

自動水質計を用いた雨天時を含む河川水質濃度の推定と負荷量算定評価

AVAILABILITY ANALYSIS OF RIVER WATER QUALITY AND INFLOW POLLUTANT LOAD EVALUATED BY AUTOMATIC WATER QUALITY SENSORS INCLUDING RAINFALL DURATION PERIOD

城戸由能¹・福田勝之²・中北英一³

Yoshinobu KIDO Katsuyuki FUKUDA and Eiichi NAKAKITA

¹正会員 工博 京都大学防災研究所・准教授(〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

²非会員 京都大学・工学部(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)(研究実施時の所属)

³正会員 工博 京都大学防災研究所・教授(〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

Continuous monitoring of river water quality management including rainfall events is needed, because pollutant load from non-point sources became dominant of river basin more than point sources. But it is not easy to get many water samples during rainfall duration and analyze in laboratory. Recently, some automatic water quality monitoring system consisting of multi-sensors was developed, but the evaluation and examination of availability for the actual river observation during long periods have not adequately been tried. This study proposes modification methods to estimate organic pollutants and nutrients by the automatic monitoring and shows the evaluation of amount of runoff pollutant and reasonable monitoring intervals. Statistical multivariate analysis is available for compensation of automatic monitoring sensors. And inflow pollutant load of enclosed lake from river basin can be estimated by continuous compensated data. Automatic water quality monitoring can provide data sets for calibration and verification of hydrologic pollutant runoff model.

Key Words : *Automatic water quality sensor, river water environment management, annual inflow pollutant load estimation*

1. 研究の背景と目的

我が国の公共用水域では工場等の排出規制や下水道等の整備による点源汚濁負荷(Point source)の削減により水質改善が進められてきた。しかし、1980年代以降、非点源汚濁負荷(Non-Point Source)の影響が相対的に大きくなっているが、それを実証するための雨天時の汚濁負荷流出観測は十分行われていない。また、河川水質の改善に伴い流入先の閉鎖性水域における富栄養化によるアオコの発生等は減少したが、原単位法と晴天時観測のみに基づいて算定された流入負荷量に基づく削減対策では、湖沼等の水質改善も不十分となりつつある。このため、降水量依存型の原単位負荷の算定評価や水文・水質モデルを用いた負荷量評価が必要であるが、その検証に要する有機汚濁物質や栄養塩類の水質データを、降雨期間を含めて短時間間隔で十分得ることは人的および機械的労力を考えると困難である。

一方、近年イオンセンサー等を用いた自動水質計の精度が向上し、価格的にも一水系に複数地点に設置することが可能となりつつある。これまでの研究では自動濁度測定計を用いて採水分析による粒度分布と栄養塩類との関係から栄養塩負荷量を推定した研究¹⁾や光学センサーによるクロロフィルa自動測定データに基づいた受水域の富栄養化への影響を検討した研究²⁾が挙げられる。ただし、光学式濁度計については計測部自動洗浄効果や雨天時高濃度濁水の計測限界について課題が残ること、また濁度のみで栄養塩類負荷量を推定することには限界があることが指摘できる。クロロフィルaについては河川流水中と受水域の藻類活性は異なるので、河川水中の自動計測クロロフィルaと河川流水中の栄養塩類との関係性を明らかにする必要がある。さらに、自動水質測定センサーには経時的な感度の劣化や増水時の濁質の影響による測定誤差が存在するため、その補正方法や連続観測時間の限界を明らかにする必要がある。

このように長期間の自動水質計の測定値には当然多くの

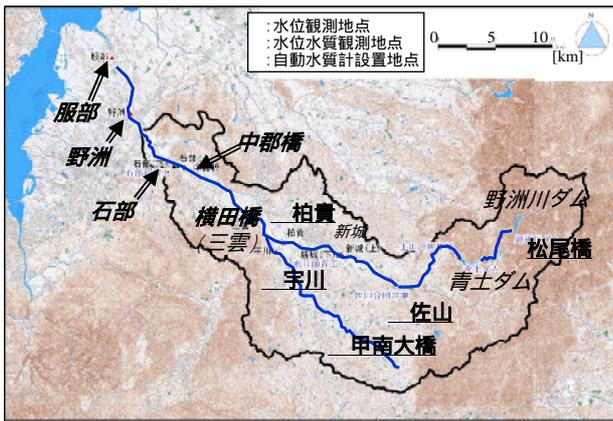


図-1 対象流域と観測地点

計測誤差があるが、多地点で連続的に水質測定値が得られることで限られた地点での時間間欠的な公共用水域の水質観測結果の内挿が可能であると考えた。また、雨天時を含めた年間流入負荷量を算定するためには水文・水質モデルを用いることが必要となるが、そのパラメータ同定および検証のために利用するデータとして有用である。

本研究では河川流域の複数地点に設置した自動水質計データをもとに、機器そのものがもつ計測誤差や降雨時の濁水の影響等を補正する方法を検討し、得られた補正值を用いて有機汚濁物質や栄養塩類等の河川水質の1時間値を推定し、湖沼等への年間流入負荷量の算定評価を行った。

2. 対象流域と観測機器

観測対象流域の野洲川(図-1)は淀川水系の一級河川で幹川流路延長65.3km、流域面積387km²で、琵琶湖流入河川のうち最大である。本川上流に野洲川ダムと青土ダムがあり、後者は自然越流式ダムであり一定量の河川水が流下するため中流部では川幅が広く流量は豊かである。最下流部の河口付近では約40年前まで河道が分岐し天井川となって琵琶湖に流入しており外水氾濫が多発したため、現在では河道を一本化して洪水防止を行っている。中下流域には農地が広がり、水口および石部の頭首工から農業用水が供給されている。石部頭首工より下流の農地には琵琶湖湖水の汲み上げ灌漑も行われており、河口部の水循環をとらえるのは困難な地域となっている。石部頭首工から佐山井堰までの区間では、本川および枝川沿いに主に水田がひろがり、佐山井堰より上流は主に森林域となる。

対象流域内には国土交通省・気象庁・滋賀県により、近江八幡・蒲生・土山のAMeDAS気象観測所、新城・三雲・中郡橋・石部・野洲・服部で水位観測所、服部・横田橋(三雲)で水質観測所が設置されている。本研究では図-1に示す5地点に独自の水質観測点を設け、自動水質計による連続観測と定期的な採水水質分析を実施した。また自動水質計の補正のための室内実験を実施した。使

用した自動水質計(堀場製作所社製:W-23XD)の測定項目は、pH・COND(電気伝導度[S/m])・Temp(水温[℃])・DO(溶存酸素量[mg/L])・ORP(酸化還元電位[mV])・TDS(全溶存固形物量[mg/L])・TURB(濁度[NTU])・塩化物イオン[mg/L]・硝酸イオン[mg/L]・カルシウムイオン[mg/L]・水深[m]・塩分濃度[%]・海水比重[σ_t]の全13項目である。センサー測定のために標準濃度液による校正後、試水の測定を行うが、高精度の測定のためにはイオン項目で1日、その他項目で1週間に一度の校正が推奨されている。しかし、今回の観測ではセンサー設置期間についての検討も目的として、1~3ヶ月に一度校正済みの水質計本体と交換し、持ち帰った水質計の感度を室内実験で確認した。使用した観測データの期間は全地点で2002年11月~2003年10月、松尾川橋・柏貴・甲南大橋については2003年12月~2004年3月のデータも加えている。

3. 観測データの補正方法

複数の変動要因を分離する有効な方法であるスペクトル解析は同時発生する複数の振動波形を分離同定するのに適しており、今回の場合不連続に発生する降雨事象によって発生するセンサー測定値の変動要因を分離するためには適切とはいえない。そこで、機器による計測誤差を考えるにあたり、まず自動水質計測定値の基本的な変動要因として以下の5要因を対象として、それぞれの変動成分を抽出して説明変数とした補正式を導出することを検討した。

年内における季節変動および1日の間の日内変動、
 現地設置センサーを交換した時に発生する個々のセンサー間の測定感度の差異による誤差、
 センサーで連続的に測定するために発生する時間経過に伴う測定感度の変動による誤差、
 降雨による急激な水質変化をセンサーが追従できずに発生する誤差、
 降雨により流出した濁質によりセンサー表面が汚染されたことによる測定感度の変動による誤差。

まず、については機器設置時の採水分析により得られた水質データに基づいて、まず自動水質計観測データから最初に差し引くことで直接補正を行った。

の季節変動は計測値の全てにおいて変動する可能性が考えられる。滋賀県が実施している三雲地点の公共用水域観測結果は晴天時かつほぼ同時刻の採水分析結果であることから降雨影響や日内変動を無視できるので、観測対象期間の毎月の観測値時系列データ12個を年間平均値からの偏差を[-1.0~+1.0]になるように標準化したものを季節変動の基準パターン関数として与えた。水質項目については、pH・DOについては公共用水域水質観測測定値をその

まま用い、ORPについては化学的に関連性の深いpH・電気伝導度、TDSについては溶存イオンとの関係が深いホウ素・フッ素・各態窒素・燐酸・塩素イオンのイオン濃度の総和から季節変動の基準パターン関数を求めた。

日内変動については水温をはじめ多くの水質項目で想定されるが、降雨イベントの発生により大きく攪乱される。また、公共用水域水質観測データは日内の変動を観測していないので用いることができない。そこで、今回の自動水質計計測値の内、降雨による変動や他の変動要因が無視できる計測器交換時から最初の降雨までの短期間の観測データを標本集団として全平均値からの偏差を[-1.0~+1.0]の変動値に標準化したものをパターン関数として設定した。季節変動および日内変動の説明変数をそれぞれのパターン関数に依存した式(1)および式(2)で表す。

については実験室内でセンサーを洗浄・校正後に水道水流水中に一定期間放置した後、標準濃度校正液を計測した(図-2)。実験の結果から時間経過に伴う測定値の誤差はセンサーを交換してからの累積時間の関数として表わせることが確認されたので、自動水質計交換時からの経過時間を用いて式(3)のように表した。については、測定感度誤差は降雨強度の関数であると仮定し、時刻*t*における降雨強度*r(t)*、および現在時刻*t_{now}*を用いた式(4)と式(5)で表した。両者の違いは、前者が降雨継続時間内で発生した感度変動は降雨終了後に戻るが、後者は降雨強度に応じてセンサーの感度劣化あるいはセンサー表面の汚染が累積し、イベント終了後も感度変動が継続すると考えた。以上の要因を説明変数とする関数表現を以下に示す。

$$\text{季節変動: } Cs_i(m) = f1_i(Ps_i(m)) \quad (1)$$

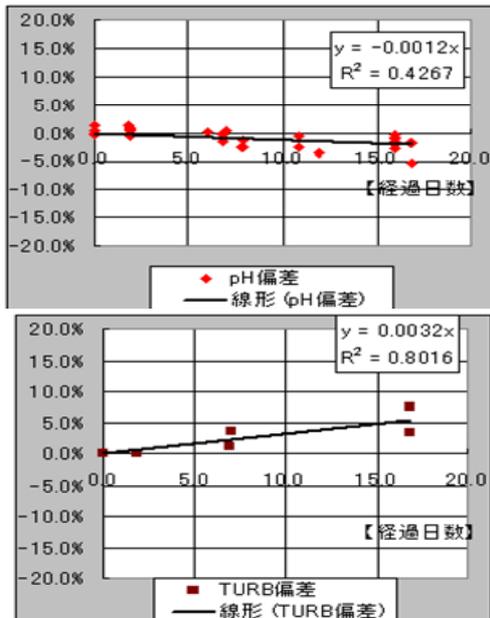


図-2 センサーの経時的感度変動に関する室内実験開始時計測値からの偏差比率と経過日数の関係

$$\text{日内変動: } Cd_i(td) = f2_i(Pd_i(td)) \quad (2)$$

$$\text{測定経過時間に伴う変動: } \varepsilon c_i(tc) = f3_i(tc) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{降雨継続時間内変動: } \varepsilon r_i(r(t)) &= f4_i(r(t)); \text{ if } r(t) > 0 \\ &= 0; \text{ if } r(t) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{降雨後残存変動: } \varepsilon a_i &= f5_i(\max(r(t); t = 0, t_{now})); \\ &0 \leq t \leq t_{now} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、*Cs_i*:季節変動要因、*Cd_i*:日内変動要因、*Ps_i*、*Pd_i*:季節変動および日変動パターン関数、*εc_i*:センサーの経時的な感度の変動要因、*εr_i*:降雨期間内の降雨強度による変動要因、*εa_i*:降雨イベントによる累積的変動要因、*r_i*:降雨強度、*m_i*:月数、*td_i*:日内時間、*tc_i*:機器設置時点からの経過日数、*t_{now_i}*:現在時刻、*f1_i*~*f5_i*:回帰関数、*i_i*:水質項目である。

以上、変動要因を表現する説明変数を準備し、自動水質計計測値を被説明変数とした重回帰分析を行った。対象とした水質項目は、pH・COND・Temp・DO・ORP・TDS・TURBの7項目である。重回帰分析の基礎式は各変動要因の関数

表-1 自動水質測定値補正の重回帰分析結果(宇川観測点)

| 項目 | 変動要因 | 偏帰係数 | 標準化偏帰係数 | T値 | 有意判定 | 重相関係数 |
|------|-------|--------|---------|----------|------|-------|
| pH | 季節変動 | -0.15 | -0.26 | 37.27 | ** | 0.829 |
| | 日内変動 | 0.17 | 0.31 | 49.36 | ** | |
| | 経過時間 | 0.00 | -0.10 | 12.75 | ** | |
| | 降雨時間中 | -0.01 | -0.01 | 2.18 | * | |
| | 降雨後残存 | -0.03 | -0.59 | 72.82 | ** | |
| | 定数項 | 3.43 | - | 1,398.55 | ** | |
| DO | 季節変動 | 0.71 | 0.18 | 17.50 | ** | 0.410 |
| | 日内変動 | 0.11 | 0.02 | 1.86 | | |
| | 経過時間 | 0.00 | -0.35 | 28.86 | ** | |
| | 降雨時間中 | -0.11 | -0.04 | 3.45 | ** | |
| | 降雨後残存 | 0.15 | 0.40 | 29.34 | ** | |
| | 定数項 | 11.85 | - | 184.32 | ** | |
| COND | 季節変動 | 0.00 | 0.01 | 0.91 | | 0.301 |
| | 日内変動 | 0.00 | -0.07 | 6.70 | ** | |
| | 経過時間 | 0.00 | -0.16 | 12.97 | ** | |
| | 降雨時間中 | 0.00 | -0.12 | 11.39 | ** | |
| | 降雨後残存 | 0.00 | -0.13 | 10.43 | ** | |
| | 定数項 | 0.01 | - | 209.90 | ** | |
| TDS | 季節変動 | 0.00 | 0.01 | 0.95 | | 0.281 |
| | 日内変動 | 0.00 | -0.11 | 9.75 | ** | |
| | 経過時間 | 0.00 | -0.16 | 12.56 | ** | |
| | 降雨時間中 | 0.00 | -0.12 | 11.50 | ** | |
| | 降雨後残存 | 0.00 | -0.08 | 6.33 | ** | |
| | 定数項 | 0.09 | - | 201.83 | ** | |
| TURB | 季節変動 | 5.29 | 0.01 | 0.64 | | 0.476 |
| | 日内変動 | 254.95 | 0.50 | 35.48 | ** | |
| | 経過時間 | 0.06 | 0.14 | 7.65 | ** | |
| | 降雨時間中 | 4.14 | 0.01 | 0.71 | | |
| | 降雨後残存 | -11.67 | -0.27 | 14.77 | ** | |
| | 定数項 | 339.20 | - | 40.16 | ** | |
| ORP | 季節変動 | -11.34 | -0.04 | 4.49 | ** | 0.473 |
| | 日内変動 | -1.89 | -0.01 | 0.93 | | |
| | 経過時間 | 0.08 | 0.41 | 34.63 | ** | |
| | 降雨時間中 | 3.02 | 0.02 | 2.42 | * | |
| | 降雨後残存 | -7.75 | -0.50 | 39.28 | ** | |
| | 定数項 | 643.51 | - | 236.82 | ** | |
| Temp | 季節変動 | 0.81 | 0.08 | 19.72 | ** | 0.931 |
| | 日内変動 | 7.76 | 0.76 | 118.74 | ** | |
| | 経過時間 | 0.00 | -0.08 | 14.44 | ** | |
| | 降雨時間中 | -0.08 | -0.01 | 2.62 | ** | |
| | 降雨後残存 | 0.22 | 0.24 | 31.94 | ** | |
| | 定数項 | 12.91 | - | 182.50 | ** | |

** : 1%有意, * : 5%有意

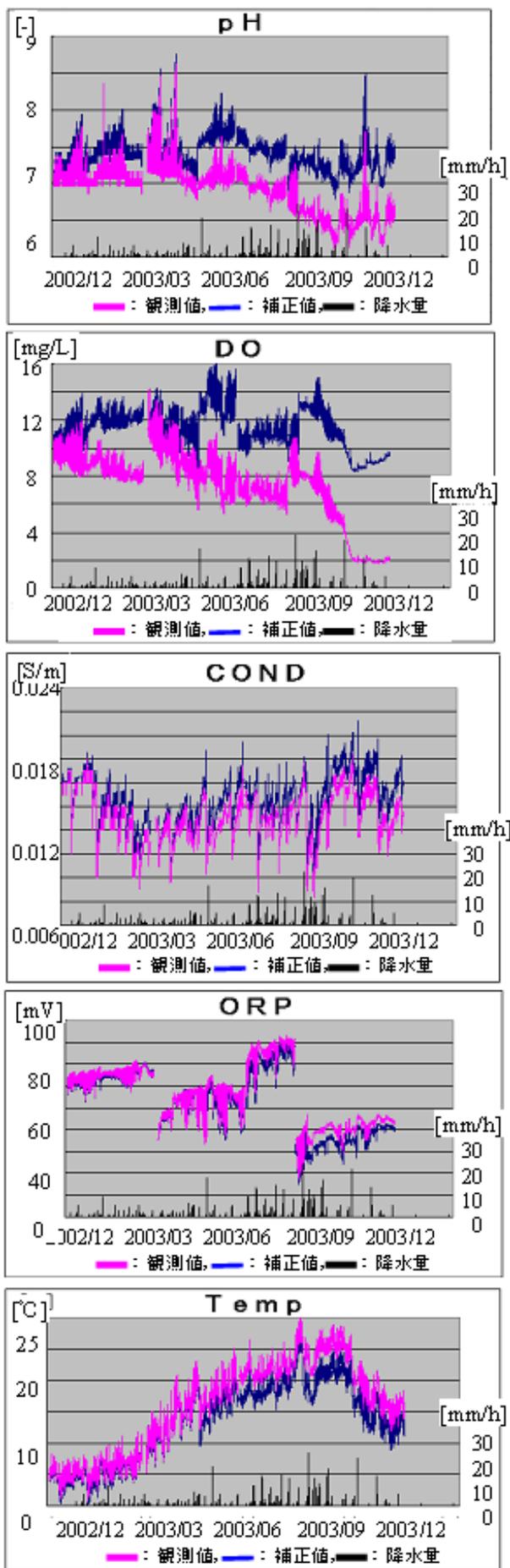


図-3 自動水質計の観測値と補正值(宇川地点)

表現を用いると式(6)のように表せるが、今回は各要素の線形和と仮定して式(7)を満たす各係数 a_i を統計的に求めることで誤差項を同定し、式(8)により逆算して、自動計測値から推定される測定値(補正值)を求めた。式(7)・(8)では水質項目の添え字 i を省いている。なお、要因については観測値が本質的に内在する変動であり誤差ではなく、以降の誤差成分を特定するために重回帰分析に導入した変数であるので、補正值(式(8)左辺)に含めて評価している。

$$Cauto_i = C0_i + Cs_i(m) + Cd_i(td) + \varepsilon_i(tc) + \varepsilon_i(t) + \varepsilon_{ai} \quad (6)$$

$$Cauto = a_0 + a_1 \cdot Ps(m) + a_2 \cdot Pd(td) + a_3 \cdot tc + a_4 \cdot r(t) + a_5 \cdot (Max(r(t); t0, t_{now})) \quad (7)$$

$$\hat{C}auto = Cauto - \{a_3 \cdot tc + a_4 \cdot r(t) + a_5 \cdot (Max(r(t); t0, t_{now}))\} \quad (8)$$

ここで、 $Cauto$:自動水質計計測値、 $\hat{C}auto$:自動水質計補正值、 $a_0 \sim a_5$:重回帰係数、 $C0$:定数項、 i :水質項目である。宇川地点におけるpH～ORPの6項目についての補正の結果を図-3示す。季節変動・日内変動を含み、センサーの設置時間、降雨イベントによるセンサー感度の変動成分を差し引いたものとなっている。宇川地点における重回帰分析の結果を表-1に示す。

pHについては、表-1に示すようにほとんどの説明変数が有意であると判定されており、図-3に示す宇川を含む全地点で日内変動および季節変動が主となっていた。特に夏季日中の植物プランクトン光合成による水中二酸化炭素の消費によるpH上昇の影響が大きいと考えられる。また、降雨による流出雨水中のイオン成分により短期間pHが低下する特徴が見られた。化学的に関係性の深いORPについても降雨時の一時的な変動よりも季節的な変動および降雨イベントの累積的な影響が大きく寄与していることが推定された(図-3)。

CONDとTDSについては、日内変動と降雨期間中の変動が比較的小さく、降雨イベント時の変動が大きい。降雨後に残存するセンサー感度の変動は小さく、年間を通じた季節的な変動も小さい(図-3)。これは、表-1の季節変動の説明変数の有意判定が低いことから明らかである。濁度については、降雨発生初期の濁質流出によって計測限界値超過が多数発生し、今回用いた濁度センサーでは降雨期間中の濁度観測が十分行えず、上流部の松尾・佐山地点に比べて特に下流3地点における偏重回帰係数およびその有意度は低い評価となった。

補正効果を確認するため、観測5地点のpH等5項目について、重回帰分析に用いなかった採水試料の室内分析

値と補正前後の自動水質計測定値との比率で比較した(図-5)。pHとORPは補正前後でほぼ100%の位置にプロットされており、補正の効果は小さい。CONDとTDSについては、補正前の計測値は採水計測値に対し80%であるが、各地点の補正後は、やや採水計測値に近づいている。DOについては、補正前は採水計測値を大きく上回っているが、補正後は採水計測値とほぼ一致することが確認できた。

4. 評価地点の水質推定と流入負荷量の推定

以上の結果、pH・COND・TURB・DO・ORPの5項目については少なくとも実計測値そのものよりも補正式を用いた方が水質評価値としてよいことが確認されたので、自動水質計の1時間間隔の連続水質観測データと補正式を用いて、現状では月1回の観測しか行われていない横田橋(三雲)および服部地点の有機汚濁物質(COD)および栄養塩類(T-N)の1時間水質値の推定を行った。

補正により得られた中・上流部5地点の時間水質値を用い、野洲川中・下流部に位置する横田橋および服部の毎月の公共用水域晴天時観測結果³⁾を被説明変数、自動水質計の補正値を説明変数とした重回帰モデルを作成し、CODおよびT-Nの毎時刻水質値の推定を行った。全地点の説明変数の数が多いので、まず各地点で補正結果が良好だった水質項目を説明変数とした重回帰分析を行い、有意度と寄与度、多重共線性など統計的な意味を考慮するとともに、濁度のように異常値の多い水質項目を除くなど物理的な特

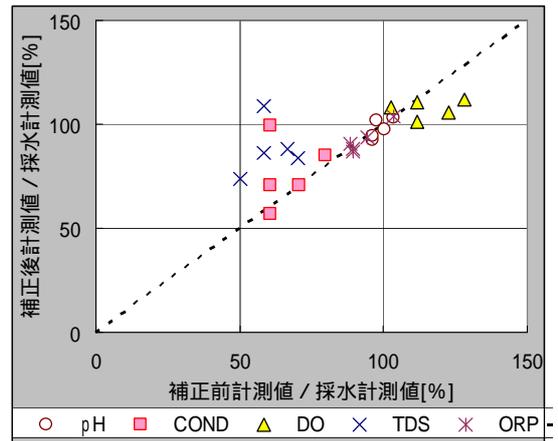


図-4 補正前後の計測値の採水計測値との比較

表-2 野洲川下流部服部地点のCODとT-N推定重回帰モデル

| 評価地点 | 説明変数 | | 偏帰係数 | 標準偏帰係数 | T 値 | 有意判定 | 重相関係数 |
|------|------|------|--------|--------|------|------|-------|
| | 地点名 | 水質項目 | | | | | |
| 服部 | 佐山 | DO | -0.35 | -1.44 | 5.79 | ** | 0.975 |
| | 柏貴 | COND | 179.47 | 0.63 | 4.16 | ** | |
| | 柏貴 | ORP | 0.00 | -0.89 | 3.81 | * | |
| | 甲南 | TDS | -29.52 | -0.90 | 3.50 | * | |
| | 宇川 | COND | -75.89 | -0.29 | 1.41 | | |
| | | 定数項 | 9.62 | | 6.01 | ** | |
| 服部 | 松尾 | pH | -0.17 | -0.22 | 2.54 | | 0.999 |
| | 松尾 | Temp | -0.04 | -0.85 | 2.14 | * | |
| | 佐山 | pH | 0.28 | 0.41 | 3.93 | * | |
| | 佐山 | TDS | -3.39 | -0.15 | 1.15 | * | |
| | 甲南 | TDS | 4.92 | 0.36 | 4.53 | * | |
| | 柏貴 | pH | -0.09 | -0.21 | 1.63 | * | |
| | 柏貴 | ORP | 0.00 | 0.04 | 0.21 | ** | |
| | 宇川 | Temp | -0.02 | -0.50 | 1.02 | ** | |
| | | 定数項 | 1.05 | | 1.72 | | |

有意判定:**:1%有意,*:5%有意

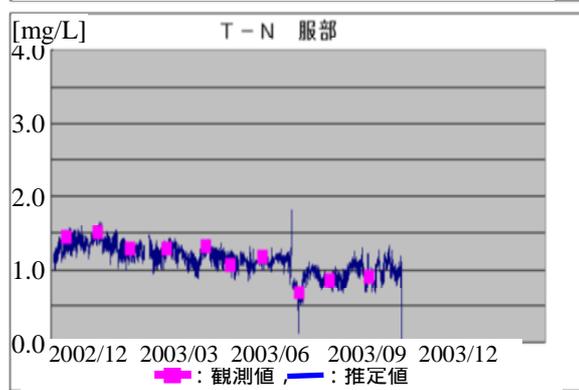
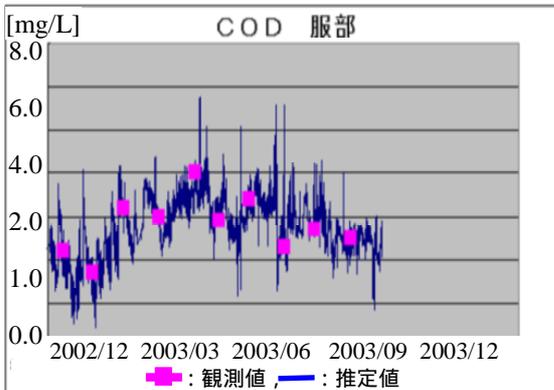
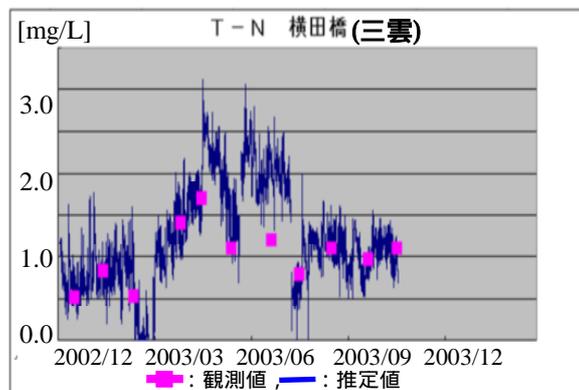
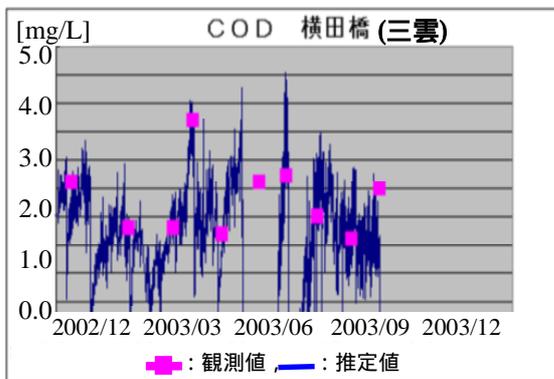


図-5 重回帰モデルによる横田橋・服部地点のCODおよびT-Nの一時間推定値と観測値

表-3 本研究と既往研究の原単位を用いた負荷量算定比較

| 文献原単位 | 総負荷量[ton/yr] | |
|-------------------|--------------|-------|
| | COD | T-N |
| 本研究 | 733.1 | 247.8 |
| 大塚他(2003) | 655.0 | 265.6 |
| 國松他(1989) | 524.9 | 200.8 |
| Kido et al (1997) | 1,484.1 | 627.0 |

性も考慮して説明変数の選定を行った(表-2)。最終的に選択された説明変数により推定された横田橋(三雲)・服部両地点のCOD・T-Nの推定結果を図-5に示す。重相関係数の値は高く、選択された地点・水質項目の有意性も高いと判定されたので、このモデルを用いて負荷量推定を行った。

さらに、両地点の時間水位データから換算した流量と毎時刻水質値の推定結果から年間負荷量を推定し、既存文献から得た土地利用別原単位を基に算定した負荷量と比較した(表-3)。今回の算定結果は野洲川を対象とした既往研究結果⁴⁾とほぼ一致し、晴天時観測に基づく原単位による積算結果⁵⁾よりも大きくなった。一方で他の水系における晴天時観測に基づく原単位を用いた積算値⁶⁾は他の算定例よりも大きく、原単位データの根拠となる観測流域特性や降雨量等の差異が負荷量算定の上で大きな影響を及ぼしており、ある流域の観測負荷量に基づいた原単位を直接別の流域に用いることには限界があることも確認できた。

次に、1時間ごとに得られる自動水質計のデータにもとづく推定値がその時点での水質値であると仮定し、現状では月1回の晴天時・日中に実施される公共用水域の観測頻度を仮想的に月1回から毎時間観測まで変化させた場合の年間水質平均値および分散への影響を評価した(図-6)。月1回の観測頻度では観測日時の影響が大きく、何日の何時に観測を行うかによって年間平均値および分散値が大きく変動する。観測頻度が増加するにつれて当然年間平均値および分散値は一定の値に収束する傾向が見られる。図では週1回から日1回の間でサンプリング個数が足りず、評価平均値と分散値の変動傾向は不連続となっている。今回の検討の結果、対象流域では週1回～日1回の観測でCOD年間平均値および年間分散で0.3[mg/L]程度の範囲に収まるので、自動水質計を用いるか否かにかかわらず少なくともこの頻度の観測が実施されることで、対象水系の年間平均的な水質環境の評価および閉鎖性水域への流入負荷量の推定評価の精度が向上することが期待できる。

5. 結論

自動水質計観測値の補正から得られたCODとT-Nの1時間値により、現在の水質観測方法にもとづくと年間負荷量が小さく見積もられていること、原単位法では降雨による負荷流出の推定が難しいことを示した。また、観測頻度が月1回程度では、その日時刻によって得られる水質状況は大きく

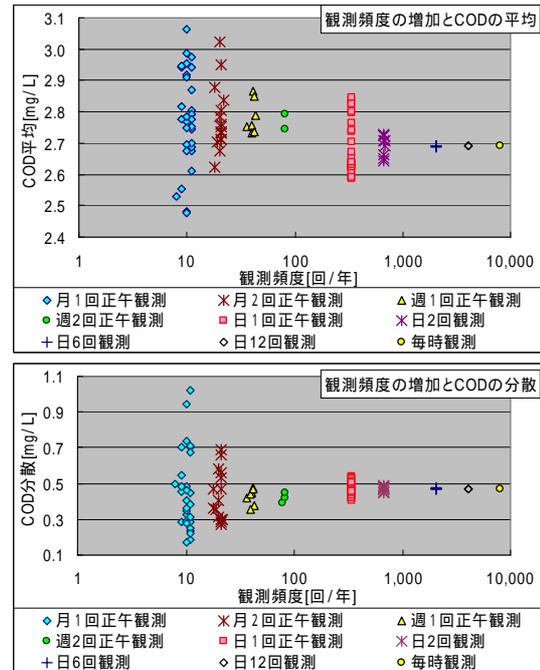


図-6 観測頻度とCOD推定値の平均および分散

変動し、全期間の水質環境を評価するためには観測頻度を増やす必要があることを明らかにした。

謝辞：観測実施にあたり国土交通省琵琶湖工事事務所の協力をいただいた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 山本浩一 他:濁度計による懸濁態栄養塩負荷推定に関する研究, 河川技術論文集, 第9巻, pp.515-520, 2003
- 2) 大久保卓也 他: ノンポイント負荷が琵琶湖水質に及ぼす影響の把握 - 降雨時等の非正常流入負荷の定量的把握とその琵琶湖水質への影響把握(その2), 平成18年度滋賀県琵琶湖環境科学研究センター試験研究報告書, Vol.3, pp.55-66, 2008
- 3) 滋賀県: 環境白書平成16年度版資料編, <http://www.pref.shiga.jp/biwako/koai/hakusyo16/shiryo16/index.html>, 2005.
- 4) 大塚恵教 他: 琵琶湖集水域 - 野洲川における溶存物質濃度と流域土地利用の関係, 流域水循環の動態の研究, 京都大学防災研究所一般共同研究13G-08, pp.106-124, 2003.
- 5) 國松孝男 他: 河川汚濁のモデル解析, 技報堂出版, pp.12-85, 1989
- 6) Y. Kido et al.: Estimation of Annual Runoff Pollutant Load and Its Reduction Efficiency, Technology Report of Tottori Univ., Vol.28, No.1, pp.253-260, 1997.

(2009.9.30受付)