

# 激甚災害をもたらす台風の実態と 地球温暖化に伴う将来変化

本講演で最もお伝えしたいこと：

- 台風は我が国の災害の最大要因で、その防災には平時からの備えと適切な避難が最も重要。
- 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台風Mindulleの眼内部  
2021年9月29日、高度45000フィート(坪木撮影)

「日本はその地理的の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』（自然のゆらぎ）である。」

「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ないということは、実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でもまれである。」

寺田寅彦先生



# 伊勢湾台風（1959年台風第15号）概要(気象庁HPより)

昭和34年（1959年） 9月26日～9月27日

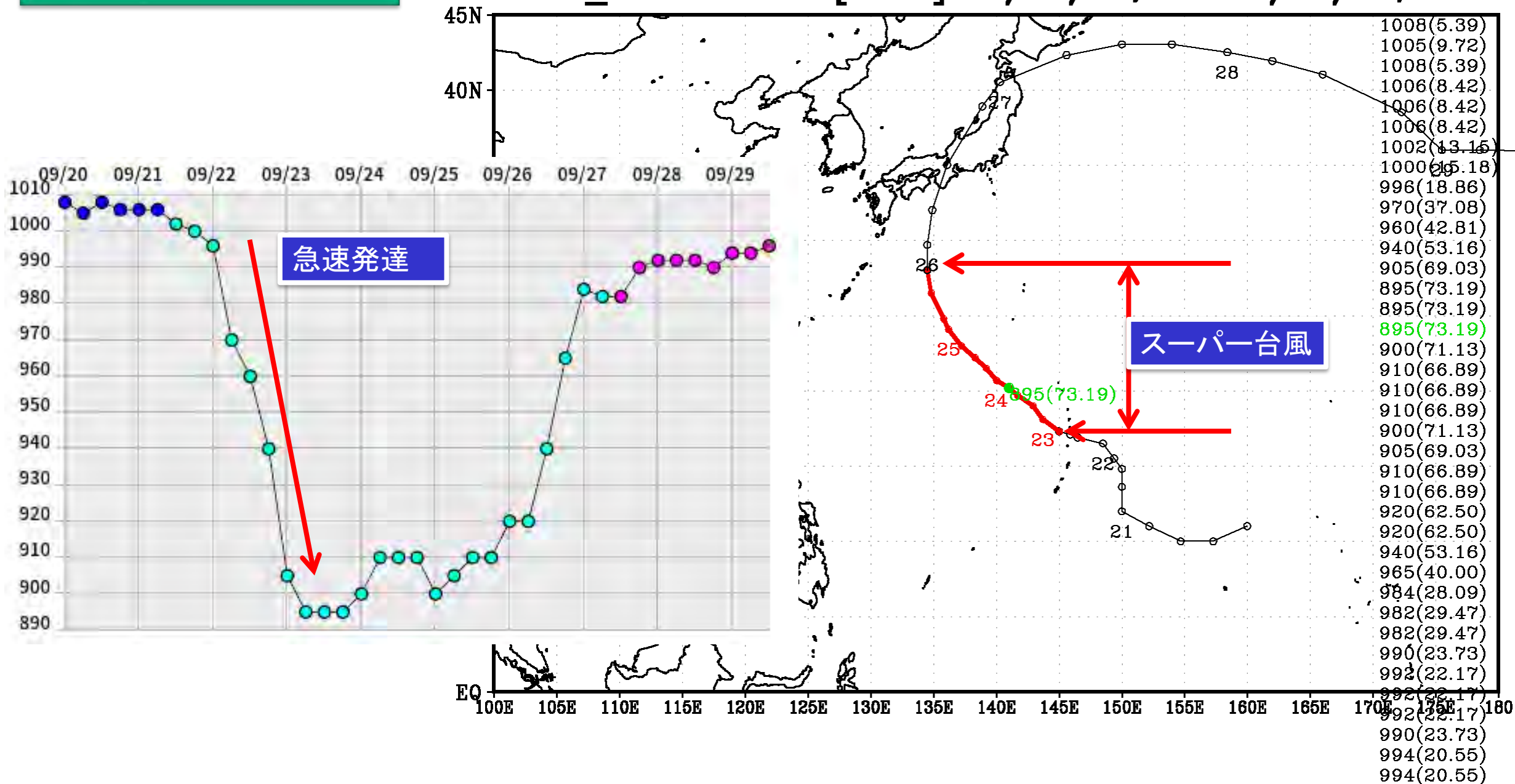
- ◆9月21日にマリアナ諸島の東海上で発生。
- ◆中心気圧が1日に91hPa下がる（急速発達）など猛烈に発達し、非常に広い暴風域を伴った。
- ◆9月26日18時頃和歌山県潮岬の西に上陸した。
- ◆上陸後6時間余りで本州を縦断、富山市の東から日本海に進む。
- ◆勢力が強く暴風域も広がったため、広い範囲で強風。
- ◆伊良湖（愛知県渥美町）で最大風速45.4m/s（最大瞬間風速55.3m/s）、名古屋で37.0m/s（同45.7m/s）を観測。
- ◆当時、気象衛星もレーダもなく、伊勢湾台風の全容を知ることはできなかった。

## 数値モデルで伊勢湾台風を再現し、その全容を知る。

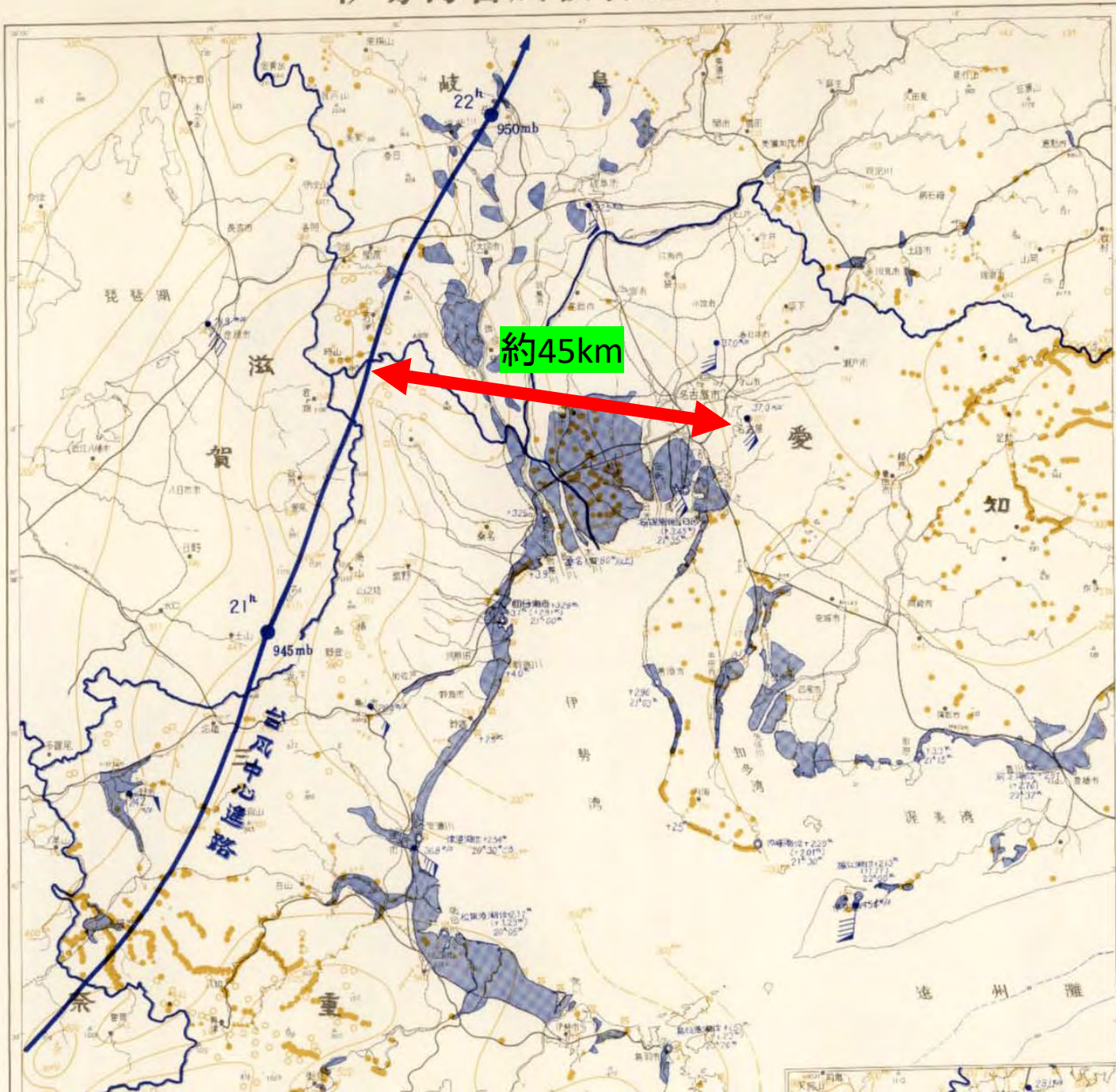
- コンピュータの発展
- 解析データの発展
- 雲解像モデルの開発

# 伊勢湾台風(1959)

JMA\_RSMC T5915 [VERA] 59/09/20,00Z-59/09/29,12Z



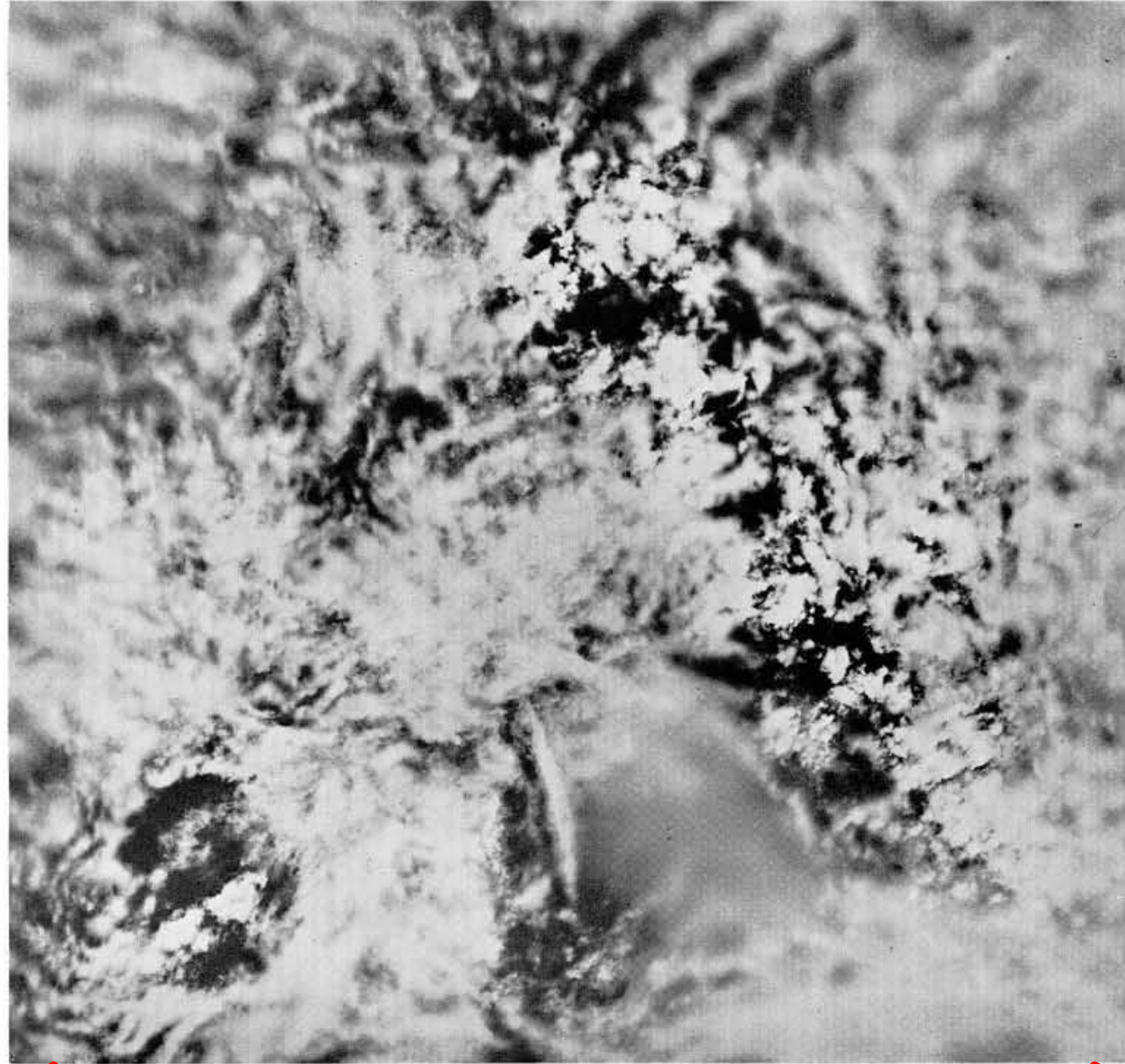
# 伊勢湾台風被害概要図



気象庁資料より

伊勢湾台風之眼（約16800m上空からの撮影）

1959年9月24日12時20分、硫黄島の南南西方約450kmで米軍観測機撮影。

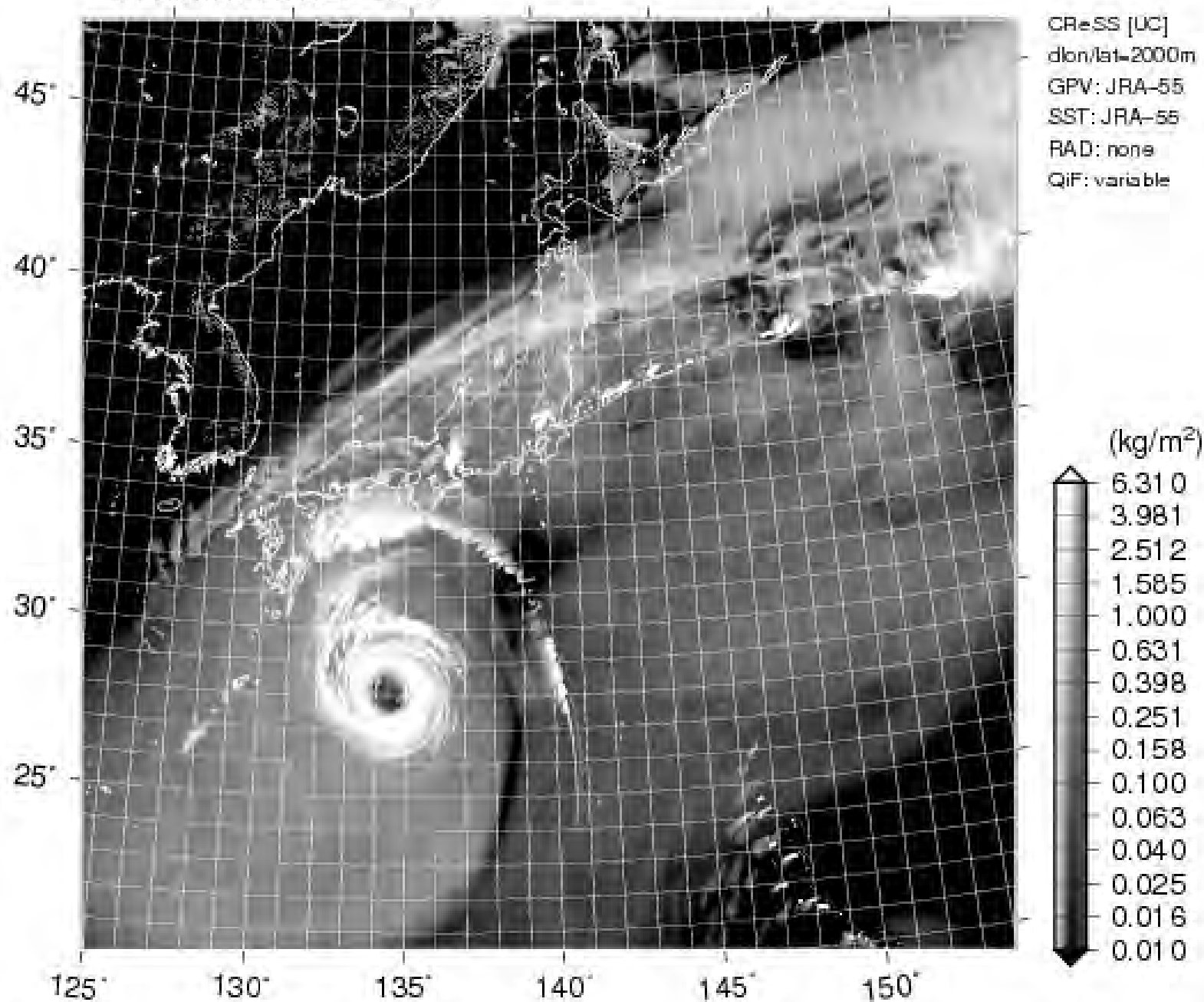


約46km

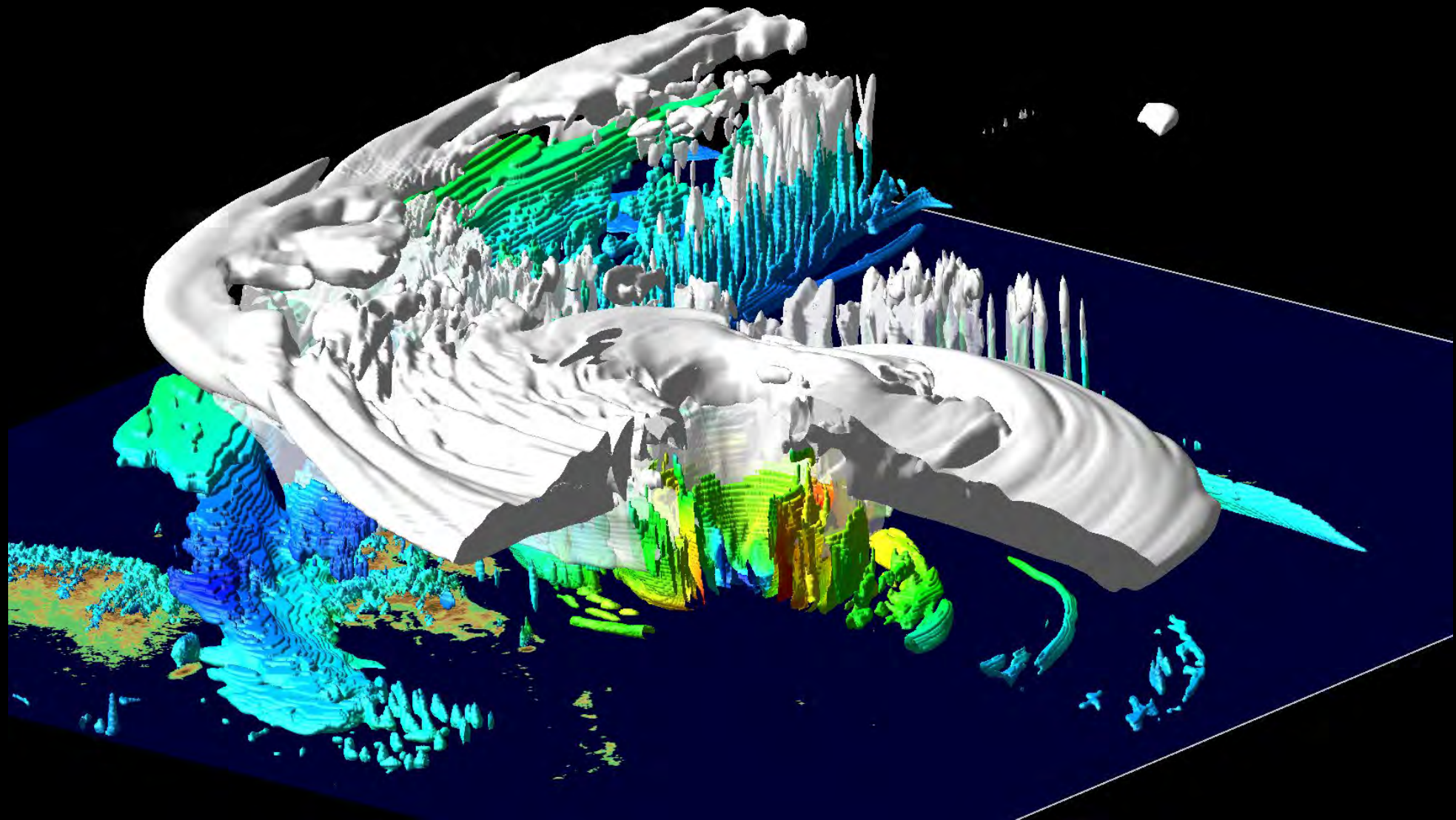
気象庁資料より

# 雲解像モデルによる伊勢湾台風の再現(1959年9月26日午前1時30分)

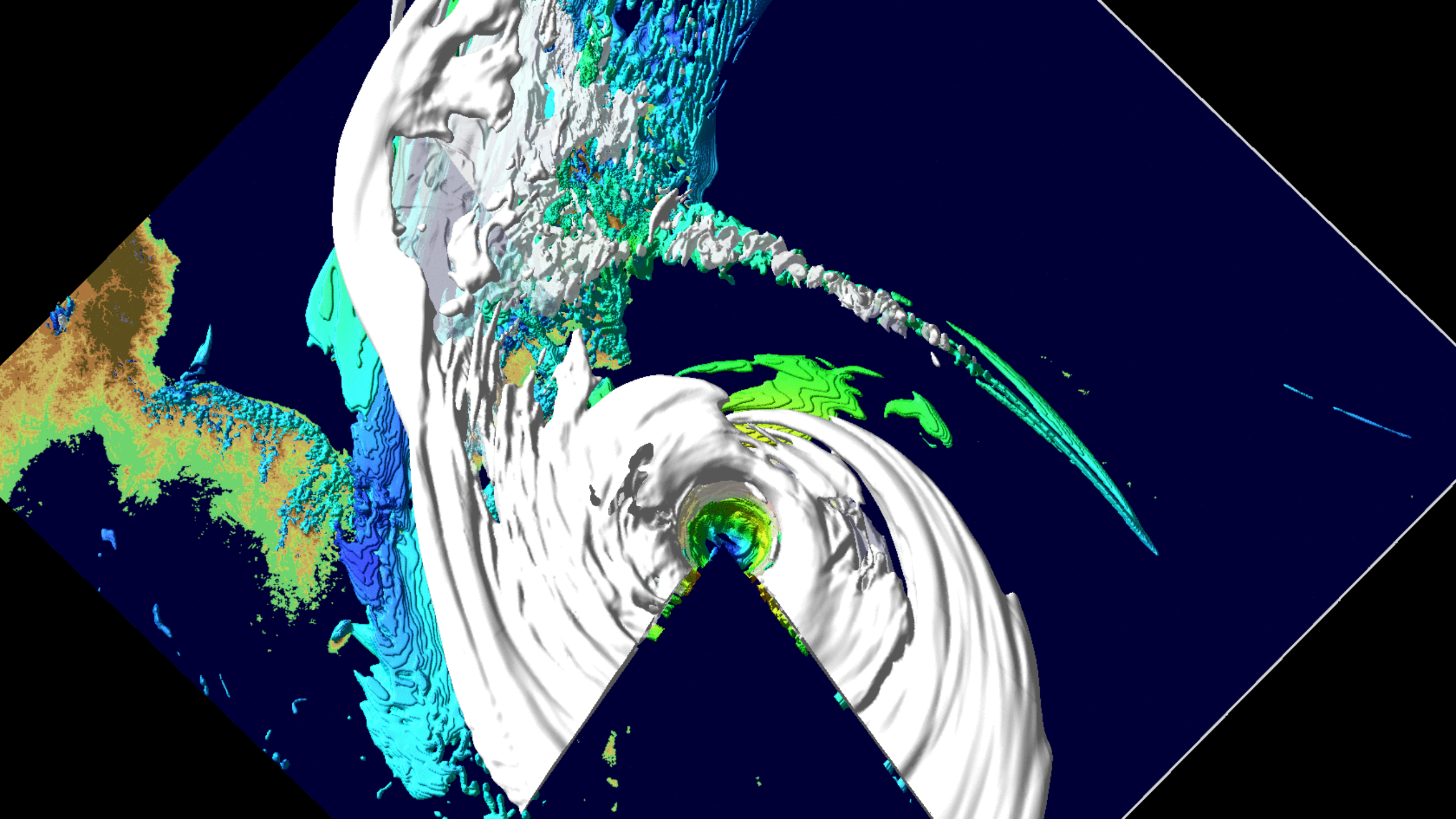
01:30 JST 26 SEP 1959



雲解像モデルCReSSで再現された伊勢湾台風の立体表示(上陸12時間前)

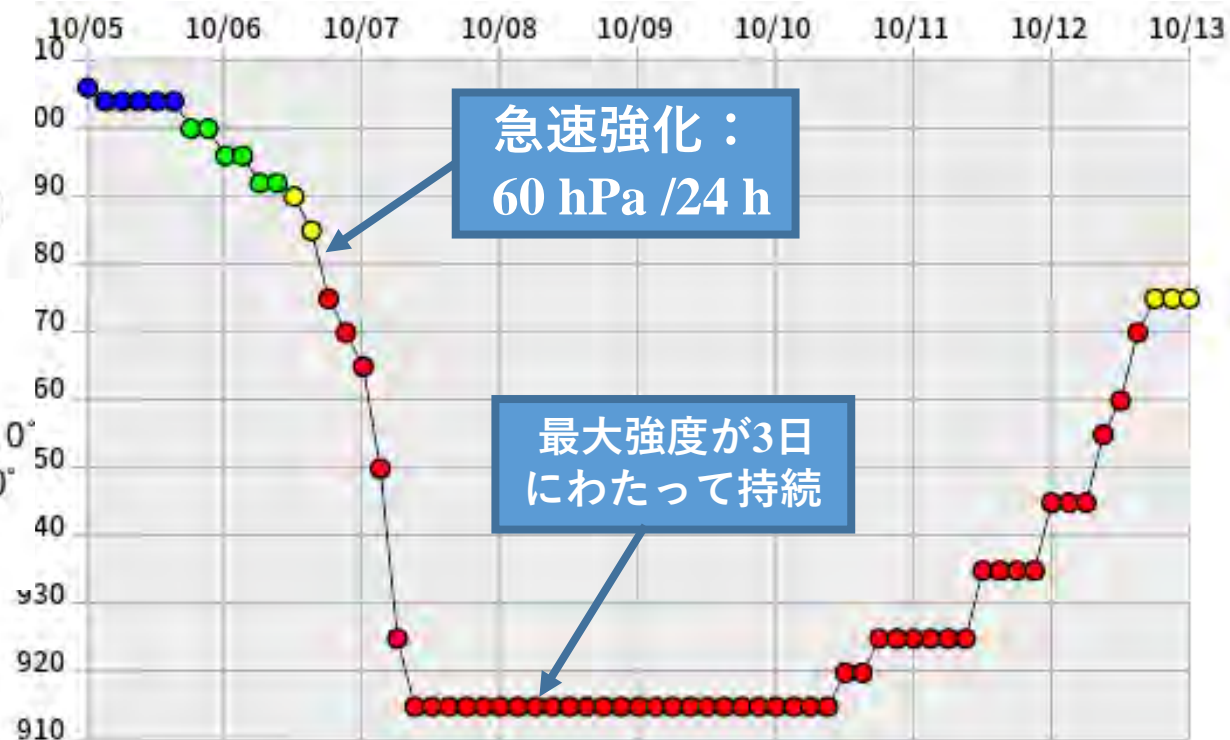
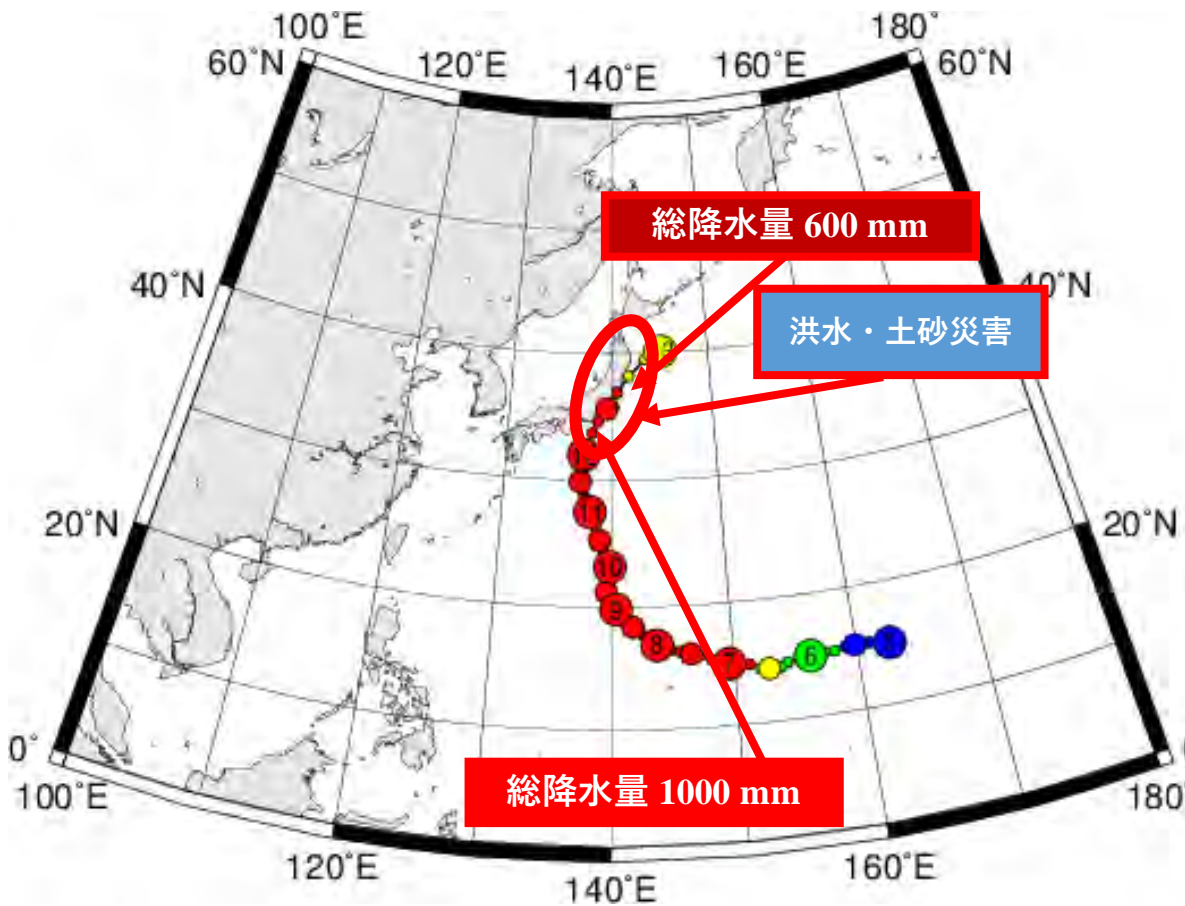




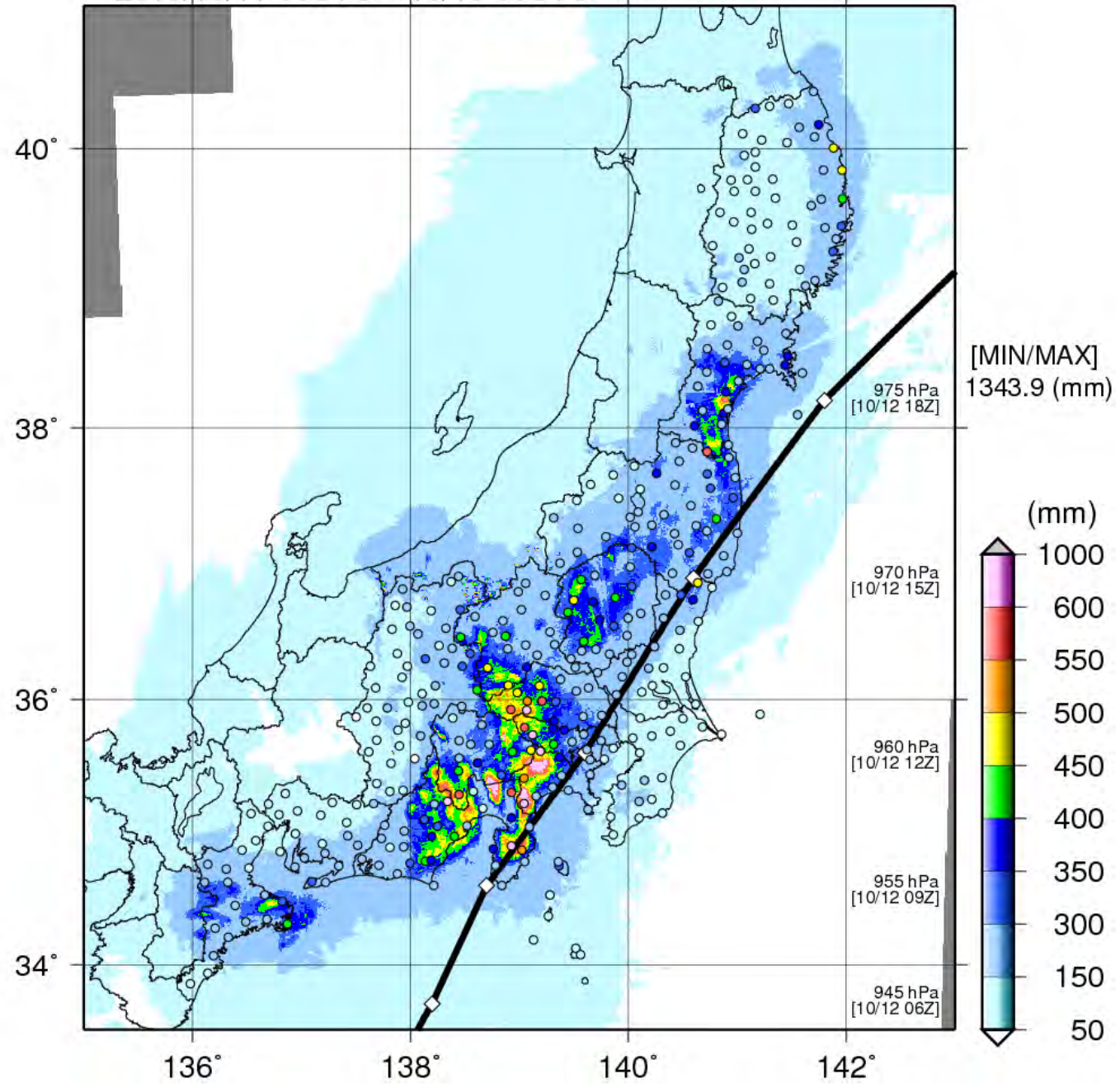


# 2019年10月の台風19号ハギビス（令和元年東日本台風）

- 急速強化と3日間にわたる最大強度
- 「大型」の台風
- 北緯25度までスーパー台風の強度
- 広域の大雨
- 142箇所で堤防決壊
- 死者104人、行方不明者3人



[HAGIBIS] 48 HOUR PRECIPITATION  
2019/10/11 00UTC - 10/13 00UTC



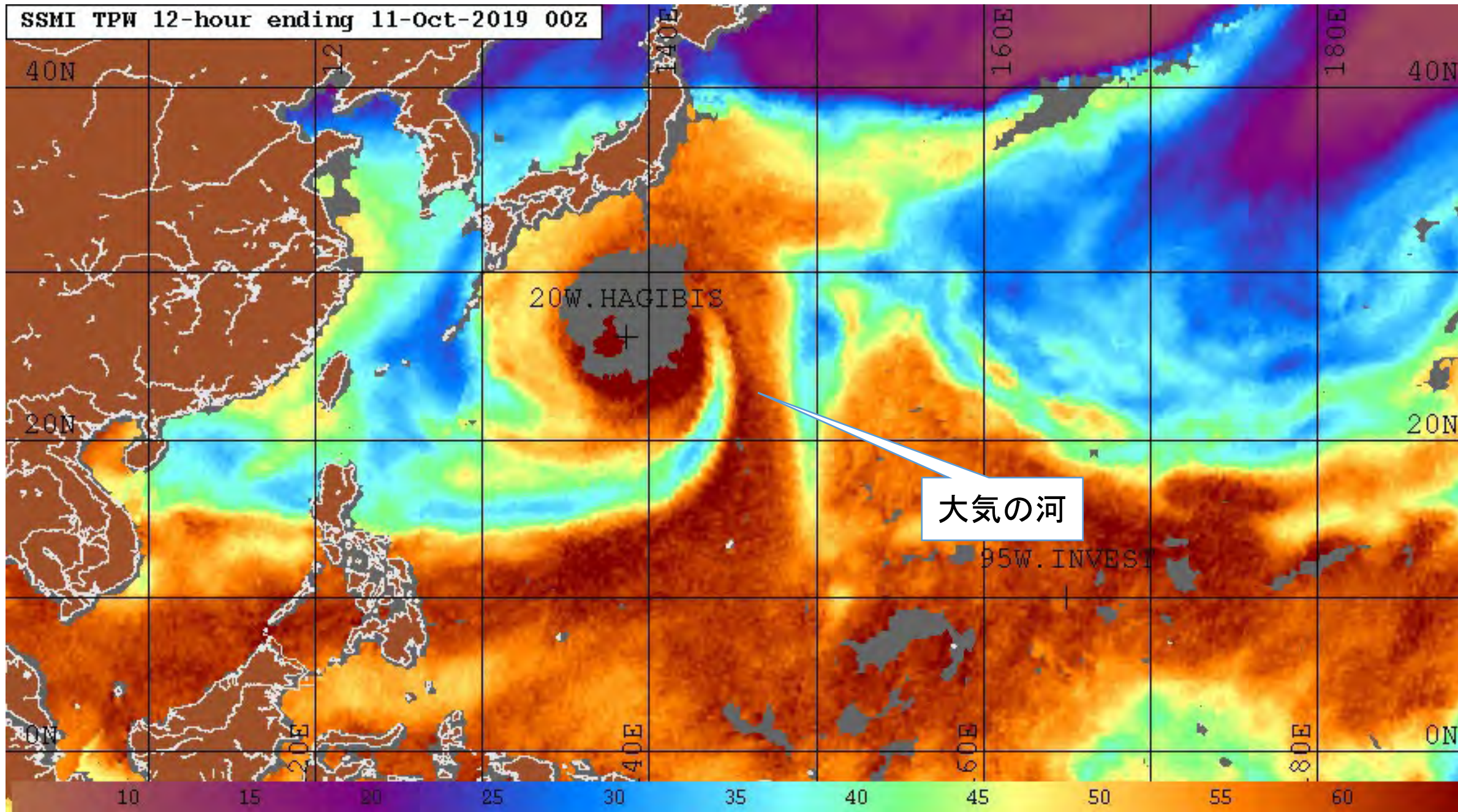


*Photo by K. Tsuboki in Nagano 2019*



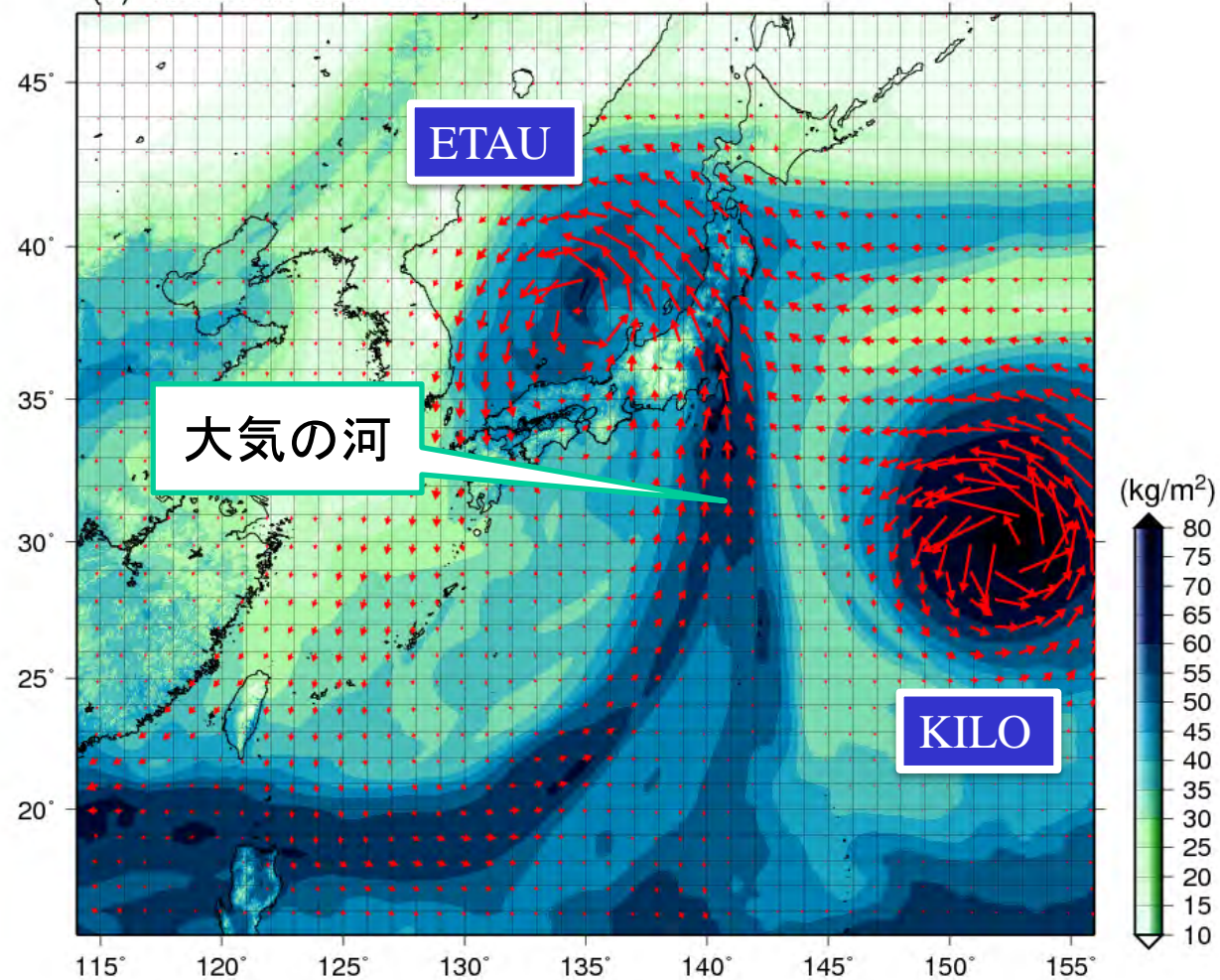
*Photo by K. Tsuboki in Nagano 2019*

SSMI TPW 12-hour ending 11-Oct-2019 00Z

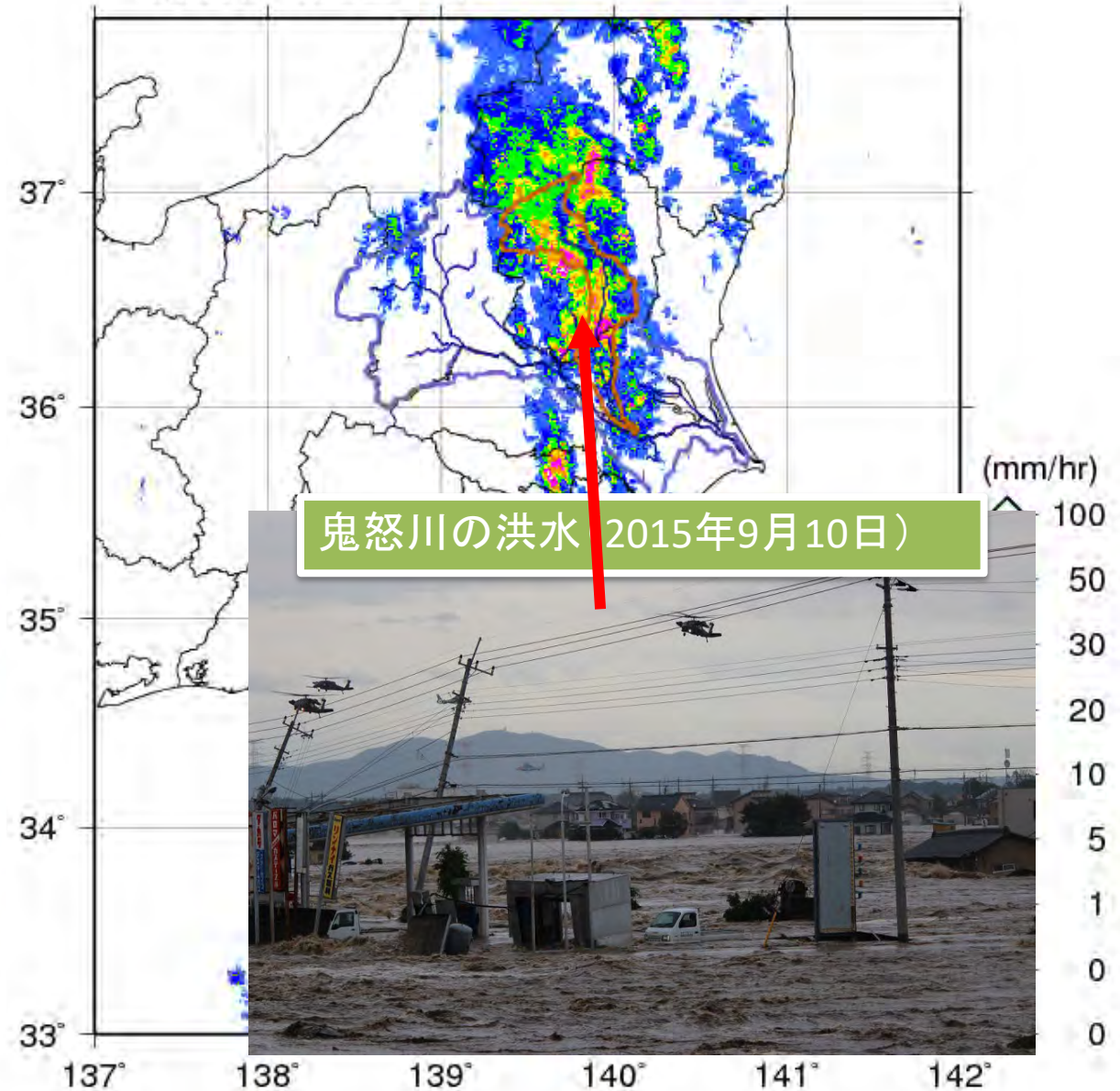


# 大気の河 2015年9月10日: 鬼怒川決壊の豪雨(関東・東北豪雨)

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

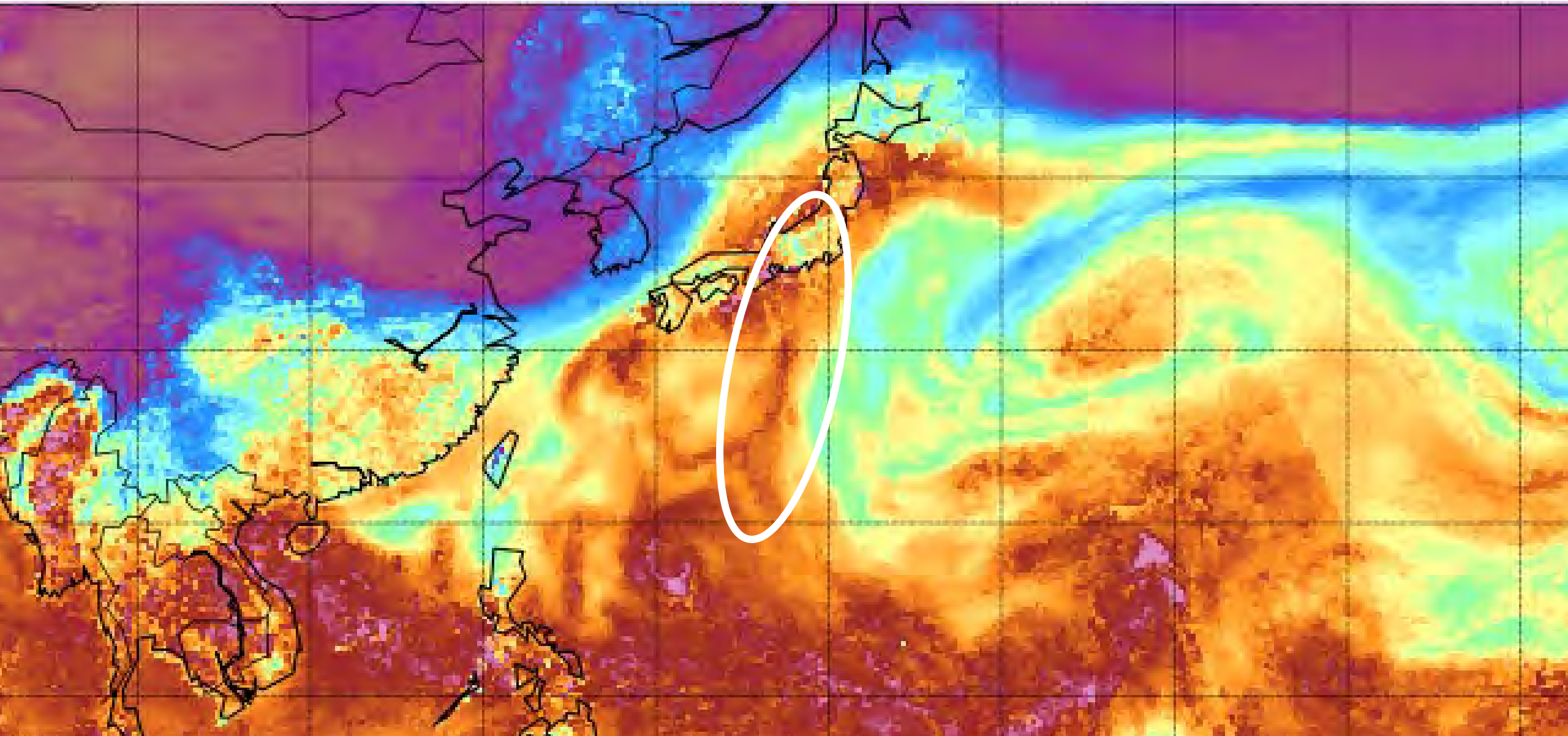


JMA RADAR  
18:00 JST 09 SEP 2015



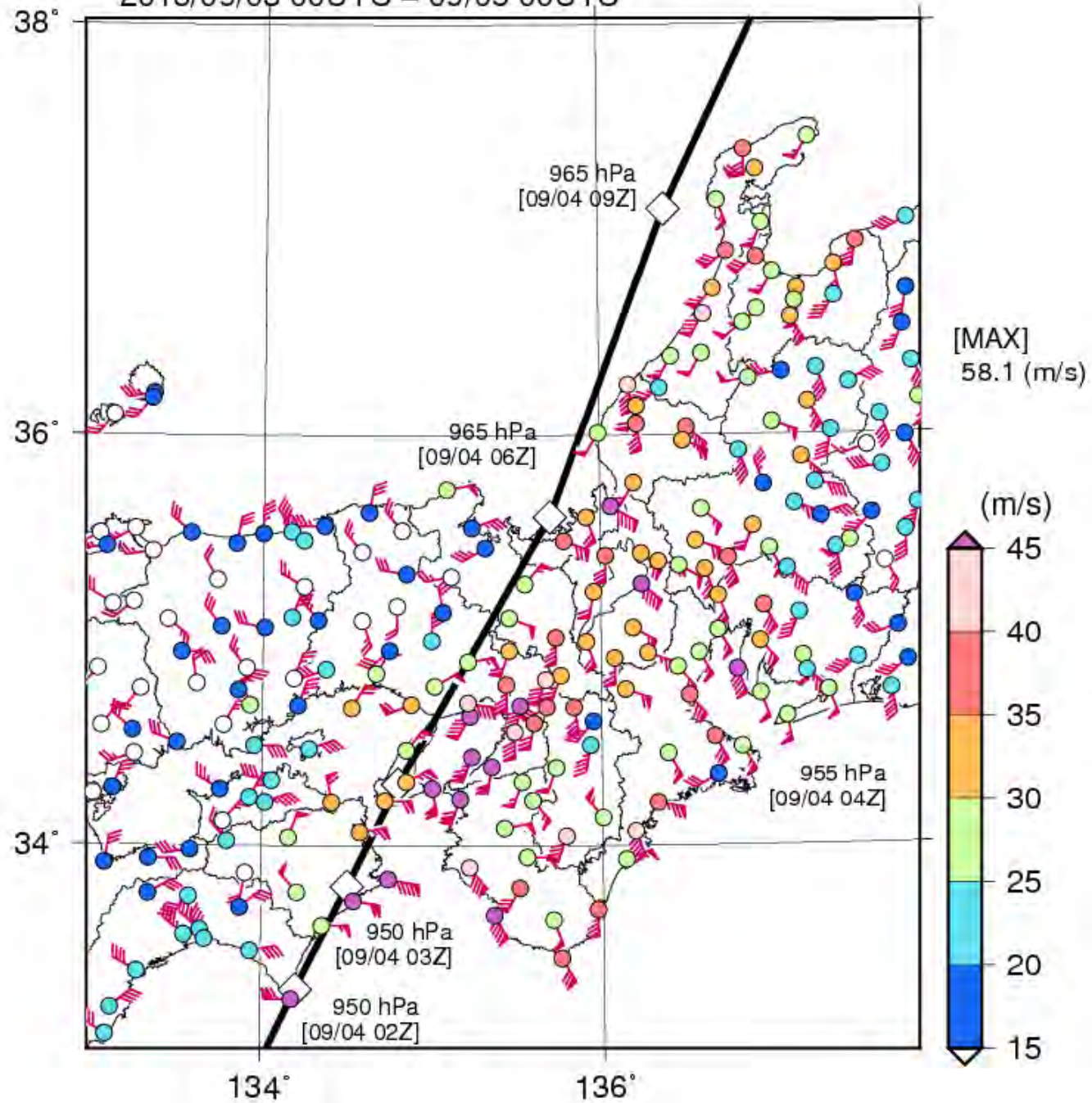
# 2022年9月台風15号に伴う東海地方への水蒸気の流れ込み(大気の河)

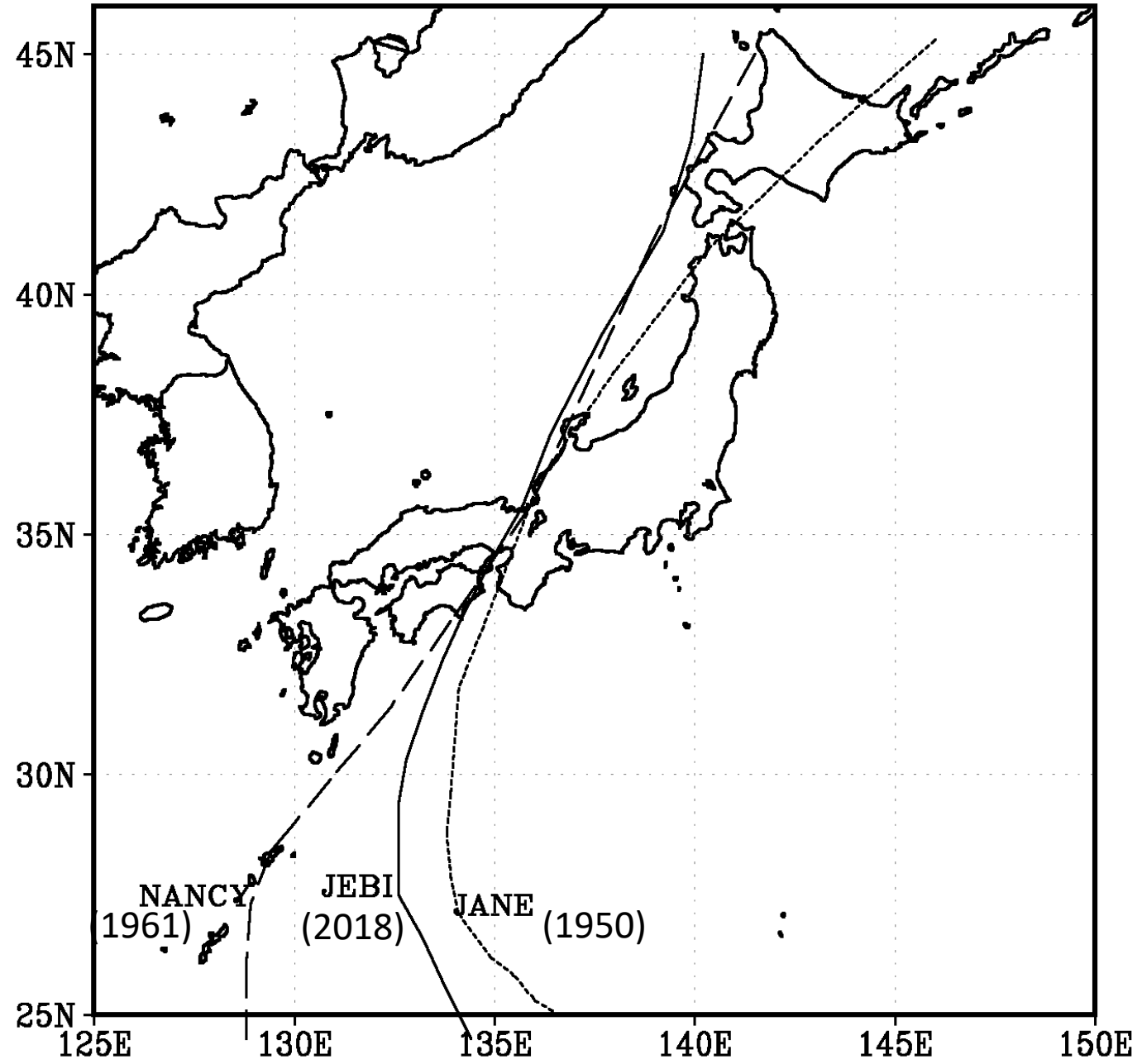
Total Precipitable Water 2022-09-23 0600 UTC





[JEBI] MAXIMUM WIND GUST  
2018/09/03 00UTC - 09/05 00UTC





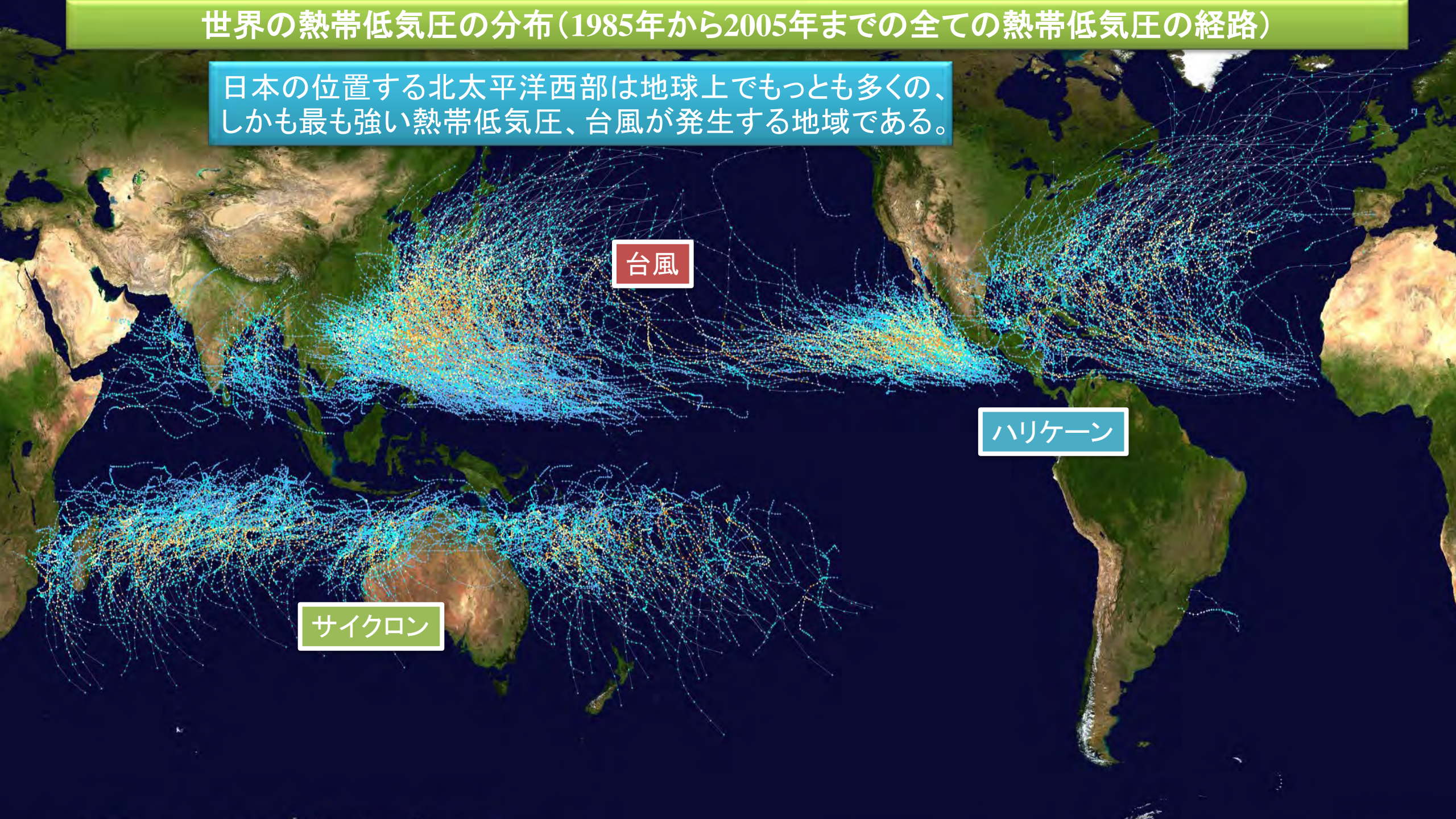
# 世界の熱帯低気圧の分布(1985年から2005年までの全ての熱帯低気圧の経路)

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

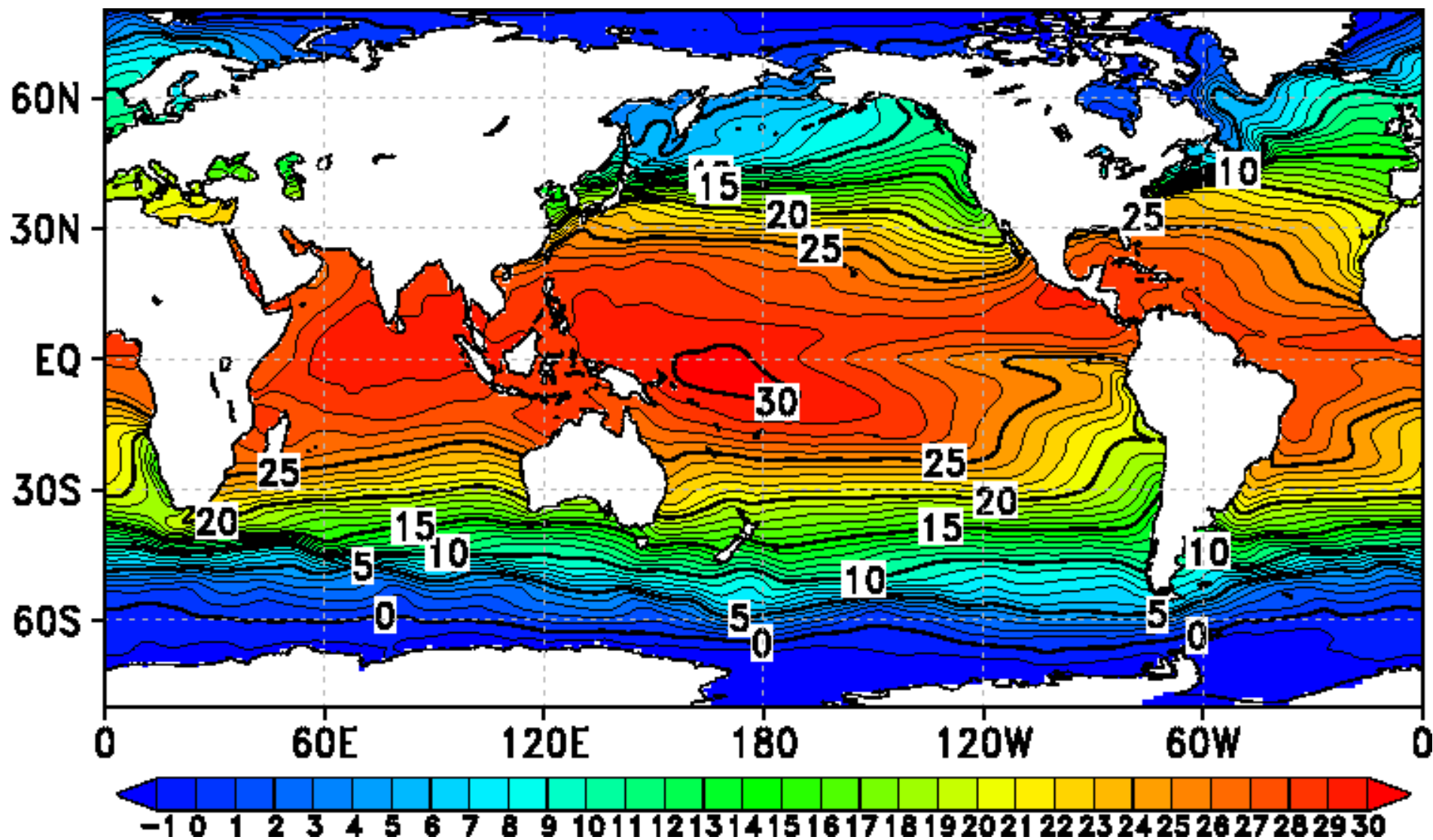
台風

ハリケーン

サイクロン

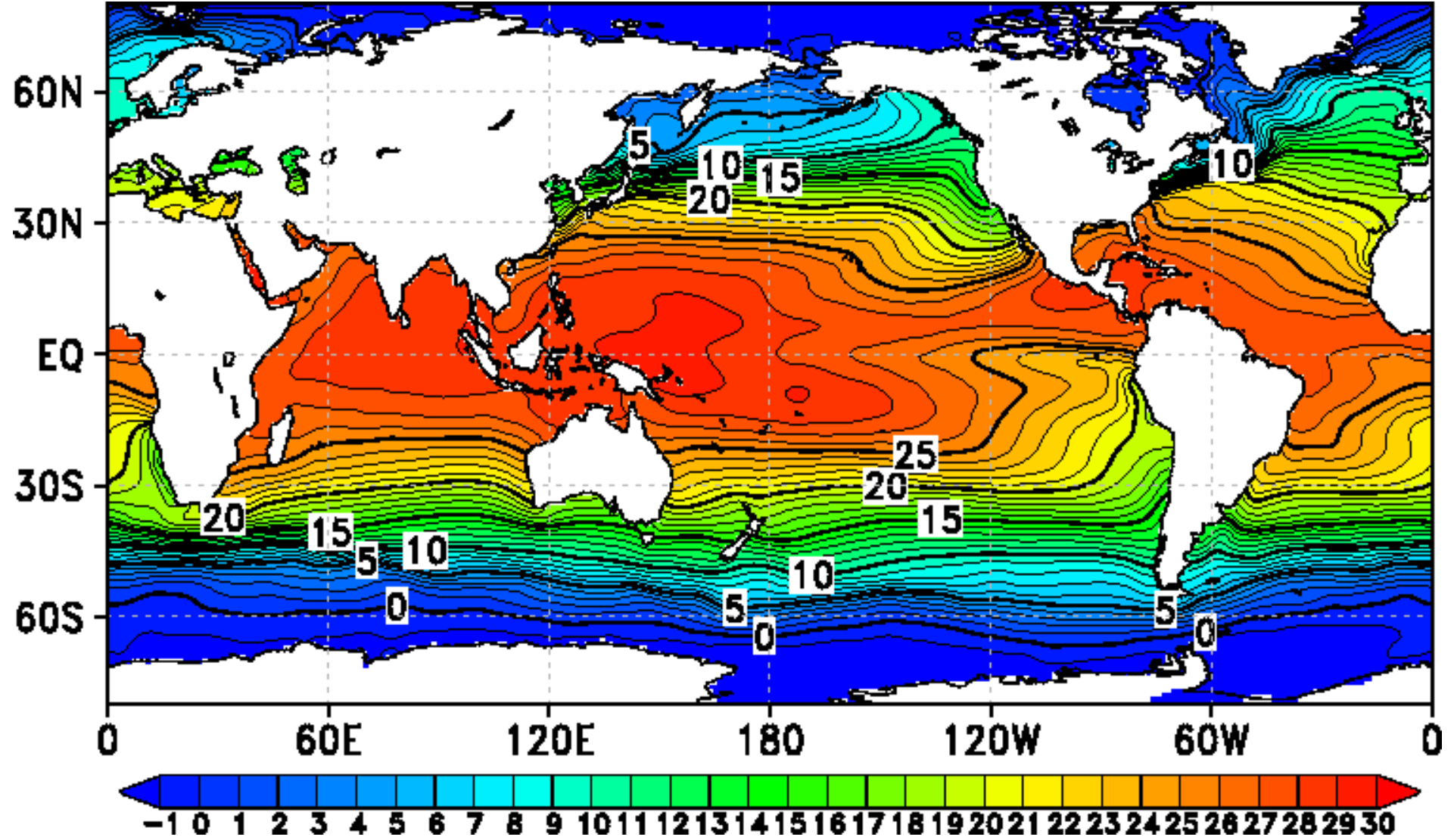


# 全球 年平均海面水温：2019年 (気象庁)



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)

## 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

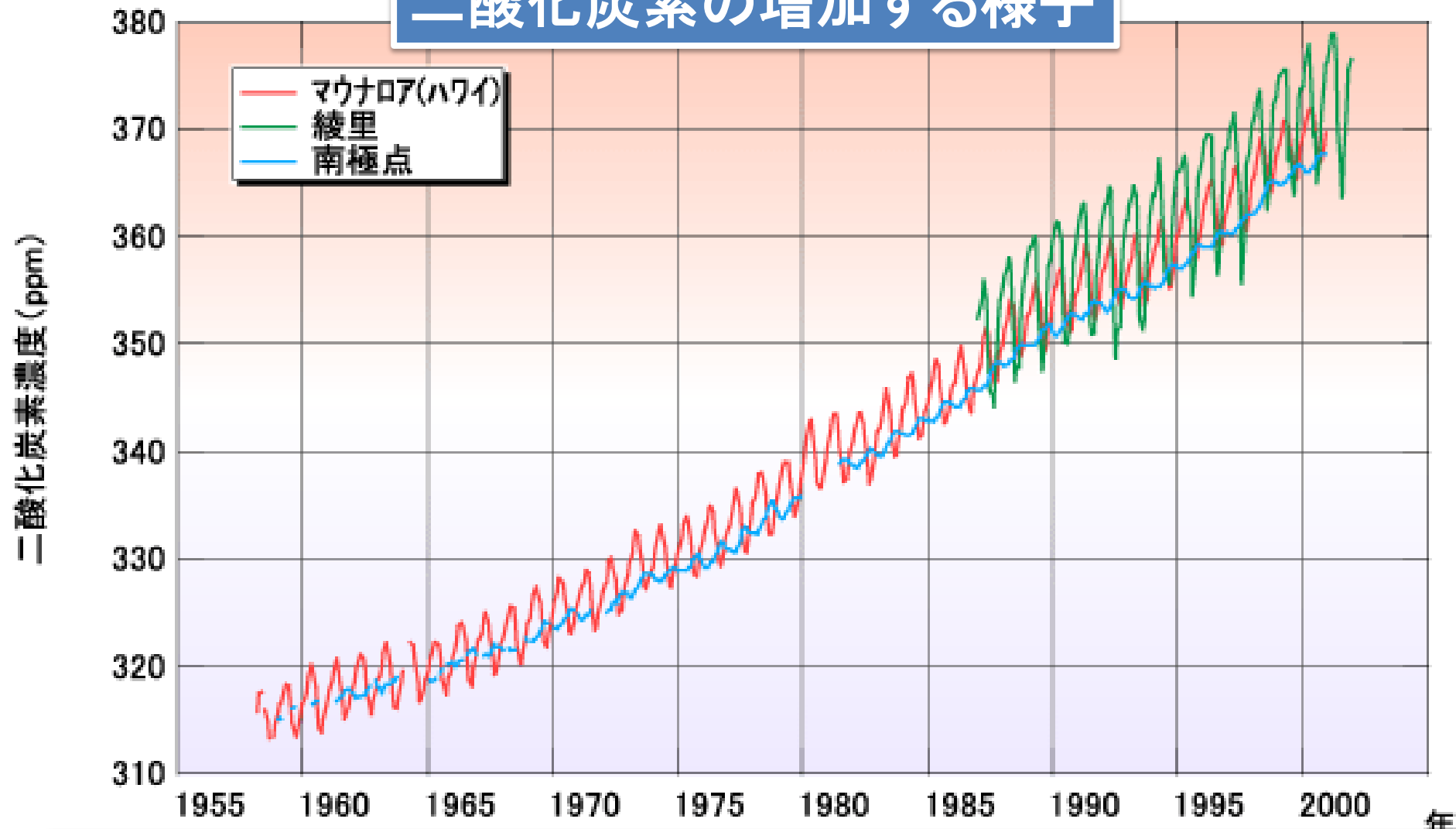
世界気象機関（WMO）は25日、**2020年**の二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）などの主要な温室効果ガスの世界平均濃度が前年から増加し、いずれも**観測史上最高記録を更新した**と発表した。

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

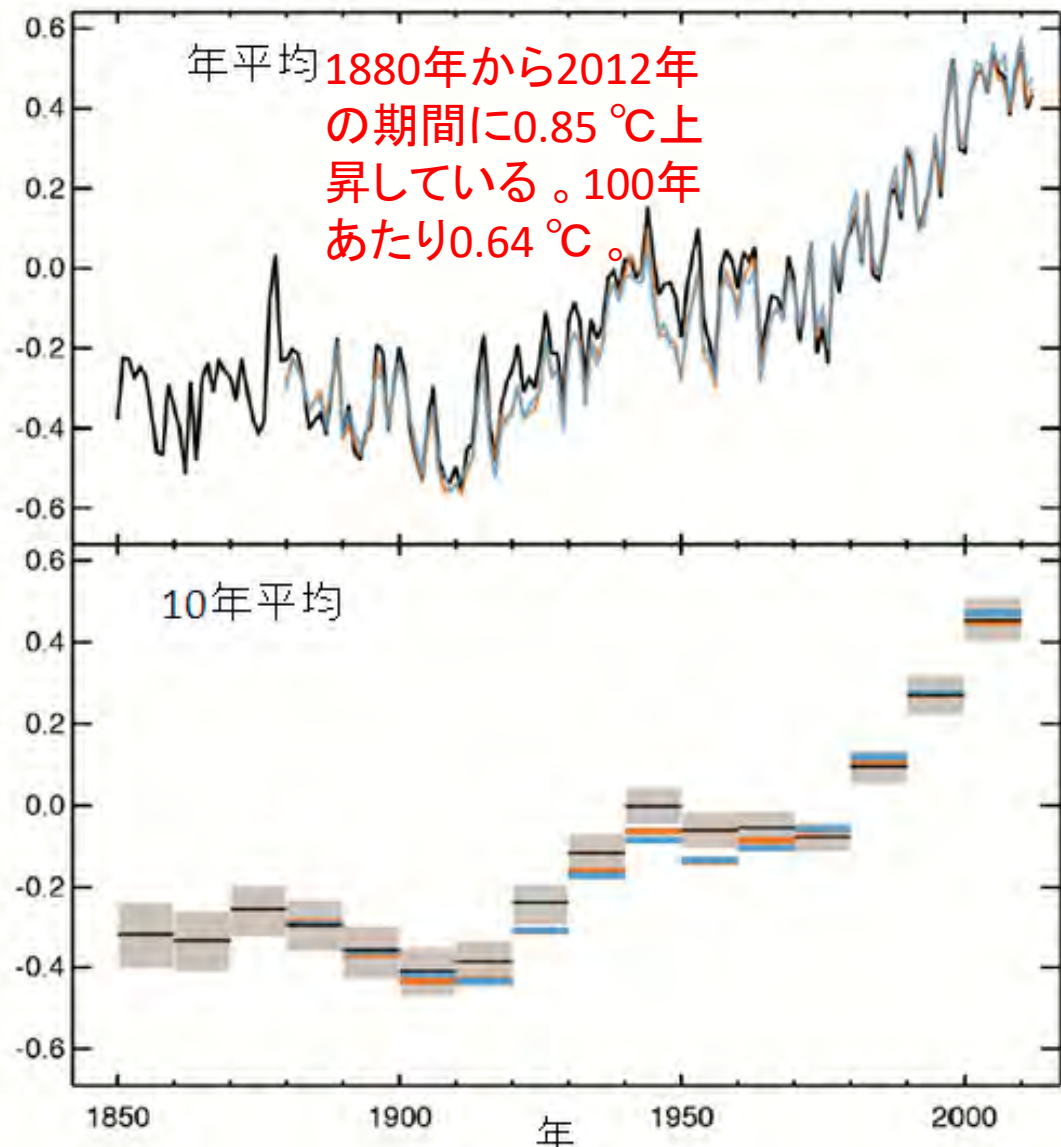
## 二酸化炭素の増加する様子



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。  
10,000,000,000,000,000,000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。**

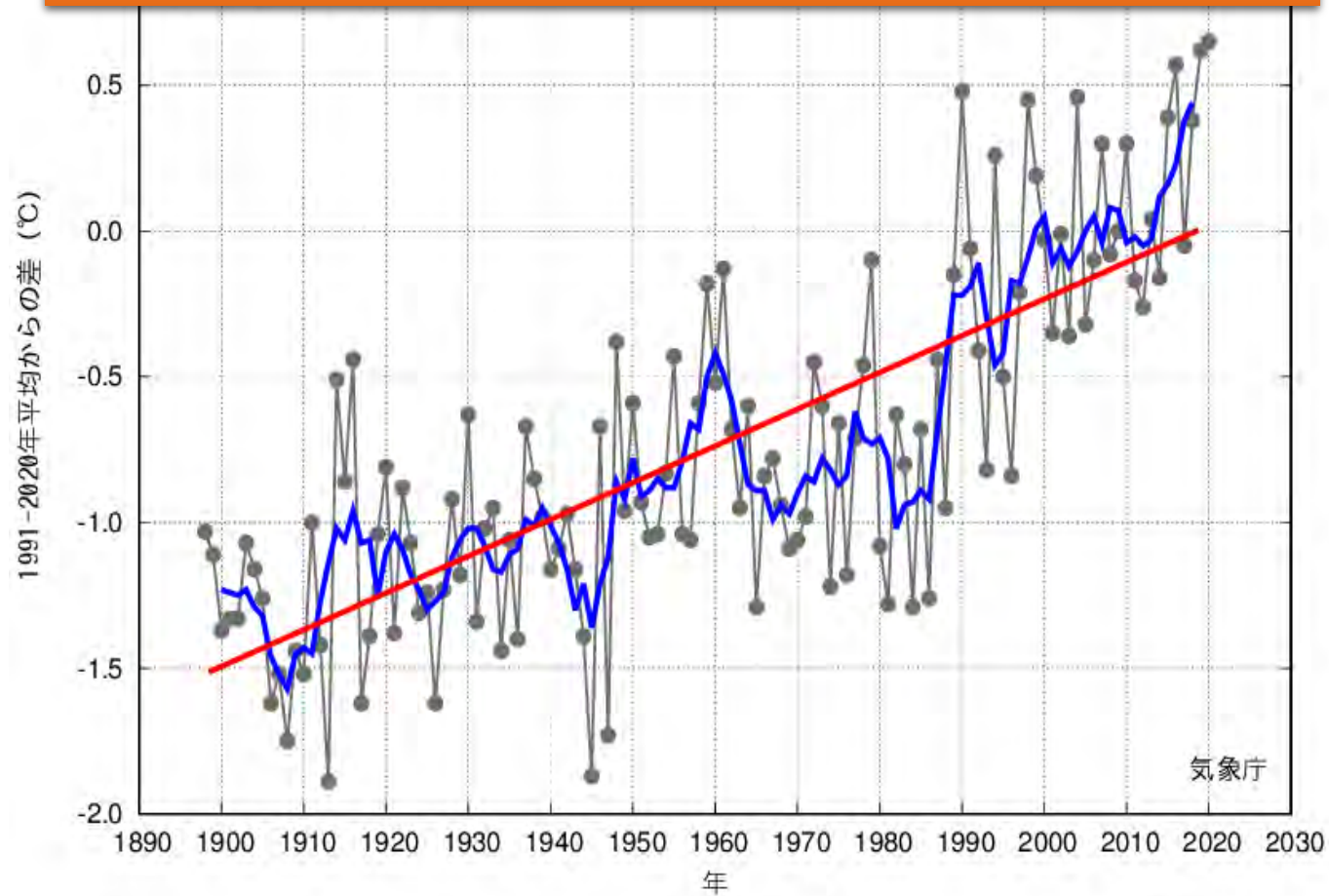




3つのデータセットによる、1850～2012年の陸域と海上とを合わせた世界平均地上気温偏差の観測値。上図：年平均値、下図：10年毎の平均値(黒色のデータセットについては不確実性の推定を含む)。偏差は1961～1990年を基準とする。(出典：IPCC AR5 WG I SPM Fig. SPM.1(a) )

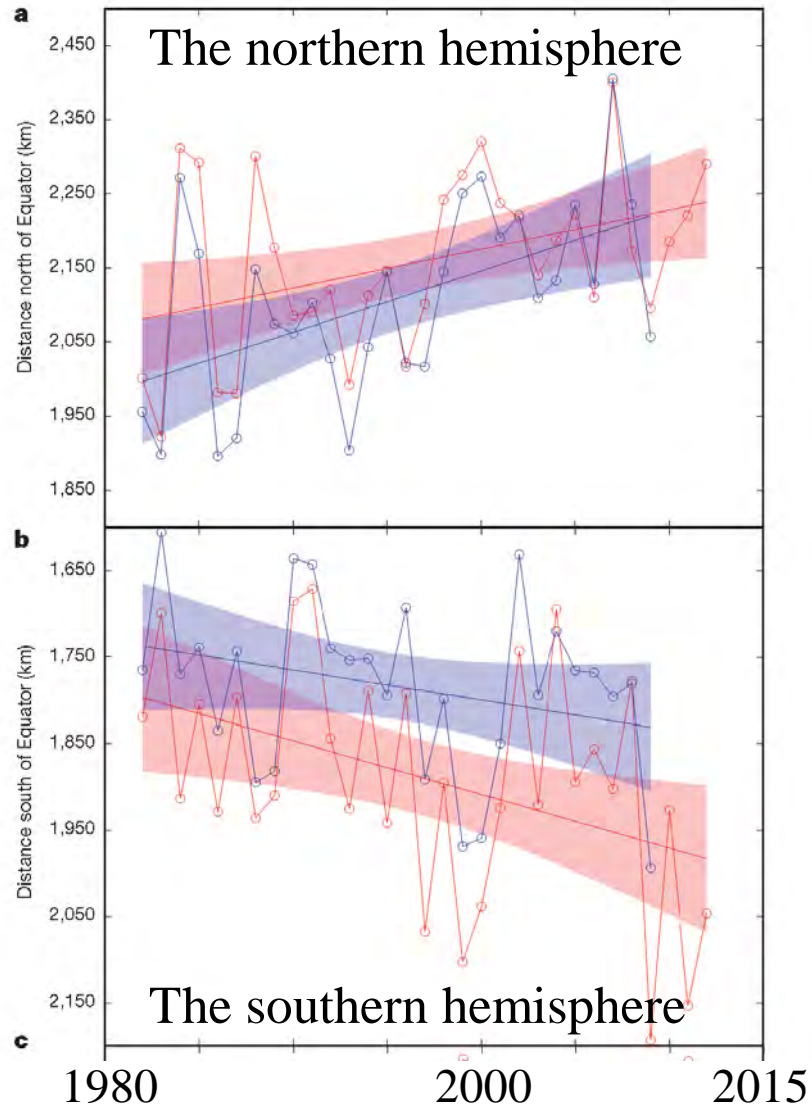
### 日本の年平均気温偏差

日本は世界平均のおよそ2倍の速度で温暖化している。



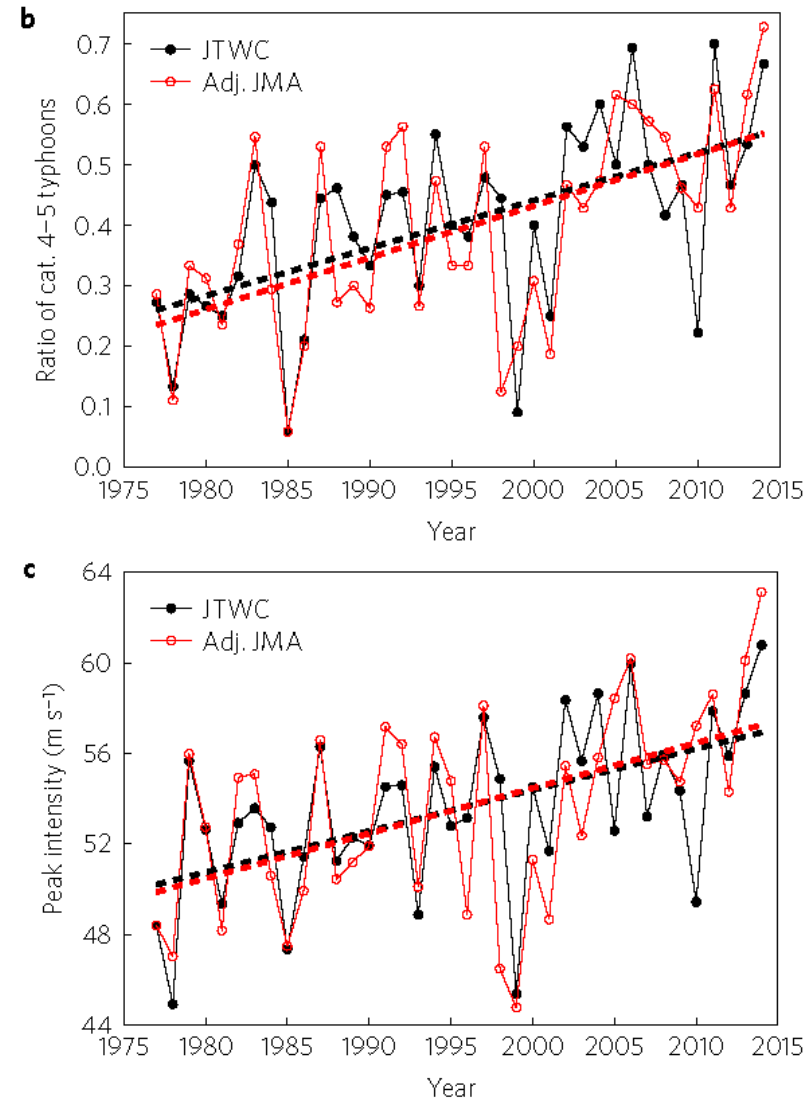
細線(黒)：各年の平均気温の基準値からの偏差、太線(青)：偏差の5年移動平均値、直線(赤)：長期変化傾向。基準値は1991～2020年の30年平均値。日本の年平均気温は、様々な変動を繰り返しながら上昇しており、**長期的には100年あたり1.26℃の割合で上昇しています。**特に1990年代以降、高温となる年が頻出しています。出典：気象庁HP 日本の年平均気温の偏差の経年変化(1898～2020年)

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



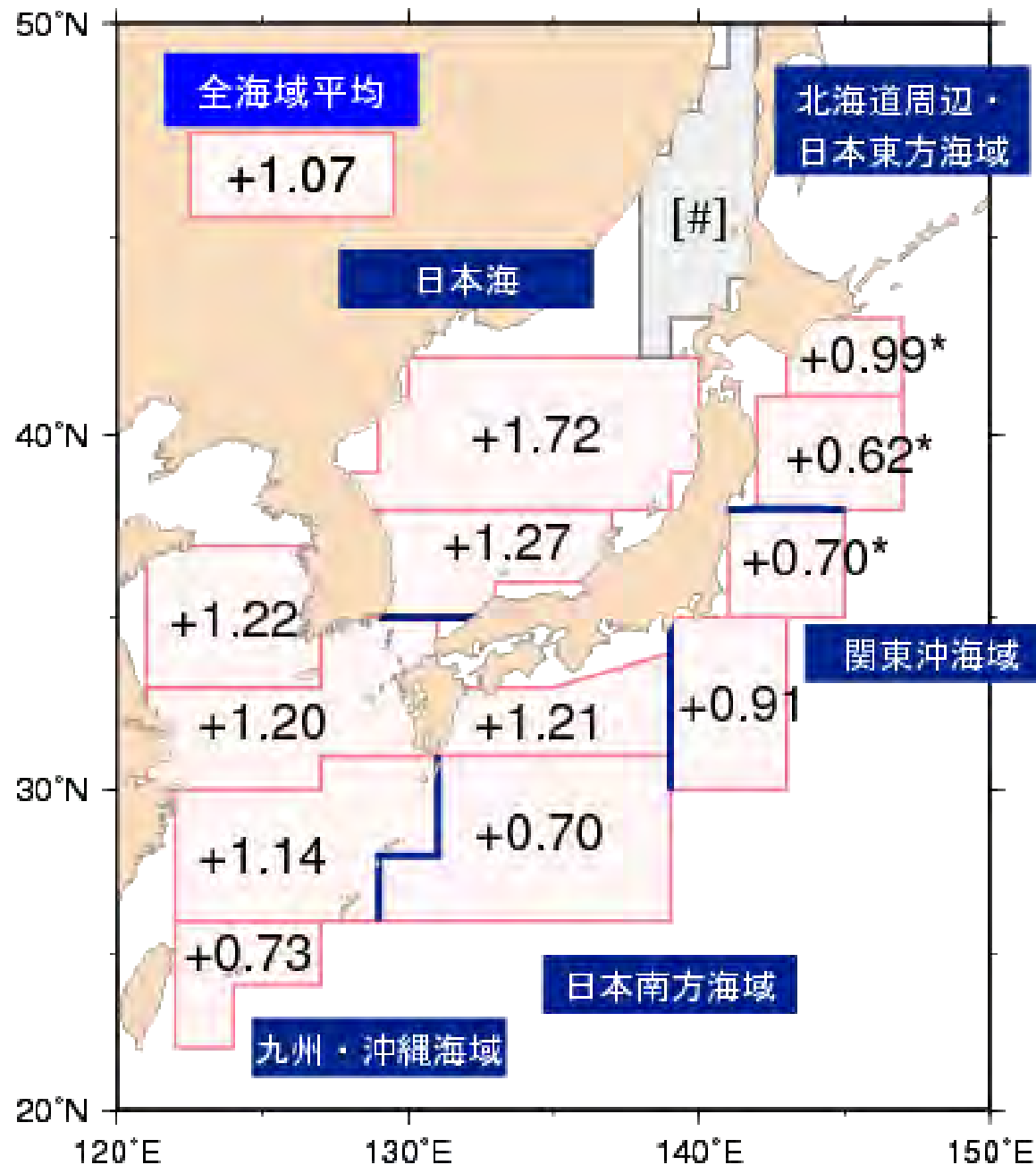
Kossin et al. (2014), *Nature*

台風の強度が増大している



Mei and Xie (2016), *Nature Geoscience*

# 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

## 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。

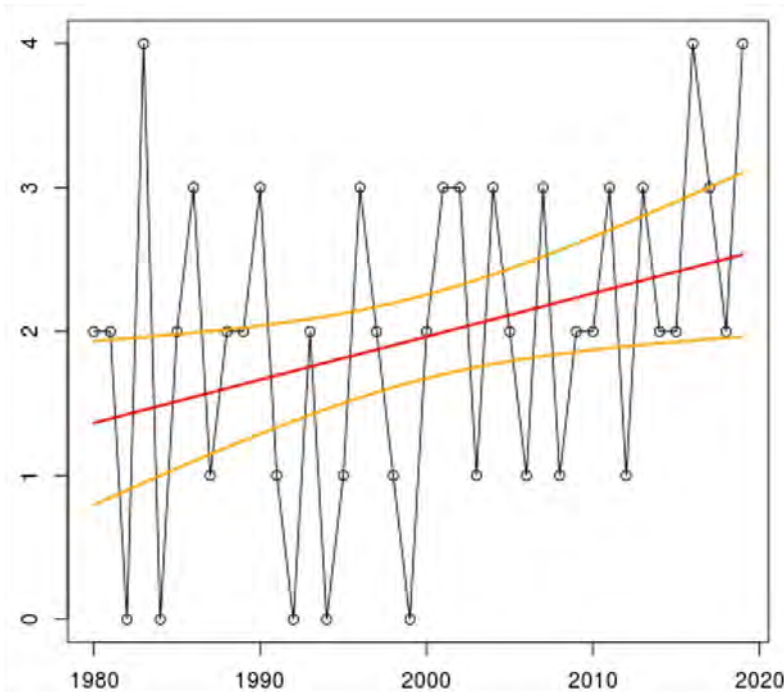


図1. 東京に接近した台風の数を経年変化。横軸は年、縦軸は各年の接近数。赤線は回帰直線、橙線は95%信頼区間を表している。増加傾向は統計的に有意である。

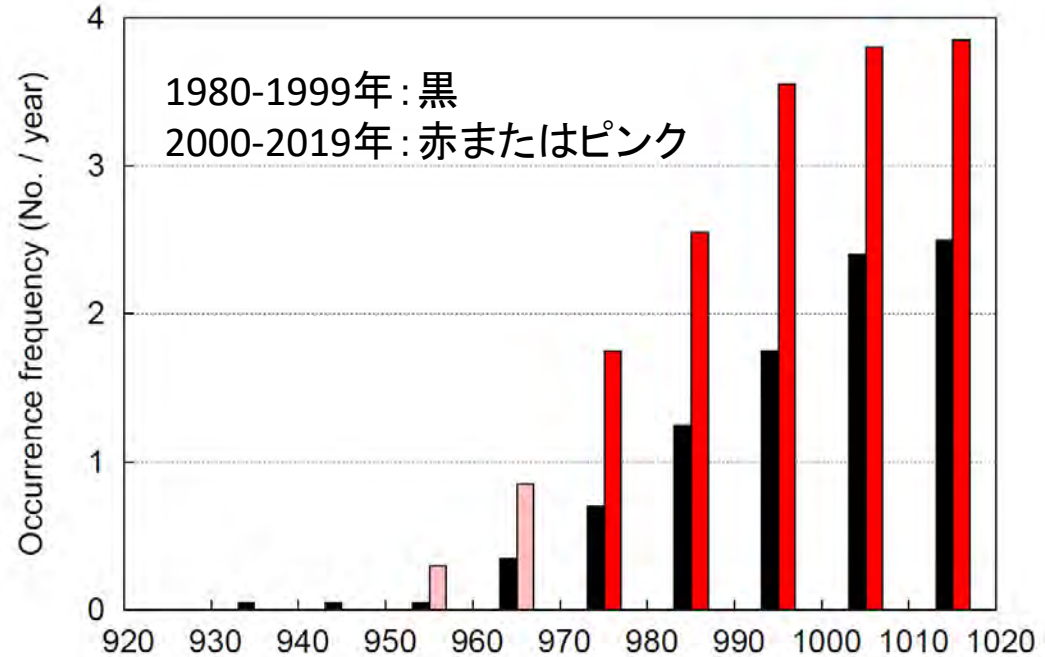


図2. 台風が東京に接近した時の中心気圧の累積頻度分布。1980-1999年が黒、2000-2019年が赤またはピンク。赤は差が有意水準5%で有意であることを示す。

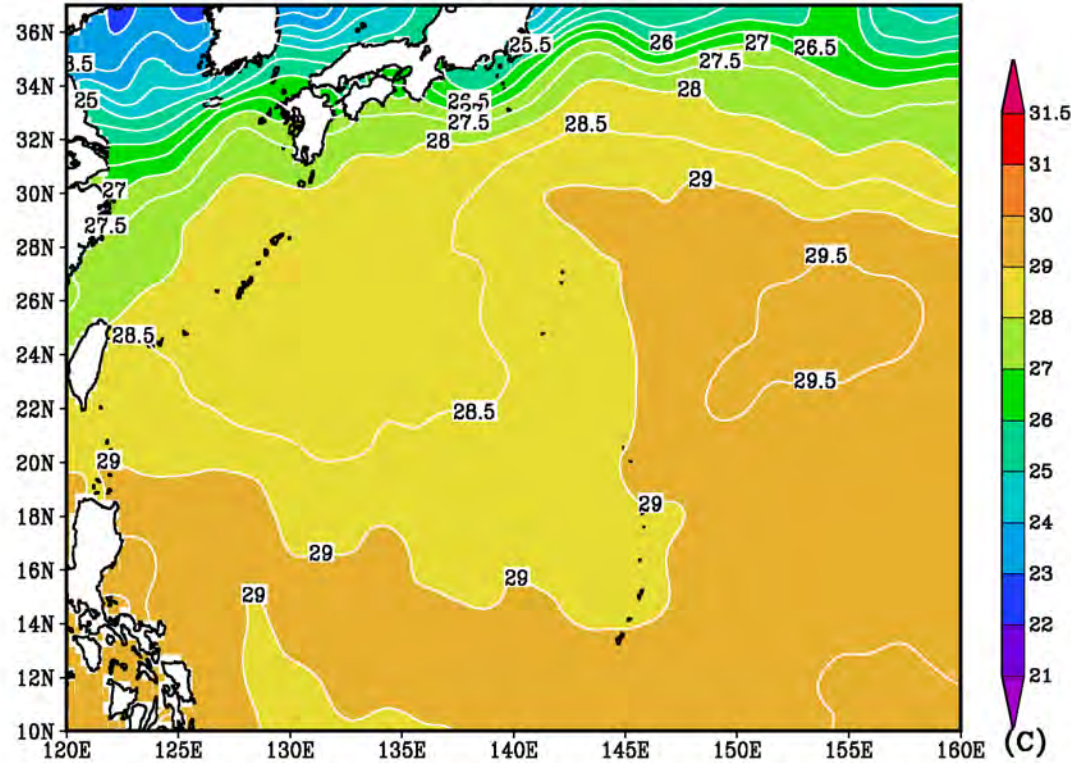
Yamaguchi, M., and S. Maeda, 2020: Increase in the number of tropical cyclones approaching Tokyo since 1980. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 775-786. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-039>

# 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

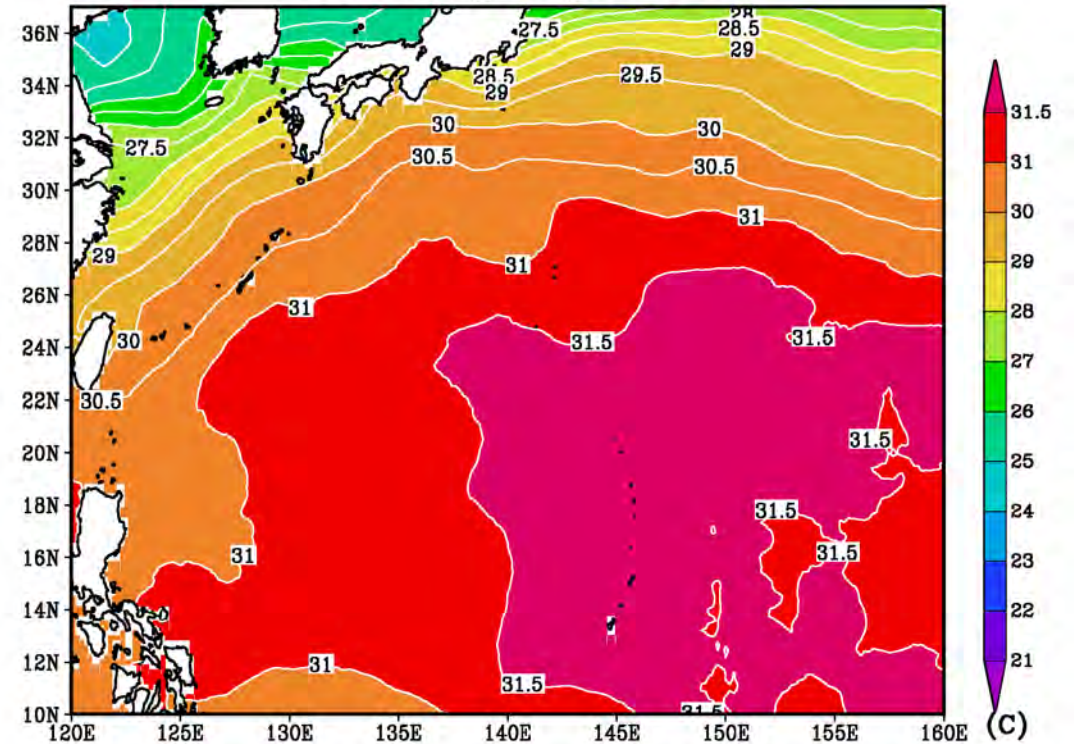
SST average Sept. 2005



現在気候の海面水温(観測値)

2076年9月の平均海面水温

SST average Sept. 2076

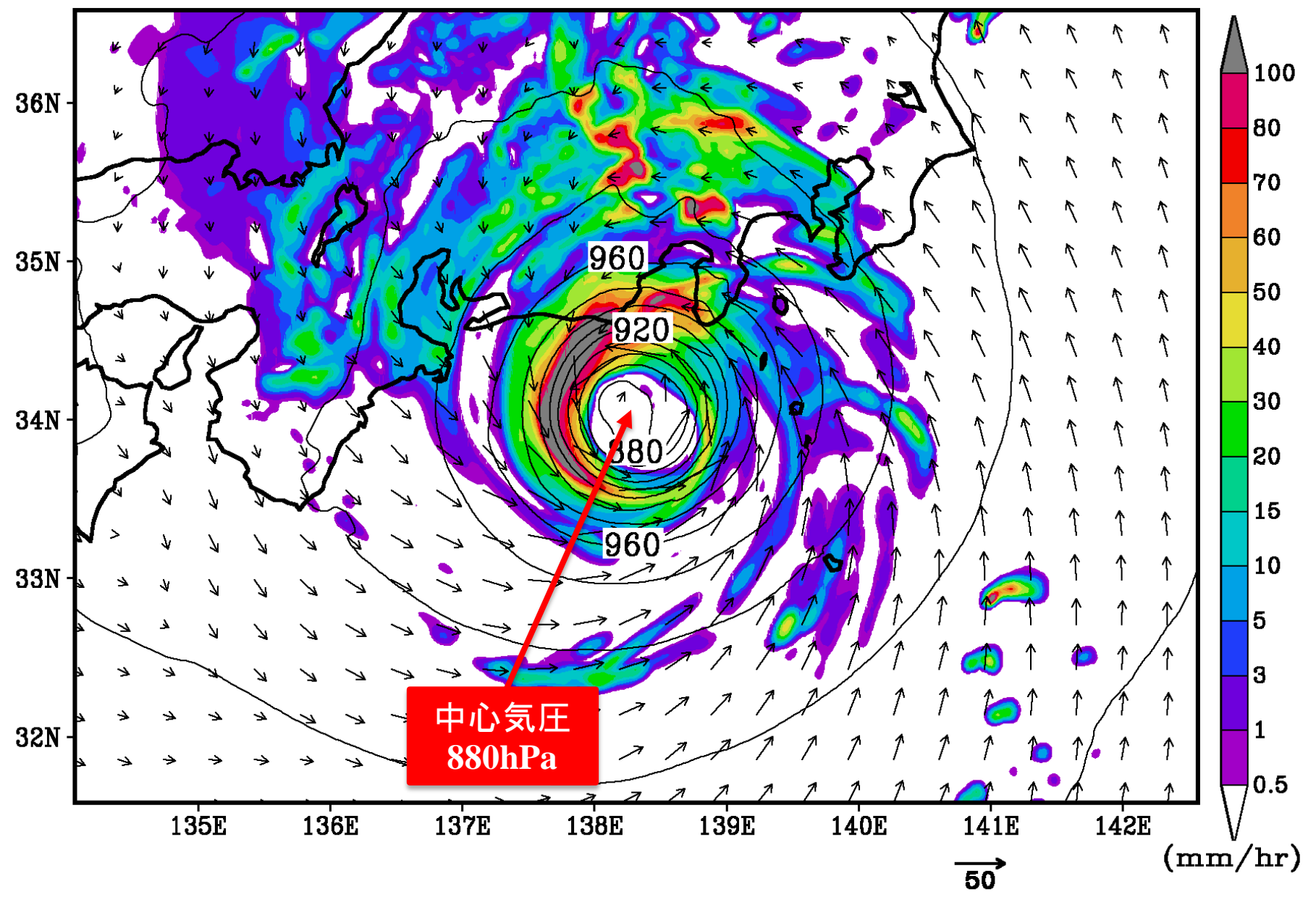
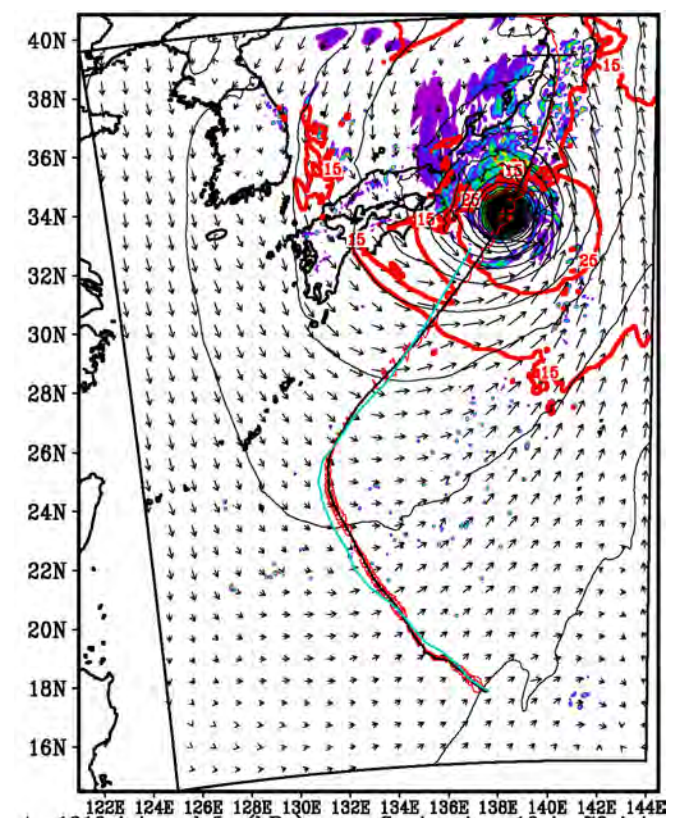


今世紀後半の海面水温(予測値)

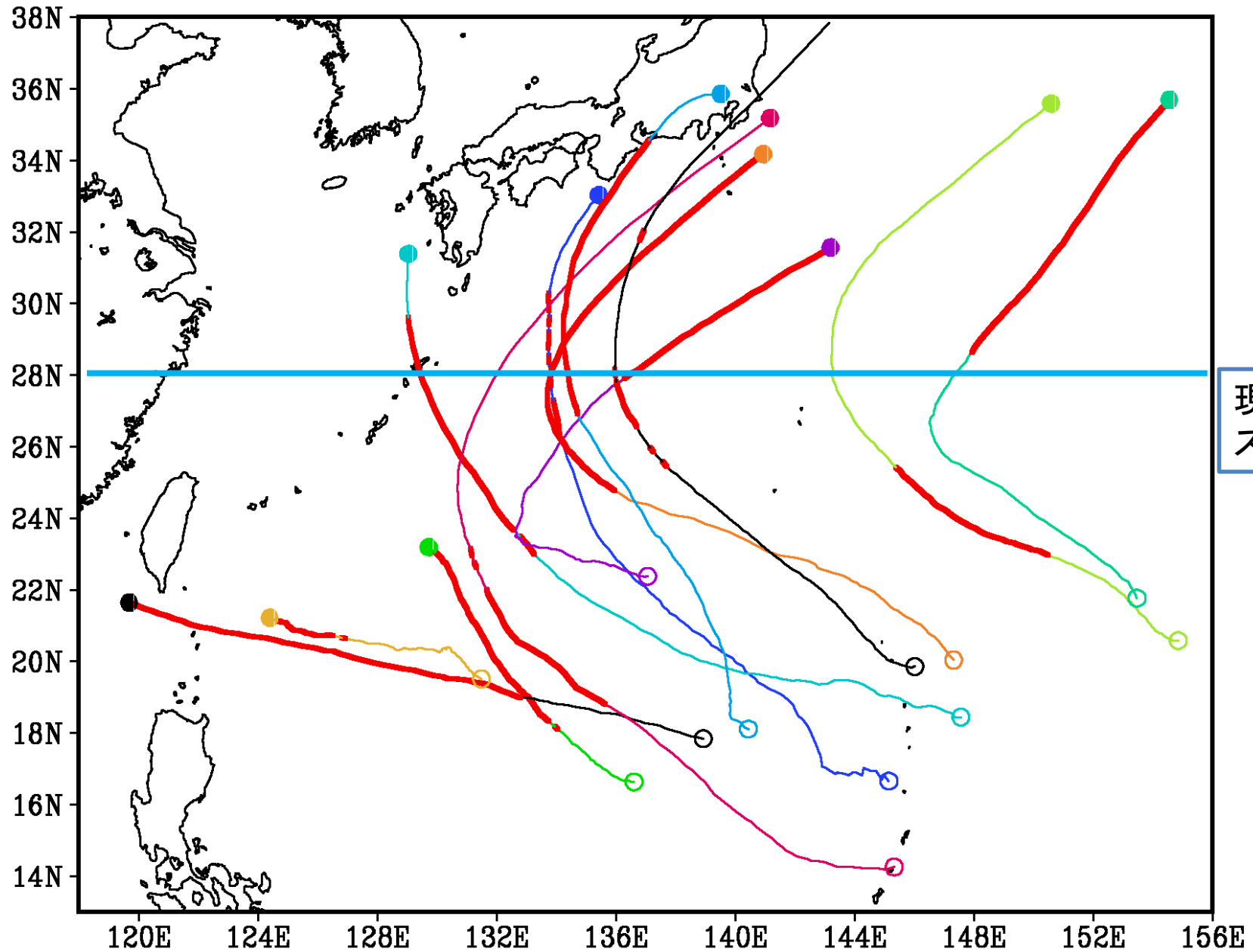
今世紀後半、北太平洋西部の海面水温は、現在より2~2.5度程度上昇すると予測される。

# 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

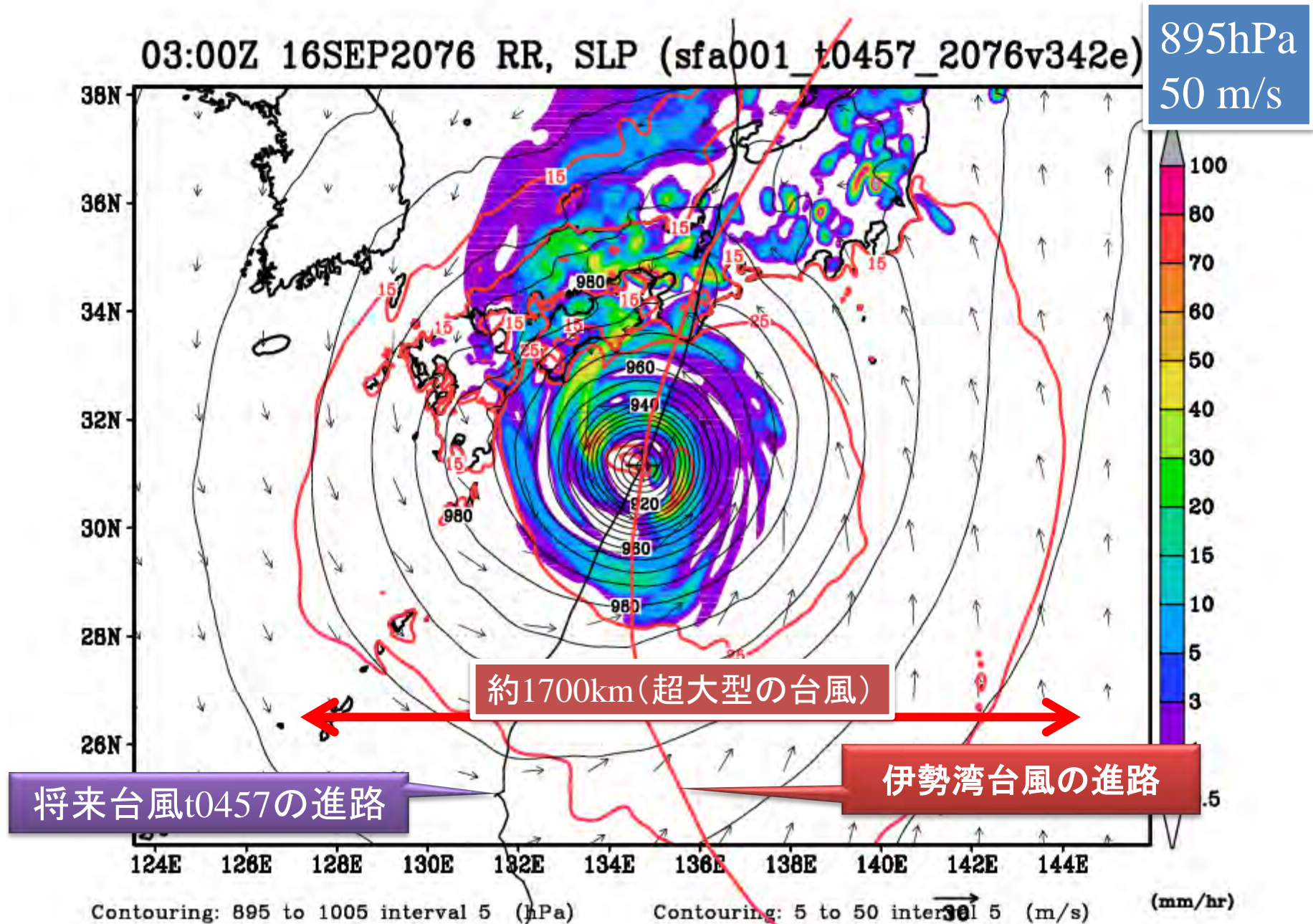


太赤線部: スーパー台風 (風速 67 m/s以上)

現在気候でのスーパー台風の北限

Tsuboki et al. 2015

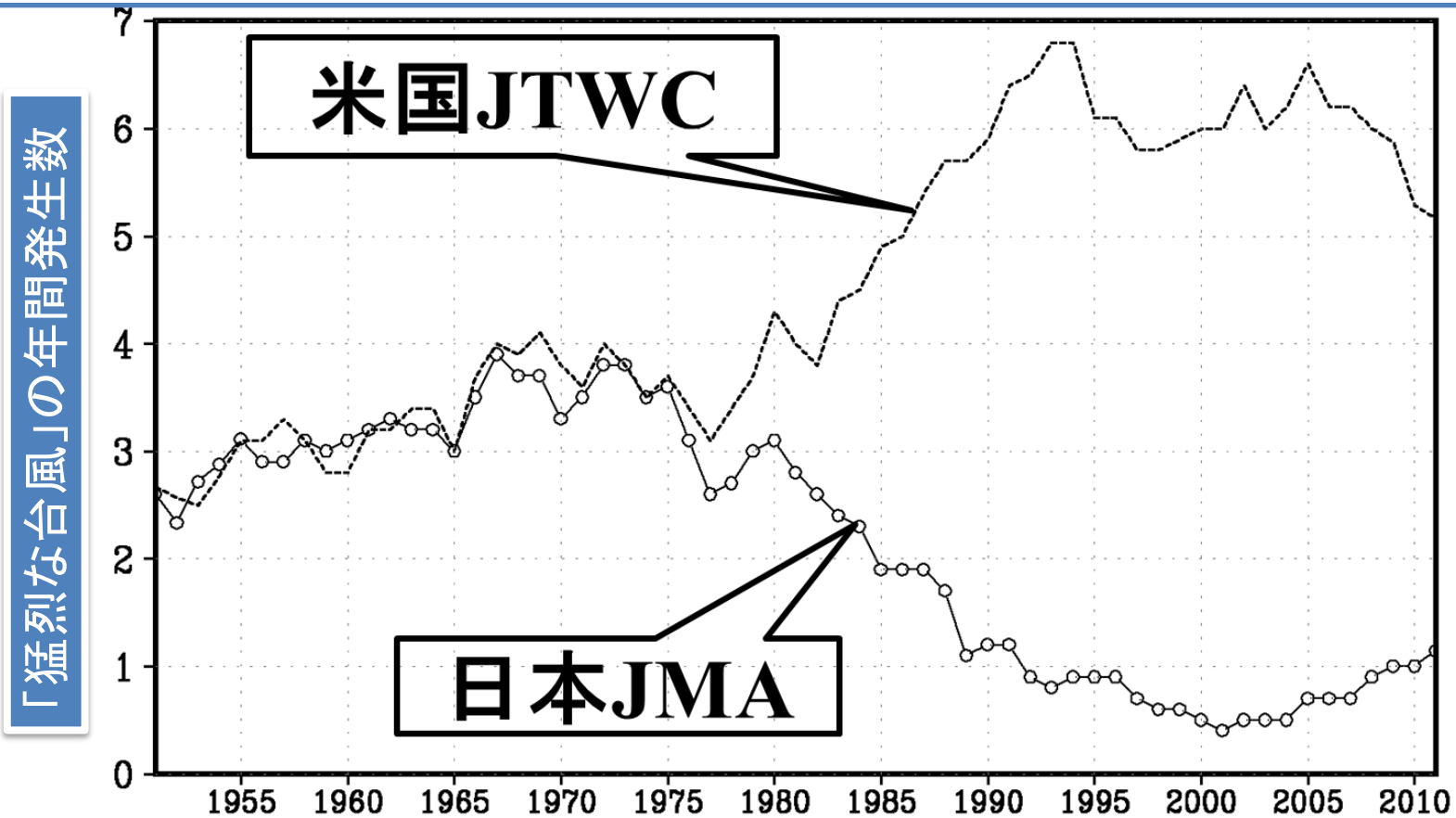
# 温暖化気候で発生した超大型の台風：伊勢湾台風とほぼ同じ上陸地点





# 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

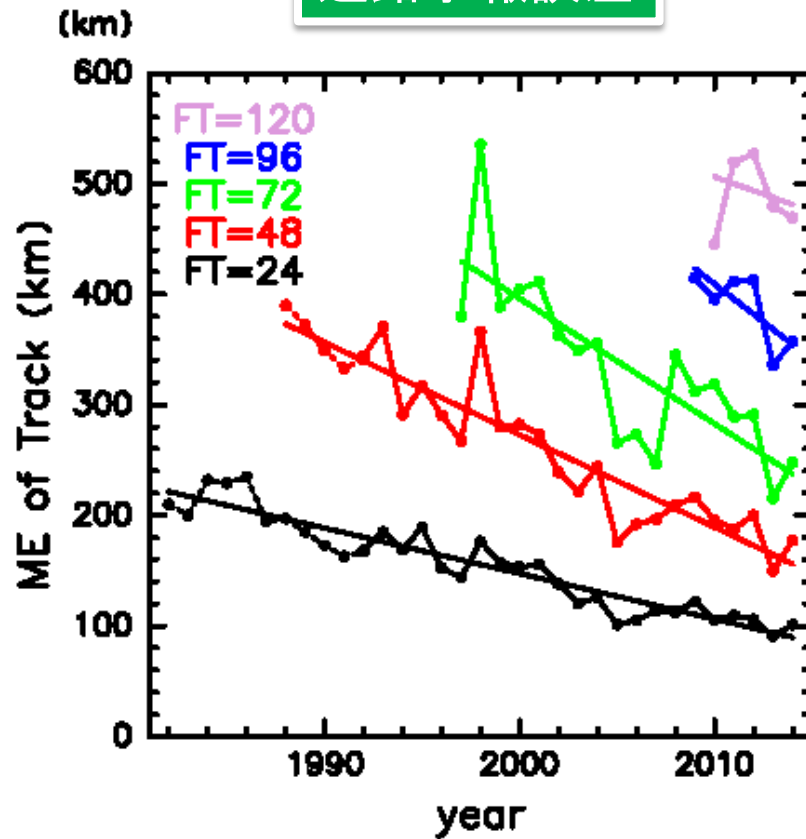
- ◆ とりわけ非常に強い台風の強度データには、1987年の米軍の台風の航空機観測終了後、強度推定値に不確実性が増大しているように見える。
- ◆ 気象庁の「猛烈な台風」(10分平均値で 54 m/s 以上)の年間の発生数は気象庁(JMA)と米国合同台風警報センター(JTWC)では、違いが増大している。



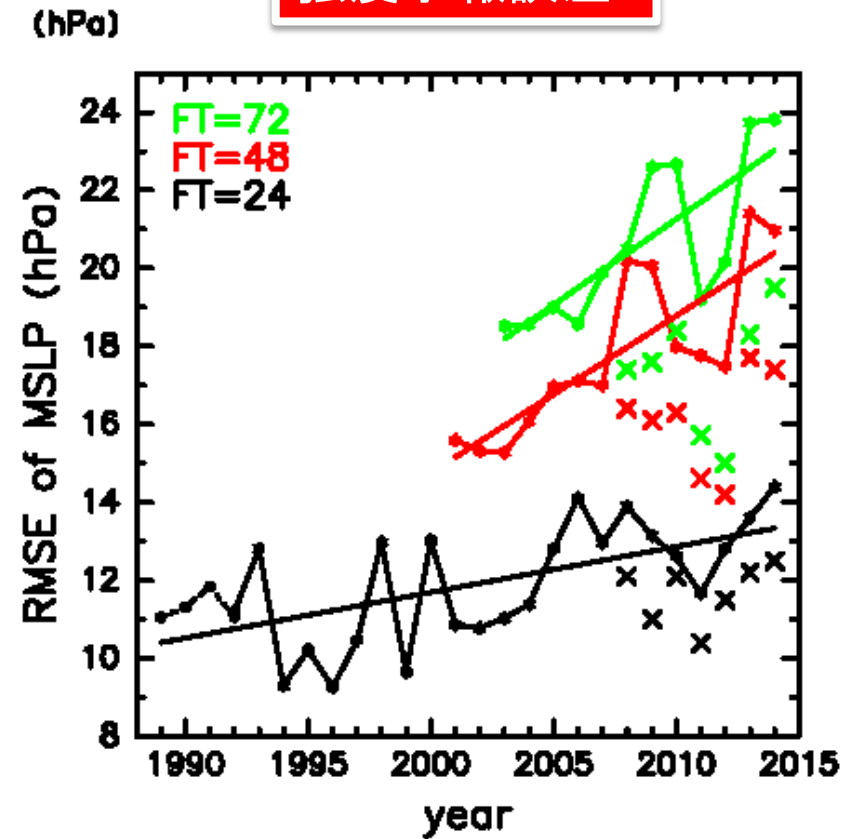
航空機による直接観測がなく、真値が不明なため、どちらがより正確かは不明。

# 問題点その2: 台風の強度予測の改善が不十分

進路予報誤差



強度予報誤差



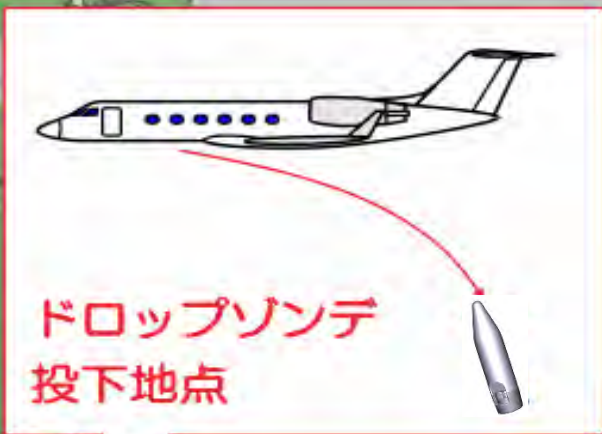
(Ito 2016, SOLA)

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。

# T-PARCII (Tropical cyclone-Pacific Asian Research Campaign for Improvement of Intensity estimations/forecasts)

(科研費基盤研究S:2016~2020, 2021~2025 研究代表者坪木(名古屋大学宇宙地球環境研究所))



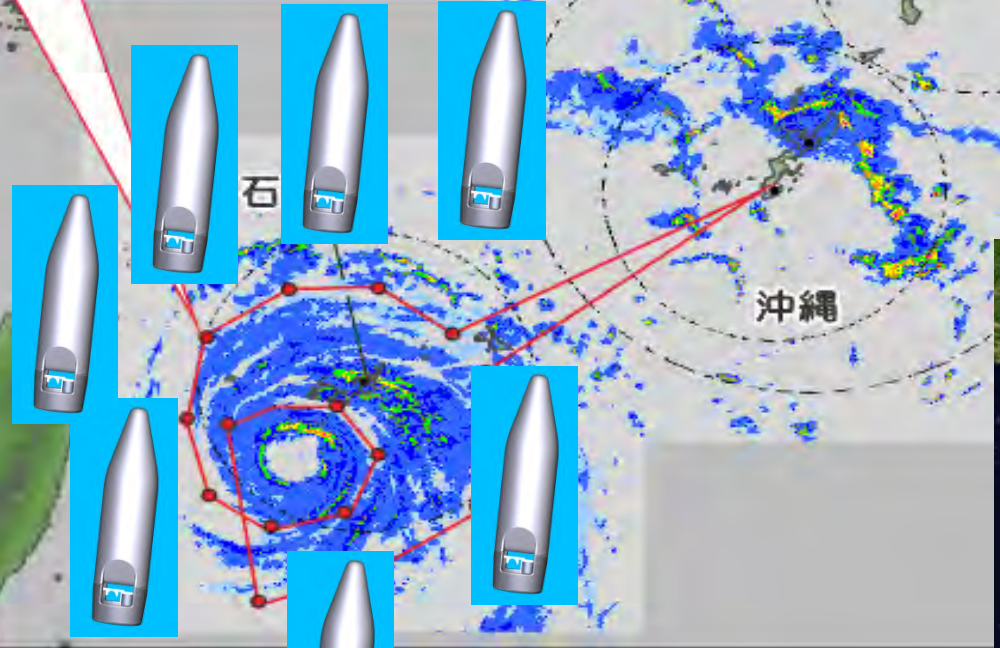
台風周辺への投下型観測器(ドロップゾンデ)の投下観測(上空から海面までの温度、湿度、気圧、風向・風速を観測)

観測用ジェット機  
ガルフストリームIV

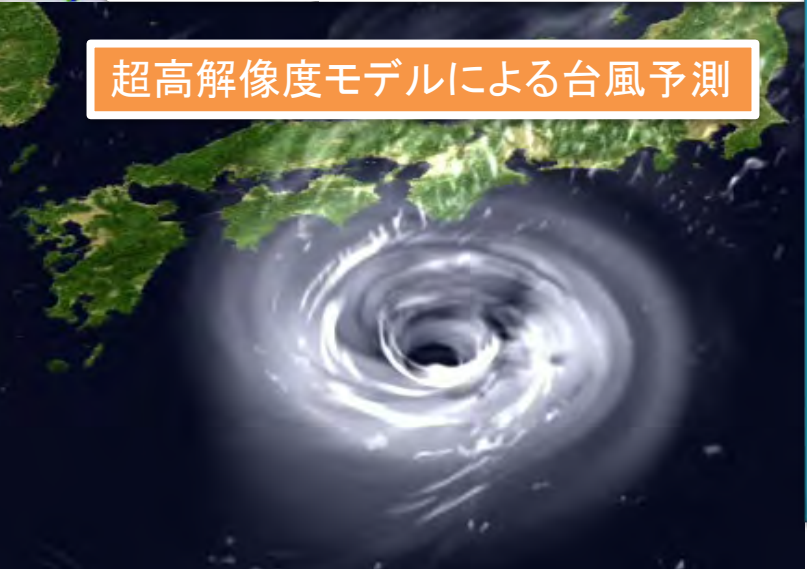


T-PARCIIプロジェクトメンバー:  
名古屋大学  
北海道大学  
東京大学  
気象庁気象研究所  
琉球大学  
防災科学技術研究所

観測用ジェット機ガルフストリームIVに新しく開発したドロップゾンデの投下装置を搭載. 台風の直接観測を行い、強度を実測するとともに、台風予測の高精度化により防災への貢献を図る。

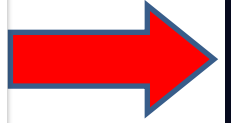


超高解像度モデルによる台風予測



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



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）



2022年9月17日宮古島市下地島空港にて（坪木撮影）



Dropsonde shooter exit

# ジェット機ガルフストリームIVに設置したドロップゾンデ投下装置(左)と受信機(右)



投下装置(下部ハンドルを回転してドロップゾンデを射出する)



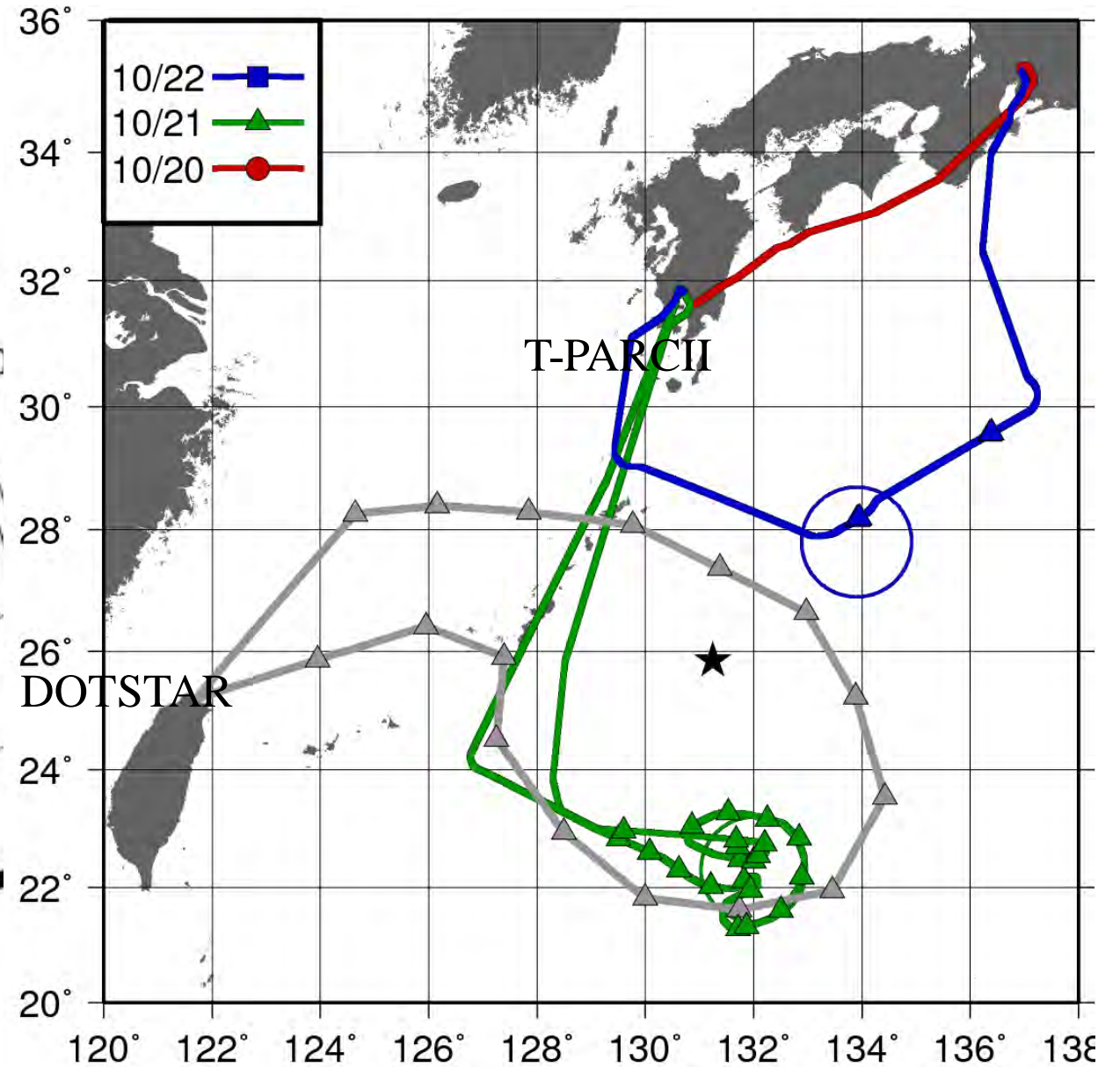
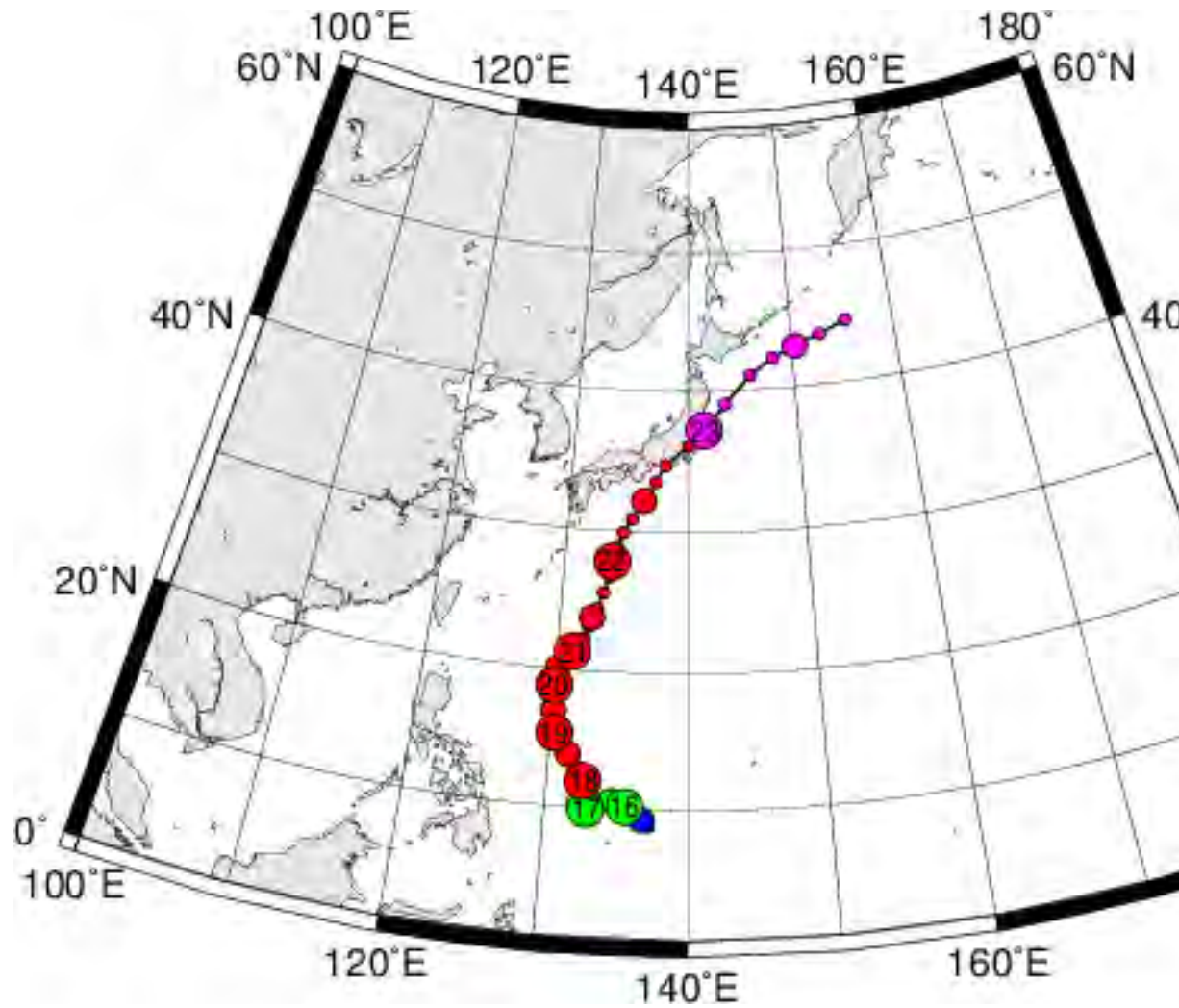
名古屋大学松尾総長(現機構長)の裁量経費で設置したドロップゾンデ投下装置

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



Typhoon Lan (2017)

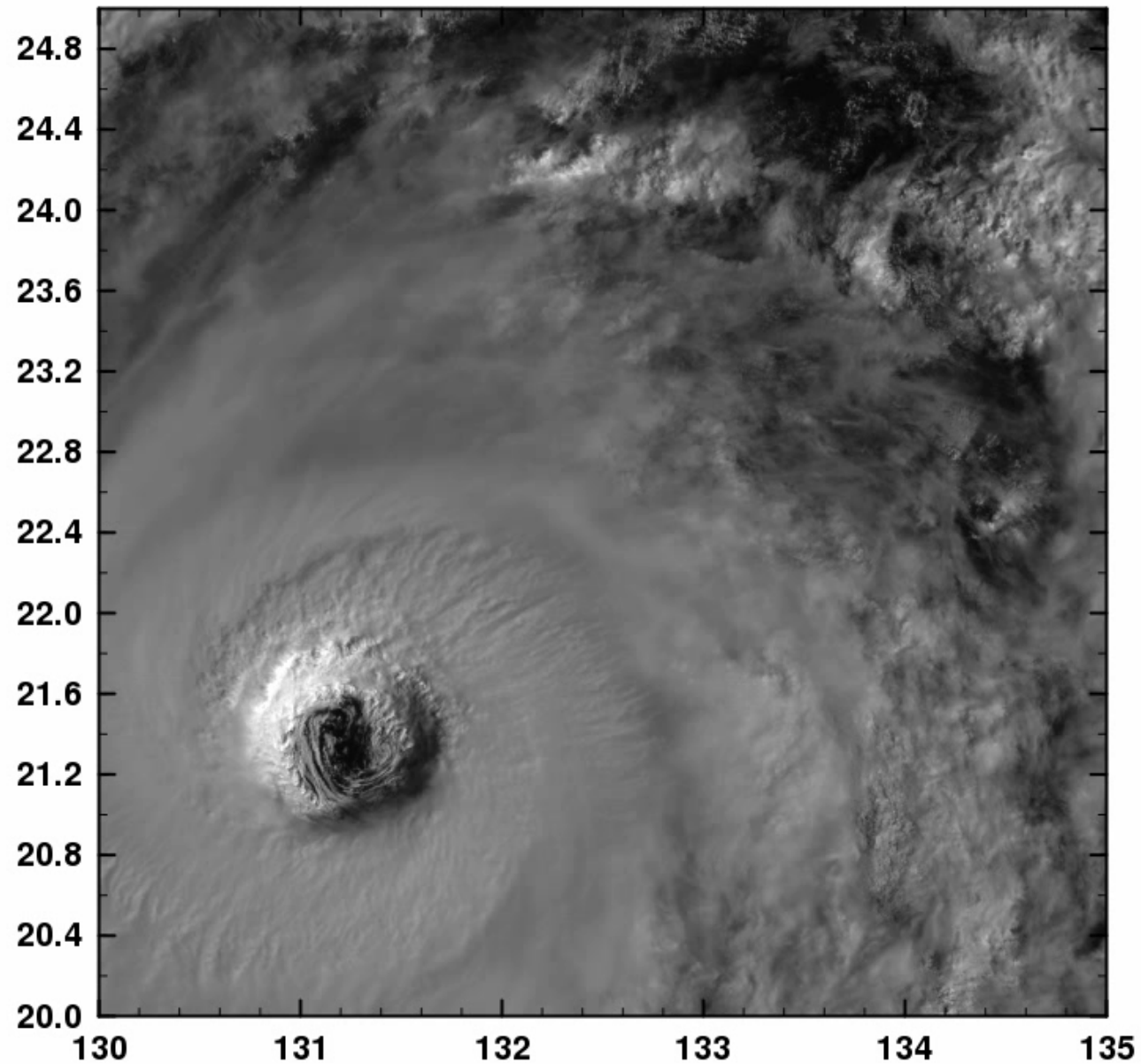
October 2017





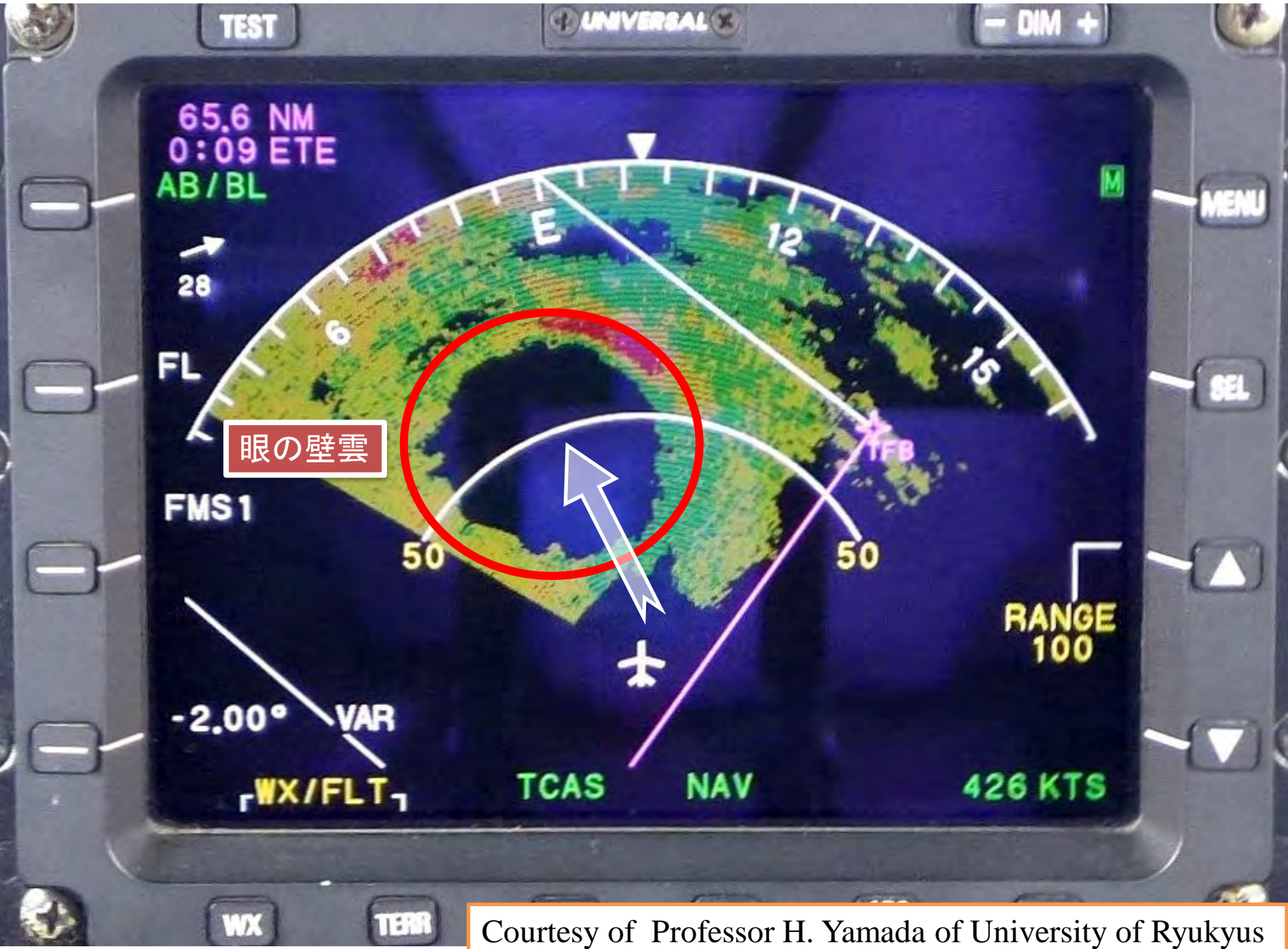
# スーパー台風ラン(2017)の気象衛星画像

himawari8-vis (00:02:20 21Oct2017)



# 航空機観測：ジェット機のキャビンの中での作業の様子

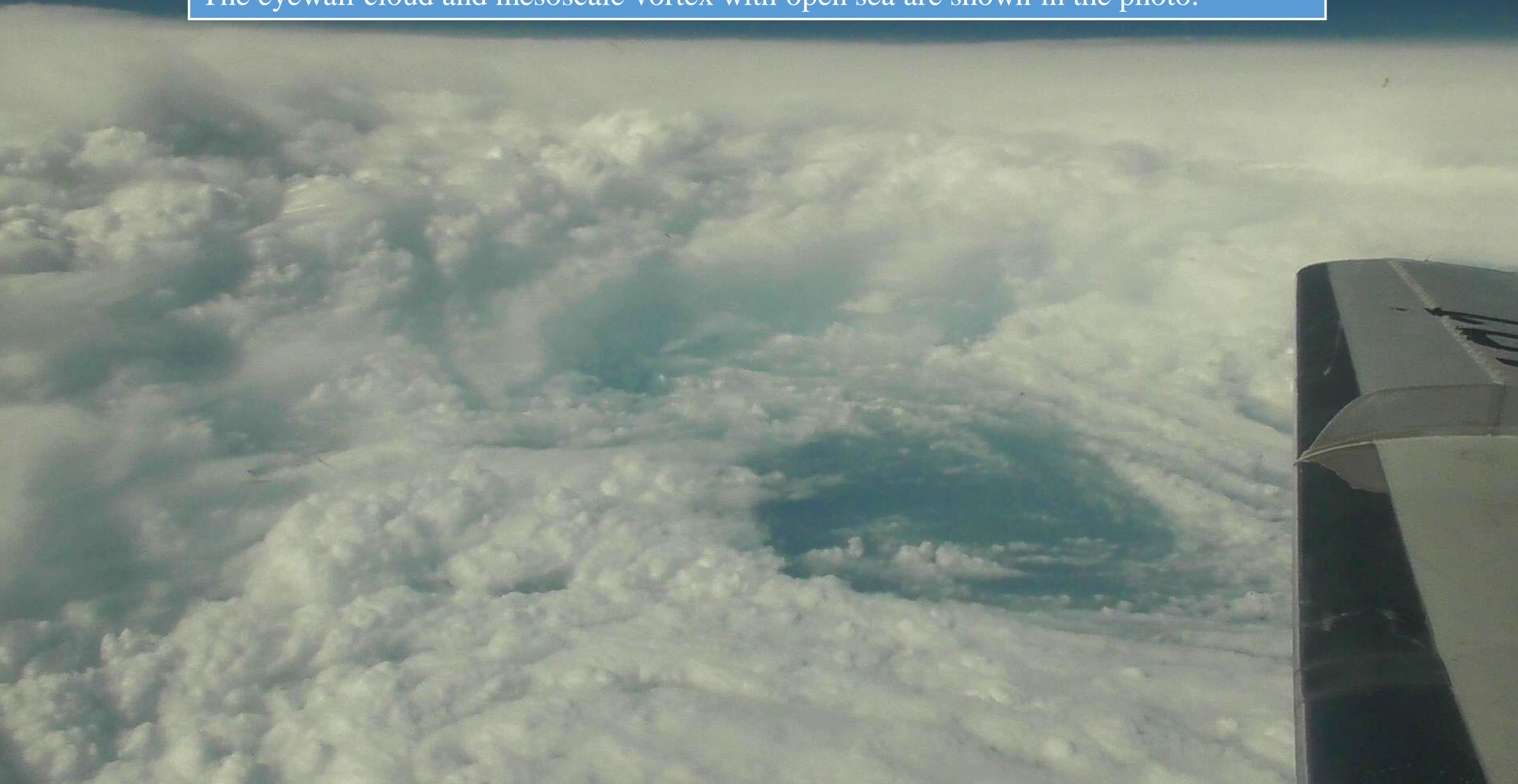




眼の壁雲

Courtesy of Professor H. Yamada of University of Ryukyus

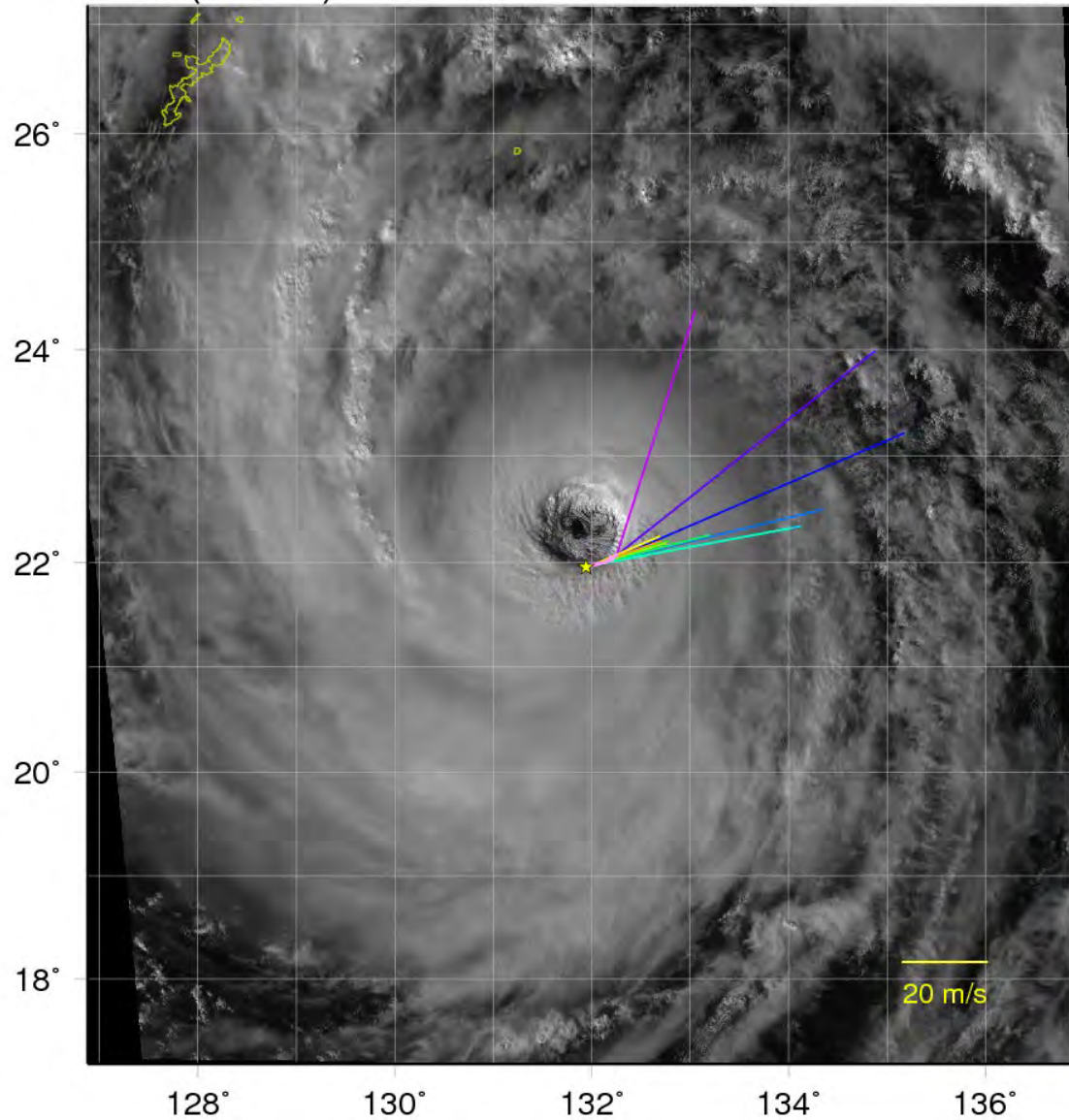
The eye of typhoon Lan (2017) observed by the T-PARCII project on October 21, 2017  
The eyewall cloud and mesoscale vortex with open sea are shown in the photo.



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

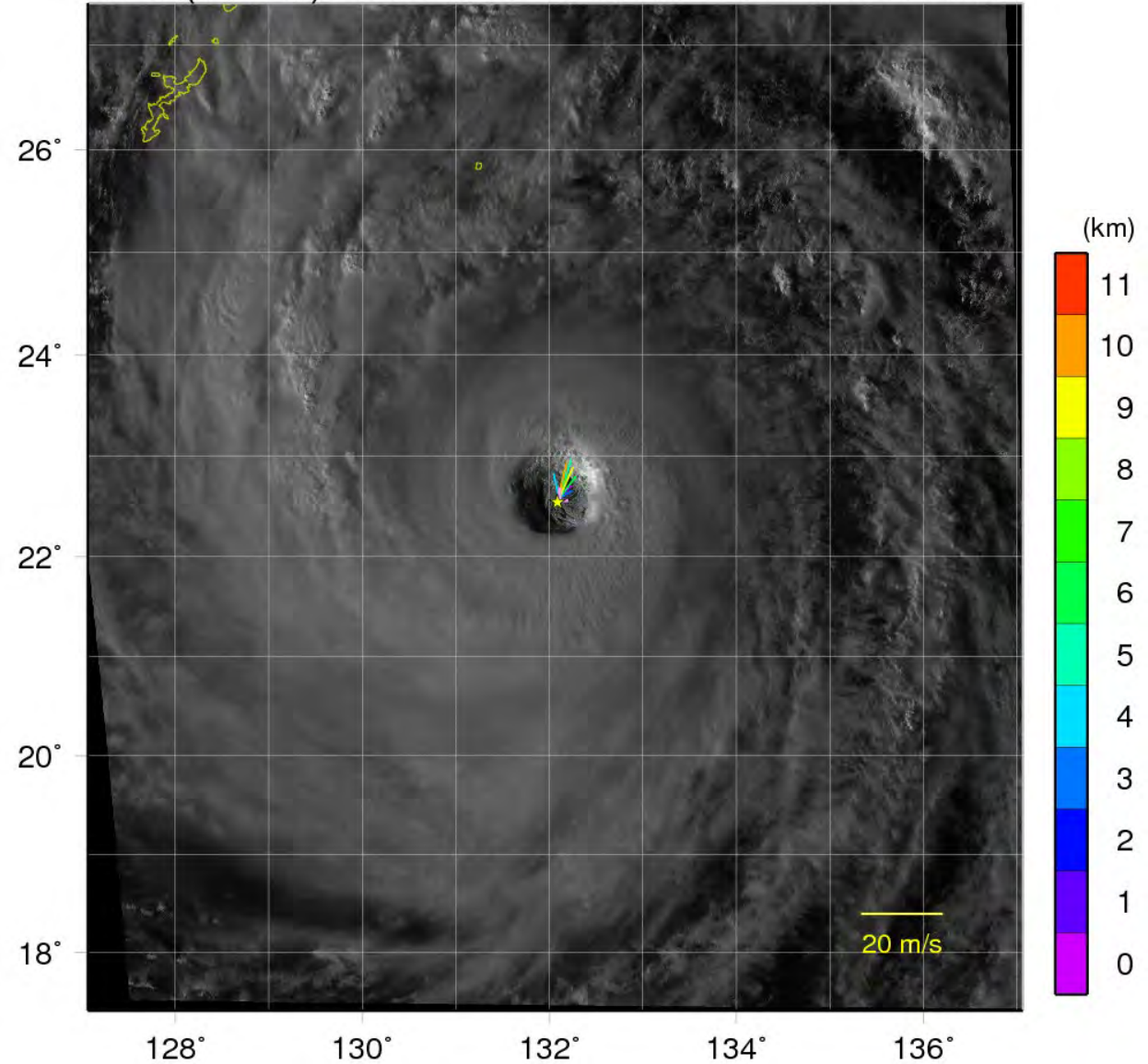
OBSERVATION: 5:35:31 – 5:49:18

LAN(T1721) 915 hPa 05:35:00 UTC 21 OCT 2017

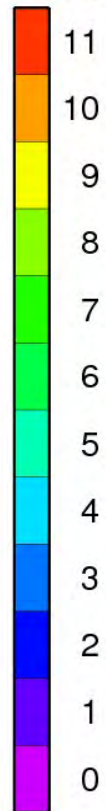


OBSERVATION: 6:39:42 – 6:52:40

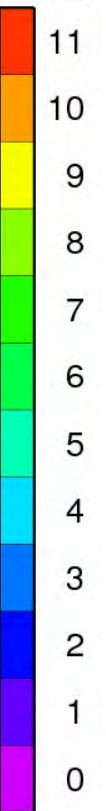
LAN(T1721) 915 hPa 06:40:00 UTC 21 OCT 2017



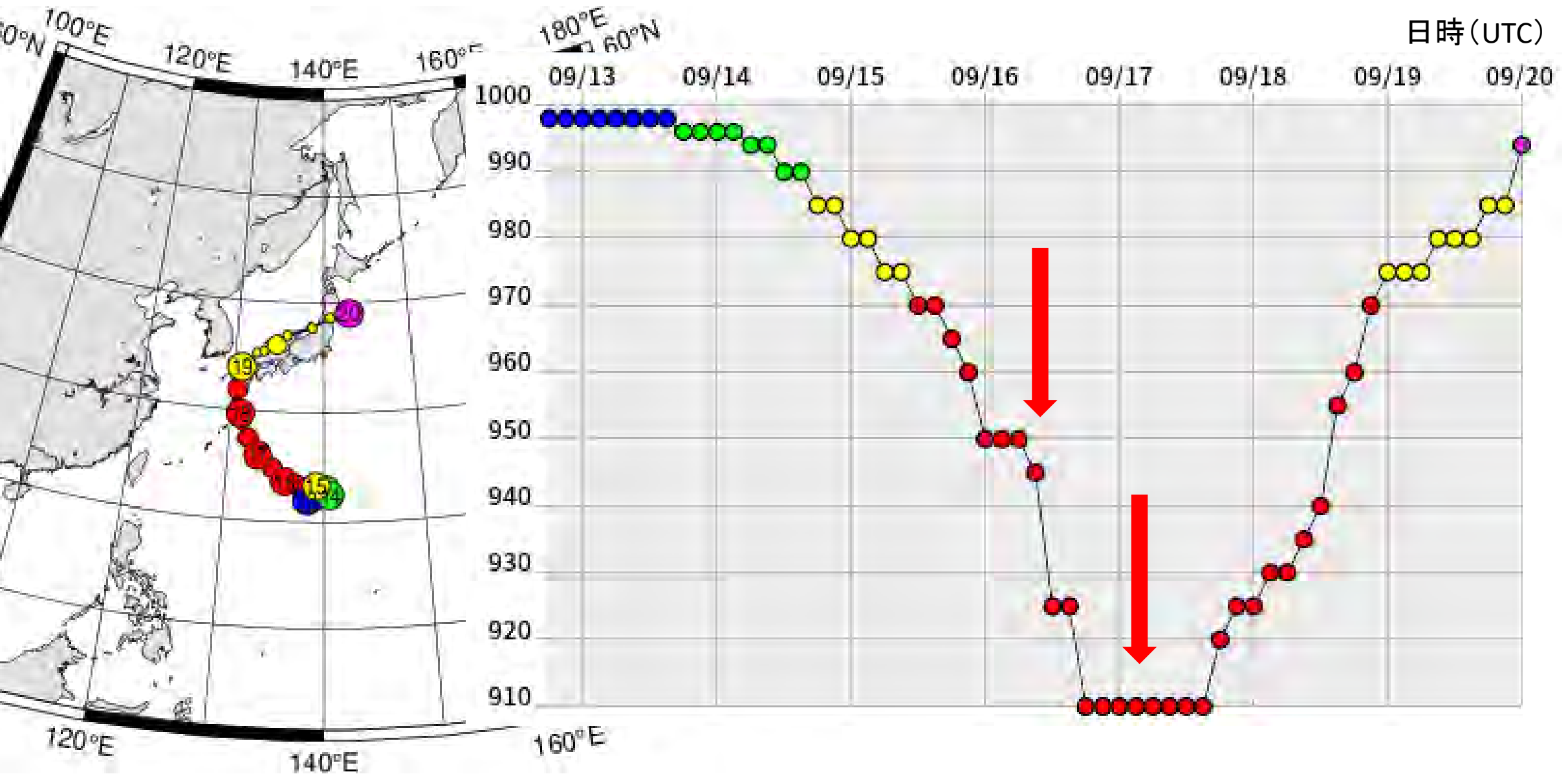
(km)



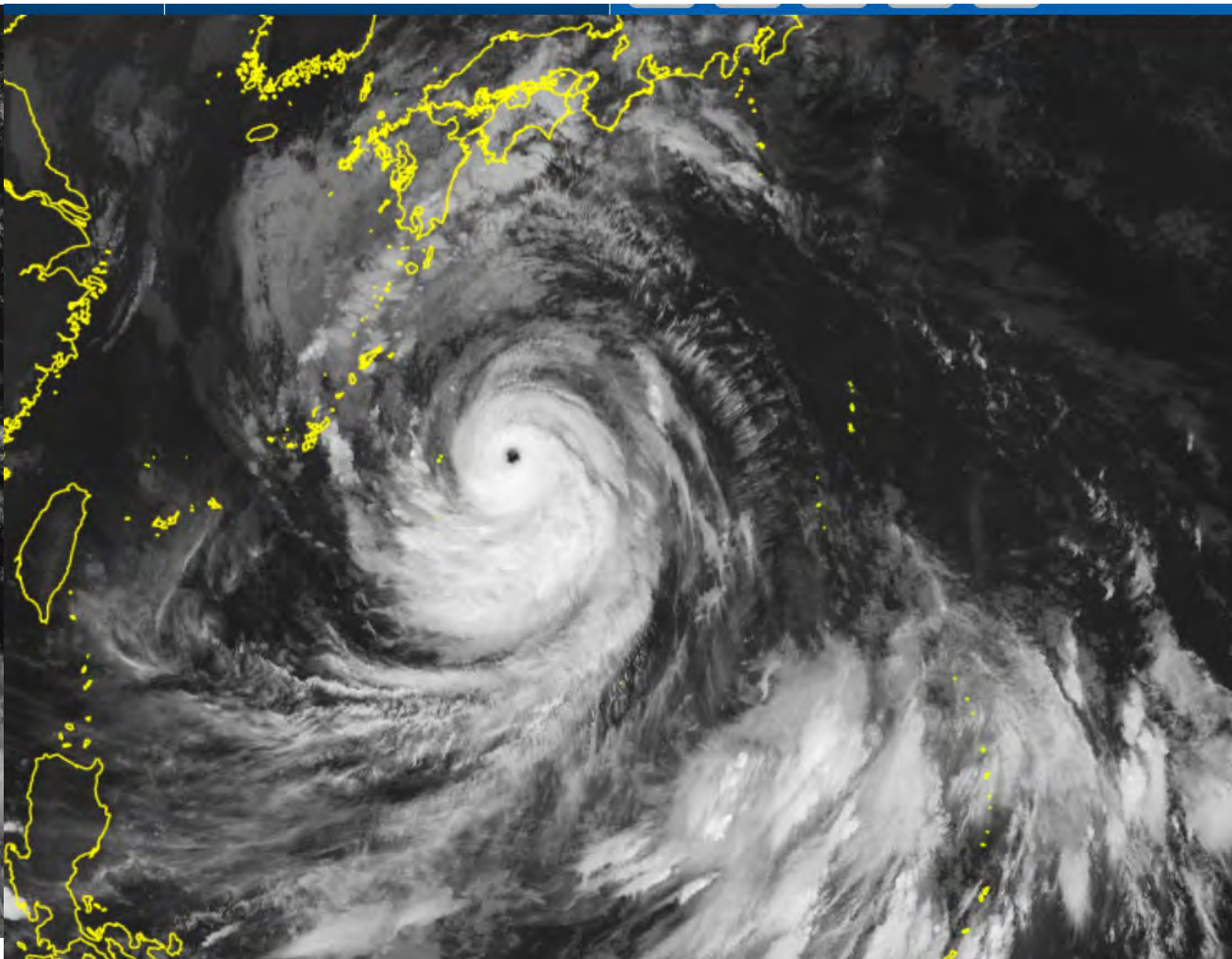
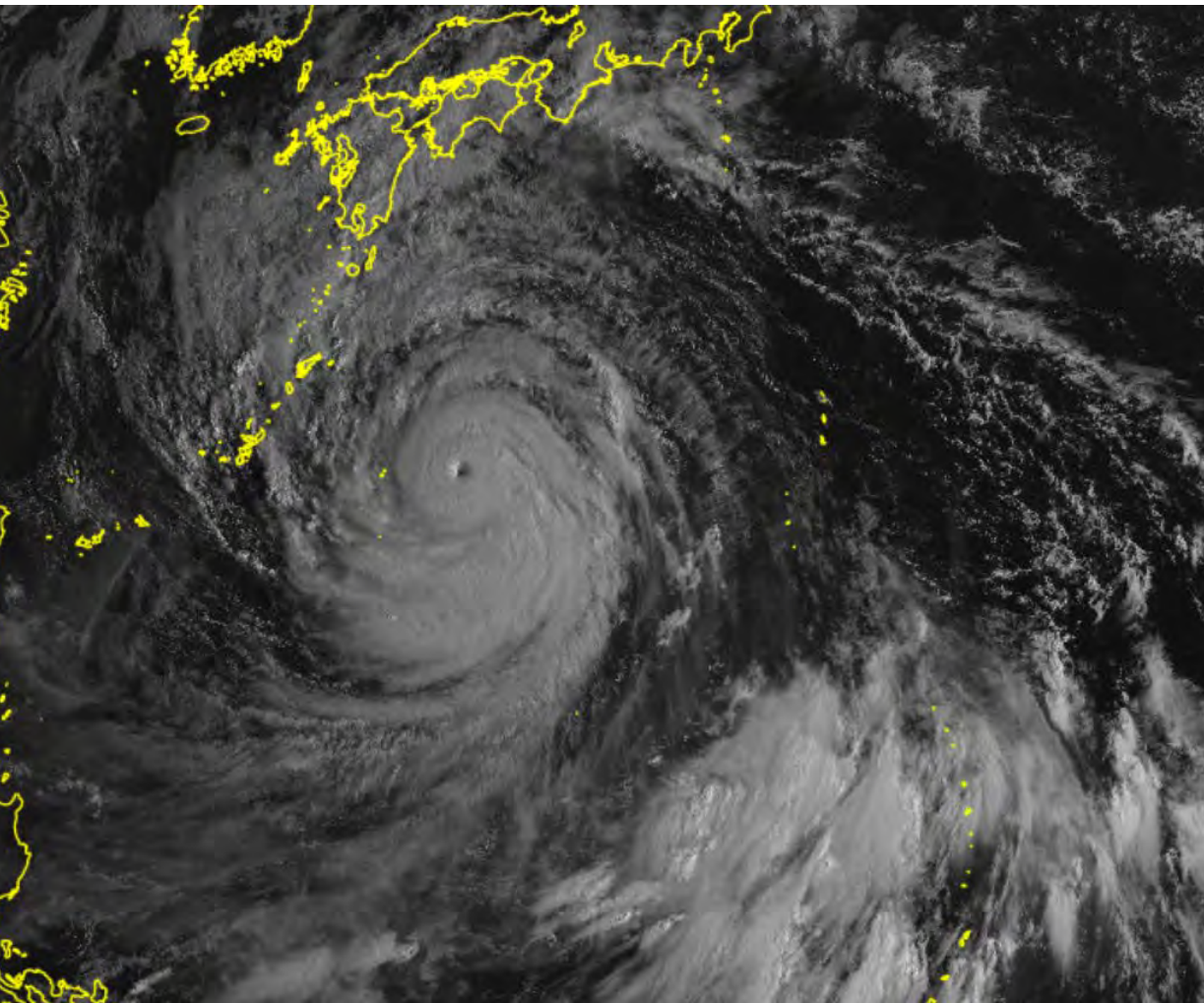
(km)

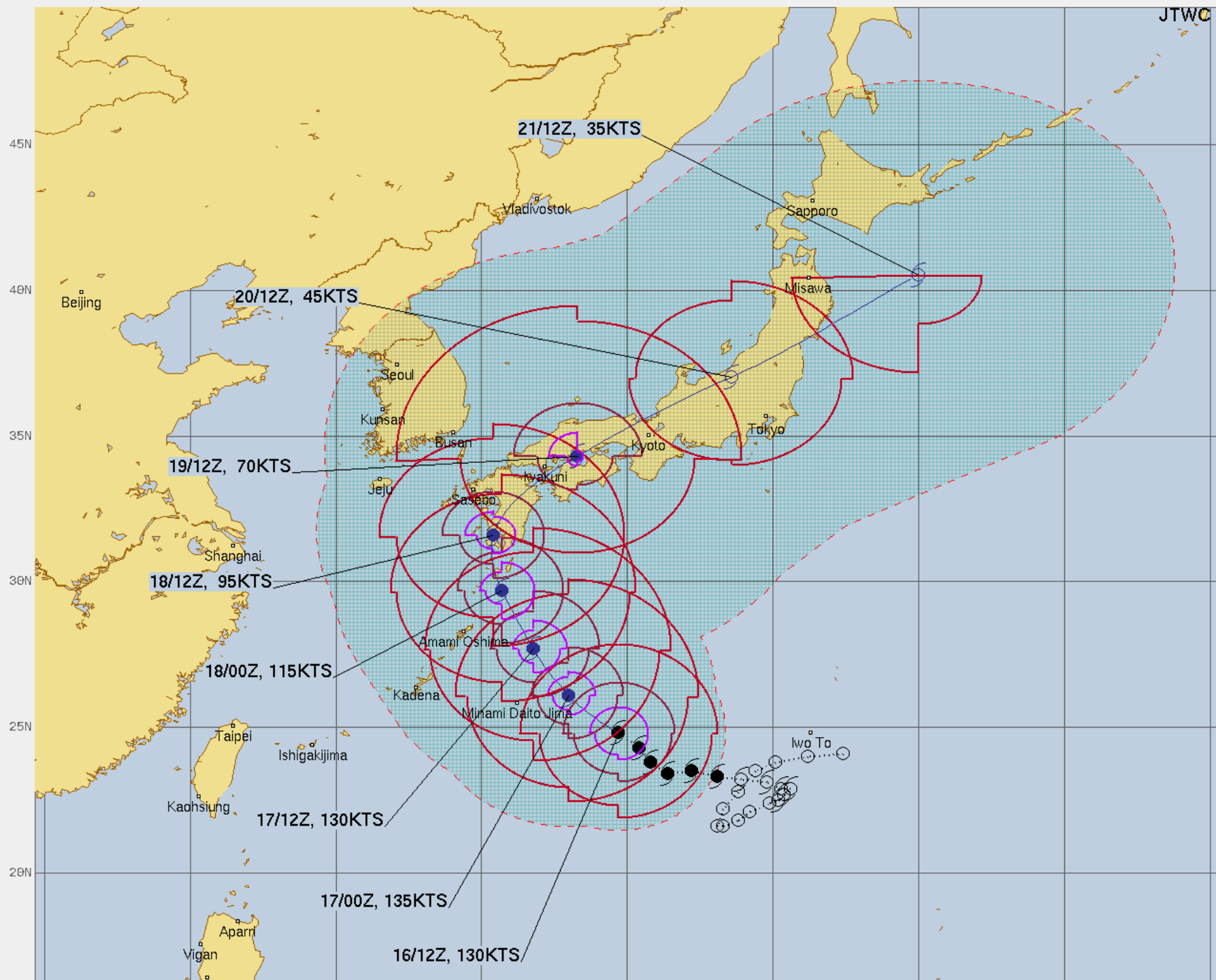


# 2022年9月台風14号 (Nanmadol) の航空機観測 (9月16日~17日)



台風14号 (Nanmadol) 9月17日08JSTの衛星画像：可視(左)、赤外(右)






**SUPER TYPHOON 16W (NANMADOL) WARNING #16**  
 WTPN33 PGTW 161500  
 161200Z POSIT: NEAR 24.8N 134.7E  
 MOVING 310 DEGREES TRUE AT 08 KNOTS  
 MAXIMUM SIGNIFICANT WAVE HEIGHT: 52 FEET  
 16/12Z, WINDS 130 KTS, GUSTS TO 160 KTS  
 17/00Z, WINDS 135 KTS, GUSTS TO 165 KTS  
 17/12Z, WINDS 130 KTS, GUSTS TO 160 KTS  
 18/00Z, WINDS 115 KTS, GUSTS TO 140 KTS  
 18/12Z, WINDS 095 KTS, GUSTS TO 115 KTS  
 19/12Z, WINDS 070 KTS, GUSTS TO 085 KTS  
 20/12Z, WINDS 045 KTS, GUSTS TO 055 KTS  
 21/12Z, WINDS 035 KTS, GUSTS TO 045 KTS

CPA TO:	NM	DTG
OKIDAITO_JIMA	137	09/17/00Z
MINAMIDAITO_JIMA	87	09/17/04Z
KADENA_AB	225	09/17/15Z
KANOYA	27	09/18/11Z
MOKPO	262	09/18/19Z
GWANGJU_AB	255	09/18/20Z
SASEBO	72	09/18/20Z
CAMP_KENGUN	9	09/18/21Z
GWANGYANG	212	09/18/21Z
YEOSU	208	09/18/21Z
KUNSAN_AB	291	09/18/22Z
CHINHAIE	186	09/19/00Z
GIMHAE_AB	179	09/19/01Z
PUSAN	168	09/19/01Z
CAMP_HUMPHREYS	320	09/19/02Z
CHEONGJU_AB	290	09/19/02Z
INCHON	355	09/19/02Z
OSAN_AB	324	09/19/02Z
SUWON_AB	329	09/19/02Z
TAEGU	216	09/19/02Z
SEOUL_AB	334	09/19/03Z
YONGSAN_AIN	341	09/19/03Z
CAMP_CASEY	356	09/19/04Z
CAMP_RED_CLOUD	354	09/19/04Z
POHANG	197	09/19/04Z
IWAKUNI	23	09/19/07Z
R2S2	26	09/19/23Z
CAMP_FUJI	94	09/20/09Z
ATSUGI	97	09/20/11Z
CAMP_ZAMA	97	09/20/11Z
YOKOSUKA	115	09/20/11Z
YOKOTA_AB	84	09/20/11Z
NARITA_AIRPORT	108	09/20/14Z
SHARIKI	152	09/21/02Z
MISAWA	107	09/21/04Z

BEARING AND DISTANCE	DIR	DIST (NM)	TAU (HRS)
IWO_TO	271	359	0
KADENA_AB	103	385	0
OKIDAITO_JIMA	084	192	0
MINAMIDAITO_JIMA	107	199	0

- LESS THAN 34 KNOTS
- 34-63 KNOTS
- MORE THAN 63 KNOTS
- FORECAST CYCLONE TRACK
- PAST CYCLONE TRACK
- DENOTES 34 KNOT WIND DANGER
- AREA/USN SHIP AVOIDANCE AREA





2022年9月17日に眼に入ったジェット機から撮影した台風14号の眼の壁雲。10時9分撮影。



## まとめ

- ◆ 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-PARCI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)、2022年のスーパー台風Nanmadol(14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。

ジェット機のキャビンから撮影した台風Mindulle(2021)の眼内部  
2021年9月29日、高度45000フィート(坪木撮影)

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 水蒸気をもたらす大気的不安定

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

