

確率的低気圧モデルを用いた越波量の確率評価

PROBABILISTIC EVALUATION OF WAVE OVERTOPPING RATES WITH A STOCHASTIC LOW PRESSURE MODEL

加藤史訓¹・柴木秀之²・鈴山勝之³
 Fuminori KATO, Hidenori SHIBAKI and Katsuyuki SUZUYAMA

¹正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室 (〒305-0804 つくば市旭1)

²正会員 博士(工) 株式会社エコー 環境水工部 (〒221-0052 横浜市神奈川区栄町10-35)

³工修 株式会社エコー 環境水工部 (〒221-0052 横浜市神奈川区栄町10-35)

Quantitative estimation of seawater flowing into hinterland due to high tide levels and high waves is necessary for risk assessment of storm surge floods. Since wave overtopping is caused by a combination of high tide levels and high waves, their concurrent probability should be taken into account for probabilistic evaluation of wave overtopping rates. Besides this, rates of wave overtopping from low pressures have not been evaluated probabilistically.

In this study, the Monte Carlo method was used to obtain data sets of wave overtopping rates long enough for extreme statistics analysis. A stochastic low pressure model was set up through an analysis on observed low pressures, long-term simulation of low pressures was conducted, and extreme statistics analysis of wave overtopping rates was conducted.

Key Words : wave overtopping rate, tide level, low pressure, probabilistic evaluation

1. はじめに

高潮氾濫の危険度評価では、高潮および高波による評価対象地域への海水流入を予測し、それによる背後地の被害の指標となる浸水深などを見積もることが必要である。海水流入の形態として越波や越流があり、その定量的評価の精度が危険度評価に大きく影響する。

海水流入の一形態である越波は、高潮位と高波浪によって生じる複合的な現象である。高潮位と高波浪は独立した現象ではなく、越波量の確率的な評価には高潮位と高波浪の同時生起性を考慮する必要がある。しかし、観測期間の短さなどから、潮位および波浪等の観測値から算定された越波量の再現期間の信頼性については議論の余地が残る。

台風時の越波流量については、台風そのものを確率的に取り扱ったモンテカルロ法による確率的な評価が試みられている¹⁾。一方、低気圧についても確率的モデルが構築され^{2),3)}、それを用いて波高の極値が推算されている⁴⁾が、越波流量の再現期間の評価には至っていない。

本研究では、台風以外の低気圧の発生・移動の確率的モデルを構築し、それを用いて低気圧による越波流量の再現期間を評価した。

2. 評価手法の概要

図-1のように、実績低気圧の特性から確率的低気圧モデルを構築し、極値統計解析に十分な期間について低気圧のシミュレーションを行い、各低気圧による最大の越波流量を算定し、その結果を用いた極値統計解析により越波流量の再現期間を評価した。その概要を以下で述べる。

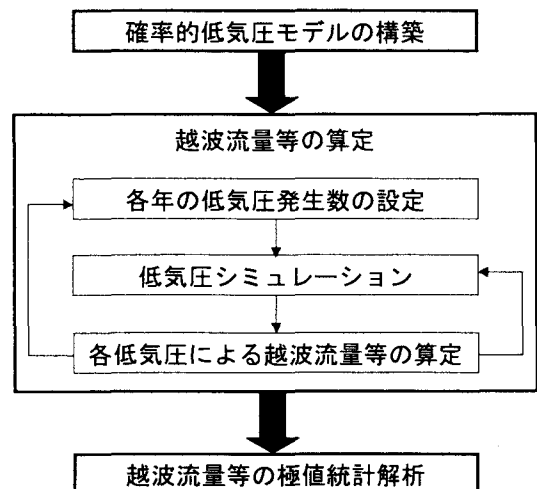


図-1 評価フロー

3. 確率的低気圧モデルの構築

(1) 既往低気圧の解析

1980～2000年の21年間の低気圧のうち中心気圧が980hPa以下に発達した1,753個について、低気圧属性（中心位置、中心気圧、移動速度、移動方向、半径）およびその時間的変化量について、2°格子毎に平均値とその標準偏差を求めた。解析には、気象庁発行のアジア太平洋地上天気図よりデータ化した、6時間間隔の低気圧中心位置および各等圧線の座標データを用いた。対象領域は、日本周辺を通過する低気圧の経路を網羅できるように、北緯20°～70°、東経100°～200°とした。確率的台風モデルでは台風属性の季節変化を考慮した事例⁵⁾があるが、今回の解析では季節変化を考慮せずデータを取り扱った。

低気圧は図-2のように楕円形を仮定し、気象庁から提供されている実績低気圧の等圧線の座標データから長軸の長さ a および短軸の長さ b 、長軸方向角 θ を読みとった。長軸は、低気圧を囲む最も遠い等圧線上の最も遠い点と低気圧の中心を結ぶ線とした。また、短軸は、長軸の直交方向に最も近い座標データを用いて設定した。

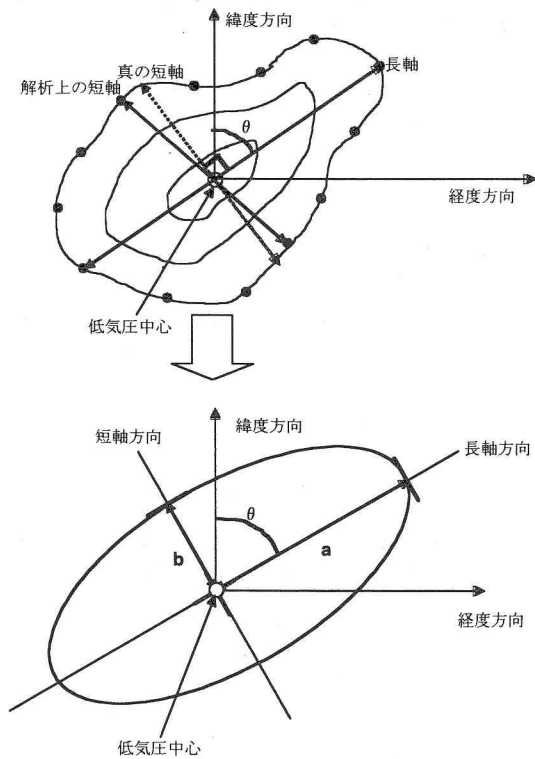


図-2 低気圧のモデル化

図-3および4は、偏平度 (a/b) および長軸方向角 θ の平均値および標準偏差を示している。偏平度の平均値は、九州から中部地方の間で1.1～1.2と小さく、関東から北海道南部に向かって増加している。偏平度の標準偏差は中部地方以西で0.1以下と小さく、平均値と同様に北に向かって増加している。一

方、本州付近の長軸方向角は、平均値は60°程度で、標準偏差は30°程度と比較的大きい。

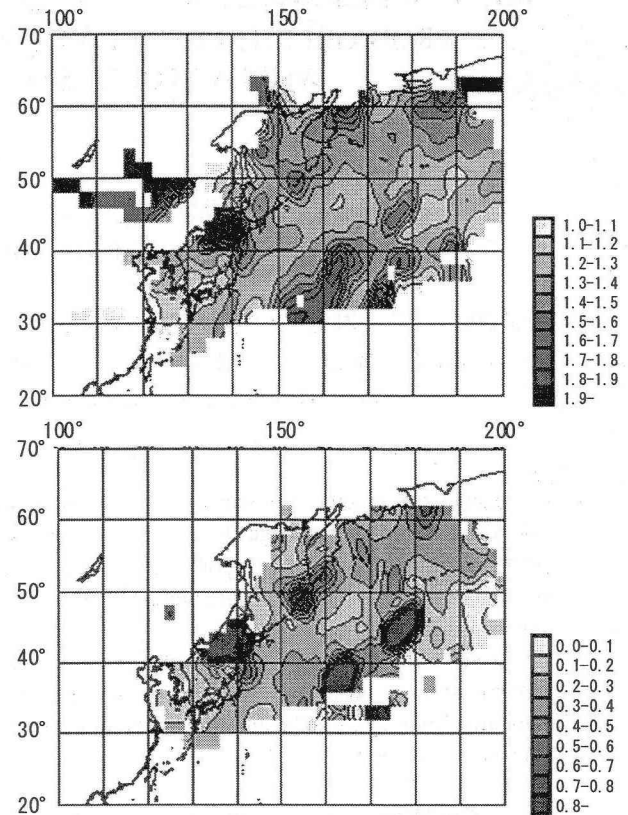


図-3 偏平度 (上: 平均値, 下: 標準偏差)

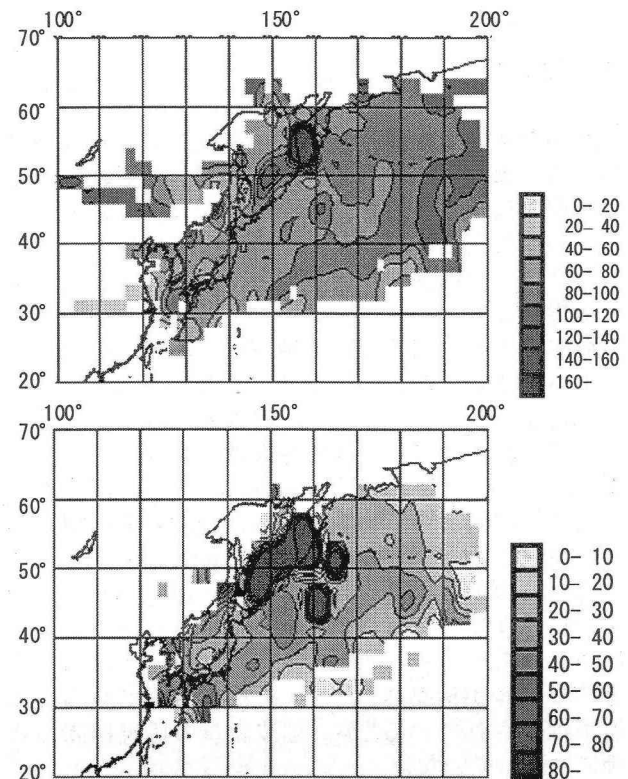


図-4 長軸方向角 (上: 平均値, 下: 標準偏差)

(2)低気圧モデルの概要

低気圧のシミュレーションは、以下のような考え方で行った。

毎年の低気圧発生個数は、実績低気圧の解析結果に基づいて、図-5のように実績の年平均発生個数(83.48)に従うポアソン乱数で決定した。

各低気圧の初期位置は、図-6、7のように、緯度・経度別の実績の累積度数分布に従う乱数で決定した。各低気圧の中心気圧、移動速度、移動方向の初期値は、その位置における平均値と標準偏差から定義される正規分布に従う乱数により決定した。偏平度および長軸方向角の初期値は、実績低気圧の平均半径と、各々偏平度および長軸方向角の相関式を用いて設定した。

式(1a)、(1b)のように、任意時刻nの低気圧の各属性は時刻(n-1)における各属性と各々の時間的変化量(平均値+偏差)の和で決定し、偏差はその位置に設定されている正規分布に従う乱数で決定した。

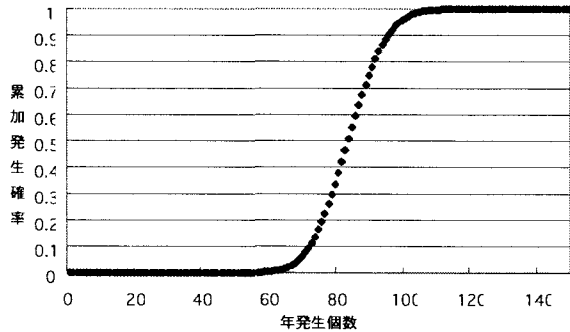


図-5 低気圧の年発生個数

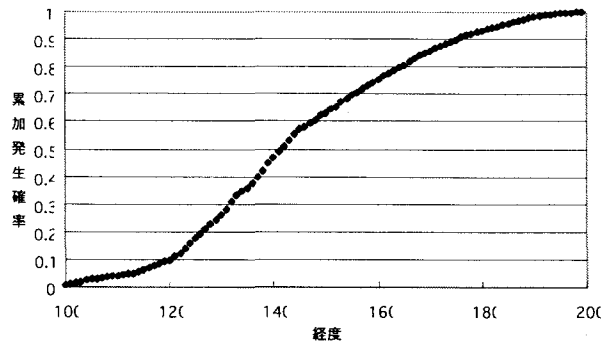


図-6 低気圧発生位置の経度分布

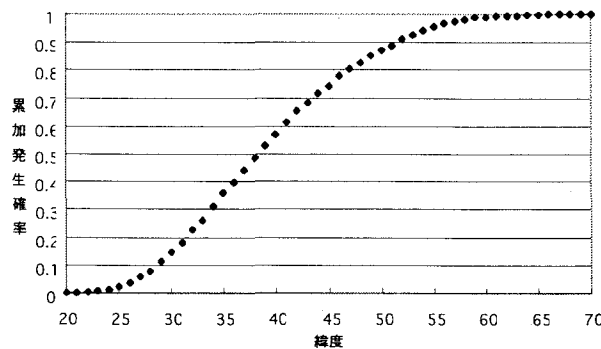


図-7 低気圧発生位置の緯度分布

$$T_n = (T_{n-1} + \Delta T_n)(1 - \alpha) + \overline{T_{n-1}(x, y)}\alpha \quad (1a)$$

$$\Delta T_n = \Delta S(x_n, y_n) + Z_n(x_n, y_n) \quad (1b)$$

ここで、 T_n は時刻nの低気圧属性の絶対値、 ΔT_n は時刻nの低気圧属性の時間変化量、 $\overline{T_{n-1}(x, y)}$ は時刻(n-1)の位置における低気圧属性の平均値、 $\Delta S(x, y)$ は低気圧中心位置における低気圧属性の時間変化量の空間平均値、 $Z_n(x, y)$ は低気圧属性の偏差である。 α は、移動場所の台風属性の平均値から大幅にずれないようにするための重み付けであり、試行計算により中心気圧、移動速度、移動方向とも0.025とした。

低気圧が時間的に大きく膨らんだり縮んだりしないように、低気圧の長軸および短軸の長さは中心気圧から設定した。実績低気圧の平均半径と中心気圧の関係は、図-8のように975hPa付近で変化しているため、975hPaを境に異なる関係式を用いて、中心気圧から低気圧の短軸の長さを設定した。また、任意時刻nの偏平度および長軸方向角は、実績低気圧の解析で得られたそれぞれの平均値および分散値に従う乱数に、重み付けした時刻(n-1)の値を加えて設定した。

計算時間間隔は6時間とし、対象領域外に低気圧が移動する、または中心気圧が1,012hPa以上になるまで低気圧の計算を継続した。その結果を補間して、1時間間隔の低気圧属性を推定した。

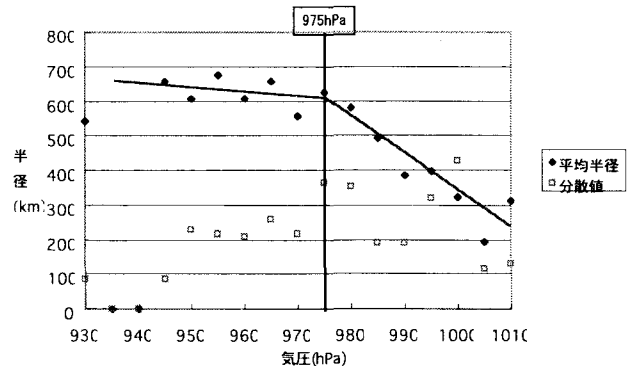


図-8 低気圧の平均半径と中心気圧の関係

(3)低気圧モデルの検証

低気圧モデルの検証のため、低気圧の初期値(位置、属性)を実績値と一致させて解析対象の21年間について低気圧のシミュレーションを50回行い、低気圧の通過頻度と、中心気圧、移動速度、移動方向の平均値および標準偏差を実績値と比較した。

図-9のように、本州沖からカムチャッカ半島沖にかけての海域で通過頻度が大きい傾向については、予測結果は実績ほど顕著ではないが、低気圧の通過頻度は特に西日本では概ね一致した。また、中心気圧の平均値については、図-10のように、予測結果は実績と比べて西日本でやや高く、北日本でやや低

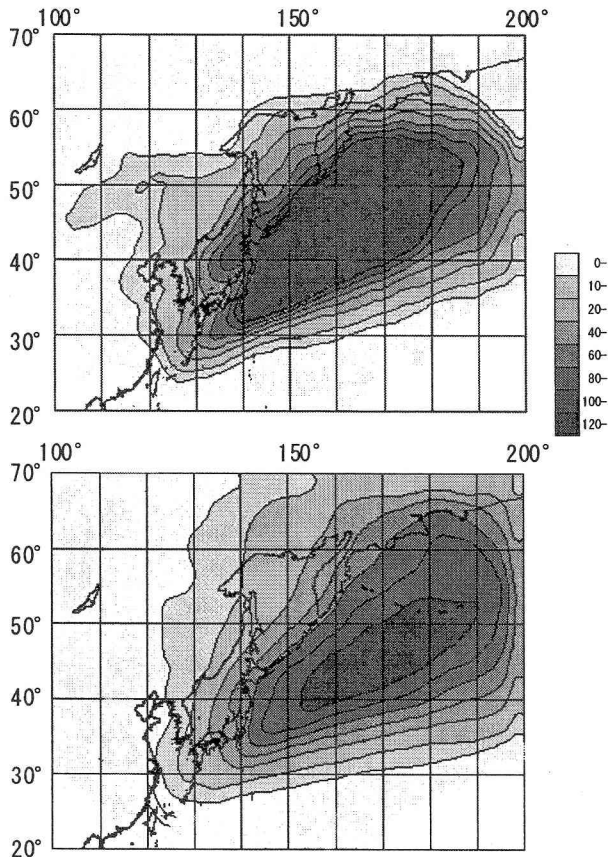


図-9 低気圧の通過頻度 (上: 実績, 下: 予測)

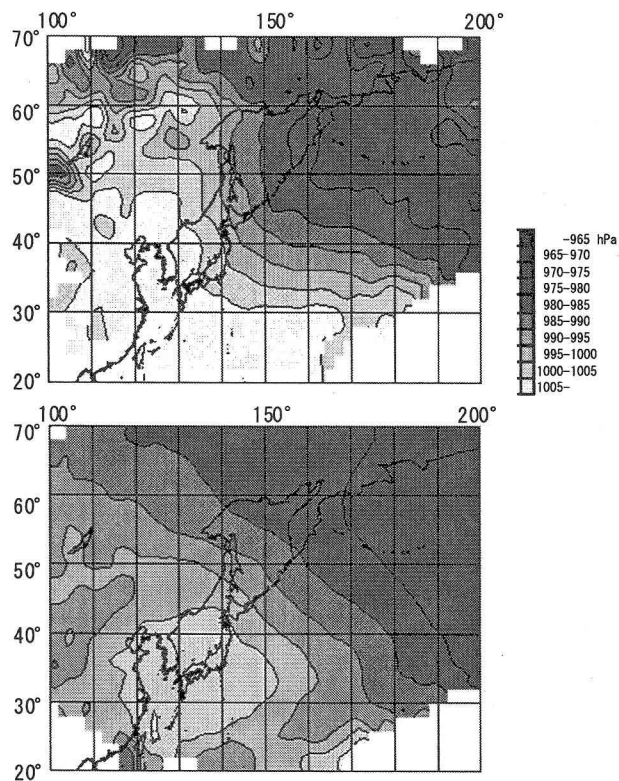


図-10 中心気圧の平均値 (上: 実績, 下: 予測)

いものの、その差は5hPa程度に収まっている。一方、中心気圧の標準偏差は、実績、予測結果とも、対象海岸周辺では5~10hPaであった。さらに、日本周辺では、移動速度の平均値は計算結果の方が大きいものの、移動方向の平均値は実績、予測結果とも東となった。実績、予測結果とも、対象海岸周辺では、移動速度の標準偏差は30km/h以上、移動方向の標準偏差は20°以上と大きかった。

日本沿岸に影響を及ぼした代表的な低気圧を対象に、低気圧モデルが実績の低気圧を十分に再現できるかどうか検証した。対象とした低気圧は、1981年4月に本州南岸を通過した低気圧と1990年11月に日本海を通過した低気圧で、それぞれの属性の初期値を用いて低気圧シミュレーションを50回行った。図-11および12は、それぞれの実績の経路と計算で得られた経路を示しており、計算結果については平均値も示している。確率的低気圧モデルであるため、計算で得られた経路はばらついているが、その平均的な経路は日本周辺では概ね一致している。

以上のことから、この手法により十分な精度で低気圧シミュレーションを行うことができると判断した。

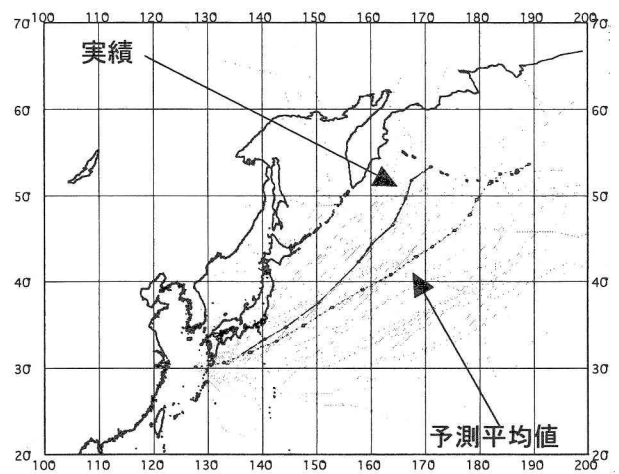


図-11 低気圧の試行計算結果 (南岸低気圧)

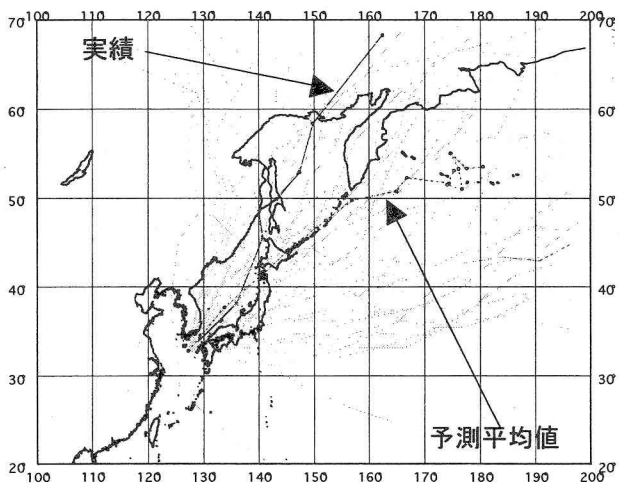


図-12 低気圧の試行計算結果 (日本海低気圧)

4. 越波量の再現期間の評価

(1) 評価方法

構築した確率的低気圧モデルを用いて2,000年間の低気圧を予測し、4海岸（東京湾：検見川海岸，伊勢湾：長島海岸，大阪湾：淀川河口，土佐湾：仁淀川河口）を対象に、各低気圧によって生じる潮位偏差，潮位，波高，越波流量を算定し，それらの年最大値を用いて極値統計解析を行った。検見川海岸には緩傾斜護岸が，それ以外の海岸には直立式の護岸や堤防が設置されている。

低気圧周辺の海上風の推算には，低気圧の楕円形を考慮して，Myersモデルを改良したモデルを用いた。具体的には，長軸および短軸と同じ半径の同心円を仮定してそれぞれの海上風をMyersモデルにより算定し，その2つの分布を図-13のように合成した。

予測する低気圧の数が著しく多いため，潮位偏差は気象庁の予測式⁶⁾で，波浪はSMB法で推算し，実績値との関係式で補正した。wave setupを考慮するため，外洋に面する土佐湾については，潮位偏差に有義波高の1割を加えた。潮位は，乱数で決定した低気圧発生時刻からの予報天文潮を，潮位偏差に加えて算出した。越波流量は，模型実験により得られた算定図^{7),8)}を用いて算定した。極値統計解析では，既往研究⁹⁾に従い，年最大値にGumbel, Weibull, 極値II型の各分布を当てはめ，もっとも適合する分布を採用した。

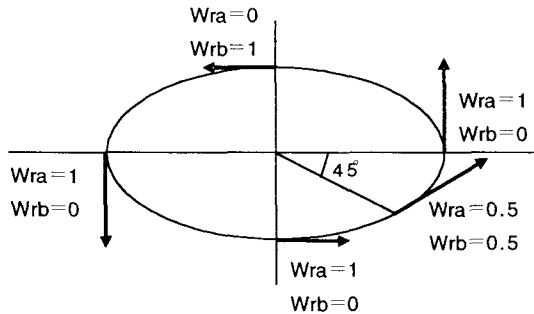


図-13 海上風の合成方法

(2) 評価結果

2,000年間の潮位偏差，潮位，波浪，越波流量の推定値を用いて，極値統計解析を行った。

潮位偏差は，東京湾および土佐湾で極値II型分布，伊勢湾および大阪湾でWeibull分布が適合確率分布で，表-1のように伊勢湾と東京湾がほぼ同じで，次いで大阪湾，土佐湾の順であった。台風について同様の方法で評価した結果¹⁾と比較すると，低気圧による潮位偏差は台風によるものの21~38%で，その割合は東京湾や土佐湾で比較的高かった。

潮位の適合確率分布は，潮位偏差と同じであった。表-2のように，潮位は伊勢湾がもっとも大きく，次いで東京湾と大阪湾がほぼ同じであった。

波高は，いずれの湾でもWeibull分布が適合確率

分布で，表-3のように土佐湾が再現期間100年で10.4m，同1,000年で12.6mと大きく，次いで大阪湾，東京湾，伊勢湾の順であった。潮位偏差と同様に台風による波高¹⁾と比較すると，低気圧による波高は土佐湾で約60%程度，伊勢湾で約70%，東京湾および大阪湾で約90%であった。その比が伊勢湾と東京湾，大阪湾で異なっている理由の一つとして，フェッチが最長となる方向が東京湾および大阪湾で南西，伊勢湾で南と異なることが考えられる。

越波流量の適合確率分布は，東京湾および伊勢湾でWeibull分布，大阪湾および土佐湾で極値II型であった。表-4のように，越波流量は土佐湾以外では非常に少なかった。土佐湾も，再現期間1,000年で $0.02\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ を超えず，台風によるものの3%程度に過ぎなかった。

これらの結果は，潮位偏差や波浪の簡易的推算により得られたものであることから，その精度に一定の限界があることは否めない。しかし，計算機の能力向上によって多数の低気圧に対して精度が高い潮位偏差および波浪の推算が可能となれば，本手法は有効なツールになる可能性がある。

表-1 潮位偏差の確率評価結果

bay	return period (years)				
	50	100	200	500	1000
Tokyo	0.55	0.62	0.69	0.79	0.88
Ise	0.55	0.63	0.72	0.83	0.92
Osaka	0.53	0.59	0.65	0.71	0.76
Tosa	0.40	0.44	0.49	0.56	0.62

(m)

表-2 潮位の確率評価結果

bay	return period (years)				
	50	100	200	500	1000
Tokyo	1.14	1.19	1.23	1.29	1.33
Ise	1.45	1.50	1.56	1.64	1.71
Osaka	1.10	1.15	1.22	1.31	1.40
Tosa	0.94	0.97	1.00	1.04	1.06

(m)

表-3 波高の確率評価結果

bay	return period (years)				
	50	100	200	500	1000
Tokyo	2.7	2.9	3.0	3.1	3.2
Ise	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7
Osaka	3.9	4.1	4.3	4.5	4.6
Tosa	9.6	10.4	11.1	12.0	12.6

(m)

表-4 越波流量の確率評価結果

bay	return period (years)				
	50	100	200	500	1000
Tokyo	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
Ise	0.0005	0.0006	0.0006	0.0006	0.0007
Osaka	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Tosa	0.0041	0.0058	0.0082	0.0124	0.0168

($\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$)

5. おわりに

既往低気圧の解析により確率的低気圧モデルを構築し、潮位偏差、潮位、波高とともに越波流量の再現期間を評価した。ケーススタディは太平洋側の海岸を対象としたが、本手法は越波の起因が低気圧である沿岸での海岸保全計画の立案に特に有用である。

最後に、本研究は科学技術振興調整費「都市複合空間水害の総合減災システムの開発に関する研究」の一環として実施したことを付記する。

参考文献

- 1) 加藤史訓, 鳥居謙一, 柴木秀之, 鈴山勝之: 確率的台風モデルを用いた潮位と越波量の確率評価, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 291-295, 2003.
- 2) 山口正隆, 大木泰憲, 畑田佳男, 前川浩章: 確率的低気圧モデルに関する研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 246-250, 1996.
- 3) 山口正隆, 畑田佳男, 前川浩章, 野中浩一: 低気圧属性の確率的発生モデルの再構成, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 466-470, 1997.
- 4) 山口正隆, 畑田佳男, 野中浩一, 羽間義晃: 確率的低気圧モデルに基づく波高の極値推算システムの適用性, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 251-255, 1999.
- 5) 橋本典明, 川口浩二・河合弘泰・松浦邦明・市川雅史: 港湾・海岸構造物の合理的設計を目的とした確率台風モデルの構築と精度の検証, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 176-180, 2003.
- 6) 気象庁: 潮位表 (平成12年版), p. 283, 1999.
- 7) 合田良実: 防波護岸の越波流量に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol. 9, No. 4, pp. 3-42, 1970.
- 8) 玉田崇, 井上雅夫, 手塚崇雄: 緩傾斜護岸の越波流量算定図とその越波低減効果に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 641-645, 2002.
- 9) 合田良実: 設計波高および設計潮位の決め方, 第33回水工学に関する夏期研修会講義集, B-4, pp. 1-18, 1997.