

平成21年5月20日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18760375
 研究課題名（和文）農業活動が盛んな流域における水物質循環の健全性評価に関する研究
 研究課題名（英文）Study on evaluation for health of water and materials cycle in a rural agricultural catchment area

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：果樹栽培が盛んな紀の川流域に注目して、農業活動が盛んな流域の豊かな水環境の構築に関する学問的基礎の確立を目指した。本研究ではまず、分布型モデルを用いた水流出解析を紀の川流域で実施して、農業用水利用が灌漑期の河川流量に多大な影響を与えていることを示した。続いて、支川の貴志川流域からの窒素排出量を算定して、流域では果樹園からの肥料由来の窒素排出量が非常に多く、特に秋の施肥時期にその多くが流出する可能性が高いことを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,400,000	0	1,400,000
2007年度	1,300,000	0	1,300,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	240,000	3,740,000

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：紀の川，農業集水域，河川調査，河川水質，分布型水流出モデル，汚濁負荷量解析，マクロモデル，GIS（地理情報システム）

1. 研究開始当初の背景

稲作とともに蜜柑，柿，桃などの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、平成12年度から継続している河川調査研究によって、中流部での全リン濃度上昇、支川における施肥時期の全窒素濃度上昇、少雨時における農業用取水堰（頭首工）直下の流水消失（瀬切れ）、およびそれに伴う下流水質悪化などが明らかになっている。これらを解決して豊かな流域水環境の構築を目指す

場合、生活排水や産業排水だけでなく農地からの肥料流出量（汚濁負荷量）を把握して、必要に応じてその削減を進めなければならない。また瀬切れは、水質悪化や水域生態系破壊など、水環境全体に悪影響を及ぼすので、瀬切れを起こさない流域一体となった水利用体制の確立が望まれる。

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（平成13年度一部供用開始）に続いて、紀の川中流流域下水道（平成22年度完成予定）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発生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年夏季の貴志川（紀の川最大の支流）では、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ている。

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健全な水物質循環の確立につながる。

2. 研究の目的

本研究では、農業活動が盛んな紀の川流域に注目し、水環境変化の原因となる水量・水質に関する2テーマについて検討を行った。

（テーマ1）農業活動が河川流量に与える影響（水流出解析）

瀬切れを起こさない流域一体となった水利用体制を確立するためには、空間的かつ動的に変化する水文流出過程を理解することが重要である。そこで、農業集水域に適した水流出解析モデルを構築して紀の川流域に適用し、農業用水取水が灌漑期の流量に与える影響を評価した。

（テーマ2）農業活動が河川水質に与える影響（汚濁負荷量解析）

水質総量規制や水質汚濁問題に取り組むには、流域からの汚濁排出量を算定し、河川の水質に与える要因を特定することが重要である。そこで、原単位法とマクロモデルを利用した汚濁負荷量解析モデルを構築して支川の貴志川流域に適用し、窒素排出量を算定することで、流域内の農業活動、特に果樹園が河川水質に与えている影響を評価した。

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奈良県南部の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紀伊水道に注いでいる。主な支川には、貴志川、紀伊丹生川、大和丹生川、高見川などがある。

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）、紀の川はこれらの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大幅に増えており、流域全体でも増加傾向にある。

流域内は森林が約70%を占め、土地利用の

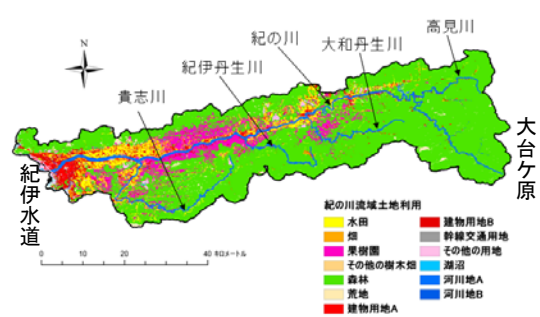


図-1 紀の川流域の土地利用図

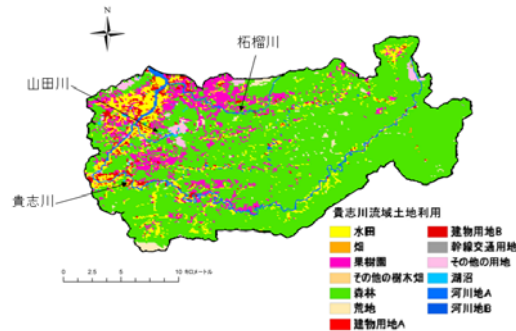


図-2 貴志川流域の土地利用図

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は汚濁負荷量解析で対象とした支川の貴志川の土地利用図を示している。貴志川の流路長は約60km、流域面積は約300km²である。土地利用は森林が大部分を占め、それ以外は4分の1程度にすぎない。ただし中下流部では水田および果樹園が多くなり、特に桃栽培が盛んな支川の柘榴川の下流部には果樹園が広がっている。市街地は下流部に集中し、流域内人口の4分の3にあたる約27,500人が住む。

(2) 水流出解析

① 分布型モデル

今回は、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の3つで構成されている（図-3）。今回は、分布型モデルを利用するため、図-4のように紀の川流域を4km正方形メッシュに分けた。

② 農業用水取水モデル

紀の川には、4つのダムと6つの頭首工があり、流域全体で人為的な水操作が行われている。今回は解析対象期間として1999年から

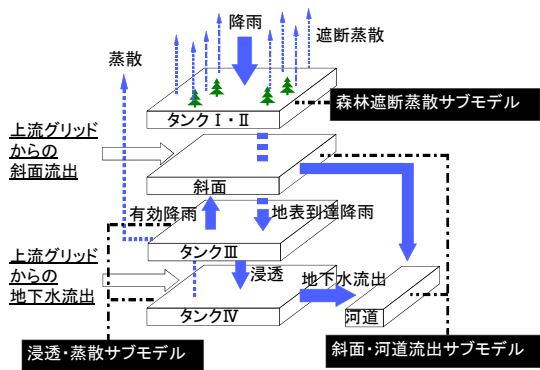


図-3 分布型水流出モデル構成図

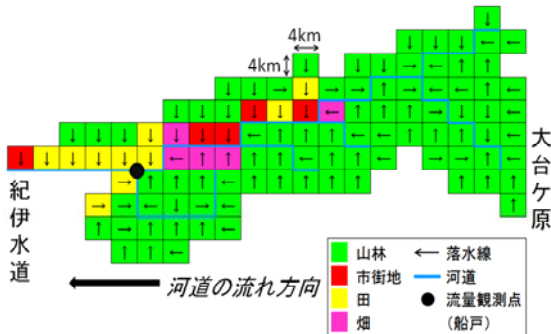


図-4 紀の川流域メッシュモデル(4km×4km)

2002年を選んだが、この4年間の灌漑期(6月10日～9月15日)における頭首工からの平均取水量は $25.06\text{m}^3/\text{s}$ であった。同様に、4年間の船戸地点における平水流量 $22.72\text{m}^3/\text{s}$ や低水流量 $11.82\text{m}^3/\text{s}$ と比較すると、頭首工からの取水量は非常に多い。今回の分布型モデルには人為的な水操作は考慮されていないので、石塚・江種(水工学論文集52, 2008)が提案した農業用水取水モデル(式(1))を用いて、河川流量に及ぼす人為的な影響を検討した。

$$q_r = q_{org} - \sum_{i=1}^N (1-r_i)q_i + \sum_{j=1}^M \Delta q_j + \sum_{k=1}^L p_k q_k \quad (1)$$

ここで、 q_r は取水・分水が考慮された流量、 q_{org} は分布型モデルにより得られた取水・分水を考慮していない解析流量、 q_i は頭首工 i の取水量、 r_i は農業用水の還元率(=0-1)、 Δq_j はダム放流量と流入量の差、 q_k は流域外からの分水量、 p_k は分水効率を表す。

(3) 汚濁負荷量解析

① 原単位法による年間窒素排出量

流域における年間窒素排出量は、原単位法を使って求めた。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で、発生に関与する活動あるいはものの存在に係数(原単位)をかけて発生量を算定する。この方法は、限られた条件のもとではあるが係数を決定しておけば、後は既存の統計資料を活用して推計できるので、各種計画策定、環境アセスメントなどで広く採用されている。

今回は、流域の最も大きな特徴である果樹園の原単位だけを施肥データから求め、それ以外の排出源(生活系、産業系、森林、水田、畑地、市街地)の原単位は、文献(流域別下水道整備総合計画調査指針と計画, 1999)に載っている平均値を用いた。水田や畑地などの農地からの窒素排出量も果樹園と同様に算定すべきであるが、後述するように水田や畑地からの窒素排出量は果樹園と比較すると非常に少ない。そこで、今回は平均値を使用しても窒素排出特性に影響はないと判断し、果樹園原単位の算定のみ限定した。

果樹園などの面源の原単位については、数年間の定時調査と降雨時調査の結果から算定するのが基本とされている。しかし、今回は入手が容易な統計データを利用する原単位法の性質を考え、野外観測によらない、より簡便な方法として、果樹園における窒素収支式(2)を利用した簡易算定方法を検討した。

$$A+B+C-D-E-F=G \quad (2)$$

ここに、 A : 化学肥料窒素量(施肥量)、 B : 大気降下量、 C : 窒素固定量、 D : 作物吸収量、 E : 脱窒量、 F : 堆肥散布によるアンモニア揮散量、 G : 農地余剰窒素量である。ただし、式中の各項の正確な値は得られていないので、今回は式(2)を参考に以下の4式を使って原単位を算定した。

$$\text{Case1: 原単位}=(A-D)/\text{栽培面積} \quad (3)$$

$$\text{Case2: 原単位}=(A-D-E)/\text{栽培面積} \quad (4)$$

$$\text{Case3: 原単位}=(A+B-D)/\text{栽培面積} \quad (5)$$

$$\text{Case4: 原単位}=(A+B-D-E)/\text{栽培面積} \quad (6)$$

施肥量には流域内のJAにおける標準的施肥量を使用した。大気降下量には一部が流域に含まれている自治体で測定された数値を使用した(ただし、測定地点は流域外)。作物吸収量は、果樹園のほとんどを桃、蜜柑、柿の3種が占めるため、これら3種の栽培方法を記した文献(モモの作業便利帳, 2001; ミカンづくりと施肥, 1998; カキの作業便利帳, 1996)の値を貴志川流域に合うように修正して使用した。脱窒量は文献(続・環境負荷を予測する, 2005)に載っている一般値(化学肥料中窒素の20%)を利用した。栽培面積には和歌山県近畿農政局のデータを使用した。

今回の果樹園原単位の算定法では、JAの標準的施肥量を利用しているので、月別の施肥量が求まる。すなわち、これを利用することで、面源における年間原単位だけでなく、月別原単位も得られる。月別原単位があれば、降水量や施肥量に依存する果樹園からの窒素排出特性を詳細に検討できるため、本算定法の利用価値は高い。

② マクロモデルによる月別窒素排出量

各排出源から河川への窒素排出量の算定

にはマクロモデルを利用した。マクロモデルは、流域から排出される汚濁物質の負荷量を、流域の人口、土地利用、下水道整備率などの流域特性を表すフレーム値を用いて定式化したものである。この基本モデルは「水理公式集例題集、1999」に示されているが、ここでは面源からの排出量が降水量のみの関数になっている。そこで、今回は果樹園における月別施肥量を考慮できるように修正した。水田と畑地の原単位には文献値を利用しているため、月別原単位を求めることができない。そこで水田と畑地の算定式は他の面源と同じように降水量のみに依存するものとした。なお、後述するが、水田と畑地からの窒素排出量は果樹園よりも非常に少ないので、施肥量を考慮した算定式を用いたとしても結果に影響を与えない。

以下に排出源毎の算定式を示す。

- ・生活系および産業系の窒素排出量

貴志川流域では下水道がほとんど整備されていないため、下水道からの排出を考慮した基本モデルではなく、個別の浄化槽を対象とした形に修正した。この場合、下水管内の蓄積などを無視でき、年間を通してあまり変動しないと考えられるため、原単位法で算定した年間排出量(YL_i)を365で除して日排出量(DL_i)とした。

$$DL_i = YL_i / 365 \quad (7)$$

- ・果樹園を除いた面源からの排出量

森林、水田、畑地、市街地からの窒素流出は降雨時に生じるとして、日排出量(DL_i)は日降水量(Q)のべき乗に比例するものとした。

$$DL_i = k_i Q^a \quad (8)$$

- ・果樹園からの排出量

樹園地に残存する肥料成分は降雨時に流出するので、日排出量(DL_i)は樹園地に残存する肥料の量(M 、残存施肥量と呼ぶ)のべき乗および日降水量(Q)のべき乗に比例するものとした。なお、ここでは残存施肥量は原単位と等しいと考えた。

$$DL_i = k_i Q^a M^b \quad (9)$$

ここに、 i は土地利用番号(1:市街地, 2:森林, 3:水田, 4:畑地, 5:果樹園), k_i , a , b はフィッティングパラメーターであり、計算で得られる日排出量の合計値(ΣDL_i)が年間排出量(YL_i)と等しくなるように逆解析した。

なお今回は、降水量には日降水量を用いているが、残存施肥量には月別施肥量を日数で除したものを使用している。そこで、解析精度のことを考えて、月別排出量で評価する。

4. 研究成果

(1) 水流出特性

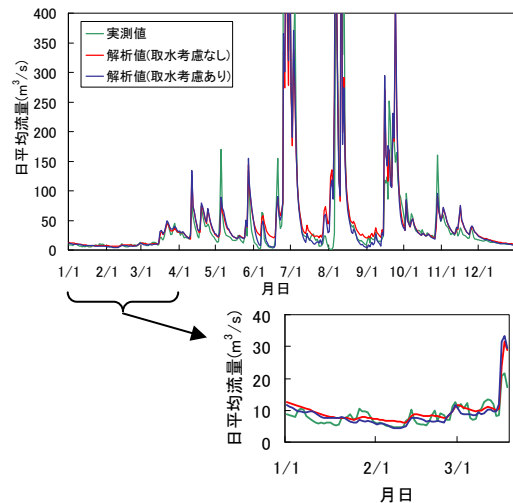


図-5 1999年の実測流量と解析流量の比較

図-5は最下流の流量観測点(船戸)における実測値と解析値を示している。農業用水取水モデルの適用に関係なく、分布型モデルを用いた解析値は、年間を通じた流量変化を概ね再現している。

ただし、農業用水取水モデルを適用していないケースでは、低水流量時に解析値が実測値よりも大きくなる傾向が見られる。とくに、6月から9月にかけてその傾向が強い。この時期は灌漑期であり、大量の農業用水取水の影響が実測流量に表れている。式(1)に示した農業用水取水モデルの還元率には一般的な60%を使っているが、農業用水取水モデルを適用することによって、灌漑期間中すべてではないが、解析結果が実測流量に近づいている(7月上旬から中旬までと8月中旬から9月上旬まで)。また、灌漑期以外でも1月から3月の低水流量時には、農業用水取水モデルを考慮した解析値の再現性が向上している。

農業用水取水ルールを考慮した分布型モデルを適用することで、6月から9月の灌漑期の流量変化の傾向もおおむね再現することができた。その結果として、紀の川の低水水量にはダムや頭首工の影響が強く表れていることが示唆された。

(2) 汚濁負荷特性

得られた果樹園原単位は、Case1が14610($\text{kg km}^{-2} \text{年}^{-1}$)、Case2が9446($\text{kg km}^{-2} \text{年}^{-1}$)、Case3が16869($\text{kg km}^{-2} \text{年}^{-1}$)、Case4が11762($\text{kg km}^{-2} \text{年}^{-1}$)である。最大値と最小値の間には1.78倍の差が生じている。ただし、最大値を示したCase3でも、文献(流域別下水道整備総合計画調査指針と計画、日本下水道協会、1999)にある愛媛県における伊予甘・みかんの原単位(14500kg/km^2)の1.16倍である。すなわち、今回の様な簡易算定法でも、窒素排出負荷量解析に十分な精度の原単位が得られる可能性が高いと推察される。

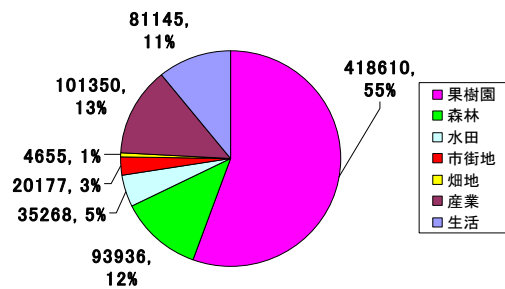


図-6 年間窒素排出負荷量 (kg/年)

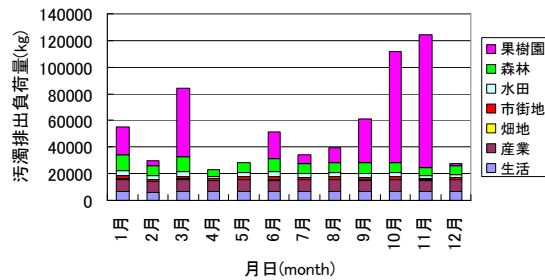


図-7 月別の窒素排出負荷量 (kg/月)

検討した4ケースでは、大気降水量と脱窒素量を考慮したCase4が最も厳密な計算である。ただし、降水中窒素濃度は流域外の値であり、また脱窒素量には一般値を使っている。そこで、対象流域に適したこれらの数値については今後の検討課題として、今回は最も簡単な式で求めたCase1の値を用いることにした。

図-6は年間窒素排出量の算定結果、図-7はマクロモデルを利用して求めた月別窒素排出量を示している。図-6より、貴志川流域では、全窒素排出負荷量の半分を果樹園が占めていることがわかる。もし果樹園の原単位に最小値であるCase2の値を用いた場合には、果樹園の割合は47%に下がるものの、依然として果樹園の影響が一番大きい。また図-7の月別排出量から、降水量と肥料量の多い10月、11月、3月の果樹園からの排出負荷量が非常に多いことがわかる。

原単位法とマクロモデルを併用した汚濁負荷量解析により、果樹園が広く分布する貴志川からの窒素排出特性を検討した。その結果、貴志川流域では樹園地からの窒素排出量が最も多いことがわかった。また、月別負荷量からは、施肥量と降水量がともに多い秋季に最も多くなることが示唆された。

(3) まとめ

本研究では、農業活動が盛んな紀の川流域に注目し、農業活動が河川流量および河川水質に与える影響について評価した。

瀬切れを起こさない流域一体となった水利用体制を確立するためには、空間的かつ動的に変化する水文流出過程を理解することが重要である。そこで、農業集水域に適した水流出解析モデルを構築して紀の川流域に

適用し、農業用水取水が灌漑期の流量に与える影響を評価した。その結果、稲作および蜜柑、柿、桃などの果樹栽培の盛んな紀の川流域における、6月から9月の灌漑期の流量変化の傾向もおおむね再現することができた。また、紀の川の低水水量にはダムや頭首工の影響が強く表れていることが示唆された。

一方、水質総量規制や水質汚濁などの質的課題に取り組むには、流域からの汚濁排出量を算定し、河川の水質に与える要因を特定することが重要である。そこで、原単位法とマクロモデルを利用した汚濁負荷量解析モデルを構築して支川の貴志川流域に適用し、窒素排出量を算定することで、流域内の農業活動、特に果樹園が河川水質に与えている影響を評価した。その結果、貴志川流域では果樹園からの窒素排出量が最も多く、約半分を占める、また施肥量と降水量がともに多い秋季に排出量が最も多くなることが示唆された。

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井上研人, 江種伸之, 分布型モデルと農業用取水ルールを利用した紀の川流域水流出解析, 環境情報科学, Vol.37, No.4, pp.100-101, 2008, 査読無。
- ②吉田慎吾, 江種伸之, 果樹栽培の盛んな農業集水域における窒素排出負荷解析, 環境情報科学, Vol.37, No.4, pp.96-97, 2008, 査読無。

〔学会発表〕(計2件)

- ①江種伸之, 吉野川・紀の川の水環境 -健全な水環境とそれを維持するための地域協働体制-, 第4回水環境に関する講演会(吉野川・紀の川流域協議会), 2008年3月23日, 大淀町文化会館(奈良)
- ②江種伸之, GIS(地理情報システム)を活用した流域水環境情報解析システムの開発ー紀の川流域環境の健全性評価ー, 平成18年度紀の川水質汚濁防止連絡協議会講演会, 2006年7月25日, JA会館(和歌山)

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