

# 災害大国日本の激甚気象： その現状と将来予測

本講演で最もお伝えしたいこと：

- 地球温暖化の進行は疑いの余地がなく、それに伴い、日本における**豪雨や台風の災害の危険性(暴風、豪雨、高潮など)**が年々増大している。
- 今世紀後半にかけて、温暖化の進行とともに、日本を含む中緯度で、台風や豪雨などの**極端気象による災害はさらに激甚化することが予想される。**



坪木和久  
(名古屋大学宇宙地球環境研究所・教授／  
横浜国立大学 台風科学技術研究センター・副センター長)

ジェット機のキャビンから撮影したスーパー台風 ランの眼内部  
2017年10月21日、高度43000フィート(坪木撮影)

「日本はその地理的位置がきわめて特殊であるために、（中略）特殊な天変地異に絶えず脅かされなければならない運命のもとに置かれている」

「ある年は災禍が重畳しまた他の年には全く無事な回り合わせが来るということは、純粹な偶然の結果としても当然期待されうる『自然変異』」

「悪い年回りはむしろいつかは回ってくるのが自然の鉄則であると覚悟を定めて、良い年回りの間に十分の用意をしておかなければならぬということは、實に明白すぎるほど明白なことであるが、またこれほど万人がきれいに忘れがちなこともまれである。」

寺田寅彦先生



# 災いの年

## 2004年の漢字「災」

- 10個の台風の上陸
- 平成16年7月新潟・福島豪雨
- 平成16年7月福井豪雨
- 震度7の新潟県中越地震
- 猛暑
- 豪雪

## 2018年の漢字「災」

- 北陸豪雪
- 大阪の地震
- 平成30年7月豪雨
- 猛暑
- 逆走する台風(12号)
- 台風20, 21, 24号
- 北海道胆振東部地震(9月6日)

# 台風は大気中に発生する最強の擾乱で、しばしば大きな災害をもたらす

## 風水害による保険金の支払額(2020年6月現在)

順位	災害名	地域	年月	(億円)
1	台風21号	近畿地方	2018年9月	10,678
2	台風19号	東日本	2019年10月	5,826
3	台風19号	全国	1991年9月	5,680
4	台風15号	関東地方	2019年9月	4,656
5	台風18号	全国	2004年9月	3,874
6	2月雪害	関東中心	2014年2月	3,224
7	台風18号	熊本・山口他	1999年9月	3,147
8	台風24号	東京・神奈川・静岡など	2018年9月	3,061
9	平成30年7月豪雨	岡山・広島・愛媛など	2018年7月	1,956
10	台風15号	全国	2015年8月	1,642

一般社団法人日本損害保険協会調べ

<https://www.sonpo.or.jp/report/statistics/disaster/index.html>

台風は依然として自然災害(特に風水害)のなかで、災害の最も大きな原因である。

非常に強い台風24号 Trami (2018)の航空機観測を実施した。



2019年10月12日千曲川の氾濫

日本の風水災害の現状



日本の風水災害の将来

2013年11月スーパー台風ハイエンの被害



*Photo by K. Tsuboki in Nagano 2019*



*Photo by K. Tsuboki in Nagano 2019*



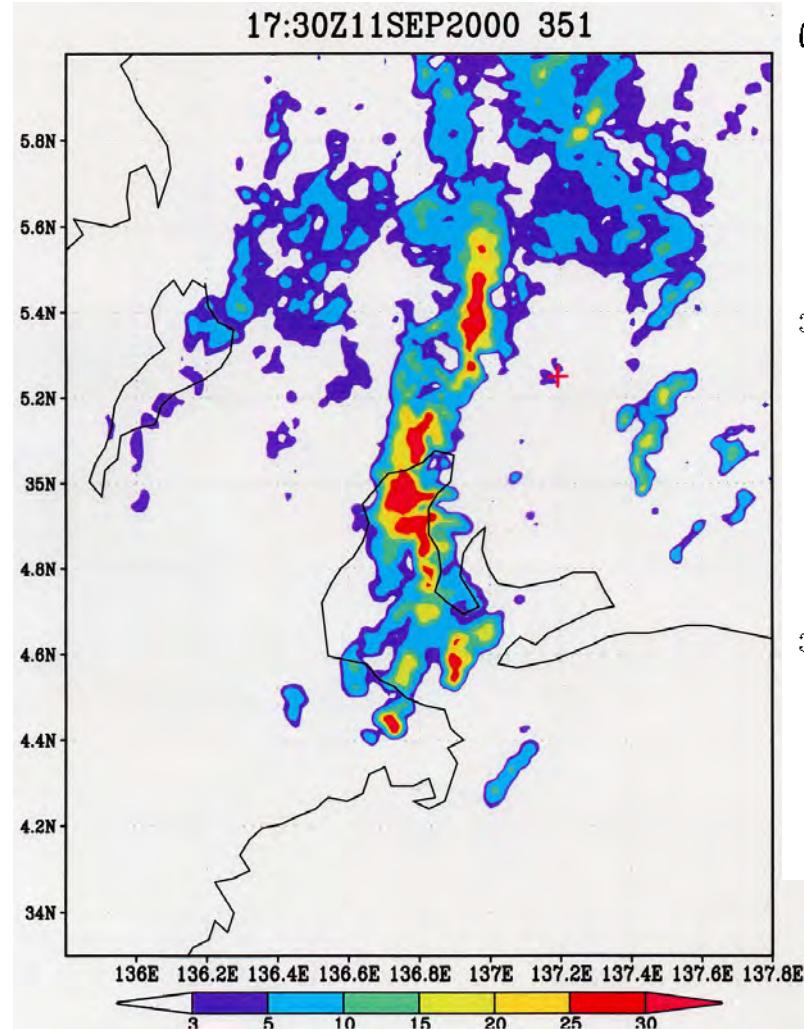
*Photo by K. Tsuboki in Marumori 2019*

# 豪雨の発生条件

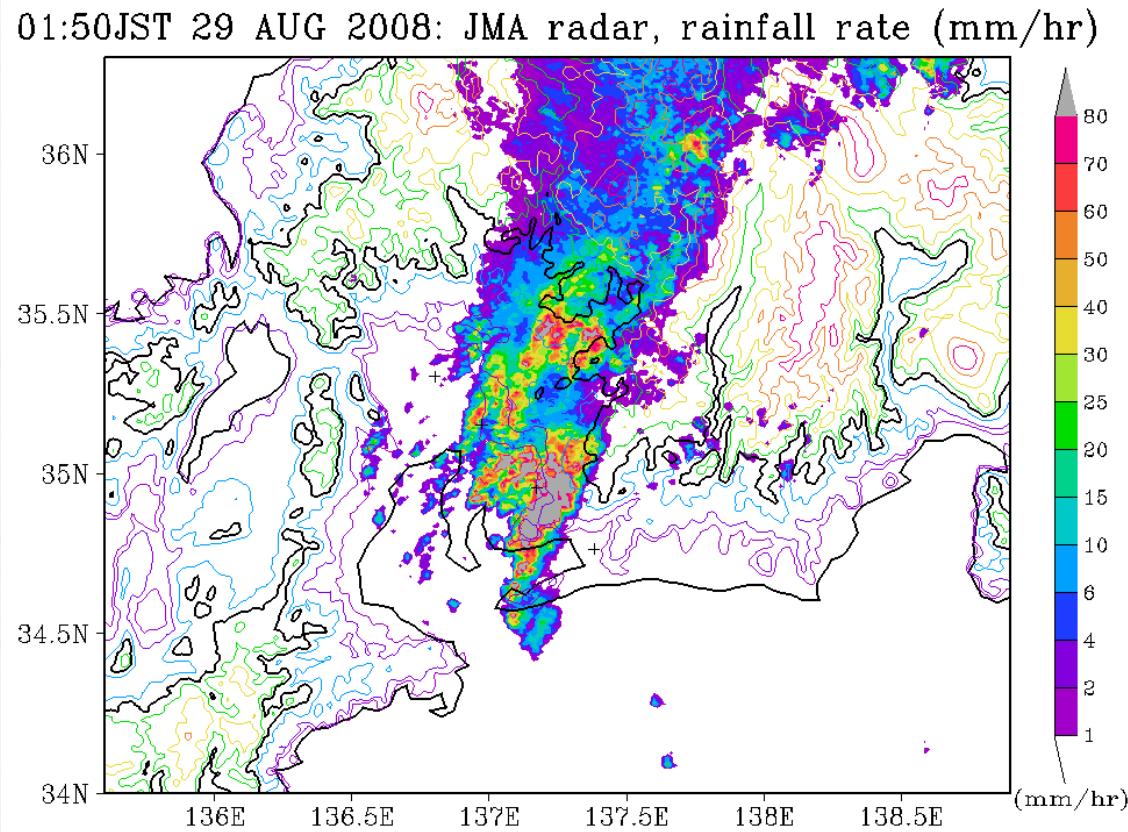
- ◆ 強い積乱雲(群)が発生する: 大気が不安定で水蒸気が大量に供給されている
- ◆ 積乱雲群や降水システムが維持・停滞するメカニズムがある(内的、外的メカニズム)
- ◆ 多くの場合**線状降水帯**が形成され、停滞する
  - ✓ 前線、収束線、局地前線
  - ✓ 山や島などの地形
  - ✓ バックビルディング形成
  - ✓ メソ対流系の形成
  - ✓ 積乱雲の自己増殖
  - ✓ メソスケール低気圧

# 線状降水帯: 100mm/hrを超える降水形成

2000年9月11日の東海豪雨を  
もたらした降雨帯



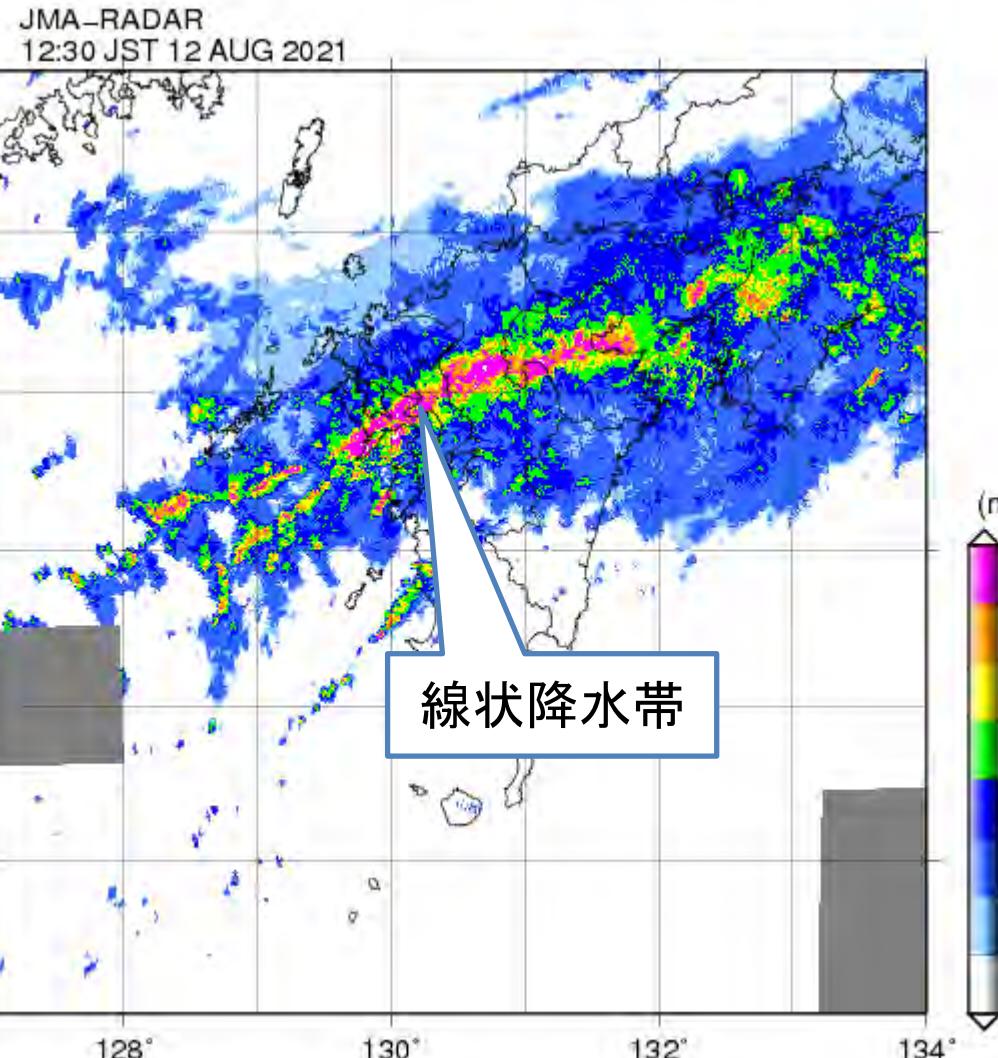
「2008年8月末豪雨」をもたらした降雨帯  
2008年8月29日



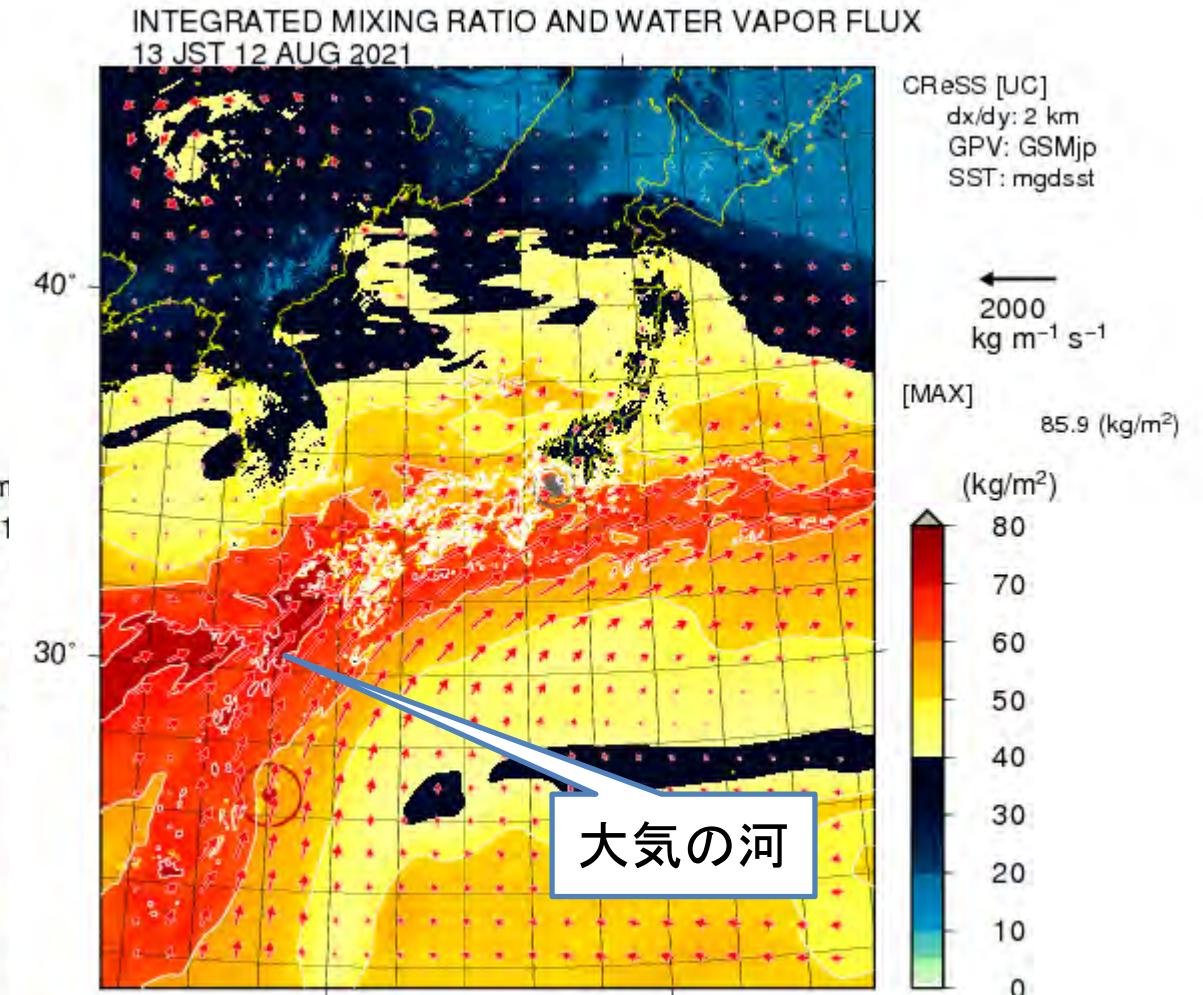
## 最大1時間雨量

- ・岡崎 146.5 mm
- ・名古屋 107.5 mm

# 2021年8月12日、九州北部地方で線状降水帯が発生



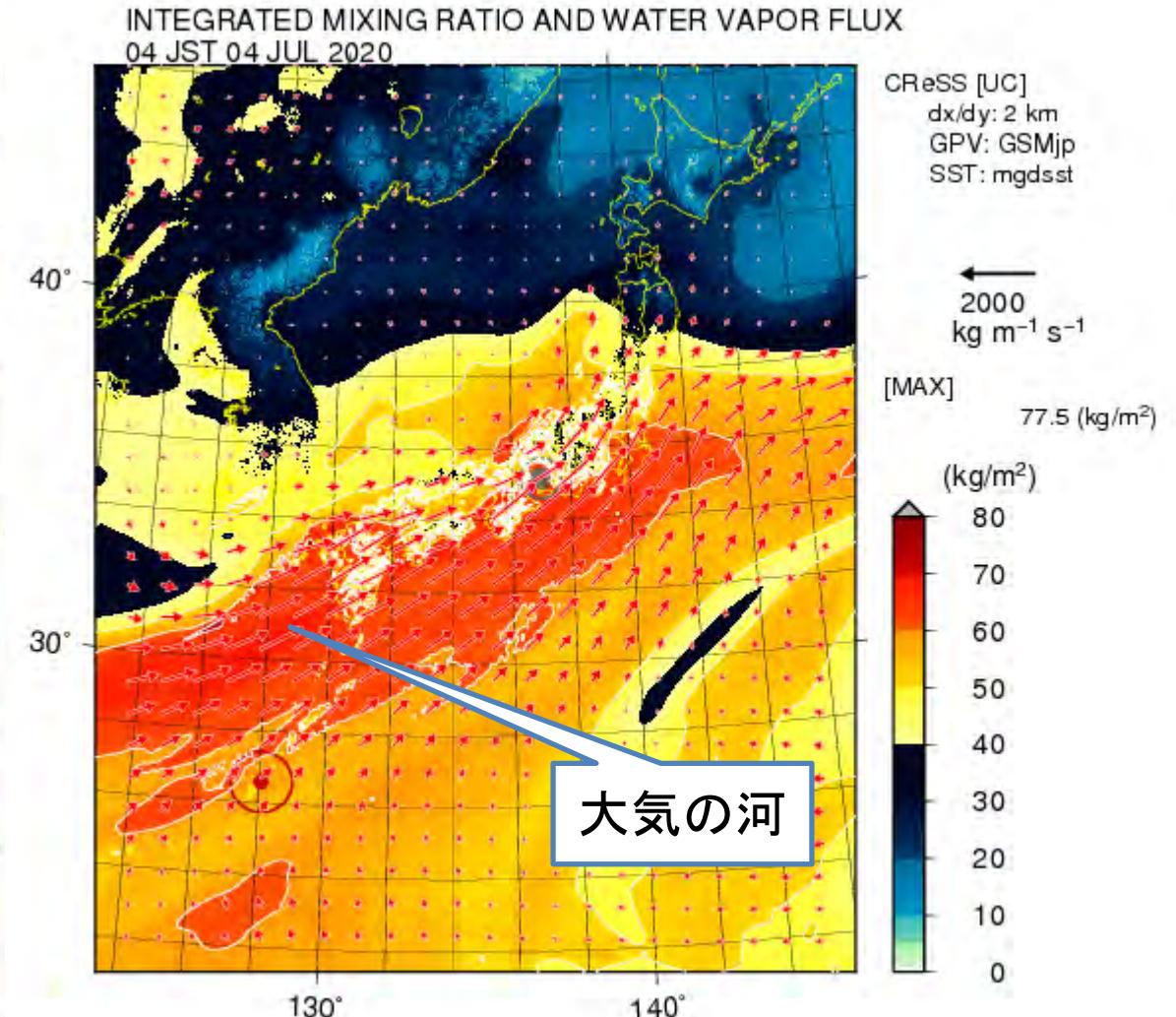
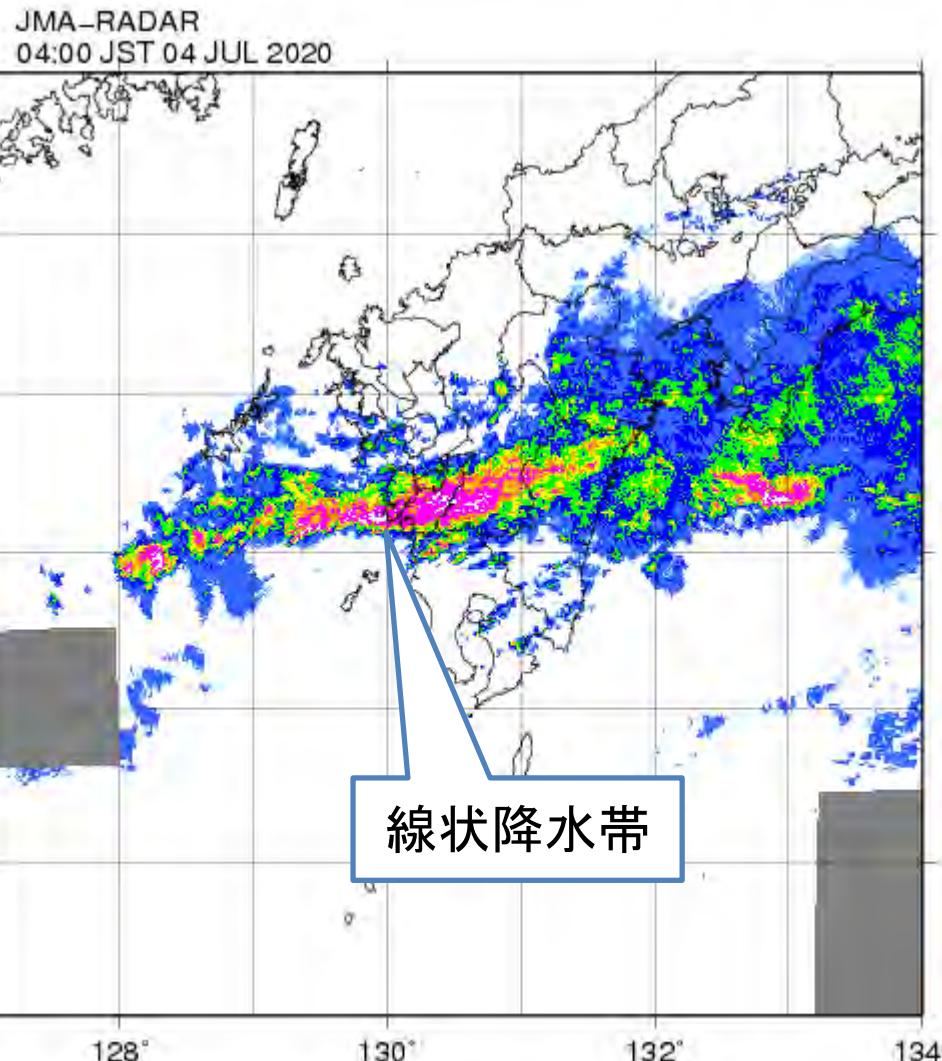
気象庁レーダによる降水分布



鉛直積算水蒸気量の分布とその流れ

8月12日は、九州北部地方で線状降水帯が発生し、24時間降水量が多いところで400ミリを超える大雨となった。（気象庁資料：災害をもたらした気象事例）

令和2年7月豪雨 令和2年(2020年)7月3日～7月31日  
2020年7月4日熊本の豪雨をもたらした線状降水帯

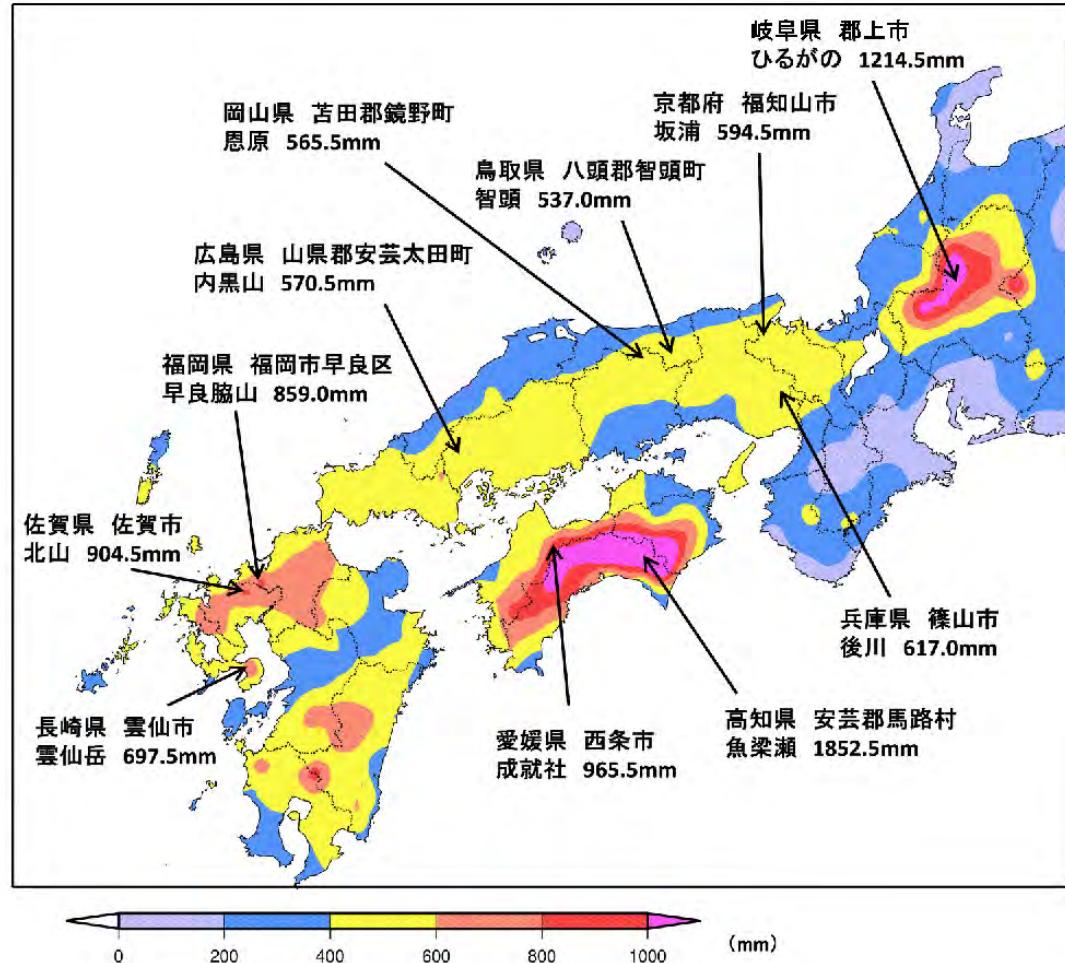


気象庁レーダによる降水分布

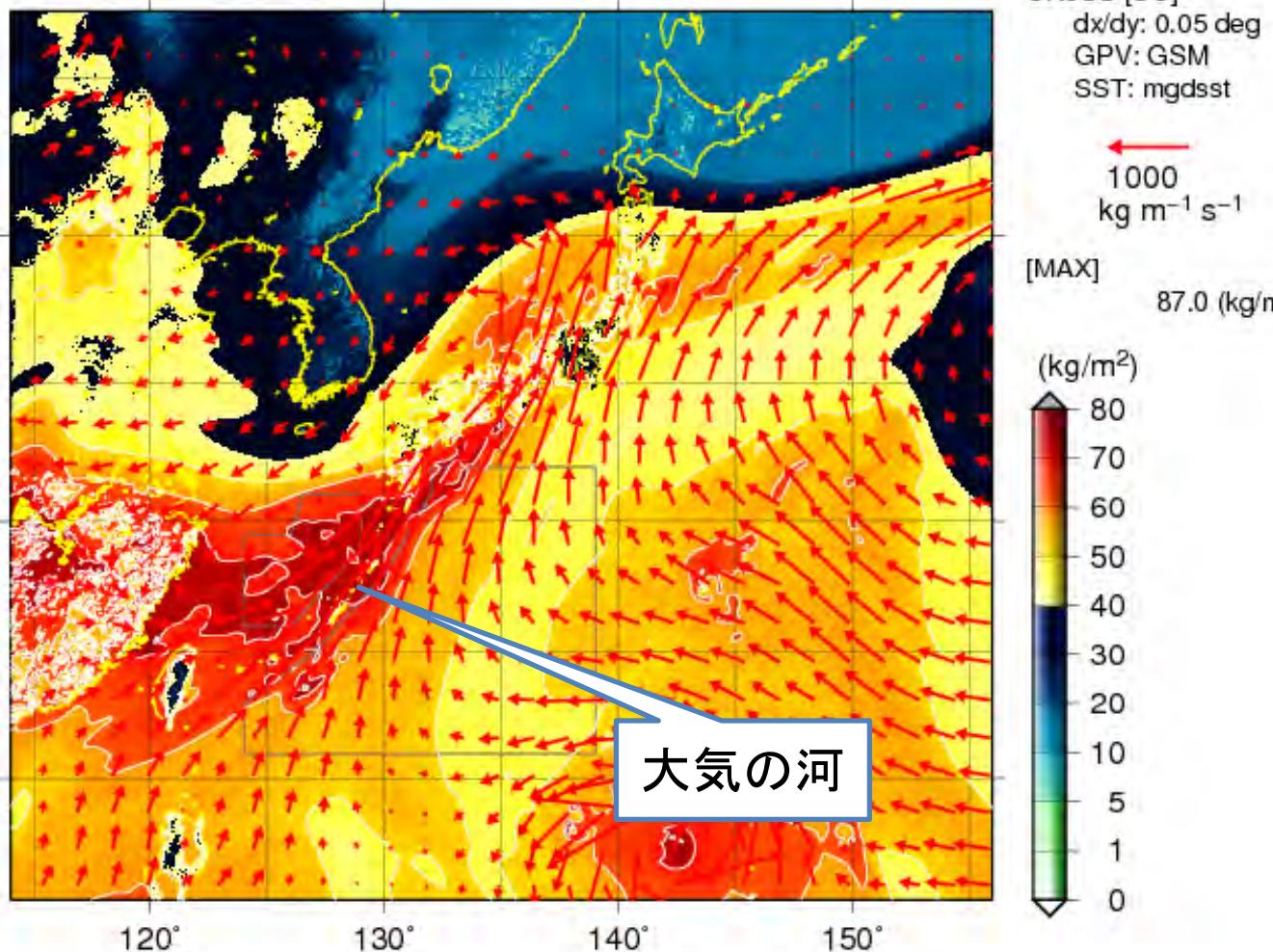
鉛直積算水蒸気量の分布とその流れ

# 平成30年7月豪雨: 総雨量分布と鉛直積算水蒸気量分布に見られる大気の河

期間降水量分布図(6月28日0時～7月8日24時)

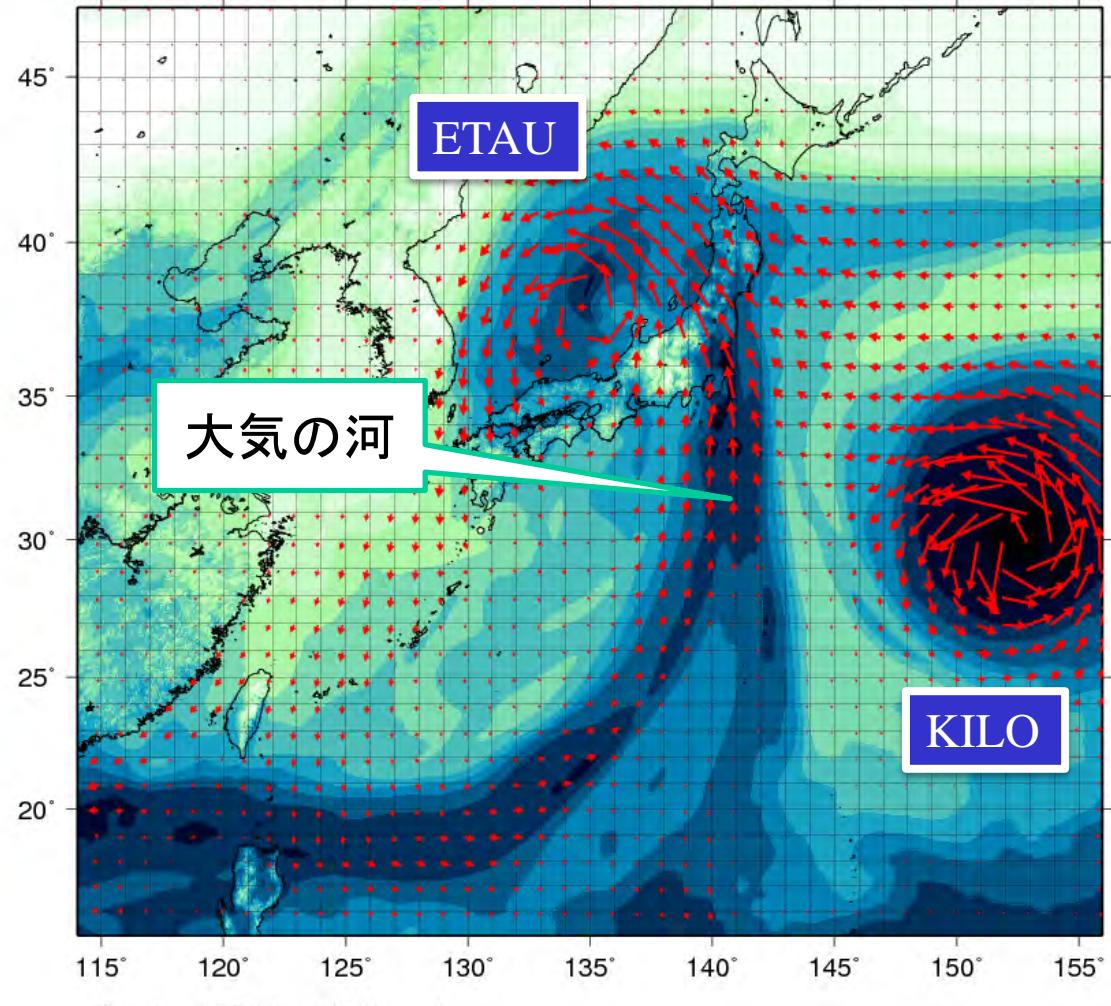


INTEGRATED MIXING RATIO AND WATER VAPOR FLUX  
10 JST 07 JUL 2018

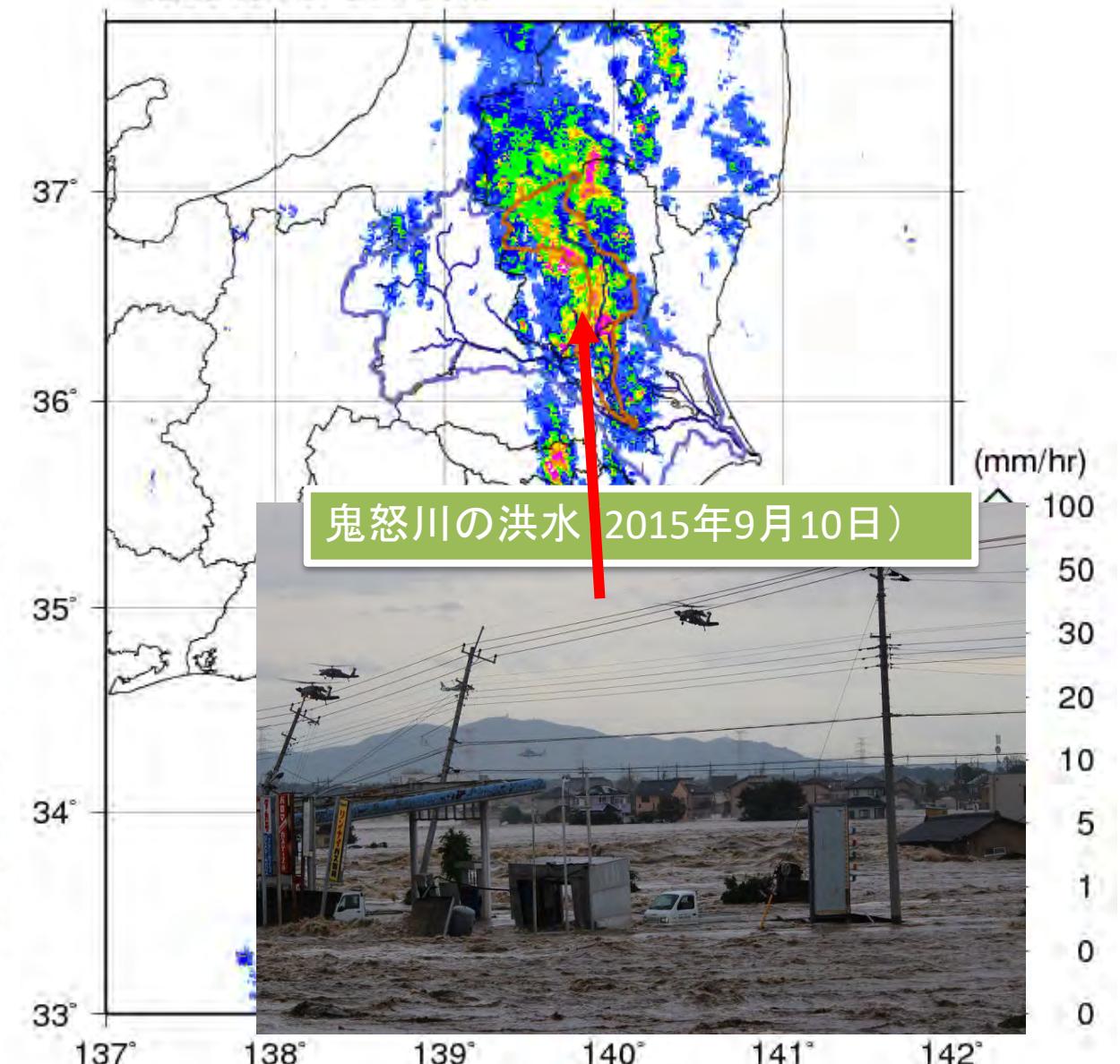


# 大気の河 2015年9月10日: 鬼怒川決壊の豪雨(関東・東北豪雨)

INTEGRATED MIXING RATIO AND WATER VAPOR FLUX  
(a) 18 JST 09 SEP 2015

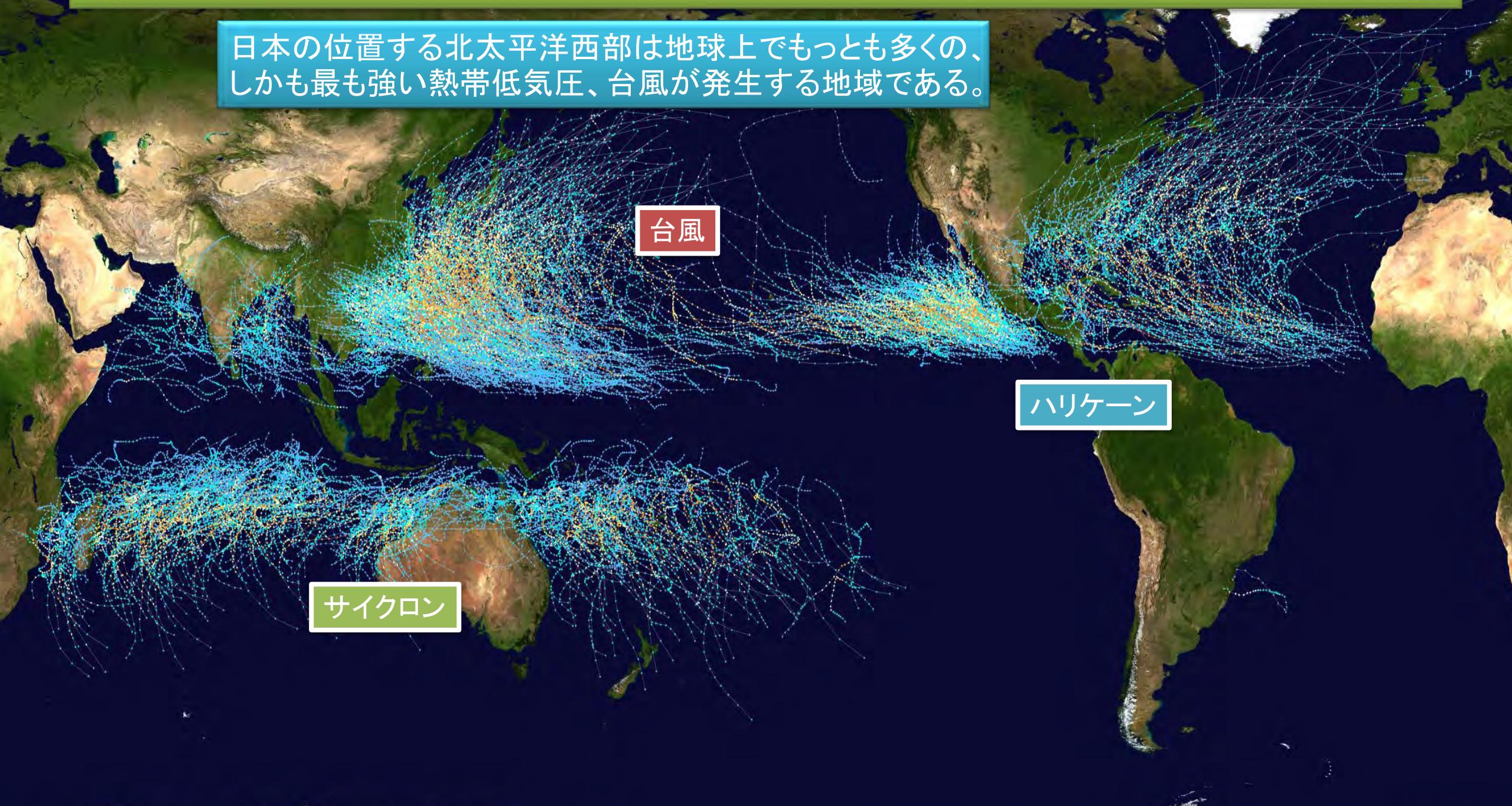


JMA RADAR  
18:00 JST 09 SEP 2015



# 世界の熱帯低気圧の分布(1985年から2005年までの全ての熱帯低気圧の経路)

日本の位置する北太平洋西部は地球上でもっと多くの、しかも最も強い熱帯低気圧、台風が発生する地域である。



# 世界の温室効果ガス、過去最高 化石燃料影響か WMO

10/25(月) 19:36 配信

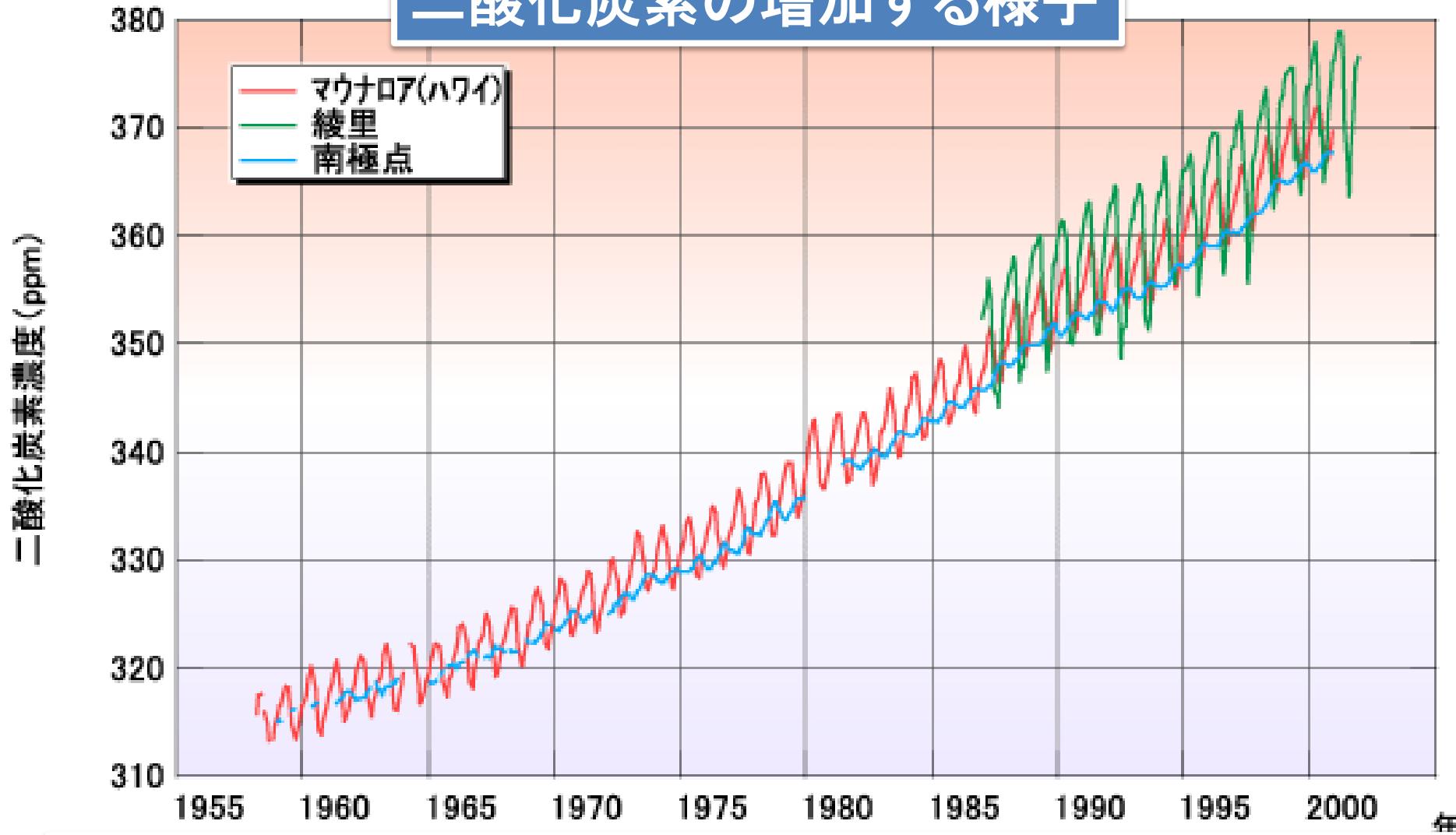
世界気象機関（WMO）は25日、**2020年の二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）などの主要な温室効果ガスの世界平均濃度が前年から増加し、いずれも観測史上最高記録を更新した**と発表した。

日本の気象庁は、人間の活動に伴う化石燃料の消費が増えていることなどが背景にあるとみている。

**CO<sub>2</sub>の平均濃度は413.2ppm**（ppmは100万分の1）で前年より2.5ppm増えた。  
メタンは1889ppb（ppbは10億分の1）、  
一酸化二窒素は333.2ppbで、前年よりもそれぞれ11ppb、1.2ppb増加した。

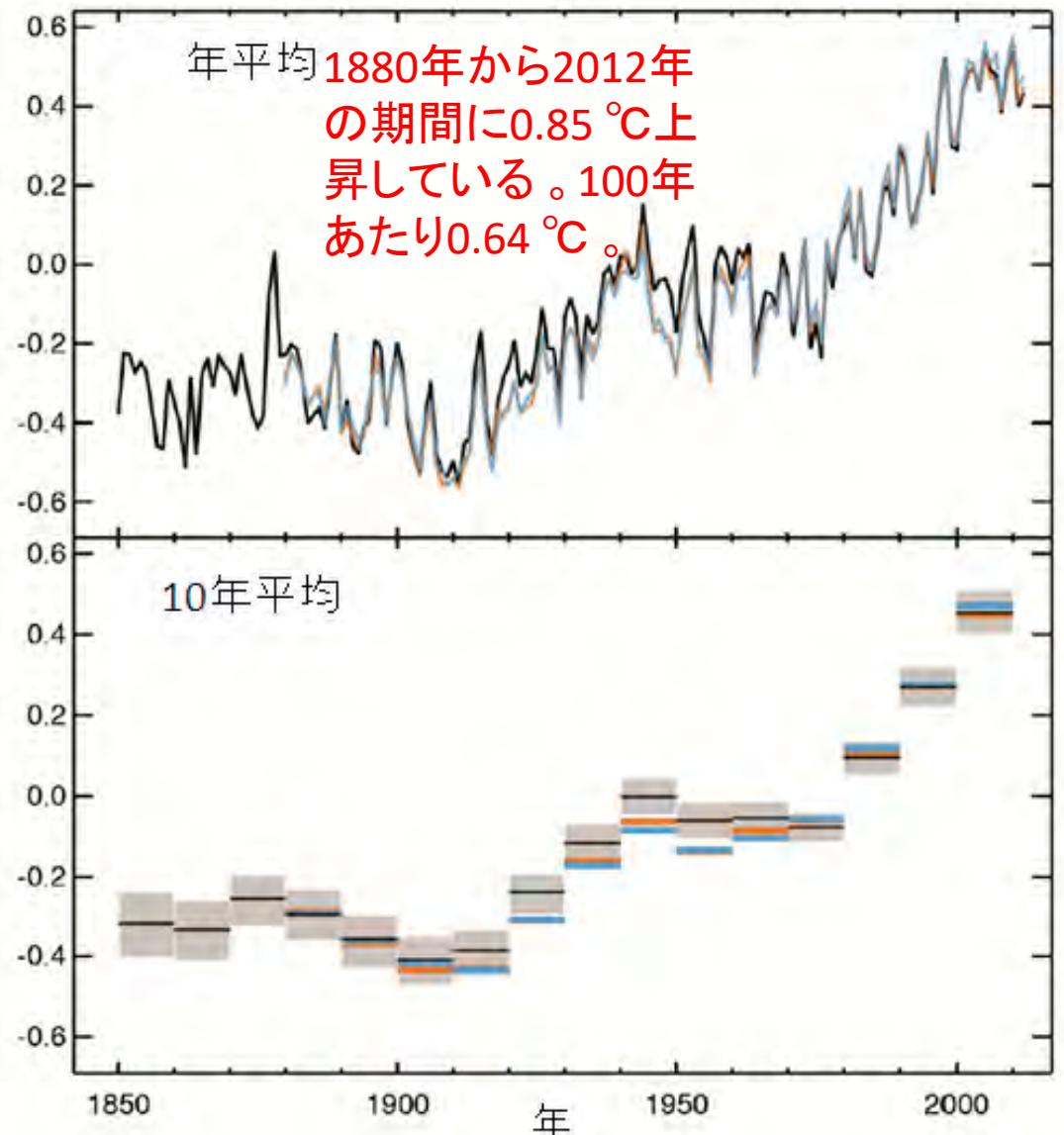
2021年10月25日 時事通信社の記事より

## 二酸化炭素の増加する様子

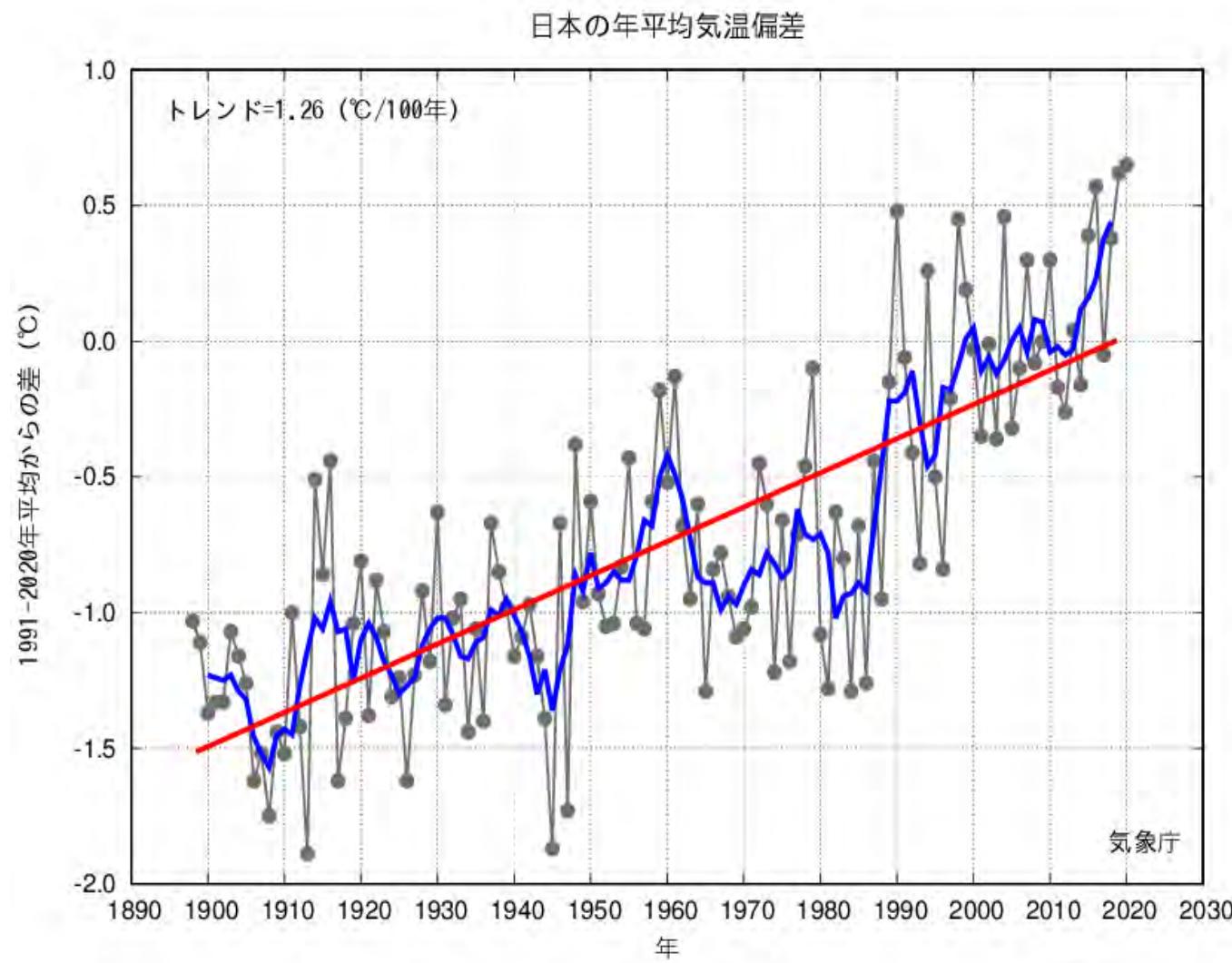


400ppmの二酸化炭素とは、空気の分子1万個に4個のCO<sub>2</sub>分子。  
1リットル中に、二酸化炭素の分子はおよそ $10^{19}$ 個も存在している。  
10,000,000,000,000,000個 = 1兆の1千万倍個のCO<sub>2</sub>

- ◆ 人間の影響が大気、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない。
- ◆ 大気、海洋、雪氷圏及び生物圏において、広範囲かつ急速な変化が現れている。
- ◆ 世界平均気温は、本報告書で考慮した全ての排出シナリオにおいて、少なくとも今世紀半ばまでは上昇を続ける。
- ◆ 向こう数十年の間に二酸化炭素及びその他の温室効果ガスの排出が大幅に減少しない限り、21世紀中に、地球温暖化は1.5°C及び2°Cを超える。
- ◆ 過去及び将来の温室効果ガスの排出に起因する多くの変化、特に海洋、氷床及び世界海面水位における変化は、百年から千年の時間スケールで不可逆的である。
- ◆ 陸域のほとんどで1950年代以降に大雨の頻度と強度が増加(人為起源の気候変動が主要な駆動要因)。
- ◆ 強い熱帯低気圧(CAT3～5)の発生割合は過去40年間で増加(内部変動だけでは説明できない)。
- ◆ 非常に強い熱帯低気圧(CAT4～5)の発生割合と強度最大規模の熱帯低気圧のピーク時の風速は、地球規模では、地球温暖化の進行と共に上昇。

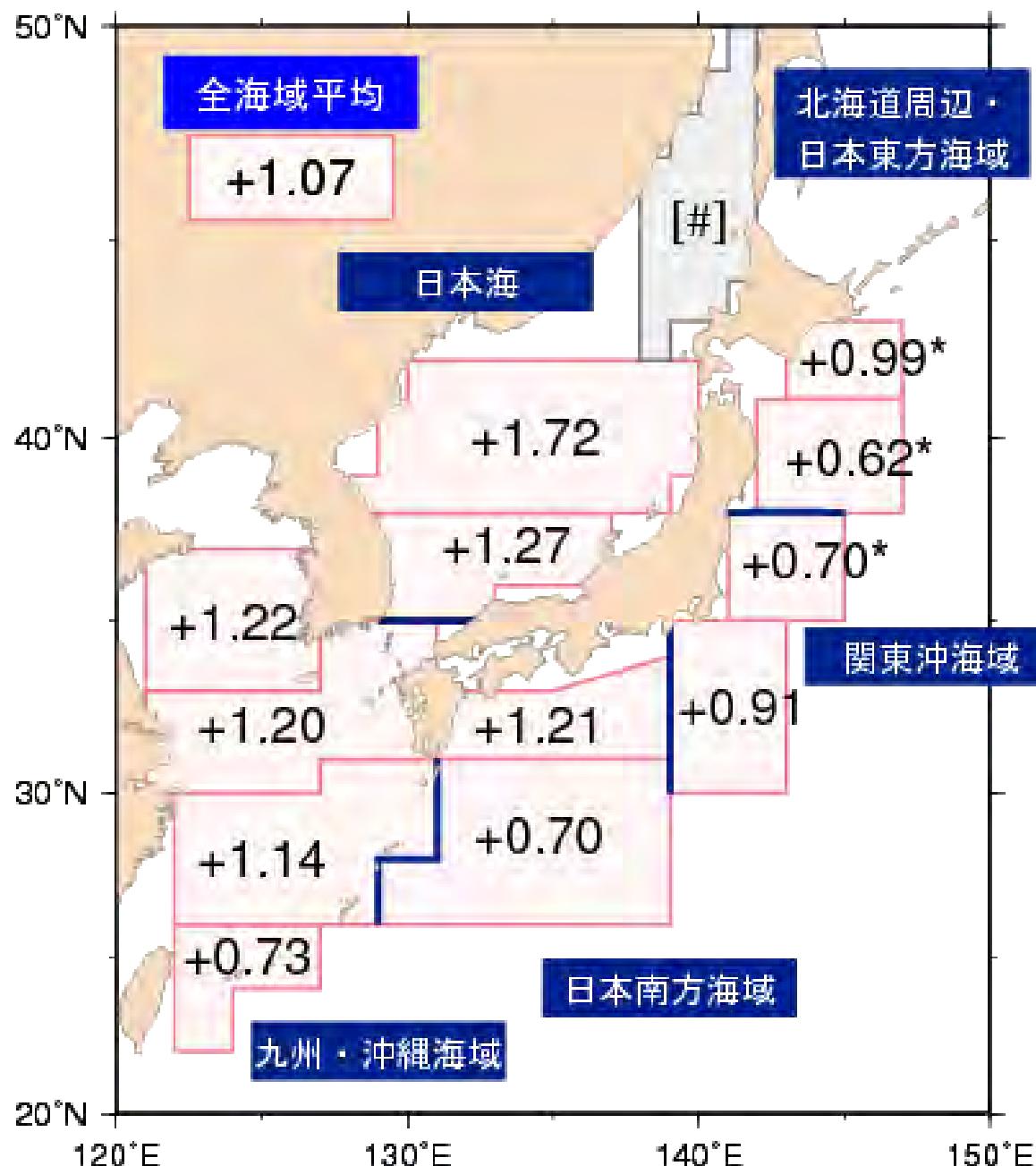


3つのデータセットによる、1850～2012年の陸域と海上とを合わせた世界平均地上気温偏差の観測値。上図：年平均値、下図：10年毎の平均値（黒色のデータセットについては不確実性の推定を含む）。偏差は1961～1990年を基準とする。（出典：IPCC AR5 WG I SPM Fig. SPM.1(a)）



細線（黒）：各年の平均気温の基準値からの偏差、太線（青）：偏差の5年移動平均値、直線（赤）：長期変化傾向。基準値は1991～2020年の30年平均値。日本の年平均気温は、様々な変動を繰り返しながら上昇しており、長期的には100年あたり1.26°Cの割合で上昇しています。特に1990年代以降、高温となる年が頻出しています。出典：気象庁HP 日本の年平均気温の偏差の経年変化(1898～2020年)

## 海面水温の長期変化傾向(日本近海)

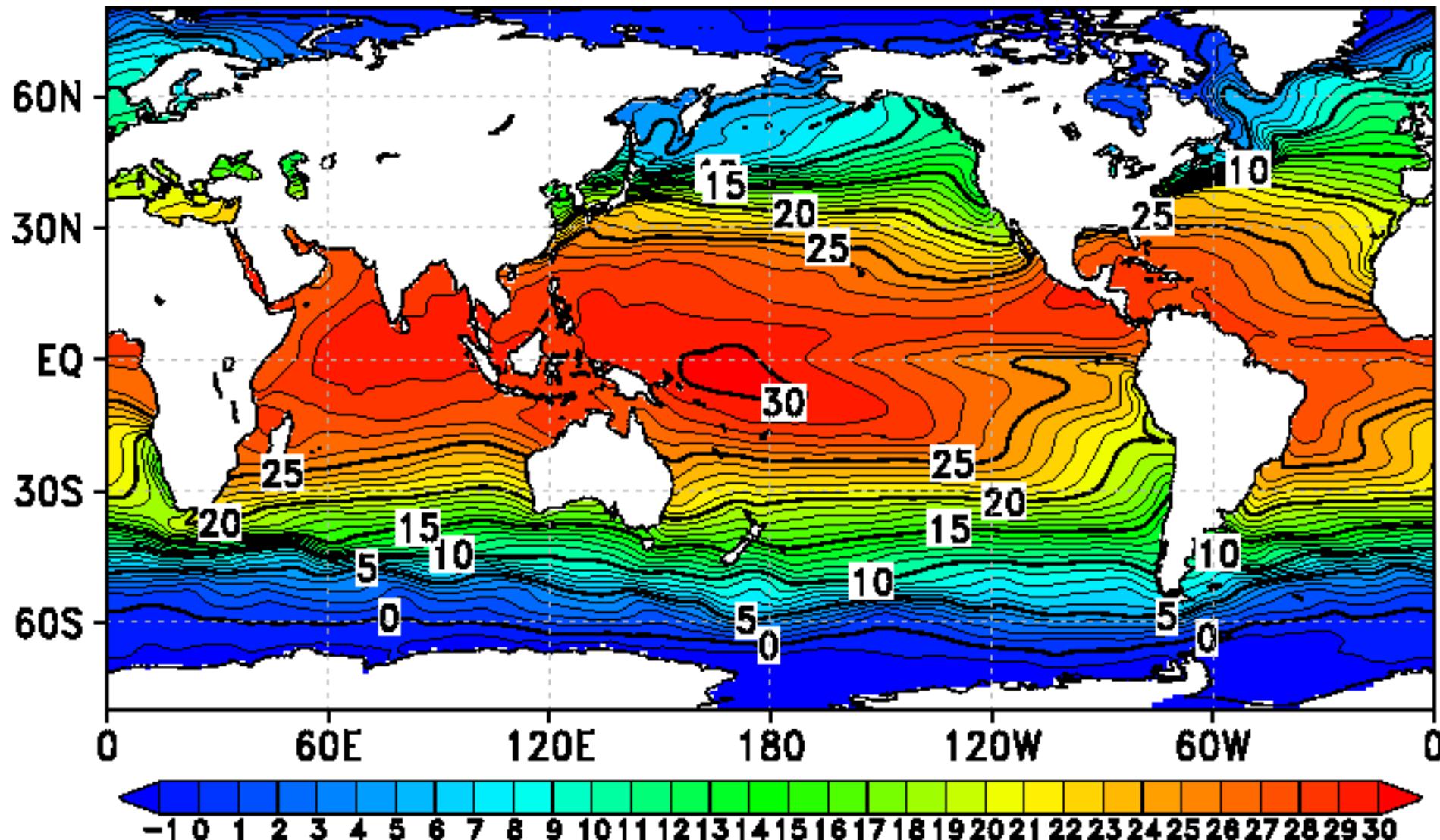


日本近海における、2014年までのおよそ100年間にわたる海域平均海面水温(年平均)の上昇率は、 $+1.07^{\circ}\text{C}/100\text{年}$ です。この上昇率は、世界全体で平均した海面水温の上昇率 $(+0.51^{\circ}\text{C}/100\text{年})$ よりも大きな値である。

海域別にみると、黄海、東シナ海、日本海南西部、四国・東海沖では日本の気温の上昇率 $(+1.14^{\circ}\text{C}/100\text{年})$ と同程度となっており、釧路沖、三陸沖、関東沖海域、沖縄の東および先島諸島周辺では日本の気温の上昇率よりも小さく、日本海中部では日本の気温の上昇率よりも大きくなっている。

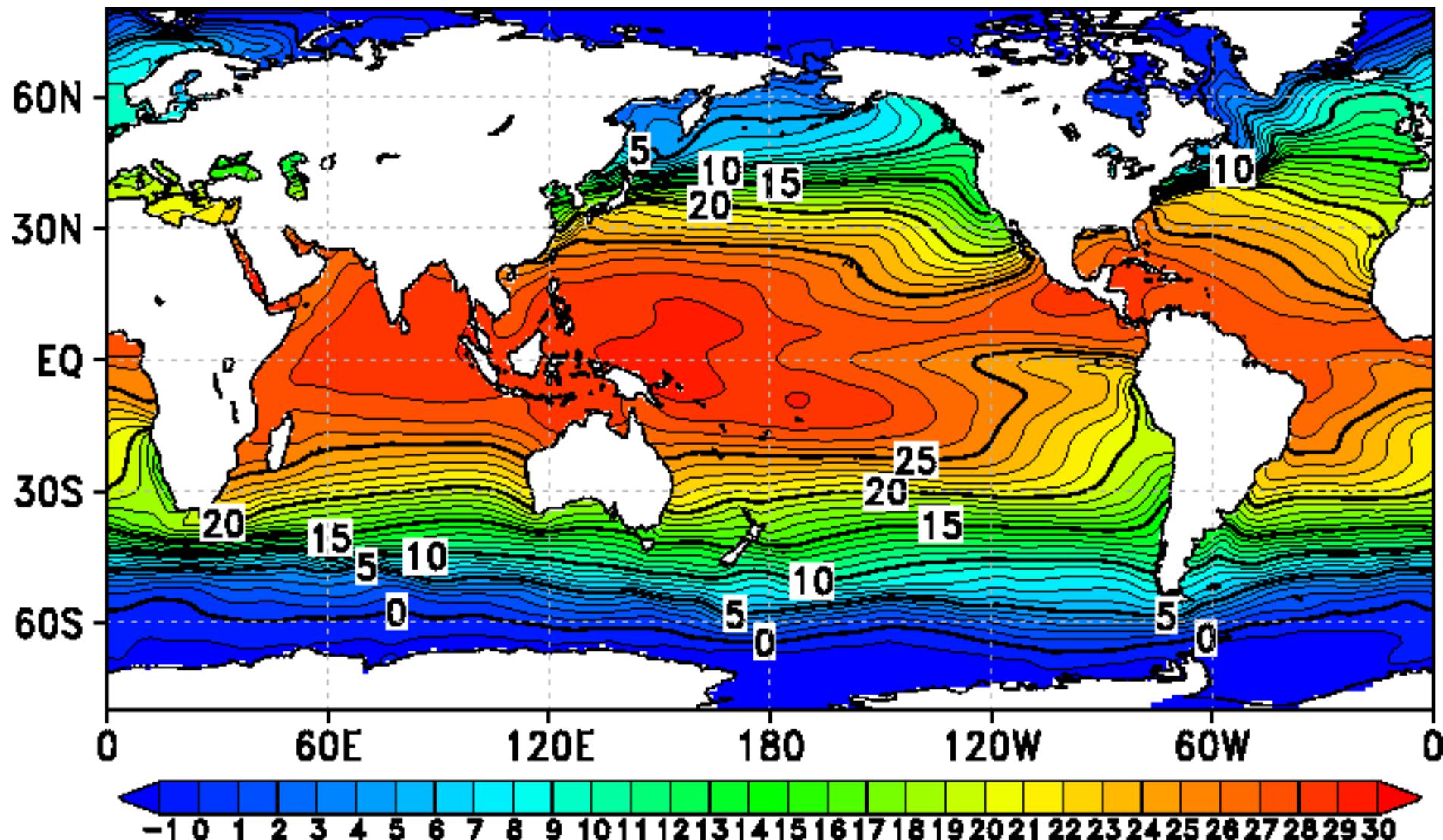
出典: 気象庁

## 全球 年平均海面水温：2019年 (気象庁)



出典: 気象庁HP: [https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/climate/glb\\_warm/sst\\_annual.html](https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/climate/glb_warm/sst_annual.html)

## 全球 年平均海面水温：1962年 (気象庁)



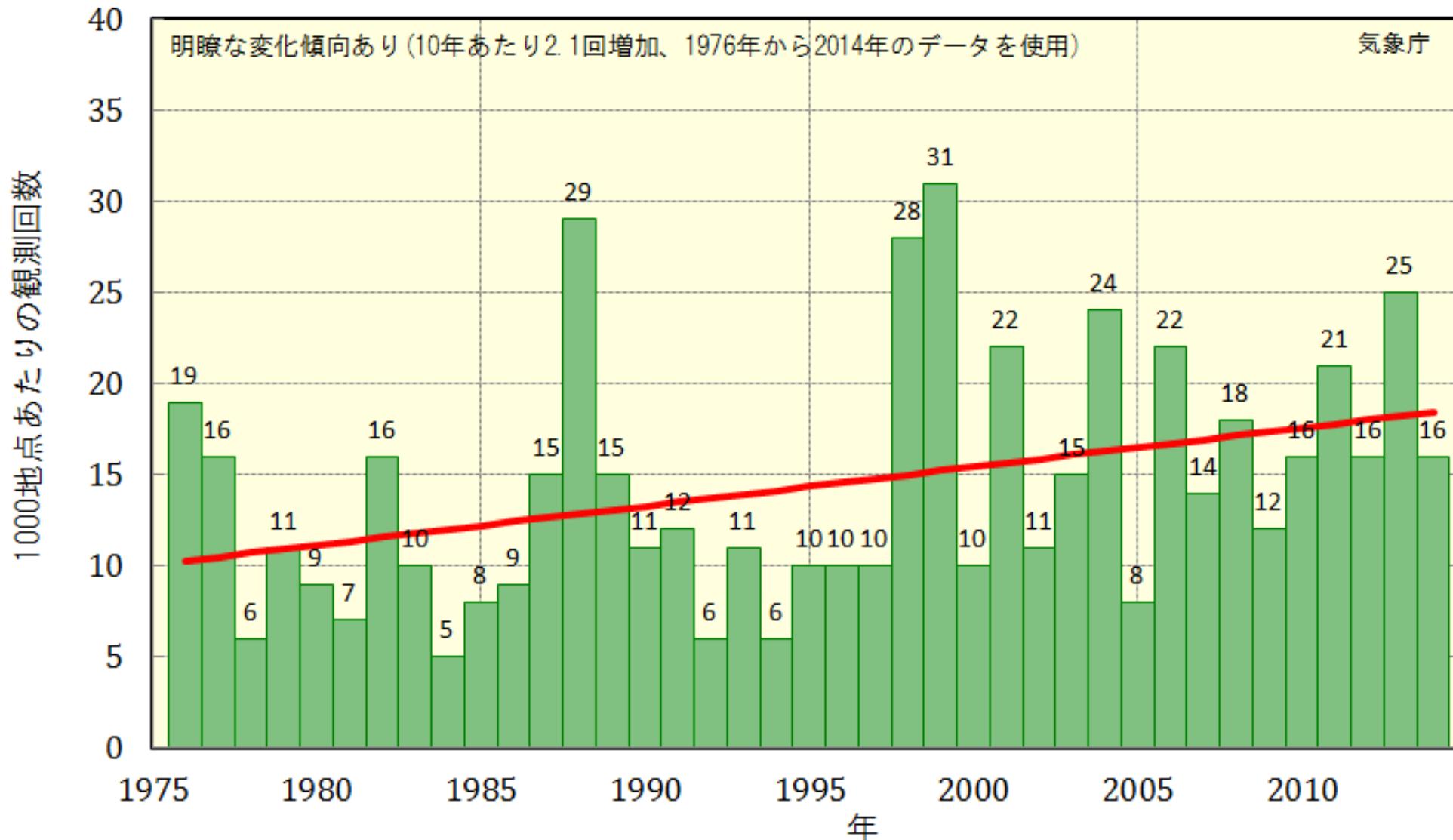
出典: 気象庁HP: [https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/climate/glb\\_warm/sst\\_annual.html](https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/climate/glb_warm/sst_annual.html)

## 地球温暖化の結果起こると予想されるもの

- ◆ 地球全体・各地域の気温の上昇
- ◆ 水蒸気量の増加
- ◆ 極端現象(豪雨・干ばつ・台風など)の増加
- ◆ 局地的豪雨の増加
- ◆ 台風の強化、竜巻の増加
- ◆ 海面水温・海水温の上昇
- ◆ 海面の上昇と低地の減少 (海面上昇は地球全体で一様でなく局的に高くなる。)
- ◆ 海洋の酸性化とそれに伴う海洋生物の変化
- ◆ 海氷、氷床、氷河、永久凍土の減少
- ◆ 植生、生態系の変化
- ◆ 熱帯性病原体の中緯度への侵入

# アメダスで見た短時間強雨発生回数の長期変化について

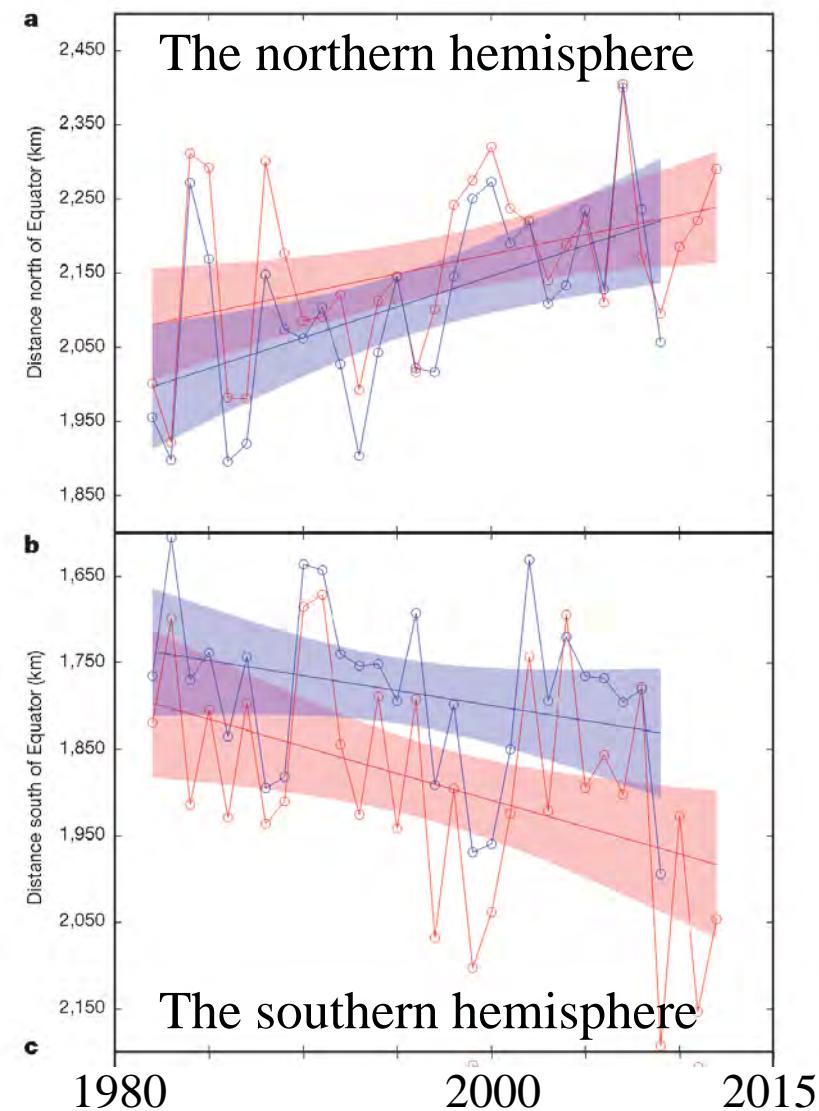
[アメダス]1時間降水量80ミリ以上の年間観測回数



出典：気象庁HP <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/heavyraintrtrend.html>

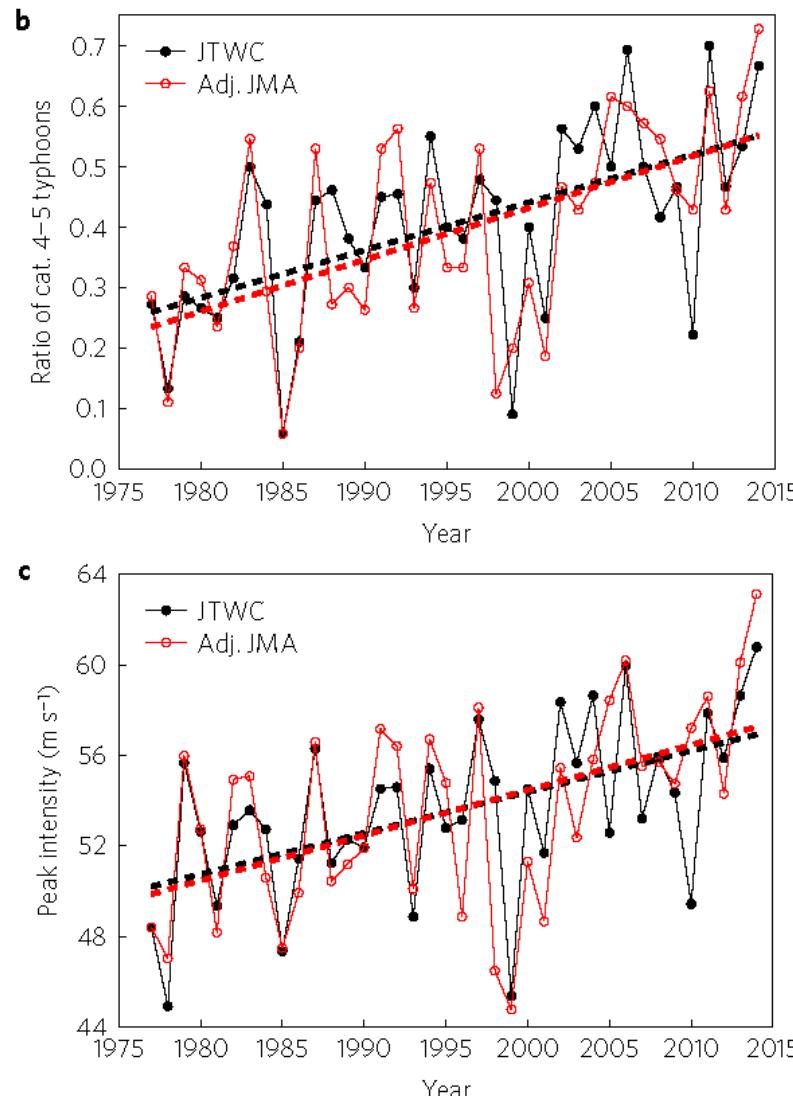
## 中緯度における台風にともなるリスクの増加

台風の生涯における最大強度をとる位置が北上している



Kossin et al. (2014), *Nature*

台風の強度が増大している



Mei and Xie (2016), *Nature Geoscience*

## 過去40年で太平洋側に接近する台風が増えている

- 太平洋側の地域に接近する台風が増えている。
- これらの接近する台風については、強度がより強くなっている。
- さらにこれらの台風の移動速度が遅くなっている。

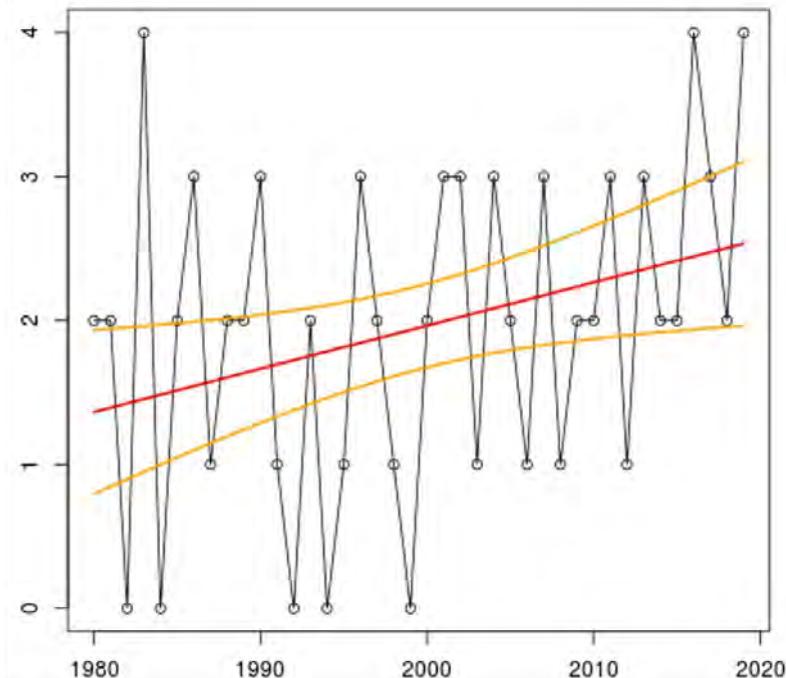


図1. 東京に接近した台風の数の経年変化。横軸は年、縦軸は各年の接近数。赤線は回帰直線、橙線は95%信頼区間を表している。増加傾向は統計的に有意である。

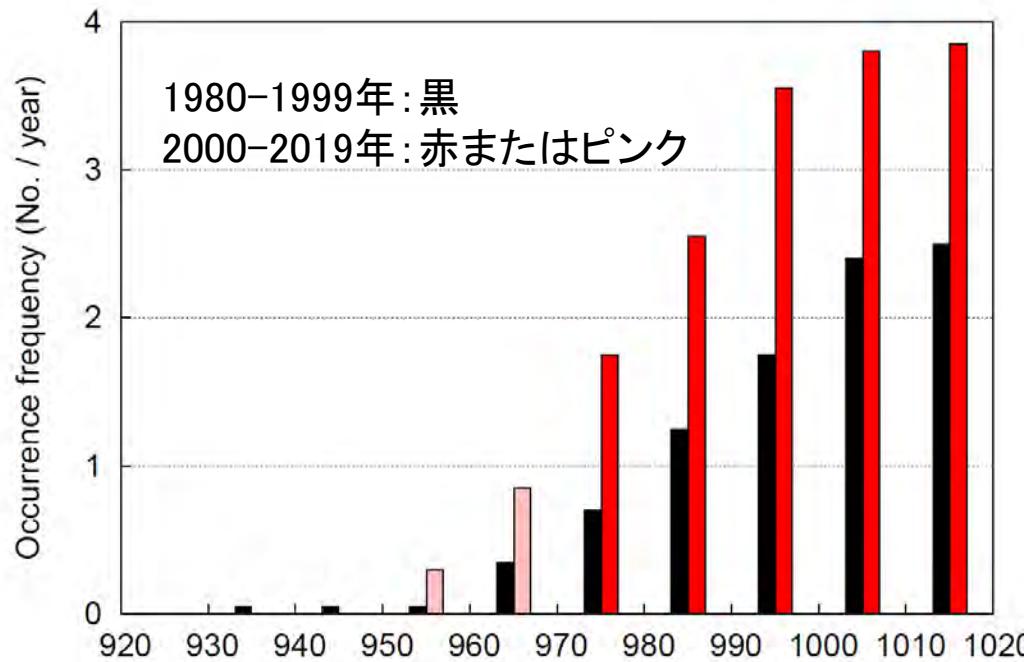
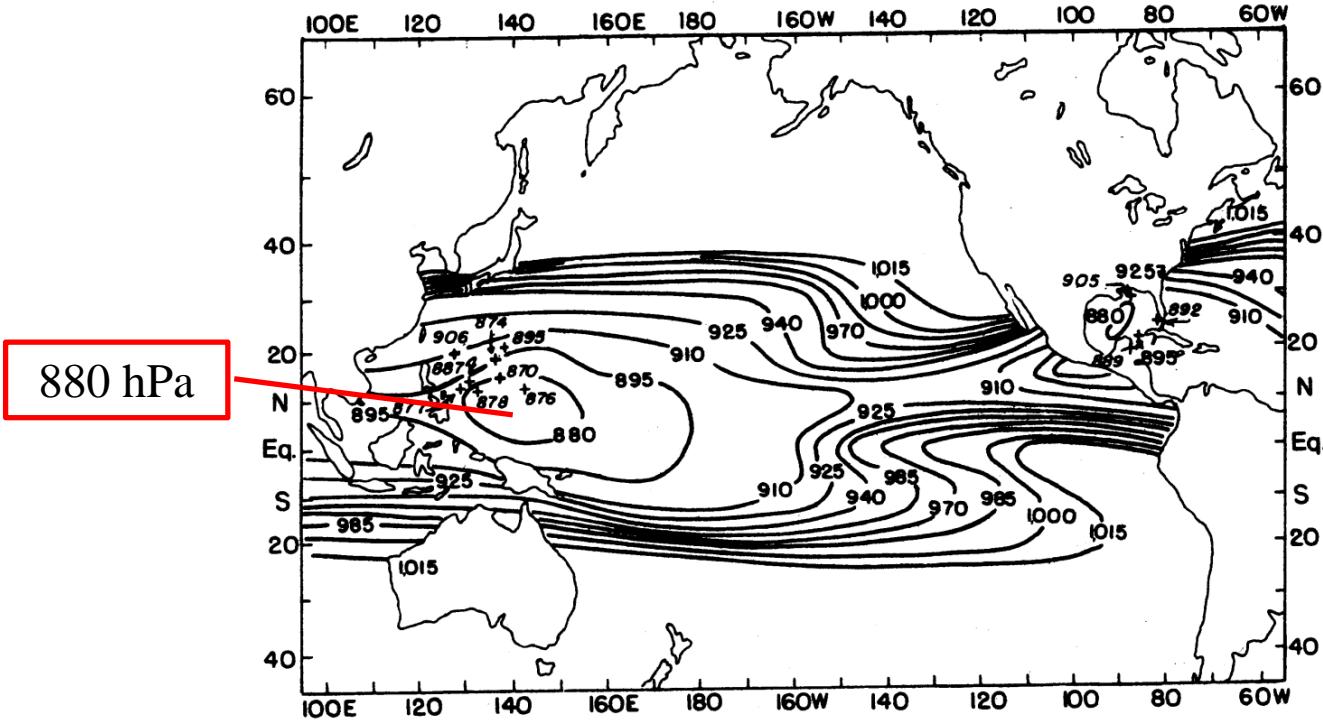
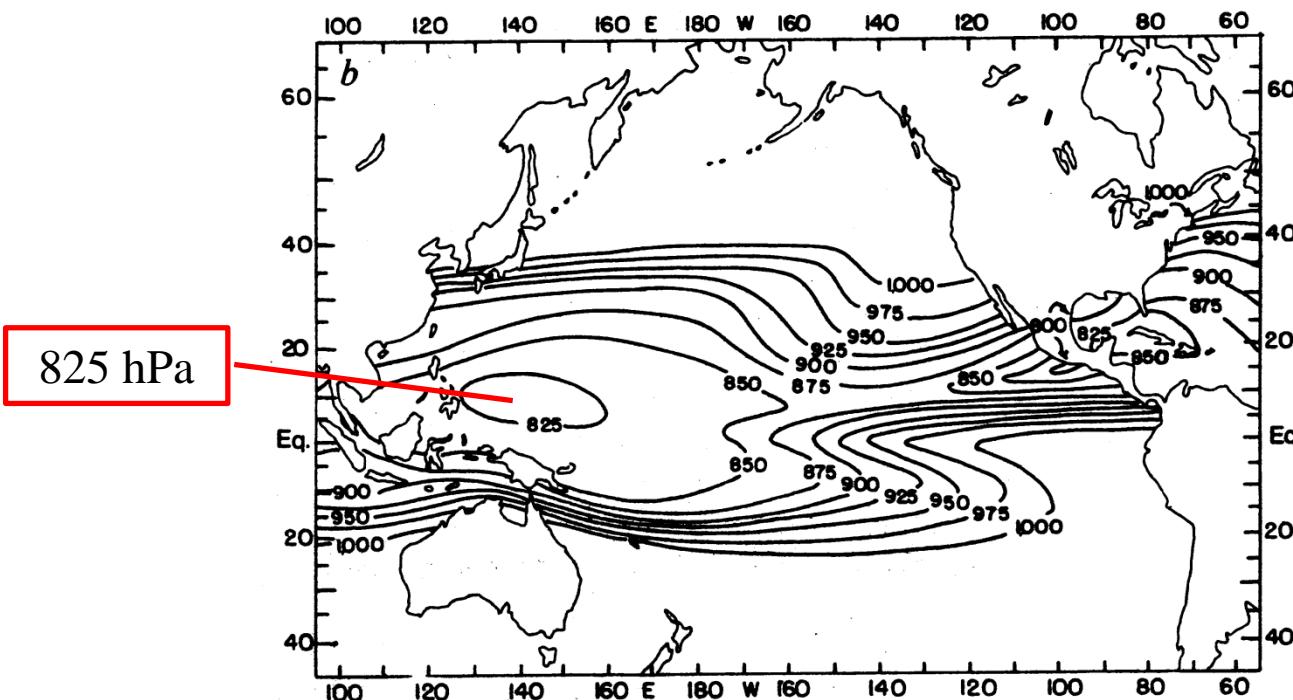


図2. 台風が東京に接近した時の中心気圧の累積頻度分布。1980-1999年が黒、2000-2019年が赤またはピンク。赤は差が有意水準5%で有意であることを示す。



## 現在気候における台風の到達可能最低中心気圧(MPI)



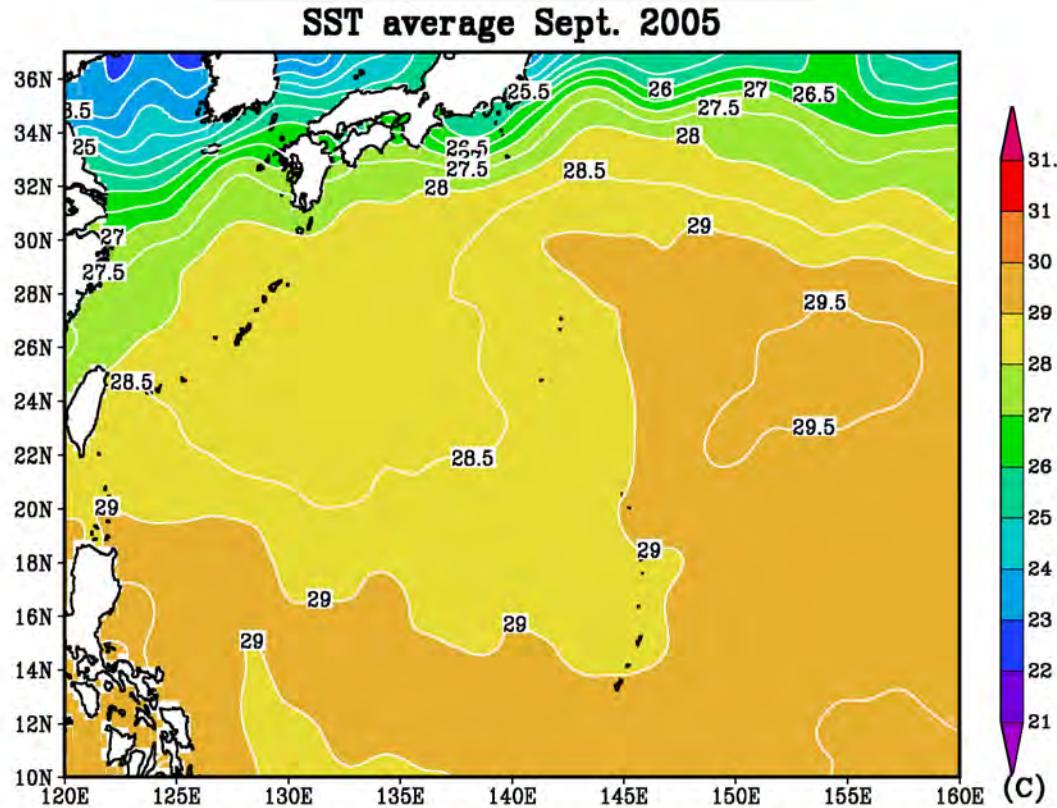
# 二酸化炭素が2倍になった気候における台風の到達可能最低中心気圧

Emanuel, 1985

# 9月の平均海面水温

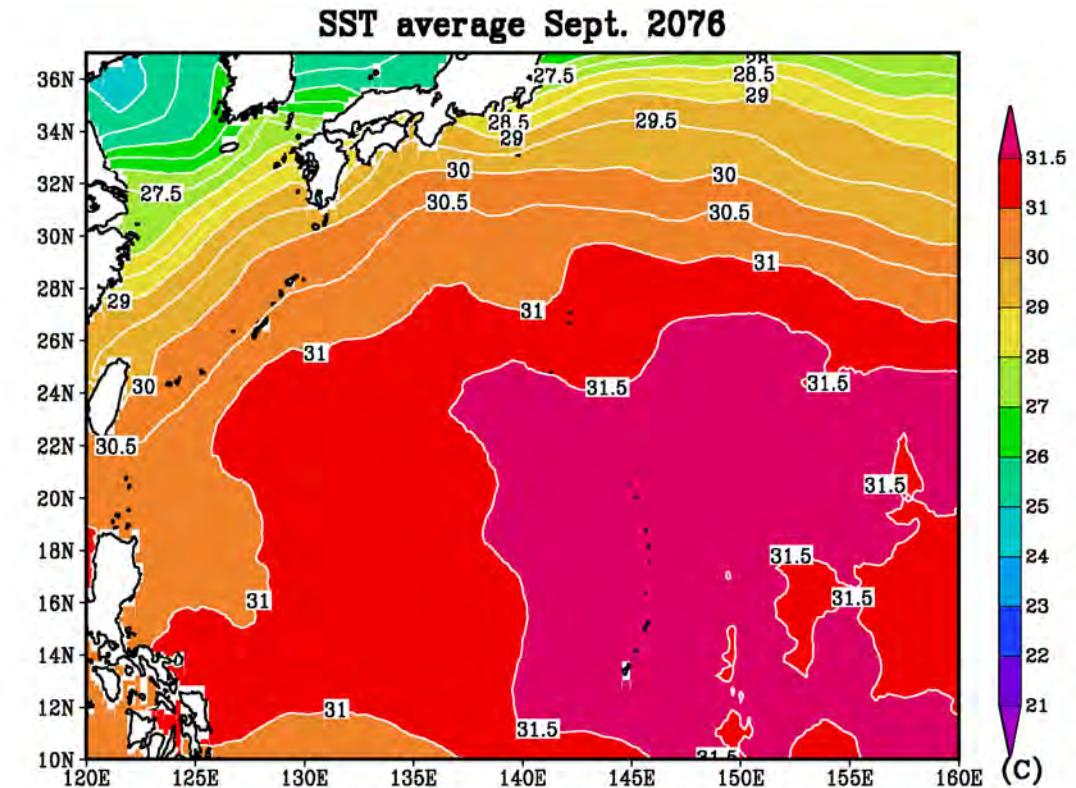
現在の気候(2005年)の観測値と今世紀後半の気候(2076年)の予測値

2005年9月の平均海面水温



現在気候の海面水温(観測値)

2076年9月の平均海面水温

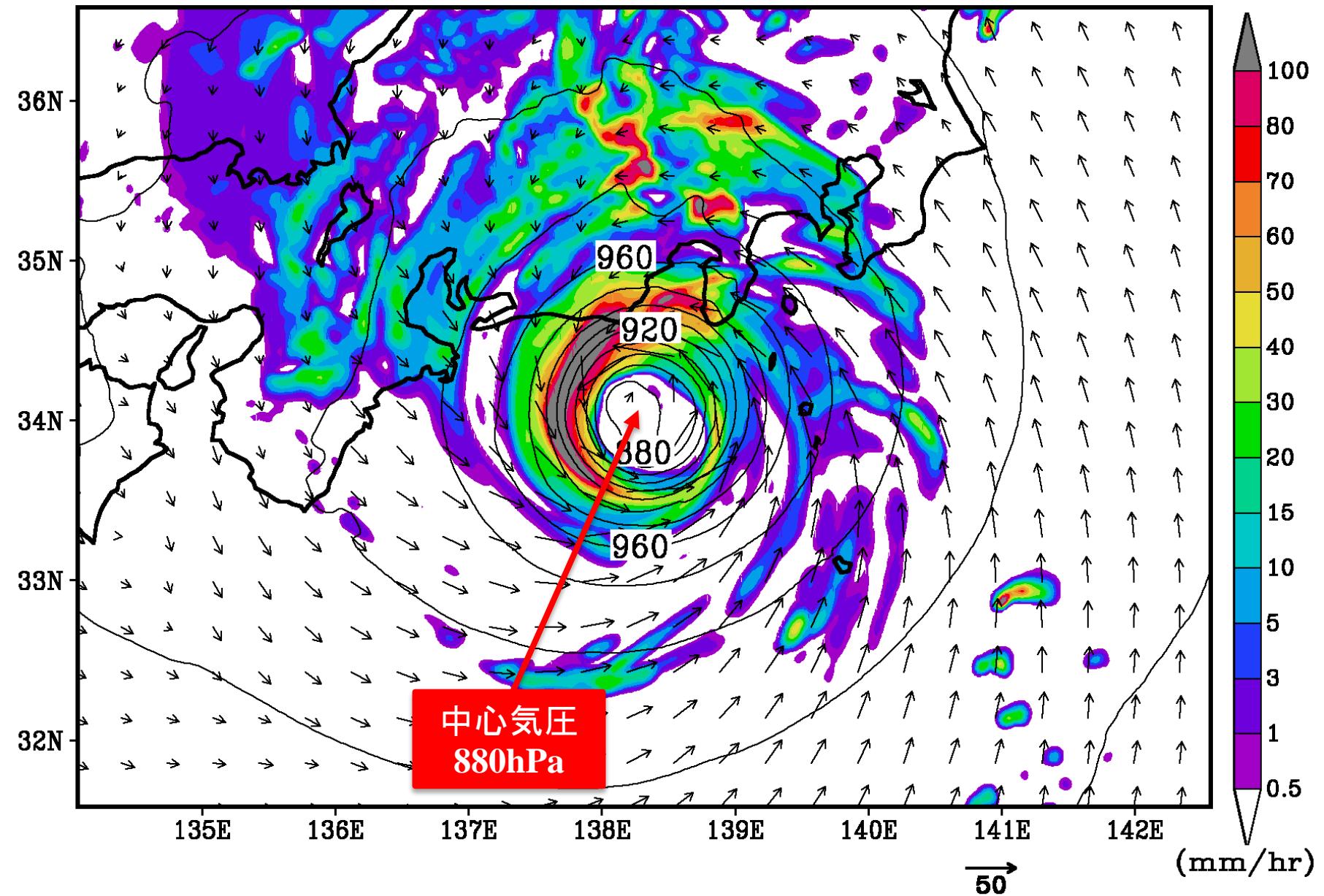
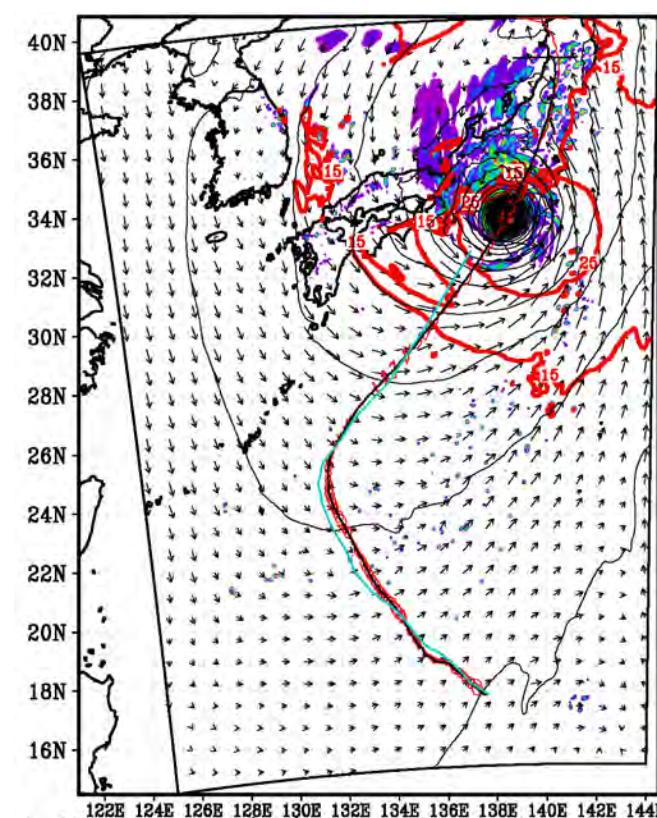


今世紀後半の海面水温(予測値)

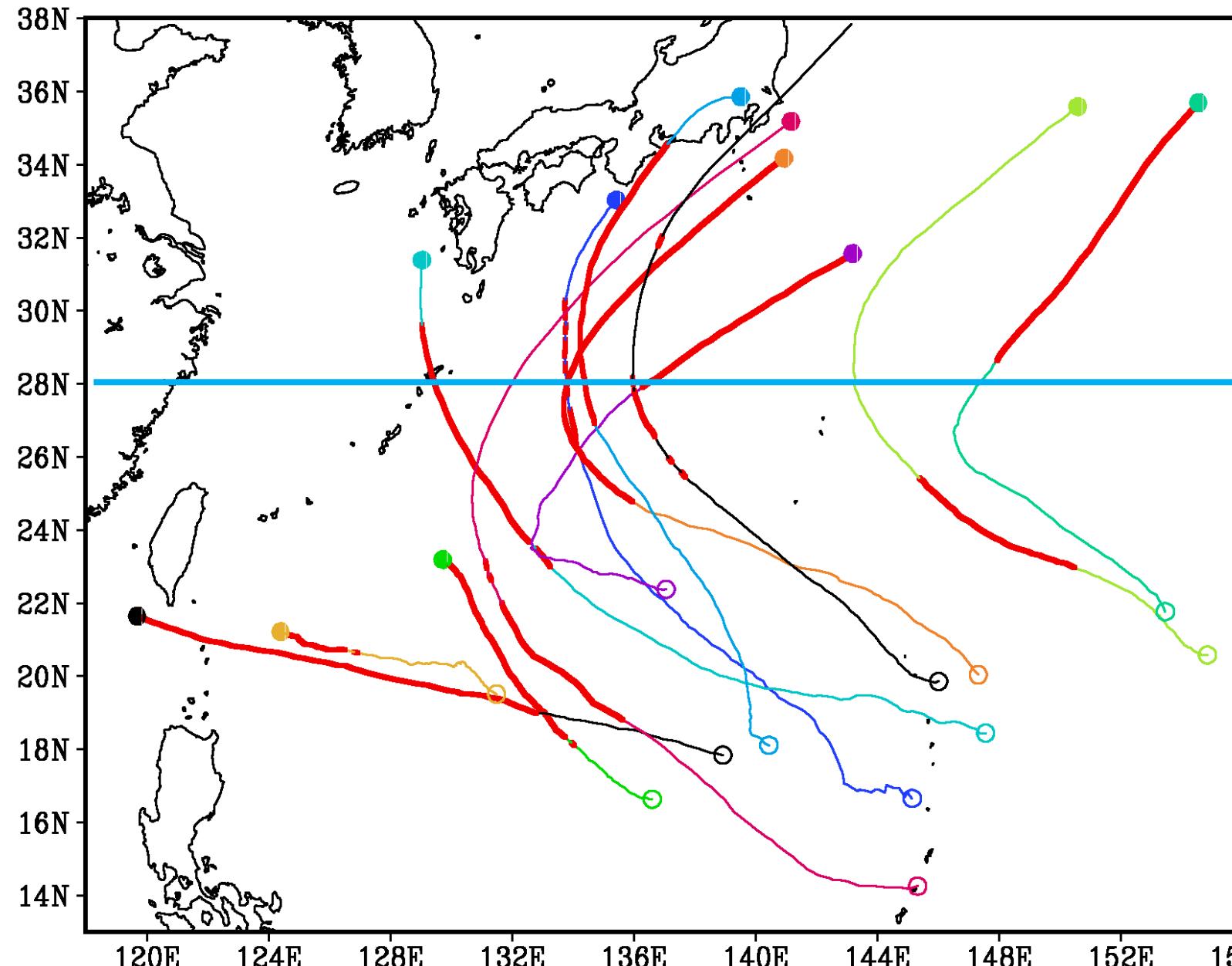
今世紀後半、北太平洋西部の海面水温は、現在より2~2.5度程度上昇すると予測される。

# 温暖化気候において、スーパー台風の強度を維持して日本に上陸する台風

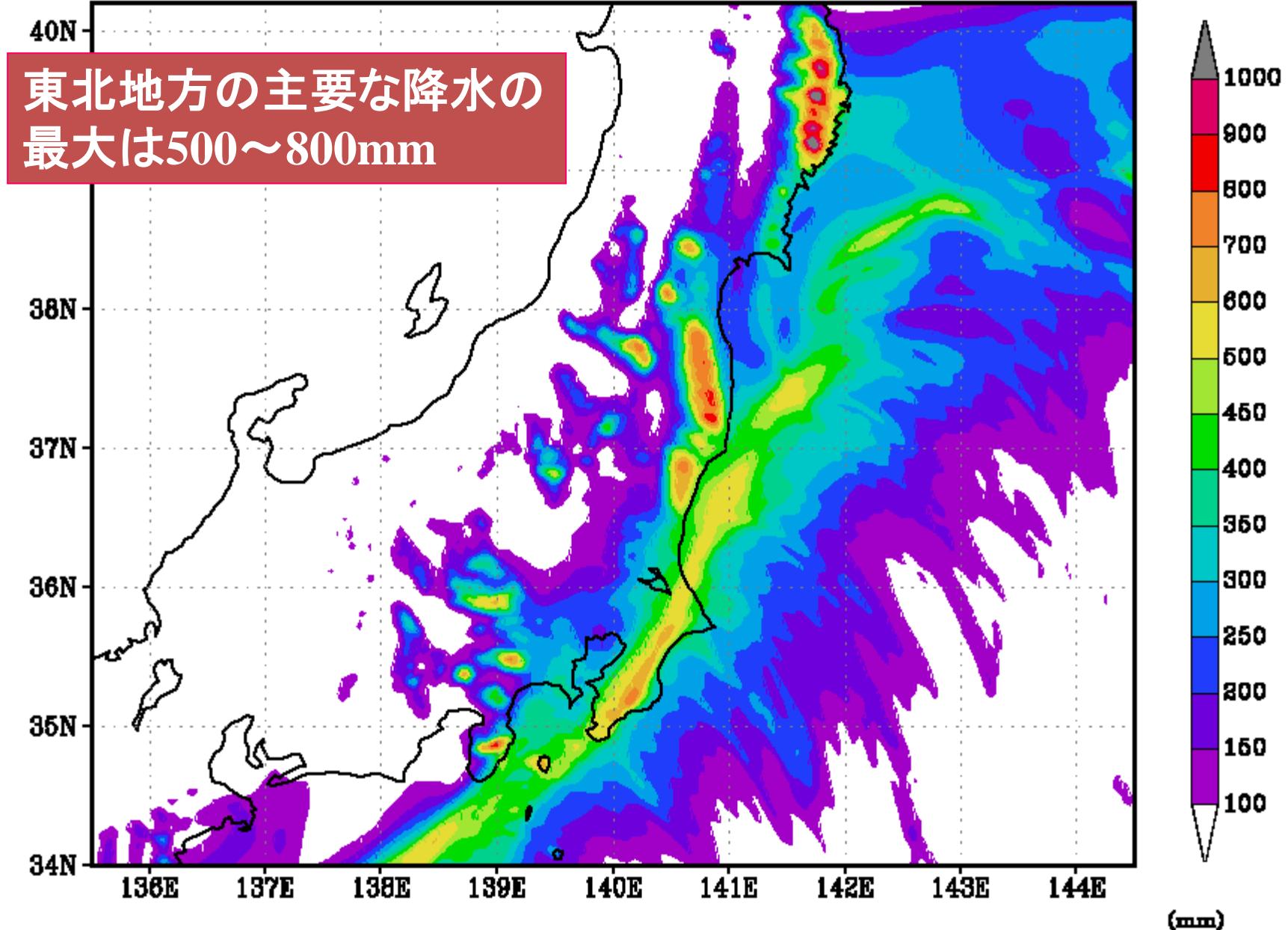
12:00Z 16SEP2076



# 今世紀末の温暖化気候で発生したスーパー台風のトラック

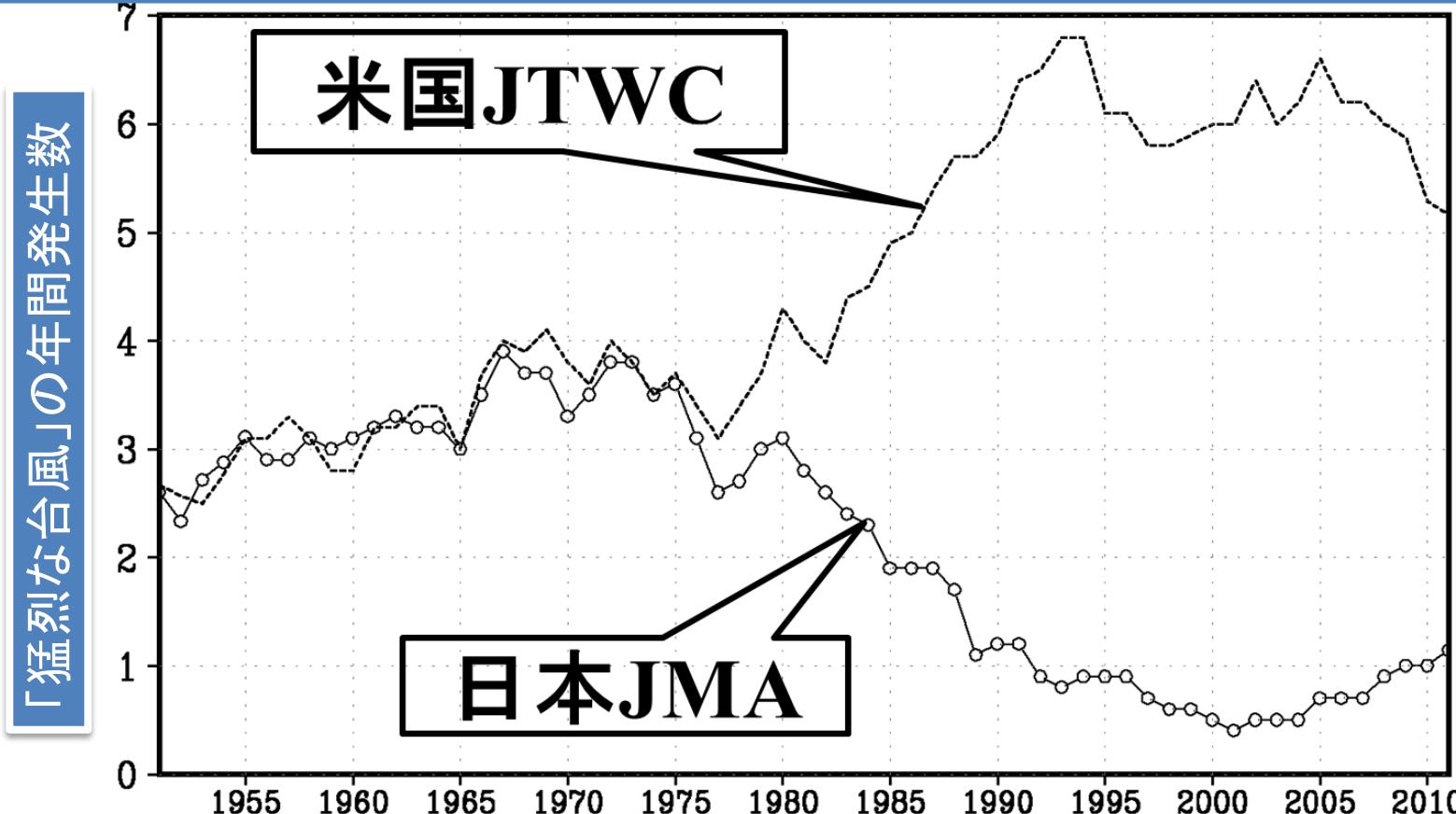


## 温暖化気候の台風のCReSS実験:台風SF0508による総降水量(mm)



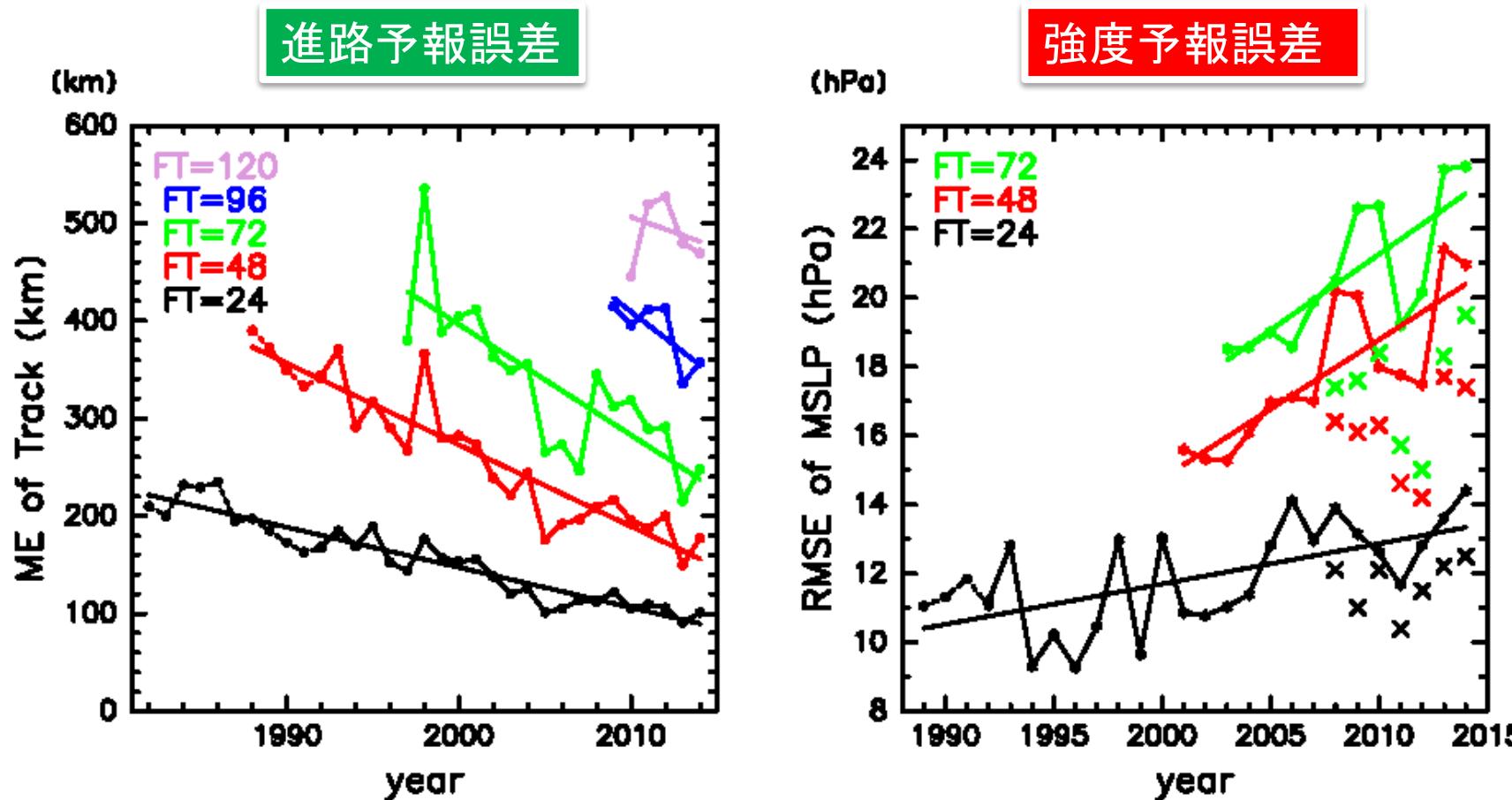
## 問題点その1：台風の強度推定値(ベスト・トラック)の不確実性の増大

- ◆ とりわけ非常に強い台風の強度データには、1987年の米軍の台風の航空機観測終了後、強度推定値に不確実性が増大しているように見える。
- ◆ 気象庁の「猛烈な台風」(10分平均値で 54 m/s 以上)の年間の発生数は気象庁(JMA)と米国合同台風警報センター(JTWC)では、違いが増大している。



航空機による直接観測がなく、真値が不明なため、どちらがより正確かは不明。

## 問題点その2:台風の強度予測の改善が不十分



(Ito 2016, SOLA)

過去25年間の間に、台風の進路予測は顕著な改善がみられるが、強度予測には改善がみられない。

台風の強度の量的予測の改善には、モデルの高精度化とともに、航空機による直接観測のデータが不可欠。

# 地球上で発生する熱帯低気圧(台風やハリケーン)の分布

西部北太平洋は地球上で最多・最強の熱帯低気圧発生域

台湾の台風観測



Wu et al. (2005, BAMS)



日本の観測機

ハリケーン  
(色線は経路)

サイ  
(色線)

航空機観測と超高解像度モデルの組み合  
わせによる世界トップクラスの台風研究



米国のハリケーン観測

- 台風の構造と時間発展の理解
- 台風強度の直接測定
- 台風の強度予報の高精度化
- 避難等の効率化などの台風防災への貢献
- 大規模避難の実現
- 台風の人工制御に向けた研究の発展

**ドロップゾンデ投下地点**

台風周辺への投下型観測器(ドロップゾンデ)の投下観測(上空から海面までの温度、湿度、気圧、風向・風速を観測)

観測用ジェット機 ガルフストリームIV

T-PARCIIプロジェクトメンバー:

- 名古屋大学
- 北海道大学
- 東京大学
- 気象庁気象研究所
- 琉球大学
- 防災科学技術研究所

T-PARCII国際アドバイザーボードメンバー:

- US:コロラド大学、NOAA
- 台湾:国立台湾大学
- 韓国:NIMS,KMA
- 香港:香港気象台
- UK:インペリアルカレッジ
- フランス:CNRS
- 日本:東京大学、気象庁、横浜国立大学台風科学技術研究センター他

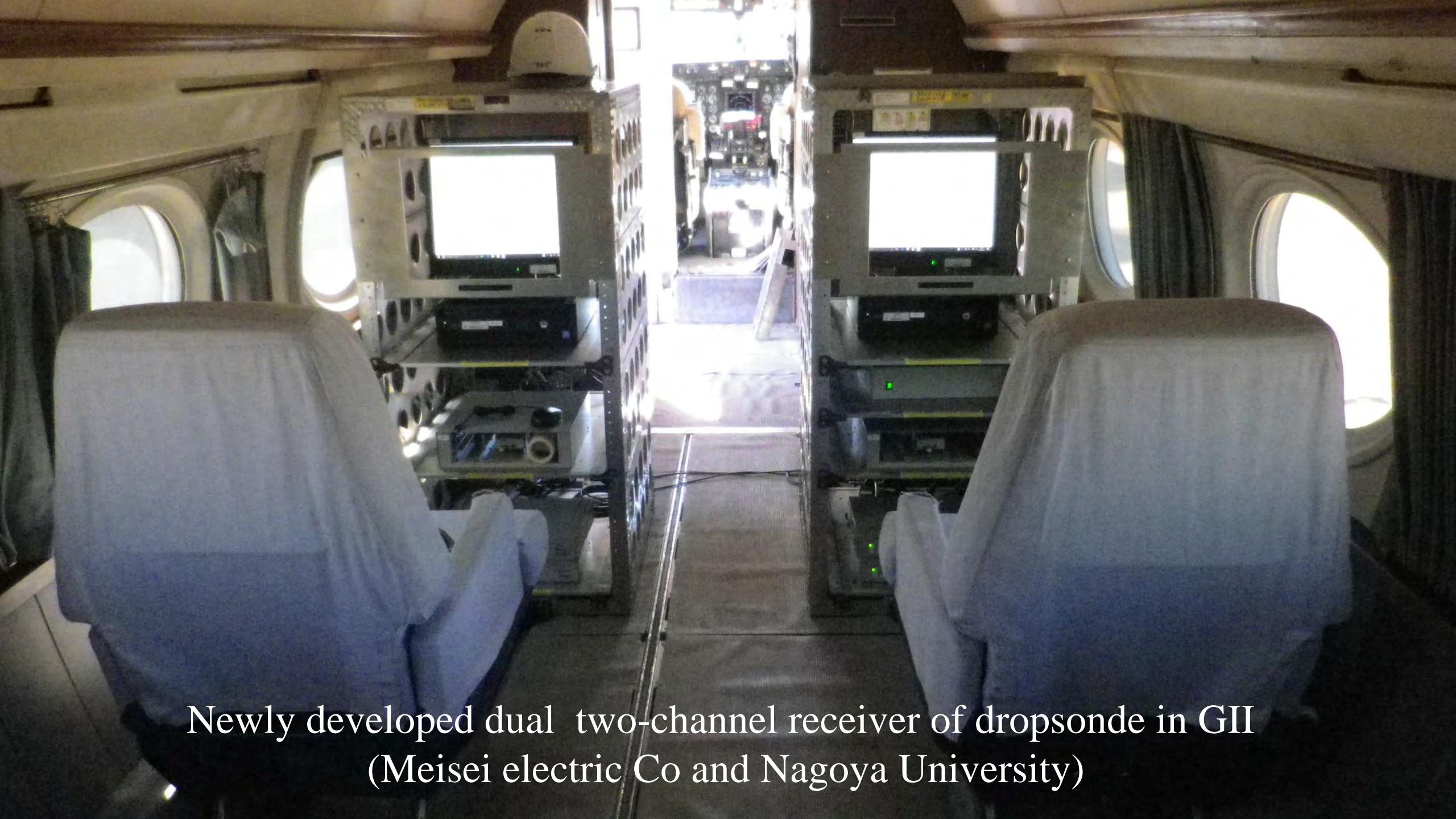
航空機からの多数の投下型観測器(ドロップゾンデ)観測データのモデルへの入力

超高解像度モデルによる台風予測

名瀬 沖縄

台風の航空機観測で使用するガルフストリームIV（ダイヤモンド・エア・サービス社）



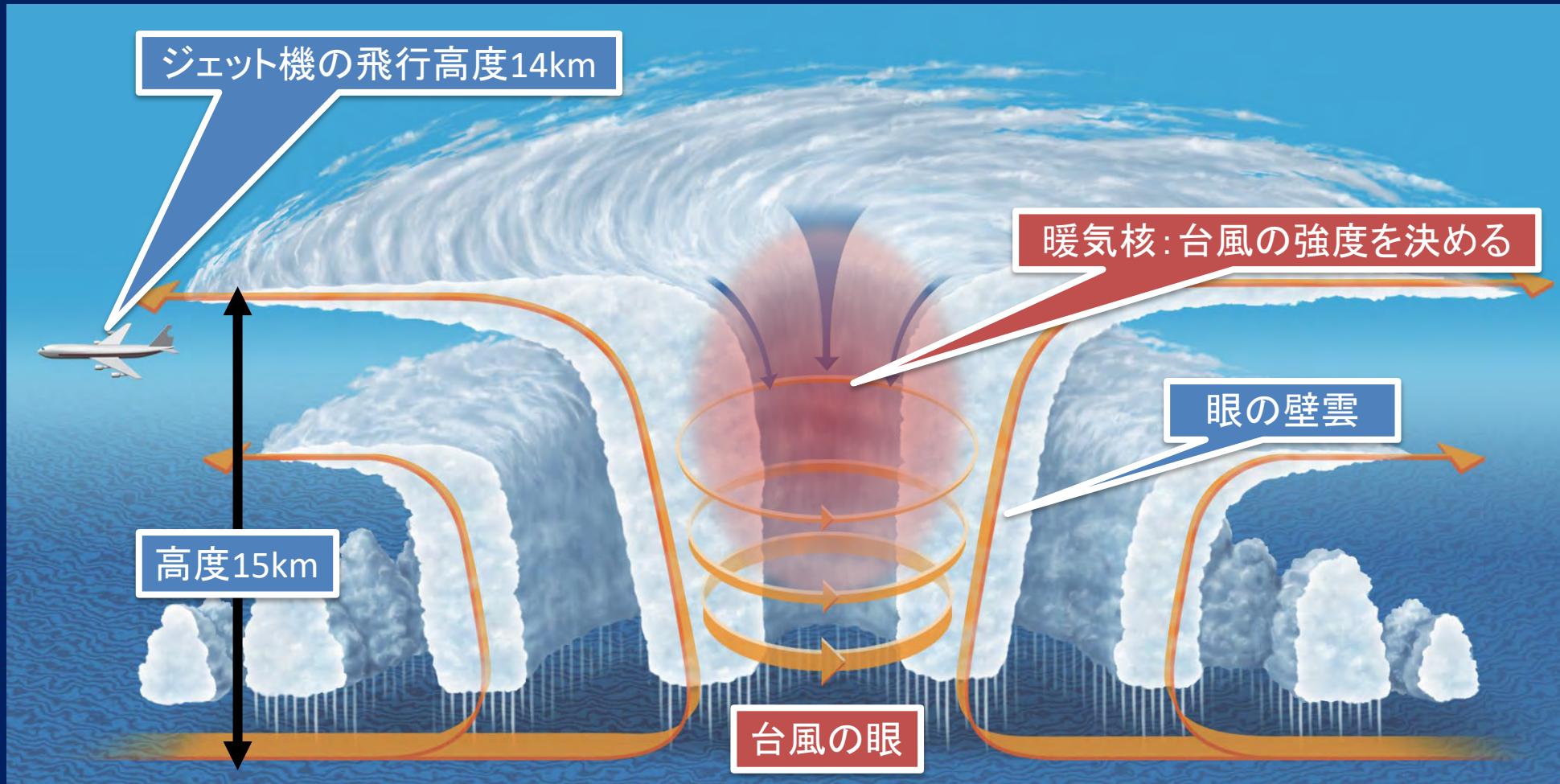


Newly developed dual two-channel receiver of dropsonde in GII  
(Meisei electric Co and Nagoya University)

新しく開発したドロップゾンデ  
(Meisei electric Co and Nagoya University)



# 熱帯低気圧(台風・ハリケーン)の模式図

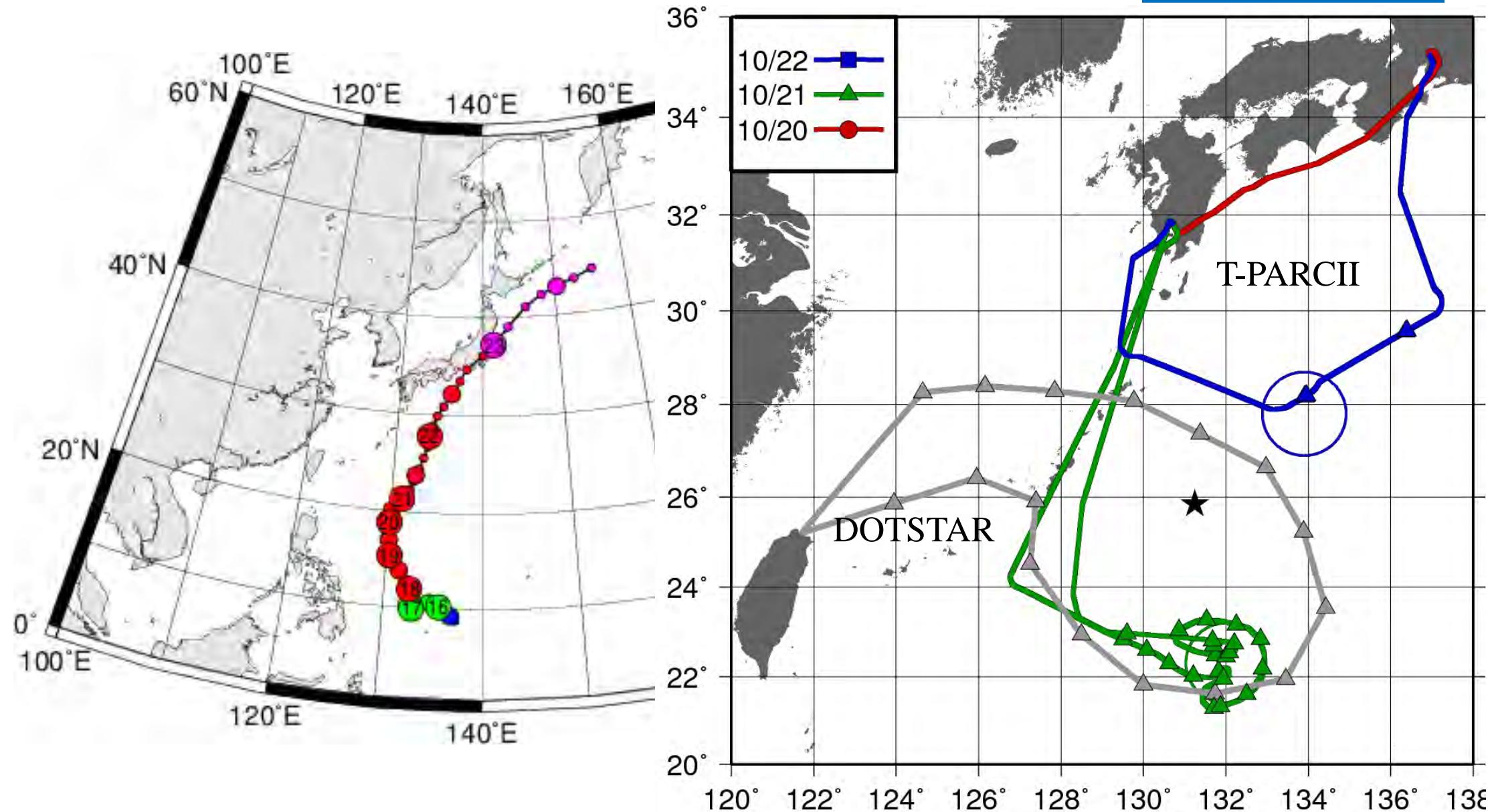


出典: わかる! 取り組む! 災害と防災4,豪雨・台風, 帝国書院, 2017年

# Flight passes of T-PARCII, SATREPS-ULAT and DOTSTAR missions

Typhoon Lan (2017)

October 2017



# 航空機観測：ジェット機のキャビンの中での作業の様子



TEST

UNIVERSAL

- DIM +

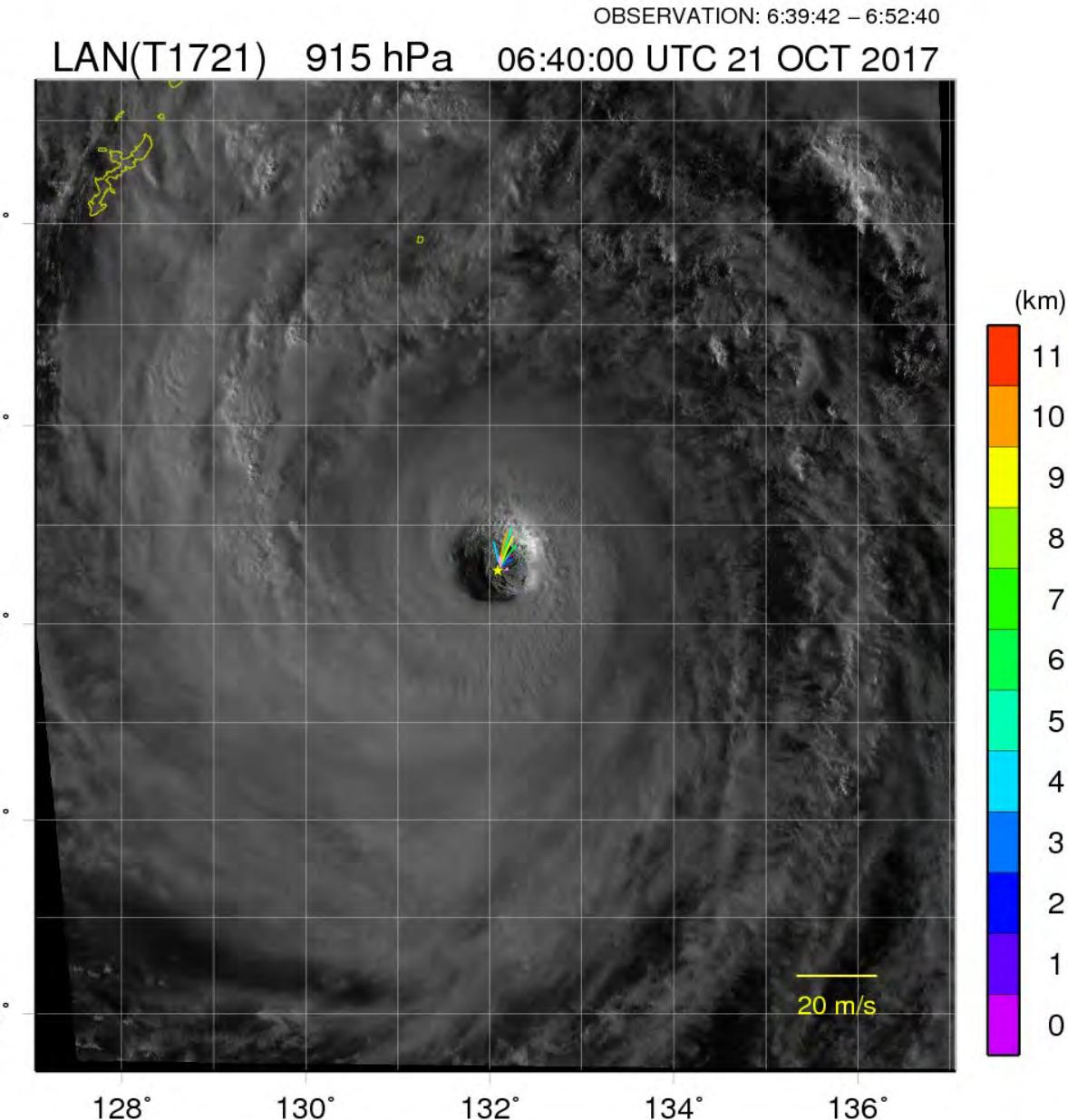
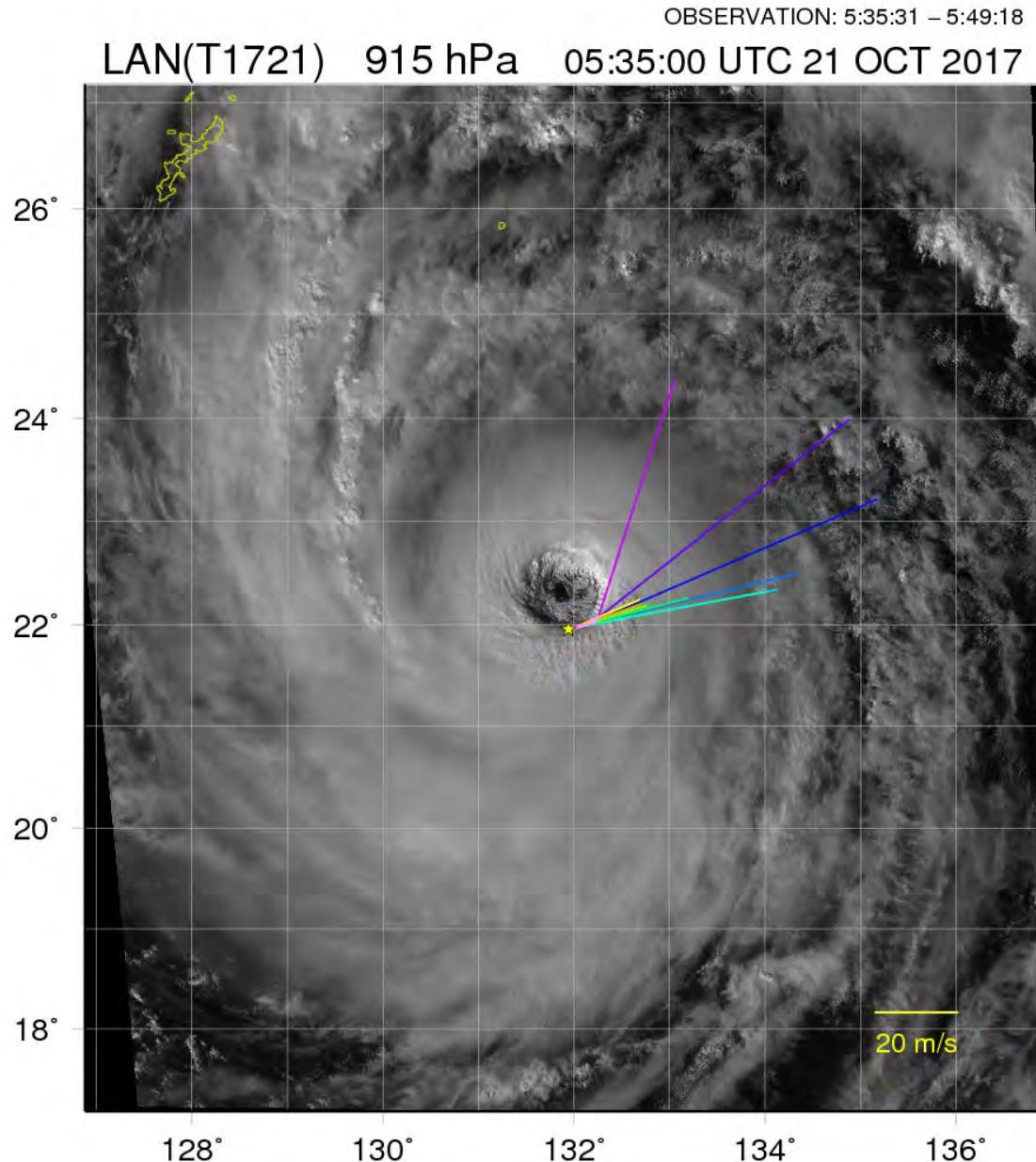


Courtesy of Professor H. Yamada of University of Ryukyus

The eye of typhoon Lan (2017) observed by the T-PARCII project on October 21, 2017  
The eyewall cloud and mesoscale vortex with open sea are shown in the photo.



# Dropsonde soundings from the aircraft in the surroundings of the eyewall



2021年09月29日03時

中心線  表示  非表示  
日時表示  表示  非表示

30N

25N

2

15N

+  
-

115E

120E

125E

130E

135E

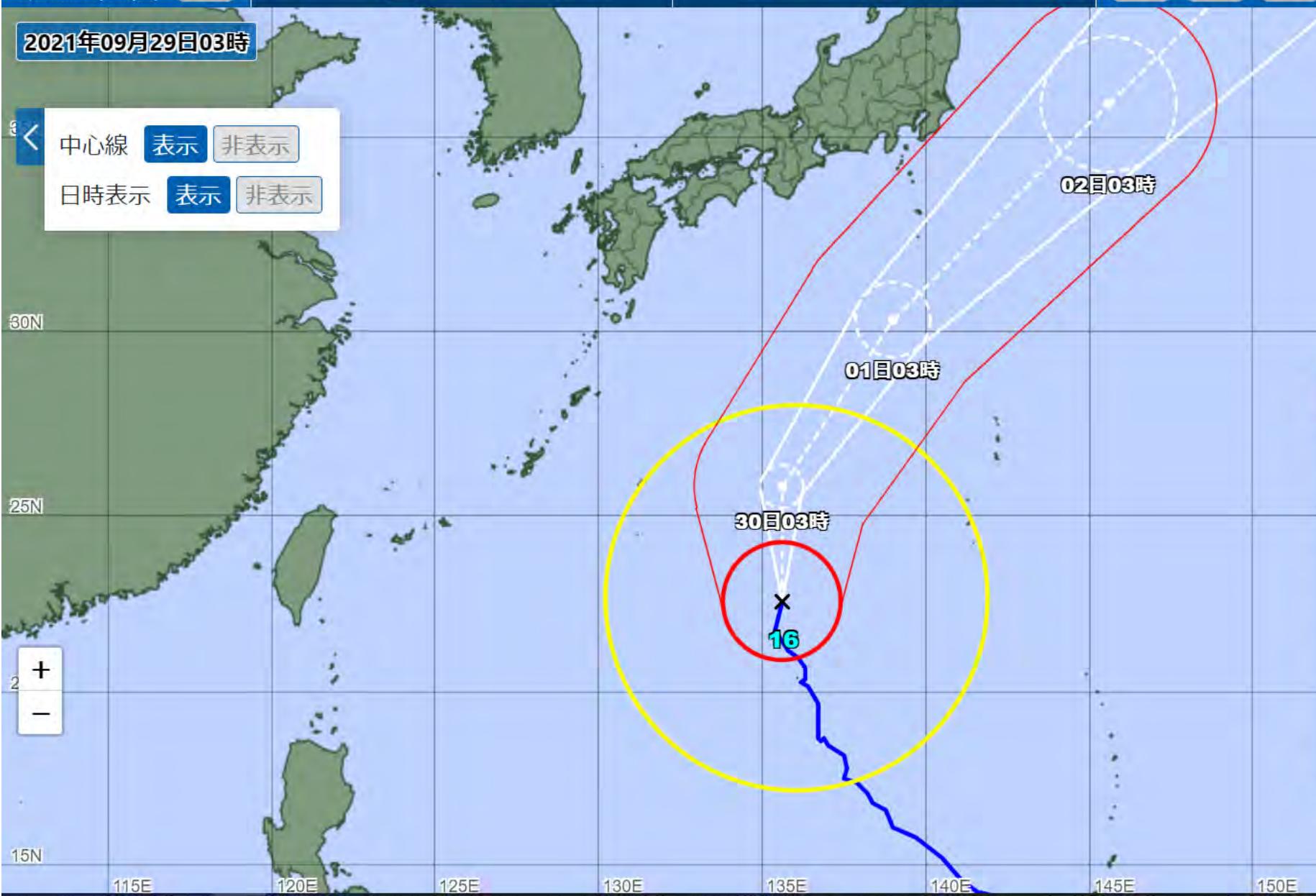
140E

145E

150E

155E

160E



## 台風第16号(ミンドゥル)

2021年09月29日03時45分発表

29日03時の実況

種別	台風
大きさ	大型
強さ	非常に強い
存在地域	日本の南
中心位置	北緯22度35分(22.6度) 東経135度35分(135.6度)
進行方向、速さ	北 10km/h(6kt)
中心気圧	935hPa



≡

ひまわりリアルタイムWeb



2021/09/29 09:50:00



00:00

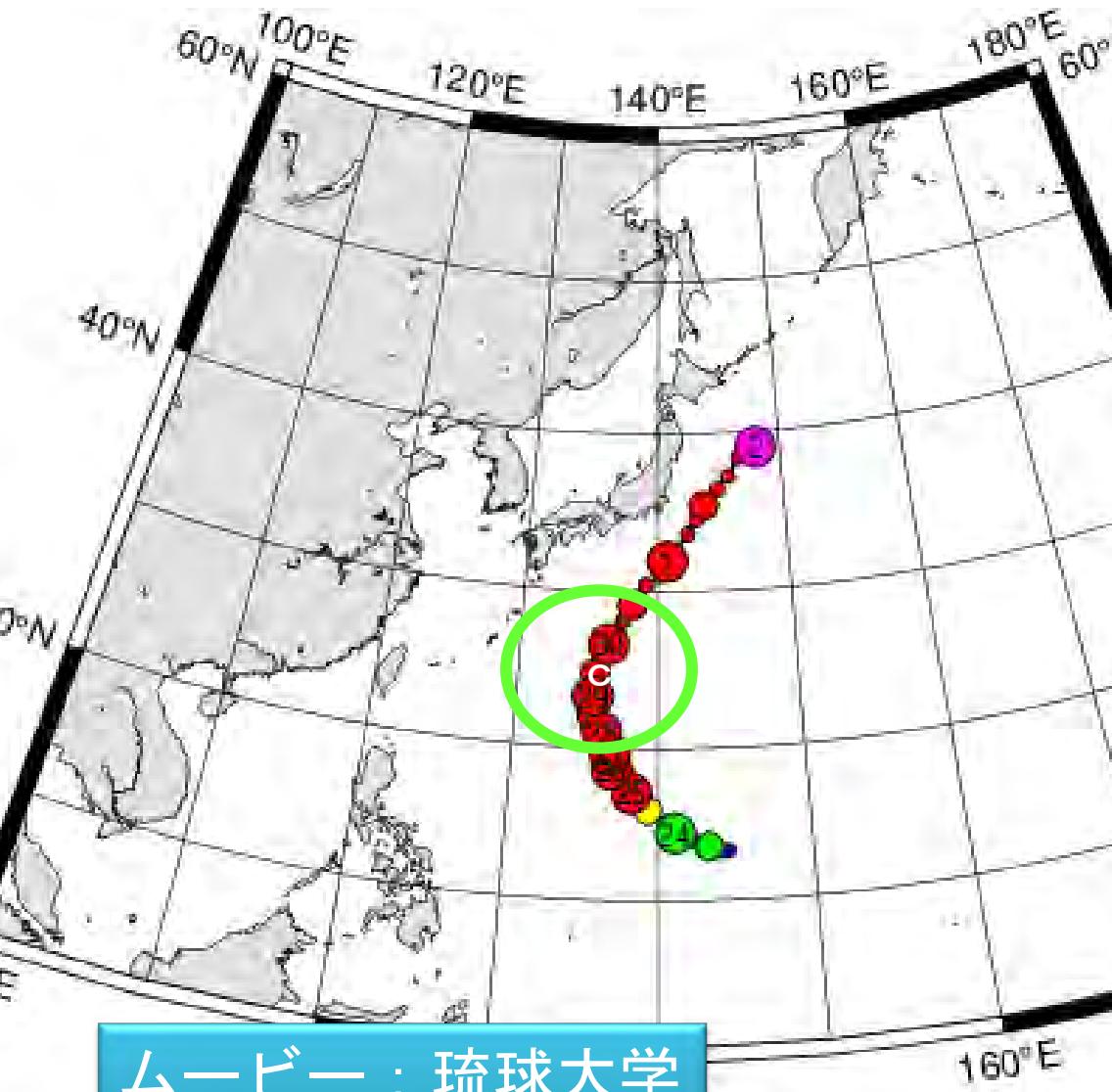
12:00

24:00

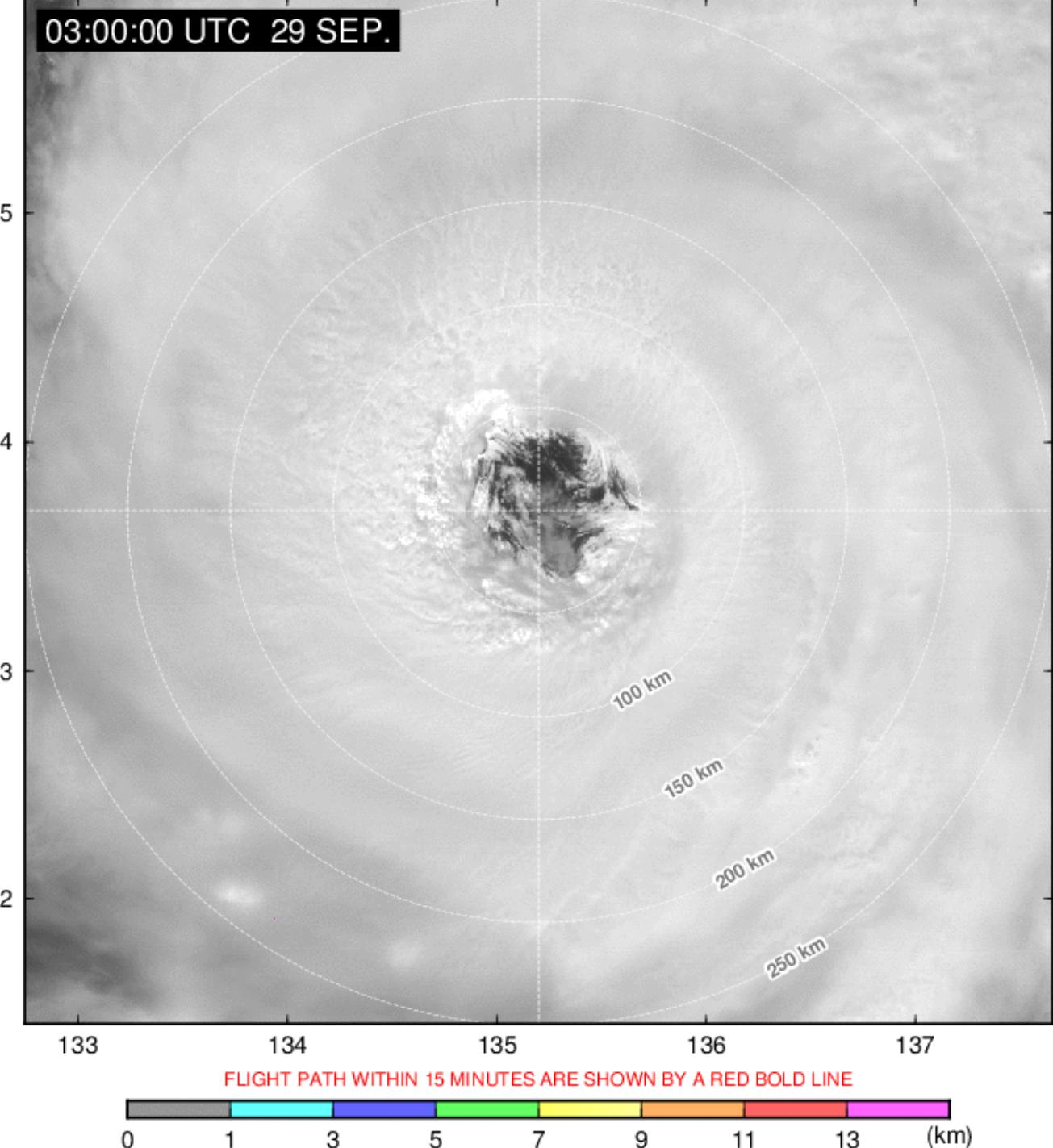
↖↖

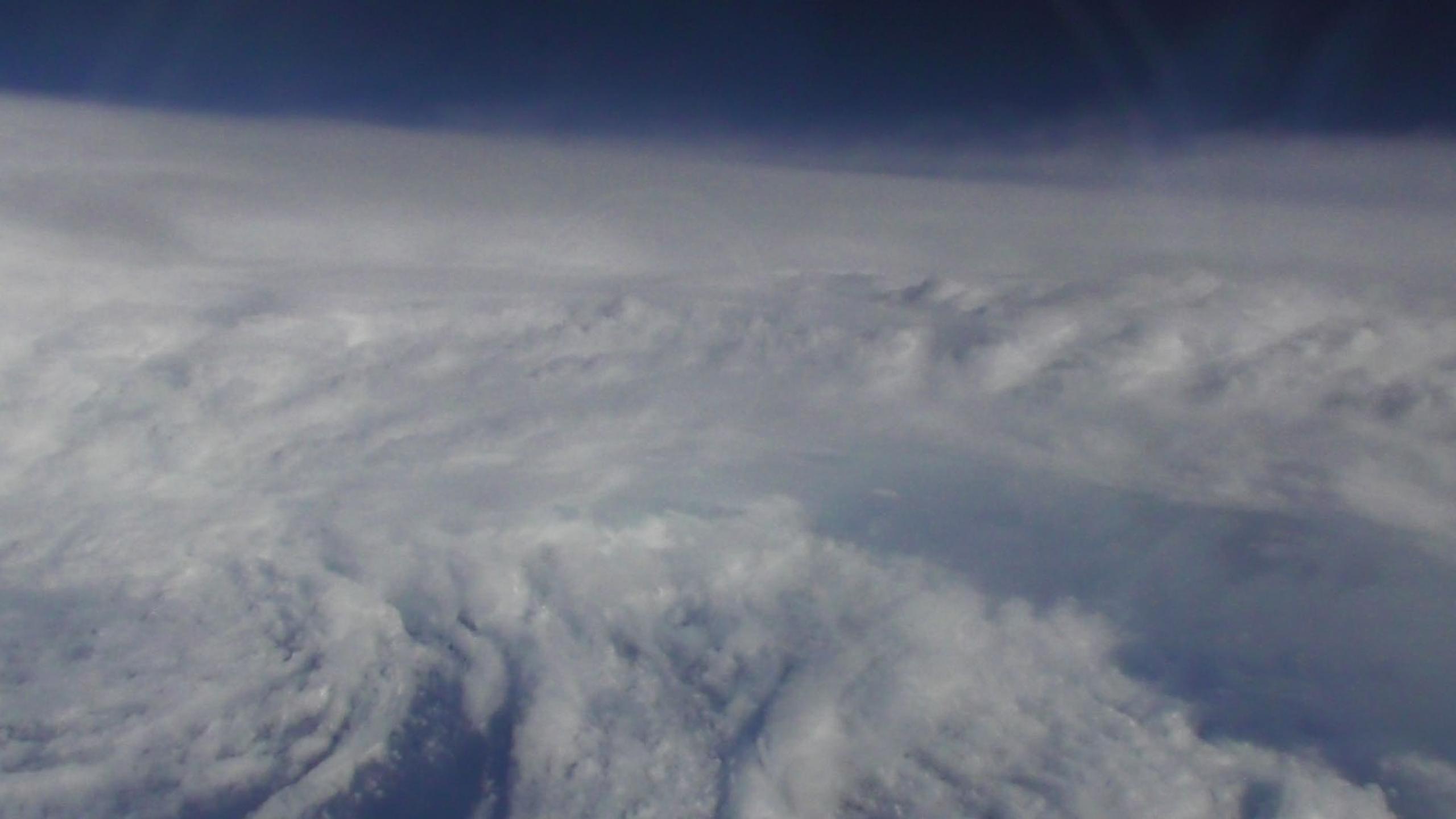


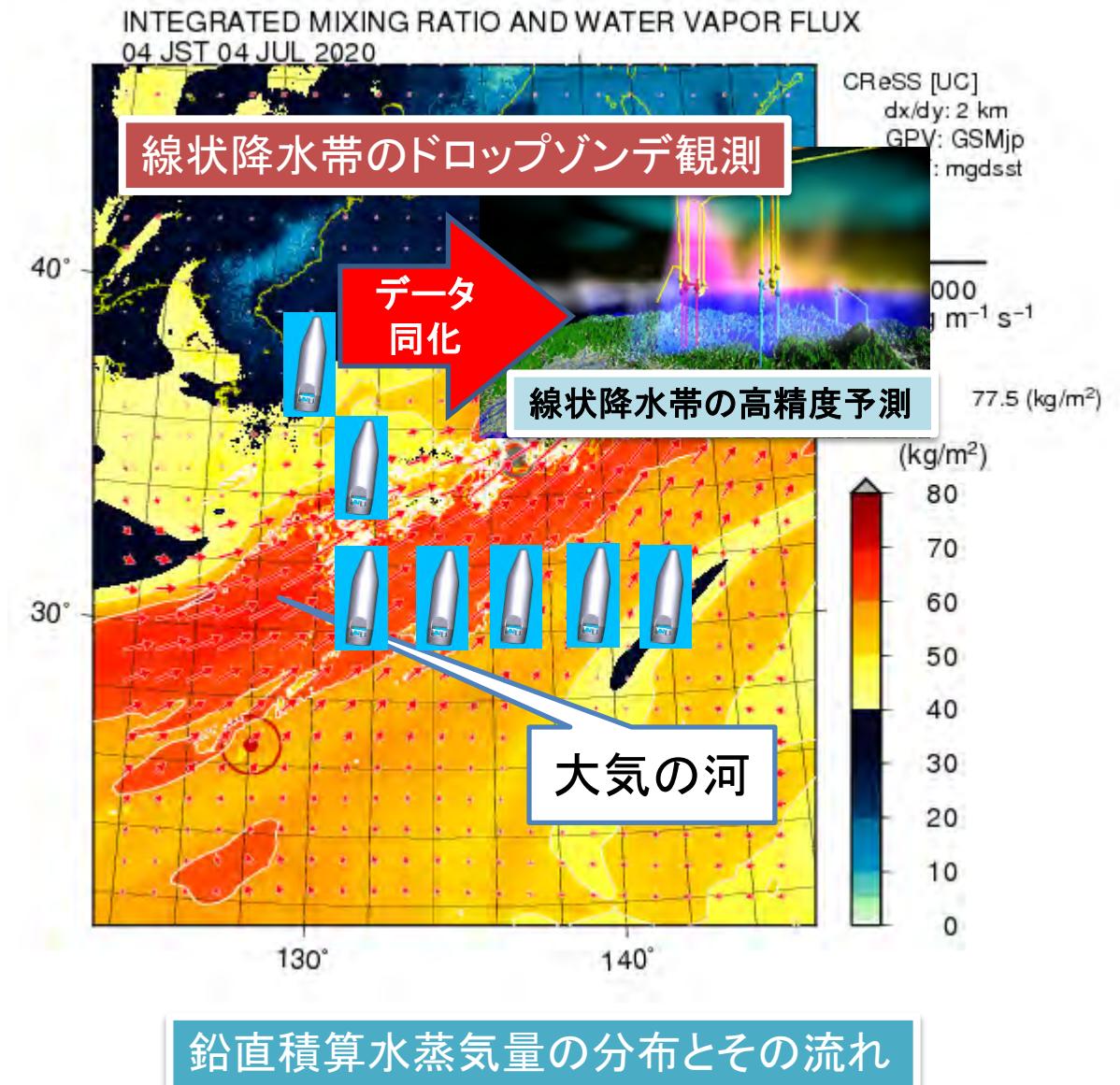
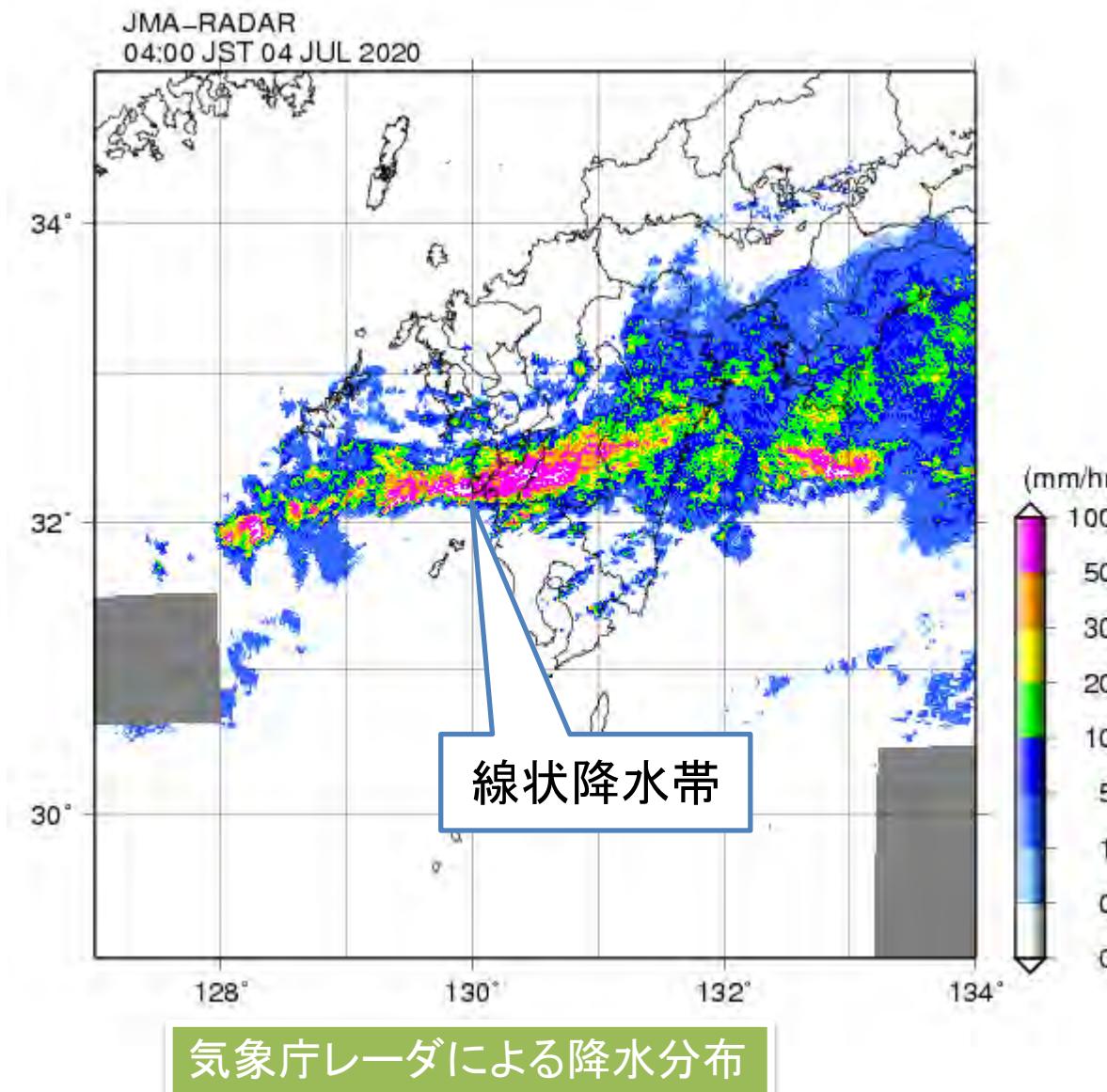
# 2021年台風Mindulle(第16号)



ムービー：琉球大学  
山田広幸先生作成







- ◆ 地球上で最も温かい海洋である西太平洋の西端に位置する日本において、台風は気象災害の最も大きな原因である。
- ◆ 近年、台風の最大強度が増大し、日本を含む中緯度における台風のリスクが増大していることが観測から示されている。
- ◆ 地球温暖化の進行は疑いの余地がなく、それに伴い、日本における台風の災害の危険性(暴風、豪雨、高潮など)が年々増大している。
- ◆ 地球温暖化に伴い、気温の上昇と共に大気中に含まれる水蒸気が増加する。それにともない激しい積乱雲やそれに伴う豪雨、さらに強い台風が増加する。
- ◆ 今世紀後半にかけて、温暖化の進行とともに、日本を含む中緯度で、台風や大雨などによる災害はさらに激甚化することが予想される。
- ◆ しかしながら、台風防災で最も重要な台風強度の推定値には大きな誤差があり、また、強度予測はほとんど改善されていないという大きな問題がある。
- ◆ これらの問題の解決には、航空機を用いた台風の直接観測が不可欠で、ドロップゾンデ観測を中心とした観測プロジェクトT-PARCIIを開始。
- ◆ 2017年のスーパー台風Lan(第21号)、2018年のスーパー台風Trami(第24号)の航空機による直接観測に成功。2021年も台風Mindulle(第16号)を観測。
- ◆ 今後もこのプロジェクトと横浜国立大学台風科学技術研究センターを発展させ、台風の理解、強度の高精度測定、さらに台風予報の高精度化に取り組んでいきたい。

寺田寅彦「天災と国防」  
(昭和9年(1934年))

「日本はその地理的位置がきわめて特殊であるために、(中略) **特殊な天変地異に絶えず脅かされなければならない運命のもとに置かれている**」

「文明が進めば進むほど天然の暴威による災害がその劇烈の度を増す」

「天災は忘れられたるころ来る」天災はある確率で必ず起こるので、平時からそれに対する備えをしておかなければならぬ。

寺田寅彦先生



ご清聴ありがとうございました。

坪木和久

(名古屋大学 宇宙地球環境研究所／  
横浜国立大学 台風科学技術研究センター)

# 『激甚気象はなぜ起こる』(新潮選書)

坪木和久

【配本・発売日】2020年5月27日発売

【造本】四六判

【ページ数】400ページ

【定価】1600円(本体価格)

## 【目次】

まえがき

第1章 繰り返される災いの年

第2章 なぜ日本は激甚気象が多いのか

第3章 高気圧はなぜ猛暑をもたらすのか

第4章 水蒸気がもたらす大気の不安定

第5章 豪雨はなぜ発生するのか

第6章 台風

第7章 激甚気象は予測できるか

第8章 地球温暖化と気象災害

第9章 激甚気象から命を守るために

あとがき

激甚気象は  
なぜ起こる

坪木和久  
Tsuboki Kazuhisa

新潮選書

Shincho Sensho

豪雪、猛暑、台風、豪雨、  
日本の「空」はどうなつて  
いるのか?

第一人者による最新気象学

新潮選書