

ダム湖の水質保全のための水質調査と解析方法の検討

北島 淳二、吉川 信治*、松瀬 紀子**、植田 千秋***、鶴田 優子*
 (*衛生薬業センター、**退職、***杵藤保健福祉事務所)

要旨

佐賀県嬉野市の岩屋川内ダム及びその集水域を対象として水質調査を実施し、窒素・リン等の流入負荷量及び流出負荷量の収支を算出し、各項目の関係を解析することによって、現状に適した水質保全対策の検討を行った。また、この調査を通して、ダム湖の水質保全のための効果的な調査・解析手法の検討を行った。

キーワード：ダム湖、水質保全、窒素・リン負荷量、物質収支

はじめに

岩屋川内ダムは佐賀県西部の嬉野市嬉野町を流れる塩田川水系岩屋川内川の中流部に、治水及び不特定用水の確保を目的として建設され、昭和49年度に竣工した。近年は毎年のようにアオコの発生が見られるなど、水質の悪化が懸念されていることから、今回の調査対象として選定した。

岩屋川内ダムの概況

1 岩屋川内ダムの特徴

1.1 岩屋川内ダムの集水域

岩屋川内ダムとその集水域の概要を図1に示す。集水域の面積は10.7km²で、周囲を標高約400~700mの山々に囲まれている。平成13年度に佐賀県が作成した「健全な水環境確保のための計画書(塩田川)」では、集水域内の人口は389人、事業所は飲食店が1軒のみで、畜産は牛44頭が飼育されている。発生源別の汚濁負荷量は表1のとおりで、BODは生活雑排水、浄化槽排水等の生活系の負荷が50%以上、T-N(総窒素)及びT-P(総リン)は山林、耕作地等の自然系の負荷が80%以上と推計されている。

図1 岩屋川内ダムとその集水域の概要

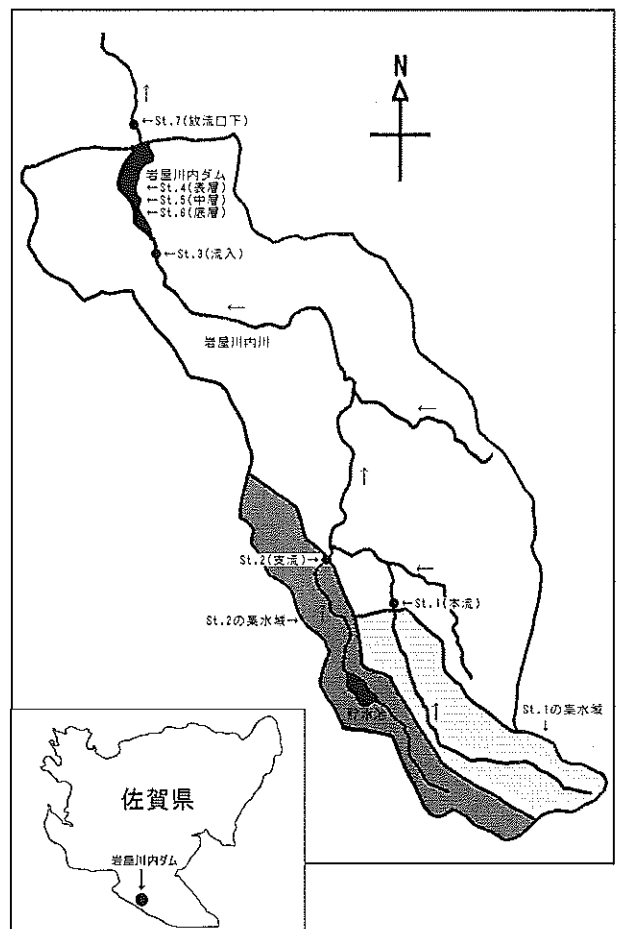


表1 岩屋川内ダム集水域の汚濁負荷量

区分	BOD(kg/日)	T-N(kg/日)	T-P(kg/日)
生活系	13.780	1.771	0.251
産業系	0.003	0.005	0.001
畜産系	2.816	3.828	0.066
自然系	7.619	26.105	1.324
合計	24.219	31.709	1.642

※佐賀県「健全な水環境確保のための計画書(塩田川)」

表2 岩屋川内ダム集水域の植生

植生	面積(km ²)	比率(%)
シイ・カシ萌芽林	0.42	4
ススキ群落	0.53	5
スギ・ヒノキ植林	7.52	70
茶畑	1.33	13
畑地雑草群落	0.06	1
水田雑草群落	0.69	6
ダム・貯水池	0.15	1
合計	10.7	100

※環境省 自然環境保全基礎調査から概算

また、環境省の自然環境保全基礎調査の結果から、集水域に占める植生の割合を概算した結果を表2に示す。全体の70%をスギ・ヒノキ植林が占めており、耕作地としては水田より茶畑が多いのが特徴的である。

1.2 岩屋川内ダムの主要諸元

集水面積：10.7km²

形式：重力式コンクリートダム

湛水面積：0.14km²

有効貯水容量：2,280,000m³

常時満水位：E.L. 182.50m

2 岩屋川内ダムの水質

2.1 県内ダム湖との比較

岩屋川内ダムは生活環境項目の環境基準類型指定はされていないが、佐賀県では水質汚濁防止法に基づく公共用水域水質測定の一環として、毎年6回(原則として奇数月)水質測定を実施している。

表3に県内主要ダム湖の平成9～18年度の平均水質を示す。岩屋川内ダムはT-Nが2.3mg/Lで他のダム湖と比較して高い。pH、SS、T-P、クロロフィルaはやや高いが、CODは比較的低い。

2.2 経年変化

図2に平成12年5月以降の経年変化を示す。各項目ともほぼ横ばいであるが、平成14、17年にCOD等の濃度が大きく上昇するなど、年によって季節的な変動が激しい。

調査方法

1 調査期間

平成17年7月～平成18年6月の1年間で調査を実施した。

2 調査地点

調査地点の概要を表4に、位置を図1に示す。また、St.1及びSt.2の集水域における植生と住居数を概算した結果を表5に示す。

3 河川流量

ダムの流入・流出水量は岩屋川内ダム管理所からデータの提供を受けた。また、St.1及びSt.2には自記水位計を設置し、調査期間中の水位を記録した。また、毎月1回の水質試料採取時に、河川の水深と流速を実測した。これを基に流量と水位の相関を求め、調査期間内の流量を推定した。

4 水質調査

水質試料の採取は毎月1回実施し、溶解性成分分析用試料は採取後、速やかに孔径0.45μmのメンブランフィルターでろ過した。なお、平成18年4月については、流入河川であるSt.1～3の地点のみ、増水時と平水時の2回試料を採取した。水質試料の分析項目及び分析法を表6に示す。

表 3 県内主要ダムにおける平成 9～18 年度の平均水質

ダム湖名称	pH	DO (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	Chl-a (mg/m ³)
北山ダム	8.4	11	3.2	3	0.46	0.024	12
平木場ダム	7.9	10	3.3	7	0.52	0.031	-
伊岐佐ダム	7.7	10	2.9	2	0.33	0.020	9.1
本部ダム	8.8	11	5.5	5	1.2	0.039	30
竜門ダム	7.5	9.4	4.1	2	0.45	0.013	11
有田ダム	6.9	9.2	2.4	1	0.22	0.006	2.5
岩屋川内ダム	8.3	10	3.2	4	2.3	0.033	18

図 2 岩屋川内ダムにおける水質の経年変化 (平成 12 年 5 月～19 年 3 月)

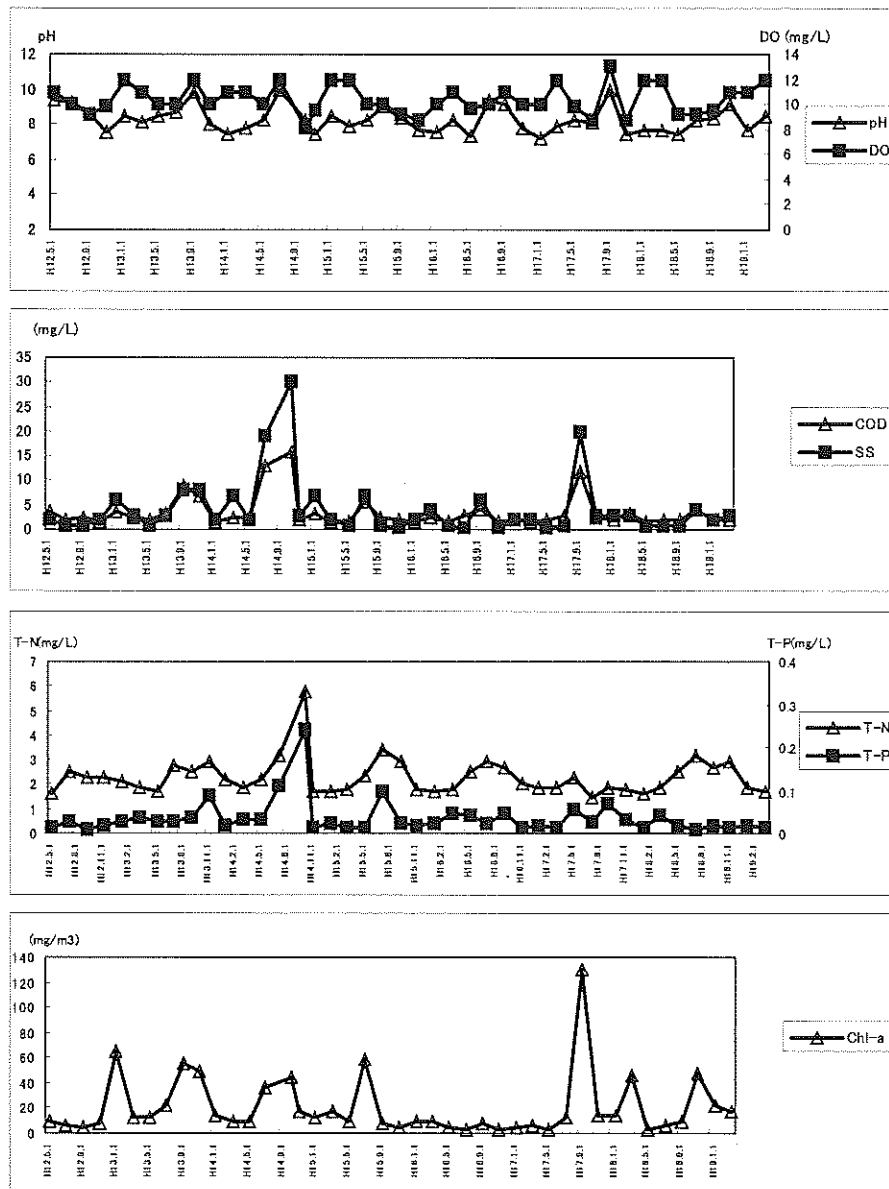


表4 調査地点の概要

地点名	概要
St.1	岩屋川内川本流
St.2	岩屋川内川支流、上流に農業用貯水池有り
St.3	岩屋川内川、ダム流入地点
St.4	ダム中央、表層
St.5	ダム中央、中層、常時満水位より 4m下方
St.6	ダム中央、底層、常時満水位より 14m下方
St.7	ダム放流口下

表5 St.1及びSt.2の集水域の植生、住居の数

植生	St.1集水域		St.2集水域	
	面積(km ²)	比率(%)	面積(km ²)	比率(%)
シイ・カシ萌芽林	0.12	11	0.03	3
ススキ群落	-	0	0.29	26
スギ・ヒノキ植林	0.84	71	0.33	30
茶畑	0.12	10	0.30	27
畑地雑草群落	-	0	-	0
水田雑草群落	0.09	8	0.08	7
ダム・貯水池	-	0	0.08	7
合計	1.17	100	1.11	100
住居の数	約20戸		約15戸	

表6 水質試料分析方法

測定項目	測定方法	規格等
水温	水温計	JIS K 0102
水素イオン濃度 (pH)	ガラス電極法	JIS K 0102
電気伝導率 (EC)	電気伝導度計	JIS K 0102
溶存酸素量 (DO)	ウインクラー-アジ化ナトリウム変法	JIS K 0102
生物化学的酸素要求量 (BOD)		JIS K 0102
化学的酸素要求量 (COD)	COD _{Mn}	JIS K 0102
浮遊物質 (SS)	ガラス繊維ろ紙法	水質環境基準告示
全窒素 (T-N)	銅・カドミウムカラム還元法	JIS K 0102
アンモニア性窒素 (NH ₄ ⁺ -N)	インドフェノール青吸光度法	JIS K 0102
硝酸性窒素 (NO ₃ ⁻ -N)	Cu-Cd還元ナフチルエチレンジアミン吸光度法	JIS K 0102
亜硝酸性窒素 (NO ₂ ⁻ -N)	ナフチルエチレンジアミン吸光度法	JIS K 0102
全リン (T-P)	ペルオキシ二硫酸カリウム分解法	JIS K 0102
リン酸態リン (PO ₄ ³⁻ -P)	モリブデン青 (アスコルビン酸) 吸光度法	JIS K 0102
硫酸イオン (SO ₄ ²⁻)	イオンクロマトグラフ法	JIS K 0102
塩化物イオン (Cl ⁻)	イオンクロマトグラフ法	JIS K 0102
カルシウムイオン (Ca ²⁺)	イオンクロマトグラフ法	-
マグネシウムイオン (Mg ²⁺)	イオンクロマトグラフ法	-
ナトリウムイオン (Na ⁺)	イオンクロマトグラフ法	JIS K 0102
カリウムイオン (K ⁺)	イオンクロマトグラフ法	JIS K 0102
溶解性鉄 (S-Fe)	フレイム原子吸光法	JIS K 0102
溶解性マンガン (S-Mn)	フレイム原子吸光法	JIS K 0102
クロロフィルa (Chl-a)	吸光度法	湖沼環境調査指針
河川流量	流量計	-

表 7 水質測定結果の平均値

地点名	水温 (°C)	pH	EC (mS/m)	DO (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	NO ₂ ⁻ -N (mg/L)
St. 1	14.1	7.3	7.8	9.4	0.7	1.1	2	1.8	<0.01	1.7	<0.01
St. 2	16.3	7.5	8.5	9.4	0.7	1.5	4	2.1	<0.01	1.9	<0.01
St. 3	15.3	7.6	8.2	9.8	0.6	1.1	1	1.6	<0.01	1.5	<0.01
St. 4	17.1	8.2	8.3	10	1.2	3.2	4	2.0	0.02	1.6	<0.01
St. 5	15.8	7.9	8.3	9.4	1.6	2.2	3	1.9	0.02	1.6	<0.01
St. 6	14.8	7.4	8.2	7.2	1.0	2.3	3	1.7	0.04	1.5	<0.01
St. 7	15.7	7.7	8.2	9.6	1.1	2.1	2	1.8	0.01	1.5	<0.01

地点名	T-P (mg/L)	PO ₄ ³⁻ -P (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Chl-a (mg/m ³)
St. 1	0.023	0.013	4.4	5.1	5.2	2.3	4.7	1.3	0.7
St. 2	0.016	0.006	3.2	4.8	6.0	3.1	4.2	1.1	2.9
St. 3	0.023	0.015	3.1	4.7	5.6	2.6	4.8	1.5	0.9
St. 4	0.025	<0.003	3.7	4.8	5.7	2.6	4.9	1.4	22
St. 5	0.020	<0.003	3.6	4.9	5.8	2.6	4.9	1.5	11
St. 6	0.017	<0.003	3.7	4.8	5.9	2.6	4.8	1.5	5.8
St. 7	0.016	<0.003	3.6	4.8	5.8	2.6	4.8	1.4	8.9

結果及び考察

1 測定結果

1.1 河川流量

表 5 に示すように St. 1 及び St. 2 の集水域の面積は、どちらも約 1.1km² で全集水域の 10% 程度であるため、河川流量も同様の比率になることが予想されるが、St. 1 での推定流量はダム流入水量の 21%、St. 2 での推定流量はダム流入水量の 7% となり、推定精度が低いと思われるため、解析用のデータとして採用しなかった。推定方法、結果の詳細は資料編に示す。

精度が低かった理由としては、流量を実測する回数が限られており、平水時に偏っていること、流速が低い部分が多く測定が困難だったこと、また、St. 1 では河床の起伏が大きく、河川断面積の計算が正確ではなかったことなどが考えられる。

1.2 水質測定結果

各項目の測定値の平均を表 7 に示す。なお、S-Fe 及び S-Mn の測定値は、ほとんど定量下限値未満であったため省略しており、解析にも使用しなかった。調査期間中の全測定値は資料編に示す。

2 流入河川の水質特性

2.1 流入河川の窒素・リン成分の濃度

表 7 で St. 1~3 の測定結果を見ると、窒素・リンの濃度がかなり高いことがわかる。特に窒素に関しては岩屋川内川上流からダム放流口下まで濃度の変化は少ない。

St. 1 と St. 2 の窒素成分の濃度を見ると、T-N 及び NO₃⁻-N とともに、St. 1 < St. 2 となっている。これは、表 5 に示すとおり、St. 2 の集水域には窒素肥料を多量に施用する茶畑が多いためではないかと思われる。

リン成分では T-P 及び PO₄³⁻-P とともに St. 1 > St. 2 の傾向が見られる。逆にクロロフィル a は St. 1 < St. 2 となっている。また、St. 2 の毎月の測定結果を見るとクロロフィル a が高い時に、PO₄³⁻-P が低い傾向が見られる。これは、St. 2 の集水域内に比較的大きな農業用貯水池があり、ここで植物プランクトンが増殖して PO₄³⁻-P が消費され、固形物として貯水池の底質に貯留されているのではないかと思われる。

次に、ダム湖への流入水質を代表する St. 3 での測定結果から、溶解性無機態窒素(DIN)と溶解性無機態リン(DIP)を次のように定義し、DIN/DIP 比(重量比)を算出した。

$$DIN = NH_4^+-N + NO_2^- -N + NO_3^- -N$$

$$DIP = PO_4^{3-} -P$$

$$DIN/DIP = 1.5/0.015 = 100$$

この DIN/DIP 比を、湖沼の植物プランクトンの増殖に関する窒素/リン比として評価すると、岩屋川内ダムは窒素制限とリン制限の境界である DIN/DIP=20 を大きく超えており、リン制限の傾向が非常に強いと判断される。

2.2 窒素・リンとイオン成分等の相関

窒素・リンとイオン成分等の相関を見るため St. 3 の主な測定データを使用して多変量解析法のクラスター分析を行った。使用したソフトウェアはエスミ社製の EXCEL 多変量解析 Ver. 5.0 で、クラスター形成にはウォード法を使用した。測定項目のうち大半が定量下限値未満であった NH_4^+-N 、 $NO_2^- -N$ は対象とせず、また欠測のある月のデータは使用しなかった。なお、クロロフィル a のみ正規化のため対数変換した値を使用した。

分析結果は図 3 のとおりであり、窒素については T-N、 $NO_3^- -N$ ともに水温と最も近親性が高くなっている。この原因は、主な窒素供給源と思われる茶畑、水田等への施肥が 3~9 月の比較的高温期に行われるためではないかと推測される¹⁾。

リンは T-P、 $PO_4^{3-} -P$ ともに K^+ と最も近親性が高く、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} と同じクラスターとなっている。リン酸と K^+ 、 Ca^{2+} 等の塩、あるいは K^+ 、 Ca^{2+} 等を含む物質との混合物が肥料として施用されているのではないかと推測される。

3 岩屋川内ダムでの窒素・リン等の収支

表 7 で、流入河川 (St. 1~3) とダム湖 (St. 4~6) の水質を比較すると、河川水に対してダム湖は BOD、COD、クロロフィル a の濃度が大きく増加し、 $PO_4^{3-} -P$ 濃度が減少している。

ここで、ダム湖での物質収支を見るために、各測定項目の流入負荷量 (Le) と流出負荷量 (Ld) の概算値を次式により算出し、表 8 に示す。

$$Le = \sum (C_{3i} * Qe_i)$$

$$Ld = \sum (C_{7i} * Qd_i)$$

C_{3i} : i 月の St. 3 での測定値

C_{7i} : i 月の St. 7 での測定値

Qe_i : i 月の流入水量

Qd_i : i 月の流出水量

収支の算出にあたって項目によって欠測がある場合は、その月を除いて積算した。

図 3 St. 3 の水質のクラスター分析結果

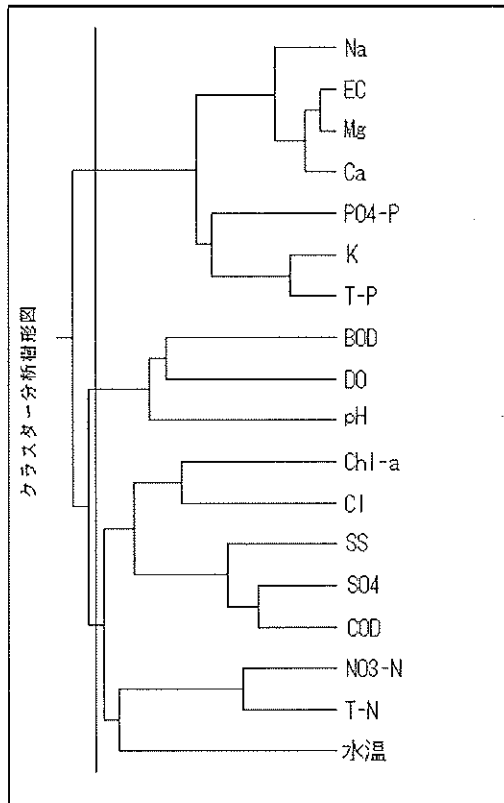


表 8 調査期間中の岩屋川内ダムの物質収支

	COD (kg)	BOD (kg)	SS (kg)	T-N (kg)
流入負荷量	28,000	10,000	40,000	32,000
流出負荷量	48,000	17,000	59,000	36,000

	T-P (kg)	NO3-N (kg)	PO4-P (kg)	Chl-a (kg)
流入負荷量	410	28,000	260	19
流出負荷量	310	29,000	60	130

流入水の DIN/DIP 比から、植物プランクトンの増殖については、リン制限の傾向が強いため、 $PO_4^{3-}P$ を消費して、藻類が増殖し、その結果 BOD、COD、SS 等が増加しているものと思われる。 NO_3^-N の濃度はあまり変化していないが、流入水に大過剰の NO_3^-N が含まれているため、見かけ上の変化が少ないものと思われる。T-P については、やや減少しており、植物プランクトンの一部は底質へ蓄積されているのではないかとと思われる。

4 水温の特性と水質に対する影響

当センターで平成 10～11 年に実施した伊岐佐ダムの調査では、6～10 月の間に鉛直方向に温度成層が形成されて、底層付近では無酸素状態となり、底質からの栄養塩の溶出が見られた²⁾。

また、佐賀県ダム管理事務所が平成 16 年以降に県内主要ダムを対象に実施した調査でも、有田ダム、竜門ダム、本部ダム等での高温期の温度成層の形成とそれに伴う底層の無酸素化が確認されている。しかし、この調査で岩屋川内ダムは他のダムほど明確な温度成層が形成されにくい傾向が見られた。

今回の調査でも表層と底層の温度差が最も大きかったのは平成 17 年 7 月の $6.5^{\circ}C$ であり、調査期間を通じて温度成層は明確には形成されなかった。また、底層の DO の最低値は平成 17 年 8 月の $1.3mg/L$ であり、無酸素状態も確認されず、 NH_4^+-N についてもそれほど高い濃度は記録されなかった。

ダム湖の貯水容量や集水面積で比較すると、伊岐佐ダムと岩屋川内ダムはほぼ同じような規模である。岩屋川内ダムで温度成層が形成されにくい理由は明らかではないが、ダム湖の形状及び流入河川や取水口の位置関係等の条件によって、ダム湖内の水が攪拌されやすいのではないかとと思われる。

また、現在のダム湖の底部にかつて温泉の泉源があったことから、温水により熱が供給されているため成層ができないのではないかと

う説も考えられているが、詳細については現在のところ不明である。もし、今後、温水による攪拌が確認されれば、他の温度成層を形成するダム湖の湖底に人為的な熱源を設置し、どの程度の効果が得られるかを、ばっ気等の方法と比較することで、低コストでの新たな温度成層対策立案の可能性も考えられる。

5 水質保全対策の方向性

前項までの検討結果から、岩屋川内ダムでは底質からの栄養塩類の溶出は少ないと見られ、伊岐佐ダム等で試みられている、ばっ気装置の設置は、窒素・リン濃度の抑制効果はないものと思われる。ただし、ばっ気装置での湖水の攪拌により、植物プランクトンの有光層以深への引き込みによる増殖抑制の効果は期待できる。

岩屋川内ダムの窒素・リン濃度を低減し、水質を改善するためには、流入水の水質改善が最も重要であるため、集水域全体で耕作地における施肥の合理化、合併浄化槽の普及による生活排水対策等により負荷量の削減を図ることが必要である。

6 調査手法の評価

6.1 河川流量及び汚濁物質負荷量

今回の調査では、自記水位計を使用して任意の地点で調査期間の水位の変動を観測し、実測による水位と流量の相関曲線から、期間を通じた流量の把握を試みたが、精度が低いと思われるため、解析に使用しなかった。水位計の設置には正確な流量を測定できる場所の選定が必要であるが、山間部の河川での適地の確保はかなり困難である。

また、各発生源からの汚濁物質負荷量については調査地点の集水域内にいろいろな発生源が混在しており、定量的な評価は難しいため、定性的な傾向の把握に止めた。

6.2 水質調査

今回の調査では 1 年間の期間で毎月測定を行ったが、統計手法を適用するには、測定頻度は高いほうが良い。同時期に岩屋川内ダムを対象とした水質調査は、本調査の他に、水質汚濁

防止法に基づく公共用水域の水質調査やダム管理事務所で実施した調査があったが、測定項目や調査地点に相違があるため、参考に止め、解析用データとしては使用しなかった。効率のよい調査のためには、関係機関で調査計画の摺り合わせを行い、データの共有化を図ることが必要である。

また、今回は1年間での調査となったが、複数年で計画し、1年目は予備調査として全体的な傾向の把握と調査項目の絞込みを行い、2年目以降で重点的に本調査を実施するほうが、よい成果が得られ、費用対効果についても向上するのではないかとと思われる。

6.3 統計手法を用いた解析

今回はダム流入水についてクラスター分析のみを行ったが、発生源の推定と特徴の把握をすることができた。さらにデータ数を多くし、他の手法も取り入れれば、さらに総合的、多面的な検討が期待できる。

6.4 増水時の調査

汚濁物質負荷量の総合的な把握を行うためには、平水時だけではなく、増水時の流出特性の調査が必要であるが、山間部では試料採取に困難が伴うため、今回は実施しなかった。今後、安全で合理的な試料採取方法を検討する必要がある。

6.5 生物層の調査

今回生物相についての調査は実施しなかったが、アオコ等の発生防止のためには、植物プランクトンの種の特特定と、水温、日射量等のわかりやすい指標を用いた短期的な予測手法及び対策の検討が必要である。

文献

- 1) 佐賀県：平成17年度施肥・病虫害防除・雑草防除のてびき(水稻・大豆・果樹・茶)(2006)
- 2) 北川信吉 他：伊岐佐ダムにおける栄養塩類の挙動について(第1報・1)、佐賀県環境センター所報第15号(2000)

謝辞

本調査を実施するに当たり、水量等のデータの提供及び採水時のボートの提供等の御協力をいただいた、佐賀県ダム管理事務所及び岩屋川内ダム管理所の皆様には感謝致します。