

八郎湖の水質と水質汚濁機構の解析

－ 八郎湖の水循環と汚濁負荷特性 －

秋田県立大学 生物資源科学部

近藤 正

1. はじめに

湖沼やため池など、貯水機能や断面拡張により流下速度が著しく低下し滞留を生じる水域を閉鎖性水域と呼ぶ。閉鎖性水域では流域からの栄養塩類や懸濁物質が供給されると物理的、生物的、化学的作用を受けて新しい循環系へ取り込まれ、養分などは蓄積する方向に推移する。自然の要因に加え人間活動の影響が過度に加わると蓄積速度が急激に早まる。湖沼など閉鎖性水域の急激な富栄養化問題はすでに各地で発生し多くの対策が講じられ着実な成果を上げている地域も一部にある。その対策の基本には発生源における負荷削減と水域からの汚濁物質の除去・浄化の二つに大別される。適切な浄化設計のためにはそれぞれの湖沼における汚濁機構の解明が必要となる。特に農地などの面源からの負荷は人為的要因と自然的要因を受け流量と濃度の変動を伴って発生し栄養塩類が閉鎖性水域に排出される。濃度管理から総量規制へと汚濁対策が進んできたが、面源負荷についてはその実態評価と対策への反映の具体化が大きな課題といえる。特に11指定湖沼の中で人口や工場・事業所が少なく農地の面積率の大きい八郎湖においては面源負荷対策が重要といえる。ここでは、流域の水循環と汚濁との関連性を「負荷量」の変動と負荷収支評価の面から考察するとともに、対象地域ごとに汚濁負荷量を定量的に評価することに加えて動的に評価することの意義について確認する。

2. 八郎湖の水利・水文構造の特徴と水質汚濁の現状

1) 八郎潟干拓と水質汚濁

八郎潟干拓地は、我が国第二の湖、八郎潟22,024haの湖底の肥沃な土壌の農地利用と残存水域の調整池利用という、大規模な水域環境の構造改変を伴った農地・農村開発であった。汽水湖八郎潟の約8割を干拓した後の残存湖（八郎湖）は干拓地の農業用水を確保する調整池として防潮水門により海と遮断、淡水化、堰上げされ干拓地に農業用水を供給する水源となり、流域流出水と干拓地排水を貯え反復および循環利水する水利構造が新たに構築された。4,564haの八郎湖は、東部承



図1 八郎湖の負荷収支調査地点

水路および南側の調整池が連続しており、西部承水路は南側（南部排水機場）と北側（浜口機場）より不足水の供給または余剰水の排出がゲートとポンプ操作により東部承水路との間で行われ、日本海の平均潮位と同じ水位に管理されている。湖面より低い干拓地からのポンプ排水は調整池および東部承水路に排水される。

このように八郎潟から八郎湖への地理的变化により、水利・水文構造も大きく変化した。加えて、農地の大幅な増加と干拓以降の高度経済成長による大量消費型の生活様式の変化や、大規模かつ集約的な農業様式への転換が流域で進んだ。これに伴い八郎湖では干拓以降富栄養化が進み、1970年代には湖水全域でアオコが発生している。1987年の海水流入でシジミが大量に発生し約5年間はアオコの発生はなく水質改善が見られたが、その後は再び毎年夏期には全域でアオコが発生し、ワカサギの出荷停止や上水の給水被害、無酸素水塊の発生など、慢性的な富栄養状態に陥っている。2007年12月に環境省により11番目の指定湖沼の指定を受け、中央干拓地大潟村は全域が流出水対策地区に指定された。人為的な開発により新たな農業地域が生まれたが、一方で調整池として貯水された八郎湖は富栄養化という新しい問題を抱えることとなった。

2) 八郎湖の水利構造の特徴

中央干拓地の取水量は年間約3億 m^3 、八郎湖の貯水量の約3倍に当たる。干拓地からの排水量は、降水や堤防浸透などの湧水も含め年間約4.5億 m^3 がある。中央干拓地の農業用水は干拓地を取り囲む19カ所から取水され、降水など余剰水は中央部を走る幹線排水路を経て、主に $40\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ の排水能力を持つ南北の排水機場から電力により機械排水される。

湖水位は、東部承水路と調整池域は連続してお

り灌漑期間は海拔+1m、非灌漑期は+50cmに、西部承水路は通年日本海の平均潮位である海拔+35cmに維持される。西部承水路からも中央干拓地の水田の約半分の面積が灌漑水を引いており、流域面積と貯水量の小さい西部承水路へは北と南の給水地点にて東部承水路と調整池から不足分が供給される。降雨流出時には、西部承水路流域の余剰水はポンプで東部または調整池へ排出され、湖岸地域の湛水を防いでいる。中央干拓地の幹線排水路は海拔-6.3mに維持され、干拓地内の陸域を維持してきた。

3) 干拓に伴う湖水域の水文特性と閉鎖度の変化

約6.6億 m^3 の貯水量が干拓により約1.1億 m^3 に減少したが、流域面積はほぼ変わらず年間で貯水量の10倍以上の流出がある。閉鎖水域への流下による栄養塩類などの到達物質は、外域への流出の前に滞留水域内の物質循環過程に取り込まれる。八郎潟干拓による湖水面積と貯水量の減少は、地形的な評価からは閉鎖度を下げたが、灌漑期の水源確保のための高水位管理と海水の出入の遮断は閉鎖度を高めた。一方で、国有林の伐採や民有林の荒廃は流域河川の洪水流出強度を高め、基底流量を減少させた。潟水期は流域水田における水利用も加わり、滞留時間と閉鎖度をさらに高めている。図2は、2005年の八郎湖から日本海へ放流された水量の日変動を示したものである。流出は春の雪解け時や大降雨時に突出している。また図3は放流量の累積値を示している。年間累積量は貯水量の10倍以上だが、時期的に滞留時間が大きく異なることが判る。

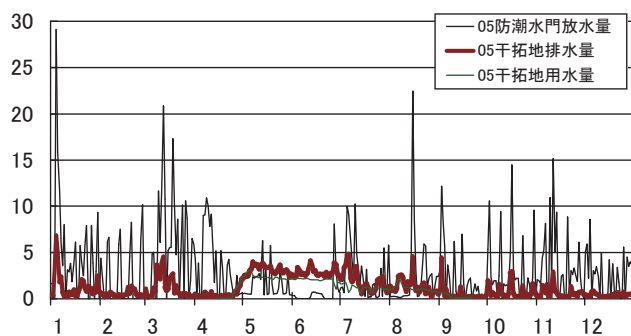


図2 日本海への放流量と干拓地用排水量日変動 (2005年)

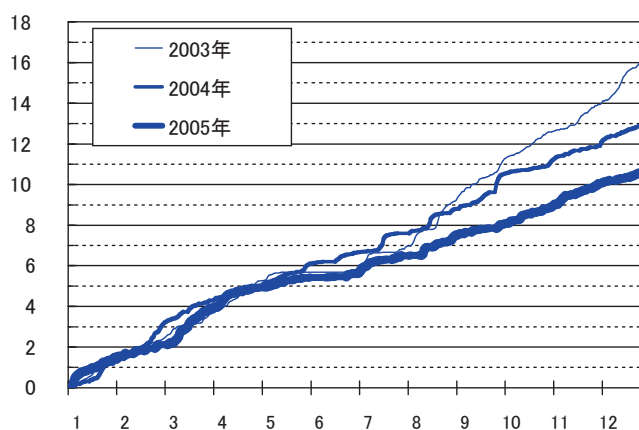


図3 日本海への累積放流量 (八郎湖防潮水門流量)

3. 汚濁負荷収支からみた八郎湖の富栄養化機構

1) 湖沼の富栄養化問題と負荷量測定の意義・目的

人為的活動による要因と自然の物質循環による汚濁成分の流出は、時刻変動や日変動、季節的変動、濃度と流下水量（流量）の変動を伴って、閉鎖性滞留域に到達する。生態系や土壌循環系、あるいは大気循環系への移行速度のラグとして富栄養化速度に応答することから、水系外への除去となる。点源（ポイント・ソース）と面源（ノンポイント・ソース）に大別できるが負荷量を測定することは、おのおのの発生源を定量的に評価するとともに、これにより対策の検討が初めて可能になる。これが概算であれば十分な対策に辿り着けないとともに、対策の効果を評価することもでき

ないことになる。「負荷量」^{6), 7)}に関する概念は田淵によって整理されている。負荷量は流量と水質・濃度という変動因子と変動因子の積で求まる。測定頻度によって“概算”の負荷と日々変動する“動態”負荷の意味が測定値には含まれることになる。しかしながら、詳細な測定には多大な労力が必要となる。そこで流域の特性を一定の測定結果を基に負荷量と流量の相関関係から求めるL-Q式を求め推定する方法や、発生源の総量に単位当たりの発生量である「原単位」を乗じて発生負荷量を推定する原単位法などで概算として求める場合もある。しかしこれらはあくまでも概算であり、推定式は基となる測定値とその頻度に左右され影響が残ると共に、汚濁要因の経時的变化に対応できない。また原単位は、流域内での農業用水の反復利用やその影響域の変化を表現しきれない。加えて急激な降雨流出などイベント型流出や農作業による影響量の分離など原因や汚濁負荷特性の

解明には至らない場合が多い。対策効果の定量的評価においても流出する“動態負荷”の実測が必要となる。一見便利な予測方法もその根拠となる実測値の精度に支配される。目的と意味を十分に踏まえて利用すべきであり、落とし穴に注意する必要がある。

2) 八郎潟中央干拓地（流出水対策地区）における汚濁負荷収支と干拓地からの差引排出負荷量

八郎潟から八郎湖への変遷の中で、様々な汚濁要因が付加され定量的評価手法の開発などが課題となるが、ここでは八郎湖に出入りする水量と栄養塩類濃度変動の測定結果を基にして、汚濁物質

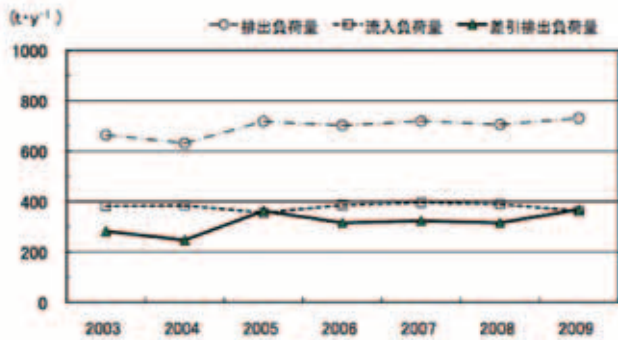


図4 中央干拓地年間N差引排出負荷量の推移 (2005年)

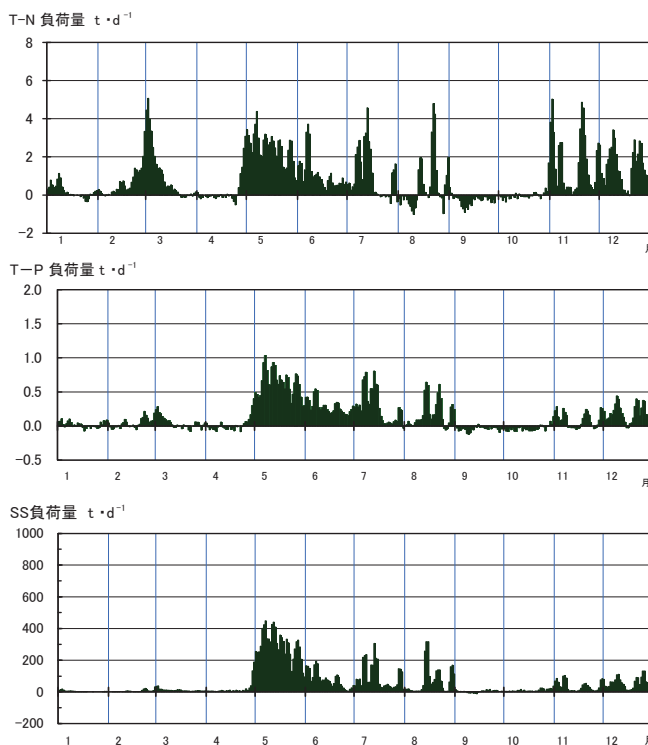


図5 干拓地N、P、SS 差引排出負荷量 (2008年)

の移動量：負荷量の変動について考察する。平均の滞留時間が約一ヶ月程度ということは、毎月、毎週に1回程度の水質測定頻度では負荷量の推定に大きな比率で誤差が含まれることになる。流出量の変動や栽培時期に応じて毎日から隔日程度の水質測定を基にした評価から汚濁負荷の動態について検証し、定量的評価から浄化対策の方向性とポイントについて考察する。

流出水対策地区に指定されている八郎潟中央干

拓地からの窒素の差引排出負荷量^{8)、9)}の7年間の推移を図4に、窒素、リン、SSの2006年からの3年間の日変動を図5に示す。差引排出負荷量は、次式で表され、それぞれの経路ごとに測定したものである。

干拓地差引排出負荷量

= 南部排水機場+

北部排水機場の排出負荷量

− (用水負荷量+降雨負荷量+

堤防浸透負荷量)

中央干拓地からは毎年250t以上、大きい年では約400tの差引排出負荷がある。2008年は春先の乾燥による用水不足と余水削減効果により汚濁負荷が削減されたが、2009年は流動化による取水負荷の減少、田植え時期に重なる降雨流出の発生などで差引排出負荷が増加した。

日変動では、代かき田植え時期に $2t \cdot d^{-1}$ 以上の排出が一ヶ月近く継続し $10t \cdot d^{-1}$ 以上の排出も観測されこの年の最大日排出量となった。また非灌漑期間にも $2t \cdot d^{-1}$ 以上の排出が数回あった。排出負荷抑制のための施肥方法や圃場管理が必要である。さらに2008年は6、7月にも大きな排出があった。図6は西部承水路への通水量を示して

いる。2005年からは7月以降、2009年は灌漑初期から、西部承水路への給水を干拓地北側の浜口機場主体にしたため、南部排水機場から吐出された栄養塩の負荷は干拓地水田に循環灌漑されず、大半が調整池へ排出された。灌漑後半の浜口からの流入と南からのポンプ排水は、「流動化」による操作状況である。

干拓地への取り込みによる浄化(差引排出負荷が-値)は、調整池でアオコが発生し灌漑水中の

窒素濃度が上昇した7、8月頃に毎年数日間認められた。

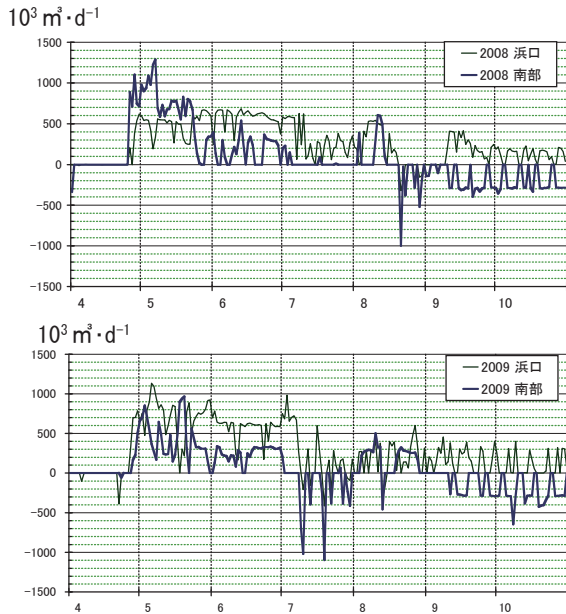


図6 西部承水路への通水量(上:2008,下:09年)
+ : 西部承水路への給水、- : 承水路からの機械排水

2) 干拓地水田用水の水質変動特性

反復利水は同一河川の上流水田の排水を下流水田で再利用する灌漑形態で、循環灌漑は同一地区の水田排水を再利用する灌漑形態である。反復利水は上流地域からの汚濁負荷を下流部の水田が取り込み浄化するとともに、その水田の落水で新たな負荷を下流部に排出する。循環灌漑では落水時は負荷が一旦排出されるが、水田負荷は同一地区の水田に再供給され浄化される。

八郎湖に到達するまでの河川流域は反復利水域であるが、八郎潟中央干拓地は、循環灌漑と反復利水の混在域であり、取水地点別の取水量や西部承水路への給水量などの循環水と河川流入水の湖内流動が負荷収支に影響を与える特殊な形態といえる。同じ中央干拓地内の水田でも、取水地点と干拓地排水の排出地点との位置関係や水量管理から反復利水の中で上下流関係を形成する。主に南部排水機場から西部承水路への給水を行う場合に

は干拓地排水がほぼ直接取水され、その循環灌漑域は約5千haとなるが、浜口機場から全量給水する場合の循環灌漑域は500ha程度に減少することにもなる。

各取水地点における水質変動特性はこの灌漑形態の特徴を表すものとなっていた。図7は特徴的な取水地点の窒素濃度変動を、図8は干拓地排水の全窒素と全リンおよびSS濃度の変動を示したものである。南部排水機場からの排水を循環灌漑した西部承水路南側地区の用水は、代かき田植え時期に濁水による影響で窒素濃度が上昇するが普通灌漑期には低下し、農業用水基準の $1\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ よりやや高めを推移する。これに対し、調整池に面した地点は灌漑初期の4月から6月上旬に掛けては雪解け水の影響で $0.6\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 程度の低濃度で推移するが、7月から8月にかけて、アオコの発生と浮上、季節風による吹き寄せなどで高濃度を呈していた。

循環利水地区における灌漑初期の濁りは、水田から流出した懸濁成分であり、農業用水の直接流下水(余水)により排水路で混合・希釈され、八郎湖に達している。循環利水は、一度水田から流出した土壌養分を干拓地内へ再び取り戻し調整池への拡散を抑制しているが、そこには余水による希釈と、循環速度を速め調整池水域へ負荷を拡散するという二つの要素を含むことになる。循環利水構造を活かした汚濁負荷の削減効果を高めるに

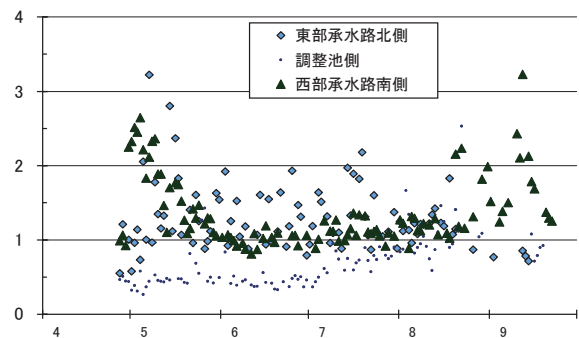


図7 中央干拓地取水地点別のN濃度(2008年)

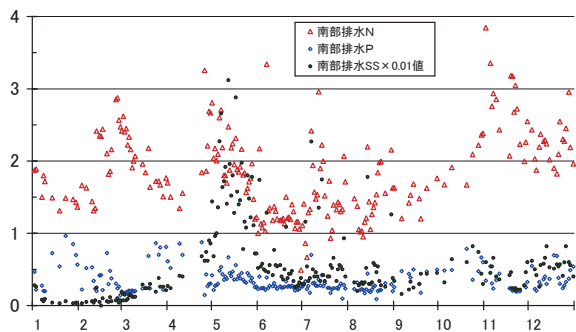


図8 干拓地排水のN・P・SS 濃度 (2008年:南部排水)

は、余水量を削減し希釈率を下げ排水量に対する再利用率を高めることが必要となる。また西部承水路南側と東部承水路南側の、従来の循環灌漑域は、調整池域に比べ流路が狭く常に流れがあるため、調整池からの余水によるアオコそのものの循環がない限りは、循環灌漑域での夏期のアオコの増殖による窒素濃度上昇は起こりにくい。このように余水削減は循環灌漑による水田の水質浄化機能の増強につながる。西部承水路への供給を北側の浜口機場を主体にした場合、南側での干拓地排水の循環利水量は減少し、干拓地からの汚濁負荷の多くは調整池に直接排出される。

農業用水における水質面の懸念は、代掻き期の濁水ではなく、アオコの発生と湖面での濃縮である。アオコの発生期は開花期に当たり、水田で多量の灌漑水を必要とするため、アオコの大量混入は窒素過多の可能性を高める。 $5\text{mgN}\cdot\text{L}^{-1}$ の用水を 200mm 灌漑すると $1\text{kg}\cdot(10\text{a})^{-1}$ の窒素を水田に供給したことになる。 $5\text{mgN}\cdot\text{L}^{-1}$ は実際に起こり、さらに高濃度にもなる場合がある。

3) 流域河川負荷と干拓地の影響量比較¹⁰⁾

干拓地差引排出負荷、河川負荷、防潮水門放流負荷量の3年間の毎月値を図9に示した。

年間の調整池への流入負荷量のうち中央干拓地の影響量は、2003年は28%、04年は24%、05年は22%となった。しかし夏期のアオコの発生への影響量を高水位管理が始まる4月20日以降、7月末までの間で比較すると、2003年以降60%、33%、55%となり流域最大の負荷発生源となっている。防潮水門からの放水量は、2003年以降、16、13、11億 m^3 があり、湖水量を1.1億 m^3 とすると、年間10回以上の流出があることになるが、それでも毎年アオコが発生するところに八郎湖の汚濁の深刻さがある。

河川別に負荷割合を図10に示した。これまで濃度測定結果から最も八郎湖の汚濁に影響していると指摘されてきた馬踏川は水田反復利用率が高く河川としての排出負荷ではさほど大きくない。最大負荷河川は流量の大きい馬場目川であるが、次いで三種川も大きく日本海への放流地点から最も遠い地点で八郎湖へ流入することから湖水域の最低濃度を引き上げている可能性もある。灌漑期間の負荷割合が大きいことも特徴であり、三種川の

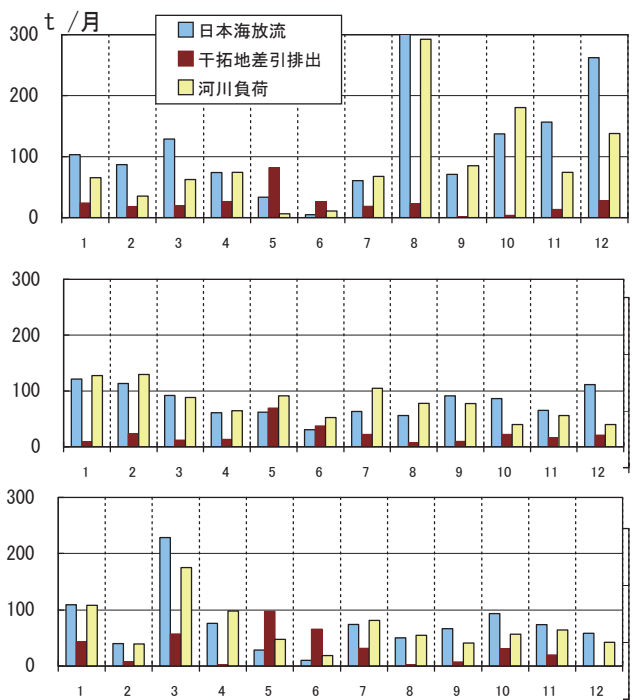


図9 八郎湖の月別N負荷収支 (上から2003, 04, 05年)

られる。また03年8月に発生したような大降雨での掃流現象がなかったことも蓄積を進める要因と考えられる。2005年は、5、6月の干拓地からの差引負荷が流域河川負荷を上回り、干拓地の影響が大きい年となった。

4. 八郎湖の流域汚濁負荷特性からみた水質改善の可能性

1) 農地負荷流域としての特徴

八郎湖は全指定湖沼中、最も農地負荷の比率が高い¹¹⁾。水田負荷が大きく、水田農業のあり方が問われている。寒冷多雪の東北日本海側にあり、年に貯水量の10倍以上の流出がある八郎湖に、毎年全面にアオコが発生することが、今日の集約性優先の農業の歪みが現れていると見ることもできる。代掻き濁水の管理、肥培管理や耕法など新しい農法の推奨もあるが、窒素流出負荷や漏水増加など技術的課題も多く、対策の推進も農家経営が優先されがちで弱い。水質浄化型農法の確立が技術課題である。また湖沼指定を契機に積極的な参加型地域活動も進められ流域意識の向上が伺える。流域内の水循環の中で要所となる浄化水田や水田浄化域の設置などの計画的流域水質浄化方策など、新たな地域共同の可能性が期待される。

2) 流出量と人為的水管理構造

八郎湖のもう一つの特徴は、滞留時間が短い流動性のある湖沼ということと、農業利水を軸にした人為的水管理機構を有し、その影響が湖水環境にとって大きな影響力をもっている点といえる。干拓地水田は、現在は最大の汚染源であるが、水管理によっては最大の浄化流域になりうる条件を備える。実態評価とともに個々の営農者の地域認識の獲得、さらには地域合意が大きな鍵を握る。

3) 汽水浄化経験と資源循環構造の構築

富栄養化の要因の一つとして、湖を介した物質循環の崩壊が挙げられた。その回復には湖水域の植生など生物相の回復と同時に生物の利用を必要とする。それが産業として地域住民の生業の中に構築され持続性が確保される必要がある。秋田は、湿田が多く好適な転作作物が少ない。休耕田や転作田を利用し、八郎湖と物質循環で連携する新しい農業の構築が必要である。農業など地域の自然維持型の産業の再構築で雇用を創出し、若者の流出を止める必要がある。

また海水が流入し一時的に汽水化した経験は、八郎湖にとって大きな可能性を示した。気象情報や水質の遠隔管理技術の発展など、開発当時には持ち得なかった情報管理技術や自然現象の評価方法などの科学技術の発展は、ハード面の改造なしに、管理汽水化を可能にする条件を備えてきている。ヤマトシジミの水揚げピーク量の半分の年5千tの水揚げ量は、1kgあたり千円とすると50億となり秋田県の沿岸漁業の水揚げ高を超えることになると同時に、窒素約150tの持ち出しとなる。

4) 地域特性を活かした水環境改善の追求を

人間が自然へ働きかける力の大きさは、自然構造を改造するまでに発展を遂げ、人間の都合における効果的利用を進めてきたが、八郎湖におけるアオコの発生は、様々な矛盾と示唆を私たちに示したといえる。何を優先しどのような資源管理や地域作りを進めるのか、十分な議論と地域合意を獲得する必要がある。その場合、地域特性の正確な評価は不可欠であり、やはり「持続性」が欠かせない基準となる。我が国最大の干拓事業八郎潟干拓は、戦後の食糧自給への気運と土木機械など土木技術の発展を基に、湖底地の優良農地化を達成した一成功例といえる。しかし、補償の対象となった漁業にとどまらず、汽水湖の担っていた機

能は干拓によって失われ、急激な富栄養化という形で表面化した。人類はどのような形であれ自然に働きかけて、食糧や生活物資を生産し生命活動を展開していることから、この干拓の否定もまた尚早であるが、年間11回分の流出量があるにもかかわらず毎年激しくアオコが発生する問題の深刻さを、直視する必要がある。

他の指定湖沼と比べても圧倒的に農地比率が高く、人口や畜産、事業所といった汚染源が少ない八郎湖の富栄養化問題は、①農村地域における水田湿地の浄化機能を評価した適正な水管理、②農業における資源管理と物質循環の適正化、汚濁負荷軽減と農業経営の両立、③自然生態系の浄化・生産能力の再生と資源管理産業である漁業の再生、④林業や中山間地農業など流域機能産業の再生、⑤持続可能な生活・産業圏の污水管理システムの確立といった課題を示している。

八郎湖の水環境の再構築は流域的課題であり、八郎湖干拓事業はこの意味でまだ未完成である。持続性や資源循環の視点は、湖沼の富栄養化問題にも該当する。資源や物質循環の定量的な評価や多様な水域や水界との接合点の状態評価に基づく自浄作用強化など、新たな段階の認識と対応が求められており、英知を結集し流域の課題を解決することは、八郎湖のような「限界水域」での使命である。

5. まとめ

秋田県立大学は、持続可能な人類と自然との共生を、農業農村地域において追究する課題に真剣に取り組んでいる。八郎湖の富栄養化による水質汚濁問題は、単に東北農業地域の一湖沼の水質汚濁問題として、通り一遍の対策を講じれば解決できる簡単な問題ではない。人類史の中の現代を象徴する地球循環系の歪みが顕著化した課題であり、自然、地理的条件のみならず、水文・水循環、

水管理などの水資源管理と物質循環、その中で営まれる現代型農業、その方向性を左右し支配する社会経済的圧力、さらには国、民族としての姿勢が関連する構造的な課題として捉えられるべきである。従って、本質的な解決に向かうためには、対策者も生活者もまた農業者も消費者も一つの象徴的課題として八郎湖の水質問題を認識する必要がある、その認識を獲得するための根拠が不可欠となる。アオコの激しい発生自体が象徴的であることは言うまでもないが、加えて本テーマであった汚濁負荷の解明の意義はこの点に集約される。つまり認識を獲得するための根拠に相応しい“確かさ”すなわち数値の精度が必要になるということである。私たちは、精度について常に検証を試みる必要がある、その前提を厳守した上でないと負荷量の課題を論ずることはできない。雑駁な値の役割は課題への導入時にこそ僅かに必要であれ、具体的な認識の獲得においては、いつまでもこの推定に頼りすぎるならば、むしろ解決を遅らせるばかりでなく、方向性を誤らせることにもなりかねない危険すらはらむ。複雑な要因の中から根本的な解決策を提案するためには、八郎湖における富栄養化と水質汚濁問題の因果の連鎖を追究、解明しこれを抑制し断ち切るために測定を続ける必要がある。そして自然と真剣に向き合うならば、対策の効果についても確かめ検証し続けるべきである。昨今我が国の多くの公共事業が事業実施前の影響評価を僅かに行うだけで、事業後の評価は事業前の“評価結果”を信じて見向きもしないまま放置し、人間活動の恩恵のみの経済評価で表面的な成功を飾ることが多い。我が国の“現代文明”の限界を感じざるを得ない。しかしながらこれを乗り越えなければ人類と自然との共生にたどり着けないことも揺るぎない真実である。自然や現象、事実に対し真摯に向き合い、真実を追究することこそ、時代の方向性を示すべき役割を担う科学の

役割、地球における人類と自然の共生に向かう総合科学・実学の役割は大きいことを強調し、実学分野からの今後の環境研究に期待する。

謝 辞

本研究の一部は、大潟村農地・水・環境保全対策推進事業活動として実施した。また秋田県八郎潟干拓地基幹施設管理事務所、東北農政局男鹿東部農地防災事業所、西奥羽調査管理事務所より八郎湖の水管理や構造に関する貴重な資料の提供を賜った。また現地実験、調査においては、大潟土地改良区、大潟村、秋田県生活環境部環境管理課八郎湖環境対策室および八郎湖内水面増殖漁業協同組合に多大なご協力を賜った。ここに記して謝意を表する。

引用文献

秋田県(2008) 八郎湖に係る湖沼水質保全計画(第1期)

男鹿市教育委員会(1998) 男鹿半島その自然・歴史・民族

秋田県(1924) 秋田県八郎潟土地利用概要

秋田県(1948-2005) 秋田農林水産年報

秋田県(1985-2005) 秋田県水産振興センター事業報告書

田淵俊雄, 安楽敏, 中曾根英雄, 柚山義人(1998) 清らかな水のためのサイエンス, 一地域環境工学シリーズ4 水質環境学一, 農業土木学会, 207pp.

田淵俊雄, 高村義親(1985) 集水域からの窒素・リンの流出, 東京大学出版会, 219pp.

近藤正(2006) 八郎湖への汚濁負荷流出と干拓地水田の影響, H17農業土木学会講演要旨集, 350-351

近藤正(2008-2010) 大潟村農地・水・環境保全向上対策推進事業平成19、20、21年度中央干拓地水質・汚濁負荷モニタリング報告書, 大潟村農

地・水・環境保全向上対策推進会議

近藤正(2006) 平成17年度東北農政局管内農業農村整備事業推進方策検討業務報告書, 農業土木学会

田淵俊雄(2009) 湖沼水質保全と八郎湖、農業農村工学会誌, 77(7), 563-566.