気候変動に伴うわが国の大規模河川下流域の浸水氾濫リスクの将来予測

Estimation of the future flood and inundation risk on Japanese major rivers' basins caused by climate change

横木 裕宗[1*]・桑原 祐史[2]・塙　尚幸[3]・郡司 美佳[4]
戸村 達也[5]・平山　歩[6]・三村 信男[1]
Hiromune YOKOKI[1*], Yuji KUWAHARA[2], Naoyuki HANAWA[3], Mika GUNJI[4],
Tatsuya TOMURA[5], Ayumu HIRAYAMA[6] and Nobuo MIMURA[1]

[1]茨城大学 広域水圏環境科学教育研究センター・[2]茨城大学 工学部都市システム工学科・[3]五洋建設(株)
[4]東北大学大学院 環境科学研究科・[5]日本水工設計(株) 東京支社第三技術部
[6]パシフィックコンサルタンツ(株) 情報事業本部
[1]Center for Water Environment Studies, Ibaraki University
[2]Department of Urban and Civil Engineering, Ibaraki University
[3]Penta-Ocean Construction Co., Ltd.
[4]Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University
[5]Nippon Suiko Sekkei Co., Ltd.
[6]Disaster Management & Maintenance System Department, Pacific Consultants Co., Ltd.

摘　要

気候変動に伴う降雨量変化によって、河川下流域では、洪水に伴う浸水・氾濫の危険性が高まることが危惧されている。そのため、被害の影響を低減させてゆくため計画的な適応対策を講じてゆくことが重要となる。本研究では、対応策の策定に先立つ基本的情報を提供するとともに、一般的な洪水・氾濫モデルを用いて、将来の洪水・氾濫リスクを評価した。まず、日本全国を対象とした既往の洪水・氾濫解析に関する業務とそのプロセスを整理するとともに、被害の要素を把握するために用いる地理情報の整備状況を整理した。これらの事前情報をもとにして、将来の洪水流量の推定に気候シナリオの出力と応答関数を用い、茨城県の那珂川および久慈川流域の洪水・氾濫の将来予測を行った。その結果、将来の洪水流量はあまり変化せず、最大浸水面積の大きな変化は見られなかったが、浸水面積の増加速度が変化し、最大浸水時間が増加することが分かった。

キーワード：河川氾濫、気候変動、降水量、地球温暖化、地理情報システム
Key words：river flood risk, climate change, precipitation, global warming, geographic information system

1. はじめに

近年、地球温暖化による気候変動に伴い、世界各地で異常気象が発生し国際的な問題となっている。このような気候変動に関して科学的見地から評価を行うIPCCの第4次評価報告書では、現在までの気温上昇、海面上昇を示すとともに、今後も気温や海面が上昇することが予測されている。さらに、大雨の頻度や熱帯低気圧の活動度が増加する可能性が高いことも示されている[1)]。わが国においても、降水量や降水パターンの変化により洪水や渇水のリスクが高まることが予想され、将来の洪水や渇水のリスクを評価する研究がいくつかなされている[2), 3)]。これらの研究によると、将来は豪雨が発生する確率が高くなり、洪水のリスクが高まることが予測される。

そこで本稿では、まず日本全国を対象とした既往の洪水・氾濫解析に関する業務とそのプロセスを整理する(2章)とともに、被害の要素を把握するために用いる地理情報の整備状況を整理した(3章)。次に、茨城県の那珂川および久慈川を対象として、既往の降雨量・流量の観測データから過去数十年間の降雨、流量の変化を明らかにするとともに、気候シナリオデータと線形応答関数法を用いて将来の流量を予測した(4章)。そして、その結果を用いて将来の降水量の変化に伴う洪水時の河川下流域の氾濫・浸水リスクの変化を分析した(5章)。

受付：2009年4月29日，受理：2009年6月9日
* 〒316-8511　茨城県日立市中成沢町4-12-1，e-mail：yokoki@mx.ibaraki.ac.jp

2. 全国を対象とした河川氾濫域推定および地理情報

2.1 全国を対象とした河川氾濫域推定の代表的事例

日本全国を対象とした河川氾濫域の情報として浸水想定区域図があげられる。図の作成に際しては、統一された方法に基づき、氾濫原・地盤高さ・破堤氾濫条件等、河川毎の個別の特性を盛り込み、浸水想定区域を把握することが提案されている[4)]。この方法では、氾濫開始水位は「危険水位」による。危険水位は「洪水により相当の家屋浸水等の被害を生ずる氾濫の起こる恐れがある水位」とされており、河川断面毎に原則として計画高水位が用いられ、河川整備状況によっては現況の堤防高や家屋隣接の特殊性に応じた水位設定の必要性も指摘されている[4)]。水理解析手法については、大河川では準二次元不等流計算が基本とされている。計算の条件では出発水位・粗度係数・死水域・境界混合係数・堰上げ・河床波・湾曲による水位上昇・支川合流による水位上昇等を考慮に入れた現況河道流下能力算定条件を用いることが指摘されている。そして、現況河道における *H-Q* 式を作成し、破堤氾濫開始流量を求めることになる。氾濫想定地点は、対象洪水流量が氾濫開始流量に達した全ての危険箇所で氾濫させた場合と同等の浸水区域となる必要最小限の地点を想定地点とすることが定められている[4)]。最終的に、氾濫シミュレーションを行うことになるが、浸水位は国土地理院発行数値地図 50 m を利用することで求め、浸水深は 0.5 m、1.0 m、2.0 m および 5.0 m を区分値とした 5 段階で設定することが目安とされている[4)]。

以上の計算は、主として 1 級河川に該当する大河川を想定した浸水想定区域の算定方法であるが、国土交通省では主要な中小河川に対しても浸水想定区域図作成を進め、その結果を洪水ハザードマップ等に展開し、住民への周知を通して注意を喚起する活動を行っている[4)]。大河川に対する方法と大きく異なる点は、氾濫流を二次元平面流と考える方法とは別に、流下型氾濫または貯留型氾濫といった簡便な手法による氾濫解析を盛り込んでいる点である[5)]。また、地盤高さの情報として、航空レーザ測量データの援用もプロセスに加えられている[5)]。

一連の作業は、最終的に洪水ハザードマップの作成と市民への提示、というプロセスで完結する。洪水ハザードマップの作成法に関しても国土交通省で手引きが作成されており、被害の形態の区分や避難場所の選定、そして予報の伝達法等を整える際に考慮する事項が整理されている[6)]。洪水に対する避難計画とそのプロセスは地域により様々な形態になることが想定できるため、市町村地域防災計画との整合や支援に関しても必要となるプロセスが整理されている[6)]。そして、現在、公開されているハザードマップを集約した洪水ハザードマップ集も広く一般に販売・公開されている状況にある[7),8)]。

2.2 全国を整備対象とした代表的な地理情報

洪水・氾濫の影響を低減させるためには、影響を受ける要素をあらかじめ把握しておくことが重要となる。日本全国の代表河川を対象とする本研究では、流域毎の評価結果を同一の尺度（情報作成年、空間分解能、情報項目等）で表現されたデータを用いることが望まれる。これを満たすものとして、国土数値情報、国勢調査データ（以下、人口データと記述）に注目できる。国土数値情報は、全国総合開発計画の基礎データとして利用するために、1974 年に国土庁が中心となり整備開始したデータである[9)]。このうち、特に 1/10 細密土地利用データが重要である。各種の土地利用データは、官公庁および地方公共団体で比較的高い空間分解能で作成されてはいるものの[10)]、作成主体の行政単位による限界や高空間分解能ゆえに限られた地域を対象としたものが多く、現状、日本全国を同一の分類項目で網羅した土地利用データはこれが唯一である。作成年のみで議論するならば、MODIS 等、衛星画像より作成した新しい土地被覆情報はあるものの、細密土地利用データが有する地上約 100 m メッシュと比較すると空間分解能が低い点があげられる。

国勢調査データについては、人口・世帯に関わる最も基本的なエリア統計データであり、総務省により実施されている調査統計データである。調査結果は、総務省統計局の規定する地域メッシュ（4 次：地上対応約 500 m メッシュ）での扱いが有利であり、集計データの製品を入手することができる。現状では平成 17 年調査統計が最新の情報である[11)]。氾濫解析で最も重要となる地盤高さデータは、国土地理院発行数値地図 50 m（以下、DEM と記述）に注目できる。1/25,000 地形図の等高線を利用して、地上対応約 50 m ピッチ毎にメッシュ中心の平均標高値を収録したディジタル標高データである[12)]。日本全国を対象にする際には、今後、ASTER G-DEM が 2009 年を配布開始年として準備が進められている[13)]。G-DEM は空間分解能が 30 m であり、ステレオ観測されている衛星データ（EOS-Terra/ASTER）より作成されるものであり、その効果が期待される。航空レーザ測量に基づく高解像度の DEM は、現在整備が進んでいる状態にあり、三大都市圏や重要河川流域に関してはアーカイブスを利用することができる。比較的安価に入手するものとして国土地理院発行数値地図 5 m メッシュ（標高）があり、三大都市圏および高知・福岡について利用可能である[14)]。

3. 研究対象領域と地理情報データセット

3.1 地理情報データセットの構築

対象とする河川流域として、久慈川、那珂川、利根川、荒川、天竜川、吉野川、筑後川、淀川、木曽川、

信濃川の10水系を選定した。流域選定に際しては、河川延長や流域面積が大きく地域を代表する河川であること、下流域に平野部(低平地)が広がっていることなどを主に考慮した。加えて、過去に激甚な氾濫実績を有する河川である点も考慮に入れた。この全10河川を対象として、国土数値情報「流域非集水域」データを使用し(以下、流域データと記述)、整備した地理情報より河川流域に該当するデータを抽出することで、現在までの研究で整備してきた流域データセットを継続して更新・編集してきた[15]。**表1**に流域データセットの項目を示す。なお、信濃川については、浸水・氾濫の解析は新潟県域で十分に低平地を網羅できることを考慮し、県内に限定したデータ作成をした。GISで扱うデータは、ラスタ形式とベクタ形式の2種類に大別される。本研究では、土地利用および標高をラスタ形式で整備することとし、その他のデータについては属性情報の利用を念頭に置きベクタ形式とした。また、測地系はJGD2000またはWGS84とし、位置整合が図れるように加工と編集処理を進めた。

3.2　海面上昇による潜在的な氾濫域の推定

(1)想定外力

上述の流域データセットを用いて、桑原らは氾濫域の推定を行っている[15]。この研究では、茨城大学工学部都市システム工学科水圏環境研究室において算定された、潮位および高潮の既往最大値を考慮して作成されたデータ[16]を使用した。具体的には、「潮位、高潮、海面上昇量」の3つを考慮に入れて、IPCCによる本世紀末の最大海面上昇量である59 cmを海面上昇量とした「潮位データ＋高潮データ＋SLR」の海面高さ以下の標高の領域を、将来予測に基づく氾濫域とした[15]。

(2)氾濫域の算定手順

氾濫域を求める際に、**図1**に示す手順に従い、海面以下の領域を探索させた。この方法をレベル湛水法と記述した。標高データは、データベースに含まれるDEM(50 mメッシュ)の下流部を切り出して使用した。海面高さデータは1分メッシュで整備されているため、DEMのメッシュサイズ約50 mと合わせると、若干の位置ずれが生じる。この点への対処は、**図1**に示す「水域の確認」および「陸域に水域が隣接しているか確認」の処理ステップで行った。また、氾濫域の探索回数は、「繰返し回数」を領域全体に対して十分に探索したか否かという点をDEMで確認し、試行検討に基づき設定した。

氾濫域の高精度推定を進める際には、河川水の影響や、堤防等防護施設の分布、地表面・建築物の粗度を考慮に入れた解析が必要とされる。この点について桑原らは、気候変動に伴う海域からの氾濫危険性を把握する、という観点から、海面高さおよび地形効果のみを考慮に入れた潜在的な氾濫域算定を進めた[15]。なお、現状のデータ分析では、堤防等を考慮していないために、荒川近傍、木曽川近傍、淀川近傍、筑後川近傍等の一部において、満潮時に氾濫域が見られた。

以上の方法と前提に基づき、対象河川の下流域を対象とした氾濫域算定を行い、例えば、**図2**に示す那珂川下流、**図3**に示す久慈川下流等の氾濫域を導いた。これらの図では、JGD2000(世界測地系)に基づく行政界、海岸線、河川水域(図中でkasen-jgdと表記)も示している。その後、氾濫域に該当

表1　本研究で構築した流域データセット.

大項目	データNo.	小　項　目
指定地域	R-1	リゾート法指定公園
沿岸域	R-2	海岸利用施設
	R-3	漁港
	R-4	保護水面
	R-5	低地地形分類
	R-6	治水地形分類図
	R-7	沿岸域自然公園
土地関連	R-8	土地利用
	R-9	衛星画像(EOS-Terra/ASTER)
国土骨格	R-10	鉄道
	R-11	道路密度・道路延長
施　設	R-12	公共施設
	R-13	空港
	R-14	発電所
	R-15	文化財
水　文	R-16	湖沼
	R-17	流域非集水域
人　口	R-18	世代別人口
	R-19	産業別人口
	R-20	暮らしやすさ評価スコア
標　高	R-21	標高

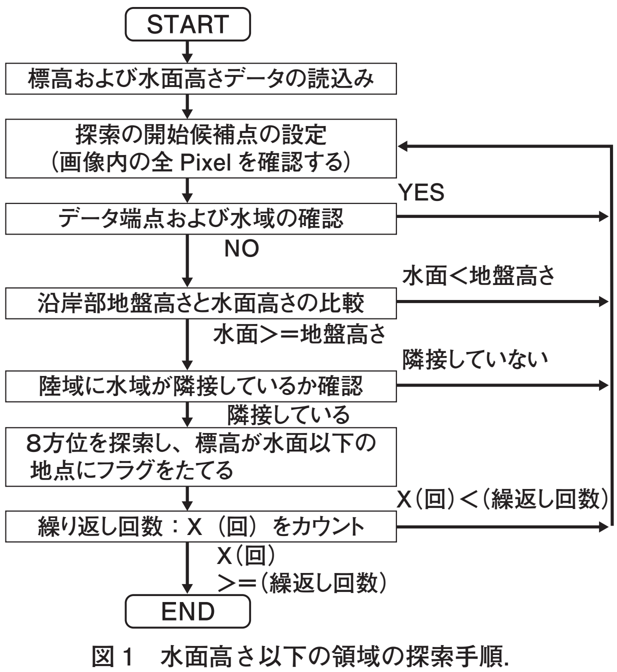

図1　水面高さ以下の領域の探索手順.

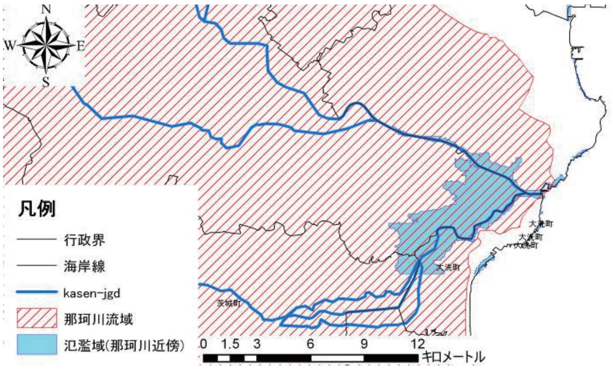

図 2　氾濫域および流域データ(那珂川).

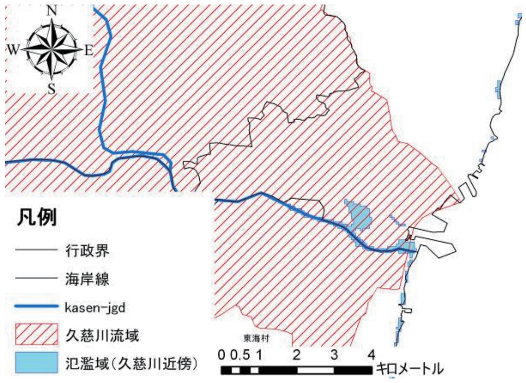

図 3　氾濫域および流域データ(久慈川).

表 2　氾濫域内の土地利用集計結果.

流域名 / 土地利用	久慈川	那珂川	利根川	荒川	信濃川	天竜川	木曽川	淀川	吉野川	筑後川
田	0.17	13.62	181.70	0.00	21.19	0.00	12.95	5.03	41.34	196.69
その他農用地	0.03	1.16	4.59	0.22	1.92	0.00	1.33	0.13	9.28	2.47
森林	0.00	0.08	0.78	0.05	0.00	0.00	0.02	0.47	1.06	0.15
荒地	0.00	0.05	3.04	0.06	0.17	0.00	0.31	0.04	0.03	0.50
建物用地	0.03	1.40	19.98	79.63	27.52	0.00	4.72	203.39	21.87	50.76
幹線交通用地	0.09	0.14	1.42	7.07	4.72	0.00	0.78	25.98	1.50	0.27
その他の用地	0.01	0.41	6.05	7.13	7.93	0.00	1.16	26.60	8.28	3.82
河川地及び湖沼	0.39	3.10	240.58	24.33	8.02	1.59	31.51	28.53	23.46	30.70
海浜	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.06	0.06	0.00	0.17	0.00
海水域	0.00	0.00	0.04	0.18	0.00	0.02	0.31	0.27	0.11	0.00
ゴルフ場	0.00	0.00	0.88	2.05	0.00	0.00	0.00	0.52	0.15	0.76

注 1)単位：km^2，注 2)利根川は参考値として掲載

表 3　氾濫域内の人口.

	総人口
久慈川	1.0
那珂川	17.6
利根川	145.7
荒川	1774.0
信濃川	317.1
天竜川	3.9
木曽川	50.1
淀川	3616.1
吉野川	163.8
筑後川	275.6

単位：(千人)

する箇所の土地利用を**表 2** に示す形で集計するとともに、**表 3** に示す形で人口を集計した。**表 2** より、那珂川、久慈川流域の氾濫域は主に農業用地、荒川、淀川では都市域が主な氾濫域となり、信濃川、吉野川、筑後川では農業用地と都市域が主たる氾濫域となることが分かった。いくつかの例外はあるものの、本研究で対象とした流域では、氾濫域の特徴として、「農業用地」・「都市域」・「農業および都市域」の3つに大まかに分類できることが示された。

4. 那珂川・久慈川における洪水流量の将来予測

本研究では、洪水流量の将来予測および氾濫・浸水の将来予測について、上で述べた 10 水系のうち那珂川と久慈川を対象に行った。これは、予測計算では雨量、流量の長期間のデータが必要になることと、既往の研究[17),18)]によりこの 2 つの河川ではこれらのデータをすでに取得していることによるものである。

4.1　降雨量・流量観測データの解析

那珂川、久慈川は、茨城県、栃木県、福島県を流域とした一級河川であり、下流域には水戸市や日立市といった地域の中核をなす都市がある(**図 4**)。これらの流域では昔から洪水の被害に見舞われており、近年では那珂川において 1986 年、1991 年、1998 年、久慈川においては 1986 年、1991 年に水害が発生した。

平山ら[17)]は、流域における観測データ[19)]からできるだけ長期間のデータを取り出し、那珂川・久慈川それぞれの観測所における日降雨量、日流量の年最大値を取り出し変化傾向を調べた(**図 5**、**図 6**)。

図 5(a)から、那珂川の板室観測所では年最大日降雨量は増加傾向で、変動が大きく、年降雨量はほとんど変化がないことがわかる。久慈川の大子観測

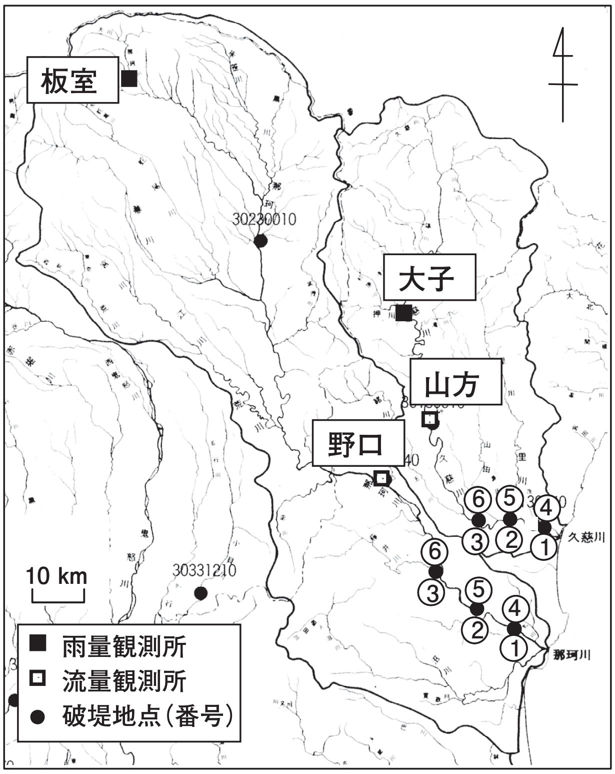

図４　那珂川・久慈川の流域図.

所では、年最大日降雨量は年変動が大きいが、やや増加傾向で、年降雨量はほとんど変化がない（**図５(b)**）。また、**図６**は、年最大日流量と年平均日流量の経年変化を示している。**図６(a)**から那珂川では年最大日流量は増加しているものの緩やかで、年平均日流量はほとんど変化していないことがわかる。一方、**図６(b)**から久慈川では、年最大日流量は変動も大きく、明らかな増加傾向であることがわかる。しかし、年平均日流量は年変動が大きいものの長期的な傾向はほとんど変化がないことがわかる。

以上から、那珂川では年間で雨の降る総量は変化していないが、短期間に集中して雨が降る傾向がみられる。それに比べて日流量は増加が小さいので、ダムや遊水池などによる流量制御がないとすると小規模な洪水が発生していることになり、このことは洪水リスクが増加に繋がると考えられる。久慈川では降雨には大きな変化が見られないが、日流量が増加している。流域の流出特性が変化したものと考えられるが、今後の検討課題である。

4.2 線形応答関数法を用いた洪水流量の将来予測

横木らは、将来の洪水流量を予測するために、流域の降水量と流量の関係を求めた[18]。ここでは、降

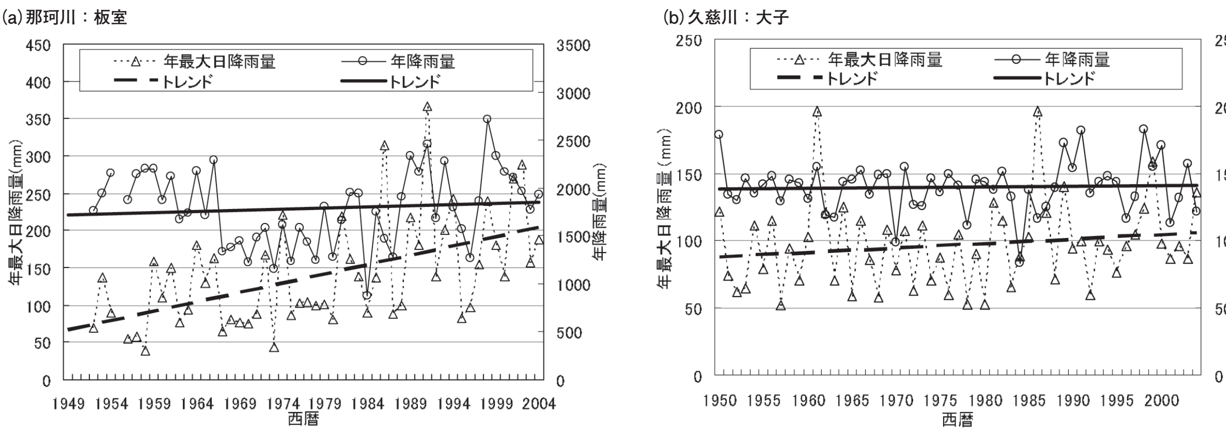

図５　年最大日降雨量と年降雨量の経年変化（(a)那珂川，(b)久慈川）.

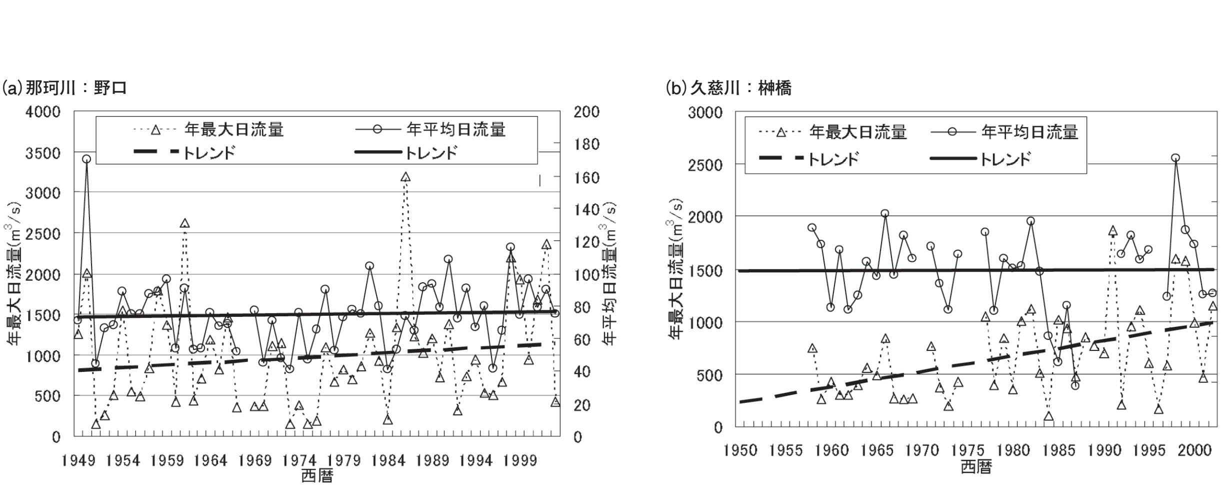

図６　年最大日流量と年平均日流量の経年変化（(a)那珂川，(b)久慈川）.

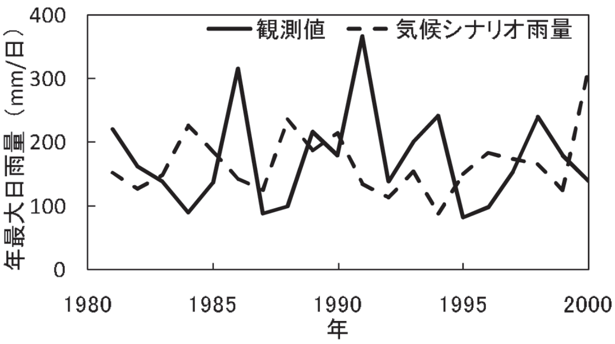

図 7　年最大日雨量の観測値と気候シナリオの出力（那珂川；板室）.

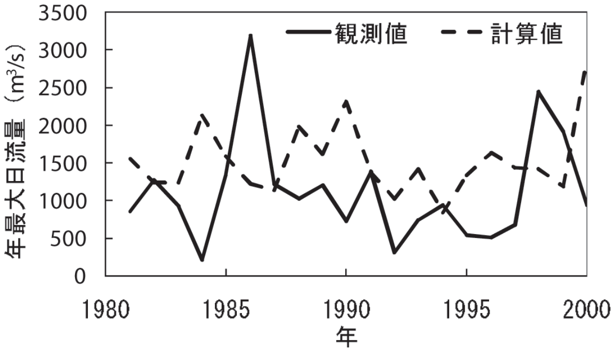

図 8　年最大日流量の観測値と計算値（那珂川；野口）.

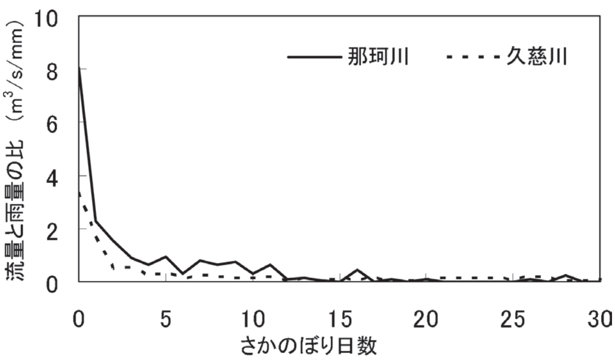

図 9　調整後の平均応答関数.

雨量と流量の関係が線形応答で表されると仮定した。線形応答モデルでは、ある地点の降雨量 $r(t)$ と流出量 $y(t)$ の関係は式(1)のように表される[20]。

$$y(t)=\int_0^{\infty} h(\tau)\, r(t-\tau)\, d\tau \qquad (1)$$

ここで、$h(\tau)$ は線形応答関数、τ は現在時刻を原点として過去にさかのぼる時間である。なお、応答関数はフーリエ変換法を用いて求めた。

本稿では、那珂川の解析では、降雨量データとして板室雨量観測所の日雨量データ、流量データとして野口水位流量観測所の日流量データを用いた。また、久慈川の解析では、大子雨量観測所の日雨量データと山方水位流量観測所の日流量データを用いた（**図 4**）。それぞれの河川において、1981 ～ 2000 年の日降雨量データと日流量データを収集し、各年ごとに応答関数を計算した。得られた 20 通りの応答関数を平均化し 1 つの平均応答関数を求めた。そして、平均応答関数を用いて観測日雨量の代わりに、気候シナリオによる日降雨量データから、日流量を推定した。

本稿で用いた気候シナリオは、気象庁気象研究所で開発された気候統一シナリオ第 2 版[21]である。このシナリオでは、1981 ～ 2000 年、2031 ～ 2050 年、2081 ～ 2100 年の 3 期間の様々な気候データが収められており雨量データは日雨量のみが収録されている。そこで本稿では日雨量データを用いた。

図 7 に、板室観測所における観測日雨量と気候シナリオの出力（最寄りのグリッド）から求めた年最大日雨量を示した。本稿で用いた気候シナリオデータに限らず一般に気候モデルからの出力値は、個々の気候値より平均値や分散など統計値の方が信頼度が高い。**図 7** を見ると、各年での最大値は異なっているが 20 年間通してみると年最大値の最大値はほぼ等しくなっているので、統計的には、現在をほぼ反映しているものと解釈できる。そこで、平均応答関数の絶対値を調節して、気候シナリオによる日雨量データから推定した年最大日流量の 20 年間の最大値が、観測データの年最大日流量の 20 年間の最大値とほぼ等しくなるようにした。**図 8** に、那珂川の野口流量観測所における年最大日雨量と調整された平均応答関数による推定結果を示した。このとき用いた応答関数を**図 9** に示した。

本稿では、この応答関数を用いて気候シナリオの日降雨量から、日流量を推定した。**表 4** に、推定された将来の年最大流量の 20 年間最大値を示した。ここで、観測流量から求めた値を現在（2000 年）の洪水流量、2031 ～ 2050 年のデータから求めた値を将来 1（2050 年）の、2081 ～ 2100 年のデータから求めた値を将来 2（2100 年）の洪水流量として表示している。また、**表 4** の値を洪水流量として、河川周辺の氾濫計算に用いた。

表 4　現在（観測値）および将来の日洪水流量の最大値.

河川名	洪水流量（m^3/s） 現在	将来 1	将来 2
那珂川	3190	2720	3230
久慈川	1390	1270	1340

（現在 ：1981 ～ 2000 年の観測値,
将来 1：2031 ～ 2050 年の推定値,
将来 2：2081 ～ 2100 年の推定値）

5. 那珂川・久慈川流域における将来洪水流量を用いた氾濫解析

本研究では、前節で求めた那珂川、久慈川における洪水流量の将来予測結果を用いて、洪水時の氾濫・浸水の将来予測を行った。以下、予測方法とその結果を述べる。

5.1　解析方法

横木ら[18]では氾濫・浸水解析に、2次元不定流モデル[22]を用いた。基礎方程式は式(2)～(4)に示すように、連続の式とx、y方向の運動方程式からなる。

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial M}{\partial x}+\frac{\partial N}{\partial y}=0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t}+\frac{\partial (UM)}{\partial x}+\frac{\partial (VM)}{\partial y}=-gh\frac{\partial (h+z_b)}{\partial x}-\frac{gn^2U\sqrt{U^2+V^2}}{h^{1/3}} \tag{3}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\frac{\partial (UN)}{\partial x}+\frac{\partial (VN)}{\partial y}=-gh\frac{\partial (h+z_b)}{\partial y}-\frac{gn^2V\sqrt{U^2+V^2}}{h^{1/3}} \tag{4}$$

ここで、hは水深(m)、M、Nはx、y方向の流量フラックス(m^2/s)（＝Uh、Vh）、U、Vはx、y方向の断面平均流速(m/s)、gは重力加速度(m/s^2)、z_bは地盤高(m)、nはManningの粗度係数($m^{-1/3}s$)をそれぞれ表している。また、t、x、yはそれぞれ時間、空間(平面)座標を表している。

数値計算には差分法を用い、変数の配置にはstaggered格子を、時間発展計算にはleapfrog法を用いた。本研究では、河道内も氾濫域と同様の計算を行っている。計算格子にはそれぞれ不透過、氾濫域、河川、海という情報を与え、各格子間の水のやり取りを制御した。氾濫水の先端条件としては閾値法[22]を用い、水深が閾値水深以下であれば、その格子からの流出はないとした。また、地盤高が急変する地点では式(5)、(6)に示すような近似式[23]を用いた。

$$M \text{ or } N=0.544h_h\sqrt{gh_h} \quad \text{(段落ち)} \tag{5}$$

$$M \text{ or } N=0.35h_h\sqrt{gh_h} \quad \text{(遡上)} \tag{6}$$

ここで、h_hは上流側の水位と上下流側のどちらか高い方の地盤高との差(m)を表している。

5.2　解析条件

那珂川では野口水位流量観測所から河口までを、久慈川では山方水位流量観測所から河口までを計算領域とし、破堤地点を仮定し、周辺地域の氾濫を計算した。

破堤地点は、那珂川の河口から10 km、20 km、30 kmの地点の右岸側(それぞれ地点1、2、3)、および左岸側(それぞれ地点4、5、6)に、そして、久慈川の河口から5 km、10 km、15 km地点の右岸側(それぞれ地点1、2、3)、および左岸側(それぞれ地点4、5、6)に設定した(**図4**)。破堤地点を設定する際には、既往の浸水実績からは典型的な破堤地点を決定することができなかったので、本研究では実績浸水域付近を中心に河口から等間隔となるようにした。氾濫計算では、ある洪水流量に対して1地点のみで破堤するとしている。破堤地点では、堤防高さを周辺地盤高と等しく設定した。洪水に伴い、河川水位が増加し地盤高を越えると、自動的に溢水し周辺域が浸水していく様子を計算した。このような計算結果から、それぞれの破堤地点からの溢水による浸水面積が現在と将来とでどう変化するのか、また破堤地点ごとに変化するのかを解析することができる。

地盤高データは、国土地理院刊行の数値地図50 mメッシュおよび数値地図25,000(空間データ基盤)より作成したものを用いた。計算格子の大きさは、50 m × 50 mとした。格子数は、那珂川では630 × 540格子、久慈川では410 × 410格子となった。なお、用いた地盤データの空間解像度および堤防データ未入手のため詳細な河川断面を設定することができなかったので、河川断面は長方形断面とし高水敷を考慮しなかった。この際、河道内に数点ある水位流量観測所での断面地形および平均流量から、平常時に溢れないように断面を計算し、河道内全体にわたって内挿した。また、堤防高は年平均流量(2002年観測値、那珂川：90 m^3/s、久慈川：20 m^3/s)を用いた計算から求められる水深に余裕高を加えることで算定した。したがって、河川断面や堤防高は必ずしも現状を正しく反映していない。しかし、流量を変えて水面形を計算した結果、妥当な水位分布が得られたので、氾濫計算に用いる溢水量の境界条件として有効であると判断した。なお、Manningの粗度係数は、河道内で0.03 $m^{-1/3}s$、氾濫域で0.06 $m^{-1/3}s$と一定であると仮定した[24]。時間差分間隔は1.0 s、閾値水深は0.001 mとした。

氾濫・浸水計算は、**表4**に示している洪水流量の値に対して行った。計算で用いたハイドログラフは、これらの値をピークとする余弦曲線と仮定した。平常時流量から増加してピーク流量までに24時間、ピーク流量から減少して平常時流量までにさらに24時間かかるよう設定した。なお、計算は洪水開始から浸水面積が一定になるまで行うものとし、実際には72時間程度を目安にした。

また、2050年、2100年における計算では、河口の水位を海面上昇の予測値だけ上昇させた。海面上昇の予測値は、IPCCの報告[1]から読み取り、それぞれ現在からの上昇量として0.25 m、0.59 mとした。なお本研究では、河口における潮位変動および高波浪による平均水位上昇は考慮せず平均海面を用いた。これは、現在と将来において20年間の平均的な氾濫・浸水リスクを比較しようとしたことと、将来気候における波浪増大を評価できるデータが入手できなかったためである。

5.3　解析結果

(1)浸水範囲・面積

本研究[18]では、那珂川、久慈川それぞれで、**表4**で示された洪水流量と、6地点の破堤地点の組み合

表 5　最大浸水面積（那珂川）.

年	洪水流量 (m^3/s)	浸水面積 (km^2)		
		①	②	③
2000 年	3190	0.72	2.83	10.76
2050 年	2720	0.00	2.70	7.70
2100 年	3230	6.89	5.46	10.81

（①，②，③は破堤地点．河口より 10,20,30 km 右岸）

年	洪水流量 (m^3/s)	浸水面積 (km^2)		
		④	⑤	⑥
2000 年	3190	3.87	24.00	30.59
2050 年	2720	0.00	21.47	29.20
2100 年	3230	3.92	24.08	30.90

（④，⑤，⑥は破堤地点．河口より 10, 20, 30 km 左岸）

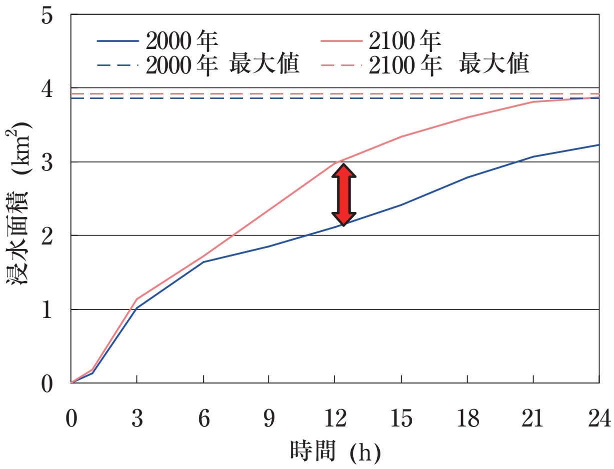

図 10　浸水面積の時間変化（那珂川，破堤地点④）.

表 6　最大浸水面積（久慈川）.

年	洪水流量 (m^3/s)	浸水面積 (km^2)		
		①	②	③
2000 年	1390	4.46	7.28	2.73
2050 年	1270	4.19	6.72	1.89
2100 年	1340	4.35	7.05	2.73

（①，②，③は破堤地点．河口より 5, 10, 15 km 右岸）

年	洪水流量 (m^3/s)	浸水面積 (km^2)		
		④	⑤	⑥
2000 年	1390	11.38	17.42	21.89
2050 年	1270	10.80	17.03	21.18
2100 年	1340	11.33	17.28	21.73

（④，⑤，⑥は破堤地点．河口より 5, 10, 15 km 左岸）

わせで浸水・氾濫計算を行った。その結果得られた那珂川、久慈川における最大浸水面積をそれぞれ**表 5**、**表 6** に示した。これらの浸水域は、既往の浸水実績やハザードマップと比較しても大きくは異なっていないことを確認している。

表 5 より、那珂川では破堤地点 1、2 において、2000 年と比較して 2100 年に浸水面積の増加が見られた。洪水流量が 40m^3/s 程度しか増加していないのに、浸水面積が著しく増加した原因としては、地形による影響や河口での海水位の上昇による影響が考えられる。

その他の洪水流量と破堤地点の組み合わせの計算では、洪水流量の増減に最大浸水面積がほぼ連動していた。定量的にみると、洪水流量があまり変化しなかったため、最大浸水面積に大きな変化は見られなかった。

最大浸水面積の変化で見ると、降雨量の変化とともに河口での水位が、浸水リスクに大きく影響していることが分かる。

(2) 浸水面積の時間変化

次に、破堤後の浸水面積が時間とともにどのように変化するかを調べた。**図 10** に、那珂川で破堤地点 4 の場合の、2000 年と 2100 年での流量条件での浸水面積の時間変化を示した。**表 5** によると、これらの条件では最大浸水面積がほぼ同じであるが、**図 10** からは、2100 年の方が、浸水域が速く拡大していることが分かる。これは、2100 年と 2000 年の洪水流量はあまり増加していないが、2100 年の計算では河口で 59 cm の海面上昇を考慮しているので、同じ流量でも溢水地点での河川水位が上昇していることになり、溢水流量が増加して、より速く浸水域が拡大していくことによると考えられる。また、総浸水面積は地形の影響を大きく受けるので、どちらの計算でも変わらないと考えられる。これらのことから、場所によっては、総浸水時間が増大することがあることを示している。

このことは、将来の洪水・氾濫リスクを議論する上で、気候変動により単に最大浸水面積のみではなく、氾濫域では湛水時間も変化する可能性があり、それらを考慮しなければならないことを意味している。

しかしながら、精度の良い洪水・氾濫計算を行うためには、時間雨量、時間流量の予測データが必要となるが、現状の気候モデルの出力では時間データまで信頼できる予測結果を得るのは難しいこともあり、本研究では日雨量データを用いるにとどまっている。実際の洪水時の流量変化は、時間・分ごとに大きく変化しており、時間データを用いて解析した場合と比較すると、ピーク流量の値や、溢水の閾値を超える時間帯、その量などが、日データでは平滑化されてしまい、合計の溢水量が過小評価されてしまうと考えられる。しかしながら、本研究で着目した、洪水流量、氾濫・浸水面積などの現在と将来との比較は有用であると考える。今後、より現実的な比較を行うために、気候モデルの改良が進められているので、その結果を受けて時間雨量を用いた予測を行いたい。また、降雨、流量データの高精度化とともに、地盤高や土地利用・被覆データの精度も向上させ、河道内および氾濫域の地形データの精度も

向上させる必要がある。

6. まとめ

本稿では、環境省地球環境研究総合推進費S-4で実施された、「気候変動に伴う河川下流域の浸水・氾濫リスクの将来予測への研究の取り組み」を紹介した。本研究では、浸水・氾濫域の地理・基盤情報の整備と予測手法の構築を鋭意進めてきた。基盤情報および手法の高精緻化の余地はまだまだ残されているものの、現時点の予測結果でも、浸水・氾濫リスクが高まっていくことが示された。今後はさらに高精度な基盤情報や気候シナリオデータに基づく予測を行うとともに、来るべき時に向けて適応策の具体的な技術的検討も行っていきたい。

謝　辞

本研究は、環境省地球環境研究総合推進費(S-4)「温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究」の支援を受けて行われたものである。また、本研究の一部は科学技術振興調整費(戦略的拠点育成)の事業のフラッグシップププロジェクト(茨城大学担当分)の一環として行われた。ここに記して感謝の意を表します。

引用文献

1) IPCC(2007)Climate *Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
2) 東 博紀・大楽浩司・松浦知徳(2006)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, 50, 205-210.
3) 和田一範・村瀬勝彦・冨澤洋介(2005)地球温暖化に伴う降雨特性の変化と洪水・渇水リスクの評価に関する研究. 土木学会論文集, 796/II-72, 23-37.
4) 国土交通省河川局治水課(2005a)浸水想定区域図作成マニュアル.
5) 国土交通省河川局治水課(2005b)中小河川浸水想定区域図作成の手引き.
6) 国土交通省河川局治水課(2005c)洪水ハザードマップ作成の手引き.
7) (社)日本損害保険協会(2002)洪水ハザードマップ集, CD-ROM.
8) (社)日本損害保険協会(2005)洪水ハザードマップ集, CD-ROM.
9) 国土交通省国土計画局参事官室, 国土数値情報ダウンロードサービス.
http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/
10) 例えば国土地理院発行数値地図5000(土地利用).
※刊行範囲は, 現状, 3大都市圏(2009.2.1).
11) 例えば総務省統計局・政策統括官(統計基準担当)・統計研修所, Webページ.
http://www.stat.go.jp/data/mesh/gaiyou.htm
12) 国土交通省国土地理院(1998)数値地図ユーザーズガイド, (財)日本地図センター.
13) ERSDACWebページ：ASTER全球3次元地形データ.
http://www.ersdac.or.jp/GDEM/J/1.html
14) 日本地図センターWebページ:数値地図5 mメッシュ(標高).
http://www.jmc.or.jp/data/5m.html
15) 桑原祐史・郡司美佳・横木裕宗・三村信男・小柳武和(2008)大規模河川下流域を対象とした海面上昇による氾濫リスク推定のための基礎的分析. 地球環境, 16, 79-86.
16) 福原直樹(2004)地理情報システムによるデータ統合と気候変動の地球規模脆弱性評価. 茨城大学修士学位論文.
17) 平山 歩・横木裕宗・三村信男(2006)那珂川・久慈川流域における洪水リスクの変遷および将来予測. 第14回地球環境シンポジウム講演論文集, 157-162.
18) 横木裕宗・戸村達也・塙 尚幸・桑原祐史・三村信男(2008)気候変動に伴う洪水・氾濫リスクの将来予測－那珂川・久慈川流域における解析. 地球環境研究論文集, 16, 87-93.
19) 日本河川協会(2007)雨量・流量年表データベース, DVD.
20) 神田 徹・藤田睦博(1982)水文学. 新体系土木工学26, 技法堂出版, 182-186.
21) 気象庁(2005)地球温暖化予測情報, 第6巻,
22) 中川 一(1999)氾濫流の解析. 水工学における計算機利用の講習会講義集, 土木工学水理委員会基礎水理部会, 43-50.
23) 東 博紀(2006)平成16年7月新潟・福島および福井豪雨災害における豪雨・洪水氾濫特性. 防災科学研究所主要災害調査40, 79-92.
24) 土木学会(1999)水理公式集, 平成11年版. 丸善.

横木　裕宗
Hiromune YOKOKI

1965年兵庫県生まれ。1991年東京大学大学院工学系研究科土木工学専攻修士課程修了。東京大学助手、茨城大学講師を経て、1998年より茨城大学広域水圏環境科学教育研究センター助教授（2007年より准教授）。専門は海岸工学で、不規則波浪場の解析や海岸地形変化の統計的解析に従事してきた。現在は、気候変動の沿岸域への影響およびその適応策に関する研究を主に行っている。将来の世界の問題の一つである気候変動の研究を通して、より健全な社会づくりに貢献できればと思っている。

桑原　祐史
Yuji KUWAHARA

1968年神奈川県生まれ。1994年東京理科大学大学院理工学研究科土木工学専攻修士課程修了、1995年同大学院博士課程中退。同年茨城大学工学部都市システム工学科助手、茨城大学講師を経て、2009年より茨城大学工学部都市システム工学科准教授。専門はリモートセンシング・GISで、衛星画像処理技術の開発に従事してきた。現在は、南太平洋島嶼国・東南アジア・日本国・茨城県等を対象領域とし、陸域を対象に気候変動の影響評価と適応策策定への援用を目指した土地被覆分析を進めている。自然災害に対する様々な策を講じて行く際に、現在までの国土の変化と現況について市民が共通認識を持つことが活動の出発点になると考え、その一助となるMappingの成果を提供できればと思っている。

戸村　達也
Tatsuya TOMURA

千葉県生まれ。茨城大学工学部都市システム工学科出身。大学時代は、水環境に興味を持ち、地球環境問題や気候変動、またそれらが水および河川に与える影響を河川洪水氾濫解析により、周辺地域への影響を研究する。卒業後は日本水工設計㈱に入社、現在、水道施設の計画・設計に携わる。

平山　歩
Ayumu HIRAYAMA

1983年栃木県生まれ。2006年茨城大学工学部都市システム工学科卒業。2008年筑波大学大学院環境科学研究科環境科学専攻修了。同年パシフィックコンサルタンツ株式会社入社、現在に至る。大学では土木を専攻し、地球温暖化に伴う河川の洪水リスクの予測、大学院では気象学・気候学を学び、東アジアを対象とした降水量の変化を研究。現在は、情報事業本部防災保全システム部に所属し、気候変動に伴う水資源影響評価や、防災情報に関わるシステム設計等の業務に携わる。

三村　信男
Nobuo MIMURA

1949年広島県生まれ。1979年東京大学大学院都市工学専攻博士課程修了。東京大学助教授、茨城大学工学部および広域水圏環境科学教育研究センター教授などを経て、2006年から地球変動適応科学研究機関（ICAS）機関長。専門は、地球環境工学、海岸工学。気候変動の影響評価と適応策について研究し、「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」の報告書の執筆を担当した。外務省や文部科学省、環境省などの委員も務め、最近では温暖化影響総合予測プロジェクトの代表を務めている。