

気象制御実現への挑戦

- 気象をコントロールして豪雨災害を減らせるか！？ -

小槻峻司

(shunji.kotsuki@chiba-u.jp)

千葉大学

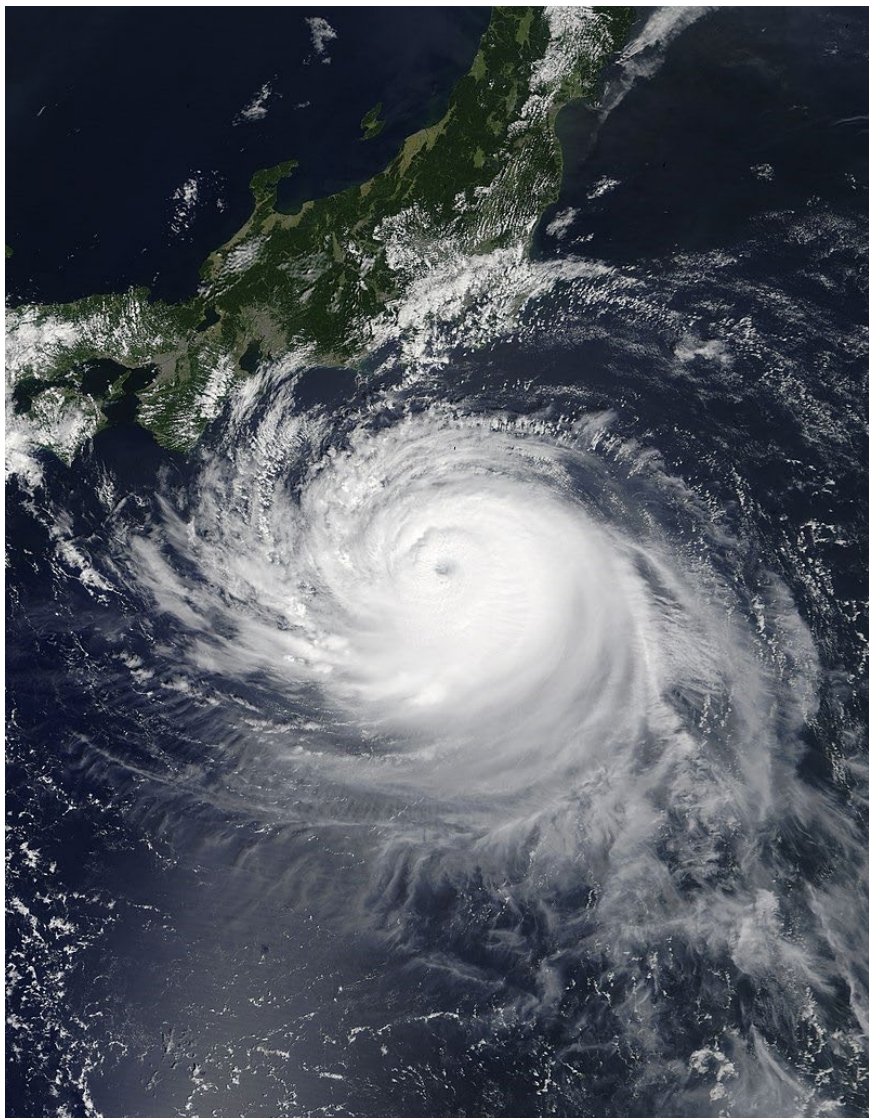
国際高等研究基幹 / 環境リモートセンシング研究センター 教授

東進・未来発見講座 (中・高校生向け)



激化する気象災害

令和元年房総半島台風 (2019)



images from wikipedia, 市民防災研究所

最初にクイズ

地球温暖化により、日本では
雨の日の数は増えているでしょうか？

YES

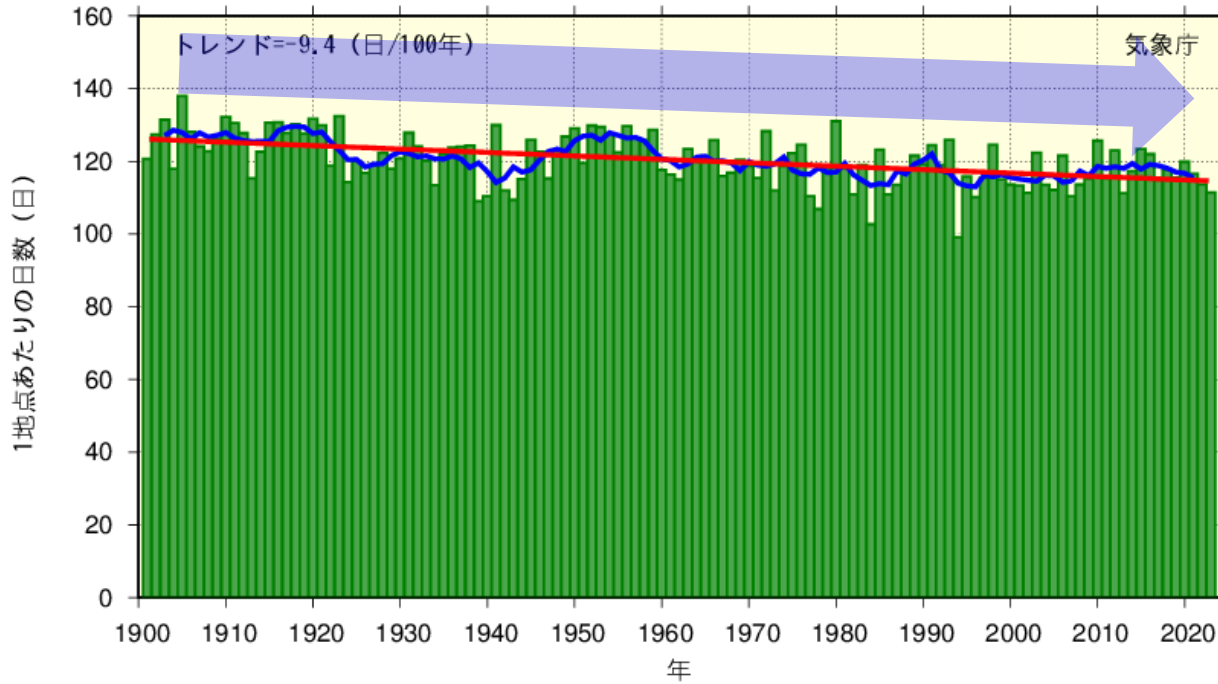
NO

激化する気象災害

全国アメダス51地点 年間降水の日数

雨の日の数は**減少**傾向

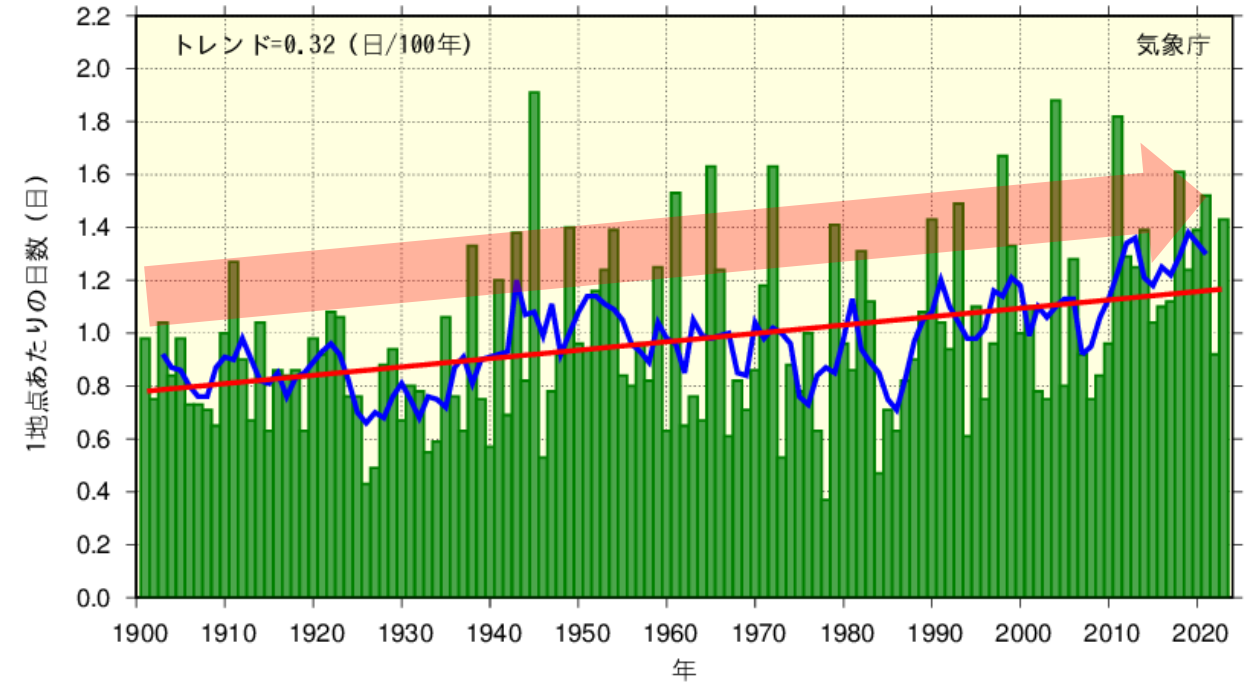
【全国51地点平均】日降水量1.0mm以上の年間日数



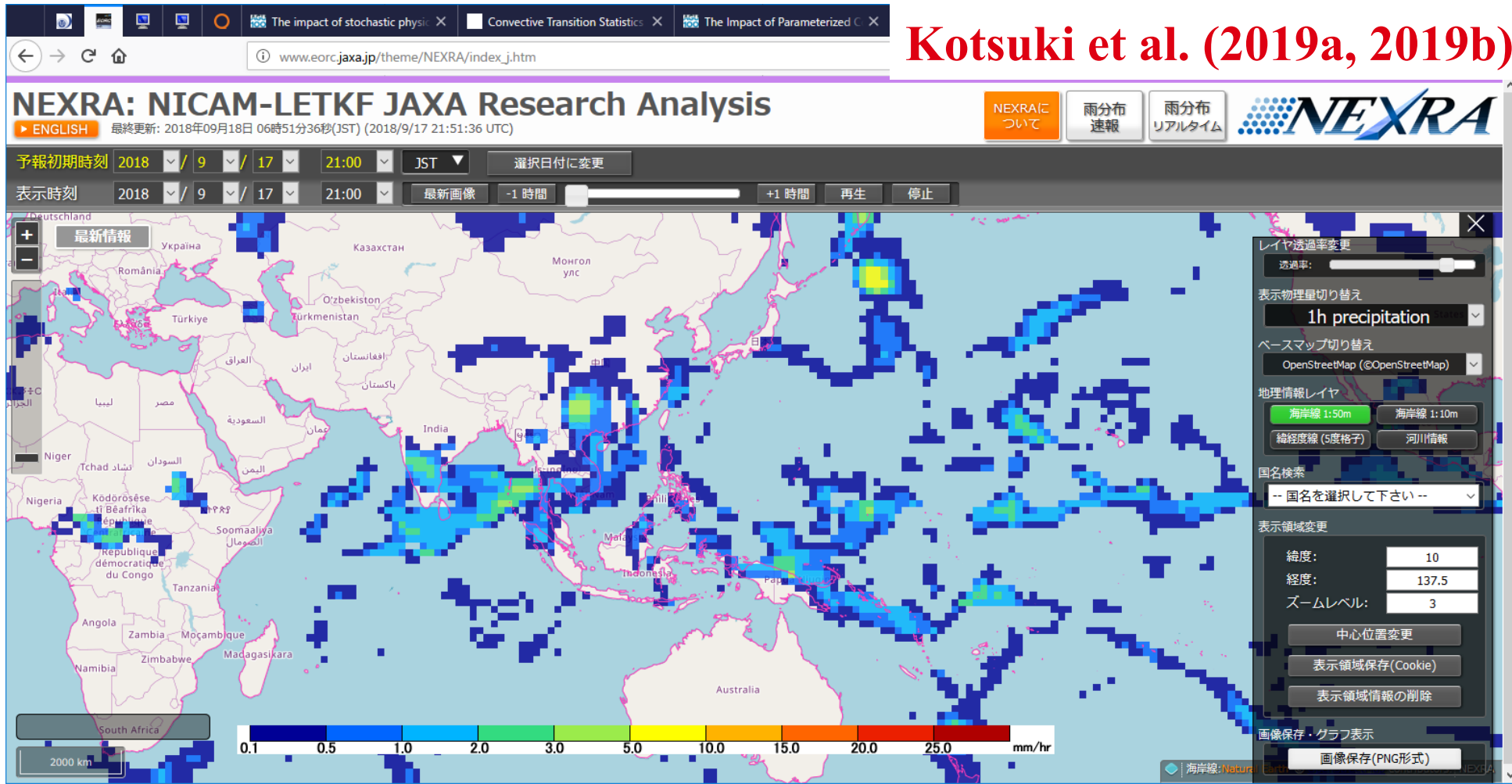
全国アメダス51地点 豪雨の回数

豪雨の数は**増加**傾向

【全国51地点平均】日降水量100mm以上の年間日数



私の専門: 全球天気予報システムの開発



Kotsuki et al. (2019a, 2019b)

- JAXA, 理研, 東大と共同開発。
- スパコン「富岳」も使い研究推進。
- 社会生活に直結する研究！

富岳プロジェクトも参画



2021年 千葉大学 先進学術賞

2022年 科学技術分野の文部科学大臣表彰・若手科学者賞

頑張っている研究: ムーンショット・気象制御

内閣府・ムーンショット事業 (2050年までの目標実現):

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) を推進する大型研究プログラム

新聞報道 (2023.1.11 朝日新聞)

海で豪雨発生させ 地球救う志

観測データ+シミュレーション融合 千葉大 小槻峻司教授



「理系チカラ」

噴水装置で積乱雲 地上の被害減めず

海上で豪雨を発生させるイメージ

大気中の水蒸気が減って地上の被害減少

マイクログラビティで加熱

冷気の塊を形成

海上で豪雨を発生させるイメージ

大気中の水蒸気が減って地上の被害減少

マイクログラビティで加熱

冷気の塊を形成

取材 (2024.07 JST News)

小槻 峻司 Kotsuki Shunji

千葉大学 国際高等研究基幹 / 環境リモートセンシング研究センター 教授
2022年よりムーンショット型研究開発事業 目標8 プロジェクトマネージャー



特集1 OVERVIEW

遠くの海上で人為的に豪雨を発生 陸地における被害の緩和を目指す

近年、集中豪雨の発生頻度が増加し、全国各地で土砂災害や氾濫などの被害が生じている。令和に入ってから被害総額は全国で3兆5000億円以上にのぼり、影響は甚大だ。千葉大学国際高等研究基幹 / 環境リモートセンシング研究センターの小槻峻司教授は、海上からの水蒸気供給に起因する集中豪雨に着目し、陸地から遠く離れた海上で人為的に豪雨を発生させ、大気中の水蒸気を大幅に減らすことで、陸地における被害の緩和を目指している。

テレビ放送 (2024.07 BSフジいまからサイエンス)



メディア放送 (2025.?? 東進・未来発見講座)

東進ハイスクール 東進衛星予備校 合格実績 近くの校舎を探す 東進模試 過去問データベース

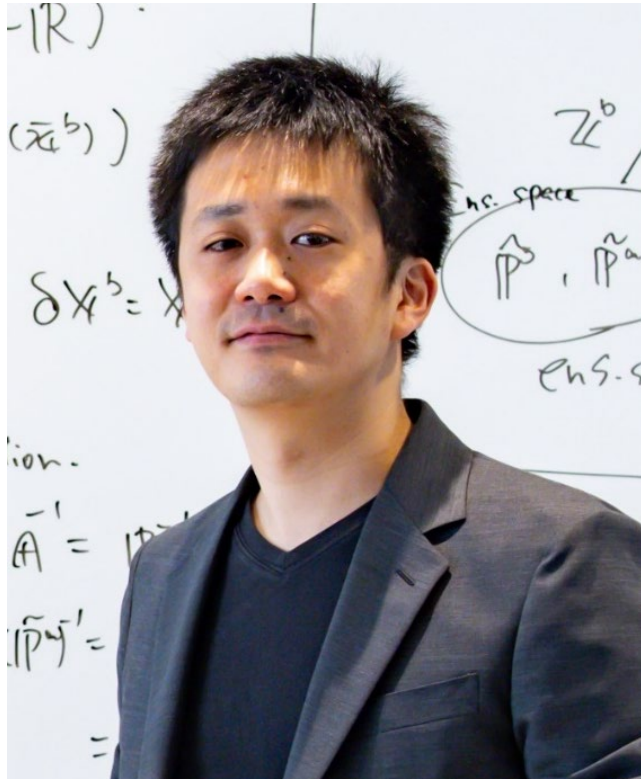
学びの原動力となる「夢を見つけ、志を高める」

特別講義 未来発見講座

—— 最先端の研究・ビジネスからワクワクする未来を発見



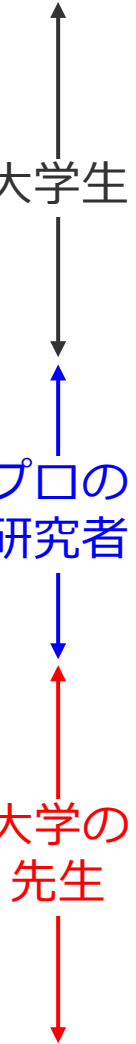
自己紹介: 小槻 峻司 (こつき しゅんじ)



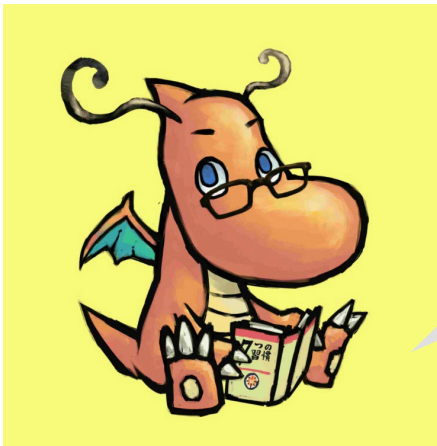
(38歳)

趣味:
感動した言葉の収集

- 1986.05 高知県高知市に生まれる
- 2005.04 京都大学 工学部 地球工学科 入学 (18歳)
- 2013.11 同 大学院 工学研究科 工学博士
- 2014.01 理化学研究所 計算科学 特別研究員 (27歳)
- 2017.10 同 研究員
- 2019.10 千葉大学 環境リモセンセンター 准教授 (33歳)
- 2022.07 千葉大学 国際高等研究基幹 / 環境リモセン 教授 (36歳)



- (1) 小槻の経歴: 研究者になるまで
- (2) 研究の紹介: 天気予報の仕組み と 気象制御への挑戦
- (3) 学生さんへのメッセージ



小槻の人生を変えた言葉や
人生から得た教訓も紹介していきます

友人の描いてくれた小槻の-avatar: コツキング

小槻の経歴: 研究者になるまで



特殊な人だけが研究者になるんじゃないくて
案外、普通な人も研究者になります。

1. 小学生: 高知県高知市でのんびりと育つ



性格は臆病で気弱。集中力はあった。
高知県の豊かな海・川・山で遊び、
これが後の研究者の原点になる。
(ということに35歳くらいで気が付く)



1. 小学生時代

本来臆病なのだが、クラスや野球部では手を挙げる。



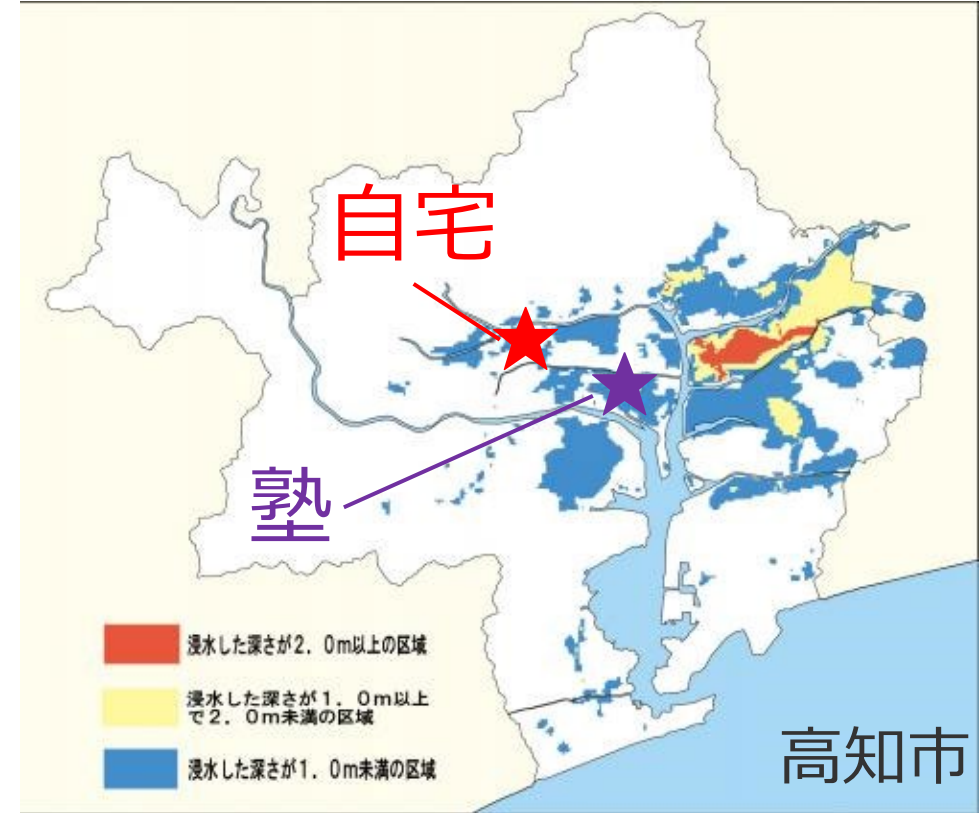
野球部ではキャプテン(しんどかった)



教訓: 迷ったら手を挙げる, と決めておく
→ 集中力が上がる & 経験値を積める

1. 小学生時代のビックリ: 大洪水 (1998年高知豪雨)

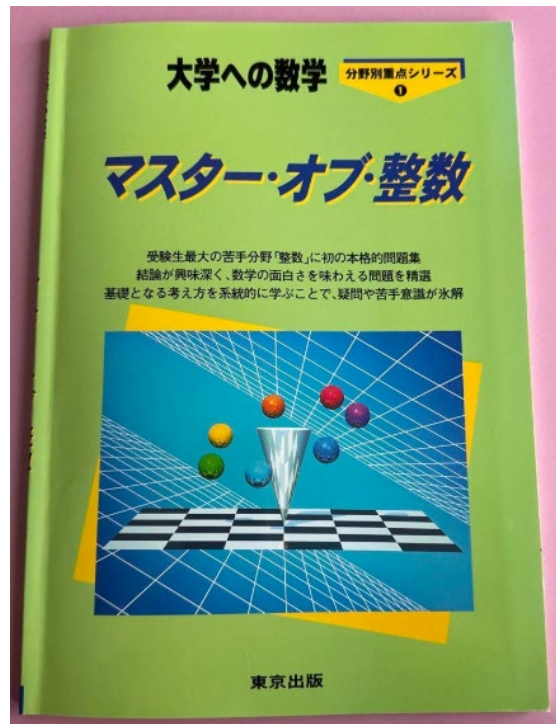
1時間雨量129.5mm および 24時間雨量861.0mmは、いずれも観測史上最多 (高知市)



小学校に通う道路が水に浸かっている。
自然の力に心底ビックリする。

2. 高校時代

授業は机の下で読書や問題集に明け暮れる (先生ごめんなさい)。でも、面白かった授業の雑談は今でも覚えている。



韓非子の法家思想を採用した
秦王朝は直ぐに滅亡した。
孔子の徳治主義を採用した
漢王朝は長く栄えた。

今、道徳→法への置き換えが進んでいる。非常に危ない。

土佐高校・亀山先生 (漢文)
(当時、授業は怖くて嫌だった)



3. 大学進学: 京都大学工学部・地球工学科に進学 (18歳)

高知県にある竜馬イズム
「おっきいことせにゃならん」



地球のお医者さんにな
りたいなあ
(ぼんやり)



入学のガイダンス
先生「土木工学だよ」
小槻「マジすか、、」



構造



計画

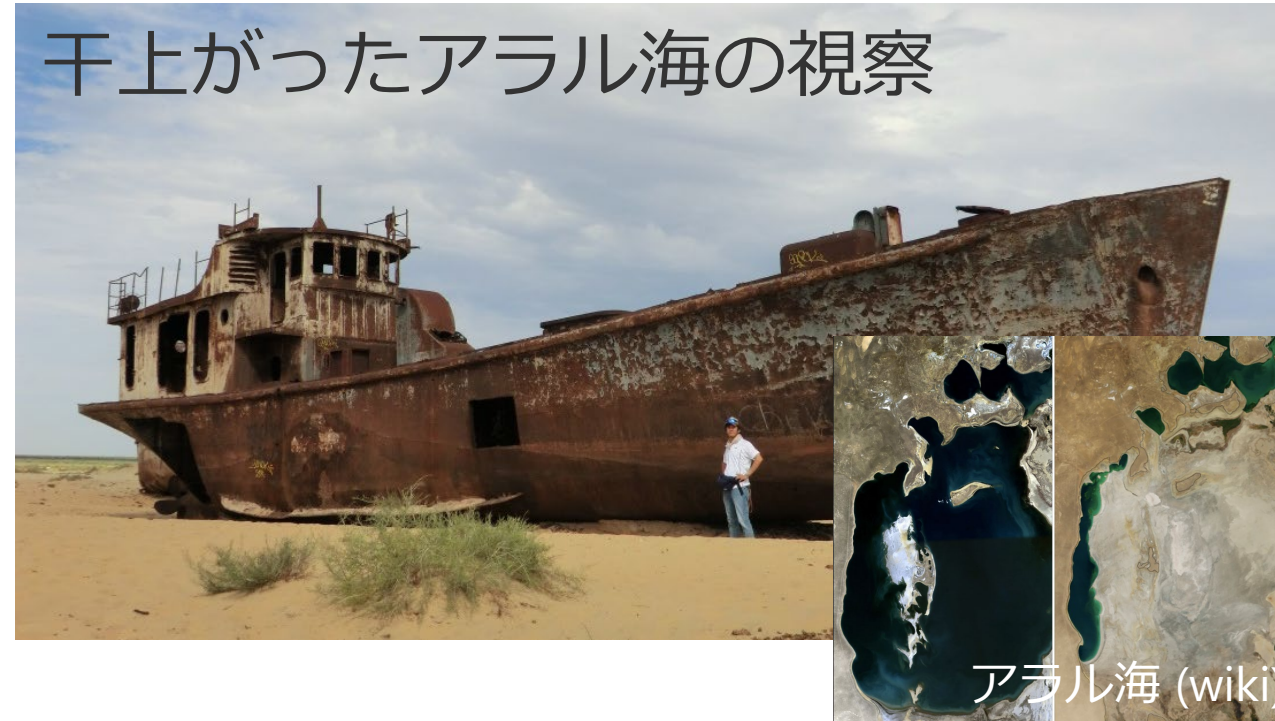
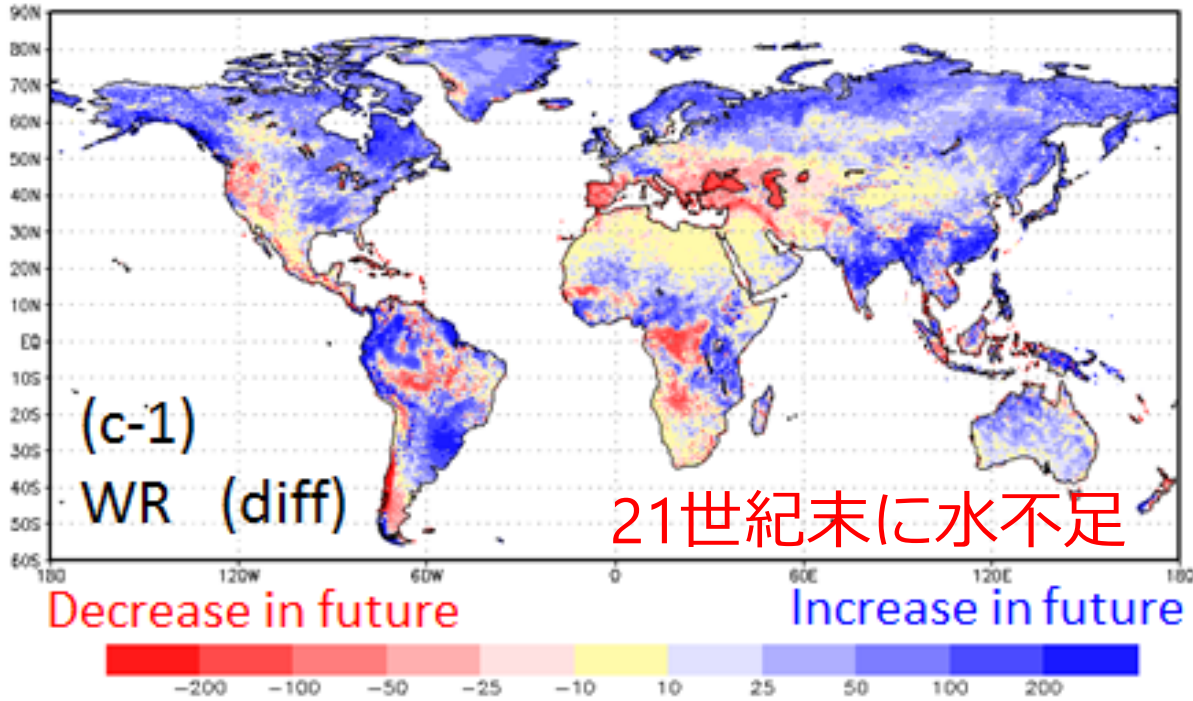


水



3. 研究室では世界各地での経験を積ませて頂く

気候変動で、世界のどこで、将来水不足が起こるのか？



研究室では、多くの地域に行く経験を積ませて頂いた。
現地視察: エジプト、ウズベキスタン、タイ、ベトナム
会議参加: 中国、韓国、フランス、ドイツ、シンガポール、台湾

3. 進路に迷う24歳

研究者か？



シンクタンクか？



公務員か？



国土交通省

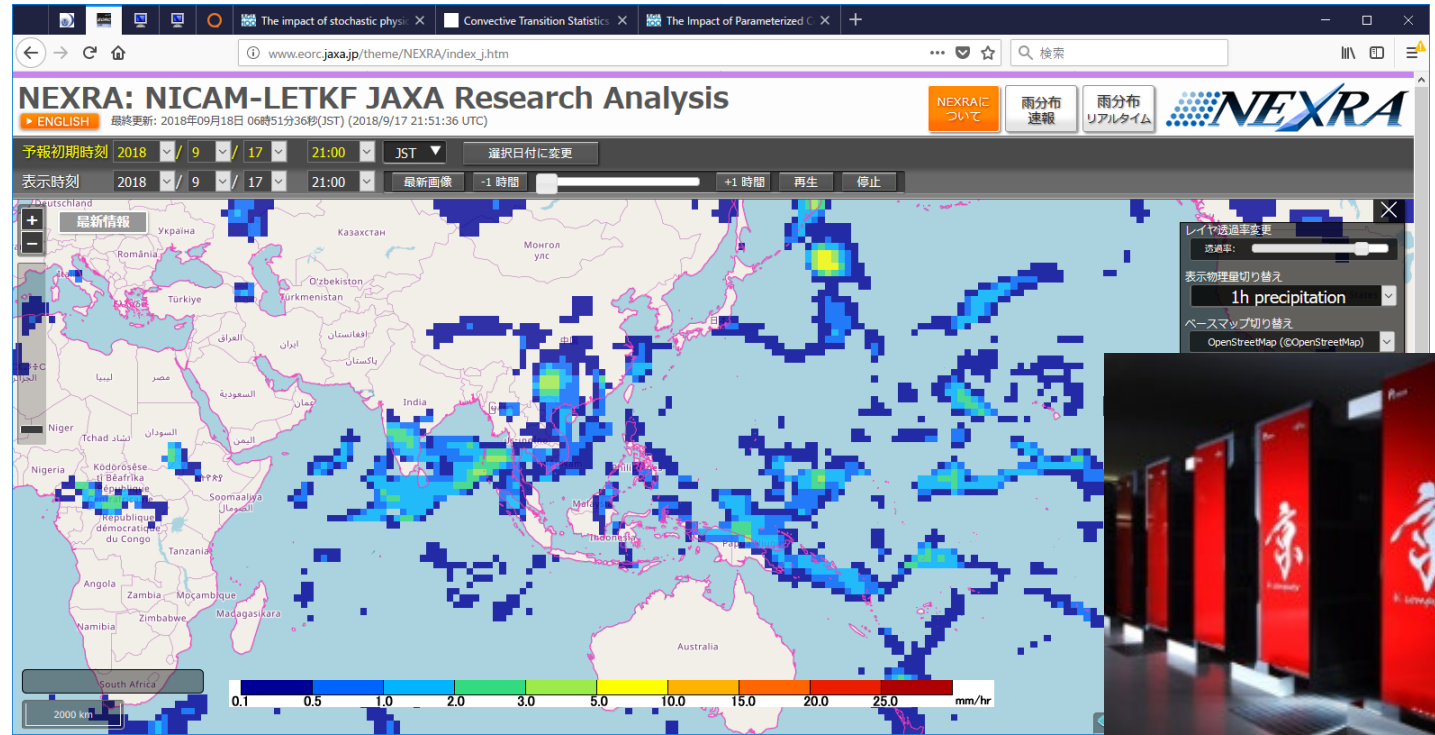


理由 (1): 研究が楽しくなってしまった。
理由 (2): 歴史に名を残せる仕事を選びたかった。
理由 (3): 攻略本の無い人生を選びたかった。
(なお、学部生の頃は銀行に就職してお金を稼ぎたいと考えていた)

4. 研究員 @ 理化学研究所・計算科学研究センター (28歳)



JAXAとの共同研究で
天気予報システムの
開発に打ち込む。
苦しくも実りを得た
青春時代。



33歳頃

暇と退屈は違う。人は暇が無くても、退屈する。

プレイヤーとしての研究に退屈しているかも。
世界一の自分の研究グループを創りたい。

→ 自分の研究室を持つために千葉大学へ

暇と退屈の倫理学 増補新版
國分功一郎



「わたしたちはバンだけでなく、バラも求めよう。
生きることはバラで飾られねばならない」

閑るく退屈と、人生の冒険に乗りだすための勇気を！
新版に寄せた渾身の挿画「暇と退屈」43,000円を寄付す。

本紙は原 定価 (1,200円+税)



5. 千葉大学で環境予測科学研究室を立ち上げる (33歳)



(人工衛星の研究センター)



環境リモートセンシング研究センター

Center for Environmental Remote Sensing



現在の研究室メンバー

6. 気象制御研究のチャンスをつかむ (35歳)

内閣府・ムーンショット事業 (2050年までの目標実現):
 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) を推進する大型研究プログラム

目標1 身体、脳、空間、時間の制約からの解放



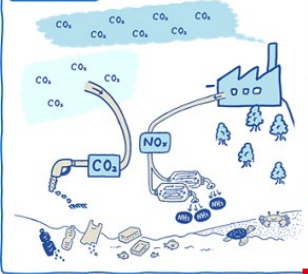
目標2 疾患の超早期予測・予防



目標3 自ら学習・行動し人と共生するAIロボット



目標4 地球環境の再生



目標5 2050年の食と農



目標6 誤り耐性型汎用量子コンピュータ



目標7 健康不安なく100歳まで



目標8 気象制御による極端風水害の軽減



目標9 こころの安らぎや活力を増大



海で豪雨発生させ 地球救う志

観測データ＋シミュレーション融合

天候予報などの観測データ「全層」を最大限に活用し、高精度の豪雨発生確率を算出する。これにより、豪雨発生時の被害を軽減する。

「観測データ」を最大限に活用し、高精度の豪雨発生確率を算出する。これにより、豪雨発生時の被害を軽減する。



噴水装置で積乱雲 地上の被害減めざす

海上で雲を発生させるイメージ。マイクロ波で加熱し、冷気の層を形成させる。地上の被害を減らす。

海上で雲を発生させるイメージ。マイクロ波で加熱し、冷気の層を形成させる。地上の被害を減らす。



2024.07 いまからサイエンス



人生からの学び



1. アウトプットを意識してインプットする

• 質問しようとして聴けば、インプットの精度が上がる

- アウトプットを意識したインプットで、学習効率は劇的に向上
- 試しに、「明日友達に説明する」つもりで本を読んでみる。
 - 最初は大変だけど、慣れると出来るようになる。
- 「自分の言葉」で世界を理解できるようになってくる。



• 「悩んだらやる」と決めておけば、悩まなくなる

- 質問にせよ、グループの代表にせよ、フィードバックが得られる。
 - 上手くいくにせよ、失敗するにせよ、この経験値が非常に重要。
- 立場が人間を創る。多くの経験を積みれば、人間性を磨ける。
- 仮にその立場でなくても、ロールプレイングゲームはできる。



2. ぼんやりとした興味、が人生の道標になる

地球のお医者さんになりたいなあ
(ぼんやり)

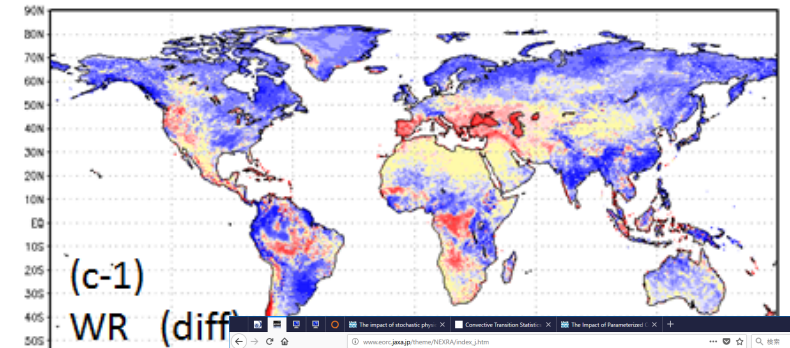


スティーブ・ジョブス (意識)

- ・ 経験が役立つかなんか分からん。
- ・ 後で繋がって見えるものだ。
- ・ だから心の声に従って行動せい。

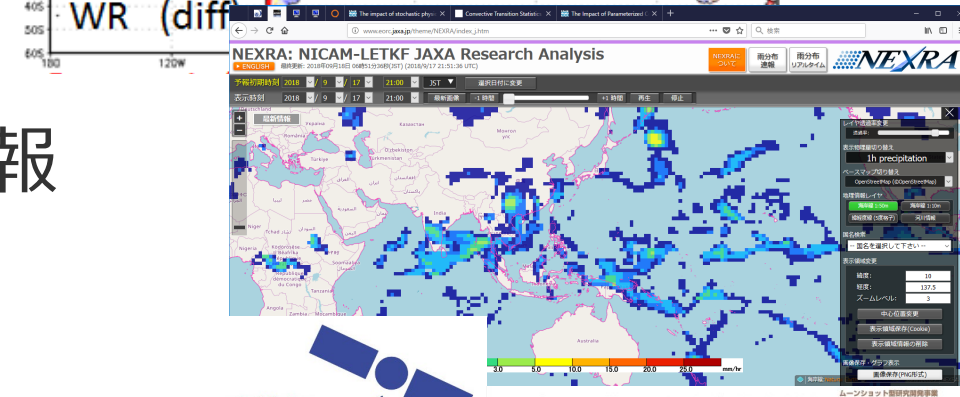
博士の研究

世界の水資源



研究員時代

世界の天気予報



千葉大の着任

衛星研究センター



現在

気象制御への挑戦



遠くの上で人為的に豪雨を発生
陸地における被害の緩和を目指す

3. ? ? ? ? ? ?

3 番目は一番最後に紹介



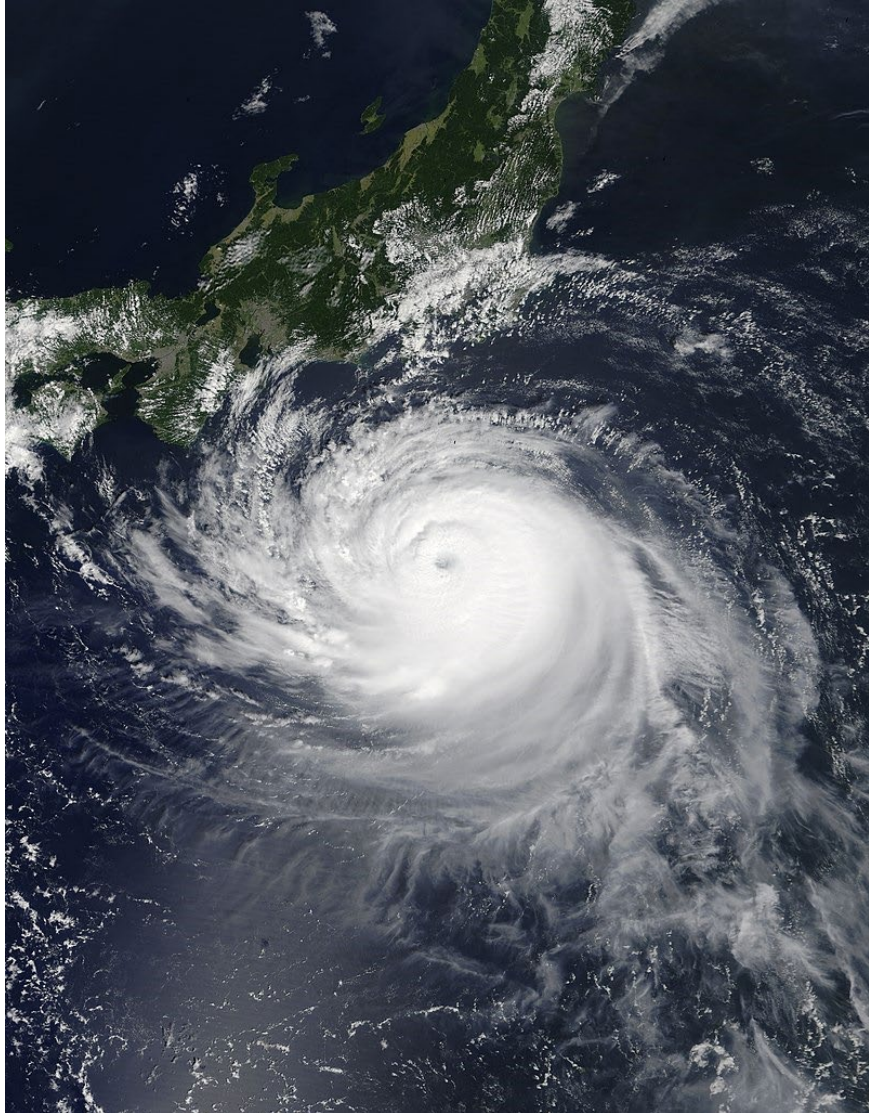
研究の紹介: 気象制御について



そのまえに、天気予報の仕組み

激化する気象災害

令和元年房総半島台風 (2019)



被災住居



倒壊した鉄柱@市原市

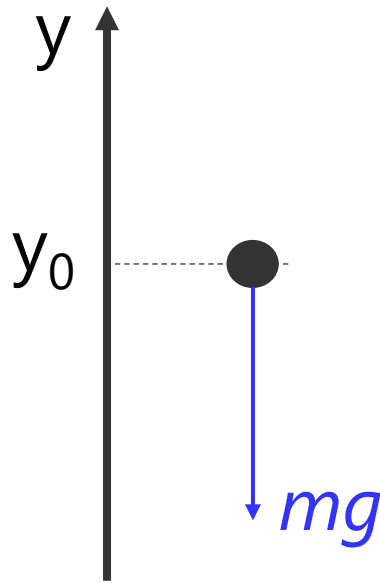
images from wikipedia, 市民防災研究所

積分の気持ち: 積分で未来を予測する

速度: 微小時間の位置変化 $v = \frac{dx}{dt}$

加速度: 微小時間の速度変化 $a = \frac{d^2x}{dt^2}$

簡単な例: 自由落下運動



$$m \frac{d^2y}{dt^2} = -mg \Leftrightarrow \frac{d^2y}{dt^2} = -g$$

積分 $\rightarrow \frac{dy}{dt} = \int \left(\frac{d^2y}{dt^2} \right) dt = \int (-g) dt = -gt + C = v$

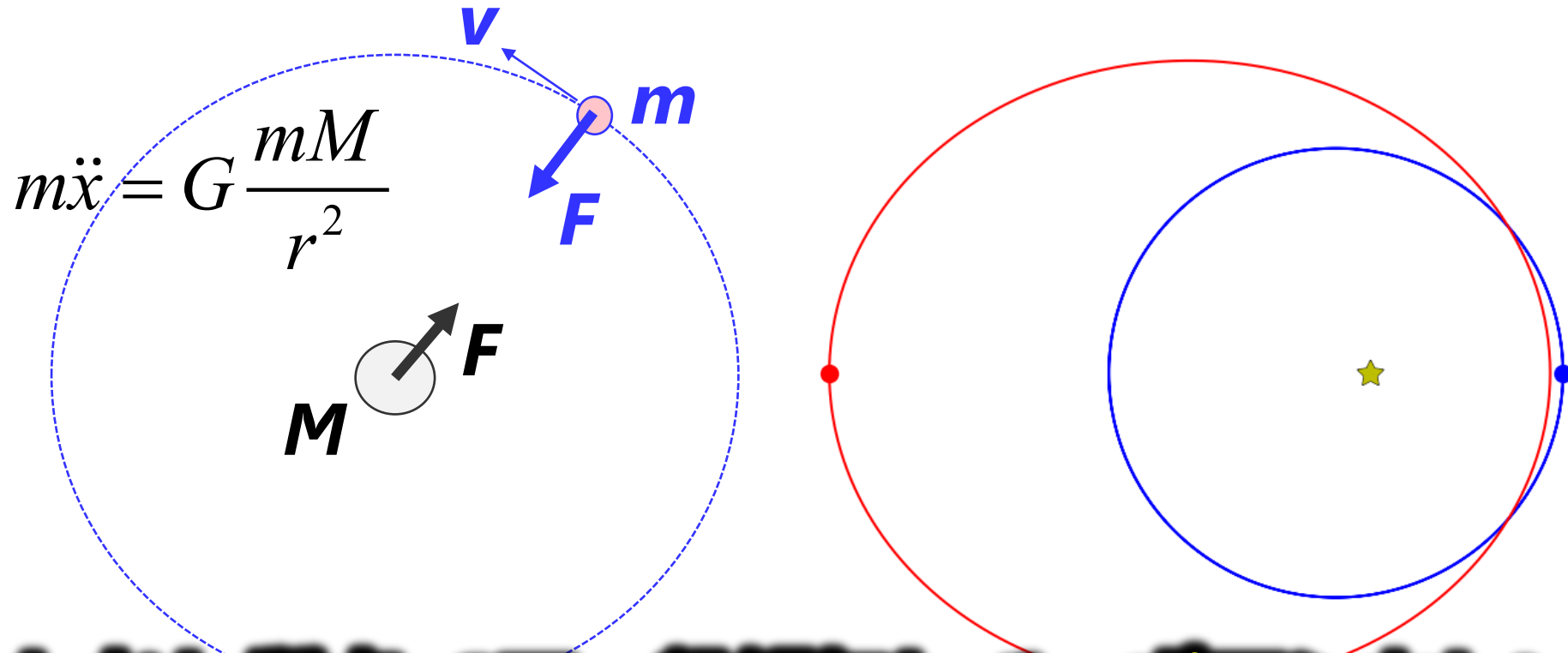
積分 $\rightarrow y = \int \left(\frac{dy}{dt} \right) dt = \int (-gt + C) dt = -\frac{1}{2}gt^2 + Ct + C'$

(i) 初期条件 $v(0) = 0$ より $C = 0$
(ii) 初期条件 $y(0) = y_0$ より $C' = y_0$ $\therefore y = -\frac{1}{2}gt^2 + y_0$

- ① 支配方程式を積分して初めて状態 (位置・速度) が分かる
- ② 予測には初期条件 (積分定数) が必要

ニュートン力学と求積解の限界

世界は時間について微分方程式 (運動方程式) で記述されていて積分で予測する (=求積する)

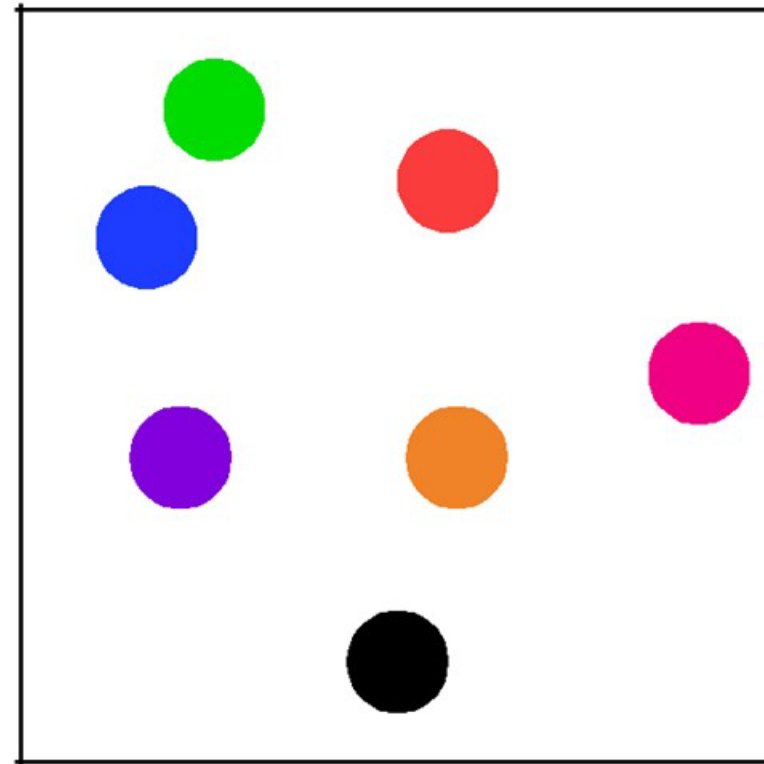


しかし質点 ≥ 3 で一般解無し (by ポアンカレ)
 → コンピュータを使った数値予測へ

計算機による数値積分の気持ち①



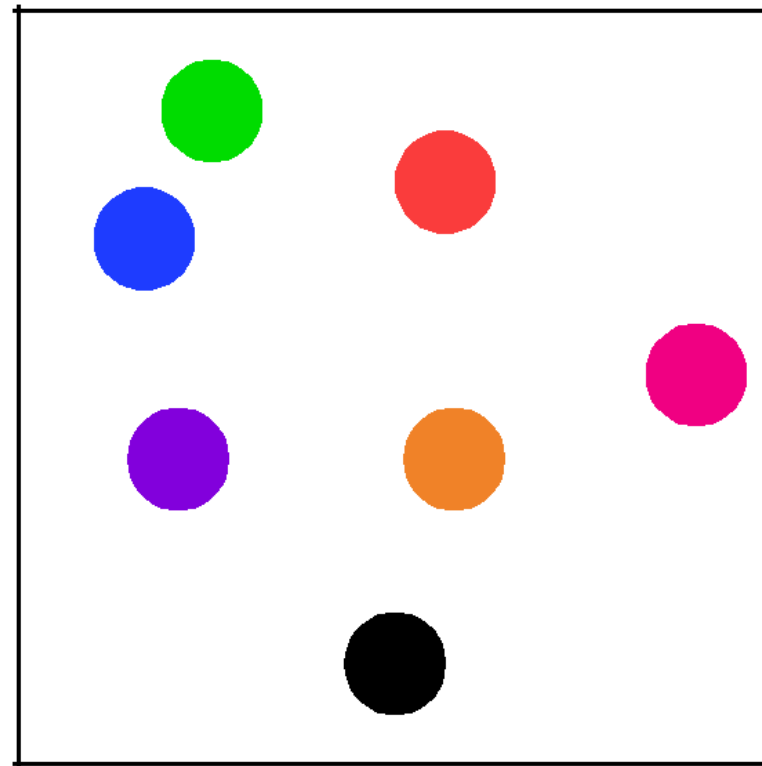
ビリヤードの例



計算機による数値積分の気持ち①



ビリヤードの例

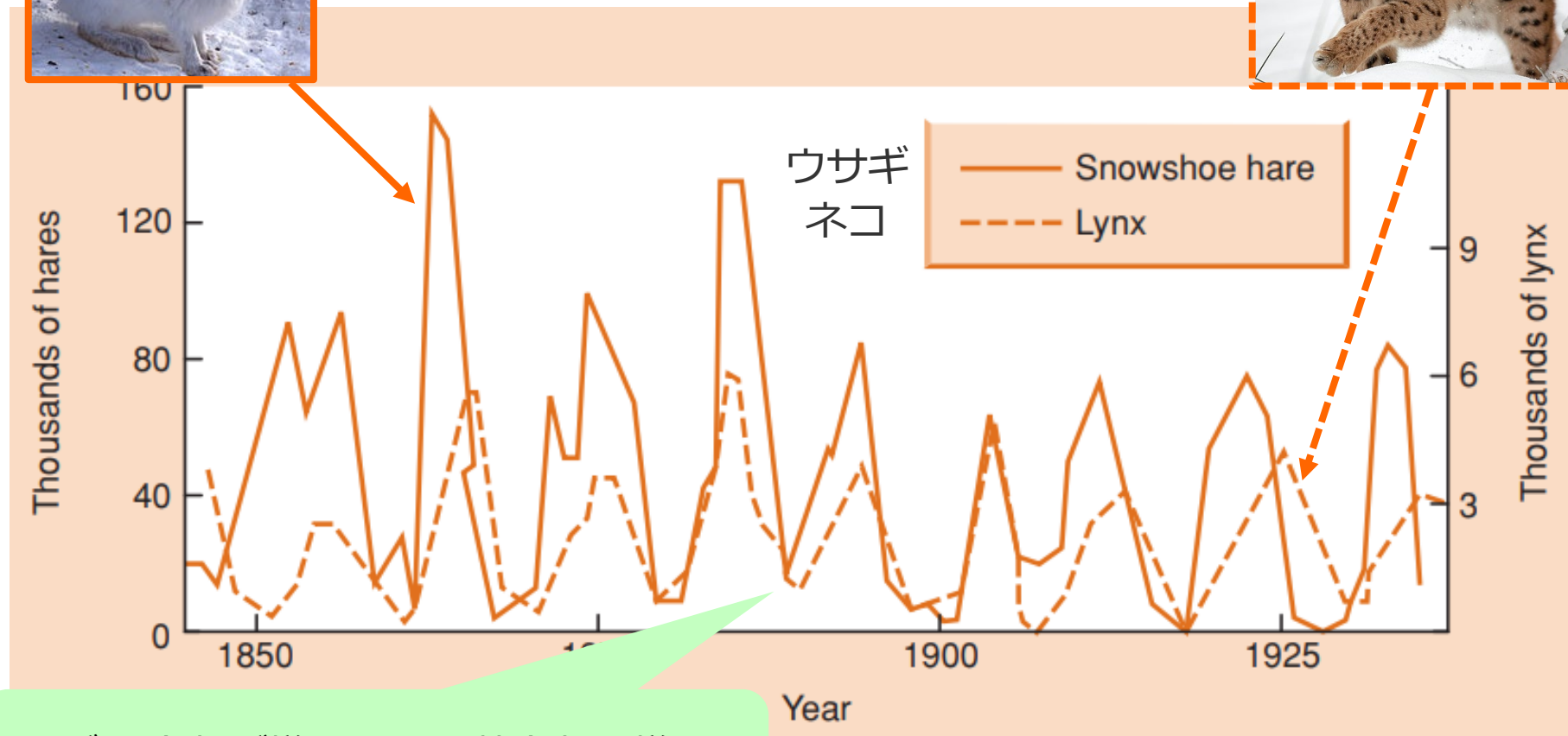


計算機による数値積分の気持ち②

カンジキウサギ (hare)



オオヤマネコ (Lynx)



ウサギ(被食者)が増え、ネコ(捕食者)も増える。
どうやったら表現できるだろう？

計算機による数値積分の気持ち②

被食者の個数変化

(ウサギが増える割合)

$$\frac{dX}{dt} = rX - aXY$$

ウサギの
自然増加

ウサギがヤマネコに
捕獲される数

捕食者の個数変化

(ヤマネコが増える割合)

$$\frac{dY}{dt} = faXY - qY$$

ヤマネコがウサギを
捕獲して繁殖する数

ヤマネコの
自然減少

ロトカ・ヴォルテラの捕食モデル

X	被食者の数
Y	捕食者の数
r	被食者の増殖率
a	捕食者の捕獲効率
f	捕食者が餌を子供に転換する効率
q	捕食者の死亡率
t	時間

fa : 捕食者が餌を見つけて繁殖する率

数値積分 (≡ 数列) で未来を予測

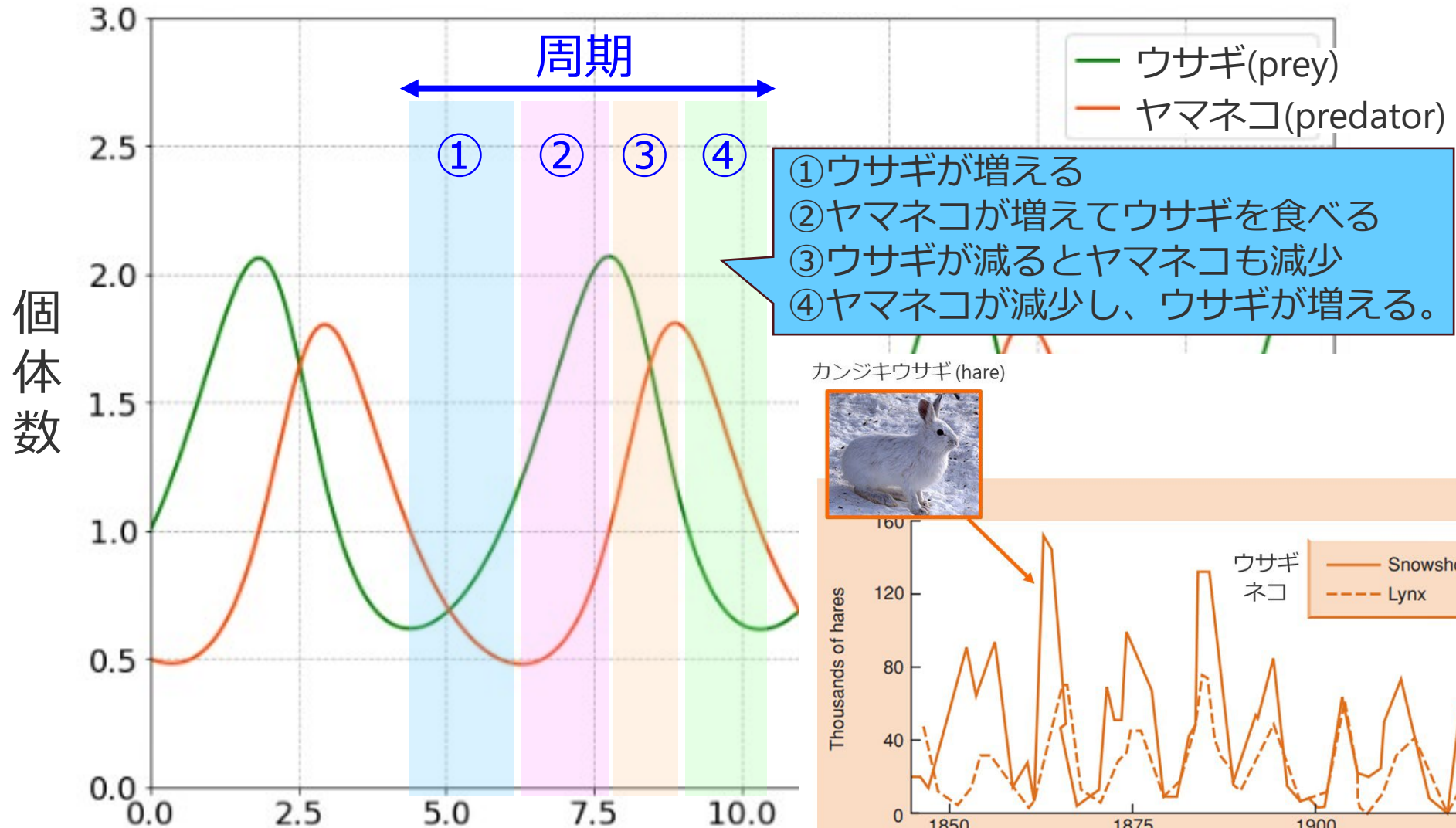
ある時刻のウサギ $X(t)$ とネコ $Y(t)$ から、

$$\begin{aligned} X(t + dt) &= X(t) + dX \\ &= X(t) + (rX - aXY)dt \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y(t + dt) &= Y(t) + dY \\ &= Y(t) + (faXY - qY)dt \end{aligned}$$

計算機による数値積分の気持ち②

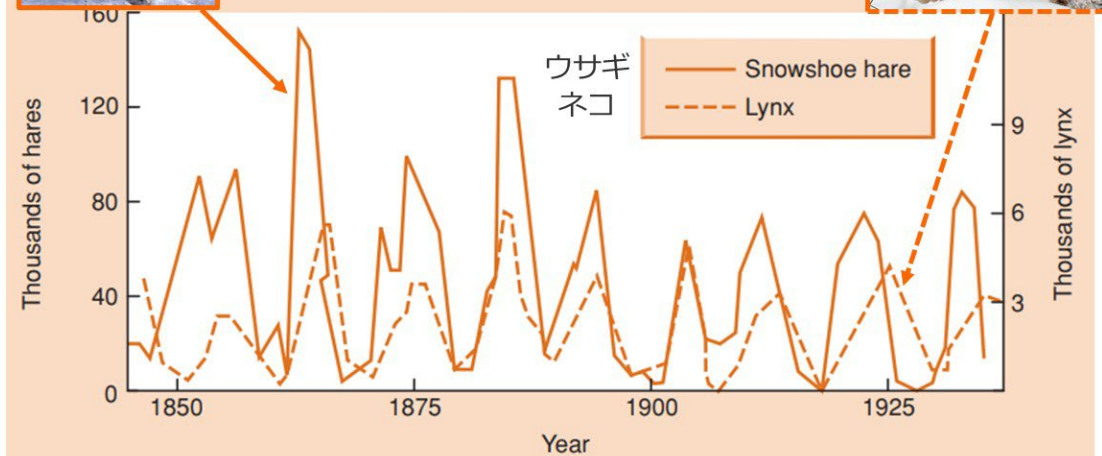
ウサギとヤマネコの個体数変化の数値シミュレーション



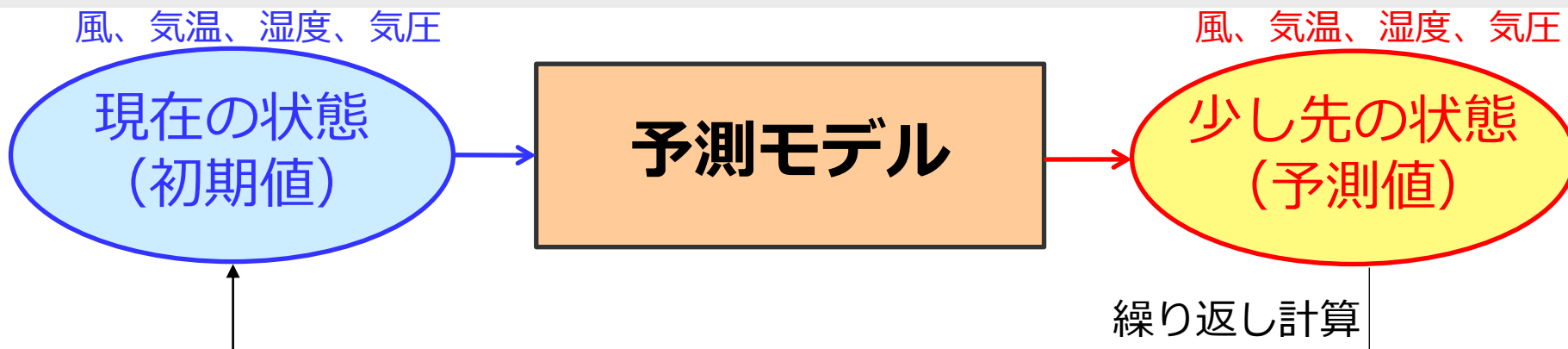
カンジキウサギ (hare)



オオヤマネコ (Lynx)



計算機を用いた天気予報

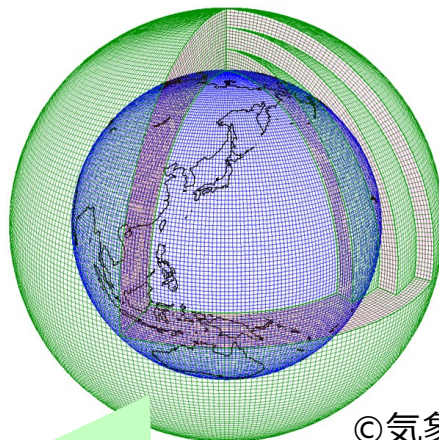


現実の地球



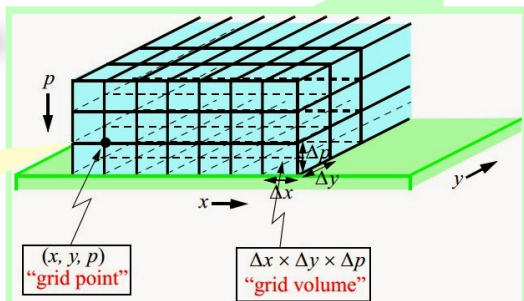
discretize

計算機の地球



©気象庁

各格子点で
風, 気温, 湿度, 気圧...



ATMOS 301
Numerical Weather Prediction

リチャードソンの夢 (1920; 200km)

©JMA



富岳 (2020; 3.5km x 1000 アンサンブル)



©RIKEN

世界の降水量のシミュレーション

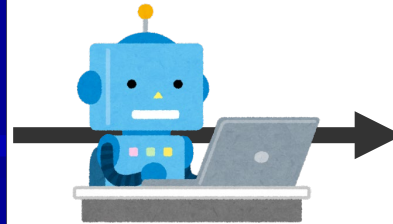
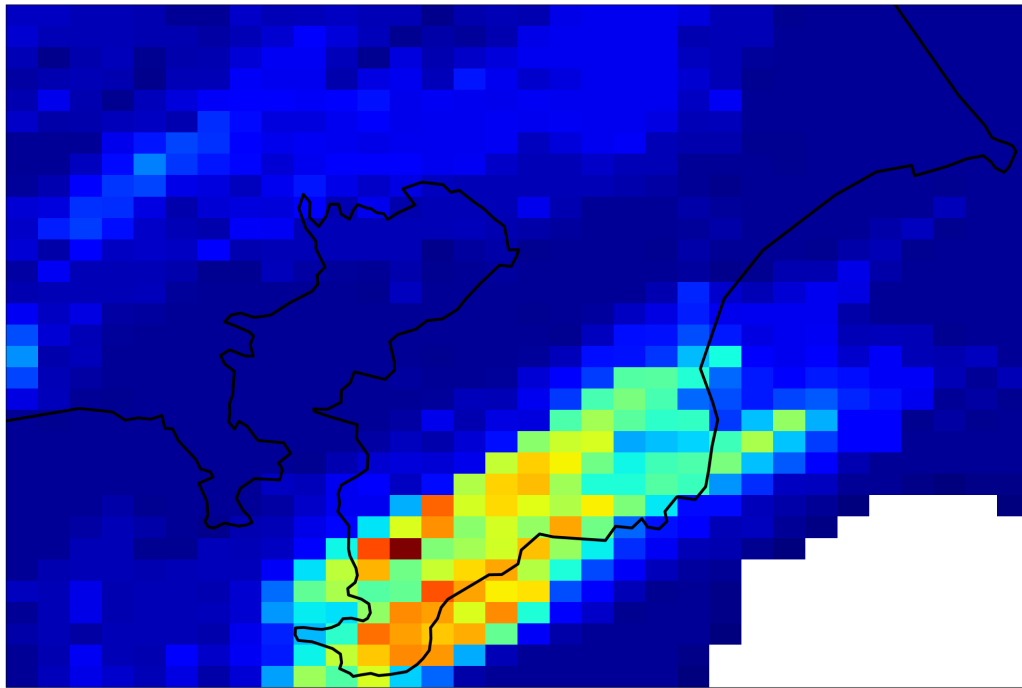


2014/05/25 00:00

天気予報研究の最前線: AI研究

粗い降水データ × AI → 災害予測の高度化

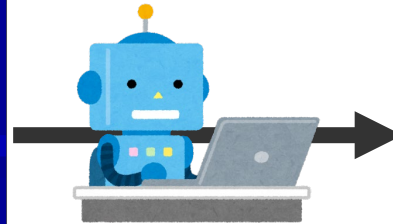
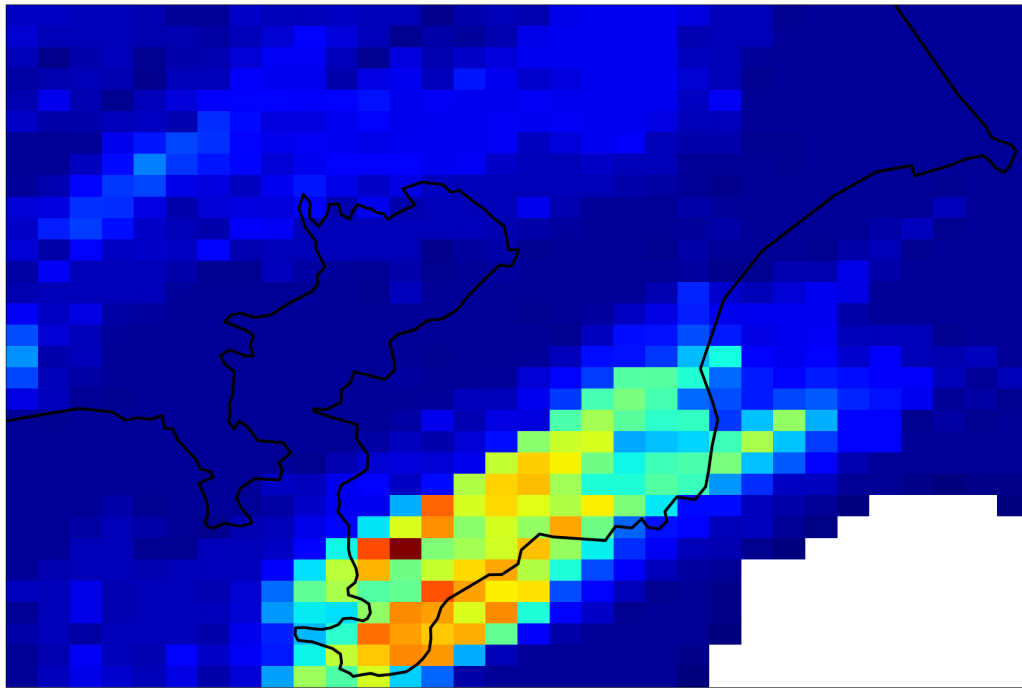
入力降水分布 (低解像度☹)



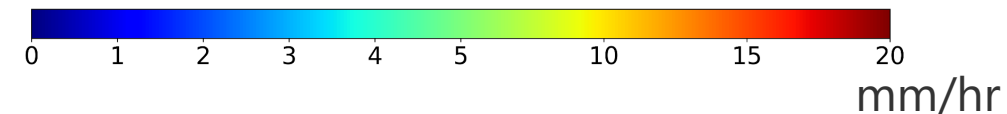
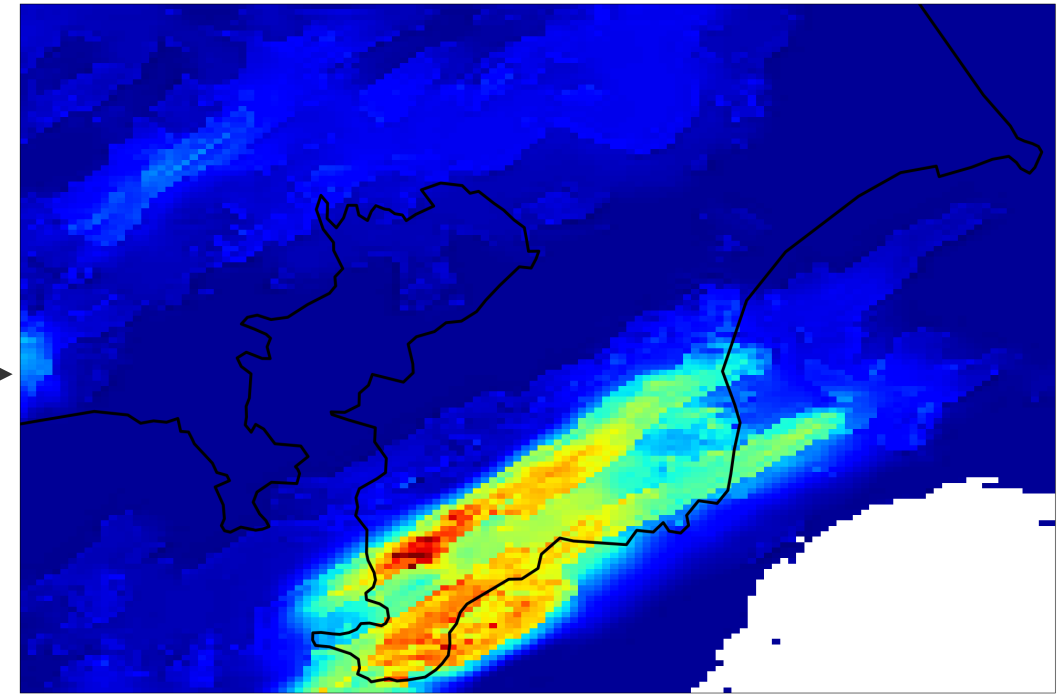
mm/hr

粗い降水データ × AI → 災害予測の高度化

入力降水分布 (低解像度☹)



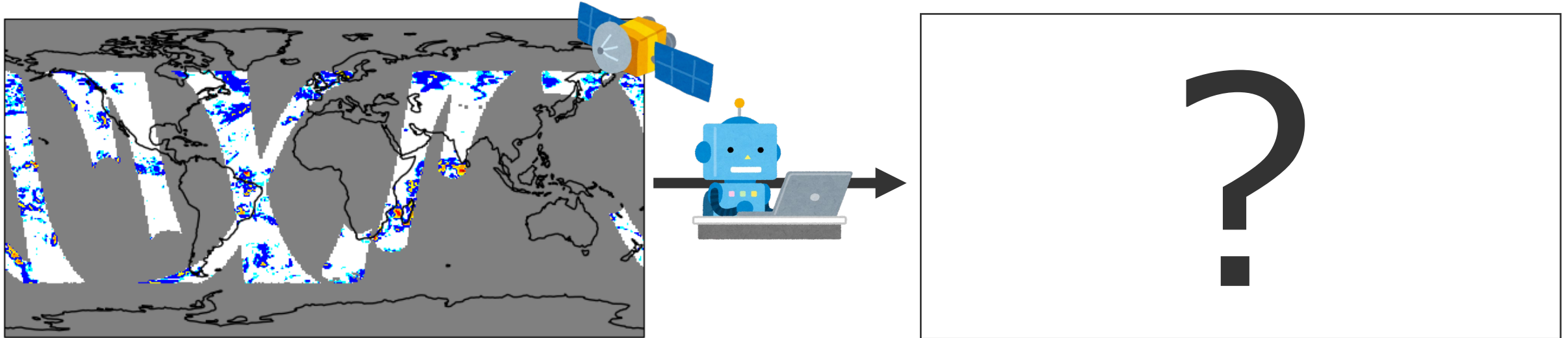
高解像度の降水分布



天気予報研究の最前線: AI研究

衛星観測降水 × 生成AI → 世界の災害を監視

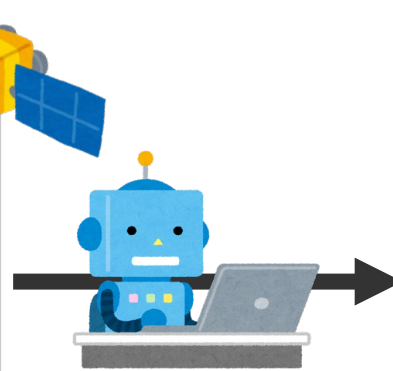
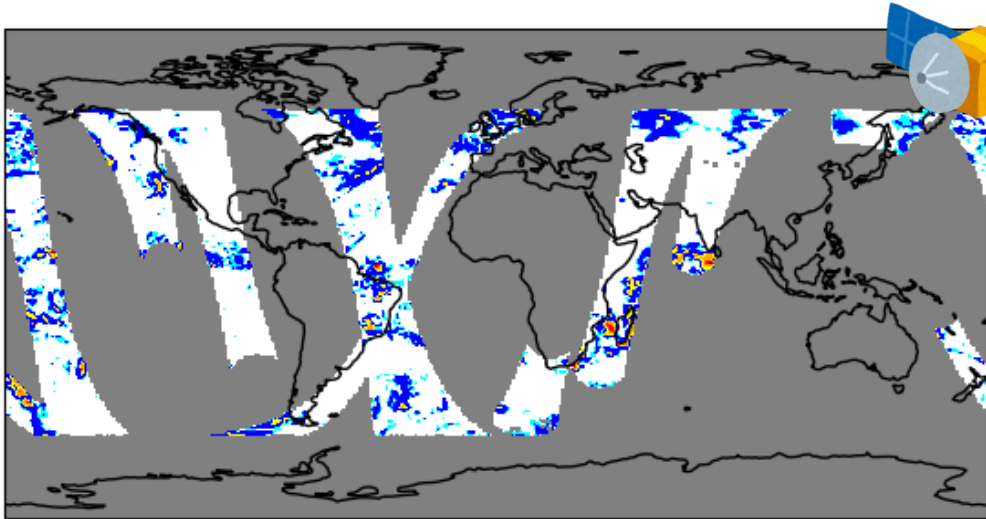
衛星観測降水 (空間的に疎☹)



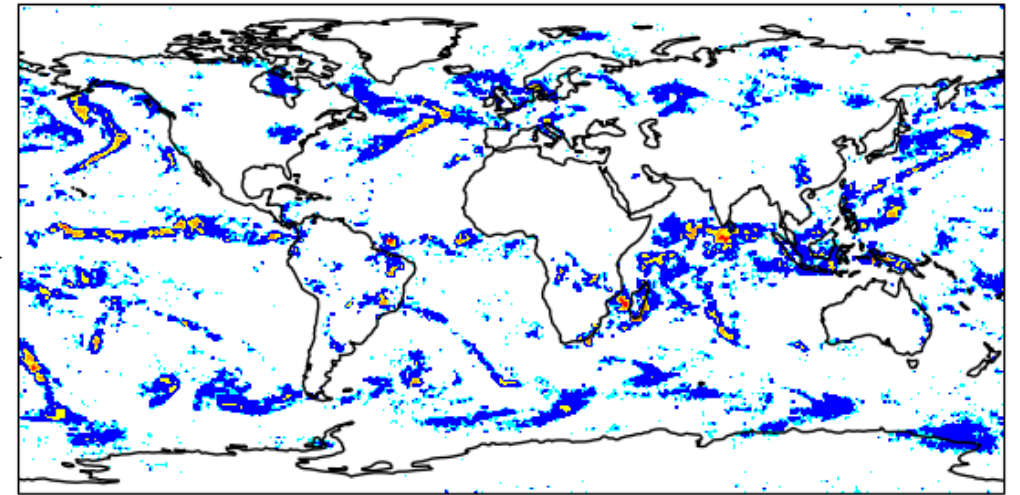
天気予報研究の最前線: AI研究

衛星観測降水 × 生成AI → 世界の災害を監視

衛星観測降水 (空間的に疎☹)



世界の降水分布



激化する気象災害

日本の水害被害

年別の全国水害被害額合計

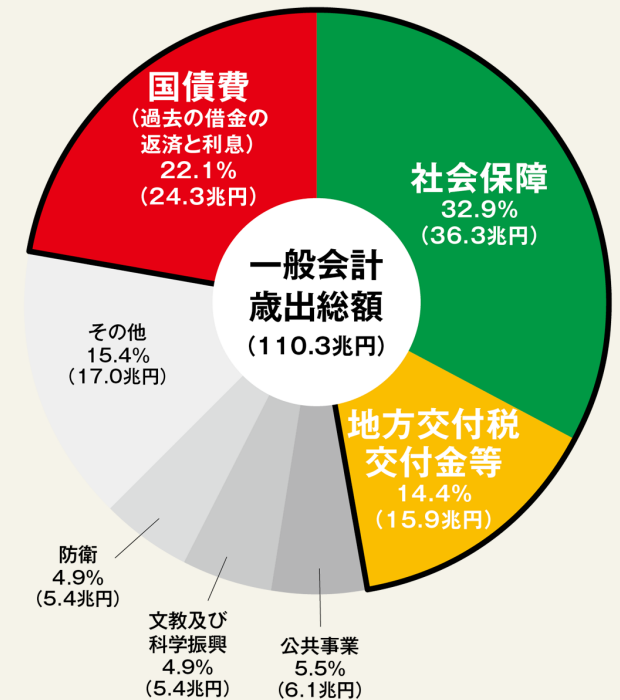
2013年	4,061億円	2018年	1兆4,051億円
2014年	2,938億円	2019年	2兆1,799億円
2015年	3,896億円	2020年	6,618億円
2016年	4,661億円	2021年	3,583億円
2017年	5,360億円	2022年	5,967億円

出典:ソニー損害保険株式会社

(<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000036.000063966.html>)

日本の国家予算

【2022年度補正後予算】



(注1) 「その他」には、新型コロナ及び原油価格・物価高騰対策予備費 (5.5% (6.1兆円)) が含まれる。
(注2) 補正後予算は、令和4年5月31日成立の補正に基づくもの。

出典: 財務省

気象予測 から 気象制御 へ

天気予報モデルやAIにより
気象災害を予測の予測技術は
大きく進展

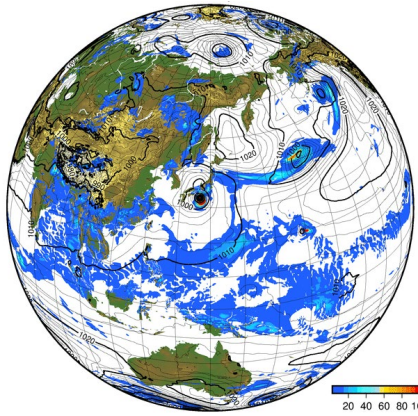
集中豪雨



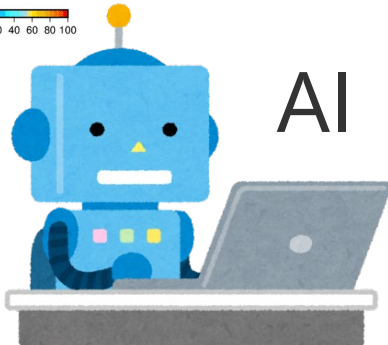
洪水



天気予報モデル



20 40 60 80 100



人為的に気象を変える制御で
気象災害を減らせないか？

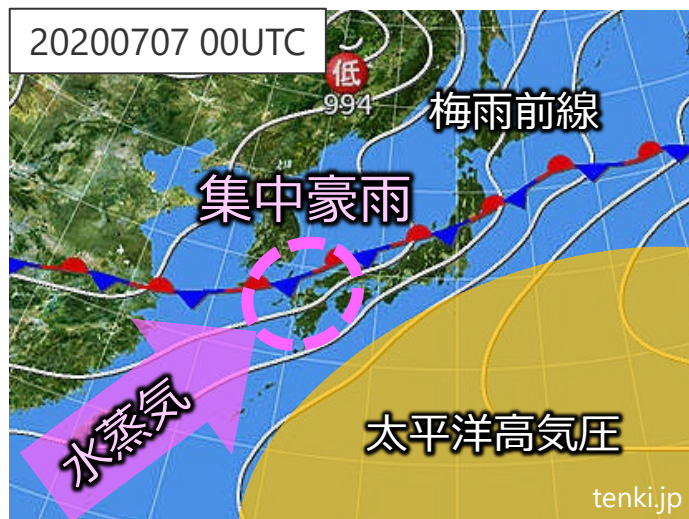
気象制御実現への挑戦



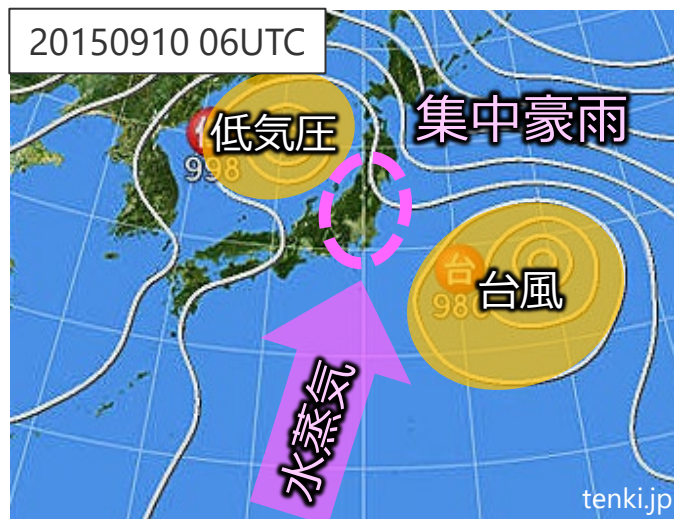
日本や世界で引き起こされる集中豪雨

海上からの水蒸気供給に起因する集中豪雨の例

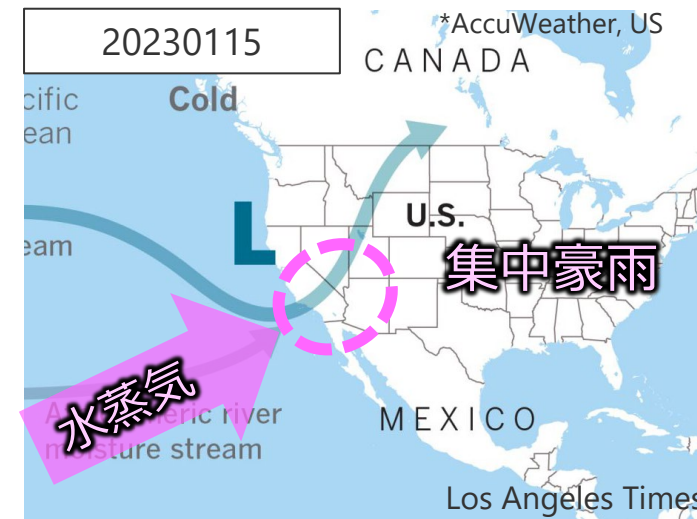
令和2年7月豪雨 (被害5,800億円)



平成27年関東・東北豪雨(被害2,940億円)



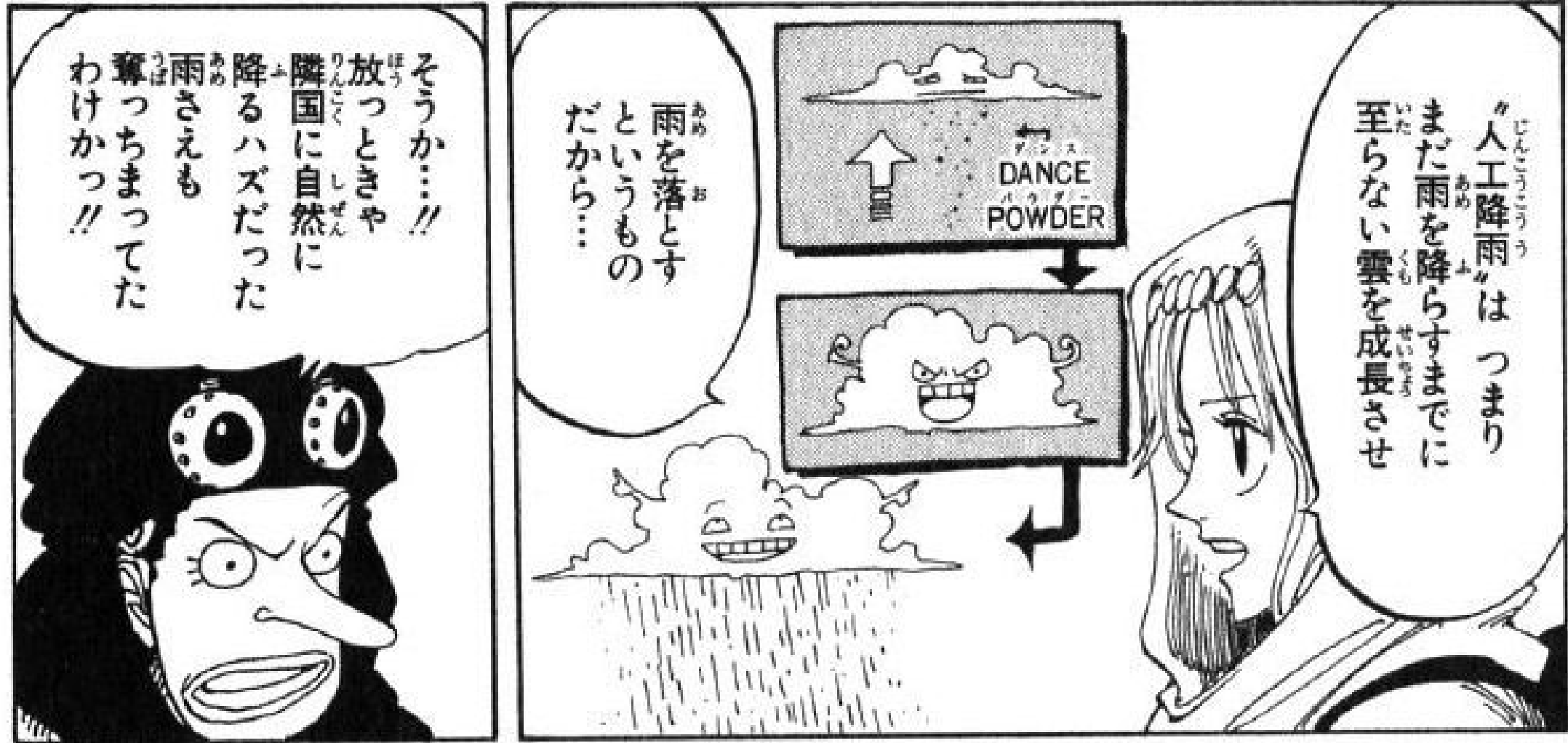
2023年米国カリフォルニア豪雨(被害4兆円)



どうやったらこのような集中豪雨の被害を防げるだろうか？

プロジェクトの戦略

そのままだと日本に降るはずだった豪雨を先に降らすことができる



豪雨緩和戦略のイメージ

自然界にあるメカニズム
バックビルディング・集中豪雨

集中豪雨を人為的に、
水蒸気の流入する
上流海上で起こす

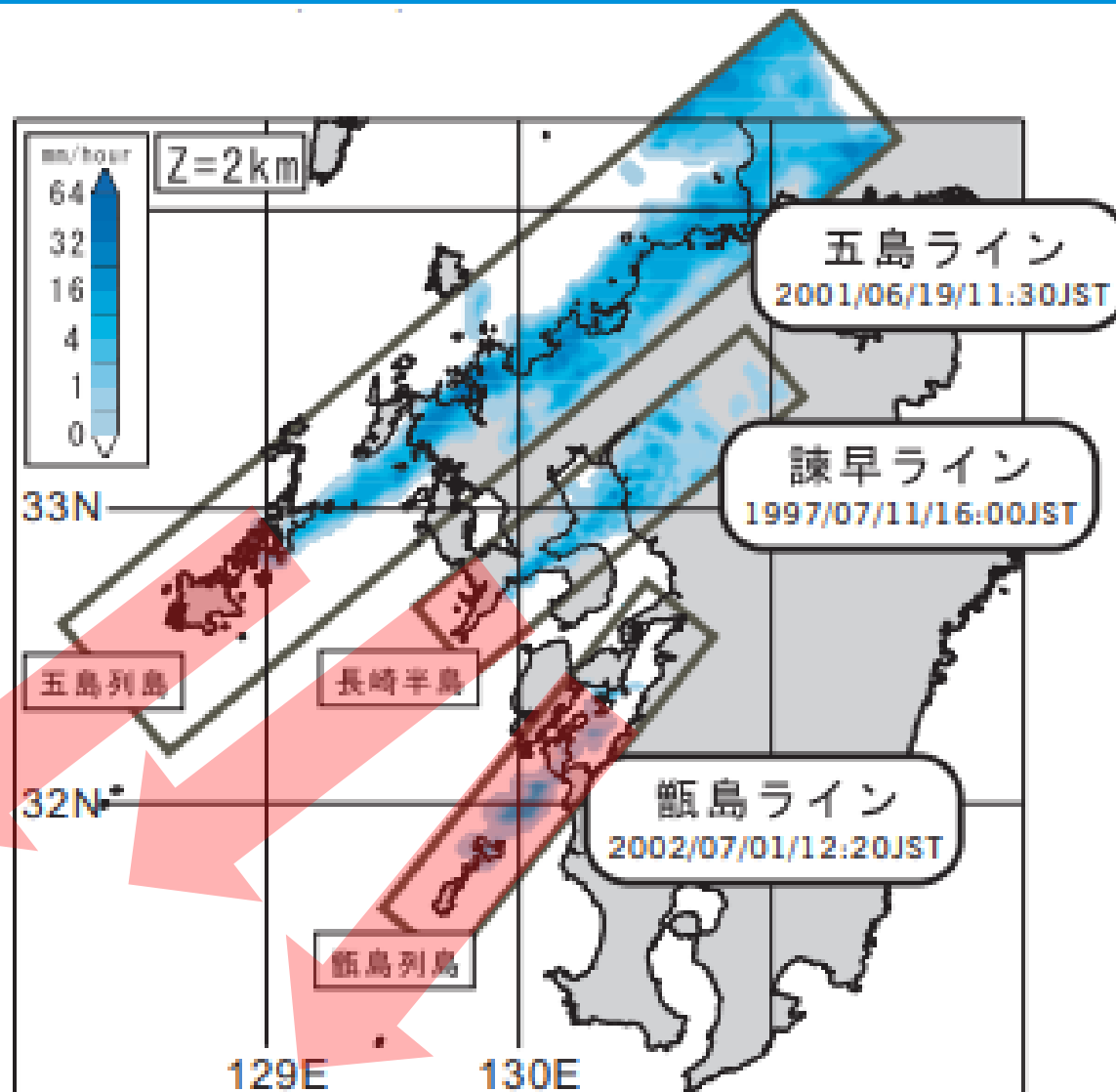
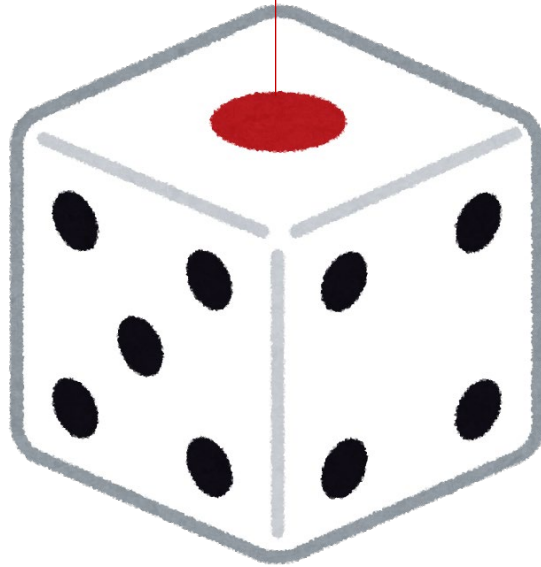


図 1: 九州地方に見られる最も顕著な地形性降水帯の例。高度 2km における降水強度の水平分布 (JMA レーダー)。

気象制御に向けて解決すべき課題

気象研究

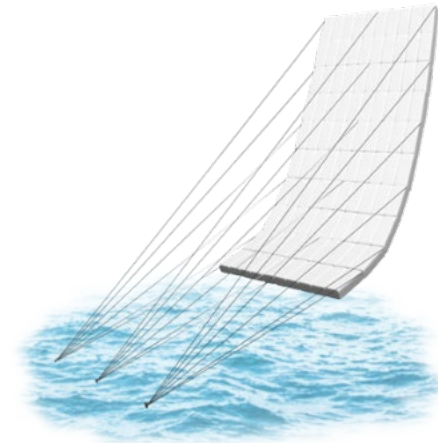
如何に海上豪雨を形成するか?



シーディング



風



最初のステップ: 気象への介入により集中豪雨は緩和できるのか?
→ フィールド実験を行う前に、計算機を使った数値モデル実験で検討

数値モデルを用いた人工降雨実験



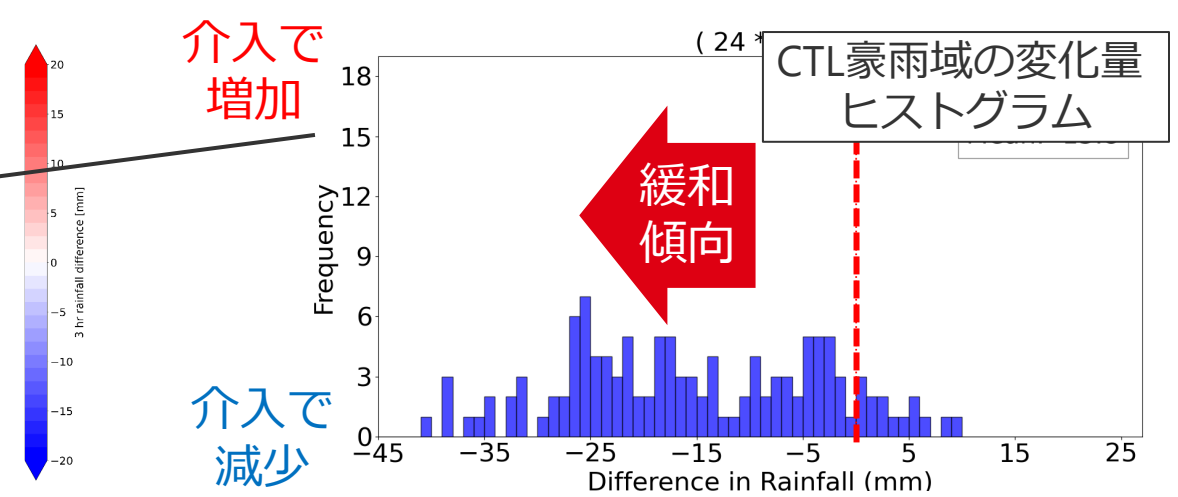
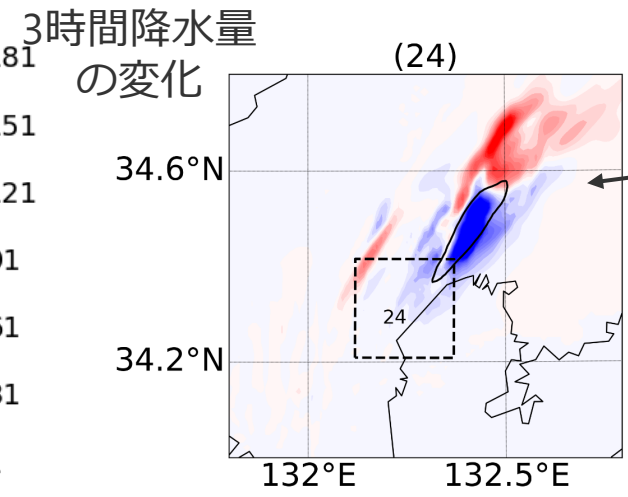
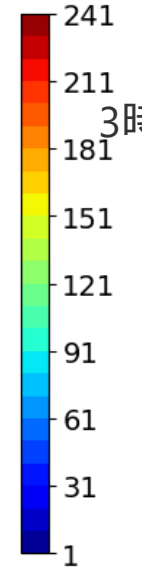
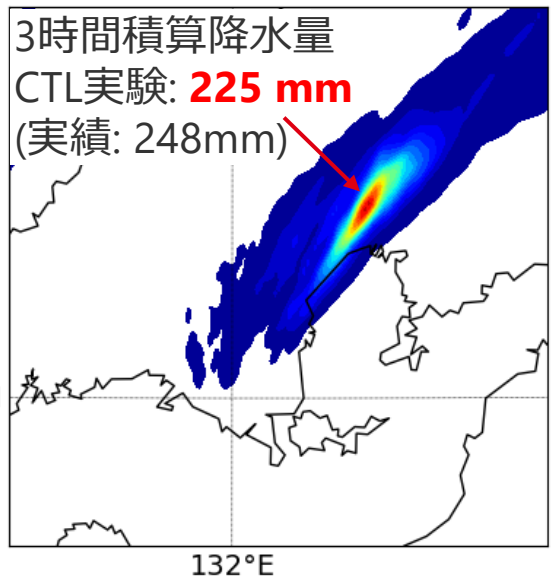
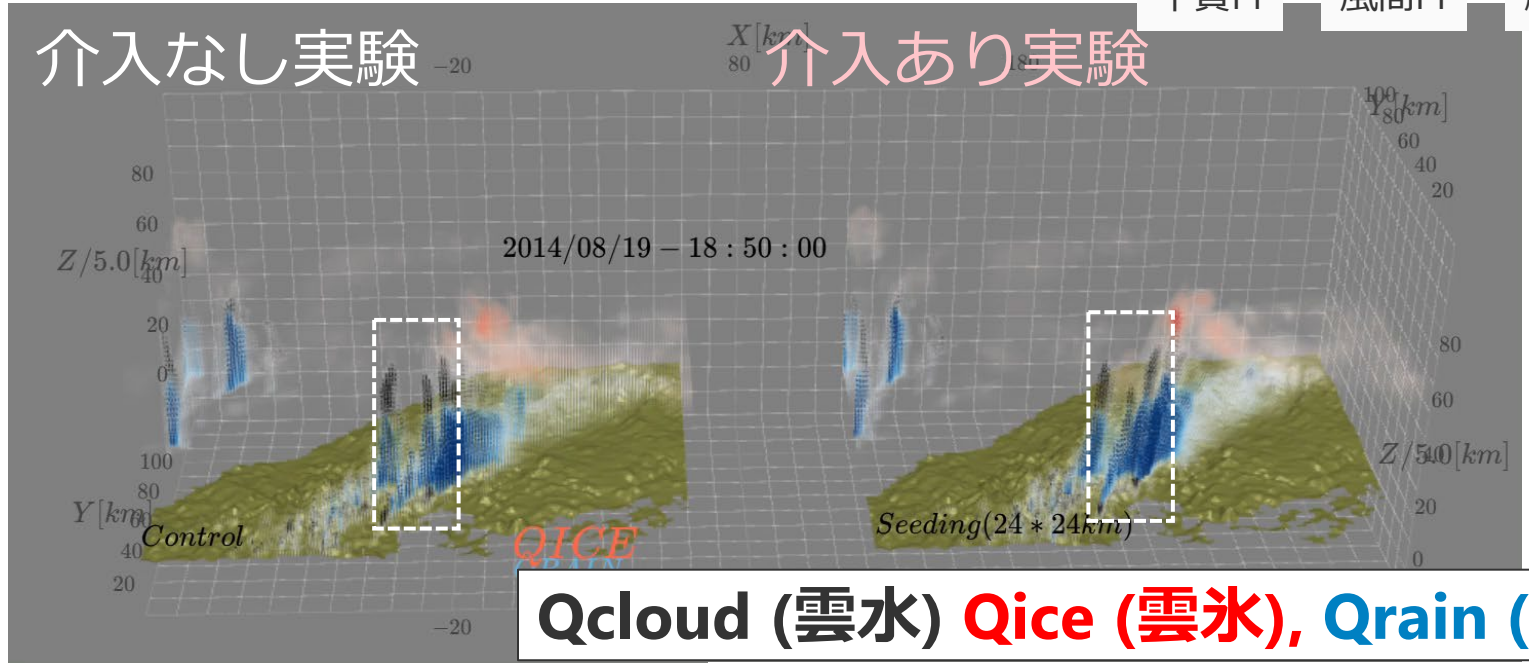
平賀PI

風間PI

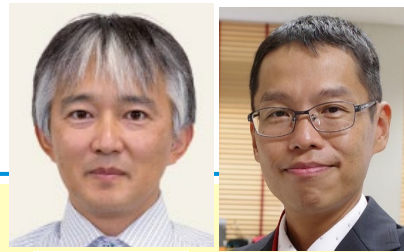
船富PI

現実的な介入 (オーバーシーディング) により集中豪雨の緩和を数値計算で実証

平成26年8月 広島豪雨



凧による気象介入実験



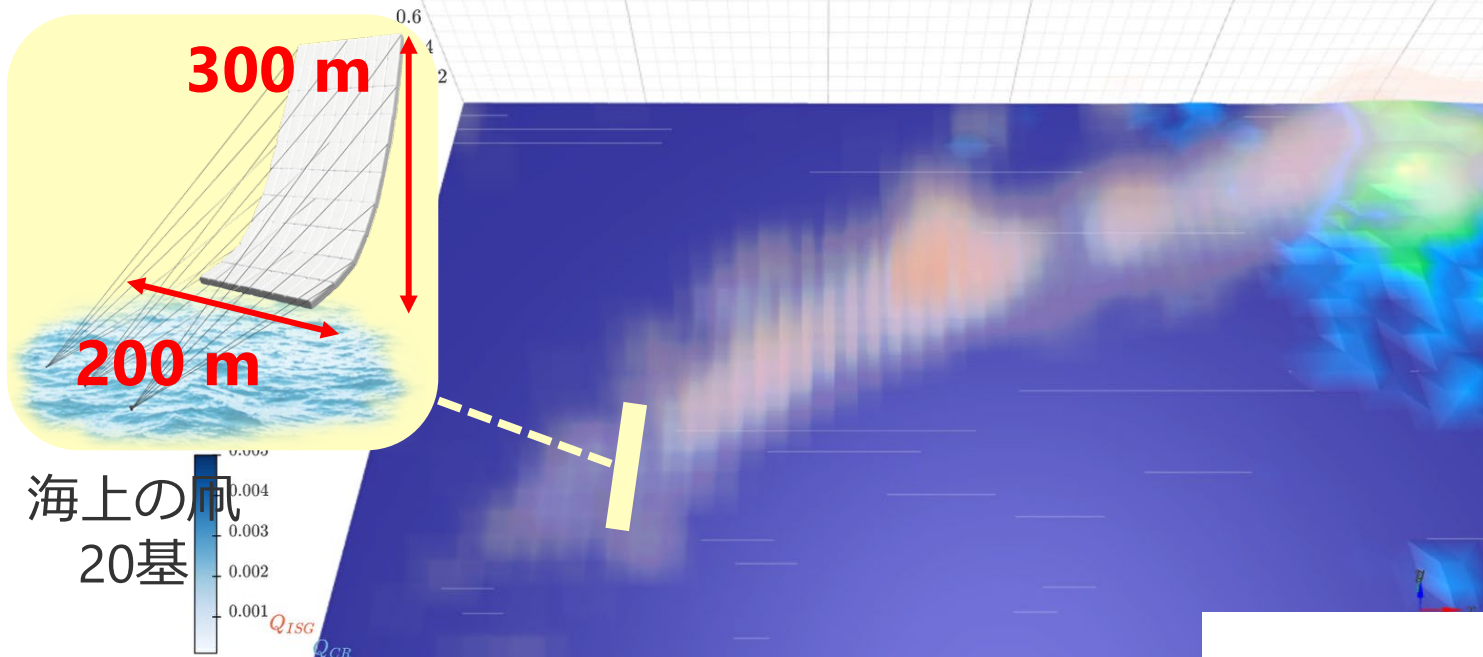
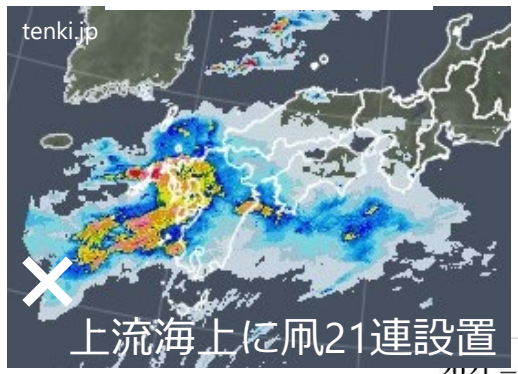
安永 PI

船富 PI

凧は上流域の降水量を増加させ、下流域の降水量を減少させる

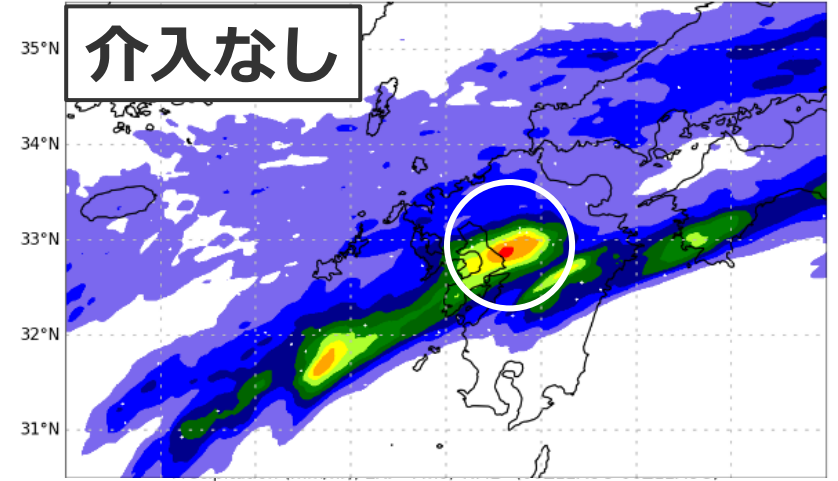
6時間平均降水量 (アンサンブル平均)

2021年8月豪雨

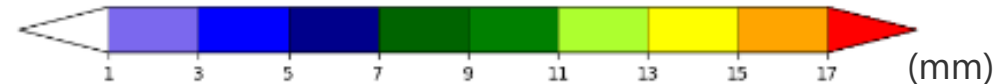
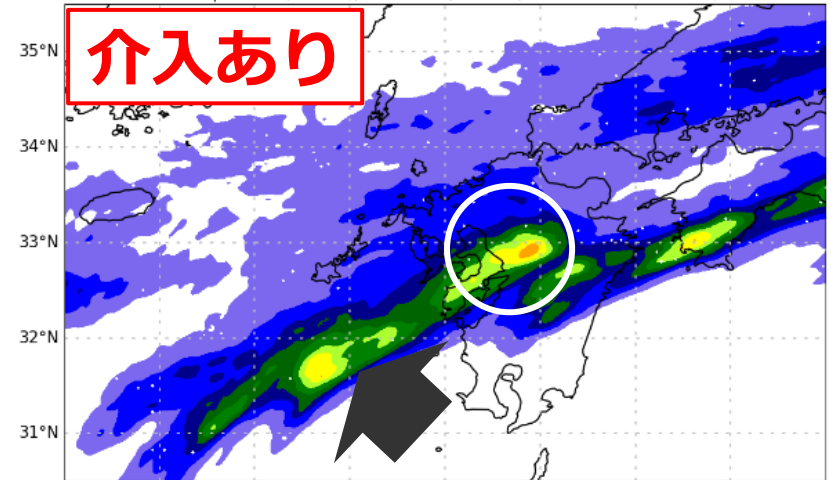


Precipitation (mm/hr), EXP=Cntl, TIME=(00Z12AUG-06Z12AUG)

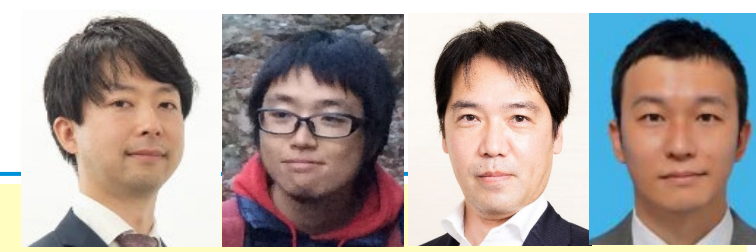
介入なし



介入あり

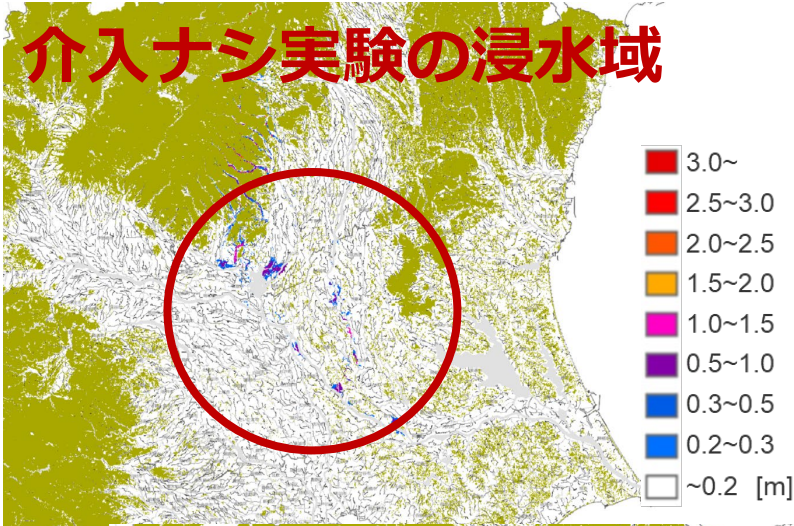
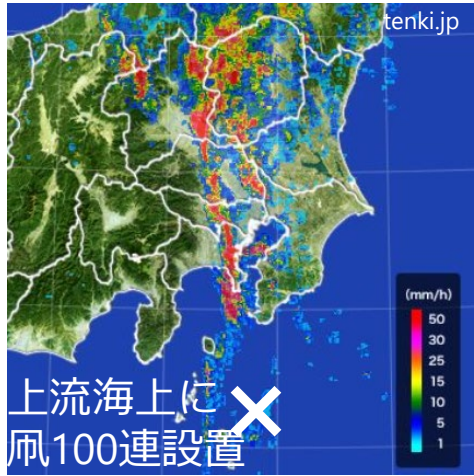


2015年 関東・東北豪雨 被害低減効果

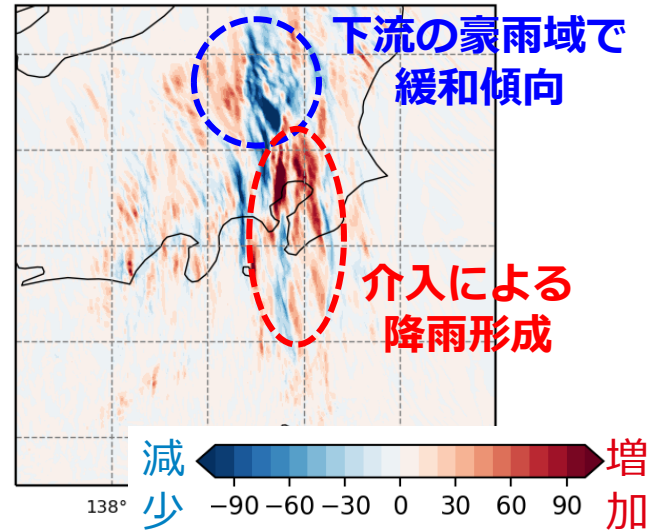


風の介入実験。洪水氾濫モデルと被害推定モデルによる被害低減効果の試算

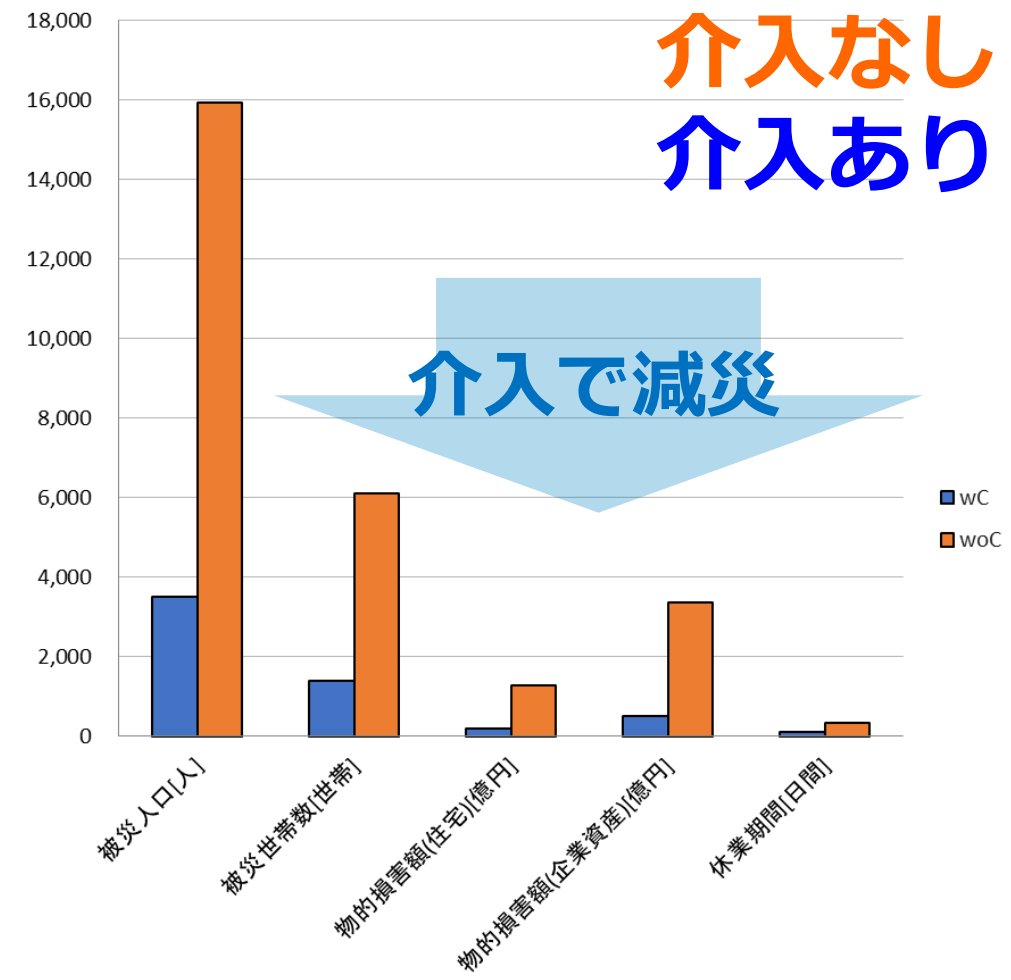
2015年9月関東・東北豪雨



24時間積算降水量 (或るメンバー)



経済被害低減効果



気象制御に向けて解決すべき課題

気象研究

如何に海上豪雨を形成するか?



数理研究

如何に介入を最適化するか?



RRI研究

如何に社会受容を目指すか?



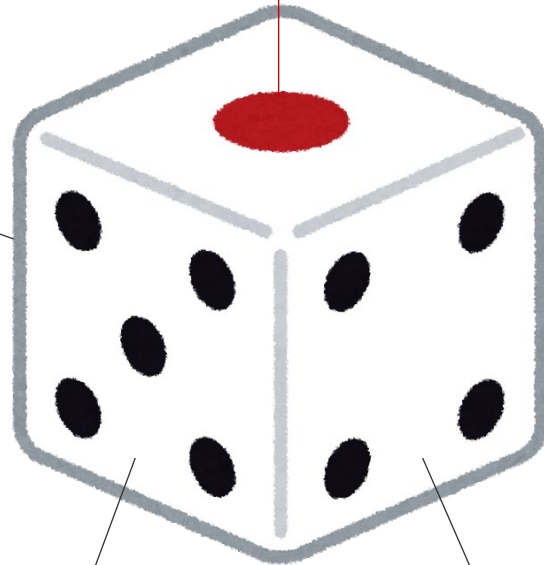
工学研究

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?



気象制御に向けて解決すべき課題

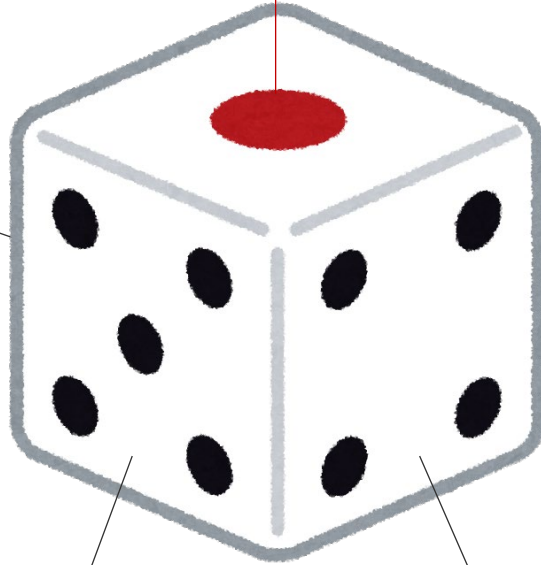
気象研究

如何に海上豪雨を形成するか?



数理研究

如何に介入を最適化するか?



RRI研究

如何に社会受容を目指すか?



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?

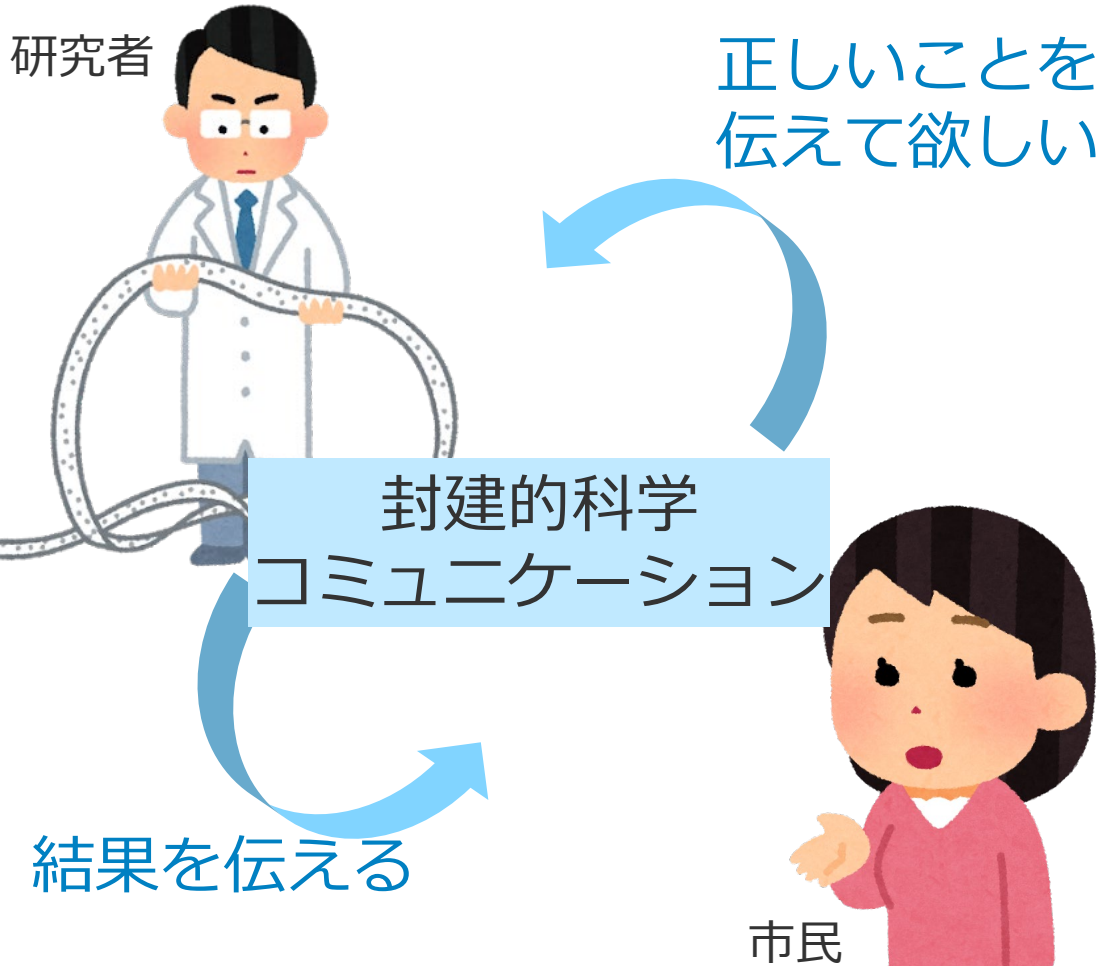


責任ある科学イノベーション (RRI)

依然として日本の科学伝達では、専門家が「結果を伝え」、社会の側も「正しいことを伝えて欲しい」という一方通行の面があり、科学者と社会が科学成果の社会的価値を最大化する仕組みは道半ば (e.g. 新型コロナ)。

市民・行政・企業・産業などのステークホルダーとどのような気象制御を目指すべきか議論する。

現状の日本の科学コミュニケーション



どのような気象制御を目指すのか？



- ・ 技術開発の社会的価値を最大化する
- ・ 日本発のイニテアチブ・国家戦略に繋げる

これからの研究計画

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。

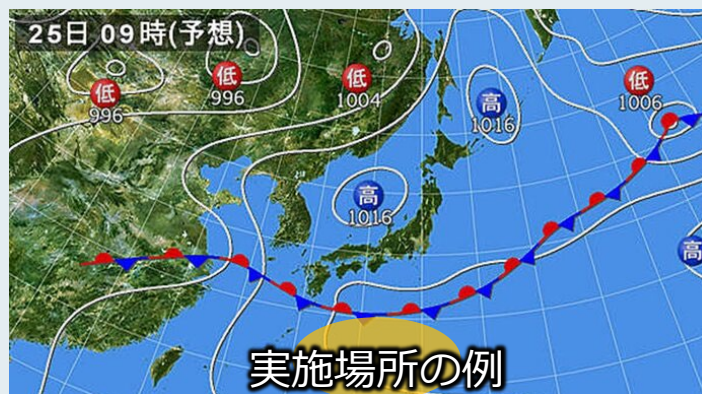
屋外実証実験

介入技術を個別に屋外で検証
(2027年～)



大規模実証実験
(2037年～)

梅雨前線が南方海上にあるなど
気象変化による社会影響
が少ない状況で実施



研究
推進を
円滑化

合意形成に向けた取り組み

(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
- ・ 利害関係の調整

(3) 社会・法制度の設計

- ・ 実施機関や避難対策
- ・ 国際ルール策定を主導



目標実現に向かって頑張っています！



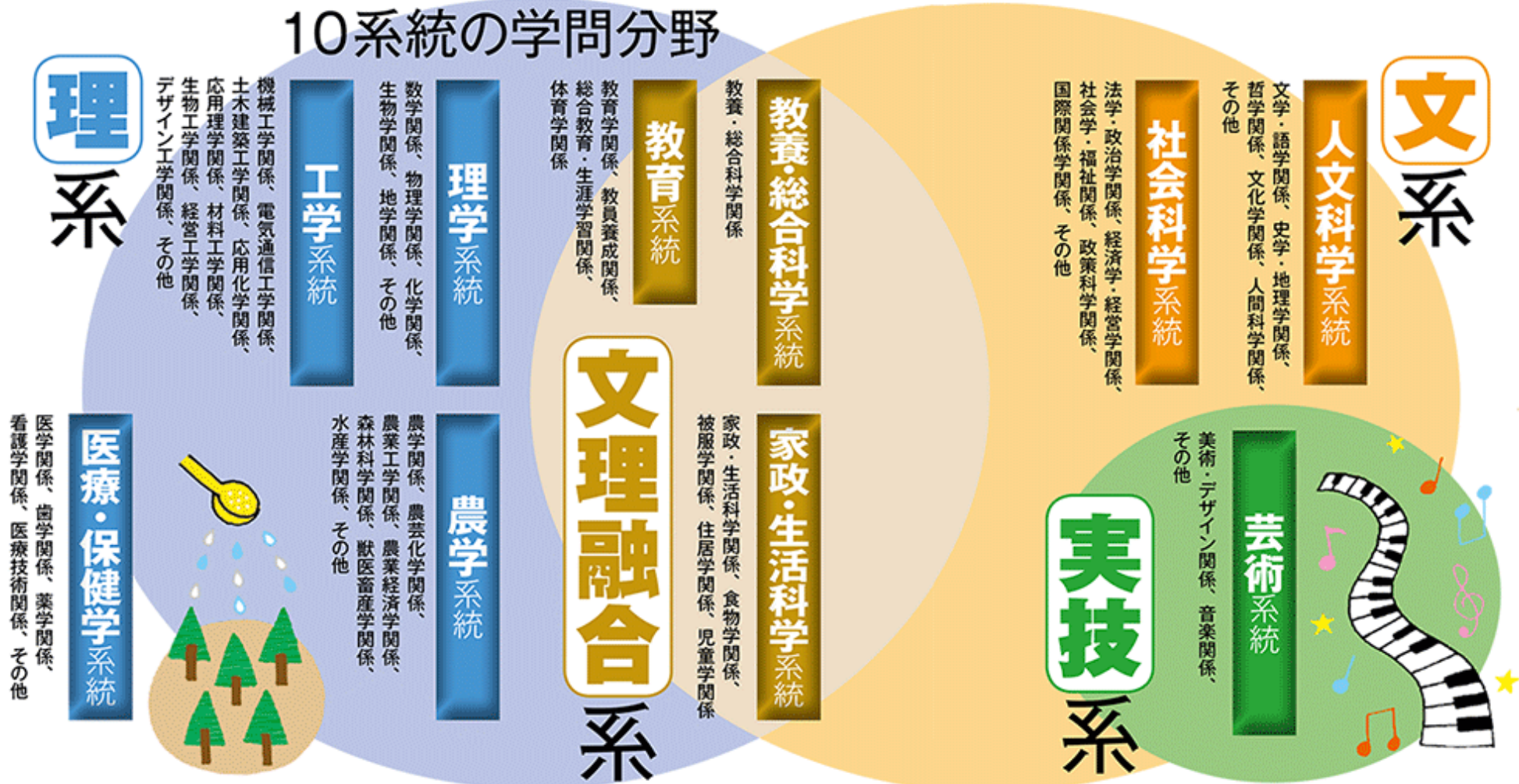
2024年12月・プロジェクト会合@千葉大



最後のメッセージ：
「経験」して自分の「好き」を見つけよう

時代の背景① 人工知能

現在のAIは「全分野で」博士レベルの知識を有する



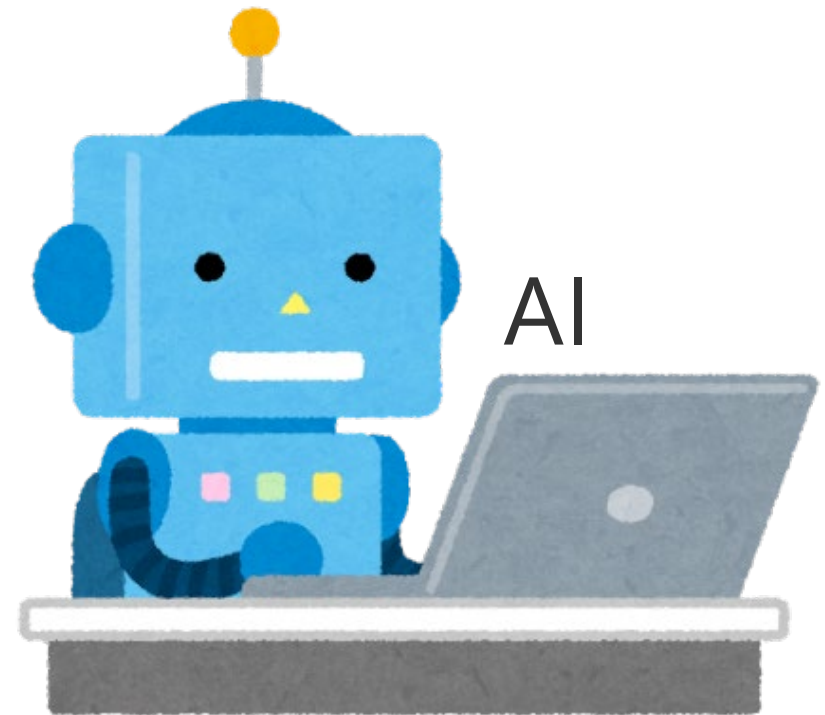
時代の背景①: 人工知能

これまで



優れていれば人生は楽だった

これから



優れているだけでは厳しい

時代の背景②: 世界にあふれる「いいこと」

モノサシが「合っているか否か」では決められない



優れる よりも 異なる 方が簡単

では、どうすれば異なれるのか？

→ 君だけの経験を重ね、「好き」を見つける
「合っているか」ではなく「好きか嫌いか」
を判断のモノサシにしていく

実際に経験する、は、本当にタイパが悪いのか？

時間のかかる読書

時間の短い要約



タイパ: タイムパフォーマンス (時間効率)

最後のメッセージ

- 「将来を考える」ことは、「夢や仕事を決める」ことだけじゃない
- 自分の中にある「好き」と「嫌い」を知ること、とっても大事
 - 自分がどんな時に楽しくて、どんな時に楽しくないのか？
 - 自分はどんなことが好きで、どんなことが嫌いなのか？
 - 自分が没頭してしまうことは何か？お金を払ってもやりたいことは何か？
- それを知るために、「**いろいろな事を実際に経験**」してみたい
 - やって見たら分かることが、たくさんある。
 - 身を置いているだけで得ていることが、たくさんある。
- 君だけの経験が、君だけの価値観を育み、他人から差別化する。

小槻も色々な経験を重ね、自分の価値観を知った

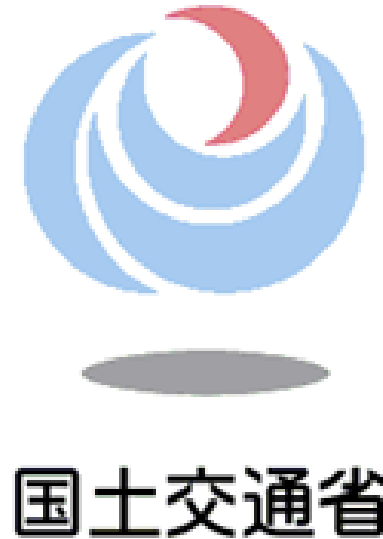
研究者か？



シンクタンクか？

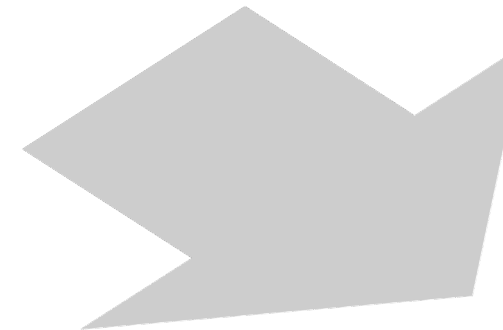
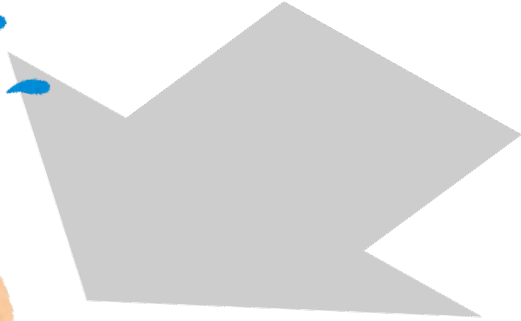
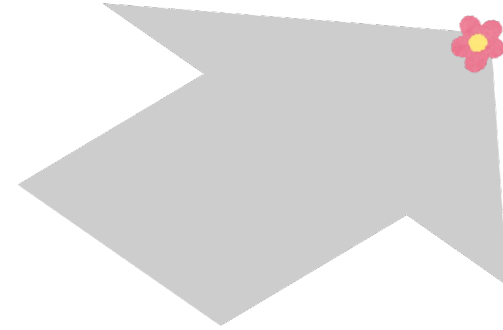
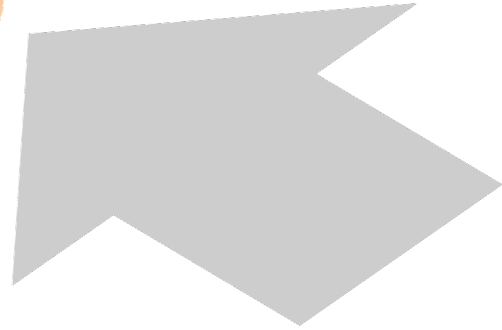


公務員か？



- 理由 (1): 研究が楽しくなってしまった。
理由 (2): 歴史に名を残せる仕事を選びたかった。
理由 (3): 攻略本の無い人生を選びたかった。
(なお、学部生の頃は銀行に就職してお金を稼ぎたいと考えていた)

人生とは、みんなが別の方向に走るマラソン



伝えなかった3つのメッセージ: 因果を疑う

- **(1) アウトプットを意識して、インプットする**
 - 授業が分からないから、質問するんじゃない。
 - 質問しようと思って聞くから、分からなくなる。
- **(2) ぼんやりとした興味を大事に行動する**
 - 合理的に判断して、行動しなくていい。
 - 自分の心の声に従って、直感で決めたらいい。
 - ぼんやりとした興味には理由が無い。だからこそ消えない。
- **(3) 経験を通して、自分だけの好きを見つける**
 - 好きだから、行動・経験するんじゃない。
 - 行動・経験を通して、自分の好きに気づき、価値観を育める。