

砕波と沿岸流

岩田憲幸・藤縄幸雄・田中孝紀

国立防災科学技術センター平塚支所

浅田康夫

北辰電気製作所

関本道夫

鶴見精機工作所

Wave Breaking and Longshore Currents

By

N. Iwata, Y. Fujinawa and T. Tanaka

Hiratsuka Branch, National Research Center for Disaster Prevention

Y. Asada

Hokushin Electric Works, Ltd., Tokyo

and

M. Sekimoto

Tsurumi Precision Instruments Co., Ltd., Yokohama

Abstract

In order to estimate the longshore currents in surf zones from the propagation direction of surface waves, a measurement system consisting of a wave sensor of strain-gauge type and of electromagnetic current meters has been developed.

From the signals of wave-induced pressure fluctuations and from those of horizontal components of water-particle velocities, moving average, variance and covariance for a certain period are obtained, and then it is possible to calculate the direction of incoming surface waves and longshore currents in the surf zone.

まえがき

浅海域における波浪でも、砕波しない場合は、水位変動 ζ 、あるいは水位変動に伴う任意の深さの圧力変動 P と、水粒子の水平速度 $v=(u, v)$ が測定できれば、進行する波浪の主方向はもちろんのこと、波浪のパワーの2次元スペクトルを計算することが可能である。

砕波帯内部では、波浪は保存されないから、厳密な解析は不可能であるが、上記の v 、 P の観測から、進入波の主方向、砕波帯内部で変形された波のパワー、沿岸流および離岸流の流速を求めることができる。

これらの諸量と漂砂による海浜変形との相関を求めるためには、両者とも長期にわたる連続観測

と観測値の統計的処理が必要となる。このため、波浪による水面変動や圧力変動、あるいは水粒子の運動の瞬間値でなく、それらに統計的処理を施して得られる適当な平均値を連続的に観測することが望ましい。

以下に述べることは、この v 、 P およびそれから得られる種々の統計量の観測システムと、実際の試験観測の解析結果である。

1. 電磁流速計の構造と特性

図1に示すように、直径 D (cm)のパイプ内の平均流速を v (cm/s)とする。パイプの上下に設置されたコイルにより磁界 B (G)を流れに直角

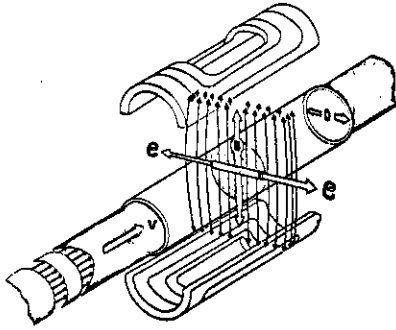


図1 電磁流速計の原理

に与える。そのとき、磁界と流れのおのおのに直交する両電極間に発生する起電力 e (V) は

$$e = BDv \times 10^{-8} \quad (1)$$

となる。電磁流速計はこの原理を応用したものであるが、実際の設計の場合は、直流による電極と海水との間の分極現象を避けるため交流による励磁を行なう。したがって、出力は交流電圧となる

が、電圧レベルが数 mV であるため高入力インピーダンスをもった変換器によりまず直流信号に変換する。この直流は $v = 0$ の場合 30mA でフルスケール 5 m/s の流速に対して (30 ± 20) mADC になるようにした。海底面における水粒子の移動速度は、孤立派を仮定すると

$$\eta = H \operatorname{sech}^2 \left[\sqrt{\frac{3H}{4h^3}} (x-ct) \right],$$

$$\frac{u}{\sqrt{gh}} = \frac{\eta}{h} \left[1 - \frac{5H}{4h} - \frac{3H}{2h} \left\{ 2 \frac{z}{h} + \left(\frac{z}{h} \right)^2 \right\} \right]$$

$$+ \left(\frac{\eta}{h} \right)^2 \left[\frac{5}{4} + \frac{9}{4} \left\{ \frac{2z}{h} + \left(\frac{z}{h} \right)^2 \right\} \right]$$

となるから海底 $z = -h$ では

$$\frac{u}{\sqrt{gh}} = \frac{\eta}{h} \left(1 + \frac{H}{4h} - \frac{\eta}{h} \right), \quad \frac{H}{h} \leq 0.78$$

であって、波の谷から測った水深 h が $h = 2$ m のときには $u_{\max} = 1.4$ m/s にもなるので高波のときに砕波帯内で観測するときは計器の利得を調整する必要がある。

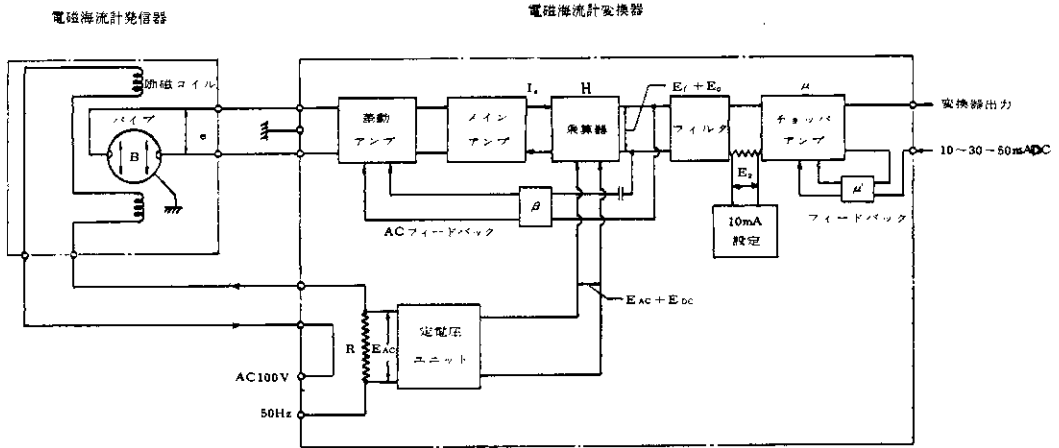


図2 電磁流速計原理

図2は流速計変換器の動作原理を示す。この変換器は、電源電圧、周波数、あるいは周囲の温度変化に対して自動補償を行なう割算回路により外部からのノイズを防いでいる。回路の時定数は0.5以下である。

図3は流速ベクトルの直交2成分を測定するための発信器、変換器の配置を示す。発信器は円筒

ケースを採用し、両端に流線形ヘッドを取り付け全体としてはカプセル形になっている。発信器からの信号を増幅し、直流電流出力に変換する変換器は鋼板製ケースに2組格納され、各発信器の間は鉄製コンジットにより結合されている。出力の直流電流は電源と同軸の海底ケーブルにより陸上に伝送され電流電圧変換器により最終出力として

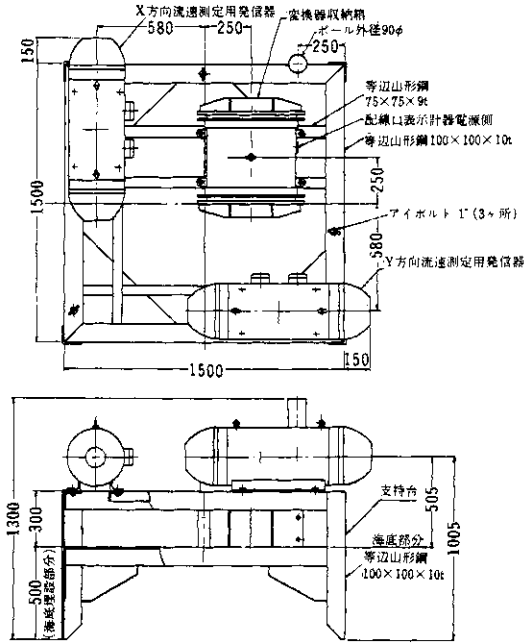


図3 電磁流速計発信部の構造

±10 Vの直流電圧に変換される。

1. 発信器口径：100 mm
2. 耐水圧：10 kg/cm²
3. 温度範囲：-10~+40°C
4. 電源：100 V, 5.1 A (50 Hz)
5. 自重：約1000 kg
6. 精度：0.5% (フルスケール5 m/s に対して)

図4は流速計の方向特性をみるために開水路でテストした結果を示す。テストに使用した水路は一周600 mの水流回転性のプールで測定は平均流速が0.3 m/sと0.5 m/sの場合について行なったが図に示したのは0.5 m/sの場合の結果である。流れに対する電磁流速計の配置を図の上段に示す。このようにセットした流速計の上流、約7.4 mのところ、プロベラ形流速計と電磁ログをならべて設置して三者同時に流速を測定する。図の黒丸とそれらの点を平滑した実線は電磁流速計No. 1 (上段に黒く塗りつぶして示してある計器)の測定流速を電磁ログの流速で割った値であり、バツ印および点線はプロベラ形流速計の流速で割った値である。No. 2の計器についても同

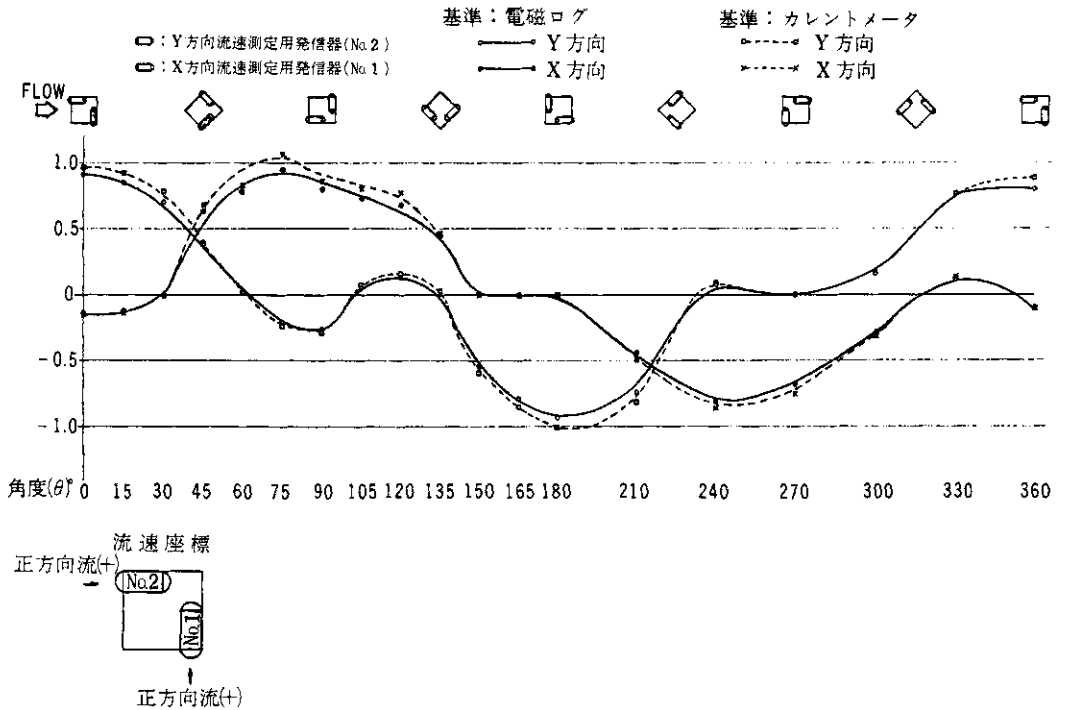


図4 電磁流速計の方向特性

様である。方向特性が理想的ならば、No. 1の計器は $\cos \theta$ でNo. 2の計器は $\sin \theta$ で変化すべきであるが、No. 2の計器については特性が非対称で $\theta = 120^\circ$ あたりのひずみが目立つ。この傾向は、水路の平均流速を 0.3 m/s とした場合もほぼ同じ値ででてくる。原因は、図3に示す変換器の位置にあると思われる。実際に観測を行なう場合の波による水粒子の移動速度は、この検定時の流速 0.5 m/s よりはるかに大きいから、その場合このひずみがどのように大きくなるか問題である。

2. 波浪計の構造と特性

波浪計にはひずみゲージ形水圧信号検出器を使用した。すなわちダイヤフラムが受ける水圧を伝達ロッドによって板状スプリングに伝え、このスプリングに固定されてあるサファイア製巻わくの針金ひずみゲージの張力変化、つまり電気抵抗の変化として取り出す。この際、ひずみゲージの温度特性を相殺するため4個のひずみゲージでブリッジ回路の4辺を構成し温度補償を行なっている。

海底ケーブルによる陸上への伝送はゲイン制御形発振器 (Hydap 発振器) による周波数伝送の方式を使用した。この発振器の基本回路を図5に示す。この回路の振動は

$$(Rc)^2 \ddot{e} - \zeta Rc \dot{e} + \beta e = 0 \quad (1)$$

で表現される。振動解の周波数は

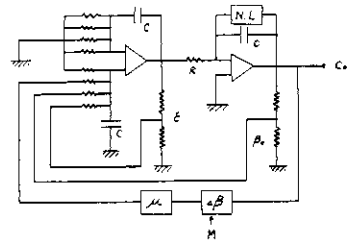


図5 波浪計発信器の基本回路

$$f = \frac{\sqrt{\beta}}{2\pi Rc} \sqrt{1 - \frac{\zeta^2}{4\beta}}$$

となるが、 $\zeta < \beta$ ならば近似的に

$$f = \frac{\sqrt{\beta}}{2\pi Rc} \quad (2)$$

となって発振周波数は β によって制御される。 β は帰還回路の伝達ゲインであるから、ここに水圧信号検出器を組み込めば水圧周波数変換が行なえる。図の μ は信号検出器のゲインが低いとき、所定の Δf が得られるように増幅するときの増幅率を示す。また、NL は振幅制限回路である。この周波数変換の特徴は、周波数が帰還回路の伝達ゲインのみによって定められる点と、基準の周波数 f_0 と周波数変化幅 Δf とが独立に設定できる点にある。

水中発信器の基本回路を図6に示す。点線で囲んである部分が1枚の基盤にはいる。AがHydap

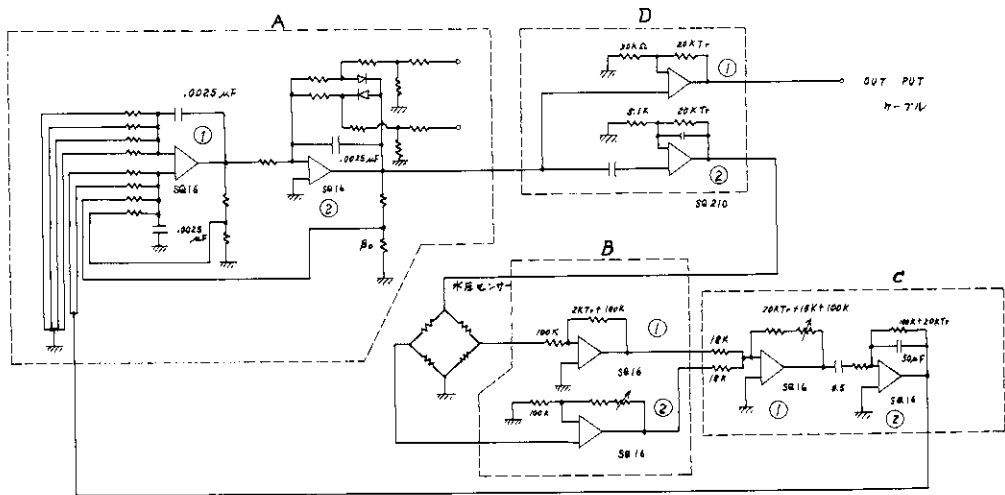


図6 波浪計水中発信器の基本回路

発振器で $\mu A \beta$ 回路は A → D → 水圧信号検出器 → B → C → A の帰還ループが相当する。Hydap 発振器(A)の出力を D のモジュール②によって増幅し、水圧信号検出器に伝え、その出力を B のモジュール①、②で反転、非反転増幅し、両者を C のモジュール①、②で増幅、調整して A に帰還し水圧を

同波数に変換する。出力信号は D のモジュール①で緩衝増幅して海底ケーブルに送り出す。ケーブルは ± 15 V の直流電源とこの出力信号の伝送に使用する。出力周波数と水深 h との関係は

$$f(\text{Hz}) = 2775 + 141.8 D (\text{m})$$

で IRIG 8, 9 バンドを使用している。

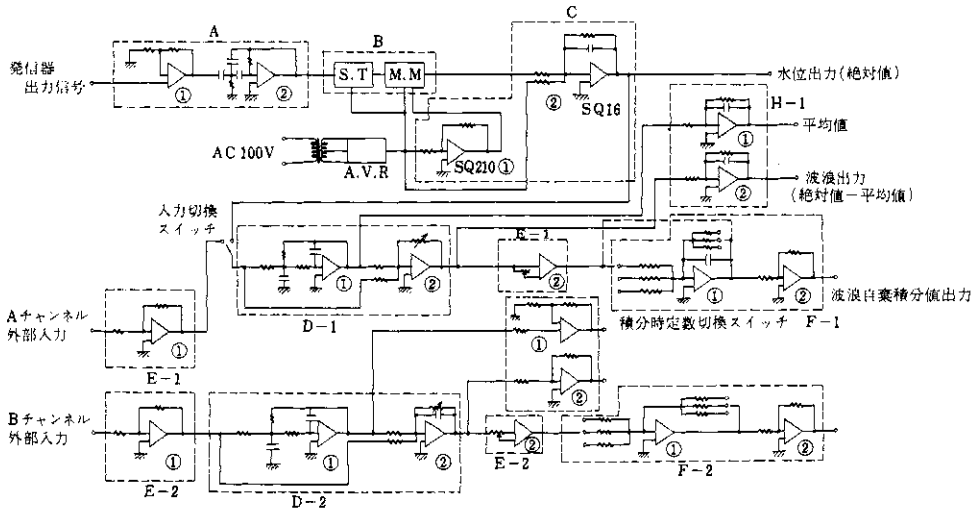


図7 二乗積分回路の構成図

図7に陸上変換部の基本回路を示す。伝送されてきた周波数信号はAの高入力インピーダンス増幅器①のモジュールで受けられモジュール②のフィルターで信号周波数より低い電源ノイズ等を除きBのシュミット・トリガーによって正弦波からパルスに成形されたあと、単安定マルチバイブレーター (monostable multivibrator) で更に高さ、幅が一定のパルスに変換される。単安定マルチバイブレーターの出力の直流分は一定時間内のパルスの数、すなわち周波数に比例する。ただし、単安定マルチバイブレーターの出力は水深 $h = 0$ のときにも零にならないから直流安定化電源 (AVR) と C のモジュール①、②によって $h = 0 \text{ m}$ で 0 V, $h = 10 \text{ m}$ で 10 V の出力が得られるように調整してある。

3. 二乗積分回路

このようにして得られた水圧変動 p および流速変動 v からから、ある一定時間の移動平均値 \bar{p} , \bar{v} , およびそれぞれの分散

$$\sigma_p^2 = \langle (p - \bar{p})^2 \rangle, \quad \sigma_v^2 = \langle (v - \bar{v})^2 \rangle$$

を求める回路である。回路の基本図は図7にあわ

せて示してある。まず D-1 のモジュール①の低域通過フィルターによって平均値を求め H-1 のモジュール①の緩衝増幅器を通して出力を得る。

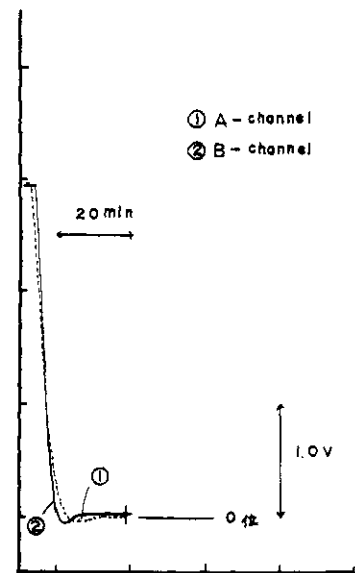


図8 平均値回路の応答特性

この平均値回路の応答特性を図8に示す。これは直流電圧を加え定常状態に達してから入力を切ったときの出力の応答を示すもので、ほぼ指数関数的に減少し、立上り時間は10分前後である。

D-1のモジュール②は入力信号と平均値の差を求めるためのものであり、この値はH-1の②の緩衝増幅器を通して波浪の出力となる。出力電圧8Vが水頭圧で1mになっている。

これと平行にE-1のモジュール②にはいった信号は二乗されF-1の①で一定の時定数を持った積分を行ない②で増幅調整して出力となる。積分の時定数は2分、3分、5分の3段である。

各出力端子の出力インピーダンスは50Ω以下であるが最大許容電流は5mAに制限されている。

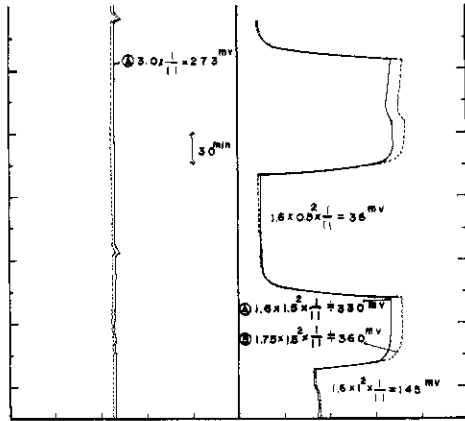


図9 二乗積分回路の応答特性 (正弦波 $T = 10$ s)

図9は二乗積分回路の応答テストの一部である。テストした入力は直流3Vに0.1Hzの正弦波を乗せたもので、山から谷までの電圧差がそれぞれ0.5, 1.0, 15Vの場合であって、積分時定数は5分とした。立上り時間は10分前後である。図10に検定の結果を示す。

いま、入力電圧を

$$x(V) = \frac{H}{2} \cos \sigma t + x_0$$

とすると、図7のD-1の①の出力は符号を反転した平均値 $-x_0$ となり、これはH-1の①によりいま一度符号を反転して出力 x_0 を得る。D-1の②では入力からこの平均値が差引かれ更にn倍に増幅された反転出力

$$x_1 = -n \frac{H}{2} \cos \sigma t$$

を得る。この出力H-1の②によっていま一度符

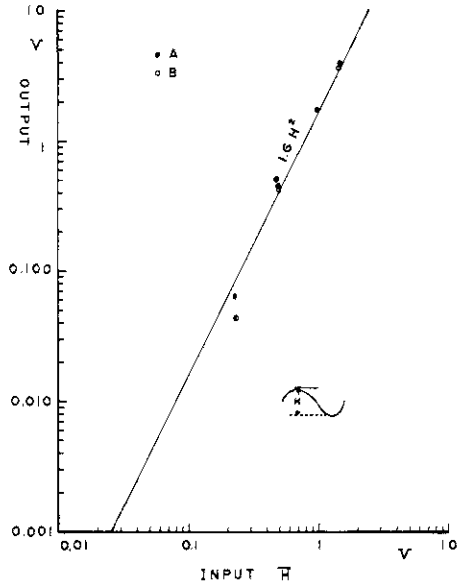


図10 二乗積分回路の検定

号が反転され平均値を除いた波浪出力となる。E-1の②は二乗回路でその出力は

$$x_2 = 0.1 x_1^2$$

となる。F-1の①は積分回路でその出力は

$$x_3 = -\frac{1}{T} \int_{t-T}^t x_2 dt$$

$$= -0.1 \frac{1}{2\pi} \left(\frac{nH}{2} \right)^2 \int_{\sigma t - 2\pi}^{\sigma t} \cos^2 x dx$$

$$= -\frac{0.1}{2} \left(\frac{nH}{2} \right)^2$$

となりF-1の②で最終段の増幅mをうけて符号が反転し

$$y = 0.1 \frac{m}{2} \left(\frac{nH}{2} \right)^2 (V^2)$$

が出力電圧となる。波浪観測用のAチャンネルおよび沿岸流観測用のBチャンネルは $n = 8$, $m = 2$ と設定してあるから

$$y = 1.6 H^2 (V^2)$$

が設計出力となる。二乗回路の入力は ± 10 V と制限されているが、観測される最大波高は $H = 0.8$ mとみてよいかから $h = 2$ mで1.6Vとなり、この

ときの二乗回路入力は $n=8$ で $\frac{n}{2}H=6.4$ V の程度である。これに反し水粒子の速度は 1 節で述べたように $u=0.4\sqrt{gh}$ にも達するので、岸に平行な成分の振動流に対しては 1 m/s が 2 V となる信号検出器に対して $n=8$ としてよいが、増設予定の岸に直角成分のチャンネルに対しては信号検出器の利得を 1 m/s が 2 V とすると $n \leq 4$ としなければならない。

二乗回路は温度の変化によって影響を受ける、その影響は入力小さいほど目立つから n を適当に選んで入力の大きさを調整しなければならない。

4. 観測値の整理

図11は水圧と流速の平塚海岸における観測例である。図12はこの信号を二乗積分回路に通したときの出力の例である。平均値出力に見られるよう

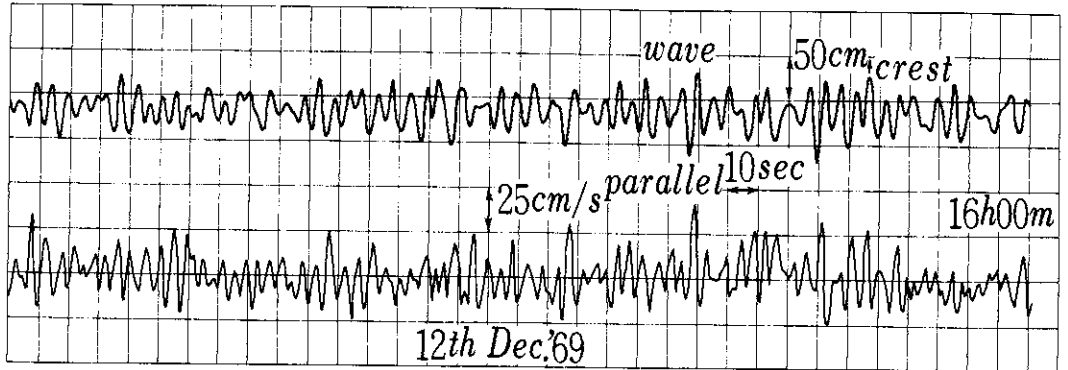


図11 波浪および粒子速度の観測例

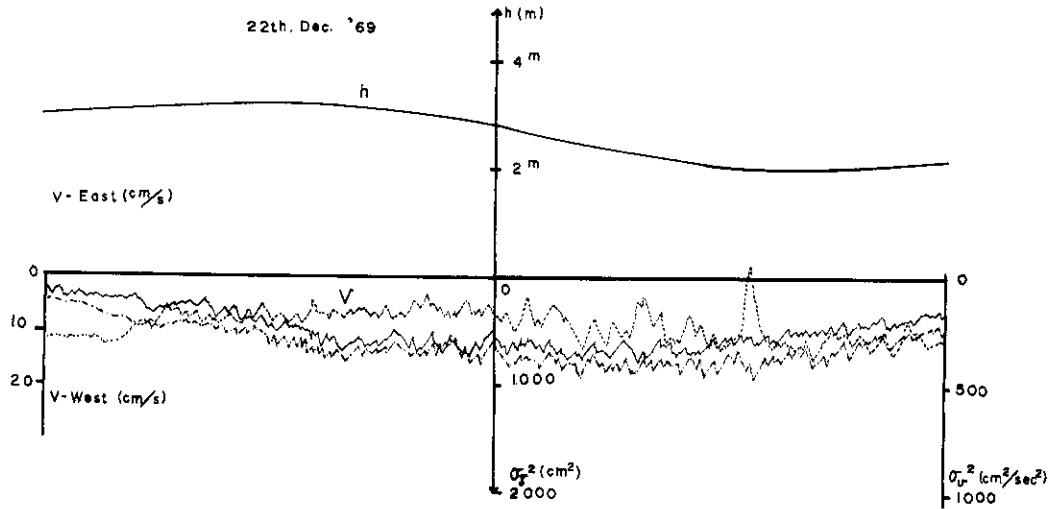


図12 二乗積分回路の出力例 (実線が波で鎖線が流れを示す)

に、設置水深は 2~3.5 m で変化している。汀線からの距離は約 150 m である。

一般に沿岸流の流速 V 、離岸流の流速 U および波による水のたい積 (Wave set-up) の量は次式で与えられる。(岩田ら, 1970)

$$\frac{V^2}{gh} = \frac{r}{8K_f} \frac{\beta - (\frac{r}{8})^2 K_f \sin^2 \theta}{1 + \frac{r^2}{8} (2 - \cos 2\theta)} \sin 2\theta \quad (4)$$

$$U = -\frac{r^{3/2}}{8} \sqrt{gHb} \sin \theta \quad (5)$$

$$\overline{d\zeta} = l \frac{\beta + \frac{r^2}{8} K_f \frac{\sin^2 \theta}{2 - \cos 2\theta}}{1 + \frac{8}{r^2 (2 - \cos 2\theta)}} \quad (6)$$

ただし、座標軸および波の進入方向は図13の上端に示してあるようにとる。 H_b は碎波の波高で $r = H_b/h_b$ で0.78とした。 l は汀線から碎波点までの距離で K_f は海底摩擦係数である。図の13は(4)式によって計算した計算値と観測実験値との比較で、これらの値はPutnam (1949)らが行なった

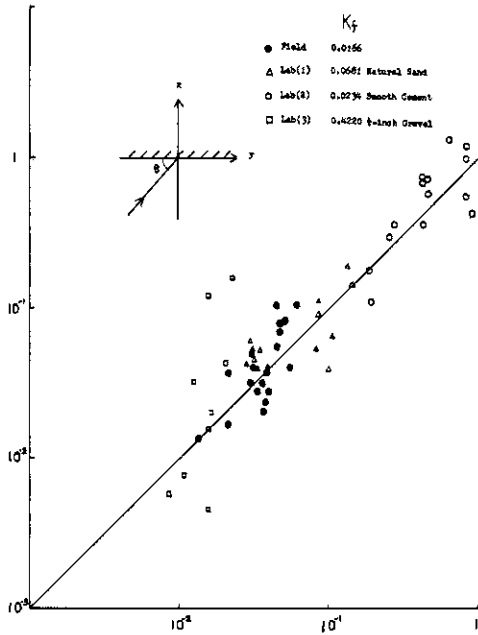


図13 沿岸流の計算値と観測値の比較 (Putnam (1949)らの資料による)

室内実験と野外観測により得られたものである。

いま、波浪の周波数・方向スペクトルを $S(\sigma, \theta)$ とすると、水圧変動および粒子速度成分のパワースペクトルはそれぞれ、

$$p_{pp}(\sigma) = (\rho g K)^2 \int_{-\pi}^{\pi} S(\sigma, \theta) d\theta,$$

$$p_{uu}(\sigma) = (\sigma K \coth kh)^2 \int_{-\pi}^{\pi} \sin^2 \theta S(\sigma, \theta) d\theta,$$

$$p_{vv}(\sigma) = (\sigma K \coth kh)^2 \int_{-\pi}^{\pi} \cos^2 \theta S(\sigma, \theta) d\theta.$$

また、速度の相互スペクトルは

$$p_{uv}(\sigma) = (\sigma K \coth kh)^2 \int_{-\pi}^{\pi} \frac{\sin 2\theta}{2} S(\sigma, \theta) d\theta.$$

ただし

$$K = \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh}$$

で与えられる。分散および共分散は

$$\overline{u^2} = \int_0^{\infty} p_{uu}(\sigma) d\sigma,$$

$$\overline{v^2} = \int_0^{\infty} p_{vv}(\sigma) d\sigma,$$

$$\overline{uv} = \int_0^{\infty} p_{uv}(\sigma) d\sigma.$$

である。波浪の進行の主方向は、図13の座標では

$$\tan 2\theta = \frac{2\overline{uv}}{\overline{v^2} - \overline{u^2}}$$

となるから、流速の分散と共分散を測定すればよい。共分散の測定が困難な場合でも、方向スペクトルの幅が狭い場合は、上記のスペクトルの表現から近似的に

$$\cos 2\theta = \frac{\overline{v^2} - \overline{u^2}}{\overline{v^2} + \overline{u^2}} \quad (7)$$

とすることができる。碎波帯近辺の浅海波では、特にスペクトルの高周波側を問題としないかぎり(7)式を使用しても波向を決めても支障はないと思われる。

更に、浅海岸を単一周期の波で代表させることができるような状態では

$$\sqrt{\frac{\overline{v^2}}{p^2}} = \frac{\sigma_m}{\rho g} \coth kh \cos \theta \quad (8)$$

となる。この単一周期の波として、風によって起きた沖波の極大周波数の波をとる。風浪のスペクトルを-5乗則で近似すると(Volkov, 1968)

$$\frac{\sigma_m}{g} = \frac{\alpha}{(g \sqrt{\overline{v^2}})^{1/2}}, \quad \alpha = 0.231$$

が得られる。(8)式の近似の程度では

$$\overline{p^2} = (\rho g K)^2 \overline{\zeta^2}$$

としてよい。したがって(8)式は、 $z = -h$ で

$$\cos \theta = \frac{1}{\alpha} \tanh kh (\cosh kh)^{1/2} \left[\frac{\overline{v^2}}{g \sqrt{\overline{p^2}}} \right]^{1/2},$$

$$\overline{p^2} = \frac{\overline{p^2}}{(\rho g)^2}$$

となる。 $kh \ll 1$ ならば更に

$$\cos \theta = \frac{2\pi}{a} \frac{h}{L} \left[\frac{\sqrt{v^2}}{g \sqrt{P_*^2}} \right]^{1/2} \quad (9)$$

となるから、 v と P の分散だけからでも、主方向 θ の大体の推定をすることができよう。

今回の試験観測では、岸に直角方向の流速 u の測定信号検出器が故障し、更に二乗積分回路も u と v のみの2チャンネルだけの未完成の状態であったので、やむをえず(9)式を使用して波向を推定し

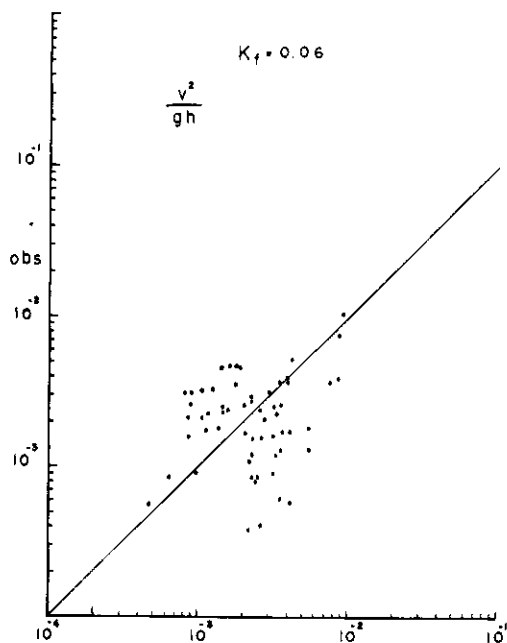


図14 沿岸流の計算値と観測値との比較

た。計算は $h/L=0.1$ として行なった。これは $h=3$ m で $T=6$ s の波を考察していることになる。このようにして求めた θ を使用し、(4)式による計算値と、観測値を比較したものが図14である。ただし、海底こう配 $\beta=0.02$ で $K_f=0.06$ とした。この K_f の値は Putnam らの自然砂による室内実験の結果得られた資料から(4)式によって求めた K_f の平均値 0.0681 を考慮して仮定した。

試験観測を行なった期間は昭和44年11月30日から昭和45年2月7日までで、計器の設置場所は平塚市虹ヶ浜の国立防災科学技術センター平塚支所前面の砂浜海岸であった。設置水深は平均潮位下3mであって、観測期間中には有義波高が1mを越えることが少なかったために図14には観測点で砕波しない波の資料まで含まれている。

5. おわりに

本稿の1節は浅田の原稿を2、3節は関本の原稿をもとにして岩田が全体をとりまとめたものである。

参 考 文 献

- Iwata, N. (1970): Wave breaking and longshore currents (*to be published*).
- Putnam, J. A., W. H. Munk and M. A. Traylor (1949): The prediction of longshore currents. *Trans. Amer. Geophys. Un.*, **30**(3), 337-345.
- Volkov, Yu. A. (1968): Analysis of the spectra of sea swell developing under the action of turbulent wind. *Izv. Acad. Sci. USSR, Atmospheric and Oceanic Physics*, **4**(9), 555-564.