

我が国の水災害に関わる 気候変動影響評価研究の進展

中北英一

京都大学 防災研究所
気象・水象災害研究部門

我が国の災害影響評価へのポイント

- 様々なハザード、人と関わった災害がある。
- 現実味のある（たとえば）河川流量を算定するためには、時間・空間的にきめ細かな情報が求められる。
- 気候モデルによる高解像出力が可能となって初めて、我が国の洪水、高潮・高波・波浪、風災害などの災害環境への気候変動による影響評価が可能となった。

共生、革新から創生プログラムへ

- Kyousei(共生)Program:2002-2006
 - 20kmRCM(領域気候モデル) (日雨量)
- Kakushin(革新)Program:2007-2011
 - 20kmGCM(全球気候モデル、時間雨量)
 - 5,2,1kmRCM (時間雨量、30分雨量、10分雨量)
 - 自然災害への影響評価
- Sousei(創生)Program:2012-2016
 - アンサンブル情報を用いた影響評価(ハザード+社会経済的)
 - 適応策への哲学、考え方の構築

SOUSEI 自然災害, 水資源, 生物生態系・生態サービス

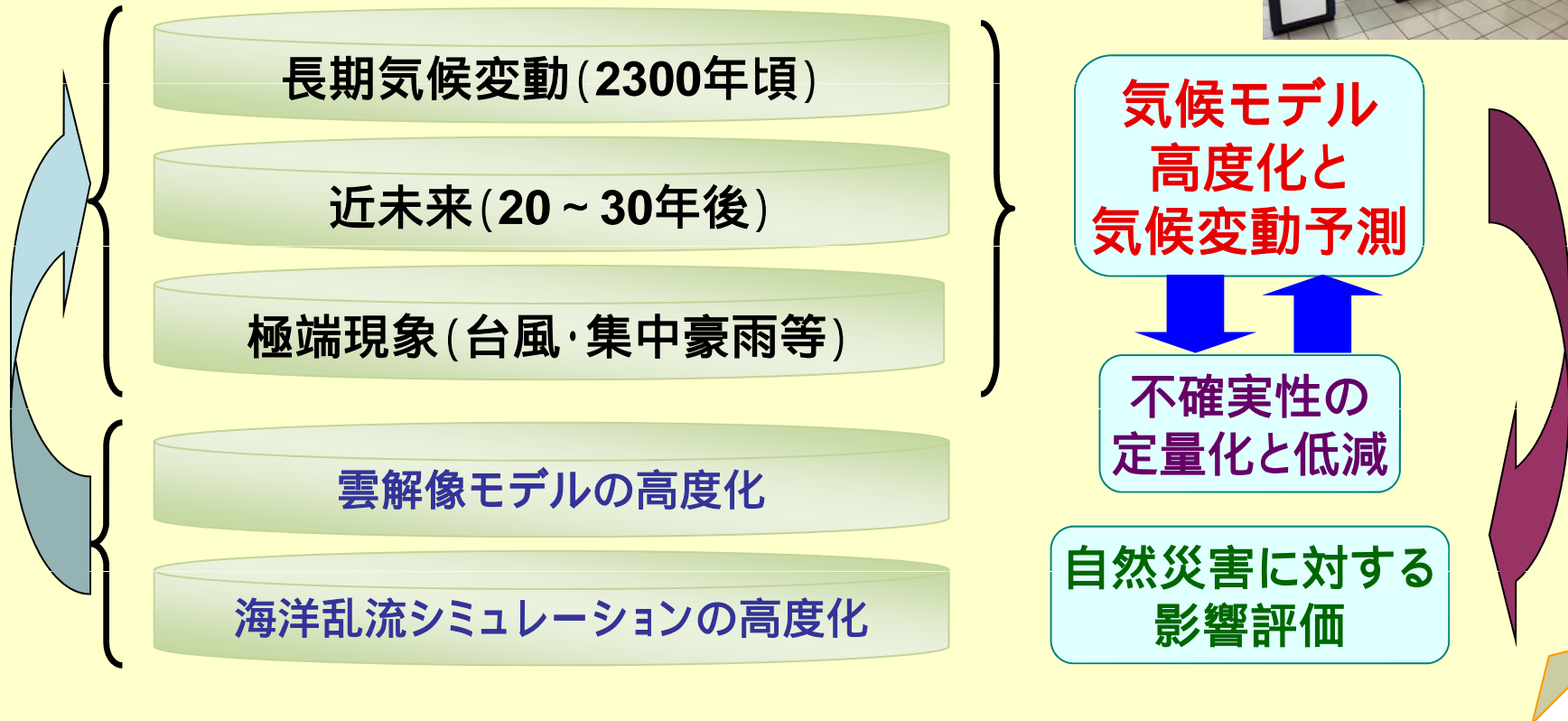


KAKUSHIN



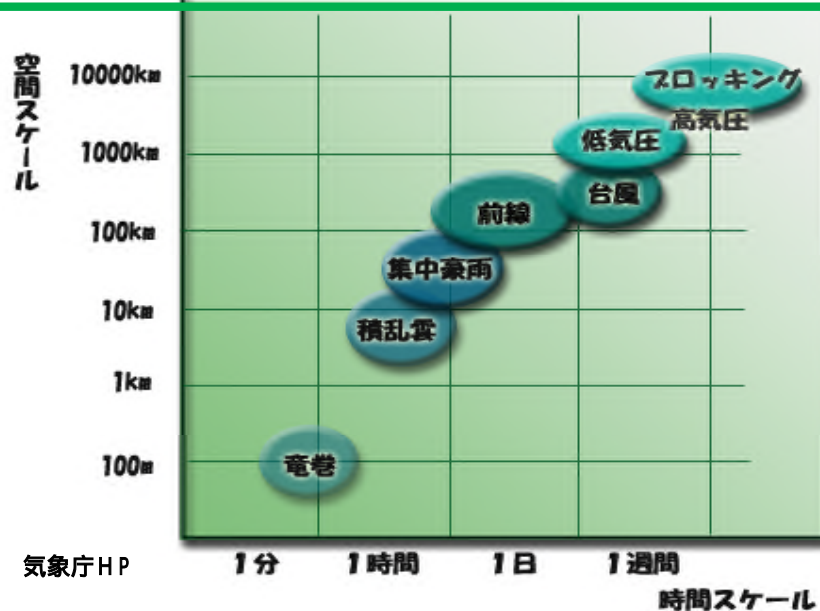
KAKUSHIN

地球シミュレータによる 気候変動予測



IPCC第5次評価報告書へ貢献
科学的根拠の提供・政策検討・対策立案

豪雨と災害のスケール

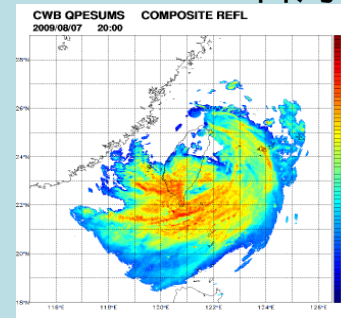


台風

範囲: 1000km

継続時間: 1日から数日

大川での洪水、大規模水害、土砂災害、高潮・高波、強風災害
2009/08/08 in 台湾



GCMで影響評価可能



台湾中央気象局、台湾国家災害防救科技中心

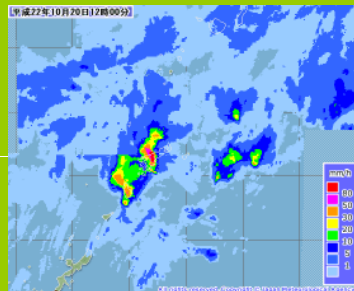
集中豪雨

範囲: 100km

継続時間: 6時間から半日程度

中・小川での洪水、内水氾濫、土砂災害
2010/10/20 in 奄美

RCMで影響評価可能



南日本新聞 OFFICIAL SITE

ゲリラ豪雨 (局地的集中豪雨)

範囲: 数km

継続時間: 1時間程度

小川や下水道内での鉄砲水、都市内水氾濫
2008/07/28 at 都賀川 2008/08/05 at 雑司ヶ谷

まだ影響評価不可能

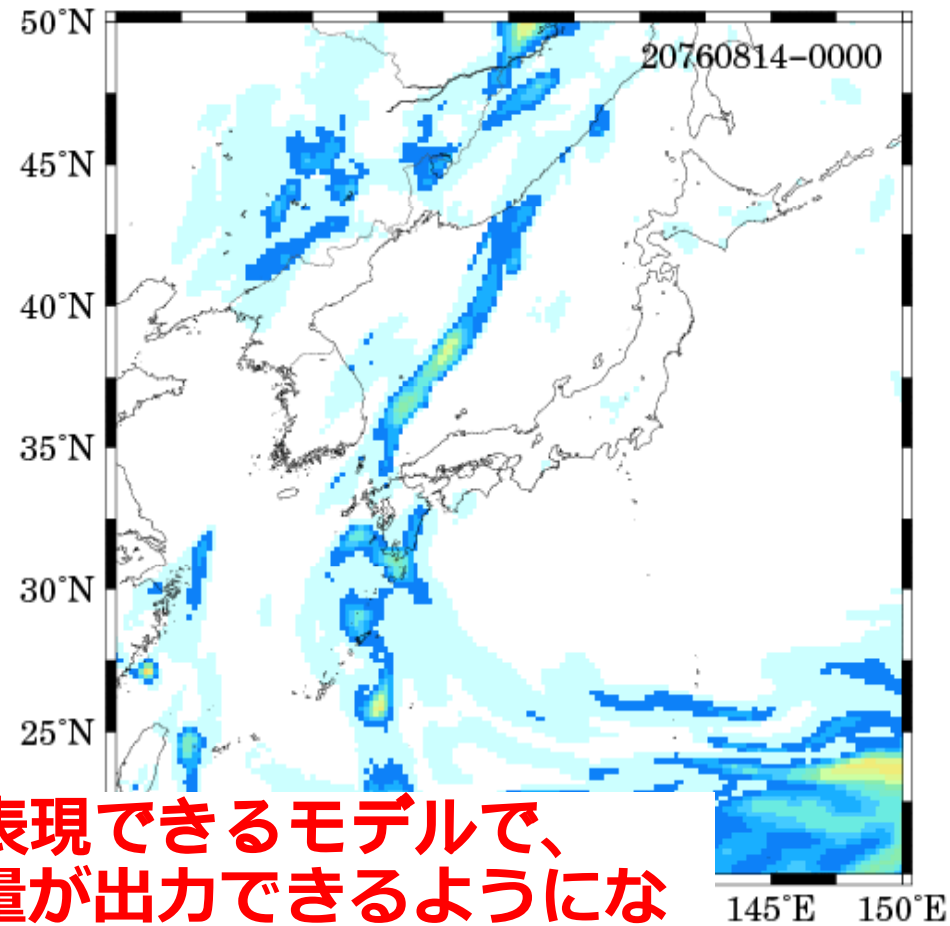


都賀川モニタリング映像

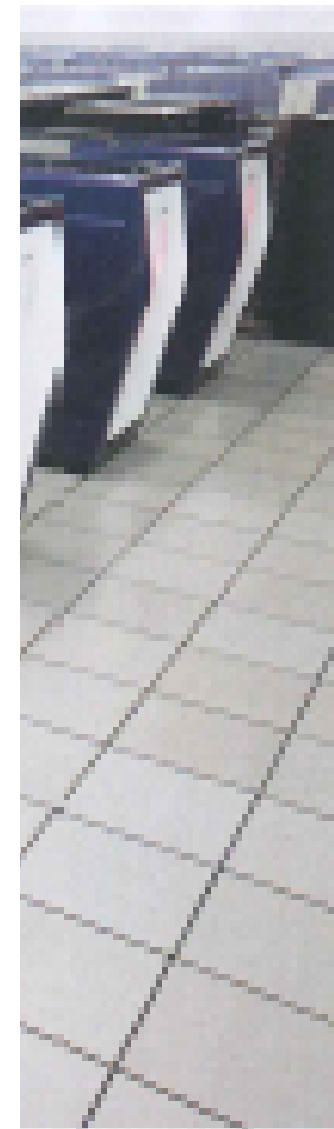


共同通信

地球シミュレーターが推測する2076年8月後半



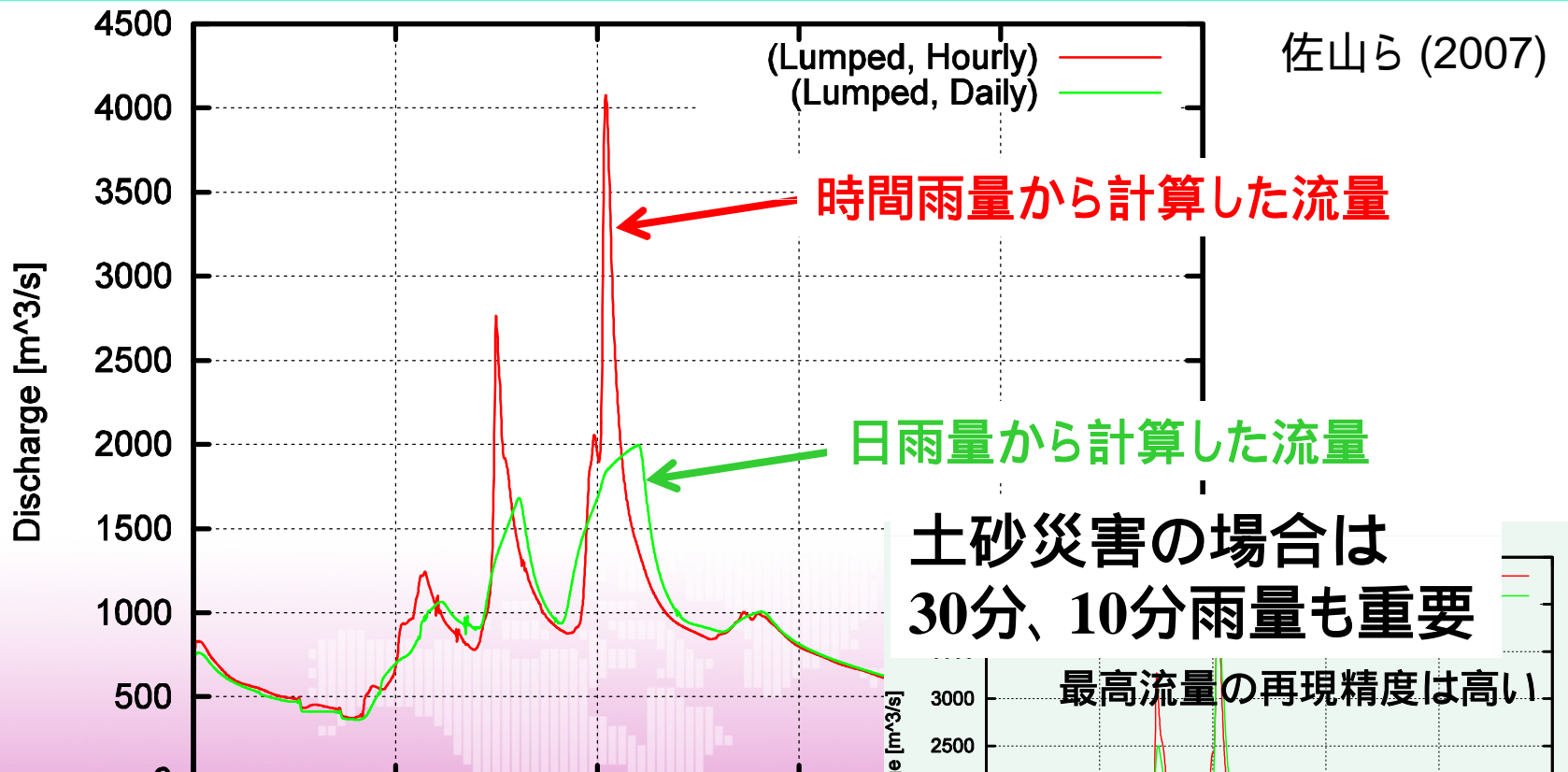
台風を表現できるモデルで、
時間雨量が出力できるようにな
って、我が国の、極端現象とし
ての災害評価が可能となった



我国の災害評価における時間雨量の重要性

日雨量データの利用だけではピーク流量を半分に算定してしまう。

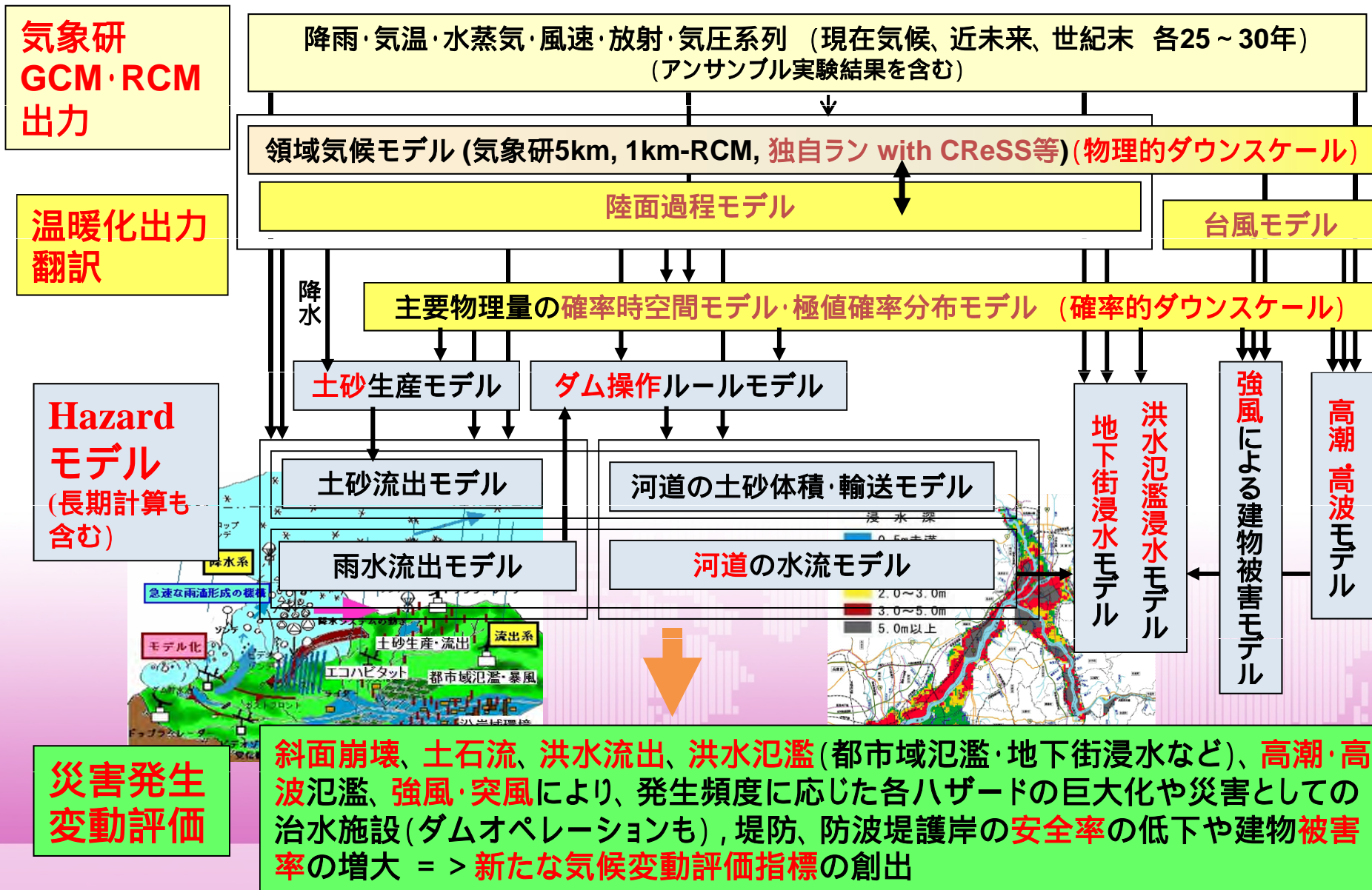
淀川
枚方地点の流量



利根川や淀川といった大河川ですら毎時毎時の雨量情報が気候モデルから出力されるようになって初めて、現実味のある河川流量や水位の算定が可能になりました。

極端現象に伴う災害発生変動評価

斜面系 山岳系 河道 都市・低平地 沿岸域



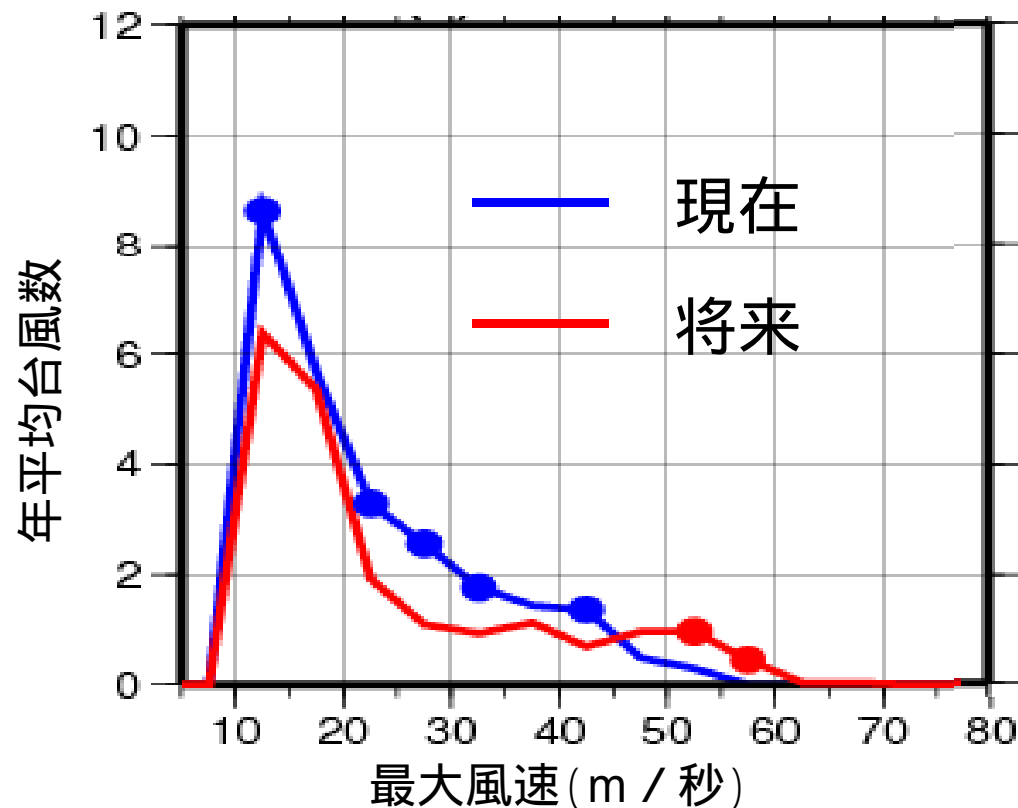
内 容

- 水災害に係る気候モデル出力の特徴
- 水災害に関連する諸量の将来変化
- 不確定性について
- 最悪シナリオについて
- 適応の向けて

強い台風が増加（前期モデル）

(気象研究所よりスライドを借用)

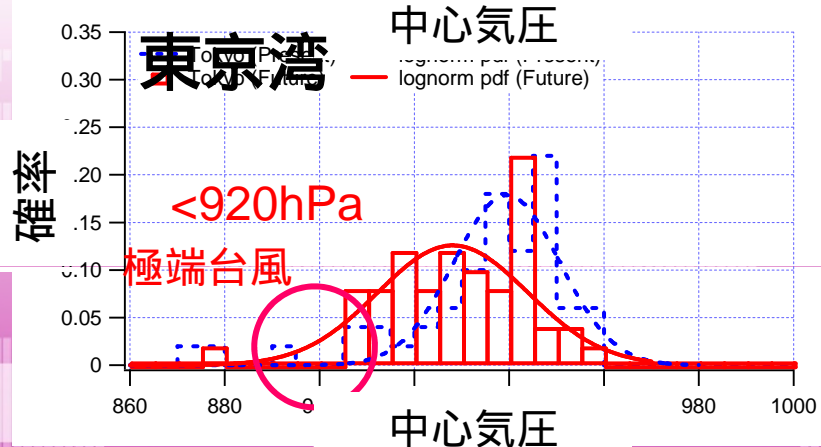
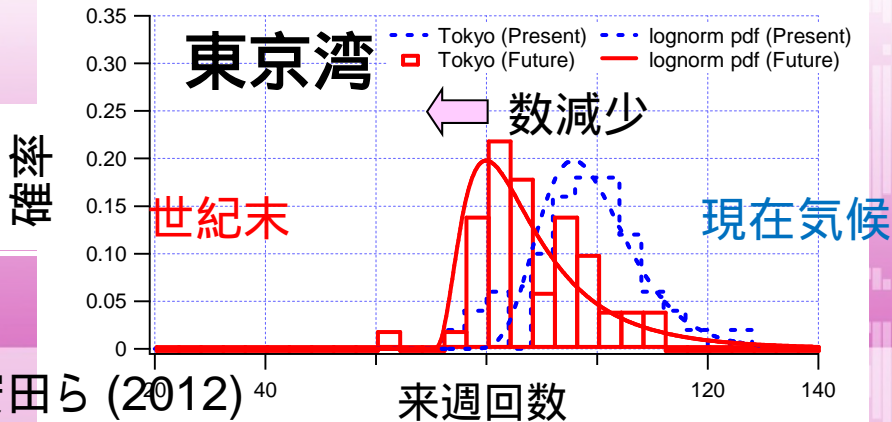
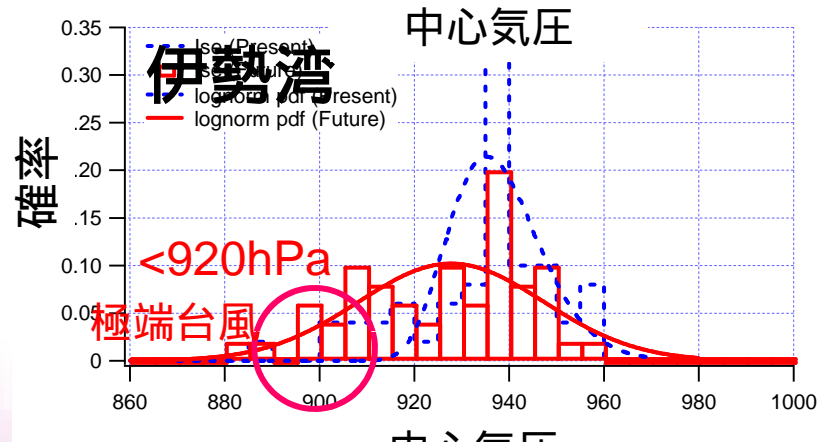
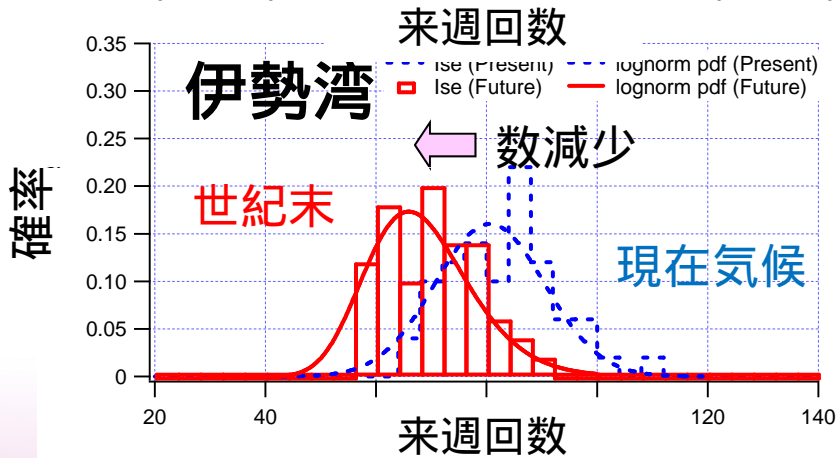
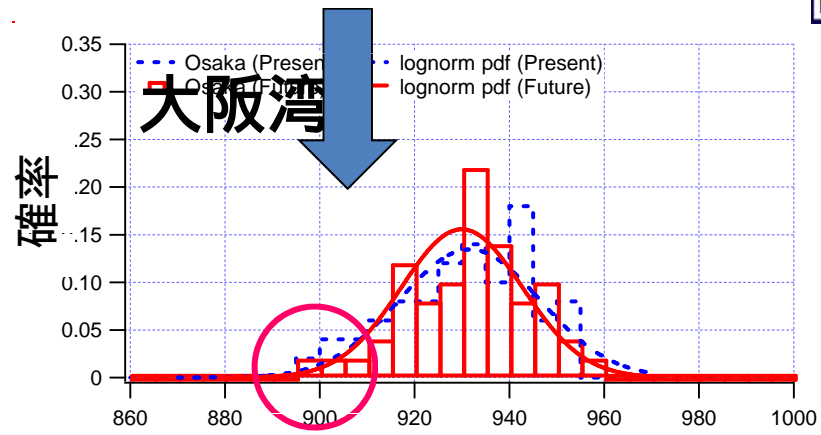
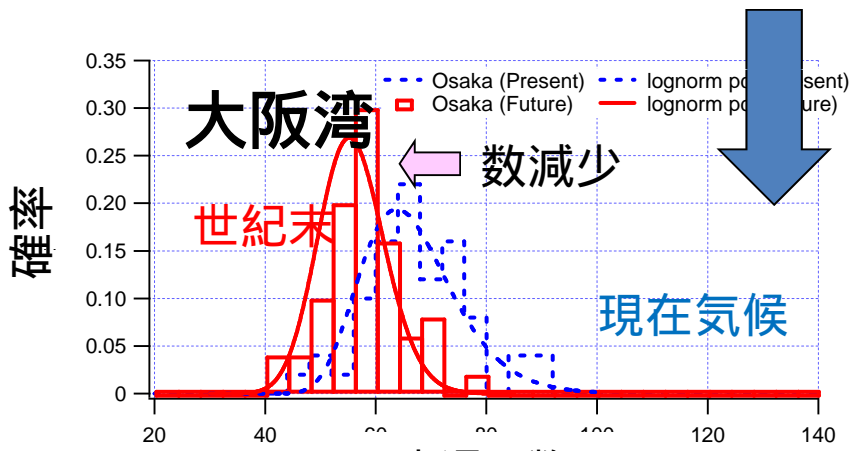
Murakami et al.,
2012, J.Climate



有意に増える
有意に減る

台風の発生数は減るが、いったん発生すると、
発達に必要な水蒸気が(気温が高いと)多いた
め、最大発達可能強度は強くなる

三大湾への台風来襲回数と中心気圧の頻度変化

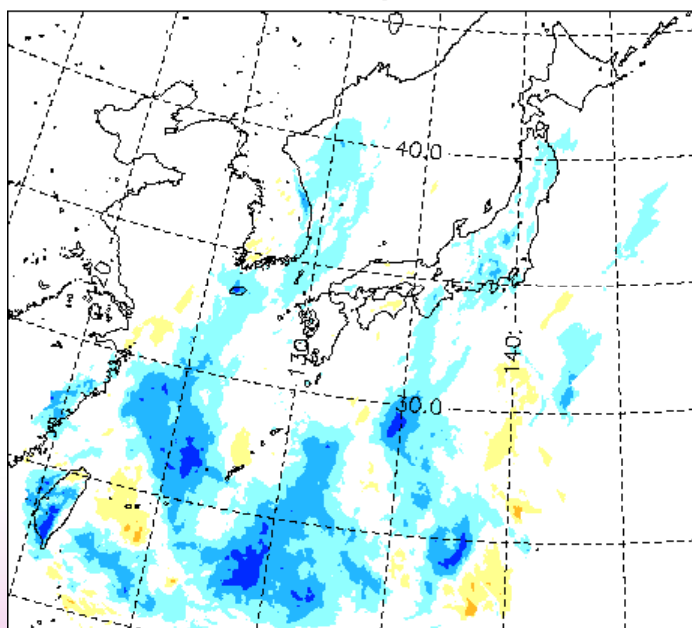


台風によってもたらされる 日本付近の降水の特性と将来予測

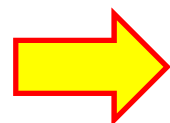
(気象研究所よりスライドを借用)

台風1個あたりの降水量の変化

5kmNHM PREC TYbody/masktotal F-P

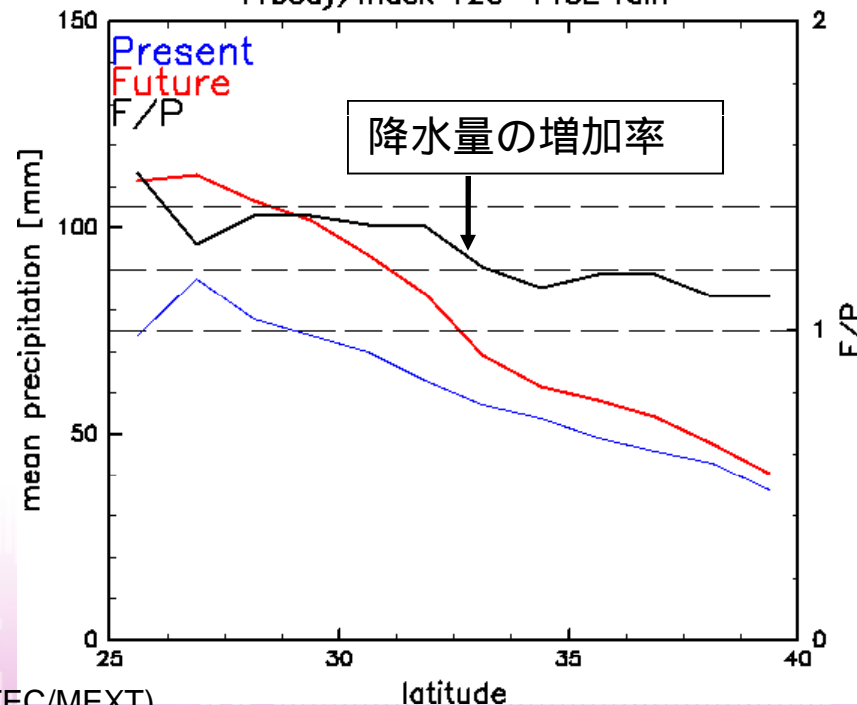


緯度平均



台風1個あたりの降水量の変化(緯度平均)

TYbody/mask 120-145E rain



(MRI/JMA/JAMSTEC/MEXT)

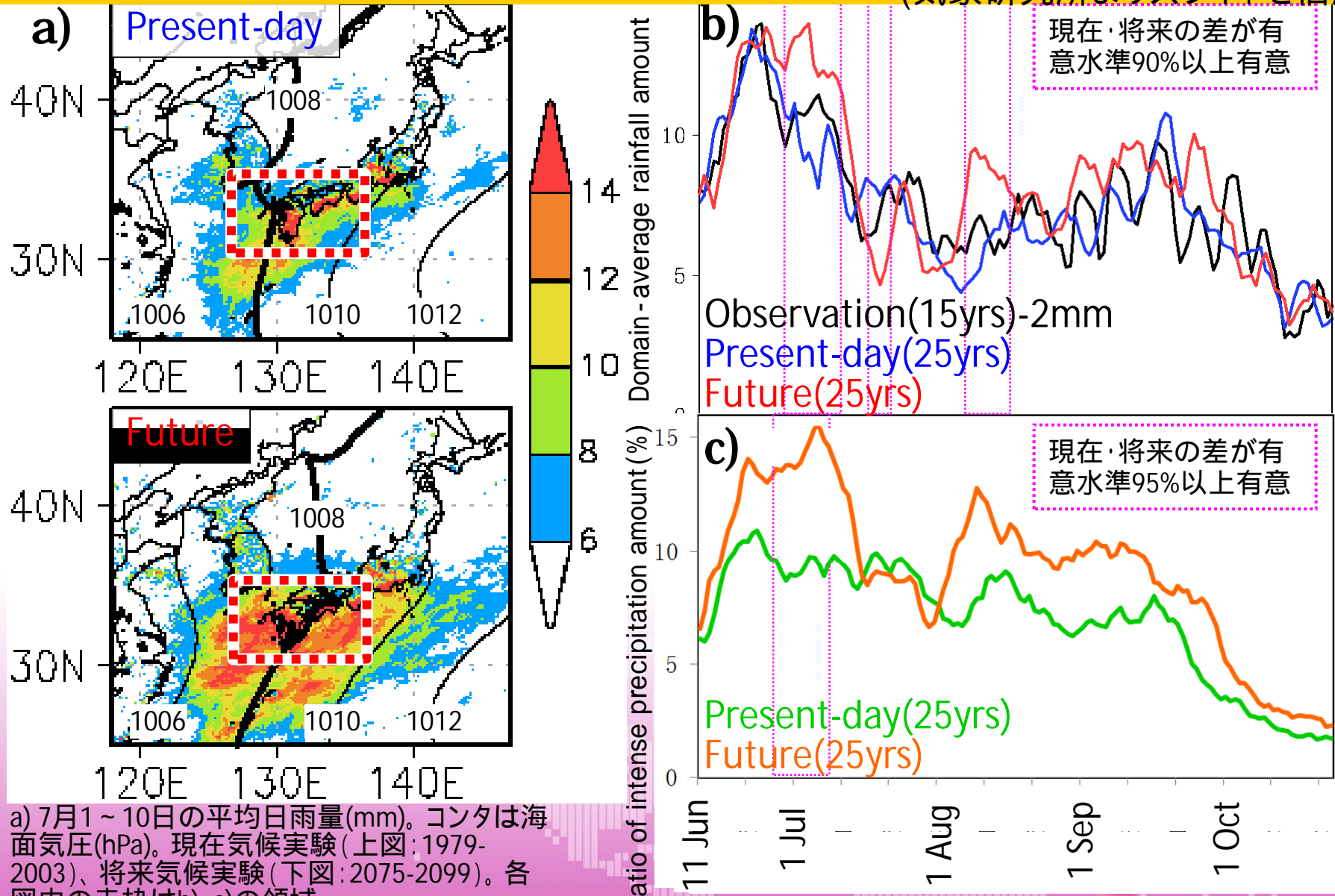
21世紀末には台風一個あたりの降水量が増加
日本付近での降水量増加は約20~40%
ただしサンプル数が少ない→擬似温暖化実験



KAKUSHI11

西日本周辺域の梅雨の変質

(気象研究所よりスライドを借用)



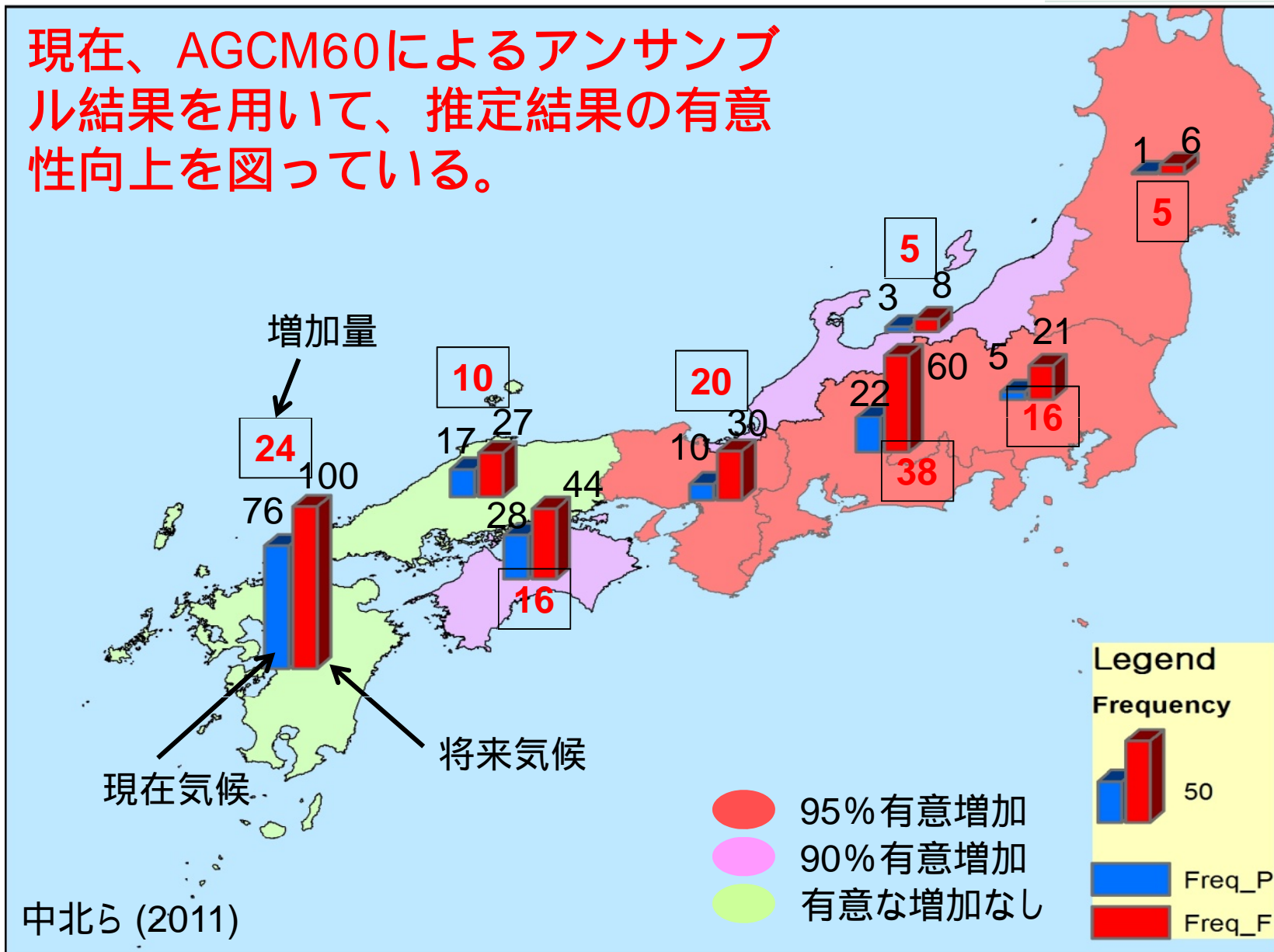
a) 7月1～10日の平均日雨量(mm)。コンタは海面気圧(hPa)。現在気候実験(上図:1979-2003)、将来気候実験(下図:2075-2099)。各図内の赤枠はb), c)の領域。

(Kanada et al., 2012, JMS)

b) a)で示した領域の25年平均日雨量(mm)の季節変化, c) 日雨量100mm以上の大雨によってもたらされる雨量の総量に対する割合(%)

RCM5を用いた梅雨集中豪雨の発生回数（25年）

現在、AGCM60によるアンサンブル結果を用いて、推定結果の有意性向上を図っている。



内 容

- 水災害に係る気候モデル出力の特徴
- 水災害に関連する諸量の将来変化
- 不確定性について
- 最悪シナリオについて
- 適応の向けて

*実効降水量の将来変化

全球モデル(60km)アンサンブル計算

不確実性を評価

表層崩壊発生のパテンシャル

$R_{1.5}$

ほとんどの地域で10~20%増える

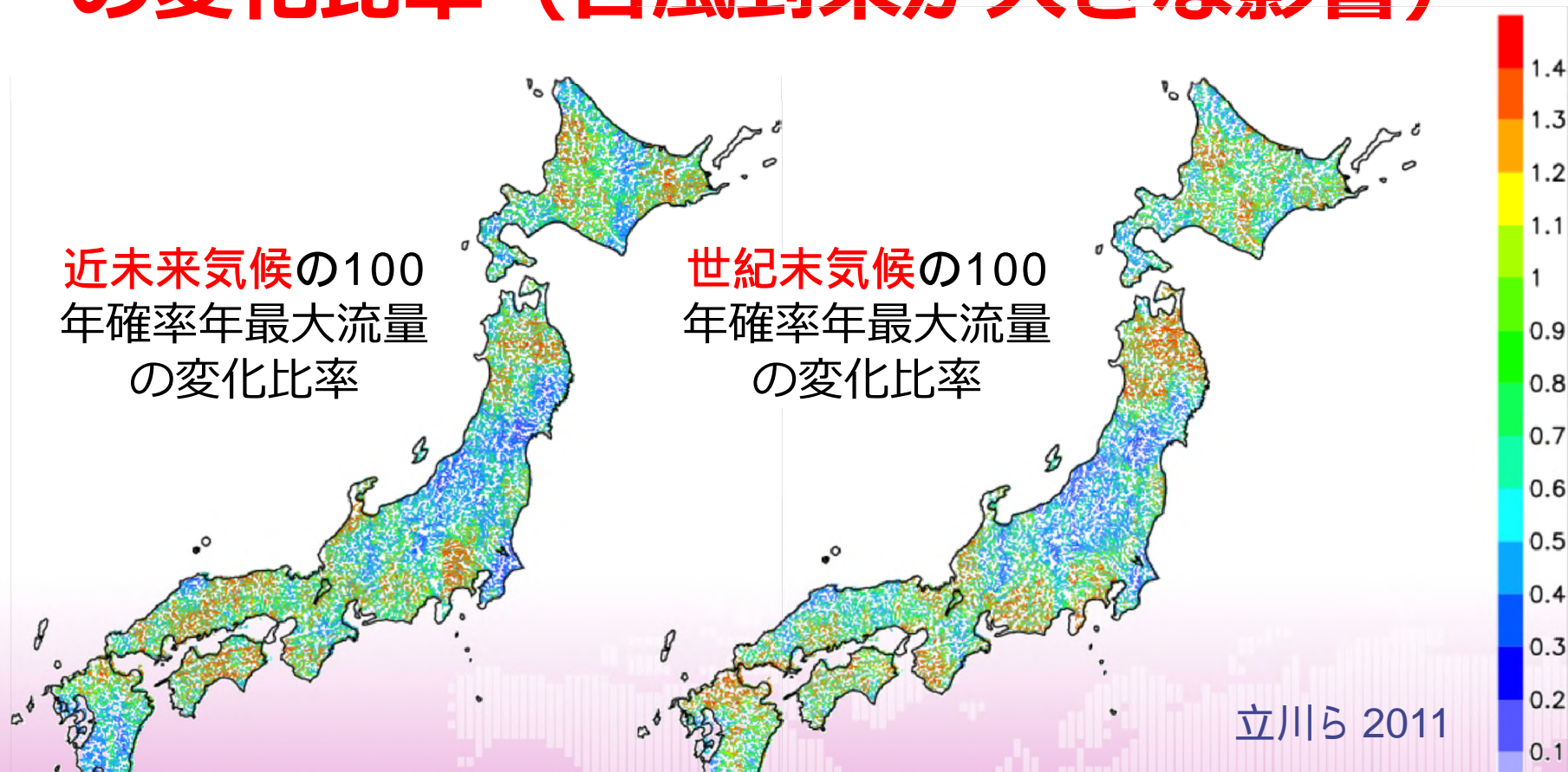
深層崩壊発生のパテンシャル

R_{72}

東海以西と東北で10~20%増える

.....95%の信頼度で有意な変化, •それに満たない変化

再現期間100年に対応する年最大流量 の変化比率（台風到来が大きな影響）



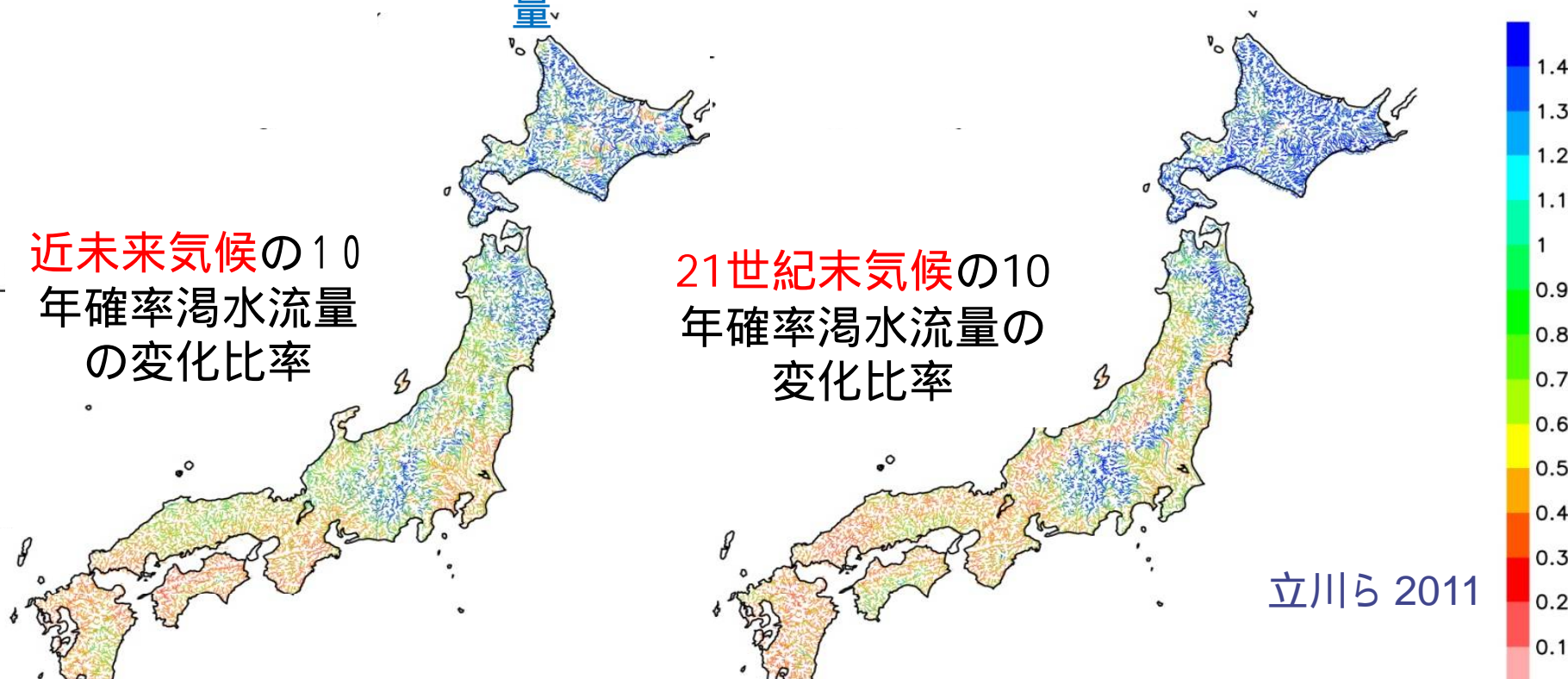
- 東北南部と北陸東部以外、ほとんどの地域で最大流量は増加。30 - 40%増も。
- もともと大雨の少ない東北では、クリティカルになる危険性が大きい。
- ただし、九州～近畿以外では、台風到来頻度が元々相対的に少なく、GCMによる25年間の計算では、たまたまという影響が大きいと考えられる。洪水危険度は東日本も要注意。

再現期間10年に対応する渇水流量の 変化比率（台風が来ない事が大きな影響）

渇水流量：1年で約10番目に少ない、河川の一日の流量

近未来気候の10
年確率渇水流量
の変化比率

21世紀末気候の10
年確率渇水流量の
変化比率



立川ら 2011

- 北日本と中部山地以外では、渇水時の流量減少。渇水が深刻に。
- 西日本では、洪水危険も増すし、渇水危険度も増す。
- ただし、九州～近畿以外では、台風到来頻度が元々相対的に少なく、GCMによる25年間の計算では、たまたまという影響が大きいと考えられる。

流域水収支 (MRI-AGCM3.2S IPCC AR4 A1B)

淀川水系

(降水・降雨・降雪 (融雪) ・蒸発散・水収支)

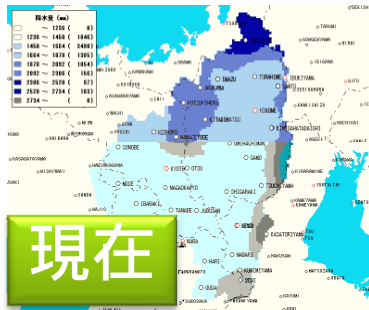
水収支 (水資源賦存量)
(= 降水量 - 蒸発散量)

降水量

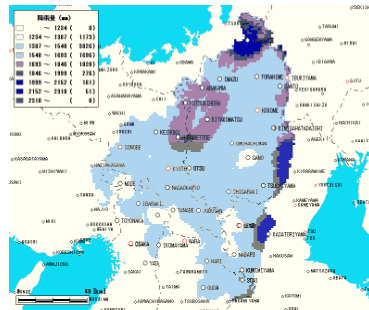
降雨量

降雪量

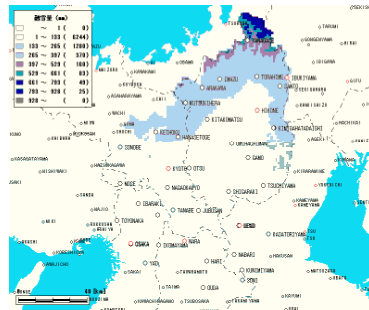
蒸発散量



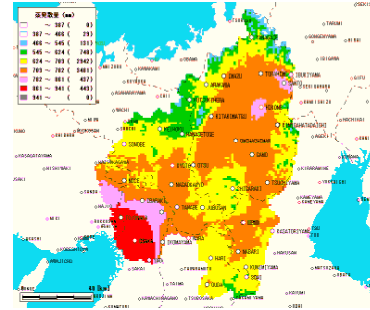
1645mm



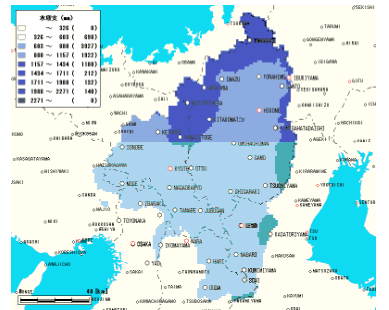
1544mm



101mm



707mm



938mm

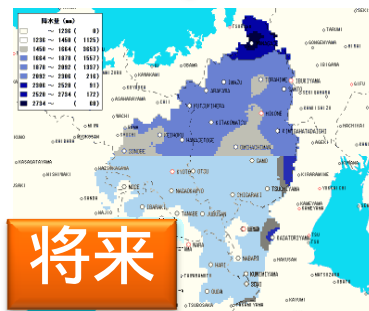
↓ +3%

↓ +8%

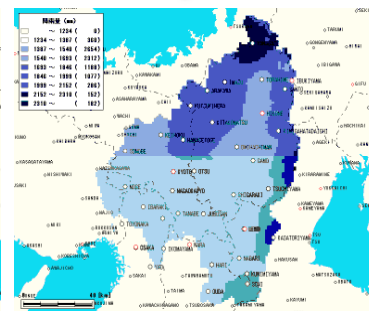
↓ -67%

↓ +14%

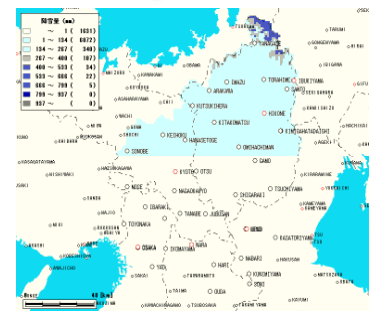
↓ -5%



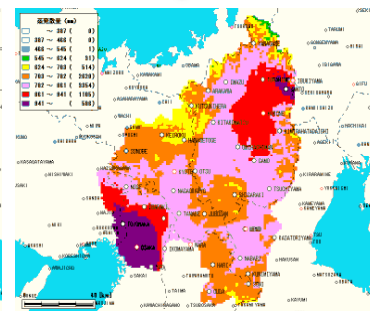
1697mm



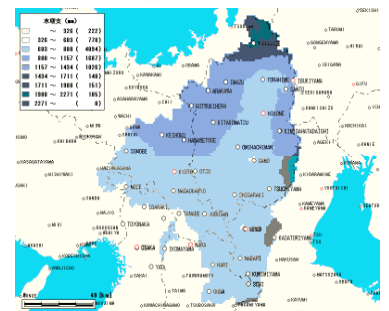
1664mm



33mm



889mm



889mm

流域水収支 (MRI-AGCM3.2S IPCC AR4 A1B)

吉野川水系

(降水・降雨・降雪 (融雪) ・蒸発散・水収支)

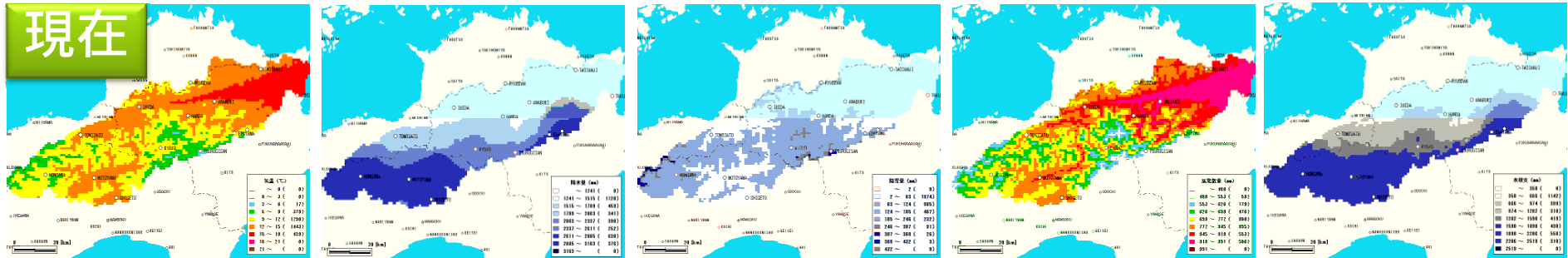
水収支 (水資源賦存量)
(= 降水量 - 蒸発散量)

気温

降水量

降雪量

蒸発散量



12.0

2041mm

80mm

790mm

1251mm

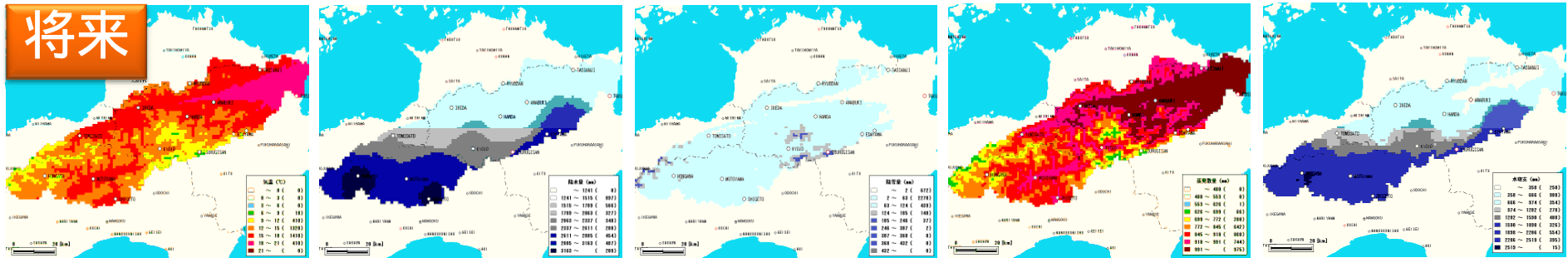
↓ +2.9

↓ +5%

↓ -60%

↓ +16%

↓ -2%



14.9

2051mm

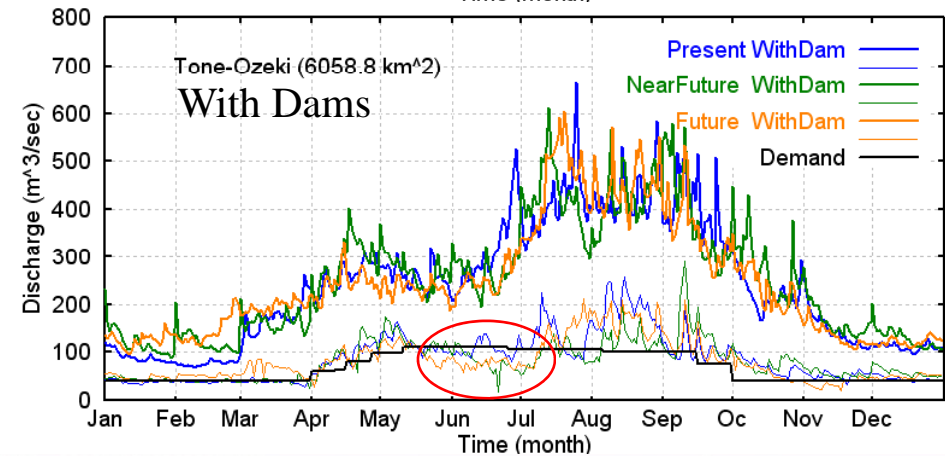
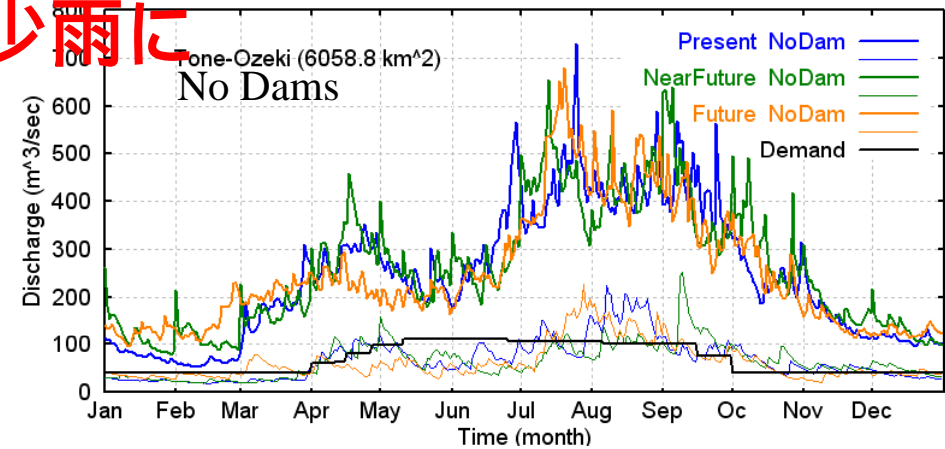
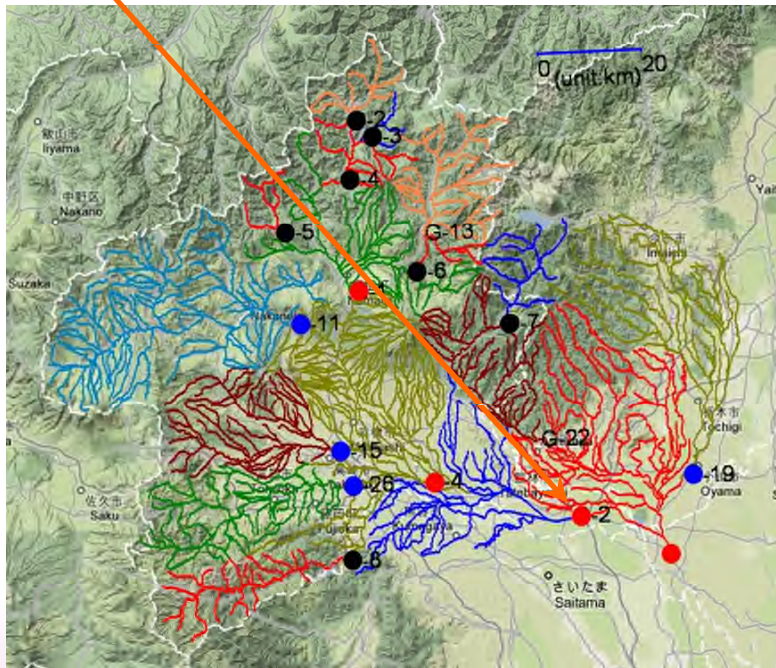
32mm

919mm

1232mm

利根川ダム群は今世紀末の少雨に 対応できるか？

Water Resources at Tone-Ozeki (6058.8 km²)



Water Demand

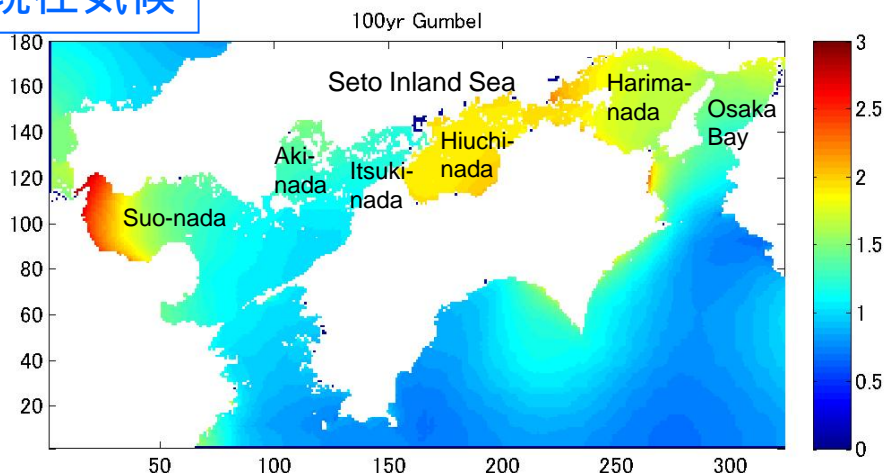
- Living water: 37.43 m³/s
- Industrial water: 2.08 m³/s
- Agricultural water:
 - Apr~May 39.51 ~ 60.99 m³/s
 - May~Sep 111.62~186.71 m³/s

- ダム群から離れた下流の地点である利根大堰(流域面積6058.8km²)に対する計算結果からは、ダム群の操作影響が少なくなることがわかる。
- **利根大堰地点では、ダム群操作にもかかわらず年最小流量が必要な水利用量に対して満足できない時期が現れる。そのため、新たな操作ルールの開発が必要とされる。**

気候変動予測実験出力を直接用いた高潮リスクの評価

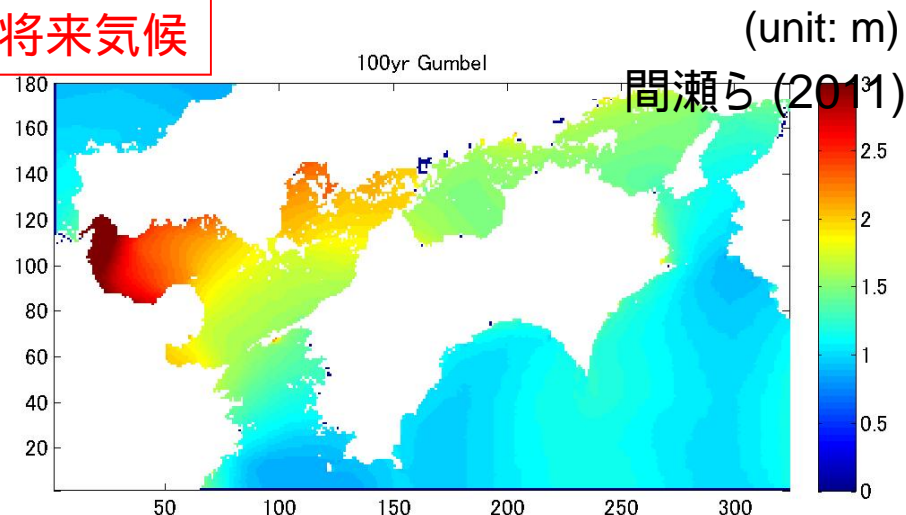
GCMデータを駆動力として高潮シミュレーションを実施．台風ごとの最大高潮偏差を極大値資料とし，Gumbel分布を用いて極値統計解析を行った．再現期間は100年

現在気候



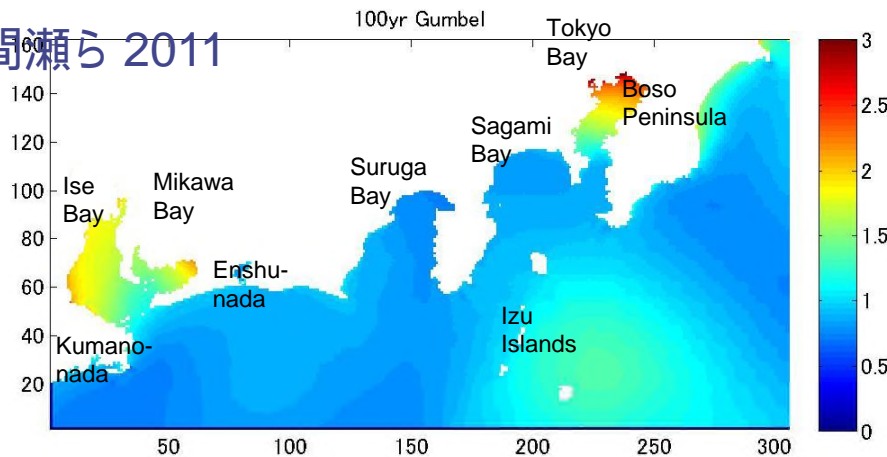
周防灘西部における高潮偏差の再現確率値が最大で，2.4～2.7m．燧灘および播磨灘においても大きい．

将来気候

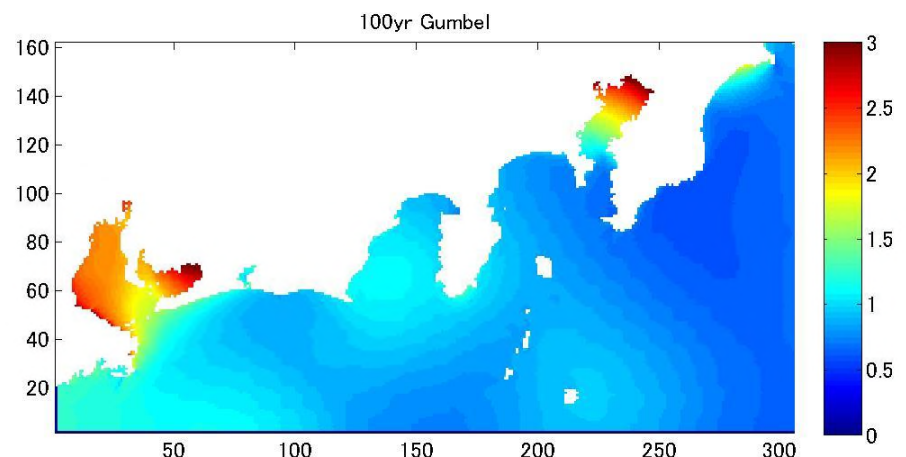


周防灘で，現在気候に比べて大きく増大し，3.0～3.7m．燧灘や播磨灘では小さく，安芸灘および斎灘では大きくなった．

間瀬ら 2011



東京湾で最も大きく2.3～3.0m．次いで，伊勢湾西部および三河湾で大きく，それぞれ1.8～2.1m，1.5～2.1m．



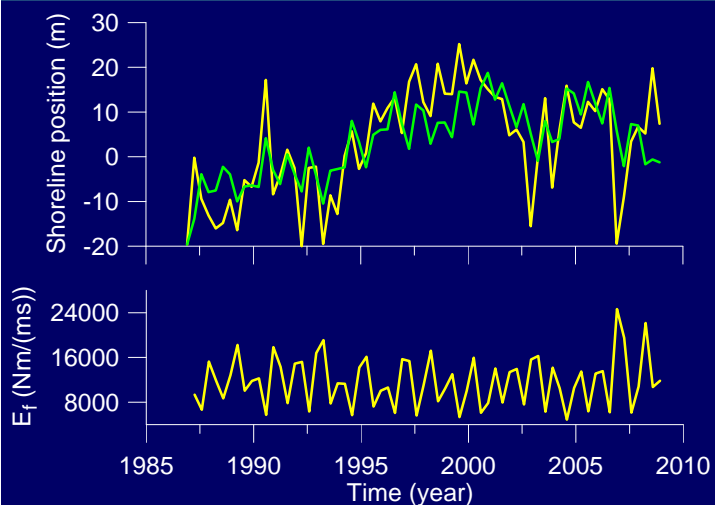
東京湾では2.3～3.4mに増大したのに対し，伊勢湾では2.2～2.6m，三河湾では2.5～3.2mと際だって増大した 21



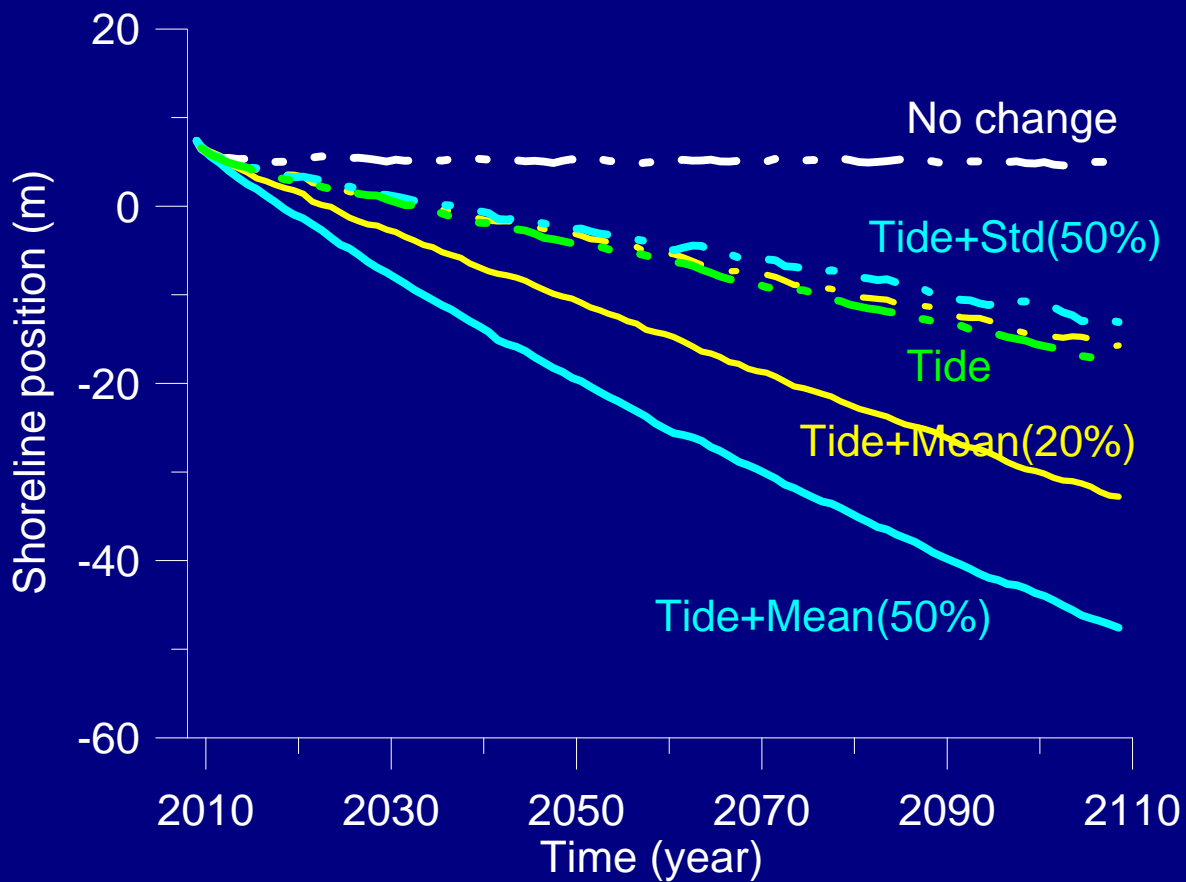
D-i-c
沿岸災害

汀線（海岸線）の将来変化の感度実験 茨城県波崎海岸

港空研(2014)



Validation
Observation
Projection



Projection
(Wave+SLR)

SOUSEI



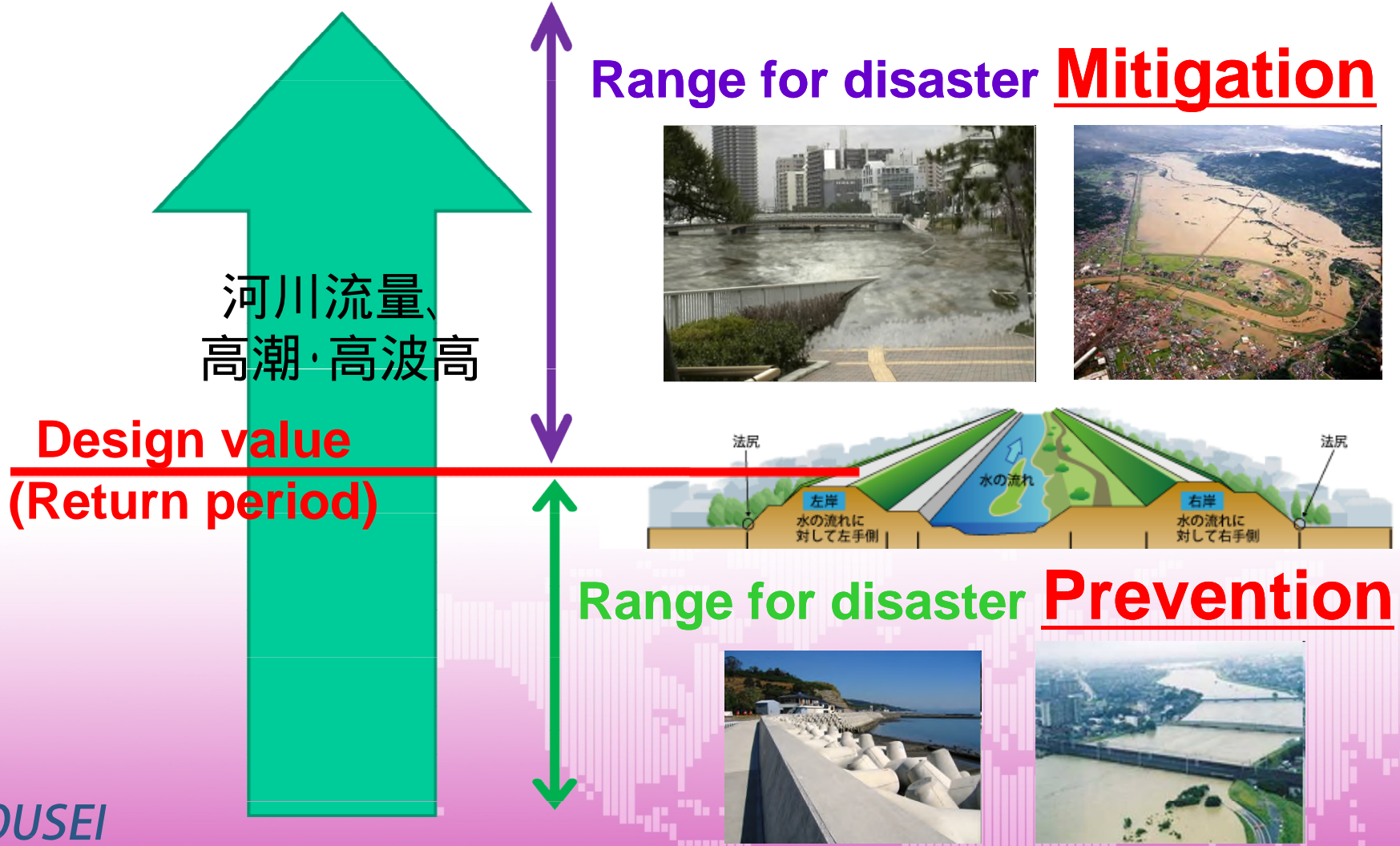
内 容

- 水災害に係る気候モデル出力の特徴
- 水災害に関連する諸量の将来変化
- 不確定性について
- 最悪シナリオについて
- 適応の向けて

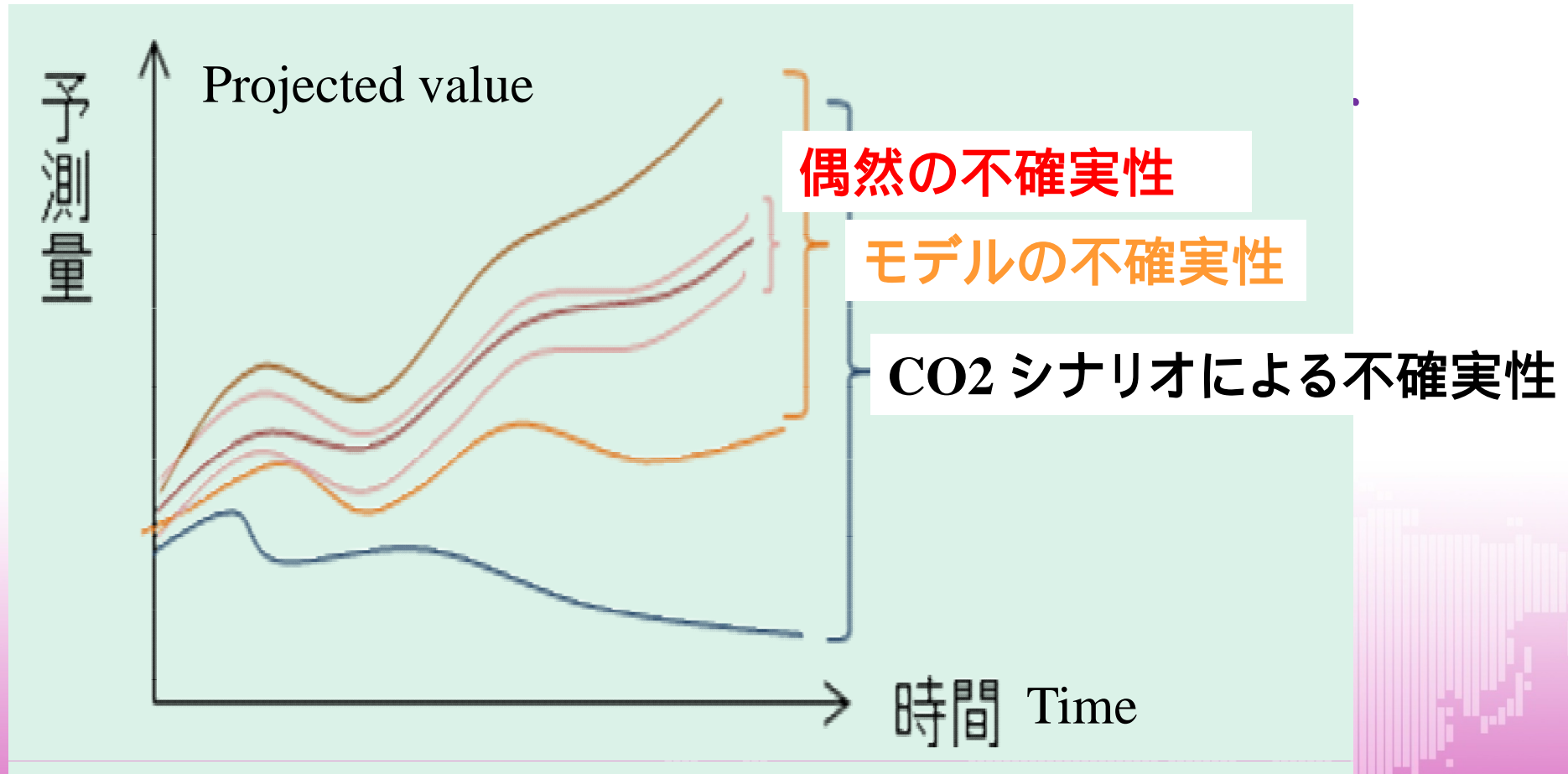
不確定性がまだまだある(1)

- 以上の気候変動影響評価としての計算結果は概算値である。特に、まれな(極端な)ハザードほど不確定性は高い。(もちろん、概算値とその精度が出るだけでも、飛躍的な進歩である)
- なぜなら、気候モデルによる世紀末までの出力の中には特定の河川や湾に対する最悪の台風がたまたま含まれない場合も想定されるから。

Design value (確率値)



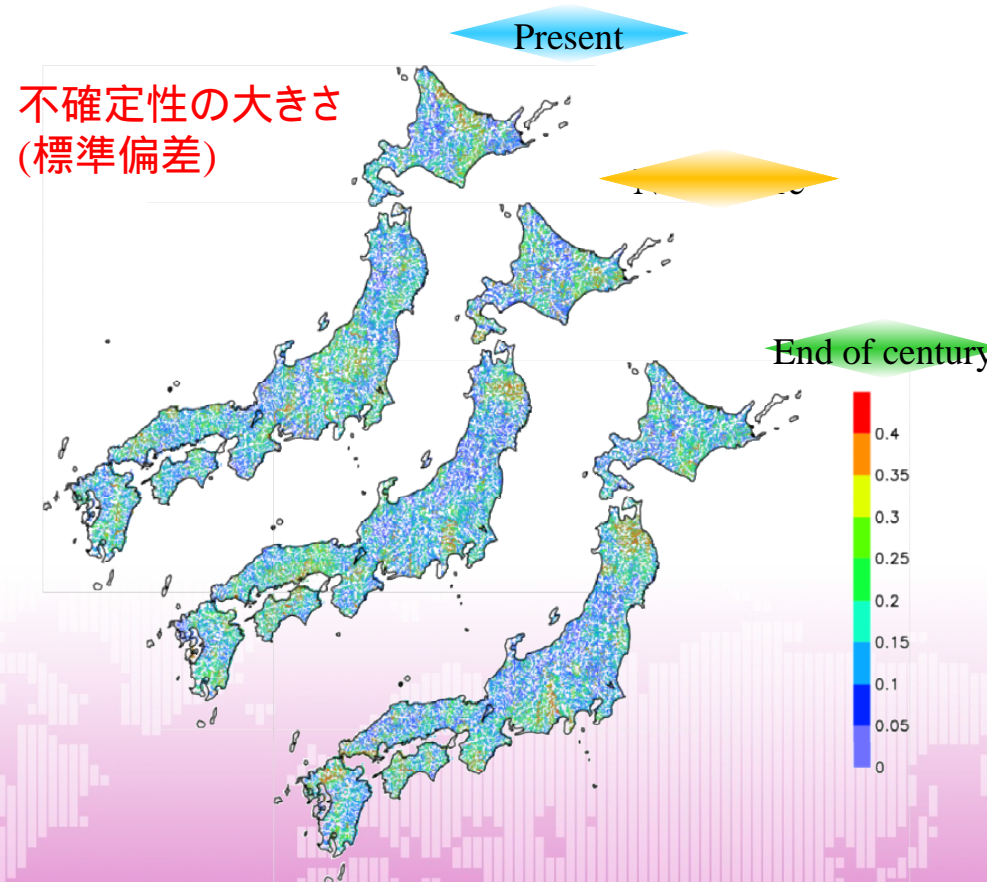
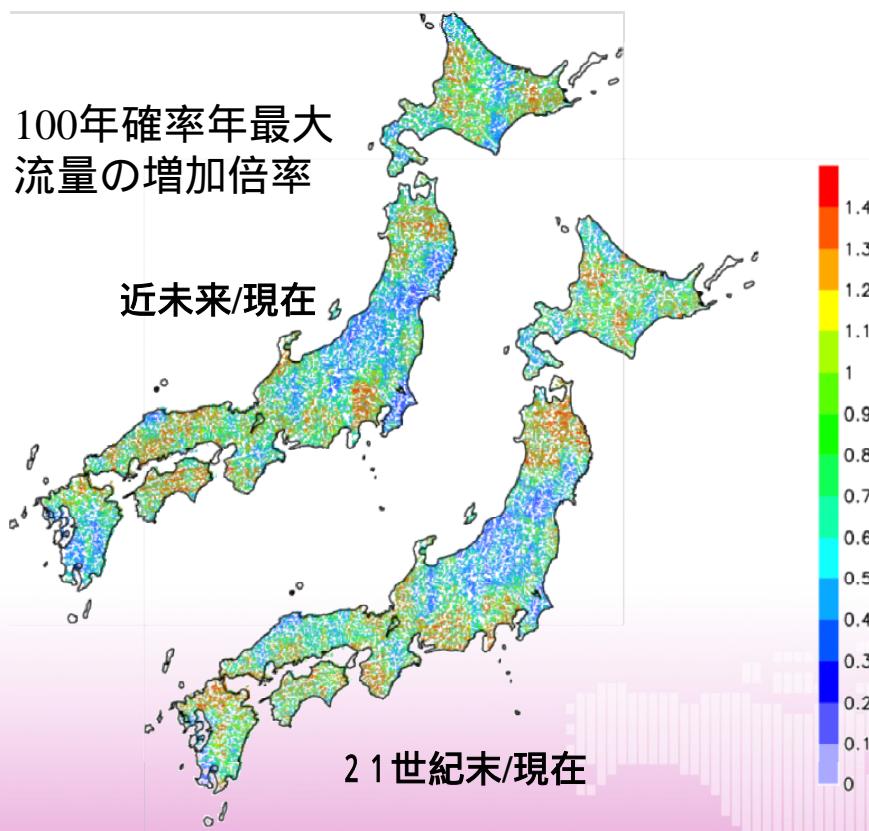
GCM予測に潜む不確実性



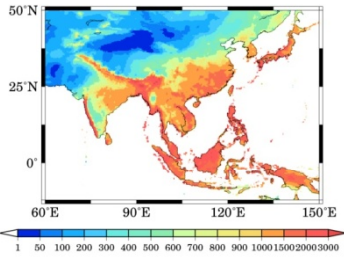
年最大河川流量の増大推測の不確実性

100年確率値の不確実性(Jackknife 法による)

25年時系列から推定する場合



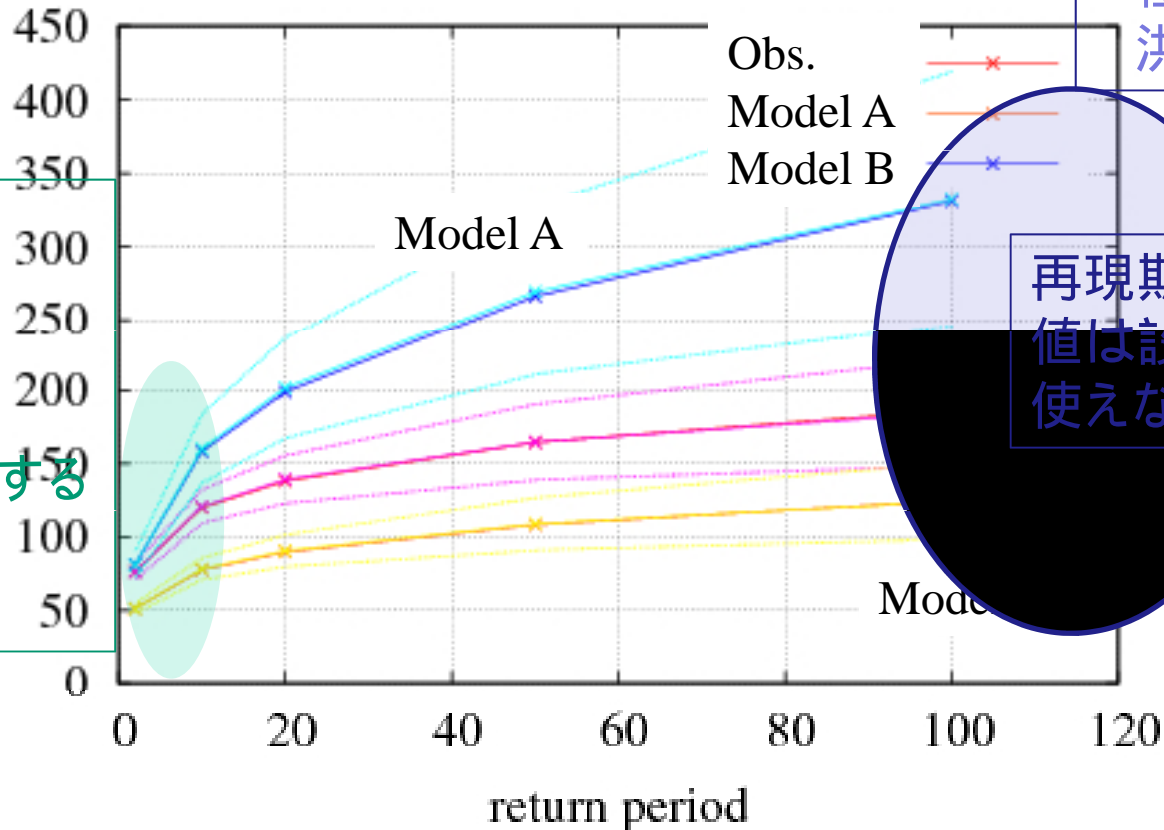
増大倍率が高いほど不確定性が大きい



年最大値

再現期間に対応する推定値の不確実性

Jackknife GEV



高い不確定性:
極端現象,
洪水, 土砂崩壊

低い不確定性:
農業,

再現期間に対応する
値を設計値に
利用可能

再現期間に対応する
値は設計値としては
使えない

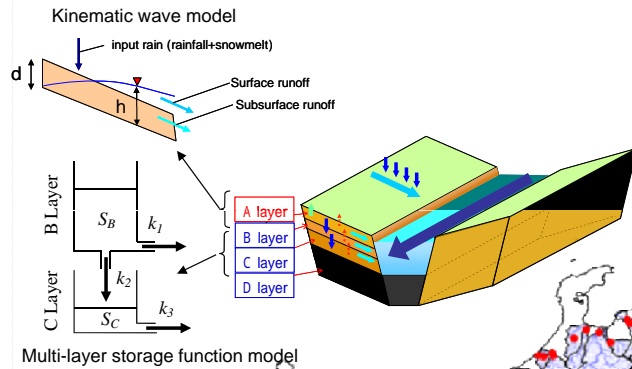
25年の時系列から算定

Konoshima and Nakakita (2010)

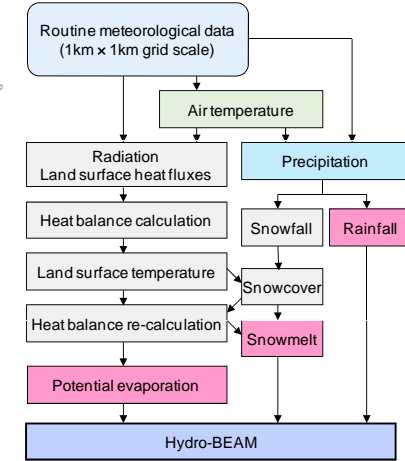
1. 分布型流出解析モデル(Hydro-BEAM) (Hydrological River Basin Environment Assessment Model)

解析対象：日本全国109水系
空間解像度：約1km²
計算出力：1時間

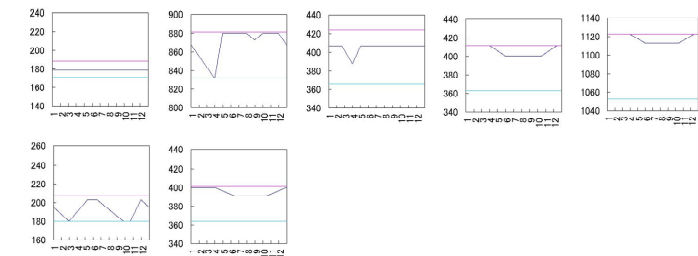
期間：現在（1976-2010年）
近未来（2026-2060年）現在+50年
21世紀末（2076-2110年）現在+100年



2. 陸面過程モデル(SVAT) 流域水収支（融雪・蒸発過程）



3. ダム操作モデル(貯水位運用)



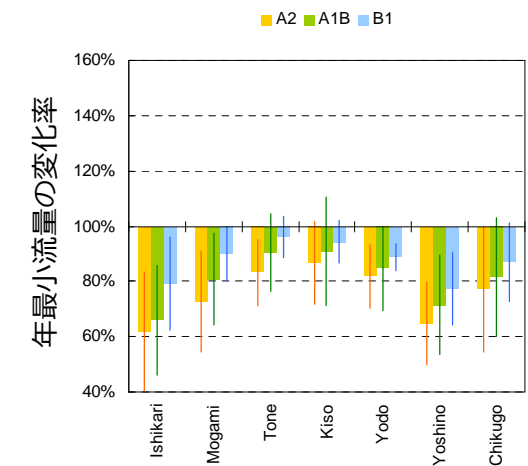
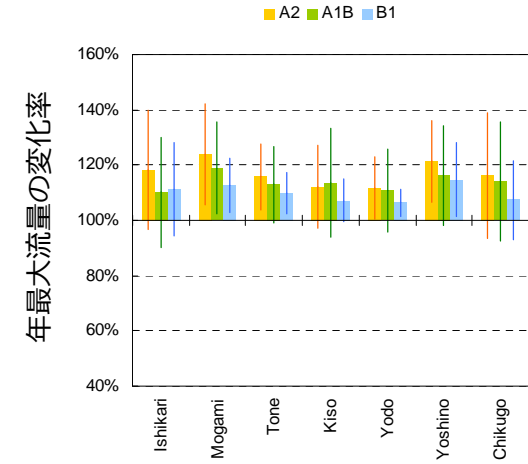
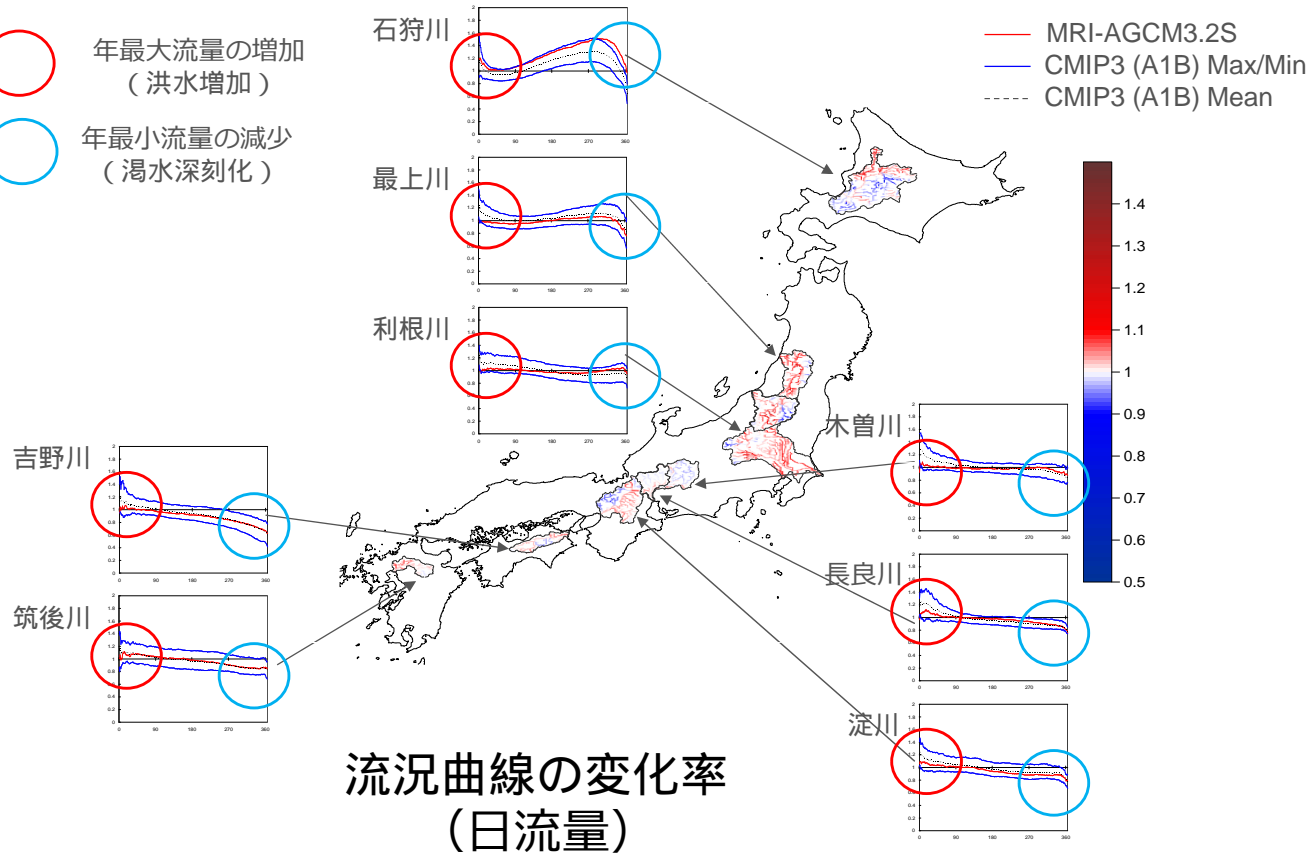
4. マルチモデル・マルチシナリオ解析(CMIP3)

BCCR-BCM2.0	CSIRO-Mk3.5	GISS-AOM	MIROC3.2(hires)
CCSM3	ECHAM5MPI-OM	GISS-EH	MIROC3.2(medres)
CGCM3.1(T47)	ECHO-G	GISS-ER	MRI-CGCM2.3.2
CGCM3.1(T63)	FGOALS-g1.0	INGV-SXG	PCM
CNRM-CM3	GFDL-CM2.0	INM-CM3.0	UKMO-HadCM3
CSIRO-Mk3.0	GFDL-CM2.1	IPSL-CM4	UKMO-HadGEM1

By 佐藤嘉展(2013)
京都大学防災研究所
水文環境システム（日本気象協会）研究領域

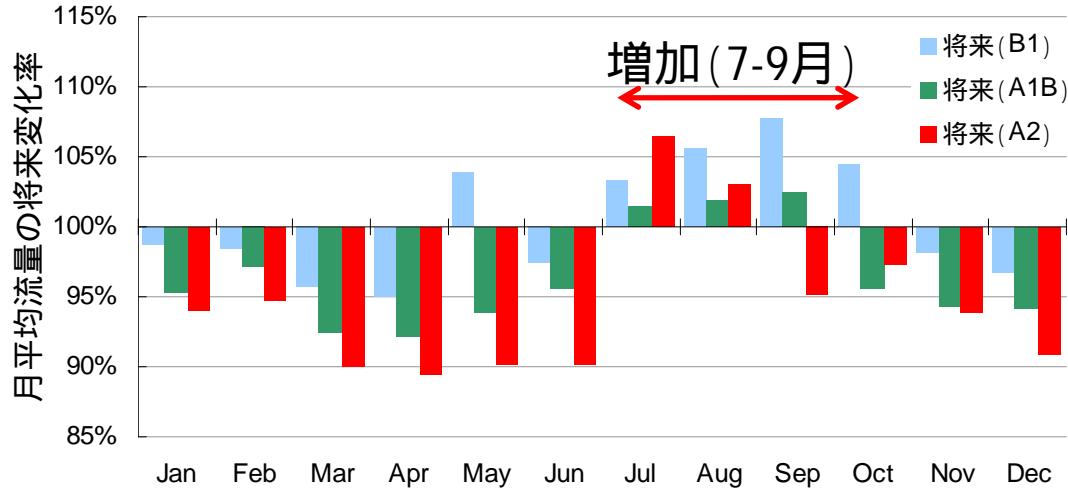
洪水と渇水の将来変化

- 年最大流量の増加 (洪水増加)
- 年最小流量の減少 (渇水深刻化)



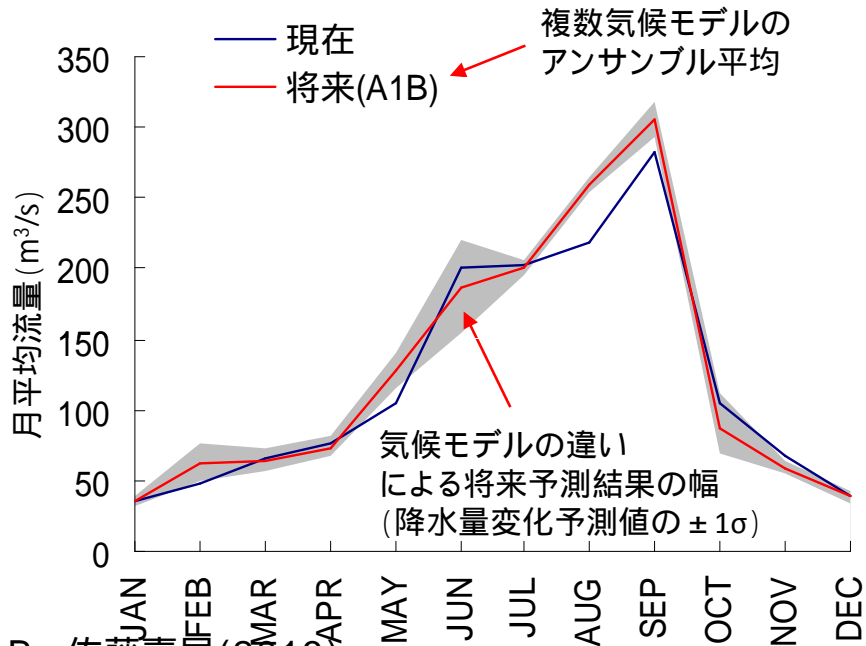
温暖化による河川流況の変化は、北海道・東北・北陸地方等の多雪流域で大きくなる洪水（年最大流量の増加）と渇水（年最小流量の低下）が同時に発生する

将来予測の信頼性と不確実性について

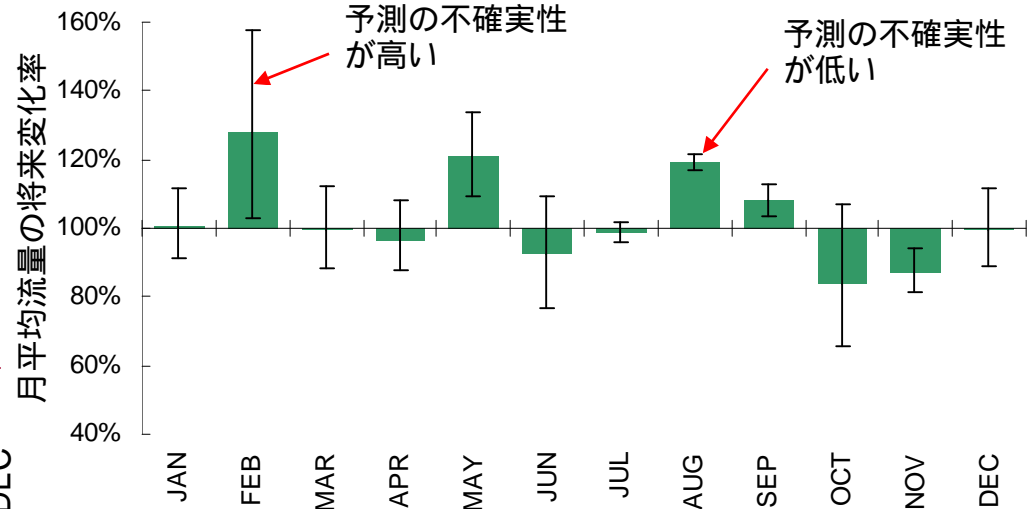


淀川流域

(複数シナリオ・アンサンブル平均)

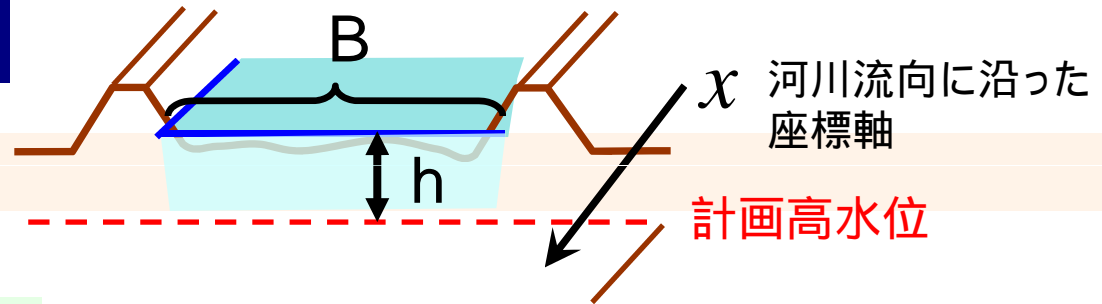


吉野川流域 (A1Bシナリオ・マルチモデル)



整備必要量指標 V の定義

$$V = \int_{\text{管理区間}} Bh dx$$

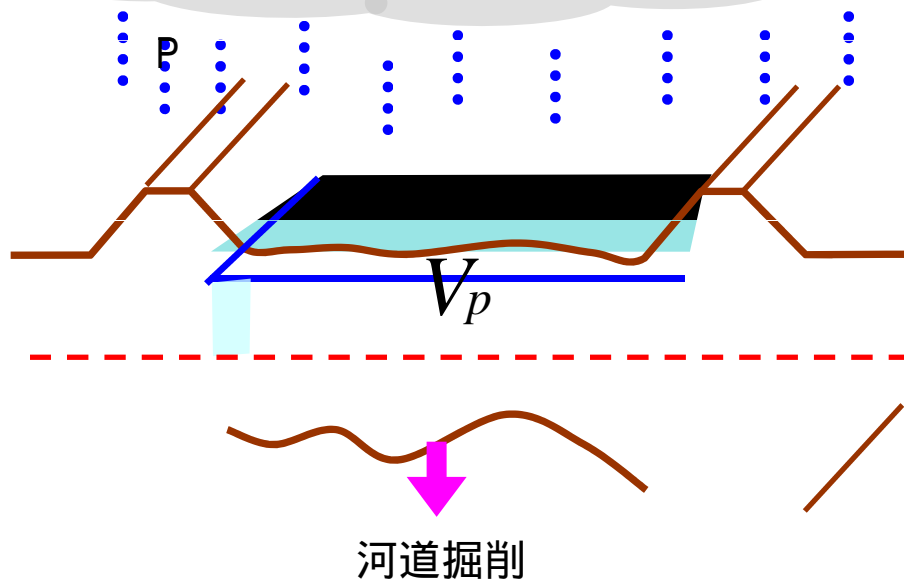


河川整備必要量比

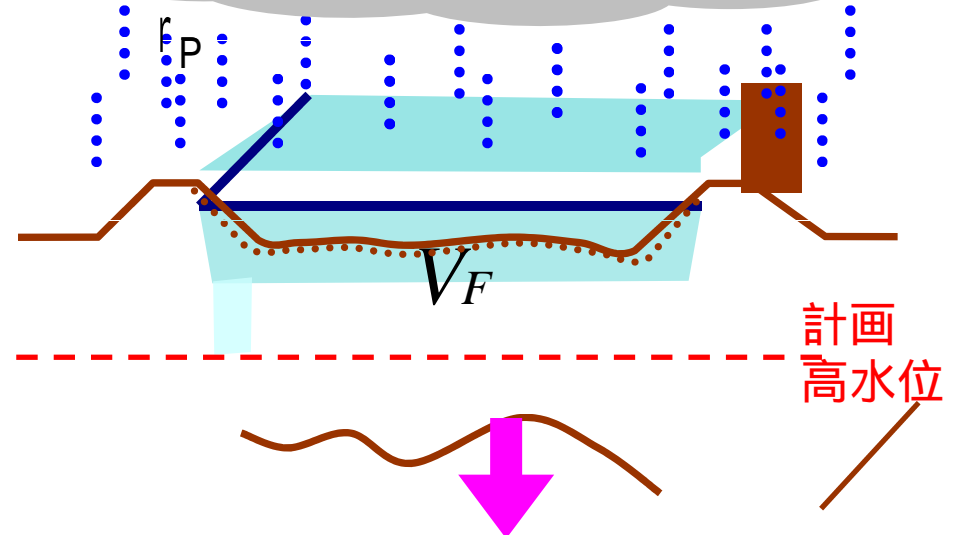
$$V_F / V_P$$

河川整備方針における計画規模と同一の生起確率年の降水量の増大

現在気候での降水量 r



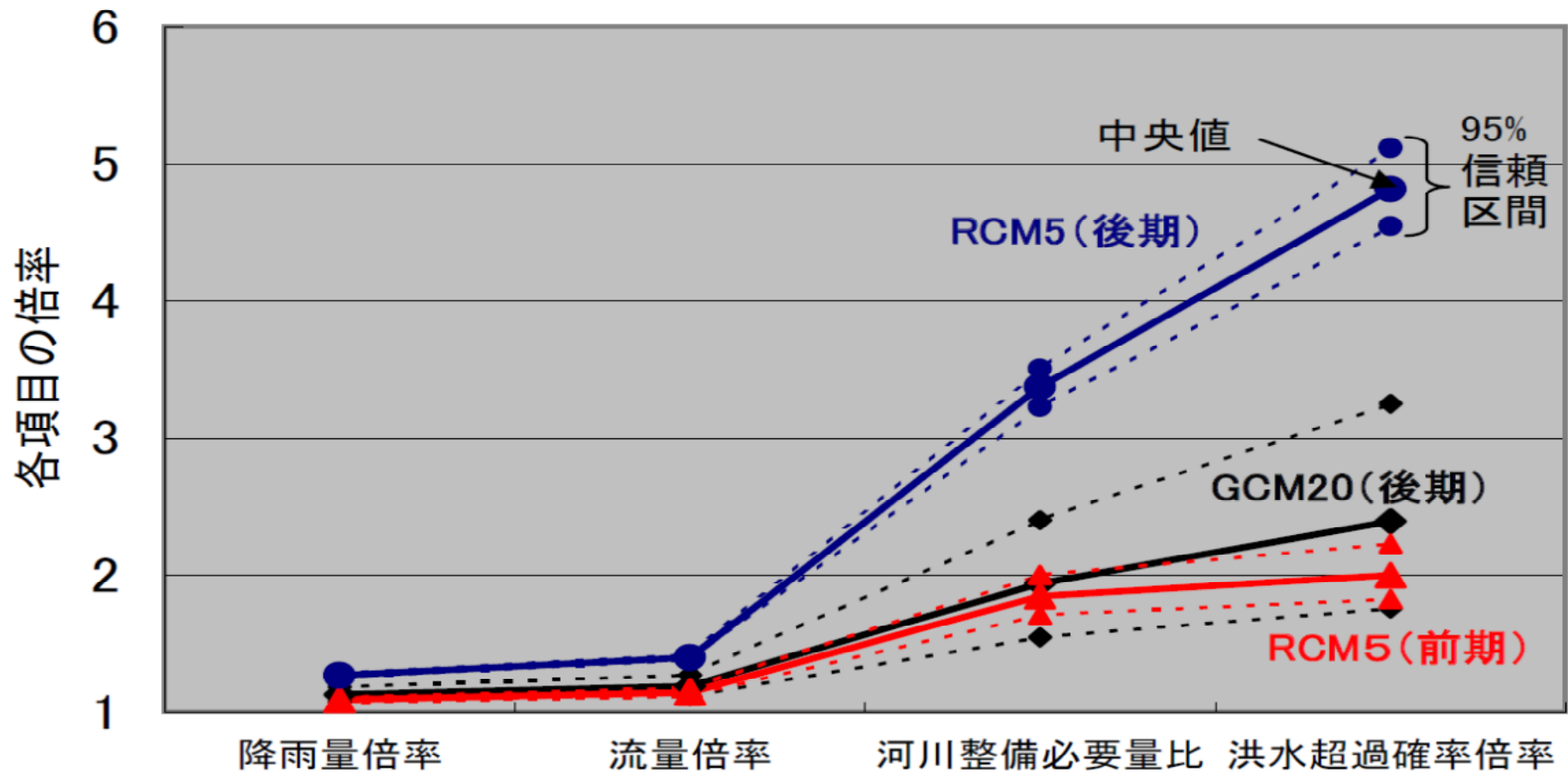
将来気候での降水量 $r_F =$



水位を下げる整備必要量*の増大 河道掘削 国総研(2012)

*) このイメージ図では河道掘削の大きさとして必要量を表記 → 引堤・ダムなど流量調節施設に置き換え可能

倍率と不確定性の伝搬



内 容

- 水災害に係る気候モデル出力の特徴
- 水災害に関連する諸量の将来変化
- 不確定性について
- 最悪シナリオについて**
- 適応の向けて

不確定性がまだまだある(2)

- そこで、最悪シナリオも影響評価の対象としておきたい。
- たとえば、できるだけ気象学的に根拠のある形で台風のコースをずらして大雨や河川流量を算定するとどうなるだろうか？



適応に向けて

最悪シナリオ

サバイバビリティ・クリティカル（生存の淵、土俵際）から、しなやかにより戻せる足（社会システム）が、より重要となる

= 大規模災害の場合もふくむ

世紀末のデザイン値

将来気候下での推測デザイン値には不確定性がある

気候変動による影響評価では
= 同じ頻度に対応するデザイン値は上昇する。
= でも、どこまで上昇するかにはあいまいさがある。

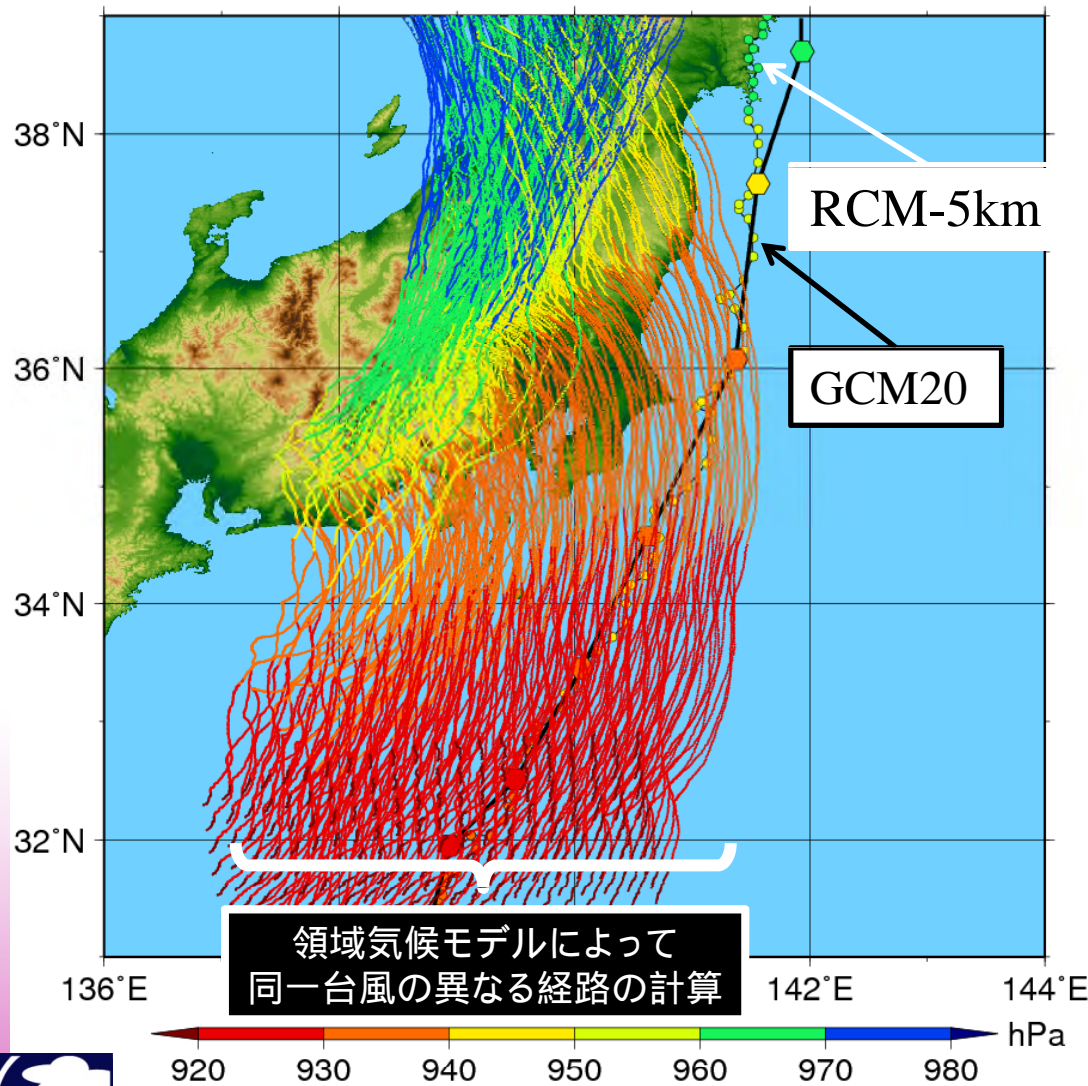
現気候下でのデザイン値

河川の流量高潮の水位

防災の対象となる範囲

= 堤防から水は溢れさせない。
防波堤から水は越えさせない。

極端台風を進路を操作して最悪シナリオを



台風の渦を保存させて中心位置を移動させる。

(コマを移動させる)



領域気象モデルで移動後の数値シミュレーションを実施。

(コマを再び放して勝手に移動させる)

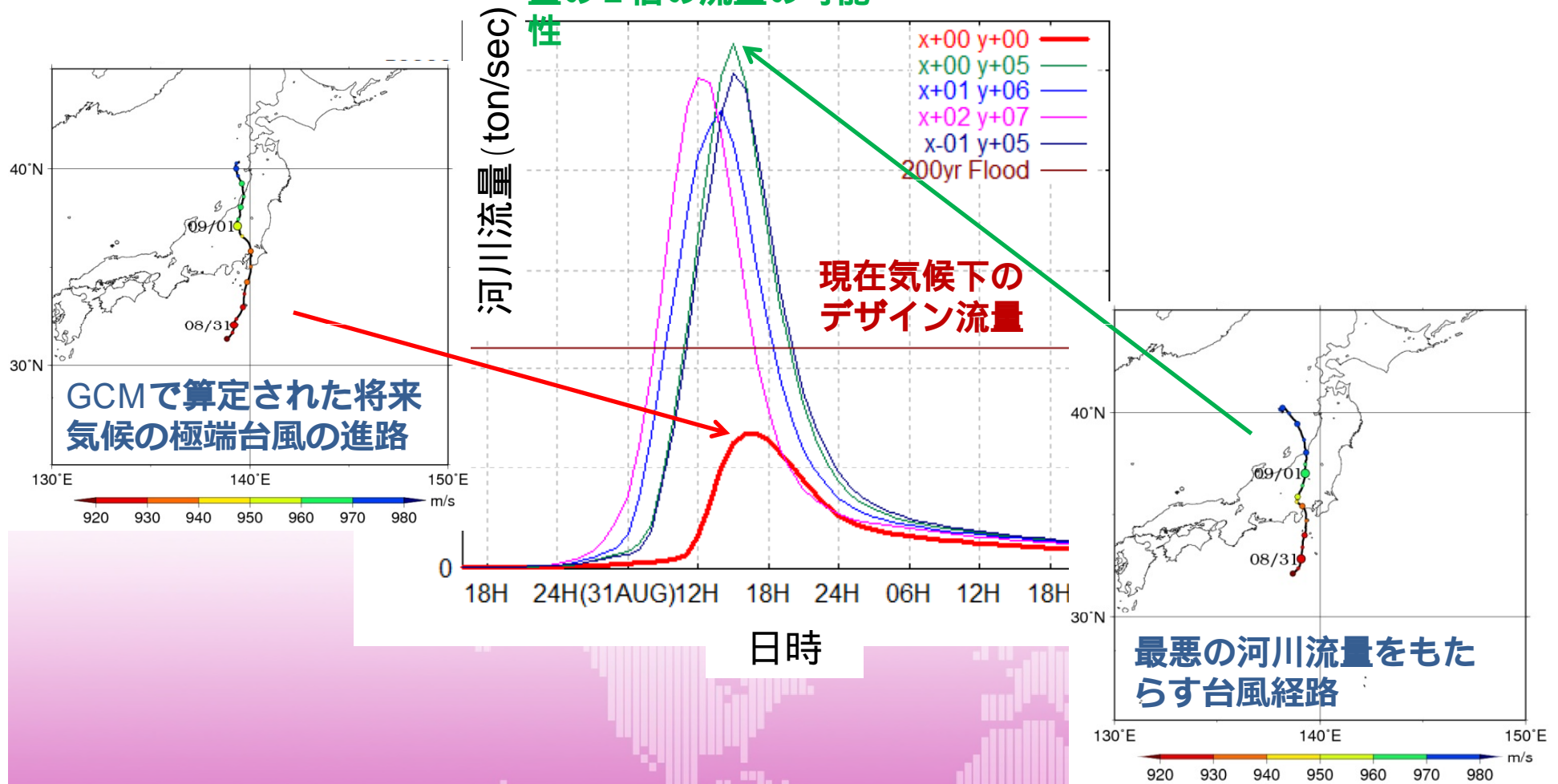


影響評価

- 陸： 強風・河川流量・浸水
- 海： 波浪・高潮

GCMで算定された将来気候極端台風を 進路変更させたときの最悪河川流量

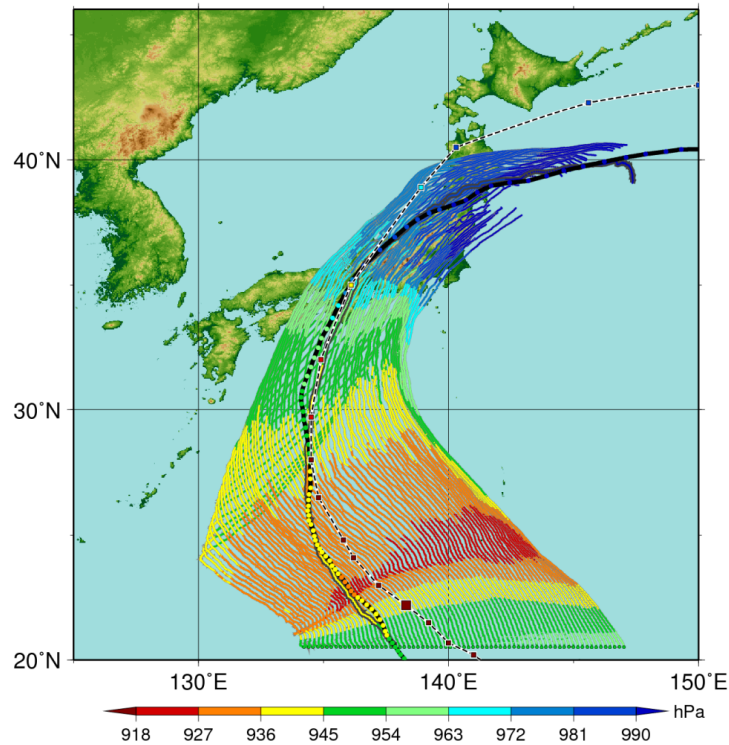
現在気候のデザイン流
量の2倍の流量の可能
性



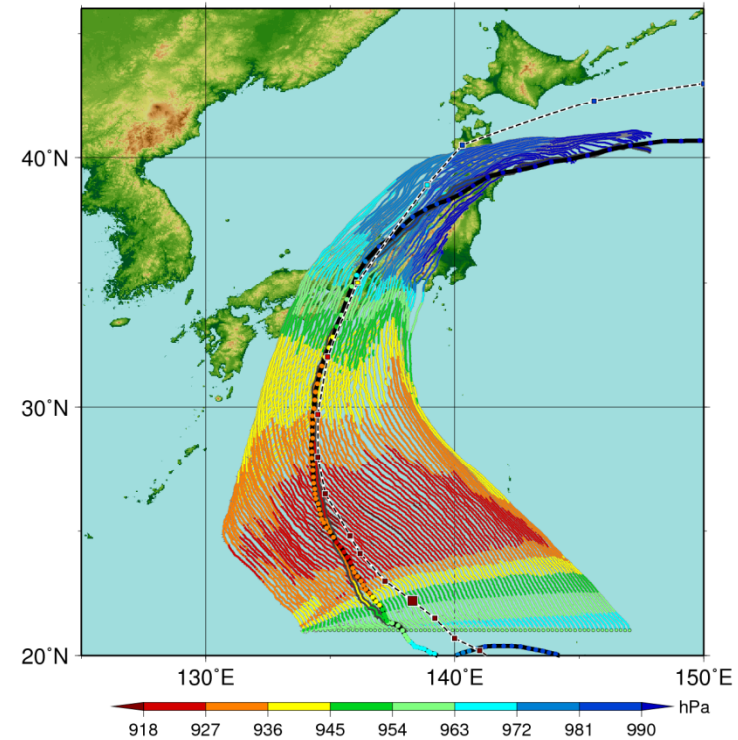
さらなる最大クラス・最悪シナリオの検討

伊勢湾台風を対象として台風経路操作アンサンブルシミュレーションを実施し、異なる経路をとった場合に想定される強雨・強風のパターンを解析

1959年9月条件



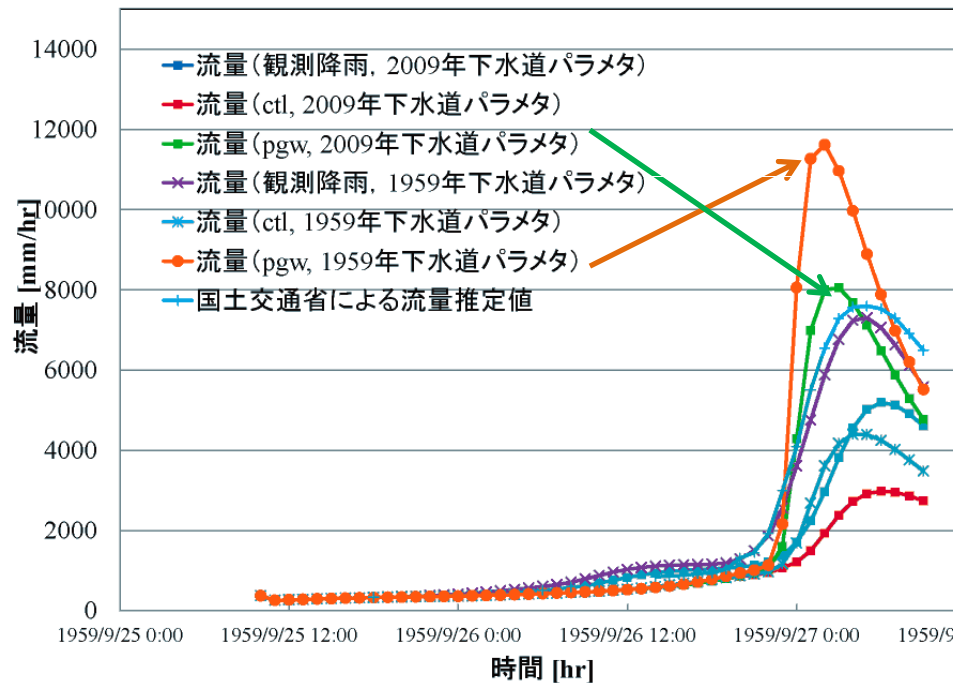
21世紀末擬似温暖化条件



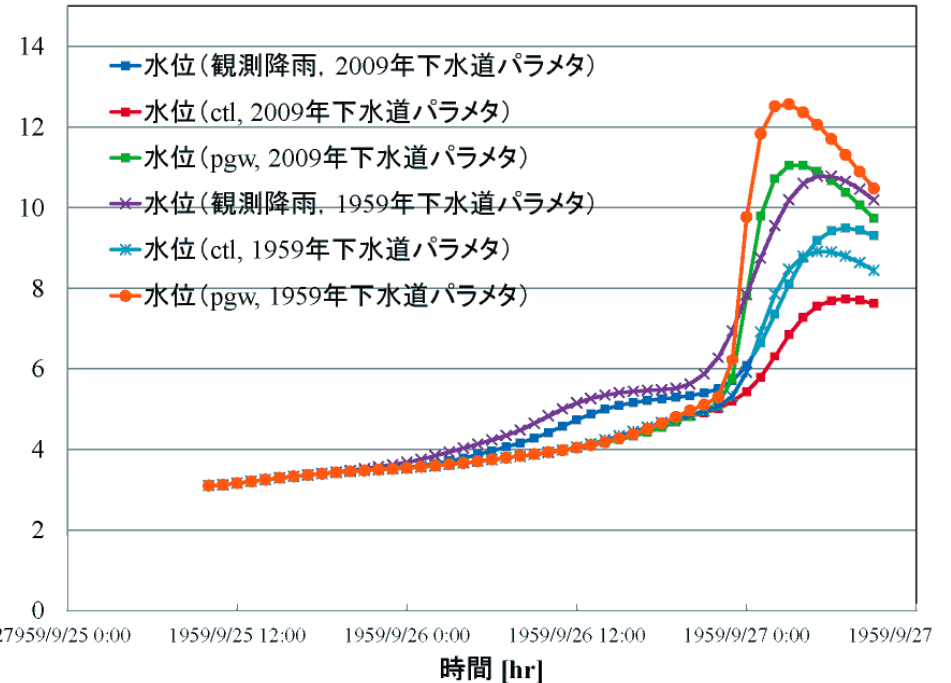
初期位置20 km間隔・合計81通りの経路をシミュレーション
水災害・沿岸災害の影響評価のデータセット作成

中野ら(2013)、竹見(2013)

流量・水位の計算結果



枚方地点の流量



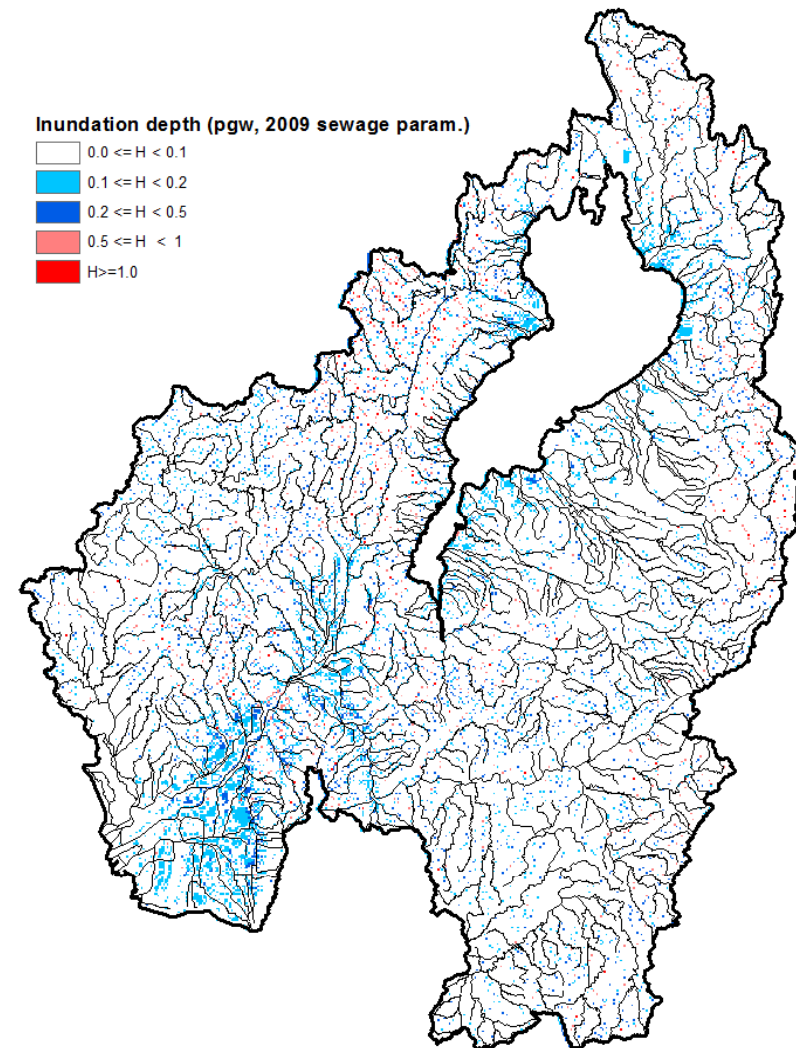
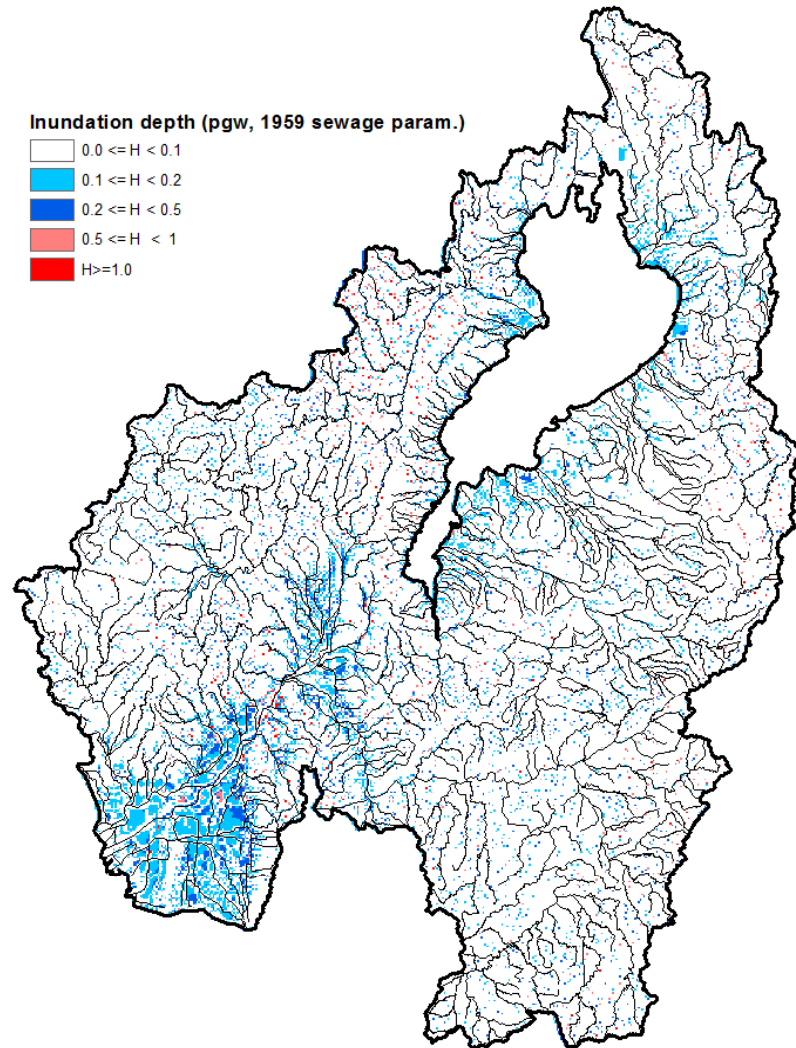
枚方地点の水位

SOUSEI



小林健一郎ら (2013): 伊勢湾台風疑似温暖化実験による淀川流域における洪水規模の変化予測 (水工学論文集に掲載) 40

浸水深計算結果



SOUSEI
1959年時点の再現計算

下水道整備が進んだ現時点の推定計算

小林健一郎ら (2013)41

寝屋川流域での被害額計算結果 (見方の例)

- 伊勢湾台風再現計算 6.1億
- Pgw実験(1959年下水道網) 530億
- Pgw実験(2009年下水道網) 190億

この資産が大まかに正しいとして、擬似温暖化のような状況が今起こった場合、気候変動による被害は183.9億円、他方、1959年の視点からは340億円が下水道整備により救われたことになる。

という、たとえばこのような試算が可能(まだまだ不確
定性大であくまで参考)。



内 容

- 水災害に係る気候モデル出力の特徴
- 水災害に関連する諸量の将来変化
- 不確定性について
- 最悪シナリオについて
- 適応の向けて**

適応策に向けて

- できるだけ気象学的に根拠のある形で台風のコースをずらして大雨や河川流量を算定すると現在の治水目標値の2倍の流量が算定される場合があります。
- 将来の適応のためにこの算定値は考慮に入れるべきでしょうか？
- たとえどれくらいの頻度で到来するかは推定できなくとも、また災害を完全に防ぐこともできないものであっても、少なくとも「生起してしまった場合にどうすべきか？」という被害軽減策を考慮しておく必要があると思っています。



適応に向けて

最悪シナリオ

サバイバビリティ・クリティカル（生存の淵、土俵際）から、しなやかにより戻せる足（社会システム）が、より重要となる

世紀末のデザイン値
= 大規模災害の場合もふくむ



不確定性が下がれば。。。。

現気候下でのデザイン値

河川の流量高潮の水位

気候変動による影響評価では
= 同じ頻度に対応するデザイン値は上昇する。
= でも、どこまで上昇するかにはあいまいさがある。

防災の対象となる範囲
= 堤防から水は溢れさせない。
防波堤から水は越えさせない。

気候変動影響評価・適応策を考えるにあたって

- 革新プロジェクトで初めて我が国の災害への影響評価が可能になった
- 気候変化が語れる空間分解能と計算分解能等と同じではない：
 - 20km以下の細かさで予想されるからといって、100年先の影響の神戸と大阪で違いは議論できない。
- 安全度評価（デザイン値の将来推定）には不確定性がある：
 - 現在の防災計画は、200年確率など、再現確率をデザイン値にしている。しかし、100年先の状態について正確に「生起確率を評価することはできない危険性がある」。（気候モデルの不確実性やアンサンブル計算数の少なさによる）
- 最悪シナリオ、サバイバル・クリティカルの重要性：
 - 気候変動適応策には増大するデザイン値の確率評価（安全度評価）だけでなく、最悪シナリオベースの評価も極めて大切である。スーパー台風が物理的根拠を持った計算上生起することが見込まれるならば、生起確率が不明であっても最悪シナリオの一つとして採用し、適応策を考える哲学を構築する、そんな考え方の転換が必要がある。サバイバビリティ・クリティカル（生存の淵、土俵際）から、しなやかにより戻せる足（社会システム）が、より重要となる。

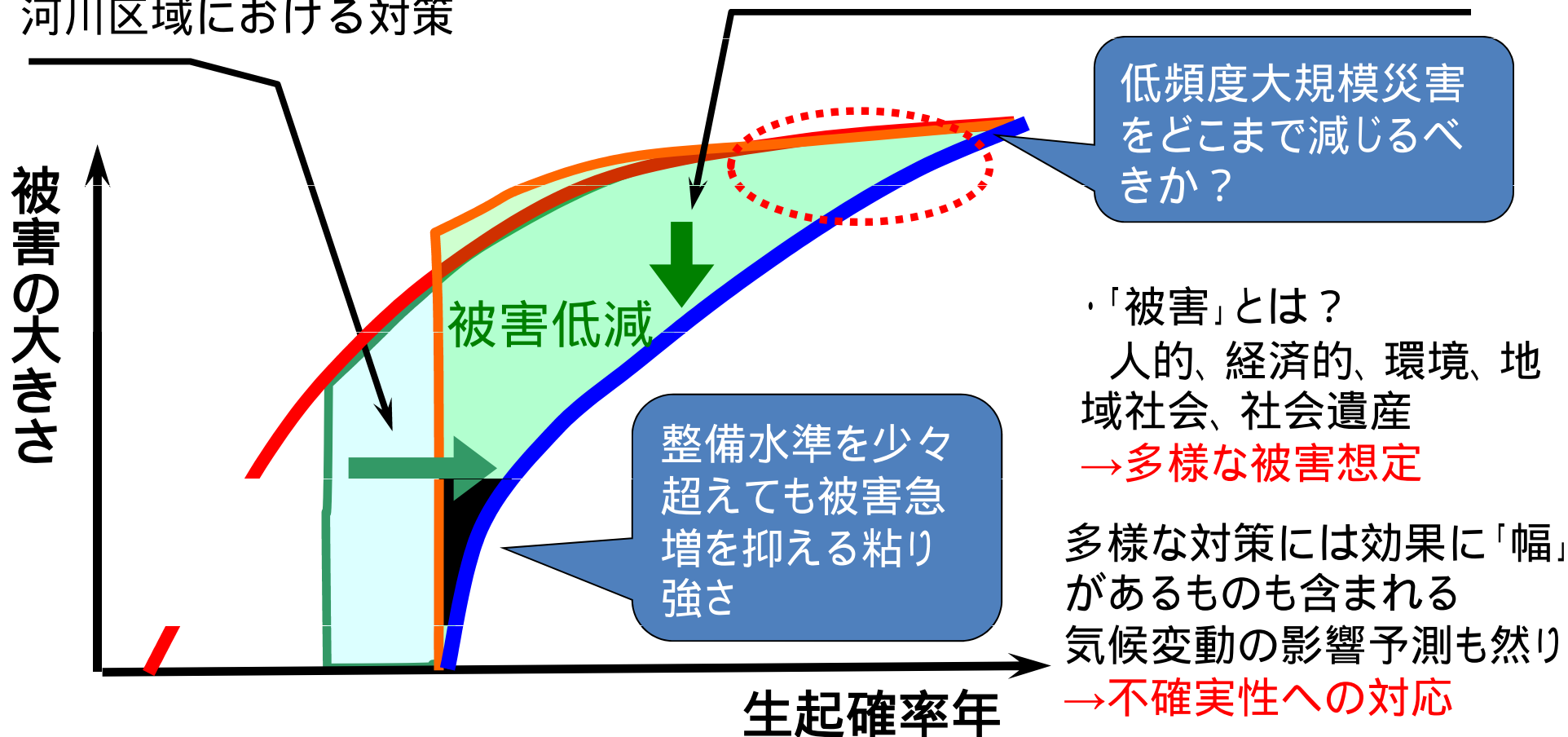
氾濫リスク評価：多角的視点と総合化

発生頻度を減じる適応策

主に河道掘削やダムなど
河川区域における対策

被害の大きさを減じる適応策

主に高規格堤防、流域に踏み出した対策



— 対策なし
 — 現状の整備水準
 — 既往対策
 — 各種対策組み合わせ

気候変動適応策の立脚点

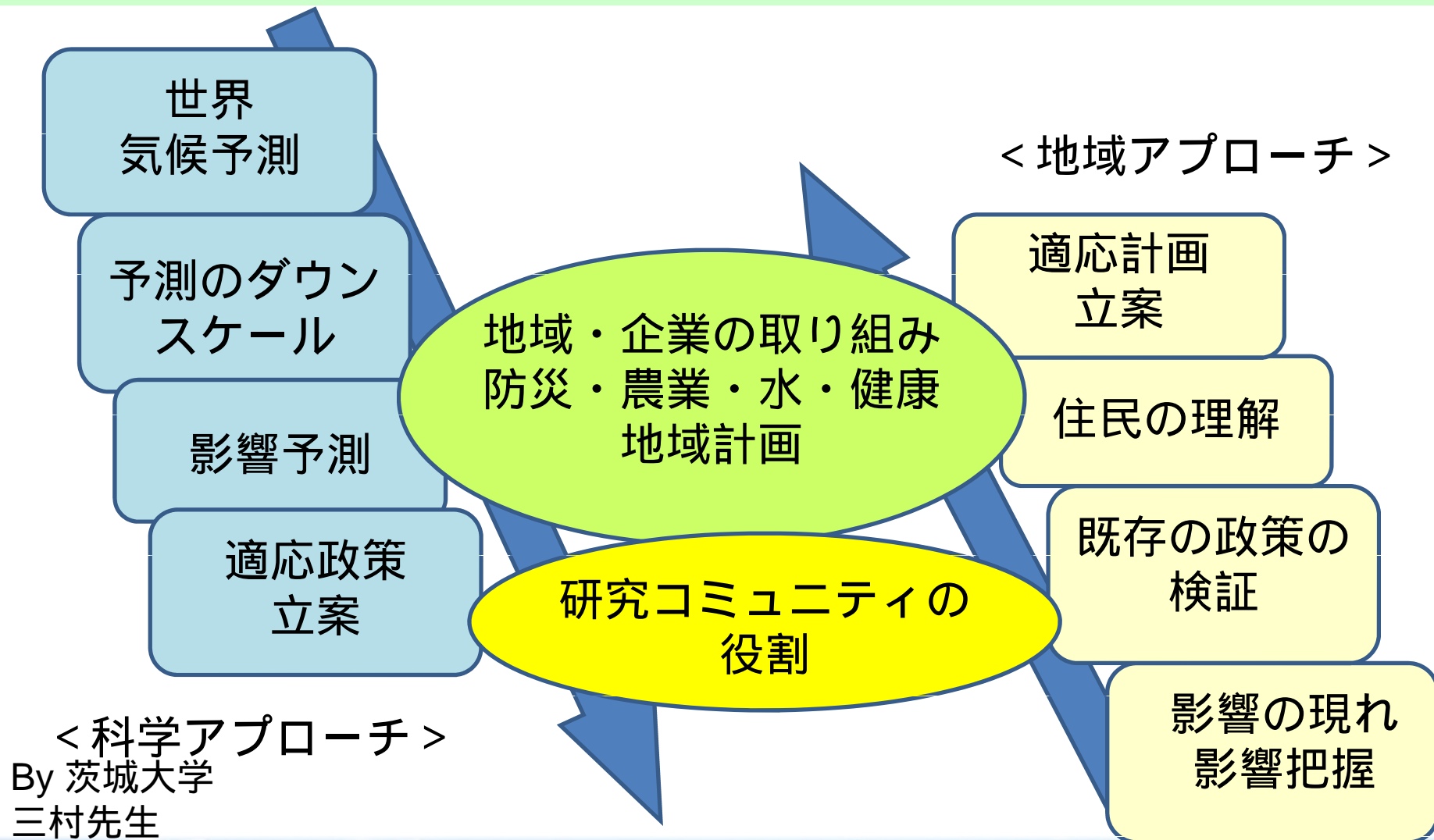
1. 気候変動の影響は起こりつつある
2. 影響と適応策には地域性が大きい
3. 不確実性の下での意志決定
柔軟で順応的な対応が必要（ Adaptive adaptation ）

By 茨城大学
三村先生

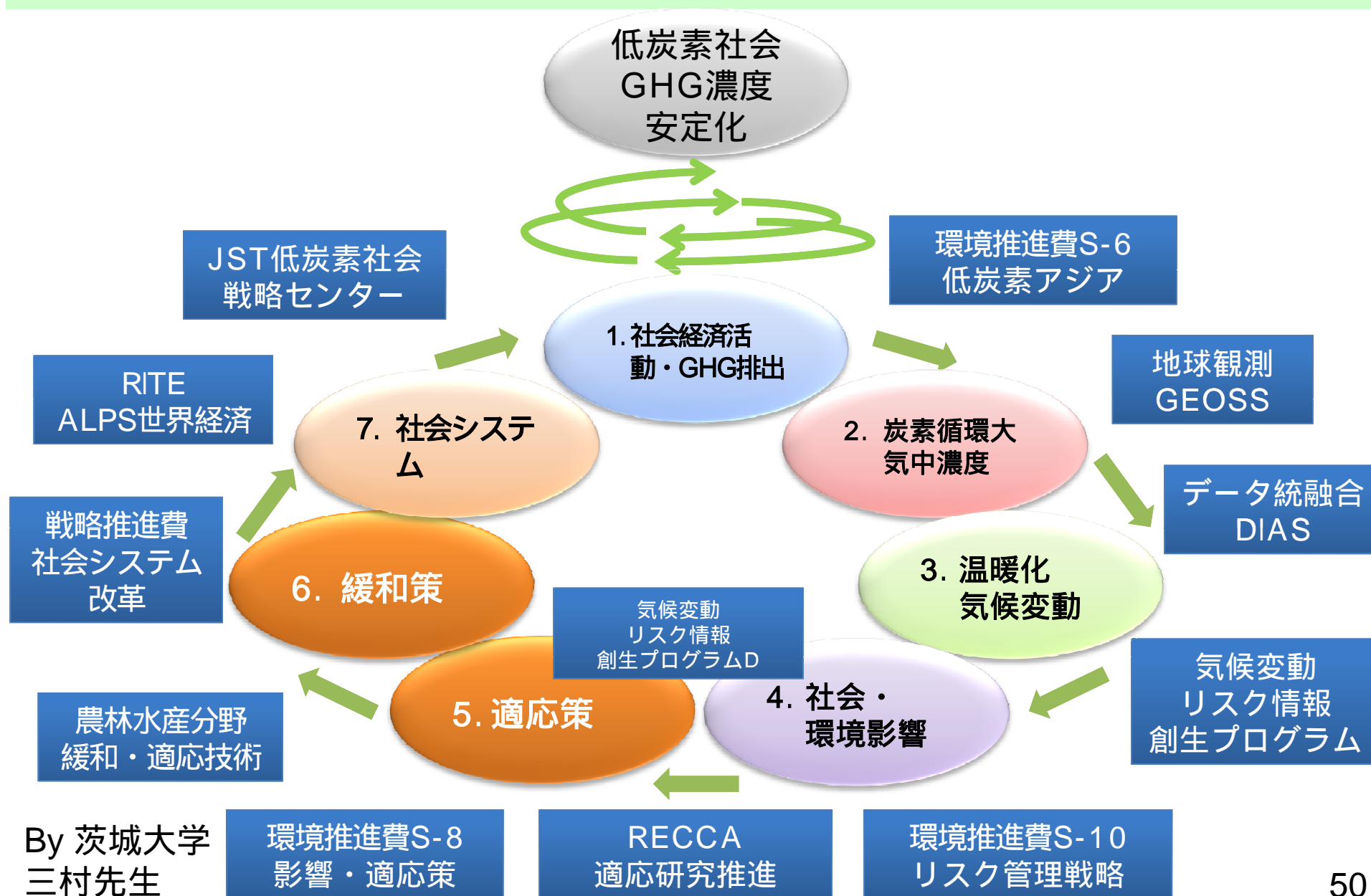


気候変動適応研究推進プログラム

適応策のアプローチと科学的支援



気候変動に関する研究プロジェクト



Sousei (創生) Program D (2012-2016)

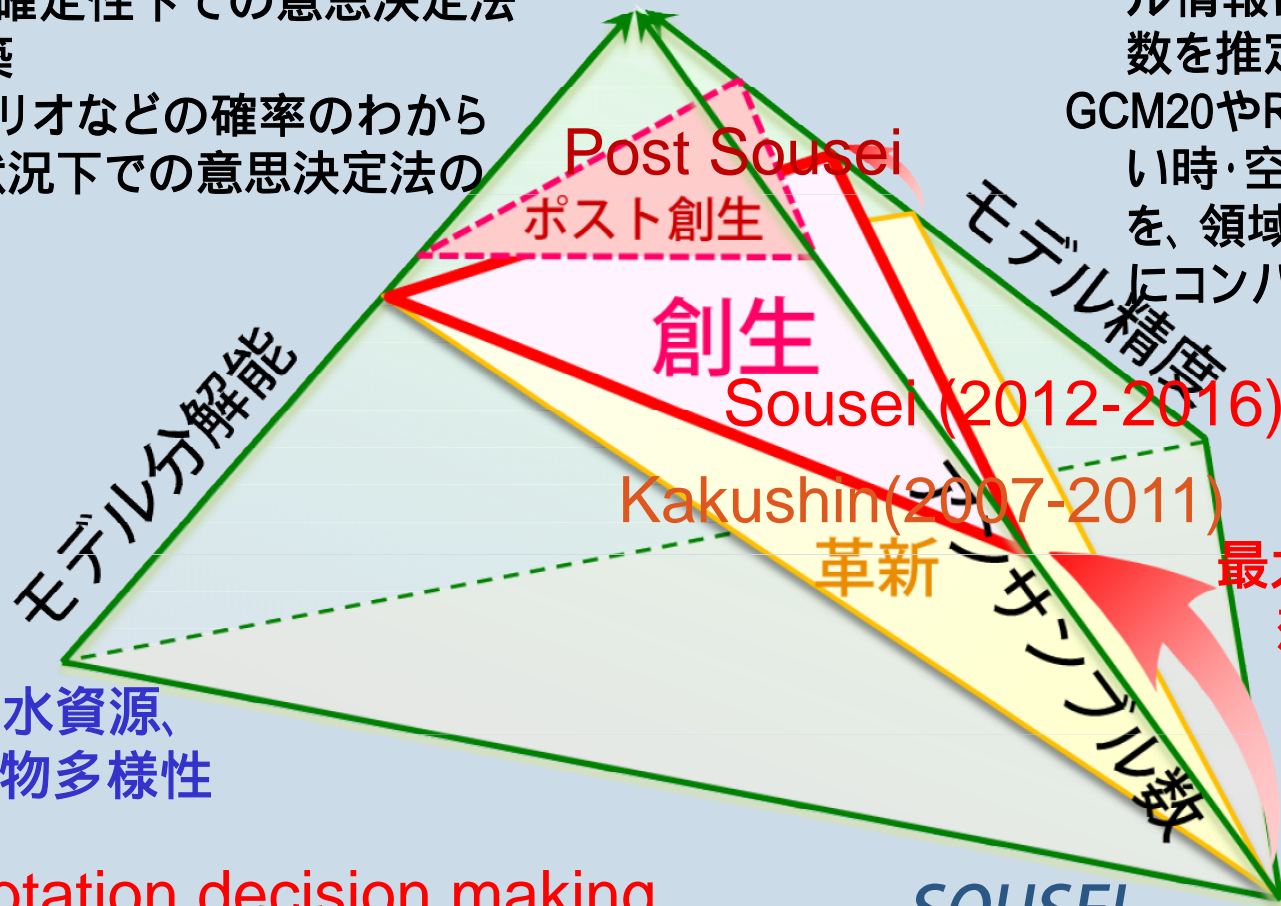
適応策創出の哲学・考え方の構築

大きな不確定性下での意思決定法の構築
 最悪シナリオなどの確率のわからない状況下での意思決定法の構築

より精度の高い確率の推定

粗いモデルによるアンサンブル情報により確率密度関数を推定する。
 GCM20やRCMを用いて、粗い時・空間解像度での値を、領域スケールでの値にコンバート

Ultimate Goal



対象:
 自然災害, 水資源,
 生態系・生物多様性

最大クラス外力の
 想定 - 生存の縁
 最悪台風群
 複合災害
 社会シナリオ
 の想定

For adaptation decision making
 Deterministic, Probabilistic and Beyond

SOUSEI



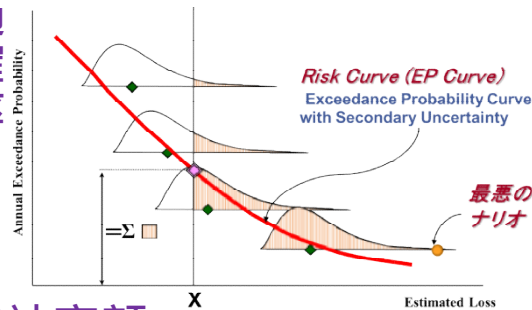
適応策の費用便益評価方法の構築



□ 不確定性を考慮したリスク評価

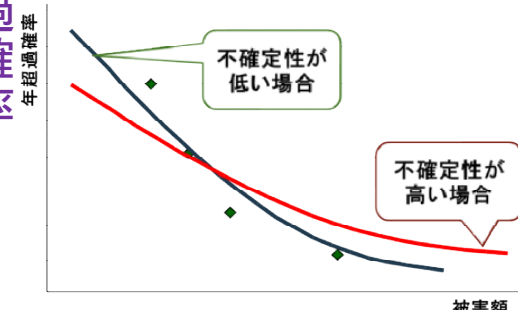
不確定性：
台風の発生位置，
破堤シナリオなど

超過確率



期待被害額

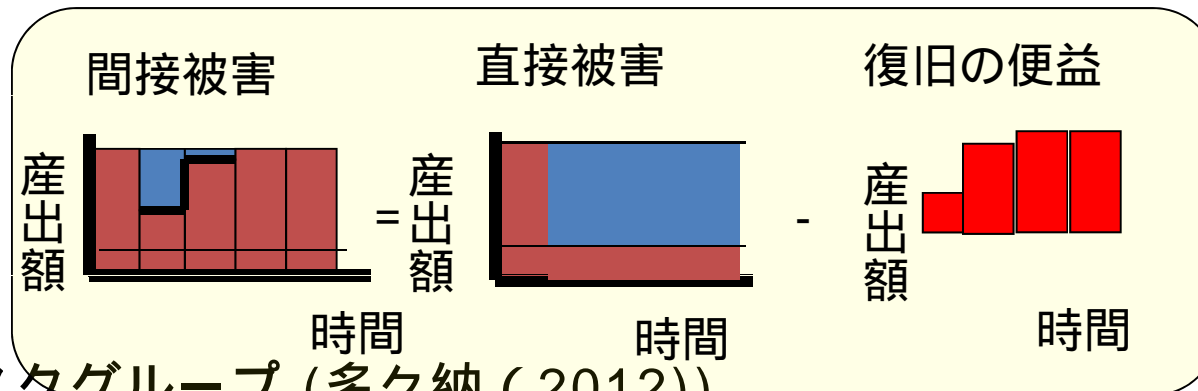
超過確率



期待被害額

□ 被害の統合的評価

$$\begin{aligned} \text{総被害額} &= \text{直接被害額} - \text{復旧の純便益} \\ &= \text{間接被害額} + \text{復旧費用} \end{aligned}$$



創生京大リスクグループ (多々納 (2012))

適応への考え方

- ・ 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。
 - どう言うことが生じるだろうかという想像力と覚悟が大切。
- ・ 実践を通しての適応:「はっきりとはわからないけど進める」
 - 専門家はまずこの認識を持つことが大事。
 - 「現在の進行も適応になる」以上の認識が必要。
 - この認識を、他省庁とも共同して、国民に理解してもらうように努める。
 - 温暖化の影響らしきものを国民に発信してゆく
 - 「具体的な実行があって助かった」を蓄積してゆく。
- ・ 基本計画としての適応
 - 設計値(年確率値)にのみこだわるならまだまだ不確定性は高い。
 - だからこそ、最悪シナリオ(極端シナリオ)をどう計画に組み込んでいくか、という適応が重要。(設計値にという意味ではない)