

河川水質の連続時系列推定値に基づく霞ヶ浦 流域からの流出負荷量の特性分析

ANALYSIS ON POLLUTANT LOAD CHARACTERISTICS IN KASUMIGAURA WATERSHED BASED ON RIVER WATER QUALITY TIME SERIES

黎 嘉韻¹・木内 豪²・石川 忠晴³

Jiayun LI, Tsuyoshi KINOCHI and Tadaharu ISHIKAWA

¹学生会員 工修 東京工業大学 総合理工研究科 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259)

²正会員 工博 東京工業大学准教授 総合理工研究科 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259)

³正会員 工博 東京工業大学教授 総合理工研究科 (〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259)

This paper analyzes the impact of land use factors to pollutant distribution in the watershed of Lake Kasumigaura. In the field experiment presented in this paper, two types of optical signals and water quantity were used to estimate the loads of chemical oxygen demand (COD), particulate chemical oxygen demand (P-COD), total nitrogen (TN), nitrate (NO₃-N), total phosphorus (TP) and particulate phosphorus (P-P). Artificial neural network (ANN) models are trained to set up the correlations among them. Annual pollutant loads were calculated by the ANN simulation results. Regression analysis was applied to evaluate the impact of different types of land use in different periods to the 6 pollutants respectively. The analysis results showed that paddy fields exert strong positive influence on the load of COD, P-COD, TP and P-P in the flood-irrigation period, and less influence on the load of TN and NO₃-N in almost the whole year except the flood-irrigation period. The cropland exerts strong influence on load of TN and NO₃-N in the whole year. According to the regression results, pollutant load in unit area in the basin is also estimated.

Key Words : Artificial Neural Network model, Time series, Land use, Regression analysis, Unit pollutant load

1. はじめに

水域に過剰な量の窒素やリンが流入すると水塊の低酸素化と藻類の異常な増殖を引き起こす。この富栄養化現象は人間活動によって加速され、世界の多くの国々で今もなお大きな問題となっている。この問題を解決するには人間活動に伴い直接的あるいは間接的に水域にもたらされる窒素やリンを適切に削減することが重要である¹⁾ことから、原因となる有機物や栄養塩等といった富栄養化物質(汚濁負荷)の起源や水域への流出現象の特性をより良く理解し、その上で効果的な対策を実施していかなければならない。

土地利用の形態は、汚濁負荷の流出量を大きく左右する要因であることから、様々な土地利用からの汚濁負荷流出量について、これまでも各種調査がなされ、その結果は、汚濁負荷原単位やL-Q式のような汚濁負荷量推定法となって水質保全計画等に活用されてきている²⁾。し

かし、流域の土地利用やそれ以外の環境も変化するものであり、水域に流入する汚濁負荷量を計画的に削減していくためには、土地利用の形態に基づく汚濁負荷の流出原単位を時代とともに見直し、汚濁負荷量の推定精度を高めていく必要がある。また、水田、農地、森林などの面源由来の汚濁負荷は洪水時の短時間に集中し、時間的変動が大きいことが知られている³⁾ことから、土地利用との関係においては、洪水時、非洪水時などの水文条件の違いもきめ細かく考慮することが重要である。すなわち、水域に流入する汚濁負荷量の時空間変動特性を踏まえた、より精度の良い汚濁負荷量の推定結果に基づきながら、原因同定や対策実施を行うことが重要である。

そこで、本研究では富栄養化問題の改善がなかなか進まない霞ヶ浦流域を対象に、光学センサーを用いて計測された水質情報を利用して、ニューラルネットワーク(Artificial Neural Network, 略してANN)モデルを用いて汚濁負荷量の連続時系列情報を作成し、この連続時系列情報に基づいた、より詳細な汚濁負荷原単位の推計を試

みる。ANNにより負荷量の連続時系列情報を作成するにあたっては、2007年に霞ヶ浦への流入河川で計測した濁度とクロロフィル蛍光強度のデータ及び平常時・出水時に行ったCOD, P-COD(懸濁態COD), TN(総窒素), NO₃-N(硝酸体窒素), TP(総リン), P-P(懸濁態リン)の水質分析結果を学習データとして用いる。これらのデータを利用して学習させたANNにより負荷量の連続時系列情報を作成し、この情報を季節別(灌漑期・非灌漑期別、洪水時・平常時別)に積算した負荷量と土地利用との関連性について重回帰分析によって検討を行う。そして、最終的には土地利用別・季節別・汚濁指標別の負荷原単位を推定し、汚濁負荷量に及ぼす流域の土地利用の影響や季節的な差異の特徴を明らかにする。

2. 研究地域

(1) 位置

霞ヶ浦流域は、茨城県の南東部に位置し、周囲約50km四方の面積を有する。流域は茨城県全体の1/3以上を占め、多くの人々の暮らしが営まれている。また、霞ヶ浦の水は生活用水や農業用水をはじめとして、漁業や工業などの地域産業を支えており、極めて重要な地域の水資源となっている。

図-1には、本研究の対象とした恋瀬川、桜川、巴川、銚田川、清明川と小野川の流域を示す。これらの流域は比較的近接していることから、気象条件が汚濁負荷流出に及ぼす影響度合いの相違についてはあまり考慮することなく、土地利用や流域活動の違いの影響に絞って検討することができる。

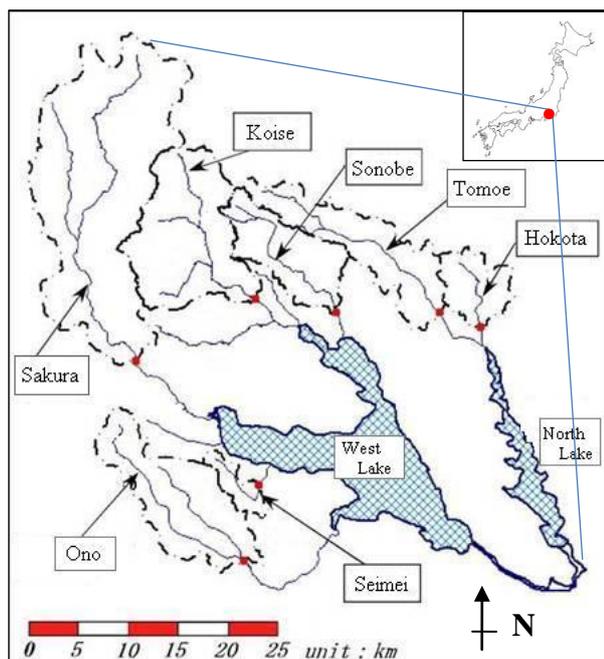


図-1 霞ヶ浦流域

表-1 各支流域の土地利用状況 (%) ⁴⁾

| | | 水田 | 農地 | 森林 | その他 |
|----|-----|------|------|------|------|
| G1 | 恋瀬川 | 21.6 | 18.7 | 48.6 | 11.1 |
| | 桜川 | 28.1 | 16.9 | 34.6 | 8.8 |
| G2 | 小野川 | 14 | 32.8 | 18.2 | 15.2 |
| | 清明川 | 20 | 29.1 | 22.7 | 9.8 |
| G3 | 銚田川 | 11.3 | 53.9 | 24.2 | 3.2 |
| | 巴川 | 15.9 | 46.9 | 21.6 | 5.1 |

(2) 土地利用

これら6支流域の気象条件はほぼ同じだが、各流域の土地利用状況は互いに異なる。表-1に示すように、各流域の土地利用種別割合は、恋瀬川、桜川では森林と水田が多く、他の4流域では農地(畑地・樹園地)が多い(巴川、銚田川でおよそ50%、小野川、清明川はおよそ30%)という特徴がある。また、小野川流域では比較的下水道整備が進んでいる。よって、これら6支流域は次の3つのグループに分類することができる。グループ1は恋瀬川と桜川、グループ2は小野川と清明川、グループ3は巴川と銚田川である。グループ1は森林や水田によって支配され、グループ3はグループ2よりも極めて農地面積の割合が高い。グループ2はその中間的な土地利用の特性を有する。

3. 汚染負荷計算

(1) 従来の時系列汚濁負荷推定法

汚濁負荷の累積量や時系列値を得るために最も広く使われている方法は、低コストで、多大な労力を必要としないL-Q法である。河川流量Qが汚濁負荷Lを決定する単一の要因として取り扱う方法である。L-Q法の方程式は下記の通り表される。

$$L = CQ^n \quad (1)$$

ここで、L: 汚濁負荷量、C: 定数項、Q: 河川流量、n: 回帰的に求まる指数である。L-Q法は汚濁負荷を過小評価していることが指摘されている³⁾。

現地における窒素・リン等の直接計測によらずに汚濁負荷の時系列値を推定する別の方法として、例えば、Liuら⁵⁾が用いた汚濁物質の濃度と光学センサーによる計測値を線形回帰する方法が挙げられる。

(2) 本研究における時系列汚濁負荷の算定手法

本研究では、Liuら⁶⁾によって非線形性が強い場合を考慮して検討された手法を用いる。本手法では、光学センサーによる計測結果とニューラルネットワーク(ANN)モデルを組み合わせ、河川水中の汚濁物質濃度の時系列値を計算する。ANNの入力値は光学センサーの計測結果で、出力値は汚濁物質濃度となる。

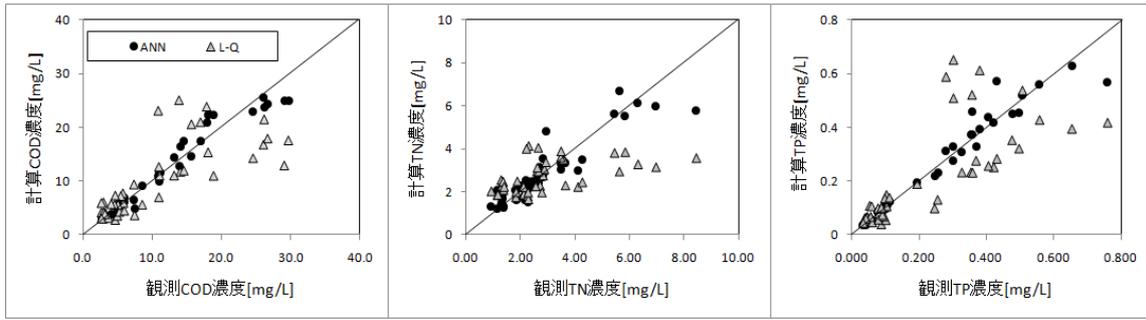


図-2 桜川のL-QとANNの汚濁負荷計算結果の比較

本手法に基づくと、汚濁負荷量は次のように一般的に表現できる。

$$L = C (Chl-a, Tb) \times Q \quad (2)$$

ここで、 L : 推定される汚濁負荷量, C : ANNにより求まる汚濁物質濃度, Q : 河川流量, $Chl-a$: 光学センサーにより計測されるクロロフィルa 蛍光強度, Tb : 光学センサーにより計測される濁度である。河川流量のデータには国土交通省の常時モニタリングデータを利用できる。

図-2はANNとL-Q法により桜川のCOD、TN、TPを推定した結果である。これより、ANNの結果はL-Q

よりも観測値に近い推定が得られていることがわかる。桜川以外についても同様に比較をした結果、相対誤差の範囲は表-2に示すように、ANNの方が全体的にL-Q法より良い結果が得られることがわかった。相対誤差の計算には次式を用いた。

$$\text{相対誤差} = \frac{|\text{推定値} - \text{実測値}|}{\text{実測値}} \times 100\%$$

図-3(a)には恋瀬川の2007年のCOD、TNとTPフラックスの時系列の計算結果を示す。図-3(b)は洪水イベント中のCOD、TNとTPフラックスの図を拡大表示したものである。推定値(黒線)と実測値(灰色の○)を比較すると、ANNによる推定値は実測値と良く一致

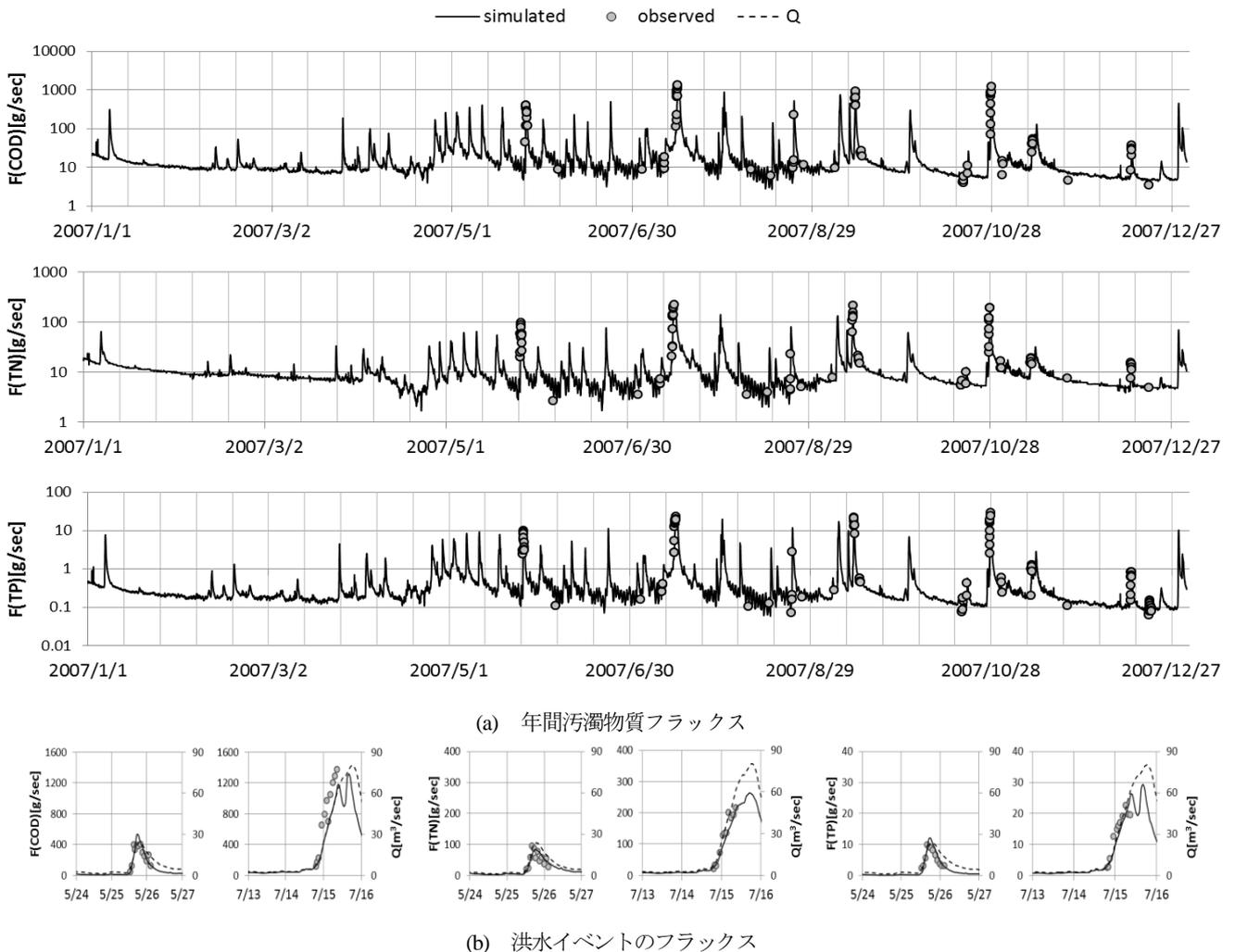


図-3 2007年恋瀬川の汚濁物質のフラックスの時系列

表-2 6河川各汚濁物のANNとL-Qの計算結果の相対誤差の範囲(%)

| | COD | P-COD | TN | NO ₃ -N | TP | P-P |
|-----|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|
| ANN | 10~21 | 18~60 | 16~30 | 13~217 | 10~22 | 12~45 |
| L-Q | 24~50 | 43~87 | 19~36 | 21~285 | 26~60 | 28~77 |

していることがわかる。程度の違いはあるが、同様のことが他の流域についても確認された。なお、フラックスの相対誤差は原理的に濃度と同じなので、相対誤差の範囲は表-2の通りとなる。

本研究でのANN適用の目的はあくまでも信頼性のある過去の時系列汚濁負荷情報を作成することにあるが、ここで示した結果は実際のリアルタイムのモニタリングにも適用できる可能性があることを示唆している。

(3) 時期別の汚濁負荷量の推定方法

1年のうちの異なる期間における汚濁負荷量の特徴や土地利用との関係を調べるため、1年を灌漑期(I)と非灌漑期(NI)に分け、さらにそれぞれを洪水(F)または非洪水(NF)に分けた。つまり、分類上、1年を灌漑・非灌漑、洪水・非洪水の2×2=4つの組み合わせで分類した。洪水期間は、95日流量をしきい値として、それより流量が大きい時を洪水時、小さい時を非洪水時とみなした。灌漑期間は4月1日から9月30日に設定し、それ以外は非灌漑期とした。

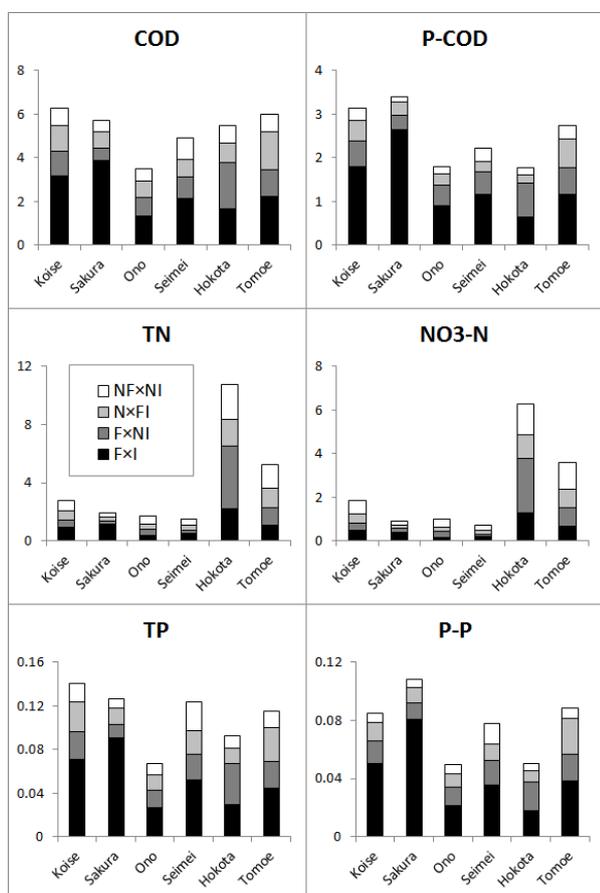


図-4 各流域時期別単位面積当たりの汚染負荷量(t/km²*yr⁻¹)

(4) 汚濁負荷の計算結果

式(2)から求まる汚濁負荷量を上述の4期間(I×F, NI×F, I×NF, NI×NF)ごとに算出し、流域面積で除することによって単位流域面積当たりの汚濁負荷量(以下、単位負荷量)を算出した(図-4)。

図-4から、土地利用の特性に対応して、単位負荷量にも異なる特徴が見いだされる。例えば、農地が優占する銚田川と巴川流域における全窒素の単位負荷量は、明らかに他の流域よりも大きい。硝酸態窒素についても同様のことが言える。また、水田や森林が優占している恋瀬川と桜川流域では、CODとTPの単位負荷量が灌漑期の洪水時(I×F)で明らかに高い値を示した。小野川流域ほどの汚濁物質においても単位負荷量が他の流域より低い傾向にあるが、この原因は下水道整備率が高く、点源由来の汚濁負荷が直接河川に流出しないことと関係していると考えられる。

4. 回帰分析と原単位負荷量の推定

(1) 回帰分析

土地利用の影響をより客観的に分析するため、図-5に示した単位負荷量と各流域の土地利用との関連を重回帰分析により調べ、各土地利用の汚濁負荷流出原単位(以下、原単位)を求めた。分析に用いた入力変数は各土地利用(水田、農地、森林)の面積率である。 χ_1 (水田)、 χ_2 (農地)、 χ_3 (森林)とすると、それ以外の土地利用(その他)の面積率は $\chi_4=1-(\chi_1+\chi_2+\chi_3)$ と計算される。また、単位負荷量は: $F=U_1\chi_1+U_2\chi_2+U_3\chi_3+U_4\chi_4$ (t/km²)として表現される。原単位を表す回帰係数U1~4はそれぞれ、水田、農地、森林、その他に対応する。重回帰のための評価関数には次式を用いた。

$$E_s = \sum_{i=1}^m \left(L_s - \sum_{j=1}^n (U_{js} * R_{ij}) \right)^2, U \geq 0 \quad (3)$$

ここで、 E_s : 各時期の評価関数、 s : 4時期(I×F, NI×F, I×NF, NI×NF)のいずれか、 L_s : 各流域のs時期の単位負荷量、 U_{js} : j土地利用のs時期に対する原単位、 R_{ij} : i流域のj土地利用の面積率である。 $i=1\sim m$ は河川流域($m=6$)、 $j=1\sim n$ は土地利用種別($n=4$)を意味している。 E_s が最も小さくなるまで、いくつかの係数の組み合わせを試し、 E_s が最小値を得られるような係数Uを原単位とする。計算ではUが非負値になる条件とした。

(2) 原単位の推定結果

図-5に土地利用別・時期別の原単位の算定結果を示す。各時期の評価関数の平方根 $\sqrt{E_s}$ は表-3のようになった。

各土地利用形態からの汚濁負荷量原単位の既往の報告値を表-4に示す。年間値は各時期の原単位の合計となっている。年間値は概ね既往の報告値の範囲内にあったが、農地の結果は既往値よりも大きかった。

図-5によると、CODとリンの場合には、水田からの年間原単位が他の土地利用に比べて最も大きく、水田の

表-3 各時期の評価関数の平方根 \sqrt{Es}

| | F×I | F×NI | NF×I | NF×NI |
|--------------------|------|------|------|-------|
| COD | 0.70 | 0.60 | 0.75 | 0.39 |
| P-COD | 0.72 | 0.17 | 0.37 | 0.19 |
| TN | 1.06 | 2.60 | 0.79 | 0.97 |
| NO ₃ -N | 0.61 | 1.47 | 0.51 | 0.62 |
| TP | 0.02 | 0.01 | 0.02 | 0.02 |
| P-P | 0.02 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |

表-4 各土地利用からの汚濁負荷量原単位報告値²⁾

| | 水田 | 農地 | 森林 |
|-----|-----------|-------------|-------------|
| COD | 10.0~45.7 | 0.49~2.2 | 1.64~3.14 |
| TN | 3.77~6.76 | 1.94~5.26 | 0.35~0.55 |
| TP | 0.15~0.74 | 0.032~0.043 | 0.037~0.047 |

単位: $t/km^2 \cdot yr^{-1}$

年間原単位に占める洪水・灌漑期の原単位のウェイトが大きい。また、CODとリンに関する水田の年間原単位は、各土地利用の年間原単位を全て合計した値の50%を超える。CODやリンは洪水時に土砂とともに流出すると考えられることから、水田が比較的、水で満たされている灌漑期にあつては洪水時に容易に田面水位が上昇し、土砂あるいは有機物が流出しやすい状況となっていることが影響していると考えられる。一方、洪水・非灌漑期時には、水田に水が無い状態に降雨が流入することとなり、相当の豪雨でない限りは、水田が湛水するだけで、土砂・有機物の流出はほとんどないと考えられ、そのため、CODとリンの原単位はゼロか、小さい値を示したものと考えられる。水田の原単位には及ばないものの、CODとリンに関しては、森林の洪水・灌漑期原単位も比較的大きな値を示しているのも特徴的である。一方、農地の場合は、洪水・非灌漑期および平常・灌漑期において、COD、リンの原単位が比較的大きな値を示した。非灌漑期には作物で耕地が覆われていない場合も多いと考えられ、そのような土地に降雨があれば土砂は流出し易いことから、この結果は合理的と考えられる。平常・灌漑期に比較的高い原単位を示した理由としては、農地におけるP-CODとP-Pの平常・灌漑期原単位が同じく洪水・非灌漑期原単位の半分以下になっていることから考えると、より微細な土粒子成分が小規模出水等により流出したり、溶存成分が流出したことによるものと考えられる。

窒素の場合では、農地における原単位が、洪水・非灌漑期間を中心に、全期間を通じて高いことから、農地が窒素の支配的な負荷流出源になっていると考えられる。農地では継続的に施肥が行われているとともに、水田の

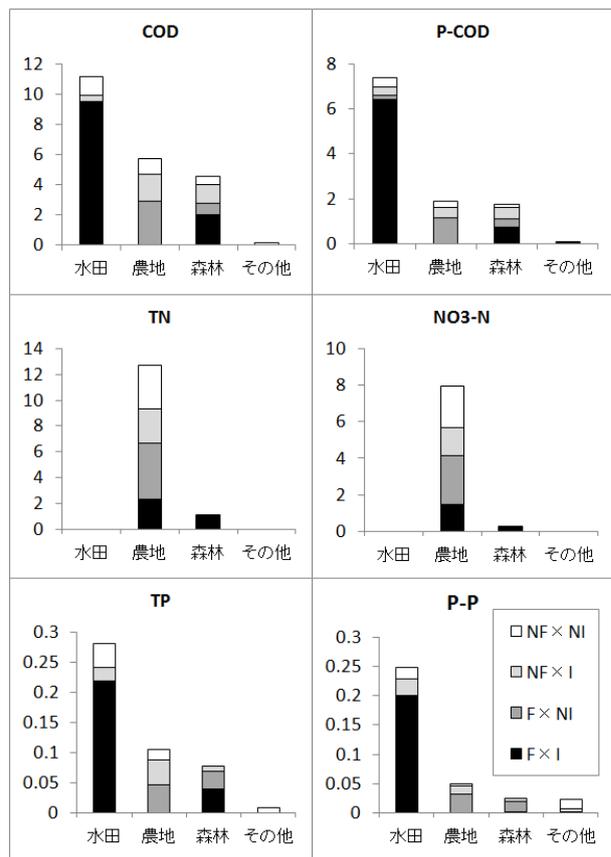


図-5 土地利用別の汚濁負荷量原単位 ($t/km^2 \cdot yr^{-1}$)

ような脱窒作用も少ないと考えられることから、このように顕著な値を示したものとみられる。年間を通じて高い原単位であるのは、基底流出を形成する地下水の窒素濃度が高くなっていることの証左でもある。また、森林でも洪水・灌漑期で窒素の原単位がゼロではなく、ある程度の値が算出されているが、このことは、森林における窒素飽和現象の生起⁷⁾とも関連しているように見受けられ、興味深い点である。

流域からの窒素負荷の流出を抑制するには、農地における対策をより重点的に実施することが必要と考えられるが、図-5の結果によると全窒素の原単位と硝酸態窒素の原単位にはある程度の開きがあることから、地下水が主体と考えられる硝酸態窒素だけでなく、表面流出に伴う窒素流出についても、対策の余地が十分残されていることを示唆している。

「その他」の土地利用は全体的に原単位が低かった。この土地利用分類には都市が含まれるため、都市部の下水処理システムが有効に機能している証拠であると考えることができよう。

(3) 回帰分析結果の検証

図-6に回帰分析の検証結果を示す。横軸はANNシミュレーションから計算された単位負荷量で、縦軸は回帰分析で求めた原単位を用いて算出される単位負荷量である。相対誤差は、CODとP-CODで各々18%と23%、TN

とNO₃-Nでは各々83%と97%、TPとP-Pでは各々27%と23%という値が得られた。CODとリンについては、原単位に基づく算出精度が良好である一方、窒素については両者の相関性が比較的強く、原単位法による算出結果が頭打ちとなるようにも見える。この一因として、降水中の窒素成分が影響していることが考えられる。前述のように、霞ヶ浦流域に位置する筑波山では降水中窒素の影響による窒素飽和が報告されているが⁷⁾、降水中窒素については今回の原単位算出で考慮されていない成分であることから、降雨成分も考慮することにより、精度の向上が可能ではないかと考えられる。

以上の検証結果からすると、懸濁態成分を主体とする汚濁物質（CODやリン）の土地利用別・季節別原単位としては、本研究の推定結果が有効に利用できると考えられる。また、窒素に関しても、CODやリンには相対的に劣るものの、降雨水質の影響も加味することによって利用可能な原単位が推定されたものと考えられる。

5. 結論

本研究では光学センサー計測結果とニューラルネットワーク（ANN）モデルを組み合わせて、COD,TN,TPお

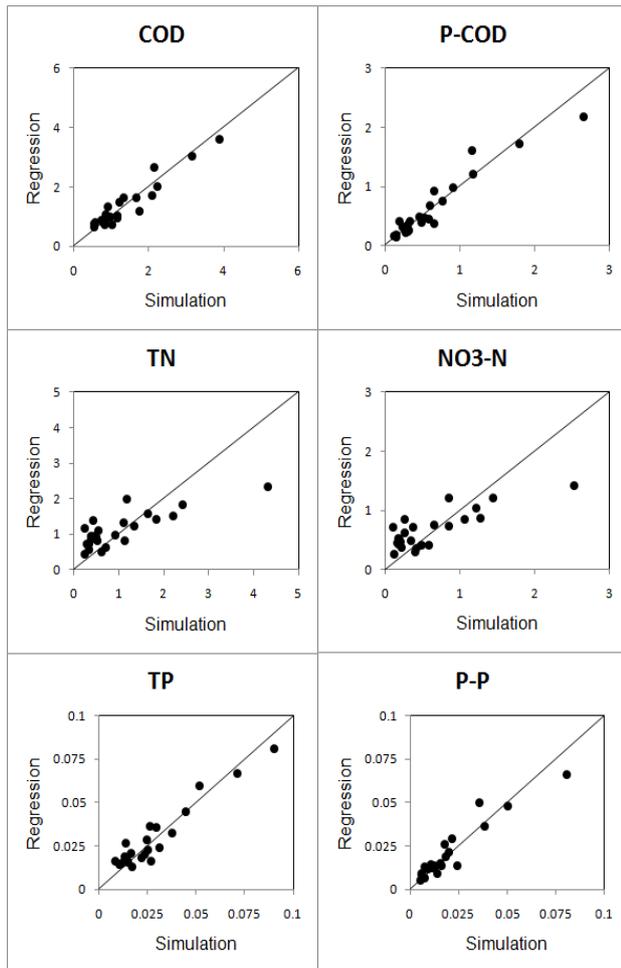


図-6 回帰分析結果の検証

よび懸濁態・溶存態成分の濃度・負荷の時系列データを作成し、それに基づく汚濁負荷量の算出と土地利用との関連性の検討、さらには各土地利用から時期別の汚濁負荷原単位の推定を行った。

近年水質悪化傾向の銚田川・巴川では年間を通じてTNの単位面積あたり負荷量が他の4河川に比べて3~6倍も大きかった。これには農地（畑・樹園地）の占める割合が高いことが影響していることが推定された。CODやTPの単位面積負荷量は小野川で相対的に小さな値を示し、特に灌漑期の洪水時で顕著だった。小野川の農地面積割合は30%程度と小さくないが、灌漑期雨天時に農地等から流出する汚濁も下水道により流域外に運ばれることの効果と言える。

重回帰分析により得られた年間の原単位はほぼ既往の報告値の範囲内にあつたが、時期別の原単位の推定結果から、COD, TPについては灌漑期の洪水時における水田からの負荷原単位が全ての季節・土地利用の中で圧倒的に大きいこと、TNに関しては農地の負荷原単位が高く、とりわけ非灌漑期の洪水時や平常時における農地からの負荷原単位が大きいことを示した。TNについては農地の他に森林の影響も比較的大きかったことから、大気由来の影響が示唆された。

謝辞：本研究の実施に際し、国土交通省霞ヶ浦河川事務所から各種データの提供を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Conley, D.J., Paerl, H.W., Howarth, R.W., Boesch, D.F., Seitzinger, S.P., Havens, K.E., C. Lancelot, Likens, G.E., Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus, *Science*, 323 20 Feb. 2009.
- 2) 建設省都市局下水道部監修：流域下水道整備計画（指針と解説），日本下水道協会，1999.
- 3) 善見憲二，劉銘環，石川忠晴：光計測による河川汚濁負荷推定の効率化に関する基礎的研究，河川技術論文集，第13巻，pp. 219-224，2007
- 4) 平成20年度霞ヶ浦汚濁負荷流入特性検討業務報告書，理工学振興会，2009.
- 5) Liu, M., Ishikawa, T., Yoshimi, K. and Kunihiro, E., A practical approach to the estimation of pollutant load from optical sensor measurement. *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 51, pp. 193-198, 2007
- 6) Liu, M., Ishikawa, T., Yoshimi, K. and Kudo, K., New approach for time series estimation of pollutant load in river by using optical sensor measurement and artificial neural network, *Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering*. Vol. 26, pp. 27-39, 2008.
- 7) 渡邊未来：森林から窒素が流れ出す-筑波山の窒素飽和-，国立環境研究所ニュース，Vol. 27, No. 5，2008.

(2011. 5. 19受付)