

波による魚礁の局所洗掘と埋没の特性に関する実験的研究

Experimental Study on Characteristics of Local Scour and Embedment of Fish Reef by Wave Action

金 俊圭*, 水谷法美**, 神野夏樹*, 古川 清***, 岩田好一朗****

June-Q KIM, Norimi MIZUTANI, Natsuki JINNO, Kiyoshi FURUKAWA, Koichiro IWATA

The characteristics of local scour and embedment of Artificial Fish Reef (AFR) by wave action are investigated experimentally, and the mechanism of embedment is discussed. With selected models of AFR, the experiment was conducted in a two-dimensional wave tank. The vortex patterns near the angled part of AFR are also observed by the hydrogen-bubble method. The patterns of scour, the maximum scour depth, the embeded volume and the bottom-contact area of AFR model are revealed to be controlled by KC number and shape of AFR on the movable bed.

Keywords : artificial fish reef, local scour, embedment, vortex

1. はじめに

大規模な沿岸域開発によって破壊された環境の復元と改善および水産資源の保護と増殖などの面から水産生物に対する環境創造技術の構築が緊急課題となっている。人工魚礁を設置し人工漁場を造成する技術は古くから行われてきたが、主に比較的深い海域を対象としており、浅海域では満足のいく水準にまで達していないのが現状である。太陽光線が届く比較的浅い砂質海域では光合成が旺盛で極めて高い基礎生産力を持っているが、底質が移動することが多いので植物が根を充分定着させることができず、このため魚介類の隠れ場や産卵等の場所の提供ができないため豊富な生物相までには至っていない場合が多い。従って、高い基礎生産力を持つ浅海の砂質海底に人工魚礁や藻場造成用のブロックを設置すると、水産生物の増殖効果には極めて大きいものがあると思われる。しかし、このような海域では波の影響を大きく受けるため、波の作用によってブロック周辺で発生する局所洗掘やそれに伴う埋没、沈下、転倒等により本来の機能が消失することが指摘されている。本研究は、上述のような波による局所洗掘の実態を水理実験より明らかにすると共に、局所洗掘に極めて重要な影響を及ぼす魚礁周りの流速の計測と流況の可視化を行い、その特性を議論するとともに、局所洗掘と埋没の発生機構を考究する。

2. 水理実験

本研究は局所洗掘の実態と機構を解明することを目的とした基礎的な研究であり、そのため、発生波は全て規則波に限定した。図-1に示す名古屋大学工学部土木工学教室の片面ガラス張りの鉛直2次元鋼製水槽（長さ25、幅0.7、高さ0.9 m）に先端部が1/6の勾配を持つ高さ20cmのステップを設けて移動床実験と固定床実験を行った。なお、水槽の一端にはフラップ型造波装置、他端には消波装置が設置されている。移動床実験ではステップの中央部に中央粒径 $d_{50}=0.038\text{cm}$ の珪砂を使ってサンドプールを設置した。実験では静水深を40cmに固定し、入射波の周期を1.0、1.4、1.8秒と変化させ、波高を10.0、13.0、15.0、18.0、20.3 cmの5種類を変化させた。

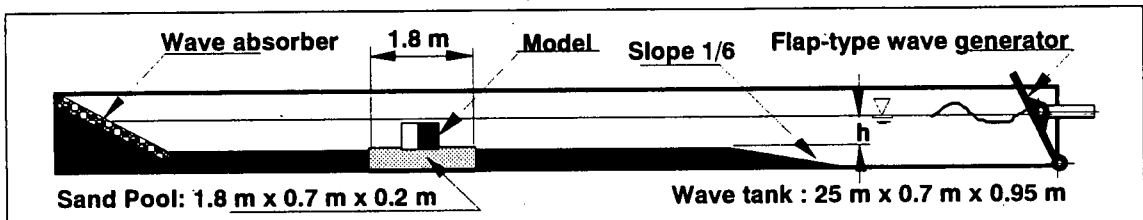


図-1 実験水槽

移動床実験では、地形変化に及ぼす、人工魚礁の幾何学的効果を調べるために、図-2のような、形状は異なるが体積 V_t は等しい($V_t=512\text{cm}^3$)9種類のコンクリート製の模型を採用した。模型は半球体、円柱、三角錐、三角柱、四角錐、正六面体、直六面体、屋根型、半円柱である。なお、模型の設置に際しては波の入射方向に対す

* 学生会員 名古屋大学大学院工学研究科 土木工学専攻 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

** 正会員 名古屋大学大学院工学研究科 土木工学教室

*** 正会員 ポートコンサルタント(株)

**** フェロー 名古屋大学大学院工学研究科 土木工学教室

る模型の方向性も考慮した。移動床実験で9種類の模型に対して、局所洗掘の発生位置と形状を写真およびビデオ撮影し、洗掘深はポイントゲージとレーザ変位形を使って計測し、模型の底面と砂との接触面積は模型に付いている珪砂の形と移動床上の痕跡を測って求めた。また実験前後の模型の各頂点の高さの変動から模型の埋没量を計算した。なお、波の作用時間は地形変化がほとんど認められなくなる範囲の約1時間である。

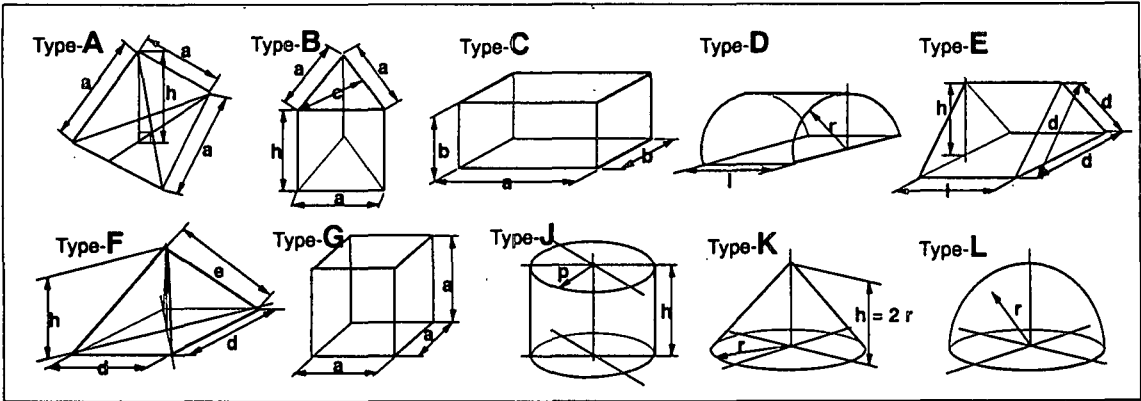


図-2 実験に採用された模型の形状と種類

固定床実験では、移動床実験より得られた局所洗掘の発生位置と形状等を検討して、特徴的でなお基本的な局所洗掘と渦の発生が認められた正六面体を取り扱い、水素気泡法により、流れの可視化実験を行い、模型から生じる渦の特性を写真とビデオ映像を解析して求めた。

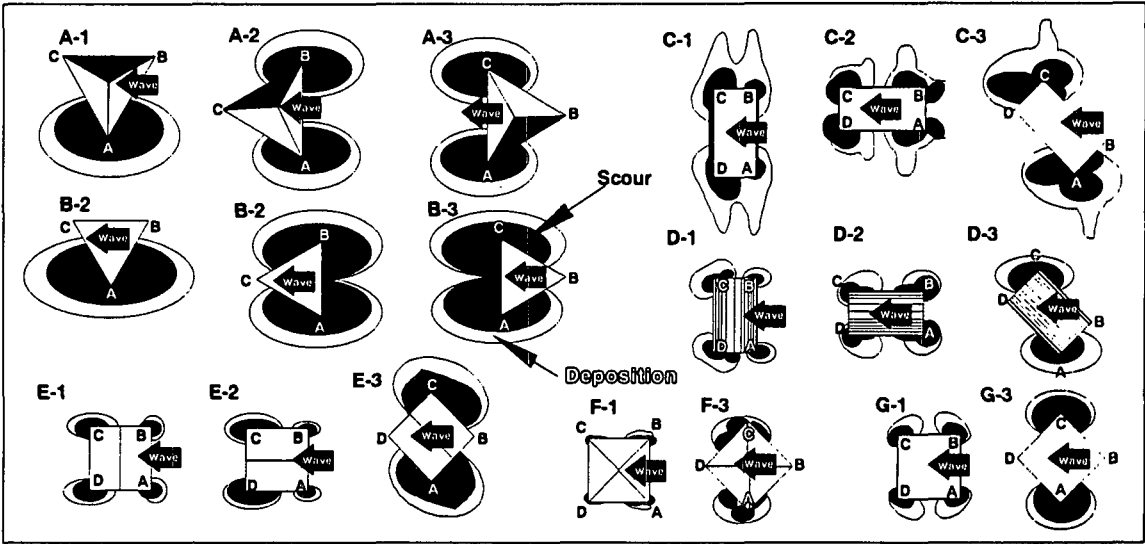


図-3 洗掘と堆積の一般的なパターン

3. 実験結果および考察

3. 1 ブロック周辺の局所地形変化に及ぼすブロックの形状効果

図-3は各模型に対して実験で得られた局所洗掘と堆積の一般的な形状を模式的に示したものであり、半球型、円錐型および円柱型の場合は著しい洗掘と洗掘による堆積や模型の傾きが認められなかったので、省略してある。なお、魚礁の集魚効果に関して魚礁から発生する渦が大きく寄与することが挙げられており、洗掘防止のため渦の発生を抑えることは、集魚効果としては二律背反する可能性があることを頭の片隅に置いておかねばならない。同図から模型の形状の違いによって洗掘と堆積のパターンが異なること、また、同じ模型でも波の入射方向に対する設置方向によって洗掘と堆積の状況が全く違うことなどが認められる。すなわち、図-3には示されていないが、円筒や円錐のように円形の底面を持つ模型の場合は、波を作用させて時間が経っても局所洗掘らしい地形変化は生じなく、周辺に砂澱が発生することが観察された。一方、三角柱や四角柱のような隅角部を持つ模型は全ての実験で、波を作用させてから急速に洗掘と堆積が進み数分以内に模型特有のパターンを表し、その後徐々にその範囲が拡大されて行くことが確認された。また、洗掘された砂は洗掘部の外辺に堆積されるのが確認された。

可視化実験によれば、模型底部の局所洗掘の発生は模型表面で形成されそして吐き出される鉛直方向に発達した竜巻状の渦により大きく支配されることが認められ、このため模型の隅角部の底面から最初局所洗掘が発生す

る。そして、この竜巻状の渦が底面の砂を巻き上げてスリ鉢状の洗掘領域を作る。一方、巻き上げられた砂の一部はスリ鉢状の洗掘領域内に落ちてまた巻き上げられる。そして、残りはスリ鉢状洗掘領域の外辺に堆積する。他にごく一部が波の質量輸送により岸側へ輸送される。

同形の底面を持つ錘状と柱状模型の洗掘のパターンを比較してみると、柱状の洗掘が錘状の洗掘より広いことが分かる。これは、柱状模型の隅角部は鉛直であるため、ここから生じる渦は、隅角部が鉛直方向に斜めになっている錘状模型より大きいことが観察から判った。したがって、模型の底面のみならず立体的な形も洗掘に大きい影響を与えることが解る。全実験を通じて、模型の設置時に不整があり、隅角部底面に高低差が生じると、低い位置の隅角部周辺の洗掘がより進んで模型が傾く場合があったことも認められた。次に、地形変動の大きい立方体模型を取り扱い、渦の発生状況と局所地形変化についてもう少し詳細に検討する。

3. 2 立方体ブロック周辺の洗掘と地形変化

流れの可視化実験より得られた模型周りの渦の模式図が図-4と図-5であり、水粒子速度の運動方向（半周期間は波の進行方向、残り半周期間はその逆方向）に対応して渦は形成される。

(i) 設置Aの場合（波進行方向に対して射影面積が最小）：図-4のように四つの隅角部で渦が発生する。模型の上流側の渦の断面形状は楕円形、構造物の下流側で発生する渦の断面形状はほぼ円形に近づく。周期が短く比水深が大きい場合（ $h/gT^2=0.041$ ），渦が各々独立して存在するが、周期が長く比水深が小さくなると（ $h/gT^2=0.021, 0.013$ ），前半の半周期で形成された渦がそのまま残り、後半の半周期の渦と重なりあうことが観察され、波の周期が渦の発達を大きく左右することが判る。渦の剥離・吐き出しについては、 $h/gT^2=0.041$ の場合には渦が形成される前に逆方向に押し流されたが、 $h/gT^2=0.021$ の場合には1,2個、 $h/gT^2=0.013$ の場合には3,4個の大きい吐き出し渦が確認できた。

(ii) 設置Bの場合（波進行方向に対して射影面積が最大）：図-5のように模型の左右の隅角部の前後で渦が発生して、隅角部を中心に8の字を描くような挙動をする。渦の断面形状は $h/gT^2=0.041$ の場合楕円形で側面を沿うような挙動をするが剥離・吐き出しまでには至らない。一方、 $h/gT^2=0.021$ の場合渦の断面形状は円形に近づき、剥離・吐き出しする渦も確認できた。さらに比水深が小さくなると（ $h/gT^2=0.013$ ）渦の規模は大きくなり、剥離・吐き出し数も増える。図-6、図-7はそれぞれ設置Aと設置Bに対する局所洗掘深を示したものであり、渦の発生・発達と剥離・吐き出しの特性とよく対応していることが理解できる。

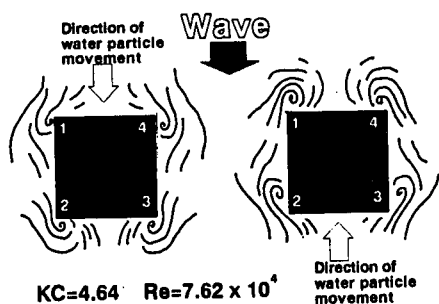


図-4 渦の挙動

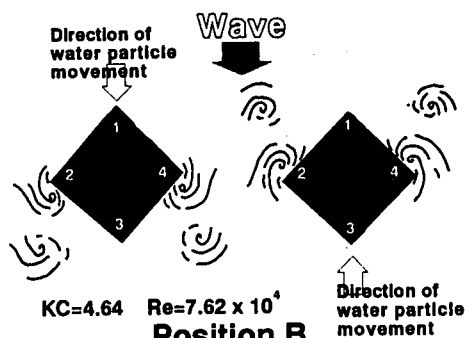
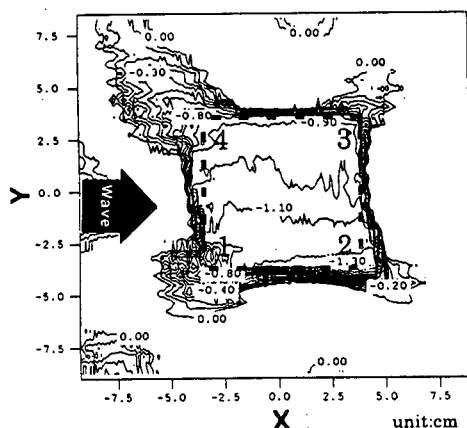
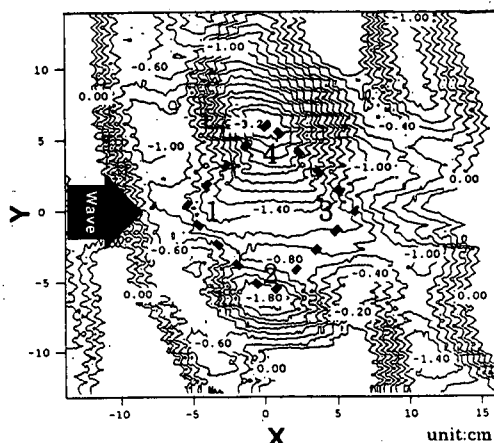


図-5 渦の挙動



($h_{sm}=1.47, x=3.97, y=4.28$
 $KC=5.63, Re=14.5 \times 10^4$)
図-6 設置Aの地形の等深線



($h_{sm}=3.36, x=-0.40, y=5.90$
 $KC=4.64, Re=7.6 \times 10^4$)
図-7 設置Bの地形の等深線

3. 3 洗掘と埋没の機構について

図-8は造波一時間後の模型底面と砂面との接触面積を模式的に示したもので、黒塗りの部分が砂との接触部分、白い部分は砂と非接触部分であり、立方体模型の場合である。実験によれば、まず、模型隅角部で生じた渦により隅角底面部がスリ鉢状に洗掘され、模型底面と砂面に隙間が隅角部にできる。この隙間は最初はフィルム状の1mm-3mm程度のものであるが、これが次第に隅角部から拡大されていき、模型の底部にある程度広がると模型が傾くことが観察された。この底面と砂面の隙間に強い往復流が実験では確認されたので、ブロック模型の洗掘と埋没を支配するのはブロック隅角部から形成される竜巻状の渦とブロック底面と砂面の隙間を流れる強い往復流であると考えられ、図-9に示すように、KC数(= $U_m T / \lambda$)の増大につれて埋没量は増大していくことが判明する。これは、KC数の増大につれて、ブロック模型周辺に大きな渦が形成されるとともに相対的に流速が速くなるので洗掘が進行し易くなるためである。ここで U_m は模型がないときの底面での線型理論で求めた最大水粒子速度、 λ は立方体の1辺の長さ $V_{s,z}$ は模型が初期底面の下に沈んだ体積、 V_l は立方体の体積である。図-9によれば、さらに設置方法がBの方がAの設置方法より埋没量が大きくなることが認められる。

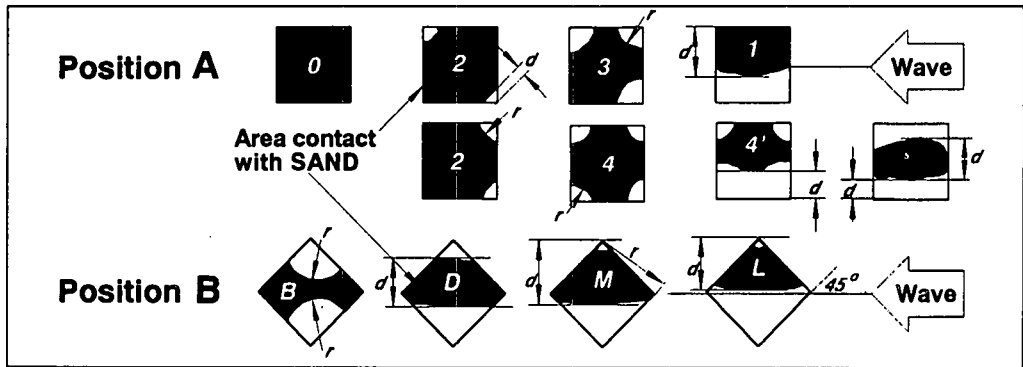


図-8 模型底面と砂面との接触面積を模式

以上をまとめると、埋没の機構は、1) 接触面積の減少による単位面積当たりの支持荷重の増加により模型の沈下が生じる。2) 隙間が次第に広がって行って或る限界に達すると、模型はバランスを失い隙間の間隙分だけ傾き隙間はなくなる。そして、また、スリ鉢状の洗掘部から新たな隙間が生じて広がって行くという同じサイクルが繰り返されて、徐々にスリ鉢状の方へ傾きながらまたは滑りながら沈んでいく。この時、底面の隅角部の位置は次第に低くなって、竜巻状の渦の発生位置も低くなり、洗掘深も或る限界まで深く洗掘されていく。3) 洗掘や隙間の広がりが必ず波向に対して対称にはならないため、一般的に模型も波向に対して非対称に傾く。したがって、波による模型周囲の流れが非対称になり、横方向の力が周期的に向きを変えながら模型に作用することになり、場所を周期的に変えながら底面に荷重が与えられる。といった三つの複合作用であると思われる。

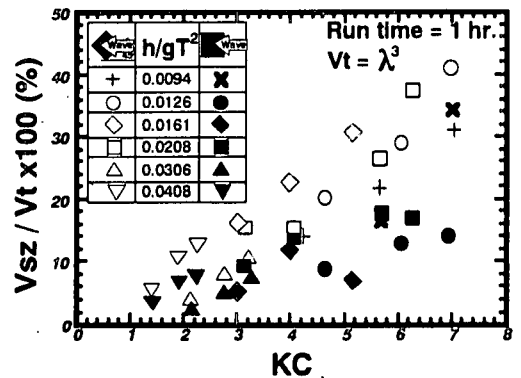


図-9 埋没量とKC数の関係

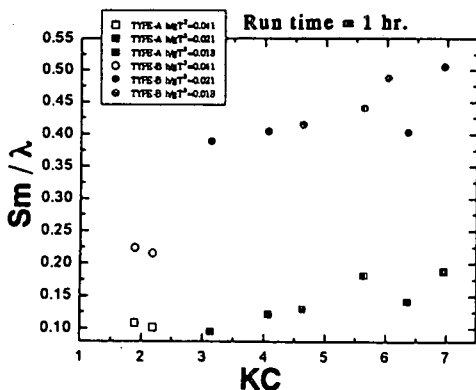


図-10 KC数と Sm/λ との関係

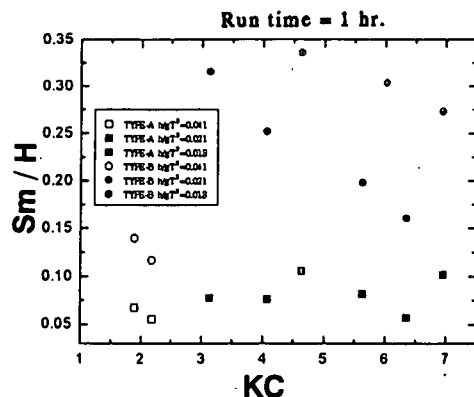


図-11 KC数と Sm/H との関係

3. 4 最大洗掘深と埋没量

実験の観察およびビデオ解析から、最大洗掘発生位置は、模型の傾きや滑り等がない限り時間的にほとんど変化しない。そして、最大洗掘深の時間変化は、波の作用の初期段階で急激に進行し、その後定常状態に至るまでは徐々に進むことが判った。図-10は正六面体の最大洗掘深 S_m を特性長 λ ($\lambda^3 = V_t$, V_t は模型の体積)で無次元化した量 S_m/λ とKC数の関係である。若干変動するが、一般的に最大洗掘深はKC数の増加しており、既述したようにKC数は渦の形成と密接な関連があるため渦の強度が強いほど洗掘深は大きくなることが分かる。図-11は最大洗掘深 S_m を波高 H で無次元化した量 S_m/H とKC数の関係をしめす。この図から最大洗掘深はかならずしも波高に比例して増加しないことが判る。

4. おわりに

水理実験の結果の検討して得られた主な結論をまとめると次のようになる。

- 1) 魚礁周りの局所洗掘は、構造物の形状により大きく異なり、特に隅角部の有無により顕著な差異が生じる。すなわち隅角部を持たない物体に比べて隅角部を有する物体の場合、局所洗掘の範囲、深さともに増加する。
- 2) 局所洗掘は物体の砂面に接する底面形状のみならず立体的な形状によって局所洗掘の様相は変化する。
- 3) 局所洗掘の発生場所は隅角部を中心とし、その形状は円形のスリ鉢状となる。ただし、入射波の周期が長くなると円形から楕円形に変化する。
- 4) KC数がかなり小さい範囲から物体の隅部から渦が発生する。この渦は流速の反転とともに移動するが、ほとんどの場合隅部の周辺にとどまる。
- 5) 局所洗掘の最大洗掘深はKC数の増加とともに増大するが、その値は物体の形状により変化する。
- 6) 魚礁周辺の局所洗掘は、隅角部より発生する渦に極めて大きく支配され、渦の存在範囲と局所洗掘の最大深とほぼ一致する。
- 7) 実験で、物体設置時に不整があり、隅角部に高低差が生じると、低い位置の隅角部周辺の魚礁周りの局所洗掘が一方向的に進行し、魚礁の傾きを助長する。
- 8) 埋没の機構は、隅角部底面がスリ鉢状に洗掘され、ここから板状の隙間が物体底面に沿って発達し、底面面積が減少してある限界に達すると次の三つの機構が各々または総合的に作用して埋没が進む。a) 支持荷重の増加による沈下、b) バランスが崩されて傾くかあるいは滑るか、c) ブロック模型の傾きによる流況変化から生じる力が周期的に底面に働くことによる沈下。

参考文献

- 1) 榎木亨, 松見吉晴: 魚礁背後の水平渦による地形変動機構について, 海岸工学論文集第30巻, 1983, pp. 288-291
- 2) 榎木亨, 松見吉晴, 北口雅章: 魚礁周辺の局所洗掘とその対策工法について, 海岸工学論文集第31巻, 1984, pp. 345-349
- 3) June-Q Kim, Norimi Mizutani and Koichiro Iwata: Experimental Study on the Local Scour and Embedment of Fish Reef by Wave Action in Shallow Water Depth, ECOSET'95, 1995, pp.168-173