

砕波帯における波浪・海浜流・潮汐・地形の相互関連について

橋 本 宏*・宇 多 高 明**

1. ま え が き

砕波帯付近の海底地形は、波浪・海浜流・潮汐などの変化と共に、また波浪や海浜流は潮位の変化と共に刻々変化している。これらの波浪・海浜流・潮汐・地形の相互の関連性は現地海岸での現象を考える際極めて重要な問題であるが、定性的な議論はなされているものの、定量的評価を基にした議論はほとんど行われていない。この理由としては、潮汐変化の時間スケールに対応した変化を調べるためには、少なくとも数日単位で測定を継続する必要があるが、砕波帯でこのような長期間の現地観測を行うことが測定器の信頼性や記録能力などから困難であったことによる。

本論文では、以上の問題の研究の第1歩として、茨城県のア字ヶ浦で行った観測の結果について述べる。すなわち、波高計(2台)、電磁流速計(2台)を用いて、砕波帯における波浪と海浜流の80時間にわたる連続観測と、漂砂観測用棧橋から6時間間隔で7日間の深浅測量を行い、波浪・海浜流・潮汐・地形相互の関連性を調べた。この結果、砕波帯内外の水位変化や、砕波帯内の有義波高、有義流速、radiation stress などと水深の関係を明らかにすることができた。

2. 観 測 方 法

海底地形測量は、棧橋上より錘りを付けたワイヤーを用いて行った。測定は3m間隔で65点行った。測定時間間隔は約6時間とし、昭和53年12月11日午前7時より、16日正午まで延べ23回行った。

波浪と流速は、棧橋先端とソリ¹⁾に波高計と電磁流速計を取付けて行った。棧橋先端には抵抗線式波高計と水平2成分型の電磁流速計を設置した。またソリには容量型波高計と3成分型の電磁流速計が取付けられている。ソリの移動は棧橋先端に滑車を取付けて、ジープでけん引して砕波帯へ移動させた。ただし前報¹⁾で明らかにしたソリによる観測法は、電磁流速計の受感部の固定位置が高いために、砕波帯の浅水域での測定に困難を来す

場合があった。このため今回の測定ではソリの座高を15cm低下させた。

測定方法としては、棧橋先端の波高計・流速計(3ch)及びソリの波高計・流速計(4ch)、合計7chの信号を観測小屋内へ導き、TEAC製の長時間データレコーダによってアナログ記録をとった。測定は12月12日13時30分より80時間の連続測定であった。ただし磁気テープの記録時間は約40時間であったために、この間テープ交換を1回行った。このため12月14日午前6時より30分間記録を中断した。

3. 観測結果と考察

(1) 地形特性

地形データはほぼ6時間おきに、合計で23回得られたので、これらの値を用いて平均地形や分散値を求めた。図-1はこの結果を示したものであり、棧橋直下の平均

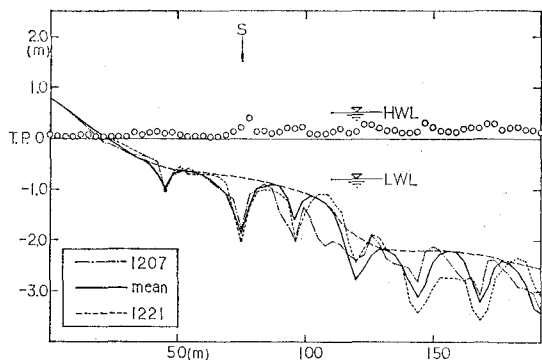


図-1 海浜形状図 (S: ソリの設置位置)

地形は実線で示されているように、stepが良く発達している。ただし図中の鋭角状の地形変化は橋脚の洗掘を表わしている。

この棧橋直下の地形は、観測期間中には有意な変化は認められず、地形変動と潮汐、波浪、海浜流などの明確な応答関係は見出せなかった。ただし分散値は図中に○印で示されているように、約10cm程度存在し、また橋脚部分で大きくなる傾向がある。

また、この地形の長期的変化を調べるために、観測期間前後1週間の地形も図示してある。これによれば汀線

* 正会員 建設省土木研究所海岸研究室長

** 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室

付近ではそれほど大きな変化は見られないが、約 100 m 付近では 1 週間で約 1 m もの堆積が生じている。なお、図-1 には観測期間中の最高潮位と最低潮位、及びソリの設置位置 (S 点) も併せて表示してある。ただしソリの位置は棧橋より沿岸方向に約 7 m 離れた地点であり、したがって洗掘地形の外側に位置していた。

(2) 有義波高と潮位の特性

データ処理に当っては、汀線より沖向に x 軸、沿岸方向に y 軸をとり、各軸の方向の流速を u, v と定め、更に棧橋先端で取られたデータは添字 1 を、またソリのデータは 2 を付けて区別することにする。さて、計算処理は 1 時間おきに行うこととし、 $\Delta t = 0.3125$ 秒で $n = 2048$ 個のデータを AD 変換して求め、これより式 (1) で定義される平均流速、平均水位を算出した。

$$\bar{u}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n u_{ij}, \quad \bar{v}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_{ij}, \quad \bar{\eta}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \eta_{ij} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ただし $i=1, 2$ である。また変動流速と cross product を次のように定義した。

$$u'_{ij} = u_{ij} - \bar{u}_{ij}, \quad v'_{ij} = v_{ij} - \bar{v}_{ij} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\langle u'v' \rangle = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n u'_{ij} v'_{ij} \quad \dots \dots \dots (3)$$

更に波高記録に対してはスペクトルと有義波高を計算し、また流速記録より有義流速等を算出した。

さて、図-2 は棧橋先端とソリにおける有義波高と潮

(H_2) は潮位と高い相関を有している。ただし干潮時のデータが欠損しているが、これはソリの波高計が干潮時に水面上へ露出したためである。

ところで、図-2 に示した潮位は相対潮位を示すものであるが、実際に水深を算出するには絶対潮位が必要である。絶対潮位を算出するには、基準点との関係が明らかな潮位記録と比較しなければならない。このため阿字ヶ浦より約 6 km 南の三浜港での潮位と比較することにした。この結果が図-3 である。三浜港の潮位 ($\bar{\eta}_3$) と波

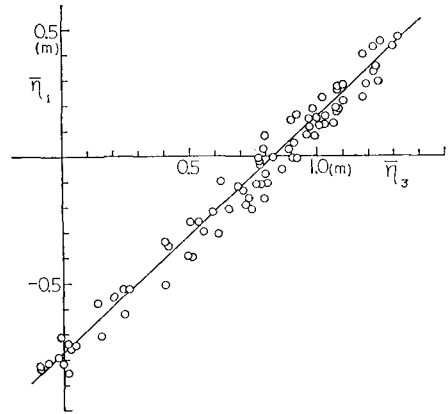


図-3 三浜港の潮位 ($\bar{\eta}_3$) と棧橋の波高計の水位 ($\bar{\eta}_1$) との相関

高計水位 ($\bar{\eta}_1$) との間には式 (4) が成立する。

$$\bar{\eta}_1 = -0.77 + 0.93\bar{\eta}_3 \quad \dots \dots \dots (4)$$

また、三浜港の基準値は T.P. + 0.79 であるから、T.P. 値への換算は式 (5) の関係を用いれば良い。

$$\text{T.P.} = 1.075\bar{\eta}_1 + 0.038 \quad \dots \dots \dots (5)$$

式 (5) ではその係数値が 1.0 より大きいが、波高計の検定では、この比を 1.0 に調節してある。このため両者は 7.5% 相違するが、この原因としては、三浜港の潮位と波高計の水位両者の誤差が考えられるため、現段階では明確な結論を出すには至らなかった。したがって水位については式 (5) の関係を用いる一方、有義波高については波高計の検定値をそのまま用いることにした。

次に図-4 は、ソリと棧橋の水位 $\bar{\eta}_2, \bar{\eta}_1$ の相関を示すものである。ただし、図-4 では棧橋先端での入射波高 (H_{in}) の大小による区別が行われており、○印は $H_{in} = 0.49$ m、●印は $H_{in} = 0.8$ m の場合である。また $\bar{\eta}_1$ については T.P. との関係は式 (5) のように明らかになっているが、 $\bar{\eta}_2$ についてはその絶対値が未知であり、したがって相関図は上下方向へ移動しても良い。 $\bar{\eta}_1$ と $\bar{\eta}_2$ とは線型性は有しておらず、二点間で相当大きな水位差が発生することを示している。この主要因としては、砕波帯付近の wave set-up と set-down と考えられたために、この点について検討を加えることにした。

まず、鉛直上方に z 軸、汀線より沖向に x 軸をとれ

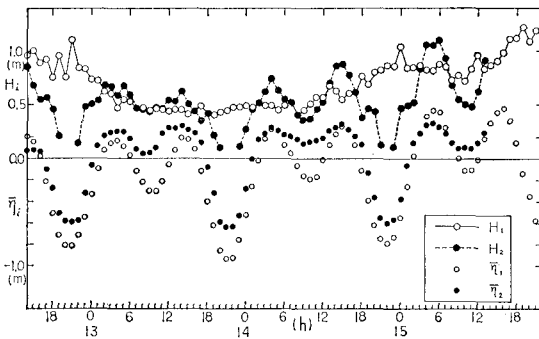
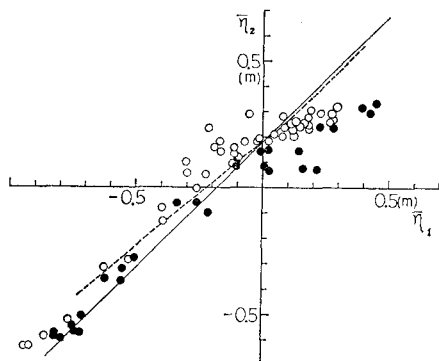


図-2 有義波高と潮位の経時変化

位の経時変化を示している。図の上段が有義波高 (H_i)、下段が潮位 ($\bar{\eta}_i$) の変化を示している。潮位については、絶対水位は明らかでないために測定値自体が図示されており、したがって両者の水位は上下に相対的に移動しても良い。しかし両者のデータを比較すると振幅が異なっており、ソリ (●印) の方が振幅が小さい。ただしこの理由については、後に検討することとして、その他の特長を調べると、まず棧橋の有義波高 (H_1) は波高が約 0.8 m より約 0.5 m に低下し、1.5 日間程度継続した後再び約 0.8 m となっている。この変化は緩やかであり、潮位とはほとんど無相関である。一方、ソリの有義波高



図—4 ソリ (η_2) と棧橋先端 (η_1) の水位の相関
(○: $H_{1n}=0.49\text{ m}$, ●: $H_{1n}=0.8\text{ m}$)

ば、基礎式は式 (6) で与えられる。

$$-\rho g(h+\zeta) \frac{d\zeta}{dx} = \frac{dS_{xx}}{dx} \quad (6)$$

砕波帯外では $\zeta \ll h$ の関係が成立し、その解²⁾は式 (7) で与えられる。

$$\zeta = -\frac{H^2}{8} \frac{k}{\sinh 2kh} \quad (7)$$

一方、砕波帯内では $H=\gamma(h+\zeta)$ の関係が成立するとすれば、式 (6) の解は式 (8) で与えられる²⁾。

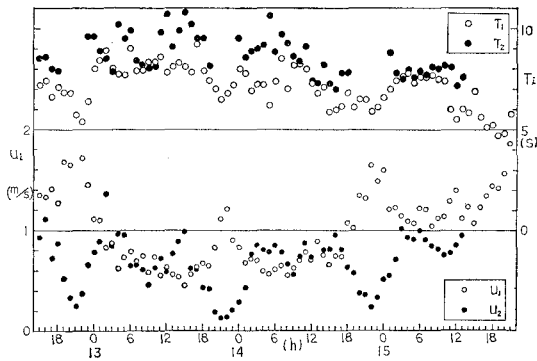
$$\zeta = K(h_b - h) + \zeta_b \quad (8)$$

ただし h_b は砕波水深、 ζ_b は砕波点での水位変化を示し、また K は γ によって表示される定数である。式 (8) によれば、砕波点の位置とその点までの波高分布が求められれば、水位分布は決定される。ここでは海底地形としては 図—1 の破線で示す平均地形を与え、先端 ($x=149\text{ m}$) で波を入射させ、かつ潮位を変えて計算を行った。ただし波高分布は線型理論によって求め、また砕波波高は $H_b=0.7h_b$ とおくことにした。更に、入射波高 (H_{1n}) としては 0.49 m とし、 γ の値は 0.5 、 0.6 、 0.7 と 3 ケース変えた。

以上の計算によって棧橋先端とソリの位置間の水位差が求まるので、この結果のうち $\gamma=0.7$ に対応するものを 図—4 に破線で表示した。ただし η_2 の絶対値は未知であるから、計算値はその位置を上下に移動させて、測定値と最も良い一致を示す位置を見出した。破線は○印に対応し、wave set-up と set-down の傾向は比較的良く説明するが、計算値は小さい値となっている。この原因としては、波高データの精度と共に、波高の増加を線型理論で評価したことなどが問題と考えられる。この点については今後更に検討を加える必要があろう。

(3) 有義流速と周期の特性

次に、図—5 は有義流速 (u_i) と周

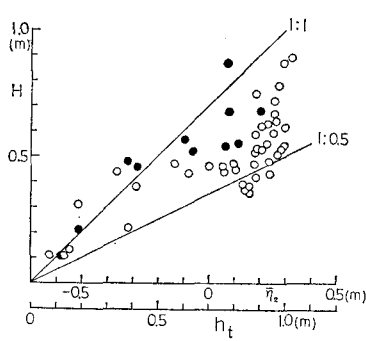


図—5 有義流速と周期の経時変化

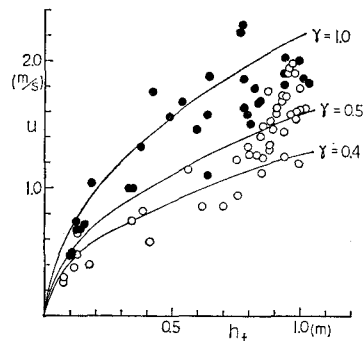
期 (T_i) の経時変化を示している。図の上段は波高計による周期を、下段が有義流速を示し、○印は棧橋の、●印はソリの記録を示している。有義流速は 図—2 の潮位と比較するとどちらも相当高い相関を有するが、その傾向は逆である。すなわち、ほぼ常時砕波帯内にあるソリでは干潮時には非常に流速が小さくなっており、一方棧橋のものは砕波帯外にあるため、干潮時には砕波点に接近し、これによって干潮時に極大値が表われている。

ところで、先に述べたソリの有義波高は有義流速と共に潮位と極めて良い相関を有するので、この点を更に詳細に検討することにした。まず、図—6 は有義波高とソリ地点の潮位の関係を示したものである。ただし図中の○印は $H_{1n}=0.49\text{ m}$ 、●印が $H_{1n}=0.8\text{ m}$ の場合である。このときも絶対水位は明らかではないが、図中実線で示すように潮位が低いときは潮位と有義波高の間にはほぼ 1 対 1 の関係が成立するので、この直線を外挿して原点を求めた。この点の潮位は -0.7 m であり、これによって新たに水深 (h_t) を定める軸を決定した。この水深は平均水位の変化を考慮したものであるが、これによって γ を計算すると、 $\gamma=0.5\sim 1.0$ 程度となることがわかる。

次に、有義流速と水深との関係を調べた。これが図—7 であり、○印は $H_{1n}=0.49\text{ m}$ 、●印が $H_{1n}=0.8\text{ m}$ の場合を示している。ところで、有義流速 (u) と有義波高 (H) の間には、微小振幅長波を仮定すれば、式 (9) の関係が成立する。ただし $H=\gamma h_t=\gamma(h+\zeta)$ とする。



図—6 有義波高と潮位の関係



図—7 有義流速と水深の関係

$$u = \gamma \sqrt{g \cdot h_i^{1/2}} \quad \dots\dots\dots (9)$$

γ を指定すれば, h_i に対して u は求まるので仮に $\gamma = 0.4, 0.5, 1.0$ において計算を行った. この結果が図-7 に示されている. ○印について $\gamma = 0.4 \sim 0.5$, ●印については $\gamma = 1.0$ がほぼ良い一致を示している. 以上のことから, 砕波帯内の波高及び岸沖流速はほぼ水深のみの関数として表示できることがわかる.

さて, 図-5 には周期の経時変化も示されていたが, これによれば, ほぼ砕波帯内に存在するソリの周期 (T_2) の方が棧橋で取得された周期 (T_1) より大きい値となっている. これは 図-8 の相関図を参照すれば一層明らか

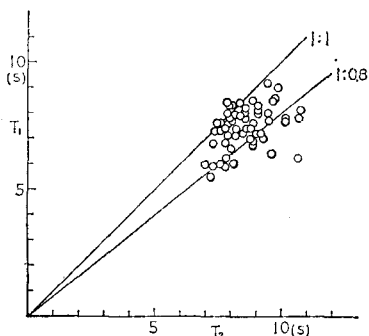


図-8 棧橋先端 (T_1) とソリの波高計 (T_2) の周期の相関

であり, 平均 15% ほど周期が長くなっている. この原因としては, 短周期の波が砕波と共に急速に減衰することや, 砕波帯付近の長周期波の存在が関係すると思われる. ところで, 図-5 に示す棧橋の波高計の周期 (T_1) は 図-2 に示した潮位と弱いながら相関がある. このため潮位と周期の相関を調べて図示したのが 図-9 であ

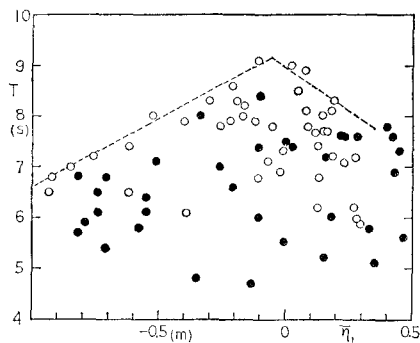


図-9 棧橋先端波高計周期と潮位の相関

る. ただし図中の○印は $H_{in} = 0.49$ m, ●印は $H_{in} = 0.8$ m に対応する. $H_{in} = 0.49$ m の場合については, その上限値がほぼ破線で示されているが, $\eta_1 \sim -0.1$ m 付近で周期は極大となっている. このような周期と水深の関係が, 実際に存在するのか, あるいは, 単に統計処理上の結果であるかどうかについては更に詳細な検討を必要とするが, 十分な検討を行うことができなかったため, こ

こでは測定結果を述べることで止めておく.

(4) 海浜流速と radiation stress

図-10 は沿岸流 ($\bar{v}_i$) と岸沖流速 ($\bar{u}_i$) の経時変化を

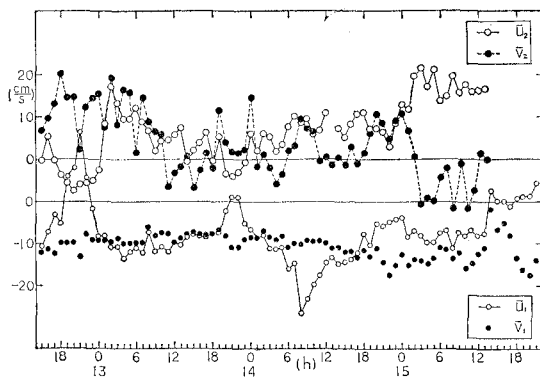


図-10 海浜流速の経時変化

示している. 上段はソリの流速, 下段が棧橋先端の流速である. まず, $\bar{v}_1$ はほぼ一定して負 (南流) となっている. 岸沖流速 ($\bar{u}_1$) は 図-2 の潮位と比較すると, 干潮時に正側 (離岸方向) への変化が見られるが, ほぼ負 (向岸) 方向の流れとなっている. 一方, ソリの流速の絶対値 $\bar{u}_2$ は棧橋先端の波高 (H_1) と弱い相関があるが, 顕著な特性は見られない. 次に, 流速の2点間の場所的相関を調べた. このうち, ($\bar{v}_1, \bar{v}_2$) の関係を示したのが 図-11

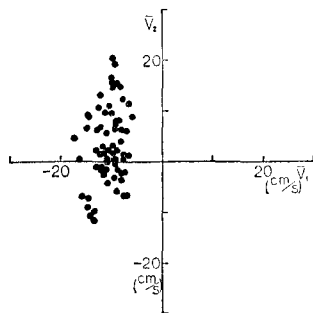


図-11 棧橋先端とソリの沿岸流流速の相関

である. $\bar{v}_2$ は砕波帯内にあるときは北流 (正) が卓越するとすれば, 砕波帯外ではその補償流として南流 (負) が存在するはずである. このことから, $\bar{v}_1$ と $\bar{v}_2$ の第2象限での負の相関は説明できる. また第3象限において $\bar{v}_1, \bar{v}_2$ が共に負となることに対しては, ソリが砕波帯外に出たことによって流向が反転したためであろう. この点は, 図-2 の潮位と, 図-10 の上段の●印で示された $\bar{v}_2$ を比較したとき, $\bar{v}_2$ が負となるのはほぼ満潮時であることから明らかであろう.

次に, 図-12 は, cross product $\langle u'_i, v'_i \rangle$ の経時変化を示している. ただし図中の上段が $\langle u'_i, v'_i \rangle$ の変化を示しており, ●印はソリ, ○印は棧橋先端における値を表わす. $\langle u'_i, v'_i \rangle$ は, 干潮時にパルス状に絶対値が極大と

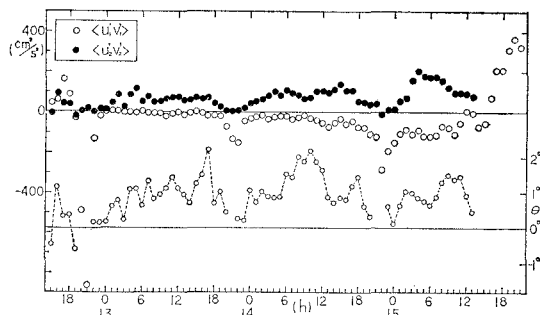


図-12 cross product $\langle u'_i v'_i \rangle$ と θ の経時変化

なっている。これは、流速計が表面近くに固定されており、また干潮時にはその設置位置が砕波点に接近することが原因と考えられよう。また $\langle u'_2 v'_2 \rangle$ は、潮位との相関があるが、これを詳細に調べたのが 図-13 である。

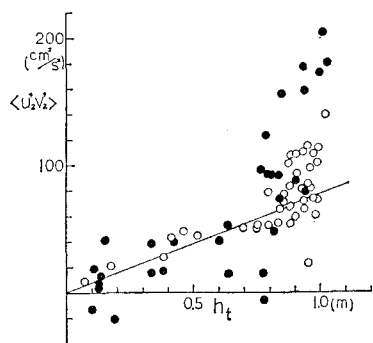


図-13 $\langle u'_2 v'_2 \rangle$ と水深の関係

図中の○印は $H_{in}=0.49$ m、●印は $H_{in}=0.8$ m に対応する。●印についてはバラツキが大きい、○印に対しては、図示されているように、 $h_t \leq 0.8$ m の範囲では、ほぼ線型な関係が成立する。

さて、radiation stress の定義は式 (10) で与えられる。

$$S_{xy} = \int_{-h}^{\eta} \rho u'v' dz = E \frac{C_g}{C} \sin \theta \cos \theta \quad \dots\dots (10)$$

式 (10) において浅海長波近似が成立すると仮定すれば、式 (10) は次式のように変形できる。

$$\langle u'v' \rangle h_t = 1/16 \cdot g H^2 \sin 2\theta \quad \dots\dots (11)$$

更に、 $H = \gamma h_t$ の関係を代入すれば式 (12) が得られる。

$$\langle u'v' \rangle = 1/16 \cdot g \gamma^2 \sin 2\theta \cdot h_t \quad \dots\dots (12)$$

概算として、 $\gamma \sim 0.6$ 、 $\theta \sim 1^\circ$ とおいたものが 図-13 の実線である。一方、逆に式 (11) を θ について解くと、式 (13) が得られる。

$$\theta = \frac{8 \langle u'v' \rangle h_t}{g H^2} \quad \dots\dots (13)$$

図-12 の下段はこの θ の経時変化を示しているが、 θ は水深との相関があるので、更に h_t との関係を調べた。この結果が 図-14 である。ただし図中の○印は H_{in}

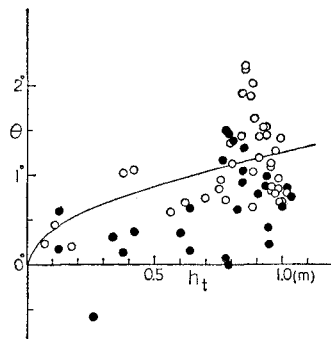


図-14 θ と水深の関係

$= 0.49$ m、●印は $H_{in}=0.8$ m に対応する。 $0.8 \leq h_t \leq 1.0$ の範囲で θ が急激に増大するのは、式 (13) において H の減少が非常に大きいためである。流速計は底面に置いてあり、砕波による乱れは表面より底面に向かって減少すると考えられるので、見かけ上底面では $\langle u'v' \rangle$ が小さ目に出たためであろう。また、図-14 の実線は波向に対して定常状態を仮定して、比較のために snell の法則によって波向変化を調べたものである。 $h_t \leq 0.8$ ではほぼ水深の平方根に比例していることがわかる。

4. あとがき

砕波帯付近における波浪・潮汐・海浜流・地形相互の関連を調べるために現地観測を行い、いくつかの興味ある点を明らかにすることができた。すなわち、波高や流速、radiation stress への潮汐の効果や、海浜流や波浪の場の時間的变化、更に wave set-up や set-down について明らかにした。しかし長周期波の解析やスペクトルの変化などについては議論を行うことができなかった。これらは別の機会に報告したい。また、今回の観測では、地形応答については応答が弱いために十分な議論ができなかったが、この点については再び観測を行って明らかにしたいと考えている。

参考文献

- 1) 橋本 宏・宇多高明：海浜流と摩擦係数の現地観測，第 25 回海講論文集，pp. 435-439, 1978.
- 2) 土木学会：水理公式集，pp. 507-509, 1972.