

# 地球温暖化と台風(導入編)

海洋研究開発機構 山田洋平

台風セミナー2019

2019年4月15-16日

京都大学防災研究所宇治キャンパス

防災研連携研究棟3階大会議室

謝辞: 発表資料の一部は、東京大学大気海洋研究所 佐藤正樹教授、気象研究所 杉正人博士よりご提供いただいた資料をもとに作成しました。

# Contents

- 台風の将来変化

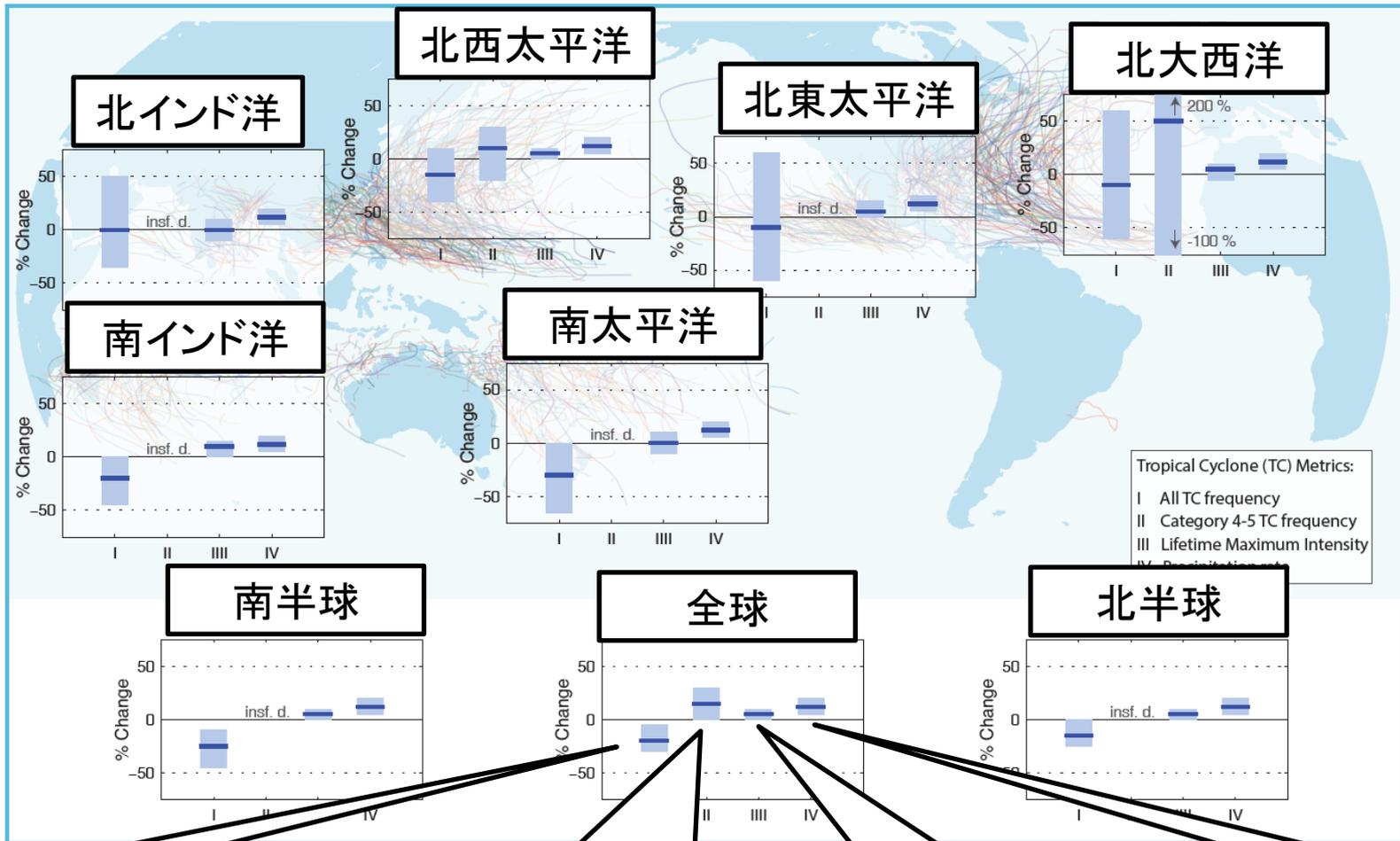
#より包括的な話は下記にアーカイブあり

[http://www.itonwp.sci.u-ryukyu.ac.jp/Typhoon\\_Research\\_Group/](http://www.itonwp.sci.u-ryukyu.ac.jp/Typhoon_Research_Group/)

2014年度 杉 正人 先生 公演資料

- Downscaling technique (Emanuel et al., 2006)

# 台風の将来変化のまとめ (IPCC, 2013)



台風の年間発生数
強い台風の年間発生数
台風の平均強度
台風の周りの雨

水平解像度数十～数百kmの複数の数値モデルの結果をまとめて作成  
 ( <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> )

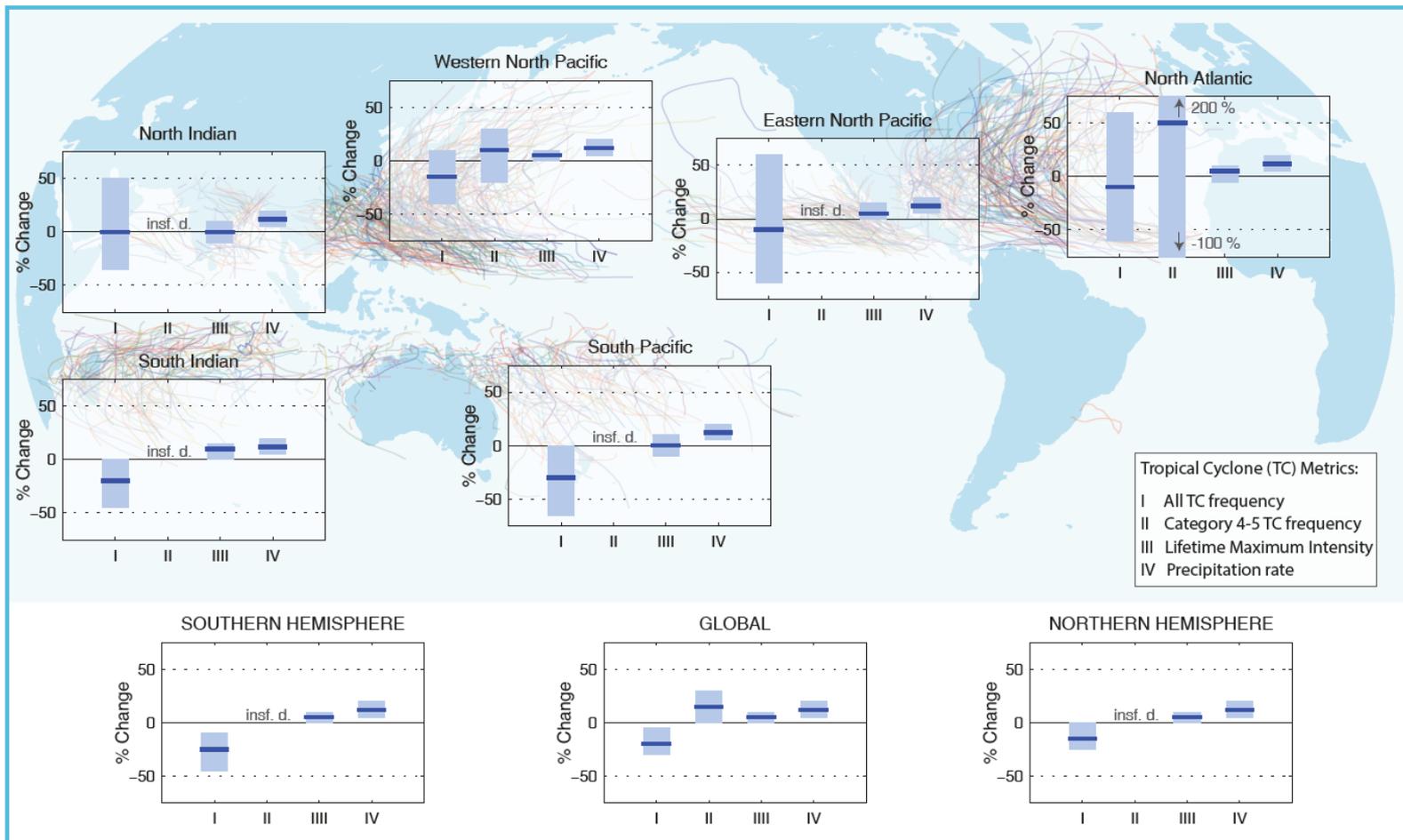
## 台風の将来変化(より最近の研究も含めて)

- 台風の頻度
- 非常に強い台風の頻度 (Category 4 & 5)
- 台風の強度
- 台風に伴う降水
- 台風の経路と発生位置
- 台風の移動速度
- 台風の大きさ
- 高波 (storm surge)

*Courtesy of Prof. Satoh and Prof. Sugi*

# 台風の頻度

- 全球的に減少(5–30%; Walsh et al., 2016)または変化しない
- 海盆毎にはさらにバラつき大きい



# 台風の種類

## 減少する理由は？

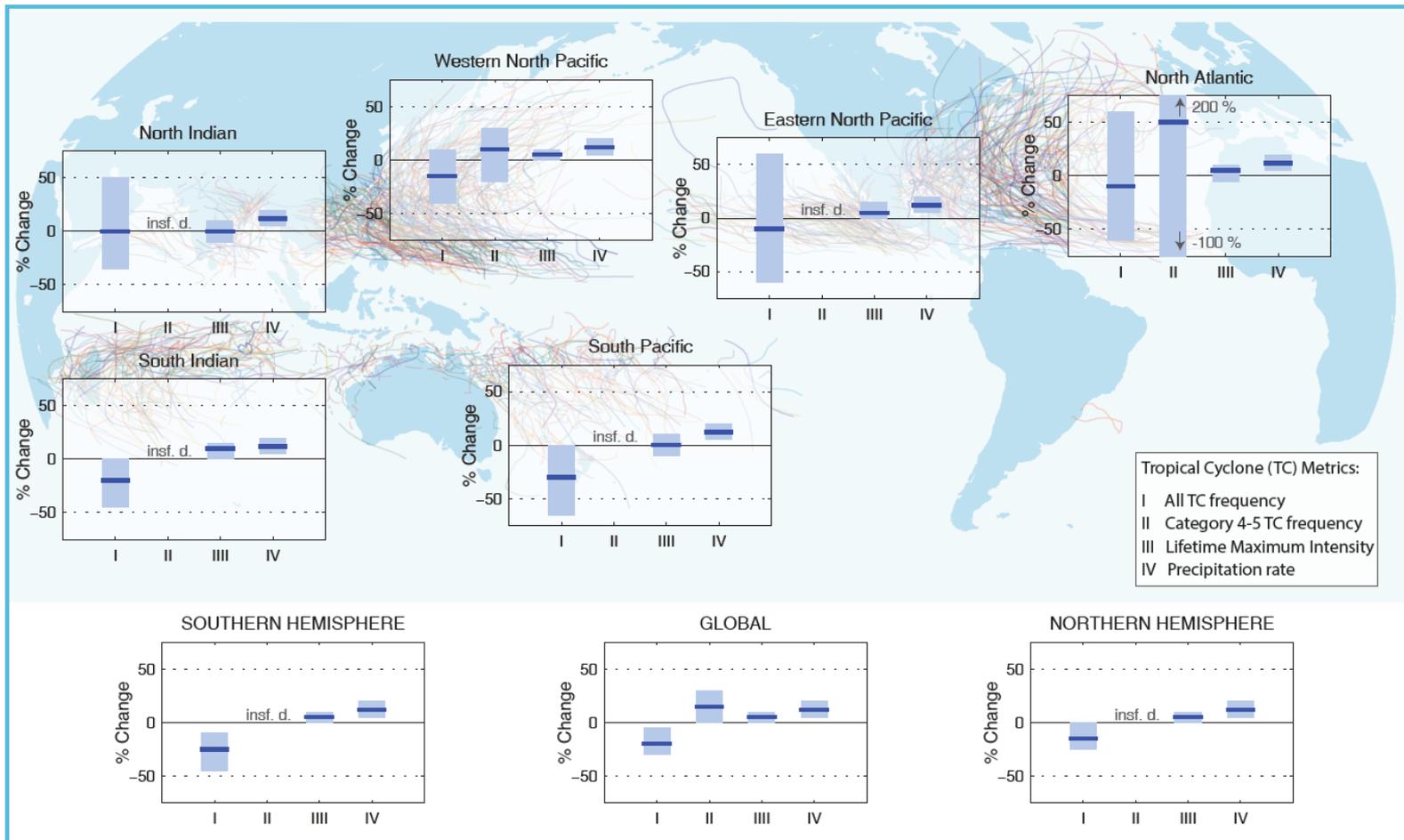
### #幾つかの仮説

1. Upward mass flux hypothesis (Sugi et al., 2002, 2012)  
気候モデルの将来予測で頑健な特徴 (Held and Soden, 2006)  
台風の発生には unfavorable condition
2. 台風の Mass flux の割合による制約 (Sato et al., 2015)  
"台風に伴う mass flux" / "熱帯全体の mass flux"  $\equiv$  一定と仮定  
 $\text{mass flux} \propto \text{台風の強度} \rightarrow \text{強い台風増加} \rightarrow \text{台風の総数減少}$
3. Saturation deficit hypothesis  
中層の乾燥化  
Ventilation index (Tang and Emanuel, 2012)

# 非常に強い台風の頻度 (Category 4 & 5)

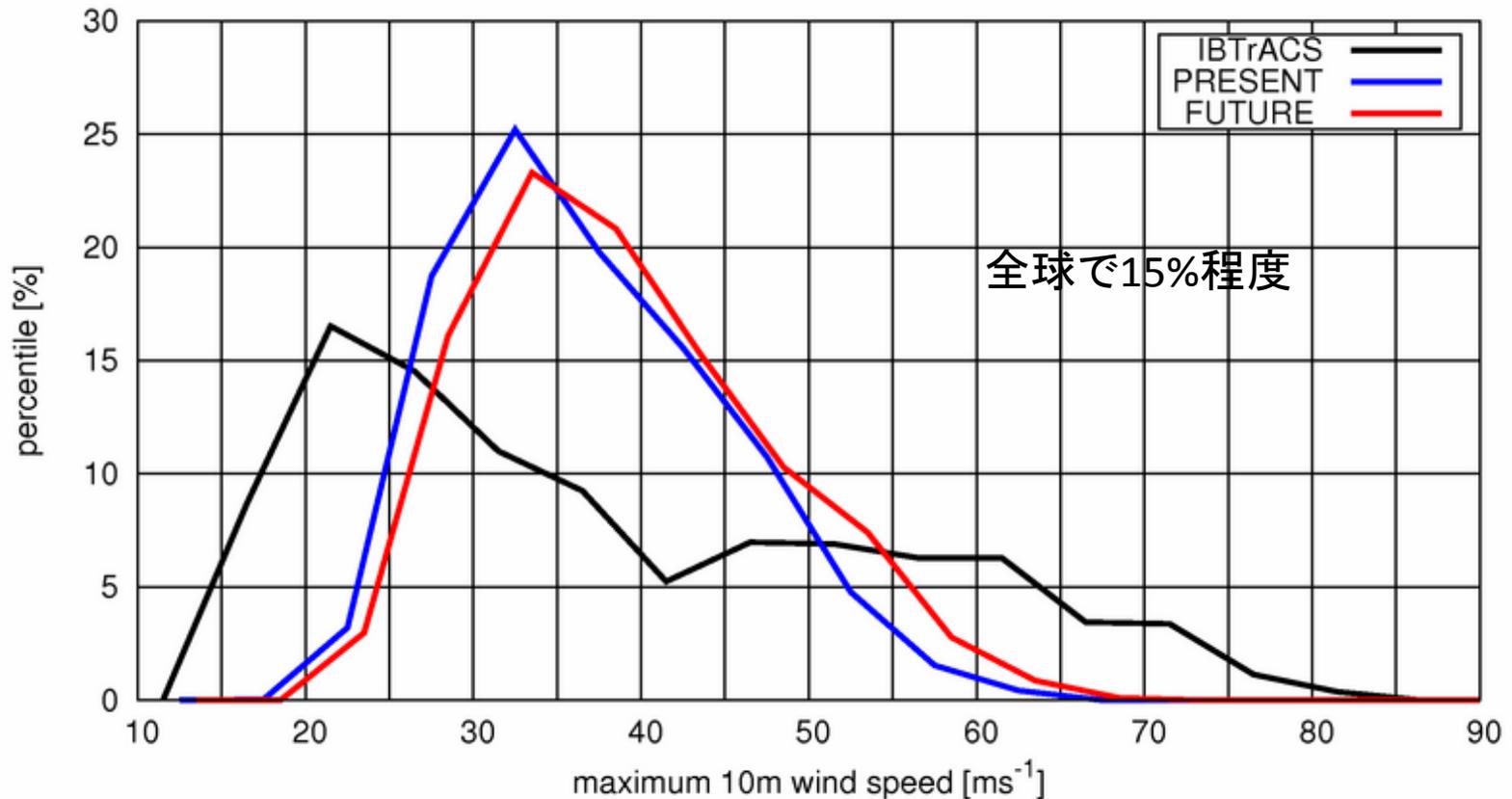
- 変化しない～増加 (0–25%; Walsh et al., 2016)

#Category 4 & 5の台風: 最大1分平均風速59m/s以上の台風



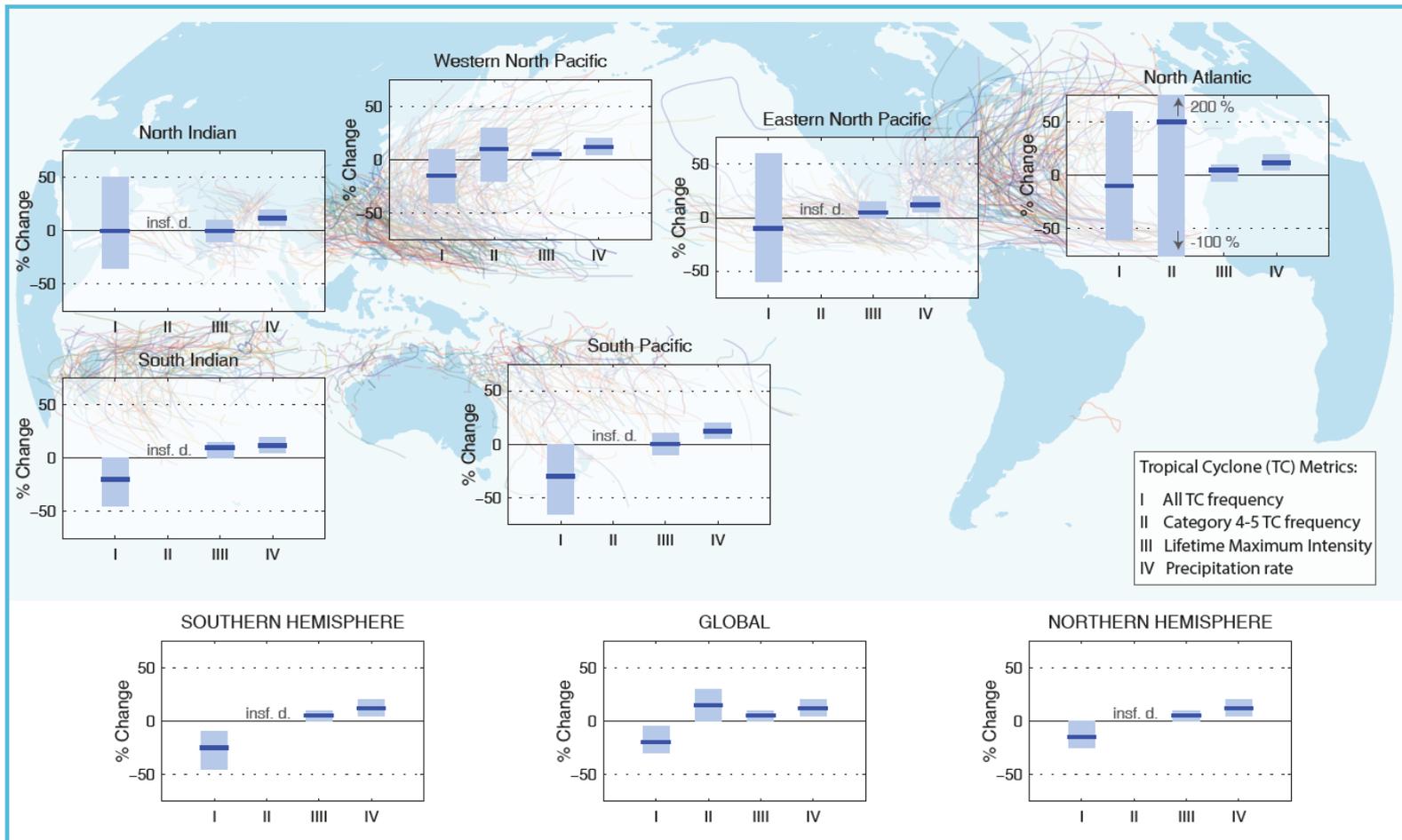
# 非常に強い台風の頻度 (Category 4 & 5)

- 1979～2008年の観測では発生割合は全球で15%程度
- 米国では6%程度の割合にも関わらず被害のほぼ半分は非常に強い台風による (Pielke et al., 2008)。



# 台風の強度

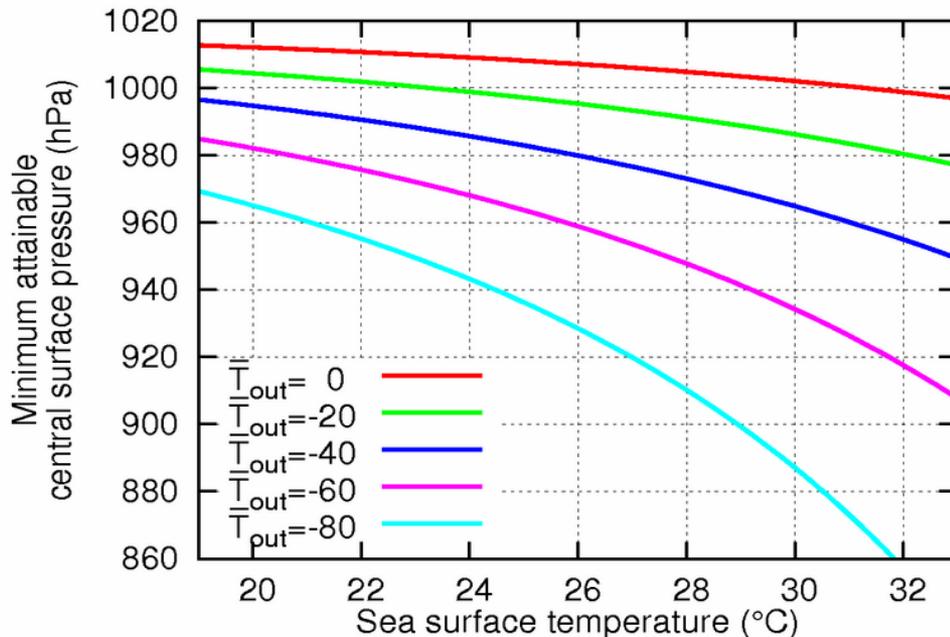
- 増加(数%; Walsh et al, 2016)



# 台風の強度

- 海面水温の増加を考慮すると増加はreasonable?
- Emanuel (1986)より

$$\ln p_{cs} = \ln p_{as} - \frac{C_p}{R} \frac{\left( \frac{T_b - \bar{T}_{out}}{T_b} \right) \frac{Lq_a^*}{C_p T_s} (RH_c - RH_a)_s - \frac{1}{4} \frac{f^2 r_0^2}{C_p T_b}}{1 - \left( \frac{T_b - \bar{T}_{out}}{T_b} \right) \left( 1 + \frac{Lq_a^* RH_{cs}}{C_p T_s} \right)}$$



Emanuel (1986)の式26を基に再計算

# 台風の強度

- 海面水温の増加を考慮すると増加はreasonable?



ARTICLE

Received 29 Oct 2014 | Accepted 10 Apr 2015 | Published 18 May 2015

DOI: 10.1038/ncomms8188

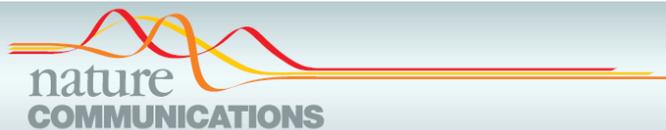
OPEN

Change in ocean subsurface environment to suppress tropical cyclone intensification under global warming

Ping Huang<sup>1,2</sup>, I-I Lin<sup>3</sup>, Chia Chou<sup>4</sup> & Rong-Hui Huang<sup>1</sup>

台風通過時の降水による海水の塩分濃度低下が抑制効果を打ち消す

台風通過時の海面水温の低下により台風の強化を抑制する



ARTICLE

Received 7 Apr 2016 | Accepted 21 Oct 2016 | Published 25 Nov 2016

DOI: 10.1038/ncomms13670

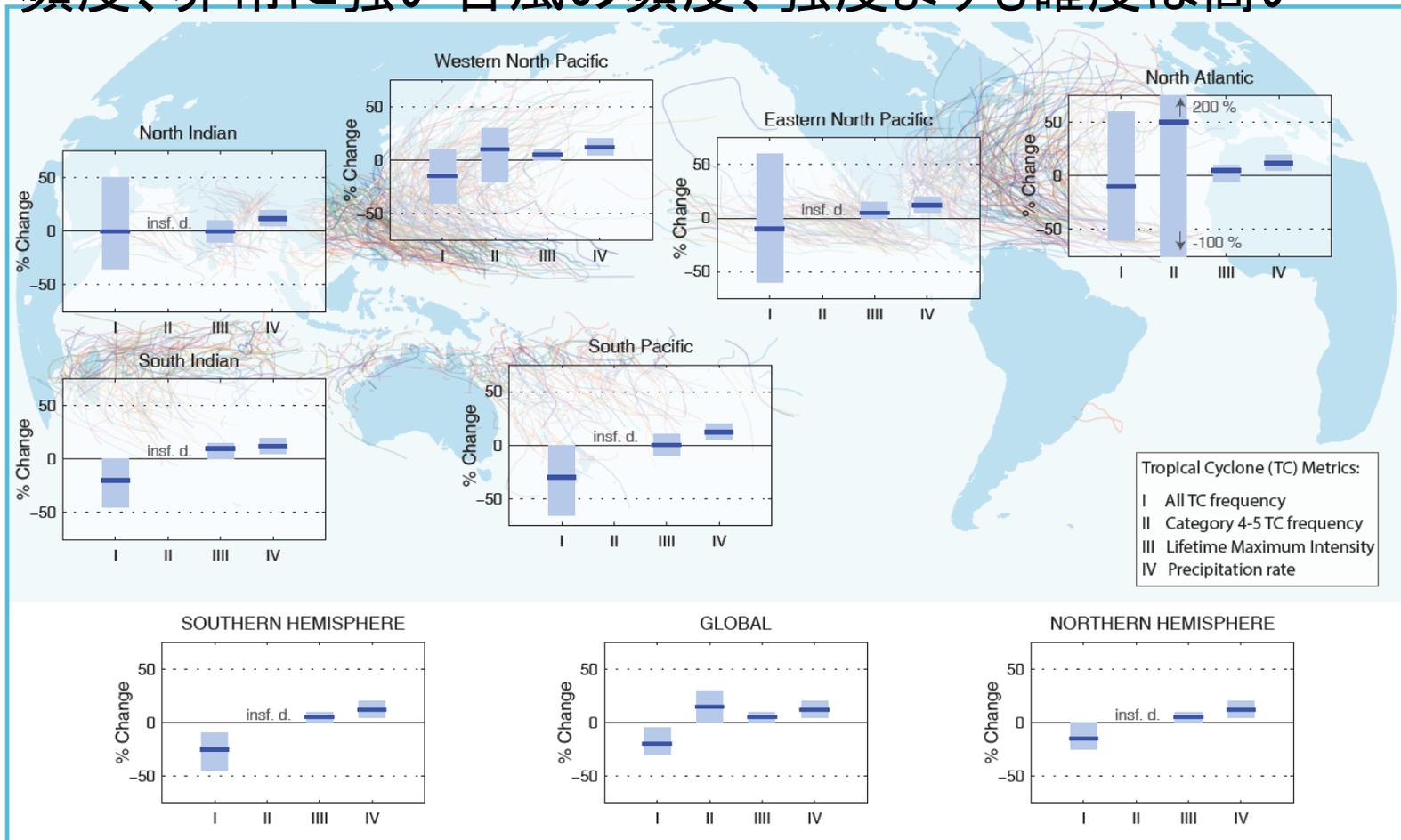
OPEN

Global warming-induced upper-ocean freshening and the intensification of super typhoons

Karthik Balaguru<sup>1</sup>, Gregory R. Foltz<sup>2</sup>, L. Ruby Leung<sup>3</sup> & Kerry A. Emanuel<sup>4</sup>

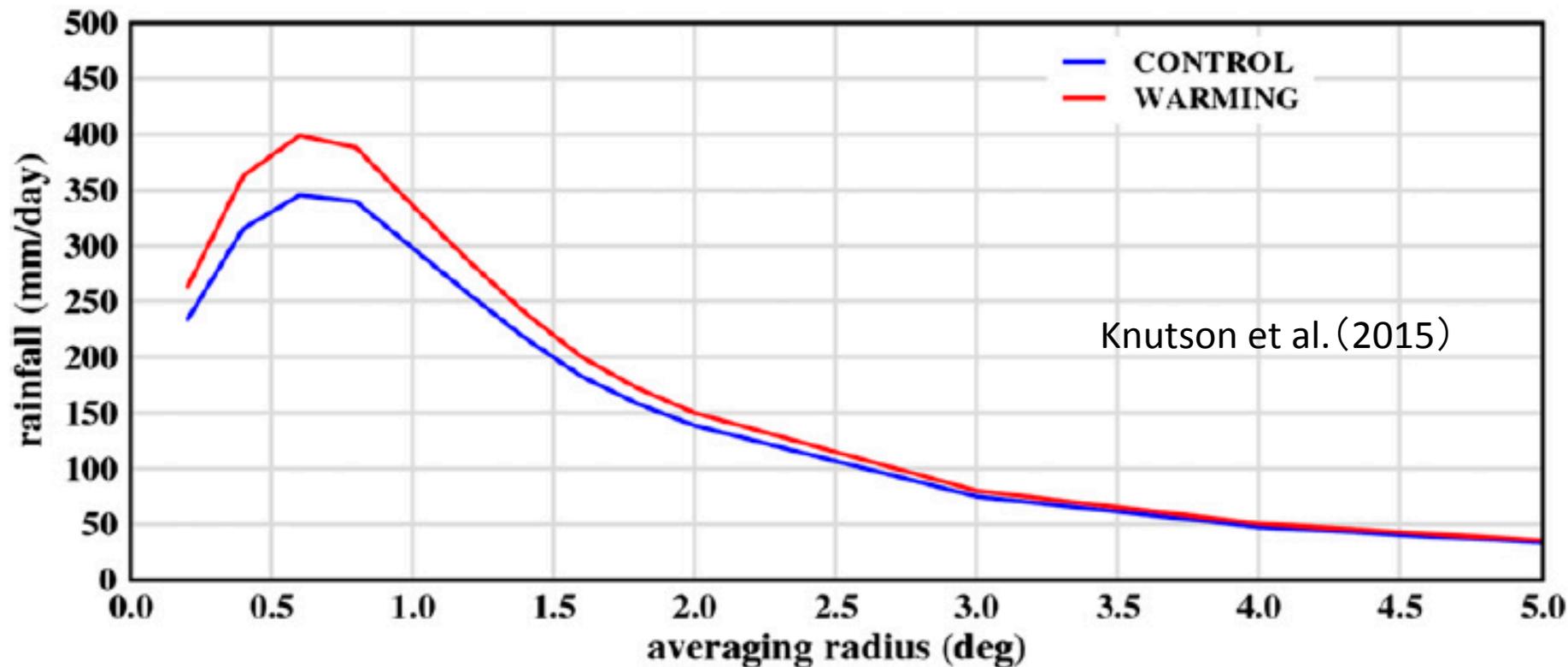
# 台風に伴う降水

- 増加(5–20%; Walsh et al., 2016)
- 温暖化による水蒸気量の増加の影響
- 頻度、非常に強い台風の頻度、強度よりも確度は高い



# 台風に伴う降水

- 増加 (5–20%; Walsh et al., 2016)
- 温暖化による水蒸気量の増加の影響
- 頻度、非常に強い台風の頻度、強度よりも確度は高い



## 台風の将来変化(より最近の研究も含めて)

- 台風の頻度
- 非常に強い台風の頻度 (Category 4 & 5)
- 台風の強度
- 台風に伴う降水
- 台風の経路と発生位置
- 台風の移動速度
- 台風の大きさ
- 高波 (storm surge)

*Courtesy of Prof. Satoh and Prof. Sugi*

# 台風経路と発生位置

- 多くのモデルを用いた研究はあるがコンセンサスはない  
例えば...
  - 経路の極側、北太平洋日付変更線付近での経路の東への拡張 (Nakamura et al., 2017)
  - 北太平洋東部から中央部での台風活動の活発化 (Chand et al., 2017)
  - 有意な変化はない (Daloz et al. 2015)
  - 北西太平洋や北大西洋の上陸台風は減少する (Colbert et al., 2013, 2015)
  - 最大強度に達する位置が極に移動 (Kossin et al., 2016)
- 現在気候シミュレーションにおけるモデルのバイアスが将来変化の予測に影響を与える (Murakami et al., 2014)

# 台風の移動速度

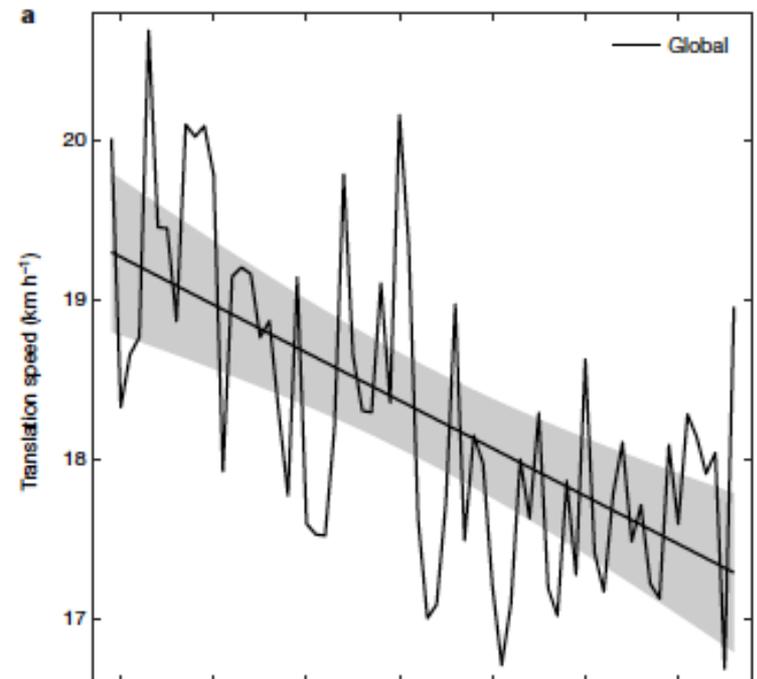
- 気候モデルの現在の台風気候場再現性が重要
- 最近ベストトラックから以下の論文が発表 (Kossin 2018)

## LETTER

<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0158-3>

### A global slowdown of tropical-cyclone translation speed

James P. Kossin<sup>1\*</sup>



# 台風の大きさ

- 研究例が少なくまだよくわかっていない

例えば、Gutmann et al. (2018), Kim et al. (2014), Knutson et al. (2015), Sun et al. (2017), Yamada et al. (2017)

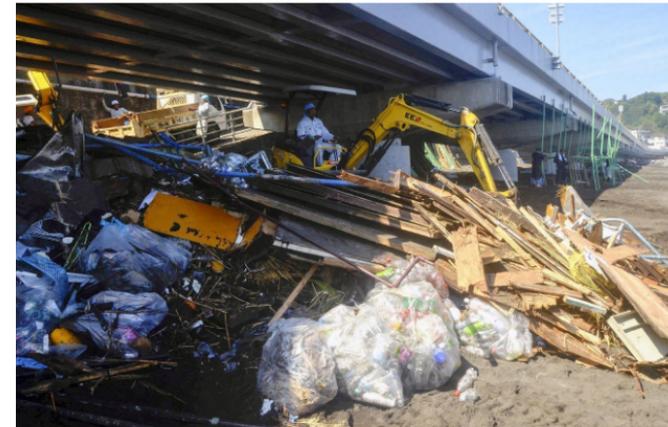
# 高波 (storm surge)

- 台風の頻度
  - 非常に強い台風の頻度 (Category 4 & 5)
  - 台風の強度
  - 台風に伴う降水
  - 台風の経路と発生位置
  - 台風の移動速度
  - 台風の大きさ
- 上記の影響を受ける。

## 【台風12号】湯河原で海の家12軒全壊、警備の小屋も

神奈川新聞 | 公開: 2018/07/30 21:41 更新: 2018/07/30 21:57

シェア Twitter 記事保存



海の家に使われていた柱や鉄骨などを集めトラックに積み込む撤去作業  
= 30日午後、湯河原海水浴場

カナロコより引用

<http://www.kanaloco.jp/article/349927>

# 台風将来変化のまとめ

以下のことがIPCC AR5で議論されているが確度は不十分

- 台風の頻度(変化しないまたは減少)
- 非常に強い台風の頻度(Category 4 & 5)(増加)
- 台風の強度(増加)
- 台風に伴う降水(増加)

以下は今後、知見が深まっていくと期待

- 台風の経路と発生位置
- 台風の移動速度
- 台風の大きさ
- 高波(storm surge)

# 台風の将来変化のまとめ

以下のことがIPCC AR5で議論されているが確度は不十分

- 台風の頻度(変化しないまたは減少)  
増加を指摘する研究も...例えばEmanuel(2013)
- 非常に強い台風の頻度(Category 4 & 5)(増加)
- 台風の強度(増加)
- 台風に伴う降水(増加)

以下は今後、

- 台風の経路と発生位置
- 台風の移動速度
- 台風の大きさ
- 高波(storm surge)

# 台風気候場の見積もり方法

## 不確実性の要因の一つ

#以下の3分類で見積もられる(Emanuel, 2013)

### 1. Direct simulation

全球モデルの結果から直接台風を抽出(Broccoli and Manabe, 1990; Murakami et al., 2012; Sugi et al., 2002; Yamada et al., 2017...)

### 2. Downscaling

全球モデルの結果にダウンスケーリング手法を用いて抽出(Emanuel, 2013; Kanada et al., 2013; Knutson et al., 2015...)

### 3. Genesis index

シミュレーション結果の気候場から発生数を見積もる(Emanuel and Nolan, 2004...)

# 台風の抽出方法

## 不確実性の要因の一つ

#以下の3分類で見積もられる (Emanuel, 2013)

### 1. Direct simulation

全球モデルの結果から直接台風を抽出 (Broccoli and Manabe, 1990; Murakami et al., 2012; Sugi et al., 2002; Yamada et al., 2017...)

### 2. Downscaling

全球モデルの結果にダウンスケーリング手法を用いて抽出 (Emanuel, 2013; Kanada et al., 2013; Knutson et al., 2015...)

### 3. Genesis index

シミュレーション結果の気候場から発生数を見積もる (Emanuel and Nolan, 2004...)

Dynamical downscaling (Emanuel et al., 2006)

- 気候モデルの出力を用いて経路・強度を決定

# A STATISTICAL DETERMINISTIC APPROACH TO HURRICANE RISK ASSESSMENT

BY KERRY EMANUEL, SAI RAVELA, EMMANUEL VIVANT, AND CAMILLE RISI

In a novel approach to hurricane wind risk assessment, a coupled ocean–atmosphere hurricane model is run along each of a large number of hurricane tracks synthesized by two independent methods.

# 経路・強度の決定

- 経路は環境場の風速とベータドリフトの効果で決まると仮定

$$V_{track} = \alpha V_{850} - (1 - \alpha) V_{200} + V_{\beta}$$

$V_{track}$ : 移動速度 (ベクトル)

$V_{850}$ : 環境場の風速 (ベクトル)、再解析や気候モデル出力

$V_{200}$ : 環境場の風速 (ベクトル)、再解析や気候モデル出力

$V_{\beta}$ : ベータドリフト (ベクトル)、南北方向に2.5m/s

$\alpha$ : 定数、0.8

$$\frac{dx}{dt} = V_{track}$$

# 経路・強度の決定

- 環境場の風速は月平均の場とその分散から決定  
以下は高度250hPa面の東西風 $u_{250}$

$$u_{250}(x, y, \tau, t) = \bar{u}_{250}(x, y, \tau) + \sqrt{u_{250}'^2(x, y, \tau)} F_1(t),$$

$x$ : 位置(東西)、 $y$ : 位置(南北)

$\tau$ : 時間(月)、 $t$ : 時間(月より短いスケール)

$$F_1 \equiv \sqrt{\frac{2}{\sum_{n=1}^N n^{-3}}} \sum_{n=1}^N n^{-3/2} \sin\left[2\pi\left(\frac{nt}{T} + X_{1n}\right)\right],$$

$X_i$ :  $n$ に対する乱数(0~1)

$T$ : 時間スケール

# 経路・強度の決定

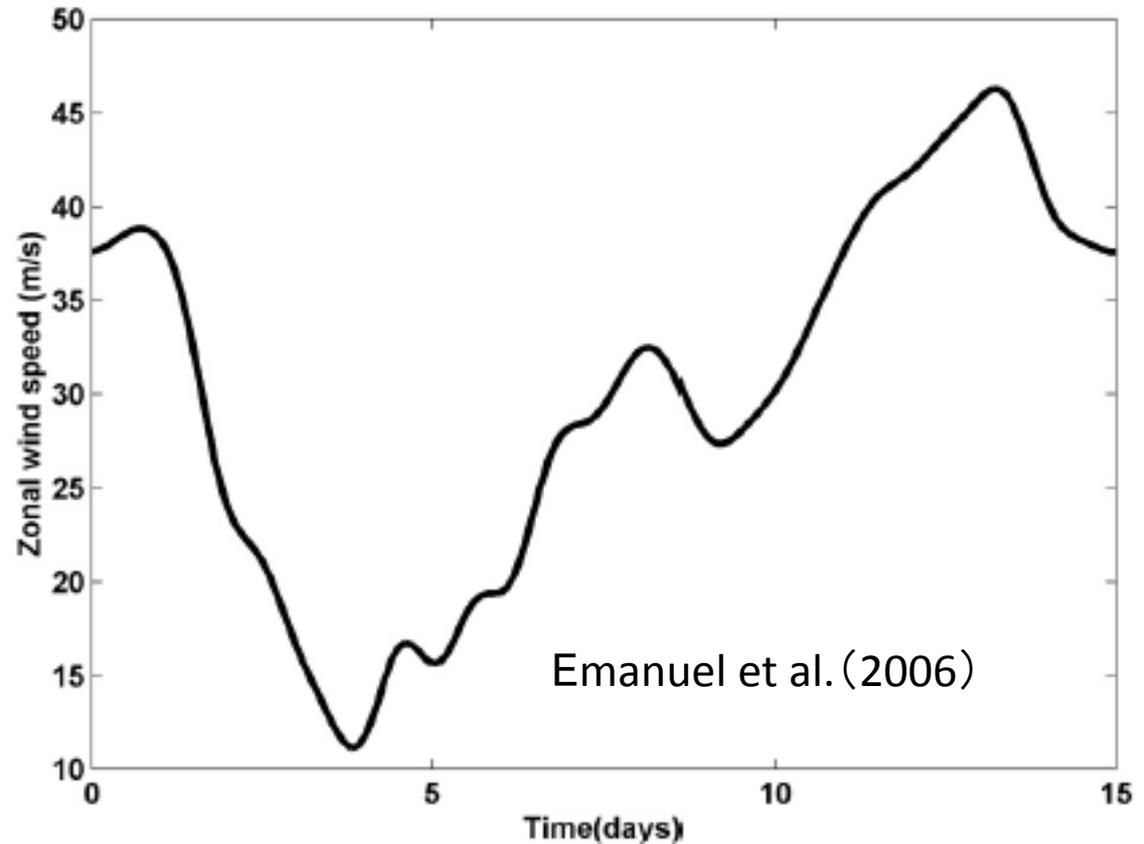
- 生成された風速の時系列のサンプル

$$\bar{u}_{250} = 30 \text{ m s}^{-1}$$

$$\sqrt{u'_{250}{}^2(x, y, \tau)} = 10 \text{ m s}^{-1}$$

$$T = 15$$

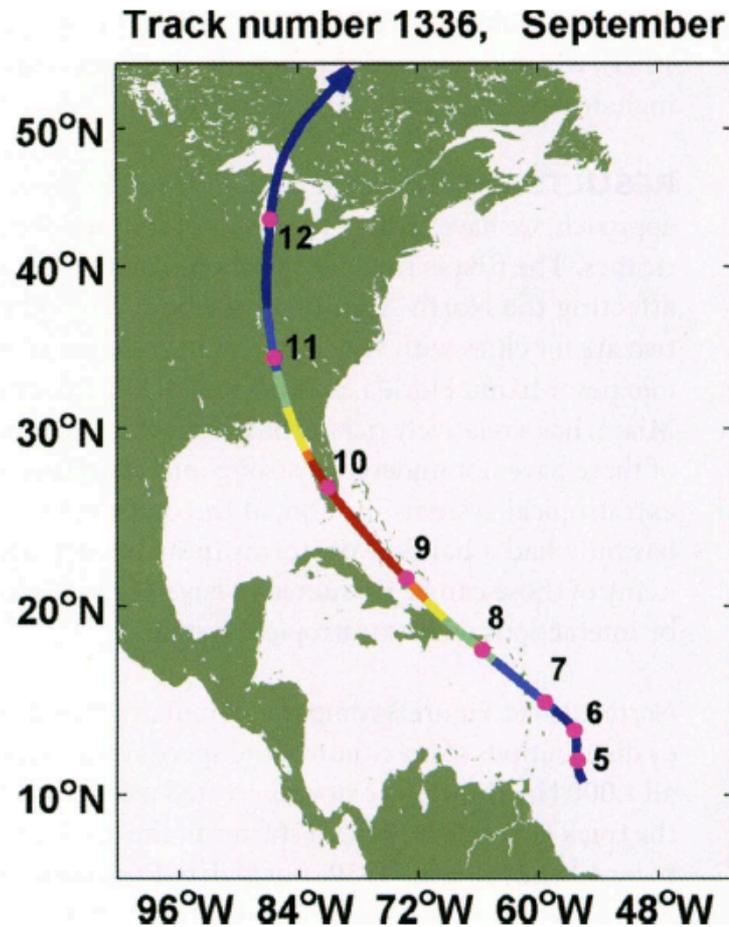
$$N = 15$$



他の風速成分も同様に生成

# 経路・強度の決定

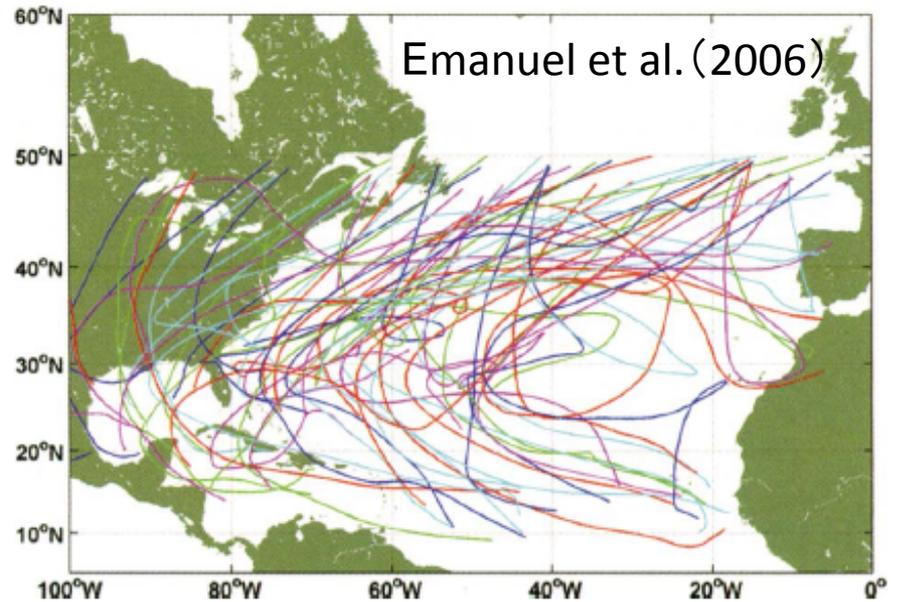
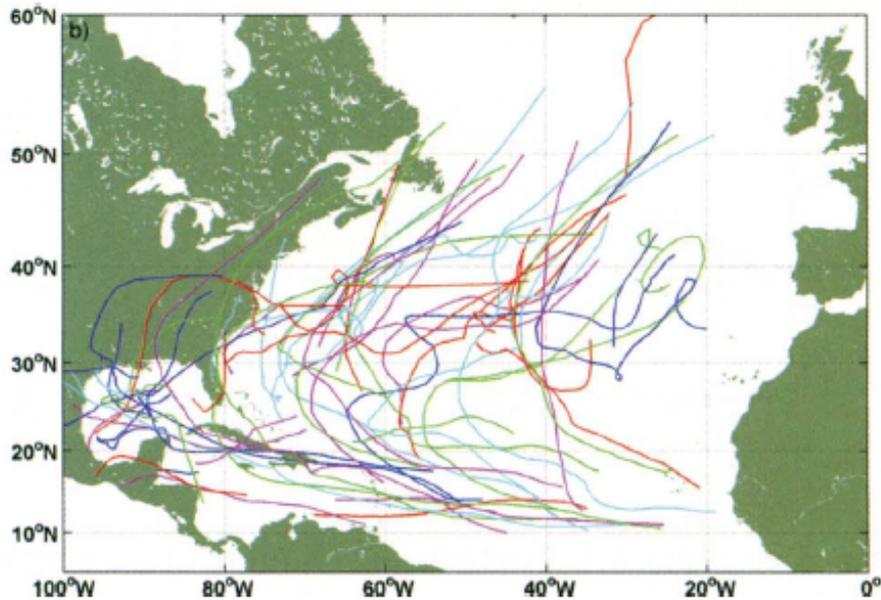
- 強度は経路が決まれば環境場の状態が決まるので、
- 環境場から強度を推定 (CHIPSモデル; Emanuel et al., 2004)



Emanuel et al. (2006)

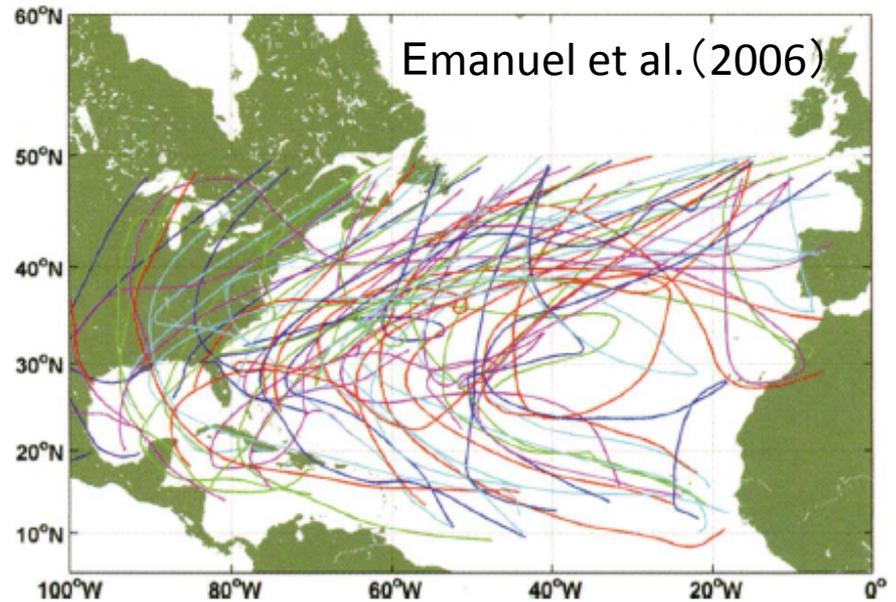
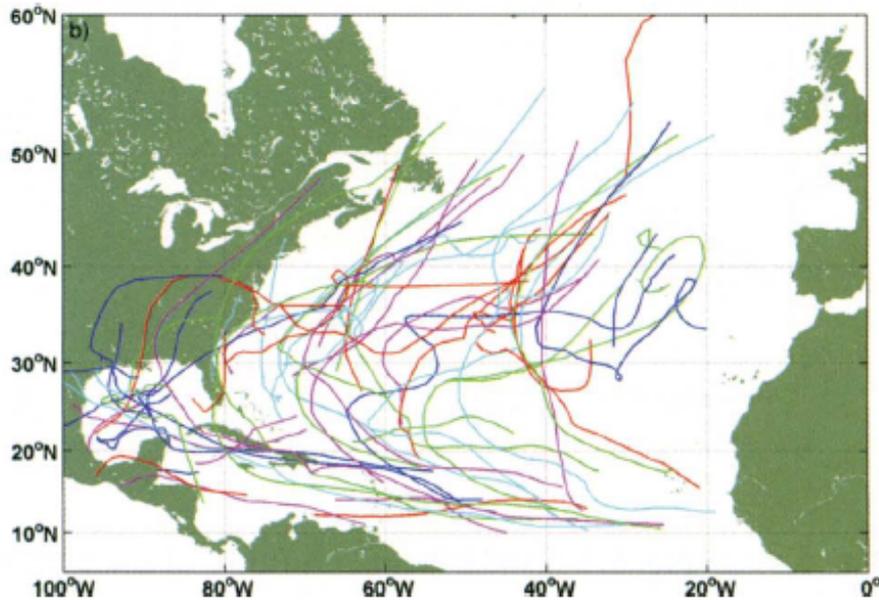
# 経路・強度の決定

- 強度は経路が決まれば環境場の状態が決まるので、
- 環境場から強度を推定 (CHIPSモデル; Emanuel et al., 2004)



# 経路・強度の決定

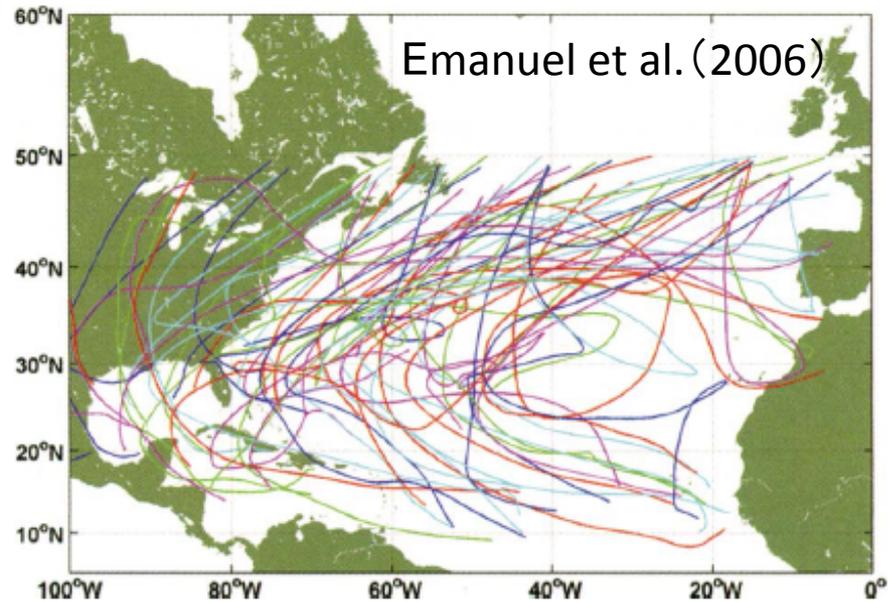
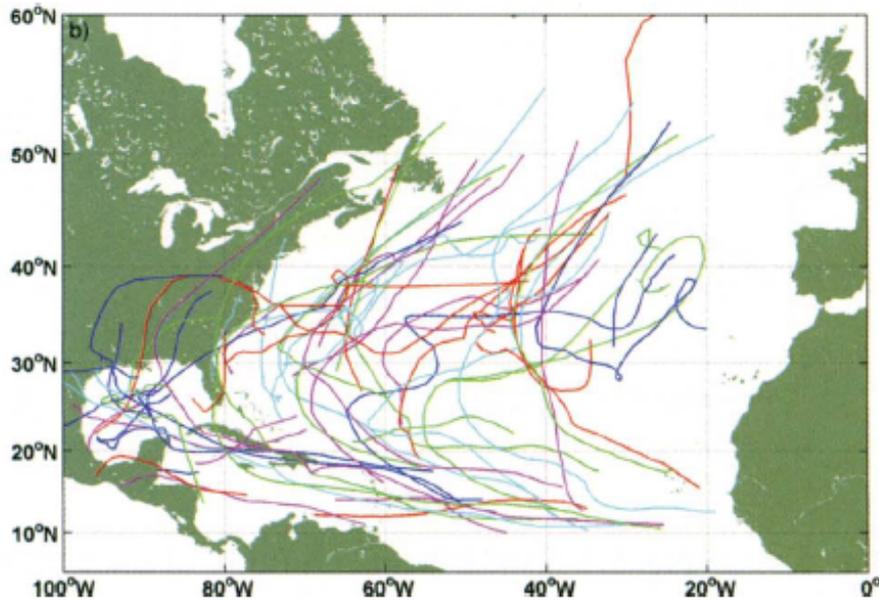
- 強度は経路が決まれば環境場の状態が決まるので、
- 環境場から強度を推定 (CHIPSモデル; Emanuel et al., 2004)



メリット: 月平均場のみから台風の経路・強度を生成可能

# 経路・強度の決定

- 強度は経路が決まれば環境場の状態が決まるので、
- 環境場から強度を推定 (CHIPSモデル; Emanuel et al., 2004)

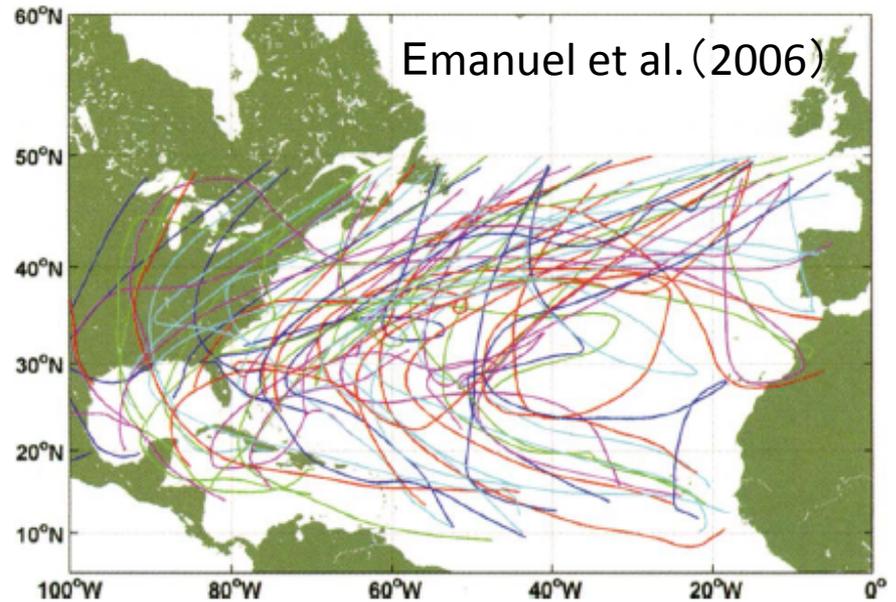
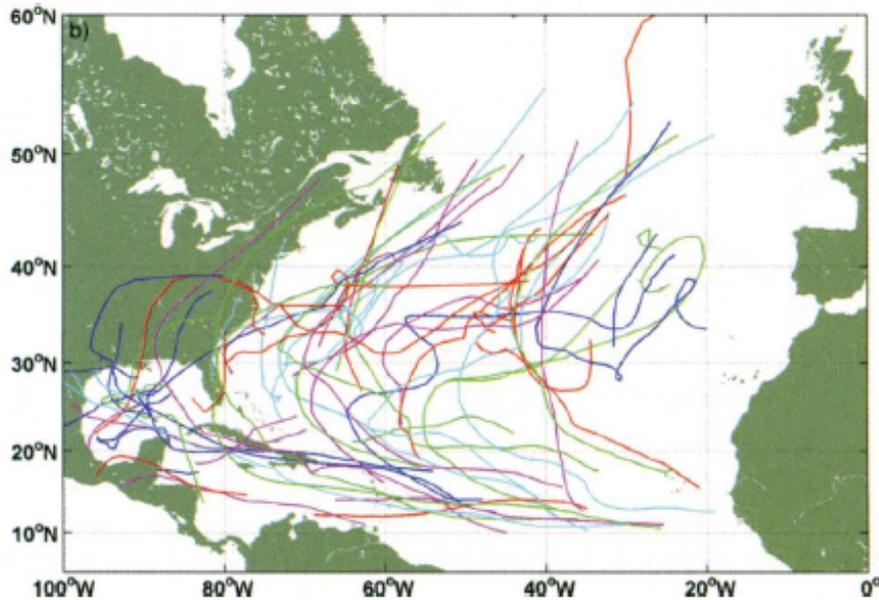


メリット: 月平均場のみから台風の経路・強度を生成可能

デメリット: 仮定を置く必要があり、不確実性の要因となりうる

# 経路・強度の決定

- 強度は経路が決まれば環境場の状態が決まるので、
- **環境場から強度**を推定 (CHIPSモデル; Emanuel et al., 2004)



メリット: 月平均場のみから台風の経路・強度を生成可能

デメリット: 仮定を置く必要があり、不確実性の要因となりうる

# Potential Intensity (PI)

$$PI^2 = \frac{T_s}{T_{out}} \frac{C_k}{C_D} (CAPE^* - CAPEb)$$

Bister and Emanuel (2002)

$T_s$  : temperatures at the sea surface

$T_{out}$  : temperatures at outflow regions in the upper troposphere

$C_k$  : exchange for enthalpy

$C_D$  : drag coefficient

$CAPE$  : convective available potential energy

$CAPE^*$  :  $CAPE$  of air lifted from saturation at sea level in reference to the environmental soundings

$CAPEb$  :  $CAPE$  of air in the boundary layer.

# Emanuel et al. (2006)を用いた台風の将来変化

- CMIP5の出力に適用

## Downscaling CMIP5 climate models shows increased tropical cyclone activity over the 21st century

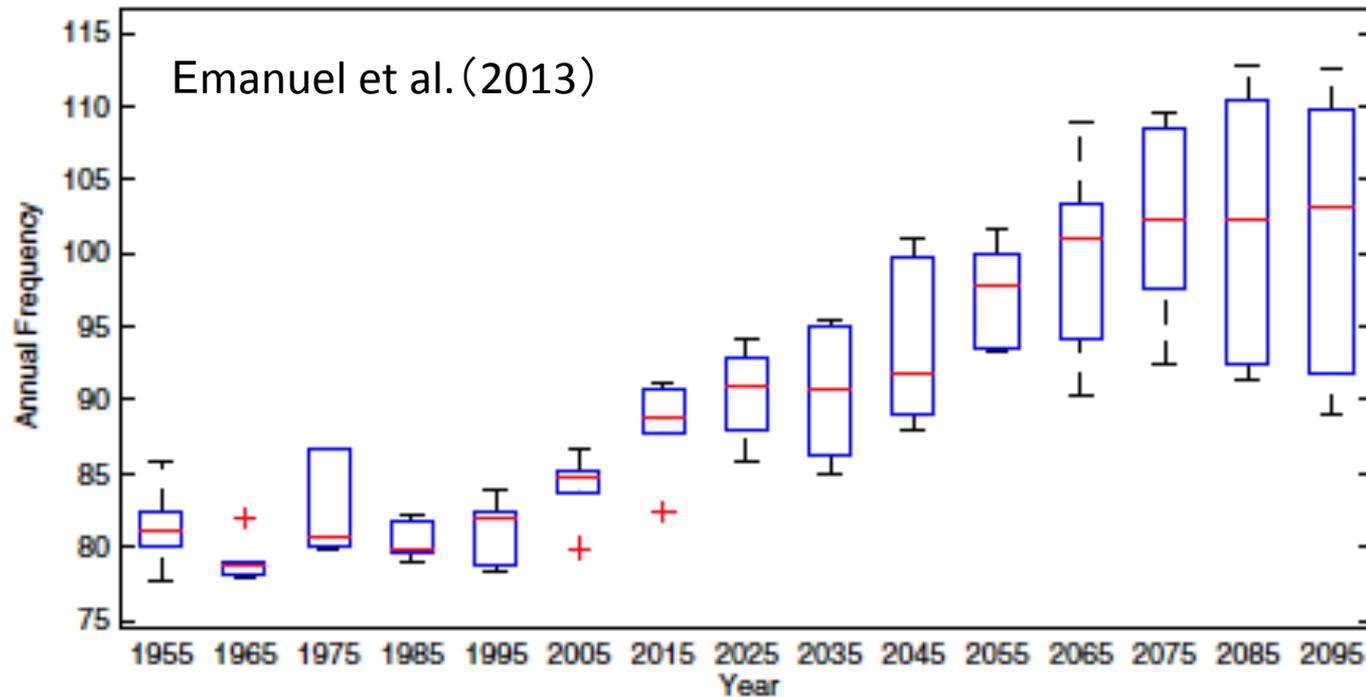
Kerry A. Emanuel<sup>1</sup>

Program in Atmospheres, Oceans, and Climate, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139

Edited by Benjamin D. Santer, E. O. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, and approved June 10, 2013 (received for review January 20, 2013)

# Emanuel et al. (2006)を用いた台風の将来変化

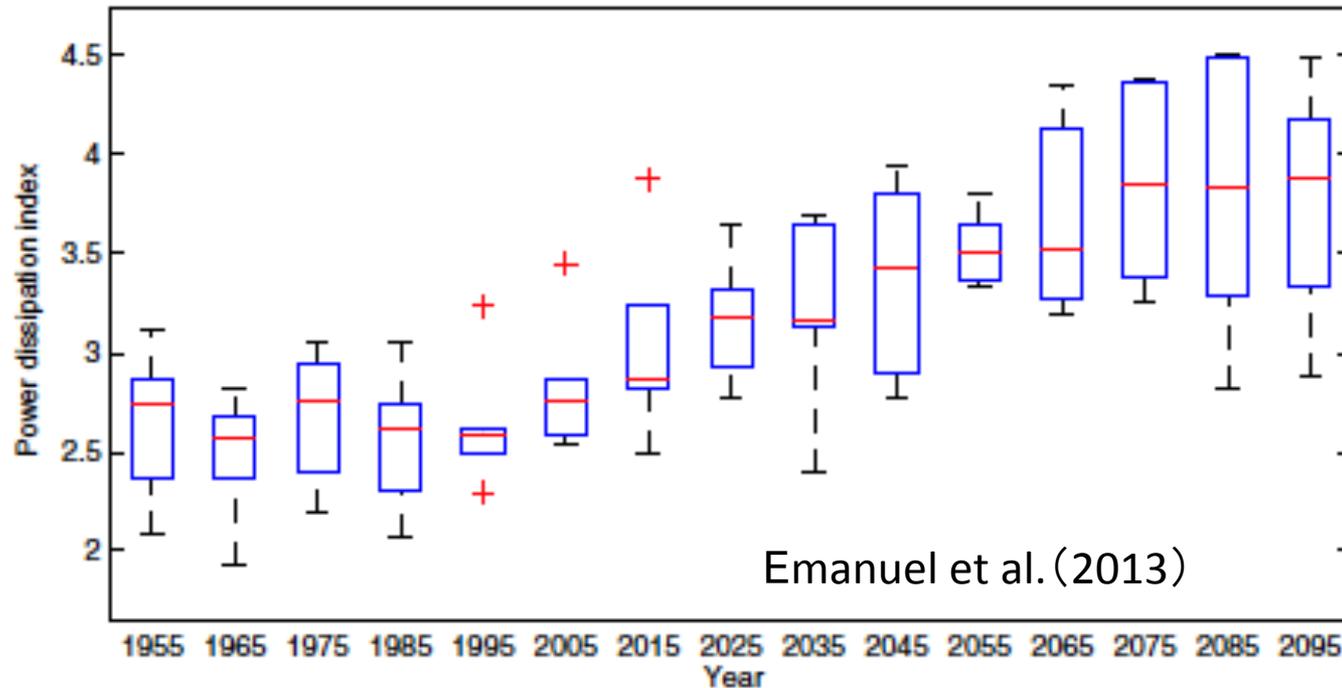
- 台風発生数(全球)の増加  
#CMIP5の出力に適用



# Emanuel et al. (2006)を用いた台風の将来変化

- 台風強度の増加

#Power Dissipation Index [ $\times 10^{12} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$ ]で定義



# Power Dissipation Index (Emanuel 2005)

nature

Vol 436|4 August 2005|doi:10.1038/nature03906

LETTERS

## Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years

Kerry Emanuel<sup>1</sup>

台風のPotential destructivenessを表現するため次式で定義

$$\text{PDI} = \int_0^T V_{\max}^3 dt$$

似た量として Accumulated cyclone Energy (ACE) (Bell et al., 2000)、風速の二乗

# Power Dissipation Index (Emanuel 2005)

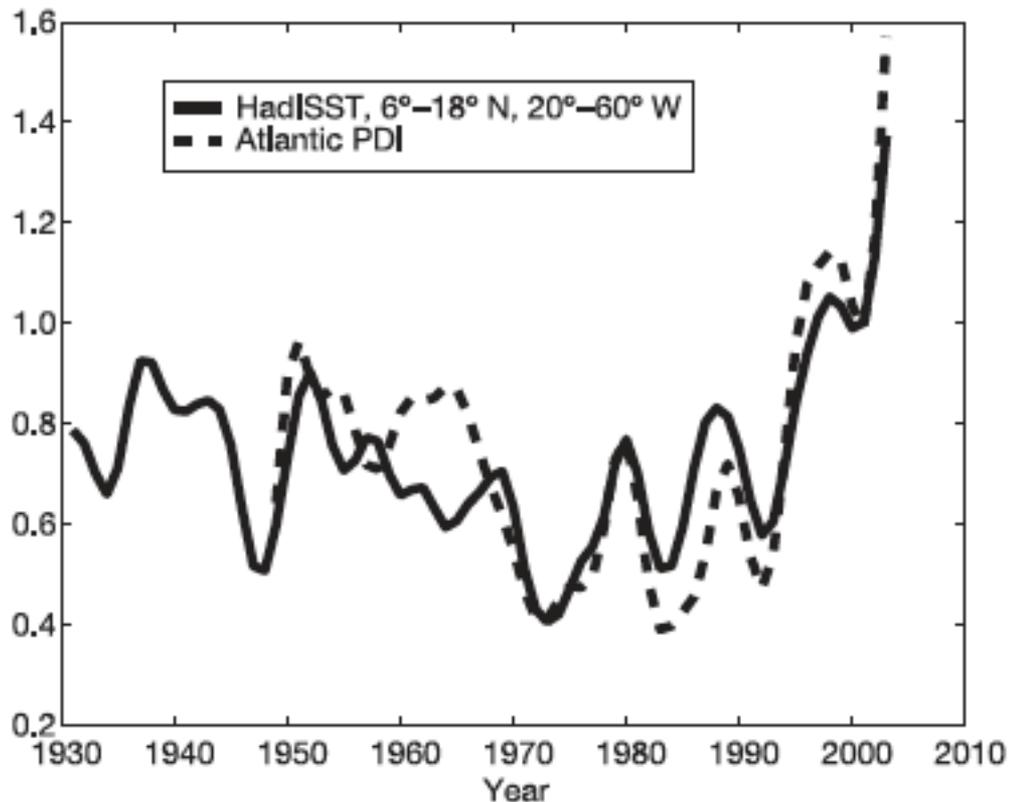
nature

LETTERS

## Increasing destructiveness the past 30 years

Kerry Emanuel<sup>1</sup>

台風のPotential destructive



$$PDI \equiv \int_0^T V_{\max}^3 dt$$

似た量として Accumulated cyclone Energy (ACE) (Bell et al., 2000)、風速の二乗

# Direct simulation vs. Downscaling

J. Adv. Model. Earth Syst., Vol. 2, Art. #9, 9 pp.

## Comparison of Explicitly Simulated and Downscaled Tropical Cyclone Activity in a High-Resolution Global Climate Model



*Kerry Emanuel<sup>1</sup>, Kazuyoshi Oouchi<sup>2</sup>, Masaki Satoh<sup>2,3</sup>, Hirofumi Tomita<sup>2</sup> and Yohei Yamada<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Program in Atmospheres, Oceans, and Climate, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA

<sup>2</sup> Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Yokohama-Shi, Japan

<sup>3</sup> Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo, Tokyo, Japan

---

Manuscript submitted 13 June 2010; in final form 28 August 2010

# Direct simulation vs. Downscaling

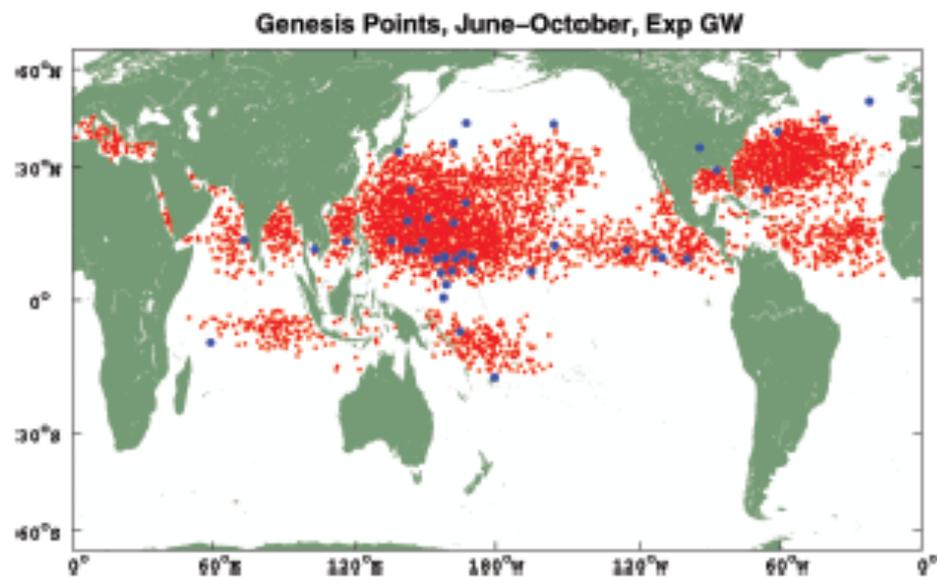
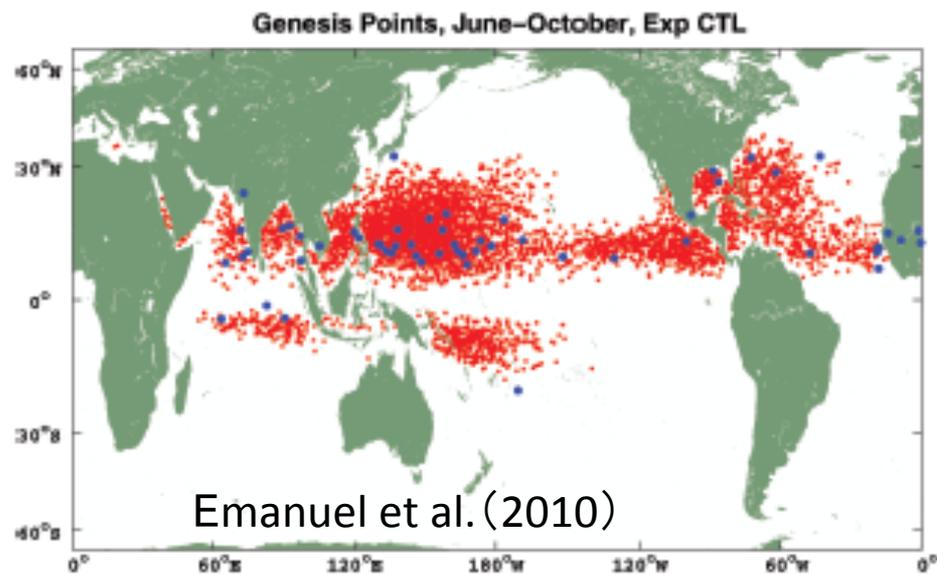
上段：現在気候

下段：将来気候

青：Direct simulation

赤：Downscaling

#5000の種



# Direct simulation vs. Downscaling

発生数の将来変化

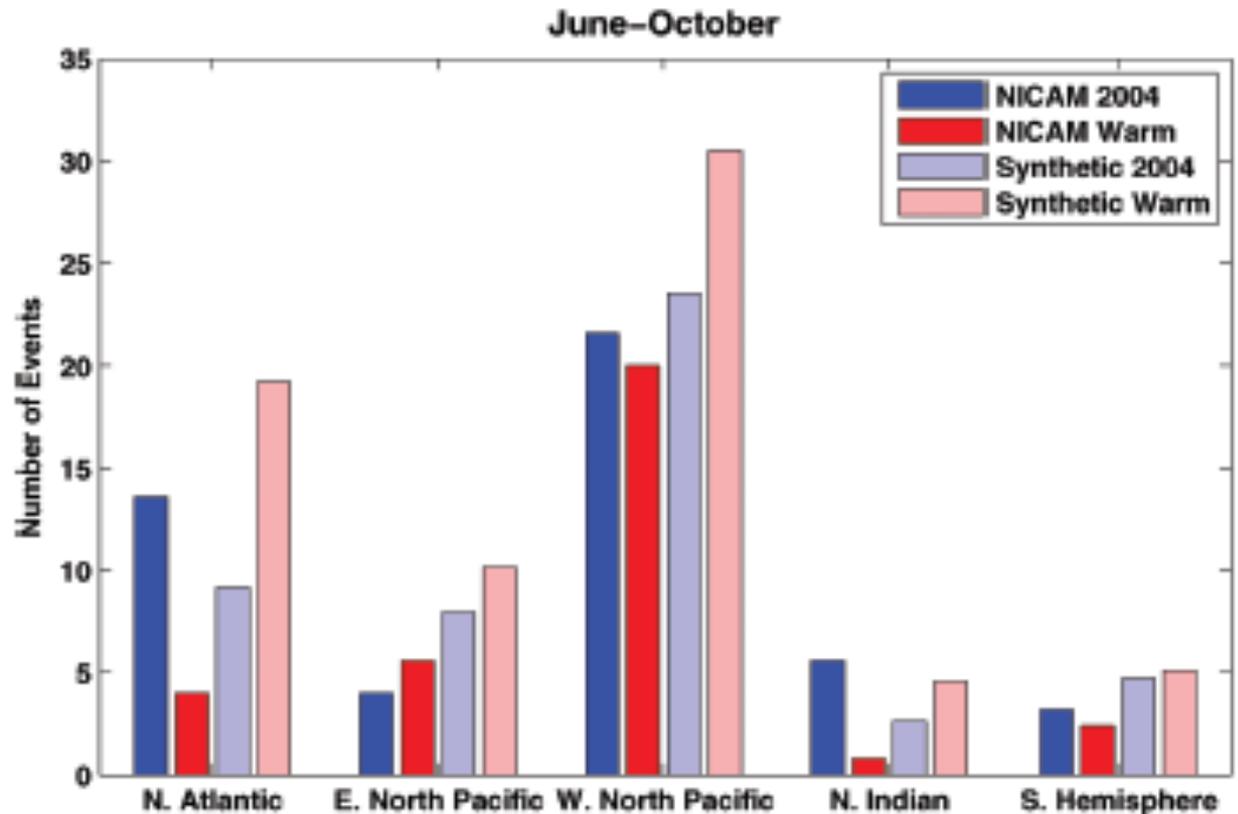
#各ケースの数は観測に合わせて規格化

Direct simulation

→ 減少

Downscaling

→ 増加



# Direct simulation (抽出方法の違い)

	DX [km]	期間	GL	NH	SH	NI	WN P	ENP	NA	SI	SP	SA
TempExt	56	~2013	224.1	146.1	78.1	15.9	66.2	37.3	26.7	26.7	48.2	3.3
	28	~2002	284.1	173.3	110.9	19.2	69.5	54.7	29.9	41.0	65.8	4.1
	14	~1960	280.7	167.8	112.9	14.9	67.4	54.9	30.6	48.9	61.1	2.9
TempExt	56	~2013	167.6	109.5	58.2	11.9	55.5	22.4	19.7	19.9	35.8	2.5
	28	~2002	179.7	113.5	66.2	11.7	49.6	31.4	20.8	25.9	37.7	2.6
	14	~1960	179.8	111.5	68.4	6.8	47.6	32.4	24.7	31.1	35.4	1.9
Cyclone	56	~2004	108.1	76.3	31.8	9.6	45.1	15.0	6.7	13.0	18.7	0.1
	28	~1986	97.8	67.6	30.2	7.1	31.8	20.5	8.3	17.2	13.0	0.1
	14	~1959	85.6	61.0	24.6	3.1	27.4	17.7	12.8	16.7	7.8	0.1
OBS	-----	1979 ~2016	83.9	58.8	25.1	4.9	25.2	16.3	12.4	15.7	9.3	0.1