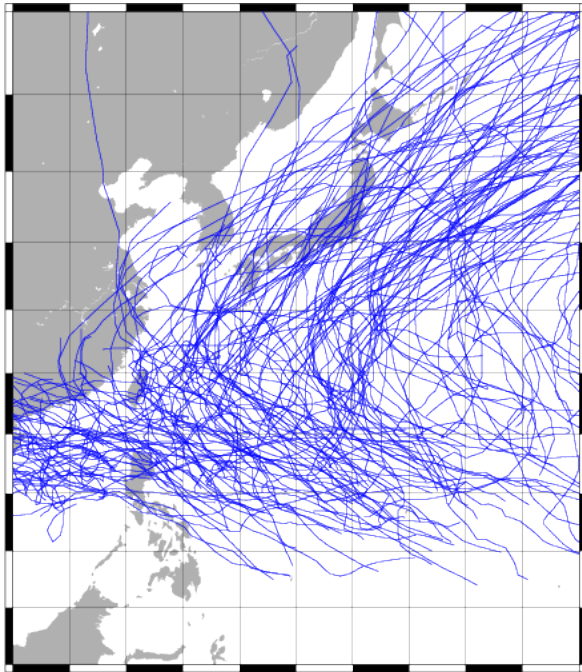


# 気候変動をさぐる統計数理的 アプローチ

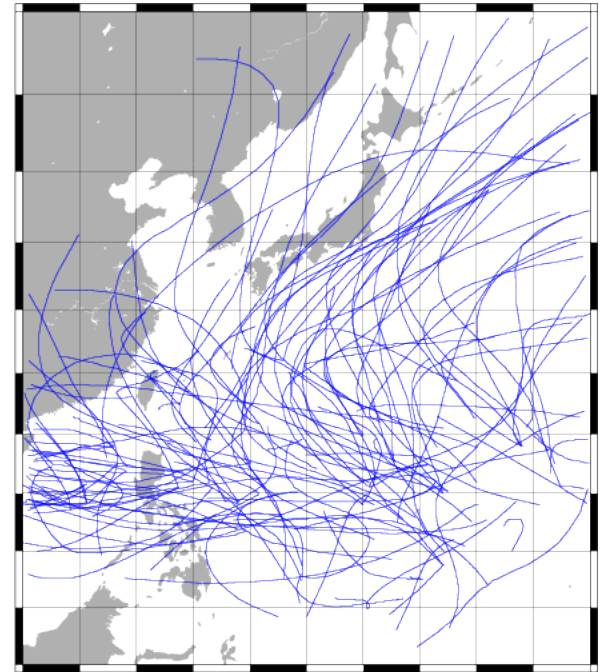
中野 慎也

(統計数理研究所)

# 統計に基づく台風モデル



データ (1980~2009年の9月の台風経路)

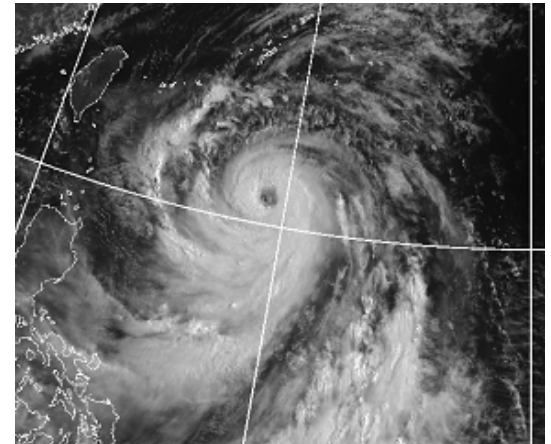


モデルによるシミュレーション

- データから台風の挙動を表現する確率モデルを構築する.
- 得られたモデルから、台風に関する気候学的知見を得ることを目指す.

# 目的

- 我々の生活 (生活区域, 農業栽培, 防災設備など) は, 現在の気候 (気象の統計的な特性) を前提に成り立っている.
- しかし, 気候は定常的ではない (段々と変化している). 気候の変化は様々な方面でリスクを高め得る.
- 台風の活動も, 気候変動に伴って変化すると言われており, リスク要因となる可能性がある.
- 実際に, 台風が気候変動 (特に地球温暖化) の影響を受けているのかを調べるのが本研究の目的(だった).

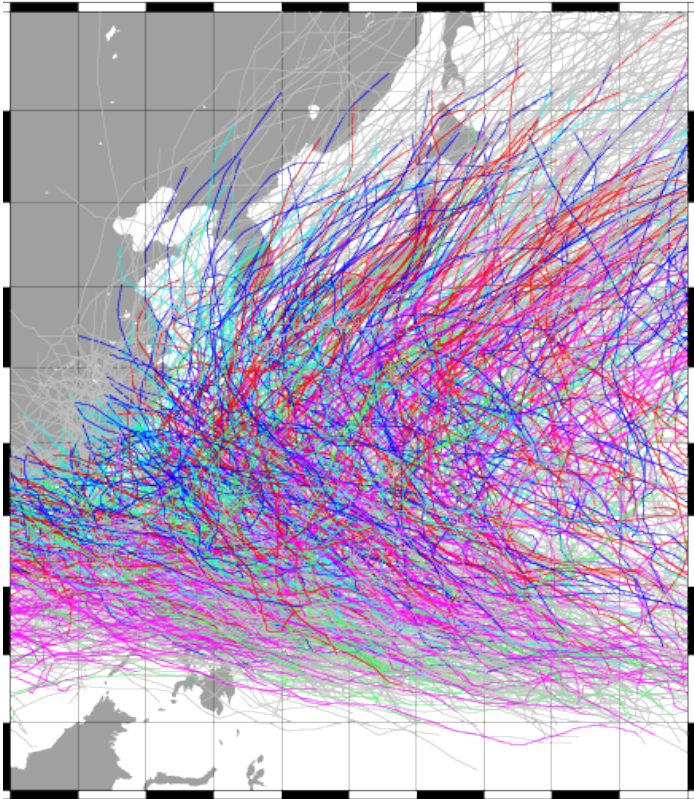


(c) JMA

# 気候モデル

- 気候変動の影響を調べるために、シミュレーションは一つの有力な手段.
- シミュレーションでは、物理法則にしたがって、地球大気・海洋の長期的変化を模擬する.
- 最近の(物理)気候モデルによるシミュレーションでは台風も生成されるが、1回実行しただけで、台風の気候学的な(統計的な)性質を議論するのは難しい.
- 繰り返し計算すれば、様々なシナリオが考慮できるが、物理気候モデルでは計算量的に困難.
- そこで、物理に頼らない確率モデルの構築を目指す.

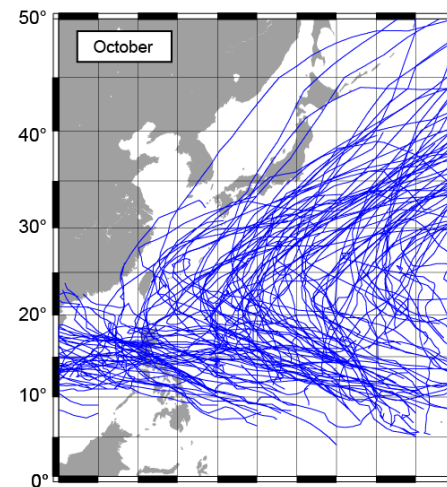
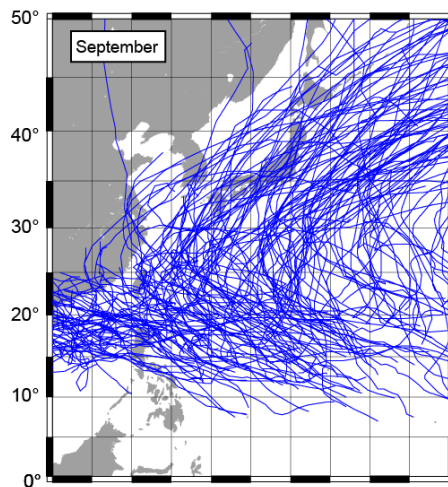
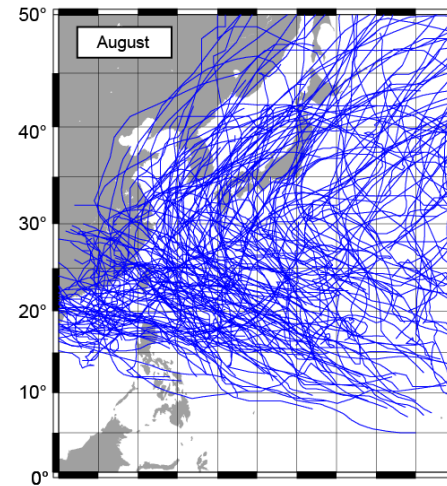
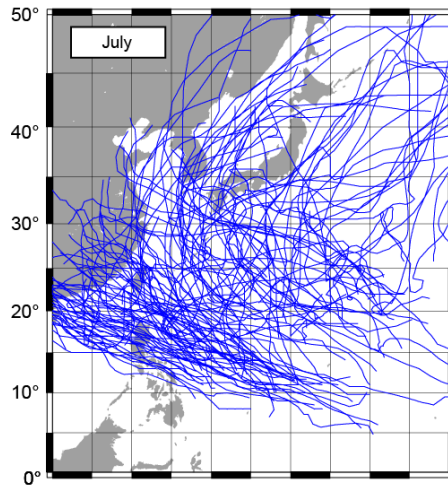
# 台風経路データ



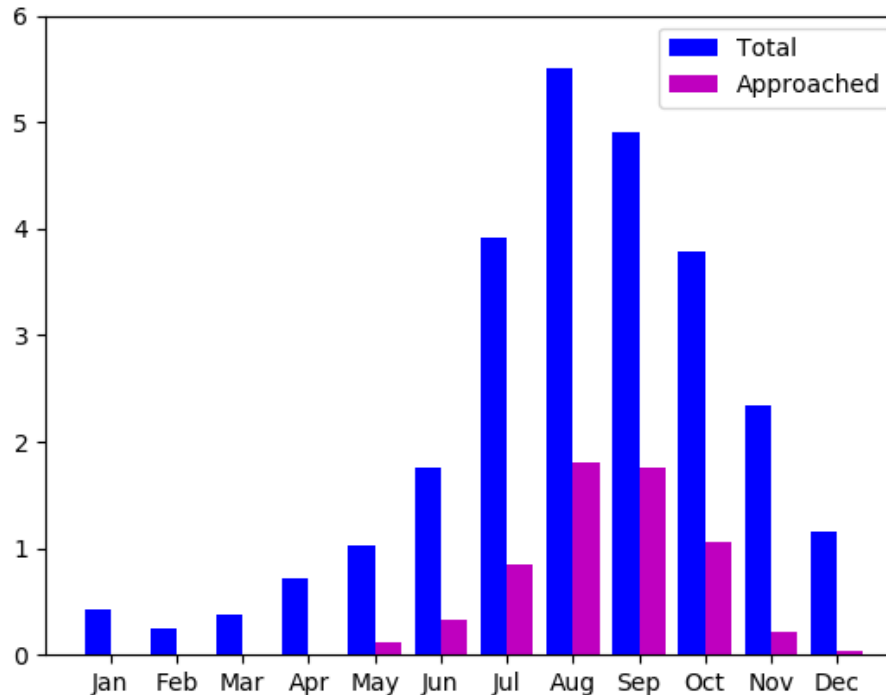
Pollock plot of the best track data

- 気象庁に設置されているRegional Specialized Meteorological Centerが“best track data”と呼ばれるデータを提供している.
- 1951年以降に観測された台風について、6時間ごとの位置，中心気圧，中心風速を推定したもの.
- NOAAのデータを参照すればもっと遡れるが，今は気象庁のデータを使っている.

# 台風経路の季節変化

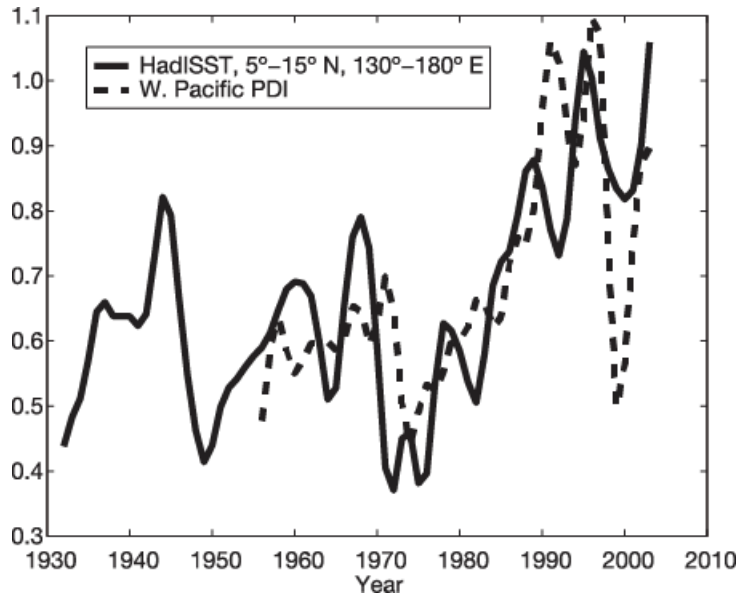


# 季節変化

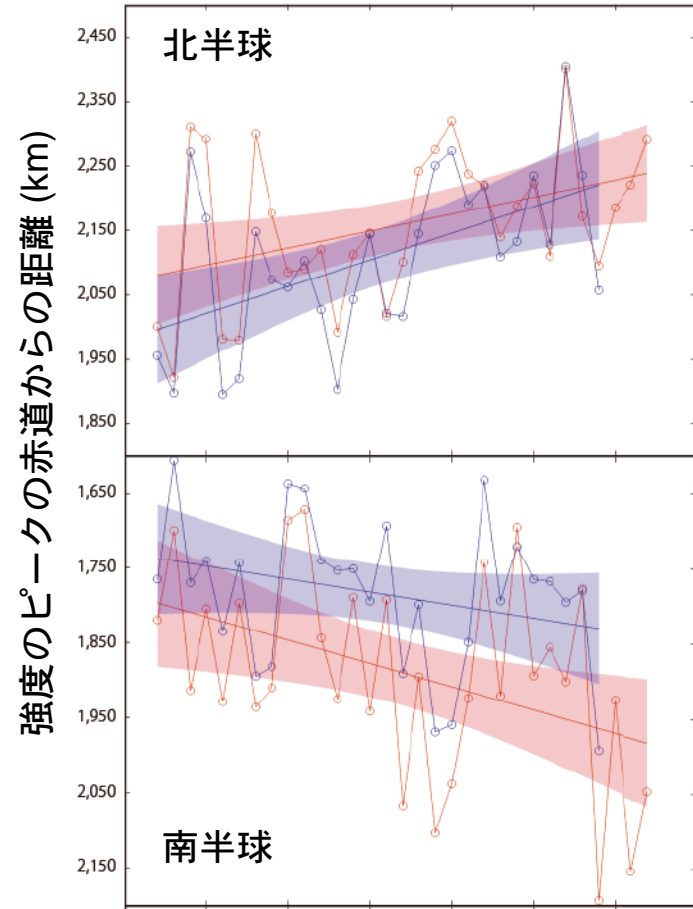


- 1年あたりの発生個数と日本本土接近回数.
- 接近回数は日本本土付近(東経130~145度, 北緯30~45度)を通過したもので計算.

# 台風の長期変動



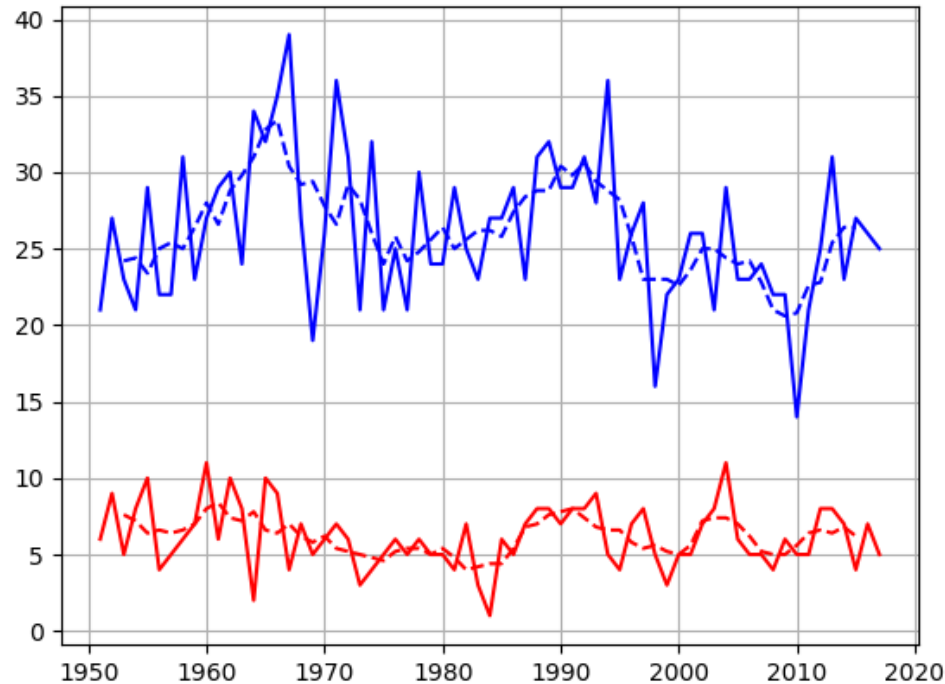
台風の強さの年平均のようなもの(点線)と海面水温(実線)の比較 (Emanuel, 2006)



Kossin et al. (2014)

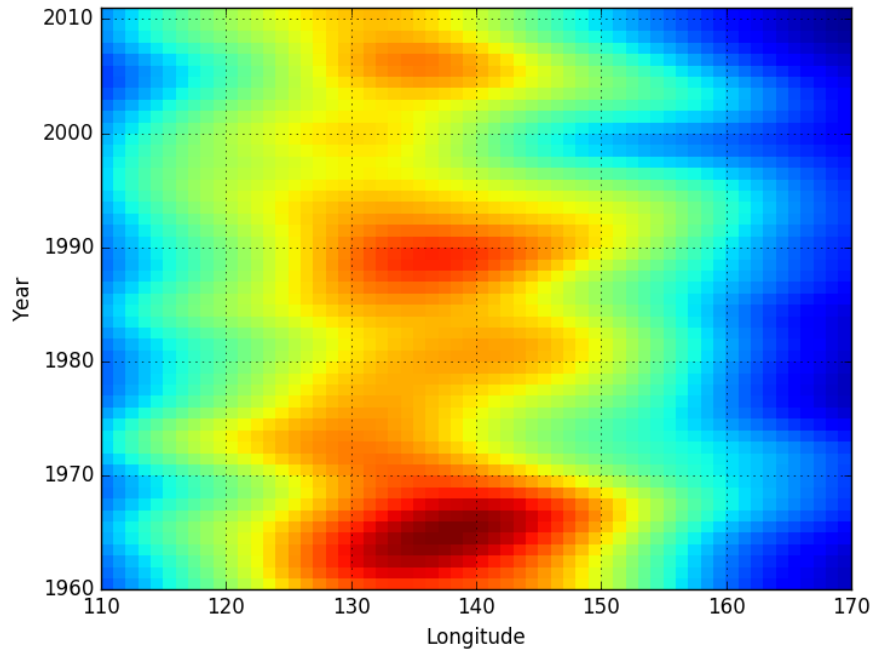


# 台風数の長期変動

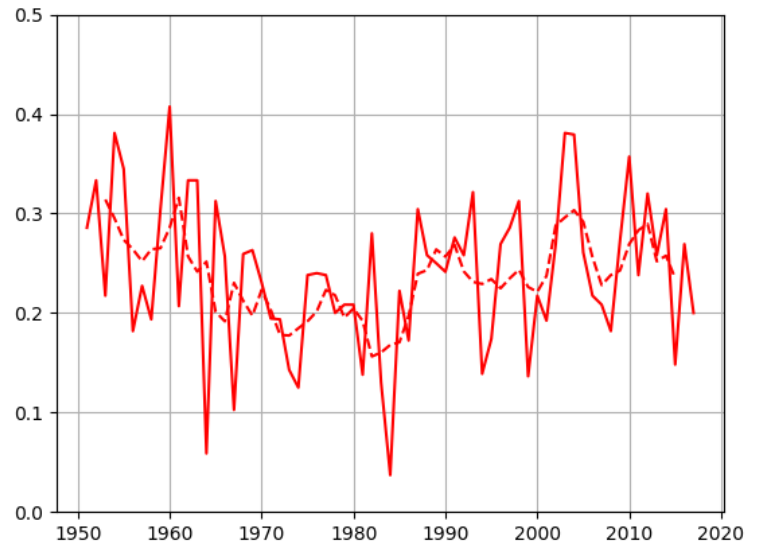
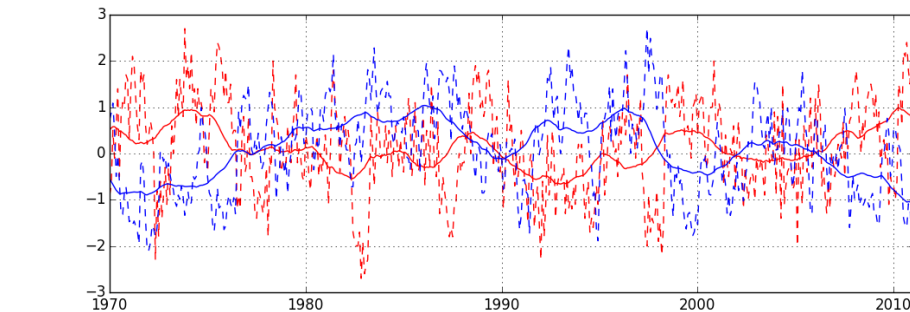


- 1年あたりの発生個数と日本本土接近回数 (点線は5年移動平均).
- 接近回数は日本本土付近(東経130~145度, 北緯30~45度)を通過したもので計算.

# 発生位置の変動



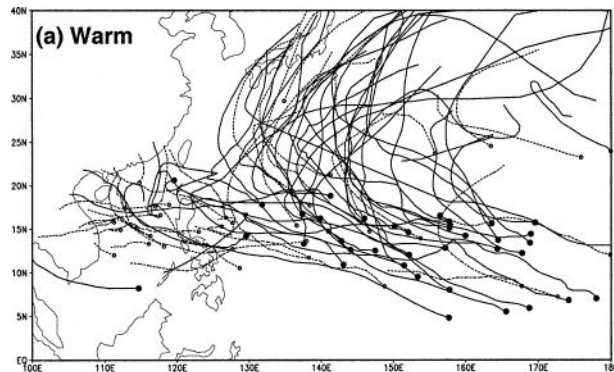
- データから得られた発生頻度経度分布の経年変化. ( $\pm 2$ 年スケールで平滑化)



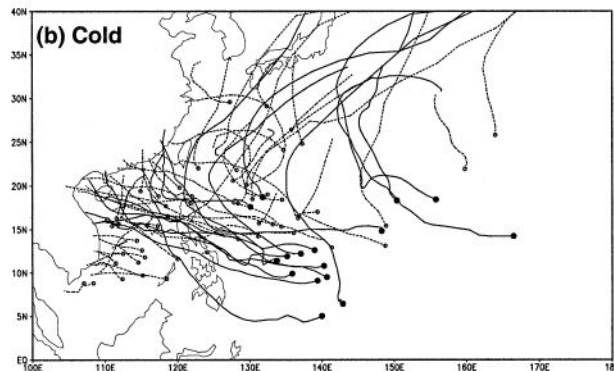
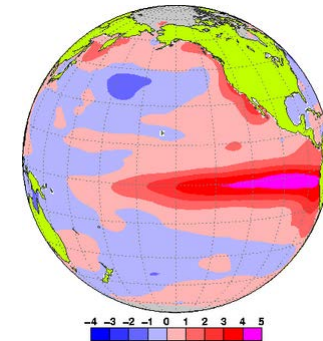
各年の日本に接近する台風の割合  
(点線は5年移動平均)

# 台風の長期変動

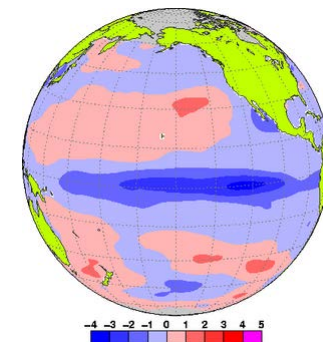
- もう少し長い時間スケールで見ると，例えば，エルニーニョ時とラニーニャ時で発生海域が変わる傾向がある。



エルニーニョ時



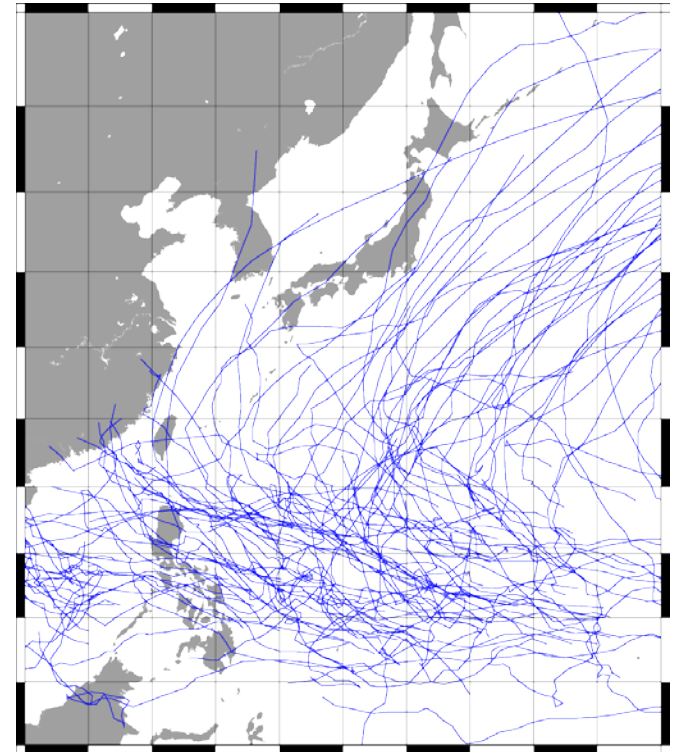
ラニーニャ時



気象庁HPより

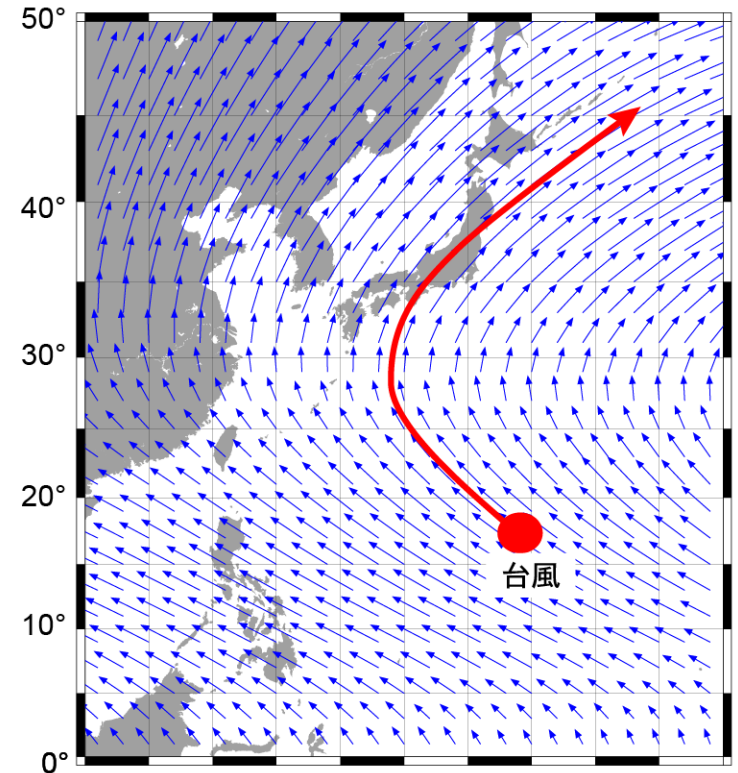
# 台風確率モデル

- ここでは台風の経路のモデルを作る.
- 台風経路の場合, 3つの過程を考えることになる:
  1. 生成,
  2. 移動,
  3. 消滅.
- データから, それぞれの過程を表す統計モデルが構成する.
- それを使ってシミュレーションも実行できる.



# 台風の振る舞い

- 台風の挙動は，周辺の大気・海洋の状態を与えてやれば，ある程度決まる.
  - 台風の生成，盛衰には海面水温や風の分布が影響する.
  - 台風は風に流されて進む性質があるので，台風の経路は周りの風の空間分布で決まる.
- 台風の統計的な性質を表すには，周辺の大気・海洋の状態が色々変化することを考慮する必要がある.



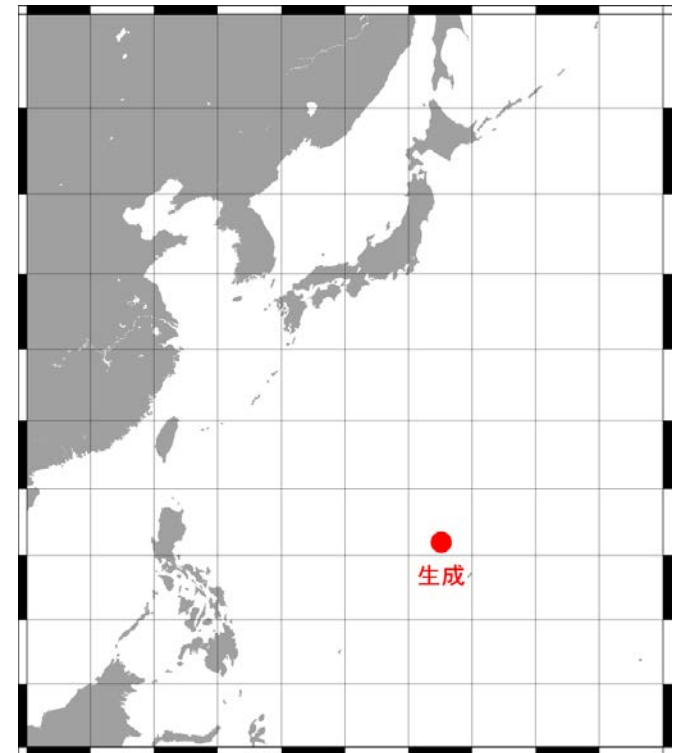
# モデルの設計

- モデルでは，影響しそうな変数もなるべく考慮しておく
  - 季節変化
  - さらに長期的な変動 (=気候変動) があるなら，それも考慮した方がよい.

# 生成モデル

- ある条件下での発生個数  $n$  を決める.
- 各台風について，発生時の位置や強さ等の状態  $z_0$  を定める:

$$z_0 \sim p(z_0 | \theta)$$



# 移動モデル

- ある時点での台風の位置  $x_t$  から、次の時点 (6時間後) の状態への遷移を

$$x_{t+1} = x_t + v_t \Delta t$$

のような形で記述する.

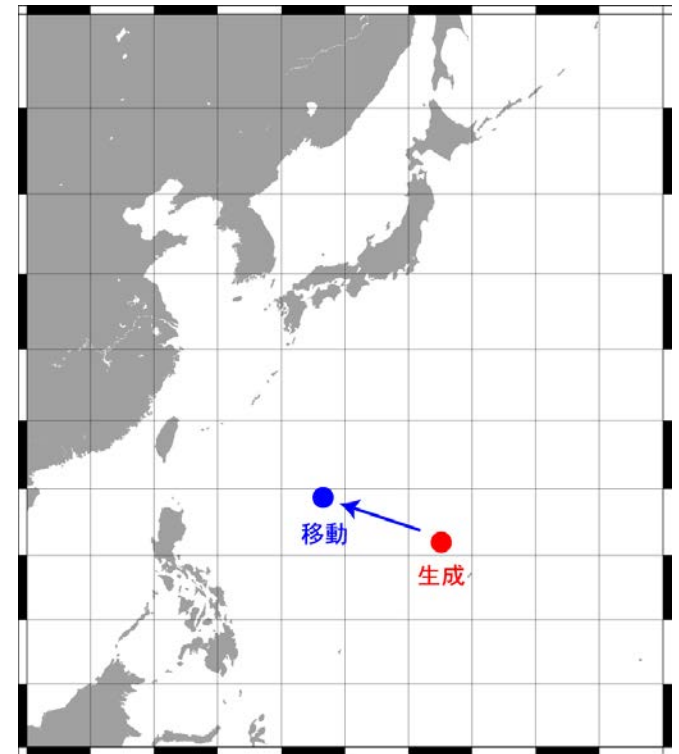
- 速度  $v_t$  をその時の状態  $z_t$  の関数

$$v_t = f(z_t).$$

として表現すると,

$$x_1 = x_0 + f(z_0) \Delta t$$

のように次の位置が得られる.





# 移動モデル

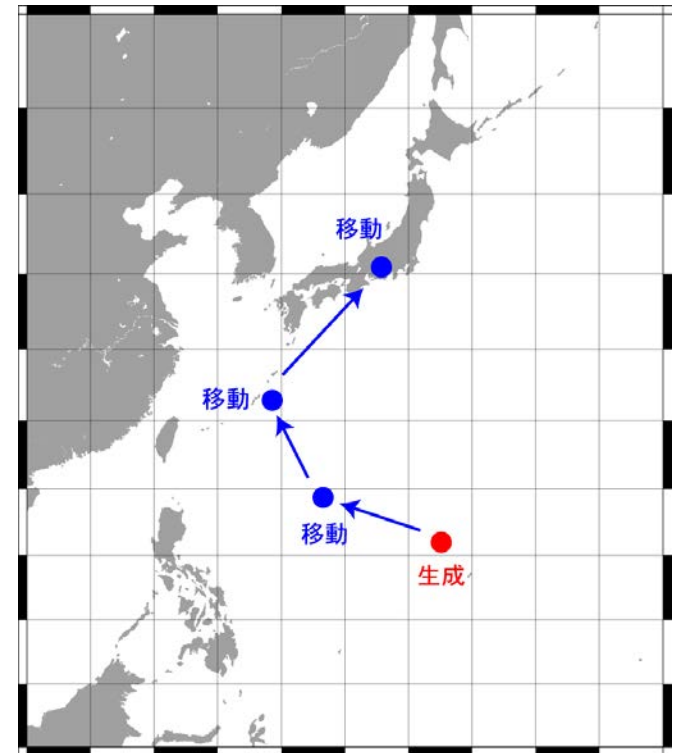
- その後の位置も

$$\mathbf{x}_2 = \mathbf{x}_1 + f(\mathbf{z}_1)\Delta t,$$

$$\mathbf{x}_3 = \mathbf{x}_2 + f(\mathbf{z}_2)\Delta t,$$

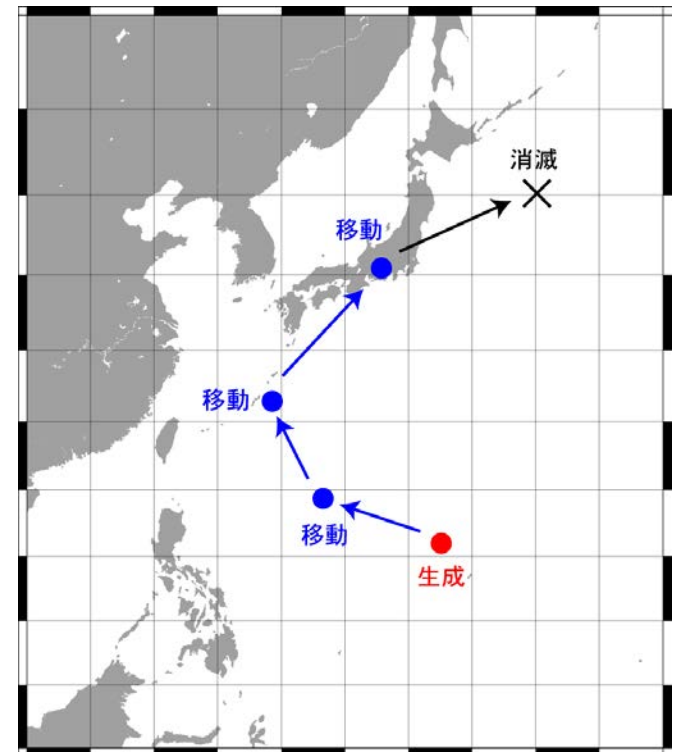
⋮

のような手続きで得られる.



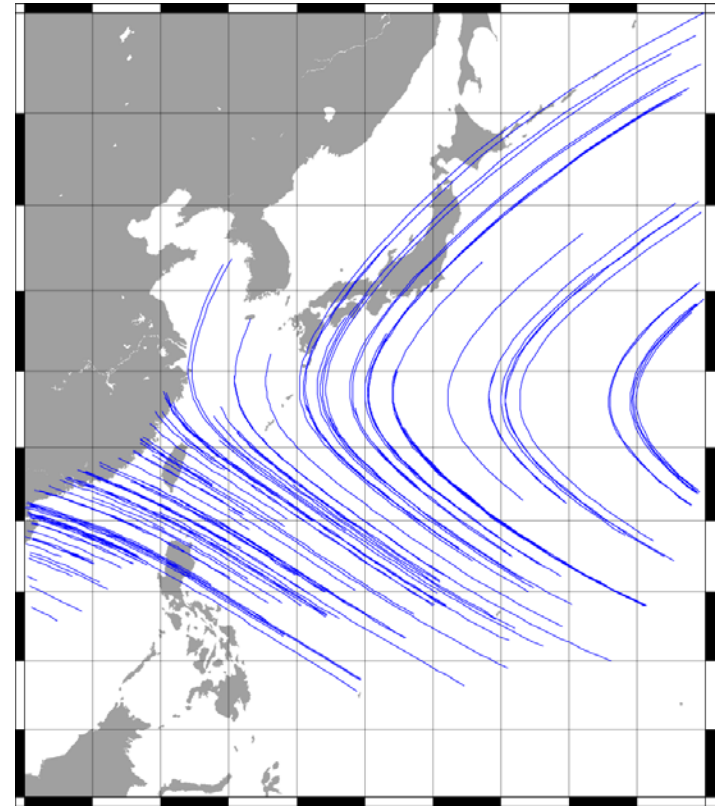
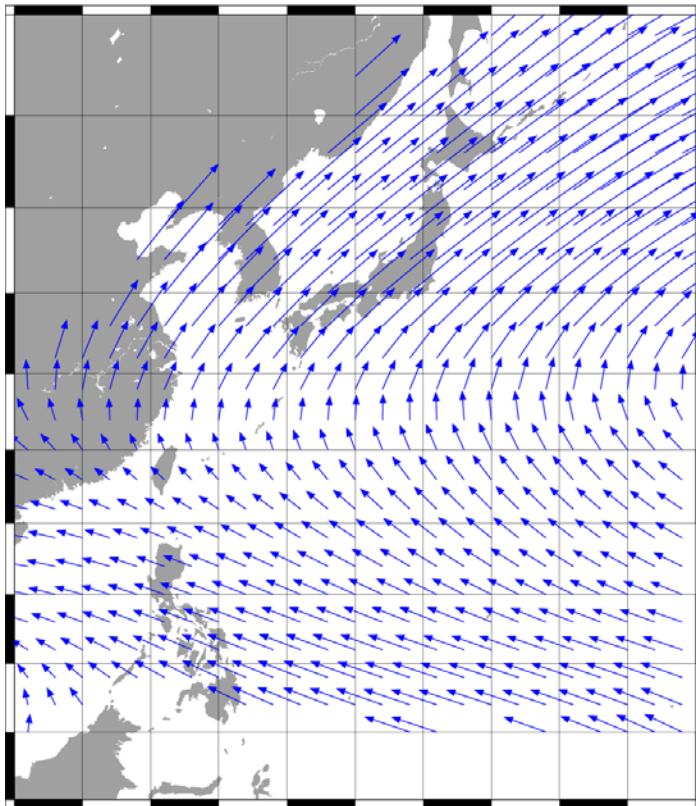
# 消滅モデル

- 台風が消滅する確率も，状態  $z_t$  のに依存する形で設定する．
- 消滅過程のモデルはまだちゃんと作っていない．今は，各台風の寿命を確率モデルで設定している．



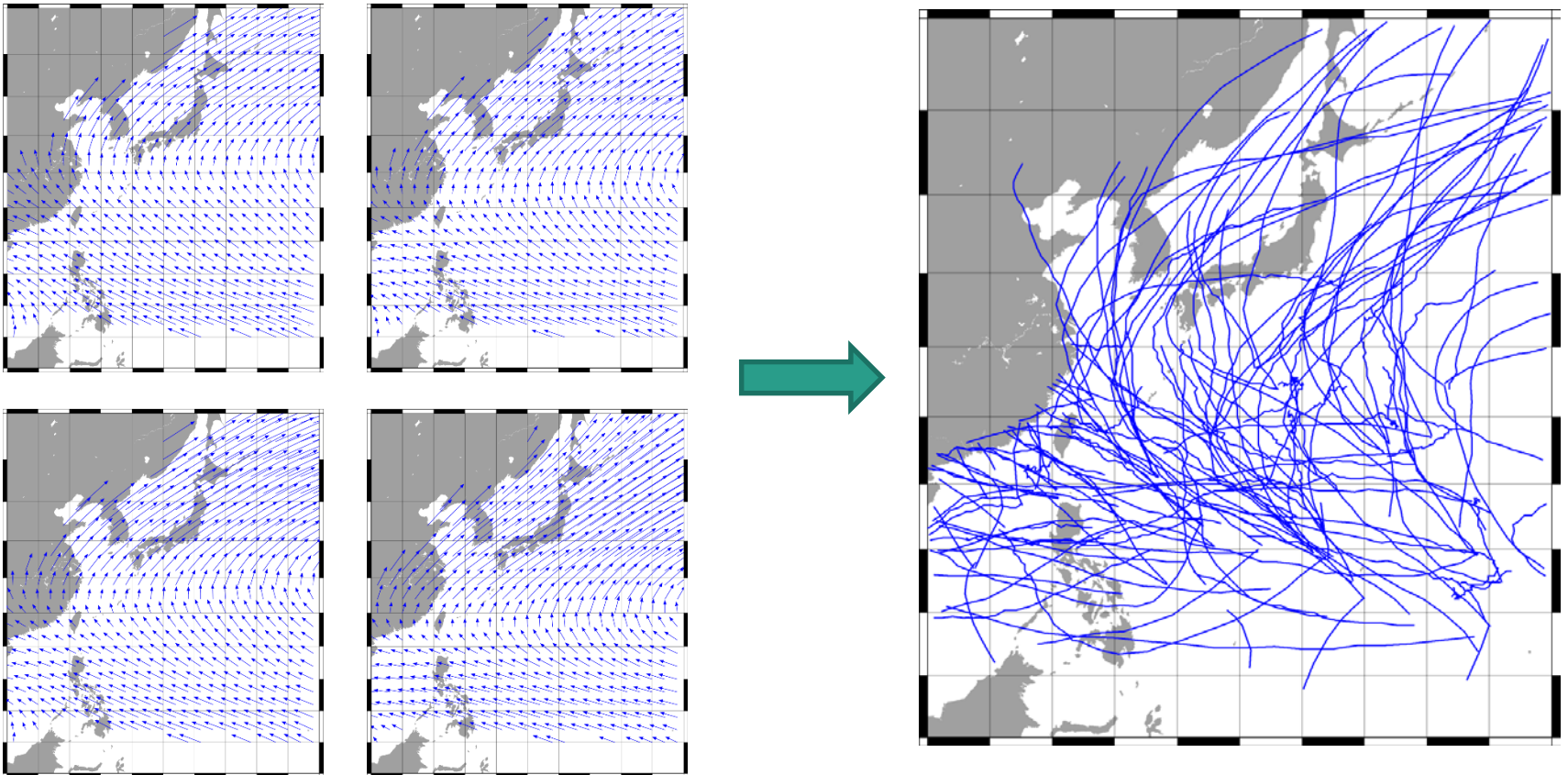
# モデルの設計

- 移動速度分布(≒風の分布)が変わらないとすると，多様な経路が得られない。



# モデルの設計

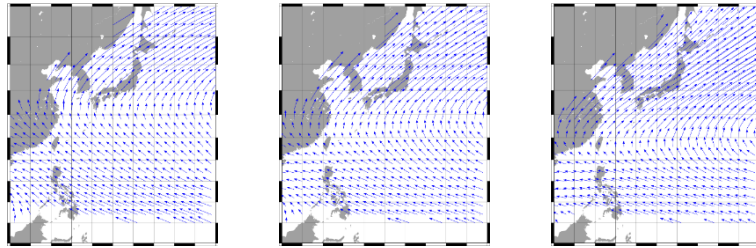
- 色々な速度分布パターンを表す確率モデルを考えると，多様な経路が生成できる。



# モデルの設計

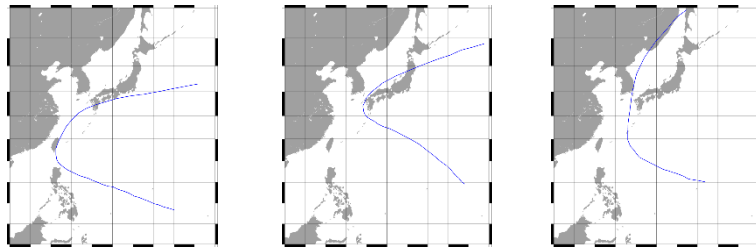
- 背景場 (移動速度空間分布) の確率分布

- 色々な背景場を生成

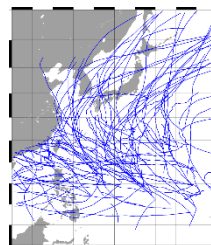


- 与えられた背景場の下での台風の動きに関する確率分布

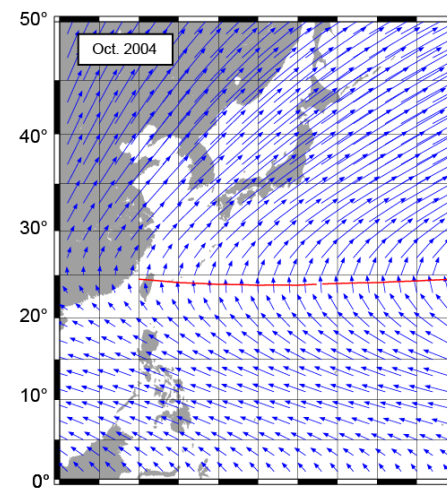
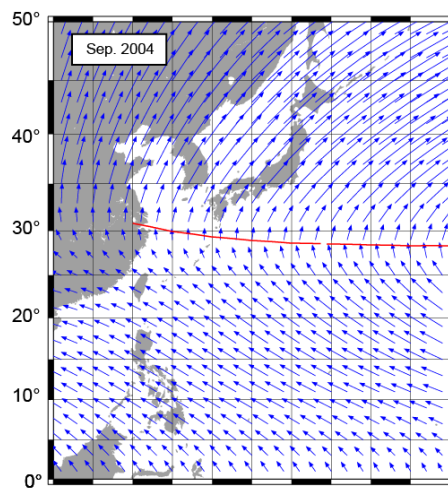
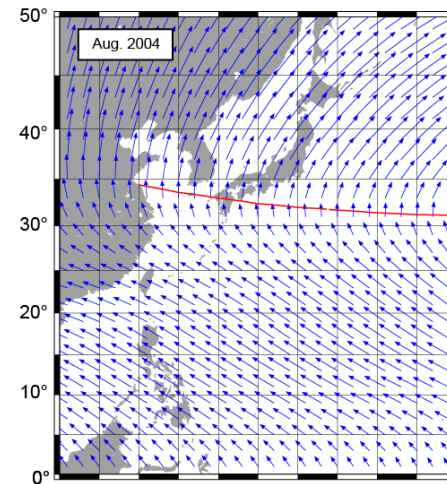
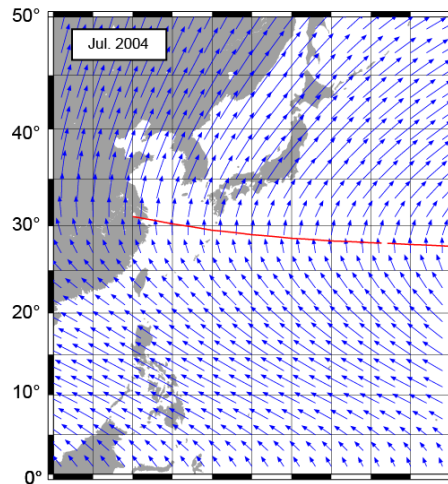
- 個々の具体的な背景場の下で仮想的な台風を生成



- 得られた仮想台風をまとめると欲しい台風の分布になる

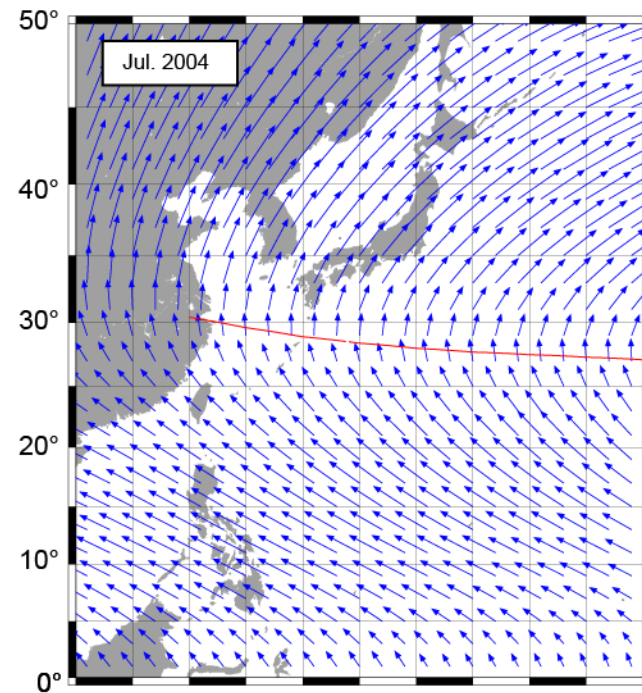
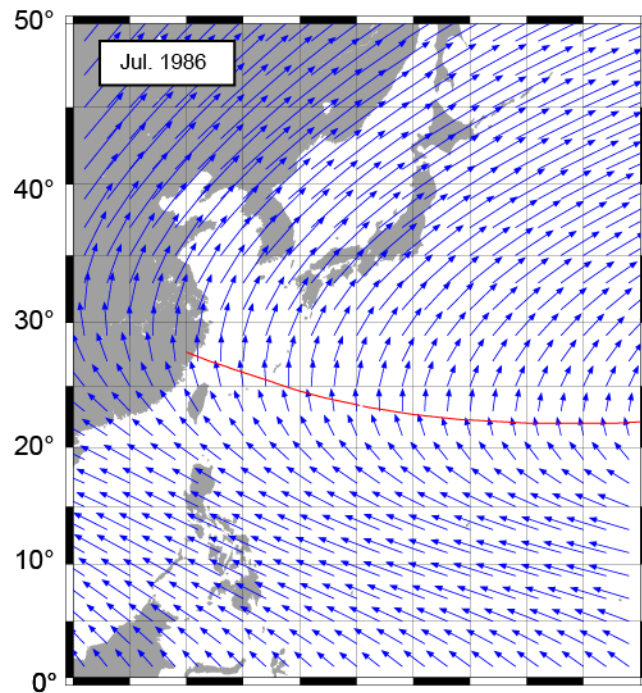


# 典型的パターンの長期変動



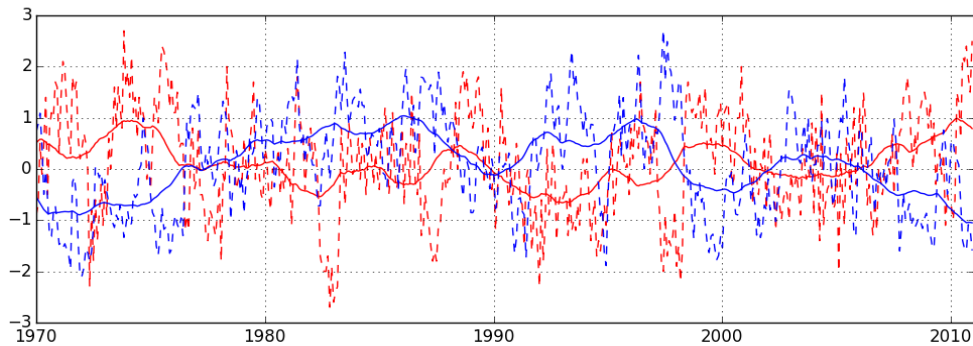
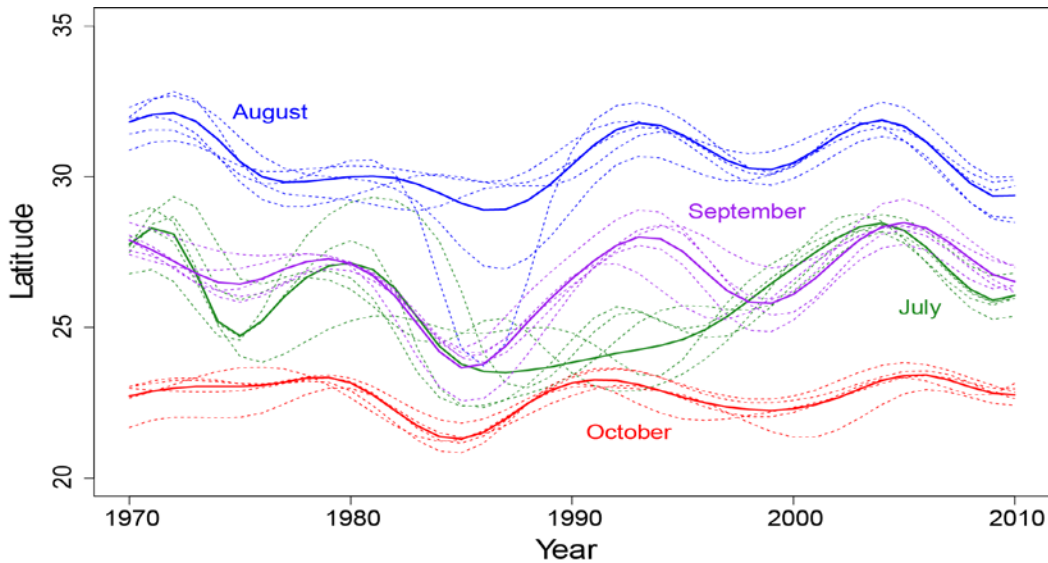
→ 20km/h

# 典型的パターンの長期変動



Nakano et al. (2016)

# Long-term variation



赤: 南方振動指数

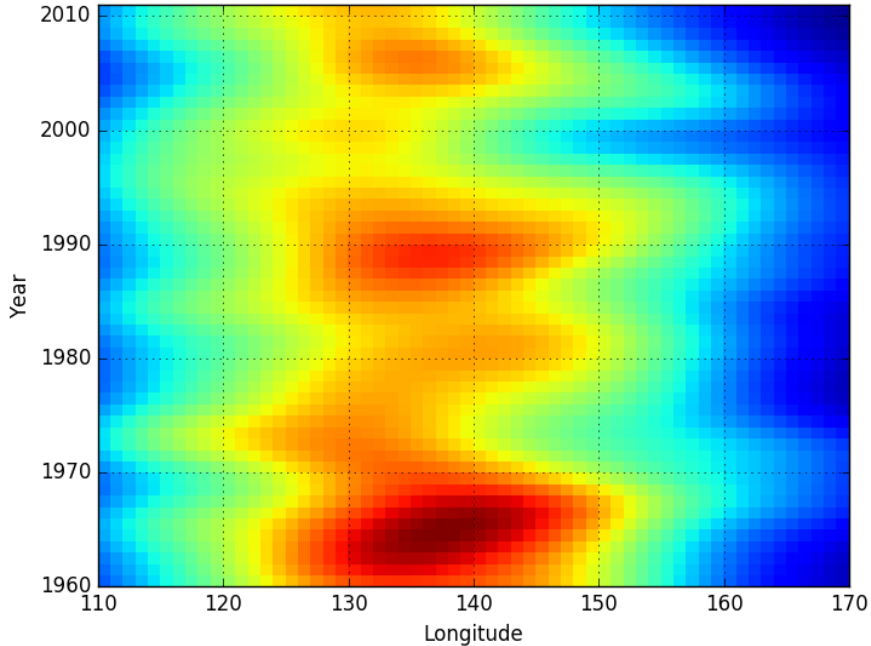
青: 太平洋十年振動指数

Solid: moving average with 4-year window

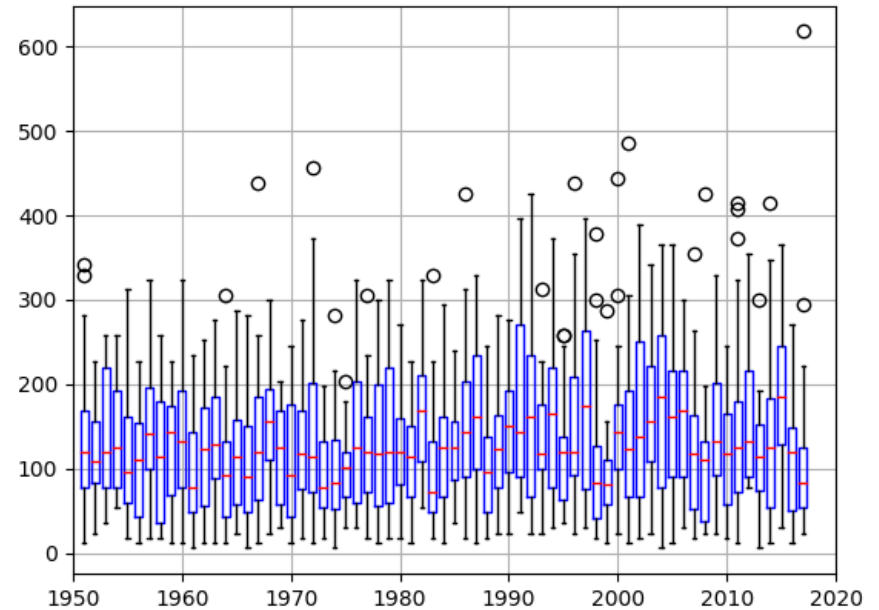


# 台風の長期変動

- 発生位置，寿命についても過去データからモデリング．

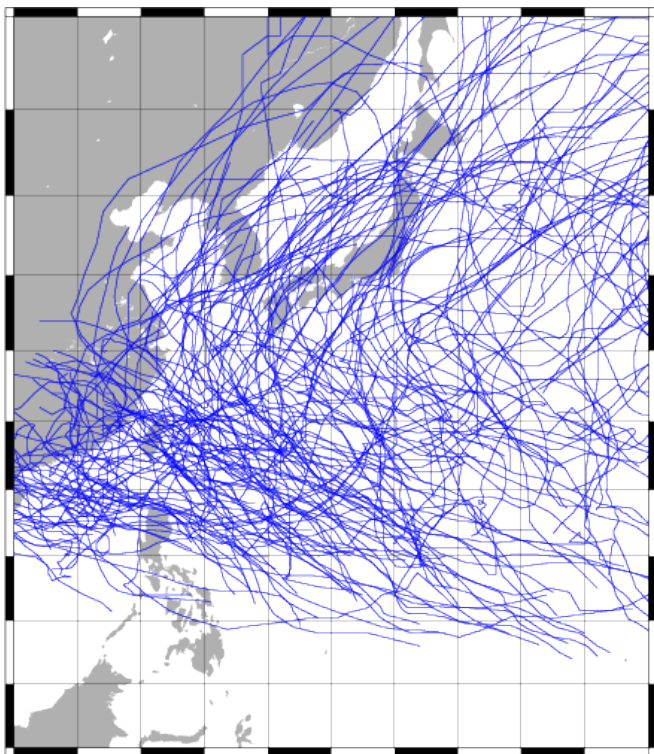


発生経度の変化

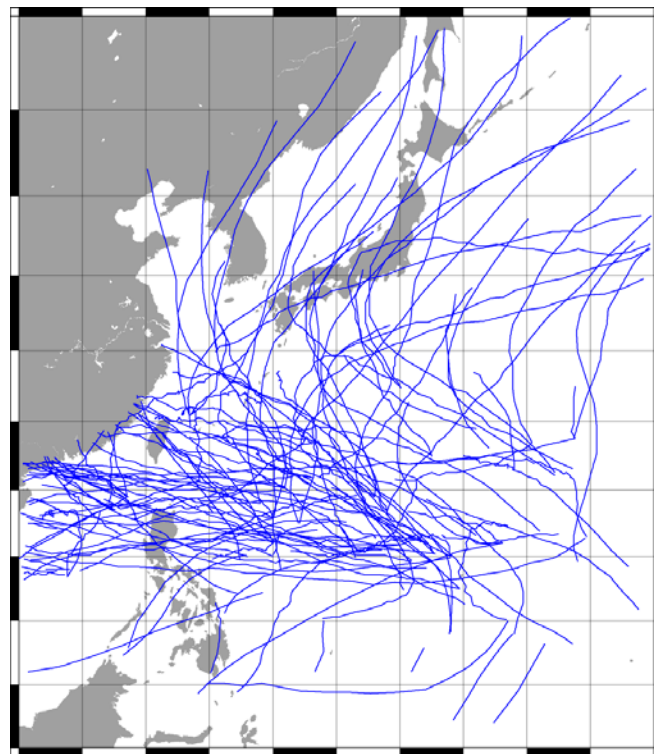


台風の寿命の経年変化 (hour)

# シミュレーション

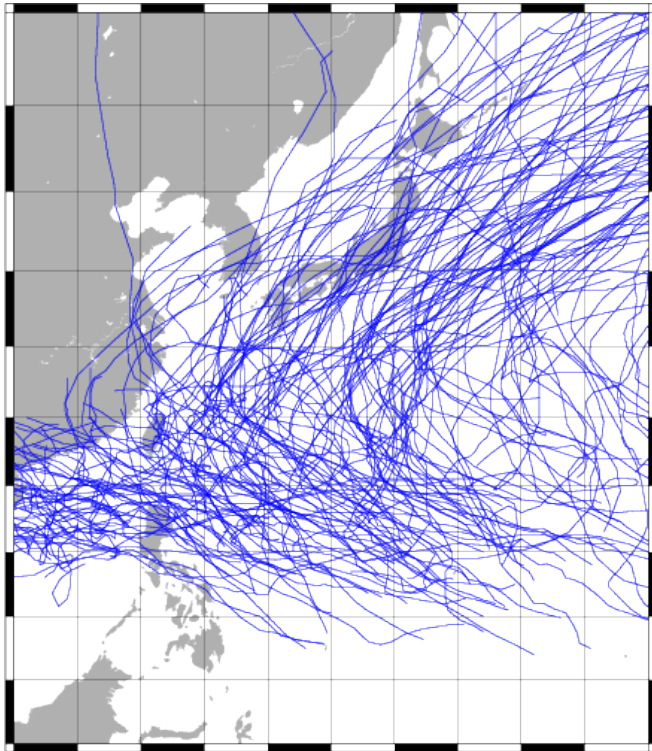


August from 1980 to 2009

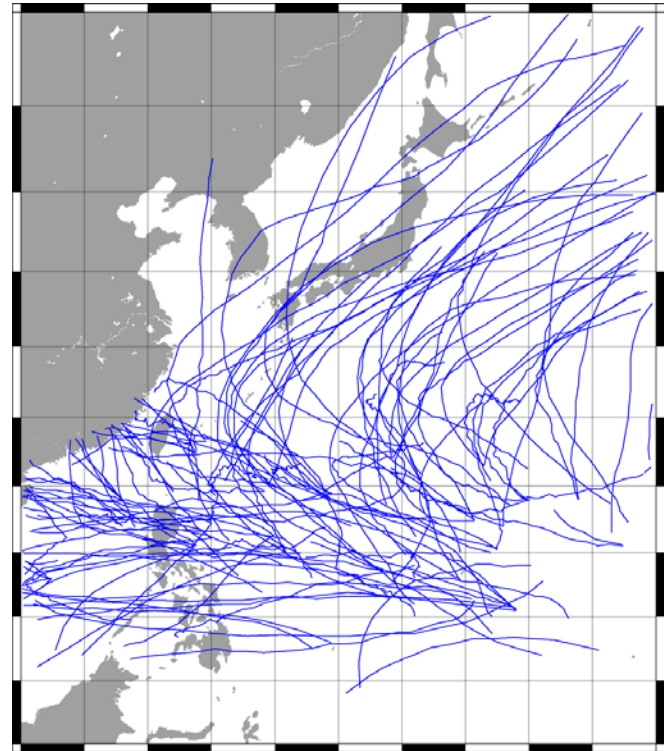


Model for August

# シミュレーション

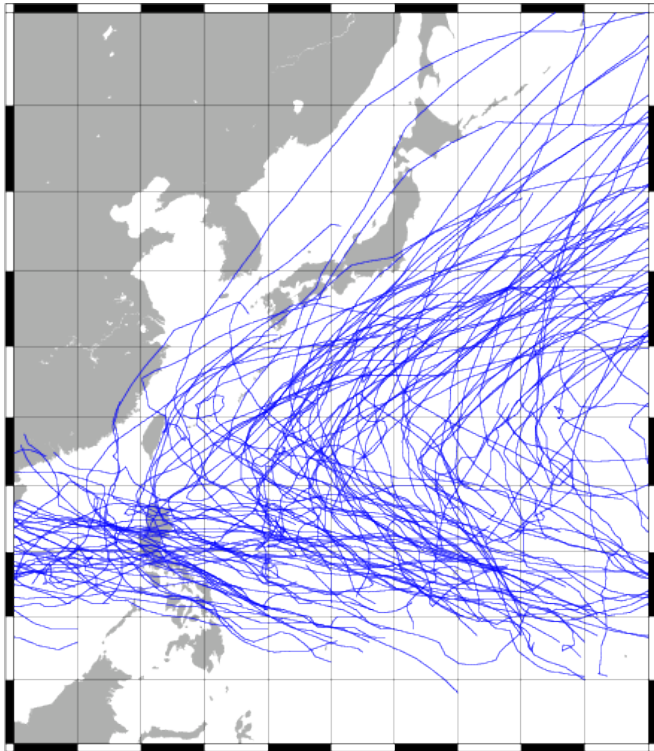


September from 1980 to 2009

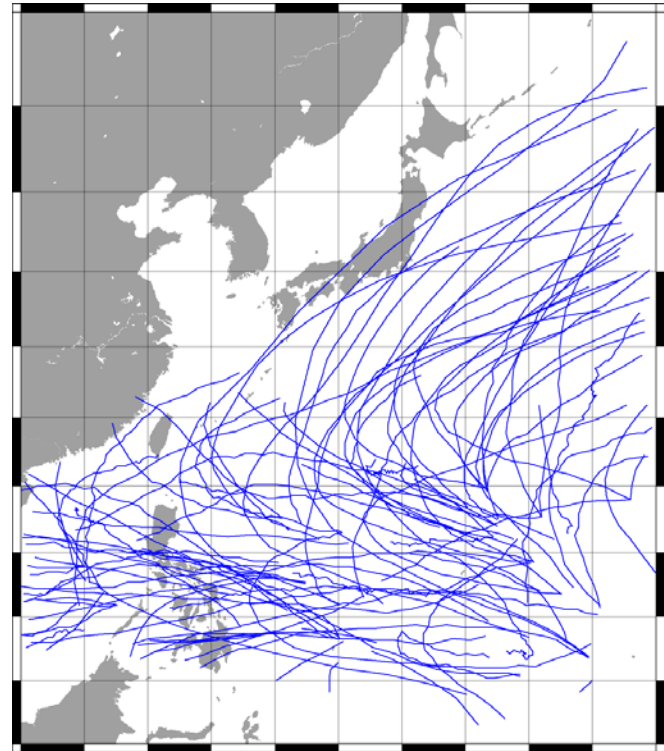


Model for September

# シミュレーション

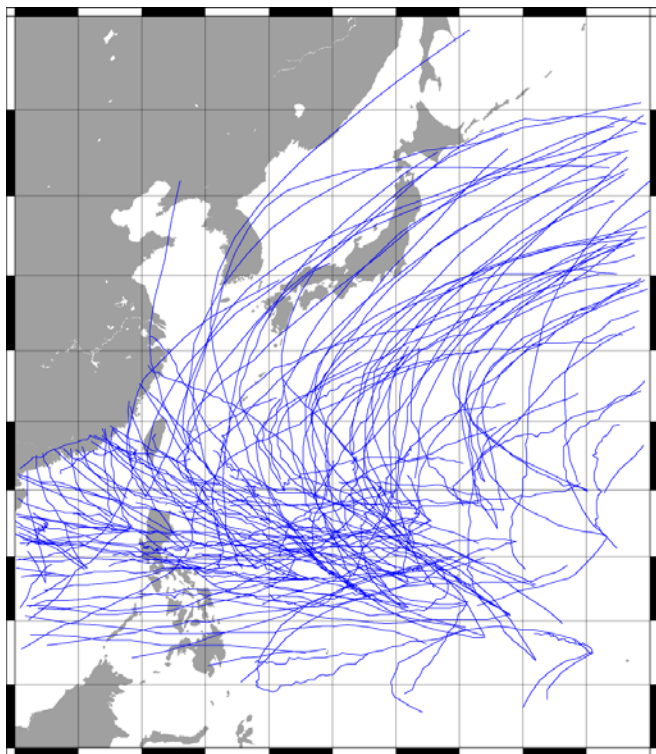


October from 1980 to 2009

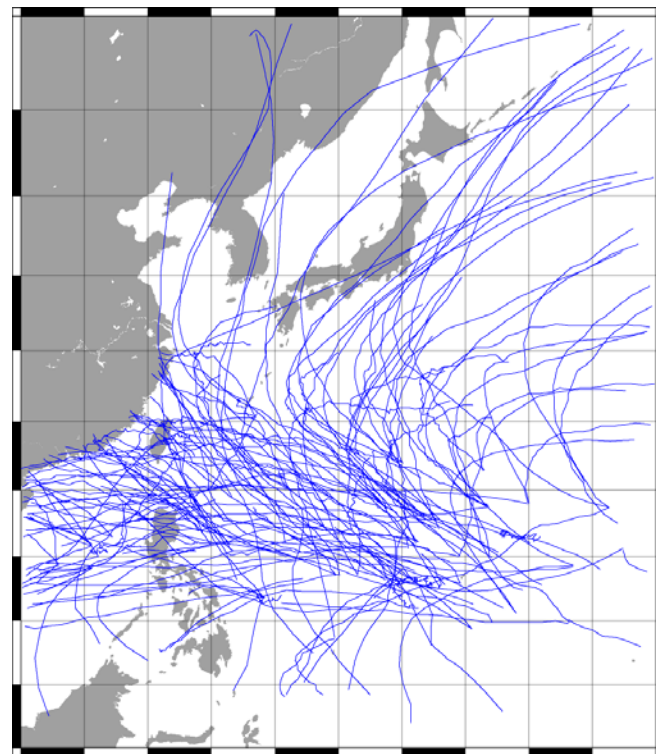


Model for October

# シミュレーション

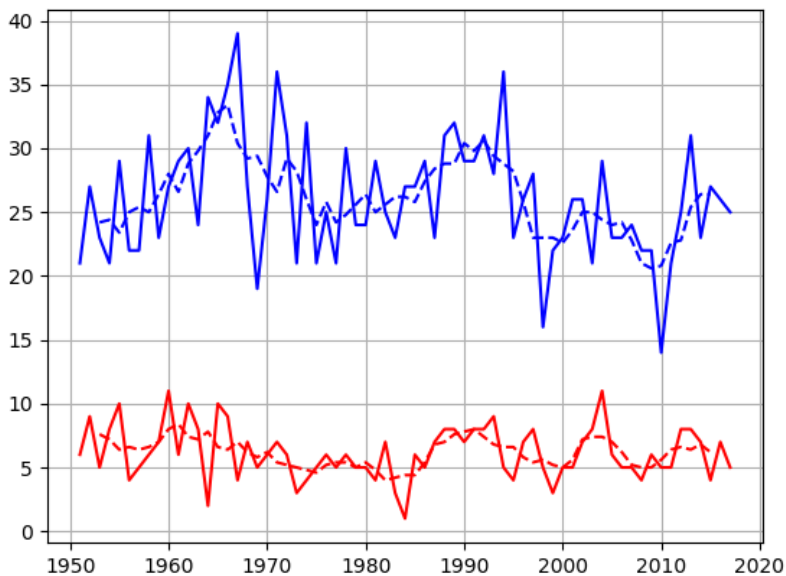


Model for Sep 1986

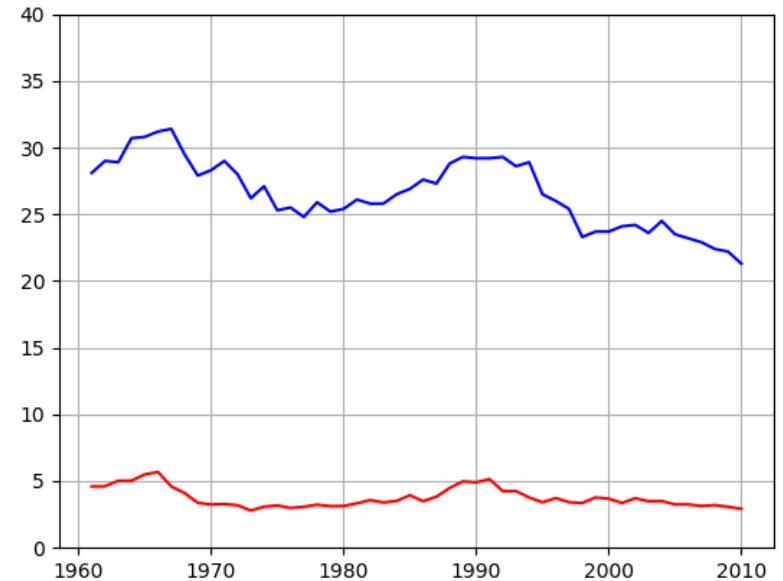


Model for Sep 2004

# 台風数の長期変動



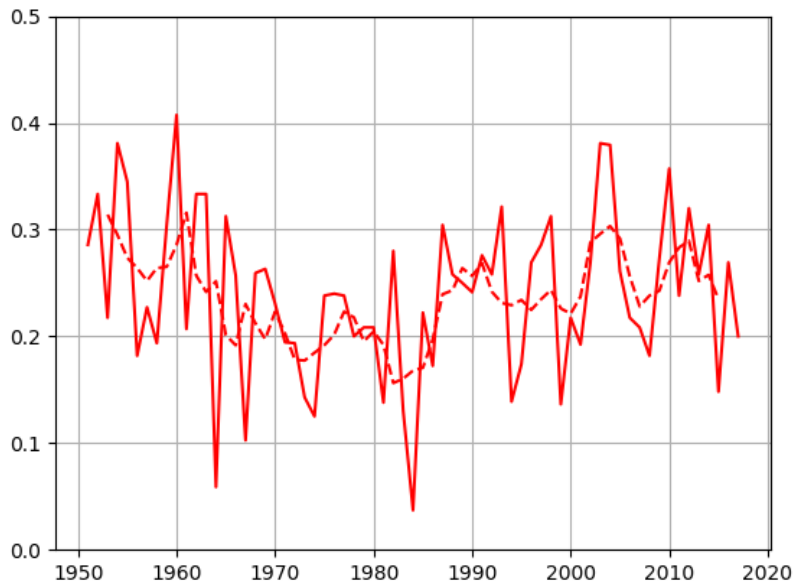
実際の台風の発生個数と日本接近回数 (/年)



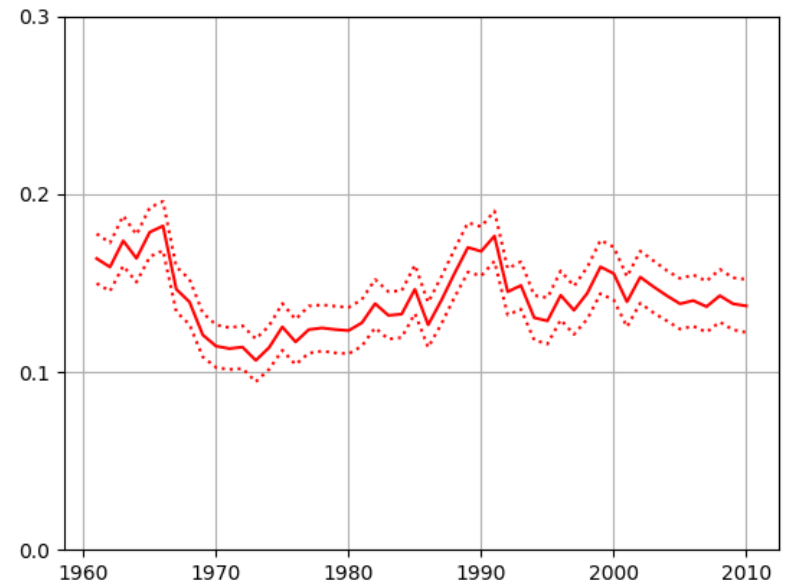
モデルからの再構成

- 全体として日本接近回数を過小評価傾向.
- 変化の傾向はある程度捉えられている.

# 台風数の長期変動



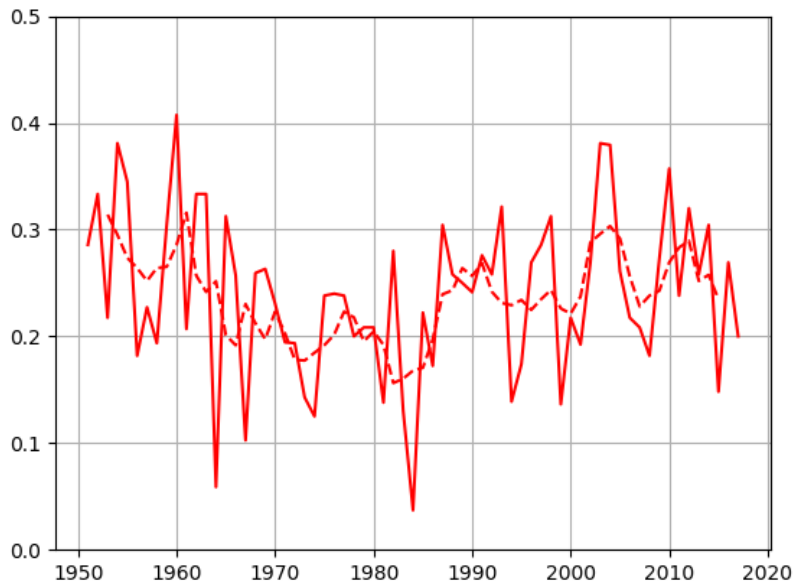
実際の台風の発生個数と日本接近回数之比



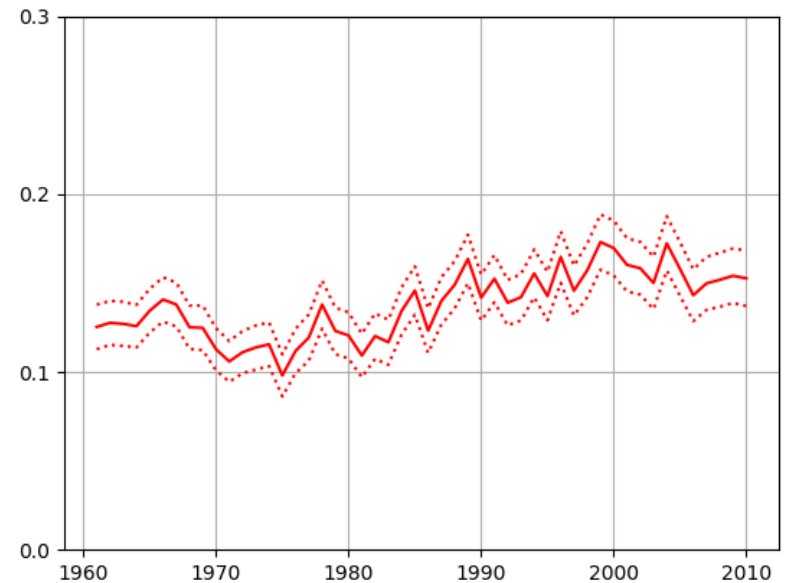
モデルからの再構成

- 全体として日本接近回数を過小評価傾向.
- 変化の傾向はある程度捉えられている.

# 台風数の長期変動



実際の台風の発生個数と日本接近回数之比

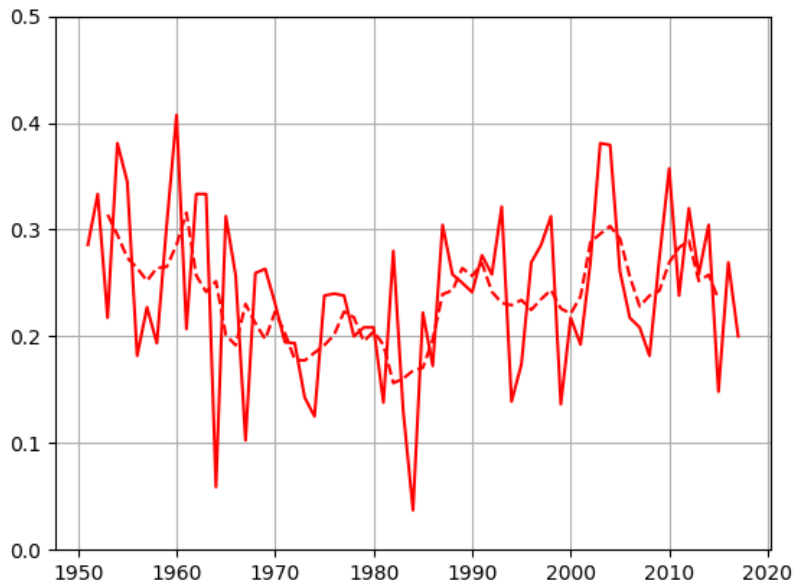


モデルからの再構成 (対流パターン固定)

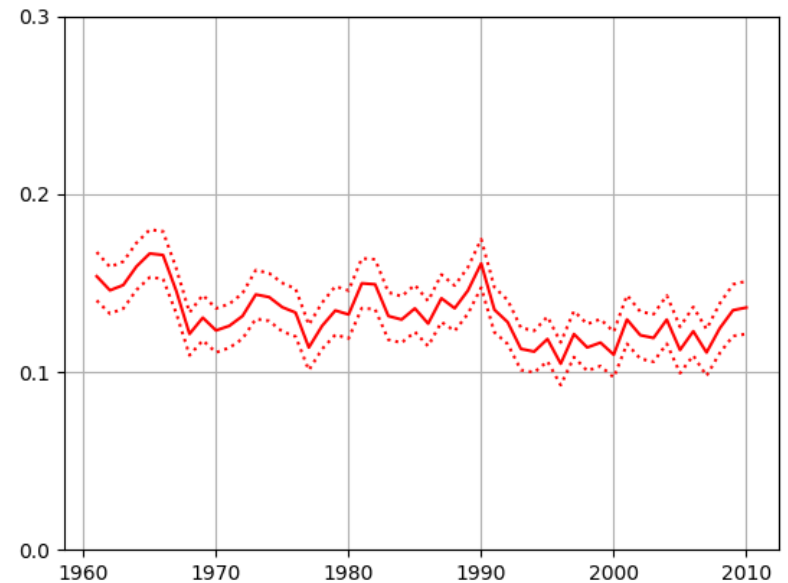
- 長期トレンドは，生成，消滅パターンの変化で表される。
- 10年程度のスケールの変化ははっきりとは見られない。



# 台風数の長期変動



実際の台風の発生個数と日本接近回数の比



モデルからの再構成 (生成パターン固定)

- 明確な傾向はないが、10年スケールの変化は見られる。
- より長期の傾向は合わない。

# まとめ

- データに基づき，季節変動や気候変動を表現できる台風確率モデルの開発を進めている．
- 台風らしい経路を生成することはできるようになりつつある．
- 量的なずれは残っているが，季節変化や長期変動も定性的な傾向は表現できそうである．
- 結果のvalidationや，台風の強度，雨量とのモデル化は今後の課題である．