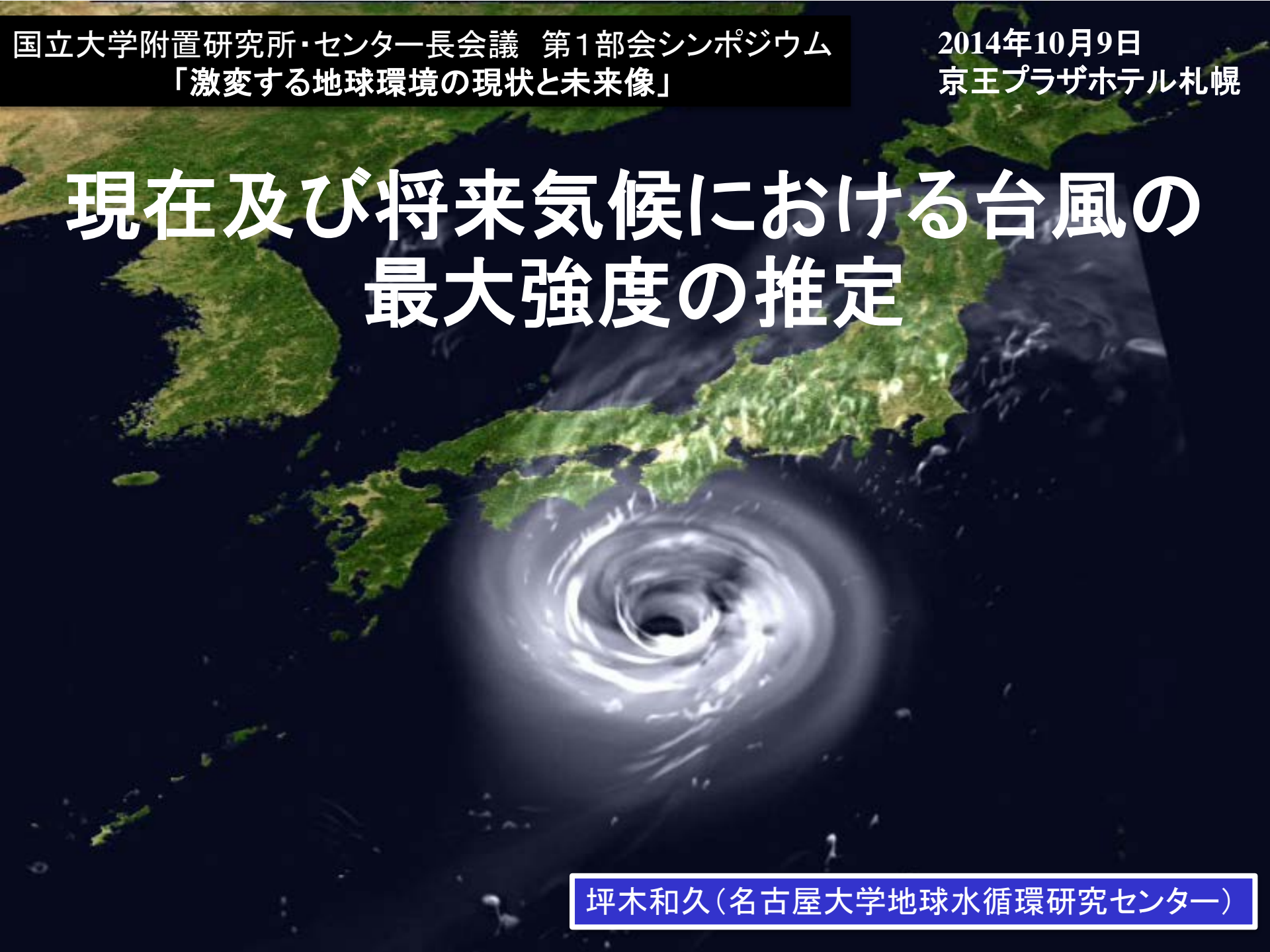


現在及び将来気候における台風の 最大強度の推定



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、その結果として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ことを一日も忘れてはならないはずである。**」

「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という事実である。**」

「文明が進むほど天災による損害の程度も累進する傾向があるという事実を充分に自覚して、そして平生からそれに対する防御策を講じなければならないはずであるのに、それがいっこうにできていないのはどういうわけであるか。そのおもなる原因は、畢竟(ひっきょう) **そういう天災がきわめてまれにしか起こらないで、ちょうど人間が前車の顛覆(てんぷく)を忘れたところにそろそろ後車を引き出すようになるからであろう。**」

中谷宇吉郎「天災は忘れられたるころ来る」

「実はこの言葉は、先生の書かれたものの中には、ないのである。(中略) 先生の代表的な随筆のひとつとされている「天災と国防」のなかには、これと全く同じことが、少し違った表現ででている。」

風水害等による保険金の支払い

過去の支払保険金（災害例）

順位	災害名	地域	年月日	支払保険金（単位：億円）			
				火災・新種	自動車	海上	合計
1	平成3年台風19号	全国	1991年9月26日～28日	5,225	269	185	5,680
2	平成16年台風18号	全国	2004年9月4日～8日	3,564	259	51	3,874
3	平成11年台風18号	熊本・山口・福岡等	1999年9月21日～25日	2,847	212	88	3,147
4	平成26年2月雪害	関東中心	2014年2月	2,318	217	—	2,536
5	平成10年台風7号	近畿中心	1998年9月22日	1,514	61	24	1,599
6	平成16年台風23号	西日本	2004年10月20日	1,112	179	89	1,380
7	平成18年台風13号	福岡・佐賀・長崎・宮崎等	2006年9月15日～20日	1,161	147	12	1,320
8	平成16年台風16号	全国	2004年8月30日～31日	1,038	138	35	1,210
9	平成23年台風15号	静岡・神奈川等	2011年9月15日～22日	1,004	100	19	1,123
10	平成12年9月豪雨	愛知等	2000年9月10日～12日	447	545	39	1,030

※ 一般社団法人 日本損害保険協会調べ

※ 千万円単位で四捨五入を行い、算出しています。

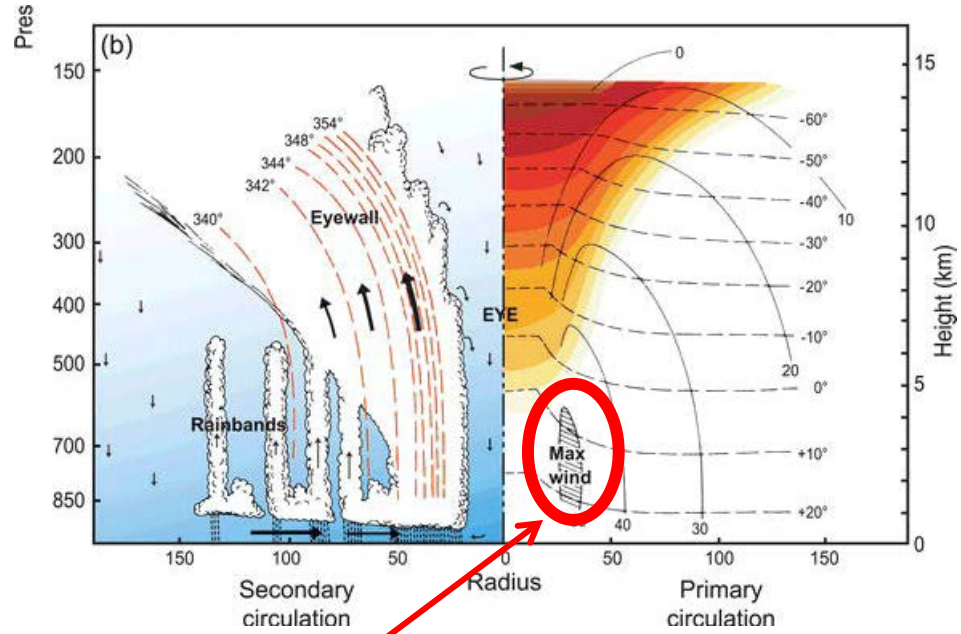
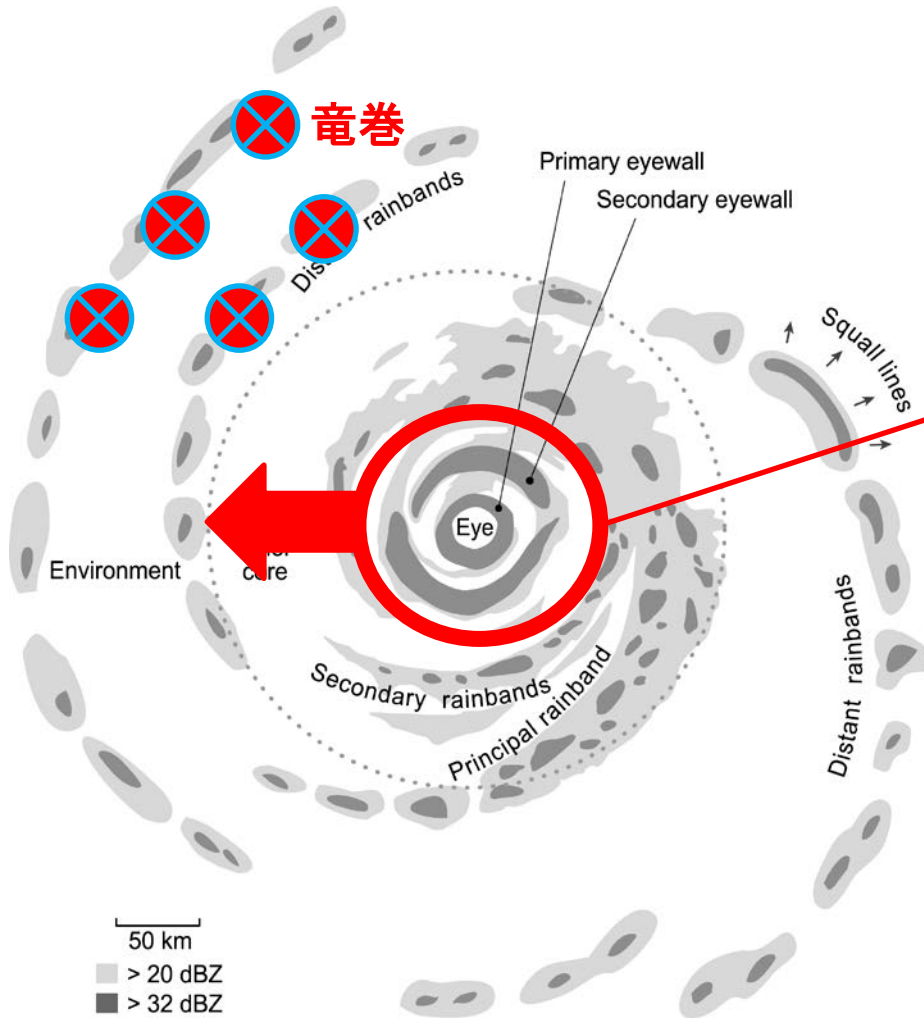
そのため、各項目を合算した値と合計欄の値が一致しないことがあります。

自然災害での支払額のうち風水害等による保険金の支払い（日本損害保険協会）

台風は依然として風水害の最も大きな原因である。

熱帯低気圧(台風)の構造

眼の壁雲と(スパイラル)レインバンド



最大風速

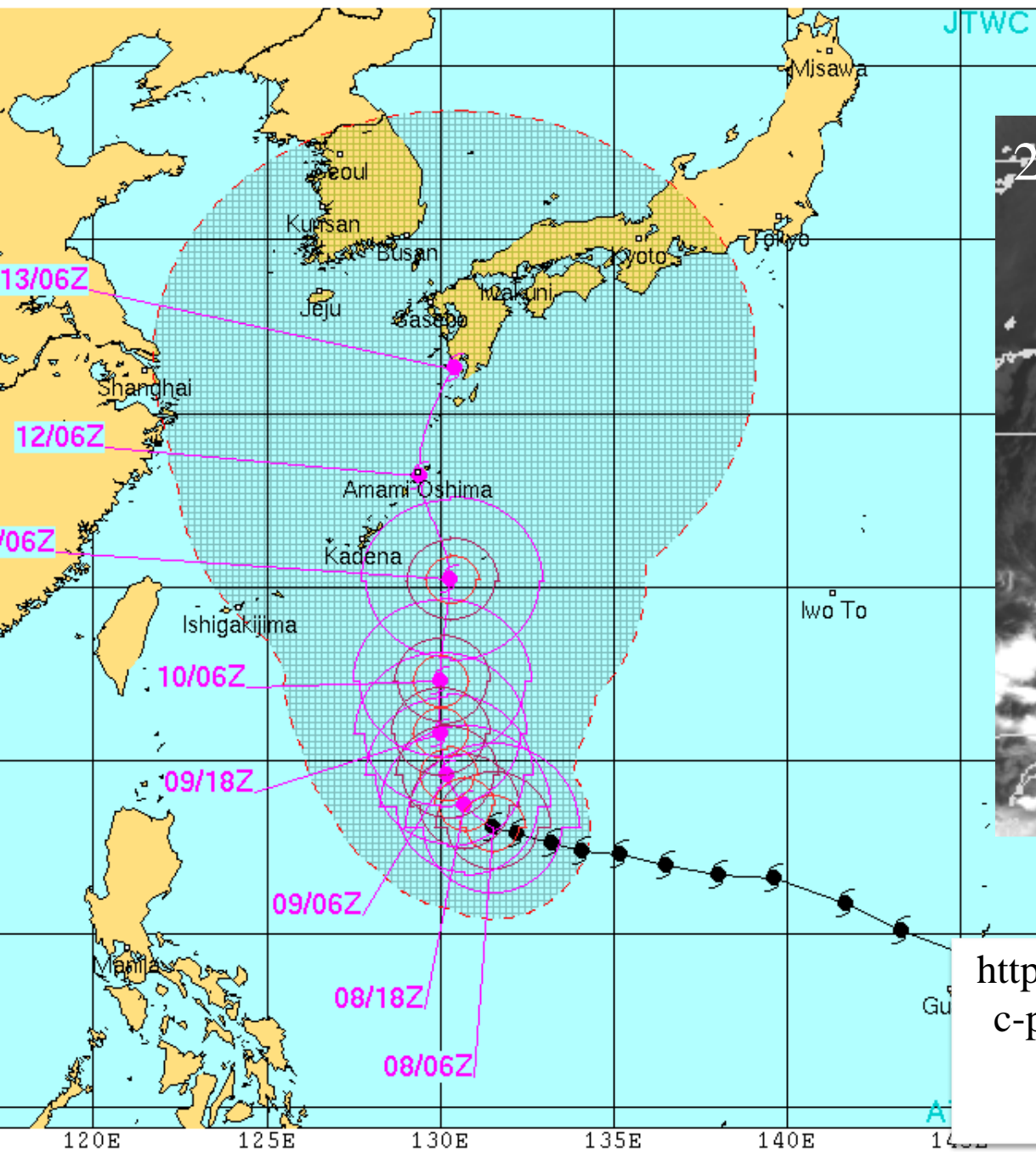
台風を特徴付ける量

- ◆ **強度**: 中心気圧・最大地上風速
- ◆ **大きさ**: 風速15m/sの半径(大型、超大型)
- ◆ **経路**
- ◆ **移動速度**
- ◆ **発生数**(他に上陸数や接近数)

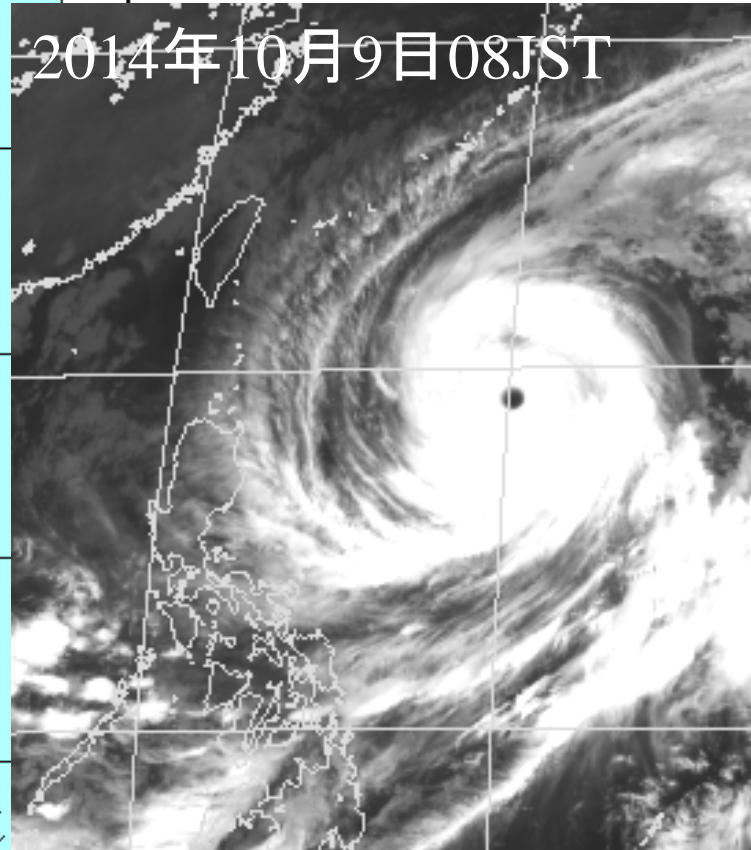
台風とは北西太平洋(赤道より北で東経180度より西の領域)または南シナ海の風速17m/s以上の風速を持つ熱帯低気圧

台風の階級	10分平均風速(m/s)	1分平均風速(m/s)
台風	17 m s ⁻¹	19 m s ⁻¹
強い	33-44 m s ⁻¹	37.5-50 m s ⁻¹
非常に強い	44-54 m s ⁻¹	50-61 m s ⁻¹
猛烈な	54 m s ⁻¹ 以上	61 m s ⁻¹ 以上

米国での西太平洋の熱帯低気圧の名前	10分平均風速(m/s)	1分平均風速(m/s)
Tropical Depression	<15.4 m s ⁻¹	< 17.5 m s ⁻¹
Tropical Storm	15.4-28.5 m s ⁻¹	17.5-32.4 m s ⁻¹
Typhoon	28.5-58.8 m s ⁻¹	32.4-66.9m s ⁻¹
Super-typhoon	58.8 m s ⁻¹ 以上	66.9 m s ⁻¹ 以上



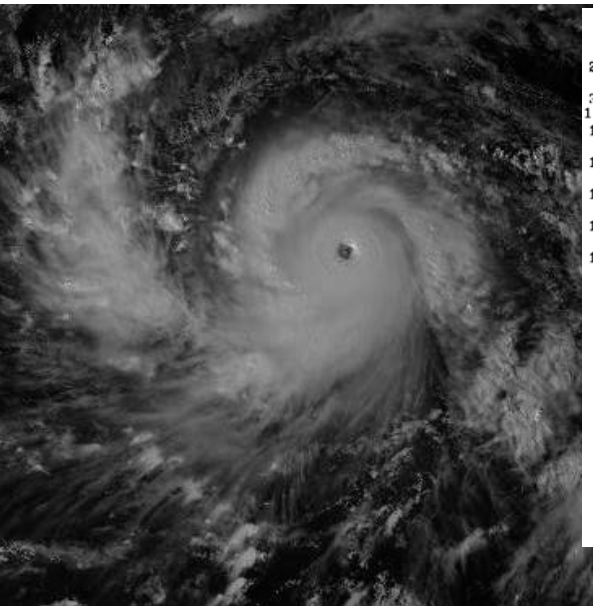
SUPER TYPHOON 19W (VONGFONG) WARNING
 WIPN31 PGIW 080900
 080600Z POSIT: NEAR 18.1N 131.5E
 MOVING 285 DEGREES TRUE AT 07 KNOTS



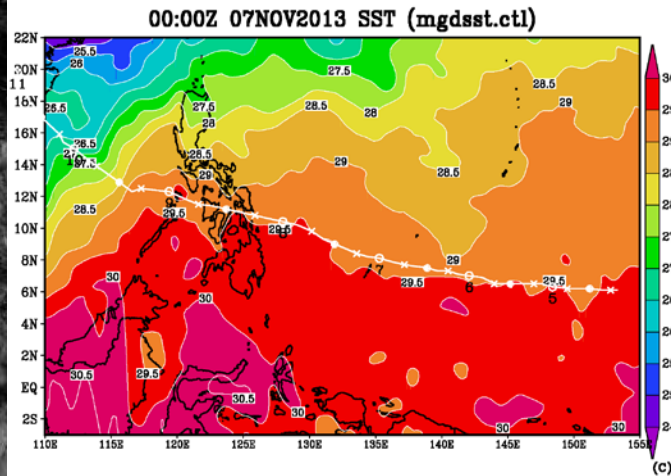
<http://www.usno.navy.mil/NOOC/nmf-c-ph/RSS/jtwc/warnings/wp1914.gif>
 台風19号 JTWC 解析
 2014年10月8日09UTC

スーパー台風とは何か

- ◆ 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。
- ◆ 防災の観点から台風の強度予測は極めて重要で、進路予測精度が年々向上しているのに対して、強度予測はほとんど精度が向上していない。



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



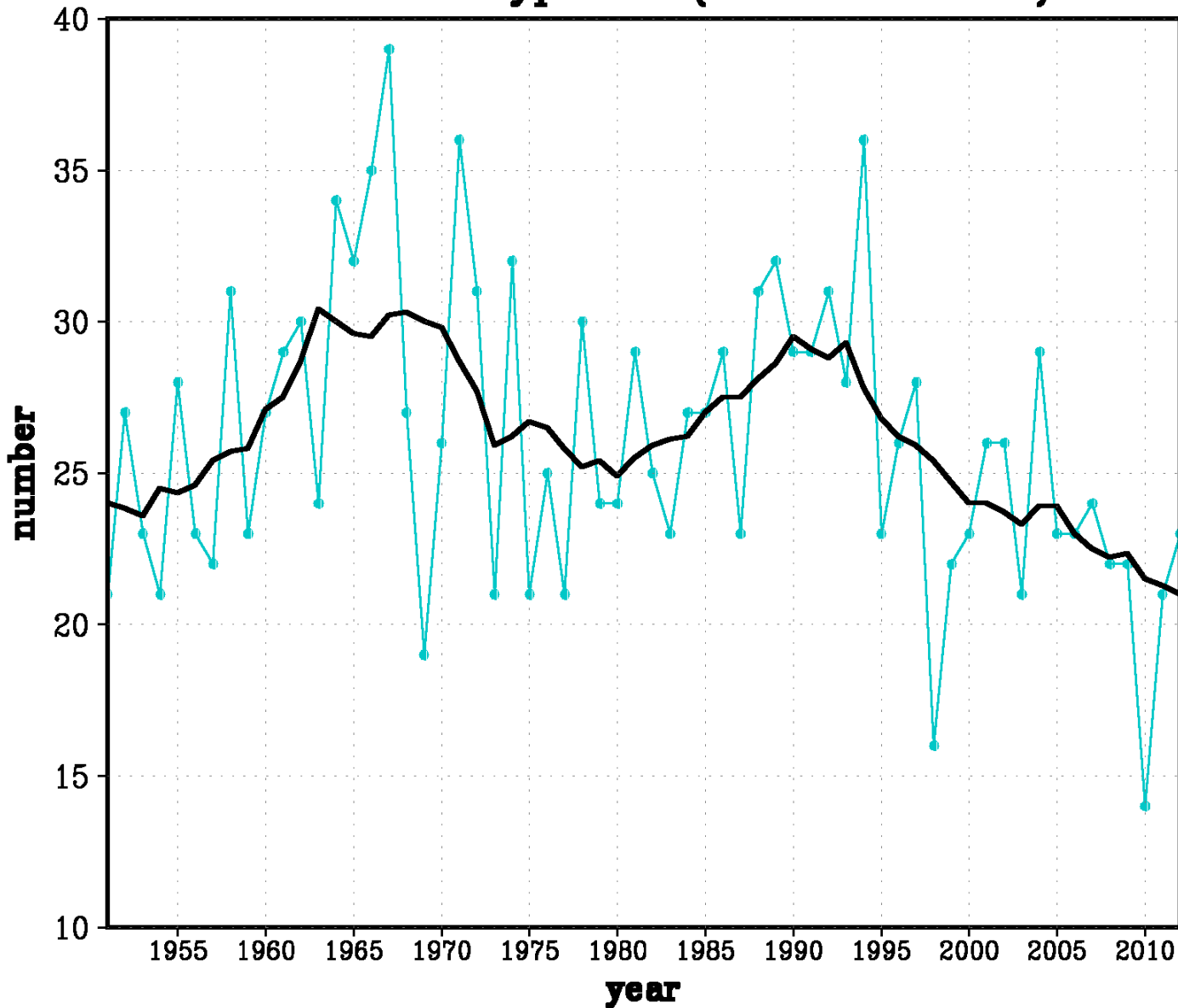
Super-typhoon Haiyanの経路と
2013年11月07日の海面水温分布



Super-typhoon Haiyanによるフィリピン
の災害

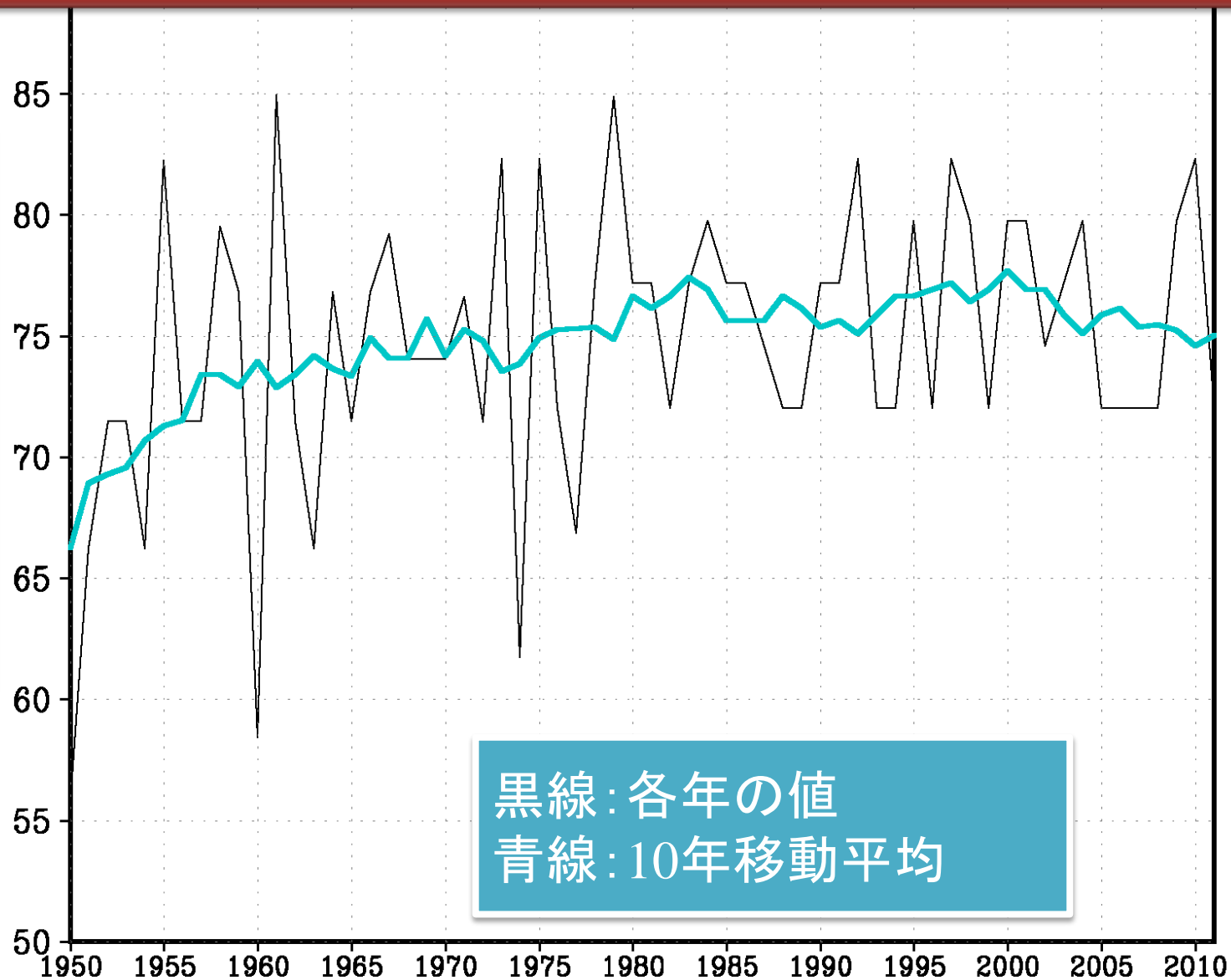
台風の数を経年変化(気象庁の観測:1951~2012年)

Number of typhoon (JMA RSMC data)



各年の最も強い台風の最大地上風速の年々変動 JTWCの1分平均の風速 (1950~2011年)

1分平均の風速



黒線: 各年の値
青線: 10年移動平均

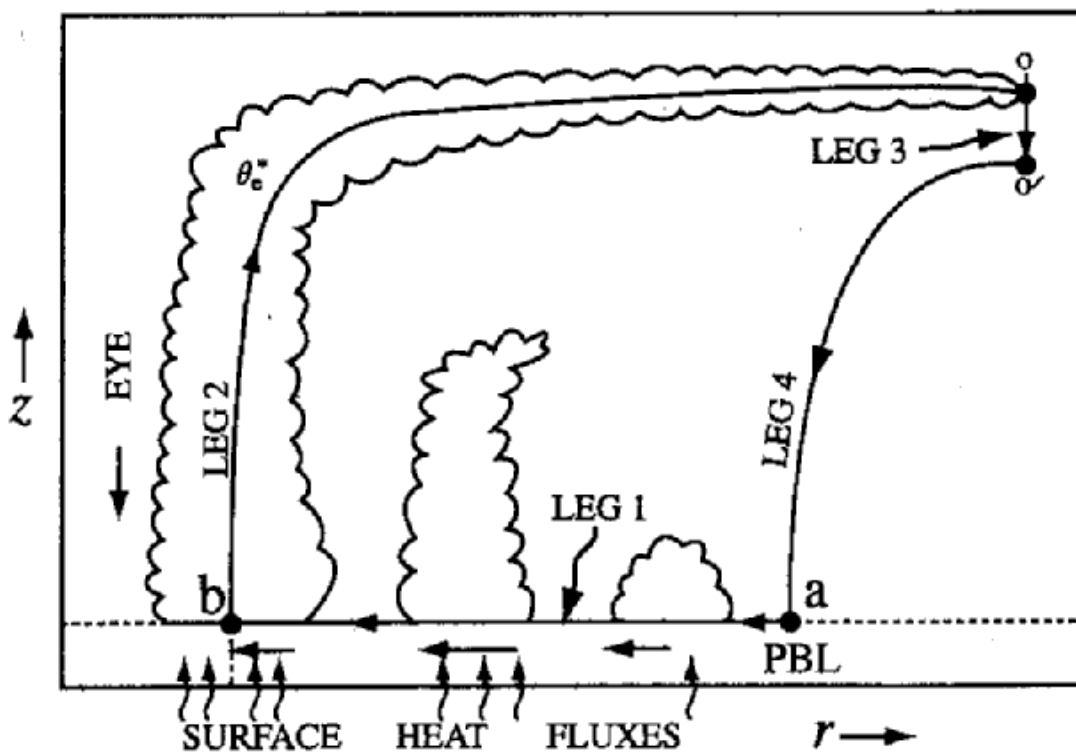
年

台風の最大強度の理論

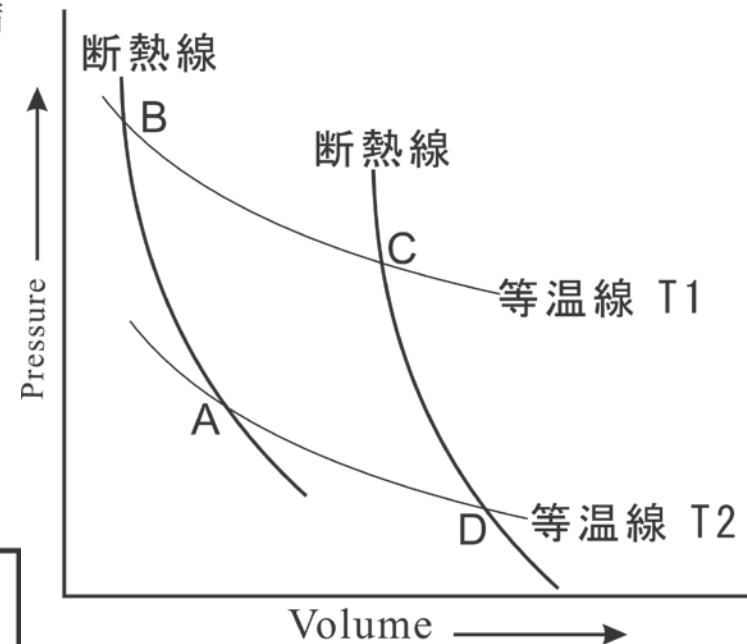
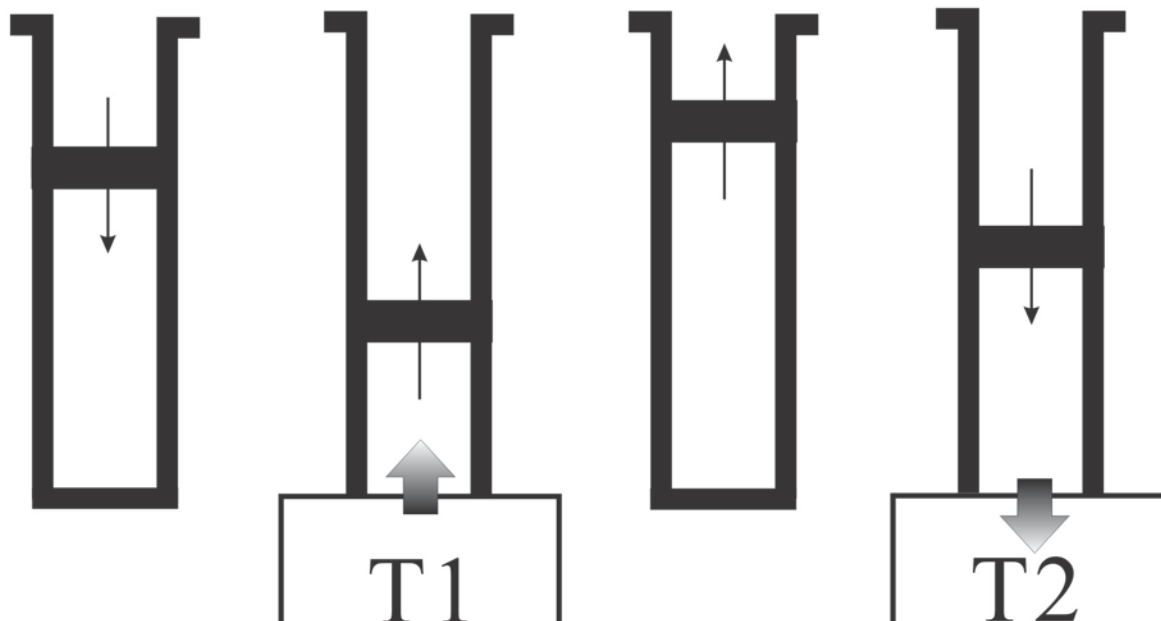
台風とは、海を高熱源、対流圏上層を冷熱源とするカルノーサイクルと考える。

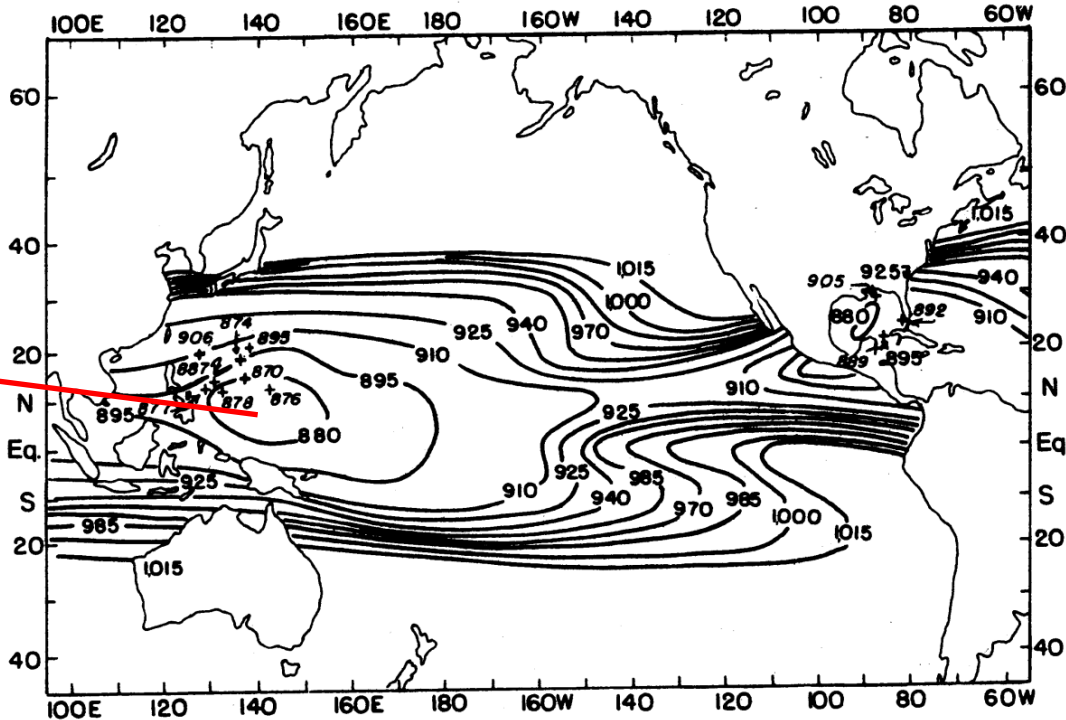
それらの温度差によって決まる熱力学的効率が大きいほど台風の強度は大きくなる。

Emanuel, 1985

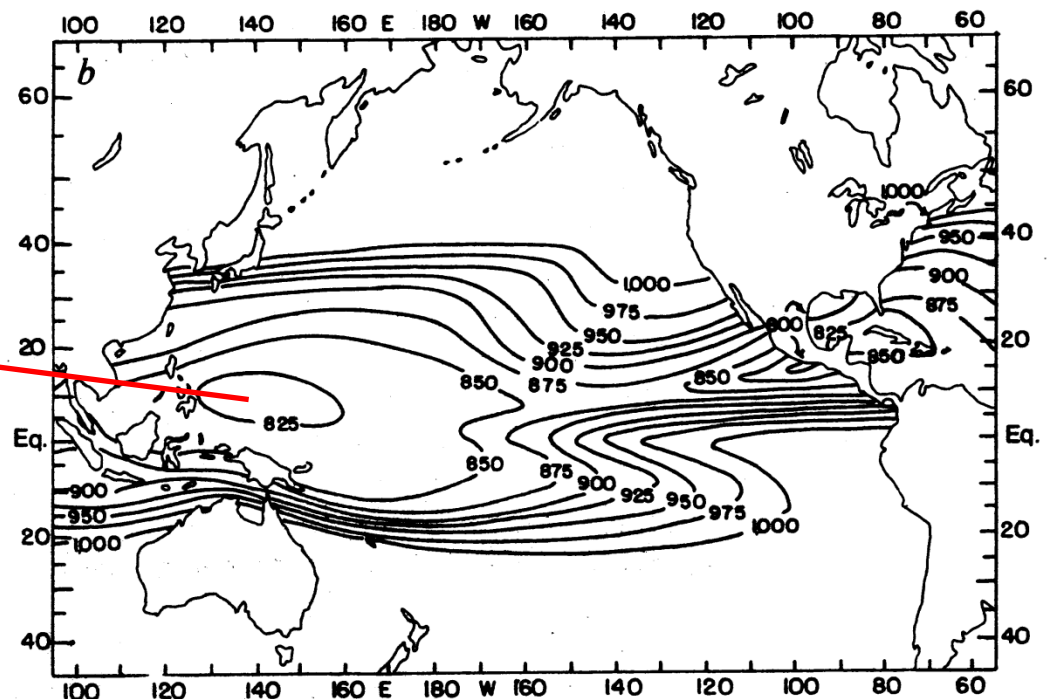


(I) 断熱圧縮 (II) 等温膨張 (III) 断熱膨張 (IV) 等温圧縮





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

将来、温暖化気候で最大強度の台風はどれくらい強くなるか？

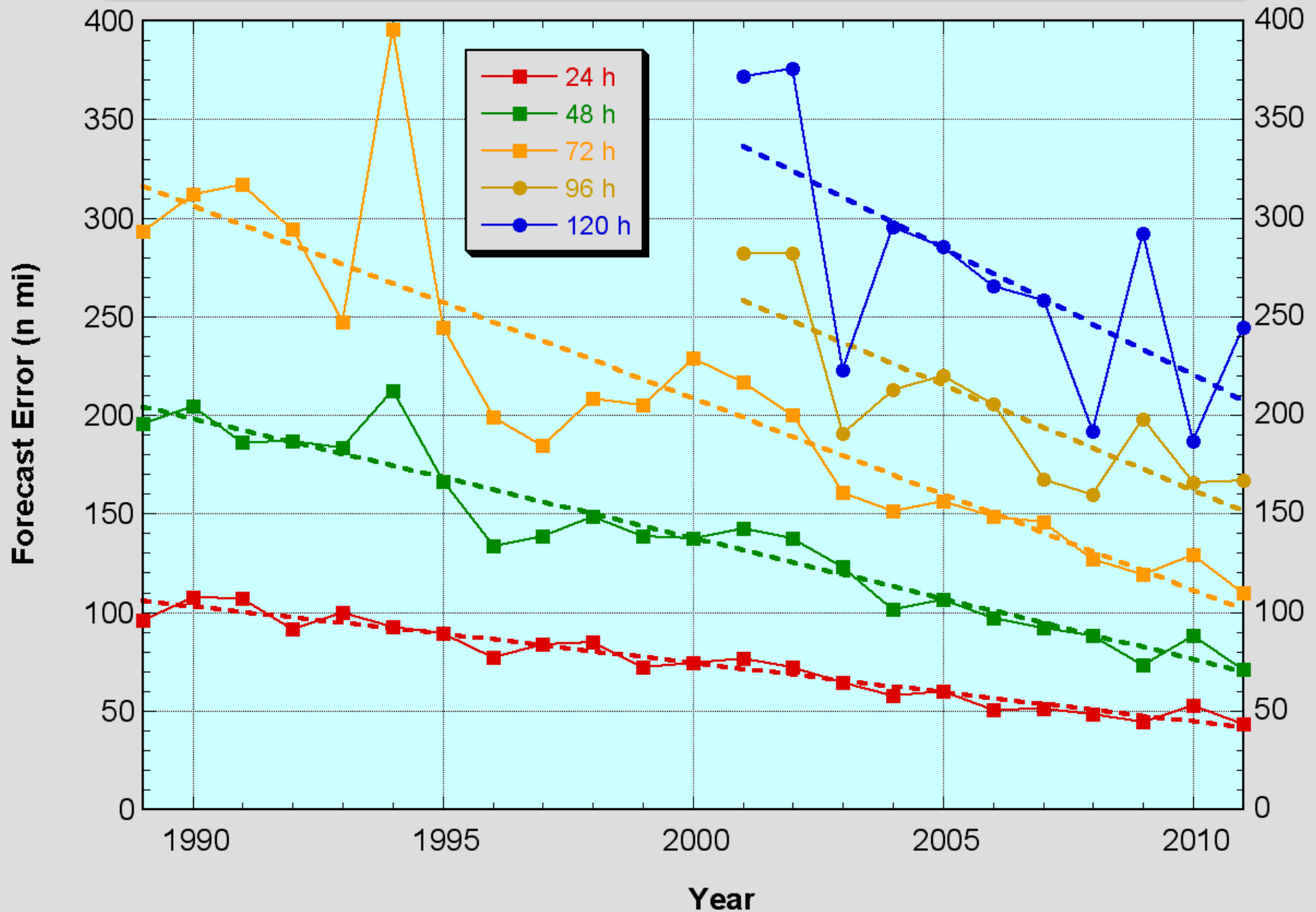
1. **観測的方法**：過去の観測された台風データから将来の台風の最大強度を推定する。
2. **理論的方法**：気象の理論から温暖化気候における台風の最大強度を推定する。
3. **数値的方法**：雲解像モデルを用いて温暖化気候における台風の最大強度を推定する。

雲解像モデルCReSSを用いた高解像度シミュレーション

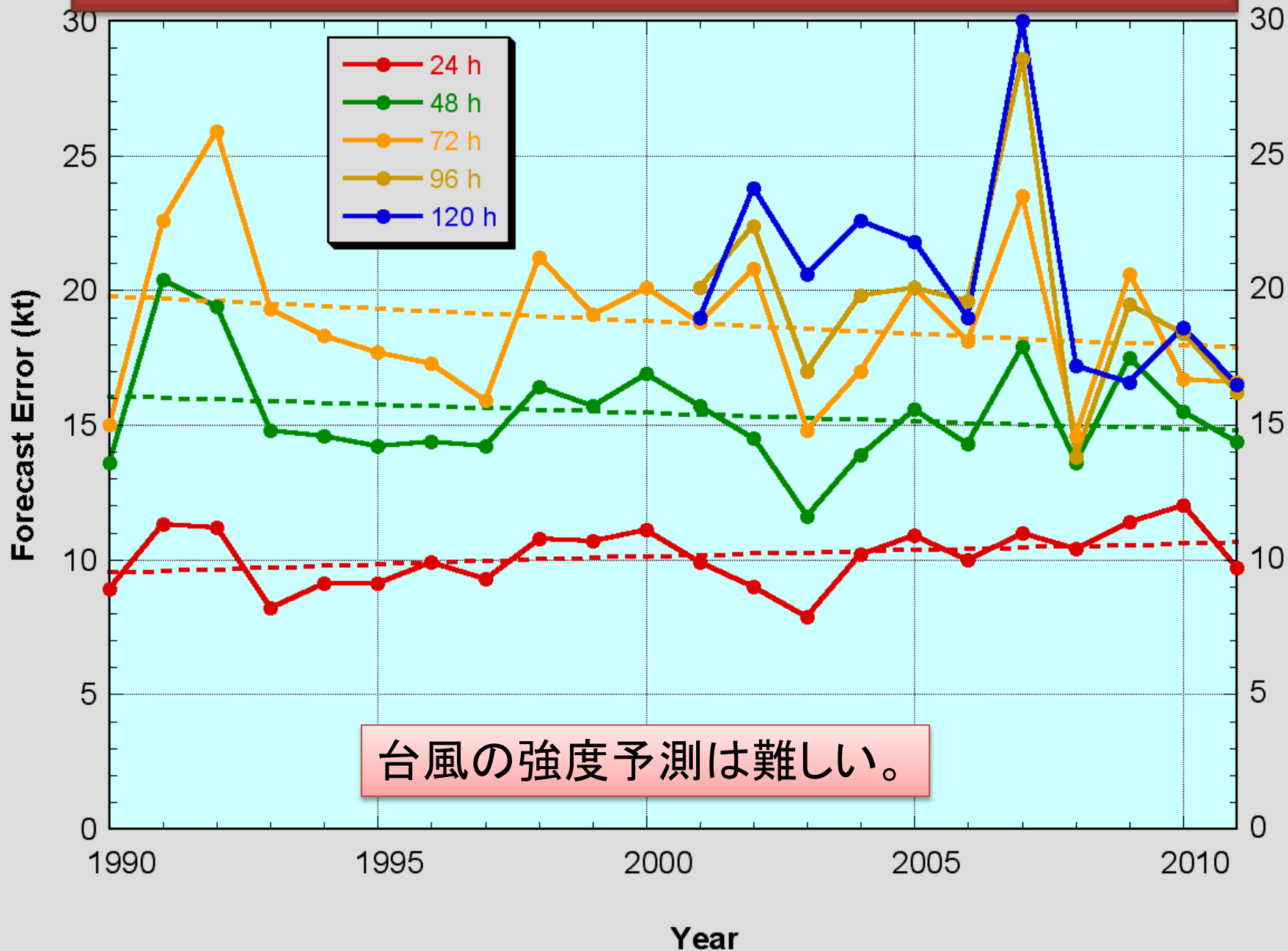
台風の数値シミュレーションの困難

- 台風全体のスケールは1000kmに及ぶ。このため全体の構造や移動を表現するためには、広い計算領域が必要。
- 台風を駆動するエネルギー源は、大きさが数キロメートルから数10km程度の積乱雲とその群である。このため台風の駆動源を表現するためには、高解像度の計算が必要。
- 積乱雲の水とエネルギー循環は、そのなかの雲・降水過程が規定する。このため詳細な雲物理が必要。台風の数値予報は非常に大規模な計算になる。

熱帯低気圧の進路予測の誤差の年々変動



熱帯低気圧の強度予測の誤差の年々変動



台風の強度予測は難しい。

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MPL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*

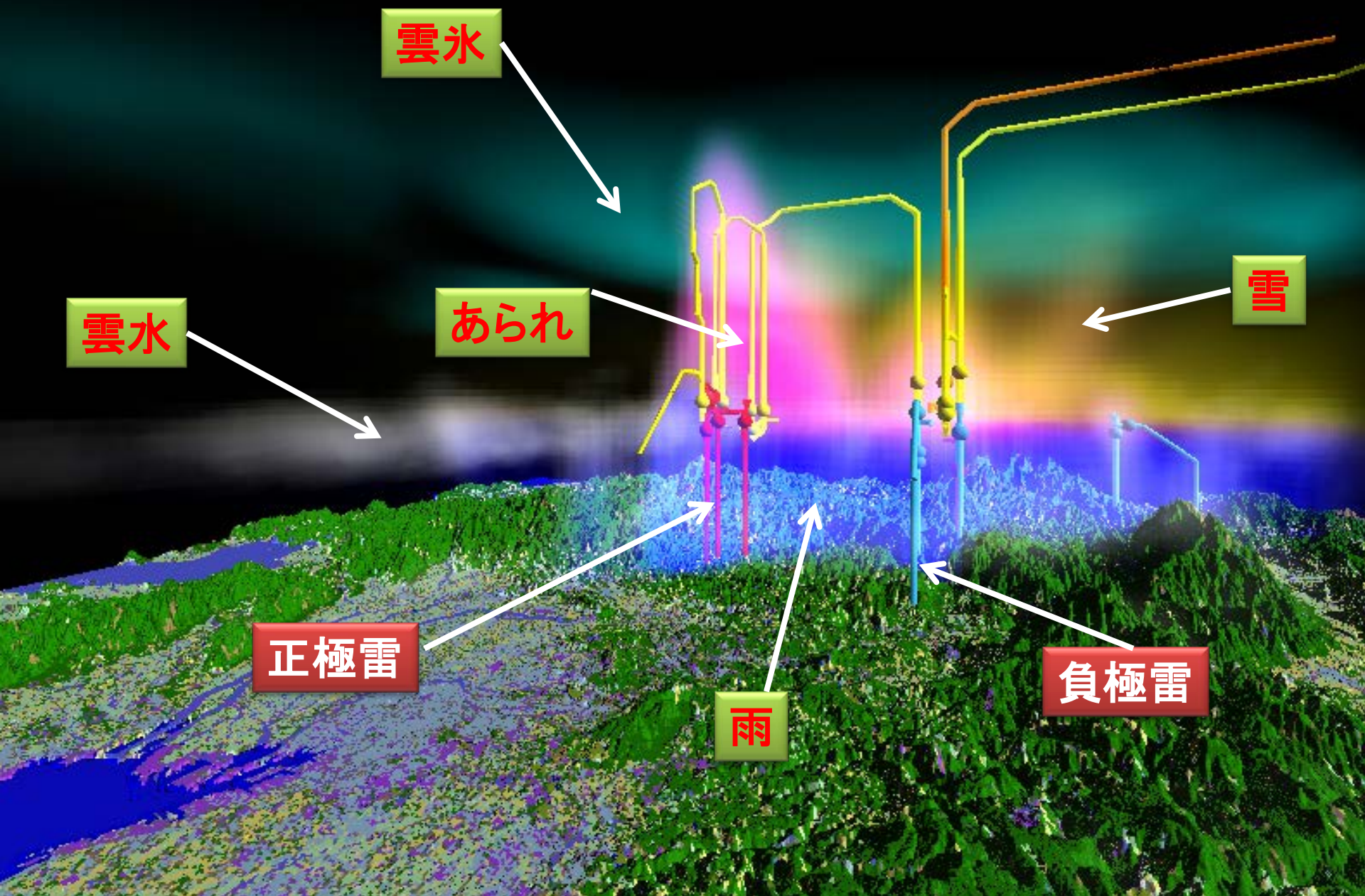
Iwabuchi, H. and K. Tsuboki, 2004: *Journal of Visualizations* (SGI賞)

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

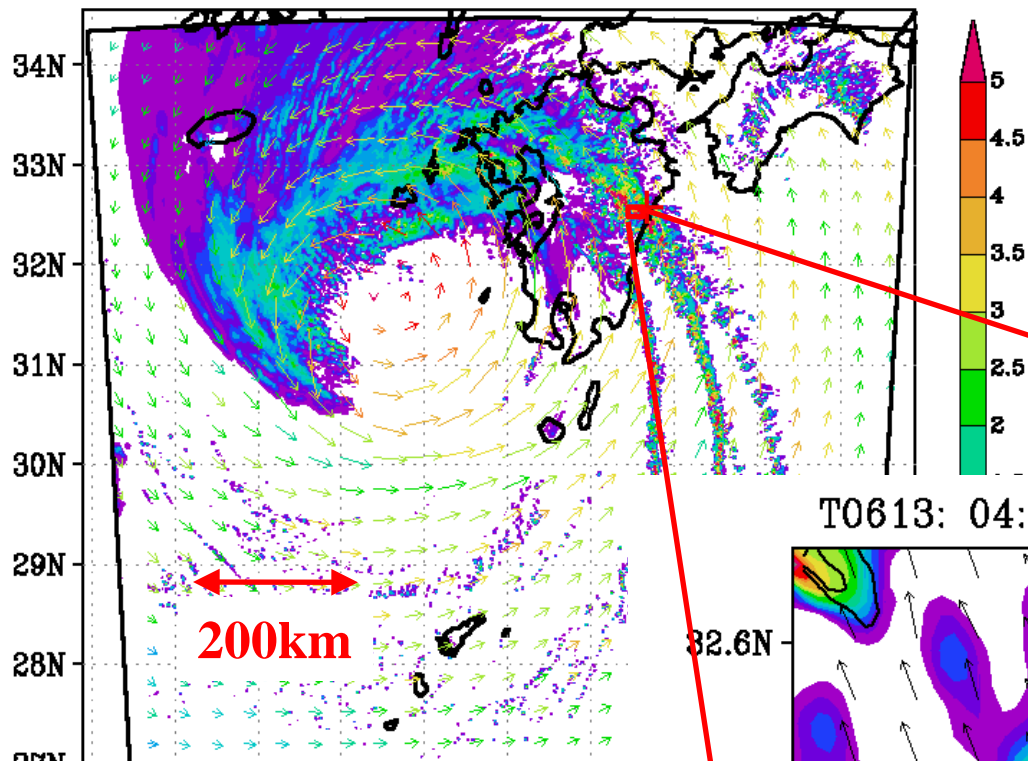
The Japan Time (2009.9.8)

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)

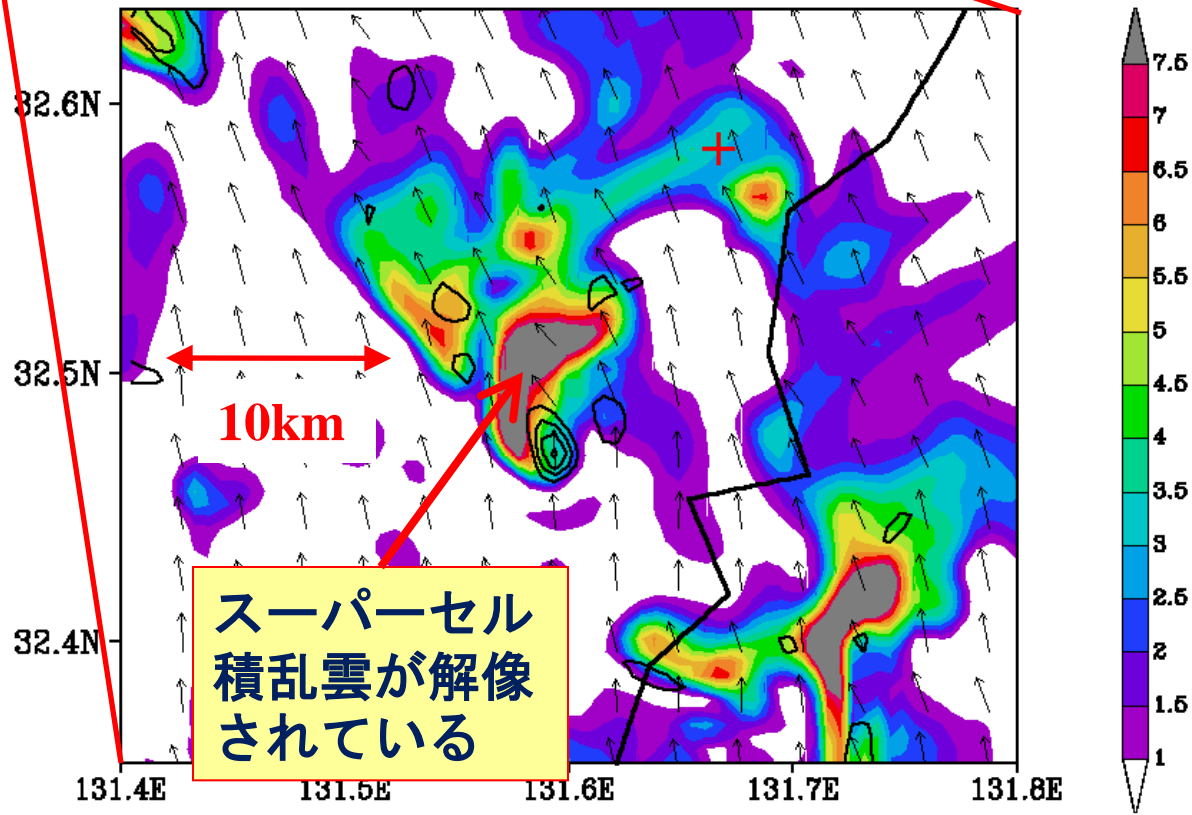


T0613: 04:50Z 17SEP2006 ht=1.91km No.59



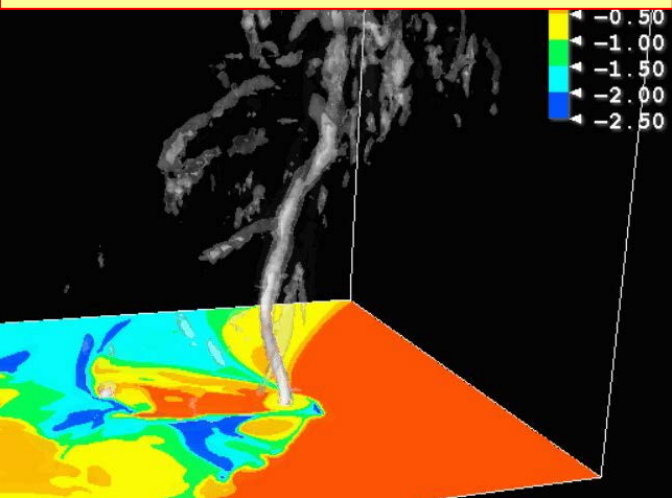
雲解像モデルCReSSを用いた、台風0613号の解像度500mのシミュレーション
台風全体のなかに降雨帯、さらそれを構成する積乱雲が解像されている。

T0613: 04:50Z 17SEP2006 ht=1.91km No.2



スーパーセル積乱雲が解像されている

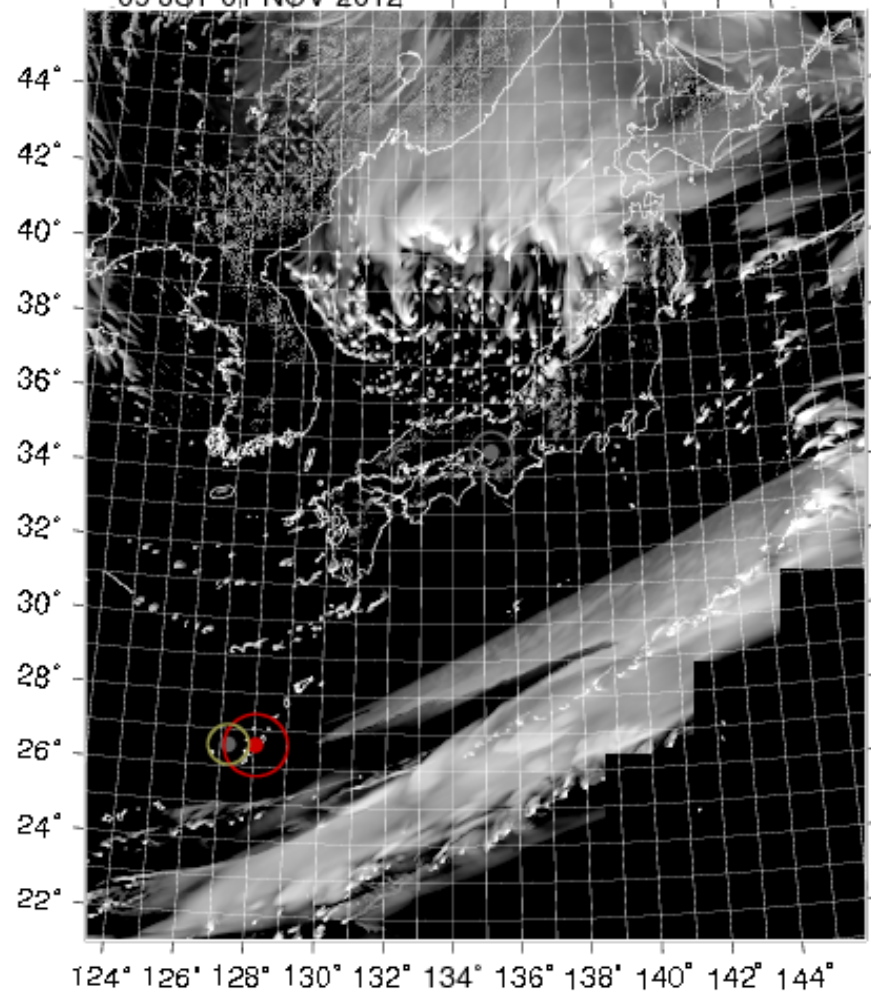
雲解像モデルCReSSを用いた、竜巻のシミュレーション



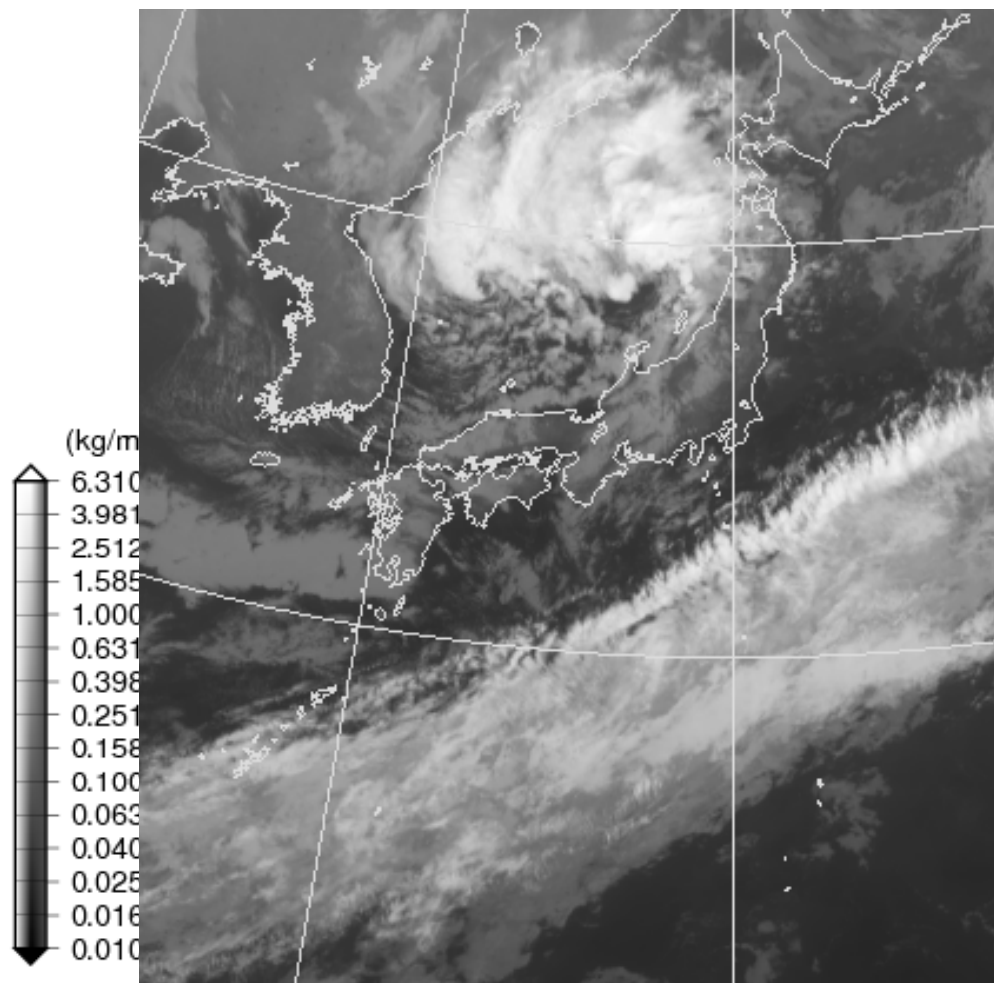
雲解像モデルCReSS解像度2kmの毎日の予報実験の計算例

CReSSによるシミュレーション

INTEGRATED MIXING RATIO OF QC, QR, QI, QG, AND QS
09 JST 01 NOV 2012



気象衛星による観測



IPCC第4次評価報告書(2007)：政策決定者向け要約より引用

- ◆ 気候システムの温暖化には疑う余地がない。
- ◆ 極端な気象現象の頻度と強度の変化及び海面水位上昇は、自然及び人間システムに、主として悪影響を及ぼすと予想される。
- ◆ 熱帯域の海面水温上昇に伴って、将来の熱帯低気圧(台風及びハリケーン)の強度は増大し、最大風速や降水強度は増加する可能性が高い。

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より引用

- ◆ 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。
- ◆ 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。
- ◆ 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」。

台風(熱帯低気圧)の強度推定と将来予測についての研究

理論

- ◆ 台風(熱帯低気圧)の可能最大強度(MPI)推定が、軸対称構造を仮定して発展してきている。これにより温暖化気候での熱帯低気圧の強度の推定が行われている。(Emanuel 1986; Bister and Emanuel 1998; Holland 1997)
- ◆ しかしながら、非軸対称構造など考慮されていない要素の効果については、未解明な点が多い。

高解像度全球モデル

- ◆ 20km解像度の全球モデル(AGCM)は、台風の将来予測を大きく進歩させた。温暖化に伴い熱帯低気圧の数は減るが、強い熱帯低気圧は増える。(Oouchi et al. 2006; Muraami et al. 2011)
- ◆ しかしながら、この解像度は台風の眼の壁雲を解像していないので、極端に強い台風の強度を量的に予測ができるかどうか不明。
- ◆ 静力学近似と対流パラメタリゼーションは、強度の予測に不確定性の原因となる。

全球非静力学モデル

- ◆ 非静力学全球モデル(Satoh et al. 2008; Fudeyasu et al. 2008; Yamada et al. 2010) はこれらの不確定性を排除したが、現状の解像度はまだ不十分である。
- ◆ 最近の研究では熱帯低気圧の内部コアの構造を表現するためには2km以下の解像度が必要。(Gentry and Lackmann 2010)

ダウンスケールシミュレーション

- ◆ 全球シミュレーションのデータを初期値・境界値として領域モデルに与えて、台風の存在する領域のシミュレーション行う。
- ◆ ダウンスケール実験により、太平洋でも大西洋でも台風やハリケーンなどの熱帯低気圧の強度が増大することが示されてきている。(Bender et al. 2010; Knutson et al. 1998)
- ◆ 2km解像度の理想条件のダウンスケール実験により、温暖化により熱帯低気圧の強度が増大することが示された。(Hill and Lackmann 2011)

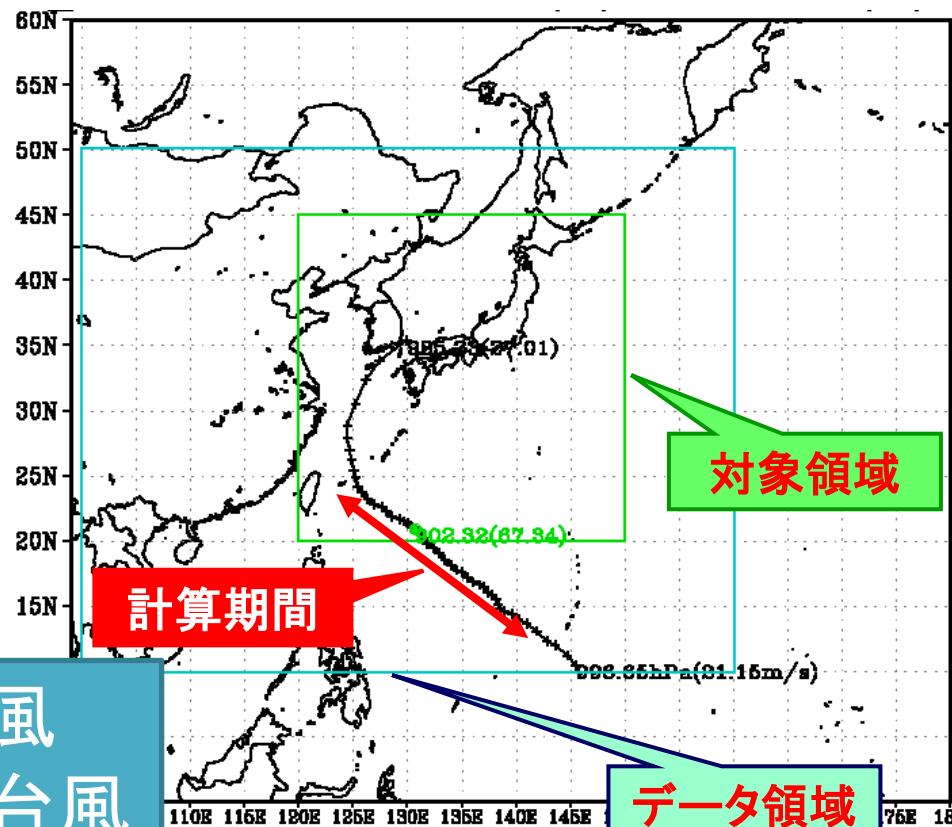
問題点:

- ◆ 温暖化に伴い台風の中で最も強いカテゴリーのスーパー台風（最大地上風速 67 ms^{-1} 以上、ハリケーンカテゴリー4・5に相当）の強度がどれくらい増加するのかは、量的に示されていない。
- ◆ そのために雲解像モデルを用いた高解像度のシミュレーションが必要。

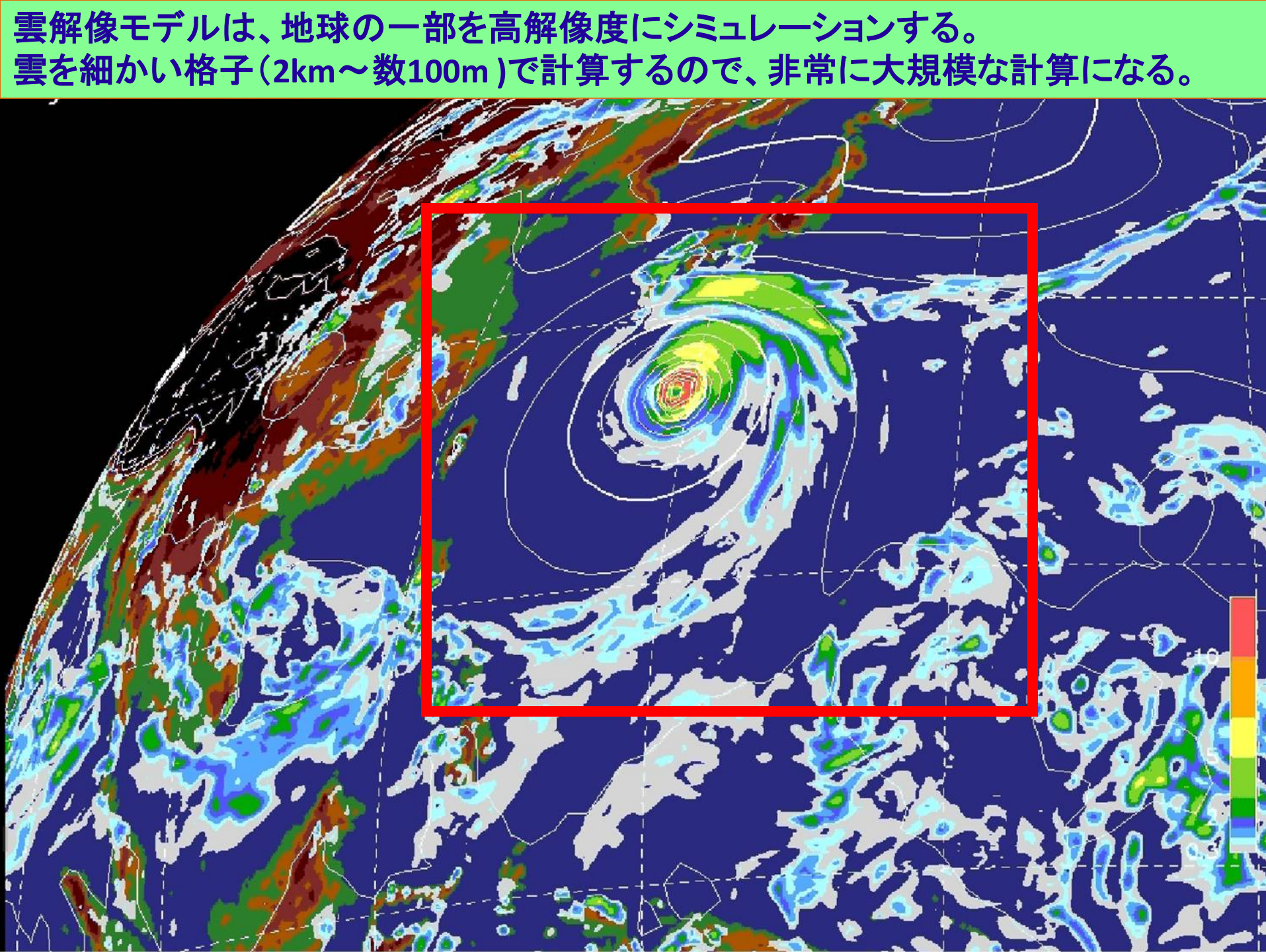
現在気候・温暖化気候の台風についての雲解像実験

気象研究所20kmGCMを用いた現在気候・温暖化気候の全球シミュレーション実験で発生した台風のうち、次の条件で選択した台風について、雲解像モデルCReSSを用いた高解像度(2km)シミュレーション実験を実施した。

1. 台風のライフタイムの中で、最低中心地上気圧が970hPa以下になること。(発達した強い台風であること。)
2. そのときの中心の位置が、東経120-150度、北緯20-45度の領域(図中の緑の枠)にあること。(シミュレーションを行うために、十分データがある領域に最発達時があること。)

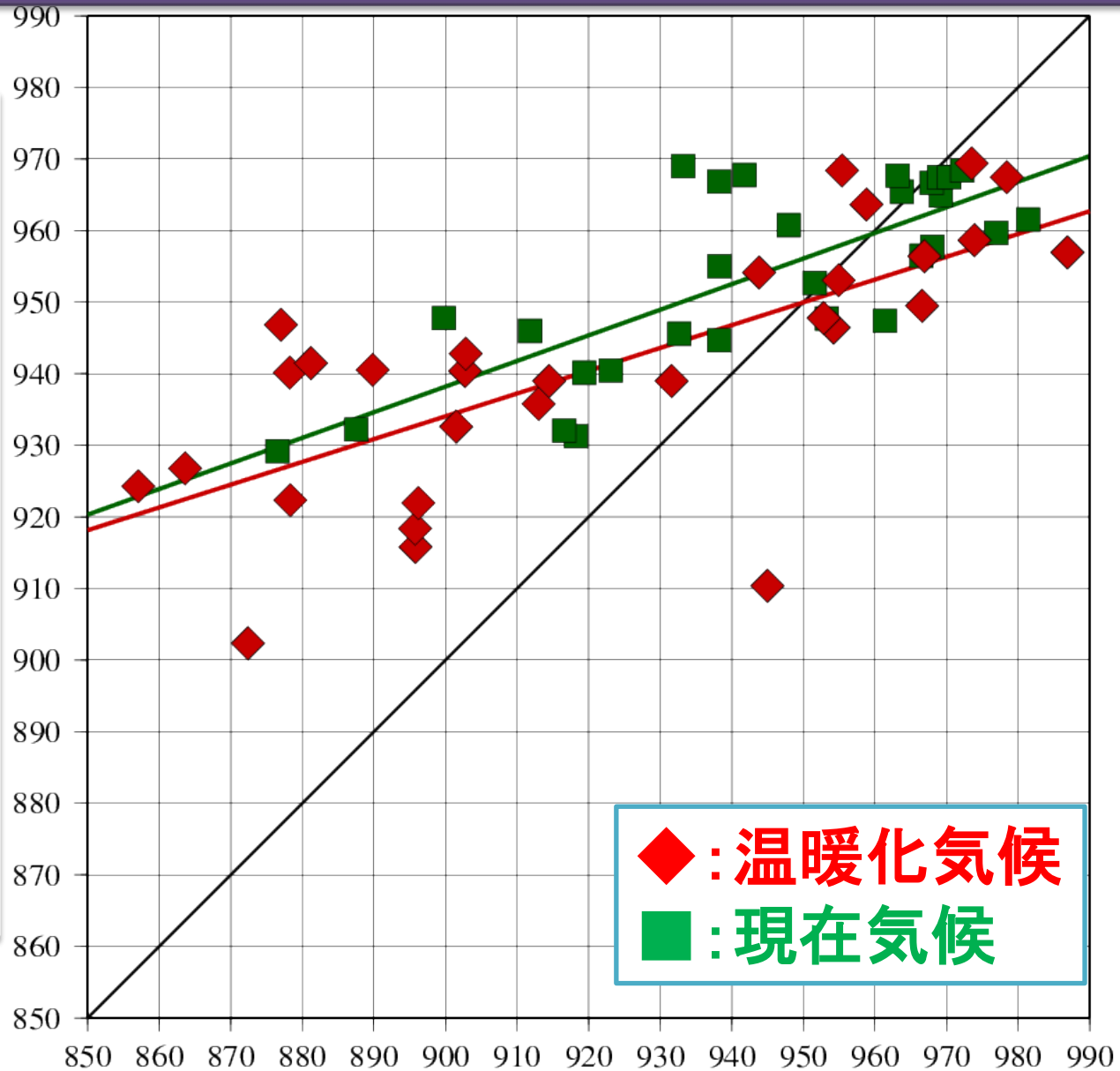


現在気候: 上位30事例の台風
温暖化気候: 上位30事例の台風



AGCMと雲解像シミュレーションの最低中心気圧の散布図

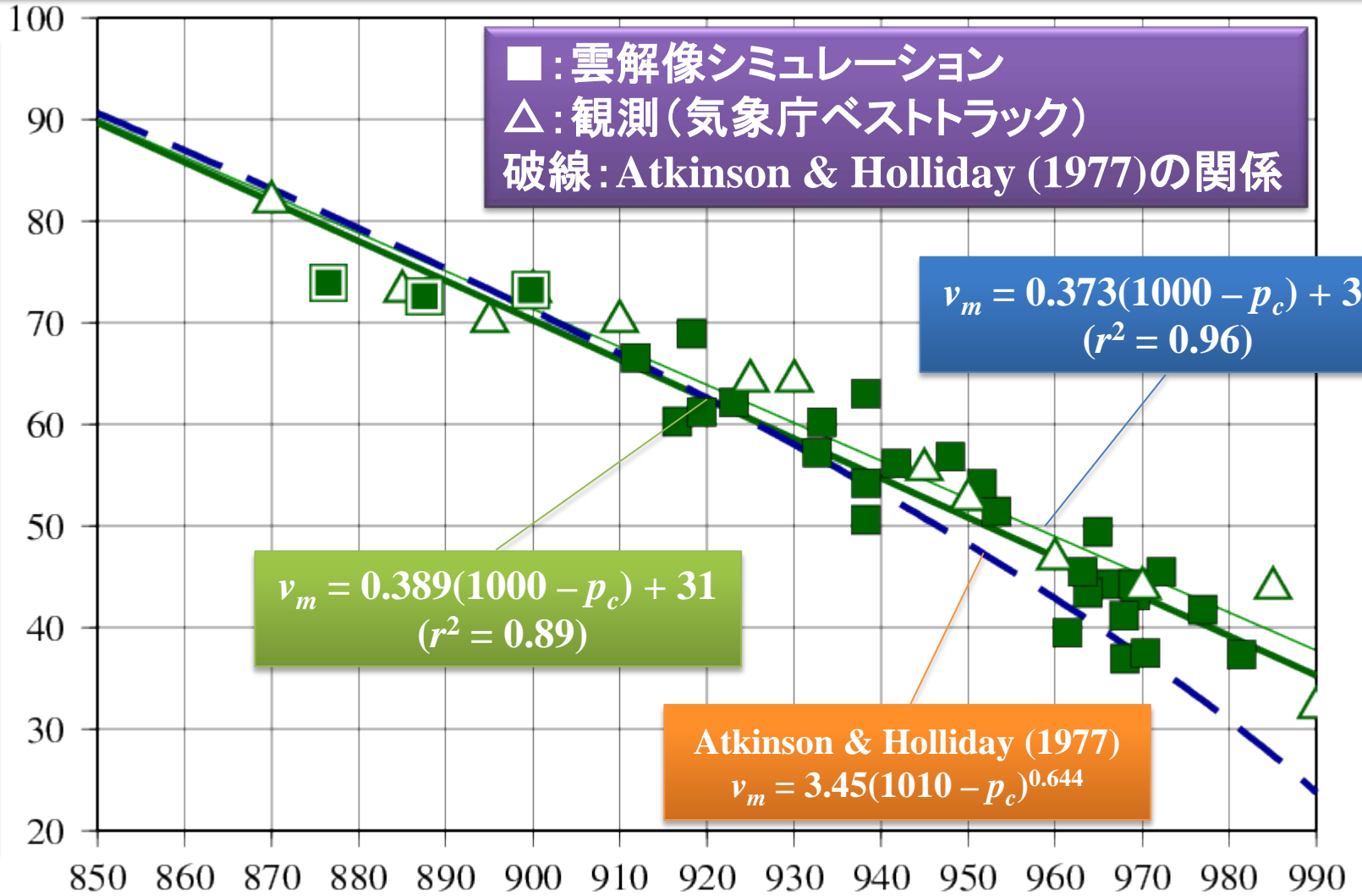
全球モデルにおける最低中心気圧 (hPa)



雲解像モデルにおける最低中心気圧 (hPa)

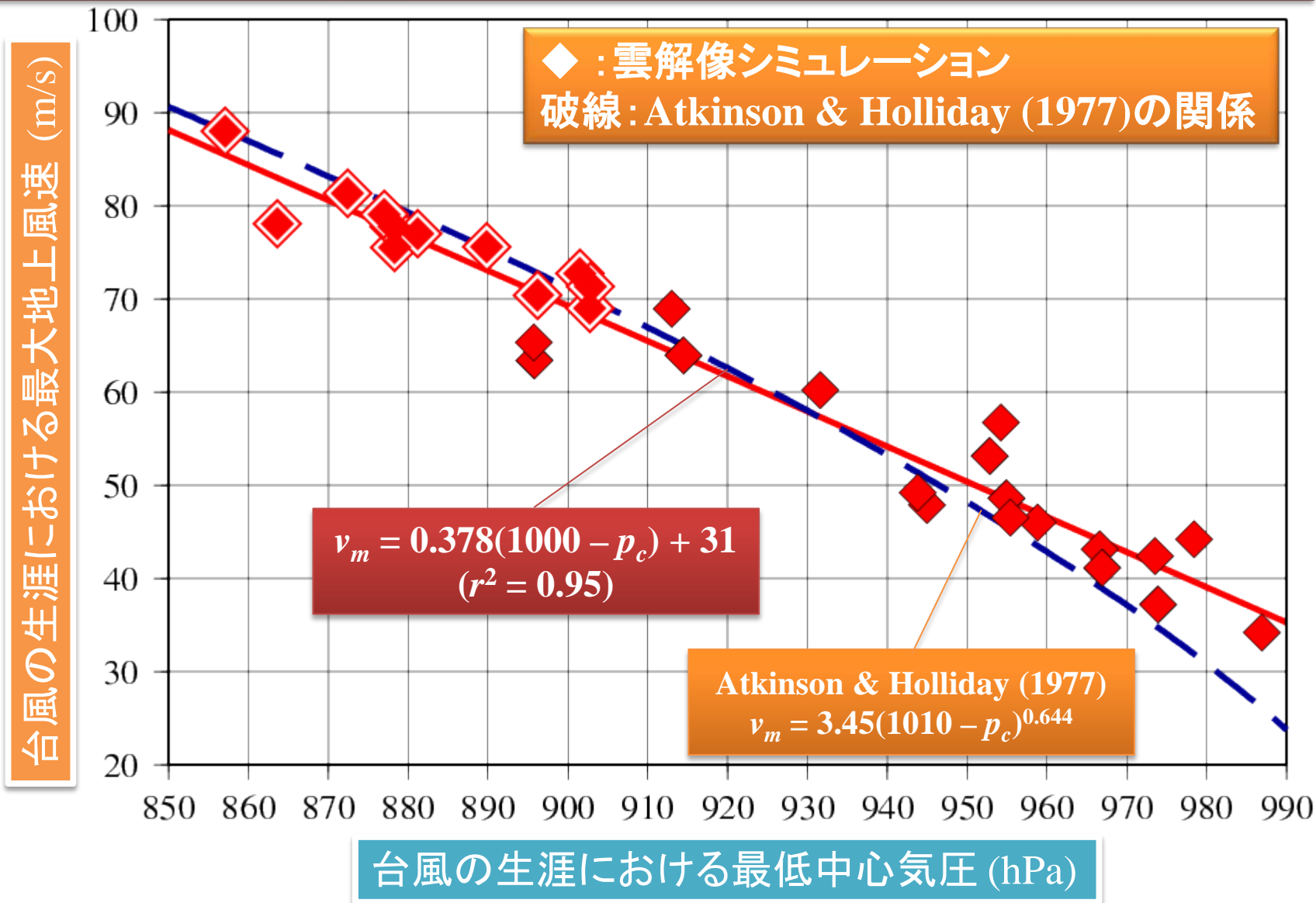
現在気候の台風の最低中心気圧と最大地上風速の散布図

台風の生涯における最大地上風速 (m/s)



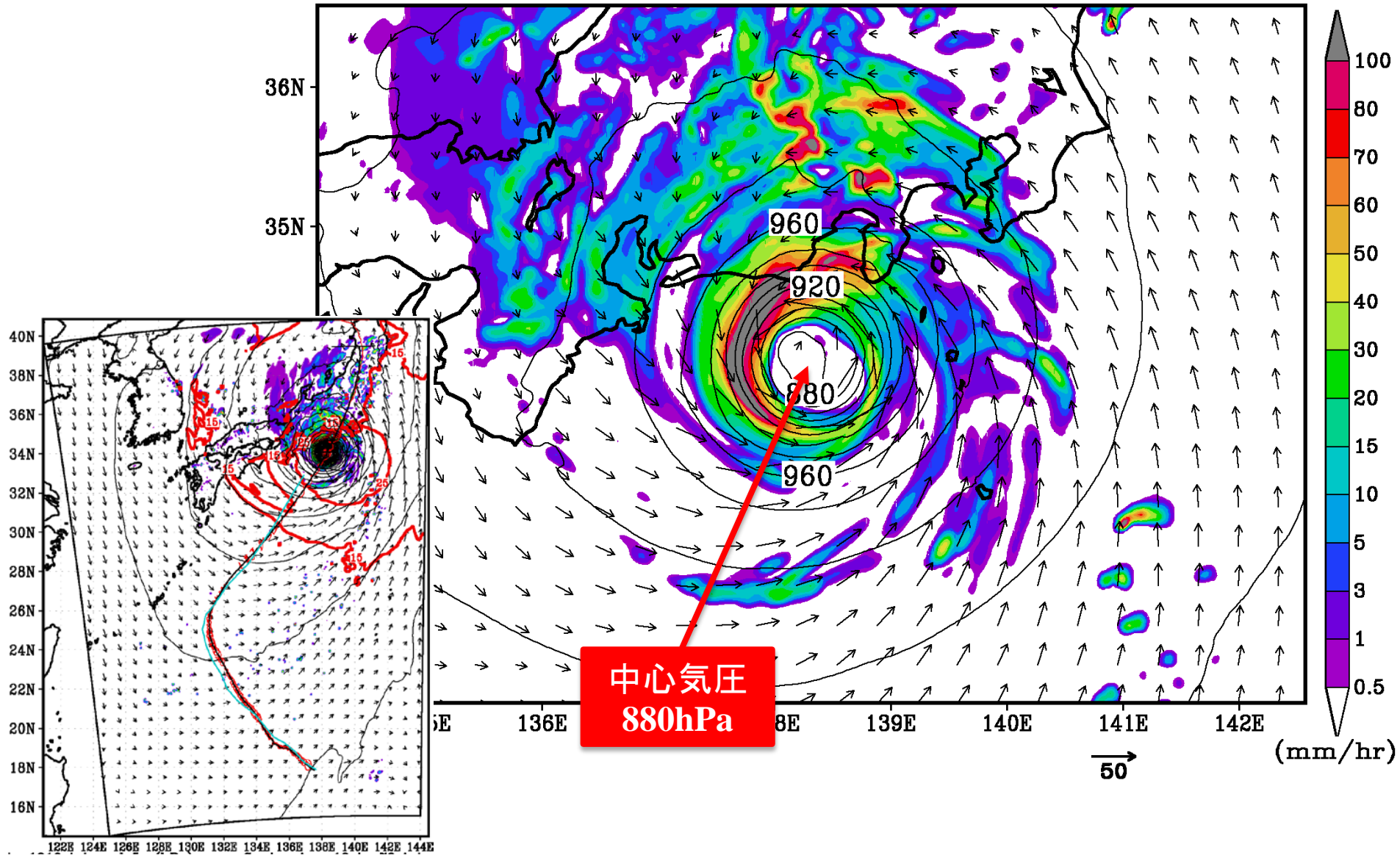
台風の生涯における最低中心気圧 (hPa)

温暖化気候の台風の最低中心気圧と最大地上風速の散布図



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



台風強度をより精度よくシミュレーションするための現在進行中の研究

- 非静力学大気海洋波浪結合モデル
- 台風上部のアウトフローレイヤーの巻雲
- 歴史的台風の再現実験：伊勢湾台風(Vera, 1959)、狩野川台風(Ida, 1958)、第2室戸台風(Nancy, 1961)

雲解像大気モデル

(Cloud Resolving Storm Simulator)

名古屋大学

DX = 4km

初期値・水平境界条件.: GPV from NPD/JMA

非静力海洋モデル

(NonHydrostatic Ocean model for ES)

海洋研究開発機構

DX = 4km, DZ = 2 m for top 100 m

初期値・境界条件: JCOPE2 再解析

乱流クロージャーモデル (Furuichi et al., 2012; Nakanishi & Niino, 2009)

波浪モデル

マイアミ大学(Donelan et al., 2012)

DX = 4km

$$E(x, y, \theta, \sigma)$$

θ 波向 [rad] 24グリッド

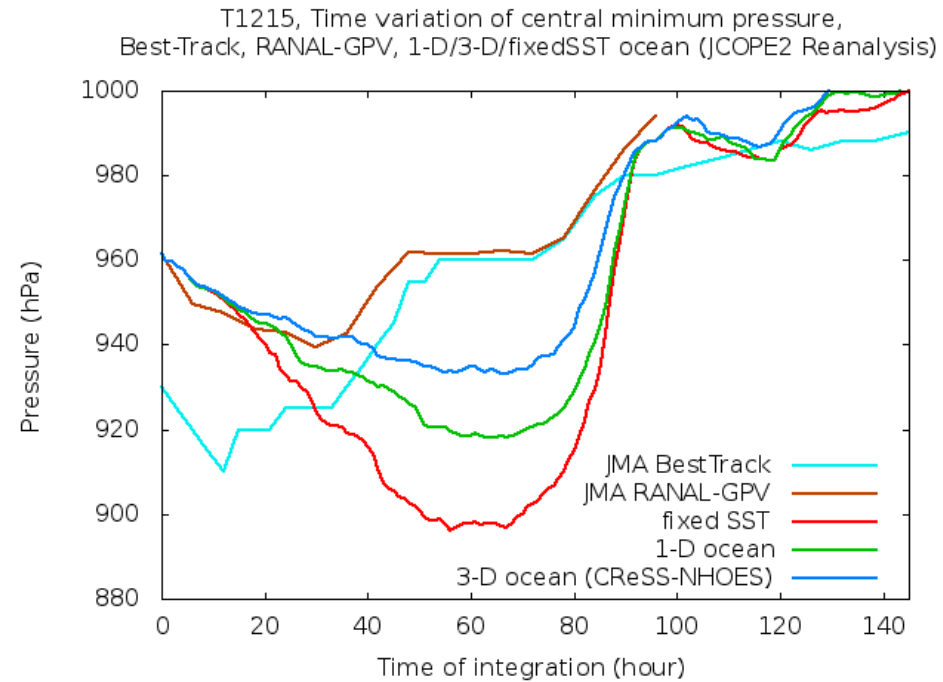
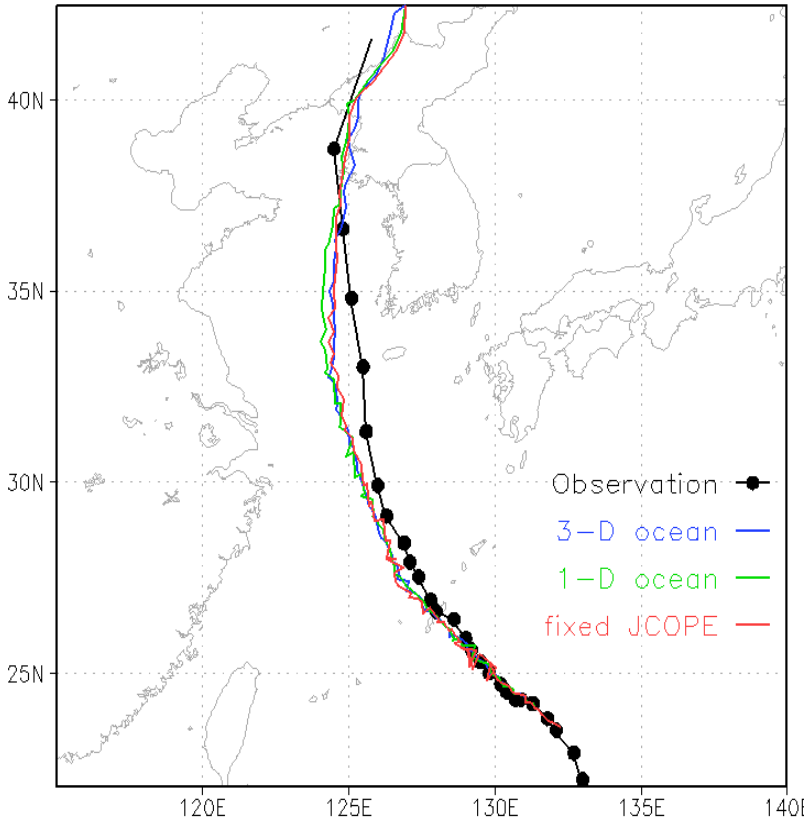
σ 波の振動数 [1/s] 36グリッド

ES用ベクトル化作業終了

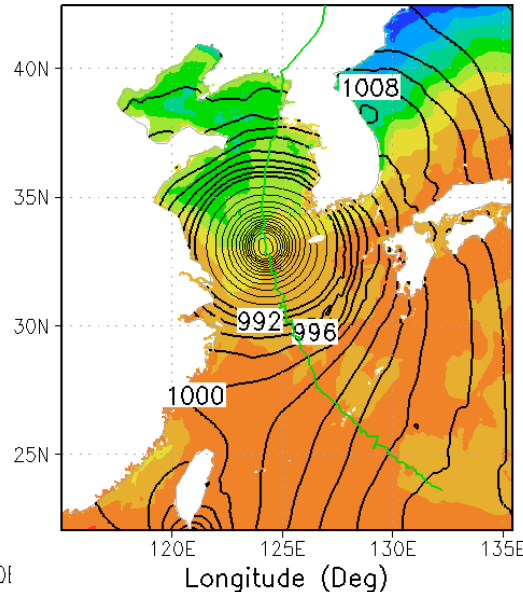
非静力学海洋モデルの結合のインパクト 2012年台風15号(BOLAVEN)を例として。

- ◆ 台風の経路についてはほぼ同じ。
- ◆ SST固定と比較して約35hPa、1次元モデルと比較して約15hPa、中心気圧が高くなる。
- ◆ SSTの低下の程度が顕著に異なる。

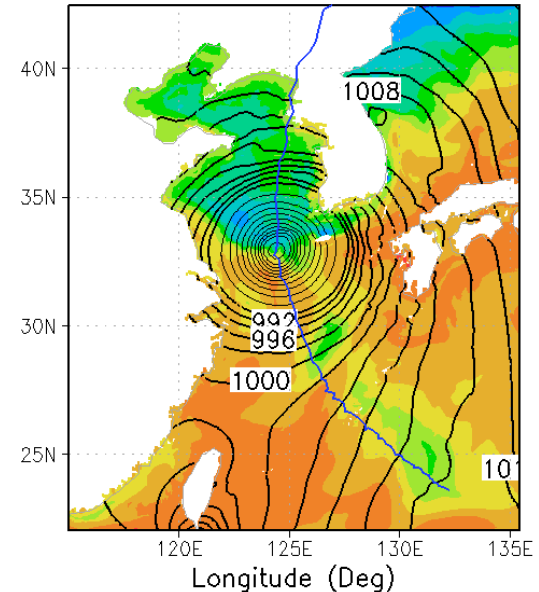
T1215 Tracks: fixed SST, 1-D, 3-D Oceans, (JCOPE2) and observation (JMA BestTrack)



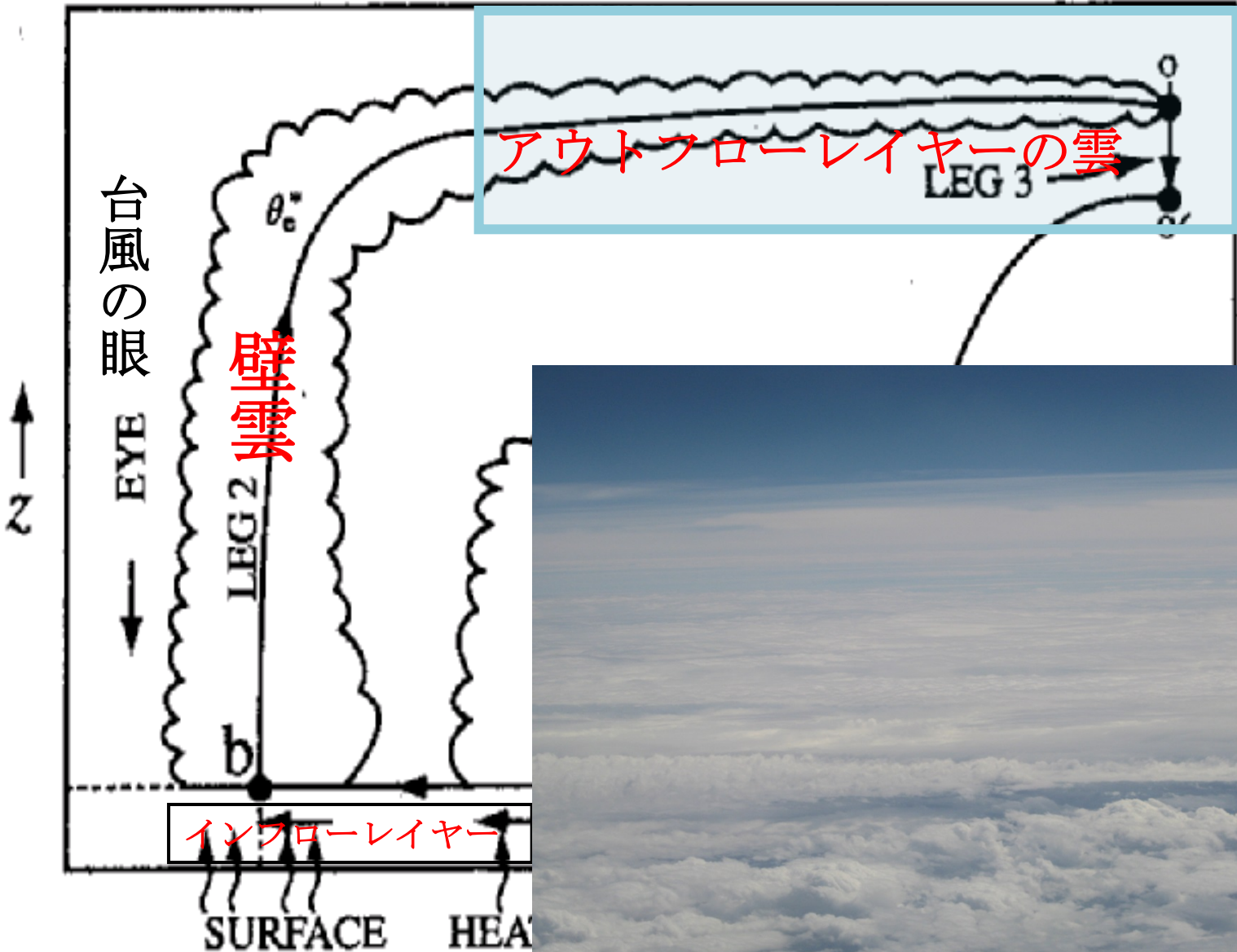
T1215 1-D Ocean SST(K), SLP(hPa)
8/27 18UTC, TC_min=918.344(hPa)



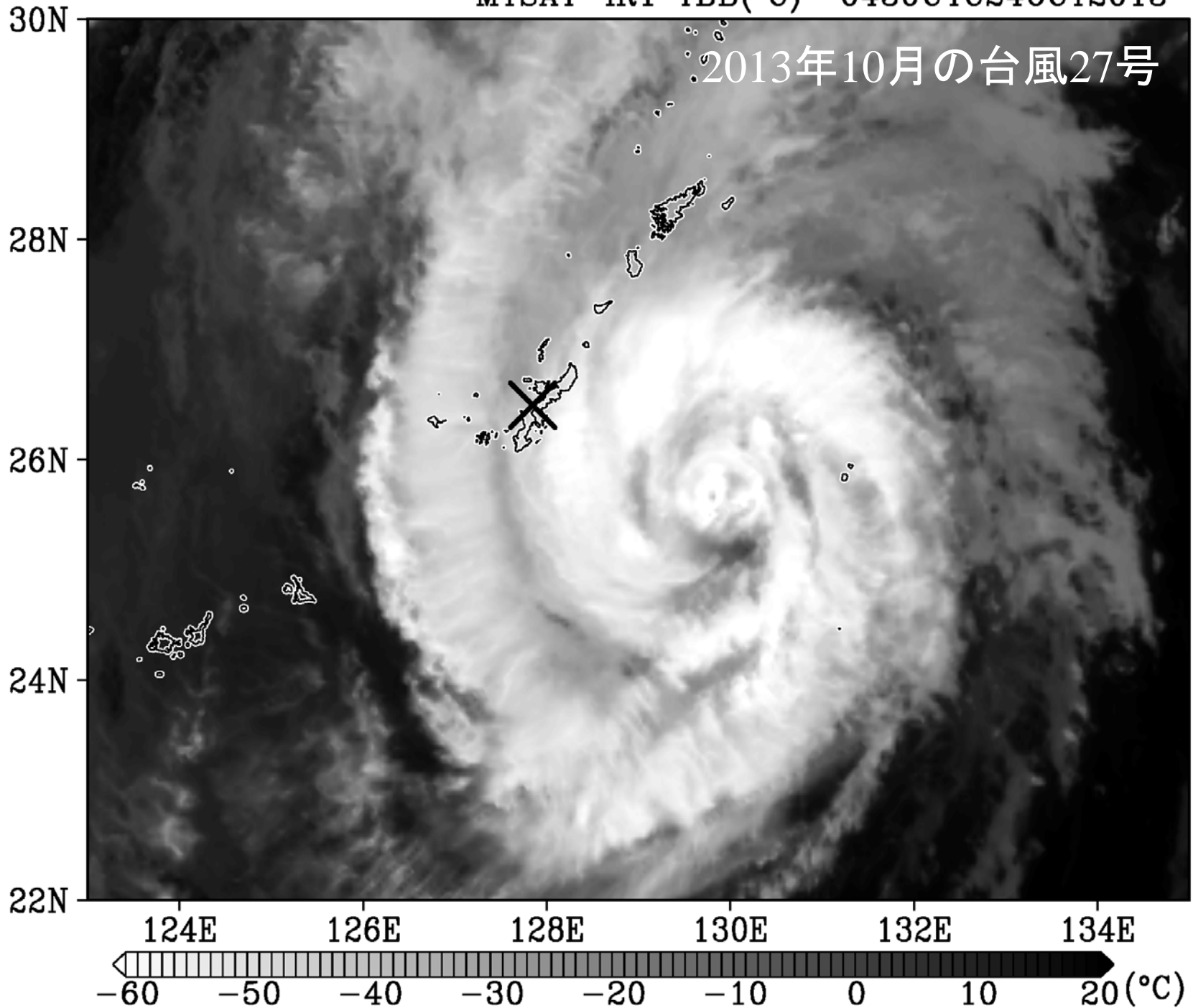
T1215 3-D Ocean SST(K), SLP(hPa)
8/27 18UTC, TC_min=933.242(hPa)



台風の上部吹き出し層(アウトフローレイヤー)の巻雲



2013年10月の台風27号



雲粒子ゾンデHYVIS(明星電気製)の改良



提灯がなくなり、LEDが採用された。
吊り輪がなくなった。
重さは1270g
(旧夜間型:1700g、旧強制吸引型:2200g)



まとめ

- ◆ 台風は日本を含む東アジア地域に水資源をもたらすとともに、強風や大雨、さらに高潮などにより甚大な災害をもたらす。
- ◆ 台風の強度の上限、すなわち最大強度はどこにあるのか。この問題は大気科学として興味深いだけでなく、防災の観点からも大きな問題である。
- ◆ 雲解像モデル・非静力学大気海洋波浪結合モデルを開発し、現在及び将来気候における台風についての最大強度を推定を試みている。
- ◆ **雲解像モデルを用いた実験では、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。**
- ◆ **このような強い台風、スーパー台風は、地球温暖化に伴い本州のような中緯度にまで達することが示された(21世紀気候変動予測革新プログラム)。**
- ◆ **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をもたらすだろう。**
- ◆ 台風の最大強度をより精度よく推定するため「**気候変動リスク情報創生プログラム**」で非静力学大気海洋波浪結合モデルを用いた研究を実施している。
- ◆ また、モデルの高精度化のために、台風の雲特性についてレーダや雲粒子ゾンデを用いた観測を行っている。