農林地からの汚濁負荷とその計測方法*

國 松 孝 男 武 田 育 郎

1. はじめに

非特定汚染源の中でも最も自然度の高い山林は降水を浄化しており、人工自然である農地は肥料成分を流出して汚濁しているというのが一般の捉え方である。これに林業・林学に関係する人々からは異議はないが、農業・農学を専門とする人々の間からは異議があり、特に水田は浄化機能を持っており、汚濁負荷は一般に言われているよりもずっと少ないのであると¹⁾。

とにかく今もってこれらの非特定汚染源の評価が定まらないのは、家庭排水負荷などと違って、地域特性が非常に大きいことが最大の要因である。さらに、調査が構造的にも地理的にも困難であり、精度の高い実測が不足していることが挙げられる^{2),3)}。わが国の山林面積は国土の67%を占めており、一般に集水域に占める面積比率が大きいため、山林からの汚濁負荷（原単位）の精度が集水域の総汚濁負荷発生量の評価に大きく影響する。農地は14%であるが、汚濁負荷が山林より大きいので、やはりその精度が集水域における評価を大きく左右するのである。小論ではこれらの非特定汚染源からの汚濁負荷に関する調査研究の現状を整理

し、今後の研究の方向を探ってみる。

2. 研究の方法

水環境との関わりという視点からは、農林地はその生態系内部における物質循環はとりあえずブラックボックスとしても、水収支に伴う物質収支が明らかにされればよいと考えて研究されてきた^{1)~3)}。図1はこれまでに得られている研究成果と統計資料などから筆者が推定した平均的な農地における物質収支である⁴⁾。

栄養塩類は外部循環系から降水・降下塵と農地では灌漑水によって供給され、表面流出・地下浸透によって外部循環系へ排出される。これに栄養塩類の収支に最も大きな影響を与える肥料を考慮すると、降水と灌漑水が土壌生態系を経由して外部循環系へ排出する物質・汚濁負荷量(L)は次式で与えられる。

$$L = \alpha C_i Q_i + \beta C_i Q_i + \gamma F \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに C_i , C_i , Q_i , Q_i はそれぞれ灌漑水と降水の濃度と水量, F は施肥料, α , β , γ はそれぞれの流出率である。流入物質は土壌・植物に吸収され、逆に窒素固定や土壌の風化によって水中に供給されるが、それらはネットとして流出率に含まれている。

農地についてみると、灌漑水、降水・降下塵と比較して肥料による供給量(図1)が圧倒的に大きいので、施肥量と肥料の流出率 γ から次式で汚濁負荷流出量を求める場合もある。

$$L = \gamma F \quad \cdots \cdots (2)$$

いずれの場合についても流出率を決める必要があるが、例えば α , β は濃度や滞留時間・水管理などによって変わることが知られているし、 γ も施肥量・栽培作物などによって変わる。さらに土壌条件や気候によっても変わる。その上これらをそれぞれ分離して測定することも困難で、今のところ一般的な規則性は見いだされていない。

農林地からの汚濁負荷総量の評価は、外部水系からの汚濁物質のインプットと外部水系へのアウトプットを実測し、それらの差・正味の汚濁負荷量(L_1)でなされるのが普通である。

$$L_1 = C_0 Q_0 + C_2 Q_2 - C_i Q_i \quad \cdots \cdots (3)$$

$$L_2 = C_0 Q_0 + C_2 Q_2 - C_i Q_i - C_i Q_i \quad \cdots \cdots (4)$$

ここで C_0 , Q_0 , C_2 , Q_2 は表面排水と地下浸透排

Takao Kunimatsu

昭和46年 京都大学大学院農学研究科
博士課程修了

47年 滋賀県立短期大学農業部講師

57年 滋賀県琵琶湖研究所兼務

63年 同短期大学教授
農学博士

Ikko Takeda

昭和61年 京都大学農学部農業工学科
卒業

同年 同大学大学院農学研究科入学

63年 同博士課程進学

* Estimation of Nutrient Loading from Agricultural Lands and Forest, 昭和63年10月14日受理

図1 水系における農地の物質収支

水の濃度と水量である。農林関係では正味の汚濁負荷流出量からさらに降水・降下塵による負荷を差し引いた L_2 (差引排出量) が用いられることが多い¹⁾。しかし、 L_2 は林地に適用するとマイナスとなる上、汚濁負荷解析を行う場合には降水・降下塵による負荷を別途、見積る必要があるので、普通は L_1 が用いられている。

流出予測モデルとしては、林地では河川からの流出負荷の予測に多く用いられている $L \sim Q$ 関係式(5)が適用されることが多い。

$$L = aQ^b \dots\dots\dots(5)$$

水田については汚濁負荷総量(原単位)から肥培管理や施肥時期(図4参照)を考慮して、1年を3期に分け(図2)、各期の流出濃度比(P_2, P_3)を一定と仮定して濃度 C_1 を逆算し、流出水量から流出負荷量を予測するモデル式(6)が提案されている⁵⁾。

$$\begin{aligned} L &= C_1 \Sigma Q_1 + C_2 \Sigma Q_2 + C_3 \Sigma Q_3 \\ &= C_1 (\Sigma Q_1 + P_2 \Sigma Q_2 + P_3 \Sigma Q_3) \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

3. 計測法と研究の現状

3.1 農地

図2 水田流出負荷濃度の期別パターン

これまで、①水収支型ライシメーター、②一区画(1筆)農地、③広域農地、④農耕地河川を対象にした物質収支の実測に基づいて調査研究されてきた。これらは農地のスケールや水収支の条件などが異なっているので、それぞれの手法によって得られた汚濁負荷流出量が外部水系に対してもつ意味が異なることに注意すべきである²⁾。水田についてはこれまでかなり多くの調査研究が行われてきたが、畑地についてはわが国では非常に少ない⁶⁾。

言うまでもなく、汚濁負荷量の精度は主に実測精度によって決まる。水田についてこれまでの成果を詳しく検討すると、その多くは①期間が水稻の作付期間(約5カ月)に限られており、年間流出量にはなっていない。②実測頻度が10日に1回以下であるなど精度的に問題がある。③1水文年以下の調査である。④実測農地の土壌タイプが偏っているなど、問題が多い(例えば広域水田調査について図3参照²⁾)。

そこでそれぞれの元データを検討して、少なくとも欠測期間について筆者のデータをもとにして補完して1年間の流出量を推定し、T-N、T-Pの流出量と施肥

図3 広域水田調査の実測精度
実測例11のうち乾田1例、グライ土壌・湿田10例

量の関係を検討したところ、正味の汚濁負荷流出量と施肥量の間にはT-N、T-Pとも相関は認められなかった。さらに用水および用水と降水による供給量と表面流出と地下浸透による排出量との間にもT-N、T-Pともに相関は認められなかった²⁾。結局、水田からの正味の汚濁負荷流出量を施肥量あるいは水田用水の汚濁程度（用水による流入負荷量）と関係づけることは難しい。また、T-N、T-Pともに循環灌漑水田＜排水不良水田＜乾田＜傾斜地水田の順に大きくなる傾向にあり、水田タイプによる排出量の差が大きい²⁾。

畑地からの表面流出は降雨時のみであるが、排水路系が不十分であることが多く、さらに栽培作物・施肥量・肥培管理・降水量・地形・土質などの影響を水田よりも強く受ける。内外のデータを検討したところ、表面流出量と施肥量との相関はT-N、T-Pいずれについても認められなかった。地下浸透量と施肥量については、T-Pには相関は全く認められなかったが、T-Nには比較的良い相関が認められた。これは酸化条件下にある畑地の表層土壤中では、Nは急速に NO_3^- に酸化されて土壤に保持されにくくなるために施肥量との対応が明確になるが、Pは逆に土壤に強く固定されるためであると推察される⁹⁾。

3.2 山林

山林からの汚濁負荷の流出は溪流の1地点で実測すればよく、比較的調査しやすい。しかし、人為的影響の全くない流域は一般に遠隔地で不便であり、特に降雨時の調査には危険さえ伴うのでこれまで国内外にそれほど多くの信頼できる調査・研究事例があるわけではない。さらにこれまで林学や植物生態学者によって研究されてきた森林生態系における物質循環は、主にミネラルに限られており、全窒素・全リンが調査された例は非常に少ない³⁾。

3.3 原単位適用

特定の流域に分布する農林地のおかれた条件は、比較的小さな流域が対象であっても、かなり異なっているのが普通である。これらの研究成果を原単位として

流域における汚濁物質の流出解析に適用するにあたっては、それらが流出解析の精度と目的にかなった手法で行われた調査から得られた結果であるかどうかを十分吟味する必要がある。例えば、降雨流出を含む解析を行う場合は、当然、原単位も降雨流出が評価されたものを使わなければならない。その場合、原単位の一部が、一時的に堆積・貯留されることも考慮しなければならない。さらに汚濁成分の生物利用活性は化学・物理形態によって異なることにも注意を払う必要がある。

4. 農林地負荷の特徴と計測上の課題

農林地からの物質の流出は、それぞれの生態系における物質循環の一要素である。従って、流出負荷量はそれぞれの生態系を構成する要素のうち少なくとも主なものについて内部の物質移動量を明らかにし、それらの関連の中で相互に検証されなければならない。それには大気圏・生物圏・土壌圏を循環するエネルギーと水の移動に伴う物質の循環についての総合的な研究を必要とする。しかしながら研究の現状は、特に水質汚濁成分についてこれらを明らかにするところまでは到達していない。これらはどれをとっても地域特性（気候、地形・地質・土壌、植生・栽培品種、土壌管理・水管理・肥培管理、灌漑水の水質など）が強い。さらに農地では人為的影響が大きく、かつそれらが非定常である。以下に今後、検討されなければならない主な課題を整理しておく。

4.1 流入系

①降水 降水量とそのパターンは地域によって異なり、水質も下層大気汚染を反映して異なる。さらに同一地域であっても降水量によって年変動する⁷⁾。しかし、わが国で2年以上継続してT-N、T-Pが測定された例は4例しか見あたらないのが現状である³⁾。

②灌漑 水田の水管理は間断灌漑法と掛け流し灌漑法に大別される。用排水系が整備されて水の供給が十分になると、水管理の労力を省くために掛け流しが多

図4 水稻の栽培暦の一例

くなる傾向がある。6～7月に1週間ほど中干しが行われ、その後は間断灌漑となり、結実してから稲刈りまでの間は灌漑しないのが普通である(図4)。

用水中の成分も土壌・作物に吸収(浄化)されるが、吸収率(流出率)は濃度(汚濁の程度)に依存する。汚濁地域では耕作者は汚い水は田に入れたがらないため、灌漑水量が少なくなる傾向がある。表流水の乏しい地域では地下水が揚水されて灌漑水として使われるが、地下水中の成分は必ずしも直上の土壌系から供給されたものとは限らないことからその評価は難しい。

4.2 内部系

①施肥 肥料は作物生理上、必要な時期に必要な成分が必要量だけ分施される(図4参照)。この非定常性が肥料流出の評価を難しくしている。その施肥量も作物によって異なり(表1)、同一作物であっても地方・地域によって異なる(表2)。さらに、畑では作付回数(耕地利用率)によって施肥量は大きく異なる。

肥料の施肥法および成分の化学形態も流出に影響を与える。 NH_4^+ は土壌中で酸化されて NO_3^- となり流出しやすくなるが、この反応は還元状態では進まないのので湛水したり(水田)、施肥位置を深くする(全層施肥、施肥田植機)ことによって抑制される。ただし、リンは逆に流出しやすくなる。また、尿素肥料・コーティング肥料など肥料の化学・物理形態によっても流出のしやすさは異なる⁸⁾。

②土壌 物理化学的諸性質が表面流出や地下浸透に影響を与えるほか、傾斜などの地理的条件も影響する。リンは活性アルミニウムの多い土壌(火山灰土)ほど不溶化して固定される率が高い。窒素やカリウム(NH_4^+ , K^+)などの陽イオンの一部は土壌に蓄積(肥沃化)されるが、その保持力(保肥力)は土壌の塩基置換容量によって異なる。また透水性に比例して、用水使用量と地下浸透量が多くなる。最近の基盤整備では畑作転換を容易にするため(汎用農地化)、暗渠排水などによって排水改良されることが多くなり、今後その影響を評価する必要がある。

農地を耕起(畦立て)して土壌への酸素の供給を多

表1 野菜の施肥量の例

(kg/10a)

種 類	N	P	種 類	N	P
ト マ ト	37	13	ハ ク サ イ	28	9
キ ュ ウ リ	34	11	キ ャ ベ ツ	27	10
ナ ス	33	8	レ タ ス	24	9
ダ イ コ ン	19	6	セ ル リ ー	59	16
ニ ン ジ ン	22	9	ホ ウ レ ン ソ ウ	17	5
エ ダ マ メ	6	5	ネ ギ	28	11

くすると、乾土効果のため、その後一定期間、窒素の流出量は多くなる。水田でも収穫後の耕起(図4)によって、その直後から NO_3^- の降水による浸透流出濃度は高くなる(図5)²⁾。山林では伐採による裸地化と植林がこれに対応する³⁾。

③植生変更 水田では米過剰時代に入り、畑作等への転換(転作)がすでに25%を超え、純水田地域は存在しなくなっている。畑地では土壌表面の被覆度が栽培品種によって異なり、降雨による表面流出に影響を与える。山林では伐採・植林による樹種の変更があり、一時的に降水と物質の流出率が大きくなる³⁾。

④持ち出し 植物残渣の持ち出し量・焼却量が地域によって一定ではない。例えば、稲藁の焼却は東北地方では収穫期にはその煙が稲藁スモッグとして公害にまでなるほど盛んであるが、その他の地域では田に鋤込まれる場合が多い(最近焼却する農家が多くなっている)⁴⁾。山林では伐採は数十年以上の期間に1度程度の頻度になるが、その間、下草刈・間伐・枝払が何度か行われる。

4.3 流出系

①表面流出 山林・畑地で表面流出が起こるのは降雨時のみであるが、降雨時に河川から流出する汚濁負荷量は低・平時の数倍から数百倍に達することがある。これを評価するためには長期にわたって流量と水質を連続して実測する必要がある⁹⁾。

水田については水管理が間断灌漑の場合は、大雨で溢流がある時を除いて流出はないが、強制的に表面排出されることもある。特に田植機の操作性をよくするため、元肥(図4参照)を含んだ濁水が強制落水されることがあり、その場合の流出負荷は大きい¹⁾。掛け流し灌漑では常に余水が越流している。その量は個々の農家によって調節される上、降雨も加わるので排水量・水質を測定するのは非常に難しい。非灌漑期間には水

表2 米の収穫量と施肥量(1986年)
(kg/10a)

地 域	収量	N	P
全国	508	11.1	5.2
北海道	526	11.1	4.8
東北	558	11.7	5.5
北陸	532	10.9	4.1
関東・東山	477	10.3	5.3
東海	452	10.9	5.8
近畿	471	10.7	6.2
中国	494	10.7	4.9
四国	455	9.8	4.7
九州	499	11.7	5.3

収量(玄米)は農林水産統計、施肥成分量は米生産費調査(全調査農家)より計算

図5 水田浸透水の窒素濃度の年間変動
ライシメーター浸透水, —: 標準施肥区, ----: 無肥料区

尻の堰は切ってあるので降水は田面を経て排水される。

用排水が分離されている地域においても、上流ブロックの水田の排水が下流ブロックの水田に取り込まれるよう設計されている場合が多いが、その反復利用率は判然としない場合が多い。用水不足地域では、水質汚濁の防止を兼ねて排水路末端でポンプアップするよう設計される場合もある¹⁰⁾。

②浸透排出 田面水の鉛直浸透成分は比較的測定しやすいが、畦畔漏水・浸透の評価が難しい。また、汎用農地として整備された水田では、当然、落水期間の暗渠排水が多くなる。

③排水路内堆積 一旦農地から排出された汚濁成分の一部は、排水路内に堆積したり植物によって吸収されて一時固定される。小水路ではこれらは降雨時に流出するが、大きな水路では豪雨による出水時かしゅんせつしない限り排出されない場合もあるので別途評価する必要がある。

④化学形態の評価 河川から流出する物質の化学的形態・組成は一様ではなく、流域の土地利用や地理的条件、天候などによっても変化する。河川からの汚濁負荷は、これまではその質は問わず全窒素・全リンでなされてきたが、閉鎖性水域における生物利用活性および沈降などの物理化学的挙動は化学的形態および水域の物理化学的・生物化学的条件（例えば富栄養化の程度）などによって異なる。都市河川と農地河川のT-N、T-Pを形態別にみると(図6)、前者の方が溶存成分が多い¹²⁾。従って、農林地からの汚濁負荷についても今後、化学形態別に定量することによってこれまでの調査結果を再評価する必要がある。

5. あとがき

農林地の汚濁負荷流出に関する研究の現状は、以上のように必要な調査が河川における同種の調査より困難であることもあって、河川・湖沼などの研究レベルと比較して十分とは言えず、初歩的な流出モデルしか提

図6 琵琶湖に流入する134河川のリンの形態
南湖流域は北湖流域と比較して都市化が進んでいる。流量加重平均濃度

出されていない。特に畑地や林地の汚濁負荷流出量に関するデータはまだまだ少なく、一般的に適用できる原単位を推定することもかなり無理がある。またCODの調査事例がほとんどない。今後、より精度の高い研究と流出予測モデルの構築が望まれる。

さらに農林地の国土保全上の評価や水田農業の水質浄化機能の評価に関する研究も重要である。

文 献

- 1) 田淵俊雄, 高村義親(1985) 集水域からの窒素・リンの流出, pp.75-129, 東大出版会, 東京。
- 2) 國松孝男(1985) 農地からのN, P負荷(その1, 2), 環境技術, 14, 114-119, 195-202。
- 3) 國松孝男, 吉良竜夫(1986) 山林からの栄養塩の流出と対策, 水処理技術, 27, 721-730。
- 4) 國松孝男(1983) 汚水の農地への還元利用—その理論と実際, 農業土木学会畑地灌がい研究部会編, pp.31-62, 畑地農業振興会, 東京。
- 5) 丸山利輔(1988) 湖沼汚染の診断と対策, 服部明彦編, pp.100-105, 日刊工業新聞社, 東京。
- 6) 國松孝男, 同上, pp.51-53。
- 7) 安部喜也, 同上, pp.37-41。
- 8) 國松孝男(1986) 農地からの栄養塩の流出と対策, 水処理技術, 27, 713-720。
- 9) 吉良竜夫, 國松孝男, 浜端悦治(1986) 水資源の保全—琵琶湖流域をめぐる諸問題, 吉良竜夫編, pp.97-112, 人文書院, 東京。
- 10) 國松孝男(1981) びわ湖とその集水域の環境動態, 環境科学研究報告 B105-R12-12, pp.82-105。