

NHRCM 5km降水量10分値データを用いた 神田川上流域の洪水流出・浸水リスク評価

STORM RUNOFF AND INUNDATION RISK ANALYSIS USING
10 MINUTE PRECIPITATION OF NHRCM-5KM DATA IN THE UPPER KANDA
RIVER WATERSHED

天口 英雄¹・河村 明²

Hideo AMAGUCHI¹ and Akira KAWAMURA²

¹正会員 博士(工) 東京都立大学 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 東京都立大学 教授 都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

In this study, NHRCM 5km rainfall data was used to create centralized rainfall with an annual excess probability of 1/20 for three periods (past (1980-1999), near future (2016-2035), and future (2076-2095)) We evaluated flood inflow and inundation risk in the upper Kanda River basin using the Tokyo Storm Runoff (TSR) model to evaluate the risk of inundation due to climate change. Flood runoff analysis confirmed that the increase in discharge during rainfall increases with age, so if the capacity of the reservoir is not different from the present, the increase in discharge downstream will be more pronounced than in the middle stream.

Key Words : *climate change, NHRCM05, urban landscape GIS, urban watershed, distributed runoff model, inundation model, Tokyo Storm Runoff (TSR) Model*

1. はじめに

都市中小河川流域では治水施設整備の遅れや施設規模を上回る豪雨発生時に内水氾濫や中小河川からの外水氾濫による浸水被害が頻発している。気候変動に関する政府間パネルのIPCC第5次評価報告書¹⁾によれば、世界の平均地上気温上昇に伴って今世紀末までに、日本での短時間降雨は、強度が高まりかつその頻度も増加することが予測されている。

一級河川流域の気候変動影響評価では、大規模アンサンブル気候予測データベース database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF)²⁾を用いた研究が数多く行われている。d4PDFは、解像度60kmの全球モデル(気象研究所全球大気モデル MRI-AGCM3.2)実験結果を用いて、日本域をカバーする領域モデル(気象研究所領域気候モデル NHRCM)実験により20km解像度へのダウンスケリングが行われており、過去実験では50アンサンブル、4度上昇実験では90アンサンブルについて、それぞれ60年間分のデータが提供されている。d4PDFを用いた洪水リスクに関する検討例としては、荒川・庄内川・淀川流域を対象とした極値河川流量の将来変化³⁾、雄物川流域と肱川流域を対象とした累積雨量と洪水ピーク流量の関係について評価した研究⁴⁾、雄物川流域を対

象とした浸水リスク評価⁵⁾などが行われている。気候変動による洪水リスクに対する影響評価は、外力として利用できる降水量データの時空間解像度の制約から、流域面積のオーダーが数千km²の流域に対して行われているが、都市河川のように流域面積が数十km²から数百km²に対する影響評価を行ったものは極端に少ないのが現状である。特に都市河川では、10分間の平均降雨強度の最大値と河川ピーク水位に相関が見られる⁶⁾など、洪水流出・浸水リスク評価に用いる降雨データの時間解像度には10分程度のデータが必要となるため、d4PDFで提供されている1時間降水量を用いることは出来ない。

本研究で対象とする神田川流域では、時間雨量50mmを年超過確率1/20の時間雨量75mmに引き上げる整備方針が計画されている。気候予測では、今世紀末までに東京都内の短時間強雨の発生回数が現在の1.3倍に上昇するなどの報告⁷⁾がなされており、どの程度の治水対策が必要になるのかを検討するためには、将来の予測降雨による流出解析評価が今後の河川整備を進めていく上で重要である。

気候変動による都市流域の浸水リスク評価に適用可能な降水量データとして、気象研究所による水平格子間隔5kmの非静力学地域気候モデル(NHRCM-5km)による降水データが挙げられる。IPCC第4次評価報告書に基づ

いて解析された地球温暖化情報第8巻⁸⁾のA1B(2.8℃上昇相当)の気候変動シナリオで、現在のIPCC第5次評価報告書で用いられているシナリオRCP8.5(4℃上昇相当)などとは異なるものの、DIAS(Data Integration and Analysis System)により時間解像度10分、空間解像度5kmでの現在気候、近未来および未来に対しそれぞれ20年間データが提供されている。

そこで本研究では、地球温暖化情報第8巻のNHRCM 5km降水量データを用いて3つの期間(現在気候(1980-1999)、近未来(2016-2035)および未来(2076-2095))の年超過確率1/20の中央集中型降雨を作成し、Tokyo Storm Runoff(TSR)モデルを用いて神田川上流域を対象とした洪水流出・浸水解析を行うことにより、気候変動による浸水リスクを評価する。

2. NHRCM-5km降水データによる計画降雨

(1) データの概要

地球温暖化予測情報第8巻(以下、第8巻)のNHRCM-5km降水データは、気象庁気象研究所(JMA/MRI)から提供されている非静力学地域気候モデルにより予測シナリオA1Bで計算されたもので、空間解像度は5km、時間解像度は10分である⁸⁾。本データには、現在気候(1980-1999)、予測シナリオA1Bでの実験値として近未来(2016-2035)および未来(2076-2095)の3期間のデータセットが含まれている。図-1は、東京都付近のNHRCM-5km解析格子とアメダス観測所の配置を示したものである。NHRCM-5kmの降水量データの取り扱い時には、特定の狭い地域の変化傾向に着目せず、広域的に平均や積算した傾向として把握する⁹⁾ことが望ましいとされており、確率降雨の作成には東京都に覆われた解析格子データの平均値を利用することとした。

(2) 予測シナリオRCP8.5との比較

地球温暖化予測情報第9巻⁹⁾(以下、第9巻)では、予測シナリオRCP8.5で計算されたNHRCM 5km降水量データ(以下、R1980)は、日単位での時間解像度で現在気候での実験値(1980-1999)、将来気候では4つのメンバーの実験値(2076-2095)がDIASから提供されている。第8巻での10分値降雨データを評価するため、第9巻の日単位降水量を用いて検討する。

図-2は都内5つのアメダス観測所とこれに近接する第8巻および第9巻の解析格子データについて、年最大日降水量の順位統計量をプロットしたものである。なお第8巻は10分値から求め、第9巻はバイアス補正データを用いた。同図a), b)は、1980年から1999年を、c), d)は2076年から2095年を対象としている。現在気候同士の比較では、第8巻はアメダスの値よりも予測値が大きく(図-2a)), 第9巻では逆にアメダスの値よりも予測値が小さくなる傾向が見られる(図-2b))。次いで図-2c)の現在気候の年最

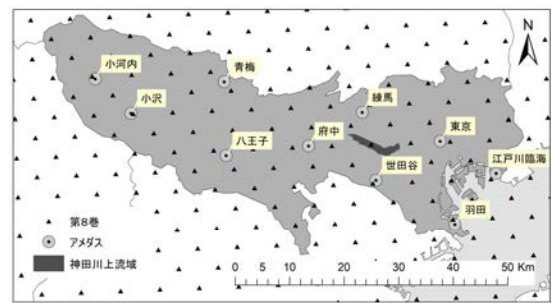


図-1 NHRCM-5km解析格子とアメダス観測所の配置

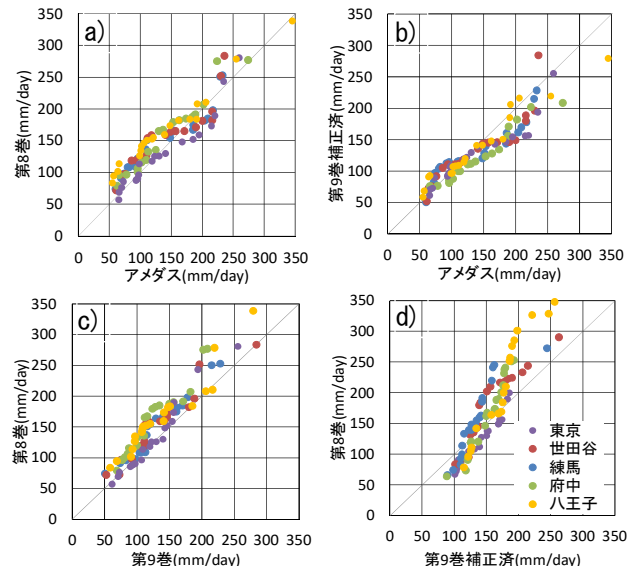


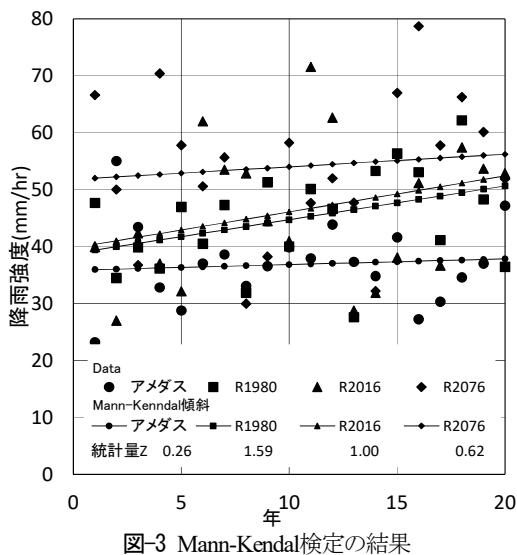
図-2 年最大日降水量の比較

a) 第8巻とアメダス, b) 第9巻とアメダス,
c) 第8巻と第9巻(現在気候), d) 第8巻と第9巻(未来気候)

大日降水量の予測値は、東京は概ね一致した傾向が見られるものの、東京西部に位置する八王子および府中は、第8巻の方が第9巻よりも大きくなっている。将来気候での比較では、年最大日降水量がおよそ100~150mm/dayより大きい場合は第8巻が、それより小さい場合は第9巻が大きくなる傾向が見られる。年最大日降水量の特性を見る限りでは、気候シナリオRCP8.5よりもA1Bの年最大日降水量が大きい。第8巻の10分値データはバイアス補正がなされていないため、降雨強度が増加する将来気候においてその傾向が顕著となったものと思われる。

(3) Mann-Kendal検定

計画降雨作成の前段階として、定常水文頻度解析の妥当性を判断するために、本研究では小林ら¹⁰⁾にならない、Mann-Kendal検定を用いてNHRCM-5km降水量データを評価する。Mann-Kendal検定では、時系列水文量が独立で同一の確率分布に従うという帰無仮説が成立するかを検査する¹¹⁾ものである。この仮説が棄却された場合には、対象の時系列は傾向変動を持つものと評価される。すなわちMann-Kendal検定により算定される統計量Zにおいて、 $|Z| > 1.96$ の場合には有意水準が5%で帰無仮説が棄却されることになる。また、算定されたMann-Kendal傾斜 β が負の時は減少トレンド、正の時は増加トレンドとして評価



される。

NHRCM-5kmにより得られた領域の3期間の時系列降水量データから東京都の範囲で69の解析格子データを抽出し、1年毎に10分値降水量から60分値降水量を求め、その中で最大のものを年最大60分雨量とした時系列データを作成した。本研究では全体的な傾向を把握するため、69の解析格子平均値を用いてMann-Kendal検定を行った。また、1980年から1999年までの20年間を対象に、東京都内のアメダス観測所(10箇所)の年最大1時間雨量の時系列データを作成し、その平均値を用いて同様の検定を行った。NHRCM-5km降水量データでは10分値データから年最大60分雨量を求めているのに対し、アメダスデータは基本的に正時1時間雨量の年最大1時間雨量であるため、アメダスの降水量は小さく評価されている可能性がある。

図-3は、3期間のNHRCM-5km降水量から求めた年最大60分雨量とアメダスによる年最大1時間雨量の入力データを散布図で表わしたものと、Mann-Kendal検定により求めた統計量Z値とMann-Kendal傾斜を示したものである。全てのMann-Kendal傾斜は増加トレンドを示しているが、統計量Z値は1.96以下であり、傾向変動は無いものと判定されるため、基本的には定常水文頻度解析が適用できるものと考えられる。

(4) 計画降雨の作成

東京都の河川計画の目標である20年確率降雨モデルを作成するため、極値解析により確率雨量を推定する。NHRCM-5kmのR1980の時系列降水量データから東京都部分として69の解析格子データを抽出し、格子データ毎に年最大10, 20, 30, 60, 120, 180分降水量の時系列データを作成し、一般化極値分布を用いて20年確率雨量を計算した。

得られた20年確率降雨量の補正には、地上雨量計での確率雨量(Gt_T)と現在気候での確率雨量(Dt_T)との関係を線形と仮定し、次式により係数(α_t)を求めた¹²⁾。

$$Gt_T = \alpha_t Dt_T \quad (1)$$

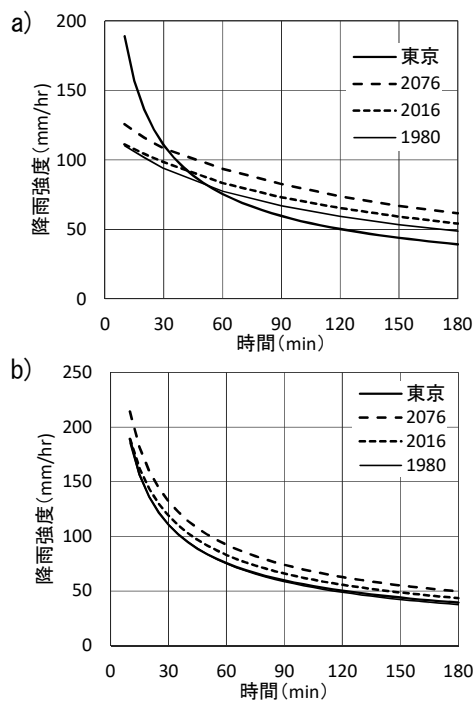


図-4 年超過確率1/20の雨強度曲線, a) 補正前, b) 補正後

本研究では地上雨量計での確率雨量として、東京都河川計画¹²⁾で用いられている東京管区気象台の20年確率降雨強度式により得られた10, 20, 30, 60, 120, 180分での降水量を設定し、全格子データでの平均値との比を求めたところ、係数 α_t はそれぞれ1.71, 1.34, 1.27, 0.97, 0.85, 0.81となった。NHRCM-5kmにおける近未来のR2016および未来のR2076の20年確率降水量についても同様の手順で求め、この係数 α_t により確率降雨を補正した。

降雨強度式の作成には、東京都の河川計画¹³⁾で採用されているクリーブランド型を用いた。定数の設定には、補正したR1980, R2016およびR2076の20年確率雨量について10, 20, 30, 60, 120, 180分の降水量を与えた。

$$I = \frac{a}{t^n + b} \quad (2)$$

ここで、 I は降雨強度(mm/hr)、 t は降雨継続時間(分)、 a , b , n は定数である。

図-4は20年確率降雨強度曲線で、a)は補正前、b)は補正後の曲線である。NHRCM-5km降水量は、60分より短い短時間降水量は過小に、60分以上の降雨は過大評価されている傾向がある。降雨量変化倍率は、年最大60分雨量の場合、R2016で1.10倍、R2095で1.22倍となっており、d4PDF⁷⁾によるRCP8.5の場合の降雨量変化倍率1.3倍よりも小さく、RCP2.6の倍率1.1よりも大きい。

東京都の河川計画の目標である20年確率60分雨量の75mmを将来気候での確率を評価するため、60分雨量を対象とした確率降雨強度曲線を作成した(図-5)。東京管区気象台およびNHRCM-5kmの60分確率強度曲線はほぼ重なっており、現在気候での年最大60分雨量の再現性は非常に高い。このため、R2016およびR2076の確率雨量

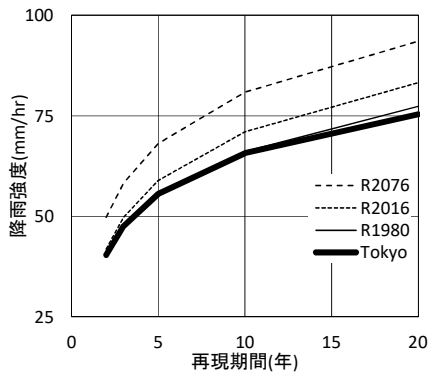


図-5 60分確率降雨強度曲線

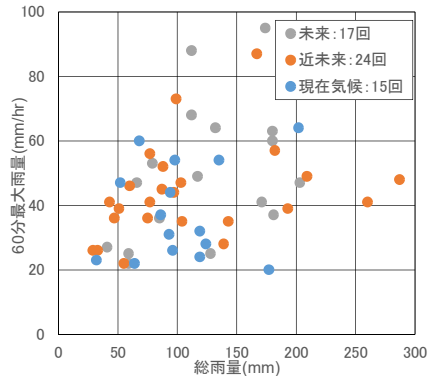


図-6 豪雨イベント

の補正は行っていない。この図より、時間雨量75mmの再現期間は、近未来(R2016)で13年、未来(R2076)で8年と減少し、豪雨頻度の増加傾向が示唆される。

(5) 豪雨イベント抽出

NHRCM-5km降水量10分値データの降雨波形による影響を把握するため、豪雨イベントによる洪水流出特性を把握する。対象とする豪雨イベントは、1時間最大雨量20mm超の降雨を対象とした。前述したように、継続時間60分以上の降雨は過大評価されている可能性があるが、計画降雨での解析では捉えることが出来ない、洪水の頻度の観点から豪雨イベントによる検討を実施する。図-6は抽出した豪雨イベントで、縦軸は60分最大雨量、横軸は総雨量である。近未来R2016は頻度が多く、未来R2076では60分最大雨量が60mmを超えるイベントが多く見られる。

3. 対象流域の概要と解析条件

(1) 流域の概要

神田川は、三鷹市の井の頭池にその源を発し、途中善福寺川と妙正寺川を合流して隅田川に流入する東京都内の代表的な都市河川である。本研究では、井の頭池から善福寺川合流点までの神田川上流域(流域面積約11.8km²、流路延長約9km)を設定した。対象流域の下水道は合流式で整備されており、汚水は下水道幹線により下水道処理場に送水されている。図-7は、東京都1/2500地形図より構築した神田川上流域の高度な地物データGISを示し

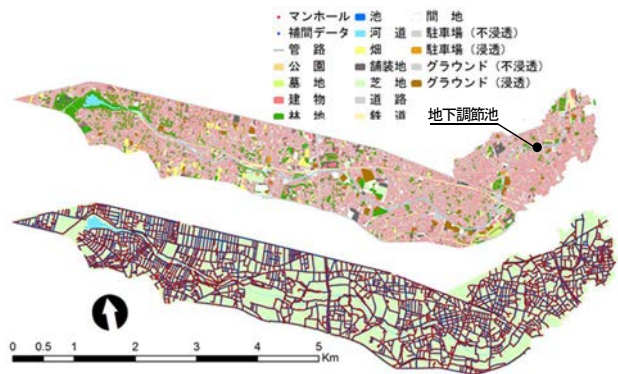


図-7 神田川上流域の概要

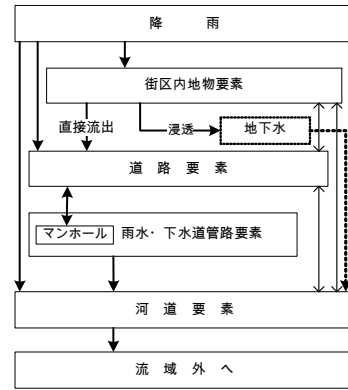


図-8 TSRモデルの概要

たものである。地表面の全要素数は104,342、建物、道路、緑地、舗装地の流域面積に対する面積率はそれぞれ29%、16%、9%および3%である。雨水管路網のGISデータは、マンホールをポイント型、管路をポリライン型で表しており、神田川上流域ではマンホール数9,632、管路数9,904となっている。

(2) TSRモデルの概要

本研究では、都市流域を対象とした洪水流出・浸水解析モデルとしてTSR(Tokyo Storm Runoff)モデル¹⁴⁾を用いる。本モデルが対象とする代表的な雨水流出過程を図-8に示す。流域内への降雨は高度な地物データGISから作成される土地利用地物要素それぞれに与えられる。街区内部では、土地利用地物要素が持つ浸透・不浸透特性に応じて不浸透域の降雨および浸透域の浸透能を超えた降雨を直接流出として計算し、建物の雨水は近傍の道路要素への流出量として算定する。道路要素の雨水は、その要素内にマンホールが存在する場合には雨水・下水道管路に流入し、存在しない場合には道路要素上を流下する。こうして、雨水・下水道管路へ流下した水は数々の管路網を経て、最終的には河川要素に流出して流域外へと流去していく。

(3) 解析条件

TSRモデルで用いる初期損失量、初期浸透能、終期浸透能、浸透能の減衰係数および土地利用地物要素の等価

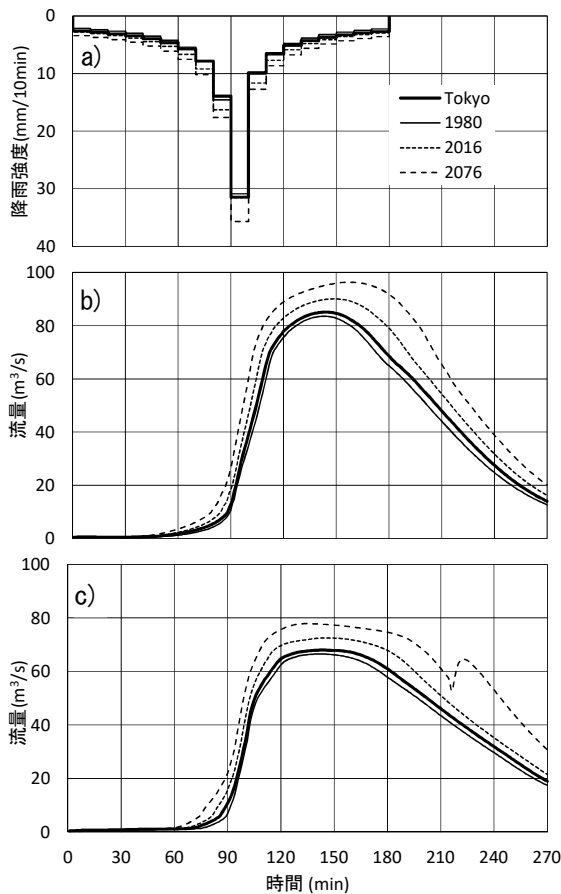


図-9 洪水流出解析結果, a) 降雨強度, b) 2km地点の流量, c) 合流地点の流量

粗度係数などのパラメータは、既往の研究により得られた値を設定¹⁵⁾した。

対象流域内にある環状七号線地下調節池については、現在は善福寺川北部に連結されており総貯留量は54万 m^3 であるが、本研究では神田川と善福寺川の区間に相当する24万 m^3 を貯水容量として設定した。地下調節池のモデル化では、TSRモデルにおける雨水・下水道管路モデル化手法を適用し、河道と調節池との接続情報には越流敷高および越流幅を、調節池の時系列水位および貯留量の算定には24万 m^3 を最大貯水容量とする水位-貯留量曲線を用いた。

河川計画で見込まれている流域対策については、2000年までに設置された浸透ます、浸透トレンチ、透水性舗装の3種類を対象とした¹⁶⁾。浸透ますは建物ごとの設置個数、浸透トレンチは建物ごとの設置長(m)、透水性舗装では路線ごとの舗装面積(m^2)で、リスト形式の住所等から神田川上流域の土地利用地物要素に振り分けている。流域内の浸透ますの設置個数は約1万個、浸透トレンチの設置長は約40km、透水性舗装の設置面積は約22万 m^2 となっている。浸透ますと浸透トレンチの単位浸透量は、それぞれ0.234 m^3 /(個・hr)、0.220 m^3 /(m・hr)を用いた¹⁷⁾。透水性舗装では、厚さを0.20m、空隙率を0.1として、20mmの貯留量を設定した¹⁷⁾。TSRモデルでは、建物ごとに異なる浸透能、道路ごとに異なる貯留量を設定させ

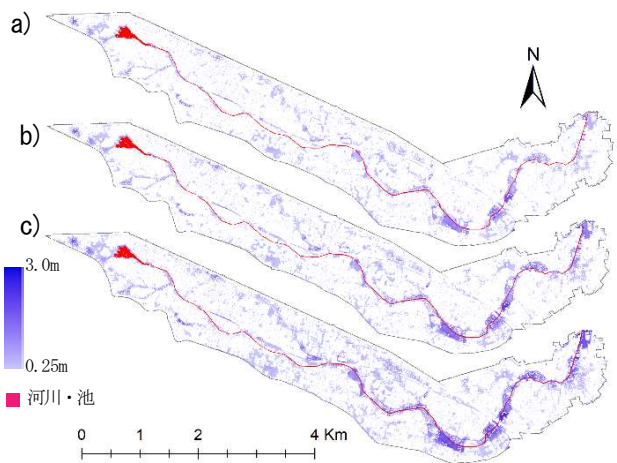


図-10 深さ25cm以上の最大浸水面積, a) 現在気候(R1980), b) 近未来(R2016), c) 未来(R2076)

表-1 地物種別による浸水深25cm以上の浸水面積(km^2)

	Tokyo	R1980	R2016	R2076
道路	0.15	0.14	0.18	0.22
街区	0.20	0.18	0.25	0.34
家屋	0.24	0.23	0.27	0.30
合計	0.59	0.56	0.70	0.87

て計算を行った。

4 解析結果

(1) 確率降雨による浸水リスク評価

年超過確率1/20の中央集中型降雨を用いて、河道流量と対象流域内の最大浸水面積の変化を期間毎に比較して、浸水リスクの評価を行う。河道流量の変化は、図-7に示した善福寺川との合流地点とここから2kmの地点で解析した。両地点の間には地下調節池が位置している。

図-9は降雨強度とそれに伴う河道流量の変化を示したものである。参考のために、東京管区气象台での降雨強度度式から計算された中央集中型波形(Tokyo)を用いた洪水流出解析結果を併記した。R2076の場合、合流地点において降雨ピーク後に流量が急激に上昇しているが、これは調節池が容量の限界まで達して、地下調節池への取水が不可能になったためである。流量の増加量はどちらの地点でも年代が進むにつれて大きくなっており、浸水リスクは増加している。流量変化の最大値はどの期間においても2km地点が合流地点より大きい。現在気候を基準にピーク流量の倍率を比較すると、2km地点では近未来(R2016)が1.08倍、未来(2076)が1.15倍となっているのに対し、合流点では近未来が1.09倍、未来が1.17倍となっている。このことから、調節池よりも下流で浸水リスクの増加が大きい傾向にあると言える。

図-10は浸水深25cm以上となる最大浸水図、表-1はこれに対応した道路、街区、家屋の浸水面積を示したものである。深さ25cm以上の最大浸水面積は現在気候R1980

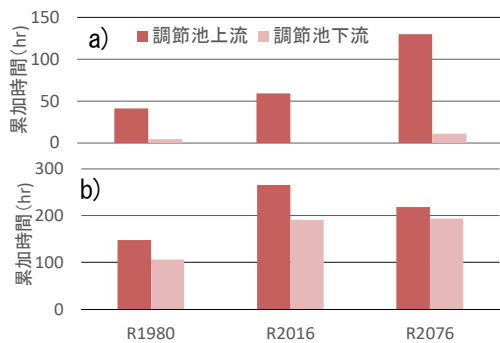


図-11 調節池上下流地点における基準水位超過の累加時間，
a) 堤防高の河川水位，b) 堤防高-1mの河川水位

では約0.56km²，近未来R2016では約0.70km²，未来R2076では約87km²となっている。現在気候と比較して近未来では約1.25倍，未来では約1.55倍に拡大している。

(2) 豪雨イベントによる洪水リスク評価

抽出した豪雨イベント用いて，河川水位の変化を期間毎に集計して，河川水位の観点から洪水リスクの評価を行う。評価方法は，解析で得られた河川水位を対象に，調節池の上流側(2.0km)および下流側(1.2km)の河道を1断面ずつ取り上げ，堤防高および堤防高-1mの河川水位を基準水位に設定し，計算河川水位がそれらの水位を超えていた時間を累計した。

図-11は，3つの期間から抽出された豪雨イベントを入力とした洪水流出解析により得られた河川水位を，上述の基準により超過した時間を累計したものである。堤防高水位および堤防高-1mの河川水位を超えていた時間の累計を2地点間で比較すると，全ての期間において2km地点の方が1.2km地点よりも大きく，洪水頻度の点では調節池上流側の浸水リスクが高いと言える。

5. むすび

本研究では，NHRCM-5km降水量10分値データ用いて，現在気候(1980-1999)，近未来(2016-2035)および未来(2076-2095)の年超過確率1/20の中央集中型降雨を作成し，Tokyo Storm Runoff(TSR)モデルを用いて神田川上流域を対象とした洪水流出・浸水解析を行い気候変動による浸水リスクの検討を行った。

降雨解析では，東京都区部の河川計画である再現期間20年の時間雨量75mmは，近未来は約13年，未来では約8年程度と豪雨頻度の増加傾向が示唆された。洪水流出解析では，降雨時の流量の増加は年代が進むとともに大きくなるため，調節池の容量が現在と変わらなければ下流では流量の増加が中流部と比較して顕著に表れることが確認された。浸水リスク評価においては，浸水深25cm以上の最大浸水面積は現在気候と比較して近未来では約1.25倍，未来では約1.55倍に拡大することが確認された。

謝辞：利用したデータセットは，文部科学省の委託事業

により開発・運用されているデータ統合解析システム(DIAS)の下で，収集・提供されたものである。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) IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 2014.
- 2) Mizuta R., and co-authors: Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simulations by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models. Bull. Amer. Meteor. Soc., 98, 1383-1398, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0099.1>. 2017.
- 3) 立川康人，他6名：超多数アンサンブル気候予測実験データを用いた極値河川流量の将来変化の分析。土木学会論文集B1(水工学), Vol.73, No.3, 77-90, 2017.
- 4) 阿部紫織，他4名：大規模気候予測情報を用いた浸水解析に降水量観測値と海面水温パターンが及ぼす影響，土木学会論文集B1(水工学) Vol.75, No.2, I_1081-I_1086, 2019.
- 5) 影山雄哉，他3名：大規模アンサンブル実験データを用いた累積雨量と洪水ピーク流量の関係の考察，土木学会論文集B1(水工学) Vol.75, No.2, I_1075-I_1080, 2019.
- 6) 高倉望，池田直広：ゲリラ豪雨に伴う都市河川の水位変化予測解析—IoTによるゲリラ豪雨の河川水位変化予測—，東急建設技術研究所報 No. 42, pp.75-80, 2016.
- 7) 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会：気候変動を踏まえた治水計画のあり方，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)
- 8) 気象庁，地球温暖化予測情報第8巻，2013.
- 9) 気象庁，地球温暖化予測情報第9巻，2017.
- 10) 小林健一郎，宝馨，中北英一：全球気候モデル出力を用いた日本域の100年確率日降水量の将来予測，土木学会水工学論文集,第54巻, pp.223-228, 2010.
- 11) 西岡昌秋，宝馨：Mann-Kendall検定による水文時系列の傾向変動，水文・水資源学会誌, Vol. 17, No. 4, pp.343-353, 2004.
- 12) 児島利治，丸谷靖幸，原田守啓：岐阜県を対象とした20km メッシュ d4PDF 確率降雨量の補正式の提案，土木学会論文集 B1(水工学), 74(5), I_133-I_138, 2018.
- 13) 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)
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 荒木千博，他3名：地物データGISを用いた都市流域地下水涵養モデルの構築および実流域シミュレーション，土木学会論文集B1 (水工学), Vol.68, No.2, pp.109-124.
- 17) 東京都総合治水対策協議会：東京都雨水貯留・浸透施設技術指針，2019.

(2020. 4. 2受付)