

1970年土佐湾高潮の特異性に関する解析

柴木秀之*・村上大輔**・村上和男***

1970年に土佐湾へ来襲した台風10号による高潮は、高知で2.35 mの潮位偏差を記録し、外洋沿岸で発生する最大級の値となった。この異常な高潮の主成分は wave setup による水位上昇であることが高潮推算から確認された。そこで、土佐湾に来襲した他の台風による高潮についても wave setup による水位上昇を考慮し、台風7010号による高潮のみが有する特異性の要因を解析する。解析方法は、波の効果を組み込んだ高潮経験式による成分分析と wave setup を考慮した高潮推算による観測値の再現である。解析の結果によれば、台風7010号の経路が風による吹き寄せと wave setup による水位上昇を促進し、異常な高潮が発生したと考えられる。

1. はじめに

1970年に土佐湾へ来襲した台風10号による高潮は、外洋に面する沿岸において既往最大級（高知港の最大潮位偏差2.35 m）を記録し、気圧と風の効果を考慮した従来の数値計算による再現が困難な異常高潮であった。この台風7010号による異常な高潮は、柴木ら（2001）の研究により、wave setup を考慮した高潮推算モデルでは再現できた。しかしながら、土佐湾に来襲した台風7010号以外の台風による高潮は、wave setup の効果を考慮した再現がなされていない。そのため、台風7010号による高潮が有する特異性は未解明と言える。

一方、高橋ら（2004）は、台風7010号時の高潮のように wave setup の影響が顕著な場合、砕波帯の沖側に防波堤の開口部を設置すると、港内の高潮は低減し、低減量が7010号時に最大1.0 m 程度になることを明らかにした。このため、高知港の外港防波堤が整備された1980年代中旬以降は、異常な高潮が発生しにくいと予想される。

そこで、本研究では、高知港の外港防波堤が未整備の時期に、土佐湾へ来襲した台風7010号と1970年代以前の台風時の高潮を、波浪による水位上昇成分を組み込んだ高潮経験式により分析するとともに、台風7010号以外の高潮について、wave setup を考慮した推算モデルによる再現を試みる。これらの結果をもとに、台風7010号と他の台風による高潮の発生特性を比較し、台風7010号による高潮のみが有する特異性の要因について解析する。

2. 土佐湾に来襲した台風の気圧・風・波浪の推算

(1) 土佐湾に来襲した台風の抽出

第一の解析として、波による水位上昇成分を組み込んだ高潮経験式を推定する。この経験式推定にあたって、

表-1 解析に用いた台風の情報と発生潮位偏差の一覧表

	台風 No	解析期間	最大潮位 偏差 (cm)	台風 半径 (km)	進行 方向	台風中心 距離 (km)
1	台風5405	1954.8.17~8.19	62	270	ENE	NW30
2	台風5415 洞爺丸	1954.9.25~9.27	71	140	NE	NW110
3	台風5522	1955.9.29~10.1	55	90	NNE	W250
4	台風5523	1955.10.3~10.5	37	50	NNW	W140
5	台風5609	1956.8.16~8.18	27	150	NE	NW250
6	台風5612	1956.9.9~9.11	29	140	NE	NW400
7	台風5710	1957.9.6~9.8	45	170	NE	NW40
8	台風5906	1959.8.7~8.9	55	240	ENE	S50
9	台風5914	1959.9.16~9.18	—	90	NE	NW400
10	台風5915 伊勢湾	1959.9.25~9.27	50	95	NNE	E180
11	台風6011	1960.8.10~8.12	—	110	NNW	E40
12	台風6016	1960.8.28~8.30	123	120	NNE	W5
13	台風6118 第二号戸	1961.9.15~9.17	91	75	NE	SE40
14	台風6303	1963.6.12~6.14	—	200	NE	NW60
15	台風6309	1963.8.8~8.10	76	110	NW	SW200
16	台風6414	1964.8.23~8.25	42	180	NE	NW90
17	台風6420	1964.9.23~9.25	81	250	NE	NW40
18	台風6523	1965.9.9~9.11	82	80	NE	E30
19	台風6524	1965.9.16~9.18	37	100	NE	SE230
20	台風6624	1966.9.24~9.26	29	400	NE	SE40
21	台風6804	1968.7.27~7.29	47	250	NW	SW60
22	台風6909	1969.8.21~8.23	41	90	ENE	SE40
23	台風7010	1970.8.20~8.22	235	80	NNW	W70
24	台風7912	1979.9.3~9.5	21	80	NE	NW30

注) 台風中心距離：高知を基準とした台風中心が位置する方向と距離

土佐湾沿岸に近い経路を通過し、かつ年最大相当の高潮・高波を発生させた1950年代から1970年代の台風を抽出する。ここで、台風経路は台風の事典を参照し、最大の潮位偏差は台風7010号の被災後の報告（1973）を参照した。表-1 は抽出された24個の台風の一覧であり、高潮・高波の最大値発生時刻を含む解析期間、土佐湾最接近時の台風半径、進行方向、高知から台風中心までの方向と距離及び高知で観測された最大潮位偏差を表す。表中、潮位偏差の時系列が整理されている台風 No の欄に陰影を付けた。また、高知で70 cm 以上の最大潮位偏差が観測された場合、台風中心と高知との距離が台風半径

* 正会員 博(工) 株式会社エコー 環境水工部長
** 日本道路(株)
*** 正会員 工博 武蔵工業大学教授 工学部都市基盤工学科

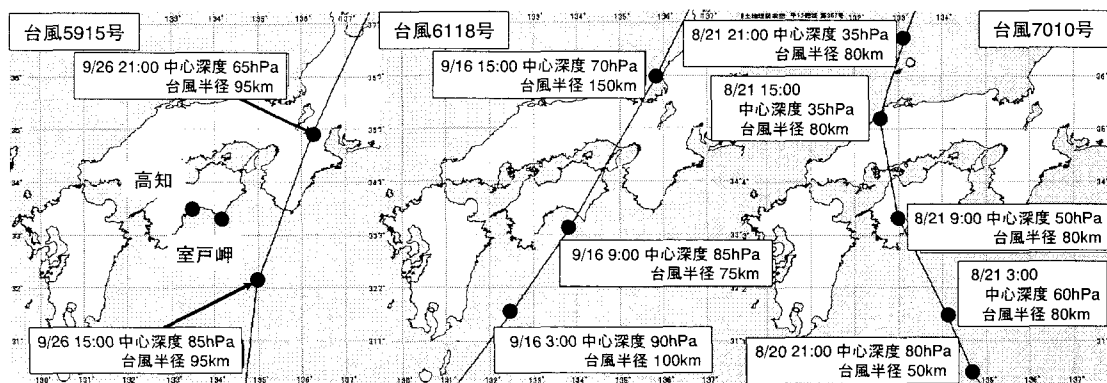


図-1 台風5915号・6118号・7010号の台風経路と土佐湾沿岸接近時の台風情報

とはほぼ同程度の場合、台風の進行方向が北向きの場合、台風経路が高知の西側で、高知が台風の危険半円に位置する場合は、各々、最大潮位偏差・台風半径・進行方向・台風中心距離の欄に陰影を付けた。

図-1は、24個の台風のうち、高知において高い最大潮位偏差が記録され、かつ潮位偏差の時系列が整理されている3台風(5915号、6118号、7010号)の経路を表す。

(2) 気圧・風・波浪の推算方法

表-1の台風来襲時の気圧・風・波浪の推算を行う。気圧の推算はMyers式に基づく台風モデルを適用し、海上風の推算は、傾度風と場の風を考慮した台風モデルの推算値と、台風の影響圏外の天気図の気圧情報を入力条件とする傾度風モデルの推算値を空間的に滑らかに結合し、境界層モデルにより海上風へ変換する手法(後藤・柴木, 1993)を適用する。波浪推算は、海上風の推算値を入力条件とする橋本ら(2005)のWAM法を用いる。これら推算により、土佐湾中央に位置する高知(検潮所が存在)における24個の台風来襲時の気圧・海上風・波浪の毎正時と最大潮位偏差発生時の時系列値を求める。

(3) 気圧・風・波浪の推算結果

図-2は、台風7010号と6118号来襲時に、高知で観測

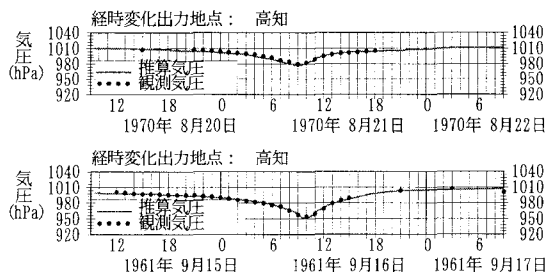


図-2 台風7010号と6118号来襲時の高知における観測気圧と推算気圧の時系列の比較

された気圧と推算気圧の時系列の比較を表す。推算値と観測値は一致し、台風モデルによる気圧の推算精度は良好と評価できる。図-3は、2台風の来襲時に室戸岬で観測された毎正時の10分間平均風速・風向と推算風の時系列の比較を表す。室戸岬の気象観測点は高度185mに位置するため、土佐湾沿岸で相対的に陸上地形の影響を受けにくい。この観測風を10m高度に補正すると、海上風の推算値との比較が可能となる。推算値は台風7010号の通過後に過大となるものの、期間を通じて風向・風速とも観測値とほぼ一致している。

波浪の推算値と観測値の比較は、高知沖(水深-120.0

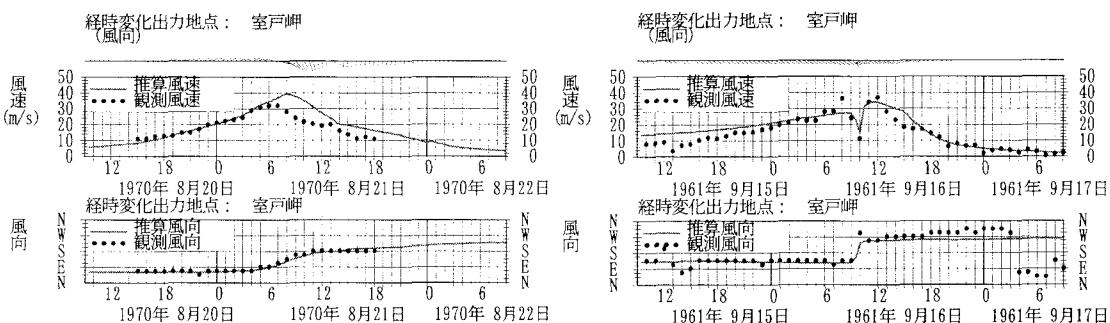


図-3 台風7010号と6118号来襲時の室戸岬における観測風(10m高度補正值)と推算風の時系列の比較

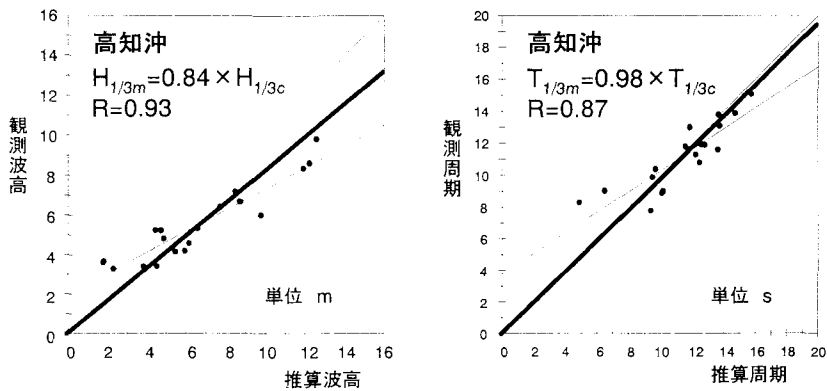


図-4 上佐湾に來襲した台風時の高知沖における最大有義波高・有義波周期の観測値と推算風の相関図

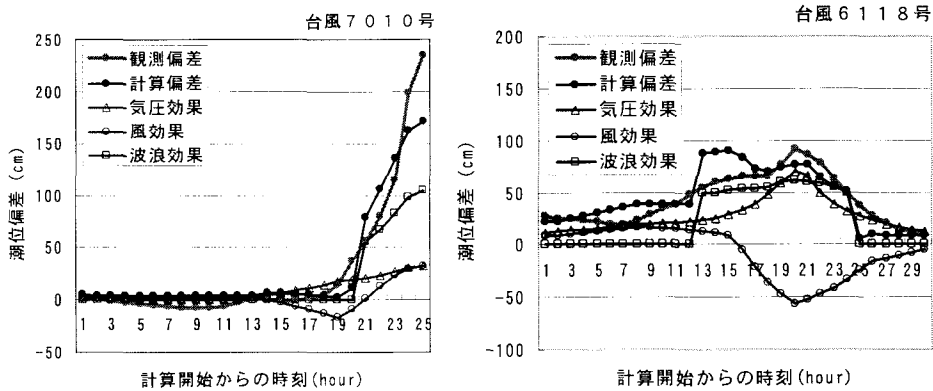


図-5 台風7010号と台風6118号時の高潮経験式による高知の潮位偏差の時系列の推定結果（観測潮位偏差と推定値の比較）

m) において波浪観測が実施された1981年から1989年の年最大相当の高波を選定し、最大有義波高と有義波周期について行う。観測値は、沿岸波浪観測年報(1983～1991)から引用する。図-4は推算された有義波諸元の最大値と観測値との相関図を表す。相関データは比較的最もまとまった分布を示しているものの、有義波高の推算値は、観測値よりも幾分高めである。そこで、有義波高の推算値に0.84を乗じ、観測値相当の値へ補正する。有義波周期の推算値は補正を行わなかった。

3. 高潮経験式による解析

(1) 高潮経験式の定式化

前述した気圧・風・波浪の推算により、高知において推定された3諸元の時系列と観測潮位偏差の時系列を利用し、波による水位上昇成分を組み込んだ高潮経験式の係数を同定する。高潮経験式の定式化は、磯崎(1970)にない次式を採用する。

$$H' = a\Delta p + bW^2 \cos \theta + ch_0 \dots \dots \dots (1)$$

式中の右辺第1項は気圧低下による潮位偏差成分、第2項は風の吹き寄せによる成分、第3項は波による水位上

昇成分を表す。各項の係数は、左辺に高知の観測潮位偏差(単位 cm)の時系列を、右辺の各項に高知の推算気圧深度・風速・有義波高(単位は hPa, m/s, m)と風向の時系列を当てはめ、重回帰分析により同定する。本研究では、係数の同定にあたり、高知において観測潮位偏差の時系列が整理されている5台風(5915号、6118号、6909号、7010号、7912号)の時系列データを用いる。

波の効果を組み込んだ高潮経験式の係数は、 $a = 1.08$ 、 $b = 0.12$ 、 $c = 8.11$ と同定された。各成分の数値を理論から評価すると、気圧低下による成分は $a = 1.00$ 、 $c = 10.0$ 程度の値になる。これより、係数はほぼ妥当な値と考えられる。ただし、風による吹き寄せ成分は、沿岸部の平均的な水深への依存や風波の発達量にも影響することから理論的な値を推定しにくい。波の効果を考慮しない高知の高潮経験式(気象庁, 1999)は、8個の最大潮位偏差で係数同定を行い、 $a = 2.385$ 、 $b = 0.033$ が示されている。この係数と本研究で得られた高潮経験式の係数を比較すると、気圧低下による成分の係数はより理論に近い値となり、風による吹き寄せ成分の係数は約4倍となる。

(2) 高潮経験式による潮位偏差の推定

図-5は、台風7010号と6118号の来襲時に、高知で観測された潮位偏差と高潮経験式から推定された潮位偏差の時系列の比較である。図中の推定値は、気圧・風・波浪の効果による3成分の時系列も併記してある。図-5の左図によれば、台風7010号による潮位偏差は、最大偏差発生時刻に全ての偏差成分が正となり、波浪の効果による成分の寄与が大きい。一方、右図に表す台風6118号による潮位偏差は、風の効果による負の偏差（陸風による負の偏差）と波浪の効果による正の偏差が相殺する傾向が確認できる。図に表すほど大きな風の効果による負の偏差が、外洋に面する沿岸で推定されることに問題は残る。また、高潮経験式が有する特徴から考えると、各成分の定量的な妥当性に課題はある。しかしながら、高潮の発生現象は定性的に表現していると考えられる。

4. 高潮推算による解析

(1) 高潮推算モデルの概要

第二の解析として、観測潮位偏差の時系列が整理され、かつ相対的に高い潮位偏差を発生させた台風6118号（第二室戸台風）と台風5915号（伊勢湾台風）来襲時の高潮推算を行い、台風7010号時の推算結果と比較する。高潮推算は、柴木ら(2001)により報告された台風7010号による高潮の再現と同様に、wave setupを考慮した高潮推算モデルを適用する。以下に、モデルの概要を記述する。

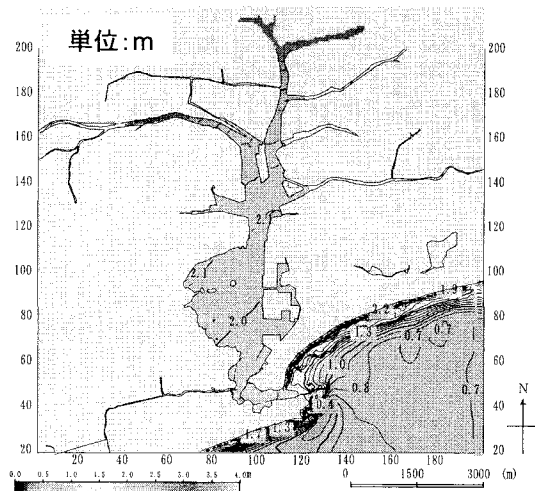
高潮の発達過程において、気圧低下、海上風による吹き寄せ、密度成層による高潮増幅、wave setupを考慮する。このモデルは、3層に層分割した連続式と運動方程式を基礎式とし、運動方程式は気圧・水位・密度の3成分の水平勾配を含む圧力勾配項と radiation 応力発散項を考慮する。Radiation 応力は、波の発達・減衰・変形を同時に考慮した浅海波浪推算により、時間変化する波浪場から計算する。碎波条件は、合田(1970)の碎波限界波高式を波高上限値として用いる。3層の radiation 応力は、Longuet-Higgins・Stewart(1964)の鉛直分布を層別に積分して求める。高潮推算は、台風の通過経路を含む広域について行い、外洋域は最大32.4 km 格子で、高知港周辺の領域は50 m 格子で地形近似を行う。格子間隔の異なる複数の領域は、水位と流量を接続して同時計算を行う。

(2) 高潮再現性の検証

図-6は、台風7010号と6118号来襲時に発生した最大潮位偏差の平面分布の推定結果である。台風7010号時は、沖側の潮位偏差が約0.7 mで、港口部の海岸において2.0 m以上の急激な水位上昇が確認できる。これに伴い、浦戸湾内の潮位偏差も約2.0 mまで上昇する。一方、台風6118号時は、沖側の潮位偏差が約1.0 mで、港口の海

岸で生じる水位上昇は小さいため、浦戸湾内の潮位偏差も約1.0 m程度となる。図-7は、台風7010号、6118号と5915号来襲時の高知における観測潮位偏差と推算値の時系列の比較を表す。柴木ら(2001)により、台風7010号時の潮位偏差のうち、wave setupによる水位上昇は1.0 m程度になることが確認されている。一方、台風5915号と6118号来襲時の高潮推算から求められた潮位偏差の時系列を見ると、wave setupの効果を考慮しても、観測値を良く再現する。前述した最大潮位偏差の平面分布から判断して、海岸部の wave setupによる水位上昇は見られるものの、台風7010号時に匹敵する量は生じていない。

台風7010号の最大潮位偏差



台風6118号の最大潮位偏差

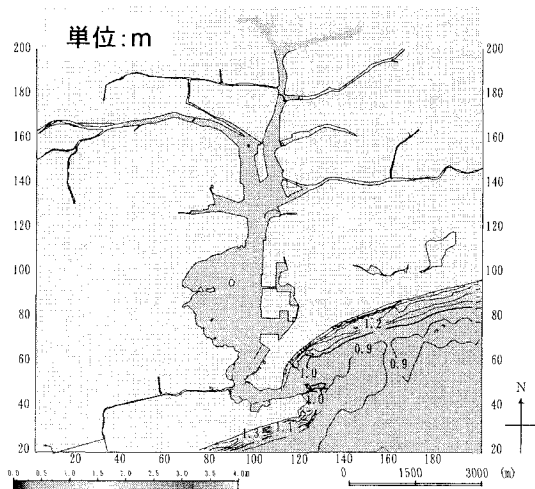


図-6 台風7010号と6118号来襲時に推定された高知港の最大潮位偏差の平面分布

5. 台風7010号による高潮の特異性の考察

高潮経験式から推定された台風7010号時の気圧・風・波浪の効果による潮位偏差成分の時系列は、最大値の発生時刻に3成分とも正となり、波浪効果の成分の寄与が最も大きい。一方、台風6118号時は、陸風に伴う負の偏差と波浪の効果による正の偏差が相殺し、潮位偏差の増大が抑制される傾向であった。また、台風6118号と5915号来襲時の高潮推算結果によれば、wave setupの効果を考慮しても観測値と同程度の偏差しか推算されなかった。特に、高知の気圧低下量は、台風6118号が7010号よりも30 hPa程度大きい。しかし、発生した最大潮位偏差は1.0 m以上低かった。

この要因は、台風6118号が高知の東側を通過し、高知周辺は台風の危険半円に位置しなかったため、台風最接近時に陸風が吹き、風による吹き寄せと風波の発達が抑制されたことが挙げられる。それに対し、台風7010号は、高知の西側を70 km程度（台風半径と同程度）離れて北上するという台風経路に関する3条件を兼ね備えたため、高知は台風の危険半円に位置し、南系の強風（海風）が継続した。これに伴い、風による吹き寄せと風波の発達が同時に生じ、顕著な高潮が発生した。表-1に示した土佐湾の来襲台風のうち、台風経路が高知の西側で、台風半径と同程度離れ、北上するという3条件を兼ね備えた台風は7010号以外にない。これが、台風7010号による高潮の特異性の要因と考えられる。

6. おわりに

本研究は、土佐湾で発生した台風7010号による異常な高潮の発生特性を、他の台風による高潮と比較することにより明らかにした。主要な成果を以下にまとめる。

- ①波の効果を組み込んだ高潮経験式の係数は、 $a = 1.08$, $b = 0.12$, $c = 8.11$ となり、理論的に妥当な値となった。
- ②台風7010号時の高潮経験式の解析によれば、最大偏差発生時に気圧・風・波浪の3成分とも正となった。一方、台風6118号時は、陸風による負の偏差と波浪による正の偏差が相殺し、偏差の増大が抑制された。
- ③Wave setupの効果を考慮した高潮推算を行い、台風6118号、5915号時の潮位偏差の観測値を再現した。
- ④台風7010号は、高知の西側を、70 km程度（台風半径と同程度）離れ、北上するという台風経路に関する3条件を兼ね備えた台風であり、高知で海側からの強風が継続した。これにより、吹き寄せと風波の発達が同時に生じ、顕著な高潮が発生した。
- ⑤土佐湾の来襲台風のうち、3条件を兼ね備えた経路の台風は7010号以外にない。これが、台風7010号による高潮の特異性の要因と考えられる。

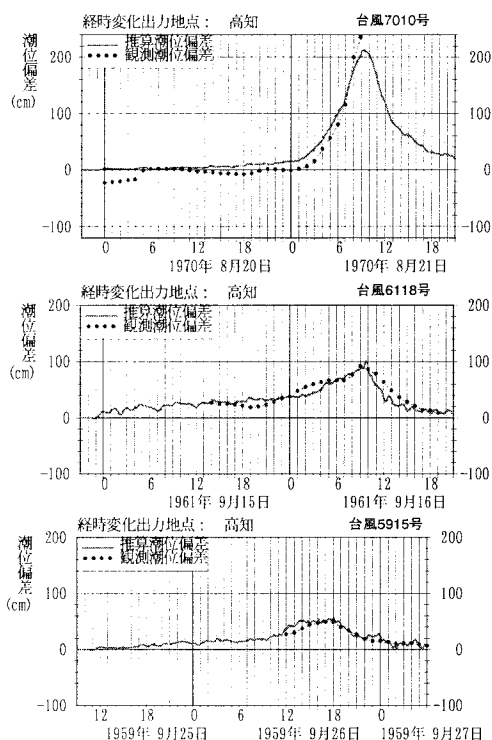


図-7 台風7010号・6118号・5915号来襲時の高知における潮位偏差の推算値と観測値の時系列による比較

謝辞：本研究のテーマ選定は、横浜国立大学名誉教授合田良実博士からの御助言によるものである。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 磯崎一郎(1970)：舞阪の高潮，沿岸海洋研究ノート，第8巻，第2号，pp. 40-47。
 気象庁(1999)：潮位表 平成12年。
 合田良実(1970)：砕波指標の整理について，土木学会論文報告集，第180号，pp. 39-49。
 高知県河川課(1973)：高知県の高潮事業について。
 港湾技術研究所(1983-1991)：沿岸波浪観測年報(1981-1989)。
 後藤智明・柴木秀之(1993)：陸上地形の影響を考慮した海上風推算，港湾技術研究所報告，第32号，第3号，pp. 65-97。
 柴木秀之・加藤史訓・山田浩次(2001)：密度成層と wave setup を考慮した土佐湾異常高潮の推算，海岸工学論文集，第48巻，pp. 286-290。
 高橋吉弘・田辺勇人・柴木秀之・岩瀬浩之(2004)：土佐湾の異常な高潮に対する防波堤の高潮低減効果，海岸工学論文集，第51巻，pp. 231-235。
 橋本典明・鈴木勝之・永井紀彦(2005)：2004年に発生した台風に伴う高波の波浪特性，海洋開発論文集，第21巻，pp. 821-826。
 Longuet-Higgins, M.S. and Stewart, R.W.(1964)：Radiation stresses in water waves: A physical discussion with applications, *Deep-Sea Res.*, Vol.11, pp. 529-562。