

# 気候変動に伴う台風・水災 リスクの現状と将来変化

このセミナーで最もお伝えしたいこと:

- 地球温暖化に伴い、日本における台風のリスク(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、台風リスクはさらに増大していくことが予想される。

坪木和久(名古屋大学 宇宙地球環境研究所)

## 寺田寅彦「天災と国防」(昭和9年(1934年))

「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) 気象学的地球物理学的にもまたきわめて特殊な環境の支配を受けているために、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」

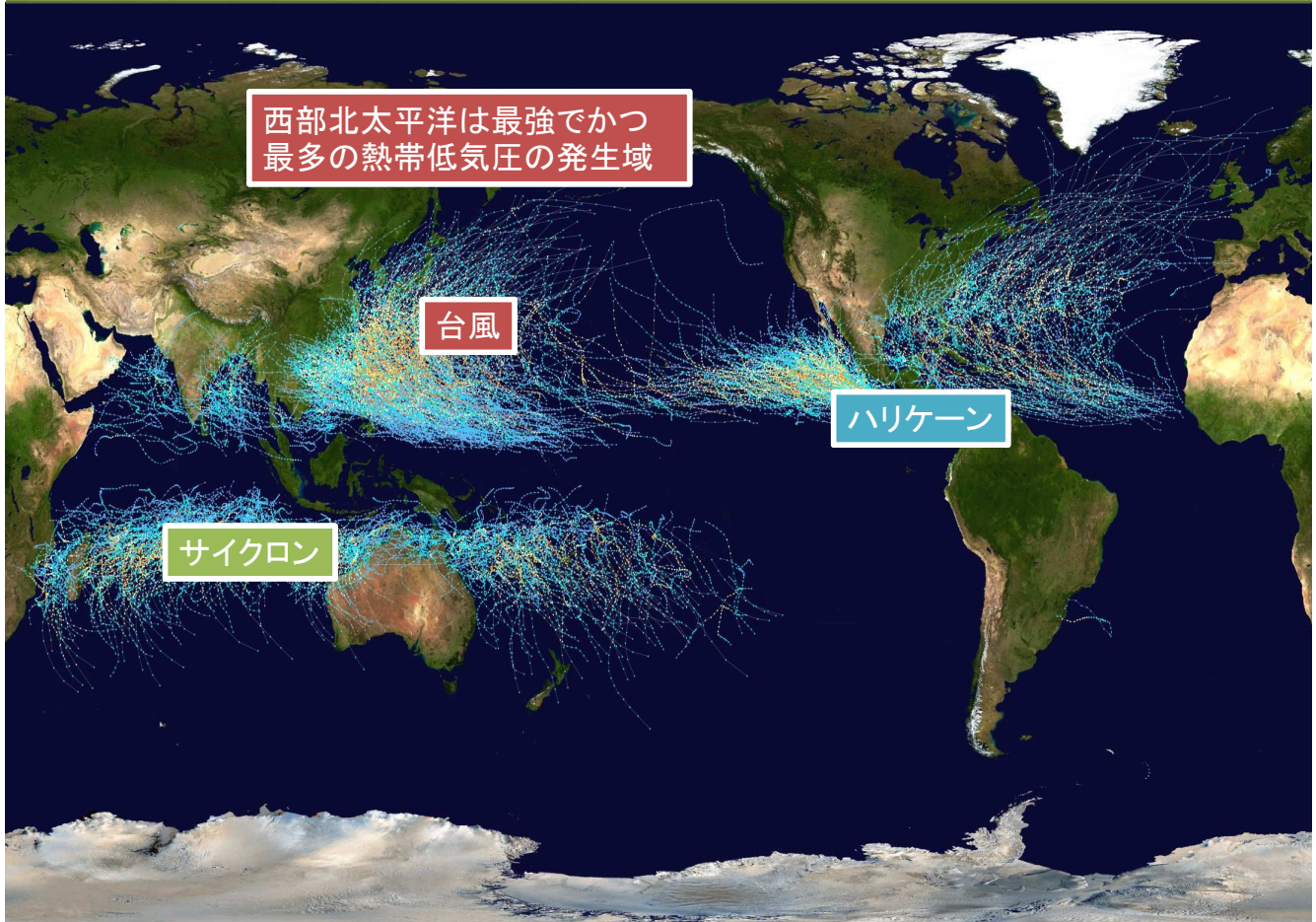
「いつも忘れられがちな重大な要項がある。それは、文明が進めば進むほど天然の暴威による災害がその劇烈の度を増す」

「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ない。

寺田寅彦先生



## 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)



## 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(2016年4月現在)

順位	災害名	地域	年月	(億円)
1	台風19号	全国	1991年9月	5,680
2	台風18号	全国	2004年9月	3,874
3	2月雪害	関東中心	2014年2月	3,224
4	台風18号	熊本・山口他	1999年9月	3,147
5	台風7号	近畿	1998年9月	1,599
6	台風15号	九州他	2015年8月	1,410
7	台風23号	西日本	2004年10月	1,380
8	台風13号	九州北部他	2006年9月	1,320
9	台風16号	全国	2004年8月	1,210
10	台風15号	静岡・神奈川	2011年9月	1,123

一般社団法人日本損害保険協会調べ

<http://www.sonpo.or.jp/archive/statistics/disaster/>

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。

2015年9月10日鬼怒川の氾濫

日本の風水災害の現状



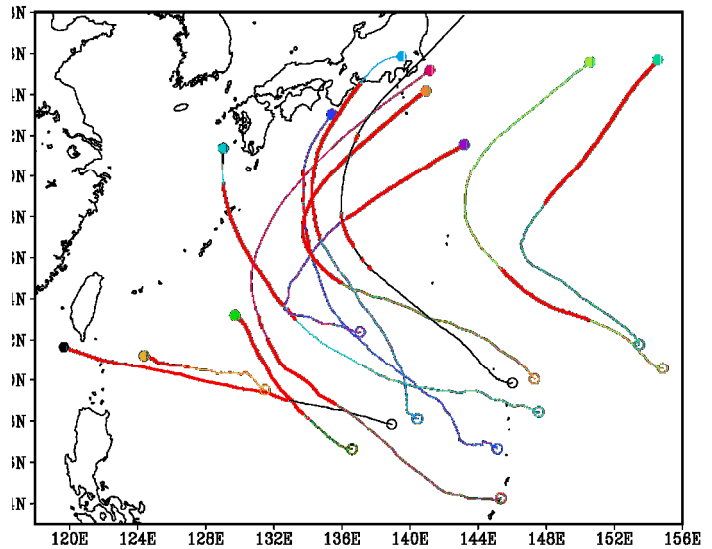
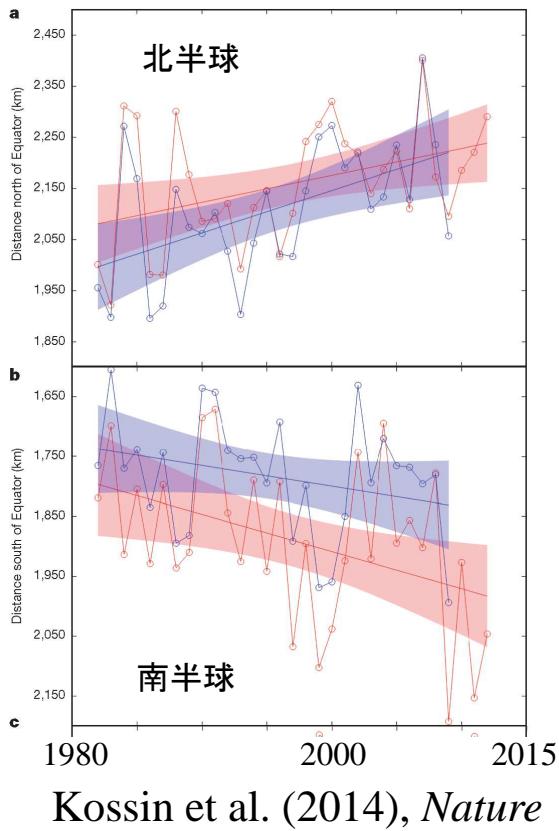
日本の風水災害の将来



2013年11月スーパー台風ハイエンの被害

熱帯低気圧の最大強度の極向き移動

温暖化気候で発生したスーパー台風のトラック

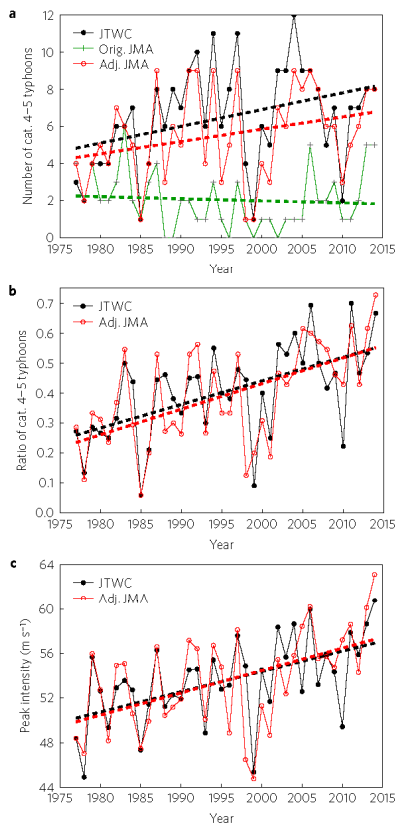


太赤線部: 風速 67 m/s以上

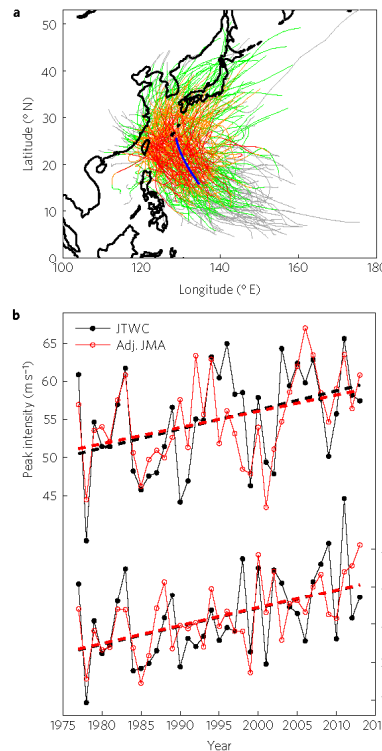
Tsuboki et al. (2015), *Geophysical Research Letters*

LETTERS

NATURE GEOSCIENCE DOI: 10.1038/NNGEO2792



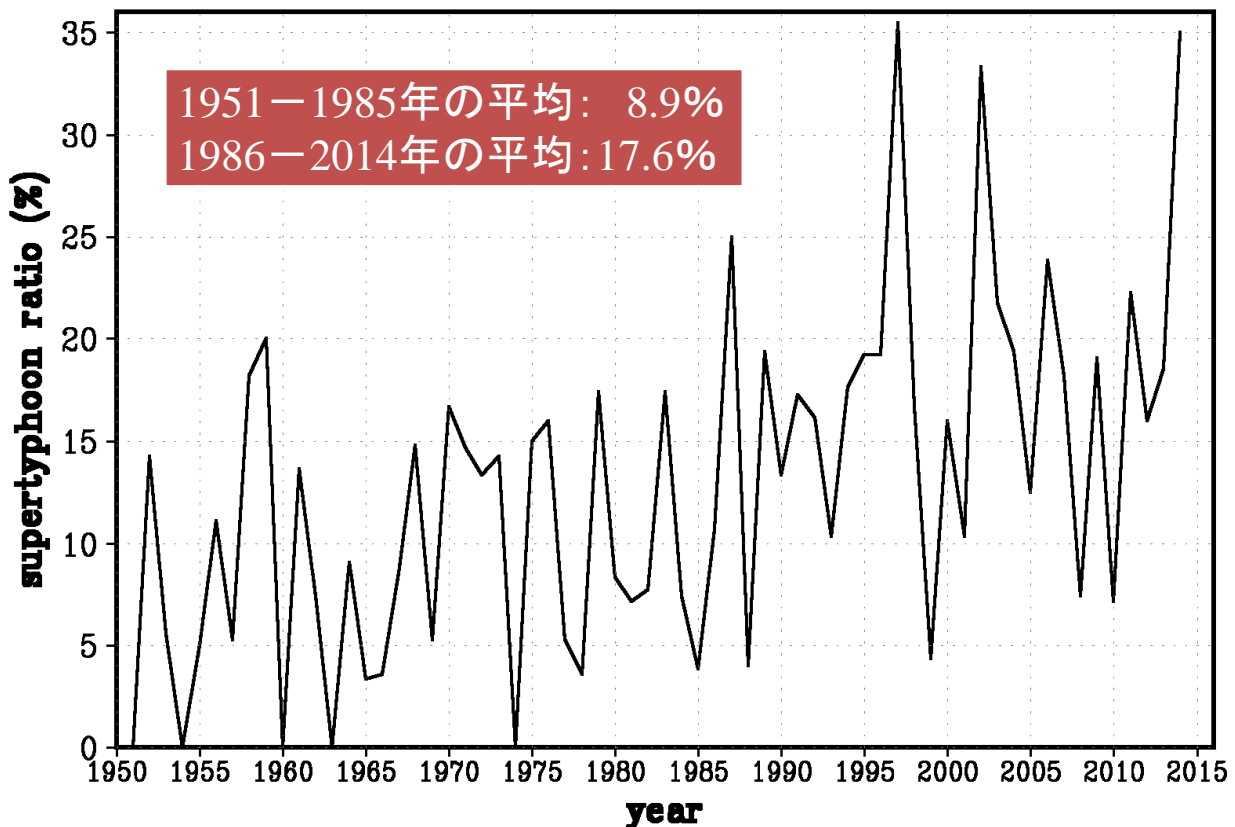
**Figure 1 | Temporal evolution of various typhoon intensity metrics.** **a-c**, Annual number of category (cat.) 4-5 typhoons (**a**), ratio of the annual number of category 4-5 typhoons to that of all typhoons (**b**), and annual mean typhoon lifetime peak intensity (**c**) in the northwest Pacific as a function of time from the JTWC data (black curve) and adjusted (adj.) JMA



Mei and Xie 2016

**Figure 2 | Tracks and intensity evolution of typhoons in Cluster 1.** **a**, Tracks of typhoons from the JTWC data (the JMA data show similar results). The colours show the intensity of tropical depression (grey), tropical storm (green), categories 1 and 2 (orange), and categories 3 to 5 (red). **b**, Annual mean typhoon lifetime peak intensity and annual mean typhoon intensification rate as a function of time from the JTWC (black curve) and adjusted JMA (red curve) data. Thick dashed lines show linear trends during 1977-2013.

## 台風数に対するスーパー台風の割合の年々変動 (JTWCのベストトラック)



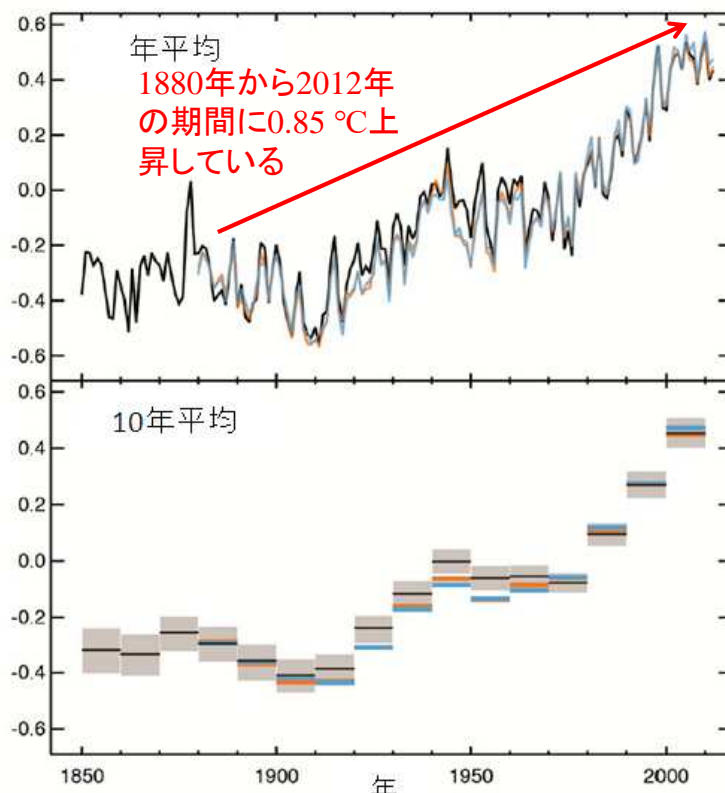
### IPCC 第5次評価報告書 (2013) 第1 作業部会報告書 自然科学的根拠の要旨

- ◆ **気候システムの温暖化には疑う余地がなく**、1950年代以降、観測された変化の多くは数十年～数千年間で前例のないものである。
- ◆ 陸域と海上を合わせた世界平均地上気温は、(中略) 1880～2012年の期間に0.85 [0.65～1.06]°C上昇している。
- ◆ 大気中の二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、メタン(CH<sub>4</sub>)、一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)濃度は、**少なくとも最近80万年間で前例のない水準にまで増加している**。海洋は排出された人為起源の二酸化炭素の約30%を吸収し、海洋酸性化を引き起こしている。
- ◆ **気候システムに対する人間の影響は明白**である。
- ◆ 1951～2010年の世界平均地上気温の観測された上昇の半分以上は、温室効果ガス濃度の人為的増加とその他の人為起源強制力の組合せによって引き起こされた可能性が極めて高い。
- ◆ **温室効果ガスの継続的な排出は、更なる温暖化と気候システム全ての要素の変化をもたらすだろう**。気候変動を抑制するには、温室効果ガス排出量の大幅かつ持続的な削減が必要であろう。
- ◆ **強い熱帯低気圧の活動度の増加**: 21世紀末で「いくつかの海域でどちらかといえば可能性が高い」。

## 地球温暖化のもたらすもの

- ◆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所的に高くなる。）
- ◆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

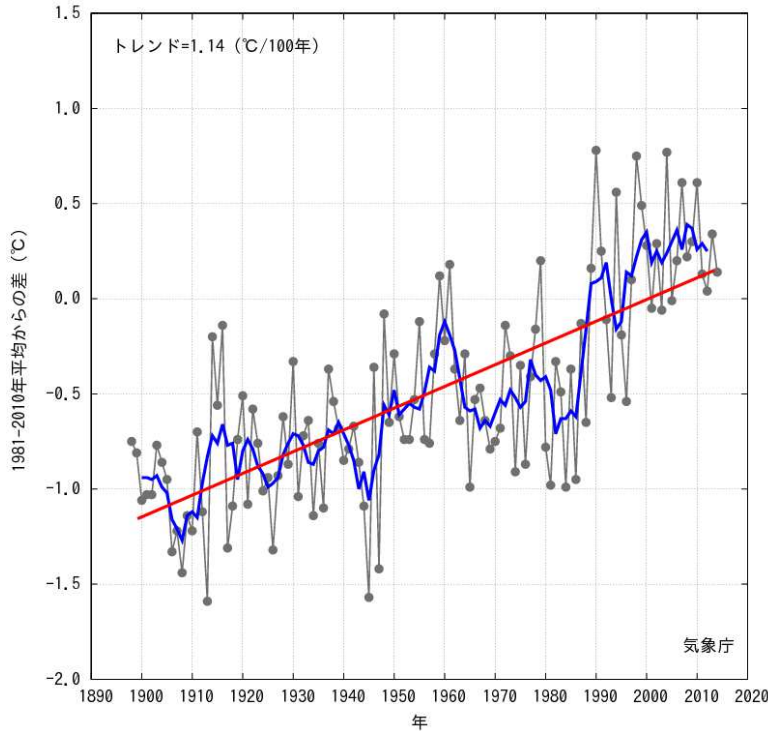
観測された世界平均地上気温(陸域+海上)の偏差(1850~2012年)



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))

# 日本における年平均気温の1981～2010年平均からの差

日本の年平均気温偏差



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、直線(赤):長期的な変化傾向。基準値は1981～2010年の30年平均値。日本の年平均気温は、長期的には100年あたり約1.14°Cの割合で上昇しており、特に1990年代以降、高温となる年が頻出。

出典: 気象庁HP 日本の年平均気温の偏差の経年変化(1898～2014年)  
[http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an\\_jpn.html](http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_jpn.html)

## 2013年の猛暑と豪雨について

### 猛暑 豪雨 やはり「異常気象」

専門家らでつくる気象の異常気象分析検討会の太平洋側の一部や九州(会長、木本昌秀東大)南部などは記録的な少雨(気海洋研究所教授)は二となった。

日、広い範囲で猛暑となり、地域によって局地的な豪雨や極端な少雨になつた。記者会見した木本教授は「社会的な影響も大きかった今年の夏(六・八)であったと言わざるを得月)について「異常気象ない」と説明した。

だつた」と位置付けた。検討会の分析によると、気象庁によると、全国と、インドネシア周辺な九百二十七の観測点のうちで海面水温が平年よりち百一十五地点で最高気温高くなり大量の雲が発生温を更新、十八地点で夕した影響で、日本上空にイ記録となつた。最低気ある下層の太平洋高気圧温も七十四地点で高い記と上層のチベット高気圧

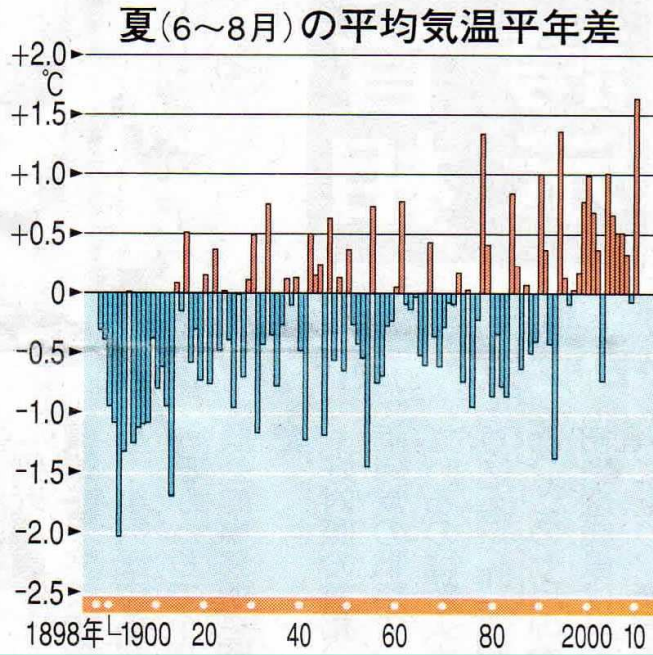
#### 気象庁検討会が分析

録を更新。高知県四万十市では八月十二日、国内観測史上最高気温を六六ぶりに更新する四一・〇度に達した。

日本の平均気温は平年より一・〇六度高く、一八九八年以降で四位の暑さだった。都市化の影響が降った。

が少ないとみられる十七地点の観測値を使つている。秋田、岩手、島根、山口の一部地域では、過去に経験がないような豪雨が降り、日本海側を中心に局地的な大雨が目立話した。

# 113年で一番暑い夏

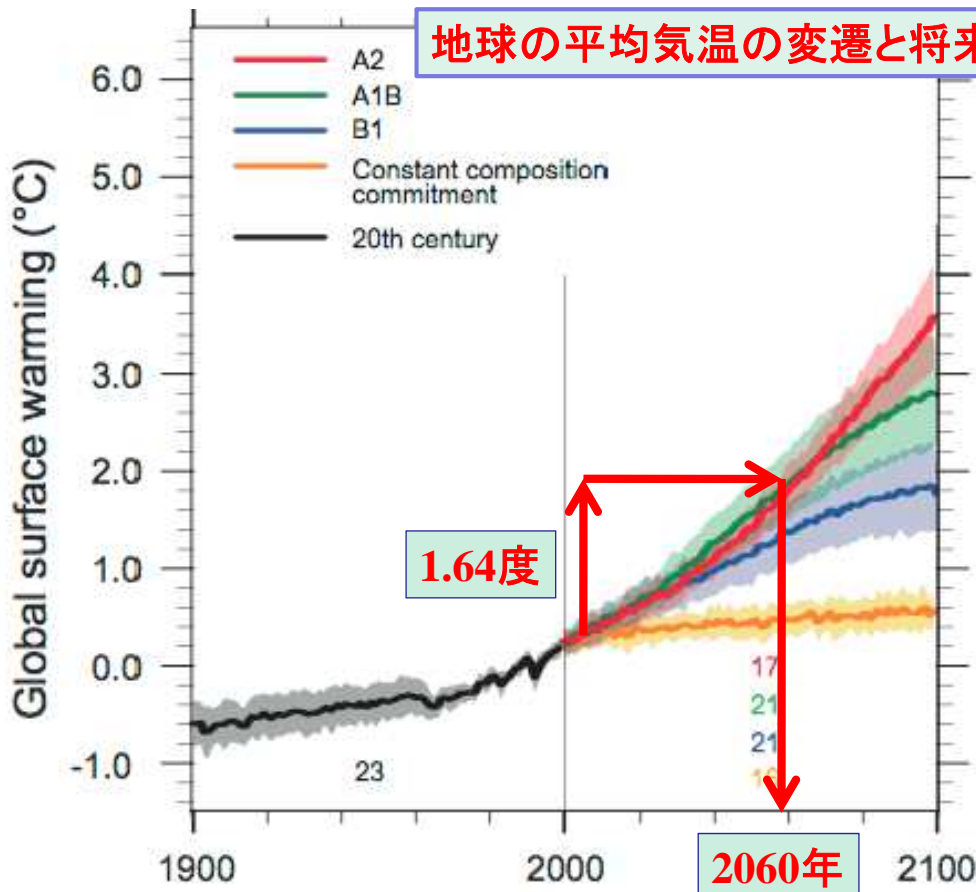


今夏(六~八月)の  
 日本(六~八月)の  
 平均気温は平年  
 を一・六四度上回  
 平年を一・三六  
 一・六四度上回  
 一九九四年を  
 統計を開始し  
 一八九八(明  
 治三十  
 年以降の百  
 二  
 年間で最  
 も高  
 かった  
 こと  
 が一日、  
 気象庁の  
 まと  
 めで分  
 かった。

今夏は平年より1.64度高い気温だった。

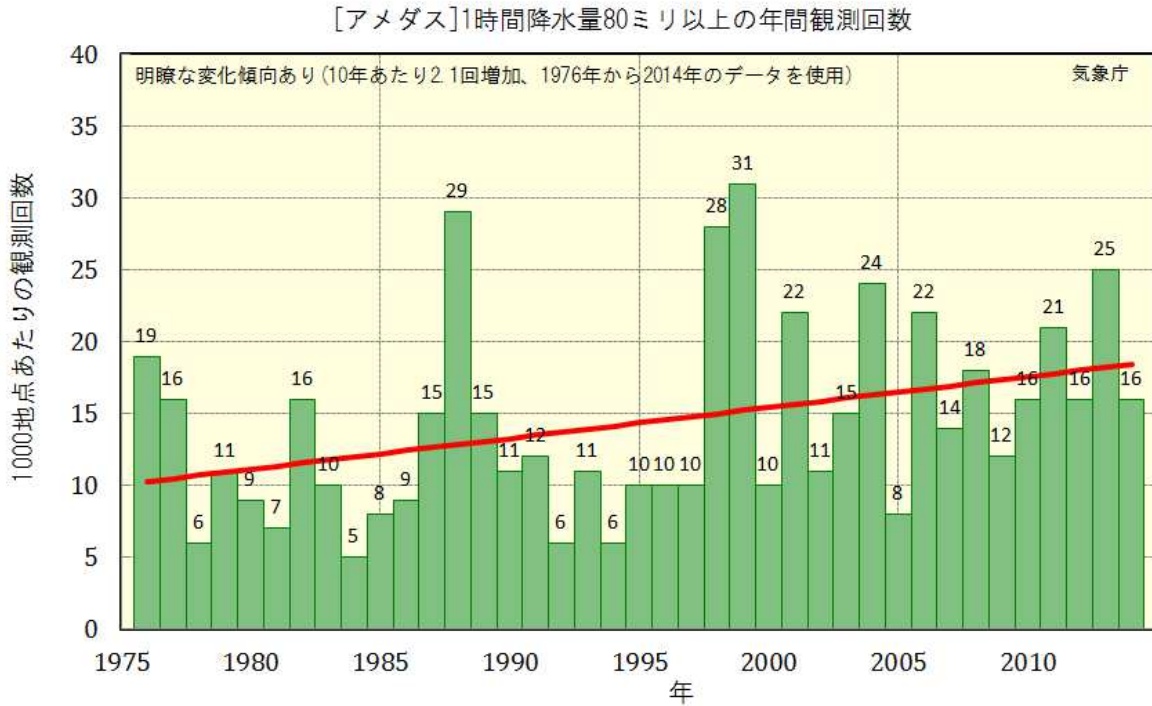
2010年9月2日中日新聞

## 2010年の漢字は「暑」です



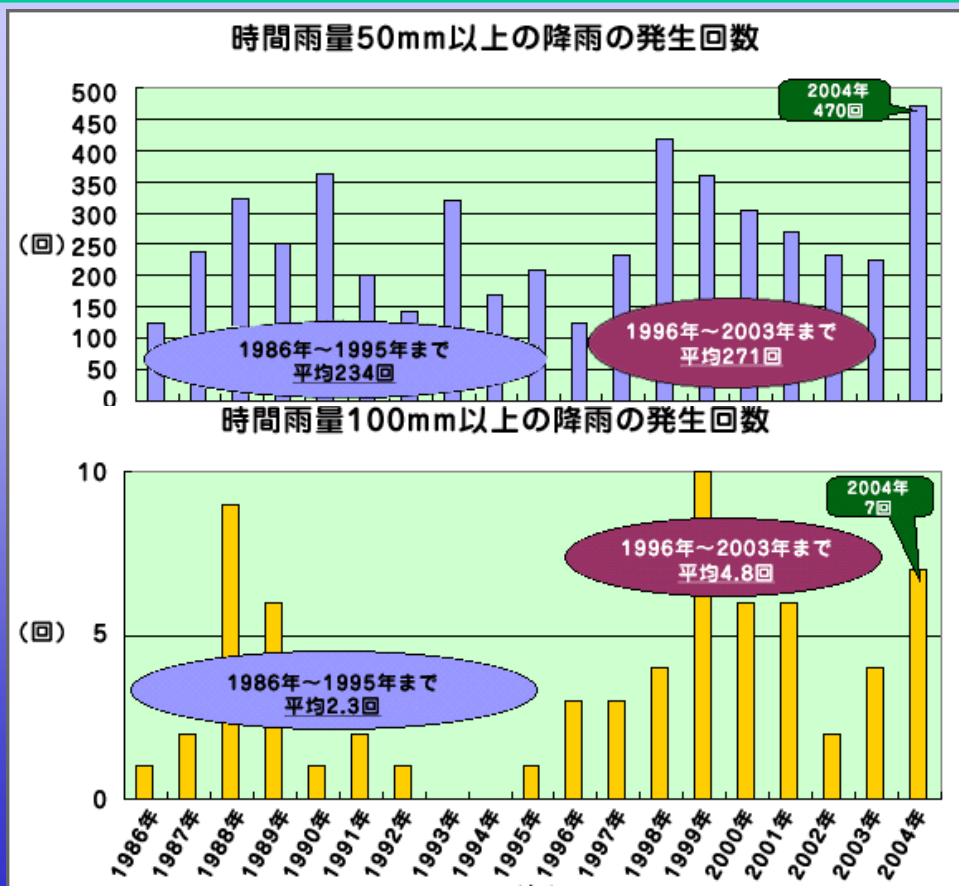
2010年の夏は、50年後の夏を擬似体験した夏だった。

# 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



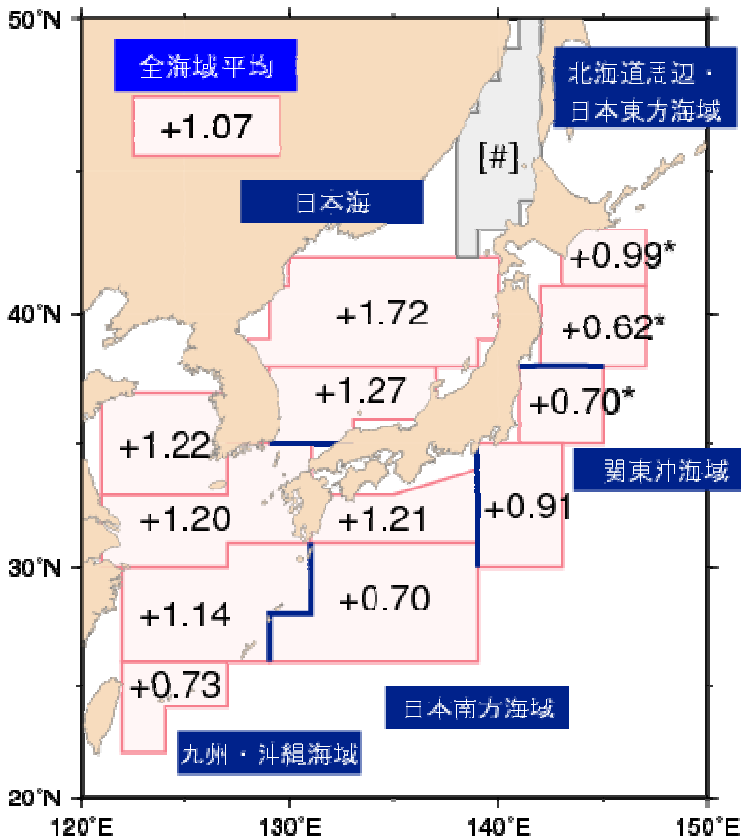
出典：気象庁HP <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/heavyraintrend.html>

## 最近、気象災害が増えている？





## 海面水温の長期変化傾向(日本近海)

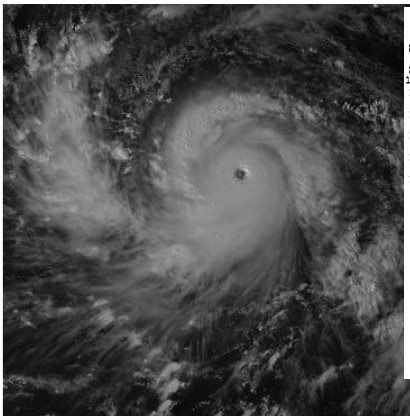


日本近海における、2014年までのおよそ100年間にわたる海域平均海面水温(年平均)の上昇率は、 $+1.07^{\circ}\text{C}/100\text{年}$ です。この上昇率は、世界全体で平均した海面水温の上昇率( $+0.51^{\circ}\text{C}/100\text{年}$ )よりも大きな値である。

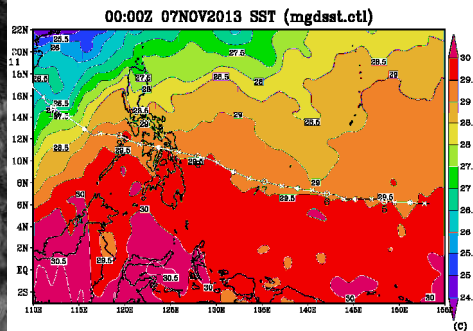
海域別にみると、黄海、東シナ海、日本海南西部、四国・東海沖では日本の気温の上昇率( $+1.14^{\circ}\text{C}/100\text{年}$ )と同程度となっており、釧路沖、三陸沖、関東沖海域、沖縄の東および先島諸島周辺では日本の気温の上昇率よりも小さく、日本海中部では日本の気温の上昇率よりも大きくなっている。

## スーパー台風

- ◆ スーパー台風とは、最も強い台風のカテゴリーで、気象庁の「猛烈な台風」、ハリケーンのカテゴリー5(最も強いハリケーン)に相当する台風である。これは大気中のもっとも激しい気象システムであり、それに伴う強風と大雨は洪水や高潮などを引き起す。
- ◆ スーパー台風とは、地上の平均風速が1分平均で $67\text{m/s}$ 以上、10分平均で $59\text{m/s}$ 以上の風速を持つ台風の状態である。
- ◆ スーパー台風などの強い台風は、低頻度であるが、一旦、上陸すると極めて影響の大きな事象であり、その強度予測の高精度化と温暖化気候における台風の最大可能強度推定は、影響評価研究や防災対策における重要な情報である。



Super-typhoon Haiyanの可視画像  
2013年11月07日15時00分(JST)

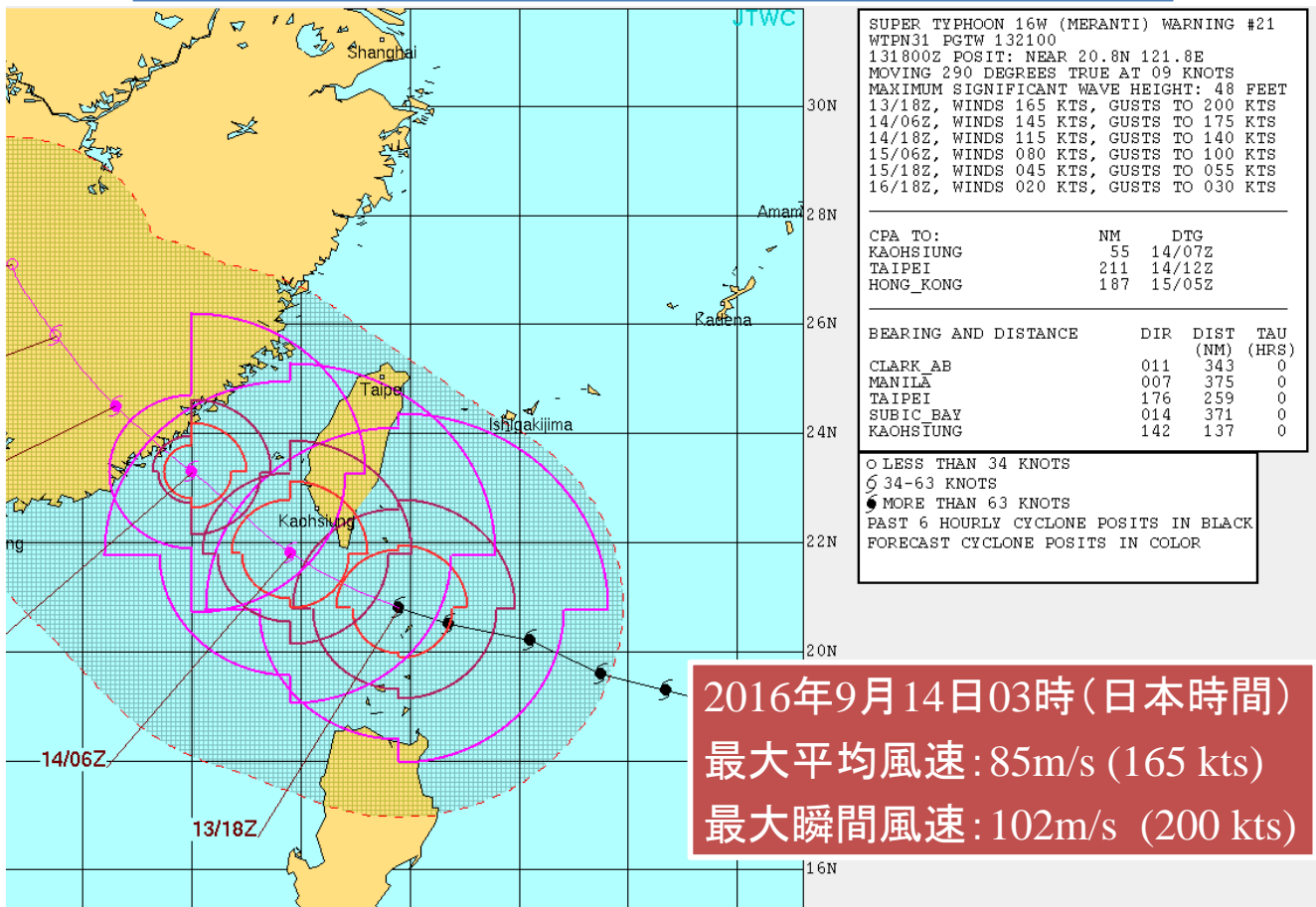


Super-typhoon Haiyanの経路と  
2013年11月07日の海面水温分布



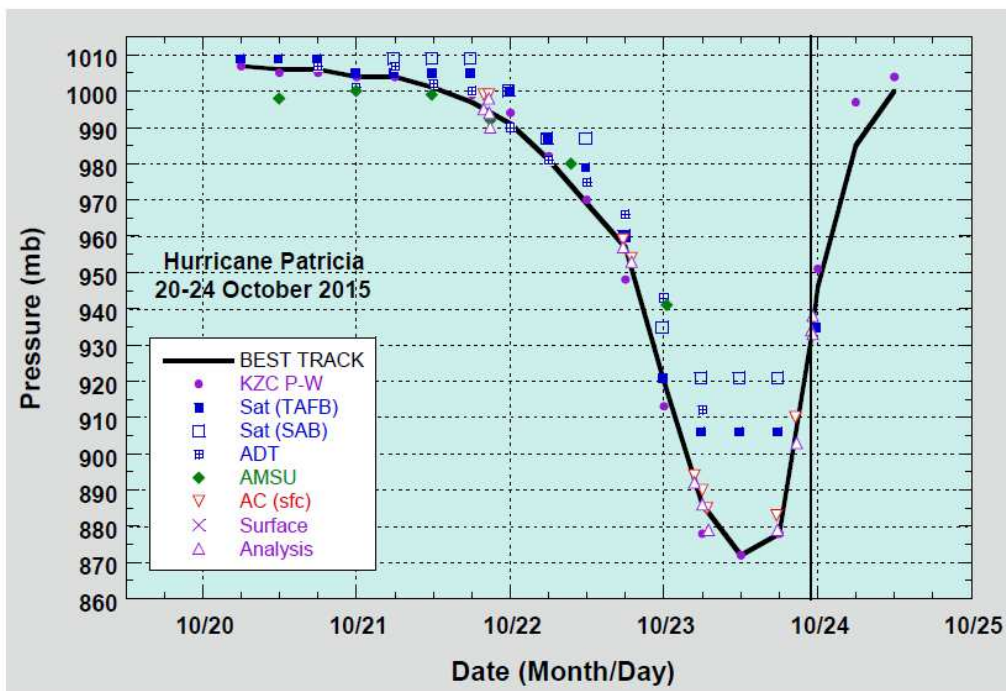
Super-typhoon Haiyanによるフィリピン  
の災害

# 2016年台風第14号ムーランティ (supertyphoon Meranti)



## 最低中心気圧を更新したHurricane Patricia (2015)

Hurricane Patricia 23



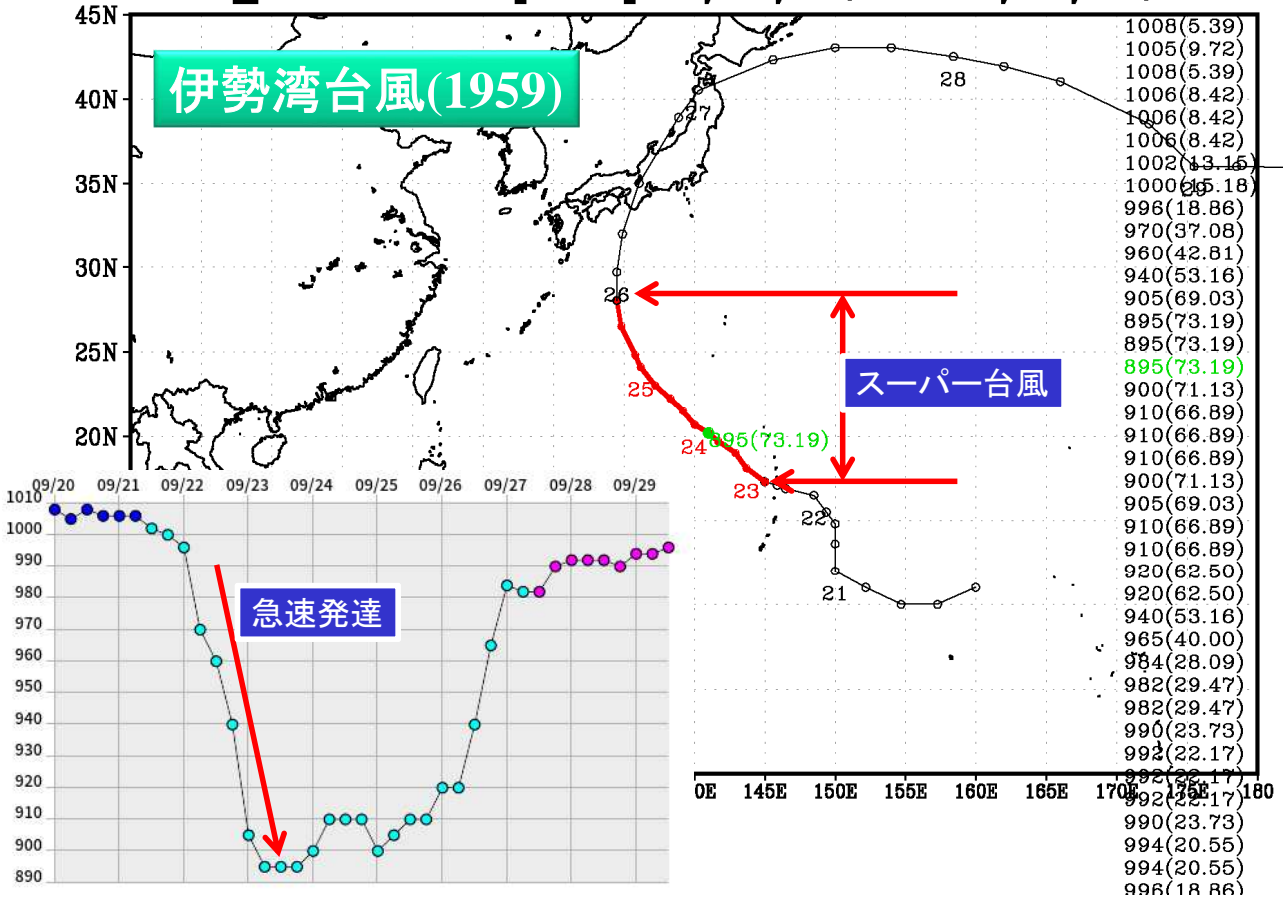
3. Selected pressure observations and best track minimum central pressure curve for Hurricane Patricia, 20-24 October 2015. Advanced Dvorak Technique estimates represent the Current Intensity at the nominal observation time. AMSU intensity estimates are from the Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies technique. KZC P-W refers to pressure estimates derived using the Knaff-Zehr-Courtney pressure-wind relationship. Dashed vertical lines correspond to 0000 UTC, and the solid vertical line corresponds to the time of landfall.

# バヌアツを襲うサイクロン「パム」2015年3月13日

Cyclone Pam on March 13, 2015



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



# 台風の強度は何が決めるのか

## 環境要因

- ◆海面水温(海洋上部の貯熱量)
- ◆大気鉛直シア(下層と上層の風速差)
- ◆対流圏上部の気温(アウトフローレイヤーの巻雲)
- ◆海洋の構造
- ◆大気熱力学的構造(安定度・湿度)

## 内的要因

- ◆眼の構造(形や壁雲の入れ替わり)
- ◆スパイラルレインバンド
- ◆メソ渦

その他: 台風の移動速度、海洋の波、波の飛沫、エアロゾル

## CReSS (Cloud Resolving Storm Simulator)

### 非静力学・雲解像シミュレーションモデル

台風、竜巻、豪雨、豪雪、スーパーセル、積乱雲などのシミュレーション

開発者: 坪木和久・榊原篤志

1998年: 開発開始

2002年: Ver.1(振興調整費: 住教授)

2007年: Ver. 2 (HyARC共同研究)

2011年: Ver. 3(革新プログラム: 坪木)

国内外の対抗するモデル

MRI-NHM(気象庁)

WRF(NCAR)

ARPS(U. of Oklahoma)

## Supertyphoons in store as seas warm

KYODO

A supertyphoon stronger than the deadly Hurricane Katrina that devastated the southern United States in 2005 could hit Japan in the latter half of this century if global warming continues, according to a study by a Japanese research team made available Monday.

Typhoons packing winds of at least 241.2 kph are often called supertyphoons, but the one feared by the researchers could blow as strong as 288 kph on the ground, the team from Nagoya University and the Meteorological Research Institute said.

Several supertyphoons may also develop between 2074 and 2087 due to a projected 2-degree rise in sea temperatures in the Western Pacific south of Japan, the study showed, based on a scenario drawn up by the Intergovernmental Panel on Climate Change in which average global temperatures will rise about 3 degrees from preindustrial levels by the end of the century.

"Given that global warming is under way, it is little wonder that typhoons develop in an extreme way," Nagoya University associate professor Kazuhisa Tsuboki said. "The point is

how we will forecast them and take disaster control measures."

Using the Earth Simulator supercomputer, the team predicted in detail the occurrence and development of typhoons around Japan during the 2074-2087 period.

A rise in sea temperatures generally makes typhoons more powerful because they develop by taking energy from warm seas. Such typhoons would also bring heavy rain because warmer temperatures will increase water vapor in the air.

If global warming is arrested, supertyphoons are less likely, the team said.

One of the expected supertyphoons could have a minimum atmospheric pressure of 866 hectopascals at its center and maximum winds of 288 kph on the ground, which is stronger than Katrina at 902 hectopascals or the devastating typhoons that have struck Japan.

It could have a short, steep decline in central pressure and rapid development, according to the team.

Another predicted typhoon could bring more than 1 meter of rainfall in the Tohoku region, according to the simulation.

国内利用機関・組織 : 京大防災研、東大、東北大、山梨大、岩手大、福島大、会津大、京都産業大、愛媛大、長崎大、JAMSTEC、防災科研、土木研、国土地理院、東京海上日動、明星電気、東芝、中電CTI他。

国外利用国

カナダ、台湾、韓国、中国、バングラデシュ、ベトナム他。

## 主要プロジェクト・プログラム

21世紀気候変動予測革新プログラム(文部科学省)

国土交通省XバンドMPレーダプロジェクト(国土交通省)

気候変動リスク情報創生プログラム(文部科学省)、他

主要論文 (CReSSを用いた査読付論文 21編)

Tsuboki, K and A. Sakakibara, 2002: *High Performance Computing*

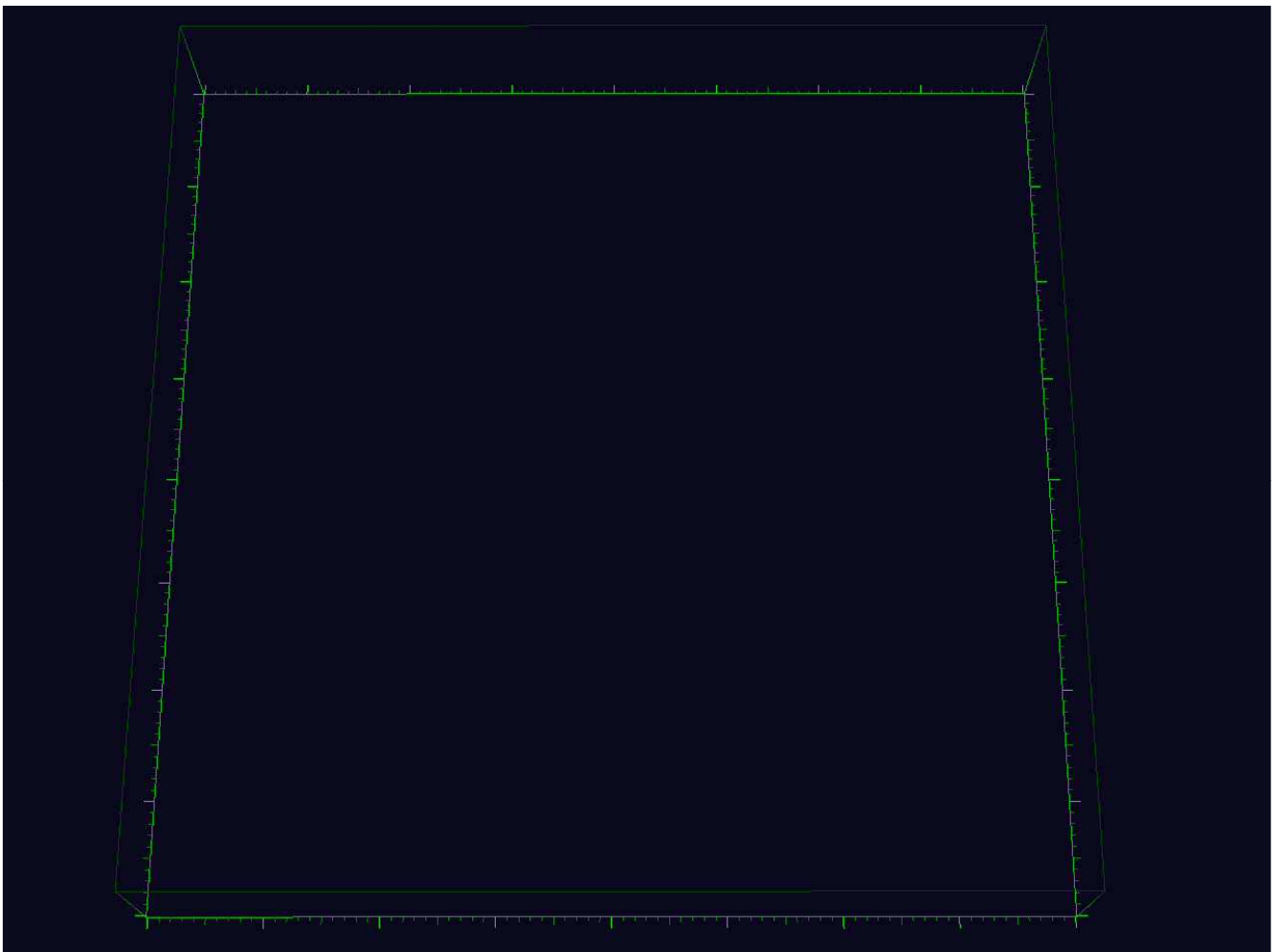
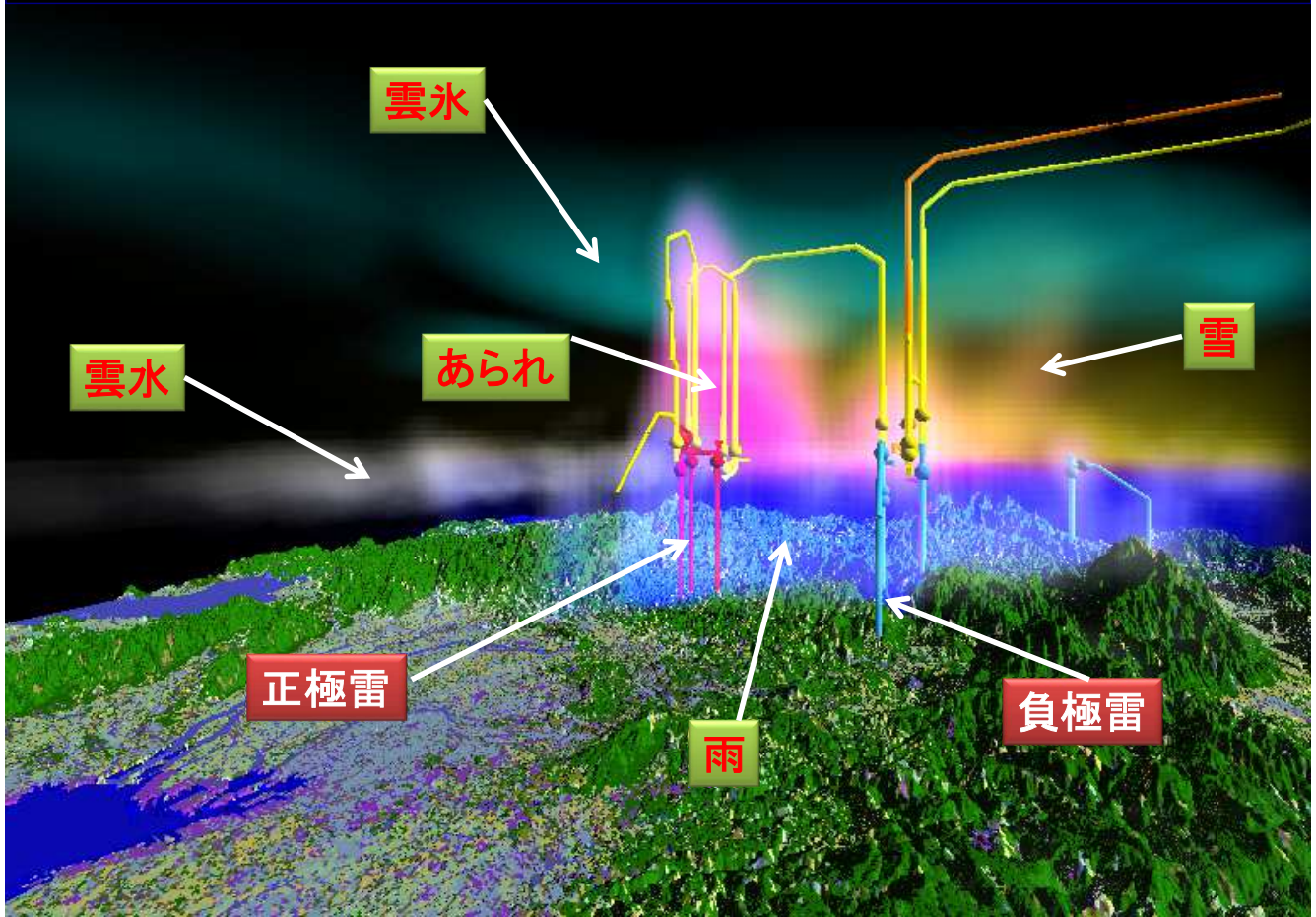
Iwabuchi, H. and K. Tsuboki, 2004: *Journal of Visualizations* (SGI賞)

Akter, N. and K. Tsuboki 2012: *Monthly Weather Review*

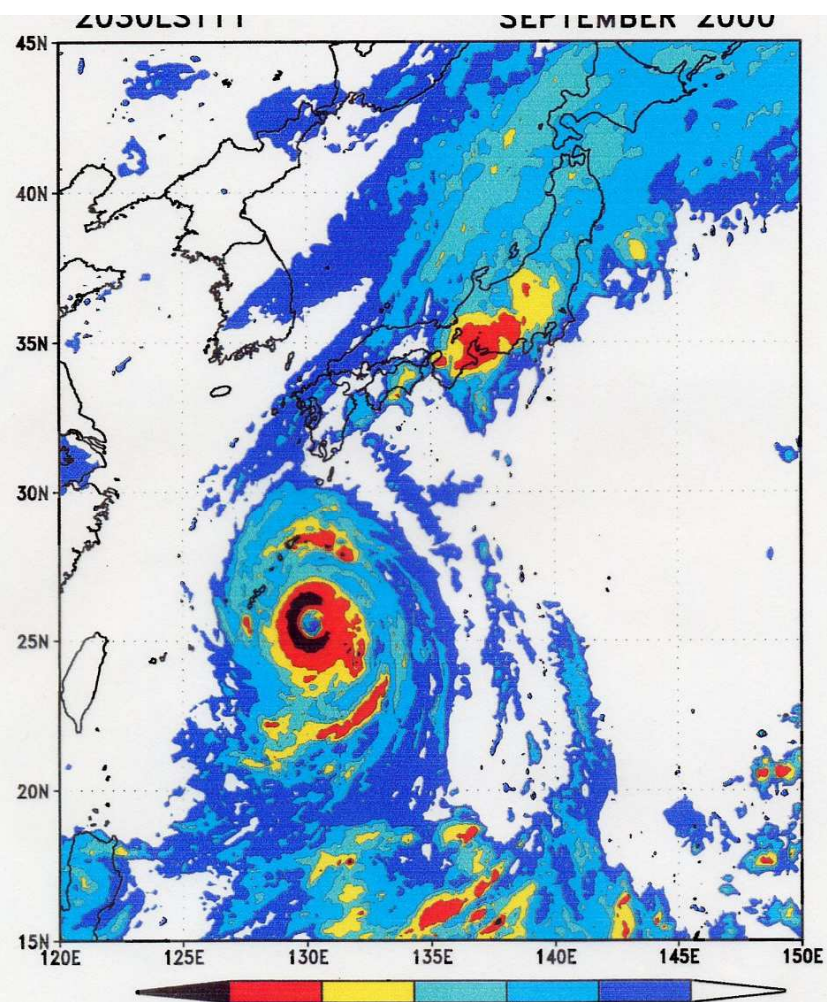
The Japan Time (2009.9.8)

革新プログラムの成果の記事

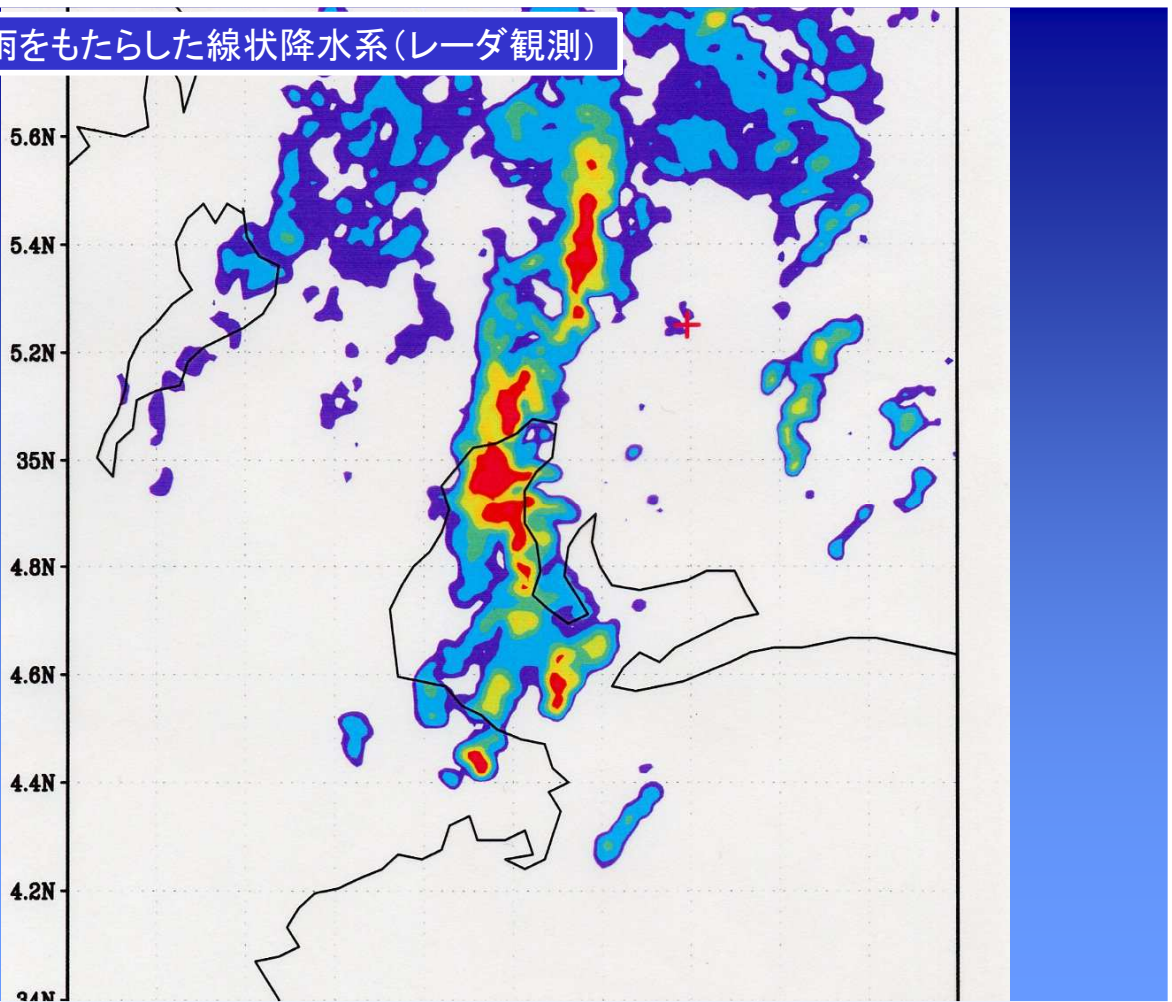
# 集中豪雨をもたらした積乱雲群の構造(雲解像モデルCReSS)





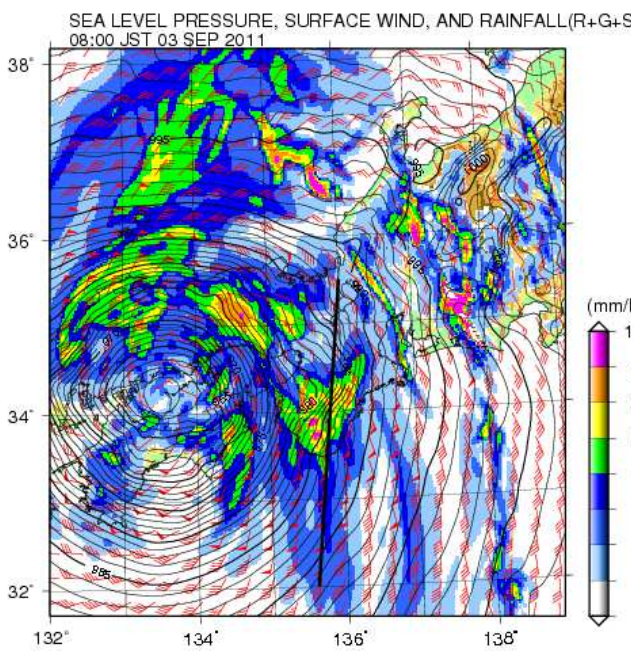


東海豪雨をもたらした線状降水系(レーダ観測)

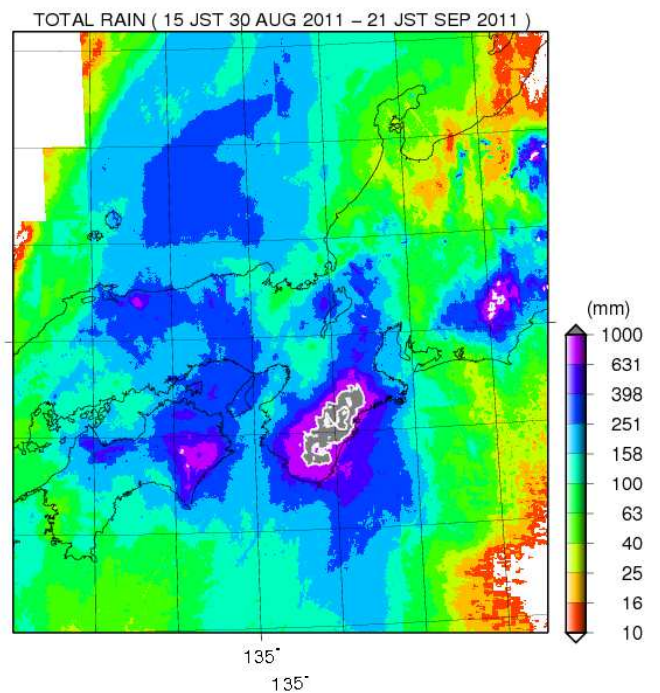


台風12号に伴う紀伊半島の大雨: シミュレーションと観測の総降水量

CReSS: 2011年9月3日08時

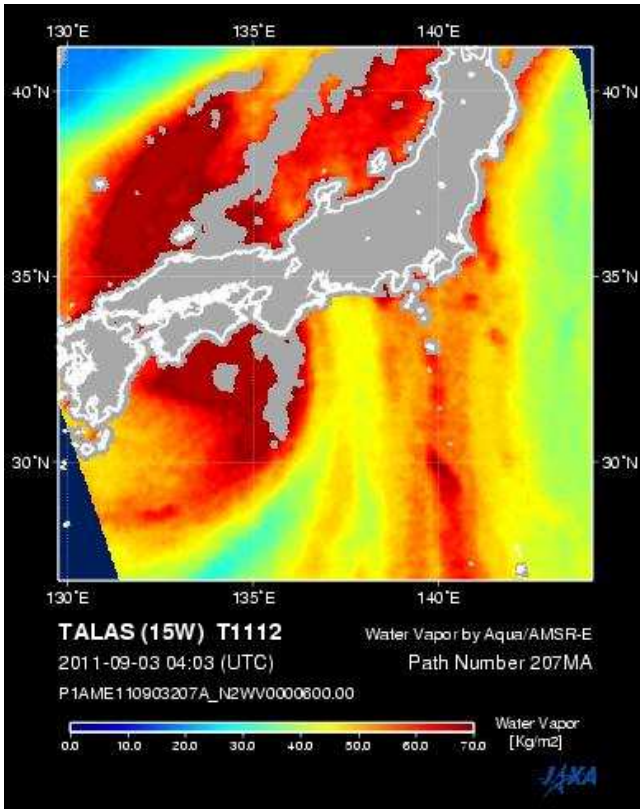


台風12号に伴う総降水量(観測)

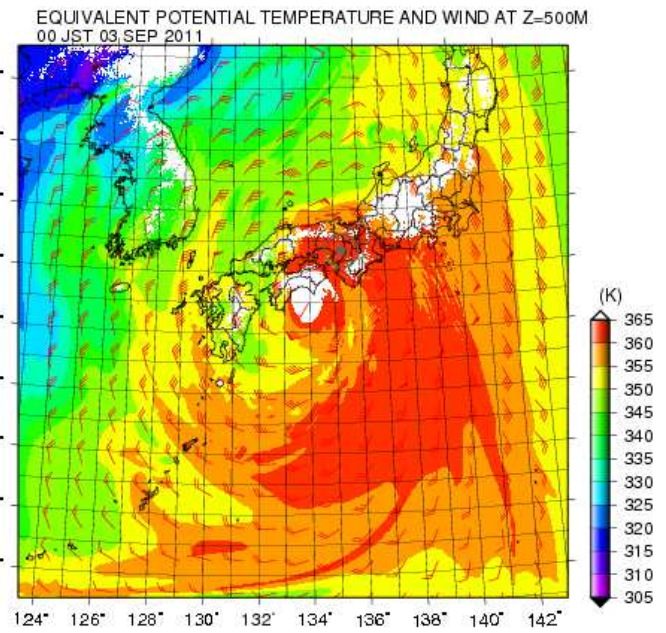




## AMSR-Eによる可降水量



## CReSSによる相当温位

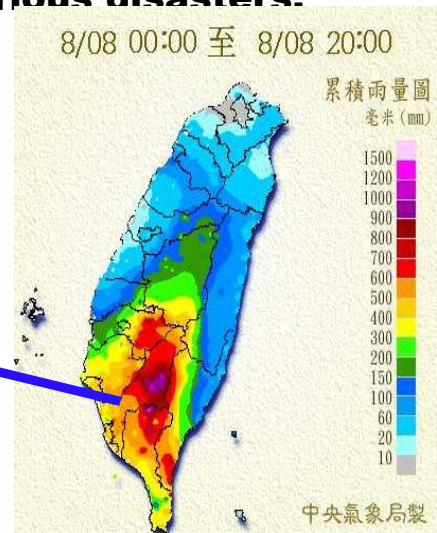


# Typhoon Morakot 2009



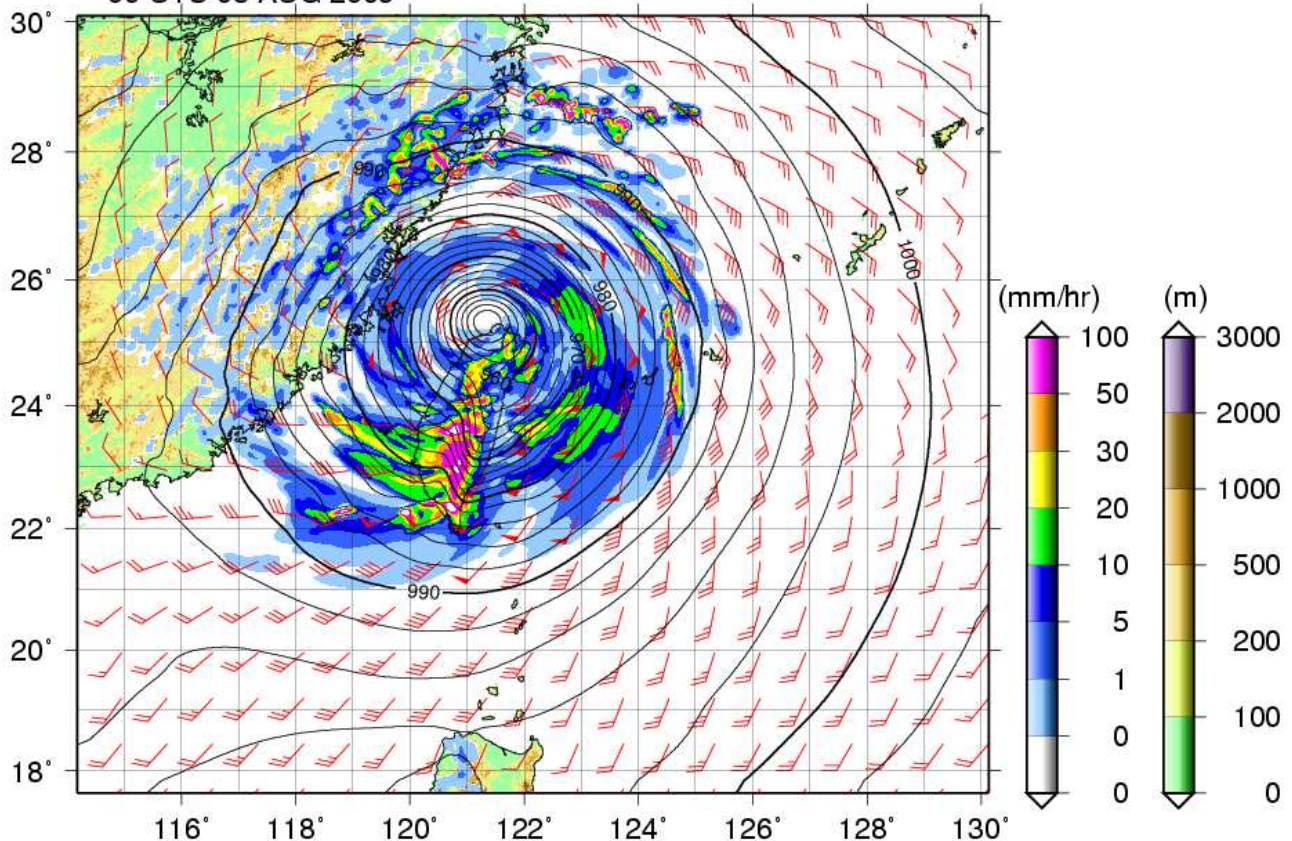
**It brought extreme rainfall (>2000 mm in 2 days) in southern Taiwan and caused serious disasters.**

Shiao Lin village, Taiwan, drastic changes after typhoon Morakot.



# SLP, WIND, AND RAIN AT 48HR (2009/08/08 00UTC)

SEA LEVEL PRESSURE, SURFACE WIND, AND RAINFALL RATE  
00 UTC 08 AUG 2009

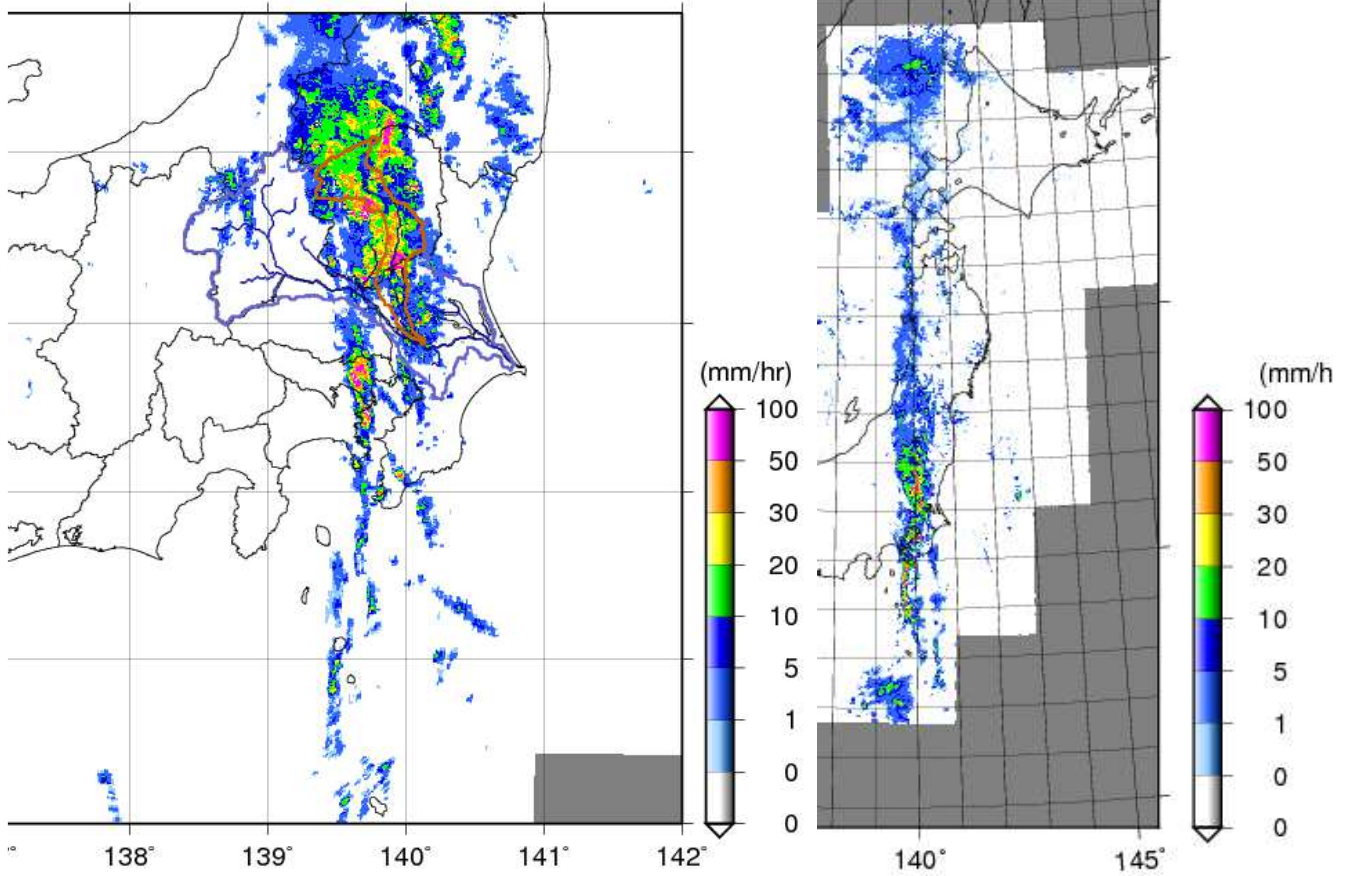


## 平成27年9月関東・東北豪雨の総観場の特徴

- 大規模な南北にのびる降水帯とそのなかに形成される複数のメソスケールの線状降水帯
- 台風18号の東側から南側に延びる帯状の水蒸気帯
- 西から移動してきた総観規模のトラフの南縁を回り込む南～南西風
- 水蒸気帯の東側、台風17号との間に形成されリッジに伴う南東～南風

現代化学, 536, 32-33. 坪木和久(2015)「2015年9月の関東・東北豪雨はなぜ起こったのか。」

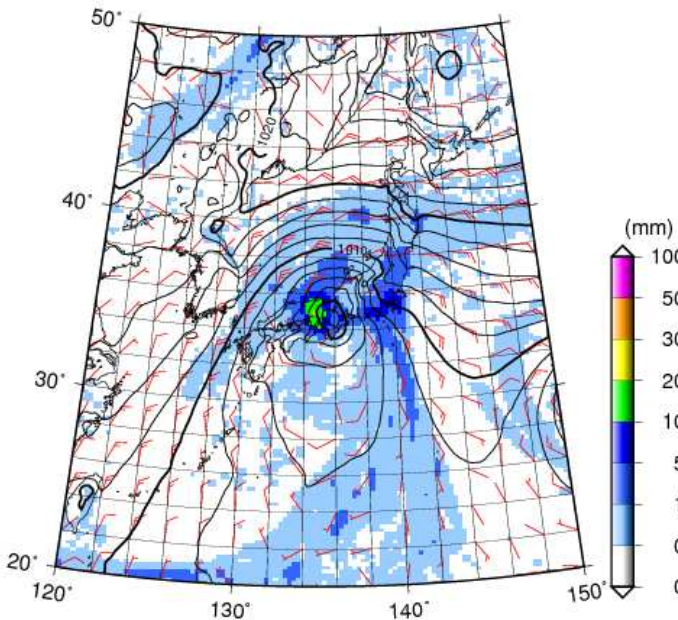
JMA RADAR  
18:00 JST 09 SEP 2015



西から移動してきた総観規模のトラフの南縁を回り込む南～南西風とその東側に形成された線状降水システム

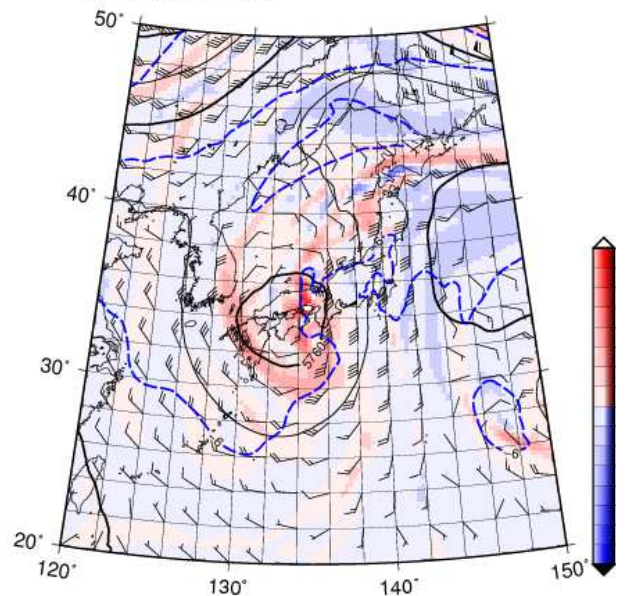
### JMA GSM surface

SEA LEVEL PRESSURE AND 1HR RAINFALL  
12 JST 09 SEP 2015



### JMA GSM 500 hPa

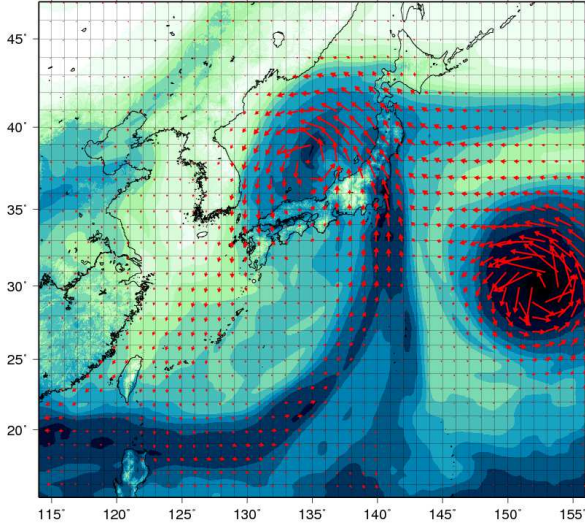
VORTICITY, HEIGHT, AND TEMPERATURE AT P=500hPa  
12 JST 09 SEP 2015



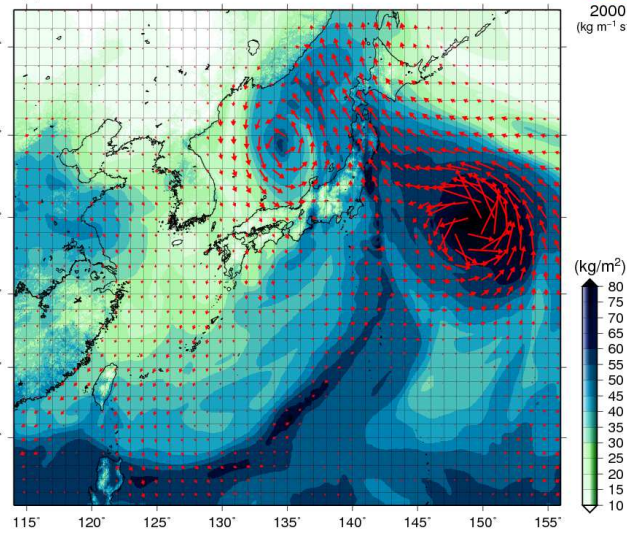
雲解像モデルCReSSのシミュレーション結果からみた、台風18号の東側から南側に延びる帯状の水蒸気帯(鉛直積算水蒸気量)

CReSS

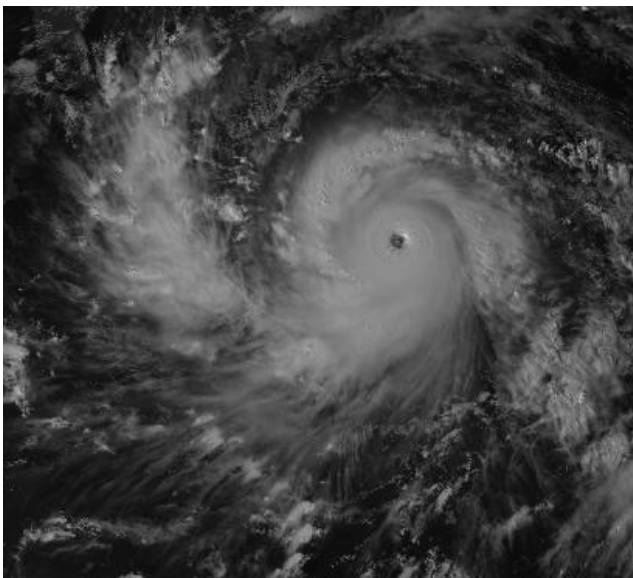
INTEGRATED MIXING RATIO AND WATER VAPOR FLUX  
(a) 18 JST 09 SEP 2015



(b) 19 JST 10 SEP 2015



## Super-typhoon Haiyan (2013年台風第30号)



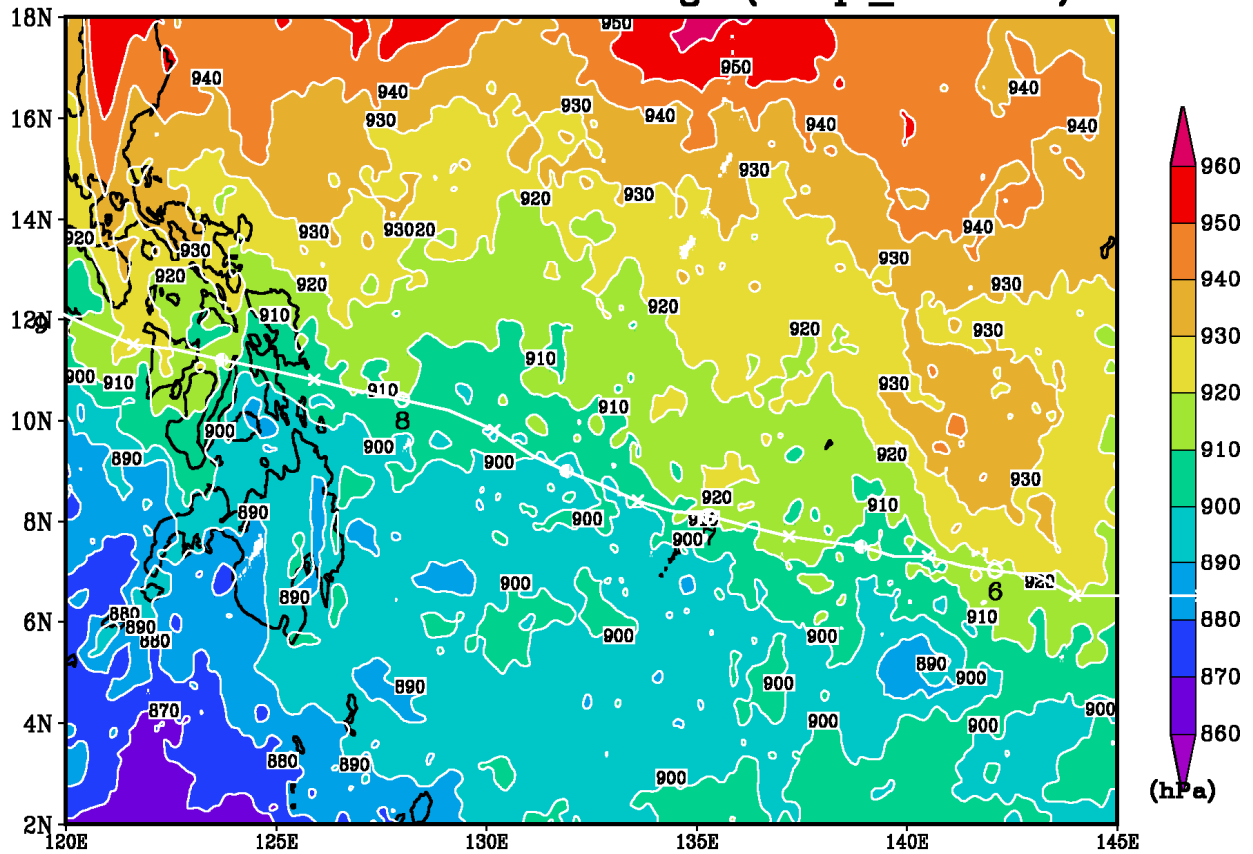
Super-typhoon Haiyanの可視画像  
2013年11月07日15時00分(JST)



Super-typhoon Haiyanによるフィリピンの災害

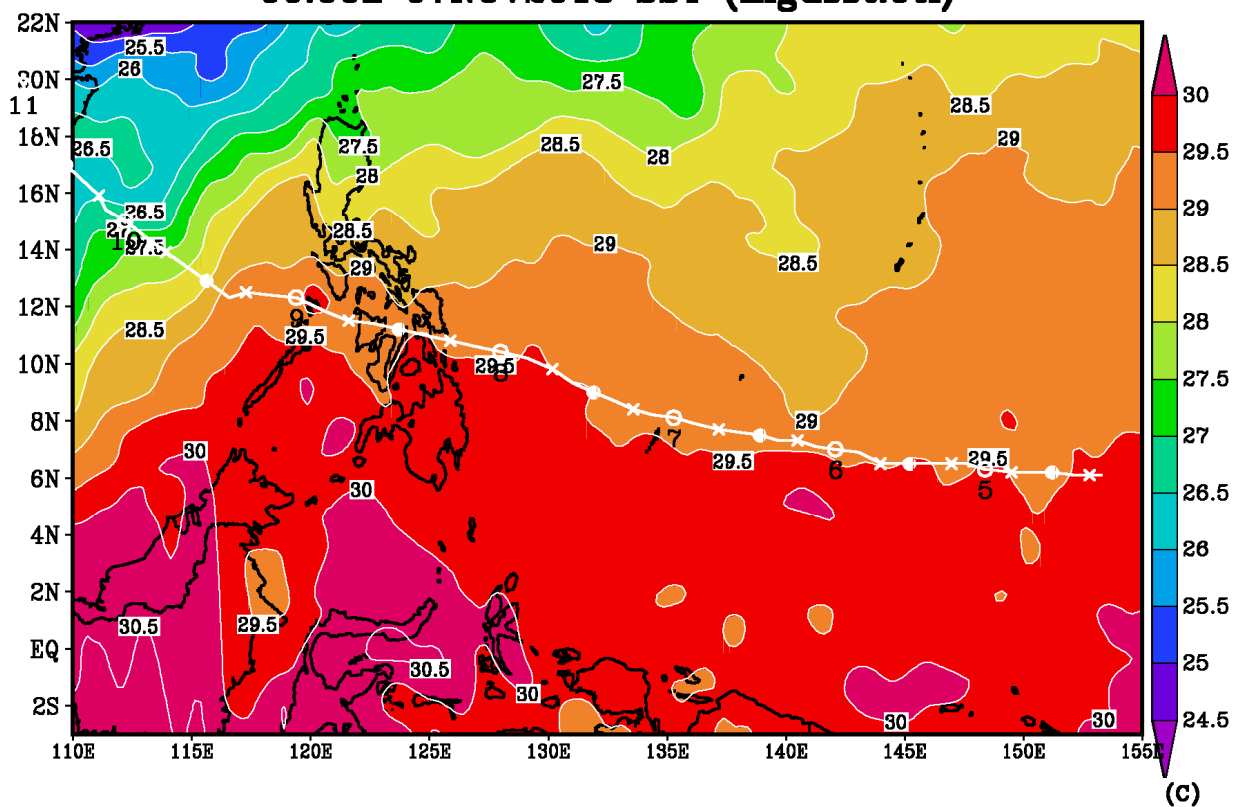
# 2013年第30号台風Haiyanの理論最大到達可能強度

03:00Z 07NOV2013 MPI average (tcmpi\_cress.ctl)



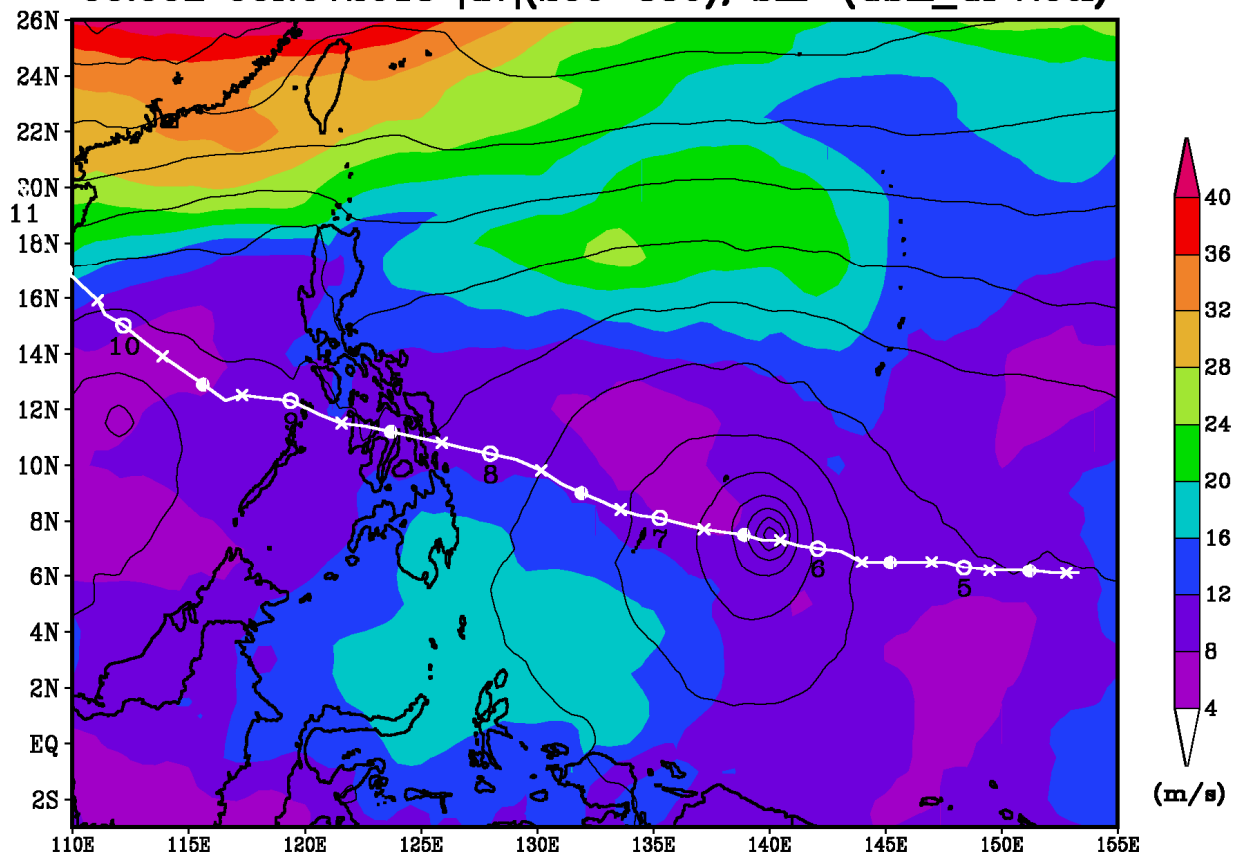
# 2013年第30号台風Haiyanの発達時の海面水温分布

00:00Z 07NOV2013 SST (mgdsst.ctl)



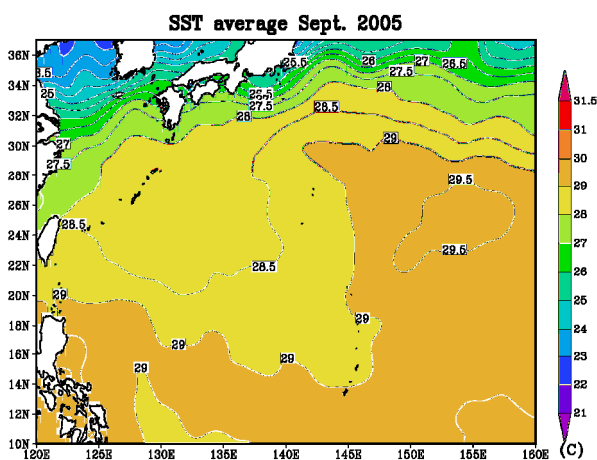
# 2013年第30号台風Haiyanの鉛直シア(風速差)

00:00Z 06NOV2013 |dV|(200-850), SLP (GSM\_GPV.ctl)

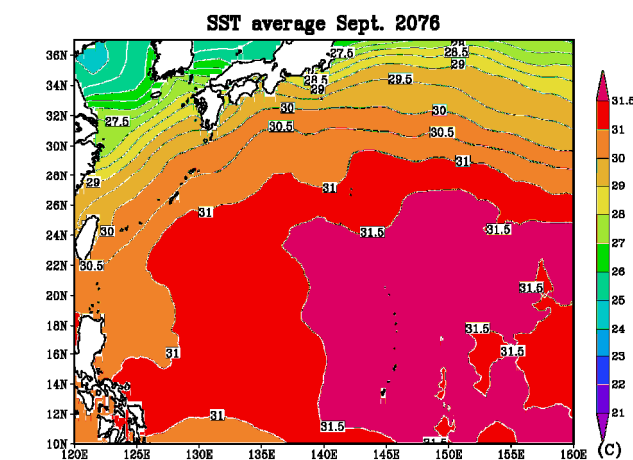


現在気候(2005年観測値)と将来気候(2076年)の海面水温(9月平均値の例)

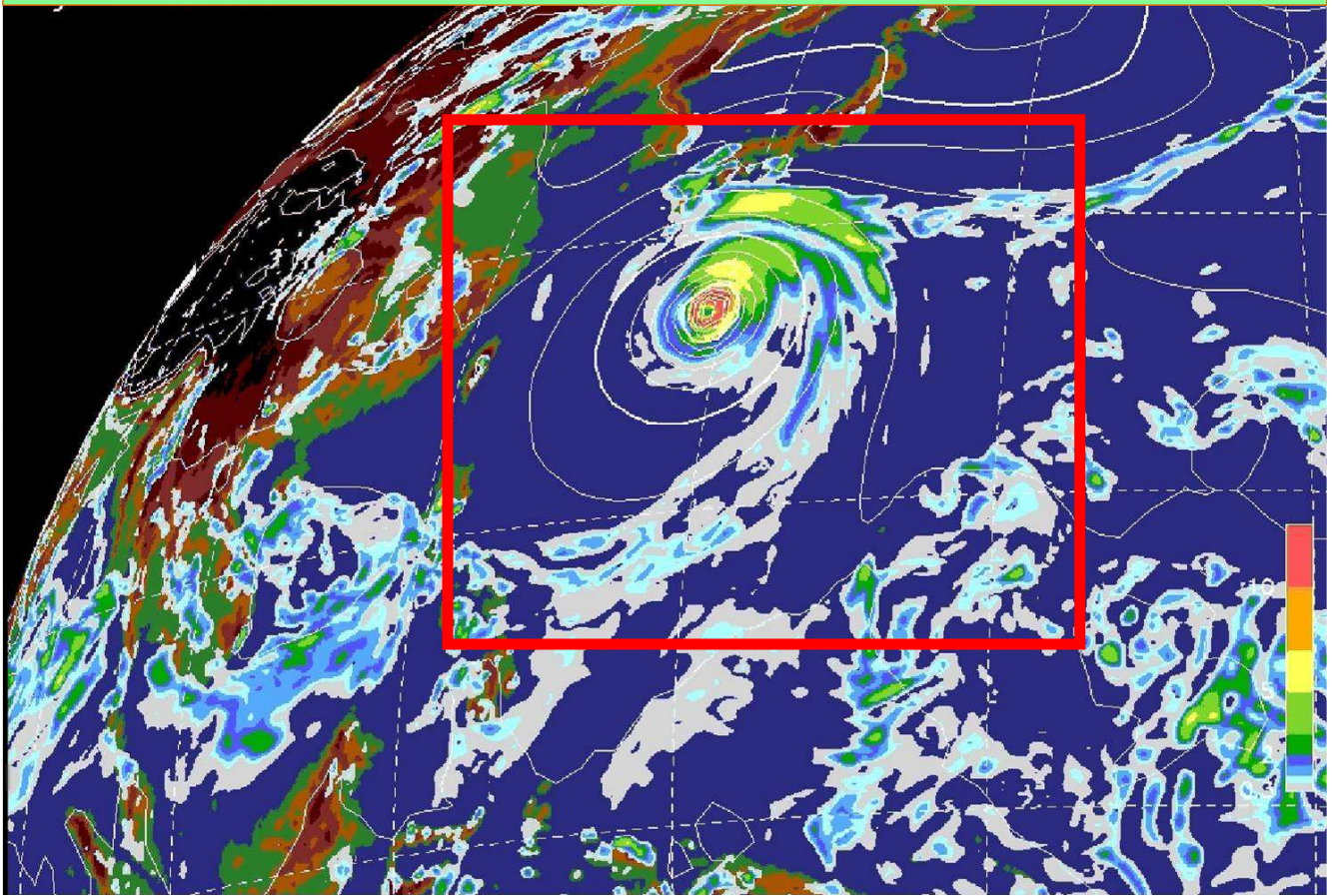
2005年9月の平均海面水温



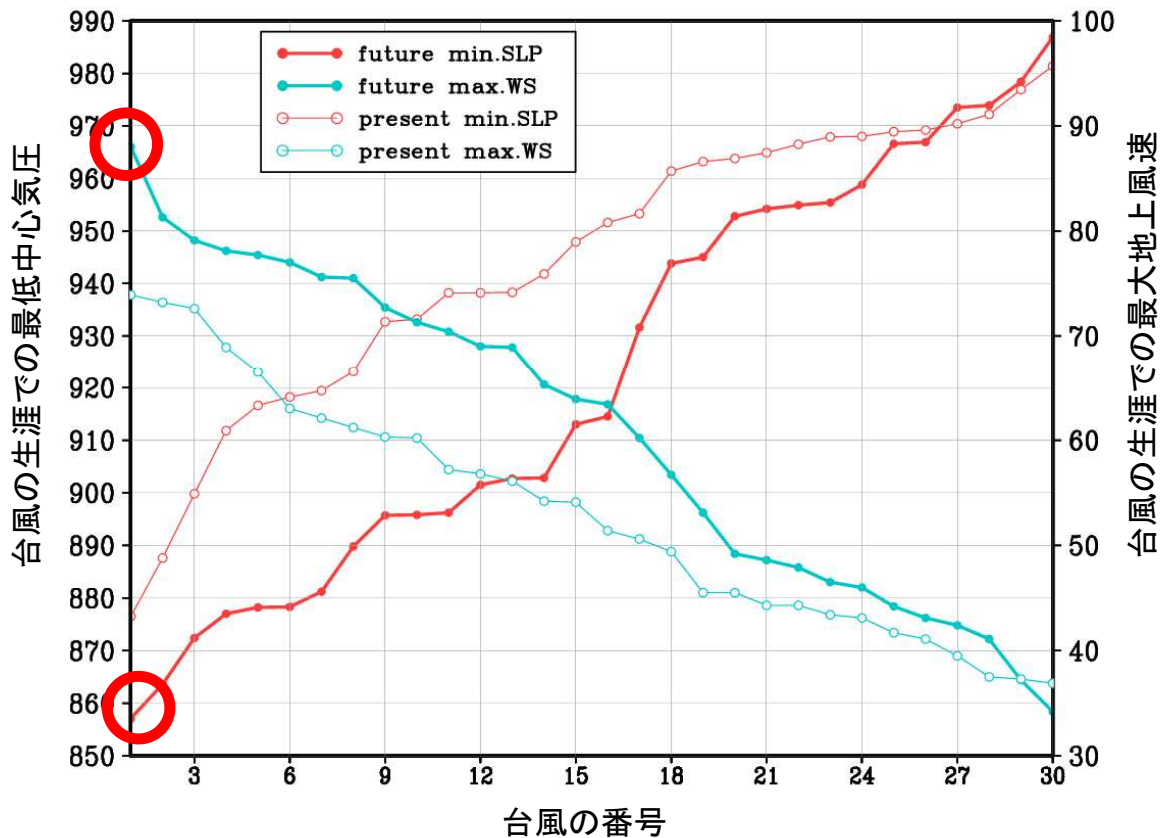
2076年9月の平均海面水温



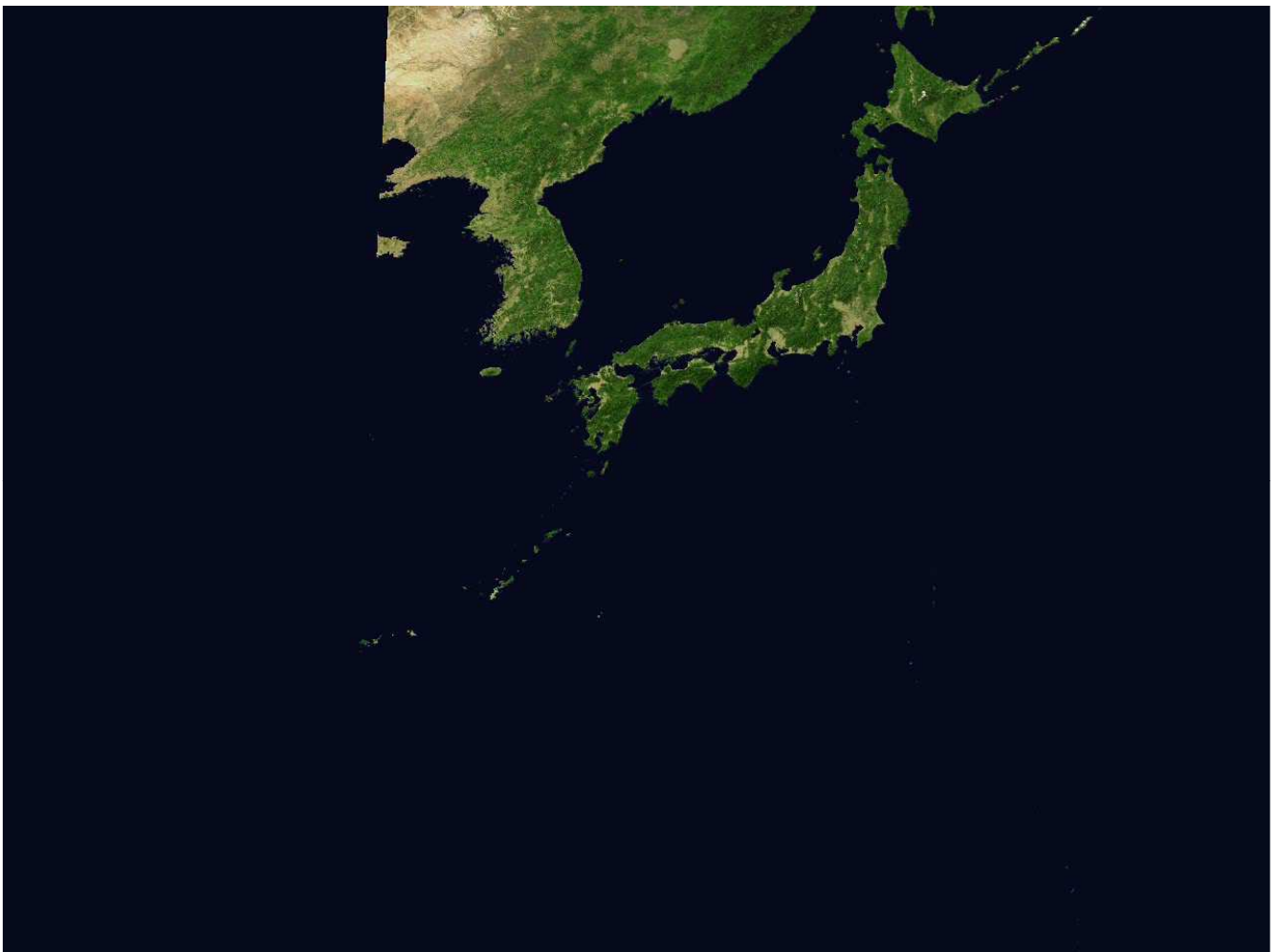
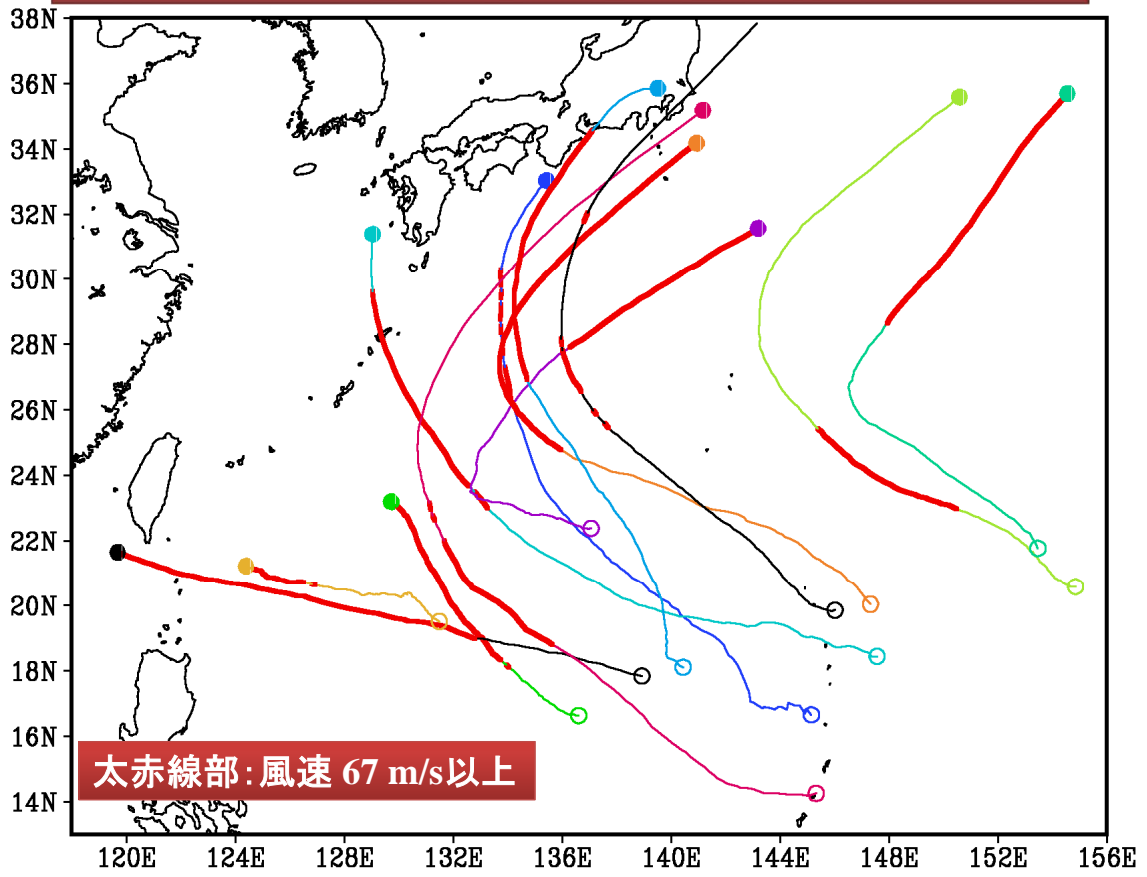
雲解像モデルは、地球の一部を高解像度にシミュレーションする。  
 雲を細かい格子(2km~数100m)で計算するので、非常に大規模な計算になる。



現在気候と将来気候の最も強い各30個の台風を強度でソートして比較した最低中心気圧と最大地上風速



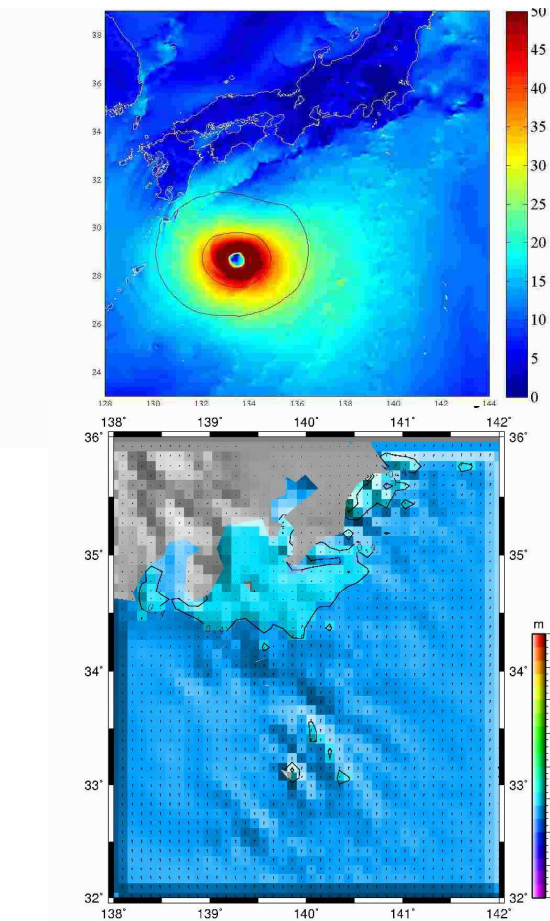
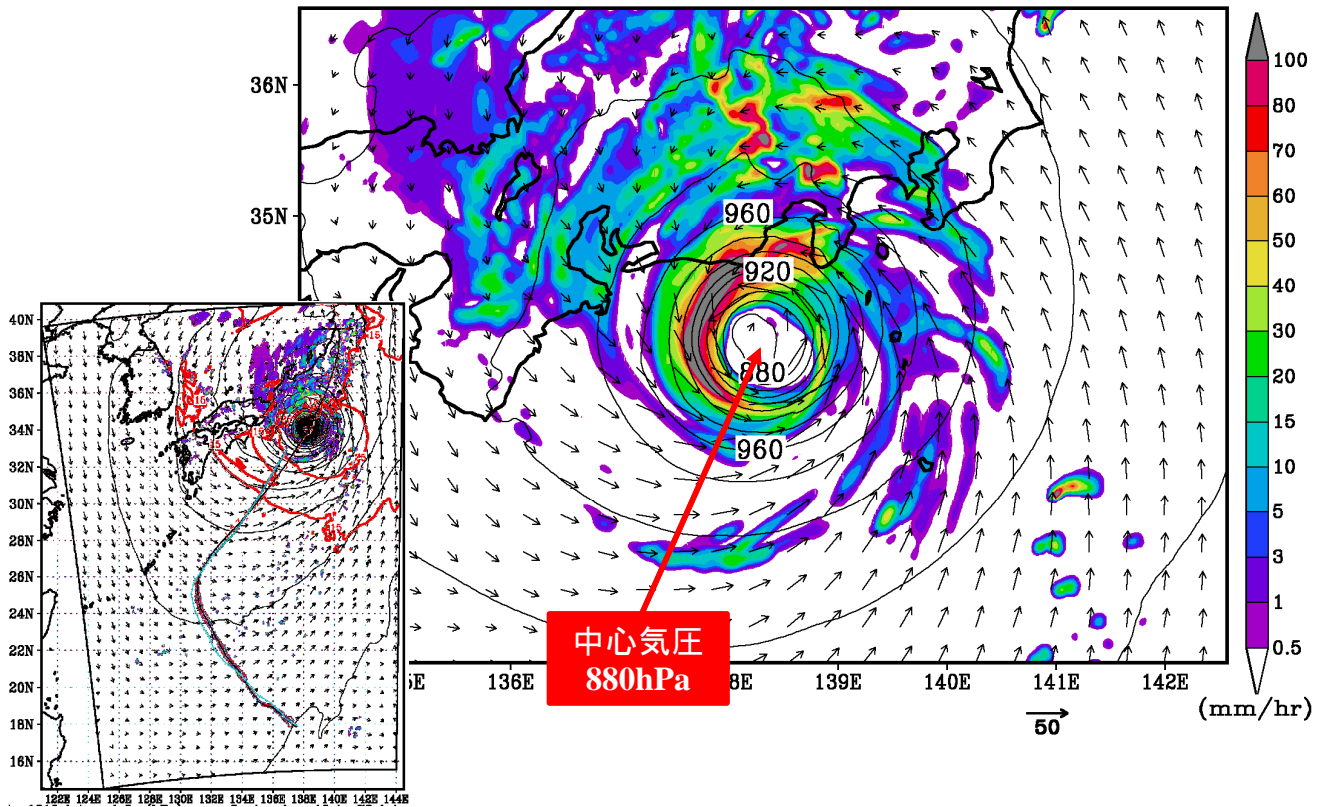
# 温暖化気候で発生したスーパー台風のトラック



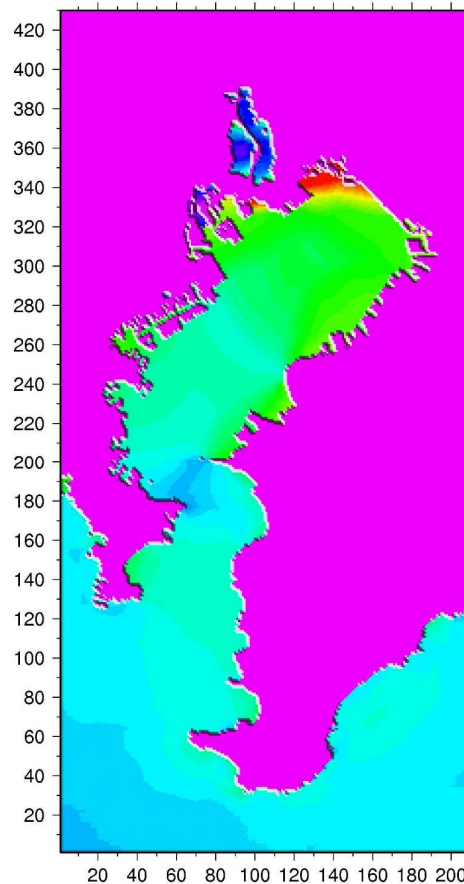


温暖化気候において、スーパー台風の強度を維持して日本に上陸する台風（後期実験の一事例）

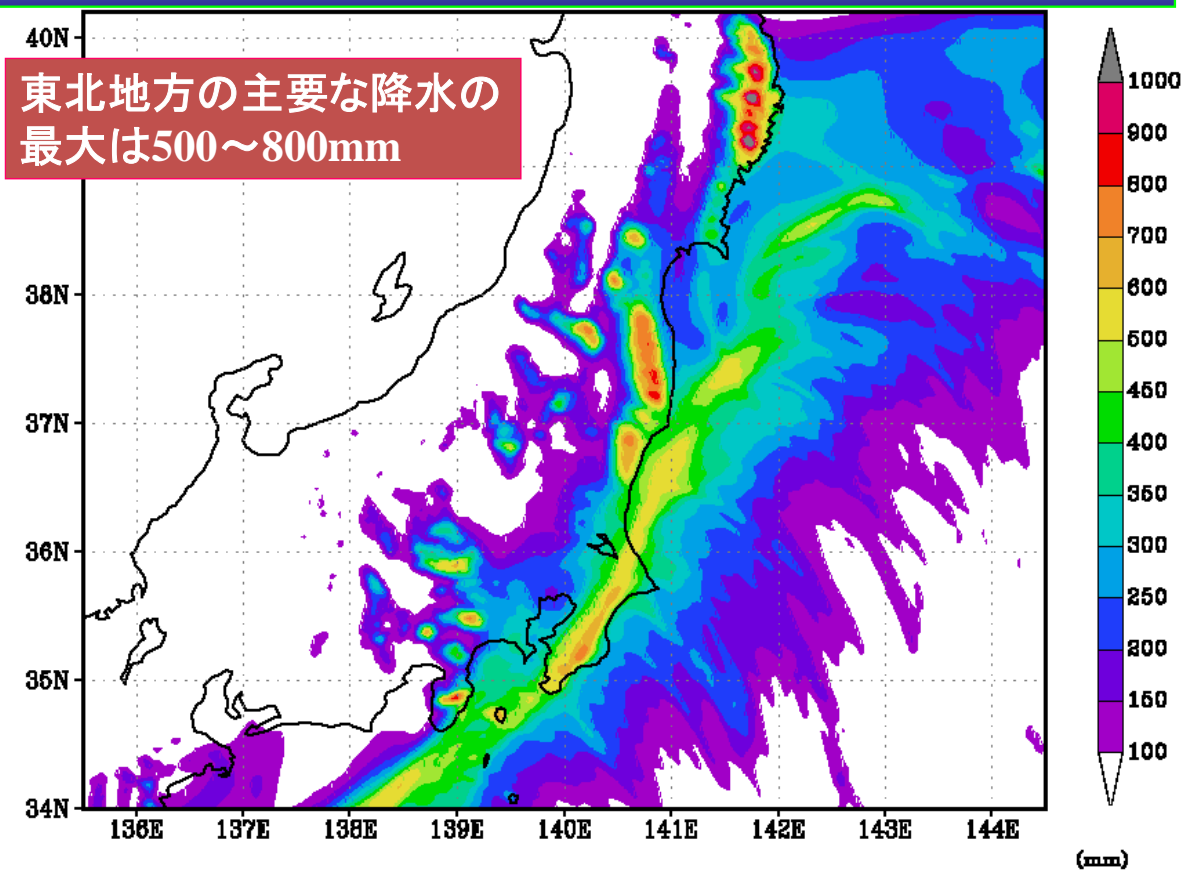
12:00Z 16SEP2076



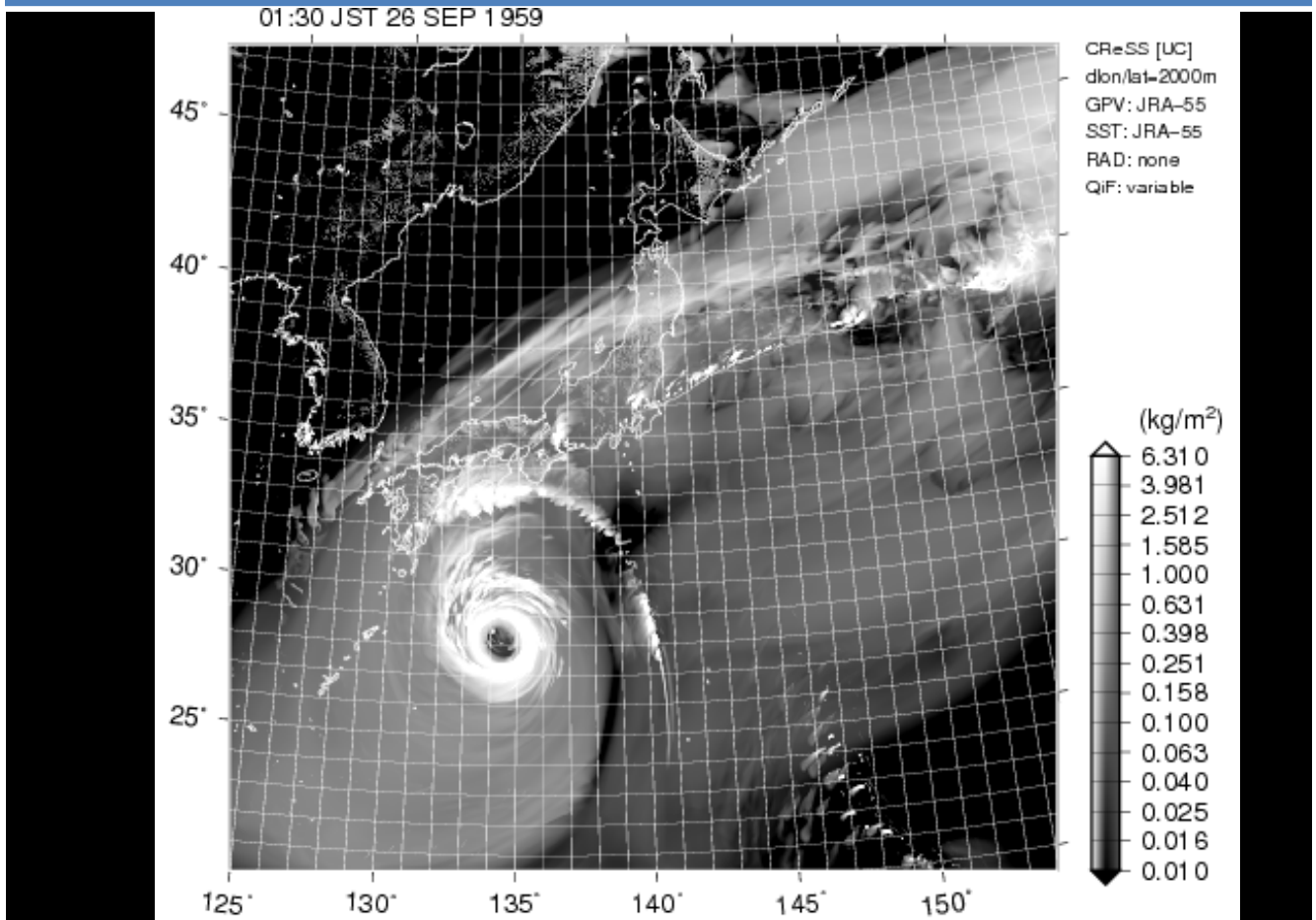
金先生作成



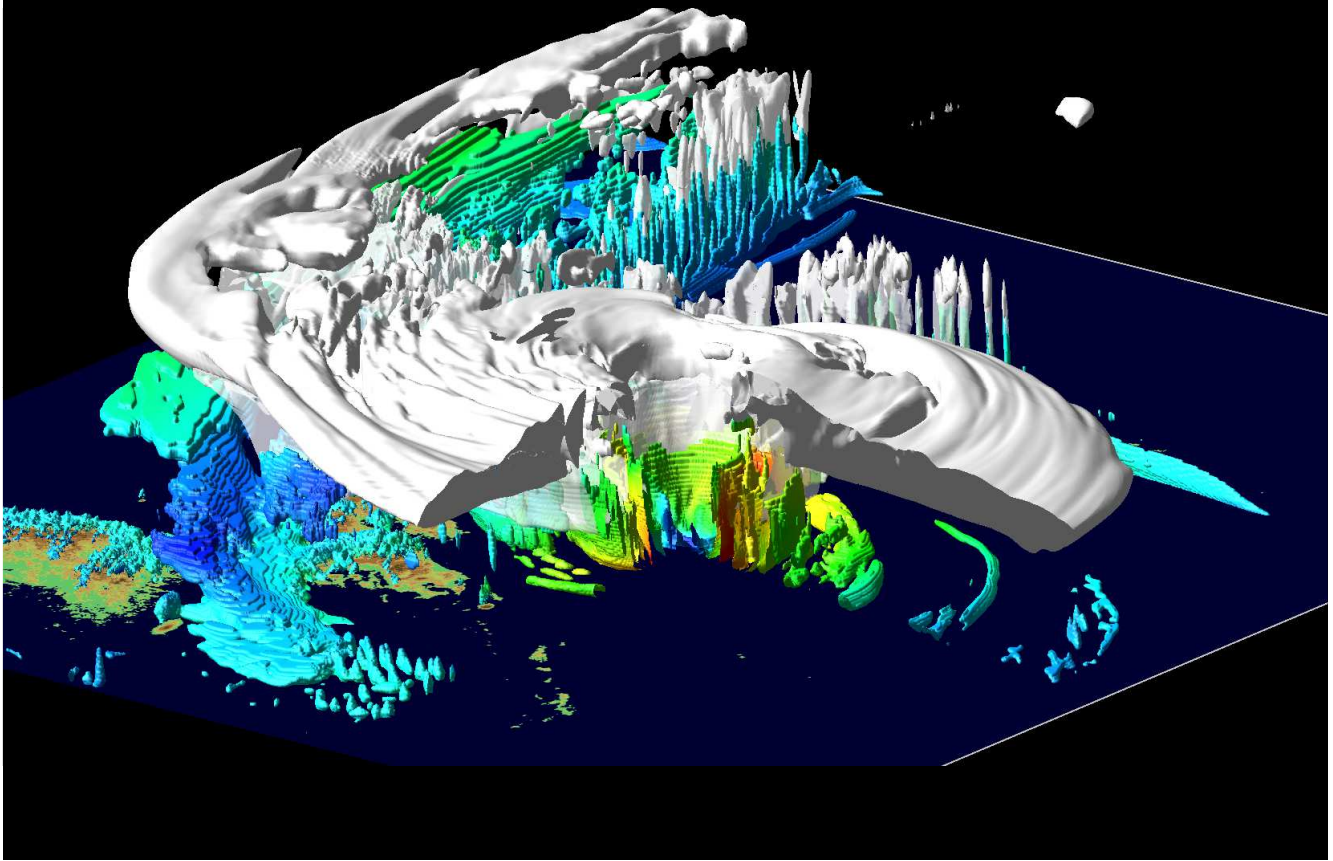
GCM温暖化気候の台風のCReSS実験: 台風SF0508による総降水量(mm)



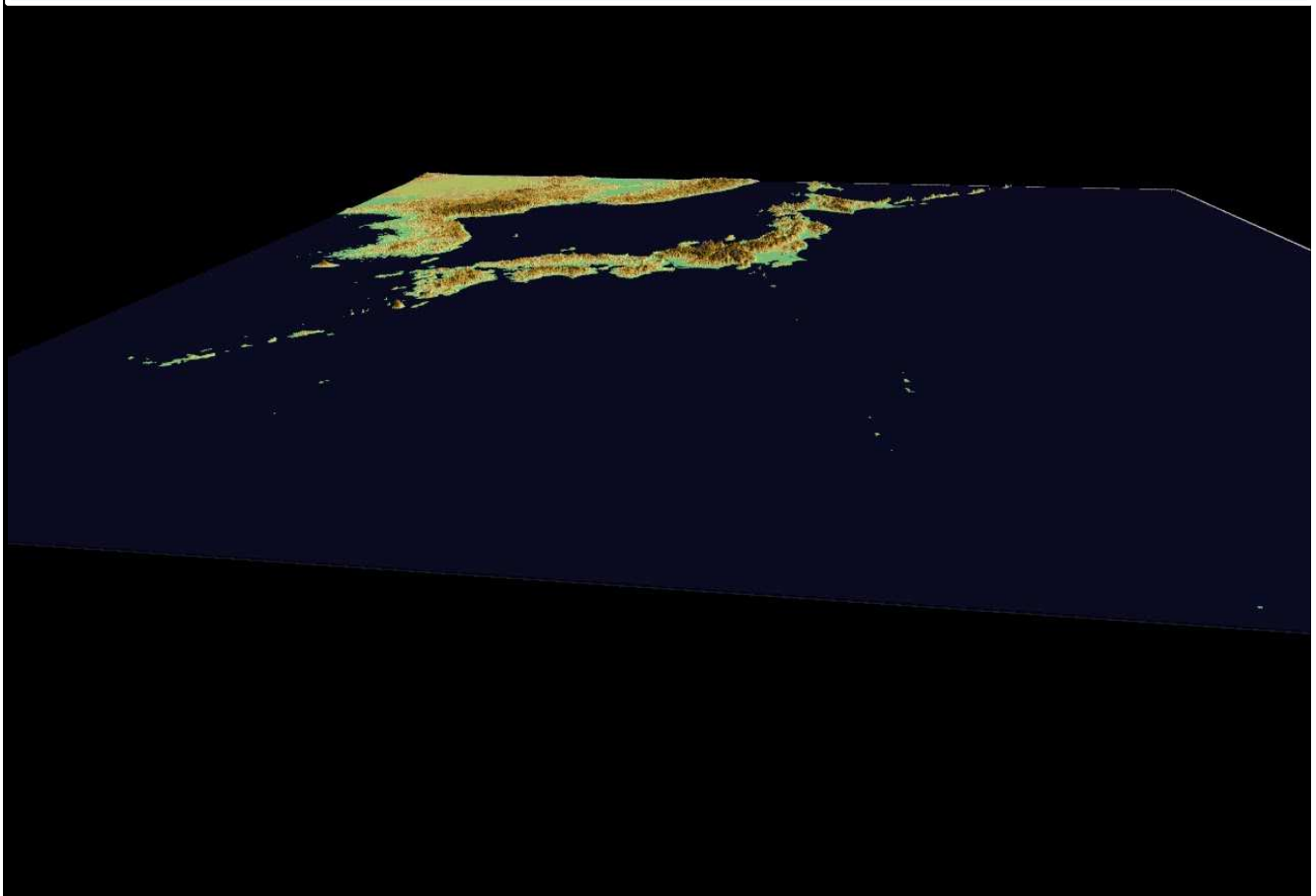
雲解像モデルによる伊勢湾台風の再現(1959年9月26日午前1時30分)



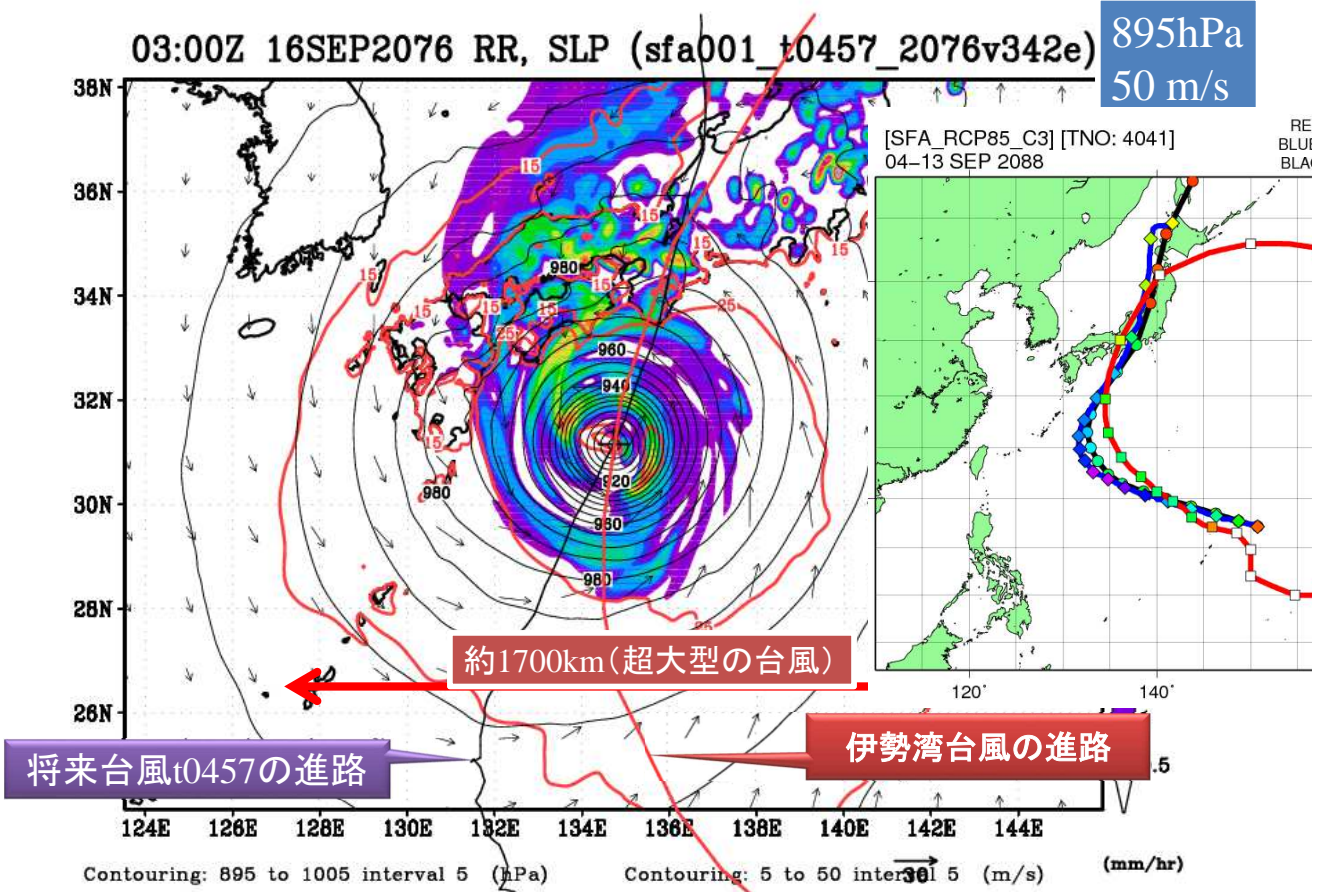
雲解像モデルCReSSで再現された伊勢湾台風の立体表示(上陸12時間前)



伊勢湾台風の雲解像モデルCReSSを用いた再現結果の3次元表示

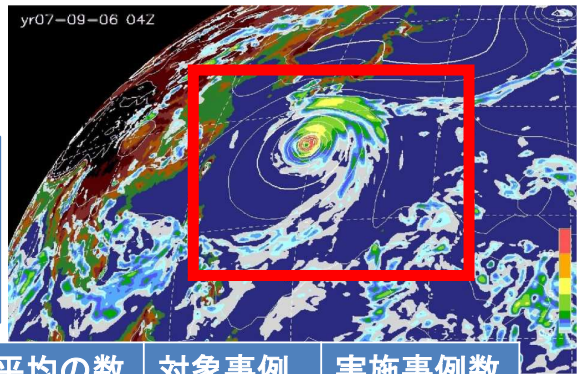


温暖化気候で発生した超大型の台風：伊勢湾台風とほぼ同じ上陸地点

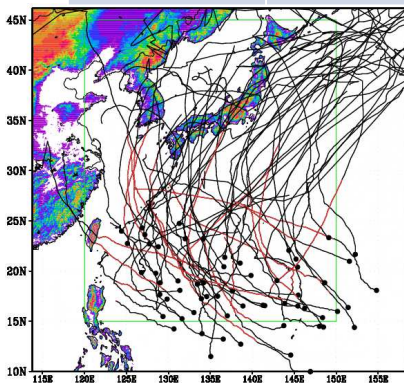


全球20kmMRI-AGCMのダウンスケール実験：A1Bシナリオ実験

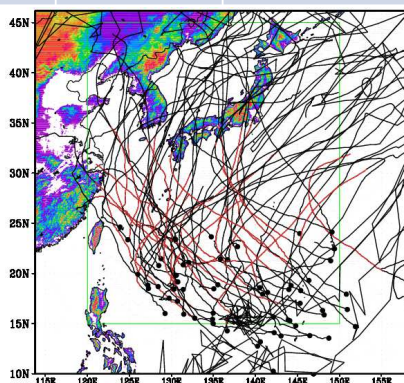
- ◆ 日本の本州などの中緯度地域について、将来の台風のリスクはどのくらい増大するのか。
- ◆ 北上する台風について、雲解像モデルを用いた4km解像度のダウンスケール実験を実施。



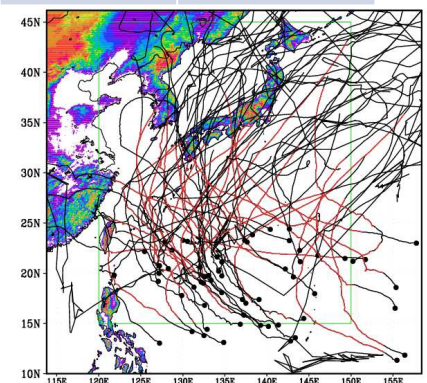
気候	台風期間	台風の数	年平均の数	対象事例	実施事例数
現在気候	1979-2003年	593個	23.7個	110個	60事例
近未来気候	2015-2039年	541個	21.6個	90個	60事例
将来気候	2075-2099年	471個	18.8個	84個	60事例



現在気候

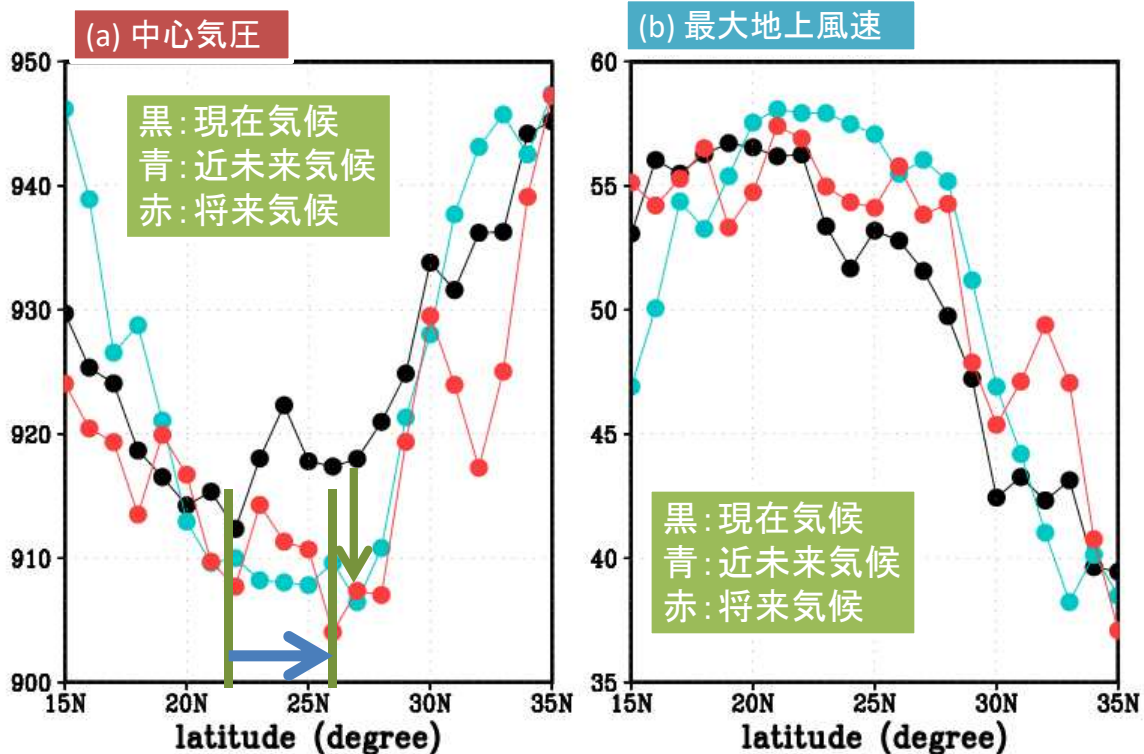


近未来気候



将来気候

## 現在・近未来・将来気候の実験(各60事例)の台風の平均強度の緯度分布



- 温暖化とともに北上する台風の強度減少が緩和
- 台風の最大強度の緯度が北上
- 日本の本州のような中緯度域では、温暖化に伴う台風リスクが平均的に増大

### まとめ

- ◆ 地球温暖化の進行は明白であり、それに伴い、**極端現象が増加**することが予測されている。
- ◆ 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。水蒸気は熱エネルギーと等価で、水蒸気が増加すると激しい積乱雲やそれに伴う豪雨が増加する。
- ◆ 東海豪雨のような**大雨は、地球温暖化とともに頻度も強度も増える**可能性がある。このような大雨は暖候期には、いつ、どこで起こっても不思議ではない。
- ◆ 日本の本州のような中緯度域では、**温暖化に伴う台風のリスクが平均的に増大**していることが示されてきている。
- ◆ 雲解像モデルを用いた実験では、**今世紀後半の温暖化気候において、最も強い台風は850~860hPa、80~90m/sに達**する。
- ◆ このような台風が上陸すれば、**暴風、大雨、洪水、竜巻、高潮などの極めて甚大な災害がもたらされる**だろう。
- ◆ 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、台風リスクはさらに増大**していくことが予想されるので、台風や高潮に対する**防災対策を長期的視野にたって、今からはじめる**必要がある。