

34. 神田川上流域における都市緑地の有する雨水浸透機能と内水氾濫抑制効果に関する研究

- 内外水複合氾濫モデルを用いたシミュレーション解析 -

A simulation study of rainwater infiltration and flood prevention effects by urban green spaces in Kanda River, Tokyo

飯田晶子*・大和広明**・林誠二***・石川幹子**
Akiko Iida*, Hiroaki Yamato**, Seiji Hayashi***, Mikiko Ishikawa**

Tokyo metropolitan area has frequently experienced torrential rains that were causing serious inundation floods. This paper evaluates rainwater infiltration and flood prevention effects by urban green spaces using a combined inundation simulation model. The study site is the Kanda River, Tokyo. It simulates three cases: present green space, green space decrease scenario and green space creation scenario. As a result, the infiltration amount decreases 0.8 times and the inundation area increases 1.2 times by the application of the decrease scenario, which reduce private green spaces by half. The infiltration amount increases 1.3 times and the inundation area decrease 0.7 times by the application of the creation scenario, which increase both public and private green spaces. It is found that the urban green spaces have significant effects on the rainwater infiltration and flood prevention. In particular, not only the public green spaces, but also the private green spaces play important role.

Keywords: Torrential rain, Inundation, Watershed management, Urban green space, Scenario evaluation, Matrix
集中豪雨, 内水氾濫, 流域対策, 都市緑地, シナリオ評価, マトリクス

1. はじめに

近年、気候変動への関心が集まるなか、都市における気象災害リスクに対する懸念が高まっている。その一例として、夏期のヒートアイランド現象を一因とする都市型集中豪雨に伴う内水氾濫があげられる。内水氾濫の低減方策については、従来の河川整備や下水道整備といった大規模・集中型の治水計画には限界があり、雨水貯留浸透施設の設置や緑地の保全創出による小規模・分散型の「流域対策」を強化する必要性が指摘されている¹⁾。

流域対策のうち、雨水貯留浸透施設に関しては、流出抑制効果を試算した研究が存在し²⁾、自治体も設置の義務化や助成事業を積極的に進めている。緑地の保全創出に関しては、都市公園³⁾、屋上緑化⁴⁾、街路空間⁵⁾を対象として、雨水浸透機能や流出抑制効果を算出した研究が存在する。しかし、これらの研究は建物・地区スケールにおける限定的な都市緑地を対象としており、流域スケールでの全体的な現象の解明には至っていない。また、都市緑地による雨水の浸透機能や流出抑制だけでなく、内水氾濫の抑制効果まで検討した研究は皆無である。

そこで、本研究では、内外水複合氾濫モデルを用いたシミュレーション解析により、流域スケールで都市緑地の有する雨水浸透機能と内水氾濫抑制効果を検証することを目的とする。その際、緑地現況データをもとにしたシミュレーションだけでなく、緑地を減少させた場合と創出した場合の2つの仮想的なシナリオを作成し、比較検討を行う。

人工被覆が大部分を占める都市部では、雨水の地表面流出水は、雨水枠を通して下水管渠へ排出される。そのため、本研究では、地表面での雨水の浸透と流出、および下水管渠と河道からの氾濫過程を統合化した内外水複合氾濫モデルを用いて、雨水浸透量、溢水量、浸水域面積を算出する。

近年の緑地計画では、河川や崖線などの線状の緑地（コリ

ドー）と大規模公園など点在する緑地（パッチ）とをネットワーク化させる従来の手法に加え、民有地の微細な緑地を含む都市の基質的な緑地（マトリクス）⁶⁾を評価し、設計・計画に位置づけようとする考え方が時流となりつつある。このような都市の基質的な緑地に関しては、これまでに CO₂ 固定量の算出⁷⁾、熱環境緩和効果の検証⁸⁾ やシミュレーションによる熱・風環境への影響の解明⁹⁾などが行われている。本研究では、この都市の基質的な緑地に着目し、緑地の減少・創出の2つのシナリオを作成する。

研究の対象地は、武蔵野台地上の神田川上流域のうち、神田川と善福寺川の合流点までの約 23 km² である（図1）¹⁰⁾。神田川流域は、時間 50 mm を超える集中豪雨が多く発生し、都内において目黒川流域と並んで最も浸水被害棟数や浸水被害額が多い¹⁰⁾。また、東京緑地計画をはじめ過去のグリーンベルト施策の重点箇所のひとつであり、計画的市街地整備と建築制限により一定程度緑地が担保されてきた経緯がある¹¹⁾。

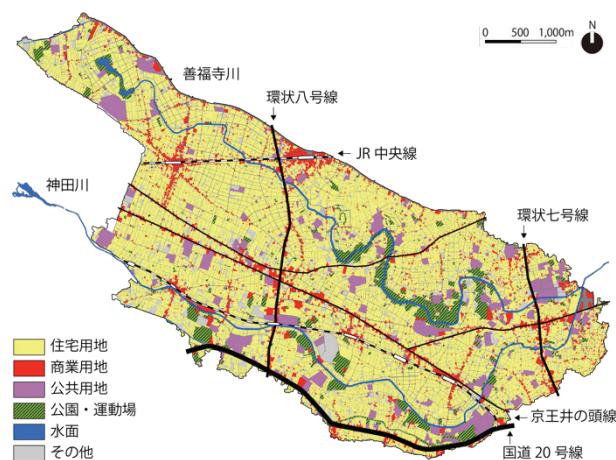


図1 研究の対象地

* 正会員 東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻 (The University of Tokyo)

** 正会員 中央大学理工学部人間総合理工学科 (Chuo University)

***正会員 国立環境研究所地域環境研究センター (National Institute for Environmental Studies)

表1 緑地の分類と最終浸透能

分類		緑地の特徴	最終浸透能 (mm/h)	文献 ⁽⁵⁾
緑地	落葉二次林 (強管理型)	主に落葉樹が高木層にのみ生育する林 低木層に樹木がなく階層性はない	215	3)
	落葉二次林 (雑木林型)	主に落葉樹により構成される階層性のある林	222	3)
	常緑落葉混交林	様々な落葉樹、常緑樹、針葉樹により構成される階層性のある林	230	3)
	常緑樹林	主に常緑樹により構成される林	144	3)
	屋敷林	様々な落葉樹、常緑樹により構成される 100m ² 以上の緑化された庭に存在する樹林	230	本研究で設定
	前庭植栽	様々な落葉樹、常緑樹、芝生などにより構成される緑化された庭	102	本研究で設定
	農地	果樹園や畠地	215	本研究で設定
	芝地・草地	芝生化や草本に覆われた土地	22	2)
	裸地	表土が露出した土地	7	2)
	グラウンド (自然舗装)	野球場など土系のグラウンド	7	2)
非緑地	グラウンド (人工舗装)	テニスコートなど舗装されたグラウンド	0	-
	墓地	墓石、樹木、裸地などが混在する土地	13	12)
	建蔽地・道路・鉄道	建物の立っている建蔽地、舗装された道路用地や鉄道用地	0	-
間地	間地	建蔽地と道路の間で石や砂利やコンクリート面などで覆われている土地	7	本研究で設定

2. 手法

2.1 緑地現況データの作成と最終浸透能の設定

(1) 緑地現況データの作成

まず、ArcGIS10.1を用いて、解像度10cmのマルチバンド航空写真⁽²⁾からNDVI(正規化植生指標)0.4以上の部分をラスター形式で抽出し、ポリゴンに変換した。NDVI 0.4は、本研究で用いた航空写真で樹林系の緑地が抽出できる値として設定した。この樹林系の緑地のポリゴンに対して、建物の陰など誤検出された箇所を航空写真的目視判読により手作業で除去・修正した。また、建物上に張り出した樹冠など、緑地と建蔽地が重複した部分については、東京都都市整備局の2006年度建物現況データを用いて、緑地データから除去した。

次に、樹林系の緑地のうち公園部分については、東京都と杉並区より提供を受けた都立公園と区立公園の植栽図の情報、および林相と樹種の現地踏査を踏まえ、「落葉二次林(強管理型)」「落葉二次林(雑木林型)」「常緑落葉混交林」「常緑樹林」の4つに分類した。また、それ以外の樹林系の緑地については、100m²未満の微細な緑地を「前庭植栽」、100 m²以上の樹林のうち、戸建て住宅内のまとまった樹林を「屋敷林」、集合住宅などの樹林で公園と類似の管理下にあるものを「落葉二次林(強管理型)」として区別した。なお、「前庭植栽」は、NDVI0.4で抽出された樹冠に加え、その周辺の芝地・草地も含むように手作業でポリゴンを修正した。NDVI0.4以上では抽出できない「農地」、「芝地・草地」、「裸地」、「グラウンド(自然舗装)」「グラウンド(人工舗装)」「墓地」といった緑地については、航空写真的目視判読により手作業でポリゴンを作成した。

続いて、作成した緑地現況データと2006年度土地利用現況データと重ね合わせ、抽出された緑地を民有地の緑地、公有地の緑地、その他の緑地に分けた。その際、民有地は土地利用現況データのうちの住宅用地、農用地、商業用地、工業用地とし、公有地は公共用地と公園・運動場等とした。道路用地、鉄道用地、未利用地などはその他とした。

なお、以上の緑地現況データの作成と分析に用いた情報は、航空写真(2009・2010年撮影)、建物・土地利用現況データ(2006年度作成)、公園の現地調査(2013年実施)と年代が異なる。

航空写真を基本に、建物・土地利用現況データと公園の現地調査の年次との差は前後3~4年であり、経年変化による誤差は許容範囲内であると判断した。

(2) 緑地の分類ごとの最終浸透能の設定

武蔵野台地上の最終浸透能を計測した研究^{2,3,12)}を引用し、緑地の分類ごとに内外水氾濫複合モデルに入力する最終浸透能⁽³⁾⁽⁴⁾を決定した(表1)。「落葉二次林」や「常緑落葉混交林」などの樹林系の緑地が215~230 mm/hと大きな浸透能力を有する一方で、「芝地・草地」「裸地」「墓地」「グラウンド(自然舗装)」などは、7~22 mm/hと浸透能力が低い。なお、既往研究では、「屋敷林」「前庭植栽」「農地」の最終浸透能は調査されていない。そこで「屋敷林」は「常緑落葉混交林」と同程度と判断し230 mm/hに定め、「前庭植栽」は構成を芝地・草地40%、落葉樹林30%、常緑樹林30%と仮定して、最終浸透能を102 mm/hに定めた。「農地」は、落葉二次林(強管理型)と同様の215 mm/hとした。また、非緑地部分の最終浸透能については、不浸透面である「建蔽地・道路・鉄道」を0 mm/h、建蔽地と道路の間で石や砂利などが敷かれている「間地」を、裸地と同じ7 mm/hとした。「建蔽地」は、建物現況データを用い、「間地」は、土地利用現況データの敷地区分から、建物現況データと緑地現況データを差し引いて作成した。

2.2 緑地現況をもとにしたシミュレーション解析

(1) 内外水複合氾濫モデルの概要

本研究で使用する内外水複合氾濫モデルのベースモデルは、MVH Soft社が開発した「InfoWorks ICM」を採用した。まず、観測された降雨をもとに作成される確率降雨を入力データとして、樹冠遮断や地表面上のくぼ地貯留による初期損失分を除いた後、地表面流出量計算過程で、地中へ浸透させる量(雨水浸透量)と地表面上に流出し下水管に流れ込む量(地表面流出量)の算定を行った。それらの算定にあたり、緑地や間地といった浸透面に対しては、先に設定した最終浸透能を用いたホートン式⁽⁶⁾により雨水浸透量を計算するとともに、浸透出来ない余剰降雨を地表面流出量として算定した。一方、建蔽地や道路といった不浸透面に対しては、固定流出係数⁽⁷⁾を適用した。

次いで、下水管渠や河道における不定流解析については、流

下方向に1次元のサンブナン式^⑧を適用した。さらに、流下過程において地表面流出量が下水管渠や河道の通水能を上回る場合発生するマンホールなどからの溢水量や、河川堤防からの越流量をもとに、2次元のサンブナン式を用いた内水ならびに外水による複合氾濫解析を実施した。

なお、本研究で採用したモデルの精度は、文献13)で検証されている。シミュレーション結果と浸水実績値との比較からは、浸水面積をやや過大評価する傾向にあるものの、オーダーとしてはほぼ整合することが確認されている。

モデルに入力する降雨データは、降雨継続時間3時間の10年確率降雨^⑨とした。3時間の総降雨量は約110mmで、降雨開始の約1時間～2時間後のピーク時降雨量は70mm/hである。これは、神田川流域における河川整備の目標対策雨量の50mm/hを超える降雨量である。本研究では、この降雨量を入力データとして対象地全域へ一様に与えてシミュレーションを実施した。

(2) 解析単位の設定

人工被覆が大部分を占める都市部では、地表面流出水は、雨水枠を通して下水管渠へ排出される。そこで、本研究では、雨水浸透量を解析する単位として、下水管渠網（図2）とマンホールをもとにした集水域データを作成した。

まず、ArcGIS10.1のSpatial Analysisツールを用いて、国土地理院基盤地図情報の5mメッシュの標高データから流向を計算し、東京都下水道局の下水管渠データ、およびマンホールデータの位置座標より作成した流出点データをもとに、サブ集水域（平均面積963m²）の作成を行った。

次に、河川次数の概念を応用し、下水管渠に次数を割り当てた。そして、下水管渠の次数をもとにサブ集水域を統合し、1次～5次の集水域単位を作成した。その上で、街区～地区スケールに相当し、かつ、比較的均質な土地利用により構成される単位として、2次集水域（平均面積：24,626m²）を以降の分析単位として決定した（図2）。低地部の河川沿いは非集水域として設定し、解析の対象からは除いた。

なお、対象地全体は、杉並区が94%を占め、善福寺川最上流部が練馬区、善福寺川と神田川の合流点付近が中野区となっている。三区とも全域が合流式下水道である。また、雨水排水に関する施設として、環状七号線地下調節池、および和田堀調整池が整備されている。本研究で用いた内外水複合氾濫モデルには、それらの施設を組み込んでいる。

(3) シミュレーション結果の解析

まず、内外水氾濫複合モデルを用いて計算された雨水浸透量を2次集水域単位で解析した。次に、都市空間の質の違いによる雨水浸透量への影響を把握した。その際、都市空間の質を表す指標として、土地利用を規定する用途地域と、敷地内の建蔽地と雨水の浸透面である非建蔽地の割合を規定する建蔽率の2つを選択し、2次集水域内で最も優占する用途地域と建蔽率の組み合わせを、その2次集水域の類型とした（図3）。そして、2次集水域単位で類型と雨水浸透量との関係を分析した。続いて、内外水氾濫の現状を解析するため、溢水量と浸水域の面積を求めた。

2.3 緑地減少・緑地創出シナリオのシミュレーション解析

(1) 緑地減少・緑地創出シナリオの作成

緑地を減少させた場合と、緑地を創出した場合の雨水浸透機能と内水氾濫抑制効果への影響をみるために、2つの仮想的なシナリオを作成した。緑地減少シナリオでは、公的な政策により担保されていない、前庭植栽、屋敷林、農地などの民有地の緑地を減少させるシナリオを設定した。緑地創出シナリオでは、第一種低層居住専用地区の住宅での緑化と雨水貯留浸透施設の導入、公園やグラウンドや学校などの公有地での緑化と調整池の設置、および民間・公共双方の建築物への屋上緑化の導入を図るシナリオを設定した。

(2) 緑地減少・創出シナリオのシミュレーション解析

緑地減少と緑地創出の2つのシナリオに対し、緑地現況データによるシミュレーションと同じ条件で再度シミュレーションを実施し、雨水浸透量、溢水量、浸水域の面積を算出した。算出された値を現況のシミュレーション結果と比較することで、緑地を減少、あるいは創出させたことによる都市緑地の有する雨水浸透機能と内水氾濫抑制効果への影響を考察した。



図2 研究対象地の下水管渠網と2次集水域

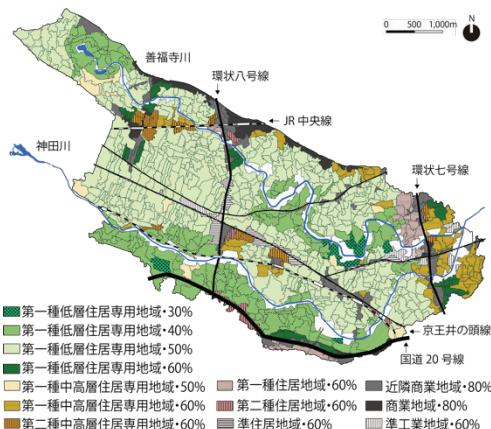


図3 研究対象地の用途地域と建蔽率

3. 結果

3.1 緑地現況データの作成

解像度10cmのマルチバンド航空写真をもとに作成した緑地現況データ（図4）より、それぞれの緑地の面積を算出した（表2）。全緑地面積は、512.1haで、対象地全体に占める緑地率は22.5%であった。中でも、最も大きな面積を占めるのは「前庭植栽」の192.1haで、緑地全体の約4割を占めた。次いで大

きな面積を占めるのが、主に川沿いの大規模～中規模公園に分布する「落葉二次林（強管理型）」の141.6haで、約3割を占めた。この2つが対象地域における緑地の骨格を成していた。また、対象地内では、自然舗装や人工舗装の「グラウンド」が川沿いの公園緑地や学校などの公共施設に立地し、緑地の約1割を占めた。一方、JR中央線の駅前や幹線道路沿いでは、緑地が少なかった。

また、前庭植栽、屋敷林、農地を中心とする民有地の緑地は267.7ha、公園や公共施設内の樹林地やグラウンドを中心とする公有地の緑地は227.0ha、その他の緑地は3.4haであった（表2）。民有地の緑地は、全体の5割以上を占め、公有地の緑地を上回る規模であった。

3.2 緑地現況をもとにしたシミュレーション解析

（1）雨水浸透量

内外水複合氾濫モデルに降雨継続時間3時間の10年確率降雨を入力して計算した雨水浸透量を2次集水域単位で集計した結果を図5に示した。

2次集水域単位の雨水浸透量の分布は、中央値が27.9mm、最大値が89.5mm、最小値が1.9mmであった。全ての集水域のうち、中央値を含む50%の集水域が含まれる四分位範囲は、19.5mm～42.0mmであった。公園や公共施設が主に立地している河川沿いの集水域で、四分位範囲より大きい雨水浸透量となっており、緑地の少ない駅前や幹線道路沿い、善福寺川と神田川の合流付近の低地で四分位範囲より浸透量が小さかった。

2次集水域単位を、用途地域の種類と建蔽率によって類型化すると13分類された（図3）。この分類ごとに雨水浸透量と土地被覆割合を算出した結果を図6に示した。

全集水域の雨水浸透量の中央値27.9mm以上の類型は、第1種低層住居専用地域の建蔽率30%、40%、50%、および第1種中高層住居専用地域の建蔽率50%の集水域の4つであった。これらの集水域では、建蔽率が小さくなるにつれ、雨水浸透量は増加した。建蔽率が小さいほど、雨水浸透量が大きくなる理由は、土地被覆のうち、緑地と間地をあわせた浸透面の割合が、

建蔽率が小さいほど大きいためである。また、それぞれ集水域の個数は12個、157個、431個、8個であり、特に、第1種低層住居専用地域の建蔽率40%、50%の集水域が対象地全体の約7割を占めた。

さらに、浸透面のうち、雨水浸透能が大きい緑地の割合が大きいほど、計算された雨水浸透量も大きくなつた。第1種低層住居専用地域の建蔽率30%や第1種中高層住居専用地域の集水域で突出して浸透量が多いのは、公園などの公有地に雨水浸透能の高い樹林系の緑地が多いためである。

また、建蔽率60%以上の用途地域では、いずれも雨水浸透量が中央値27.9mmを下回っていた。中でも、商業系、工業系の用途地域は、住居系の用途地域よりも雨水浸透量が小さかつた。最小の値を示すのは、駅前や幹線道路沿いの建蔽率80%の商業地域、近隣商業地域であった。

（2）溢水量と浸水域

内外水氾濫複合モデルにより計算された浸水域を図7に示した。本研究では、河川堤防から越流する外水氾濫ではなく、下水管渠の中を雨水が逆流しマンホールから溢水する内水氾濫のみが見られた。また、本研究でいう浸水域とは、5cm以上の浸水が見られた地域とした。

対象地域内の21,808個のマンホールのうち、1m³以上の溢水がのべ954箇所で発生した。そのうち3箇所では1,000m³以上の大規模な溢水がみられた。溢水は、善福寺川、神田川、および暗渠化された松庵川の低地沿いで特に発生していた。これは、河道の水量が増しているために、河川沿いの下水管渠から河道へ雨水が排出されず、逆流するために生じる。また、台地上でも、駅前の商業地域や幹線道路沿いの雨水浸透量が少ないエリアで溢水が見られた。

浸水域は、全体で113.4haに広がった（図7）。そのうち約97%が、内水氾濫が集中する低地上に分布していた。善福寺支流沿いでは、神田川支流沿いよりも浸水域が広かつた。JR駅

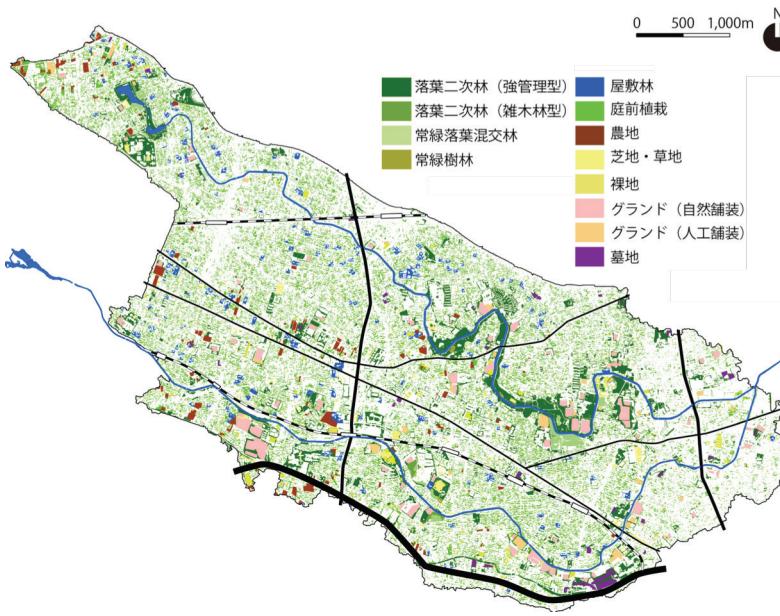


図4 緑地分布図

表2 緑地の分類と面積

緑地の分類	民有地(ha)	公共地(ha)	その他(ha)	合計(ha)	割合(%)
前庭植栽	171.3	15.4	5.4	192.1	37.5
落葉二次林（強管理型）	38.6	98.0	4.9	141.6	27.6
グラウンド（自然舗装）	0.2	40.3	1.5	42.0	8.2
水面	0.0	26.1	0.0	26.1	5.1
屋敷林	22.4	1.7	0.7	24.8	4.8
農地	22.4	0.9	0.0	23.3	4.6
裸地	7.0	6.6	2.1	15.7	3.1
芝地・草地	3.2	7.7	2.7	13.6	2.7
グラウンド（人工舗装）	1.2	10.4	0.0	11.6	2.3
墓地	0.3	9.6	0.1	10.0	2.0
常緑落葉混交林	1.0	7.9	0.0	8.9	1.7
落葉二次林（雑木林型）	0.0	1.7	0.0	1.7	0.3
常緑樹林	0.0	0.7	0.0	0.7	0.1
合計	267.7	227.0	17.4	512.1	100.0
割合(%)	52.3	44.3	3.4	100.0	

前など雨水浸透量の小さい集水域が多く、流域全体での地表面流出量の多いことが一因と考えられる。

3.3 緑地減少・緑地創出シナリオのシミュレーション解析

(1) 緑地減少・緑地創出シナリオの作成

緑地現況データをもとにしたシミュレーション結果より、公園内の樹林系の緑地が多く分布する集水域の他、前庭植栽をはじめとした民有地の緑地が広く分布している集水域で雨水浸透量が多いことが明らかとなった。そこで、本研究では、公有地の緑地だけでなく、これら民有地の緑地に着目した2つの仮想的なシナリオを作成した(表3)。

一つ目は「緑地減少シナリオ」である。公的に担保されていない民有地の緑地が減少することを想定したシナリオであり、3つのメニューを導入した。【A1】前庭植栽を半減させ、その分を裸地・間地に転換した。相続や建て替えにより敷地の分割が起こることや、緑地を駐車場に転換することを想定した。

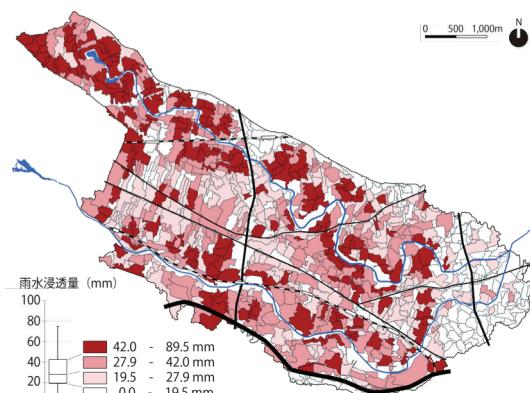


図5 2次集水域単位で集計した雨水浸透量

表3 緑地減少シナリオと緑地創出シナリオのメニュー

A. 緑地減少シナリオ	B. 緑地創出シナリオ
■ 民有地	■ 民有地
【A1】前庭植栽を50%減少	【B1】第一種低層住居専用地区の台地上の住宅の50%で緑化・雨水浸透施設導入
【A2】屋敷林を前庭植栽に転換、農地を建蔽地に転換	■ 公有地
【A3】第1種低層住居専用地域において建蔽率を40%から50%へ引き上げ	【B2】グラウンド(自然舗装)の芝生化、学校校庭へのビオトープ設置、河川沿いのグラウンドの調整池化
	■ 民有地+公有地
	【B3】民有地は敷地規模1000m ² 以上の建物、公共施設は250m ² 以上の建物の50%に屋上緑化を導入

【A2】屋敷林と農地をそれぞれ前庭植栽と建蔽地に転換した。開発により、屋敷林が細分化された宅地になることや、農地が駐車場になることを想定した。【A3】建蔽率40%の第1種低層

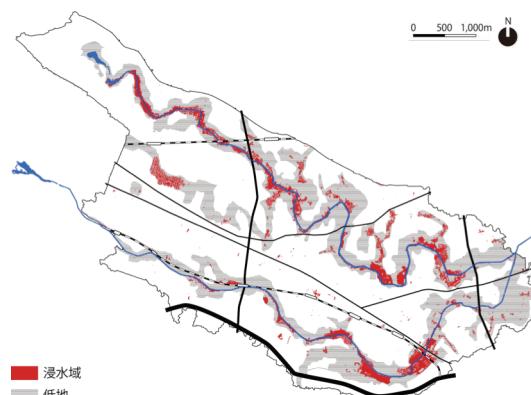


図7 浸水域

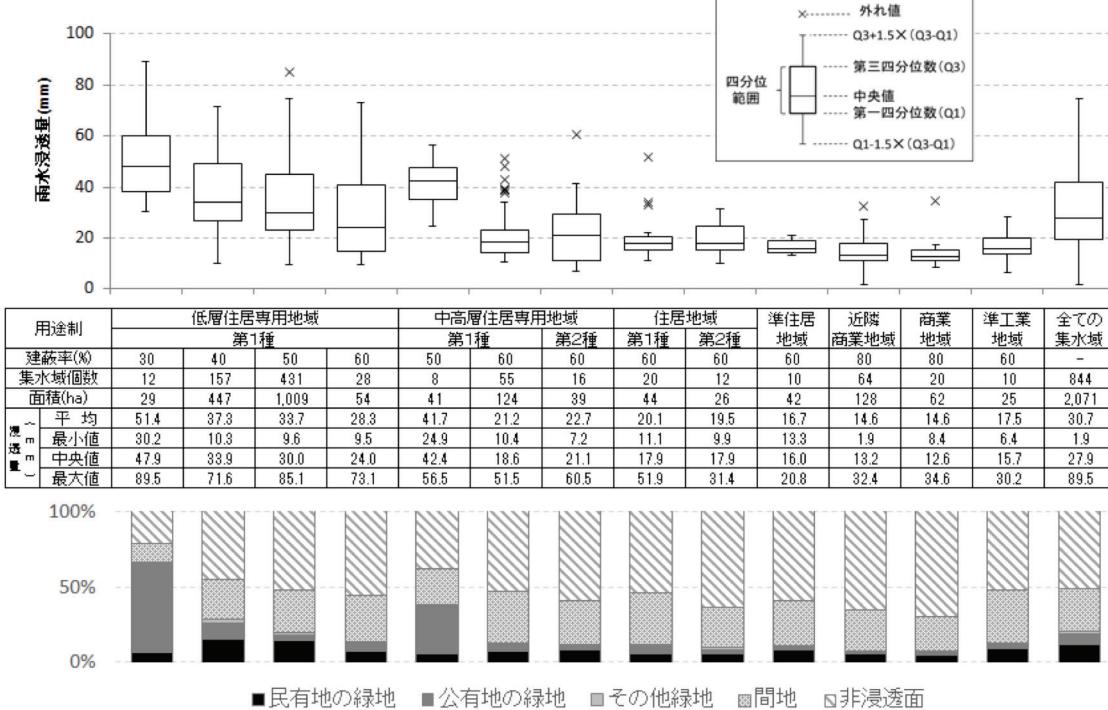


図6 2次集水域単位で集計した雨水浸透量用途地域の種類と建蔽率との関係

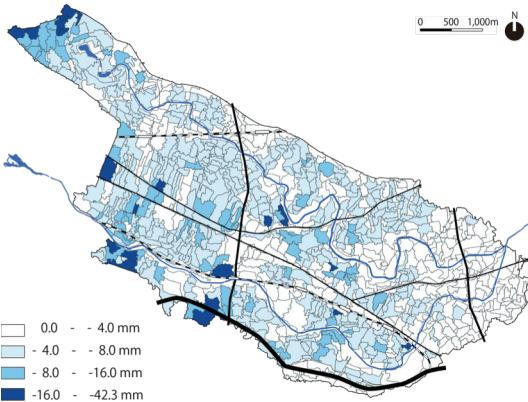


図8 現況と緑地減少シナリオの雨水浸透量の差分

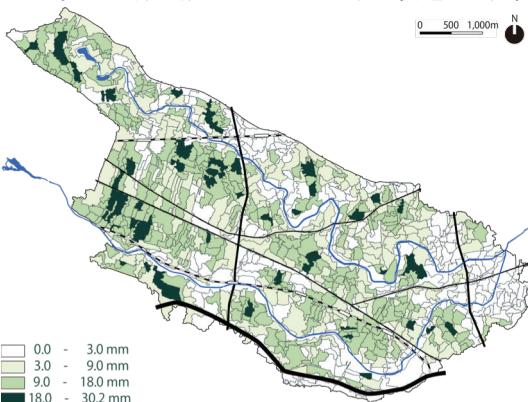


図9 現況と緑地創出シナリオの雨水浸透量の差分

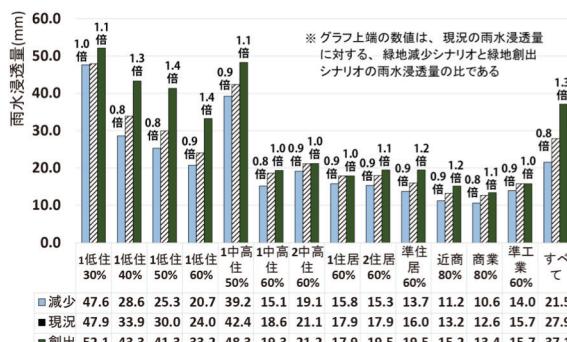


図10 シナリオごとの雨水浸透量の変化

住居専用地域を、建蔽率50%に引き上げた。これまで良好な住環境を維持してきた旧緑地地域と風致地区における規制緩和を行い、対象地域において最も一般的な建蔽率である50%に引き上げることを想定した。

二つ目は「緑地創出シナリオ」である。民有地と公有地の双方を対象としたメニューを設定した。民有地においては、【B1】第一種低層住専用地区の台地上⁽¹⁰⁾の住宅の50%に対して、杉並区が神田川流域で進める単位対策量60mm⁽¹¹⁾の緑化、もしくは雨水貯留浸透施設の導入を図った。公有地においては、【B2】グラウンド（自然舗装）の芝生化、学校校庭へのビオトープ設置、および河川沿いのグラウンドの調整池化を図った。ビオトープは、面積50m²、降雨時の貯留量10m³のものを設置した。調整池は、既存の和田堀調整池と現在建設中の善福寺川調整池の貯留量を参考に、新規に4箇所設置した（設置箇所

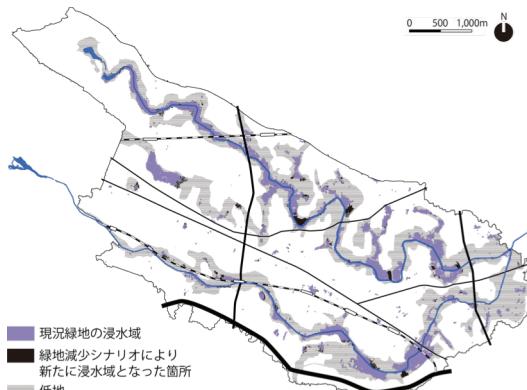


図11 緑地減少シナリオの浸水域の変化

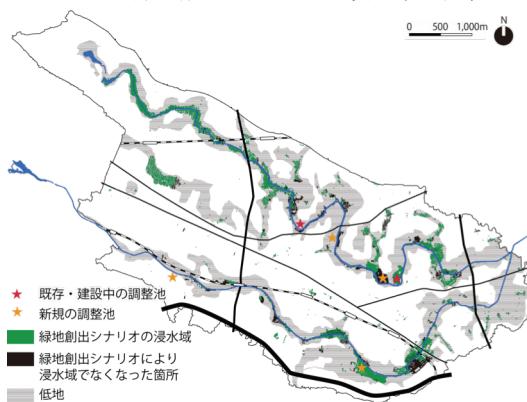


図12 緑地創出シナリオの浸水域の変化

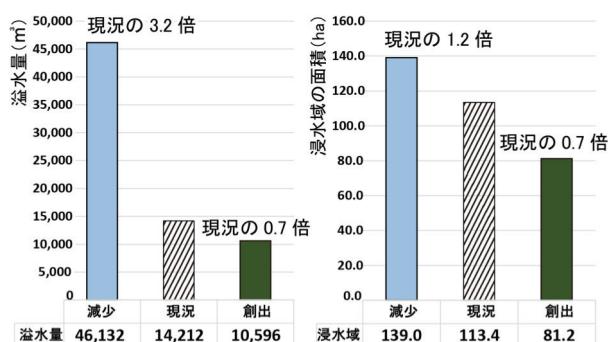


図13 シナリオごとの溢水量と浸水域の変化

は図12参照）。また、民有地と公有地双方において、【B3】民有地では敷地規模1,000m²以上の建物、公有地では250m²以上の建物総数の50%に屋上緑化を導入した⁽¹²⁾。屋根面に降った雨が一時的に屋上緑化の土壤中に貯留され、雨水流出が抑制される。屋上面に雨水が一定時間とどまるため、入力降雨から1時間当たり10mmが土壤中に貯留されると想定した。

(2) 雨水浸透量の変化

緑地現況データをもとにした雨水浸透量と、緑地減少シナリオ、緑地創出シナリオを適応した際の雨水浸透量との差分を図8、図9に示した。また、緑地現況、緑地減少、緑地創出の3事例の雨水浸透量を、用途地域と建蔽率による集水域の13類型ごとにまとめたものを図10に示した。

緑地減少シナリオでは、雨水浸透量の中央値が現況の27.9mmの約0.8倍の21.5mmへと減少した。また、用途地域

と建蔽率の13分類ごとにみてみると、特に第1種低層住居専用地域の建蔽率40%、50%の集水域において、雨水浸透量の中央値がそれぞれ33.9mmから28.6mmの約0.8倍、30.0mmから25.3mmの約0.8倍に減少しており、前庭植栽、屋敷林、農地などの民有地の緑地が減少したことの影響がみてとれた。

一方、緑地創出シナリオでは、雨水浸透量の中央値が27.9mmの約1.3倍の37.1mmまで増加した。雨水浸透量の増加は、民有地での緑化と雨水貯留浸透施設の導入を図った、第一種低層住居専用地区の建蔽率40%、50%、60%の集水域で、それぞれ1.3倍～1.4倍と顕著であった。その他に、グラウンド（自然舗装）の芝生化、学校校庭へのビオトープ設置が多く行われた、第一種低層住居専用地区の建蔽率30%と第1種中高層住居専用地域の建蔽率50%の集水域においても、それぞれ1.1倍の雨水浸透量の増加がみられ、緑地を創出させた効果がみてとれた。

（3）溢水量と浸水域の変化

緑地現況での浸水域の広がりと、緑地減少シナリオと緑地創出シナリオを適応した際の浸水域の広がりを比較したものを図11、図12に示した。また、3事例での全域的な溢水量と浸水域の面積を図13に示した。

緑地減少シナリオでは、溢水量が現況の $14,212\text{ m}^3$ の3.2倍の $46,132\text{ m}^3$ となり、浸水域の面積は113.4haの1.2倍の139.0haとなった。主に浸水域が増大した箇所は、善福寺川と神田川の中・下流域の低地部で顕著にみられた。その理由としては、両河川の上流部の台地上での雨水浸透量の減少があげられる。上流部の雨水浸透量が減少し、地表面流出量が増加したために河川水位があがり、下水管渠から河道へ雨水が排出されず、溢水、浸水が発生したと考えられる。また、善福寺川沿いの低地部では、浸水域が拡大されるだけでなく、現況と比べて浸水深の著しい増加がみられた。

一方で、緑地創出シナリオの場合は、溢水量が現況の $14,212\text{ m}^3$ の0.7倍の $10,596\text{ m}^3$ となり、浸水域の面積も113.4haの0.7倍の81.2haとなり、内水氾濫が緩和されていた。浸水域が縮小した箇所は、同様に両河川の中下流部において顕著にみられた。その理由としては、流域全体で雨水浸透量が増大した効果、および調整池などの雨水を貯留させる施設を設置した効果が効いていると考えられる。

緑地減少・緑地創出の2つのシナリオでは、公有地だけではなく、民有地に対するメニューを適応しており、それぞれにその効果をみてとることができた。

4. まとめと考察

本研究では、神田川上流域を対象として、総降雨量約110mmの10年確率降雨を内外水複合氾濫モデルに入力し、緑地現況、緑地減少シナリオ、緑地創出シナリオに対して、雨水浸透量、溢水量、浸水域を算出し、都市緑地の有する雨水浸透機能と内水氾濫抑制効果を検証した。その結果は、以下にまとめられる。

4.1 流域対策としての都市緑地の保全創出の意義

気候変動に伴う降雨の変化、頻発する集中豪雨時の内水氾濫抑制のために流域対策が必要とされる。これに対し、これまでには雨水貯留浸透施設の導入が主な対策とされてきたが、本研究

により都市緑地の保全創出の重要性が示唆された。

具体的には、公園など林系の緑地が多く分布する第1種低層住居専用地域・建蔽率30%の集水域で大きな雨水浸透量（中央値が47.9mm）であることが示された。また、前庭植栽や屋敷林や農地などの民有地の緑地が多く分布する第1種低層住居専用地域・建蔽率40%、50%の集水域においても、それぞれ中央値が33.9mm、30.0mmと雨水浸透量が比較的大きかった。一方で、緑地が少ない駅前や道路沿いに立地する商業系の集水域では、雨水の浸透量が小さく、溢水による内水氾濫が発生していた。このことから、建蔽率により規定される緑地や間地などの浸透面の割合が高いほど、2次集水域単位での雨水浸透量が大きい値であることが定量的に示された。

また、民有地の緑地を減少させたシナリオをシミュレーションに適応した結果からは、緑地現況と比較して、雨水浸透量が約0.8倍、溢水量は3.2倍、浸水域は1.2倍となり、内水氾濫が発生するリスクが高まった。特に、上流部の台地上において雨水浸透量の減少が顕著に生じ、結果として溢水した雨水が河川沿いの低地部に集まり、浸水域の拡大が見られた。一方で、民有地と公有地の双方の緑地を創出させたシナリオを適応した結果、雨水浸透量は1.3倍、溢水量は0.7倍、浸水域は0.7倍となり、内水氾濫の抑制に効果があることがわかった。とりわけ、上流部の台地上を中心とした雨水浸透量の増加、および新たに公園・グラウンドに設置した調整池での貯留量の増加により、溢水量の減少と低地部での浸水域の縮小が見られた。これらの結果は、都市緑地そのものが大きな雨水貯留・浸透機能を有していること表しており、同時に緑地の増減により内水氾濫のリスクが増減することも示している。

従来の研究は、限定的な都市緑地を対象に雨水浸透量などを算出するに留まっていた。本研究は、流域スケールで都市緑地の有する雨水浸透機能と内水氾濫抑制効果を検証することで、流域対策としての緑地の保全創出の意義を示すことができた。

4.2 民有地を含む都市の基質的な緑地の重要性

本研究が対象とした東京都心近郊の武蔵野台地の中小河川は、都市型集中豪雨が発生しやすい地域であり、大規模・集中型の治水計画と併せて、流域対策が必要とされていた。高密な市街地が広がるこの地域において、一つ一つが微細であり、かつ分散して立地する民有地の緑地は、公園などの公有地の緑地と比較してまとまりに欠ける。しかしながら、流域全体で捉えると、民有地の緑地は、公有地の緑地を上回る面積を持ち、流域対策上も重要な役割を持つことが明らかとなった。

雨水浸透量の大きい集水域のうち、公園など公有地の緑地を中心とする第1種低層住居専用地域・建蔽率30%の集水域は、対象地において1割にも満たないが、前庭植栽や屋敷林や農地などの民有地の緑地を中心とする第1種低層住居専用地域・建蔽率40%、50%の集水域は対象地内の約7割を占めており、地域全体での雨水浸透量を大きく左右することがわかった。実際に、緑地現況、緑地減少シナリオ、緑地創出シナリオのシミュレーション結果の比較からは、それらの地域での民有地の緑地の増減が、溢水量の減少・増加と浸水域の縮小・拡大に大きく寄与することが明らかとなった。

4.3 緑地計画への示唆

本研究のシミュレーションにより、特に高い雨水浸透機能を示した第1種低層住居専用地域の建蔽率30%、40%の地域は、風致地区や戦後の特別都市計画法により制定された旧緑地地域とほぼ重なる。旧緑地地域は、1968年の新都市計画法で全面廃止されたが、「土地区画整理事業を施行すべき区域」とされ、公園、運動場などの公有地の緑地の計画的整備が行われ、前庭植栽、屋敷林、農地などの民有地の緑地が維持してきた。過去の東京の緑地計画が、現在の流域対策上、意義ある成果をもたらしていると評価できる。

一方、今後、当該地域における都市緑地の保全創出を通した流域対策を考える上では、公園（コア、パッチ）や河川（コリドー）など都市の骨格を形成する公共的な緑地を担保していくことに加え、宅地内の前庭植栽、屋敷林、農地などの民有地の緑地を含む都市の基質的な緑地（マトリクス）を保全創出し、流域全体で雨水浸透機能を上げることが重要である。例えば、雨水浸透機能を上げるべき地域を流域対策重点地域として指定し、緑化地域制度などにより民有地を含めた緑地の保全創出を図ることや、まとまった屋敷林を特別緑地保全地区制度や市民緑地制度などを活用して永続的に保全することが有効であると考えられる。また、当該地域では、生産緑地制度により都市農地が担保してきた。今後は現存する宅地化農地を含めて都市農地を長期的に保全する仕組みづくりも重要であろう。

都市緑地は、本研究で扱った雨水浸透機能や内水氾濫抑制効果だけでなく、生物多様性保全、微気象緩和、景観・アメニティ、防災・減災、食糧供給など、多様な価値を有する。実際に、既往研究では、都市の基質的な緑地を対象として、CO₂固定や熱・風環境の緩和などの機能に着目した研究が進められている⁷⁹⁾。今後は、それらの都市緑地の多機能性、とりわけ気候変動など昨今の都市環境問題の解決に寄与しうる都市緑地の機能に着目した統合的な緑地計画が必要とされる。

謝辞 本研究は、文部科学省「気候変動適応推進プログラム（RECCA）」の支援により実施された。

【注釈】

- (1) 区部の公共下水道と多摩部の流域下水道の管理を担う東京都下水道局は、両者を分けて管理しており、下水道データの整備状況も異なる。本研究ではモデルに導入する下水道データの制約から、区部のみを対象とし市部は解析範囲から除いている。
- (2) マルチバンド航空写真は、(株)国際航業による10cm解像度のパンチャーブン画像で、2009年10月と11月に撮影されたものを用いた。
- (3) 浸透能は、土壤が地表にある水分を一定の時間で浸透させる能力のことと、通常 mm/hで表示される。これは土壤の種類と地表面状態などによって異なる。浸透能は、降雨初期に高い値となり、その後徐々に減少し、最終的にはほぼ一定値に漸近する。最終的に一定値に近づいたものを最終浸透能という。
- (4) 文献2,3,12)の緑地の最終浸透能の値は、本研究の対象流域内や同様の流域特性を有する近隣地域での野外実験から求められた値であるが、その値を本研究対象地に適応しようとした際、必ず誤差が生じる。それらを具体的な数値として最終浸透能に反映させることは、理論的にも技術的にも困難を伴うため、本研究では、便宜的に既往文献の最終浸透能の値を一様に与えた。緑地の種類による誤差は、植生の根系の発達状況により土壤構造の空間的不均一性が増加することから、樹林地>農地>裸地>芝地の順で大きいと考えられる。
- (5) 表1の文献は、本研究で用いた緑地の分類ごとの最終浸透能の値を設

定する際に根拠として引用したものである。

- (6) ホートン式は、 $f = f_0 + (f_0 - f_e)e^{-kt}$ で表される。ここで、 f は浸透量、 f_0 は初期の浸透量、 f_e は最終浸透能、 k は減衰係数、 t は経過時間。
- (7) 道路と建蔽地の固定流出係数は、日本道路協会編「道路土工・排水工指針」に基づき、道路0.8を、建蔽地0.85とした。
- (8) サンプナン式は、以下の連続式と運動方程式で表される。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (連続式)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} \quad (運動方程式)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho_w}$$

ここで、 h は水深、 u, v はそれぞれ x, y 方向の流速成分、 M, N はそれぞれ x, y 方向の流量フラックス、 H は水位、 τ_{bx}, τ_{by} はそれぞれ x, y 方向の底面剪断応力。詳しくは、文献13) を参照されたい。

- (9) 10年確率降雨とは、10年間で1回おこる可能性のある大雨のことで、過去の降雨データから統計学的に算出されている。
- (10) 低地は雨水がほとんど浸透しないため、本研究では台地のみをメニュー導入の対象とした。
- (11) 単位対策量とは、敷地の単位面積あたり確保すべき雨水の貯留・浸透量で、神田川流域では、60mmと定められている。杉並区では、100m²以上1,000m²未満の敷地に建物を建てる場合は、建築面積に単位対策量を乗じた値を、1,000m²以上の敷地に建物を建てる場合は、敷地面積に単位対策量を乗じた値を目標対策量として定め、緑化もしくは雨水貯留浸透施設の導入による雨水の貯留・浸透を図っている。
- (12) 本研究では、屋上緑化を施す建物を抽出するにあたり、東京都の「緑化計画書制度」を参考に、敷地面積1,000 m²以上の民有地の建物、敷地面積250 m²以上の公有地の建物とした。そして、それらの建物総数の50%をランダムに抽出し、屋上緑化する想定とした。なお、同制度においては、敷地の規模別に屋上面積の20~25%に屋上緑化を施すとされるが、本研究では、各建物の屋上面積を求めるのは困難であること、および、建物ごとに最大限屋上緑化を施した場合の効果を解析するために、便宜的に建築面積の100%を屋上緑化する想定とした。

【引用文献】

- 1) 東京都 (2007) 東京都豪雨対策基本方針.52
- 2) 藤村和正・安藤義久 (1998) 都市流域における雨水浸透施設による流出抑制効果に関するシミュレーション. 水文・水資源学会誌, 11(4), 360-370
- 3) 吉田葵・林誠二・石川幹子 (2013) 都市緑地における種組成の差異が雨水浸透機能に与える影響に関する研究. 都市計画学会論文集, 48(3), 1011-1016
- 4) 菊池佐智子・輿水肇 (2011) 局所的集中豪雨を想定した貯排水層の異なる屋上緑化システムの流出特性: ランドスケープ研究, 74(5), 739-742
- 5) 井上薰・杉本南・清水裕之・大西暁生・村山頼人・大月淳 (2011) グリーンインフラストラクチャの概念を用いた浸透性街路空間デザインの導入効果: 日本建築学会計画系論文集, 76(660), 335-340
- 6) Forman, R. (1995) Land Mosaics, The ecology of Landscape and regions. Cambridge, Cambridge University Press, 632
- 7) 斎藤直哉・石川幹子 (2009) 衛星データを用いた緑被率・炭素吸収量の推計に基づく都市内緑地の評価に関する研究: 横浜市を事例として. 都市計画論文集, 44(3), 19-24
- 8) 脊田 有希・石川 幹子 (2013) 市街地における基質的な景観構造が気温に与える影響に関する研究. 都市計画学会論文集, 48(3), 1035-1040
- 9) 高取佳大・広和明・高橋桂子・石川幹子(2013) 明治初期と現代のマトリクス構造の変化が熱・風環境に与える影響に関する研究. 東京都心部を対象として. 都市計画論文集, 48(3), 1029-1034
- 10) 東京都総合治水対策協議会 (2009) 神田川流域豪雨対策計画.38
- 11) 竹内智子・石川幹子 (2007) 神田川上流域における公園緑地施策の変遷に関する研究. 都市計画学会論文集, 45(3), 7-12
- 12) 藤村和正 (1999) 散水型浸透計による浸透能実測値を用いた都市流域の洪水流出解析とその応用. 学位論文, 博士(工学), 東京都立大学, 183
- 13) 林誠二 (2015) 内水氾濫の再現と予測のためのケーススタディ地区を対象としたシミュレーションの検証 気候変動適応研究推進プログラム「都市・臨海・港湾域の統合グリーンイノベーション」平成26年度成果報告書 (印刷中)