

わが国太平洋岸における高潮の極値の推定

山口正隆*・畑田佳男**・花山格章***

1. 緒 言

わが国沿岸に甚大な被害をもたらす高潮は主として熱帯低気圧である台風によって生起する。一般に、台風はその勢力や経路について大きい偶然的変動性をもつうえに、台風に伴う強風域が数百 km と狭いことから、特定地点を対象とする場合、既往最大級もしくはそれを上回る異常高潮が生起する可能性も否定できない。したがって、台風を主な発生要因とする高潮の場合、気象資料が整備されている過去数十年という短い期間で発生した台風に伴う観測結果や追算結果を極値資料として用いても、長期の再現期間をもつ高潮の極値が確実に把握しうるかどうかが疑問である。これに代わる手段として、台風属性(中心気圧、移動速度、移動方向、台風半径)に関する確率的台風モデルと、台風モデル法および高潮偏差推算モデルの組み合わせから、高潮の極値を推定するシステムが考えられる。長友ら(1980)および端野・桑田(1987)はすでにこうした方法に基づいて高潮の極値を推定しているが、対象海域が九州西岸や大阪湾などに限定されていることから、一般的な適用性をもつとはいえない。

そこで、本研究ではまず過去約 40 年間に取得された台風別最大高潮偏差観測資料(以下、台風別最大高潮偏差を高潮偏差あるいは偏差と呼ぶ)に対する極値統計解析に基づいて、南西諸島を含むわが国太平洋岸、東シナ海沿岸および瀬戸内海沿岸における既往(期間)最大偏差や 50~1000 年確率偏差の地域特性を検討する。ついで、確率的台風モデルと台風モデル法および高潮偏差に関する重回帰式を組み合わせた「高潮偏差の極値推算システム」に基づいて行った 1000 年間 100 回のシミュレーション結果から得られる高潮偏差資料を極値統計解析することにより、超長期にわたる高潮偏差の極値や 50 年~1000 年確率偏差とその変動幅を推定するとともに、観測資料から推定した高潮偏差の極値との比較から、本システムの有効性を調べる。

2. 観測資料に基づく偏差の極値の推定

高潮偏差資料を収集した地点は、小名浜以西の太平洋岸、東京湾、伊勢湾、大阪湾、瀬戸内海沿岸、東シナ海沿岸、南西諸島沿岸で気象庁検潮所のある地点、および瀬戸内海で重要な港湾のある地点(姫路、呉)の合計 60 地点であり、その中から極値統計解析および重回帰分析を行うのに必要な年数あるいは個数の偏差資料が得られる 44 地点を選び出した。

図-1 は作図の都合上、偏差の小さい 12 地点を除いた 32 地点の位置を示したものである。各地点の偏差資料のうち、1962 年以前でピーク時の値が得られている場合にはピーク時の値を、1963 年以降では、ピーク時の値が全地点あるいは全対象期間について掲載されていないことから、台風別に 1 時間ごとに観測された偏差の中で最大のものを選んだ。また、同じ地点で同じ台風により生じた偏差であるにもかかわらず、参照した資料によって値が異なる場合には、より多くの資料に掲載されている値を抽出した。

資料収集期間は、地点により違いはあるが、最も長い大阪で 1934 年の 3412 号(室戸台風)から 1991 年までの 58 年間である。しかし、1940 年代以前における偏差資料

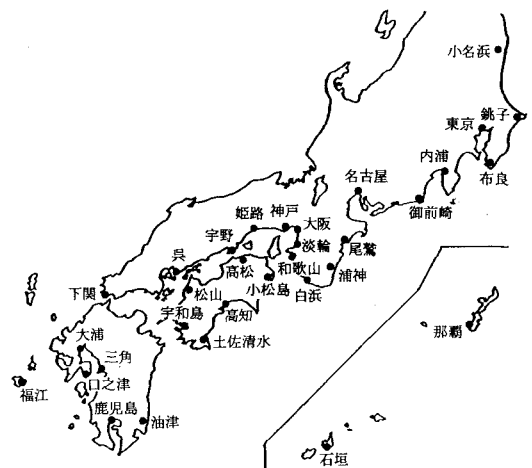


図-1 高潮偏差資料解析地点

* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部土木海洋工学科
 ** 正会員 工修 愛媛大学助手 工学部土木海洋工学科
 *** 学生会員 愛媛大学大学院 工学研究科

は大被害を生じた台風によるものしか残っておらず、記録としてもあまり明確でないことから、結局、定常的で信頼性のある資料は主として1950年代以降のものであると判断せざるをえなかった。したがって、今回の検討では、偏差資料が経年的に連続して得られる過去40年程度の偏差記録を主体に極値統計解析および重回帰分析を行うことから、たとえば、東京における期間最大偏差(230 cm, 大正6年の台風)や第2位偏差(220 cm, 昭和13年の台風)などは解析から落ちることになる。

こうして得られた各地点の上位N個の偏差資料に、3母数Weibull分布をあてはめて50年~1000年間の再現期間をもつ確率偏差を推定する。この場合の母数の推定は主として積率法によることとし、適合度が十分でない場合には最尤法も使用する。

図-2は名古屋および大阪における偏差資料に対する3母数Weibull分布のあてはめ結果であり、Weibull分布は全体的に良好な適合性を示す。しかし、名古屋における第1位の偏差資料はWeibull分布よりはずれる傾向にあることから、より厳密には異常値の棄却検定を行った検討が必要であろう。

表-1は各地点における期間最大偏差 η_{max} と発生台風名ならびにWeibull分布のあてはめから推定した100年確率偏差 $\eta^{(100)}$ および1000年確率偏差 $\eta^{(1000)}$ と極値統計解析資料の期間および個数を示したものである。これによると、対象期間中の全地点における第1位および第2位の偏差は台風5915号(伊勢湾台風)時に名古屋で発生した345 cmおよび台風3412号(室戸台風)時に大阪で発生した292 cm, 200 cmを越える大きな偏差が発生したのは東京, 名古屋, 和歌山, 大阪, 神戸, 姫路, 高知, 大浦, 鹿児島等の9地点である。すなわち、従来云われているように、S方向を開口部にもち、水深の小さい東京湾, 伊勢湾, 大阪湾, 有明海などが国の代表的内湾での偏差が大きいが、このほか水深の大きい鹿児島湾や外洋に直接面する高知においても異常な偏差が発生している。また、200 cmを越える偏差の発生した時期のほとんどが30年以上前であり、最近ではこうした大きな偏差の

表-1 期間最大偏差および確率偏差(観測資料)

番号	地点名* *最尤法	η_{max} (cm)	台風 番号	$\eta^{(100)}$ (cm)	$\eta^{(1000)}$ (cm)	期間 (西暦)	個数
1	小名浜*	74	8115	69	86	'58~'91	34
2	銚子*	93	4922	64	79	'58~'91	32
3	布良	112	5822	113	149	'56~'91	36
4	東京	230	大正6年 台風	142	183	'58~'91	34
5	内浦	58	5313	64	73	'51~'91	41
6	御前崎	78	5822	79	97	'58~'91	34
7	名古屋*	345	5915	272	387	'50~'91	42
8	尾鷲*	197	5915	141	194	'53~'91	39
9	浦神*	176	5915	149	214	'53~'91	39
10	白浜	100	6523	102	127	'64~'91	28
11	和歌山	217	6118	213	317	'50~'91	42
12	淡輪*	162	6118	169	244	'53~'91	39
13	大阪	292	3412	262	377	'50~'91	42
14	神戸	217	3412	212	291	'50~'91	42
15	姫路	210	6523	208	273	'50~'87	16
16	宇野	133	6523	139	171	'50~'91	42
17	呉	150	9119	162	198	'51~'91	21
18	下関*	124	9119	124	157	'50~'91	42
19	高松	131	5115	143	179	'50~'91	42
20	小松島*	191	6118	163	243	'50~'91	42
21	松山	145	9119	160	217	'50~'91	42
22	宇和島	88	5415	91	112	'50~'91	42
23	高知*	235	7010	184	267	'50~'91	42
24	土佐清水	123	4516	117	152	'42~'91	50
25	三角	155	9119	168	239	'63~'91	29
26	大浦	212	9119	234	310	'70~'91	22
27	口之津	124	9119	146	201	'70~'91	22
28	福江*	98	9119	104	148	'70~'91	22
29	油津	80	6420	86	103	'53~'91	39
30	鹿児島*	200	4516	150	237	'69~'91	23
31	那覇	54	7920	61	69	'73~'91	19
32	石垣	78	7613	83	106	'73~'91	19

発生は少ない。しかし、1991年9月に日本列島を襲った台風9119号は大浦で200 cmを越える偏差を、有明海周辺や瀬戸内海の西部沿岸においても期間最大偏差、もしくはそれに近い偏差の値を記録した。

一方、100年確率偏差が200 cmを越える地点は期間最大偏差が200 cmを越えた名古屋, 和歌山, 大阪, 神戸, 姫路, 高知, 大浦の7地点であるし、全地点を通じての第1位および第2位の100年確率偏差は名古屋の308 cmおよび大阪の262 cm, 信頼性は低いが、1000年確率偏差の上位2位も名古屋の387 cmおよび大阪の377 cmとなっている。しかし、極値統計解析用資料に期間最大偏差が含まれない東京や鹿児島での100年確率偏差はそれぞれ142 cmおよび123 cmであって、期間最大偏差よりかなり小さく評価される。

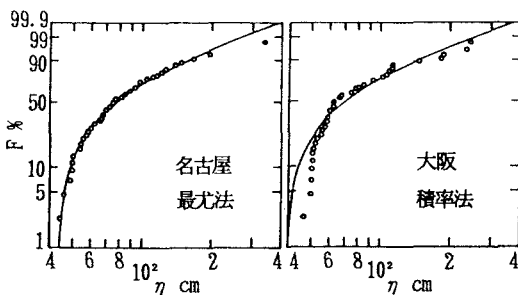


図-2 Weibull分布のあてはめ(観測資料)

3. シミュレーション資料に基づく偏差の極値の推定

(1) 確率的台風モデルの概要

確率的台風モデルの作成に使用する台風として、およそ北緯 20~40°, 東経 120~150°の領域(南北方向 2640 km, 東西方向 2720 km, 格子分割数 34×35, 格子間隔 80 km)を 1951 年から 1991 年の間に通過し, 中心気圧が 980 hPa 以下に発達した台風のうち, 領域内発生 15 台風を除く 320 個を採用し, 気象要覧, 台風経路図および天気図よりそれぞれの台風に対して 6 時間ごとの台風属性資料を作成した。

確率的台風モデルでは, 年台風発生数を平均値 7.8 のポアソン分布, 境界上の台風属性(中心気圧, 中心位置, 中心移動量, 台風半径)の平均特性を重み付きスプライン関数, 対象領域内の台風属性および台風属性変化量間の相関関係を 1 次回帰式で近似するとともに, 境界および領域内での平均値からの変動量を, 資料解析より求められる経験的確率分布関数で表示する。この際, 境界を 6 分割, 領域を 16 分割した小区域で経験的確率分布を求めることにより, 確率的台風モデルの精度向上を図るとともに, 台風半径の算出においては, 中心気圧との相関を考慮する。

1000 年間を対象としてシミュレーションを行い, 各境界区域および領域区域ごとの台風属性(中心気圧, 移動速度, 移動方向, 台風半径)の平均値および標準偏差や得られた台風経路を原資料と比較することにより, 台風属性の平均特性のみならず台風の北上に伴う転向や減衰, 台風属性の連続的変化などが再現されるかどうかを検討した。その結果, 台風半径資料の標準偏差は原資料より若干小さい値をとるが, 他の台風属性統計量については良好な対応が得られることから, 本確率的台風モデルは妥当な結果を与えると判断された。

(2) 偏差重回帰式の作成

偏差の重回帰分析に使用する経験式は定数項と台風モデル法に基づく最大風速 U_{max} の 2 乗の余弦成分 (θ_{max} : 最大風速時の風向) に比例する項と最低気圧低下量 $\Delta P_{min}(=1013 - P_{min})$ に比例する項の和で表される。

$$\eta = a + b \cdot U_{10max}^2 \cdot \cos(\theta_{max} - \theta_w) + c \cdot \Delta P_{min} \quad \dots (1)$$

ここに, a, b, c は過去の偏差資料と台風モデル法に基づく風・気圧特性から最小 2 乗法により決定される定数, P_{min} は最低気圧であり, θ_w は入力偏差と重回帰式による偏差の相関係数が最大になるように決定する。

重回帰式の作成にあたり, 説明変数として台風モデル法に基づく風・気圧特性を採用する場合, 観測風・気圧を説明変数とする回帰式ほど高い精度の回帰式が得られない地点があるので, ①各地点で収集した全資料, ②適

当な基準値(閾値)で 2 つのグループに分けた偏差資料のうち大きい方の資料, のそれぞれに対して重回帰式を作成した。図-3 は代表地点における①と②の場合の重回帰式による偏差と観測偏差の相関図である。①の場合には, 一般に観測偏差が大きいときほど, 重回帰式による偏差が観測偏差より離れる傾向を示すし, 観測偏差の変動幅が小さい地点では, 相関が低くなる。一方, ②の場合には, 大きい偏差資料のみを用いて重回帰式を導いているので, ①の場合と比較すると, 相関は高い。

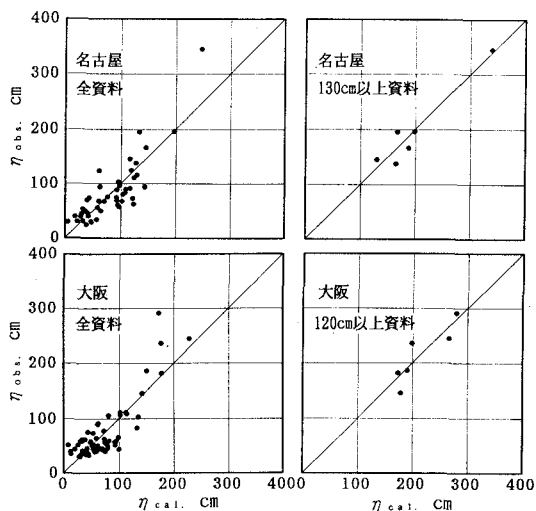


図-3 重回帰式による計算偏差と観測偏差の相関

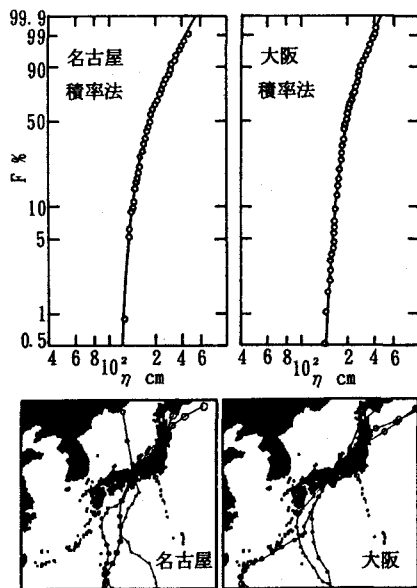


図-4 Weibull 分布のあてはめと台風経路 (シミュレーション資料)

(3) 確率偏差の推定

確率的台風モデルに基づくシミュレーションでは、各台風ごとに①の方法で算出した偏差が②の重回帰式作成時に使用した基準値を上回る場合にのみ、②による偏差を採用するという方法を用いることを原則とする。また、観測偏差の変動幅が小さい地点では、②の重回帰式の係数 b 、 c が小さい値をとり、その結果、シミュレーションにおいて過小な偏差を生じることもあったので、この場合には①の重回帰式のみを用いる方法を採用する。

さて、前述した潮位観測点において「高潮偏差の極値推算システム」により、1000年間の台風に伴う偏差を100回計算して、台風別上位偏差資料を作成するとともに、各ケースの1000年間偏差資料における期間最大偏差の平均値、標準偏差、最大・最小値の抽出と、3母数 Weibull 分布のあてはめ(母数の推定は積率法による)から50年～1000年確率偏差の平均値、標準偏差、最大・最小

値の算出を行った。

図-4は第1回目の1000年間の台風シミュレーションにより求めた偏差資料に対する3母数 Weibull 分布のあてはめ結果および上位3位の偏差をもたらした台風の経路図の2例である。この場合には資料の数はかなり多いことから、いずれの地点でも Weibull 分布の適合度はかなり良好である。また、台風は対象地点左側近傍を通過する経路をとり、それぞれの地点に期間最大観測偏差をもたらした台風の経路と類似している。

図-5は観測資料に基づく期間最大偏差、100年および1000年確率偏差と、シミュレーションに基づくそれらの平均値および最大・最小値を沿岸分布図として示したものである。観測資料に基づく結果は観測期間の短さや確率分布へのあてはめに伴う誤差、シミュレーション資料に基づく結果は確率的台風モデルや重回帰式に伴う誤差などを含むので、両者の比較には注意を要する。まず期

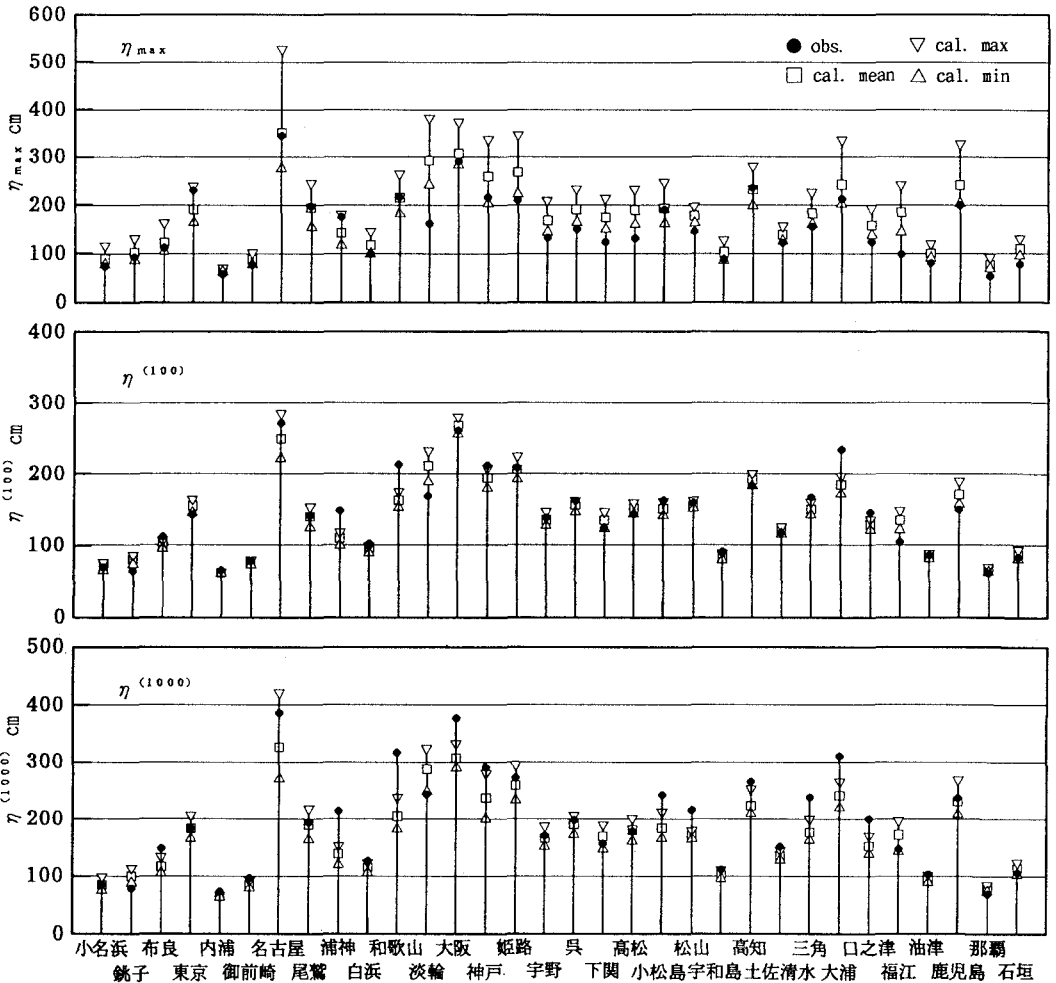


図-5 期間最大偏差および確率偏差の沿岸分布

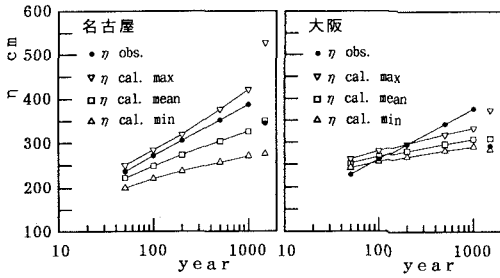


図-6 期間最大偏差および確率偏差の平均値と変動幅

間最大観測偏差は、シミュレーション資料に基づく期間最大偏差の最大値よりやや小さい東京および浦神を除いて、平均値以下にプロットされるから、シミュレーション結果は一応の妥当性をもつと判断されよう。したがって、その変動幅を考慮すると、長い時間スケールでは期間最大観測偏差を上回る異常偏差が発生する事態も予想される。また期間最大偏差は1m以上の変動幅をもつ地点が多いが、その最大値が2mを越える地点は18地点、3mを越える地点も名古屋を筆頭に7地点(ただし、淡輪では過大評価傾向にある)を数える。一方、100年確率偏差の変動幅は名古屋を除いてほぼ30cm以下であり、観測資料に基づく確率偏差も多く地点でその変動幅内もしくは最小値以下にプロットされ、シミュレーション資料および観測資料に基づく100年確率偏差が比較的良好に対応するのに対して、1000年確率偏差では、観測資料に基づく結果がシミュレーション資料に基づく結果を上回る地点が増加する。これは、シミュレーション結果そのものに含まれる誤差のほか、数十年以下の観測資料に基づいて数百年以上の再現期間に対する確率偏差を推定したことによるところが大きいと考えられる。

図-6は図-5の挙動をより詳細にみるため、名古屋および大阪における期間最大偏差(図の右端)および確率偏差とその変動幅を図示したものである。この結果によれば、名古屋では、100年確率偏差の平均値は249cm、変動幅は64cmであるが、1000年確率偏差の平均値は327cm、変動幅は150cm、期間最大偏差の平均値は350cm、変動幅は250cmに達する。一方、大阪では100年確率偏差の平均値は268cm、変動幅は24cm、1000年確率偏差の平均値は307cm、変動幅は43cm、期間最大偏差の平均値は308cm、変動幅は90cmと評価されるから、名古屋に比べて変動幅がかなり小さい。また、観測資料に基づく確率偏差は名古屋ではシミュレーション資料に基づく結果の上限と平均値の中間に位置するのに対し、大阪ではシミュレーション結果の平均値より小さい前者

が、再現期間が大きくなると、後者を上回る。しかし、名古屋での期間最大観測偏差はシミュレーション結果の平均値と同程度の値を、大阪でのそれはシミュレーション結果の最小値より若干大きい値をとり、変動幅の中に納っている。

なお、気象庁(1987)により観測最大風速・風向と観測最低気圧低下量を用いて導かれた偏差重回帰式を採用した場合の同様のシミュレーションも試行的に行った。その結果、シミュレーション資料に基づく確率偏差は布良、清水港、串本、神戸、三角、油津などで観測資料に基づく確率偏差と良好な対応を示したが、名古屋、大阪、高知などではかなり過大な値を、一方、松山、宇野などではかなり過小な値を与えた。これは本システム中の偏差重回帰式が台風モデル法に基づく風特性の使用を前提としているために生じた結果であり、台風モデル法による風特性が観測風と必ずしも一致しないことを示す。

4. 結 語

本研究で得られた結果は次のように要約される。

(i) わが国沿岸で期間最大観測偏差が2mを越える地点は名古屋、大阪など9地点、100年確率偏差が2mを越える地点も東京、鹿児島を除く同じ7地点である。これらの地点の大部分はいずれも開口部をS方向にもち、水深の小さい内湾部に位置するが、水深の大きい内湾部の鹿児島や外洋に面した高知でも2mを越える高潮偏差が観測されている。

(ii) 高潮偏差の極値推算システムは超長期の高潮偏差とその変動幅の評価に有効である。たとえば、名古屋での100年および1000年確率偏差の平均値と変動幅はそれぞれ242cmおよび50cm、320cmおよび115cmと評価される。したがって、この結果を代表例として、数百年以上の時間スケールでは、各地において期間最大偏差を上回る異常偏差が生起する可能性も否定できないことが示唆される。

最後に、高潮偏差観測資料を提供戴いた神戸海洋気象台、長崎海洋気象台ならびに松山地方気象台に深甚の謝意を表す。

参 考 文 献

- 気象庁(1987): 昭和62年潮位表, p. 319.
 長友文昭・鶴谷広一・副島 毅・宮原誠一(1980): 確率を考慮した高潮の計算方法について, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 557-561.
 端野道夫・桑田康雄(1987): 確率的台風モデルによる降雨・高潮の同時生起性評価, 土木学会論文集, 第387号/II-8, pp. 237-245.