱窒速度を過大に評価している可能性がある。

3. 積雪・融雪モデル

冬季の石狩川流域は長期間積雪があり、また湖沼が結氷するため、この時期は著しく異なった水

図7 正味降水量の推定

質水文環境にあると予想される。そのため、石狩川河跡湖の水質環境の実態や水質形成機構を正確に評価するには、積雪・融雪期の状況を含めて検討する必要がある。

そこで本研究では、積雪・融雪計算法を加味して、積雪・融雪期の水質水文環境を推定することを試みた。積雪・融雪量の推定には、加藤ら¹⁴⁾が提案した計算法を適用した。積雪・融雪計算法から出力され、タンクモデルに入力される水量を正味降水量と定義する。正味降水量の計算結果を図7に示す。12月中旬から3月中旬にかけては、正味降水量がほとんど無く、降水量の多くは積雪として集水域に蓄えられる。そして蓄えられた積雪は、3月中旬から4月中旬にかけて、融雪流出として伊藤沼に短期間に流入すると推定された。

4. サブモデルの統合

3つのサブモデル（負荷流出モデル、内部モデル、積雪・融雪モデル）を統合した伊藤沼の水質シミュレーション結果を図8に示す。なお、計算値は伊藤沼の水位観測が開始された2002年5月30日から2003年11月26日までである。2002年、2003年ともに、概ね良好な結果が得られた。2002年、2003年の両年で、非灌漑期に誤差がみられるのは、降雨に伴う負荷流出の推定精度などが原因と考えられる。降雨時の負荷流出は、先行晴天期間、降雨強度、先行降雨の流出規模等に影響を受けるが、本シミュレーションは、これらの因子

図8 水質シミュレーションの結果

図9 期別負荷流入量の推定

をパラメータに組み込んでいないため、誤差が生じたものと考えられる。また、実測値のない積雪期に関して、積雪初期のT-N濃度は高かったが積雪期を通じて徐々に低下し、3月中旬から4月中旬の融雪期に急上昇する結果となった。積雪期は正味降水量がほとんどなく、伊藤沼への負荷流出も非常に少ない。そして、脱窒による窒素の消失が卓越することから、T-N濃度は低下する。融雪期には正味降水量に伴い伊藤沼への流入水が急増し、多量の負荷が流入するためT-N濃度が急上昇したと考えられる。

V 水質シミュレーション結果

1. 期別の負荷流入割合

図10 水田面積率の変化にともなう水質変化のシミュレーション

5月から8月までを灌漑期、9月から積雪が始まるまでを非灌漑期、積雪から融雪を経て灌漑が始まるまでを積雪・融雪期として、各期の負荷流入量が年間の総流入量に占める割合を算出した(図9)。対象期間は2002年9月1日から2003年8月31日の1カ年である。

積雪地域では、融雪期の水質成分の流出負荷量や流量が年間の総流出量に占める割合は極めて高いといわれる。伊藤沼の場合、流入水量は灌漑期で年間の8割近くを占めるが、T-N総負荷に占める灌漑期の割合は3割に過ぎず、T-N負荷の約半分は積雪・融雪期に流入すると推定された。

2. 土地利用変化シミュレーション

伊藤沼の水質保全に資する土地利用や水管理を定量的に評価するため、水田から畑地への転換を将来シナリオとして与え、伊藤沼の水質をシミュレートすることで水質保全に対する土地利用・管理の影響を検証した。集水域内の農地面積に占める水田と畑地の面積割合を、各々水田面積率、畑地面積率と定義する。現状での水田面積率は約70%であるが、これを50%、10%としたときの伊藤沼のT-N濃度のシミュレーション結果を図10

に示す。これによると、水田の畑転換が進むとともに、伊藤沼の T-N 濃度は上昇傾向を示した。ため池を対象にした既往の研究では、集水域内の畑地率が高いほど T-N 濃度が上昇し、水田率が高いほど T-N 濃度が低下する傾向がある⁵⁾と報告されており、分析結果はこれと付合するものとなった。

IV まとめ

伊藤沼の水質水文環境は集水域の農地利用や水管理に強く影響されており、灌漑期には概ね良好な水質で経過するものの、代かき期や非灌漑期には水質悪化が認められた。また、水質水文モデルから、伊藤沼への流入水量は灌漑期が年間の約 8 割を占めるが、窒素負荷流入は 3 割程度に過ぎず、5 割近くが積雪・融雪期に流入すると推定された。以上のことから積雪寒冷地域の湖沼における水質変動が把握できたが、その詳細な要因については不明な点があり、今後はパラメータの感度分析などをおこなって検討することが課題である。水質保全の観点からは、集水域の農地利用形態は畑地よりも水田が好ましいことが確認された。水質保全のみを目的とした営農は困難であるが、河跡湖の地域資源的価値を損なわないためには、営農との関わりを十分に配慮した対応を模索していく必要がある。

引用文献

1) 草 大輔・山本忠男・長澤徹明・井上 京 (2001) :

治水機能からみた石狩川河跡湖の地域資源的評価, 農村計画論文集 3, pp.67-72

2) 山本忠男・長澤徹明・井上 京・草 大輔 (2001) : 石狩川河跡湖の水質保全機能に関する評価, 農村計画論文集 3, pp.49-54

3) 山本忠男・長澤徹明・井上 京 (2002) : 石狩川河跡湖の利用と周辺農地が水質に及ぼす影響, 農村計画論文集 4, pp.157-162

4) 細見正明・須藤隆一 (1992) : 手賀沼における窒素およびリンの収支, 水環境学会誌 15 (2), pp.105-112

5) 中曽根英雄・黒田久雄・渡辺政子・田淵俊雄 (1998) : ため池の窒素・リン濃度と集水域の土地利用, 水環境学会誌 21 (2), pp.83-87

6) 丸山利輔・富田正彦・小林慎太郎 (1979) : 複合タンクモデルによる広域農業用水需給解析 1, 農土誌 47 (2), pp.97-102

7) 北海道農業試験場環境化学部環境保全科 (1996) : 水田における窒素フローの把握, 北海道農業試験会議資料

8) 松本成夫 (1997) : 農村地域における窒素フローの評価に関する研究, 日土肥誌 68 (3), pp.247-248

9) 北海道農政部農業改良課 (1996) : 化学肥料等使用実態調査報告書, pp.4-16

10) Seitzinger, S.P. (1988) : Denitrification in freshwater and coastal marine ecosystems, *Limnol Oceanogr.* 33, pp.702-724

11) Madsen, P.P. (1979) : Seasonal variation of denitrification rate in sediment determined by use of ^{15}N , *Water Research*, 13, pp.461-465

12) 戸田任重・松本英一・宮崎龍雄・芝野和夫・川島博之 (1994) : 灌漑用溜池における硝酸態窒素の消失, 日土肥誌 65 (3), pp.266-273

13) Welander, U. (2003) : Denitrification at low temperatures using a suspended carrier biofilm process, *Water Research*, 37, pp.2394-2398

14) 加藤 徹・佐藤晃三 (1985) : 融雪流出解析における積雪・融雪計算について, 農土論集 115, pp.9-15

Summary

The model of water quality and hydrology of the Ito-numa oxbow lake is proposed by integrating Tank Model of runoff, denitrification and snow melting. Nitrogen flows into the oxbow lake was simulated. The following results were obtained. Inflow of water during irrigation period account for 80% of total amount, but inflow of nitrogen load account for only 30% of annual loading. And 50% of the total amount of nitrogen load flows into the lake during snow melting period. In addition, it's expected that landuse exchange from paddy field to upland field causes eutrophication of the oxbow lake.