

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月24日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560541

研究課題名（和文）果樹栽培の盛んな農業集水域における河川水中の栄養塩類濃度特性の解明
 研究課題名（英文）Investigation of nutrient concentration characteristics in river water at a fruit-rich watershed

研究代表者

江種 伸之 (EGUSA NOBUYUKI)

和歌山大学・システム工学部・准教授

研究者番号：00283961

研究成果の概要（和文）：河川の水量・水質に関する野外調査と分布型モデルを利用した水・物質負荷量解析を実施して、果樹栽培が盛んな紀の川流域における水環境を評価した。その結果、物質収支に基づいて既存情報から果樹園における栄養塩類の原単位を算出する方法を構築することができた。また、得られた原単位を利用したモデル解析により、果樹園が広く分布する支流のTN濃度変化および本川中流部におけるTP濃度の大きな上昇の要因を明らかにすることができた。

研究成果の概要（英文）：Water environment in the Kinokawa River watershed was estimated by field surveys and numerical simulations. Fruit growing is very active in this watershed. As a result, a method to calculate nutrient emission factors using existing information based on mass balance in orchard was established. Moreover, the numerical simulations using the calculated emission factors could demonstrated seasonal changes in TN concentration in a branch of the river and huge increases in TP concentration in the middle part of the river.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工水理学

キーワード：水圏現象，水質汚濁，分布型水文流出モデル，汚濁負荷量解析，紀の川流域

1. 研究開始当初の背景

稲作とともに果樹栽培が盛んな紀の川流域では、農業活動が河川の水量や水質に多大な影響を与えている。例えば、中流部での全リン(TP)濃度上昇、支川の柘榴川における施肥時期の全窒素(TN)濃度上昇、支川の貴志川にある農業用取水堰直下における少雨時の流水消失(瀬切れ)と下流水質の悪化、水道水

の異臭味(かび臭)などが確認されている。これらを解決して健全な水物質循環の確立を目指す場合、生活・産業排水由来だけでなく面源由来の汚濁負荷量も把握し、必要に応じてそれらの削減に努めなければならない。

さらに、紀の川流域を対象とした場合には、農業活動だけでなく流域下水道整備や気象変化による流量・水質変化についても無視す

ることができない。下水道普及率の低い紀の川流域では、紀の川流域下水道に続いて、紀の川中流域下水道の整備が進んでおり、流量や水質が将来変化する可能性が高い。また、近年の少雨化傾向や多雨と少雨の較差拡大は、紀の川流域における洪水や渇水のリスクを高めている。大きな被害には至らなかったものの、平成13年夏季には貴志川で、梅雨前線に伴う出水と少雨による瀬切れといった、相反する被害が短期間のうちに発生した。すなわち、これら諸課題の解決に取り組むことが、農業活動が盛んな紀の川流域における豊かな水環境の構築につながる。

2. 研究の目的

本研究では、河川の水量・水質に関する野外調査と数値解析を実施して、農業活動が盛んな流域（農業集水域）における水環境を評価し、また農業集水域である紀の川流域における健全な水物質循環について考察した。

(テーマ1) 果樹園の栄養塩原単位算出

果樹栽培が盛んな農業集水域の水環境評価では、面源、特に果樹園で発生する汚濁物質の原単位を決定することが重要になる。面源の原単位算出法としては、現地調査結果から求める方法が提示されている。しかし、実測データが少ない場合でも排出負荷量を求めることが可能な原単位法の特徴を踏まえ、現地調査によらない原単位算出法を検討することは非常に有意義である。そこで、現地調査によらずに果樹園における原単位を算出する方法を検討した。

(テーマ2) 窒素負荷特性・河川水質特性

果樹園が広く分布する支川の柘榴川流域では、野外調査により施肥時期のTN濃度上昇が確認されている。そこで、分布型モデルを利用した水流出・物質負荷量解析および河川水質解析を実施して、流域の窒素負荷特性および河川水質特性を考察した。

(テーマ3) リン負荷特性・河川水質特性

既存の水質モニタリングデータでは、紀の川中流部において1990年代後半から2000年代前半の一時期にTP濃度の大きな上昇が観測されている。そこで、物質負荷量解析および河川水質解析を実施して、流域のリン負荷特性および河川水質特性を考察した。

3. 研究の方法

(1) 流域の概要

図1は紀の川流域の土地利用図を示している。紀の川は流域面積1750km²、幹川流路延長136kmの一級河川で、日本最多雨地帯である大台ヶ原を水源とし、北西に流れた後、西南西へ進路を変え、中央構造線に沿って流下して瀬戸内海に注いでいる。

流域内には奈良県と和歌山県を合わせて23市町村があり(2005年の市町村合併前)、紀

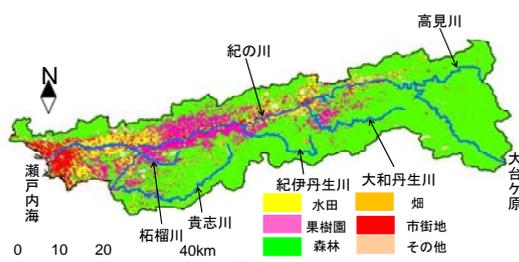


図1 紀の川流域の土地利用図

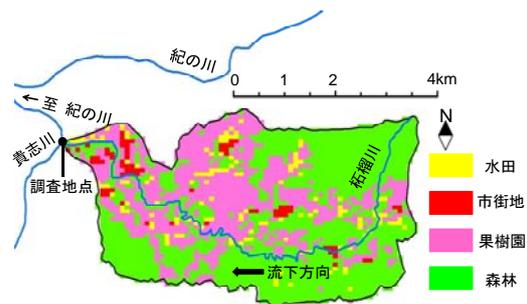


図2 柘榴川流域の土地利用図

の川はこれら自治体の重要な水源になっている。流域人口は約70万人で、最下流部の和歌山市が約半数を占める。なお、近年は中下流部で人口が増加傾向にある。

流域内は森林が約70%を占め、土地利用の変化は主に河川に沿って見られる。上流部は主に針葉樹からなる森林地帯である。中流部から水田や果樹園が多くなり、中流部から下流部までは、蜜柑、柿、桃などの果樹園、水田、市街地と土地利用が大きく変化している。

図2に示した柘榴川は紀の川下流部に流れ込む貴志川の支川である。流路延長は14km、流域面積は26km²で、流域人口は2,919人である。土地利用は上流部の森林(約52%)と中下流部の果樹園(約34%)に二分される。流域内の産業は果樹栽培が中心で、蜜柑、八朔、桃、柿の4種で栽培面積の80%以上を占める。

(2) 数値解析モデル

図3は数値解析モデルの概要を示している。

① 水流出解析

人口、土地利用、降水量といった流域の空間分布特性を考慮できる分布型モデルを採用した。使用したモデルは、福嶋・鈴木(京大演習, 1986)が提案した流域水循環モデルの参考にしたもので、モデルグリッド状の降雨遮断を解く森林遮断蒸発サブモデル、蒸散過程および地下浸透過程を解く浸透・蒸散サブモデル、および斜面および河道の流れを解く斜面・河道流出サブモデルで構成されている(石塚・江種, 水工学論文集52, 2008)。

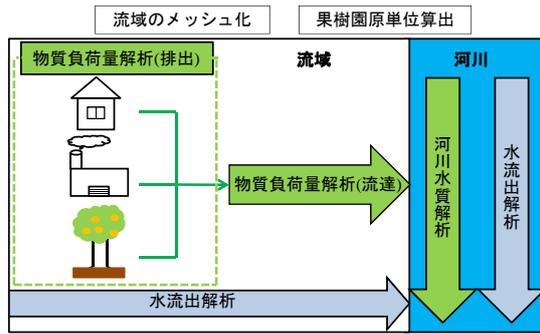


図3 数値解析モデル概要図

②物質負荷量解析 (概要)

物質負荷量解析は、原単位法を使った排出負荷量解析とマクロモデルを使った流達負荷量解析からなる。

③物質負荷量解析 (原単位法による排出負荷量解析)

原単位法とは、汚濁物質の発生量を把握するときの一手法として、発生に関与する活動の大きさに係数(原単位)をかける方法である。本研究では、生活系は人口、産業系は中分類別製造品出荷額等、森林、果樹などの面源は面積にそれぞれの原単位を乗じて排出負荷量を求めた。なお、原単位は主に文献値(流域別下水道整備総合計画調査指針と計画, 1999)を用いた。ただし、産業系の原単位は文献(同上)記載の方法に従って細分類別製造品出荷額から求め、果樹園の原単位は次項に示す方法に従って施肥データから求めた。

④物質負荷量解析 (果樹園における原単位算出)

TN原単位は、園地内の窒素収支に基づき、JAの肥料データなどの比較的入手が容易な情報を利用して算出した。なお、今回は脱窒量や大気降下量の有無を考量して、以下の4ケースの原単位を求めた。

$$\text{Case1: 原単位}=(A-B)/H \quad (1)$$

$$\text{Case2: 原単位}=(A-B-C)/H \quad (2)$$

$$\text{Case3: 原単位}=(A-B+D)/H \quad (3)$$

$$\text{Case4: 原単位}=(A-B-C+D)/H \quad (4)$$

ここに、 A : 肥料中窒素量、 B : 作物吸収量、 C : 脱窒量、 D : 大気降下量である。園地内の窒素収支には、土壌吸着分や落葉・落果由来の窒素も含まれるが、今回は肥料および大気由来成分のみが河川へ流出するとした。また、果樹園の年間窒素収支はゼロとしている。

TP原単位の算出では、TNと同様に肥料および大気由来成分のみが河川へ流出するとした。ただし、土壌に吸着されやすいリンは、その多くが土壌とともに流出する。しかし、現状では土壌流出量が不明なので、園地内の物質収支を考慮することは難しい。そこで、

施肥量、大気降下量、および既往文献(集水域からの窒素・リンの流出, 1985)に載っている流出率を利用して原単位の算出を試みた。

$$\text{原単位}=(A+D)*I/H \quad (5)$$

ここに、 A : 肥料中リン量、 D : 大気降下量、 I : 流出率である。なお、この式により得られた原単位を用いた場合には、土壌流出を伴うような降雨時の負荷量は含まれない。

⑤物質負荷量解析 (マクロモデルによる流達負荷量解析)

既往文献(水理公式集 例題プログラム集, 1999)に記載されているマクロモデルを改良して使用した。生活系と産業系の日流達負荷量(DL)は、流域内の下水道普及率が低いため、下水道での貯留を考えず、排出負荷量を365で除して求めた。面源の日流達負荷量は、水流出解析で求めた表面・中間流出量および基底流出量のべき乗に比例するとした。ただし、果樹園のみ、さらに果樹園に存在する物質量のべき乗にも比例するとした。

$$\text{果樹園以外 } DL_{i,j} = \sum_{n=1}^2 k_{i,n} A_i Q_{j,n}^a \quad (6)$$

$$\text{果樹園 } DL_{5,j} = \sum_{n=1}^2 k_{5,n} A_5 Q_{j,n}^a M_{j,n}^b \quad (7)$$

ここに、下付き i : 土地利用、 j : 日、 n : 水流出過程、 A : 土地利用面積割合、 Q : 日平均水流出量、 M : 果樹園に存在する物質質量、 k と上付き a, b : モデル係数である。なお、マクロモデルで得られた日流達負荷量の年合計値は原単位法によって計算された年間排出負荷量に一致するようにしている。

⑥河川水質解析

河川水中の拡散過程と濃度の時間変化を考慮しない一次元定常移流方程式を用いて、河川水中の物質濃度を算定した。流下方向に x 軸を取ると方程式は次式で表される。

$$v \frac{dc}{dx} = -\lambda c + S \quad (8)$$

ここに、 c : 濃度、 v : 河川流速、 λ : 自浄係数、 S : 流域からの流入負荷量である。なお、河川流速には実測値や水流出解析結果、流入負荷量には物質負荷量解析結果、自浄係数には推定値を用いている。

4. 研究成果

(1) 果樹園の栄養塩原単位算出

TN原単位は6,362~11,206kg/年/km²となった。流域内の農地における原単位の報告例がないので、文献値(流域別下水道整備総合計画調査指針と計画, 1999)と比較すると、算出結果は文献値(愛媛県の蜜柑: 14,500kg/年

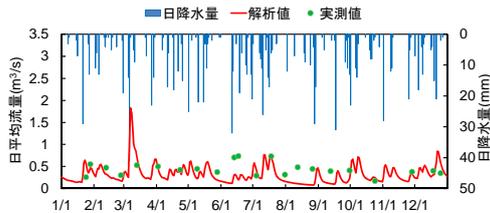


図4 最下流地点の日平均流量と日降水量 (2002年)

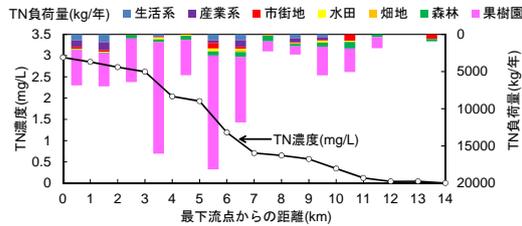


図5 流下方向に沿った年単位のTN濃度 (2002年)

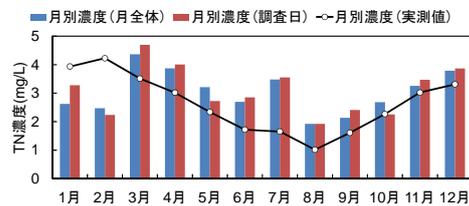


図6 月別TN濃度 (2002年)

/km², 愛知県のナシ・ブドウ等: 14, 200~16, 300kg/年/km²)と同程度以下であった。

一方, TP原単位は186kg/年/km²となった。TNと同様に文献値と比較すると, 算出結果は愛媛県の蜜柑(125kg/年/km²)や愛知県のナシ・ブドウ等(43~81kg/年/km²)よりも大きな値を示した。TP原単位の算出では園地内の物質収支を考慮していないので, 算出結果の精度はTNほど高くない。そのため, 精度向上には, 流出率に関する情報収集やリンの土壌流出量の把握などが望まれる。

(2) 窒素負荷特性・河川水質特性

図4に柘榴川の水流解析結果を示す。なお, 図中の実測値は著者らが2002年に週2回の頻度で実測した値である。解析値と実測値を比較すると, 6月から9月に少し差が生じている期間が見られるが, 全体的な流量変化は再現されている。

図5に流達地点毎に集計した年間排出負荷量を使用して計算した河川水中のTN濃度(年単位)を示す。また, 図6には月別流達負荷量もしくは調査日の流達負荷量を使用して計算した最下流地点のTN濃度を2002年の実測値と共に示す。なお, 式(8)の流入負荷量にはマクロモデルで計算した月別流達負荷量を使用している。図5では負荷量の少ない上流部で濃度が低く, 果樹園からの負荷量が多くなる中流部から濃度上昇が大きくなり, 最下流部では約3mg/Lに達している。一

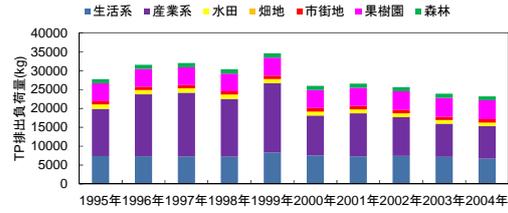


図7 TP排出負荷量

方, 図6では濃度は春先から低下を始めて夏場に最も低い値を示し, 秋から上昇し始める。これは野外調査結果と同じ傾向である。また, 調査日の実測濃度と解析濃度を比較すると, 1月, 2月, 7月のように差の大きな月もあるが, 実測値の変化の傾向は概ね再現できている。

以上より, 果樹園が流域内に広く分布する柘榴川のTN濃度変化は, 果樹園からの肥料流出によって引き起こされている可能性が高いことが示唆される。

(3) リン負荷特性・河川水質特性

図7はリン濃度が大きく上昇していた区間にある自治体のTP排出負荷量の1995年から2004年までの経年変化を示している。対象となる3つの自治体は2005年に隣接する自治体と合併した。このため, 2005年以降の中分類別製造品出荷額等は合併後の市町村で集計されており, 2004年までと同じ精度で排出負荷量を算出することが困難になった。そこで, ここでは2004年までを対象期間とした。

図7によると, 産業系, 生活系, 果樹園の順で排出負荷量が大きく, この3つで85%以上を占めている。この中では, 産業系に特徴があり, 1990年代後半の排出負荷量が2000年以降と比べて非常に多くなっている。この影響を検討するために, 中分類別の排出負荷量を見てみると, 1990年代後半は家具・装備品, 繊維工業, および化学工業の負荷量が大きく, この3分類で産業系負荷量の60%を占めていた。しかし, 2000年代に入ると両者の出荷額が減り始め, 2004年には1990年代後半より4分の3程度減少した。すなわち, 2000年以降の排出負荷量の減少は, 主にこれら3分類によって引き起こされたと考えられる。

このように, 2000年代に入ると産業系負荷量の減少が見られるが, 2003年と2004年の負荷量はそれ以前よりもさらに減っている。2003年からは第5次水質総量規制が既存施設にも適用されるようになったので, これがTP負荷量の削減をさらに促進したと推察される。そこで, 水質総量規制の有無を排出負荷量解析で比較したところ, 水質総量規制の導入により2004年度の産業系負荷量は導入前より約2割削減されていた。

図8は1995年から2004年までの各年の河川水質解析結果を示している。ここでは各年の平均的な濃度を計算しているため, 式(8)の流入負荷量には流達負荷量ではなく排出

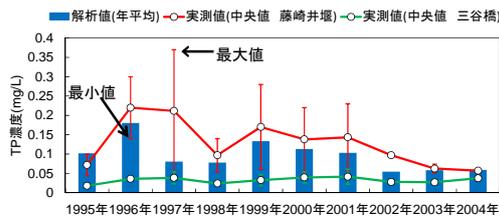


図8 TP濃度解析結果

負荷量を使用している。各年の水質解析結果は、1997年を除き概ね実測値に近い数値が得られている。1997年は5月に1回だけ0.37mg/Lという非常に高濃度が観測されているが、他の測定日のTP濃度は0.053mg/Lから0.15mg/Lであり、解析結果は1997年5月を除いた実測値に近い値といえる。

各年の平均的なTP濃度は、1996年や1999年のような負荷量が多く流量が少ない年に高くなる傾向を示している。すなわち、紀の川中流部に位置する三谷橋から藤崎井堰までの区間のTP濃度は、外部負荷と河川水量の影響を受けて変動し易いといえる。

(4)まとめ

本研究では、農業活動が盛んな流域における水環境を評価し、農業集水域である紀の川流域における健全な水物質循環を考察した。

まず始めに現地調査によらずに果樹園における栄養塩類の原単位を算出する方法を検討した。その結果、現地調査によらずに既存情報だけを利用した場合でも、年間排出負荷量や平均的な河川水質の評価に利用可能な原単位を算出できることがわかった。この方法の有用性としては、施肥量に応じた原単位を簡便に算出できるため、施肥量管理による栄養塩類の流出抑制効果の検討を容易に行えることである。

続いて、分布型モデルを利用した水流出・物質負荷量解析および河川水質解析を実施して、TN濃度に特徴的な変化が見られる支川の柘榴川流域における窒素負荷特性および河川水質特性を考察した。その結果、流域の3分の1を果樹園が占める柘榴川流域では、河川へのTN流達負荷量が、水流出量と土中窒素量の影響を受けて、降水量や果樹園への施肥量の多い10月から4月まで多くなり、河川水質も流達負荷量と同じように変動することが示された。このような水質変化は野外調査でも得られており、柘榴川のTN濃度変化は、果樹園からの肥料流出によって引き起こされている可能性が非常に高いと推察される。

最後に、紀の川中流部の水質モニタリングデータに見られる1990年代後半の大きなTP濃度上昇の要因を、物質負荷量解析および河川水質解析により考察した。物質負荷量解析により、産業系、生活系、および果樹園の3つで総負荷量の85%以上を占め、特に産業系の負荷量が一番多いことが示された。さらに、

1990年代後半は、家具・装備品、繊維工業、化学工業の3分類で産業系負荷量の60%を占めていたこと、2000年以降は出荷額の減少および第5次水質総量規制の導入により、産業系負荷量が1990年代後半より約50%減少したことも示された。そして、このうち12%分が水質総量規制の導入によるものであった。また、河川水質解析により、中流部のTP濃度の大きな上昇は産業系に由来する外部負荷量の増加および低流量によって生じていたと推察される。すなわち、紀の川中流部のTP濃度は流域からの外部負荷量と流量の影響を強く受けるため、河川水中のTP濃度管理では両者を考慮することが重要となる。感度解析によると、TP流達負荷量が32,000kg/年以上かつ流量が8m³/s以下になると、TP濃度上昇が0.1mg/Lを上回る可能性が高い。

国内では、市街地や水田の多い流域を対象とした研究が主流であり、水田以外が多い農業集水域における水と物質の動態については未解明な点が多く残されている。そのため、本研究の成果は、紀の川流域における水物質循環の健全化推進に役立つだけでなく、農業集水域における水環境管理に有益な情報となることが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

- ①日野良太, 江種伸之ほか2名(2番目): 果樹園の月別窒素原単位に基づいた河川水質の季節変化特性に関する数値解析, 水工学論文集, Vol. 56, pp. I_607-I_612, 2012, 査読有。
- ②日野良太, 江種伸之, 平田健正: 樹園地内の物質収支に基づいた栄養塩類の原単位算出法に関する基本考察, 環境情報科学論文集, Vol. 25, pp. 269-274, 2011, 査読有。

〔学会発表〕(計3件)

- ①日野良太, 江種伸之ほか2名(2番目): 果樹園栽培が盛んな流域を対象としたTN流出負荷量解析, 土木学会第66回年次学術講演会, 2011年9月7日, 松山市
- ②江種伸之: 豊かな水環境を取り戻すために環境モデリング技術を利用した流域水環境評価, 平成22年度紀の川水質汚濁防止連絡協議会講演会, 2010年9月7日, 和歌山市
- ③華井英樹, 江種伸之: 農業活動が盛んな紀の川流域の水流出解析, 土木学会第10回地下水環境水文学に関する研究集会, 2009年9月5日, 福岡市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

江種 伸之 (EGUSA NOBUYUKI)

和歌山大学・システム工学部・准教授

研究者番号: 00283961