

リモートセンシングによる海浜流と波向の観測

宇多高明*・竹 潤 勉**・橋 本 宏***

1. ま え が き

近年、海浜流や漂砂に関する野外観測が数多く行われ、これにより波、流れ、漂砂に関する新しい知見が得られるようになった。これまで行われた野外観測について調べてみると、大部分は対象領域が狭いものであって、ポケットビーチ全体などのように広い領域を調査した例は比較的少ない。漂砂や海浜流の研究を進める上では種々の見地から検討を進めて行くことが望ましいので、広域の調査も行う必要がある。これまで広域調査が行われなかった理由は、良い調査法がなかったためである。この点に関しては、広域を瞬時に調査可能というリモートセンシング技術の応用が有効と考えられる。このため筆者らは数年前よりリモートセンシング技術の海岸調査への応用を図ってきた。これにより当技術を海岸調査へ利用することが相当有効なことが見出された^{1),2)}。本研究ではリモートセンシングによる海浜流と波向の観測法について検討を行った。すなわち MSS によって広域の水温・波向分布の観測を行い、またカラー写真撮影により流況と波向の測定を行った。とくに波向に関しては、方向スペクトル等の理論的研究は盛んであるが、波向の場所的変化を現地海岸で実際に調べた例が少ないために、波向の場所的分布を明らかにすることを旨として研究を行った。このため、航空機によって1分間隔で60枚連続的に写真撮影を行い、得られた航空写真よりデジタイザーを用いて波峰線形状を読み取り、これより波向を算出した。さらに波向を波峰線上の2地点間の勾配より計算する際の測点間の最適距離について検討した。この結果、2地点間の間隔と沖波波長との比がほぼ1.7のとき最適となることを見出された。

2. 観 測 方 法

カラー写真撮影および MSS による測定は、図-1 に示されるように茨城県那珂湊市の阿字ヶ浦より日立港に至る延長約 13km、幅 2km の海域を対象として選び、

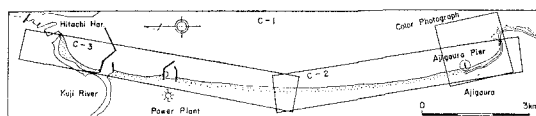


図-1 MSS およびカラー写真撮影のコース

南端の阿字ヶ浦上空でカラー写真を、また海岸に沿う 3 コースにおいて MSS の測定を行った。MSS による測定は、1980 年 9 月 13 日と 1982 年 3 月 3 日の計 2 回行った。測定時の飛行高度はコース C-1 が 1880m、コース C-2, 3 が 690m である。カラー写真撮影は 1980 年 9 月 12 日 8 時 2 分より 9 時 2 分の間行い、約 1 分間隔で 60 枚の写真を撮影した。撮影高度は 1000m に保ち、縮尺 1/6500 の写真を撮影した。一方、1982 年 3 月 3 日には 3 個のフロートを船より投入し、その移動状況を 6 台のトランシットで追跡することにより流況測定を行った。なお 1 回の測定では広い範囲の流況をとらえることができないので、測定は繰り返して行った。

3. 波向と海浜流の観測結果

まず、最初に航空写真より得られた阿字ヶ浦における平面的波向分布を明らかにする。図-2 は、1980 年 9 月 12 日に測定された沿岸方向に 1450m、岸沖方向に 880m の範囲の波峰線の分布を示す。図の実線が波峰線、破線が 1980 年 8 月末時点の等深線を表わす。観測時波は南寄りの入射であり、桟橋の先端付近では桟橋軸の方

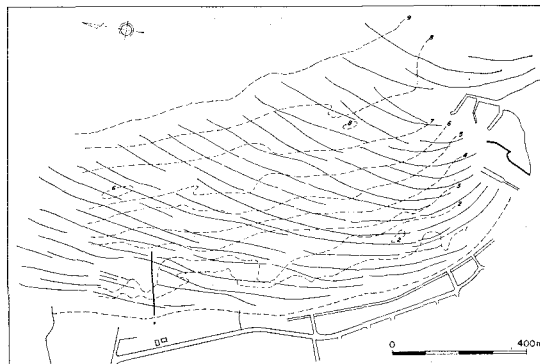


図-2 波峰線図 (September 12, 1980)

* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長

** 正会員 建設省土木研究所海岸研究室

*** 正会員 建設省土木研究所河川研究室長

向(これは汀線に直角方向でもある)に対して時計回りの方向に 12° で入射していたことがわかる。なおこの日の波浪条件としては、阿字ヶ浦より南へ約10kmに位置する大洗港の波高計によると、日最大有義波高で1.56m, 周期6.8秒であった。また航空写真によれば、栈橋位置における砕波点はちょうど栈橋先端にある。

図-3は、投入したフロートを追跡することによって

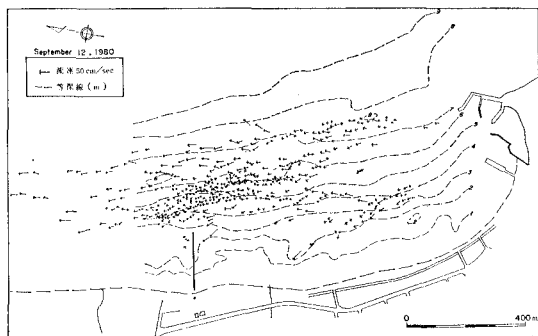


図-3 海浜流の流況図 (September 12, 1980)

求められた沿岸方向1450m, 岸沖方向500mの範囲の海浜流の平面的流況図である。この図は主として砕波帯外の流況を表わす。流速の最大値は約60cm/secであり、また水深8m付近まで海岸のほぼ全域で北向きの流れが発達していたことがわかる。このような流況は前報²⁾で明らかにした流況とは異なっている。すなわち前報の観測では阿字ヶ浦において沖合水が時計回りの方向に回転して海浜循環流を形成していたのに対し、図-3では、沖合水も北向きに流れている。この原因としては、図-2に示されたように今回の観測では沖合においても非常に大きな入射角で波が入射していた点があげられる。このような絶対値の大きな南寄りの入射角は前報では得られておらず、このことが流れの分布を変化させた一因と考えられる。

図-4は、海浜流観測の翌日、9月13日の9時56分～59分の間にMSSを用いて測定した阿字ヶ浦より日立港までの海域の水温分布図である。発電所からの排水量が小さかったため、発電所近傍では顕著なパターンは捉えられていない。しかし、阿字ヶ浦において 21°C の等温線が南より北へ向けて楔状となっている点は注目に値す

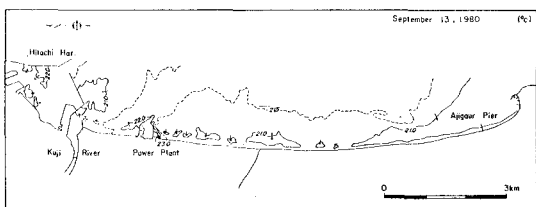


図-4 阿字ヶ浦～日立港間水温分布図 (September 13, 1980)

る。このような楔形の等温線分布は、他の観測でも得られ、それが砂浜から海への熱拡散によるものであることが明らかにされた¹⁾。しかし、この場合の分布はそれとは相違し、阿字ヶ浦南端の岬を越えて北向きに流動する流れが沖合より岸向きに入り込んで生じたものと考えられる。なぜならば、阿字ヶ浦において撮影されたカラー写真によると、磯崎漁港の沖より海岸に沿って濁った海水が栈橋方向へ流れ込んでいる状態が撮影されたからである。阿字ヶ浦における海浜流観測は前日行われたので、水温観測時の流況は明らかではない。しかし北向きの沿岸流が生じていたことは波向の沿岸方向分布図より明らかとなる。図-5は、MSSの波峰線模様²⁾より求めた砕

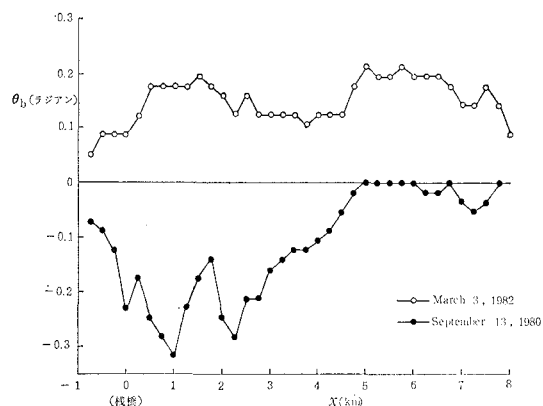


図-5 入射角の沿岸方向分布

波点付近の入射角の沿岸方向分布を示す。図の $x=0\text{km}$ が栈橋位置であり、発電所専用港は $x=8\text{km}$ に位置する。正の値は海岸線の法線に対して反時計回り、すなわち北寄りの入射条件を表わす。9月13日の測定値によると、栈橋北1km地点では -0.31 ラジアン(約 -18°)という絶対値の大きな南寄り入射となっており、また栈橋位置では $\theta_0 = -0.23$ ラジアン(-13°)であったことがわかる。さらに栈橋より北5kmの区間ではすべて南寄り入射であったこともわかる。栈橋地点の入射角の比較を行うと、図-5の値と波峰線図(図-2)の値とは測定日は1日ずれているが、図-2の $\theta_0 = -12^\circ$ 、図-5の $\theta_0 = -13^\circ$ とかなり良い対応を示している。

今回の観測も含めて、現在までに行われてきた観測^{1),2)}のほとんどは夏に行われ、従って南寄りの入射波が卓越するという条件であった。これらによると南寄りの入射波によって北向きの沿岸流が発達したが、海浜流の場を明らかにする上では波の入射方向が逆転し、北寄りの入射となった条件のもとで観測を行うことが望ましい。このため1982年3月3日に再度観測を行った。観測内容はMSS撮影とトランシットによるフロート追跡である。

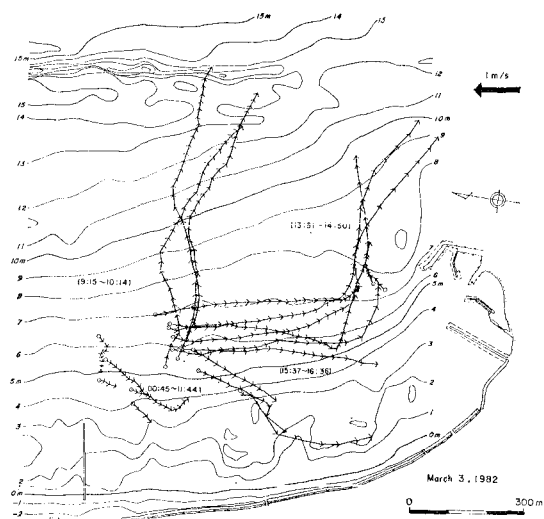


図-6 海浜流の流況図 (March 3, 1982)

図-6 は、海浜流の流況図である。この流況図は航空機によって得られたものと相違し、短時間に測定されたものではなく、フロートを繰り返して投入することによって得られたものである。測定時間は図中に示されるように9時15分より16時36分まで約7時間であった。9時15分に投入したフロートの軌跡は他のものと相違しているが、基本的特徴として栈橋沖で投入されたフロートは南へ流れたあと漁港前面で東へ向きを変えて流れたことがわかる。なお、図-6の深浅図は1981年9月の深浅測量結果を示す。またこの観測時における沿岸方向の入射角分布は図-5に示すとおりである。栈橋より専用港に至る海域において θ_0 は正、すなわち北寄りの入射波であったことがわかる。このような入射角の場合、沿岸流は南向きとなるが、この流れが岬によって阻止されると離岸流が生ずる。図-6は、このような機構によって生じた流れを表わしていると考えられる。

4. 波向の岸沖分布

砕波点における入射角の沿岸方向分布は図-5に示したが、次に波向の岸沖分布について検討する。すなわち岸沖方向の各地点でどのような方向を持った波が分布しているかを明らかにするために、とくに栈橋軸延長上の測線において詳しい測定を行った。波向測定は写真上の波峰線形状をデジタイザーによって読み取り、波峰線上の2地点間の勾配より向きを算出するものである。

詳しい測定法は次のとおりである。撮影された60枚の写真上には栈橋が写されているので、図-7に示されるように栈橋の陸側の端に原点Oを置き、ここより栈橋軸の方向沖向きに y 軸、これと直角方向に x 軸をとった。各写真はおのおのの写真縮尺がわずかに異なるので、栈橋長を基準にして現地スケールに換算した。なお写真

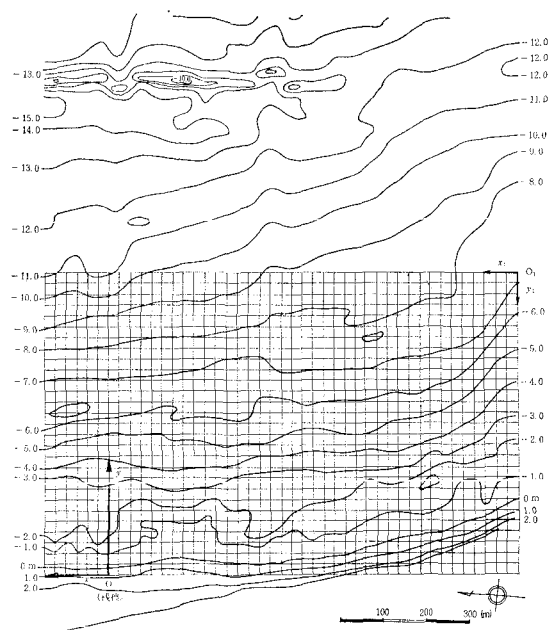
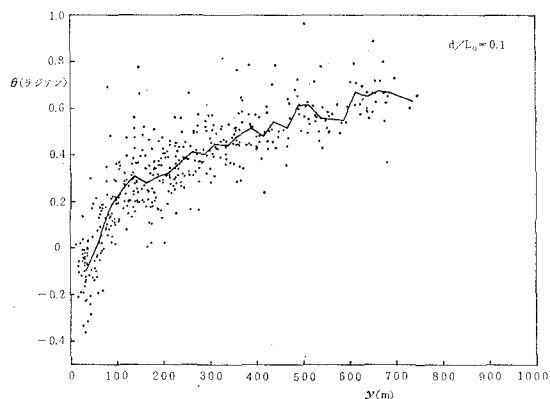


図-7 波向算定のための座標系と屈折計算の格子図

は厳密には約 3° 以内の傾きを有しているが、この傾きの補正は行わなかった。デジタイザーによるサンプリングは各波峰線に沿って連続的に行った。1本の波峰線に関して座標点 (x, y) が最大40組ずつ記録される。実際の測定間隔は写真上で約1mmである。波向は2地点間の場所的勾配より算出される。方向は y 軸に関して時計回りより入射するものを正とする。

波向の算定に際しては、波峰線上の2地点間の間隔 (d) はどのように決めるべきかとの問題が生ずる。何故ならば間隔 d のとり方によって波向の値が異なるのであれば、波向に関する一般的議論が不可能となるからである。このため沖波の波長 L_0 を基準として d/L_0 を0.1より2.0の間で変化させた。ただし測定時の有義波周期は7.2秒、沖波波長81mである。図-8は、 $d/L_0=0.1$

図-8 入射角の岸沖方向変化 ($d/L_0=0.1$, 実線は平均値を示す)

のときの波向の岸沖分布を示す。この図は栈橋陸端より沖合 750 m の範囲の波向分布である。図中の実線は 25 m 間隔ごとに波向を単純平均することによって求められた平均波向 ($\bar{\theta}$) を表わす。測定値は大きなばらつきを有するが、 $y=700$ m 地点で $\bar{\theta}=0.6$ ラジアンで入射し、汀線付近で -0.1 ラジアンとなるまで変化したことがわかる。なお θ が負の値となっているのは 図-7 に示されるように栈橋直下の海底地形が複雑でかつ等深線が y 軸に関して反時計回りに傾いているためである。図-9 は、

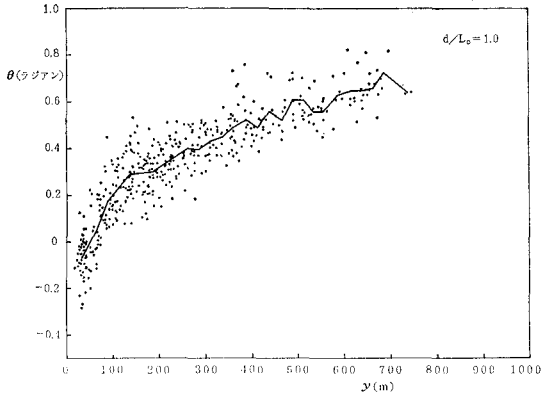


図-9 入射角の岸沖方向変化 ($d/L_0=1.0$, 実線は平均値を示す)

$d/L_0=1.0$ の場合の波向である。基本的特徴は $d/L_0=0.1$ のときと良く似ているが、測定値のばらつきはかなり減少している。同様に 図-10 は、 $d/L_0=2.0$ の場合

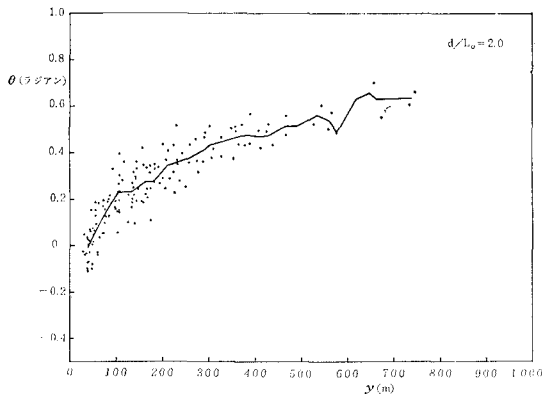


図-10 入射角の岸沖方向変化 ($d/L_0=2.0$, 実線は平均値を示す)

である。図-8, 9 と比較するとデータ数が非常に減少してしまっている。ばらつきは少なくなるものの、平均波向の推定精度は低下すると考えられる。なお $d/L_0=2.0$ の場合データ数が減少したのは、2 地点間の間隔 d が波峰線の長さよりも長くなってしまうためである。

d/L_0 を変化させたときの平均波向は 図-8~10 に示したが、それらをまとめると 図-11 のようになる。沖

合ではもともと変動が大きいので相互の差異は明らかではないが、 $y=100$ m 付近の浅海域で比較すると、 d/L_0 の小さいときほど波向の場所的変化が急激となっている。間隔が大きくなると波向変化はなだらかなものとなる。 d/L_0 を変えたときの結果は明らかになったが、これらの比較のみでは優劣を判断しにくいので、屈折計算の値と比較することにした。屈折計算は 図-7 に示すように、沖合の点 O_1 に原点をとり、この点より岸向きに y_1 軸、沿岸方向に x_1 軸をとって行った。まず両方向に 25 m 間隔で水深を読みとり、さらに計算過程で 12.5 m ピッチの格子点の水深を補間し、最終的に 12.5 m 間隔で計算を行った。屈折の基本式は、波向を θ とすると、

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{1}{C} \left(\sin\theta \frac{\partial C}{\partial x_1} - \cos\theta \frac{\partial C}{\partial y_1} \right) \quad \cdots \cdots (1)$$

である。ここに C は波の波速である。境界条件は x_1 軸上で栈橋軸延長上 $y=700$ m の位置における平均波向 $\bar{\theta}=0.65$ ラジアンとし、栈橋軸の延長と波向線とが交差するときの岸沖距離 (y) と波向を求めた。なお x_1 軸上では一定の入射角としたが、等深線は x_1 軸と平行ではないから、実際には栈橋より南へ離れるにしたがい入射条件は変化する。しかしながらここでは栈橋軸延長上の波向にのみ注目しており、栈橋より離れた地点から入射する波は結果に影響を持たないこと、また 図-2 によると $y=540$ m 付近の波向について調べてみると、沿岸方向に約 450 m の範囲ではほぼ一様となっていることから上記の仮定を設けた。

図-11 には、屈折計算の結果が黒丸印で示されている

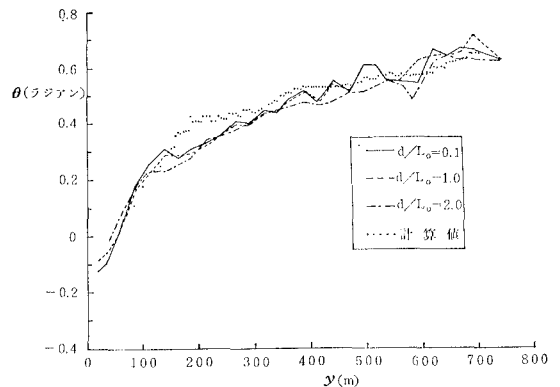


図-11 入射角の測定値と計算値の比較

る。砕波点は $y=200$ m にあるが、この付近を除けば計算値と実測値は一応対応を示している。しかし砕波点付近の波向の差はかなり大きく、約 0.1 ラジアン計算値が測定値を上まわっている。両者が相違する原因は種々考えられる。栈橋沖合では 図-3 に示したように北向きの流れが存在するが、屈折計算に流れの効果を取り入れると波はさらに直進性を示し、計算値と実測値の差は広

がる。また波の有限振幅性については、沖合の等深線がほぼ平行と仮定して波速変化の効果をとり入れると、この場合も両者の差は拡大する傾向となる。一方数値計算では格子間隔を 12.5 m としたが、この格子間隔が広すぎたため海底地形の場所的変化が計算上良好に取り入れられず、そのために誤差が生じた可能性もある。しかし、浅橋沖合の深浅測量の測線間隔は 50 m であり、もともと小分割するほどの精度を有していない。その他境界条件の相違や波の不規則性の影響も考えられるが、ここでは原因を明確にすることはできなかった。詳しい検討は今後の問題点として残されている。

以上の議論は平均波向に関するものであったが、波向の測定値は 図-8~10 に示したように場所的に大きな変動を有している。図-12 は変動の特性を調べるために、

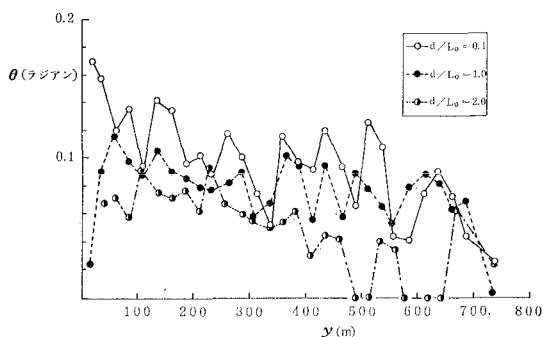


図-12 入射角の標準偏差の岸沖分布

平均波向からの変動量を用いて計算した標準偏差の岸沖分布を示している。代表的に d/L_0 が 0.1, 1.0, 2.0 の場合が示されているが、標準偏差 σ は d/L_0 が小さいほど大きく、また沖方向には減少傾向にある。

波向は波峰線上の 2 地点間の勾配より算定された。この場合間隔 d のとり方によって 図-8~12 に示したように平均波向や標準偏差は相当相違する。このため 2 地点間の間隔 (d) はどのように決めるべきかとの問題が生ずる。このため最適間隔について検討を加えることにした。まず変動の程度を明らかにするため平均波向からの標準偏差 (σ) の岸沖方向の平均値 ($\bar{\sigma}$) を求め、図-13 に示した。 $\bar{\sigma}$ は d/L_0 が大きくなるにつれ減少することがわかる。一方間隔 d を大きくするとその間に含まれる波峰線の数も減少する。図-13 には、 $d/L_0=1.0$ のときの波峰線の数 (466 本) を基準として d/L_0 を変えたときの波峰線数との比 (r) の変化が示されている。これによると r は d/L_0 が 1.5 より大きくなると急速に減少することがわかる。一方、図-11 に示した平均波向は、 d/L_0 を変えたとき変化が見られたが、 d/L_0 を変えたときみな異なった分布となるのでは計算した波向の妥当性を判定できなくなる。波向は基本的には波峰線に

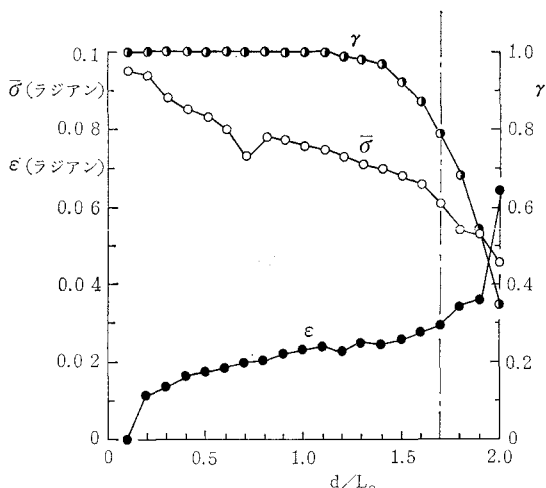


図-13 波峰線数の割合 (r), 入射角の標準偏差の平均 ($\bar{\sigma}$), 平均波向の誤差 (ϵ)

対する法線となるべきであり、間隔 d を大きくすればするほど入射波は絶対値が小さなものになるであろう。このため $d/L_0=0.1$ の平均波向を基準とし、 d/L_0 を変えたときのこれからの変化量より標準偏差 (ϵ) を計算した。 ϵ は 図-13 に示すように d/L_0 の増大とともに増加傾向にある。 d/L_0 が 1.7 よりも小さければ ϵ は 0.03 以下となるが、それ以後 ϵ は急激に増加する。以上の点より d/L_0 を変えたとき $\bar{\sigma}$ と ϵ をできるだけ小さなものとするには最適な d/L_0 が存在し、それはほぼ $d/L_0 \approx 1.7$ で与えられることがわかる。

5. まとめ

本研究では、リモートセンシングによる海浜流と波向の現地観測を行い、広範囲における海浜流の流況や波向分布を明らかにした。また波向の岸沖方向の変化を明らかにするために、航空写真よりデジタイザーを用いて波峰線形状を読み取り、これより波向を算出した。さらに波峰線上の 2 地点間の勾配より波向を計算する際の測点間隔の最適距離について検討した。この結果、2 地点間の間隔と沖波波長との比がほぼ 1.7 で最適となることが見出された。一方、平均波向については屈折計算との比較を試みたが、計算値と実測値とは砕波点付近で差違が見られた。

参考文献

- 橋本 宏・宇多高明・田中邦一: 熱映像による砕波帯の熱拡散係数の測定法, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 119~123, 1979.
- 橋本 宏・宇多高明・新行内利隆: リモートセンシングによる海浜流循環の観測, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 351~355, 1982.