WRFによるダウンスケーリングの不確実性が 貯水池水質予測計算に与える影響

EFFECT OF UNCERTAINTIES IN DOWNSCALING RESULTS USING WRF MODEL ON WATER QUALITY PREDICTION IN A RESERVOIR

矢島 啓¹・崔 貞圭²・谷口 健司³

Hiroshi YAJIMA, Jungkyu CHOI and Kenji TANIGUCHI

¹正会員 博(工) 鳥取大学大学院准教授 社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

西オーストラリア大学 Centre for Water Research 特任上級研究員

²学生会員 修(工) 鳥取大学大学院 社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

³正会員 博(工) 金沢大学特任助教 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

In this research, we evaluated errors of meteorological data generated by a dynamical downscaling using a regional weather forecast model of WRF from JRA25 data along with several bias-correction technique applications. Then we investigated uncertainties of the water quality prediction in a reservoir due to those errors using a 3-D hydrodynamic and ecological model of ELCOM-CAEDYM. Comparisons of several bias-correction methods revealed that the quantile mapping method is most suitable. But a statistical downscaling was better for wind direction and wind speed correction might need very fine grid scale simulation to express wind field in a reservoir. In-reservoir water quality simulations revealed that errors of air temperature and solar radiation, which can be bias-corrected, were two major factors that affect the seasonal change of water temperature profile and the phytoplankton biomass in a reservoir.

Key Words : WRF, downscaling, water quality prediction, Quantile mapping, ELCOM-CAEDYM

1. はじめに

全球気候モデル(General Circulation Model; GCM)を用いた将来予測計算結果を用いて、気候変動が流域水資源の量的変化に及ぼす影響を評価した多くの研究がある^{1),2)}。通常GCMモデルの出力値は時間・空間解像度が荒いため、それらの研究には、力学的あるいは統計学的に解像度の高いデータへとダウンスケールされたデータが用いられている。しかしダウンスケールされたデータには、系統的な誤差が含まれているため、何らかの手法でこの誤差を最小化するための補正がなされる^{3),4),5)}。この補正手法の中で最もよく用いられている手法が頻度分布マッピング(Quantile mapping)であり、Leungら⁶⁾は米国コロンビア川流域における気候予測結果を補正するために適用している。また、補正されたデータにも誤差は残っていると考えられるが、それらの値をもとに流出計算などを行う場合には、そこで使用するモデルの精度に起因する予測結果の不確実性がさらに生じる可能性がある^{7),8)}。

また近年においては、気候変動に伴う水資源の変化の予測は、流域規模のものだけでなく、水資源として重要な湖沼やダム貯水池の小スケールを対象とした研究に発展している⁹⁾。しかしながら、水質ま

で含んだ研究は生態系モデルとリンクした鉛直1次元モデルによる評価が一般的であり^{10),11)}、3次元湖沼生態系モデルを用いた評価を行った例は少ない¹²⁾。しかし今後は、淡水水資源として重要な湖沼や貯水池の水量・水質に気候変動が及ぼす影響を詳細に把握する必要性が高まるものと考えられる。矢島ら¹³⁾は、3次元水理-生態系モデルELCOM-CAEDYMを用いて、温暖化が植物プランクトンを含む水質に与える影響評価を行っているが、温暖化予測とは直接リンクされていない感度分析にとどまっている。

このような状況から、詳細な3次元湖沼生態系モデルとGCMモデルおよびそのダウンスケールをリンクした研究が急務であると考えられる。しかし先に述べたように、気候モデルを用いた将来気候による影響評価を詳細に行うためには、使用するモデルやダウンスケールに伴う不確実性が湖沼や貯水池での水量・水質に与える影響を評価する必要がある。そこで、本研究ではGCMデータを用いる前段階の検討として、荒川水系の浦山ダムを対象に、領域気象モデルWRFを用いた力学的ダウンスケーリングを行い、その結果を複数の方法で補正したデータについて精度を評価するとともに、貯水池生態系モデルを適応したときの、バイアス補正による不確実性が貯水池水質に与える影響を評価する。

2. 研究方法

(1) 研究対象地域

浦山ダムは、荒川水系上流部埼玉県秩父市（北緯35°57'12"，東経139°3'08"）に位置し、秩父市・埼玉県・東京都に合計日最大約35万m³の水道用水を供給する首都圏にとって重要な水ガメである。その規模は、堤高156m，堤頂長372m，集水面積51.6km²，湛水面積1.2km²，総貯水量5,800万m³，平常時最高貯水位EL.393.3mの重力式コンクリートダムである。また、洪水調節，水道用水，流水の正常な機能の維持の供給および発電を行う多目的ダムである。

(2) WRFを用いた力学的ダウンスケーリング

本研究では米国大気研究所を中心として開発されている非静力領域気象モデル Weather Research Forecasting System (WRF) を用いて気候情報の力学的ダウンスケーリングを行う。WRFの初期値及び境界条件には気象庁と電力中央研究所のプロジェクトによる気象庁長期再解析データ (Japanese 25-year Reanalysis : JRA25) を用いる。JRA25はGMS再計算衛星風，熱帯低気圧周辺風，SSM/Iによる可降水量・積雪域情報，中国積雪データ等の使用により，全球平均月別降水量や熱帯低気圧等の表現に秀でているとされる。WRFの実行に必要な海面分布，海陸分布，標高，土壌タイプ，植生タイプ等の陸面情報に関しては米国環境予測センターによるNCEP FNLを用いる。また，下部境界条件として必要な海面水温にはNOAA Optimum Interpolation 1/4 Degree Daily Sea Surface Temperature Analysisを用いる。

本研究では解像度の異なる3つの領域をネスティングすることにより，ダウンスケーリングを行う。モデルの水平格子間隔は粗い方から90km，30km，6kmとした。各領域がカバーする範囲を図-1に示す。積分間隔は空間解像度の粗い領域から，それぞれ360秒，120秒，24秒である。また，ダウンスケーリングは各月毎に行い，スピンアップ期間として各月に先立つ10日間を与えている。

(3) 研究対象地域バイアス補正方法

WRFを用いて水平格子間隔6kmで力学的ダウンスケーリングされた結果から，浦山ダムに一番近いグリッド（北緯35°57'32.4"，東経139°3'3.6"，モデル標高551m）の値（以下，「計算値」と呼ぶ）を，浦山ダムにおける観測値（雲量については熊谷と前橋地点の平均値）を用いてバイアス補正する（以下バイアス補正された値を「補正值」と呼ぶ）。なお，バイアス補正方法については，以下の5つを検討する。

a) 線形回帰式による補正法 (Linear regressions)

観測値と計算値の線形回帰式より得られた傾きおよび切片の係数 a ， b を用いて，次式により補正される。

$$x'_{di} = a \times x_{di} + b \quad (1)$$

図-1 WRFによる計算領域。空間解像度は領域1，2，3それぞれ90km，30km，6km。

ここで x'_{di} は補正された計算値， x_{di} は i 番目の計算値である。

b) 平均値の比による補正法 (Relative ratios)

観測値と計算値の平均値の比を，すべての計算値に掛け合わせることで補正する。

$$x'_{di} = x_{di} \times \frac{\mu_{obs}}{\mu_d} \quad (2)$$

ここで μ_{obs} は観測値の平均値， μ_d は計算値の平均値である。

c) 正規分布型バイアス補正法 (Parametric)

観測値と計算値は同じ正規分布となるとし，それぞれの平均値と標準偏差が等しくなるように，頻度確率をそろえる。

$$x'_{di} = \frac{\sigma_{obs}}{\sigma_d} (x_{di} - \mu_d) + \mu_{obs} \quad (3)$$

ここで σ_{obs} は観測値の標準偏差， σ_d は計算値の標準偏差である。

d) 頻度分布マッピング (Quantile mapping, hourly)

観測値と計算値それぞれの累積分布関数 (CDF) を作成し，次式により計算値に対してマッピングを行い補正する方法である。補正は計算期間すべての毎時データを用いて処理する。

$$x'_{di} = F_{obs}^{-1}(F_d(x_{di})) \quad (4)$$

ここで F_{obs}^{-1} は観測値の累積分布逆関数， F_d は計算値の累積分布関数である。

d') 頻度分布マッピング (Quantile mapping, seasonal)

d)で述べた方法から季節毎の変動パターンを考慮するために4つの期間(春:3～5月，夏:6～8月，秋:9～11月，冬:12～2月)ごとにマッピングを行う。

(4) バイアス補正に依らない気象データの補正

貯水池水質予測計算に用いる気象データは，気温，湿度，風速，風向，雲量，日射量，気圧の7項目である。これらの項目のうち，風向は山間部に位置するダム地形を反映した特性があるため，バイアスによる補正が困難であることが予想される。そこで毎時の観測風向とダウンスケーリングから得られた計算風向を16方位で分類し，計算風向毎の最頻値の風向である22.5°と180°の選択的に補正する統計的な補正を行うこととした（図-2）。

図-2 ダム地点における観測・計算風向の出現頻度

(5) 貯水池モデルの構築

浦山ダム貯水池における水質予測モデルは、既存研究¹³⁾で構築したモデルを使用し、年間降水量が平均的であった2000年を対象に、4種類の植物プランクトンに関するパラメータを中心に再キャリブレーションを行う。また、浦山ダムに流入する2河川の流量については観測値（流域面積による全流入量の按分）を使用し、流入水質は既往のLQ式から設定する。ただし、流入水温については、ダウンスケーリングの影響を取り込むため、気温から推定する。水温は2006年～2011年(2008年はデータ欠測により除外)まで5年間の実測値を用い、24・48・72時間の気温の移動平均値から得られる多重回帰式による推定式式(5)を作成した。本回帰式で得られる推定値と実測値の比較で、高い決定係数 R^2 : 0.915（絶対平均誤差AME:1.35℃、2乗平均平方根誤差RMSE:1.71℃、平均誤差ME:0.00℃）が得られ、十分精度があると考えられた。

$$Tw_{inf} = 0.5413 \times Ta_{24h} - 0.4716 \times Ta_{48h} + 0.6267 \times Ta_{72h} + 1.6102 \quad (5)$$

ここで、 Tw_{inf} は流入水温(℃)、 Ta_{24h} 、 Ta_{48h} 、 Ta_{72h} は

それぞれ気温の24・48・72時間の移動平均値(℃)である。

3. 貯水池水質予測計算に用いる境界条件の補正結果

(1) ダウンスケーリング気象データの補正

毎時観測値と前章に示した5つの方法による補正結果についての項目ごとの比較を表-1に示す。ただし、方法1～5は、先にあげた補正法のa)～d)に対応している。また参考に、方法0として観測値と計算値を直接比較したものも示した。

a) 項目毎の補正精度

表-1に示される R^2 で判断すると、気温、気圧・日射量、雲量、湿度、風速、風向の順に精度が高いことが分かる。この順番で、気温から雲量までは R^2 が0.5を超えており、相関があると判断されるが、風速・風向では R^2 が0.1以下となり、ほとんど相関がない。従って、ダム貯水池における風向・風速のように局地性が強い項目については、6km格子程度のダウンスケーリングでは補正を行っても十分表現することができない。特に風向の R^2 が最小であり、先に示した統計的な補正の方が、信頼性が高いことが明らかである。

b) 補正方法毎の精度

R^2 で判断すると季節によるCDF特性を考慮した方法5(Quantile mapping, seasonal)の精度が高いことが多いことが分かる(表-1)。

一番 R^2 が高く、水質予測に大きな影響を及ぼす気温に対するAMEとRSMEをみると、方法5の値が一番小さく精度が高い。次に R^2 が高かった気圧をみると、AMEとRMSEでは方法1(Linear regressions)が最

表-1 5つの補正法による各項目の補正値と観測値の比較統計量

(項目毎に精度の高い値を赤字で表示)		気温(℃)	湿度(10 ⁻² %)	風速(m/s)	風向(°)	雲量(0-1)	日射量(W/m ²)	気圧(hPa)
方法0	R² (無単位)	0.865	0.380	0.088	0.002	0.502	0.600	0.610
方法1								
方法2								
方法3								
方法4								
方法5		0.879	0.454	0.083	0.003	0.486	0.610	0.599
方法0	AME	2.613	0.160	2.103	111.54	0.197	105.06	13.20
方法1		2.441	0.141	1.409	80.14	0.210	82.67	2.924
方法2		2.449	0.156	1.946	82.08	0.202	77.32	3.222
方法3		2.487	0.151	1.807	96.53	0.218	91.33	3.061
方法4		2.487	0.151	1.822	92.48	0.218	78.12	3.061
方法5		2.328	0.139	1.843	92.41	0.218	75.39	3.102
方法0	RMSE	3.479	0.205	2.919	140.47	0.282	200.52	13.85
方法1		3.205	0.175	1.983	90.82	0.281	141.31	4.000
方法2		3.218	0.201	2.657	106.97	0.282	142.35	4.434
方法3		3.262	0.195	2.464	125.51	0.304	150.03	4.235
方法4		3.262	0.195	2.460	120.94	0.304	148.23	4.235
方法5		3.089	0.180	2.473	119.50	0.310	144.02	4.302

も良い結果であるが、2000年の平均気圧が965.8hPaであることを考慮すると、方法2～5においても大きな違いはない。また、気圧とほぼ同じ R^2 であった日射量をみると、方法5あるいは方法1(Linear regressions)の誤差が小さい。その他の項目についても、方法1あるいは方法5の精度が高い結果となった。しかし、方法1を将来予測時に適応する場合、線形補正は、過大評価や過小評価を行う可能性があるため、方法5が一番安定した補正結果となると考えられる。風向については統計的補正を行うためここでは評価しないが、風速については、いずれの方法でも精度は低いため、今後はさらに詳細なダウンスケーリングを行うなどの検討が必要である。

(2) 流入水温の計算結果

気温の補正誤差はそのまま流入水温の誤差につながる。そこで、ダウンスケーリングで得られた気温の計算値と気温に対する補正法で一番精度の高かった方法5で補正された補正値を用いて、式(5)により推定された水温と実測値を比較検討する。

実測値、計算値、補正値の毎時流入水温の年平均値および変動範囲は、それぞれ11.30℃(0.6～25.6℃)、11.25℃(0.9～20.0℃)、10.34℃(0.1～19.9℃)であった。このように気温を用いた算定で

表-2 季節毎の平均水温(気温)

単位 ℃	春 3-5月	夏 6-8月	秋 9-11月	冬 12-2月
実測値	9.94 (10.18)	17.01 (22.41)	13.31 (14.64)	4.90 (2.85)
計算値	10.35 (12.35)	17.66 (23.01)	12.28 (15.48)	4.65 (4.49)
補正値	8.84 (10.18)	17.24 (22.41)	11.68 (14.64)	3.53 (2.85)

図-3 日平均流入水温の実測値・計算値・補正値の比較

図-4 基準点での観測値と再現計算の比較結果1(左:表層, 中:中層, 右:底層; 上:水温, 中:溶存酸素, 下:SS)

は、平均的な水温の推定はできても、夏季日中の水温上昇を過小評価している。また、季節的な傾向をみると、実測値に比べて、計算値と補正値は冬と秋に低く、夏に高い傾向がある。これらは、推定式の特性和考えられた(表-2, 図-3)。

さらに気温データと併せて比較すると、気温の補正値と実測値は等しく、計算値は実測値よりも高い値を示している。しかし水温では、計算値の方が実測値に近いことが分かる(表-2)。これは、計算対象とした2000年がダム供用開始の翌年であり、作成した式(5)の関係が流域状況の変化等の影響で近年と異なっていた可能性がある。

4. ダウンスケール計算結果が貯水池水質予測結果に与える影響

(1) 水質予測モデルの再現計算

2000年を対象に、水温と水質に対する再現計算を行なった結果を、貯水池内の基準点における定期調査時の水温、溶存酸素(DO)、濁度(SS)、Chl.a, TN, TPの項目について、表層(水深0.5m)、中層(平均EL.332.5m)、低層(平均EL.291.4m)の3か所で比較を行った。

a) 水温の再現精度

水温は表層、中層、低層での R^2 はそれぞれ0.961, 0.968, 0.933であり、AMEは1.131, 0.313, 0.470℃とRMSEは1.336, 0.356, 0.522℃と十分な精度で再現計算が行われた(図-4)。

b) 水質の再現精度

DO: R^2 は3つの層で0.460, 0.190, 0.135とAME及びRMSEは0.821, 1.128, 1.563 mg/Lと1.064, 1.366, 2.149 mg/Lであった。特に、10月以降のDO低下の表現ができず、低層での計算誤差が大きくなった。また、この原因については、よく分からなかった(図-4)。

SS: 図-4に示す1～4月にかけて前年から残留していた微細粒子と考えられるSS濃度の再現はできなかったが、小規模の出水が1回あったが、洪水に伴うSSの沈降は、ある程度再現できていた。

Chl.a: 濃度が高く一番問題となる表層の時系列変化をよく再現できた。図は示していないが、植物

図-5 基準点での観測値と再現計算の比較結果2(左:表層, 中:中層, 右:底層; 上:Chl.a, 中:TN, 下:TP)

図-6 気象条件の補正の違いによる貯水池内基準点における水質変化(左:水温, 中:溶存酸素, 右:SS)

プランクトン種毎の再現精度も良好であった(図-5)。

TN・TP: TNはどの層においても再現精度が高かった。これに対し, TPの3か所での R^2 は0.030, 0.078, 0.001と精度が低かった。流入河川のTP($\text{PO}_4\text{-P}$)のLQ式による推定誤差, 植物プランクトンやSSに関するモデルパラメータに起因する問題があると考えられた(図-5)。

(2) ダウンスケーリング気象データが貯水池水質予測結果に与える影響

ダウンスケーリングから得られた直接の値をもとに水質予測計算を行ったケース(計算値)と流入水温と同様にダウンスケーリングからの値を方法5(Quantile mapping, seasonal)によって補正(風向は統計学的補正)した値をもとにした水質予測計算を行ったケース(補正值)の2ケースを, 再現計算結果のケースと比較し考察する。

a) 水温分布に与える影響

浦山ダムの基準点での再現計算値と補正值の水温分布はほぼ同じであったが, 計算値はそれらより明らかに高い水温となった(図-6)。6月21日の表層において, 計算値は補正值よりも 6.3°C 高い水温であった(最大較差)。これは入力された気象データで, 観測値の年平均気温は 12.54°C , 計算値は 13.85°C , 補正值は 12.54°C , 年平均日射量はそれぞ

れ 130.2 , 207.2 , 141.0W/m^2 と, 計算値が観測値と補正值より気温, 日射量ともに大きな値をとっていると同時に, 計算で得られた気温を外力の境界条件として与えているため, 計算値においては不自然な熱収支が生じている場合があるためである。

b) DO分布に与える影響

DO分布は, 水温分布ほど大きな違いはみられず, 12月15日の分布で分かるように, 水温の違いによる飽和濃度の違いが原因の差が支配的である(図-6中)。ただし, 6~8月の分布でこれが明確でないのは, 植物プランクトンの光合成の影響を受けているからと考えられる(図-7上)。

c) SS分布に与える影響

SSの場合, 3つのケースで大きな違いは見られなかった(図-6右)。これは, 計算値での水温分布は他のケースよりも温かいものの, 流入水温も同様に高くなるため, 濁水の貫入状況に違いは見られなかったからと考えられる。ただし将来は, 流出モデルと組み合わせて流入量を変化させるときには, 雨量・流量の誤差が大きく影響を及ぼすと推測できる。

d) 表層Chl.aに与える影響

貯水池内基準点の表層におけるChl.aの違いは明らかであった。日平均最大Chl.aで再現計算値, 計算値, 補正值はそれぞれ 49.7 (8月2日), 60.6 (7月15

図-7 ダウンスケーリングから得られた気象条件の補正による貯水池内基準点表層における日平均の水質変化（上:Chl.a, 中:TN, 下:TP）

日), 62.1(7月22日)µg/Lと, 最大濃度とその発生日も異なった(図-7上)。特に計算値においては, 水温が高くなった影響を受けて, Chl.aのピークの時期が早くなるだけでなく, 一度6月19日にピーク(57.1µg/L)を示した後, PO₄-Pの枯渇による濃度低下を示した後, 7月8日に発生した洪水による栄養塩の補給後に再びピークを迎えており, 植物プランクトンの出現パターンも異なっていた。

c) TN・TP分布に与える影響

貯水池表層におけるTN・TPの濃度には, Chl.aのように大きなケース間の違いは見られなかった。計算に用いた河川流入量とTNとTP等の濃度は, どのケースにおいても同じであるため, 流入河川の貫入位置の違いによる栄養塩の供給水深の違いや藻類の成長と死滅による変化が, ケース間のTN・TPの変化に影響を与えていると考えられる。

5. おわりに

本研究は, 浦山ダムを対象に, JRA25をもとにWRFを用いた力学的ダウンスケーリングを行い, その結果を複数の方法で補正したデータについて精度を評価するとともに, 貯水池生態系モデルを適応したときの, バイアス補正が貯水池水質に与える影響を評価した。ここで, 得られた成果をまとめる。

- 1) 浦山ダム付近の気象データのバイアス補正についての検討を行った結果, 将来時への適応を考慮した場合, 頻度分布マッピングが最も適切な補正方法と考えられた。また, 補正後の精度から, 気温, 気圧, 日射量, 雲量, 湿度についてはバイアス補正が可能であるが, 風向については統計的ダウンスケーリングが有効であり, 風速についてはさらに詳細なダウンスケーリングなどの対応が必要である。
- 2) 湖沼生態系水質予測モデルELCOM-CAEDYMを用いた検討を行った結果, ダウンスケーリングから得られた気温や日射量に適切なバイアス補正を行うことにより, 植物プランクトンのバイオマスに大きな影響を与える表層水温に重要な熱収支の問題を少なくすることができることが分かった。

今後は, ダウンスケーリング手法が流出へ及ぼす検討を含め, 温暖化に伴う詳細なダム貯水池における水量・水質問題を明らかにしていく予定である。

謝辞: 本研究は, 独立行政法人科学技術振興機構, CREST(研究課題「気候変動に適応した調和型都市圏水利用システムの開発」代表古米弘明)の助成を受けて行ったものである。また, 浦山ダムに関するデータは, 水資源機構荒川ダム総合管理所より提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Wood, A. W. et al. : Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 107, D20, 4429, 2002.
- 2) Wood, A. W. et al. : Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs, *Climatic Change*, 62, pp.189-216, 2004.
- 3) Hashino, T. et al. : Evaluation of bias-correction methods for ensemble streamflow volume forecast, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 3, pp.561-594, 2006.
- 4) 猪股広典, 竹内邦良, 深見和彦: GCM降水量データの統計的バイアス補正手法に関する一考察, 水工学論文集, 第53巻, pp.223-228, 2009.
- 5) 洪尾欣弘, 鼎信次郎: 大雨に着目した気候モデル日降水量出力のバイアス補正手法比較, 水工学論文集, 第54巻, pp.235-240, 2010.
- 6) Leung, L. R., Hamlet, A. F., Lettenmaier, D. P. and Kumar, A. : Simulations of the ENSO hydroclimate signals in the Pacific Northwest Columbia River basin, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 80, pp.2313-2318, 1999.
- 7) 藤原洋一ら: GCMs・ダウンスケーリング・水文モデルに起因する温暖化影響評価の不確実性, 水工学論文集, 第52巻, pp.373-378, 2008.
- 8) Najafi, M.R. et al. : Assessing the uncertainties of hydrologic model selection in climate change impact studies, *Hydrological processes*, 25, pp.2814-2826, 2011.
- 9) Lofgren, B.M. et al. : Evaluation of potential impacts on great lakes water resource based on climate scenarios of two GCMs, *J. Great Lakes Res.*, 28(4), pp.537-554, 2002.
- 10) Elliott, J.A. et al. : Combining a regional climate model with a phytoplankton community model to predict future changes in phytoplankton in lakes, *Freshwater Biology*, 50, pp.1404-1411, 2005.
- 11) Taner, M.U. et al. : Integrated model projections of climate change impacts on a North American lake, *Ecological Modelling*, 222, 3380-3393, 2011.
- 12) Frago Jr. et al. : Potential effects of climate change and eutrophication on a large subtropical shallow lake, *Environmental Modelling & Software*, 26(11), pp.1337-1348, 2011.
- 13) 矢島啓, 崔貞圭, Hamilton, D. : 温暖化の季節パターンの変化がダム貯水池の水質に及ぼす影響, 土木学会論文集中B1(水工学), 68 (4), I_1645-I_1650, 2012.

(2012. 9. 30受付)