

(21) 流域管理とその支援システム (第1報)

RIVER BASIN MANAGEMENT AND ITS SUPPORTING SYSTEM (1st REPORT)

福島武彦*、原沢英夫*、天野耕二*、海老瀬潜一*

Takehiko FUKUSHIMA*, Hideo HARASAWA*, Kohji AMANO*, Sen-ichi EBISE*

ABSTRACT; In order to help the environmentally sound management of water regions and their basins, we are struggling to present a new supporting system. This system is made up by three parts; 1) watershed information system comprised of data base, some tools for handling the geographical data, and watershed indices, 2) a number of models for predicting the future water environment, cost/results of some restoration practices, etc., 3) manual for proposing and giving priority to some reasonable plans of basin-wide management. In this first-report, the structure and functions of watershed information system are discussed and build up for Lake Kasumigaura's basin. In addition, the application of one runoff model (HSPF) to a small basin (9 km²) is examined.

KEYWORDS; River basin management, Watershed information system, Watershed index, HSPF

1. はじめに

湖沼、内湾等の閉鎖性水域の水環境の保全には、水域内での直接対策（浄化用水の導水、バイオマニピュレーションなど）と流域での対策を平行して進める必要がある。後者は、例えば事業、規制・監視、行政指導、補助・助成、教育・啓発、調査・研究などのメニューを有している。すなわち、流域対策の特徴としては（1）多様な手法の組合せであること、（2）効果に加えてコスト、問題点を考慮しなければならないこと、（3）流域内の人間活動、自然が刻々と変化し、また対策技術自身も進歩すること、（4）対象物質、問題となる現象も時代とともに変化すること、（5）地域計画の中に具体的なプランとして提案されなければならない、などが挙げられよう。

このため、本研究の目標として、図1のような流域管理を支援するシステムの構築を考えた。第1ステップは流域データベースの作成で、流域における自然、人間活動などの情報を面的に有していることが条件である。特に、流域の現況を捉えることが可

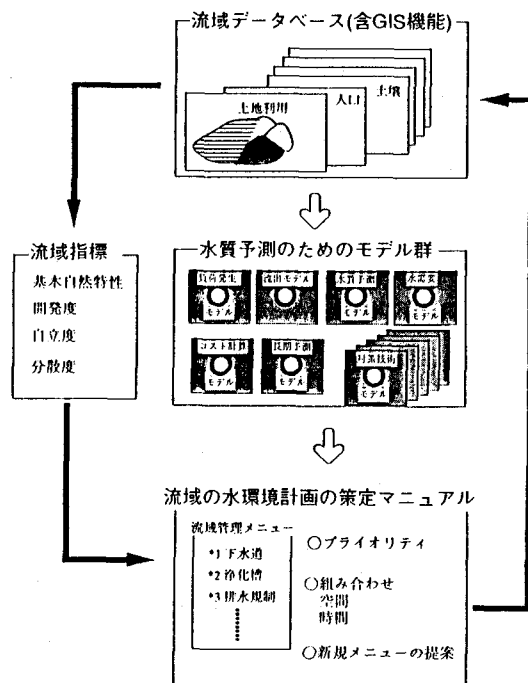


図1. 流域管理支援システムの概要

能な道具（例えばリモセンデータの活用）や面的データを処理する道具（例えば地理情報システム）に支援されたデータベースであることを目標としている。次に第2ステップは、水環境予測のためのモデル群で、各種のコンパートメントモデルにより構成されていて、流域における水環境の将来予測、対策の実施による効果予測などを行う。第3ステップは流域水環境計画の策定マニュアルで、実際には流域管理メニューから諸対策案をどのように順位付けて選ぶか、それらを空間的に、時間的にどのように組み合わせるのか、を合理的に提案できるものである。そのため、モデル群の結果を利用するとともに、ステップ2に並立して示した流域指標（ステップ1'で大まかにはステップ1に含まれる）を有効に利用する方法を考えた。流域管理に関する研究例としては表1のようなものがあり、後述の流域指標、流域モデルに関する研究をあわせても、個々には独立した単品のイメージが強い。また、近年広域環境管理を目標として情報システムの整備が多くの自治体で実施されつつあるが、それをどのように加工・集約して管理に利用してゆくかの研究が少なかった。このため本研究においては、流域情報、モデル、流域指標、対策案の提示といった要素の有機的な連結を目指す。なお、今回の第1報では、主にステップ1と1'を対象とする流域情報管理システムとステップ2の流域モデルの部分について、その目標と現状を示す。

2. 流域情報管理システム

流域情報管理システムはワークステーション（Sun 3）上に作成され、その基本機能は表2、利用法は表3に示すようである。システムに入力したデータを表4にまとめる。異なる集計単位、例えば国勢調査（総務庁）、国土数値情報（国土庁）は1 kmメッシュ、ランドサットデータはTMで30 mメッシュ、工業（通産省）、農業（農林省）統計は市町村、負荷量データは小流域など、を同じ土俵で扱うための機能をこのシステムは基本的に有している（表2中、画像表示、基本メッシュデータへの変換など）。また、今回の報告では霞ヶ浦を対象としてデータベースの収集にあたったが、同様な方式を全国の多くの湖沼流域に拡張することが可能である（負荷量データのみ点源情報を含んでいて一般的には公表されていない）。

このシステムは基本的には、図1の流域データベースをもとに、モデルに対して入力情報を切り出すとともに、各種の流域指標を算定して、第3ステップの水環境計画策定の基礎資料を与えるものである。流域を全体として一つの数値に代表させることなく、面的な情報として扱ったのは、対策案の提案において具体的な場所の提示が重要であり、また上下流の位置関係が流域環境の評価、流出モデルの計算結果に影響が大きいと考えられるためである。図2にはこのシステムから得られた表示例をいくつか示す。

表1 流域管理手法に関する既往の研究例（流域指標、流域モデルは除く）

a. 流域情報	
*データの保管、表示	滋賀県琵琶湖研究所 (1988)
*GISを用いてのデータの切り出し	Osborne & Wiley (1988)
*モデルへの入力データ	Loucks et al. (1985)
	Still & Shih (1985)
	Hession & Shanholtz (1988)
b. 流域管理のメニュー	
*地下水を含めた水質管理手法の組合せ	Milon (1987)
*新規手法	環境カルテ・環境家計簿
	盛岡・末石 (1983)
	CRP、CC
	Humerik et al. (1987)
	大気汚染との問題の結合
	NSEPB (1987)
	政治、制度、財政的問題
	Novotny (1988)

表2 流域情報管理システムの基本機能

*データベース管理（検索、更新、…）
*画像表示（オーバーレイ機能含む）
*基本メッシュデータへの変換
*演算処理（2画面の線形・論理計算、…）
*集計処理（指定領域内の統計処理、…）
*領域設定（幾何学的距離等にもとづく）

表3 流域情報管理システムの利用法

*流域モデルへの入力データの切り出し
*流域特性の評価
*流域指標の計算

ランドサットデータの解析は最良線形判別関数による方法（飯倉・安岡 1988）を取り入れた画像処理システム（IPSEN-RICA/VAX）を用いた。遠赤外を除いた6チャンネルのTMデータを原データとして、土地被覆状態のわかっている領域での値をもとに最良線形判別関数を求めて判別するものである。土地被覆分類としては現在、森林、水田、畑地、市街地、水域の5分類としている（原沢 1990）。

表5には既往の流域あるいは地域指標の算定例を示す。基本自然特性とは例えば水質の場合、各流域のベースとなるものを意味し、それが同じ領域をEcoregionなどと呼び、水質基準の設定に利用されようとしている。開発度とは流域間、あるいは同一流域の時間的変遷を表現するのが目的で、あるレベルに達した時に負荷の減少をもたらす事業を始める、などに利用することが可能である。分散度とは流域あるいは小流域（湖沼に流入している河川それぞれで、流域特性の異なる上中下流程度に分けたもの）における人、物の散らばり具合を示す指標で、例えば排水処理の選定に際して適切なシステムの選択に利用される。この指標と汚濁ポテンシャルなどの指標を組み合わせれば、どの小流域から対策を始めるべきかといった対策事業のプライオリティ評価が可能であろう。現在、これらの関数形を検討し、またその組合せを考えている。

表4 データベースのデータ一覧

	ファイル名	出典	集計単位	年度更新
社会・経済	人口（年齢別、…）	総務庁	メッシュ	五年おき
	工業（製造品出荷額、水利用量）	通産省	市町村	一年おき
	農業（収穫量、家畜数、…）	農林省	市町村	五年おき
	土地利用	国土庁	メッシュ	
物理的諸元	表面被覆（土地利用）	技術センター*1	メッシュ	18日
	標高（平均、最低、…）	国土庁	メッシュ	
物理的諸元	表層地質・土壌・地形	国土庁	メッシュ	
	発生負荷量	負荷量（生活、工場、畜産、養殖、農地）	茨城県	メッシュ・小流域
地図情報	都市計画位置	国土庁	線データ	
	湖沼位置、河川流路位置	国土庁	線データ	
	流域境界位置	国土庁	線データ	

*1; ランドサットデータ

3. 流域モデル

流域モデルとは、流域からどのように水、物質が発生し、対象水域にど

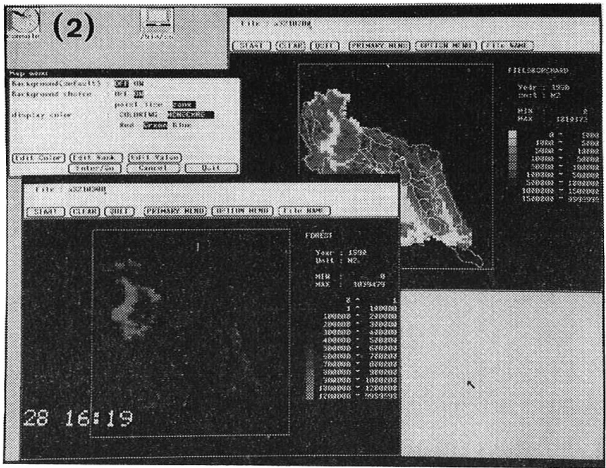
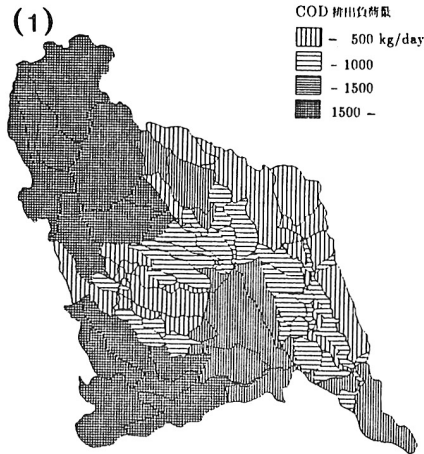


図2. 流域情報管理システムからの出力例、(1)霞ヶ浦流域からのCOD排出負荷量（小流域ごと）、(2)メッシュ単位の土地利用面積表示と小流域境界の重ね合わせ

のように流達し、そこでどのような挙動をするかを数学モデルで表現したものである。また、流域の改変や対策の実施によりその流出現象がどのように変わるかが評価できるものである。米国を中心に多くの流域モデルが提案されているが、それらを分類する軸としては表6のようなものがある。表7には、有名かつ一般的な（特殊な地域だけでなく各種多様な土地特性の地域に適用可能）モデルを4つ選び、その比較を行った。この内HSPFは、(1)比較的小流域（0.18 km²；Moore et al., 1988、53 km²；Ng & Marsalek, 1989）から大流域（7236 km²；Donigian et al., 1984）まで適用可能なこと、(2)短期間（洪水）から長期間（低水流出）にわたる幅広い流出現象を扱えること、(3)水の流出にあわせて土壌粒子、栄養塩（窒素では溶存態のアンモニア窒素、吸着態のアンモニア窒素、亜硝酸性窒素、硝酸性窒素、有機窒素、土壌中窒素ガス、植物中の窒素、リンでは、溶存態のリン酸リン、吸着態のリン酸態リン、有機性リン、植物中のリン）、農薬、保存性物質の動態を予測することができる、(4)農地を対象としたARM（Agricultural Runoff Management Model）と都市域を主な対象としたNPS（Nonpoint Source Pollutant Loading Model）を合体させてできたプログラムなので多様な土地利用に

表5 流域、地域指標の例

対応可能である、		
(5)Fortranで書かれたプログラムであるので修正が容易である、などの特徴を有している。このため、本研究ではU.S.EPAよりプログラムの提供を受け、日本の流域への適用を考えた。		
HSPFの概要は図3に示す通りで、計算には対象流域の諸特性から推定さ		
れる各種パラメータ（例えば浸透域では、樹冠遮断量、浸透速度、斜面のマニング粗度係数、中間流、地下水流の減少係数など20前後、その内半数のものは月毎に変化させることができる）と、気温、降水量、可能蒸発散量などの気象量の時系列データを入力してやらなければならない。時間刻みは5 min、15 min、60 minの三通りが可能であるが、以下の計算例では15 minとした。		
	A. 基本自然特性	
	* Geomorphology, Soils, Vegetation, Climate, Water, Fauna → Ecoregion, ...	Environment Canada
	* Primary productivityから見たLand classification	Moss (1986)
	* Ecoregionと水質との関係、水質基準	Hughes & Larsen (1986)
	* 自然立地単位	井手・武内 (1985)
	B. 開発度（←自然度）	
	* Natural, Hydrological, Social, Economic, Environmental factors	
	→ Development function → 流域での対策案	David (1985)
	* 汚濁・汚染ポテンシャル	Gilliland & Baxter (1987)
	* 緑の国勢調査	
	C. 自立度	
	* 流域内水利用水量に占める流域起源の水の割合	
	* 流域内で発生する負荷の内、流域外に流出しないものの割合	
	D. 分散度、多様性	
	* 人口密度 → 処理の費用（公共下水道、集落下水道、合併浄化槽）	中西・沖野 (1982)
	* → 処理の効率（Centralized system, Local tertiary treatment, Wetland filter）	Lowgren et al. (1989)
	E. その他	
	* 流域の環境保全機能の評価	加藤 (1988)
	* 土地利用の適切性	Rojas et al. (1988)

表6 流域モデルの分類（Task Committee (1985) 等を参考に）

透域では、樹冠遮断量、浸透速度、斜面のマニング粗度係数、中間流、地下水流の減少係数など20前後、その内半数のものは月毎に変化させることができる）と、気温、降水量、可能蒸発散量などの気象量の時系列データを入力してやらなければならない。時間刻みは5 min、15 min、60 minの三通りが可能であるが、以下の計算例では15 minとした。	* 1；原理	統計モデル（経験モデル）、物理プロセスモデル（概念モデル）
	* 2；構造	パラメトリックモデル、コンポーネントプロセスモデル
	* 3；空間スケール	ミクロスケール、マクロスケール（水流出モデルの精度） 流域、広域、小流域モデル（目的）
	* 4；時間スケール	単一降雨、長期連続
	* 5；対象水質	水量（洪水・低水）、土壌粒子、栄養塩、農薬、一般科学項目、...
	* 6；対象地域	都市域（SWMM, STORM）、農地（ARM, CREAMS, ANSWERS）、複合（HSPF）
	* 7；目的	リサーチ、プランニング
	* 8；パラメータ	キャリブレーション、全国規模の実測値（SCS, USLE）

表7 代表的な流域モデル

	ANSWERS	CREAMS	HSPF	GWLF
水流出のモデル	Hortonタイプ	SCS法 (復帰流*2)	Stanford法	SCS法
空間スケール	フィールドスケール メッシュモデル	フィールドスケール (流域スケール*3)	流域スケール	流域スケール
時間スケール	イベント	連続	イベント・連続	イベント (年トータル*4)
対象項目(水質)	水、土壌粒子 (リン*1)	水、土壌粒子、 栄養塩、農薬	水、土壌粒子 栄養塩、農薬	水、土壌粒子
対象地域	農地	農地	多様な土地利用	多様な土地利用
モデルの目的	リサーチ プランニング	プランニング	リサーチ プランニング	プランニング

ANSWERS; Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation (Beasley et al. 1980; Purdue Univ.),
CREAMS; Chemical Runoff Erosion from Agricultural Management (Knisel 1980; USDA), HSPF; Hydrological Simulation
Program Fortran (Johanson et al. 1980; USEPA), GWLF; Generalized Watershed Loading Functions (Haith & Lawrence
1981), *1; Storm et al.(1988), *2; Williams et al.(1985), *3; Heatwole et al.(1987), *4; Haith & Shoemaker(1987)

なお、計算はVAX8550上で行った。

HSPFを霞ヶ浦全流域に適用するための準備段階として、図4に示すような小流域(小桜川の約9.0 km²の流域)における一雨降雨を対象に各種パラメーターのキャリブレーションを行った。まず、図4(1)のような流域を同図(2)のような5つの浸透域と流路に分けた。そして、降水量、気温、風速データはAMeDASの柿岡地点での時間値データを用い、日射量は館野の日データを用いた。また、可能蒸発量は館野での正味放射量(志村・上野 1988)、平均気温、風速、湿度などのデータをもとに、ペンマン法で計算した(中野 1976)。2年間各月の計算結果を霞ヶ浦湖岸でA-panにより測られた蒸発量(土屋 1981、可能蒸発散量と近いとされる)と比較するとよく一致した。

こうしたデータをもとに、対象降雨(1986年12月19日の32 mmの降雨)の約2年前(1985年1月1日より)からシミュレーションを行い、水質観測地点での流量とSS濃度を計算した(図4の流域の最下流)。その結果の一例を図5(1)、(2)に示す。水の流出では、対象領域が急勾配の小流域であるので、表面流出(早い中間流も含めて)の寄与が大きい結果が得られた。すなわちこのモデルでは、1986年一年間のトータルとして、年間降水量1400 mmに対して表面流出152 mm、中間流5 mm、地下水流出606 mm、全流出量763 mm、遮断による蒸発散169 mm、表層土壌からの蒸発散249 mm、下層土壌からの蒸発散170 mm、地下水層からの蒸発散23 mm、全蒸発散量611 mm(可能蒸発散量は735 mm)となった。

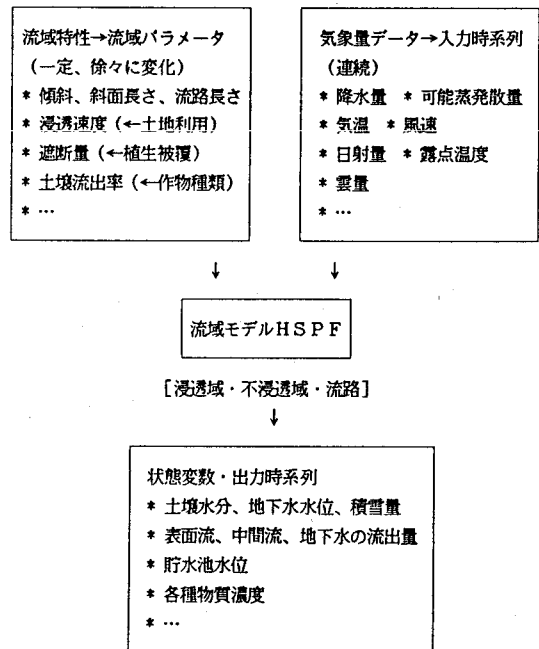


図3 HSPFモデルの概要

また、SS濃度に関しては、降雨による可搬態の土砂生産速度と表面流出による移送能力によって決まる方式となっている。このため、晴天時には土壌流出がなくSS濃度はゼロとなるなど現状と異なるが、降雨時にはいくつかのパラメーターを調整することによってピーク濃度をあわせることが可能である。

こうした流域モデルを用いてどのような対策案が評価可能かをまとめたのが表8である。HSPFなど米国で開発されたモデルが日本の風土と合わない点としては、(1)水田の表現方法、(2)降水中に含まれる栄養塩の入力方法、などいくつかのものがあり、今後これらを改善してから各種対策案の評価に結び付けたい。

4. おわりに

流域管理を支援するためのシステムの目標、構成を示し、現在まで進めてきた作業の紹介を行った。こうしたシステム作りの成功の鍵は、個々の道具に磨きをかけるとともに、全体の流れを合理的に設計することであろう。また、多くの人、機関が同じ道具を使い、それを精錬してゆくような努力がないと、その道具を支援システムの核として利用してゆくことが難しいであろう。今後、これらの点に注意をおきつつ、流域管理とその支援システムの研究にあたりたい。

表8 流域モデルで評価可能な主要な水質汚濁防止対策 (Donigian 1984)

対策	流域モデルで変化させること
(1) 下水道・工場排水処理	河川への点源排出量の変更
(2) 土地利用変化	土地利用カテゴリの相対的割合の変更
(3) 貯水池の最適運用	貯水池の操作ルール曲線の変更や 需要に見合った放流量に
(4) 貯水池の適地選定	現在の流路を貯水池に
(5) 流量増加・流路変更	特定の流路、貯水池への流入、流出量の変更
(6) 汚濁負荷の流入位置の選定	許容排出負荷量の再分配
(7) 河川改修(堤防等)	特定の河川部分の流況の変更
(8) 雨水貯留	貯流量を設定
(9) 都市・農地のBMPs	おのの対策(パラメータ値の変更)
(10) 土地・土壌の崩壊	土砂の流出量の変更

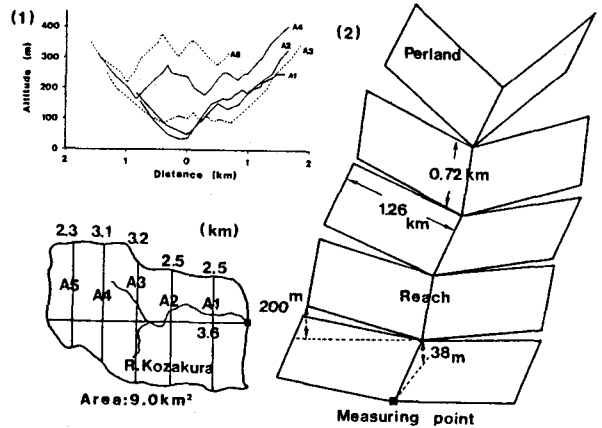


図4. HSPFを適用した霞ヶ浦小桜川流域。

(1)流域図とその断面図、(2)モデル内での扱い方。

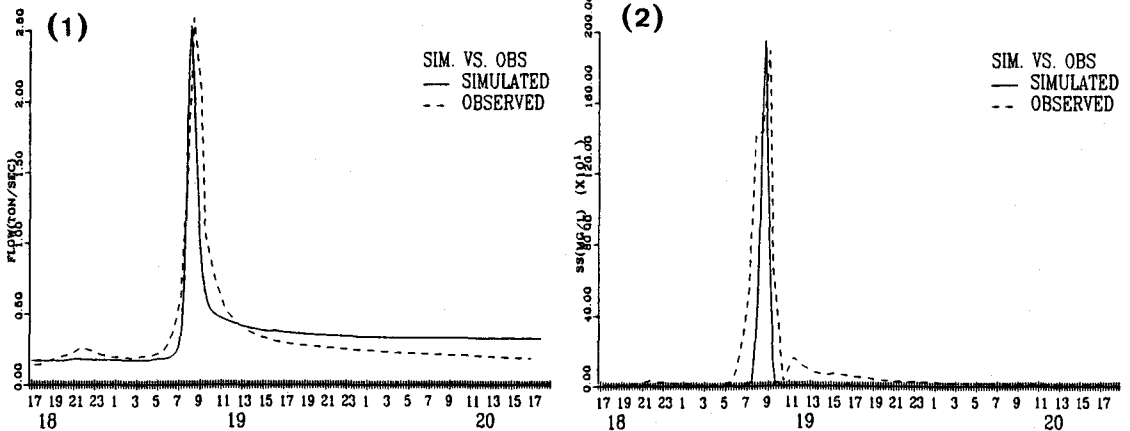


図5. HSPF出力結果(小桜川、1986.12.18-20)。(1)流量、(2)SS濃度。

参考文献

- Beasley, D. B. et al. (1980) ANSWERS Users Manual. Purdue Univ., 55pp.
- David, L. (1985) River basin development strategies in the Tisza Vally. in 'Strategies for River Basin Management', D. Reidel Pub., 19-29.
- Donigian, A. S. et al. (1984) Application guide for HSPF, EPA-600/3-84-065.
- Gilliland, M. W. & W. Baxter-Potter (1987) A geographic information system to predict non-point source pollution potential. Wat. Resour. Bull., 23, 281-291.
- Haith, D. A. & Lawrence, J. T. (1981) Watershed loading functions for nonpoint sources. J. ASCE, EE, 107, 121-137.
- Haith, D. A. & Shoemaker, L. L. (1987) Generalized watershed loading functions for stream flow nutrients. Water Resour. Res., 23, 471-478.
- 原沢英夫 (1990) 湖沼流域管理のための支援システム. 第3回環境容量シンポジウム予稿集、国立公害研究所
- Heatwole, C. D. et al. (1987) Basin scale water quality model for coastal plain flatwoods. Trans. ASAE, 30, 1023-1030.
- Hession, W. C. & V. O. Shanloitz (1988) A geographic information sysytem for targeting nonpoint-sources agricultural pollution, J. Soil. Wat. Conserv. 43, 264-266.
- Hughes, R. M. & D. P. Larsen (1988) Ecoregions: an approach to surface water protection. J. WPCF, 60, 486-493.
- Humerik, F. J. et al. (1987) Pollution from nonpoint sources. Environ. Sci. Tech., 21, 737-742.
- 井手久登・武内和彦 (1985) 自然立地の土地利用計画. 東大出版会、227pp.
- 飯倉善和・安岡善文 (1988) 最良線形判別関数を用いた多重分光画像の効率的な自動識別. 計測自動制御学会論文集、24(3), 8-15.
- Johanson, R. C. et al. (1980) Users manual for HSPF. EPA-600/9-8-015, 677pp.
- 加藤好武 (1988) 流域のもつ環境保全機能の総合評価とその変動予測、茨城県桜川流域の例. 環境情報科学、17-4, 21-30.
- Knisel, W. G. ed. (1980) CREAMS, Conservation Res Rep., 26, U.S. Dept. of Agri., 640pp.
- Loucks, D. P. (1985) Interactive data management for resources planing and analysis. Wat. Resour. Res., 21, 131-142.
- Lowgren, M. et al. (1989) Wastewater treatment or resource management: a comparison between centralized and on-site systems. J. Environ. Manage., 28, 71-84.
- Milon, J. W. (1987) Opitimizing nonpoint source controls in water quality regulation. Wat. Resour. Bull., 23, 387-396.
- Moore, L. W. et al. (1988) Agricultural runoff modeling in a small west Tennessee watershed. J. WPCF, 60, 242-249.
- 盛岡通・末石富太郎 (1983) 環境学習の用具としての環境家計簿と環境カルテの提案. 環境問題シンポジウム講演論文集、11, 80-92.
- Moss, M. R. (1985) Land processes and land classification. J. Environ. Manage., 20, 295-319.
- 中西準子・沖野外輝夫 (1982) 下水道計画論. 武蔵野書房、222pp.
- 中野秀章 (1976) 森林水文学. 共立出版、228pp.
- Ng, H. Y. F. & Marsalek, J. (1989) Simulation of the effects of urbanization on basin streamflow. Water Resour. Bull., 25, 117-124.
- NSEPB (National Swedish Environmental Protection Board) (1987) Action Plan for Marine Pollution. pp. 67.
- Novotny, V. (1985) Diffuse (nonpoint) pollution-a plitical, institutionnal, and fiscal problem. J. WPCF, 60, 1404-1413.
- Osborne, L. L. & M. J. Wiley (1988) Empirical relationships between land use/cover and stream water quality in an agricultural watershed. J. Environ. Manage., 26, 9-27.
- Rojas, E. et al. (1988) Land conservation in small developing countries: Computer assisted studies in Saint Lucia. Ambio, 17, 282-288.
- 滋賀県琵琶湖研究所 (1988) うごくアトラス.
- 志村英洋・上野丈夫 (1988) 館野の日射・放射観測資料について. 高層気象台しゅう報、48, 33-36.
- Still, D. A. & S. F. Shih (1985) Using LANDSAT data to classify land use for assessing the basinwide runoff index. Wat. Resour. Bull., 21, 931-940.
- Storm, D. E. et al. (1988) Modeling phophorus transport in surface run off. Trans of ASAE, 31, 117-127.
- Task Committee on Quantifying Land-Use Change Effects of the Watershed Management (1985) Evaluation of hydrologic models used to quantify major land-use change effects. J. ASCE Irig. Drain. Eng., 111, 1-17.
- 土屋徹 (1981) 湖面蒸発量の研究. 国立公害研究所報告、No.20、43-67.
- Williams, J. R. et al. (1985) Simulator for water resources in rural basins. J. ASCE, 111, 970-986.