海上豪雨生成で実現する
集中豪雨被害から解放される未来

小槻 峻司
(shunji.kotsuki@chiba-u.jp)

千葉大学・国際高等研究基幹・教授

with many thanks to project members

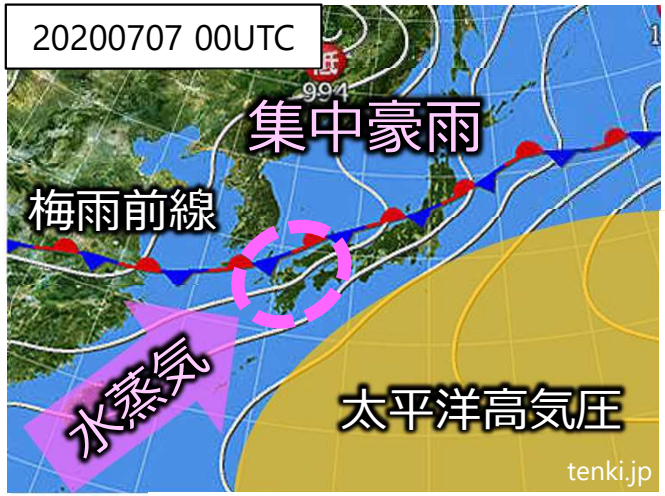
2023/10/29 ムーンショット目標8・公開シンポジウム

想定する集中豪雨 と 制御戦略

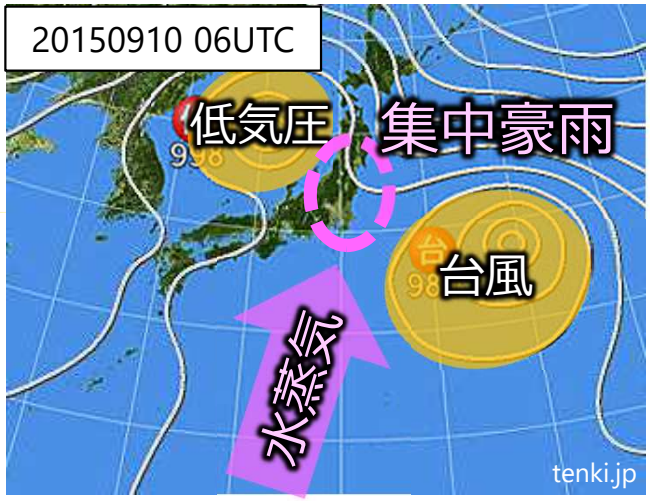
海上からの水蒸気供給が起こす豪雨が増加。上流の海上で豪雨を起こして、
大気中の水蒸気を大幅に減らすことが出来れば、豪雨被害を緩和できる。

海上からの水蒸気供給に起因する集中豪雨の例

令和2年7月豪雨
(被害5,800億円)



平成27年関東・東北豪雨
(被害2,940億円)



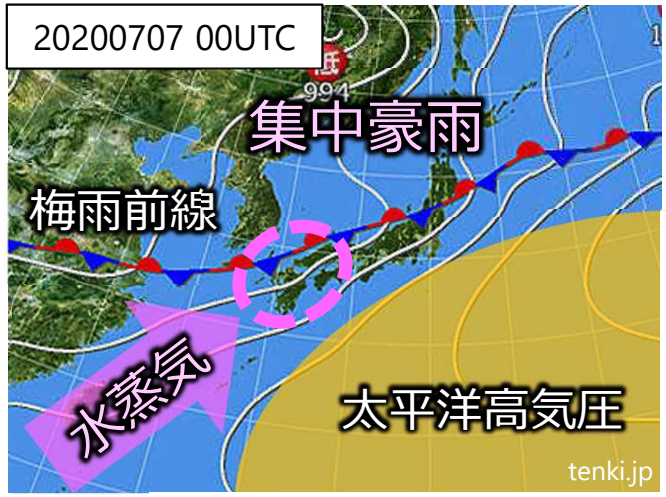
2023年 米国カリフォルニア豪雨
(被害 4兆円)

想定する集中豪雨 と 制御戦略

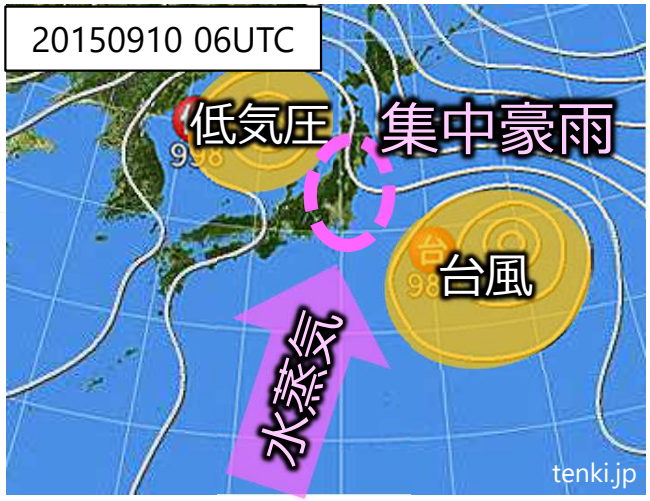
海上からの水蒸気供給が起こす豪雨が増加。上流の海上で豪雨を起こして、大気中の水蒸気を大幅に減らすことが出来れば、豪雨被害を緩和できる。

海上からの水蒸気供給に起因する集中豪雨の例

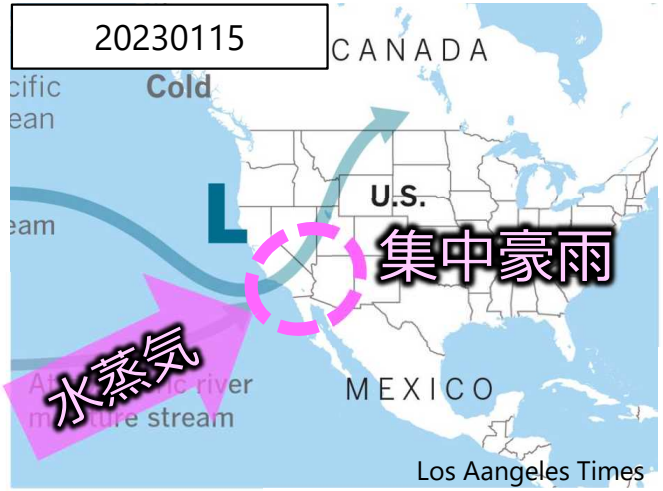
令和2年7月豪雨
(被害5,800億円)



平成27年関東・東北豪雨
(被害2,940億円)



2023年 米国カリフォルニア豪雨
(被害 4兆円)



集中豪雨制御の方法

△ 海からの蒸発を遮断する ➔ 環境負荷などクリアすべきハードルが高い

△ 大きな場の流れを変える ➔ 莫大なエネルギー、かつ、被害移転は社会受容困難

○ 上流の海上で降水として落下させて、大気中の水蒸気を大幅に減らす

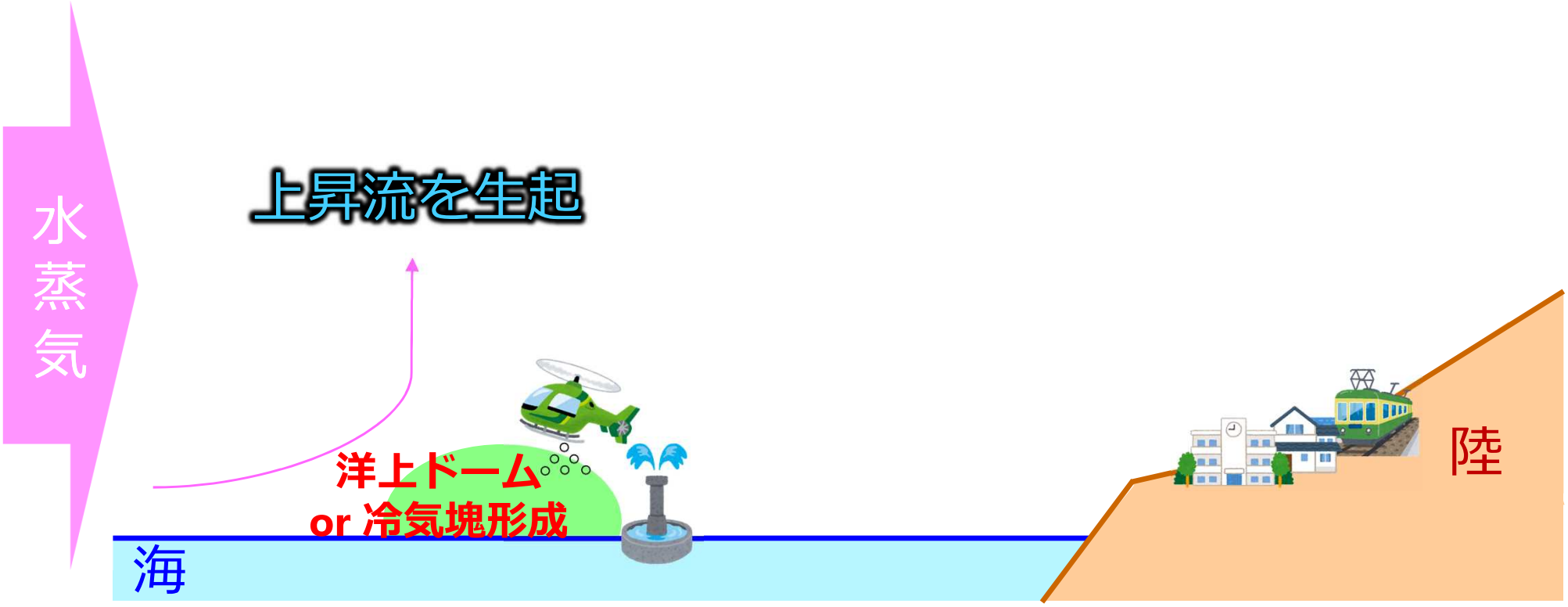
- 層状性のしとしと雨を生むシーディングのみでは水蒸気→雨の変換率は数%程度
- 本研究の戦略: 変換率>40% の 対流性降水 (積乱雲) の組織化＝豪雨 を生成する

海上豪雨の生成方法

海上の豪雨生成を、(1) 積乱雲を生起し、(2) 組織化することで実現

(1) 積乱雲を生起する = 自由対流高度まで空気塊を上昇させる

➔ 洋上ドーム・冷気塊で上昇させ

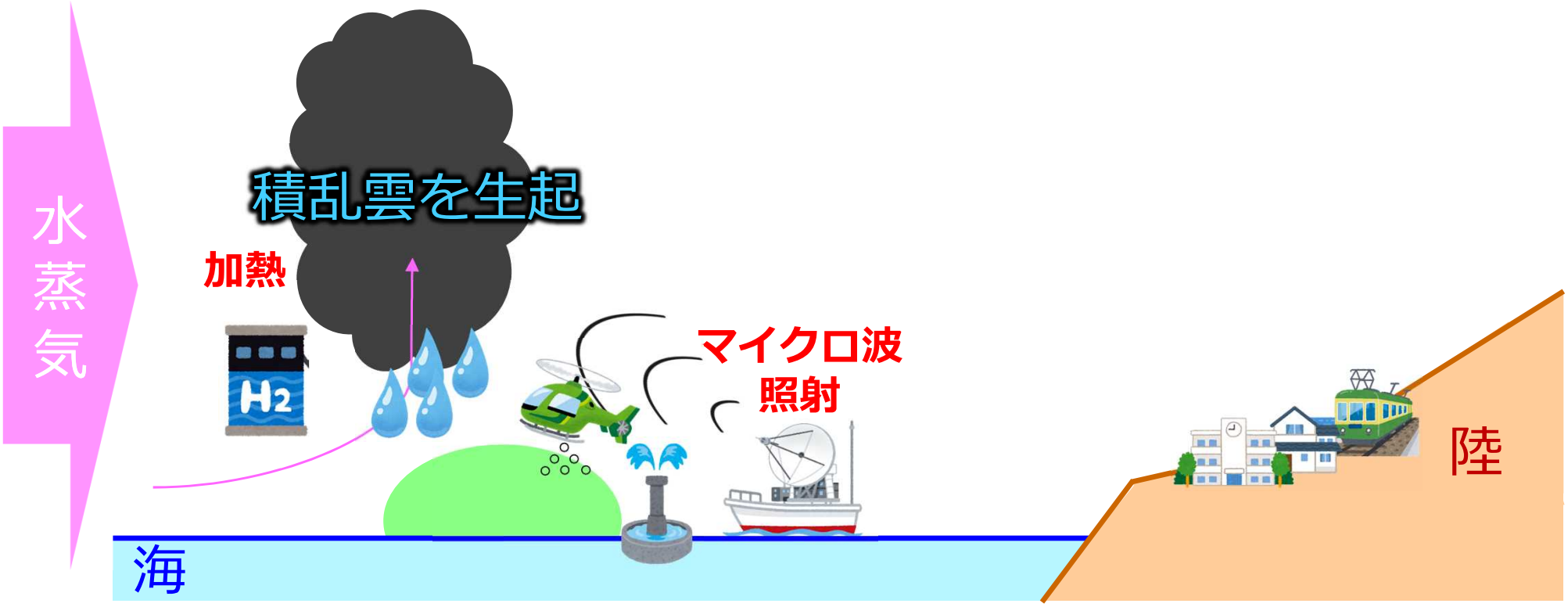


海上豪雨の生成方法

海上の豪雨生成を、(1) 積乱雲を生起し、(2) 組織化することで実現

(1) 積乱雲を生起する = 自由対流高度まで空気塊を上昇させる

➔ 洋上ドーム・冷気塊で上昇させ、更に水素燃焼・マイクロ波で加熱



海上豪雨の生成方法

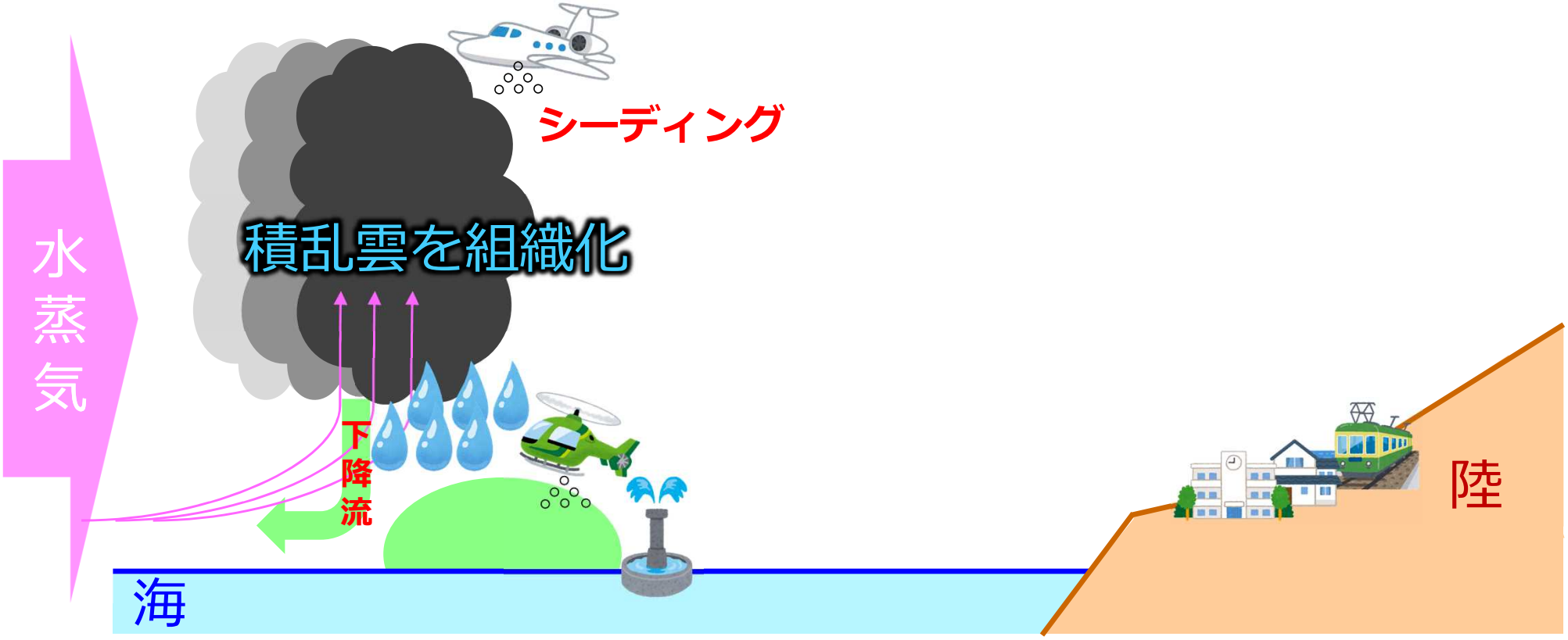
海上の豪雨生成を、(1) 積乱雲を生起し、(2) 組織化することで実現

(1) 積乱雲を生起する = 自由対流高度まで空気塊を上昇させる

➔ 洋上ドーム・冷気塊で上昇させ、更に水素燃焼・マイクロ波で加熱

(2) 積乱雲を組織化する = バックビルディング型組織化を風上側に起こす

➔ シーディングで降水強化しつつ、冷気塊で下降流を風上側に誘導



海上豪雨の生成方法

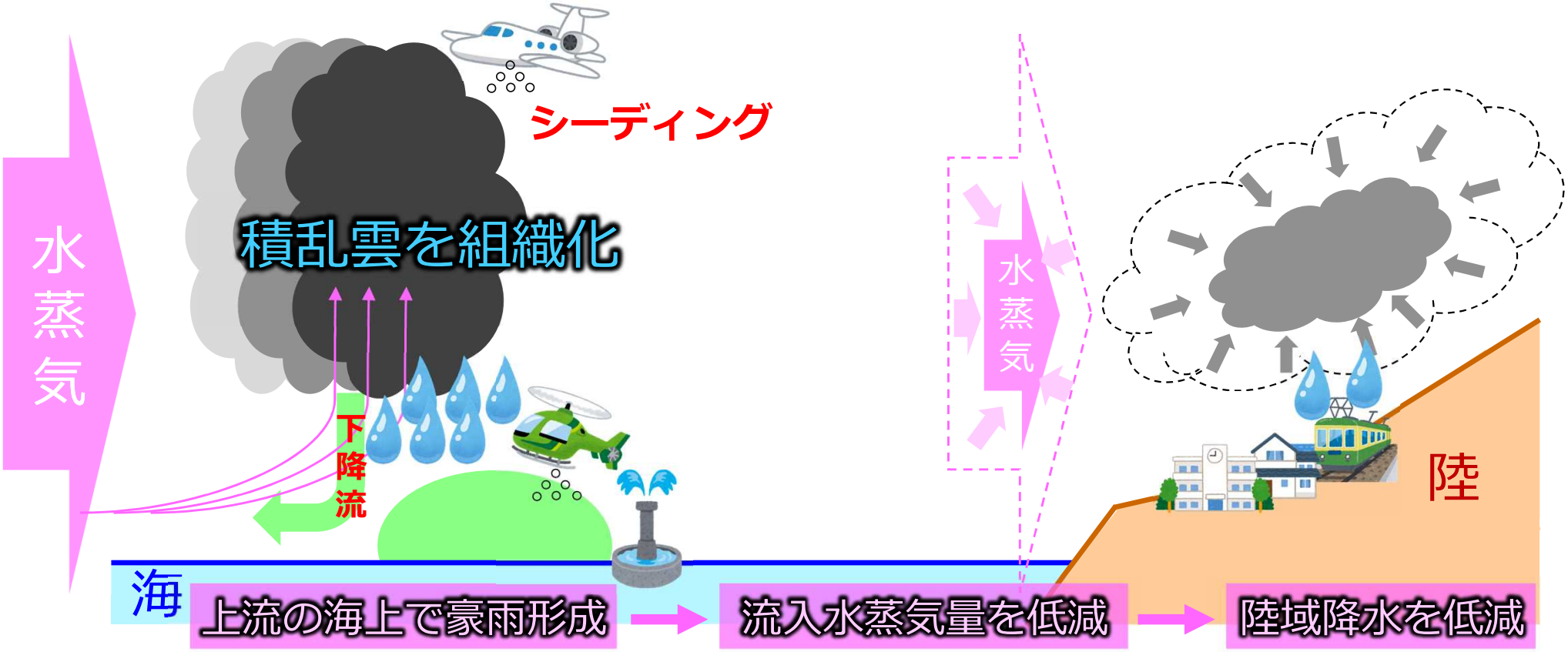
海上の豪雨生成を、(1) 積乱雲を生起し、(2) 組織化することで実現

(1) 積乱雲を生起する = 自由対流高度まで空気塊を上昇させる

➔ 洋上ドーム・冷気塊で上昇させ、更に水素燃焼・マイクロ波で加熱

(2) 積乱雲を組織化する = バックビルディング型組織化を風上側に起こす

➔ シーディングで降水強化しつつ、冷気塊で下降流を風上側に誘導

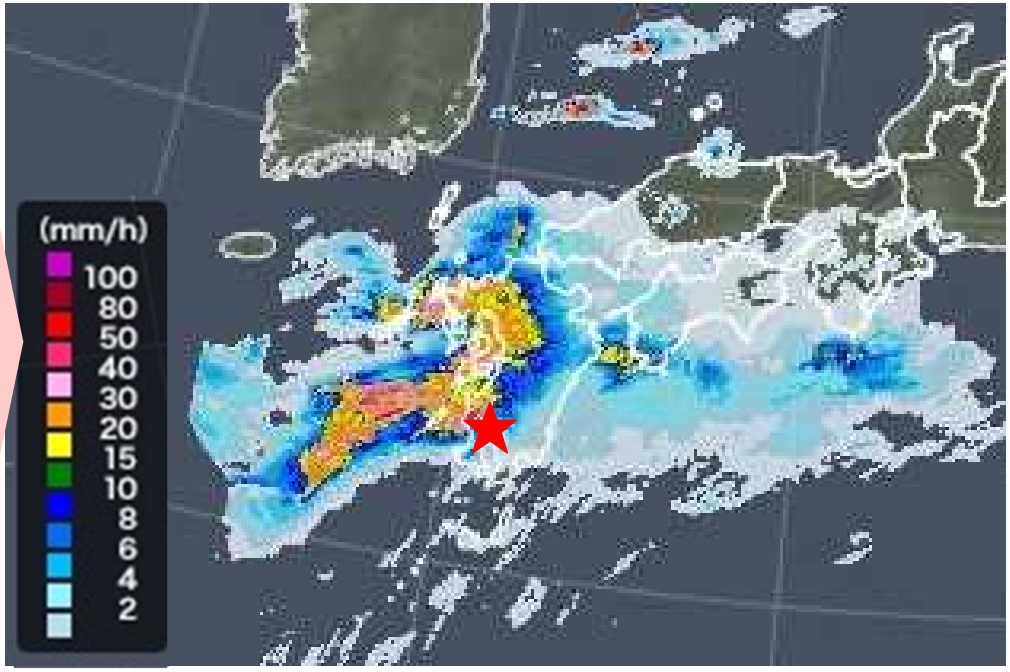


対流を起こす条件 と オーダー

人為的に対流を起こすには、 ① **自由対流高度 (LFC) まで力学的に上昇**させる
又は、② **空気塊に対流抑制 (CIN) 相当のエネルギーを付与**する必要がある。
豪雨直前の水蒸気を膨大に含む不安定大気で、**LFCとCINは非常に低い**。

豪雨の直前 (2021/08/10 00UTC)

豪雨 (2021/08/11 00UTC)



自由対流高度 : **770 m**
対流抑制エネルギー : **1.31 (J/kg)**

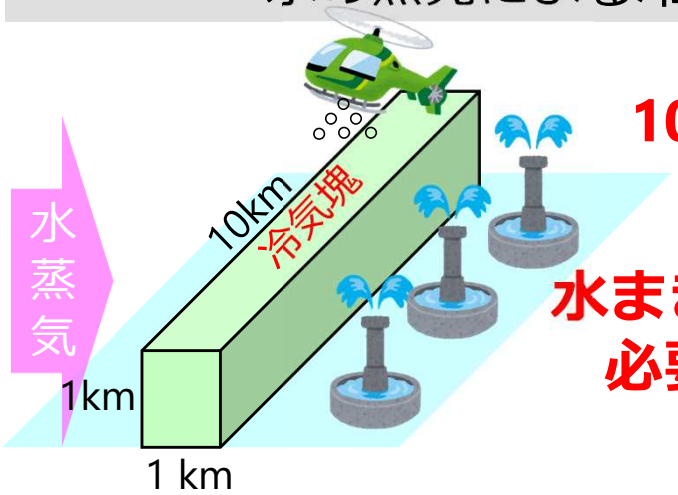
自由対流高度 : 3200 m
対流抑制エネルギー : 47.0 (J/kg)

(米国・ワイオミング大学の鹿児島ゾンデ解析データを利用)

工学的な介入手段の実現性

冷気塊形成・空気塊加熱に必要なエネルギー・手段は工学的に実現可能。
一方で開発・運用費の効率化へ、介入効果を最大化する手法も不可欠。

水の蒸発による冷気塊形成



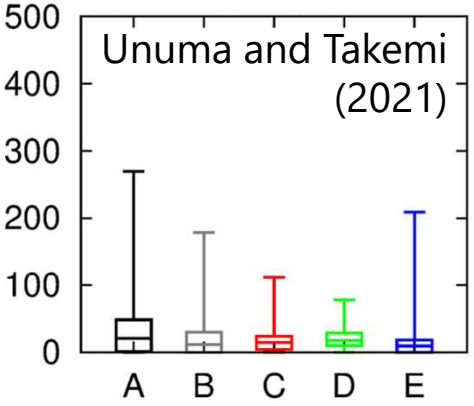
1000s で 1K 冷却

水まき量: 4.2×10^6 (kg)
必要出力: 60 (MW)

詳細は補足資料

水素燃焼・マイクロ波照射による空気塊加熱

日本の豪雨時CIN (J/kg)



CIN=10 (J/kg) の空気塊
(1000×1000×100m)を
効率25% で加熱

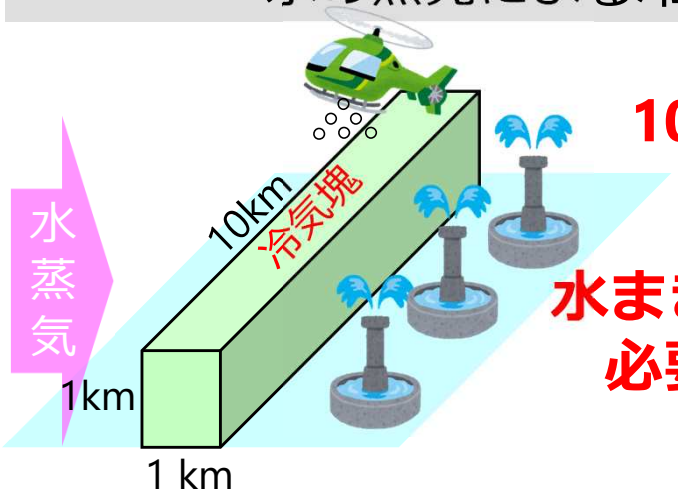
H_2: 800 (m^3), LNG 300 (m^3)
マイクロ波出力: 4.4 (MW)

マイクロ波は900sで加熱　　詳細は補足資料

工学的な介入手段の実現性

冷気塊形成・空気塊加熱に必要なエネルギー・手段は工学的に実現可能。
一方で開発・運用費の効率化へ、介入効果を最大化する手法も不可欠。

水の蒸発による冷気塊形成



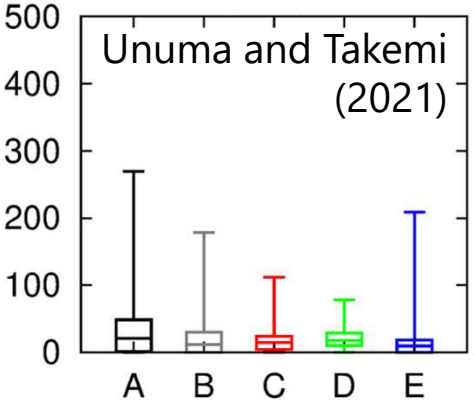
1000s で 1K 冷却

水まき量: 4.2×10^6 (kg)
必要出力: 60 (MW)

詳細は補足資料

水素燃焼・マイクロ波照射による空気塊加熱

日本の豪雨時CIN (J/kg)



CIN=10 (J/kg) の空気塊
(1000×1000×100m)を
効率25% で加熱

H_2: 800 (m^3), LNG 300 (m^3)
マイクロ波出力: 4.4 (MW)

マイクロ波は900sで加熱　詳細は補足資料

洋上での実現手段

噴水
- 世界最高300m (1983年建設)
- 現代技術で1kmまで可能

約1億円

水素燃焼 約10億円
- 飛行船: 2.0×10^5(m^3)
- ボンベ: 7.0×10^3(m^3)

ジャイロトロン 約1億円
- マイクロ波生成
- 1MW出力を実現

ガスエンジン
- 1基: 34MW

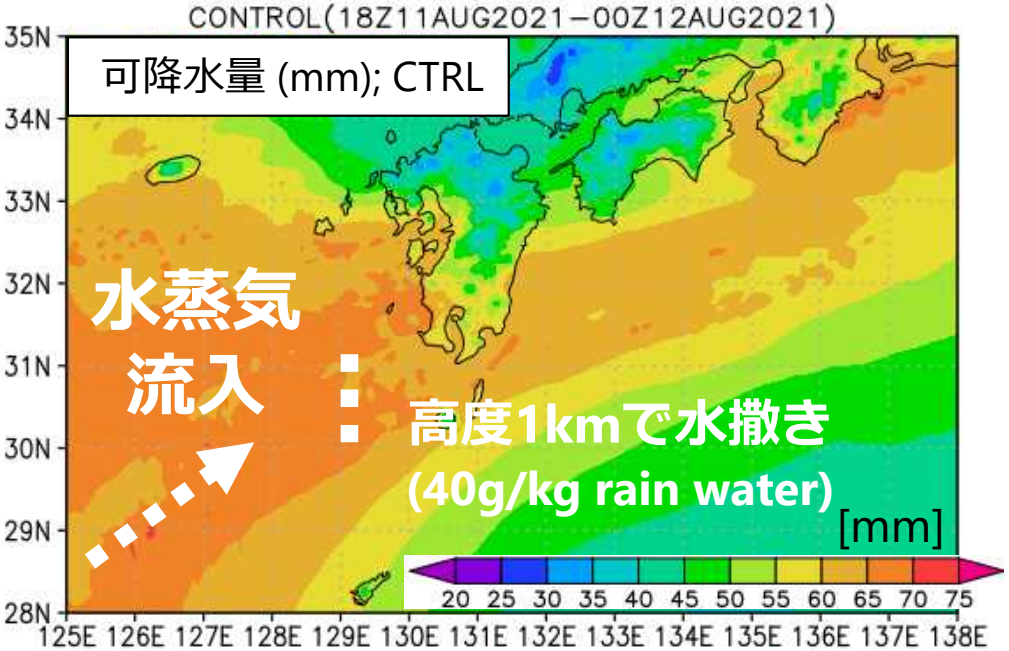
約40億円

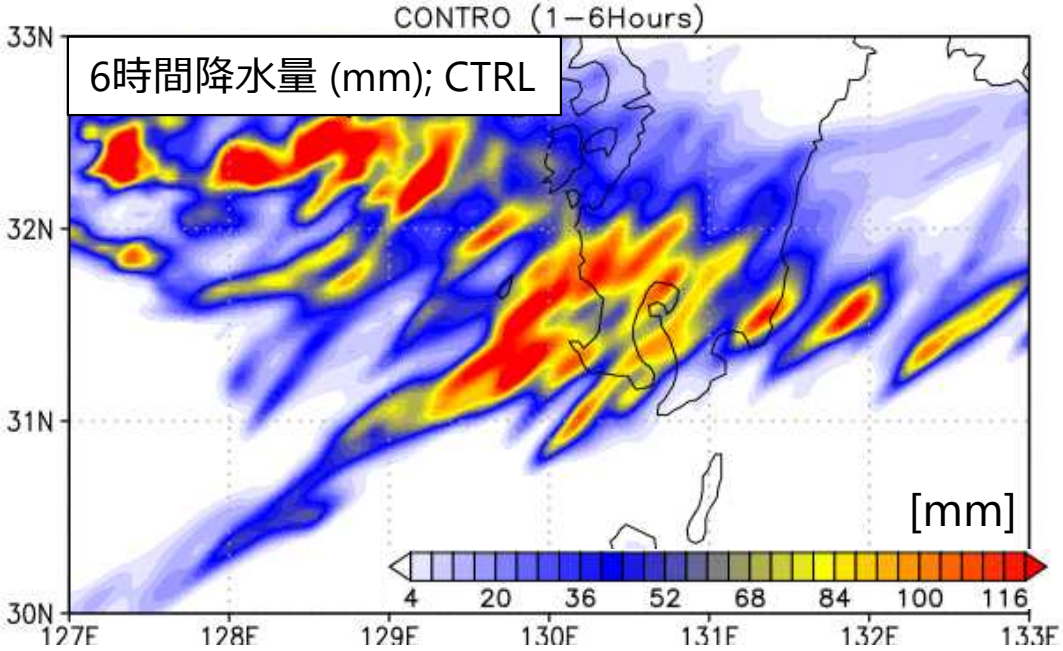
LM2500+G4 ©GE

洋上風力発電
- 1基: 14MW

約50億円

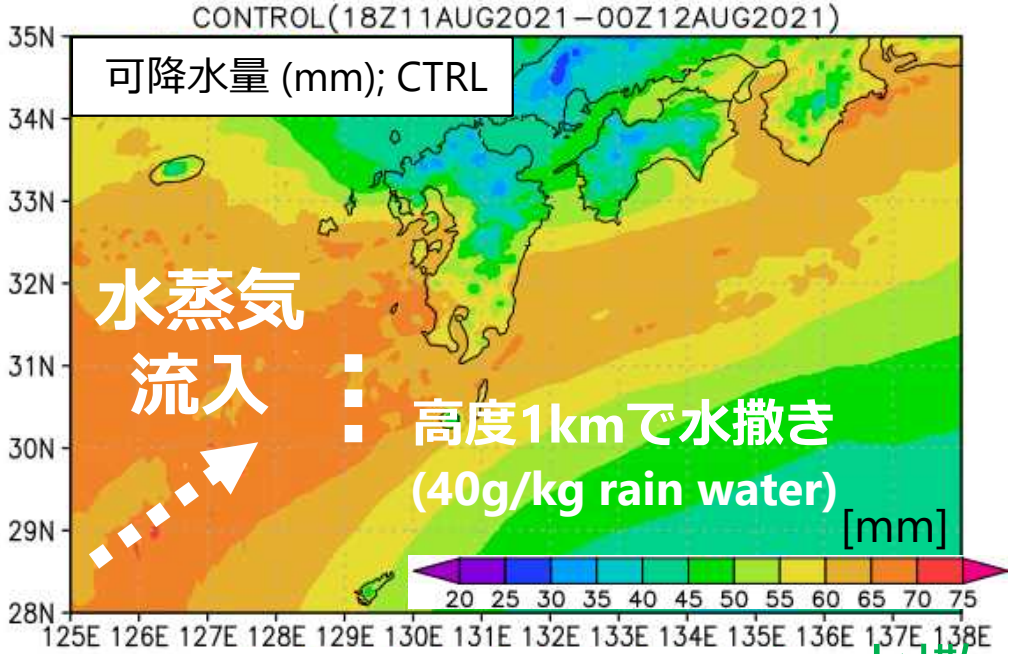
気象モデルを用いた水撒き実験

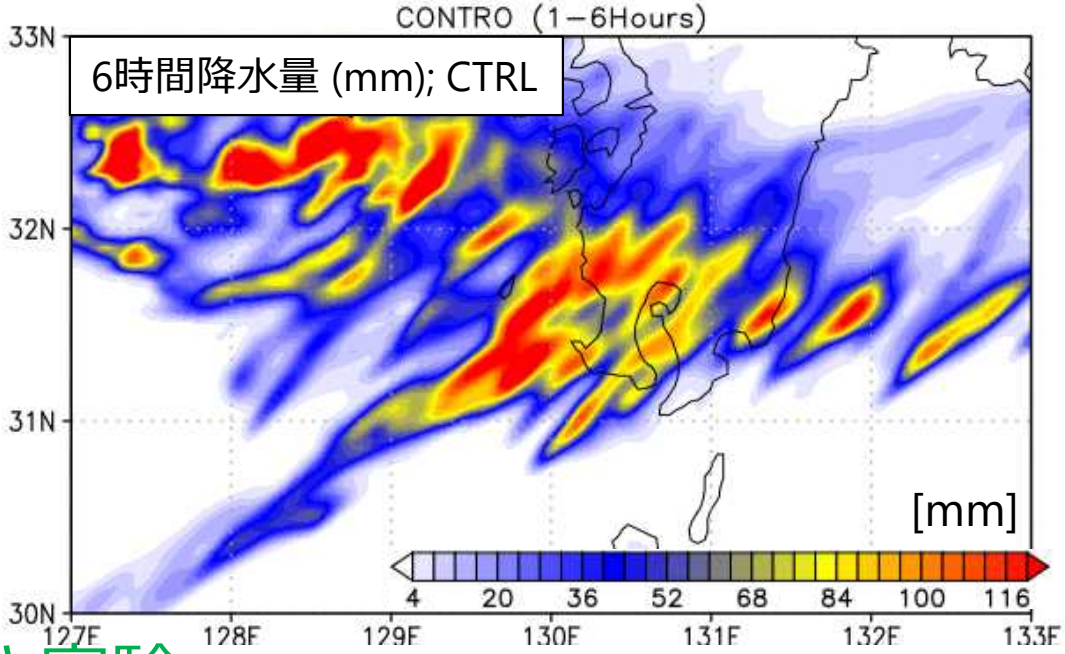




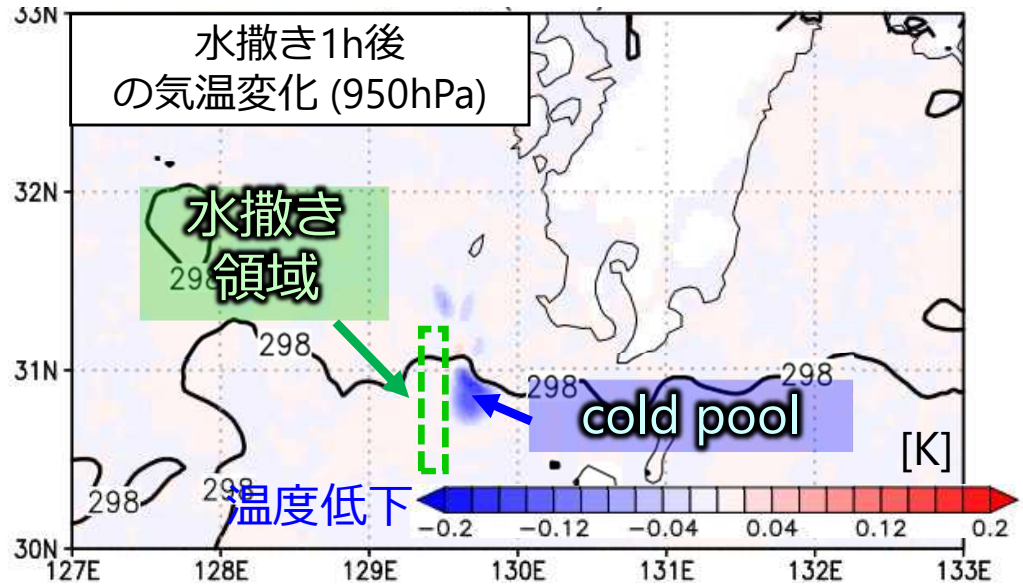
Courtesy of Prof. Yasunaga (Toyama U.)

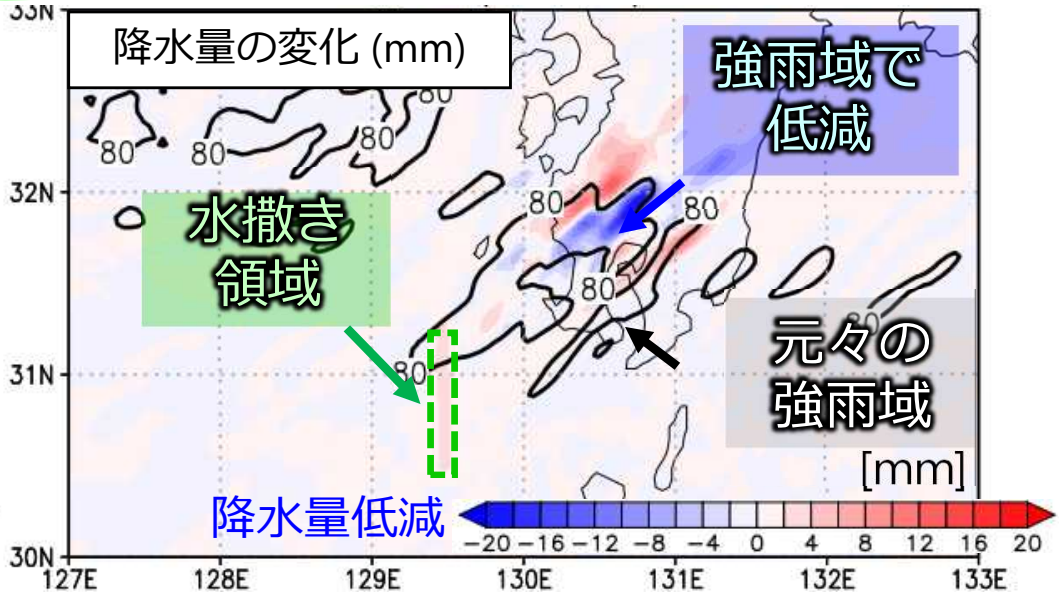
気象モデルを用いた水撒き実験





水撒き実験





Courtesy of Prof. Yasunaga (Toyama U.)

克服すべき課題 と 研究項目

Environmental Prediction Science Laboratory

克服すべき研究課題

数理研究
如何に介入を最適化するか？

気象研究
如何に海上豪雨を形成するか？

工学研究
如何に介入手段を実現するか？

法的研究
如何に法制度を設計するか？

RRI研究
如何に社会受容を目指すか？

研究開発項目

- 研究開発項目1: 気象制御手法の開発
- 研究開発項目2: データ駆動型気象予測手法の開発
- 研究開発項目3: 気象情報の潜在空間表現
- 研究開発項目4: 気象制御計算システムの開発
- 研究開発項目5: 数値計算に基づく介入方法の調査
- 研究開発項目6: 工学的気象介入技術の開発
- 研究開発項目7: 法的課題の解決
- 研究開発項目8: 経済被害推定
- 研究開発項目9: 気象制御におけるRRI
- 研究開発項目10: 情報科学を活かした社会調査・発信

克服すべき課題 と 研究項目

Environmental Prediction Science Laboratory

克服すべき研究課題

数理研究
如何に介入を最適化するか？

気象研究
如何に海上豪雨を形成するか？

工学研究
如何に介入手段を実現するか？

法的研究
如何に法制度を設計するか？

RRI研究
如何に社会受容を目指すか？

研究開発項目

- 研究開発項目1: 気象制御手法の開発
- 研究開発項目2: データ駆動型気象予測手法の開発
- 研究開発項目3: 気象情報の潜在空間表現
- 研究開発項目4: 気象制御計算システムの開発
- 研究開発項目5: 数値計算に基づく介入方法の調査
- 研究開発項目6: 工学的気象介入技術の開発
- 研究開発項目7: 法的課題の解決
- 研究開発項目8: 経済被害推定
- 研究開発項目9: 気象制御におけるRRI
- 研究開発項目10: 情報科学を活かした社会調査・発信

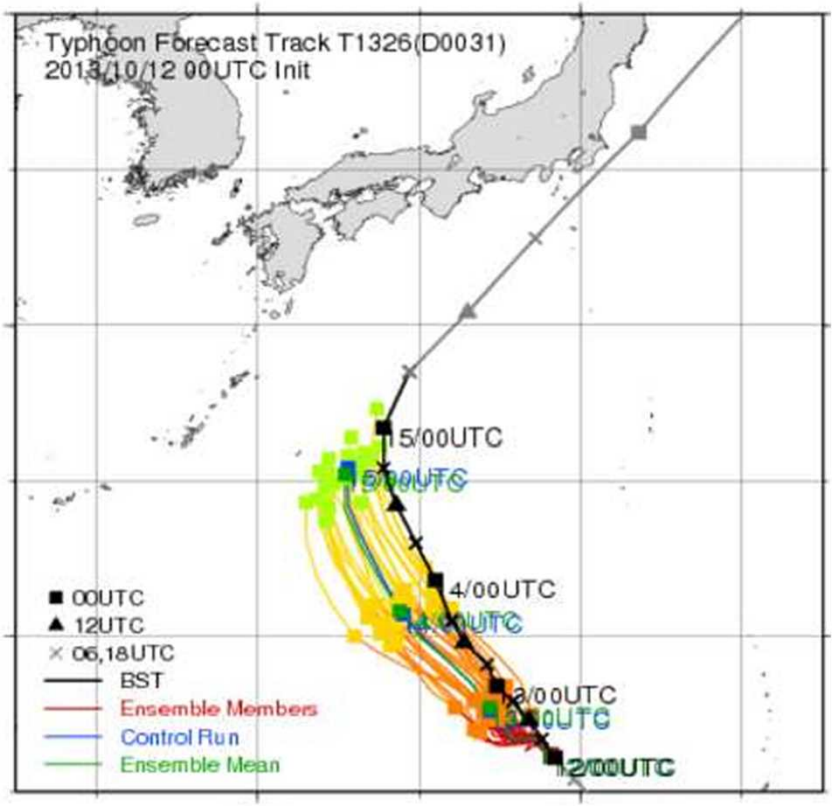
先行研究の
研究成果

① 気象現象の分水嶺の探知技術

Environmental Prediction Science Laboratory

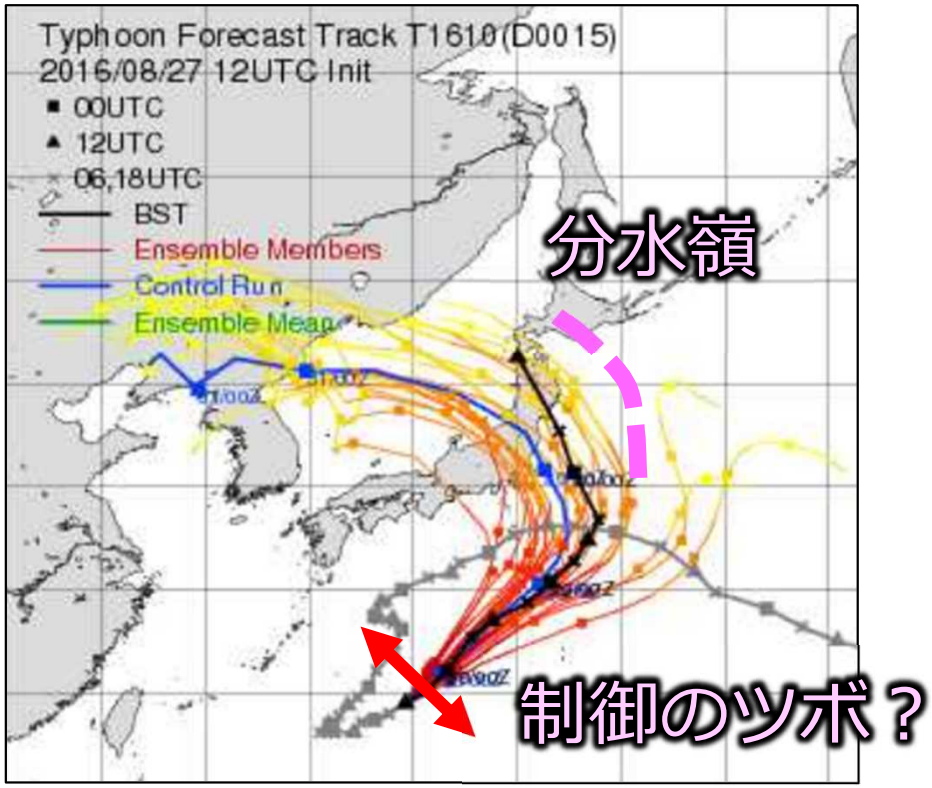
闇雲に制御を行うのではなく、
限られた介入効果を最大化する「制御のツボ」はあるか？

分水嶺の無い台風の例



・入力変化に対する感度が低い
➔ 制御に膨大なエネルギー必要

分水嶺のある台風



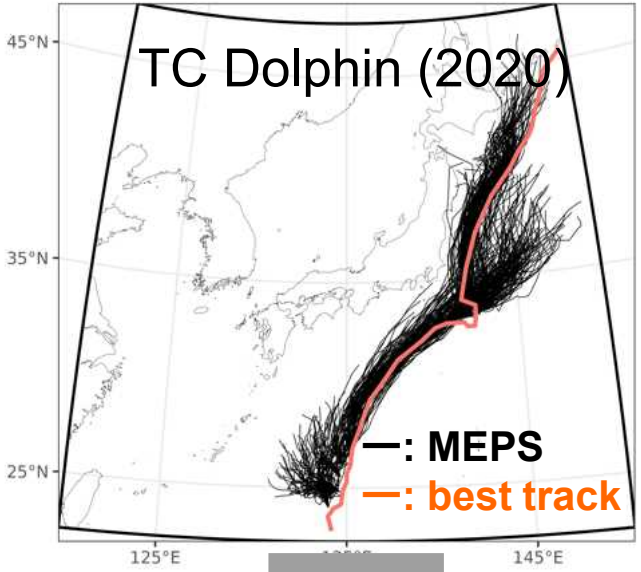
・少し入力で未来を大きく変える
「制御のツボ」がある可能性が大

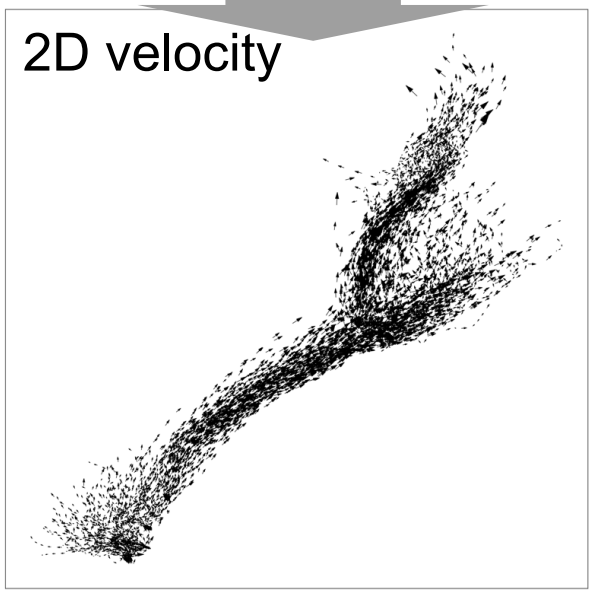
(例: BTが日本・大陸に上陸して望ましくない)

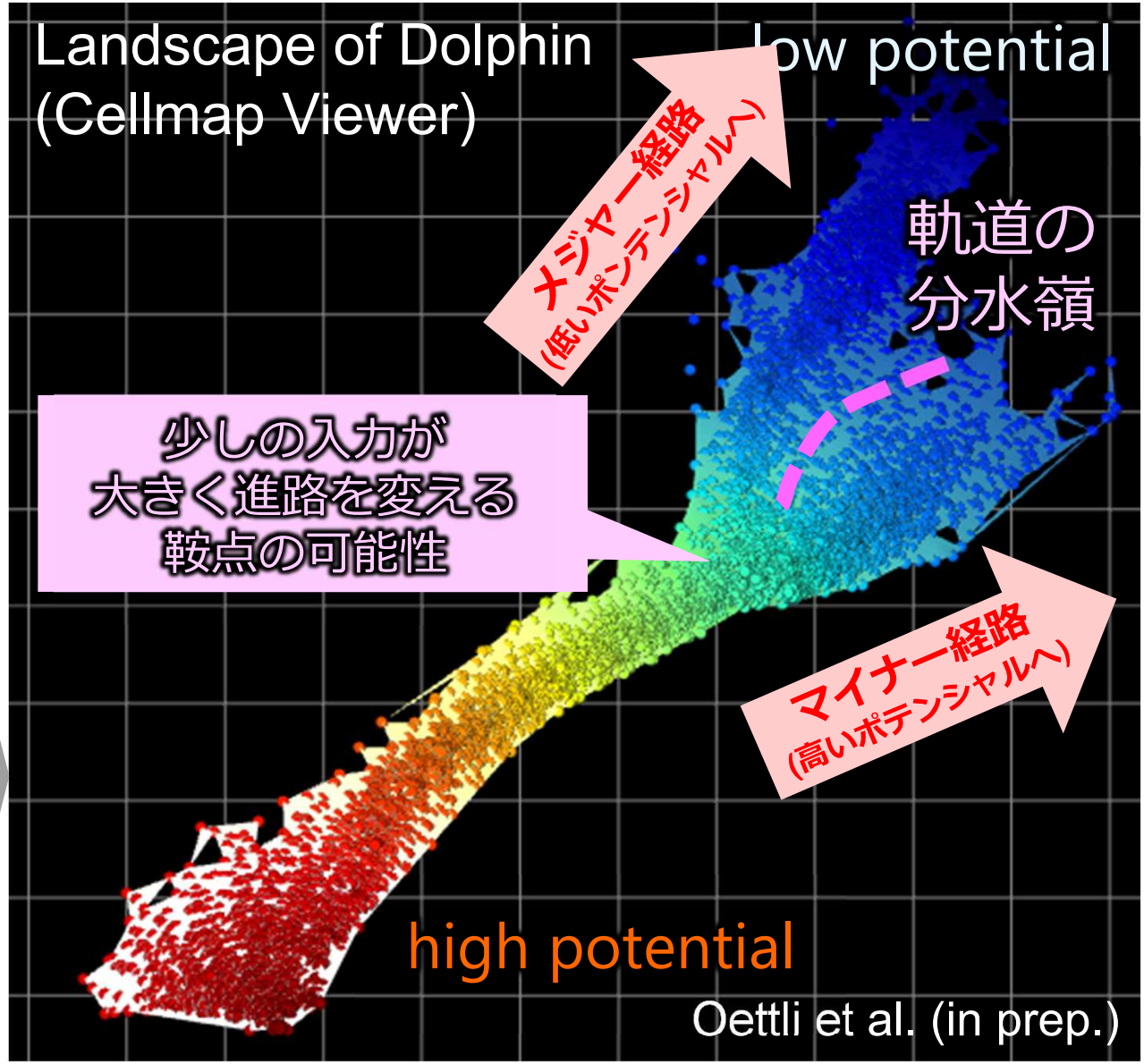
①台風のランドスケープ可視化

P. Oettli　Y. Imoto

台風のランドスケープを可視化 ➔ 豪雨の組織化に適用へ







Oettli et al. (in prep.)

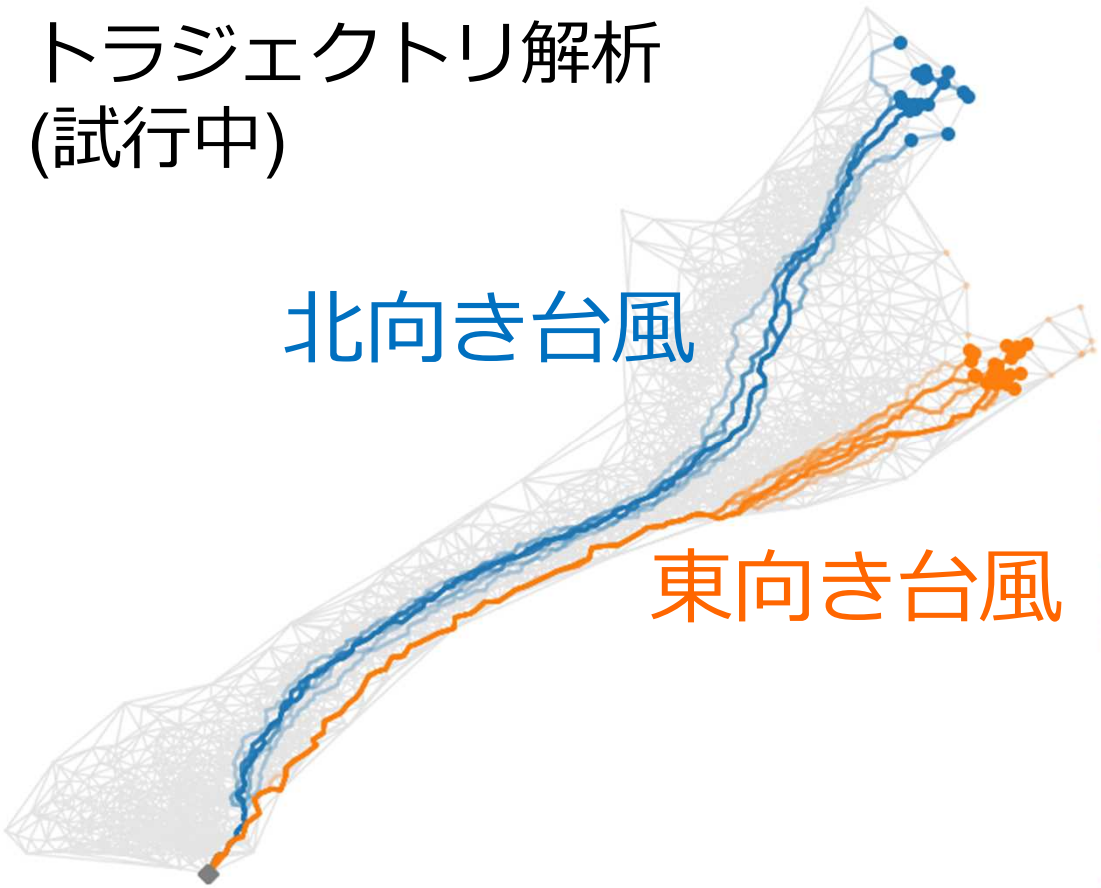
台風のランドスケープ可視化

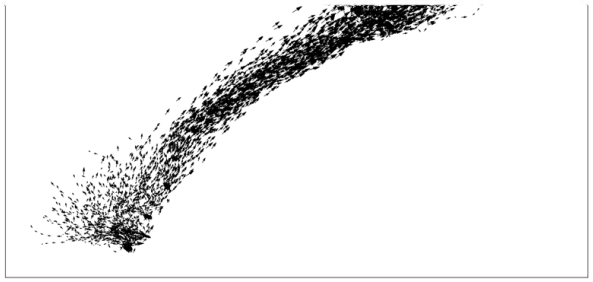
P. Oettli

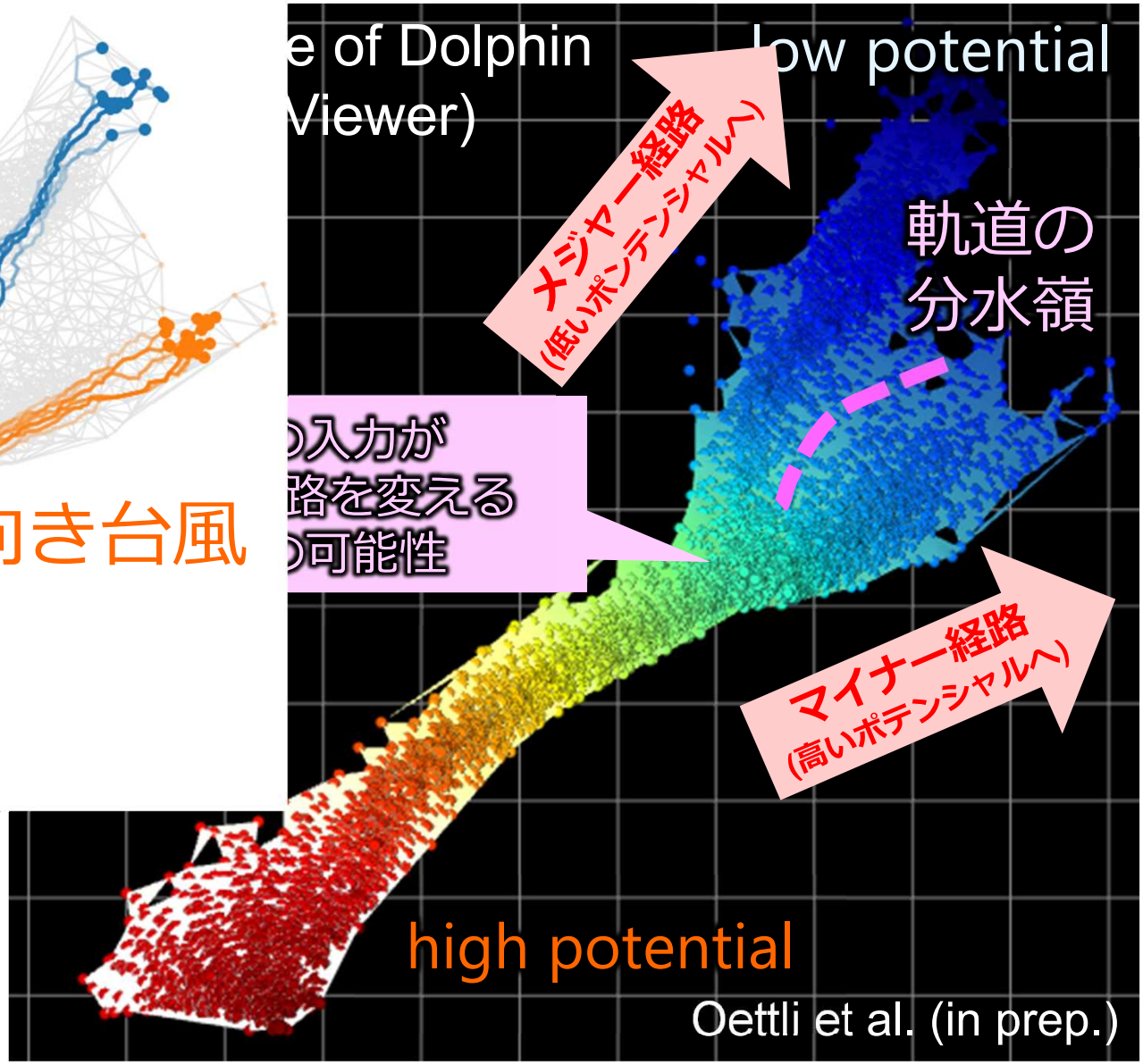
Y. Imoto

台風のランドスケープを可視化 ➔ 豪雨の組織化に適用へ

トラジェクトリ解析
(試行中)





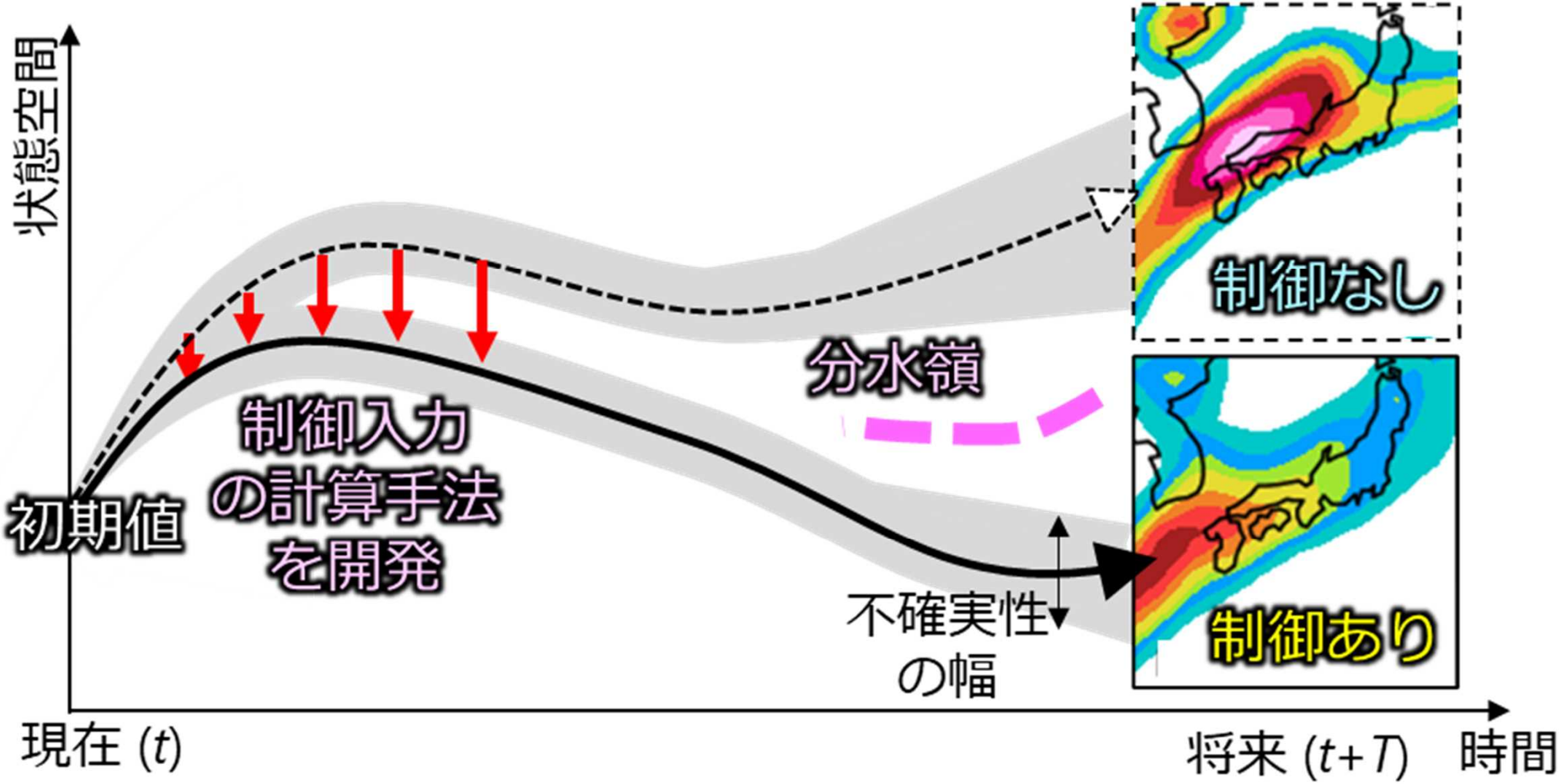


Oettli et al. (in prep.)

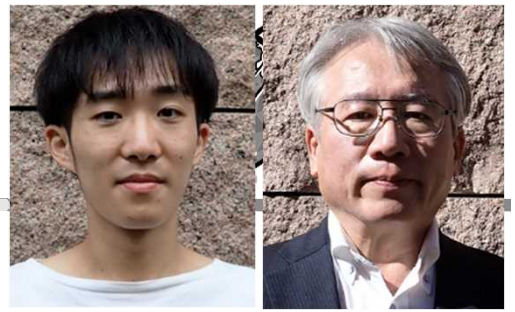
② 気象制御計算の高速化

介入効果を最大化して豪雨を生成するため、世界初の気象制御手法を開発。
特に気象制御で問題となる、計算時間の高速化 を可能とする手法を開拓。

モデル予測制御 (MPC) に基づく気象誘導のイメージ

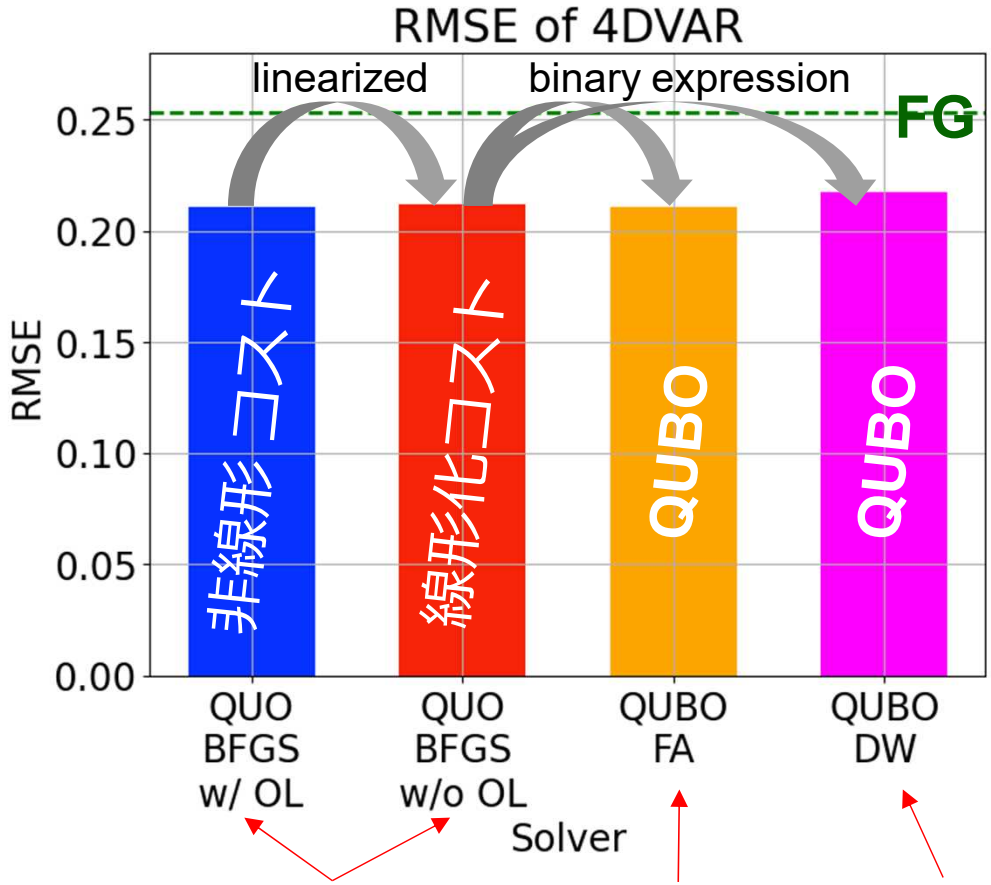


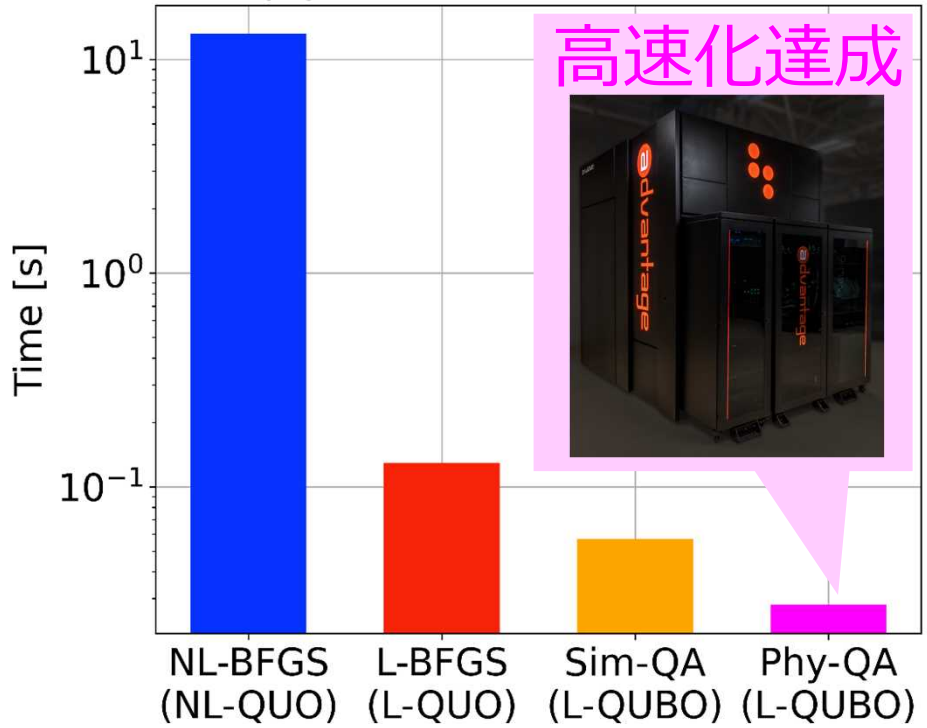
② 量子マシンで計算高速化



F. Kawasaki M. Ohashi

50回の4次元変分・データ同化の平均 (L96モデル)
(window: 2days, 40 obs, **B** is manually tuned)





従来手法BFGS
w/wo outer loop
(w/wo TLM/ADJ updates)

疑似
量子計算機
(GPU-based)

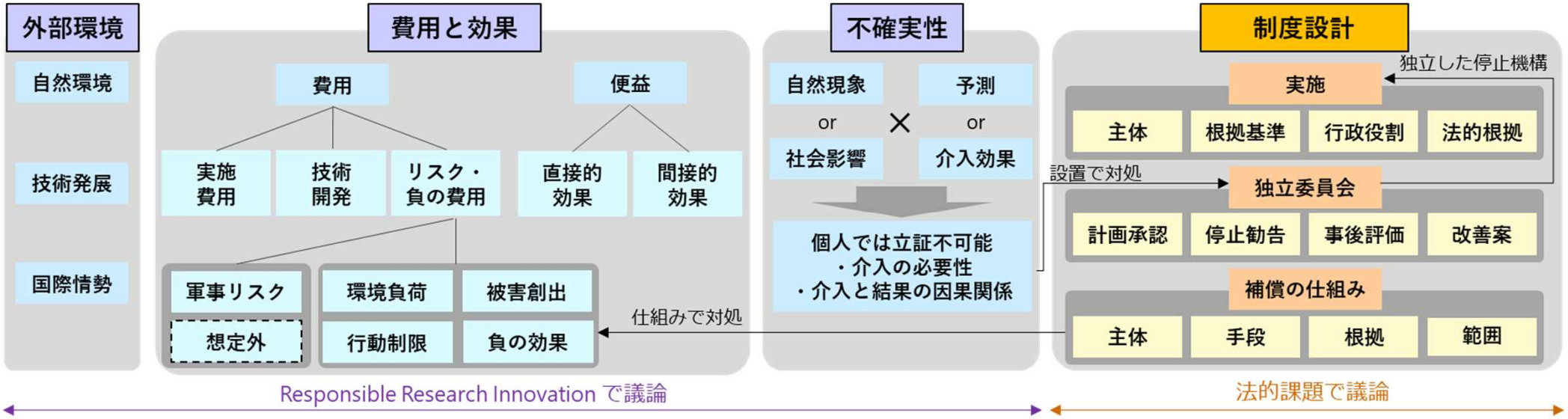
物理
量子計算機
(D-Wave)

現状は使える量子論理ビット
が最大170 Qbit
➔ 今後の研究発展に期待

[Kotsuki et al., submitted]

③ 合意形成へ情報創出の検討

過去の社会的議論から得た、社会的合意を得るために提供されるべき情報。

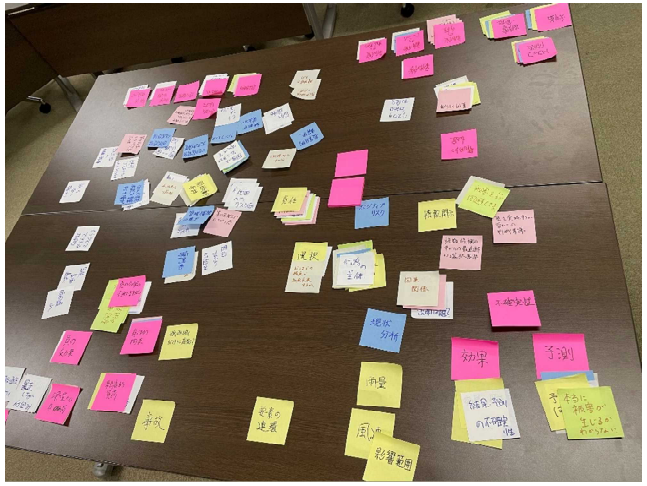


過去の社会的議論から得た主要な論点 (KJ法)

社会的議論の例

- 原発再稼働
- ワクチン接種
- 流域治水
- 核廃棄物の処分
- ダム建設

ポストイットと分類



グルーピングと関連性

今後の計画とまとめ

2050年までのシナリオ

目標からのバックキャストに基づく研究方針

2032年以降: 小規模→大規模屋外実験, 社会合意形成を図りつつ社会制度確立

2031年まで: 計算機上で制御手法を確立, ボトルネックとなる社会課題の洗出

	科学技術開発	社会的課題の解決
2037~2050年 大規模実験・社会実装	四国南方など海洋上で大規模な実証実験	法・保険など社会制度の確立
2032~2036年 屋外実験・合意形成	個々の介入手段を屋外実験で検証	国内外の合意形成 と実証実験の手配
2027~2031年 概念実証・費用試算	計算機で制御手法を確立し仕様決定	費用・被害低減効果の試算を完了
2023~2026年 可能性実証	現実的介入による豪雨生成を計算で実証	法的問題など社会課題の洗出し

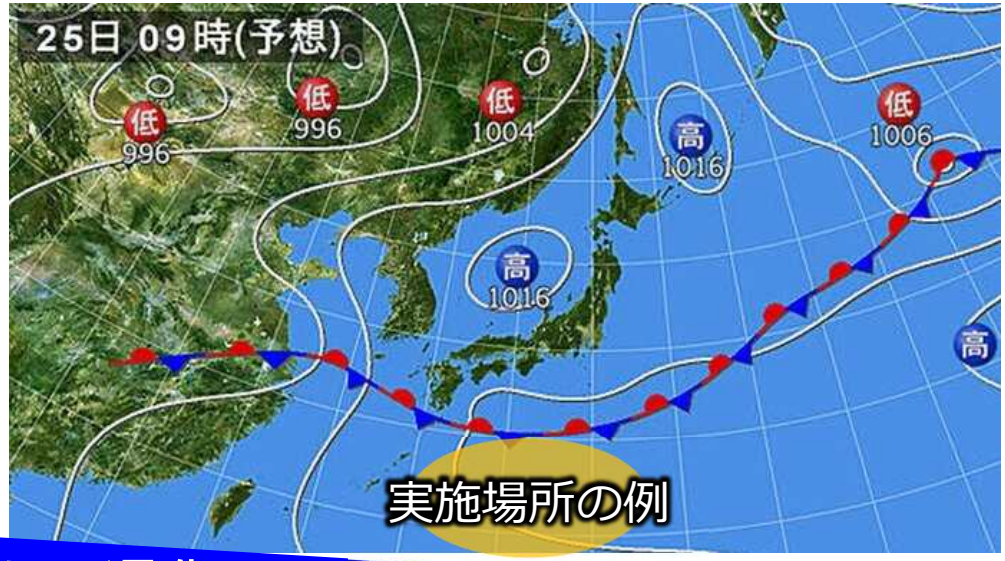
2032年以降の研究計画

2032年以降は、屋外実証実験で成功例を重ねつつ、技術を精緻化。
社会合意形成を図りながら社会制度確立していく。

介入技術を個別に屋外で検証 (2032年～)

大規模実証実験 (2037年～)

梅雨前線が南方海上にある状況など
気象改変による社会影響が少ない状況で実施



研究推進を円滑化

ELSI研究の方向性

(1) 屋外実験の実現
- 法的問題の解決 (電波法)
- 国際機関への通知

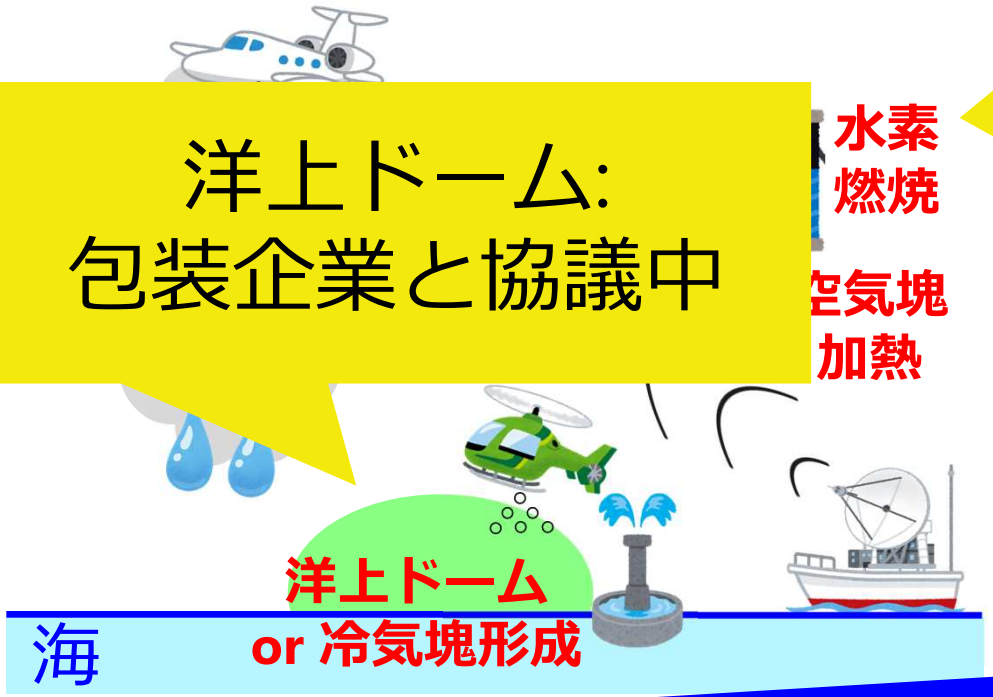
(2) 社会合意形成の推進
- 技術やリスクの説明
- ステークホルダーと対話

(3) 社会・法制度の設計
- 実施機関やソフト対策
- 国際ルール策定を主導

産業界との連携状況

2032年以降は、屋外実証実験で成功例を重ねつつ、技術を精緻化。
社会合意形成を図りながら社会制度確立していく。

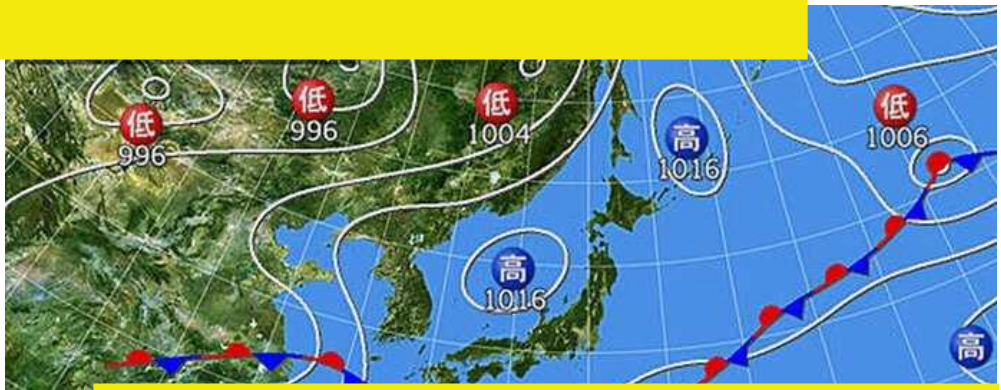
介入技術を個別に屋外で検証 (2032年～)



水素:
重工と相談を開始

洋上ドーム:
包装企業と協議中

など
況で実施



国際連携:
気象業務会社と協議中

研究推進を円

被害推定:
損保会社と連携中

ELSI研究の方向性

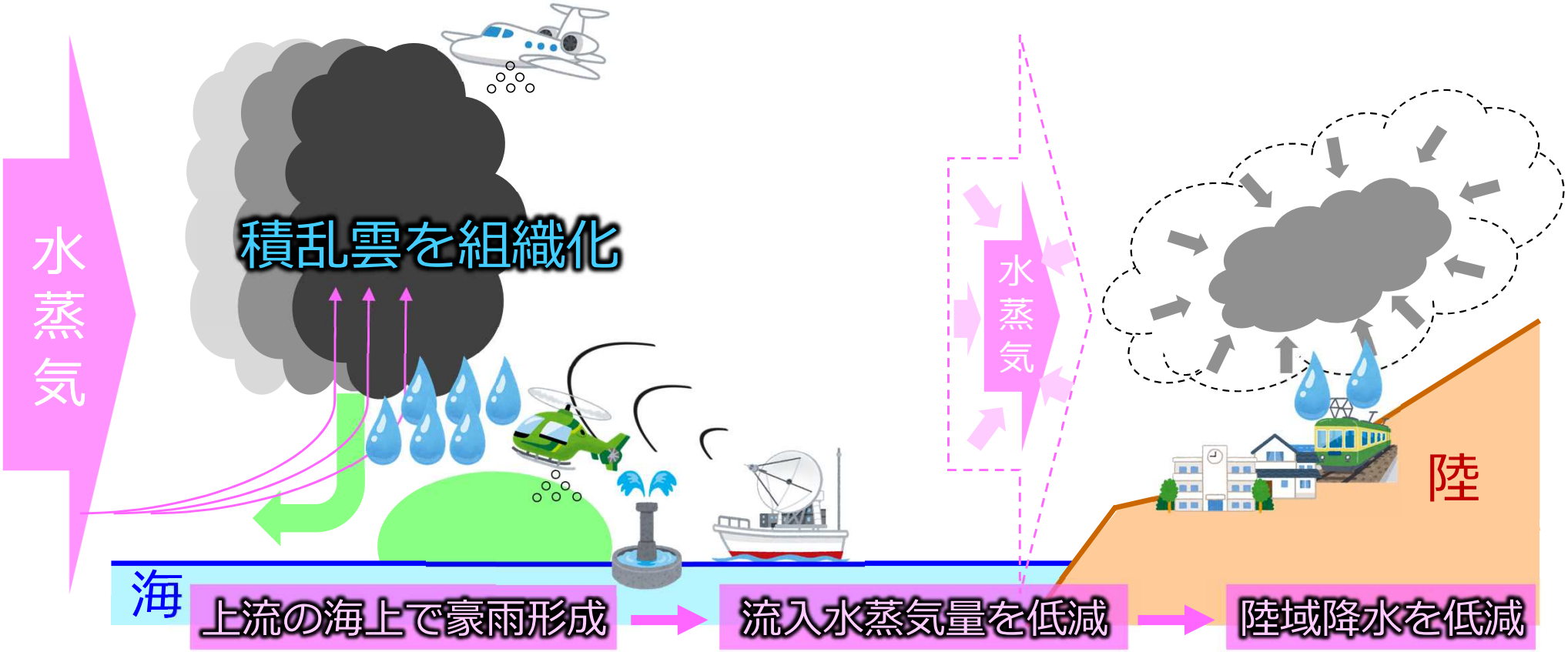
2) **社会合意形成の推進**
・技術やリスクの説明
・ステークホルダーと対話

社会・法制度の設計
実施機関やソフト対策
・国際ルール策定を主導

海上豪雨生成で被害緩和

目標実現へ、(1) 数理・気象・工学・ELSIの具体的問題に落とし込み、
(2) 各分野のエキスパートを結集した研究体制を構築。

応援をよろしくお願いします。
また、欠けた観点や新たな提案があれば、ご指摘頂けますと幸いです。



Thank you for your attention.

We always welcome to take any suggestions, questions, and concerns.