

グリーンインフラを考慮した 雨水流出解析モデルの提案とその適用

天口 英雄¹・河村 明²

¹正会員 東京都立大学助教 都市基盤環境学科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)
E-mail:amaguchi@tmu.ac.jp

²正会員 東京都立大学教授 都市基盤環境学科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)
E-mail:kawamura@tmu.ac.jp

都市の低影響開発では、水路および池を組み合わせた雨水流出抑制排水システムにグリーンインフラ機能を加えるなど、雨水流出負荷を低減させる試みが行われている。このような雨水流出抑制排水システムの効果を確認するため、複雑な都市構造を忠実に表現することが出来る高度な地物データ GIS を用いて詳細な雨水流出過程をモデル化する手法を提案した。

提案モデルを適用するスウェーデン・マルメ市の再開発地域では、地区外への雨水流出を抑制するため、グリーンルーフ、水路、池等の雨水流出抑制排水システムが設置されている。本研究では、Augustenborg地区の雨水流出抑制排水システムを考慮した地物データ GIS を構築するとともに、グリーンルーフおよび流出抑制型の水路の効果をシミュレーションにより示した。

Key Words: urban drainage, Sweden, green infrastructure, rainfall runoff and inundation analysis

1. はじめに

都市流域を中心に推進された総合的な治水対策では、流域の保水・遊水機能を維持させるため、雨水流出を抑制する施設として雨水浸透施設、雨水貯留施設などが積極的に設置されるようになり、施設設置による効果が認められている¹⁾。東京都の豪雨対策²⁾では、年超過確率1/20規模の降雨である区部の時間雨量75mmのうち、10mmを流域対策として位置づけるなど、雨水貯留浸透施設は都市の雨水管理にとって重要な役割を担っている。一方、欧米での都市域における雨水対策では、雨水を下水道等により速やかに排水させるのではなく、小規模な敷地単位で管理する低影響開発(LID:Low Impact Development)を目指して行われている。例えば米国ポートランド市では、グリーンストリート、緑溝、雨水プランター、屋上緑化など土壌と植生に備わる雨水貯留、地下水涵養、蒸発散、水質浄化など、多面的な機能を生かしたいわゆるグリーンインフラによる雨水流出抑制対策が行われている³⁾。我が国でも雨水流出管理をはじめ、自然環境の多様な機能を活用し持続的な都市整備を行うために、様々な公共施設にグリーンインフラを活用していく取り組みが進められている⁴⁾。

日本での雨水対策の場合、必ずしも土壌や植生に関わ

る施設計画をしている訳ではないが、雨水流出抑制については様々な設計指針が作成されている。愛知県新川流域の例では、宅地開発時の雨水阻害行為許可のための施設対策として、透水性舗装、側溝舗装、浸透ます、貯留施設などの施設設計指針が示されている⁵⁾。このような都市開発を対象とした施設計画では、計画降雨に対して計画後のピーク流出量が開発前のピーク流量を上回らないような施設設計が必要とされている。しかしながら、施設整備後には複数の浸透施設、水路、池、雨水・下水道管路等が組み合わさった複雑な排水システムとして構成される。このような開発地区の雨水流出特性を評価するためには、一連の施設特性を考慮可能なシミュレーションモデルが必要となる。

既往の研究では、流域特性を反映させたサブキャッチメントモデル⁶⁾やグリッド型流出モデル⁷⁾により、雨水貯留施設への流入量を算定するなどの単純化を図ったものであり、個々のグリーンインフラ等の施設を考慮した、複雑な排水システムをモデル化した例は少ない。海外の事例では、下水道への雨水流入量を計算するために、建物、不浸透域(下水道接続・未接続)、浸透域などで構成するHRE (Hydrological Response Unit)として定義しLID評価を目的とした研究⁸⁾がある。検討事例でのHREの面積は数千m²程度を想定しており、雨水流出の評価には、

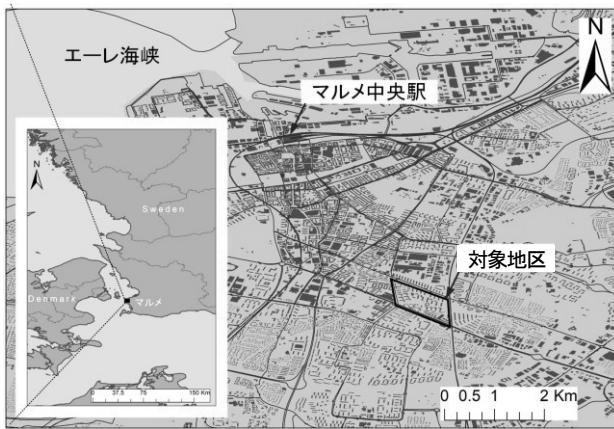


図-1 対象地区の位置

HRE を構成する個々の面積比を変更することにより可能ではあるが、雨水管路への雨水負荷量の計算が目的で詳細なグリーンインフラ施設を評価することは困難である。

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、道路等の実際の不透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^{9), 10)}を開発している。TSR モデルにおいてグリーンインフラ施設を考慮するためには、これらの施設特性に応じた地物データ GIS を設定する必要がある。

そこで本研究では、都市流域の複雑な排水システムを考慮するため、著者らが提案する高度な地物データ GIS を用いて、グリーンルーフ、水路、池などグリーンインフラとしての機能を備えた地区をモデル化し、その効果について定量的に評価を行う。

2. 対象地区の概要

スウェーデン・マルメ市はスウェーデン最南部のスコネ地方に位置し、スウェーデンの3大都市の1つで、人口は34万人である(図-1a)。本研究で対象とする Augustenborg は人口3470人、面積0.3km²の団地が立ち並ぶ居住地であり、住居間には芝地が整備された緑豊かな地区である。(図-1b)。本地域では、1990年代の大雨による駐車場および地下室の浸水被害や建物の老朽化などの問題を解決するために、市民と住宅会社が協力してこの地区の改修を行う Eco-city Augustenborg プロジェクトが発足した¹¹⁾。プロジェクトでは下水道への排水量を減少させるため、合流式下水道により行われているこの地区からの雨水排水を、グリーンルーフ、複数の池と水路とを組み合わせた雨水流出抑制型の排水システムが計画され、1998年に施工が始まり2002年に完成している。図-2は排水システムの設置状況を、表-1は図-2の



図-2 対象地区の概要

表-1 雨水流出抑制排水システム

No.	説明	No.	説明
1	Botanical roof garden area	6	Cube canal
2	Concrete canal	7	Ditch through the park
3	Onion gutters	8	Outlet pond
4	Storage pond	9	Macadam-bottomed ditch
5	Green roof	10	Constructed stone canal

番号についての説明したものである。グリーンインフラとしての機能を備えた水路には、景観向上のため自然素材や流速を減少させるための工夫がなされたものが設置されている。

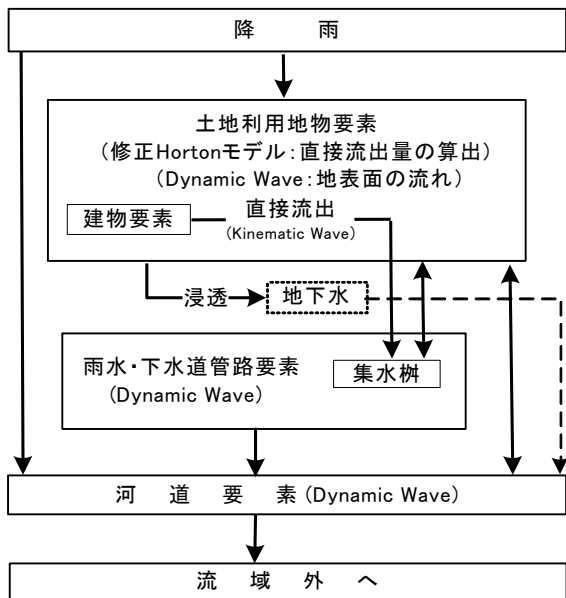
3. TSR モデルの概要と地物データ GIS による対象地区のモデル化

(1) TSR モデルの概要

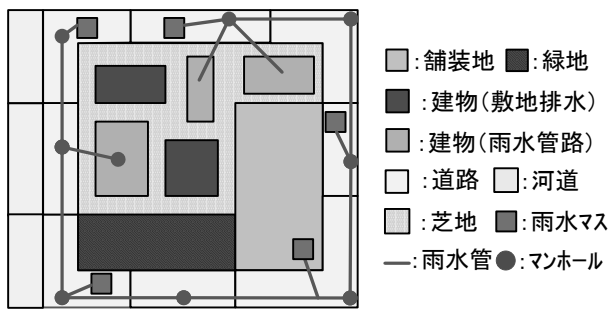
本研究では、TSR モデルを活用してこの地区の詳細な雨水排水経路と考慮した洪水流出解析モデルの構築を行う。図-3(a)は TSR モデルの洪水流出過程であり、本流出過程を実現する GIS データを高度な地物データ GIS と定義している。また、高度な地物データ GIS を構築するために必要となる GIS データは、建物外周線、街区道路境界線、河道境界線、雨水管路情報、地盤高情報、土地利用情報などであり、これらの GIS データを基礎的地物データ GIS と呼んでいる。図-3(b)は提案モデルで用いる高度な地物データ GIS を示したもので、土地利用地物要素、河道要素および雨水管路要素により構成される。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-3(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。

(2) グリーンインフラ施設のモデル化

本研究では、Augustenborg 地区の雨水流出抑制排水システムを、建物および道路のポリゴンデータ、標高 DEM データ (1m×1m) および衛星画像を用いて、地物データ GIS によりモデル化する。まず、建物および道路ポリゴンから、対象となる排水区のパリゴンを抽出する。次いで、標高データを参照しながら等高線に沿って微小要素



(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-3 洪水流出過程と高度な地物データ GIS の構成要素

に分割した後、以下の手順で雨水流出抑制排水システムを考慮した地物データ GIS を構築する。

(3) 池のモデル化

地物データ GIS での池のモデル化では、地表面の解析格子を池の形状や地形特性に合わせて分割する。すなわち、航空写真を参照して池の位置を特定し、DEM を参照しながら水位上昇時の貯留容量との関係を再現できるように、等高線と平行となる線とこれに直交となる線で微小分割する(図-4)。なお、標高データから各要素に地盤高を与え調整池を表現する。池の水位-容量曲線が得られる場合には、この特性に合った分割を行う。

(4) 水路・暗渠部のモデル化

地物データ GIS での水路のモデル化は、基本的には池のモデル化と同様である。すなわち航空写真を参照して水路の形状を抽出し、水路の横断方向に微小分割する。水路の底高が不明の場合、横断面と地盤高から推定する。水路の底高は、実際の特徴を反映させることを念頭に、流向方向に注意しながら設定する。その後、水路に接す

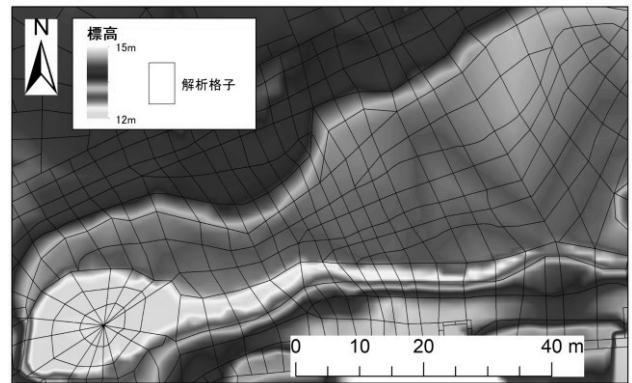


図-4 調整池のモデル化

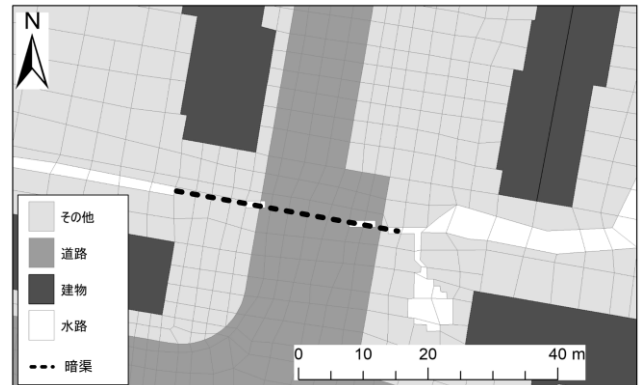


図-5 水路および暗渠部のモデル化

る要素も同様に細かく分割する。

水路を接続する水路および暗渠(橋および道路の水路)は、航空写真から作成した 2 次元の GIS データ上では水路が途切れたように表現され、このままでは雨水の流れが表現できない。そこで図-5 に示すように、水路の連続性を実現するために水路の両端を管路によって接続して管渠部をモデル化し、その大きさを水路断面相当に設定し、暗渠部の解析では、雨水・下水道管路の流れ⁹⁾を適用する。

(5) 対象排水区での地物データ GIS によるモデル化

図-6 は、以上の手順によって構築した地物データ GIS の完成図である。地表面の土地利用種別は表-2 に示すように 8 種類とした。全要素数は 23,382 で、1 要素当りの面積は約 15m² である。緑化されている建物は、要素数は 9 で、1 要素あたりの面積は約 1300m² と、緑化なしの建物(約 450m²/要素)と比べて 3 倍程度大きい。建物以外の要素の平均面積は 10~20m² で、1 要素当りの大きさは 3~5m 程度となっている。

流域内の雨水管路のうち幹線情報はマルメ市より入手し、末端の管路は現地調査結果を基にデータ化を行った。家屋からの雨水の大半は雨水管路に流れ込むようになっており、また対象地区からの雨水は 7 本の管路により流域外に排水されている。建物からの雨水は、雨樋と雨水管路とが接続されている場合には雨水管路に流入し、未

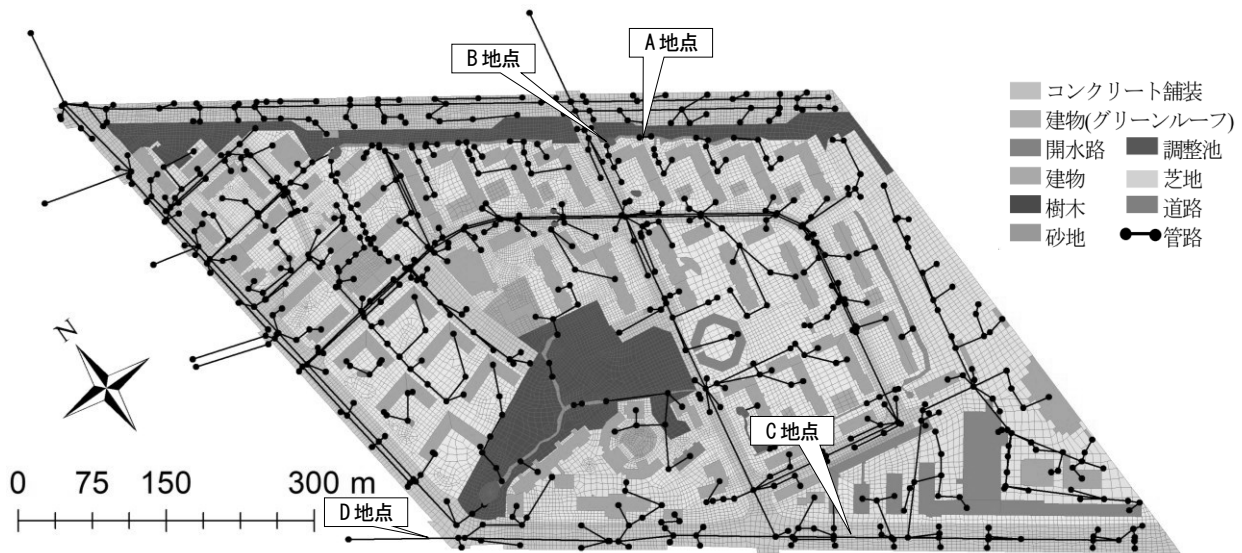


図-6 モデルデータの完成図

表-2 地表面地物データ GIS の要素数と面積

土地利用	要素数	面積 (m ²)	平均面積 (m ²)
道路	7,289	86,427	12
建物 (緑化あり)	9	11,715	1,302
建物 (緑化なし)	118	54,090	458
舗装地	3,478	58,392	17
芝地	7,994	94,815	12
樹木	3,331	38,038	11
砂地	745	6,881	9
水路・池	418	10,469	25
合計	23,382	360,826	15

表-3 管路数と累加距離

管路	要素数	距離 (m)	平均距離 (m)
管路 (データ入手)	143	7,155	50
管路 (仮想データ)	551	8,836	16
合計	694	15,991	23

表-4 マンホール種別と要素数

マンホール	要素数
マンホール (合流点)	139
雨水流入出点	458
家屋からの流入	125
合計	722

接続の場合には周囲の敷地に流出するようにモデル化している¹²⁾。図-6において、建物に管路が接続されている場合は雨水管路に直接流入する。グリーンルーフの場合も同様の雨水流出過程であるが、累積降水量が貯留量よりも大きくなった場合、それ以降の雨水は管路に流入する。表-3 および表-4 に構築した雨水・下水道管路の要素数を示す。流域内の雨水排水システムを再現するため、現地調査および航空写真等から雨水流入口を特定し、入手した管路数 143 に、新たに 551 の管路を追加した。マンホールの種別は、雨水管路への流入の違いを考慮しており、総数 722 の内、建物からの流入数は 125、地表面からの流入数は 458、合流点数は 139 である。地表面

表-5 モデルパラメータ¹³⁾

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
	緑地・芝地等	20.0
浸透能 I_i (mm/hr)	その他	5.0
	道路間	0.043
地表面の粗度係数 n (s/m ^{1/3})	他	0.067
	管路の粗度係数 n (s/m ^{1/3})	0.013

の流入口のみが地表面と雨水・下水道管路との相互の移動が可能となっている。図中の A, B, C, D は後述する解析結果の評価地点を示している。

4. 洪水流出解析

(1) 解析条件

表-5 は、都市流域の構造を忠実に表現可能な地物データ GIS をモデル入力値とする TSR(Tokyo Storm Runoff) モデルに設定したパラメータ値を示したものである。また表-6 は、グリーンインフラに対する TSR モデルでのパラメータ設定方針を示した。対象降雨は、DHI (デンマーク水理環境研究所) による 10 年確率降雨¹³⁾を使用した。総雨量は 43mm で 10 分最大雨量は 104mm/hr である。また、流域外へと排水される管路では、流下能力相当の排水が常時可能なものとして設定した。

本研究では、雨水流出抑制排水システムとしてグリーンルーフの有無およびグリーンインフラとしての水路の粗度の違いが与える影響について検討するために、表-7 に示す 4 ケースを対象に評価を行う。グリーンルーフによる貯留量 15mm は、対象地区での実績を考慮して設定した¹⁴⁾。

表-6 TSR モデルのパラメータ設定

	説明	設定値
水路	水路には、流出時間を遅らせるため、底部に凹凸を施したものもある。機能としては、周囲の要素の降雨を調整池まで流す。	地表面流として解析し、水路種別による粗度係数を設定する。 凹凸無：0.012 凹凸有：0.035
グリーンルーフ	初期降雨を土壌水分量が飽和状態になるまで雨水を貯留することができる。	土壌の最小含水量まで直接流出がないものとし、15mmの貯留量を設定する。

表-7 解析対象 Case とパラメータの設定値

	グリーンルーフ	水路の粗度
Case 1	貯留量:15mm	凹凸有:0.035 凹凸無:0.012
Case 2	貯留量:0mm	全て:0.012
Case 3	貯留量:0mm	凹凸有:0.035 凹凸無:0.012

現状でのシミュレーションを case 1 とし、Case 2 はグリーンルーフの貯留効果および水路の流下速度の低減を考慮しない場合、すなわちグリーンルーフの貯留量をゼロ、水路の材質をコンクリートとした場合を想定した。水路のグリーンインフラとしての機能は流下速度の低減効果を対象としており粗度係数により評価する。Case 3 では、Case 1 に対応したグリーンルーフの効果を把握するために、貯留量を 0mm とした場合を設定した。

(2) 解析結果

流出解析による水深分布を確認するため、図-7 に Case 1 による最大水深分布図を示した。地物データ GIS によるモデル化により、対象地区内の池や水路の分布特性が反映された結果が得られており、水深は最大で 70cm 程度となっている。

グリーンルーフによる流出抑制および流下抑制型水路の効果を把握するため、排水区全体での流出高について、Case 1 および Case 2 を比較する。図-8 は地区外に排水する流出量の合計値を流出高として示したものである。グリーンルーフを考慮した Case 1 のピーク流出高および総流出高はそれぞれ 0.5mm/min、20mm である。ピーク流出高の低減は見られないが、総流出高は Case 2 と比べて約 3%の減少が確認された。グリーンルーフが設置された建物の面積は約 3%であり、面積相当分の流出が削減されている。

次にグリーンルーフおよび水路について、個々の効果を確認する。図-6 の A 地点に設置されている池にはグリーンルーフが設置された建物からの流入はほぼ無いため、流出特性の違いは水路の粗度による影響と考えられる。図-9 a) は、図-6 に示す A 地点の流量を示したものである。ピーク流量は、水路の粗度を 0.012 と設定した Case 2 は 0.4m³/s、グリーンインフラの機能を有する水路として 0.035 を設定した Case 3 は約 25%低減して 0.3m³/s

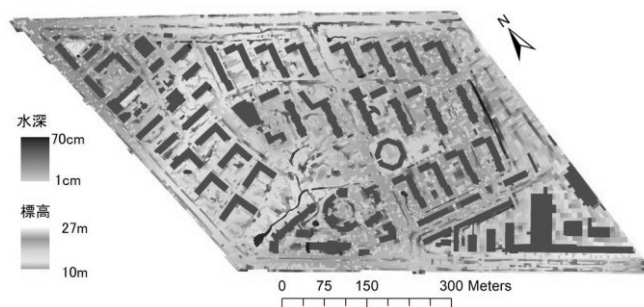


図-7 Case 1 による最大水深分布

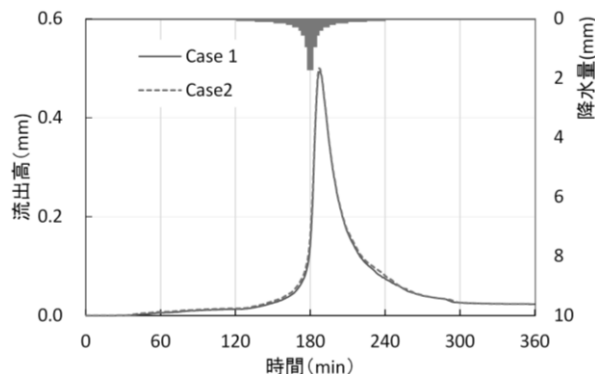


図-8 地区外への流出高

となっている。図-9 b) に示す B 地点の池の水深変化はこれに対応しており、流下抑制型的水路により池の水位上昇を 10 分ほど遅らせる効果が得られている。

次にグリーンルーフ付きの建物からの直接流出量を確認するため、図-6 の C 地点の流量について考察する。Case 1 のグリーンルーフの貯留量を考慮した流出量 (図-9 c)) は、累加雨量が貯留量 15mm を超えると、Case 3 の流量とほぼ一致するようになる。参考のために、グリーンルーフの効果が最も大きいと考えられる D 地点の流量を図-9 d) に示す。D 地点も C 地点の流量と同様の流出特性となっている。ピーク雨量までの累加雨量は約 25mm でグリーンルーフの貯留量 15mm よりも多いため、ピーク流量発生時には既に貯留効果が期待できなくなっている。ピーク流量の低減効果を期待するには、10 年確率降雨よりも小さな規模の降雨を対象とする必要があると考えられる。

6. むすび

本研究では、グリーンインフラを考慮した都市流域の流出解析モデルを提案し、スウェーデンの小排水区を対象にモデル化を行い、シミュレーションによりその効果を定量的に示した。まず、排水区の詳細な雨水流出抑制システムを再現するため、収集した DEM や基礎的な雨水・下水道管路データに加え、現地調査および航空写真等から詳細な水路ネットワークおよび地上の雨水排水口から想定される雨水・下水道管路網のモデル化を行った。雨水流出解析では、10 年確率降雨を用いてグリーンイ

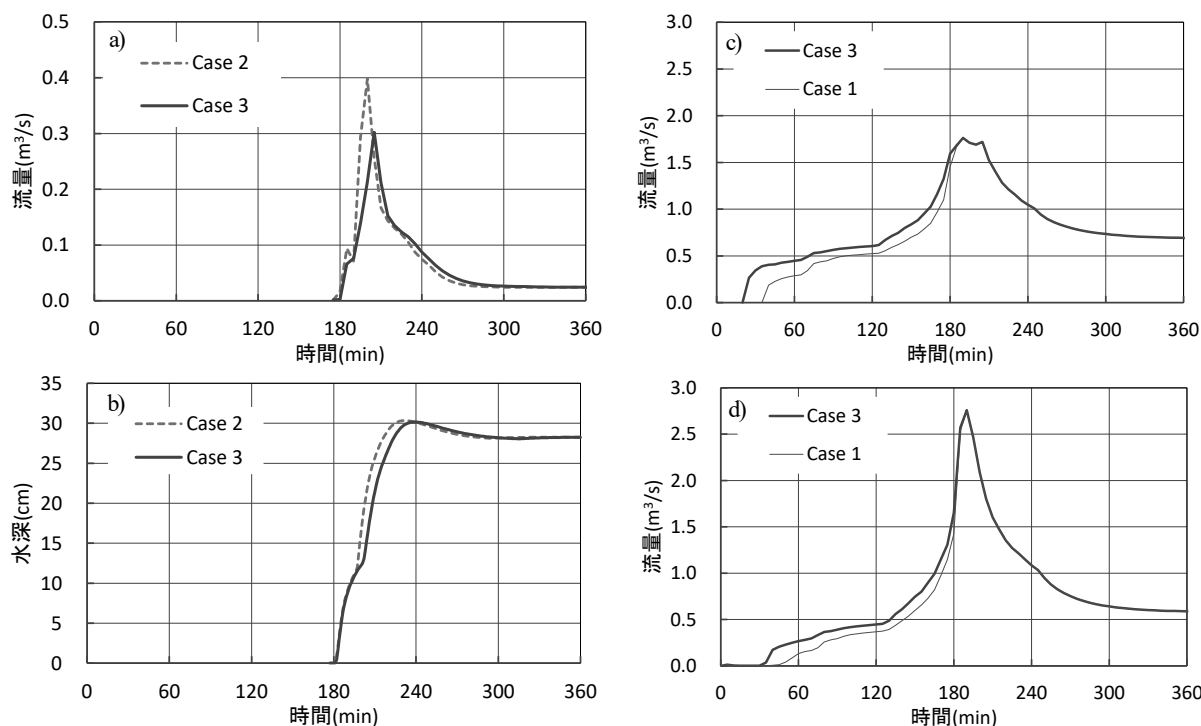


図-9 解析結果, a) 管路流量(A地点), b) 池の水深(B地点), c) グリーンルーフが設置された建物付近の管路流量(C地点), d) 対象地区外への流出量

ンフラとしてグリーンルーフおよび流下抑制型の水路の機能を評価するために、それらの機能がない場合を想定した場合についてのシミュレーションを実施した。排水区内の池の水深を比較することにより、グリーンルーフの流出高低減効果および流下抑制水路の流下速度低減効果について適量的な確認を行った。

今後は現地観測データを用いることにより、地物データ GIS の要素設定の課題および水理・水文パラメータの妥当性を検討していく必要がある。

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：19K04622)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) 国土交通省：流域と一体となった総合治水対策に関するプログラム評価，2004。
- 2) 中小河川における今後の整備のあり方検討委員会：東京都の中小河川における今後の整備のあり方について，https://www.kensetsu.metro.tokyo.lg.jp/jigyo/river/chusho_seibi/chusho_arikata/index_chusho_arikata.html (アクセス日 2020/3/31)
- 3) Shandas, V., 原田宏美：アメリカにおけるグリーンインフラ導入の現状と課題について，日緑工誌 42 (3) pp.405-408, 2017。
- 4) 国土交通省：グリーンインフラ推進戦略(案)，2019。
- 5) 新川流域総合治水対策協議会：新川流域雨水浸透阻害行為許可等，<http://www.sougo-chisui.jp/shinkawa/usui-taisaku/index.html> (最終アクセ

ス日 2020/3/1)

- 6) 和田有朗，岸本宏司，道奥康治：流出抑制及び面源負荷軽減対策における雨水貯留施設の評価，土木学会水工学論文集，第 54 巻，pp. 1327-1332, 2010。
- 7) 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，土木学会水工学論文集，45 巻，pp. 109-114, 2001。
- 8) Joong Gwang Lee, Christopher T. Nietch and Srinivas Panguluri: Subcatchment characterization for evaluating green infrastructure using the Storm Water Management Model, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., doi:10.5194/hess-2017-166, 2017
- 9) 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，Vol.63, No.3, pp.206-223, 2007。
- 10) 天口英雄，他 4 名：都市流域を対象とした建物浸水モデルの提案，土木学会河川技術論文集，第 19 巻，pp.211-216, 2013。
- 11) Urban storm water management in Augustenborg, Malmö (2014), <https://climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/case-studies/urban-storm-water-management-in-augustenborg-malmo>, (アクセス日 2020/3/31)
- 12) 天口英雄，他 4 名：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，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.71, No.4, pp. I_313-I_318, 2015。
- 13) Daniel Kibirige and Xing Tan, Evaluation of open storm-water solutions in Augustenborg, Sweden, Lund university, 2013。
- 14) Lars Bengtsson, Lennart Grahn and Jonas Olsson, Hydrological function of a thin extensive green roof in southern

A PROPOSAL OF URBAN STORM RUNOFF MODEL CONSIDERING GREEN INFRASTRUCTURES AND ITS APPLICATION

Hideo AMAGUCHI and Akira KAWAMURA

In the low-impact development of urban areas, storm runoff control drainage systems combining land drainage channels and rainwater regulating ponds are developed to reduce the load on rainwater runoff. In order to confirm the effect of storm runoff control drainage system, a method for modeling a detailed rainwater runoff process using urban landscape GIS data that can faithfully represent a complicated urban structure. In this study, we constructed a urban landscape GIS considering the rainwater runoff control drainage system in Augustenborg area, and showed the effects of green roof and runoff control type open channel by simulation.