

気候変動の地域影響予測と 適応政策の在り方

高知工科大学 教授，副学長

那須 清吾

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2021年8月

気候変動の地域影響予測と適応政策の在り方

Regional Impact Prediction of Climate Change and Adaptation Policy

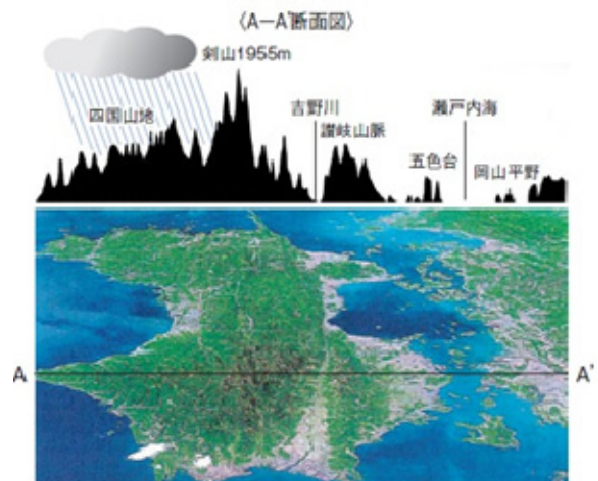
那 須 清 吾
Seigo NASU

1. はじめに

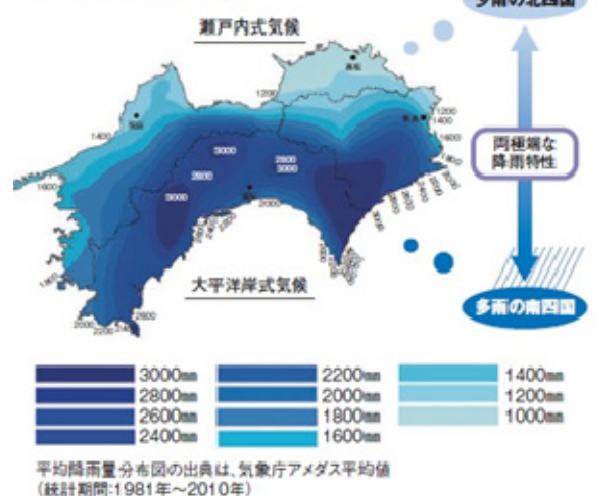
四国は特徴的な気候を有する。高知県を中心とする年間降雨量が3000mm／年を超える南部と1500／年以下になる北部である（図－1 参照）。よって、四国は国内でも有数の水不足が多発する地域であり、洪水の危険度も高い。特に四国最大の河川である吉野川は、長期にわたって香川県や愛媛県など頻繁に渇水に見舞われる。高知県も年間降雨量は大きい、貯水施設は十分とは言えず同様に渇水の頻度は高い。この様な四国4県、特に吉野川流域の水資源政策および水防災政策の難しさは、この様な気候や水資源に関わる自然現象に加え、水利用の権利関係や社会経済に対する影響の複雑性にあり、地域、流域内での政策に関わる合意形成を困難にしている。気候変動に関する政府間パネル（I P C C）第4次評価報告書によれば、大雨の頻度が増え、渇水の影響を受ける地域が拡大することが予測され、気候変動による降雨量や降雨パターンの変化が起きるとされている。四国はただでさえ厳しい水資源管理および防災政策を強いられており、気候変動が四国および吉野川の降雨パターンを変化させ、経済活動や生活用水としての利水のみならず、水環境や洪水調節機能にも大きな影響を与えることが懸念されている。気候変動が、利水、洪水、水環境にどのような影響を与えるかを評価し、水資源政策によってどのように気候変動に適応できるかを、定量的に把握することが喫緊の課題となっている。この様な多様で複雑な課題に取り組む為に様々な産学官の研究、政策立案などの活動が実施されてきた。

まず、平成18年度に「四国水問題研究会」が発足し、これが起点となって課題構造の解明と政策合意に向けた動きが始まった。そののち、平成22年度に文部科学省が立ち上げた「気候変動適応研究推進プログラム(RECCA) 」

■自然特性が大きく異なる瀬戸内側と太平洋側



■年間降水量の分布図



図－1 四国の気候特性

（四国水問題研究会・最終提言書より抜粋）

において、高知工科大学・東京大学らの研究グループが「気候変動下における四国の水資源政策決定支援システムの開発」をテーマに研究を開始した。現実の課題を解決する方法としての特徴は、気象学、水文学、経済学、経営学など多様な分野を統合して課題を構造化し、そのメカニズムを理解することでソリューションとしての政策を立案するところである。気候変動現象、洪水や干ばつなどの自然現象、これらの影響を受ける社会の経済現象、適応策としての施策の立案を支援してきた。その後、平成27年度に文部科学省が設定した「気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT)」では、気候変動適応のための技術開発により地方自治体の温暖化への適応を支援するための研究が目的となり、高知工科大学の研究グループが更に地方自治体と連携して研究および政策立案支援をすすめる、その後も地方自治体と連携した防災政策立案の支援を行っている。なお、市町との政策立案連携はSI-CATにおける唯一のケースであり、現在も全国の市町村支援の方法論として継続研究を行っている。

2. 四国の水問題の理解

四国における水資源管理および防災政策に関わる複雑な自然現象および社会現象を読み解き、そこから四国4県の相互理解と課題解決に向けた政策を立案することは非常に難しい。水循環、水利用、水環境の自然現象から社会現象に至る統合的な関係性を知る必要がある。その上で気候変動が如何なる影響を与えるのかを予測し、政策立案をする必要がある。このため、平成18年6月に「四国水問題研究会」が発足し、四国4県、民間利害関係者、マスコミ、有識者等で構成され、四国および吉野川の水問題の勉強を行うことで解決方法を模索する取り組みが始まった。四国4県は吉野川水系でつながっており、関連地域の水問題（治水、利水、環境）を構造的に研究・理解し、水資源の有効利用と関係者が合意できる政策提言の取りまとめを行った。

まず、四国・吉野川流域に対する問題認識として以下の内容が明らかとなった。

- ①洪水に対する安全性、水使用の安定性、環境の工学的および便益上の相互作用が十分に確認される制度上の基盤が無い。
- ②水源地域の負担および受益地域の便益の関係が明らかでなく、相互理解を踏まえた負担・便益の配分にも困難が伴う。
- ③河川の工学的機能面から見た治水・利水・環境の相互作用モデル、地域社会面から見た負担と受益の関係、水資源配分と社会的便益量、帰着先の関係モデルが存在しない。

そのうえで、最終提言書においては今後の四国・吉野川流域の在り方を考える上で、治水・利水・環境あるいは水源地と利用地の関係性など、課題構造に関わる情報の創造と情報共有および相互理解が重要であり。そのための行政、住民、専門家が参画したプラットフォームづくりが重要であることが示された。また、気候変動の影響予測に関する行政の評価と判断、対話と合意形成を踏まえた地域が納得できる結論を得ることの重要性、そのためには受益と負担の関係性を評価できるシステムも重要であることが示された。

このような共通認識に応えるためには、前述した様な学術統合による課題の構造化が必要であるが、多様な学術分野への理解のもとで所謂Inter-discipline（学術分野を繋ぐ）およびTrans-discipline（学術と現実を繋ぐ）が求められる。しかし、その様な研究者による取り組みは事例が多くはなかった。

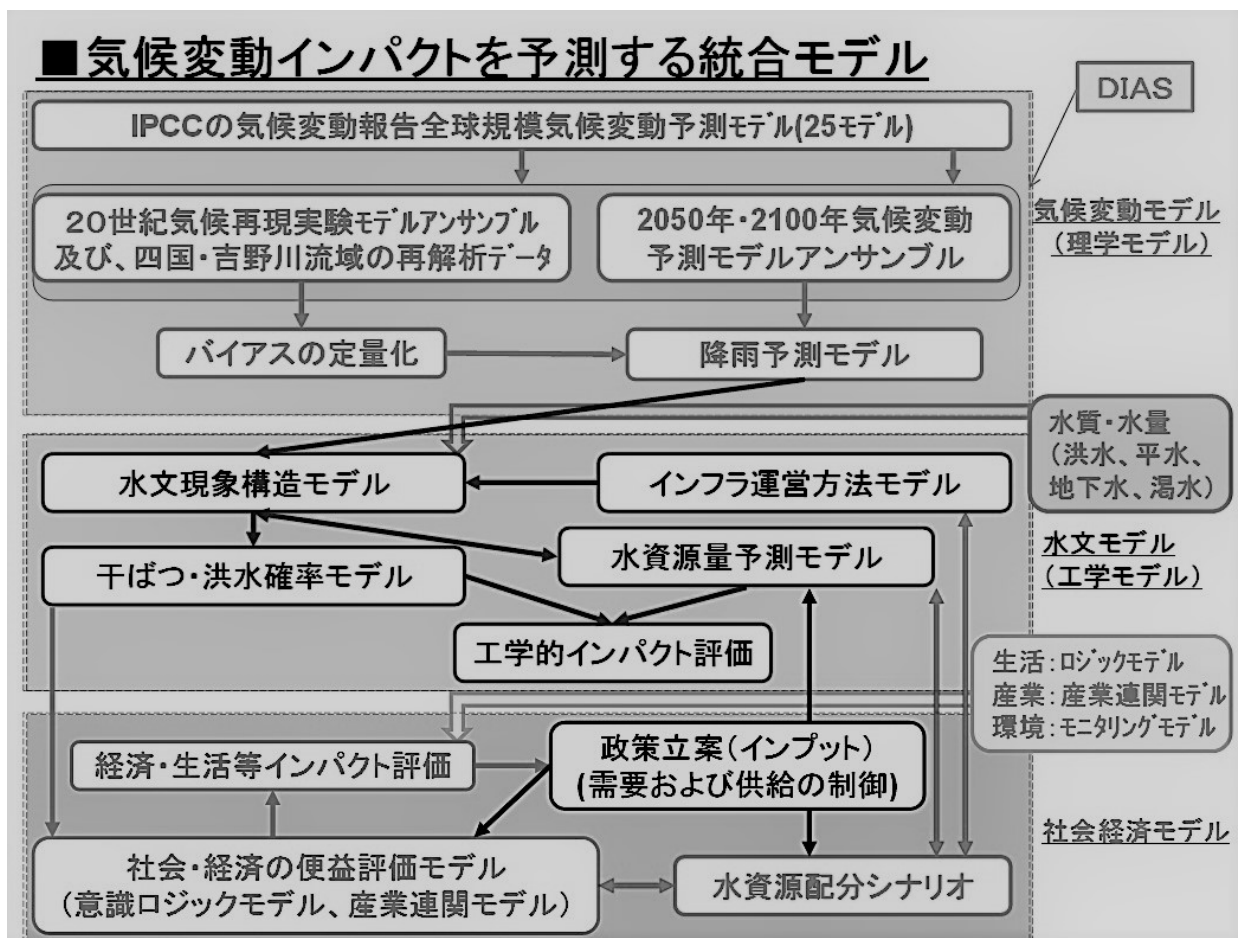
3. 水問題の構造化と気候変動適応策

四国水問題研究会の提言内容を具体化したのが気候変動適応研究推進プログラム(RECCA)で実施した「気候変動下における四国の水資源政策決定支援システムの開発」である。水問題および気候変動問題の構造を明らかにするため、

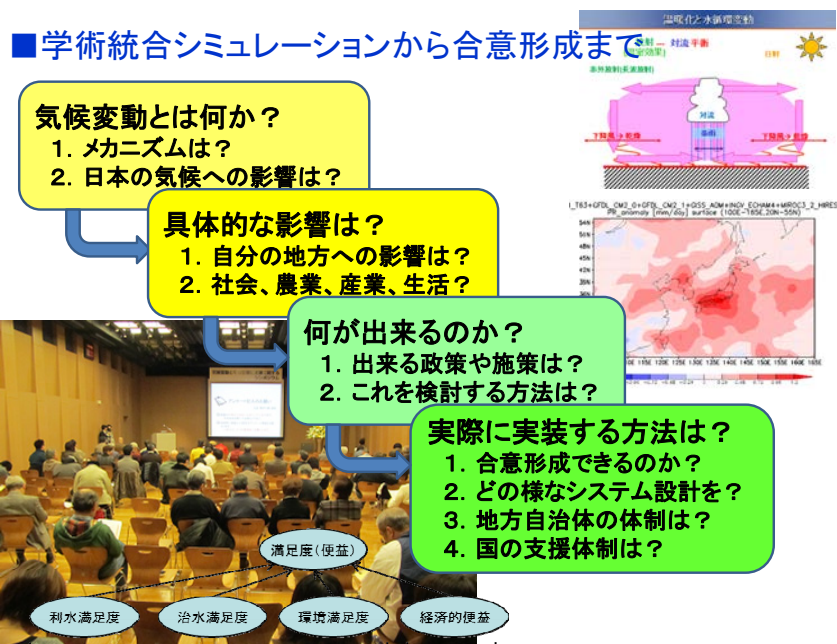
①気候変動に伴う水資源の偏在、水資源量の変化と極端現象の影響を評価した策効果予測

②情報共有と相互理解による適応策合意形成の試行

を行った（図－２参照）。四国における水問題の構造と気候変動の影響を明らかにした。



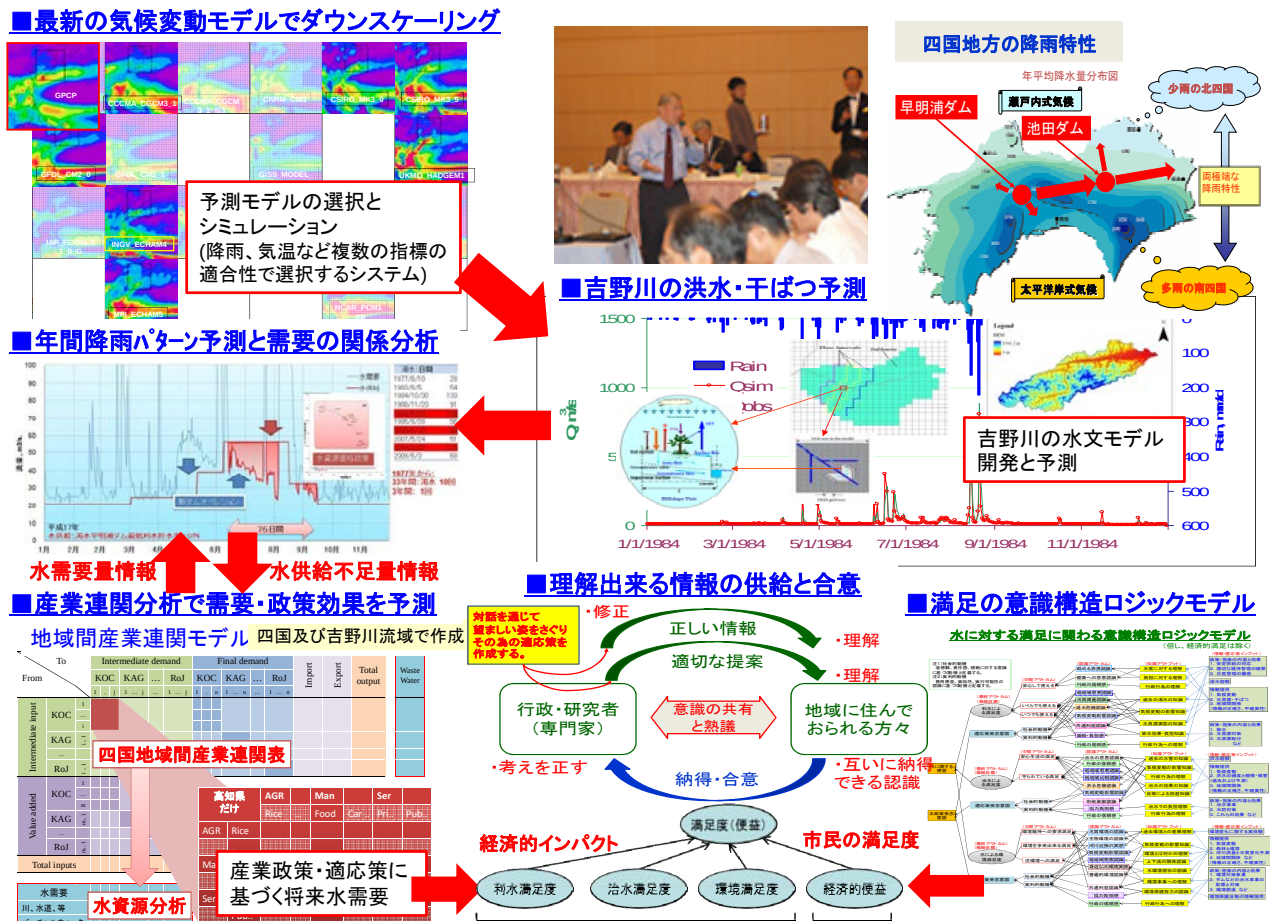
図－２ 気候変動影響および適応策の予測モデル



図－３ 四国・吉野川の気候変動研究の流れ(RECCA)

4. 気候変動の予測とその影響シミュレーション

気候変動により四国の水はどうなるのか、雨の降り方が変化するか、その当時の科学的知見の範囲内で明らかになった。なお、その後の気候変動予測研究の進歩の中でもそれほどの大きな予測結果の違いは見られない。図－4に示したのは、影響予測の具体的な学術分野毎のモデルとその統合関係である。気象学による予測結果から水文モデルによる洪水・干ばつシミュレーションを行い、年間降雨と年間水需要から水不足量を予測した。その結果を産業連関表で分析することにより経済的インパクトを評価するとともに、これらの影響予測情報に提供し、市民と対話しながら水に関わる満足度を測定した。これらのシミュレーションモデルを用いて政策効果の予測を行うことで政策立案を支援する仕組みを構築した。



図－4 気候変動影響予測と学術統合

図－5は、1981年～2000年と2046年～2065年の各20年間の早明浦ダムにおける梅雨期および台風期の月平均降雨量の変化を予測した結果である。

図が示すとおり、梅雨期では8つ全ての全球気候モデル(GCM)で豪雨の雨量が増加すると予測しており、ほぼ確実に激しい雨の雨量は増加すると考えられる。一方、台風期は5つGCMで豪雨の雨量が増加すると予測しており、どちらかと言えば激しい雨の雨量は増加の可能性があると考えられる。また、右図が示すとおり、梅雨期は8つのモデルの内7つのモデルで通常降雨の雨量が増加すると予測しており、梅雨期は通常降雨の雨量は増加する可能性が高いと考えられる。一方、台風期は8つ全てのモデルで通常降雨の雨量が増加すると予測しており、大きな変化ではないが、台風期はほぼ確実に通常降雨の雨量が増加すると考えられる。

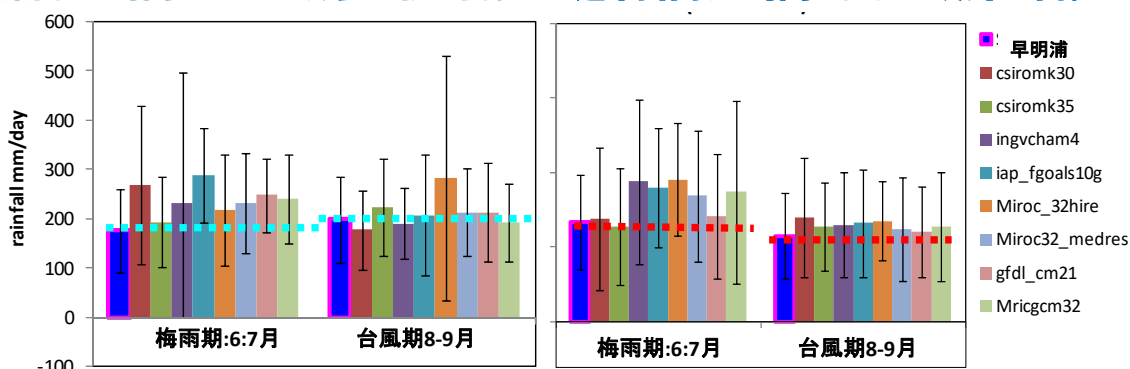
全ての解析に共通した特徴は、将来の月平均降雨量の予測された変動量は大きくなっており、洪水および干ばつへの対応は難しくなる可能性を示した。

通常降雨が増加する傾向は水資源の観点からは望ましいが、年によって変動がより大きくなることから利

用できる水資源量が必ずしも増加するとは限らない。豪雨においても量的に増加する上に変動も大きくなるので、洪水対策はより困難になると予測される。研究の結果では、20年間に発生する洪水の規模が増大すること、現在の洪水規模の頻度も高くなることが予測されている。

早明浦の季節降雨量の変化(梅雨期:6-7月、台風期:8-9月)

豪雨(一時間に50ミリ以上の強い雨) 通常降雨(一時間に50ミリ以下の雨)



青■: 1981-2000年の20年間の平均月観測雨量

その他: 2046-2065年の気候変動モデルの計算結果の平均月降雨量

図ー5 早明浦ダム付近の気候変動による降雨変化

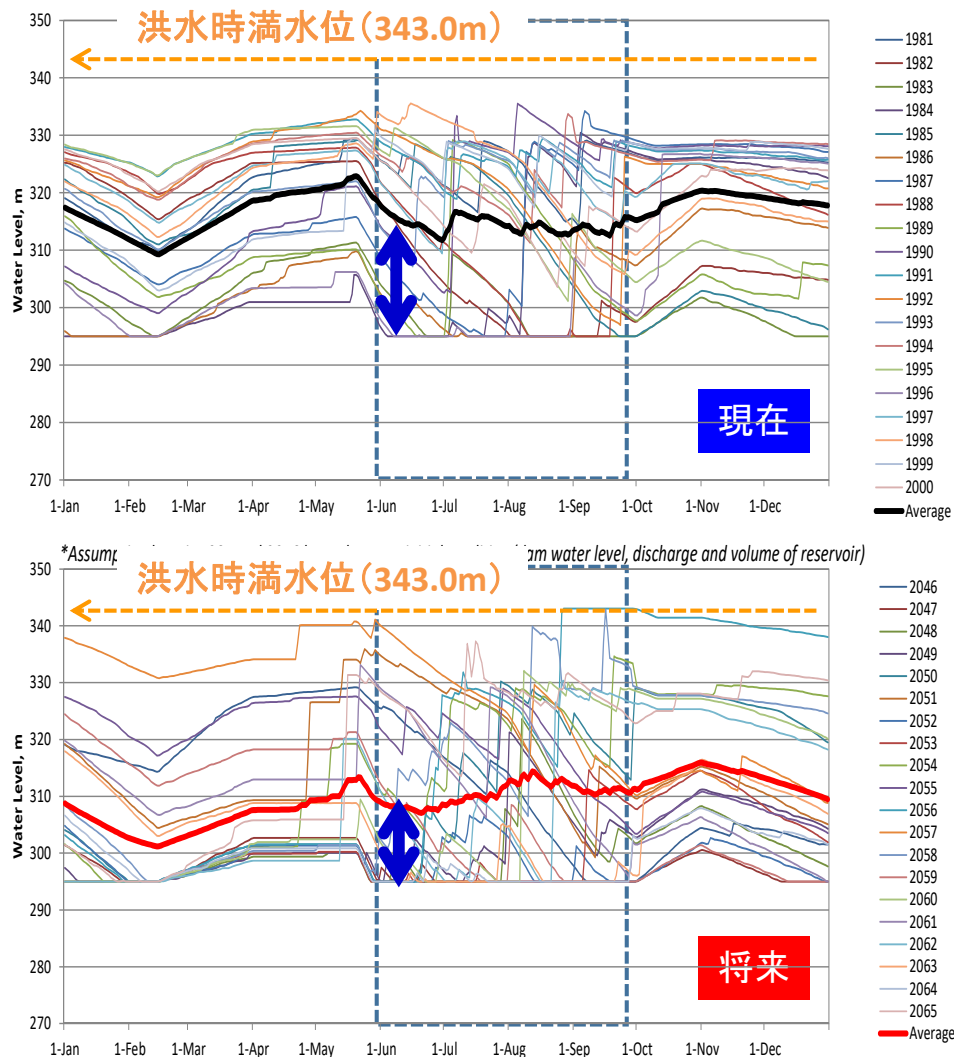
5. 気候変動と洪水・干ばつ問題

図ー6は前述した降雨特性の変化を踏まえた早明浦ダムの貯水量レベルの変化の予測結果である。上グラフ(1981年～2000年)と下グラフ(1981年～2000年)は、早明浦ダムの年間貯水レベルの気候変動による影響の予測変化を示している。一年間の変化を20年間(20ライン)で示しており、その平均を太線で示している。

20年間の平均貯水レベル(太線)で比較すると将来利用できる水資源量は低下することが予測できる。さらに、20ラインが下限値にまで下がって貯水量がゼロになるケースが増大し、渇水危険性が今以上に高くなることが懸念される。洪水調整にも課題が発生することが懸念される。現在はないケースだが、洪水時の貯水レベルが洪水時満水位に達して洪水調整が困難になる可能性も予測されている、現在の早明浦ダムの運用方法あるいは将来の危険性に備えた気候変動との関係での議論が促進されることが期待される。なお、国土交通省では社会全体の生産性向上につながるストック効果の高い社会資本の整備・活用等を加速するとしており、その一環として既設ダムを有効活用する「ダム再生ビジョン」を策定している。早明浦ダムについても放流設備増設と容量振替による治水機能の増強に取り組んでいる。

● 早明浦ダム水位(貯めた水の高さ)はどう変化？

現在(1981-2000年)と将来(2046-2065年)における
早明浦ダム水位レベル(図中の太線は水位の平均値)



- 早明浦ダム水位は、将来下がること予測
- 満水位を超える恐れが将来ある

図－6 早明浦ダムの気候変動影響予測

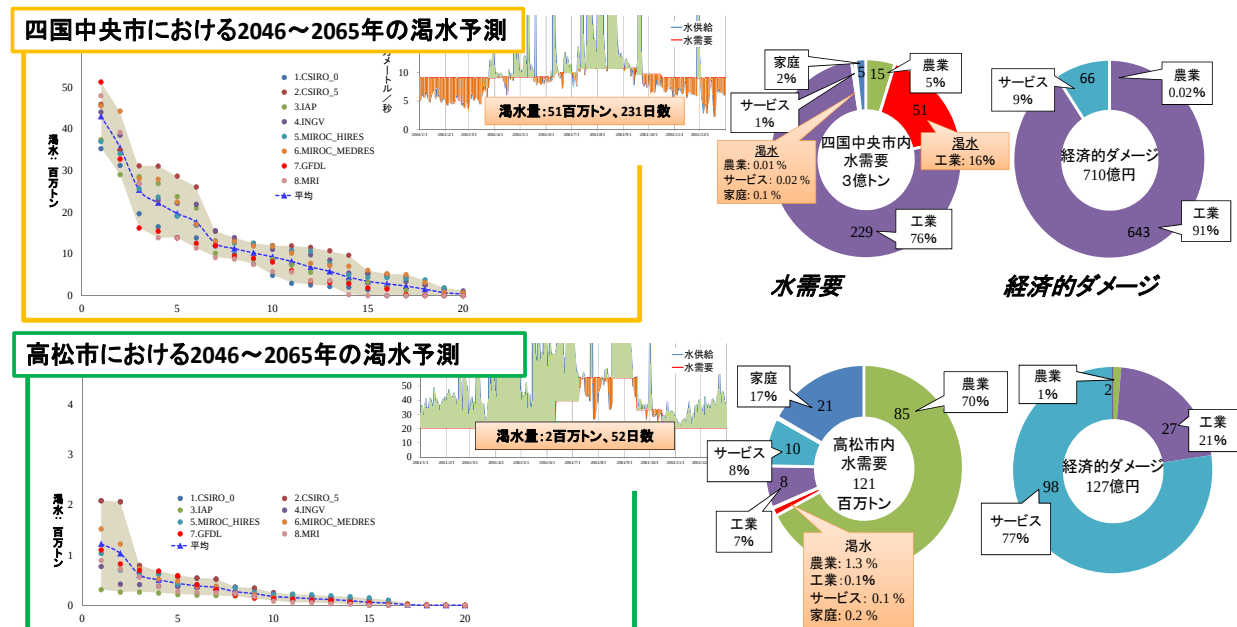
6. 気候変動と社会経済に与える影響

グローバルな気候変動が地域に与える影響は非常にローカル性が高いことが分かっている。降雨現象は地域毎の地理的特性の影響を強く受けるので、温暖化による気候の変化も同様である。四国においては降雨が少ない地域において気候変動により減少する傾向、降雨が多い地域においては増加する可能性があり、その結果が水資源量の経済に与える影響結果からも読み取れる。地域毎の社会経済構造や水需要構造、将来の経済成長率、人口予測、農地面積等の社会シナリオの影響も大きく受ける。

全球気候モデル (GCM) の中でアジアモンスーン地域の降雨特性等の再現性の高い8モデルで予測した四国・吉野川流域の降雨特性の変化には大きな幅があり、その不確実性の高さを示している。しかし、その幅

の中にあっても四国・吉野川流域では地域の地理特性および経済構造によって気候変動のローカル性は非常に高く、気候変動適応策が市町村単位で策定されるべきことを示している。検討に当たって経済に与える影響を予測するために17種類の将来経済パターンを策定した。ここで紹介する将来予測結果は、その中でも人口や農地面積の将来変化が同一で経済成長だけを最大（2％）および中庸（1％）に設定したケースである。

●予測モデルの最も厳しいケースにおける渇水ダメージ



- 第三次産業が約9割を占める高松市では相対的に気候変動および人口、経済成長、耕作面積などの社会的条件の不確実性の影響が相対的に小さく、第二次産業が中心である四国中央市では気候変動の影響が大きいとともに、その度合いも社会的条件の不確実性の影響を大きく受けることを確認した。

図－7 高松市および四国中央市における気候変動の影響予測（経済）

図－7（右図）は、高松市および四国中央市における渇水の影響の最も大きい予測結果である。また、図－7（左図）は、8つの気候変動予測モデルが予測した2046年～2065年の20年間における渇水の影響を示しており、20年間の最悪ケースから順番に並べ、そのモデルによる変動幅を示している。予測結果はモデルで相当に幅があり、気候変動予測モデルの精度向上が期待される。なお、この結果は両市民にも提供したが、この様な精度の情報ではあっても大きな信頼性を得たことが特筆に値する。図－8は、両市民が提案した適応策案である。

●気候変動の適応策の「策定」

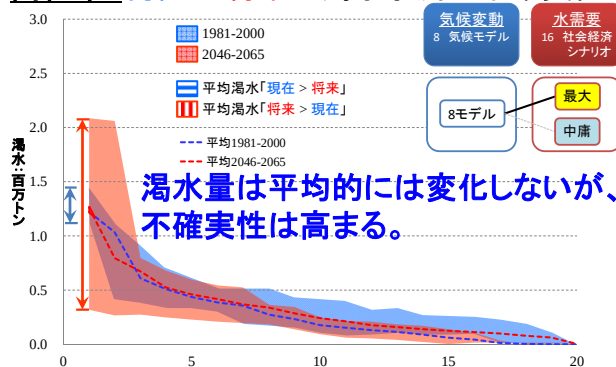
高松市	政策オプション	四国中央市
● 水を大切にしようという文化・意識の醸成 ● 節水対策（常時給水制限、水道料金値上げ） ● 地下水、雑排水など用途に縛られない水の有効活用 ● 貯留先の確保（調整池、ため池の嵩上げ） ● 水源の有効活用（井戸水、地下水の利用） ● 海水の淡水化 ● 排水性舗装 ● 災害時も含めた対応策の検討（4県合同ペットボトル工場）		● 海水の淡水化 ● 貯留先の確保（地下溜める、氷として保管） ● ライフスタイルの見直し ● 水の量を抑えても同じ品質を確保できる製紙の技術開発（緩和策） ● 二酸化炭素を埋めるまた利用する技術開発 ● 紙のスラッジのペレット化

図－8 気候変動影響評価結果に対する市民の反応としての適応策の提案

図－９は、香川県高松市および愛媛県四国中央市において渇水の将来予測を社会シナリオに沿って解析した結果であり、経済成長率は最大（２％）のケースである。図－９（左図）で青い帯(1981年～2000年)と赤い帯(2046年～2065年)にはそれぞれ幅があるが、これはGCMの８モデルによる影響予測結果の幅であり不確実性を表している。また、予測した２０年間の中で渇水の程度の大きい順に左から右に図示している。

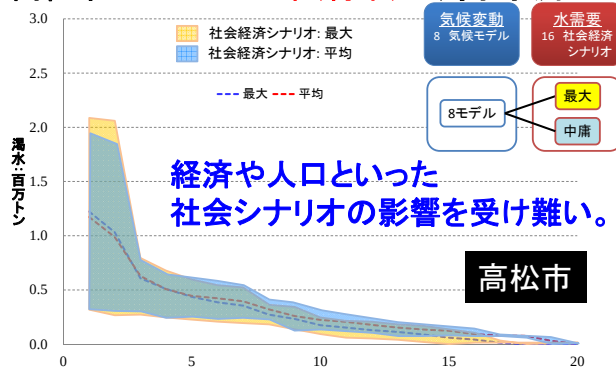
現在と将来の渇水予測の不確実性

高松市:現在と将来の渇水予測の不確実性

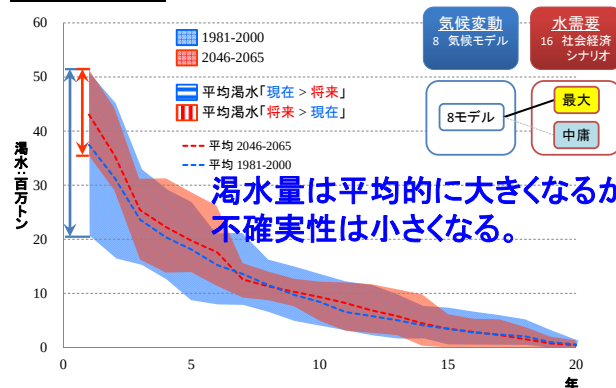


社会シナリオ(経済成長率など)の影響

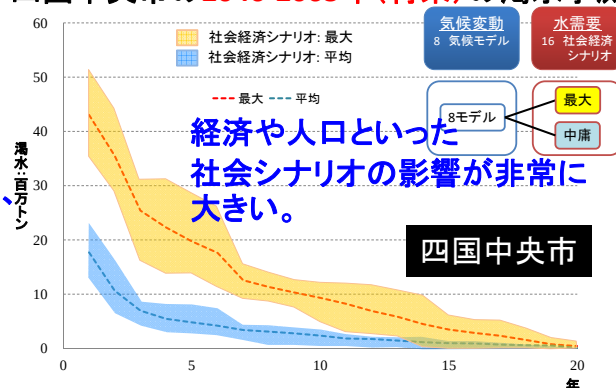
高松市の2046-2065年(将来)の渇水予測



四国中央市:現在と将来の渇水予測の不確実性



四国中央市の2046-2065年(将来)の渇水予測



図－９ 気候変動による水資源量の変化が地域経済に齎す影響

高松市はサービス産業が９割以上を占める経済構造であり水資源に大きく依存しない。一方、その水資源の約三分の一を早明浦ダムから池田ダムの分水に依存しているの、地理的特性は水源である早明浦ダム上流の影響を受け、気候変動の影響により水資源量は減少しないが、変動幅は大きく不確実性も高まる。経済構造と地理的特性の組み合わせで予測すれば、渇水の可能性は高まるが水不足は現状の水準程度に留まる。

工業都市である愛媛県四国中央市では、経済成長に必要な水資源の需要は高くなるが、降雨が少ない地域の立地なので、より確実に水資源が減少する。従って、より確実に渇水危険性は高くなる。

また、図－９（右図）は、経済成長率が１％の場合（青）と２％の場合（黄色）での渇水量の違いを示している。サービス産業が中心の高松市は、経済成長シナリオの影響をほぼ受けないと言えるが、工業中心の四国中央市は大きく影響を受けることも確認できる。

この２市は地理的に近い四国の近隣都市であるが、影響は全く異なる。地理的特性と経済的特性の両要素の組み合わせによっては、非常に多様な気候変動の影響が予測される。この検討結果から、地方自治体によって大きく異なる気候変動の影響に対して個別に政策立案を支援する必要性が明確になったと言える。

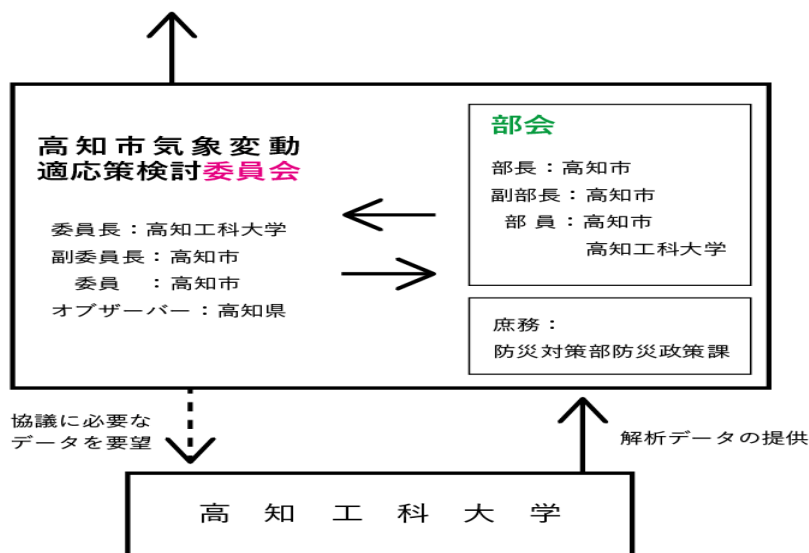
７．防災減災の考え方の見直しと地方自治体の政策支援

国土交通省が平成２７年に公表した「新たなステージに対応した防災・減災の在り方」では「想定外」に対応すべく、「最大クラスの外力（大雨等）」を想定して対策を進めることが必要とされた。最大クラスの

豪雨とは、近隣地域における最大降雨が流域全体に発生する、或いは、千年に一度の降雨が発生するとの想定であり、これにより従来の浸水想定区域図が見直されたが、四国の地方自治体の防災対策に与える影響は非常に大きい。

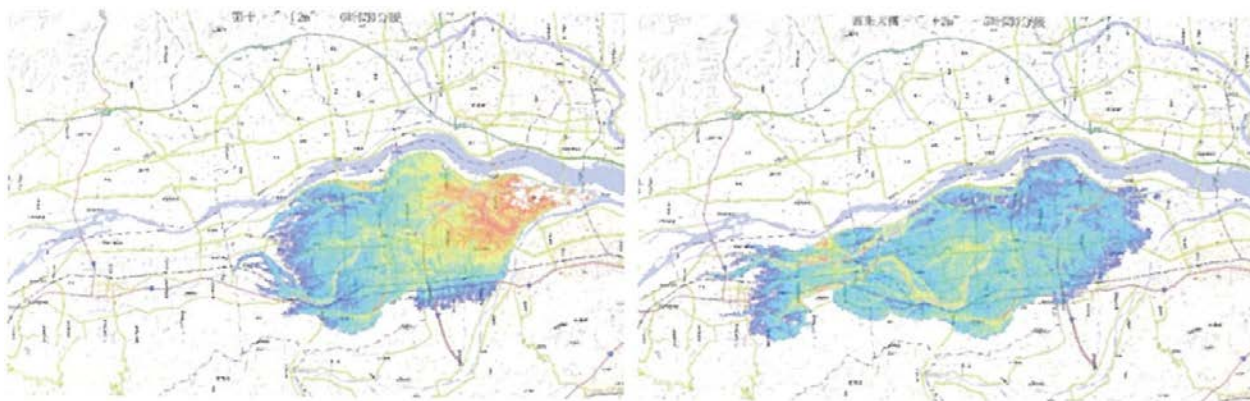
文部科学省「気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT)」の中では、高知県高知市および徳島県石井町との連携で政策の立案支援を実施したが、現在も継続している。徳島県石井町では、浸水想定区域図において町内全域が浸水することが想定され、周辺の高台も地滑り地帯であることから避難できる地域が域内に存在しない。域内全域が浸水する状況が示されても、防災対策や避難誘導には活かせない。高知県高知市においても同様であり、さらに河川の堤防決壊時の河川水の市街地流入現象も変化することが確認されている。高知県高知市、徳島県石井町では、外力規模を段階的に大きくしたシミュレーションで、高解像度の動的氾濫解析によりこれらの課題に対応している。連続的に外力規模を大きくした動的シミュレーションにより、外力の増大に伴う防災の考え方の転換点を探り、想定を超える状況にも対応できる防災政策立案を試みている（図－１０参照）。

防災対策施策の提案



図－１０ 防災政策立案のための連携体制

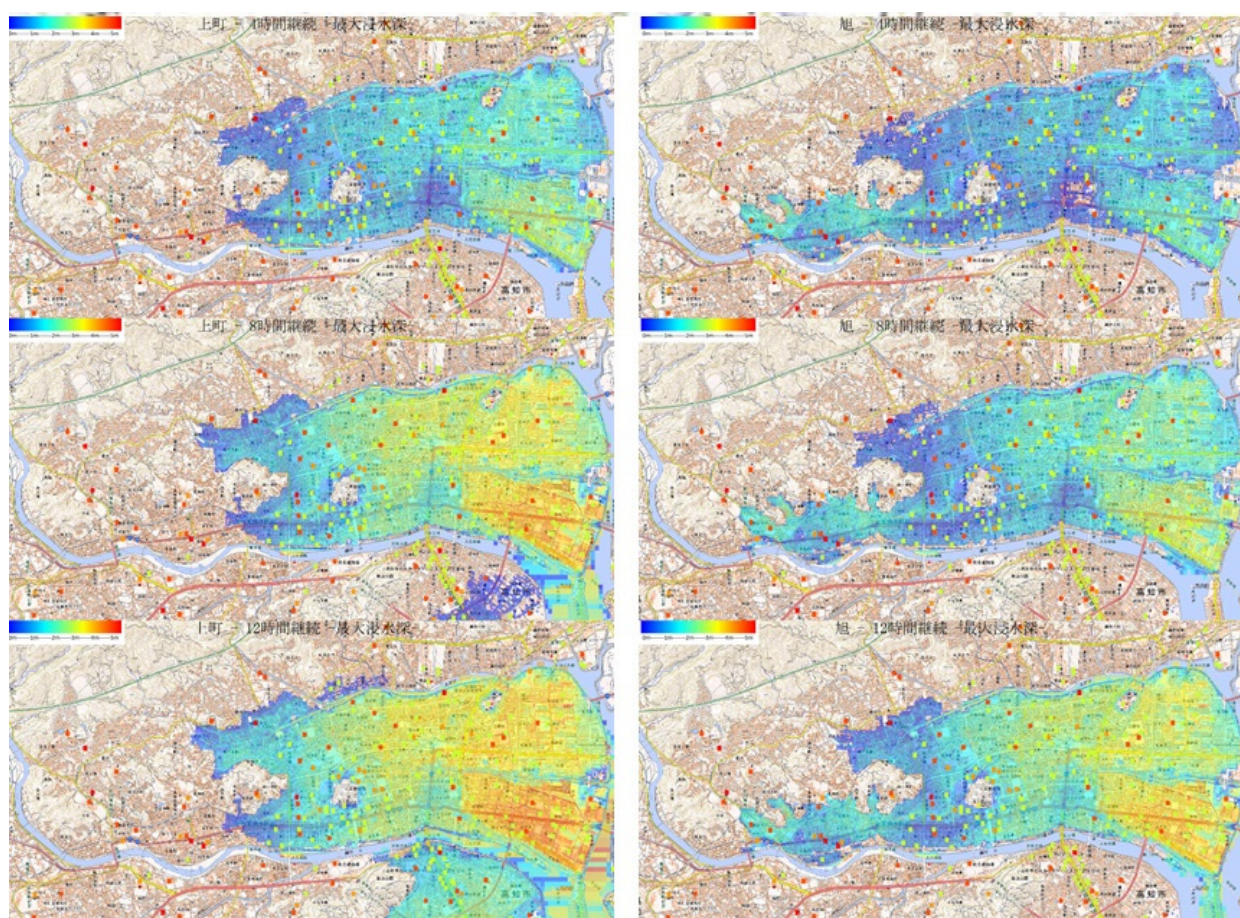
図－１１は、徳島県石井町において検討した破堤地点の違いによる浸水区域と浸水深の違いであり、浸水域および浸水深が大きく異なることがわかる。また、図－１２は、高知県高知市内の二級河川鏡川の浸水域および浸水深を時系列で示しており、破堤後長時間経過した後の浸水深が異なることが分かる、また、その浸水継続時間も異なることが分かっており、高知市の防災対策に大きな影響を与える。さらに、洪水の規模によっても市街地における河川水の流速や流れの経路も変化することが分かっている。なお、図１１、図１２において青色から赤色に向かって水深が大きい。



(下流での破堤)

(上流での破堤)

図－１１ 徳島県石井町の氾濫シミュレーション



(下流での破堤)

(上流での破堤)

図－１２ 高知県高知市の時系列氾濫シミュレーション

高知工科大学の研究グループは、高知県高知市および徳島県石井町との連携により、河川管理者から提供される浸水想定区域図では提供されない動的なシミュレーション結果を踏まえた行政の防災活動に関わるタイムライン上の判断および意思決定を図上訓練で実施する取り組みを進めている。また、その結果を踏まえた災害時の迅速で的確な対応の実現、防災政策の企画立案システムの実装を進めており、将来的には全国の市町村に対して発信することを目指している。

気候変動に対する地方自治体の適応策は、その想定する災害規模によって変化する（図－１３参照）。

河川整備（ハード整備）には財政的にも限界があり、水防活動など（ソフト対策）では対応できない場合は住民の自助・共助に頼らざるを得ない。これらの防災対策は気候変動の影響予測を含めて洪水の規模によって変化させる必要があり、今後の重要な研究テーマとなっている。

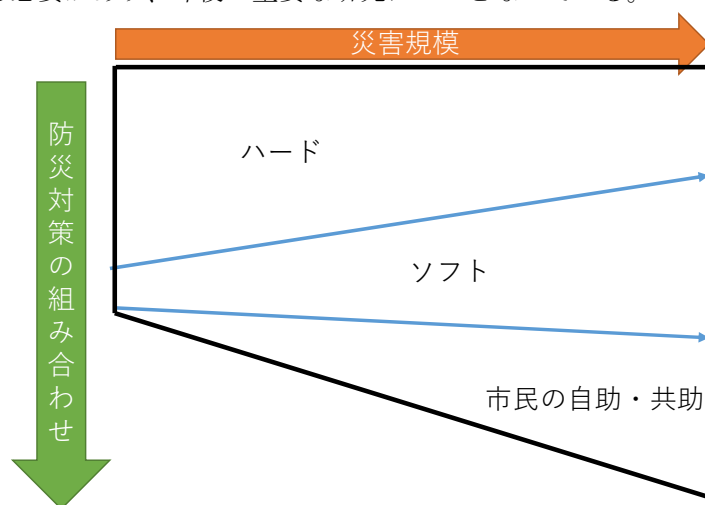


図-1-3 災害規模と防災対策の変化

このような政策的変化に対応した事例が、平成28年に神奈川県相模原市で起きた道路冠水時事故を受けた政策対応である（写真-1、図-1-4参照）。道路の歩道で起きた事故であったが、豪雨、道路、下水道、地理的特徴など複合的要素を含んだ複雑な現象であったと推定される。重要なことは、図-1-3に示されている内容である。



写真-1 相模原市道路冠水時安全対策検討会

「想定外」に対応すべく、「最大クラスの外力（大雨等）」を想定して対策を進めることの意味について考える必要がある。単に外力に関わる最大クラスの検討を行えば良いのではなく、その結果の影響とその度合いの最大範囲の特定が必要なのである。また、社会や市民が受ける影響は様々であり、その中には必ず避けることを求められる場合があり、市町村にとって「想定外」に対応することの責任の重さと困難さがそこにあることを知るべきである。

このケースの場合、道路冠水を学術的に解析するのは困難であったため、

「①：履歴があり、危ない箇所」

「②：浸水（内水）ハザードマップ等のシミュレーションの結果、冠水の可能性がある箇所（想定される箇所）」

「③：①、②以外で冠水が発生した箇所（想定していない箇所）」

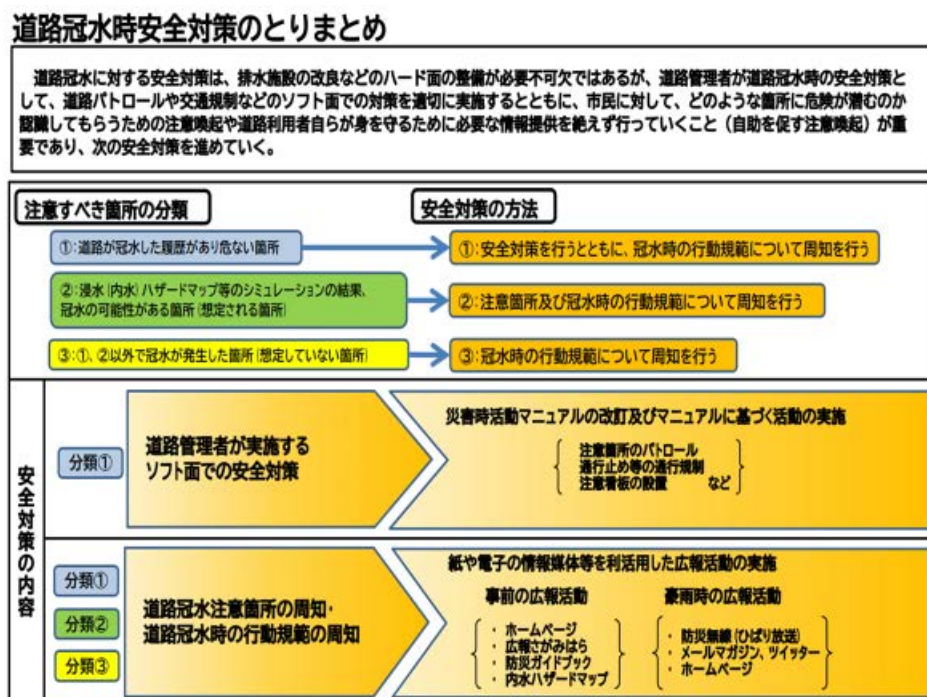
この3つの分類に対しての対応方法を示した。これは、最大クラスの外力が不確定であっても市町村は万全の対応を求められることになった結果であり、前述の3分類に対して

「①：安全対策を行うとともに、冠水時の行動規範について周知を行う」（ソフト対応）

「②：注意箇所及び冠水時の行動規範について周知を行う」（ソフト対応）

「③：冠水時の行動規範について周知を行う」（自助）

とせざるを得なかったのである。防災政策の変更に伴い学術的成果を如何に実務的に活用するのか、その方法論が問われている。



図－１４ 相模原市の対応方針

８．今後の水問題への対応の在り方

四国・吉野川流域の水資源問題や洪水対策などは、自然現象と社会現象の複雑な相互作用を学術統合により再現することで将来予測モデルを構築し、将来予測と政策効果の評価により行政や市民との連携で適応策・政策を企画し実現する必要がある。防災政策の転換が技術的にどのような意味を有し、影響するのも学術分野の重要なテーマであり、研究とすべきである。

しかし、このような視点で防災政策支援を市町村と直接連携している研究事例は殆ど存在しない。今後、このような取り組みを全国に普及させることを望みたい。

９．その他の取り組み

文部科学省「気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT)」の中では、より具体的な地域における気候変動の影響予測を行う為に様々な研究開発にも取り組んできた（図－１５参照）。

地域における危険な降雨・洪水パターンの特定とその結果を踏まえた洪水予測および浸水状況の動的・高解像度化が、市町村の防災政策立案および図上訓練に非常に有効である。また、AIによる水文モデルの構築や、ハイブリッド産業連関モデルの開発による洪水の前後で起きる経済的影響の詳細化、洪水対策の経済効果分析なども可能となっている。

SC-CAT研究概要

合理的な想定最大外力の推定手法

力学的ダウン
スケーリング

■洪水に関わる降雨強度は

①面積

②分布

③洪水継続時間の3要素に依存

統計的ダウン
スケーリング

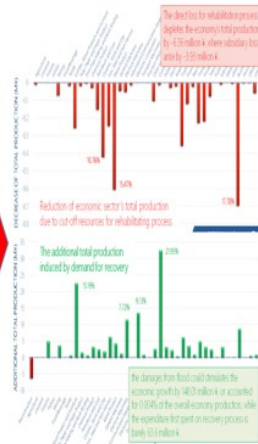
降雨特性と洪水(極端現象)関係分析



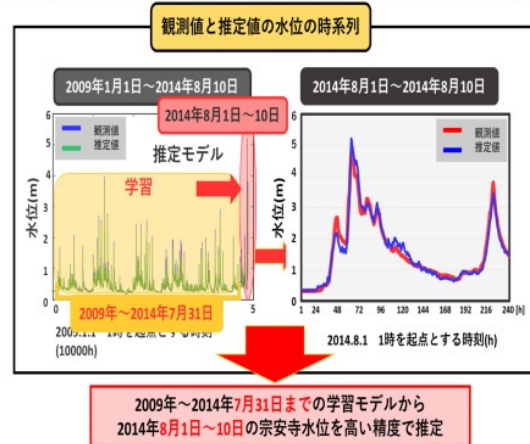
洪水被害と復興政策の評価手法

Structure of Reconstruction Sector in Hybrid I-O Table

産業別	建設業	製造業	卸売業	小売業	飲食業	宿泊業	運輸業	情報業	金融業	不動産業	公共サービス業	その他	合計
建設業	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
製造業	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
卸売業	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
小売業	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
飲食業	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
宿泊業	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
運輸業	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
情報業	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
金融業	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
不動産業	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
公共サービス業	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
その他	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000



AIを用いた河川流出現象の物理的理解詳細化



図ー14 AIによる水文モデル構築、ハイブリッド産業連関モデル構築

【参考資料】

1) 四国水問題研究会

(<http://www.skr.mlit.go.jp/kikaku/mizu/index.html>)

2) 気候変動適応研究推進プログラム

(<https://www.restec.or.jp/recca/>)

3) 気候変動適応技術社会実装プログラム

(<https://www.restec.or.jp/si-cat/index.html>)

4) 高知工科大学Cutting-edge Research and Social Contribution

(https://www.kochi-tech.ac.jp/power/research/post_57.html)