

河川環境整備のための流域水環境システムモデルの応用

Application of Comprehensive Watershed Model to Preservation and Management of River Environments

村上正吾¹・渡辺正孝²・天野邦彦³・林誠二⁴・井上隆信³

Shogo MURAKAMI, Masataka WATANABE, Kunihiro AMANO, Seiji HAYASHI, Takanobu INOUE

1. はじめに

河川審議会答申に見られるように、今日的意味での河川環境は水循環系と生態系の健全性の保全を前提とした治水・利水への取り組みから醸成されるべきとの認識が定着している。こうした観点は、必然的に水系一貫、より広い意味では流域全体を視野に入れた上で、水・物質循環系の最重要サブシステムとしての河川およびそれに関する技術的側面の在り方を考えさせるものと思われる。この水環境の保全・整備の問題は基本的には、流域環境の変化が水・物質循環の質・量的側面と生態系に及ぼす影響の解明と、治水・利水との整合性を保った上で流域全体の水、土砂、その他の陸域起源物質等を制御していく技術開発とから構成される。物質の輸送過程は流域を構成する単位流域面積要素によって大きく異なり、こうした均質な流域構成単位（面、立体）と河川水系網（線）よりなる幾何学的な流域構造を構築する必要がある。こうした、立体構造は必然的に、水と物質の輸送過程を表現するモデルとして、集中型ではなく分布型を要求する。近年のリモートセンシング、地理情報システムGISの発達はこの流域構造の表現のための時空間的なデータベースの構築を可能にしている。また、計算機の高速化に伴い、分布型の水・物質循環モデルが提案されており、こうしたモデルを使うことで、初めて流域内の水・物質循環系を構成する構成要素の相互作用系の結果として生じる全系の挙動が理解される。

ところで、水・物質循環系は、相互作用系を成す多くのサブシステムより構成されており、さらにそのサブシステム自体が複雑な機構となっている。従って、我々の第一目標としては、細かなサブシステムの機構解明に先だって、環境変化に伴って全系はどのように応答挙動するか解明に焦点を絞ることとした。その次の段階として、サブシステムの機構解明を行う。すなわち、本研究では、全系の理解を進めるために、地理情報システムと水・物質循環の数学モデルを組み合わせることを試みた。すなわち、流域内の降雨流出過程にともなう土砂輸送のシミュレーションを行い、実測値との比較からその適用性を論じたものである。

2. 流域環境の数学モデル

汚濁物質の発生、流域での降雨流出、河川での水質変動を取り扱った数理モデルは数多く発表されている¹⁾。この場合、水文流出過程、土砂移動量の追跡、水質、生息環境保全等の目的に絞ったモデル、あるいは、特定の機能をまず優先させたモデル化が進んでいる。治水・利水・生態系保全で代表される河川の機能のバランスを考慮した総合的なモデル化の方向は、今後の課題であるのが現状である。こういった取り組みは、国際河川の流域上下流問題、行政上の河川管理の一元化への取り組み、あるいは生態系への配慮等の経験が先行した諸外国で開発が盛んなようである。総合的な流域モデルを用いる利点は、対象としている水・物質の循環系を構成し、かつ相互作用を持つ多岐にわたる要素より構成された複雑なシステムとなっている点にある。従来は、その一部を取り出しての一次的な評価、多分に経済合理性を指向する評価によって単一な目

キーワード：河川環境，流域環境モデル，HSPF，non-point source

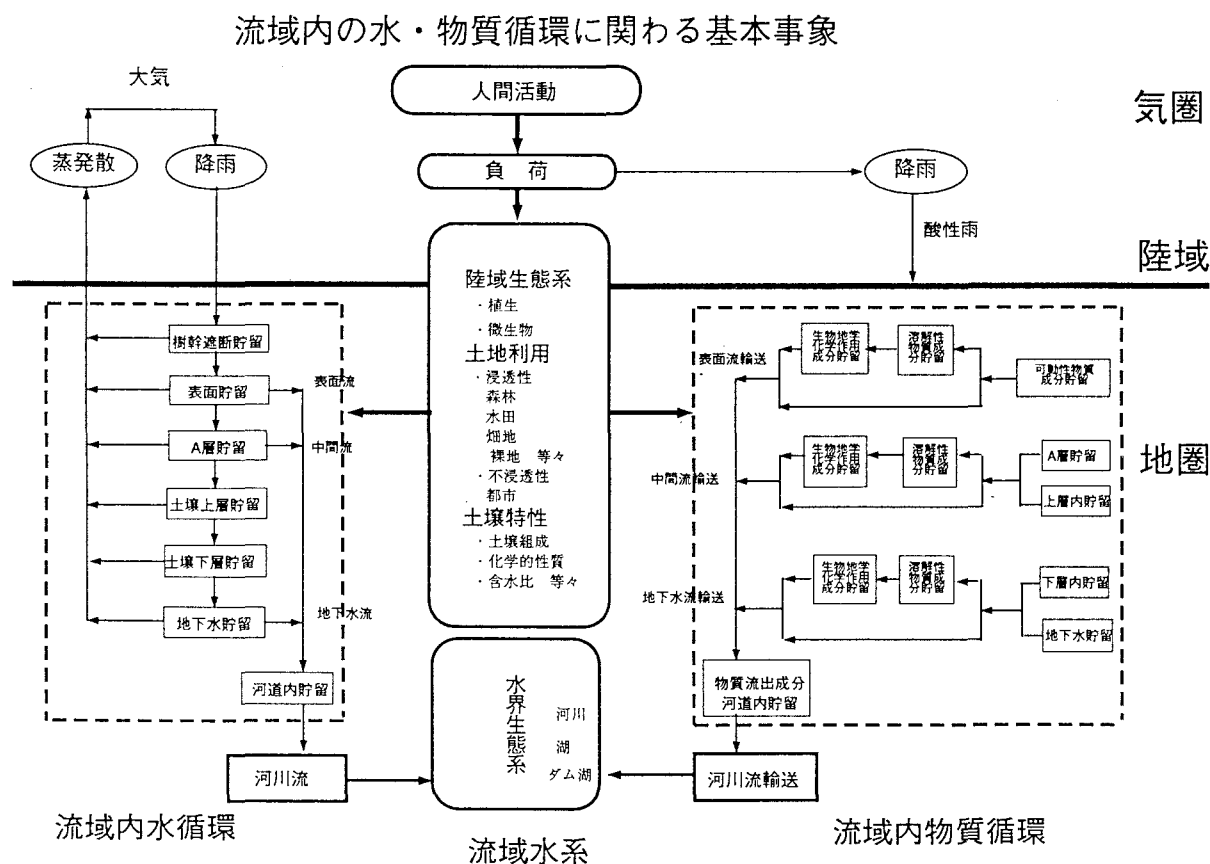
¹ 環境庁国立環境研究所水圏環境部水環境工学研究室長

² 環境庁国立環境研究所水圏環境部長

³ 環境庁国立環境研究所水圏環境部水環境工学研究室主任研究員

⁴ 環境庁国立環境研究所水圏環境部土壌環境研究室研究員

本研究では、いくつかのモデルを比較検討した結果、アメリカ合衆国環境庁（EPA）開発のHSPF（Hydrological Simulation Program-FORTRAN）Ver.11を用いることとした²⁾。本モデルは降雨、気温等の気象条件、流域地理特性（斜面・河道勾配、河川長等）を入力条件として、河川・湖沼や水理構造物（ダム、堰等）を含む水循環過程、栄養塩や農薬等の物質輸送過程を模擬するものであり、動植物プランクトンへの影響を通して、生態系への影響評価も可能なように設計されている。図-1にHSPFが想定している循環系の基本概念を示す。例えば降雨流出モデルでは、各土地利用毎に表面、A層、上層、下層、地下水層といった概念的なタンクを配し、タンク毎のパラメータはその土地利用・植生被覆と土壌特性に応じて決められる。各単位流域面内で土地利用別に区別される構造より、HSPFの水文流出モデルは条件付きで概念化されたタンクが流域面に多数配置された分布型モデルと考えて差し支えない。土砂、栄養塩、農薬等の物質の輸送を扱う上で、流出過程モデルは分布型モデルの適用が必要である。地下水の挙動は低水流出のみならず、土砂崩壊現象においても重要な役割をはたし、土砂動態把握においても必須な要素となる。概念化された機構を持つ分布型モデルのHSPFが選択された理由の一つはこうした面にある。適用可能な領域の大きさについては、流域を構成する面要素のスケールによって、小流域から大流域への適用が可能であり、それに応じた形で降雨流出も洪水流出から低水流出まで扱える。長年の適用により、モデル定数に関する知見が蓄積されているが、近年でも、適用対象を広げた例が報告され、モデルの改良も合わせて行われている³⁾。



3. 流域モデルの涸沼川流域への適用

3.1 涸沼川流域の特徴

本研究では茨城県中央部を東から西へ流下する涸沼川を対象に検討を進めている（図-2参照）。涸沼川は本川長65km、流域面積459km²の川で、本川流域はその58%を占め、そこに流域人口の55%が生活している。特に、上流域には下水道が十分には整備されていない笠間市の市街地があり、また下流域には近年富栄養化が問題と成りつつあり汽水湖の涸沼がある。また、涸沼川の涸沼への流入付近は低平地で治水上の問題をあり、比較的小流域ではあるが、水量、水質、閉鎖性水域等の基本的問題を抱えた流域である。全流域の土地利用の特徴としては、水田、畑地、果樹園を合わせた農耕地が流域面積の40%を占める。表面土壌は西部地域は砂質土、東部地域は黒ボク土である。

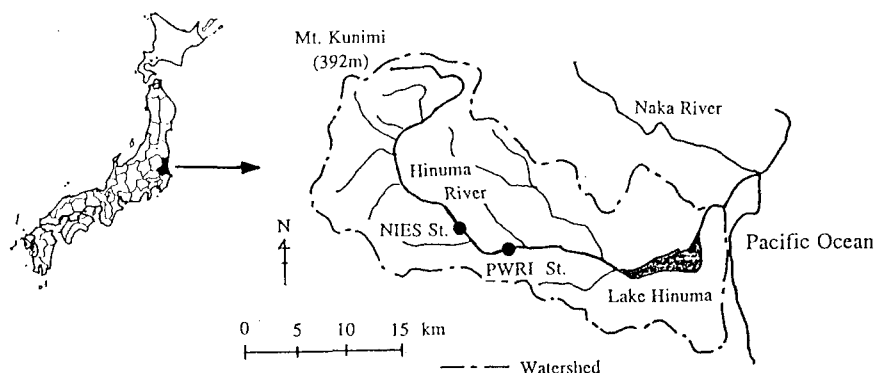


図-2 涸沼川流域図と観測点

1987年から1990年にかけては環境研究所によって中小洪水を含めて河川流況（流量時系列）と水質の観測が行われた⁴⁾。一方、1987年から現在にかけては建設省土木研究所が大規模出水時を含めて流量、流砂量観測を行うと共に、植生分布調査等を含めて総合的に洪水と河道動態の観測を実施している⁵⁾。それぞれの観測点は河口より33km、28kmであり（図-2のNIES St. および PWRI St.），図-2に見られように両観測点間に桜川が支川として流入している。

3.2 涸沼川流域の擬河川網と流域要素

流域における物質輸送の基本的かつ最重要な外力である水の移動を規定する最大要因が流域地表面の地形特性と河川水系網である。これらの面，線特の数学モデルへの入力には，領域斜面勾配，面積，河川勾配，として特定する必要がある。最近の地理情報システムの進歩は，数値標高モデルDEMより使用される数値地図の分解能と精度に応じて，代表単位面積の最急勾配線の方に規定される線を容易に構成する。これはあくまでも地形構造から決まる水移動の方向を示すものであり，実際の河川網との比較は既に多くの研究者によって論じられている。図-3は，国土地理院の50mメッシュの数値地図にGIS（ARC/INFO）を適用して構築された擬河道網と実際の河道網とを比較したものである。沿岸付近のごく平坦な地域を除いて，この擬河道網は実際の河道網と良く一致していた。この事より，用いたGIS（ARC/INFO）より構築された『線』としての河道，『面』としての流域斜面の地形情報は，ほぼ実際の流域構造を反映したのとなっていると判断した。実際の水・物質の移動は表面経路の植生被覆割合，また土地利用に，また地表面内の場合には土地利用と土壌特性に規定される。

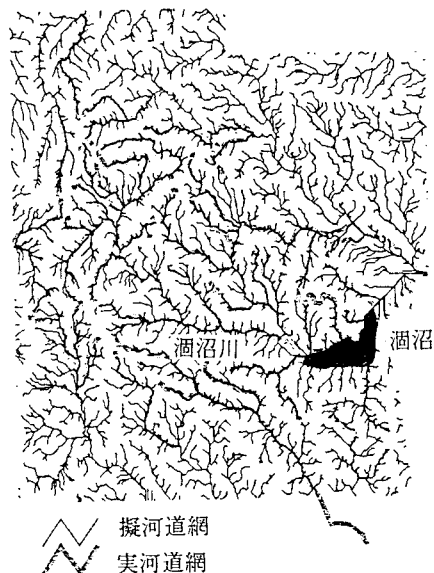


図-3 構築された擬河道網

本研究では，土地利用を水田，畑地，果樹園（低木），森林（高木），市街地を代表として12種類に分類した。土壌は当初10種類に分類したが，前述したように黒ボク土が大きな面を占めており，後述の計算に

当たっては、全流域、黒ボク土が覆っているものと仮定した。

河道の形状特性としては、土木研究所が行った詳細な流域内の河道調査結果より、低水路幅、堤防間隔、平均低水路高さ、河道構成材料を各河川区間毎に与えた。河道の抵抗特性はManning-Strickler式より推定した。

3.3 降雨流出のシミュレーション

シミュレーションの入力の気象情報は笠間市におけるアメダスの降雨、気温、日射データで代表させた。HSPFの適用モデルに当たって用いられているモデル定数は多く、その調整のため、土木研究所によって観測された1987年の年間の流量データに対して、シミュレーション計算結果の全体的なパターンやピーク値が見た目で最も良く合うように確定した。最終浸透能は畑、果樹園で70mm/hr、森林で120mm/hr、水田で75mm/hr、市街地で15mm/hrとした。表層付近での土壌貯水量は水田、畑、果樹園で7mm/hr、森林で15mm/hr、市街地で2.5mm/hr、下層貯留は黒ボク土の特性に依存するとして全流域で200mm/hrとした。本研究では水田の水文特性を十分には考慮しておらず、この値を除くと他の土地利用・植被状態での水文モデルの値はこれまでに報告されている日本の土壌、土地利用状況におけるの平均値とばらつきの範囲内に入っていた。一方、各層間の降下浸透に関わるパラメータについてはHSPFの推奨値の範囲内の値を与えた。調整されたモデル定数値を用いて、1989年の年間降雨流出の再現計算を試みた結果を図-4、8月のかなり大規模な出水時の計算結果を図-5に示す。計算値と実測値とはほぼ良好な一致を示していると判断される。ただし、図-5に見られるような短期出水の時間遅延がやや早く、今後の前述した各層間の水移動、貯留能等の検討が必要と思われる。図-6は観測点に直接流入する流域要素内の畑と市街地からの流出成分の寄与を示した計算結果である。観測結果との比較はできないが、農耕地・森林においては降雨後の中間流出成分の寄与が大きく、これが図-6の通減率の違いに現れていると推測される。市街地においては降雨時の表面流出成分のみが顕著であることが示されている。図-7は図-6に対応する蒸発散量の計算結果であり、総蒸発散量のオーダーは従来の観測値と同一であった。両者とも中間層からの蒸発散が特徴的であるが、水田、森林の場合は土層下部からの蒸発散量も大きいのが計算上の特徴であった。

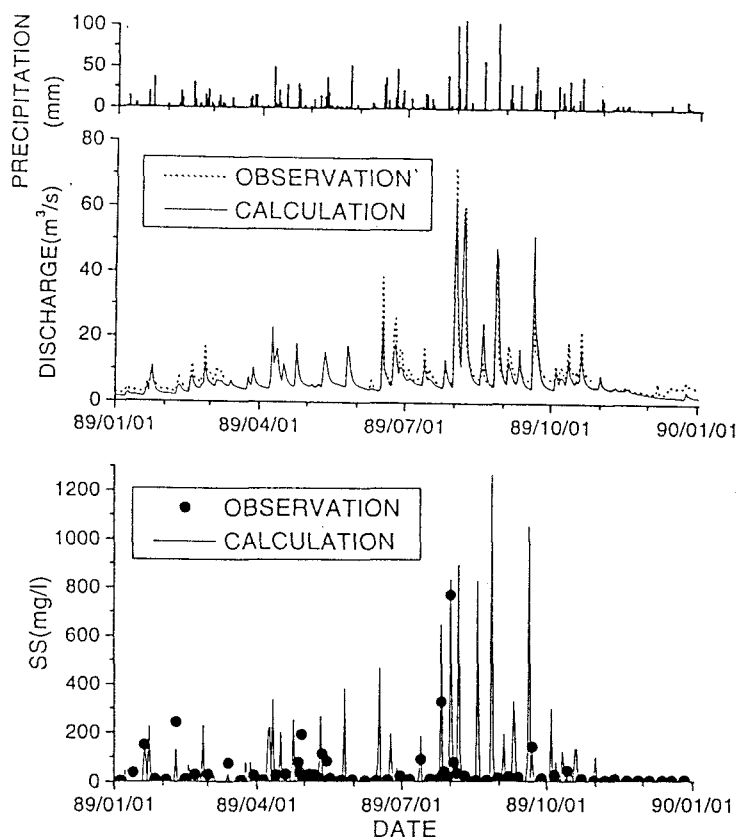


図-4 降雨流出と浮遊土砂のシミュレーション結果

3.4 浮遊性物質のシミュレーション

HSPFは種類の汚濁物質の輸送過程の追跡が可能である。化学物質、リンなどが土壌粒子に吸着するなど、

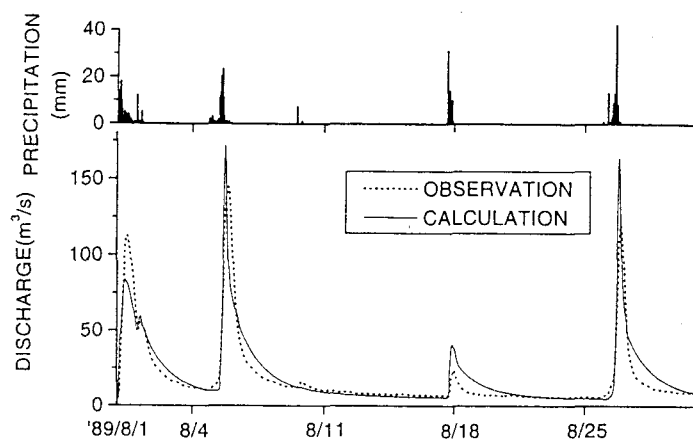


図-5 降雨流出の計算例

懸濁態成分を考えるうえで土壌粒子は重要な役割を果たすことより、まず第一段階として比較的微細な土砂の輸送量の再現計算を試みた。対象とした観測値は1989年、定期的に計測された浮遊性物質の濁度である。観測結果には土壌粒子以外のものも含まれている可能性が高いが、ここではすべて非粘着性土砂と仮定している。HSPFにおいては土砂輸送形式は、雨滴によるものと表面流によるものとに分けられている。前者のモデル定数についての参考資料はほとんどないこと、逆に後者については力学的検討も十分されており、モデル定数の確定は容易であることより、土砂輸送に係わるモデル定数を調整することはせず、HSPFの指定する値を用いて再現計算を行った。結果は、図-4に示すように、基本的な傾向は十分に模擬しているものと判断された。ただし、比較的大きな出水が短期間で生起する場合に、引き続き降雨時に多量の土砂輸送が計算においては認められ、これは堆積土砂の再巻き上げ現象の模擬結果と推測された。図-8は畑地と市街地からの移動開始土壌量を示したもので、市街地からの移動量は畑地からの10倍にもなることと、雨滴による土壌剥離も良くシミュレートされていることが分かる。図-9は6月から8月末までの観測値点での浮遊濁質の濃度と輸送量とを成分毎に表示した計算結果である。先行する降雨との時間間隔、継続時間によって、観測点での計算流量が同程度であっても、総量が違う可能性を示唆しており、non-point sourceからの汚濁負荷量を推定するに当たっては、こうした作用外力の非定常特性を考慮すべきことを再確認する結果となっている。

4. あとがき

生態系の変化として顕著に現れるであろう河川環境、河川景観の保全のために、流域内で総合的に水・物質の循環を管理することが求められている。このとき、河川に求められる種々の機能を整合性をもって、これに対処しなければならない。これらはしばしばトレードオフの関係にあるにも拘わらず、単一の機能の最適化が優先されてきた傾向があったようである。流域開発においても持続的発展が望まれる時代においては、機能間の相互関係をまず十分に理解することが重要であり、その上で具体的な目標設定がされると思われる。総合的な流域環境モデルの必要性はこの理解を広げてくれるという点にあると考える。

謝辞

本研究において建設省土木研究所河川研究室より貴重な観測資料の提供を受けたことを記して感謝します。

参考文献

1. Krysanova, V., Wohlfeil, M.D., and A. Becker : Integrated modelling of hydrology and water quality in mesoscale watersheds, Potsdam Institute for Climate Impact Research Report No.18, 1996.
2. Environmental Protection Agency edit. : Hydrological Simulation Program : ROTRAN, Users Manual for Release 10, 1993.
3. Laroche, A. M., Gallichchand, J., Lagace, R. and A. Pesant : Simulating Atrazine transport with HSPF in an agricultural watershed, Jour. of Environmental Engrg., Vol. 122, No.7, 1996.
4. 井上隆信：河床付着生物膜による河川流下過程の水質変化に関する研究，北海道大学学位論文，1996。
5. 建設省土木研究所河川研究室：酒沼川洪水観測レポート（1）1988～1989，土木研究所資料第2895号，1990。

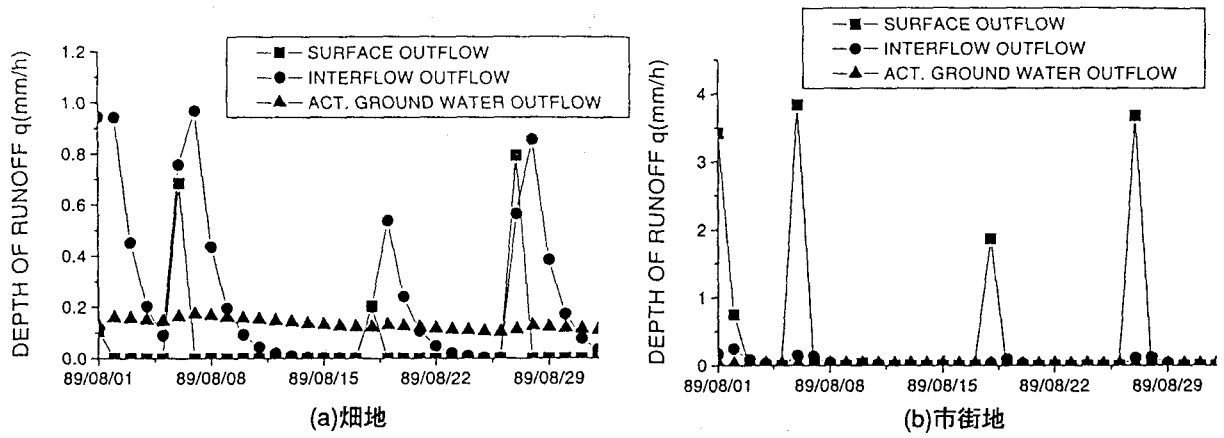


図-6 土地利用別流出成分

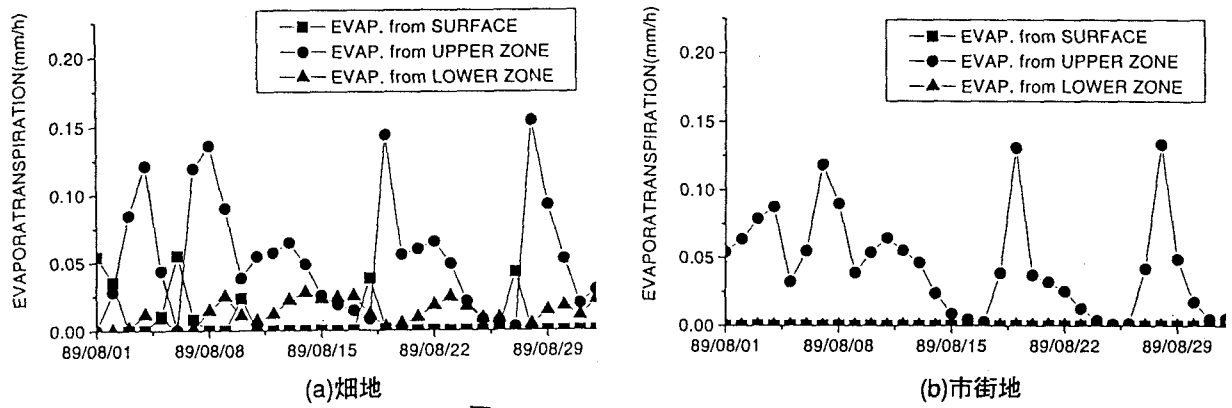


図-7 土地利用別蒸発散成分

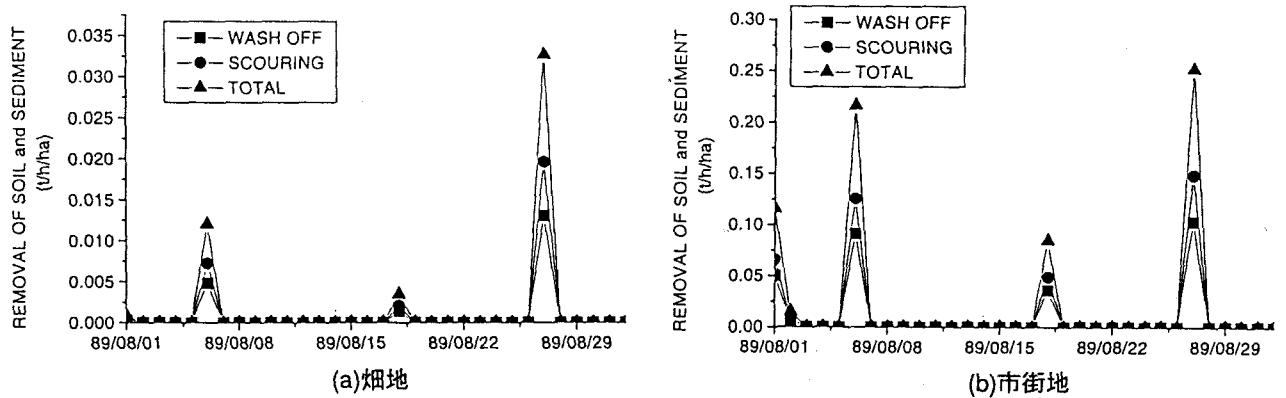


図-8 土地利用別土壌開始量

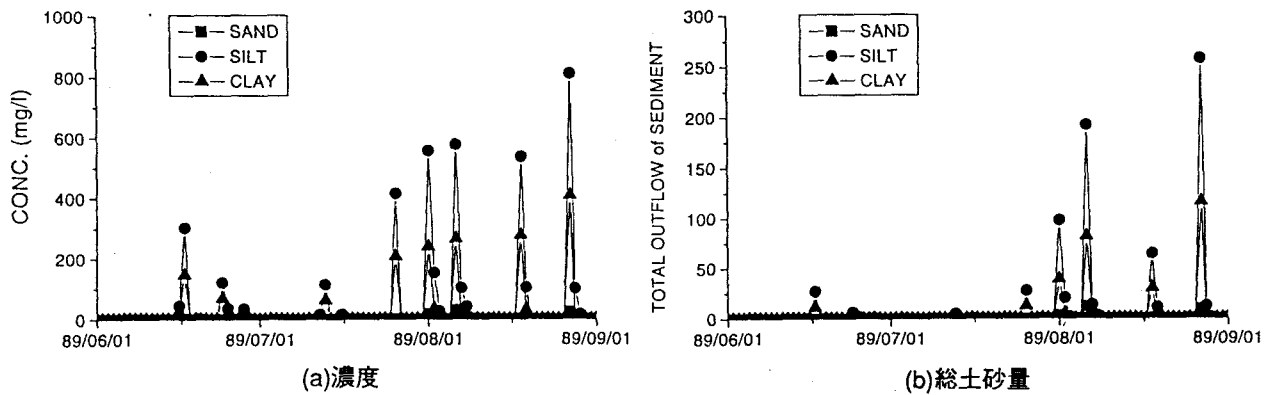


図-9 浮遊土砂