

地球温暖化による豪雨発生頻度の変化と 洪水氾濫への影響評価

IMPACTS OF GLOBAL WARMING ON HEAVY PRECIPITATION FREQUENCY AND FLOOD RISK

東 博紀¹・大楽 浩司¹・松浦 知徳²

Hironori HIGASHI, Koji DAIRAKU and Tomonori MATSUURA

¹正会員 博士(工) 独立行政法人 防災科学技術研究所 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)

²非会員 理博 独立行政法人 防災科学技術研究所 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1)

We describe impacts of global warming on heavy precipitation characteristics and flood risk using the 2-day precipitation of the 12 General Circulation Models. The frequency analysis based on partial duration series was carried out. The model ensemble average 200-year quantiles in Tokyo during 2050-2300 under the climate condition of IPCC SRES-A1B scenario were 1.07-1.20 times as large as the one under the present climate condition. Those influences on runoff discharge and flood risk in the Tama river basin were investigated using the numerical simulations. The estimated high water discharge rise by 10-26%, and the flood volume increased by 46-131% if the precipitation with a 200-year return period occurred.

Key Words : global warming, heavy precipitation frequency, flood risk, model ensemble

1. 研究目的

近年, 地球温暖化による気候変動が国際的に問題となっており, その対策として温室効果ガスの排出抑制, 吸収・固定の技術開発が行われる一方で, 将来の温暖化による気温, 日照, 降水量等の変化に備えて, 環境に適應する品種の開発等の農林水産技術, 降水パターンの変化に対応する治水・水利用技術, 海岸や河川の保全・都市改造等の海面水位上昇対策技術, さらに気候の変動に対する植生・野生生物種の保全技術等の温暖化適応対策が進められている¹⁾.

将来の適応策・緩和策の指針を得るため, 気候変動の的確な将来予測および地球温暖化による地域の気象・水災害への影響の明確化が緊急に求められている. 現在, 地球温暖化による水循環への影響について全球気候モデルおよび地域気候モデルを用いた数値シミュレーションによる研究が進められている. 世界の多数の機関が独自のモデルを構築し, 現在気候の再現性を検証するとともに, IPCCで採択されたSRES(Special Report on Emission Scenarios)シナリオに基づいて温室効果ガスやエアロゾルの大気中濃度および将来の気候変動の予測を行っている. その結果によると, 地球温暖化により大気中の水蒸気量が増加するため, 日本のみならず全球において一雨あたりの降水量が大きくなる, 年降水量および豪雨頻度は増加すると予測されている^{2),3)}. しかし, 周知のように現在の気候モデルでは局地気候の定量的な再現性には限界があり, その精度やパイア

スは各モデルによって様々である. とくに局地的な短期集中豪雨や台風の的確な予測は困難とされており, 地球温暖化による雨水流出・洪水氾濫への影響評価を行ううえで問題となっている.

モデルの不確実性を少なくするための研究が進められる一方で, 地球温暖化の早急な対策を図る必要性のために, 数値モデルの限界および予測の不確実性を考慮しつつ, 気候変動の将来予測を行うアプローチが試みられている. 唯一のモデルおよび初期・境界条件から決定論的に予報を行うという従来の考え方とは異なり, 初期・境界条件そのものにも誤差が含まれることを考慮して想定しうる複数の初期・境界条件にて計算を行うアンサンブル解析, モデル自体も完全ではないため複数のモデルを用いて計算を行うモデルアンサンブル(マルチモデルアンサンブル)解析が行われ, 地球温暖化による地域気候への影響評価に応用されている^{4),5)}.

IPCCでは世界各国の研究機関で実施された全球気候モデルによる地球温暖化シナリオ実験結果を収集し, データ配布センターを設置してそれらを公表している. 本研究では, IPCCより入手した12全球気候モデルの計算結果を用いて地球温暖化による豪雨頻度の変化を明らかにするとともに, 流域の雨水流出量および洪水氾濫危険度への影響を定量的に評価することを目的とする. 東京における降水量の観測値, 気候モデルの計算値およびモデルアンサンブル平均値を比較して再現精度を検討するとともに, 地球温暖化によって変動す

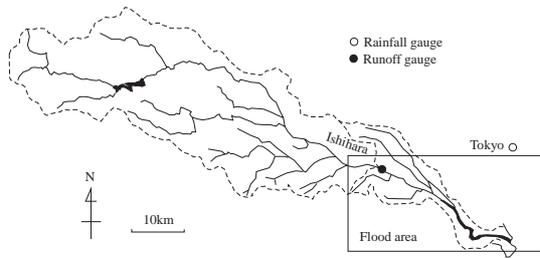


図-1 多摩川流域の概要

表-1 全球気候モデルと日降水量データの一覧

Model	IPCC LD.	Resolution lon.×lat. (degree)	20c3m				A1B				B1			
			2000	2050	2100	2200	2300	2050	2100	2200	2300			
ccma_cgcm3_1	CGCM3.1(T47)	3.8 3.7	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
cnrm_cm3	CNRM-CM3	2.8 2.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
csiro_mk3_0	CSIRO-Mk3.0	1.9 1.9	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
gfdl_cm2_0	GFDL-CM2.0	2.5 2.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
giss_aom	GISS-AOM	4.0 3.0	○	○	○	×	×	○	○	○	×	×	○	○
giss_model_e_r	GISS-ER	5.0 4.0	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
iap_fgoals1_0_g	FGOALS-g1.0	2.8 2.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ipsl_cm4	IPSL-CM4	3.8 2.5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△
miroc3_2_hires	MIROC3.2(hires)	1.1 1.1	○	○	○	×	×	○	○	○	×	×	○	×
miroc3_2_medres	MIROC3.2(medres)	2.8 2.8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
miub_echo_g	ECHO-G	3.8 3.7	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ncar_pcm1	PCM	2.8 2.8	○	△	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○

○ Available data △ Unavailable data × No data

る確率降水量の算定を試みる。多摩川流域を対象として計画規模の降水が発生したときの雨水流出・洪水氾濫シミュレーションを行い、地球温暖化によるピーク(計画高水)流量および浸水被害の変化を議論する。

2. 解析の対象と手法

a) 多摩川流域とその整備計画

多摩川⁶⁾は、その源を山梨県塩山市笠取山(標高1953m)に発し、途中多くの支流を合わせながら東京都西部から南部を流下し、東京都大田区羽田地先で東京湾に注ぐ、幹川流路延長138km、流域面積1240km²の一級河川である(図-1)。

現治水計画で用いられている計画降水量は、基準地点石原より上流域における大正12年から昭和49年までの52年間の年最大2日間降水資料を用い、統計解析より求められた200年確率457mm/2-dayを採用している。基本高水および計画高水流量については、昭和23年から昭和49年までの石原上流域における2日間降水量の多い上位20個の降水波形を用い、それぞれ457mm/2-dayとなるように各時間の降水量を一律に引き伸ばして流出計算を行い、カバー率80%の8700、6500m³/sと決定されている。なお、多摩川においては当面の整備計画として基準点石原において4500m³/sを流下できる整備を行うことになっている。

(1) 降水資料と確率降水量の算定法

本研究では、表-1に示してあるIPCCのデータ配布センターより入手した12モデルの温暖化実験結果の日降水量データを整理し、多摩川流域の整備計画で対象となっている2日間降水量を統計資料とする。解析対象はSRES A1BおよびB1シナリオの2046~2065年(以降、2050年と省略)、2081~2100年(2100年)、2181~2200

年(2200年)、2281~2300年(2300年)の各20年間である。なお、A1Bシナリオはグローバル化による急激な経済成長と世界人口の増加が21世紀半ば続いた後減少し、エネルギー源は化石・非化石燃料をバランスよく消費するというもの、B1シナリオでは、A1Bと同様に21世紀半ばに世界人口がピークに達した後に減少するが、経済構造はサービス及び情報経済に向かって急速に変化し、物質志向は減少し、クリーンで省資源の技術が導入されるというものである。

統計期間20年の毎年最大値系列より200年確率降水量を的確に求めることは困難である。本研究では、比較的短い統計期間でも精度よく確率降水量が求められる部分期間系列(Partial Duration Series, PDS)を用いて統計解析を行う⁷⁾。ここで用いるデータは、より細かく分類すれば、PDSのうちの非毎年超過資料に相当するが、以下では、総称的なPDSという名称を用いる。

PDSは各モデル・シナリオ・期間における20年間の2日間降水量データのうち降水量が大きい上位40個(資料年数の2倍)、すなわち降水を大きい順にならべたときの順序統計量の第40位を閾値とし、降水量が閾値以上である40降水とする。PDSより閾値を超える年最大降水量の確率分布を求める方法は次のとおりである。閾値 x_0 を超える降水量が年に M 回生起する確率 P は、Poisson分布に従うと仮定すると、(1)式で表わされる⁷⁾。

$$P \{M = m\} = \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda} \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (1)$$

ここに、 λ : 閾値超過降水の平均年生起回数である。

降水量を確率変数 X とし、 X が閾値 x_0 を超え、かつ $X \leq x$ となる確率分布を $G(x) = P \{X \leq x | x \geq x_0\}$ とする。このとき、 X が x_0 を超え、かつ $X > x$ となる事象の年生起回数の期待値 λ_* は(2)式、年生起回数が M' となる確率 P は(3)式で表わされる。

$$\lambda_* = \lambda \{1 - G(x)\} \quad (2)$$

$$P \{M' = m\} = \frac{\lambda_*^m}{m!} e^{-\lambda_*} \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (3)$$

毎年最大値の確率分布を $F_a(x) = P \{X \leq x\}$ とすると、これは X が1年間に x を超えない確率に等しい。したがって、 F_a は(3)式の m を0とした(4)式で表わされる。

$$F_a(x) = \exp[-\lambda \{1 - G(x)\}] \quad (4)$$

$G(x)$ には後述のように指数分布(5)式が適合するので、それを採用する。

$$G(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x - x_0}{a}\right) \quad (5)$$

ここに、 a : 母数(PDSの平均降水量)である。 $G(x)$ を(4)式に代入すると F_a はGumbel分布(6)式となる。

$$F_a = \exp\left\{-\exp\left(-\frac{x - c_0}{a}\right)\right\} \quad (6)$$

ここに、 c_0 : 位置母数(= $x_0 + a \ln \lambda$)である。この方法では、閾値 x_0 を決定すれば統計資料より λ と a が求められるため、確率降水量を算定することができる。

表-2 年降水量および2日間降水量の比較

		Annual Average (mm/year)	2-day precipitation in PDS			Quantile	
			Maximum (mm/2-day)	Threshold (mm/2-day)	Average (mm/2-day)	100-year (mm/2-day)	200-year (mm/2-day)
Observed(Tokyo)		1479	294	86	140	376	415
ccma_cgcm3_1	case 1	1834	170	71	99	216	236
	case 2	1701	116	57	73	144	156
cnrm_cm3	case 1	2227	214	86	120	266	290
	case 2	1975	145	66	82	150	162
csiro_mk3_0	case 1	1600	124	61	76	139	149
	case 2	1598	110	56	70	129	139
gfdl_cm2_0	case 1	1671	175	66	91	201	219
	case 2	1560	120	53	71	149	161
giss_aom	case 1	1795	68	49	57	89	94
	case 2	1964	62	44	52	84	89
giss_model_e_r	case 1	1065	66	41	47	72	76
	case 2	1736	55	41	46	67	70
iap_fgoals1_0_g	case 1	2077	144	77	93	162	173
	case 2	2100	89	54	64	109	116
ipsl_cm4	case 1	2106	363	104	149	344	376
	case 2	1746	109	61	75	136	146
miroc3_2_hires	case 1	1823	143	70	84	147	157
	case 2	1779	126	65	75	117	124
miroc3_2_medres	case 1	1863	108	63	75	128	136
	case 2	1786	84	52	63	109	117
miub_echo_g	case 1	1138	110	46	62	130	141
	case 2	1271	77	42	53	102	109
ncar_pcm1	case 1	1601	123	57	73	145	157
	case 2	1524	82	46	57	103	110
model_ensemble	case 1	1733	151	66	86	170	184
	case 2	1728	98	53	65	117	125

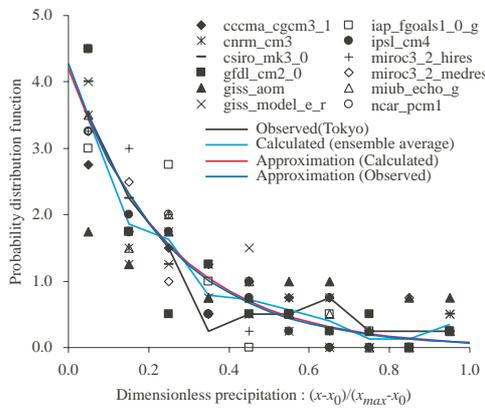


図-2 20世紀再現計算結果の閾値超過降水量の頻度分布

(2) 地上観測降水量と20世紀再現計算結果の比較

ここでは気候モデルの出力値の精度やバイアスを明らかにするため、1981～2000年の東京管区気象台(139.76E, 35.69N)における地上観測降水量と各モデルの20世紀再現実験(1981～2000年,以降2000年と省略)結果のPDSを比較・検討する。通常,局地的な降水を議論するためには高解像度の地域気候モデルを用いてダウンスケーリングを図るべきである³⁾が,全球気候モデルの結果を初期・境界条件に用いるため,結局は全球気候モデルの結果に降水量が左右されると言わざるを得ない²⁾。計算結果に全球気候モデルのみならず地域気候モデル自体のバイアスも含まれることになるうえに,近い将来には計算機器の発達により地域気候モデルに匹敵した高解像度の全球気候モデルによる計算が可能になることも十分に予測される。このような理由により,本研究では全球気候モデルによる東京における降水量として次の2ケースを検討することにする。

- Case 1:東京を含むグリッドの降水量
- Case 2:東京に近い4グリッドの計算値を用いて東京からの距離の逆数を重みとした平均値

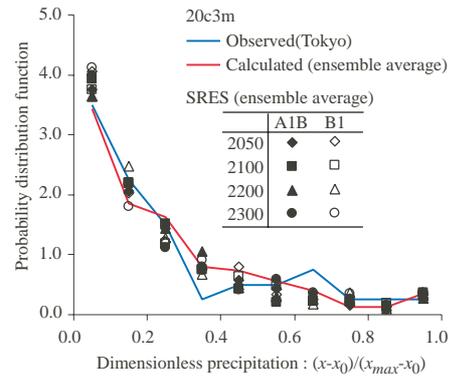


図-3 地球温暖化実験結果の閾値超過降水量の頻度分布

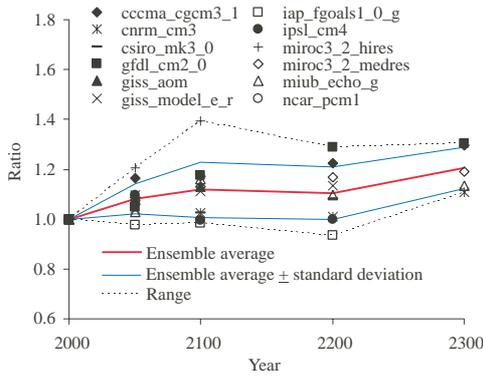
表-2に平均年降水量および2日間降水量の最大値およびPDSの閾値(第40位)と平均降水量を示す。平均年降水量をみると,case 1,2のモデルアンサンブル平均値(12モデル出力値の算術平均値)はほぼ等しく,観測値と比較すると17%過大ではあるが,まずまず良好な再現精度を有しているといえる。しかし最大2日間降水量ではいずれも観測値と大きな差が見られるうえに,case 1のモデルアンサンブル平均値はcase 2の1.54倍と両者の差が顕著である。モデルアンサンブル平均したPDSの閾値および平均降水量はcase 1のときはcase 2のときの1.24,1.32倍であり,最大2日間降水量ほど両者の差は大きくないが,観測値とはいずれもかなりの差が見られる。計算値と観測値の差はモデルの性能・分解能が要因であり,case 1と2で見られる差は,case 1では1グリッドの降水量であるのに対してcase 2では4グリッドの降水量の平均値を用いたことによって降水波形が平滑化されたことが原因と考えられる。以降,比較的現実の値に近いcase 1で考察を進めることにする。

図-2に閾値超過降水量の頻度(度数)分布を示す。なお,同図の降水量は各モデルの最大値(x_{max})と閾値(x_0)を用いて無次元化しており,階級幅を0.1として各階級の頻度を求めている。モデルによってばらつきはあるものの,各階級の頻度のモデルアンサンブル平均値は観測値とよく一致していることがわかる。また,同図には観測値およびモデルアンサンブル平均値の降水量頻度について(5)式の指数分布で近似した結果を併示してあるが,各階級の頻度とよく一致している。モデルにおける雨量の出力値は観測値と差が見られるものの,無次元化した降水量の発生頻度はともに同じ指数分布に従っていることが分かる。

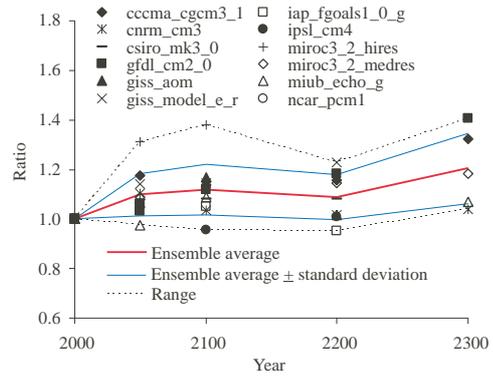
3. 地球温暖化にともなう東京の降水特性の変化

(1) 地球温暖化によるPDSの統計特性の変化

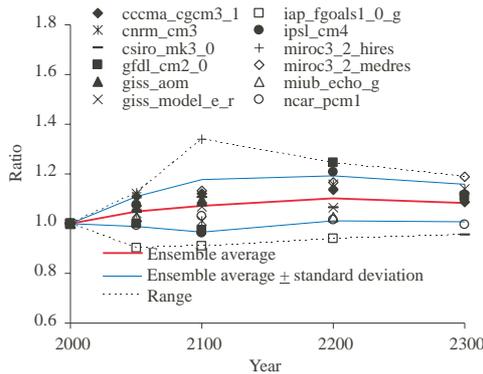
本研究では,20世紀再現実験の結果を踏まえ,各モデルにおける地球温暖化によるPDSの変化傾向およびモデル間の類似点・相違点を調べ,地球温暖化による豪雨発生頻度への影響を議論する。



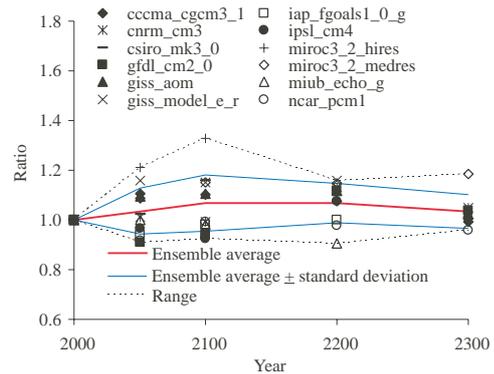
(a) A1Bシナリオ



(a) A1Bシナリオ



(b) B1シナリオ



(b) B1シナリオ

図-4 閾値の変化

図-5 PDSの平均降水量の変化

図-3にモデルアンサンブル平均した閾値超過降水量の頻度分布を示す。なお、同図の降水量は各モデル、シナリオおよび期間における最大値 (x_{max}) と閾値 (x_0) を用いて無次元化し、モデルアンサンブル平均については階級幅を 0.1 として各階級の頻度を算術平均して求めている。また、同図には 20 世紀再現実験のモデルアンサンブル平均および観測値の頻度分布を併示してあるが、地球温暖化シナリオ実験の結果と大きな差は見られないことが分かる。閾値 x_0 や平均降水量 a は後述するように地球温暖化にともなって変化するが、閾値超過降水の頻度分布の形状は変化せず、いずれも同じ指数分布で近似できると考えられる。

図-4および5に地球温暖化による閾値 x_0 および閾値超過降水量の平均値 a の変化を A1B および B1 シナリオごとに示す。なお、両図の縦軸は各モデルの 20 世紀再現実験のそれぞれの値で除して無次元化しており、モデルアンサンブル平均はそれら 12 モデルの結果を算術平均したものである。また、表-1に示してあるように、A1B, B1 シナリオともに 2050 年と 2100 年では同じモデル数であるが、2200 年および 2300 年ではモデル数が少なくなっているため、単純な比較はできないが次のことが明らかになる。

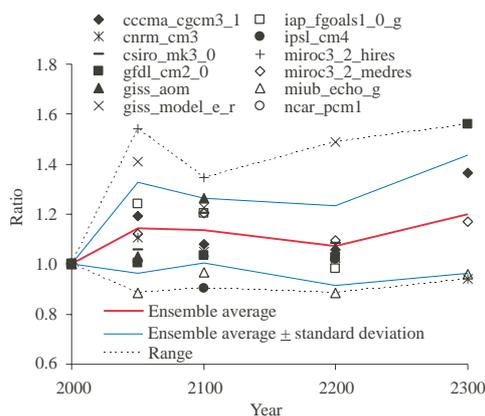
x_0 および a のモデルアンサンブル平均は、A1B シナリオではそれぞれ 8 ~ 21, 9 ~ 20 %, B1 シナリオでは 5 ~ 10, 3 ~ 7 % ほど 2000 年と比べて増加している。大気

中の二酸化炭素濃度の増加量が B1 シナリオより A1B シナリオの方が大きいことが原因と考えられる。

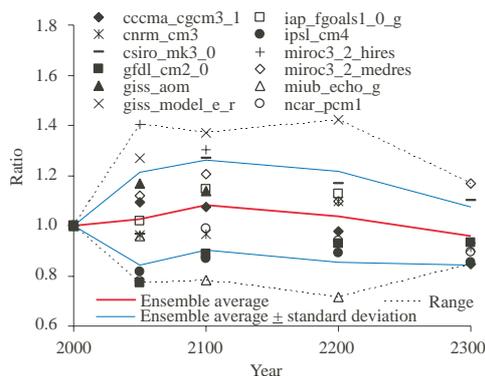
図-4および5には、モデル間のばらつきを見るために求めたシナリオ・期間ごとの x_0 , a の最大値、最小値および標準偏差を併示してある。A1B, B1 シナリオともに 2050, とくに 2100 年において miroc3_2hires が他のモデルと差が大きく見られ、 x_0 , a の最大値となっているが、標準偏差を見るといずれのシナリオ・期間においても 0.10 ほどで大きな変化は見られない。A1B シナリオではほぼ全てのモデルにおいて x_0 および a が増加する結果となっており、モデル間のばらつきを考慮しても x_0 , a ともに増加する可能性が高く、地球温暖化によって一降水あたりの降水量が増大すると考えられる。一方、B1 シナリオでは x_0 および a が 2000 年より減少するモデルが比較的多く、いずれも増加するとともに減少するともいえないことが分かる。

(2) 確率降水量

各モデルの PDS を用いて (1) ~ (6) 式より算出した 200 年確率降水量を図-6に示す。同図には、シナリオ・期間ごとに求めたモデルアンサンブル平均とその標準偏差、最大値、最小値を併示してある。A1B シナリオにおける 2050 ~ 2300 年の確率降水量のモデルアンサンブル平均値は 2000 年の 1.07 ~ 1.20 倍であり、2050 および 2100 年の確率降水量がともに 2000 年より多くなる



(a) A1Bシナリオ



(b) B1シナリオ

図-6 200年確率降水量の変化

結果となっているモデル数は11モデル中9つであった。A1Bシナリオでは確率降水量が大きくなる可能性が高いといえるが、モデル間のばらつきを見ると、 x_0 、 a のときと比べて標準偏差は大きくなっており、予測はより不確実になっていると考えられる。それに対し、B1シナリオでは2050～2300年の確率降水量のモデルアンサンブル平均値は2000年の0.96～1.08倍であり、2000年とあまり差が見られないことが分かる。B1シナリオでは2050および2100年の確率降水量がともに2000年より多くなる結果となっているモデル数は12モデル中6つであり、B1シナリオでは豪雨の発生頻度は増加するとともに減少するともいえないことが分かる。

4. 地球温暖化による洪水氾濫危険度への影響

(1) 解析手法

本研究では、地球温暖化によって確率降水量が増加する可能性が高いA1Bシナリオを対象とし、200年確率の2日間降水が生じたときの雨水流出・洪水氾濫解析を行い、地球温暖化による影響を検討する。

氾濫原は図-1に示す領域とし、石原地点における河川流量を与えて氾濫計算を行う。石原地点における流量は雨水流出解析を行って求める。ここでは直接流出成分の解析にはkinematic runoff model、基底流出成分にはunit hydrograph法を用いる⁸⁾。浸透域における有

効降雨については、過去の水文データより保留量曲線を作成して、それを用いて算出する。洪水氾濫解析については、河道流は連続式およびSt.Venant式を用いて1次元解析し、氾濫原における浸水深および氾濫流速については平面2次元浅水方程式を用いて算定する⁹⁾。本モデルを用いて2002年10月1～2日の降雨データを用いて石原地点の河川流量および堤体の洪水痕跡(最高水位)の計算を行ったところ、流量・水位ともに計算値は観測値とよく一致し、解析モデルは妥当であると判断した(結果の表示省略)。

破堤については河道水位によって任意の位置で自動的に生じるように設定し、その破堤条件(破堤開始水位、破堤敷高、破堤幅等)は栗城ら¹⁰⁾に従うことにする。東京湾における潮位は、地球温暖化によって海面水位が上昇することは多数報告されている²⁾が、ここでは現計画で用いられているT.P.+3.85mで一定とする。2050、2100、2200、2300年における200年確率降水量については、現計画の流域平均降水量457mm/2-dayに図-6(a)に示してあるモデルアンサンブル平均の比率を乗じた値(それぞれ523、519、491、548mm/2-day)とする。降水波形については、現治水計画で採用されている方法を参考にして、1949年8月30日10時～9月1日10時の降水波形を、その総降水量が確率降水量と等しくなるように、一定比率で引き伸ばして用いる。なお、1949年8月30日10時～9月1日10時の降水波形は、それを計画降水量457mm/2-dayに引き伸ばしたとき、計画対象となっている20降水波形のうちで流出計算結果のピーク流量が現計画洪水流量6500m³/sに最も近いものである。

(2) 解析結果

図-7に降雨波形(2000年)、石原地点のハイドログラフおよび氾濫総流量を示す。また、図-8に2000年と2300年の最大浸水深の分布を示す。図-7を見ると、2050、2100、2200、2300年の確率降水量は2000年に対して1.15、1.14、1.07、1.20倍であるが、ピーク流量は2000年の6802m³/sに対して1.19、1.17、1.10、1.26倍と確率降水量よりも大きい増加量となっている。さらに、氾濫総流量は2000年の16.5×10⁶m³に対して2.00、1.74、1.46、2.31倍と大きく増加している。図-8を見ると、2000年では石原地点の直下流右岸で破堤しているが、2300年では両岸で同時破堤が見られ、浸水域が広がっていることが分かる。地球温暖化による降水量の増加は流域の洪水被害を著しく大きくすると予想される。

5. 結論

本研究では、IPCCデータ配布センターにて公表されている全球気候モデルの降水量を用いて2日間降水量のPDSを作成し、地球温暖化による東京の豪雨頻度の変化を議論するとともに、多摩川流域を対象として流域における雨水流出・洪水氾濫への影響について検討し

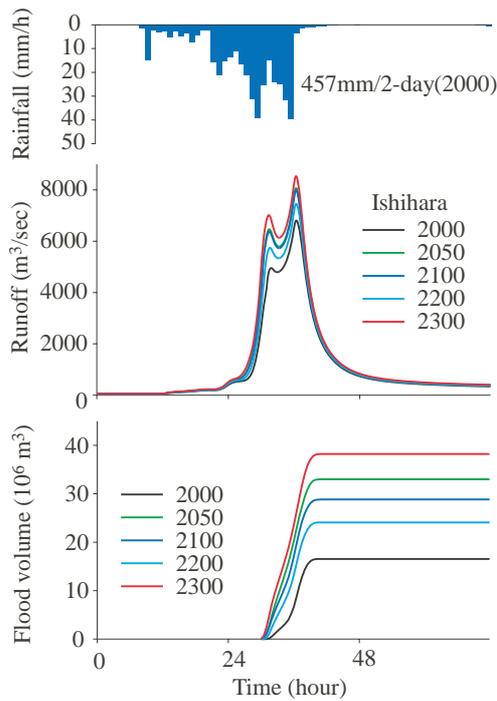
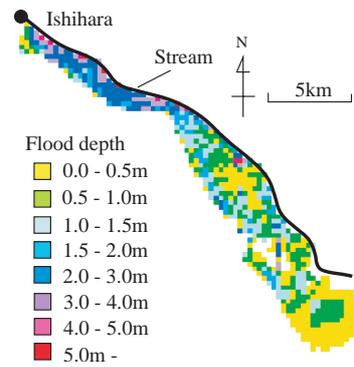
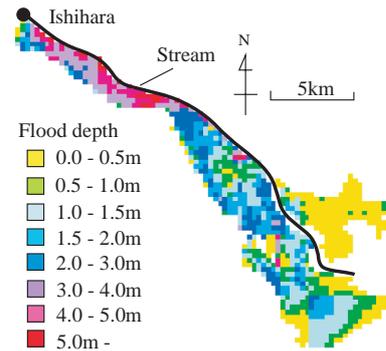


図-7 雨水流出量および氾濫総流量の変化



(a) 2000年



(b) 2300年

図-8 氾濫浸水深の最大値

た．得られた結論をまとめると次のとおりである．

- (a) 東京における地上観測降水量のPDSと全球気候モデルの計算値のPDSには，最大2日間降水量やPDSの平均降水量など定量的には大きな差が見られるが，降水量の頻度分布の形状はともに指数分布とよく一致する．
- (b) A1Bシナリオの2050，2100，2200，2300年におけるPDSについては，降水量の頻度はいずれも2000年と同様に指数分布と一致するが，閾値およびPDSの平均降水量はそれぞれ8～21，9～20%増加する．B1シナリオではPDSの閾値および平均降水量は2000年と比べて大きく変化しない．
- (c) A1Bシナリオにおける2050，2100，2200，2300年の200年確率降水量は2000年の1.07～1.20倍である．A1Bシナリオでは地球温暖化によって豪雨の発生頻度が高まると予想される．
- (d) A1Bシナリオにおいて多摩川流域の計画高水流量は現計画のものよりも1.10～1.26倍になると予測される．現流域・河道状況で200年確率降水が発生したときの氾濫総流量は現在の1.46～2.31倍に大きく増加する．地球温暖化によって流域の洪水氾濫危険度は著しく高まることが懸念される．

謝辞： 本研究を遂行するにあたり，国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究室 室長 末次忠司 博士および同省 関東地方整備局 京浜河川事務所には多摩川流域の水文データおよび治水計画の情報をご提供いただきました．また，東京都には多摩川上流域のダム・調整池について資料をご提供いただきました．ここに深く謝意を表します．

参考文献

- 1) IPCC: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. and Johnson, C.A. eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 2001.
- 2) 原沢 英夫，西岡 秀三 編著：地球温暖化と日本 第3次報告 - 自然・人への影響予測 - ，古今書院，pp.1-411，2003．
- 3) 大楽 浩司，江守 正多，野沢 徹：全球気候モデルにネスティングした地域気候モデルによる21世紀のアジアの水循環変動予測，水工学論文集，第49巻，pp. 397-402，2005．
- 4) Wilby, R.L. and Wigley, T.M.L.: Precipitation Predictors for Downscaling: Observed and General Circulation Model Relationships, *Int. J. Climatol.*, vol. 20, pp. 641-661, 2000.
- 5) Benestad and Rasmus E.: Empirically Downscaled Multimodel Ensemble Temperature and Precipitation Scenarios for Norway, *J. Climate*, vol. 15, No.21, pp.3008-3027, 2002.
- 6) 旧建設省河川局:多摩川水系河川整備基本方針，2001．
- 7) 星 清:洪水ピークの確率評価法について，開発土木研究所月報，No. 539, pp. 34-47, 1998.
- 8) 岡 太郎：バングラデシュの洪水に関する調査と考察，平成11年度水資源セミナー講演集，京都大学防災研究所，pp.104-113，1999．
- 9) 井上和也：開水路非定常流の数値解析法とその水工学への応用に関する研究，京都大学学位論文，pp.149-156，1986．
- 10) 粟城 稔，末次 忠司，海野 仁，田中 義人，小林 裕明: 氾濫シミュレーション・マニュアル(案)，土木研究所資料，第3400号，1996．

(2005.9.30 受付)