

# 伊勢湾台風による高潮に及ぼす湾形効果 について

大阪大学工学部 田 中 清\*  
大阪大学工学部 室 出 明\*\*

## 1. 概 説

台風に伴う気象潮の生起については、従来、一般に風の吹き寄せにその主因を求めているが、このような風の吹き寄せのみによつて、大きな異常潮位が生ずるといふ考え方には、若干の疑問がある。すなわち、冬の季節風の如く長時間、一定方向から吹送される風の場合は、風から海面へのエネルギー伝達が十分行なわれてかなりの吹寄せが生じうるのである。Colding がバルチック海における観測から求めた吹寄せによる海水堆積の予報式は、このような状態に対応するものであり、又、わが国における観測でも冬の季節風の長時間の連吹によつてはそれほど大きな水位上昇が見られないが、3～5月に温帯性低気圧が日本海に入つて急激に発達する場合、暖域に当る太平洋岸で強い南寄りの風が連吹し、このような吹寄せでも異常潮の高さは高さ80cmの程度であることが認められている。

しかるに台風のごとく回転性風向の場合は、海岸方向のみへの異常に大きい吹寄せを生ずる程、風による海面へのエネルギー伝達が行なわれるためには、その方向についての風の継続時間が短か過ぎるように、しかも最大気象潮が2mをこえるような大きな高潮はかならず、有明湾、東京湾、大阪湾、及び伊勢湾等の湾入部に限られており Fetch に比例するとする吹寄せ予報式では（その Fetch の取り方に問題があるが）このように Fetch の小さい湾入部での大きな高潮を説明することが出来ない。

一方、伊勢湾台風に伴う各地の潮位曲線を検討すると、最高潮位の生起時間が、南寄りの最大風速の起時より若干早い例が屢々認められ、又最高潮に達する前から風向に関係なく水位上昇が起つている。この点からも最高潮がかならずしも吹寄せのみによるものとは考えられず、むしろ外海での台風収斂風によつて生じた“吹溜り”が長波型式で伝播すると考える方が妥当なように想われる。

紀伊半島先端や直線状海岸で観測された気象潮1.5～1.7m程度の“吹溜り”が外洋で形成され、これが長波の型で湾入部に侵入すると共に、湾形効果によつて増幅

されて異常な潮位を生ずるのではなからうか。

特に、伊勢湾の平面形が楔状をなしていることに着目して、今次、伊勢湾台風による高潮に関して上述のような解析法を試み、高潮波高に及ぼす湾形効果を概略見積ることとする。なお、純粋に湾形効果のみを抽出して考えるため、吹寄せ効果等は敢て除外して計算を行つた。

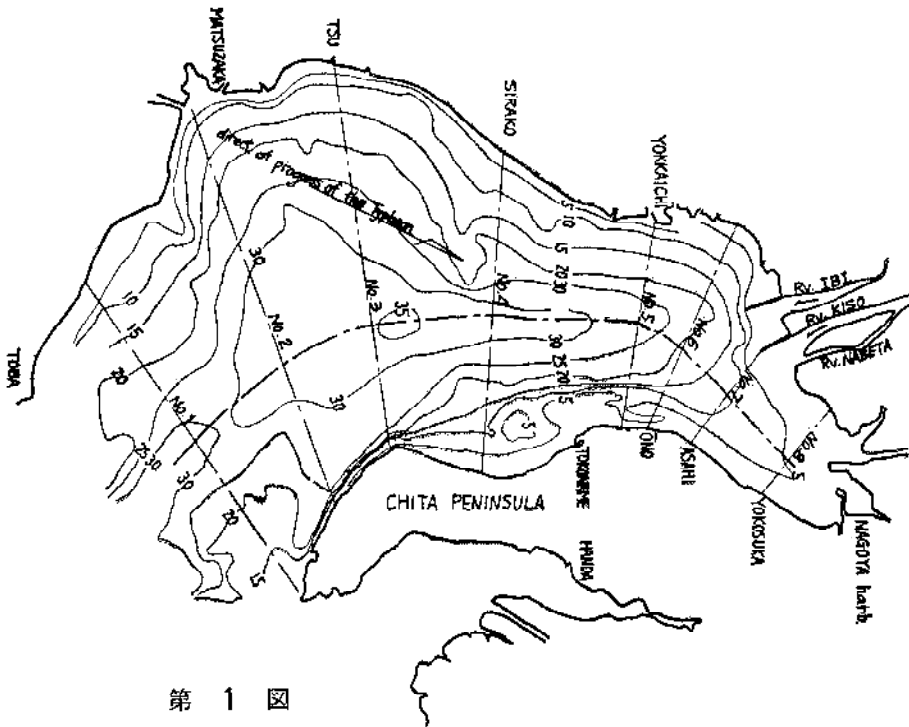
更に、湾内における高潮現象を長波とする立場をとれば、次の如き重要な特性に注意する必要がある。すなわち、長波は、よく知られているように、その進行に伴つて卓越した質量輸送を行う。従つて、長波が海岸線に近づくと共にその波高を増大するのみでなく実質的な流速もかわりの程度に達する。沿岸構造物の破壊、高潮の陸地への進入範囲等も、この高潮流速を除外して考えることが出来ず、従来の高潮被害が単に static は水位上昇という観点からのみ対策が立てられていることは疑問であり、海水流動を加味した dynamic な観点から高潮対策が再検討されねばならぬのではないかと考えられる。なお、伊勢湾台風直後に行なわれた高潮水位痕跡の調査結果をみると、極めて近接した二地点間で水位が相当違つている例が多く見られるが、この事実も高潮の dynamic な特性を立証する一例であると考えられる。すなわち、高潮現象が、海水の流動を伴わない static は水位上昇のみであれば近接地点で痕跡の大きな差違が発生することは全く考えられないけれども、高潮自身のかなりの流速のため地形地物の微妙な影響を敏感に受けて上記の如き複雑な痕跡結果が得られたものと想像される。

又、伊勢湾内における長波の屈折図を作図し、高潮による最大異常潮の伝播、高潮エネルギーの収斂と分散の模様について概略の見通しを得ることが出来た。

## 2. 伊勢湾の海底地形、及び沿岸各地の観測異常潮位

海図から伊勢湾内の等深線図を画けば Fig. 1 の如くである。ただし、図中の数字は D.L. (名古屋港潮望平均干潮位) からの水深を m で示したものである。図の等深線の配置から湾の軸線を Fig. 1 の一点鎖線で示す如く

\*教授 \*\*助教授



第 1 図

定め、又後述する高潮の屈折図を勘案して、ほぼこの湾軸線に直交する如き計算断面を図示の如く 8 断面、設定する。なお、伊勢湾台風が、この考える領域を進行した時の進行方向は、ほぼ  $N25^{\circ}E$  であり、同じく Fig. 1 に矢印でその方向を示す。

上述計算断面における断面積： $A_0$ 、湾幅員： $B$ 、平均水深： $H_0$  ( $=A_0/B$ ) の諸量と、湾口からの累加距離との関係を示せば Fig. 2 の如くである。

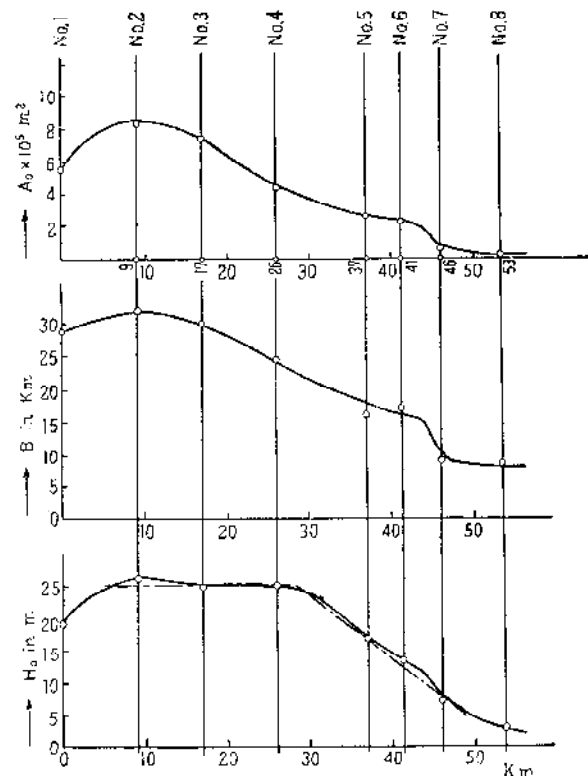
基準面 D.L. 以下の湾断面積についていえば、湾口（知多半島先端を通る断面）から松阪を通る断面にかけて若干、 $A_0$  は増加するが、それから湾奥に向い流積は単調に減少し、特に、四日市と揖斐川河口を通る断面の間で急激に減少する。又、湾幅： $B$  も上と全く同じ傾向をとるが、ただ平均水深： $H_0$  は Fig. 2 に示す如くほぼ、2 本の折線で代表され、No. 2 と No. 4 の区間ではほぼ、2 本の折線で代表され、No. 2 と No. 4 の区間ではほぼ一定 ( $H_0=25m$ ) と見做すことが出来、No. 4 から湾奥に向い直線的に減少する。

次に、各地での観測潮位記録については、われわれは気象研究所、名古屋气象台、建設省中部地方建設局の関係各位の御厚意によつて、かなり多数の潮位記録を入手することが出来た。しかるに、次のような理由からこれら資料の一貫した整理をなし得なかつたのは真に遺憾である。すなわち、各地の潮位計原点が統一されておらず採用基準面が明確でないため各地点の潮位の絶対値を算出し得ない場合が多いこと、および、各観測地点での推算潮位が明示されないため、異常偏差を算出することが

不可能である。前者の困難すなわち採用基準面の不明確さは全く致命的であり、これは必ずしも異つた 2 地点で基準面が異なるばかりでなく、同一地点でも、たとえば事業母体によつてその採用基準面が異なり、甚だしい場合は相互の換算が出来ない場合すらある。

幸い、名古屋港における検潮基準面の説明図を入手することが出来たので、これを Fig. 3 に示す。

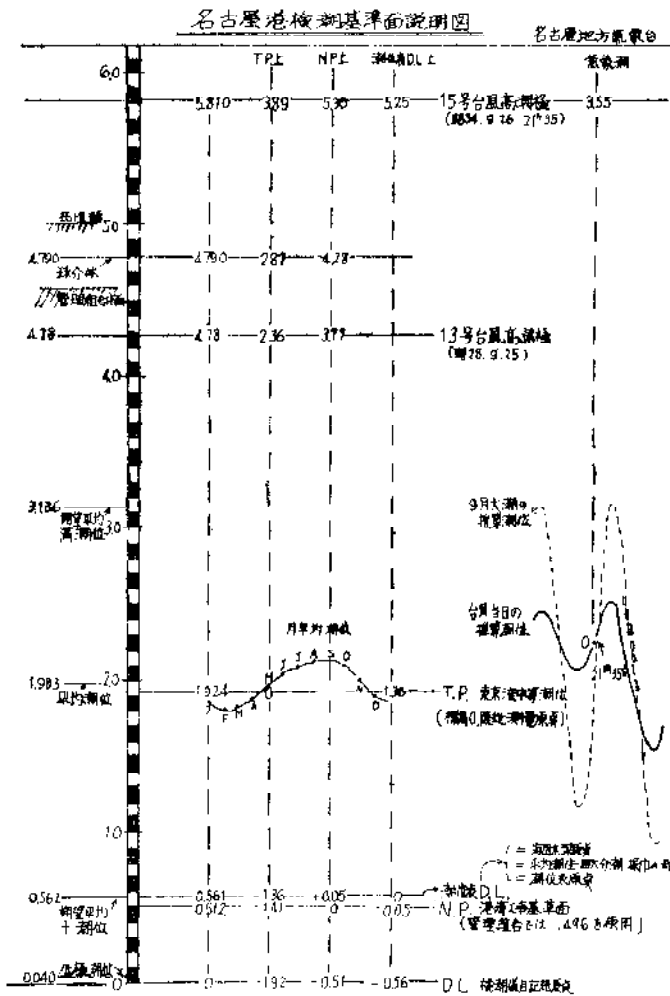
なお、かかる検潮基準面の不統一は、観測資料の整理に大きな障害となるばかりでなく、多くの無駄な労



第 2 図

力を費すこととなるので、この際、全国的な規模で検潮儀基準面の明示と整備のための作業を急速になされることを強く要望したい。

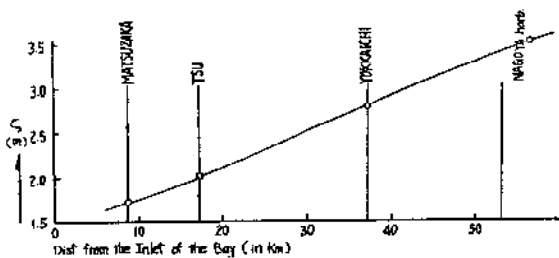
東大・気象庁・高潮合同調査班が湾沿岸一帯の高潮痕跡の調査を行われ、各地点での最高潮位（東京湾中等潮位上m）とその起時を整理されたものを検討すると、近接 2 地点間で 20~30cm の痕跡水位差が認められるのが



第 3 図

多く存在するが、これは調査誤差のみではな前節で述べた高潮の dynamic な特性のためであり、従つてこのことから、検潮儀の据付け位置も問題となる筈であり、厳密にはこの点からも観測記録の検討を行なわねばならず問題を益々複雑ならしめている。

然し、我々の解析では、---まず沿岸各地での最大偏差(最大気象潮高)を知ればよいので、以下の計算では気象研究所海洋部で発表された値(例えば、宇野木早苗:台風と高潮;自然, Dec.1959, P.15)を用いるものとする。



第 4 図

各地での最大偏差:  $\zeta_m$  を図示すれば、Fig. 4 の如くであり、湾軸に沿つてほぼ直線的に増幅されていった様相が明らかに認められる。

### 3. 湾断面積が漸変する場合の高潮波高の変形

前節で述べた如く、以下の解析では、湾口で与えられた長波波高が、湾断面の漸縮によつて逐次増加されるものとしての計算を行う。

長波の水路断面積漸変による変形については、有名な Green の法則があるので、以下に簡単に説明する。

静止水面以下の平均水深を  $H_0$ 、その上にある長波による水面上昇量を  $\zeta$ 、水路幅を  $B$ 、波動による水粒子移動距離を  $\xi$ 、とすれば、連続方程式は次の如くである。

$$\zeta = -\frac{1}{B} \frac{\partial}{\partial x} (H_0 B \xi) \quad (1)$$

又、運動方程式は

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (2)$$

(1), (2) 式より  $\xi$  を消去すれば

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = \frac{g}{b} \frac{\partial}{\partial x} (H_0 B \frac{\partial \zeta}{\partial x}) \quad (3)$$

今、 $x$  の代りに、次式

$$\frac{dx}{d\tau} = (gh)^{1/2} \quad (4)$$

で定められる変数:  $\tau$  を用いることにすれば(3)式は、

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial \tau^2} = S'' + \left( \frac{B'}{B} + \frac{1}{2} \frac{H_0'}{H_0} \right) \zeta' \quad (5)$$

$B, H_0$  共に const. とすれば(5)式は  $\zeta = F(\tau - t)$  なる解をもつ。それで

$$\zeta = \theta \cdot F(\tau - t) \quad (6)$$

とおき、 $\theta$  を  $\tau$  のみの関数と考える。(6)式を(5)式に代入すれば

$$2 \frac{\theta'}{\theta} \cdot \frac{F'}{F} + \frac{\theta''}{\theta} + \left( \frac{B'}{B} + \frac{1}{2} \frac{H_0'}{H_0} \right) \left( \frac{F'}{F} + \frac{\theta'}{\theta} \right) = 0 \quad (7)$$

今、

$$2 \frac{\theta'}{\theta} + \frac{B'}{B} + \frac{1}{2} \frac{H_0'}{H_0} = 0$$

又は  $\theta = CB^{-1/2} H_0^{-1/4}$ , (但し、 $C$  は定数) (8)

とすれば(7)式の  $F$  を含む項は消え、従つて(6)式は(3)式を満足する解である。

(6), (8)式の意味は次の如くである。すなわち、初期断面の諸量に添字: \* をつけることにすれば、流水断面の漸変による長波波高の変化は次式で与えられる。

$$\frac{\zeta}{\zeta_*} = \left( \frac{B_*^2 H_*}{B^2 H_0} \right)^{1/4} \quad (\text{Green' law}) \quad (9)$$

以上のような波高幅大の法則と、伊勢湾高潮の実測潮位との比較を行うため、次のような操作を行う。すなわち、

第 1 表

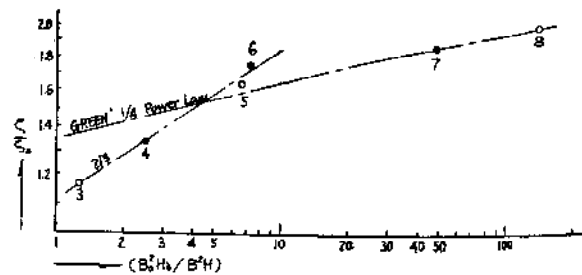
断面番号	地点	累加距離 (km)	D.L.以下断面面積 $A_0 \times 10^3$ (m <sup>2</sup> )	平均幅 (B <sub>0</sub> km)	D.L.以下平均水深 $H_0$ (m)	推算潮位 $D.L. + \frac{\zeta}{h}$ (m)	最大偏差 $\zeta$ (m)	$H_0 + h$ (m)	$H_0 + h + \zeta$ (m)	$\frac{B_*^2 H_*}{B_0^2 H_0}$	$\frac{\zeta}{\zeta_0}$	$\sqrt{g(H_0 + h)}$ (m/sec)	$\sqrt{g(H_0 + h + \zeta)}$ (m/sec)	$u$ (m/s)	絶対伝播速度 $\omega$ (m/s)	輸流量 $Q \times 10^4$ (m <sup>3</sup> /s)	送量 $\Delta Q / \Delta x$ (m <sup>3</sup> /s)
1	知多半島先端	0	554	29	19.1	T.P. (1.5)	(1.6)	20.6	22.2			14.3	14.8	1.0	15.8	62.7	
2	松阪	9	836	B <sub>*</sub> 32	26.1	(1.6)	$\zeta_0$ 1.7	27.7	29.4	1.000	1.00	16.5	17.0	1.0	18.0	84.0	+ 34.9
3	津	17	741	30	24.7	(1.6)	2.0	26.3	28.3	1.203	1.18	16.1	16.7	1.2	17.9	101.8	+ 9.8
4	白子港	26	428	25	17.4	(1.6)	(2.3)	19.0	21.3	2.540	1.35	13.7	14.5	1.6	16.1	85.1	- 18.6
5	四日市	37	262	16	16.4	(1.7)	2.8	18.1	20.9	6.38	1.65	13.3	14.3	2.0	16.3	66.9	- 16.5
6	霞ヶ浦	41	225	17	13.2	(1.7)	2.7	14.9	17.6	6.95	1.65	12.1	13.1	2.0	15.1	60.0	- 17.0
7	大曾川右岸海流港先端	46	63	9	7.0	(1.7)	(3.2)	8.7	11.9	47.4	1.88	9.2	10.8	3.2	14.0	34.3	- 77.6
8	浅川(横須賀)	53	23	8	2.8	(1.7)	(3.4)	4.5	7.9	137.0	2.00	6.6	8.8	4.4	13.2	27.8	- 9.3
9	名古屋港	58	-	-	-	1.7	3.55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(1) 湾の幅は海図によつて与えられる Fig. 2 のものを用いる。

(2) 静止水深:  $H_0$  としては, D.L. 以下の平均水深に更に, 天文潮高を加えたものを用いる. これは, 気象潮の周期に比し, 天文潮長波の周期がかなり大きく変動がゆるやかであるという仮定の元に, 天文潮推算潮位:  $h$  を静止水深に加えることとする. なお, 各計算断面における推算潮位 (D.L. 上+) は前述の如くほとんど判つておらぬので, 名古屋港における推算潮位 D.L.+1.7 を基準とし, 潮位表等によつて適宜各断面の  $h$  を仮定した.

これらの数値はすべて表-1 に示す.

観測異常潮の最大偏差:  $\zeta/\zeta_*$  と表-1 の  $B_*^2 H_*/B^2 H$  を全対数方眼紙に plot すれば Fig. 5 の如くである.

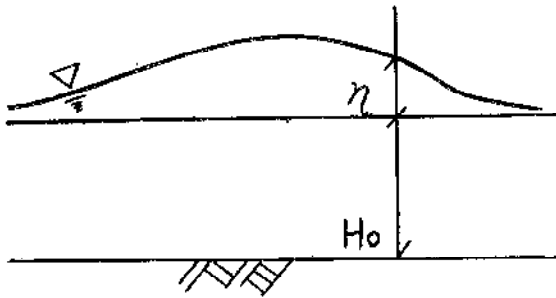


第 5 図

図によれば, No. 5 乃至 No. 6 断面ほぼ四日市付近より湾奥では Green の  $\frac{1}{4}$  乗則が正しく現象を説明しているようであるが, No. 2 松阪と No. 5 四日市の区間では  $\zeta/\zeta_*$  の増幅はほぼ  $(B_*^2 H_*/B^2 H)$  の  $\frac{2}{3}$  乗に比例し, Green の法則で与えられるよりも著しい増幅を示している. これ等の理由は次の如く考えられる. すなわち, 四日市を通る断面より湾奥では湾形が典型的な楔状をなしているという以外に, この領域では海面面積が比較的小さいため, 吹寄せ等の風の効果に二次的, 湾形効果がほぼ純粋に効くため Green の法則でよく説明しうるような増幅が行なわれる. しかるに前記断面より湾口側では海面面積が前者に比し極めて大きく, 従つて風の効果も大きく効いてくる筈であつて, 湾形による増幅則よりも大きな程度で高潮波高が増大しているのであろう. ここに風の効果というのはかならずしもいわゆる吹寄せのみに限らず台風通過速度と長波伝播速度の関係による強振的増幅現象も考慮しなければならないであろう. 事実表-1 に示す如く高潮長波の伝播速度はほぼ 16m/sec の程度であり, 一方, 台風の伊勢湾周辺通過時の進行速度はほぼ 13~14m/sec 程度で, 両者の速度はかなり近接しており, 従つて長波波高の強振的増幅も考えられぬことはない.

#### 4. 高潮に伴う質量輸送とその流速

有限波高の長波では, かなり大きい水実質の, その進



第 6 図

行方向への輸送があることは前述の通りであるが、このような流速を特性曲線の考え方により誘導すれば次の如くである。すなわち Fig. 6 の如く、一様静止水深： $H_0$  の上に、 $\zeta$  なる水位上昇量をもつ長波が  $x$  方向に進行する場合を考える。

運動方程式は、

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad (1)$$

連続方程式は、

$$\frac{\partial}{\partial x} [(H_0 + \zeta)u] = -\frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad (2)$$

又は、

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} = -(H_0 + \zeta) \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3)$$

(3)式に  $f'(\zeta)$  (ただし  $f(\zeta)$  は未知函数をかけ(1)式に加えると、

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} \right) \{ f(\zeta) + u \} = (H_0 + \zeta) f'(\zeta) \frac{\partial u}{\partial x} - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} = -(H_0 + \zeta) f'(\zeta) \frac{\partial}{\partial x} \{ f(\zeta) + u \} \quad (4)$$

今、 $(H_0 + \zeta) \{ f'(\zeta) \}^2 = g$

とすれば、

$$f(\zeta) = 2\sqrt{gH_0} \left\{ \left( 1 + \frac{\zeta}{H_0} \right)^{1/2} - 1 \right\} \quad (5)$$

従つて

$$P \equiv f(\zeta) + u, \quad Q \equiv f(\zeta) - u \quad (6)$$

と書けば、

$$\frac{\partial P}{\partial t} + (u + \omega) \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + (u - \omega) \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

ただし  $\omega \equiv (H_0 + \zeta) f'(\zeta) = \sqrt{gH_0} \left( 1 + \frac{\zeta}{H_0} \right)^{1/2}$  (9)

従つて、 $P$  は  $x$  方向に

$$\sqrt{gH_0} \left( 1 + \frac{\zeta}{H_0} \right)^{1/2} + u \quad (10)$$

の速度で動く点に関しては一定であり、同様に、

$Q$  は  $x$  の負方向に

$$\sqrt{gH_0} \left( 1 + \frac{\zeta}{H_0} \right)^{1/2} - u \quad (11)$$

なる速度で動く座標に関しては一定である。すなわち、

進行波に関しては (6), (10), (11)より

$$Q = 0, \quad u = \frac{1}{2}P = 2\sqrt{gH_0} \left\{ \left( 1 + \frac{\zeta}{H_0} \right)^{1/2} - 1 \right\} = 2 \left\{ \sqrt{g(H_0 + \zeta)} - \sqrt{gH_0} \right\}_0 \quad (12)$$

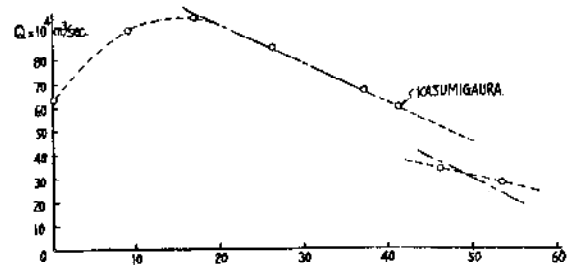
又、絶対伝播速度： $\Omega = u + \omega$  は(10), より

$$\Omega = 3\sqrt{g(H_0 + \zeta)} - 2\sqrt{gH_0} \quad (13)$$

$\zeta$  として伊勢湾沿岸における高潮の最大偏差を用いて高潮長波の水粒子移動速度： $u$ 、及び絶対伝播速度を各々(12), (13)式により計算し、表-1に示す。

すなわち、津を通る断面より湾口側では  $u \approx 1 \text{ m/sec}$  の程度であるが、それより湾奥に向つて相対波高の漸増にともないこの流速も増加し、湾奥では  $3 \sim 4 \text{ m/sec}$  の程度にも達する。既往の高潮解析では、しばしば微小波高の理論に立つため、この  $u$  を省略し、たとえば高潮伝播速度として  $\sqrt{g(H_0 + \zeta)}$  を用いていたが、ここに示す如く、海浜近くでは到底水実質の移動を無視することが出来ず、むしろ相対伝播速度と同程度の流速が現われることすらあるという点は十分注意されねばならない。

この水粒子移動による実質的な輸送流量を各断面につき計算し、表-1、及び Fig 7 に示す。



第 7 図

Fig 7 に見られる如く、湾口から津付近までは輸送流量が漸増し、津-四日市間で直線的に減少し、揖斐、木曾川の河口付近で流量の急激な減少を示した後、再び湾奥、名古屋港に向つて直線的に流量が減少する。

ここで、注意すべきは、われわれの以上の計算は高潮の crest について行つており、従つて時間的水位上昇項： $\partial \zeta / \partial t$  はほぼ 0 と認められるので、この計算では輸送流量は常に一定でなければならない。しかるに湾軸に沿つてかかる流量の変動があるのは矛盾するのであるが、これには次の如き理由が考えられる。すなわち、

(1) われわれの計算では海底摩擦による Energy の消費を考慮していない。流速、 $1 \text{ m/sec}$  を超すような場合は、摩擦項は省略出来ず、このため、流速減少、従つて輸送流量の減少を出す筈である。

(2) 更に、この計算では流水断面を矩形断面におきかえているため、水位上昇による流積の幅の変化；換言すれば湾両岸における陸地への侵入流量が考慮されてい

## 生産と技術

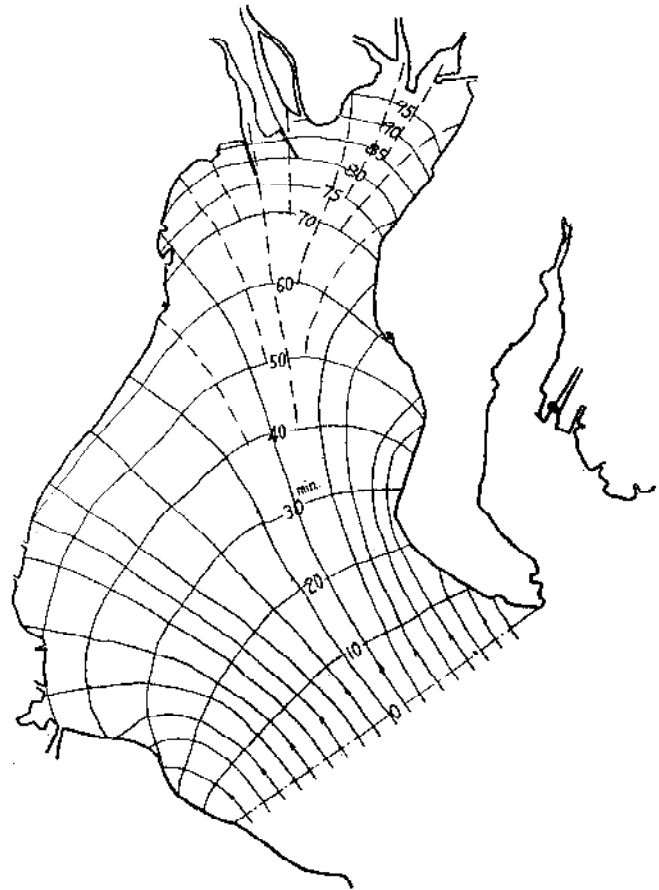
い、勿論、この侵入量を考えに入れば湾奥に行つて輸送流量は減少する。

(3) 上と同様に、沿岸河川への高潮遡上量も考慮されていない。たとえば表-1に示す如く、木曾川河口での流量の著減は、あるいはこれら河川への高潮の一部遡上で説明されるかもしれない。

以上の如き、ごく粗い第一近似をもつてしても、湾沿岸付近における高潮挙動の動的特性は、到底無視することが出来ない。たとえば、海岸堤防によつて、かかる高潮流れを阻止した場合、 $u=3m/sec.$  とすれば、第一近似として  $u^2/2g=0.46m$  の水位上昇があるから、いわゆる静的高潮水位に更にこの動圧による水位上昇量を付加して堤防高を計画する必要がある、しかも後者は決して無視しう程小さくないことに十分注意したい。

次に、このような実質流れを伴う高潮の陸岸への遡上の模様を概略、検討すれば次の如くである。すなわち、特に、最高潮位の起時の付近に着目すると時間的変動項はほぼ省略し得て、近似的に定常流の取扱いが出来る。すなわち、汀線で水位と流速が与えられた流れの陸岸逆勾配、又は水平勾配への背水曲線を求めればよい。

白子、及び四口市においてこのような背水曲線を計算し図示すれば各々 Fig 8 の如くである。もつとも最高潮に達するまでに先行的な浸水があればこのような侵入

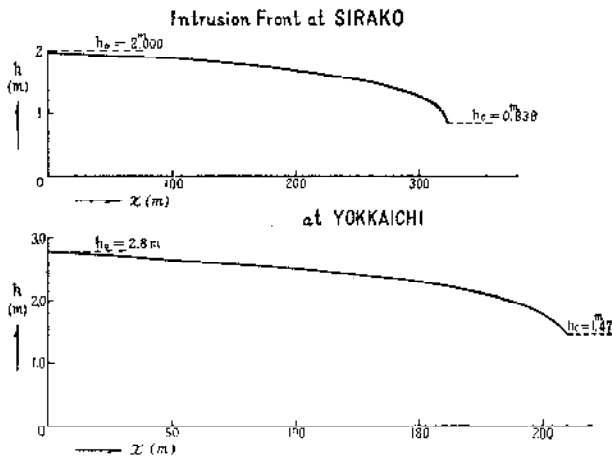


第 9 図

交線法を用い、伊勢湾内の高潮の屈折図を作図し、Fig 9 に示す如き結果を得た。なお、この際、高潮の初期峰線を断面：1（知多半島先端を通る断面）とし、直線状峰線を初期値として湾奥に向つて作図を行う。

得られた結果は次の如くである。

すなわち、高潮エネルギーは、特に津、及び常滑付近に集中し、白子、松阪付近では分散の傾向にあり、これはほぼ被害の程度と一致した傾向を示す。又、知多半島から名古屋港への高潮到達所要時間はほぼ 100 分程度である。なお、前述の踏査報告書には最高潮起時の聴込み値も報告されているが、これによれば、湾口（例えば鳥羽）で  $20h30m \sim 21h$ 、名古屋周辺（例えば四口市港）で  $21h$  と報告されており、又、同一地点でも  $\pm 30'$  程度の聴込み値差違がしばしば見られるので、われわれの行つた位相伝播速度とこれらと比較することは出来ない。



第 8 図

水面とはならないが、たとえば海岸堤防の決崩によつて急に高潮が侵入する場合の侵入水面の概形を与えるものとしてよく、従つて海岸線から背水曲線前面までの間が被害も甚大であり、高潮の流れによる flush が効くものと想われる。

## 5. 高潮の屈折

台風高潮を長波と見做して、風波と同様、屈折図を画くことが出来、これによつてエネルギーの集中、発散、及び高潮の伝播、沿岸における最高潮の起時等を知ることが出来る。われわれは Arthur-Munk-Issacs の修正直