

# 粒子法による波の遡上高の数値計算

## NUMERICAL SIMULATIONS OF WAVE RUN-UP BY KOSHIZUKA'S PARTICLE ANALYSIS

仲座栄三<sup>1</sup>・津嘉山正光<sup>2</sup>・牧野敏明<sup>3</sup>・比嘉真由美<sup>4</sup>・渡久地豊<sup>5</sup>

Eizo NAKAZA・Seikoh TUKAYAMA・Toshiaki Makino・Mayumi HIGA・Yutaka TOGUCHI

<sup>1</sup>正会員 工博 琉球大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒903-0123 沖縄県西原千原1番地)

<sup>2</sup>正会員 工博 琉球大学教授 工学部環境建設工学科 (〒903-0123 沖縄県西原千原1番地)

<sup>3</sup>琉球大学大学院 理工学研究科 (〒903-0123 沖縄県西原千原1番地)

<sup>4</sup>(有) 海岸環境調査研究所 (〒903-0125 沖縄県西原上原118-1)

<sup>5</sup>(株) 国建 (〒903-0015 沖縄県那覇市久茂地1-2-20)

There are a lot of researches on the run-up of waves which propagate onto plain beaches. The results from them have been contributing to the estimations of wave run-up height for the real planning of maritime structures and the managements of coastal zones. Contrary to this, however, not enough knowledge has been given on the run-up phenomena of long-period waves on complex beaches, because of the difficulty of numerical simulations of breaking and run-upping waves and restrictions of experimental equipments for long-period waves.

Koshizuka has developed a numerical simulation method for breaking and run-upping waves on a beach, based on the particle analysis. This Koshizuka's method is applied to analyze the run-up height of long-period waves such as Tsunami or solitary wave. The results are verified by Synolakis's experimental data for the run-up heights for the plain beach.

**Key words:** Numerical simulation, Wave run-up, Run-up height, Wave breaking, Particle method, Solitary wave

### 1. はじめに

通常の波に対する遡上問題を取り扱った研究は、古くから数多く行われており、それらの成果は実務設計などで有効利用されている。例えば、Hunt<sup>1)</sup>の経験式や Saville<sup>2)</sup>の実験結果などは、その代表例として挙げられよう。複断面海岸における波の遡上に関しては、Saville や中村ら<sup>3)</sup>の仮想勾配法がよく知られている。その他、通常の波の遡上に関する研究成果は数多くあり、実務設計においては、それらの成果で十分に対処できる場合が多い。

一方、津波など長周期の波を対象とした遡上高の研究も数多く行われている。しかし、この場合、対象とする波が長周期波ということもあり、とりわけ実験的研究は、通常の波の遡上実験に比較し、かなり限定されたものとなっているようである。

通常の波、すなわち10秒程度の周期を持つ波を対象とする場合であっても、沖縄諸島のサンゴ礁海岸やさらに複雑な海岸、あるいは構造物等が設置されているような海岸における波の遡上高を推定しようとする、従来の研究成果では説明できないような場合も多々ある。

さらに、津波などの遡上に対しては、従来の研究成果の多くが、一様斜面勾配を対象としており、護岸を越える時の遡上高や複断面海岸における遡上高算定には応用が困難なものとなっている。

ところで、数値計算などで波の遡上問題を解析する際の困難さは、自由表面の取り扱いや波の陸上遡上に伴う水域と陸域との境界の取り扱い方、すなわち移動境界の取り扱い方にある。

越塚<sup>4)</sup>は、粒子法を用いた波の砕波現象および遡上

現象を解析することに成功している。その後、この手法は、後藤ら<sup>5)</sup>によって波の砕波現象や越波など複雑な海岸の水理現象の数値解析に応用されている。

本研究では、越塚によって開発された粒子法を後藤らにならい、波の遡上現象の解明に応用するものである。

研究の最終目的は、リーフ海岸など複雑な断面を有する海岸における通常の波の遡上や津波など長周期の波の遡上現象等の解明にあるが、本論文は、粒子法の波の遡上現象への適用性の検証を行う目的から、入射波に孤立波を用い、長周期の波の遡上高の解析を主として取り扱うものである。

## 2. 数値解析

粒子法は、越塚<sup>4)</sup>により開発されたものであり、基本的には、Eulerの運動方程式を直接数値計算するものである。その詳細は、文献4)に詳しく論じられており、また後藤ら<sup>5)</sup>の文献にも紹介されているため、ここではその説明を割愛させて頂く。

図一1に計算に用いた水槽モデルを示す。モデルの長さの縮尺は1/100に設定されている。

図示のとおり、水槽の一端に静水深と波高値とから理論的に予測される孤立波の波形を静止水面で与え、静止状態から瞬間的に運動させることで孤立波を発生させた。また、水槽の他端には、海岸斜面を模した斜面を設け、波を遡上させている。海岸斜面は、1/20, 1/10, 1/5, 1/3の一樣勾配斜面の場合と、沖側を1/10勾配の斜面にし、岸側の斜面勾配を1/5および1/1.5と変化した場合の複断面海岸も計算対象とした。

なお、計算に用いた粒子の直径は、5mmであり、計算に用いた粒子の総計は6000～8000個であった。また、計算時の時間刻み幅は、何れのケースにあっても、0.001秒であった。

計算には、Intel系CPU(3GHz)のパーソナルコン

ピュータで1ケース当たり約5時間を要した。

孤立波の波形は、次式で与えている。

$$\eta = H \operatorname{sech}^2 \left( \sqrt{\frac{3H}{4h^3}} x \right) \quad (1)$$

ここに、 $\eta$ は孤立波の波形、 $H$ は孤立波の初期波高、 $h$ は静水深、 $x$ は最大波高位置からの距離である。

計算では、初期孤立波の波高を3cmから12cmと変化した。計算開始後、孤立波の波形は伝播と共に、静水状態で与えた初期波形よりも低下し、斜面前面では、初期波高の1/3程度の大きさになった。

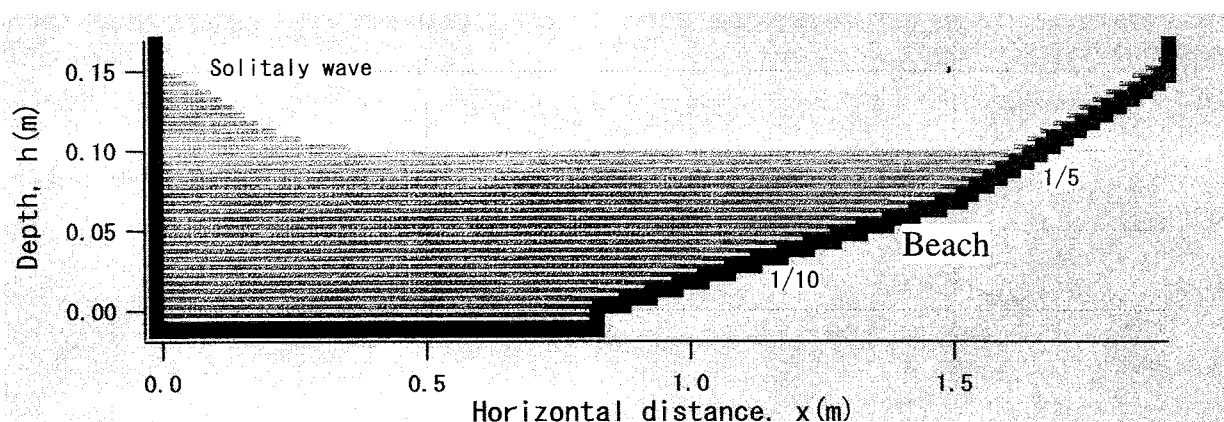
計算では、まず入射波の波高を確定するため、斜面を作らず、一樣水深の状態で孤立波を発生させ、伝播孤立波の波高が安定する位置での波高を読み取った。

続いて、斜面を有する場合の計算を行い、水深が一樣水深部から斜面部に変化する付近での波高を読み取り、一樣水深の場合の波高と比較した。その結果、それらの波高値に殆ど違いの無いことが確認されたため、入射波高としては、一樣水深で求めた波高値を用いることとした。

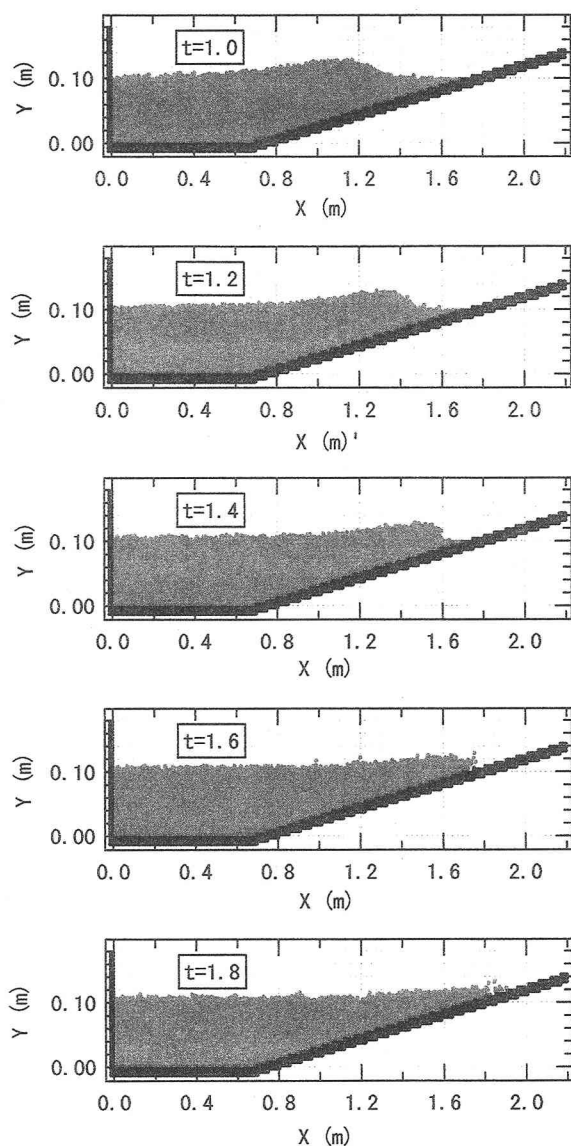
計算に用いたモデル水槽は、用いた入射波の波長スケールに比較し、短いものとなっているが、これは、数値粘性による波高減衰を抑える目的による。

図一2に、勾配1/10の一樣斜面に対する計算結果を示す。結果は、孤立波が砕波後、遡上していくまでの様子を0.2秒間隔で示している。また、図一3に、斜面勾配が1/3の場合の遡上の様子を0.2秒間隔で示す。

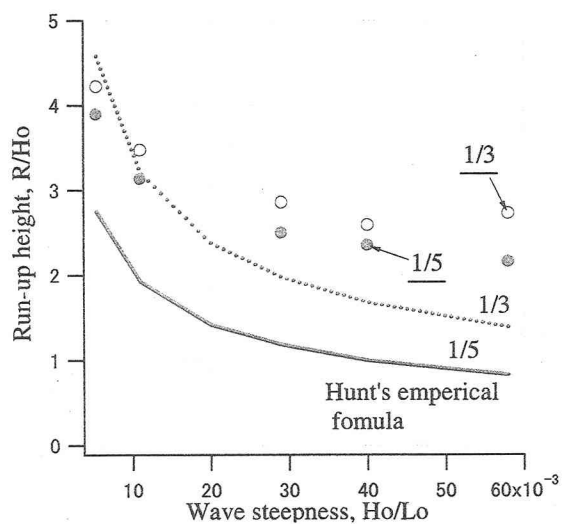
斜面勾配が1/10の場合、孤立波はPlunging型の砕波を発生させ遡上している。これに対し、斜面勾配が1/3の場合は、砕波形式はSurging型の砕波を発生させ遡上している。



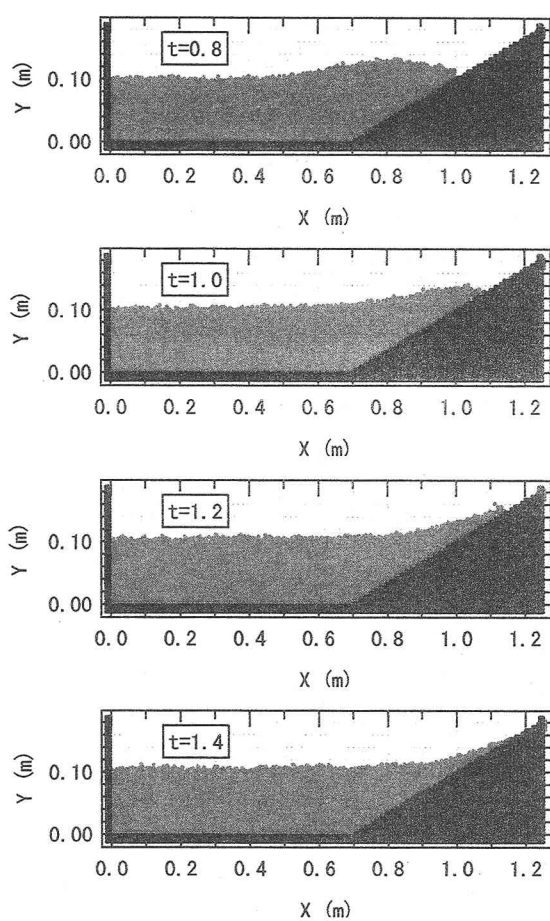
図一1 計算に用いた水槽モデル



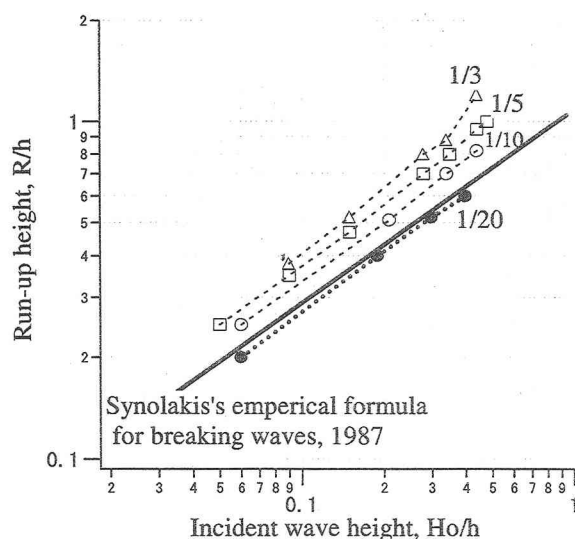
図一2 勾配 1/10 の一様斜面上を遡上する孤立波



図一4 Hunt の経験式との比較



図一3 勾配 1/3 の一様斜面上を遡上する孤立波



図一5 入射波高と遡上高との関係

ここで、孤立波の遡上高と Hunt の経験式より求める通常の波の遡上高との比較を行う。Hunt の経験式は次式で与えられている。

$$R/Ho = 1.01 \cdot \tan \alpha / (Ho/Lo)^{1/2} \quad (2)$$

ここに、 $R$  は遡上高、 $Ho$  は入射波高、 $\tan \alpha$  は斜面勾配、 $Ho/Lo$  は入射波の波形勾配である。

したがって、Hunt の経験式では、斜面勾配および波形勾配が遡上高を決定する重要なパラメータとなる。

孤立波の場合、厳密にいうと理論的に入射波長を決定することはできない。そこで、Synolakis<sup>3)</sup>

(1987) にならい、孤立波が作る水表面と静止水面間の高さが波高の 5% となる位置と波頂位置との水平長さの 2 倍をもって、便宜的に孤立波の波長と見なすことにした。

式 (1) に基づき、孤立波の波長  $Lo$  が次式で見積もられる。

$$Lo = 2Ho/\gamma \cdot \arccos h \left[ (1/0.05)^{1/2} \right] \quad (3)$$

$$\gamma = \left[ 3/4 (Ho/h)^3 \right]^{1/2} \quad (4)$$

図一 4 に、粒子法で求めた孤立波の遡上高と Hunt の経験式より求める通常の周期波の遡上高との比較を示す。

図中の破線および実線は、Hunt の経験式から求めた遡上高であり、○および●印は、孤立波に対する数値計算値である。図示のとおり、計算値と通常の周期波を対象とした Hunt の経験式による推定値とは異なる値を示している。斜面勾配が急な程遡上高が大きくなるとする傾向や遡上高が波形勾配に逆比例関係にあるとする傾向は似ているものの、それらのパラメータの遡上高への寄与率は周期波の場合と孤立波の場合とで異なることが示される。

同じ斜面勾配に対し、孤立波の遡上高は総じて周期波の遡上高よりも大きくなることを示している。

図一 5 に、入射波の波高と遡上高との相関を示す。Synolakis は勾配 1/20 の一様斜面に対する実験値をまとめている。図中には、計算値の妥当性を比較する目的から Synolakis がまとめた砕波を伴う場合の実験結果から得られた経験式を実線で示してある。

斜面勾配 1/20 に対する計算結果は、Synolakis の実験データを近似する経験式より若干低めの値を示しているものの、両者の一致度は非常に良いと言える。したがって、本解析手法の妥当性が示されたと言える。

孤立波の遡上高は、周期波の遡上高に対し、Hunt の経験式が示すように、斜面勾配が急になる程、遡上高が一様に大きくなることを示している。このことは、図一 2 および図一 3 に示すように、斜面勾配

が緩やかな程、砕波位置が沖側に位置し、砕波に伴うエネルギー減衰が長い距離に及び、結果としてトータルなエネルギーロスが大きくなることによるものと判断される。

次に、複断面海岸を孤立波が遡上する場合を考える。ここに示すのは、図一 1 に示すように、沖側の斜面勾配が 1/10 であり、岸側の斜面勾配が 1/1.5 および 1/5 の場合である。このとき、岸側斜面の法先水深と入射波高との比は、 $h/Ho = 0.7$  である。

図一 6 および図一 7 に、入射波高を 2.3cm に設定した場合における計算結果を示す。図には、0.2 秒ごとの波形を表してある。

図一 2 に示すように、勾配が 1/10 の一様斜面においては、孤立波は、Plunging 砕波を発生させているが、図一 6 に示す複断面で岸側斜面勾配が 1/1.5 の海岸モデルの場合には、Plunging 砕波を伴わず、岸側斜面に小さな Surging 砕波を伴い乗り上げている。

これに対し、図一 7 に示す岸側斜面勾配が 1/5 と比較的緩い勾配を持つ複断面海岸モデルの場合には、図一 2 に示す一様斜面勾配と同様な Plunging 砕波が岸側の斜面上で発生している。

複断面海岸に遡上する周期波を取り扱った Saville の実験結果は、岸側の斜面勾配が 1/1.5 の場合の遡上高は斜面勾配 1/5 の場合に比較し、約 2.5 倍も大きくなることを示している。これに対し、ここに示す計算結果は、両者の比が約 1.3 程度となることを与えた。

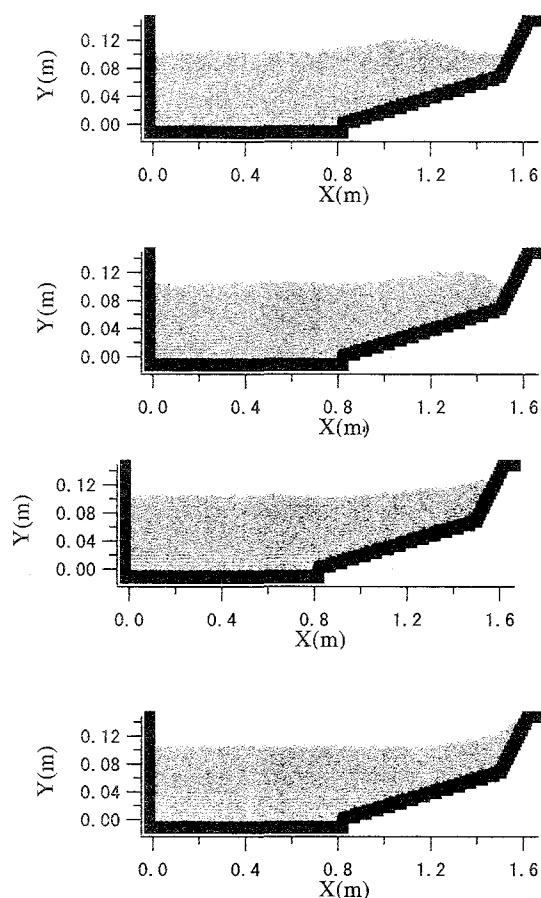
### 3. おわりに

越塚によって開発された粒子法 (MPS 法) を用い、孤立波の一様斜面および複断面斜面への遡上現象の数値解析を行った。

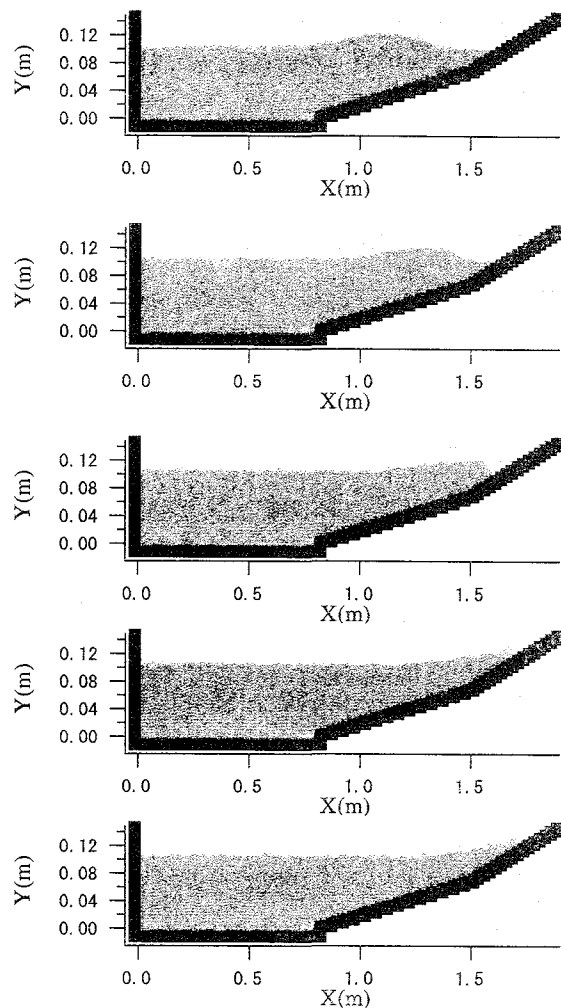
計算結果は、勾配 1/20 の一様斜面に対する Synolakis の実験結果との比較でその妥当性を検証した。ついで、Hunt の経験式から求められる周期波の遡上高と計算された孤立波の遡上高との比較を行い、孤立波の遡上高が周期波の遡上高より大きくなることを示した。

また、複断面海岸モデルに対する数値計算を行い、一様斜面の場合との比較を行った。

**謝辞：**本研究を行うに当たり、東京大学工学部越塚誠一助教授には、解析プログラムの提供や理論解析に関するご指導を頂いた。ここに記し、感謝の意を表す。



図一六 複断面斜面への孤立波の遡上  
(斜面勾配：沖側 1/10, 岸側 1/1.5)



図一七 複断面斜面への孤立波の遡上  
(斜面勾配：沖側 1/10, 岸側 1/5)

#### 参考文献

- 1) Hunt, I. A. Jr. : Design of sea-walls and breakwaters, Proc. ASCE, 126, PartIV, 1961, pp.542-570.
- 2) Saville, T. Jr. : Wave runup on shore structure, Proc. ASCE, Vol.82, Paper 925, 1956.
- 3) 中村充・佐々木康雄・山田譲二：複断面における波の打ち上げに関する研究, 第19回海岸工学論文集, 土木学会, pp. 309-312, 1972.
- 4) 越塚誠一：数値流体力学, 倍風館, 1997, 223p.
- 5) 後藤仁志・林稔・目見田哲・酒井哲郎：粒子法による直立護岸前面砕波・越波の数値シミュレーション, 土木学会論文集, No. 726, pp. 87-98, 2003.
- 6) Costas Emmanuel SYNOLAKIS: The runup of solitary waves, J. Fluid Mech. vol.185, pp.523-545, 1987.