

荒天時の海底地形変動に関する一考察

佐藤 昭 二*・入江 功**

1. ま え が き

荒天時の海底地形を知ることが、砂浜海岸上に建設された港湾・海岸施設の維持、あるいは海浜それ自体の保持を考える上にきわめて重要である。海底地形の測量は、通常、測量船と音響測深儀によっているため、海上が静穏なときでないと測量できない。荒天時の海底地形になるべく近いものを知るため、しけの直後に測深する方法もとられているが、これとて海上がすでに静穏になったあとで測深されるわけであり、荒天時の海底地形がどれほど残っているか疑問がある。そこで、どうしても荒天時に直接測深する必要があるわけであるが、これまでもこころみられた例がいくつかある。藤木¹⁾は、新潟海岸の冬期風浪による海底地形変動を、空中ケーブルからレッドを吊す方法にて測量した。また井島²⁾、鈴木は、遠隔投射式測深器にて、荒天時の海底地形変化の動的特性を知ることを試みた。しかし、いずれの場合も、それらによるデータの集積により、海底地形変動の動的特性などについて解析するまでには到っていない。著者らは、海底地形変動の動的特性を追求することは、砂浜海岸における漂砂特性を把握し、さらには、移動床による模型実験の現地再現性を向上させる上に重要なことであると考ええるものである。そこで、荒天時も含めて、海底地盤高を連続的に測定する超音波式洗掘計を試作し、富山湾海岸の海中に設置した³⁾。その観測データ解析から、海底地形の変動に関するいくつかの興味ある事実が明らかとなったので、ここに報告する次第である。

2. 超音波式洗掘計について

本装置の外観は図-1に示す通りで、原理的には通常の音響測深儀の送受波器を水中ポールに固定したものとせばよい。測深値に対する水温の影響を調べるため、サーミスターが取り付けられている。海底地盤高に関する情報は、海底ケーブルをへて陸上へ送られ、打点式記録器により記録される。設置場所は、富山湾西岩瀬砂浜海岸の汀線より約100m沖、水深約-2mの地点で、通常のしけ時には、砕波帯内に入る。また測深に対する浮遊砂や砕波により水中にまきこまれた気泡による影響が、

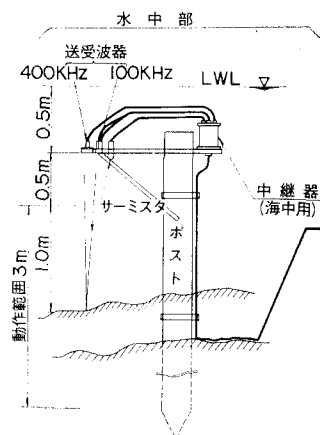


図-1 超音波式洗掘計

超音波の周波数によりどの程度異なるかを調べるため、100 kHz および 400 kHz の二種類の送受波器を取付けた。その結果は、荒天下の観測時には 100 kHz の方が 400 kHz より途中の浮遊物による影響をうけやすかった。これは、浮遊砂よりむしろ砕波時の気泡によるものと考えられる。もし、浮遊砂によるものであれば、100 kHz より 400 kHz の方が不安定であるはずであるからである。したがって使用周波数は、500 kHz～1 MHz の範囲が適当ではなかったと思われる。

3. 波と海底地形の変動

波の諸元のうち、海底地形に大きく影響するのは波高、波形勾配と考えられる⁴⁾。しかし、現地波浪については、波高と波形勾配は、相関係数約 0.7 と、かなり相関度が高い。今回は、とりあえず海底地形変動に対する外力として、波形勾配をとった。また、現地海岸のように、波浪特性が非定常な場合、海底変動率 Δh は、海底地形に関する初期条件、すなわち、ここでは、初期水深 h_0 にも関係するであろう。超音波式洗掘計により、昭和44年11月16日から12月31日までの海底地形の変動が観測されたが、これと富山新港沖の水深 -11 m の地点で2時間ごとに観測された波の記録から計算した波形勾配との相互相関係数を計算しても、最大値がたかだか 0.1 であり、直接的にはほとんど相関がない。そこで、Thompson が⁵⁾行なったように、波形勾配 H_0/L_0 、初期水深 h_0 、海底変動率 Δh のデータを次のようにとってみる。

* 正会員 工博 運輸省 港湾技術研究所

**正会員 運輸省 港湾技術研究所

$\overline{H_0/L_0}$: 時刻 t_i から ΔT 時間後までの波形勾配の平均値
 h_0 : 時刻 t_i における水深
 Δh : 時刻 t_i における水深と、それより ΔT 時間後の水深との差

サンプリング周期 ΔT としては、Thompson は一太陰時をとったがここでは、サンプリング周期の違いがどのような意味をなすかを調べるため、 $\Delta T=6\sim 26$ 時間の範囲で変化させてみた。上記3つの変数を用いれば、海底変動率 Δh を、初期水深 h_0 と波形勾配 $\overline{H_0/L_0}$ により推定する式を、最小自乗法を用いて得ることができる。まず

$$\Delta h = X, \log(\overline{H_0/L_0}) = U, h_0 = V$$

とし、 $\Delta h = X$ の推定値 Y が、

$$Y = a + bU + cV + dU^2 + eUV + fV^2 \dots\dots\dots (1)$$

で表わされるとすれば、これらの係数は、最小自乗法による次式により求められる⁶⁾。

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N & SU & SV & SV^2 & SUV & SV^2 \\ SU & SU^2 & SUV & SU^3 & SU^2V & SUV^2 \\ SV & SUV & SV^2 & SU^2V & SUV^2 & SV^3 \\ SU^2 & SU^3 & SU^2V & SU^4 & SU^3V & SU^2V^2 \\ SUV & SU^2V & SUV^2 & SU^3V & SU^2V^2 & SUV^3 \\ SV^2 & SUV^2 & SV^3 & SU^2V^2 & SUV^3 & SV^4 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} SX \\ SUX \\ SVX \\ SU^2X \\ SUVX \\ SV^2X \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

ただし N は標本数 (90~180) で、 S は Σ (シグマ) と同じ意味をもったものである。サンプリング周期 ΔT は、6, 12, 18, 24, 26 時間と、5 通りに変化させたが、これに対応して、係数を異にする式(1)が5つ得られた。超音波式洗掘計の観測結果では、昭和44年11月16日02時における水深 h_0 (送受波器から海底面までの距離) は、1.44 m であった。そこで、この初期水深と、それ以後の波の記録から得られる波形勾配 $\overline{H_0/L_0}$ を用いて、

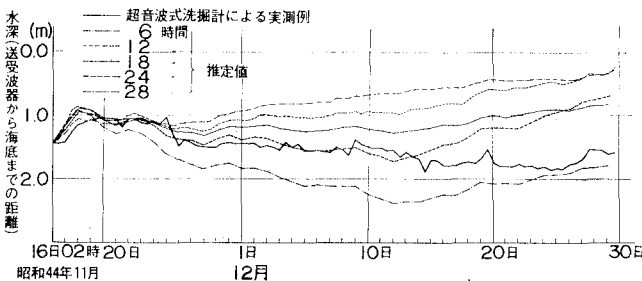


図-2 サンプリング周期を変えたときの水深変化の実測値と推定値との比較

式(1)により海底地形の変動量がつつぎに求められる。こうして、各サンプリング周期に対して得られる海底地形変動の推定値と超音波式洗掘計により得られた実測値とを比較すると、図-2 のようになる。図中、太い実線が、実測値である。サンプリング周期が短いときは、推定値は時間がたつにつれて埋没してゆく傾向を示し、またそれが短くなるほど、実測値から遠ざかっている。しかし、サンプリング周期が長い場合の推定値は、実測値と傾向がきわめて良く一致しており、特に、サンプリング周期 $\Delta T=24$ 時間の場合 11 月 16 日から最初の1ヵ月間が実測値と推定値の間で非常に良く一致している。ここで、水深の実測値 h_A とその推定値 h_E との差の自乗和を求め、それを平均して平方根をとった推定誤差 $E_r = \sqrt{\Sigma(h_A - h_E)^2 / N}$ を各サンプリング周期に対して求め、図示すると図-3 のようになる。図-2 に

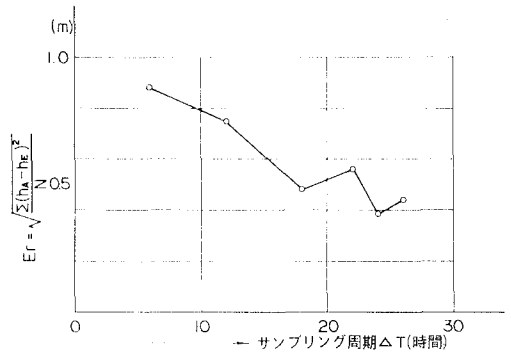
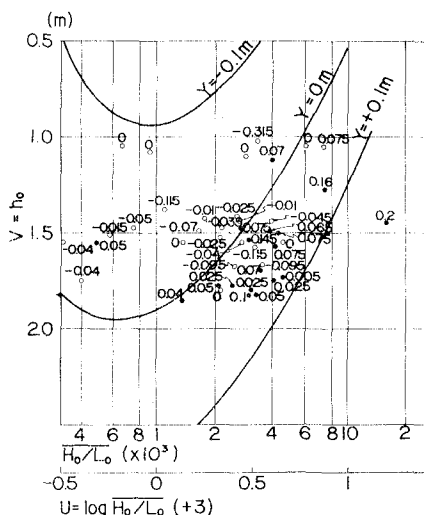
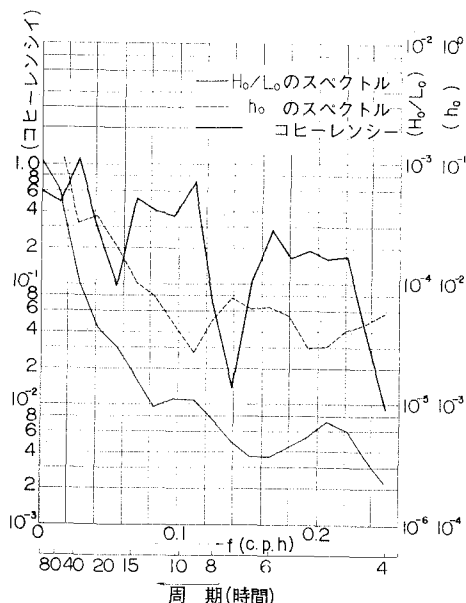


図-3 サンプリング周期と推定誤差との関係

みられた通り、推定誤差は、サンプリング周期が長くなるほど小さくなっており、ここでは、特に $\Delta T=24$ 時間の場合が最も小さくなっている。 $\Delta T=24$ 時間の場合、式(1)は $Y = -0.32U + 0.02V + 0.14U^2 + 0.05 \times UV + 0.01V^2$ となり、これより、 $V(=h_0)$ を縦軸、 $U(=\log(\overline{H_0/L_0}))$ を横軸にとり、 $Y(=\Delta h)$ をパラメータとして図示すると、図-4 のような放物線となる。また、同図には、これらの実測値もプロットしてあり、各点に付してある数字は海底地形変動率 Δh の値で、その符号は、黒丸が正、すなわち堆積を示し、白丸は負、すなわち浸食を示す。 $Y=0$ の曲線は、もし、初期水深 h_0 と波形勾配 $\overline{H_0/L_0}$ が互いにその曲線上で与えられる関係にあれば、海底地形は、もはや変動しないという平衡条件を与えるものであるが、図中の白丸と黒丸は、この曲線を境にして上下にかなり明瞭にわかれている。以上のように、海底地形の変動を式(1)で推定する場合、実測値との差、すなわち推定誤差 E_r は、サンプリング周期が 24 時間前後のとき最も小さ

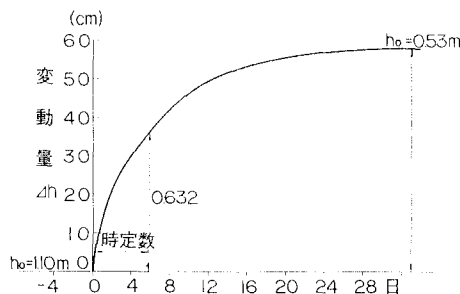


くなるが、これはいかなる理由によるものであろうか。一つ考えられるのは、波形勾配 $\overline{H_0}/L_0$ の時間的変化におけるある特定の周波数成分に対し、特に大きく海底地形が応答しているのではないかということである。そこで、2時間ごとにとられた波形勾配 H_0/L_0 と、初期水深 h_0 について、各データ数 $N=552$ のときのそれら自身のスペクトル、およびそれらの間のコヒーレンシを計算した結果を、図—5 に示す。これによると、周期が40 時間付近に高いコヒーレンシが認められ、波形勾配 H_0/L_0 のこの周期成分に対して、海底地形が大きく応答していることがわかる。もしそうであれば、海底地



形の時間的変動データに対し、40 時間の半分、すなわち 20 時間ごとにサンプリングすれば、波形勾配と海底地形の変動との関係がうまくつかめるはずであるが、このサンプリング時間は、図-2、図-3 において推定誤差が最も小さかった $\Delta T=24$ 時間に近い値である。したがって、図-2 において、サンプリング周期 $\Delta T=24$ 時間の時、最もよく海底地形の変動が推定できたのは、波形勾配 H_0/L_0 と水深 h_0 との卓越応答周期がこの時間に近かったことによるものと推定される。

4. 海底地形變動に関する時定数



になり、時間がたつにつれて変化率は減少し、やがて平衡状態になる。このような外力変化に対する応答はテストヤ温度計算等、外的条件の急激な変化に対してある遅れをもって変化する場合によく見られるものである。計測器学上は、この遅れを時定数という言葉で表わし、これは変化が始まる時点から、最終変化量の0.632倍だけ変化するときまでの時間に相当する⁷⁾。もし海底地形変動に対してもこの時定数の概念を適用するならば、図—6より、この場合の海底地形変動に対する時定数は、6日前後ということになる。ところで、はたして海底地形の変動にこのような時定数が存在すると考えて良いのか、またそうとすれば、水深と時定数との関係はどうであろうか。これを模型実験により調べてみた。まず中央粒径0.22 mmの砂でできた初期勾配1/10の模型浜に、波高10 cm、周期2.5秒、波形勾配0.01の波を長時間

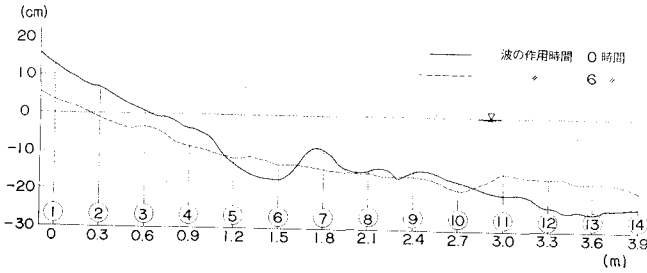


図-7 模型実験における断面の変化

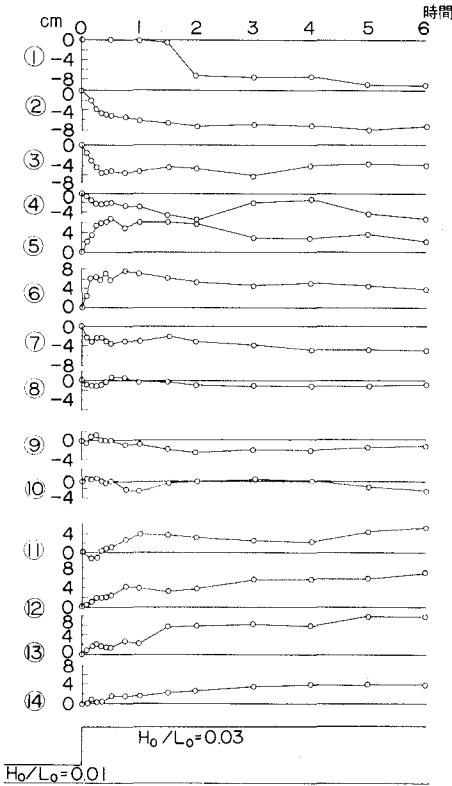


図-8 模型浜各地点における水深の変化

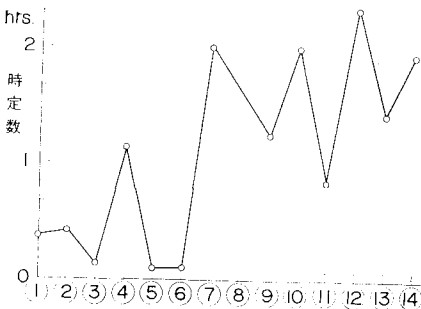


図-9 海底地形変動に関する時定数の模型浜断面に浴う変化

作用させて平衡勾配を作った。次に波形勾配の大きい波、すなわち波高 10 cm、周期 1.5 秒、波形勾配 0.03 の波を作用させて、図-7 のように海浜断面の各位置に

おける水深の時間的変化を調べた。結果は図-8 のようになり、水深の変動特性は図-6 とよく似ていることがわかる。この結果から、先の定義に従って時定数を求め、これと水深との関係をプロットすると、図-9 のようになる。これによると、海底地形変動の時定数は碎波帯内と沖浜帯とは非常に違っており、沖浜帯のそれがはるかに大きいことがわかる。

5. 海底地形変動のモデル

これまで海底地形は、波形勾配の変化に対してある遅れをなして応答することを明らかにし、この遅れを時定数で表わした。次にこのような応答系をモデル化し、海底地形変動に対する時定数による種々の影響について調べてみる。図-4 の海底地形変動の特性曲線によれば、 Y に一定の値を与える各曲線間の間隔は一定ではなく、同じ地点であっても、海底地形変動に関する時定数がある程度変化することがわかる。しかしここでは考察を容易にするため、水深が大きく異なるところでは時定数も異なるとしても、一定地点でのある範囲内での水深変化に対しては、時定数も一定と仮定する。まず 図-10 のように外力 F_0 (波形勾配など) に対して水深が h_0 で平

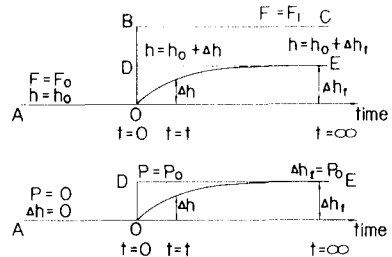


図-10 外力の変化に対する海底面の応答

衡状態に達していたとする。0 点において、外力が急に F_0 から F_1 に変化すれば、水深もそれにとまって変化する。すなわち外力が $AOBC$ と変化した時、水深は h_0 から OE と変化し、やがて Δh_f だけ変化して、外力 F_1 の下で新しい平衡状態に入るであろう。ここで以後の式を簡単にするため、外力の変化幅と水深の変化幅とが等しくなるように、

$$P = (F - F_0) \left(\frac{\Delta h_f}{F_1 - F_0} \right) \dots \dots \dots (3)$$

として、 P を外力として取扱うことにする。そうすれば、図-10 の下に示したように、 $t < 0$ では外力 $P = 0$ 、 $h - h_0 = \Delta h = 0$ であったのが、 $t = 0$ にて急に P だけ変化し、それにとまって海底面は OE と変化する。平衡水深 Δh_f と外力 P の値は等しい。 $(P - \Delta h)$ なる量は 図-10 の応答系における非平衡性を表わす。ここで

海底変動率 $d(\Delta h)/dt$ が、この非平衡性に比例するものと仮定する。この仮定は図-4 の特性曲線を見れば妥当であることがわかる。そうすれば次のような海底地形変動に関する基本ができる。

$$(P - \Delta h) = \tau \cdot \frac{d}{dt} (\Delta h) \quad \dots\dots\dots (4)$$

あるいは、

$$\tau \cdot \frac{d}{dt} (\Delta h) + \Delta h = P \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに τ は比例定数であり、時定数に相当する。図-10 のように $t < 0$ において $\Delta h = P = 0$, $t \geq 0$ において $P = P_0$ として式 (5) を積分すれば、

$$\frac{\Delta h}{P_0} = 1 - e^{-(t/\tau)}$$

これより、 $\Delta h/P_0$ と t/τ の関係をプロットすると、図-11 のようになり、図-6 の海底地形の変動は、これとよく似ている。図-11 から $t = \tau$ (時定数) のときは、 $\Delta h/P_0 = 0.623$ となる。

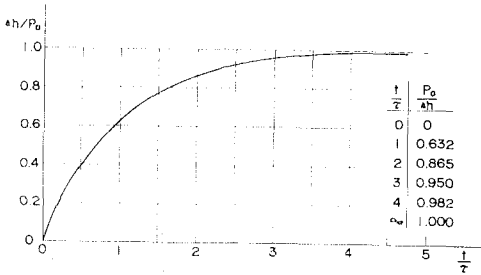


図-11 モデル化した海底面の応答

実際の波では、図-10 のように波況が急に変化することはあり得ない。来襲する波が台風によるものであろうと、冬期季節風によるものであろうと、最初静かな状態から、次第に波高が高くなり、最大値に達した後、再び次第に静穏になって行く。考察を簡単にするため、ここでは図-12 のように、外力 F が $ABCKE$ と三角形

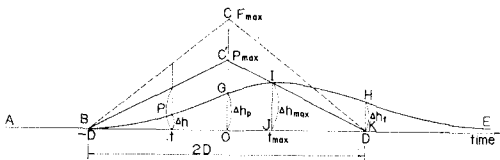


図-12 外力が三角形に変化したときの海底面の応答

状に変化するものと仮定する。式 (3) の定義を用いて、外力 F の代わりに P で表わせば、 P は $ABCKE$ のように変化する、水深は $ABGIHE$ のように変化するであろう。図において $BK = 2D$ は、海上がしける期間に相当する。また海底変動量 Δh は、外力が最大の時 (図で $t = 0$ の時) 必ずしも最大値をとらず、それより小さい値 $GO = \Delta h_p$ をとる。 Δh の最大値はこれよりある時間遅れて、 $t = t_{max}$ で $IJ = \Delta h_{max}$ をとる。海上は次第

におさまリ、それにとまって海底変動量 Δh も次第にもとへ復旧して行き、完全におさまった $t = D$ では、 $HK = \Delta h_{fin}$ なる変動量だけが残留することになる。そこで海底地形変動に関する基本式が式 (5) で表わされるものとし、外力が次のように変化した時の海底変動量を求めてみる。

$$\left. \begin{aligned} P &= \Delta h = 0 & t &\leq -D \\ P &= \alpha t + P_0, \alpha = P_0/D & -D \leq t \leq 0 \\ P &= -\alpha t + P_0 & 0 \leq t \leq D \\ P &= 0 & D \leq t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

これらの外力条件を式 (5) に入れて積分すれば、 Δh_p , Δh_{max} , Δh_{fin} を求めることができる。ここで、

$$X = D/\tau$$

$$Y_p = \Delta h_p/P_0$$

$$Y_{max} = \Delta h_{max}/P_0$$

$$Y_{fin} = \Delta h_{fin}/P_0$$

なる無次元量を用いれば、結果は次のようになる。

$$Y_p = 1 - \frac{1 - e^{-X}}{X} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$Y_{max} = 1 - \left\{ \left(1 + \frac{1}{X} - Y_p \right) e^{t_n \frac{1/X}{1+1/X-Y_p}} - \frac{1}{X} \left(1 + \ln \frac{1/X}{1+1/X-Y_p} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$Y_{fin} = 1/X + (Y_p - 1/X - 1)e^{-X} \quad \dots\dots\dots (10)$$

これらの式を用いて、 Y_p , Y_{max} , Y_{fin} と、 $X = D/\tau$ との関係を示すと、図-13 のようになる。 Y_p , Y_{max} , Y_{fin} は、たとえばしけが無限に長く続いた場合には 1 に近づく量である。しかし実際の海のように、外力の変化が三角形状に変化する時は、図-13 のように種々の変化をする。 Y_p は外力が最大になった時の海底地形変

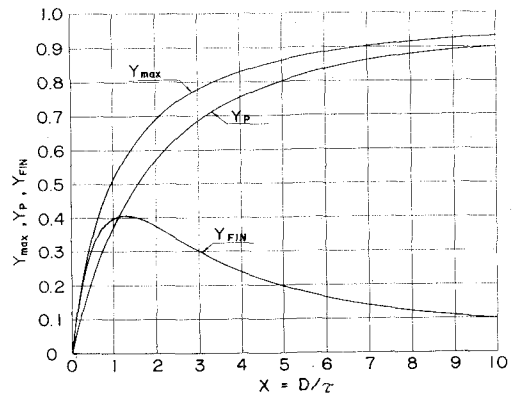


図-13 Y_p , Y_{max} , Y_{fin} と X との関係

動量を示すものであるが、海底地形変動の時定数に比して、しけの期間 $2D$ が長くなるにつれ増大している。この傾向は、海底地形変動の最大値を示す Y_{max} の場合も同じである。これはしけの期間中に観測された外力の最大値が同じであっても、しけの期間が長いかににより、海底地形の変動量が異なることを示すものであり、

波と海底地形との関係を考える上に重大な事実といわねばならない。先に述べた水深 -2m における例では、海底地形変動の時定数 $\tau=5\sim 6$ 日と考えられたが、それに比してしけの期間の半分 D は、1日～数週間であり、 $X=D/\tau$ は広い範囲で変化する。したがって、それによって海底地形の変動量も大きく異なることが考えられる。 Y_{fin} はしけが完全におさまった時の残留海底地形変動量を示すので、 $Y_{\text{fin}}/Y_{\text{max}}$ はあるしけの間に生じた最大海底地形変動量のうち、何割位がしけの直後残留しているかを表わすことになるが、これと $X=D/\tau$ との関係を示したのが 図-14 である。これよりしけの期

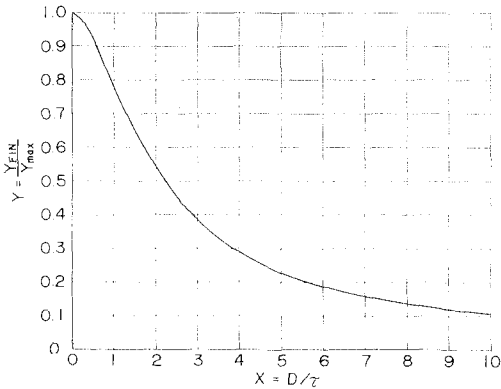


図-14 $Y_{\text{fin}}/Y_{\text{max}}$ と X との関係

間が長くなるにつれ、最大海底地形変動量の残留率が小さくなることわかる。

5. 海況変化の日本海型、太平洋型

荒天時の海底地形変動量、しけがおさまった後の残留海底地形が、しけの間の外力の最大値だけでなく、しけの期間の長さによっても左右されることがわかったが、実際の海岸においては、このしけの期間の長さが、各しけごとにかなり異なることは衆知の事実である。さらに日本海沿岸と太平洋沿岸とでは、海況の変化に大きな違いがあることは容易に想像される。たとえば図-15 は、日本海に面する新潟港と、太平洋に面する大井川港における一年間の波浪観測データを用いて、波形勾配の自己相関を計算したものであるが、両者にかんがりの相違が認められる。すなわち新潟港では Time Lag を相当大きくしても、なかなか自己相関係数が減少しないのに比べ、大井川港ではかなり急速に減少している。これは新潟港ではいったんしけになったら、それが長い間続き、また逆に静穏になったら、その状態が長く続くことを意味し、大井川港ではそれらの現象が短い期間で変化することを意味するものである。この違いのため、たとえ来

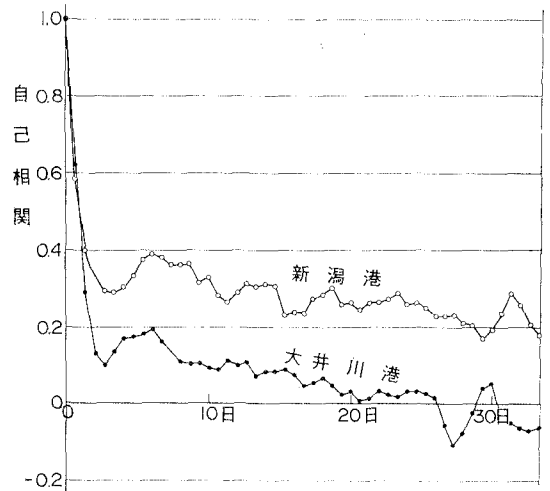


図-15 新潟西海岸および大井川港における年間の波形勾配の変化についての自己相関

襲する波浪の規模や底質条件が同じであっても、海底地形の特性は、日本海沿岸と太平洋沿岸とは相当異なるのではないと思われる。

7. ま と め

著者らが開発した超音波式洗掘計による海底地形の変動に関する観測データの解析結果から、海底地形変動に関する時定数が存在し、そのため海底地形の変動量が波浪の規模だけでなく、しけの期間の長さによっても異なることを示した。この時定数は海底地形の変化を動的にとらえる上に有用な要素と思われるが、その特性については、今後も現地観測、模型実験等によりさらに究明してゆきたいと思う。

参 考 文 献

- 1) 藤木 昇：新潟海岸の冬期観測施設とその成果について、第4回海岸工学講演会講演集，1957。
- 2) 井島武士・鈴木喜実：遠隔投射式測深器の試作(第一報)，第10回海岸工学講演会講演集，1963。
- 3) 入江 功・天坂三明：漂砂の連続的な現地観測について—海底地形変動に関する一考察—，港研報告第10巻第2号，1971。
- 4) Ralph L. Rector : Laboratory Study of Equilibrium Profiles of Beaches, BEB, Tech memo, No. 41, 1954.
- 5) Warren C. Thompson : The Effect of Waves on the Profile of Natural Beach, Proc. of 11th Conf. on Coastal Engineering, 1968.
- 6) W.C. Krumbein : Trend Surface Analysis of Contour-Type Maps with Irregular Control-Point Spacing, Journal of Geophysical Res., Vol. 64, No. 7, July, 1959.
- 7) Ernest O. Doecelin : Measurement Systems, Application and Design, McGraw-Hill Book Company.