台風の長期経年変動が三大湾における高潮ポテンシャルに及ぼす影響の基礎的検討

中條 壮大¹・藤木 秀幸²・金 洙列³・辻本 剛三⁴

¹正会員 大阪市立大学講師 工学研究科都市系専攻 (〒558-0011 大阪府大阪市住吉区杉本3-3-138)

E-mail: nakajo@eng.osaka-cu.ac.jp

²正会員 株式会社建設技術研究所 水システム部 (〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1)

E-mail: hdy-fujiki@ctie.co.jp

³正会員 鳥取大学助教 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

E-mail: sooyoul.kim@sse.tottori-u.ac.jp

⁴フェロー会員 熊本大学教授 先端科学部 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1)

E-mail: tgozo@kumamoto-u.ac.jp

台風特性の変化傾向を解析し、経路シフトや気圧変化のトレンドと変動特性が各緯度帯で異なることを示した。また、大気・海洋変動指標とのコヒーレンス解析より台風特性は特定の周期変動で高い相関を示した。トレンドの変化分析に基づいて、台風資料のフェーズ区分を行い、統計的に等価と考えられる台風特性の変化シナリオから高潮ポテンシャルの変化を推定した。三大湾では顕著な差にはならなかったが、主に経路変化に起因して、1980年以降には大阪湾と伊勢湾で高潮ポテンシャルが小さくなる傾向にあり、東京湾の東岸では高くなる傾向が見られた。

Key Words : storm surge, climate change, tropical cyclone, Osaka Bay, Ise Bay, Tokyo Bay

1. はじめに

将来の極端気象災害を予測する上で、気候変動が台風に及ぼす影響を把握することは重要であり、これまで数多くの研究が行われている。例えばChan and Shi¹⁾は1959～1994年の台風の増減トレンドと、トレンド除去後に見られる2, 5, 7年周期の変動について述べている。また, Emanuel²⁾はPDI (Power Dissipation Index) と海水面温度 (SST) の変化の解析から、勢力の強いTropical Cyclone (以下TC) のポテンシャル評価を行い、1970年代以降の長期的な変動傾向を示している。Kossin et al. ³⁾はTC強度が最大となる緯度の平均値の長期変化について解析し、それが振動しながら極方向に移動するトレンドが全球的に(北インド洋を除き)観察されることや、それがENSOによるシフト効果を除いても顕著であることを示している。近年ではKim et al. ⁴⁾が北西太平洋のTCの発生時期が後退し、TCの活動期間が短くなる傾向にあることを示し、SSTやジオポテンシャル高度、渦度分布との相関関係から考察している。また、気象庁の異常気象レポート2014⁵⁾では、台風の発生数、接近数、勢力の強い台風の頻度等について、年々変動や数年～数十年スケールの変動は見られるが、有意な長期的なトレンド変化は

見られないとまとめている。また、三島ら⁶⁾や泉宮・小関⁷⁾はMEIやPDO等の大気・海洋変動指標と台風経路密度、台風寿命や最低気圧等の関係を解析し、森ら⁸⁾はMPI (Maximum Potential Intensity) と台風の平均中心気圧の変動についてスペクトル解析から変動周期の類似性について解析している。このように、海洋スケールでの台風の発生数や発生時期、強度等の長期変化に関する研究は多数見られるが、特定の海域・湾スケールの台風特性変化についての検討はほとんど見られない。しかしながら、気候変動に対する具体的な社会の適応策を考える上では、湾スケールの台風特性およびそれによる高潮特性の変化を知ることが求められている。

これまでの高潮リスク評価において台風特性の変化は統計的に同一な資料とされ、例えば確率分布の経年変化などは想定されていない。本研究では、観測資料を元に北西太平洋における台風特性の推移を解析し、それに基づいたフェーズ区分から、三大湾を対象とした高潮ポテンシャルの変化について検討した。

2. 台風トラックデータとその解析方法

図-1 解析対象とした台風資料の総経路

解析に使用したデータはIBTrACS (NOAA) に含まれる1950年から2010年の台風トラックデータである。日本周辺 (N 20.43~45.56°, E 122.93~153.99°) を通過したデータを対象に経年変化の解析を行い、各緯度帯の台風中心経度、気圧、移動速度の推移を分析した。図-1に解析対象とした台風資料の総経路を示す。北西太平洋で発生するTCで日本近海を通過せず南シナ海へ抜けるものは解析対象に含まれていない。

元のトラックデータには各時刻における台風中心の緯経度と中心気圧の情報が含まれるため、ここから移動速度を算定した。長期変化傾向を解析するにあたり、緯度5度毎の帯状領域における台風特性値の平均や分散を各年で算定し、その経年変化を調べた。

3. 台風特性の長期変化

(1) 経年変化とトレンド

図-2に緯度5度毎の平均台風特性値の経年変化を示す。図-2 (a)より、低緯度帯では年変動が大きいものの、全体的には東に経路が移動するトレンドが存在することがわかる。ここでは解析対象全期間の平均台風特性値のトレンドを、線形回帰分析から一次式の傾き ΔL として求めた。表-1に示すようにN5-10°では $\Delta L = 0.16 \text{ deg./年}$ と大きく、60年では約 10° も変化することになる。これは平均経路の経年変動に関する標準偏差 σ_b が約 $2 \sim 4^\circ$ 程度であることを考えても十分に大きい変化である。またN10-15°とN35-40°でそれぞれ $\Delta L = 0.09, 0.06 \text{ deg./年}$ と大きく、低緯度側と高緯度側で東側に移動する傾向が示された。一方で中間緯度におけるトレンドは小さい。ただし、N15-25°では1960年代後半と1990年代中頃に1980年代と比較すると約 5° ほどの経路の東進が存在するなど長期的な変動は観察される。また、図は省略するが各緯度帯における経路変動の標準偏差 σ_b の経年変化にもトレンドが見られ、低緯度N5-15°で $+0.04 \text{ deg./年}$ 、N20-

図-2 各緯度帯における平均台風特性値の経年変化

表-1 各緯度帯の平均値のトレンドと経年変動

緯度帯 N (deg.)	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40
ΔL (deg/年)	0.16	0.09	0.03	0.03	0.01	0.03	0.06
σ_b (deg.)	4.45	3.16	2.23	2.01	1.84	2.73	4.43
ΔP (hPa/年)	-0.02	-0.05	-0.17	-0.08	-0.01	0.03	0.00
σ_P (hPa)	1.78	3.39	6.04	5.30	3.93	2.98	2.51

25°で $+0.05 \text{ deg./年}$ 程度であった。

森ら⁹⁾はCMIP3のモデルアンサンブル結果より、横田ら¹⁰⁾はMRI-AGCMによる高解像度モデル結果より、それぞれ現在気候と将来気候における台風経路のシフト量を算定し、将来の台風特性変化の推定を行っている。今回推定したトレンドや長期的変動特性はそうした推定のオーダー評価や有意性を検討する一資料となり得る。

中心気圧についても経度と同様に解析し、トレンド

(a) 台風中心の平均経度

(b) 平均中心気圧

図-3 各緯度帯における平均台風特性値のスペクトル

(a) 平均経度と MEI および PDO

(b) 平均気圧と MEI および PDO

図-4 平均台風特性と大気・海洋変動指標のコヒーレンス

ΔP と標準偏差 σ_p を求めた。低緯度側では全般的に低下トレンドが見られるが、 $N25^\circ$ 以北では顕著なトレンドは見られない。しかし、 $N10-25^\circ$ の領域で低下トレンドが強く、1980年頃を境に比較的低緯度側では台風が強化されている。三島ら⁹⁾はMEIとPDOを参照し、1950～1976年のcool phase (ラニーニャ期)と1977年～2007年のwarm phase (エル

ニーニョ期)でカテゴリー5の大型台風の頻度が変化し、cool phaseで増大すると述べている。ここで示した平均値の変化はそれと逆にwarm phaseで強化される傾向であるが、大気・海洋変動指標の切り替わるタイミングと概ね一致するという点は類似している。また、 $N10-25^\circ$ の領域では数年スケールの変動も顕著である。

図-2(c)に示した移動速度については、高緯度に向かうにつれて変動も大きくなる傾向にはあるが、目立ったトレンドは確認できなかった。

(2) 周波数解析結果

図-2に示した時系列データの平均値からの差分に対してFFTにより周波数解析した結果を図-3に示す。図-3(a)より、低緯度の経路においては約5年の周期 ($f=0.2$)に変動のピークが見られる。高緯度側に移動しても、約5年の周期においては同様のピークが観察されるが、低緯度側でやや顕著である。 $N35-40^\circ$ においては10, 6, 5, 3年の周期 ($f=0.1, 0.16, 0.2, 0.3$)にピークが観察される。中心気圧の変動については、10, 5, 3.5年 ($f=0.1, 0.2, 0.28$)の周期にピークが観察され、 $N15-20^\circ$ の範囲で特に顕著である (図-3(b))。

この周期変動と大気・海洋変動指標であるMEIおよびPDOとの関係性を調べるために、両者のコヒーレンスを解析した (図-4)。凡例は図-3と共通である。経路については、約10年、5年の周期 ($f=0.1, 0.2$)においていずれの指標とも緯度によらず相関が高く、PDOでは約3年周期 ($f=0.3$)でも高い相関を示していた。特に低緯度では4年以下の経路変動の周期 ($f \geq 0.25$)についてはMEIとの相関が高い。中心気圧については、10年の周期 ($f=0.1$)でいずれの指標とも緯度によらず相関が高い。MEIは $N15-30^\circ$ における中心気圧の3.5～4年の変動 ($f=0.25 \sim 0.28$)と相関が高く、特に $N20-25^\circ$ においては2.5年 ($f=0.4$)の周期とも相関が高い。一方でPDOは約3年 ($f=0.3$)の周期において緯度によらず高い相関を示した。

このように長期のトレンドのみでなく特定の周期における緯度毎の台風特性の変動傾向を示し、それが大気・海洋変動指標との相関を有していることが示された。特に経路変動における3, 5, 10年の変動と、中心気圧における3～4, 10年の変動については、変動幅と全球規模の物理過程との因果関係の観点から、注目すべき要因である。

4. 高潮ポテンシャル評価のための台風特性変化シナリオ

前章の検討、特に中心気圧のトレンドの変化を踏まえ、

表-2 各湾の危険台風経路選定条件

湾名	通過区域	進行角度†
大阪湾	N33.3~34.8° E134.0~135.5°	$33.4 \leq \theta \leq 74.9$
伊勢湾	N34.0~35.5° E135.5~137.0°	$16.7 \leq \theta \leq 138.8$
東京湾	N34.5~36.0° E138.6~140.1°	$42.4 \leq \theta \leq 103.4$

† ここで θ は東方向と台風の進行方向の間の角である

図-5 台風資料から求めた μ - σ 値の中心気圧変化. 大阪湾の例, 各期間の関数近似結果 (Approx.) も示す

本研究では1980年を境とした2つのフェーズにおける高潮ポテンシャル変化を検討することとした。便宜上, 1950~1979年をPh. 1, 1980~2010年をPh. 2と称する。森ら⁸⁾はMPIから推定される可能最大高潮偏差を用いて高潮ポテンシャルと定義している。本研究では各湾における既往台風資料をPh. 1とPh. 2に分類し, 各統計値から推定される確率的に等価なシナリオを境界条件として算定される高潮偏差を, 各フェーズの高潮ポテンシャルと定義する。同様の方法は既往研究 (例えば中條ら¹¹⁾) によっても実施されているが, 本研究では, 各緯度における特性値の平均 μ と標準偏差 σ から, 中心気圧については μ - σ 値 (下位16%相当) を, 移動速度に μ + σ 値 (上位16%相当) を求めてシナリオとして採用した。よって, 高潮ポテンシャルは可能最大高潮という意味ではない点に注意が必要である。また, シナリオ作成に使用する台風資料は, 既往の台風トラックデータの内, 各湾の湾奥で水位上昇が見込まれる危険経路を通過したものに限定した。具体的には過去の高潮経験や湾軸と風速分布, 湾口の向きを踏まえ, 表-2の条件を満たすものを選定した。

選定した台風資料から求めた μ - σ 値の中心気圧の緯度方向変化について, 各フェーズ間で比較した結果の大阪湾での例を図-5に示している。図-2の平均値においてはN15-30°の区間でトレンド変化が確認されていたが, それと同様にN20-30°では顕著な差が見られる。一方で三大湾の位置する緯度帯 (およそN34~35°) ではフェーズ間の差が小さくなっており, Ph. 1よりもPh. 2で中心気

(a) Phase 1

(b) Phase 2

図-6 各フェーズにおける高潮偏差の時間変化 (例: 伊勢湾における名古屋での値)

圧が数hPa程度低下した。図は割愛するが, 東京湾でも同様の結果が得られ, 伊勢湾におけるフェーズ間差のオーダーはほぼ0.1 hPa以下と微小であった。移動速度については, 伊勢湾と東京湾の場合に μ + σ 値がPh. 1に比べてPh. 2で遅くなる傾向が見られた (各湾の緯度では7~8 km/hの差)。しかし, 大阪湾においてはほとんど差が見られなかった。この移動速度の条件は東京湾, 伊勢湾においては, Ph. 1とPh. 2のいずれも平均水深から大まかに推定されるプラウドマン共鳴の発生条件よりも大きく, 大阪湾においてはほぼ共鳴条件に相当する移動速度の条件であった。このように中心気圧と移動速度の変化を緯度の関数として考え, 既往の各台風経路に与えたものを各フェーズの台風特性変化シナリオとした。各湾, 各フェーズ毎のシナリオ数は既往台風経路数に依存し, 大阪湾のPh. 1で25, Ph. 2で16, 伊勢湾のPh. 1で27, Ph. 2で21, 東京湾のPh. 1とPh. 2で各11ケースとなった。

5. 高潮解析手法

各台風シナリオにおける高潮計算は, Fujita¹²⁾の経験的台風モデルから算定した気圧と風速場を各時刻の境界条件として非線形長波方程式を解くことにより実施した。方程式の解法にはSuWAT¹³⁾を用いた。今回の検討では最大旋衡風速半径は75 kmで一定とした。他の計算条件は中條ら¹¹⁾と同じであり, 詳細は割愛する。ネスティング計算は3段階 (6000, 810, 270 m) で行っている。また潮汐

(a) 大阪湾の検討

(b) 伊勢湾の検討

(c) 東京湾の検討

図-7 各湾の代表地点での最大高潮偏差の平均値および極大値 ($\mu+2\sigma$) のフェーズ間変化 Δh_{max} (Ph. 2—Ph. 1)

や波浪の計算，氾濫計算は実施していない。

6. 三大湾における高潮ポテンシャルとその変動について

解析結果の一例として，伊勢湾の検討における湾奥の名古屋での各シナリオの高潮偏差を図-6に示す。ここでは横軸を最大高潮偏差 h_{max} の到達時刻を0としたリードタイムで揃えている。移動速度条件を同等にしているために，いずれのシナリオにおいても3～4時間前の前駆部の変化はよく似ている。その後はシナリオによって差が生じ始める。図は割愛するが，大阪湾の検討における湾奥のシナリオ間差異が現れるのはこれよりやや早く，約5時間前に差が生じ始めた。Ph. 1とPh. 2のいずれにおいても h_{max} が顕著になる高潮の時間変化は似ているが，伊勢湾と大阪湾の検討では，ややPh. 1の方が h_{max} 付近で高潮偏差の時間変化率は大きくなる傾向にあった。今回の高潮ポテンシャル評価にはこうした水位上昇率の違いは考慮していないが，水防対策の観点からは重要である。

(a) 大阪湾を対象とした選定台風経路

(b) 伊勢湾を対象とした選定台風経路

(c) 東京湾を対象とした選定台風経路

図-8 各フェーズにおける平均経路および経路分散

各フェーズの極大値の変化については，一つの試行の結果のみを用いて議論するのは難しいため， h_{max} の各フェーズのシナリオ群の試行結果から平均値 $h_{max \mu}$ と平均 $+2\sigma$ に相当する極大値 $h_{max \mu+2\sigma}$ を算定し，フェーズ間の変化量 Δh_{max} (Ph. 2—Ph. 1) である $\Delta h_{max \mu}$ と $\Delta h_{max \mu+2\sigma}$ を求めて比較した。図-7に示すように三大湾の $\Delta h_{max \mu}$ および $\Delta h_{max \mu+2\sigma}$ は各湾内の代表地点において基本的に小さい。特に大阪湾の検討では $\Delta h_{max \mu}$ も $\Delta h_{max \mu+2\sigma}$ も10 cmほどの変化に留まり，Ph. 1の方がやや大きくなった。比較的变化が大きかったのは須磨～西宮の北岸である。伊勢湾の検討においても平均的にはPh. 1の方が大きくなり，特に豊橋～伊良湖の渥美湾南岸では $\Delta h_{max \mu}$ で20 cm， $\Delta h_{max \mu+2\sigma}$ では40 cmほどの顕著な変化が見られた。東京湾の検討の傾向は他と異なり，葛西～木更津の東岸においてPh. 2の方が大きくなる傾向にあった。特に船橋，千葉付近では $\Delta h_{max \mu}$ で20 cm， $\Delta h_{max \mu+2\sigma}$ で約30 cmほどの変化が見られた。

こうした高潮偏差の変化傾向について，両フェーズの平均経路と経路分散から考えた(図-8)。Ph. 2では，大阪湾の選定経路は大阪湾近傍で東側にシフトし，伊勢湾の選定経路は津付近を中心に時計回りに回転し，東京湾

の選定経路は伊豆半島を中心にやや時計回りに回転する傾向にある。経路分散は伊勢湾の通過後にPh. 1の方が大きくなる傾向が見られたが、その他は目立った違いは見られなかった。こうした経路変化から推測される高潮変化と、図-7で見られた結果はほぼ整合している。

7. 結論

約60年の台風観測資料から、台風特性の変化傾向を解析し、各緯度帯で経路シフトや気圧変化のトレンドの変動特性が異なることを示した。特に低緯度と高緯度の経路の東進トレンドとN10~25°における台風の強化トレンドが顕著であった。また、大気・海洋変動指標とのコヒーレンス解析から、台風特性は特定の周期変動で高い相関を示した。特性値の変化分析結果に基づいて、1980年を境とした台風資料のフェーズ区分を行い、統計的に等価と考えられる台風特性の変化シナリオから高潮ポテンシャルの変化を推定した結果、三大湾は台風特性の変化が大きな緯度帯よりも高緯度に位置することもあり、顕著な差にはならなかった。しかし、主に経路変化に起因してPh. 2では大阪湾と伊勢湾で高潮ポテンシャルが小さくなる傾向にあり、東京湾の東岸では大きくなる傾向が見られた。

謝辞：本研究の一部は文部科学省気候変動リスク情報創生プログラムおよび統合的気候モデル高度化研究プログラム、また科学研究費補助金基盤研究（B）課題番号：15H04048および15H05220の支援のもと実施された。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Chan, J.C.L. and Shi, J.: Long-term trends and interannual variability in tropical cyclone activity over the western North Pacific, *Geophysical Research Letters*, Vol. 23, No. 20, pp. 2765-2767, 1996.

- 2) Emanuel, K.: Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years, *Nature*, Vol. 436, pp. 686-688, 2005.
- 3) Kossin, J., Emanuel, K. and Vecchi, G.A.: The poleward migration of the location of tropical cyclone maximum intensity, *Nature*, Vol. 509, pp. 349-352, 2014.
- 4) Kim, D., Kim, H., Park, D.R. and Park, M.: Variation of the Tropical Cyclone Season Start in the Western North Pacific, *Journal of Climate*, Vol. 30, pp. 3297-3302, 2017.
- 5) 気象庁：台風活動の長期変動，気象庁異常気象レポート2014，pp.116-122，2014.
- 6) 三島豊秋，山下隆男，松岡潔照，駒口友章：気候変動のゆらぎと台風災害に関する研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 65，No. 1，pp. I_1276-I_1280，2009.
- 7) 泉宮尊司，小関達郎：大気・海洋変動指標と台風特性および気候変動との関連性に関する研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 66，No. 1，pp. I_1251-I_1255，2010.
- 8) 森 信人，有吉 望，安田誠宏，間瀬 肇：台風の最大潜在強度にもとづく高潮偏差の長期変動評価，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 72，No. 2，pp. I_1489-I_1494，2016.
- 9) 森 信人，村上裕之，志村智也，中條壮大，安田誠宏，間瀬 肇：マルチモデルアンサンブルによる気候変動に伴う熱帯低気圧特性の将来変化予測，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol. 68，No. 2，pp. I_1251-I_1255，2012.
- 10) 横田雅紀，一色勇志，橋本典明，児玉充由：MRI-AGCM3.2S に基づく将来の台風来襲特性に関する検討，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol. 71，No. 2，I_25-I_30，2015.
- 11) 中條壮大，藤木秀幸，金 洙列，森 信人，澁谷容子，安田誠宏：東京湾における高潮災害ポテンシャルの評価に関する検討，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol. 71，No. 2，I_199-I_204，2015.
- 12) Fujita, T.: Pressure distribution within Typhoon, *Geophysical Magazine*, Vol. 23, pp. 437-451, 1952.
- 13) Kim, S. Y., Yasuda, T. and Mase, H.: Numerical analysis of effects of tidal variations on storm surges and waves, *Applied Ocean Research*, Vol. 30, No. 4, pp. 311-322, 2008.

(2017.3.15 受付)

ON THE EFFECTS OF A LONG-TERM YEARLY VARIATION OF TROPICAL CYCLONES ON THE STORM SURGE POTENTIAL IN JAPANESE THREE MAJOR BAYS

Sota NAKAJO, Hideyuki FUJIKI, Sooyoul KIM and Gozo TSUJIMOTO

The different temporal trend of tropical cyclone properties by each latitude has been shown based on analysis of representative value in each latitudinal band. Some variations of tropical cyclone properties are correlated to two oscillation indices of atmosphere and ocean interaction. The data of tropical cyclone was divided into two groups based on these results. Then representative scenarios for boundary conditions of storm surge simulation were estimated by using statistical approach. The phase change of tropical cyclone is not so large around three major bay, therefore the phase change of storm surge was also small. However, the change of tropical cyclone track caused local change of storm surge event in each bay.