

名古屋港および明石川河口付近における 潮流の二、三の特性

樋口 明生・中村 重久

SOME CHARACTERISTICS OF TIDES AT NAGOYA HARBOUR AND NEAR AKASHI RIVER

By Haruo HIGUCHI and Shigehisa NAKAMURA

Synopsis

The disasters at coasts are caused not only transient phenomena, i. e., storm surge and tsunami, but also by local scour and deposit by steady coastal currents and by artificial change of coastal line.

This study has been carried out to obtain some fundamental data of them, i. e., this study is on coastal flow and the related phenomena at Nagoya Harbour and the coast near Akashi River. At the two regions, coastal flow consists mainly of tidal currents. Bottom frictions and eddy viscosities are calculated and derived from the data of tidal observations at the regions, which seem to show some characteristics associated with tidal currents.

1. 緒 論

海岸付近における災害は台風による高潮、地震による津波などのほかに、定常的あるいは周期的とみられる海岸流による侵食や、築堤などによる地形の変化などが考えられる。

これらに関する基礎資料を得るために、名古屋港および明石川河口付近における海岸流およびその関連現

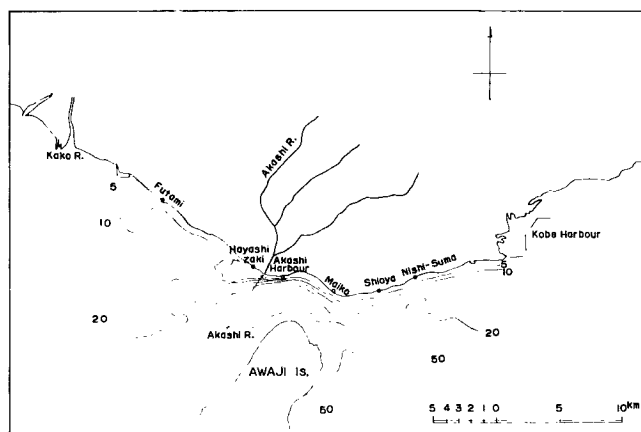


Fig. 1. Topography and coast near the mouth of Akashi River.

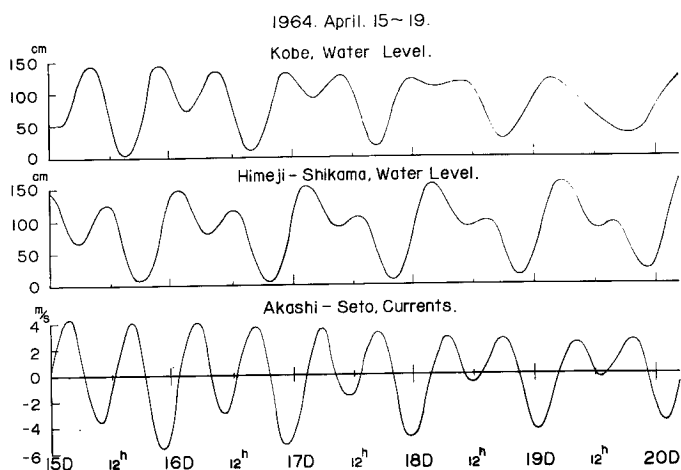


Fig. 2. Predicted sea levels of Kobe and Himej-Shikama, and predicted tidal currents at Akashi Strait.

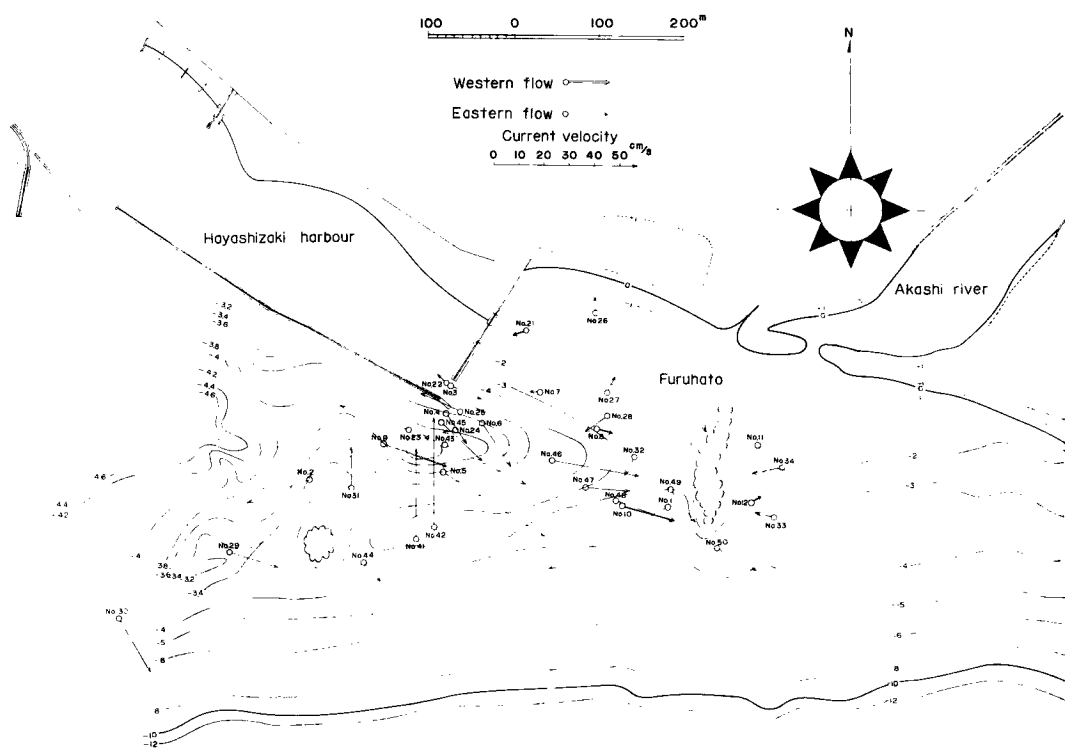


Fig. 3. Location of stations near coast and the mouth of Akashi River where tidal observations were carried out. Each of the stations encircled has ordinal indices respectively.

象について研究した。とくに潮流の海底におよぼす海底摩擦力および海水の運動における渦動粘性について考察する。

2. 明石川河口付近海岸における潮流観測

明石川河口付近において海岸流の観測を行なった¹⁾。この海岸流は主として潮流からなると考えられる。現在, 明石川右岸海岸に埋立の計画があるので, この観測の結果は海岸地形の変化にともなう潮流の作用の変化を予測するための基礎資料ともなる。明石川付近の海岸地形は **Fig. 1** のようになっており, 明石川右岸海岸(明石市林崎)は明石海岸の西端部に位置している。

潮流観測は昭和39年4月16, 17および18日(月令はそれぞれ4, 5および6)の3日間にわたっておこなわれた。この期間における神戸および姫路師磨の推算潮位, 明石瀬戸における推算潮流は **Fig. 2** に示される。潮流観測はこの **Fig. 2** でみられる明石瀬戸の推算潮流速の極大の時期をえらんだ。

潮流観測のために観測船として, 明石市林崎漁業組合の数トンの漁船を用いた。潮流観測時には船首より錨をおろし, 船が潮流によって一定方向を向いたのちに流速観測を行なうようにつとめたが, 潮流流速の観測結果には船の動揺などによる誤差が含まれている。潮流観測に用いた流速計は東邦電探株式会社製の CM-2型電気式流速計である。観測点の位置の決定には2台のトランシットを用いた。すなわち, 観測点に錨置

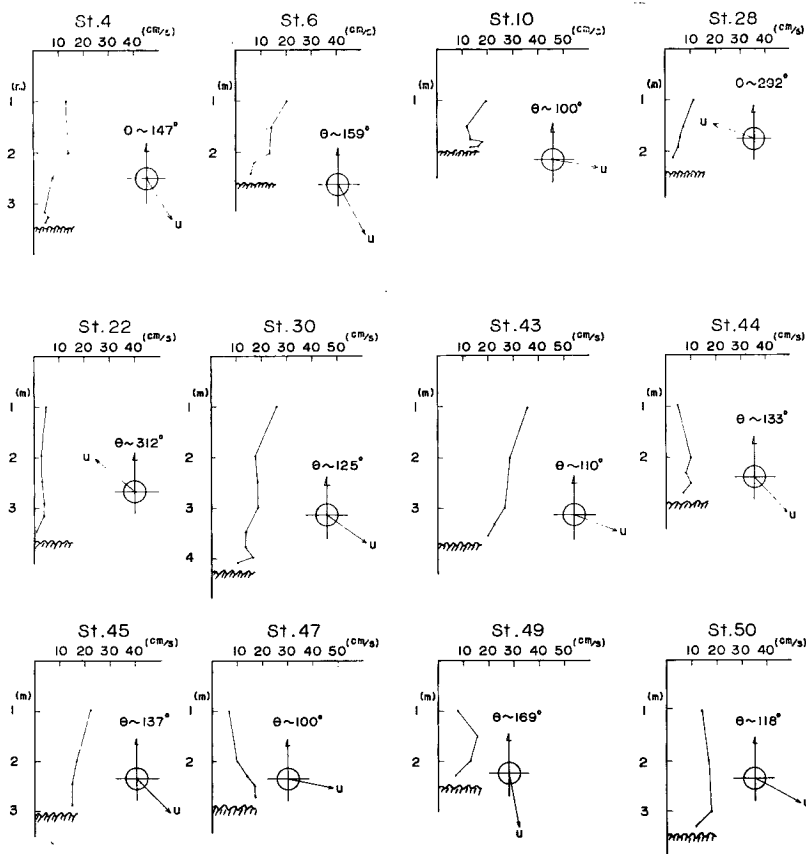


Fig. 4. Examples of vertical profile of tidal currents and averaged current directions.

した船を望見できる海岸上の2固定点にトランシットを据え、これによって測点の位置の決定を行なった。潮流観測で流速計を用いた測点の位置は Fig. 3 に示される。測点1~4では4月16日午前中、明石瀬戸の潮流が西流のとき、測点5~11では16日午後、明石瀬戸の潮流が東流のとき、測点21~25では17日午前中、潮流が東流のとき、測点26~34では17日午後、潮流が西流のとき、また測点41~50では18日午後、潮流が東流のとき、それぞれ潮流観測を行なった。

Fig. 4 には観測点における潮流の平均流向および流速の垂直分布の例を示す。一つの観測点について、一般的に流向は一定しているが、流速の小さいところでは流速計の構造上、正しい流向を示していないと思われる場合がある。これはここで用いた流速計による計測に対する誤差の限界に近い 5 cm/sec あるいはそれ以下の流速の場合に相当する。潮流流速の垂直分布は明石川付近の海岸域では複雑であって、水面から底まで一様であるとはいえない。これは明石川、林崎漁港の堤防、海底地形などに原因していると考えられる²⁾。潮流流速の垂直分布について、とくに海底付近に流速の極大があらわれる例がいくつかみられる。これは観測における誤差であると簡単にはいえないように思われる³⁾。潮流流速の垂直分布図より、各測点について観測時の最大流速とその流向とをとりだして Fig. 3 に示す。

このような流速計による観測のほか、浮子の追跡を行なって流況をしらべた。ここに用いた浮子は Fig. 5 に示すような構造のもので、大体海面下 1.5 m の深さにおける流速によって流れるように考察されている。トランシット 2 台で海岸からこの浮子を追跡し、毎分の位置を決定した。この結果をまとめて図示したものが Fig. 6 である。Fig. 6 からわかるように潮流が東向きの場合には、林崎漁港の防波堤南東部付近で投げられた浮子は、ほとんど古波戸の南端部まで直線状に移動する。浮子が古波戸の西側に入る例では、3 m 等深線のつくる沿岸砂州のところで進行方向を徐々に変え、沿岸砂州の峯線の延長に相当するところを岸へ向って移動している。また潮流が西向きの場合には古波戸南端で投げられた浮子は、ほとんど直線的に林崎漁港の防波堤南側へ向う。浮子の移動する速さは潮流の大きさと同じと考えられるが、潮流が西流の場合には東流の場合の約 $\frac{1}{2}$ である。

これから潮流の概況についてみるならば、明石瀬戸の潮流が東流の場合、林崎漁港と古波戸ではさまれる水域で 3 m 等深線より岸よりでは、海水はほとんどその水域内を環流し、明石瀬戸の潮流の流入およびそれにともなう海水の交流は極く微小であると考えられる。さらに、西流の場合には Fig. 3 より海水は明石港沖から古波戸南端をまわって、その水域へ入り込んでいるようにみえる。

3. 名古屋港防波堤開口部における潮流観測

名古屋港の高潮防波堤は昭和39年2月に90%完成した。この防波堤が完成する前の伊勢湾内の潮流に関しては多くの資料が蓄積されている。また、完成後の伊勢湾北部の潮流については模型実験などで^{4,5)}、かなりの資料が得られている。ところで、この防波堤の完成によって潮流がどのように影響を受けたかを知る実際の資料はまだ多くないようである。ここではこの名古屋港防波堤にある2つの開口部における潮流について考察する。この2つの開口部の地理的位置は Fig. 7 の記号MおよびSである。Mは大型船舶の航路にあたり主開口部と名づけ、Sは小型漁船の航走のためのもので副開口部と名づける。一般的にみて両開口部断面付近で海底は平滑であると思われるが、この断面を Fig. 8 に示す。

上述の開口部断面内で潮流観測が運輸省第5港湾建設局によって行なわれた。観測点は主開口部についてA~Gの7点、副開口部についてはH~Lの5点をえらび、それぞれの測点について観測時の海面下1,2,3,5,7 m および海底上 1 m において CM-2 型流速計を用いて潮流観測が行なわれた。ただし副開口部では水深の関係で海面下 7 m における観測は各測点とも行なわれていない。

観測はできるだけ潮位差の大きい朔または望の前後の時期をえらんだ。潮流観測を行なった時期の潮位は名古屋港気象観測塔で記録されたものについてみると Fig. 9 のようになる。すなわち、昭和39年1月27日、30日、31日および2月11日(月令はそれぞれ13, 16, 17および28)の低潮時あるいは高潮時から、それ

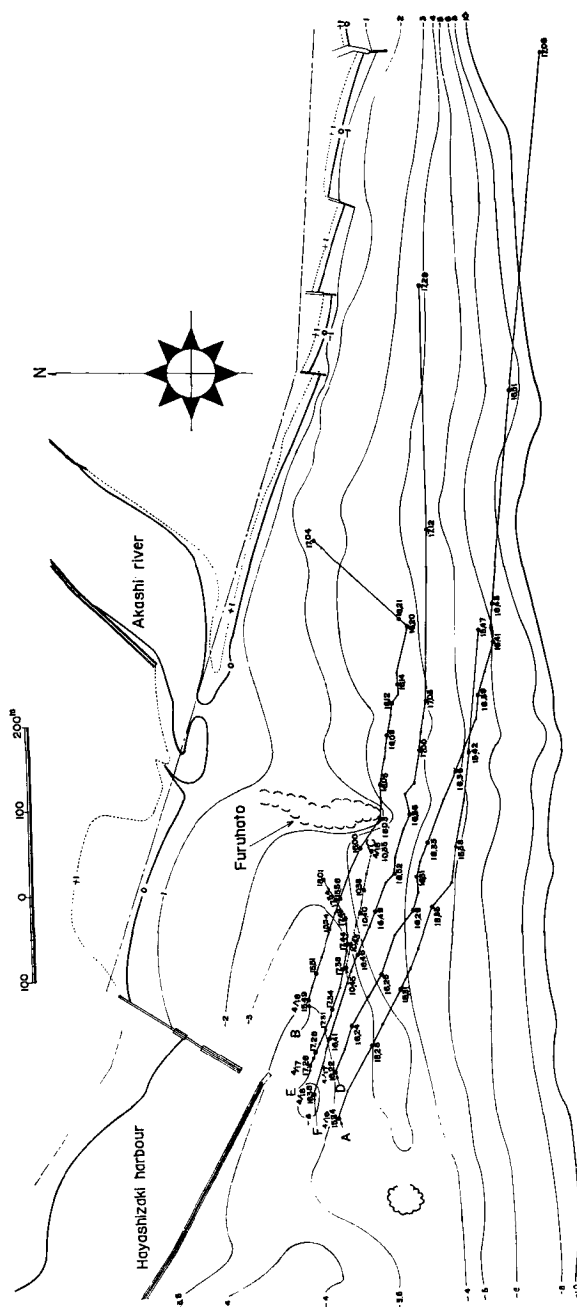


Fig. 6. Tidal loci which were observed by tracing the floats. The lined loci are at the eastern flow of Akashi Strait and the dotted are at the western flow. Times when the floats passed at the spots are numerically given respectively.

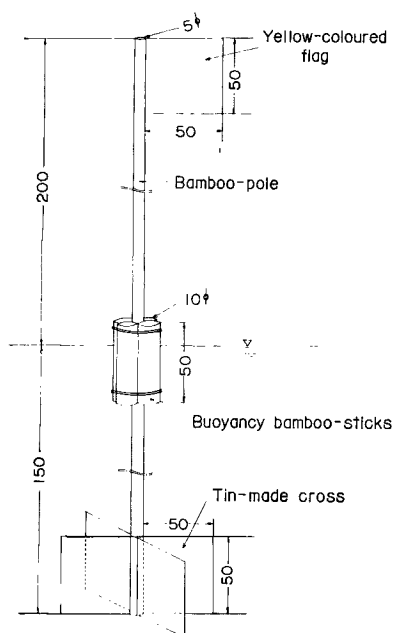


Fig. 5. Schema of float which was used for tracing tidal locus. Numericals are length in cm respectively.

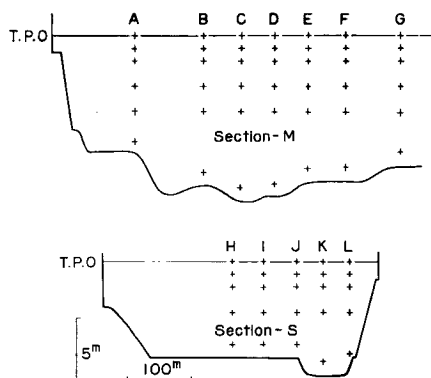


Fig. 8. Cross sections of two openings of the breakwater, in which mesh points also show the places where tidal observations were carried out.

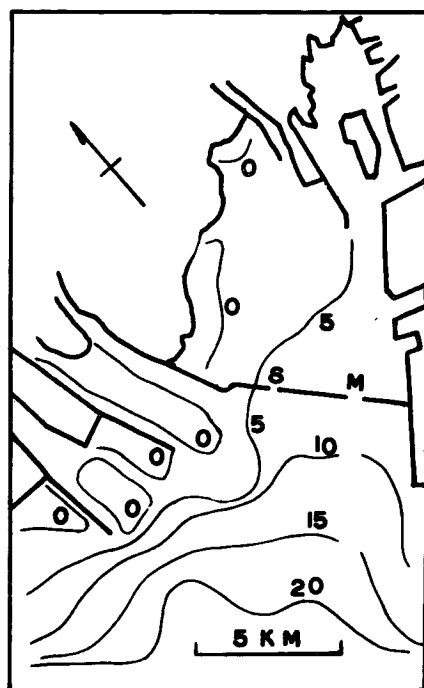


Fig. 7. Location of the new breakwater at Nagoya Harbour, in which the main opening and the sub-opening of the breakwater are marked by M and S respectively.

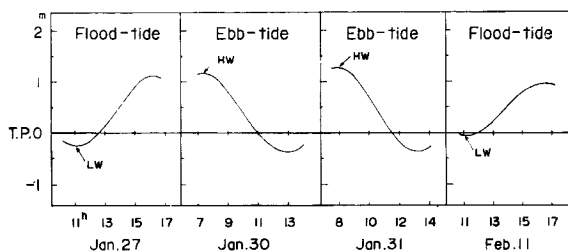


Fig. 9. Records of sea levels at the Meteorological Tower Station of Nagoya Harbour when the tidal observations were carried out.

につづく高潮時あるいは低潮時までの間について毎時の潮流が観測されている。なお参考までに名古屋港気象観測塔の風速をみると **Fig. 10** で示されるように、潮流観測時期には全般的に風速は小さく、風向は大体北西であるが、潮流の観測資料からみて、海面下 1 m より下の層ではほとんど風の影響はみられず、潮流のみと考えるとよいと思われる。潮流の時間的変化を測点についてみると **Fig. 11** のようになる。またそれぞれの日の流速最大とみられる時刻の流速断面図を **Fig. 12** に示す。

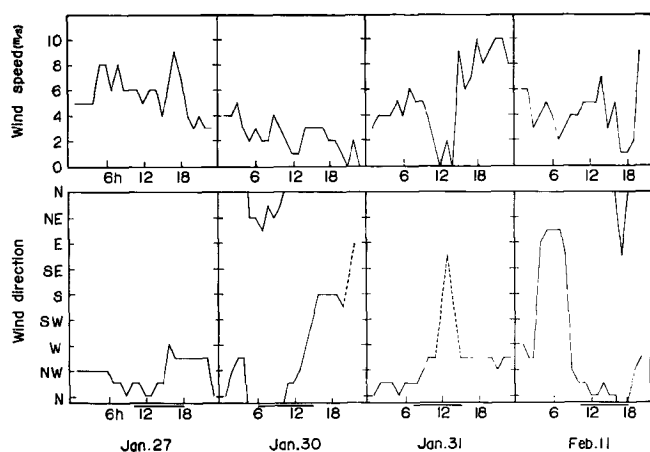


Fig. 10 Records of wind velocity at the Meteorological Tower Station of Nagoya Harbour when the tidal observations were carried out. The data of wind were obtained at the height of 17 m above low water level.

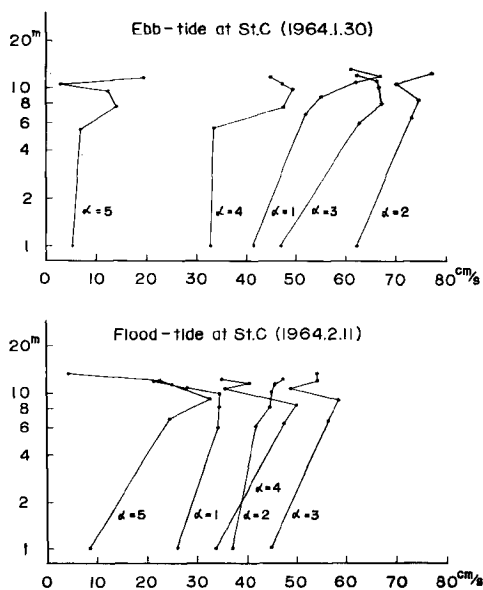


Fig. 11. Time variation of tidal currents at the station C of the main opening of the breakwater.

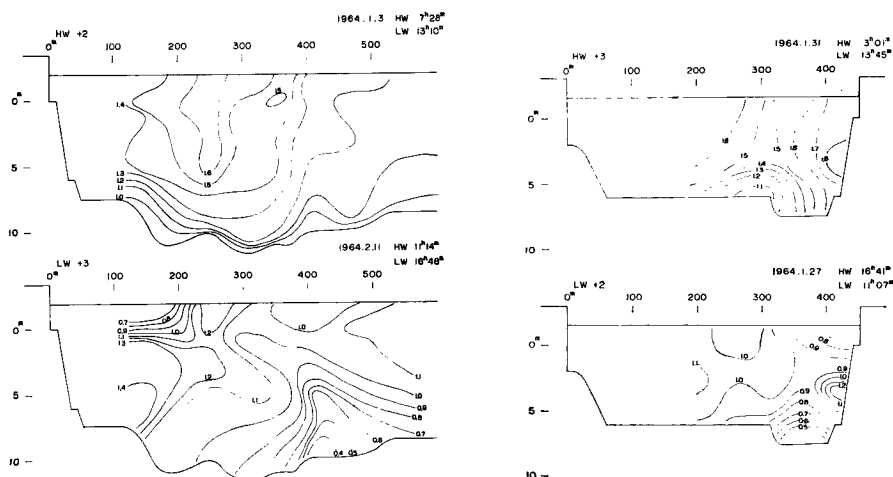


Fig. 12. Profiles of tidal currents in two cross sections of the openings of the breakwater. a) main opening and b) sub opening, in which the cases of ebb tide and flood tide are shown respectively. The profiles are at the time when the maximum velocities are found in two cross sections of the openings. The numerical indices on the contours are tidal current velocities in knot.

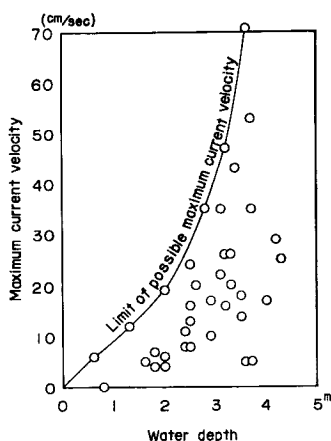


Fig. 13.

Limiting region of possible tidal currents against water depths. The region is below the limiting line in the diagram where all of tidal current velocities observed are plotted.

明石川付近海岸および名古屋港高潮防波堤開口部における観測点の水深とそこでの潮流流速とから、与えられた水深に対して潮流流速のとりうる値の限界を Fig. 12 に示す。

以上においてみた流速の垂直分布で、一部に底の近くに極大がみられる。その一つの原因は地球自転の効果であると思われる。その効果は

$$F = A \sin [f(1 + e^{-1}) \exp \frac{z}{2\sqrt{\nu t}} - \epsilon]$$

であらわれ、底から z の高さで時刻 t におけるコリオリ因子 f の効果により F なる流速成分がみられる。 A は流速成分の最大値をあらわす定数、 ν は動粘性係数、また ϵ は 0 に近い定数である。 $z/2\sqrt{\nu t}$ の

小さいところでは流速の垂直分布に関係し, $z/2\sqrt{\nu t}$ の大きいところでは上式であらわされる流速の分布はみとめられるとは考えられないが, これが潮流にともなう乱流の発生する原因と考えられる。

4. 海底摩擦力

海水の運動にともない, その境界の一つをなす海底では海底摩擦力がみられる。海底摩擦力の推定は, 海水の運動方程式を解く場合あるいは限界掃流力の問題を扱う場合に必要なのである。ここでは海岸付近の流速の垂直分布が海底の付近では対数分布則にしたがうとして

$$u = \int_{z_0}^z \frac{1}{\kappa_0 z} \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} dz$$

で与えられるとする。このとき密度流の問題に考慮しないならば, 密度の変化は大きく見積っても 3% をこえない。したがって水の密度の変化に対する効果は以下において考慮しない³⁾。密度 ρ の変化が高さ z に関与しないものと考えられるならば

$$u = \frac{1}{\kappa_0} \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \ln \frac{z}{z_0}, \quad \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = u_*^2$$

ここに κ_0 は von Kármán の定数, また u_* は摩擦速度と定義される。

Table 1. Bottom frictions and critical friction velocities

Station	Depth (m)	Date	Time	Bottom friction (dyne/cm ²)	Direction	u_{*c} (cm/s)	u_* (cm/s)	M_d est. ($\equiv d$) (mm)
1	3.7	Apr. 16	h m 10.40	1.64	164°	1.5	1.28	0.14
2	3.3		11.00	4.04	272	1.7	2.01	0.35
3	2.5		11.14	6.50	92	1.5	2.55	0.26
4	3.5		11.21	0.27	146	1.6	0.52	0.55
5	3.2		15.30	12.82	130	1.7	3.58	0.35
6	2.6		15.41	6.66	171	1.7	2.58	0.45
22	3.7	Apr. 17	11.10	0.15	313	1.5	0.39	0.26
23	4.2		11.25	5.11	300	1.7	2.26	0.45
24	3.6		11.30	5.76	262	1.7	0.24	0.50
25	4.0		11.31	3.31	285	1.6	1.82	0.30
28	2.4		16.45	1.99	295	1.4	1.41	0.25
29	3.3		16.54	6.35	45	1.7	2.52	0.36
31	3.2		17.20	4.09	0	1.7	0.64	0.35
32	2.5		17.29	3.31	260	1.5	1.82	0.25
41	2.8	Apr. 18	16.40	24.50	0	1.7	4.95	0.36
42	3.4		16.45	13.99	0	1.7	3.74	0.36
43	3.7		16.54	2.56	106	1.7	1.60	0.40
44	2.9		17.00	0.64	120	1.7	0.80	0.36
45	3.1		17.10	1.54	122	1.7	1.24	0.55
48	2.5		17.23	1.35	110	1.6	1.16	0.25
49	2.5		17.27	5.02	150	1.5	2.24	0.14
50	3.5		17.30	7.51	125	1.5	2.74	0.24

u_* : friction velocity defined by $u_* = \sqrt{\tau/\rho}$, u_{*c} : critical friction velocity, and M_d est.: estimated mean diameter of sediments.

海底摩擦力は海底付近の境界層の規模を決定する一つの主要な因子であり、また潮流現象におけるエネルギー消費の一つの原因とも考えられる。海底付近の流速の観測結果を用いて海底摩擦力を推算する際に流速の垂直分布が対数分布にしたがうとして多くの研究がなされている⁷⁻⁹⁾。潮流流速の垂直分布は必ずしも定常流でみられる分布と同じであるとはいえないが、ここでは潮流に対しても海底近くでは上記の式で与えられる対数分布則が適用できるものとする。この式を明石川河口付近海岸の潮流観測結果に適用して得られた海底摩擦力を **Table 1** に示す。**Table 1** には τ の計算に用いた流速の向きもあわせて示す。

底面が砂や礫などで構成されている場合には、そこに働く剪断応力が一定の限界値 τ_c 以上になると砂礫が移動をはじめる。この限界値(限界掃流力)は海底変形において重要な役割を演じる。この限界掃流力を計算する公式はいくつか提唱されている^{10,11)}。ここでは水路床に関する限界掃流力と底質砂礫の粒径との関係が、実際の海底に対しても適用できると考え、また海底付近の潮流が観測時の前後において準定常とみなせると考える。そしてこの限界掃流力と粒径との関係については岩垣公式¹²⁾を適用することにする。

明石川河口付近海岸における底質分析の結果得られている平均粒径から、潮流観測を行なった測点における底質の平均粒径を推定し、これを岩垣公式

$$\left. \begin{aligned} R_* > 671 & ; u_{*-c} = 0.05 \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g d \\ 162.7 < R_* < 671 & ; = \left\{ 0.01505 \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g \right\}^{25/22} \cdot \nu^{-3/11} \cdot d^{31/22} \\ 54.2 < R_* \leq 162.7 & ; = 0.034 \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g d \\ 2.14 < R_* \leq 54.2 & ; = \left\{ 0.1235 \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g \right\}^{25/32} \cdot \nu^{7/16} \cdot d^{11/32} \\ R_* \leq 2.14 & ; = 0.14 \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g d \end{aligned} \right\}$$

ただし

$$R_* = \left\{ \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) g \right\}^{1/2} \cdot d^{3/2} / \nu$$

に入れ、 $\sigma/\rho = 2.65$, $\nu \sim 0.01$, $g = 980 \text{ cm/sec}^2$ としてもとめたものを **Table 1** に海底摩擦力とあわせて示す。

つぎに名古屋港高潮防波堤開口部における潮流観測の結果から海底摩擦力を推定する方法を考える。すでに述べたようにこの防波堤開口部における潮流観測の網目は海底付近の流速垂直分布の詳細を知ろうとするには粗い。各測点についてそれぞれの時間における流速の垂直分布をみると、流速が極大になる時刻にはほとんど水面から底まで一様流とみなされる分布を示し、流速が小さい時刻にはその分布は複雑である。その間に表面から底まで対数分布則にしたがっているとみられる例もみられる。ここでは海底上 1 m の流速の観測値から海底摩擦力をもとめる。ところで防波堤開口部付近の底質は粘土およびシルトからなると考えられるから⁹⁾、海底を滑面と仮定し、von Kármán の式を用いる。すなわち

$$\frac{u}{u_*} = 5.75 \log \frac{u_* z}{\nu}$$

この式を用いて計算した海底摩擦力を防波堤の主開口部および副開口部について時間をパラメーターにとり示すと **Fig. 14** および **Fig. 15** のようになる。これを見ると海底摩擦力は水深の小さいところで大きい値をとる傾向がある。各開口部断面の測点に関するの平均を $\bar{\tau}$ とし、観測時期の低潮時あるいは高潮時からそれにつづく高潮時あるいは低潮時までの時間を $T/2$ ($\equiv 180^\circ$) であらわし、潮位差を H であらわす。ここで $\bar{\tau}/\rho$ (T/H)² と $T/2$ とを座標軸にとって **Fig. 16** に示す。 $T/2$ は大体 6 時間である。 $\bar{\tau}$ の値は最大 6 dyne/cm²、潮流の極大のとき平均として 4.2 dyne/cm² である。**Fig. 16** には海底上 1 m における流速に対してもとめた海底摩擦係数の時間的変化も示す。

従来の研究による $\bar{\tau}$ の値は R. Agnew¹³⁾ によって要約されているが、それによれば、Irish Sea の潮流

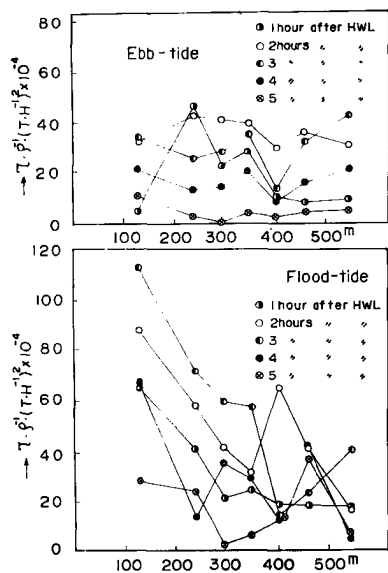


Fig. 14. Distributions of bottom stress at the main opening at the breakwater of Nagoya Harbour.

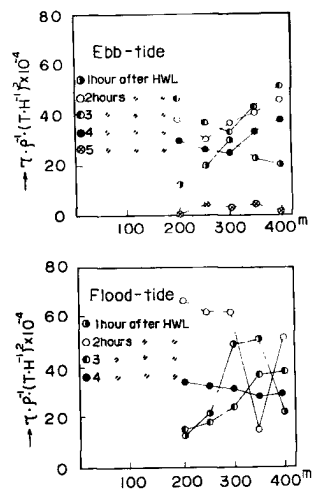


Fig. 15. Distribution of bottom stress at the sub-opening of the breakwater of Nagoya Harbour.

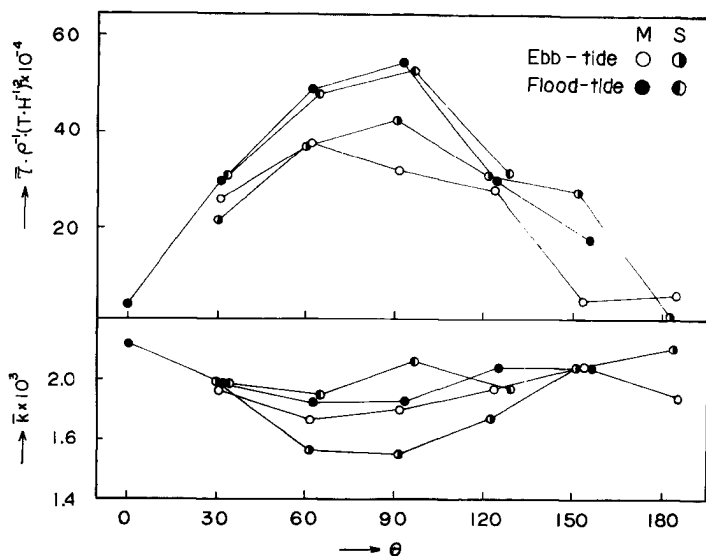


Fig. 16. Time variations of averaged bottom stress at the openings of the breakwater of Nagoya Harbour.

について Bowden および Fairbairn は最大 4 dyne/cm^2 , また Bowden は最大 8 dyne/cm^2 を与えている。さらに California 海岸沖で Lesser⁷⁾ は海底を粗面または滑面として計算し, それぞれ5または 0.2 dyne/cm^2 という値を得ている。また Kennebec の感潮河川については W.H.I. (1952) は $10 \sim 30 \text{ dyne/cm}^2$ を与えている。ちなみに, Bowden および Fairbairn の場合¹⁴⁾, 用いた資料は水深 $15 \sim 20 \text{ m}$, 潮位差約 6 m の水域におけるもので, これから τ の値について, 水深約 10 m , 潮位差約 1.5 m の防波堤開口部における値として潮流極大のときの平均が 4.2 dyne/cm^2 程度の値であることは, はば妥当であるように思われる¹⁵⁾。海岸の条件は異なるが明石川河口付近海岸においても海底摩擦力が大体 7 dyne/cm^2 以下, 測点によっては 24.5 dyne/cm^2 のところもある¹⁾。得られた数値はそれぞれ上記の値とはほぼ同じ範囲であると思われる。

5. 渦 動 粘 性

海水の運動を考える場合, 海水の内部摩擦力がどのような大きさであるかを知る必要がある。この内部摩擦力は海面における風応力および海底における海底摩擦力に関係すると考えられるが, そのほかに流れの状態によるものと考えられる。このような渦動粘性性にもとづく剪断力(内部摩擦力)の推算には Prandtl の混合距離の理論を用いるとか^{6,16)}, 乱流理論の結論を援用する¹⁹⁾という方法もある。

ここではさらに別の立場から考察したい^{3,15)}。いま, 流れの方向に x 軸, 海底から上方に z 軸をとる。垂直方向に δz だけ距った2点での流速の差 δu は δz の間の海水に働く内部摩擦力の一部を構成する。流速としてはある時間に対する平均流速 $\bar{u}$ を考える。このとき流速差 δu に対するエネルギー $\frac{1}{2} \rho (\delta u)^2$ が渦動粘性力におきかわるものとみると

$$\eta_z \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \frac{1}{2} \rho (\delta u)^2$$

ところで, 実際には, 流速には $\bar{u}$ のほかに流れの成分 u' の効果もあるはずであるが, この u' は $\bar{u}$ に対してある範囲内の値をとると考えられる^{16,17)}。たとえば名古屋港高潮防波堤開口部における潮流観測の結果を用いて渦動粘性力の推算をしようとしても u' はわからないから推定の方法として, ここでは上の式を用いることにする。ここに η_z は垂直渦動粘性係数に相当する量である。上式を用いて形式的に η_z をもとめるとき, $\eta_z < 0$ は渦動粘性力が逆向きに作用することを示すものと考えられる。それで計算にあたっては $\partial \bar{u} / \partial z$ のかわりにその絶対値をとることにする。ここでは, 垂直方向にとりあった網目の点について上式を用いて η_z をもとめ, これから毎時の主開口部および副開口部における断面内の η_z の分布図をつくる。これから各開口部断面積 A に対する η_z の断面平均

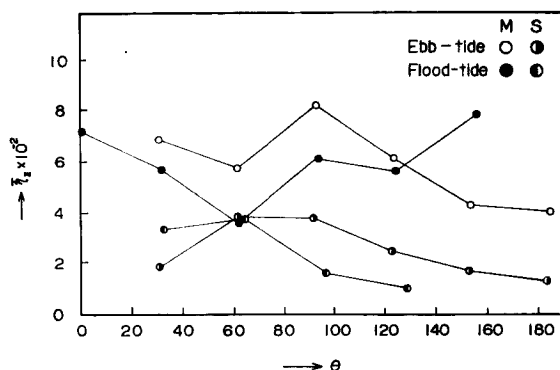


Fig. 17. Time variations of $\bar{\eta}_z$ at the openings of the breakwater of Nagoya Harbour.

Table 2. Coefficients of vertical eddy viscosity near and the coast of Akashi River.

Station	Depth (m)	Height above sea bed (m)	u (cm/s)	η_z	Station	Depth (m)	Height above sea bed (m)	u (cm/s)	η_z
4	3.5	2.5	13	200	28	2.4	1.4	11	100
		1.5	14	150			0.9	7	10
		1.0	8	25			0.7	6	10
		0.5	7	20			0.5	5	20
		0.3	5	5			0.3	3	
		0.2	6	5	30	4.3	3.3	25	400
		0.1	5				2.3	17	50
6	2.6	1.6	20	150			1.3	18	0
		1.1	14	25			1.8	18	250
		0.6	13	60			0.8	13	0
		0.4	7	10			0.5	13	30
		0.2	6				0.3	16	30
23	4.2	3.2	16	650	43	3.7	2.7	35	350
		2.2	29	300			1.7	28	100
		1.2	23	25			0.7	26	60
		0.7	22	40			0.4	22	20
		0.5	18	10			0.2	20	
		0.3	17	25					
		0.2	12	5					
		0.1	11						

$$\bar{\eta}_z = \int_A \eta_z ds / \int_A ds$$

を得る。Fig. 15 におけると同様 $T/2$ を時間軸にとって $\bar{\eta}_z$ の時間変化を Fig. 17 に示す。この図では $\bar{\eta}_z$ の時間変化の規則性は明確ではない。 T および H の考慮のもとに $\bar{\eta}_z$ と τ との関係を Fig. 18 に示す。ここに τ の変化に対応して $\bar{\eta}_z$ も変化していることがわかる。

明石川河口付近海岸の潮流観測の資料を用いて $\bar{\eta}_z$ を計算した例を Table 2 に示す。この場合 δz を名古屋港の場合より小さくとしたことも理由の一つであろうが、 $\bar{\eta}_z$ が名古屋港の場合の平均 400 C.G.S. にくらべて、小さい値となっている。

さらに平均流の方向に速度勾配がある場合平均流の方向に距離 δx の間に δu の速度差があるとき、前と同様な考えによって

$$\eta_z \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{2} \rho (\delta u)^2$$

この式の η_z は水平渦動性係数の平均流方向の成分を示す量と考えられる。ここでは明石川河口付近海岸で浮子追跡によって得られた結果に上式を適用して計算した結果を Fig. 19 に示す。

6. タイダル・フラッシュについて

海岸付近の潮流はこれまでにみたような特性をもっている。この海岸付近の潮位および潮流は河川の下流部の運動に影響をおよぼす。これについてはいろいろと研究されている²⁰⁻²³⁾。

名古屋港付近では海水と河川水について強混合型であり³⁾、ここでもすでにみたように防波堤開口部では潮流が海水の運動を支配しているとみてよいと思われる。

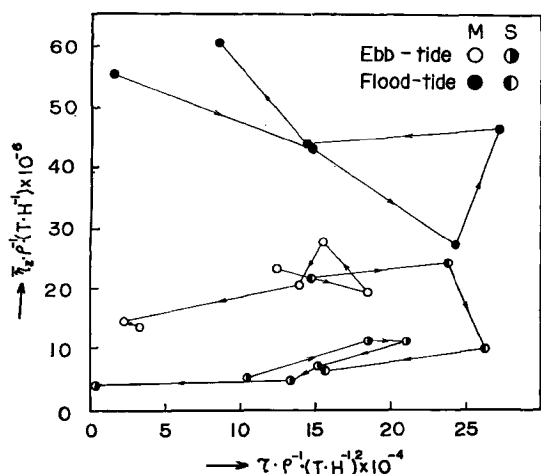


Fig. 18. Relations between η_z and τ at the openings of the breakwater of Nagoya Harbour.

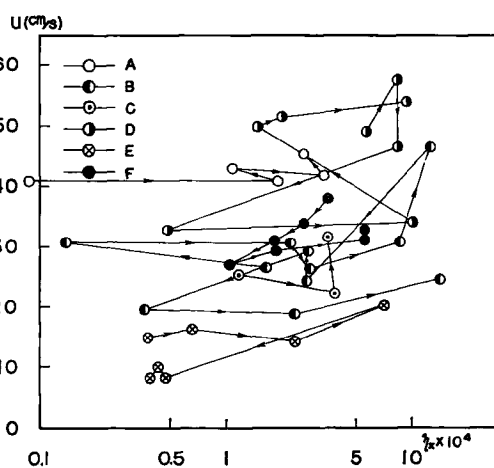


Fig. 19. Relations between u and η_x near the mouth of Akashi River.

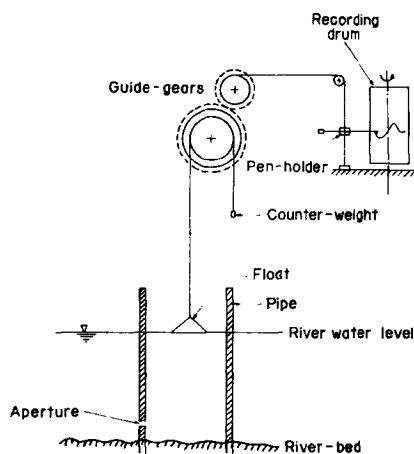
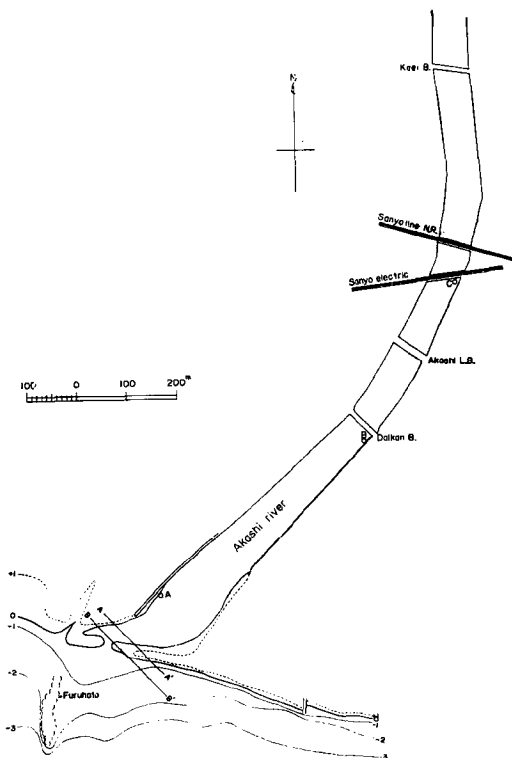


Fig. 21. Schema of Toyohara's tide gauge which is used for recording the water level in Akashi River.

Fig. 20. Location of stations where the water levels are recorded in Akashi River. The stations are encircled and represented by A, B and C.

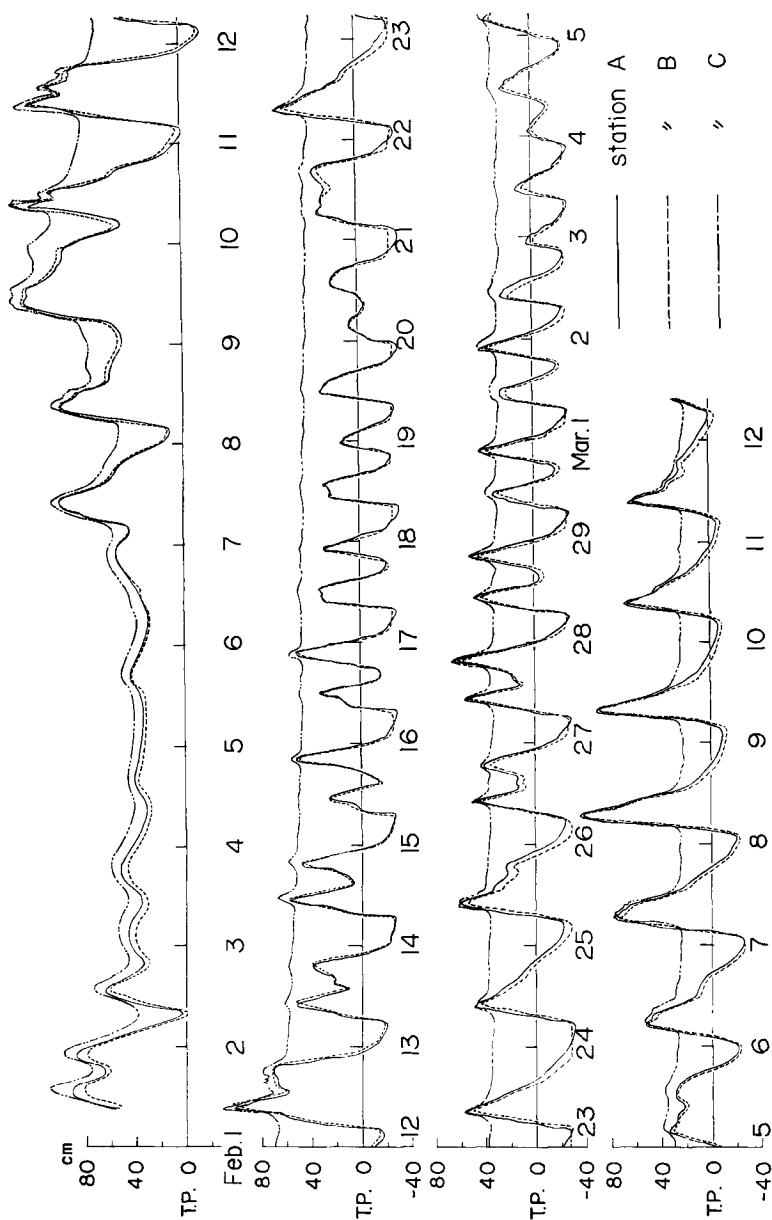


Fig. 22. Time variations of water levels at the station A, B and C in Akashi River.

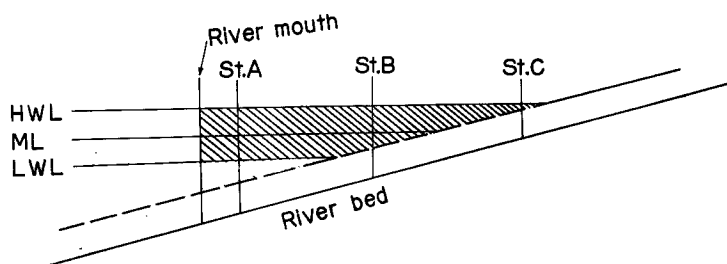


Fig. 23. Schematic profile of tidal estuary, which is a modification of the mouth of Akashi River. Quantity of water which flows in or out across the river mouth during flood or ebb tide is represented by the hatched area for a constant width of the river.

明石川河口付近ではその混合型はわからないが、ここでは河口を通して、潮位変化にともなう海水の流入について簡単な考察をする。明石川河口付近は Fig. 20 のようになっていて、T.P.O.の等高線は河口閉塞の現象を示している。この河口付近に測点 A, B および C を設け (Fig. 20 参照)、各測点に Fig. 21 のような構成の豊原式水位計を用いて、水位変化の連続記録を得た。この記録は Fig. 22 に示す。

明石川河口付近の流れはいろいろの要素に支配されているが、ここでは河口部を通して、潮位変化にともなう海水の出入に着目する。その概況を模式的に Fig. 23 に示す。すなわち、潮位について、低潮時から高潮時までに河口から河川内に流入する海水の量は図のハッチングの部分に相当する。したがって川幅を考慮すれば、その量を見積ることができる。

いま、この潮位差を H また潮位変化の影響のみられる河川の水面積を S とする。概略の傾向をみるために川幅はほぼ一定とみなし、河の両岸は垂直であるとする。河口における低潮位が河川流のつくる水深とほとんど同じの場合、低潮位からつぎの高潮位までの間に河口から河川内に流入する海水の量 V は大体 (河床勾配は一定と考慮して)

$$V = \frac{H \cdot S}{2}$$

で与えられる。またとくに H が河口における平均水深にくらべて非常に小さい場合には、上式のかわりに

$$V = H \cdot S$$

を用いても差支えない。このようにして得られた体積 V の海水が河に入るに要する時間は潮位変動周期 T の $\frac{1}{2}$ であるから、海水の河への流入する平均流量は

$$\bar{Q} = \frac{V}{(T/2)}$$

であたえられる。さらに潮位変化が正弦的であると考えられる範囲で、海水の河へ流入する流量の極大は

$$Q_{\max} = \sqrt{\pi/2} \cdot \bar{Q}$$

であたえられる。Fig. 22 の水位記録のなかから、2月11日、4日および18日 (あるいは3月2日) の例について、 V , $\bar{Q}$ および $Q_{\max}$ を計算したものを Table 3 に示す。ここに河川内で潮位変化の影響のおよぶ範囲を河口から約 1 km 上流までとし、その水面積を約 $9 \times 10^4 \text{ m}^2$ とした。また T として 24 時間をとる。もし T として 12 時間をとれば、同一の V に対して $\bar{Q}$ および $Q_{\max}$ は上の条件で計算したものの 2 倍になる。明石川河口の垂直断面形は、Fig. 20 の A-A' および B-B' に対応して Fig. 24 であらわされるが、河口における水流は必ずしも断面内一様であるとは限らないから、断面平均をとって得られた平均流速をもって、河口の流砂量の問題を考察することは適切であるとは考えられない。それにしても Table 3 の $Q_{\max}$ は潮位差の大きい 2月11日でも $2.2 \text{ m}^3/\text{s}$ であるから、河口の断面積と対比してみると、海岸における潮流にくらべ明石川から流出する水量は非常に小さく、ほとんど潮位変化による海水の出入が河口部の流

Table 3. Tidal flow across the mouth of Akashi River.

No.	Date	tidal range (m)	V (m^3)	Q (m^3/s)	$Q_{\max}$ (m^3/s)	T (h)
1	Feb. 11	1.50	67500	1.55	2.20	12
2	Feb. 4	0.36	7200	0.16	0.23	
3	Feb. 18 } Mar. 2 }	0.30	13500	0.31	0.43	
4	Feb. 18 } Mar. 2 }	0.30	13500	0.61	0.86	6

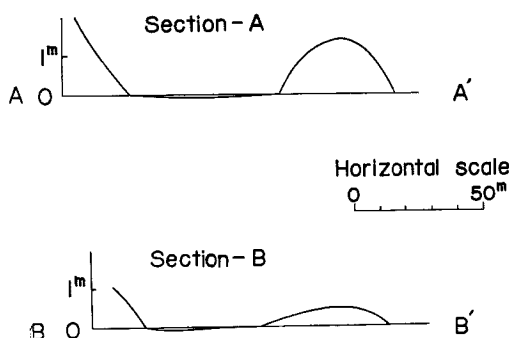


Fig. 24.

Vertical cross sections near the mouth of Akashi River. A-A' and B-B' correspond to those found in Fig. 20.

れの原因であり, その流れも **Table 3** にみるようになんとも小さい。このことは明石川には河口における潮位変化による水の往復運動がみとめられ, 上流からの流送土砂が河口付近に堆積し, さらに明石川付近海岸の沿岸流の影響は河口閉塞の現象を促進させる可能性を含んでいると考えられる。

7. 結 論

名古屋港高潮防波堤開口部および明石川河口付近における潮流観測の結果を解析して, つぎのような結論が導かれるであろう。

1) 潮流流速の極大時前後においては流速の垂直分布は対数分布あるいは一様流的分布を示すが, 流速が小さくなると, また海岸の極く近くでは分布が複雑になる。底の近くの流速の垂直分布および潮流にともなう乱流の発生の一因として地球自転効果も考えられる。

2) 海底摩擦力は防波堤開口部では潮流流速に対応して周期的に変化しその振幅は大体 4.2 dyne/cm^2 である。なお海底摩擦係数の値は 2×10^{-3} に近いが時間的に変化している。また潮流流速が極大とみられるときの明石川河口付近の海底摩擦力は最大 24.5 dyne/cm^2 である。水深, 潮位差, 海底地形などによってもその大きさは異なる。

3) 垂直渦動粘性係数は防波堤開口部では時間的な変化は明瞭ではない。最大 800 C.G.S. の値をとる。明石川河口付近については大体 10^2 C.G.S. の値をとる。その垂直分布は流速の場合と同様複雑である。また明石川河口付近における水平渦動粘性係数は 10^4 C.G.S. の値をとる。

4) 明石川河口では河川流量が小さく, 河口では往復流が顕著であると思われる。

潮流を主とする海岸流は防波堤および河口付近の海岸域における侵食と堆積とに関係が深い。これについてはさらに研究の要があると思われる。

謝 辞

この研究を遂行するにあたり、有益な討論をいただいた岩垣雄一教授に心から感謝の意をあらわす。また観測資料を提供していただいた運輸省第5港湾建設局ならびに名古屋地方気象台に厚く感謝の意をあらわす。また現地観測においては明石市市役所建設部土木課の方々に、いろいろ御配慮いただいた。さらに本研究をすすめるにあたって助力を惜しまれなかった防災研究所の柿沼忠男助手、井上雅夫助手および現地観測にあたられた防災研究所の諸氏にも心から感謝の意をあらわす。

参 考 文 献

- 1) 財団法人防災研究協会：明石川右岸海岸埋立にともなう海岸および河口調査報告書，1964. p. 205.
- 2) Per Bruun: Long shore currents and long shore troughs, Jour. Geophys. Res., 68-4, 1963, pp. 1065-1078.
- 3) 樋口明生・中村重久：名古屋港の潮流観測について，京大防災研究所年報 No.7, 1964, pp.410-419.
- 4) 樋口明生・吉田幸三：名古屋港の潮流に関する水理模型実験Ⅱ，京大防災研究所年報 No. 6, 1963, pp. 346-364.
- 5) 中村充・白石英彦・佐佐木泰雄・大西英夫：伊勢湾の水理模型実験についてⅡ，第10回海岸工学講演会講演集，1963, pp. 80-85.
- 6) 野満隆治：瀬野錦蔵：新河川学，1959, pp. 86-92.
- 7) Lesser, R.M.: Some observations of the velocity profile near the floor, Trans. A.G.U., 32-2, 1951, pp. 207-211.
- 8) Bowden, K.F. and L.A. Fairbairn: A determination of the frictional forces in a tidal current, Proc. Roy. Soc. A, 214, 1952, pp. 371-392.
- 9) Charnock, H.: Tidal friction from currents near the sea bed, Geophys. J. Roy. Astro. Soc., 2, 1959, pp. 215-221.
- 10) 土木学会編：水理公式集，昭和38年増補改訂版，1963, pp. 106-109.
- 11) 土屋義人：混合砂礫の限界掃流力について，土木学会論文集 No. 98, 1963, pp. 1-9.
- 12) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究，土木学会論文集 No. 41, 1956, pp. 1-21.
- 13) Agnew, R.: Estuarine currents and tidal streams, Proc. 7th Conf. Coastal. Eng., Vol. 2, 1960, pp. 510-535.
- 14) Bowden, K.F. and L. A. Fairbairn: Measurements of turbulent fluctuations and Reynolds stress in a tidal current, Proc. Roy. Soc. A, 1956, pp. 422-438.
- 15) 中村重久：防波堤開口部の潮流に伴う海底摩擦および垂直渦動粘性係数について，第11回海岸工学講演会講演集，1964, pp. 94-97.
- 16) Bowden, K.F.: Observations of turbulence near the sea bed in a tidal current, Quart. J. Roy. Met. Soc., 81, 1955, pp. 640-642.
- 17) Bowden, K.F. and M. R. Howe: Observations of turbulence in a tidal current, Jour. Fluid Mech., 17-2, 1963, pp. 271-284.
- 18) Kent, R.E. and D.W. Pritchard: A test of mixing length theories in a coastal plain estuary, Jour. Mar. Res., 18-1, 1962, pp. 62-72.
- 19) 速水頌一郎：On the mechanics of flow in a wide alluvial river, 上海自然科学研究所欧文報告，1, 1939.
- 20) 市栄誉：タイダル・フラッシュについて，第1回海岸工学研究発表会論文集，1954, pp. 45-52.
- 21) 市栄誉：Estuary の水理について，第2回海岸工学講演会講演集，1955, pp. 41-48.

- 22) Valembois, J. et A. Daubert : The calculation of currents in the Caroute Canal between the Etang de Berre and the Mediterranean Sea, Jour. I.A.H.R., 1-1, 1963, pp. 20-25.
- 23) Arthur, R.S. : The equations of continuity for seawater and river water in estuaries, Jour. Mar. Res., 22-2, 1964, pp. 197-201.