国内のダム湖における流入河川の水質と流域背景に関する統計的評価と将来展望

桑原 亮^{1*}・梅田 信¹

¹東北大学大学院工学研究科 (〒980-0871 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

* E-mail: kuwahara@kasen.civil.tohoku.ac.jp

ダム湖で問題となっている富栄養化現象は、集水域から流出した栄養塩が、河川を通じて流れこむことが原因の一つである。そのため、流入河川の水質と集水域環境の関係について、検討していく必要がある。本研究では、全国的な多数のダム湖を対象に、GISを用いて集水域の人口や土地形態を解析した。さらに、これら流域背景と流入河川の総リン濃度を統計的に分析し、年平均の流入河川の総リン濃度を推定する式を作成した。この式を用いて、人口変化に伴う将来のリン濃度の変化を推定したところ、現在流入リン濃度の高いダムが多い西日本において、特に水質の改善が示された。

Key Words : reservoirs in Japan, river water quality, watershed, statistical analysis

1. はじめに

河川に比べて湖沼は閉鎖的であるため、水質悪化や富栄養化が進行しやすい環境にある。また、栄養塩や土砂が湖内に蓄積されていくため、水質悪化の影響が解消されにくいと考えられる。環境省¹⁾によると、湖沼におけるCODの環境基準達成率は53.7%と近年はほぼ横ばいで推移しており、河川のBODの環境基準達成率93.0%に比べ、大きく下回っている。一方、ダム湖は日本における水道水源のほぼ半分を担うなど、非常に重要な水資源である。そのため、将来にわたり水を安定的に供給していくためには、ダム湖の水質管理が重視すべき課題である。

河川からの流入栄養塩が原因の一つである湖沼の富栄養化は、藻類増殖による着色や着臭などの問題を伴う。富栄養化の程度の指標となる藻類は、栄養塩類濃度との関係が強く、我が国の湖沼の多くでは、リンが制限因子であることが一般的に知られている²⁾。藻類の簡易的な予測方法として、栄養塩の流入負荷やダム湖の特性などから関係式を導く方法がある^{3,4)}。ダム湖の水質悪化は、飲料水や生活用水の供給に影響を与える可能性があるため、その兆候を予測検討しておく必要がある。

一般的に、ダム湖は自然の湖沼よりも滞留時間が短いため、湖内水質は流入河川の影響が支配的である。また、河川の水質は集水域からの栄養塩流出を表すことから、

ダム湖への流入負荷は、その集水域の規模や土地利用の影響を強く受けると考えられる。さらに、近年は農地や住宅地といった面源からの負荷の割合が増加していることから、集水域の環境条件が、河川水質に与える影響を評価することは重要な課題である。これまでに、GISやリモートセンシングを用いて流域背景を解析し、水質との関係を検討する研究が行われている⁵⁻⁸⁾。しかしながら、単一あるいは少数の水域を対象としている研究が多く、地域的な影響を踏まえ、全国的な関係を解析した研究は稀である。

そこで本研究では、日本国内の多数のダム湖を対象に、流入河川の総リン濃度と集水域内の人口や土地形態との関係を統計的に評価した。これに加え、将来の人口変化に伴うリン濃度の変化を予測した。

2. 研究の対象と方法

(1) 対象ダム湖の概要

水道水源となっているダム湖は、利水専用ダムと多目的ダムに区分することができ、これらの諸元は多様である。その中で、国土交通省や水資源機構が管理する多目的ダムは、流入河川の水質と流域背景の関係を検討するために用いるデータが十分に入手できる可能性が高い。

このことから、国土交通省および水資源機構が管理し、利用目的に上水道がある多目的ダムのうち、流入河川のTP濃度の実測値が得られた65のダムを対象とした。対象ダムを表-1に、それらの地理的分布を図-1に示す。気候などを含めた地理的な特徴が、河川やダム湖の水質に影響を及ぼす可能性がある。そのため、地域的な影響を踏まえて、全国的な関係を調べられるよう、対象ダムの分布に可能な限り、偏りがないように配慮した。

(2) 流入河川の総リン濃度の算出

流入TP濃度は、ダム管理者である国土交通省や水資源機構⁹⁾が、ダム湖の流入河川を対象に、概ね毎月測定したデータから求めた。本研究で入手したデータは2000年以前に測定されたものが多かったため、基本的には1990年代の実測値を扱った。ただし、冬期には観測を行っていないダム（主に北海道、東北）があることや、数年分の測定値しか入手出来なかったものなど、測定期間が限られているダムが多く、対象とする期間が異なっている。1990年代のデータが手に入らなかったダムや、2000年以降に竣工したものについては、2000年代のデータを用いた。

データ整理をする際には、以下のことに注意した。まず、流入河川が複数存在するダム湖については、全ての河川データをまとめて平均したものを流入TP濃度とした。その際には、利用期間が河川ごとで異ならないよう留意した。また、記載のあったTP濃度が1.00mg/lを超えているなど、異常値と推測されるものについては、除外して計算を行った。

(3) 流域背景の解析

a) 集水域の生成

本研究では、GISを用いて、ダム湖の集水域の生成および人口や土地利用といった流域背景の解析を行った。集水域の生成には、国土地理院が提供している基盤地図情報（<http://fgd.gsi.go.jp/download/>）のうち、日本全土に渡って整備されている10mメッシュの数値標高モデルを用い、次のような手順で作業を行った。(1)標高ポイントデータをラスタ形式に変換、(2)標高差に基づく流向の計算、(3)累積流量グリッドの作成、(4)閾値を定めて累積流量から河川グリッドを作成、(5)ダム地点を設定し集水域データを生成。なお、生成した全ての集水域について『ダム年鑑2010』¹⁰⁾に記載されている流域面積との比較を行い、再現性を確認した。

b) 人口および土地利用形態の抽出

人口および土地利用形態のデータと、作成した集水域データを空間的に重ねあわせ、検討に用いるダム湖流域の情報を求めた。ダム湖の流域人口は、2005年の国勢調

流入河川のTP濃度の実測値 (mg/l)

- 0.000 ≤ TP 濃度 < 0.020
- ◆ 0.020 ≤ TP 濃度 < 0.050
- ▲ 0.050 ≤ TP 濃度

図-1 対象ダムの地理分布と河川水質

査結果を基準に用いて、国立社会保障・人口問題研究所による解析と概ね同等の出力が得られるモデルにより花崎ら¹¹⁾が作成した3次メッシュ形式の人口シナリオデータを用いた。2010年を現在、2100年を予測のための将来人口として算出した。

土地利用形態の抽出には、国土交通省が提供している国土数値情報（<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>）の土地利用細分メッシュデータを使用した。ただし、流入河川の水質と集水域の土地利用の関係を解析するため、土地利用データは、1997年もしくは2009年に作成されたもののうち、流入河川のTP濃度データと近い年のものをダムごとに選択した。また、元データでは11項目に分けられている土地形態を、農地（田およびその他の農用地）、森林、荒地、建物用地、交用地（道路および鉄道）、河川および湖沼、ゴルフ場の7項目に分類して解析を行った。

(4) 統計的評価の方法

流入河川のTP濃度を目的変数、人口密度や土地利用形態といった流域背景を説明変数として重回帰分析を行い、関係性を統計的に分析した。説明変数はTP濃度との相関が高いものを採用した。ただし、多重共線性が発生しないようにするなど注意して検討を行った。また、TP濃度に対する説明変数の影響度を評価するため、各変数を正規化したものから標準偏回帰係数を求めた。

GISにより集水域を判別する本研究の手法では、導水路などで人工的に水を流入させる間接集水域は判別することができない。そこで、対象とした65ダムのうち、間接集水域が存在する13ダムについては、統計分析の対象から除外した。ただし、作成した回帰式を用いたリン濃度の解析には対象に含めた。

表-1 流入河川の総リン濃度データおよび流域背景の諸量

ダム名称	都道府県	流入河川の総リン濃度			GISで求めた 集水面積 (km ²)	人口密度(人/km ²)		集水域に占める割合(%)		
		データの 利用期間	平均値 (mg/l)	標準偏差 (mg/l)		2010年	2100年	農地	森林	建物用地
桂沢ダム	北海道	97-98	0.026	0.019	150.8	0.0	0.0	0.0	96.4	0.0
金山ダム	北海道	90-98	0.011	0.006	470.3	5.7	1.4	7.3	85.5	0.2
滝里ダム	北海道	05-09	0.051	0.076	1681.2	27.2	6.8	18.0	74.6	1.0
豊平峡ダム	北海道	93-98	0.009	0.011	132.9	0.0	0.0	0.0	92.8	0.0
漁川ダム	北海道	90-98	0.013	0.008	113.0	0.0	0.0	0.0	83.3	0.0
定山溪ダム	北海道	91-97	0.020	0.061	102.9	0.0	0.0	0.0	96.7	0.0
札内川ダム	北海道	06-10	0.004	0.000	118.7	0.0	0.0	0.0	96.7	0.0
二風谷ダム	北海道	96-98	0.027	0.031	1218.2	3.9	1.0	4.4	91.3	0.3
岩尾内ダム	北海道	91-98	0.008	0.004	331.9	0.0	0.0	1.8	77.0	0.0
浅瀬石川ダム	青森	90-97	0.049	0.075	227.4	3.0	0.6	4.7	86.6	0.4
御所ダム	岩手	90-96	0.012	0.011	636.2	28.7	7.4	13.8	76.9	1.2
釜房ダム	宮城	90-95	0.017	0.015	195.6	42.9	16.5	11.3	80.5	1.4
七ヶ宿ダム	宮城	91-96,98	0.017	0.025	231.6	8.2	3.3	4.9	85.8	0.4
寒河江ダム	山形	90-95	0.010	0.013	232.9	1.7	0.5	1.3	89.0	0.2
月山ダム	山形	06-10	0.007	0.009	237.2	0.5	0.1	0.2	95.8	0.0
三春ダム	福島	06-10	0.087	0.044	228.6	132.9	39.8	31.4	60.6	5.4
矢木沢ダム	群馬	90-95, 97-99	0.007	0.014	165.5	0.0	0.0	0.0	88.6	0.0
下久保ダム	群馬	90-99	0.019	0.040	323.5	14.9	6.8	2.8	91.8	0.6
草木ダム	群馬	90-96, 98-99	0.041	0.054	256.1	18.0	8.5	0.2	90.7	0.4
奈良保ダム	群馬	90-99	0.008	0.006	59.5	0.0	0.0	0.0	92.4	0.0
川治ダム	栃木	90-99	0.010	0.016	321.0	3.8	1.6	1.2	95.1	0.2
浦山ダム	埼玉	03-11	0.015	0.010	52.2	3.0	1.5	0.3	97.4	0.1
滝沢ダム	埼玉	08-11	0.008	0.005	107.8	2.1	1.3	0.0	96.3	0.2
宮ヶ瀬ダム	神奈川	95	0.007	0.004	100.6	3.3	2.0	0.0	93.9	0.1
大川ダム	福島県	90-95, 97	0.018	0.012	824.6	24.7	8.3	5.6	88.0	0.8
三国川ダム	新潟	94-95, 97	0.011	0.004	76.0	0.0	0.0	0.0	89.9	0.0
手取川ダム	石川	95-97	0.025	0.061	243.7	4.6	1.7	0.3	92.5	0.1
大町ダム	長野	90-95	0.012	0.018	194.6	0.1	0.0	0.0	93.9	0.0
味噌川ダム	長野	96	0.004	0.001	55.4	0.6	0.2	0.0	95.7	0.0
岩屋ダム	岐阜	90-96, 98	0.011	0.007	265.3	6.8	2.7	1.6	93.8	0.2
阿木川ダム	岐阜	90-95	0.070	0.085	82.4	92.6	36.0	20.1	73.5	1.6
徳山ダム	岐阜	08-11	0.010	0.007	255.4	0.0	0.0	0.0	94.1	0.0
矢作ダム	愛知	90-96, 98	0.016	0.013	504.7	18.3	9.5	4.8	90.1	0.5
蓮ダム	三重	91-97, 99	0.013	0.016	79.8	0.0	0.0	0.3	96.1	0.1
青蓮寺ダム	三重	90-98	0.019	0.021	102.1	44.6	14.6	5.6	88.9	1.1
比奈知ダム	三重	03-11	0.017	0.011	75.6	38.2	13.0	5.4	90.0	2.0
室生ダム	奈良	90-98	0.054	0.073	132.3	238.5	62.7	22.5	68.5	4.9
布目ダム	奈良	03-11	0.052	0.033	70.1	112.3	31.7	13.8	73.3	4.6
天ヶ瀬ダム	京都	91-98	0.036	0.024	369.4	251.3	129.8	7.8	77.7	4.1
高山ダム	京都	90-98	0.103	0.093	632.7	203.2	67.2	16.7	73.2	3.9
日吉ダム	京都	03-11	0.015	0.015	292.8	24.1	10.3	2.7	93.7	1.1
一庫ダム	兵庫	90-97, 99	0.058	0.036	113.4	165.5	58.1	11.1	77.0	3.9
土師ダム	広島	90-94, 96-99	0.028	0.019	304.4	48.3	17.6	12.8	81.2	0.9
弥栄ダム	広島	90-97	0.018	0.014	309.8	46.0	15.1	5.4	89.5	0.6
温井ダム	広島	06-10	0.009	0.009	243.5	10.5	3.7	5.3	90.5	0.9
八田原ダム	広島	95-96	0.078	0.070	237.4	73.7	27.8	20.2	74.1	2.0
島地川ダム	山口	90-99	0.017	0.017	31.8	3.6	1.1	3.0	91.8	0.1
池田ダム	徳島	90-99	0.008	0.006	1920.2	17.7	5.1	5.8	87.0	0.4
石手川ダム	愛媛	90-99	0.046	0.066	72.8	16.1	4.5	4.4	91.9	0.6
野村ダム	愛媛	95-95, 97-99	0.047	0.035	168.6	109.0	31.2	17.6	74.6	3.8
富郷ダム	愛媛	03-05, 07-11	0.007	0.003	98.2	2.2	0.6	0.5	96.6	0.2
大渡ダム	高知	90-99	0.015	0.006	684.2	16.9	5.0	5.3	89.6	0.5
中筋川ダム	高知	95-99	0.011	0.008	21.2	4.1	1.4	1.9	97.9	0.1
早明浦ダム	高知	90-98	0.007	0.011	413.1	3.6	1.0	1.3	87.0	0.2
寺内ダム	福岡	90-97	0.057	0.040	50.6	18.5	9.0	8.7	87.4	1.1
下釜ダム	大分	90-95, 97-98	0.015	0.009	182.0	12.9	4.0	3.0	91.5	0.8
松原ダム	大分	90, 92-95, 97	0.056	0.021	490.2	31.9	11.3	7.9	69.2	1.3
耶馬溪ダム	大分	90, 92-95, 99	0.022	0.011	88.5	13.6	4.8	5.5	91.2	0.2
厳木ダム	佐賀	91-95, 97-99	0.025	0.055	33.4	15.3	5.2	9.9	85.5	0.5
福地ダム	沖縄	90-99	0.009	0.003	8.9	0.0	0.0	1.3	84.6	0.0
新川ダム	沖縄	90-99	0.010	0.006	7.3	0.0	0.0	0.0	97.2	0.3
安波ダム	沖縄	90-99	0.013	0.008	23.6	0.0	0.0	1.6	88.6	0.0
普久川ダム	沖縄	90-99	0.019	0.023	10.2	0.0	0.0	0.0	94.0	0.0
辺野喜ダム	沖縄	90-99	0.010	0.005	8.0	0.0	0.0	0.1	91.0	0.0
漢那ダム	沖縄	93-97	0.013	0.005	7.4	0.6	0.7	0.3	75.2	0.0

(5) 将来予測

ダム湖流域の将来人口を用いて、流入河川の年平均TP濃度の変化を予測した。集水域における土地利用は、その地域の人口によって少なからず影響を受けるため、流域人口が変化することにより土地の形態も変化していくと考えられる。また、気候変動により、流域の降水条件を含めた水文過程の変化などが河川水質にも影響する¹²⁾と考えられるが、本研究ではこれらの要因は対象外とした。つまり、ダム湖の流域人口の変化が、流入河川のTP濃度に与える影響について評価、検討した。

3. 結果と考察

(1) 流入河川の総リン濃度

ダム管理者が測定したデータから、各ダム湖に流入するTP濃度の平均値を算出した。流入河川の総リンデータの利用期間と平均値を表-1に示す。入手できたデータの制約から、対象期間に差が生じた。ただし、2ダムで単年のデータとなってしまう以外は、概ね4、5年以上で算出することができた。数年分のデータを用いることで、各ダム湖の平均的な流入TP濃度が得られたと考えられる。

なお、異常値と考えられるデータについては、個別的に確認をして、解析対象外にした。5ダム9データ（浅瀬石川ダムで2回、矢木沢ダムで1回、高山ダムで2回、室生ダムで3回、寺内ダムで1回）で流入TP濃度が1.0mg/lを超えており、小出水のような影響があったとしても、通常の河川では発生し得ない濃度レベルのデータであったため、解析から除外した。また、浅瀬石川ダム・釜房ダム・池田ダム・厳木ダム・漢那ダムについては、臨時的に主要な流入河川以外の流入部で測定したデータがそれぞれ数回程度存在したが、平均値を求める際には除外して計算した。このように、流入河川あるいはダムごとに利用期間を統一することや、TP濃度の平均値の適切な算出方法などは解析上の課題である。

(2) 流域背景

本節の解析は、間接集水域を含まない52ダムで行ったものである。各ダム湖の集水域についての代表的諸量（人口密度と農地・森林・建物用地の土地割合）を表-1に示した。ダム名にハッチがかかっているものは、間接集水域が存在するダムである。人口密度は、GISによって求めた集水面積で流域人口を除して算出した。流域人口が0人のダムが16基と比較的多く、これらは北海道と沖縄に占める割合が高かった。また、ダムは河川の上流域に造られることが多いため、集水域のほとんどを森

図-2 人口密度と流入河川の総リン濃度との関係

表-2 土地利用形態と流入河川の総リン濃度との相関係数

	土地(面積)	土地(割合)
農地	0.40	0.82
森林	0.04	-0.73
荒地	-0.01	-0.15
建物用地	0.68	0.78
交通用地	0.25	0.20
河川・湖沼	0.11	-0.03
ゴルフ場	0.42	0.15
人口密度	0.84	

林が占めていることがわかる。

各ダムの2010年の人口密度と、流入TP濃度との関係を図-2に示す。相関係数は0.84であり、高い正の相関があることがわかる。一方、流域人口と流入TP濃度の相関係数は0.67であることから、TP濃度について検討を行う際は、人口密度を用いる方が適当であるといえる。

表-2は、土地利用形態ごとに河川のTP濃度との相関係数を示したものである。土地利用形態については、面積そのものの値と、集水面積に対する割合の両方で整理を行った。河川のTP濃度と特に高い相関を示した要素は、建物用地と人口密度である。このことは、生活排水など集水域における人間活動の影響が大きいことを示唆している。一方、交通用地とゴルフ場もある程度の相関が見られた。ただし、これらは集水域内での専有面積率がかなり小さい（平均で交通用地が0.1%、ゴルフ場が0.5%）ため、面源負荷としての大きさを示しているというよりは、集水域を含めた周辺の人口や人為的活動の大きさを間接的に表しているものと推測される。

一方、集水域内の土地割合で評価した結果では、農地と建物用地が、TP濃度に対して特に相関が高い結果になった。両者は、栄養塩の人為的な負荷源として考慮されるべきものである。一方、森林は-0.73と高い負の相関係数となった。森林もリンの面源負荷源であるが、このこととは逆に、森林が増えるとリン濃度が減るという結果が得られた。これは、集水域内の土地割合で考慮し

ているためである。つまり、森林の負荷原単位は、農地や市街地と比較して小さい¹³⁾ため、相対的に森林の面積割合が大きくなれば、集水域からのリンの流出が小さくなるということを表している。

(3) 統計分析

前節の結果に基づいて重回帰分析を行い、流入河川の年平均TP濃度を推定する回帰式を作成した。まず、説明変数にはTP濃度との相関係数が0.70以上と高い要素（人口密度と農地、森林、建物用地の各割合）を選定した。これらの変数間の相関係数を表-3に示す。土地利用形態同士の相関が高くなるのは、集水域内の割合で検討しているためである。また、人口密度と建物用地の相関は0.92でほぼ線形従属の関係であることから、多重共線性を避けるために、TP濃度との相関がより高い人口密度を説明変数として採用した。重回帰分析から式(1)が得られた。

$$P = 0.035 + (2.6 \times 10^{-4} D_p) + 0.11 R_a + (-2.8 \times 10^{-2} R_f) \quad (1)$$

ここで、 P は流入河川の平均TP濃度 (mg/l) , D_p は人口密度 (人/km²) , R_a は農地の割合, R_f は森林の割合である。表-4は分析結果の一覧であり、 p 値は変数ごとの検定の結果を表している。決定係数は0.78と高い値であるが、森林割合の p 値が有意水準0.05を上回っているため、式(1)は有意ではないと判断できる。そのため、TP濃度との相関が低い森林割合を除外し、再び重回帰分析を実施した。

人口密度および農地の割合を説明変数として式(2)を導いた。重回帰分析の結果を表-5に示す。

$$P = 0.009 + (2.7 \times 10^{-4} D_p) + 0.14 R_a \quad (2)$$

決定係数は0.77であり、式(1)とほぼ変わらない結果となった。また、全ての変数において p 値が0.05未満であることから、統計的に有意な式であるといえる。式(2)における定数項0.009は、人為的な負荷がなくても生じるTP濃度と考えることができ、集水域における人口密度と農地によってさらに河川中のTPが増加していくと解釈できる。流入TP濃度に対する影響度を、標準偏回帰係数で比較すると、人口密度の方が農地割合よりもわずかだが高いことが示唆される。

流入TP濃度の実測値と式(2)による推定値を図-3で比較する。黒丸は統計分析の検討対象とした52ダムであり、白四角は間接集水域をもつ13ダムを表している。流域背景が特定されていない白四角のダムについては、全体的にばらつきが大きいことから、式(2)を用いてTP濃度を推定すると誤差が大きいことがわかる。

表-3 説明変数間の相関係数

	人口密度	農地	森林	建物用地
人口密度	1.00			
農地	0.77	1.00		
森林	-0.69	-0.82	1.00	
建物用地	0.92	0.81	-0.72	1.00

表-4 重回帰分析の結果 (式(1))

説明変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	p 値
定数項	0.035		0.250
人口密度	2.6×10^{-4}	0.50	0.000
農地 (割合)	0.11	0.34	0.016
森林 (割合)	-0.028	-0.11	0.388

決定係数 $R^2=0.78$

表-5 重回帰分析の結果 (式(2))

説明変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	p 値
定数項	0.009		0.000
人口密度	2.7×10^{-4}	0.51	0.000
農地 (割合)	0.14	0.42	0.000

決定係数 $R^2=0.77$

図-3 流入河川の総リン濃度の再現性比較

(4) 将来展望

推定式(2)は過去の条件に対して統計的に導いた式である。そのため、式(2)を将来予測に適用することの妥当性の評価は難しい。すなわち、気候変動の影響が考慮されていないのに加え、流域の社会環境変化の影響についても含まれていない。その一方で、気象条件も流域環境条件も異なる、全国的な多数の貯水池流域を横並びに評価して、図-3などに示した程度の相関が得られている。そのため、前述のような不確実性があることは否定

図-4 東西日本における流域人口別のダム数の変化

図-5 東西日本における総リン濃度別のダム数の変化

出来ないものの、それなりの妥当性はあると考えられる。2100年の流域人口を用いて、流入河川の年平均TP濃度の予測を行った。土地形態については、現在のデータ（1997年もしくは2009年）から変化がないと仮定した。人口シナリオの解析結果から、全国的に人口は減少しており、2100年には現在の半数以下となる集水域もある。人口の減少に伴って、TP濃度も減少していくことが予測される。

図-1の破線を境界とする東日本（北海道、東北、関東、北陸、中部）にある26ダムと、西日本（近畿、中国、四国、九州、沖縄）にある26ダムに分けて考察する。流域人口および流入河川のTP濃度の年平均推定値を表すヒストグラムを図-4、図-5に示す。図-4より、流域人口が一万人以上のダム湖の数は、東西両地域とも大幅に減少することがわかる。一方、図-5によると、2010年において、流入TP濃度の推定値が高いダムは西日本に多い。2100年の予測では、TP濃度が0.02~0.03mg/lのダム数が東日本では3から1に、西日本では9から6に減少している。さらに、TP濃度が0.05mg/lのダム数は、東日本では2から1に対して西日本では5から1と、より多くのダムでTP濃度の減少が確認できた。これらのことから、将来の人口変化に対して、特に西日本の流入TP濃度の高いダム湖において、河川水質の改善傾向が大きいと予測される。

4. まとめ

本論文では、日本国内の多数のダム湖を対象に、ダム湖の水質悪化の要因の一つである流入河川の総リン濃度と、その流域背景の関係について検討を行った。まず、GISを用いて、人口や土地利用形態といった流域背景を解析した。次に、実測された水質データから、流入河川の総リン濃度を算出した。これらを統計的に解析することで、流域背景（人口密度および農地割合）から流入河川の年平均TP濃度を比較的高い精度で推定する式を作成した。この推定式を用いて、流域人口の将来変化に伴う、流入河川のTP濃度の変化を評価した。

評価の結果、本研究で対象としたダム湖については、現在流入TP濃度が高いダムは、西日本に多く分布していることが確認された。そして、これらのダム湖では、将来的に流域人口が大幅に減少すると予測され、流入河川の水質が改善されるとの結果が示された。

なお本研究では、将来の流域人口の変化のみを用いており、気候変動の影響や、流域管理の変化などの要因については考慮していない。しかしながら、これらの自然的、社会的な状況変化も、河川水質に対して大なり小なりの影響を及ぼすことが予想される。すなわち、本論文では、人口減少によりリン濃度の低下傾向があることを結論としたが、温暖化により気温、水温の上昇が水質悪化をもたらす可能性や、将来的な流域管理（下水道等の浄化施設の建設状況、森林、農地等の土地管理方策）が河川水質に影響することは十分にあり得ることである。一方で、これらの要因がどのように、どの程度、水質に対して影響を及ぼすのかについては、見通しが難しい。そのため、このような効果を考慮するにしろ、本研究のように考慮しないにしろ、予測結果に関して一定の不確実性が入ることは避けられないと考えられる。今後の同種研究の課題としては、そのような不確実性も考慮に入れながら、将来的な流域管理手法を提案していくことが重要な課題の一つであると考えられる。

謝辞：本研究は、環境省の環境研究総合推進費（S-8-1(3)）の支援により実施された。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 環境省 水・大気環境局：平成23年度公共用水域水質測定結果、平成24年12月発表、2012。
- 2) 大森浩二・一柳英隆 編著：ダムと環境の科学Ⅱダム湖生態系と流域環境保全、京都大学学術出版会、pp.175-177、2011。
- 3) 天野邦彦・安田佳哉・鈴木宏幸：多目的ダム貯水池の水質と流入河川・貯水池特性との関連について、ダム工学、

- vol.10, No.2, 2000.
- 4) 梅田信・落合雄太：気候変動による国内のダム湖水質への影響評価，土木学会論文集G（環境），Vol.68, No.5, I_127-I_135, 2012.
 - 5) 石井裕一・北村立実・渡邊圭司・小松伸行・天野佳正・矢部徹：河川の水質形成と集水域の土地利用形態との関係，水環境学会誌，Vol.32, No.3, pp.139-146, 2009.
 - 6) 庄司智海・森山克美・古賀憲一：遠賀川流域における汚濁負荷流出解析へのGISの利用，環境工学研究論文集，vol.35, 1998.
 - 7) 二瓶泰雄・服部裕司・小久保武・大竹野歩：GISを用いた手賀沼流入河川の汚濁負荷解析，水工学論文集，第48巻，2004.
 - 8) 沖一雄・安岡善文：リモートセンシングによる湖沼流域の年間全窒素負荷量の推定 一霞ヶ浦におけるケーススタディー，日本リモートセンシング学会誌，vol.17, No.1, pp.22-35, 1997.
 - 9) 独立行政法人水資源機構：水質年報，2003-2011.
 - 10) 財団法人日本ダム協会：ダム年鑑2010, 2010.
 - 11) 花崎直太・高橋潔・脇岡靖明：日本の温暖化影響・適応策評価のための気候・社会経済シナリオ，環境科学会誌，25(3), 223-236, 2012.
 - 12) 川越清樹・菊地裕・風間聡・滝沢智（2008）：気候変動による主要河川の水質の影響評価，環境工学研究論文集，Vol.45, 2008.
 - 13) 国土交通省・農林水産省・環境省（2006）：湖沼水質のための流域対策の基本的考え方，2006年3月.
- (2013. 4. 4 受付)
(2013. 7. 17 受理)

Statistical analysis and future projection of river water quality in reservoir watersheds in Japan in relation to catchment conditions

Ryo KUWAHARA¹ and Makoto UMEDA¹

¹Dept. of Civil and Environmental Engineering, Graduate School of Engineering Tohoku University

Reservoirs are important infrastructure in that they occupy a major fraction of water resources in our society. Therefore, to study on relationship between catchment conditions and the water quality of rivers is highly required to conduct proper management of the basins. In this study, 65 reservoirs were chosen for the study from all over Japan. Regression analysis revealed that the mean concentration of total phosphorus is expressed by population density and land coverage for agriculture, with a high correlation coefficient of 0.77. Moreover, Projection of water quality during this century was conducted considering population change in the future. Total phosphorus concentration is generally predicted to decrease in the future according to anticipated decline of population in Japan.