

都市部におけるポリゴン型不浸透面積率データを用いたHYPEモデルの流出予測精度向上に関する研究

STUDY ON A PRECISION IMPROVEMENT OF RUNOFF PREDICTION BY HYPE MODEL USING POLYGONAL IMPERVIOUS AREA RATIO DATA IN AN URBANIZED AREA

田内裕人¹・河村明²・天口英雄³・OLSSON Jonas⁴

Hiroto TANOUCHI, Akira KAWAMURA, Hideo AMAGUCHI and Jonas OLSSON

¹学生会員 修（工） 首都大学東京 都市環境科学研究科（〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1）

²正会員 工博 首都大学東京 教授 都市環境科学研究科（〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1）

³正会員 博（工） 首都大学東京 助教 都市環境科学研究科（〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1）

⁴非会員 Ph.D., Swedish Meteorological and Hydrological Institute（SE-601 76 Norrköping）

A HYPE (HYdrological Prediction for the Environment) model considering impervious land cover in an urbanized watershed is set up to improve prediction precision of storm runoff. The set-up of the model is based on the Urban Atlas that is polygonal land cover data with impervious information. Firstly accurate impervious area ratios in a target watershed are calculated using the Urban Atlas, and the ratios are set to the HYPE model. Secondly, appropriate parameters to describe hydrological property in an urbanized area are implemented for the HYPE model. The model was applied for the watershed including urbanized area of Svedala, Sweden. It was demonstrated that impervious information obtained by polygonal impervious area ratio data contributed precision improvement of runoff prediction by HYPE model in urbanized area.

Key Words : HYPE model, Urban Atlas, runoff analysis, urban landscape, impervious area ratio

1. はじめに

河川および湖などの水辺環境の向上は、環境関連団体や市民等らの強い要望であり、良好な状態を維持し保全するには非常に大きな手間と時間が必要とされる。EU諸国では、2000年に水域の水質向上を目指したWFD (EU Water Framework Directive)¹⁾と呼ばれる条例が制定された。WFDへの取り組みには、流域内の水循環機構を把握することが基本的かつ重要であり、土地利用変化や地球温暖化の影響などが生じる様々な条件下において、流域からの流出量を予測可能な分布型流出モデルの活用が有効である。

数万km²以上の広域を対象とした流域への流出モデルの適用には、河川流量の存在しない未観測地域が多数含まれており、流出特性に強く影響する土地被覆、土壌、起伏などの地理的特性から流量を予測する、いわゆる

PUB (Prediction in Ungauged Basin) を目的とした技術が必要である。例えば、HBVモデル²⁾はスウェーデン気象水文研究所 (SMHI) が極域のPUBを目的に開発した分布型流出モデルであり、流出計算の基本単位である計算グリッドごとに土地被覆と土壌タイプを設定可能である。また小尻ら³⁾が開発したHydro-BEAM⁴⁾は、計算グリッド内の土地被覆の不均一性と土壌の鉛直構造の変化を考慮し、個々の計算グリッドに対して複数の土地被覆面積率と最大4層の土壌層を設定可能なモデルとなっている。しかしながらグリッド型による対象流域のモデル計算では、特に広域へ適用する際に計算速度の点で問題がある。こうした背景から、SMHIはHBVモデルの後継モデルとして、流域と地下水流れを考慮し構築した数十km²のポリゴン型副流域を計算単位とする準分布型水文・水質統合解析モデルのHYPE (HYdrological Predictions for the Environment) モデル⁴⁾を開発した。HYPEモデルでは、各副流域に複数の土地被覆と土壌タイプを面積率として

容易に設定可能であり、GIS分野の技術的進歩とそれに伴うデータの高精度・高解像度化にも対応可能なモデル構造となっている。HYPEモデルでは、日単位における広域の流出現象の把握を目的としており、計算の高速化と流域モデル化の簡素化のために、流域の水文過程をできる限り簡素な式で表現している。2007年にスウェーデン全域を対象としたモデルが開発されて以降は、世界各地に拡張され、ヨーロッパ全域、北極圏やアフリカなどさまざまな地域の流出量予測で用いられてきた⁵⁾。現在SMHIでは、洪水流出解析への適用を視野に入れ、日単位のHYPEモデルを拡張し、時間単位のHYPEモデルの開発を検討している。

流出特性に特に大きな影響を与える地理的要因として、流域における都市部の有無がある。全流域面積に占める都市部の割合が小さい場合でも、都市部の広範囲を占める不浸透域からの雨水が地表面や雨水・下水道管路を介して河川へ直接排水されるため、流域出口における降雨時のピーク流量増大と洪水到達時間の短縮に寄与する⁶⁾。このことから、対象流域に都市部を含む場合には、不浸透域を考慮した流出モデルの設定が必要と考えられる。しかし従来、土地利用が錯雑な都市部を精緻に表現可能なGISデータを広範囲で入手することが困難であったため、流出モデルに対して不浸透域を詳細に設定した事例は、数km²程度の流域スケールを対象とした流出モデル⁷⁾に限定され、広域を対象とした流出モデルでは、不浸透域を無視するか、簡易的に扱うのみであった。例えばS-HYPEモデルは、面積45万km²のスウェーデン国内を対象とした最も高解像度なHYPEモデルであり、農村部を湖、池、沼地、氷河、モレーン、泥炭地、露岩地帯、農地、針葉樹林、広葉樹林、草原の11種もの土地被覆に分類し、各土地被覆に対して水文特性を設定しているが、都市部の分類は市街地と郊外のみであり、不浸透域の影響は考慮されていない⁴⁾。

近年、浸透特性に基づく分類がなされ、かつ従来のグリッド型と比較し個々の土地被覆形状を正確に表現可能なポリゴン型土地被覆データの整備が進んでおり、HYPEモデルのような広域を対象とした流出モデルにおいても、不浸透域の設定が可能となりつつある。例えば、欧州環境機関が2010年に公開したUrban Atlasは、ヨーロッパ各地の人口10万人を超える全ての都市部で入手可能な高精度・高解像度のポリゴン型土地被覆データであり、各街区ポリゴンには衛星画像処理により得られた浸透面積率が属性として与えられている⁸⁾。このことからUrban Atlasは、都市部を含む流域を対象とした流出モデル設定に適した土地被覆データであり、Urban Atlasを用いたHYPEモデルの設定手法を示すことはモデルの高度化に資すると思われるが、こうした研究は著者らの知る限り承知していない。

そこで本研究では、HYPEモデルにおいて、都市部における不浸透面積率データをUrban Atlasから設定する手

法（以下、U-HYPEと呼ぶ）を示すとともに、スウェーデン南部の小都市Svedalaを含む小流域を例にとり、U-HYPEと従来のS-HYPEの流出量計算結果および河川流量観測値との比較から流出予測精度を評価する。本評価結果から、HYPEモデルで正確な不浸透域面積率を考慮することが、都市部の占める割合の大小に関わらず重要であることを示す。

2. HYPEモデルの概要

(1) モデルの基本構造

図-1はHYPEモデルの基本構造を示している。HYPEモデルは対象領域を数km²程度の副流域に分割し、副流域ごとに直接流出量や土壌への浸透量、蒸発散量を計算する準分布型の物理モデルであり、副流域内部の土地被覆と土壌の不均一性について考慮可能なモデル構造となっている。HYPEモデルの実流域への適用ではまず、対象領域の土地被覆、土壌、ポリゴン型副流域の各種GISデータを用意する。ここでポリゴン型副流域の流域境界は、各河川の流域と地下水流れを考慮し決定する。次いで、土地被覆データと土壌データを重ね合わせ、耕作地（シルト土壌）や針葉樹林（モレーン土壌）といった土地被覆と土壌の組み合わせを土地被覆-土壌クラスとして抽出する。個々の土地被覆-土壌クラスには、上層土壌、中層土壌および下層土壌の3層の土壌を設定可能となっており（図-1）、土壌層ごとに層厚、萎れ点、圃場容水量、有効間隙率などの土壌物理パラメータ、直接流出量や土壌浸透量、地下水位変動、蒸発散量などを計算するための水文パラメータを設定する。最後に、各副流域に対して、個々の土地被覆-土壌クラスが占める面積率を計算し、副流域の属性として与えて対象流域をモデル化する。

(2) 流出計算フロー

図-2はHYPEモデルが対象とする水文諸過程を示している。HYPEモデルでは地表面流出、土壌各層からの中間流出や浸透量、蒸発量などの基本的な水水量に加え、積雪・融雪過程や湖内部の水・栄養塩循環、水の移動に伴う農地等からの栄養塩輸送も合わせて解くことが可能である。HYPEモデルのシミュレーションに必要な気象データは、副流域ごとの日降水量および日平均気温であ

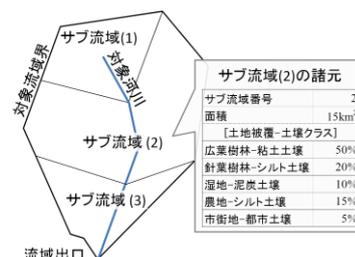


図-1 HYPEモデルの流域基本構造。

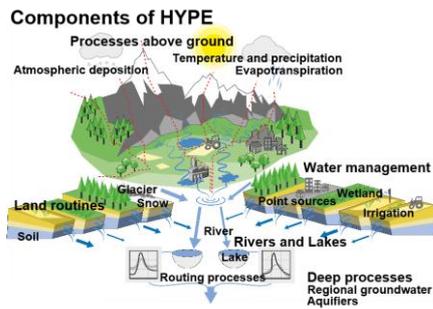


図-2 HYPEモデルで扱う諸水文過程。

り、降水量は気温が0度以上の場合には降雨として、0度以下の場合には降雪として、副流域を構成する土地被覆一土壤クラスに与えられる。以下では、副流域内の1つの土地被覆一土壤クラスにおける雨水の流れについて述べる。

まず、日降雨は土地被覆一土壤クラスごとに設定された配分パラメータに基づき、地表面流出成分、マクロポール流成分および土壤浸透成分として配分される。地表面流出成分はただちに副流域出口に排水され、降雨当日の副流域出口の河川流量増加に寄与する。マクロポール流成分は地下水に直接涵養され、地下水位上昇とこれに伴う地下水流出量増加に寄与する。土壤浸透成分については、これが日最大浸透能よりも小さく、かつ上層土壤において不飽和の状態が維持される場合には、すべて上層土壤へと浸透し上層土壤間隙を満たすが、これら条件を満たさない場合には余剰水が地表面に残り次の日の流出計算にまわされる。上層土壤では、水分量が萎れ点を上回る場合には蒸発散量のみが、圃場含水量を上回る場合には蒸発散量、直接流出量、中層土壤への浸透量がそれぞれ計算される。なお蒸発散量、直接流出量、中層土壤への浸透量がすべて計算された後に上層土壤に残った水分量については、余剰水として次の日の流出計算にまわされる。次いで、中層土壤における蒸発散量、直接流出量、浸透量は、上層土壤と同様の流れで計算される。一方、下層土壤では、土壤からの蒸発散量が地表面からの深さに対して指数関数的に減少するとの仮定から、下層土壤からの蒸発散を微小として無視しており、直接流出量と地下水面上昇のみを計算する。また、下層土壤は定常的に地下水がある層として扱われ、パラメータで設定した深さ以上に存在する水のみが河川に流出する。土壤からの直接流出量、浸透量、蒸発量や融雪過程等の詳しい計算方法と各種パラメータは、参考文献4)を参照されたい。

(3) モデルのバージョンと対象流域

図-3に本研究の対象とするSege川上流域の位置およびその概略図を示す。本研究では、HYPEモデルとしてS-HYPEのver. 4.8.0を用いることとする。S-HYPEは副流域のGISデータとして、SMHIにより整備されたSwedish Water Archive⁴⁾を用いている。Swedish Water Archiveで

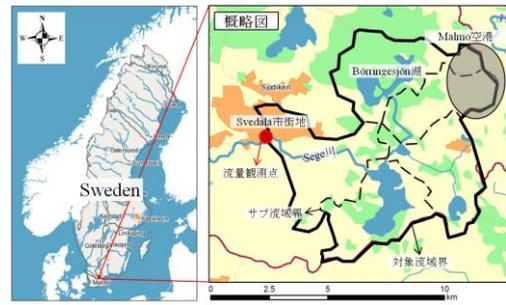


図-3 スウェーデン全域とSege川上流域の位置(左)およびその概略図と副流域(右)

は、河川流域および地下水の調査に基づいて、45万km²程度のスウェーデンをおよそ38,000個のポリゴン型副流域に分割しており、S-HYPEの副流域平均面積は約12km²でHYPEモデルとしては最大の解像度となる。またS-HYPEでは、土地被覆データとして欧州環境機関が配備した100mグリッドのCORINE Land Cover¹⁰⁾を、土壤データとしてスウェーデン地質調査所が提供するSGU soil database¹¹⁾をそれぞれ用いている(図-4)。

本研究で研究対象としたSege川はスウェーデン南部スコネ地方の湖Börningesjönにその源を発し、人口約1万人の小都市Svedalaの南部およびスウェーデン第三の都市Malmöの北側を順次流下しÖresund海峡に注ぐ河川である。Sege川の流路延長は約40km、流域面積は約200km²となっており、流域最高点は海拔49mと低く流域のほとんどが低平地となる。本研究においては、Sege川上流域の流域面積52.2km²をU-HYPEの構築対象流域に設定した。本対象流域の流域出口付近にはSvedalaの市街地が、上流域にはMalmö空港があり、それぞれ流域からの直接流出量増加に寄与すると考えられるが、対象流域の中流付近に複数の湖があり、Malmö空港からの直接流出はこれらの湖へ流れ込むため、流量観測点における降雨時のピーク流量増加に対しては、Svedala市街地からの直接流出の寄与がより大きいと考えられる。

3. 流域のモデル化

(1) 土地被覆一土壤クラスの設定

図-4は、SvedalaにおけるUrban Atlas、CORINE Land CoverおよびSGU Soil databaseを示している。Urban Atlasでは都市部を対象とし、1/50000地形図・衛星画像・ナビゲーションシステムの道路ネットワークデータ等を用いて対象領域を22個の土地被覆区分に分割・分類している。またUrban Atlasでは各街区や道路などの各土地被覆がポリゴン形状で表現されており、その水平方向の精度は5m程度となっているため、100mのグリッド型で水平精度が40mのCORINE Land Coverよりも精緻なデータといえる。さらにUrban Atlasでは、建物用地に対して不浸透面積率が属性として与えられている。このためUrban Atlasは、CORINE Land Coverと比較し都市部の浸透特性

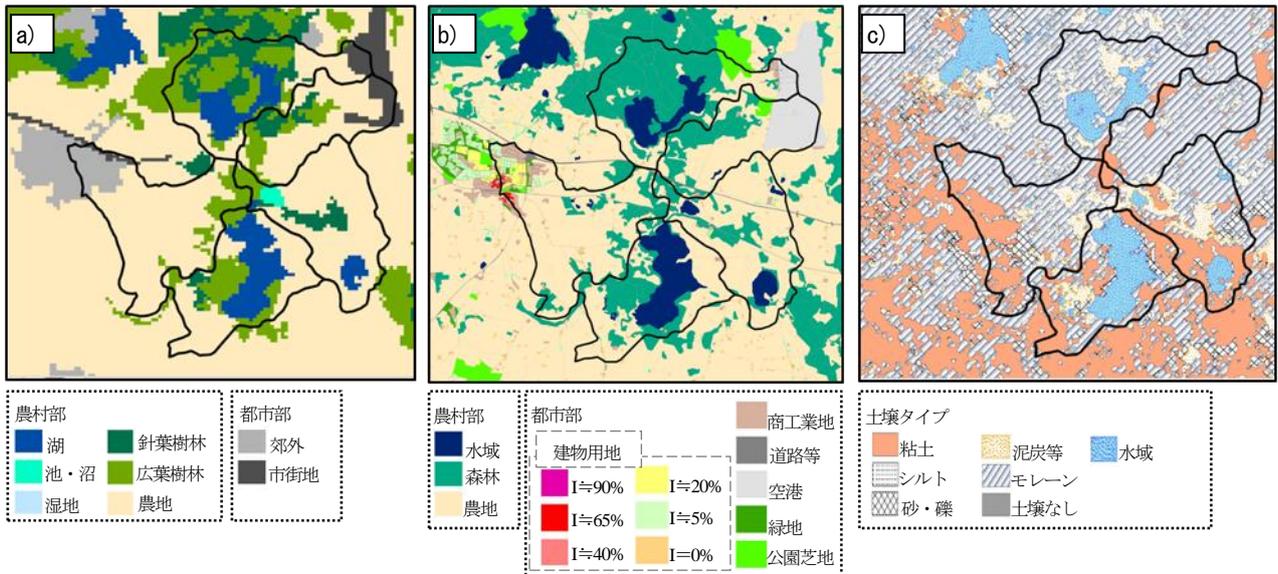


図-4 Sege川上流域のa) Corine Land Coverとb) Urban Atlasの土地被覆区分およびc) SGU Soil databaseの土壌タイプ分類

把握に適したデータであるといえる。

次いで図-4 a)のSvedala市街・Malme空港以外の農村部に着目すると、都市部と比較し土地被覆が空間的に均一で、CORINE Land Coverでも土地被覆を十分に表現可能であることが見て取れる。またCORINE Land Coverでは森林を広葉樹林、針葉樹林に分けているが、Urban Atlasでは植生による分類がない。さらに都市部の外ではUrban Atlasの構築対象領域外となる場合も考えられる。

これらの理由から、CORINE Land Coverのほうが農村部の土地被覆データとして有利といえる。そこで本研究ではまず図-5 a)のように、CORINE Land Coverによって対象流域を都市部と農村部に分類し、次いで図-5 b)のように都市部におけるUrban Atlasの22種土地被覆区分を抽出し、浸透特性に従い不浸透域、建物用地浸透域、緑地、公園芝地の4種の土地被覆種別に再分類した。ここで建物用地については、Urban Atlasの不浸透面積率に従い、不浸透域と建物用地浸透域の両方の分類における面積計算に用いている。例えば不浸透面積率が90%の建物用地であれば、その建物用地の面積の90%が不浸透域として、10%が建物用地浸透域の面積として計算される。また商業・工業用地および道路等の交通関連施設に関しては、完全な不浸透域として扱っているが、空港についてのみ、航空写真により30%程度が不浸透域と考えられたため、不浸透域を30%とし、空港の不浸透域以外は建物用地浸透域と同様に扱うこととした。なお農村部は図-5 c)のように、従来のS-HYPEと同様にCORINE Land Coverの土地被覆区分に従い、6種類の土地被覆種別に分類した。これらの土地被覆種別を組み合わせ、U-HYPEの土地被覆データを生成した(図-5 d))。表-1は、Svedala流域におけるU-HYPEで設定した各土地被覆種別の面積率を示す。本流域の都市部は対象流域全体の5.7%、特に本研究で新たに設定した不浸透域は2.6%のみであり、大部分が農村部となった。特に支配的な土地被覆種別は

農耕地であり、流域の56%を占める。なお、U-HYPEではS-HYPEと同様に土壌データとしてSGU Soil Databaseを用い、土地被覆種別と組み合わせ土地被覆-土壌クラスを設定しているが、土地被覆が不浸透域となる領域ではSGU Soil Databaseの土壌タイプを用いず、独自に「不浸透タイプ」を設定している。これについては3. (2)にて述べる。

(2) モデルパラメータの設定

表-2は本研究での土地被覆種別ごとのパラメータの設定方法を示している。本研究では、U-HYPEとS-HYPEの間に土地被覆種別の違いがない農村部に対しては、U-HYPEに従来と同じパラメータを設定した。また都市部については、4種の土地被覆種別のうち、「緑地」は農村部の「広葉樹林」と、「芝地公園」は「草原」と水文学的特性がそれぞれ類似すると考え、「緑地」については「広葉樹林」と同じパラメータを、「芝地公園」については「草原」と同じパラメータをそれぞれ設定するこ

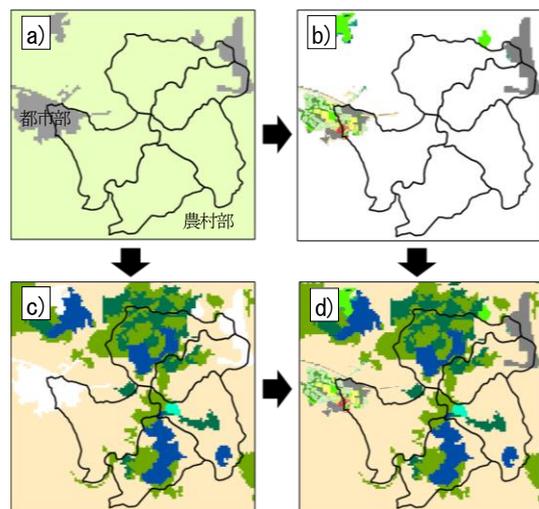


図-5 Urban AtlasとCorine Land Cover両方を用いた土地被覆データの作成方法。b), c)の凡例は図-4と同様。

表-1 Svedala流域のCORINE Land Cover, Urban AtlasおよびSGU soil databaseによる各土地被覆-土壌クラスの面積率[%]

土地被覆種別	土壌タイプ	土壌タイプ						合計	
		粘土	砂質土	粗粒土	泥炭・有機土	モレーン	不浸透		水域
農村部	湖	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0	11.0
	池・沼	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.6
	湿地	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	広葉樹林	2.8	0.0	0.4	3.9	9.8	0.0	0.0	17.5
	針葉樹林	0.4	0.0	0.0	3.2	5.1	0.0	0.0	9.0
	農耕地	15.1	0.7	3.9	6.1	29.6	0.0	0.0	56.2
都市部	不浸透域	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	0.0	2.6
	建物用地浸透域	0.3	0.0	0.0	0.1	2.5	0.0	0.0	2.9
	緑地	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1
	芝地・公園	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
	合計	19.4	0.7	4.8	14.4	49.7	2.6	10.9	100.0

ととした。さらに「建物用地浸透域」については、従来のS-HYPEで同種の土地被覆種別が与えられてはなかったが、S-HYPEの「郊外」に設定された水文学的特性が近かったことから、「郊外」の土地被覆種別と同じ水文パラメータを用いた。なお、これらの土地被覆種別下の土壌の水文学的特性については、S-HYPEと同様にSGU Soil Databaseを用いて設定している。

一方、抽出した「不浸透域」については、S-HYPEモデルで類似の水文学的特性をもつ土地被覆種別が設定されていない。そこで本研究では、不浸透域の土地被覆-土壌クラスを新たに設定し、パラメータを以下の考え方に従い設定した。図-6は、本研究で考慮した不浸透域の水文学的特性を示している。不浸透域では雨水浸透が基本的には生じず、雨水の大部分は地表面もしくは雨水・下水道管路を介する直接流出となることを考慮し、不浸透域の土壌タイプ「不浸透タイプ」における上層土壌には、間隙、浸透量、マクロポール流量が極小かつ地表面流出量が大きな「不浸透層」の特性を持たせた。なお、HYPEモデルでは副流域ごとに気温や降水量などをパラメータにより補正可能であるが、U-HYPEではS-HYPEから土地被覆に関するパラメータのみを変更し、補正パラメータについてはS-HYPEに設定されたものと同じ値を用いた。

4. 流出解析とモデル検証

本研究では、2001年1月1日から2013年12月31日までをモデル計算の対象期間として流出量の算定を行い、U-HYPEとS-HYPEによって対象流域出口のSvedala流量観測点(図-3)における流出量を計算するとともに、計算結果について同観測点における観測日平均流量との比較を行った。本研究において用いた入力気象データは、スウェーデン国内の定点観測データを空間内挿し得られた各副流域の日降水量・日平均気温データ¹²⁾である。図-7 a)は、2010年1月1日から2013年12月31日までの期間における、Svedala流量観測点での観測流量とU-HYPE、S-HYPEでのシミュレーション結果を、また図-7 b)は、融雪などの影響が少なく直接流出の河川流量への寄与が大きいと考えられる夏季の解析結果の一例として、2013年

7月1日から同年9月30日まで同図を示している。まず図-7 a)に注目すると、Svedalaでは12月から4月までの河川流量が7・8・9月の夏季と比較し多いことが見て取れる。これはスウェーデン南部が冬季多雨気候区に属することに加え、3・4月には融雪による河川流量の増加があるためと考えられる。こうした季節スケールの傾向はU-HYPEとS-HYPEの両方で表現されており、都市部を考慮した影響は大きくは現れていない。

一方、図-7 b)の夏季に着目すると、たとえば期間A・B・C・Dのような降雨が観測された日において、U-HYPEでは観測と同様に流量ピークが発生していることが見て取れ、流量ピークが発生しないS-HYPEと比較し良好な解析結果となっている。また、U-HYPEでは期間Bのような日降雨が10mm程度以下の小さなイベントにおいてもピーク流量が発生している。このことは、日降雨10~20mm程度以下の少雨においても、U-HYPEが、対象領域のわずか2.6%にすぎない不浸透域の影響を、日平均0.2~0.3m³/sのピークが現れるという形で正しく再現可能であることを示している。次いで洪水到達時間に着目すると、期間A・Dのように、U-HYPEでは洪水到達時間が観測値よりも早いことが見て取れる。これはHYPEモデルの設計において、副流域内の洪水到達の遅延を考慮していないためではないかと考えられる。また

表-2 本研究のS-HYPEでのパラメータ設定方法。

土地被覆 (農村部)			
湖	○	広葉樹林	○
池・沼	○	針葉樹林	○
湿地	○	農耕地	○
土地被覆 (都市部)			
不浸透域	×	緑地	△ (広葉樹林)
建物用地浸透域	△ (郊外)	芝地・公園	△ (草原)

○; 従来モデルで設定されている土地被覆-土壌クラス
 △; 従来モデルで類似クラス (カッコ内) がある土地被覆
 ×; 従来モデルに類似クラスがない土地被覆-土壌クラス

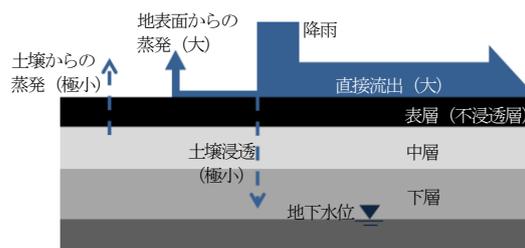


図-6 考慮した不浸透域の水文学的特性

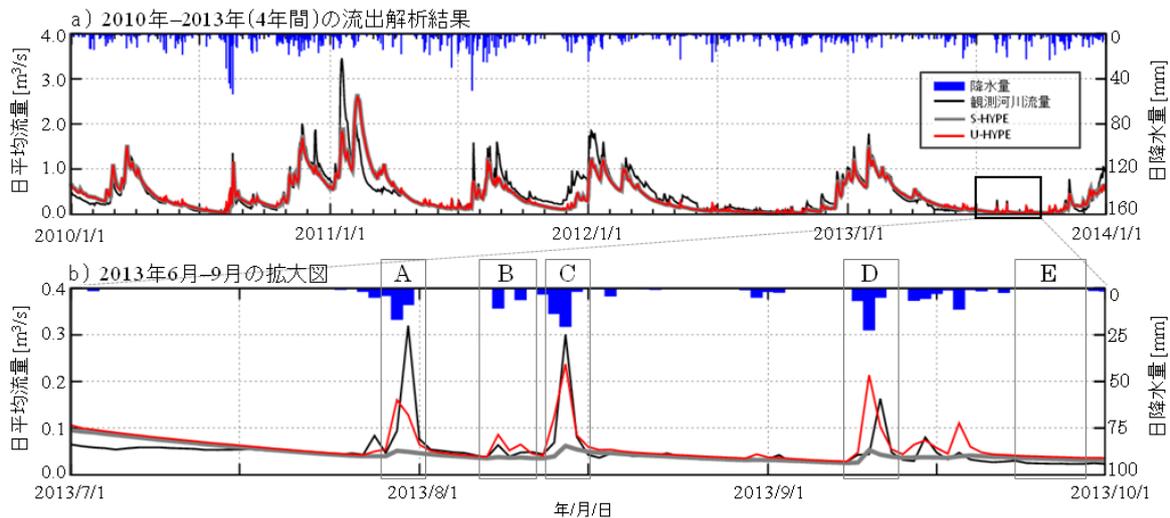


図-7 Svedala河川流量観測点の流量観測値とU-HYPEおよびS-HYPEによる河川流量の比較

降雨のない期間の基底流量に着目すると、期間Eのように若干の過大評価がみられる期間がある。しかし、U-HYPEの流出量はS-HYPEと比較し、概ね観測に近いものとなった。これらの結果から、本研究で提案した手法を用いてHYPEモデルで不浸透域を考慮することで、流出計算の精度が向上したと考えられる。

5. むすび

本研究では、SMHIが開発した広域統合流出モデルであるHYPEモデルを対象とし、ベクトル型高精度土地被覆データであるUrban Atlasから都市部の不浸透域を抽出し、不浸透域の影響をモデル計算に反映させた。本モデルをスウェーデン南部の都市Svedalaを含む流域に適用し、日流量観測データと比較を行いモデルの再現性を検証した結果、季節などの長期スケールにおいてはU-HYPEとS-HYPEに差が見られないものの、夏季における降雨時のピーク流量について再現性が向上し、特に降雨強度の小さな降雨イベントで顕著な向上が見られた。規模の小さな降雨イベントでの流量再現精度の向上は、ファーストフラッシュをはじめとする都市からのノンポイント汚染を解析する際に重要であろう。本結果は、HYPEモデルの適用において、都市の占める割合が小さな流域についても、特に都市の大部分を占める不浸透域を正確に設定する必要があることを示唆している。今後の課題としては、S-HYPEの拡張として提案したU-HYPEモデルでは洪水到達時間が観測と比較し早いこと、および基底流量の過小評価について原因究明およびその改善を行い、さらなる精度向上を図る予定である。また現在検討中の時間単位のHYPEモデルにおいても、Urban Atlasを用いた流域のモデル化を施す予定である。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、科学研究費(基盤研究(C))、代表：天口英雄、課題番号：25420530)の補助を受けました。ここに記して深謝申し上げます。

参考文献

- 1) EU Water Framework Directive, http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/index_en.html, アクセス日：2015/9/28.
- 2) Bergström, S.: Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments, *SMHI Reports RHO*, No.7, Norrköping, 1976.
- 3) 小尻利治, 黒田良人, 東海明宏: GISベースでの水環境シミュレーションと環境評価モデルの開発, 第5回地球環境シンポジウム講演集, pp.209-214, 1997.
- 4) Lindström, G., Pers, C.P., Rosberg, R., Strömqvist, J. and Arheimer, B.: Development and test of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) model – A water quality model for different spatial scales, *Hydrology Research*, Vol. 41(3)-4, pp. 295-319, 2010.
- 5) SMHI Hydrology Research, <http://www.smhi.se/en/research/research-departments/hydrology/>, アクセス日：2015/9/23.
- 6) W.D. Shuster, J. Bonta, H. Thurston, E. Warnemenda and D. R. Smith.: Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review, *Urban Water Journal*, 2:4 pp.263-275, 2005.
- 7) L. Cuo, D. P. Lettenmaier, V. Mattheussen, P. Storck and M. Wiley.: Hydrologic prediction for urban watersheds with the Distributed Hydrology-Soil-Vegetation Model, *Hydrological Processes*, Vol.22, pp.4205-4213, 2008.
- 8) Amaguchi, H., Kawamura, A., Olsson, J. and Takasaki, T.: Development and testing of a distributed urban storm runoff event model with a vector-based catchment delineation. *Journal of Hydrology*, vol.420-421, pp.205-215, 2012.
- 9) Urban Atlas, <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/urban-atlas>, アクセス日：2015/9/23.
- 10) CORINE Land Cover, <http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>, アクセス日：2015/9/23.
- 11) SGU soil database, <http://www.sgu.se/en/>, アクセス日：2015/9/23.
- 12) Johansson, B.: Estimation of areal precipitation for hydrological modeling in Sweden, Thesis (Dr), Earth Science Center, Department of Physical Geography, Göteborg University, A76, 2002.

(2015. 9. 30受付)