

伊勢湾台風にもなった高潮の解析

京都大学理学部 助教授 国 司 秀 明
京都大学防災研究所 吉 田 幸 三

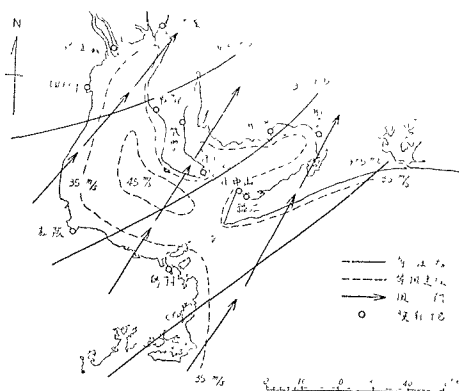
1. ま え が き

1959年9月26日伊勢湾をおそった15号台風は、東海地方に多数の人命を含む想像を絶した悲惨な傷痕を残して去った。私たちもまた、海洋学および防災的な立場から海岸工学にたずさわるものとして、あまりにも傷ましいこの事態を深く憂えないわけにはいかなかった。災害の大部分はこの台風にもなった強烈な高潮に原因していたのである。ふりかえってみると、1934年大阪湾をおそった室戸台風、1950年同じく大阪湾をおそったジェーン台風と大規模な災害はいずれもそれらの台風にもなった高潮に原因している。

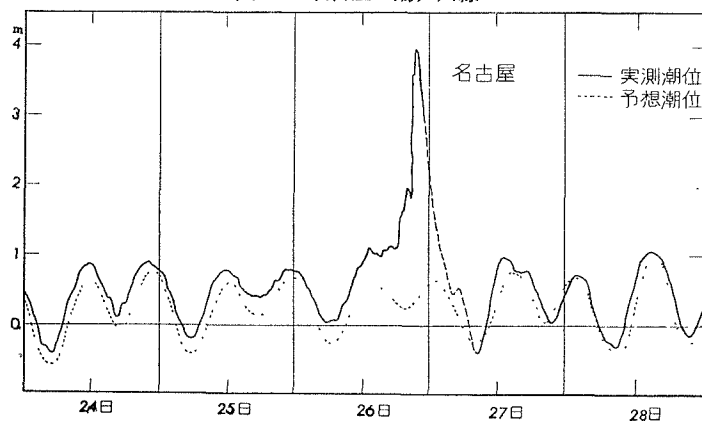
室戸台風を機にして諸先輩は高潮の本質の解明へのりだし、それが気圧降下による吸い上げと風の吹き寄せによることを明らかにしていった。なかでも、野満等(1937)と和達(1938)による定量的な研究は、いくつかの問題点を含むとはいえ、この見解の妥当性を裏づけることに十分成巧しているように思われる。これらの人々によつてすでに気付かれていながら、観測の不十分なために十分取り上げられなかった一つの事実が、ジェーン台風時の観測記録から明らかにされた。それは湾口からの高潮の侵入であり、宮崎(1951)と市栄(1951)によつて取り上げられた。特に宮崎は紀伊水道の存在という形において卓抜な見解を示している。一つの本質的な進歩ということができよう。このたびの伊勢湾台風では気象庁において電子計算機による計算がすでに試みられ、また一つの重要な前進が積み重ねられた。

しかし定性的にはほとんど余すところなくあらわにされた高潮の実態も、定量的には必ずしも十分満足な結果に達しているとはいえない。問題はもはや定性的な段階を脱して定量的な段階に入つていると思われるのに、その不一致の理由は何か？ 静かに反省してみると、定性的には妥当な諸作用も、定量的数値という点になると、余りにも多くのあいまいさがある。その意味では高潮はまだ全くわかっていないとさえいえるかもしれない。その第一は(I)風が海面におよぼす摩擦力の大きさであり、第二には(II)海水内部の乱流状態に深く関係している海底摩擦力の大きさであり、第三に(III)高潮の湾口侵入の大きさである。私たちはすでになんらかの方法でこれらの諸量の大きさを定量的に決定すべき段階にあることを思い、全く立場を変えて、さいわい比較的豊富なこのたびの伊勢湾台風の資料を用い、できるだけ資料に忠実にその語るところを引きだそうと試みた。この報告はその一部である。

図一 伊勢湾台風時における気象状況の一例と検潮所位置



図二 名古屋の潮位曲線



2. 資料の整理

図一に伊勢湾の略図を、検潮所名とともに小してある。つごう12のこれら検潮記録は26日を中心に関前後それぞれ3～4日間の実際の記録紙について写真複写により蒐集したものである。図二に一例として名古屋の記録を示す。この図に点線で示したのは予想潮位であるが、みられるように26日は日潮不等が最もはげしい日で、台風の影響のないと思われる前後の記録部分を重ね合わせる方法によつて偏差をとりだすことはできなかった。

そこでまず潮位表によつて各地の予想潮位を作りそれとの差として偏差をとりだした。この方法によるときは当然気象条件や黒潮の変動等さまざまな原因による平均水面の変動が偏差の中に含まれてくる(註1)ばかりでなく、実際に得られた各地の偏差の中には、おそらく検潮儀零点の不正確さによるとと思われる差がみつめられた。これらの誤差を除くために、全資料について 24.5 時間の移動

平均を行い、この期間の平均海面と思われるものを求めた。その実例を図-3 に示す。みられるように僅少な差はあるが、当日前後の海面はよく平行な変化を示している。さらにいちじるしいことは台風の前で約 20cm におよぶ平均海面の低下がみられることである。あるいは黒潮の台風による変動かもしれない。ともあれ、この曲線の形から、まず 26 日 0 時にはほとんどまだ台風の影響はないものと考え、この時刻頃の各地の平均海面値(図-3 参照)を先に得られた偏差から差し引いて、純粹のこの台風による偏差とみなすこととした。

こうして抜き出された偏差曲線の数例を図-4 および 5 に示してある。以後の解析には図に示された 26 日 0 時から 28 日 0 時にいたる 2 日間を用いたが、この間の読み取り間隔は 15 分である。

一方、京大気象学研究室の御好意により、図-1 にみられるような伊勢湾上 26 日 15 時から 27 日 0 時の間は 1 時間おき、他は 3 時間おきの気圧、風速、風向の分布図の提供を受け、これから必要な気象要素を読み取った。これらの図の風速および風向は、海上および陸上で、それぞれ上空風の %、 $\frac{1}{2}$; 45° 内向(註2)として海上および地表上の値にひきなおされたものである。伊勢湾中央部の読み取り値を図-6 に一例として示した。

3. 資料の解析

さてこのような浅い湾に対してコリオリの力を無視し、簡単のために非線形項を省略した高潮に対する基本式は時間 t 、水平面座標 x, y について

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \vec{M}}{\partial t} &= -\rho c^2 \text{grad}(\zeta - \zeta_0) + \vec{\tau}_a + \vec{\tau}_b \\ \rho \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \text{div } \vec{M} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。ここに記号はそれぞれ

- $\vec{M}$: 質量輸送ベクトル,
- ζ : 水位上昇量,
- $\vec{\tau}_a$: 風が海面におよぼす摩擦力ベクトル,
- $\vec{\tau}_b$: 海底摩擦力ベクトル,
- ρ : 海水の密度,
- $c = \sqrt{gH}$: 長波の速度,
- H : 水深,
- $\rho g \zeta_0 = \Delta p$: 気圧降下量,
- grad : 二次元 x, y についての勾配,
- div : 二次元 x, y についての発散

図-3 名古屋および鳥羽の平均海面

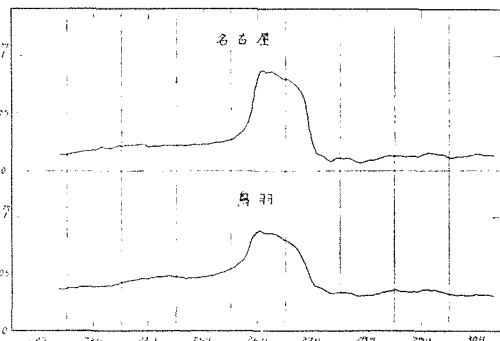


図-4 偏差曲線 (I)

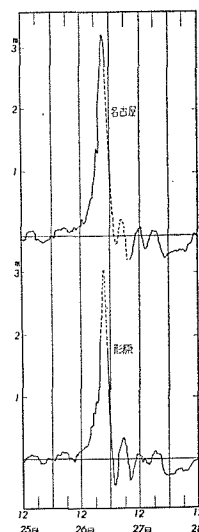


図-5 偏差曲線 (II)

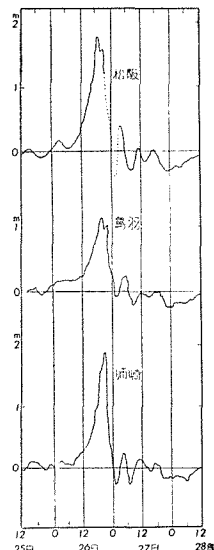
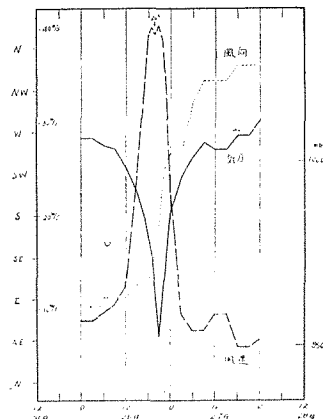


図-6 伊勢湾中央部における気圧、風速および風向



註1) たとえば、神戸海洋気象台彙報 165 号 p.49 参照。

註2) この根拠については、今回の台風についてもおおよそ成立していることが確かめられている。詳細は防災研究所報告に近く発表される予定である。

である。

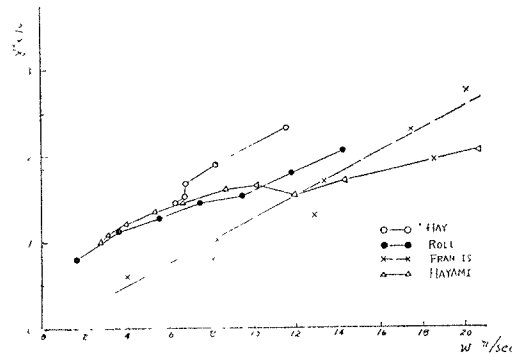
さきのべた問題の (I) 海面摩擦力および (II) 海底摩擦力はそれぞれ $\vec{\tau}_a$ および $\vec{\tau}_b$ である。さて通常海洋学では、

$$\vec{\tau}_a = \rho_a \gamma^2 w \cdot w \dots \dots \dots (2)$$

と表わし、 γ^2 を摩擦係数とよぶ。ここに ρ_a は空気の密度、 w は海上約 10 m の高さの風速である。問題はこの無次元量 γ^2 である。

この値は古くからほぼ 7~8 m/sec 以上の風速では 2.6×10^{-3} の値をとるものとむしろ無批判に信じられてきた。しかし比較的最近の研究は否定的であつて、図-7 にみられるようにその値はかなり小さい。だが、かなりはつきりしてきたこれらの値もほぼ風速 20 m/sec ぐらいまでであつて、しかも 12~13 m/sec の風速から値は漸増の傾向を示している。非常な高風速ではかえつて値は減少するのではないかと想像されるところでも、どこまで上つてどこから下がるのか現在の知識では残念ながら多くを語ることはできない。むしろ逆にこれをこそ、時に平均風速 50 m/sec にも達するこの台風の貴重な資料に語らせるべきであらう。私たちの努力はまずこの点に集中された。

図-7 $w - \gamma^2$



今仮りに相当長時間一定の風が吹いて定常状態に達したものと考えると、(1) より

$$\vec{\tau}_a + \vec{\tau}_b = \rho c^2 \text{grad}(\xi - \xi_0) \dots \dots \dots (3)$$

が得られるが、定常状態が実現されるまでの時間はほぼ倍振の周期の程度といわれる (Haurwitz, 1951)。湾の軸方向にはとうてい近似的にも (3) が成立するとは考えられないが、横方向にはある程度の可能性が考えられるから、試みに常滑一四日市について 15 時から 19 時の間の各時について、定常状態実現に要する時間を考慮した両

偏差曲線の差 $\Delta \xi$ を図-8 に示した。横軸は横方向 y に関して擬定常とみなした (1) の式

$$\Delta \xi = \frac{L}{\rho g H} (\tau_{ay} + \tau_{by}) \dots \dots \dots (4)$$

と、仮りにおいた関係式

$$\tau_{ay} + \tau_{by} = n \tau_{ay} = n \rho_a \gamma^2 w^2 \cos \theta \dots \dots \dots (5)$$

とから得られる

$$\Delta \xi = \frac{\rho_a L}{\rho g H} \cdot n \gamma^2 \cdot w^2 \cos \theta \dots \dots \dots (6)$$

における $w^2 \cos \theta$ の値である。この期間風はほぼこの方向に吹いており、風速は約 23~38 m/sec、また両地点における気圧の差 $\Delta \xi_0$ は無視できる程度であつた。

これから一応 $n \gamma^2$ の値として約 2.6×10^{-3} が得られ

る。 n の値は狭くて細長い水路では底部に生ずる補償逆流のために 1~1.5 の間にあることがほぼ理論的にも実験的にも確かめられているが、このように広い湾の横方向でも直ちにその値を使うことはゆるされない。流れは直角向きの脱出によつて、底部まで同じ向きの可能性があるからである。この期間のようになお湾奥に向つてどんどん水量の堆積の行なわれている場合には、むしろそのような可能性の方が強いように思われ、水深 16 m 前後のこのあたりの浅さでは、 n の値はかなり 1 より小さくなるのではないかと、したがつて γ^2 の値は 2.6×10^{-3} をかなりうまわるのではないかと想像される。

この点に関して私たちは一つの新しい方法を導入した。再び (1) について、高潮現象の全体を取り上げ、十分長い時間の前後では現象は消滅して、 $M = \xi = 0$ と考えると、(1) の時間に関する積分値 ($\sim$ で表わす) は

$$\text{div } \vec{M} = 0, \vec{\tau}_a + \vec{\tau}_b = \rho c^2 \text{grad}(\xi - \xi_0) \dots \dots \dots (7)$$

また (2) によつて一応平均的 γ^2 で満足することとすると、

$$\vec{\tau}_a = \rho_a \gamma^2 w \cdot w \dots \dots \dots (8)$$

である。(7) の後式は (3) と同形であつて有用な手段を与える。

表-1 各地における $\tilde{\zeta}$, $\tilde{\zeta}_0$ および $\tilde{\zeta} - \tilde{\zeta}_0$ の値
(単位: $10^5 \text{ cm} \cdot \text{sec}$)

検潮所名	鳥羽	松阪	四日市	名古屋	師崎	形原	小中山
$\tilde{\zeta}$	31.5	44.3	48.5	49.3	28.5	32.6	30.7
$\tilde{\zeta}_0$	14.8	15.7	15.4	14.8	14.4	13.7	14.1
$\tilde{\zeta} - \tilde{\zeta}_0$	16.7	28.7	33.1	34.5	14.1	18.9	16.6

さて現象の始めと終りの時刻を種々の点から 26 日 0 時と 28 日 0 時に定め、この積分を各地について遂行した結果が表-1 にまとめている。一方風の資料からこの期間にわたる同様な w^2 の積分値を求め、湾の軸方向 x についてこれと $\tilde{\zeta} - \tilde{\zeta}_0$ との関係を鳥羽を基準として図-9 に示した。整理は (4) に相当する関係式

$$\Delta(\tilde{\zeta} - \tilde{\zeta}_0) = \frac{\tilde{\phi}}{\rho g}, \quad \tilde{\phi} = \int_0^x \frac{\tau_{ax} + \tau_{bx}}{H} dx \dots \dots (9)$$

において、 τ_{bx} は τ_{ax} に関係あるものと考え、一つの長さの次元をもった特性変数

$$\tilde{S} = \int_0^x \frac{\tau_{ax}}{\rho a \gamma^2 g H} dx = \int_0^x \frac{w^2 \cos \theta}{g H} dx \dots \dots (10)$$

によっているが、結果はきわめて興味のある点の配列を示している。

この図の解釈は海水内部の乱流状態に深く依存し、 γ^2 の値以上にその知識に乏しい海底摩擦の解釈の仕方ですまざまに考えられるであろう。私たちはさまざまな検討の結果、海底摩擦は負であつて、海面摩擦は図の直線で規定される程度に作用していると考えるのが最もよいように思われた。図の曲線は簡単に海底摩擦が海面摩擦と逆向きで湾奥に行くほど比例的に大きくなると考えた場合、すなわち、

$$\tau_{bx} = -\alpha \tilde{S} \cdot \tau_{ax} \dots \dots (11)$$

と仮定した場合の理論曲線であつて、この程度の単純な仮定でよく実測を説明できると思われる。もしこの仮定が許されるとするならば、これから $\gamma^2 = 4.3 \times 10^{-3}$ 、海底摩擦は湾奥でほぼ海面摩擦の $1/2$ となる。この程度の γ^2 の値や、海底摩擦の大きさは、図-7 の傾向や期待される流速の大きさから決して無理な値ではない。湾奥における最大流速はほぼ 1.5 m/sec の程度となろう。また先にのべた常滑-四日市間から求めた $n\gamma^2$ の値も、この部分が湾口から約 $7 \sim 8$ 割の距離にあることを考えると、ほぼ期待される値に近い。

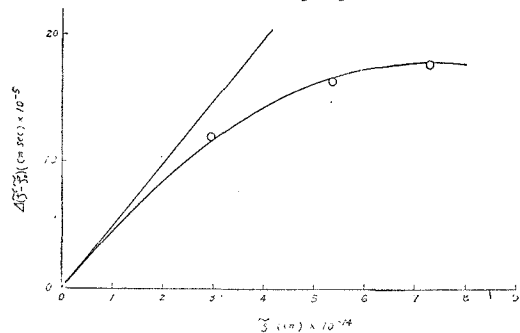
最後に、第三の問題として取り上げた高潮の湾口浸入も表-1 の鳥羽の積分値でおおよそを推定することができる。すなわちこの $\tilde{\zeta}_0$ は気圧降下によつて期待される水位上昇であり、これにくらべて実際の上昇量 $\tilde{\zeta}$ は約 2.1 倍となつている。このあたりの水深 25 m から約 20 km 先の 50 m に傾斜している状況からみて、沖ではほとんど $\tilde{\zeta}_0$ の程度と考えられる水位上昇に風の吹き寄せの効果や、そう大きいとは考えられないが気圧降下の動圧降下を考えあわせても、 $\tilde{\zeta}$ は $\tilde{\zeta}_0$ の 1.5 倍程度しか期待することはできない。この差はおそらくすでに宮崎が紀伊水道の存在の形で大阪湾口の条件を考慮した際にあらわれている広い範囲からの集水作用に起因しているものと考えられる。この点のさらに進んだ検討は今後の研究問題である。一応これを高潮浸入時における湾口効果とすれば、表-1 からこの場合 $16.7 \times 10^5 \text{ cm} \cdot \text{sec}$ で、ほぼ気圧効果 $\tilde{\zeta}_0$ と同じ程度である。

4. む す び

こうして高潮全体について、結果的にみて、風の効果、気圧の効果および高潮浸入の湾口効果との比は、名古屋において $2 : 1 : 1$ の程度であると想定され、これにさらに海底摩擦の効果が -1 の割合で加わるものと考えられる。問題は本質的に二次元的で、湾内海水のかなり規模の大きな移動をとまなうであろう。風の摩擦係数はこのような高風速時にかなり大きくは 4×10^{-3} の程度となつていられる。

ともあれ、この解析は問題の完全な解決を与えるものでなく、ただそのいとぐちに達したに過ぎない。摩擦係数 γ^2 の値の決定はおそらく最も重要な問題点の一つであり、この点について、すでに建設中の京大防災研究所の高

図-9 $\tilde{S} - \Delta(\tilde{\zeta} - \tilde{\zeta}_0)$



速風洞水槽（宇治川水理実験所）および海洋観測塔（田辺湾白浜瀬戸臨海実験所附近）とは有力な手段を与えるであろう。また高潮の湾口浸入については、理論的検討を進めるばかりでなく、模型実験的な説明がとくに切望される。そしてまた最終的な予測には電子計算機の活躍に待つこととなろう。それでもなお実際の災害対策に直結するためには、いくつかの克服すべき難問題が予想される。しかし、私たちはたとえ一足とびにそこへ到達できなくても、一日も早く多くの研究の成果が総合されて、定量的予測が可能になることを切望してやまないものである。

なお、この報告はかなり端折つたので、十分意の達しなかつた点のあることを恐れるが、詳細は近く刊行の予定である防災研究所の報告によられたい。

最後に資料の蒐集にあたつて多大の便宜をはかつていただいた関係諸官庁のかたがたに深甚なる感謝の意を表するとともに、この研究にあたつて有益な論議をいただいた速水頌一郎教授、矢野勝正教授、岩垣雄一教授をはじめ防災研究所の諸先生方および気象図の作製をこころよくひきうけていただいた気象学研究室の光田寧助手に深く感謝するものである。

なおこの研究は一部文部省科学総合研究費に負うものであることをあわせ記して謝意にかえる。