

波と流れと海底地形の相互干渉に関する実験的研究

Experimental Study on Interaction among Waves, Currents and Bottom Topography

Md. H. ジャマン*・富樫宏由**

Md. Hasanat Zaman and Hiroyoshi Togashi

The experimental results of the interaction among wave, current and a submerged mound have been reported in this paper. This study is carried out for the cases where the wave is propagating in the following and the opposite direction of the current over a submerged mound of parabolic cross section. The phenomenon is investigated for varying forced currents, mound geometry and relative water depths. It is found that following current amplify the wave height over the mound but reverse current over the whole domain. Other results indicate that current of both directions affect the wave characteristics significantly over the mound.

Keywords: Wave-current interaction, Following and reverse current, Bottom topography.

1. 序 論

波・流れ相互干渉の現象は、大部分の動的な沿岸過程に著しい影響を与えるために、多くの海岸関係の技術者や研究者の大きな関心を惹いてきた。一般に、海浜循環流はいろいろな方向からのいろいろな形式の運動があるので非常に複雑である。例えば、近くの河川からの流出、沖合いから海岸に接近する波浪、自然海浜や海岸護岸あるいは海崖による反射、海浜流、波と流れによる砂礫の移動等々が存在するからである。波が沿岸域に到達すると、波は浅瀬に入り、流れがある所では波形が険しくなり始め、従って波向、波速、波高や波長が変化することになる。かくして、波・流れと地形変化の結合効果を研究する必要がある。Hedge (1987) が述べているように、伝統的には、波場において流れの存在を無視することは技術者の習慣であり、流れの速度が極めて小さい場合にはこれでよいのかも知れないが、しかし流れ速度がもっと強くて無視し得ない場合はそういう慣習的な手法では問題は解決されない。

Longuet-Higgins and Steward (1964)は、線形波理論に基いて波と流れの干渉問題を解析した草分けである。Witham (1962)と Lundgren (1963)は、海面の変化に対する理論的な表現や波連の線形並びに非線形特性を理論的に導いた。Kirby (1984)と Liu (1990)は、修正緩勾配方程式を適用することによって、波に対する流れの効果を検討した。近似分散関係式に基いて、Skop (1987)は表面波が水深が変化する流れと干渉する場合の理論的なモデルを展開した。Kemp and Simons (1982, 1983)の実験は、最大滑面床せん断応力は波が流れに重ね合わされる場合に増大するということを指摘した。Tayfun等 (1976)は、流れと海底地形は不規則波のスペクトル特性に非常に大きな影響を持ち得るということを示した。以上より、波・流れの相互干渉、波の反射と透過の現象を理解するためには、三大要素に注目する必要があると言えるであろう。この要素とは：波の特徴、流れの特性及び局所的な水深；と指摘される。この実験では、水槽の水深は一樣であるが、海底地形としての放物型マウンドがそれを越える波・流れの相互干渉を調べるために設置されている。

2. 装置及び器具

実験に用いた波動水槽は、ガラス製側壁と鋼製底床版から成る長方形断面 ($W1.5\text{m} \times D1.5\text{m}$) で、長さは26mである。水槽の一端にはコンピュータ制御のプランジャー型造波装置が、また他端には消波装置が各々設置されている。

その概観を図-1に示す。循環流の発生装置は軸流ポンプで、回転周波数で流れの大きさを設定するが、事前にプロベラ式流速計で検定してある。流速は、マウンドと波がない状態で、水深を10等分する点で測定し、その平均値を本実験中の流れの速度として用いた。浅瀬工として用いた海底地形マウンドは、頂点高さ0.3m、底面長さ1.5mの鋼製放物線状断面を有し、水槽の中央に設置した。

このマウンドの上・下流側の水槽上15地点に、波高測定用の容量式波高計を設置したが、この内上流側の5点と下流側の5点は水平床上に、残りの5点はマウンド上に設置し、連続する波高計間隔は30cmである。この波高計はアナログレコーダに接続されており、次いでアナログデータはコンピュータに結合されているA/Dコンバータによってデジタルデータに変換される。キャリブレーションは、水槽内で15点全部一緒に行われた。

* 学生会員 長崎大学大学院海洋生産科学研究科 (〒852 長崎市文教町1-14)

** フェロー会員 長崎大学工学部社会開発工学科

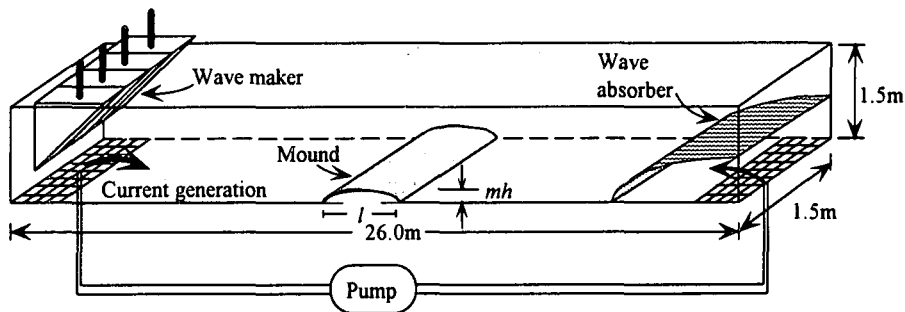


図-1 波動水槽の概要図

3. 実験方法及びデータ収録

先ず始めに、水槽の中に必要に応じた流れを起こし、少し間をおいて流れが充分に安定したと見なされた後、その上に指定した波高と周期の正弦波状の規則波を起こす。同一方向流れの場合については、波・流れの重畳運動が充分に安定した後、オン・ラインHPコンピュータで15点同時測定のためのデータ収録が行われた。一方、逆方向流れの場合については、波は発生後しばらくすると不安定になる。この理由は、逆方向流れそれ自体の存在とまたそれが末端に設置してある消波装置を透過して水槽中に入ってくる際に滑らかに通り抜けるのを妨げ、流れの鉛直分布を一樣でなくなるように乱してしまうことに起因するものであろう。この問題を避けるために、この不安定な状況が発生する前にデータを記録して実験を終えるようにした。尚、同一方向流れの場合には、流れ速度の鉛直分布は流速40cm/s位迄かなり良く一樣になっていることがわかったが、逆方向流れの場合には、この分布は流速約17cm/sでも不安定な状況であった。

4. 結果と考察

実験は種々の大きさの流れ速度、相対マウンド高と相対水深で行われた。実験結果は2部に分かれて与えられているが、Section-Aでは波と同一方向流れを伴った波とマウンドとの間の干渉について述べており、一方Section-Bでは波・逆方向流れとマウンドの間の相互干渉結果について示してある。

Section-A マウンド上を越える同一方向流れを伴った波運動

種々の同一方向強制流れの場合に対しては、流れの大きさのみを変化させ、その他の波とマウンドのパラメーターは一定とした。この場合は、 U/C_i を0.14, 0.18, 及び0.22と変化させ、これに対して相対水深 $h/L_i=0.28$, 波形勾配 $H/L_i=0.03$, 相対マウンド高 $m=0.5$, 相対マウンド長 $mh/l=0.2$ 等は一定とした。ここで、上記の U は流れ速度、 h は静水深、また C_i , L_i , H_i はそれぞれ波がない時の波速、波長、波高であり、 mh と l はマウンドの頂点高さと底面長さである。

図-2と3は種々の強制流れに対する波高と平均水位の局所的分布を表している。図-2は、マウンド上で水深が次第に浅くなること、波を陰しくするように作用している流れそれ自体との相関特性のために、マウンド上で波高が増加することを示している。一方図-3は、強制流れが大きくなるにつれて、マウンド上の平均水位は著しく低下することを示している。マウンド下流側における平均水位の低下も目立つことが注目される。これはマウンドからの流れの剥離渦によるものであるが、底面近くの逆流はマウンド背後の極近傍で相当大きいことが染料注入による流れの可視化手法によって観察された。それはマウンドから離れるにつれて次第に減少し、マウンドからのある距離の水平床上で消失する。逆流の強さと範囲は強制流れの大きさと関係していることが分かった。この逆流があるために、主流の平均流速は、流れの連続性を維持するために増加し、その結果として平均水位が低下する。

図-4と5は、種々の相対マウンド高に対する波高分布と平均水位の低下を示している。この実験で m は0.4, 0.5 及び0.6と変化させ、パラメーターは $U/C_i=0.18$, $h/L_i=0.28$, $H/L_i=0.03$, $mh/l=0.2$ とした。この場合、 m が増加すると、波高と平均水位の低下の仕方は増加することが観察される。

図-6と7は、種々の相対水深に対する波高と平均水位の変化の関係を表している。この場合、 h/L_i は0.28, 0.39 及び0.48と変化させ、他のパラメーターは $U/C_i=0.18$, $H/L_i=0.03$, $m=0.5$, $mh/l=0.2$ としてある。図-6は、増加する相対水深に対してマウンド上の波高の減少の仕方は非常に小さく、マウンドからの反射の影響は中間的な相対水深の時に最も大きいことを示している。一方図-7によれば、相対水深は変化しても、平均水位の低下の仕方を要する大きな影響は殆ど与えないことを示している。

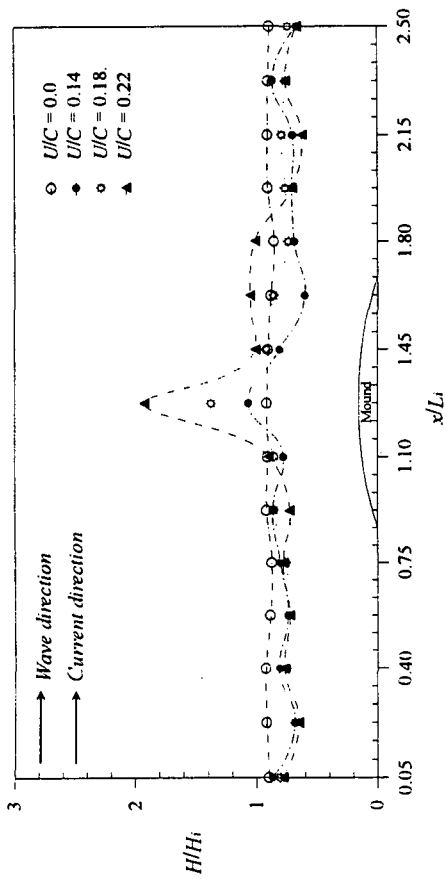


図-2 種々の同一方向強制流れに対する波高(順流)
($h/L_i = 0.28$, $H_i/L_i = 0.03$, $m = 0.5$ and $mh/l = 0.2$)

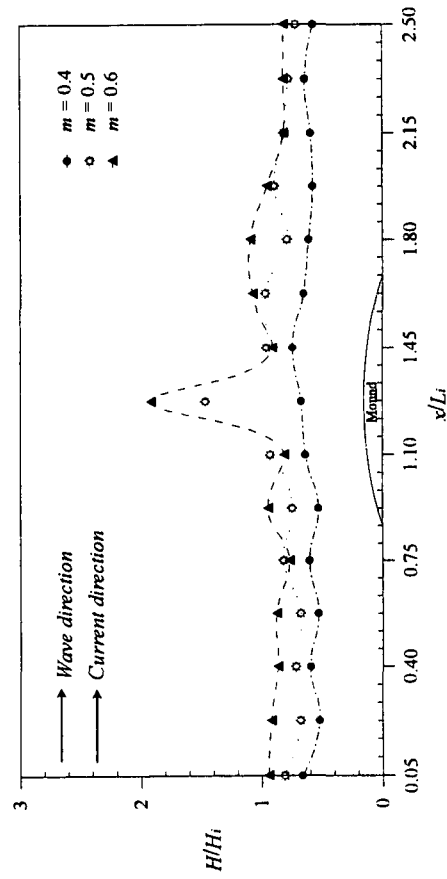


図-4 相対マウンド高に対する波高(順流)
($U/C_i = 0.18$, $h/L_i = 0.28$, $H_i/L_i = 0.03$ and $mh/l = 0.2$)

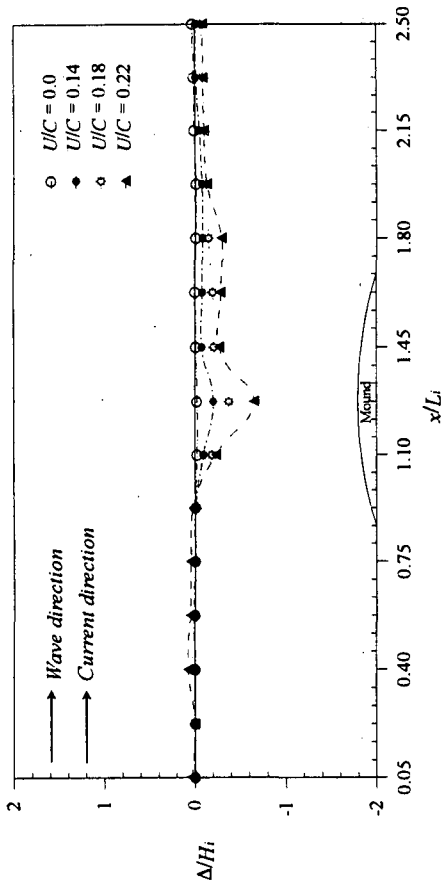


図-3 種々の同一方向強制流れに対する平均水位(順流)
($h/L_i = 0.28$, $H_i/L_i = 0.03$, $m = 0.5$ and $mh/l = 0.2$)

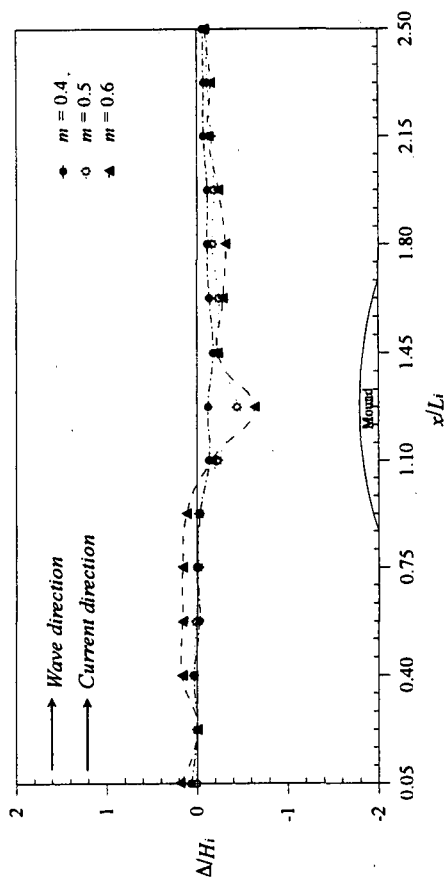


図-5 相対マウンド高に対する平均水位(順流)
($U/C_i = 0.18$, $h/L_i = 0.28$, $H_i/L_i = 0.03$ and $mh/l = 0.2$)

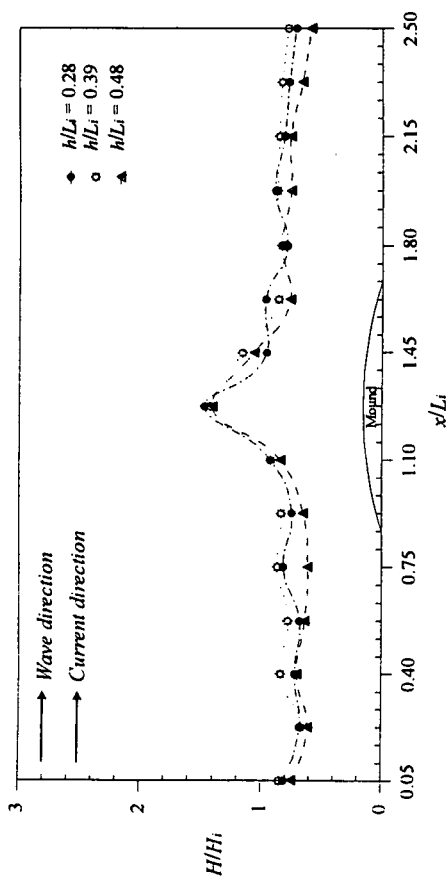


図-6 相対水深に対する波高(順流)
($U/C_i = 0.18$, $H_i/L_i = 0.03$, $m = 0.5$ and $mh/l = 0.2$)

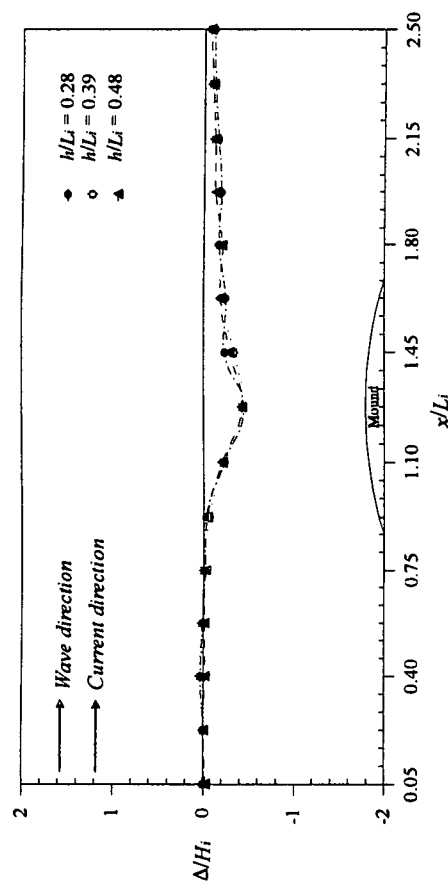


図-7 相対水深に対する平均水位(順流)
($U/C_i = 0.18$, $H_i/L_i = 0.03$, $m = 0.5$ and $mh/l = 0.2$)

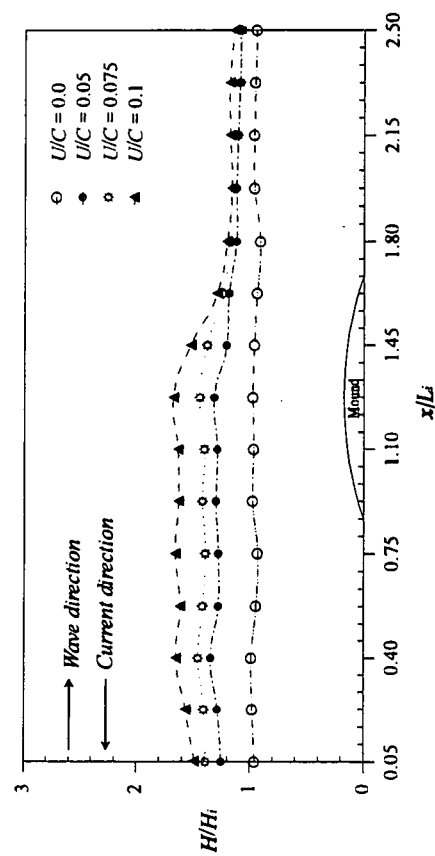


図-8 種々の逆方向強制流れに対する波高(逆流)
($h/L_i = 0.3$, $H_i/L_i = 0.03$, $m = 0.5$ and $mh/l = 0.2$)

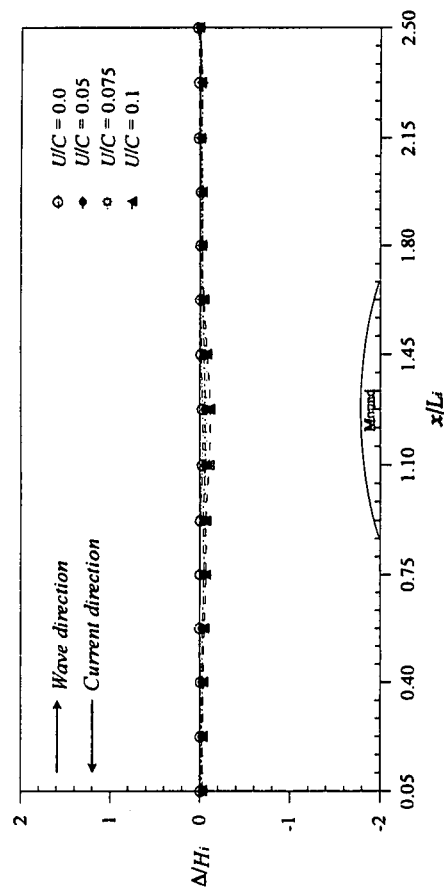


図-9 種々の逆方向強制流れに対する平均水位(逆流)
($h/L_i = 0.3$, $H_i/L_i = 0.03$, $m = 0.5$ and $mh/l = 0.2$)

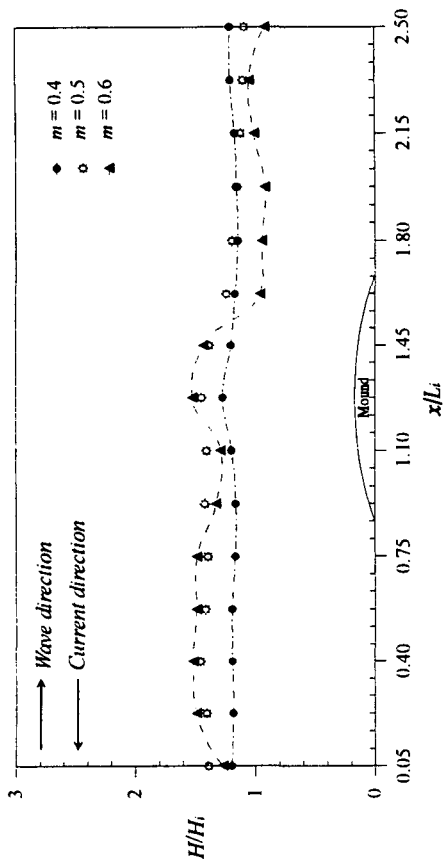


図-1 0 相対マウンド高に対する波高(逆流)
($U/C_i = 0.075$, $h/L_i = 0.3$, $H_i/L_i = 0.03$ and $mh/l = 0.2$)

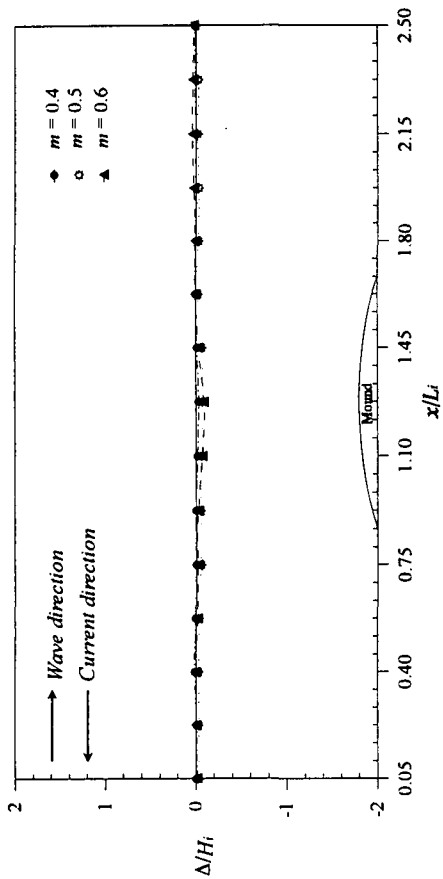


図-1 1 相対マウンド高に対する平均水位(逆流)
($U/C_i = 0.075$, $h/L_i = 0.3$, $H_i/L_i = 0.03$ and $mh/l = 0.2$)

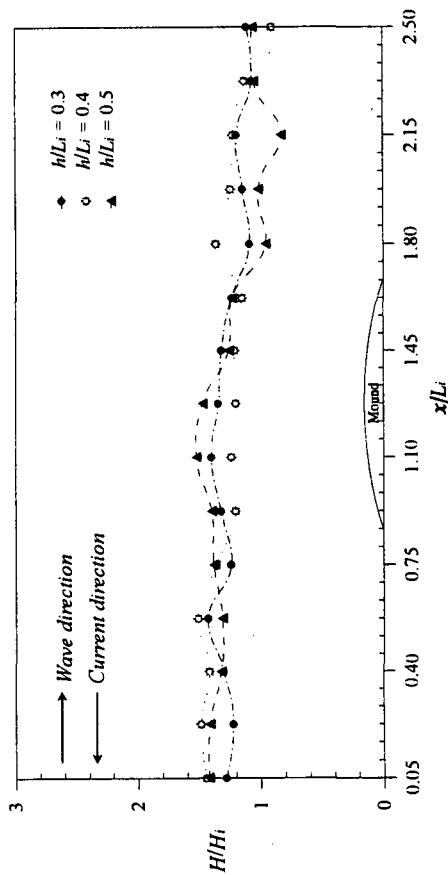


図-1 2 相対水深に対する波高(逆流)
($U/C_i = 0.075$, $H_i/L_i = 0.03$, $m = 0.5$ and $mh/l = 0.2$)

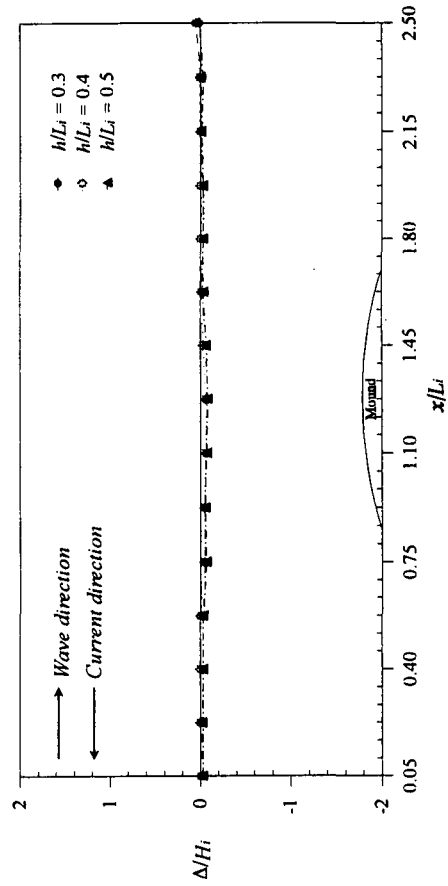


図-1 3 相対水深に対する平均水位(逆流)
($U/C_i = 0.075$, $H_i/L_i = 0.03$, $m = 0.5$ and $mh/l = 0.2$)

Section-B 逆方向流れを伴う表面波とマウンドとの間の相互干渉

図-8と9は、逆方向強制流れに対する波高分布と平均水位の低下の関係を表している。ここで U/C_i は0.05, 0.075及び0.1と変化させたのに対して、 $h/L_i=0.3$, $H_i/L_i=0.03$, $m=0.5$, $mh/l=0.2$ とした。図-8から、逆方向流れがある場合は、水槽の全長に亘って波高が増加することが注目される。図-9は、強制流れが強化されても、平均水位低下は増加せずに最小なることを示している。

図-10と11は、種々の相対マウンド高に対する波高と平均水位の変化を図示している。この場合 m を0.4, 0.5及び0.6と変化させ、これに対して $U/C_i=0.075$, $h/L_i=0.3$, $H_i/L_i=0.03$, $m=0.5$, $mh/l=0.2$ とおいている。 m が増加するにつれてマウンド上とその上流側水平床上の波高は増加し、マウンド下流側水平床上では減少するが、一方平均水位の低下には目立った変化は見られない。

図-12と13は、種々の相対水深に対する波高と平均水位の変化を図示したものである。この場合 h/L_i は0.3, 0.4及び0.5と変化させ、この時 $U/C_i=0.075$, $H_i/L_i=0.03$, $m=0.5$, $mh/l=0.2$ 等は一定としている。図-12では、相対水深が増加する場合、中間的な相対水深による波高増加が特異な性質を示し、マウンド上では最小でその前後で最大となる。一方図-13によれば、相対水深の変化は平均水位の低下に殆ど影響しないことを示している。

5. 結 論

1) 波と同一方向強制流れがある場合には、相対流れ速度と相対マウンド高が増大すると、マウンド上の波高と平均水位の変化は共に増加する。相対水深を変化させる場合でも、パラメータの影響でマウンド上の波高は全体として増加するが、相対水深が増大すると、浅水変形効果によってマウンド上の波高は若干小さくなるが、平均水位の低下の仕方には殆ど変化を与えない。

2) 一方、波と逆方向強制流れ速度が増大する場合には、マウンド上のみならずその上流側水平床上でも波高は大きく増加するが、マウンド下流側水平床上の増加は小さい。相対水深が増大する場合は、マウンド上とその上流側水平床上では波高が概して増加し、マウンド下流側水平床上では概して減少する。また、この逆方向流れの場合は、流れ速度、相対マウンド高及び相対水深のいずれの変化によっても注目すべき平均水位の低下は殆ど見られなかった。

謝 辞

この実験を遂行するに当たり、貴重な御助言を頂き、絶えず実験を見ながら励まして下さいました長崎大学工学部社会開発工学科の余 錫平助教授に深甚なる謝意を表します。また、実験装置の製作から操作等で常に側に居て親切に助けて下さいました、同じく社会開発工学科の平山康志技官に深謝致します。更に、この実験を行うに当り、同社会開発工学科海岸工学研究室の卒業研究学生として一緒に実験して貰いました、現在長崎大学大学院工学研究科社会開発工学専攻修士課程2年の浜村和馬君と同期の卒業生枳原 肇君、そして今年の卒業生須藤貴光・藤井和窓の両君に対して、ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- Hedges, T. S. (1987): "Combination of waves and currents: an introduction", *Proc. Instn Civ. Engrs, Part 1*, **82**, 567-585
- Kemp, P. H. and R. R. Simons (1982): "The interaction between waves and a turbulent current: waves propagating with the current", *J. Fluid Mech.*, **116**, 227-250.
- Kemp, P. H. and R. R. Simons (1983): "The interaction of waves and a turbulent current: waves propagating against the current", *J. Fluid Mech.*, **130**, 73-89.
- Kirby, J. T. (1984): "A note on linear surface wave-current interaction over slowly varying topography", *J. Geophys. Res.*, **89**(C1), 745-747.
- Liu, P. L. F. (1990): "Wave transformation", In *The Sea* (ed. B. LeMehaute and D. M. Hanes), Wiley Interscience, 27-63.
- Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart (1964): "Radiation stress in water waves, a physical discussion with application", *Deep-Sea Res.*, **11**, 529.
- Lundgren, H. (1963): "Wave thrust and energy level", *Proc. IAHR, London*, 147.
- Skop, R. A. (1987): "Approximate dispersion relation for wave current interaction", *J. Waterway, Port, Coast., and Ocean Engng.*, **113**(2), 187-195.
- Tayfun, M. A., R. A. Dalrymple and C. Y. Tang (1976): "Random wave-current interactions in water of varying depth", *Ocean Engng.*, **3**, 403-420.
- Whitham, G. B., (1962): "Mass, momentum, and energy flux in water waves", *J. Fluid Mech.*, **12**, 135.