

29. 気候変動を考慮した那珂川流域の 降雨・流出解析

山城 健太^{1*}・三村 信男²

¹茨城大学大学院理工学研究科（〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1）

²茨城大学広域水圏環境科学教育研究センター（〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1）

* E-mail: yms21306@ideacon.co.jp

気候変動の影響には地域性が強く、日本でも地域によってその影響が異なるため、影響予測・対応策を国全体で行う形から自治体レベルで行う形へダウンスケールする必要がある。本研究では、茨城県、栃木県を流れる那珂川流域において、現在から将来にかけての日雨量、河川流量の変化量を明らかにした。降雨量に関して、MIROC3.2の出力結果では過去50年間の観測値よりも50mm/day～100mm/day程度大きな値を記録する頻度が増加すると推定された。2081～2100年の年最大日雨量を用いて流域平均での100年確率日雨量を推定した。それを用いて流出解析を行った結果、将来気候予測モデルにより河川流量の推定量が変動し、その下限値は現行の治水計画規模よりも小さく、上限値は大きくなると推定された。

Key Words : *climate change, daily rainfall, return period, rainfall-runoff simulation, GCMs, peak discharge, distributed hydrological model*

1. 研究の背景と目的

地球温暖化問題では、時・空間分解能ともに詳細な気候変動予測が行われ、全球規模での水資源予測や、海面上昇による影響評価などに関する研究が行われている。一方、日本のように地域ごとに多様な気候を持つ国では、影響予測・対応策を国全体で行う形から自治体レベルで行う形へダウンスケールすることが必要になっている。水災害に関しても、地域レベルでの気象・水災害への影響の明確化が求められている^{1,2)}。

そこで、本研究では、那珂川流域に注目し、降雨と河川流量に対する気候変動の影響を推定し、洪水リスクへの影響を明らかにすることを目的とした。具体的には以下の通りである。

- ① 気候変動により那珂川流域において降雨特性がどの程度変化するかを明らかにする。特に、年最大日降雨量の変化量を推定する。
- ② 時間雨量を入力値とする降雨流出モデルを用いて、過去の洪水イベントを再現し、那珂川流域における流出モデルのパラメータの推定を行う。これによっ

て、那珂川流域における分布型流出モデルを構築する。

- ③ 将来、那珂川流域で降雨特性の変化により河川流量がどの程度変動するかを推定することで、現行の治水計画の評価を行う。また、洪水リスクへの影響評価を行う。

上記の目的を設定し、本研究では、過去 50 年間と将来期間 2081～2100 年までの年最大日降雨量のトレンド分析、那珂川の降雨流出モデルの構築、将来降雨を用いた河川流量の推定、以上 3 つを行った。

2. 水文統計解析

(1) 降雨特性の経年変化解析

将来気候における降水量は、全球気候モデル（GCM）を用いたシミュレーションによって推定される。本研究では、GCM の一つである MIROC（Model for Interdisciplinary Research on Climate）の予測結果を用いた³⁾。本研究で用いた将来降雨データを表-1 に示す。MIROC の種類

は、MIROC3.2hires と MIROC5.0 の二種類が整備され、データ名の末尾に付加されている_A1B と_RCP4.5 は、それぞれの気候モデルにおいて、社会経済シナリオ SRES A1B または温室効果ガスの代表的濃度パスシナリオ RC P4.5 の条件で計算されたことを示す。データ名に TWRF を含まないものは、全球気候モデル MIROC の日単位データであり、含むものは MIROC の予測結果を境界条件とし、TWRF（領域気候モデル）で力学的ダウンスケール（DD）を行った日単位のデータであることを示す。

表-1 将来降雨を求めた気候モデル³⁾

気候モデル	シナリオ	DD
MIROC3.2hires_A1B	SRES A1B	無
MIROC3.2hiresTWRF_A1B	SRES A1B	有
MIROC5.0_RCP4.5	RCP4.5	無
MIROC5.0TWRF_RCP4.5	RCP4.5	有

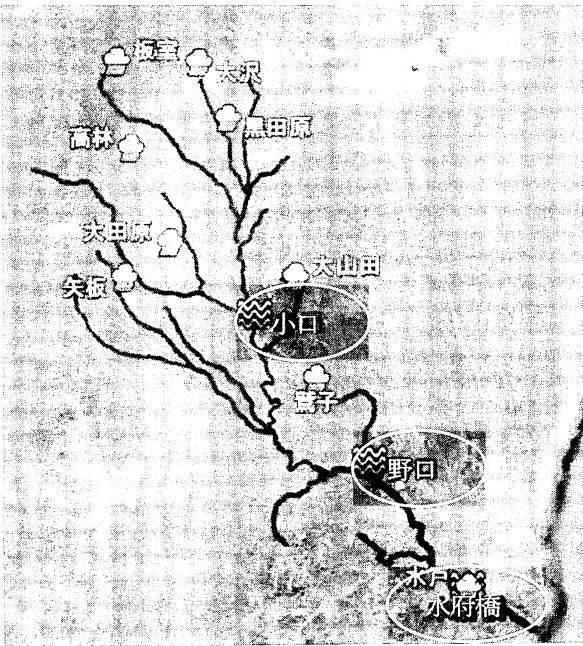


図-1 白字:解析対象としたアメダス観測点,
丸囲み: 流量算出地点とした流量観測所

那珂川流域における現在と将来降雨の傾向変動を調べるため、図-1 の9つの雨量観測所に関して1961～2010年のアメダス観測データと、2081～2100年の将来降雨データを整理した。これから得た年最大日降雨量の経年変化傾向を表-2に示した。傾きの検出には線形回帰分析を用いた。下線付き文字の箇所は、傾向変動が統計的に有意と判断されたものである。（省略記号は次の通り MI 3 : MIROC3.2hires_A1B, MI3TW : MIROC3.2hiresTWRF_A1B, MI5 : MIROC5.0_RCP4.5, MI5TW : MIROC5.0TWRF_RCP4.5)

なお、傾向変動が統計的に有意であるかどうかを判断するには、Mann-Kendall 検定を用いて判定した⁴⁾。表-2の結果から、那珂川流域の上流・中流地点で、年最大日降雨量は過去50年間で増加傾向にあると考えられる。

表-2 年最大日降雨量の経年変化の傾向 (mm/year)

観測地点	過去50年	MI3	MI3TW	MI5	MI5TW
板室	<u>1.61</u>	2.51	2.19	-0.83	0.38
大沢	0.72	5.39	6.47	-2.61	-1.13
高林	1.18	3.65	3.21	-1.31	0.27
黒田原	0.47	3.82	5.79	-1.43	0.16
大田原	0.32	2.94	3.75	-1.32	-0.72
矢板	0.32	3.24	2.59	-1.94	1.54
大山田	<u>0.57</u>	1.50	0.33	-1.13	<u>-2.11</u>
鷺子	<u>0.52</u>	1.49	-0.64	-1.26	<u>-2.24</u>
水戸	-0.21	3.47	-2.72	-1.46	0.64

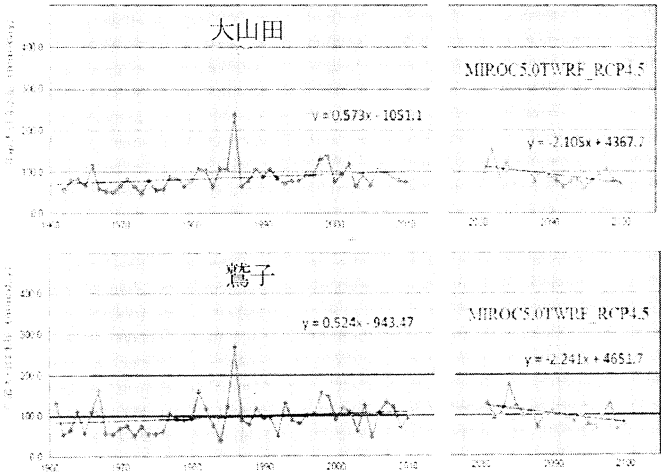


図-2 大山田（上図）・鷺子（下図）地点での
年最大日降雨量の経年変化

将来予測の時系列変化の傾向に関して、MIROC3.2の結果では全ての地点で増加傾向であり、MIROC3.2TWRFの結果では、上流・中流域で増加傾向にあった。反対に、MIROC5.0の結果は、全ての地点で減少傾向を示し、MIROC5.0TWRFの結果では、中流域である大山田・鷺子地点で統計的に有意な減少傾向にあった。図-2に大山田・鷺子地点の経年変化を示した。統計的に有意で減少傾向があると判断された MI5TW では減少傾向が見られる。

(2) 確率雨量の推定

本研究では、現在から将来に向けて那珂川流域の確率雨量がどのように変化するかを推定した。特に、年最大日降雨量を対象に確率降雨量の推定を試みた。

過去50年間の年最大日降雨量を用いて極値統計解析を行い、50年、100年、200年確率日降雨量の推定を行った。確率分布の推定結果と、その分布関数から算出される確率降雨について表-3に示した。確率分布は一般化極値分布（GEV）を当てはめ、その適合度を標準最小二乗基準（SLSC）と相関係数（COR）で評価した。表-3から年最大日降雨量の確率分布として GEV 分布が適してお

り、また確率降雨量の結果から那珂川流域では上流部の方が中流・下流部より日最大雨量が多いことが分かった。

表-3 年最大日降雨の頻度分布と GEV 分布との適合度 (SLSC,COR) , 100, 200 年確率降雨 (mm/day)

観測点	SLSC	COR	100 年	200 年
板室	0.018	0.996	400	455
大沢	0.110	0.920	392	515
高林	0.064	0.960	399	492
黒田原	0.038	0.988	309	392
大田原	0.047	0.968	355	451
矢板	0.047	0.969	313	378
大山田	0.064	0.956	188	212
鷺子	0.047	0.975	224	247
水戸	0.032	0.987	189	210

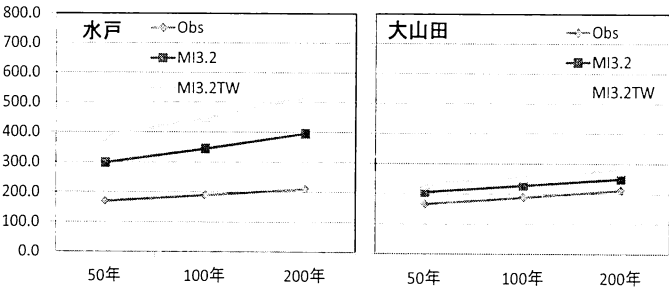


図-3 現在気候 (Obs) , MIROC3.2, MIROC3.2TWRf の年最大日雨量から算出した確率雨量 (50,100,200 年)

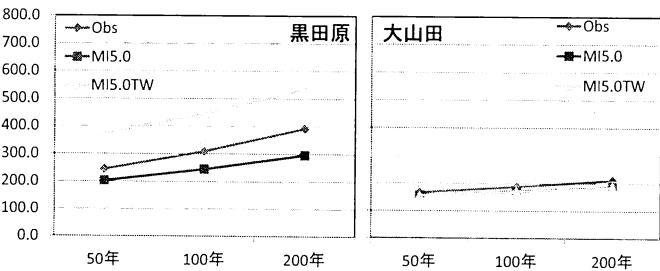


図-4 現在気候 (Obs) , MIROC5.0, MIROC5.0TWRf の年最大日雨量から算出した確率雨量 (50,100,200 年)

図-3, 4 には、将来気候の確率雨量が現在気候に比べて大きくなって地点と、現在気候と将来気候の確率雨量がほとんど変化しなかった地点を示した。このように本研究で用いた将来予測結果からは、確率日雨量がそれぞれの地点で異なった傾向を示し、流域全体で一様な傾向を示すわけではないと考えられる。

3. 降雨流出解析

(1) 降雨流出モデル

本研究では、降雨流出計算を行う際に、任意の地点の流量を算定でき、また流域全体に降る雨を考慮できる分

布型流出モデルを使用した。そのため、京都大学、水文・水資源研究室が公開している流出モデル 1k-FRM-event⁶⁾を用いた。

a) 流域地形のモデル化

流出モデル 1k-FRM-event の仕様に従い、那珂川の流域地形をモデル化した。その手順としては、初めに全球規模で整備されている解像度 30 秒 (約 1km) の標高データと流れ方向情報を含む河川網データ HydroSHEDS⁷⁾からアジア域の河川網を取り出す。さらに計算対象とする那珂川流域を含む矩形領域を切り出す。次に、那珂川を含む矩形領域の中で、那珂川以外の流域を除き図-5 のような地形モデルを作成した。

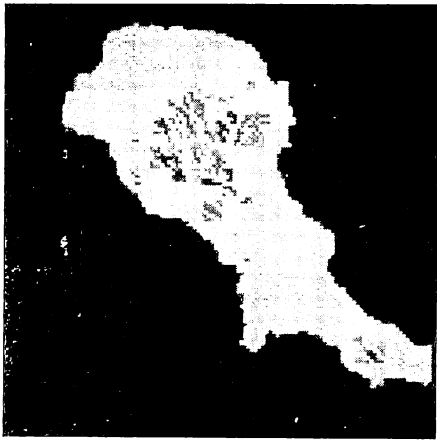


図-5 計算対象とする那珂川の地形モデル

b) 1k-FRM-event モデルの構造

本研究で用いた 1k-FRM-event では、図-6 ように流域地形を構成する要素として、雨水が地表面を流れる際の斜面、そして河川部分を表す河道がある。モデルによる計算では斜面、河道ともに雨水の地下への浸透を想定していない。そこで地下浸透を考慮するため、メッシュ毎の降雨量に流出率を掛けて有効降雨量 (実際に流出する降雨量) を算定し、それを入力降雨量とした。

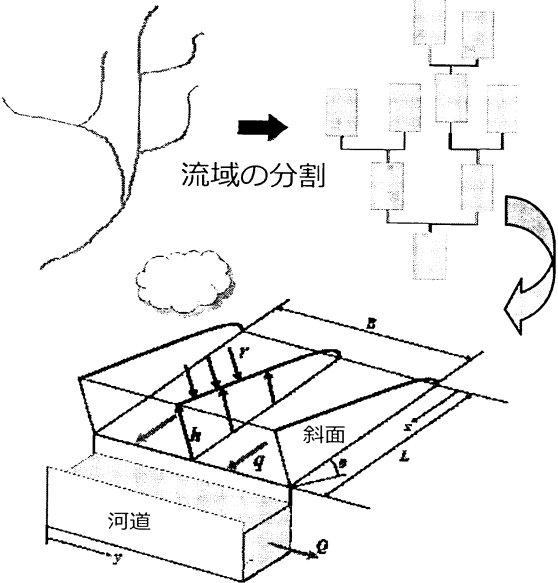


図-6 分布型流出モデルの概念図

c) 流出モデルの構成

斜面、河道における雨水の流れは kinematic wave モデルで表現されている⁸⁹⁾¹⁰⁾。図-6 に示すように、地表面での流れは広幅矩形断面水路を流れる薄層流と考えることができる。単位幅流量を q ，斜面から垂直に測った水深を h ，斜面勾配を θ ，斜面におけるマンニングの粗度係数を n ，斜面に垂直に与えられる降雨強度を r とすると，斜面における kinematic wave 式は以下ようになる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \quad , \quad q = \alpha h^m \tag{1}$$

$$\text{ただし } \alpha = \frac{\sqrt{\sin \theta}}{n} \quad , \quad m = \frac{5}{3}$$

河道における kinematic wave 式は，広幅矩形断面水路を想定し，流量を Q ，通水断面積を A ，河床勾配を i_0 ，河道におけるマンニングの粗度係数を n_0 ，河道幅を B ，河道に沿った距離 y での斜面下端の単位幅流量 q_L とすると以下ようになる。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial y} = q_L \quad , \quad Q = \alpha_a A^m \tag{2}$$

$$\text{ただし } \alpha_a = \frac{\sqrt{i_0}}{n_0} \left(\frac{1}{B} \right)^{2/3} \quad , \quad m = \frac{5}{3}$$

図-6 のように分割された流域を，河道を通して接続することにより，全体の流出モデルが構成される。

この計算において推定する必要がある物理パラメータは斜面流と河道流それぞれに対するマンニングの粗度係数，そして非集水グリッドの閾値の3つである。本研究においては，次節に示す再現計算を通して物理パラメータは，斜面の粗度係数を $0.780 \text{ (m}^{-1/3}\text{s)}$ ，河道の粗度係数を $0.033 \text{ (m}^{-1/3}\text{s)}$ ，非集水グリッドの閾値を 320 とした。

(2) 過去の洪水の再現計算

本研究では，過去の洪水再現計算にあたって時間降水量データとして 5km あるいは 2.5km メッシュ単位で整備されたレーダー・アメダス解析雨量¹¹⁾を用いた。解析雨量ではアメダス雨量計では把握できないような領域の雨量を推定しており，分布型流出モデルで解析雨量を利用することにより降水の局地性を考慮した河川流量を再現できると考えられる。再現計算としては表-4 の洪水事例の再現を試みた。洪水の再現計算を行った結果を表-5，図-7 に示す。流出率については流域の土地利用を考慮した値を設定し，時間によらず一定とした。また，流量の算出点は計画水位等が定められている小口，野口，水府橋とした(図-1, 表-4)。

表-4 対象とした洪水イベントの各水位 (m)

		小口	野口	水府橋	成因
	指定水位	4.00	2.50	3.00	
	警戒水位	5.00	3.50	4.00	
	計画水位	9.550	7.371	8.152	
最高水位	1998. 8.25-9.4	5.87	5.00	8.43	停滞前線
	1998. 9.14-18	4.17	3.40	6.80	台風5号
	1999. 7.11-17	4.83	4.10	7.69	停滞前線
	2001. 9.8-15	4.27	2.79	6.13	台風15号
	2002. 7.8-15	5.25	4.29	8.07	台風6号

表-5 再現計算による観測ピーク流量との合致性

	小口	野口	水府橋
1998. 8.25-9.4	-220m³/s	○	-550 m³/s
1998. 9.14-18	+600m³/s	+380m³/s	○
1999. 7.11-17	+500 m³/s	○	○
2001. 9.8-15	○	-225 m³/s	-311 m³/s
2002. 7.8-15	+755 m³/s	○	+281 m³/s

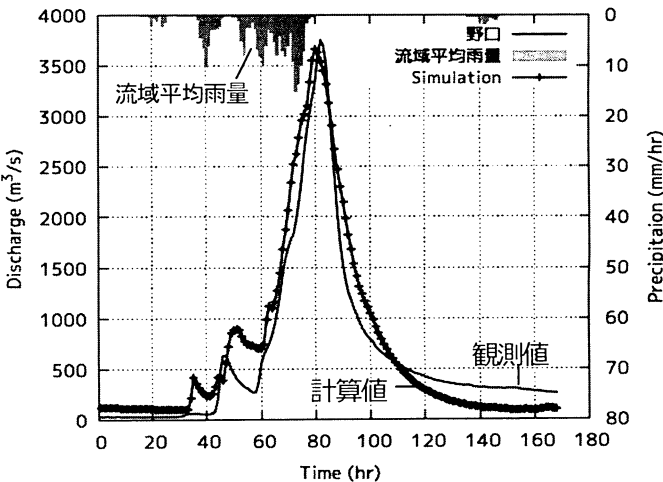


図-7 2002,7.8-15洪水イベントの再現計算(野口)

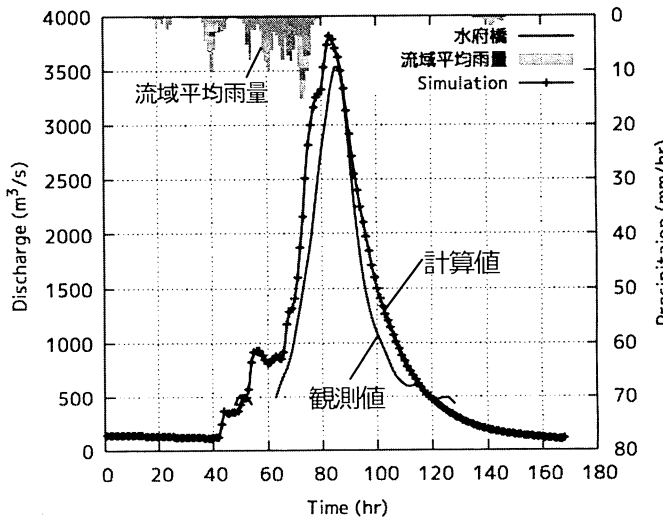


図-8 2002,7.8-15洪水イベントの再現計算(水府橋)

過去の洪水の再現計算では，図-7 の 30 時間目から 60 時間目までように流量の立ち上がりの再現は十分でないことが多かった。また，ピーク流量後の流量逓減がうま

く再現できない場合も多かった。これらの原因は流出率の設定と、モデルでは雨水の地下浸透を考慮していないため全流出成分のうち、表面流出しか表現していないことによるものだと考えられる。しかし、実際の洪水の再現計算では、表面流出のみを考慮している流出モデルでも図-7のようにピーク流量の算定は可能である。表-5では、ピーク流量について計算値から観測流量の値を引いた結果をまとめた。計算値と観測流量のピーク流量の差が $200\text{m}^3/\text{s}$ 以下の結果は丸印で示した。同一の物理パラメータで計算した結果であり、それぞれ観測値との差が見られるが、5 つすべての洪水を一番よく表現できたので、この結果を算定した際の物理パラメータを用いて那珂川の降雨流出モデルとした。

(3) 将来予測結果を用いた流量計算

GCM 出力結果ごとに流域平均日雨量を整理し、各出力結果 20 年間の中で最大の流域平均日雨量を記録した日の日雨量を用いて、降雨流出計算を行った (図-9)。

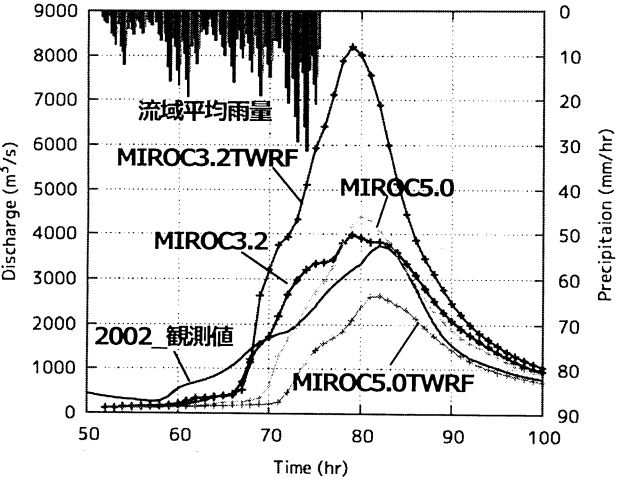


図-9 各モデルの最大日雨量を用いた流量 (野口)

図-9 では、MIROC3.2TWRf の最大日雨量を用いた場合、現行の治水計画である安全度 1/100 として設定されたピーク流量 $8500\text{m}^3/\text{s}$ と同等な流量が算出された。

(4) 将来気候の 100 年確率雨量を用いた流出計算

各 GCM の流域平均日雨量を整理し、年最大日雨量 20 年間分を用いて極値統計を行い、各 GCM の 100 年確率日雨量を求めた。その日雨量を用いて流出計算を行った (図-10)。100 年確率雨量の空間分布は各 GCM 内で最大値を記録した際の分布を参照し、時間降雨波形は 2002 年 7 月の降雨波形を各 GCM の 100 年確率日雨量の規模に拡張し、将来気候における流量計算を行った。MIROC3.2TWRf の 100 年確率日雨量を用いた場合、小口、野口、水府橋でそれぞれ現行の治水計画の計画流量である $5600\text{m}^3/\text{s}$ 、 $8500\text{m}^3/\text{s}$ 、 $6600\text{m}^3/\text{s}$ を大幅に超える流量が算出された。

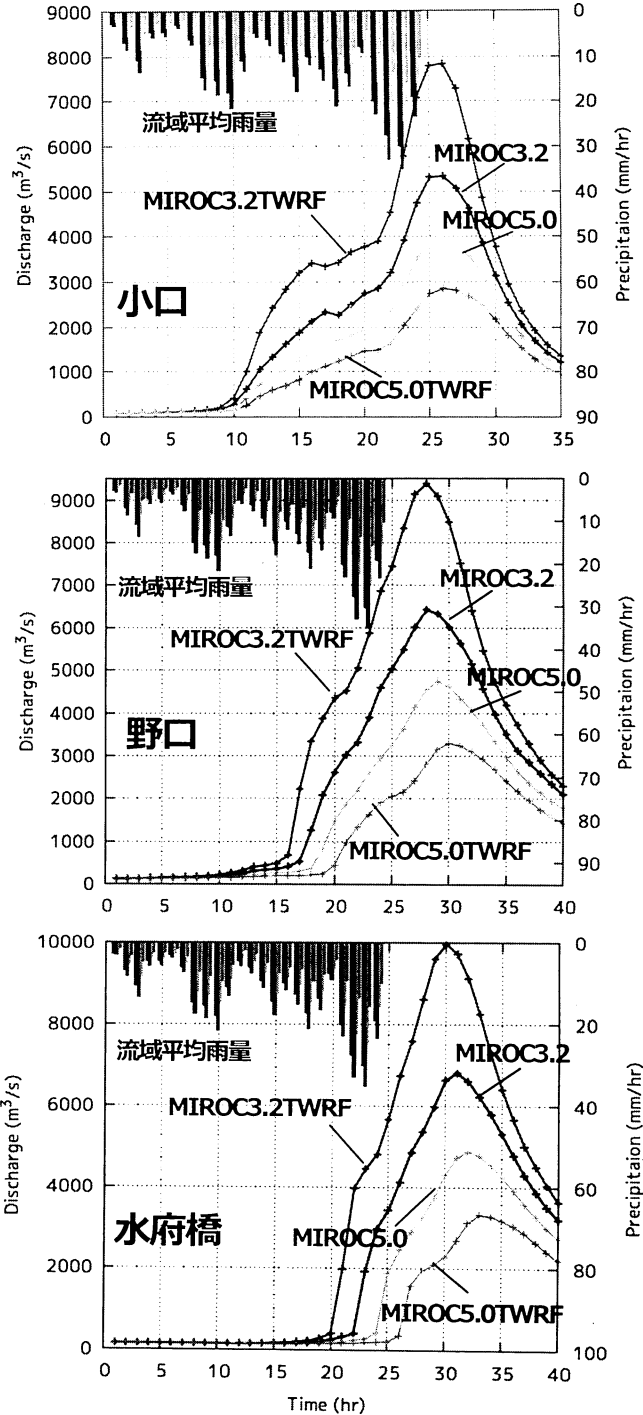


図-10 流域平均 100 年確率日雨量の降雨流出計算

4. 結論

以下に本研究の結論を述べる。

- ① 全球気候モデルによる将来気候予測では、那珂川流域で降雨変化が最も大きい地点で、過去 50 年間の観測値よりも $50\text{mm}/\text{day} \sim 100\text{mm}/\text{day}$ 程大きい年最大降雨水量を記録する機会が増加すると推定された。一方で、気候モデルによっては、過去 50 年間の観測値と同程度の降雨量を予測したものもあった。

- ② 那珂川における降雨流出モデルを構築し、過去の洪水を再現したところ、洪水時のピーク流量を再現することができた。この那珂川における降雨流出モデルに対して全球気候モデルの将来降雨予測データを用いることで将来の河川流量を算定した。その結果、那珂川が氾濫した 1998 年 8 月の洪水規模をはるかに超える洪水が起こる可能性が示唆された。一方、将来予測降雨が最も少ない MIROC5.0TWRF の出力結果を用いると、より規模が小さい 2002 年洪水の観測ピーク流量には至らなかった。
- ③ 将来気候における 100 年確率日雨量を用いた流出解析では、現行の計画洪水規模を超えるケースからそれ以下のケースまで、気候モデルによって洪水流量に大きな差が生じた。最大の洪水流量を与える MIROC3.2 の結果では、現行の治水計画規模を越えて洪水リスクが高まると考えられる。
- ④ こうした将来予測の差は、現在の気候モデルの不確実性に因るものである。この不確実性には、全球気候モデル自体の不確実性、地域気候モデル（ダウンスケール）の限界、100 年確率の豪雨と言った極端現象の予測に関する不確実性といった異なる要因が重なっている。
- ⑤ 以上のように、気候モデルの出力には不確実性があるため、その出力を直ちに河川計画に反映させるのは難しいと言える。この不確実性を狭めるためには、気候モデルやダウンスケール手法がさらに改善される必要がある。また、気候予測の不確実性を河川計画にどのように取り入れるか、その考え方や方法の検討も今後重要である。

謝辞：本研究では将来気候予測に関して、環境省環境研究総合推進費（S-8）プログラムの気候シナリオ、気候モデルによる予測結果を利用させていただきました。ここに記して謝意を表します。また、気象データを提供して下さった（財）気象業務支援センターの皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 東 博紀・大楽浩司・松浦知徳：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, 水工学論文集, 第 50 巻, pp.205-210, 2006.
- 2) 小林 健一郎：極端気象による洪水災害の統合的シミュレーションとリスク分析, 京都大学学術情報リポジトリ博士論文, 2010. <http://hdl.handle.net/2433/120906> (2013.1.30)
- 3) 花崎直太・高橋潔・脇岡靖明：日本の温暖化影響・適応策評価のための気候・社会経済シナリオ, 環境科学会誌 25(3), 223-236, 2012.
- 4) NCSU, Water Quality Group, National Nonpoint Source Monitoring Program, Tech Note 6 : Statistical Analysis for Monotonic Trends, http://www.bae.ncsu.edu/programs/extension/wqg/319monitoring/TechNotes/tech_note6_trend_analysis.pdf (2013.1.30)
- 5) 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・水資源学会誌第 17 巻 4 号, pp.343-353, 2004.
- 6) 京都大学工学研究科 都市環境工学専攻 水文水資源分野：1 K-FRM-event (A distributed flow routing model for river discharge simulation), <http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/products/1K-DHM/1K-DHM.html> (2012.11.5)
- 7) WWF : HydroSHEDS (Hydrological data and maps based on Shuttle Elevation Derivatives at multiple Scales), <http://hydrosheds.cr.usgs.gov> (2012.11.6)
- 8) 椎葉充晴・立川康人・市川温, 例題で学ぶ水文学, 森北出版株式会社, pp.78-132, 2010.
- 9) 立川康人・滝野晶平・市川温・椎葉充晴：地球温暖化が最上川・吉野川流域の河川流況に及ぼす影響について, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.475-480, 2009.
- 10) 滝野晶平・立川康人・椎葉充晴・山口千裕・萬和明：地球温暖化に伴う日本の河川流経変化の推計, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.475-480, 2010.
- 11) 気象庁：レーダー・アメダス解析雨量 CD-ROM, 1988-2011.