

2021年1月29日（金）

国立研究開発法人 国立環境研究所 気候変動適応センター主催
令和2年度 気候変動適応研修（中級コース）

講義解説資料

講義 6

「豪雨災害に関する気候変動予測と 適応」

京都大学防災研究所 中北 英一

本講義解説資料は、講義の口頭説明を事務局で編集したものです。

皆さんご存じのように、毎年台風あるいは梅雨による災害が日本のどこかで起こっています(図1)。2017年には九州北部の狭い領域で非常に強い豪雨がありました。2018年は西日本全体で3日以上にわたる長雨で、200人以上の方が亡くなられています。同じ2018年には大阪湾で第2室戸台風以来の高潮が60年ぶりに起き、関西空港も浸水しました。



図1：近年における水害・土砂災害の発生状況

2019年は、台風15号による強風で、関東では電線や家屋、施設等が被害を受け、秋の台風19号では、千曲川、荒川、多摩川、利根川、阿武隈川等で堤防の決壊や土砂災害等が起きました。2020年も梅雨の時期に球磨川で豪雨がありました。現在は、豪雨の水蒸気量における温暖化の寄与の研究も進んでいますが、2017年以降のこれらの豪雨は、温暖化による影響を受けていることが示されています。科学的にも、温暖化が豪雨災害に影響を及ぼし始めているとほぼ断言してよいでしょう。図2には、温暖化の影響が出だしているのではないか、と書いてありますが、既に出ています。今までの常識が通用しない現象が、より頻繁に、より強力に起きる可能性があり、地球温暖化による災害で後悔しないために、適応を進めていく必要があります。

そのために、まず科学的な気候変動の将来予測を使って、雨や風の動向を検討し、気候変動の適応策としての治水計画を考えていく必要があります。治水の基礎体力であるハードウェアの強化ももちろん重要ですが、河川氾濫が起きた時の危機管理対応の準備も大切で

す。更に、自助、共助を考慮した逃げるためのリスクコミュニケーションも、防災力の強化には不可欠です。これら全てを含めて、豪雨防災における温暖化への適応となります。

気候変動はじわじわと徐々に進行しているように見えますが、振り返ってみると未経験の災害が起きてきていることがわかります。治水の適応は時間を要しますので、早く計画し着実に進めなければ手遅れになります。科学的な将来予測を元に、これまでの自然災害で得た多くの知恵を生かして適応を進めることが大切です。

最近の災害から思うこと

- 地球温暖化の影響が出だしているのではないか？
- 今までの常識が通用しない。
 - 豪雨：より頻繁に、より強力に、初めての地域に=>未経験
 - 西日本豪雨：強力ではないが、広域で長期間
- 後悔しない、地球温暖化への適応
 - 科学的な気候変動将来予測を軸にしあたる
 - 治水の基礎体力の増強
 - 危機管理の深化
 - 自助・共助としての防災力の増強
 - ともに時間がかかる。じわじわでも温暖化進行の方が早い。=>後悔しない早い目そして計画的な対応が必要！
- では、何を？どの優先順に適応するか？
 - 将来予測の共有
 - 災害からの教訓
- 水工学・土木工学・気象学"研究"として抜けているものはないか？



中国地方整備局



九州地方整備局
中北(2018, 2019)⁴

図 2：最近の災害から思うこと

1 どのような気候予測データセットがあるか

ここでは、まず気候予測のデータセットについて簡単にお話します。日本では2000年頃から高性能のスーパーコンピューターで気候変動予測を行っていますが、2007年頃からは地球全体での河川への評価に必要な時間雨量の情報が提供されるようになり、国内の河川等の自然災害の影響評価が始まりました。その後、更に多くの予測情報が利用できるようになり、現在では水資源も含めて河川への確率的なリスク評価ができるようになってきました。適切な適応策の検討や、各適応策の効果の評価を行う段階に入っています。

文部科学省の共生、革新、創生、統合のプログラムでは、気候、気象、ハザードの様々な研究者コミュニティが協力し、自然災害に関わる将来予測や適応の研究を進めてきています（図3）。これらのプロジェクトでの実施内容を少しご紹介します。

文部科学省 共生～統合プログラム

- **Kyousei(共生)Project:2002-2006 「人・自然・地球共生プロジェクト」**
 - 地球シミュレータ用の温暖化予測モデルを開発
 - 20km日本域出力(日雨量)
- **Kakushin(革新)Program:2007-2011 「21世紀気候変動予測革新プログラム」**
 - 20km全球出力, 5,2km日本域出力(時間雨量)
 - 自然災害への影響評価が可能に
- **Sousei(創生)Program:2012-2016 「気候変動リスク情報創生プログラム」**
 - 最大クラス外力による影響評価も
 - 自然災害、水資源、生物・生態系
 - 適応に向けたリスク評価
- **Tougou(統合)Program:2017-2021 「統合的気候モデル高度化研究プログラム」**
 - 気候モデル～ハザードモデルの統合と高度化
 - 後悔しない適応・評価



図 3：文部科学省 共生～統合プログラム

文部科学省・統合的気候モデル高度化研究プログラム

4つの研究領域テーマを連携させた統合的な研究体制の構築

全球規模の気候変動予測と基盤的モデル開発

気候変動予測を可能とする「全球気候モデル」を構築し、他の研究・予測へと活用。



統合的気候変動予測

日本周辺を中心とした「領域気候モデル」を構築し、適応策検討に活用できるよう、高精度な予測情報を創出。



統合的ハザード予測

温暖化により激甚化が想定される高潮・洪水等のハザードの予測。



炭素循環・気候感度・ティッピング・エレメント等の解明

炭素・窒素の循環も含む「地球システムモデル」を構築。気候感度^(*)やティッピングエレメント^(**)等を解明。



* 気候感度：大気中のCO₂濃度が2倍になった時の気温上昇量。
** ティッピング・エレメント：気候変動があるレベルを超えたとき、気候システムにしばしば不可逆性を伴うような激変が生じる現象。

○前身事業以降開発しているわが国独自の気候モデルの利用数は、世界でもトップクラス。

○創出された気候変動予測情報は、気候変動の影響評価の基盤として活用。



作成：文部科学省(水災害・水資源分野における気候変動の影響と適応に関するシンポジウム資料、2109)

7

図 4：文部科学省・統合的気候モデル高度化研究プログラム

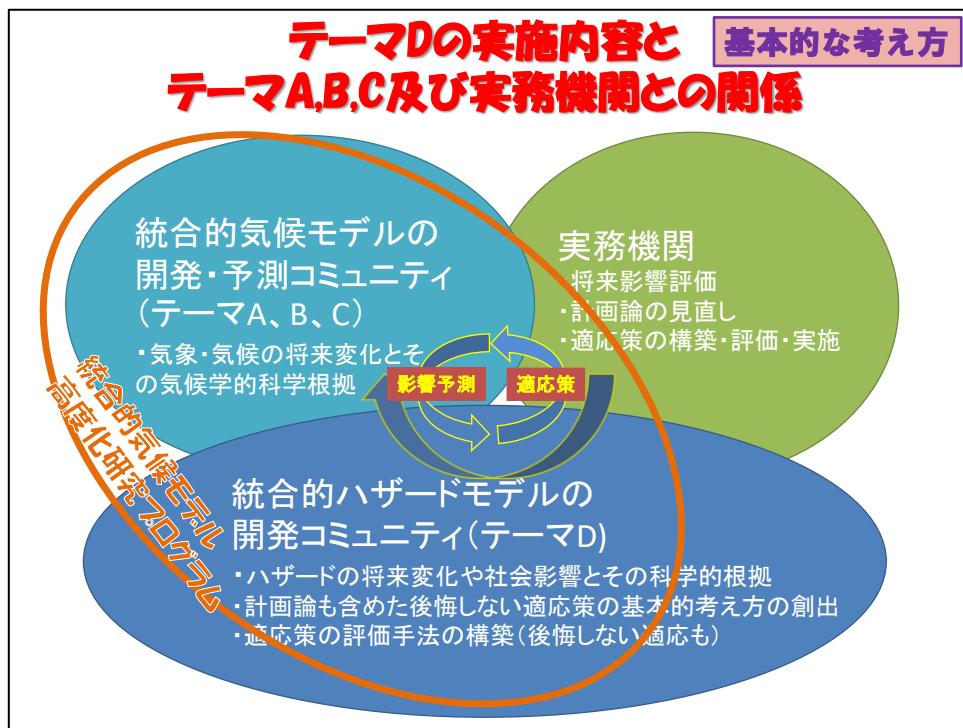


図 5：テーマ D の実施内容とテーマ A、B、C 及び実務機関との関係



図 6：地球温暖化で地球はどうなるだろう

後で解説する図9は気候予測の分野から防災研究に提供される、1時間ごとの雨量の出力ですが、208X年という気候変動の将来予測の中で台風が発生し、日本付近に大雨をもたらしています。このような気象モデルを使って、台風の将来の増加傾向や、中心気圧や総雨量の変化を見ることができますが、2080年頃の具体的な日付が付いていても、天気予報のように天候が当たるわけではなく、この頃に起きやすい傾向を読み取るために利用します。例えば21世紀末の30年位の間の全体的な気候の傾向を踏まえた1時間ごとの予測を計算すると、将来の気候における台風の傾向が読み取れます。

ここで、天気予報と気候予測の違いを説明します。図7の2つの図の縦軸は、気温や降水量などの具体的な気象要素を示します。天気予報のような1週間先程度であれば、予測計算の初めの状態が少し違った程度では、それほど予測の振る舞いは変わりません。ところがある程度予測時間が長くなると、予測と実際の状況の違いは非常に大きくなり、様々な小さな違いが互いに影響を与え合って、実際の天候との比較では非常に大きな差となって現れます。気候変動の将来予測はこのような効果があることを踏まえて計算しており、計算結果は統計的な揺れ幅や平均量として確認します。このように、日々の天気予報との違いを意識して使って頂く必要があると思います。

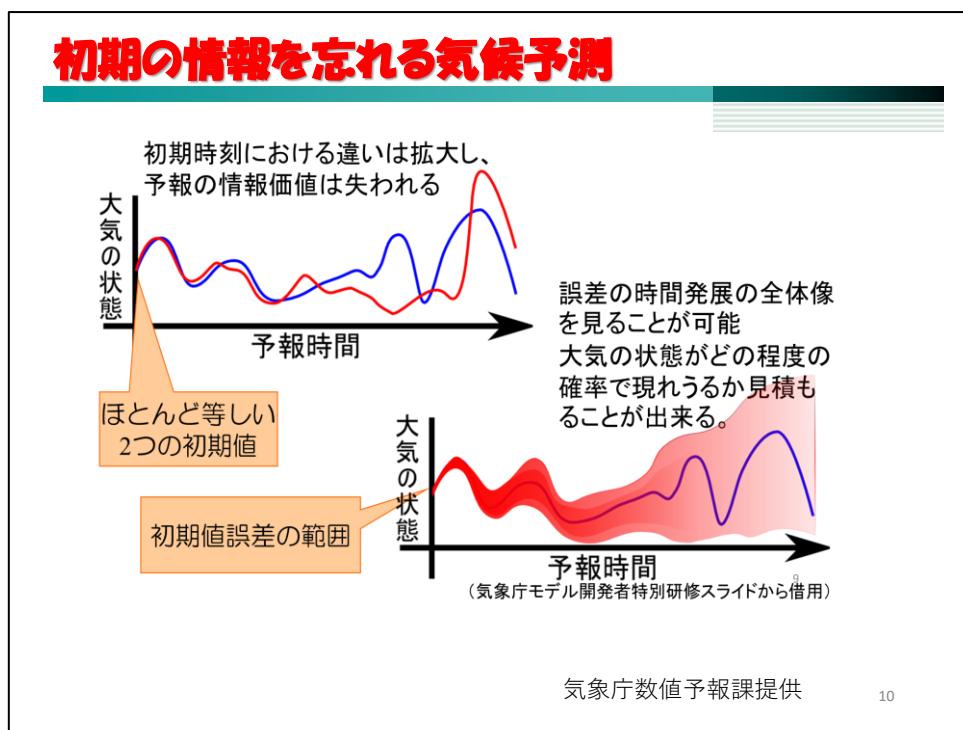


図7：初期の情報を忘れる気候予測

1.1 GCM、RCM と豪雨災害予測

将来予測では、は地球全体を対象とした全球気候モデル (Global Climate Model、GCM)、及び領域気候モデル (Regional Climate Model、RCM) を用います。大気は地球上で繋がっているため、長期に渡る将来予測には全球での計算が必要ですが、計算コストが掛るため解像度はそれほど細かくできません。一方で、20km ほどの解像度のモデルでは、梅雨の豪雨や積乱雲の再現が重要なゲリラ豪雨などは解像度が粗すぎて確認できません。そのため、図 8 のように見たい現象に応じて 20km、5km、2km などの解像度の領域気候モデルを使い、注目する領域での高解像度化を行います。例えば、梅雨前線の位置は全球モデルの粗い解像度でも見られますが、梅雨に伴う豪雨を解析する場合には、領域モデルによる高解像度化が必要です。



図 8：日本で災害をもたらす三大降雨原因

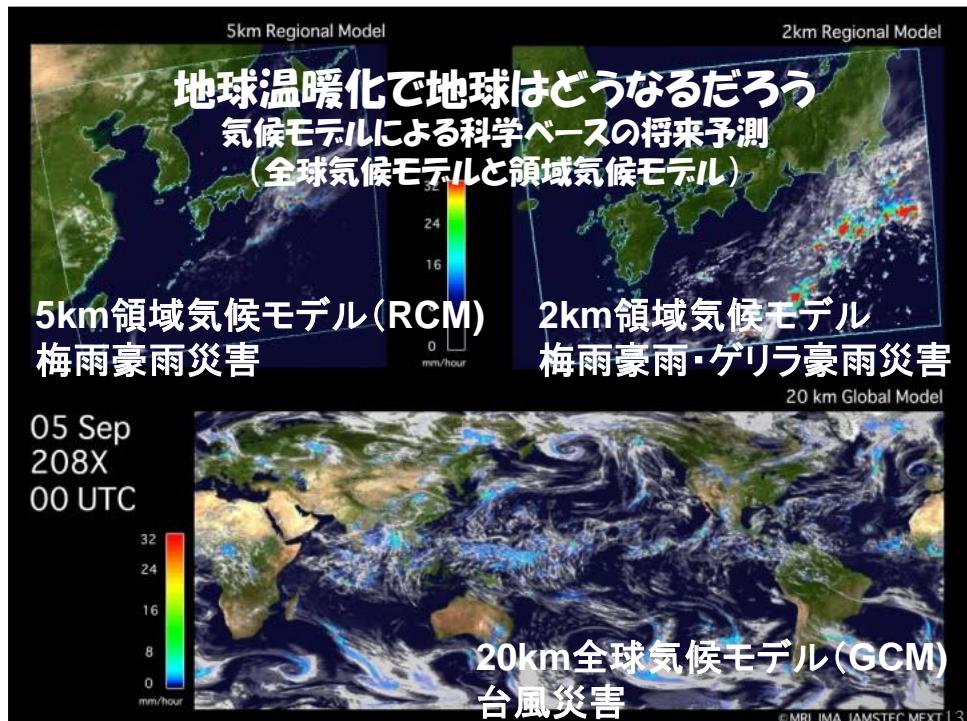


図 9：地球温暖化で地球はどうなるだろう

1.2 メガアンサンブルとその意味

高解像度の領域モデルでは計算コストの問題で多数の計算はできませんが、粗い解像度であれば将来予測を多く計算することができます。同じ気候条件の下で、小さなばらつきを与えた多数の計算をアンサンブルと呼びますが、文部科学省の統合的気候モデル高度化研究プログラム（以下、統合プロジェクト）では、メガアンサンブルという非常に多くのケースを計算するアンサンブルを実施しています。2010年もしくは最近の大気や海洋の状態を再現した上で、将来の温室効果ガスの変化等の条件を与えて計算しますが、将来の海の状態も 6 種のケースを採用し、更に観測からのばらつきなどを与えて様々な可能性を検討することで、少しの違いで生じる可能性のある予測結果をなるべく多く得られるようにしました。アンサンブル計算での一つ一つのケースをメンバーと呼びますが、今回の実験では 4°C 上昇時の計算を 90 メンバーについて各 60 年分計算したので、合計 5400 年相当の 4°C 上昇の世界の情報が得られることになります。同様に 2°C 上昇時の実験も行われ、現在は 1.5°C でも同じような計算が行われています（図 10）。

同じ考え方で 1850 年以降の温室効果ガス排出量増加がなかった場合の過去についても、100 メンバーでシミュレーションが行われています。非温暖化実験と呼ばれるこれらの計算は、温暖化が起きなかった場合との比較に用いられます。

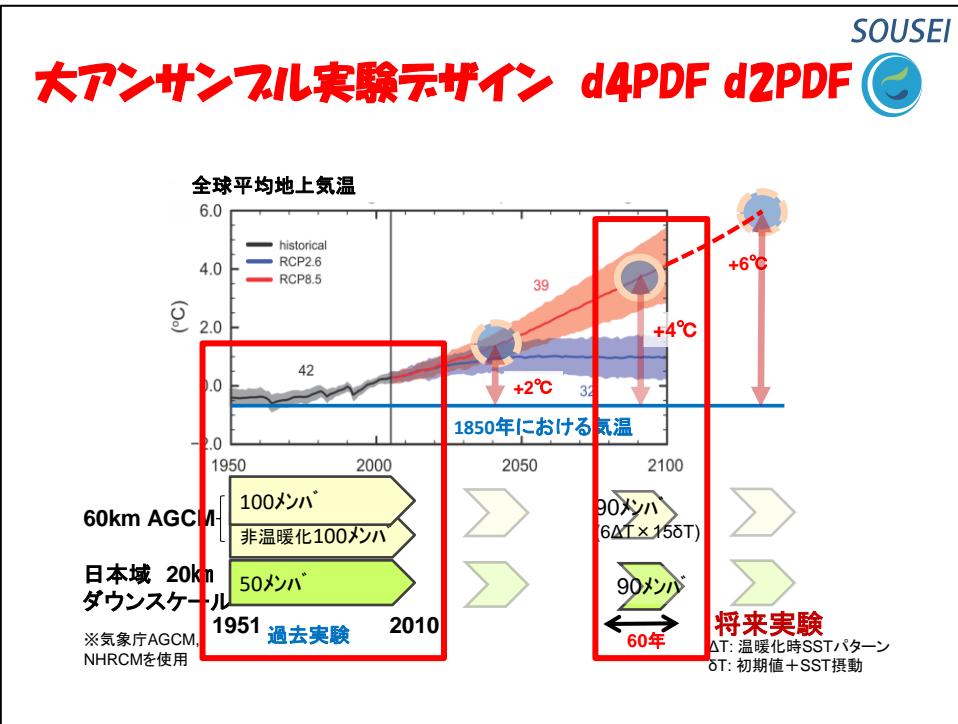


図 10：大アンサンブル実験デザイン

NHK スペシャルでも紹介されました、2019 年に台風 19 号による千曲川の氾濫について、気象研究所の川瀬宏明さんが、温暖化がなかった場合の台風のシミュレーションを行っています。その結果から、温暖化がなければ氾濫域が現在よりかなり小さかったと考えられることがわかりました。このようなモデルを使うことで、更に将来どの程度被害が悪化する可能性があるかもシミュレーションできます。

既に起きた過去のシミュレーションが多数あるという考え方には違和感を覚える方もいらっしゃるかもしれません、小さな違いで発生しうるケースを多数シミュレーションすることで、過去についても確率的な評価ができるようになります。

確率的な評価の例を見てみると、図 11 上の図のように 1 メンバーのみではあまりはつきりしない分布しか示せませんが、多数のアンサンブルで描かれた下の図では、全体的な確率分布がわかりやすくなります。アンサンブルの多数の情報により、現象の起きやすさの変化を確率的に評価できるようになります。

なお、既にこのような確率評価のためのデータセットは出来ており、全球気候モデル、領域気候モデルなど、目的に応じた解像度のモデルも利用できるようになってきました。これらの情報を適切に利用して将来予測を行い、適応に結びつけることが大切です。

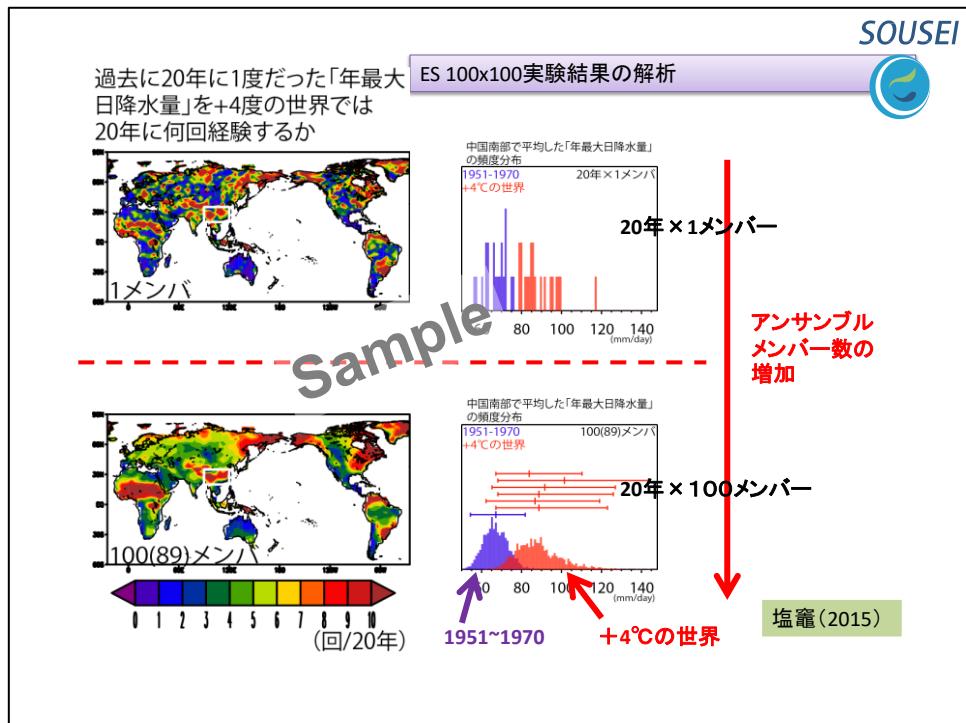


図 11 : ES100×100 実験結果の解析

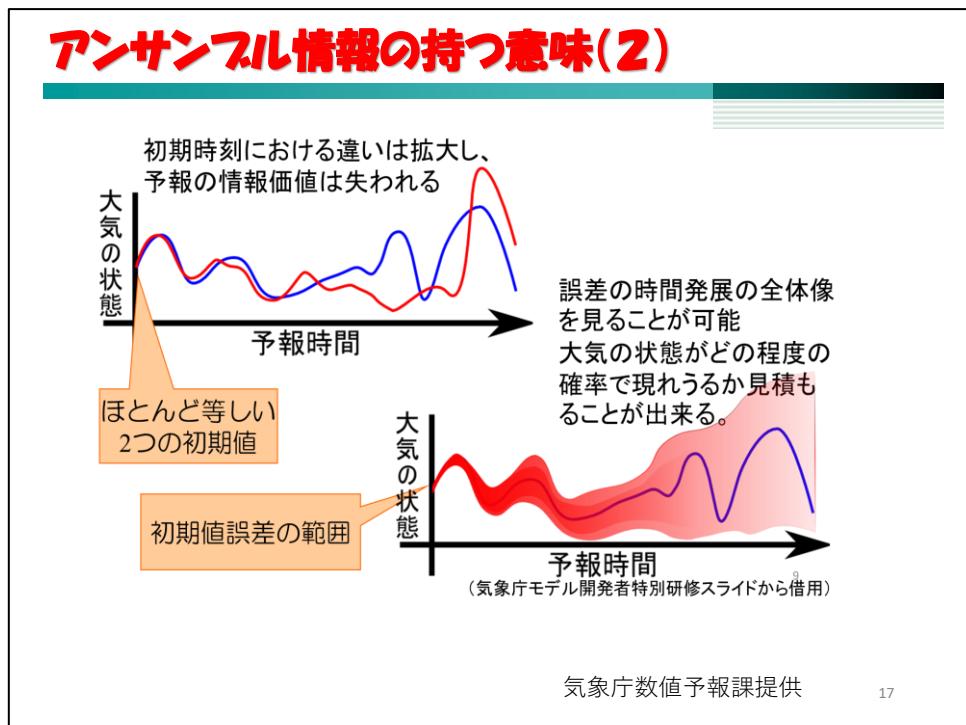
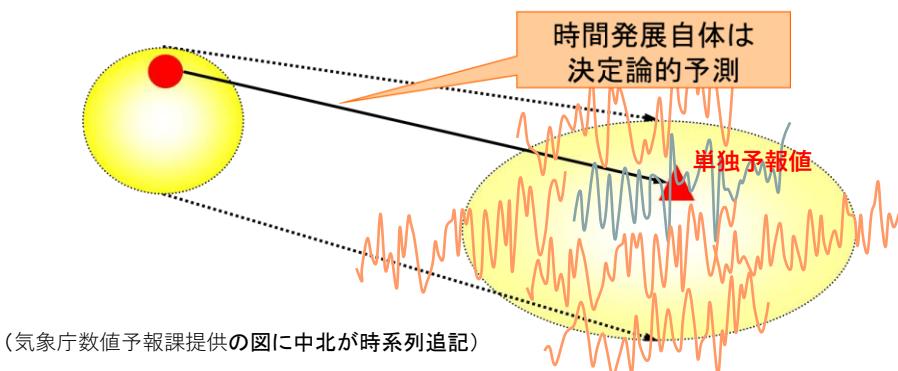


図 12 : アンサンブル情報の持つ意味 その 1

アンサンブル情報の持つ意味(2)



18

図 13 : アンサンブル情報の持つ意味 その2

創生と統合 Program D (2012-2022)



図 14 : 創生と統合

1.3 力学的ダウンスケールと統計的ダウンスケール

ダウンスケールには大きく分けて力学的ダウンスケールと統計的ダウンスケールがあります(図15)。気象の現象は、空間的な大きさと時間的な長さが概ね連動していますが、統計的ダウンスケールでは、粗い解像度の計算と細かい現象の関係を重回帰分析などによって直接統計的な関係を導き、将来予測などに適用します。一方の力学的ダウンスケーリングでは、気象要素を空間的解像度と時間的解像度の関係を維持しながら、物理法則に基づくモデルで計算します。

なお、豪雨などの自然災害では、主にこの力学的ダウンスケールの結果を利用しています。これは、自然災害では、雨の面的分布が実際の降雨で生じ得る分布であることが重要ですが、統計的ダウンスケールでは、それぞれのポイントでの統計式が別々に作成されるため、面的な分布を計算しても、必ずしも実際の降雨の現象で見られる面的分布にならない可能性があり、使いにくいためです。

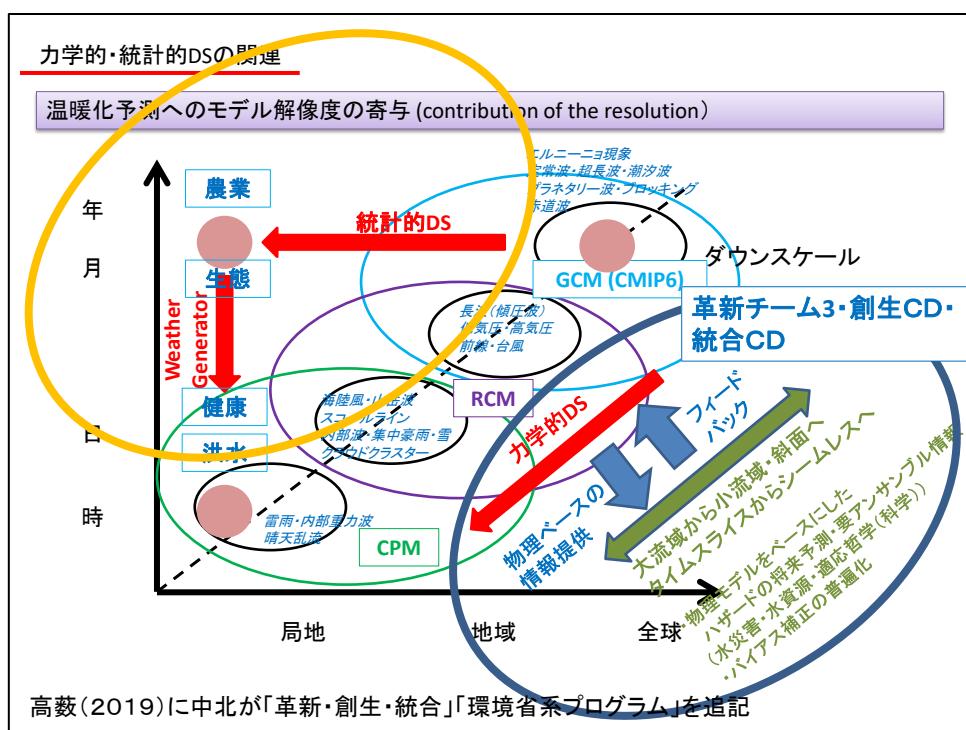


図 15：力学的・統計的ダウンスケールの関連

このため、豪雨災害の影響評価では、物理法則で計算された力学的ダウンスケーリングを使用していますが、図16の通り、力学的ダウンスケーリングは計算機を多く使用するため計算コストの高さが難点です。それでも、治水などの自然災害分野で、信頼性の高い予測を元に計画を立てるためには必要な情報です。

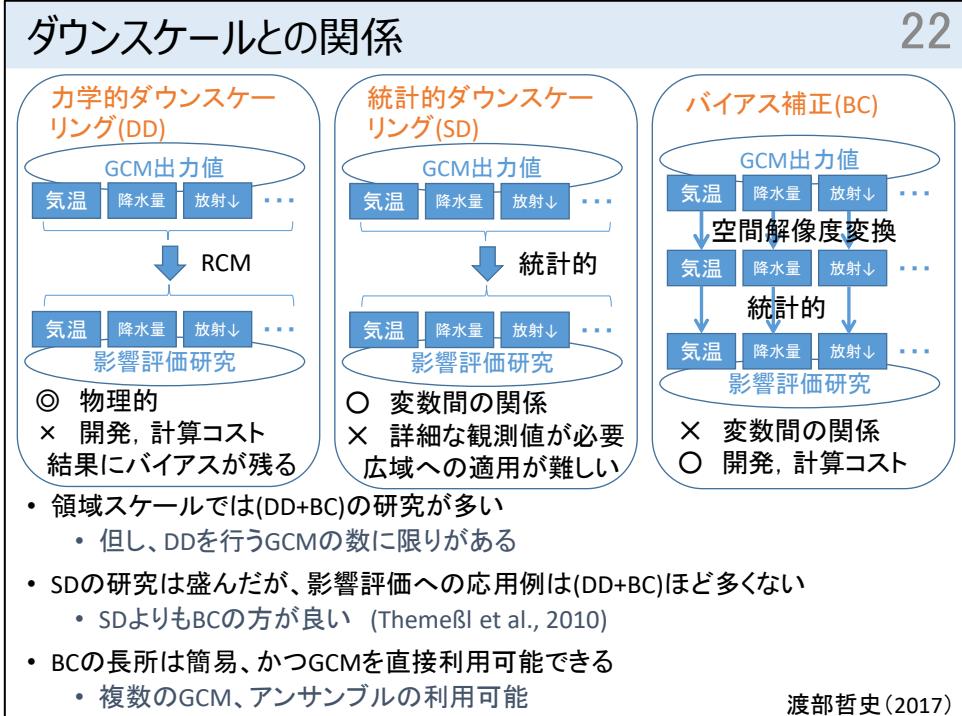


図 16：ダウンスケールとの関係

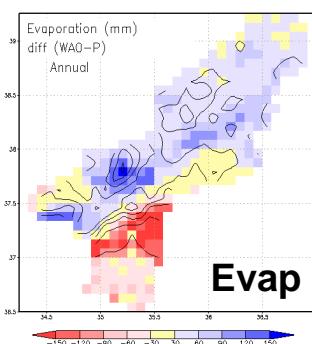
ただ、物理法則を組み込んだモデルは必ずしも観測と同等の精度とは限りません。観測値と過去を再現したモデルの値を比較し、差がある場合はモデルの結果に補正を行う必要があります（図 18）。

バイアス補正には主に 2 つの方法があります。一つは観測値と過去を再現したモデルの値の差を使い、将来予測を補正する図 18 の①の手法、もう一つはモデルの過去再現と将来予測の関係性を観測値に当てはめ、将来の予測値とする②の手法です。更に複雑なものを含め、補正手法は複数あることを覚えておいていただきたいと思います。

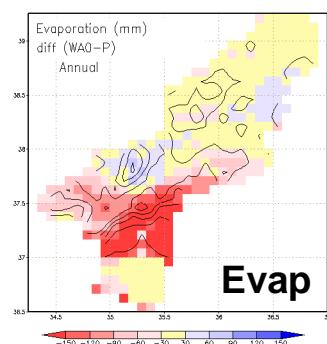
例として、図 17 の水資源での水の蒸発散の計算を示します。左のバイアス補正前の図では蒸発量がマイナスで水蒸気が凝結する領域が多いものの、右の通り補正を行うと蒸発量が多くなります。このようにバイアス補正が結果を大きく左右することもあります。

気候変動影響評価におけるバイアス補正の効果 (from ICCAP)

No correction



Bias corrected

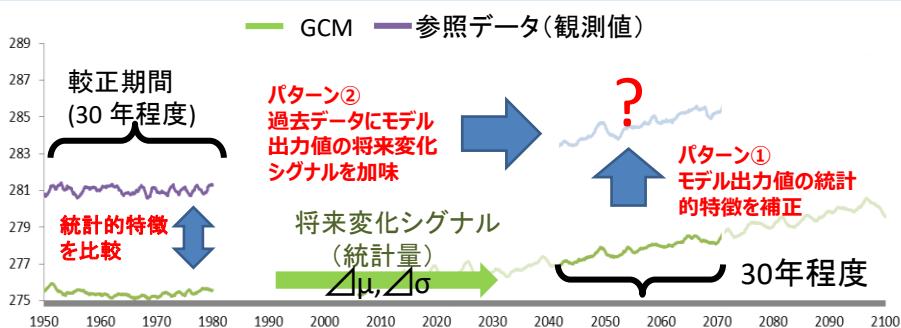


元の領域気候モデルに大きなバイアスがある場合、補正後に正負が逆転する場合がある。したがって、気候変動影響評価においてバイアス補正是大切である。 京大防災研究所田中賢治准教授(2016)

図 17 : 気候変動影響評価におけるバイアス補正の効果

2. バイアス補正とは

24



- ・気候モデル出力値と観測値（参照データ）との間の統計的な差を比較し修正する
 - ・両者の個々の出力（同一日時）を比較できない点に注意が必要
- ・広義ではダウンスケールの一つとして扱われている
 - ・複数の変数を使う（→統計的DS）か、否か（→BC）で区別する
- ・変換関数型（パターン①）とデルタ型（パターン②）に大別される

渡部哲史(2017)

図 18 : バイアス補正とは

図 19 は力学的ダウンスケーリングのデータ種別を整理したものですが、空間分解能やアンサンブル数はデータ選択での重要な要素です。アンサンブル数の多い d4PDF や d2PDF の他、同様に 1.5°C 上昇で計算されたものもあり、5400 年相当の将来の計算と 3000 年相当の過去の計算が利用できます。

また、それらに加えて国立環境研究所等でバイアス補正された将来予測データや、気象庁や環境省による将来予測データセットなど、様々な機関で情報が作られています。同じ力学的ダウンスケーリングでも温室効果ガス排出シナリオの違い、5km や 2km などの解像度の違い、使われている全球モデルの違いなどを考慮し、目的に応じたデータセットを選定することになります。なお、データによって異なる結果が得られるということは、一つのデータセットのみを使った判断は、危険であることも示していると言えます。

図 20 は、同様に統計的ダウンスケーリングのデータをまとめたものです。自然災害系では統計的ダウンスケーリングのデータはあまり利用しませんが、生態系や農業等ではこれらの情報が使われます。

力学的ダウンスケーリング						
	空間解像度	シナリオ	計算期間	バイアス補正	公開年	帰属・プロジェクト等
21世紀末における日本の気候	20km	RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5	現在気候 21世紀末	あり	2015	環境省・気象庁
温暖化予測情報 第9巻	5km	RCP8.5	現在気候 21世紀末	観測地点のみ	2017	気象庁 (SOUSEI)
気象研究所2km 力学的DSデータ	2km	RCP2.6, 8.5	現在気候 21世紀末	準備中	2018	SOUSEI, TOUGOU
d4PDF (4°C上昇)	20km		4°C上昇	作成中	2016	SOUSEI
d2PDF +2K	20km		2°C上昇	なし	2019	SI-CAT
D1.5PDF	20km		1.5°C上昇	なし	2019	TOUGOU
100年以上シームレス	20km	RCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5	1951-21世紀末	なし	2021予定	TOUGOU

図 19 : 力学的ダウンスケーリング

統計的ダウンスケーリング						
	空間解像度	シナリオ	計算期間	手法	公開年	帰属・プロジェクト等
S-8共通（第二版）	1km	RCP2.6, 4.5, 8.5	現在気候 21世紀中頃 21世紀末	線形内挿・スケーリング法	2013	S-8
日本全国1kmメッシュ統計的	1km	RCP2.6, 8.5	現在気候から21世紀末	BCSD法	2019	防災科研、SI-CAT
日本全国1km地域気候予測シナリオデータセット	1km	RCP2.6, 8.5	現在気候から21世紀末	スケーリング法	2019	農研機構、SI-CAT
CMIP5をベースにしたCDFDM手法による日本域バイアス補正気候シナリオデータ（NIES2019）	1km	RCP2.6, 8.5	20世紀初めから21世紀末	CDFDM法	2019	国立環境研究所
CMIP6をベースにしたCDFDM手法による日本域バイアス補正気候シナリオデータ（NIES2020）	1km	3種のSSP-RCPを提供予定	20世紀初めから21世紀末	CDFDM法	2021予定	国立環境研究所

図 20：統計的ダウンスケーリング

2 どのように豪雨災害予測に使うか、どのようなことが予測されているか

災害に関連する豪雨として、台風、梅雨、ゲリラ豪雨を挙げましたが、それぞれ影響を及ぼす広さや対象が違います。台風は非常に広い領域が対象となり大河川にも影響を及ぼしますが、梅雨は少し狭く、ある地方程度の領域で中小河川から小さめの一級河川、ゲリラ豪雨はごく狭い領域で都市の小さな河川や下水管での鉄砲水やアンダーパスの浸水などに影響を及ぼします。

気候変動による影響としては、台風、サイクロン、ハリケーンは大気の安定化によって個数は減る予測となっており、日本への到来回数も減る予測のようですが、海水温が上昇することで、一旦台風ができるとエネルギーを得やすく強大化する可能性があります。また、7月上旬の梅雨の豪雨の発生割合増加や、集中豪雨での総雨量増加も予測されていますが、これらは、実際に起きた西日本豪雨、九州北部豪雨、球磨川豪雨の傾向とも合致しています。加えて、今後 21 世紀末頃には、日本海側、東北・北海道でも梅雨の豪雨が起こる可能性があると予測されています。

文部科学省の統合プロジェクトでは、このような将来予測による雨や気温、水蒸気などを使って、土砂ジオハザードや土砂生産の他、一連の降水量の河川への影響、河川氾濫への影響を予測します（図 22）。

温暖化による日本への影響推測

・台風：

- 日本への到来回数は減る
- スーパー台風の危険性は高まる



・梅雨：

- 7月上旬の日100mm以上の割合や集中豪雨の生起回数が増える。
- 日本海側の豪雨も増えるだろう

・ケリラ豪雨：

- 都市化や下層水蒸気の流入増があり増えるだろう

28

図 21：温暖化による日本への影響推測

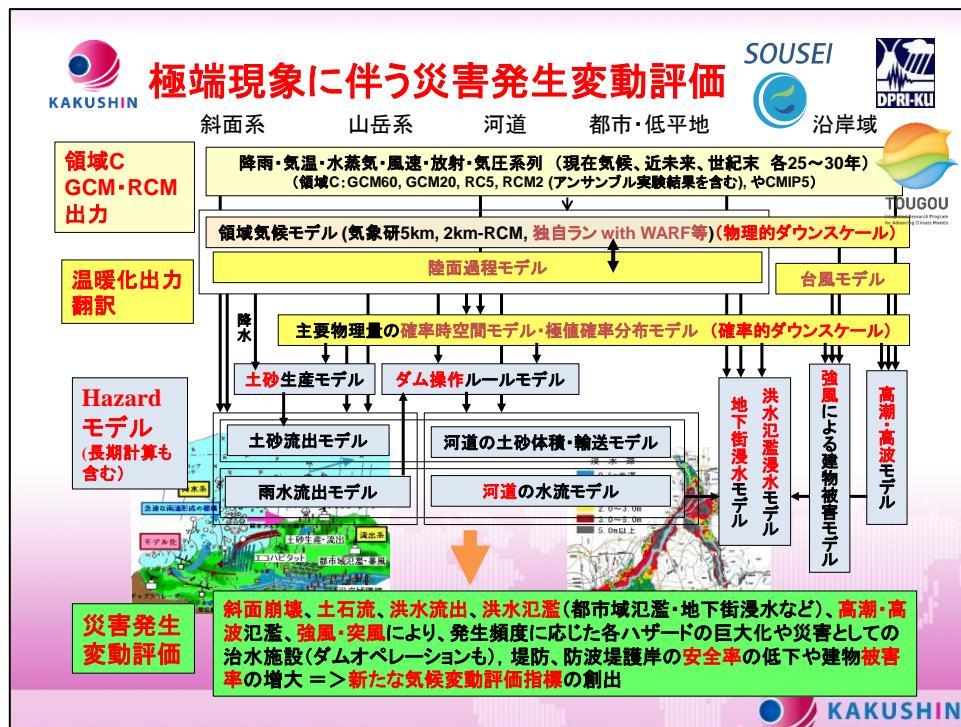


図 22：極端現象に伴う災害発生変動評価

なお、現在では、気象モデルとハザードモデルを組み合わせることで河川や高潮などへの影響も予測できるようになってきました。台風の影響なども含め、治水に重要な将来的な豪雨による河川流量への影響も計算することで、ダム管理等における現在の手法の適用可能性なども検討できます。気候変動による極端現象の変化は、表面崩壊や深層崩壊といった土砂災害、高潮、高波、積雪など、様々な対象に影響を及ぼす可能性があります。

水災害・水資源に関し、我が国でおおよそ何が推測されているか？

- 100年に一度起こる規模の河川最大流量が全国で増大する
- 10年に一度の少ない規模で起こる河川流量が北日本と中部山岳地帯を除く多くの流域で悪化し、融雪水を利用している地域では、融雪ピークの減少やそれが早期化する
- ダム操作の有効性が変化する（洪水時も、渇水時も）
- 西日本太平洋側を中心に、表層崩壊や、深層崩壊という数10mの深さでかつ水平規模の大きい斜面崩壊の危険性が増大すること
- 100年に一度の規模で起こる高潮・高波が主要湾で悪化すること
- 降雪、積雪状況の変化により、水ストレスが増加すること

30

図 23：水災害・水資源に関し、我が国でおおよそ何が推測されているか？

次に、梅雨での豪雨について、お話しします。2017年九州北部豪雨は土砂崩壊、土石流により70名程の方が亡くなりました（図24）。梅雨前線に伴う豪雨でしたが、非常に小さな地域に特に強い雨が発生し、航空写真でも生活が営まれていた地域が、全て土砂で埋まってしまうという非常に悲惨な状態を生んでしまったことがわかります。

このような梅雨期の豪雨の将来変化も、気象研究所で計算されている5kmの解像度の6月7月頃の30分降水量の情報を用いて研究しています。d4PDFの5400年のデータには及びませんが、複数の海面水温予測を使うなど多くの種類の結果が得られるように工夫しています。



図 24：九州北部豪雨(梅雨豪雨)災害



図 25：筑後川右岸流域の被害状況

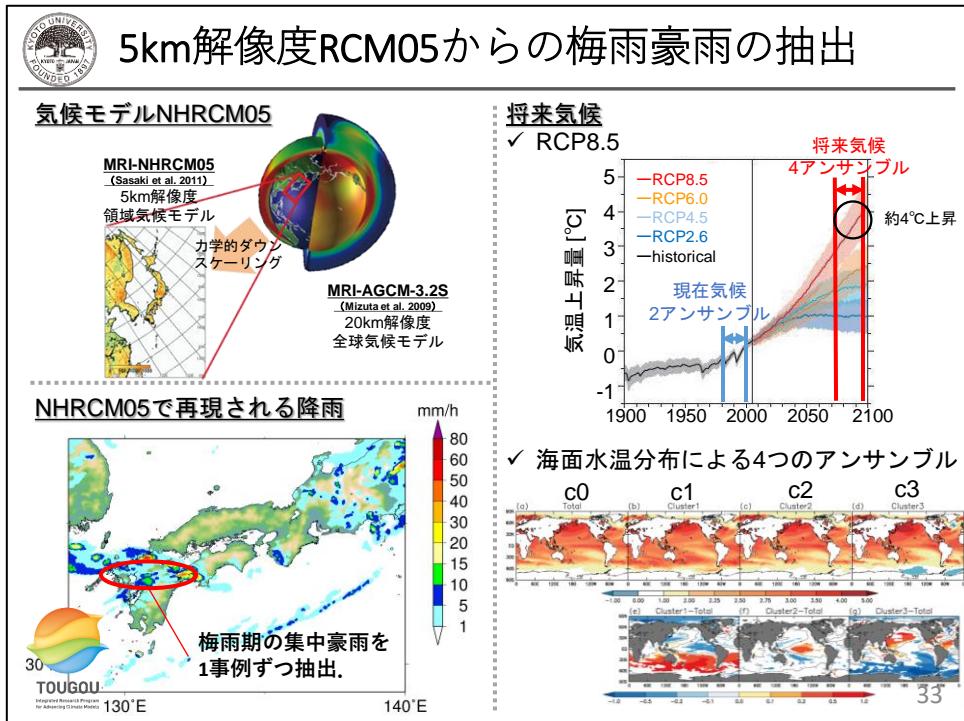


図 26 : 5 km解像度 RCM05 からの梅雨豪雨の抽出

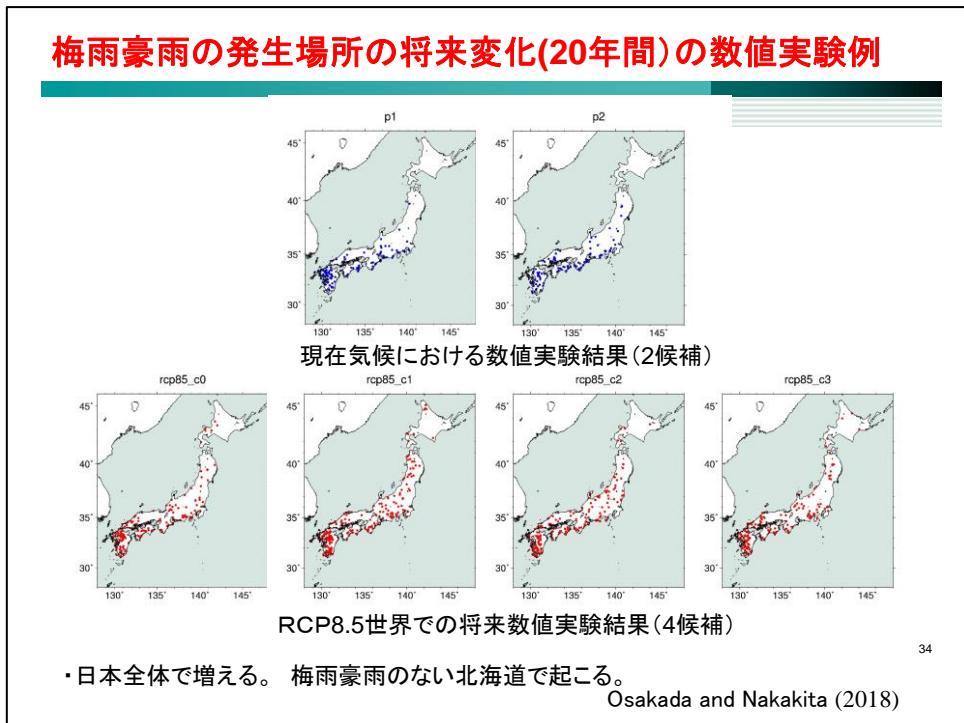


図 27 : 梅雨豪雨の発生場所の将来変化(20 年間)の数値実験例

図 27 は梅雨前線に伴う豪雨の発生の 4°C 上昇時の将来変化を実験したものですが、21世紀末近くでは東北や北海道、日本海側でも発生が予測されています。このように、力学的ダウンスケーリングでは、地形の影響も加味した将来の発生傾向が予測できます。

線状降水帯を始めとした長時間継続する豪雨は、治水に大きな影響を与えます。 50mm/h 以上の雨の継続時間と総降水量を確認すると、将来は同じ継続時間でも総降水量がより多くなることが予測されています(図 28)。この図での九州北部豪雨や球磨川豪雨などの位置を確認すると、将来予測での中心に近くに位置しており、このような豪雨が既に発生していることは、気候変動影響の研究結果が現状と矛盾していないことを示しているとも言えるでしょう。なお、将来の土砂災害の危険度を地域別に計算することで、斜面崩壊等の将来リスクが検討できますが、最先端の研究では、連続的な将来予測を用いてリスクの高いエリアの今後の動向を調べています。

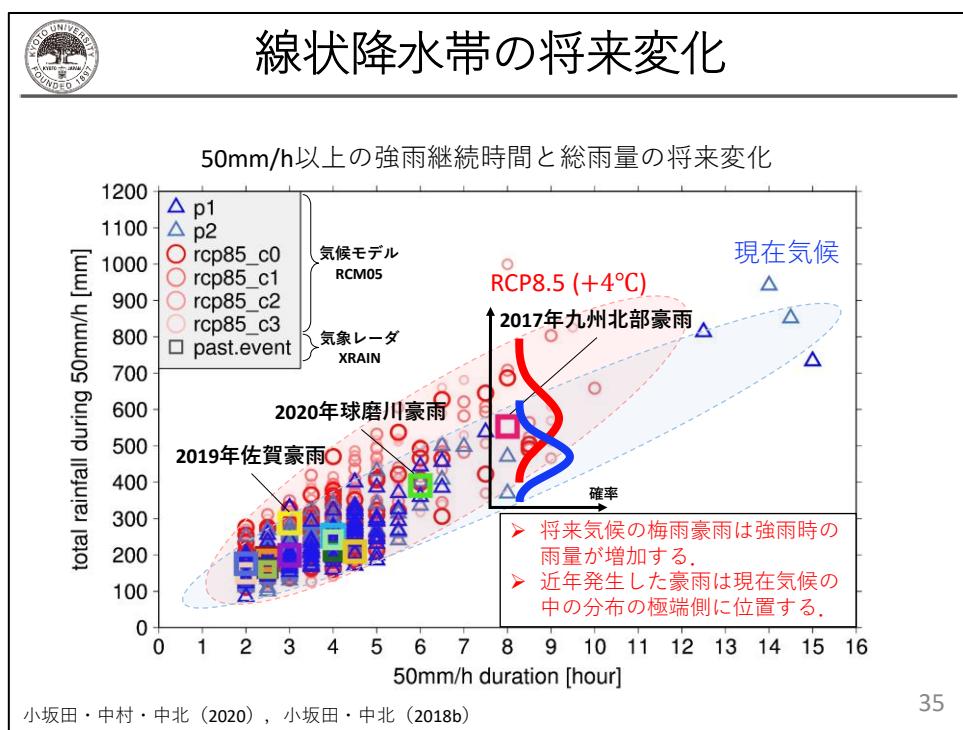


図 28：線状降水帯の将来変化

気候変動による台風への影響として、スーパー台風が日本にも大雨をもたらす可能性が指摘されています(図 29)。平成 25 年(2013 年)の台風 18 号では、近畿地方で淀川上流の桂川、宇治川、木津川の上流で大雨が発生し、京都府内で桂川が溢れるなど、強大な台風の被害は既に見られています。この時には、宇治川及び桂川上流のダム、琵琶湖から宇治川に流れる堰を全て満杯まで溜めることで、洪水を最小限に抑えました(図 30)。

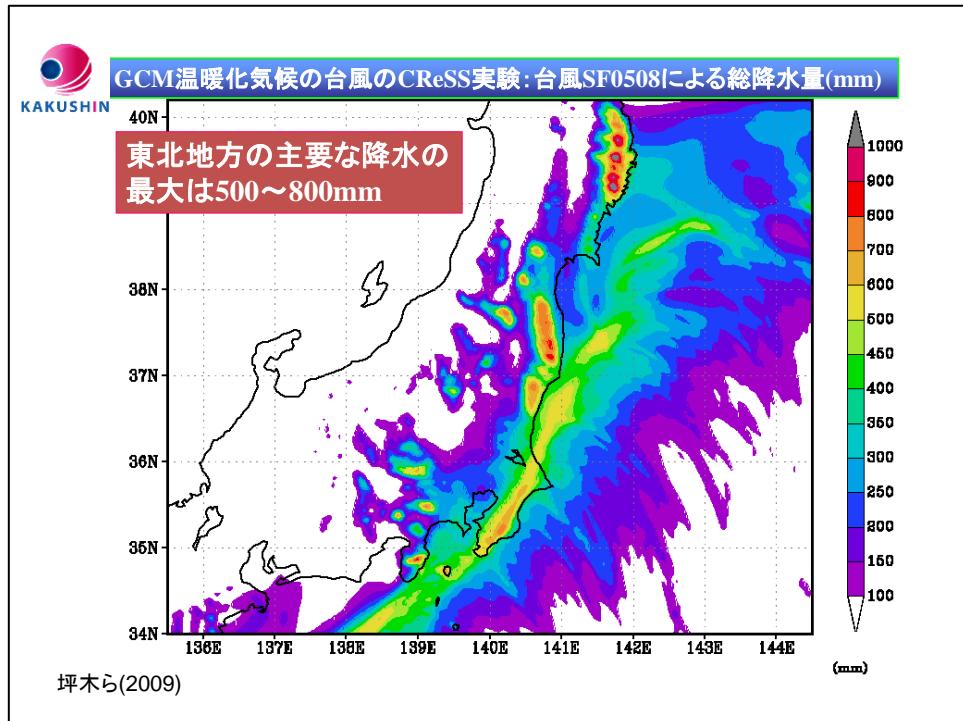


図 29 : GCM 溫暖化機構の台風の CReSS 実験 : 台風 SF0508 による降水量(mm)



図 30 : 淀川水系のダム群全体で洪水調整

そのような豪雨の発生をアンサンブルの情報を使って、ある流量を超えない確率（非超過確率）で考えてみます（図 31）。例えば、過去実験での枚方では、200 年に 1 回程度を表す非超過確率 99.5% の河川流量は毎秒 1 万 2000 t です。将来予測で同じ 200 年に 1 回の結果を見ると、増加することがわかります。このような将来予測のばらつきは確率分布で表され、庄内川や荒川など別の河川での 200 年に 1 回や、900 年に 1 回の確率も計算できますし、高潮や高波でも同じような確率分布が検討できます。

2018 年の台風 21 号では、大阪の街はぎりぎりで高潮が水門を超えて守られました（図 34）。この水門は 60 年前に建てられてから初めて効果を發揮しましたが、老朽化のため現在新しいものを設計しています。80 年程度の長期にわたって使用するため、設計には温暖化の影響も考慮していますが、今後の温室効果ガス排出量の変動の影響もあり、起きうる状況には幅があります。このような幅も、様々な予測による確率分布等を確認することで、多面的に検討することができます。

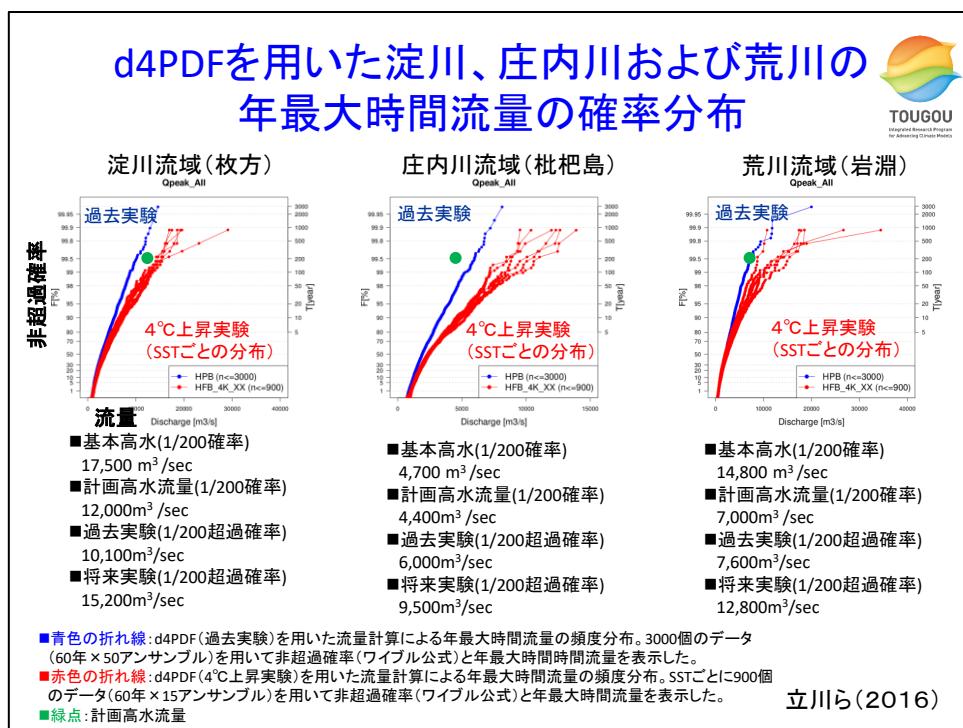


図 31 : d4PDF を用いた淀川、庄内川および荒川の年最大時間流量の確率分布

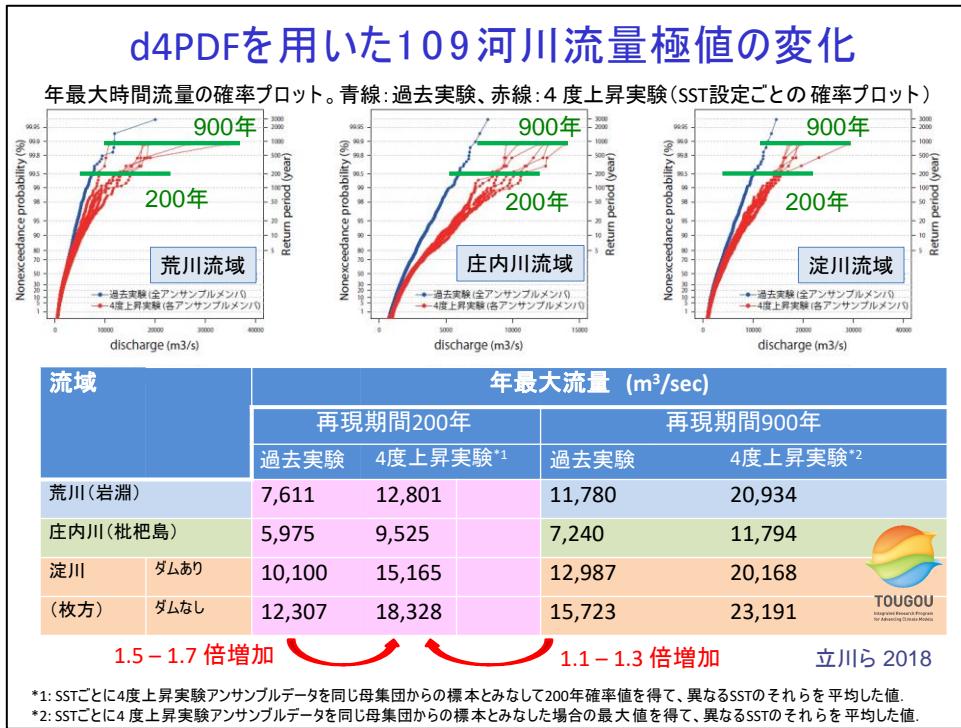


図 32 : d4PDF を用いた 109 河川流量極値の変化

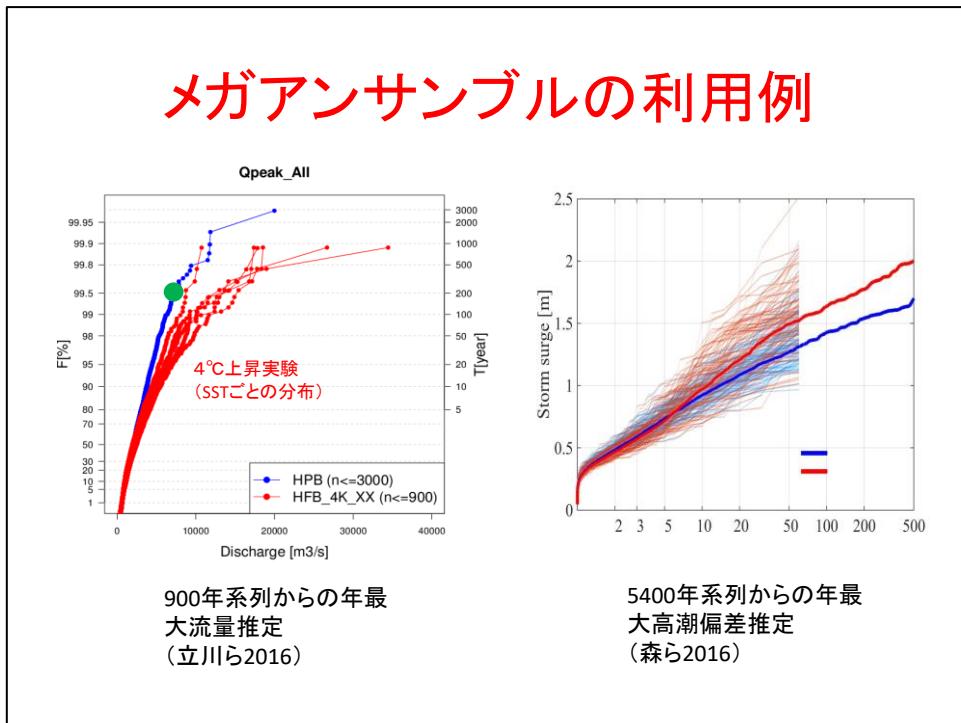


図 33 : メガアンサンブルの利用例

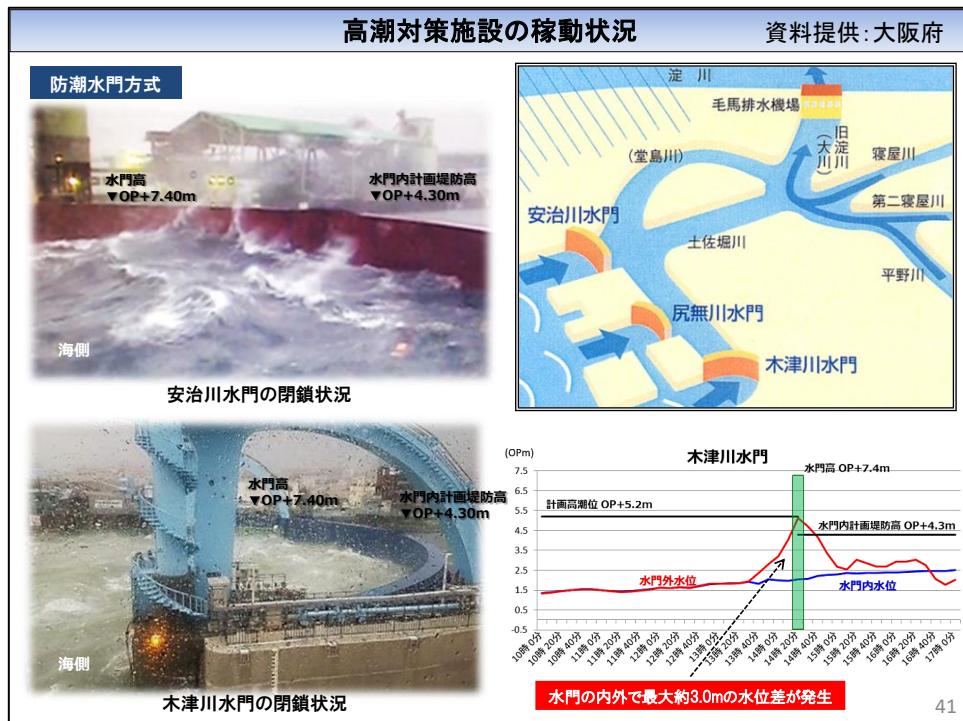


図 34：高潮対策施設の稼働状況

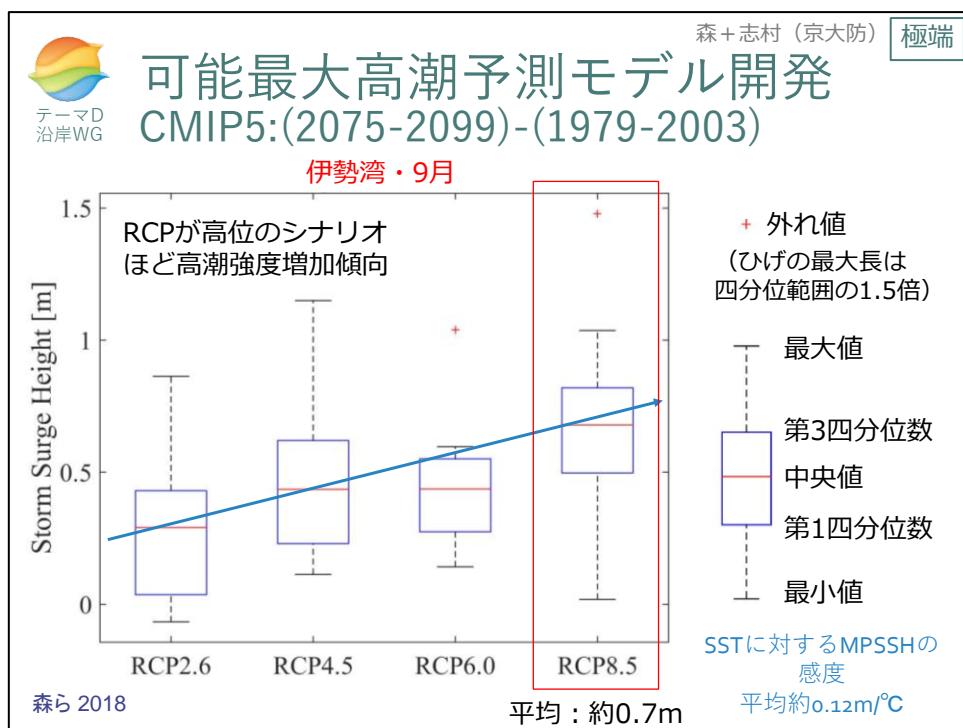


図 35：可能最大高潮予測モデル開発

3 最大クラス予測とは

稀な現象の検討では、100年に一度程度起きる程度の現象をレベル1（L1）、1000年に一度程度の災害をレベル2（L2）と呼んでいます。最近は、これらの災害の危機管理でも、河川流量や高潮の将来の発生確率を使った検討ができるようになってきました。

図38は1959年の伊勢湾台風が、温暖化の影響を受けた場合に起きた台風と高潮を検討したものです。伊勢湾台風は名古屋を高潮が襲い、5500人以上の方が亡くなりました。この実験では、当時の台風の進路が少しずれていた場合や、将来4°C上昇の時の海面水温上昇や気温上昇が起きた場合など、少し条件を変えて台風を計算しました。なお、このように将来の気温上昇を加味した計算を擬似温暖化実験と呼んでいますが、このような手法で、過去の台風の最悪シナリオだけでなく、温暖化の影響も加味した場合の最悪シナリオが検討できます。図38の過去の再現と4°C上昇時の高潮の氾濫域を比較すると、4°C上昇時は氾濫域が広がっていることがわかります。

なお、令和2年度に改訂された高潮浸水想定区域図のマニュアルでは、この計算のように、気候変動の影響が検討できる場合は、影響評価も利用してもよいことが示されました。



図36：最大クラスの気候変動予測とその重要性

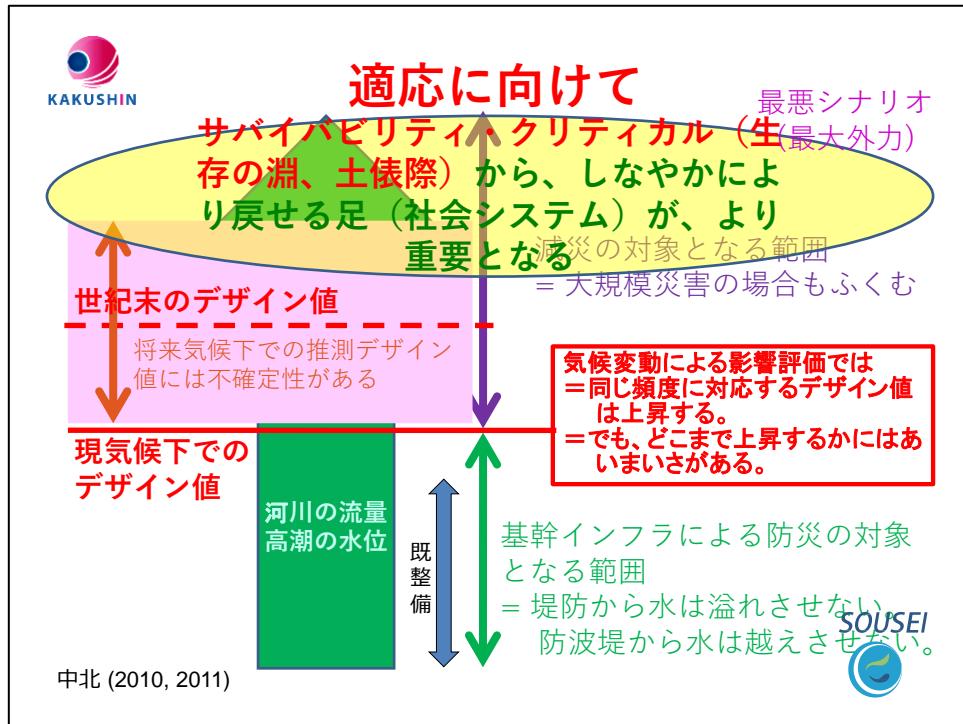


図 37 : 適応に向けて

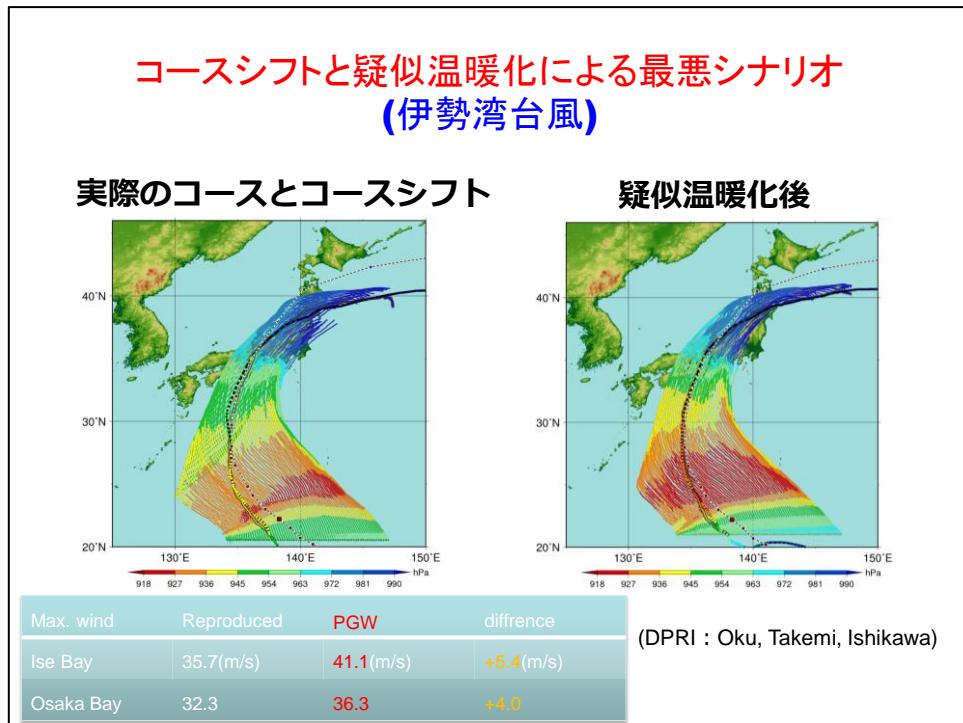


図 38 : コースシフトと疑似温暖化による最悪シナリオ

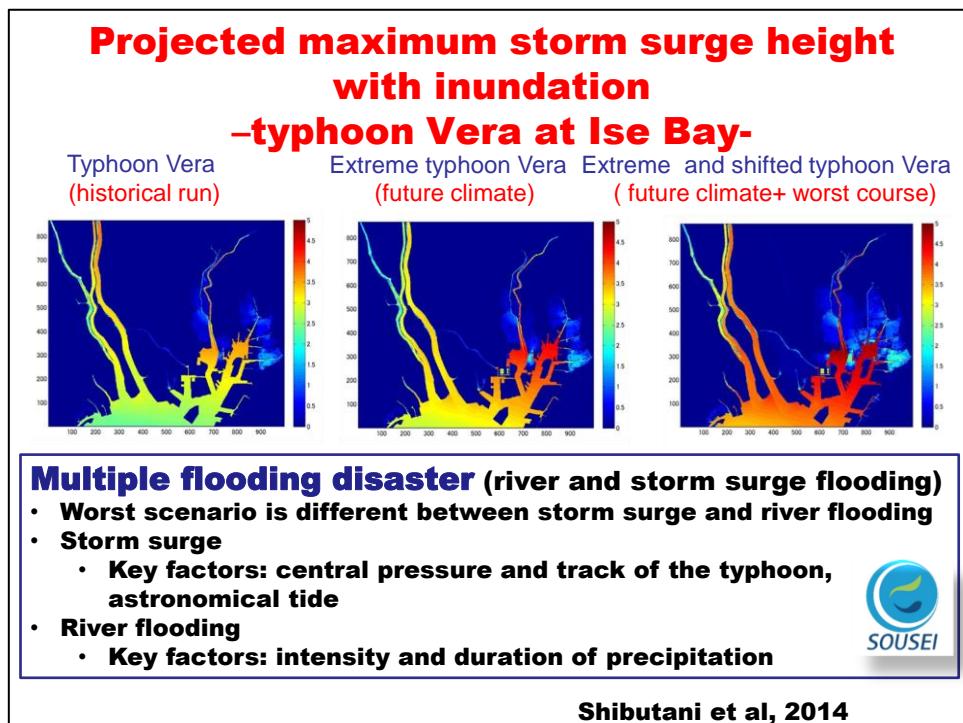


図 39：洪水を伴う高潮の最大潮位偏差予測

4 豪雨災害に対する気候変動適応とは

最後に気候変動適応についてお話しします。気候変動適応は、政府、地方公共団体等の実務機関との情報共有が非常に大切ですが、私たち研究者も国土交通省や環境省との協働を意識し、シンポジウム等を開催しています（図 40、図 41）。

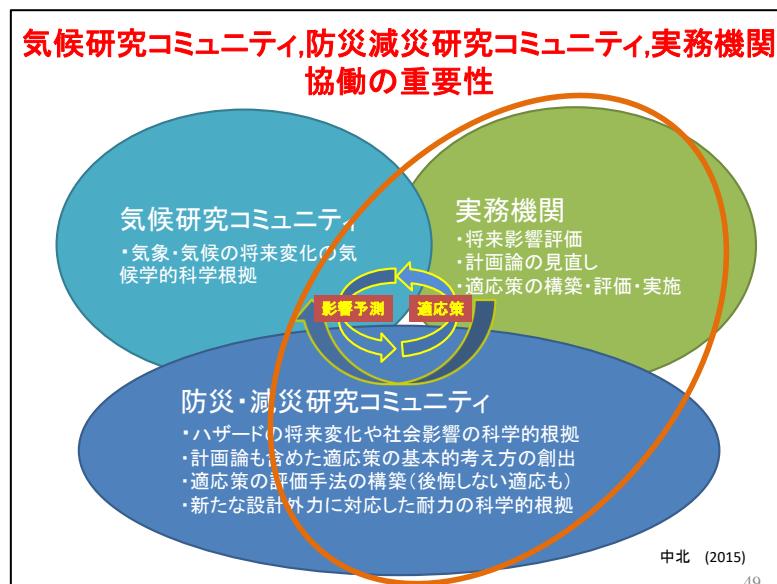


図 40：気候研究コミュニティ、防災減災研究コミュニティ、実務機関協働の重要性



図 41：実務省庁との研究連絡会やシンポジウムでの協働

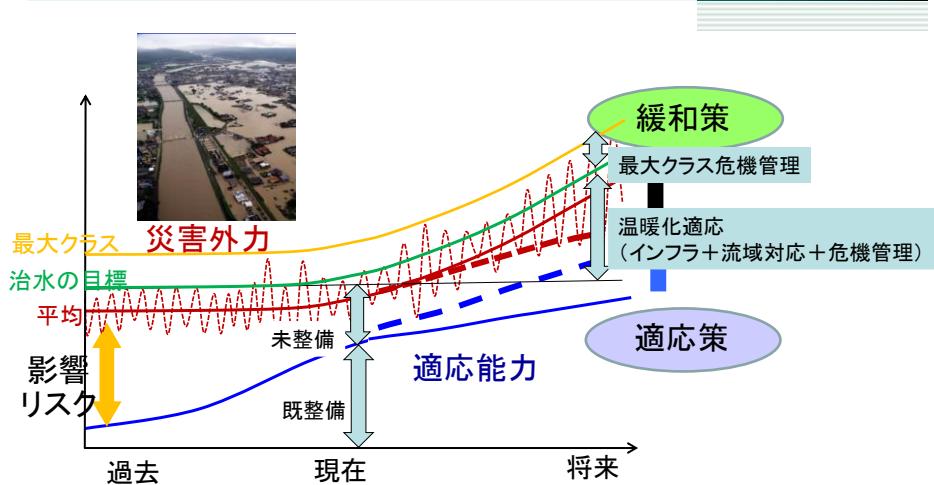
気候変動による変化は、図 42 のようにギザギザと小刻みに上下しながら上がっている状況です。将来変化を小さくするために気候変動の緩和策が非常に大切ですが、たとえ緩和策が成功しても影響の増加は止められません。このため、将来の変化を踏まえて、治水等の対策も対応能力を上げる必要があります。これが適応です。

温暖化の影響で、現在治水対策が完了している場所だけでなく、当然現在未整備の場所でもリスクが増大します。今後は、未整備箇所への対応、最大クラスの災害での危機管理対応など、更なる検討が必要です。現在、国土交通省は、災害等への対策検討には、 2°C 上昇時では降水量 1.1 倍、河川流量 1.2 倍として検討することを提言しています。加えて、流域全体で関係者が主体的に治水に取り組む流域治水の考え方に基づき、ハードとソフトの両方を考慮した検討を行っています。

図 43 では「後悔しない適応」と書いていますが、適応には時間が掛かるため今始める必要があります。温暖化の今後の推移によって、5 年後、10 年後に見直しながら実施する順応的な対応が効果的ですが、そのような対応が難しい場合には 4°C 上昇時をある程度見込んだ対応を検討するなど、手戻りのない適応が非常に大切です。

現在、日本は 2°C 上昇までに抑えることを緩和の目標とし、閣議決定もなされています。21 世紀末と予測されている 4°C 上昇と異なり、 2°C 上昇の世界はあと 30 年程度で起きることになります（図 44）。現在、治水でも使われている雨量 1.1 倍、河川流量 1.2 倍の世界になるまで、実はもう 20~30 年程度しかないのです。

適応策の役割



小松(九大、2012)、三村(茨城大、2014)に中北が追加(2019)

51

図 42：適応策の役割

温暖化に対する順応的適応策の考え方

手戻りのない適応・後悔しない適応とは

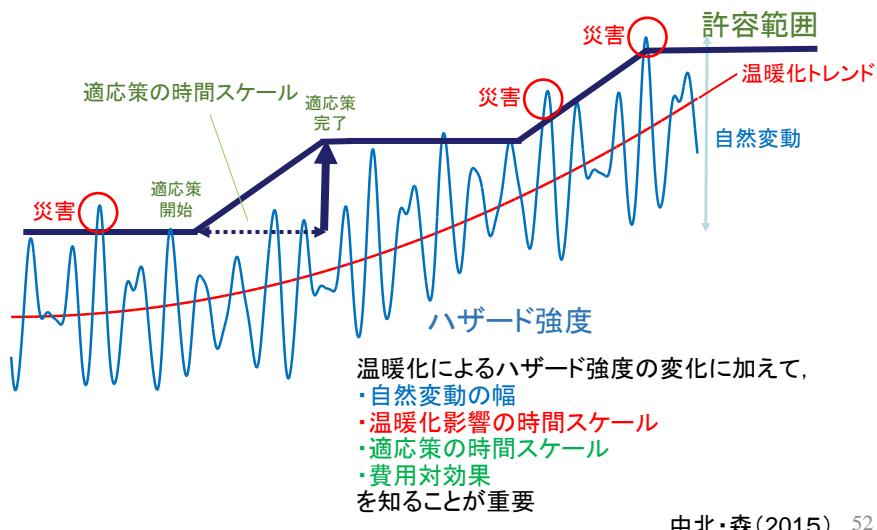


図 43：温暖化に対する順応的適応策の考え方

今世紀末までの世界平均気温変化予測： RCP2.6でも2度上昇は世紀末ではありません

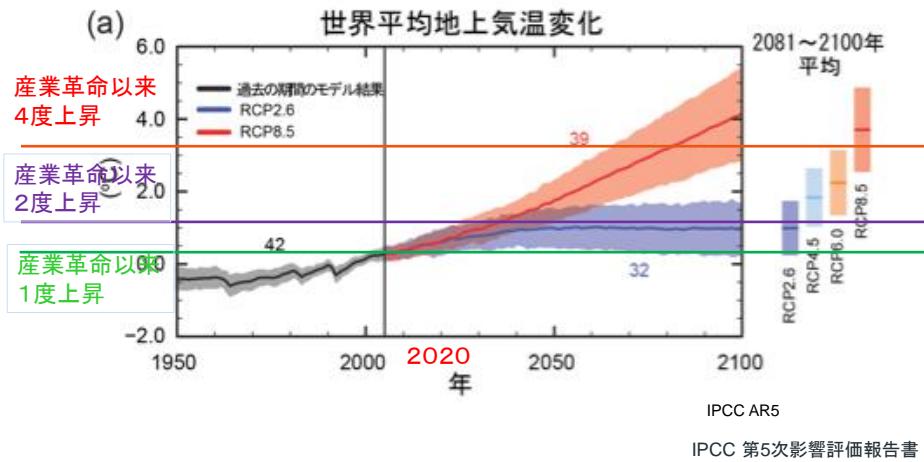


図 44：今世紀末までの世界平均気温変化予測

お話しした通り、温暖化による豪雨災害の影響が東や北に広がること、既に豪雨災害が多い西日本でも更にリスクが増大することなどから、科学的な将来予測に基づいた後悔しない適応が大切です（図 45）。

現在の日本では、気候変動予測モデルを使ったハザードや水資源への将来予測が可能になっています（図 46）。気候変動で豪雨災害、渇水などの極端現象はより厳しくなると言われていますが、そのような現象も確率が計算できるようになっています。予測結果に不確実性はあるものの、不確実性を理由に気候変動への対応を遅らせると、取り返しのつかないことがあります。

また、実践を通じた適応策のボトムアップも一つ一つ進めることも大切です。全国一律で行う対策もあるかもしれません、まずは各流域、各土地改良区など、それぞれの地域のそれぞれの分野で適応を着実に進めることが重要です。これまで温暖化対策と意識されずに取っていた対策の中には、結果的に温暖化の適応となる対策もあるでしょう。

温暖化の進行について、現在わかっていない脆弱性が顕在化することも考えられます。今から様々な可能性を検討し、わかっていない事象を発掘することも大切です。更に、ステップバイステップで、手戻りのない適応を行うと共に、最悪の事態も想定した危機管理についても検討が必要です。例えば、地域づくりとタイアップし、土砂災害や水災害の危険域などリスクの高い場所に住まないことなどが挙げられます。

温暖化影響予測と適応(1)



- ・ 温暖化の影響が出だしており、後悔しない適応が重要である
- ・ 科学的将来予測を元にした適応計画を構築し今すぐ実行に移すことが重要である
- ・ 温暖化は時間的にだけではなく東へ北へと地域的にもじわじわと進行する。したがって気候区分の境目での影響も大きい。また、計画降雨を超えるばかりかそれに近い雨量も増加するので未整備のところが目立つようになる。19号台風災害ではこの視点も重要である。どのように温暖化の影響が出だしてきているのかを、継続的に検証し明確化してゆくことも、温暖化適応を促進してゆく上で極めて大事なことである
- ・ 治水としての適応には長い時間を要する。そのことからすれば地球温暖化の進行は速い。今すぐに適応をスタートすること、すなわち、今すぐ、科学的将来予測をもベースに先を見越して考え、新たな考え方ですどう適応するかを決め（計画）、そして実行に移してゆくこと（適応）が、「後悔しない適応」である。時間が限られている。

（中北、2020）

図 45：温暖化影響予測と適応(1)

温暖化影響予測と適応(2)

- ・ 気候モデルによる時間毎の出力値により、我が国のハザード・水資源の気候変動影響予測が可能となっている。
- ・ 世纪末にかけて、極端現象はよりシリアルスになると推測されている。
- ・ 「どれくらい？」が不確定だからといって適応を遅らせていると将来の適応が不可能あるいは困難になる危険性がある。
 - 今すぐ始める！ => 後悔しない適応
- ・ 実践を通しての気候変動適応もボトムアップとしてひとつひとつ進める。
 - まずこの認識を持つことが大事
 - 現在進行している対策も大切な温暖化適応である
 - 現気候下でも気づいていない脆弱性の発掘（災害調査等の重要性）
- ・ 科学的将来予測をベースに進める（基幹インフラの計画）
 - Step by step の適応 を計画する。手戻りのない適応。
- ・ 最悪の事態も推測した適応（危機管理）を考える。
 - 気候変動下の最悪の状況をどう適応に組み込んで行くかが最も重要な
- ・ 地域・街・町・都市づくりによる適応



（中北、2010, 2019）

図 46：温暖化適応予測と適応(2)

適応に向けての大切なこと

1. 対象とする河川流量などの設計値を見直す。
2. 気候変動下での最悪ケース群を想定する。
3. 高い不確実性の中で後悔しない意志決定。
4. 普段の「しんとい管理」の「じわじわ」とした高頻度化、これが今後、現場のしんとさ・疲労増大に結びついてリアルタイム防衛システムの安全度を低下させる、そのようなことがないように対応して行く。
5. ギリギリ守ることができた事例も蓄積
6. ダム再生、豪雨・流量予測能力の向上と安心できる操作規則
7. 猛暑や水不足など、普段の場のじわじわ変化への適応
8. 治水の基礎力(基幹インフラ)、危機管理能力、自助共助による防災・減災力の向上
9. 可道内と外(堤外と堤内)を一体化した治水
10. シリアスに早期に逃げること。やばいと感じること。
11. 危険な場所には住まないこと。



SOUSEI



図 47：適応に向けて大切なこと

気候変動を踏まえた治水計画のあり方提言の概要(国土交通省)

I 踏ま化している気候変動の状況

IPCCのレポートでは「気候システムの温暖化には疑う余地はない」とされ、実際の気象現象でも気候変動の影響が観在化

<踏ま化する気候変動の影響>

既に発生していること	今後、予測されること
・世界の平均気温が1850～1900年と2003～2012年で比較 0.78°C上昇	-21世紀末の世界の平均気温は 更に0.3～4.8°C上昇
・豪雨の発生件数が約30年前の 約1.4倍に増加	-21世紀末の豪雨の発生件数が 約2倍以上に増加 ・短時間豪雨の発生回数と降水量とともに増加 ・流入水蒸気量の増加により、総降水量が増加
・平成30年7月豪雨の陸域の 総降水量は約6.5%増	

II 水害対策の考え方

水防災意識社会の再構築する取り組みをさらに進化するため

・気候変動により増大する将来の水害リスクを徹底的に分析し、分かりやすく地域社会と共有し、社会全体で水害リスクを低減する取組を強化
・河川整備のハード整備を充実し、早期に目標とする治水安全度の達成を目指すとともに、災害リスクを考慮した土地利用や、流域が一体となった治水対策等を組合せ

IV 治水計画の考え方

気候変動の予測精度等の不確実性が存在するが、現在の科学的知見を最大限活用したできる限り定量的な影響の評価を用いて、治水計画の立案にあたり、実績の降雨を活用した手法から、**気候変動により予測される将来の降雨を活用する方法に転換**ただし、解像度5kmで20上昇相当のd2PDF(5km)が日々公表されることから、河川整備基本方針や施設設計への降雨変化倍率の反映は、この結果を踏まえて、改めて年度内に設定

<治水計画の見直し>

- ・河川の目標と整合する**RCP2.6(2°C上昇に相当)**を前提に、**治水計画の目標流量に反映**。
整備メニューを変更、将来、更高的温度上昇により降雨量が増加する可能性があることを考慮。
- ・気候変動による水害リスクが観在化する中でも、目標とする治水安全度を確保するため、**河川整備の速度を加速化**

<将来降雨の予測データの評価>

・気候変動予測に関する技術開発の進展により、地形条件をより的確に表現し、治水計画の立案で対象とする台風・梅雨前線等の気象現象をシミュレーションし、災害をもたらすような極端現象の評価ができる大量データによる気候変動予測計算結果が整備

<将来の降雨量の変化倍率> <暫定値>

・RCP2.6(2°C上昇相当)を想定した、将来の降雨量の変化倍率は全国平均約1.1倍



<合わせて実施すべき事項>

- ・外力の増大を想定して、**施設の設計や将来の改造を考慮した設計**や、**河川管理施設の危機管理的な運用等**も考慮しつつ、検討を行うこと。
- ・施設能力を上回る洪水が発生した場合でも、被害を軽減する危機管理型ハード対策などの構造の工夫を実施すること。

V 今後の検討事項

- 気候変動による、気象要因の分析や降雨の時空間分布の変化、土砂・流木の流出形態、洪水と高潮の同時発生等の定量的な評価やメカニズムの分析
- 社会全体で取り組む防災・減災対策の更なる強化と、効率的な治水対策の進め方の充実

国土交通省, 2019 57

図 48：気候変動を踏まえた治水計画のあり方提言の概要(国土交通省)

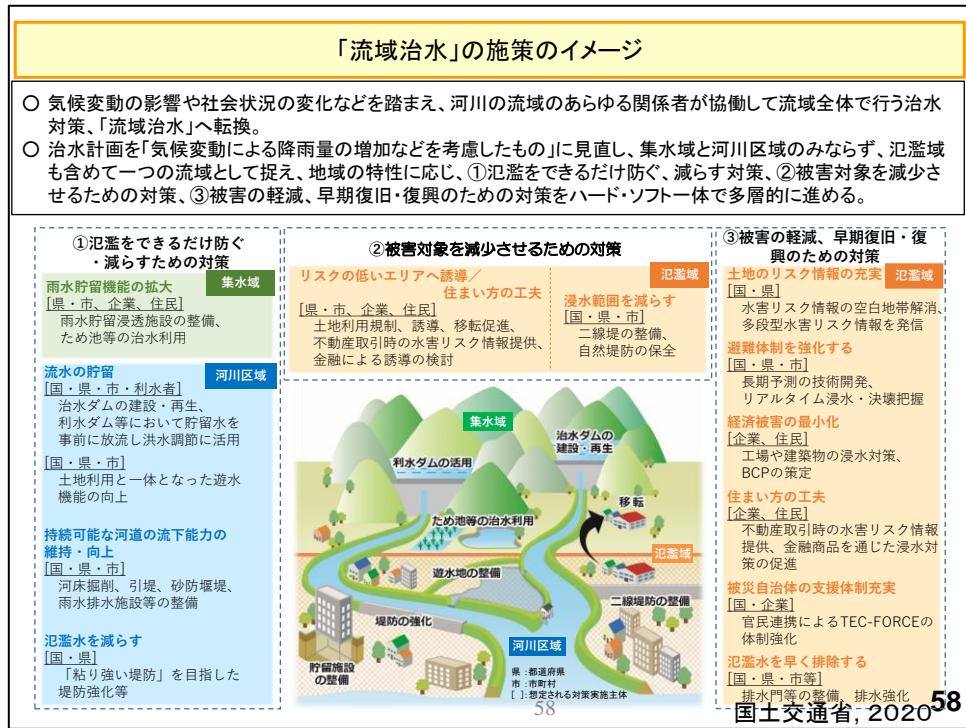


図 49 :「流域治水」の施策のイメージ

そもそも欠けている考え方はないか？

- 災害の形態が変わるのでないか？
- そもそも、自然ベースの流域・河川・沿岸の姿が変わるのでないか？
- どういった早さで？
- これらを科学的に予測する科学技術が重要！
- それに私達はどう適応して行くのか？（社会、考え方の変化も含め）一ひとつひとつの適応の総体が地域の適応となる！一
- 誰をハッピーにするのか？ 流域住民である！
を益々深めてゆかねばならない！

TOUGOU
Integrated Research Program
for Advancing Climate Models

図 50 : そもそも欠けている考え方はないか？

最後に、私たちは住民の皆さんをハッピーにするという使命を持って日々検討を行っています（図 50）。今の世代だけでなく、子供や孫、更に先の世代までをハッピーにするために、皆さんと一緒に仕事ができることを願っています。

（以上）

【用語解説】

リスクコミュニケーション	利害関係者間でリスクに関する情報を共有し、意思疎通を図ること
地球シミュレーター	海洋や地球科学等、様々な分野で利用されるスーパーコンピューター。海洋研究開発機構に所属。
ハザード	健康、財産、インフラ等様々な損失をもたらす物理的現象もしくは物理的影響。気候変動では特に気象や海洋に関係するものを指す。
GCM、RCM	GCM：全球気候モデル（Global Climate Model）、RCM：領域気候モデル（Regional Climate Model）
力学的ダウンスケーリング	物理法則に基づく数値モデルを用いた高解像度化手法
メガアンサンブル	メンバー（計算ケース）数が非常に多いアンサンブル
統計的ダウンスケーリング	低解像度データを統計的関係に基づき高解像度化する手法
バイアス	系統的な誤差、偏り
d4PDF、d2PDF	文部科学省のプロジェクトで開発された 4°C上昇及び 2°C上昇時の条件でアンサンブルを行ったデータセット
L1、L2	レベル 1 (L1)：数十年から百数十年に 1 回程度の災害、 レベル 2 (L2)：数百年から千年に 1 回程度の災害

国立環境研究所 気候変動適応センター主催
令和2年度 気候変動適応研修（中級コース）解説資料