

流出負荷予測モデル  
に関する研究

黒田久雄

①

# 流出負荷予測モデル に関する研究

黒田久雄

# 目 次

第 I 章 序論	.....( 1)
1. 研究の背景	.....( 1)
2. 研究の目的	.....( 2)
3. 既往の研究	.....( 3)
4. 本研究の構成	.....( 4)
第 II 章 流出負荷予測モデルの提案	.....( 6)
1. 水質モデルの構造	.....( 6)
2. 本モデルの特徴	.....( 7)
3. $\text{NO}_3\text{-N}$ 日流出負荷量推定方法	.....( 8)
(1) LQ 式法の特徴	.....( 8)
(2) 濃度係数法 (CC 法) の特徴	.....( 9)
4. モデルの同定方法	.....(11)
5. モデルの評価方法	.....(12)
第 III 章 流出負荷量の精密調査結果	.....(13)
1. 精密調査の意義	.....(13)
2. 調査集水域概要	.....(14)
(1) 森林集水域	.....(14)
(2) 農業集水域	.....(15)
3. 調査方法	.....(18)
(1) 森林集水域の調査方法	.....(18)
(2) 農業集水域の調査方法	.....(19)
4. 森林集水域の流出負荷量調査結果	.....(22)
(1) 流出水の濃度と流出負荷量の年次変動状況	.....(22)
(2) 特徴的な時期における変動	.....(26)
a) 標準的降水時期 — 10月の状況 —	.....(27)
b) 少雨の時期 — 2月の状況 —	.....(28)
c) 多雨の時期 — 7月の状況 —	.....(29)
(3) 月別負荷量の変動	.....(31)
a) 比流量と流出率	.....(31)
b) 月別平均濃度の変化	.....(32)
c) 月別比負荷の変化	.....(34)
(4) $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{T-N}$ 、 $\text{SS}$ の年間総流出負荷量	.....(34)

(5) 地下水の水質	..... (35)
(6) 他集水域との比較	..... (36)
(7) 森林集水域のまとめ	..... (39)
5. 農業集水域（非灌漑期）の流出負荷量調査結果	..... (40)
(1) 流出水の濃度と流出負荷量の年次変動状況	..... (40)
a) 一般的流出状況	..... (40)
b) 流量、濃度、負荷量の頻度分布	..... (42)
(2) 月別の流量、濃度および負荷量	..... (43)
(3) 湧水、支流、地下水のNO <sub>3</sub> -N濃度と負荷量の調査結果	..... (45)
(4) 農業集水域（非灌漑期）のまとめ	..... (47)
6. 農業集水域（灌漑期）の流出負荷量調査結果	..... (48)
(1) 流出水の濃度と流出負荷量の年次変動状況	..... (48)
a) 流量の変動状況と水収支	..... (48)
b) 濃度の変動状況	..... (51)
c) 流出負荷量の変動状況	..... (52)
d) 流量、濃度、負荷量の頻度分布	..... (53)
(2) 月平均濃度と負荷量の変動	..... (56)
a) 月平均流量と月降水量	..... (56)
b) 月平均濃度の変動	..... (57)
c) 月平均負荷量の変動	..... (58)
d) 6カ月間の総流出負荷量	..... (58)
(3) 農業集水域（灌漑期）のまとめ	..... (59)
7. LQ式の特徴	..... (60)
(1) LQ式について	..... (60)
(2) 流量と流出負荷量の関係	..... (60)
a) 森林集水域	..... (60)
b) 農業集水域（非灌漑期）	..... (64)
c) 農業集水域（灌漑期）	..... (67)
第IV章 タンクモデルによる流出負荷量予測と評価	..... (70)
1. 森林集水域のモデル	..... (70)
(1) モデル構成とその特徴	..... (70)
(2) 解析結果	..... (71)
a) 流出水量	..... (71)
b) 流出負荷量解析結果（LQ式法）	..... (71)
c) 流出負荷量解析結果（CC法）	..... (76)

d)実測値と計算値との比較	.....(78)
(3)森林集水域タンクモデル解析のまとめと今後の課題	.....(79)
2. 農業集水域（非灌漑期）のモデル	.....(81)
(1)モデル構成とその特徴	.....(81)
(2)解析結果	.....(83)
a)流出水量	.....(83)
b)流出負荷量解析結果（LQ式法）	.....(87)
c)流出負荷量解析結果（CC数法）	.....(93)
(3)農業集水域（非灌漑期）タンクモデル解析の まとめと今後の課題	.....(96)
3. 農業集水域（灌漑期）のモデル	.....(97)
(1)モデル構成とその特徴	.....(97)
(2)解析結果	.....(101)
a)流出水量	.....(101)
b)流出負荷量解析結果（LQ式法）	.....(104)
c)流出負荷量解析結果（CC法）	.....(106)
d)水田水質浄化機能を組み込んだモデルについて	.....(107)
(3)農業集水域（灌漑期）タンクモデル解析の まとめと今後の課題	.....(110)
第V章 流出負荷予測モデルの応用例	
(過去30年間の年次変動解析の事例)	.....(112)
1. モデルに用いる降水量、蒸発散量と流出負荷量	.....(112)
2. 長期予測結果の検討	.....(116)
(1)森林集水域の予測結果	.....(116)
(2)農業集水域の予測結果	.....(121)
(3)長期解析結果のまとめと今後の課題	.....(124)
3. 流出負荷予測モデルの今後の課題	.....(126)
第VI章 結論と今後の課題	.....(127)
1. 結論	.....(127)
2. 今後の課題	.....(130)
参考文献	.....(131)
謝辞	.....(134)
付録	
プログラム	.....(1)
論文要旨（日本語）	.....(21)
論文要旨（英語）	.....(26)

## 第1章 序論

### 1. 研究の背景

昭和40年代に入って、高度経済成長下で、湖沼・溜池などの閉鎖性水域における人為的富栄養化が大きな問題となった。この問題は、最近に至るも大幅な改善は成されておらず、問題はますます深刻化する様相さえ見せている。富栄養化によって引き起こされるアオコの大発生（水の華現象）は、悪臭や景観の悪化、霞ヶ浦においては水道水源水の悪化に伴う処理費用の増加、そしてアオコの死滅分解による酸欠水による漁業被害、またある種プランクトンによる魚類のカビ臭被害など、多くの悪影響がある。また、上水道においては有機物が多いと、塩素処理をするために有機塩素化合物であるトリハロメタンやトリクロロエチレンなどの発ガン性物質の生成も問題となってきている。

富栄養化現象を起こす原因として、流域からの窒素・リンの閉鎖性水域への流入がある。また、閉鎖性水域内での窒素・リンなどの湧き出し（養殖に伴うエサとふん尿、降水からの流入、生物による窒素固定など）も存在するが、多くの流入源は流域からの窒素・リンの流入負荷である。

流域での窒素・リンの発生源としては大きく点源と面源とに分類される。そのうち点源は、大点源と小点源に分類される。大点源に対しては法律により排水基準が決められ、一つの事業所からの排水は減少しているが、事業所の数の増加が著しいために効果が現れにくい。また、小点源としての家庭雑排水に対しては規制が難しく、下水道の整備が待たれているところである。面源からの排水も、発生源の特定が難しいために、対策が遅れている。特に、農地からの流出負荷量は、その汚濁源に対しての対策が立てにくく、近年汚濁割合が上昇しつつあり、大きな問題となりつつあるところである。昭和60年3月に湖沼水質保全特別処置法（以下「湖沼法」という。）が施行され、それともない霞ヶ浦（茨城県）、印旛沼（千葉県）、手賀沼（千葉県）、琵琶湖（滋賀県）、児島湖（岡山県）、諏訪湖（長野県）、釜房ダム貯水池（宮城県）、中海（鳥根、鳥取県）、宍道湖（鳥根県）が指定湖沼に指定された。指定湖沼を有する都道府県の知事は、湖沼水質保全計画の策定が義務づけられた。それに伴って湖沼流域の面源からの栄養塩類の流出を正確に把握することが、ますます必要になってきている。

## 2. 研究の目的

近年、湖沼・ため池の富栄養化の要因として、集水域からの栄養塩類の流入をいかに制御するかが重要な問題となっている。そして、面源からの栄養塩類の流出負荷量を正確に算出しようとする試みが数多く行われてきている。各種の集水域からの流出負荷量の詳細かつ長期の測定例についてはわが国ではそれほど多いとはいえないが<sup>1)・2)</sup>、大橋・桜井<sup>3)</sup>、中曽根・中村<sup>4)</sup>、海老瀬<sup>5)</sup>は河川の流出負荷量を長期的に測定し、福島・河村<sup>6)</sup>は樹園地帯で、平田・村岡<sup>7)</sup>は山林地帯でかなり詳細な測定を行っている。しかし、農業集水域での詳細な測定はほとんど見当たらない。それは、流出負荷量は、大きな時間変動を伴うので、測定には大変な労力が必要となるからである。流量の連続測定は比較的行いやすいが、水質（特に窒素やリン濃度）の連続測定は、現在のところ不可能に近い。そのため、ある限られた数のデータを用いて集水域からの流出負荷量を推定せざるをえない。そこで、本論文では、まず面源である森林集水域と農業集水域について時間的に密な連日調査を行い、面源からの栄養塩類の流出実態状況について検討した。次にこの測定結果をもとに、モデルを作成し、集水域からの流出負荷量がどの程度正確に推定できるかどうかを検討することにした。

湖沼水質保全計画策定時には、各湖沼において水質解析モデル（一般に生態系モデル）による将来予測を行っている。流出負荷量推定の時間間隔は、その生態系モデルの入力条件として河川流入水量や河川流入負荷量などがあり、ほとんどの生態系モデルにおいて、日単位の入力値を用いている。そこで、本モデルにおいても、将来的に生態系モデルの入力を担当できるように、日単位の解析を行うこととした。また、モデルで推定する水質項目は、 $\text{NO}_3\text{-N}$ を対象とした。これは、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が窒素の形態変化の最終段階の状態であり面源からの流出負荷量に占める $\text{NO}_3\text{-N}$ の割合が大きいためである。また、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は、溶解態物質であるために水質分布が小さく採水が容易で分析もしやすいことも対象とした要因である。

### 3. 既往の研究

現在までに、集水域からの流出負荷量の推定モデルが多く発表されている。先駆的な研究として、①山口・吉川は、水質モデルを、流量や降水量の説明変数とする「流送能力」型モデルと汚濁負荷量のポテンシャルを導入した「流送能力・供給関数」型モデルの2つに分類し、この2種類の方法を用いて流出負荷予測のモデルを提案している<sup>8) 9)</sup>。②海老瀬は、タンクモデルを用いてLQ式を流出現象に適応させるモデルを提案している<sup>10)</sup>。③小林は、複合タンクモデルを用いて、広範囲の集水域における農耕地の水利用をも考慮したモデルを提案している<sup>2)</sup>。流出負荷量の推定方法は、主にLQ式を用い、測定例が無い場合に原単位を用いて推定している。④中曽根・中村は、タンクモデルの各流出孔に汚濁物質の蓄積量をポテンシャルとして与えたモデルを提案している<sup>11)</sup>。⑤奥川・宗宮等は、LQ式を用いた「流送能力」型汚濁流出モデルを提案している<sup>12)</sup>。

これらのモデル以外にも多くの水質モデルが存在するが、それらは単位水田などの狭い範囲を対象としていたり、点源のウエイトが高い場合や市街地の影響がある場合がある。國松・村岡の著書<sup>2)</sup>にも、その他の水質モデルが多く紹介されているが、本論文で目的とする面源のみからの流出負荷量に着目した水質モデルはない。

水質モデルに用いられている流出負荷量の推定方法は、LQ式を用いて解析を進めているモデルが多いが、LQ式の測定頻度による精度についての考察が少ないため、良好な推定をしているかが不明瞭である。また、測定されていないモデル係数の同定に、原単位を用いて推定するモデルも多いが、使用する原単位の信用性まで考慮して用いていない場合が多い。さらに、ある一定期間での値である原単位をもとに推定する場合、時間変動の大きな面源からの流出負荷量を適切に推定しているかどうか不明である。

水質モデルの評価方法としては、水質データが少ないためか、適切な評価方法を取り入れてモデルの精度を判断していないモデルが多い。特に、誤差評価の方法として、ポリュートグラフ上で実測値と計算値の再現性を評価するモデルや、相関係数で実測値と計算値の再現性を評価するモデルなどがあるが、どちらの方法も誤差評価の適正さに欠ける場合が多い。



#### 4. 本研究の構成

本研究の構成は、Fig. I-4-1に示したようにⅥ章からなる。

第Ⅰ章では研究の背景と目的ならびに既往の研究成果について述べた。

第Ⅱ章では面源解析において流出負荷予測モデルの提案と特徴について検討した。

第Ⅲ章ではモデルで用いる6時間間隔で採水・分析した森林集水域と農業集水域の現地精密調査の結果について、検討した。

第Ⅳ章では、流出負荷予測モデルの開発を行い、LQ式法と濃度係数法という2通りの方法で推定した予測結果についての精度について考察した。

第Ⅴ章では、第Ⅳ章で開発した流出負荷予測モデルの応用例を示し30年間の長期流出負荷量の予測を試みた。

第Ⅵ章では、結論と今後の課題を示した。

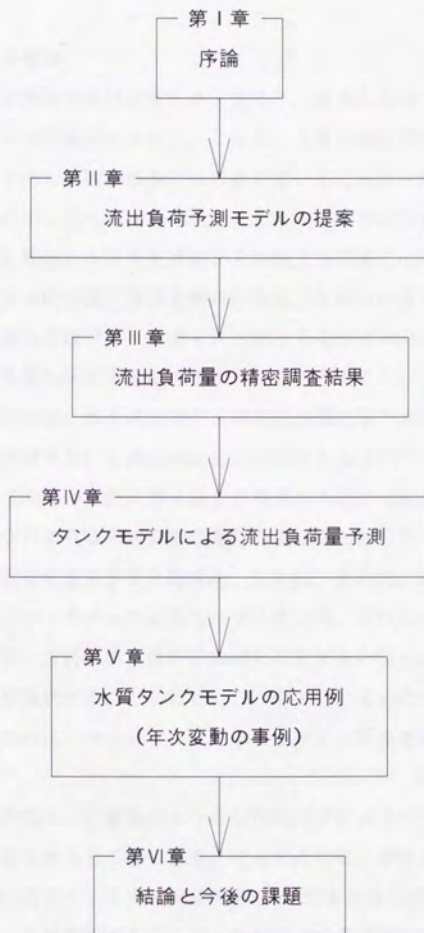


Fig. 1-4-1 本論文の構成

## 第II章 流出負荷予測モデルの提案

### 1. 水質モデルの構造

水質モデルの分類の方法は非常に多くある<sup>2)</sup>。本来ならば一つのモデルで全て説明できるモデルの作成が望ましい。しかし、水質の流出機構が、物理的、化学的、生物的、地学的な要因が複雑に入り組んでいるために不明な点多々あるので、個々の目的に沿ったモデルの作成が行われているのが実際の現状である。そこで、ここでは比較的小さな集水域からの流出負荷量にのみ注目することとする。そして、集水域内の流出機構を解明する目的を持つ水質モデルを機構モデルと呼び、流出機構などはブラックボックス的であるが流出負荷量を正確に表すことを目的とした水質モデルを流出モデルと呼ぶこととする。

機構モデルの特徴は、集水域内での土地利用面積比率や施肥量などを自由に設定してその流出機構を用いて流出負荷量を予測できるということにある。そのことによって、土地利用変化に伴う過去や将来の予測が可能となる。また、富栄養化を起させないような集水域管理を行うような対策もたてられるようになる。その反面、流出機構を追求すると物理的、化学的、生物的、地学的な要因が複雑に絡み合い多くのファクターが必要なモデルとなる。これらのファクターが簡単に求まればよいが、水質機構自体が不明瞭なことが多い現在、モデルが作成されてもファクターを選択することが難しいことが多い。そのためモデルの精度が落ちることを防ぐために、フィッティング項を設けて、誤差をその中で丸めることが行われる。

流出モデルの特徴は、日変動のような短時間のタイムスケールの流出負荷量の変動を簡単に推定できるところにある。そのためには、水質機構的な複雑な部分には踏み込まず、出力としての流出負荷量をINPUT量からいかに単純に表すことができるかということが重要である。そのために流出負荷量の推定方法をできるだけ単純化する必要がある。しかし、それによって流出負荷量を予測する変数の自由度が機構モデルよりも小さくなり将来予測や過去予測などの精度が犠牲になる。

本論文では、後者の流出モデルを中心に論を進めることになるが、機構モデルの展開にも応用ができ、今後の水質機構の解明によってより複雑な現象を推定できるモデルの開発も念頭に置くことにした。

## 2. 本モデルの特徴

本論文で解析対象とする集水域は比較的小さな小集水域を対象とした。それは大集水域では、面源だけの集水域を探すことが難しくなることがある。つまり、農業地区内に大きな集落や畜産が入り、点源の影響を無視できなくなり本論文の目的である面源が及ぼす富栄養化に対する流出負荷量の影響の推定が困難になることが理由の一つである。また、大集水域にすることで、水路長が長くなり水路内の浄化作用や流速速度の遅れ時間が大きくなりモデルがより複雑化し、面源の影響度を表す目的が弱くなる可能性が大きいためである。

本モデルの構造上の特徴については森林集水域と農業集水域で異なるので詳細は各節で述べることにし、ここでは共通の特徴を説明する。本モデルの中心部は、菅原のタンクモデルで構成されている。タンクモデルは水文学で用いられる流出水量解析モデルである。このモデルは、入力量として降水量と蒸発散量を入れ流出水量を推定するモデルである。また、土地利用や土壌条件などはモデル定数に含まれるので単なる流出モデルではなく機構モデル的な要素も持っている。タンクモデルの基本は4段直列タンクモデルであるので、これを出発点にし水質モデルの作成を進めていくこととする。今後、このモデルを「流出負荷予測モデル」と呼ぶこととする。

また本モデルの作成において最も重点をおいて開発した点は、モデルの応用性が高く、誰でも作成できる簡便なモデルという点である。そのため解析に用いる計算機にはメインフレームやEWSといった、特殊な知識を必要とする計算機での解析は対象外とした。すなわち本モデルは、PC（パーソナルコンピュータ）レベルの計算能力を持てば解析が行えるぐらいの計算量にした。実際に解析に主に利用した計算機は、CPUがi386DX(20MHz) + 数値演算コプロセッサを搭載した計算機(PC9801RA21)上に言語にN88BASIC (MS-DOS版)を用いて、半年間の計算(誤差計算も含む)が約30秒弱で可能である。i486SX(16MHz)で約20秒かかるから、最新のCPU搭載PCでは1秒程度の計算量である。このように簡便で、しかも個人レベルで解析を行える実用性を持ち、他の水質モデルより構造が単純で精度が良いモデルである。

### 3. NO<sub>3</sub>-N日流出負荷量推定方法

流出負荷量の推定方法には、タンクモデルの結果を利用する方法とタンクモデルの構造を利用する方法の2とおりの方法を用いた (Fig. II-3-1)。前者は、タンクモデルで推定した流量を、流量と流出負荷量との関係式であるLQ式に代入して流出負荷量を推定しようとするLQ式法である。後者は、タンクモデルの構造が、各層からの流出に対応するという物理的意味を持つと考えられているので、NO<sub>3</sub>-Nの流出濃度も各層で異なると仮定した濃度係数法 (以下CC法) である。以下にそれぞれの特徴について詳しく述べる。

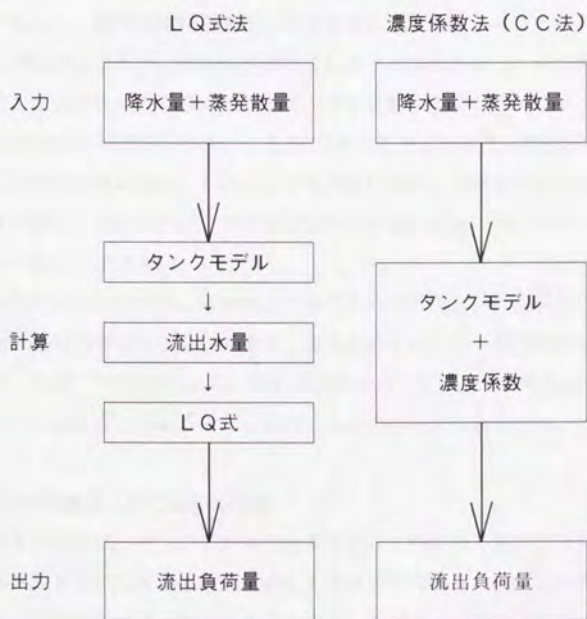


Fig. II-3-1 流出負荷量の推定方法

#### (1) LQ式法の特徴

LQ式法とは、タンクモデルで求めた流量をLQ式に代入して流出負荷量を求める方法である。LQ式は、実測データをもとにした回帰式で、流量さえわかっ

ていれば簡便に流出負荷量を推定できる方法となる。今回LQ式法は流出モデルとして扱うので、LQ式の係数に物理的な意味を追求せず、集水域はブラックボックスとして取り扱うことにする。それにより、図II-3-1のフローに示したように、降水量+蒸発散量→タンクモデル→流出水量→流出水量→流出負荷量が計算される。

LQ式法の短所としては、LQ式を作成した時点の状態で流出負荷量を推定することとなり、そのために将来的に土地利用の変化が集水域内で大きく変化した時などは、新たなLQ式を作成する必要がある。また、実測値が少ない場合に作成するLQ式は、データ中に一つでも飛び抜けて大きな値があれば、その値に引きずられてしまう可能性がある。そのため正確に推定しようとすればするほど、測定間隔が密になり、簡便性が薄れてしまう可能性がある。その結果、LQ式法にはLQ式を作成する時点の誤差が大きく影響する事と、タンクモデルでの流出解析の結果にも誤差が当然生じるので2重の誤差が生じる可能性が存在するといういくつかの短所がある。しかし、大きな河川では、水質と流量が測定されている場合が多く、それらのデータよりLQ式を作成して用いるということができるメリットも非常に大きい。

今回用いたLQ式は、全期間と月別でそれぞれ作成した曲線型( $L=aQ^b$ )と直線型( $L=aQ\pm b$ )の4種類のLQ式である。曲線型のLQ式が一般的に多く用いられているが、田淵<sup>13)</sup>らの報告から、測定頻度が少ないと直線型よりも曲線型の方が誤差が大きくなる場合があることが判明したので、今回は両方を用いて検討した。

## (2)濃度係数法(CC法)の特徴

濃度係数法は、タンクモデルの各流出孔に、各層から流出する $NO_3-N$ 濃度に対応する係数を乗じて流出負荷量を推定するモデルである。流出孔に対応する各濃度係数が層別流出水濃度に対応するために、モデルへの物理的な意味を持たすことも可能である。

今回は、濃度係数が複雑になることを避け、簡便化をはかるために、原則として定数として扱う。将来的には地下水水質変動、土地利用別影響や水質浄化機構などの要素も組み入れた濃度係数を開発し、本モデルを機構モデルに改良していく予定である。

このように濃度係数法は、流出モデルに重点を置くが係数の取り方次第では機構モデルへの発展性がある。しかし、本段階では簡便な方法として流出負荷量の推定を行うことにする。つまり、降水量+蒸発散量→タンクモデル+濃度係数→流出負荷量と計算される。

#### 4. モデルの同定方法

水質モデルの同定方法は、ポリュートグラフを用いて実測値と計算値を比較し、精度の判定をしているモデルが非常に多い。実測値といっても週に1回の実測値やそれに年に数十回は起こるのである降雨イベントの内、数回を実測したものを水質データとして用いたモデルでは、ポリュートグラフでの形の判断しかできないのが実態である。本モデルでは、時間的に密な水質データを用いているためにポリュートグラフの判断以外に客観的な方法をとる必要があると考えた。そこで、流出解析のタンクモデルを中心部を持つ本モデルでは、水文学的に用いられている同定法を導入することで、本モデルの客観性を確立することとする。実際のモデルの同定法と評価法は、角屋<sup>14)</sup>らが流出解析で用いている方法を採用した。

それは、最適なモデル係数を求めるための評価基準として、 $\chi^2$ 誤差評価基準(式(II-4-1))のように定義し、この基準値が最小になるようにモデル係数を試行錯誤的に決定するという方法である。

$$\chi^2 \text{誤差評価基準} = \frac{1}{\text{データ数}} \sum \frac{(\text{計算値} - \text{実測値})^2}{\text{実測値}} \quad \dots\dots\dots(\text{II-4-1})$$



## 5. モデルの評価方法

誤差の評価方法として、次式で与える2つの誤差率を採用した。

「収支誤差率」は一定期間の収支のズレを評価し、「相対誤差率」は日変動のズレを評価する。この両誤差率を使用する目的は、収支誤差率のみの評価では、全体の誤差を評価するにはよいが、±で偶然に評価が小さくなる可能性があるからである。また、相対誤差率では、個々の誤差を評価するには適しているが、全体的なズレを評価することがむずかしい。そこで、2通りの評価法を用いることで、各々の欠点を補いより良い解析の評価にしようとした。

収支誤差率について

$$\text{収支誤差率}(\%) = \frac{\sum \text{計算値} - \sum \text{実測値}}{\sum \text{実測値}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(\text{II}-5-1)$$

相対誤差率について

$$\text{相対誤差率}(\%) = \frac{1}{\text{データ数}} \sum \frac{|\text{計算値} - \text{実測値}|}{\text{実測値}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(\text{II}-5-2)$$

また、モデル解析でよく用いられる方法として実測値と計算値の比較を、1:1直線や相関係数を用いて行う方法がある。これについては森林集水域の”d) 実測値と計算値との比較”で検討した。その結果、この評価方法では、モデルの評価が不十分であることがわかったので、農業集水域での評価は上記の2方法のみの評価とした。

### 第三章 流出負荷量の精密調査結果

#### 1. 精密調査の意義

本モデルで解析する対象集水域は森林集水域と農業集水域とした。農業集水域については、灌漑期と非灌漑期に分けて調査を行ったので、のべ3つの集水域についての調査・解析を行うことになる。これらの集水域において、モデルに用いるデータを収集するために時間的に密な調査を行った。この時間的に密な調査結果と流出構造に関する調査をもとにして、モデル化を図った。

調査の時間間隔は6時間とした。つまり1日当たり4本の採水を行うことになる。調査期間は、森林集水域は1987年9月～1988年8月7日までの342日間を調査対象期間とした。8月7日までという中途半端な期間となった理由については、次節で述べることとする。

農業集水域の連日調査は、非灌漑期間を1986年10月から翌年3月までの6カ月間の179日間、灌漑期は1989年4月から9月までの6カ月間の181日間行った。このうち、灌漑期間は5月から8月までの4カ月間である。

このように、のべ2年間毎日4本ずつの採水、分析を行いモデルに用いるデータをえた。

## 2. 調査集水域概要

### (1) 森林集水域

森林集水域の連日調査を行うに当たって、林地を代表する集水域を決定するために恋瀬川集水域で予備調査を行った。恋瀬川は茨城県八郷町の中央を南北に流れ千代田村、石岡市を通り霞ヶ浦高浜入りに流入する一級河川である。予備調査は恋瀬川集水域の内、八郷町片野地区より上流の約85km<sup>2</sup>の周囲を筑波山・加波山・足尾山・吾国山等の標高500m～800mの山々に囲まれた盆地である集水域を対象に行った。調査は、1985年4月～1986年3月までの1年間、月に1回ずつ恋瀬川の本・支流あわせて18カ所で流出負荷量測定を行った(Fig. III-2-1)。その結果、NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N濃度の平均値が一番低かった上曾集水域を人為的影響が無い、面源のみで構成された森林小集水域として調査集水域に決定した。本集水域は、大学より車で約50分の位置にある。

上曾集水域は、面積2.95km<sup>2</sup>の集水域である。最高標高528m、平均高度296mの褐色森林土壌で植生はスギ、ヒノキ植林が大部分を占めている。集水域中には裸地、道路等が少々存在するが、本論文では森林面積を100%として取り扱った(Fig. III-2-2)。



Fig. III-2-1 恋瀬川集水域

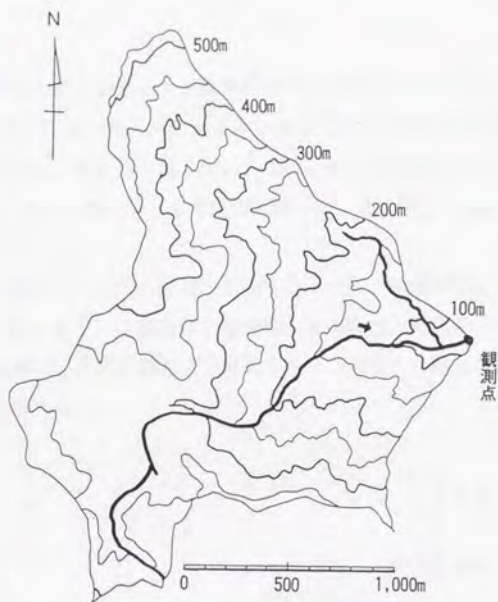


Fig. III-2-2 森林集水域調査地域

## (2) 農業集水域

純農業集水域を面源解析の対象としたいので、調査に頻繁に行ける距離内で畜産の影響や、人家が密集しているような集水域を避け対象集水域を選択した。その結果、調査地は霞ヶ浦流域内にある阿見町大形集水域の台地と谷津田で形成される農業小集水域に決定した。台地は林地と畑地で構成され、畑地には冬期にハクサイ、夏期にスイカ、落花生が主に栽培されている阿見町近辺では一般的な栽培形態を持つ集水域である。低地には谷津田と休耕田（全水田面積の約30%）が存在する（Fig. III-2-3）。畜産はなく、人家も8件だけであり、点源負荷の影響はほとんどない。台地に降った降水は地下へ浸透し、浅層地下水となり、低地の谷津田地帯に浸み出す。その後、素堀の小水路を流下するが、それは水田の用排兼用水路となっている。非灌漑期は、この水路を通して直接集水域外へ流出する。また、灌漑期にはこの水が水田に灌漑される。そのために谷津田の中の用排兼用水路のいたるところに木板による簡易な堰が設けられ流出水は繰り返し水田に利用されている。したがって、水田と水路は一体となっていると見てよく、集水域

からの流出水の水量と水質は水田灌漑に伴う水管理操作により大きく影響される。なお、渇水時には2本の井戸から地下水が灌漑のために水田に補給される（本調査年には平均0.75 l/sで少量であった）。集水域内には本流のほか支流が2本あり、これら3本の水路が合流して、集水域の末端（図上の「本II」地点）に到達している。

土地利用別面積は、Table III-2-1に示したように、非灌漑期において全集水域の面積が66.7haである。灌漑期は、灌漑期の堰の操作の関係で、調査集水域からの流出水量を測定する流量観測点の位置を少し下流側へ移動した。このため集水面積が、若干増加した。

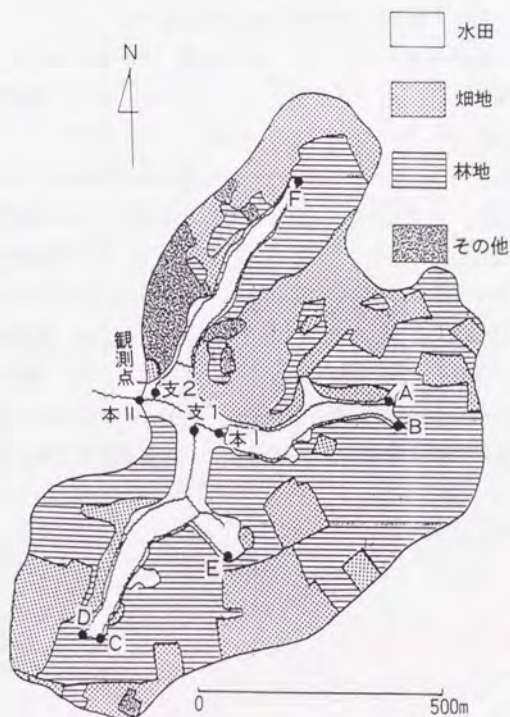


Fig. III-2-3 農業集水域調査地域

Table III-2-1 土地利用

	水 田	畑 地	林 地	その他	計
森林地区 ha	---	---	2.948	---	2.948
%	---	---	100	---	100
農業地区 ha	9.7	20.7	33.7	2.7	66.7
(非灌漑期) %	15	31	51	4	100
農業地区 ha	11.6	22.5	35.9	3.5	73.5
(灌漑期) %	16	31	49	5	100

注：数字を四捨五入したために合計と合わない個所がある。

### 3. 調査方法

本調査は、水質水文学的な調査であるので、調査内容は、水文学である流量観測、降水量観測、蒸発散量観測と水質測定との2分野の調査からなる。

#### (1) 森林集水域の調査方法

流量を観測するために、堰を設けることにしたが、現地の集水域にコンクリート製全幅堰があったために、この地点を流量観測点に決定し、集水域をこの地点を末端とし調査を開始した。この地点の詳細は、河床がコンクリート護岸され、かつ、川幅が狭くなり、全幅堰の下流側に段差があるために下流の影響を全く受けない。この地点において上流側の河川左岸に自記水位計を設置した。流量は自記水位計により水位を連続測定し、水位流量曲線より6時間間隔で流量を読んだ。水位流量曲線は、毎週1回記録紙を交換するときと増水時に実測したデータから作成した。ただし、1988年8月11日の集中豪雨で水位計が破壊されたため、それ以降は正確な水位が追えなくなってしまった。そのため、6時間間隔で流出負荷量を求めるため、流量が測定できた8月7日までの342日間を調査期間とした。

水質分析用サンプルは自動採水器を用いて採水を行った。採水地点は流量観測点と同じ場所にしようとしたが、設置するスペースが存在しないために、堰より上流側の溪流に自動採水器を設置して測定を行った。6時間間隔の水質分析用サンプルは自動採水器により行い、1,368サンプルをえた。また、週1回の手による採水を行った。特に夏期については、約一週間自動採水器内にサンプルを放置するため、クロスチェックのために手動採水と分析値を比較したが、森林集水域では影響が無かった。6時間間隔のサンプルのうち、ECとSSは6時間おきの全サンプルを測定した。NO<sub>3</sub>-Nは毎日12時のサンプルと流量やECの値が変化した時のサンプルを分析し流量安定時には1日1サンプルの水質分析を行い、流量に変化がある場合は全てのサンプルを分析した。なお、分析しなかった時の濃度はその前後の分析値を平均して求めた。また、1988年6月28日～7月1日までは、採水時間を2時間間隔に変えて分析をした。分析項目は Table III-3-1に、分析方法は Table III-3-2に示した。

森林小集水域の窒素流出構造を調べるために、本流脇10mの地点にオーガで地下水観測用井戸を掘った。観測用井戸は、オーガで深さ約85(cm)に掘り、側面に小穴を開けた塩ビパイプを差し、降水が入らないように蓋を付けた。調査時に、ま

ず水位を測定し、井戸の水を全て吸い出して数10分後に、井戸に溜った水を濁さないように注意深く採水した。そのためこの水は、パイプの各穴から浸出した水であり、森林土層各層の水が混ざった水と考えられる。観測期間中に、週1回計55回採水した。

## (2) 農業集水域の調査方法

調査は連日調査と通年にわたる集水域内の流出構造調査からなる。前者の連日調査は集水域の末端（本流Ⅱ以下「本Ⅱ」）に自記水位計と自動採水器を設置して、6時間間隔で採水と水位の読み取りを行い、流量と水質を調査した（Table Ⅲ-3-1、Ⅲ-3-2）。流量と水質については、森林集水域と同様の方法で行った。灌漑期には気温が高くなるために、自動採水器からのサンプルを週2回ごとに交換した。また、採水した水を森林集水域同様にクロスチェックしたところpHに変化がみられたので、灌漑期の解析においてpHの値を用いることは断念した。

流出構造調査は、集水域内の湧水、地下水、支流、本流の水質と流量観測を毎月1回、1986年7月から1988年10月までの2年3カ月の間に28回行った。



Table III-3-1 測定水質項目

調査名		測定水質項目
森林地区	連日測定調査	EC, pH, NO <sub>3</sub> -N, T-N, SS
	本流調査	EC, pH, NO <sub>3</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N, NH <sub>4</sub> -N, T-N, PO <sub>4</sub> -P, SS
	地下水調査	EC, pH, NO <sub>3</sub> -N, NO <sub>2</sub> -N, NH <sub>4</sub> -N, T-N, PO <sub>4</sub> -P
非灌漑期	連日測定調査	EC, pH, NO <sub>3</sub> -N, T-N, SS
	流出構造調査	EC, pH, NO <sub>3</sub> -N, T-N, SS
	地下水調査	EC, pH, NO <sub>3</sub> -N
灌漑期	連日測定調査	EC, pH, NO <sub>3</sub> -N, NH <sub>4</sub> -N, T-N, PO <sub>4</sub> -P, SS, COD
	流出構造調査	EC, pH, NO <sub>3</sub> -N, NH <sub>4</sub> -N, T-N, PO <sub>4</sub> -P, SS

Table III-3-2 分析方法

分析項目	分析方法(JIS K0102 による)
EC	横河北辰電気製 SC-51 18℃換算
pH	横河北辰電気製 pH-51
NO <sub>3</sub> -N	亜硝酸還元法
T-N	セントラル科学全窒素測定値を カルダール窒素とNO <sub>3</sub> -Nで補正
SS	ワットマンGF/Cで濾過
NO <sub>2</sub> -N	グリース改良法
NH <sub>4</sub> -N	ネスラー法
PO <sub>4</sub> -P	モリブデン青法
COD	過マンガン酸カリウム法

溶存態成分は、GF/C濾過後の濾過水を用いた。

#### 4. 森林集水域の流出負荷量調査結果

##### (1) 流出水の濃度と流出負荷量の年次変動状況

本集水域近くにある茨城県八郷町柿岡の地磁気観測所<sup>15)</sup>の平均年降水量は1,381mmであり、調査期間の降水量は、1,493mmであった。上曾集水域は1,742mmと柿岡の降水量よりも約1.2倍多かった。柿岡の月別と調査期間中の平均降水量・気温と上曾集水域の降水量を Table III-4-1に示した。調査期間の降水量は、3月、7月が平年より約50%以上多く、1月と2月が約50%以上少なかった。また、特徴的な現象は、2月の降水量が8mmと少雨であったことと、8月11日に一時間雨量59.5mmという集中豪雨があり、8月10日からの3日間で249.5mmの降水量を観測したことである。

全調査期間の6時間間隔の比流量、NO<sub>3</sub>-N濃度、NO<sub>3</sub>-N流出負荷量、NO<sub>3</sub>-N比負荷、降水量の経時変化をFig. III-4-1に示した。全期間の比流量、EC、pH、NO<sub>3</sub>-N、T-N、SSの各濃度は Table III-4-2に示した。

Table III-4-1 月別気温・降水量

月	柿 岡				上曾
	平年値		調査期間		
	平均気温 (℃)	降水量 (mm)	気 温 (℃)	降水量 (mm)	降水量 (mm)
9	22.7	184.1	22.7	185.0	216.0
10	17.0	153.2	17.4	120.0	128.0
11	11.0	77.4	10.5	69.0	71.0
12	5.2	50.3	3.8	49.0	56.0
1	2.8	45.7	3.7	22.0	30.0
2	3.9	53.4	2.4	8.0	8.0
3	7.7	93.4	7.2	158.0	167.5
4	13.6	117.4	18.8	103.0	129.0
5	18.4	158.1	17.9	159.0	193.5
6	21.3	187.2	21.3	121.0	180.0
7	24.6	133.5	21.0	205.0	211.0
8	26.4	127.3	26.2	294.0	352.0※
全期間	14.6	1,381.0	14.5	1,493.0	1,742.0

※8月7日までの降水量は、32.5(mm)

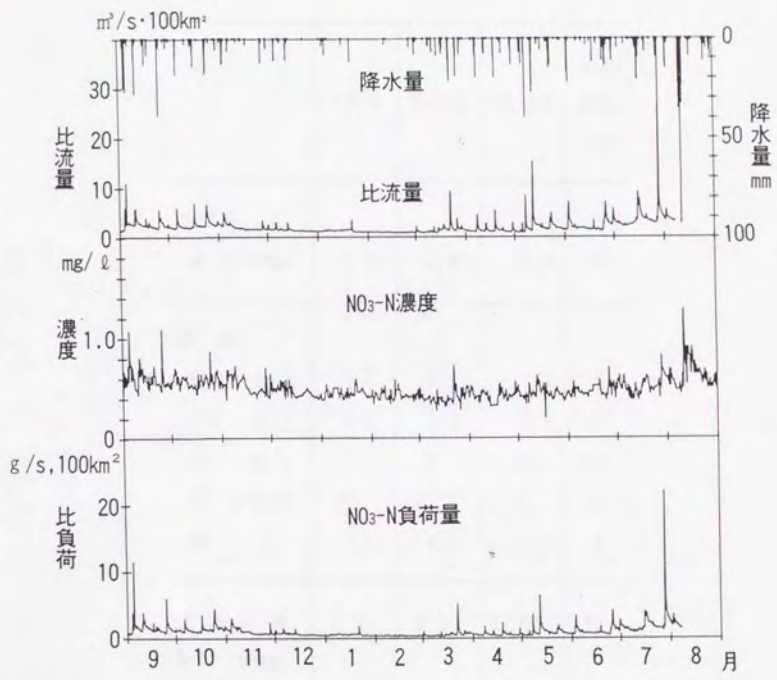


Fig. III-4-1 降水量、比流量、NO<sub>3</sub>-N濃度・流出負荷量・比負荷の年間変動状況

Table III-4-2 比流量, EC, pHと濃度 (NO<sub>3</sub>-N, T-N, SS)

	平均値	最小値	最大値	変動 係数 (%)
比流量 m <sup>3</sup> /s・100km <sup>2</sup>	2.06	0.85	26.9	67
濃度				
NO <sub>3</sub> -N mg/ℓ	0.5	0.2	1.1	18
T-N mg/ℓ	0.8	0.3	3.9	43
SS mg/ℓ	16	0	1,410	427
EC μS/cm	49	41	72	6
pH	7.1	6.5	7.7	2
比負荷量 g/s・100km <sup>2</sup>	1.0	0.3	22.0	92

8月7日までの1,368データを使用。

調査期間内の流量、EC、pH、NO<sub>3</sub>-N、T-N、SSの濃度と流出負荷量のヒストグラムは、Fig. III-4-2に示した。

流量は、平均値約60ℓ/s以下が63%を占め小さい方に偏った山を持つ。

ECは、平均値49μS/cmを中心に小さい値の方に偏る。pHは、平均値7.1をピークに高い値の方に偏る。EC、pH両者とも変動幅が小さく安定している。

NO<sub>3</sub>-N濃度は、平均値0.5mg/ℓにピークを持ち0.4~0.6mg/ℓの間に約80%近くが収まる。T-N濃度は、平均値0.8mg/ℓを中心に山を持ち、1.2mg/ℓ以下に95%が収まる。SS濃度は、20mg/ℓ以下が90%をこえ極端に小さい方に偏っている。

NO<sub>3</sub>-N・T-N・SS流出負荷量は、いずれも値の小さい方に偏り、右に長い尾を引

く。しかし、その反面、大きな値も存在する。

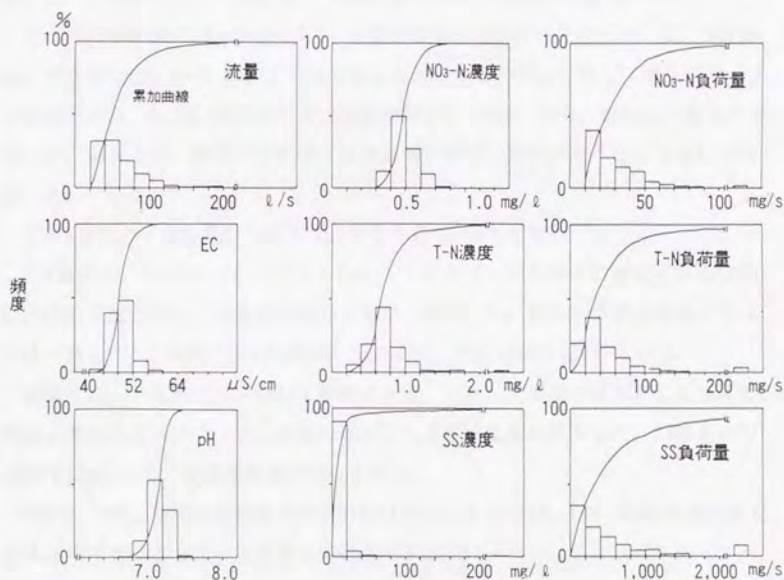


Fig. III-4-2 ヒストグラム

## (2) 特徴的な時期における変動

森林集水域の変動を検討するために特に顕著な変動を示した3つの月を選んだ。まず日最大降水量83.5mmが現れた7月を多雨の月、月降水量8mmの2月を少雨の月、10月を標準的な降水条件の月として、各月の比流量、濃度、流出負荷量の変動状況について検討する。また、8月は7日までのデータなのでここでの考察の対象か

らずした。

a) 標準的降水時期 — 10月の状況 —

10月には、6日に30.0mm、15日～17日に35.5mm、24日～25日に46.0mmと、10mm以上の降水が3回あった。比流量は、平水時は $2.0\text{m}^3/\text{s}\cdot 100\text{km}^2$ 前後で安定し、降水に応じて増大した。平均値は、 $2.58\text{m}^3/\text{s}\cdot 100\text{km}^2$ であった(Fig. III-4-3)。

EC、pHの平均値は $50\mu\text{S}/\text{cm}$ と7.1、変動係数は5%と2%で小さかった。NO<sub>3</sub>-N濃度は、平水時には $0.5\sim 0.6\text{mg}/\ell$ 程度であったが、流量の増大に応じて濃度が増大する場合(25日、 $0.2\text{mg}/\ell$ 程度)と、濃度が減少する場合(6日、 $0.1\text{mg}/\ell$ 程度)があった。両者とも、流量の逡減時には流量増大前より濃度が高くなった後に元に戻った。

NO<sub>3</sub>-N濃度の平均値は $0.6\text{mg}/\ell$ で、変動係数は10%と安定していた。

T-N濃度は、平水時には、 $0.7\sim 1.0\text{mg}/\ell$ であるが、流量増大に敏感に反応し約1.5～5倍程度上昇し、流量の逡減にともない減少した。また、流量と濃度のピークは一致した。T-N濃度の平均値は $0.9\text{mg}/\ell$ で、変動係数は32%であった。

SS濃度は、平水時には、 $6\text{mg}/\ell$ 程度である。しかし、流量の増大にともなって、流量と濃度のピークは一致し流量の低下よりも早く濃度が減少した。SS濃度の平均値は $18\text{mg}/\ell$ で、変動係数は332%と大きい。

NO<sub>3</sub>-N、T-N、SS流出負荷量は平水時には安定しているが、T-N、SS流出負荷量では流量の増大にともなって急激な変動を示す。



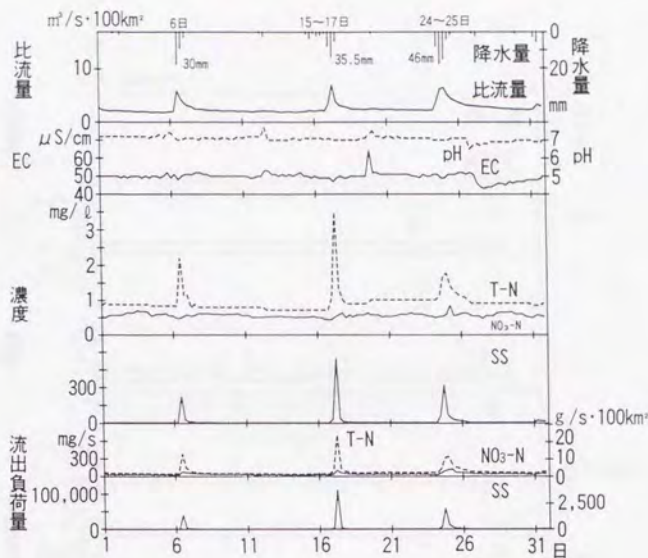


Fig. III-4-3 10月の変動状況（標準的降水時期）

b) 少雨の時期 — 2月の状況 —

2月は、12日に3.0mm、27日に4.5mmと降水が2回あったが、流量の変動は見られなかった (Fig. III-4-4)。比流量は、 $0.92 \sim 1.09 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 100\text{km}^2$  で安定し、変動係数も5%と安定していた。比流量の平均値は  $0.98 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 100\text{km}^2$  と月別平均の中では最も小さかった。

EC、pHは、平均値が  $46 \mu\text{S}/\text{cm}$  と  $7.1$ 、変動係数は2%と1%で非常に安定している。

$\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は、 $0.4 \sim 0.5 \text{ mg}/\ell$  で安定していた。

T-N濃度とSS濃度もほぼ安定しているが、降水に無関係な増減が11日にあった。

この原因は不明である。

流出負荷量は、11日を除けば変化が見られなかった。

このように、少雨の時期は流量、濃度、流出負荷量とも大きな変動はない。

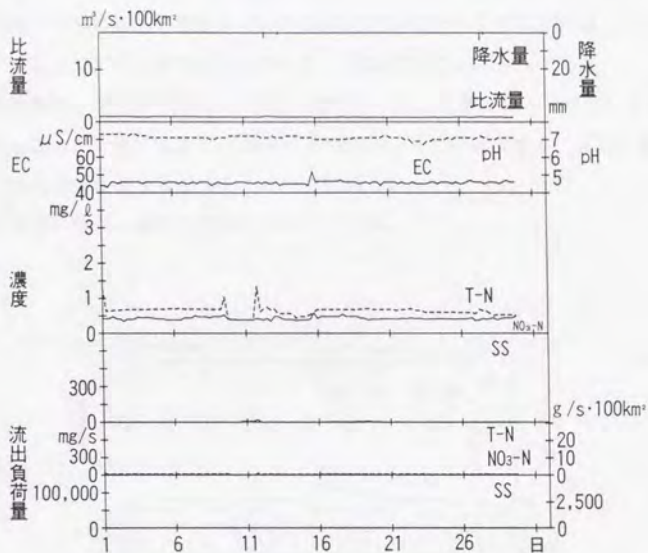


Fig. III-4-4 2月の変動状況（少雨の時期）

c) 多雨の時期 — 7月の状況 —

7月は、14日～17日に88.0mm、20日に10.0mm、27日～28日に95.0mmの降水があった。比流量は、16日に $9.09 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 100 \text{ km}^2$ と28日に $26.9 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 100 \text{ km}^2$ を記録した。 $26.9 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 100 \text{ km}^2$ は、全調査期間の最大値であった。この値は、最小値 $0.85 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 100 \text{ km}^2$ の32倍となった。平水時は、 $2.3 \sim 2.8 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 100 \text{ km}^2$ 程度の値をとった。比流量の変動係数は、67%であった(Fig. III-4-5)。

EC、pHは、平均値が各々 $50 \mu\text{S}/\text{cm}$ と7.2で変動係数は、3%と1%と安定していた。

$\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は、平水時に $0.4 \sim 0.5 \text{ mg}/\ell$ と安定していた。しかし、流量逓減時には、流量増大前より濃度が高くなった後に元に戻った。変動係数は15%で比流量に比べると安定している。

T-N濃度は、平水時 $0.7 \sim 0.8 \text{ mg}/\ell$ であった。T-N濃度のピークは、流量のピーク

と一致し、流量が増大すると濃度も増大した。また、流量逡減時の濃度低下は28日以降が非常に遅く、濃度が下がりがきる前に次の降水がきて、結局、1.0mg/ℓ以下になるまでにピーク後12日を要した。変動係数は44%であった。

SS濃度は、平水時で10mg/ℓ程度の値であった。SS濃度のピークは、流量のピークに一致し、急激に上昇し、減少するのは他の月と同様である。変動係数は294%で、他の月に比較すると小さい値の方に属した。

流出負荷量は、流量の増減に対応している。

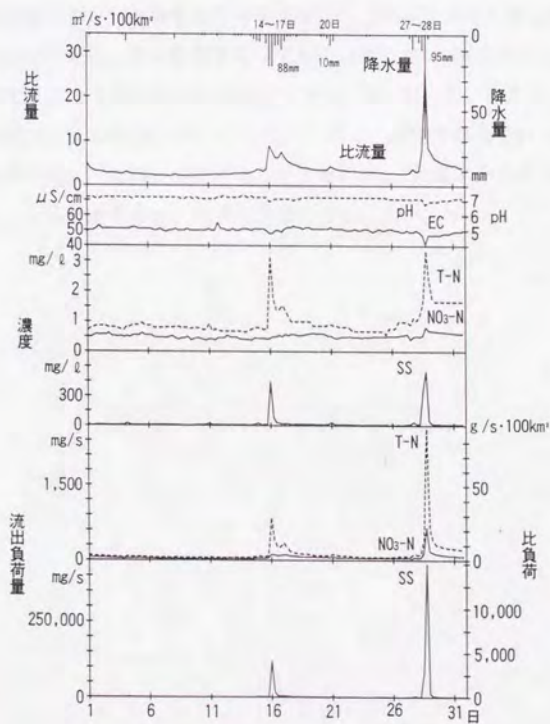


Fig. III-4-5 7月の変動状況（多雨の時期）

### (3) 月別負荷量の変動

8月の観測数が28データと少ないので、ここでは8月を除いて検討する。

#### a) 比流量と流出率

比流量と流出率の月別変化を月降水量、月流出量とともにFig. III-4-6に示した。月流出量は、月降水量の大小に対応している。しかし、比流量は（最大値/最小値）比が4で、月降水量の比27に比べて小さく安定している。2月の比流量は、 $0.98 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 100 \text{ km}^2$ で関東地方の水源地帯の自然湧水比流量<sup>16)</sup>といわれる約 $1.0 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 100 \text{ km}^2$ とほぼ一致している。流出率でみると、1、2月は100%を越え、月降水量よりも月流出量が多い。蒸発散量を考慮すると1、2月はかなり大きな水分量が失われていることになる。その影響を受けて3月、4月、5月と流出率が小さくなっているが、これは、1、2月に失われた土層中の水分量を補っているためと思われる。全期間の流出率は43%であった。この値は、同じ八郷町で観測された村岡・平田<sup>7)</sup>の流出率46.5%、45.8%と比較すると若干低い。7月後半の大雨が完全に流出していないことを考慮すると、特別な差は認められない。

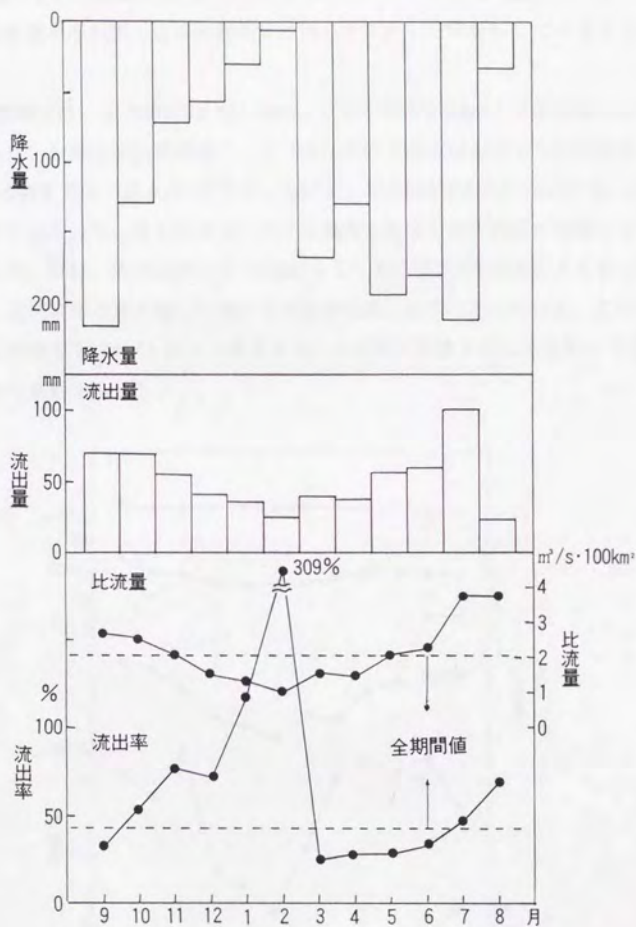


Fig. III-4-6 流出率と比流量の月別変化

b) 月別平均濃度の変化

ECは、最大値が10月の $54 \mu S/cm$ 、最小値が12、1、2月の $46 \mu S/cm$ で変動幅は $8 \mu S$

/cmと小さく、pHでは全期間の平均値7.2をとった月が6カ月、他は、7.1をとり月別の変化は認められず、他の水質項目に比べて安定した値を示している (Fig. III-4-7)。

NO<sub>3</sub>-N濃度では、最大値が9月の0.6mg/ℓ、最小値が0.4mg/ℓで変動幅が0.2mg/ℓであった。変動状況は秋が高く、冬・春にかけて低くなるような年変動をしている。T-N濃度では、最大値が7月の1.0mg/ℓ、最小値が3月の0.5mg/ℓで、変動幅が0.5mg/ℓとなった。冬から春先にかけて濃度が減少し夏に濃度が増加する年変動を示した。SSは、最大値が11月の24mg/ℓで、最小値が2月の2mg/ℓであった。11月は、全期間中の最大値1,413mg/ℓの値を記録した月であったため、この1データだけで平均値を12mg/ℓ近く上昇させた。この値を考慮すると年変動よりは、降水量と似た変動を示した。

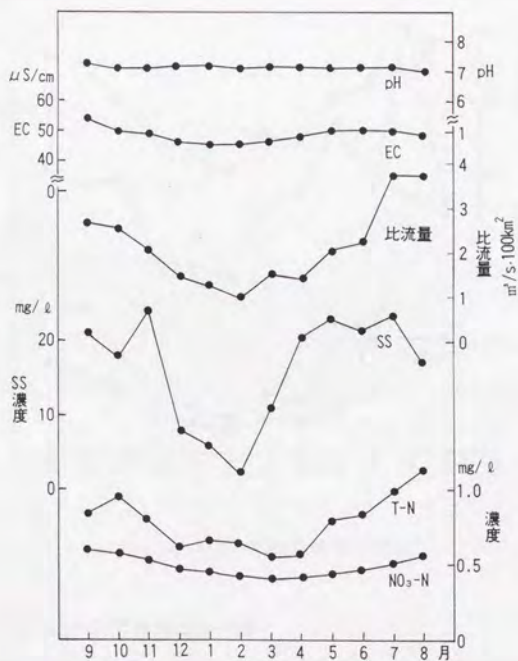


Fig. III-4-7 月別平均濃度変化

c) 月別比負荷の変化

月別比負荷の変動状況をFig. III-4-8に示す。

NO<sub>3</sub>-N比負荷は、最大値は7月の6.5kg/ha・yr、最小値は2月の1.3kg/ha・yrであった。T-N比負荷も、最大値が7月の15kg/ha・yrで最小値が2月の2.0kg/ha・yrであった。SS比負荷も、最大値が7月の716kg/ha・yrで最小値が2月の6kg/ha・yrであった。どの比負荷も7月に最大値、2月に最小値をとり、濃度変化と対応せず、比流量の変化に対応した。これは、比負荷が、濃度変化より流量の変化に強い影響を受けるからである。

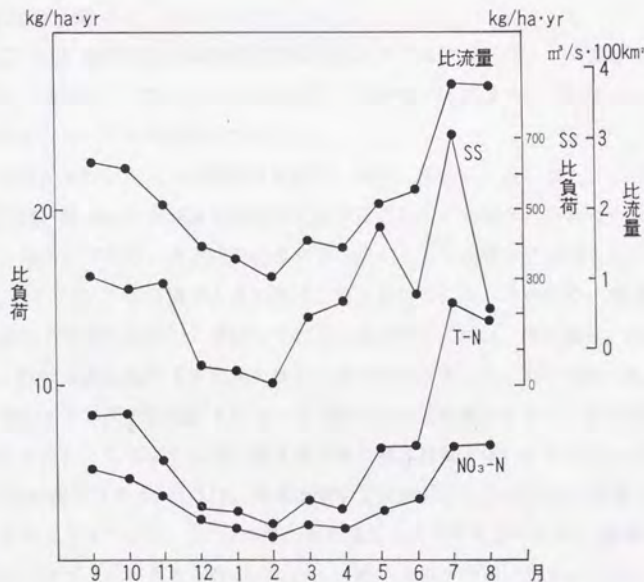


Fig. III-4-8 月別比負荷の変化

(4) NO<sub>3</sub>-N、T-N、SSの年間総流出負荷量

NO<sub>3</sub>-N、T-N、SSの比負荷を年当りの量とするには、水位観測が不備になった8月7日以降のデータを補正しておく必要がある。そこで、8月7日までの値を8月の代

表値とみなし、

$$\text{8月の流出量} = \text{7日までの流出量} \div 7 \times 31 \quad \dots\dots\dots (\text{III-4-1})$$

で算出した量を8月の値とし年換算した。年比負荷は、 $\text{NO}_3\text{-N}$ で3.5kg/ha·yr、T-Nで6.5kg/ha·yr、SSで255kg/ha·yrである。また、平年換算では、8月を除く降水量が平年値の96%なのでこれを比例配分すると $\text{NO}_3\text{-N}$ で3.7kg/ha·yr、T-Nで6.8kg/ha·yr、SSで265kg/ha·yrとなる。

#### (5) 地下水の水質

Fig. III-4-9に地下水位の経時変化を示した。地下水位は、パイプ上部から測定したため、グラフ上で読み易くするために、渇水期の本流表面水位を0cmとし、本流表面水位に対しての相対水位で表した。

地下水位の変動状況は本流流量と増減が、ほぼ一致している。また、この調査期間内では、降水時や大雨後の観測でも地表流の起こった跡がみられなかった。これは、地表面下で早い流出成分の存在する場として、土層中に発達したリター層<sup>18)</sup>とパイプ流<sup>19)</sup>の影響が大きいとと考えられている。そのため、降水の大部分は森林土壌中を經由して流出していると思われる。pHは、平均値5.7で安定している。ECは本流と比べて変化が大きく、秋の増減が著しい。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は、平均値が0.4mg/lで本流の0.5mg/lに比べると低いが、変動幅が大きく、EC同様に秋の増減が大きい。このように常に森林地下水の窒素濃度が低いということから、2つの原因が推定される。1つは、森林土壌中で脱窒が起こり地下水に到達する前に浄化されてしまうこと、もう1つは、森林植生の窒素吸収量が大きく窒素成分を吸収してしまうことが考えられる。しかし、地下水濃度が高いときもある。これはおそらく森林土壌中に存在する無機態窒素成分は不安定な状態で存在し大きな降水があると洗い出し効果のため流出するのであろう。



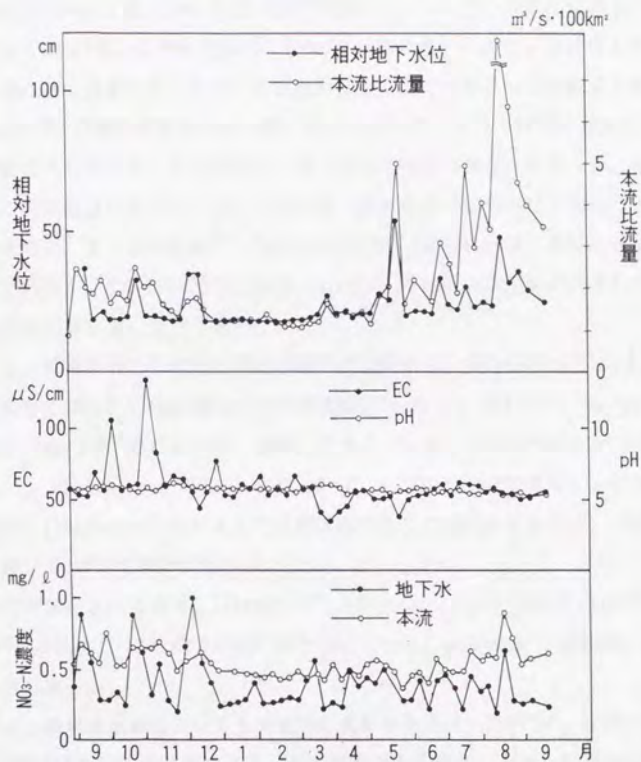


Fig. III-4-9 地下水・本流水質の年間変動状況

#### (6) 他集水域との比較

他の集水域と比較することにより上曾集水域の特徴を明確にしたい。まず、森林集水域と比較する。本調査集水域より南に約7kmの地点で、本調査期間に近い1985年4月～1987年3月までの間、調査を行っていた国立公害研究所(現国立環境研究所)の平田・村岡<sup>17)</sup>の報告によれば、集水域への無機態窒素のINPUT 11.13kg/ha·yr(平均濃度0.706mg/ℓ)、OUTPUT 12.51kg/ha·yr(平均濃度1.71mg/ℓ)との報告がある( Table III-4-5)。

上曾集水域に比較し $\text{NO}_3\text{-N}$ のOUTPUTと濃度で3.4倍大きい。平均比流量では、 $2.29\text{m}^3/\text{s}\cdot 100\text{km}^2$ で、上曾集水域の $2.06\text{m}^3/\text{s}\cdot 100\text{km}^2$ の1.11倍と、ほぼ等しいので、比負荷の差は濃度に依存していると思われる。後に他集水域と比較するが、上曾集水域の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は特別に低い値とはいえないが、平田・村岡の報告もかなり高い濃度を示している。この原因は不明であり、今後の課題となろうが、森林調査地点の選定の違いだけで、同じ山系で排出型と吸収型に分かれてしまうことは大変興味深い。また、建設省<sup>20)</sup>で発表された値 $3.4\text{kg}/\text{ha}\cdot\text{yr}$ は、上曾集水域の半分のものであるが、6カ月間で5回の測定、しかも、降水時の測定値が含まれていないため低めの値になったのであろう。

次に、滋賀県内で行われた調査の報告と比較する。西村(桐生)<sup>21)</sup>によれば、無機態窒素でINPUT  $5.4\text{kg}/\text{ha}\cdot\text{yr}$ (林外雨濃度 $0.28\text{mg}/\ell$ )、OUTPUT  $2.2\text{kg}/\text{ha}\cdot\text{yr}$ (平均濃度 $0.11\text{mg}/\ell$ )、堤によれば、3地区(若女、朽木、竜王)<sup>2)</sup>のT-Nで各々INPUT 6.92、9.21、 $11.90\text{kg}/\text{ha}\cdot\text{yr}$ 、OUTPUT 1.83、2.66、 $4.20\text{kg}/\text{ha}\cdot\text{yr}$ である。上曾集水域でのINPUT  $11\text{kg}/\text{ha}\cdot\text{yr}$ と差があって直接比較することは危険であるが、上曾集水域に比較してINPUTもOUTPUTも小さい。

外国で測定された値は、Likens<sup>22) 23)</sup>とPierce<sup>24)</sup>の値が西村とほぼ同じで、Swank<sup>25)</sup>とGosz<sup>26)</sup>は比較的到低い値を示している。Hornbeck<sup>27)</sup>の値は、上曾集水域よりも高い。

以上、森林集水域においても測定値に変動があるが、T-Nでは、ほぼ $1\sim 7\text{kg}/\text{ha}\cdot\text{yr}$ の範囲にあるものと思われる。若干の差があるのは、上述した測定頻度の違いのほかに、森林の状態や気象条件の差によるものと思われる。

次に農耕地との比較を行う。水田、畑地、牧草地からの比負荷<sup>1)</sup>に比較して、上述した森林集水域の値は1桁以上低い。特に、多肥区の畑地<sup>1)</sup>や樹園地<sup>6)</sup>に比較すると2桁低い。森林集水域は、これら農耕地に比較して比負荷は小さく閉鎖性水域に対する影響は小さいといえる( Table III-4-5)。

Table III-4-3 他集水域の窒素流出

								出典
森林	筑波	3カ所	3.4			5回/6カ月		建設省
	筑波		(12.4)	'85-'87		隔週		村岡
	滋賀	桐生	(1.5)	'68-'69		週1回		西村
	滋賀	若女	1.83	'76-'83				堤
	滋賀	朽木	2.66	'79-'80				堤
	滋賀	竜王	4.20	'82-'83				堤
				(2.3)	'63-'69		週1回	Likens
		ニューハンプシャー		(2.3)	1972		"	Likens
				(2.0)	1971		隔週	Pierce
				(4.5)	'70-'72		週1回	Hornbeck
	ノスカロライフ		(0.2)	'73-'74		"	Swank	
	ニューメキシコ		0.9	'74-'75		"、冬隔週	Gosz	
畑地	標準施肥区	茨城		75	'74-'77			小川
	多肥区	茨城		150	'74-'77			小川
	広域圃場	茨城		37	'74-'77			小川
牧草地		広島		34~57			広島農試	
樹園地	みかん	愛媛		145	'87-'88			福島
水田	水田群	茨城		10~44	'74-'76			茨大農

( ) は、無機態窒素

(7) 森林集水域のまとめ

1年間の連続調査から本森林小集水域では、

1)  $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{T-N}$ 、 $\text{SS}$ は、平常時重み付平均濃度が各々 $0.5\text{mg}/\ell$ 、 $0.7\text{mg}/\ell$ 、 $6\text{mg}/\ell$ と低い。流量の増大にともなって濃度が上昇する傾向がある。

2) 比負荷は、 $\text{NO}_3\text{-N}$ で $3.7\text{kg}/\text{ha}\cdot\text{yr}$ 、 $\text{T-N}$ で $6.8\text{kg}/\text{ha}\cdot\text{yr}$ 、 $\text{SS}$ で $265\text{kg}/\text{ha}\cdot\text{yr}$ である。

## 5. 農業集水域（非灌漑期）の流出負荷量調査結果

### (1) 流出水の濃度と流出負荷量の年次変動状況

#### a) 一般的流出状況

非灌漑期の6時間間隔の測定値の変動状況をFig. III-5-1に、測定結果の諸量をTable III-5-1に示した。流量は降水後に増大するが小集水域であるために1~2日で低下する。平均流量は8.4 l/sで、この平均流量の3倍に相当する25 l/s以上の流量を示したのは18回で、いずれも10mm以上の降水の時であった。

ECは平常には約150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ でほとんど一定であるが、流量増大時に100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 程度に低下する。

$\text{NO}_3\text{-N}$ もECと同じく流量増大時に低下する。平常時には6~8mg/lであるが、流量増大時に2~4mg/lに低下している。

SS濃度は降水時に流量と同じように増大するが、その変動は激しい。平常時は10~20mg/lであるが、流量増大時にはその10倍の200mg/l以上になる。

$\text{NO}_3\text{-N}$ 負荷量は流量と同じような変化をするが、これは濃度の低下量よりも流量の増大量の方が大きいからである。

このように降水量に対応して流量が変化し、それに応じて濃度と負荷量が変化している。

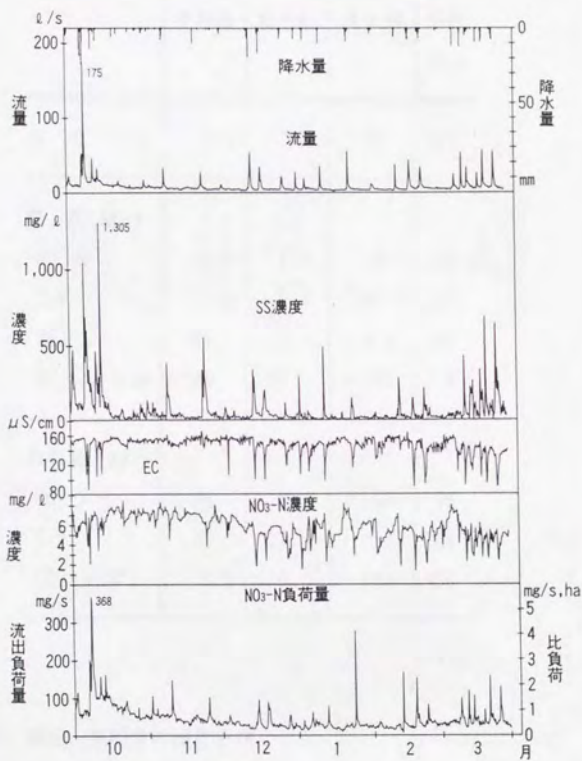


Fig. III-5-1 非灌漑期の雨量、流量、SS、EC、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の濃度と負荷の変化

Table III-5-1 流量・濃度・負荷量の測定結果（非灌漑期）

	平均値	最小値	最大値	変動 係数 (%)
流量 $\ell/s$	8.4	2.2	175	115
濃度 $mg/\ell$				
NO <sub>3</sub> -N	5.7	1.4	8.4	24
T-N	7.2	2.2	13.1	17
SS	61	0	1.310	175
EC $\mu S/cm$	146	86	165	8
負荷量 $mg/s$				
NO <sub>3</sub> -N	44	8	368	76
T-N	59	17	1.040	108
SS ( $\times 10^3$ )	1.2	0	104	456

n=716

## b) 流量、濃度、負荷量の頻度分布

流量の頻度分布は小流量の方に片寄っており、5  $\ell/s$ 以下の小流量が38%、10  $\ell/s$ 以下では81%となる。平均流量8.4  $\ell/s$ の3倍以上の流量は約4%しかないが、最大値は175  $\ell/s$ で平均流量の21倍になった。変動係数は115%である。

ECは140~160  $\mu S/cm$ の間に81%が収まり、160  $\mu S/cm$ 以上の値はほとんどない。変動係数はわずか8%である。

NO<sub>3</sub>-N濃度は4.5~7.5  $mg/\ell$ の間に80%があり、比較的狭い範囲に収まっている。増水時に2  $mg/\ell$ 程度にまで低下する。最高は8.4  $mg/\ell$ で平均値の2倍以上の高濃度は存在しない。変動係数は24%で小さい。NO<sub>3</sub>-N負荷量は流量と同じように低い値

に片寄っており、60mg/s以下で83%を占める。最大値は368mg/sで平均負荷量の8.5倍でそれほど大きくはない。変動係数も76%で、流量のそれよりも小さい。

SS濃度は流量以上に小さい値に片寄っていて、100mg/ℓ以下で85%を占める。しかし、増水時の最大値は平均値の21倍で、変動係数は175%にも達した。

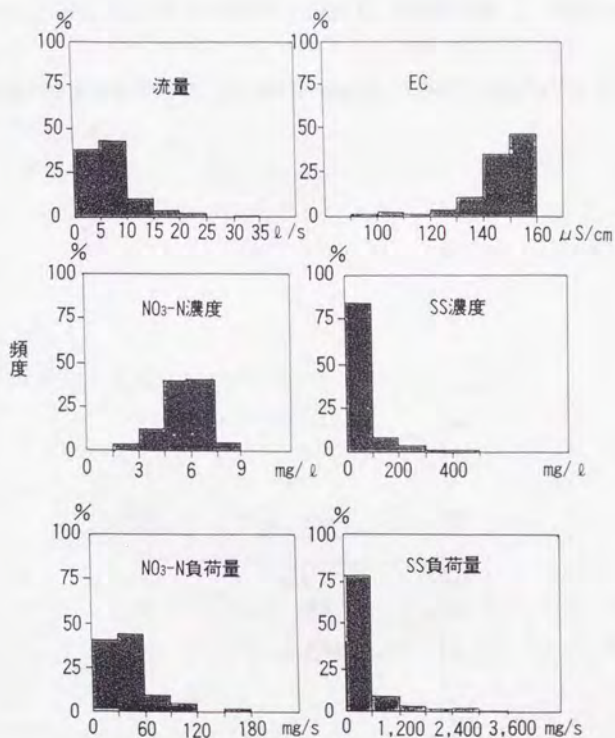


Fig. III-5-2 ヒストグラム

## (2) 月別の流量、濃度および負荷量

月別の平均値の変化を見ると (Fig. III-5-3)、流量は降水量の変化と対応して11月～2月の冬期に低下している。SSの濃度も流量と同じく渇水期にかなり低下する



が、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度はわずかな減少を示す。ECはほとんど一定である。また $\text{NO}_3\text{-N}$ の負荷量も流量と同様の変化をする。

6カ月間の全平均値では流量が $8.4 \text{ l/s}$ となるが、比流量では $12.6 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2$ 、6カ月間の水深表示では $198\text{mm}$ となる。降水量は $428\text{mm}$ だったので、流出率は $46\%$ になる。なお、平年降水量は $529\text{mm}$ で本調査年の降水量はその $81\%$ に相当した。

ECは $146 \mu\text{S/cm}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の平均濃度は $5.7\text{mg/l}$ 、T-Nは $7.2\text{mg/l}$ 、SSは $61\text{mg/l}$ であった。

6カ月間の総流出負荷量は、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が $10.4\text{kg/ha}$ 、T-Nが $13.9\text{kg/ha}$ である。

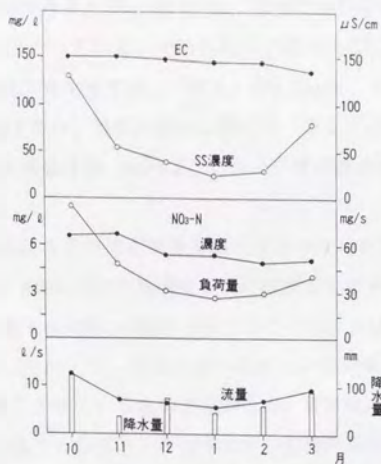


Fig. 111-5-3 月別降水量、流量、EC、SS、 $\text{NO}_3\text{-N}$ の月別平均値の変化

### (3) 湧水、支流、地下水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度と負荷量の調査結果

1987年4月から1988年1月までの計10回測定した湧水A、B、C、D、E、Fの平均濃度をFig. III-5-4の平面図に示した。最も高い濃度を示したのは「湧水E」で $18.5\text{mg}/\ell$ であった。これは、Fig. III-2-3の土地利用図から明らかなように、「湧水E」の後背地がほとんど畑地であり、肥料の溶脱のためと考えられる。一方、最も低い濃度を示したのは後背地が林地である湧水Bで、 $0.2\text{mg}/\ell$ であった。そのほかのA、C、D、Fは林地と畑地の混在する集水域からの湧水で、その $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は $0.8\sim 7.9\text{mg}/\ell$ でEとBの濃度の中間に位置し、畑地の面積割合にほぼ比例した濃度を示した。

また、流下過程でも、その周辺の台地上の土地利用が濃度に影響している。たとえば、湧水CからC'までは濃度は $7.9\text{mg}/\ell$ から $1.7\text{mg}/\ell$ と減少しているが、これはC-C'の水路に接した台地上にはほとんど畑地がないためである。一方、AからA'およびDからD'の間では濃度が上昇しているが、これもその周辺の台地上の畑地からの浸出水を反映している。

次に負荷量についてみると(Fig. III-5-5)、湧水の中では「湧水E」の負荷量が最も大きく $9.5\text{mg}/\text{s}$ となっている。それに比べて湧水Bは $0.04\text{mg}/\text{s}$ できわめて小さい。本流と支流の流下負荷量では、「本I」が $5.0\text{mg}/\text{s}$ 、「支I」が $11.6\text{mg}/\text{s}$ 、「支II」が $4.3\text{mg}/\text{s}$ であり、濃度の場合と同じく「支I」の負荷量が最も大きい。末端の「本II」の負荷量は $20.1\text{mg}/\text{s}$ で、これらの負荷量の合計値とほぼ一致している。

一方、水路の両側にある水田の影響を調べるために、本流末端3カ所の水田地下水(深さ $30\sim 70\text{cm}$ )の $\text{NO}_3\text{-N}$ の平均濃度と同日に測定した本流の値とをFig. III-5-11に示した。水田地下水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度はほとんどが $1\text{mg}/\ell$ 以下で低く、本流の値の約8分の1である。したがって、本集水域では水田からの浸透流出は高濃度の本流の $\text{NO}_3\text{-N}$ をむしろ低下させているものとみられる。それは本集水域の水田が湿田であるために、 $\text{NO}_3\text{-N}$ はごくわずかししか発生せず、脱窒作用が働くためと思われる。

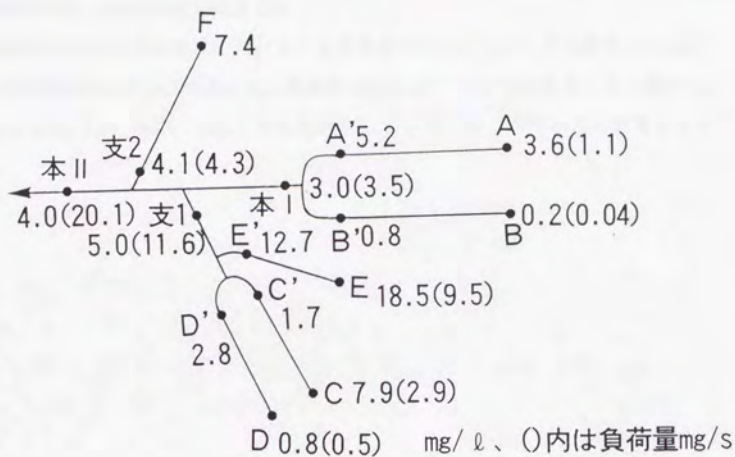


Fig. III-5-4 湧水と支流のNO<sub>3</sub>-N平均濃度と負荷量(1987)

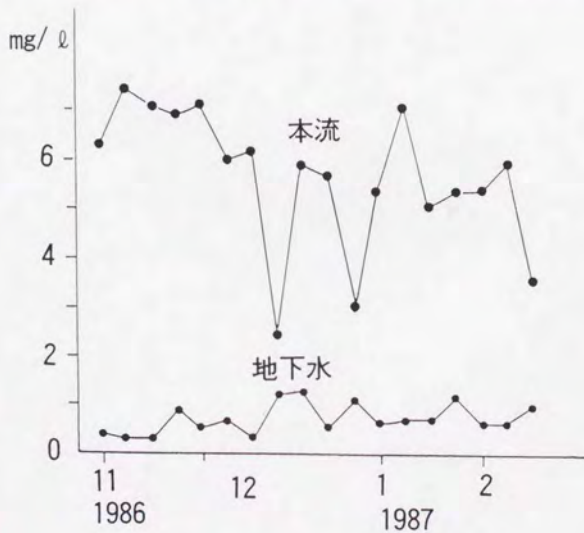


Fig. III-5-5 水田地下水のNO<sub>3</sub>-N濃度

#### (4) 農業集水域（非灌漑期）のまとめ

- 1) 全期間の平均 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は $5.7\text{mg}/\ell$ 、比負荷量は $66\text{mg}/\text{s}\cdot\text{km}^2$ 、T-N濃度は $7.2\text{mg}/\ell$ 、比負荷量 $88\text{mg}/\text{s}\cdot\text{km}^2$ であった。農業集水域の値<sup>1)</sup>としては大きい方に属する。
- 2) 湧水に占める $\text{NO}_3\text{-N}$ は、多肥の野菜を栽培している台地上畑地からの影響が大きい。

## 6. 農業集水域（灌漑期）の流出負荷量調査結果

### (1) 流出水の濃度と流出負荷量の年次変動状況

#### a) 流量の変動状況と水収支

灌漑期の平均流量は $20.8 \text{ l/s}$ （比流量 $28.3 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2$ ）で、平均流量の3倍以上の大流量は11回あった。そのすべてが大雨が降った後に起きたもので、降水と関係のない大きな流量は生じなかった。Fig. III-6-1に6カ月間の降水量と流量および各濃度の変動状況を示したが、流量は大雨の際に大きく増大し、2~3日で元に戻っている。この図の中に、前述した11回の大流量出現時を流量の大きさの順に番号を付記した。6カ月間の流出水量は $447\text{mm}$ 、この間の降水量は $966\text{mm}$ であるから、流出率は46%である。なお、流量は通常年の $843\text{mm}$ に比べて15%大きかった。測定結果の諸量はTable III-6-1に示した。

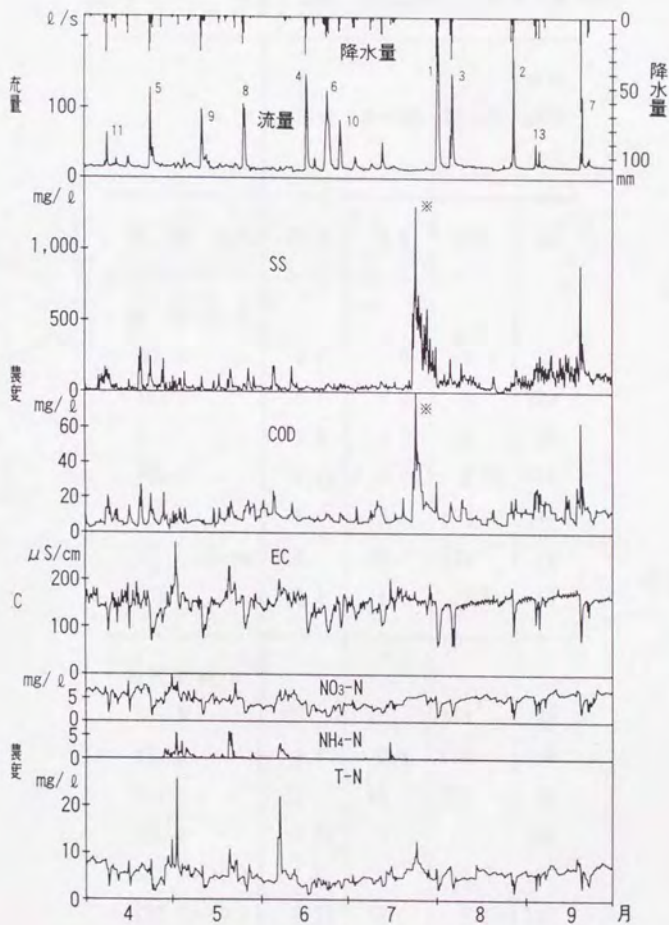


Fig. III-6-1 灌漑期間の流量と濃度変化

Table III-6-1 流量・濃度・負荷量の測定結果（灌漑期）

	平均値	最小値	最大値	変動 係数 (%)
流 量 $\ell/s$	20.8	8.6	209	98
濃 度 $mg/\ell$				
NO <sub>3</sub> -N	4.7	1.0	9.8	32
NH <sub>4</sub> -N	0.2	0.0	5.7	300
T-N	5.5	1.1	25.7	36
PO <sub>4</sub> -P	0.02	0.00	0.62	300
SS	76	0	1,310	141
EC $\mu S/cm$	150	62	279	16
COD	10.4	1.7	79.6	63
負荷量 $mg/s$				
NO <sub>3</sub> -N	83	22	313	39
NH <sub>4</sub> -N	3.7	0.4	110	258
T-N	101	28	575	52
PO <sub>4</sub> -P	0.29	0	11.1	269
SS ( $\times 10^3$ )	1.6	0	35.5	171
COD ( $\times 10^3$ )	0.22	28	2.78	122

n=732

## b) 濃度の変動状況

Fig. III-6-1に流出状況を示した。

ECは平均値 $150 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、変動係数16%と変動が少ない。また、ECは流量の増大したときには必ず減少しており、増水時の希釈による低下が起きている。

$\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は平均は $4.7\text{mg}/\ell$ 、変動係数32%で、やはり変動は小さい。平常時は $4\sim 7\text{mg}/\ell$ であるが、ECと同じく降水による増水時に低下する。平常時に濃度が高いのが特徴である。

$\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は平均 $0.2\text{mg}/\ell$ 、変動係数300%である。ほとんどの時には $0.1\text{mg}/\ell$ 以下の低濃度で、5月上旬の元肥期を中心にごくわずかの回数に検出されるという他の成分とは異なる得意な変動を示している。これも灌漑期のひとつの特徴である。

T-N濃度は平均 $5.5\text{mg}/\ell$ 、変動係数36%である。T-Nの主成分が $\text{NO}_3\text{-N}$ であるので、一般的には $\text{NO}_3\text{-N}$ の変動に似ており、流量が増大する際に低下する。しかし、特別に上昇することが3回あり、そのうちの1回は元肥期の $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度の上昇と同じ時で、2回目は6月上旬の追肥の時期であり、あとの1回は7月下旬でありこれは、流量の増減と何の関係もない時であり、農作業の結果と思われる。

SS濃度の全期間平均値は $76\text{mg}/\ell$ 、変動係数141%で、今回測定した水質成分の中では一番変動の大きい項目である。しかし、SS濃度が $300\text{mg}/\ell$ を越える大きな値になったのは2回だけである。そのうちの最高値を示したのは、T-Nでも確認された7月下旬であった。SS濃度は流量とあまりよく対応せず、相関係数は0.01であった。このように流量とSS濃度の間に対応がないのは意外であるが、これは灌漑期で水田に湛水があること、および水路の到るところに木板による堰が設けられていて増水時のSSの流出が抑制されたことと、一方水田での農作業が流量と関係ないSSの流出を引き起こしているためとみられる。

COD濃度の平均値は $10.4\text{mg}/\ell$ 、変動係数63%である。SSよりは変動係数は小さく、変動の幅が小さい。平均値の3倍以上になったのはSSと同じ時に2回であり、そのうちの一度は、やはり流量の変化が生じていない時に起きている。また、その変動はSSと同様に流量の変動と対応していないことが多く、流量とCOD濃度の相関は0.04で、この点もSSとよく似ている。



### c) 流出負荷量の変動状況

Fig. III-6-2に流出負荷量の変動状況を示した。

$\text{NO}_3\text{-N}$ 負荷量の変動も流量と対応している。しかし、流量の増大時に濃度が低下するので、変動係数はSSやCODに比べて小さく39%である。また、7月下旬の例外的な増大は起きていない。

$\text{NH}_4\text{-N}$ 負荷量は濃度と同じく、元肥期を中心にした限定された時に増大している。

T-N負荷量も $\text{NO}_3\text{-N}$ と同様であるが、前に濃度の項で述べたように、7月下旬と元肥期に流量の増大と係わりない負荷の増大が生じている。

SSの負荷量は流量の増大時に増大している。流量が平均流量の3倍以上を示した11回のすべてで、SS負荷量も大きく増大している。ただし、7月下旬のSSの負荷量の増大だけは、流量と関係のないものである。

CODの負荷量もSSと同様で流量の増大時に大きく増大している。しかし、7月下旬の増大は例外である。

以上のように $\text{NO}_3\text{-N}$ 、T-N、SS、CODの負荷量の変動状況には差がある。また、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は水田の施肥時に限定されて流出する。このように灌漑期の流出負荷量は水田での農作業を反映しているが、一般的には流量と対応した変化をしている。

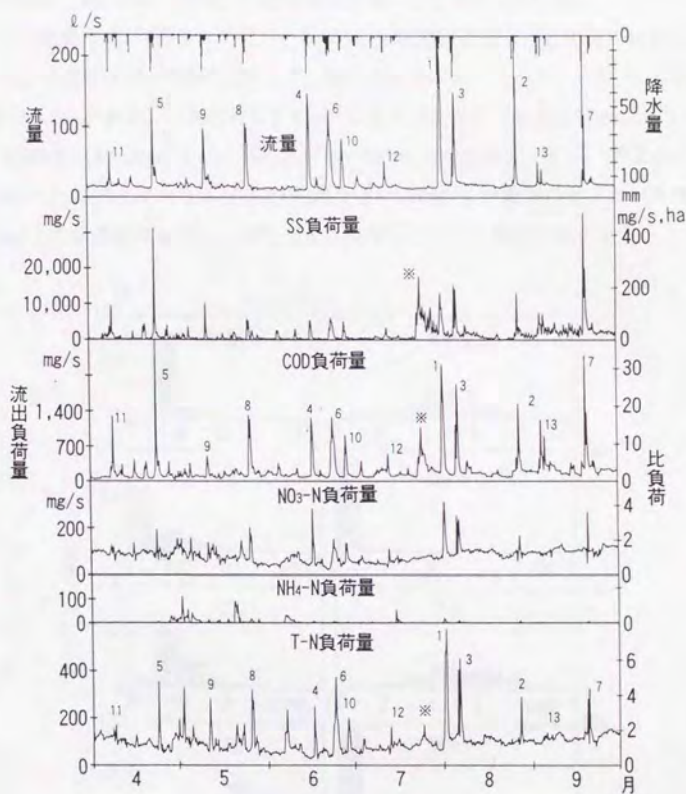


Fig. III-6-2 灌漑期の流量と負荷量の変化

d) 流量、濃度、負荷量の頻度分布

Fig. III-6-3, 4に頻度分布を示した。

流量は10~20 l/sの値が83%を占め、30 l/s以上の値はわずか7%である。

ECは140~160  $\mu$ S/cmにピークがあり、その両側に値がちらばっている。

NO<sub>3</sub>-N濃度も4~5mg/lの範囲にピークがあるが、その両側に値は分布している。

NH<sub>4</sub>-N濃度は低い値の0~0.5mg/ℓにピークがあり、90%以上を占めている。平常時には0.1mg/ℓ以下でほとんど検出されないことを表している。

T-N濃度はNO<sub>3</sub>-N濃度と同じで、3~8mg/ℓの範囲にほとんどの値が収まっている。

PO<sub>4</sub>-P濃度はNH<sub>4</sub>-N濃度と同じく、低いところにピークがあり、0~0.05mg/ℓの範囲に95%がある。平常時には0.02mg/ℓ以下の低濃度であることを示している。

SS濃度は0~50mg/ℓの一番小さい値が58%を占めて最も大きく、濃度が大きくなるにつれて頻度は少なくなる。COD濃度は5~10mg/ℓの範囲にピークがあり、0~5mg/ℓの低濃度は少ない。濃度が大きくなるにつれて頻度は低下する。

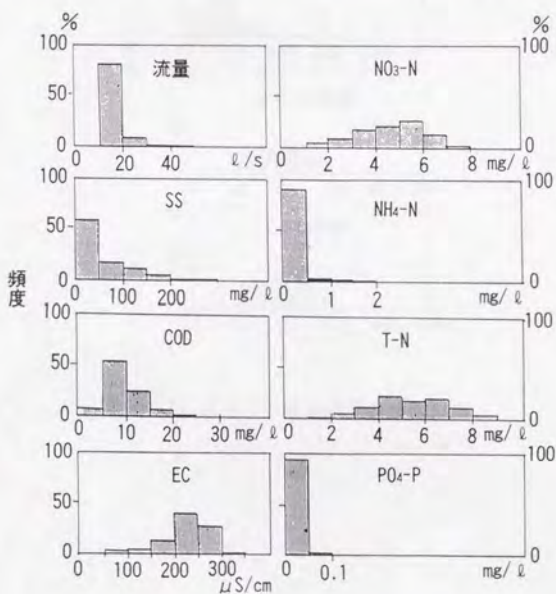


Fig. III-6-3 流量と濃度の頻度分布

NO<sub>3</sub>-NとT-Nの負荷量は台形状の分布をしていて、ある範囲内にそのほとんどが収まっている。経常的にある程度の流出があるということを示している。

SSの負荷量は濃度と同じように低いところにピークがあり、右下がりの分布である。CODは100~200mg/ℓにピークがある。これらはいずれも濃度の分布型と同

じである。

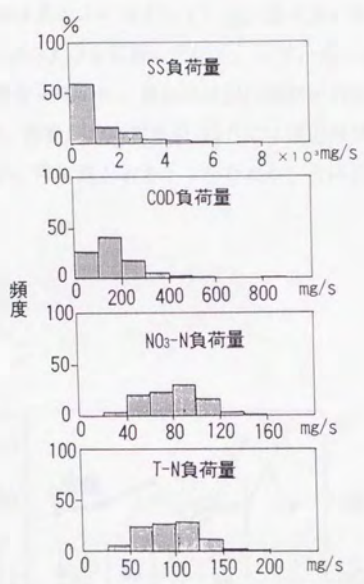


Fig. III-6-4 各負荷量の頻度分布

(2) 月平均濃度と負荷量の変動

a) 月平均流量と月降水量 (Fig. III-6-5)

月平均流量は月降水量とよく対応している。最大の月降水量は237mmを記録した8月に流量も最大値28.3ℓ/sを記録している。一方、最小月降水量は87mmの7月に15.6ℓ/sと最小流量を記録した。流出率は7月の63%が例外的に高く、その他の月は40~47%であった。灌漑開始の田植期の5月には流出率をもっと低下するのではないかと予想したが、降水量が大きかったためか、さほどの低下は示さなかった。

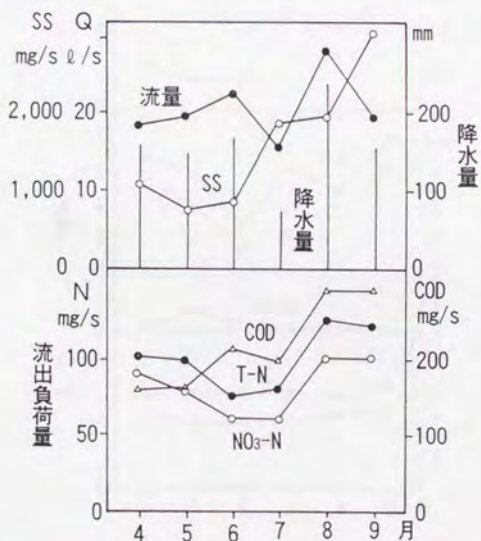


Fig. III-6-5 月降水量と流量、SS、COD、NO<sub>3</sub>-N、T-Nの各負荷量の月別平均値の変化

b) 月平均濃度の変動 (Fig. III-6-6)

ECは月による変動はほとんどなかった。

$\text{NO}_3\text{-N}$ とT-Nは6月に低く、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は水田の元肥期の5月に高い。

SSとCODは4~5月の前半に低く、7~9月の後半に上昇している。水田での代かきの影響は出ていない。

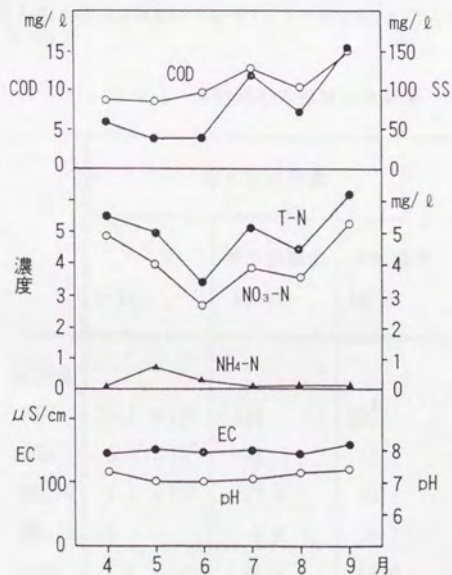


Fig. III-6-6 各水質濃度の月別平均値の変化

c) 月平均負荷量の変動 (Fig. III-6-3)

NO<sub>3</sub>-NとT-Nの負荷量はほぼ同じ月変化をしているが、6~7月に低下するのが特徴である。気温の上昇とともにNO<sub>3</sub>-Nの水田における稲の吸収や脱窒が次第に増大したためとみられる。

SSの負荷量は4~6月の前半に小さく、7~9月の後半に2倍以上に増大した。CODも同様の変化をしている。これは流量の増大だけでなく有機態の懸濁成分が夏期に増大したことを示しており、生物活動の変化に起因していると思われる。

d) 6カ月間の総流出負荷量

Table III-6-2に4月から9月までの6カ月間の総流出負荷量をまとめた。T-Nで21.8kg/ha、そのうちの大部分の82%はNO<sub>3</sub>-Nで、17.8kg/haを占める。NH<sub>4</sub>-Nは0.8kg/haと小さい。

Table III-6-2 灌漑期間の総流出負荷量

	総流出負荷量		
	kg	単位面積当 kg/ha	平年換算 kg/ha
負荷量			
SS	25.3 × 10 <sup>3</sup>	344	300
COD	3.5 × 10 <sup>3</sup>	48	42
NO <sub>3</sub> -N	1.3 × 10 <sup>3</sup>	17.8	15.4
NH <sub>4</sub> -N	59	0.8	0.7
T-N	1.6 × 10 <sup>3</sup>	21.8	19.0
PO <sub>4</sub> -P	4.6	0.063	0.055
流出	329	4.47	3.89
水量	× 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	× 10 <sup>3</sup> m <sup>2</sup> /ha	× 10 <sup>3</sup> m <sup>2</sup> /ha

### (3) 農業集水域（灌漑期）のまとめ

灌漑期の主要な調査結果を列記すると次のようになる。

- 1) 灌漑期において流出負荷量の主要な変動要因は降水であり、降水時の増水により負荷量は大きく増大した。しかし、降水時以外にもSSやCODについては若干の例外的増大があった。
- 2) 灌漑期には各成分とも非灌漑期に比べて同一流量に対する負荷量が減少する傾向があった。これは水田灌漑が抑制したとみられる。
- 3) 4～9月の6カ月間のT-Nの全流出負荷量は19kg/haでその大部分はNO<sub>3</sub>-Nであった。これは台地上の畑地からの肥料流出が大きく影響しているためである。



## 7. LQ式の特徴

### (1) LQ式について

集水域からの流出負荷量を推定する方法として、原単位法を使用する例が多い。しかし、原単位法では流出負荷量の時間的変動に対する予測ができない。そこで流量 $Q$ と流出負荷量 $L$ の関係式 $L = f(Q)$ は、流量から流出負荷量の時間変動を求めることが容易にできるので集水域からの流出負荷量を算出する場合に役に立つ。さらに、指定湖沼の生態系モデルにも流入（集水域からの流出）負荷量の日当たりの変化 $L(t)$ を必要とするが、その際にも流量 $Q(t)$ を媒介としてLQ式が用いられるようになってきた。また、流出負荷予測モデルにとってもLQ式は最も大事な部分である。それゆえLQ式を精度よく、また簡便に求めることが要望されている。国内でも山口・吉川<sup>9)</sup>、海老瀬<sup>2, 8), 5)</sup>、中曽根・中村<sup>2, 9)</sup>、福島・河村<sup>6)</sup>などによってLQ式はいろいろの角度から検討されている。また田淵<sup>3, 10)</sup>らはLQ式の信頼性について養豚集水域で本論文と同様な6時間間隔の綿密なデータを用いてLQ式の検討を行っている。

本論文で用いるLQ式とは、流量と流出負荷量とを最小自乗法で求めた回帰式で $L=aQ+b$ の型を直線型、 $L=aQ^b$ の型を曲線型とし、式の型としてはこの2種類の式を用いた。

### (2) 流量と流出負荷量の関係

#### a) 森林集水域

相関係数をみてみると、全期間では流量と $NO_3-N$ 流出負荷量が0.95と相関係数が非常に高く、次に $T-N$ 流出負荷量とが0.90、 $SS$ 流出負荷量が0.67と低くなっている。これは、Fig. III-7-1をみると、 $SS$ のパラツキが大きく、 $NO_3-N$ と $T-N$ では小さいことからわかる。季節別では、 $NO_3-N$ 流出負荷量が0.92以上の値を常にとり相関が非常に高い。 $T-N$ 流出負荷量は0.833~0.935と相関は高い。 $SS$ 流出負荷量は、春・夏にかけては相関は高いが、秋・冬には相関はみられない。 $NO_3-N$ 流出負荷量との相関が高いのは、 $NO_3-N$ 濃度の変動幅が流量の変化に対してほぼ一定なため、流量との積である流出負荷量が流量の変化に強い影響を受けるためである。

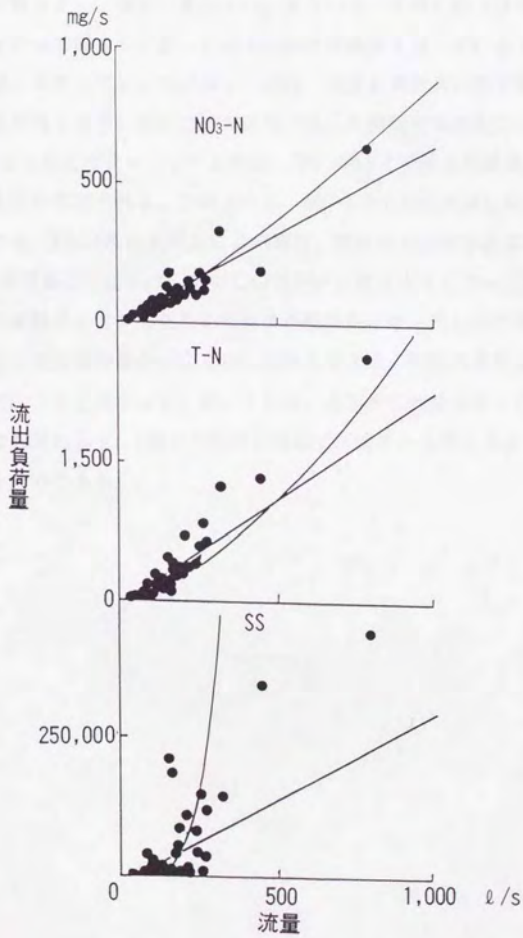


Fig. III-7-1 流量と流出負荷量の関係

LQ式を月別にすると12本となり、グラフ上ではその違いがわかりにくくなるので、LQを季節別に分けてFig. III-7-2に示した。NO<sub>3</sub>-N流出負荷量のLQ式は秋の傾きが一番大きく、春が一番小さい。すなわち、季節別の式は秋→冬→春→夏とループを作って回っている。LQ式の傾きは濃度を表していると考えられるので、秋には、リターフォールが多く、また、気温もまだ高いので硝化速度が大きいめに濃度が高くなる。反対に春は植物が成長を開始するために土壤中からNO<sub>3</sub>-Nを吸収するためとリターフォールが秋、冬にかけて分解され蓄積量が減少したため濃度が低いと考えられる。このように、NO<sub>3</sub>-N流出負荷量のLQ式には、季節変動が存在する。NO<sub>3</sub>-N流出負荷量には直線型、曲線型の大きな差異は認められない。

T-N流出負荷量のLQ式は、冬のLQ式だけが他と大きく違っている。これは、冬に濃度の変動が小さかったために傾きが緩やかになったものである。また、降水量が少なく流出負荷量が小さくなったためである。SS流出負荷量のLQ式は冬が曲線型だけ大きく異なっている。これは、全体的に流量が低く流出負荷量が小さかったにも関わらず、100 ℓ/s前後の流量でSS濃度が極端に大きくなったデータが存在するためである。

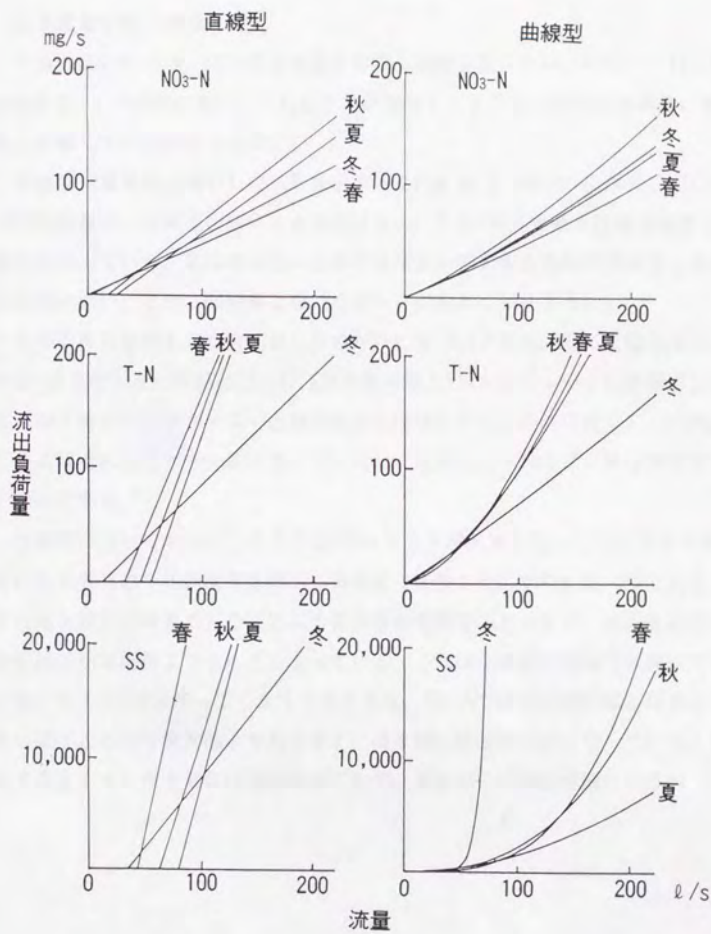


Fig. III-7-2 季節別 L Q 式の比較

b) 農業集水域 (非灌漑期)

流量と $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{T-N}$ 、 $\text{SS}$ の各負荷量との間の相関係数は0.84、0.97、0.87といずれも0.8以上で相関は強い。これはすでに報告してきたように流出負荷量に流量が強く影響しているからである。

非灌漑期農業集水域のLQ式を図示するとFig. III-7-3のようになる。 $\text{NO}_3\text{-N}$ と $\text{T-N}$ では直線型と曲線型の間に大きな差はない。 $\text{T-N}$ は原点を通る直線で流量と負荷量は比例している。 $\text{SS}$ は増水時に急激に負荷量が増大するために曲線型と直線型の差が大きい。また、回帰線と離れたデータが数多く存在する。

月別の直線型のLQ式を図示したのがFig. III-7-4である。 $\text{SS}$ のLQ式は10、11、3月の流量の大きい時期と12、1、2月の渇水期とで2つのグループに明瞭に分かれる。増水時のデータが少ないと緩勾配のLQ式になる。これに対して、 $\text{NO}_3\text{-N}$ のLQ式はそれほど大きな差は現れていない。増水時にそれほど大きな増水をしなためである。

全期間について求めたLQ式に6時間おきの実測流量を代入して負荷量を求め、それから各月の平均負荷量を算出し実測値と比較したのがFig. III-7-5である。 $\text{SS}$ では渇水期に曲線型のLQ式による算出値が実測値より大きく、逆に直線型による算出値が実測値よりも小さくなっている。これは小流量の範囲で直線式で求めた値がほとんど0になってしまうからである。 $\text{NO}_3\text{-N}$ では増水期にはLQ式による算出値はどちらも実測値よりも小さく、渇水期には逆に大きくなっている。LQ式で算出すると増水期には過小評価になり、渇水期には過大評価になる。

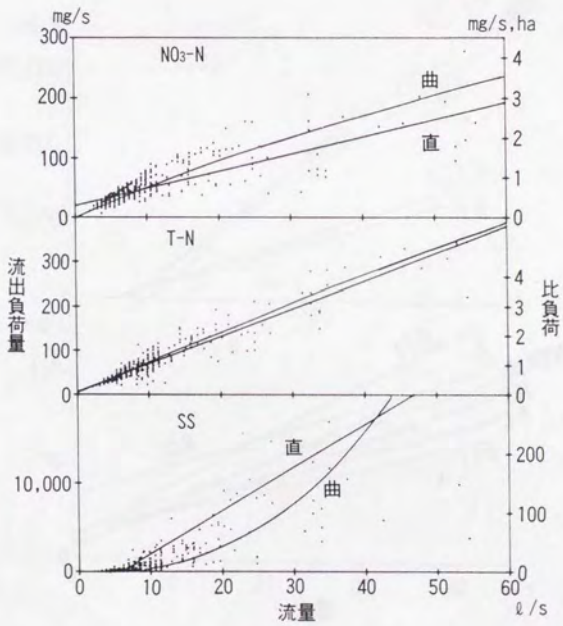


Fig. III-7-3 流量と負荷量の関係式

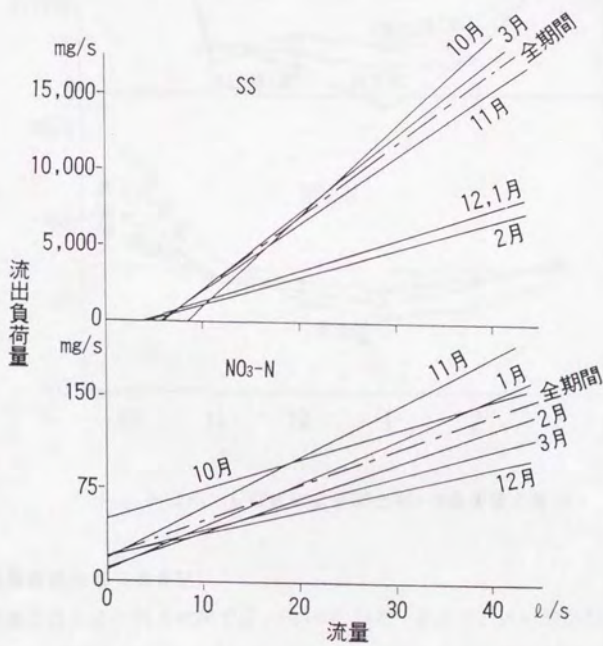


Fig. III-7-4 月別のLQ式 (SSとNO<sub>3</sub>-N)

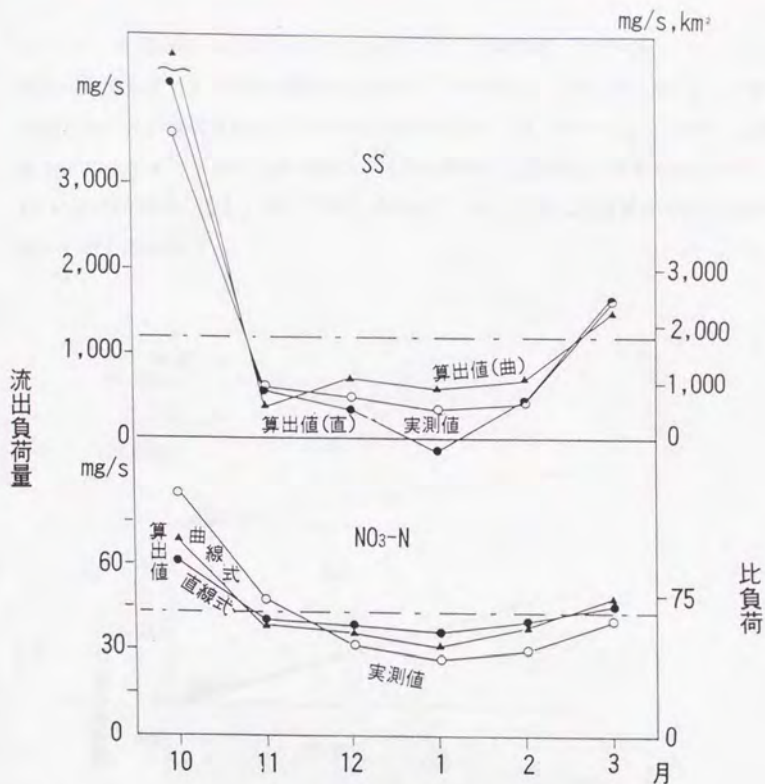


Fig. 3-7-5 LQ式によるSSとNO<sub>3</sub>-N負荷量の算出

c) 農業集水域 (灌漑期)

流量と負荷量との相関では、CODが0.84で一番高く、次いでT-Nが0.77、NO<sub>3</sub>-Nが0.64、SSが0.53となっている。Fig. 3-7-6をみても、SSはCODなどに比べてやや点のバラツキが大きい。

LQ式は Table 3-7-1に示したが、回帰誤差率は直線式でNO<sub>3</sub>-NとT-Nが30~33%で小さく、CODが67%、SSは145%で大きくなっている。LQ式が使えるのはNO<sub>3</sub>-NとT-Nといえる。

月別のLQ式では、かなりの違いが見られる(Fig. 3-7-7)。CODでは灌漑期の5



月～8月と非灌漑期の4、9月との間には差があり、灌漑期の方が勾配が小さい。これは同一流量に対する流出負荷量が小さいことである。一方、 $\text{NO}_3\text{-N}$ では同一流量に対し6～7月が他の月に比べて負荷量が小さくなり、8、9月が大きくなる。これは水田での湛水と水温の上昇が水田のNの脱窒吸収に影響した結果とみられる。8月には水温は高くても、水田で湛水が間断的になるために負荷量が上昇したのではないかと思われる。

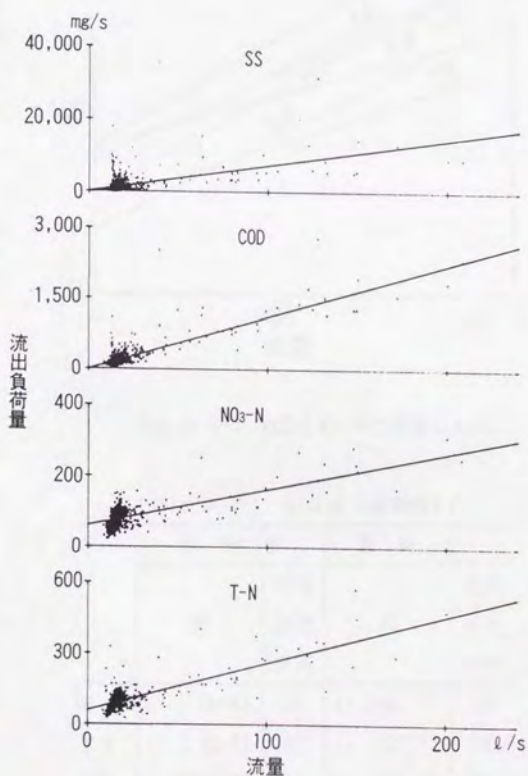


Fig. III-7-6 流量と負荷量の関係

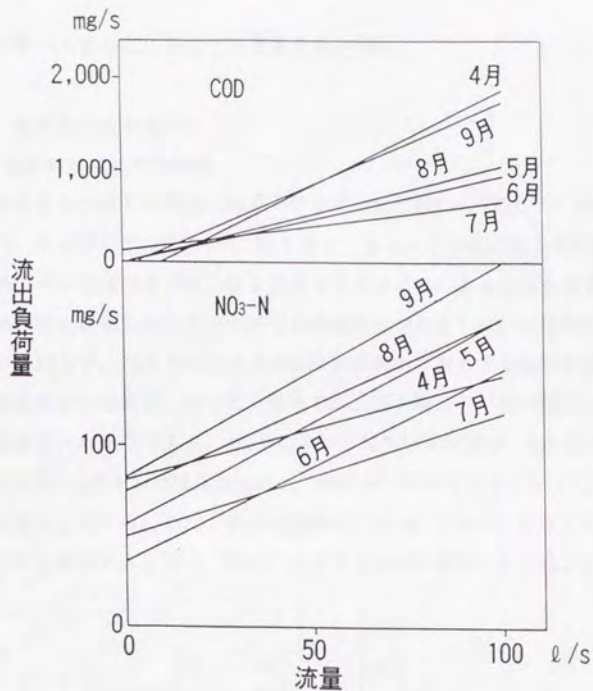


Fig. III-7-7 CODとNO<sub>3</sub>-Nの月別LQ式

Table III-7-1 LQ式 (灌漑期)

	直線型		曲線型	
	式	回帰誤差率%	式	回帰誤差率%
NO <sub>3</sub> -N	$L = 1.0Q + 84$	30	$L = 24Q^{0.47}$	30
T-N	$L = 2.0Q + 81$	33	$L = 19Q^{0.60}$	34
SS	$L = 72Q + 154$	145	$L = 12Q^{1.41}$	157
COD	$L = 11Q - 12$	67	$L = 5.9Q^{1.14}$	69

単位: L: l/s·km<sup>2</sup>, Q: l/s·km<sup>2</sup>

1. 森林集水域のモデル

(1)モデル構成とその特徴

本モデルの核となる流出解析モデルは、直列4段タンクモデルである (Fig. IV-1-1)。タンクモデルにおいて1段目のタンクはふつう表面流出を想定しているが、このモデルではパイプ流の様な大きなマクロポアによる流れを想定している。これは、現地観測において大雨時でも表面流出が発生している様子がなかったのにもかかわらず、ハイドログラフ上では表面流出に対応する流れが生じていることが読めるからである。そして、現地では、降水時のみ小河川脇の小孔からの流出が観測されたからである。2段目のタンクは早い中間流出、3段目のタンクは遅い中間流出、4段タンクは基底流出と一般に用いられているタンクモデルと同様な流れを想定している。また、集水域面積が $2.948\text{km}^2$ であり、対象とするタイムスケールが日単位であるので、降水に対する流出の時間遅れは考慮していない。

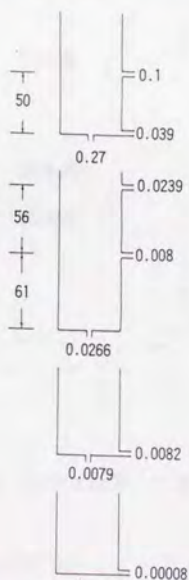


Fig. IV-1-1 直列4段タンクモデルと係数

## (2) 解析結果

### a) 流出水量

タンクモデルで計算した流出水量、実測した流出水量および降水量をFig. IV-1-2に示した。秋と夏に流出水量逓減時の谷が実測値より低くなるが、そのほかはピークもよく合い良好な結果を得ていると思われる。誤差率でみると、収支誤差率-2.2%、相対誤差率14.1%であった( Table IV-1-2)。流出負荷予測モデルの誤差評価は両方法とも流出解析の誤差率を参考値とした。それは、両方法ともこのタンクモデルを利用して流出負荷量を推定するのであるから、基本的にこの誤差率よりも誤差がよくなることはありえないはずである。もし、この誤差率よりも推定結果がよくなるということが起きた場合、その原因は推定方法の方にあるはずである。そのために、この誤差率を各推定方法による結果の誤差率と比較し参考にすることによって、流出負荷予測モデルの精度の評価に役に立つからである。

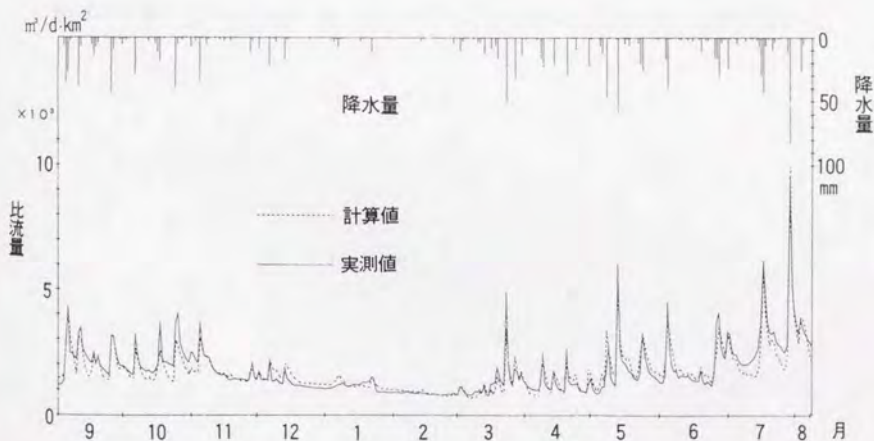


Fig. IV-1-2 実測比流量と計算比流量の比較

### b) 流出負荷量解析結果 (LQ式法)

LQ式の各係数と相関係数をTable IV-1-1に、各推定法で推定したNO<sub>a</sub>-N流出負

荷量のグラフを Fig. IV-1-3～ Fig. IV-1-6に示した。LQ式法での各グラフは、全体的に大きなズレが認められないが、秋の推定結果が実測値よりやや低い。しかし、この4方法をグラフ上から判断することは困難なので、Table IV-1-2に収支誤差率と相対誤差率での評価の結果を示した。各方法の収支誤差率は、-2.3%～-4.7%と小さく、精度は良い。その中で全期間LQ式の値が、月別LQ式の値よりもやや小さい。相対誤差率で比較すると、17.3%～21.3%となったが、その中で月別LQ式の値が全期間LQ式の値よりもやや小さい。また、直線型LQ式と、曲線型LQ式を比較すると、収支誤差率で直線型がやや良く、相対誤差率で曲線型が良いという結果になったが、いずれの差もわずかである。

LQ式法は、タンクモデルで計算した流量を代入して用いるので、流量の推定が結果を大きく左右することになる。そのため流量の誤差の影響を排除するために実測流量をLQ式に代入して求めた結果が Table IV-1-2の下欄である。その誤差率で比較すると、収支誤差率はいずれの方法でもかなり小さくなった。また、相対誤差率も10%以上小さくなった。中でも月別直線型LQ式が最も評価が高かった。

Table IV-1-1 LQ式と濃度補正法の係数

月	デー タ数	L = a Q <sup>b</sup>			L = a Q + b			濃度補 正係数
		a	b	r	a(x10 <sup>-4</sup> )	b	r	
9	30	4.5x10 <sup>-5</sup>	1.3	0.96	9.0	-2.0	0.94	1.3
10	31	4.8x10 <sup>-4</sup>	1.0	0.95	5.9	-0.14	0.96	1.5
11	30	2.7x10 <sup>-5</sup>	1.3	0.97	7.0	-0.88	0.97	1.2
12	31	4.2x10 <sup>-5</sup>	1.3	0.95	5.8	-0.44	0.96	0.89
1	31	2.3x10 <sup>-4</sup>	1.1	0.90	5.0	-0.17	0.90	0.95
2	29	6.5x10 <sup>-3</sup>	0.65	0.39	2.8	0.37	0.39	1.0
3	31	1.6x10 <sup>-4</sup>	1.1	0.97	4.9	-0.29	0.98	1.1
4	30	2.0x10 <sup>-4</sup>	1.1	0.92	4.5	-0.10	0.96	0.93
5	31	2.1x10 <sup>-4</sup>	1.1	0.98	4.7	-0.13	0.98	0.85
6	30	2.3x10 <sup>-4</sup>	1.1	0.98	5.2	-0.25	0.98	0.96
7	31	5.3x10 <sup>-5</sup>	1.3	0.98	7.4	-1.9	0.98	1.2
8	7	1.0x10 <sup>-6</sup>	1.7	0.97	8.8	-3.1	0.97	
全期間	342	7.2x10 <sup>-5</sup>	1.2	0.98	6.4	-0.68	0.96	

(単位 : L=kg/d , Q=m<sup>3</sup>/d)

Table IV-1-2 収支誤差率と対誤差率

	流量	LQ式法					
		CC法		全期間		月別	
			補正法	直線	曲線	直線	曲線
収支誤差率(%)	-2.2	-13.1	-3.4	-2.3	-3.1	-4.4	-4.7
(実測Q)(%)				0.5	0.1	-0.1	-1.2
相對誤差率(%)	14.1	19.3	13.3	21.3	20.2	18.1	17.3
(実測Q)(%)				10.6	9.8	7.6	7.6

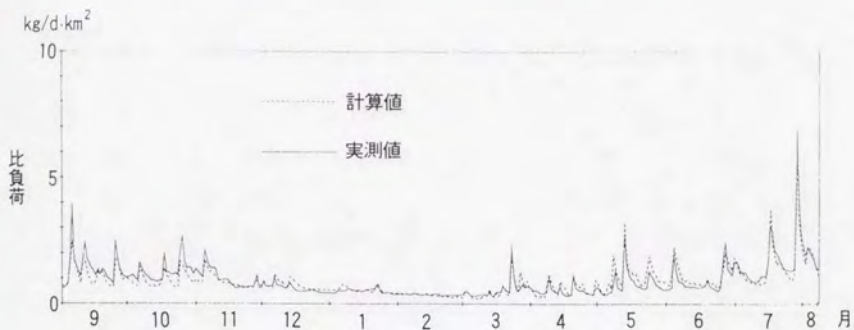


Fig. IV-1-3 実測比負荷と計算比負荷の比較  
(全期間直線型LQ式)

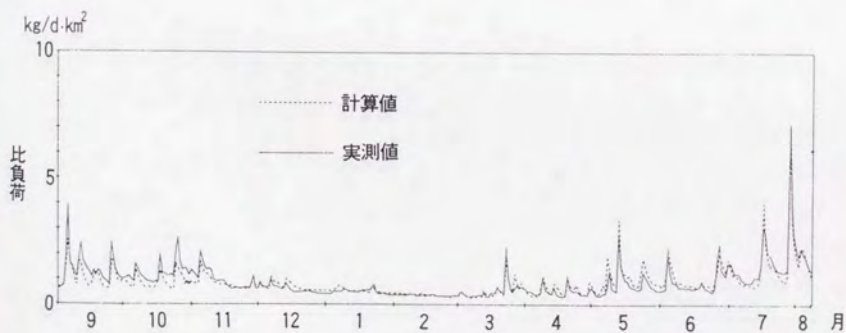


Fig. IV-1-4 実測比負荷と計算比負荷の比較  
(全期間曲線型LQ式)

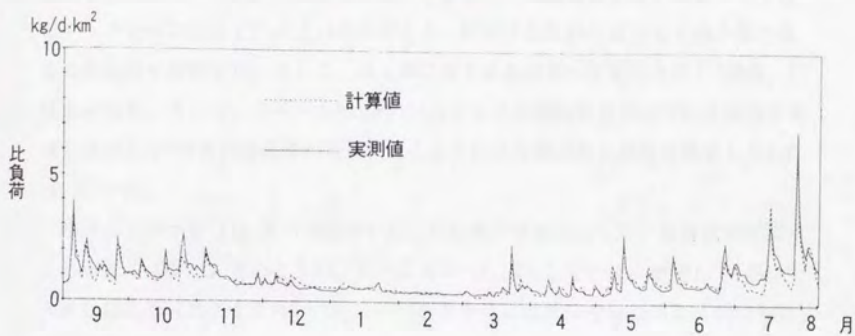


Fig. IV-1-5 実測比負荷と計算比負荷の比較  
(月別直線型LQ式)

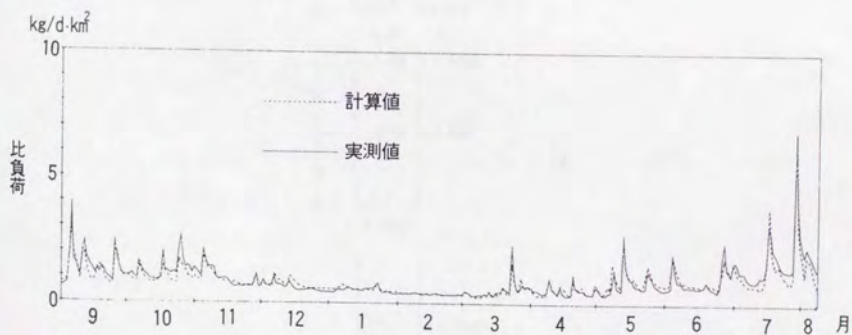


Fig. IV-1-6 実測比負荷と計算比負荷の比較  
(月別曲線型LQ式)



c) 流出負荷量解析結果 (CC法)

CC法の同定方法は、まず渇水期の流出負荷量に合わせるために、4段タンクの係数を合わせた。これは、渇水期には、上段タンクの影響が少なくなるので下段のタンクのみ注目すればよいからである。同定するための値として渇水期の濃度の最低値を参照した。そして、渇水期に続く春先のデータをもとにして3段、2段を求めた。そして、もう一方洪水時に1段タンクの係数を合わせておき両方を考慮しながら $\chi^2$ 誤差評価基準が最小になるように試行錯誤的に係数を決定した(Fig. IV-1-7)。

結果のグラフを Fig. IV-1-8に示した。秋に他の推定法よりも、計算値が実測値よりも低くズレた。そのことが、収支誤差率-13.1%とLQ式法に比較して10%以上大きな値となったことに表われた。相対誤差率はLQ式法の全期間と月別の中間の値であった。

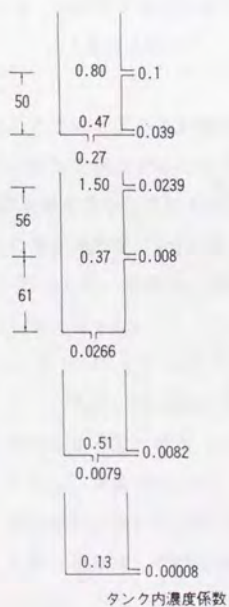


Fig. IV-1-7 タンクモデルと濃度係数法の係数

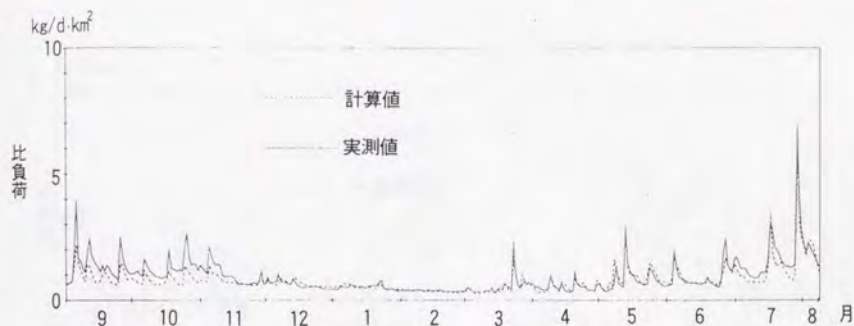


Fig. IV-1-8 実測比負荷と計算比負荷の比較  
(濃度係数法)

これが濃度係数を定数化したための誤差の影響であるとするならば、計算値と実測値とのズレを補正して、原因を検討することとした。補正方法は、月別に計算値と実測値を $\chi^2$ 誤差評価基準を最小にさせるような係数を算出して補正（以降、CC補正法）した。得られた補正係数を Table IV-1-1に、補正係数でCC法を補正したグラフを（Fig. IV-1-9）示した。結果は、収支誤差率で10%近く、相対誤差率も前方法の推定結果よりも良くなった。

補正係数が1を越えたのは、9.10.11.3.7・8月で、3月を除けば夏期から秋期に補正係数が大きくなっている。これは、渇水期から春先にかけてのデータをもとに濃度係数を求めたことに起因すると思われる（3月は、この期間に入るの特に考慮しないこととする）。それは、本集水域の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は、秋に高く、春に低いという特徴をもつために、春を基準に決めた係数では、低めの推定結果になってしまったのである。そのため濃度係数は、季節変動の影響を考慮に入れたほうがより良い推定を行えると思われる。

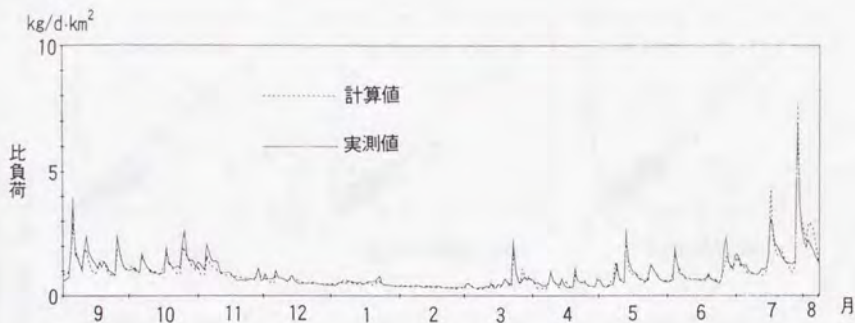


Fig. IV-1-9 実測比負荷と計算比負荷の比較  
(補正係数で補正した濃度係数法)

#### d) 実測値と計算値との比較

モデルの精度を評価するために、実測値と計算値のグラフや相関係数で比較をすることが多い。そこで、本論文でも Fig. IV-1-10 に実測値と計算値とのプロットを示し、結果を評価することとする。グラフ中の式は直線回帰式、 $r$  は相関係数である。まず、各プロットの違いについては、グラフ上からは明確な差を判断できない。また、グラフ中の相関係数にも大きな差を認められるとは言いがたい。そこで、直線回帰式の傾きが1に、切片が0に近い(1:1直線にのる)ものを、再現性を表す指標とし、各推定法の直線回帰式の傾きと切片に着目することとする。各LQ式法では、全期間曲線型LQ式の傾きと切片の値のズレが他よりやや大きい、著しい差とは認められない。CC法では、傾きが0.73と小さく、精度が良くないことがわかる。このように、これらの評価方法は、各推定法間での誤差率が大きいときは有効であろうが、LQ式法間のように誤差率の値が近い場合については適切さに欠けるものと思われる。

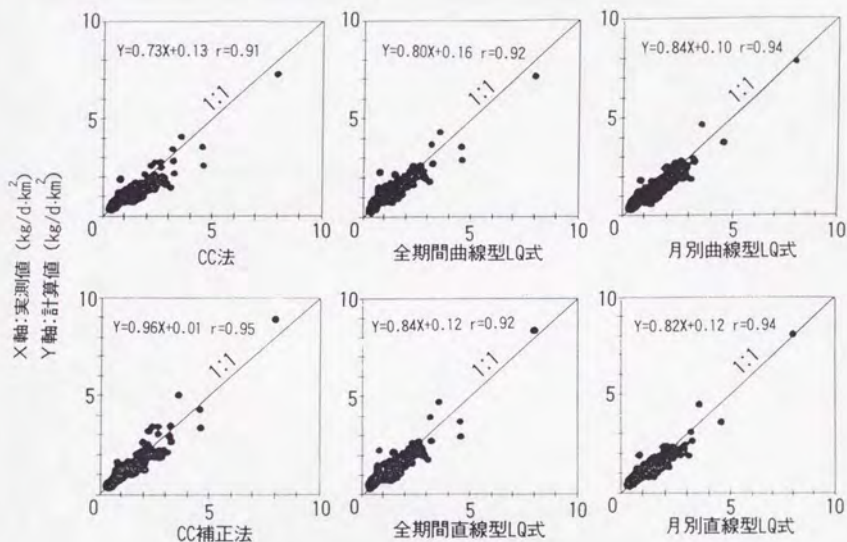


Fig. IV-1-10 実測値と計算値との比較

### (3) 森林集水域のまとめと今後の課題

まず、本調査集水域のNO<sub>3</sub>-N流出負荷量を推定した結果以下のことがわかった。  
本モデルによれば、

- 1) LQ式法では、収支誤差率を-5%以内、相対誤差率を20%程度で推定することができた。
- 2) 濃度係数法では、季節変動を考慮すれば収支誤差率-5%以内で、相対誤差率は20%以下で推定できた。
- 3) 流出負荷量を推定するには、流出水量の解析結果が大きく影響するので、できるだけ正確な流出解析をしておく必要がある。

森林集水域のモデルでの推定結果は良好であった。しかし、濃度係数法においては、季節変動を考慮した濃度係数の採用が望ましいことがわかった。今後、各タンクの濃度係数の内、どの係数が最も季節変動を受けやすいのかを調べることによって森林集水域の流出機構がより鮮明になるものと思われる。

## 2. 農業集水域（非灌漑期）のモデル

### (1) モデル構成とその特徴

農業集水域を対象とするため並列型タンクモデルの構成を採用することにした。ここで用いる並列型とは、台地と低地に対応する2つの直列型タンクを並列させ、独立に計算した結果を加算し全体量を計算するという意味である。並列型にした理由は、Fig. IV-2-1に示したように非灌漑期の台地からの湧出水は、低地の水田に流入（灌漑）せず、水路を流下して直接集水域外へ流出しているからである。また、モデルの簡便性のために台地からの水が低地地下から湧きだすことは考慮に入れずに解析をすることとした。

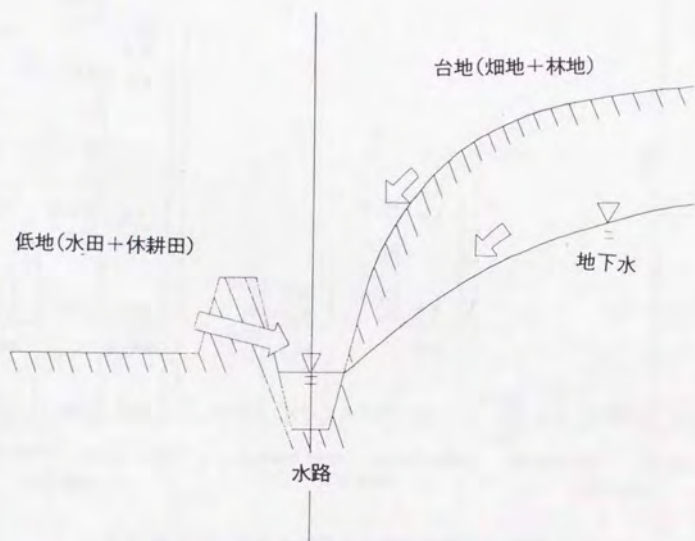


Fig. IV-2-1 非灌漑期の概念図

また、モデルの精度を上げるためには、タンクモデルの段数と流出孔を多くする方が良いが、そのために変数が多くなり同定が困難になる。そこで、流出孔は各タンクに最大2個までとした。Fig. IV-2-1に示したようにタンクの段数は、低地タンクは表面流出と基底流出を表す2段直列タンクモデルを、台地タンクは4段直列タンクモデル（以下4+2段モデル）を採用した。次に、簡便化を進めるために台地タンクを2段タンクにしたモデル（以下2+2段モデル）で計算した。最後に、最も単純である低地タンクと台地タンクの両方を1段（以下1+1段モデル）にしたモデルを用いて計算を行い、この3種類のモデルでの解析結果について比較を行った。

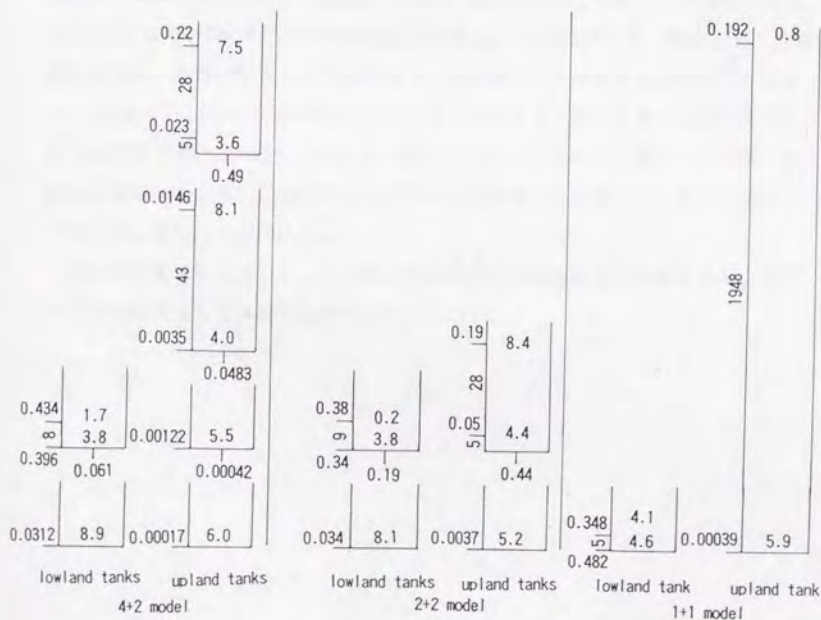


Fig. IV-2-2 モデルの構成と濃度係数法の係数  
(4+2段、2+2段、1+1段モデル)

## (2) 解析結果

### a) 流出水量

4+2段モデルで解析した流出解析結果を Fig. IV-2-3に、2+2段モデルの結果を Fig. IV-2-4に、1+1段モデルの結果を Fig. IV-2-5に示した。3モデルの計算値と実測値の差は、ハイドログラフ上の10月から11月の流量逡減時にかけて大きく現れた。細かくみると4+2段モデルが最もよく一致し、2+2段モデルでの差はそれよりもやや大きく、1+1段モデルの差はかなり大きく、ピークもズレてしまった。Table IV-2-1に誤差率を示した。収支誤差率でみると4+2段モデルは-2.4%、2+2段モデルは-2.0%、1+1段モデルでは-11.8%となった。結果として、2+2段モデルが収支誤差率では最も誤差が小さいことになった。相対誤差率でみると、12.3%、13.1%と21.6%となり4+2段モデルが良好な結果を得た。1+1段モデルは、構造としては単純であるが、両誤差率で大きな差を生じ、他のモデルとの精度差が大きい。しかし、4+2段と2+2段モデルの両誤差率の差は、1%以下とあまり大きいとはいえず、どちらのモデルが優れているかという断定はこれだけではいえない。これは、対象集水域が小さいために流出の仕方がそれほど複雑にならなかったために差が生じにくかったためと思われる。

流出負荷量解析において、この各モデルの両誤差率の結果を森林集水域のモデル同様に参考値とし検討を進めていくこととする。



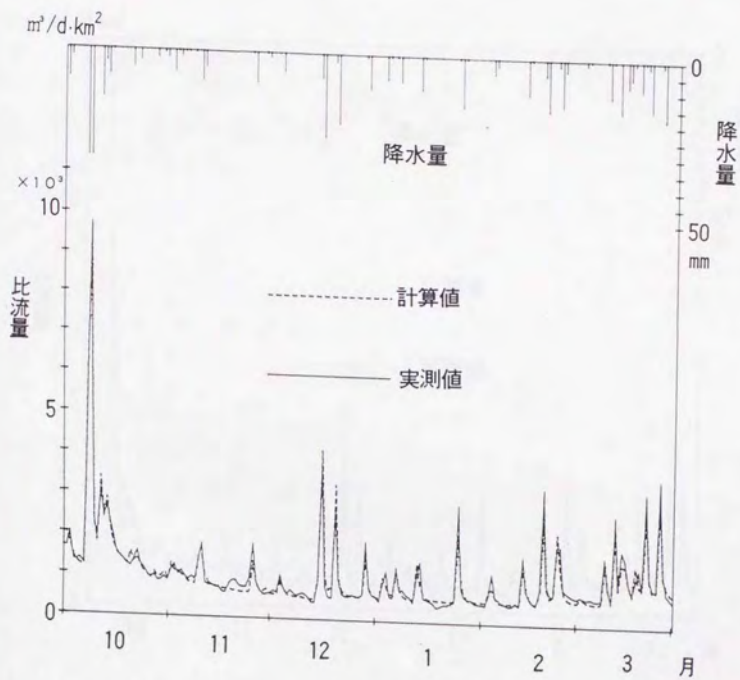


Fig. IV-2-3 実測比流量と計算比流量の比較 (4+2段モデル)

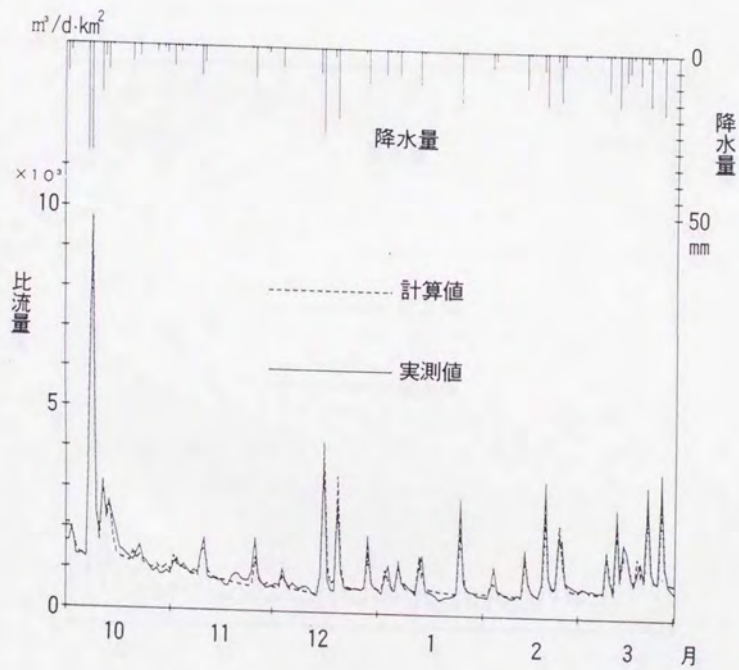


Fig. IV-2-4 実測比流量と計算比流量の比較 (2+2段モデル)

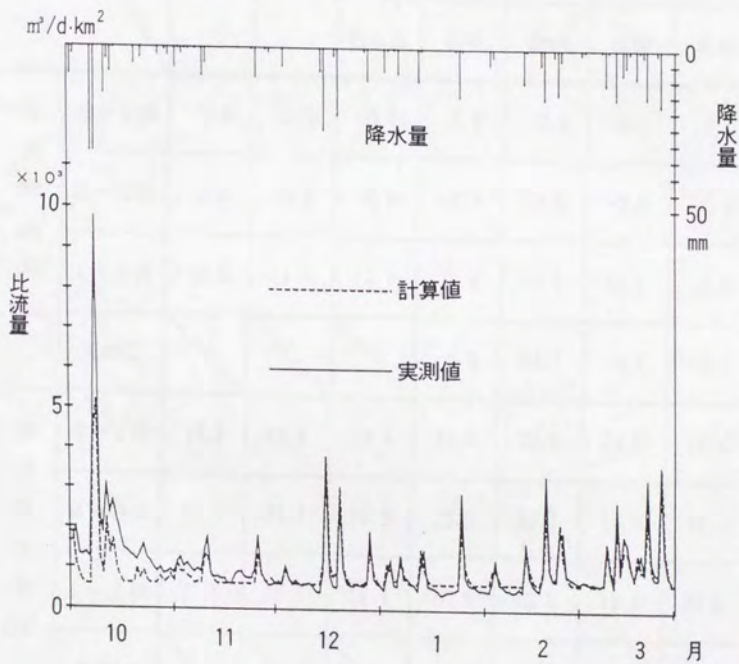


Fig. IV-2-5 実測比流量と計算比流量の比較 (1+1段モデル)

Table IV-2-1 収支誤差率と相対誤差率

		流量	CC法		LQ式法			
					全期間		月別	
				補正法	直線	曲線	直線	曲線
収 支 誤 差 率 (%)	4+2段	-2.4	-3.3	0.0	-2.6	2.0	-2.1	-1.5
	2+2段	-2.0	-3.3	-0.6	-2.3	2.4	-2.0	-1.4
	1+1段	-13.5	-14.6	-4.7	-11.8	-7.8	-12.6	-13.5
	実測Q				0.0	4.1	-0.6	-0.1
相 対 誤 差 率 (%)	4+2段	12.3	14.6	14.5	21.8	22.0	14.2	14.4
	2+2段	13.1	15.7	15.2	22.6	23.1	14.8	15.1
	1+1段	21.6	29.5	16.4	30.9	32.5	18.9	20.9
	実測Q				19.4	19.5	10.4	9.8

## b) 流出負荷量解析結果 (LQ式法)

LQ式の係数をTable IV-2-2に示した。LQ式法で計算した結果、4+2段モデルを Fig. IV-2-6に、2+2段モデルを Fig. IV-2-7に、1+1段モデルを Fig. IV-2-8に示した。3つのモデルについてグラフ上からは、LQ式の直線型と曲線型との解析結

果に大きな差は認められなかった。しかし、全期間と月別LQ式では、秋の負荷量逓減時と12月のピークで、4+2段モデルと2+2段モデルは月別の方が良く一致した。1+1段モデルでは、明瞭な差は表れなかった。

Table IV-2-2 LQ式の係数、相関係数、濃度補正係数

月	デー タ数	L = a Q <sup>b</sup>			L = a Q + b			濃度補正係数		
		a	b	r	a × 10 <sup>-3</sup>	b	r	4+2 段	2+2 段	1+1 段
10	31	0.023	0.83	0.98	4.7	2.7	0.99	1.0	1.0	1.8
11	30	0.016	0.87	0.96	5.3	1.3	0.95	1.2	1.2	1.4
12	31	0.047	0.67	0.92	2.5	2.0	0.93	0.91	0.91	0.79
1	31	0.025	0.76	0.90	3.8	0.89	0.95	1.0	1.0	0.79
2	28	0.034	0.71	0.96	2.9	1.4	0.97	1.0	1.0	0.81
3	28	0.049	0.67	0.93	2.9	2.0	0.95	1.0	1.0	0.95
全期間	179	0.012	0.89	0.92	4.5	1.0	0.94	/	/	/

(単位: L=kg/d·km<sup>2</sup>, Q=m<sup>3</sup>/d·km<sup>2</sup>)

収支誤差率では、4+2段モデルと2+2段モデルでは全期間曲線型LQ式法の符号がプラスで、他の推定法と結果が異なったが、その他の差は非常にわずかであった。しかし、1+1段モデルは値がかなり大きかった。相対誤差率では、3モデルと

も、全期間のLQ式法は、月別に比較して精度が悪かった。特に1+1段モデルは、全期間のLQ式法で30%台前半の値、月別では20%近くの値をとり他の2モデルより精度が悪かった。4+2段モデルと2+2段モデルでは、わずかに4+2段モデルの精度がよいがその差はわずかであった。

ここで、流出解析の誤差の影響を除いた場合について検討するために、各LQ式に実測流量Qを代入し検討することとした。結果を Table IV-2-2の実測Qの欄に示した。収支誤差率では、全期間曲線型LQ式法を除いて0%台と小さくなった。全期間曲線型LQ式法のズレの理由は、流量が大きい時に曲線型LQ式法の推定結果が大きくなる可能性があるためである。そのためモデル解析では流量の誤差がマイナスであったために誤差と誤差が打ち消しあい収支誤差率が小さくなったと思われる。相対誤差率では、月別は約10%、全期間は約20%の値となり、月別のLQ式で推定した精度の方が高いことがわかった。このことから、LQ式を用いての流出負荷量解析は、流出解析の結果が支配的であり、いかに効率よく流出解析をおこなえるかが、推定精度にとって大きな問題であることがわかった。各推定法の誤差を分かりやすくするために Fig. IV-2-9に両誤差率をグラフ化した。この結果、4+2段モデルと2+2段モデルの差はわずかであることがわかる。また、収支誤差率の全期間曲線型LQ式が他の推定法の結果と異なること。相対誤差率で月別LQ式の推定がよいことが確認できた。

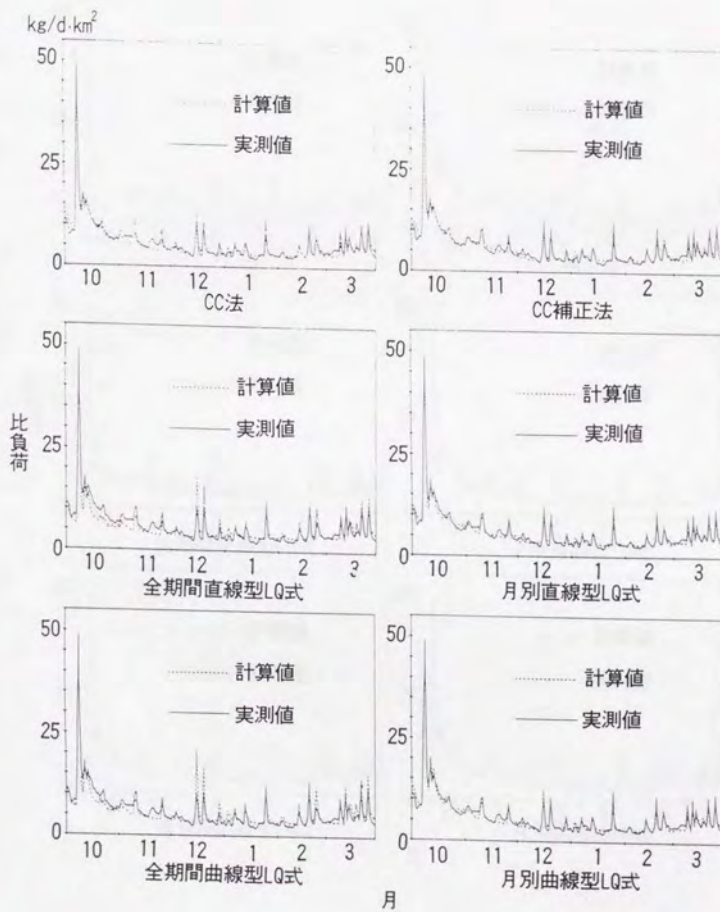


Fig.IV-2-6 実測比負荷と計算比負荷の比較 (4+2段モデル)

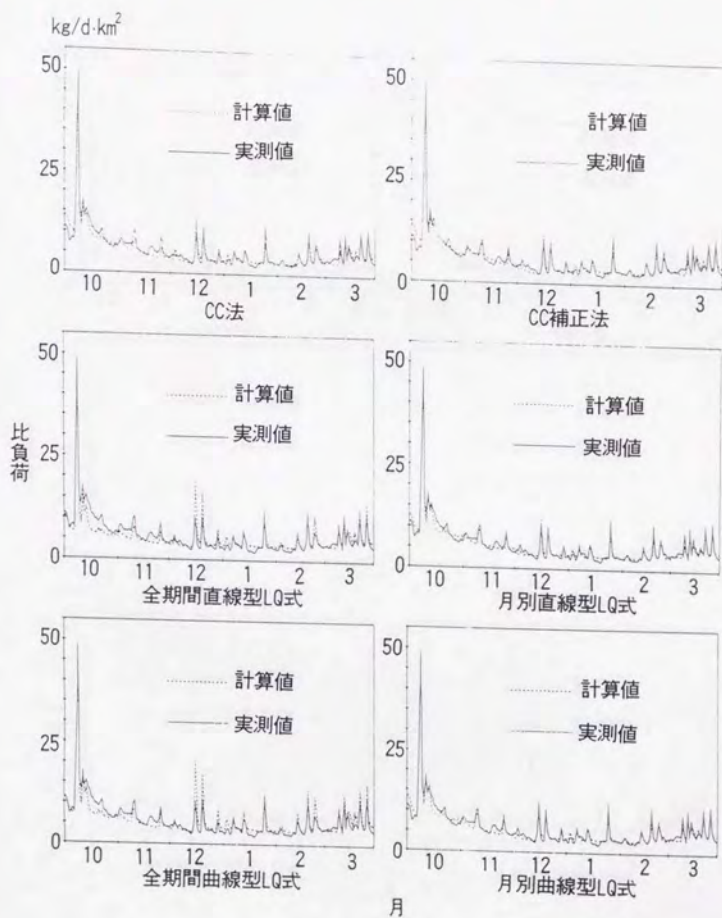


Fig. IV-2-7 実測比負荷と計算比負荷の比較 (2+2段モデル)



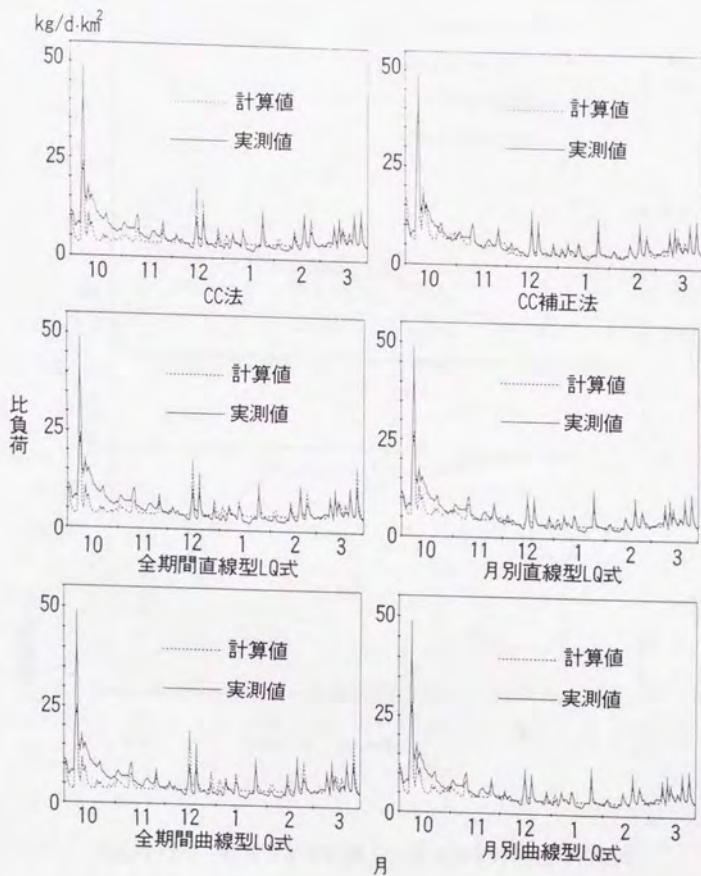


Fig. IV-2-8 実測比負荷と計算比負荷の比較 (1+1段モデル)

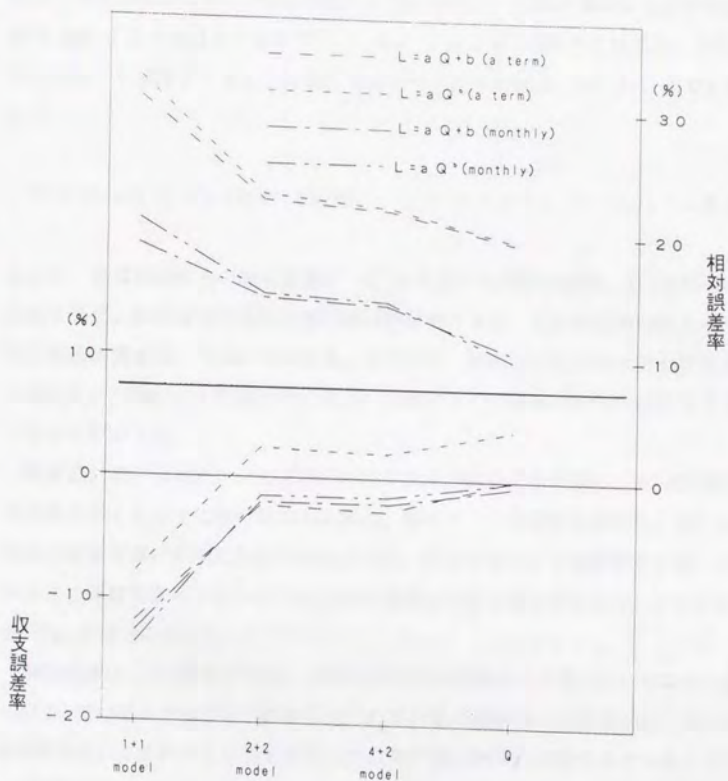


Fig. IV-2-9 各モデルで計算した收支誤差率と相對誤差率

c) 流出負荷量解析結果 (CC法)

濃度係数は、現地調査の結果から次のように求めた。

低地タンクは水田地下水の水質調査の結果 (集水域末端での水田地下水濃度は、ほぼ  $1\text{mg}/\ell$  以下であった)、とタンク上段は、非灌漑期であるため、降水による流出を考慮に入れて係数を求めることとした。

台地タンクの濃度係数は、林地と畑地を考慮して以下のように行った。NO<sub>3</sub>-N濃度は、林地が優勢な地点の湧水濃度が0.2mg/ℓから、畑地が優勢な地点の湧水濃度18.5mg/ℓまでのばらつきがあった。仮にこの二つの濃度がそれぞれ、林地と畑地を代表した濃度とすると、単純に面積重み付き平均値は、(IV-2-1)式で与えられる。

$$C = (C_r \times 0.51 + C_a \times 0.31) \div 0.82 \quad \dots\dots\dots (IV-2-1)$$

ここで、Cは台地からの流出水濃度、C<sub>r</sub>は林地からの湧水濃度、C<sub>a</sub>は畑地からの湧水濃度、数字はそれぞれ土地利用面積割合とする。この結果台地からの平均的な流出水濃度は、7.1mg/ℓとなる。この値は、林地と畑地の混在する湧水濃度0.8mg/ℓ～7.9mg/ℓとの範囲内に入り、台地タンクの濃度係数を同定する上での一つの目安とした。

同定は、まず台地タンクの冬期にかけて流量が減少する時期に、χ<sup>2</sup>誤差評価基準を最小にするように試行錯誤的に求め、低地タンクの係数を求めた。その後10月の流量の多い時期に対応できるように、再び台地タンクの係数を求め、低地タンクの係数を求めるということを試行錯誤的に繰り返し決定した。求めた係数を Fig. IV-2-2に示した。

解析結果は、4+2段モデルは、11月の計算値が実測値より低いほかはよく一致している。2+2段モデルでは10月から11月の負荷量の遞減時に計算値が低くなったが、1+1段モデルはそれ以上に値が低かった。その他の時期の差は少なかった。グラフ上では4+2段モデルの結果がよく一致しているように思われる。

収支誤差率でみると、1+1段モデルは、-14.6%、他の2モデルは-3.3%と同じであるが、LQ式法よりも精度は悪い。相対誤差率でみると、4+2段モデルが2+2段モデルより約1%、1+1段モデルより約15%精度が良いが、わずかに月別LQ式法の値より悪くなる。

前節同様に、この誤差が濃度係数を定数化したためで、実際は月別に係数が変動すると仮定する。月別にCC法の計算結果をχ<sup>2</sup>誤差評価基準が最小になるような補正係数を求めて計算しなおしてみた。求めた補正係数を Table IV-2-2に示した。4+2段モデルと2+2段モデルは森林集水域と異なりほぼ1前後の係数をとった

め、グラフ上ではCC法との相違はほとんど認められなかった。収支誤差率は、0%台となり精度が向上したが、流量の誤差よりも良くなったため、誤差と誤差とが打ち消しあったためとも思われる。相対誤差率には、ほとんど変化が見られなかった。1+1段モデルは、グラフ上では多少良くなったが、他2モデルよりもズレがめだつ。収支誤差率は約10%、相対誤差率は約13%精度が上がった。しかし、流量の誤差率よりよい値となったことから、1+1段モデルの補正した結果は季節変動によるものか、大本の誤差が大きいいため補正が効いたようにみえるのかわからない。

以上のことから、今回の補正はあまり意味が無かったといえる。これは、前節の森林集水域に比較し、1+1段モデルを除けばCC法の誤差が大きくなかったことと、本モデルの大きな部分を占める台地タンクからの流出に季節変動が少ないことが関係しているものと思われる。特に後者については、同集水域で畑地湧水の連続観測を行っている黒田ら<sup>30)</sup>の報告とも一致する。

モデルの濃度係数を $\chi^2$ 誤差評価基準を最小にするように決定したため、結果として低地タンクの濃度係数が、予想以上に高い値となってしまった。特に、低地下段タンクでは、台地タンクの高い濃度係数と変わらなくなった。流出負荷量のみに着目する場合は特に問題も生じないが、低地タンク下段の濃度係数に対応する実測した集水域末端の地下水濃度 $1\text{mg}/\ell$ <sup>2)</sup>とかけ離れた値である。そこで、この高い濃度係数を実測値 $1\text{mg}/\ell$ と変えて計算しなおしてみた。なお、上段タンクの濃度係数の値は変化させなかった。その結果は、収支誤差率-33.3%となり10倍近く、相対誤差率では30.7%と2倍程度に誤差が増えた。これは、もとの高い濃度係数で推定した流出負荷量が、低地タンクからの流出負荷量の依存度を大きくしていたためである。言い換えれば、台地の濃度係数が低かった可能性がある。そこで、 $1\text{mg}/\ell$ に変えた低地タンクの濃度係数を利用して、台地タンクの濃度係数を再び同定し直してみた。その結果、Fig. IV-2-2の2+2段モデルの濃度係数が以下ようになった。台地上段の濃度係数が8.4→9.2と4.4→6.2に、下段の濃度係数が5.2→6.8(単位 $\text{mg}/\ell$ )となった。誤差率では、収支誤差率が-17.2%と5倍近く、相対誤差率では31.5%と2倍程度に誤差が増えた。台地タンクの濃度を変化させない時と比較すると、収支誤差率では、2倍程度誤差が小さくなったが、相対誤差率ではほとんど変化がなかった。今後、流出機構を解析する上では、この台地と低

地の分離が重要になると思われる。

### (3) 農業集水域（非灌漑期）タンクモデル解析のまとめと今後の課題

非灌漑期の農業集水域における本モデルの解析結果からわかったことは、

1) 4+2段モデルと2+2段モデルとの差は、わずかであり、2+2段モデルでの推定でも十分な精度をあげられることがわかった。しかし1+1段モデルは精度上問題があった。

2) LQ式法では、収支誤差率 $\pm 3\%$ 以内で十分に推定できた。相対誤差率では、月別LQ式法で約15%程度で推定できた。全期間LQ式法はそれに比較して7~8%程度推定精度が悪かった。

3) 濃度係数法では、収支誤差率-3.3%、相対誤差率約15%程度の推定ができた。

本モデルにおいて、CC法の低地タンクの濃度係数が高い値となってしまった。これは流出モデルとして算出した流出負荷量が合うという意味では十分であるが、土地利用別モデルを将来作成する上では問題になる。そのために、低地タンクの濃度係数が高い理由を、もう一度検討し直す必要がある。今回のモデルからいえることは、低地地下への台地からの浸透水の存在が相当量あるということである。その浸透水が流出する場所が台地に近い低地に集中しているのか、全体的に流出しているのかは不明である。その意味では本モデルでも機構解析に一步踏み込んでいるといえる。

### 3. 農業集水域（灌漑期）のモデル

#### (1) モデル構成とその特徴

非灌漑期モデルでは、台地からの流出水が低地に流入（灌漑）されずに直接用排水路から集水域外へ流出するために、台地タンクと低地タンクを並列に置く並列型モデルを採用した。しかし、灌漑期では水の流出経路が異なるために、そのままのモデルでは、本集水域の特徴を表すことができない。そこで、灌漑期を対象にしたモデルを新たに構築し流出負荷量を推定することにした。

灌漑期は、本集水域では台地からの流出水は谷津田内の用排兼水路に設けられた簡単な木製の堰により谷津田に灌漑され、その後集水域外へ流出する（Fig. IV-3-1）。そこで、Fig. IV-3-2に示したように、5月～8月までの灌漑期の流出を台地と低地の直列型モデルによって推定することにした。つまり、台地からの流出水を低地タンクに流入させ、その後低地から集水域外へ流出させるモデルである。4月と9月の非灌漑期間は前節の並列型モデルで解析した。また、前節でタンクの段数を変化させての解析を試みたが、特に大きな相違が認められなかったので、精度的にも問題が無く、より単純である台地2段+低地2段の直列型タンクモデルを灌漑期では採用した。また、台地タンクは、非灌漑期の並列型タンクの台地タンクをそのまま利用することとした。それは、台地からの $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出水濃度の季節変動が小さいために、灌漑期への適用が可能であると考えたためである。

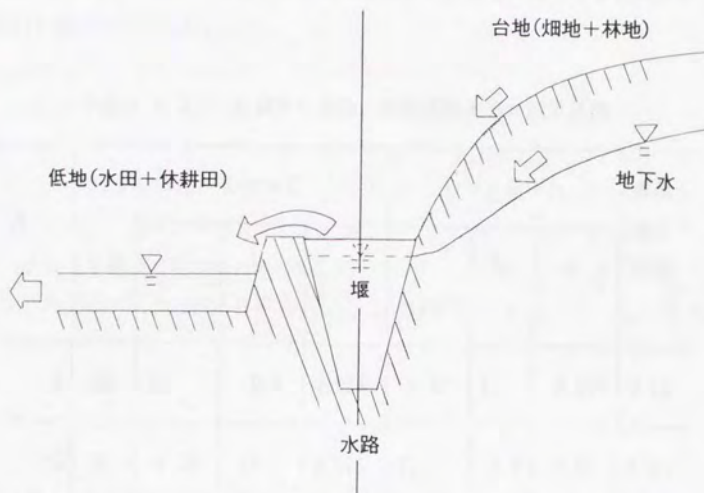


Fig. IV-3-1 灌漑期の流出状況概念図



Fig. IV-3-2 灌漑期モデルの概念図

LQ式は、月別LQ式と、灌漑期間(5月～8月までの123日間)と非灌漑期間(4月と9月の60日間)に分けて作成したLQ式を用いた。LQ式の係数と相関係数rをTable IV-3-1に示した。

Table IV-3-1 LQ式の係数、相関係数と濃度補正係数

月	デー タ数	L = a Q <sup>b</sup>			L = a Q + b			濃度 補正 係数
		a	b × 10 <sup>-2</sup>	r	a × 10 <sup>-4</sup>	b	r	
4	30	11	-0.8	0.023	0.58	11	0.049	0.62
5	31	0.26	46	0.57	11	6.7	0.57	1.6
6	30	0.22	44	0.70	8.9	4.7	0.79	0.96
7	31	9.3	-3.8	0.039	-0.37	7.2	0.012	1.2
8	31	0.66	36	0.88	9.3	8.9	0.92	0.74
9	30	11	1.5	0.028	3.0	12	0.15	0.45
非灌漑期	60	8.1	4.6	0.092	2.4	11	0.13	
灌漑期	123	0.21	48	0.63	10	6.2	0.71	

(単位: L=kg/d・km<sup>2</sup>, Q=m<sup>3</sup>/d・km<sup>2</sup>)

灌漑期間のCC法の計算方法は、台地からの流出水を低地タンクに流入させた



後、集水域外へ流出する構造をとるため、濃度係数を低地タンクのみを設定した。つまり、台地からの影響は流量のみとなり、流出負荷量の影響は受けないことになる。実際は、先の非灌漑期モデルから、台地の $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出負荷量の影響が大きいことがわかっている。しかし、灌漑期の谷津田地区の特徴として、集水域末端では、流出水はいったん低地を経由して集水域外へ流出するために低地の影響も大きいことが考えられる。また、灌漑期の水田は、施肥などの人為的影響、植生による窒素の吸収、脱窒による窒素除去機能の働きがあるために複雑な影響がある。そこで、濃度係数を低地タンクのみを設定することで、濃度係数にこれらの要因を含ませることが可能となり、簡便なモデルとすることができる。

得られた係数を Fig. IV-3-3 に示した。なお、同定期間は4月から9月までの6か月間で行った。

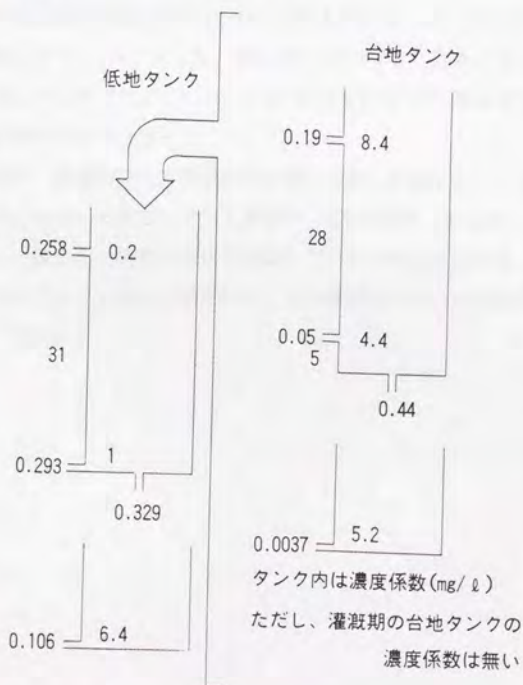


Fig. IV-3-3 モデルの構成と濃度係数法の係数

## (2) 解析結果

### a) 流出水量

本モデルの流出解析結果を Fig. IV-3-4 に示した。グラフ上では非灌漑期の4月と9月に計算値が実測値より大きくなり、逆に5～8月の灌漑期間は小さめの解析結果となった。得られた両誤差率は、4月から9月までと、5月から8月までの灌漑期間と、4月と9月の非灌漑期間の3つの期間に分けて結果を Table IV-3-3 に示した。収支誤差率でみると、5月～8月までの灌漑期間で-10.0%となり、森林集水域や非灌漑期の計算結果と比較すると5倍程度悪い結果となった。しかし、人為的な影響の大きな灌漑期の収支誤差率が1割程度の誤差で推定することが可能であるとの見方もできる。

4月～9月までの期間では、0.5%と良好な結果であったが、これは非灌漑期間である4月と9月の誤差21.3%と打ち消し合ったためである。相対誤差率では、5月～8月までの灌漑期間で17.1%であった。20%以内で推定でき、想像以上に良好な結果であった。4月～9月までは20.7%、4月と9月の誤差が28.1%と灌漑期間の5月～8月までの推定結果より大きな値をとった。

この結果は、灌漑期間と非灌漑期間を暦上分離し計算したが、実際には4月には、代かきに備えて水田に灌漑している農家や、9月にはまだ水を落としていない農家などもあり、降水が一時的に水田で貯留していたためと思われる。灌漑期間だけをとってみると十分とはいいがたいが、この単純なモデルでは満足できる推定結果を得たと思われる。

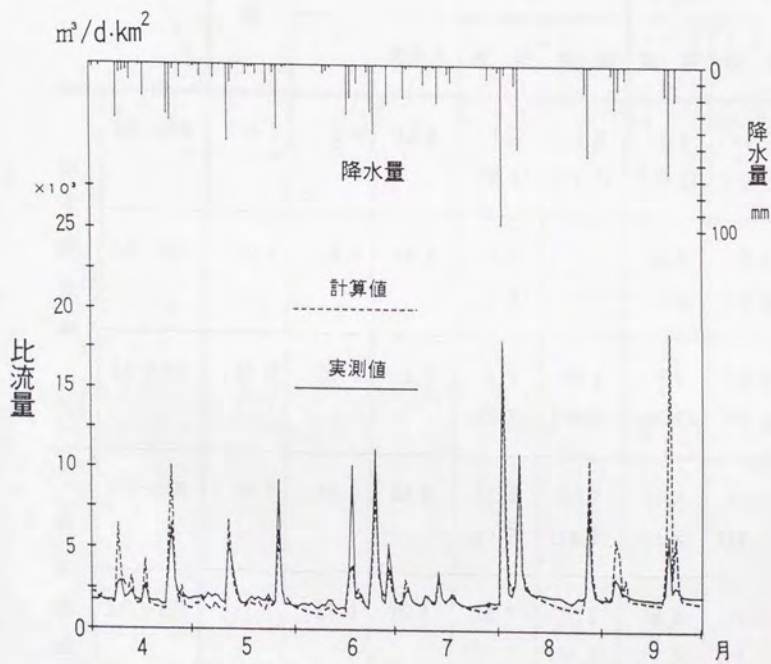


Fig. IV-3-4 実測比流量と計算比流量の比較

Table IV-3-2 収支誤差率と相対誤差率

	流 量	CC法			LQ式法			
					期間別で作成 した		月 別	
			補正法	直 線	曲 線	直 線	曲 線	
収 支 誤 差 率  (%)	4月～9月	-0.5	2.4	-18.8	-1.8 (-0.5)	-4.9 (-1.7)	-1.4 (-0.3)	-4.7 (-2.2)
	5月～8月	-10.0	-9.8	-8.8	-3.8 (-0.9)	-7.7 (-2.4)	-2.6 (-0.0)	-7.5 (-3.3)
	4月と9月	21.3	21.7	-34.7	1.2 (0.2)	-0.4 (-0.7)	0.6 (-0.3)	-0.4 (-0.4)
相 対 誤 差 率  (%)	4月～9月	20.7	33.0	33.0	21.4 (20.7)	21.7 (19.9)	15.8 (14.8)	16.2 (14.1)
	5月～8月	17.1	28.9	26.1	26.7 (25.7)	27.2 (24.6)	18.8 (17.5)	19.6 (16.5)
	4月と9月	28.1	41.3	47.1	10.6 (10.4)	10.4 (10.1)	9.6 (9.2)	9.3 (9.2)

※LQ式法で ( ) 内は、実測流量Qを各LQ式に代入し計算した値の誤差率

#### b) 流出負荷量解析結果 (LQ式法)

LQ式法で解析した結果を Fig. IV-3-5に示した。全期間としたLQ式は、4月と9月を非灌漑期LQ式で計算し、5月～8月までを灌漑期間LQ式で計算したという意味でここでは用いている。グラフ上では全期間LQ式で計算した直線型と曲線型の両結果は、6月と7月に計算値がやや高めになった。月別LQ式では、月毎の平均を通るような動きを示し、ピークの反応が鈍かった。

Table IV-3-2に収支誤差率と相対誤差率の結果を示した。LQ式法の欄にある括弧内の数字はLQ式に実測流量Qを代入した結果の誤差率で、モデルの誤差率の目安となる。

5月～8月までの期間は、収支誤差率では、全期間の直線型LQ式で-3.8%、曲線型LQ式はそれより-3.9%精度が悪かった。月別では直線型LQ式で-2.6%、曲線型LQ式では-4.9%精度が落ちた。全期間と月別LQ式を比較すると月別LQ式で推定した結果が若干よいが、その差はわずかである。

相対誤差率では、全期間直線型LQ式で26.7%、曲線型が0.5%ほど悪かった。月別では直線型が18.8%、曲線型が0.8%悪かったが収支誤差率ほどの差はなかった。全期間と月別では月別で推定した結果の方が約8%ほど精度がよかった。

非灌漑期と灌漑期のLQ式法では全期間で直線型が-1.8%、曲線型で-4.9%であった。灌漑期間だけでは、直線型-3.8%と曲線型-7.7%であった。括弧内の数字を比較しても、曲線型が直線型よりも悪くなっている。月別では、全期間が直線型が-1.4%と0.4%、曲線型では逆に-4.7%と0.2%誤差が減った。収支誤差率だけでみると月別にした利点がみられない。ただし灌漑期間だけを考慮すると直線型LQ式では誤差率が減少する。曲線型LQ式は、直線型に比較してその差はわずかであり、月別にする利点は少ない。実測流量を代入した結果でも、直線型は多少精度が上がるが、曲線型の精度はかえって悪くなった。

相対誤差率では、非灌漑期と灌漑期でのLQ式法での誤差は、ほぼ同じである。月別では、全期間では5%以上、灌漑期間で約8%近く精度が上がっている。それぞれの値と括弧内の値を比較するとその差は小さく、実測流量を代入してもこれだけの誤差はやむを得ないならば、本モデルの精度も実用上十分であると思われる。

以上の結果より、相対誤差率からは月別のLQ式を用いた方がよく、収支誤差率からは直線型のLQ式を用いた方が精度がよかった。結果として月別直線型L

Q式での推定が最も精度が高いことになった。

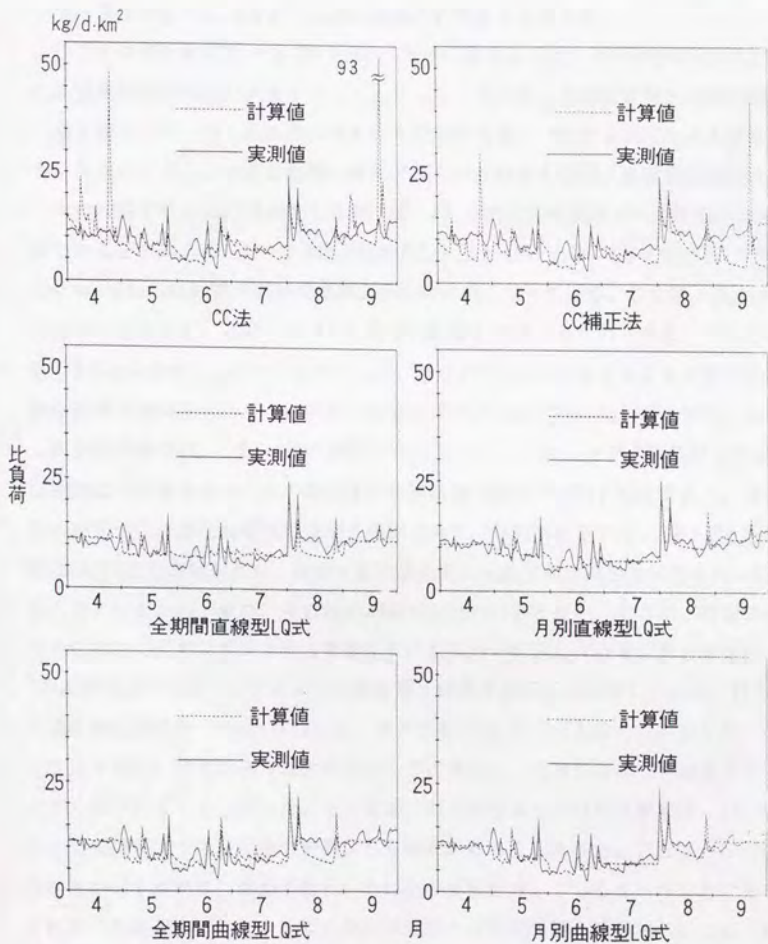


Fig. IV-3-5 実測比負荷と計算比負荷の比較

### c) 流出負荷量解析結果 (CC法)

灌漑期の濃度係数は、低地タンクの3つの濃度係数を求めるだけですむので比較的簡単に決定できる。同定は、非灌漑期2+2段モデルの濃度係数をもとに $\chi^2$ 誤差評価基準値が最小になるように試行錯誤的に係数を決定した。

CC法の解析結果を Fig. IV-3-5のグラフ上段に示した。グラフ上では4月と9月の非灌漑期間の推定が大きくなってしまった。これは、非灌漑期間と灌漑期間の分類を暦上で行ったため実際の農家の水管理を考慮にいれなかったためと思われる。反対に、もしこの非灌漑期の推定が正しかったとすれば、水稻栽培期間に入らない時期でも水田に湛水をしておけば、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出負荷量のピーク流出が抑えられているともいえる。また、4月下旬から5月上旬、6月上旬、7月下旬と8月下旬はの4つの時期の計算値の値が実測値より大幅に低くなっている。これは、代かき・田植えに伴う元肥、追肥、中干しと落水の影響がでているためである。つまり前者の2つは人為的な施肥ともなうもで、後者の2つは水田湛水による水質浄化機能の発現が抑制されたために実測の流出負荷量が大きくなったものと思われる。

収支誤差率では、5月～8月の期間では、-9.8%であった。モデルの精度的にはLQ式法よりも落ちるが、この値はほぼ流出水量の誤差率と同じ程度である。その他の期間もほぼ流出水量の誤差率と同様である。相対誤差率では、5月～8月の期間は28.9%近くの値をとり、流出水量の誤差率と比較すると満足な推定を行っているとはいえない。また、その他の期間でも30%～40%と悪い。そこで、前節のようにCC法の計算結果が月別の影響を受けたものと仮定し、計算結果を月毎に $\chi^2$ 誤差評価基準を最小にするような濃度補正係数を乗じて再計算してみた。得られた濃度補正係数を Table IV-3-1に、グラフを Fig. IV-3-5上段の右に示した。グラフ上では4月と9月にあった大きなピークは減少し、計算値自体も実測値よりも大きく減少してしてしまった。その結果、収支誤差率と相対誤差率では、5月～8月の期間以外すべてCC法の結果よりも精度が落ちてしまった。これは、CC法の結果のズレが単に、季節変動という以上の要因を持っているということである。それは、先ほども述べたように人為的な施肥と水管理問題と低湿地のもつ $\text{NO}_3\text{-N}$ 水質浄化機能などの問題が影響していると思われる。今後、これらの影響をCC法に組み込み、精度をあげられるようにしなければ精度が向上しないものと思われる。

d) 水田水質浄化機能を組み込んだモデルについて

灌漑期のCC法のモデルでは、台地からの流出負荷量の影響を無視し、流出水量だけに限定し、その濃度については計算に影響しない形で低地からの流出負荷量の推定を行った。しかし、実際は台地からの流出負荷量は大きく、その流出負荷量2.84t/yrは、全集水域の流出負荷量2.38t/yrを上回るほどの影響を持つ。この逆転現象は、低地（特に水田）の持つ水質浄化機能によるところが大きい。そこで、この機能をモデルに組み込むことによって流出負荷量を推定する方法を検討することにする。計算方法は、田淵<sup>13, 31)</sup>の提案する窒素除去式（近似式） $Y$  ( $g/m^2 \cdot day$ ) =  $0.01X$  ( $mg/l$ ) を用いて計算を行うこととした。この式は、水田に流入する $NO_3-N$ 濃度がわかれば $NO_3-N$ 除去量が計算されるという式である。この式を用いるためには、水田に流入する濃度が必要となる。流入水濃度は非灌漑期モデルの台地タンクからの流出負荷量を流出水量で除して算出することとした。しかし、非灌漑期モデルの問題点として台地と低地の流出負荷量が明瞭に分離されていないという点があった。それで、ここでは一つの応用例ということで、非灌漑期の最後に検討した低地下段の濃度係数 $1mg/l$ とし台地タンクの濃度係数を再計算したモデルを用いることにする。それは、多少誤差的には問題があるが、集水域からの流出負荷量のほとんどが台地からの流出であり、その台地からの効果を最もよく現象を説明していると思われるためである。Fig. IV-3-6 に計算の概念図を示し、式IV-3-1.2で計算方法を示した。

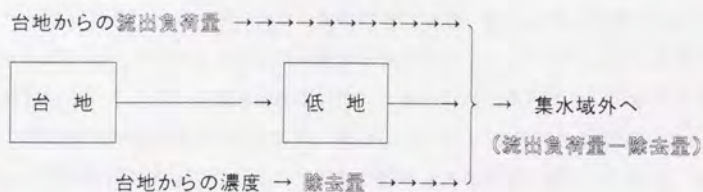


Fig. IV-3-6 水田水質浄化機能を組み込んだモデルの概要



流出負荷量 = 台地からの流出負荷量 - 除去量 ..... (N-3-1)

除去量 (kg/day) =  $a \cdot X \cdot A \cdot E \cdot 10^3$  ..... (N-3-2)

ここで、 $a$  : 浄化係数 (m/day)、 $X$  : 台地からの $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度 (mg/l)

$A$  : 低地面積 ( $\text{m}^2$ )、 $E$  : 有効除去面積率

ここで、 $E$  (有効除去面積率) は、実際の低地の内、灌漑が行われ窒素除去機能が発揮されると思われる低地面積に対する面積割合である。たとえば、 $E=1.00$ の時 (低地をすべて水田とみなした) は、低地に占める水田面積割合が100%であることを示す。また、実際は約30%が休耕田で灌漑が行われないので、それを考慮した場合が $E=0.70$ である。えられた結果をTable N-3-3に示した。その結果、5月~8月までの灌漑期間では、収支誤差率は前者で-82.9%、後者で-46.6%と大きな値をとった。この値は、マイナスであるのでこの窒素除去式では水田の浄化能力を過大に見積もったこととなる。この窒素除去式は、 $A$  (低地面積) が定数であるので、浄化係数と有効除去面積率との関数とみることができる。そこで、浄化係数0.01の時に、 $\chi^2$ 誤差評価基準値を最小になるような有効除去面積率を求めた値をTable N-3-4の浄化係数0.01の欄に示した。全期間では有効除去面積率26%と小さな割合となった。月別にみると5月3%、6月31%、7月25%、8月49%であった。これらの有効除去面積率は湛水期間であるにもかかわらず低地面積の半分未満と小さい数値である。これは、5月は元肥や追肥の影響が強いので浄化の影響が相殺されたためと思われる。他の月は、田面均平の不均一性による田面流の水口から水尻へのショートカットが生じ田面全体を均等に流下していないことに起因すると思われる。そこで、田面流が均等に流れた場合の浄化係数について考察する。ここでは有効除去面積率1.00と0.70の場合について $\chi^2$ 誤差評価基準値を最小とするような浄化係数を求めた。これは前者が低地全体を均等に流下した場合、後者が休耕田を除く水田全体を均等に流下した場合に相当する。その結果、両者とも浄化係数0.01より一桁以上低い値となった。最も近い値としては、有効除去面積率0.07の8月の値が最も近いがそれでもやはり一桁低い値となった。これは、実際の低地における窒素除去機能が有効に活用されていないことを示唆している。少

なくとも浄化係数0.01を発揮させられるような水管理を行うことで相当の浄化能力を低地は持つものと推察される。これらの結果をモデルからみると収支誤差率では10%以下（8月を除く）で推定できているので結果としてはそう悪くはない。しかし相対誤差率の結果が7月が19.5%とよいが8月が75.6%と悪く、全体をみても40%近辺の値をとる。この理由として、降水に伴う水田滞留時間の変動、植生による窒素除去能力の季節変動などが窒素除去式の係数に無関係であること、また、台地タンクからの流出負荷量が実際よりまだ低く見積もられていることなどが考えられる。

窒素除去式が単位水田、ライシメーターや室内実験から求められた値であるので、流出負荷量の日変動を求める本モデルに適用するには更なる研究が必要である。そして、本モデルを台地からの流出機構をより正確に表せる土地利用別モデルに改良し、水田の浄化機能を組み込むモデルの発展をはかっていきたい。

Table IV-3-3 窒素除去式を用いた試算（1）

浄化係数 0.01 で一定	有効除去面積率1.00		有効除去面積率0.70	
	収 支 誤 差 率	相 対 誤 差 率	収 支 誤 差 率	相 対 誤 差 率
灌漑期間	-82.9	126.1	-46.6	87.8
5月	-117.6	137.3	-82.8	102.8
6月	-98.0	137.3	-52.8	87.6
7月	-114.9	115.6	-70.0	69.4
8月	-28.3	114.4	-1.0	91.3

Table IV-3-4 窒素除去式を用いた試算(2)

	浄化係 数0.01 面積率 %	面積割 合1.00 $\times 10^{-2}$	面積割 合0.70 $\times 10^{-2}$	収 支 誤 差 率	相 対 誤 差 率
		浄化係数			
全期間	26	0.25	0.37	6.8	43.8
5月	3	0.03	0.04	-5.3	44.7
6月	31	0.31	0.44	6.5	40.8
7月	25	0.25	0.36	-2.6	19.5
8月	49	0.49	0.70	17.8	76.0

## (3) 農業集水域(灌漑期) タンクモデル解析のまとめと今後の課題

以上の結果から

1) LQ式法では、月別直線型LQ式での推定が最もよかった。5月～8月の灌漑期間でも収支誤差率-2.6%、相対誤差率で18.8%で推定できた。

2) 他のLQ式法も、実測流量で推定する程度の誤差で推定は可能であり、その意味では十分実用に耐える。

3) 濃度係数法は誤差が大きく灌漑期間の使用は難しい。これは、人為的な施肥や中干しや落水などの管理体系を定数で組み込むことが難しいからである。

今後の課題としては、CC法の改良が必要であることが明らかになった。これは、台地と低地を直列型タンクモデルにし、台地の流出を100%低地タンクに流入させたことも原因の一つであろう。その対策として、まずFig. IV-3-2で示した灌

漑期モデルを中干しや落水などの水管理に対処できるように、台地から直接集水域外へ流出するバイパスとバイパス率を用いるという方法も考えられる。これは非漑期と漑期との過渡期にも有効であろう。また、大ざっぱな農作業歴を参考にして、元肥や追肥を関数にモデルに組み込みという方法も考えられる。次に、最も大事な改良点として、土地利用別モデルの作成が必要である。これは、台地を畑地と林地に分離するほか、低地も台地からの伏流水が卓越する水田とそれ以外の水田などと分離する必要性が感じられる。前者については、先に検討した森林集水域のモデルを参考に林地を分離することが可能と考えられる。後者については、さらなる調査が必要である。また、今後、本モデルが面源だけでなく点源を取り入れることも必要であろう。

## 第V章 流出負荷予測モデルの応用例（過去30年間の年次変動解析の事例）

前章までで、流出負荷予測モデルの解析が終了した。本章では、作成した森林集水域と農業集水域のモデルを用いてモデルの応用例の一つを示すこととする。応用例として今回は、作成した流出負荷予測モデルで過去の降水量を用いて流出負荷量の推定を行い、長期間の流出負荷量の降水条件による変化を調べた。それは湖沼水質保全計画などでは降水量の変動に応じた負荷量の予測が必要になっているからである。

解析に用いた流出負荷予測モデルは、森林集水域はそのままであるが、農業集水域のモデルは、通年で解析できるように非灌漑期と灌漑期モデルを組み合わせ、5月から8月までを灌漑期モデルで他の月は非灌漑期モデルを用いて計算した。

### 1. モデルに用いる降水量、蒸発散量と流出負荷量

長期間の降水量を茨城県気象月報から特定集水域の代表として土浦の日降水量データをピックアップした(Table V-1-1)。つまり、本モデルを利用して、解析してきた集水域と同様の集水域が存在すると仮定して、そこに土浦の日降水量が合った場合の流出負荷量の変動を検討することになる。ここでは、1964年から1993年までの30年間のNO<sub>3</sub>-N日流出負荷量のモデル計算結果の年次変動について考察する。まず、降水量は土浦の降水量を用いる。なお、モデル計算の初期値の変動を考慮して1959年から1964年までの5年間の日降水量を用いて計算した後30年の計算を開始した。

Table V-1-1 土浦の35年間の降水量(1959年～1993年)

年	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
1月	55	19	33	40	0	101	27	25	32	16	56	50
2月	132	10	27	8	42	37	12	111	44	64	85	36
3月	109	75	97	70	64	69	27	116	94	60	148	49
4月	128	115	123	82	44	66	69	117	116	114	77	42
5月	150	131	45	231	125	54	315	132	68	189	104	130
6月	156	119	364	220	182	203	152	306	133	134	191	176
7月	93	59	80	225	170	86	95	96	79	139	140	84
8月	147	215	83	106	219	172	82	47	29	275	88	49
9月	163	103	37	13	110	112	330	286	216	70	110	85
10月	149	183	196	89	293	104	71	59	157	126	152	86
11月	86	80	53	119	83	52	68	26	66	26	83	164
12月	141	63	38	50	23	60	69	9	33	160	2	34
合計	1,509	1,172	1,176	1,253	1,355	1,116	1,317	1,330	1,067	1,373	1,236	985
	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82
1月	47	116	89	31	50	1	15	21	48	67	2	32
2月	39	114	40	68	66	90	13	25	74	16	31	25
3月	60	39	9	76	84	60	112	90	58	130	107	70
4月	158	156	152	114	116	92	85	112	88	99	124	95
5月	80	121	104	86	99	245	105	115	184	169	111	72
6月	92	119	118	191	141	162	124	85	86	115	97	147
7月	124	158	15	215	175	125	119	18	101	181	102	127
8月	223	88	77	121	31	160	242	14	60	95	84	128
9月	204	150	163	156	155	226	194	139	100	116	114	313
10月	53	40	85	91	157	184	43	129	210	136	269	146
11月	0	45	0	25	159	59	63	45	99	97	48	123
12月	0	126	0	47	61	31	17	31	35	39	4	19
合計	1,080	1,272	852	1,221	1,294	1,435	1,132	824	1,143	1,260	1,093	1,297
	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	
1月	20	38	5	12	40	20	63	28	51	49	107	
2月	64	61	144	29	47	7	127	98	62	24	64	
3月	122	39	103	129	67	138	121	85	112	141	56	
4月	136	47	142	73	40	95	140	124	86	166	46	
5月	79	40	80	141	69	135	122	111	66	113	84	
6月	164	164	314	107	78	190	159	106	109	150	125	
7月	134	66	63	88	103	168	86	54	111	68	233	
8月	91	4	135	240	129	240	238	90	161	67	208	
9月	196	34	71	116	205	274	146	201	377	80	81	
10月	90	66	70	80	120	64	153	155	405	255	118	
11月	45	38	51	35	60	20	56	191	95	130	101	
12月	5	49	22	75	57	1	26	26	33	58	65	
合計	1,146	646	1,200	1,125	1,015	1,352	1,437	1,269	1,668	1,301	1,288	

Table V-1-2 月別平年降水

月	平年	農業	森林
1	39	40	20
2	55	47	7
3	85	67	138
4	102	140	95
5	120	122	135
6	157	159	190
7	114	86	168
8	125	238	240
9	159	146	205
10	137	80	120
11	71	35	60
12	43	75	57
計	1,207	1,235	1,435

単位：mm

次に蒸発散量であるが、蒸発散量のデータは以下のように仮定し求めた。

- ① 蒸発散量は灌漑期と非灌漑期に分けて区別することができる。
- ② 農業集水域の年間水収支から推定した蒸発散量を用いることができる。
- ③ ET比率が両集水域とも同様に用いることができる。

以上の3つの大きな仮定をもとにして計算を行った。

まず、農業集水域の平年降水量1,372mmと流出高631mmの差741mmが蒸発散量であると仮定した。次に各月のET比率の値を非灌漑期と灌漑期で合計する。ET比率が月ごとに変動を持つ場合は平均値を用いた。そして、農業集水域は低地（水田）と台地（水田以外）の土地利用別割合を乗じる。すると、農業集水域は、非灌漑期5.03と灌漑期3.23であり、森林集水域は、非灌漑期4.9と灌漑期3.0である。それぞれの割合で蒸発散量を計算すると、農業集水域は非灌漑期452mmと灌漑期289mm、森林集水域は非灌漑期459mmと灌漑期282mmである。また、35年間の降水量

データから非灌漑期の平均無降水日数は177日、灌漑期は80日である。それゆえ日当り換算では、農業集水域の蒸発散量は、非灌漑期で2.55mm/day、灌漑期で3.61mm/dayとなり、森林集水域は非灌漑期2.59mm/dayと灌漑期3.53mm/dayとなる。これらの値は、蒸発散量の平均的な値であるために、年によって蒸発散量の見積もりが多い年や少ない年が存在するのも事実であるが今回はこの値を用いて計算することとする。

最後に流出負荷量のデータであるが、これは実測値がないために比較検討することができない。森林集水域と農業集水域の調査年が数年にわたるので、35年間の降水量の平均値と調査年の降水量を月別に整理しTable V-1-2に示した。そこで、実測値を現地降水量と対応する年・月の降水量の比で換算した。その後、特定した集水域（この場合土浦）の降水量の平均値と調査年に対応する年・月の降水量の比で換算した。そして、30年間の流出負荷量の年次変動を降水量比例換算値として、平均値と各年の降水量の比を乗じて求めることとした。

その結果、森林集水域は、実測値1,044kg/yrであったので、8月を除く現地降水量1,394mmと対応する年の降水量1,195mmの比を乗じ898kg/yrをえた。平年換算値は集水域の平均値1,207mm/yrと1,435mm/yrとの比を乗じ755kg/yrをえた。農業集水域は、実測値1,881kg/yrであり、現地降水量1,394mmと対応する降水量1,235mmの比を乗じ1,666kg/yrで、平年換算値は1,627kg/yrとなる。



## 2. 長期予測結果の検討

### (1) 森林集水域の予測結果

Fig. V-2-1に森林集水域で予測した各年の年総流出負荷量の変動を示した。Table V-2-1に予測した結果と降水量比例換算値を示した。

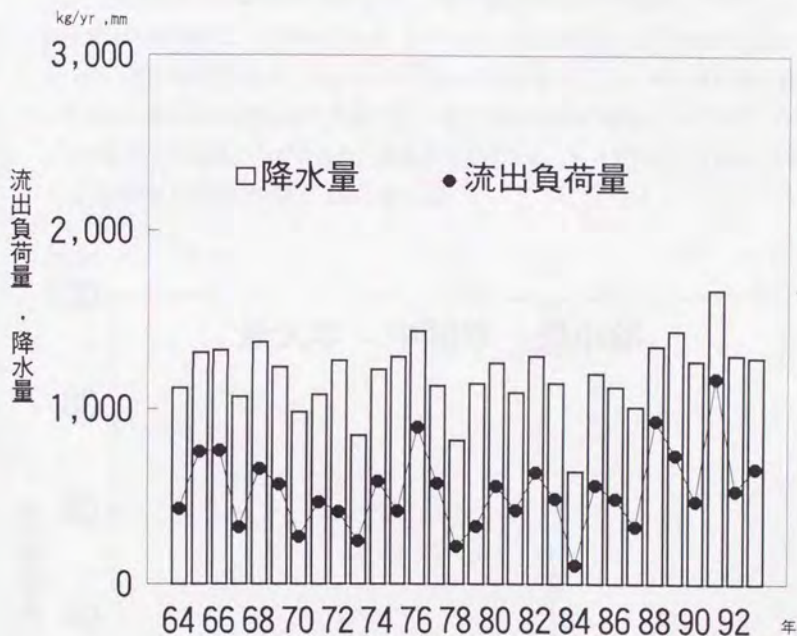


Fig. V-2-1 30年間の流出負荷量の変動 (森林集水域)

当然ながら降水量比例換算値は、降水量の大小と同じ傾向の結果になる。それに比較しモデルで予測した結果は変動が大きい。特に、降水量の最も多かった1991年に1,173kg/yrと最大値をとった。続いて1988年、1976年、1966年、1965年の順に流出負荷量が多かった。流出負荷量が最も大きかった1991年を最大年、最も小さかった1984年を最小年とする。これらの年はそれぞれ最大降水量年と最小降水量年に相当する。また、30年中15番目の年の1992年を中間年として流出負荷量

の日変動をFig. V-2-2に示した。3年とも夏を過ぎるまで大きな変動がなかったが、秋口にかけて流出負荷量が増大した。夏場、特に8月に流出負荷量が小さくなるのは、前月の大きな降水量の影響を受け流出負荷量が増大していたこととLQ式を作成したデータ数が少なかったため推定結果が小さくなったと思われる。

30年間をとおしてみると、タンクモデルで計算した平均値が535kg/yr(1.8kg/ha·yr)、最大値1,178kg/yr(4.0kg/ha·yr)、最小値107kg/yr(0.4kg/ha·yr)となり、降水量比例換算値は、平均値746kg/yr(2.5kg/ha·yr)、最大値1,043kg/yr(3.5kg/ha·yr)、最小値404kg/yr(1.4kg/ha·yr)となった(Table V-2-1)。最大値と最小値との差は、前者が1,071kg/yr(比は11倍)、後者が639kg/yr(比は2.6倍)とタンクモデルで計算した結果の方が大きい。変動係数で見ると、タンクモデルは43.1%と降水量比例換算では16.9%で約2.5倍となった。

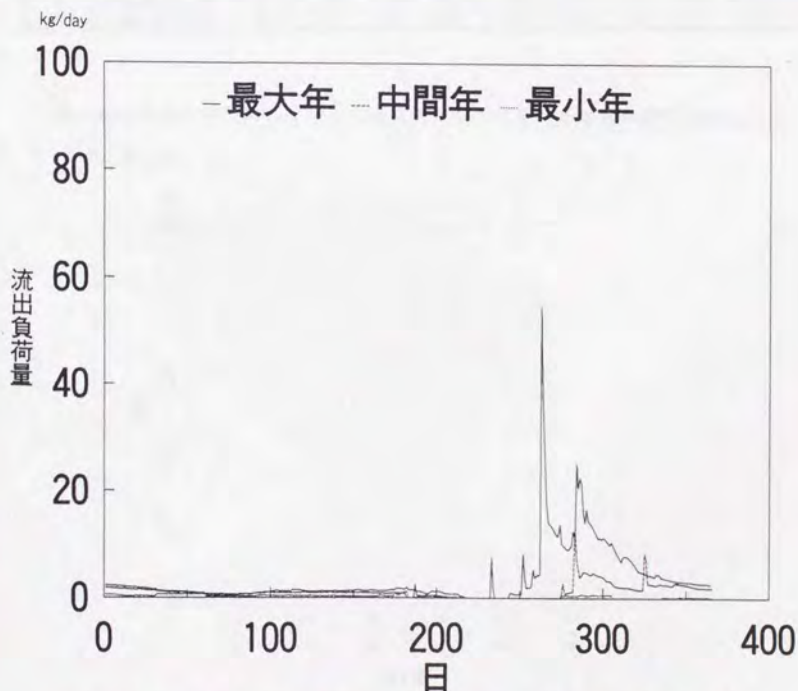


Fig. V-2-2 森林集水域の最大年、中間年、最小年の流出負荷量の日変動

Table V-2-1 30年間の降水量による流出負荷量推定結果

		1,964年~1,973年									
年		64	65	66	67	68	69	70	71	72	73
森林集水域	降水量 (mm)	1,116	1,317	1,330	1,067	1,373	1,236	985	1,080	1,272	852
森林集水域	月別直線型LQ式	428	757	763	324	658	571	271	468	414	248
森林集水域	降水量比例換算値	698	824	832	667	859	773	616	676	796	533
農業集水域	月別直線型LQ式	2,037	1,973	2,092	1,918	2,036	2,213	1,927	1,795	1,886	1,711
農業集水域	降水量比例換算値	1,506	1,777	1,795	1,440	1,853	1,668	1,329	1,458	1,717	1,150
		1,974年~1,983年									
年		74	75	76	77	78	79	80	81	82	83
森林集水域	降水量 (mm)	1,221	1,294	1,435	1,132	824	1,143	1,260	1,093	1,297	1,146
森林集水域	月別直線型LQ式	588	418	898	575	216	331	562	422	640	488
森林集水域	降水量比例換算値	764	809	898	708	515	715	788	684	811	717
農業集水域	月別直線型LQ式	1,757	2,002	2,243	2,022	1,666	1,849	2,017	2,059	2,022	1,996
農業集水域	降水量比例換算値	1,648	1,746	1,937	1,528	1,112	1,543	1,700	1,475	1,750	1,547
		1,984年~1,993年									
年		84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
森林集水域	降水量 (mm)	646	1,200	1,125	1,015	1,352	1,437	1,269	1,668	1,301	1,288
森林集水域	月別直線型LQ式	107	566	488	330	934	738	475	1,173	536	664
森林集水域	降水量比例換算値	404	751	704	635	846	899	794	1,043	814	806
農業集水域	月別直線型LQ式	1,550	1,792	1,792	1,798	2,032	2,268	2,214	2,636	2,433	2,215
農業集水域	降水量比例換算値	872	1,619	1,518	1,370	1,825	1,939	1,713	2,251	1,756	1,738

降水量の頻度分布をFig. V-2-3に森林集水域の年流出負荷量の頻度分布をFig.

V-2-4に示した。

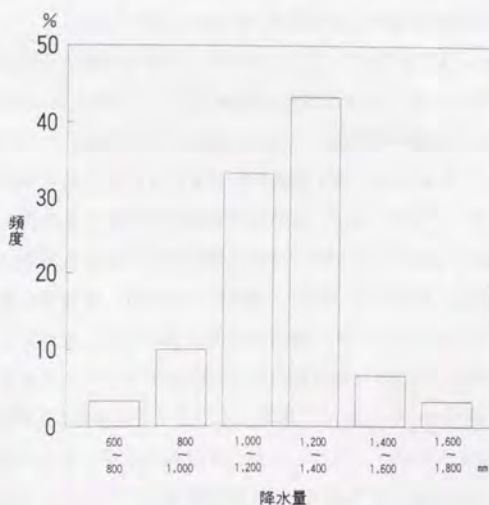


Fig. V-2-3 降水量の頻度分布

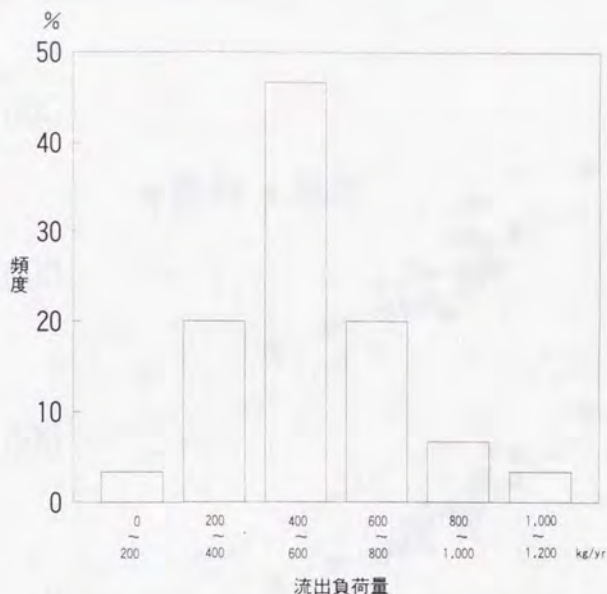


Fig. V-2-4 森林集水域流出負荷量の頻度分布

降水量の最も頻度が大きかったのは1,200~1,400mmであるが、これは平均値である1,192mmより大きい。そのため頻度分布は左に片寄った形となった。年流出負荷量では平均値の範囲の頻度が最も大きく、ほぼ両側に均等に広がっている。Fig. V-2-5に降水量と流出負荷量を回帰直線で表した。傾きが1.01で、相関係数は0.89と高く降水量と流出負荷量は比例する。しかしFig. V-2-1を詳細にみると、森林からの流出負荷量が単純に降水量に比例していないことを示している。それは、降水量の降順が、1991年、1989年、1976年、1968年、1988年と流出負荷量とは異なることから、一回の降水状況の影響が大きいことを示していると思われる。それは降水量がほとんど同じ1975年と1982年間や1979年と1983年間では流出負荷量はそれぞれ1.5倍も違うことによく表れている。そのため降水量が最も多かった1991年は台風が多い年で年降水量も多かったが、一回当たりの降水量も多く、降雨強度も強かったのでその影響が強くていているものと思われる。森林集水域の特徴として洪水時にNO<sub>x</sub>-N濃度が上昇することがあるので、一回当たりの降水の影響

が特に大きくでたものと思われる。

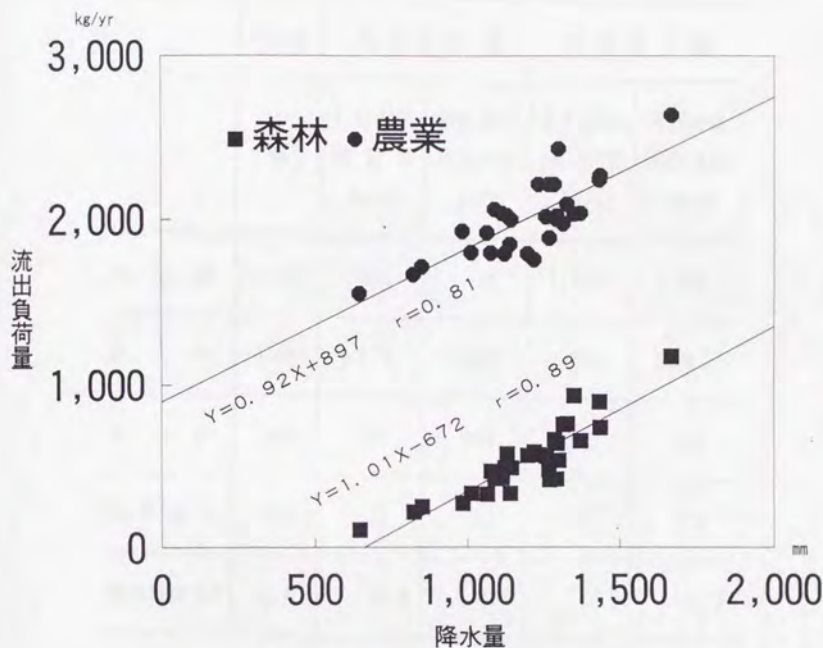


Fig. V-2-5 降水量と流出負荷量の関係

以上のことから、年によっては森林集水域からも大きな流出負荷量を発生させる可能性があることがわかる。さらに森林の面積は大きいので、本モデルの目的の一つである生態系モデルの応用に関しても森林からの流出状況が無視できないことになる。このように、森林集水域の流出負荷量が水文学的な影響を強く受けることによって、森林集水域の調査は長期間の調査、特に降水時の変動を調べるのが重要であることと、年間の流出負荷量は単純に降水量に比例することでないことがわかった。

Table V-2-4 推定結果の諸量

	降水量 mm	森林集水域		農業集水域	
		LQ式法 推定値 kg/yr	降水量比 例換算値 kg/yr	LQ式法 推定値 kg/yr	降水量比 例換算値 kg/yr
平均値	1.192	535	746	1.998	1.609
最大値	1.668	1.173	1.043	2.636	2.251
最小値	646	107	404	1.550	872
標準偏差	202	229	126	231	272
標準偏差(%)	16.9	42.8	16.9	11.6	16.9

## (2) 農業集水域の予測結果

Fig. V-2-6に農業集水域での予測結果を示した。Table V-2-4に計算結果の諸量を示した。流出負荷量の最大値と最小値は森林集水域と同様に1991年と1984年であった。15番目の30年間の中間値は1980年となった。最大値、最小値と中間値をFig. V-2-7に示した。4月から9月にかけての流出状況はどの年も大きな変動がなく月別LQ式の影響が強くでた結果となった。また、秋口の降水量が最も流出負荷量に影響を与えている。30年間を通してみるとモデルで予測した平均値が1.998kg/yr(30.0kg/ha・yr)、最大値2.636kg/yr(39.5kg/ha・yr)、最小値1.550kg/yr(23.2kg/ha・yr)となり、降水量比例換算値は、平均値1.609kg/yr(24.1kg/ha・yr)、最大値2.251kg/yr(33.7kg/ha・yr)、最小値872kg/yr(13.1kg/ha・yr)となった。最大値と最小値との差は、前者が1.086kg/yr(比は1.7倍)、後者が1.379kg/yr(比は

2.6倍)と森林集水域とは逆にタンクモデルで計算した結果の方が小さい。変動係数でみると降水量の変動係数が16.9%、タンクモデルで計算した結果が11.6%となった。

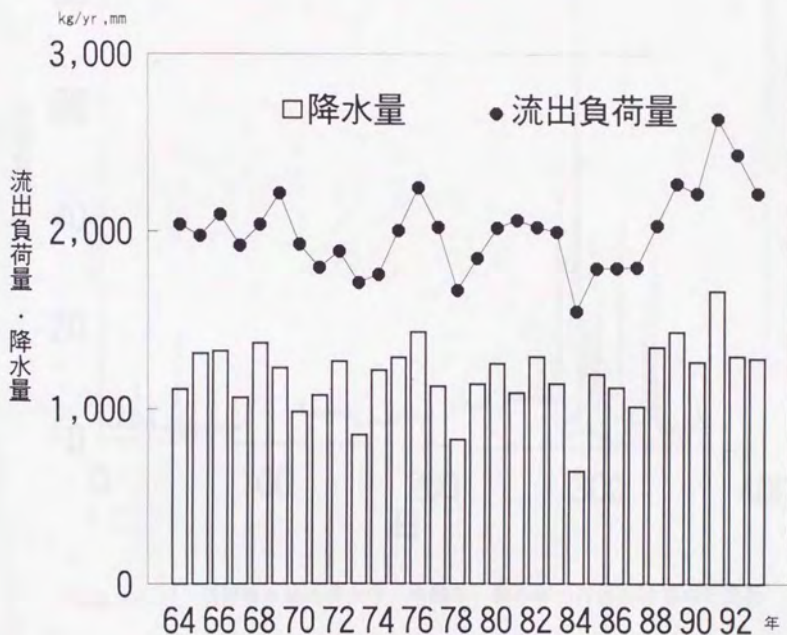


Fig. V-2-6 30年間の流出負荷量の変動（農業集水域）

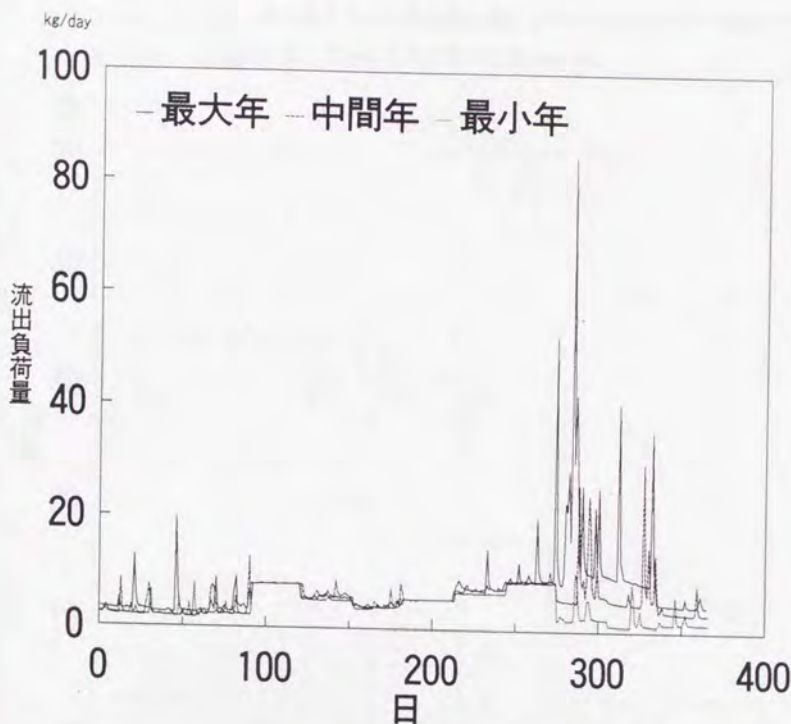


Fig. V-2-7 農業集水域の最大年、中間年、最小年の流出負荷量の日変動

農業集水域の結果の頻度分布をFig. V-2-8に示した。平均値が属する範囲が最も頻度が大きく左寄りの形になり、多少降水量の頻度分布と似た形になった。Fig. V-2-5の回帰式をみると、傾き0.92、相関係数0.81となり、降水量と流出負荷量間の比例関係がわかる。Fig. V-2-6の年次変動をみると、やはり森林集水域同様に年降水量の変動に比例していない年間流出負荷量がいくつか認められる。このことは、タンクモデルでの計算結果が単年の結果ばかりでなく前年や次年にも影響を与えていることを示すものである。つまりある年の集水域からの流出負荷量を検討する上では、少なくとも数年間の調査結果から検討する必要がある。流出負荷量の変動は森林集水域より比較的小さく、降水量比例換算値よりも小



さくなくなった。これは、農業集水域では森林集水域と違い流量の増大時に濃度が減少するために、流出負荷量の変動も小さくなると思われる。

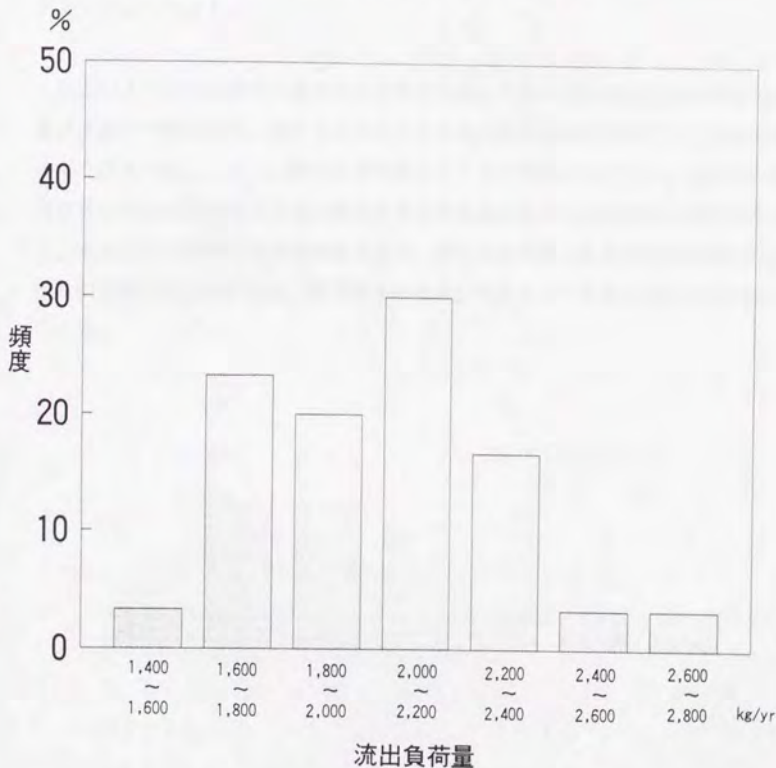


Fig. V-2-8 農業集水域流出負荷量の頻度分布

### (3) 長期解析結果のまとめと今後の課題

流出負荷予測モデルの応用例として30年間の年次変動を検討した結果、以下のことがわかった。

- 1) 森林集水域の計算結果では、最大値と最小値の比は11倍、変動係数42.8%で降水量の16.9%よりも大きく、変動が大きかった。
- 2) 農業集水域の計算結果では、最大値と最小値の比は1.7倍、変動係数11.6%

で降水量の16.9%よりも小さく、変動が小さかった。

3) タンクモデルの計算結果には降水量比例換算値では表せない年次間の影響も表すことができる。

以上のように流出負荷予測モデルの開発によって降水量の異なる年の流出負荷量の予測が可能になり、過去や将来における流出負荷量の予測をすることができるようになった。しかし、30年間の計算を行う上で問題点も生じた。それは、蒸発散量の推定に関してである。蒸発散量は降水量の約半分にも当たる量であるので、本モデルの結果に大きな影響を持つ。今回は平均的な値を用いて計算したが、本格的に推定するためには、蒸発散量の推定が精度よくできることが必要になってくる。

### 3. 流出負荷予測モデルの今後の課題

今回は本モデルの応用例の一つとして長期間にわたる流出負荷量の推定を行った。

LQ式法に関しては、現実問題としてLQ式を精度よく求めることが最も重要な課題である。また、長期間にわたるような解析を行う場合、土地利用が変化したりするためにLQ式がそれにつれて変化する可能性がある。そのためにより少ない頻度で正確なLQ式が算出できればLQ式法の発展性も広がる。しかし現在のところLQ式の頻度や精度に関する研究が少なく、今後の研究が待たれるところである。それゆえ本モデルを発展改良、応用することは、濃度係数法を進展させることが現状からみて本筋となる。そこで濃度係数法を進展させるために現在以下の2方法を考えている。

① 濃度係数を関数化することによって実際の現象を説明できるようなモデルにする。

② 今回は台地タンクにしたが、台地を畑地タンクと森林タンクに分離することによって土地利用別型モデルにする。

①の具体例としては、低地タンクに水田の水質浄化機構を組み込みための水質浄化関数を濃度係数や、畑地の施肥量を考慮にいれた濃度係数や、森林の影響を考慮した濃度係数を用いることで栄養塩類の流出機構を説明するようなモデルの開発が可能である。濃度係数の汎用化がはかれれば多くの土地で流出負荷予測モデルの開発が容易になる。また、②の具体例として、水田と畑地と林地の相互関係を直列や並列やより複雑に組み込むことによって、閉鎖性水域への最適な土地利用形態や土地利用割合の算出が可能になる。以上のように本モデルは、実用性を追求して流出モデルの開発してきたが、機構モデルの開発も十分に可能である。

### 1. 結論

閉鎖性水域において面源由来の栄養塩類の比率は、徐々にではあるが増加傾向が続いている。栄養塩類特に $\text{NO}_3\text{-N}$ 流出負荷量を正確に予測することが富栄養化防止対策を立てる上で必要になっている。しかしながら、林地や畑地などの面源からの栄養塩類の綿密な流出状況調査は未だ少なく、流出負荷量予測の方法も原単位法を用いるなどで、動的な解析方法の確立が強く望まれている。このような状況下において、本研究の目的である簡便な流出負荷量予測方法の開発は、富栄養化防止対策において有用性が高いものと考えられる。

本論文において、綿密な面源流出負荷量調査をもとにし森林集水域と農業集水域の流出状況を明らかにした。そして、その結果をもとに簡便な水質モデル開発を行った。

そのために、第I章では、本研究の目的および既往の研究について述べた。水質モデルを作成する上で多くの試みがなされているが、モデルで用いる水質データが少ないために客観的な判断基準が示されていない場合が多いことを示した。第II章では、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 日流出負荷量を推定する方法として、タンクモデルを用いて流出負荷予測モデルの提案を行った。これは、タンクモデルで計算した流量をLQ式に代入し流出負荷量を推定するLQ式法とタンクモデルの各流出孔に各層に対応する濃度係数を用いる濃度係数法の2通りの方法を用いることにした。そして、モデル作成の客観性確立のために、同定方法に $\chi^2$ 誤差評価基準値を用いることを提案した。また、モデルの評価方法として、今まで行われてきた計算値と実測値をポリュートグラフ上で判断することから、全期間のズレを評価するための収支誤差率と個々のズレを評価するための相対誤差率の2通りの誤差率を用いることで、客観性を持った誤差評価方法を提案した。第III章では、森林集水域と農業集水域（非灌漑期と灌漑期）において、6時間間隔で測定した連続調査をもとに、各水質の流出状況の特徴と、LQ式についての考察を行った。第IV章では、第III章で得られたデータを用いて各集水域ごとに流出負荷予測モデルを作成し、その精度について考察した。森林集水域のモデルの構造は、直列4段タンクモデルである。農業集水域においては、台地タンクと低地タンクを並列に配置した非灌漑期モデル

と台地タンクと低地タンクを直列型に配置した灌漑期モデルを作成した。特に前者に関してはタンクの段数による精度の違いについて考察を行った。後者では水田の持つ水質浄化機能を組み込んだモデルを提案した。第V章では、作成したモデルを用いて、長期間流出負荷量の推定を行った。

以上の各章について明らかになった成果を以下の要約に述べる。

森林小集水域の結果から、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{T-N}$ 、 $\text{SS}$ は、平常時重み付平均濃度が各々0.5mg/ℓ、0.7mg/ℓ、6mg/ℓと低いが、流量の増大にともなって濃度が上昇する傾向がある。比負荷は、 $\text{NO}_3\text{-N}$ で3.7kg/ha・yr、 $\text{T-N}$ で6.8kg/ha・yr、 $\text{SS}$ で265kg/ha・yrである。農業集水域（非灌漑期）は、全期間の平均 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は5.7mg/ℓ、比負荷量は66mg/s・km<sup>2</sup>、 $\text{T-N}$ 濃度は7.2mg/ℓ、比負荷量88mg/s・km<sup>2</sup>であった。農業集水域（灌漑期）は、灌漑期には各成分とも非灌漑期に比べて同一流量に対する負荷量が減少する傾向があった。これは水田灌漑が抑制したとみられる。4～9月の6カ月間の $\text{T-N}$ の全流出負荷量は19kg/haでその大部分は $\text{NO}_3\text{-N}$ であった。農業集水域では台地上の多肥な作物を栽培している畑地の影響が大きい。

流出負荷予測モデルの結果から、特に流出負荷量を推定するうえで、流出水量の解析結果が大きく影響するので、できるだけ正確な流出解析をしておく必要があることが誤差率から判明した。森林集水域のモデルでは、LQ式法では、収支誤差率を-5%以内、相対誤差率を20%程度で推定することができた。濃度係数法では、季節変動を考慮すれば収支誤差率-5%以内で、相対誤差率は20%以下で推定できた。非灌漑期の農業集水域モデルは、4+2段モデルと2+2段モデルとの差は、わずかであり、2+2段モデルでの推定でも十分な精度をあげられることがわかった。しかし1+1段モデルは精度上問題があった。LQ式法では、収支誤差率±3%以内で十分に推定できた。相対誤差率では、月別LQ式法で約15%程度で推定できた。全期間LQ式法はそれに比較して7～8%程度推定精度が悪かった。濃度係数法では、収支誤差率-3.3%、相対誤差率約15%程度の推定ができた。灌漑期モデルは、LQ式法では、月別直線型LQ式での推定が最もよかった。5月～8月の灌漑期間でも収支誤差率-2.6%、相対誤差率で18.8%で推定できた。他のLQ式法も、実測流量で推定する程度の誤差で推定は可能であり、その意味では十分実用に耐える。濃度係数法は誤差が大きく灌漑期間の使用は難しい。これは、人為的な施肥や中干

しや落水などの管理体系を定数で組み込むことが難しいからである。

長期解析結果からは、森林集水域の計算結果では、最大値と最小値の比は11倍、変動係数42.8%で降水量の16.9%よりも大きく、変動が大きかった。農業集水域の計算結果では、最大値と最小値の比は1.7倍、変動係数11.6%で降水量の16.9%よりも小さく、変動が小さかった。モデルの計算結果には降水量比例換算値では表せない年次間の影響も表すことができる。

## 2. 今後の課題

流出負荷予測モデルを用いて $\text{NO}_3\text{-N}$ 日流出負荷量を推定することが十分に可能なことがわかった。しかし、簡便化を目的の一つにしたためにいくつかの問題も残った。LQ式法では、特に農業集水域の曲線型LQ式に問題があることがわかった。今回のように精度の高いLQ式を用いているにもかかわらず誤差が大きかったので、測定頻度とLQ式の関係、さらに汎用型LQ式についての研究が望まれる。濃度係数法では、森林集水域モデルからは、濃度係数法の濃度係数が季節変動する可能性があることがわかった。この季節変動を濃度係数に組み込むことによって森林集水域の推定精度の向上をはかることが可能である。しかし、農業集水域においては濃度係数に季節変動の影響はほとんどみられなかった。つまり他の影響が大きいとさえ考えざるをえない。この精度をあげるには、濃度係数の関数化、水質浄化機能の導入、栽培管理スケジュールの組み込みなどがある。また、今回は台地タンクとしたモデルを林地と畑地に分離することにより土地利用別型モデルにすることによって簡便なモデルから機構モデルへの発展が望める。そのためにも、畑地、林地、水田の水質面からのアプローチや、地表水中心の研究から地下水流動を含めた流出水の調査研究が必要である。また、長期解析結果からもわかるように、蒸発散量の推定などの水文学分野の研究の取り組みを行いたい。

今回のモデルでは、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 日流出負荷量についての解析を行ってきた。そして、他の水質項目への適用も考えていきたい。たとえばT-NのLQ式に高い相関係数が認められているので流出負荷予測モデルの適用も考えていきたい。SSについては、LQ式法を用いることが難しいことがわかっているので濃度係数法を適用するしか方法がない。SSの流出の仕方はファーストフラッシュ時の流出が大きく、かつ流量増大時にそのほとんどが流出するので濃度係数も指数関数的な係数にする必要があるであろう。

水質問題は、要因が多くしかも複雑に絡み合っているため、その説明が難しい。本研究はそのような分野のほんの端緒の解決にしかすぎないかもしれない。しかし、流出負荷予測モデルが、水質問題の解決の一助となれることを希望し本論文を終わりにする。

参考文献

- 1) 田淵俊雄・高村義親：集水域からの窒素・リンの流出、東京大学出版会、1985
- 2) 国松孝男・村岡浩爾編著：河川汚濁のモデル解析、技報堂出版、1989
- 3) 大橋通成・桜井善雄：千曲川における水質および河床クロロフィル量の季節変動、陸水富栄養化の基礎的研究、第3号、pp. 33~36(1974)
- 4) 中曽根英雄・中村良太：降雨時における烏川の水質変動と汚濁負荷量の流出について、農土論集111、pp. 35~42(1984)
- 5) 海老瀬潜一：霞ヶ浦流入河川による総流入負荷量の評価、国立公害研究所研究報告、50、pp. 4~58(1984)
- 6) 福島忠雄・河村宣親：急傾斜樹園地における栄養塩類の流出特性に関する調査研究、農土論集、142、pp. 75~82、1989
- 7) 平田健正・村岡浩爾：渓流水質から見た森林の浄化機能に関する研究2、国立公害研究所研究報告 95、pp. 37~56(1986)
- 8) 山口高志・吉川勝秀：河川の水質・汚濁負荷量に関する研究(I)：土木研究所報告、第151号(1978)
- 9) 山口高志・吉川勝秀：河川の水質・汚濁負荷量に関する研究(II)、土木研究所報告第154号、pp. 1~27 (1980)
- 10) 海老瀬潜一・宗宮功他：タンクモデルを用いた降雨時流出負荷量解析、用水と排水、Vol. 21, No. 12(1979)
- 11) 中曽根英雄・中村良太：水質の日流出負荷量の解析に関する研究、農土論集151、pp. 27-32、(1991)
- 12) 奥川光治・宗宮功他：流域特性を考慮した流送能力型汚濁流出モデルの開発、水質汚濁研究、第14巻6号 pp. 35-43(1991)
- 13) 田淵俊雄・林寛司：流量・負荷量関係式の信頼性について、農土論集131、pp. 11~18(1987)
- 14) 角屋睦：長短期流出両用モデルの開発とダム管理への活用に関する研究、科研成果報告書、(1988)
- 15) 水戸地方气象台：茨城県気象月報、1988-1989
- 16) 五十崎恒他：かんがい排水、養賢堂、1978
- 17) 平田健正・村岡浩爾：渓流水質から見た森林の浄化機能に関する研究、国立公



- 害研究所報告、第116号(R-116-'88)、pp.75~97、1988
- 18)たとえば李憲浩・芝野博文：リター層中を流下する雨水の水利特性、日林誌、72(3)、pp.223~229、1990
- 19)たとえば北原曜：山地土層中における不均質性地下水流の諸特性、水水学会研究発表会要旨集、pp.107~110、1989
- 20)建設省：昭和50年度霞ヶ浦汚濁制御調査報告、1976
- 21)西村武二：山地小流域における養分物質の動き、日林誌、55(11)、pp.323~333、1973
- 22)Likens,G.E. et al.:Nutrient-hydrological cycle interaction in small forested watershed-ecosystems. In Productivity of Forest Ecosystems, Proc.Brussels Symp.,UNESCO publ. pp.553 to 563,1969
- 23)Likens,G.E. and Bormann,F.H.:An Experimental Approach in New England Landscapes.Springer-Verlag,pp.7 to 29,1975
- 24)Pierce,R.S. et al.:Nutrient loss from clearcutting in new hampshire, National Symposium on Watersheds in Transition,pp.285 to 295,1972
- 25)Swank,W.T. and Douglass,J.E.:Nutrient Flux in Undisturbed and Manipulated Forest Ecosystems in The Southern Appalachian Mountains, Proc. of Tokyo Symp. IAHS,pp.445 to 456,1975
- 26)Gosz,J.R.:Nitrogen Input to Stream Water from Forests along an Elevational Gradient in New Mexico,Water Research Vol.12.,pp.725 to 734,1978
- 27)Hornbeck,J.W. et al.:Moderating the Impact of Contemporary Forest Cutting on Hydrologic and Nutrient Cycles,Proc. of Tokyo Symp. IAHS,pp.423 to 433,1975
- 28)海老瀬潜一：霞ヶ浦流入河川の流出負荷量変化とその評価、国立公害研究所研究報告21、pp.1~110(1981)
- 29)中曽根英雄・中村良太：降雨時における烏川の水質変動と汚濁負荷量の流出について、農土論集111、pp.35~42(1984)
- 30)黒田清一郎他：畑地湧水中の硝酸態窒素濃度の変動、農士大会講演要旨集、pp.480~481、(1992)

- 31) 田淵俊雄他：休耕田を活用した窒素除去の試み、農土誌61(12)、pp. 19~24、(1993)

#### 本研究に関する研究論文

##### 第III章に関する研究論文

- 1) 森林小集水域における流出水の濃度と流出負荷、農土論集154、pp. 25~35(1991)
- 2) 非灌漑期の農業集水域からの流出水の窒素濃度と負荷、農土論集154、pp. 45~53(1991)
- 3) 灌漑期の農業集水域からの流出水の水質と負荷特性、農土論集154、pp. 55~64(1991)
- 4) 台地と谷津田の農業集水域の窒素流出構造、農土論集154、pp. 65~72(1991)
- 5) LQ式による流出負荷量算出に与える測定頻度の影響、農土論集164、pp1-9 (1993)
- 6) The relation between landuse and  $\text{NO}_3\text{-N}$  outflow from catchment area (1991)  
International Association on Water Pollution Research and Water

##### 第IV章に関する研究論文

- 7) 森林地区の $\text{NO}_3\text{-N}$ 日流出負荷量の推定、農土論集、168、pp. 31~36、(1993)
- 8) 非灌漑期農業地区からの $\text{NO}_3\text{-N}$ 日流出負荷量の推定、農土論集 (投稿中)
- 9) The tank model for nitrate-N daily load from agricultural area  
International Association on Water Quality(1994)
- 10) 灌漑期農業地区からの $\text{NO}_3\text{-N}$ 日流出負荷量の推定、農土論集 (投稿準備中)

## 謝辞

本研究は、大学4年次の卒業論文、修士論文からの課題であり、本研究を始める端緒を与えてくださり、常に熱心なご指導と有益なご助言を頂いた東京大学農学部 田淵俊雄教授に厚く感謝する次第である。

また、本研究を行うに当たって、八郷町上曽地区、大形地区の水利組合と農家の方々の多大な御協力をいただいた。そして、茨城大学農業水利学研究室の大勢の院生・学生諸氏の調査・分析などへの協力を得て行われた。また、茨城大学農学部の久保田治夫名誉教授、中曽根英雄教授、増島博教授、高村義親教授には調査・分析・解析方法のご指導を、長南富久さんには数々のご協力をえた。ここに記して謝意を表します。

本論分作成中には、茨城大学農学部生物生産学科生産環境工学大講座の岩田進午教授、林 尚孝教授、荒川 稔助教授、軽部重太郎助教授、木ノ瀬紘一助教授、森泉昭治助教授、中石克也助手には、多大なご援助と激励をいただきました。ここに厚く感謝いたします。

大学院時代同期生であった農業水利学研究室の青山和夫君、農業機械学研究室の矢口実君、嶋田浩先輩（秋田県立農業短期大学）との議論も、本論文の作成にあたり非常に有用なものであった。

最後に、当時院生であり、上曽地区での冬期に行った河川横断レベル測量や4年次生が卒業した後も一人分析を手伝ってもらった故清水薫君のご冥福をお祈り申し上げます。

付 録

第IV章用プログラム

共通ルーチン

```

1100 ' --- INPUT DATA ---
1110 WIDTH 80,20 : CONSOLE 0,25,0,1 : SCREEN 3 : CLS 3
1120 GOSUB *LOADDATA
1130 PARA=2 : MY(1)=30000 : MY(2)=15
1140 CN=6 : SPS=STRINGS(CN," ")
1150 DIM LX(10),LY(10),Y(2,N)
1160 LX(1)=14 : LY(1)=5 : LX(2)=30 : LY(2)=4
1170 LX(3)=30 : LY(3)=6 : LX(4)=30 : LY(4)=9 : LX(5)=16 : LY(5)=11
1180 DSP$(1)="観測値" : DSP$(2)="片対数" : DSP$(3)="地点の比率"
1190 PR$(0)="段" : PR$(1)="初期値" : PR$(2)="側孔下" : PR$(3)="側孔上"
1200 PR$(4)="高さ下" : PR$(5)="高さ上" : PR$(6)="底孔" : PR$(7)="濃度下"
1210 PR$(8)="濃度上"
1220 LQ$(1)="連続期間 L Q 式" : LQ$(2)="月 別 L Q 式"
1230 LQK$(1)="一次式 L Q 式" : LQK$(2)="指数式 L Q 式"
1240 FOR I=0 TO 5 : FOR J=0 TO 7
1250 LOCATE 16+J*8,14+I : PRINT PARA(I+1,J+1);
1260 NEXT J : NEXT I
1270 GOSUB *OFFICIENT
1280 GOSUB *CALUCLATION
1290 GOSUB *FINISH
1300 SCREEN 3 : WIDTH 80,25 : CLS 3
1310 END
1320 *FINISH : LOCATE 0,0
1330 PRINT "1 : COPY 2 : RETRY 3 : ERROR 4 : KPRINT 5 : END 6 : X-Y";
1340 INS=INPUT$(1) : IN=VAL(INS) : IF 0<IN AND IN<7 THEN PRINT ELSE 1330
1350 ON IN GOTO *HARDCOPY,*RETRY,*ER,*KPRINT,4320,*XY
1360 *HARDCOPY : COPY : LPRINT CHR$(12) : GOTO *FINISH
1370 *RETRY : RETURN 1270
1380 *SUBEND : RETURN
1400 ' --- INPUT OFFICIENT DATA ---
1410 *OFFICIENT
1430 H1=0 : H2=100 : V1=112 : V2=272
1440 WINDOW(10,0)-(50,50) : VIEW(H1,V1)-(H2,V2)
1450 RESTORE *TANKDATA
1460 FOR I=1 TO 4 : READ P
1470 FOR K=1 TO P : READ X1,Y1
1480 IF K<>1 THEN LINE(X1,Y1)-(X2,Y2)
1490 X2=X1 : Y2=Y1
1500 NEXT K
1510 NEXT I
1520 LINE( 4,12)-(35,12),,H303
1530 LINE(14, 9)-(18, 9),5 : LINE(18, 9)-(16,12),5 : LINE(16,12)-(14, 9),5
1540 LINE(14,13)-(18,13) : LINE(14.8,14)-(17.2,14) : LINE(15,15)-(17,15)
1550 *TANKDATA
1560 DATA 4.10, 5.10,46.20,46.20,50
1570 DATA 5.25,50.25,46.35,46.35,40.40,40
1580 DATA 4.40,35.35,35.35,20.40,20
1590 DATA 3.40,15.35,15.35,05
1600 '
1610 LOCATE 1, 6 : PRINT PR$(1)
1620 LOCATE 11, 8 : PRINT PR$(3)
1630 LOCATE 1, 9 : PRINT PR$(5)
1640 LOCATE 11,11 : PRINT PR$(2)
1650 LOCATE 1,12 : PRINT PR$(4)
1660 LOCATE 1,14 : PRINT PR$(6)
1670 WINDOW(100,100)-(110,150) : VIEW(160,90)-(310,250)
1680 DRAW "C7" : DRAW "Q10.50" : LINE(2000,2200)-(2100,2200)
1690 FOR I=1 TO 2
1700 LINE(106,100+I*6.2)-(109,100+I*6.2),I+4

```

```

1710 LINE(106,112.4+I*6.2)-(109,112.4+I*6.2),I+2 :NEXT I
1720 LOCATE 21, 5 : COLOR 5 : PRINT "負荷実測値"
1730 LOCATE 21, 6 : COLOR 6 : PRINT "負荷計算値"
1740 LOCATE 21, 7 : COLOR 3 : PRINT "流量実測値"
1750 LOCATE 21, 8 : COLOR 4 : PRINT "流量計算値" : COLOR 7
1770 '
1780 WINDOW(1000,1280)-(1536,1420) : VIEW(103,259)-(639,398)
1790 FOR I= 0 TO 140 STEP 20 : LINE(1000,I+1280)-(1536,I+1280) : NEXT I
1800 FOR I=24 TO 600 STEP 64 : LINE(I+1000,1280)-(I+1000,1420) : NEXT I
1810 '
1820 LOCATE 13,13 : PRINT USING " ";PRS(0);
1830 FOR I=1 TO 8 : PRINT USING " ";PRS(I); : NEXT I
1840 '
1850 GOSUB *DSPWEIGHT
1860 DATS="" : DN=1 : PR=1 : X1=23 : Y1=13
1870 IF DN=0 THEN X1=0 : Y1=0 : CN=4
1880 LX=X1+(CN+2)*(PR-1) : LY=Y1+DN
1890 LOCATE LX,LY : INS=INPUTS(1) : IN=ASC(INS)
1900 IF IN=13 THEN *FIXDATA
1910 IF 45<IN AND IN<58 THEN GOSUB *INPDATA
1920 IF IN<28 OR 31<IN THEN 1870 ELSE DATS=""
1930 ON IN-27 GOSUB *HIDARI,*MIGI,*UE,*SHITA
1940 '
1950 IF PR>8 THEN PR=8
1960 IF PR<1 THEN PR=1
1970 IF DN>6 THEN DN=6
1980 IF DN<1 THEN DN=1 : GOSUB *WEIGHT
1990 GOTO 1870
2000 '
2010 *HIDARI : PR=PR+1 : RETURN
2020 *MIGI : PR=PR-1 : RETURN
2030 *UE : DN=DN-1 : RETURN
2040 *SHITA : DN=DN+1 : RETURN
2050 '
2060 *INPDATA
2070 '
2080 DATS=RIGHT$(SPS+DATS+INS,CN) : PARA(DN,PR)=VAL(DATS)
2090 LOCATE LX-CN,LY : PRINT USING "&"+STRING$(CN-2," ")+"&";DATS
2100 RETURN
2110 '
2120 *WEIGHT
2130 LOCATE 0, 0 : PRINT "表示・・・1 ウェイト・・・2 LQモデル・・・3";
2140 INS=INPUTS(1) : PARA=VAL(INS) : IF PARA<1 OR PARA>3 THEN 2130
2150 ON PARA GOTO 2170,2220,2300
2160 '
2170 LOCATE 0, 0 : PRINT "表示 : 観測値・・・1 片対数・・・2 "
;
2180 INS=INPUTS(1) : IF INS="1" OR INS="2" THEN PARA=VAL(INS) ELSE 2170
2190 LOCATE 0, 0 : PRINT STRING$(40," ")
2200 LOCATE 0, 0 : PRINT "表示 :";DSPS(PARA)
2210 LPARA=1 : RETURN
2220 LN=1 : DATS="" : GOSUB *DSPWEIGHT
2230 LOCATE 17.2+LN : INS=INPUTS(1) : IN=ASC(INS)
2240 IF IN=13 THEN *CHECK
2250 IF IN=30 OR IN=31 THEN 2400
2260 IF IN<46 OR 57<IN THEN 2230
2270 DATS=RIGHT$(" "+DATS+INS,5) : WC(LN)=VAL(DATS)
2280 LOCATE 12.2+LN : PRINT USING "& &";DATS
2290 GOTO 2230
2300 LOCATE 0, 0 : PRINT "連続期間LQ式・・・1 月別LQ式・・・2 ";
2310 INS=INPUTS(1) : LQPARA=VAL(INS)
2320 LOCATE 0, 0 : PRINT "一次式LQ式・・・1 指数式LQ式・・・2 ";

```

```

2330 INS=INPUT$(1) : LQKATA=VAL(INS)
2340 LPARA=3 : PARA=2
2350 '
2360 RETURN
2390 '
2400 IF IN=31 THEN LN=LN+1 ELSE LN=LN-1
2410 IF 0<LN AND LN<=PN THEN DAT$="" : GOTO 2230
2420 DAT$="" : RETURN
2430 '
2440 *CHECK : CK=0
2450 FOR I=1 TO PN : CK=CK+WC(I) : NEXT I
2460 IF CK>1 THEN 2220 ELSE RETURN *FIXDATA
2470 *FIXDATA
2480 DAN=1
2490 IF PARA(DAN,2)=0 AND PARA(DAN,6)=0 THEN DAN=DAN-1 : RETURN
2500 PI(DAN)=PARA(DAN,1) : DAN=DAN+1 : LOCATE 12,12+DAN : PRINT DAN-1
2510 GOTO 2490
2520 '
2530 *DSPWEIGHT
2540 LOCATE 0,2 : PRINT "*** 地点の比率 ***"
2550 LOCATE 0,3 : PRINT USING " 水田 = #.#### ";WC(1)
2560 LOCATE 0,4 : PRINT USING " 台地 = #.#### ";WC(2)
2570 IF LPARA<>3 THEN 2580 ELSE 2600
2580 LOCATE 21,10 : PRINT " "
2590 LOCATE 21,11 : PRINT " "
2600 LOCATE 21,10 : PRINT LQS(LPARA)
2610 LOCATE 21,11 : PRINT LQK$(LQKATA)
2620 RETURN

```

集水域別ルーチン

```

2640 ' --- CALUCLATION ---
2650 *CALUCLATION
2660 CLS : '蒸発散量
2670 FOR I=1 TO 30 : IF PD(1,I)=0 THEN PW(I)=-6.2 ELSE PW(I)=PD(1,I)
2675 NEXT I
2680 FOR I=31 TO 61 : IF PD(1,I)=0 THEN PW(I)=-2.9 ELSE PW(I)=PD(1,I)
2685 NEXT I
2690 FOR I=62 TO 91 : IF PD(1,I)=0 THEN PW(I)=-1.5 ELSE PW(I)=PD(1,I)
2695 NEXT I
2700 FOR I=92 TO 122 : IF PD(1,I)=0 THEN PW(I)=-.6 ELSE PW(I)=PD(1,I)
2705 NEXT I
2710 FOR I=123 TO 153 : IF PD(1,I)=0 THEN PW(I)=-1! ELSE PW(I)=PD(1,I)
2715 NEXT I
2720 FOR I=154 TO 182 : IF PD(1,I)=0 THEN PW(I)=-1! ELSE PW(I)=PD(1,I)
2725 NEXT I
2730 FOR I=183 TO 213 : IF PD(1,I)=0 THEN PW(I)=-2.7 ELSE PW(I)=PD(1,I)
2735 NEXT I
2740 FOR I=214 TO 243 : IF PD(1,I)=0 THEN PW(I)=-3.8 ELSE PW(I)=PD(1,I)
2745 NEXT I
2750 FOR I=244 TO 274 : IF PD(1,I)=0 THEN PW(I)=-3.6 ELSE PW(I)=PD(1,I)
2755 NEXT I
2760 FOR I=275 TO 304 : IF PD(1,I)=0 THEN PW(I)=-4.7 ELSE PW(I)=PD(1,I)
2765 NEXT I
2770 FOR I=305 TO 335 : IF PD(1,I)=0 THEN PW(I)=-4.6 ELSE PW(I)=PD(1,I)
2775 NEXT I
2780 FOR I=336 TO 342 : IF PD(1,I)=0 THEN PW(I)=-7.6 ELSE PW(I)=PD(1,I)
2785 NEXT I
2790 LOCATE 0,0 : INPUT " 使用する最初のデータは ? ",NS
2800 LOCATE 0,0 : INPUT " 使用する最後のデータは ? ",NE
2810 Q3=0 : AQ=0 : AL=0 : AVQ=0 : AVL=0 : QB=0 : INF1=0
2820 FOR J=0 TO 6 : ET(J)=0 : NEXT J
2830 FOR I=NS TO NE : QD(1,I)=0 : CQD(1,I)=0
2840 FOR J=1 TO 4

```

```

2850 S1=PARA(J,2) : S2=PARA(J,3) : H1=PARA(J,4) : H2=PARA(J,5)
2860 BT=PARA(J,6) : C1(J)=PARA(J,7)/1000 : C2(J)=PARA(J,8)/1000
2870 'IF PW(1)=-ET THEN PW(1)=PW(1)*WC(2)
2880 'IF J<>1 THEN PI(J)=PI(J)+Q3+ET(J-1) ELSE PI(1)=PI(1)+PW(1)
2890 IF PI(J)<0 THEN ET(J)=PI(J) ELSE ET(J)=0
2900 IF PI(J)<=0 THEN Q1=0 : Q2=0 : Q3=0 : GOTO 2960
2910 IF PI(J)<=H1 THEN Q1=0 : Q2=0 : GOTO 2950
2920 IF PI(J)<=(H1+H2) THEN Q2=0 : GOTO 2940
2930 Q2=S2*(PI(J)-H1-H2)
2940 Q1=S1*(PI(J)-H1)
2950 Q3=BT*PI(J)
2960 QD(1,1)=QD(1,1)+(Q1+Q2)*WC(2) : PI(J)=PI(J)-Q1-Q2-Q3
2970 CQ1=C1(J)*Q1 : CQ2=C2(J)*Q2
2980 CQD(1,1)=CQD(1,1)+(CQ1+CQ2)*WC(2)
2990 IF PI(J)<=0 THEN PI(J)=0
3000 NEXT J : QB=BT*PI(4) : Q3=0 : ET(4)=0
3010 QB=BT*PI(4)
3020 FOR J=5 TO 6
3030 S1=PARA(J,2) : S2=PARA(J,3) : H1=PARA(J,4) : H2=PARA(J,5)
3040 BT=PARA(J,6) : C1(J)=PARA(J,7)/1000 : C2(J)=PARA(J,8)/1000
3050 'IF PW(1)=-ET THEN PW(1)=PW(1)*WC(1)
3060 IF J<>5 THEN PI(J)=PI(J)+Q3+ET(J-1) ELSE PI(5)=PI(5)+PW(1)
3070 IF PI(J)<0 THEN ET(J)=PI(J) ELSE ET(J)=0
3080 IF PI(J)<=0 THEN Q1=0 : Q2=0 : Q3=0 : GOTO 3140
3090 IF PI(J)<=H1 THEN Q1=0 : Q2=0 : GOTO 3130
3100 IF PI(J)<=(H1+H2) THEN Q2=0 : GOTO 3120
3110 Q2=S2*(PI(J)-H1-H2)
3120 Q1=S1*(PI(J)-H1)
3130 Q3=BT*PI(J)
3140 QD(1,1)=QD(1,1)+(Q1+Q2)*WC(1) : PI(J)=PI(J)-Q1-Q2-Q3
3150 IF PI(J)<=0 THEN PI(J)=0
3160 CQ1=C1(J)*Q1 : CQ2=C2(J)*Q2
3170 CQD(1,1)=CQD(1,1)+(CQ1+CQ2)*WC(1)
3180 NEXT J : QB=QB+BT*PI(6)
3190 QB=QB+BT*PI(6)
3200 AQ=AQ+QD(0,1) : AL=AL+CQD(0,1) : INF1=INF1+QB
3210 QD(1,1)=QD(1,1)*AREA : CQD(1,1)=CQD(1,1)*AREA
3220 IF LPARA<>3 THEN 3240
3230 GOSUB *LQMETHOD
3240 NEXT I
3250 AVQ=AQ/(NE-NS+1) : AVL=AL/(NE-NS+1)

```

---

```

3270 ' --- GRAPH --- 共通ルーチン
3280 *GRAPH
3290 ON PARA GOSUB *ORIGINAL,*SEMILOG
3300 H1=320 : H2=639 : V1=110 : V2=250 : OX=0 : OY=0 : MX=PDN+1 : MY=MY(PARA)
3310 WINDOW(OX,OY)-(MX,MY) : VIEW(H1,V1)-(H2,V2)
3320 DRAW"C7" : CLS 2
3330 LINE(OX,OY)-(OX,MY) : LINE(OX,MY)-(MX,MY)
3340 'A(1)=1 : A(2)=4 : A(3)=8 : A(4)=10 : A(5)=16
3350 'FOR Y=1 TO 5 : AY=LOG(A(Y)) : LINE(OX,AY)-(OX+.3,AY) : NEXT Y
3360 FOR JB=0 TO 1 : CL=JB+3 : DRAW"C=CL;"
3370 POINT(1,MY-Y(JB,NS)) : XK=PDN/(NE-NS+1)
3380 FOR I=2 TO NE-NS+1 : X=I*XK : Y=MY-Y(JB,NS+I-1) : DRAW"M=X; ,Y;" : NEXT I
3390 NEXT JB
3400 '
3410 OX=0 : OY=0 : MX=PDN+1 : MY=50 : H3=320 : V3=0 : H4=639 : V4=110
3420 WINDOW(OX,OY)-(MX,MY) : VIEW(H3,V3)-(H4,V4) : CLS 2
3430 LINE(OX,OY)-(OX,MY) : LINE(OX,MY)-(MX,MY)
3440 FOR JB=0 TO 1 : CL=JB+5 : DRAW"C=CL;"
3450 POINT(1,MY-CQD(JB,NS)) : XK=PDN/(NE-NS+1)
3460 FOR I=2 TO NE-NS+1 : X=I*XK : Y=MY-CQD(JB,NS+I-1) : DRAW"M=X; ,Y;" : NEXT I

```



```

3470 NEXT JB
3480 RETURN
3490 '
3500 *ORIGINAL
3510 FOR J=0 TO 1 : FOR I=NS TO NE : Y(J,I)=QD(J,I)      : NEXT I,J : RETURN
3520 *SEMILOG
3530 FOR J=0 TO 1 : FOR I=NS TO NE
3540 IF QD(J,I)<=0 THEN Y(J,I)=0 ELSE Y(J,I)=LOG(QD(J,I))
3550 NEXT I,J : RETURN
3560 '
3570 ' --- DATA ---
3580 *LOADDATA : PARA=1 : CONSOLE 0.25,0.1 : CLS 3
3590 PN=2 : AQ=0 : AL=0 : AVQ=0 : AVL=0
3600 LOCATE 2,2 : PRINT " DATAはDISKのみです。 "
3620 LOCATE 2,6 : PRINT " 大形・・・・・・・・・・ 2 "
3630 LOCATE 2,8 : PRINT " 上曾・・・・・・・・・・ 3 "
3640 LOCATE 2,10 : PRINT " 上から選んで下さい。 "
3650 SELS=INPUTS(1) : SEL=VAL(SELS)-1
3660 ON SEL GOSUB *OOGATA,*UWASO
3670 CLS 3 : GOTO 3800
3720 *OOGATA : '非灌漑期と灌漑期とは別係数
3730 M=3 : N=179 : ET=.97 : PDN=N : QDN=N : DIM D(M,N),INS(N),KNS(M),PD(2,N),QD(2,N),CQD(2,N),PW(N) : DNS="A:\N88BAS1C\DATA\DOOGATA.DAT" : WC(1)=.145 : WC(2)=.855 : AREA=667
3740 DNAME$="A:\N88BAS1C\DATA\OOGATA-1.DAT" : DTYTLES$=" 大形タンクモデル係数 "
3750 RETURN
3760 *UWASO
3770 M=3 : N=342 : ET=0! : PDN=N : QDN=N : DIM D(M,N),INS(N),KNS(M),PD(2,N),QD(2,N),CQD(2,N),PW(N) : DNS="A:\N88BAS1C\DATA\UWASO.DAT" : WC(1)=0 : WC(2)=! : AREA=2948
3780 DNAME$="A:\N88BAS1C\DATA\UWASO-1.DAT" : DTYTLES$=" 上曾タンクモデル係数 "
3790 RETURN
3800 '***** INPUT DATA FROM DISK *****
3810 OPEN DNS FOR INPUT AS #1
3820 INPUT #1,DBTAS
3830 PRINT : PRINT DBTAS
3840 FOR I=1 TO N : INPUT #1,INS(I) : NEXT I
3850 FOR K=1 TO M : INPUT #1,KNS(K) : PRINT KNS(K)
3860 FOR I=1 TO N : INPUT #1,D(K,I)
3870 NEXT I : NEXT K
3880 CLOSE #1
3890 OPEN DNAME$ FOR INPUT AS #1
3900 INPUT #1,DTYTLES
3910 PRINT : PRINT DTYTLES
3920 FOR K=1 TO 6 : FOR I=1 TO 8
3930 INPUT #1,PARA(K,I)
3940 NEXT I : NEXT K
3950 CLOSE #1
3960 PRINT USING "      " : $,DNS,DBTAS
3970 PRINT "N=";N;" " ; "M=";M
3980 FOR I=1 TO N : PD(1,I)=0 : QD(0,I)=0 : CQD(0,I)=0 : NEXT I
3990 FOR I=1 TO N : PD(1,I)=D(1,I) : QD(0,I)=D(2,I) : CQD(0,I)=D(3,I) : NEXT I
4000 CLS 3 : CONSOLE 0.1,0.1
4010 RETURN
4020 '***** ERROR *****
4030 *ER
4040 G=0 : ER=0 : YE=0 : LG=0 : LER=0 : LYE=0 : CQ=0 : CL=0
4050 FOR I=NS TO NE
4060 'YE=(QD(1,I)-QD(0,I))^2/QD(0,I) : G=G+YE
4065 YE=ABS(QD(1,I)-QD(0,I))/QD(0,I) : G=G+YE
4070 'LYE=(CQD(1,I)-CQD(0,I))^2/CQD(0,I) : LG=LG+LYE
4075 LYE=ABS(CQD(1,I)-CQD(0,I))/CQD(0,I) : LG=LG+LYE
4080 CQ=CQ+QD(1,I) : CL=CL+CQD(1,I)
4090 NEXT I

```

```

4100 'ER=100*((G/(NE-NS+1))-1)/(AVQ/AVQ) : ' 1 HA 0.5 . (/AVQ) CUT
4105 ER=100*(G/(NE-NS+1))
4110 'LER=100*((LG/(NE-NS+1))-1)/(AVL/AVL)
4115 LER=100*(LG/(NE-NS+1))
4120 LOCATE 25, 1 : PRINT "誤差率(%)"
4130 LOCATE 25, 2 : PRINT USING "####.##";ER
4140 LOCATE 25, 3 : PRINT USING "####.##";LER
4150 LPRINT "ERRQ ";ER;" LERR ";LER
4160 LPRINT "RE Q ";AQ;" RE L ";AL
4170 LPRINT "CALQ ";CQ;" CALL ";CL
4180 LPRINT "INFILTRATION ";INF|
4190 LPRINT
4200 GOTO 1330
4210 '***** KEISUU LPRINT *****
4220 *KPRINT
4230 FOR I=1 TO 8 : LPRINT USING " ";PRS(I); : NEXT I
4240 FOR J=1 TO 6 : LPRINT ; FOR I=1 TO 8
4250 LPRINT USING " #.######";PARA(J,I);
4260 NEXT I : NEXT J : LPRINT
4270 LPRINT "RAIN Q QCAL L LCAL "
4280 FOR I=NS TO NE
4290 LPRINT PD(1,I),QD(0,I),QD(1,I),CQD(0,I),CQD(1,I)
4300 NEXT I
4305 GOTO 7000
4310 RETURN 1270
4320 '***** OUTPUT DATA TO DISK *****
4330 OPEN DNAME$ FOR OUTPUT AS #1
4340 PRINT #1,DYTTLES
4350 PRINT : PRINT DYTTLES
4360 FOR K=1 TO 6 : FOR I=1 TO 8
4370 PRINT #1,PARA(K,I)
4380 NEXT I : NEXT K
4390 CLOSE #1
4400 CONSOLE 0.25,0.1 : SCREEN 3 : CLS 3
4410 END
4430 '

```

集水域別ルーチン

```

4440 *LQMETHOD
4450 '
4460 ON SEL GOTO 4770,5060
4760 'OOGATA
4770 IF LQPARA=2 THEN 4810
4780 IF LQKATA=2 THEN 4800
4790 CQD(1,1)=.0045*QD(1,1)+.67 : RETURN
4800 CQD(1,1)=.011*(QD(1,1))-.83 : RETURN
4810 IF LQKATA=2 THEN 4940
4820 IF I>0 AND I<32 THEN 4830 ELSE 4840
4830 CQD(1,1)=.0047*QD(1,1)+1.83 : RETURN
4840 IF I>31 AND I<62 THEN 4850 ELSE 4860
4850 CQD(1,1)=.0053*QD(1,1)+.88 : RETURN
4860 IF I>61 AND I<93 THEN 4870 ELSE 4880
4870 CQD(1,1)=.0025*QD(1,1)+1.33 : RETURN
4880 IF I>92 AND I<124 THEN 4890 ELSE 4900
4890 CQD(1,1)=.0038*QD(1,1)+.59 : RETURN
4900 IF I>123 AND I<152 THEN 4910 ELSE 4920
4910 CQD(1,1)=.0029*QD(1,1)+.96 : RETURN
4920 CQD(1,1)=.0029*QD(1,1)+1.35 : RETURN
4930 '
4940 IF I>0 AND I<32 THEN 4950 ELSE 4960
4950 CQD(1,1)=.028*(QD(1,1))-.73 : RETURN
4960 IF I>31 AND I<62 THEN 4970 ELSE 4980
4970 CQD(1,1)=.015*(QD(1,1))-.81 : RETURN

```

```

4980 IF I>61 AND I<93 THEN 4990 ELSE 5000
4990 CQD(1,1)=.043*(QD(1,1))-1.59 : RETURN
5000 IF I>92 AND I<124 THEN 5010 ELSE 5020
5010 CQD(1,1)=.024*(QD(1,1))-1.67 : RETURN
5020 IF I>123 AND I<152 THEN 5030 ELSE 5040
5030 CQD(1,1)=.026*(QD(1,1))-1.66 : RETURN
5040 CQD(1,1)=.061*(QD(1,1))-1.55 : RETURN
5050 ' ***** UWASO *****
5060 IF LQPARA=2 THEN 5100
5070 IF LQKATA=2 THEN 5090
5080 CQD(1,1)=.00064*QD(1,1)-1.68 : RETURN
5090 CQD(1,1)=.000072*(QD(1,1))-1.224 : RETURN
5100 IF LQKATA=2 THEN 5350
5110 IF I>0 AND I<31 THEN 5120 ELSE 5130
5120 CQD(1,1)=.0009*QD(1,1)-1.95 : RETURN
5130 IF I>30 AND I<62 THEN 5140 ELSE 5150
5140 CQD(1,1)=.00059*QD(1,1)-1.14 : RETURN
5150 IF I>61 AND I<92 THEN 5160 ELSE 5170
5160 CQD(1,1)=.0007*QD(1,1)-1.88 : RETURN
5170 IF I>91 AND I<123 THEN 5180 ELSE 5190
5180 CQD(1,1)=.00058*QD(1,1)-1.44 : RETURN
5190 IF I>122 AND I<154 THEN 5200 ELSE 5210
5200 CQD(1,1)=.0005*QD(1,1)-1.17 : RETURN
5210 IF I>153 AND I<183 THEN 5220 ELSE 5230
5220 CQD(1,1)=.00028*QD(1,1)-1.37 : RETURN
5230 IF I>182 AND I<214 THEN 5240 ELSE 5250
5240 CQD(1,1)=.00049*QD(1,1)-1.29 : RETURN
5250 IF I>213 AND I<244 THEN 5260 ELSE 5270
5260 CQD(1,1)=.00045*QD(1,1)-1.1 : RETURN
5270 IF I>243 AND I<275 THEN 5280 ELSE 5290
5280 CQD(1,1)=.00047*QD(1,1)-1.13 : RETURN
5290 IF I>274 AND I<305 THEN 5300 ELSE 5310
5300 CQD(1,1)=.00052*QD(1,1)-1.25 : RETURN
5310 IF I>304 AND I<336 THEN 5320 ELSE 5330
5320 CQD(1,1)=.00074*QD(1,1)-1.88 : RETURN
5330 CQD(1,1)=.00088*QD(1,1)-3.11 : RETURN
5340 '
5350 IF I>0 AND I<31 THEN 5360 ELSE 5370
5360 CQD(1,1)=.000045*(QD(1,1))-1.293 : RETURN
5370 IF I>30 AND I<62 THEN 5380 ELSE 5390
5380 CQD(1,1)=.00048*(QD(1,1))-1.019 : RETURN
5390 IF I>61 AND I<92 THEN 5400 ELSE 5410
5400 CQD(1,1)=.000027*(QD(1,1))-1.348 : RETURN
5410 IF I>91 AND I<123 THEN 5420 ELSE 5430
5420 CQD(1,1)=.000042*(QD(1,1))-1.29 : RETURN
5430 IF I>122 AND I<154 THEN 5440 ELSE 5450
5440 CQD(1,1)=.000232*(QD(1,1))-1.081 : RETURN
5450 IF I>153 AND I<183 THEN 5460 ELSE 5470
5460 CQD(1,1)=.006477*(QD(1,1))-1.652 : RETURN
5470 IF I>182 AND I<214 THEN 5480 ELSE 5490
5480 CQD(1,1)=.000158*(QD(1,1))-1.115 : RETURN
5490 IF I>213 AND I<244 THEN 5500 ELSE 5510
5500 CQD(1,1)=.000204*(QD(1,1))-1.087 : RETURN
5510 IF I>243 AND I<275 THEN 5520 ELSE 5530
5520 CQD(1,1)=.000206*(QD(1,1))-1.089 : RETURN
5530 IF I>274 AND I<305 THEN 5540 ELSE 5550
5540 CQD(1,1)=.000229*(QD(1,1))-1.084 : RETURN
5550 IF I>304 AND I<336 THEN 5560 ELSE 5570
5560 CQD(1,1)=.000053*(QD(1,1))-1.25 : RETURN
5570 CQD(1,1)=.000001*(QD(1,1))-1.661 : RETURN
5590 '
5600 RETURN

```

5610 '

共通ルーチン (ただし、データ数が異なる)

```
5620 *XY
5630 ' ***** 流出負荷量のグラフ . . . . . *****
5640 COLOR 3 : LPRINT CHR$(21)+"BF*32";
5650 LOCATE 0,0 : PRINT " . . . . .のスイッチを入れて下さい。 "
5660 '
5670 ' ***** 座標軸 ***** : ' データ数に注意
5680 ITB=NE-NS+1 : XD=3600/ITB
5690 LPRINT "S3" : LPRINT "LO" : LPRINT "Q0"
5700 LPRINT "M"200,200
5710 LPRINT "X0"117.92,11
5712 LPRINT "D"200,1600
5720 LPRINT "M"200,200
5730 ' IF NE<179 THEN 5759
5740 LPRINT "X1"157.895*2,1
5741 LPRINT "X1"163.158*2,1
5742 LPRINT "X1"157.895*2,1
5743 LPRINT "X1"163.158*2,1
5744 LPRINT "X1"163.158*2,1
5745 LPRINT "X1"152.632*2,1
5746 LPRINT "X1"163.158*2,1
5747 LPRINT "X1"157.895*2,1
5748 LPRINT "X1"163.158*2,1
5749 LPRINT "X1"157.895*2,1
5750 LPRINT "X1"163.158*2,1
5753 LPRINT "X1"36.8421*2,1
5760 LPRINT "M"2100,200
5770 LPRINT "D"2100,1200
5780 LPRINT "X2"400,10
5790 LPRINT "D"200,1600
5800 LPRINT "S5" : LPRINT "LO" : LPRINT "Q0"
5810 LPRINT "M"200,200
5820 FOR I=0 TO 2 : LPRINT "M"50,185+117.92*I*5
5830 LPRINT "P"i*1*5 : NEXT I
5840 FOR I=0 TO 2 : LPRINT "M"2100,1185+200*I
5850 LPRINT "P"(50-I*25) : NEXT I
5860 LPRINT "M"150,1300 : LPRINT "Q1" : LPRINT "S3"
5870 LPRINT "M"2180,900
5880 LPRINT "M"200,20*CQD(0,1)+200
5890 FOR I=NS TO NE
5900 XX=I*XD+200 : YY=40*CQD(0,1)+200
5910 LPRINT "D"XX,YY
5920 NEXT I
5930 LPRINT "M"1000,900
5960 LPRINT "D"1300,900
5970 LPRINT "M"200,40*CQD(1,1)+200
5980 LPRINT "L1" : LPRINT "B10"
5990 FOR I=NS TO NE
6000 XX=I*XD+200 : YY=40*CQD(1,1)+200
6010 LPRINT "D"XX,YY
6020 NEXT I
6030 LPRINT "M"1000,1000
6060 LPRINT "D"1300,1000
6070 LPRINT "LO"
6080 LPRINT "M"200,1600
6090 FOR I=NS TO NE
6100 IF PD(1,1)=0 THEN GOTO 6140
6110 XX=I*XD+200 : YY=1600-8*PD(1,1)
6120 LPRINT "M"XD*I+200,1600
6130 LPRINT "D"XX,YY
6140 NEXT I
```

```

6150 COLOR 3 : LPRINT CHR$(21)+"BF*$1";
6160 COLOR 7 : RETURN 1270
7000 ***** OUTPUT DATA TO DISK2 *****
7001 SCREEN 3 : CONSOLE 0,25,0,1 : CLS 3
7010 INPUT " データをディスクに保存しますか。 YES/1 OR NO/0";Z
7020 IF Z<>1 THEN RETURN 1270
7030 INPUT " データの名前を付けて下さい。 ";DNN2$
7040 DNN2$="A:\N88BASIC\DATA¥"+DNN2$
7050 OPEN DNN2$ FOR OUTPUT AS #1
7060 INPUT " データの副題を付けて下さい。 ";DNMAE$
7070 PRINT #1,DNMAE$
7080 FOR I=1 TO 342                                     : ' データ数に注意
7090   PRINT #1,INS(I)
7100 NEXT I : PRINT ""
7110   KONS(1)=" 実測値 " : KONS(2)=" 計算値 "
7120 FOR K=1 TO 2
7130   PRINT #1,KONS(K);""
7140   FOR I=1 TO 342                                     : ' データ数に注意
7150     PRINT #1,CQD(K-1,I);""
7160   NEXT I
7170 NEXT K
7180 CLOSE #1
7190 RETURN 1270

```

```

2650 *CALUCLATION
2660 CLS
2670 FOR I=1 TO 179 : IF PD(1,I)=0 THEN PW(I)=-ET ELSE PW(I)=PD(1,I)
2675 NEXT I : GOTO 2790
2790 LOCATE 0,0 : INPUT " 使用する最初のデータは ? ",NS
2800 LOCATE 0,0 : INPUT " 使用する最後のデータは ? ",NE
2810 Q3=0 : AQ=0 : AL=0 : AVQ=0 : AVL=0 : QB=0 : INFI=0
2812 S1=0 : S2=0 : H1=0 : H2=0 : BT=0
2820 FOR J=0 TO 6 : ET(J)=0 : NEXT J
2830 FOR I=NS TO NE : QD(1,I)=0 : CQD(1,I)=0
2840 FOR J=1 TO 4
2850 S1=PARA(J,2) : S2=PARA(J,3) : H1=PARA(J,4) : H2=PARA(J,5)
2860 BT=PARA(J,6) : C1(J)=PARA(J,7)/1000 : C2(J)=PARA(J,8)/1000
2870 IF PW(I)=-ET THEN PW(I)=PW(I)*WC(2)
2880 IF J<>1 THEN P1(J)=P1(J)+Q3+ET(J-1) ELSE P1(1)=P1(1)+PW(I)
2890 IF P1(J)<0 THEN ET(J)=P1(J) ELSE ET(J)=0
2900 IF P1(J)<=0 THEN Q1=0 : Q2=0 : Q3=0 : GOTO 2960
2910 IF P1(J)<=H1 THEN Q1=0 : Q2=0 : GOTO 2950
2920 IF P1(J)<=(H1+H2) THEN Q2=0 : GOTO 2940
2930 Q2=S2*(P1(J)-H1-H2)
2940 Q1=S1*(P1(J)-H1)
2950 Q3=BT*P1(J)
2960 QD(1,I)=QD(1,I)+(Q1+Q2)*WC(2) : P1(J)=P1(J)-Q1-Q2-Q3
2970 CQ1=C1(J)*Q1 : CQ2=C2(J)*Q2
2980 CQD(1,I)=CQD(1,I)+(CQ1+CQ2)*WC(2)
2990 IF P1(J)<=0 THEN P1(J)=0
3000 NEXT J : QB=BT*P1(4) : Q3=0 : ET(4)=0
3010 QB=BT*P1(4)
3020 FOR J=5 TO 6
3030 S1=PARA(J,2) : S2=PARA(J,3) : H1=PARA(J,4) : H2=PARA(J,5)
3040 BT=PARA(J,6) : C1(J)=PARA(J,7)/1000 : C2(J)=PARA(J,8)/1000
3050 IF PW(I)=-ET THEN PW(I)=PW(I)*WC(1)
3060 IF J<>5 THEN P1(J)=P1(J)+Q3+ET(J-1) ELSE P1(5)=P1(5)+PW(I)
3070 IF P1(J)<0 THEN ET(J)=P1(J) ELSE ET(J)=0
3080 IF P1(J)<=0 THEN Q1=0 : Q2=0 : Q3=0 : GOTO 3140
3090 IF P1(J)<=H1 THEN Q1=0 : Q2=0 : GOTO 3130
3100 IF P1(J)<=(H1+H2) THEN Q2=0 : GOTO 3120
3110 Q2=S2*(P1(J)-H1-H2)
3120 Q1=S1*(P1(J)-H1)
3130 Q3=BT*P1(J)
3140 QD(1,I)=QD(1,I)+(Q1+Q2)*WC(1) : P1(J)=P1(J)-Q1-Q2-Q3
3150 IF P1(J)<=0 THEN P1(J)=0
3160 CQ1=C1(J)*Q1 : CQ2=C2(J)*Q2
3170 CQD(1,I)=CQD(1,I)+(CQ1+CQ2)*WC(1)
3180 NEXT J : QB=QB+BT*P1(6)
3190 QB=QB+BT*P1(6)
3200 AQ=AQ+QD(0,I) : AL=AL+CQD(0,I) : INFI=INFI+QB
3210 QD(1,I)=QD(1,I)*AREA : CQD(1,I)=CQD(1,I)*AREA
3220 IF LPARA<>3 THEN 3240
3230 GOSUB *LQMETHOD
3240 NEXT I
3250 AVQ=AQ/(NE-NS+1) : AVL=AL/(NE-NS+1)
3260 '

```

## 農業集水域灌漑期用ルーチン

```

2640 * --- CALCULATION ---
2650 *CALCULATION
2660 CLS
2670 FOR I= 1 TO 30 : IF PD(1,I)=0 THEN PW(1)=-3.57 ELSE PW(1)=PD(1,I)
2680 NEXT I
2690 FOR I= 31 TO 61 : IF PD(1,I)=0 THEN PW(1)=-2.35 ELSE PW(1)=PD(1,I)
2700 NEXT I
2710 FOR I= 62 TO 91 : IF PD(1,I)=0 THEN PW(1)=-2.35 ELSE PW(1)=PD(1,I)
2720 NEXT I
2730 FOR I= 92 TO 122 : IF PD(1,I)=0 THEN PW(1)=-2.31 ELSE PW(1)=PD(1,I)
2740 NEXT I
2750 FOR I=123 TO 153 : IF PD(1,I)=0 THEN PW(1)=-2.94 ELSE PW(1)=PD(1,I)
2760 NEXT I
2770 FOR I=154 TO 183 : IF PD(1,I)=0 THEN PW(1)=-1.91 ELSE PW(1)=PD(1,I)
2780 NEXT I
2790 LOCATE 0,0 : 'INPUT " 使用する最初のデータは ? ",NS
2800 LOCATE 0,0 : 'INPUT " 使用する最後のデータは ? ",NE
2810 Q3=0 : AQ=0 : AL=0 : AVQ=0 : AVL=0 : QB=0 : INFI=0
2820 S1=0 : S2=0 : H1=0 : H2=0 : BT=0
2821 NS = 31 : NE = 153
2830 FOR J=0 TO 6 : ET(J)=0 : NEXT J
2840 FOR I=1 TO 183 : QD(1,I)=0 : CQD(1,I)=0
2850 FOR J=1 TO 4
2860 S1=PARA(J,2) : S2=PARA(J,3) : H1=PARA(J,4) : H2=PARA(J,5)
2870 BT=PARA(J,6) : C1(J)=PARA(J,7)/1000 : C2(J)=PARA(J,8)/1000
2890 IF J>1 THEN P1(J)=P1(J)+Q3+ET(J-1) ELSE P1(1)=P1(1)+PW(1)
2900 IF P1(J)<0 THEN ET(J)=P1(J) ELSE ET(J)=0
2910 IF P1(J)<=0 THEN Q1=0 : Q2=0 : Q3=0 : GOTO 2970
2920 IF P1(J)<=H1 THEN Q1=0 : Q2=0 : GOTO 2960
2930 IF P1(J)<=(H1+H2) THEN Q2=0 : GOTO 2950
2940 Q2=S2*(P1(J)-H1-H2)
2950 Q1=S1*(P1(J)-H1)
2960 Q3=BT*P1(J)
2970 QD(1,I)=QD(1,I)+(Q1+Q2)*WC(2) : P1(J)=P1(J)-Q1-Q2-Q3
2980 CQ1=C1(J)*Q1 : CQ2=C2(J)*Q2
2990 CQD(1,I)=CQD(1,I)+(CQ1+CQ2)*WC(2)
3000 IF P1(J)<=0 THEN P1(J)=0
3010 NEXT J : Q3=0 : ET(4)=0
3020 QB=BT*P1(4)
3025 '
3030 IF I<=NS OR I>=NE THEN GOTO *NONIRRI ELSE GOTO *IRRI
3040 '
3050 *NONIRRI
3051 S1(5)=.34 : S2(5)=.38 : H1(5)= 0 : H2(5)=9
3052 BT(5)=-.19 : C1(5)=3.8 : C2(5)=.2
3053 S1(6)=-.034 : S2(6)=0 : H1(6)= 0 : H2(5)=0
3054 BT(6)=0 : C1(6)= 8.1 : C2(6)= 0
3060 '
3062 FOR J=5 TO 6
3063 S1=S1(J) : S2=S2(J) : H1=H1(J) : H2=H2(J)
3064 BT=BT(J) : C1(J)=C1(J)/1000 : C2(J)=C2(J)/1000
3066 IF J>5 THEN P1(J)=P1(J)+Q3+ET(J-1) ELSE P1(5)=P1(5)+PW(1)
3067 IF P1(J)<0 THEN ET(J)=P1(J) ELSE ET(J)=0
3068 IF P1(J)<=0 THEN Q1=0 : Q2=0 : Q3=0 : GOTO 3074
3069 IF P1(J)<=H1 THEN Q1=0 : Q2=0 : GOTO 3073
3070 IF P1(J)<=(H1+H2) THEN Q2=0 : GOTO 3072
3071 Q2=S2*(P1(J)-H1-H2)
3072 Q1=S1*(P1(J)-H1)
3073 Q3=BT*P1(J)
3074 QD(1,I)=QD(1,I)+(Q1+Q2)*WC(1) : P1(J)=P1(J)-Q1-Q2-Q3

```

```

3075 IF P1(J)<=0 THEN P1(J)=0
3076 CQ1=C1(J)*Q1 : CQ2=C2(J)*Q2
3077 CQD(1,1)=CQD(1,1)+(CQ1+CQ2)*WC(1)
3078 NEXT J
3079 QB=QB+BT*P1(6)
3080 GOTO 3390
3100 '
3110 *IRRI
3111 PW(1)=PW(1)+QD(1,1)/WC(1)
3112 C2(5)=CQD(1,1)/QD(1,1)
3113 QD(1,1)=0
3119 '
3120 FOR J=5 TO 6
3130 S1=PARA(J,2) : S2=PARA(J,3) : H1=PARA(J,4) : H2=PARA(J,5)
3140 IF J=6 THEN 3143
3141 BT=PARA(J,6) : C1(J)=PARA(J,7)/1000 : C2(J)=C2(5)/1000
3142 GOTO 3160
3143 BT=PARA(J,6) : C1(J)=PARA(J,7)/1000 : C2(J)=PARA(J,8)/1000
3160 IF J<>5 THEN P1(J)=P1(J)+Q3+ET(J-1) ELSE P1(5)=P1(5)+PW(1)
3170 IF P1(J)<0 THEN ET(J)=P1(J) ELSE ET(J)=0
3180 IF P1(J)<=0 THEN Q1=0 : Q2=0 : Q3=0 : GOTO 3240
3190 IF P1(J)<=H1 THEN Q1=0 : Q2=0 : GOTO 3230
3200 IF P1(J)<=(H1+H2) THEN Q2=0 : GOTO 3220
3201 IF J=6 THEN GOTO 3210
3202 Q2=S2*(P1(J)-H1-H2) : P1(J)=H1+H2
3203 Q1=S1*(P1(J)-H1)
3204 Q3=BT*P1(J)
3205 QD(1,1)=QD(1,1)+(Q1+Q2)*WC(1) : P1(J)=P1(J)-Q1-Q2-Q3
3207 '
3209 GOTO 3240
3210 Q2=S2*(P1(J)-H1-H2)
3220 Q1=S1*(P1(J)-H1)
3230 Q3=BT*P1(J)
3240 QD(1,1)=QD(1,1)+(Q1+Q2)*WC(1) : P1(J)=P1(J)-Q1-Q2-Q3
3250 IF P1(J)<=0 THEN P1(J)=0
3260 CQ1=C1(J)*Q1 : CQ2=C2(J)*Q2
3270 CQD(1,1)=CQD(1,1)+(CQ1+CQ2)*WC(1)
3280 NEXT J
3290 QB=QB+BT*P1(6)
3300 '
3390 AQ=AQ+QD(0,1) : AL=AL+CQD(0,1) : INF1=INF1+QB
3400 QD(1,1)=QD(1,1)*AREA : CQD(1,1)=CQD(1,1)*AREA
3410 IF LPARA<>3 THEN 3430
3420 GOSUB *LQMETHOD
3430 NEXT I
3440 AVQ=AQ/(NE-NS+1) : AVL=AL/(NE-NS+1)

```



## 第V章用プログラム

## 30年間森林集水域用プログラム

```

1010 ' --- INPUT DATA ---
1020 WIDTH 80, 25: CONSOLE 0, 25, 0, 1: SCREEN 3: CLS 3
1030 DIM MLQ(2, 12), QD(2, 366), CQD(2, 366), PD(2, 366), PW(366), R(366)
1040 DIM Y(2, 366)
1050 PARA = 2: MY(1) = 30000: MY(2) = 15
1060 FOR M = 1 TO 12: READ MLQ(1, M): NEXT M
1070 DATA 31, 59, 90, 120, 151, 181, 212, 243, 273, 304, 334, 365
1080 FOR M = 1 TO 12: READ MLQ(2, M): NEXT M
1090 DATA 31, 60, 91, 121, 152, 182, 213, 244, 274, 305, 335, 366
1100 '
1110 PARA(1, 2) = .0039: PARA(1, 3) = .1: PARA(1, 4) = 0: PARA(1, 5) = 50
1120 PARA(1, 6) = .27: PARA(1, 7) = -.47: PARA(1, 8) = .8
1130 PARA(2, 2) = .008: PARA(2, 3) = -.0239: PARA(2, 4) = 61: PARA(2, 5) = 56
1140 PARA(2, 6) = .0266: PARA(2, 7) = .37: PARA(2, 8) = 1.5
1150 PARA(3, 2) = .0082: PARA(3, 3) = 0: PARA(3, 4) = 0: PARA(3, 5) = 0
1160 PARA(3, 6) = .0079: PARA(3, 7) = .51: PARA(3, 8) = 0
1170 PARA(4, 2) = .00008: PARA(4, 3) = 0: PARA(4, 4) = 0: PARA(4, 5) = 0
1180 PARA(4, 6) = 0: PARA(4, 7) = .13: PARA(4, 8) = 0
1190 P1(1) = 0: P1(2) = 40: P1(3) = 115: P1(4) = 3100
1200 WC(1) = 1!: AREA = 2948
1210 '
1220 LQKATA = 1
1230 '
1240 ' 降水量データの読み込み
1250 PARA = 1: CLS 3
1260 FOR YEAR = 1 TO 35
1270 YEARS = STR$(YEAR)
1280 DNS = "B:INI"+YEARS+".DAT"
1290 IF YEAR >= 10 THEN 1320
1300 DNS = LEFT$(DNS, 5) + RIGHT$(DNS, 5)
1310 GOTO 1330
1320 DNS = LEFT$(DNS, 5) + RIGHT$(DNS, 6)
1330 DDNS = "B:RT"+YEARS+".DAT"
1340 IF YEAR >= 10 THEN 1370
1350 DDNS = LEFT$(DDNS, 4) + RIGHT$(DDNS, 5)
1360 GOTO 1380
1370 DDNS = LEFT$(DDNS, 4) + RIGHT$(DDNS, 6)
1380 DNN2$ = "E:CLF1"+YEARS+".DAT"
1390 IF YEAR >= 10 THEN 1420
1400 DNN2$ = LEFT$(DNN2$, 6) + RIGHT$(DNN2$, 5)
1410 GOTO 1430
1420 DNN2$ = LEFT$(DNN2$, 6) + RIGHT$(DNN2$, 6)
1430 OPEN DNS FOR INPUT AS #1
1440 FOR I = 1 TO 7: INPUT #1, A(I): PRINT A(I): NEXT I
1450 CLOSE #1
1460 YR = A(1): NS = A(2): NIE = A(3): IS = A(4): IE = A(5): NIS = A(6): NE = A(7)
1470 N = NE: PDN = N: QDN = N
1480 OPEN DDNS FOR INPUT AS #1
1490 FOR I = 1 TO A(7)
1500 INPUT #1, R(I)
1510 NEXT I
1520 CLOSE #1
1530 FOR I = 1 TO NE: PD(1, I) = 0: NEXT I
1540 FOR I = 1 TO NE: PD(1, I) = R(I): NEXT I
1550 CLS 3
1560 '
1570 IF A(7) = 365 THEN UY = 1 ELSE UY = 2: 'うるう年判別
1580 '

```

```

1590 GOSUB *OFFICIENT
1600 GOSUB *CALCULATION
1610 NEXT YEAR
1620 GOSUB *FINISH
1630 END
1640 *FINISH : LOCATE 0,0
1650 PRINT "1 : COPY 2 : RETRY 3 : ERROR 4 : KPRINT 5 : END 6 : X-Y";
1660 INS = INPUT$(1); IN = VAL(INS); IF 0 < IN AND IN < 7 THEN PRINT ELSE 1650
1670 ON IN GOTO *HARDCOPY,*RETRY,*ER,*KPRINT,2980,*XY
1680 *HARDCOPY : COPY : LPRINT CHR$(12) : GOTO *FINISH
1690 *RETRY : RETURN 1590
1700 *SUBEND : RETURN
1710 '
1720 ' --- INPUT OFFICIENT DATA ---
1730 *OFFICIENT
1740 H1 = 0: H2 = 100: V1 = 112: V2 = 272
1750 WINDOW (10, 0)-(50, 50): VIEW (H1, V1)-(H2, V2)
1760 RETURN
1770 '
1780 ' --- CALCULATION ---
1790 *CALCULATION
1800 CLS
1810 FOR I=NS TO NIE
1820 IF PD(1,I)=0 THEN PW(I)=-2.59 ELSE PW(I)=PD(1,I)
1830 NEXT I
1840 FOR I=IS TO IE
1850 IF PD(1,I)=0 THEN PW(I)=-3.53 ELSE PW(I)=PD(1,I)
1860 NEXT I
1870 FOR I=NIS TO NE
1880 IF PD(1,I)=0 THEN PW(I)=-2.59 ELSE PW(I)=PD(1,I)
1890 NEXT I : FOR I=1 TO NE : PRINT PW(I):: NEXT
1900 Q3 = 0: Q8 = 0: INF1 = 0
1910 S1 = 0: S2 = 0: H1 = 0: H2 = 0: BT = 0
1920 FOR J = 0 TO 4: ET(J) = 0: NEXT J
1930 FOR I = NS TO NE: QD(1, I) = 0: CQD(1, I) = 0
1940 FOR J = 1 TO 4
1950 S1=PARA(J,2):S2=PARA(J,3): H1=PARA(J,4):H2=PARA(J,5)
1960 BT=PARA(J,6):C1(J)=PARA(J,7)/1000:C2(J)=PARA(J,8)/1000
1980 IF J <> 1 THEN PI(J)=PI(J)+Q3+ET(J-1) ELSE PI(1)=PI(1)+PW(1)
1990 IF PI(J) < 0 THEN ET(J) = PI(J) ELSE ET(J) = 0
2000 IF PI(J) <= 0 THEN Q1 = 0: Q2 = 0: Q3 = 0: GOTO 2060
2010 IF PI(J) <= H1 THEN Q1 = 0: Q2 = 0: GOTO 2050
2020 IF PI(J) <= (H1 + H2) THEN Q2 = 0: GOTO 2040
2030 Q2 = S2 * (PI(J) - H1 - H2)
2040 Q1 = S1 * (PI(J) - H1)
2050 Q3 = BT * PI(J)
2060 QD(1,I)=QD(1,I)+(Q1+Q2) : PI(J)=PI(J)-Q1-Q2-Q3
2070 CQ1 = C1(J) * Q1: CQ2 = C2(J) * Q2
2080 CQD(1,I)=CQD(1,I)+(CQ1+CQ2)
2090 IF PI(J) <= 0 THEN PI(J) = 0
2100 NEXT J: Q3 = 0: ET(4) = 0
2110 PRINT QD(1,I)*2948 : PI(4);
2120 QD(1,I)=QD(1,I)*AREA: CQD(1,I)=CQD(1,I)*AREA
2130 PRINT I;" ":PRINT QD(1, I):: PRINT CQD(1,I)
2140 GOSUB *LQMETHOD
2150 NEXT I
2160 '
2170 ' --- GRAPH ---
2180 *GRAPH : GOTO 2380
2190 ON PARA GOSUB *ORIGINAL,*SEMILOG
2200 H1=320: H2=639: V1=110: V2=250: OX=0: OY=0: MX=PDN+1: MY = MY(PARA)
2210 WINDOW (OX, OY)-(MX, MY): VIEW (H1, V1)-(H2, V2)

```

```

2220 DRAW "C7": CLS 2
2230 LINE (OX, OY)-(OX, MY): LINE (OX, MY)-(MX, MY)
2240 'A(1)=1 : A(2)=4 : A(3)=8 : A(4)=10 : A(5)=16
2250 'FOR Y=1 TO 5 : AY=LOG(A(Y)) : LINE(OX,AY)-(OX+.3,AY) : NEXT Y
2260 FOR JB = 0 TO 1: CL = JB + 3: DRAW "C=CL;"
2270 POINT(1,MY-Y(JB,NS)) : XK=PDN/(NE-NS+1)
2280 FOR I=2 TO NE-NS+1: X=I*XK: Y=MY-Y(JB,NS+I-1): DRAW "M=X; ,Y;": NEXT I
2290 NEXT JB
2300 '
2310 OX=0: OY=0: MX=PDN+1: MY=50: H3=320: V3=0: H4=639: V4=110
2320 WINDOW (OX, OY)-(MX, MY): VIEW (H3, V3)-(H4, V4): CLS 2
2330 LINE (OX, OY)-(OX, MY): LINE (OX, MY)-(MX, MY)
2340 FOR JB = 0 TO 1: CL = JB + 5: DRAW "C=CL;"
2350 POINT(1,MY-CQD(JB,NS)) : XK=PDN/(NE-NS+1)
2360 FOR I=2 TO NE-NS+1: X=I*XK: Y=MY-CQD(JB,NS+I-1): DRAW "M=X; ,Y;": NEXT I
2370 NEXT JB
2380 OPEN DNN2$ FOR OUTPUT AS #1
2390   FOR I = 1 TO NE
2400     PRINT #1, QD(1, I); CQD(1, I)
2410   NEXT I
2420 CLOSE #1
2430 RETURN
2440 '
2450 *ORIGINAL
2460 FOR J = 0 TO 1: FOR I = NS TO NE: Y(J, I) = QD(J, I): NEXT I, J: RETURN
2470 *SEMILOG
2480 FOR J = 0 TO 1: FOR I = NS TO NE
2490   IF QD(J, I) <= 0 THEN Y(J, I) = 0 ELSE Y(J, I) = LOG(QD(J, I))
2500 NEXT I, J: RETURN
2510 '
2520 '
2530 *LQMETHOD
2540 '
2550 ' ***** UWASO *****
2560 IF LQKATA=2 THEN 2820
2570 IF I>=1 AND I<=MLQ(UY,1) THEN 2580 ELSE 2590 : '1
2580 CQD(1,1)=.0005*QD(1,1)-.17 : RETURN
2590 IF I>MLQ(UY,1) AND I<=MLQ(UY,2) THEN 2600 ELSE 2610 : '2
2600 CQD(1,1)=.00028*QD(1,1)+.37 : RETURN
2610 IF I>MLQ(UY,2) AND I<=MLQ(UY,3) THEN 2620 ELSE 2630 : '3
2620 CQD(1,1)=.00049*QD(1,1)-.29 : RETURN
2630 IF I>MLQ(UY,3) AND I<=MLQ(UY,4) THEN 2640 ELSE 2650 : '4
2640 CQD(1,1)=.00045*QD(1,1)-.1 : RETURN
2650 IF I>MLQ(UY,4) AND I<=MLQ(UY,5) THEN 2660 ELSE 2670 : '5
2660 CQD(1,1)=.00047*QD(1,1)-.13 : RETURN
2670 IF I>MLQ(UY,5) AND I<=MLQ(UY,6) THEN 2680 ELSE 2690 : '6
2680 CQD(1,1)=.00052*QD(1,1)-.25 : RETURN
2690 IF I>MLQ(UY,6) AND I<=MLQ(UY,7) THEN 2700 ELSE 2710
2700 CQD(1,1)=.00074*QD(1,1)-1.88 : RETURN : '7
2710 IF I>MLQ(UY,7) AND I<=MLQ(UY,8) THEN 2720 ELSE 2730
2720 CQD(1,1)=.00088*QD(1,1)-3.11 : RETURN : '8
2730 IF I>MLQ(UY,8) AND I<=MLQ(UY,9) THEN 2740 ELSE 2750 : '9
2740 CQD(1,1)=.0009*QD(1,1)-1.95 : RETURN
2750 IF I>MLQ(UY,9) AND I<=MLQ(UY,10) THEN 2760 ELSE 2770 : '10
2760 CQD(1,1)=.00059*QD(1,1)-.14 : RETURN
2770 IF I>MLQ(UY,10) AND I<=MLQ(UY,11) THEN 2780 ELSE 2790 : '11
2780 CQD(1,1)=.0007*QD(1,1)-.88 : RETURN
2790 IF I>MLQ(UY,11) AND I<=MLQ(UY,12) THEN 2800 ELSE 3070 : '12
2800 CQD(1,1)=.00058*QD(1,1)-.44 : RETURN
2810 '
2820 IF I>=1 AND I<=MLQ(UY,1) THEN 2830 ELSE 2840 : '1
2830 CQD(1,1)=.000232*(QD(1,1))-1.081 : RETURN

```

```

2840 IF I>MLQ(UY,1) AND I<=MLQ(UY,1) THEN 2850 ELSE 2860 : '2
2850 CQD(1,1)=.006477*(QD(1,1))1.652 : RETURN
2860 IF I>MLQ(UY,1) AND I<=MLQ(UY,1) THEN 2870 ELSE 2880 : '3
2870 CQD(1,1)=.000158*(QD(1,1))1.115 : RETURN
2880 IF I>MLQ(UY,1) AND I<=MLQ(UY,1) THEN 2890 ELSE 2900 : '4
2890 CQD(1,1)=.000204*(QD(1,1))1.087 : RETURN
2900 IF I>MLQ(UY,1) AND I<=MLQ(UY,1) THEN 2910 ELSE 2920 : '5
2910 CQD(1,1)=.000206*(QD(1,1))1.089 : RETURN
2920 IF I>MLQ(UY,1) AND I<=MLQ(UY,1) THEN 2930 ELSE 2940 : '6
2930 CQD(1,1)=.000229*(QD(1,1))1.084 : RETURN
2940 IF I>MLQ(UY,1) AND I<=MLQ(UY,1) THEN 2950 ELSE 2960
2950 CQD(1,1)=.000053*(QD(1,1))1.25 : RETURN : '7
2960 IF I>MLQ(UY,1) AND I<=MLQ(UY,1) THEN 2970 ELSE 2980
2970 CQD(1,1)=.000001*(QD(1,1))1.661 : RETURN : '8
2980 IF I>MLQ(UY,1) AND I<=MLQ(UY,1) THEN 2990 ELSE 3000 : '9
2990 CQD(1,1)=.000045*(QD(1,1))1.293 : RETURN
3000 IF I>MLQ(UY,1) AND I<=MLQ(UY,1) THEN 3010 ELSE 3020 : '10
3010 CQD(1,1)=.00048*(QD(1,1))1.019 : RETURN
3020 IF I>MLQ(UY,1) AND I<=MLQ(UY,1) THEN 3030 ELSE 3040 : '11
3030 CQD(1,1)=.000027*(QD(1,1))1.348 : RETURN
3040 IF I>MLQ(UY,1) AND I<=MLQ(UY,1) THEN 3050 ELSE 3070 : '12
3050 CQD(1,1)=.000042*(QD(1,1))1.29 : RETURN
3070 RETURN

```

30年間農業集水域用プログラム

```

1010 ' --- INPUT DATA ---
1020 WIDTH 80,25:CONSOLE 0,25,0,1:SCREEN 3:CLS 3
1030 DIM MLQ(2,12),QD(2,366),CQD(2,366),PD(2,366),PW(366),R(366)
1040 DIM Y(2,366)
1050 PARA=2:MY(1)=30000:MY(2)=15
1060 FOR M=1 TO 12:READ MLQ(1,M):NEXT M
1070 DATA 31,59,90,120,151,181,212,243,273,304,334,365
1080 FOR M=1 TO 12:READ MLQ(2,M):NEXT M
1090 DATA 31,60,91,121,152,182,213,244,274,305,335,366
1100 '
1110 PARA(1,2)=.05:PARA(1,3)=.19:PARA(1,4)=5:PARA(1,5)=28
1120 PARA(1,6)=.44:PARA(1,7)=4.4:PARA(1,8)=8.4
1130 PARA(2,2)=.0037:PARA(2,7)=5.2
1140 PI(1)=0:PI(2)=168:PI(3)=0:PI(4)=207
1150 WC(1)=.145:WC(2)=.855:AREA=667
1160 '
1170 LQKATA=2
1180 '
1190 ' 降水量データの読み込み
1200 PARA=1:CLS 3
1210 FOR YEAR=1 TO 35
1220 YEARS=STR$(YEAR)
1230 DNS="B:INI"+YEARS+".DAT"
1240 IF YEAR >= 10 THEN 1270
1250 DNS=LEFT$(DNS,5)+RIGHT$(DNS,5)
1260 GOTO 1280
1270 DNS=LEFT$(DNS,5)+RIGHT$(DNS,6)
1280 DDNS="B:RT"+YEARS+".DAT"
1290 IF YEAR >= 10 THEN 1320
1300 DDNS=LEFT$(DDNS,4)+RIGHT$(DDNS,5)
1310 GOTO 1330
1320 DDNS=LEFT$(DDNS,4)+RIGHT$(DDNS,6)
1330 DNN2S="e:CLK"+YEARS+".DAT"
1340 IF YEAR >= 10 THEN 1370

```

```

1350 DNN2$=LEFT$(DNN2$,5)+RIGHT$(DNN2$,5)
1360 GOTO 1380
1370 DNN2$=LEFT$(DNN2$,5)+RIGHT$(DNN2$,6)
1380 OPEN DNN$ FOR INPUT AS #1
1390 FOR I=1 TO 7:INPUT #1,A(I):PRINT A(I): NEXT I
1400 CLOSE #1
1410 YR=A(1) : NS=A(2) : NIE=A(3) : IS=A(4) : IE=A(5) : NIS=A(6) : NE=A(7)
1420 N=NE : PDN=N : QDN=N
1430 OPEN DDN$ FOR INPUT AS #1
1440 FOR I=1 TO A(7)
1450 INPUT #1,R(I)
1460 NEXT I
1470 CLOSE #1
1480 FOR I=1 TO NE: PD(1,I)=0: NEXT I
1490 FOR I=1 TO NE: PD(1,I)=R(I):NEXT I
1500 CLS 3
1510 '
1520 IF A(7)=365 THEN UY=1 ELSE UY=2: 'うるう年判別
1530 '
1540 GOSUB *OFFICIENT
1550 GOSUB *CALCULATION
1560 NEXT YEAR
1570 GOSUB *FINISH
1580 END
1590 *FINISH : LOCATE 0,0
1600 PRINT "1 : COPY 2 : RETRY 3 : ERROR 4 : KPRINT 5 : END 6 : X-Y";
1610 IN$=INPUT$(1): IN=VAL(IN$): IF 0 < IN AND IN < 7 THEN PRINT ELSE 1600
1620 ON IN GOTO *HARDCOPY,*RETRY,*ER,*KPRINT,3090,*XY
1630 *HARDCOPY : COPY : LPRINT CHR$(12) : GOTO *FINISH
1640 *RETRY : RETURN 1540
1650 *SUBEND : RETURN
1660 '
1670 ' --- INPUT OFFICIENT DATA ---
1680 *OFFICIENT
1690 H1=0: H2=100: V1=112: V2=272
1700 WINDOW (10,0)-(50,50): VIEW (H1,V1)-(H2,V2)
1710 RETURN
1720 '
1730 ' --- CALCULATION ---
1740 *CALCULATION
1750 CLS
1760 FOR I=NS TO NIE
1770 IF PD(1,I)=0 THEN PW(I)=-2.55 ELSE PW(I)=PD(1,I)
1780 NEXT I
1790 FOR I=IS TO IE
1800 IF PD(1,I)=0 THEN PW(I)=-3.61 ELSE PW(I)=PD(1,I)
1810 NEXT I
1820 FOR I=NIS TO NE
1830 IF PD(1,I)=0 THEN PW(I)=-2.55 ELSE PW(I)=PD(1,I)
1840 NEXT I : FOR I=1 TO NE : PRINT PW(I);: NEXT
1850 Q3=0: QB=0: INF1=0
1860 S1=0: S2=0: H1=0: H2=0: BT=0
1870 FOR J=0 TO 4: ET(J)=0: NEXT J
1880 FOR I=NS TO NE: QD(1,I)=0: CQD(1,I)=0
1890 FOR J=1 TO 2
1900 S1=PARA(J,2): S2=PARA(J,3): H1=PARA(J,4): H2=PARA(J,5)
1910 BT=PARA(J,6): C1(J)=PARA(J,7)/1000: C2(J)=PARA(J,8)/1000
1930 IF J <> 1 THEN P1(J)=P1(J)+Q3+ET(J-1) ELSE P1(1)=P1(1)+PW(1)
1940 IF P1(J) < 0 THEN ET(J)=P1(J) ELSE ET(J)=0
1950 IF P1(J) <= 0 THEN Q1=0: Q2=0: Q3=0: GOTO 2010
1960 IF P1(J) <= H1 THEN Q1=0: Q2=0: GOTO 2000
1970 IF P1(J) <= (H1+H2) THEN Q2=0: GOTO 1990

```

```

1980 Q2=S2*(P1(J)-H1-H2)
1990 Q1=S1*(P1(J)-H1)
2000 Q3=BT*P1(J)
2010 QD(1,1)=QD(1,1)+(Q1+Q2)*WC(2); P1(J)=P1(J)-Q1-Q2-Q3
2020 CQ1=C1(J)*Q1; CQ2=C2(J)*Q2
2030 CQD(1,1)=CQD(1,1)+(CQ1+CQ2)*WC(2)
2040 IF P1(J) <= 0 THEN P1(J)=0
2050 NEXT J; Q3=0; ET(2)=0
2060 PRINT QD(1,1)*667;P1(2);
2070 IF I<1S OR I>1E THEN GOTO *NONIRRI ELSE GOTO *IRRI
2080 '
2090 *NONIRRI
2100 S1(3)= .34 ; S2(3)=.38 ; H1(3)=0 ; H2(3)=9
2110 BT(3)= .19 ; C1(3)=3.8 ; C2(3)=.2
2120 S1(4)= .034; S2(4)= 0 ; H1(4)= 0 ; H2(4)=0
2130 BT(4)=0 ; C1(4)=8.1 ; C2(4)= 0
2140 '
2150 FOR J=3 TO 4
2160 S1=S1(J) ; S2=S2(J) ; H1=H1(J) ; H2=H2(J) ; BT=BT(J)
2170 C1(J)=C1(J) / 1000; C2(J)=C2(J) / 1000
2180 IF J <> 3 THEN P1(J)=P1(J)+Q3+ET(J-1) ELSE P1(3)=P1(3)+PW(1)
2190 IF P1(J) < 0 THEN ET(J)=P1(J) ELSE ET(J)=0
2200 IF P1(J) <= 0 THEN Q1=0; Q2=0; Q3=0; GOTO 2260
2210 IF P1(J) <= H1 THEN Q1=0; Q2=0; GOTO 2250
2220 IF P1(J) <= (H1+H2) THEN Q2=0; GOTO 2240
2230 Q2=S2*(P1(J)-H1-H2)
2240 Q1=S1*(P1(J)-H1)
2250 Q3=BT*P1(J)
2260 QD(1,1)=QD(1,1)+(Q1+Q2)*WC(1); P1(J)=P1(J)-Q1-Q2-Q3
2270 IF P1(J) <= 0 THEN P1(J)=0
2280 CQ1=C1(J)*Q1; CQ2=C2(J)*Q2
2290 CQD(1,1)=CQD(1,1)+(CQ1+CQ2)*WC(1)
2300 NEXT J
2310 GOTO 2690
2320 '
2330 *IRRI
2340 S1(3)=.321 ; S2(3)=1 ; H1(3)=0 ; H2(3)=200
2350 BT(3)=.525 ; C1(3)= -5.4/1000
2360 S1(4)=.105 ; S2(4)= 0 ; H1(4)=0 ; H2(4)=0
2370 BT(4)=0 ; C1(4)=1/1000 ; C2(4)=0
2380 PW(1)=PW(1)+QD(1,1)/WC(1)
2390 C2(3)=CQD(1,1)/ QD(1,1)/1000
2400 QD(1,1)=0
2410 '
2420 FOR J=3 TO 4
2430 S1=S1(J) ; S2=S2(J) ; H1=H1(J) ; H2=H2(J) ; BT=BT(J)
2440 '
2480 IF J <> 3 THEN P1(J)=P1(J)+Q3+ET(J-1) ELSE P1(3)=P1(3)+PW(1)
2490 IF P1(J) < 0 THEN ET(J)=P1(J) ELSE ET(J)=0
2500 IF P1(J) <= 0 THEN Q1=0; Q2=0; Q3=0; GOTO 2630
2510 IF P1(J) <= H1 THEN Q1=0; Q2=0; GOTO 2620
2520 IF P1(J) <= (H1+H2) THEN Q2=0; GOTO 2610
2530 IF J=4 THEN GOTO 2600
2540 Q2=S2*(P1(J)-H1-H2); P1(J)=H1+H2
2550 Q1=S1*(P1(J)-H1)
2560 Q3=BT*P1(J)
2570 QD(1,1)=QD(1,1)+(Q1+Q2)*WC(1); P1(J)=P1(J)-Q1-Q2-Q3
2580 '
2590 GOTO 2630
2600 Q2=S2*(P1(J)-H1-H2)
2610 Q1=S1*(P1(J)-H1)
2620 Q3=BT*P1(J)

```

```

2630 QD(1,I)=QD(1,I)+(Q1+Q2)*WC(1):PI(J)=PI(J)-Q1-Q2-Q3
2640 IF PI(J) <= 0 THEN PI(J)=0
2650 CQ1=C1(J)*Q1:CQ2=C2(J)*Q2
2660 CQD(1,I)=CQD(1,I)+(CQ1+CQ2)*WC(1)
2670 NEXT J
2680 '
2690 QD(1,I)=QD(1,I)*AREA: CQD(1,I)=CQD(1,I)*AREA
2720 GOSUB *LQMETHOD
2721 PRINT I;" "":PRINT QD(1,I): PRINT CQD(1,I)
2730 NEXT I
2740 '
2750 ' --- GRAPH ---
2760 *GRAPH : GOTO 2960
2770 ON PARA GOSUB *ORIGINAL,*SEMILOG
2780 H1=320: H2=639: V1=110: V2=250: OX=0: OY=0: MX=PDN+1: MY=MY(PARA)
2790 WINDOW (OX,OY)-(MX,MY): VIEW (H1,V1)-(H2,V2)
2800 DRAW "C7": CLS 2
2810 LINE (OX,OY)-(OX,MY): LINE (OX,MY)-(MX,MY)
2820 'A(1)=1 : A(2)=4 : A(3)=8 : A(4)=10 : A(5)=16
2830 'FOR Y=1 TO 5 : AY=LOG(A(Y)) : LINE(OX,AY)-(OX+.3,AY) : NEXT Y
2840 FOR JB=0 TO 1: CL=JB+3: DRAW "C=CL;"
2850 POINT(1,MY-Y(JB,NS)): XK=PDN/(NE-NS+1)
2860 FOR I=2 TO NE-NS+1: X=I*XK: Y=MY-Y(JB,NS+I-1): DRAW "M=X; ,=Y;": NEXT I
2870 NEXT JB
2880 '
2890 OX=0: OY=0: MX=PDN+1: MY=50: H3=320: V3=0: H4=639: V4=110
2900 WINDOW (OX,OY)-(MX,MY): VIEW (H3,V3)-(H4,V4): CLS 2
2910 LINE (OX,OY)-(OX,MY): LINE (OX,MY)-(MX,MY)
2920 FOR JB=0 TO 1: CL=JB+5: DRAW "C=CL;"
2930 POINT(1,MY-CQD(JB,NS)): XK=PDN/(NE-NS+1)
2940 FOR I=2 TO NE-NS+1: X=I*XK: Y=MY-CQD(JB,NS+I-1): DRAW "M=X; ,=Y;": NEXT I
2950 NEXT JB
2960 OPEN DNN2$ FOR OUTPUT AS #1
2970   FOR I=1 TO NE
2980     PRINT #1,QD(1,I): CQD(1,I)
2990   NEXT I
3000 CLOSE #1
3010 RETURN
3020 '
3030 *ORIGINAL
3040 FOR J=0 TO 1: FOR I=NS TO NE: Y(J,I)=QD(J,I): NEXT I,J: RETURN
3050 *SEMILOG
3060 FOR J=0 TO 1: FOR I=NS TO NE
3070   IF QD(J,I) <= 0 THEN Y(J,I)=0 ELSE Y(J,I)=LOG(QD(J,I))
3080 NEXT I,J: RETURN
3090 '
3100 *LQMETHOD
3110 '
3120 'OOGATA 1993/11/08
3130 IF LQKATA=2 THEN 3380
3140 IF I>1 AND I<=MLQ(UY,1) THEN 3150 ELSE 3160
3150 CQD(1,I)=.0038*QD(1,I)+.59 : RETURN: '01
3160 IF I>MLQ(UY,1) AND I<=MLQ(UY,2) THEN 3170 ELSE 3180
3170 CQD(1,I)=.0029*QD(1,I)+.96 : RETURN: '02
3180 IF I>MLQ(UY,2) AND I<=MLQ(UY,3) THEN 3190 ELSE 3200
3190 CQD(1,I)=.0029*QD(1,I)+1.35 : RETURN: '03
3200 IF I>MLQ(UY,3) AND I<=MLQ(UY,4) THEN 3210 ELSE 3220
3210 CQD(1,I)=5.8*10^-5*QD(1,I)+7.8 : RETURN: '04
3220 IF I>MLQ(UY,4) AND I<=MLQ(UY,5) THEN 3230 ELSE 3240
3230 CQD(1,I)=1.1*10^-3*QD(1,I)+4.9 : RETURN: '05
3240 IF I>MLQ(UY,5) AND I<=MLQ(UY,6) THEN 3250 ELSE 3260
3250 CQD(1,I)=8.9*10^-4*QD(1,I)+3.5 : RETURN: '06

```

```

3260 IF I>MLQ(UY,6) AND I<=MLQ(UY,7) THEN 3270 ELSE 3280
3270 CQD(1,1)=-3.7*10-5*QD(1,1)+5.3 : RETURN: '07
3280 IF I>MLQ(UY,7) AND I<=MLQ(UY,8) THEN 3290 ELSE 3300
3290 CQD(1,1)=9.3*10-4*QD(1,1)+6.5 : RETURN: '08
3300 IF I>MLQ(UY,8) AND I<=MLQ(UY,9) THEN 3310 ELSE 3320
3310 CQD(1,1)=3*10-4*QD(1,1)+8.5 : RETURN: '09
3320 IF I>MLQ(UY,9) AND I<=MLQ(UY,10) THEN 3330 ELSE 3340
3330 CQD(1,1)=.0047*QD(1,1)+1.83 : RETURN: '10
3340 IF I>MLQ(UY,10) AND I<=MLQ(UY,11) THEN 3350 ELSE 3360
3350 CQD(1,1)=.0053*QD(1,1)+.88 : RETURN: '11
3360 CQD(1,1)=.0025*QD(1,1)+1.33 : RETURN: '12
3370 '
3380 IF I>1 AND I<=MLQ(UY,1) THEN 3390 ELSE 3400
3390 CQD(1,1)=.023*(QD(1,1))-.76 : RETURN: '01
3400 IF I>MLQ(UY,1) AND I<=MLQ(UY,2) THEN 3410 ELSE 3420
3410 CQD(1,1)=.03*(QD(1,1))-.71 : RETURN: '02
3420 IF I>MLQ(UY,2) AND I<=MLQ(UY,3) THEN 3430 ELSE 3440
3430 CQD(1,1)=.043*(QD(1,1))-.67 : RETURN: '03
3440 IF I>MLQ(UY,3) AND I<=MLQ(UY,4) THEN 3450 ELSE 3460
3450 CQD(1,1)=8.3*(QD(1,1))-(8*10-3) : RETURN: '04
3460 IF I>MLQ(UY,4) AND I<=MLQ(UY,5) THEN 3470 ELSE 3480
3470 CQD(1,1)=.22*(QD(1,1))-.46 : RETURN: '05
3480 IF I>MLQ(UY,5) AND I<=MLQ(UY,6) THEN 3490 ELSE 3500
3490 CQD(1,1)=.19*(QD(1,1))-.44 : RETURN: '06
3500 IF I>MLQ(UY,6) AND I<=MLQ(UY,7) THEN 3510 ELSE 3520
3510 CQD(1,1)=6.8*(QD(1,1))-(3.8*10-2) : RETURN: '07
3520 IF I>MLQ(UY,7) AND I<=MLQ(UY,8) THEN 3530 ELSE 3540
3530 CQD(1,1)=.54*(QD(1,1))-.36 : RETURN: '08
3540 IF I>MLQ(UY,8) AND I<=MLQ(UY,9) THEN 3550 ELSE 3560
3550 CQD(1,1)=8.1*(QD(1,1))-.014 : RETURN: '09
3560 IF I>MLQ(UY,9) AND I<=MLQ(UY,10) THEN 3570 ELSE 3580
3570 CQD(1,1)=.022*(QD(1,1))-.83 : RETURN: '10
3580 IF I>MLQ(UY,10) AND I<=MLQ(UY,11) THEN 3590 ELSE 3600
3590 CQD(1,1)=.015*(QD(1,1))-.87 : RETURN: '11
3600 CQD(1,1)=.041*(QD(1,1))-.67 : RETURN: '12
3620 RETURN

```



## 論文の内容の要旨

論文題目 流出負荷予測モデルに関する研究

氏名 黒田久雄

近年、閉鎖性水域における富栄養化現象が大きな問題となっている。その原因の一つとして面源由来の栄養塩類の流入比率の増加があげられる。しかし、林地、畑地、水田等の面源からなる集水域からの栄養塩類の流出状況を綿密に調査した報告は少ない。それは、降水時に流出負荷量は大きく変動するので、測定には大変な労力を必要とするからである。さらに、流出負荷量調査においては、流量測定は連続観測が可能であるが、窒素やリンなどの水質の連続測定は不可能であるためである。それゆえ、ある限られた数のデータを用いて面源からの流出負荷量を推定せざるをえないのが現状である。そこで、モデルを用いた集水域からの流出負荷量推定方法の開発が望まれている。

この課題の究明のために本研究は、面源主体の集水域である森林集水域と農業集水域において時間的に密な流出負荷量連日調査から流出状況を明らかにすること、その結果をもとに簡便な $\text{NO}_3\text{-N}$ 日流出負荷量を予測する水質モデルの開発を行うことを目的として行ったものである。

第I章「序論」では、本研究の目的および既往の研究について述べた。その中で、日単位での流出負荷量の推定が必要になっていることについて述べた。また、今までのモデルの多くが、実測値の少ないデータを用いて解析を行っている場合が多く、客観的な判断基準が示されていない報告が多いことについて述べた。

第II章「流出負荷予測モデルの提案」では、 $NO_3$ -N日流出負荷量を推定する方法として、タンクモデルを用いた流出負荷予測モデルの提案を行った。本モデルは、降水量と蒸発散量から流出負荷量を推定しようとするモデルである。流出負荷量の推定方法は、2とおりの方法を用いた。第一の方法は、タンクモデルで計算した流量をLQ式に代入し流出負荷量を推定するLQ式法である。LQ式とは、流量と流出負荷量の関係式のことである。LQ式は、直線型と曲線型の2種類を用いた。これは、LQ式を作成するデータの測定頻度が、流出負荷量の推定結果に大きな影響を与えることがわかっているからである。そして直線型と曲線型それぞれについて全観測期間で一つのLQ式を作成する場合と月別にLQ式を作成する場合の合計4種類のLQ式を用いて解析を行うこととした。第二の方法は、タンクモデルの各タンク流出孔に各層に対応する濃度係数を用いる濃度係数法である。濃度係数は、モデルの簡便化のために係数を定数扱いすることにした。そして、モデル作成の客観性確立のために、同定方法に $\chi^2$ 誤差評価基準値を用いることを提案した。また、モデルの評価方法として、今まで行われてきた計算値と実測値をポリユートグラフ上で判断することから、全期間のズレを評価するための収支誤差率と個々のズレを評価するための相対誤差率の2とおりの誤差率を用いることで、客観性を持った誤差評価方法を提案した。

第III章「流出負荷量の精密調査結果」では、森林集水域と農業集水域（非灌漑期と灌漑期）についての調査結果の解析を行った。調査は集水域末端において、自記水位計と自動採水器を設置し、6時間間隔の連日調査をのべ2年間行っ

た。この調査結果から、各水質の流出状況の特徴を以下に要約する。森林小集水域の調査結果からは、平常時重み付平均濃度が $\text{NO}_3\text{-N}$ で $0.5\text{mg}/\ell$ 、 $\text{T-N}$ で $0.7\text{mg}/\ell$ 、 $\text{SS}$ で $6\text{mg}/\ell$ と低いが、流量の増大にともなって濃度が上昇する傾向があることがわかった。比負荷量は、 $\text{NO}_3\text{-N}$ で $3.7\text{kg}/\text{ha}\cdot\text{yr}$ 、 $\text{T-N}$ で $6.8\text{kg}/\text{ha}\cdot\text{yr}$ 、 $\text{SS}$ で $265\text{kg}/\text{ha}\cdot\text{yr}$ であった。農業集水域（非灌漑期）では、10月から3月の6カ月間での平均 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は $5.7\text{mg}/\ell$ 、比負荷量は $66\text{mg}/\text{s}\cdot\text{km}^2$ 、 $\text{T-N}$ 濃度は $7.2\text{mg}/\ell$ 、比負荷量 $88\text{mg}/\text{s}\cdot\text{km}^2$ であった。農業集水域（灌漑期）では、各成分とも非灌漑期に比べて同一流量に対する負荷量が減少する傾向があった。これは水田への灌漑が流出負荷量を抑制したためとみられる。4～9月の6カ月間の $\text{T-N}$ の全流出負荷量は $19\text{kg}/\text{ha}$ であり、その大部分が $\text{NO}_3\text{-N}$ であった。この農業集水域では、台地上の多肥作物を栽培している畑地の影響が大きいことがわかった。

第IV章「タンクモデルによる流出負荷量予測と評価」では、第III章で得られたデータを日換算し各集水域ごとに流出負荷予測モデルを作成し、その精度について考察した。森林集水域の流出負荷予測モデルの中心部には、直列4段タンクモデルを採用した。農業集水域においては、谷津田地形を考慮に入れて台地タンクと低地タンクに分けた。そして、非灌漑期は、2つに分けたタンクを並列に配置した並列型モデルとし、灌漑期は、直列型に配置した直列型モデルを作成した。また、非灌漑期については、モデルの簡便化のために、台地タンクと低地タンクの段数を変えることによる精度の違いについての考察も行った。灌漑期では、濃度係数法に水田の持つ水質浄化機能を組み込んだモデルを提案した。

両集水域の共通した解析結果からは、流出負荷量の推定に流出水量の解析結果が大きく影響するので、できるだけ正確な流出水量の解析をしておく必要があることがわかった。森林集水域のモデル解析の結果からは、以下のことがわかった。LQ式法は、収支誤差率を-5%以内、相対誤差率を20%程度で推定することができた。濃度係数法は、季節変動を考慮すれば収支誤差率を-5%以内で、

相対誤差率は20%以下で推定できた。非灌漑期の農業集水域モデルの解析結果からは、LQ式法は、収支誤差率±3%以内で推定できた。相対誤差率は、月別LQ式法で約15%程度で推定できた。全期間LQ式法は、月別に比較して7~8%程度推定精度が悪かった。濃度係数法は、収支誤差率-3.3%、相対誤差率約15%程度で推定ができた。モデルの段数を変えてみた結果、4+2段モデルと2+2段モデルとの差はわずかであり、2+2段モデルでの推定でも十分な精度をあげられることがわかった。しかし、1+1段モデルは精度上問題があり実用的ではないことがわかった。灌漑期モデルは、LQ式法では、月別直線型LQ式での推定が最もよく、人為的影響の大きな5月~8月の灌漑期間でも、収支誤差率-2.6%、相対誤差率で18.8%で推定できた。他のLQ式法も、実測流量を用いて推定する程度の誤差で推定は可能であり、その意味では十分実用に耐えると思われる。濃度係数法はLQ式法に比較して誤差が大きく、灌漑期間の使用は難しいと思われる。これは、人為的な施肥、中干しや落水などの栽培管理体系を定数で組み込むことが難しいからであると思われる。また、濃度係数法に水田水質浄化機能を組み込むことにより、モデルの発展性の考察を行ったが、田面などの不均一性が精度に影響を与えていることがわかった。

第V章「流出負荷予測モデルの応用例」では、前章で作成したモデルを用い、応用例の一つとして過去30年間の長期間流出負荷量の推定を行った。これは、降水量の変動による流出負荷量の変動が求められているからである。そこで、本モデルは降水量と蒸発散量から流出負荷量の推定を行えるので、特定地域の降水量記録を用い流出負荷量の年変動について考察を行った。用いた流出負荷量推定方法は、月別直線型LQ式法である。前章で最も安定性がよかったためにそれを用いることにした。長期解析による森林集水域の計算結果では、流出負荷量の最大値と最小値の比は11倍、変動係数は42.8%で降水量の変動係数16.9%よりも大きく、変動が大きかった。農業集水域の計算結果では、最大値と最小値の比は1.7倍、変動係数は11.6%で降水量の変動係数16.9%よりも小さく、変

動が小さかった。また、モデルの計算結果から、降水量比例換算値では表せない年次間にわたる降水量の変動の影響も表すことができることを示した。

第VI章「結論と今後の課題」では、以上の内容を要約した後、今後の課題について述べた。

#### 本研究に関する研究論文

##### 第III章に関する研究論文

- 1) 森林小集水域における流出水の濃度と流出負荷、農土論集154, pp.25~35 (1991)
- 2) 非灌漑期の農業集水域からの流出水の窒素濃度と負荷、農土論集154, pp.45~53(1991)
- 3) 灌漑期の農業集水域からの流出水の水質と負荷特性、農土論集154, pp.55~64(1991)
- 4) 台地と谷津田の農業集水域の窒素流出構造、農土論集154, pp.65~72(1991)
- 5) LQ式による流出負荷量算出に与える測定頻度の影響、農土論集164, pp.1-9(1993)
- 6) The relation between landuse and  $\text{NO}_3\text{-N}$  outflow from catchment area IAWPRC(1991)

##### 第IV章に関する研究論文

- 7) 森林地区の $\text{NO}_3\text{-N}$ 日流出負荷量の推定、農土論集、168, pp.31~36, (1993)
- 8) 非灌漑期農業地区からの $\text{NO}_3\text{-N}$ 日流出負荷量の推定、農土論集 (投稿中)
- 9) The tank model for nitrate-N daily load from agricultural area IAWQ(1994)
- 10) 灌漑期農業地区からの $\text{NO}_3\text{-N}$ 日流出負荷量の推定、農土論集 (投稿準備中)

## Summary

### Study on a Model for Nutrient Out Flow from Watersheds

by Hisao Kuroda

Recently, the eutrophication of closed water bodies has become a serious concern. It has been pointed out that a possible cause for eutrophication might be nutrient rich salts originating from non-point sources. Reports describing runoff phenomena of nutrient rich salts from watersheds consisting of forest, upland fields, and paddy fields have been very scarce. Since load varies greatly with rain, the observation of load requires considerable man power. Though, continuous observation of discharge is possible, continuous observation of water quality such as nitrogen and phosphorus observation is not. Hence, the load from non-point sources must be estimated with only a limited number of observed data. Consequently, it is desirable to develop a model, using methods of estimation of load from a watershed.

This study was carried out with the following goals; 1) to verify runoff conditions from minute observation of continual load from a watershed where the main land use was forest and agricultural land; 2) and to develop a conventional water quality model to estimate the daily  $\text{NO}_3\text{-N}$  load.

The aim of this study and previous related research are presented in Chapter I; "Introduction". In this chapter, the necessity for estimating the daily load is introduced. It is also stated that many models previously developed were analyzed with small amount of observation data and there were many papers which didn't show objective criteria.

A model for nutrient out-flow from watersheds using the tank model, which can estimate the daily  $\text{NO}_3\text{-N}$  load is presented in Chapter II; "Proposition of the Model for Nutrient Out Flow from Watersheds". This model can estimate the load from precipitation and evapotranspiration. There are two methods for estimating

load. First; is the *LQ* method which estimates load substituting discharge calculated with the tank model into the *LQ* equation. This *LQ* equation expresses the relationship between discharge and load. *LQ* equations are of two types: the straight type, and the curved type. This means that the frequency of the observed data which predict the *LQ* equation has a great influence on the estimated result of load. Four types of models consisting of two straight types and two curved types were analyzed. In this analysis, *LQ* equations using whole data taken during the observation period, and other *LQ* equations using monthly data, were formulated. Second; is the Concentration Coefficient Method which describes the concentration coefficient for each tank's runoff holes. To simplify the model, the concentration coefficients were assumed as constants. The author proposed the value of estimated standard  $\chi^2$  error, to identify unknown model parameters, in order to establish objectivity. To evaluate the model, the coincidence of measured values with calculated values from a pollute graph was observed. Hence, an objective evaluation method of error is proposed such that the author uses the balance error ratio(%) in order to evaluate the gap between the measured and calculated data, and to compare the relative error ratio(%) for each gap. Observed results from watersheds consisting of forest and agricultural areas with on irrigation period or non-irrigation period are presented in Chapter III; "Minute Observation Results of Load". An automatic water table gauge and an automatic water sampler were set in operation at each watersheds outlet, and observations were carried out at 6 hour intervals over two year period. From the observed results, the characteristics of runoff phenomena of each type of water quality are summarized as follows. Observation results from the forest watershed depicted the weighted mean average as 0.5 mg/l for  $\text{NO}_3\text{-N}$ , 0.7 mg/l for T-N, and 6 mg/l for SS, but there was a tendency such that the concentrations of the above mentioned increase was in accordance with the increase in discharge. Specific loads were 3.7 kg/ha,yr for  $\text{NO}_3\text{-N}$ , 6.8 kg/ha,yr for T-N, and 265 kg/ha,yr for SS. In the

agricultural watershed(non-irrigation period), an average value over six months from October to March was 5.7 mg/l for the NO<sub>3</sub>-N concentration, 66 mg/s, km<sup>2</sup> for the specific load of NO<sub>3</sub>-N, 7.2 mg/l for the T-N concentration, and 88 mg/s, km<sup>2</sup> for the specific load of T-N. It was found that the load of each water quality component decreased for the same discharge in the agricultural watershed(irrigation period). This can be attributed to the fact that irrigation for paddy fields regulates the load. The total load from April to September(six months) for T-N was 19 kg/ha, and a large part of this T-N was NO<sub>3</sub>-N. This significant influence on the agricultural watershed can be explained in the sense that a great amount of chemical fertilizer was applied for vegetables in upland fields on the terrace.

The observed data in Chapter III was turned into daily data, and a model for nutrient out-flow from watersheds was developed. Then the accuracy of the proposed model was investigated, and is presented in Chapter IV; "Estimation of Load using the Tank Model and its Evaluation". A four Series Tank Model was used for the forest watershed. In the agricultural watershed, the model was divided into two parts: upland tank, and lowland tank, considering the topology of each area. The parallel type model, which has two separated tanks was used during the non-irrigation period, and the series tank model was used during the irrigation period. In order to simplify the model, the number of tanks including upland tanks and lowland tanks was varied, and the difference of accuracy between them was investigated over the non-irrigation period. The purification work by paddy fields is introduced in the concentration coefficient method during the irrigation period.

Analyzed results of both watersheds indicate that an accurate analysis of discharge was necessary as soon as possible since analytical results of discharge greatly affect the estimation of load. Model analysis for the forest watershed showed results as follows. The LQ method could estimate load within -5% for the balance error ratio and around 20% for the relative error ratio.



Considering seasonal changes, the concentration coefficient method could estimate load within -5% for the balance error ratio and less than 20% for the relative error ratio. In case of analyzed results for the forest watershed model during the non-irrigation period, the *LQ* method could estimate load within -3% for the balance error ratio. Also it could estimate load at about 15% for the relative error ratio. Compared with the monthly *LQ* method, the whole term *LQ* method showed poor accuracy of estimation at about 7-8%. The concentration coefficient method could estimate load at -3.3% of the balance error ratio and about 15% of the relative error ratio. When the number of tanks was changed, the results showed the difference between the 4+2 and 2+2 step models was small, and the estimation accuracy was sufficient even with the 2+2 step model. But the 1+1 step model had a problem with accuracy, and was not practical. The estimation results with the monthly straight type *LQ* equation was the most favorable among *LQ* equations, during the irrigation period. A balance error ratio of -2.6% and relative error ratio of 18.8% was achieved during the irrigation period from May to August in spite of excessive influence by human activity. When sufficient accuracy, estimating load using observed discharge was achieved with other *LQ* methods, then, these could be used. The error of concentration coefficient method was greater than that of the *LQ* method. Therefore, it might be difficult to use these models during the irrigation period. This is due to the fact that some constants which express fertilization, drying-up of paddy fields, and crop management could be difficult to introduce into this model. The purification ability of paddy fields into the concentration coefficient method was introduced and the possibility of the model was investigated. It affected the accuracy of the nonuniformity of the paddy field surface.

Using the developed models long term loads over the past thirty years, were estimated for one example of application in Chapter V; "An Example of Application of the Model". This was performed because the variation of load can be estimated according to the variation of precipitation. Variations of load were investigated

from the precipitation data of a special area, since the model can be used to estimate the load from precipitation and evapotranspiration. The monthly straight type  $LQ$  equation was used for the estimation of load. This equation was found to be the most suitable and stable as described in Chapter IV. The calculated results of long term analysis for the forest watershed showed that a ratio of maximum to minimum load was 11 times, and the Coefficient of Variation was as high as 42.8% which was 16.9% greater than that of precipitation. The calculated results for the agricultural watershed showed that the ratio of the maximum to minimum was 1.7 times and the Coefficient of Variation was 11.6% which was 16.9% less than that of precipitation. It is concluded from the calculated results of the model that the effect of long term variation for precipitation which can not be expressed by proportional converted values of precipitation can be predicted.

The entire investigation is summarized in Chapter VI; "Conclusions and Recommendations for Further Study".

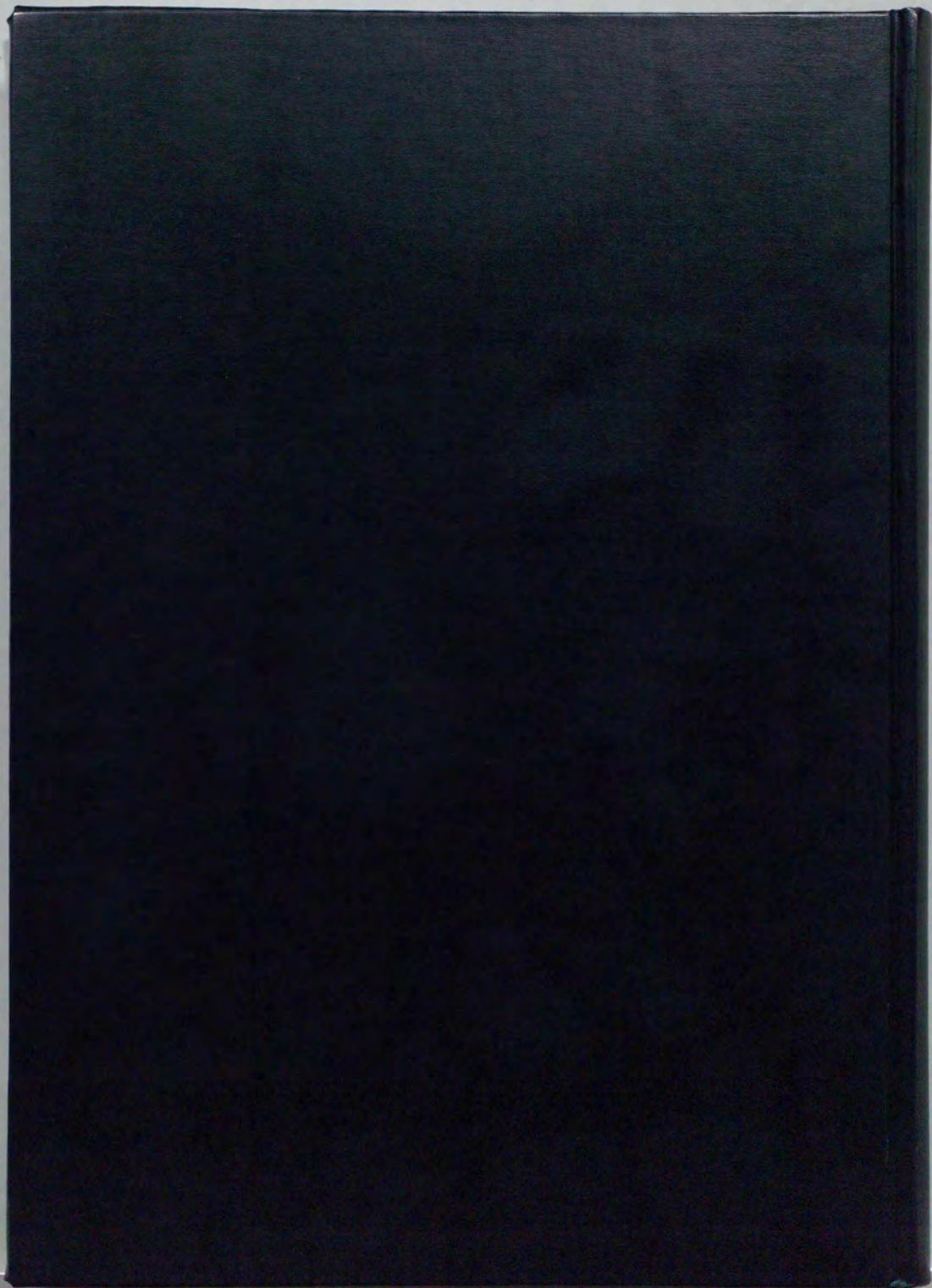
#### PUBLICATIONS RELATED THIS STUDY

##### Papers related to chapter III

- 1) Nutrient Outflow from a Forest Area. Trans. JSIDRE, 154, pp. 25-35 (1991)
- 2) Nitrogen Outflow during Non-irrigation Period from a Small Agricultural Area. Trans. JSIDRE, 154, pp. 45-53 (1991)
- 3) Nitrogen Outflow during Irrigation Period from a Small Agricultural Area. Trans. JSIDRE, 154, 55-64 (1991)
- 4) Nitrogen Outflow Diagram in a Small Agricultural Area Having Uplands and Lowlands. Trans. JSIDRE, 154, 65-72 (1991)
- 5) Influence of Number of Data on the calculation of Outflow Load by the  $LQ$  equation. Trans. JSIDRE, 164, 1-9 (1993)
- 6) The relation between landuse and  $NO_3-N$  outflow from catchment area. IAWPRC (1991)

Papers related to chapter IV

- 7) The Estimation of Daily  $\text{NO}_3\text{-N}$  loads from a Forest Area. Trans. JSIDRE, 168, 31-36 (1993)
- 8) The Estimation of Daily  $\text{NO}_3\text{-N}$  loads during Non-irrigation Period from an Agricultural Area. (in contribution)
- 9) The tank model for nitrate-N daily load from agricultural area. IAWQ (1994)
- 10) The Estimation of Daily  $\text{NO}_3\text{-N}$  loads during Irrigation Period from an Agricultural Area. (now preparation for contribution)



inches 1 2 3 4 5 6 7 8  
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

# Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black



# Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

