

高波浪時における波浪・海浜流場の現地観測に関する一考察

大熊義夫*・阿部光信*・田中正博**・宇多高明***

1. ま え が き

規模が大きな防波堤などの構造物の建設においては、それに起因する周辺海岸での海浜変形について予め十分な精度で予測計算を行い、海浜への著しい影響が生じると予測される場合には、その影響を軽減するための対策を立案する必要がある。しかし、波・流れ・海浜地形変化に関するモデルは多く提案されているものの、多くの海岸では複雑な海底形状および波浪条件を有するために通常の数値モデルによる計算のみでは十分な精度で予測が行えない場合も多い。このような場合には、現象の複雑さから、まず現地観測により現象解明を図ることが望まれる。とくに、著しい海浜変形が生じるのは主に高波浪時であることから、そのような条件下での観測が必要とされるが、高波浪時の観測には多くの困難が伴うことから、現地データは十分あるとは言えないのが現状である。このことから、本研究では各種予測モデルの適用性検討のための資料を得るために、防波堤による波の遮蔽域周辺での波高変化と海浜循環流に着目し、波高・波向・海浜流の連続観測を実施し、外力とそれに対する応答としての海浜流の発達について現地観測により明らかにするものである。

2. 現地観測の方法と観測海域の海底地形特性

現地観測は、図-1に示すように太平洋に面した茨城県北部の大津漁港周辺で行った。大津漁港は大津岬の南端部に位置しており、漁港の北側には岡倉天心が建てた六角堂を有する五浦海岸（岩石海岸）が続いている。大津漁港には延長約1100 mの沖防波堤が伸びており、その南側には防波堤による波の遮蔽域形成に伴って形成された砂浜が伸びている。

図-2には観測域の詳細図を示す。沿岸方向に9 km岸沖方向に約7 kmの区域が観測区域であって、この区域において1993年8月に海底地形測量を行うとともに、図に黒丸印で示す13地点に波高計・波向計・電磁流速計を

設置し、1993年9月と1994年3月の計2ヶ月間の連続観測を実施した。本論文では、これらのうち1994年3月1日～31日において沿岸部の測点A～Eおよび沖合の定点で観測されたデータを集中的に分析する。なお、沿

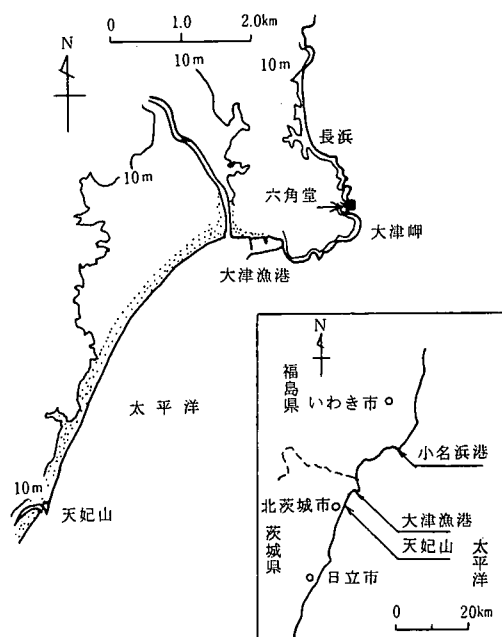


図-1 調査海域の位置

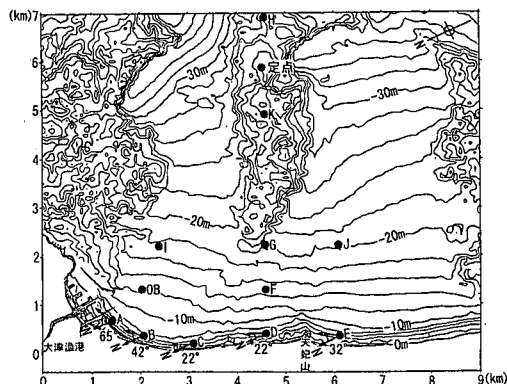


図-2 観測域の詳細図

* 正会員 東電設計(株)第二土木本部火力土木部
 ** 正会員 東京電力(株)建設部土木調査課
 *** 正会員 工博 建設省土木研究所河川部長

岸部の測点は天津漁港に最も近接して測点 A が位置し、そより南側に B, C, D, E の順で並んでいる。測点の水深は沖合の定点で約 20 m, A~E が約 5 m である。観測区域の北端は天津漁港であって、測点 D と E の間には岩礁（天妃山）があり、そこで汀線近傍の等深線がやや折れ曲がっている。この岩礁の付け根には北側へと蛇行してきた大北川が流入している。また、測点 E は大北川河口から南側になだらかに伸びる海岸線のほぼ北端部に位置する。

図-2 には測点 A~E のそれぞれの地点における汀線に対する接線と、磁北とのなす角も示している。汀線の接線角度は、A で 65° と最大であり、以下 42° , 22° , 22° , 32° となる。測点 A と C, D では 43° も方向角が変化している。

波浪・海浜流の観測期間中、1994 年 3 月 8~11 日と 3 月 23~25 日の 2 回、低気圧の通過に伴う高波浪時の観測に成功した。特に 3 月 24 日には最大有義波高 5.34 m, 周期 11.9 s (定点) という高波浪の来襲があった。

図-2 には 1993 年 8 月測量の海底地形を示しているが、この観測区域の沖合には広域にわたって露岩域があり、そのため複雑な等深線形状を有する。最も広い岩礁域は天津岬沖にあり、五浦海岸の岩石海岸に続く。この岩礁は天津漁港の沖合に大きく張り出し、また岩礁の突出高さが大きいので、その背後の海岸線ではとくに E ないし ENE 方向からの入射波の減衰が著しいと考えられる。定点を設置した付近にもほぼ東西方向に伸びる細長い岩礁域があるが、著しい海底面の凹凸はほぼ -20 m 以深に集中している。また、定点および点 D を含む岸沖測線は、幅約 1 km の細長い岩礁上に位置している。この岩礁は平均水深で 20~30 m の海底面から最高で約 10 m も突出しているので、複雑な波の屈折・回折が起こる条件下にある。さらにこの岩礁域の南約 5 km にもまた岩礁域が存在する。これらの岩礁域の間は比較的なだらかな等深線形状である。一方、汀線近傍では -9 m 以浅の等深線が狭い間隔で汀線とほぼ平行に伸びており、-10 m 以深の緩勾配の等深線とは明らかな違いを示す。このことは、沿岸漂砂の活発な範囲がほぼ -9 m 以浅にあることを示していると考えられる。

3. 有義波高と海浜流流速の時系列変化

図-3 には 1994 年 3 月における測点 A~E での有義波高、波向および海浜流流速の経時変化を示す。有義波高・波向はベクトルで示し、ベクトルの大きさが有義波高を、そしてベクトルの方向が観測点における波向を示している。波向については、図中に示す磁北との関係から方向角が分かる。同様に海浜流流速についてもベクトルで示す。また、図中には各測点での海岸線の接線方向

とそれに直交する方向を示している。これにより海岸線への入射角と海岸線に相対的な海浜流の流向が明らかとなる。観測区域のほぼ中央部にあって、北部の岬、沖合の岩礁および防波堤の影響を受けることの少ない測点 D を代表として考えると、3 月初めには E 方向の入射波条件であり、このとき弱いながら南西向きの沿岸流が発達している。顕著な流れは、3 月 8~11 日と 3 月 23~25 日に SE 方向から高波浪が来襲した時に生じている。とくに 3 月 23~25 日には最大有義波高 3.34 m の条件下で最大流速 0.69 m/s の流速が観測された。海岸線への法線との関係によれば、最大波高の出現時の入射角は時計回りの方向に約 104° をなしており、これと同時に海岸線方向に約 27° 斜行して斜め冲向きの流れが観測された。同様に、この期間、測点 C, D, E では時計回りの方向からの波が入射したために、NNE 方向の沿岸流が発達しており斜め入射波と沿岸流の発達とが非常に良好な相関を示している。さらに、約 100 m の長さで海に突き出た岩礁である天妃山を挟んで、ほぼ対照的な位置にある測点 D, E では、高波浪時ほぼ同規模の流れが生じていることが注目される。なぜなら、図-2 に示したように、測点 E は南側から長く伸びてきた砂浜の北端部に位置するので沿岸流も十分発達し得ると考えられるのに対して、測点 D は天妃山のすぐ北側で、しかもその岸側に離岸堤群が設置されているから、碎波に伴う海浜流の発達は相対的に弱いと考えられるにもかかわらず、高波浪時そのような特徴があまり見られないことは、高波浪時天妃山を迂回するようにして沿岸流が流れた可能性を示唆するからである。

一方、天津漁港の防波堤による波の遮蔽域に入る測点 A では、測点 D で高波浪が生じている場合にも波高は相対的に低く、また波の入射方向が測点 D と大きく異なり S 方向への集中度が著しい。そして、波の入射方向の変化は D から B, A と北側にずれるにしたがい非常に著しくなっている。このような波向の変化と調和して、A では常時離岸流が生じ、他の測点での沿岸流の発達と著しい差を示す。またそれらの間の測点 B では測点 C から時計回りの方向に rotation が起き、流れの方向が約 90° 変化していることも分かる。これは防波堤方向へ流れた沿岸流が防波堤背後での循環流へと変化していく状況を捉えたものである。防波堤のように波を遮蔽する構造物の背後では波向と波高の沿岸方向変化により遮蔽域の外側から内側へと向いた循環流が生じることはよく知られており、事実天津漁港においてもこの流れに起因して防波堤背後に土砂が堆積してきた（宇多，1997）が、そのような流れを波浪条件とともに経時的に観測した例はあまりない。この見地から図-3 はこのような流れの実態をよく明らかにしていると言える。そして、循環流は高波浪

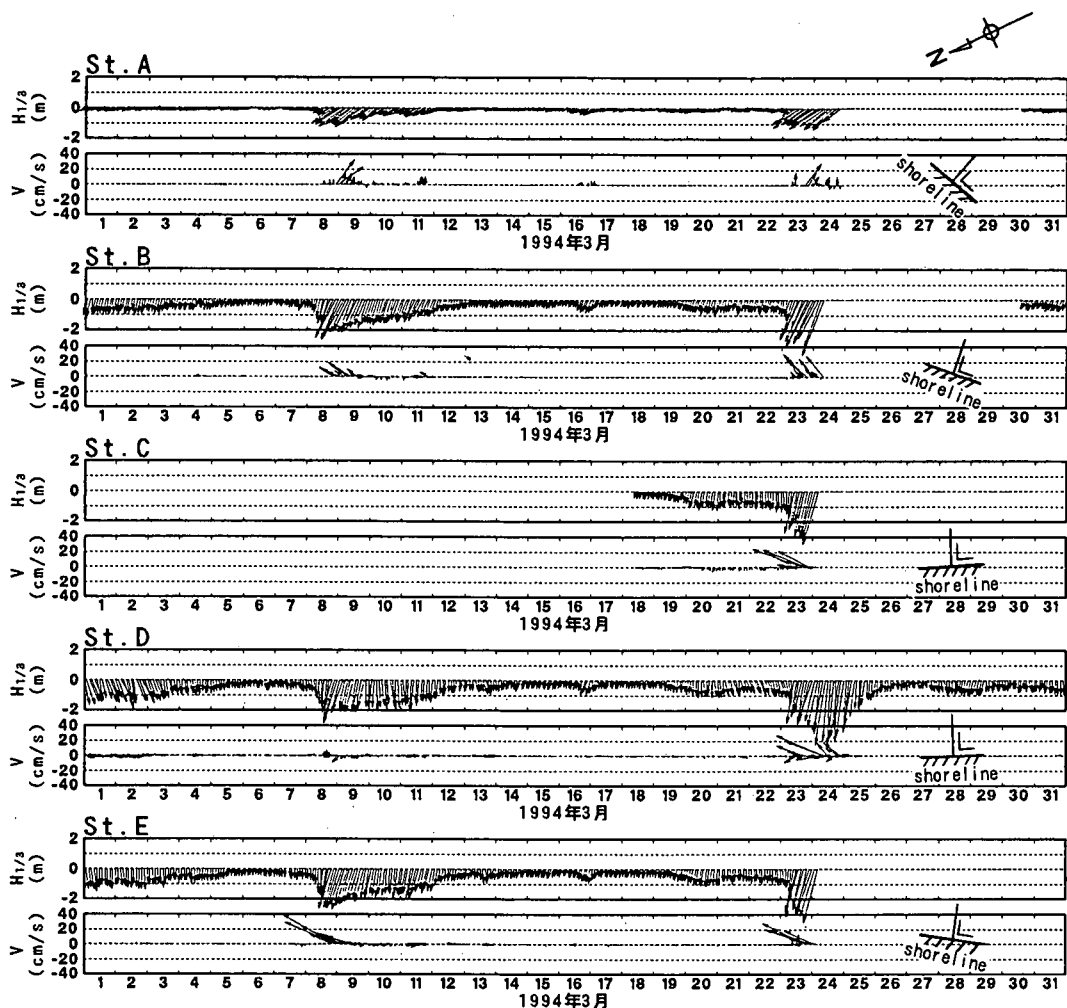


図-3 観測期間の有義波高・波向・海浜流流速

と対応して生起していることも分かる。

4. 各観測点間の波高・波向の相関分析

沖合の定点での有義波高・周期・波向を基準として、各測点の値との単相関分析を行い、循環流の生じている海域の平均的な波浪場について調べてみる。図-4は定点の観測値を基準とした時の、有義波高、周期、波向の関係を調べた結果である。また表-1には、単相関分析における回帰係数と相関係数を整理している。

まず、波高については測点A～Eにおける計測器の設置水深が約5mであり、その点における限界波高は約4mとなることを考慮すれば、ほぼ波高4m以上では碎波減衰が現れる。しかしながら定点波高に対して、各点の波高はいずれもかなりよい相関を示す。そして定点波高に対する波高比は、測点A～Eの順に0.50, 0.76, 0.83, 0.84, 0.83である。すなわち、A～C間では常時沿岸方向

の波高分布が生じ、この条件で循環流が発生していることがわかる。一方、周期は広い範囲でばらついており相関係数は低い。とくに点Aではばらつきが非常に大きい。波向については沖合の岩礁による屈折・回折の影響を受けることが少ない測点B, Cでは定点での波向とのばらつきが小さいが、岩礁近傍の測点D, Eおよび測点Aでは変動が大きい。

図-5は各地点の測定値より波向の頻度分布を求めたものである。定点ではESE方向を中心としてE～SEの波向であったのに対して、直線状海岸線に位置する測点Dはほぼ同様であるが、測点C, B, Aと防波堤に近接するに従い、波向がSE～S方向に集中するようになり測点AではSへの集中度が非常に高い。図-2に示した海底地形図によれば、大津漁港の周辺で等深線は大きく湾曲しているが、それを考慮しても測点Aでは大きく時計回り（南寄り）の方向から入射することが分かる。以上の

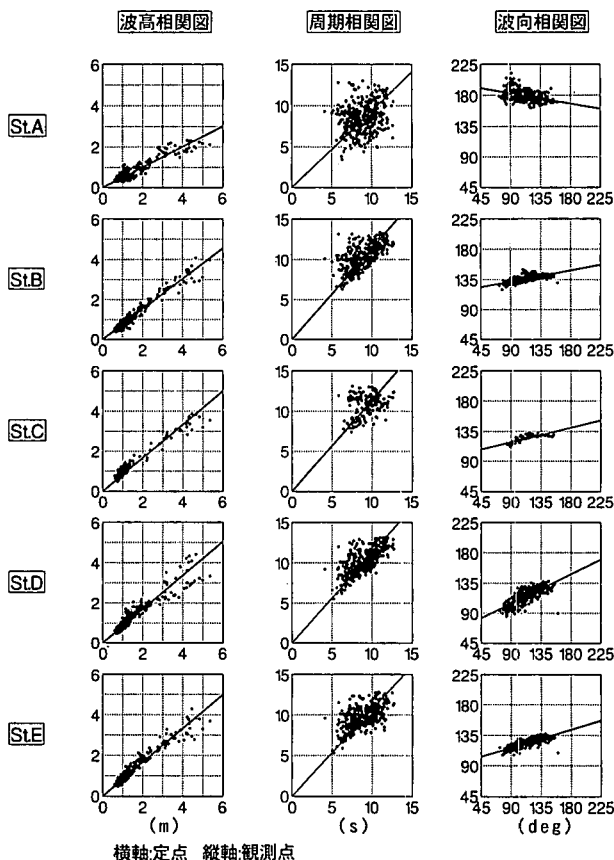


図-4 定点と沿岸測定の有義波高, 周期, 波向相関図

表-1 単相関分析による回帰係数と相関係数

st.	波 高		周 期		波 高	
	回帰年数	相関係数	回帰年数	相関係数	回帰年数	相関係数
A	0.50	0.94	0.94	0.23	-0.17	-0.42
B	0.76	0.98	1.14	0.63	0.19	0.72
C	0.83	0.98	1.14	0.30	0.24	0.82
D	0.84	0.95	1.12	0.71	0.49	0.77
E	0.83	0.97	1.07	0.61	0.30	0.81

沿岸流・波高分布は, 防波堤の背後へと漂砂を移動させ, そこで堆積を促す方向であることが注目される。

5. 沿岸方向のエネルギーフラックスと海浜流流速の関係

図-6 には, 測点 D に対する測点 C, E の沿岸流流速の関係を示す。ここに沿岸流流速成分の算出においては測点 C, D, E の海岸線の傾き角を考慮して求めている。これによると, 測点 D に対して C, E ともに相対的に大きな流速が出現している。さらに, 波浪の沿岸方向のエネ

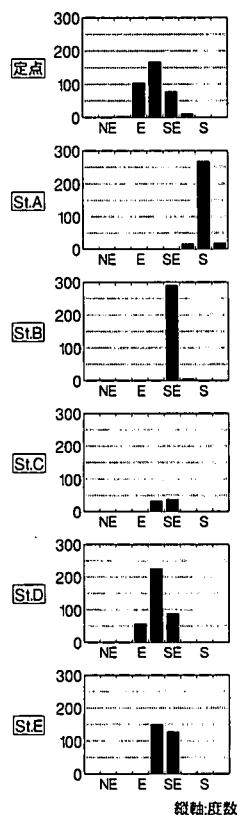
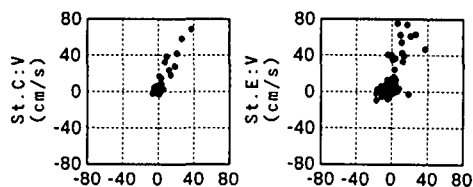


図-5 波向の頻度分布

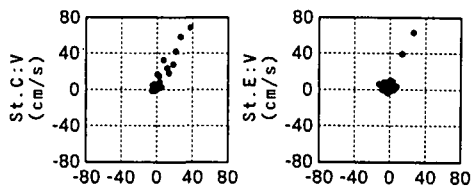
ルギーフラックスと実測の沿岸流流速の関係を図-7 に示す。比較的直線的な海岸線の沖合に位置する測点 C, D, E では両変数の間にかなり高い相関が見られる。しかし測点 D では測点 C, E と比較して同じ沿岸方向フラックスに対して沿岸流流速が小さ目に出ており, 逆に天妃山の南側から伸びてきた長い砂浜の北端部に位置する測点 E では C に対してやや大きめの値を有する。これらは図-6 においても同様な特徴が見られた点であるが, これにはいくつかの要因が考えられる。まず, 測点 D はその岸側に離岸堤が設置されているため, その消波効果により沿岸流の発達に費やすことのできる波のエネルギー量が減少したこと, また測点 C, E の比較では, C は天妃山の岩礁の北側に並ぶ離岸堤群の北端からわずかに 1000 m 離れるのみであったことから, 沿岸流が十分発達しえなかったことが考えられる。

一方, さらに大津漁港に近接した測点 B では相関は高くなる。しかし, 波の遮蔽域内の測点 A では両者の相関はほとんど見られなくなる。このことは測点 A での流れが, その地点における砕波に伴うエネルギーフラックスにより生じているのではなく, 北上する流れが防波堤によって遮られたために, 流れの連続性を満足するよう補

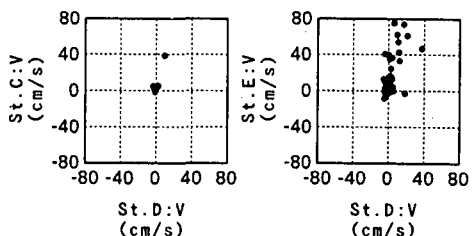
全体



120° ≤ 波向 < 130°



130° ≤ 波向 < 140°



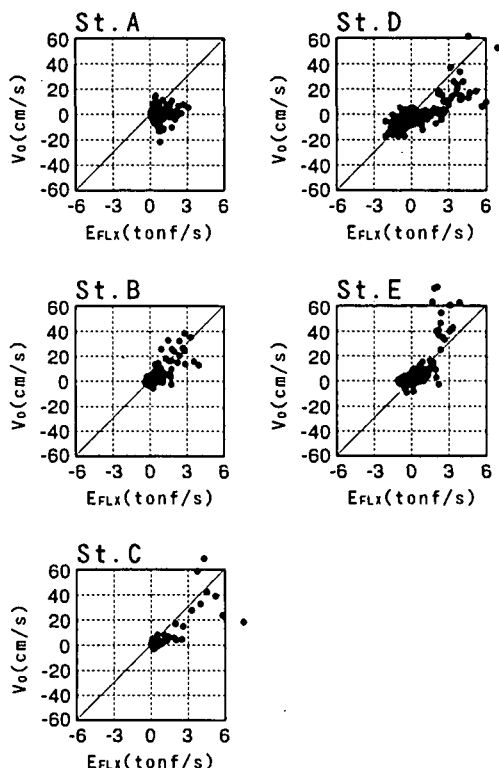
注) 波向は、漂砂の上手方向の観測点の波向を用いた。
(CとDの相関にはDの波向、DとEの相関にはEの波向)

図—6 測点DとC, Eの沿岸流速の相関

償流として生じていることを示すと考えられる。

6. 考 察

高波浪時における大津漁港周辺での波・流れの観測によれば、沖合の定点での波の入射方向がE~SEの間で変化しても、大津漁港近傍の汀線に対しては大きく時計回りの方向からの入射となる。また同時に波高分布も沿岸方向に分布を持ち、大津漁港に近づくにしたがい波高低下が起きている。これらに起因して、全体として反時計回りの方向の海浜循環流が生じる。その場合、入射波の周期・波向はかなり広い範囲で変動するが、これらが不規則に変動しても、観測された流れの向きは平均的にほぼ同一方向が卓越している。このことは、海浜流場が波の平均場に依存していることから当然の結果ではあるが、逆に観測された範囲での波浪場の変動に対して流れの場の応答は緩やかであって、波浪のエネルギーレベルさえ高ければ常時防波堤の背後方向へと沿岸流が生じうること、その結果として波の遮蔽域外から遮蔽域内へと



図—7 エネルギーフラックスと沿岸流速の相関

土砂移動が生じることを意味している。このことは、過去に大津漁港の防波堤の南側隣接部に堆積が、そしてそのさらに南側の神岡上海岸で侵食が単調に進んできたことを説明している。

7. ま と め

大津漁港周辺の沿岸方向に約9 km, 岸沖方向に約7 km という広い観測区域での波高・波向・海浜流の連続観測により、高波浪時の波浪・海浜流の観測に成功し、防波堤周辺での波高の沿岸方向分布、波向変化、沿岸流流速、防波堤背後での循環流の発生、およびそれらの相互関係を明らかにすることができた。また波高・波向の実測値から波浪の沿岸方向のエネルギーフラックスを求めたところ、これらは沿岸流流速とよい相関が成立することがわかった。今後はある一定期間の実測波浪をもとに波浪・流況特性を確率論的に推定する方法について検討を行う予定である。

参 考 文 献

宇多高明 (1997): 日本の海岸侵食, (株)山海堂, 460 p.