

栂崎港の漂砂調査について

石原藤次郎・岩垣 雄一・野田 英明

FIELD INVESTIGATIONS OF SAND-DRIFT AT GUMIZAKI FISHERY HARBOR

*by Dr. Eng. Tojiro ISHIHARA, Dr. Eng. Yuichi IWAGAKI
and Hidzaki NODA*

Synopsis

Gumizaki Fishery Harbor in Fukui Prefecture facing to Japan Sea has been filled up by drifting sand annually. Therefore, the function of the harbor has been maintained by dredging.

This paper reports the results of the field investigations made to study the cause of coastal material movement and deposition in the basin and to consider the counter-measure. The field investigations contain echo-sounding survey, analysis of coastal material and observations of wind waves, coastal current, sand-drift and seich in the basin. Results of consideration based on the observed data lead to the conclusion that the seich in the basin may play an important role to the filling-up of the basin by drifting sand.

1. ま え が き

福井市の西部約 20km にある日本海岸に面した栂崎港は、毎年港内泊地が漂砂により埋没し、浚渫によって、漁港としての機能を維持してきた。とくに冬期には港内泊地は漂砂の堆積が激しく、その機能がいちじるしく低下し、最悪の場合にはその機能を停止するという事態が生じ、恒久的な埋没防止対策が切望されてきた。そこで著者らは、埋没の原因を究明し、埋没防止対策を講ずるため現地調査を行ない、貴重な資料を得ることができた。この論文はその調査報告である。

調査期間は昭和34年8月、同12月および昭和35年12月の計3回、それぞれ10日前後にわたって実施した。調査の主目的は漂砂の移動と、その泊地内における堆積の機構を明らかにすることであり、上の観点から、ある期間ごとの泊地内の深浅測量により泊地内における漂砂の堆積量を算定し、付近一帯の海岸の深浅測量により漂砂とくに砂の移動帯をみきわめ、底質および漂砂の採集により運搬される底質の特性を、また波および流れの観測によりそれらの特性を把握して総合的な判断をくだす資料とした。なお泊地内の漂砂堆積には風や波による流れ、および静振なども重要な要因となると考えられ、これらについても観測を行なった。その詳細については以下順をおつて述べることにしよう。

2. 海 岸 地 形

栂崎港付近は海岸直前まで山がせまり、各所に岩が散在した日本海特有の海岸地形をなしており、漁港の防波堤は散在する岩をコンクリートでつなぎ、一連の防波堤としたもので、防波堤の総延長は約 300 m、泊地は長さ 200 m、巾 25 m、水深 1.5~2.0 m の長方形をなし、港口は西向き、泊地南端は岩礁であり、泊地の機能を十分に発揮するためには水深 1.8 m~2.0 m が維持されなければならない。しかし泊地内の水深は漂砂の堆積により風の来襲ごとに浅くなる傾向にあり、毎年浚渫によりその水深を維持しているのが現状で

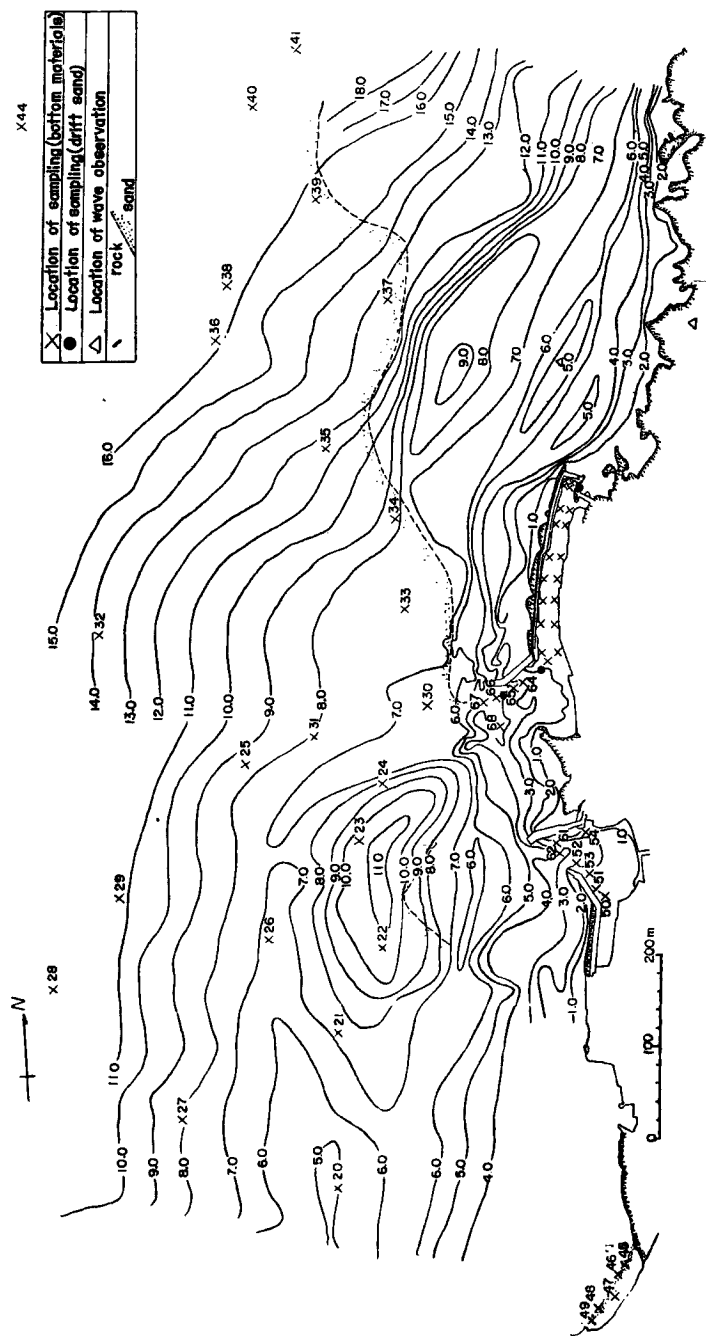


Fig. 1 Sounding of the adjacent of Gumizaki Harbor

ある。茅崎港の平面図の概略は Fig. 3 にしめすようである。

最初、昭和34年8月3日から13日までの11日間に泊地ならびに付近一帯の深浅測量および底質調査を行ない、海岸地形の特性を検討した。深浅測量にあたって、調査の目的である漂砂を考慮して測量区域を選定する必要があるから佐藤、岸¹⁾の式により砂の移動限界水深 h を定め、それより浅い区域で深浅測量を実施した。この場合、砂の移動限界水深 h はつぎのようにあらわされる。

$$\sinh \frac{2\pi h}{L} = \left(\frac{2.5}{d_m} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\pi H}{2T}$$

ここに、 L : 波長 (m), H : 波高 (m), T : 周期 (sec), d_m : 平均粒径 (mm), であり、 $H=5$ m, $L=53.20$ m ($T=8$ sec), $d_m=0.4$ mm と仮定して所要の水深を求めると $h \approx 10$ m となつた。したがつて、水深 10 m より浅い区域の深浅測量を行なつた。その結果は Fig. 1 にしめすようである。測量には間縄、レッドおよび音響測深機 (沖電気製 54 ヒロメーター) を併用し、比較的水深の浅い区域は間縄、

レッドおよびポール、深い区域は音響測深機を用いた。

Fig. 1 は茅崎港を中心に南北に約 1.3 km の区間に 31 地点を選び海岸線からはほぼ直角に測線をのぼし、その測線上的水深を求めて、等深線を記入したものであり、あわせて、波高観測点およびその測桿の位置、

底質の採集点、漂砂の採集点をも記入した。海岸地形の特徴は防波堤先端の南側と北側の区域では非常に様相がことなっていることである。すなわち、南側の海底は比較的緩勾配であつて距岸 400~500 m で水深が 10 m に達し、また音響測深機の記録から判断しても相当の砂が存在し、岩はほとんどみあたらない。ただ測線 No.17~24, 距岸 200 m 付近に水深が 11.5 m と深くなっているのが注目される。それに反し北側の海底は距岸 100~200 m ですでに水深が 10 m に達し、海底地形がきわめて複雑で、急勾配をなしている。しかも砂質がほとんど存在せず、大部分が岩よりなっている。Fig. 2 は No. 9, No. 18 および No. 28 の各測線の断面形を比較したもので、上に説明した地形の特徴をよく表わしている。

以上海岸地形について述べたが、問題となる港内泊地についての調査結果を述べよう。泊地の深浅測量は昭和34年4月26日、同8月10日、同12月13日、同19日、昭和35年12月21日および同24日の計6回実施した。その結果の2例を Fig. 3 および Fig. 4 にしめす。

しかし、昭和35年はじめに一度浚渫が行なわれたため、上の計6回の等深線図から土砂の変化の状態を比較検討することはできないが、昭和34年12月および同35年12月の2回はそれぞれ比較でき、短期間の漂砂の変化の状態を検討することはできるが、長期間の漂砂堆積状況についてはそれを推定することは不可能であろう。

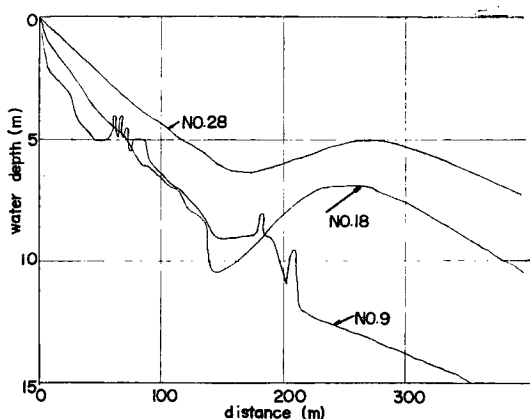


Fig. 2 Comparison between profiles of No. 9, No. 18 and No. 28

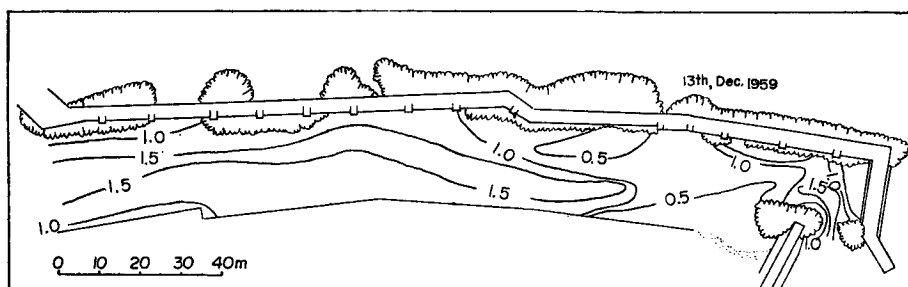


Fig. 3 Sounding of basin on 13th, Dec. 1959

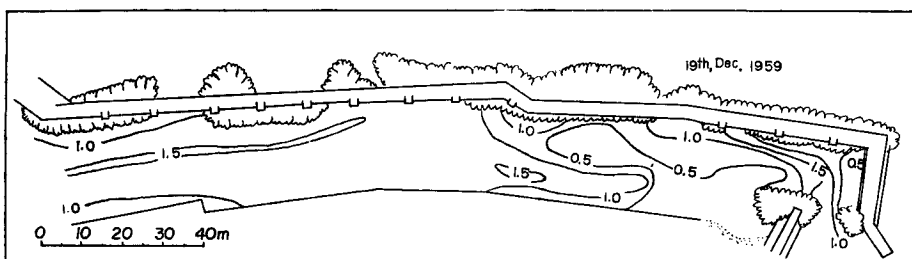


Fig. 4 Sounding of basin on 19th, Dec. 1959

3. 底質と漂砂

底質は漂砂の性状を把握するために必要な基本資料の一つであるから底質の粒径を明らかにして、漂砂の状況を見きわめねばならない。底質の採集は測線に沿って行なうつもりであったが、流れのため Fig. 1 および Fig. 3 にしめす 60 地点および北端(大味川口)で 3 地点、計 63 地点から random に採砂器を用いて採集し、V. A. Tube 法により粒度分析を行ない、各粒径に対する累加重量百分率、平均粒径を計算したが、その結果は Table 1 にしめす通りである。なお採砂点の水深もあわせて記入した。

分析結果にあらわれた傾向をみると、

- (1) 港内泊地の平均粒径は $d_m=0.14\sim0.32$ mm, 荷揚場では $d_m=0.30\sim0.52$ mm, および港口では $d_m=0.27\sim0.44$ mm で泊地より荷揚場, 港口の方が平均粒径がやや大きい。
- (2) 泊地, 荷揚場および港口の粒径 0.15 mm 以下の砂粒の含有率はそれぞれ平均して 18%, 9% および 6% と港内に進むにしたがって大きくなっている。

Table 1 Data of coastal material analyzed by V. A. Tube Method (unit : %)

Loca- tion	Basin														
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	10	11	12	13	14	15	
$d(\text{mm})$	0.11	14.0	13.0	15.8	12.5	20.0	9.5	15.0	22.9	10.6	13.2	7.4	13.5	14.1	13.0
	0.15	18.0	18.9	21.9	17.4	23.8	11.7	19.0	27.0	15.3	17.8	9.8	16.6	19.5	16.1
	0.25	52.2	46.0	44.5	38.2	47.0	37.0	43.0	58.8	38.0	42.1	24.5	52.0	44.2	47.3
	0.30	79.2	73.0	71.0	61.0	71.0	62.8	67.8	84.8	64.3	70.0	47.8	76.0	67.5	75.0
	0.40	95.4	92.7	87.6	87.8	92.5	87.2	82.7	99.0	91.0	94.5	71.8	97.0	89.0	96.0
	0.60	99.2	99.0	94.5	98.3	98.0	99.7	88.4	—	—	99.8	92.1	—	—	99.8
	0.85	—	99.8	—	99.0	—	—	—	—	—	—	96.4	—	—	—
	1.20	—	99.9	—	—	—	—	—	—	—	—	97.3	—	—	—
d_m	0.20	0.21	0.20	0.23	0.16	0.27	0.22	0.14	0.24	0.18	0.32	0.21	0.21	0.21	0.22
$h(\text{m})$															

Loca- tion	Slip				Harbor entrance					Gamo Harbor					
No.	16	17	18	19	64	65	66	67	68	50*	51	52	53	54	
$d(\text{mm})$	0.11	6.0	7.8	2.1	15.2	0.1	6.0	3.8	4.0	8.0	1.6	20.8	0.8	2.8	2.8
	0.15	8.0	8.8	3.2	16.1	1.7	8.0	4.5	5.8	10.0	—	26.0	1.3	3.5	3.0
	0.25	23.8	24.8	10.7	38.0	8.4	34.2	15.0	24.1	35.0	16.3	50.2	5.8	13.9	13.5
	0.30	44.0	38.1	23.0	54.1	21.9	59.3	37.5	45.0	64.0	—	73.0	13.0	32.0	38.0
	0.40	65.0	52.0	46.0	67.8	48.4	90.0	71.5	68.2	90.4	76.8	91.7	34.2	63.0	75.5
	0.60	88.3	69.0	85.1	82.4	77.0	—	97.8	86.0	—	—	—	74.3	94.7	98.1
	0.85	98.3	79.7	95.8	89.0	90.0	—	98.5	93.6	—	97.2	—	90.2	—	—
	1.20	—	86.0	96.8	91.5	95.5	—	—	—	—	—	—	97.0	—	—
d_m	0.35	0.52	0.40	0.30	0.44	0.27	0.33	0.35	0.27	0.33	0.16	0.47	0.37	0.37	0.35
$h(\text{m})$								4.0	4.0	4.0					

Location No. $d(\text{mm})$	Without harbor (water depth of less than 11m)													
	61	62	20	21	22	23	24	25	26	27	30	31	33	34
0.11	4.0	2.8	1.2	0.3	6.1	0.7	1.2	2.4	1.2	4.1	5.2	1.4	3.8	4.1
0.15	6.1	3.8	2.1	0.5	7.6	3.0	1.3	4.5	1.8	8.2	7.0	1.4	5.5	7.8
0.25	24.0	18.1	7.0	6.8	16.5	9.0	6.3	10.4	5.0	22.3	17.2	9.1	18.0	20.0
0.30	51.8	33.6	18.6	17.0	31.7	24.8	19.4	24.0	14.6	38.3	35.0	21.0	39.4	38.9
0.40	81.6	65.0	44.6	52.7	55.8	57.9	51.2	62.0	41.7	60.7	60.7	46.3	73.0	70.4
0.60	—	92.0	85.9	94.8	89.6	88.0	91.0	94.8	79.0	88.8	91.8	73.2	98.8	92.5
0.85	—	99.8	99.0	97.2	96.9	—	98.7	98.4	96.8	96.4	—	90.7	99.2	—
1.20	—	—	99.4	97.3	98.2	—	99.0	98.8	98.0	96.8	—	97.6	99.8	—
d_m	0.31	0.35	0.42	0.38	0.36	0.38	0.40	0.36	0.44	0.34	0.37	0.45	0.34	0.29
$h(\text{m})$			5.0	7.2	10.4	10.5	8.0	8.5	7.0	8.0	6.5	8.0	7.5	8.0

Location No. $d(\text{mm})$	Without harbor (water depth of greater than 11m)													
	28	29	32	35	36	37	38	39	40	41	42*	43	44	45
0.11	7.2	4.3	3.8	10.9	8.6	16.6	10.7	11.2	10.2	5.0	0.2	6.6	9.5	—
0.15	9.3	7.0	5.5	16.0	12.3	21.6	14.2	17.4	14.0	8.4	—	8.0	13.1	—
0.25	24.0	17.2	18.0	32.9	38.7	46.0	40.0	43.2	34.5	26.4	—	28.1	42.8	—
0.30	40.2	35.0	39.4	56.0	64.8	67.7	69.0	67.0	65.0	56.1	—	50.8	69.5	0.4
0.40	68.8	60.7	73.0	83.0	90.2	89.4	94.6	88.0	91.0	85.3	—	83.0	84.8	1.4
0.60	95.9	91.8	98.8	98.9	—	98.5	99.5	98.6	99.0	96.7	—	95.2	96.3	32.6
0.85	—	—	99.2	—	—	99.0	—	99.5	—	98.0	—	95.7	—	69.2
1.20	—	—	99.8	—	—	99.5	—	—	—	98.9	—	92.2	—	80.8
d_m	0.33	0.36	0.32	0.24	0.26	0.20	0.24	0.22	0.25	0.29	0.96	0.29	0.26	0.85
$h(\text{m})$	13.0	11.2	14.0	11.5	16.0	12.5	16.0	15.0	16.0	16.0	—	16.0	—	—

Location No. $d(\text{mm})$	48	Location No. $d(\text{mm})$	Beach face at Southern coast			Mouth of Oaji River at northern coast			(42)
			46*	47*	49*	56*	57*	58*	
0.11	—	0.25	0.3	0.6	—	—	—	—	5.7
0.15	—	0.40	7.8	32.4	0.17	—	—	0.2	22.7
0.25	0.5	0.85	73.6	93.6	62.0	0.04	—	4.4	27.6
0.30	0.8	2.00	—	98.8	—	8.5	17.2	41.7	66.4
0.40	2.0	4.80	96.3	—	100.0	70.7	95.5	83.7	—
0.60	15.6	—	—	—	—	—	—	—	—
0.85	41.7	—	—	—	—	—	—	—	—
1.20	60.7	—	—	—	—	—	—	—	—
d_m	1.35	d_m	0.68	0.47	0.84	3.77	2.74	2.52	—
$h(\text{m})$	—	$h(\text{m})$	—	—	—	—	—	—	—

note : * date by sieve analysis

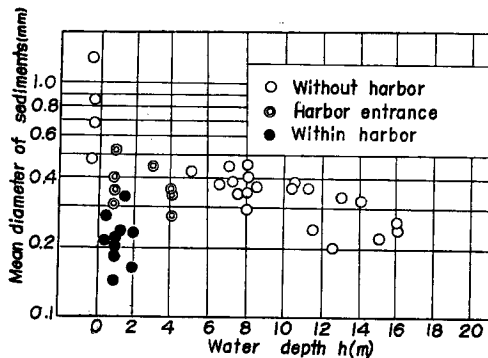


Fig. 5 Relation between mean diameters of bed materials and water depth

(3) 泊地と港外とは平均粒径がやや異なるが、水深約 10 m 以上の区域と泊地内の粒径はほとんど一致している。なお水深 h と平均粒径 d_m との関係をしらべると Fig. 5 のようになり、泊地内と港外との粒径のちがいがよく現われている。

(4) 海岸南端の砂浜の汀線以上の陸岸の平均粒径は $d_m = 0.47 \sim 1.35$ mm となっており、他の地点にくらべて大きい。

以上、底質分布についての調査は昭和34年8月に行なわれたものであるが、泊地に多量の土砂が堆積するのは冬期であり、この冬期の泊地付近の

Table 2 Fall diameter distribution and mean diameter of suspended load analyzed by V. A. Tube method (unit : %)

Location No.	No. 1 Harbor entrance (direction : unknown)													
	N ₉₀	N ₇₀	N ₅₀	N ₃₀	N ₁₀	W ₉₀	W ₇₀	W ₅₀	W ₃₀	W ₁₀	S ₉₀	S ₇₀	S ₅₀	S ₃₀
d(mm)														
0.11	6.7	8.2	3.8	5.3	8.3	—	9.0	5.5	6.0	2.5	21.9	24.5	7.5	7.0
0.15	10.7	10.7	6.9	7.5	11.5	—	13.0	10.3	9.0	5.5	29.3	30.5	11.5	11.0
0.25	41.0	33.4	28.1	27.5	34.5	—	41.0	38.5	34.0	26.5	62.2	63.5	39.5	36.5
0.30	61.5	55.2	48.9	49.0	54.5	—	60.0	58.0	53.0	46.5	77.6	81.0	61.0	59.0
0.40	84.5	84.2	80.4	83.0	79.0	—	83.0	86.2	81.0	79.0	94.2	98.0	89.5	89.5
0.60	99.5	100	100	100	98.5	—	98.0	100	100	97.0	100	100	98.0	98.4
0.85	100	—	—	—	100	—	100	—	—	99.0	—	100	—	99.1
1.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100	—	—	—	100
d_m	0.26	0.26	0.29	0.28	0.27	—	0.26	0.26	0.28	0.30	—	—	0.25	0.24
Weight (gr)	19.45	9.10	42.65	119.40	128.55	2.50	9.30	52.20	46.80	167.35	19.10	14.00	79.00	119.30

Location No.	No. 2 North end basin													
	S ₁₀	E ₉₀	E ₇₀	E ₅₀	E ₃₀	E ₁₀	N ₉₀	N ₇₀	N ₅₀	N ₃₀	N ₁₀	W ₉₀	W ₇₀	W ₅₀
d(mm)														
0.11	13.0	14.6	14.3	12.0	9.0	5.2	4.0	2.0	4.3	2.5	1.8	—	—	0
0.15	19.0	21.1	20.5	17.0	13.5	7.5	5.0	3.0	6.4	4.0	2.0	—	—	0
0.25	52.0	52.7	52.1	49.5	42.0	31.0	11.5	12.7	21.5	11.0	4.5	—	—	12.2
0.30	70.0	69.3	68.2	67.5	64.0	51.5	22.5	26.5	35.0	20.5	10.5	—	—	25.4
0.40	93.0	86.5	90.0	91.0	87.0	79.5	49.0	58.0	59.5	43.0	32.0	—	—	49.0
0.60	100	99.0	100	100	100	97.0	92.0	96.5	88.0	80.5	75.0	—	—	92.8
0.85	—	100	—	—	—	100	98.0	100	94.0	92.0	89.0	—	—	99.1
1.20	—	—	—	—	—	—	100	—	96.5	97.5	97.5	—	—	100
d_m	0.21	0.22	0.21	0.22	0.25	0.29	0.38	0.35	0.34	0.42	0.49	—	—	0.38
Weight (gr)	138.05	23.50	23.90	66.20	64.30	81.80	54.90	76.50	143.70	116.70	301.20	0.70	—	86.70

Location No.	(direction and height : unknown)														
$d(\text{mm})$	W_{80}	W_{10}	S_{90}	S_{70}	S_{50}	S_{30}	S_{10}	E_{90}	E_{70}	E_{50}	E_{30}	E_{10}	N_{90}	N_{70}	N_{50}
0.11	3.3	—	0	6.9	4.5	4.0	1.8	3.2	3.5	—	1.3	2.0	—	—	—
0.15	5.0	—	3.8	9.4	5.2	5.1	2.5	4.9	5.6	—	1.6	2.1	—	—	—
0.25	20.3	—	14.0	30.5	16.0	18.0	13.3	15.5	19.5	—	7.0	7.0	—	—	—
0.30	35.0	—	26.2	51.3	29.5	31.5	24.0	29.5	34.0	—	15.0	15.5	—	—	—
0.40	62.0	—	47.6	72.2	58.0	56.0	49.5	54.0	59.0	—	37.5	37.5	—	—	—
0.60	93.5	—	86.9	96.7	93.0	91.5	92.0	90.5	88.5	—	80.0	80.5	—	—	—
0.85	97.5	—	95.0	100	96.5	97.0	97.2	95.5	93.5	—	93.5	91.3	—	—	—
1.20	100	—	100	—	99.5	100	100	98.5	96.0	—	98.0	96.5	—	—	—
d_m	0.34	—	0.37	0.30	0.35	0.35	0.38	0.35	0.33	—	0.44	0.44	—	—	—
Weight (gr)	143.60	—	57.40	24.00	126.75	134.60	314.90	52.85	108.10	—	116.25	219.00	0.10	0.20	2.35

Location No.	No. 3 North end of basin (observed time period : 24 hours)															
$d(\text{mm})$	N_{90}	N_{10}	W_{90}	W_{70}	W_{50}	W_{30}	W_{10}	S_{90}	S_{70}	S_{50}	S_{30}	S_{10}	E_{90}	E_{70}	E_{50}	E_{10}
0.11	—	—	—	—	—	14.3	12.5	—	24.5	14.7	10.4	17.0	—	—	14.0	17.0
0.15	—	—	—	—	—	29.0	14.5	—	29.0	20.6	15.2	22.0	—	—	19.5	22.5
0.25	—	—	—	—	—	50.5	42.0	—	50.5	50.2	43.9	56.5	—	—	41.8	46.5
0.30	—	—	—	—	—	68.5	64.0	—	68.5	68.9	62.7	77.0	—	—	60.5	67.0
0.40	—	—	—	—	—	85.0	88.0	—	85.0	89.6	85.1	92.0	—	—	86.5	87.0
0.60	—	—	—	—	—	98.0	100	—	98.0	100	100	100	—	—	100	100
0.85	—	—	—	—	—	100	—	—	100	—	—	—	—	—	—	—
1.20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
d_m	—	—	—	—	—	0.24	0.25	—	—	0.22	0.25	0.16	—	—	0.22	0.19
weight (gr)	2.40	2.60	0.65	1.70	1.45	6.05	5.85	1.35	7.40	12.35	11.50	20.70	1.20	1.70	3.70	9.05

漂砂についても十分調査検討する必要がある。漂砂の採集は昭和34年12月13日から25日の間に計4カ所で行なつた。採集器は鉄筋で作つた4角錐の対角線上に互いに採砂孔が向い合い、海底からそれぞれ10cm, 30cm, 50cm, 70cm, および90cmの高さに採砂装置を取り付け漂砂を採集した。採集位置はFig. 1に示す通りであるが、採集器を海底に固定しなかつたために、激しい波浪で移動したり、流れて紛失または押つぶされたりしたため方向別の漂砂量ならびに単位時間当りの漂砂量は1カ所をのぞいて得られなかつた。しかし波および流れにより泊地へ運搬される漂砂の特性については検討することができるであろう。Table 2は得られた資料を天秤で0.05grまで測定し、V. A. Tubeを用いて粒度分析した結果である。分析結果についてその傾向をみると、

- (1) 冬および夏の泊地の底質粒径にはほとんど差異がみとめられない。

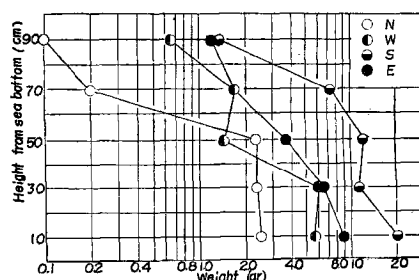


Fig. 6 Vertical distribution of suspended load

(2) 漂砂採集器 No. 2 は他とくらべて平均粒径がかなり大きい、移動が激しく、海底に埋れたので、他との比較はできない。

(3) No. 3 は方向別の漂砂量および24時間の漂砂量をしめしている。横軸に漂砂量 (gr), 縦軸に海底からの高さを取り方向別に図示すると Fig. 6 にしめすようになる。

以上底質および漂砂の観測結果について述べたが、その泊地への運搬堆積の機構に関しては後に考察しよう。

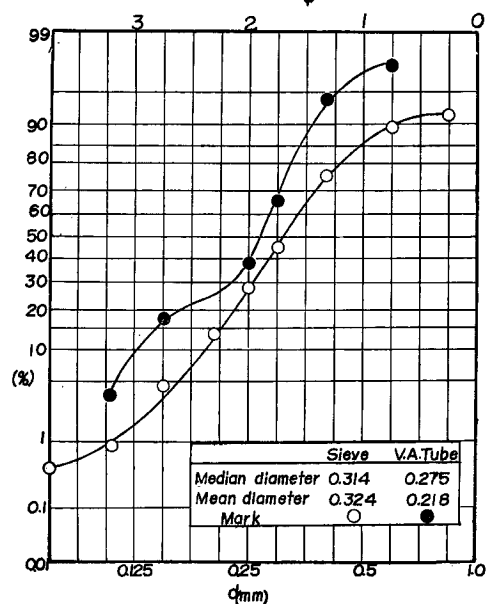


Fig. 7 Comparison between fall diameter distribution by V. A. Tube method and sieve diameter distribution

なお粒度分析は従来から用いられている篩による篩分け粒度分析によらず、米国の B. C. Colby および R. P. Chrisensen²⁾ により考案された Visual Accumulation Tube を用いたが、その理由は漂砂には砂の大きさよりも、沈降速度が重要であるという考え方³⁾によるもので、Table 1 および Table 2 の平均粒径 d_m を求める方法は、横軸に

$$d(\varphi) = -\log_2 d(\text{mm})$$

により、mm 単位から φ 単位に変換した $d(\varphi)$ をとり、縦軸に確率目盛で累加百分率をとつたとき、86%および16%に対応する φ の値をそれぞれ φ_{86} , φ_{16} とすれば、 $d_m(\varphi) = (\varphi_{84} + \varphi_{16})/2$ に対応する mm 単位の値となる。しかも V. A. Tube 法による粒径は fall diameter であり、篩による sieve diameter とこの fall diameter とは、砂粒の形や比重などでことなってくる。Fig. 7 は底質を篩分け分析した結果と V. A. Tube による分析結果の一例を比較したもので、両者の分析結果の相違は比重の相違をしめしている。

4. 海象および気象

(1) 風速および風向

荏崎港では従来まで気象観測は行なわれてなく、既応の風の資料は全くないが、北方約 23km にある三国港は地形的にみても近く、ここでは従来から風の観測が行なわれている。したがって三国港の風の記録によつて荏崎の風を推定しても大体一致すると考えられるから、この結果を使つて検討することにする。

風による波の発生、発達を支配する要素は風速、吹送時間および吹送距離であり、漂砂の移動方向を知るためにはその風向も重要な要素となる。いま三国港の昭和26年から同30年までの5カ年間の4時間毎観測による季節別風向頻度分布をしめすと Fig. 8 のようであるが、年間風向頻度は各季節を通じてとくに卓越した方向は見いだせない。しかし風速 10 m/sec 以上の強風風向頻度 (Fig. 9) では W, WNW が全体の大半をしめ、NW, NNW がこれについて多いのがみられる。荏崎付近の海岸線はほぼ N-S 方向であり、海風は N-W-S とみてよいから、波の発達および漂砂に影響を与えるのはこの方向の風であり、とくに W および WNW の風が大きく影響するものと考えられる。つぎに風速について検討してみよう。Fig. 10 は昭和28年、同30年および同33年の4時間毎観測による各月平均風速をしめすもので、風速は12月、1月および2月に卓越し、なかでも1月はとくに大きく、泊地の埋没が冬に著しく進行することをよく表わしている。

海象との関連において気象を検討する場合風向、風速ともに、その継続時間が大きく作用する。Table 3

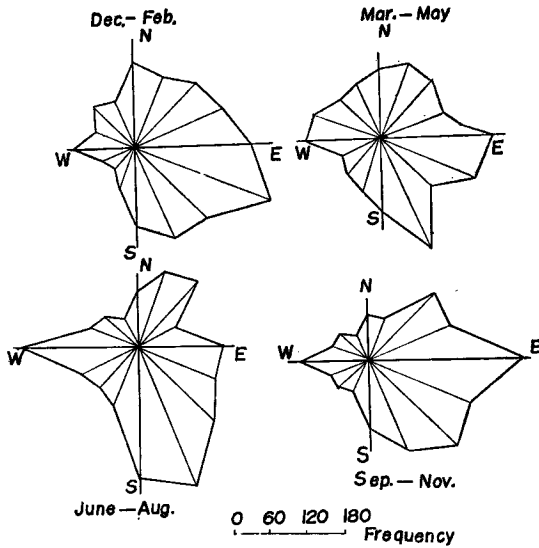


Fig. 8 Seasonal frequency distribution of wind direction at Mikuni Harbor

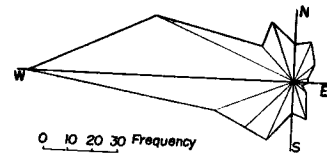


Fig. 9 Frequency distribution of direction of strong wind

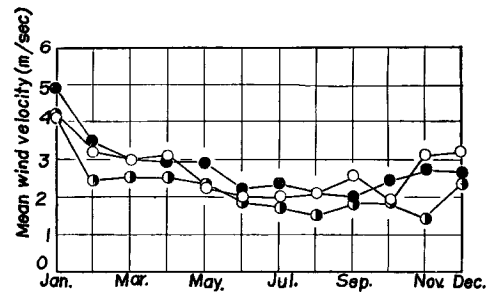


Fig. 10 Monthly mean wind velocity

Table 3(a) Duration time of wind in each direction for Mikuni Harbor

Duration time t	$V \geq 10$ m/sec					$V \geq 15$ m/sec					$V \geq 20$ m/sec				
	N~ ENE	E~ SSE	S~ WSW	W~ NNW	total	N~ ENE	E~ SSE	S~ WSW	W~ NNW	total	N~ ENE	E~ SSE	S~ WSW	W~ NNW	total
2- 4 hrs.							1	1		2		2	1	2	5
5- 8						1		1		2					
9-12	1	1	5	5	12				2	2					
13-16	2	1	1	4	8										
17-20				1	1										
21-24				1	1										
≥ 25															
total	3	2	6	11	22	1	1	2	2	6	2	1	2	2	5

Table 3(b) Duration time of wind in each direction for Shikaura Harbor

Duration time t	$V \geq 5$ m/sec					$V \geq 10$ m/sec					$V \geq 15$ m/sec				
	N~ENE	E~SSE	S~WSW	W~NNW	total	N~ENE	E~SSE	S~WSW	W~NNW	total	N~ENE	E~SSE	S~WSW	W~NNW	total
2- 4 hrs.				12	12				28	28				6	6
5- 8		1		10	11				7	7				2	2
9-12				6	6				4	4					
13-16				1	1				1	1					
17-20				6	6				1	1					
21-25				1	1										
≥ 26				2	2										
total		1		38	39				41	41				8	8

は三国港における昭和26年から同30年までの4時間毎観測による5カ年の方向別一定風速継続時間および茨崎南方約12kmの四ヶ浦港における昭和31年10月から同32年3月までの冬期6カ月間の方向別一定風速継続時間頻度をしめすもので、冬期におけるW~NNWの強風が非常に卓越したものであり、この付近一帯の海岸における漂砂の大部分を規制するものと考えられる。

(2) 波 浪 観 測

海岸における波の諸特性、とくにその波高と周期を正しく知ることがいかに必要であるかはいうまでもないことで、従来その直接観測は、波浪の理論研究上、さらに海岸施設の保全の立場から、いろいろな方法が考案されてきたが、簡便で正確な波浪観測法は確立されていない。したがって、波浪観測を行なう場合、その調査目的、所要精度、陸岸の地形、測点の位置等を考慮した最適の観測法を選ぶ必要がある。われわれは、つぎにしめす波高計を試作して波浪の観測を行なつた。すなわち、海上の測点(Fig. 1にしめす距岸150 m、水深5 mの地点)に測桿(全長8 m、 $\phi 5$ cm、の鋼管を50 cm間隔に赤白にぬりわけたもの)を設置し、陸岸より水面の上下動を手動操作(トランシット垂直微動ネジを回転する)によりトランシット望遠鏡の視線で追跡し、波浪を連続記録して測定観測する方法で、比較的取扱いが簡便なこと、荒天、降雪時にも測桿はよく見え支障が少なく、その観測精度もかなりよいと思われる。ただ観測点を適当な高所に設けることができないと高浪時測桿が手前の波の峰にかくれて観測が不正確になること、荒天、高浪にも十分耐える測桿を設置する必要があること、および夜間の観測が不可能であること等が欠点として挙げられる。

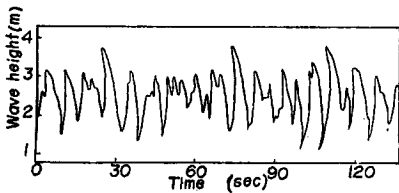


Fig. 11 An example of recorded waves

上にのべた波浪観測法を用いて昭和34年12月12日から同16日まで午前8時から午後4時の間1時間ごとにそれぞれ10分づつ波浪観測を行なつた。Fig. 11はその記録の一部である。海の波の発生、発達理論はJeffreys⁴⁾、Rossby⁵⁾の研究をへて、Sverdrup および Munk⁶⁾ が波の予知理論まで発展せしめ、その後 Bretschneider⁷⁾ によつて修正された波の予知方法 S-M-B 法が提唱されたが、海の波は種々の振巾、波長および波向をもつた波が乱雑な位相をもつて重なり合つて現われる。この複雑な波を正確に表現することは困難であるが、Sverdrup および Munk は有義波という概念を導入し、工学的目的のため海の波を単一の波高、周期をもつ波によつて表わした。Table 4 は最大波高 H_{max} および有義波波高 $H_{1/3}$ 、周期 $T_{1/3}$ ならびに風向、風速および波向をしめすものである。

この表にあらわれた傾向をみると、

- (1) 風速の増加とともに波高も増大し、とくに NW および WNW の風では著るしく波高が増大している。
- (2) 波の周期は3.2~6.7 sec であるから、沖波波長は16.00 m~70.00 m となる。
- (3) 観測期間中の最大波高は4.13 m であつた。
- (4) 16日の風速8 m/sec 以上で7:00~24:00時まで18時間吹送した。

16日の夜半に波高桿が波のため破損し以後の記録はないが、Table 4 の記録は水深5 mの地点で測定したものであり、波長が16.00~70.00 m の波としては浅海波に属するもので正しい沖波波高を表わしているとはいえないが、風速を横軸、観測波高を縦軸にとり、海風および陸風を区別して図示すると Fig. 12 のようになり N~W 方向の風速と波高との間にはかなりの相関がみられる。また観測期間中の波の周期は3.2~6.7 sec と割合に小さく、波の発生域が沿岸近くであり吹送距離が短かい風波性のものであろう。最後にわれわれが用いた波浪観測計の精度および誤差について考察しよう。本波高計の誤差の主な原因としては

- (1) トランシットの視線を正しく水面上に合せ得ないための誤差
- (2) トランシットが水平のとき、垂直微動ネジ中心線と鉛直軸とのなす角を正しく直角にし得ないため

Table 4 Observed significant wave heights and periods

date (1959)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (sec)	H_{max} (m)	wave direction	wind direction	V (m/s)
Dec. 12, 9:00	0.43	5.1	0.57	WSW	SSW	1.1
10:00	0.43	4.6	0.58	WSW	WSW	1.1
11:00	0.42	4.0	0.68	WSW	W	0.9
12:00	0.42	4.0	0.67	WSW	W	0.9
13:00	0.54	3.2	0.94	WSW	W	0.7
14:00	0.39	4.1	0.66	WSW	W	1.1
15:00	0.32	3.8	0.47	WSW	W	1.1
16:00	0.29	4.1	0.49	WSW	W	1.3
Dec. 13, 8:00	0.87	6.0	1.43	WSW	SW	1.1
9:00	0.88	5.8	1.35	W	SSW	1.1
10:00	0.90	5.5	1.32	NW	SSW	1.3
11:00	0.81	5.3	1.06	WNW	SW	1.1
12:00	0.85	5.9	1.47	WNW	SSE	0.7
13:00	0.98	5.6	1.54	NW	ES	2.0
14:00	0.80	5.6	1.20	NW	ES	2.4
15:00	0.92	6.2	1.39	NW	ES	1.5
16:00	0.87	6.0	1.48	NW	ES	0.9
Dec. 14, 8:00	0.65	5.8	1.02	NW	ES	2.2
9:00	0.73	5.5	1.02	W	ES	2.2
10:00	0.55	4.5	0.89	SW	ES	2.6
11:00	0.55	5.8	0.87	SW	ES	2.0
12:00	0.69	6.0	0.86	SSW	ES	2.4
13:00	0.85	6.3	1.48	SW	ES	3.0
14:00	0.88	6.3	1.41	SW	ES	3.8
15:00	1.03	5.7	1.45	NW	ES	4.2
16:00	1.27	6.7	1.97	NW	SSE	4.8
Dec. 15, 9:00	1.15	6.7	1.55	NW	WNW	5.5
10:00	1.22	6.2	1.79	NW	WNW	5.4
11:00	1.35	6.4	1.90	NW	W	4.2
12:00	1.37	5.5	1.98	NW	W	3.8
13:30	1.17	5.0	1.93	NW	W	3.4
15:30	1.51	6.2	3.48	NW	W	3.8
Dec. 16, 8:00	1.63	4.9	2.36	WNW	N	8.0
9:00	1.79	5.7	2.85	WNW	NNW	9.4
10:00	1.91	5.3	2.98	WNW	NNW	9.4
11:00	1.92	6.3	2.72	WNW	NNW	9.8
12:00	—	—	—	WNW	N	10.0
13:00	2.09	5.8	3.17	NW	N	9.8
15:00	2.84	6.5	4.13	WNW	N	9.4

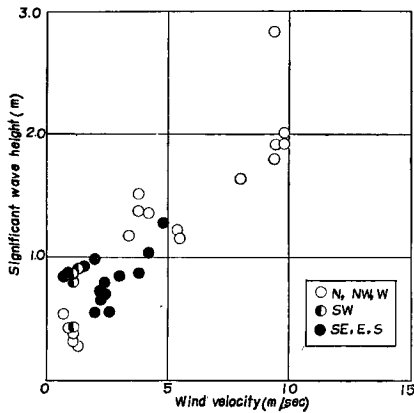


Fig. 12 Relation between significant wave height and wind velocity

$\Delta R' = 5 \times 10^{-4}(\text{m})$ となり、栞崎にて用いた器械は $K=1/2.5$ であり、 $L=150\text{m}$ 、 $B=10\text{m}$ と仮定して波高観測の精度を求めると

$$\frac{\Delta H}{H} = 3.9 \times 10^{-2} \frac{1}{H} + 0.5 \times 10^{-2}$$

となり、 $\Delta H/H$ と H との関係および ΔH と H との関係を図示すると Fig. 13 のようになり、波高 50 cm で $\pm 5\text{cm}$ 程度の誤差、4.00m で $\pm 6\text{cm}$ の誤差となるが、これは一つの波高についてのものであり、有義波のように多数の平均波高をとる場合には誤差は相当小さくなると考えられ、波高観測の精度としては十分のものと考えられる。

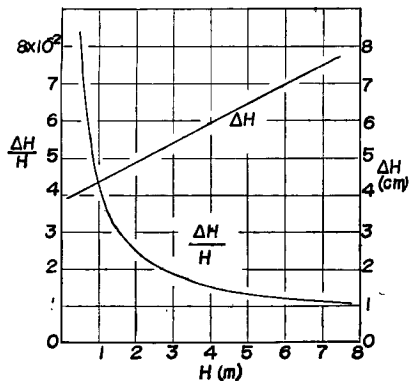


Fig. 13 Relations between observed wave height and accuracy and error

つまり波浪流が漂砂に関係することはすでに認められている。栞崎港においても波高が大きくなると、港口付近の海水は非常に濁り、浮遊砂が相当多量に存在するのがみられ、前述した漂砂の採集結果でも浮遊砂のみならず、掃流砂もかなり存在することが明らかである。こうした砂がどのように運搬されるかを知るためには波浪流の調査をしなければならない。われわれは昭和34年12月14日から21日までの5日間、港内の表面流向、流速の測定を行なったが、

の誤差、

- (3) 記録の読み取りが正確でないための誤差、
- (4) 器械の動揺による誤差、および
- (5) 微動ネジを記録計に連動するために滑車が空回りして正しい回転角を与えないための誤差、

などになる。いま観測波高 H 、波高の誤差 ΔH 、トランシット中心から測桿までの水平距離 L 、記録読み取りの誤差 $\Delta R'$ 、伏角の誤差 $\Delta \theta$ 、視角の誤差 $\Delta \delta$ およびトランシット中心から海面までの高さ B とすれば、簡単な計算により、一つの波に対する波浪観測の精度はつぎのようになる。

$$\frac{\Delta H}{H} = \Delta R' \frac{K \cdot L}{H} + \Delta \theta \frac{2B}{L} + \Delta \delta \frac{L}{H}$$

ここに、 K は器械による定数である。いま宇田居氏⁹⁾の実験結果を参照すれば、 $\Delta \delta = 6 \times 10^{-5}(\text{rad})$ 、 $\Delta \theta = \tan 2^\circ \approx 0.036$ 、

(3) 流 れ

港湾埋没の問題を取り扱う場合、砕波帯を通過した流れ、

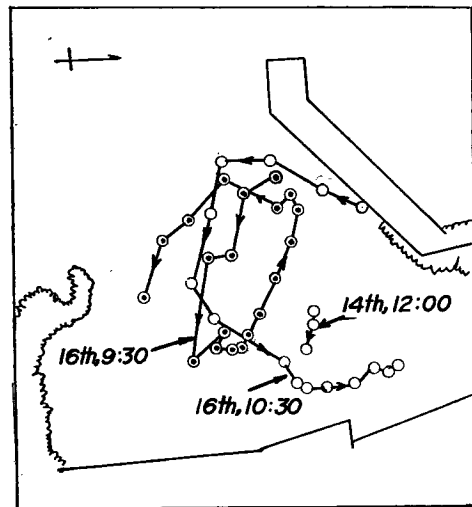


Fig. 14 Direction of coastal current

Table 5 Mean velocity of coastal current

No.	date (1959)	mean velocity (cm/s)	wind velocity (m/s)	wave height (m)	wave direction
1	Dec. 14, 11 : 30	7	2.0	0.34	SW
2	12 : 00	8	2.4	0.47	SSW
3	Dec. 16, 9 : 30	23	9.4	1.04	WNW
4	10 : 00	26	9.4	1.16	WNW
5	10 : 30	25	9.4	1.21	WNW
6	11 : 00	40	9.8	1.74	WNW
7	14 : 00	47	9.8	—	—
8	Dec. 17, 11 : 30	32	0.9	—	—
9	12 : 00	51	1.1	—	—
10	Dec. 20, 14 : 00	25	6.8	—	—
11	Dec. 21, 15 : 30	27	0.9	—	—

ゴムボールの浮標を使い、水面下約 1m の所に石塊を結び浮標の動きを 30 sec 間隔に 2 台のトランシットで追跡した。Fig. 14 は観測した流向を、Table 5 はその流速、波高および風速をしめす。

流向は波高の小さい穏かな 14 日には港口から舟揚場へ直線的に侵入しているが、その流速は小さく 8 cm/sec 程度であり、流速 8 cm/sec では掃流限界流速以下と考えられ、漂砂の運搬には重要なものとは考えられない。しかし 16, 17 日には波高もかなり大きく、港内を左まわりに循環する流れがみられ、平均流速も 40 ~ 50 cm/sec と大きく海水も相当に濁り、Fig. 5 にしめたように港口付近の底質粒径が 0.3 ~ 0.5 mm であることを考慮すると、表面流速 40 ~ 50 cm/sec は底面付近において掃流限界流速に近いものであろう。また波によって浮遊した漂砂は容易に運搬されることになる。したがって、港外の底質を運搬してきた波浪流が港内に侵入し、流速が減少するとともに砂が沈降し堆積するものと考えて妥当であろう。

5. 静振と泊地内漂砂の堆積について

外海が荒れてくると、港口付近には相当な流れが起こり、海水が濁って細砂を浮遊させるのがみられ、しかも港外から掃流あるいは浮遊の形で運搬されてきた砂粒が港内に堆積する。この事実は Fig. 5 の港外の底質粒径と港口付近の砂の粒径とにほとんど差異がないことから十分にうかがえるが、泊地は防波堤に囲まれいつでもかなり静穏であり、常識的には港口付近にのみ砂が堆積し泊地奥深くまで砂が運搬され堆積するとは考えられない。それにもかからわず粒径 0.2 mm 前後の細砂がどしどし堆積し、泊地の機能を低下させている。このような漂砂の侵入堆積の原因は上述の結果からどのように説明すればよいであろうか。泊地内の漂砂の堆積機構についていまだ定説はないが、速水博士⁹⁾の泊湾における静振観測はわれわれに一つの示唆を与えるもので、泊地における定常波が漂砂の堆積に寄与するという考え方である。

前述したように築崎港泊地は 200 m × 25 m の長方形をなし泊地内の水は外力の変化に応じて一定の周期をもった自己振動を起こすことは十分に考えられる。この静振が漂砂の侵入堆積に重要な要素となることは従来の研究によりしめされている。すなわち、定常波にともなう砂堆の発生機構に関する研究としては H.Lettau¹⁰⁾ が静振による水流によって砂粒が浮遊して時間 t のち、ある基準面からの水底の高さ y は

$$y = y_0 - k \frac{\pi a^2}{2Th^2} \sin \frac{2h\pi}{L} x \left\{ \sin \frac{4\pi}{T} t + \frac{4\pi}{T} t \right\}$$

になるとした。ここに、 y_0 ははじめの水底の高さであり、 h は水深、 L は湾の長さ、 T は固有周期であり、右辺において時間 t に関する周期項は砂粒の往復運動により高さに変化を与えないが、 t に関する一次項を含むから時間の経過につれて水波の 2 倍節に当る砂堆を作り、浮遊粒子が水波の節を去り腹に集まると

した。

しかし野満博士¹¹⁾は浮遊粒子を仮定することに疑問をもち砂粒は水流により掃流運搬されるものとして

$$y = \frac{3}{4} b k v^2 \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 \left\{ v^2 \cos \frac{4n\pi}{L} x - \left(v^2 - \frac{4}{3} v_e^2 \right) \cos \frac{2n\pi}{L} x \right\} t - y_0$$

を得た。ここに v は定常波の最大水平速度であり、 v_e は掃流限界流速である。したがって、転流性の砂粒では水波の4倍節に当る砂堆を作り、節と腹とがともに山をなし、その中間には谷ができるとした。また実験により節の砂堆は砂粒が大きく、腹は細粒となるが、浮遊性砂粒では水波の2倍節砂堆を作り、静振の節

に谷が、腹に山が生ずることを確かめた。

それでは茶崎港泊地の漂砂堆積の機構は静振によつて説明できるであろうか。そのためにまず泊地の静振と漂砂の堆積の仕方に注目しよう。静振の観測は昭和35年12月に泊地内各所において行なわれた。Fig. 15 はその一例であり、これらの記録を移動平均して30秒以下の波を消去した平滑曲線が Fig. 16 である。この図から70~80 secの周期が卓越しているのがみられる。一般に長方形の湾においては静振の周期 T は水深 h が一定とすれば、

$$T = \frac{4L}{(2n-1)\sqrt{gh}}$$

であらわされる。ここに、 $L(m)$ は湾の長さであり、 n は節の数であるから、 $L=200m$ 、 $h=1.2m$ と仮定して泊地の周期を概算すると単節静振($n=1$)では $T=233sec$ 、双節静振($n=2$)で $T=78sec$ 、3節静振($n=3$)で $T=47sec$ となる。

つぎに泊地の漂砂の堆積状況について検討してみよう。Fig. 17 は昭和34年12月13日と19日の深淺

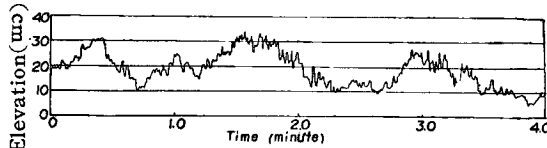


Fig. 15 Record of seich in basin

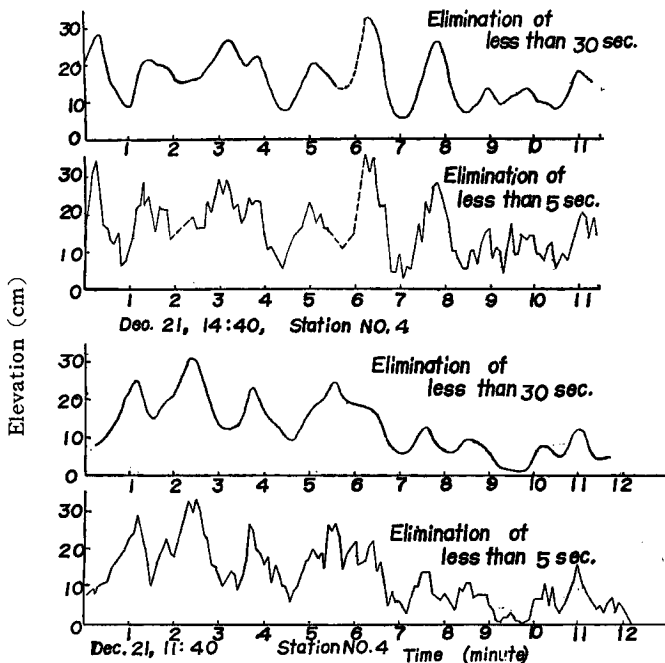


Fig. 16 An example of curves by obtained due to elimination of wave period of less than 5 seconds and 30 seconds by mean of moving average

測量結果を比較して泊地内に堆積した砂の平均堆積高と卓越している双節静振とを比較したものである。野満博士によれば静振の腹および節に砂粒が堆積するとされており、図に示された結果では堆積高の大きいところと、静振の腹および節には若干の相違がみられるが、これは泊地内の水深の変化や防波堤間隙からの海水の吹出しなどの影響をうけていると考えられ、漂砂の堆積には双節静振によると考えるのが妥当であろう。また Fig. 18 は泊地から湾口および港外の砂の平均粒径の変化と水深の変化の状況をしめすもので、波により浮遊した砂が港内に運搬され、流速の減少とともに比較的大きい砂粒のみは限界掃流力以下となり

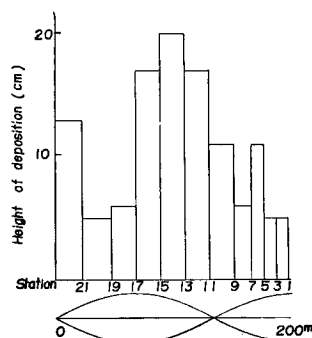


Fig. 17 Mean deposition height in basin

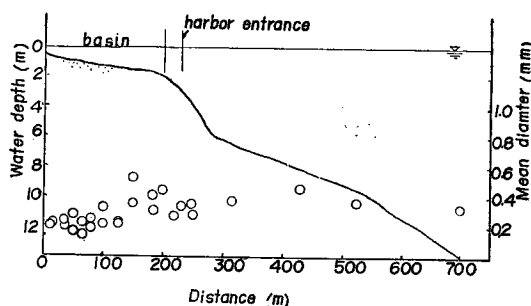


Fig. 18 Size of bed materials and water depth in basin

港口付近に堆積し、細砂は静振の往復運動で泊地内に侵入し堆積するが、一部はまた逆流によりもとの位置にかえる状況が説明されるであろう。

6. 結 語

以上、風波、流れおよび静振などがどのように漂砂の侵入堆積に関係するかを砂粒の分布や堆積量にもとづいて調査し、若干の考察を加えたが、結論としていままで述べた事項について要約すると、

- (1) 冬季の風の卓越方向から港外における漂砂の移動方向が大体推定される。
- (2) 波高が増大すると湾口付近には左まわりの循環流が発達し、粒径 0.3~0.5mm 程度より細かい砂が浮遊状態となり港内に侵入してくる。
- (3) 漂砂の供給源が明確でないで、いそ波帯の底質が波の擾乱運動により浮遊しあるいは転流して、波や流れにより港内に運搬され、かなり大きい粒径の砂は港口付近に、細砂は静振により泊地に侵入し堆積すると考えられる。
- (4) 泊地内の漂砂の堆積には双節静振が重要な役割を果すが、それ以外にも色んな要素が多少とも作用しているから、模型実験によりその影響を十分に検討して、防波堤の位置、泊地の面積や形状などの選定について慎重に考慮する必要がある。

最後にこの調査にたゞり終始御協力をいただいた福井県土木部河港課の諸氏ならびに大学院学生、仁張隆次および甕受昌和の両君に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 佐藤清一、岸力：漂砂に関する研究 (7)、波動による海底剪断力と底質の移動、土木研究所報告、第85号の6、昭31、pp. 1-16.
- 2) Colby B. C. and Christensen R. P. : Visual Accumulation Tube for Size Analysis of Sand, Jour. Hydraulics Div., Proc., ASCE, Vol. 82, June 1956, pp. 1-17.
- 3) 例えば、岩垣雄一：海岸漂砂の調査について、第6回土木学会海岸工学講演会講演集、昭34.11、pp. 145-150.
- 4) Jeffreys, G. B. : On the Formation of Water Waves by Wind, Roy, Soc., Proc., A, Vol. 107, 1925.
- 5) Rossby, C. G. : On the Frictional Force between Air and Water and on the Occurrence of a Laminar Boundary Layer next to the Surface of the Sea, Phys. Oceanog. Met., Vol. 4, No. 3, 1936.

- 6) Sverdrup, H. U. and Munk, W. H. : Wind, Sea and Swell, Theory of Relations for Forecasting, U. S. Hydrographic Office, Pub. No. 601, March, 1947.
- 7) Bretschneider, C. L. : The Generation and Decay of Wind Waves in Deep water, Trans. AGU, Vol. 33, No. 3, 1952.
- 8) 宇田居吾一：トランシットによる波浪の記録観測法，土木学会海岸工学講演会講演集，昭30.11，pp. 79-87.
- 9) 速水頌一郎：泊港湾の漂砂に関する研究，鳥取県漂砂対策調査報告書，昭25.4，pp. 35-50.
- 10) Lettau, H. : Stehende Wellen als Ursache Ungestaltender Vorgänge in Seen, Ann. d. Hydrogr. u. Mar. Met. 60, Jahrg, 1932. p. 385.
- 11) 野満隆治：定常波による湖海の砂堆と砂漣，地理物理，第7巻1号，昭18，pp. 61-79.