

## 波と流れの干渉による波動と流れの場の変化

## The changes of wave field and nearshore current by wave-current interaction

建設省土木研究所 正会員 橋本 宏

同 上 同 上 宇多高明

## 1. ま え が き

一般に、河口付近の現象や、砕波帯に放出された温排水等の挙動を調べる場合には波と流れの干渉が重要な問題になると考えられる。また砕波帯において、砕波に伴って生ずる海浜流が強い場合にも波と流れの干渉が生ずると考えられる。このような場合の流況を予測するには、運動量とエネルギー式から成る方程式系を計算する必要があるが、カップリングがそれほど強くなければ海浜流計算モデルを利用することもできよう。しかし現地データや実験値との対比によるモデルの妥当性は、実験や観測の困難さから充分検討されていない。

ここでは波の進行方向に直交する方向に強制的に沿岸流を発生させ、波と流れの干渉を調べると共に、数値モデルを用いた計算を行い、平均流れに関して計算値と実験値との比較を行った。この結果、波動場が与えられれば、波と流れによる海浜流の変化などはほぼ予測が可能ながことが明らかになった。また波動場自体の変化についても多少の解析を試みた。しかしこの点については定性的な比較に止まった。

## 2. 実験方法

実験は、海浜流発生装置付きの平面水槽（長さ25m、幅8m）を利用した。水槽はモルタル製で、海底勾配は1/20とし、打上げ部分を含めて海浜部分は6mあり、それより沖合は一定水深（20cm）とした。海浜流発生装置は流量制御弁の付いた管路を水槽の両側に導き、更に端末に数多くの穴を開けた管路を配置し、それより一定の流量を流す構造となっている。水槽が一定水深の場合は場所的に一定な流量にすることは比較的容易であるが、実験では断面形状が変化するために場所的に一定な流量にすることは困難であった。このために、沿岸流としては図-1に示すように、斜面上で流量が次第に増加し、斜面との交点で一定流量となるようにした。ただし図-1は浮子を利用して各地点の単位長さ当りの流量を求めたものであり、また図中の数字は水槽左端からの距離を示している。

実験は全体で3ケース行った。すなわち、No.1 流れのみ、No.2 波のみ、No.3 波+流れである。いずれの場合にも中央には突堤を配置した。この突堤は厚さ15cmのブロック製であり、汀線と直角に2mの長さとした。実験条件として流量は $3.6\text{ m}^3/\text{min}$ 、入射波高は5.0cm、周期は1.6秒とした。なお、突堤を配置したのは、波と流れの顕著な干渉を発生させるためであり、同時に強い沿岸流が存在する場合の突堤周辺の流況変化の予測の可能性を検討するためであった。測定は、波高、周期、流況、拡散、水位等について行った。まず波高は4台の容量式波高計を用いて8m四方を50cm間隔で測定した。流況はフィルムケースのふた（径3.2cm、厚0.8cm）を着色して投入し、その軌跡を架台（8m）上より5秒間隔で写真撮影して求めた。また拡散係数はフローレッセンの拡がりより求めた。

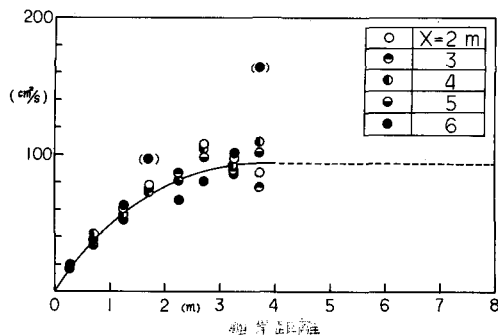


図-1. 流量分布

## 3. 解析方法

基礎式は、汀線方向に  $x$  軸、これと直角に  $y$  軸をとり、各方向の流量を  $M$ 、 $N$  とし、また静水面より上方に水位  $\eta$  をとれば、式(1)~(3)となる。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{2M}{H} \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{N}{H} \frac{\partial M}{\partial y} + \frac{M}{H} \frac{\partial N}{\partial y} = -g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} - r_b U_0 U + L V^2 M - \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{M}{H} \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{N}{H} \frac{\partial N}{\partial y} + \frac{2N}{H} \frac{\partial N}{\partial y} = -g(h+\eta) \frac{\partial \eta}{\partial y} - r_b U_0 V + L V^2 N - \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

ただし、 $M=V(h+\eta)$ 、 $N=V(h+\eta)$ であり、 $S_{xx}$ 、 $S_{xy}$ 、 $S_{yy}$ は radiation stressを示し、波のエネルギーと群速度によって表示される。その定義式については文献<sup>1)</sup>を参照されたい。ただし、 $Na 1$  (流れのみ)では  $S$  を含む項は消え、また摩擦項は例えば  $r_b U(U^2+V^2)^{1/2}$  のように変える必要がある。

計算は差分法によって式(1)~(3)を差分化して行う。なお格子間隔は  $25 \text{ cm}$  とし、格子点で波高と波向をデータとして与えた。計算法は、上記文献に詳述されているが、特に境界条件の与え方に注意を要する。すなわち、沿岸流と波のときは、境界沿いの各点ごとの流量を図-1の流量曲線より補間して与えた。また運動方程式の各項が運動状態を決定する上でどの程度重要かを判断するために各項の値の空間分布を求めた。更に、計算条件として、摩擦係数は  $Na 1$  では  $0.0026$ 、 $Na 2$ 、 $3$  では  $0.0064$  とおいた。

#### 4. 実験と計算の比較

##### 4.1 拡散係数

まず最初に、染料の拡がりより求めた拡散係数を等価半径との関係において図示したのが図-2である。図中の小さな黒丸は構造物で遮蔽された領域における値を示し、大きな丸印がここでの実験値である。これらのデータは、全体として太い実線で示された2乗則にはほぼ従っている。一方、碎波帯における渦動粘性係数を Longuet-Higgins<sup>3)</sup> は式(4)のように定義したが、

$$L = \rho N |y| \sqrt{gh} \quad (4)$$

渦動粘性係数と拡散係数がほぼ同じ値を持つと仮定し、また  $N=0.01$  とおけば、 $Na 2$ 、 $3$  に対して係数値は図-2の細かい実線の範囲で変化する。Longuet-Higginsの式は構造物によって遮蔽されない条件で成立するものであり、一方、 $Na 2$ 、 $3$  は遮蔽されていないが、構造物に近接している。このため計算値は  $Na 2$ 、 $3$  共実験値より大きい値となっている。ただし遮蔽された場合のものは1オーダー異っていた<sup>2)</sup>が、それと比較するとオーダー的にはほぼ等しくなっている。

一方、流れのみ ( $Na 1$ ) は  $Na 2$ 、 $3$  より1オーダー小さい値となっている。以上の点を考慮して、計算では格子間隔を  $25 \text{ cm}$  としたために、それより小さなスケールの渦は渦動粘性として考慮されるべきであると考え、平均的な係数値として  $Na 1$  は  $20 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、 $Na 2$ 、 $3$  は  $50 \text{ cm}^2/\text{sec}$  とおいた。

##### 4.2 波高分布と流況

さて、図-3、4は各々  $Na 2$ 、 $3$  の波高分布を示している。図-3では突堤の左側に波高のピークが存在したが、強制流を加えたとき(図-4)は、波高の集中が分散された傾向を有している。このような流れによる波高分布の変化が予測可能かどうかは興味ある問題であるが、これらを検討する前に流況を調べることにする。

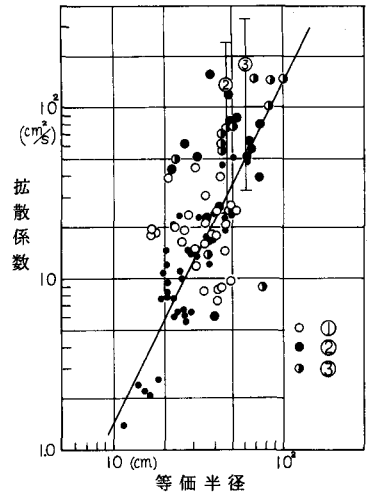


図-2 拡散係数と等価半径

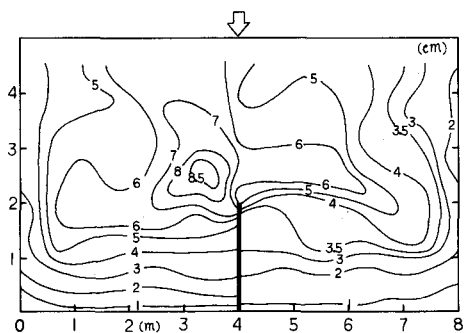


図-3. 波高分布 (No. 2, 波のみ)

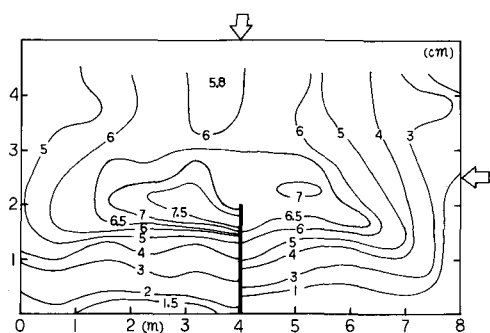


図-4. 波高分布 (No. 3, 波+流れ)

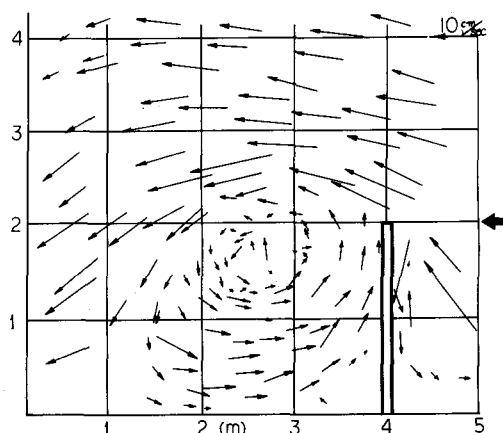


図-5. 流況図 (No. 1, 流れのみ)

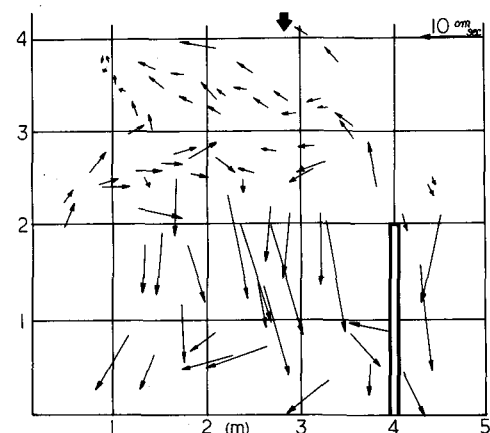


図-6. 流況図 (No. 2, 波のみ)

まず図-5は、No. 1 (流れのみ) の流況を示している。突堤の背後に反時計回りの循環流が生じている。これに対して図-6に示されたNo. 2 (波のみ) では、中央ほど高い波高分布を持つために、**radiation stress** によって時計回りの循環流が発生した。ただし流況はNo. 1と比較すると相当バラツキがあるが、これは水深が小さい地点でも流速が測定できるように薄い浮子を用いたため、波に乗ってしまったためである。

次に図-7はNo. 3 (波+流れ) を示している。この場合の特長は、汀線と約  $45^\circ$  をなす方向に向岸流が発生していることである。このような流況は、水平方向に運動量を持った水粒子が **radiation stress** によって岸方向に加速されたため発生したものであろう。また波と流れの干渉が比較的に強いために、後に述べるように非線型項が重要な働きをする。このためNo. 1とNo. 2の流況を合成したものとはまったく異った流況を示

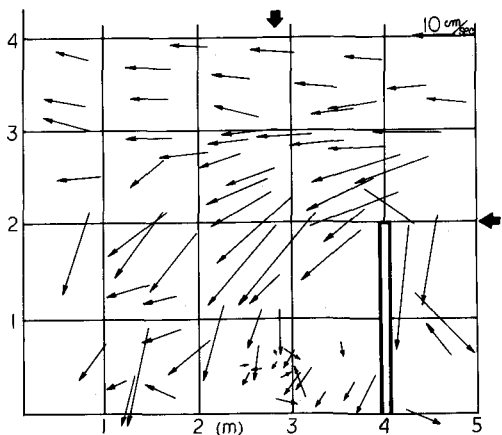


図-7. 流況図 (No. 3, 波+流れ)

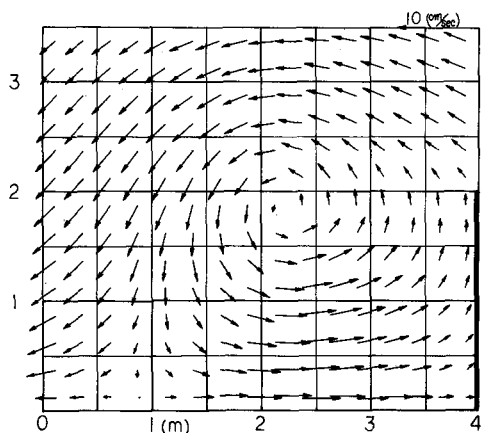


図-8. 流況図 (No. 1, 流れのみ)

している。

次にこのような流況の計算による再現性を検討した。この結果が図-8, 9, 10である。これらは順に, No. 1, 2, 3に対応する。まず流れのみの場合については, 図-5と8を比較すると, 後流渦のスケールはほぼ等しいが, 反流域の汀線近傍の流速は実験では約  $6 \text{ cm/sec}$  に対して計算では約  $12 \text{ cm/sec}$  であり, 約2倍過大な値となっている。また汀線近傍の流向が水平になり過ぎている点があげられる。これは浅海部分ではレイノルズ数が小さくなり層流状態に近くなるために, 計算で与えた底面摩擦が小さ目となったことが一因と考えられよう。

次に波のみの場合の図-6と9については, 実験値は浮子が波に乗ってしまったために詳細な比較は困難であるが, 循環流の形態はほぼ同様なものとなった。

ただし, 他の実験例<sup>2)</sup>と比較するとそれほど再現性は高いとは言えないようである。

最後に, 波と流れを合成した場合の流況に関しては, 図-7と10を比較すると, 突堤の先端より向岸方向に斜めに接近する流況パターンはほぼ再現されていると言えよう。ただし実験では汀線より  $1 \sim 2 \text{ m}$  の区間では  $20 \text{ cm/s}$  程度の流速となっているのに対して, 計算ではその約  $1/2$  となっている。この原因はむしろ浮子が適切でないための実験上の誤差であると考えられる。

## 5. 運動方程式各項の空間分布

波と流れを加えた場合の流況は, その各々の場合の流況を合成したものと非常に変化した, この理由を更に明らかにするために, 運動方程式 (式(1), (2)) 各項の空間分布を求めた。ただし,  $x = 2 \text{ m}$  の地点における断面で各項の評価を行った。まず最初に, 図-11と12はNo. 1 (流れのみ) における  $x$ ,  $y$  方向の運動方程式の各項の離岸方向分布を示すものである。 $x$  方向の運動量式は圧力項 (⑤) に対して主に非線型項 (②, ③) によって釣合が保たれている。一方,  $y$  方向の運動量式も圧力項 (⑤) に対して非線型項 (②)

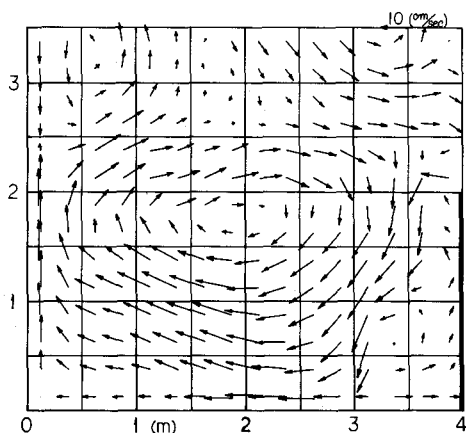


図-9. 流況図 (No. 2, 波のみ)

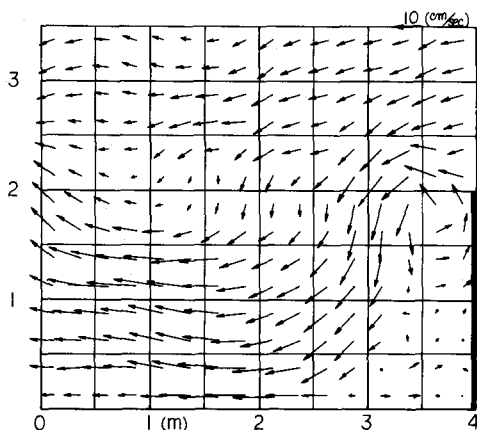


図-10. 流況図 (No. 3, 波+流れ)

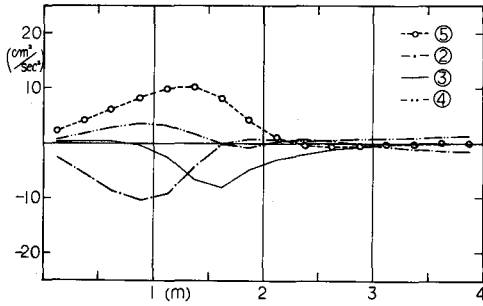


図-11. 式(1)の各項の分布 (No. 1)

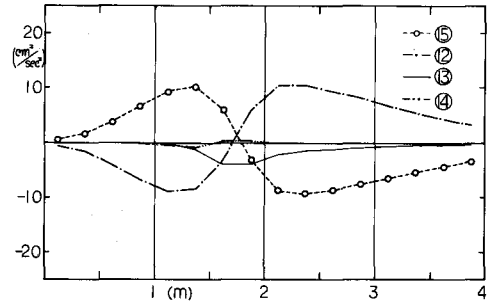


図-12. 式(2)の各項の分布 (No. 1)

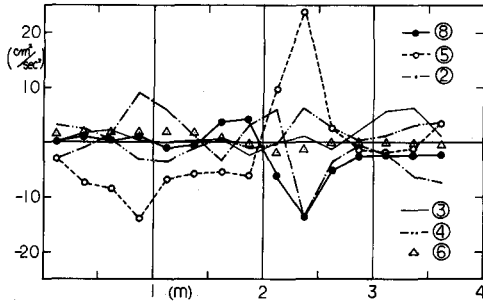


図-13. 式(1)の各項の分布 (No. 2)

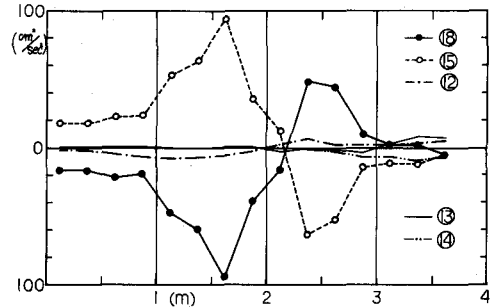


図-14. 式(2)の各項の分布 (No. 2)

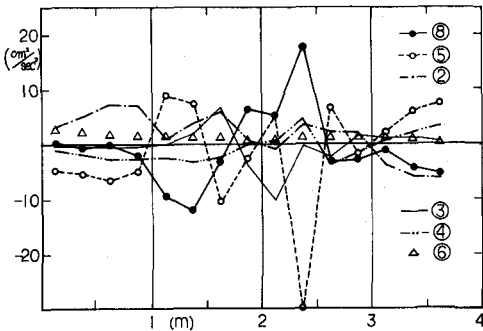


図-15. 式(1)の各項の分布 (No. 3)

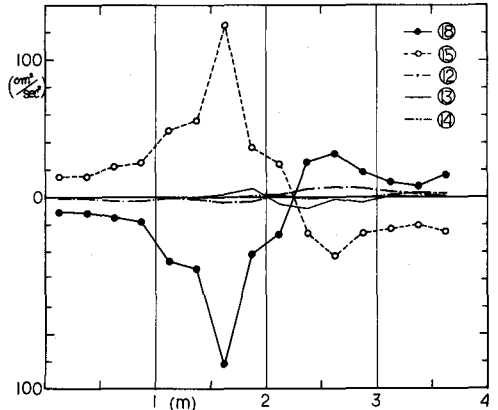


図-16. 式(2)の各項の分布 (No. 3)

が釣合っている。またこれら両者とも、加速度のオーダーはほぼ  $10 \text{ cm}^2/\text{sec}^2$  となっている。

次に図-13, 14 は No. 2 (波のみ) の結果である。x 方向の運動量に関しては、radiation stress 項 (⑧) と圧力項 (⑤) は他の項に対して大きい、非線型項も無視できる大きさではない。このことは、構造物周辺の海浜流を求めるときには、線型化方程式では満足な値が得られないことを示している。一方、y 方向の運動量に関しては、圧力項 (⑮) と radiation stress (⑮) とがほぼ釣合っており、これに対して他の項は相対的に小さい値をとる。最後に、波と流れを重ねた No. 3 の結果が図-15 と 16 である。このときは、No. 2 とほぼ同様な特長を有している。

## 6. 波動場の変化について

既に述べたように、波と流れを重ね合せたときの流況は、波動場の予測ができれば、それを用いて予測がほぼ可能である。このため強制流を加えたときの波動場の変化について検討を行うことにする。このような条

件での波高分布の予測に関しては、岩垣・酒井ら<sup>4)</sup>が研究を行っているので、これを参照しながら検討を進めることにする。まず定常状態での波のエネルギー式は式(5)のように表わされる。

$$\frac{\partial}{\partial x} [E(U + C_{gx}^*)] + \frac{\partial}{\partial y} [E(V + C_{gy}^*)] + S_{xx} \frac{\partial U}{\partial x} + S_{xy} \frac{\partial V}{\partial x} + S_{xy} \frac{\partial U}{\partial y} + S_{yy} \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

ここに  $S_{xx}$ ,  $S_{xy}$ ,  $S_{yy}$  は radiation stress であり、流れに相対的な群速度  $C_g^*$  と波速  $C^*$  及びエネルギー  $E$  の関数である。これらの定義式は上記文献に詳述されているのでここでは省略する。

ここで、波を入射させたときのエネルギー分布を  $E$ 、またこのとき生ずる平均流れを  $(U, V)$  とし、これに強制流を加えたときのエネルギー変化を  $\epsilon$ 、流速度化を  $(u, v)$  とおいて式(5)へ代入すると、 $\epsilon$  に関する振動方程式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial y} [\epsilon C_{gy0}] = -\frac{\partial}{\partial x} [E u] - \frac{\partial}{\partial y} [E(C_{gy2} + v)] - E \left( S'_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + S'_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} + S'_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} + S'_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (6)$$

ここに、 $C_{gy0}$  は波のみの場合の群速度、 $C_{gy2}$  は波とそれによって生じた流れがある所へ強制流を加えたときの群速度の変化である。また  $S'_{xx}$ ,  $S'_{xy}$ ,  $S'_{yy}$  は式(7)で定義される。

$$\left. \begin{aligned} S'_{xx} &= C_g^*/C^* \{ (1 + \cos^2 \theta) - 1/2 \} \\ S'_{xy} &= C_g^*/C^* \cdot \sin \theta \cos \theta \\ S'_{yy} &= C_g^*/C^* \{ (1 + \sin^2 \theta) - 1/2 \} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(6)の  $u$ ,  $v$  は未知量であり、運動方程式に対しても同様に振動を行って  $u$ ,  $v$ ,  $\epsilon$  に対する方程式を導いてそれらの解を求める必要がある。しかしここでは第1近似として  $u$ ,  $v$  に  $Na 1$  の流速値を用いることにして数値計算を行った。この結果得られた波高分布を図示したのが図-17である。白丸は  $Na 2$  の、黒丸は  $Na 3$  の分布を示しており、 $Na 2$  から  $Na 3$  への変化が予測できれば良いわけであるが、中央より左側では変化の方向は正しいが、その絶対値はまだ小さい。一方、中央左側では一致する点と不一致の点があり、振動の効果は明らかではない。この原因としては第1近似の流速が適切でないことや、波高測定上の誤差等が考えられる。

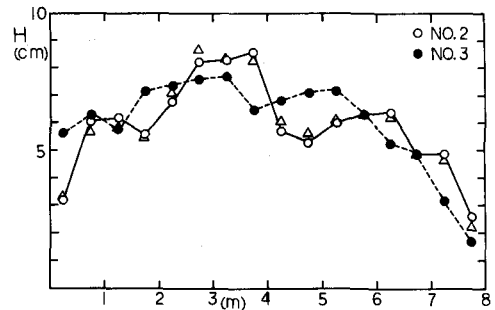


図-17. 波高変化

## 7. あとがき

本論文では、波と流れの干渉について実験と数値計算によって検討を行った。これによって干渉による流況の変化を明らかにすることができた。また計算による流況の再現性について調べたところ、波動場が与えられれば波と流れによる海浜流の変化はほぼ予測が可能になったことが明らかになった。更に、波動場自体の変化についてもエネルギー式を用いて検討を行ったが、実際に生じている波高変化を充分説明するまでには到らなかった。この点については今後更に検討が必要である。

## 参考文献

- 1) 橋本宏・宇多高明：海浜流の数値計算法とその応用，第21回海岸工学講演会論文集，pp.335~360，1974.
- 2) 橋本宏・宇多高明・林敏夫：海岸構造物周辺の海浜流と地形変化の特性，第23回水理講演会論文集，1978.
- 3) Longuet-Higgins, M.S.: Progress in the study of Longshore Currents, pp.203~248, 'Waves on Beaches and Resulting Sediment Transport, edited by R.E. Meyer, Academic Press, 1972.
- 4) 岩垣雄一・酒井哲郎・岡幸夫：流れによる波の屈折と波高変化，第24回海岸工学講演会論文集，pp.25~29，1977.