



豪雨制御

ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と
共に生きる気象制御

水工学オンライン連続講演会
2024年10月28日

豪雨を鎮める気象制御

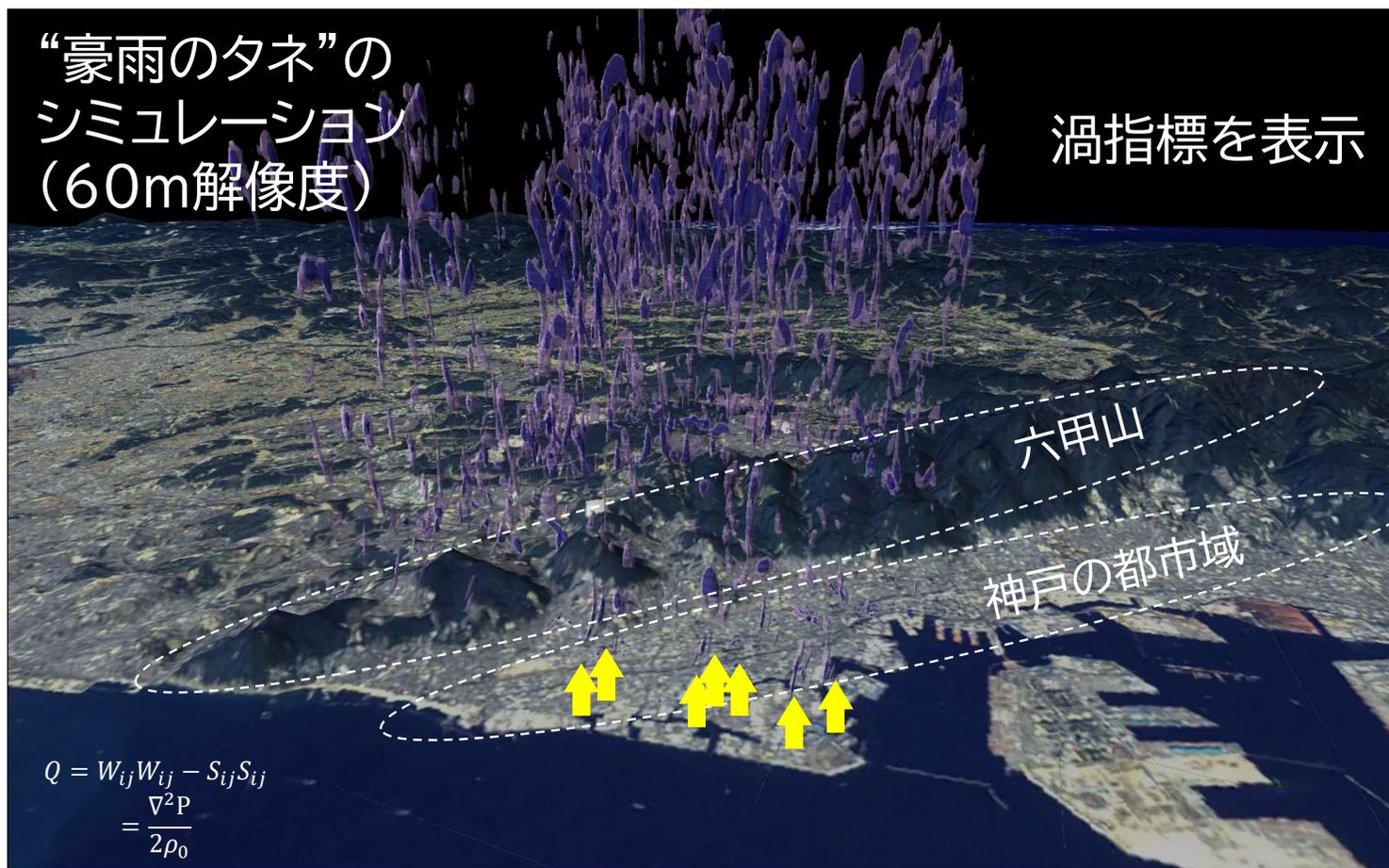
京都大学防災研究所
山口 弘誠



ムーンショット目標 8
2050 年までに、激甚化しつつある台風や豪雨を制御し
極端風水害の脅威から解放された安全安心な社会を実現



研究の動機： 人間活動がゲリラ豪雨を促進？



q.criteria (/s²)
0.001
0.0005

13:55
2017-08-18

山口ら(2017)

熱的上昇流の併合



小さな3つが
大きな1つに!



中央の1つだけでも
無くすことができれば、
大きくなることはない?

豪雨のタネ(渦)の一部は、地表面から生成されている。
⇒ そのタネを削減すれば、豪雨を抑制できるのではないか？



内閣府ムーンショット型研究開発制度

<p>目標1 身体、脳、空間、時間の制約からの解放</p> 	<p>目標2 疾患の超早期予測・予防</p> 	<p>目標3 自ら学習・行動し人と共生するAIロボット</p> 
<p>目標4 地球環境の再生</p> 	<p>目標5 2050年の食と農</p> 	<p>目標6 誤り耐性型汎用量子コンピュータ</p> 
<p>目標7 健康不安なく100歳まで</p> 	<p>目標8 気象制御による極端風水害の軽減</p> 	<p>目標9 こころの安らぎや活力を増大</p> 



ムーンショット型研究開発制度は、我が国発の破壊的イノベーションの創出を目指し、従来技術の延長にない、より大胆な発想に基づく挑戦的な研究開発（ムーンショット）を推進する国の大型研究プログラムです。

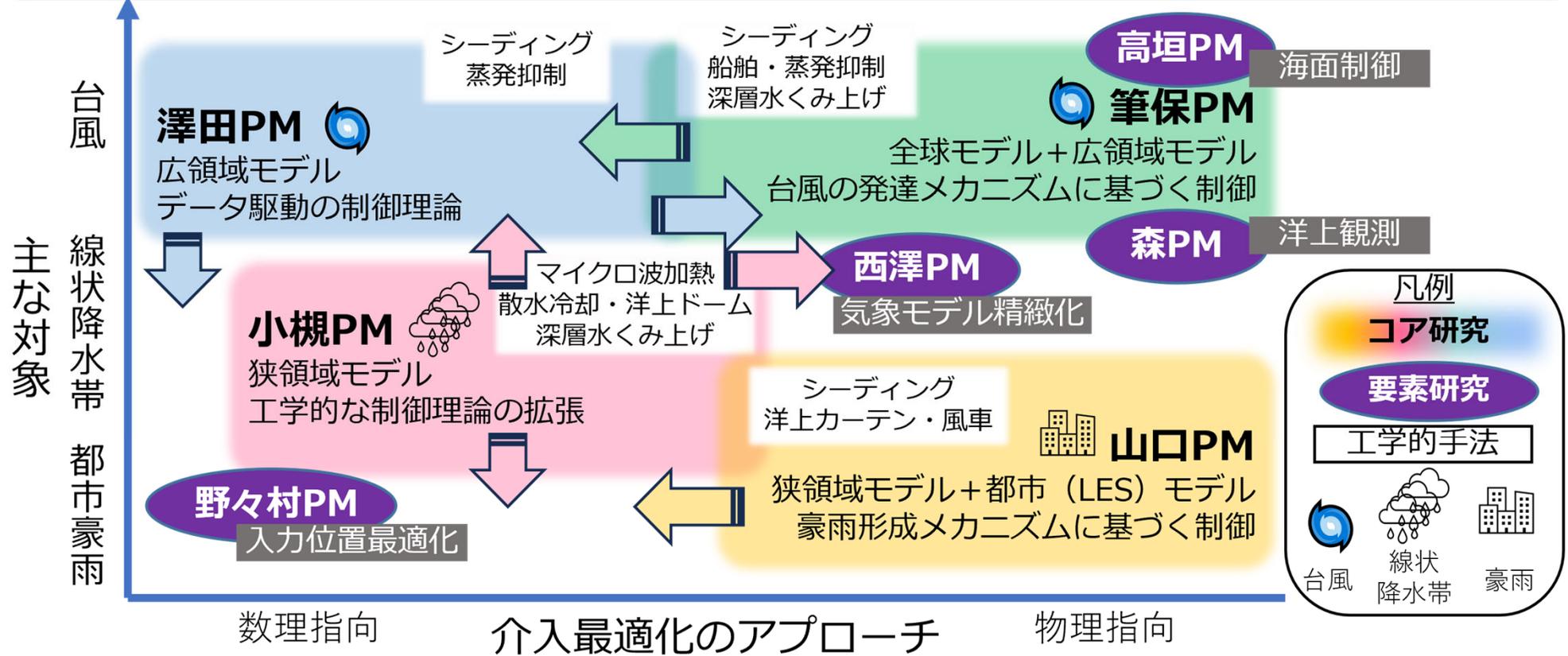
目標8は2022年度に開始。

内閣府ウェブサイト：
<https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/index.html>

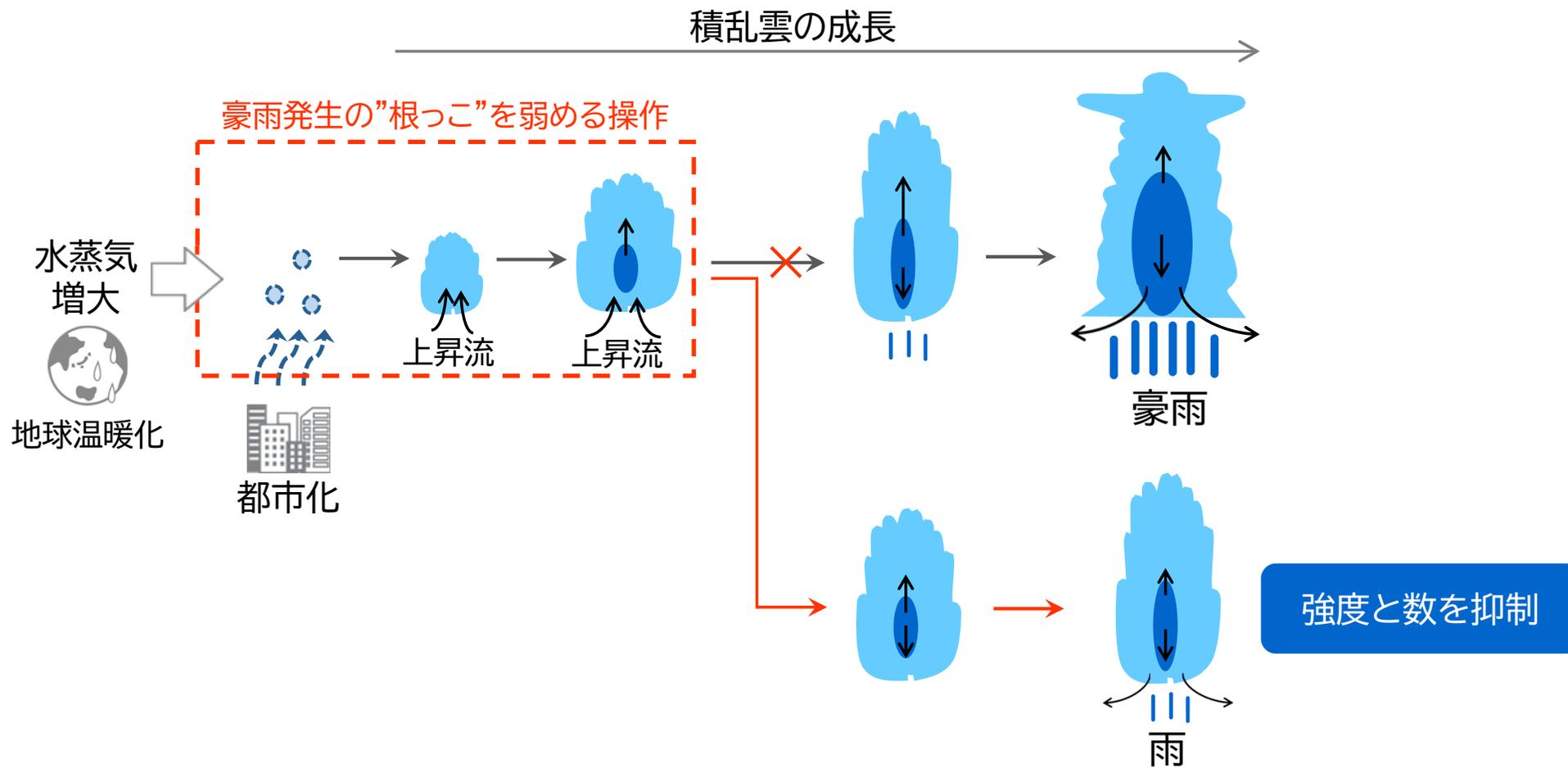


目標8の全体デザイン

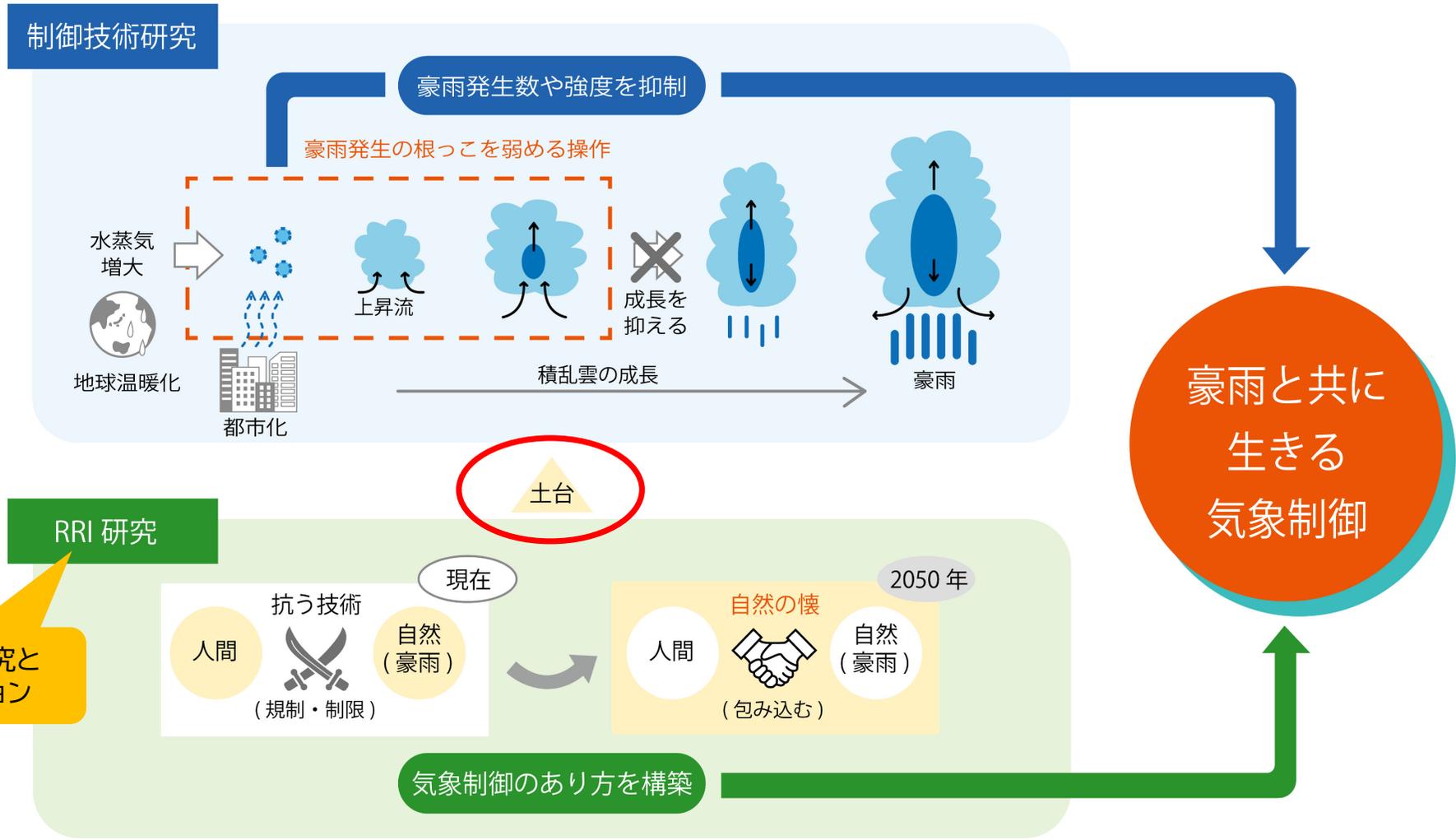
シナリオ初期における重点的研究開発領域と期待する展開



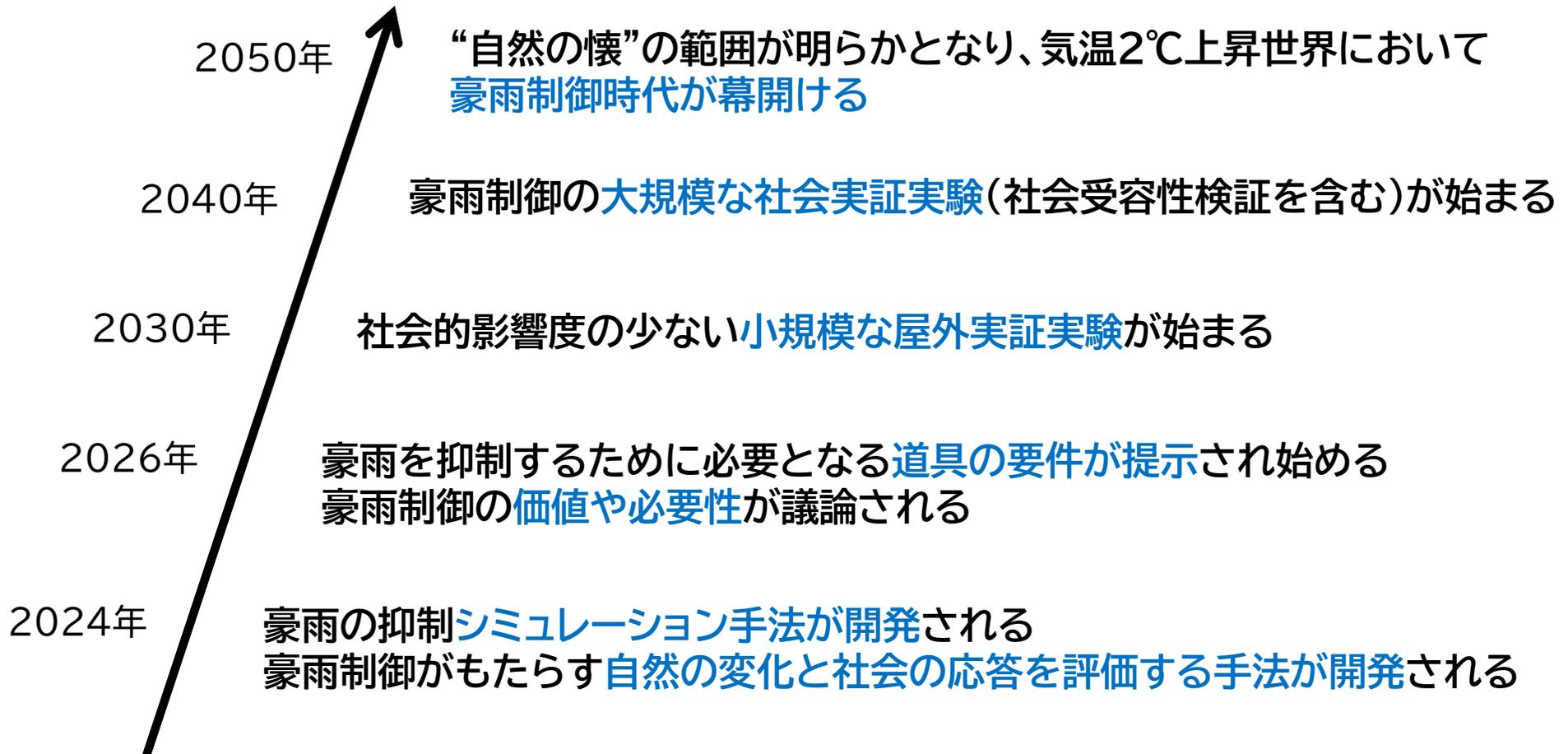
豪雨制御のイメージ・ねらい



豪雨制御のための土台となる考え方



2050年の実現に向けたシナリオ



豪雨を制御する道具たち

Offshore Curtain

Curtain hung by kites from the ships suppresses abundant water vapor inflow from the ocean.

Wind Turbine

A secondary use of offshore wind power facilities is to suppress wind convergence that results in updrafts.

Cloud Seeding

Spraying dry ice from airplanes on initial cumulonimbus clouds inhibits the growth of precipitation particles.

Fan

Mobile or building-mounted fans dissipate heat pockets and vortex flow caused by urban activities that enhance updraft.

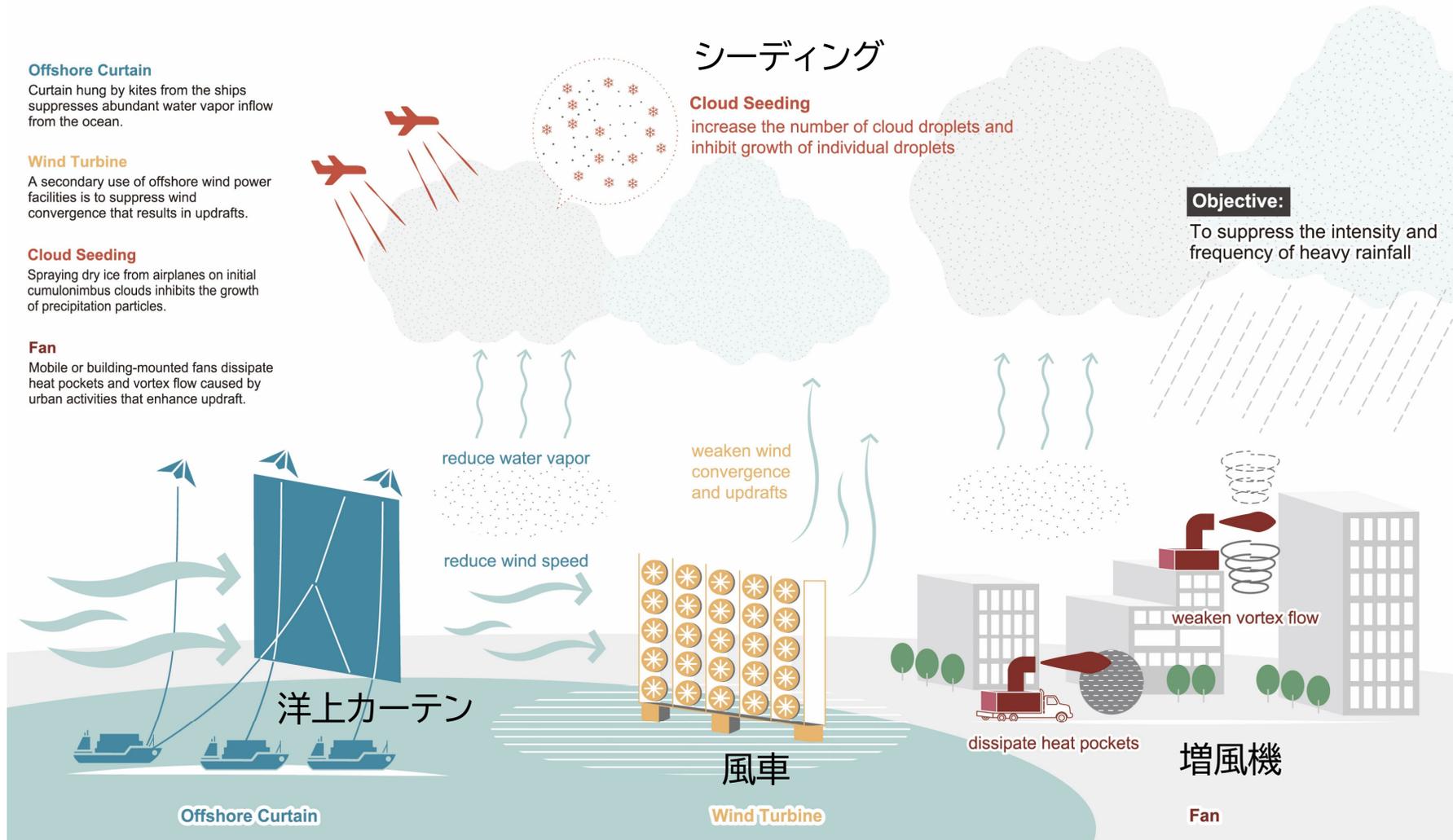
シーディング

Cloud Seeding

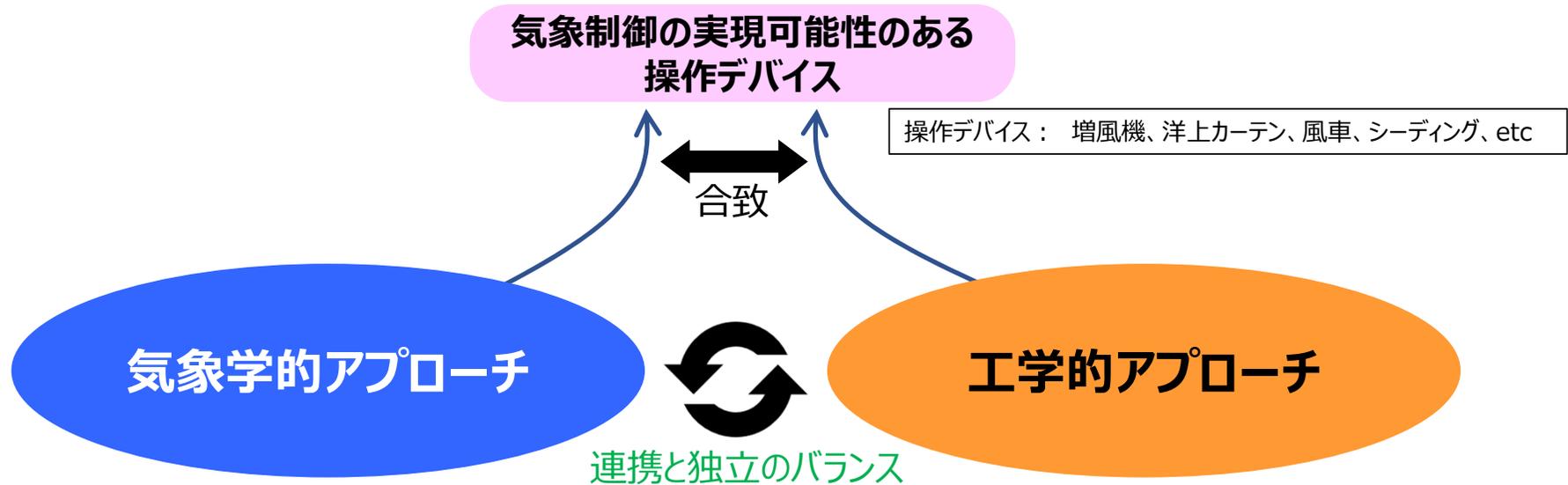
increase the number of cloud droplets and inhibit growth of individual droplets

Objective:

To suppress the intensity and frequency of heavy rainfall



気象学的アプローチと工学的アプローチ



気象シミュレーション等によって、
目標とする気象（豪雨）の変化
量に対して、**どのような操作が必要となるのか**を明らかにする。

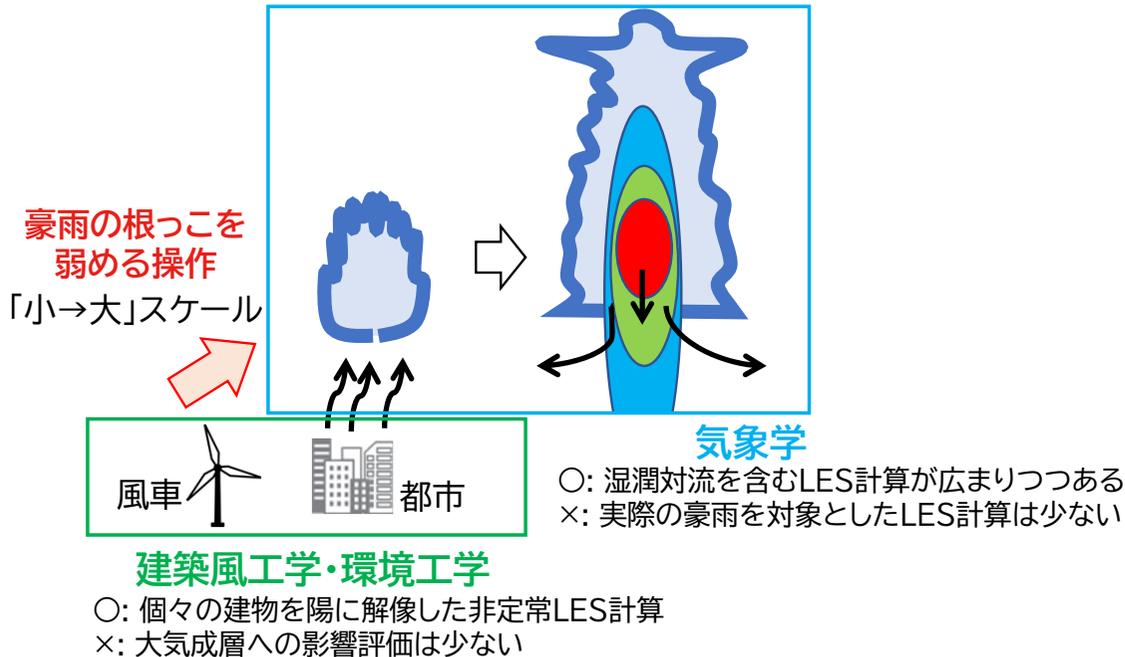
ex) 豪雨の風上10km位置の風速を3m/s減らす、など。

ものづくりのことも考慮して、周辺気象をどの程度変化させうるかを明らかにする。

ex) 風車を2台設置して、風車の後流を3m/s減らす、など。

研究の独自性

1. 制御技術的観点



制御デバイス～豪雨スケールを表現する数値モデル研究はほぼない。

⇒本プロジェクトの優れている点

①高分解能LES+メソ気象モデル、②シームレスLES

⇒本プロジェクトの不足している点

①実現象による検証が乏しい

Weather modification技術としてシーディングが多い。

⇒本プロジェクトでは、**力学的な操作(風などの操作)**も検討する。

2. ELSI/RRI的観点

気象改変(weather modification)プログラムを対象に、その法的・制度的枠組みや市民参加プロセスを検討した研究がいくつか見受けられるが、問題提起や事例紹介に留まっている。

豪雨を**制御**する

- ・ 自己中心的・一方的な関わり合い
- ・ 思い通りにいかない対象を無理やり押さえつける行為

豪雨を**ケア**する

- ・ 互恵的・相補的な関わり合い、思いやりのある関係
- ・ 劣化してしまう状態を見守ることで、自らの生きやすさを高める行為

豪雨を**鎮める**

- ・ 畏怖・礼節ある関わり合い
- ・ 超越的な対象に対して、自己の限界を認めて、自らの安寧を祈る行為

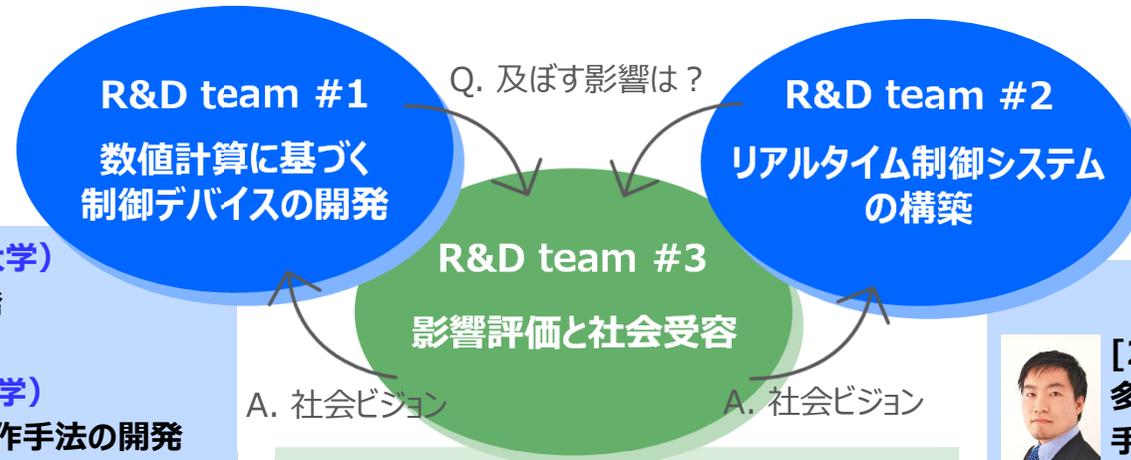
→開発技術を通じて「豪雨を鎮める」関わり方を維持・実現できるか？

豪雨と共生した地域社会の伝統的な自然観や慣習に即した気象制御のあり方は検討されていない。

⇒本プロジェクトの優れている点

＜社会＞＜技術＞＜自然＞が織りなす関係性の全体像を「気象コモンズ」という視座から捉えることにより、地域社会が制御技術を主体的に利用できる能力を検討する。

研究開発内容と研究課題代表者



[1-1] 竹見哲也 (京都大学)
熱に対する操作手法の開発



[1-2] 山口弘誠 (京都大学)
気流渦・水蒸気に対する操作手法の開発



[1-3] 西嶋一欽 (京都大学)
室内実験による工学的手法に対する要求性能の特定



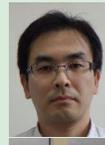
[1-4] 板倉英二 (Toyota) from 2025
水蒸気流入に対する洋上カーテン操作の実現可能性の検証



[1-5] 内田孝紀 (九州大学)
気流収束に対する操作手法の開発(風車群)



[1-6] 鈴木善晴 (法政大学)
雲粒子形成に対する操作手法の開発(シーディング)



[3-1] 萬和明 (京都大学)
流出・水資源への短期的・長期的影響評価



[3-2] 田中智大 (京都大学)
豪雨制御による浸水リスク変化の水文社会経済分析



[3-3] 羽鳥剛史 (愛媛大学)
豪雨制御の社会実装に向けた地域協働に関する総合研究



[2-1] 西嶋一欽 (京都大学)
多時点・多段階操作による意思決定支援手法の開発



[2-2] 大東忠保 (防災科学技術研究所)
制御効果モニタリング手法の構築

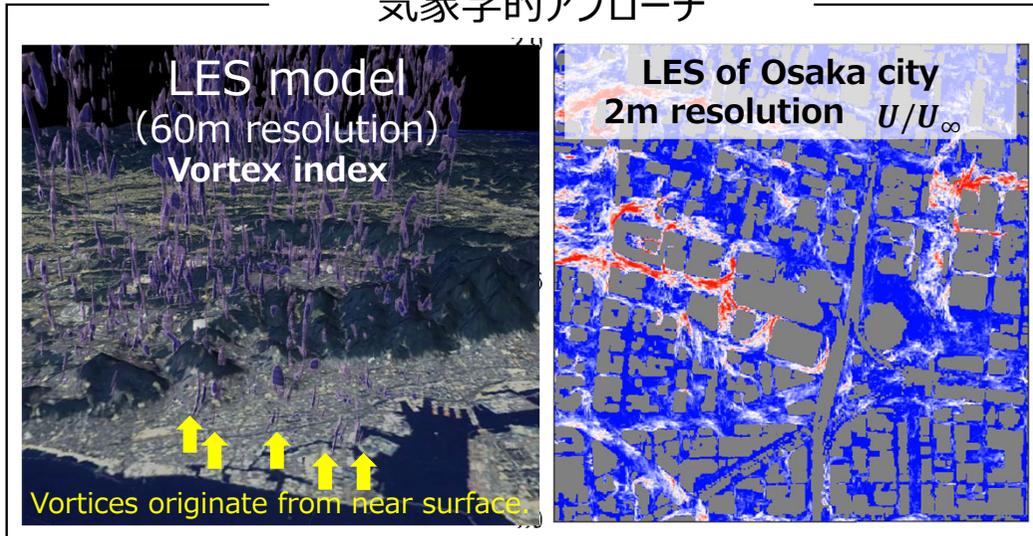


[2-3] 仲ゆかり (京都大学)
偶然性・必然性概念の制御システムへの利用

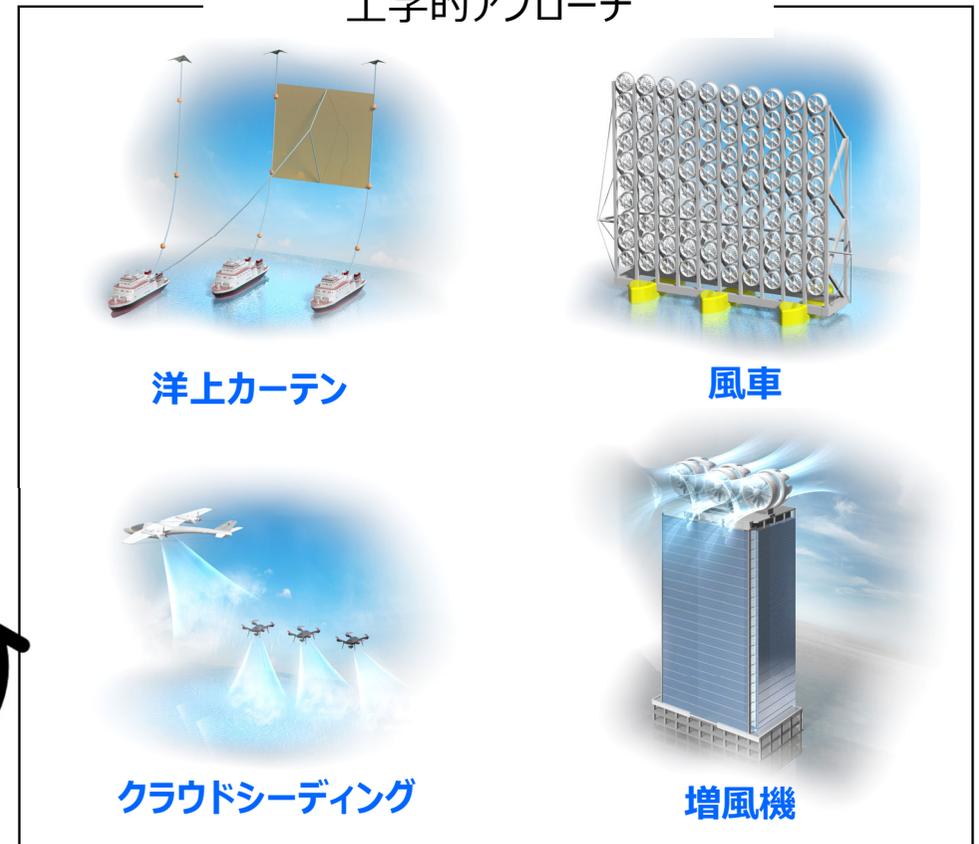
Team #1 数値計算に基づく制御デバイスの開発

豪雨の根っこ（きっかけ）をもたらす現象を操作するための制御デバイスを開発する。
e.g.) vortex tube, heat, water vapor, wind convergence, cloud-formation.

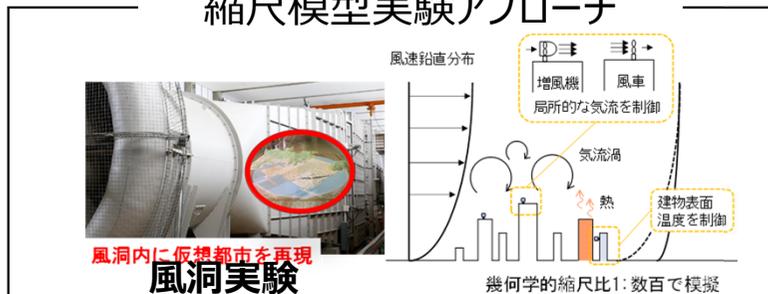
気象学的アプローチ



工学的アプローチ

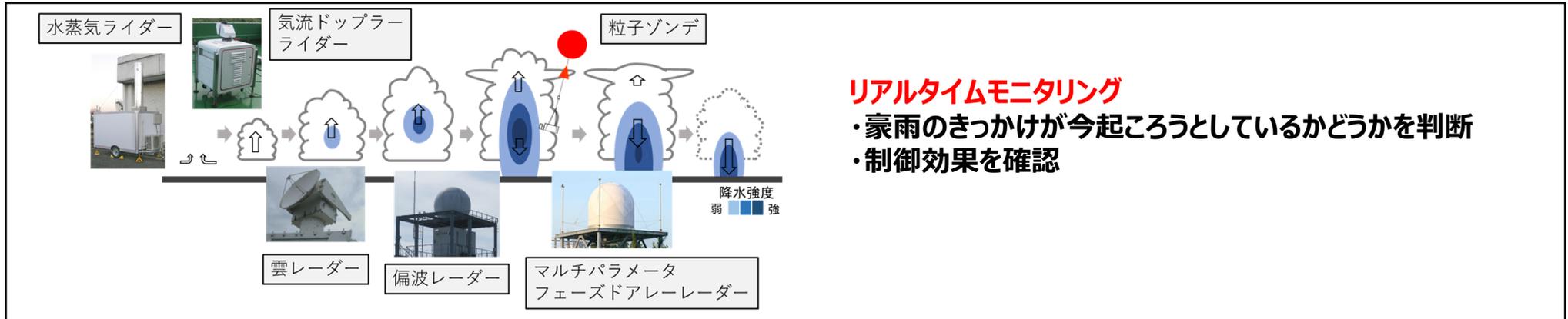


縮尺模型実験アプローチ

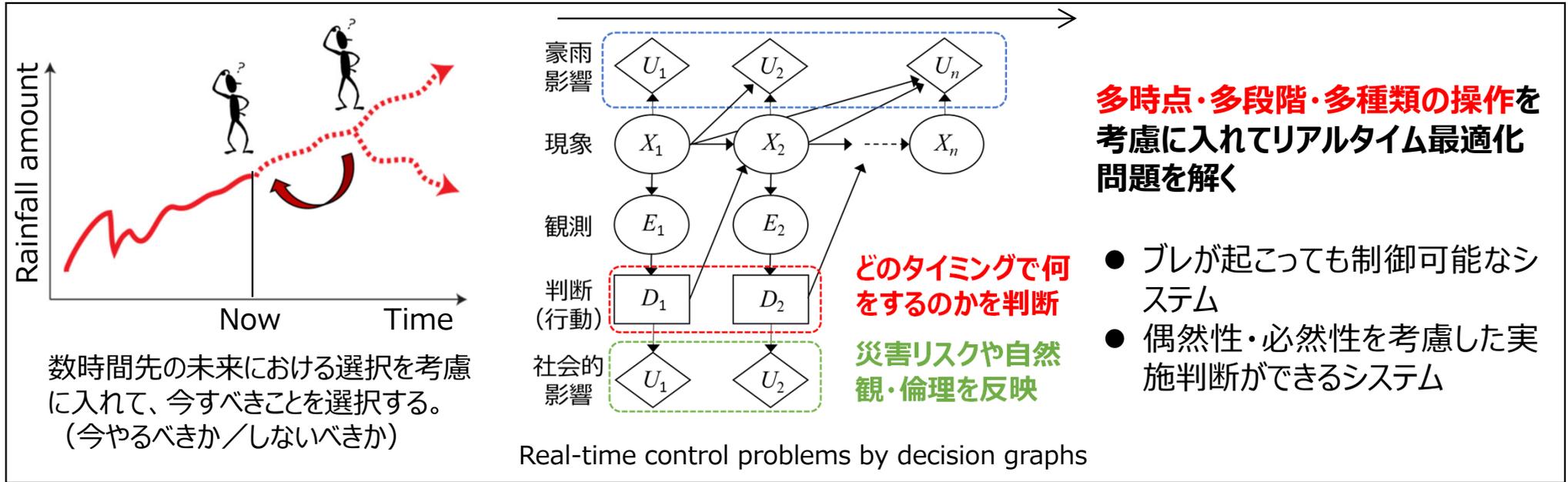


Team #2 リアルタイム制御システムの開発

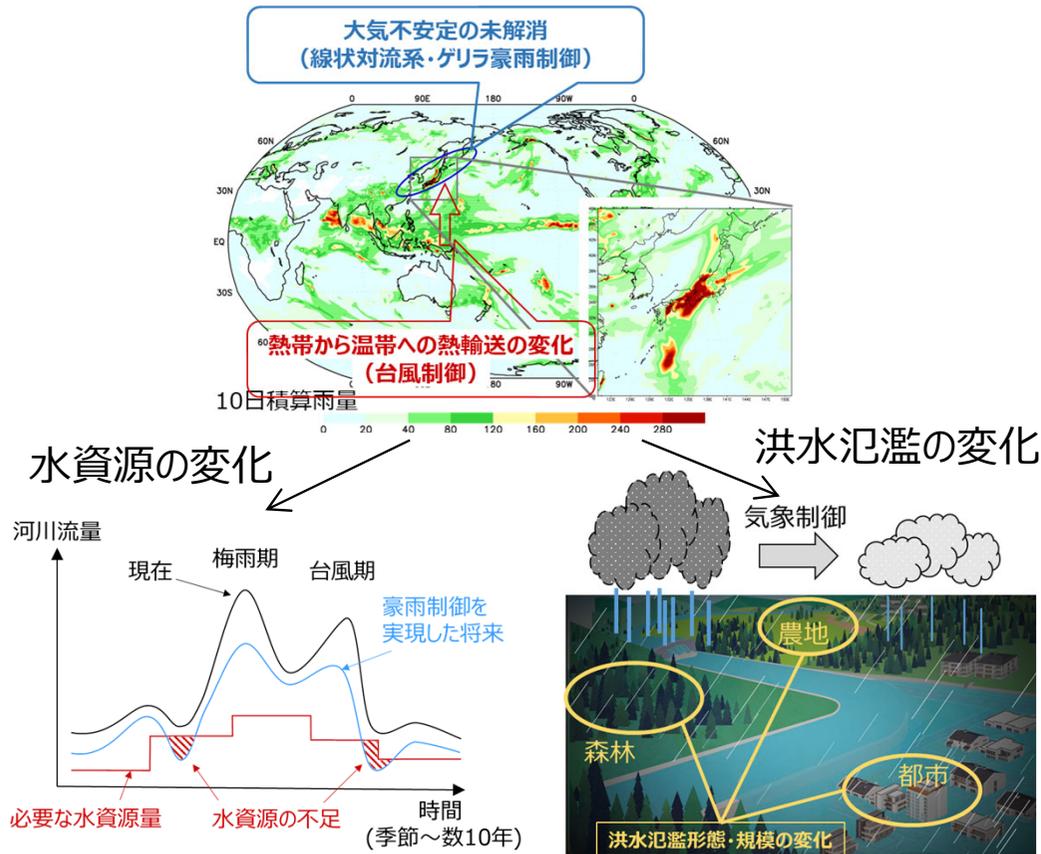
モニタリング



リアルタイム制御システム

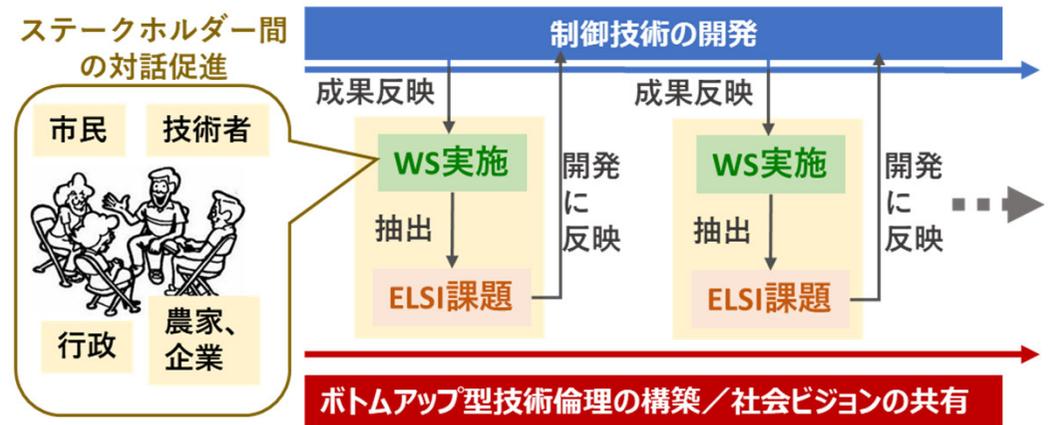


影響評価



短期・中長期の影響評価。

社会受容性の構築

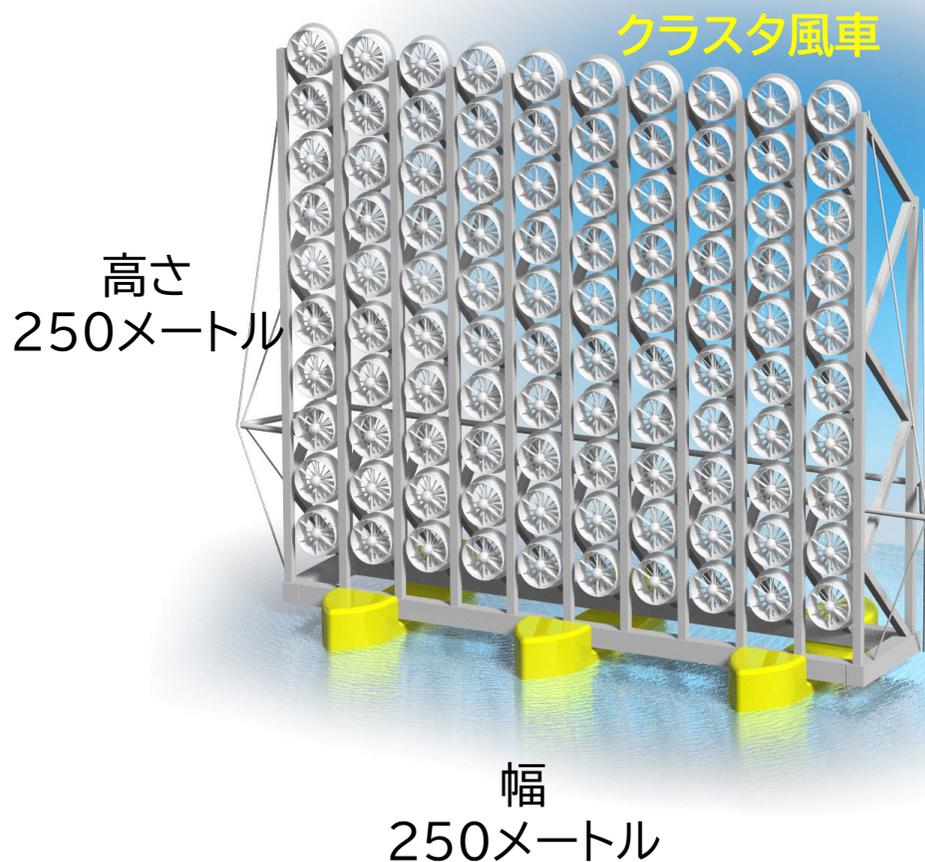


地域住民が新しい制御技術を通して気象資源を主体的に活用・保全しながら、豪雨と共に暮らしていくための協働のしくみを「気象コモンズ(羽鳥, 2022)」として捉える概念モデルを構築する。
気象制御の必要性について考究。



制御シミュレーションの現状

操作手法① 風車



ねらい

風を弱めることで
風の集まり(収束)を抑制

上昇流のきっかけ

→ 豪雨を抑制



風車によるゲリラ豪雨の抑制

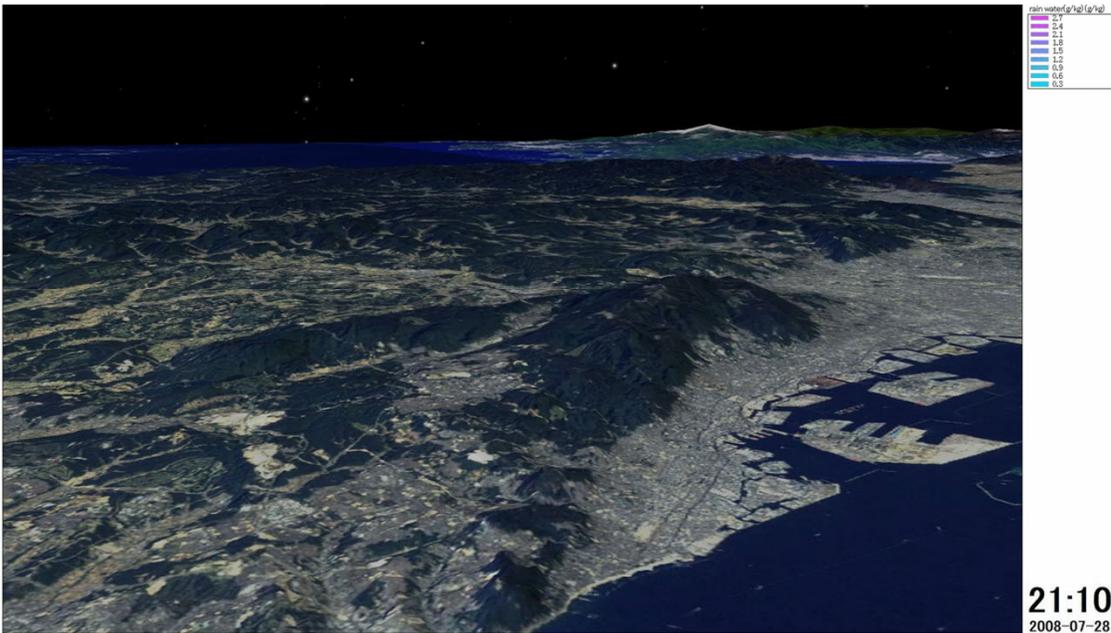


山口・西村^太・中北(2023) 豪雨制御

2008年神戸・都賀川豪雨を模擬した制御シミュレーション

風車: 無し

風車: 有り



降雨強度
190mm/h



降雨強度
140mm/h
27%抑制

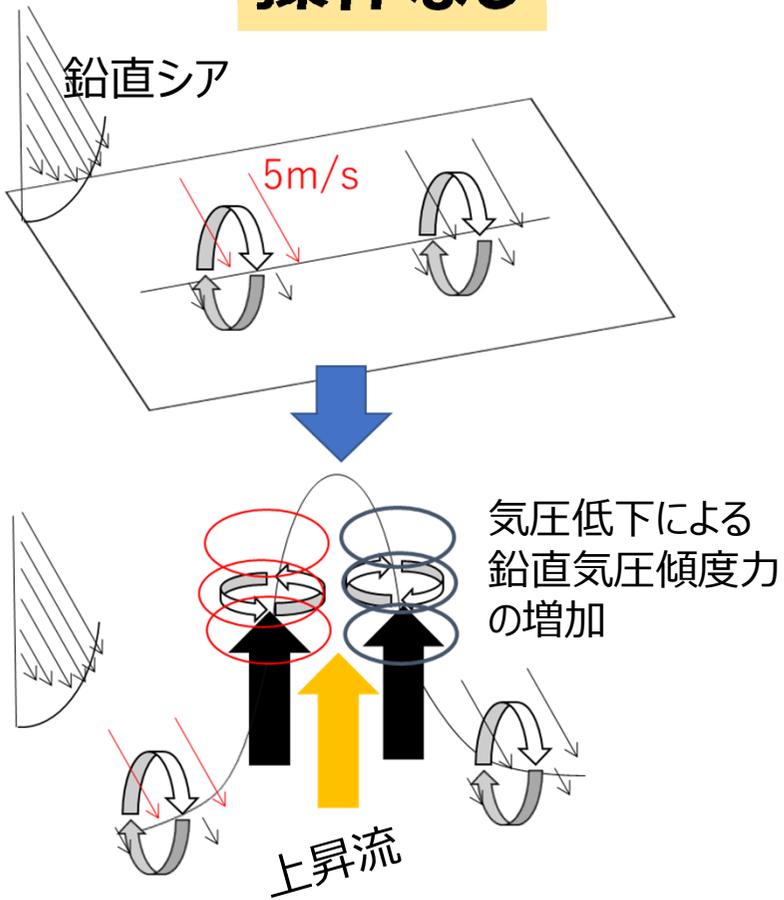


風速場操作のねらい 気流渦の阻害

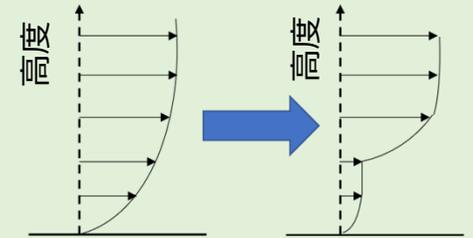
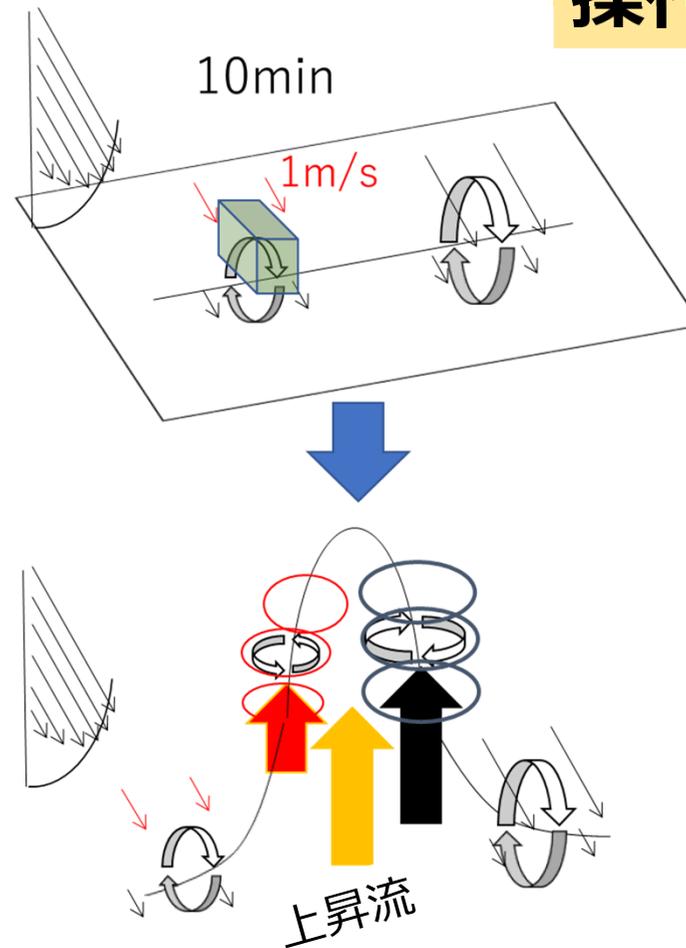


山口・西村^太・中北(2023) 豪雨制御

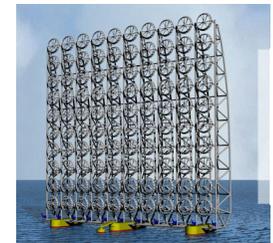
操作なし



操作あり



	Amount
風速変化量	5 ms ⁻¹ → 1 ms ⁻¹
操作領域	1km(W) x 3km(D) x 0.3km(H)
操作時間	10 minutes



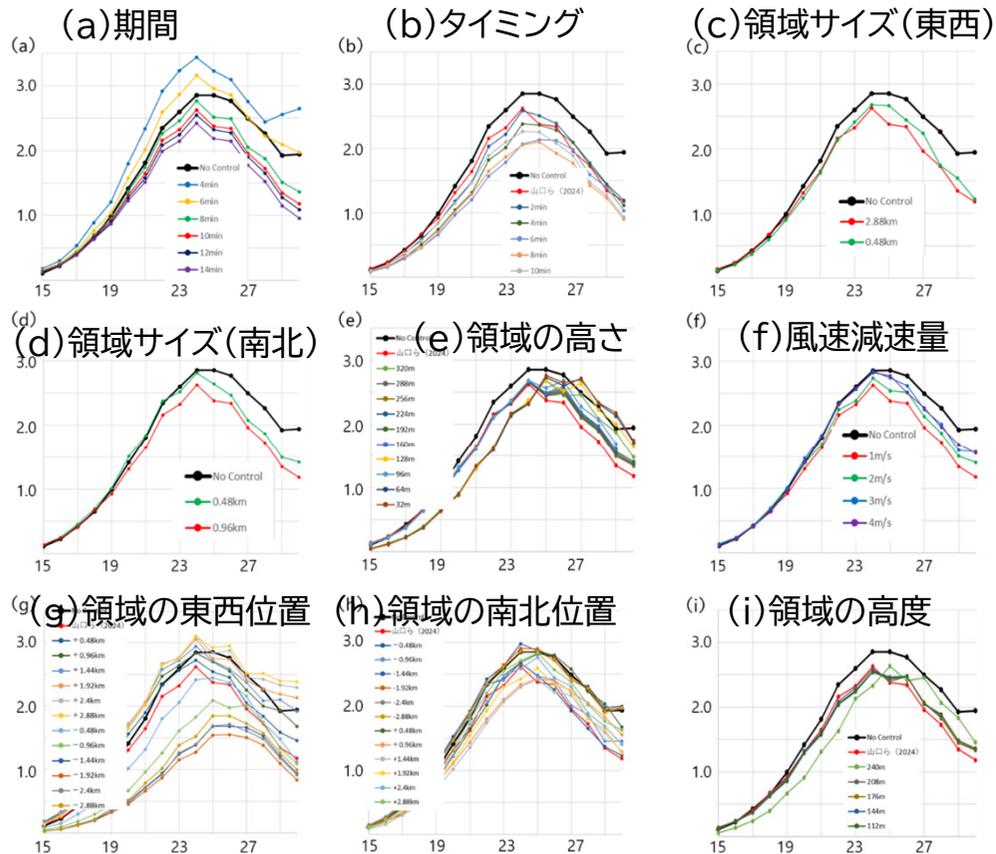
©九州大学
洋上風力研究教育センター

感度実験



山口・西村^太・中北(2024) 豪雨制御

操作手法の感度実験



横軸は計算開始からの経過時間(分)
縦軸は各時刻における雨水混合比(g/kg)の最大値
いずれも黒線が操作なし実験

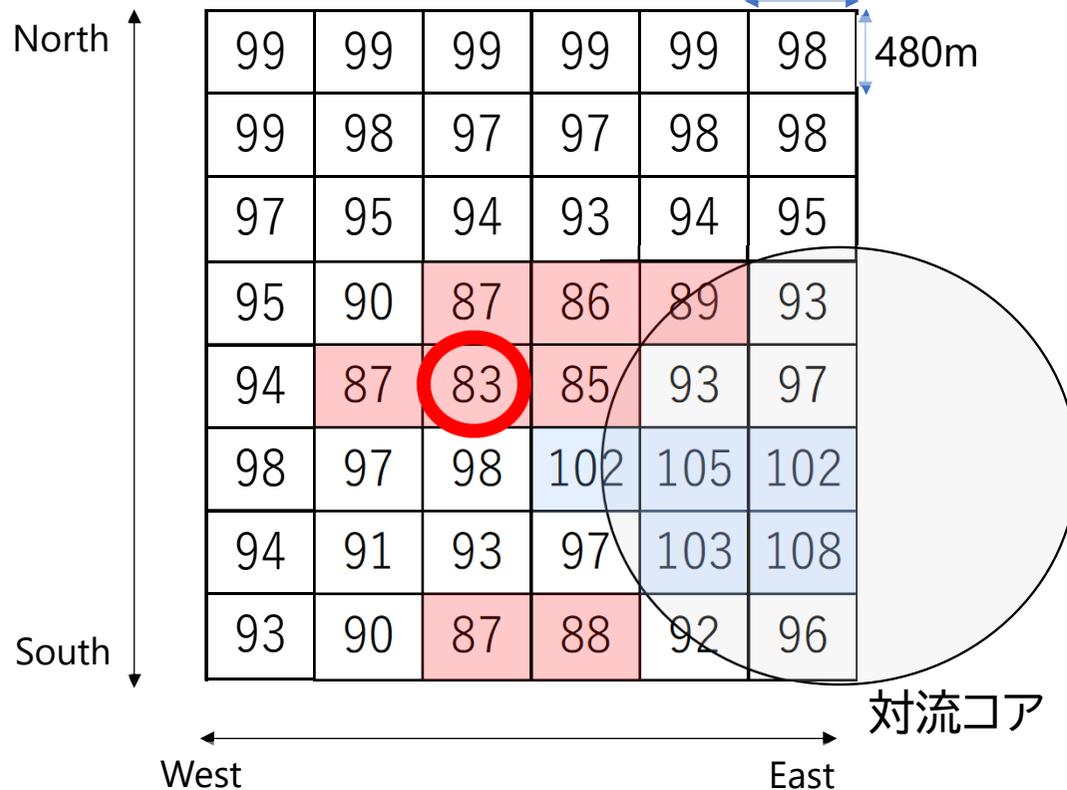
操作手法(時間・時刻、領域・位置、量)の感度実験

- 風の主風向(西風)の向きに沿って、位置やサイズを変化させると大きな感度がある。
特に、東西方向(風の主風向)の設置位置に大きな感度がある。
- 操作時間は長い方が良い。短時間操作はむしろ高湿塊を持ち上げるので、逆効果。
- 最適なタイミングがある。
- 風速減速量は大きいほど効果がある。

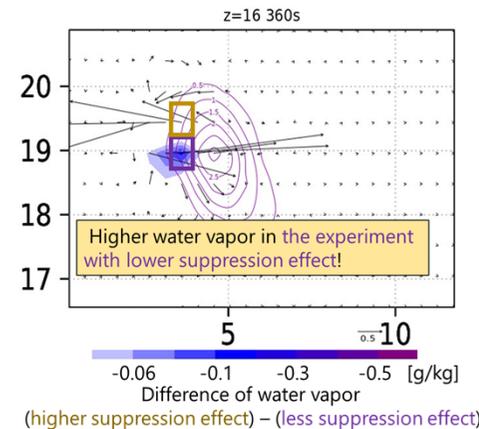
操作位置の“勘所”

1格子(風車2台分)操作での設置位置に関する感度

操作なし実験に対するピーク降雨強度の比率
(<100%: 抑制) 480m

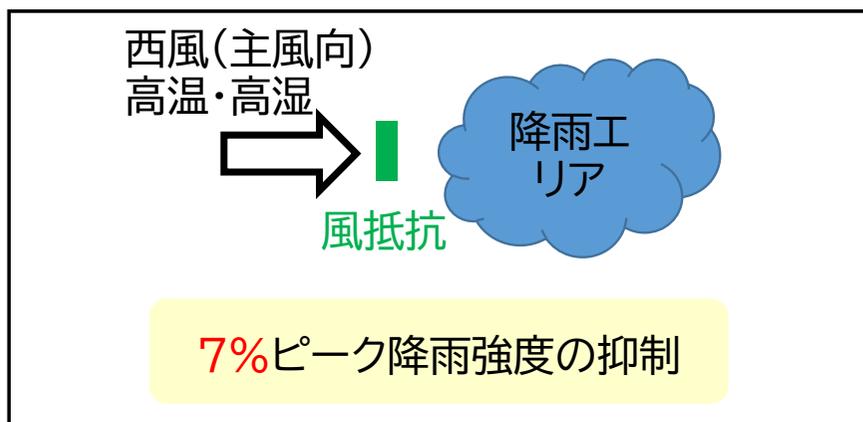


- 基本的に、対流コアの近くで風上側に設置した方が抑制効果大きい。(赤丸:最大で17%抑制)
- ただし、本当の対流コア中心に設置すると逆効果だった。(水色部分)。その理由は風車抵抗によって風を弱めた一方で、下層の水蒸気を少し上空に持ち上げてしまっていたため。
風の抑制 v.s. 水蒸気の持ち上げ
重回帰分析の結果、重みが1:2であることから、いかに水蒸気を持ち上げずに、その上で風を抑えるかという観点が重要

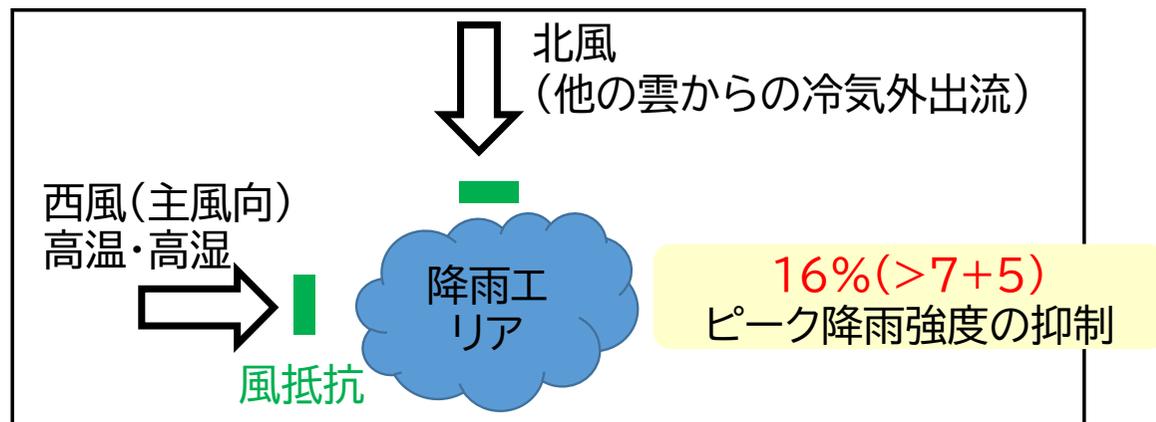


複数位置操作による相乗効果？

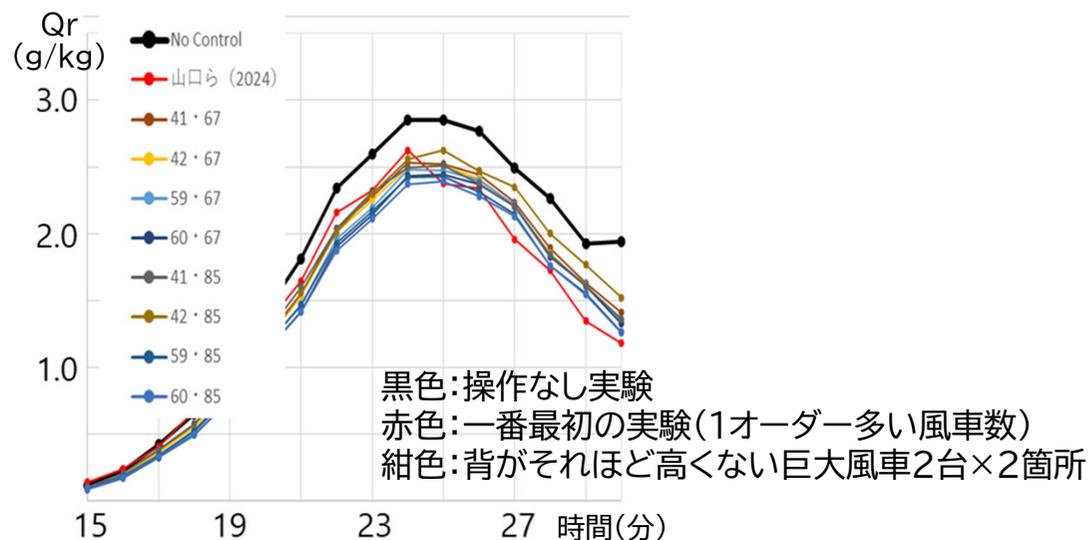
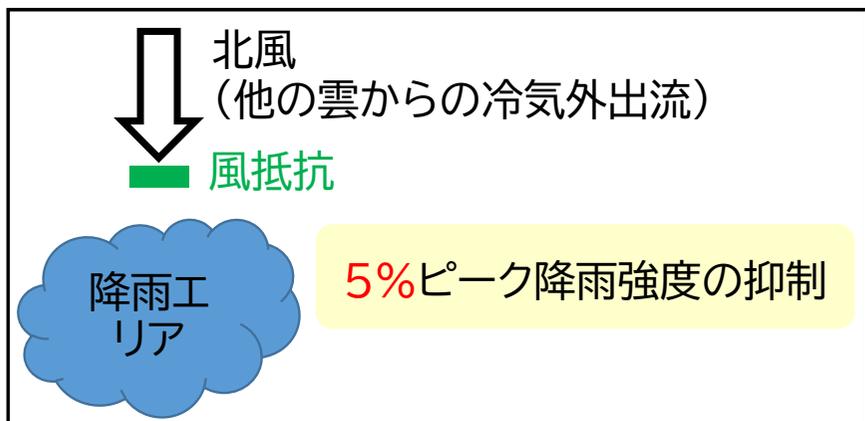
風車の高さを抑える(320m→224m)



西風抑制と北風抑制の両方の組み合わせ



別の発生メカニズム(北風)を抑制する

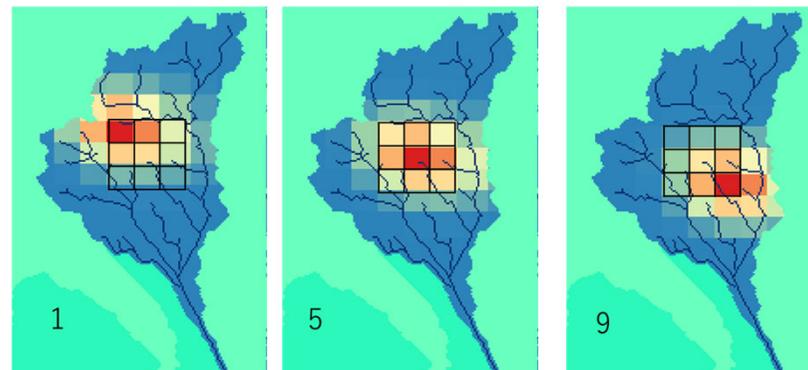
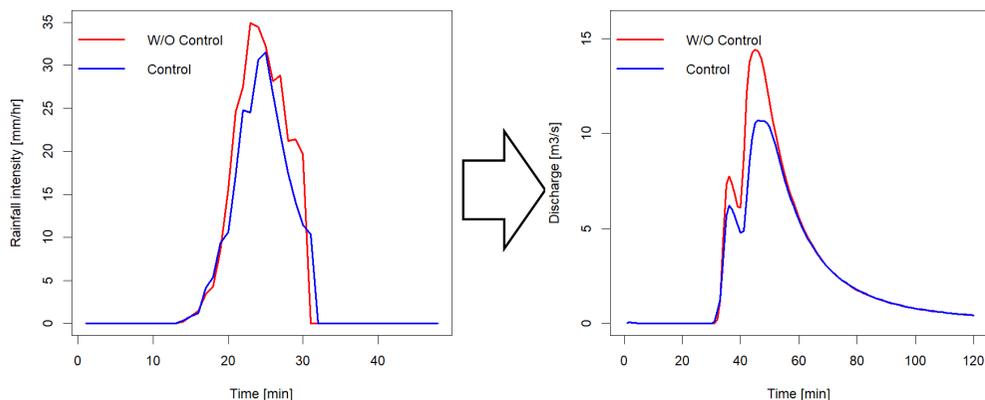


豪雨制御計算と洪水氾濫計算の連結



田中ら(in preparation) 豪雨制御

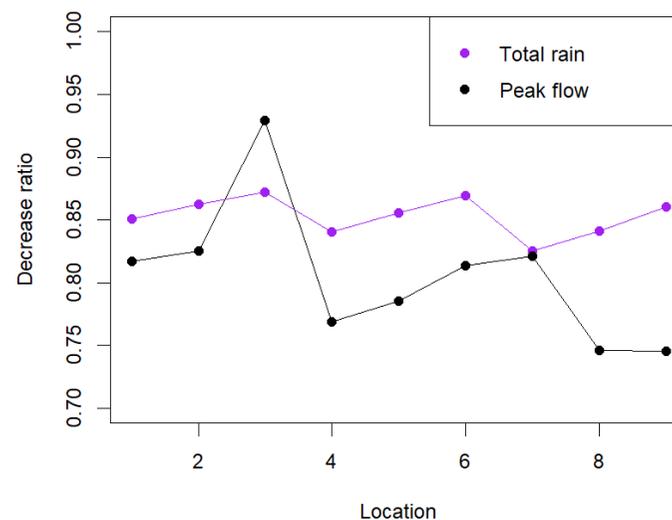
都賀川豪雨事例



流域平均雨量 (-15%)

河川のピーク流量 (-26%)

- 都賀川豪雨の事例では、人の避難が防災上最も重要な観点。その意味では、ピーク強度だけではなく、降雨の立ち上がり方を緩やかにする制御が重要。
- 山地部に降った場合は土層厚の関係で時間遅れが発生して効果的。(この事例では +3分避難時間を確保)



制御技術の開発要件へのフィードバック

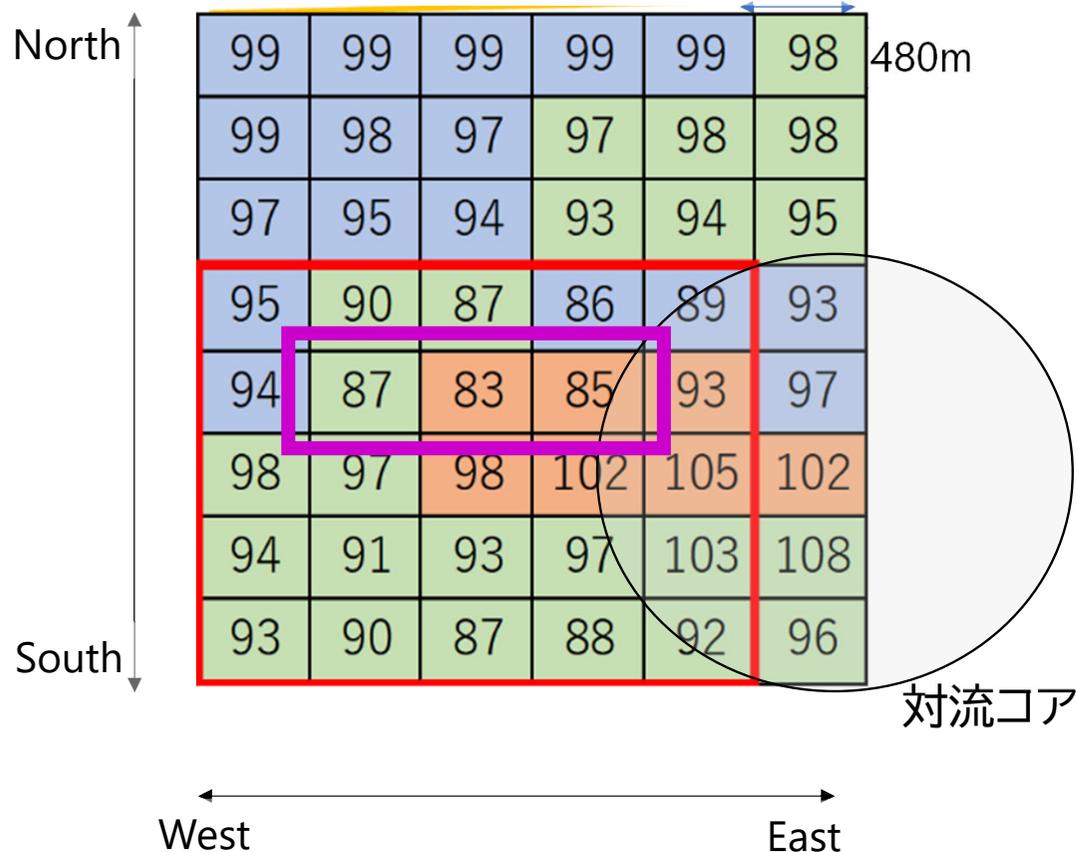


山口・西村^太・中北(2024) 豪雨制御

ピークまでの遅れ時間

青色:遅れ無し、緑色:1分遅れ、橙色:2分遅れ

480m



- 河川からの避難時間を確保という意味では立ち上がりが遅い方が良い
- 紫色で示す「対流コアの少し風上側、少し中心からずらした場所が良い」と言ってきたが、目的関数を避難時間にすると、多少の雨量増加は気にする必要は無く、単純に対流コアの風上を狙えば時間遅れが可能となる。

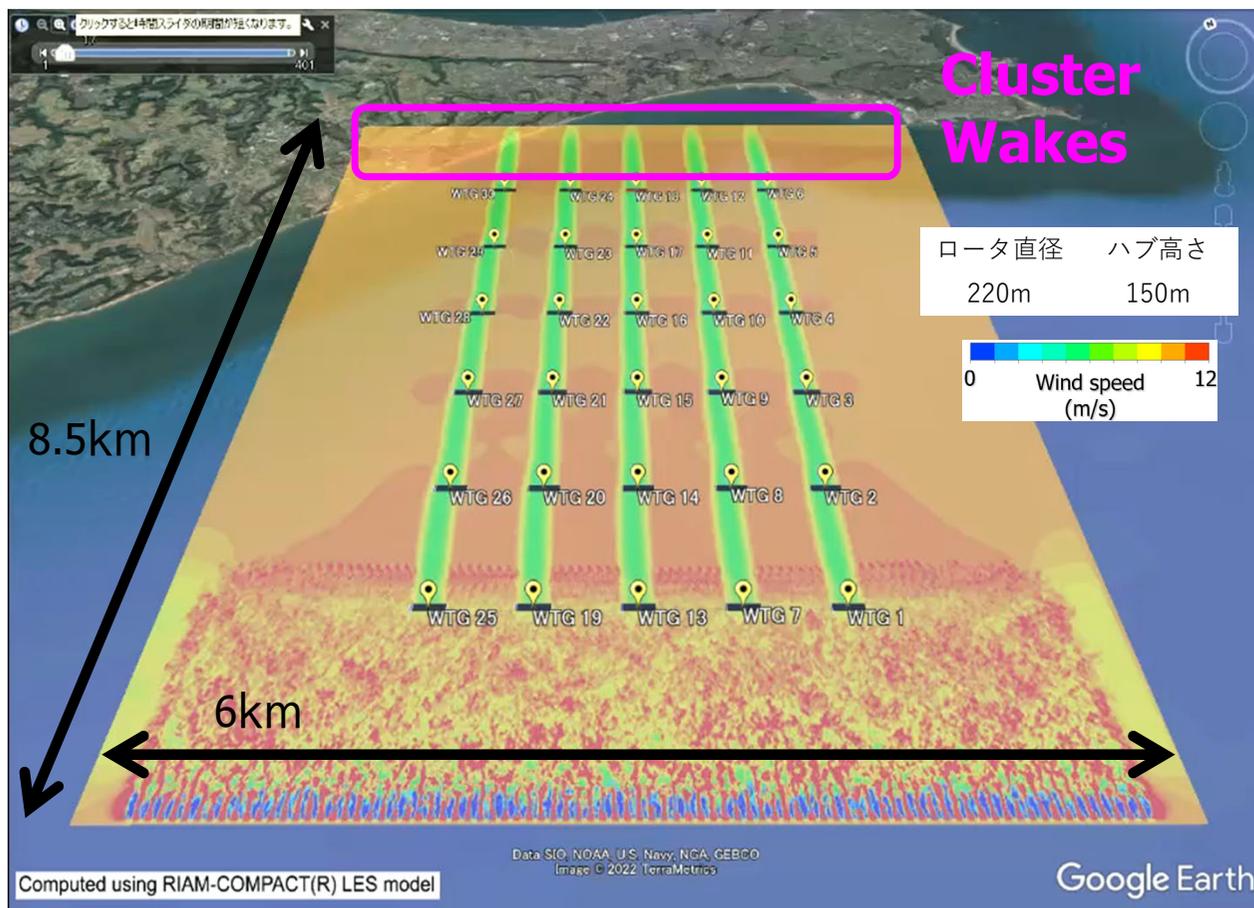
ゲリラ豪雨のパターンを分類化
他のパターンでも同様のことが言えるのかどうかを検証中。

風車周辺の詳細計算(工学的アプローチ)

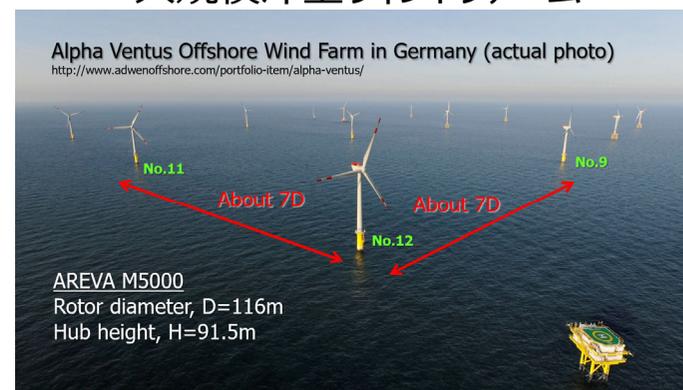


内田ら(2023)

豪雨制御



大規模洋上ウインドファーム



- ※格子乱流場を生成
- ※水平断面内の風向変化を考慮

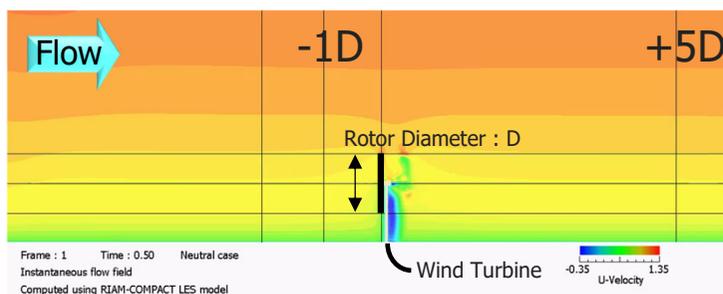
実際のウインドファームを想定して、風車がローカルな気象場に与える影響をLES計算によって評価した。風車の計算スキームを風速場操作の気象学的アプローチへパスした。

風車ウエイク現象が顕在化する気象条件の明確化の必要性

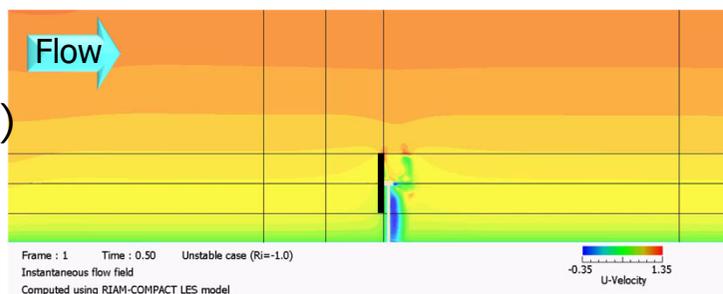


内田ら(2024) 豪雨制御

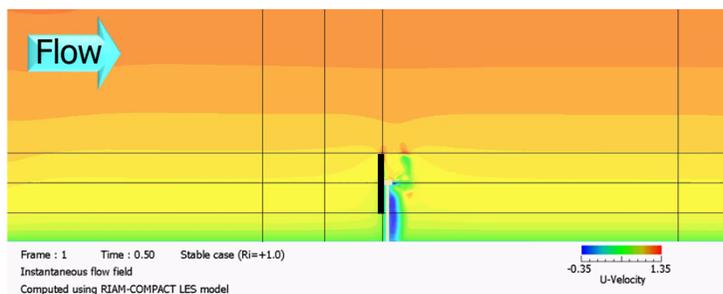
Ri=0
(Neutral Case)
最適周速比4.0



Ri=-1.0
(Unstable Case)
最適周速比4.0



Ri=+1.0
(Stable Case)
最適周速比4.0



最適周速比:発電効率を考
える上で重要となる風車翼
の先端速度と風速の比

種々の大気安定度を考慮した風車ウエイクシミュレーション

✓流入気流が有する乱流と、風車ウエイクが形成する乱流がお互いに強く干渉している。

✓特に不安定時ではその影響が顕著である。

✓不安定時では、地面から上昇気流と風車ウエイクが干渉し、風車ウエイク領域が上方に持ち上げられている。

これらの知見を一般化できたら、
気象学的アプローチへフィードバックする。

風車のものづくりの観点

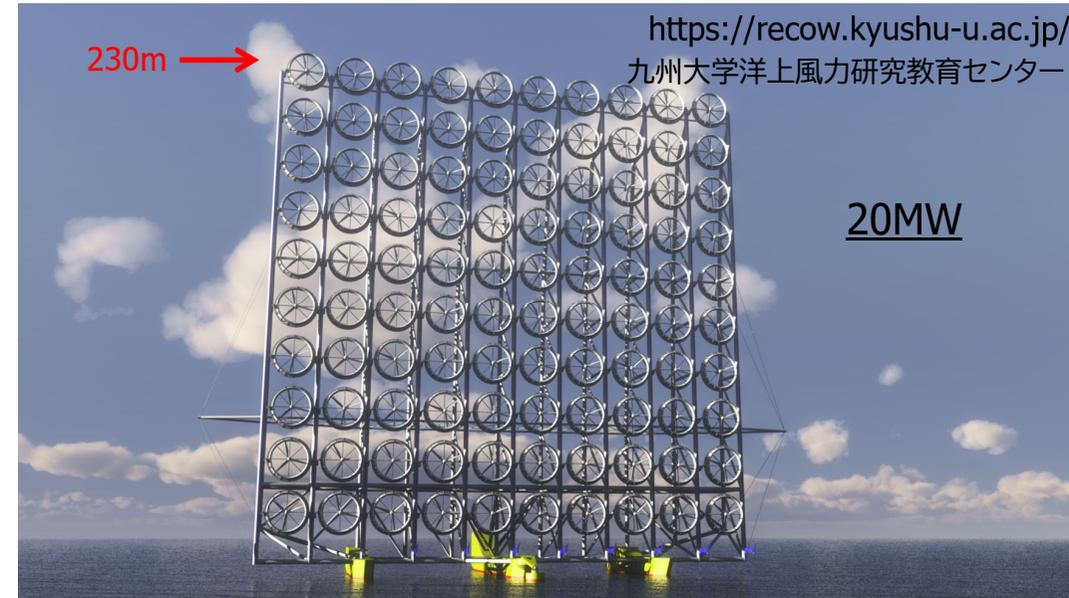


内田ら(2024)

豪雨制御



大規模洋上ウィンドファーム
Large-scale offshore wind farm



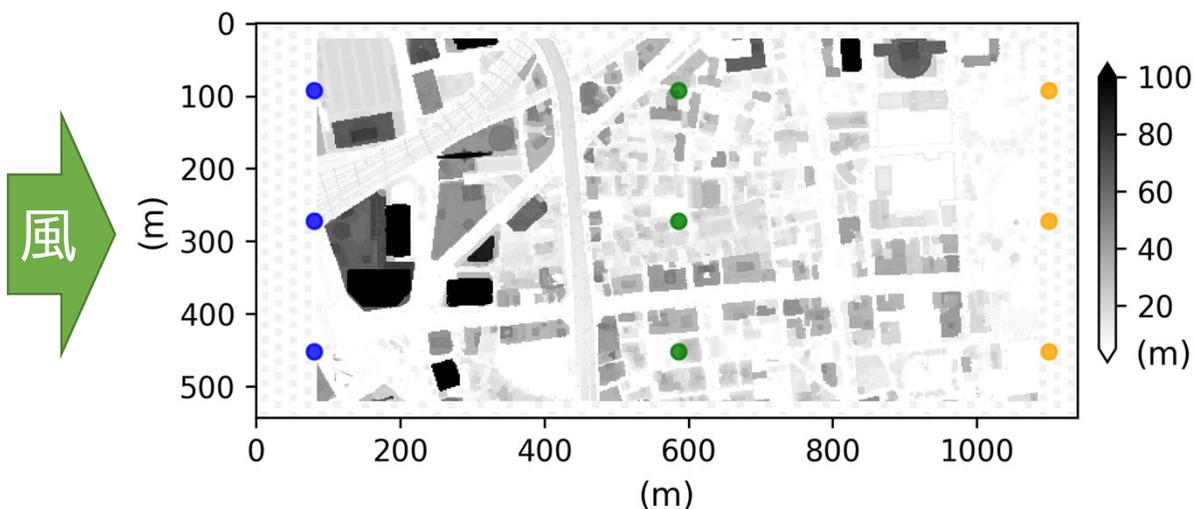
浮体式クラスタレンズ風車
Floating cluster wind lens turbine

風車や増風機で都市の排熱を抑制

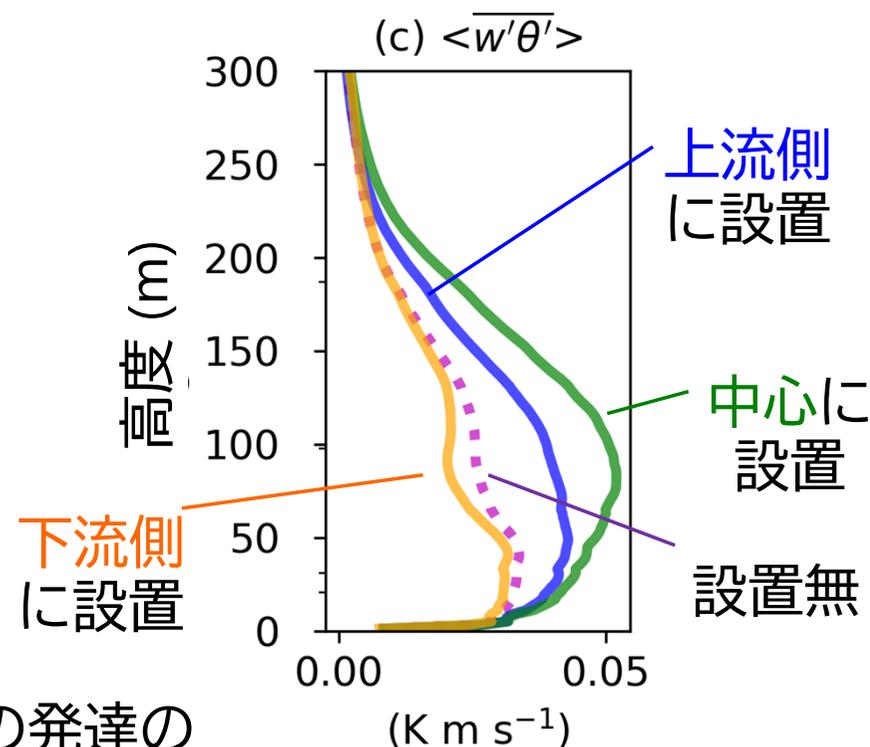


丹治・竹見(2024) 豪雨制御

上流側、中心、下流側の3通りの位置で風車を置くと、都市からの熱の運ばれ方がどう変わる？

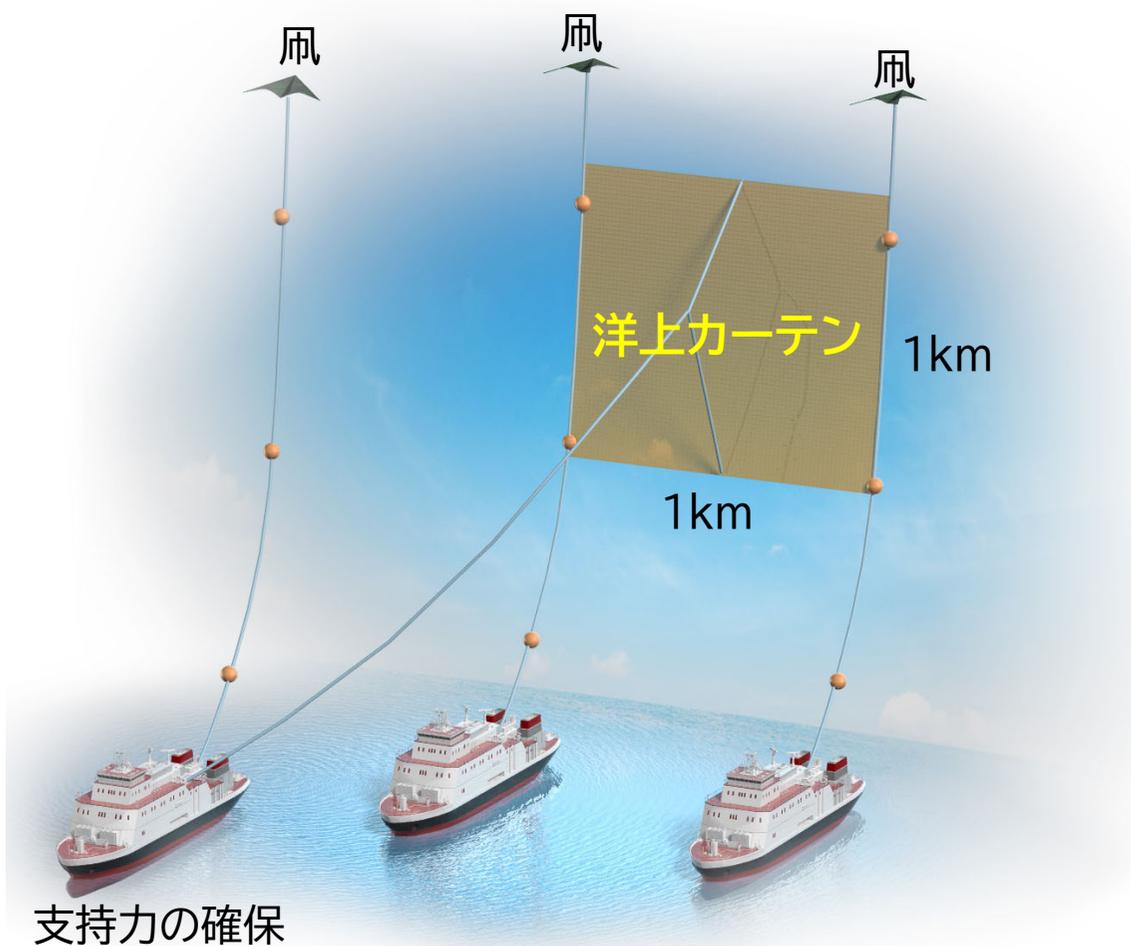


上向きの熱の輸送量



設置位置を工夫することで、積乱雲の発達の根っこの熱輸送を抑制できる

操作手法② 洋上カーテン



ねらい

海からの豊富な
水蒸気流入を抑制

雨の源

→ 豪雨を抑制



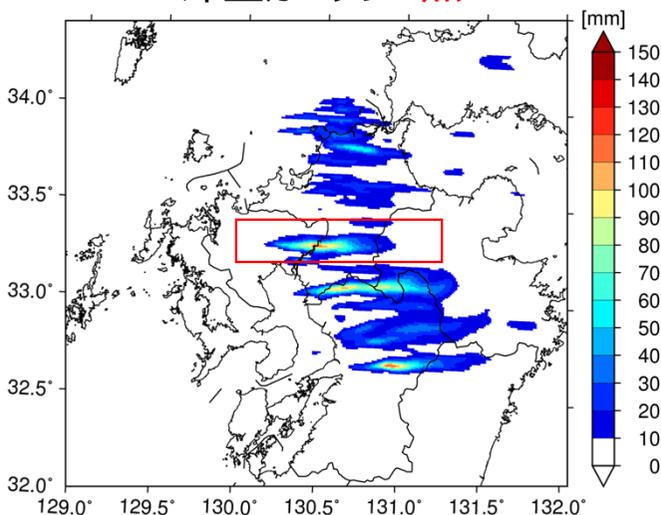
洋上カーテンによる水蒸気流入の操作



山口・西村^将・中北(2024) 豪雨制御

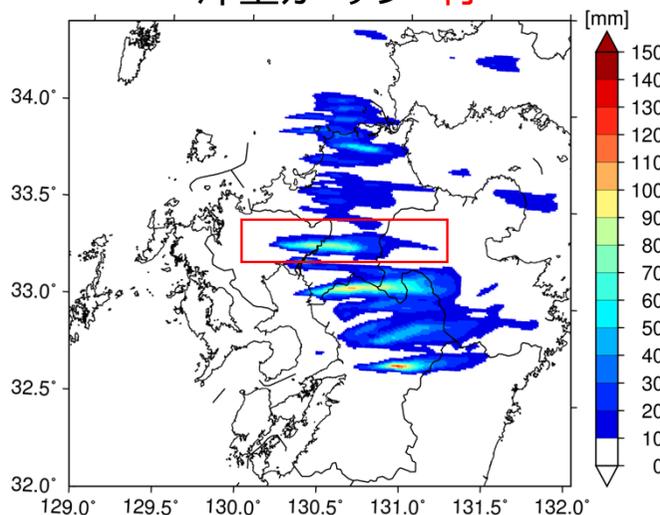
2017年九州北部豪雨事例のある時間帯 3時間積算雨量の比較

洋上カーテン 無



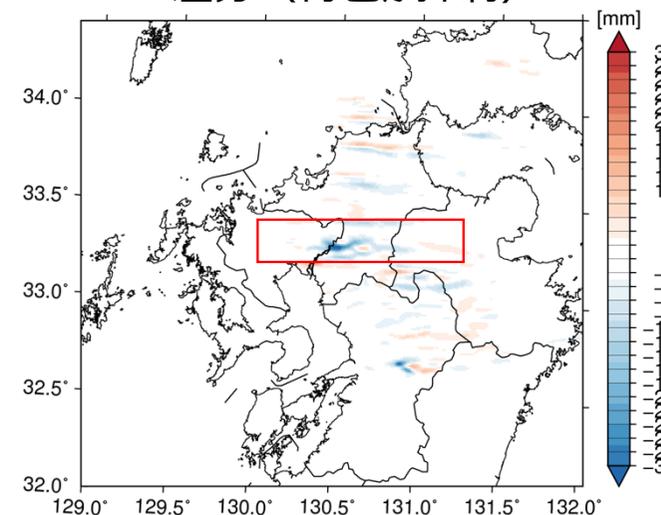
115mm/3h

洋上カーテン 有



75mm/3h

差分 (青色が抑制)



34%抑制

- 対象とした線状対流系豪雨は、多くの地点において雨量を抑制した（ただし、風下側の雨量がやや増加）
- 線状対流系の雨量分布の形状を変化させるものではない。
- 今回の対象ではない周囲の雨量も幾分か（+にも-にも）変化させている

洋上カーテンによる水蒸気流入の操作

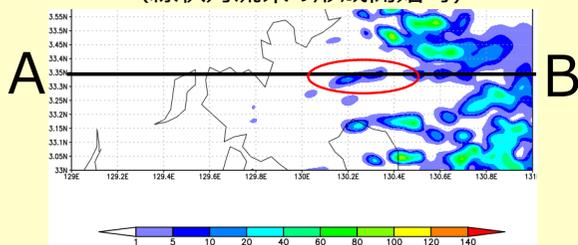


山口・西村^将・中北(2024) 豪雨制御

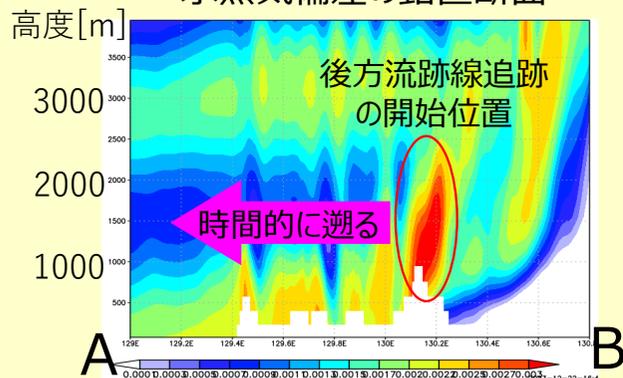
水蒸気流入経路の特定

村瀬ら(2023)による後方流跡線追跡手法を使用

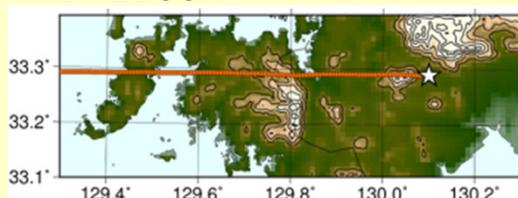
降雨強度分布
(線状対流系の形成開始時)



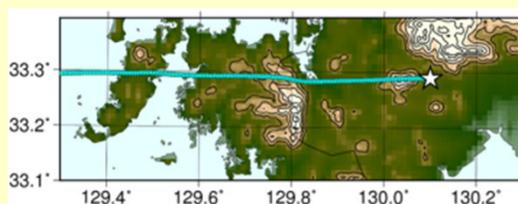
水蒸気偏差の鉛直断面



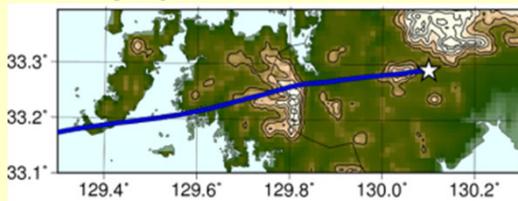
z=2100m



z=1450m



z=820m



決定した設置位置

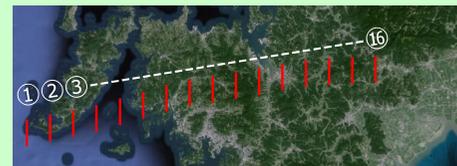
上層 z=1860-2750m



中層 z=1250-2080m



下層 z=650-1450m



3(高度)×16(東西)
=48ケース

洋上カーテンによる水蒸気流入の操作



山口・西村^将・中北(2024) 豪雨制御

雨水混合比の3次元分布

洋上カーテン 無



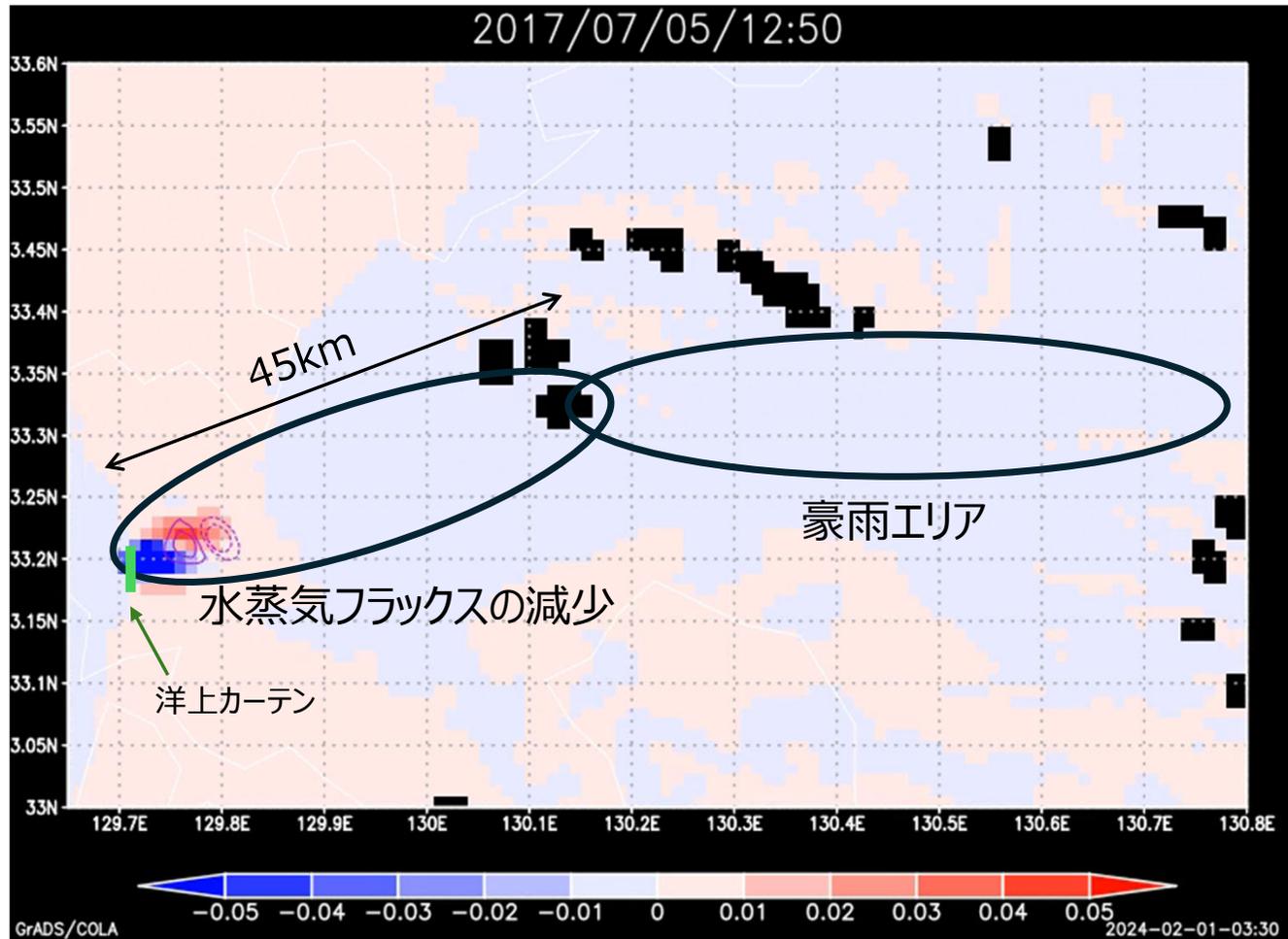
洋上カーテン 有



- 線状対流系（システム）として、全体構造を大きく変化させるものではない。
- システム内部の一つ一つの降水セルの位置や強度が変化している。

操作なし実験に対する水蒸気フラックスの変化

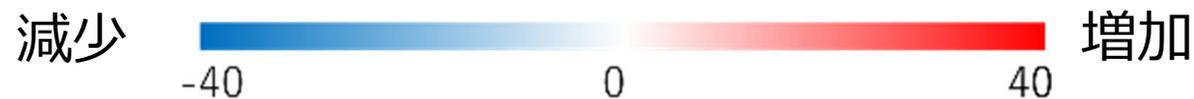
山口・西村将・中北(2024) 豪雨制御



洋上カーテンの設置位置に関する感度実験

3時間積算雨量の領域**最大値**の変化 [mm]

	西 (豪雨発生位置から70km)								東 (豪雨発生位置)							
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯
上層	-17.1622	-14.5011	-23.8602	-25.4166	-11.8903	4.837502	-5.24031	10.87362	-4.01608	-20.4708	-10.643	-1.1653	-17.738	-10.6014	-14.4651	-20.9154
中層	-27.1097	-10.9045	-34.0444	-3.20303	-4.31136	6.466515	11.96919	6.54493	-24.6367	-16.6432	-17.3061	-14.1804	-0.92619	-5.58431	-6.98702	13.54086
下層	-20.0353	-31.8007	-4.63947	-10.351	-31.4101	-33.9706	-21.8439	-26.9463	-39.1679	-31.6042	-35.3318	19.19234	-1.58507	-16.9647	-3.49049	-15.7192



- 48ケースの平均：-13%(減少)。
- 変化の幅は、**-34%(減少)**～+16%(増加)。
- 層別平均は、上層：-10%、中層：-7%、**下層：-17%**
- 豪雨発生位置に近い方が影響が大きいと思いきや、そうでもない。

洋上カーテンの設置位置に関する感度実験

山口・西村 将・中北(2024) 豪雨制御



3時間積算雨量の領域**平均値**の変化 [mm]

西 (豪雨発生位置から70km)

東 (豪雨発生位置)

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯
上層	-1.11092	-3.55E-02	-0.68171	-0.67427	1.241879	1.35038	2.431362	2.400135	1.438826	1.923969	-0.32805	0.108225	-0.82196	-0.75106	-1.10216	-1.41585
中層	-0.75397	-8.21E-02	-0.34053	1.23704	2.121058	1.960934	2.386541	1.793095	0.479063	0.557575	-0.78163	-0.37073	0.306215	-3.72E-02	-0.89182	0.383259
下層	-1.16011	-2.38514	1.702805	-0.64824	-0.92307	-1.46884	-0.89397	-2.67047	-2.69957	-0.94496	-4.40291	-0.53389	-0.70199	-0.66577	1.68E-02	-1.21275

減少

-2.5

0

2.5

増加

- 変化の幅は、**-21%(減少)**~+11%(増加)。
- 層別平均は、上層：-1%、中層：-2%、**下層：-6%**
- 領域最大値だけでなく、領域平均値でも減少パターンが見られたことは意義が大きい。(28/48ケース)

洋上カーテンの工学的アプローチ

板倉(in preparation) 豪雨制御



トヨタ自動車のマザーシッププロジェクトと連携



- 姿勢制御技術の改良
- カイトに関して、様々な条件下(強風、凧、夜間)で長時間(12h)の飛行実験成功

操作手法③ クラウドシーディング

クラウドシーディング:雲の種まき



ねらい

降水粒子形成を変化させて、
雨雲全体の形成を抑制

→ 一つの雨雲が一時的に
強くなったとしても、その後
の線状降水帯全体として抑
制



クラウドシーディングによる抑制シミュレーション

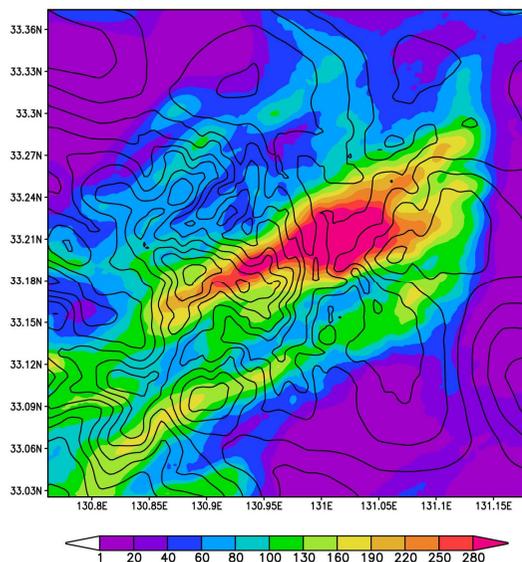


鈴木ら(in preparation) 豪雨制御

21時間積算降水量(mm)の比較

平成21年7月中国・九州北部豪雨

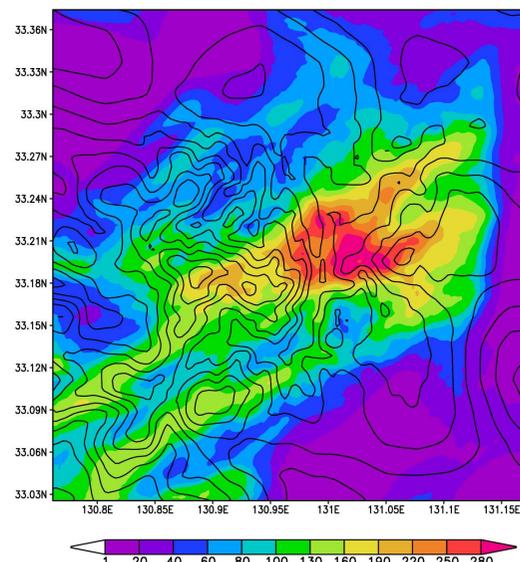
操作無し



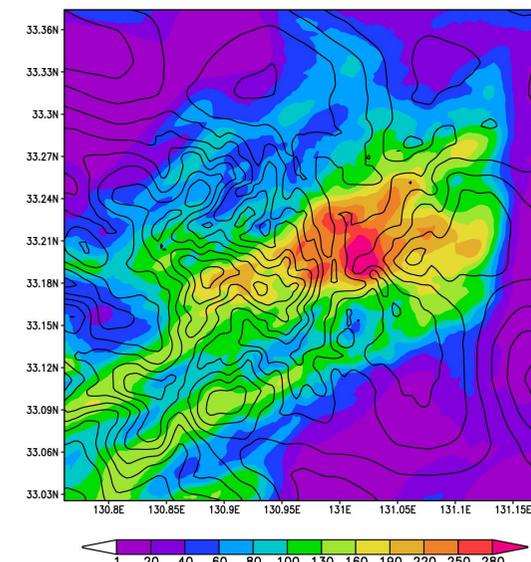
シーディング
操作



氷晶核数 10^5 倍



氷晶核数 10^9 倍



時間積算降水量が190mm以上の領域（オレンジ色以上）が減少

- 場所によって6~18%の抑制効果。
- 領域積分するとほぼ変化無し。

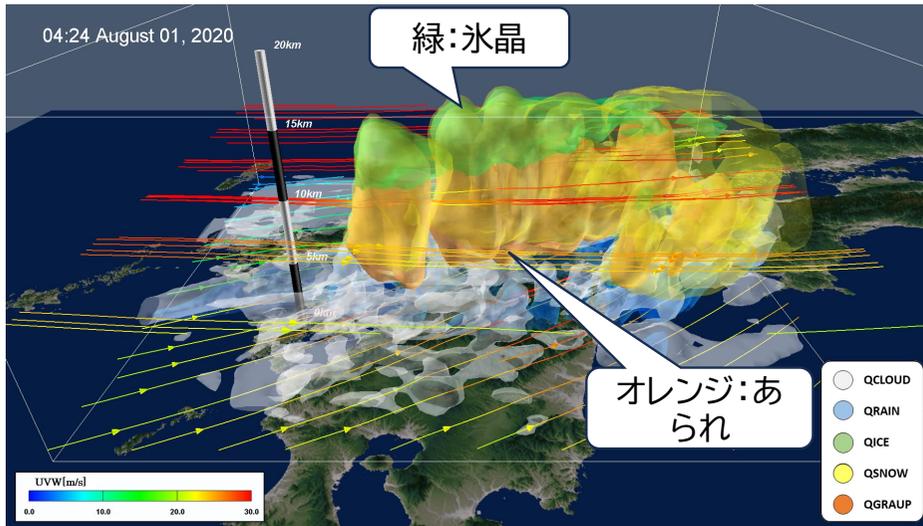
⇒空間的な分散

抑制メカニズム

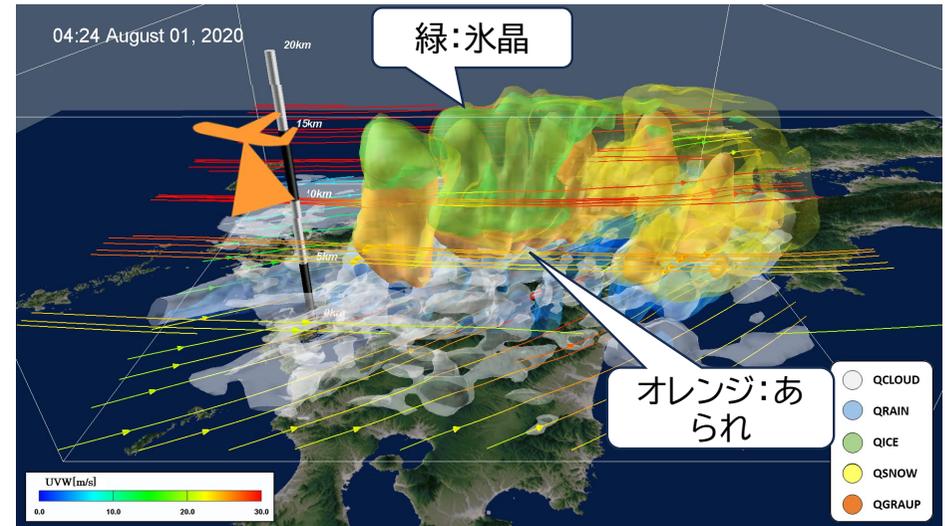


鈴木ら(in preparation) 豪雨制御

クラウドシーディング: **無し**



クラウドシーディング: **有り**



- 小さな粒の氷晶が作られすぎて、一粒あたりの水蒸気供給量が減った。
- 風上側の霰生成が下降流を生み、次の雲の上昇流とぶつかった。
- 下流側へと雨域が分散した。



計算条件

主な進捗と研究成果【気象学的アプローチ③クラウドシーディング】

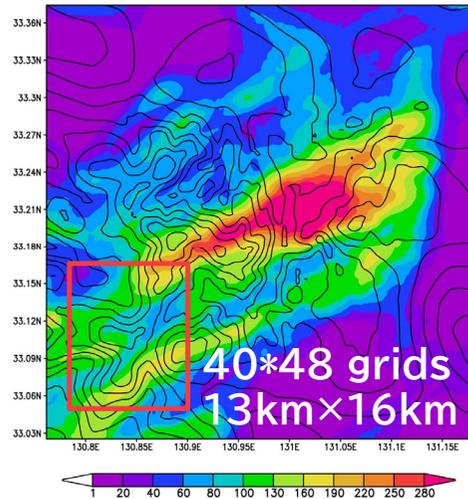
シーディングの表現方法

氷晶核の数濃度に操作倍率をかけることで間接的に表現
→先行研究を参考に 10^5 倍、 10^9 倍の2パターン

平成21年7月中国・九州北部豪雨
WRF-ARWとSCALE-RMで検証

シーディング実施領域

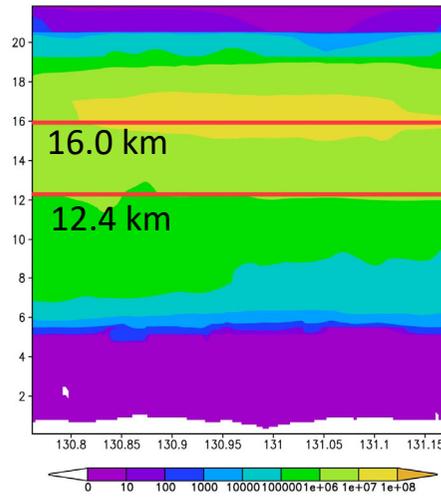
降水量が多い領域の風上側



21時間積算降水量(mm)

シーディング実施高度

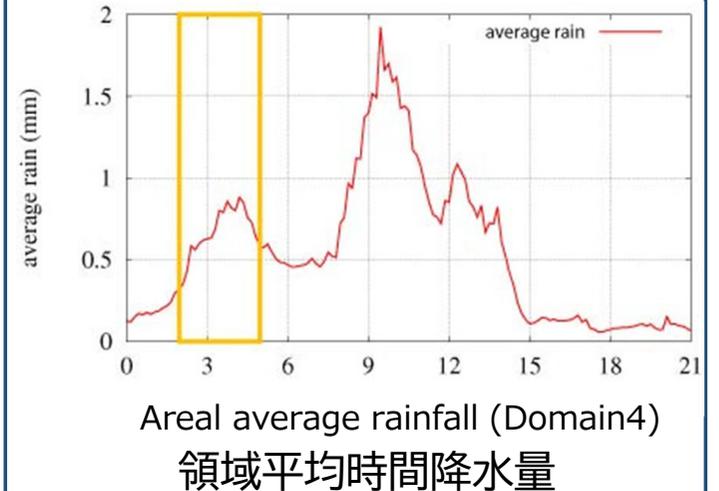
氷晶数濃度が大きい高度



氷晶の数濃度(num/kg)

シーディング実施時間

降水量が増加する直前の180分間



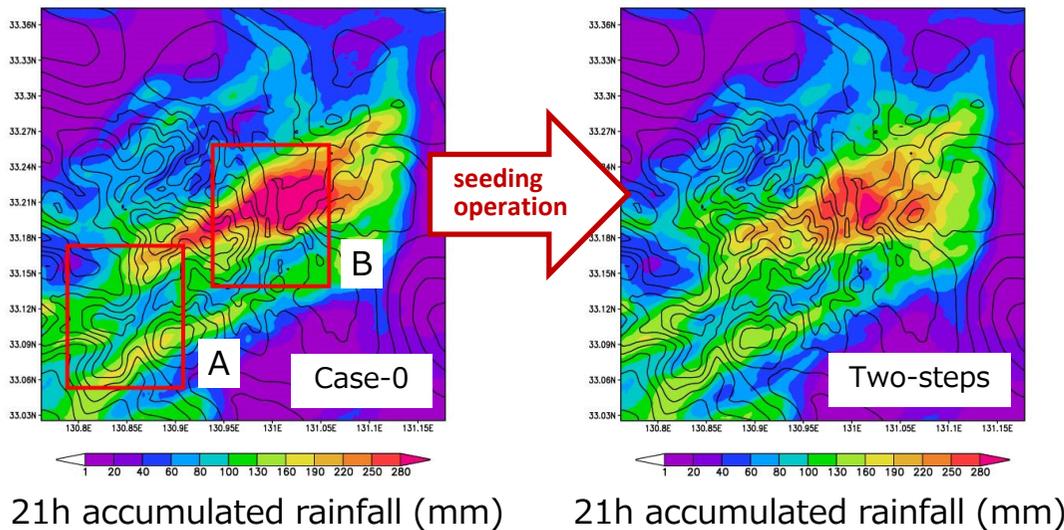
2段階シーディング



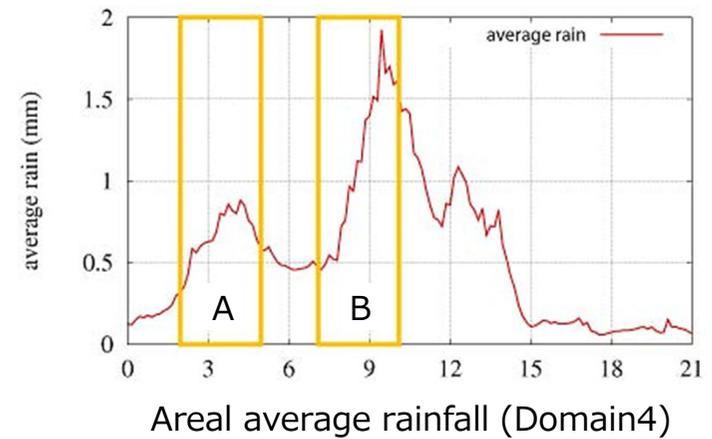
鈴木ら(in preparation) 豪雨制御

2段階シーディング

- ✓ 操作領域：(A)線状対流系のLeading edgeの発生域と (B)降雨ピークの発達域
- ✓ 操作時間：3時間



2段階シーディング操作の時間帯



◆ 操作なし実験と比較した雨量の変化

	1段階のみ	2段階
時間積算の空間最大	-9.03	-18.98
領域積算の時間最大	-12.86	-11.43
時間・空間平均	-0.49	-0.62

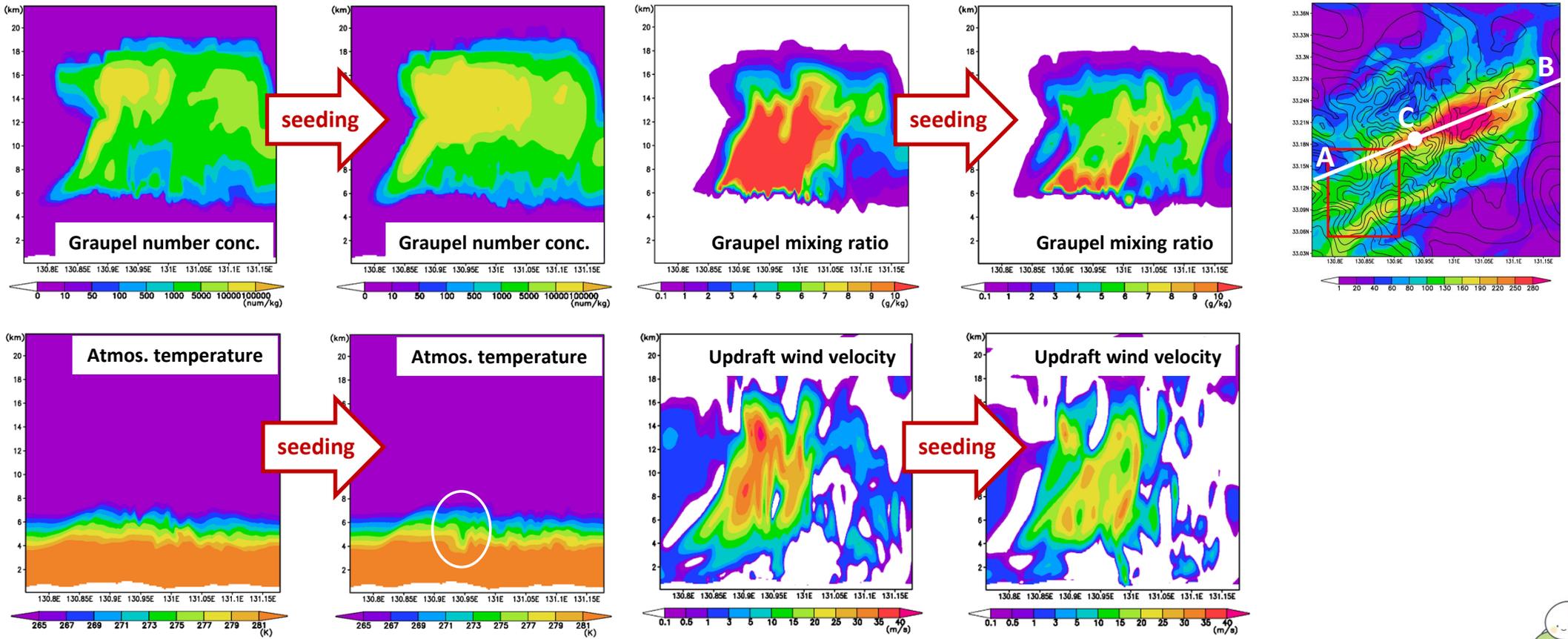


2段階シーディング



鈴木ら(in preparation) 豪雨制御

抑制メカニズム: 1段階目(発生期)における降水粒子落下に伴う上昇流の抑制
2段階目(発達期)におけるオーバーシーディングによる競合的成長と蒸発による冷却効果



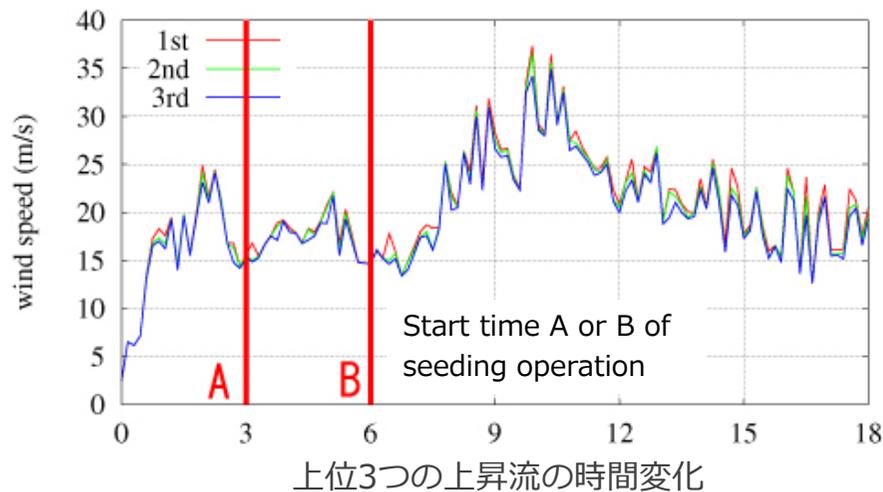
ピンポイントシーディング



鈴木ら(in preparation) 豪雨制御

ピンポイントシーディング

- ✓ 面的ではなく、強い上昇流を対象としたピンポイント位置(水平位置)の操作
- ✓ 上位3つの強い上昇流グリッドを対象
- ✓ ただし、高さ方向には広がりを持つ(右図)
- ✓ 氷晶数濃度の操作倍率: $\times 10^9$



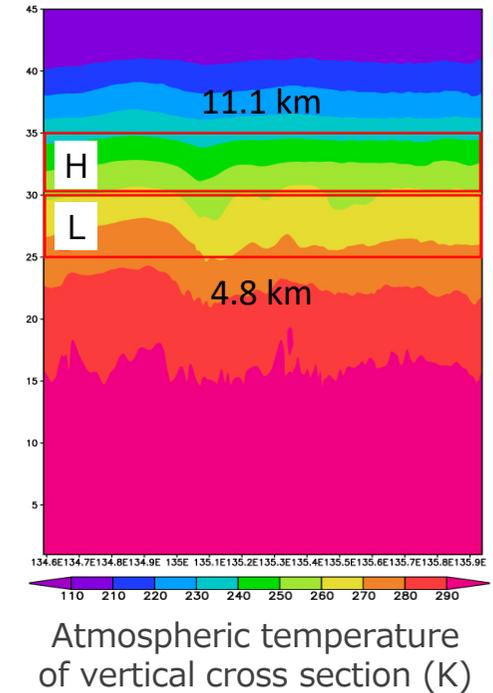
操作高度

- ✓ Altitude blow -4°C with some cloud water
- ✓ **Low layer (L) : 25-30** (4.8 to 7.8 km)
- ✓ **High layer (H) : 31-35** (8.5 to 11.1km)

操作期間

- ✓ 毎9分ごとに、合計 360, 180, 60 分間の3パターン

- With no seeding operation (CTRL)
⇒ Case-0
- With seeding operation
⇒ Case-(start time)-(duration)-(altitude)



ピンポイントシーディング



鈴木ら(in preparation) 豪雨制御

◆ Rate of change of rainfall from Case-0 (%)

操作開始時刻と 操作高度		操作期間 360 min			操作期間 180 min			操作期間 60 min		
		時間積算の 空間最大	時間・空 間平均	領域積算の 時間最大	時間積算の 空間最大	時間・空 間平均	領域積算の 時間最大	時間積算の 空間最大	時間・空 間平均	領域積算の 時間最大
A+B (3h&6h)	H+L	-12.80	-1.94	-11.40	-8.92	-1.18	-8.31	-5.56	-1.19	-5.99
	H	-1.11	1.88	-0.26	-6.29	1.78	1.92	-3.60	0.85	-5.79
	L	-16.53	-2.29	-14.30	-6.27	-1.47	-12.52	-5.83	-2.34	-5.79
A (3h)	H+L	-14.08	-0.73	-8.29	-9.83	-0.76	-5.92	-6.03	-1.86	-4.35
	H	-4.18	0.85	-1.30	-1.32	0.55	1.60	-5.54	0.68	-1.38
	L	-11.39	-1.34	-12.73	-5.46	-2.79	-9.58	-6.51	-2.18	-5.54
B (6h)	H+L	0.02	-1.02	1.44	-1.49	-1.18	1.39	3.20	-0.23	2.39
	H	-2.60	-1.36	2.24	-1.93	-0.84	2.24	4.10	-0.18	2.20
	L	2.66	-1.63	2.00	-1.16	-0.32	1.98	-5.77	-0.73	2.30

操作期間が長いほど、操作開始時刻が早いほど、操作高度が低いものを含むと、抑制効果大きい。
最大で、**21時間積算雨量の空間最大値を16%抑制**(ただし、やはり平均雨量としては2%のみの抑制)



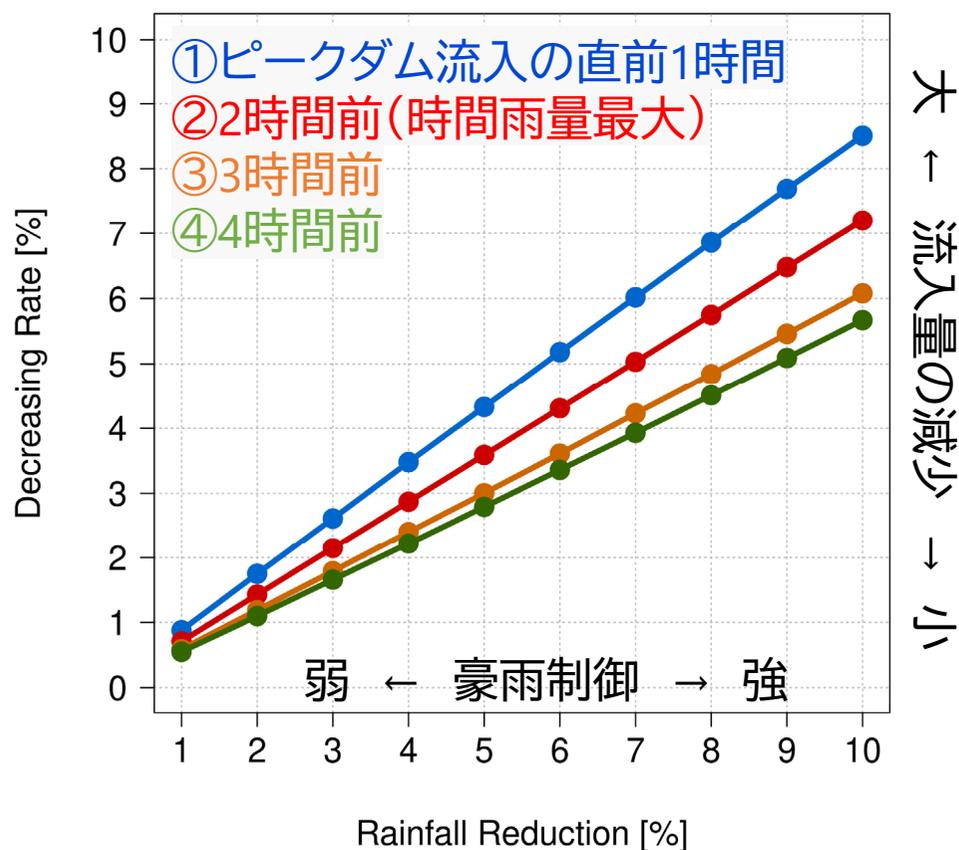
豪雨制御と洪水氾濫の連携から見た制御技術開発要件へのフィードバック

萬ら(in preparation)



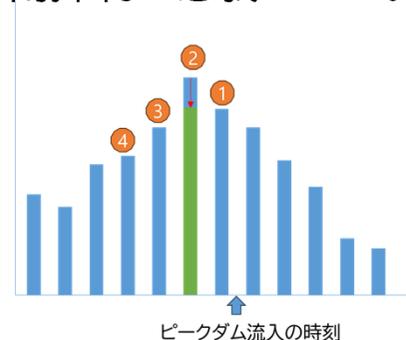
豪雨制御

Decreasing Rate of Peak Discharge



- ピークダム流入量をもっとも低減させられるのは、最大時間雨量となる1時間よりも、ピークダム流入の直前1時間の豪雨を制御した場合であった。
- 流出応答特性が時間帯によって異なっているという事実。
- より早い時間に豪雨制御すると、ピークダム流入量の低減効果は小さくなる。

⇒ピークダム流入量を河川流量と見立てると、洪水氾濫を防ぐ観点からは、雨量のピークを過ぎた後でも豪雨抑制の意義がある。



抑制シミュレーションの現状 まとめ

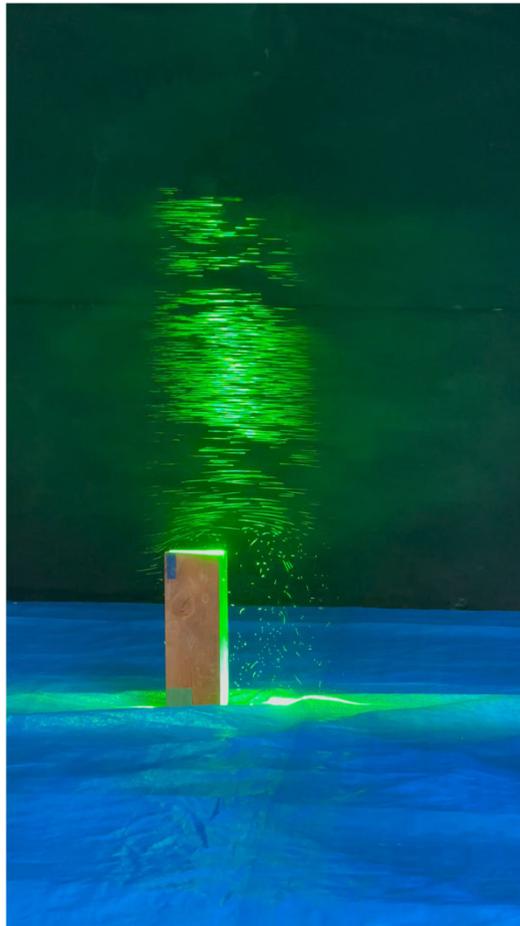


豪雨制御

- 風車(ゲリラ豪雨事例で検証)
 - ✓ そのままの雨域形状のままで雨量を17%抑制。
 - ✓ 時間を数分程度遅らせる効果(避難時間の確保)。
 - ✓ 複数場所に設置すると相乗効果がありそう。
- 洋上カーテン(線状対流系事例で検証)
 - ✓ ほぼ同様の雨域形状のままで流域雨量を20%抑制。強雨域を30%抑制。
 - ✓ 風下側にやや流されることで、雨量が増加した場所もあった。
 - ✓ 雨域から離れた場所で最大の効果を示した。(カオス制御の可能性)
 - ✓ 風車と比べると、少し操作位置が変わると変化傾向が変わる。
- クラウドシーディング(線状対流系事例で検証)
 - ✓ 強雨域を20%程度抑制。(空間的にも時間的にも“ならず”効果)
 - ✓ 流域雨量はほとんど変化しない

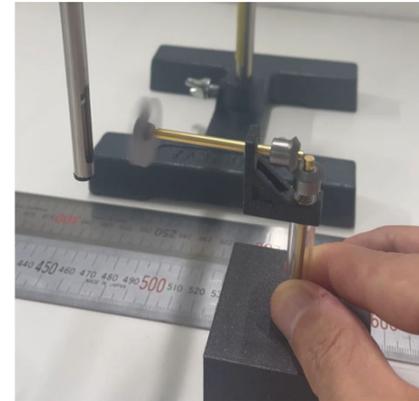
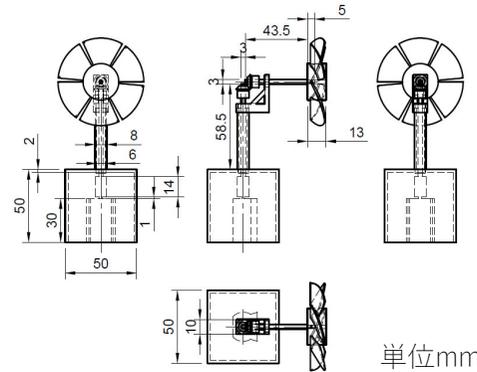


縮尺模型実験(風洞実験)



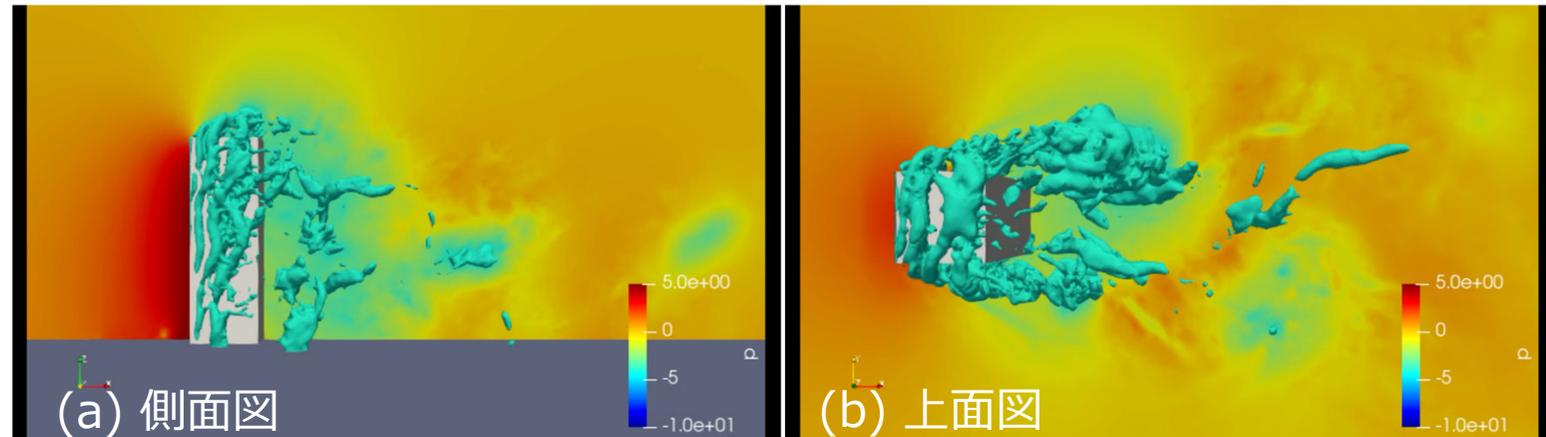
建物模型後流の流れの可視化

増風機模型の製作



デバイスからの距離 mm	風速 m/s
10	1.2
20	1.2
30	0.8
40	0.6

建物の後流シミュレーション(圧力の可視化)



縮尺模型実験(風洞実験)

西嶋ら(in preparation)





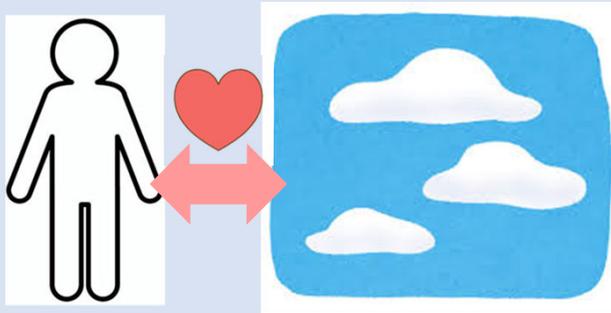
豪雨制御のあり方の構築に関する現状

豪雨制御によって変容する空との関係性



羽鳥ら(in preparation) 豪雨制御

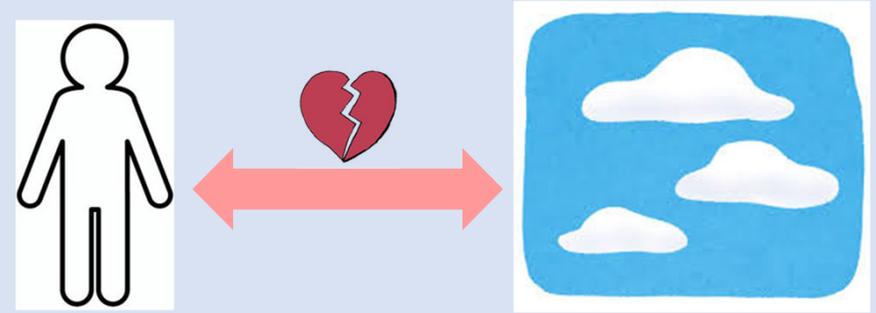
「近い空」の世界



制御技術を通じて、
空との関わり合いが強くなる

- 空や雨を身近に感じる、楽しむ
- 大雨が降りそうなら、被害が起きないように祈る、避難する

「遠い空」の世界



制御技術を通じて、
空との関わり合いが弱くなる

- 空や雨に鈍感になる、疎遠になる
- 大雨が降りそうなら、降らないようにコントロールする、避難しない

どっちの世界が“ハッピー”だろうか？



気象コモンズ思想



羽鳥ら(in preparation) 豪雨制御

「コモンズ(commons)」とは

「みんなのモノ = 自分たちのモノ」として大切に使ったり、
守ったりする方法や仕組み



自分のモノ



みんなのモノ



みんなのモノ
= 自分たちのモノ



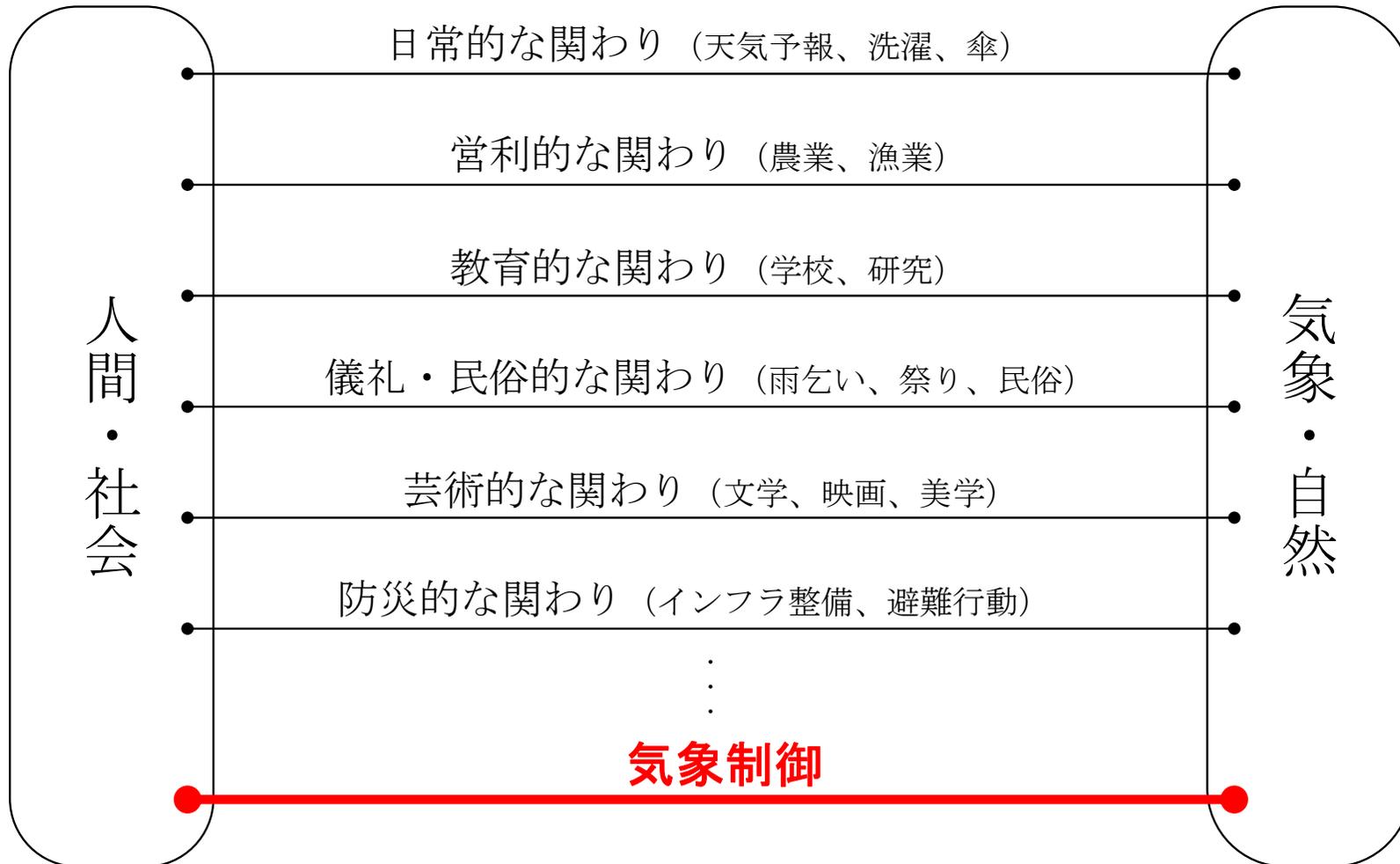
?



気象制御: 人と気象との新しいチャンネル



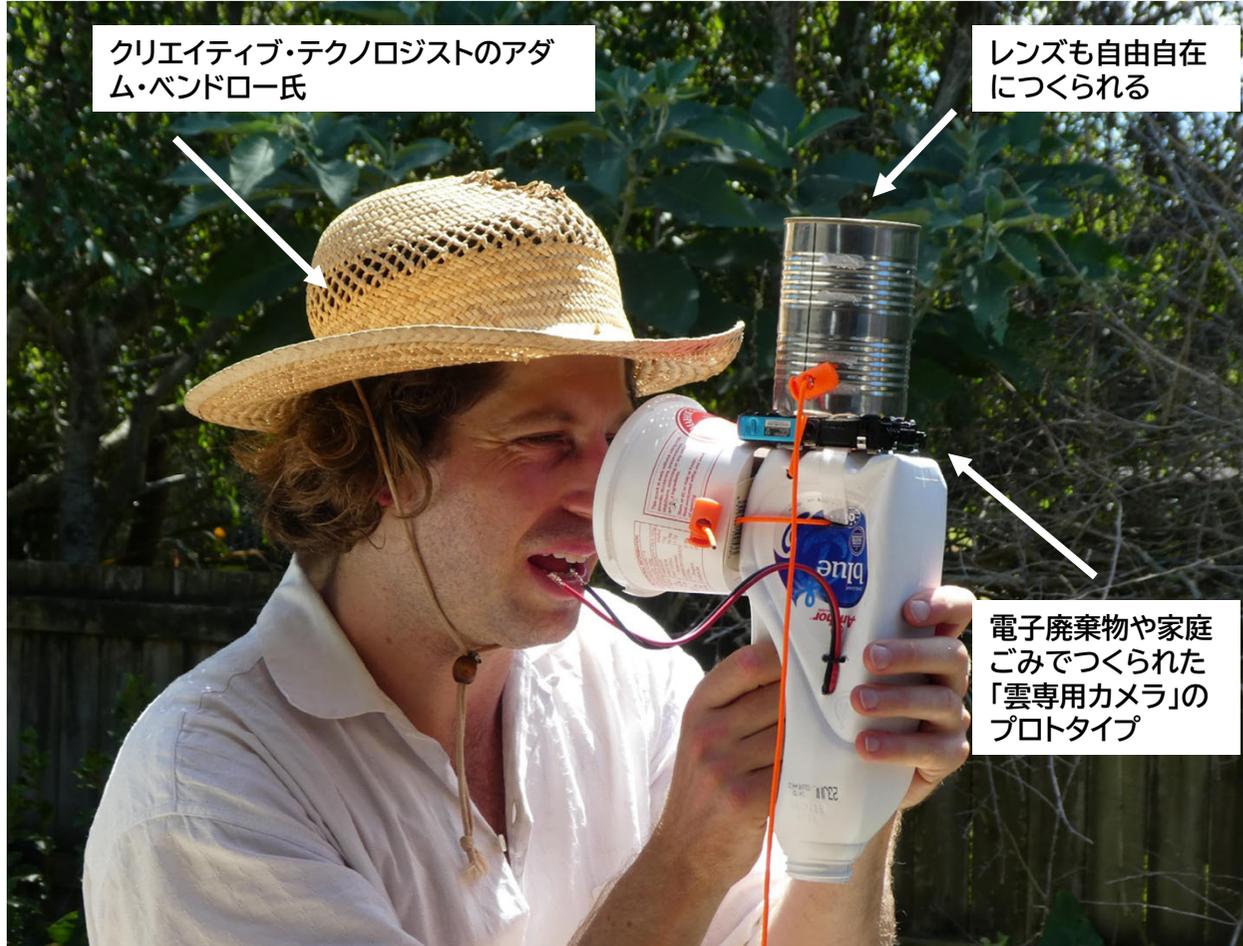
羽鳥ら(in preparation) 豪雨制御



空と、みんなと、仲良くなるための手作りの方法 例: Cloud Million Air (雲を味わえるためのカメラ)



Chris et al. (in preparation) 高雨制御



こんな「ハンテコなカメラ」だとともだちも思い出もたくさんできる！

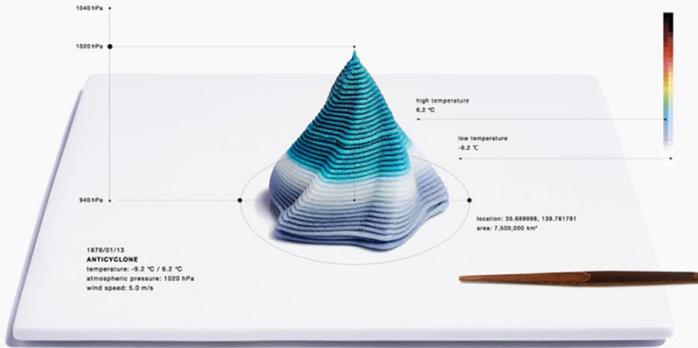


最新技術を通じた空を味わう方法 例:サイバー和菓子 (“気象まんじゅう”)

Konel Inc.(株式会社コネル)HPより引用



豪雨制御



サイバー
和菓子
Cyber Wagashi

ALGORITHM

独自アルゴリズムを開発

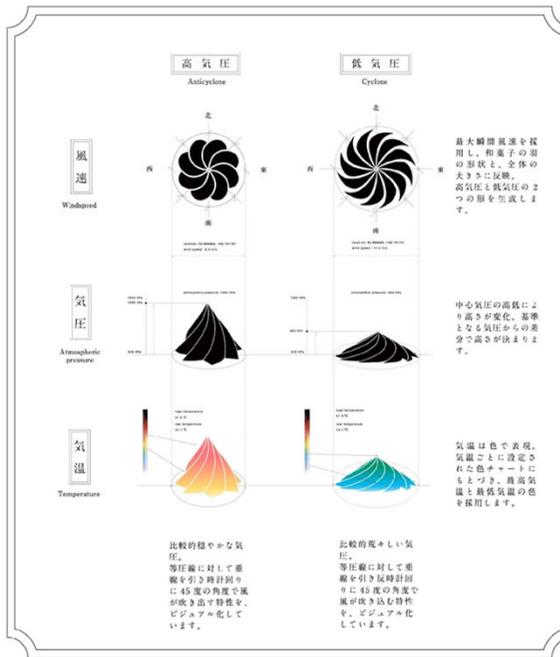
季節の移ろいは、日本の気候の積み重ねによって生じます。
全ては地球を回る風の流れによって起るひの自然現象です。

天候を決める大きな要素は、「風速」「気圧」「気温」。

その日の天候を直感的に和菓子から感じるデザインにこだわり、独自のアルゴリズムをつくりました。

たとえば、風の強い日は大きく荒々しく、暑い日は暖色系で、

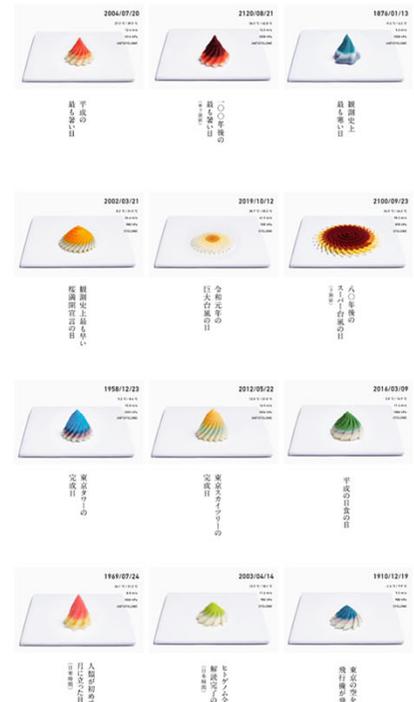
「高気圧」と「低気圧」の2種類を出力します。



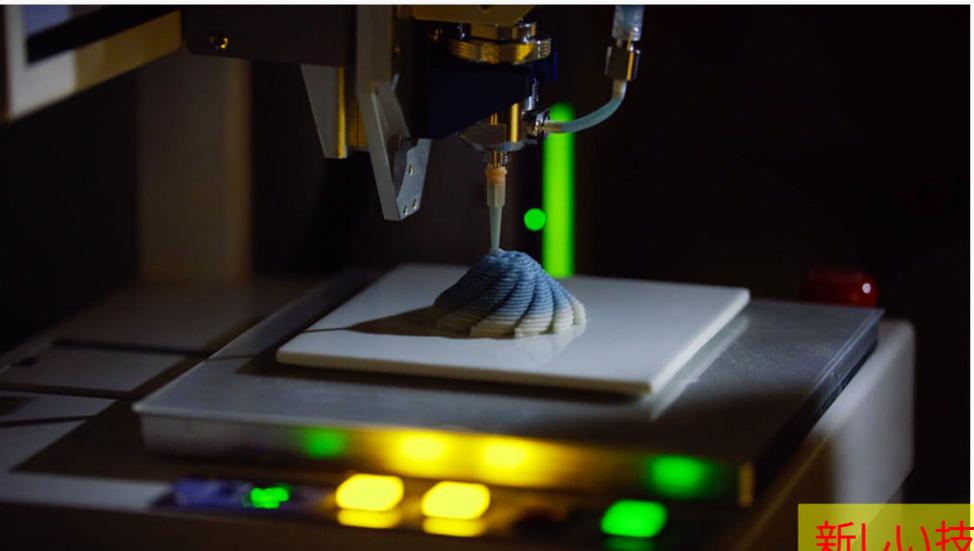
THE DAY

独自のアルゴリズムによって、現在の気象データから特定の「あの日」の気象データを生成することが可能です。
また過去の気象データから特定の気象を手探し、影にすることも可能です。
これが、アートが可能な新しい季節の感じ方です。

「あの日」
の和菓子。



新しい技術は、私たちと空との新たな関係を生み出す可能性もある！



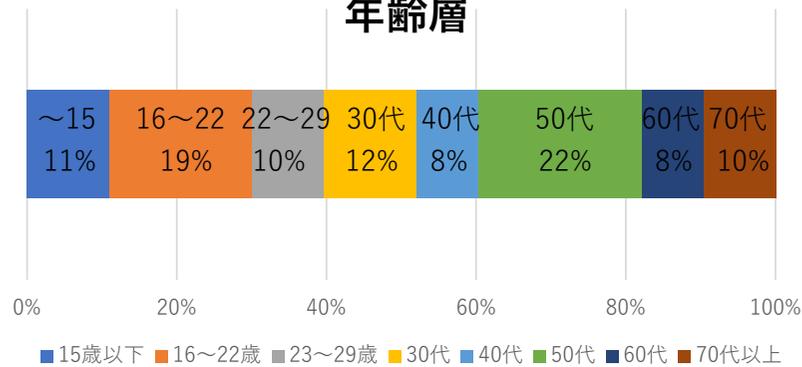
豪雨制御に関するアンケート



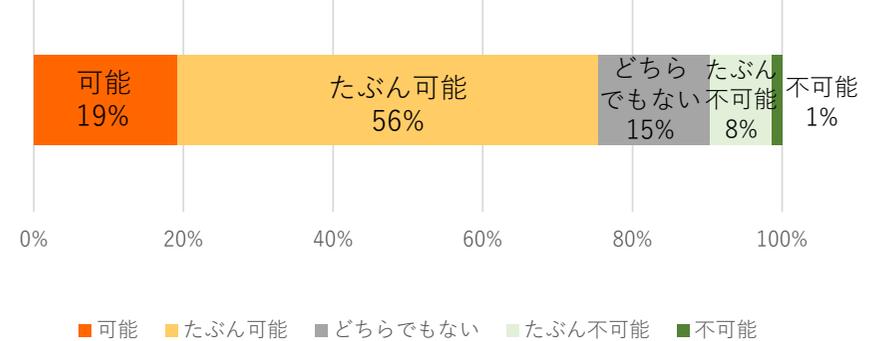
山口ら(in preparation) 豪雨制御

市民対話イベントの来場者を対象。豪雨制御の説明後にアンケートを実施、サンプル数:73

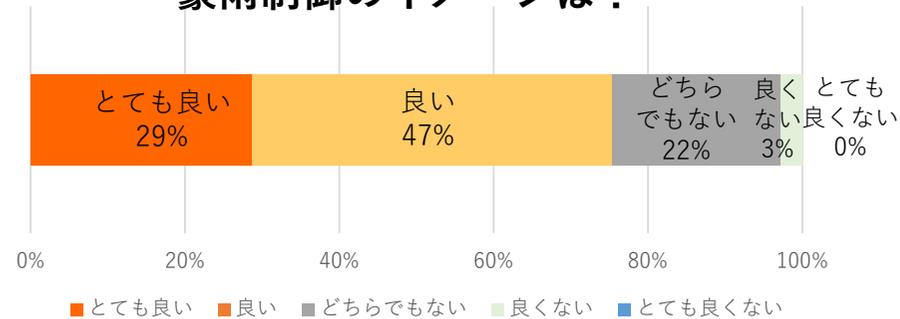
年齢層



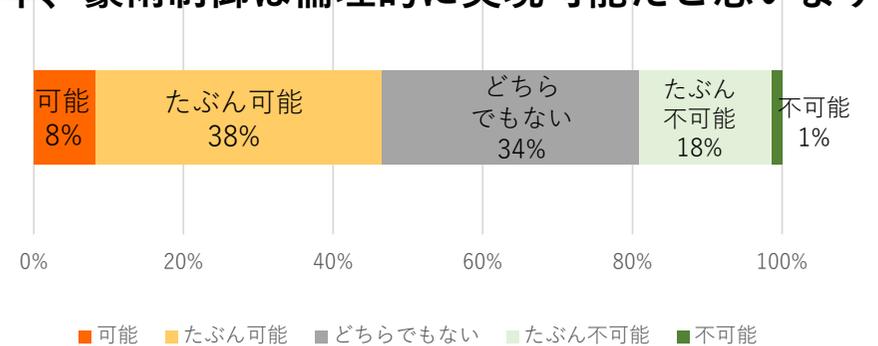
2050年、豪雨制御は技術的に実現可能だと思いますか？



豪雨制御のイメージは？



2050年、豪雨制御は倫理的に実現可能だと思いますか？



“制御”の言葉が意味するところ

- 豪雨を自由自在に操るような制御ではない。自然や豪雨に対して畏敬の念を抱きつつも、将来強まる豪雨から大災害の発生を抑えるための切り札として発動する制御。すわなち、“**自然の懐**”の範囲で**豪雨を治めること**を目指すことが重要であり、「**豪雨を鎮める**」ための技術として豪雨制御を位置づけたい。
- 一方で、自然の懐の範囲内においては、言葉通り制御していく手法を開発する。そのため、多段階・多時点・多手法の操作を適切に行い、例え**想定外のブレが起こったときにでもすぐに修正できる**ような制御手法を開発する。
- 目に見えない「**空の堤防・ダム**」→新しいワードがでてくるはず。

制御技術の必要性・価値

- **基本理念**：災害への人為的影響（近代化、都市開発）の軽減
「人間がやりすぎてきたことは自然の懐の範囲で人間が治療・修復すべき」
- **近年の状況変化**：
 - 地球温暖化による激甚災害の頻発（地域の脆弱性の増大）
 - 我が国の国力の減退、人口減少社会、流域治水、伝統的な治水技術の衰退→これまでの**防災対策（ハード整備・ソフト対策）の限界**
- **制御技術の位置づけ**：
人命を守るための「最後の一手」
（「第3の防災対策」「多様な防災メニューの中の1つのオプション」「究極の奥義」）
→「**豪雨制御したからといって避難しなくてよいとはならない（既存の防災対策が必要
ないとはならない、水害脆弱エリアで都市開発を進めてよいわけではない）**」
- **従来技術（ダム・河川整備など）と比べた気象制御の優位性**：
Adaptiveなシステム（影響が大きすぎるならば止めるという選択肢をもつ）、低コスト

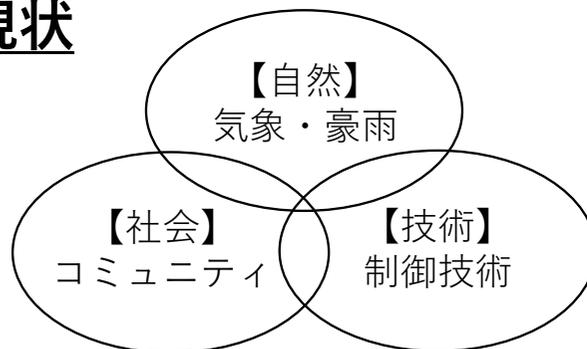
気象コモンズ(里宙)^{さとそら}



羽鳥ら(in preparation) 豪雨制御

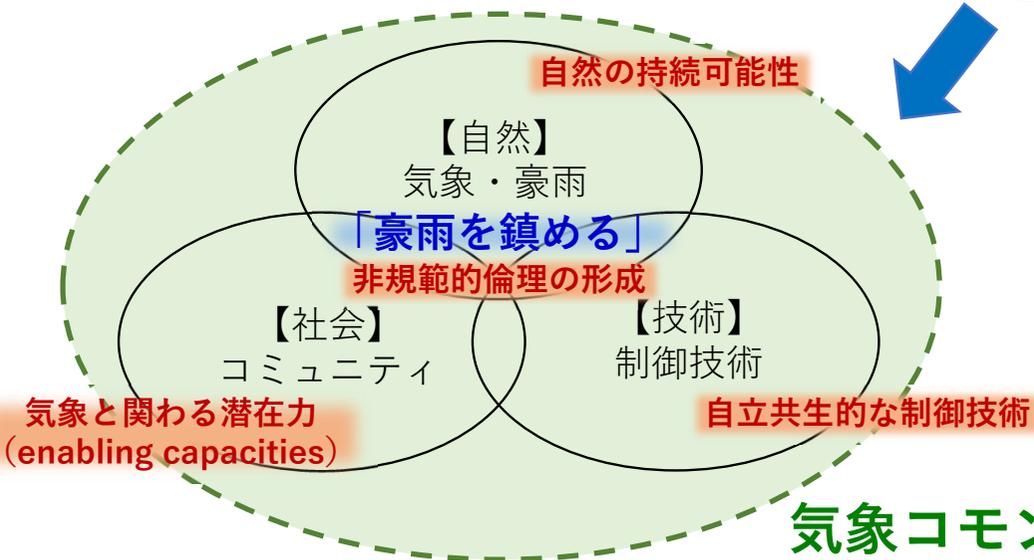
地域住民が新しい制御技術を通して気象資源を主体的に活用・保全しながら、豪雨と共に暮らしていくための協働のしくみを「**気象コモンズ(羽鳥, 2022)**」として捉える概念。“気象”は、「私」や「公」だけでなく、「共」のもの。

現状

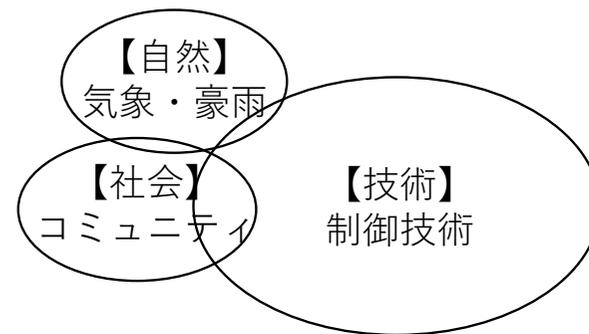


コンヴィヴィアリティ(conviviality): オーストリアの哲学者イヴァン・イリイチ(Ivan Illich, 1926年9月4日-2002年12月2日)が提唱した概念。彼は、科学技術が人々の“道具”として発達することにより、人々が“道具”に隷属し、自由を奪われる社会の到来に警鐘を鳴らし、それに代わる方途として、適切に制限された“道具”を用いることによって、一人ひとりが自律的かつ自由に生きる社会(=コンヴィヴィアルな社会)を提唱した。

自立共生社会



技術主義社会



- 生物学的退化
- 根元的独占
- 計画過剰
- 分極化
- 廃用化
- 欲求不満

気象コモンズ

大

制御技術のコンヴィヴィアリティ (自立共生性、イリイチ、1973)

小

“遠い空”のルール作り

高次レベルの検討・実践（行政、専門家）

開発段階

- ・ 技術開発、科学技術研究の推進
- ・ 法令整備、計画策定、国際ルール

社会実装（災害時）

- ・ 気象制御の意思決定
- ・ 防災対策の推進

順応的ガバナンス
（調整と学習）

日常的な気象との関わり合いを通じた
気象感覚（“sense of weather”）と
我が国の自然観に基づく非規範的倫理の形成
（Bellacasa, 2017）
→ “自然の懐”における気象制御の正統化

科学的・技術的知見に基づいた
地域レジリエンスの支援

レベル間の橋渡し（行政、市民、専門家）

開発段階

- ・ 科学知とローカル知の統合
→ “自然の懐”の範囲
- ・ 流域間のルールづくり
- ・ 受益圏と受苦圏の調整

ローカルレベルの検討・実践（流域住民）

開発段階

- ・ ローカル知の収集・醸成
- ・ 日常的な気象との関わり→倫理感の醸成
- ・ 条例・慣習づくり、地区防災計画

社会実装（災害時）

- ・ 気象制御の意思形成
- ・ 防災行動の実行

“近い空”のルール作り

ロゴマークの意味

豪雨と人が共に生きる制御を表現



横なぐりの雨を
ラインで表現

豪雨と人

抽象化

握手しているように
そして
包み込むように

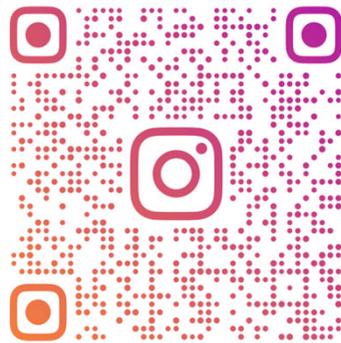
豪雨の色を薄くす
ることで、豪雨抑
制を表現



豪雨制御

ゲリラ豪雨・線状対流系豪雨と
共に生きる気象制御

キャラクター ふところん



FUTOCORON2050

- 人間は地球の片隅に住ませてもらっている
⇒ “自然の懐”
 - 日本には、自然と寄り添い、自然とともに生きている感覚を古来持っている。
 - 自然に対する恐れ、敬い。
(畏怖・畏敬)
- ⇒ 豪雨制御 → “豪雨を鎮める”



Heavy Rainfall Control

Heavy Rainfall Control for Living Together with
Isolated-Convective Rainstorm and Line-Shaped Rainbands

toward 2050



futocoron2050

#豪雨制御

#ふところん



ふところん

撮影：増田有俊氏