

瀬戸内海における高潮の伝播・発達特性 —TY0416と TY0418の解析—

駒井克昭*・日比野忠史**・松本英雄***

実測の気象・海象データと数値解析により瀬戸内海における高潮の伝播・発達特性について検討した。東寄りの経路を通った TY0416では、豊後水道と紀伊水道から進入した高潮が同調するとともに、大潮の満潮時刻に最大潮位偏差の発生時刻が重なった備讃瀬戸周辺で被害が集中した。西寄りの経路を通った TY0418では、気圧低下による海面の吸い上げや強風による吹き寄せにより高潮が発達した山口～広島で被害が集中した。2004年夏は海水密度が約 1 kg/m^3 低かったため、高潮が増大した可能性がある。

1. はじめに

2004年には台風の相次ぐ上陸に伴って、瀬戸内海沿岸で甚大な被害が生じた。瀬戸内海では近年、平均水位の上昇傾向や異常潮位がみられている。これらの水環境の変動が台風勢力の維持、高潮の規模や伝播に無関係であるとは考えにくい。TY0416および TY0418では瀬戸内海沿岸で既往最高潮位が更新され、甚大な被害がもたらされており、瀬戸内海における高潮位の発生メカニズムを明らかにすることの重要性が増している。既往最高潮位の更新頻度の増大が懸念される近年の気象・海象下では、ハードのみによる防災は不可能であり、ソフト的な防災に努める必要性が増している。高潮による浸水区域や被害予測（ハザードマップ）によるソフト的な防御を充実し、ハードとの両面からの災害軽減を行うには、瀬戸内海の特性を考慮した高潮シミュレーションによる確度の高い予測を行うことが不可欠である。

TY0416では岡山・香川・広島県沿岸にかけて浸水や防波堤、護岸、浮桟橋等の構造物の被害が発生し、備讃瀬戸（高松、宇野）で既往最高潮位を記録した。一方、TY0418では、広島、山口県沿岸を中心に浸水ならびに構造物の被害が発生し、広島でも記録的な高潮位が観測された。両台風による高潮の被災状況は地域的に異なったことから、瀬戸内海沿岸域での最高潮位や潮位偏差の規模や発生時刻ならびに高潮位の継続時間等に及ぼす物理的要因とそのメカニズムの解明が必要である。

本論文では、TY0416および TY0418を対象として台風通過時における水位等の実測データおよび高潮の数値解析により、瀬戸内海に特有の高潮の伝播・発達機構を明らかにする。

2. 瀬戸内海における高潮の特性

(1) TY0416と TY0418の台風の特性

図-1は TY0416と TY0418の(a)経路および(b)中心気圧・最大風速・暴風半径・移動速度を示している。TY0416は周防灘上を通過したのに対し、TY0418は周防灘北西部をかすめるように通過した。TY0418はTY0416に比べて瀬戸内海に最接近したときの中心気圧が約 20 hPa 低く、最大風速が約 10 m/s 、暴風半径は約 80 km 程度大きかった。また、瀬戸内海に接近・通過する速度も約 30 km/h 速かった。

図-2は広島で最低気圧を記録した時刻における気圧深度および風速ベクトル分布を示している。気圧および風速ベクトル分布は気象官署および瀬戸内海沿岸付近のアメダスの気象データを用いて距離荷重平均により求められている。細実線は台風の中心経路、□は同時刻での台風中心位置を示している。TY0418の方が台風中心から広島までの距離が約 50 km 遠いが、瀬戸内海全域で南風が激しく、気圧深度も大きかったことから、気圧低下による海面の吸い上げと強風による吹き寄せによる高潮が大きかったことが予想される。

(2) TY0416と TY0418による高潮の特性

瀬戸内海は豊後水道と紀伊水道を通じて太平洋と連結しているため、九州に向かって南側海上から台風が接近した場合、主に豊後水道から内海奥に進む高潮の伝播がみられる。さらに、台風が日本海を東進する時に高潮の規模が増幅されると考えられる。

図-3は瀬戸内海各地における TY0416および TY0418通過時の推算天文潮位、潮位偏差、最低気圧および風速ベクトルを示している。①～⑧は図-2(b)に示された地点に対応している。

境界（豊後水道①）から内海に進入した高潮に関しては、最大の潮位偏差（＝実測潮位－天文潮位）は TY0416で約 0.8 m （潮位偏差の継続時間は約40時間）、TY0418で約 0.4 m （同、約21時間）であり、境界での

* 正 会 員 修(工) 広島大学助手 大学院工学研究化

** 正 会 員 工博 広島大学助教授 大学院工学研究化

*** 正 会 員 国土交通省中国地方整備局

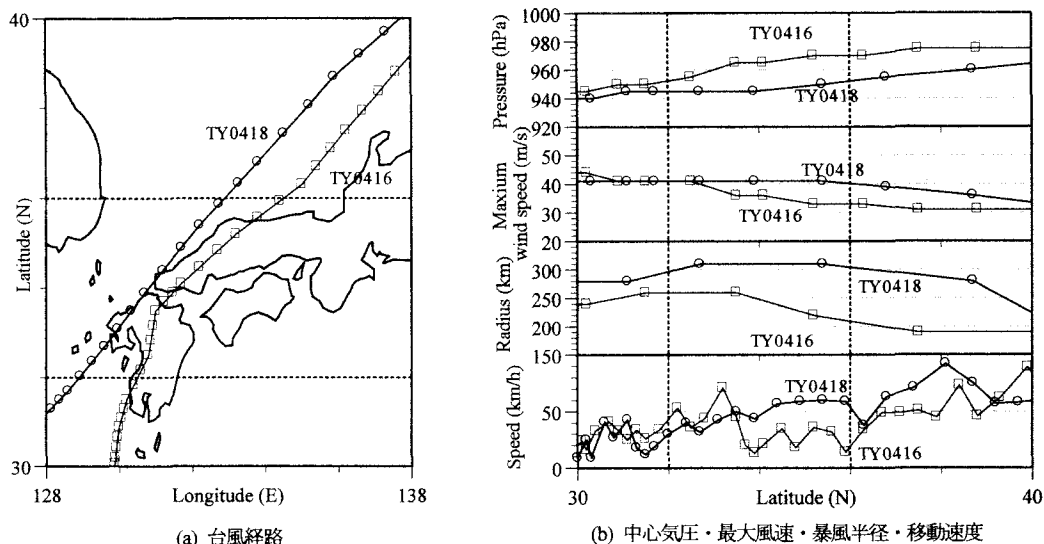


図-1 TY0416とTY0418の経路および中心気圧・最大風速・暴風半径・移動速度（記号は毎時データ。破線は瀬戸内海周辺（32°N～34°N）を示している）

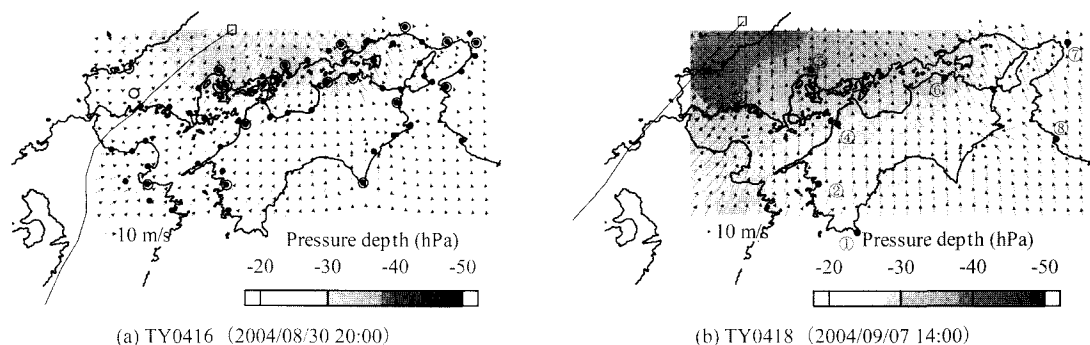


図-2 広島で最低気圧が発生した時刻における気圧深度（ $=P-P_{\infty}$ ）および風速ベクトル分布。TY0416： $P_{\infty}=1006$ hPa。TY0418： $P_{\infty}=1012$ hPa。○：気圧データ実測地点（気象官署），●：風速ベクトル実測地点（アメダス），実線：台風経路，□：台風中心位置。

高潮規模はTY0416の方が大きかった。

伊予灘④から備讃瀬戸⑥までの天文潮の伝播時間は約2時間であるが、TY0416の潮位偏差の伝播には約5時間、TY0418の潮位偏差の伝播には約3時間を要している。図-1、2によるとTY0418の方がTY0416より約2時間早く瀬戸内海周辺を通過していることから、潮位偏差の伝播速度は台風の移動速度に依存することが示唆される。

しかし、いずれの台風においても紀伊水道側に近い備讃瀬戸⑥では、最低気圧から約3時間遅れて最大潮位偏差が発生しており（図-3中の白抜き矢印）、豊後水道側に近い③～⑤より遅れて発生している。これは、備讃瀬戸では境界で発達した潮位偏差の長波伝播の寄与が大きいことやフェッチが東西方向に卓越していることで傾度風に伴う吹き寄せの効果が最大となる時間帯が異なることが一因と考えられる。

TY0416では備讃瀬戸周辺の岡山・香川～広島県にかけて高潮被害が集中した。TY0416では天文潮位は大潮期であり、備讃瀬戸⑥において潮位偏差のピーク時刻が満潮時刻に重なったため最高潮位が高くなり、既往最高潮位を記録した。TY0418は小潮期であったため、東海域においてはTY0416に比べて最高潮位が小さかった。

一方、TY0418では山口県～広島県において被害が集中した。前述したように台風の最大気圧深度や最大風速等はTY0418の方が大きく、台風中心が接近し南風が強く吹き込んだ周防灘③や広島湾⑤での高潮（潮位偏差）の発達が顕著にみられた。

(3) 台風通過時における密度場

台風のもたらす降雨に伴う海水密度の低下によって高潮の進行方向に負の圧力勾配が形成されること、あるいは内海奥で流出した河川水による海水密度の低下によって高潮の進行方向に正の圧力勾配が形成されることが水

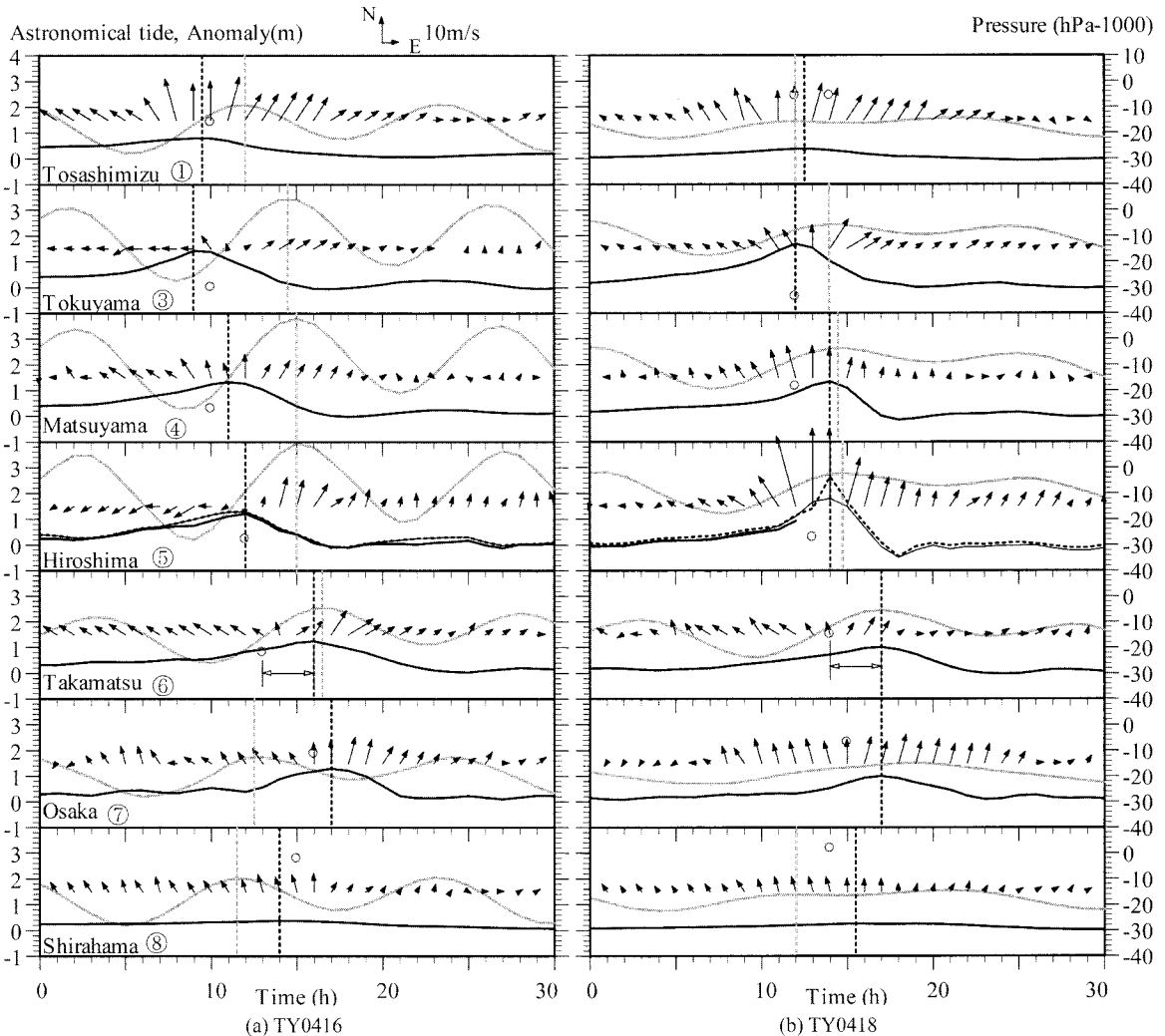


図-3 TY0416およびTY0418通過時の推算天文潮位（薄実線，CDL 基準），潮位偏差（濃実線），最低気圧（○）および風速ベクトル（矢印）．①～⑧は地点（図-2(b)参照）を示す．⑤の細実線は江波（広島市），破線は美能（広島県沖美町）．縦破線はそれぞれ推算天文潮位の満潮時刻と最大潮位偏差の時刻を示す．

位上昇を促進すると予想されるが，その規模については明らかでない．

図-4(a) (b)は2003，2004年夏期における瀬戸内海北側沿岸および周防灘南岸～四国沿岸の密度(σ_t)の鉛直プロファイルの分布を示している（瀬戸内海総合水質調査（国交省中国地方整備局）による）．密度データは水深1m毎に測定された水温，塩分から海水状態方程式を用いて求められており，毎年8月下旬～9月初旬に測定されている．瀬戸内海北側沿岸では周防灘から安芸灘にかけて，2003年には σ_t が23～20 kg/m³程度であったのが，2004年には22～20 kg/m³となり約1 kg/m³の密度低下がみられることから，圧力勾配に伴う高潮の上昇が予想される．また，周防灘南岸～四国沿岸においても

周防灘から安芸灘にかけて密度低下がみられている．

3. 瀬戸内海における高潮の伝播・発達の数値解析

豊後水道および紀伊水道南端を境界とした瀬戸内海全域を対象として高潮の数値解析を行い，境界からの潮位偏差，気圧低下・風による海面上昇ならびに密度変化による高潮の伝播・発達について検討した．表-1は計算条件を示す．

豊後・紀伊の両水道から進入した高潮の瀬戸内海での伝播特性はCASE1とCASE2（境界において潮位偏差のみを与えた場合），気圧・風による高潮の発達はCASE2（気圧・風の効果が無い場合）とCASE3（気

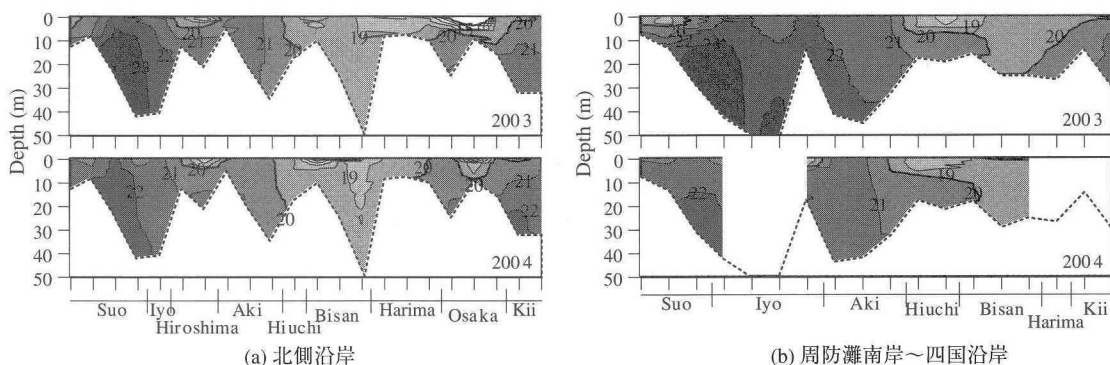


図-4 瀬戸内海沿岸における密度 (σ_T) の鉛直プロファイル (2003, 2004年夏期, 破線は最深部を示す, 単位 kg/m^3)

表-1 計算条件

	潮位偏差	気圧・風	密度分布
CASE1	豊後のみ	無	無
CASE2	豊後・紀伊	無	無
CASE3	豊後・紀伊	有	無
CASE4	無	無	有

圧・風の効果がある場合)の比較により明らかにされる。密度低下による影響は, CASE4 (密度分布を考慮した場合)の結果より明らかにされる。

(1) 高潮の数値解析モデル

数値モデルでは非線形長波方程式と連続式を解くことで流れ場を求める。CASE1では豊後水道南端で, CASE2では, 豊後・紀伊の両水道南端での実測潮位偏差 (= 実測潮位 - 推算天文潮位) が与えられる。CASE3では, 図-2 に示された沿岸付近のアメダス (58地点) の風向・風速, 気象官署 (17地点) の海面気圧および台風中心気圧の毎時値を空間的に距離荷重平均したデータを海面摩擦応力および圧力境界条件として与えられる。海面摩擦係数は本多・光易 (1980) による実験式を用いている (ここでは, 波浪による吹送流の強化は考慮せず, 計算潮位が実測値に近くなるように海面摩擦係数が調整されている)。CASE4では, 圧力項に実測密度分布 (前述の瀬戸内海総合水質調査による) を与えることで密度勾配による流れの効果が考慮されている (駒井ら, 2002)。

(2) 外海から内海奥への高潮の伝播

TY0418に比べてTY0416は東寄りの経路をとったため, 豊後水道および紀伊水道から進入する潮位偏差の規模が大きかった。そこで, 豊後水道から進入する高潮の伝播特性ならびに両水道から高潮が進入した場合の伝播・発達特性について検討を行う。

a) 豊後水道から進入した潮位偏差の伝播特性

図-5(a)は豊後水道からの高潮の進入のみを考慮した

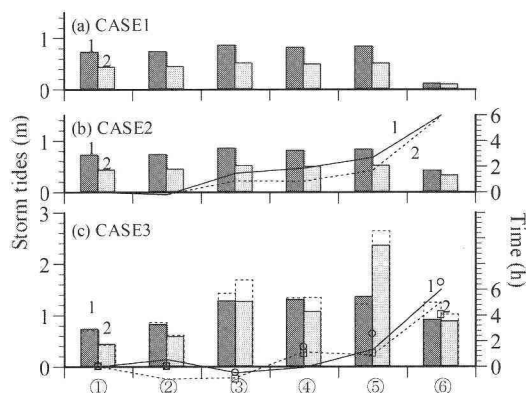


図-5 (a)CASE1, (b)CASE2, (c)CASE3による最大潮位偏差 $H_{\max}$ (棒グラフ)とその発生時刻 (折れ線グラフ)。①～⑥は地点 (図-2(b)参照)を示す。1: TY0416, 2: TY0418。 (c)の破線棒グラフおよび○, □は実測。

CASE1による最大潮位偏差 $H_{\max}$ を示している。気圧や風, 潮流の効果を無視すると, TY0416とTY0418ともに内海で現れる潮位偏差は境界から進入した潮位偏差の約1.3～1.4倍 (周防灘)に発達し, 狭窄部を通過することによって安芸灘で約0.9倍, 備讃瀬戸で約0.2倍に減衰しながら伝播する。

b) 両水道から進入した潮位偏差の伝播特性

高潮は台風経路に近い豊後水道から進入するとともに, 太平洋沿岸を伝播して紀伊水道側からも進入する。図-5(b)は紀伊水道からの高潮進入を考慮したCASE2の $H_{\max}$ とその発生時刻を示している (ここでは豊後水道①での $H_{\max}$ 発生時刻を基準としている)。豊後水道から進入した潮位偏差と紀伊水道側からの潮位偏差が同調することで備讃瀬戸⑥での高潮を上昇させていることがわかる。TY0416では東よりの経路を通過し, 太平洋側から紀伊水道に進入した潮位偏差が約10 cm 大きかったため, 備讃瀬戸での高潮が比較的発達したと考えられる。

(3) 気圧・風による高潮の発達

図-5(c)は両水道からの高潮の進入とともに、気圧低下・風を考慮したCASE3による最大潮位偏差 $H_{\max}$ を示している。周防灘③と広島湾⑤における台風による気圧低下・風による海面の吸上げと吹き寄せはTY0416に比べてTY0418の方が著しい。TY0418では九州西側海上から瀬戸内海に接近したため、豊後水道から瀬戸内海に進入した高潮は規模が小さいが、台風の勢力が衰えずに日本海側を東進したことで西海域での高潮が著しく発達したといえ、実測の $H_{\max}$ にもその傾向は現れている。

CASE2と3の $H_{\max}$ の発生時刻を比較すると、両台風共に気圧と風の効果によって発生が早まっている。特に、通過速度の速いTY0418の場合には豊後水道①を除く全域で最大潮位偏差の発生が約1時間以上早まっている。これらのことから、瀬戸内海での最大潮位偏差とその発生時刻の予測には、境界からの高潮の進入規模と長波伝播による到達、ならびに台風勢力や接近・移動速度などに依存する強制波の進行の重ねあわせが重要といえる。

(4) 密度低下による高潮の上昇

台風通過時には降雨や河川水の流出による淡水の供給が海水密度の低下を引き起こすため、水平方向に密度勾配が生じ、これに起因する圧力勾配により、平均潮位の上昇が予想される。

図-6は河川流量が少なかった期間(1982~1988年)と河川流量が多かった期間(1989~1993年)の平均密度を用いた計算CASE4による密度変化量と水位上昇量(9月期平均値の差)を示している。計算結果より、密度低下が顕著であった(約 -1 kg/m^3)伊予灘、広島湾、安芸灘にかけて水位が最大約4 cm上昇しており、淡水の流入や温暖化に伴う密度低下は高潮位を上昇すると予想される。

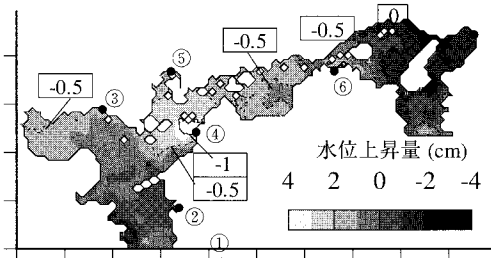


図-6 CASE4による密度変化量(破線、□は変化量を示す、 kg/m^3)と水位上昇量

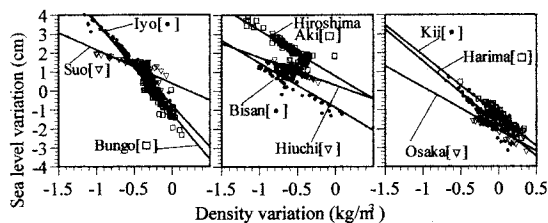


図-7 CASE4による海域別の密度変化量と水位上昇量の関係(実線は海域別の近似直線)

図-7は図-6に示された密度変化量と水位上昇量の海域別の関係を示している。密度変化量に対する水位上昇量は豊後水道、伊予灘、紀伊水道で $4\sim5\text{ cm}/(\text{kg/m}^3)$ 程度である。周防灘、広島湾、安芸灘～備讃瀬戸では $-1\sim3\text{ cm}/(\text{kg/m}^3)$ 程度と比較的小さいが、全体的に水位が上昇しており、両水道での水位上昇の影響を受けていることが考えられる。

4. おわりに

- 九州西側海上から接近した台風によって豊後水道側で発生した高潮は、周防灘で発達し、安芸灘～備讃瀬戸を通過するにともなって減衰しながら瀬戸内海東海域へ伝播する。内海における潮位偏差の伝播速度は台風の移動速度に依存する。備讃瀬戸では気圧低下から約3時間遅れて潮位偏差が最大となる特徴がみられ、紀伊水道側から進入した高潮と同調することで潮位が高まる。
- TY0416は台風の経路が東寄りであり、両水道から進入した潮位偏差が大きく、長波伝播が同調する備讃瀬戸で満潮時刻に重なったことが主因となり被害が集中した。TY0418では、台風の経路が西寄りで移動が速く、気圧低下による海面の吸い上げと強風による吹き寄せが顕著な西側海域において被害が集中した。
- 2004年には周防灘から備讃瀬戸にかけて前年に比べて約 1 kg/m^3 の密度低下がみられた。数値計算より、降雨や河川水の流出等にもなう密度低下による高潮の上昇量は数 $\text{cm}/(\text{kg/m}^3)$ のオーダーで予想された。

参考文献

- 駒井克昭・日比野忠史・清水勝義(2002): 瀬戸内海における水位の季節変動量の推定, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 381-385.
 本多忠夫・光易恒(1980): 水面に及ぼす風的作用に関する実験的研究, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 90-93.