

台風7916号による大阪湾・紀伊水道の高潮

土屋義人・中村重久・山下隆男・岡 扶樹

CHARACTERISTICS OF THE STORM SURGE DUE TO TYPHOON 7916 IN OSAKA BAY THROUGH THE KII STRAIT

By *Yoshito TSUCHIYA, Shigehisa NAKAMURA,*
Takao YAMASHITA and Tomoki OKA

Synopsis

Characteristics of the storm surge due to Typhoon 7916 are considered by the observed data, and simulated by two numerical models. Disasters associated with the typhoon are also discussed. The first amplitude of resurgence of the storm surge which was observed in the inner part of Osaka Bay is the same order of magnitude as that of the maximum anomaly of meteorological tides. It is postulated from the data of tides and winds that this phenomenon depends on the strong wind field accompanied with Typhoon 7916 in its southern area existing a dip in the pressure field.

The results of numerical simulations by the 2 level model agree with the observed data especially in magnitude of the peak and the first amplitude of resurgences of the storm surge, not in their phase.

1. 緒 言

昭和54年9月30日19時頃に、高知県室戸岬をかすめて北上した台風7916号は、同日20時頃友ヶ島付近を通過して大阪湾の東岸に沿い、23時に大阪市南部に上陸した。この台風は、発達期から大阪湾に至るまで、

Table 1 Observatories of tides and waves.

St. No.	Location	St. No.	Location
1	Kamikawaguchi	15	Osaka
2	Off Kochi	16	Sakai
3	Kochi (Katsurahama)	17	Kishiwada
4	Murotomisaki	18	Han-nan
5	Sakihama	19	M. T.
6	Kannoura	20	Tannowa
7	Gamoudamisaki	21	Fuke
8	Anan	22	Wakayama
9	Komatsujima	23	Gobo
10	Muya coast	24	Shirahama
11	Sumoto	25	Susami
12	Maiko	26	Kushimoto (Shionomisaki)
13	Kobe	27	Uragami
14	Amagasaki	28	C

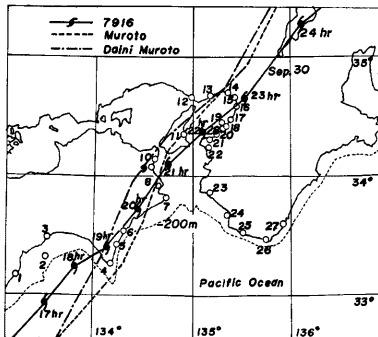


Fig. 1 Course of Typhoon 7916 and observatories of tides and waves.

Fig. 1 に示すように室戸台風および第2室戸台風と類似の経路を通り、最盛期には中心の気圧 920mb にまで達した非常に強い台風であったが、高潮の最大偏差¹⁾は大阪において 139cmで、それによる被害は予想外に軽微であった。そのため、紀伊水道および大阪湾沿岸の検潮記録の欠測は少く、しかも大阪湾東岸に沿う希れな経路を通ったため、高潮の特性にも従来の観測記録に例のないような特異な resurgence が現われた。

一般に、湾内の高潮については、便宜上つぎの3つの効果に分けて考えることができる²⁾。すなわち、外洋から進入する水位変化に加えて、湾内における気圧低下による吸い上げ、および強風による吹き寄せの効果である。外洋からの影響は、台風接近前の水位の上昇や副振動として湾内の高潮に現われるであろう。また、吹き寄せについては、大阪湾のように複雑な地形の場合には、風の場の時空間的な変化を考慮すると、現在の知見でどこまでその機構が明らかになるであろうか。また、台風通過直後の顕著な水位低下は、この吹き寄せ効果と関係があるであろうか。このような疑問点の究明には、信頼性の高い検潮記録を集積、解析して、数値モデルによる追算などを試みて、その力学的機構を考察することが必要であろう。

このような観点から、まず外洋に面した紀伊水道の潮位記録を用いて高潮の特性を把握し、つぎに高潮が大阪湾に進入した場合に現われる変形と吹き寄せの効果とについて考察し、また大阪湾沿岸の潮位記録を解析して³⁾、湾水振動と高潮との関連を見出す。さらに、最近著者⁴⁾が提案した2レベル高潮数値モデルを用いて、本台風による高潮の吹き寄せ効果を考察した。

2. 災害の概要

台風7916号による海岸災害は、既往の類似した台風と比較すると比較的軽微なものであったが、海上の強風や高波浪によると考えられるものとして、次のような被害が報告されている。

2.1 船舶の被害

田辺海上保安部の調べによれば、パナマの貨物船が和歌山南港沖で沈没した。この船はチャイナ・オーシャン・ SHIPPING・カンパニー (香港) 所属の貨物船「紫金山」(2,438総t)で、9月30日午後9時ごろ平均風速 20m/secの強い南西風のため、いかりを引きずったまま約5.5km漂流して、和歌山市西浜、和歌山南港岸壁沖合約500mの防波堤先端に船尾から衝突、浸水し、10月1日午前0時ごろ沈没し始めた (昭和54年10月1日付毎日新聞より)。この他にも、本台風による船舶の被害状況は、各府県警察本部で調べられ、大阪管区気象台、神戸海洋気象台のほか関連地域の地方気象台の異常気象速報にも表示されている。これらを総括すると、高知県における被害が多く、沈没2隻、破損23隻で、その他の府県では、前述した和歌山県の

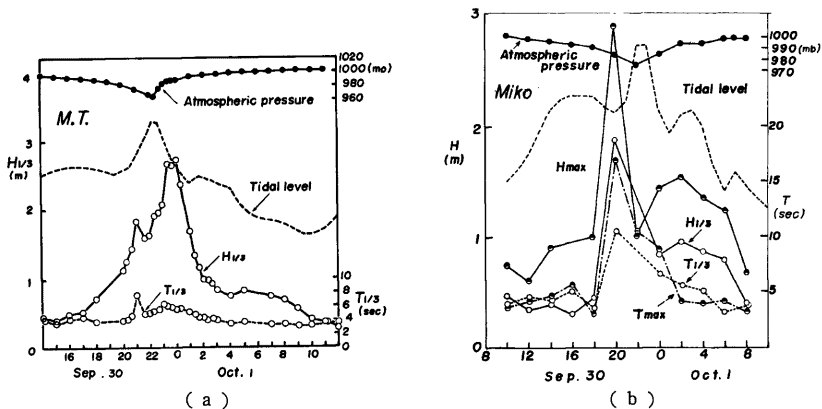


Fig. 2 Time changes of characteristics of significant waves, tidal levels and atmospheric pressures.

1隻を除けば、ろかいなどによる舟の被害だけであった。

2.2 高波浪による被害

大阪湾内で顕著な高潮を伴った、室戸、ジェーンおよび第2室戸台風と比較すると、本台風の高波浪による被害は比較的少なく、和歌山県の白浜町でみやげ物店が防波堤を越えた高波浪によって、一階のシャッターと雨戸を打ち破られ、2人が重軽傷を負った被害だけであった。このことは、台風の経路によるところが大きく、大阪湾内では、湾の東側を通過したため、その波浪特性として Fig.2 に示すように、高潮位の発生と高波浪の来襲との時間差が約 2hr であったためであるともいえよう。

3. 高潮の特性

3.1 各地の潮位記録

台風7916号に伴う大阪湾および紀伊水道沿岸の検潮記録を Fig.3 に示した。その特徴によって分類する

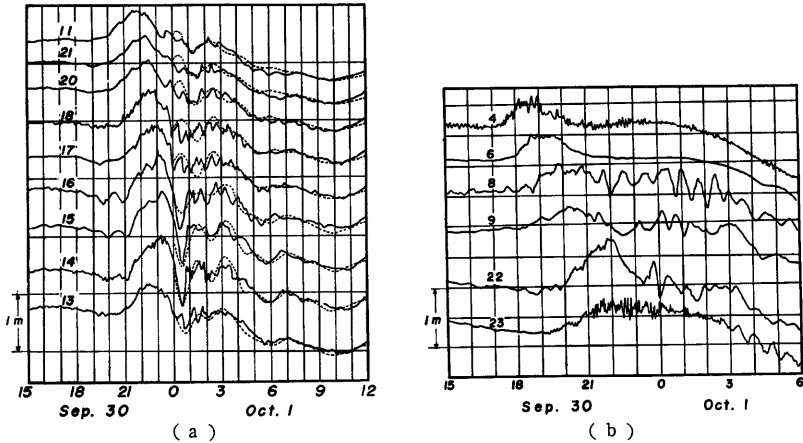


Fig. 3 Tidal records observed in Osaka Bay through Kii Strait.

と、次のようになる。なお、Fig.1 および Table 1 に各検潮所の名とその位置を示した。

(1) 大阪湾内

A類では、最大潮位の前後で対称であり、周期が約 40~50min の明確な resurgence が現われている。洲本(11)、淡輪(20)および深日(21)である。B類では、最大潮位の約 2hr 前に潮位は一旦下降し、最大潮位直後に急激な下降がみられる。さらに、これらの記録では、いわゆる storm surge とよばれる時間帯において、その下降過程に比べて上昇の過程にみられるゆるやかな非対称性が特徴であり、尼崎(14)、大阪(15)および堺(16)が対象とされる。C類では、storm surge の時間帯で、A類とB類の中間的特徴を示し、resurgence が複雑なもので、神戸(13)、岸和田(17)および阪南(18)の場合である。

(2) 紀伊水道および太平洋沿岸

D類は、最大潮位の前後での水位の時間的変化がゆるやかで、resurgence はほとんどみられない場合で、室戸岬(4)、甲浦(6)である。E類は、最大潮位に明瞭なピークがなく、周期約 40min の振幅の大きな resurgence が長時間続くもので、小松島(9)、白浜(23)の場合である。F類では、resurgence はD類と同様の特徴をもつが、最大潮位の出現が明瞭に判かるもので、和歌山(22)のような場合である。

以上のように、各地の潮位記録を分類、整理してみると、台風の経路および地域によってそれらの特色が

現われていることがよくわかる。すなわち、大阪湾内では、台風経路付近の湾奥および湾口(友ヶ島水道)で、それぞれB類およびA類に分類され、経路をはさんで両岸にC類が位置している。また、紀伊水道においても、台風経路に対して両岸にE類が、太平洋に面する位置にD類がある。

3.2 高潮の伝播特性

ここでは、大阪湾、紀伊水道だけでなく、土佐湾を含む外洋からの高潮の伝播特性を調べ、3.1で分類された潮位記録群の特性について伝播機構を考察しよう。Fig.4には、台風の進路を9月30日17hrと24hr

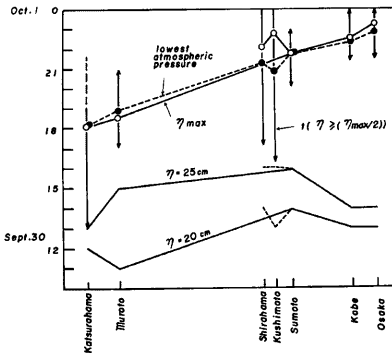


Fig. 4 Propagation diagram storm surge and center of typhoon.

の中心位置とて結ぶ直線と仮定して、これから各検潮所までの距離を横軸に、各事象の発生時刻を縦軸にとった時空間平面で、高潮および台風中心の伝播特性を示す。図中、 η_{max} は最大偏差、 $\eta = 25\text{cm}$ および $\eta = 20\text{cm}$ は、それぞれ偏差が25cmおよび20cmに達した点、黒円を結んだ破線は最低気圧なる事象の発生を示し、矢印は最大偏差の1/2が生じた時間帯を示している。この図から、高潮の伝播特性を考察すると、つぎのように要約される。(i)最大偏差と最低気圧の伝播がほぼ一致しているが、台風経路からの距離が短いにもかかわらず、湾奥の大阪では両者にずれが生じている。これは、吹き寄せの影響によるものと考えられ、4.で示す数値シミュレーションの結果において、さらに考察する。(ii)偏差が20cmまたは25cmを越える事象は、太平洋沿岸から大阪湾内にかけてはほぼ同

時に生じており、大阪湾内では湾奥の方に早く現われている。この事象の示す意味は、いわゆる forerunner 時によくみられる水位上昇の伝播特性を知ることであるが、実際には湾内での吹き寄せの効果も混入していると考えられるために、湾奥の大阪での出現時刻が洲本より早くなっていると推察される。しかしながら、湾内の値を除いた場合でも、外洋からの水位の伝播が認められることは興味深い現象である。

Fig.5は、A類の洲本(11)、B類の大阪(15)、C類の神戸(13)、D類の串本(26)およびF類の和歌山(22)の毎正時の偏差、風向、平均風速および1013mbからの気圧低下の水柱換算値 η を示したものである。これらの図から、高潮の発生および伝播機構を考察し、3.1で示した各分類ごとの特徴の説明を試みよう。まず、洲本の場合、最大偏差の現われる4~5hr前からNE方向の強風が吹き、またこの時刻には、大阪および神戸においても同一方向の強風が吹いたので、この時間帯では大阪湾内の海水は大阪から洲本方向へ吹き寄せられていたと推測される。このために、B類の特徴のひとつである最大潮位出現の約2hr前に、一旦水位が下降したものと考えられる。また、大阪の9月30日20時の偏差は吸い上げ相当偏差 η より10cm程度小さいことは、この推測を裏付けるものであると考えられる。

次に、B類のもうひとつの特徴である最大潮位直後の水位の急激な下降について考えてみよう。中島ら⁵⁾により、本台風の南後方にはいわゆる dip が生じており、このために、台風通過後に風向が急変する強風域が存在していたことが報告されている。たとえば、大阪における気象記録(参考文献5)のFig.14参照)からは、10月1日の午前0時30分に dip の中心が通過し、風向はW→N→Wへと急変し、その後はW, SWで10~20m/secの強風が吹送している。また、Fig.6は9月30日23時から10月1日2時までの毎正時の海上における風の分布を示しているが、この図から10月1日0時と1時の間で湾奥での風向がNEからWまたはWSW方向へ変化していることがわかる。なお、この図は垂水、神戸ポートタワー、尼崎、大阪南港、C局、MT局、淡輪、和歌山、徳島、洲本および姫路の計11点の風の記録を基に、山口⁶⁾にならってシンプレックス三角形要素に分割し、形状関数により内そうしたものである。この場合、地上風の風速は、

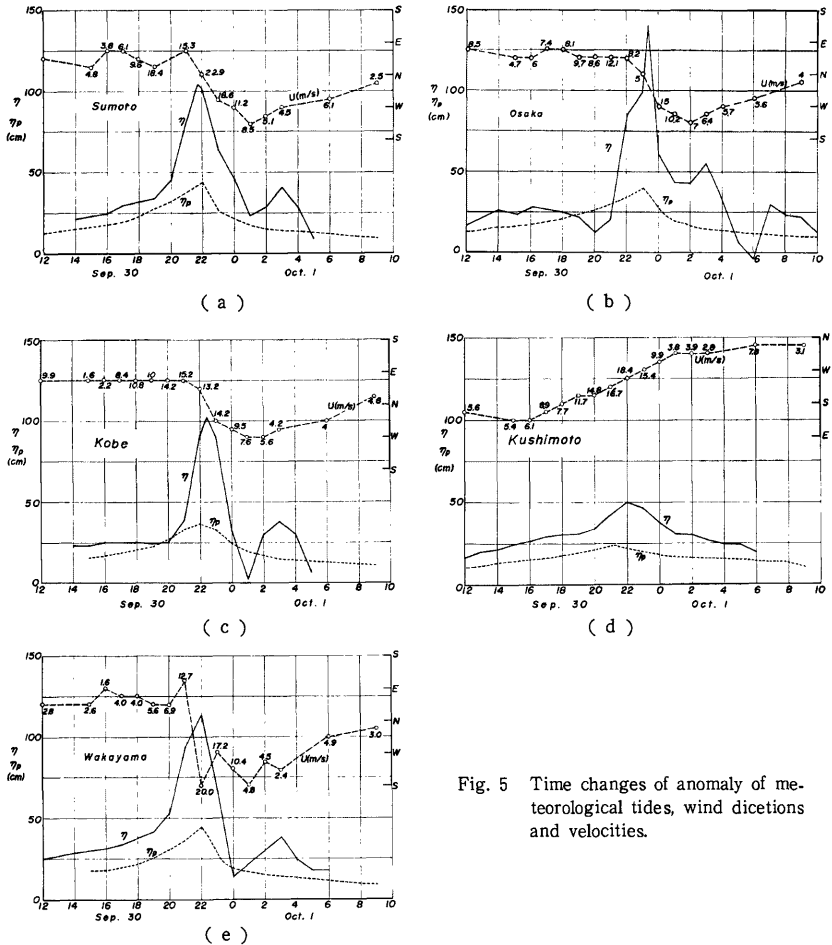


Fig. 5 Time changes of anomaly of meteorological tides, wind directions and velocities.

Fig.1 および Table 1 に示したMT局およびC局の風速の関係から、補正係数 (1.41) を用いて海上風のそれに変換した。これに Fig.5 に示した記録とを考慮して、次のように推察される。台風は大阪湾に侵入すると、dip の領域に生じた強風域のため、泉南海岸沿いに生じた強い吹送流をひきずるように、長波の伝播速度に近いスピードで進行したため、湾奥で台風の上陸域に当る大阪、堺および尼崎の記録にみられるように、台風上陸数十分後に、堺→大阪→尼崎の順でピークが出現したと考えられる。さらに大阪では9月30日23時から24時にかけては、dip の影響で W から SW の方向の強風 (平均風速で 20m/sec 程度) が吹送していたことから、この風によって極めて強い吹送流が短時間 (約1時間) で生成され、湾奥からの吹き戻しが存在していたと考えられる。ただし、風域場が急変していたため、この領域はさほど広くはなかったが、B類にみられる最大偏差直後の急激な水位の低下を生じさせるには十分な強風であったと考えられる。また、このような比較的局所的ではあるが、強い影響をもつ風域場は、高潮の数値予知モデルにどのように

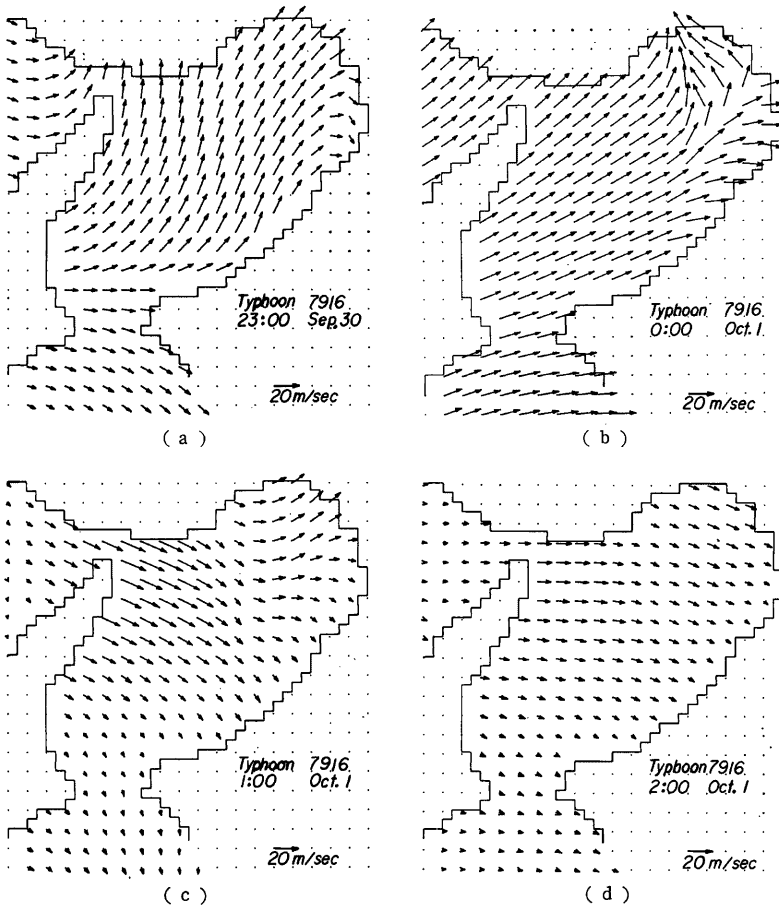


Fig. 6 Plane distribution of winds interpolated by shape function.

導入すればよいのか。さらには、吹送流の時空間的变化の激しい高潮をシミュレートするためには、どのようなモデルが適しているのかを研究することは、極めて興味深く、高潮に関する研究においては、貴重な資料をもたらした台風であったといえる。そこで、4.において、数値モデルによる若干の追算を試みて、これらの疑問点を考察することにした。

一方、A類およびC類については、いわゆる resurgence に着目して考察する。Fig. 3 に示したように、神戸とその対岸の岸和田、阪南の潮位記録には、両者の resurgence の位相の反転が明瞭に現われている。これは、前述したように、dip のために生じた W→N→W へと変化する強風域により、いわゆる短軸方向の副振動が引き起こされたものと考えてよからう。また、湾口付近に位置するC類の場合にも、A類と同様な傾向が現われているが、その振幅は小さく、特に洲本では減衰が著しい。

さらに、外洋に面した串本(Fig. 5)の偏差では、気圧低下による吸い上げ相当偏差 η_f よりも、forerunner

および resurgence 部で10~15cmの上昇が存在している。この上昇を吹き寄せと考えると、台風通過前後で風向が反転していることに矛盾する。これは何に起因しているのかは説明できないが、台風に伴う黒潮流軸変動などいわゆる外洋条件に起因するスケールの大きな現象によるものかも知れない。もしそうであれば、この影響は何らかの形で大阪湾内へも及んでいることも十分考えられ、その発生機構を調べていくべきであろう。一方、外洋に接続し、大阪湾および播磨灘へ連絡する海域としての紀伊水道における流況は単純ではなく、Fig. 3 に示すように、振幅が大きく減衰の極めて小さい resurgence が長時間現われていることは驚くべき現象である。Fig. 3 の記録からは、これが自由振動のみであるとは考えにくく¹⁾、外洋、友ヶ島水道、鳴門海峡からの流出入による強制振動であると考えらるべきであろう。もしこの仮説が正しいとすれば、いわゆる大阪湾に対する広領域を対象とした高潮の数値シミュレーションにおいては、これを考慮する必要があろう。すなわち、開境界条件をどこで与えるかによって、計算結果もかなり相違すると考えられ、この現象の機構の究明も重要な研究課題といえる。

4. 高潮数値モデルによる大阪湾内の高潮の追算

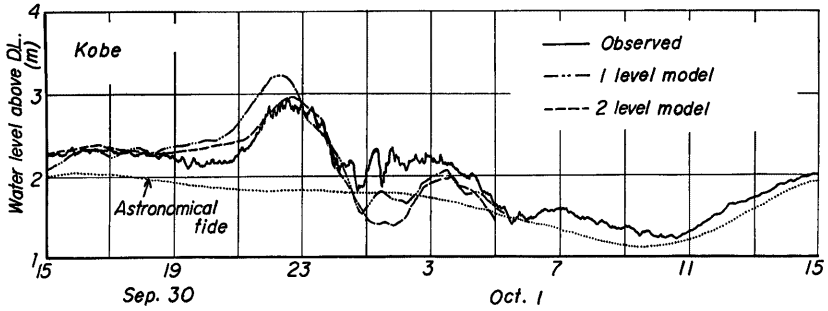
以上、3.において大阪湾および紀伊水道の高潮の特性を考察して、数値モデルによるシミュレーションの際に問題となる点を随時述べてきた。ここでは、これらのうち吹送流の分布を考慮した数値モデルに着目して、著者ら⁴⁾により提案された2レベル高潮数値モデルを大阪湾の狭領域に適用し、単層モデル(1レベルモデル)による結果との比較において本台風による高潮の追算を行った。

ここで用いた2レベルモデルは、吹送流の流向が風向に追従すると考えられる厚さで上位層を設定し、その他を下位層としたモデルであり、1レベルモデルは、従来用いられてきた単層モデルである。外力は藤田の式によるモデル台風を用いているが、本台風のように dip が存在し風域場が複雑な場合には、例えば実測風を内そうするような方法で与えられることが考えられよう。なお、Table 2 には計算条件を示す。Table 2 において、 Dt , Ds はそれぞれ時、空間のきざみ幅、 g ; 重力の加速度、 γ^2 ; 海底および海面における抵抗係数、 ρ_a , ρ_w ; 空気および海水の密度、 f ; Coriolis の係数、 C_1 , C_2 ; 移動風および傾度風の係数、 r_0 ; 台風規模を示す定数、 k ; 海底摩擦応力に及ぼす海面摩擦応力の寄与率、 ν_H , ν_V ; 水平および鉛直方向の渦動粘性係数、 h_i ; 上位層厚さであり、2レベルモデルの場合の境界面に作用するせん断応力は、上、下位層の平均流速の1次式で示し、その抵抗係数は等流状態で全流量がゼロの場合の流速分布から $C_f=1.5$ として与えることとした。

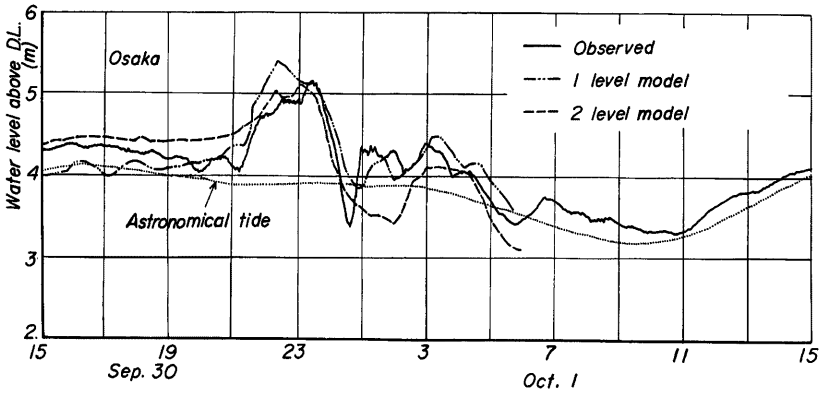
Table 2 Conditions of numerical computations.

$Ds=1500$ m	$C_1=0.6$
$Dt=20$ sec	$C_2=0.6$
$g=980$ m/sec ²	$r_0=60$ km
$\rho_a=0.00129$ g/cm ³	$k=0.25$
$\rho_w=1.03$ g/cm ³	$\nu_H=46.4$ m ² /sec
$f=-8.26 \times 10^{-5}$ 1/sec	$\nu_V=0.02$ m ² /sec
$\gamma^2=0.0026$	$h_i=8$ m

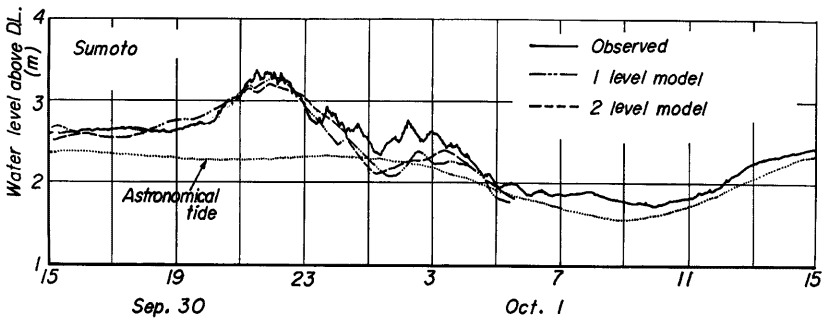
Fig. 7 は計算結果と実測潮位との比較の1例で、図中実線は実測潮位、破線は2レベルモデルの計算結果、2点鎖線は1レベルモデルの結果および点線は気象庁発表の推算天文潮位である。なお、縦軸は D. L. 上の値を示す。図から明らかなように、2レベルモデルの結果は、最大潮位付近では、ピークの急激な立ち上り、大きさおよび出現時刻まで良好な一致を示しているが、1レベルモデルの場合には、最大潮位出現時刻が大阪で約 1hr 早くなっている。これは、両モデルの特性に起因するためであると考えられる。すなわち、1レベルモデルの場合には、開境界において水位で与えた条件が長波として伝播するために、外力によ



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Comparison between tides observed and computed by 1 level and 2 level models of storm-surge prediction.

り生ずる水位上昇以前にその影響が現われ、大阪においてみられるように、それぞれの両者による2つのピーク値が生じている。一方、2レベルモデルの場合には、吹送流の分布の影響を考慮しているため、1レベルモデルのようなことは起こらず、そのピーク値も実測値をよく再現している。しかしながら、ここで用いた2レベルモデルが、必ずしも実際の吹送流を再現しているとは考えられず、また用いた外力も dip の影響の入らないモデル台風であるため、forerunner 時に大きな水位上昇が生じているし、最大偏差出現の2hr前の水位低下もシミュレートされていない。さらには、両モデルについて言えることは、モデル台風を用いているために、大阪で観測されたような局所的な風向の変化による最大潮位直後の急激な水位低下はシミュレートできていないようである。しかし、2レベルモデルの結果には、それと同程度の resurgence が生じており、これは吹送流の影響を考慮しているためと考えられる。

以上の結果および8.で示した観測潮位の記録から、高潮数値モデルへの問題点および課題を列挙すると次のようである。

(i) 水深が浅くかつ狭い領域における湾内高潮のシミュレーションには、吹送流の分布の影響を考慮したモデルが必要である。

(ii) 風域場が時空間的に急変するような台風による高潮の追算には、これを考慮した外力モデルを用いる必要がある。

(iii) 大阪湾や紀伊水道のように、外洋および他の内海と海峡や水道を通じて関係している領域では、開境界条件のとり方を十分検討すべきである。中でも、黒潮の流軸変動による効果は重要な条件である。

(iv) 特に、紀伊水道の場合には、本台風による潮位記録にみられるように、resurgence に強制振動のような挙動が現われており、これを究明することが必要である。

5. 結 語

以上、台風7916号による高潮の特性を、潮位記録から考察するとともに、数値モデルによる若干の追算を試みた結果、得られた成果および今後究明すべき問題点は次のようである。

1) 台風の経路が大阪湾の東側を通過したために、強風域の時間的特性から、高潮位の発生と高波浪の来襲とに時間の差が生じ、海岸災害は比較的軽微であった。なお、高潮を研究するための貴重な記録が多く得られた。

2) 台風の南後方に、いわゆる dip が生じたために、その風域場では、時空間的变化が著しく、大阪湾および紀伊水道における高潮の特性には、特異な現象が現われた。特に大阪湾内においては、短軸方向の副振動が顕著であり、湾奥の尼崎から堺にかけて、最大潮位出現後急激な水位の低下が観測された。

3) 紀伊水道においては、外洋または内海からの影響によるものと考えられる強制振動のような resurgence が観測された。

4) 数値モデルによる高潮の追算結果と観測記録との比較から、4.の終りに列挙したような今後究明すべき問題点が指摘された。

最後に本研究の調査活動に当り、格別の御協力をいただいた神戸海洋気象台をはじめ、関係諸官庁に謝意を表明するとともに、波浪特性について協同研究を実施した名古屋大学工学部岩田好一郎助教授に感謝する。また、大阪湾内の海上風の解析について御指導いただいた愛媛大学工学部山口正隆助教授に謝意を表明する。

なお、本研究の一部は、文部省科学研究費自然災害特別研究突発災害調査（研究代表者 室田 明, No. 402601）および同計画研究（研究代表者 土屋義人, No. 302027）の補助金を受けて行われたものであることを明記する。

参 考 文 献

- 1) 大阪管区気象台：異常気象速報，第2号，昭54，p. 14.
- 2) 矢野勝正：水災害の科学，技報堂，昭46，p. 641.

- 3) 土屋義人・中村重久・山下隆男・岩田好一郎：台風16号による高潮の特性，台風16号による風水害の総合的研究，災害科学総合研究班，No. B-54-1，昭55，pp. 69-80.
- 4) 土屋義人 他：高潮の発生機構とその極値に関する研究，災害科学総合研究班，計画研究報告，昭56（印刷中）.
- 5) 中島錫太郎 他：台風7916号について，京都大学防災研究所年報，第23号，昭55. 4，pp. 87-112.
- 6) 山口正隆・渡辺 健・畑田佳男：大阪湾における海上風の平面分布特性について，土木学会第28回海岸工学講演会論文集，昭56（印刷中）
- 7) 中村重久：大阪湾の自由振動と津波・高潮の関係，うみ：日仏海洋学会誌，Vol. 18, No. 4, 昭55, pp. 179-183.