

家屋の雨水排水経路を考慮した洪水流出解析 モデルの提案と都市小流域への適用

A PROPOSAL OF STORM RUNOFF MODEL CONSIDERING RAIN DRAINAGE OF
A HOUSE AND ITS APPLICATION FOR A SMALL URBAN CATCHMENT

天口英雄¹・河村明²・Jonas OLSSON³・高崎忠勝⁴・中川直子⁵
Hideo AMAGUCHI, Akira KAWAMURA, Jonas OLSSON, Tadakatsu TAKASAKI
and Naoko NAKAGAWA

¹正会員 博(工) 首都大学東京 助教 都市基盤環境学域 (〒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 都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

³非会員 Ph.D Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SE-601 76 Norrköping)

⁴正会員 博(工) 東京都 建設局 河川部 (〒163-8001 東京都新宿区西新宿2-8-1)

⁵正会員 博(理) 立教大学 特任准教授 理学部物理学科 (〒171-0014 東京都豊島区西池袋3-34-1)

A storm runoff model considering rain water collection system of a house is developed for urban runoff analysis. The set-up of the model is based on so-called urban landscape GIS delineation that faithfully describes the complicated urban land use features in detail. The flow between single spatial elements is based on established hydraulic and hydrological models with equations that describes all aspects of storm runoff generation in an urban environment. The model was set up and evaluated for the Palmviken catchment in city of Arvika, Sweden. The runoff response to a high-intensity storm event in 2006 which caused 30-40 buildings flooding was simulated. It was demonstrated how the model can be used to evaluate the basement flooding in the urban hydrological system.

Key Words : *TSR (Tokyo Storm Runoff) Model, rain drainage of a house, basement flooding, urban landscape GIS delineation, inundation analysis, Arvika Sweden*

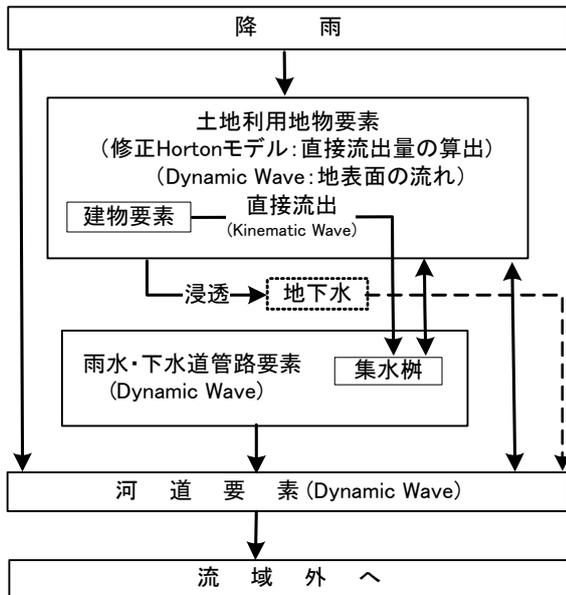
1. はじめに

Swedenの年降水量は約600mm¹⁾ (東京1600mm), 60分間10年確率雨量は24mm (東京52mm²⁾) であり, このような降雨特性を反映して道路の側溝は未設置が基本であり, 雨水の多くは雨水桝により直接雨水管路に流入している. 今後の気候変動に伴う降雨量の増加により, 都市流域における浸水被害の増加が懸念されている.

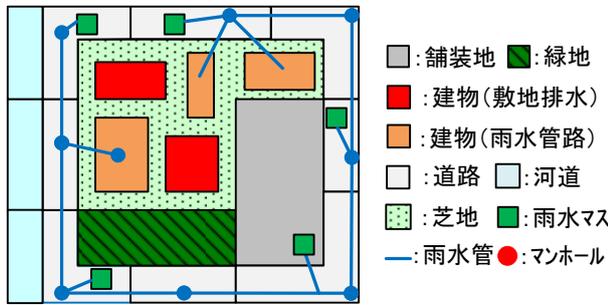
都市流域における建物浸水は, 大きな降雨強度による浸透・不浸透域での地表面流の発生, 雨水管路からの溢水による地表面流の発生などが相俟って道路および敷地の水深が増加することにより生じるものと考えられる. このような建物浸水リスクを洪水流出解析モデルにより評価するためには, 建物周辺の雨水排水状況を詳細にモデル化する必要がある. すなわち, 有効雨量を把握するための正確な土地利用情報の活用はもちろんのこと, 建物の雨水が敷地内に排水されるのか, あるいは雨水管路により敷地外に排水されるのか, また雨水管路に接続された雨水桝が地表面のどの位置から流入するかなど, これらの雨水排水経路を詳細にデータ化し, これらの情報を用いた洪水流出モデルの構築が必要であると考えられる.

既往の都市流域を対象とした洪水流出シミュレーションモデルとしては, 雨水管路の流れを対象としたWASSP法³⁾, SWMM法⁴⁾, MOUSE法⁵⁾など, あるいは, 都市流域の水循環解析を対象とした分布型流出モデル⁶⁻⁸⁾, などがある. また, 洪水流出過程に浸水現象を加えたシミュレーションモデルとしては, SWMM法等の雨水管路モデルに, 管路からの溢水を2次元氾濫解析モデルに与えるという方法^{9, 10)}で行われている. 例えば, 建物浸水リスクを評価するためには, 洪水流出に影響を与える有効雨量をできる限り正確に評価し, 地表面の雨水流と雨水管路の流れを一体で評価することが必要であるが, このようなモデルの開発はあまりなされていない.

一方, 著者らは非常に複雑な都市の洪水流出過程のモデルとして, 人工的に形成された, 個々の建物, 駐車場, 道路等の実際の不浸透域を正確に抽出できる地物データGISを用いて対象都市流域をモデル化することにより, 雨水流出経路を物理的に再現する分布型流出モデルとしてTSR (Tokyo Storm Runoff) モデル^{11, 12)}を開発している. 本研究で用いる地物データGISとは, 洪水流出量を算定する際に最も影響を及ぼす不浸透域の空間情報として, 従来のグリッド型には依らない, 建物など地物一つ一つの空間情報を用いることにより, 浸透・不浸透性の領域



(a) 洪水流出解析モデルの雨水流出過程



(b) 土地利用地物要素および雨水管路要素

図-1 提案モデルの洪水流出過程と高度な地物データGISの構成要素

を忠実にモデル化したものである。このため、建物浸水リスク評価に必要となる都市流域の詳細な土地利用情報、および家屋からの雨水排水経路の設定を反映させたモデル構築を行うには、地物データGISの活用が最適であると考えられる。

そこで本研究では、家屋の雨水排水経路を考慮した洪水流出解析モデルの構築を行った。本研究で対象とした都市流域は、北海周辺5ヶ国（蘭、独、瑞、白、英）の研究機関により立ち上げられた気候変動への適応策検討プロジェクト¹³⁾ (Climate Proof Areas) の中で進められたSweden南西部のArvika町の小流域とした。先ず、現地調査により詳細な土地利用状況および家屋からの雨水排水経路を把握することにより対象都市流域のモデル化を行い、次いで、浸水被害が発生した2006年降雨を対象とした洪水流出解析により得られた洪水流出特性および流域の浸水特性などから提案モデルの有用性について考察を行った。さらに、気候変動等により降雨強度増加が予測される将来の流出特性変化を把握するために、現在および気候モデルにより解析された将来の計画降雨を用いて洪水流出解析を実施して現況排水施設を評価した。

① 建物から道路への流れ

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r_e \quad q = \alpha h^\beta$$

h : 建物の水深, q : 単位幅流量, x : 距離 (要素間距離), t : 時間, r_e : 有効雨量, α : 等価粗度係数と勾配の関数, β : 定数

② 土地利用地物要素間の流れ

$$\frac{1}{g} \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right) - i_0 + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 |v| v}{R^{4/3}} = 0$$

v : 流速, i_0 : 勾配, h : 水深, x : 要素間距離, t : 時間, n : 粗度係数, R : 径深

③ 土地利用地物要素の連続式

$$\frac{\partial h_r}{\partial t} = (\Sigma Q_s + \Sigma Bq + \Sigma Q_{div} + rA_s - IA_s) / A_s$$

h_s : 地表面の水深, t : 時間, ΣQ_s : 隣接地表面要素からの流入量, r : 雨量, I : 浸透量, A : 地表面要素面積, B : 微小土地利用要素の斜面幅, q : 街区内地表面要素の単位幅流量

④ 雨水・下水道管路の流れ

$$\frac{1}{g} \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right) - i_0 + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 |v| v}{R^{4/3}} = 0$$

v : 流速, t : 時間, i_0 : 管路勾配, h : 水深, x : 管路長, n : 粗度係数, R : 径深, c : 微小錯乱 (重力波) の伝搬速度 (スロット幅と管路径の関数)

⑤ マンホール部の連続式

$$\frac{\partial S_m}{\partial t} = \Sigma Q_m - \Sigma Q_{out}$$

S_m : マンホールの貯留量 (マンホール部の貯留量・水位換算式により水位を算出), t : 時間, Q_m : マンホール部流入量, Q_{out} : マンホール部流出量

⑥ 河道の流れ

$$\frac{1}{g} \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right) + \frac{1}{g} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v}{2} \right)^2 - i_0 + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 |v| v}{R^{4/3}} = 0$$

v : 流速, t : 時間, x : 要素間距離, h : 水深, i_0 : 水路勾配, n : 粗度係数, A : 通水断面積, Q : 河川流量, Σq : 降水量, 雨水・下水道管路および地表面からの横流入量

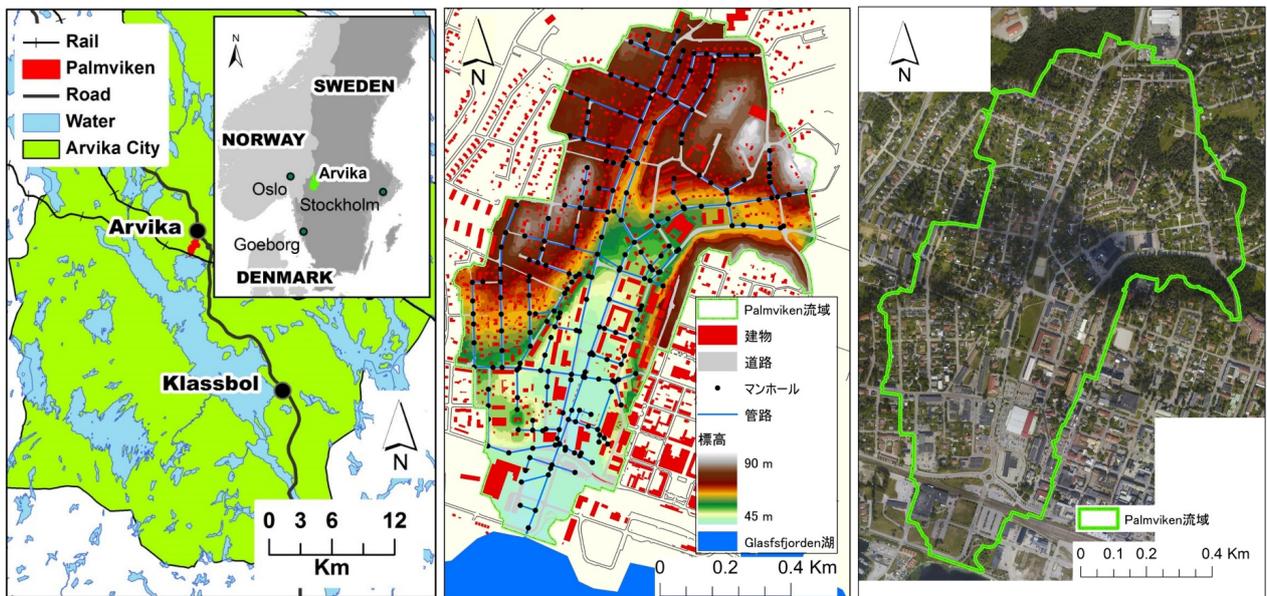
$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - \Sigma q = 0$$

図-2 提案モデルの水理・水文モデルの基礎式

2. 家屋の雨水排水経路を考慮した洪水流出解析モデル

本研究では、TSRモデル^{11), 12)}を活用して家屋の雨水排水経路と考慮した洪水流出解析モデルの構築を行う。図-1(a)は建物の雨水排水経路を考慮した洪水流出過程であり、本流出過程を実現するGISデータを高度な地物データGISと定義している。また、高度な地物データGISを構築するために必要となるGISデータは、建物外周線、街区道路境界線、河道境界線、雨水管路情報、地盤高情報、土地利用情報などであり、これらのGISデータを基礎的地物データGISと呼んでいる。

図-1(b)は提案モデルで用いる高度な地物データGISを示したもので、土地利用地物要素、河道要素および雨水管路要素により構成される。なお本モデルは洪水流出を対象としているので、降雨の直接流出成分のみを取り扱い、図-1(a)の破線で示した地下水から河道要素への長期流出成分については考慮していない。図-2は、提案モデルの水理・水文モデルの基礎式を示したものである。流域内への降雨は土地利用地物要素および河道要素に対して与え、土地利用地物要素の浸透・不浸透性に関する情報を基に、その地物の1ステップ前の水深に降雨量および周囲からの流入量との和が浸透能を超過した雨水量を計算して水深を設定する。本研究では、建物への雨水は、現地調査により得られた個別の排水状況として建物敷地内あるいは雨水管路に流下するかを新たに設定し、図-2①により流下量を算定する。地表面の雨水は、雨水桝を通じて雨水管路に排水され、雨水桝が存在しない場合には地表面を流下する (図-2②③)。雨水管路要



(a) 対象流域の位置

(b) 対象流域の基礎的地物データGIS

(c) 航空写真

図-3 対象流域の概要と収集データ

素に対しては、まず地表面との流入出力および接続管路からの流入出力により雨水枳・マンホール部においてその水位を算出し、次いで雨水枳・マンホール部の水位と管路断面特性からスロットモデル⁴⁾により流量を計算する(図-2④⑤)。この計算過程において、雨水枳・マンホール部の水位が上昇して地表面地盤高にまで達すると地上に溢水する。このように雨水管路内の水は数々の管路網を合流して最終的には河道等に流出する(図-2⑥)。なお、管路の合流・分岐によるエネルギー損失は考慮していない。

3. 流域の概要と都市流域のモデル化

(1) 流域の概要

図-3(a)は本研究で対象としたPalmviken流域の概要図である。対象流域はSweden南西部のアルビカに位置し、流域面積は0.92km²、流域の土地利用は、中上流部に住宅地、下流部には商業施設が立地している。雨水は全てが雨水管路を通じてGlafsJordan湖のKyrkviken湾に自然流下している。

(2) 都市流域のモデル化

a) 基礎的地物データGISの準備

図-3(b)-(c)は、対象流域の高度な地物データGISを構築するにあたり、アルビカ町から入手したもので、図-3(b)に建物と道路の配置および雨水管路の位置情報(ベクトル型GISデータ)と解像度1mの標高データを、図-3(c)に航空写真を示した。図-3(b)に示す雨水管路データは、雨水排水計画当時の設計資料等が無いために、2006年7月の浸水被害を契機に、雨水管路の現地測量により得られたものである。

b) 高度な地物データGIS構築の方針

本研究では局所的な雨水の流出経路を再現するため、より現実的な雨水流出経路を忠実にモデル化することを念頭に地物データGISの構築を行った。すなわち、雨水の局所的な流出経路をできる限り忠実に再現するため、建物への降雨が雨水管路に接続しているかの有無、地表面の雨水が管路に流入する雨水枳の位置に関するデータ化については、航空写真および現地踏査により厳密に設定して高度な地物データGISの構築を行った。

c) 土地利用地物要素の作成

土地利用地物要素を構成する道路および浸透・不浸透地物に対しては、航空写真および地盤高データを参照しながら、都市流域内の局所的な特性を地物データGISに反映させることを念頭に微小分割を行った。不浸透性地物としては主に駐車場、浸透性地物としては芝地、林地および裸地である。航空写真により街区を不浸透・浸透地物に分割したのち、地物面積が100m²以下となるように、地形特性を考慮して微小要素への分割を行った。また、道路地物に対しては、道路の線形方向には道路幅程度で、中央分離帯および歩道の有無の特性を考慮して道路の微小要素の作成を行うものとした。

d) 雨水管路要素の作成

入手したGIS形式の雨水管路データは、マンホール部の情報として地盤高および底高、管路部には管路長、管路直径、両端の管底高に関する情報が入力されている。本研究ではさらに、雨水枳と雨水管路との接続管に関する情報を設定する必要があるために、管路直径は現地で用いられている最小の10cm、管路勾配は幾つかの測定サンプル値を基に1/200となるように設定した。また、雨水枳は現地踏査により場所を特定して雨水管路データに反映させた。

e) 構築した高度な地物データGIS

図-4はPalmviken流域を対象に構築した高度な地物

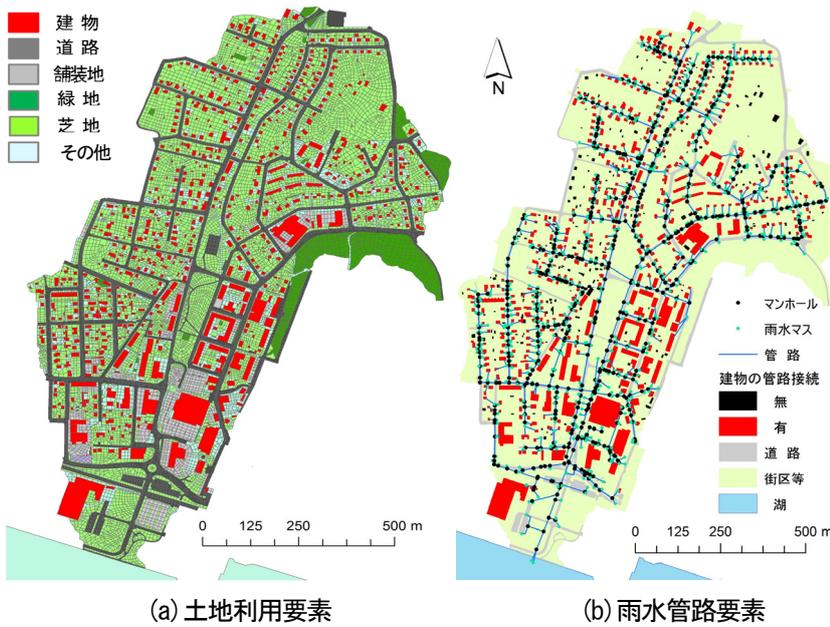


図-4 高度地物データGISによる対象流域のモデル化

データGISを示したものである。土地利用要素は建物、道路、舗装地、緑地、芝地およびその他の6種別を考慮し、建物以外は手作業により灰色の線で微小分割を行った(図-4(a))。構築した土地利用地物数は約18,000で、不透水面積率は約47%である。図-4(b)に示す雨水管路要素は、管路、マンホール、雨水樹、そして建物の雨水管路への接続有無を現地調査により特定して構築し、管路、雨水樹、マンホールの数はそれぞれ1841、319、947である。雨水管路に接続されている建物数は496で、全建物数691の約80%、面積割合として換算すると約92%となっている。

4. 洪水流出解析

(1) 2006年豪雨を対象とした洪水流出解析

表-1は本洪水流出シミュレーションに用いたパラメータであり、文献等から標準と思われる値を設定した。対象流域では土地利用毎の浸透に関する特性が得られていないため、高度な地物データGISにおける土地利用地物要素のうち浸透地物に関しては芝地、林地、裸地などを同一種別として設定することとした。不透透地物については建物地物、道路地物およびその他の3種別とした。初期損失は浸透・不透透特性に応じて降雨初期の雨量を損失量とし、浸透地物では一定の浸透能を設定し、この値を超過した降水量を直接流出量として取り扱う。地表面流に用いる粗度係数は、川池ら¹⁵⁾による街路ネットワークモデルでの適用例を、雨水管路の粗度係数は摩擦損失、マンホール損失などを考慮した値¹⁶⁾を設定した。

雨水管路の下流端条件として設定した湖水位は、計画値の46.5mである。対象降雨は建物浸水被害を発生させた2006年7月のイベントで、流域の北部3Kmに位置する降雨観測所の10分値雨量を与えた。地表面および雨水管路に関する流れの解析は約0.2秒間隔で行った。

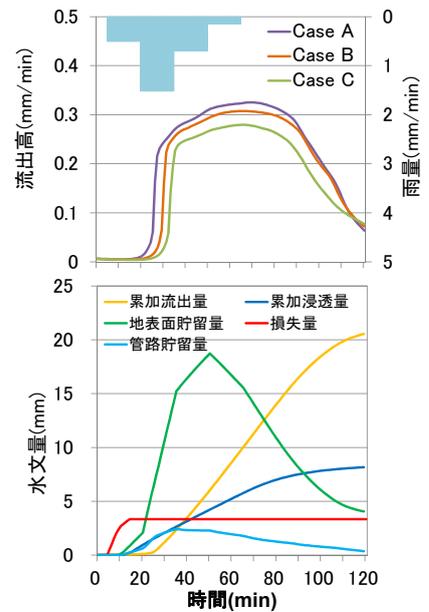


図-5 2006年降雨の解析結果

表-1 モデルパラメータ

パラメータ名 (単位)	値		
初期損失 L_i (mm)	不浸透地物	2.0	
	浸透地物	4.0	
	浸透能 I_i (mm/hr)	緑地・芝地等	20.0
		その他	5.0
地表面の粗度係数 n ($s/m^{1/3}$)	道路間	0.043	
	他	0.067	
管路の粗度係数 n ($s/m^{1/3}$)	0.013		

洪水流出解析では、提案している建物の正確な雨水排水経路考慮したモデルに対し、建物への雨水は近傍道路に流出するように設定した既往モデル^{12), 13)}との比較を行う。以下の解析では、提案モデルをCase A、建物からの雨水は近傍道路へ流出させるとともに地表面の雨水樹を考慮しない既往モデルをCase C、そして、既往モデルに地表面の雨水樹を考慮した場合のモデルをCase Bとする。

図-5は、湖への流出高および流域全体の水文量変化として損失雨量、累加浸透量、地表面貯留量、管路貯留量および累加流出量の時系列変化を示したものである。図-6は、地表面の最大浸水深、越流水深が0.1m以上のマンホール・雨水樹部と解析に用いた管路をCase毎に示したもので、管路数はCase AからCase Cでそれぞれ1841、1268、588である。また図-6(a)には、対象降雨により地下室浸水被害のあった建物を示した。

図-5より流出高ピーク値は雨水管路への流入地点(管路)数に応じてCase A、Case B、Case Cの順に高く、建物と雨水管路の接続の有無、そして地表面の雨水樹の有無が湖への流出高に影響を与えていることが読み取れる。Case Aの場合の流出率は、降水量43.2mmに対し流出量、地表面・管路内貯留雨量を加えた値は25.0mmで、68.1%となっている。図-6より地表面の冠水の多くは、領域Aの標高45m付近集中しており、その浸水深とその範囲はCase A、Case B、Case Cの順に大きいが、上流域の領域

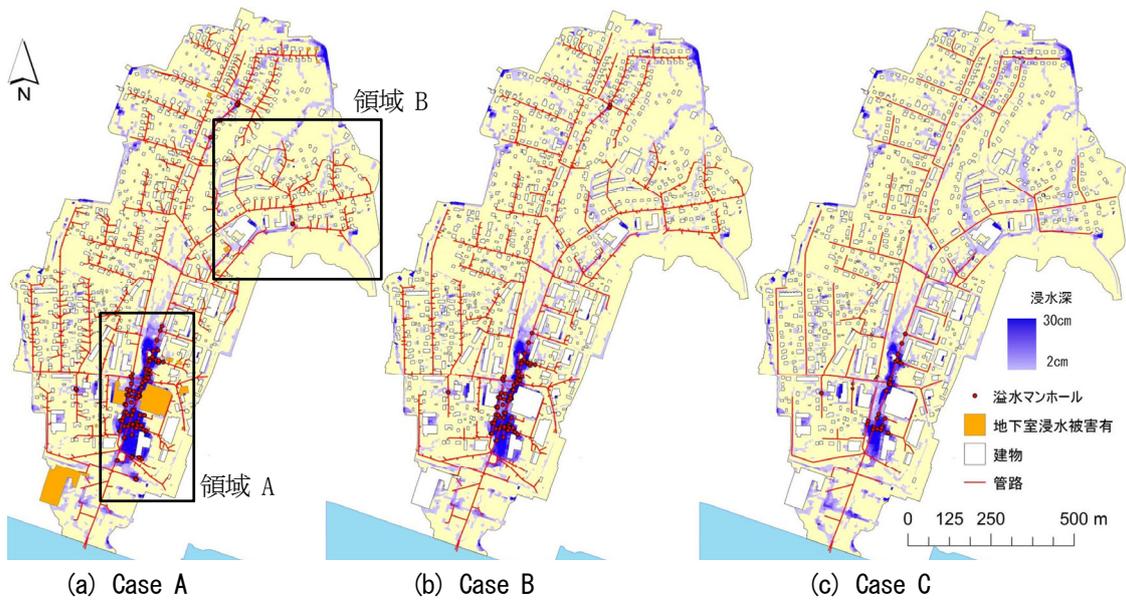


図-6 最大浸水深とマンホールの溢水状況

表-2 建物周辺の浸水深度数分布

浸水深 (m)	建物数 (地下室浸水)
0.09以下	19 (1)
0.01-0.019	156 (1)
0.02-0.039	360 (8)
0.04-0.059	60 (4)
0.06-0.079	27 (1)
0.08-0.99	0 (0)
0.10-0.19	40 (3)
0.20-0.29	14 (1)
0.3以上	15 (2)

Bでは逆にCase AよりもCase Cの方の浸水深が大きくその範囲も広がっている。提案モデルのCase Aの場合、上流域では雨水管路に接続された建物および地表面の集水桝からの雨水が下流域の標高45m付近に集中してマンホールおよび雨水桝から溢水して浸水深が上昇するので、図-5に示す湖への流出高はこれらを反映して他のCaseよりも、洪水到達時間が早くかつピーク流出高が高くなったものと考えられる。なお、対象降雨による浸水域の実測情報は得られていないが、Arvika町役場への聞き取り調査により浸水範囲は領域Aに概ね一致していることを確認している。

表-2はCase Aにおいて建物周囲の最大浸水深を建物毎に設定し、水深毎に建物数および地下室浸水被害有の建物数を集計した結果を示したものである。浸水深が0.1m以下では地下室浸水の割合は約3%程度を小さいが、0.1mを超えるとその割合は約1割に増加しているので、建物周囲の浸水深が0.1mを超えると地下室浸水リスクが高まるものと考えられる。また、図-6(a)よりマンホール等の溢水の有無と地下室浸水との明確な関係は見られないが、本シミュレーションは道路上の雨水が障害無く流入するものとした理想的な状態のため、実際にはより局所的な状況変化を考慮する必要があるものと唆される。

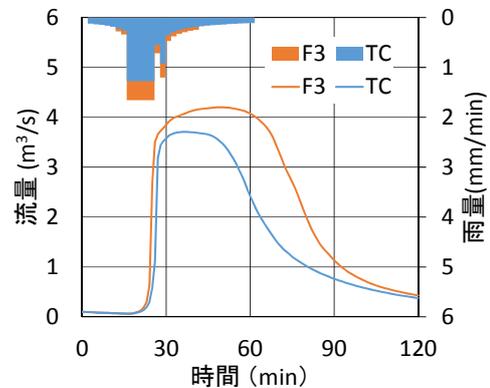


図-7 湖への流出量の比較

(2) 将来降雨を用いた流出特性の変化

対象降雨は、対象流域で計画対象とされている10年確率降雨で、現況 (TCと表記) と将来 (F3と表記) を適用する。降雨波形は図-7に示すように2山の降雨波形で、F3とTCの総雨量は29.4mm, 23.9mm、ピーク雨量はそれぞれ16.6mm/10min, 12.7mm/10minとTCよりも総雨量で23%、ピーク雨量で30%程度大きい。なおF3は、IPCCシナリオA1Bで2071-2100年を対象に全球気候モデルECHAM5により解析¹⁷⁾されたものを領域気候モデルRCA3によりSweden領域をダウンスケール化^{18), 19)}して求められたものである。

図-7は、TCおよびF3を提案モデルに入力して得られた洪水流出解析結果について、雨水管路から湖への流出量を示したものである。現況から将来にかけてピーク流量が約30%増加したことに對して、ピーク流量は約13%のみの増加と少ないが、流出率は23%から40%に増加する結果が得られた。図-8は、越流水深が0.01m以上となったマンホール・雨水桝の分布を示したものである。将来降雨F3の場合、溢水マンホールは現在降雨の場合より31から64に増加することが見込まれるため、浸水被害

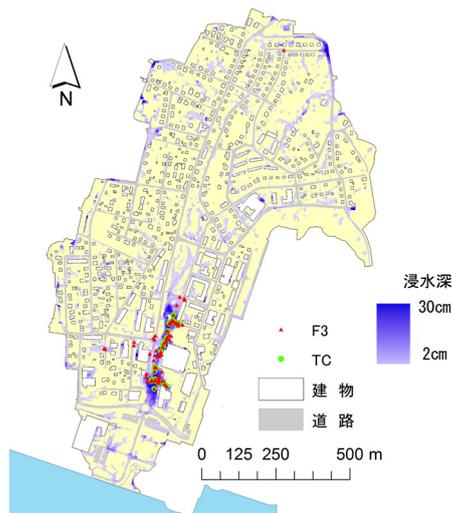


図-8 溢水マンホールの変化

を軽減させるためには、管路の改修や調節池の設置などが必要であろう。また、計画当時の市街化率の発展などにより流出率が変化しているものと考えられ、将来降雨F3に対する対策だけでなく、日々変化する都市構造の変化に目を向けていくことが重要であると考えられる。

5. むすび

本研究では、Swedenの都市小流域を対象に家屋の雨水排水経路を考慮した洪水流出解析モデルを構築し、提案モデルと既往モデルにより得られた洪水流出特性および流域の浸水特性を比較することにより提案モデルの有用性について評価・検討を行った。まず、対象都市流域特有の詳細な雨水流出過程を再現するため、基礎的地物GISデータおよび雨水管路に接続する家屋および地表面の雨水樹などの情報を現地調査により収集して高度な地物データGISの構築を行った。次いで、2006年7月降雨を対象とした洪水流出解析では、提案モデルと既往モデルを用いて家屋と雨水管路との接続の有無、地表面の雨水樹設定の有無が洪水流出特性および浸水特性に与える影響について定量的に示すとともに、提案モデルの有効性について示した。また、現況および将来の10年確率降雨による流出量の変化、溢水マンホール箇所数の増加量について評価・検討を行った。今後は提案モデルを活用して、建物への貯水槽設置、既存の雨水管路の改良、調節池の設置などのより具体的な洪水防御対策に対し、具体的なシナリオ分析を行うことが考えられる。このような分析は都市排水計画の決定プロセスの際に計画者や住民などの相互理解のために極めて重要であろう。

謝辞：本研究を遂行するにあたって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) Boda, H., Olsson, J., Kawamura, A. and Amaguchi, H.: Regional and seasonal analysis of 15-min precipitation in Sweden., 第 38

- 回土木学会関東支部研究発表会講演集, CD-ROM 版(II-15), 2011.
- 2) 東京都建設局河川部編集：東京の中小河川, 東京都建設局, 1972.
- 3) HydroWorks Wastewater network simulation and analysis software: Wallingford Software Ltd., Oxfordshire, U.K., 2000.
- 4) Huber, W.C.: EPA Storm Water Management Model -SWMM, Computer Models of Watershed Hydrology, Singh, V.P.ed., Water Resources Publication, pp.783-708, 1995.
- 5) Danish Hydraulic Institute: MOUSE-Technical Reference and User's Guide, Version 3.1, 1992.
- 6) 賈仰文, 倪广恒, 木内豪, 吉谷純一, 河原能久, 末次 忠司：分布型モデルを用いた都市河川流域における流出抑制施設の効果の比較, 水工学論文集, 第45巻, pp.109-114, 2001.
- 7) 天口英雄, 安藤義久：SMPTモデルを用いた分布型水循環モデルの改良について, 水工学論文集, 第46巻, pp.265-270, 2002.
- 8) 中村茂, 中嶋規行, 忌部正博, Srikantha Herath：グリッド型水循環系解析モデルの開発～海老川流域を対象として～, 水工学論文集, 第45巻, pp.103-108, 2001.
- 9) Hsu, M.H., Chen, S.H., and Chang, T.J.: Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system, *Journal of Hydrology*, 234, Issues 1-2, pp31-37, 2000.
- 10) Dey, A.K., and Kamioka, S.: An integrated modeling approach to predict flooding on urban basin, *Water Sci. & Tech.*, 55, pp19-29, 2007.
- 11) 天口英雄, 河村明, 高崎忠勝：地物データGISを用いた新たな地物指向分布型都市洪水流出解析モデルの提案, 土木学会論文集B, Vol63 No.3, pp206-223, 2007.
- 12) 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*, No.420-421, pp. 205-215, 2012.
- 13) Climate Proof Areas Project. <http://climateproofareas.com/> Accessed 2014.
- 14) Preissmann, A., Cunge, J.A.: Calcul des intumescences sur machinas électroniques. In: *Pro. 9th Cong. of IAHR*, Dubrovnik, Yugoslavia, pp. 656-664, 1961.
- 15) 川池健司, 井上和也, 林秀樹, 戸田圭一：都市域の氾濫解析モデルの開発, 土木学会論文集, No.698/II-58, pp.1-10, 2002.
- 16) 田中修司：下水道管渠学, 環境新聞社, pp.29-36, 2001.
- 17) Aghedo, A.M., Rast, S., Schultz, M.G.: Sensitivity of tracer transport to model resolution, prescribed meteorology and tracer lifetime in the general circulation model ECHAM5. In: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, pp.3385-3396, 2010.
- 18) Kjellström, E., Bärring, L., Gollvik, S., Hansson, U., Jones, C., Samuelsson, P., Rummukainen, M., Ullerstig, A., Willén, U., and Wyser, K.: A 140-year simulation of European climate with the new version of the Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA3). *SMHI Reports Meteorology Climatology*, No. 108, 2006.
- 19) Olsson, J. and Willén U.: Downscaling extreme RCA3-precipitation for urban hydrological applications, Research Department, *SMHI*, Mistra-SWECIA Working Paper, No3, 2010.

(2014. 9. 30受付)