

東京海洋大学

海洋産業AIプロフェッショナル育成卓越大学院プログラム

2022年度 第1回海洋AI公開セミナー



高潮予測システムの開発

～物理予測とAI予測を用いた2つのアプローチ～

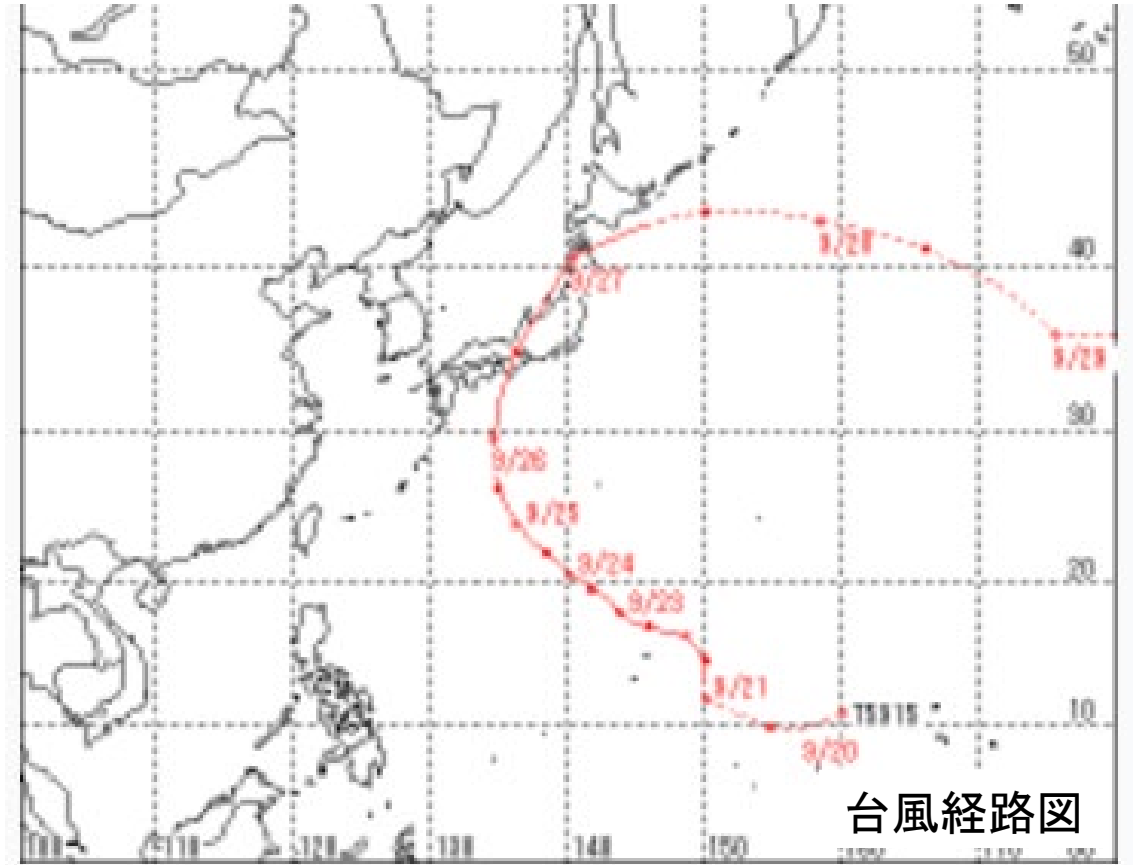
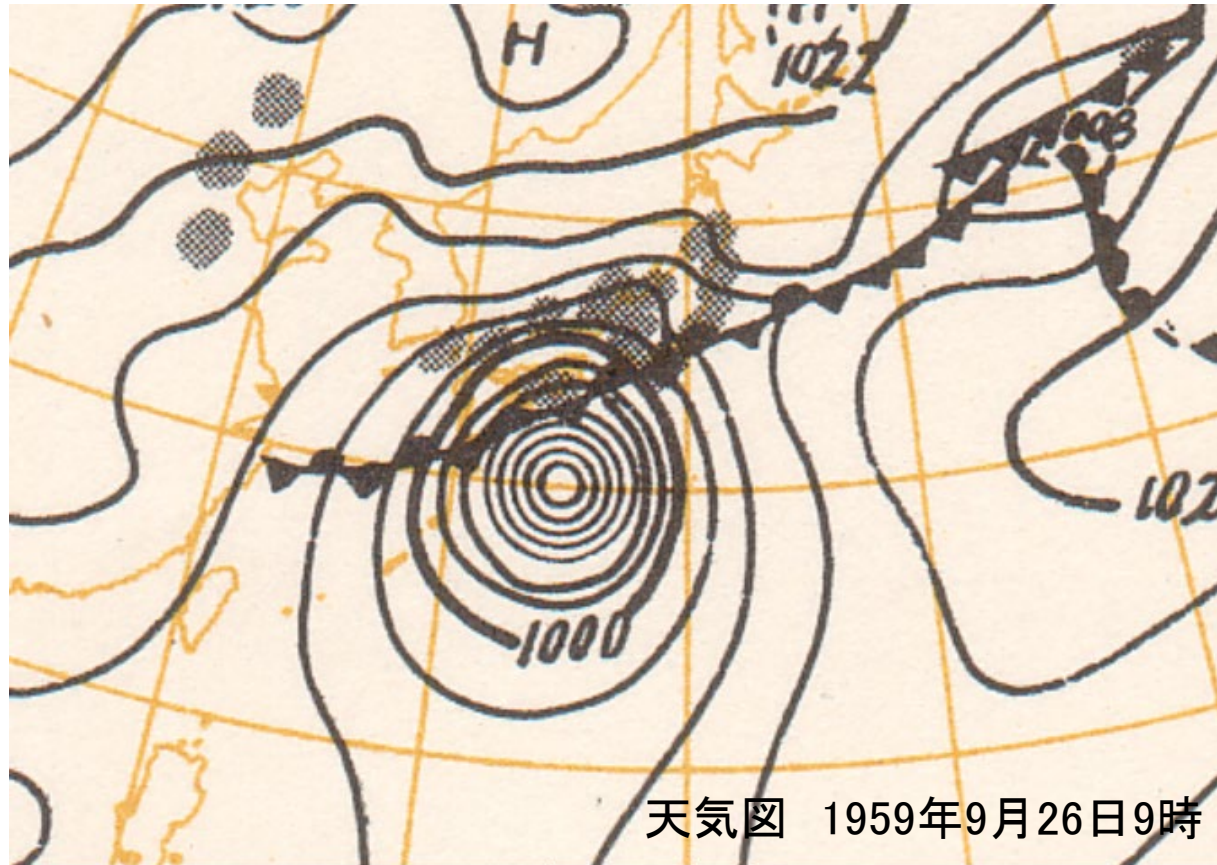
2022年7月27日(水)

一般財団法人 日本気象協会 事業本部 社会防災事業部
交通ソリューション課 港湾・海運・航空グループ

竹田 聖二

- 01. そもそも高潮って？
- 02. 高潮を予測する
- 03. 高潮予測アプローチ①(物理予測)
- 04. 高潮予測アプローチ②(AI予測)
- 05. まとめ

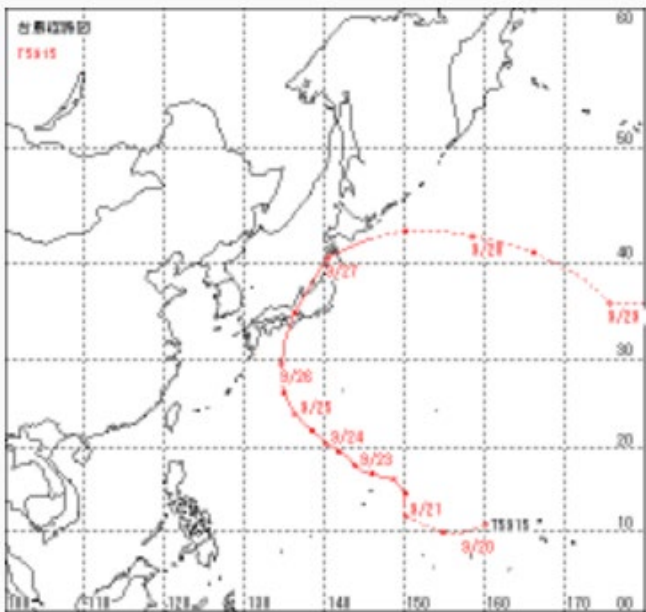
この数字の意味、ご存じですか？



出典：気象庁HP 災害をもたらした気象事例
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/1959/19590926/19590926.htm>

5,098

伊勢湾台風(昭和34年台風第15号)

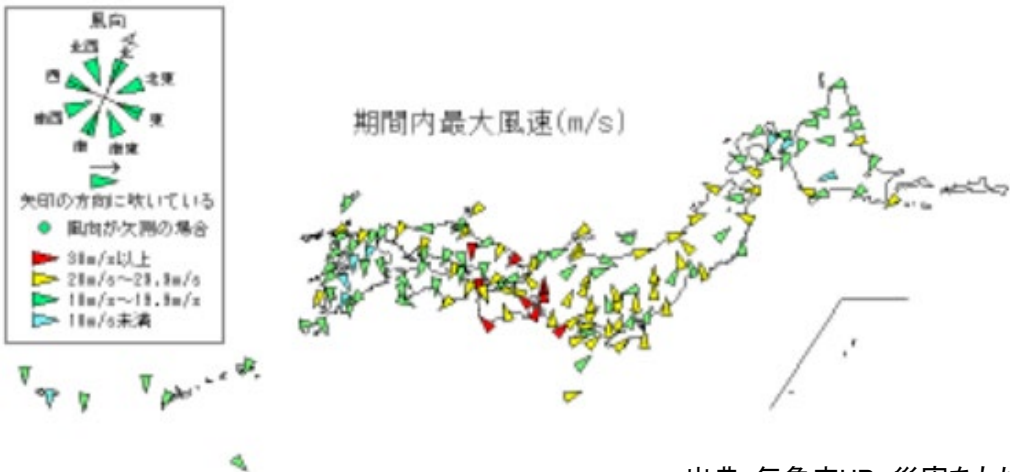


■ 概要

上陸年月日時	昭和34年9月26日18時頃
上陸位置	和歌山県潮岬の西
上陸時の気圧	929.6hPa
最大風速	37.0m/s(名古屋)
最大瞬間風速	45.7m/s(名古屋)
観測潮位	3.6m(名古屋)

■ 特徴

- 上陸時の気圧が低く、観測史上3番目
- 暴風域が広く、広範囲で強風を観測
- 伊勢湾湾奥部の臨海低平地で甚大な高潮被害



出典: 気象庁HP 災害をもたらした気象事例

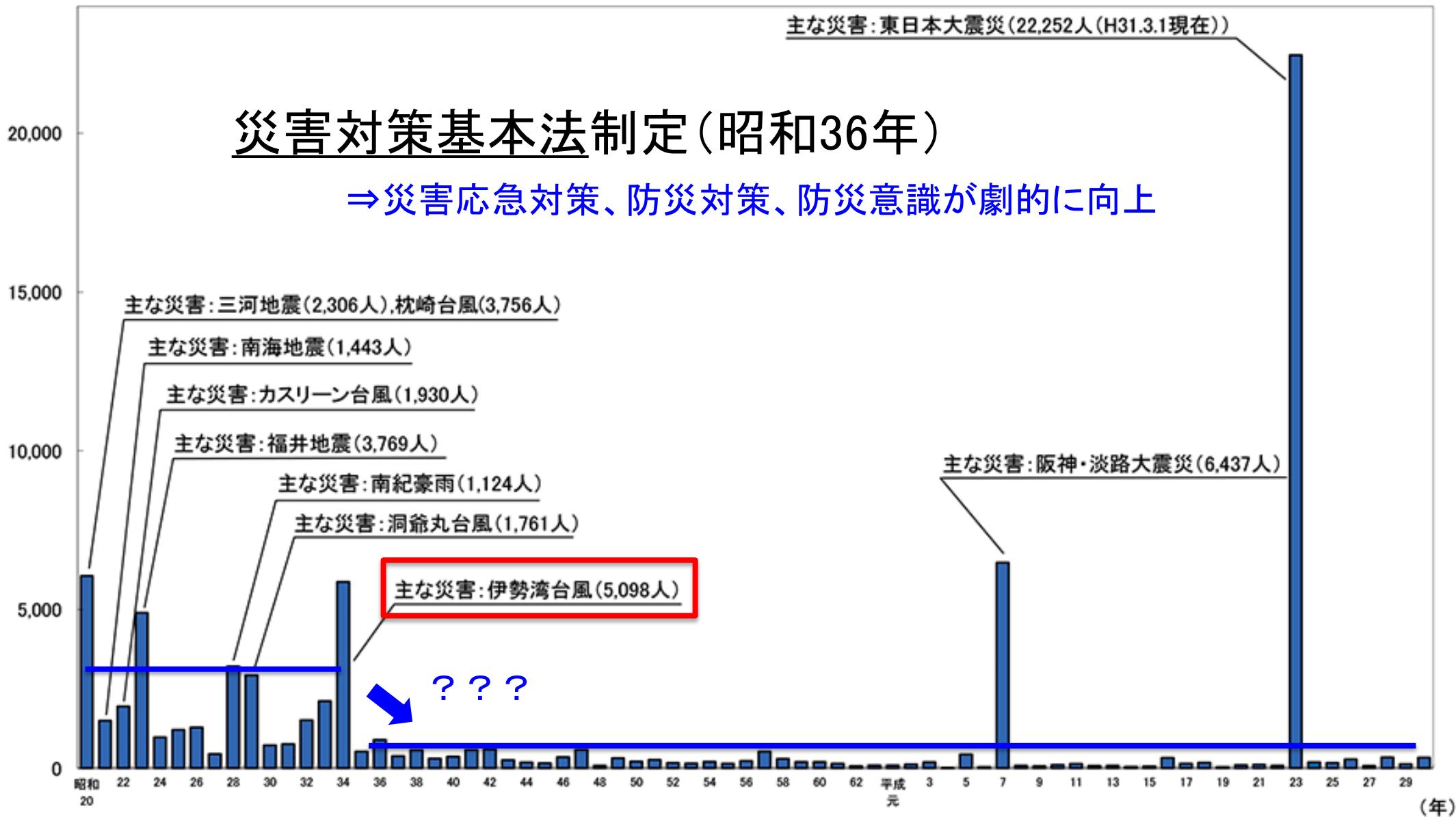
<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/1959/19590926/19590926.htm>
内閣府防災情報のページ 災害教訓の継承に関する専門調査会報告書 平成20年3月

自然災害における死者・行方不明者数



(人)

出典: 内閣府防災情報のページ 令和元年版 防災白書 附属資料7



主な高潮災害



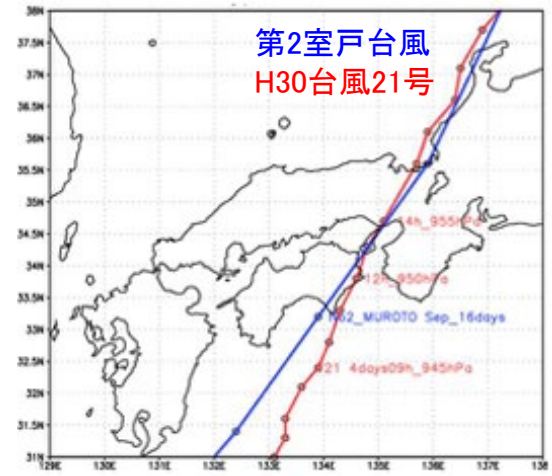
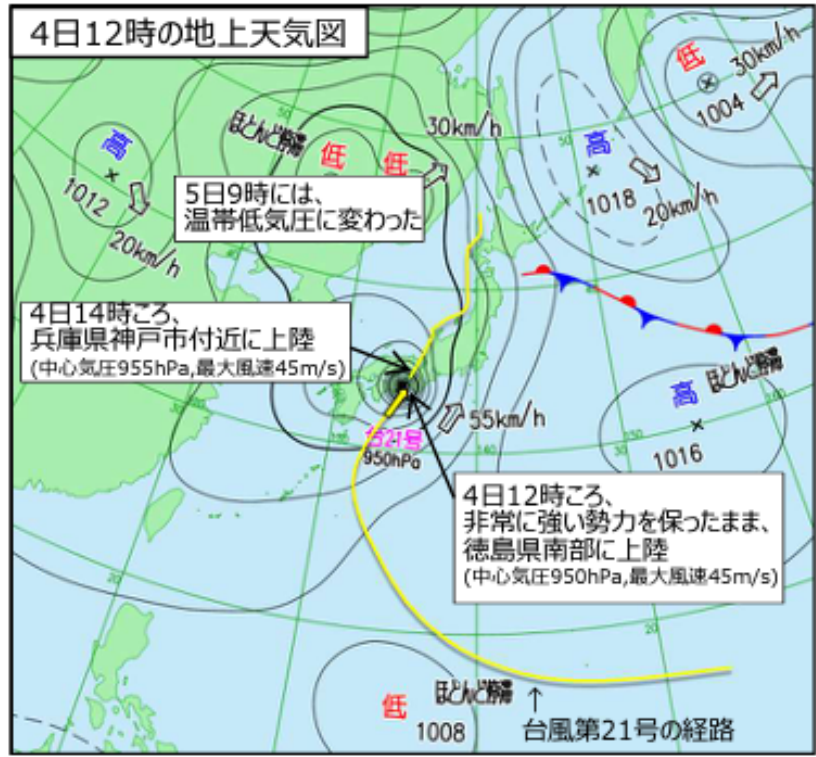
※1 1951年(昭和26年)以前は参考記録

※2 高潮以外も含む

年月日	台風	主な被害地域	上陸時気圧(hPa)	最高潮位T.P.上(m)	最大偏差(m)	死者・行方不明(人)※2	全壊・半壊(戸)※2
昭9.9.21	室戸台風	大阪湾	911.6※1	3.1	2.9	3,036	88,046
昭20.9.17	枕崎台風	九州南部	916.1※1	2.6	1.6	3,122	113,438
昭34.9.27	伊勢湾台風	伊勢湾	929.0	3.9	3.4	5,098	151,973
昭36.9.16	第2室戸台風	大阪湾	925.0	3.0	2.5	200	54,246
平11.9.24	台風18号	八代海	950.0	4.5	3.5	13	845
平16.8.30	台風16号	瀬戸内海	950.0	2.5	1.3	2	15,561
平30.9.4	台風21号	大阪湾	955.0	3.2	2.6	14	50,083
令和.10.12	台風19号	東京湾	955.0	1.5	1.4	108	-

出典: 国土交通省 日本における主な高潮被害(一部抜粋、一部追記)
<https://www.mlit.go.jp/river/kaigan/main/kaigandukuri/takashiobousai/03/index.html>

平成30年台風第21号



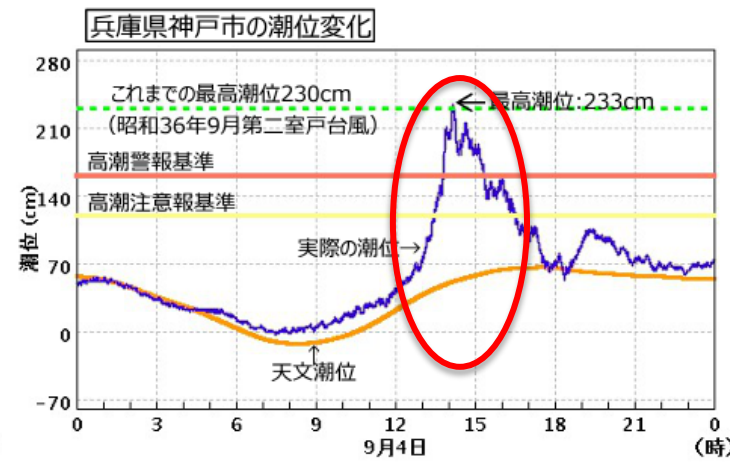
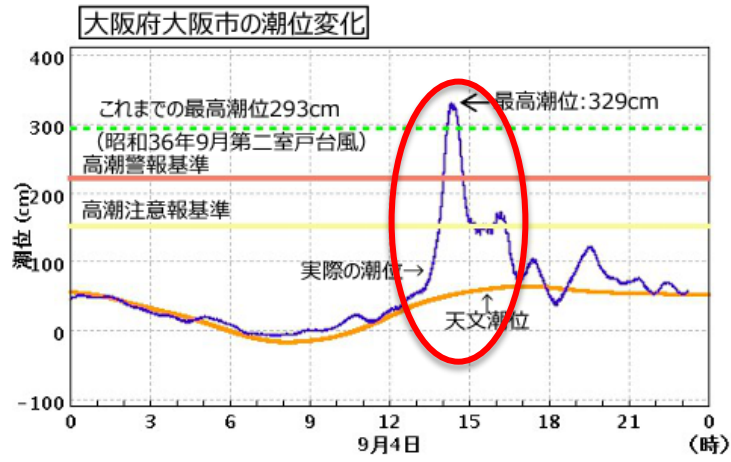
風速 期間内最大値 (9月3日～5日)

	風速(m/s)	瞬間風速(m/s)
高知県室戸市	48.2	55.3
大阪府田尻町(関西空港)	46.5	58.1
和歌山県和歌山市	42.9	57.4
兵庫県神戸市	34.6	45.3
徳島県美波町	34.6	50.3
和歌山県白浜町(南紀白浜空港)	33.4	45.8
愛知県常滑市(中部空港)	31.5	46.3
大阪府熊取町	26.8	51.2

※風速30m/s以上 又は 瞬間風速50m/s 以上を記載

<特徴>

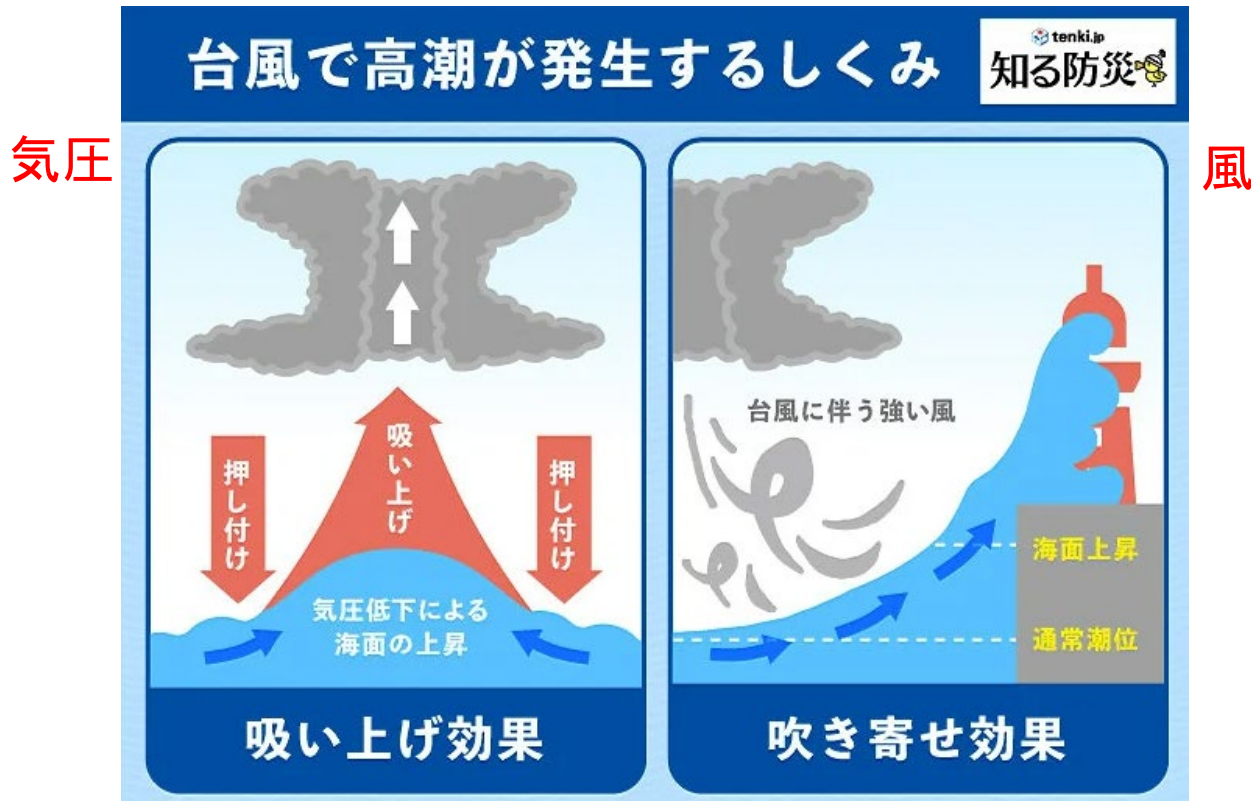
- 第2室戸台風と進路が酷似。
- 移動速度が速く、急激に風が強まった。
- 神戸港沖の有義波高が4.72m。(既往最大)
- 大阪湾を中心に記録的な高潮が発生。



出典: 大阪管区气象台 <https://www.jma-net.go.jp/osaka/>
平成30年台風21号の気象・海象の状況について

そもそも高潮って？

台風や発達した低気圧が通過する時、**潮位**が異常に高くなる現象。

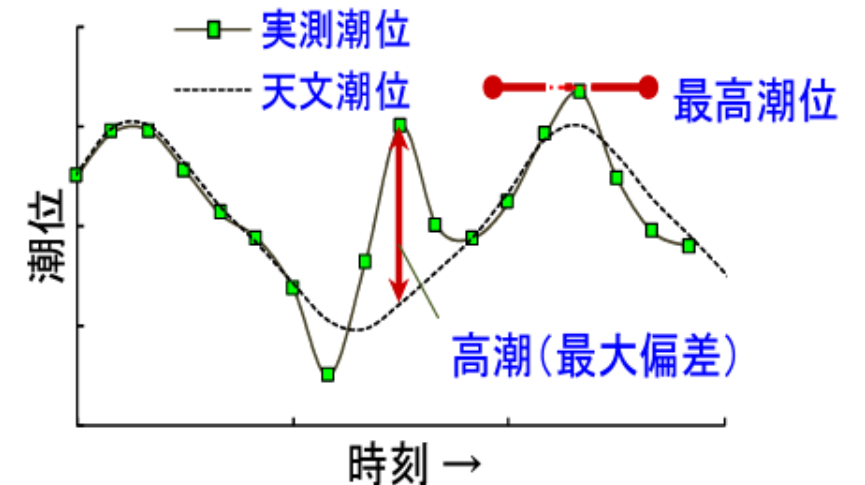


出典: tenki.jp「高潮が発生するしくみ」
<https://tenki.jp/bousai/knowledge/7951535.html>

- 吸い上げ効果 → 気圧1hPa低下で潮位は約1cm上昇
- 吹き寄せ効果 → 潮位の上昇は風速の2乗に比例

天文潮位＋潮位偏差

- 天文潮位…月や太陽の引力が影響
- 潮位偏差…気象の影響○
⇒最大偏差が現象の規模を表す。

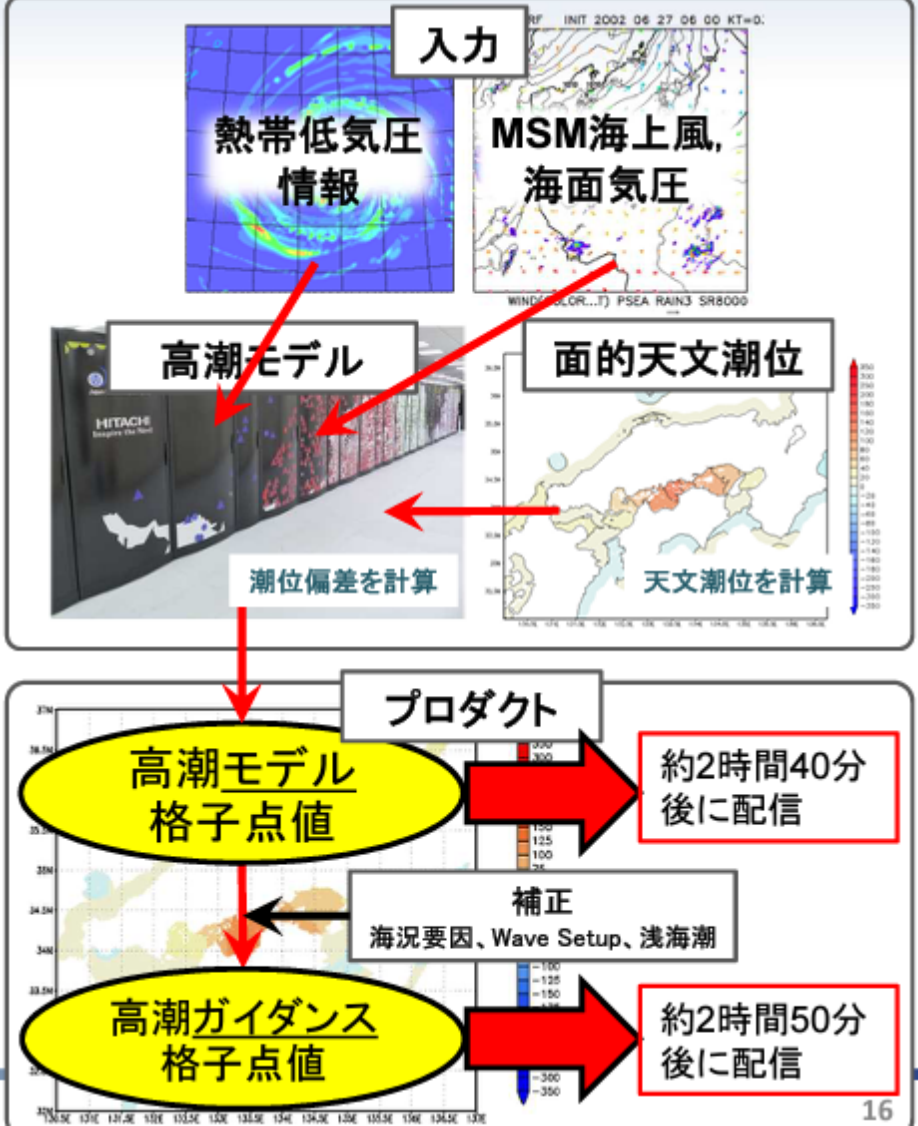


出典: 気象庁 令和元年度 予報技術研修テキスト 2.1高潮とは
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/expert/pdf/r1_text/r1_takashio.pdf

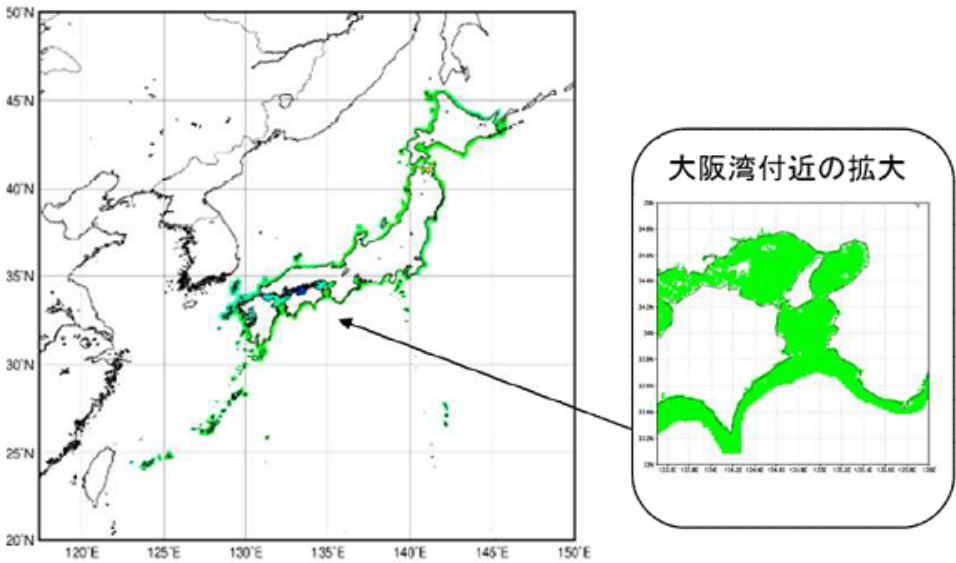
⇒**接近時刻**も重要！

- 01. そもそも高潮って？
- 02. 高潮を予測する
- 03. 高潮予測アプローチ①(物理予測)
- 04. 高潮予測アプローチ②(AI予測)
- 05. まとめ

物理モデルを用いて計算



日本沿岸から20km以内の1km格子 (約21万格子点)



高潮モデル格子点値の配信領域 (緑色)

■ 概要

計算領域	20~50N, 117.4~150E
予測時間	39 時間先まで
メンバー数	6 通り(台風時のみ)
実行頻度	1日8回

なぜ、6通りで計算するのか？

高潮が発生する場所・規模は**台風経路**に強く依存。



出典：気象庁 令和元年度 予報技術研修テキスト 3.1高潮モデル
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/expert/pdf/r1_text/r1_takashio.pdf



台風進路予報の誤差がある場合、
高潮予測にも大きな誤差が発生しうる！



出典：台風接近時の港湾における潮位の確率予測に関する二、三の検討
(河合ら、海岸工学講演会、2008)

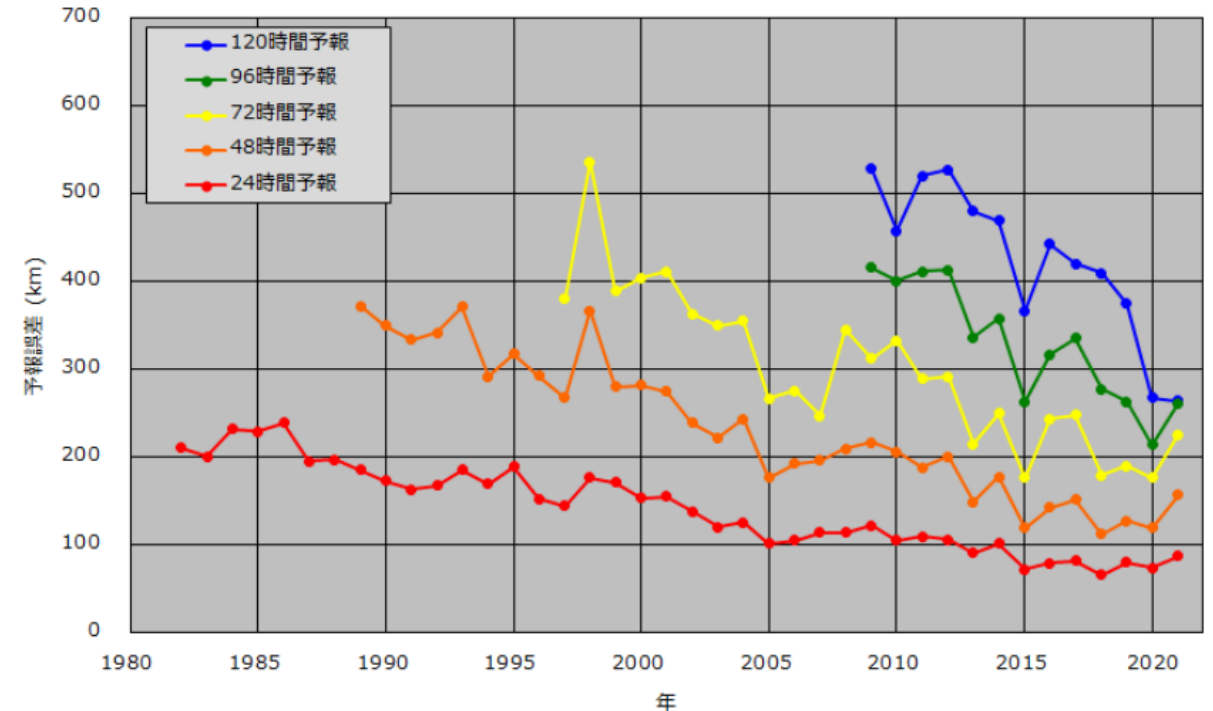
- 複数のシナリオを用意し、状況に応じて使い分け
- 不確実性や潜在的なリスクを評価

では、台風の予測精度は一体？



出典: tenki.jp「台風情報のみかた」
<https://tenki.jp/bousai/knowledge/5cb50a0.html>

台風進路予報（中心位置の予報）の年平均誤差



出典: 気象庁HP 台風進路予報の年平均誤差

https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typ_kensho/typ_hyoka_top.html

- 長期的に見れば、精度は向上
- 24時間予報でも平均100km程度の誤差あり

台風予報は不確実性が大きい

ここまでをまとめると、、、



■ 高潮災害

- 繰り返し甚大な被害に見舞われてきた。
- 予報精度の向上や防災対策により被害は減少。
- 一方で、**地球温暖化の影響**により、**高潮被害が激甚化**する恐れあり。

■ 高潮を予測する

- 台風勢力(**気圧**や**風**)の情報が必要
- 台風の**接近時刻**の予測も重要 ⇒ **満潮と重なれば危険度が高まる！**
- 台風**経路**の予測も重要 ⇒ **少しの誤差が大きな誤差に！**

■ 気象庁の高潮予測

- 物理モデルを用いて計算
- **39時間先**まで&**6通り**で計算 ⇒ 『もう少し早く知れたら良いな、6通りで十分？？』

高潮予報業務の許可制度



気象庁以外の者が予報業務を行おうとする場合、気象庁長官の許可が必要



「高潮」は、予報業務が許可されていなかった

- 予測技術の問題
- 高潮予報そのものが防災との関連性が高い



数年前に高潮も予報許可の審査開始

- 予測技術の向上
- 社会情勢(事業者毎の防災対応の重要性)



日本気象協会が第1号！(2021年1月)

- ➡ 気象庁の予報に比べて
 - より長いリードタイム
 - 地点毎といった詳細な分解能個別の利用者の目的に応じたリスク管理の情報等として有効
- ➡ 気象庁の高潮警報等と併存することで防災対応や防災行動に混乱を生じる恐れ
- ➡ 気象庁の予報との整合性確保、事業者毎へ留意事項の事前説明

- 01. そもそも高潮って？
- 02. 高潮を予測する
- 03. 高潮予測アプローチ①(物理予測)
- 04. 高潮予測アプローチ②(AI予測)
- 05. まとめ

戦略的イノベーション創造プログラム

⇒ 日本の経済・産業競争力にとっての重要課題を選定し、
基礎研究～出口(実用化・事業化)までを見据えた分野横断型プログラム。(SIP第2期:2018年～2022年)

研究課題一覧

No.	分野	研究開発課題
1	サイバー空間基盤技術	ビッグデータ・AIを活用したサイバー空間基盤技術
2	フィジカル空間基盤技術	フィジカル空間デジタルデータ処理基盤
3	セキュリティ (サイバー・フィジカル・セキュリティ)	IoT社会に対応したサイバー・フィジカル・セキュリティー
4	自動走行	自動運転(システムとサービスの拡張)
5	材料開発基盤	統合型材料開発システムによるマテリアル革命
6	光・量子技術基盤	光・量子を活用したSociety5.0実現化技術
7	バイオ	スマートバイオ産業・農業基盤技術
8	エネルギー・環境	脱炭素社会実現のためのエネルギーシステム
9	防災・減災	国家レジリエンス(防災・減災)の強化
10	健康・医療	AIホスピタルによる高度診断・医療システム
11	物流(陸上・海上)	スマート物流
12	海洋	革新的深海資源調査技術

7つの研究開発項目の体系図



出典: JICE 一般財団法人国土技術研究センター
<https://www.jice.or.jp/sip>

台風の進路予測を用い高潮・高波、河川水位、氾濫エリアを
予測するスーパー台風被害予測システムを開発

- ## キーワード

- 

※成果 ⇒ SIPとしてのもの
モデル ⇒ 気象協会独自

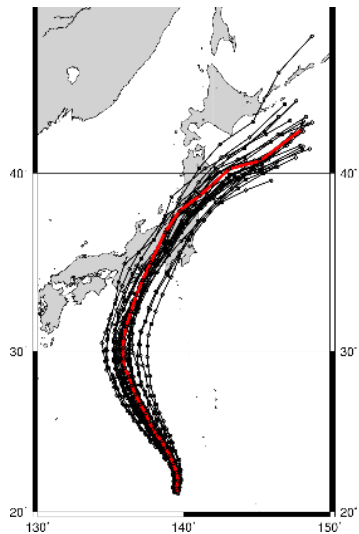
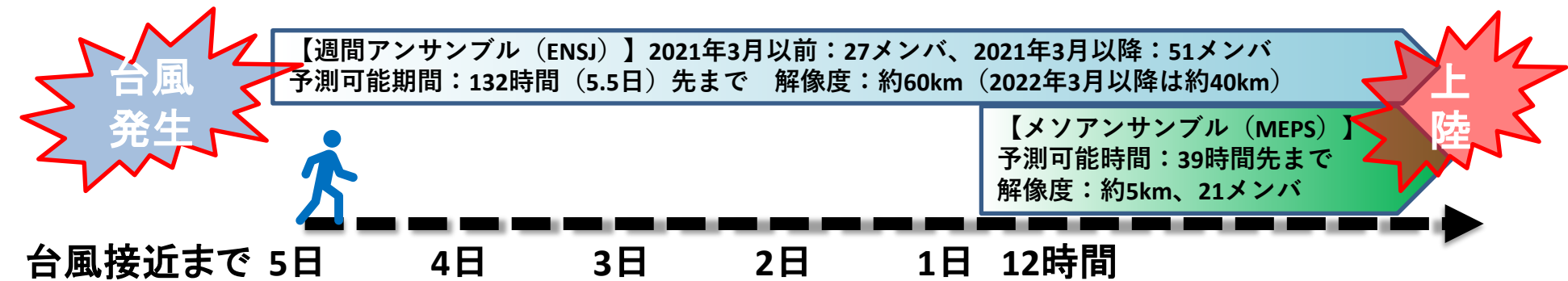
Japan Weather Association All Rights Reserved.

物理予測: アンサンブル気象予報(SIP)



一言でいえば、アンサンブル気象予報を用いた高潮予測

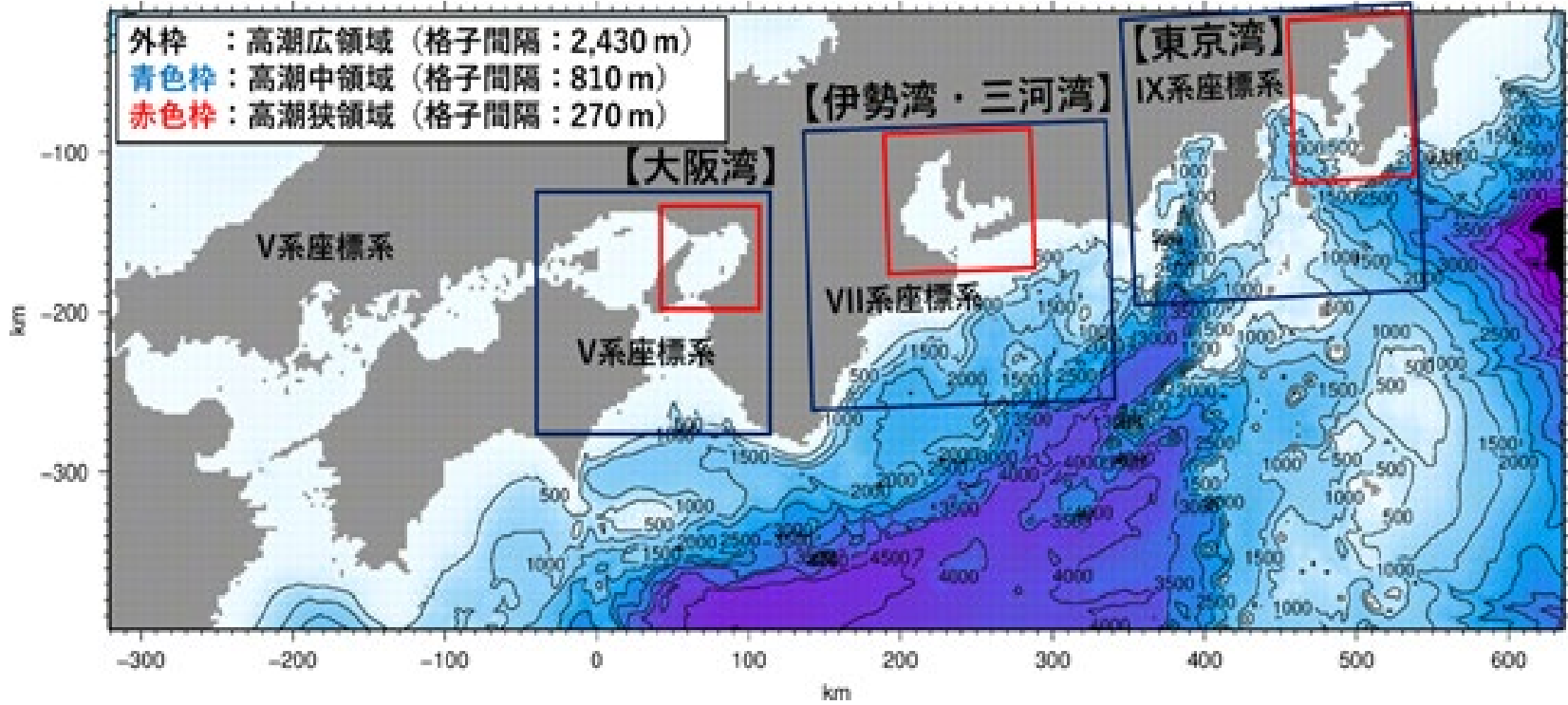
⇒ 初期値にわずかなバラツキを与えた複数の数値予報 ⇒ 不確かさを考慮した確率的な予測が可能



項目	ENSJ	MEPS
初期値	1日2回	1日4回
予報時間 (時間間隔)	週間: 264時間 (3時間) 台風: 132時間 (3時間)	39時間 (3時間)
メンバー数	51メンバー	21メンバー
格子間隔	0.375°	緯度: 0.05° 経度: 0.0625°
領域	N 19.6875° ~ 50.0625° E 119.8125° ~ 150.1875°	N 22.4° ~ 47.6° E 120.0° ~ 150.0°
配信時間	週間: 06, 20 UTC 台風: 12, 00 UTC	初期時刻+3.5時間

- 特徴
 - 132時間(5.5日)先まで予測
 - 最大51メンバで計算
 - 1分毎の予測値を提供
 - 三大湾を対象に詳細な計算を実施

■ 計算領域

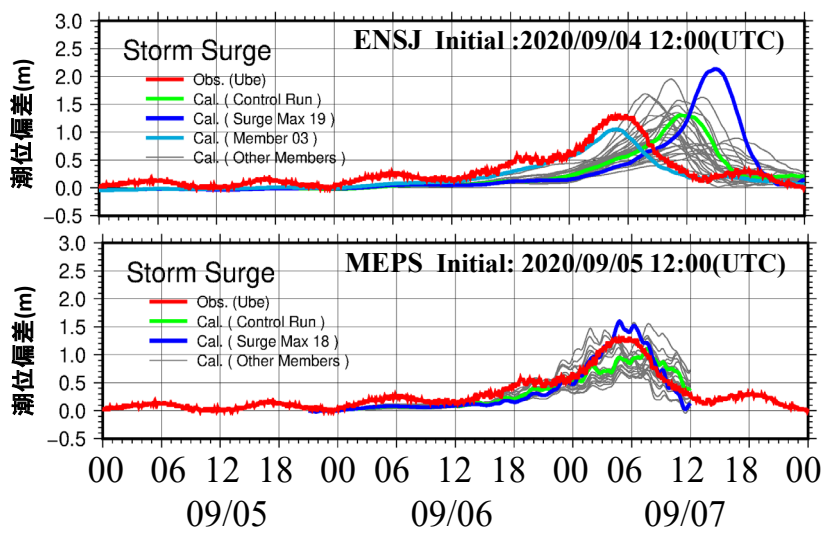
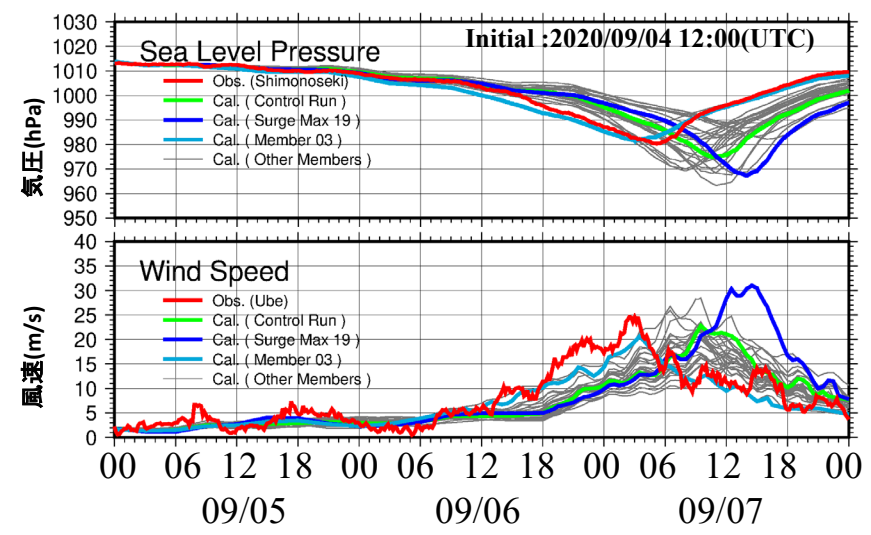
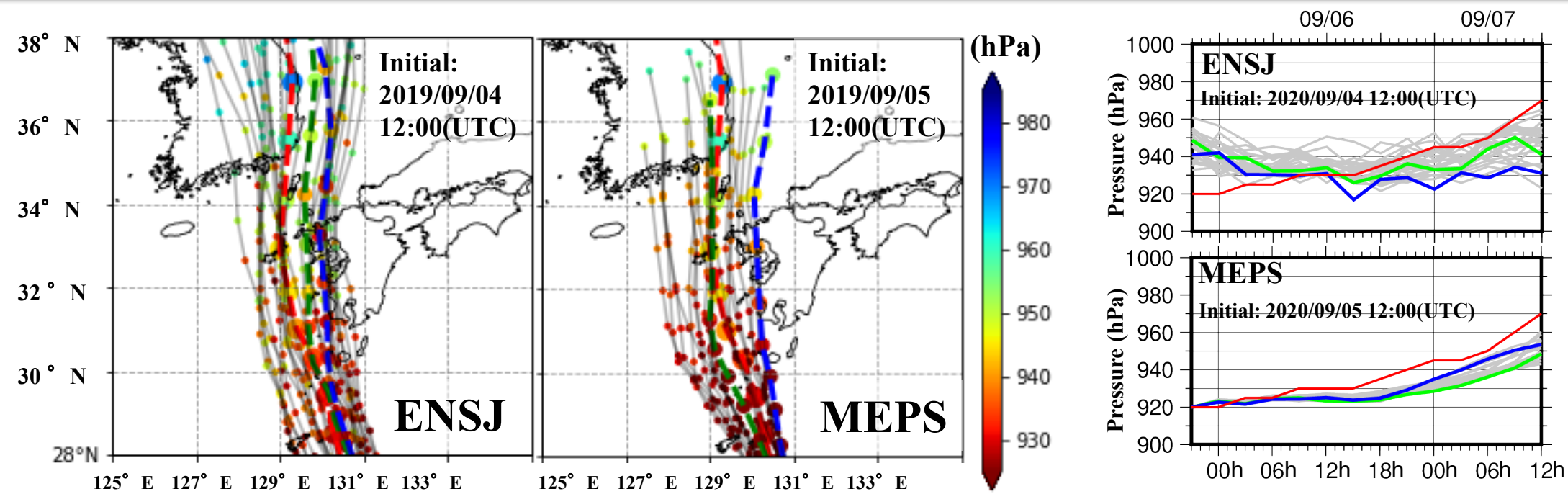


■ 計算条件

項目	広領域	中領域	狭領域
計算格子間隔	2430m	810m	270m
計算時間間隔	2.0秒	1.0秒	0.5秒

- リアルタイム予測
- ネスティングによる計算時間短縮
- 計算資源の問題

物理予測: 計算結果の例 (SIP)

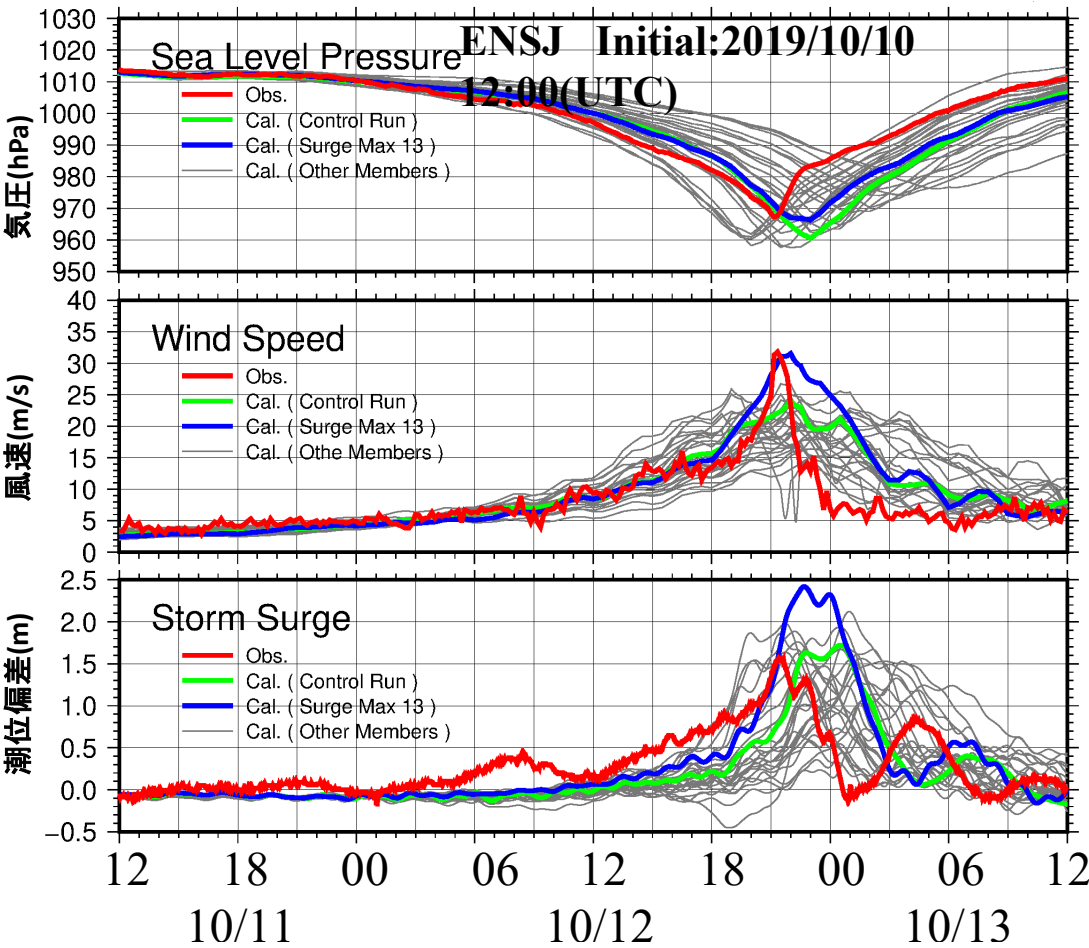


ベストトラック
コントロールラン
潮位偏差最大
Other Members

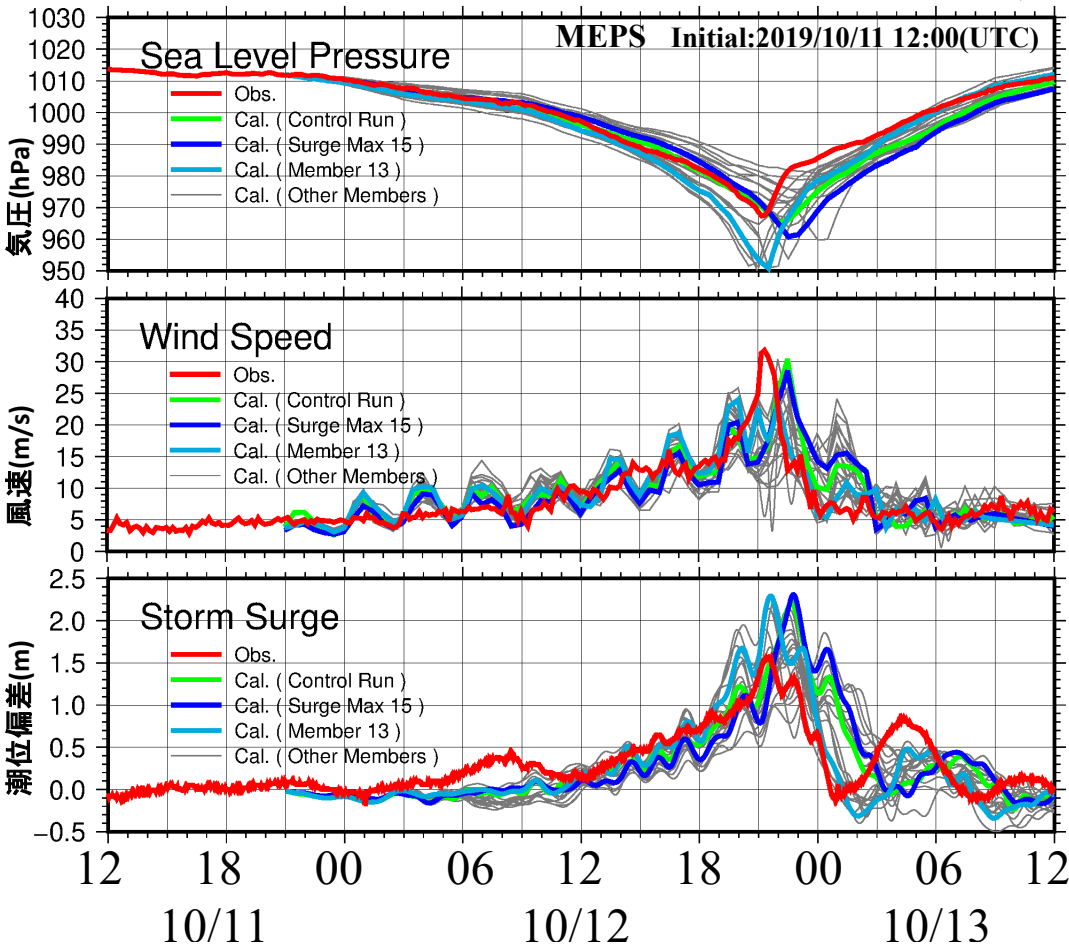
物理予測: 計算結果の例 (SIP)



ENSJ(27メンバー)



MEPS(21メンバー)



アンサンブル気象予報を利用することで、幅を持った予測が可能に！！



計算に時間がかかる。めったに発生しないが、発生した時は計算資源が膨大という問題。

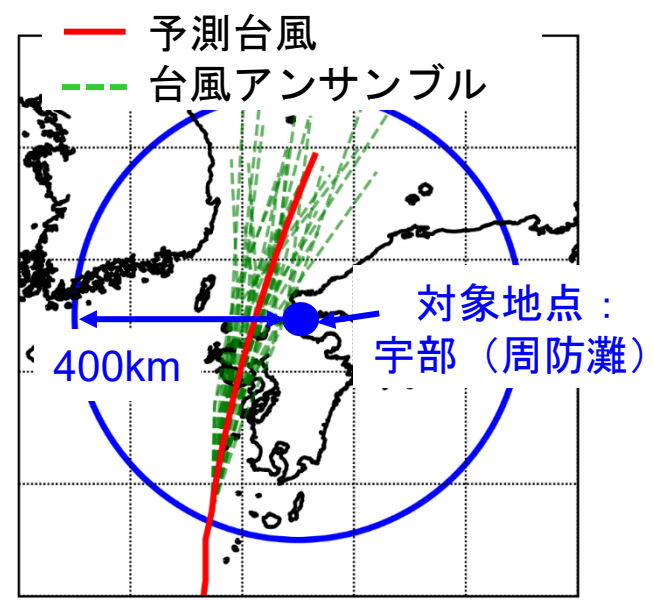
- 01. そもそも高潮って？
- 02. 高潮を予測する
- 03. 高潮予測アプローチ①(物理予測)
- 04. 高潮予測アプローチ②(AI予測)
- 05. まとめ

AI予測:フロー図



Step1

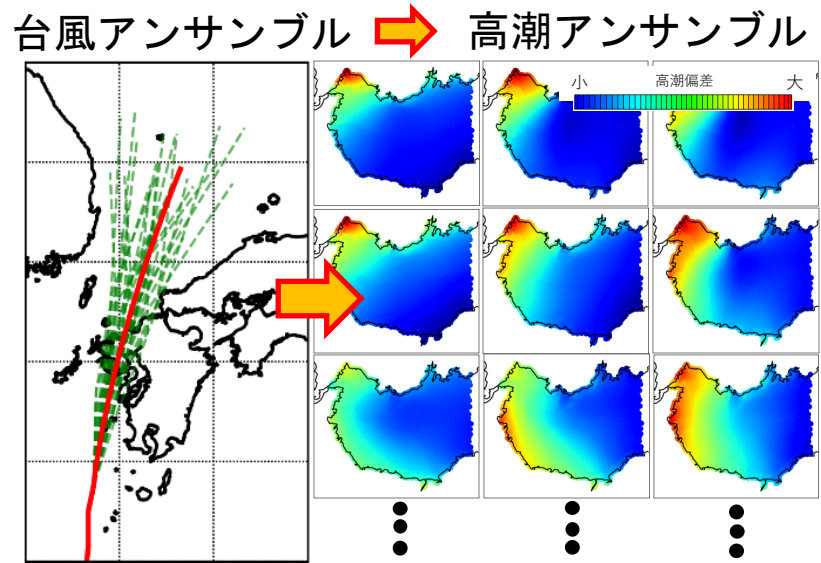
台風予測及び
台風アンサンブルの作成



- ・ 台風予測RNNモデルを用いて今後の台風情報を予測
- ・ 台風アンサンブルの作成

Step2

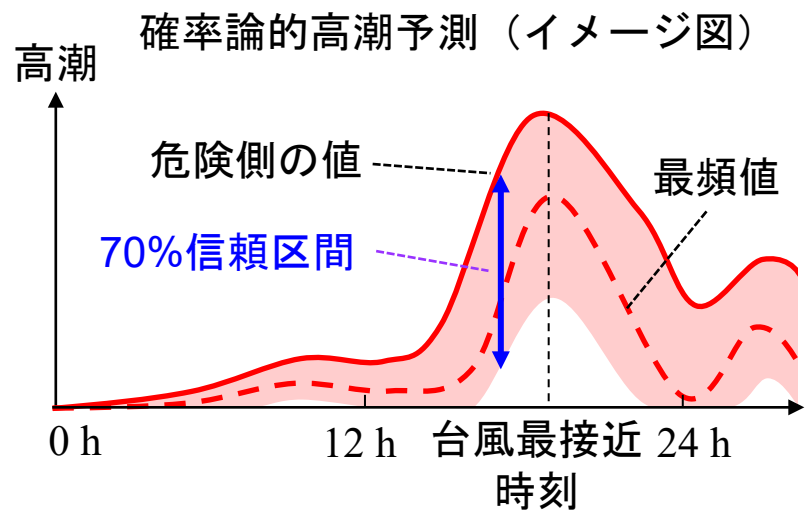
高潮予測及び
高潮アンサンブルの作成



- ・ 高潮予測NNモデルを台風アンサンブルに適用
- ・ 高潮アンサンブルの作成

Step3

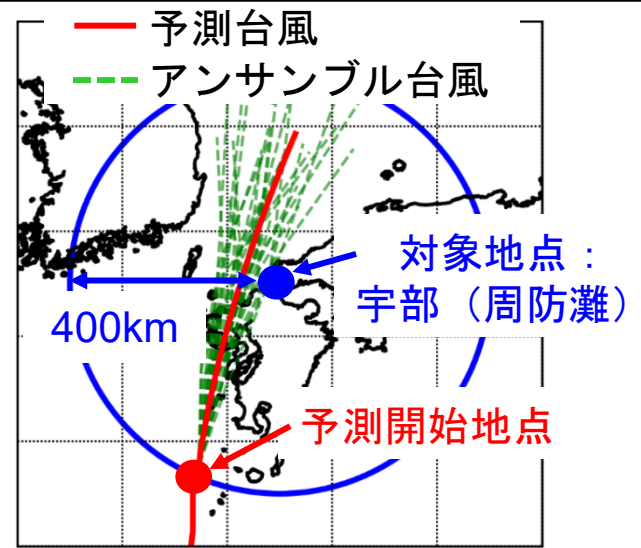
確率論的な高潮評価



- ・ 高潮信頼区間の導出
- ・ 自治体の防災情報、住民の避難指標への活用

AI予測: Step1 (台風予測RNNモデルの構築)

Step1

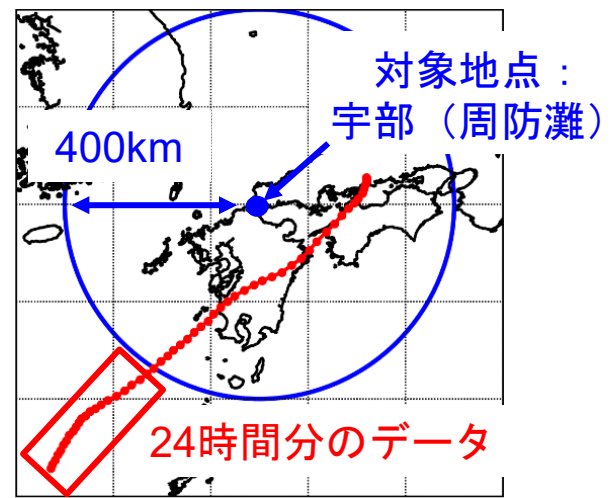


使用データ

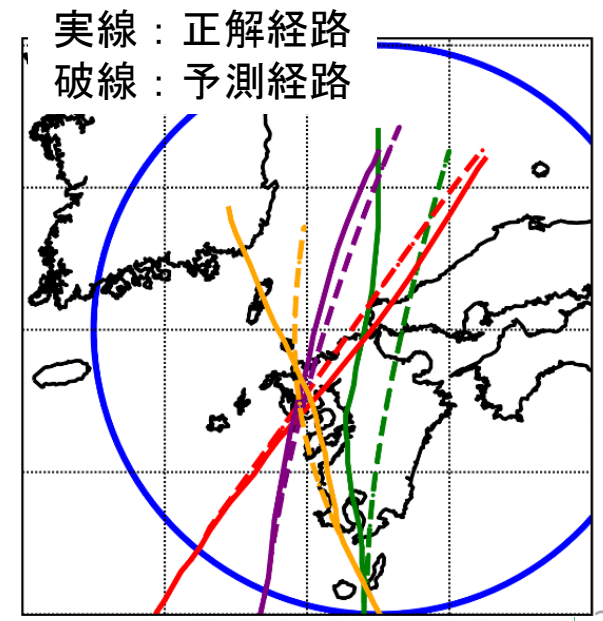
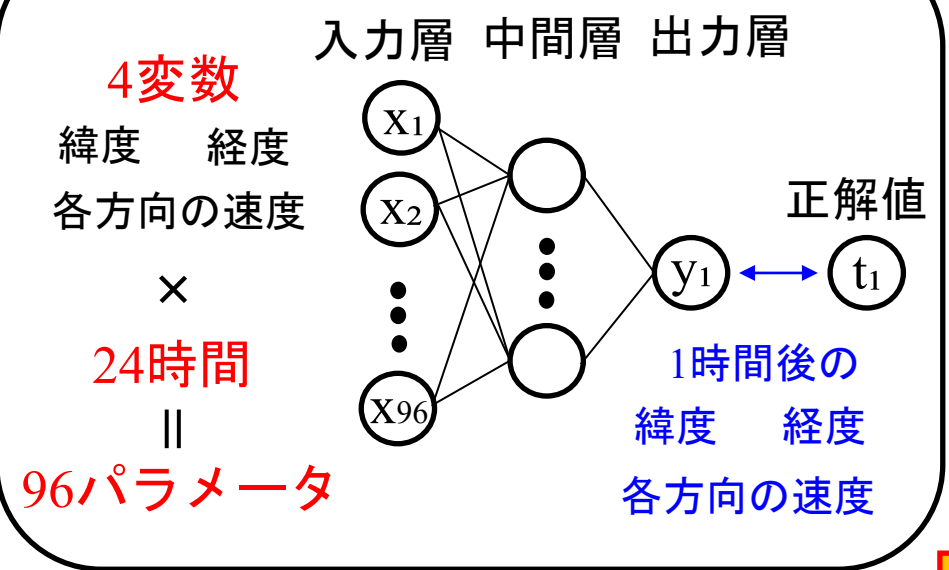
十分な数の教師データが必要

d4PDF：大規模アンサンブル気候予測データ

859個中上位 $\begin{cases} \text{教師台風} & 500\text{個} \\ \text{テスト台風} & 50\text{個} \end{cases}$



台風経路予測RNNモデルの概要

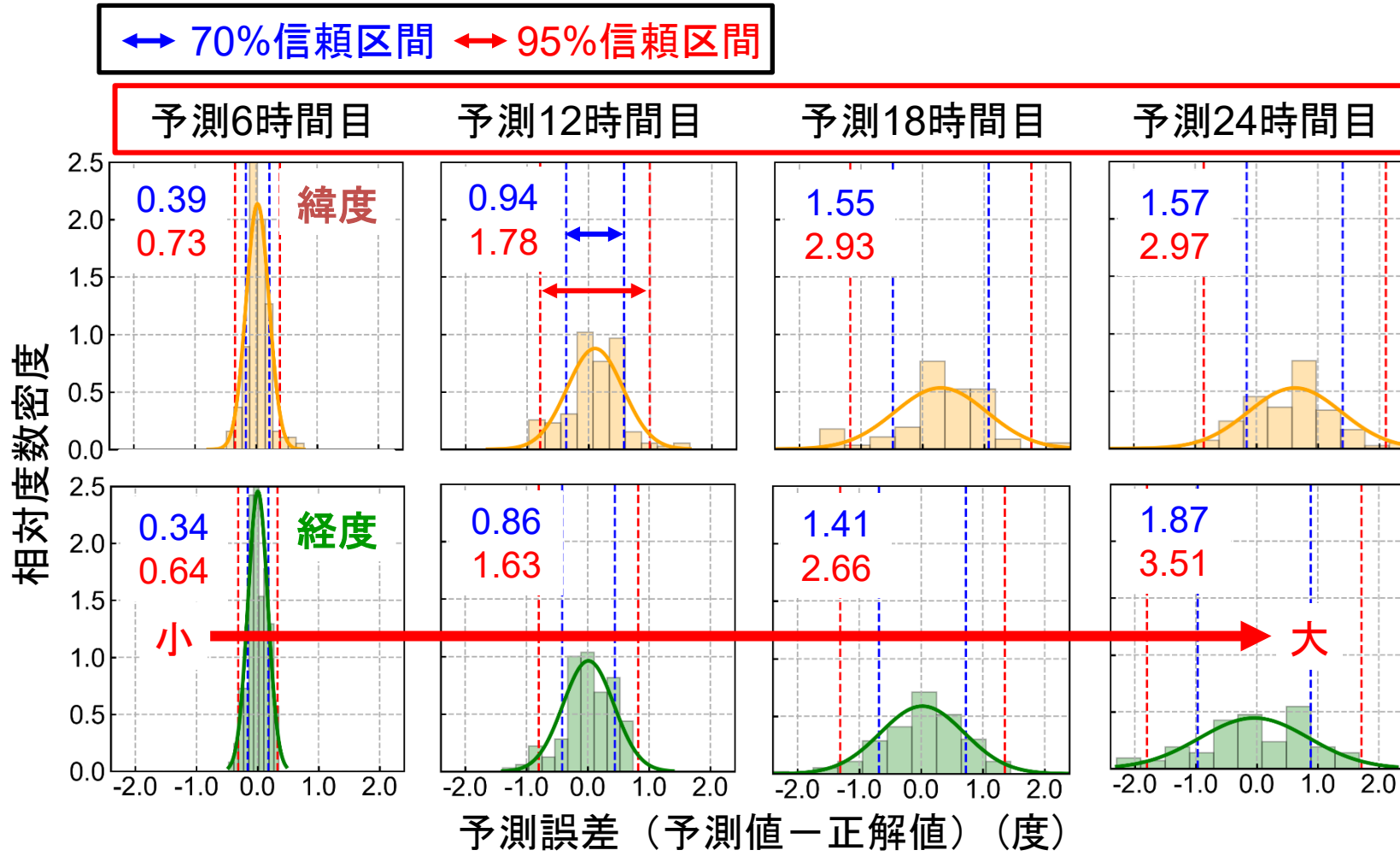
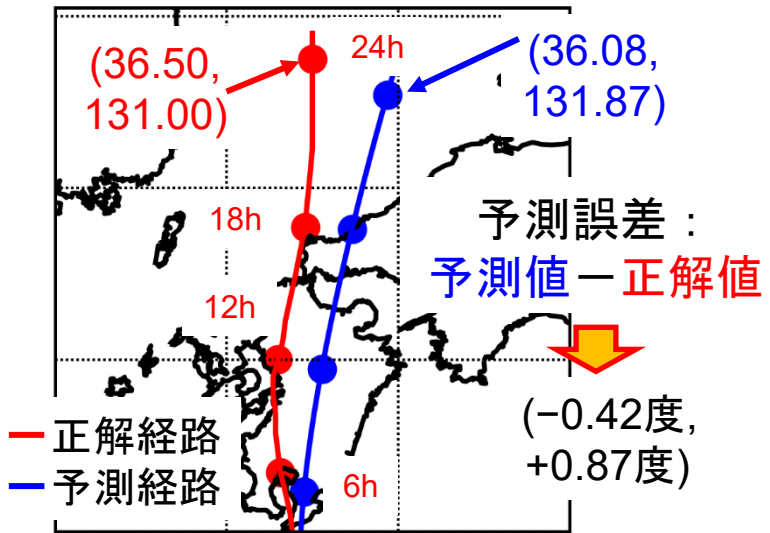
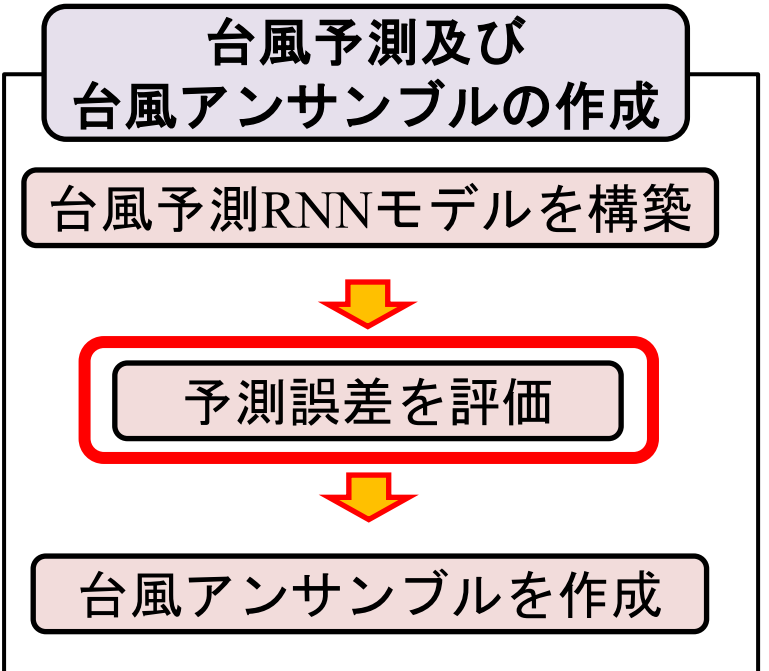


概ね高精度で予測可能

AI予測: Step1 (台風予測RNNモデルの予測誤差評価)



Step1

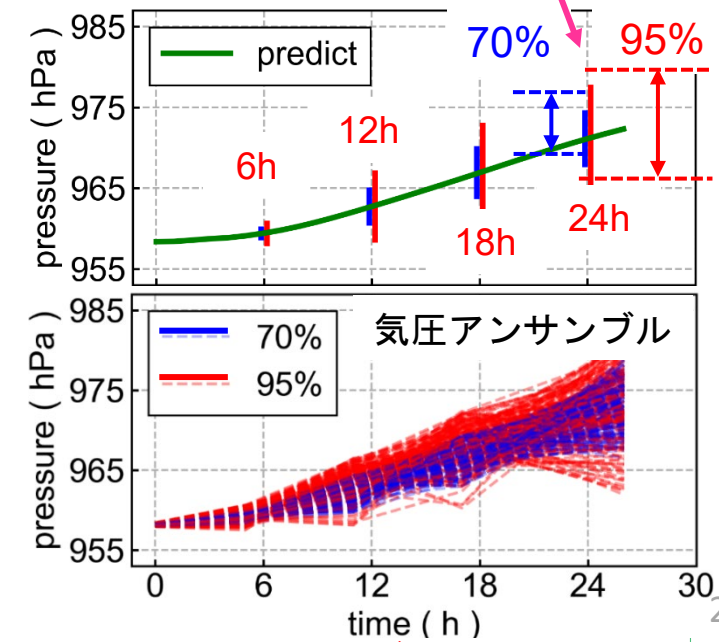
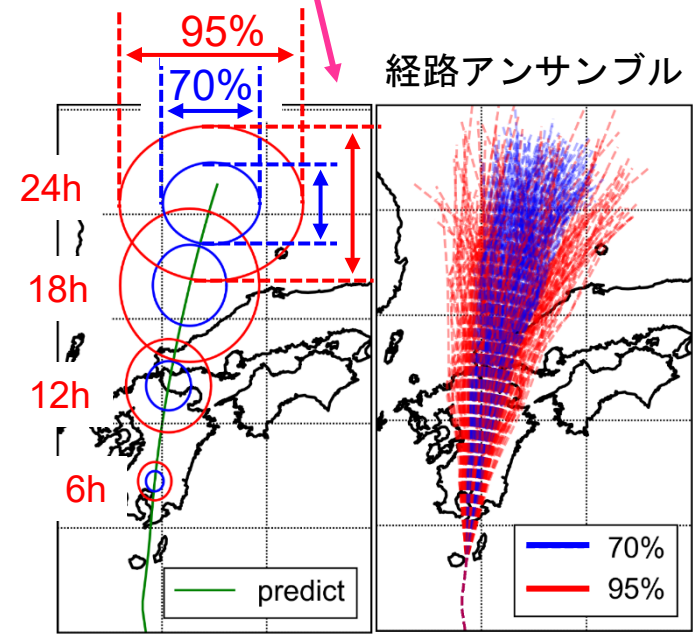
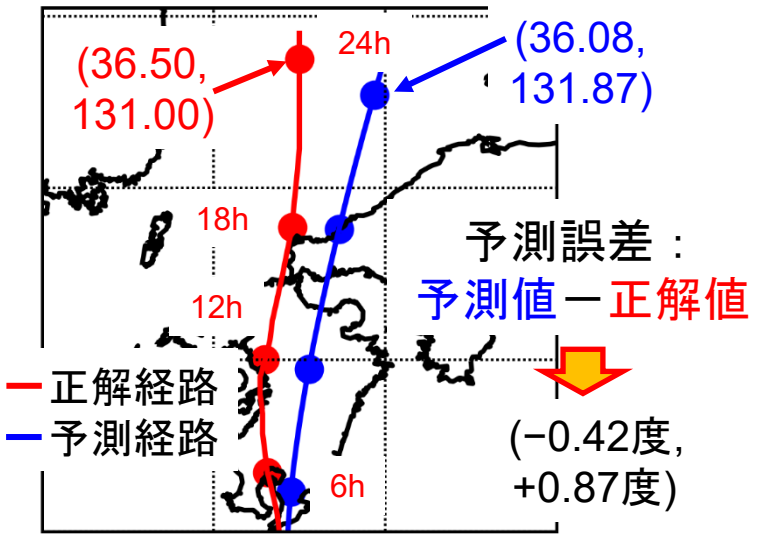
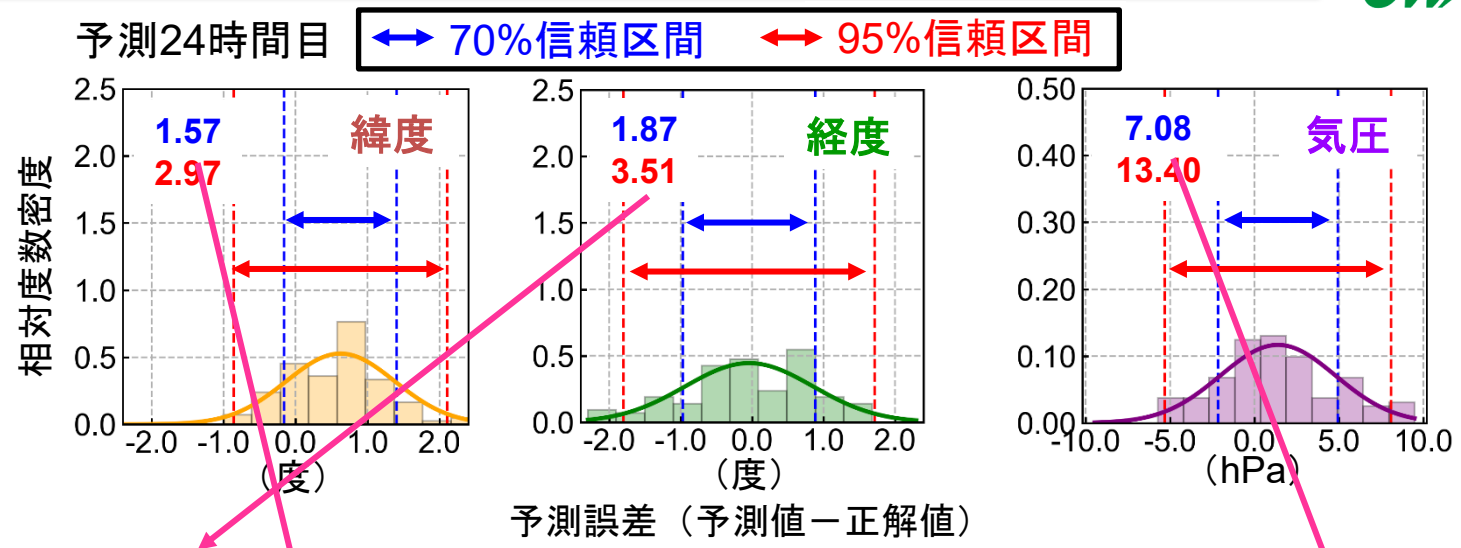
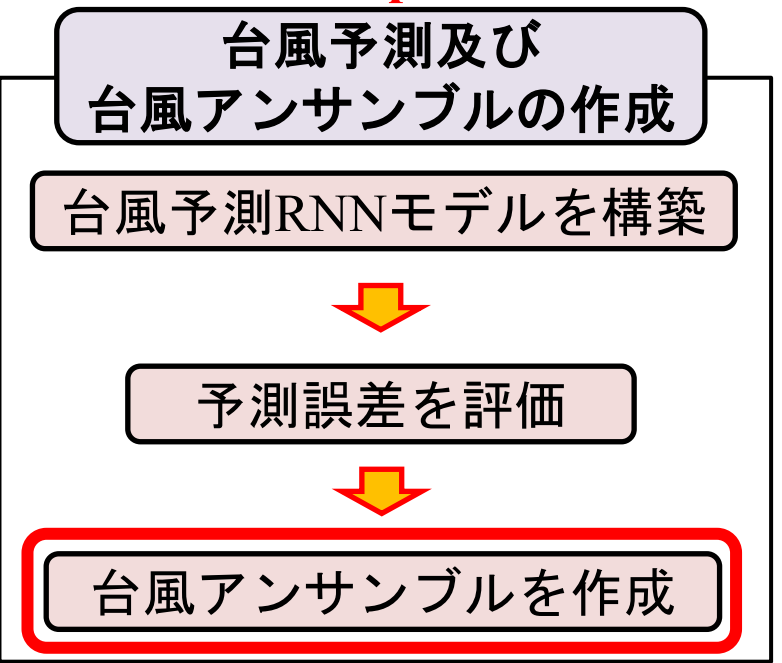


➡ 予測時間が長くなる程、予測精度が低下する

AI予測: Step1 (台風アンサンブルの作成)



Step1

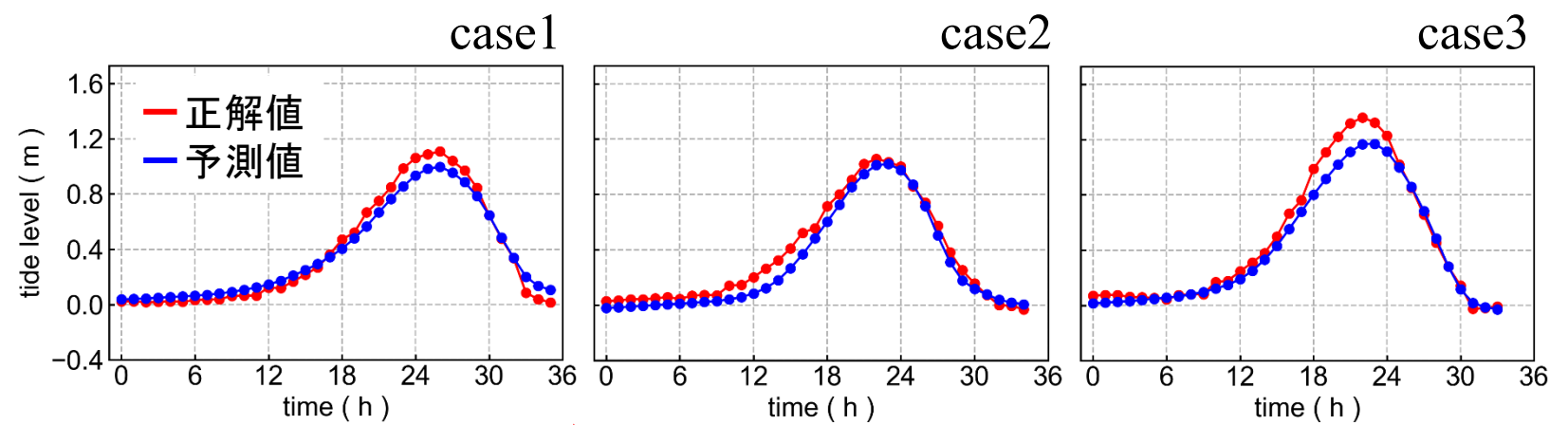
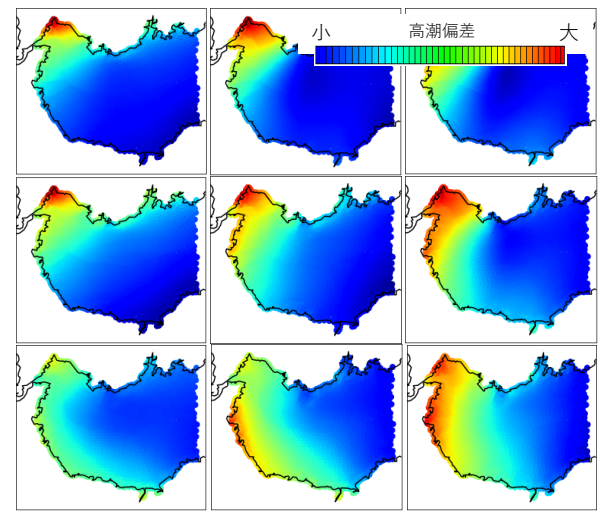
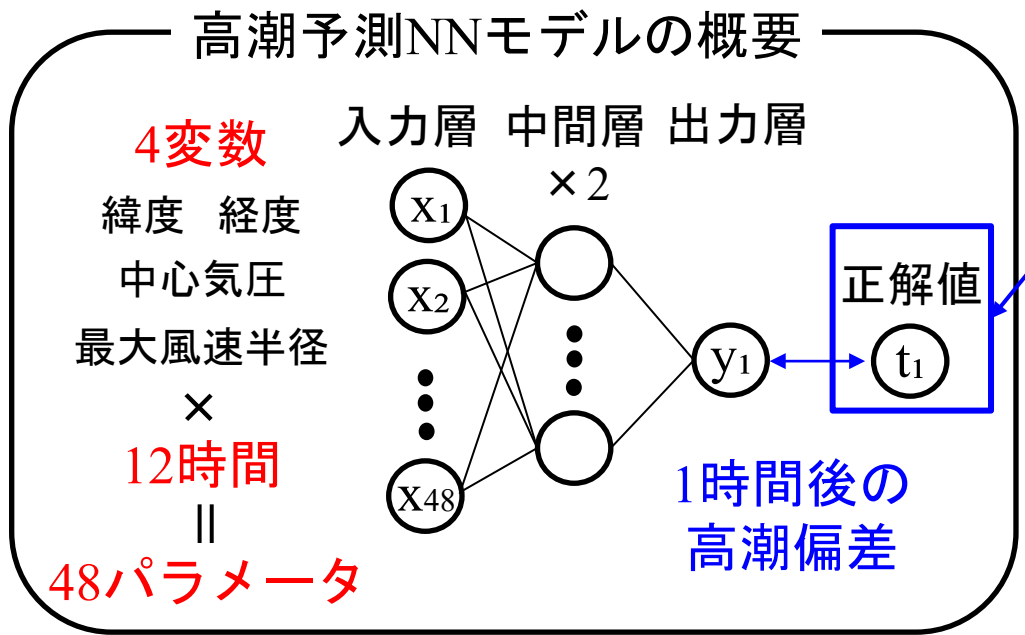


台風予測の不確実性を考慮した台風アンサンブルを作成

AI予測: Step2 (高潮予測NNモデルの構築)



Step2

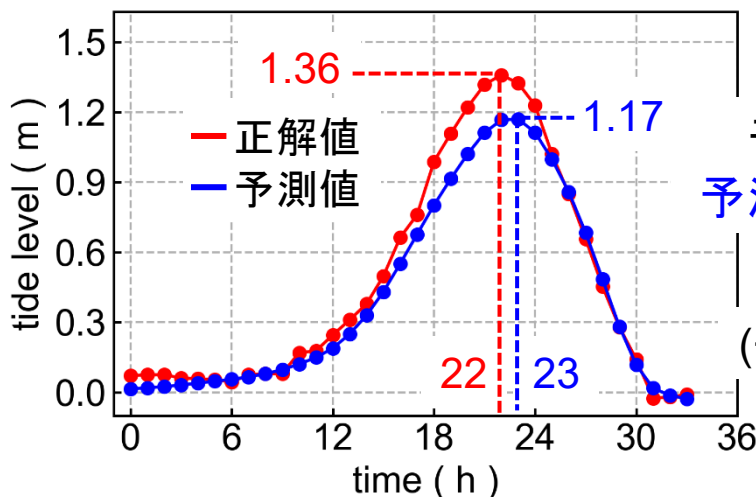
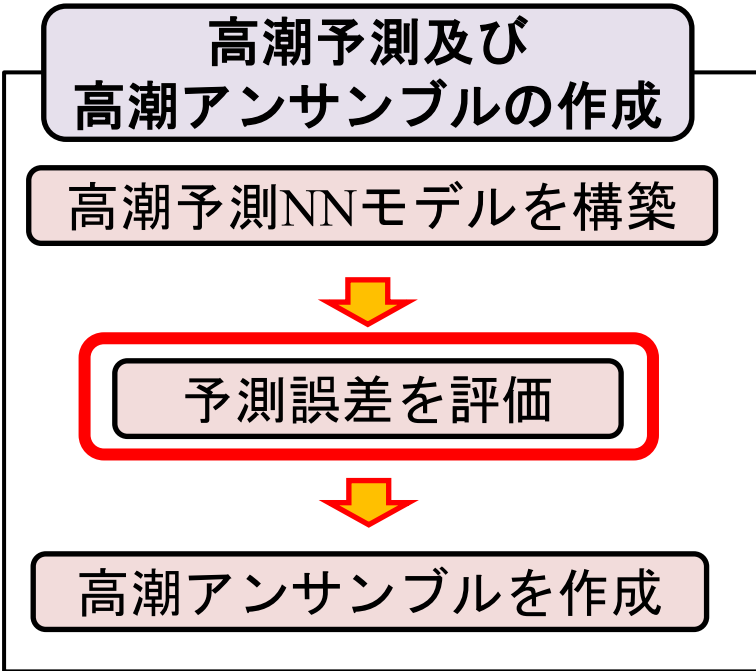


概ね高精度で予測可能

AI予測: Step2 (高潮予測NNモデルの予測誤差評価)



Step2

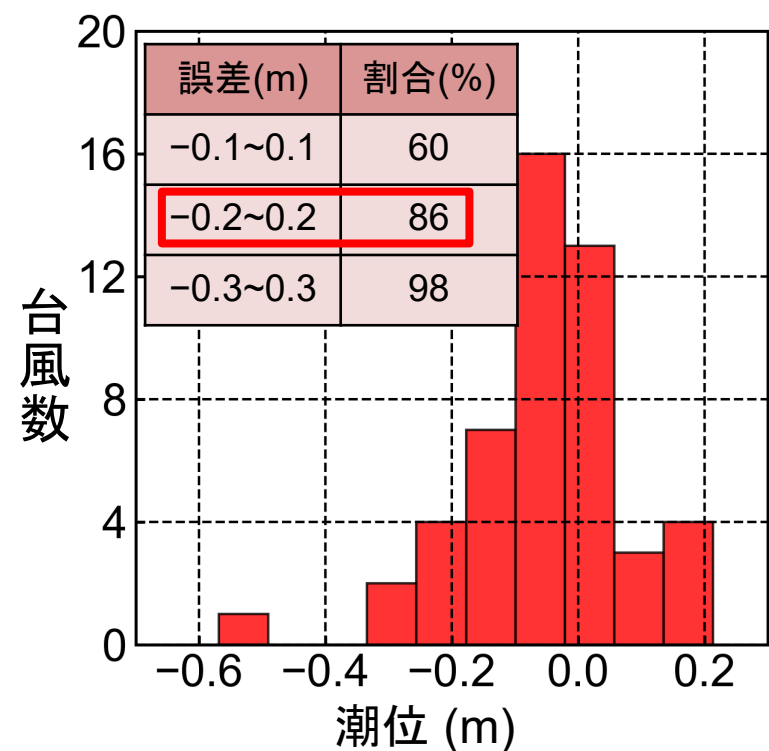


予測誤差：
予測値 - 正解値

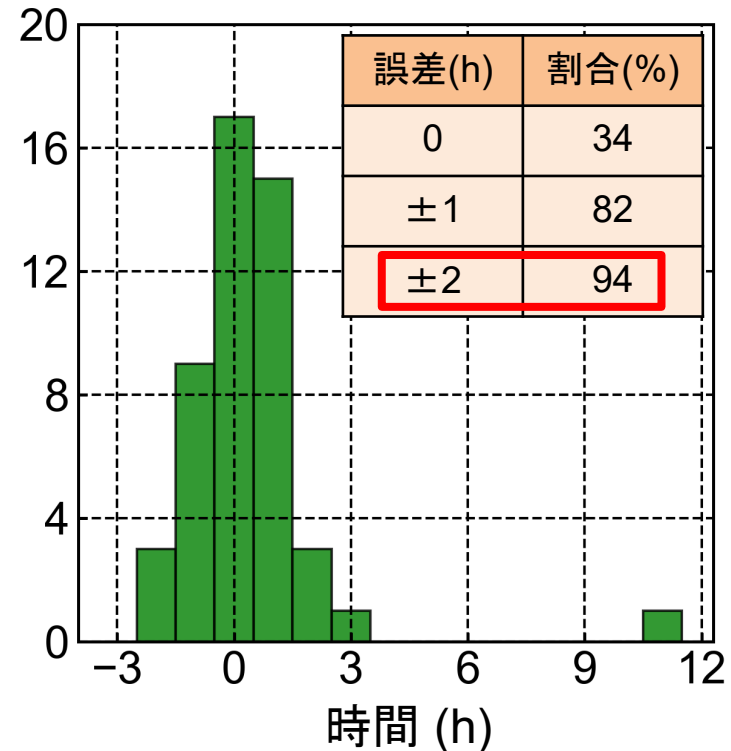
↓

(-0.19m, +1h)

最大高潮偏差



最大高潮偏差をとる時刻



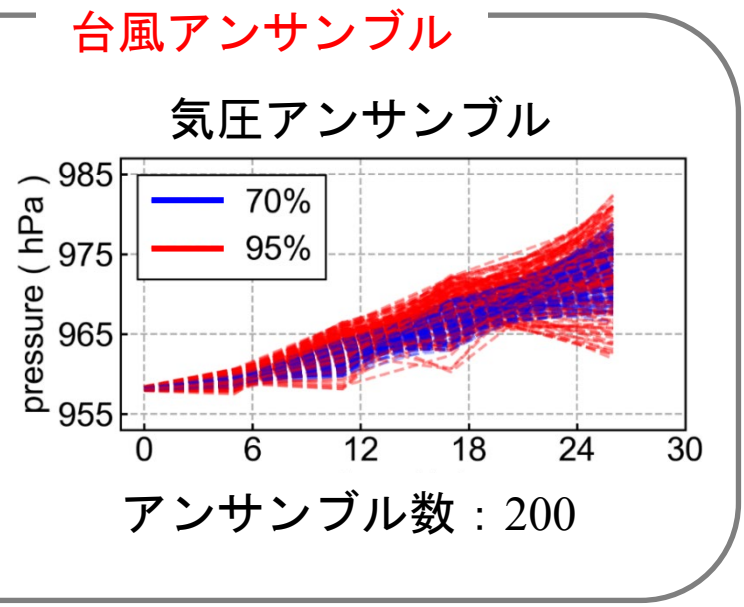
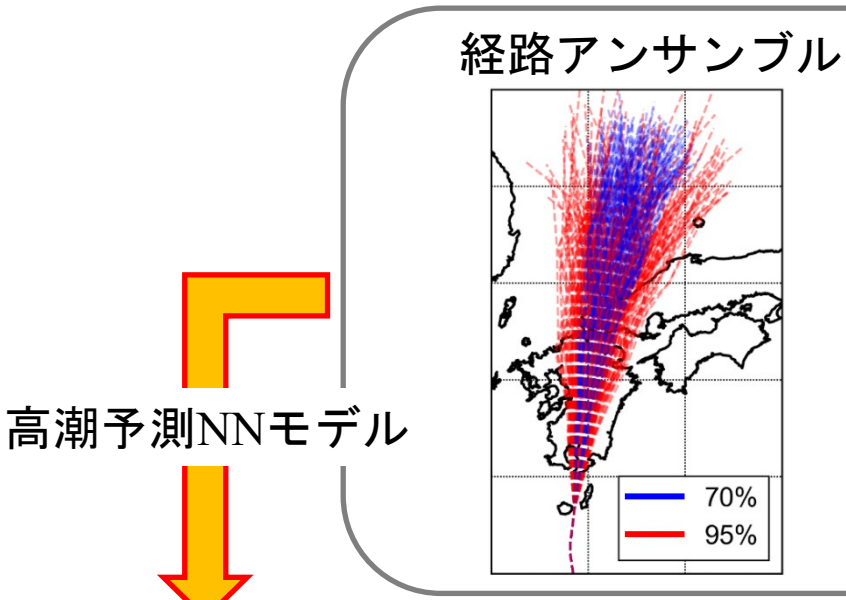
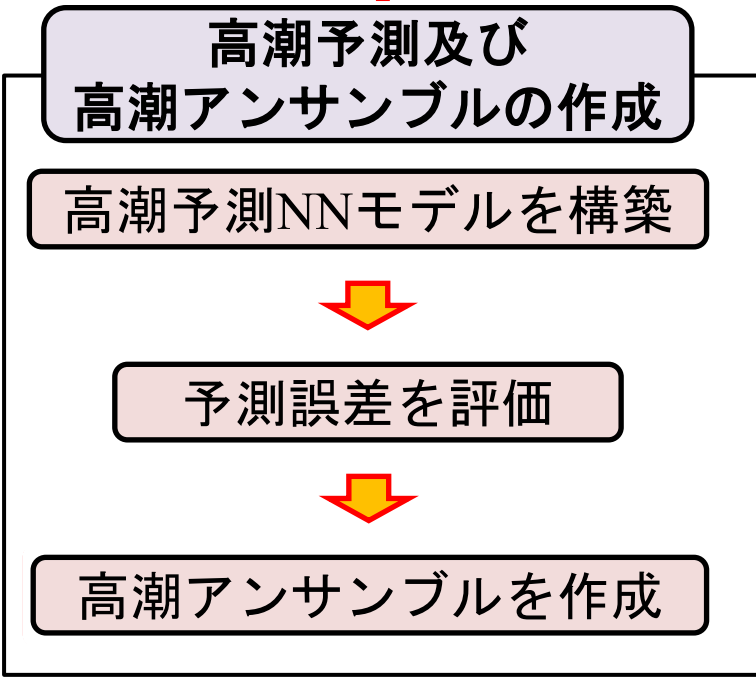
予測誤差 (予測値 - 正解値)

- ⇒ 概ね高精度で予測可能
- ⇒ このモデルを台風アンサンブルに適用
- ⇒ 高潮アンサンブルを作成

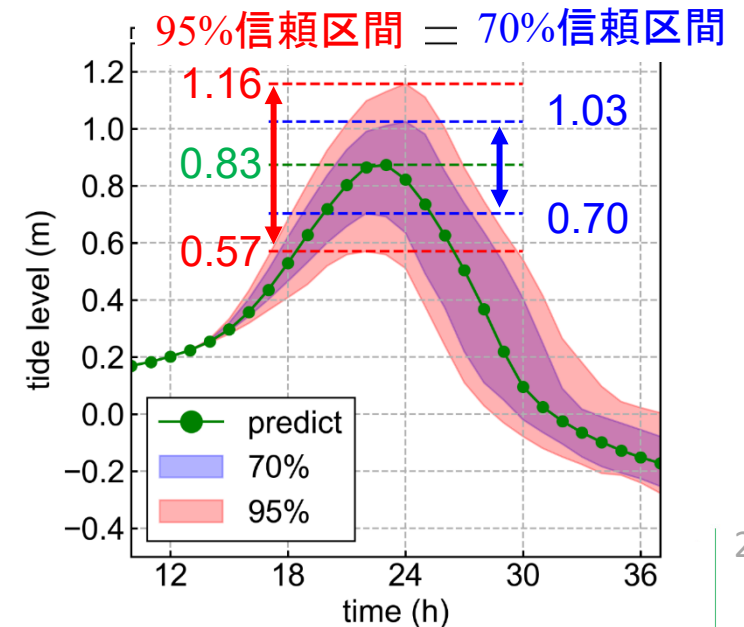
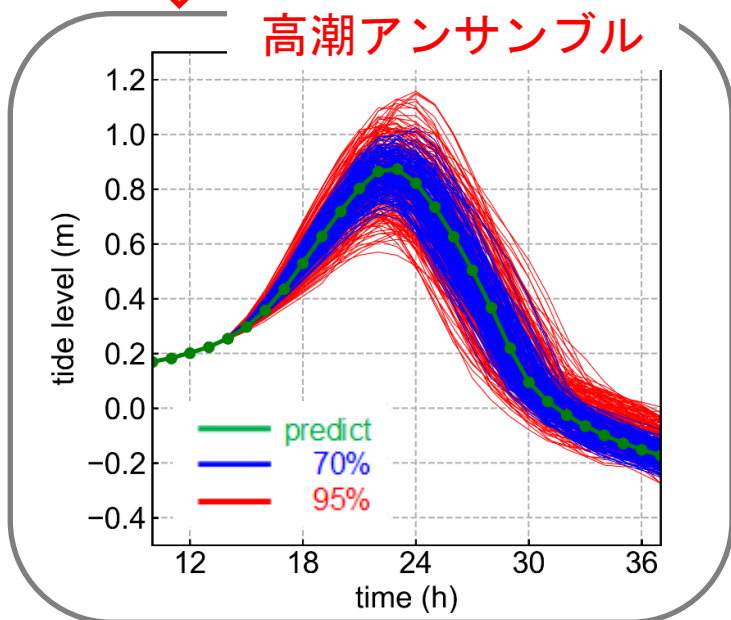
AI予測: Step2&3 (高潮アンサンブル作成 & 確率論的な評価)



Step2



Step3



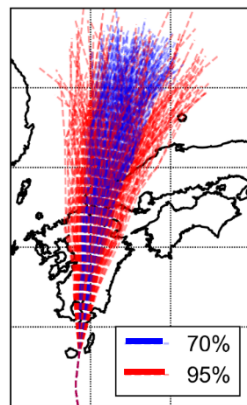
NNを用いた確率論的リアルタイム高潮予測システム

Step1

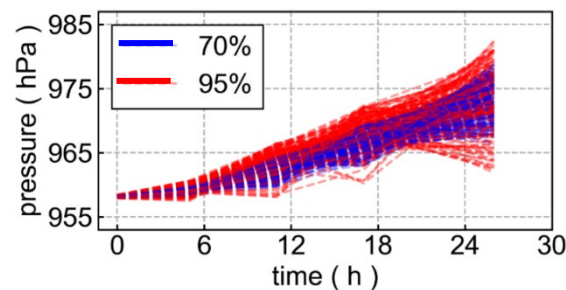
台風予測及び台風アンサンブルの作成

経路アンサンブル

台風アンサンブル



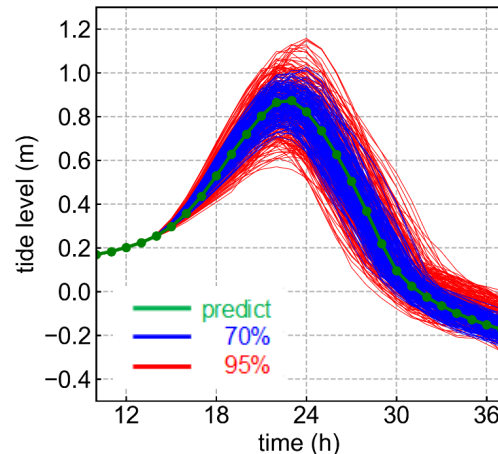
気圧アンサンブル



Step2

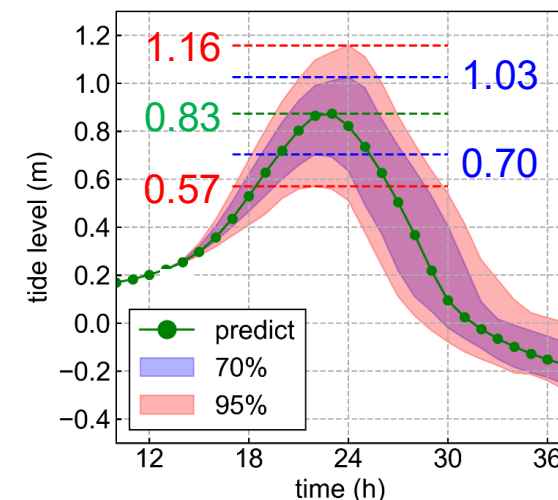
高潮予測及び高潮アンサンブルの作成

高潮アンサンブル



Step3

確率論的な高潮評価



70%及び95%の高潮信頼区間の導出



危険側の値が防災上重要



防災対応や住民避難の新たな指標
として活用

- 01. そもそも高潮って？
- 02. 高潮を予測する
- 03. 高潮予測アプローチ①(物理予測)
- 04. 高潮予測アプローチ②(AI予測)
- 05. まとめ

物理予測の長所と課題



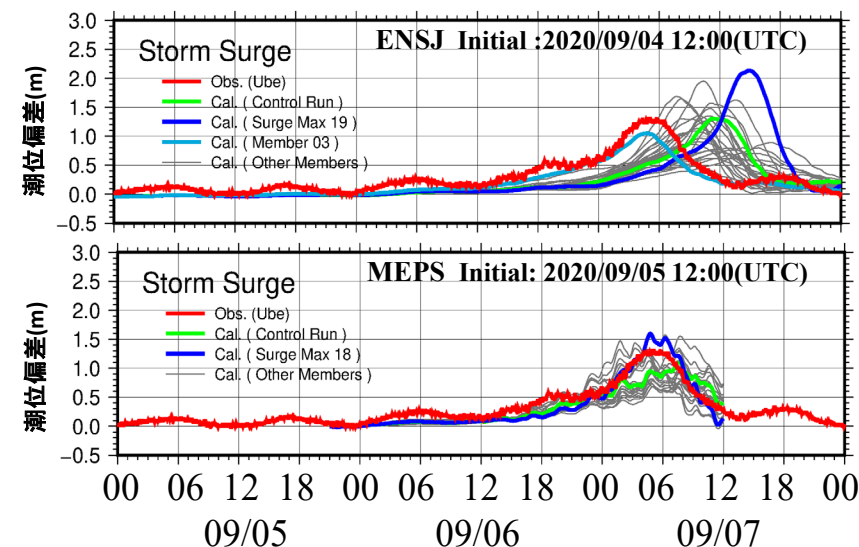
■ 長所

- 外力(気圧・風・経路)が再現された場合、概ね再現可能
- 最大51メンバで計算 ⇒ より不確実性を考慮
- リードタイムが長い ⇒ 132時間(5.5日)先まで予測
- 1分毎の予測値を提供 ⇒ 気象庁は1時間内の最大値
- 三大湾を対象に詳細な計算を実施

個別の利用者の目的に応じたリスク管理の情報等として有効

■ 課題

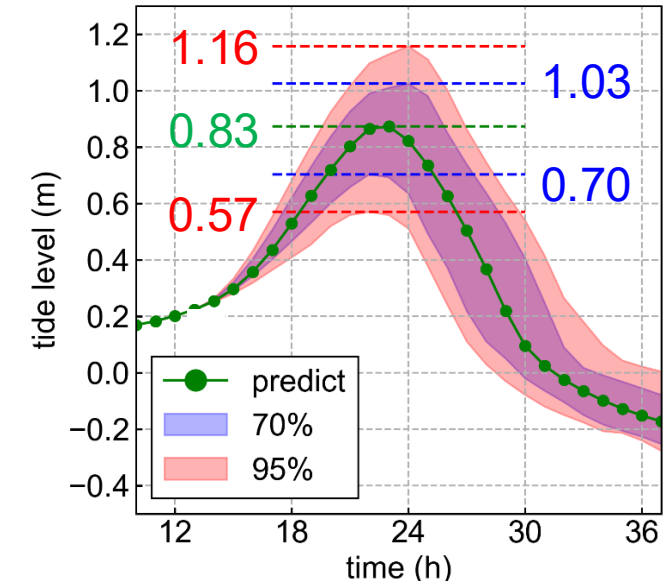
- アンサンブル気象予報でも台風予測が外れることはある。⇒ 台風の予測誤差は大きい。
- 潮位偏差の最大値がアンサンブルで賄いきれないこともある。⇒ あくまで幅を持った予測
- さらに時空間解像度の高い気象場の使用が理想。⇒ 現在は3時間間隔だが、理想は10分間隔。
- 計算資源の問題 ⇒ メンバー数が増えるほど、計算に時間がかかる。



■ 長所

- 計算時間が非常に短い。⇒ 数十秒
- 事前に多数メンバーでの学習が可能。
- アンサンブル数が多く、確率論的な評価が可能。
- 防災対策や避難支援において新たな指標となりうる。

確率論的に幅をもった評価が可能



■ 課題

- 事前に計算を行い、学習データを作成する必要がある。
- 今回作成したモデルでは、顕著な高潮は予測精度が低下傾向。⇒ 災害を及ぼすような高潮の予測が重要
- モデルの予測精度や各アンサンブルの作成方法。⇒ 様々な改良方法があるはず！
- 信頼性の担保。⇒ ブラックボックス的

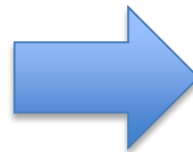
■ 物理予測

- 運用に向けた体制作り
- 洪水との連携
- マルチアンサンブル
- 台風以外の高潮(根室の爆弾低気圧等)



■ AI予測

- 精度向上に向けた技術開発
- 実台風への適用を目指す



■ 物理予測 × AI予測

それぞれの長所を活かし、短所を補い合う

物理では計算に時間がかかるが、
AIは計算時間が短い

AIでは顕著台風の予測精度が低い
物理はスーパー台風が対象

技術開発による精度向上・差別化

AIを用いて一緒に技術開発しませんか？

ご清聴ありがとうございました。