

備讃瀬戸におけるサンドウェーブの特性について

田中 則男*・小笹 博昭**・柴山 煒彦***

1. ま え が き

備讃瀬戸航路イノサキノツガイ地区(図-2 中の小図面中に斜線で示す地域)海底には、図-1 にその測深記録例を示すように波長 20~80 m, 波高 1~5 m 程度の大規模なうねり状地形(サンドウェーブ)が形成される。このために航路中に規定水深以浅の箇所が多数現われ、船舶航行上支障をきたしている。このため航路維持、増深計画上サンドウェーブの特性および形成原因についての検討が強く望まれている。

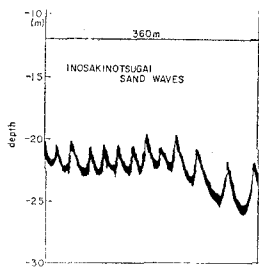


図-1 音響測深記録に現われたサンドウェーブ

海底に発生するサンドウェーブについては、地質学分野からの研究成果が本座・奈須^{1),2)}、茂木・加藤³⁾、川村・山田⁴⁾によって発表されており、茂木⁵⁾により次のようにとりまとめられている。

1) 流れの強い海域、海峡中心部の流れの強すぎる所には存在しないが、その両側入口の海底砂堆に伴って現われる場合が多い。特に潮流によって島陰にできた砂堆先端部ではサンドウェーブが発達しやすい。

2) 規模は水深と密接な関係があり、波長が増加すると波高も谷間の水深も増加する傾向がある。

3) 海底近くの推算平均流速と構成物質の粒径との関係でその形成地域をみると、砂連の形成地域から Antidunes および布状運搬への移行域に含まれる。

4) 砂粒径は、サンドウェーブの頂部では細粒で淘汰度がよく、斜面では一般に粗粒で淘汰度が悪い。谷間ではその中間である。

5) サンドウェーブは潮流によって往復振動型の移動

を繰り返して、月間 30 m 位の振幅で変化しているが、長期間には恒流方向へ移動する。

6) 浚渫によって人工的に破壊されたサンドウェーブは短時間で再び発生した。

一方河川流によるサンドウェーブについては多数の研究者により検討されている⁶⁾が、その統計的構造については Nordin & Algert の研究⁷⁾に始まる。芦田・奈良井⁸⁾はサンドウェーブの三次元的な面的変動とその発達過程について、河川乱流場(余越⁹⁾による鉛直せん断乱流場と水平乱流場)との関連から論じている。また日野¹⁰⁾はサンドウェーブのスペクトル構造が波数と砂礫の安息角とによって次元解析から決定され、スペクトル密度は波数の-3乗に比例するとしている(日野・福岡・古沢¹¹⁾は波によるサンドウェーブについても-3乗則が成立することを報告している)。

サンドウェーブ上の乱れについての実験結果としてはサンドウェーブを模した人工的な波状面(Raudkiviによるモデル)上での Sheen¹²⁾の測定があり、Reattachment Point 付近における乱れの増大が報告されている。

潮流による乱れの現地観測としては Bowden¹³⁾⁻¹⁵⁾、浜田・大久保¹⁶⁾によるものがあり、特に Bowden は海底面付近、水表面付近における Reynolds stress の測定、longitudinal, vertical, lateral 方向乱れのスケールの測定を行なっている。

本報告においてはまずサンドウェーブの平均的な特性と平均水量との関係を検討し、続いてサンドウェーブの統計的構造と海底上 50 cm における潮流の連続観測(平均値評価時間 10~40 分、瞬間値評価時間 1 秒)による乱れの観測結果を示し、その関連について検討する。

2. サンドウェーブの平均的な特性

図-2 は測深記録から水深 16, 17 m の等深線を描いたものであり、サンドウェーブの平面的な分布状況が把握できる。サンドウェーブは三ツ子島からのびる砂州上に、潮流と直角方向に互いに平行して発達している。なお備讃瀬戸の他地域におけるサンドウェーブの発生箇所を検討してみても、サンドウェーブは潮流が浅瀬にのりあが、不安定になったような箇所に発達しているようである。

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部漂砂研究室長

** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部

*** 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部主任研究官

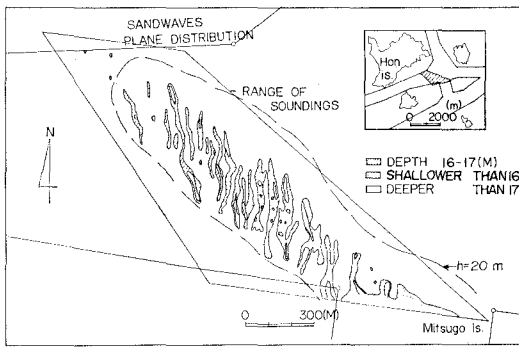


図-2 サンドウェーブの平面的分布状況

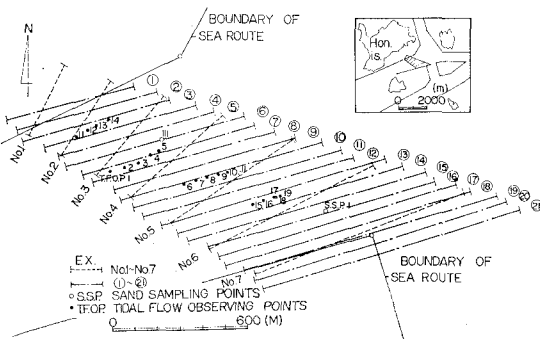


図-3 調査概要図

この地域で行なわれた調査の概要を図-3に示す。実施された調査は定線深浅測量（測線は No. 1～7, 昭和43年6月～46年5月に実施）、埋没調査深浅測量（測線は①～⑫, 昭和43年7月～46年2月に実施）、底質採取（S. S. P. I～III）および潮流観測（T. F. O. P. 1～19）である。

定線深浅測量記録から No. 1～7 について水深 h , サンドウェーブの波長 λ , 波高 d を求め、各測線について平均値と標準偏差を示したものの一例が表-1である。図-2, 3を対照すると、測線とサンドウェーブの峰線とが斜交していることがわかる。したがって測深記録から読みとられる λ は実際より過大になっているため、測線と峰線とが直交した場合に相当するように補正して表-1に記載してある。また No. 7 測線では、サンドウェーブはほとんど認められなかった。表より No. 1 測線

表-1 水深, サンドウェーブの波長, 波高
(昭和46.5 単位 m)

測線	$\bar{h}$	σ_h	$\bar{\lambda}$	σ_λ	$\bar{d}$	σ_d
No. 1	24.9	3.7	84.0	6.0	3.8	0.7
2	23.0	3.7	52.3	51.3	3.4	1.4
3	19.8	2.2	35.7	14.7	2.7	2.0
4	19.7	2.1	32.4	9.3	2.6	1.0
5	19.0	2.2	31.6	16.9	2.6	1.7
6	19.8	3.1	32.0	10.7	2.6	1.3
7	19.0	2.4	—	—	—	—

から No. 7 測線へと h, λ, d が減少していることがわかる（水深の減少は三ツ子島から砂州がはりだしていることの影響である）。イノサキノツガイ地区は航路掘削当初は埋没が心配されたが, h, λ, d は平均値, 標準偏差とも測量期間を通じてほぼ一定であり, 顕著な埋没は発生していない。また本地域における底質は I～IIIとも貝殻まじりの比較的一様に近い砂であった ($d_{50}=0.49\sim0.95$ mm, $S_0=1.30\sim1.61$)。

いま, マニングの粗度係数 $n=0.020$ sec/m^{1/3}, 断面平均流速 $\bar{v}=2$ ノット=1.03 m/sec, 径深 $R=20$ m, 底質粒径 $d=0.70$ mm と仮定して若干の計算を行なってみると, エネルギー勾配 $I_b=7.8\times10^{-6}$ (本地域において大潮潮流最強時に水面勾配の測定を行なった結果では東流時 $I_b=9.1\times10^{-6}$, 西流時 12.8×10^{-6} であった), 摩擦速度 $u_* = 3.91$ cm/sec, 無次元掃流力 $\tau_* = 0.142$ となった。 $\tau_* = 0.142$ は Ripples や Dunes が顕著に発達し, 流砂量が急激に増加していく領域にあたっている。したがって, 本地域におけるサンドウェーブが水深にそのスケールを規定された Dunes であるとして, Yalin¹⁷⁾ による Dunes のスケールの算定式を用いてサンドウェーブ諸元を試算してみると, $\lambda=5h$, $d=(h/6)(1-\tau_0/\tau_*)=0.13h$ となる。

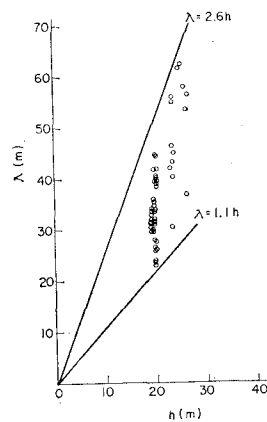
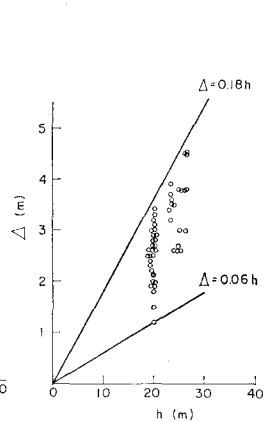
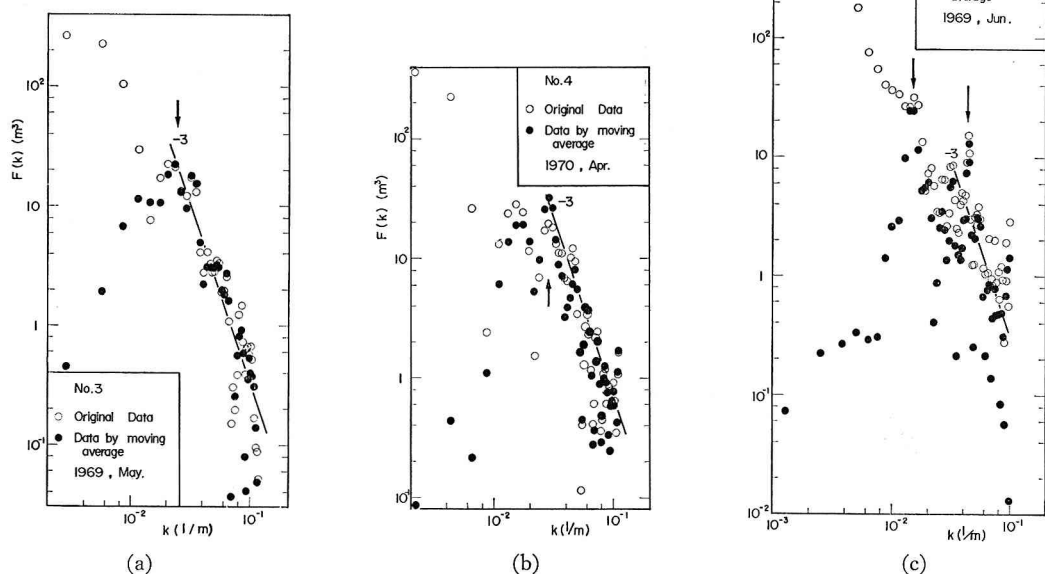
図-4(a) $\lambda \sim h$ 図-4(b) $d \sim h$

図-4(a), (b) は測線 No. 1～6 について測線ごとの平均水深と平均波長の関係, 平均水深と平均波高の関係を示したものである。これによると $\lambda=1.1\sim2.6h$, $d=0.06\sim0.18h$ となっており, λ については試算値より小さくなっているが, d は試算値とほぼ一致している。

3. サンドウェーブによる地形の統計的構造

図-5(a), (b), (c) は No. 3, 4, 6 測線について測深記録から 5 m 間隔で水深を読みとり, パワースペクトルを計算したものである。ただし計算にあたっては, 測線とサンドウェーブ峰線との斜交を考慮して No. 3,

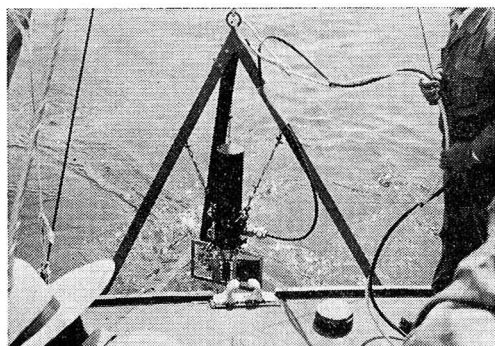


図—5 地形のスペクトル解析

4, 6 について読みとり間隔がおおの 4.4, 4.6, 4.9 m であるものとして計算してある。自由度は約 5 と低い。図中の白丸は読みとった水深データ h_i をそのままスペクトル解析したもの、黒丸はサンドウェーブより大きな波長をもった砂州の影響を除くために、 $h'_i = h_i - \tilde{h}_i$ ($\tilde{h}_i$ は h_i のデータに 13 項の移動平均を施したもの) を求め、 h'_i をスペクトル解析したものである。No. 3 については $k > 0.023$, No. 4 については $k > 0.028$ の範囲において -3 乗則が成立し、No. 6 についてはばらつきは大きいけれども $0.015 < k < 0.040$, $k > 0.040$ の範囲で -3 乗則がほぼ成立しているように思われる。No. 3 から 6 へと 2. で求めたサンドウェーブの波長 λ が減少していくに伴い、 -3 乗則の成立する範囲が高波数域へ移っていくこと、ピークが 2 箇所見られるようになってくるのが特徴的である。

4. 海底面上 50 cm における潮流乱れの測定結果

海底面近くにおける乱れを観測するために、プロペラ式全方向流速計¹⁸⁾を長さ 2 m のアングルで構成した三角錐枠中に固定した(写真—1)。三角錐枠底面三隅にはアングルが取りつけてあり、砂中に突きささるようになっている。三角錐枠はアンカーによって固定した船の船尾から海中におろされた。また流速計にはフリーコンパス部が付属しており、流向は北流を 0° として時計回りに 1° きざみで 1 秒間隔ごとの値が、流速は 1 秒ごとの流れ方向平均流速が検出できるようになっている。



写真—1 潮流観測状況

図—6 (a) はプラペラの回転に伴う 1 秒ごとの発生パルス数と流速による検定曲線を示す。図—6 (b) には流速については静止状態から一定流速に達するまでの過渡応答時間、流向についてはストッパーにより流れと直角方向に固定した尾翼部がストッパーをはずした際に流れに順応して 45° 移動するに要した時間が示されている。本図より瞬間値評価時間を 1 秒に設定することにした。

表—2 は流速測定を行なった箇所のサンドウェーブ波長 λ , 波高 d , 水深 h , 流速測定値から求めた平均流速 $\bar{U}$, 乱れの相対強さ $\sqrt{U'^2}/\bar{U}$, 主流方向流速の平均値 $\bar{u} = \bar{U} \cos(\phi - \bar{\phi})$, lateral 方向流速の平均値 $\bar{v} = \bar{U} \sin(\phi - \bar{\phi})$ (このような取り扱い u, v の定義と、流速が 1 秒間の平均値であり流向が瞬時値であるという流速計の特性の二点に多少問題点は存在する), 流向の平均値 $\bar{\phi}$ とその標準偏差 σ_ϕ を示す。なお誤差生起回数とは流向が 0° を通って変化する際には u, v の算出に誤差が生ずる

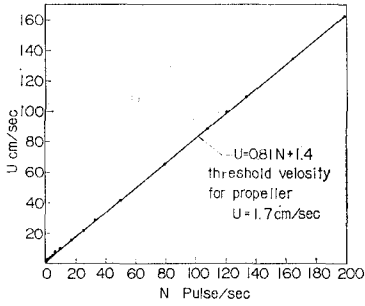


図-6 (a) 流速計検定図

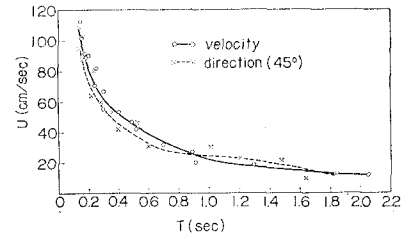
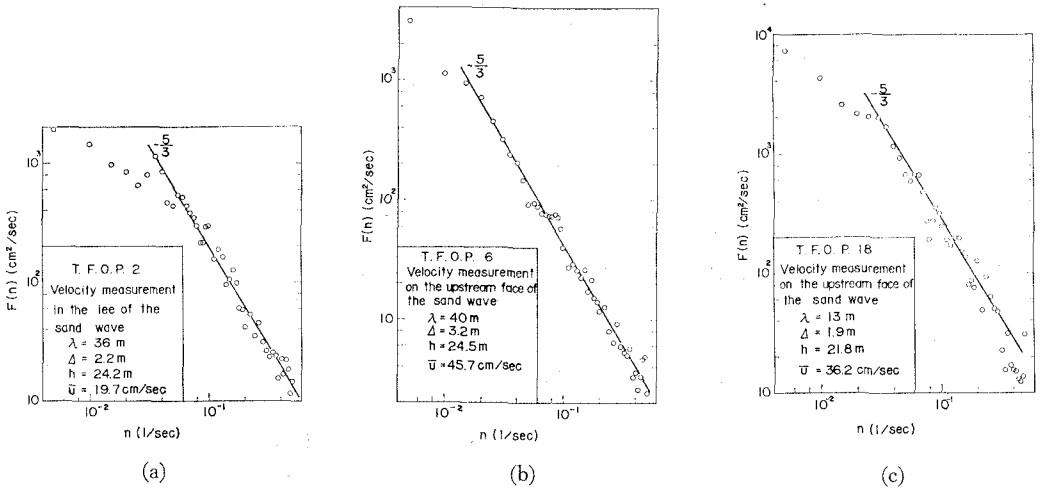
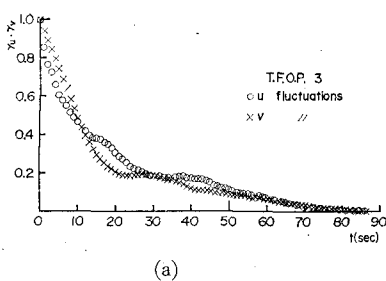


図-6 (b) 流速, 流向の応答性

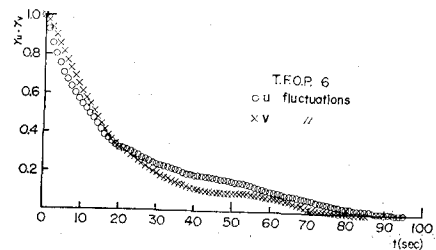
表-2 潮流観測結果

T.F.O.P.	λ (m)	Δ (m)	h (m)	$\bar{U}$ (cm/s)	$\sqrt{\bar{U}^2}$ (cm/s)	$\sqrt{\bar{U}^2}/\bar{U}$	$\bar{u}$ (cm/s)	$\bar{v}$ (cm/s)	$\bar{\phi}$ (°)	σ_ϕ (°)	誤差生 起回数	備 考
2	36	2.2	24.2	19.7	13.4	0.680	8.1	2.2	200	78	18	l.
3	24	1.1	23.0	49.6	16.3	0.329	46.4	-0.7	83	25	3	l.
4	23	2.0	21.5	61.7	13.1	0.212	60.7	0.2	66	10	0	u.
6	40	3.2	24.5	45.7	10.6	0.232	44.9	0.0	68	10	0	u.
7	21	1.8	21.8	52.4	11.7	0.223	51.6	0.2	73	10	0	u.
8	28	2.2	23.4	38.5	15.4	0.400	36.4	-0.6	92	19	0	u.
11	19	1.4	23.3	37.7	10.7	0.284	35.4	-1.0	70	21	1	u.
12	34	2.4	22.6	44.0	14.0	0.318	41.4	-0.6	85	21	0	u.
13	34	2.8	22.8	47.9	14.9	0.311	45.4	0.3	67	19	0	u.
18	13	1.9	21.8	36.2	19.5	0.539	33.3	-2.5	111	27	0	u.

l.: lee, u.: upstream face

図-7 U のスペクトル解析

(a)



(b)

図-8 u, v の自己相関係数

が、測定中に流向が 0° を通って変化した回数を示している。また、u, l. は流速測定が潮流に対してサンドウェーブのそれぞれ上手側、下手陰側で行なわれたことを示す。表から、① $\bar{U}$ が小さいほど $\sqrt{U'^2}/\bar{U}$ が大きくなっていること、② Reattachment Point 近くにおける測定値 T.F.O.P. 8, 12 における $\sqrt{U'^2}/\bar{U}$ は、 $\bar{U}$ が同じ程度の値を示す他の地点での測定値における $\sqrt{U'^2}/\bar{U}$ より大きくなっていること、③ T.F.O.P. 18 における $\bar{U}$ は潮流最強時における値であるが、T.F.O.P. 4, 7, 13 に比べて小さい値を示しており、本地域においては南へ行くと流速が減少していることがわかる。

図-7 (a), (b), (c) は T.F.O.P. 2, 6, 18 における流速 U をスペクトル解析した結果である。自由度は 20~50 である。T.F.O.P. 2, 6, 18 ではそれぞれ $n > 0.035$ ($n = 0.035$ は $U/100n = 5.6$ m に相当)、 $n > 0.020$ ($n = 0.020$ は $U/100n = 22.9$ m に相当)、 $n > 0.035$ ($n = 0.035$ は $U/100n = 10.3$ m に相当) において $-5/3$ 乗則が成立している。T.F.O.P. 2 (下手陰側) におけるスペクトルは $n < 0.035$ において顕著に減少している。また T.F.O.P. 6 (上手側) から T.F.O.P. 18 (上手側) へと $U/100n$ が減少していることは、南側へ行くにつれ、 λ が減少していくことに対応したものと考えられよう。

図-8 (a), (b) は u, v について自己相関係数を計算した結果である。いずれの測定値についても Bowden¹⁹⁾ が示しているような r_v が r_u に比べて小さくならずし時間で急激に減少する傾向は得られていない。

5. あとがき

今後は、潮流、サンドウェーブが砂州の影響を受けてどのように関連しあっているかについて、ヘリコプターからの観測も含めた検討を行なっていきたいと考えている。

なお本研究の実施にあたっては、港研海洋水理部長佐藤昭二博士、東工大沢本正樹助手より貴重な御助言を受けた。また高松港工事事務所の大和工場長、山本技官他の方々には、観測に際して絶大なる援助を受けた。ここに記して謝意を表したい。

参 考 文 献

1) 本座栄一・奈須紀幸：備讃瀬戸における sand

- waveの移動形態 (その1, sand waveの移動観測), 海洋地質, Vol. 4, No. 1, 1968.
- 2) 本座栄一・奈須紀幸：備讃瀬戸における sand waveの移動形態 (その2, sand waveの形態及び底質・潮流との関係), 海洋地質, Vol. 4, No. 2, 1968.
- 3) 茂木昭夫・加藤俊雄：備讃瀬戸東部の sand waveについて, 海洋地質, Vol. 1, No. 1, 1962.
- 4) 川村文三郎・山田紀男：マラッカ海峡の sand waveについて, 水路要報 89号, 1970.
- 5) 茂木昭夫：海洋科学基礎講座 7, 浅海地質学 p. 200~203, 東海大学出版会.
- 6) たとえば, 水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会：移動床流れにおける河床形態と粗度, 土木学会論文報告集 No. 210, 1973.
- 7) Nordin, C.F. & J.H. Algrt: Spectral analysis of sand waves, Proc. ASCE, HY 5, 1966.
- 8) 芦田和男・奈良井修二：河床形態の変動特性に関する研究—その統計的構造について—, 京大防災研年報第12号 B, 昭44. 3.
- 9) Yokoshi, S.: The structure of river turbulence, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Vol. 17, 1967.
- 10) Hino, M.: Equilibrium-range spectra of sand waves formed by flowing water, J. Fluid Mech. Vol. 34, 1968.
- 11) 日野幹雄・福岡捷二・古沢 恵：波による砂連のスペクトルについての実験, 第15回海岸工学講演会講演集, 1968.
- 12) Raudkivi, A. J.: Loose boundary hydraulics, Pergamon Press, p. 201~208, 1967.
- 13) Bowden, K. F. and L. A. Fairbairn: Measurements of turbulent fluctuations and Reynolds stresses in a tidal current, Proc. Roy. Soc. London A, 237, 1956.
- 14) Bowden, K. F.: Measurements of Turbulence near the Sea Bed in a Tidal Current, J. Geophys. Res. Vol. 67, No. 8, 1962.
- 15) Bowden, K. F. and M. R. Howe: Observations of turbulence in a tidal current, J. Fluid Mech., Vol. 17, 1963.
- 16) Hamada, T. and K. Okubo: An Observations of Velocity Fluctuations of Medium Period in a Tidal Estuary, Rep. of Trans. Tech. Res. Ins. No. 3, 1952.
- 17) 前出文献 6).
- 18) 柴山煒彦・須藤 茂：水平全方向流速計の試作について (第1報), 港研報告 Vol 9, No. 1, 1970.
- 19) 前出文献 13)~15).