

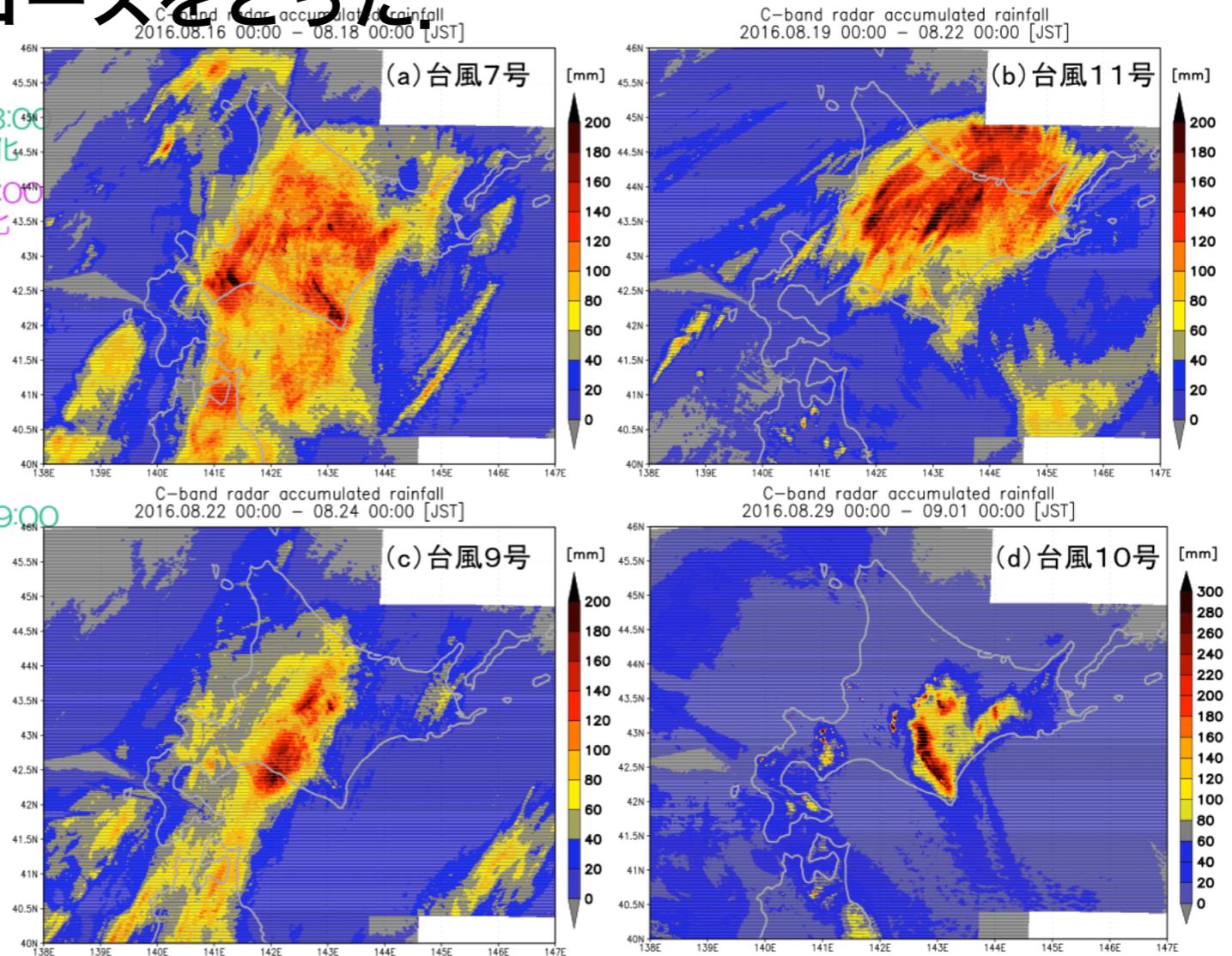
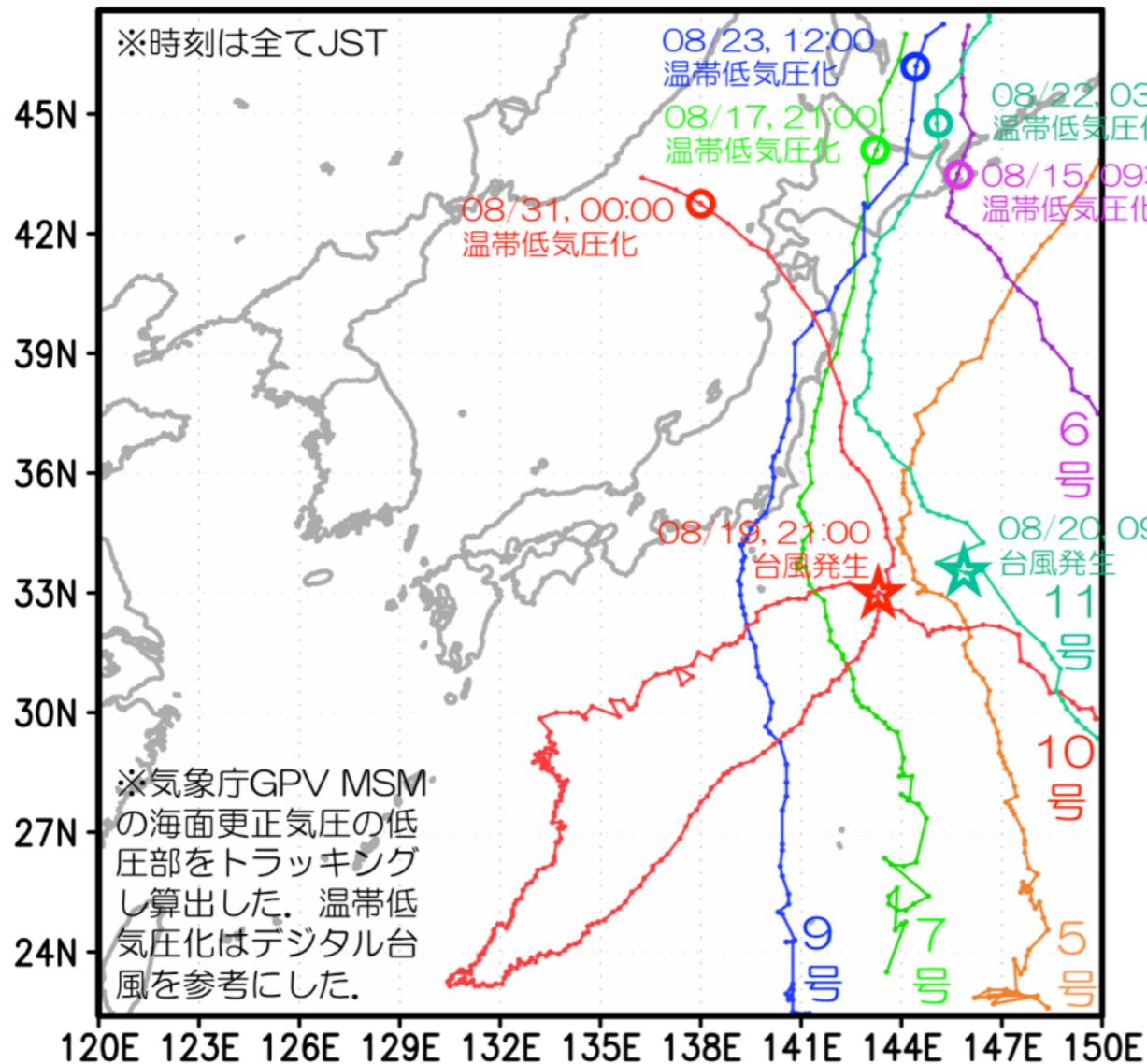
気候変動に伴う洪水外力の変化

北海道大学大学院 工学研究院

山田朋人

2016年8月の台風による豪雨災害

8月中旬から1週間の間に3個の台風(台風7, 11, 9号)が北海道に上陸し, 下旬には4個目の台風(台風10号)が接近して各地に大雨を降らせ, 激甚な災害をもたらした. 気象庁が1951年に台風の統計を開始以来, 北海道に台風が3個上陸したことは無く, また台風10号は太平洋側から東北地方へ上陸するという初めてのコースをとった.



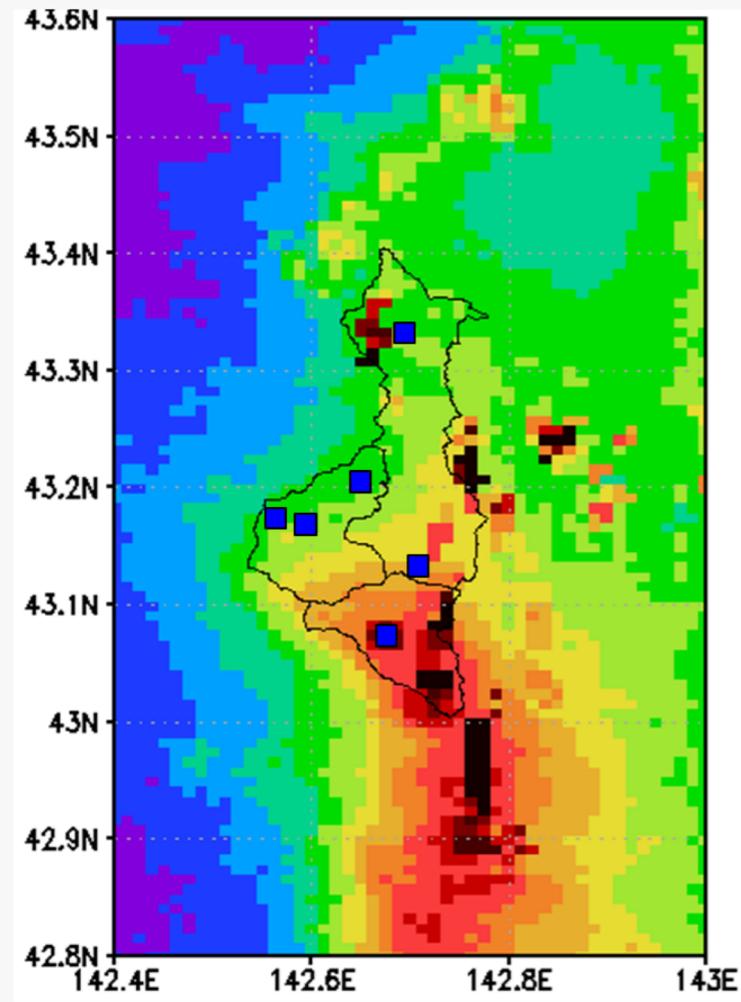
* (d) のカラーバーは範囲が0~300mmとなっている.

2016年8月に北海道を上陸もしくは周辺を通過した台風の経路. 気象庁GPV MSMの海面更正気圧の低圧部を1時間おきにトラッキングし算出した. 発生・温帯低気圧化はデジタル台風を参考にした. 図中☆印は台風発生地点, ○印は温帯低気圧化した地点.

2016年8月16日から9月1日までの台風ごとの積算降雨量. Cバンドレーダより算出. (a) 2016年8月16日00時から8月18日00時までの積算降雨量 (b) 2016年8月19日00時から8月22日00時までの積算降雨量 (c) 2016年から8月22日00時から8月24日00時までの積算降雨量 (d) 2016年8月29日00時から9月1日00時までの積算降雨量

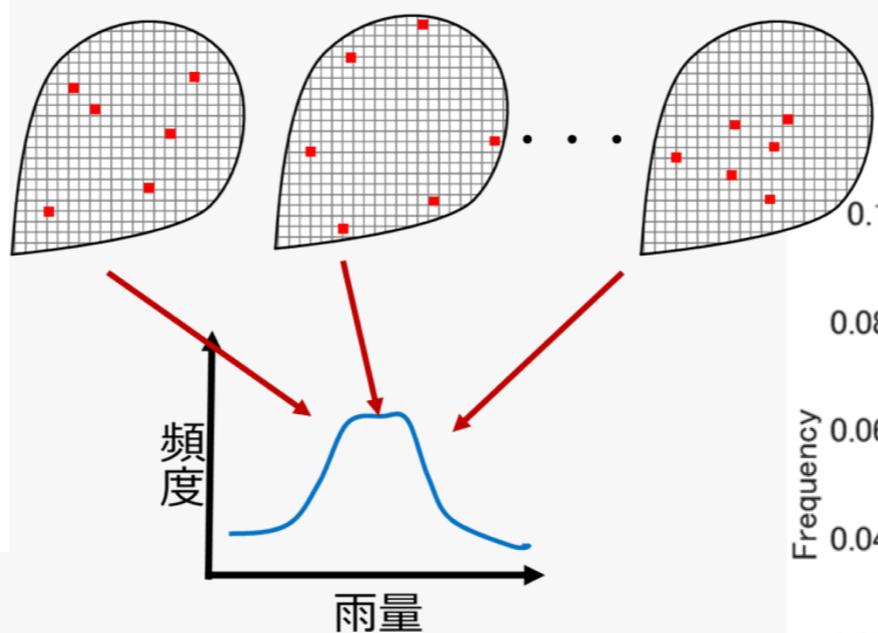
観測位置によって変化する雨量の認識

観測位置による累積雨量の認識のばらつきを定量化
空間分布をもつレーダ雨量を仮に降雨として以下の
試行を実施。

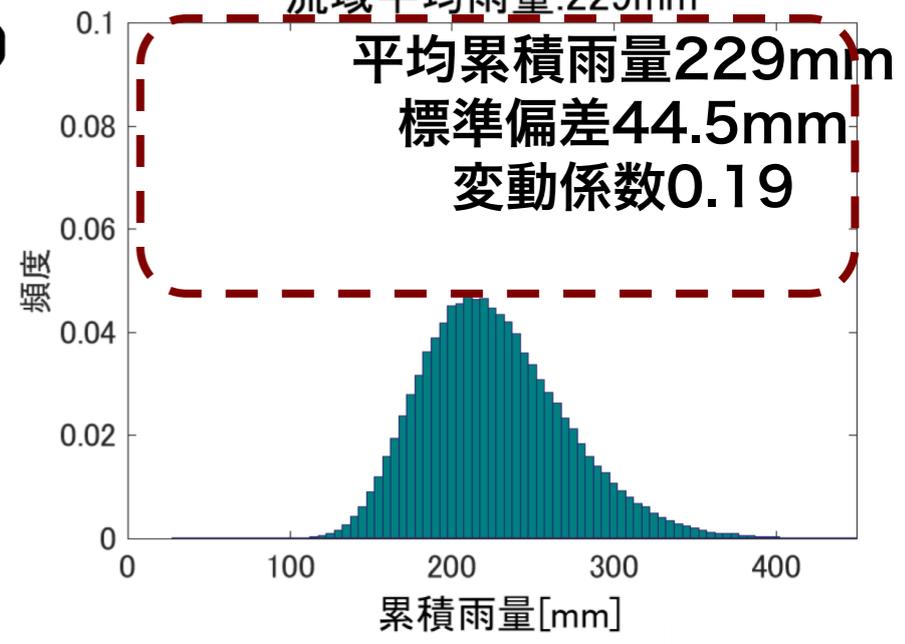


解析雨量による累積雨量
(空知川上流域、台風10号時)

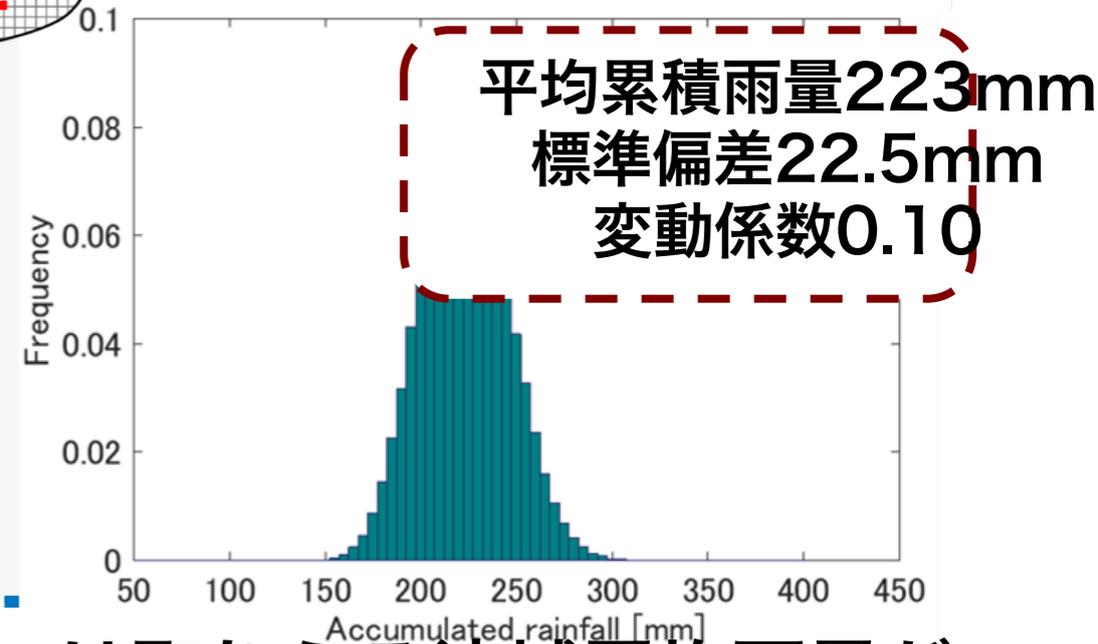
地上雨量計
国土交通省2258,
気象庁1305



金山ダム流域 台風10号(8/28 20時-8/31 19時)
流域平均雨量:229mm

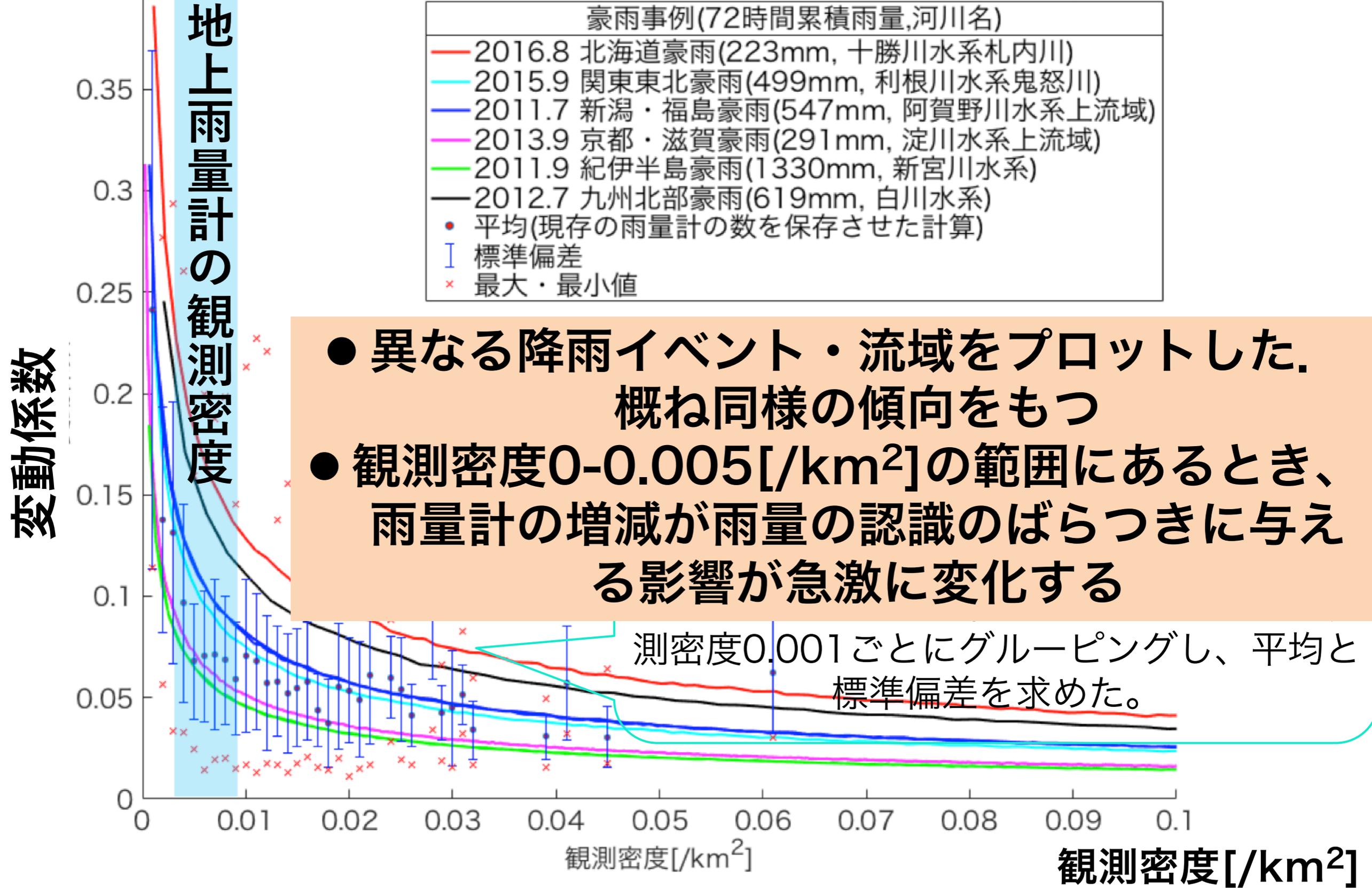


札内川流域(台風10号時)



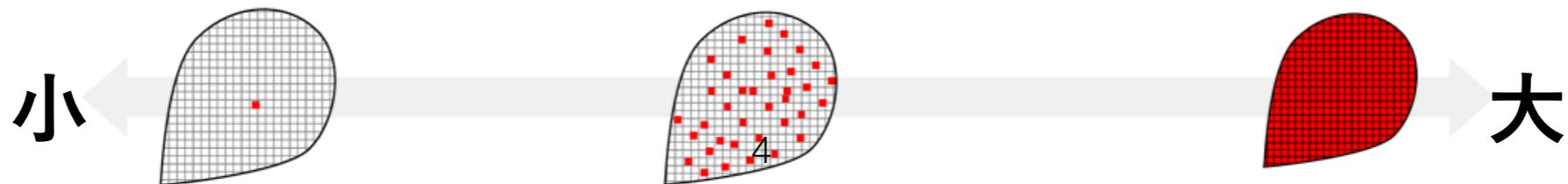
雨量計の位置によって台風10号時の空知川では取りうる流域平均雨量が
180~270mm、札内川では200~250mmの幅をもつ。

観測密度の変化に伴う雨量の認識の揺らぎ(3日雨量)



豪雨事例(72時間累積雨量,河川名)	
—	2016.8 北海道豪雨(223mm, 十勝川水系札内川)
—	2015.9 関東東北豪雨(499mm, 利根川水系鬼怒川)
—	2011.7 新潟・福島豪雨(547mm, 阿賀野川水系上流域)
—	2013.9 京都・滋賀豪雨(291mm, 淀川水系上流域)
—	2011.9 紀伊半島豪雨(1330mm, 新宮川水系)
—	2012.7 九州北部豪雨(619mm, 白川水系)
●	平均(現存の雨量計の数を保存させた計算)
I	標準偏差
×	最大・最小値

- 異なる降雨イベント・流域をプロットした。概ね同様の傾向をもつ
- 観測密度0-0.005 [km²]の範囲にあるとき、雨量計の増減が雨量の認識のばらつきに与える影響が急激に変化する



ランジュバン方程式

$$\frac{dx}{dt} = y(x) + \zeta'(x, t)$$

Step 1 : システムの支配方程式にランダム成分を加えることにより, システムの不確実性を考慮する。

$$\frac{dq}{dt} = aq^b(\bar{r}(t) - q) + aq^b r'$$

伊藤の確率微分方程式

$$dx(t) = y(x(t), t)dt + \sigma(x(t), t)dw$$

Step 2 : そのランダム成分を拡散係数かける標準ウィーナー過程の形式に書き換える

$$dq = aq^b(\bar{r}(t) - q)dt + \sigma\sqrt{T_L}dw$$

Fokker-Planck 方程式

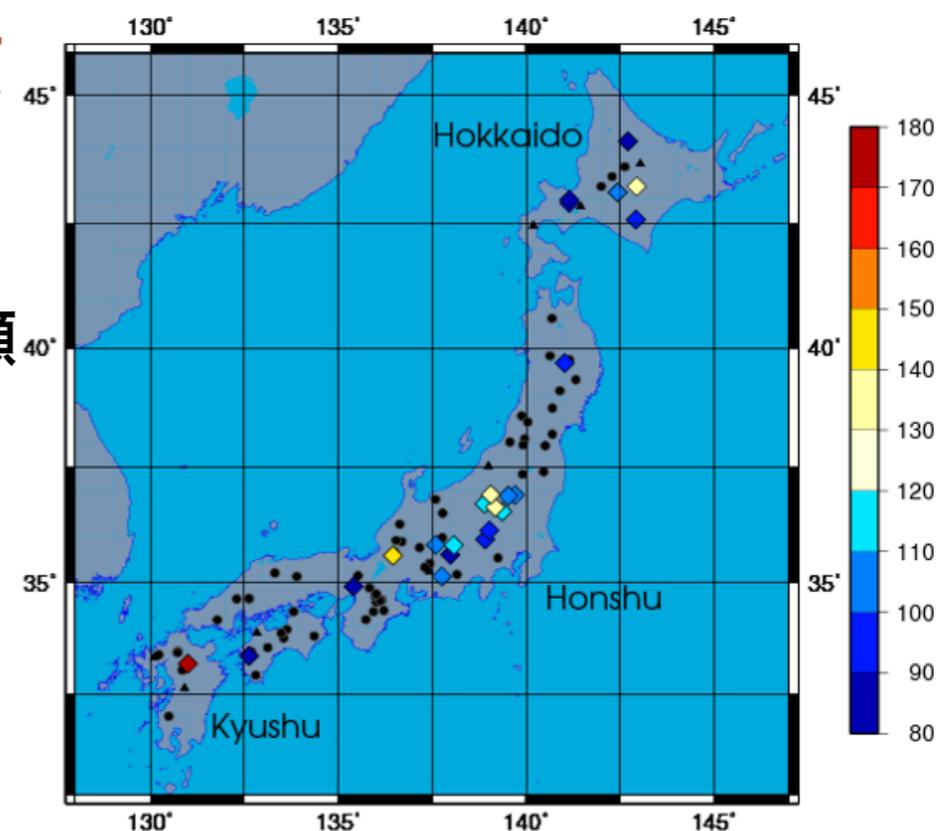
$$\frac{\partial P(x, t)}{\partial t} = -\frac{\partial y(x)P(x, t)}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \sigma^2 P(x, t)}{\partial x^2}$$

Step 3 : 確率密度関数の支配方程式が得られる。

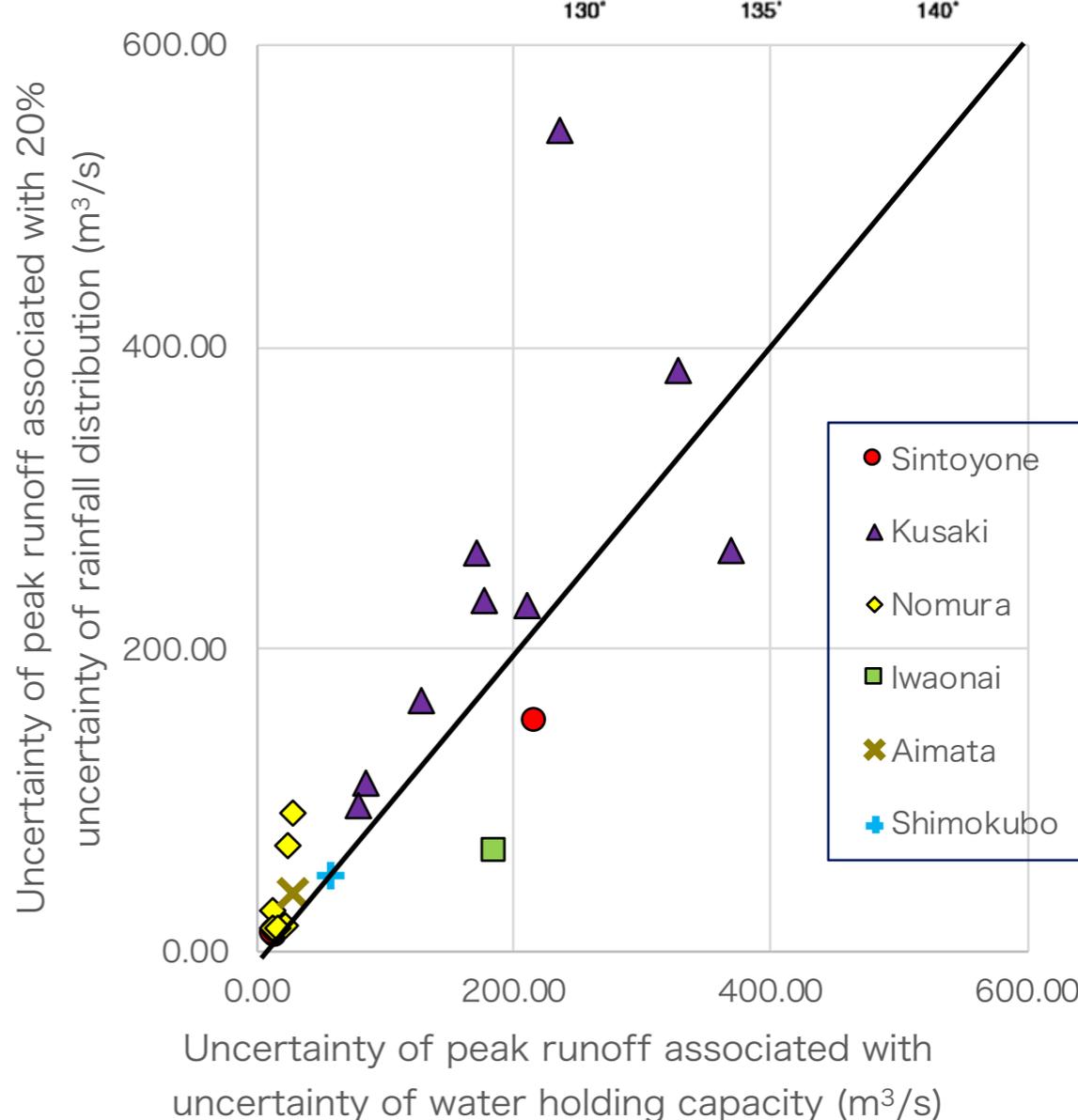
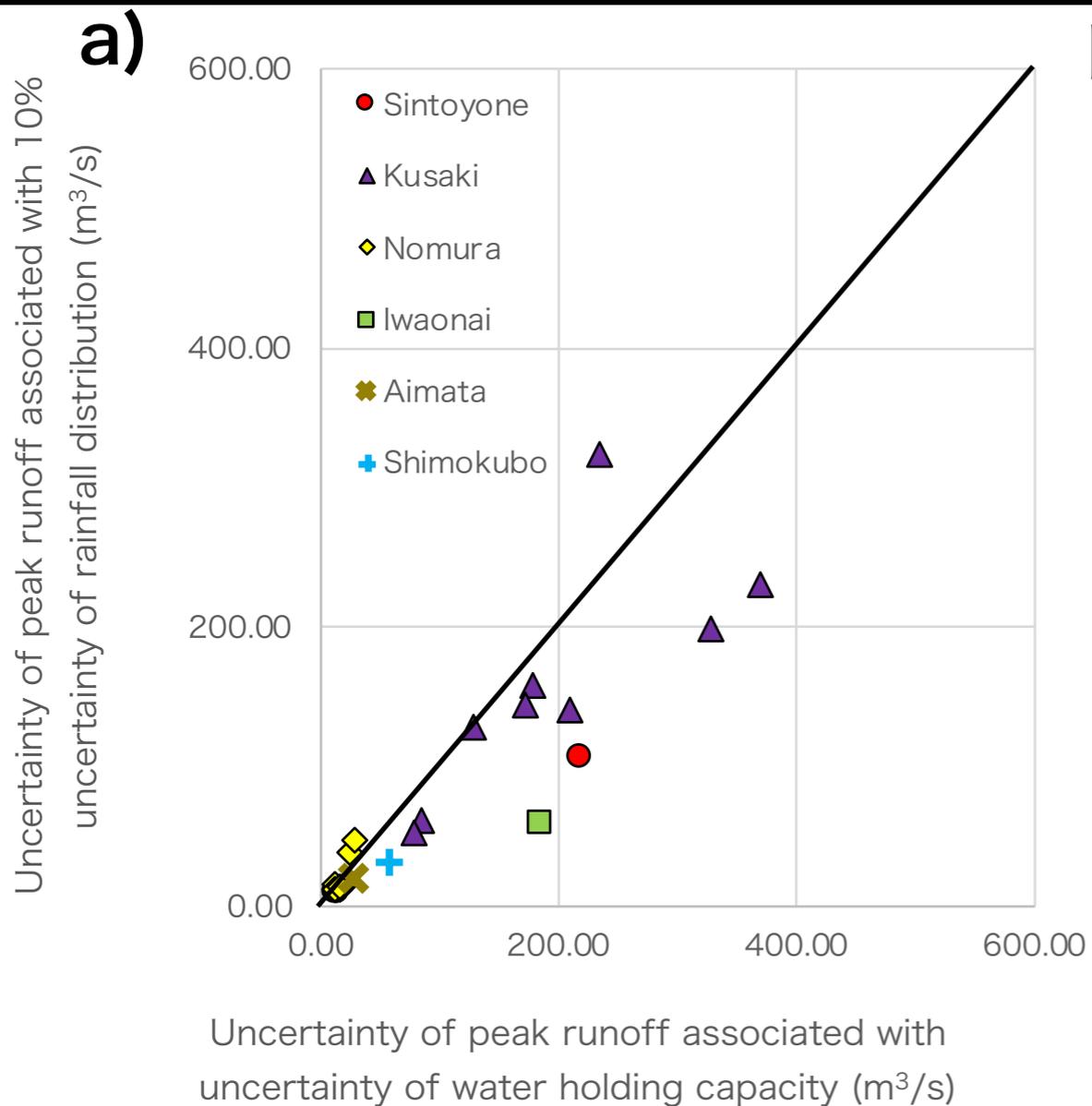
$$\frac{\partial P(q)}{\partial t} + \frac{\partial aq^b(\bar{r}(t) - q)P(q)}{\partial q} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 (aq^b \sigma\sqrt{T_L})^2 P(q)}{\partial q^2}$$

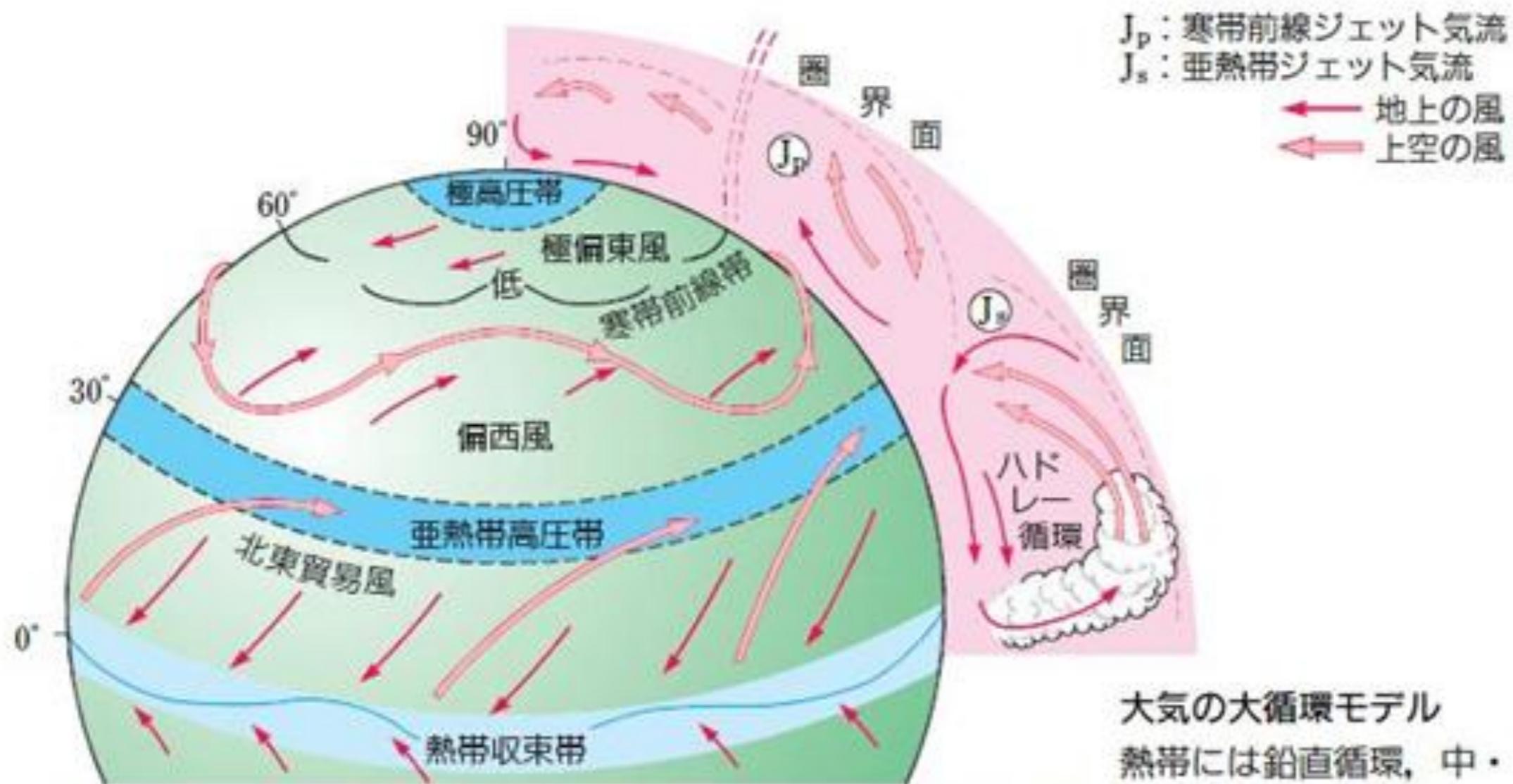
降雨降雨強度と事前貯留量の揺らぎが ピーク流出量の揺らぎに与える影響

新豊根ダム（天竜川水系大入川）；草木ダム（利根川水系渡良瀬川）；野村ダム（肘川水系）；岩尾内ダム（天塩川水系）
相俣ダム（利根川水系赤谷川）；下久保ダム（利根川水系神流川）



a) 降雨強度の揺らぎ：10%；
b) 降雨強度の揺らぎ：15%





大気の大循環モデル
熱帯には鉛直循環、中・

高緯度には水平循環がある。北東貿易風と南東貿易風が収束する部分が熱帯収束帯である。

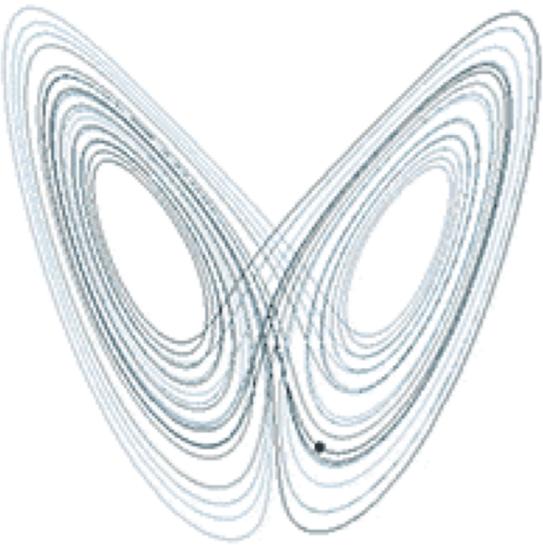
物理的に年最大降雨量の揺らぎの幅を求めることが可能か？

気候システムの揺らぎは(過去数十年の観測で発生し得る気象場は概ね経験したのか)? アンサンブル数を増やす試み.

Lorenzアトラクタ (Lorenz, 1969)

(決定論的システム, 各時間の値は予測不可能. ただし, ある範囲の中に存在(有界性))

*気候変動を考慮すると, 有界性の範囲は変動し得る.



$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -\sigma(x - y) \\ \frac{dy}{dt} = -xy + rx - y \\ \frac{dz}{dt} = xy - bz \end{cases}$$

基礎方程式(球座標系)
運動方程式

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho r \cos \phi} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + 2\Omega v \sin \phi + \frac{uw}{r} \tan \phi + \frac{uw}{r} + F_\lambda$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \phi} - 2\Omega u \sin \phi - \frac{u^2}{r} \tan \phi - \frac{uw}{r} + F_\phi$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial r} - g + 2\Omega u \cos \phi + \frac{u^2}{r} + \frac{v^2}{r} + F_r$$

連続式

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} + \frac{1}{r \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} (u) + \frac{1}{r \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (\cos \phi v) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 w) = 0$$

熱力学式 $\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_p^d \rho} \frac{dp}{dt} + \frac{Q^*}{C_p^d}$

水蒸気保存則 $\frac{dq}{dt} = S_q$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \frac{u}{r \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} + \frac{v}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} + w \frac{\partial}{\partial r}$$

u : 東西風速, v : 南北風速, w : 鉛直風速, t : 時間, λ : 緯度, ϕ : 経度, r : 鉛直座標,
 ρ : 密度, p : 圧力, Ω : 回転速度, T : 温度, C_p^d : 乾燥空気等の等圧比熱,
 Q^* : 外力と粘性による加熱, F : 粘性項と外力項の和

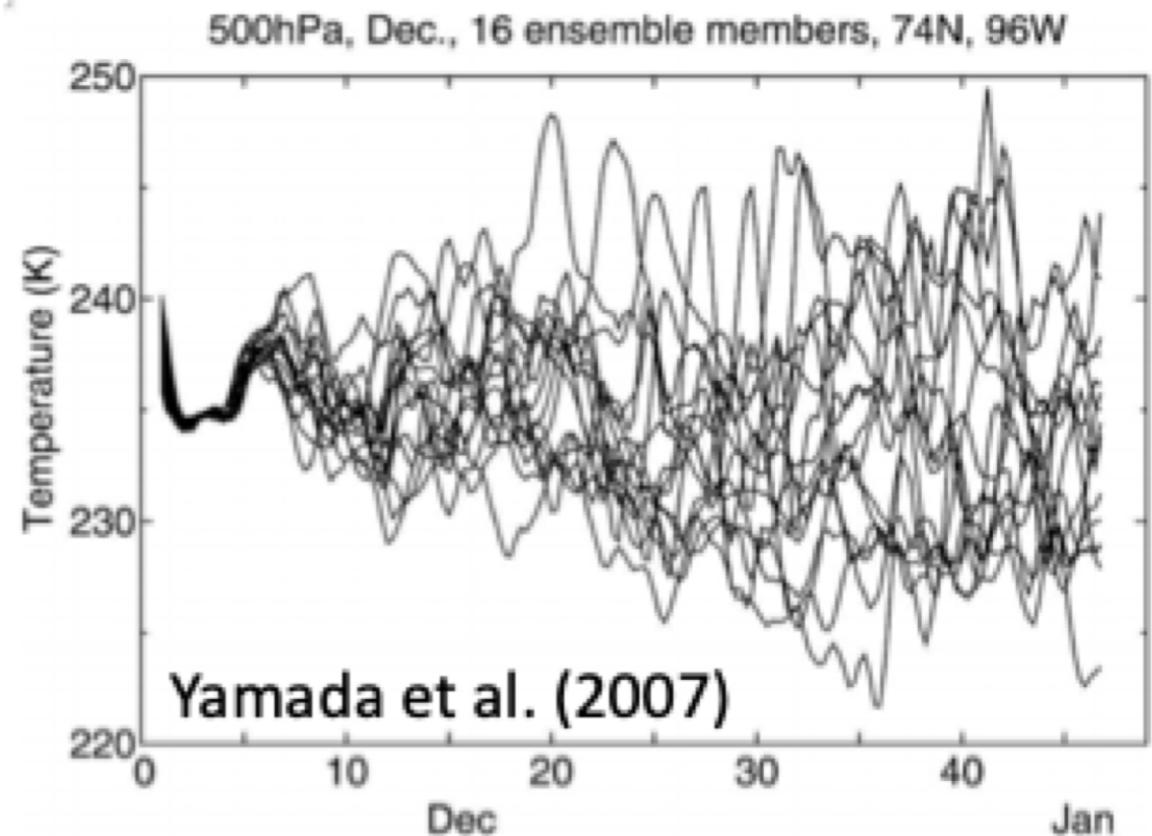
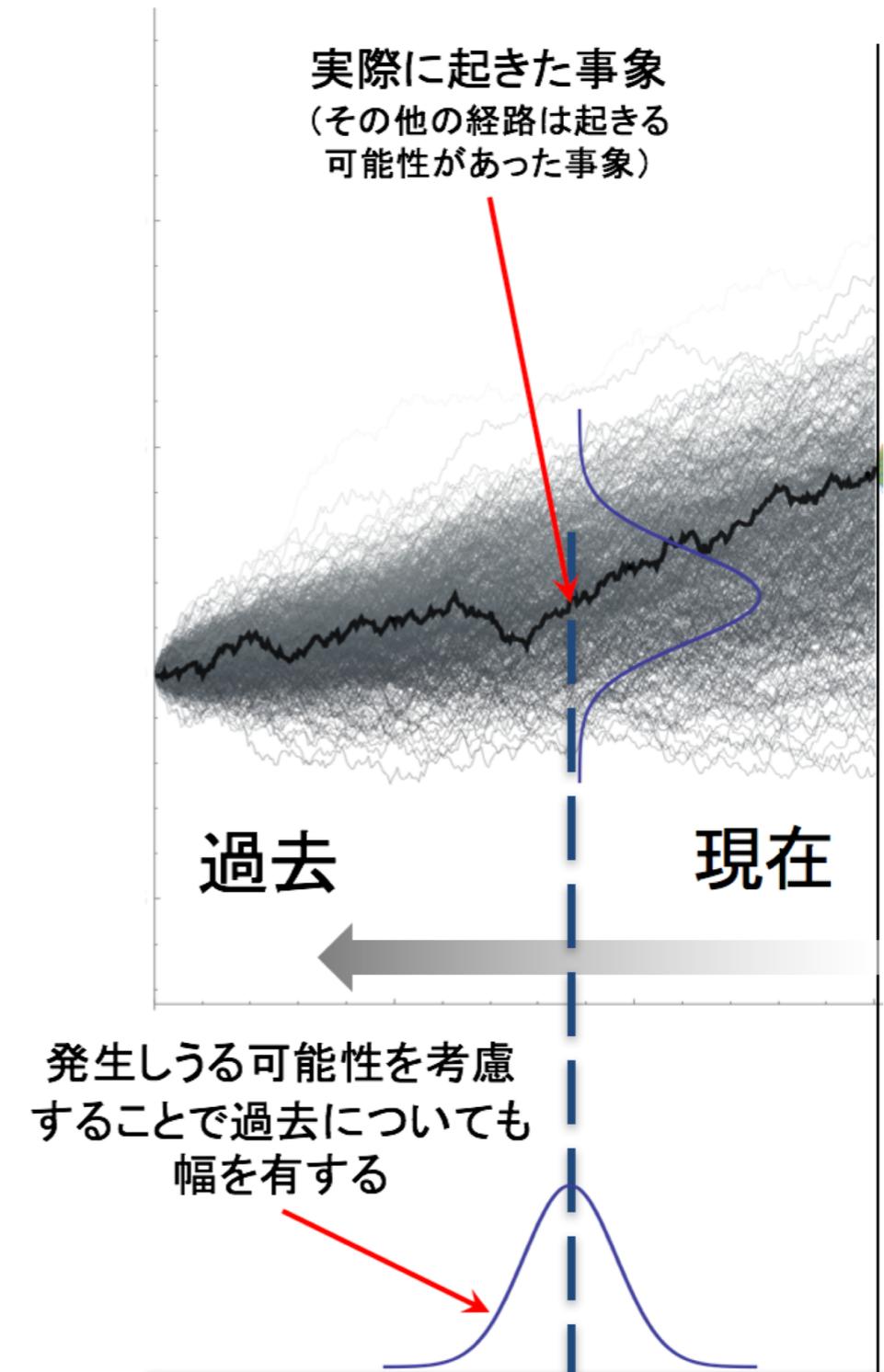
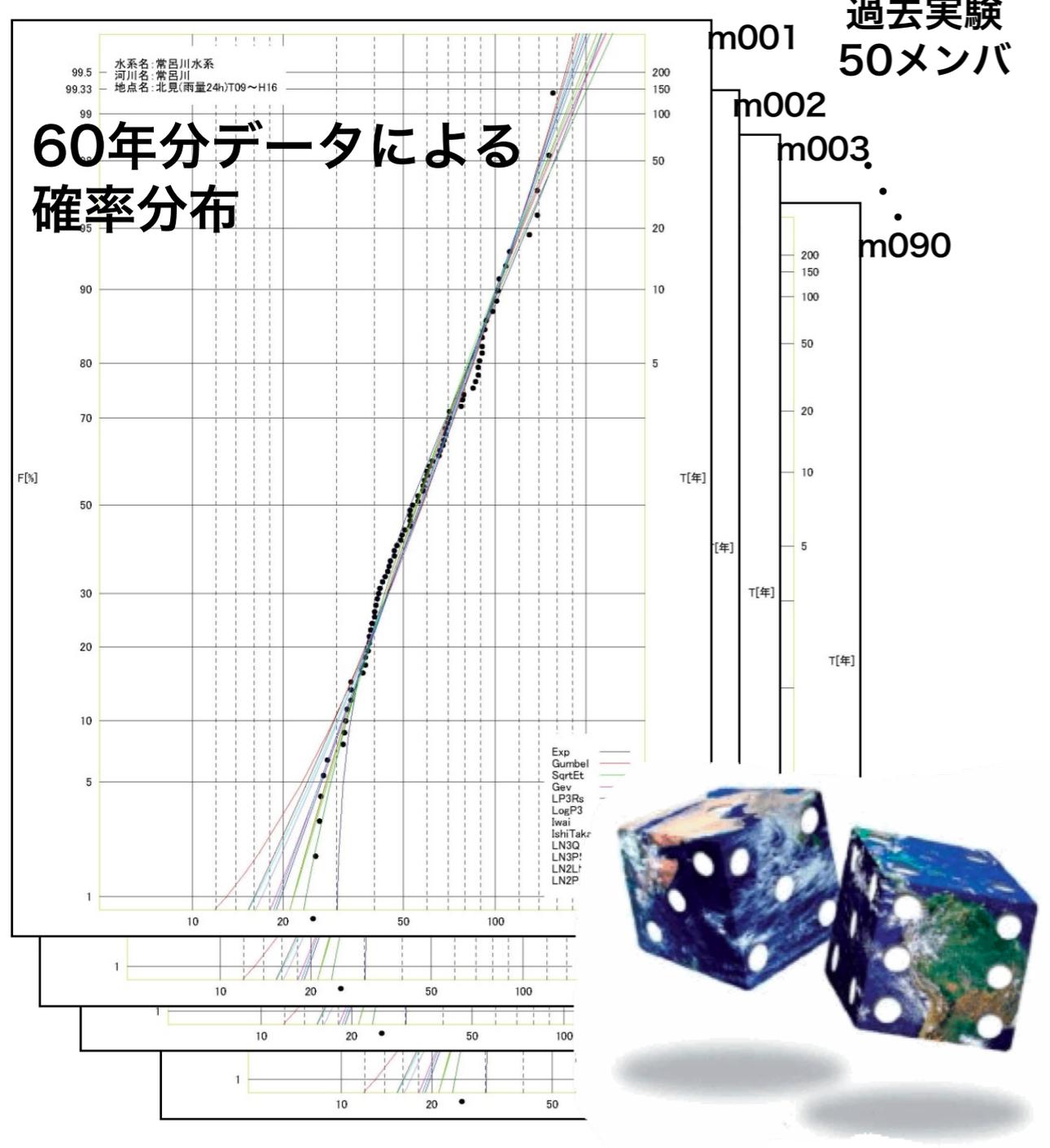


FIG. 13. Time series of 16 EMs of temperature at 500-hPa height over a grid cell in December (74°N, 96°W).

全球気候モデルにおいて, 単一の初期値から開始される数十年間程度の計算では発生し得る極端現象は限られている.

サンプリングによる確率年の揺らぎ

- ダウンスケーリング結果の5kmメッシュ時間雨量から、十勝川水系・常呂川水系の流域平均時間雨量を算出する。各水系の計画降雨継続時間で整理し、60年分の年最大流域平均雨量をメンバ毎に算出する。
- 年最大流域平均雨量を確率紙にプロットし、過去実験における超過確率雨量を算出する。



d4PDFの実験デザイン

領域モデル実験 (20kmへの力学的ダウンスケーリング)

気象研究所非静力学地域気候モデルNHRCMによる日本域をカバーする水平解像度20kmの力学的ダウンスケーリング

過去実験：1950年9月から2011年8月までの観測された海面水温などが境界条件

2°C上昇実験：産業革命以前から全球平均気温が2°C上昇した条件

4°C上昇実験：産業革命以前から全球平均気温が4°C上昇した条件

※2°C上昇実験、4°C上昇実験はトレンド成分を除いており、温暖化の程度は時間変化しない(温室効果ガス濃度は2°C上昇実験、4°C上昇実験でそれぞれRCP8.5シナリオの2040年、2090年の値を設定)

アンサンブル数

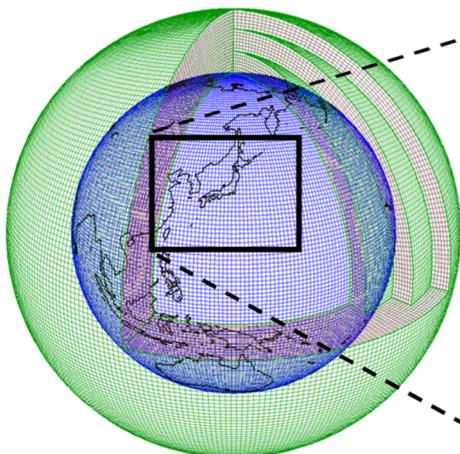
過去実験：60(年)x50(アンサンブル)=**3000(年)**

2°C上昇実験：60(年)x6(SST)x9(アンサンブル)=**3240(年)**

4°C上昇実験：60(年)x6(SST)x15(アンサンブル)=**5400(年)**

AGCM

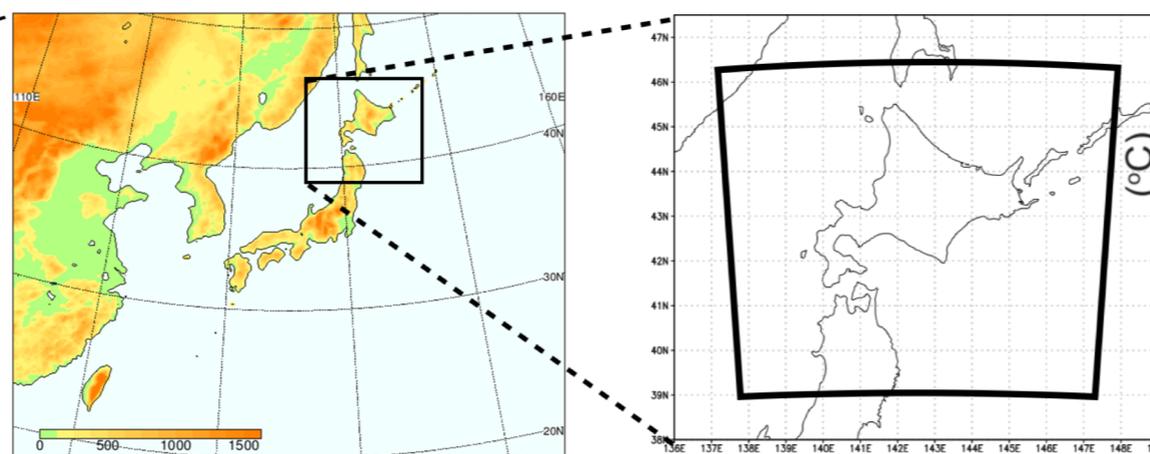
(水平解像度約60km)



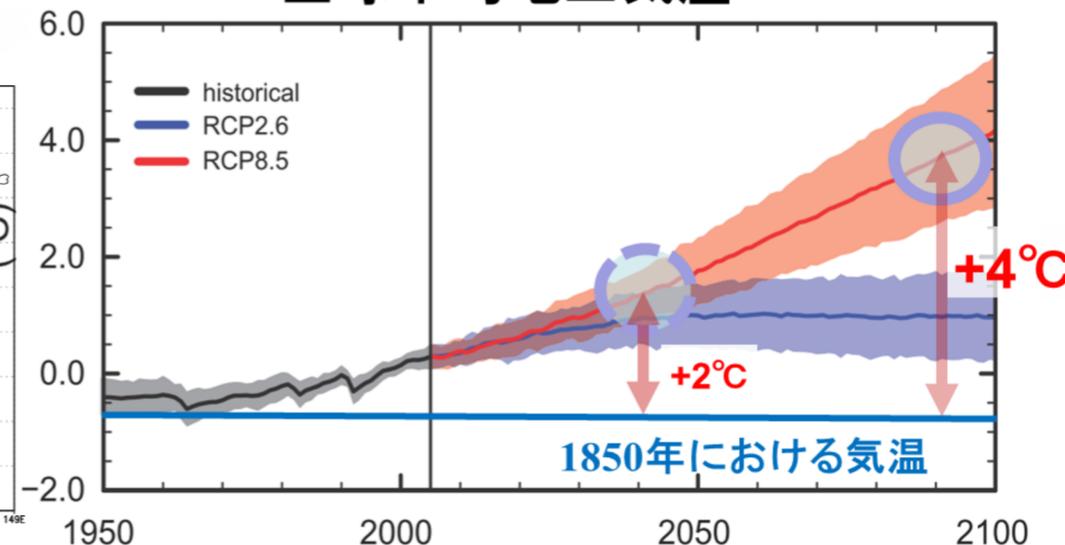
(画像:気象庁提供)

NHRCM

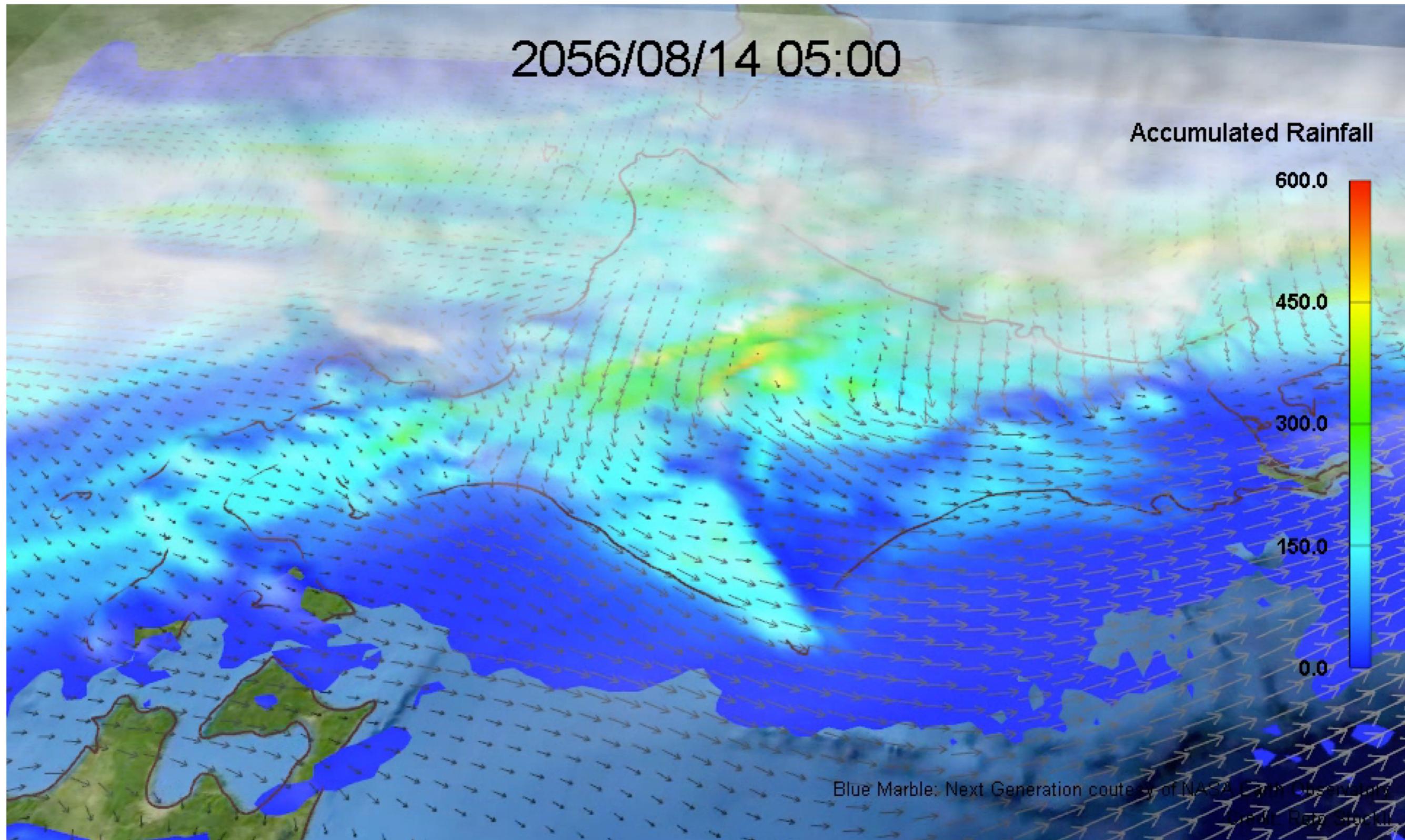
(水平格子間隔20km)



全球平均地上気温



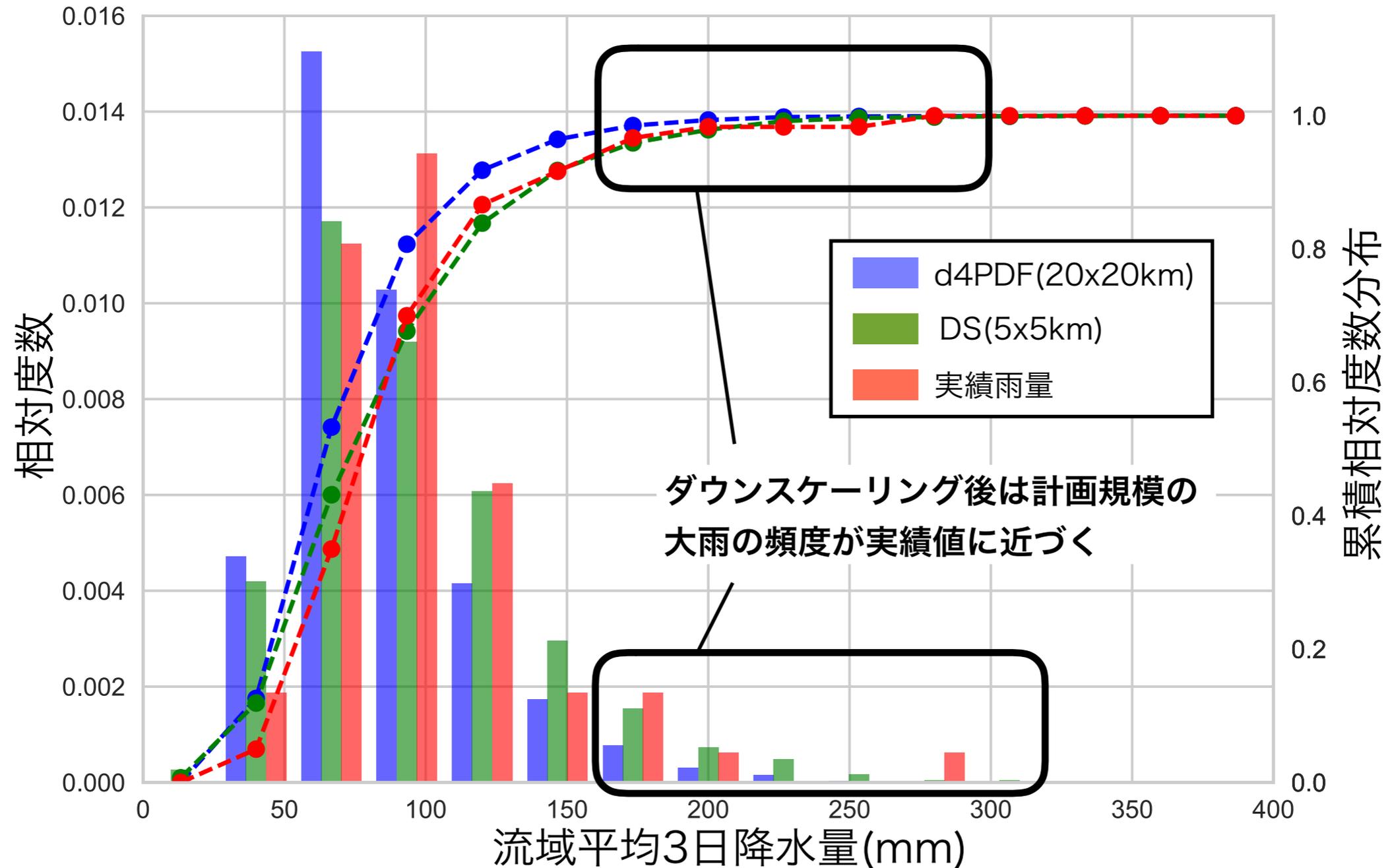
力学的ダウンスケーリング結果の一例



ダウンスケーリング前後の降水量の頻度分布

十勝川帯広基準地点集水域

過去実験3000年分、実績値60年分

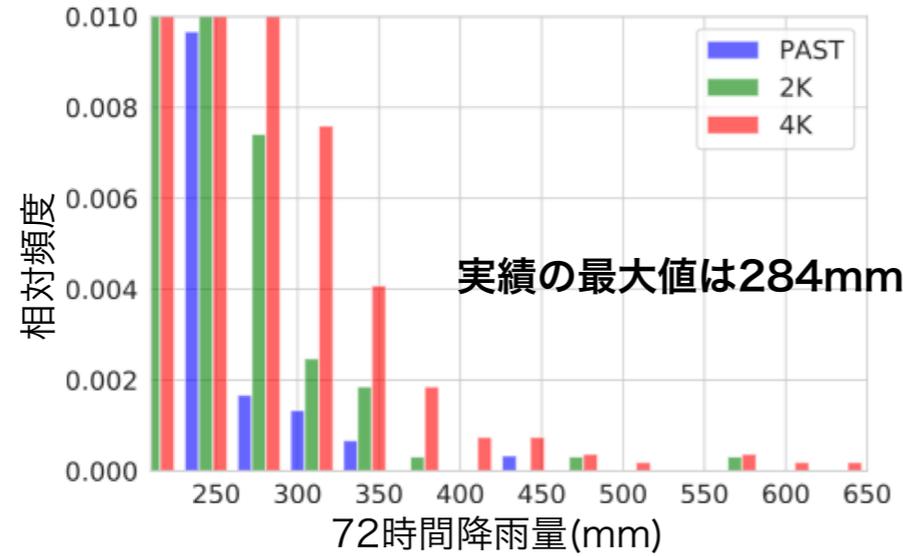


ダウンスケーリングにより計画規模の大雨の頻度が実績値に近い値となる

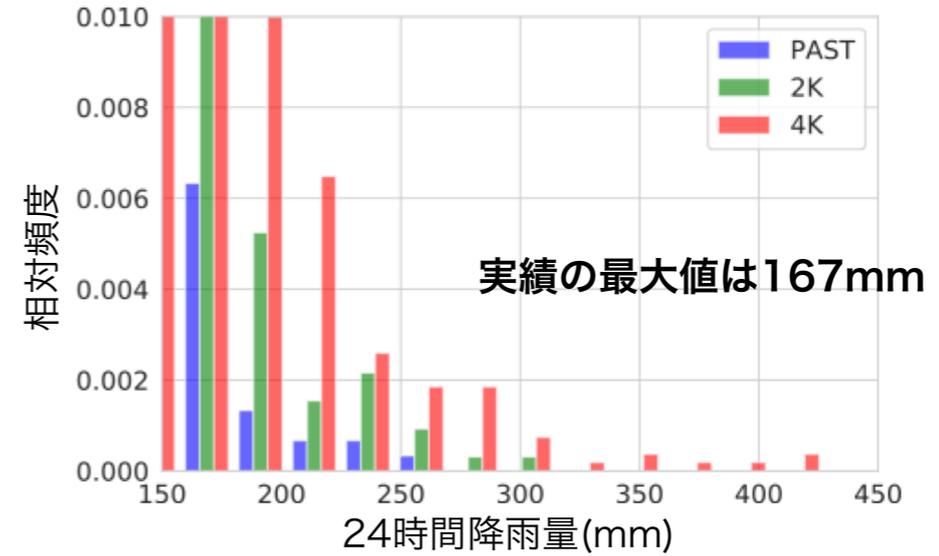
年最大降水量はどれほど変化するか？

99パーセンタイル以上に着目した年最大降水量の頻度分布

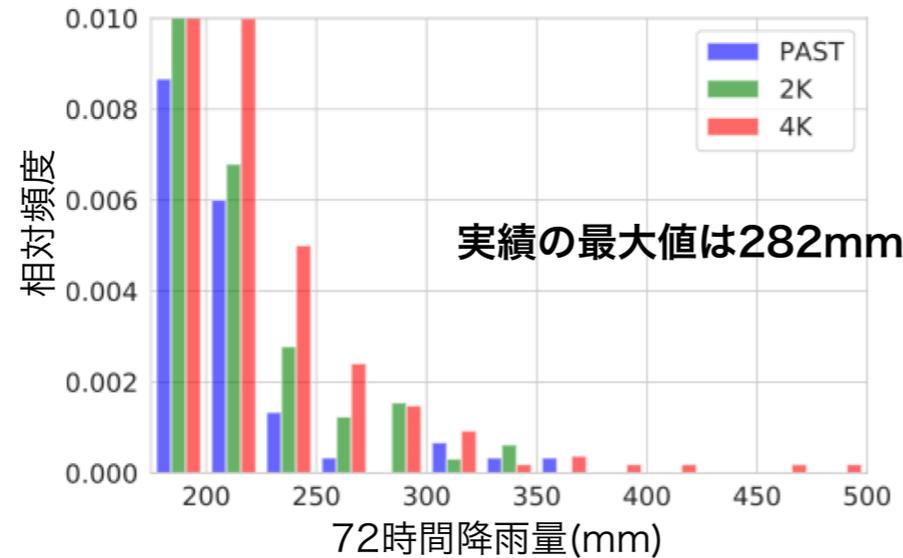
・十勝川帯広基準地点集水域



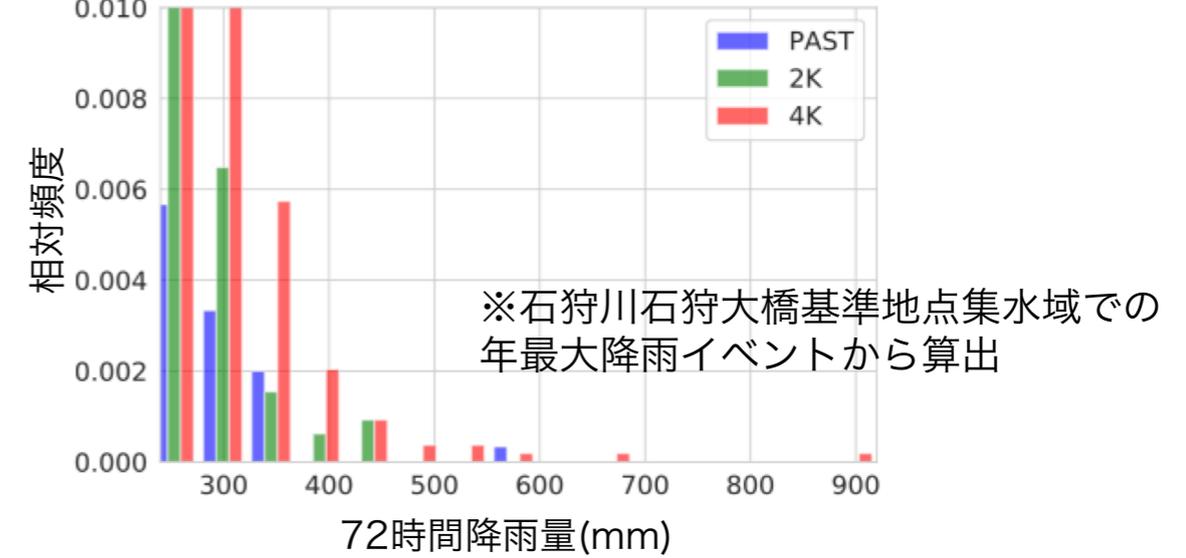
・常呂川北見基準地点集水域



・石狩川石狩大橋基準地点集水域



・石狩川水系豊平川雁来基準地点集水域



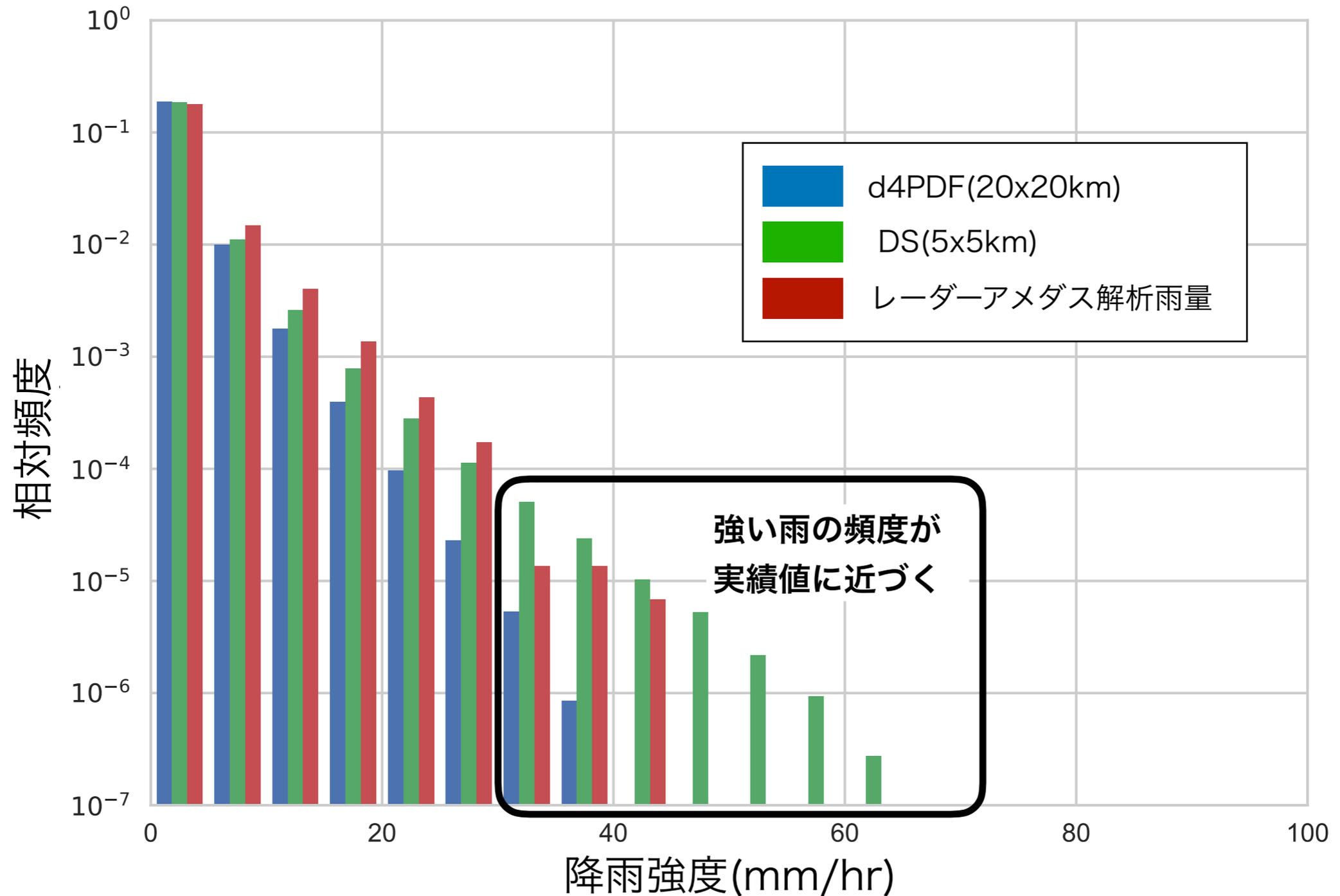
99パーセンタイル値

いずれの流域でも、過去<2°C上昇<4°C上昇の関係に

	過去実験	2°C上昇実験	4°C上昇実験	倍率 (2°C上昇/過去)	倍率 (4°C上昇/過去)
十勝川帯広基準地点集水域	235.8	268.4	317.1	1.14	1.34
常呂川北見基準地点集水域	156.3	182.2	217.6	1.17	1.39
石狩川石狩大橋地点集水域	196.1	209.9	228.4	1.07	1.16
豊平川雁来基準地点集水域	240.9	273.6	321.8	1.14	1.34

ダウンスケーリング前後の1時間降雨強度の頻度

十勝川帯広基準地点集水域

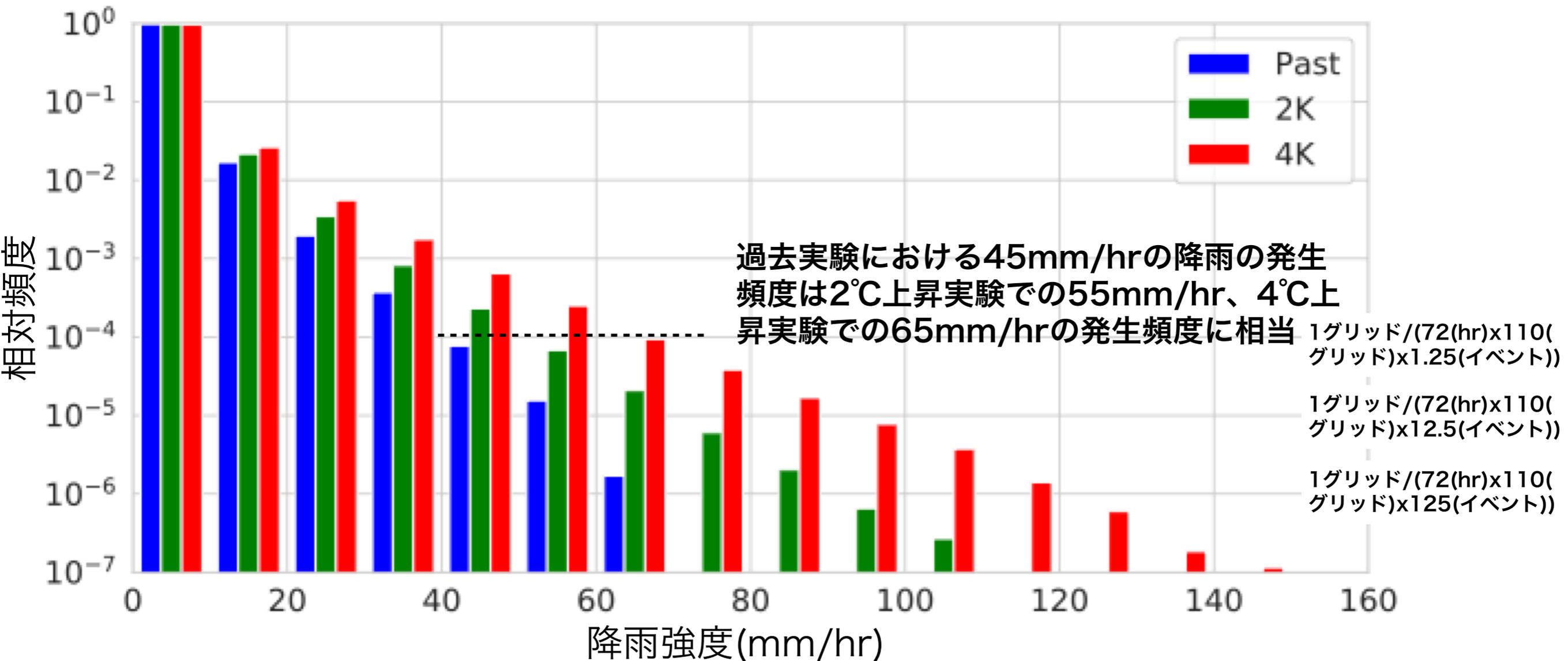


力学的ダウンスケーリングによる5km解像度の方が20km解像度のものより観測値に近い値を有する

1時間降水強度の頻度はどれほど変化するか？

十勝川帯広基準地点集水域 5kmDSの降水量での比較

過去実験は3000イベント、2°C上昇実験は3240イベント、4°C上昇実験は5400イベントが対象
年最大72時間降雨の発生期間で流域内の全格子点上の降水強度を抽出し、頻度分布を作成

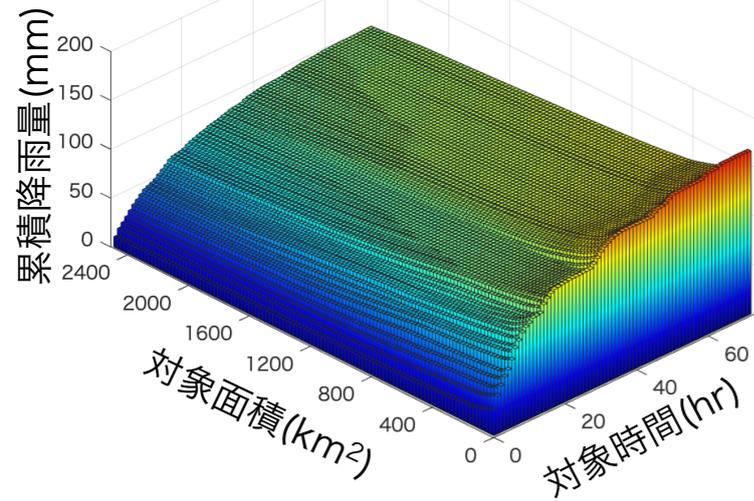


温暖化の進行度合いに応じて強度の高い雨の頻度が増加

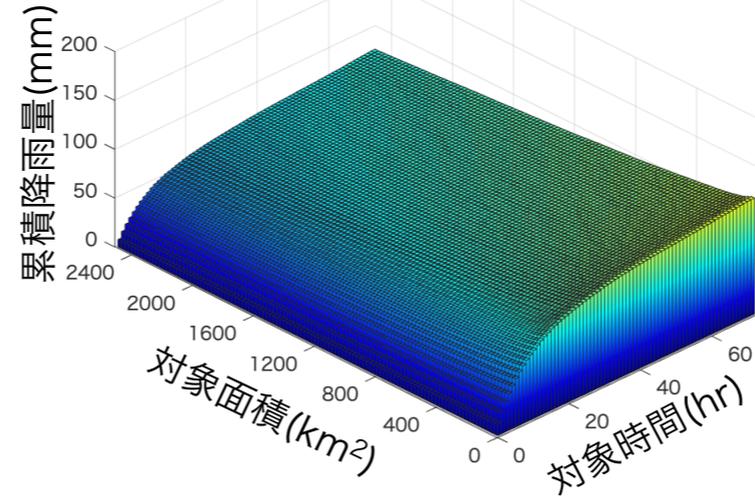
降雨の時空間的なパターンは変化するか？

十勝川帯広基準地点集水域

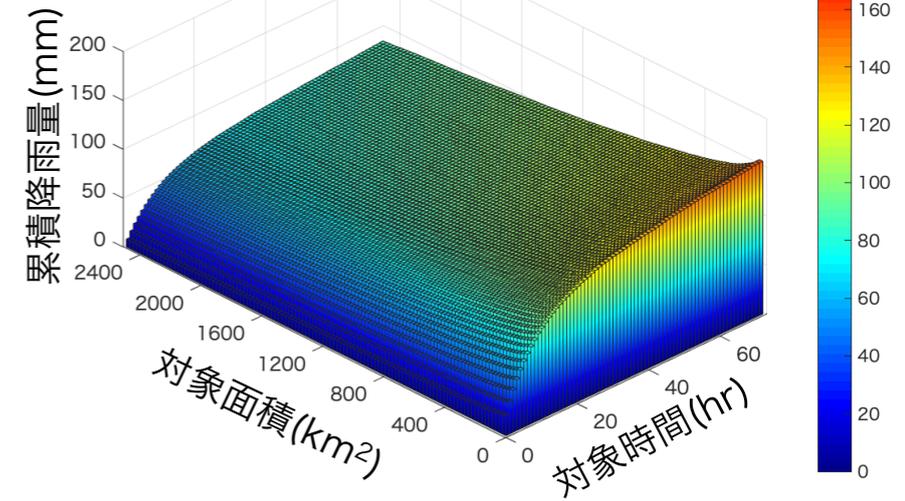
- レーダーアメダス解析雨量
(2006-2016の中央値)



- d4PDF領域実験(20x20km)
(過去実験3000事例の中央値)

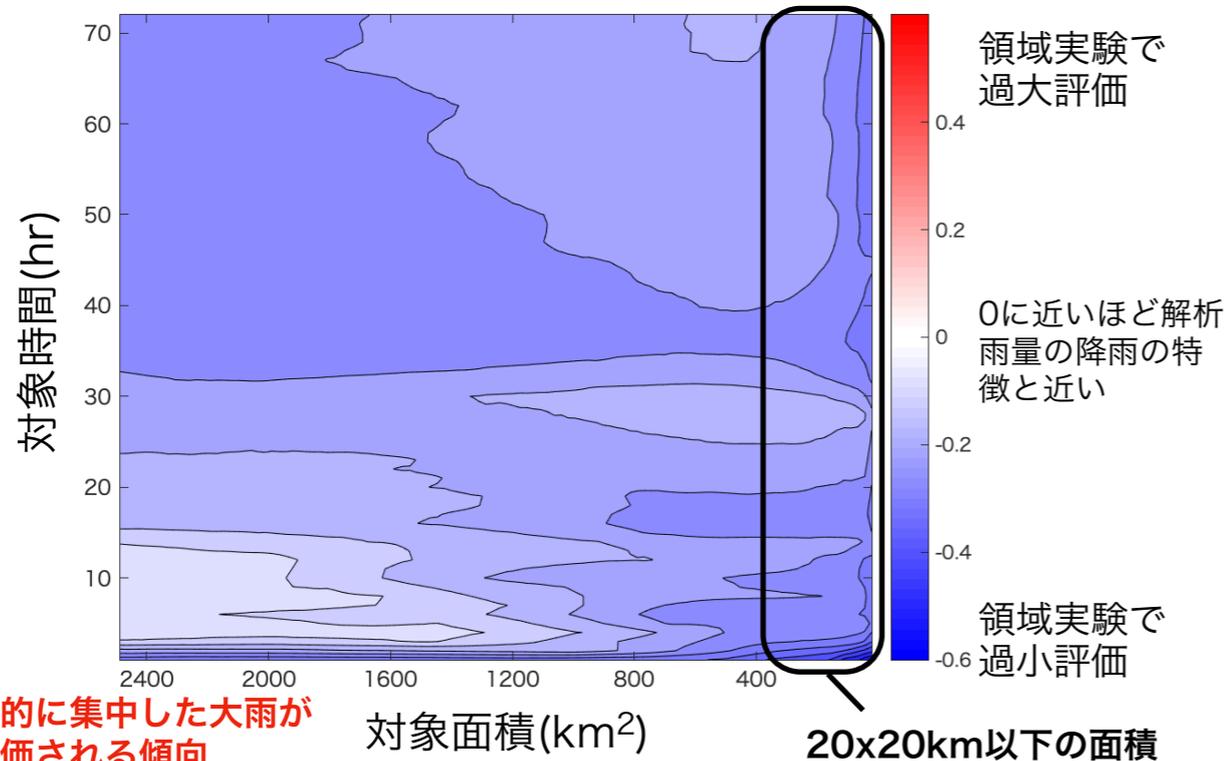


- 15日DS(5x5km)
(過去実験3000事例の中央値)



- レーダーアメダス解析雨量とd4PDF領域実験との比較

(d4PDF領域実験-レーダーアメダス解析雨量)/レーダーアメダス解析雨量

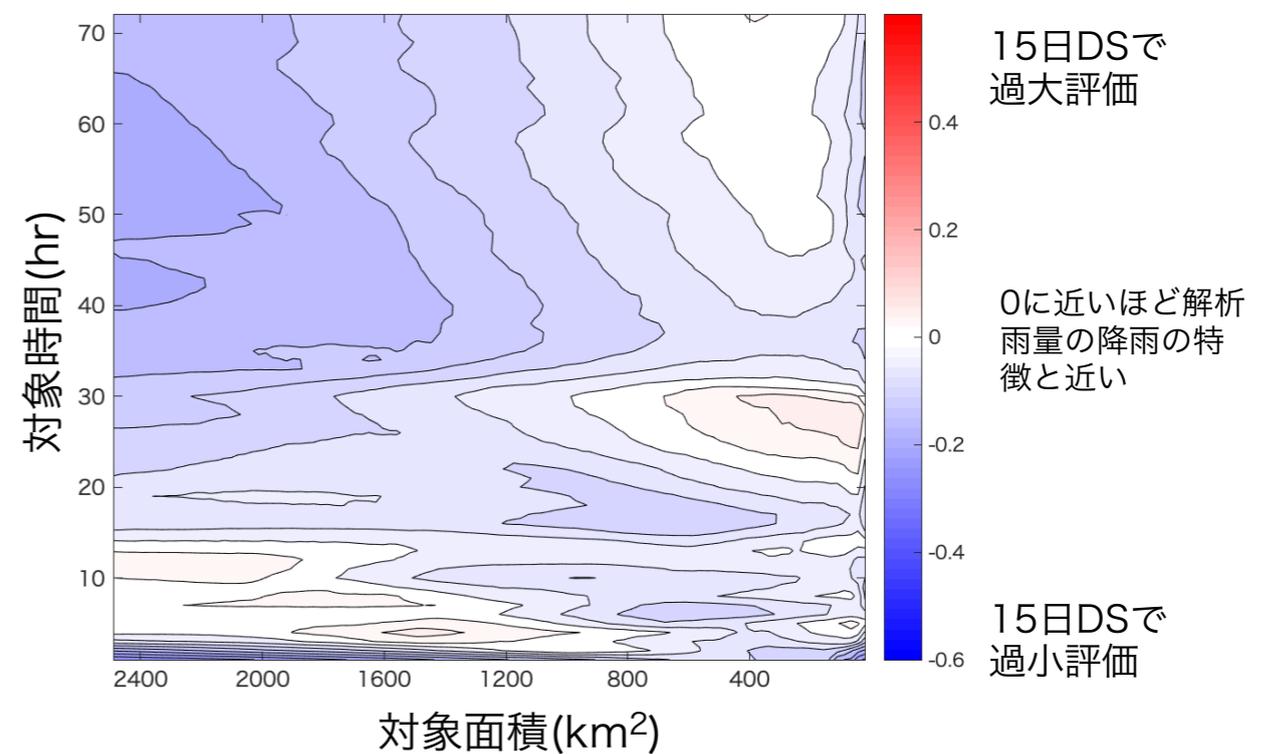


時空間的に集中した大雨が過小評価される傾向

20x20km以下の面積

- レーダーアメダス解析雨量と15日DSとの比較

(15日DS-レーダーアメダス解析雨量)/レーダーアメダス解析雨量

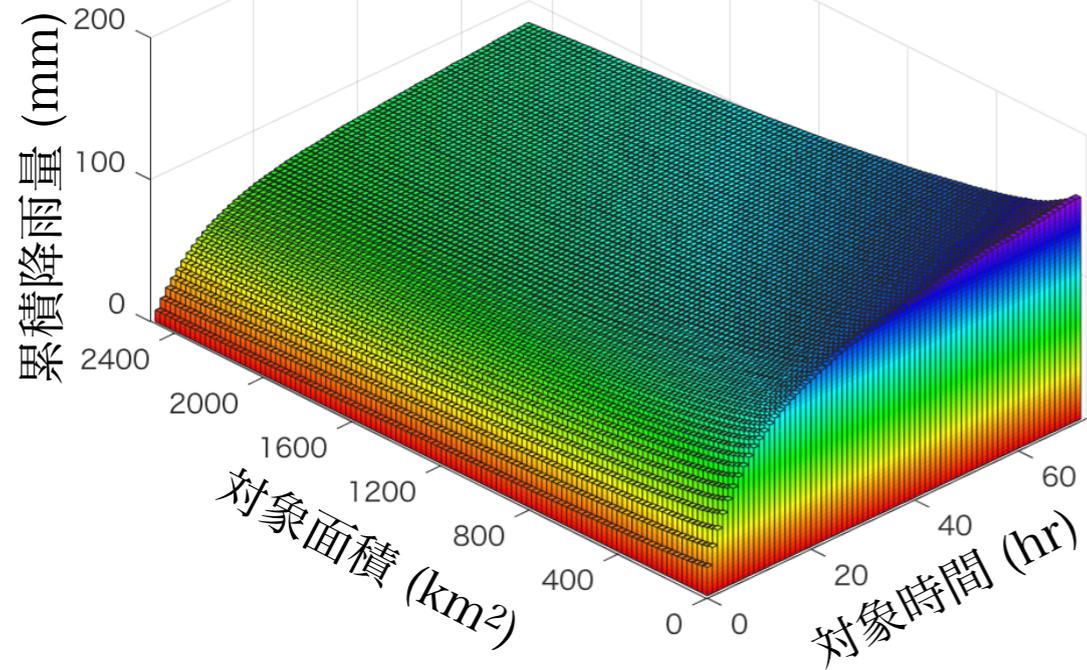


5x5kmへのダウンスケーリングにより、解析雨量の時空間特性に近い大雨情報を得ることができることを確認

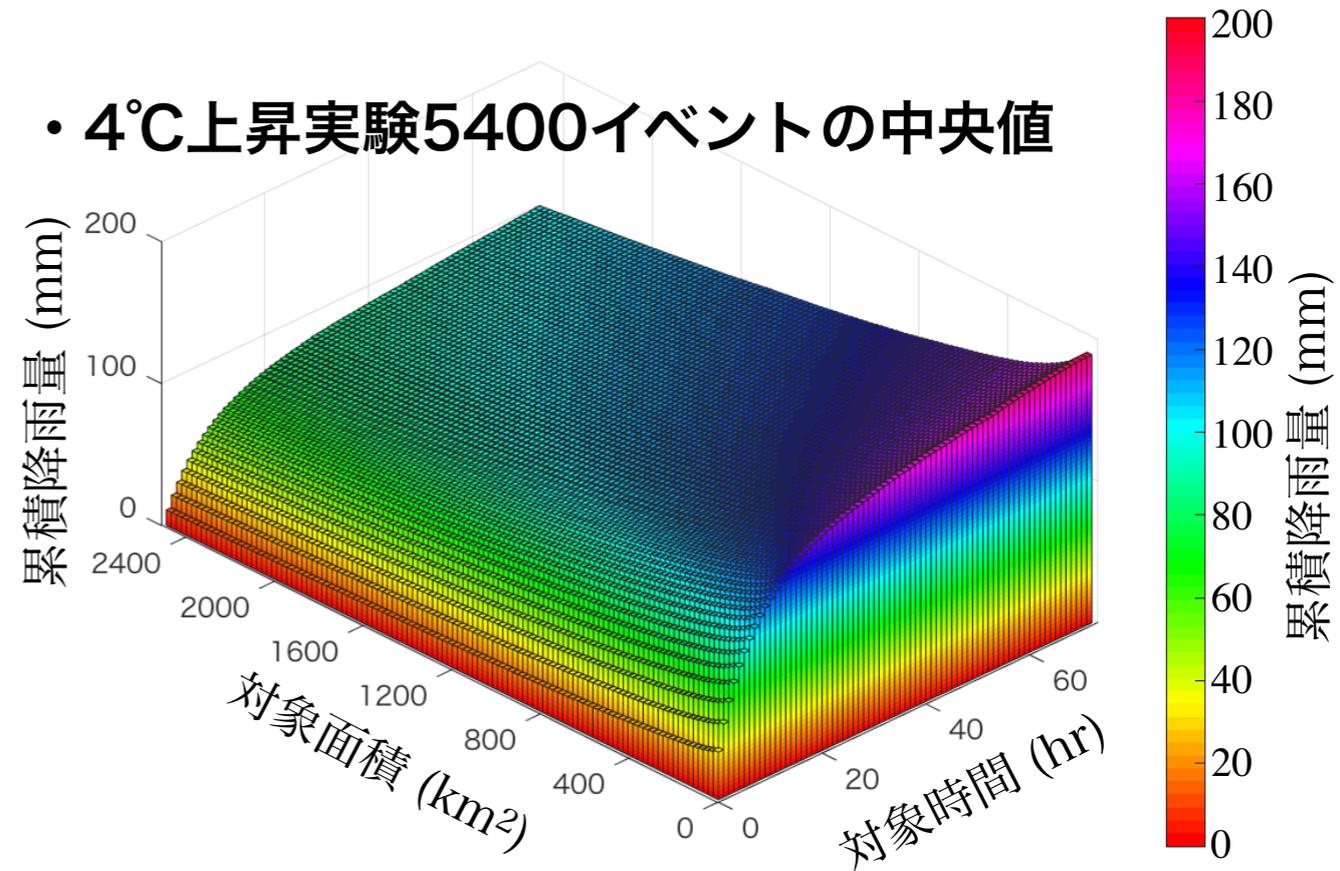
大雨の時空間的な特徴の変化

十勝川帯広基準集水域を対象

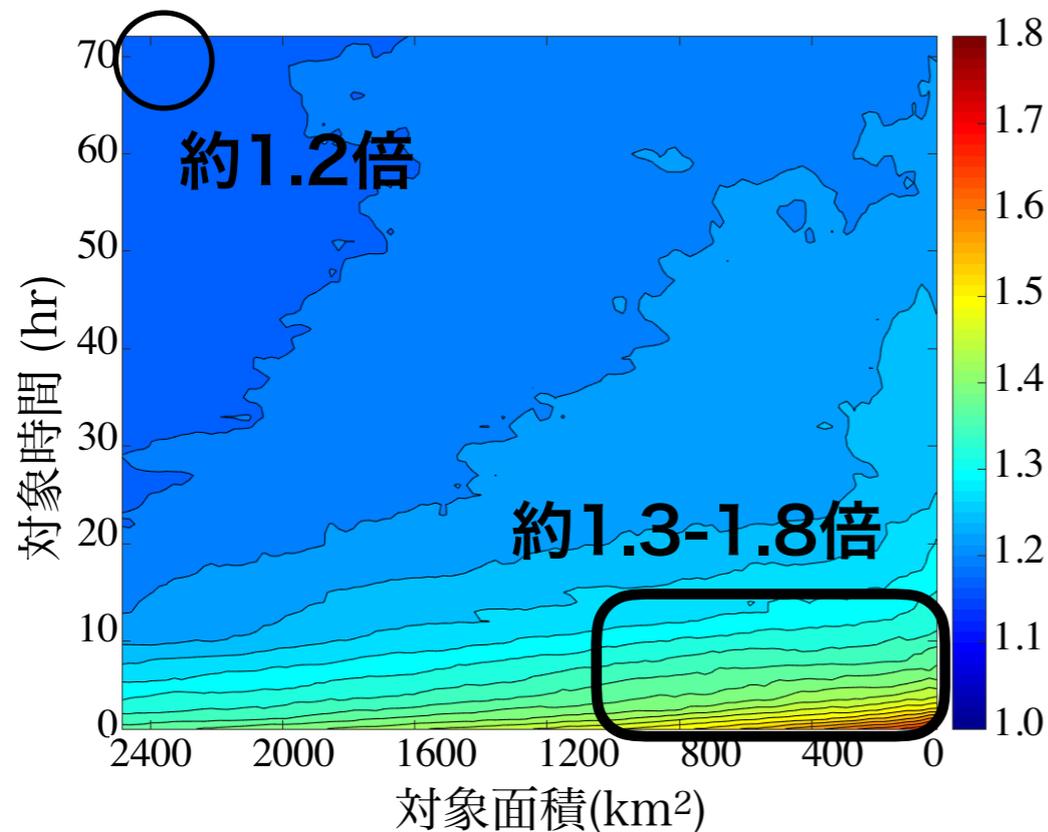
- 過去実験3000イベントの中央値



- 4°C上昇実験5400イベントの中央値



- 4°C上昇実験/過去実験



- 72時間かつ流域全体の総降雨量は将来気候で約1.2倍であったが、短時間・局所的な大雨の倍率はより高い

大雨の短時間・局所化の傾向に

異なる流域での洪水外力の変化

過去実験、4°C上昇実験の降雨量の比較

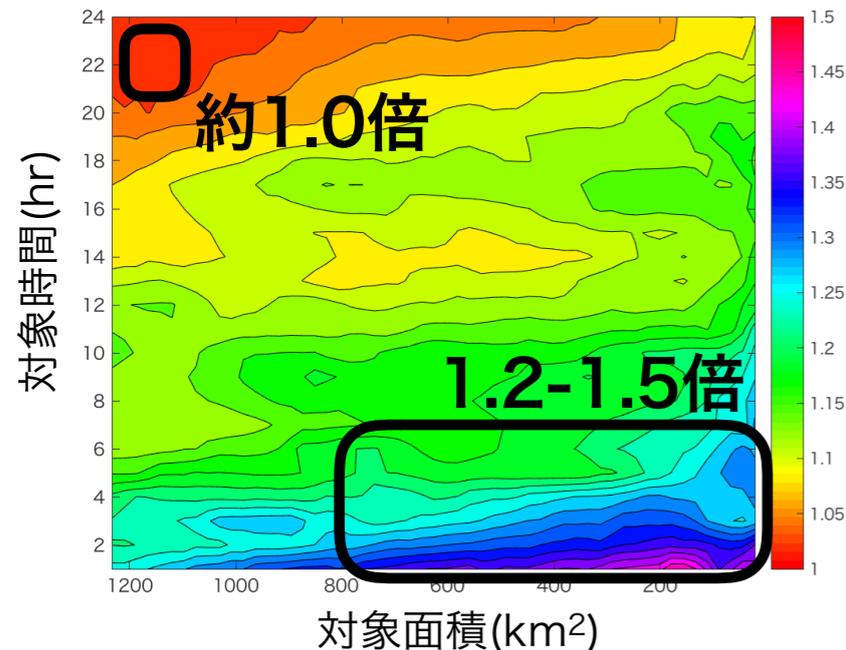
- 計画降雨継続時間における流域平均降雨量 (99%ile値)

	過去実験	4°C上昇実験	倍率
十勝川(72時間)	235.8	317.1	1.34
常呂川(24時間)	156.3	217.6	1.39
石狩川(72時間)	196.1	228.4	1.16
筑後川(48時間)	379.0	511.9	1.35

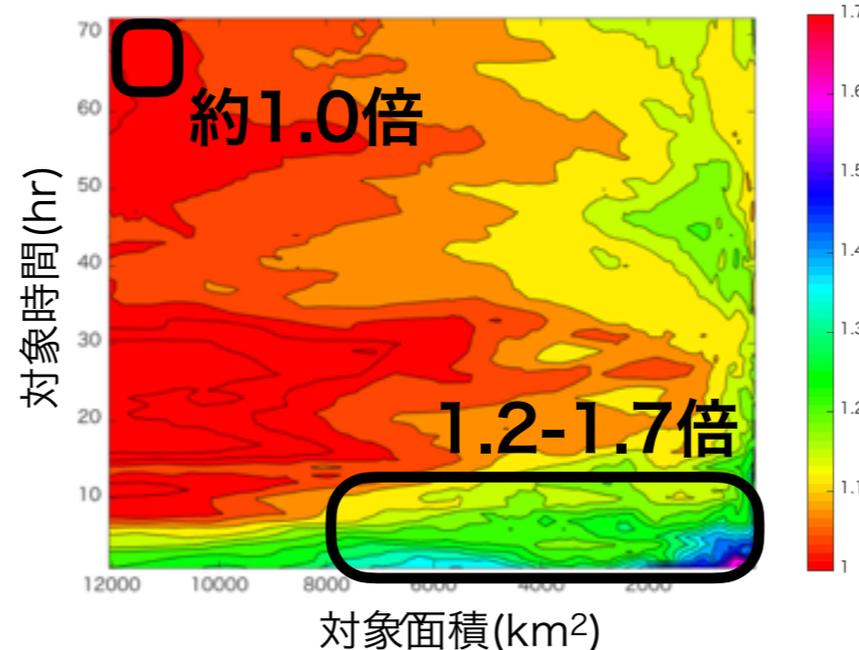
(mm) (mm)

降雨の時空間特性の比較 (過去実験、4°C上昇実験間での倍率)

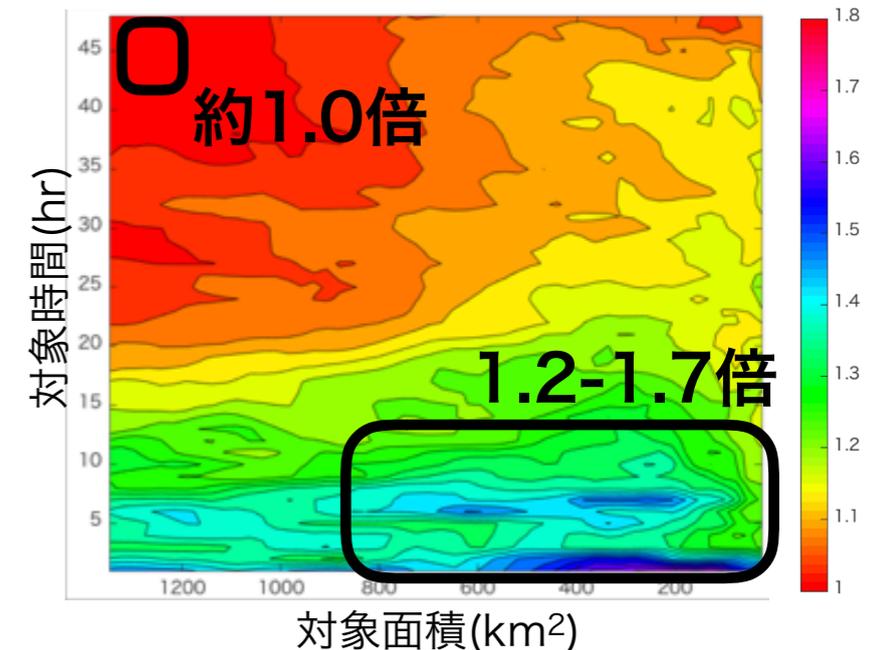
常呂川(150-200mmの降雨)



石狩川(200-250mmの降雨)



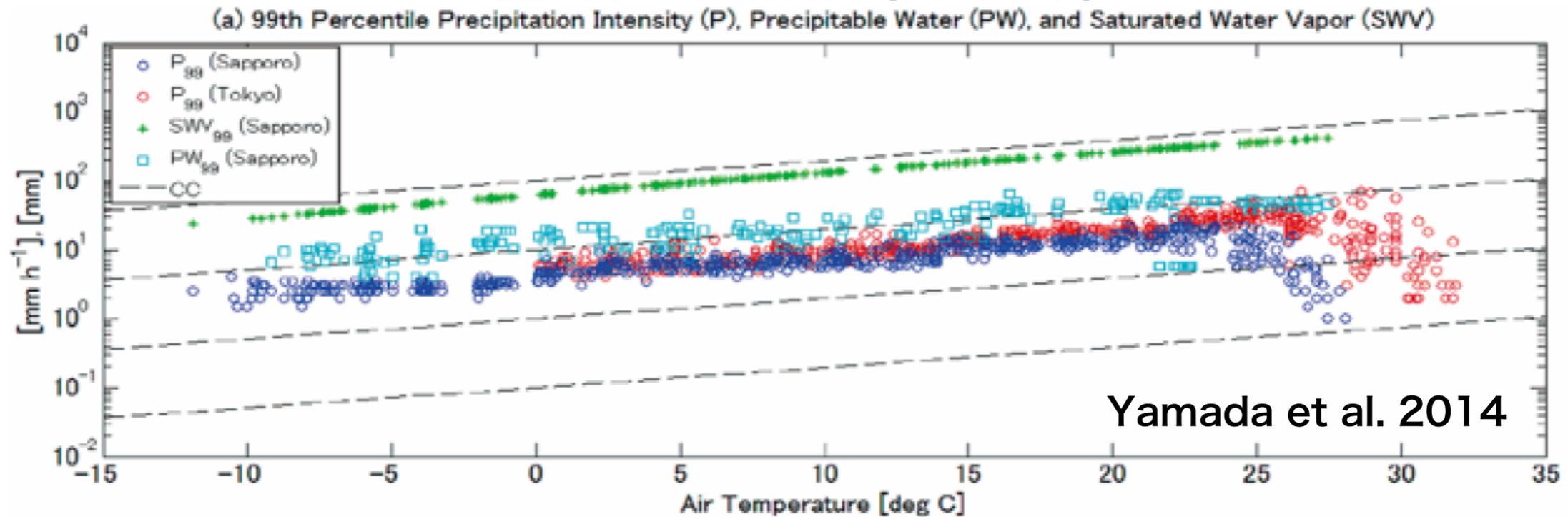
筑後川(350-400mmの降雨)



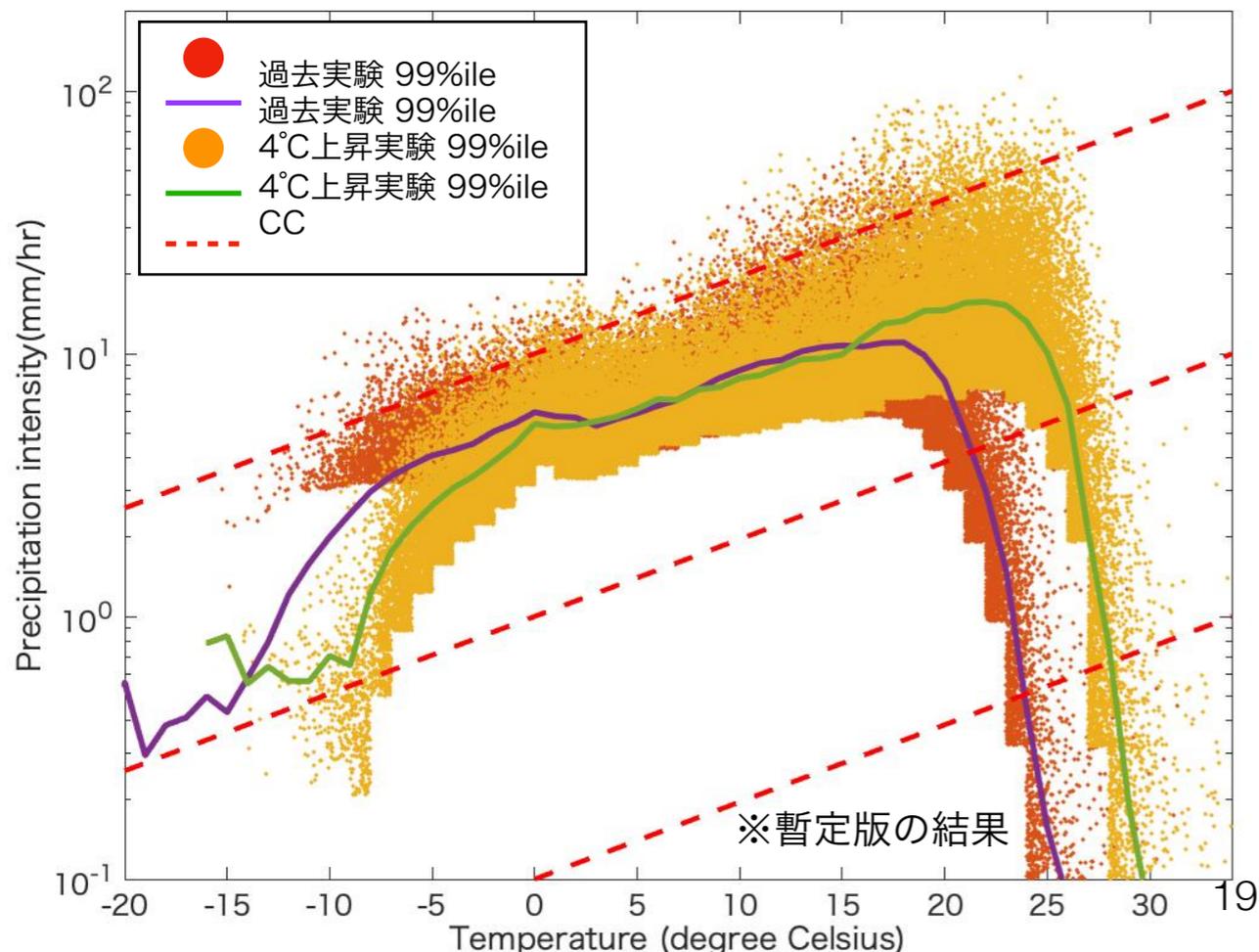
いずれの流域においても将来気候の大雨は短時間・局所化の傾向

力学的ダウンスケーリング結果の妥当性

- 気温と99パーセントイル降水強度との関係性 (観測結果)



- 気温と99パーセントイル降水強度との関係性(d4PDF,5km)



- 99パーセントイル降水強度は地表面気温と飽和水蒸気圧の関係式(Clausius-Clapeyron関係)に従うことが観測より確認されている。
- 5kmへの力学的DS結果においても、同様の関係に従うことを確認した。

力学項

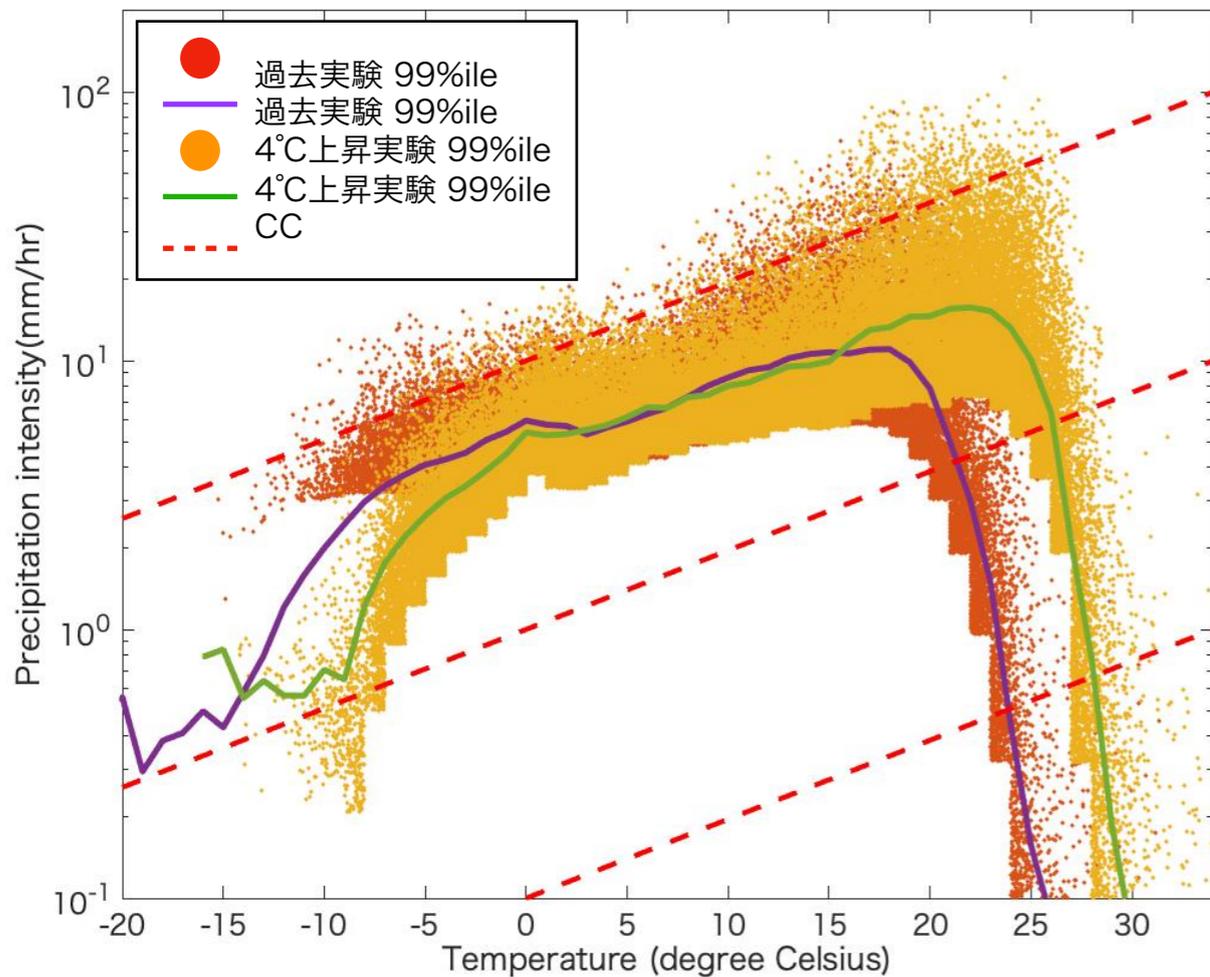
熱力学項

共変項

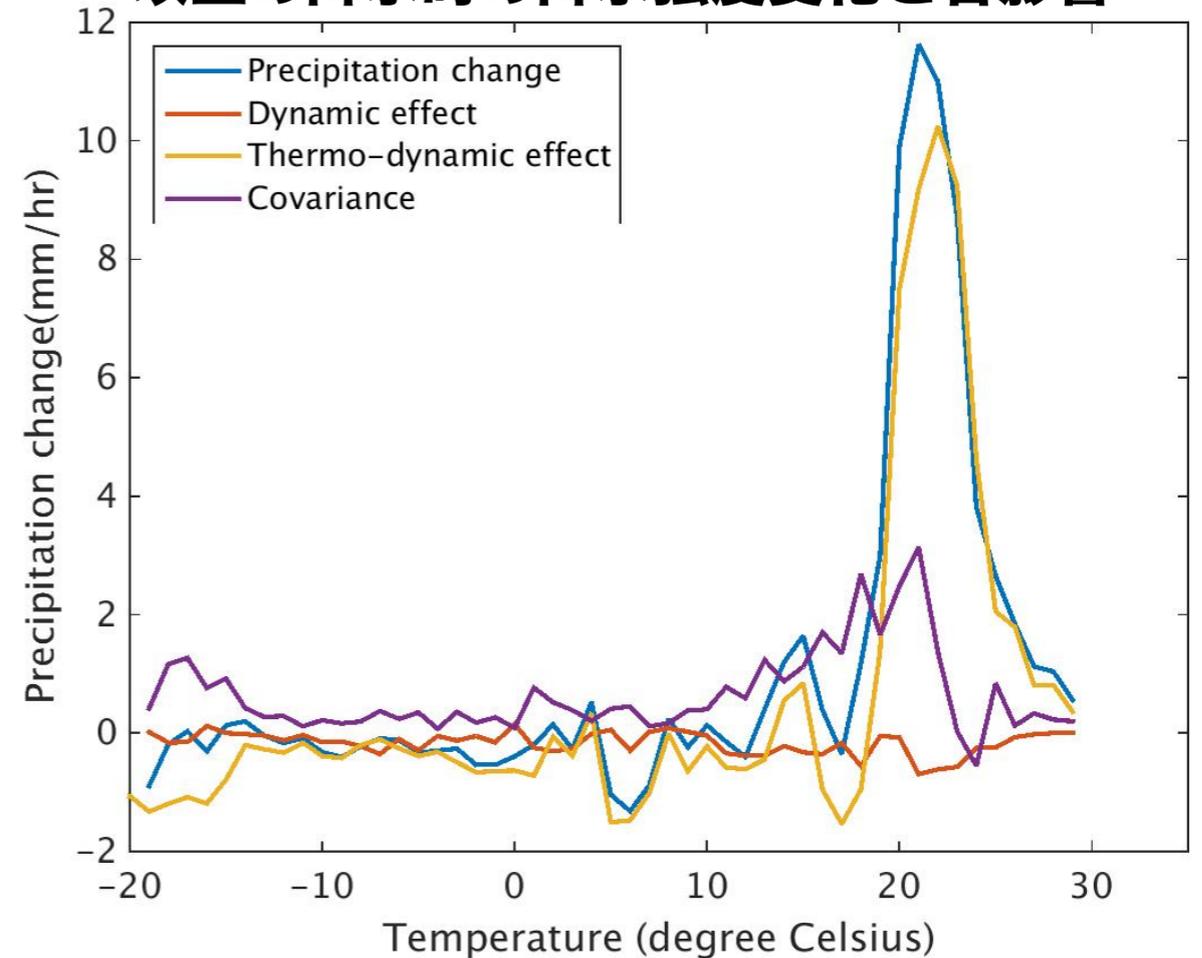
$$\delta\bar{P} = \int_{-\infty}^{\infty} P_{\omega} \delta Pr_{\omega} d\omega + \int_{-\infty}^{\infty} \delta P_{\omega} Pr_{\omega} d\omega + \int_{-\infty}^{\infty} \delta P_{\omega} \delta Pr_{\omega} d\omega.$$

$$\bar{P} = \int_{-\infty}^{\infty} Pr_{\omega} P_{\omega} d\omega.$$

\bar{P} : 平均降水量
 ω : 500hPa高度での鉛直上向き流
 Pr_{ω} : ω の発生頻度
 P_{ω} : ω の発生時の平均降水量



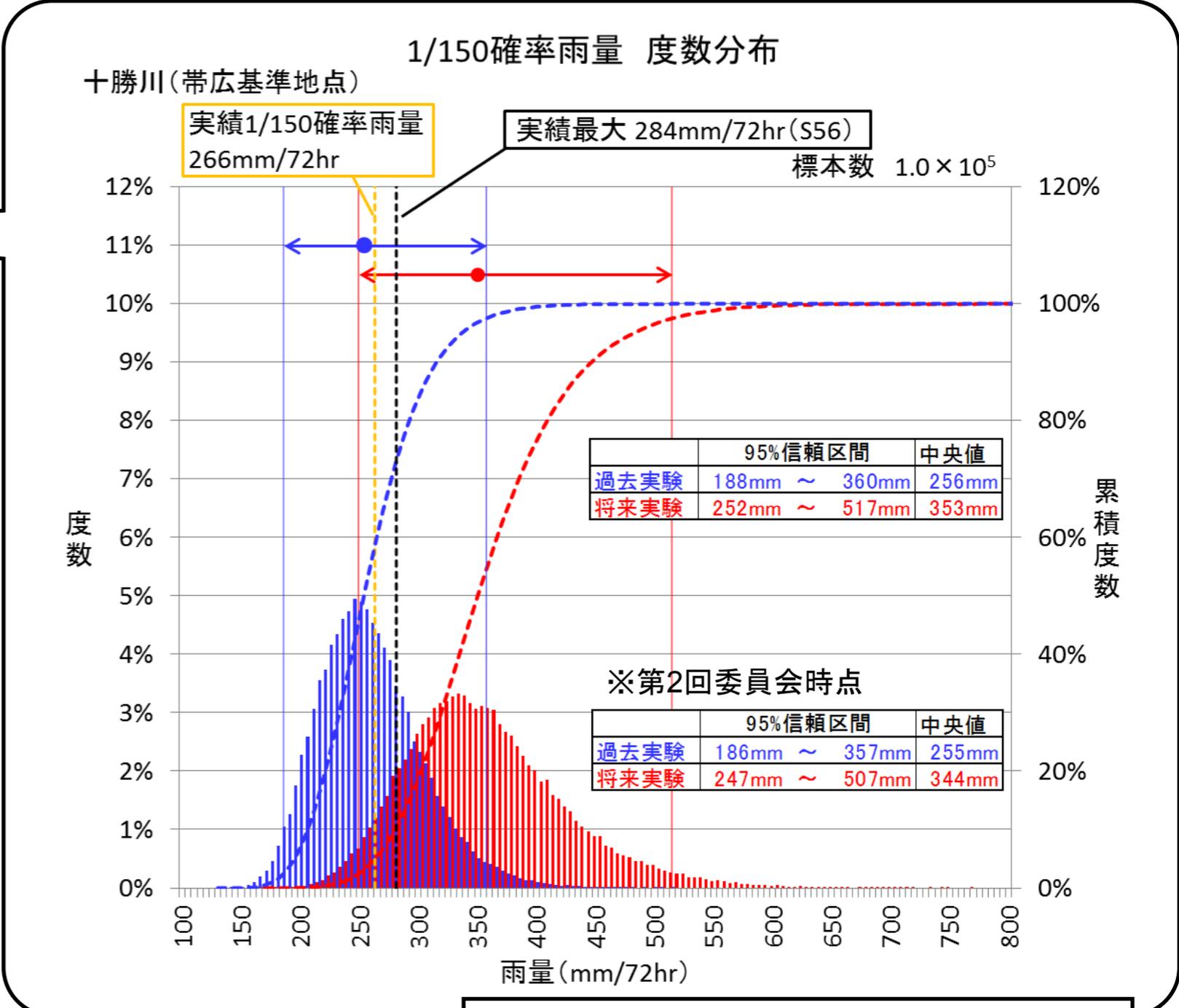
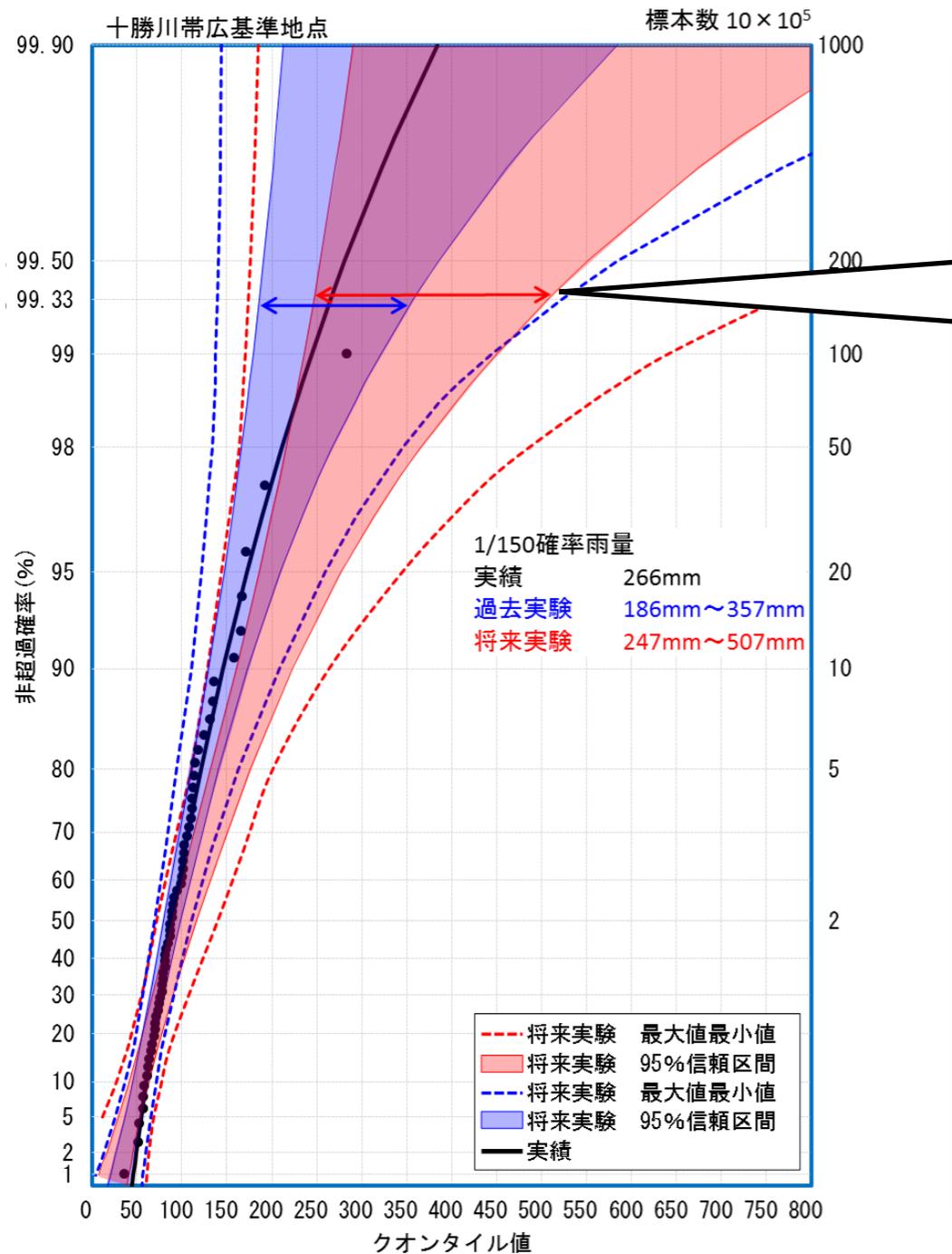
各気温での降水強度が上位1パーセント以上の降水時の降水強度変化と各影響



過去実験・4°C上昇実験ともにCC関係に従っており、かつ観測結果と整合的
 99%パーセントイル1時間降水強度の増加分は熱力学効果と一部は力学的効果との
 共分散項で占められるとの結果が得られた。

Yamada et al (in prep.)

計画対象降雨の評価



同一の確率規模での大雨による被害は
浸水面積1.4倍、想定死者数2.3倍

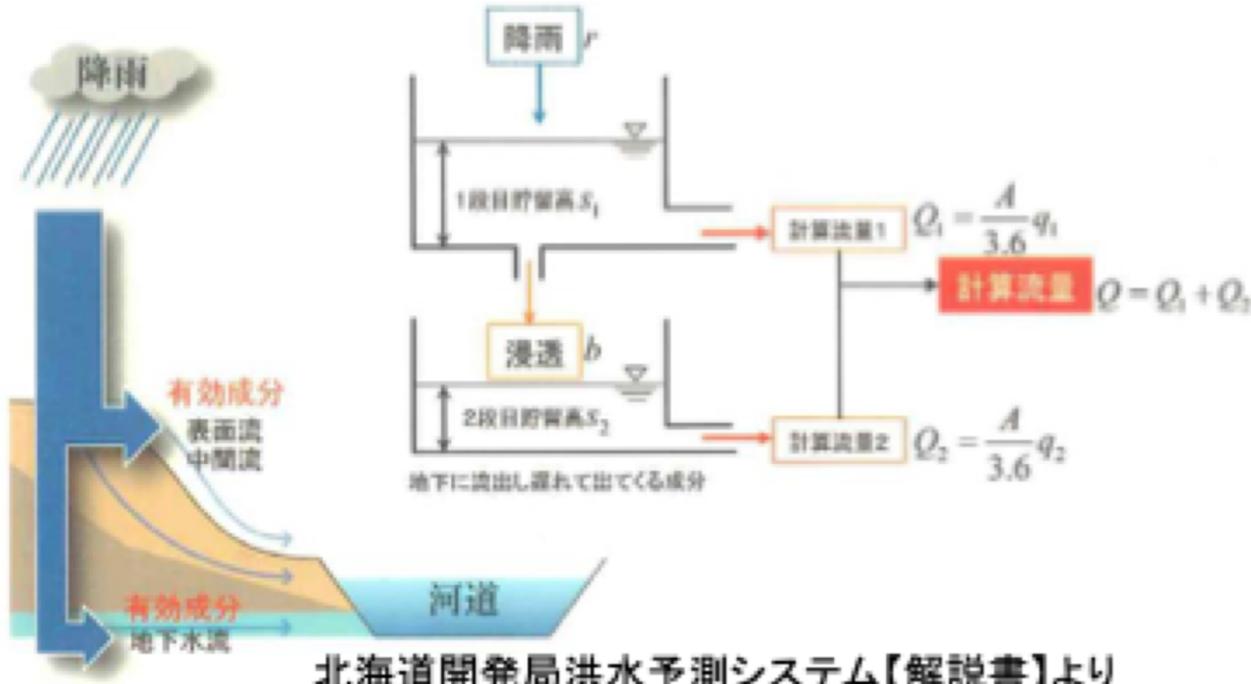
- 計画規模の降雨は増大 (中央値で1.38倍)
- 信頼区間の幅を定量化可能に (95%信頼区間の幅は170mm, 260mm)
- 信頼区間は一部、重複しており、信頼区間の上限への対応は将来の洪水対策に繋がる

「北海道地方における気候変動予測 (水分野) 技術検討委員会」資料より

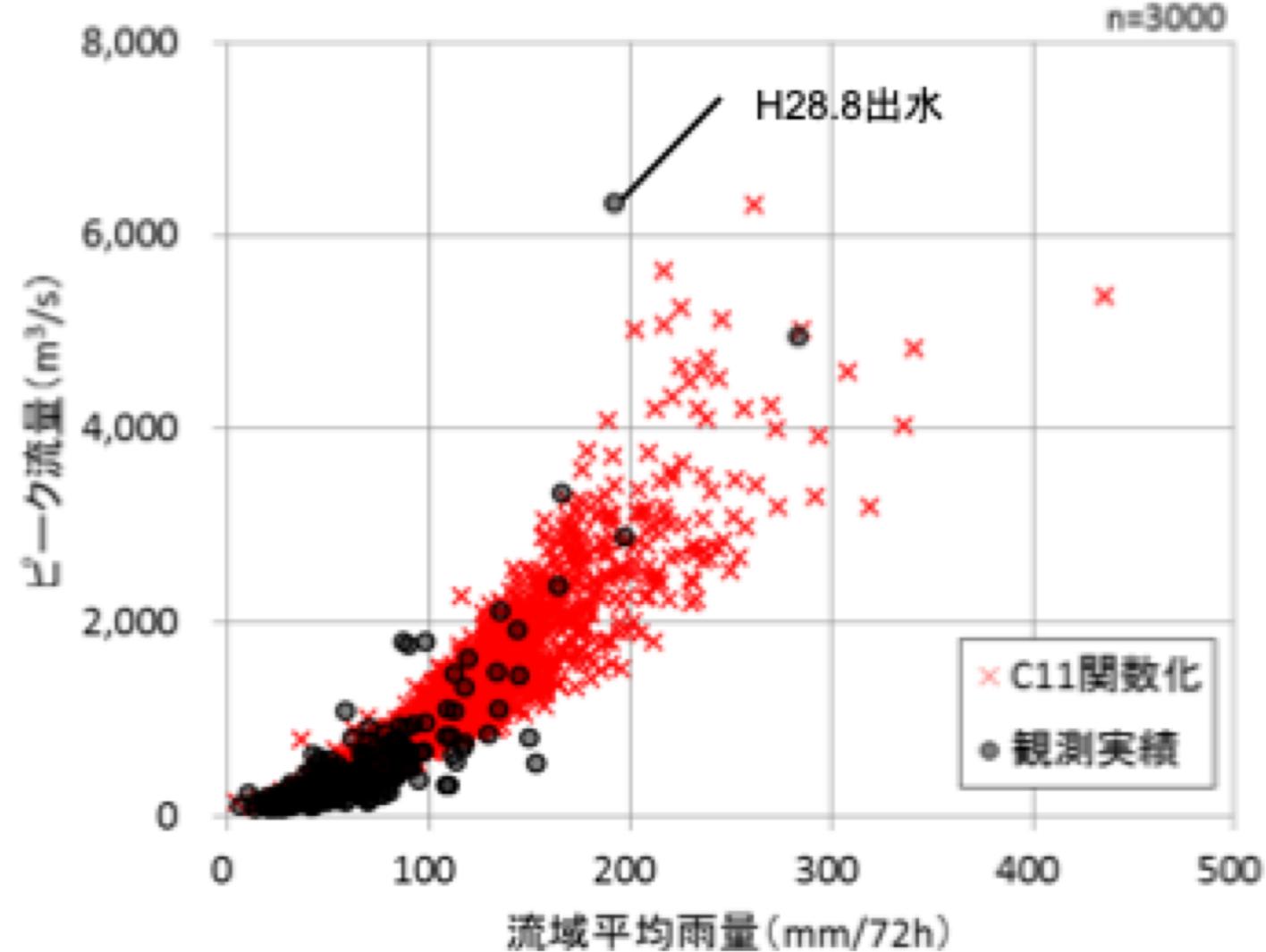
降雨パターンがもたらすピーク流量の違い

降雨流出モデル

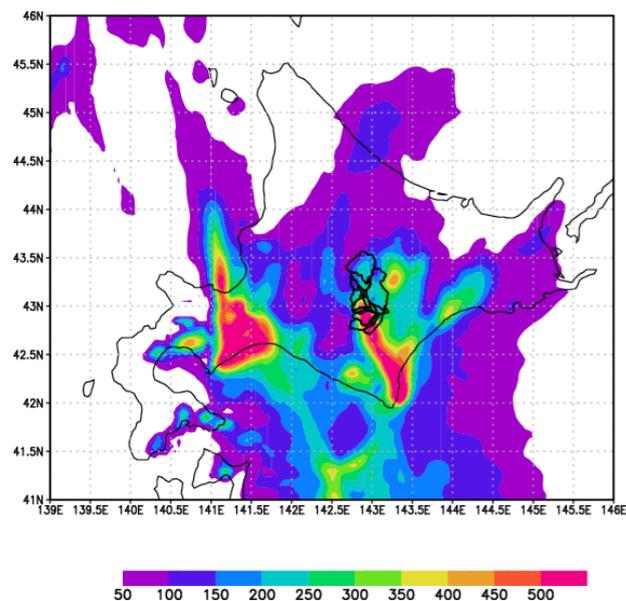
2段タンク型貯留関数モデル



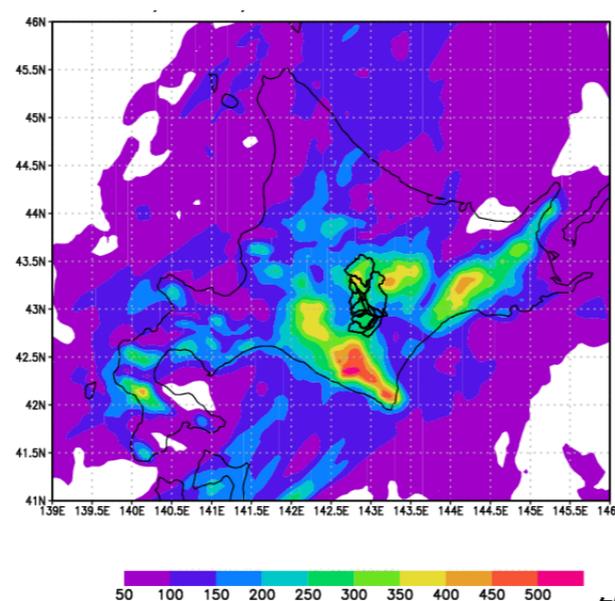
北海道開発局洪水予測システム【解説書】より
(北海道開発局,平成19年3月)



空間的な集中度の高い降雨事例

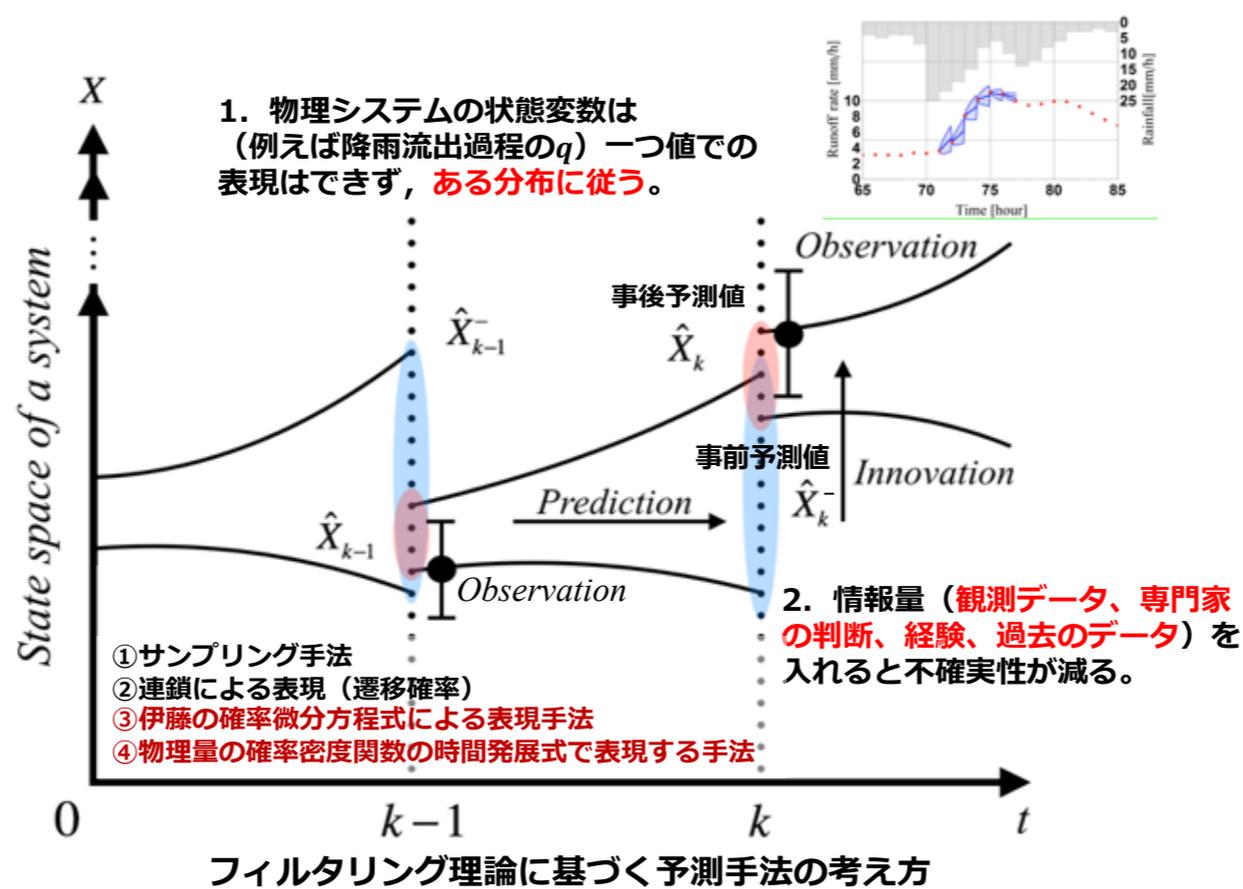


空間的な集中度の低い降雨事例



大量アンサンブルデータを用いることで降雨パターンの違いの影響を踏まえたピーク流量の確率的な評価が可能に

十勝川流域において計画規模の確率雨量による洪水ピーク流量は温暖化後には1.5~1.7倍程度に (降雨量は1.3-1.4倍)



- 年最大降雨量は温暖化の進行度合いに応じて増加 (過去実験 $< 2^\circ\text{C}$ 上昇実験 $< 4^\circ\text{C}$ 上昇実験)
- 強い降雨強度の頻度および計画規模降雨の時空間的な集中度も同様の関係に (過去実験 $< 2^\circ\text{C}$ 上昇実験 $< 4^\circ\text{C}$ 上昇実験)
- 台風が流域に接近する際の降雨強度が増大 (流域ごとに影響の大きさは異なる)
- 降雨パターンの違いがもたらすピーク流量の振れ幅が明らかに
- 洪水リスク (発生確率 \times 被害) を定量化