

分布型水質タンクモデルを用いた 灌漑のための導水による浄化効果の評価

EVALUATION OF EFFECT OF PURIFICATION BY IRRIGATION WATER CONVEYANCE USING DISTRIBUTED WATERSHED MODEL

浪平 篤¹・高木強治²・向井章恵³・樽屋啓之⁴
Atsushi NAMIHIRA, Kyoji TAKAKI, Akie MUKAI and Hiroyuki TARUYA

¹ 正会員	農博	農村工学研究所	施設資源部水源施設水理研究室	(〒305-8609 つくば市観音台2-1-6)
²	農博	農村工学研究所	施設資源部水源施設水理研究室	(同 上)
³	農修	農村工学研究所	施設資源部水路工水理研究室	(同 上)
⁴ 正会員	農博	農村工学研究所	施設資源部水路工水理研究室	(同 上)

In this research, the influences of purification by water conveyance for the irrigation was evaluated by the numerical analysis and field investigation. The target of evaluation was the surrounding area of the Ashigaike Regulating Reservoir that had been rehabilitated as part of the Toyogawa Comprehensive Canal Project. The numerical analysis was conducted using a distributed water quality tank model classified by land use. As a results, it is clarified that the TN concentration of flow from the target area would become higher though the effluent load would decrease due to denitrification at the paddy field by irrigating the high TN concentration water from the reservoir basin to the paddy field if water conveyance was not executed.

Key Words : irrigation, purification, TN, distributed water quality tank model, land use

1. 緒論

河川の感潮部や閉鎖性水域における水質汚濁への対策として、浄化用水が導入されることがある。本施策については、モデル解析によってその効果が定量的かつ詳細に評価されるとともに、その効果を支配する要因の分析も行われている^{1)~5)}。また、より効果的な方法の提言も行われている¹⁾。

一方、浄化用水の導入のように流域外から導水する施策の一つとして、灌漑用水の導入がある。灌漑用水にも水質基準⁶⁾があることから、導水元には水質が比較的良い河川等が選定される。そのため、導水先の地区で水質汚濁が問題となっていれば、導入された用水によって水質が改善されることになると考えられる。しかし、灌漑用水の導入による浄化の効果がモデル解析によって評価された事例はみられない。

そこで本研究では、豊川総合用水事業の一環として改修された芦ヶ池調整池の周辺地域を対象に、現地調査とモデル解析を行い、灌漑用水の導入による浄化効果を評価する。

2. 対象地域と水質項目

(1) 対象地域の概要

芦ヶ池調整池は、渥美半島のほぼ中央に位置し(図-1)、総貯水量201万m³、満水面積0.457km²、集水域の面積2.38km²であり、下流側の水田を灌漑している。渥美半島では、降水量の年平均値は1,700mmであり少なくはないが、降水量の分布が不規則であり連続干天日が30日以上に達することもある。そのため、旧来より大小さまざまな農業用ため池が建設されている。本調整池もその一つであり、奈良時代中期頃に築造されたとの説もある⁷⁾。近年になって、豊川総合用水事業(1980~2001年度)により、本調整池の汚濁の負荷源となる畑地や畜舎が存在するその集水域からの流出は、本調整池を経由せず、その下流にある幹線排水路に流入するように、本調整池の周囲に排水路が設置された。そして本調整池には、豊川水系宇連川の大野頭首工からの取水が、豊川用水東部幹線水路および送水路を経て補給されることとなった。なお、前述の幹線排水路の流水は、石ふみ川および今池川を流下して三河湾に到達する(図-1)。

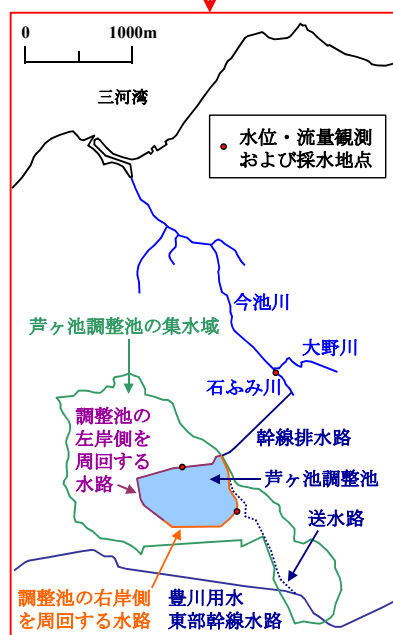
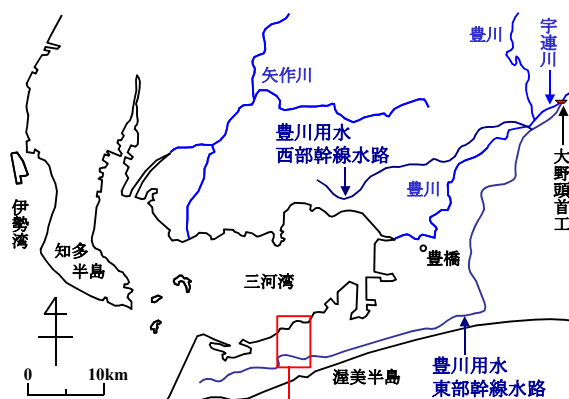


図-1 芦ヶ池調整池周辺の概要

このように、豊川から芦ヶ池調整池に導入されている用水の本来の目的は水田への灌漑(パイプライン灌漑)であるが、水田からの排水も前述の幹線水路、石ふみ川、今池川を流下するため、本用水は、本調整池の集水域にある畑地や畜舎からの負荷の多い流出を希釈し、これらの河川を浄化していると考えられる。

(2) 解析の対象とする水質項目

芦ヶ池調整池の集水域からの流出水では、特に窒素化合物の濃度が高くなっていることが東海農政局による調査の結果⁸⁾からわかっている。そこで本研究では、窒素化合物を水質浄化の評価対象とする。但し、簡単のため態変化を扱わず、全窒素(TN)として評価する。

3. モデルの作成と解析の方法

(1) モデルの作成

農地を含む流域における水および物質の移動を比較的に詳細に評価できる分布型の水文水質モデルの事例として

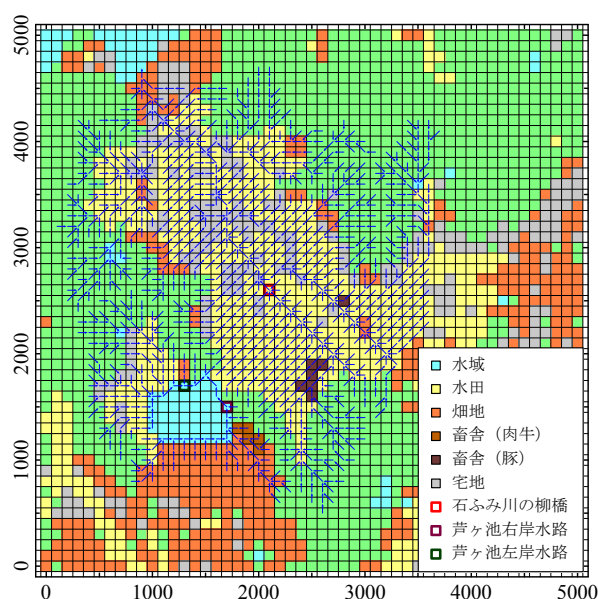


図-2 芦ヶ池調整池周辺のメッシュ分割

辻倉⁹⁾、加藤¹⁰⁾、飯泉¹¹⁾、宗像¹²⁾等がある。辻倉⁹⁾の事例では、霞ヶ浦流域からの流出水のTN濃度等が概ね良好に再現されているが、農地における用排水系統はモデル化されていない。飯泉¹¹⁾の事例では、地中が表層土壌、不圧地下水帯、被圧地下水帯ごとに詳細にモデル化されており、牛久沼流域からの流出水の無機態窒素濃度が高い精度で再現されている。しかしながら、地中の窒素動態のモデルには係数やパラメータが多く含まれており、用排水系統がモデル化されていない。宗像¹²⁾の事例では、農業水利の影響を評価できるように用排水系統がモデル化されており、油が淵流域からの流出水のTN濃度等が比較的良好に再現されている。一方で、山林や農地からの基底流出を当該モデルとは別途設定する、山林からの発生負荷量をLQ式で求める等、やや汎用性に欠ける面もある。加藤¹⁰⁾の事例では、比較的単純な構造のモデルによって霞ヶ浦流域内の0.55 km²程度の小流域からの流出水のTN濃度が良好に再現されているが、用排水系統は組み込まれていない。

本研究では、これらのモデルのうち、構造が最も簡易なために用排水系統のモデルの追加等の修正や各パラメータの決定が比較的容易と考えられたこと、および汎用性を有すると考えられたことから、加藤¹⁰⁾による土地利用別水質タンクモデル¹⁰⁾を用いることとした。具体的には、対象地域を100m×100mのメッシュに分割し、それぞれには山林、水田、畑地、畜舎(肉用牛)、畜舎(豚)、住宅地のいずれかの土地利用を設定するとともに(図-2)、2段のタンクモデル(図-3)を配置した。メッシュ間の水および物質の移動方向(図-2の矢印)については、現地の地形や水利用状況に基づいて定めた。

各メッシュにおける水質計算¹⁰⁾(図-3)としては、まず、降水と灌漑用水に含まれる溶存負荷($N_{降水}$ 、 $N_{灌漑水}$)のうち脱窒分を差し引いた分

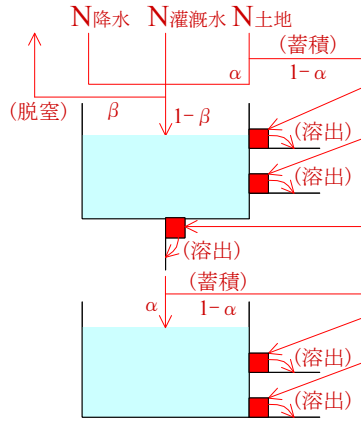


図-3 タンクモデルと水質計算の概要

$$(1-\beta) \times (N_{\text{降水}} + N_{\text{灌漑水}}), \quad 0 \leq \beta \leq 1 \quad (1)$$

が、上段タンク内に与えられる。ここで、 β は溶存負荷のうち脱窒する比率に関するパラメータである。また、灌漑用水は水田メッシュの場合のみ供給されるものとする。次に、土地利用に応じて与えられる負荷 $N_{\text{土地}}$ は、

$$\begin{aligned} \text{蓄積負荷} &: (1-\alpha) \times N_{\text{土地}} \\ \text{溶出負荷} &: \alpha \times N_{\text{土地}} \end{aligned}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (2)$$

に分けられ、前者は上段タンクの各流出孔の付け根付近に蓄積され、後者のうちさらに脱窒分を差し引いた分

$$(1-\beta) \times \alpha \times N_{\text{土地}} \quad (3)$$

が上段タンク内に与えられる。ここで α は、 $N_{\text{土地}}$ のうち溶出する比率に関するパラメータである。また $N_{\text{土地}}$ は、水田メッシュと畑地メッシュの場合には施肥、畜舎の場合には家畜糞尿、宅地の場合には生活排水によるものであり、以下のように算出される。

$$\begin{aligned} \text{水田} &: N_{\text{土地}} = 1\text{haあたり施肥量} \times (1 - \text{作物吸収率}) \\ \text{畑地} &: N_{\text{土地}} = 1\text{haあたり施肥量} \times (1 - \text{作物吸収率}) \\ \text{畜舎} &: N_{\text{土地}} = 1\text{haあたり家畜頭数} \times 1\text{頭あたり排出量} \times (1 - \text{揮散率}) \\ \text{宅地} &: N_{\text{土地}} = 1\text{haあたり人口} \times 1\text{人当たり排出量} \end{aligned} \quad (4)$$

タンクの各流出孔の付け根付近に蓄積された負荷は、その孔から流出があるときに、その時点の総蓄積量 B と流出量 q の積に比例して次式のように溶出する(図-3)。

$$\text{溶出量} = CBq, \quad C: \text{比例係数} \quad (5)$$

このような溶出は、下段タンクでも同様である。

式(2)の第1式による蓄積負荷は、加藤ら¹⁰⁾の解析では、タンクの各流出孔の付け根付近の B に追加される際(図-3)、各位置に均等に配分される。しかし、この方法では十分な再現性が得られなかったため、本研究では式(5)の C の値で重み付けを行って配分した。上側の側方流出孔

への追加蓄積量を例にすると、以下ようになる。

$$\begin{aligned} &\text{上側の側方流出孔への追加蓄積量} \\ &= (1-\alpha) \times N_{\text{土地}} \times \frac{C_{\text{側方上}}}{C_{\text{側方上}} + C_{\text{側方下}} + C_{\text{下方}}} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $C_{\text{側方上}}$ 、 $C_{\text{側方下}}$ 、 $C_{\text{下方}}$ はそれぞれ上側の側方流出孔、下側の側方流出孔、下方流出孔における式(5)の係数 C である。

上段タンクの下方流出孔からの流出に含まれる負荷は、式(2)の $N_{\text{土地}}$ と同様に蓄積分と溶出分に分けられ、前者は下段タンクの各流出孔の付け根付近に蓄積され、後者は下段タンク内に与えられる。タンクの各流出孔の付け根付近に蓄積される配分については、上段タンクと同様とした。

上段タンクの側方流出孔からの流出およびそれに含まれる負荷は下流側のメッシュの上段タンク内に、下段タンクからのものは下流側の下段タンク内に与えられる。しかしながら、このような処理では、排水システムが整備されており水田からの流出が排水路を経由する場合や、河川における流れを表現できない。そこで宗像ら¹²⁾に倣い、当該メッシュに排水路が通っている場合は、上段タンクの側方流出孔からの流出およびそれに含まれる負荷は下流側のタンクに流入せず、メッシュ間のおよび物質の移動方向(図-2の矢印)に従って一定の速度で流下することとした。当該メッシュに河川が通っている場合には、上段下段両方のタンクからの流出およびそれに含まれる負荷を、前述と同様に扱った。その際の移動速度については、宗像ら¹²⁾と同様に1m/sとした。0.5m/s、2.0m/sとした解析も行ったが、後述のように日単位で計算したため、これらの結果に違いはほとんど生じなかった。

タンクモデルおよび水質計算は、日単位で行うこととした。各パラメータは土地利用毎に異なるものとし、タンクモデルに関するものを基準化Powell法¹³⁾によって最適化した後に、水質計算に関するもの(α 、 β 、 C)を試行錯誤によって決定させた。

以上の設定の根拠資料や解析に利用するデータの出典等を、表-1に整理した。

(2) 現地データの計測

前述3.(1)のタンクモデルおよび水質計算のパラメータの決定のため、現地で水位と流量の観測および採水を行うとともに(図-1、図-2)、気象データの収集を行った(表-1)。

水位の観測については、芦ヶ池調整池を周回する排水路の末端(図-2の芦ヶ池左岸水路、芦ヶ池右岸水路)ではUIZIN社製圧力式水位計UIZ-WL500Sを用いて10分間隔で、石ふみ川のうち大野川と合流する直前の地点(図-2の石ふみ川の柳橋)では鋼尺および標尺を用いて週一回程度の頻度で行った。流量の観測については、KENCK

表-1 入力データとその出典

土地利用	入力データ	出典
全て	降水量 ^{※1}	気象庁HP
	気温 ^{※2※3}	気象庁HP
	日射時間 ^{※2※3}	気象庁HP
	標高	数値地図50mメッシュ(標高)
	土地利用	数値地図情報(KS-202-1)
水田	管理水位	宗像ら ¹²⁾
	施肥時期	宗像ら ¹²⁾
	施肥量	東海農政局資源課 ⁹⁾
	窒素吸収率	中曽根ら ¹⁴⁾
畑地	作物品目	東海農政局資源課 ⁹⁾
	施肥量	東海農政局資源課 ⁹⁾
	窒素吸収率	西尾 ¹⁵⁾
畜舎	種類	東海農政局資源課 ⁹⁾
	糞尿原単位	東海農政局資源課 ⁹⁾
	揮散率	加藤ら ¹⁰⁾
	一戸の頭数 ^{※4}	東海農政局資源課 ⁹⁾
	戸数	現地踏査および 数値地図情報(KS-202-1)
宅地	生活排水原単位	東海農政局資源課 ⁹⁾
	住人数 ^{※5}	東海農政局資源課 ⁹⁾

※1) 田原観測所のデータを使用した。

※2) 伊良子観測所のデータを使用した。

※3) Makkink式によって蒸発散能を求めるために用いた。

※4) 愛知県もしくは田原市の平均値である。

※5) 芦ヶ池集水域内のデータである。対象地域全体(図-2)のデータは、宅地面積についての比例計算で求めた。

社製プロペラ式流速計(本体部VR-201, 検出部VRT-300-20)と鋼尺を用い、全ての地点で平水時には月一回程度の頻度で、出水時には流況に応じて10～60分間隔で行った。また、採水したサンプルのTN濃度を分析した。

なお、芦ヶ池左岸水路と芦ヶ池右岸水路(図-1, 図-2)を調査対象地点にしたのは、前者の集水域となる本調整池の集水域の左岸側では水田が、後者の集水域となる本調整池の集水域の右岸側では畑地と畜舎が多く占めており、これらの土地利用からの水および窒素負荷の流出特性の把握はパラメータ決定において重要と考えられたためである。また、これらの2地点は、本調整池を周回する排水路において、集水域からの流入工のうち最下流のものよりも下流側にあること、および、出水時の流量観測が可能であることを条件に、選定した。

また、石ふみ川の柳橋(図-1, 図-2)を調査対象地点にしたのは、水位と流量の観測を比較的容易に行える地点が、石ふみ川におけるこれより下流側、および今池川に存在しなかったためである。一方、本地点の集水域には畑地や畜舎が存在しており、また、水田も広範囲に分布していることから、灌漑用水の導入による浄化効果を本地点で評価することに問題はないと考えられる。

降水量については、気象庁の田原観測所で観測されているため、そのデータを利用できたが、蒸発散能の算

出に必要な気温と日射量については、同観測所では観測されておらず、伊良子観測所のデータを利用した(表-1)。

4. 解析の結果および考察

(1) 現況の再現解析

各メッシュのタンクにおける貯水量や物質の蓄積量等の初期値を設定するため、まずそれらを全てゼロとして、2003～2007年を対象とした解析を10回繰り返し行うこととした。そして、その後に2008～2009年を対象として1回のみ行う解析を、現況の再現解析とする。なお、2009年の解析は8月31日までが対象である。

実蒸発散量については、無降水日には蒸発散能に0.7を乗じた値とし、降水日にはゼロとした。蒸発散能に乘じた係数は、0.1から1.0まで0.1刻みで変化させて解析した結果、最も高い再現性が得られた値である。

芦ヶ池右岸水路地点に対する集水域への降水については、田原観測所の降水量をそのまま用いれば、タンクモデルのパラメータの変更の範囲では、芦ヶ池右岸水路地点における流出の水収支誤差を20%未満にすることができず、特に流出のうちピーク部分の再現性が低かった(観測値<解析値)。そこで、まず、降水がある一定強度(以下、 R_{lim})を超えた場合は超過分をカットして解析に用いることとした。 R_{lim} の値としては、5mm刻みで変化させた結果、35mm以上ではピーク部分の再現性はあまり向上せず、25mm以下とすると平水時の再現性が大きく低下(観測値>解析値)したことから、30mmとした。しかしこの場合も、平水時の再現性がやや低く(観測値>解析値)、水収支誤差は7%程度であったため、降水が R_{lim} を超えたときには R_{lim} との差の一定率(以下、 γ)を R_{lim} に加えた値を解析に用いることとした。 γ の値としては、10%刻みで変化させた結果、10%とした場合に最も誤差が小さくなったことから、この値を採用した。

このようにして3. (1)で述べた方法でタンクモデルおよび水質計算のパラメータを決定したところ、現況の再現解析の結果は図-4のようになった。また、このときの芦ヶ池左岸水路地点および右岸水路地点における流出(図-4(c), (d))に関する誤差は、表-2の通りであった。なお、各誤差は以下の計算式によって評価した。

$$\text{流出の相対誤差 (\%)} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \frac{|Q_{ci} - Q_{oi}|}{Q_{oi}} \times 100 \quad (7)$$

$$\text{水収支誤差 (\%)} = \left\{ \sum_{i=1}^I Q_{ci} - \sum_{i=1}^I Q_{oi} \right\} / \sum_{i=1}^I Q_{oi} \times 100 \quad (8)$$

ここで、 Q_{oi} は流出の観測値、 Q_{ci} は流出の計算値、 I はデータ数である。

表-2の地点では、再現性が十分に高いとはいえないが、現況の流出の傾向を捉えられていると考えられる。石ふ

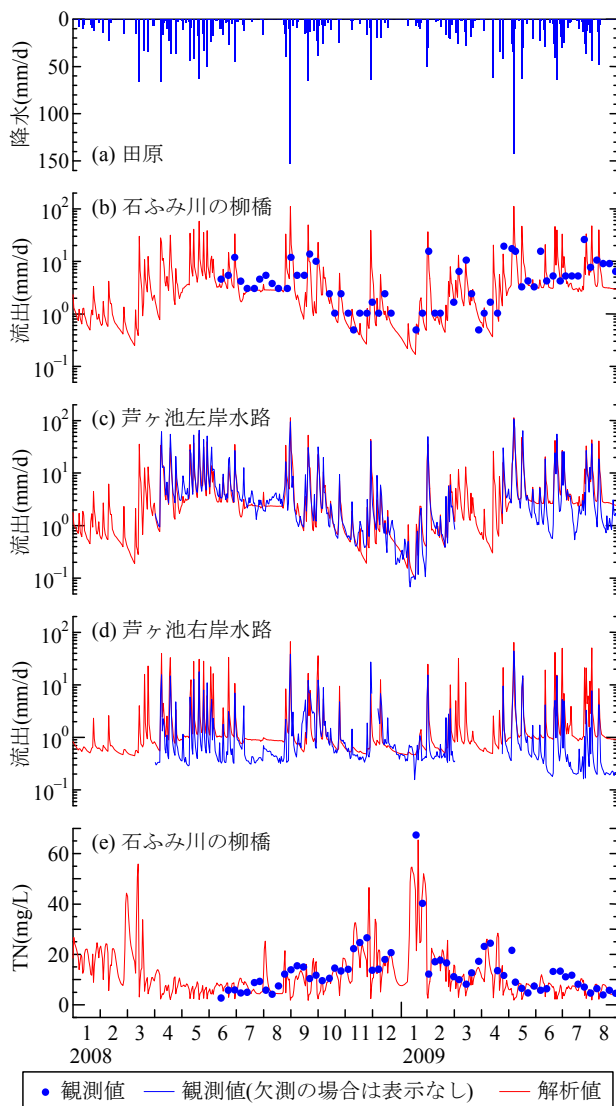


図-4 現況の再現解析の結果
(各地点の名称は図-2のものを使用)

表-2 現況の再現解析の結果に関する誤差

地点	流出の相対誤差(%)	水収支誤差(%)
芦ヶ池左岸水路	52.3	4.00
芦ヶ池右岸水路	68.9	5.46

み川の柳橋地点における流出(図-4(b))についても、観測データの数が少ないため誤差評価を行っていないが、同程度の再現性が得られていると考えられる。

水質計算の結果の一例として、石ふみ川の柳橋地点における流出のTN濃度を図-4(e)に示す。これより、水質についても現況の傾向を捉えられていると考えられる。特に、連続干天日の後には小さな出水であっても流出水のTN濃度が非常に高くなり、40～60mg/Lに達する場合もあることが再現されている。流出の再現性が向上すれば、水質計算についてもより高い精度で実施できると考えられる。

今後の課題として、引き続き現地データの観測と収集を行い、前述の芦ヶ池右岸水路地点における水収支を合わせるための処理の妥当性を検証するとともに、その改善方法の検討と、より適したパラメータの探索を継続して行う必要がある。

(2) 灌漑用水の導入がなかった場合の解析

豊川から芦ヶ池調整池に灌漑用水が導入されなかった場合の解析については、基本的には現況の再現解析4.(1)と同一である。変更および追加事項としては、計算開始時点における芦ヶ池調整池の貯留水量およびそれに含まれる負荷についてもゼロとした。また、本調整池の周回水路に到達した流出は、全て本調整池に貯留され、水田への灌漑用水として利用されることとした。さらに本調整池では、降水とそれに含まれる負荷が加えられ、蒸発散によって貯留水を減少させた。貯留水のみでは水田への灌漑用水が不足する場合も生じたが、存在する貯留水の範囲で灌漑を行うこととした。なお、貯留水に含まれる負荷は全て溶存状態とした。これらに基づいて行った灌漑用水の導入がなかった場合の石ふみ川の柳橋地点における解析結果を図-5に示す。

図-5より、灌漑用水の導入がないために、現況よりも流出が減少していることが確認される。また、畑地や畜舎が存在する芦ヶ池調整池の集水域からのTN濃度の高い流出水の水田に灌漑することによって、流域内で脱窒がより多く生じるため、現況と比較して、TN負荷量の流出が全体的に減少していることも確認される。一方で、流出水のTN濃度については全体的に高くなっている。特に、連続干天日の後の出水時には2倍程度に達する場合もある。これは、TN負荷量が減少する以上に灌漑用水が減少しているためと考えられる。

以上を整理すると、灌漑用水が導入されたことにより、水田で脱窒されず河川へと流出するTN負荷量が増加するものの、流出水のTN濃度は低下していることから、灌漑用水の導入によって石ふみ川や今池川では希釈されている、すなわち浄化されていると推定される。但し、図-5にみられるようにTN濃度が100mg/L程度となることが実際にあり得るのかについては検証が必要である。また、3.(1)で述べたように、現状ではタンクモデルによる流出計算の再現性が十分に高くない。そのため、浄化のより詳細な評価については、今後の課題である。

5. 結論

本研究では、豊川総合用水事業の一環として改修された芦ヶ池調整池の周辺地域を対象に、現地調査とモデル解析を行い、灌漑用水の導入による浄化効果を評価した。得られた主な結果を以下に示す。

(1) 分布型の土地利用別水質タンクモデルを用いて現況

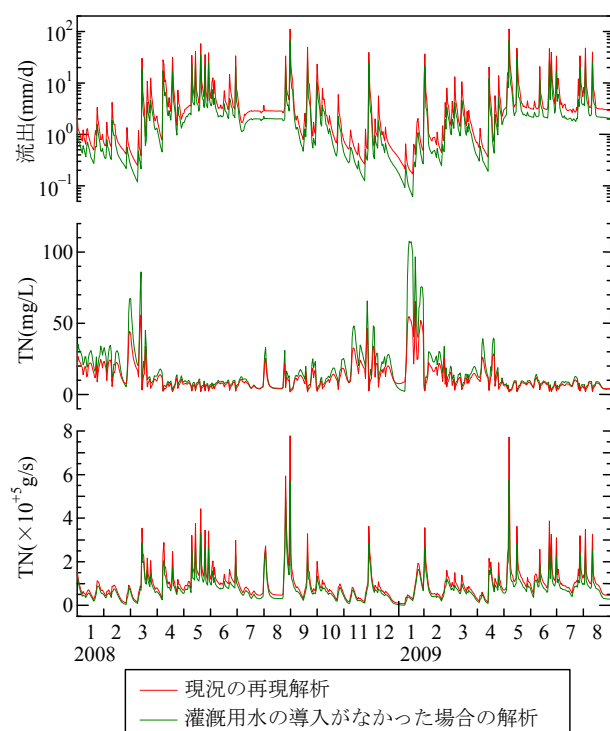


図-5 灌漑用水の導入がなかった場合の
石ふみ川の柳橋地点における解析結果
(現況の再現解析のうち流出とTN(mg/L)は図-4の再掲)

の再現解析を行った結果、再現性は十分に高いとはいえないが、流出およびそれに含まれるTN濃度の傾向を捉えることができた。

- (2) 同モデルを用いて当該地域に灌漑用水の導入がなかった場合の解析を行った結果、灌漑用水の導入により、流出するTN負荷量が増加するものの、流出水のTN濃度は低下し、芦ヶ池調整池の下流河川では浄化されていると推定された。
- (3) 今後の課題として、引き続き現地データの観測と収集を行い、水収支をあわせるための処理方法を検討するとともに、より適したパラメータの探索を継続して行う必要がある。

謝辞：本研究は文部科学省科学技術振興調整費「伊勢湾流域圏の自然共生型環境管理技術開発(代表：辻本哲郎)」の一部として行った。現地調査では田原市土地改良区の伊藤啓治氏に、水質の分析では農村工学研究所水環境保全研究室の濱田康治博士に、多大なご協力をいただいた。ここに記して、心より感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 中野晋, 山下智, 小津慶久, 三井宏：導水による都市河川網の水質制御, 水工学論文集, 35, pp.561-566, 1991.
- 2) 貴島啓文, 猪股広典, 鮎川登：河川感潮部における浄化用水の導水効果の評価, 土木学会第57回年次学術講演会, pp.227-228, 2002.
- 3) 山崎裕介, 二瓶泰雄, 猪爪高見, 西村司：浄化用水量の変化が手賀沼の水質環境に及ぼす影響, 河川技術に関する論文集, 9, pp.505-510, 2003.
- 4) 武田誠, 日置梓, 遠山智, 松尾直規：冬季における堀川の水質変化に関する現地観測と数値解析, 環境工学研究論文集, 43, pp.483-484, 2006.
- 5) 杉原幸樹, 中津川誠, 益塚芳雄：札幌圏における水循環系の変更による茨戸川への効果, 第21回水文・水資源学会研究発表会要旨集, pp.87-88, 2008.
- 6) 丸山利輔, 富田正彦, 三野徹, 渡辺紹裕：地域環境工学, 朝倉書店, p.71, 1996.
- 7) 東海農政局豊川総合用水農業水利事務所：芦ヶ池調整池技術誌
- 8) 東海農政局資源課：水質浄化技術確立調査「芦ヶ池地区」(平成7年度～11年度)総合報告書, 2000.
- 9) 辻倉裕喜, 安陪和雄, 大八木豊, 田中伸治：湖沼流域管理のための総合的な水循環・物質流動モデルの構築, 水工学論文集, 47, pp.217-222, 2003.
- 10) 加藤亮, 黒田久雄, 中曽根英雄：分布型モデルによる浄化型湿地の配置と窒素負荷除去量の評価, 農業土木学会論文集, 235, pp.43-50, 2005.
- 11) 飯泉佳子, 木内豪, 深見和彦：分布型モデルを用いた河川・地下水の水質解析, 河川技術論文集, 12, pp.335-340, 2006.
- 12) 宗像義之, 白谷栄作, 高橋順二, 長谷部均, 吉永育生, 人見忠良, 三浦麻：農業水利の影響解析のための分布型水文水質モデルの開発, 水環境学会誌, 29(12), pp.815-822, 2006.
- 13) 角屋睦, 永井明博：流出解析手法(その12)ータンクモデルとSP法による最適同定ー, 農業土木学会誌, 48(12), pp.935-943, 1980.
- 14) 中曽根英雄, 黒田久雄, 加藤亮：集水域からの窒素流出モデルの開発, 農業土木学会論文集, 205, pp.95-100, 2000.
- 15) 西尾道徳：農業生産環境調査にみる我が国の窒素施用実態の解析, 日本土壌肥科学雑誌, 72(4), pp.513-521, 2001.

(2009. 9. 30受付)