

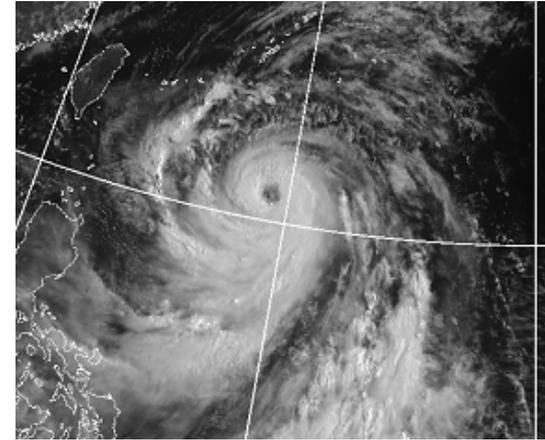
統計数理で気候変動をさぐる

中野 慎也

(統計数理研究所)

台風

- 北西太平洋域で発生する強い熱帯低気圧.
- 東アジア域においては，深刻な災害をしばしば引き起こす.
- 台風災害の対策，特に土木事業や農業政策などは，機能するまでに時間が掛かる.
- 長期的なリスク評価のために，台風の統計的性質を調べることも重要であると考えられる.



(c) JMA

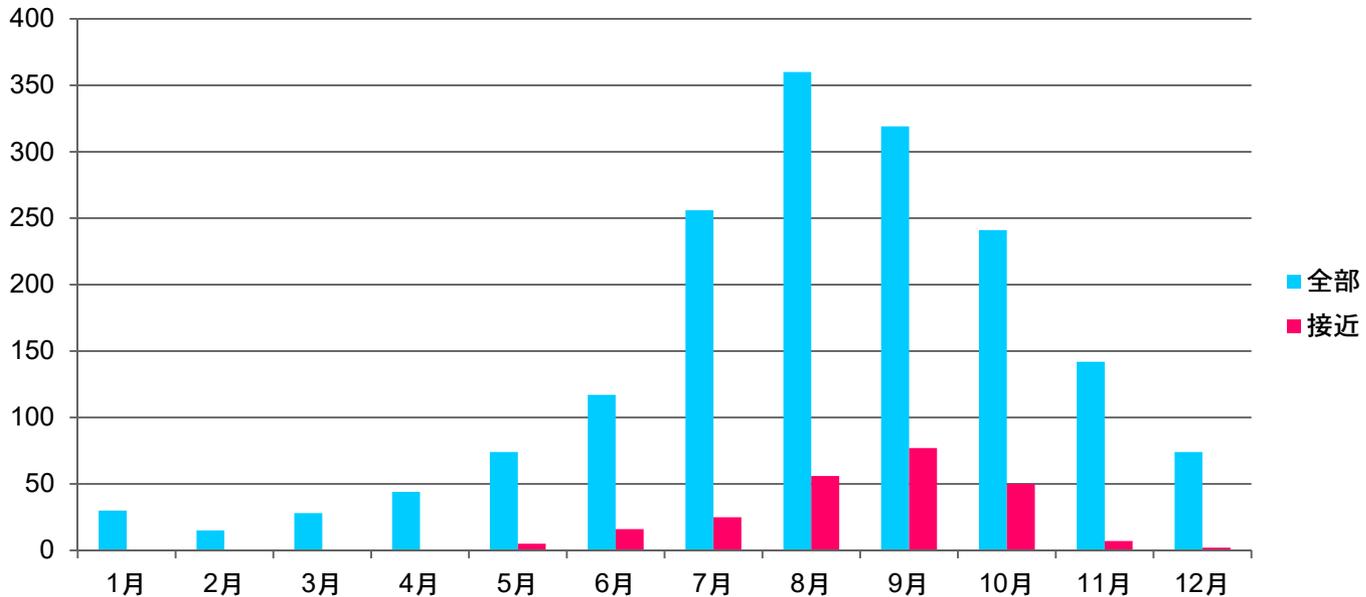


(c) BBC

気象と気候

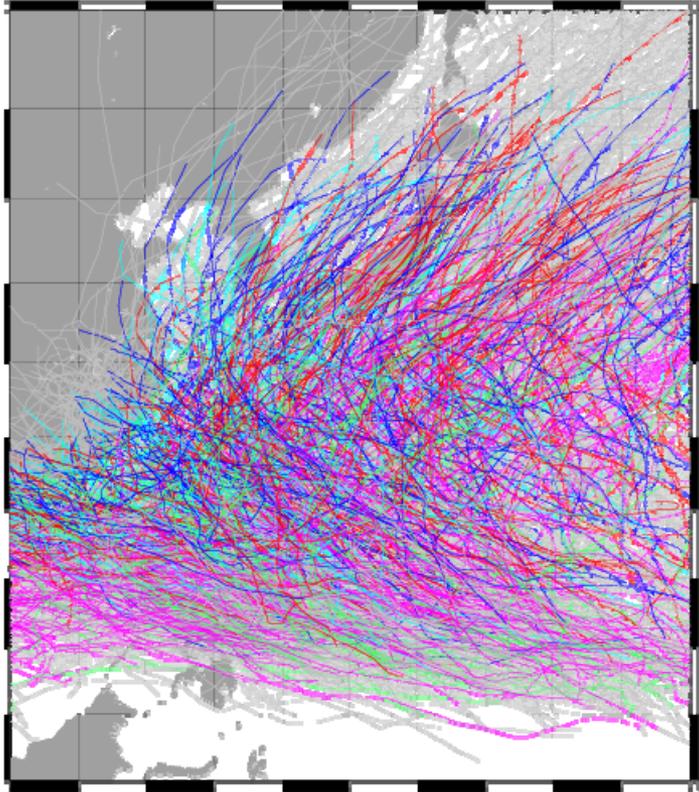
- 気象学 (Meteorology)
 - 気候学との対比では、短期的な現象が対象 (台風の生成・消滅メカニズムなど).
 - 気象予測：個々のイベントの予測.
 - 防災的応用：避難勧告・指示など.
- 気候学 (Climatology)
 - 気象現象を統計的視点から扱う.
 - 気候予測：イベントの頻度や統計的性質の将来変化の予測.
 - 防災的応用：長期的災害リスク評価，土木事業計画など.

台風統計



- 1951－2015年の発生個数.
- 全台風と日本付近(東経130～145度, 北緯30度以上)を通過したものとで区別.
- もう少し詳しい情報も欲しい.

台風経路データ



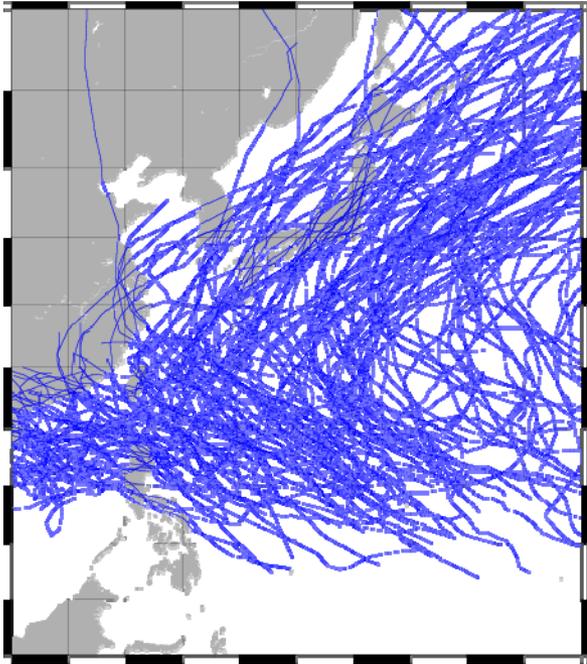
Pollock plot of the best track data

- 気象庁のRegional Specialized Meteorological Centerが“best track data”と呼ばれるデータを提供している.
- 1951年以來の60年余りの期間に観測された台風について、位置、中心気圧、中心風速などが6時間ごとに記録されている.

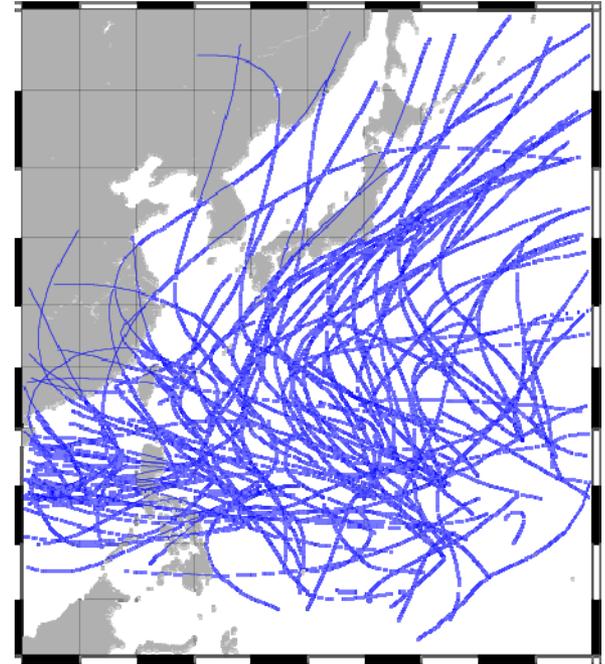


- そこで、データから台風の挙動を表現するモデルを作ること考える.
- 得られたモデルの特性を調べれば、台風に関する気候学的知見が得られるはず.

経験的モデル



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

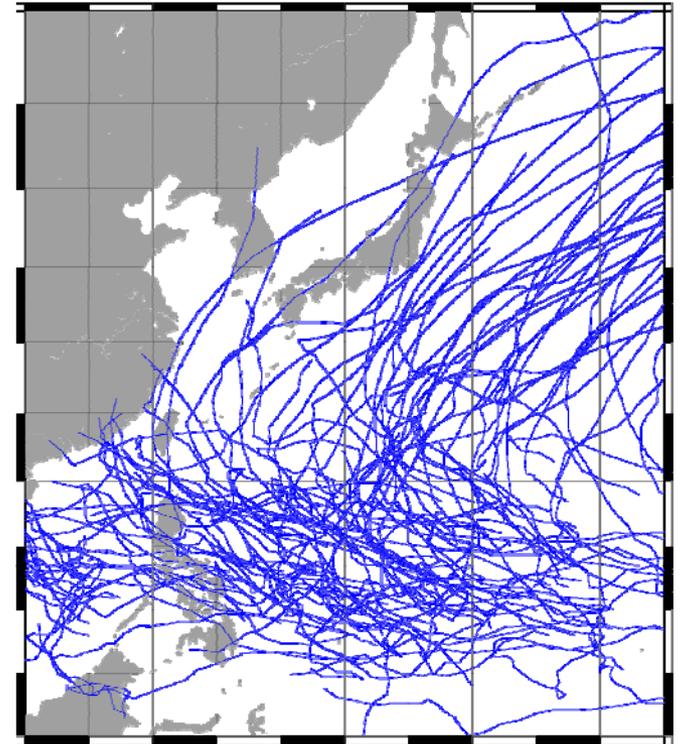
- データから台風の挙動を表現するモデルを作することを考える.
- 得られたモデルの特性を調べれば、台風に関する気候学的知見が得られる.

気候モデル

- 気候 (気象?) の専門家が言う「気候モデル」は、普通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ものを指すと思う。
- 最近の気候モデルでは台風も生成されるが、あくまでも起こりえる事象の一例を表すに過ぎない。
- 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。
- 多数のシナリオを計算すれば、原理的には個数を増やせるが、計算量的に大変。

経験的確率台風モデル

- 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する.



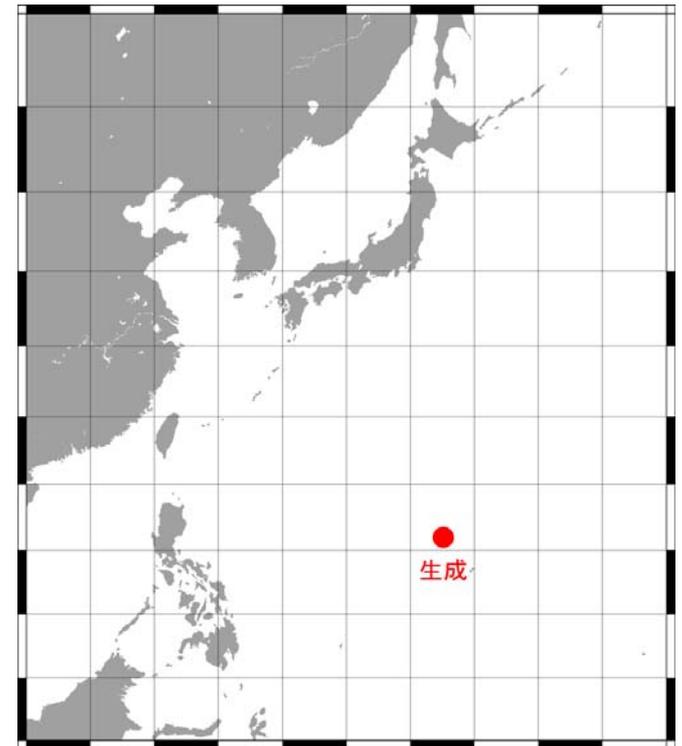
生成モデル

- 発生個数 n を決める:

$$n \sim \text{Poisson}(n; \lambda)$$

- 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.

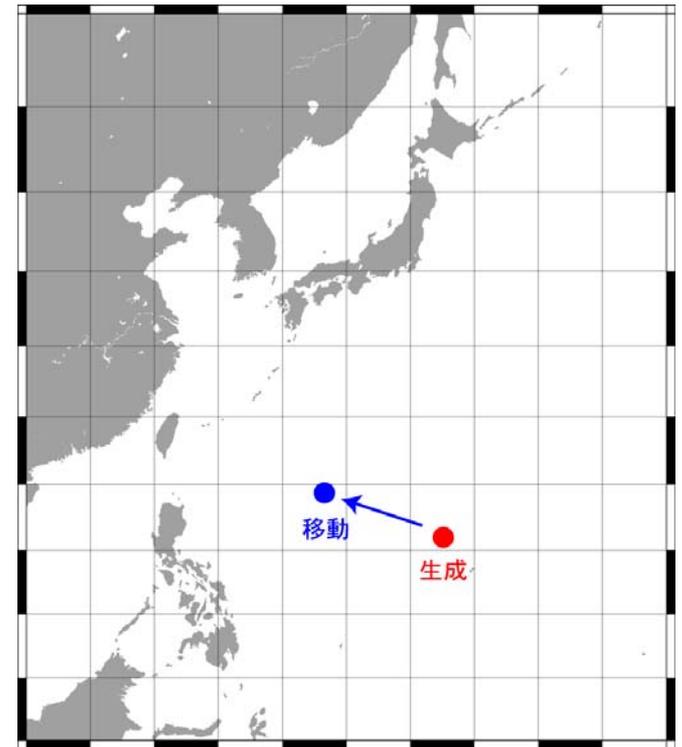
- 速度 v_t をその時の状態 z_t の関数

$$v_t = f(z_t).$$

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

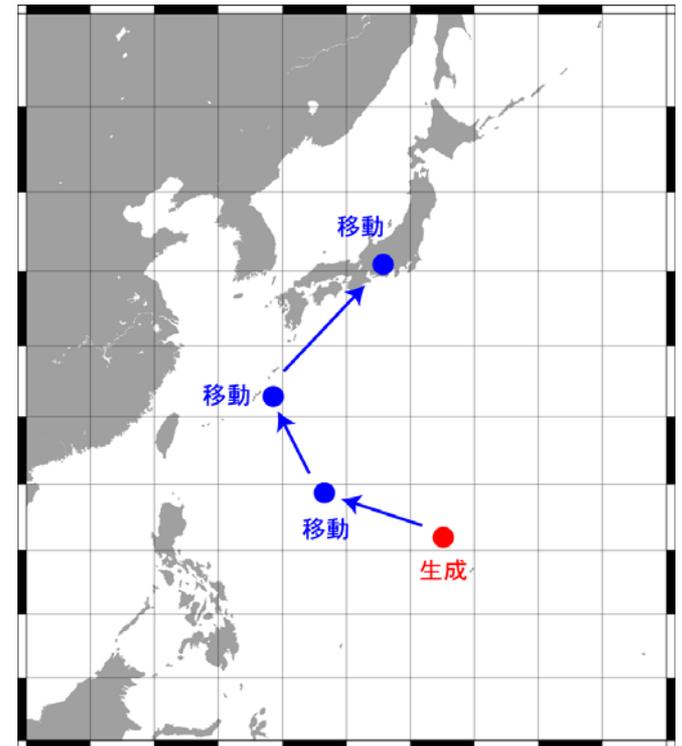
- その後の位置も

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

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

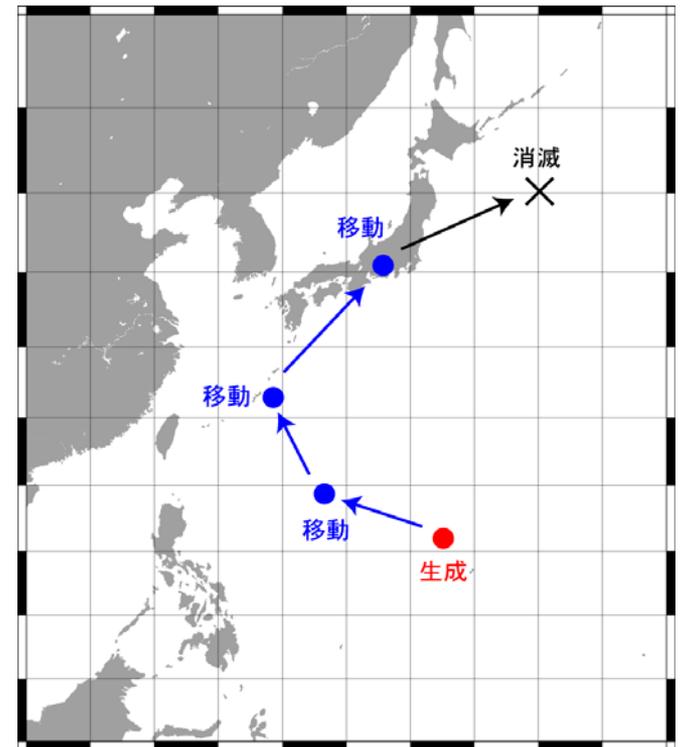
⋮

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できていないので，これは予定.

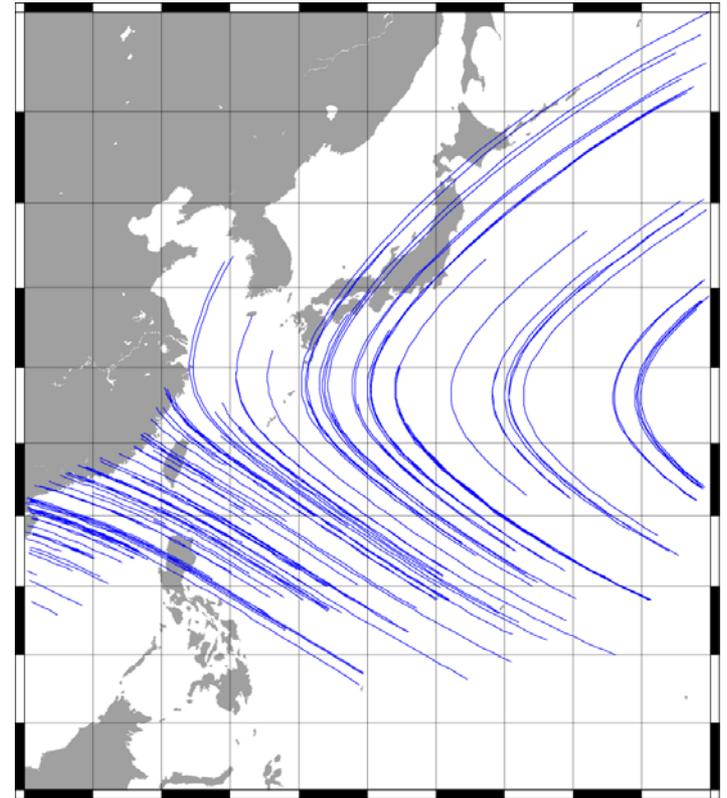
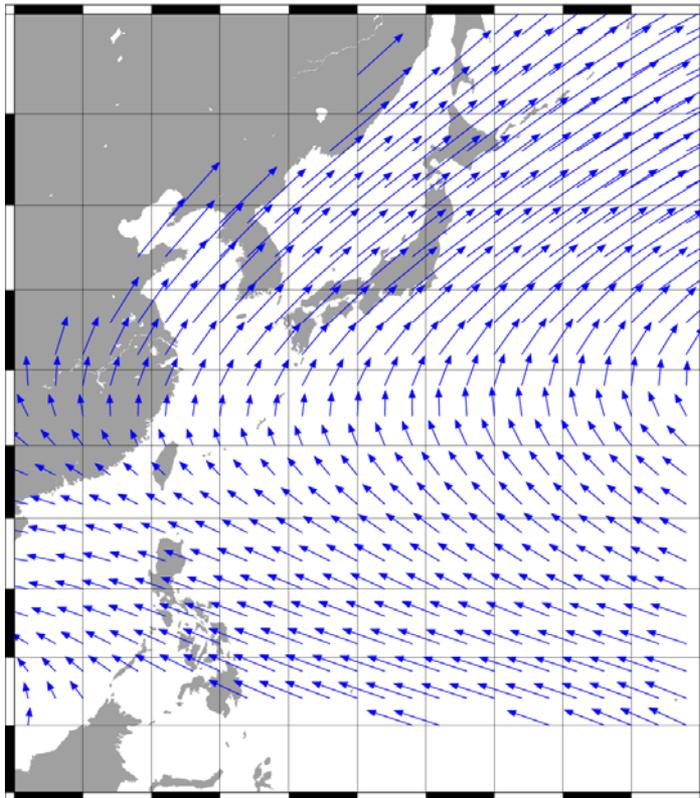


モデルの設計

- 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.
- 高精度のシミュレーションを使えば，個々の台風の振る舞いは，かなりうまく再現できる.
- 台風の統計的な性質を表すには，周辺の大気・海洋の状態が色々と変化することの方が問題.

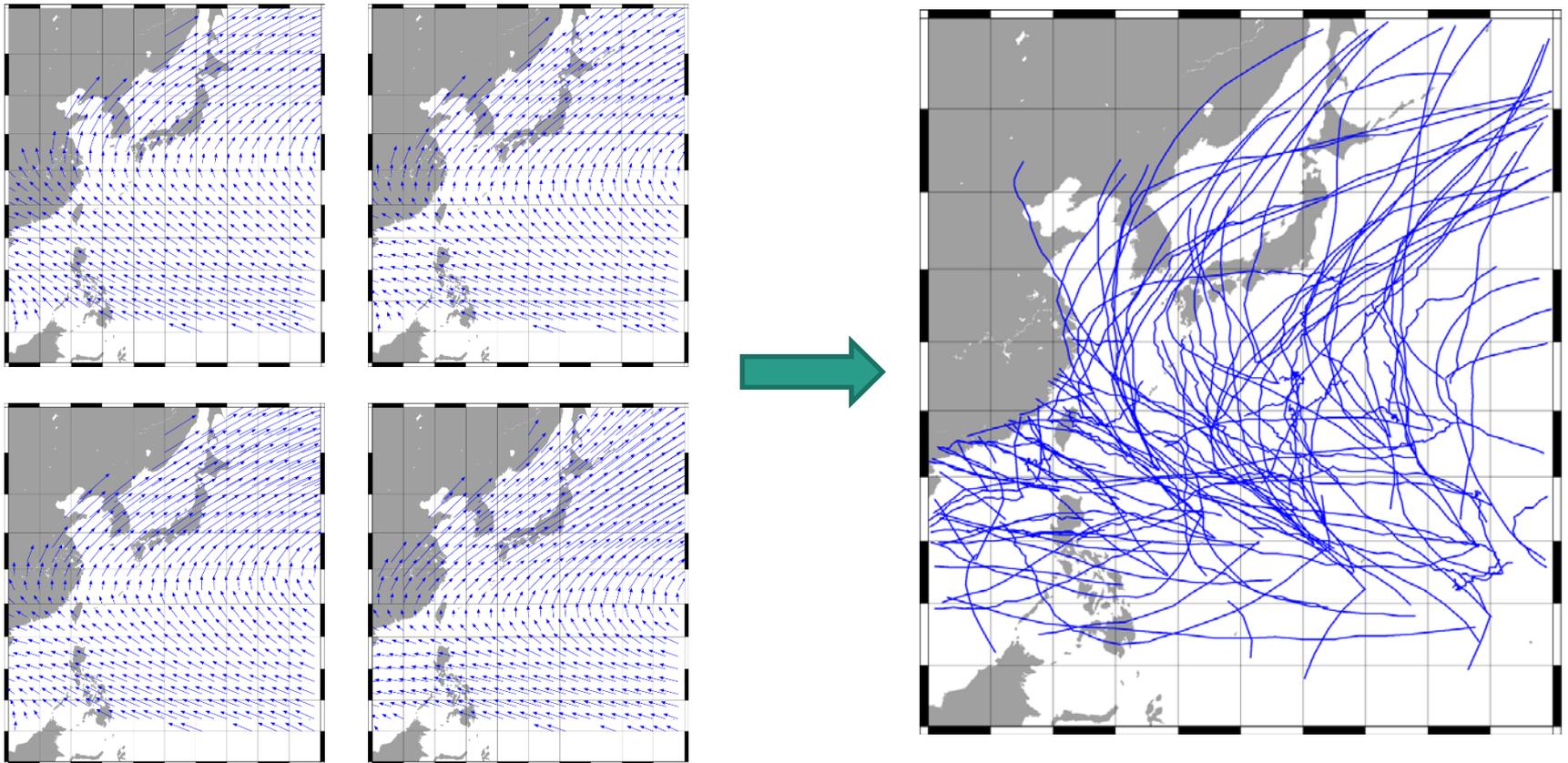
モデルの設計

- 移動速度が $v_t = f(x_t)$ のように位置のみで決まるとすると、多様な経路が得られない。



モデルの設計

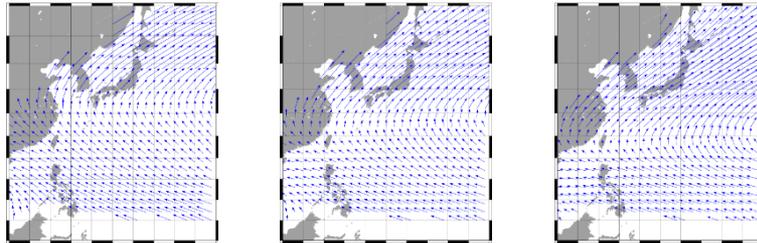
- 色々な速度分布パターンを考えると，多様な経路が生成できる。



モデルの設計

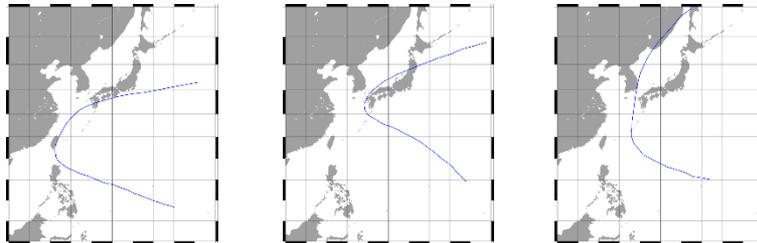
- 背景場 (移動速度空間分布) の確率分布

- 色々な背景場を生成

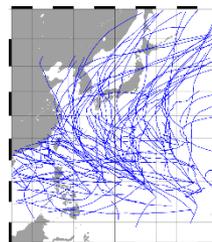


- 与えられた背景場の下での台風の動きに関する確率分布

- 個々の具体的な背景場の下で仮想的な台風を生成



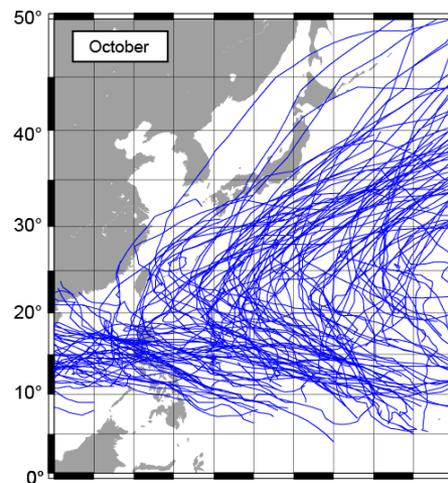
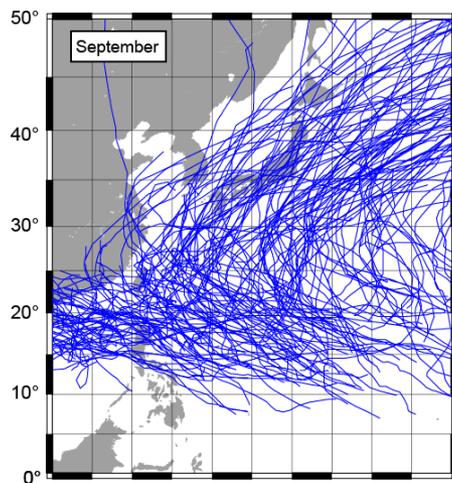
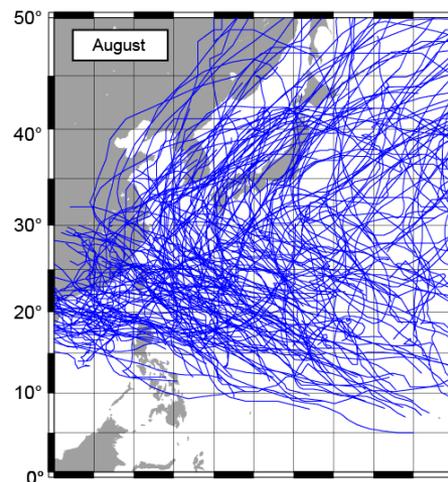
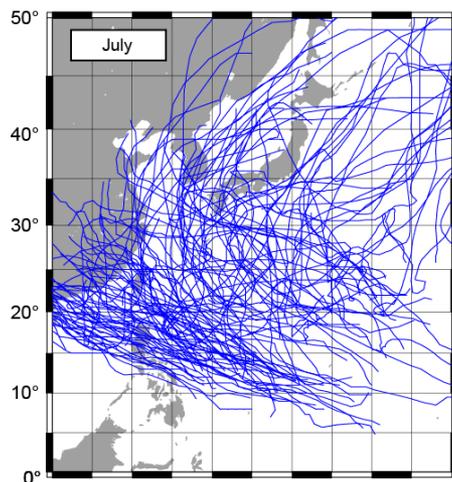
- 得られた仮想台風をまとめると欲しい台風の分布になる



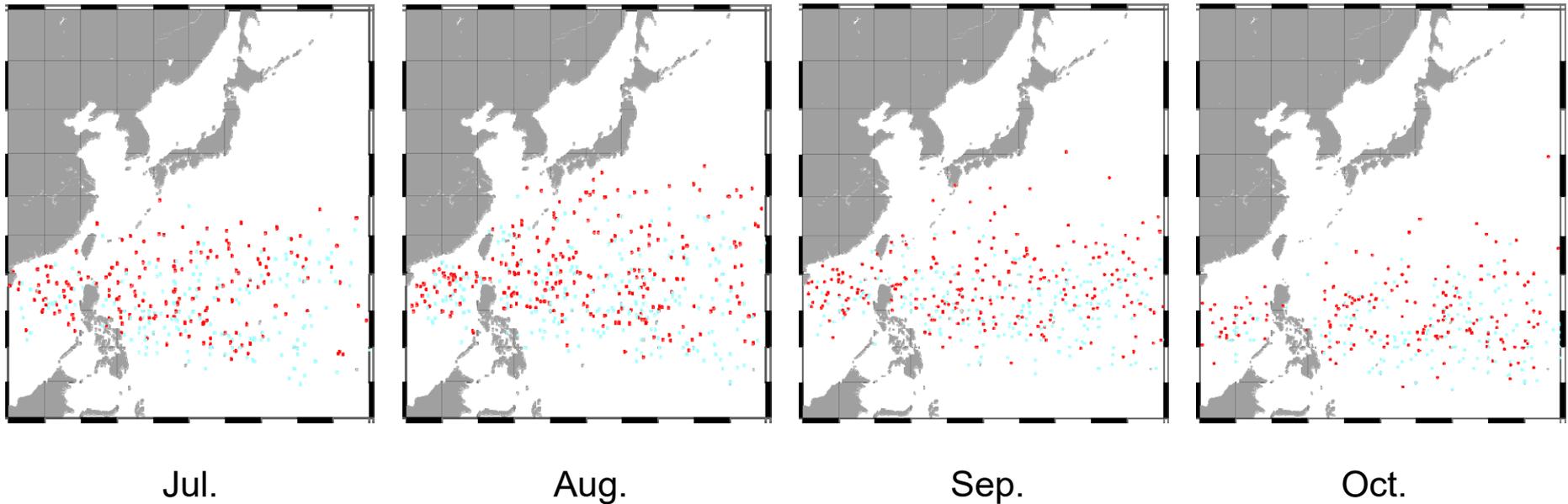
モデルの設計

- 背景場のモデルを立てるときには，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.

台風経路の季節変化



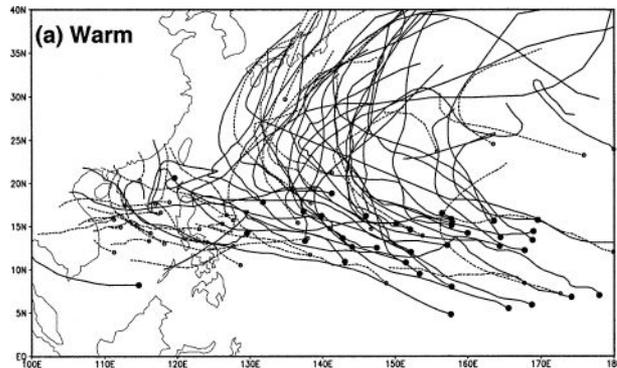
発生位置の季節変化



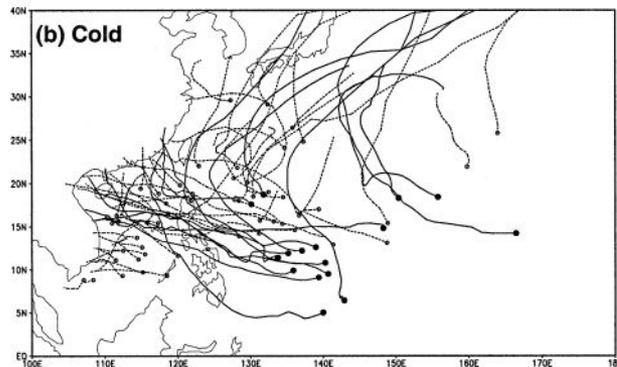
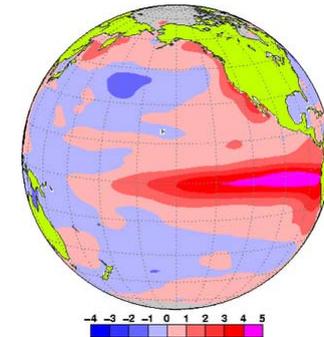
- 台風の発生位置にも季節変化が見られる。

台風の長期変動

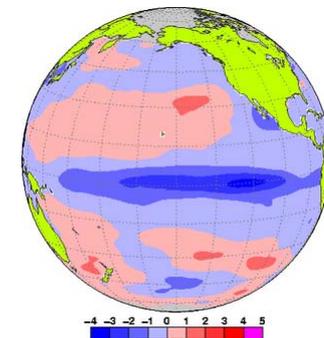
- もう少し長い時間スケールで見ると，例えば，エルニーニョ時とラニーニャ時で発生海域が変わる傾向がある。



エルニーニョ時



ラニーニャ時

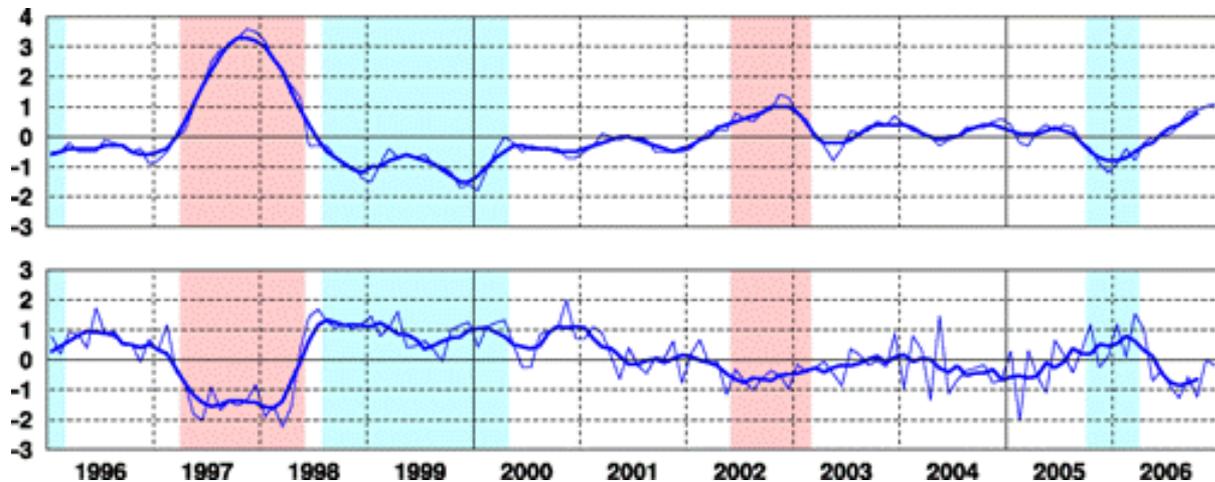


気象庁HPより

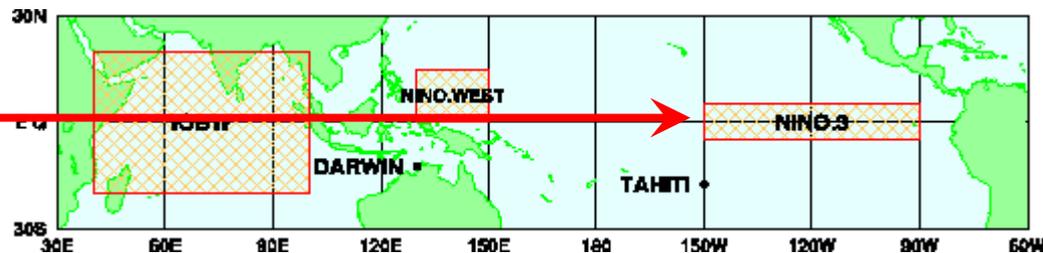
台風の長期変動

- エルニーニョは2年かそれ以上の周期の変動なので、台風にもそのくらい時間スケールでの変動があるとみられる。

ペルー沖の海面水温
の基準値との差



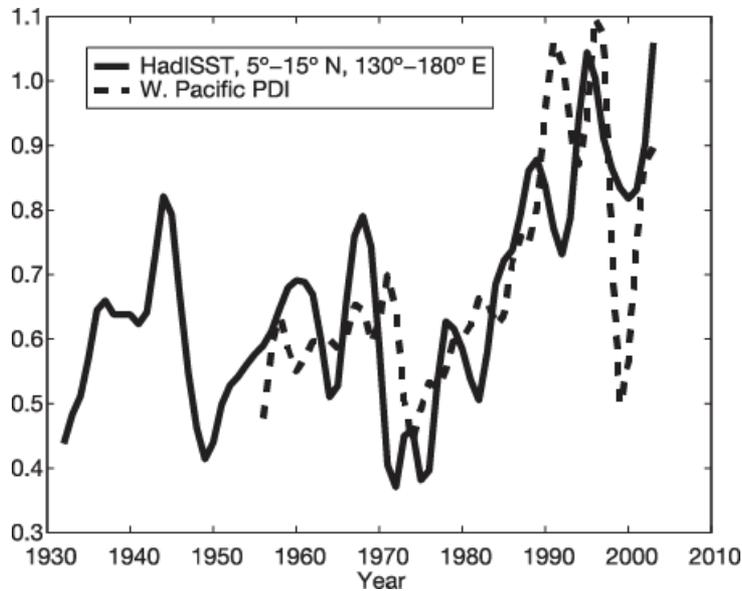
南方振動指数



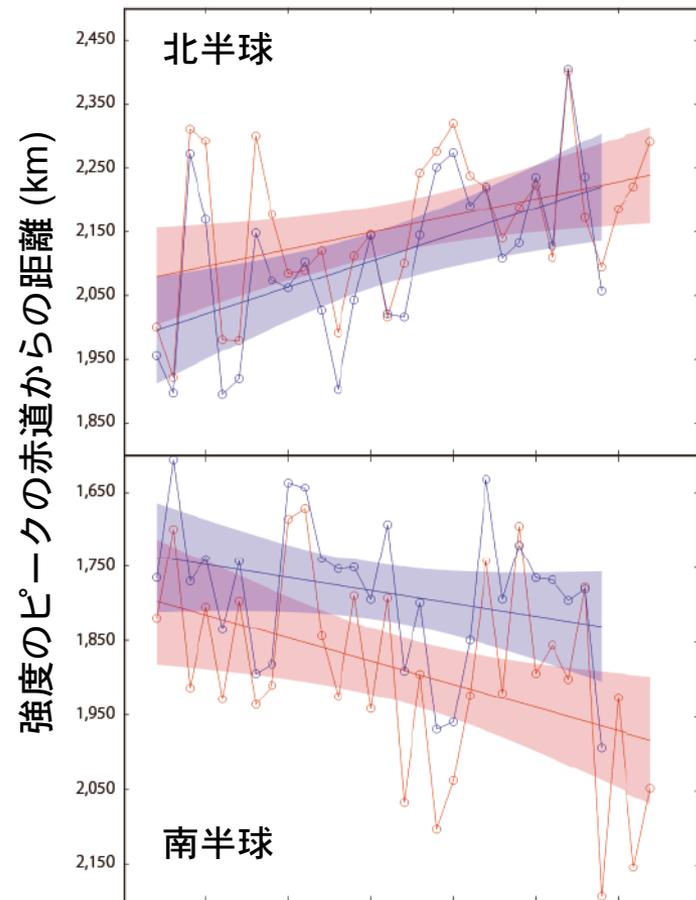
気象庁HPより

台風の長期変動

- もっと長い時間スケールの変化も見られる。



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)



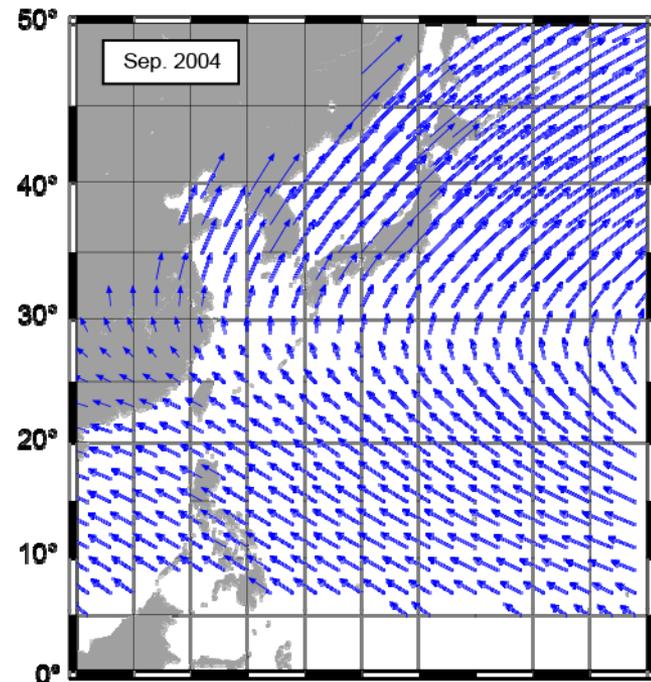
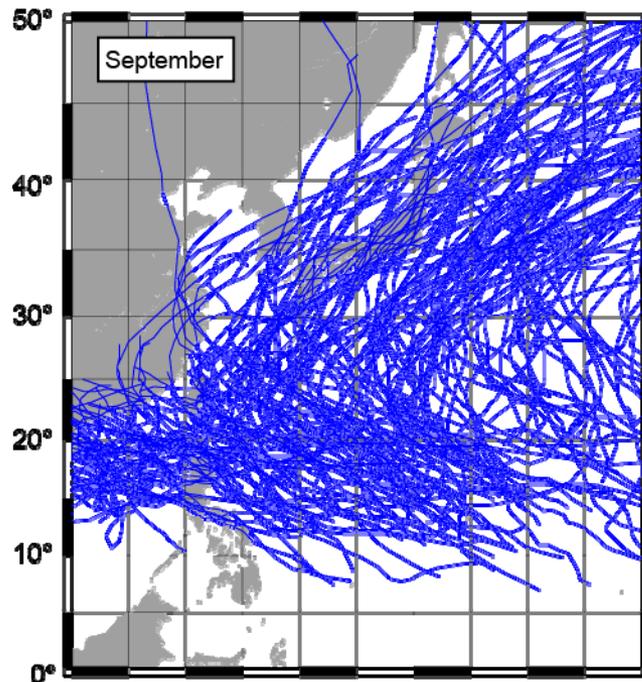
Kossin et al. (2014)

方針

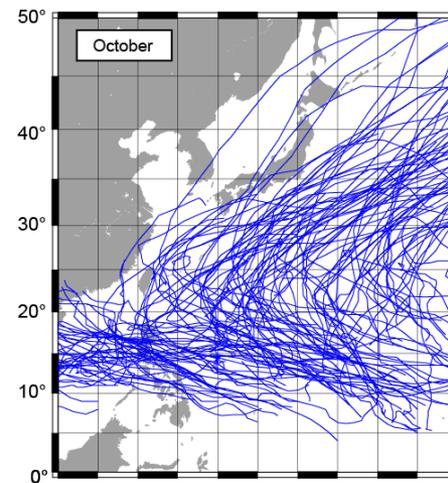
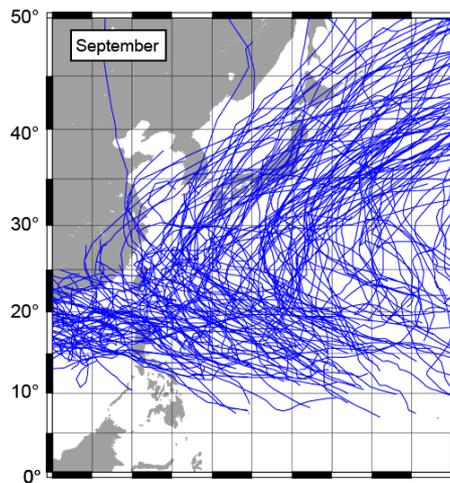
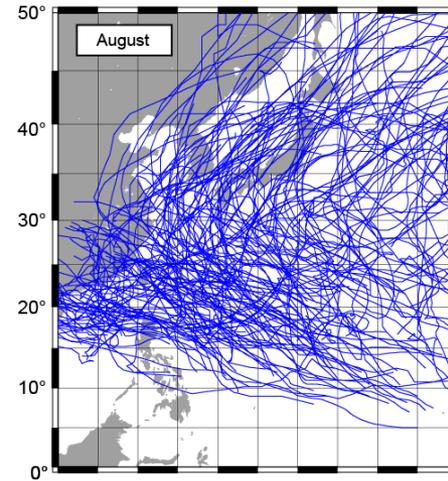
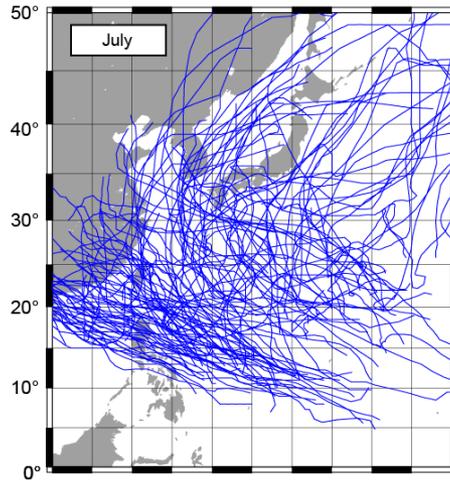
- 台風の挙動には，季節変化があり，長期的な変動もある可能性がある。
- 台風移動速度 v を，緯度 λ ，経度 ϕ ，通日 (day of year) d ，年 Y の4つの変数の関数として書くことを考える：
 - $$v = f(\lambda, \phi, d, Y).$$
 - ▣ 緯度 λ ，経度 ϕ を入力変数にすることで，空間構造を表現する。
 - ▣ 通日 (Day of year) を入力変数にすることで，季節変動を表現する。
 - ▣ (アナログ値化した)年を入力変数にすることで，気候変動スケール (数年かそれより長い時間) の長期変動を表す。
- 実際には， λ, ϕ, d, Y だけで決まるとは考えにくいので，速度を表す関数 $f(\lambda, \phi, d, Y)$ の確率分布を考える。

平均

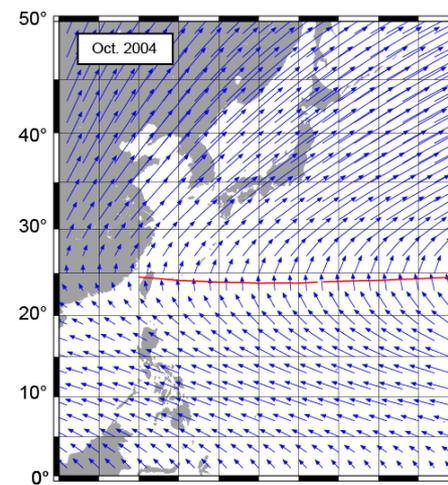
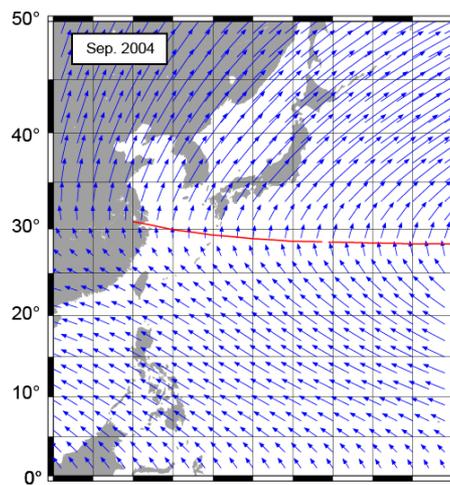
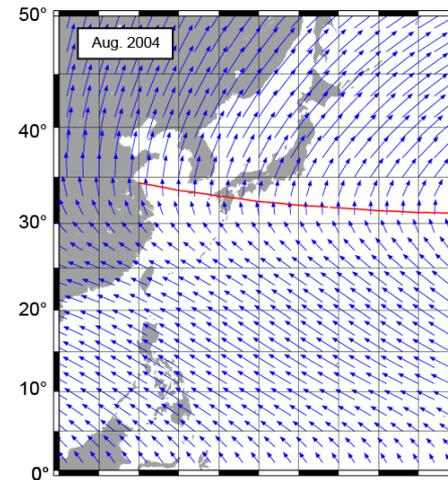
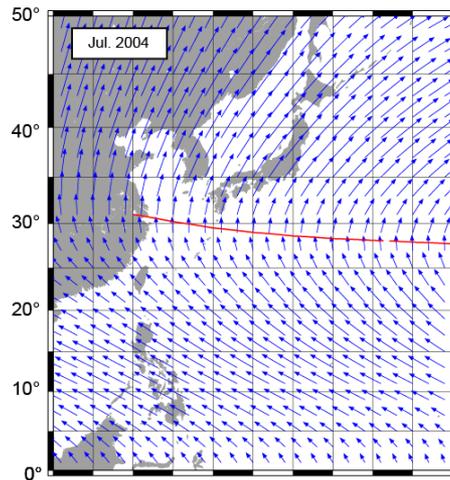
- 関数 f の確率分布というイメージしにくいですが、その平均を取るだけでも色々と情報が得られる。
- 関数 f の平均: 平均的な移動速度場を連続関数の形で与える。



台風経路の季節変化

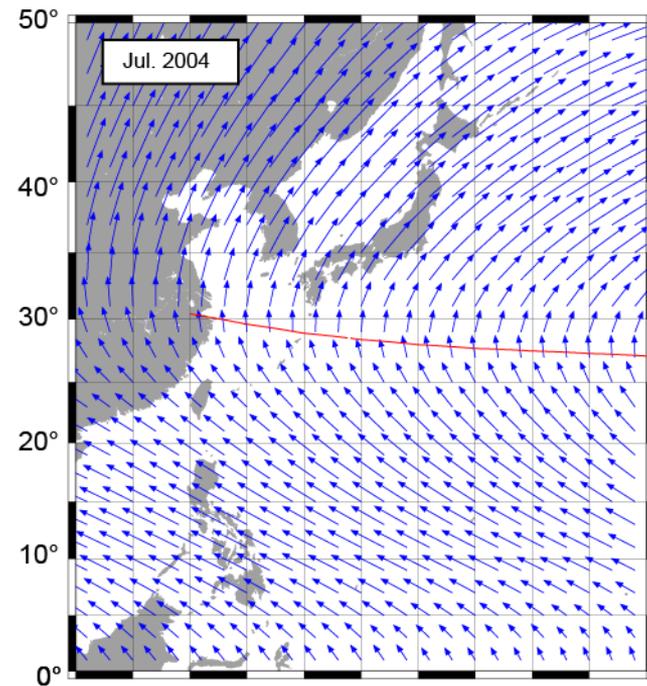
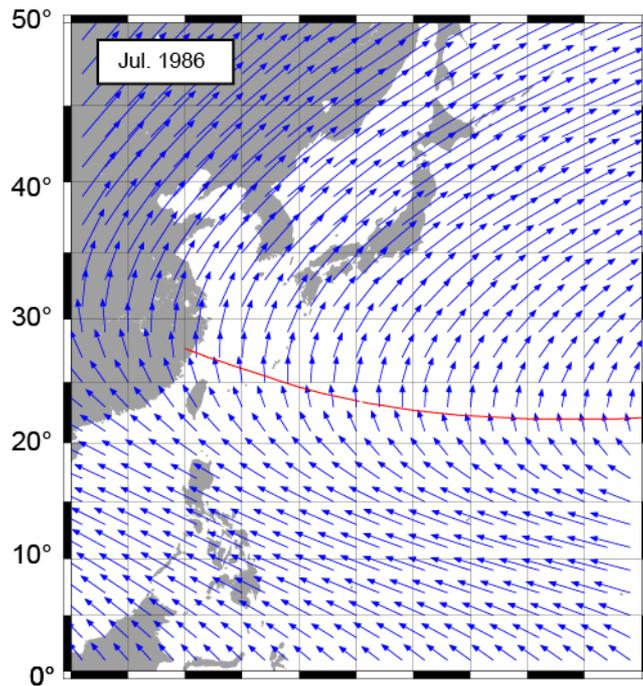


f の平均で見た季節変化



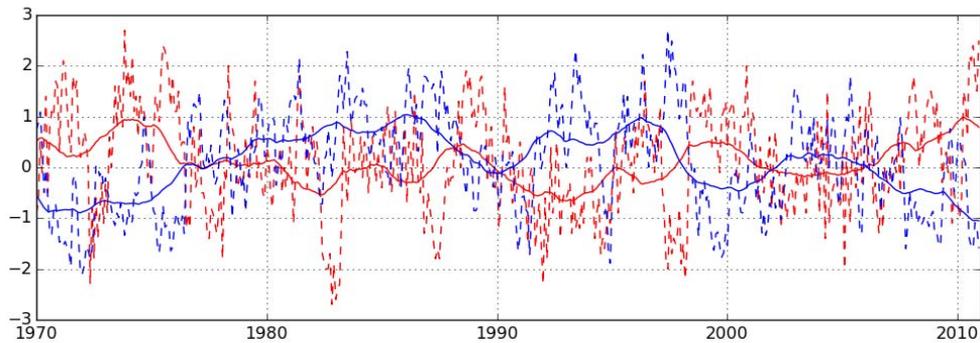
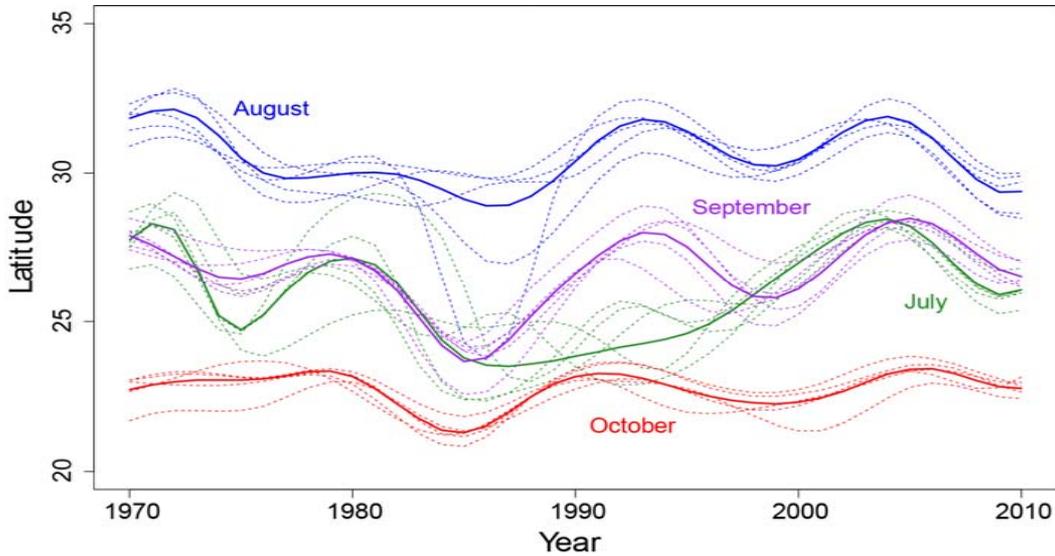
→ 20km/h

f の平均で見た長期変動



Nakano et al. (2016)

Long-term variation

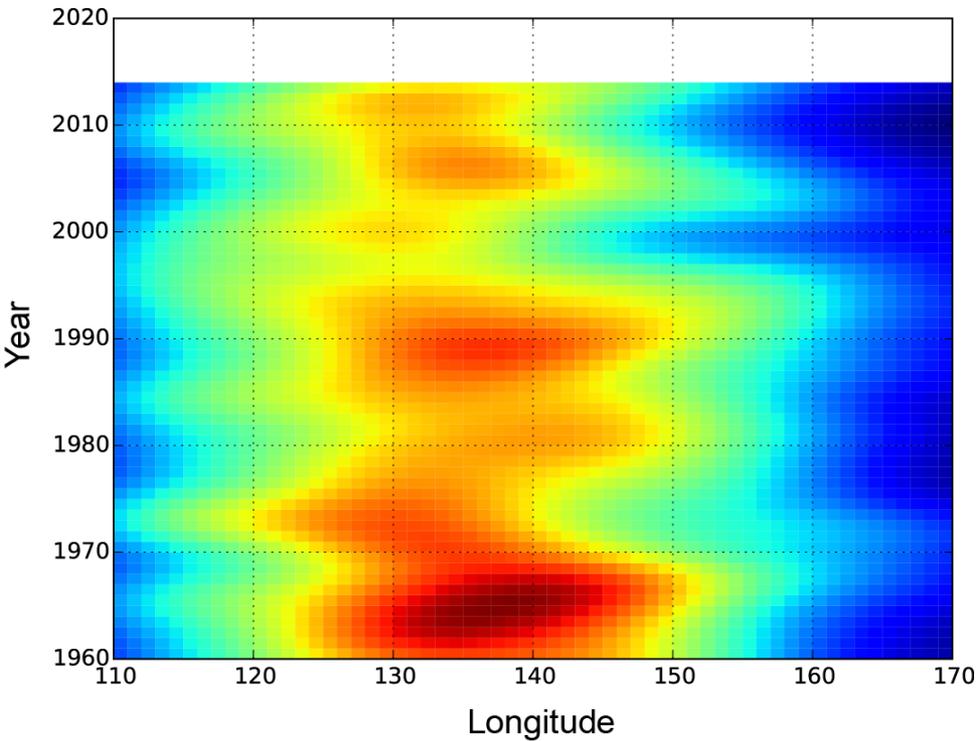


赤: 南方振動指数

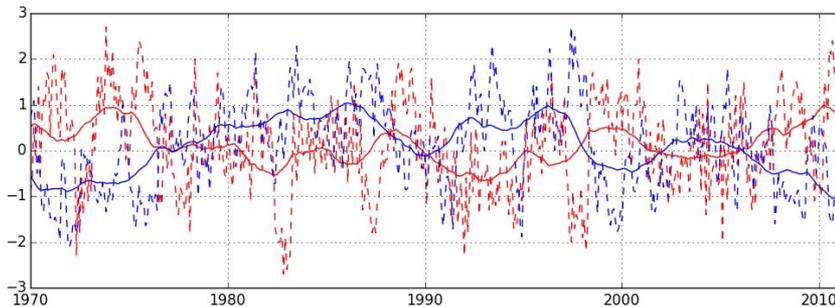
青: 太平洋十年振動指数

Solid: moving average with 4-year window

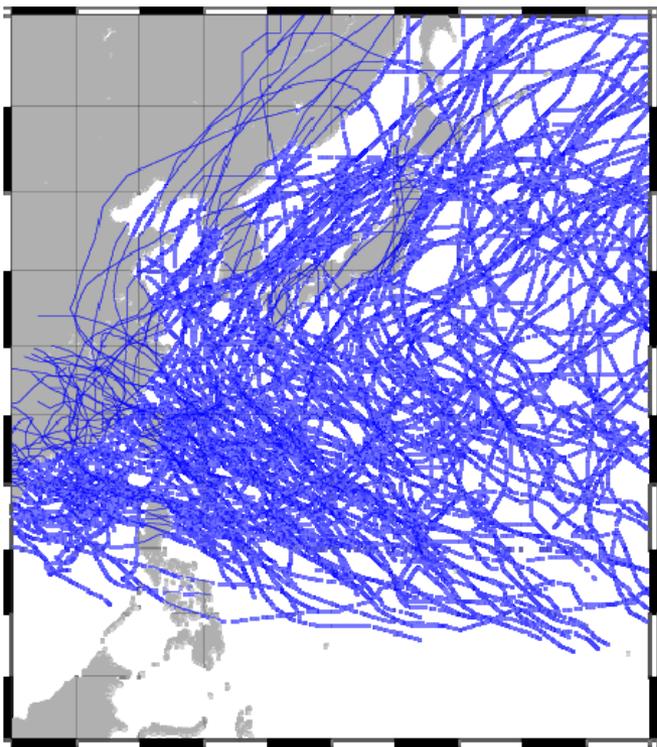
発生位置の変動



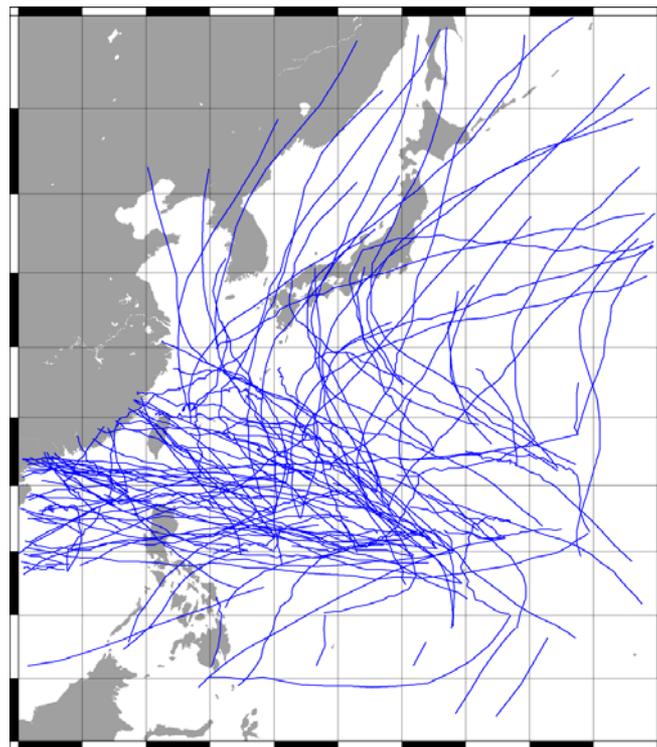
- 発生位置にも変動が見られる.



シミュレーション

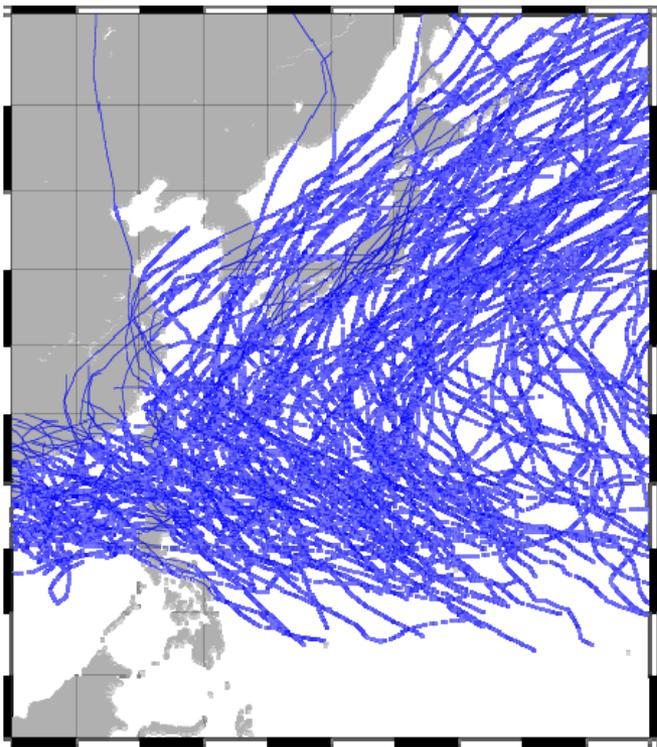


August from 1980 to 2009

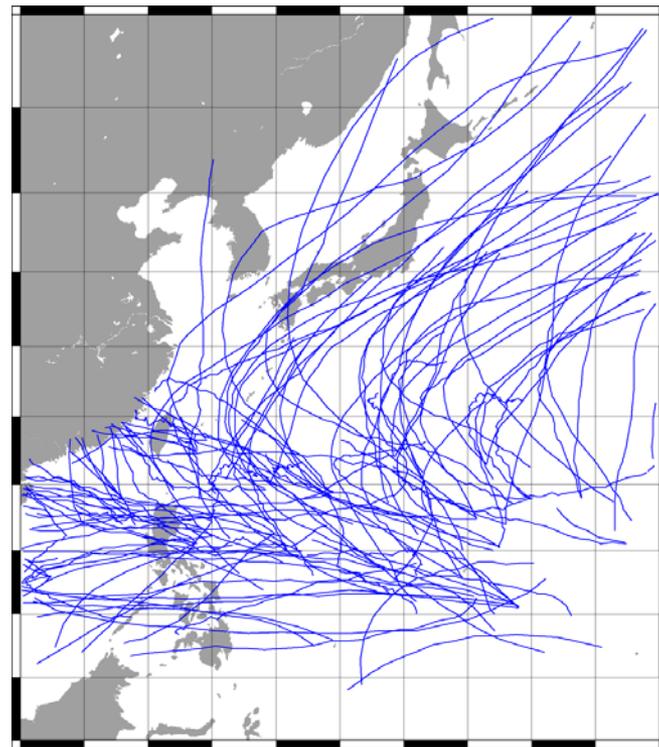


Model for August

シミュレーション

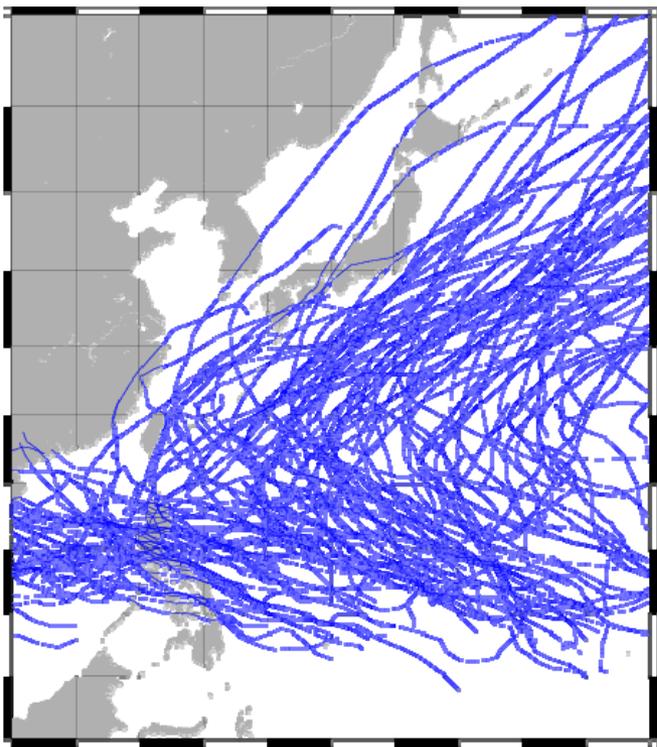


September from 1980 to 2009

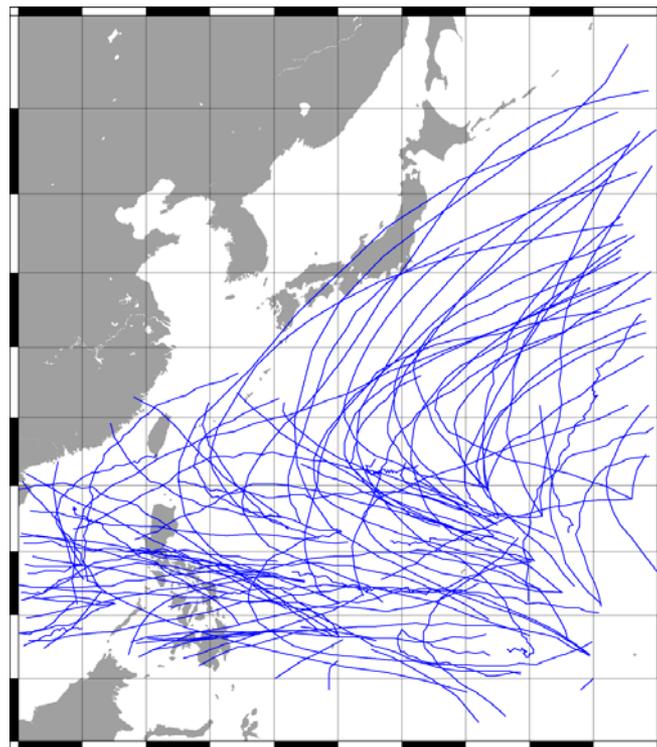


Model for September

シミュレーション

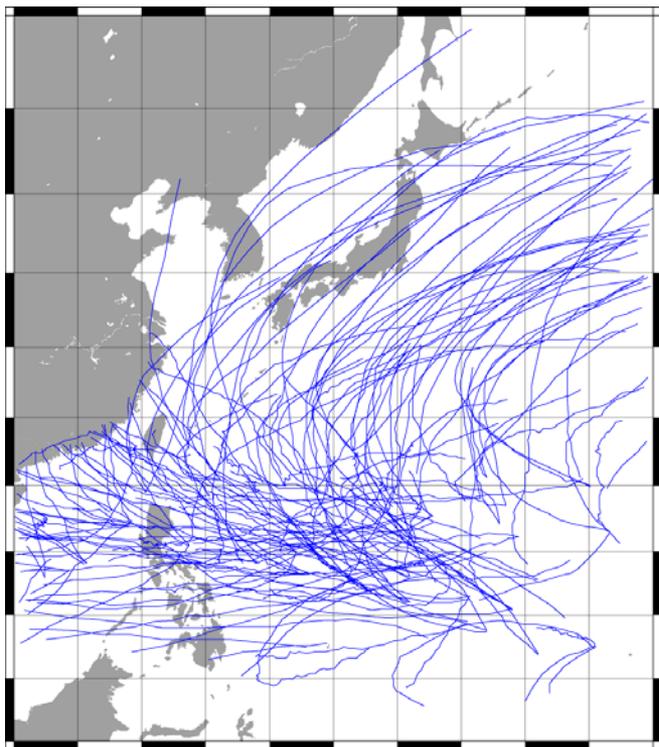


October from 1980 to 2009

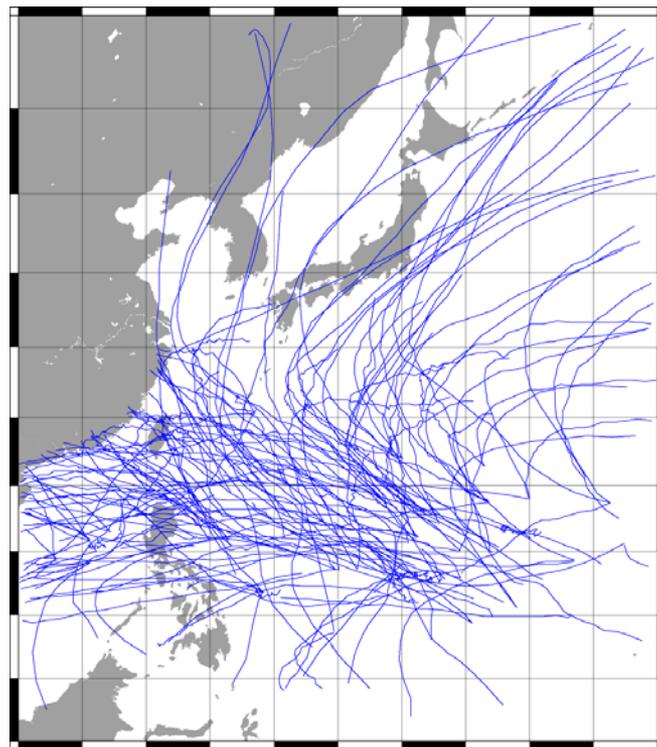


Model for October

シミュレーション



Model for Sep 1986



Model for Sep 2004

まとめ

- 統計モデルでも，台風らしい経路を生成することはできるようになってきた．
- 季節変化もそれなりに出せる．
- 数年からそれ以上の変動もありそう．但し，モデルへの反映，評価はこれから．