

流域水文モデル HSPF による沿岸海域への物質輸送シミュレーション

山下隆男*・嵯峨拓朗**

全球的な物質循環の解析では、気圏、水圏、地圏、生物圏等のサブシステムとその間の相互作用に関する知見を全球的に統合することが要求される。海岸工学の分野においても、流域・海域を結合した物質循環、外洋水と陸水の沿岸域での挙動、河口問題等、大気、海洋、陸域の複雑な相互作用を反映したモデル統合化研究が必要とされる段階に至っている。雨水の流出過程やこれに伴う土砂、栄養塩の輸送過程は、斜面勾配の他、土壌条件、植生条件によって規定される浸透能によって大きく変わる。このような現象を再現するため本研究では、米国環境省のモデル HSPF を用いて、沿岸海域への陸水、物質輸送のシミュレーションの可能性を検討した。

1. 緒 言

全球的な物質循環の解析では、気圏、水圏、地圏、生物圏等のサブシステムとその間の相互作用に関する知見を全球的に統合することが要求される。海岸工学の分野においても、流域・海域を結合した物質循環、外洋水と陸水の沿岸域での挙動、河口問題等、大気、海洋、陸域の複雑な相互作用を反映したモデル統合化研究が必要とされる段階に至っている。雨水の流出過程やこれに伴う土砂、栄養塩の輸送過程は、斜面勾配の他、土壌条件、植生条件によって規定される浸透能によって大きく変わる。このような現象を再現するための流出モデルは1980年代に河川流域管理の実務面で急速に普及し、線形・非線形、集中型・分布型、概念型・解析型等の組み合わせで多くのモデルが作成され、水質や土砂輸送モデルが組み込まれてきた。幾多のバージョンアップが繰り返され、現在では HEC, HSPF, MIKE-11, MIKE-SHE が代表的なモデルとして定着している。本研究では、米国環境省のモデル HSPF を用いて、沿岸海域への陸水、物質輸送の計算の可能性を検討する。

2. 流域水文モデル HSPF の概要

(1) 流域水文モデル

Crawford & Linsley(1966)のスタンフォード分水界モデル SWM (今は HSPF) に代表されるように、1960年代の十年間に、分水界(watershed)の水循環シミュレーションモデルが統合された。Dawdy & O'Donnell(1965)の分水界モデル, HEC-1 (Hydrologic Engineering Center, 1968) および Sugawara (1967) によって開発されていたタンク・モデルに代表されるように、分水界内の水文学的プロセスの空間変化を説明するための半分配型モデルが多く開発された。物理則に基づいた分水界

水文モデルの例としては Systeme Hydrologique European(SHE) (Abbott et al., 1986), TOPMODEL (Beven and Kirkby, 1979), IHDM がある。SHE では底質輸送を含める拡張がなされ、河川流域規模で適用が可能となった。TOPMODEL では、多くの流域情報を含むように拡張され、物理過程が強化され、パラメーター評価が改善された。また、1970年代および1980年代の間には、水文モデル以外にも、環境や生態系管理のための数学モデルが開発された。1990年代の十年間は、気候変化のインパクトを評価するために、水文学的陸域モデル、土壌学・岩盤学モデル、大気圏・水圏モデルの統合を呼びかける地域・全球水文学に力点が置かれた。この統合は、STORM, GEWEX, HAPEXMOBILHY (MAC-HYDRO) 等の大規模なフィールド実験のデータを可能にし、グローバル規模で大陸に適用される多数の水文学のモデルが出てきた。

分水界モデルに埋め込まれた数学的な方程式は、多くの場合時間的に空間的に連続的であるが、解析解は非常に単純な場合以外は得ることができない。そのために「有限差分法」、「有限要素法」、「境界要素法」「移動型境界要素法」等による数値解法が、実際の計算に使用される。最も一般的な公式化は3空間次元および時間の偏微分方程式を含むものであるが、空間の微分が無視される場合には、モデルは“集中型”と呼ばれ、それ以外は“分布型”と呼ばれ、その解は空間と時間の関数となる。

本研究で用いるモデルは HSPF (HYDROLOGIC SIMULATION PROGRAM-FORTRAN)で、スタンフォード分水界モデル SWM が基盤になっているモデルである。

(2) HSPF の概要

HSPF は、運動学的または定常的な水文事象、水理学事象の連続的なシミュレーションモデルで、固定した空間における時間発展計算を行う。さらに、混合土地利用下での栄養塩、有害物質、バクテリア、底質の負荷を予測するための機能が多く付加されている。HSPF の主な Module は、透水性ランドセグメントを対象とした

* 正会員 工博 京都大学防災研究所 助教授

** 正会員 工修 三重県 北勢県民局

「PERLND」、不透水性のランドセグメントを対象とした「IMPLND」、および完全混合状態を仮定した貯水池・水路 (Reach and Reservoir) を対象とした「RCHRES」である。

a) PERLND: ランドセグメント (land segment) は分水界を細分したもので、その境界は任意に設定できる。一般に、ランドセグメントは同質の水文学的特性を備えたエリアとして定義される。水、底質、および分水界から出てくる水質要素は、水平方向にだけ移動し、下り勾配のランドセグメントあるいは流路・貯水池へ移動すると考える。水収支に影響を及ぼす程度の浸透性を持つランドセグメントを、“pervious”と呼ぶ。HSPFにおけるPERLNDはperviousセグメントにおける水質および水量の変化をシミュレートするモジュールである。PERLND中の主要なセクションは、雪積・融雪 (SNOW)、水収支 (PWATER)、地表面侵食 (SEDMNT) 等、様々な方法によって生産される底質および水質要素をシミュレートする。他のセクションは、以下のような補助的な機能を持つ。(1) 融雪、土壌温度計算に使用するための気温の高度修正 (ATEMP)。(2) 流出水の温度を評価し農業化学物質セクション中の反応速度に影響を決める土壌温度の予測 (PSTEMP)。(3) 酸素と二酸化炭素の可溶性に影響を及ぼす流出水温度の決定。図-1にPERLNDモジュールの構造図を示す。

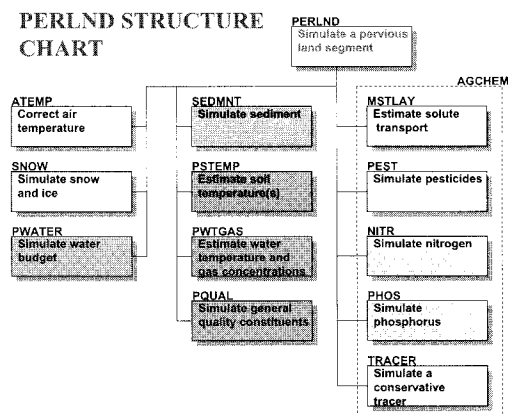


図-1 PERLND モジュールの構造図

PWATER は、浸透性セグメントからの全流出量を予測するための重要なコンポーネントである。PWATERによってモデル化される水文学プロセスを図-2に示す。ランドセグメントでのプロセスをシミュレートするために使用されるアルゴリズムは、Stanford Watershed Model IV (Crawford and Linsley, 1966) の「LANDS」サブ・プログラムの研究に端を発している。LANDSは多くのモデルに組み入れられ、広域に変化する分水界の水文学的応答をシミュレートするために使用されてきた。

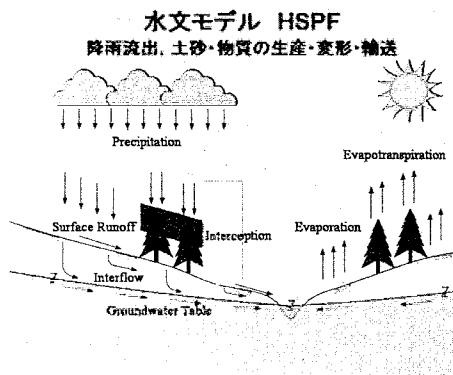


図-2 PWATER でモデル化される水文学プロセス

PWATER で必要な時系列データは、雪積および融雪が考慮されるかどうかによって依存する。これが考慮されない場合、「ポテンシャル蒸発散」および「降水」の時系列だけが必要となる。ポテンシャル蒸発散 (PET) はサブブルーチン EVAPT 中の実際の ET 計算に使用するパラメータである。

図-3は、PWATERでシミュレートされた fluxes および貯蔵の関係を表す。ランドセグメントに供給された水分を表わす時系列 SUPY は、雨または積雪からの水 (雪条件が考慮される場合) を含む。遮断貯蔵は、陸上流れ面上の任意の貯蔵により補足された水量と定義される。透過エリアでは、遮断貯蔵のほとんどは植生上で行われ、遮断貯蔵から流出した水は全て、地表面外部水平流入時系列に加えられ、表面補足貯蔵への全流入量として計算される。この表面補足貯蔵へ流入した水は、貯蔵に留まる水と浸透と陸上流出に分かれる。浸透する水は、下部ゾーンや地下水貯蔵へ移動するが、その他の水は上部ゾーン貯蔵に行くか、表面補足貯蔵または中間流貯蔵からの流出として流路を形成するか、陸上流路面に留まり陸上流出するか、時間経過後に浸透水の供給源となる。

浸透と陸上流れは同時に発生する過程で、相互に作用を及ぼしあう。緩勾配斜面上の密集植生地のような表面条件では、陸上での流速が弱められ全流量は少なくなるが、浸透時間を長くする。浸透時間の延長により増加した土壌水分は、浸透能を弱くするため、今度は陸上流量を増加させるように作用する。地表面での水の拘留は流れの特性を変える。地表面で拘留された水は、遅れて浸透し中間流となるか、上部ゾーン貯蔵に取り込まれる。

地表面から浸透し上部ゾーン貯蔵から濾過される水は、下部ゾーン貯蔵内に格納されるか、あるいは地下水貯蔵に流入するか、深層部で濾過され失われる。下部ゾーンに到着した水は蒸発散により吸い上げられる。流動地下水は最終的には基盤流 (baseflow) となり、蒸発散過程に従うことになるが、深層部で濾過される水はシステム

から消失するとして取り扱う。上部ゾーン貯蔵、下部ゾーン貯蔵および流動地下水貯蔵への外部からの側方流入流量も PWATER で解析する。水収支のシミュレーションでは、流れだけでなく貯蔵も重要である。

貯蔵はさらに蒸発散に影響する。蒸発散は遮断貯蔵、上部・下部ゾーン貯蔵、流動地下水貯蔵と baseflow からシミュレートすることができる。貯蔵と流出は、農業化学モジュール・セクションでシミュレートされる化学物質の変化および移動の手段でもある(図-3)。

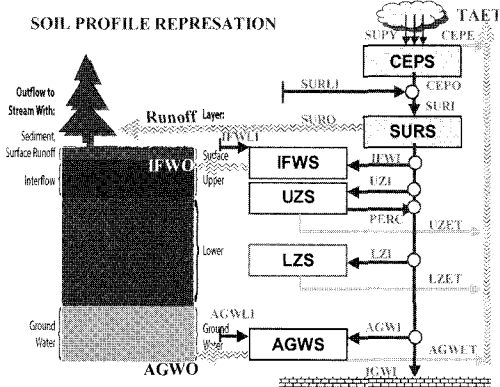


図-3 PWATER での fluxes および貯蔵の関係

b) RCHRES: RCHRES は、開または閉の単一水路あるいは完全混合湖で生じる現象を再現するモジュールで、図-4 のような構成をしている。ここでの流れは一方方向を仮定しているため、他の RCHRES およびローカルな発生源から来た水および他の物質は、単一のゲート (INFLO) を通って RCHRES に流入し、流出時には、ゲートあるいは出口 (OFLO) のうちの1つを通して RCHRES を出る。

このセクション内では、物理的なプロセス(鉛直移流、沈降、水底放出)のシミュレーションは、常に生化学のプロセスのシミュレーションの前に実行される。「質」

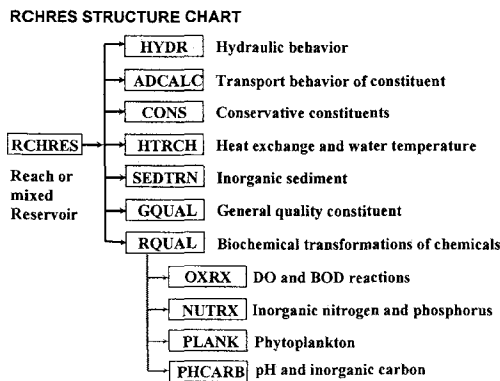


図-4 RCHRES の構成

セクション (RQUAL から CONS) が作動している場合には、セクション ADCALC は「質」要素の移流を再現するために必要な物理量を計算する。

3. HSPF による流出解析

(1) 会津川流域

本研究では、計算対象を田辺湾に直接流入する左会津川とその流域(図-5)に設定する。二級河川左会津川水系河川整備計画によれば、左会津川は、流域面積84.7 km²、幹線流路延長20.2 km の河川で、流域は、東側の左会津川流域、西側の右会津川流域と大きく二つに分かれている。田辺湾の湾口には京都大学防災研究所白浜海象観測所の高潮観測塔があり、大気・海洋結合モデルの開発、検証のための沿岸海洋観測が実施されている。

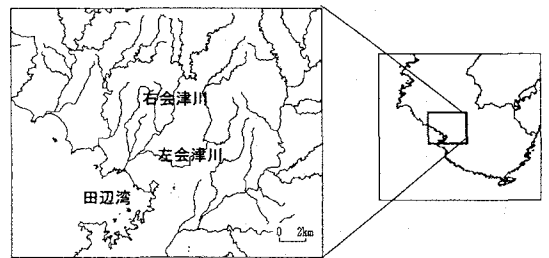


図-5 会津川的位置及び流路(国土画像情報より)

流域の地質は西日本外帯の四万十川累帯に属し、第三紀層からなっている。上・中流部の山地に音無川層群が分布している他、牟婁層群、田辺層群の分布が見られ、いずれも砂岩と泥岩の互層が主である。年降水量は平均1600 mm 程度あり、5月～7月の梅雨期、9月の台風期に多くなっている。流域の多くは森林が占めているが、農用地(主に果樹園)の利用が非常に多い。上流部はスギ、ヒノキ植林、紀州備長炭の原料となるウバメガシなどの二次林が広がっており、中流部の山腹では梅などの果樹園が広く分布している。河川沿いには水田、畑が見られ、右会津川合流点付近より下流では市街地となっている。本研究では、対象流域における地理情報を、主に流域解析システム WMS (Watershed Management System)、ならびに GRASS GIS を使用して前処理を行った。

流域の地形情報については、国土地理院数値地図50 m メッシュ(標高)を基に作成した。この標高データに基づき、対象流域における流路、分水界等の水文地形情報を算出した。流域の土地利用状況に関しては、国土交通省の国土数値情報(土地利用メッシュ平成3年土地利用, L03-03M)を使用した。以上のようにして得られた分水界と土地利用状況について、それぞれの地理情報を、WMS によって重ね合わせ、各単位流域を土地利用状況に応じてセグメントに分割した。分割された各セ

グメントの面積で、透水性セグメント(PLS)として大きな割合を占めたのは、森林、農地、水田であり、不透水性セグメント(ILS)として大きな割合を占めたのは建物用地であった。これら以外の土地利用状況に分類されるセグメントについては、その面積を同じ単位流域の主要なセグメントに対して均等に配分した(図-6)。

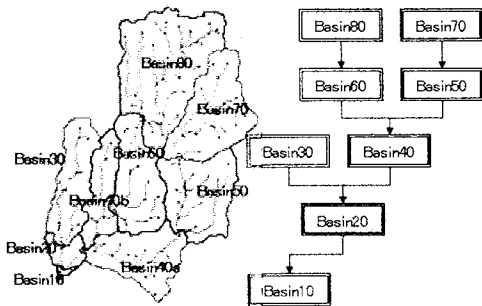


図-6 流路及び分水界の分割

(2) 流域の降雨シミュレーション

メソ気象モデルMM5による降雨シミュレーションを行った。境界条件、初期条件にはNCEP/NCARの客観解析データを用いた。流出解析の対象流域内にある気象庁の白浜観測所において、2004年7月31日の時間降雨量の比較を行った結果を図-7に示す。日降雨量の観測値は128mmで、時間降雨量の変化が全体的によく再現されており、降雨データの無い流域においても、気象モデルで降雨量を再現することが可能であると考えられる。

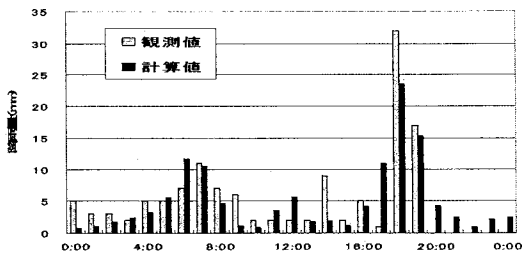


図-7 MM5による降雨シミュレーション

(3) モデルパラメータの同定とモデル検証

まず、HSPFによる流出流量の解析を行った。計算期間は、田辺湾において集中的に沿岸海洋観測が行われている夏期(7, 8月)の2ヶ月間とし、モデルパラメータは、2004年のデータにより同定を行い、2003年のデータを用いて検証を行った。蒸発量ポテンシャルはHamon(1961)の式によって求めた。会津川の水位流量情報は、河口から1.6km地点に位置する和歌山県西牟婁振興局高山寺水位観測所での水位観測結果を、セグメントRCH20におけるシミュレーション結果と比較した。同定・検定のための気象データは、MM5のシミュレー

ション結果は用いず、アメダス観測値(白浜、栗栖川の平均値)を流域全体に一樣に与えた。図-8に同定と検証の結果を示す。

図-9に、2004年の台風による降水量とランドセグメントPLS#81で再現された流出量および貯留量の時間変化を示す。図中、PET:蒸発散量, SURO:表面流の流出量, IFWO:中間流の流出量, AGWO:地下水の流出量である。水分貯留量の内訳は、CEPS:土地被覆物における水分の貯留量, SURS:表層における水分の貯留量, IFWS:中間層における水分の貯留量, UZS:上部ゾーンにおける水分貯留量, LZS:下部ゾーンにおける水分貯留量, AGWS:地下水層における水分貯留量であ

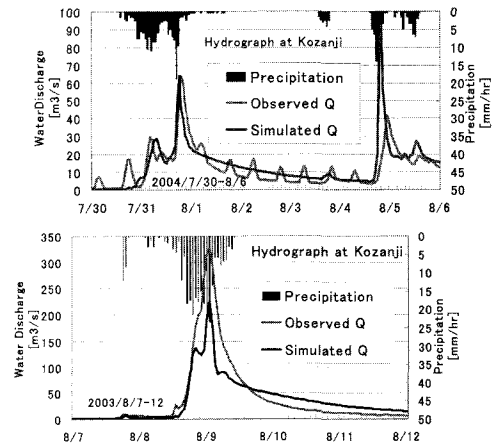


図-8 モデルパラメータの同定(上图, 2004年)とモデル検証(下图, 2003年)

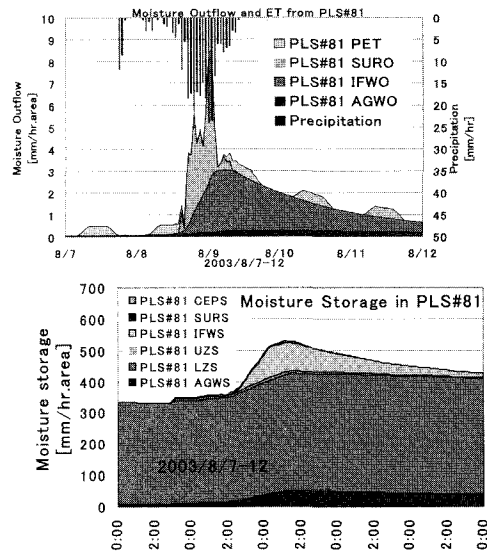


図-9 再現された流出量(蒸発散, 表層流, 中間流, 地下水流), および貯留量の時間変化

る。各内訳におけるシミュレーション結果の検証はできないが、ほぼ妥当な流出、貯留量を示していると思われる。

4. 海岸への物質供給シミュレーションの可能性

流域を移動する懸濁態物質は流域の生態系に対して大きなインパクトを持つ。さらに、浮遊性の懸濁物質は水中の栄養塩を吸着するため、水質環境という視点からも極めて大きな意味を持つ。HSPF の大きな特色の1つは、単に流出解析を行うことができるというだけでなく、種々の物質動態の解析が可能な点である。さらに、栄養塩や汚染物質の輸送過程をシミュレートしようとする場合、浮遊性の懸濁物質の輸送過程が正確に再現できていることが前提となる。

HSPF による土砂流出過程の解析では、まず地表からの土砂流出量の計算を行う（雨水の位置エネルギーが営力となる）。対象とする流域においては、土砂流出量の観測結果が得られることは少ないので、本研究では、斜面からの流失量を USLE (Universal Soil Loss Equation) で概算し（Renard ら, 1996）、HSPF との比較を行った。図-10 に示すように、土砂総流出量については HSPF の計算結果が若干低い。どちらが正しいかの判断はできないが、生産土砂量に関する観測を実施する必要がある。

斜面からの土砂流出量の再現計算に基づき、河川水中での土砂輸送過程および河口への土砂の流出量を計算した。砂、シルト、粘土（比率を15:55:30と仮定）について、それぞれの代表粒径を2.0, 0.07, 0.005 mm とし、流送土砂量を計算した。砂の輸送計算には指数則を用いた。図-11 に河口付近 (Reach20) でのべき乗 (EXPSND) を3, 4, 5と変化させた場合の堆積(+)・侵食(-)土砂量を示す。上流での侵食・堆積特性、河口での堆積量から判断して、4乗則の適用が適切であると思われる。シルト、粘土の輸送量も同様に計算されているが、これらに関してはウオッシュロード観測による検証が必要である。HSPF では浮遊粒子に付着して輸送さ

れる栄養塩も解析でき、これらの計算結果の海域への適用が可能である。

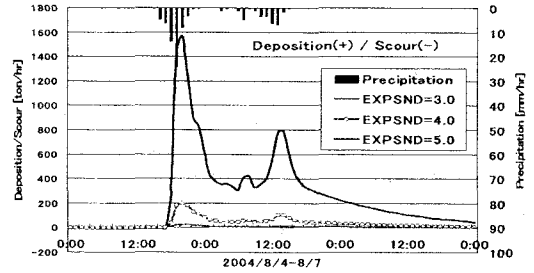


図-11 べき乗による堆積／洗掘量の変化 (Reach 20)

5. 結 語

陸域から海域への影響を評価するため、流域水文モデル HSPF を使用した。和歌山県の田辺湾に注ぐ会津川流域を対象として、HSPF の降雨・流量の応答特性と土砂流出過程について計算を行い、モデルの有効性と今後必要な観測研究について検討を行った。HSPF により、河川流量の再現は可能であるが、土砂や SS の流出量、栄養塩の動態の再現に拡張するためには、ウオッシュロードや栄養塩フラックス等の連続観測が必要である。

参 考 文 献

- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., and Rasmussen, J. (1986): An introduction to the European hydrologic system—Système hydrologique Européen, SHE, 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modeling system. J. Hydrol., 87, pp. 45–59.
- Beven, K. J., and Kirkby, M. J. (1979): A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. Hydrol. Sci. Bull., 24(1), pp. 43–69.
- Crawford, H.H. and R.K. Linsley. (1966): Digital simulation in hydrology: Stanford watershed model IV, Technical Report No. 39.
- Dawdy, D. R., and O'Donnell, T. (1965): Mathematical models of catchment behavior, J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 91 (HY4), pp. 123–127.
- Hydrologic Engineering Center (HEC) (1968): HEC-1 flood hydrograph package, user's manual, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, Calif.
- Leavesley, G. H., Lichty, R. W., Troutman, B. M., and Saindon, L. G. (1983): Precipitation-runoff modeling system user's manual, USGS Water Resources Investigations Rep. No. 83-4238, Denver.
- Sugawara, M. (1967): The flood forecasting by a series storage type model, Int. Symposium Floods and their Computation, International Association of Hydrologic Sciences, pp. 1–6.
- Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool, and D. C. Yoder (1996): Predicting Soil Erosion by water: A guide to Conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), Agriculture Handbook No. 703, USDA.

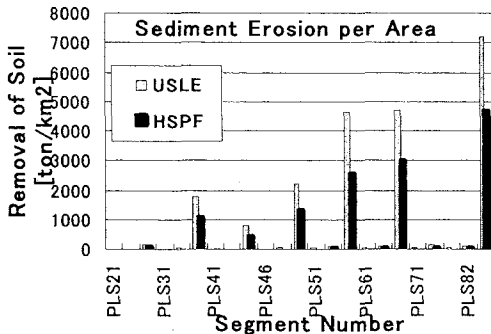


図-10 土砂総流出量 USLE と HSPF との比較