

降雨時流入負荷の湖内水質への影響

一琵琶湖赤野井湾での現地調査およびシミュレーション計算による検討結果一

大久保卓也・横田喜一郎¹⁾・東善広・市木敦之²⁾・沓掛洋志³⁾・西勝也⁴⁾

要 約

赤野井湾における水質調査および湾に流入する河川における汚濁負荷量調査、さらに水質シミュレーションモデルを用いた検討結果から次のことがわかった。

赤野井湾で増殖する植物プランクトンの現存量を減少させるためには、降雨時栄養塩負荷量の削減よりも平水時栄養塩負荷量の削減が効果的と考えられた。また、湾内外の水の交換を促進することが湾内の水質改善に効果的と考えられた。降雨時に供給される栄養塩負荷量は平水時負荷量に比べて同等かそれ以上である場合が一般的であるが、負荷量が多いからといって降雨時負荷量を削減することが必ずしも富栄養化問題の改善に結びつくわけではなく、植物プランクトン現存量への影響を定量的に評価した上で負荷削減の必要性を検討することが重要であることが本研究でわかった。ただし、本研究で検討したのは、降雨時の栄養塩負荷の影響に限定したものであり、降雨時には栄養塩の他に、道路面に堆積した石油系化学物質などの様々な化学物質が流出してくるため、それらの水質や生態系への影響評価が別途必要である。それは今後の研究課題である。

1. はじめに

下水道整備や排水規制による生活排水、工場・事業場排水等の特定汚染源（点源）からの負荷削減対策が年々進展している中で、農地等の非特定汚染源（面源）からの汚濁負荷削減対策が十分に進展しておらず湖沼水質保全における課題になっている（中央環境審議会，2005）。しかし、面源負荷の中で量的に大きな割合を占める「降雨時の流入負荷」、あるいは、水田からの汚濁負荷として短期的だが負荷強度（単位時間あたりの負荷量）の高い「代かき田植え時期の汚濁負荷」の湖内水質への影響については、まだよくわかっていない。例えば、琵琶湖に毎日1トンずつ定常的にリンが流入した場合と、月に1回30トンのリンが降雨に伴い流入した場合とでは、一月あたりのリンの負荷量は同じだが、琵琶湖の水質に対する影響、特

に富栄養化の原因となる藻類生産への影響は異なるはずである。そのようなちがいを把握した上で、面源負荷対策の方向性を検討する必要がある。滋賀県琵琶湖研究所（2005年4月に滋賀県琵琶湖・環境科学研究センターに改組）では、1996～2000年にかけて琵琶湖赤野井湾を主なフィールドとして集水域からの面源負荷と平水時負荷の定量的把握を進めてきた（大久保卓也ほか，2002a;大久保卓也，2002b）。その調査結果を踏まえて、プロジェクト研究「非定常流入負荷の湖内水質への影響予測評価」（2001～2004年度）では、赤野井湾を対象に短期的に流入する面源負荷の湖内水質への影響の把握を目的に研究を進めてきた。本報告では、これまでの赤野井湾での現地調査結果と水質シミュレーションモデルを用いた検討結果の概要を報告する。

1) 元県琵琶湖研究所 2) 立命館大学理工学部 3) 国土環境株式会社 4) 元生物流体力学研究所

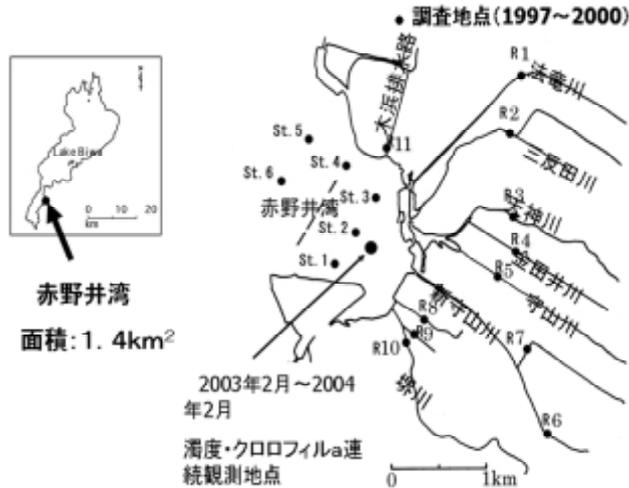


図1 赤野井湾の位置と調査地点

2. 赤野井湾の概況

赤野井湾は琵琶湖南湖の東岸に位置し（図1）、琵琶湖の中では最も富栄養化が進んでいる水域である。1994年の夏季の渇水の際には、アオコが大増殖して問題になった。面積は消波堤の内側が1.43km²、水深はおよそ1～3mである。この湾の

湾口部には消波堤があり、閉鎖性が高くなっていることが藻類が発生しやすい原因の一つと考えられる。また、集水域における人口増加、産業発展、農業用排水システムの近代化に伴い湾に流入する栄養塩量が増加したことも藻類が発生しやすくなった原因と考えられる。しかし、1990年代には集水域における下水道整備が進展し生活排水や工場排水などの点源負荷については徐々に減少していると推定される。

赤野井湾集水域の土地利用状況は、1995年時点のGISデータベースによる計算によると農地（主に水田）が55%で最も大きな割合を占め、次に宅地、市街地が43%を占めている。市街地や工場は集水域の上流部の守山駅周辺に多い。集水域内の下水道普及率（水生化された実質の普及率）は1998年で約55%、2005年で約90%である。

3. 現地調査による検討

3.1 調査方法

赤野井湾に流入する河川からの汚濁負荷量については、1996年4月～2000年3月にかけて主な流

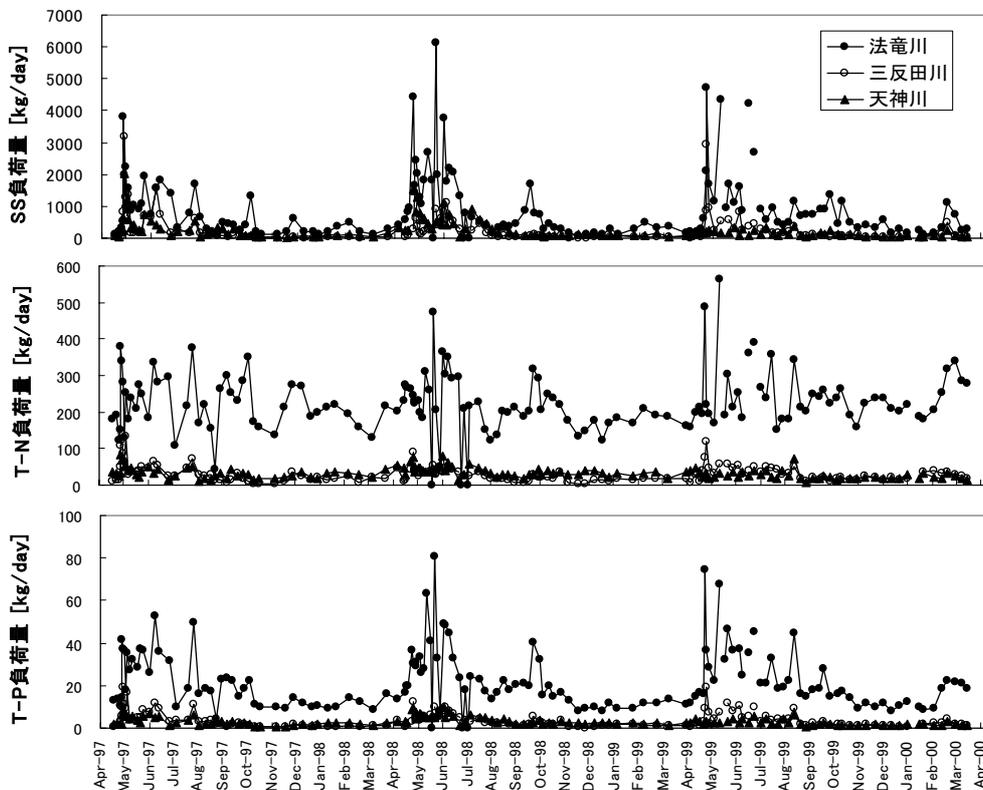


図2 赤野井湾流入主要3河川の平水時負荷量の季節変化（1997年4月～2000年3月）

入河川で水質と流量の調査を週1, 2回の頻度で実施し把握した。さらに、降雨時の汚濁負荷量についても、主な河川で数回～30回の降雨時調査を実施し流量と負荷量の関係を求めた。また、湾内の水質については1998年4月～2000年10月に湾内3地点、湾外2地点で10～15日に1回程度の頻度で調査を行い水質変動の実態を把握した。

これらの観測データから降雨時の流入負荷を含めた集水域からの負荷量の時間変動と湾内水質の変動との関係を解析した。しかし、湾内における調査頻度が十分でなく、湾内水質と流入負荷量との対応関係を把握することが難しかったため、2003年2月から2004年2月にかけて、湾内1地点に濁度・クロロフィル計（アレック電子製COMPACT-CLW）を設置し20～30分間隔で濁度とクロロフィルa濃度の連続測定を行う調査を追加して実施した。この濁度とクロロフィルaの時間変動と降水量等の気象・水文データとの相関分析から降雨時流入負荷の赤野井湾内水質への影響を解析した。

3.2 調査結果

(1) 平水時流入負荷量

主要3河川（法竜川、三反田川、天神川）における1997年4月から2000年3月の3年間の汚濁負荷量変化を図2に示す。この図には懸濁物質(SS)、全窒素(T-N)、全リン(T-P)の降雨の影響が強い日を除いた負荷量変化を示した。つまりこの

図は、平水時負荷量（基底負荷量）の季節変化を示している。この図をみてわかるように、毎年、代かき・田植え時期から6月頃にかけて各項目とも負荷量が多くなり、特にSS、T-Pでこの時期の負荷量増加が顕著であった。

(2) 降雨時流入負荷量

1996～2000年の期間に法竜川で実施した28回の降雨時調査結果から降水量と流出負荷量の関係を求めると図3（両対数グラフ）に示すようになった。なお、ここで示す負荷量は平水時の負荷量を差し引いたものである。図をみてわかるように、T-N、T-P負荷量は、灌漑期が非灌漑期に比べ同じ降水量に対して流出負荷量が多いことがわかった。ただし、降水量が100mm近くになると両者の差は小さくなりほぼ同じ流出負荷量になることがわかった。図には示していないが溶存態の窒素・リンの流出負荷量では、灌漑期と非灌漑期の差はトータルに窒素・リン負荷量に比べやや小さくなっていた。

このように灌漑期が非灌漑期に比べて窒素、リンが流出しやすい傾向は、守山市内の他の排水路でもみられており、水田を主体とする流域では一般的な傾向と考えられる。また、このような傾向は、懸濁物質、有機物においても同様にみられた。

(3) 晴天時と降雨時の負荷量比較

図3の関係式を使って一降雨の降水量から一降雨当たりの流出負荷量を算定することができる。一降雨の合計負荷量を求めた後、降水が2日以上

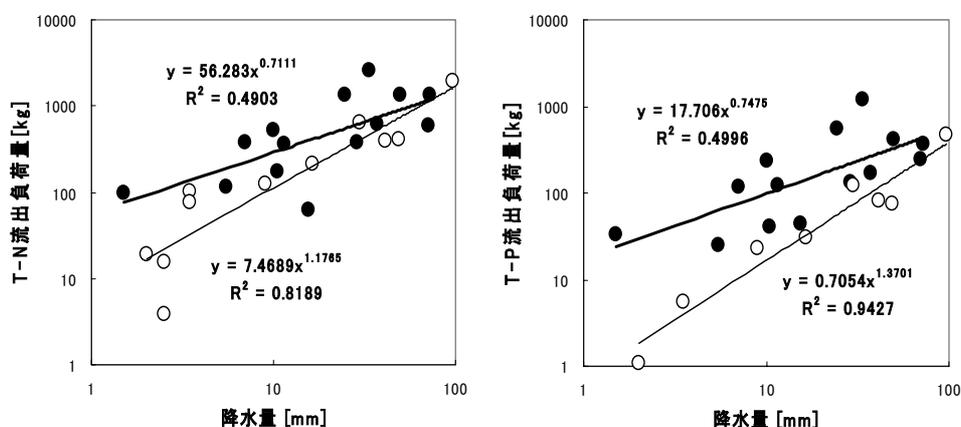


図3 法竜川で実施した28回の降雨時調査結果による降水量とT-N、T-P流出負荷量の関係（黒丸は灌漑期、白抜きの丸は非灌漑期のデータを示す。）

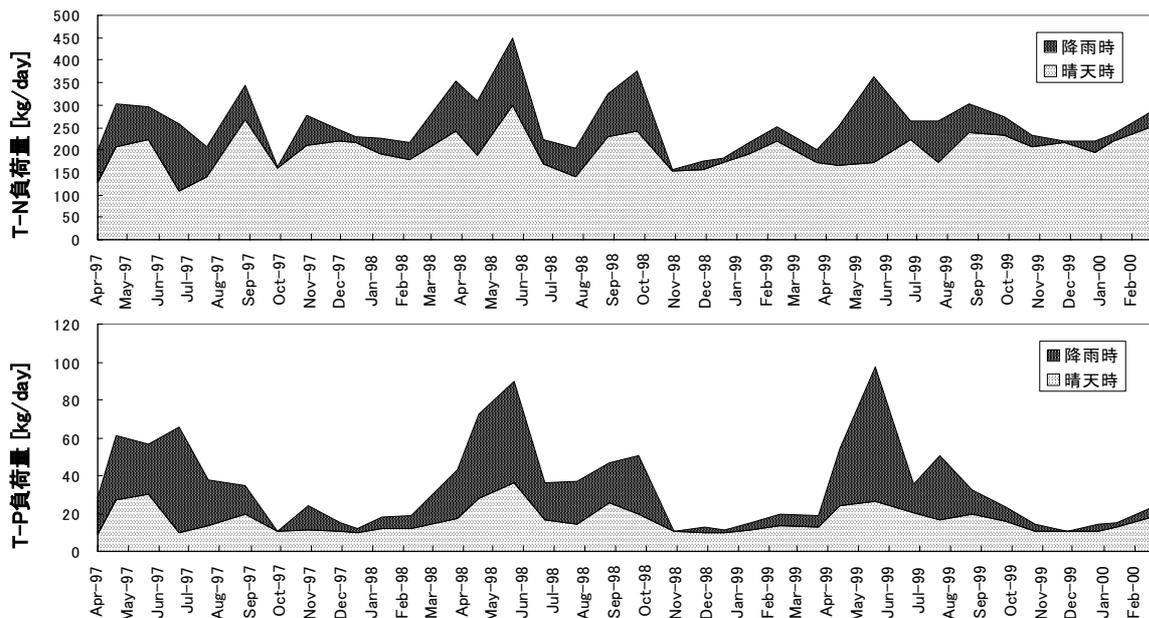


図4 法竜川における平水時負荷量と降雨由来負荷量（月平均値）

に渡る場合は、各日の降水量に比例させて各日の負荷量を再配分することで大まかな降雨時負荷量の経日変化が求められる。図4にはそのようにして求めた1日当たりの降雨時負荷量からさらに月別の降雨時負荷量を求めた結果を示した。平水時負荷量は筆者らによる実測値から求めたものである。

図4で降雨時負荷量と平水時負荷量を比較すると、T-N負荷量では、前者は、後者に比べて意外に小さい。これは、法竜川では上流にある複数の工場で冷却水などの用途で地下水をほぼ常時揚水しており、河川水量に占める降雨由来の水量割合が相対的に小さくなっているためと考えられる。また、法竜川は赤野井湾集水域では最大の河川であるが、他の琵琶湖流入河川に比べると集水域面積が小さいため、降雨に伴う河川流量の増加率が小さいこともその原因として考えられる。一般的な琵琶湖流入河川では、降雨時負荷量/平水時負荷量の比は、法竜川の比率より大きいと考えられる。このように平水時負荷量が降雨時負荷量に比べて大きいということは、法竜川および赤野井湾集水域の特殊な条件であり、後に赤野井湾での水質調査結果や水質シミュレーション計算で得られる「降雨時負荷量の湾内水質への影響が小さい」

という結果は、この条件も影響していると考えられる。

負荷量の季節変化をみるとT-N、T-P負荷量両者とも、灌漑期に降雨時負荷量が大きくなる傾向がみられた。また、T-PがT-Nに比べ降雨時負荷量の占める割合が大きかった。T-N負荷量では6月と9月にピークがみられ、T-P負荷量では6月にピークが一つだけみられた。

図には示していないが溶存態のD-N、D-P負荷量は、6月と9月にピークがみられ、T-N、T-Pの場合よりも平水時負荷量>降雨時負荷量の傾向が強かった。

(4) 赤野井湾の水質変化

1998年4月～2000年10月に実施した赤野井湾の水質調査結果を図5に示す。赤野井湾内の水質は湾内3地点の平均である。クロロフィルa、T-N、T-Pは冬季に濃度が高くなる傾向がみられた。冬季の風が強い日にはSS濃度が高くなる傾向があり、冬季のT-P濃度の上昇は、底泥の巻き上げの影響がと思われた。一方、クロロフィルa、T-Nが冬季に高くなるのは、湾内外の水の交換率が低下し、閉鎖性が高まることが影響しているものと考えられた。

降水量、琵琶湖水位、琵琶湖放流量の変化と水

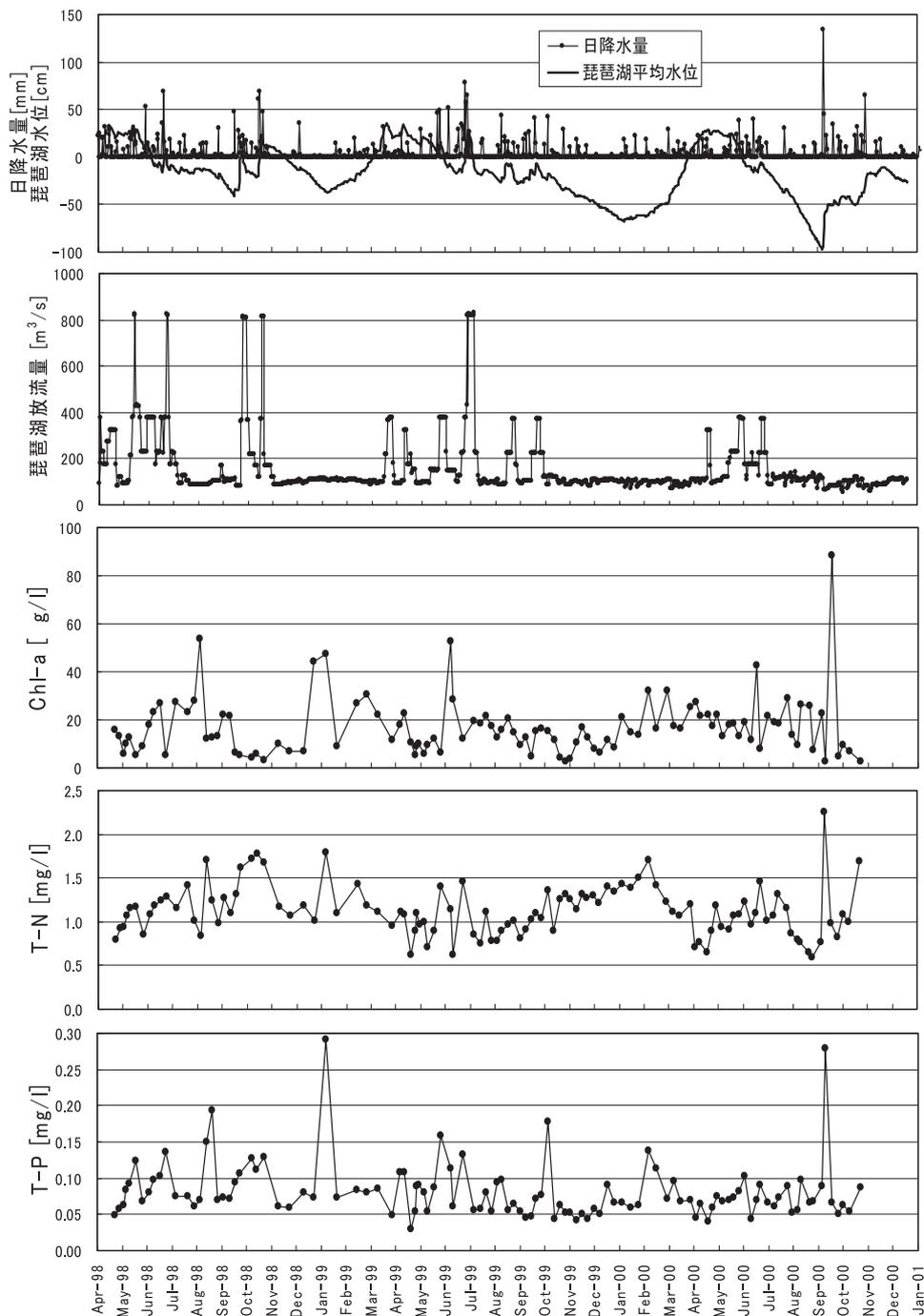


図5 赤野井湾における水質調査結果と気象、水文条件との対比（水質は湾内3地点の平均を示す。）

質変化を比較してみると、降雨時負荷量は降水量の増加に伴い増加しているはずであるが、降水量と湾内水質の対応関係は明確でなかった。降雨の影響が明確にみられたのは、2000年9月の100mmを越える日降水量があったときで、湾内のT-N、T-P濃度が明らかに高くなった。しかし、降雨の影響がみられた期間は短く、約10日後の調査では、降雨の影響はみられなかった。この結果から、降

雨時流入負荷の湖内水質への影響は比較的短期間に限定されると考えられた。

図5には瀬田川放流量も示したが、クロロフィルaは瀬田川放流量の少ない日が続くと高くなる傾向がみられた。また、事例は少ないが、降雨後にクロロフィルa濃度が高くなる場合もみられた（例：2000年9月の降雨後）。したがって、植物プランクトンの増殖には、湾内外の水の交換（滞留

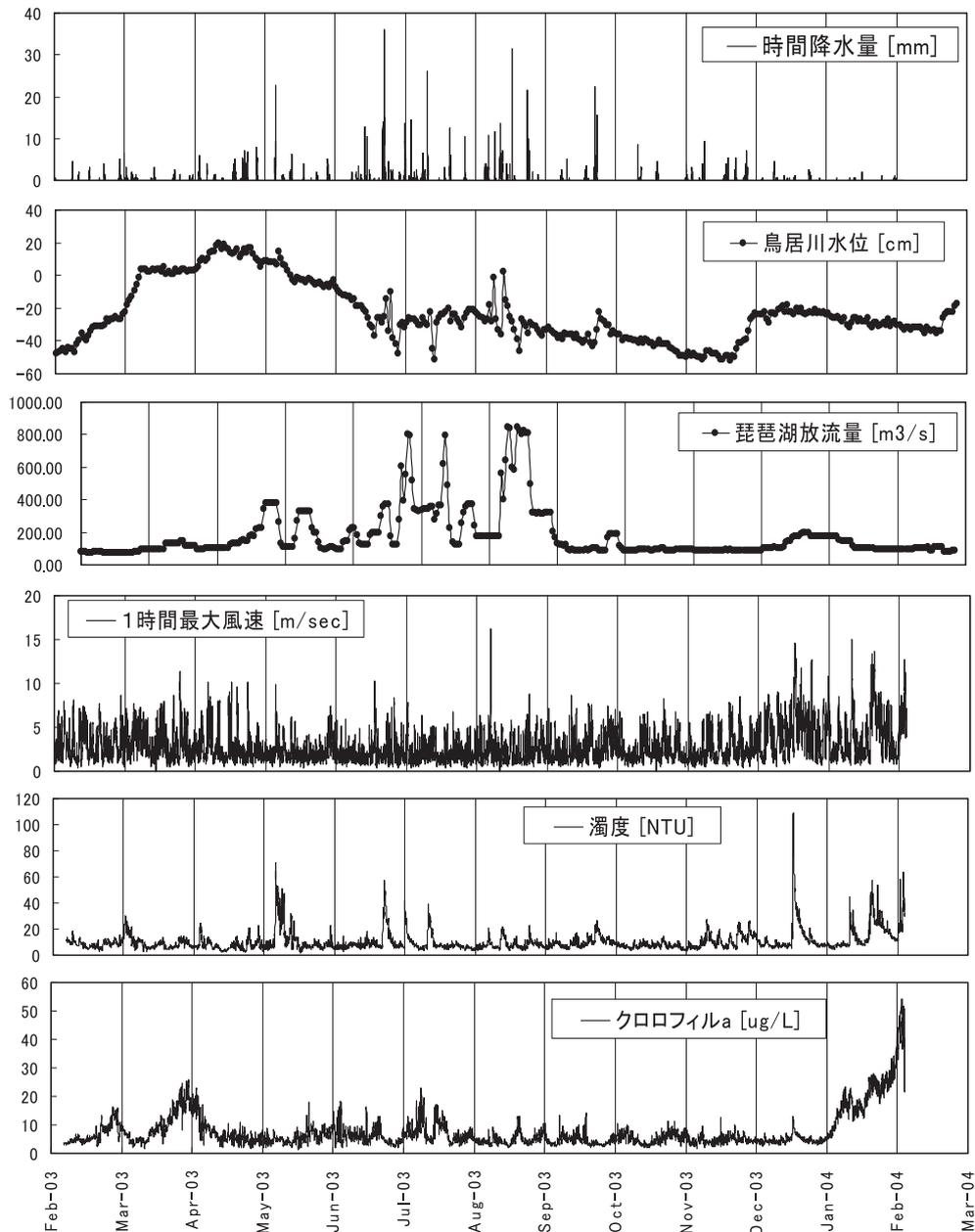


図6 濁度・クロロフィルaの連続測定結果と気象、水文条件の対比

時間)と栄養塩供給の両者が影響していると考えられた。

(5) 赤野井湾の濁度・クロロフィルaの変化

船を用いた採水調査では調査頻度を密にすること(例えば毎日調査に出ること)が実際上難しく、湾内水質に及ぼす降雨の影響を把握することが難しいと考えられた。そこで、湾奥部の真珠養殖場の外辺に自動測定機器を設置し、20分間隔で濁度・クロロフィルa濃度を測定することにした。調査期間は2003年2月から2004年2月までの1年間とし

た。

調査結果を図6に示す。濁度では、5月初旬に高いピークがみられるが、これは水田での代かき・田植えで発生した濁水が降雨によって湾に流出した影響である。また、濁度では、降水量の多い降雨後に上昇する傾向がみられた。一方、クロロフィルaでは、2月下旬、3月下旬、7月初旬にピークがみられ、降水量との対応関係は明確でなかった。

(6) 濁度・クロロフィルa濃度と環境因子の関係

赤野井湾の濁度、クロロフィルa濃度に及ぼす環境因子の影響を明らかにするため、これらの観測値と①琵琶湖水位、②瀬田川放流量、③流域平均日降水量、④南湖滞留時間、⑤1時間最大風速、⑥湾内時間降水量、⑦水温、との相関を調べた結果を表1に示す。なお、相関分析に用いたデータは、冬季の底泥の巻き上げの影響が小さい4月～11月の期間のデータとした。

相関分析の結果、降水量と濁度は正の相関（1%水準で有意）が認められたが、降水量とクロロフィルa濃度は相関は認められず相関係数は負の値になった。また、瀬田川放流量と濁度は正の相関（1%水準で有意）、瀬田川放流量とクロロフィルaは負の相関（1%水準で有意）が認められた。逆に南湖滞留時間と濁度は負の相関（1%水準で有意）、南湖滞留時間とクロロフィルaは正の相関（1%水準で有意）が認められた。このような相関関係から濁度は降雨時に高くなるが、クロロフィルaは減少し、瀬田川放流量が少なくなり南湖滞留時間が長くなるとクロロフィルaが増加する傾向にあることが明らかになった。

降雨時の栄養塩供給と藻類増殖とはタイムラグがあると考えられるため（図7）、日にちを1～14日まで1日ずつずらしながら表1の相関係数の計算を同様に行ってみたが、日にちをずらすことによって新たに有意な相関が認められることはなかった。

このような相関分析から濁度、クロロフィルa濃度（藻類濃度）と環境因子との関係をまとめると図8のよ

表1 濁度・クロロフィル濃度と気象、水文条件因子との相関係数
（冬季のデータを除いた2003年4月1日から11月30日の期間のデータで計算）

関係因子		濁度	Chlorophyll-a
鳥居川水位	相関係数	0.072(*)	0.204(**)
	データ数	973	973
瀬田川放流量	相関係数	0.162(**)	-0.155(**)
	データ数	973	973
流域平均降水量	相関係数	0.211(**)	-0.011
	データ数	973	973
南湖滞留時間	相関係数	-0.162(**)	0.117(**)
	データ数	973	973
1時間最大風速	相関係数	0.199(**)	0.050(**)
	データ数	5856	5856
湾内時間降水量	相関係数	0.071(**)	-0.005
	データ数	5843	5843
水温	相関係数	-0.117(**)	-0.084(**)
	データ数	5856	5856
濁度	相関係数	1.000	-0.078(**)
	データ数	5856	5856
Chlorophyll-a	相関係数	-0.078(**)	1.000
	データ数	5856	5856

** 相関係数は1%水準で有意(両側)

* 相関係数は5%水準で有意(両側)

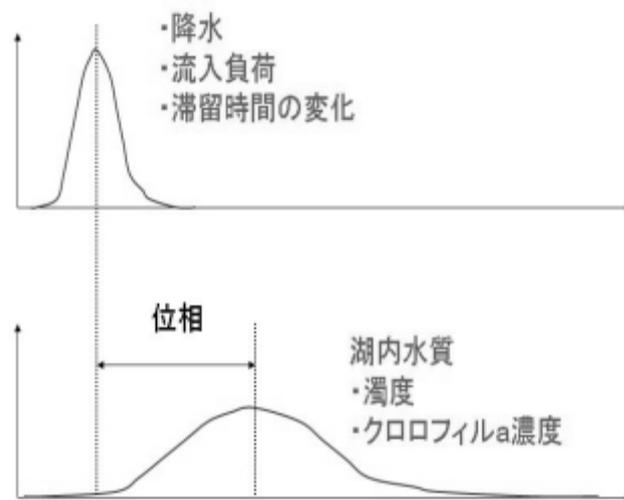


図7 降水に伴う湾内水質の変化の模式図(降水と水質変化とはタイムラグがあると考えられる。)

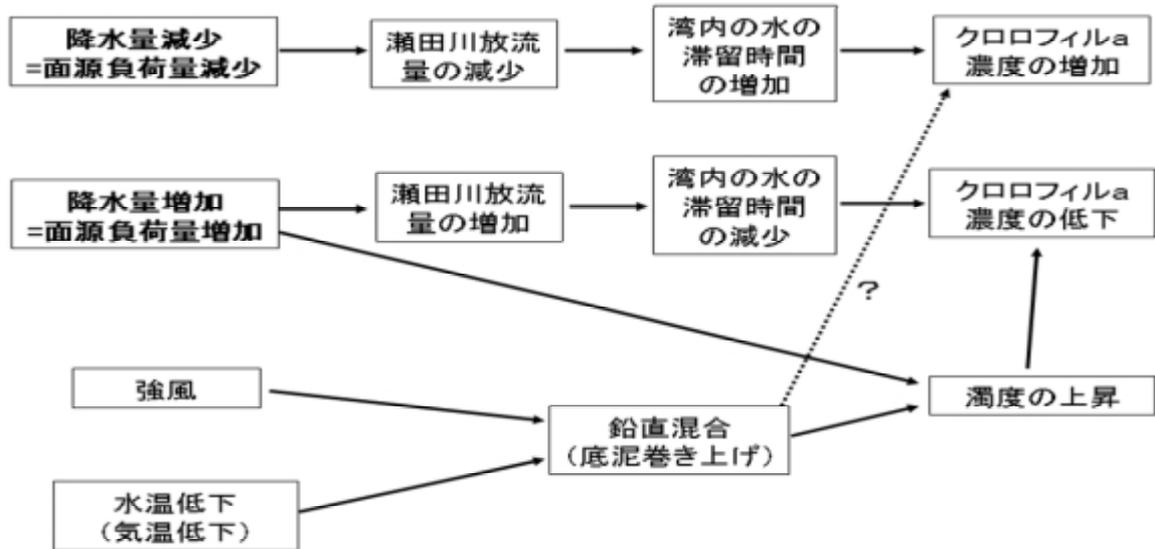


図8 赤野井湾における濁度・クロロフィルa濃度と気象・水文条件因子との関係
 (降雨に伴う栄養塩負荷量増加が、藻類増殖を促す可能性は小さい。強風時にクロロフィルa濃度が高くなる現象が時々みられた。これは、底に沈殿していた植物プランクトンや底泥(または沈水植物)に附着していた藻類が巻き上げられたためと考えられる。)

うになる。

赤野井湾では、降雨に伴って陸域から供給された栄養塩が藻類に利用されて増殖するという関係にはなっておらず、逆に降雨時には湾内の水の滞留時間が短くなり、藻類濃度が低下する傾向にあることが明らかになった。したがって、例えばアオコの増殖を抑制するためには、瀬田川流量を増加させて湾内外の水の交換を促進したり、降雨時ではなく平水時の栄養塩負荷量を減少させる対策が有効ではないかと考えられる。

4. シミュレーションモデルによる検討

次に、赤野井湾の水質シミュレーションモデルを作成し、そのモデルを用い対策の方向性を検討した結果を示す。

4.1 シミュレーションモデルの概要

水の流れ(流動)については、瀬田川放流量が赤野井湾の水質に与える影

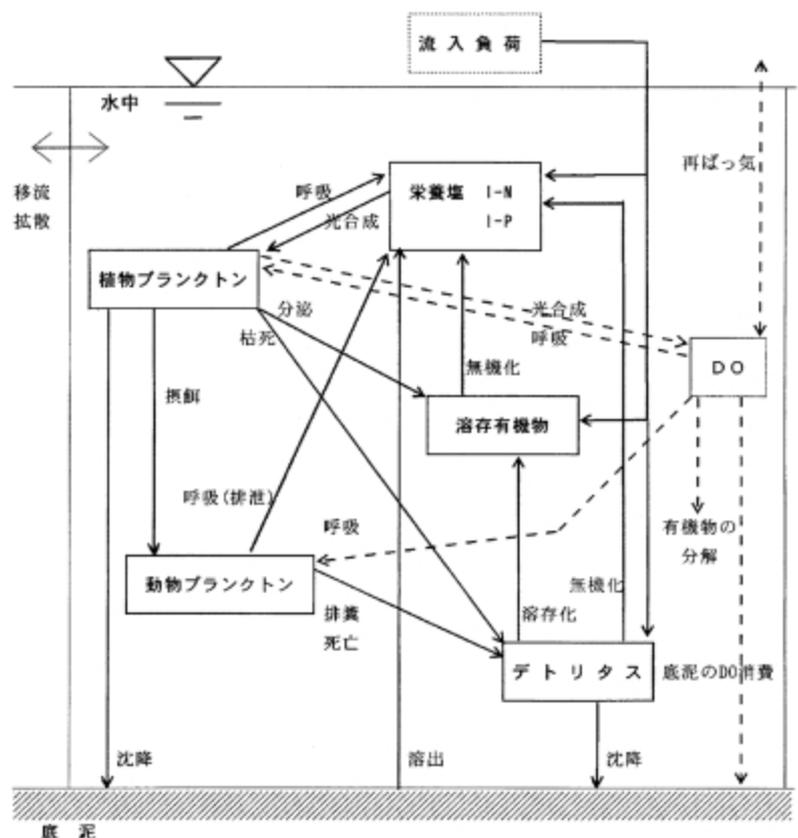


図9 水質モデルの構造

響を評価するために赤野井湾を含む琵琶湖南湖全体を100m格子に分割して流動シミュレーション計算を行った。計算期間は観測データが比較的豊富な1998年4月～1999年3月とした。また、タイムステップは20秒とした。

気温、降水量、日照時間、日射量は、彦根気象台のデータを用い、風向・風速は、琵琶湖博物館の観測データを用いた。

水質モデルは、動物プランクトンまでの食物連鎖を考慮したモデルで、富栄養化予測モデルとして一般的な構造のものを用いた(図9)。底泥からの栄養塩溶出も考慮しており、溶出速度は水温、DO、底泥間隙水中栄養塩濃度の関数とした。水質モデルでは、赤野井湾を5つのボックスに水平分割して鉛直3層とし、それぞれのボックスを完全混合層と仮定して計算した(図10)。ボックス間、および赤野井湾領域外との流入、流出量は流動シ

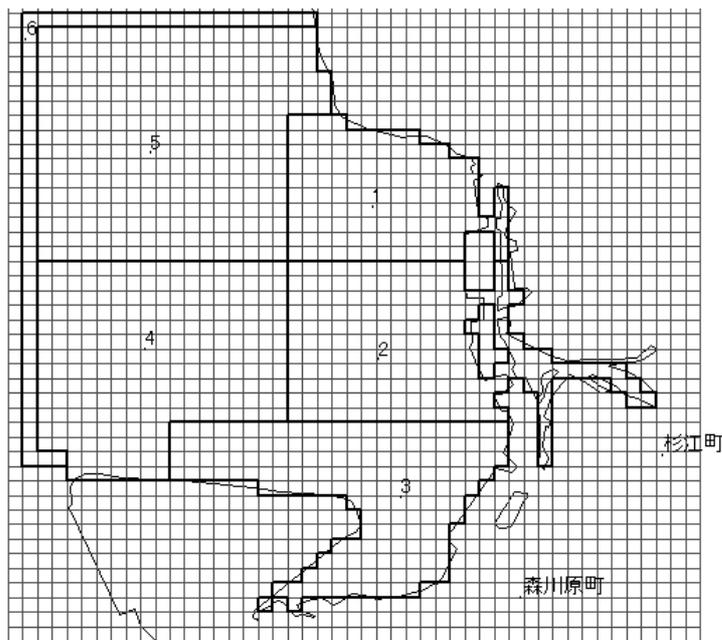


図10 水質シミュレーションモデルにおけるボックス分割 (流動シミュレーションは水平方向100m格子で行い、水質シミュレーションは水平方向5ボックスで行った。鉛直方向の分割は、両者とも1m毎に3層とした。)

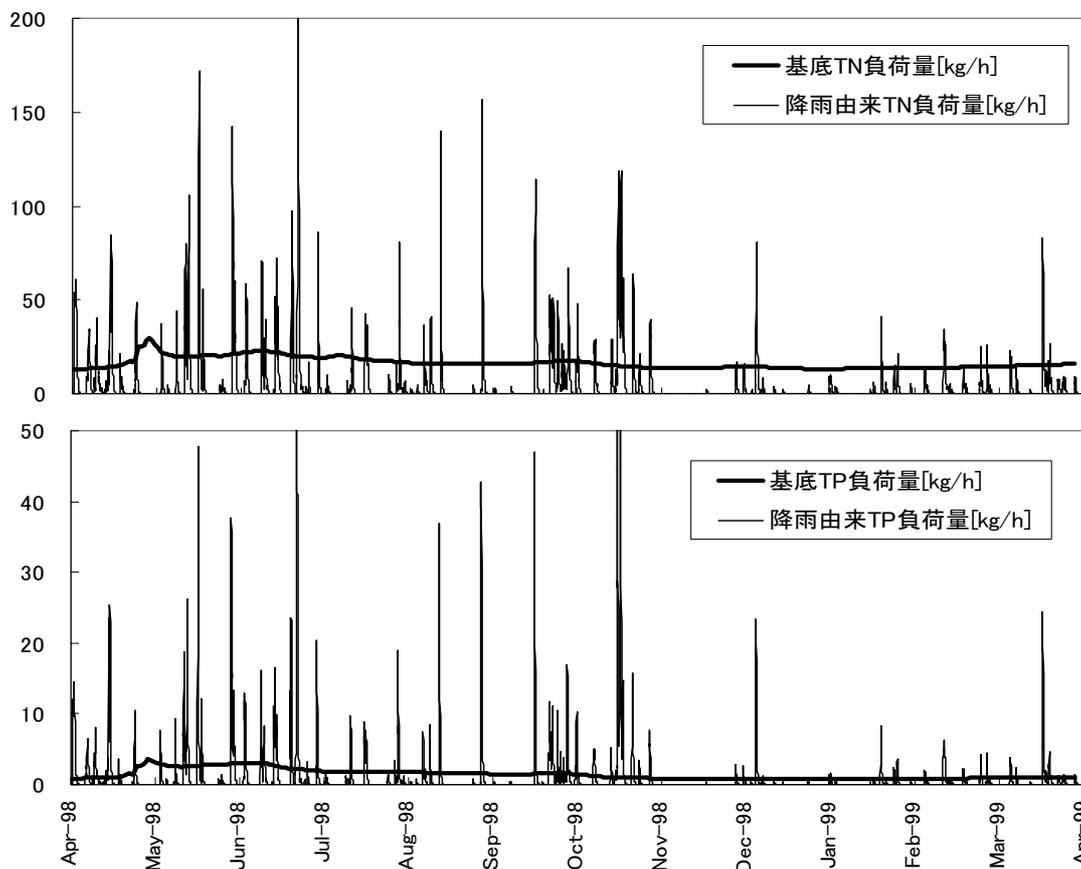


図11 水質モデルの入力条件とした流入負荷量の時間変化 (上がT-N負荷量、下がT-P負荷量)

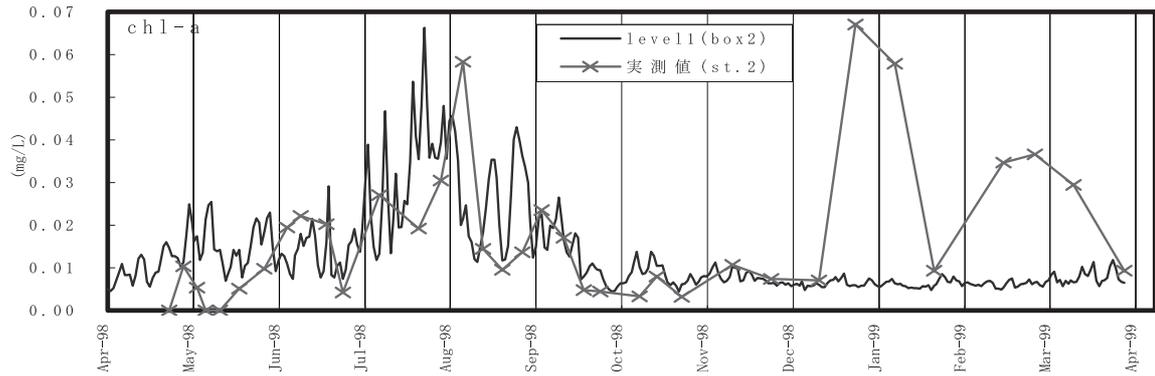


図12 計算結果と実測値との比較 (BOX 2のクロロフィルa濃度) (1998年4月～1999年3月)

シミュレーションの結果を用いて計算した。水質モデルにおける境界値は、実測データに基づき設定した。

流入負荷量は、これまでの現地調査結果に基づき、平水時負荷量と降雨時負荷量とを分けて入力した。T-N、T-P負荷量の入力値を参考に図11に示す。

4.2 計算結果

現況再現結果の例としてChl-aの計算結果と実測値との比較を図12に示す。冬季の計算結果は合っていないが、春季から秋季にかけての計算値は実測値に近い値になっている。

冬季の現況再現性が十分ではないが、降雨由来の面源負荷と平水時負荷の影響の違いを検討するため、(ケース1) 降雨由来負荷量をゼロとした場合、(ケース2) 平水時負荷量を現状の1/2にした場合、(ケース3) 平水時負荷量をゼロにした場合、の3通りのケースについて仮想計算を行ってみた。計算結果を図13に示す。

クロロフィルa濃度は、(ケース1) 降雨由来負荷量をゼロとした場合、(ケース2) 平水時負荷量を現状の1/2にした場合では、あまり減少しないことが予測された。一方、(ケース3) 平水時負荷量をゼロにした場合は、クロロフィルa濃度

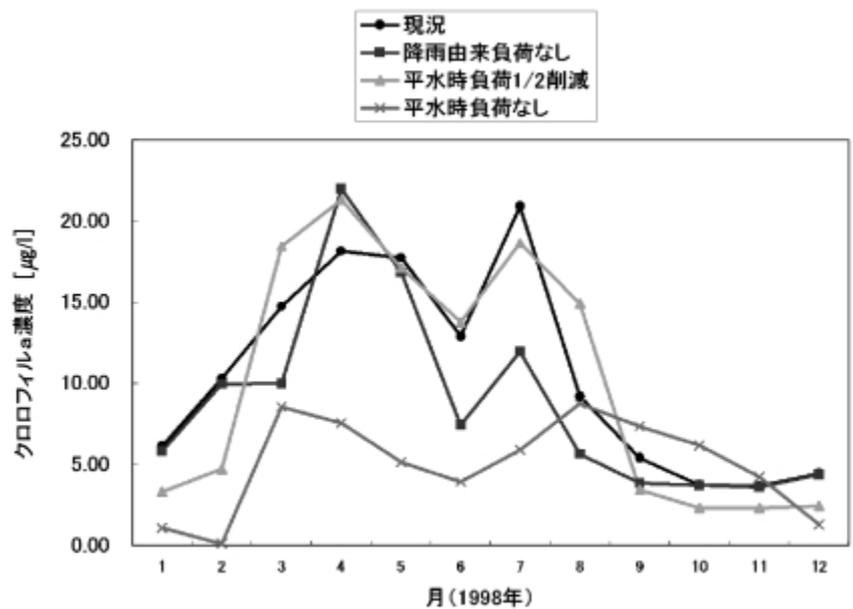


図13 事例計算結果 (BOX 2のクロロフィルa濃度) (1998年4月～1999年3月)

は現状の1/2程度に低下した。つまり、湾内の藻類濃度に対する、降雨時負荷量の影響度は平水時負荷量に比べて小さいことが予測された。この予測結果は、前に述べた湾内におけるクロロフィルaの連続観測からも推定できており、降雨時に流入する栄養塩は、赤野井湾では植物プランクトンの現存量増加には結びつきにくいことが本研究で明らかになった。

このような今回の研究結果から、赤野井湾の富栄養化防止対策としては、降雨時流入負荷の削減対策よりも、平水時流入負荷の削減対策がより重要であると考えられた。今後、下水道整備率およ

び接続率の向上によって点源負荷がさらに減少するため、面源、特に農地由来の汚濁負荷対策の重要性が増してくると予想されるが、その負荷削減を考える場合には、晴天時に節水等の水管理を徹底し、流出水量と負荷量を少なくすることが重要と考えられる。

5. まとめ

赤野井湾における現地調査および水質シミュレーションモデルを用いた検討結果から、次のことが明らかになった。

- (1) 赤野井湾における植物プランクトン現存量を減少させるためには、降雨時負荷量の削減よりも平水時負荷量の削減が効果的と考えられた。
- (2) また、赤野井湾において植物プランクトンが大量に増殖しないようにするためには、湾内の水が停滞しないようにすること、つまり、湾内外の水の交換を抑制しないことが大事であると

考えられた。

- (3) 赤野井湾の環境条件は特異であり、上記の考え方がそのまま他の水域に適用できるわけではない。例えば瀬戸内海では降雨後に赤潮が発生するケースが多いと言われており、降雨時負荷の藻類生産への影響は水域の環境条件によって異なることを注意しておく必要がある。現在、琵琶湖北湖にフィールドを移して調査を進めている。

引用文献

- 中央環境審議会（2005）：湖沼環境保全制度のあり方について。
- 大久保卓也ほか（2002a）：滋賀県琵琶湖研究所プロジェクト研究報告書A01。
- 大久保卓也（2002b）：赤野井湾における物質収支。オウミア，75，1-2。