

# 琉球大学学術リポジトリ

## 人工リーフ設置による長周期波の新たな発生

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2010-02-23 キーワード (Ja): キーワード (En): Long period waves, Surf beat, Artificial reef, Numerical simulation, Wave trapping 作成者: 仲座, 栄三, 津嘉山, 正光, 田中, 聰, Nakaza, Eizo, Tsukayama, Seikoh, Tanaka, Satoshi メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/15872">http://hdl.handle.net/20.500.12000/15872</a>

## 人工リーフ設置による長周期波の新たな発生

仲 座 栄 三\* 津嘉山 正 光\* 田 中 聰\*\*

### Numerical Simulation of Long Period Waves on a Flat Beach With an Artificial Reef

Eizo NAKAZA\* Seikoh TSUKAYAMA\*  
and Satoshi TANAKA\*\*

#### Abstract

Long period oscillations of sea water, which are generated by incoming wave groups, have been investigated by a numerical method, for the two cases of flat beach with or without an artificial reef. For the flat beachs, there are no long period waves on the beach as expected, except for the long waves existing as the standing waves resulted by reflected wave from the shore, uniformly distributed along the shore line. On the other hand, the long period waves are trapped on the reef or between the shore line and the reef front, widely exerted in frequency by incoming wave groups, the wave heights of the long period waves are larger than that for the flat beach without artificial structures. For the construction of the artificial reef on natural beachs, it is necessary to take into account the existing of long period waves, which is newly exerted on the beach due to the interaction effects between the artificial reefs and the incoming wave groups, may influence coastal phenomena such as the wave overtopping, run-up and sediment transport.

**Key Words:** Long period waves, Surf beat, Artificial reef, Numerical simulation, Wave trapping

#### 1. はじめに

砂浜の侵食や越波の著しい地域では、その防止対策として離岸堤や潜堤などの人工構造物設置が一般に行われている。最近では、景観上の問題などから、幅が広く、かつ構造物そのものが水面下にある幅広潜堤(すなわち、人工リーフ)の建設が奨励されているよう

ある。こうした潜堤を設計する際には、主に室内実験や、波の波高変化の算定を主目的とした数値波動解析による波高算定結果などが参考とされている。筆者らは、天然のリーフ海岸における波浪の現地観測結果から、リーフ海岸の場合、個々波のみでなく、長周期波が主要な水理・波動現象であることを見い出し、それと海岸における異常な水位上昇や波浪災害と

受理：1993年5月10日

\* 工学部土木工学科 Dept. of Civil Eng., Fac. of Eng.

\*\* 大学院工学研究科建設工学専攻 Graduate Student, Architectural and Civil Eng.

の関連を明かにしている。

人工リーフの建設は、個々波の波高を抑えるという目的ではかなりの成果を上げている。しかし、この人工リーフの設置は、上述の天然リーフ海岸における特異性と関連させて考えると、単純な自然海岸に新たな波動の振動モード（すなわち、明確な固有周期）を作り出す可能性が十分考えられる。もし、人工リーフ設置位置で長周期波のトラッピングが発生すると、その周りの海岸地形はその影響を大きく受けることになり、漂砂現象などに対して新たな問題を引き起こすことになる。

本研究は、人工リーフの設置により、海岸にどのような長周期波がトラップされるのか？それが周辺にどのような影響を及ぼすのかを数値計算によって検討したものである。以下では、この紀要が海岸工学のみでなく、工学の多くの分野を包括する機関誌であることから、専門的な用語に関しては必要に応じて説明を加えることとした。

## 2. 理論及び数値計算手法

### i) 「個々波」と「長周期波」との違い

はじめに、個々波と長周期波との定義をしておく。個々波 (Individual waves) とは、いわゆる“波”的ことである。すなわち、我々が海岸に立って眺めている“波”やサーフィンを楽しんでいる“波”それこそが「個々波」である。個々波の周期は、約3秒から10秒程度である。しかし、台風時などの場合、15秒にも達する（ここで述べている周期や波高のことは、海岸工学で定義するところの“有義波”に関するものである）。一方、長周期波とは、個々波よりも周期の長い波のこと、一般には30秒以上の波と言える。特に、来襲する個々波と関連し、何らかのメカニズムによって引き起こされる長周期波のことを一般に“サーフビート (Surf beat : 1948年 Munk によって名づけられた)”と呼ぶ。サーフビートとは、海岸近くの海面が非常に長い周期で振動している状態をいう。すなわち、砂浜などに立って海を眺めている時、突然、海面全体が盛り上がり波が遡上するはずのない足元まで押し寄せたりするときの(ビートを打っている)状態である。

B. Kinsman は、周期の長さによって海の波を分類する際に、電磁波の分類を参考にして、 $30^\circ \sim 5^\text{min}$  の周期を有する波を Infragravity waves と名命した。

台風時、リーフの先端付近で白い飛沫を上げて碎波

している波は、“個々波”である。外洋から来襲する個々波は、リーフの潜堤効果（リーフは波に対して一種の防波堤と言える）によって汀線近くでは非常に小さくなる。例えば、満潮時で2m程度の水深となるリーフ海岸における汀線付近の波の波高は、沖側で10m以上となっていても高々1m程度となる。しかし、長周期波の波高は、汀線付近で3.0mにも達することが筆者らの現地観測で明らかになりつつある。しかも、この長周期波は周期が1～5分程度と長く、まさしく「段波性の津波」のような現象である。長周期の波であるがゆえに、この「波」を人工的に消すことは非常に困難である（個々波ならばテトラポッドのようなブロックによって比較的簡単に消波できる）。事実、沖縄地方のリーフ海岸にある港湾・漁港の多くがこのサーフビートに付随する静振の存在に悩まされている。

写真-1は、台風時沖縄地方で一般に見られるリーフ海岸の波の状況である。リーフの沖側では波高が3mを越えるというのに、汀線では波静かである。

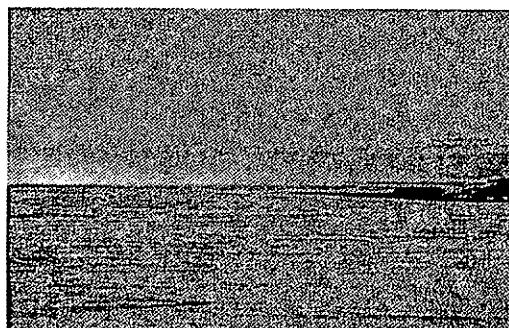
写真-2は、台風T8712号の際に発生した長周期波を示している。長周期波の波高は2mをゆうに越える。わずか数十秒の間に長周期波の発生によってリーフ上の海面全体が数mも上昇する。この現象は段波状の津波の来襲に似ており、あまりにも激しい現象である。

写真-3は、繰り返し襲う長周期波にぎりぎりに耐えているある漁港の姿を示しており、写真-4は防波堤を乗り越えた長周期波による漁船の被災状況を示している。写真-5は、長周期波の発生によって全壊した久米島北海岸の護岸の被災状況である。

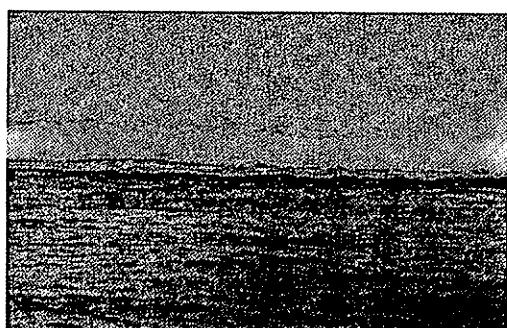
### ii) 基礎式

本研究では、長周期波の発生を、(来襲波の波高が時間的に変化することによって生じる) 波の Radiation Stress の時間的な変動によるものとしている。そのため、長周期波の計算には、予め個々波の波高分布が分かっていかなければならない。そのため、ここでは平面的な波の波高分布を放物型波動方程式を数値計算することによって得ることとした。用いた放物型波動方程式は、平口・丸山(1986)らが Radder の方程式を改良したもので次式で示される。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial x} = & \left[ i \left( k_x + \frac{k_y^2}{2k_x} \right) - \frac{1}{2k_x C_C g} \frac{\partial}{\partial x} (k_x C_C g) \right] \zeta \\ & + \frac{i}{2k_x C_C g} \frac{\partial}{\partial y} \left( C_C g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) - f_D' \zeta \end{aligned} \quad (1)$$



(a) リーフに来襲する波浪の碎波



(b) リーフ先端付近の波浪

台風時におけるリーフ上の波浪状況(1988・6・23)



(a) 汀線付近で波と戯れる子供



(b) 新原ビーチの波浪状況

汀線近傍におけるリーフ上の波浪状況(1988・6・23)

写真-1 台風時におけるリーフ海岸上の波の状況の一例

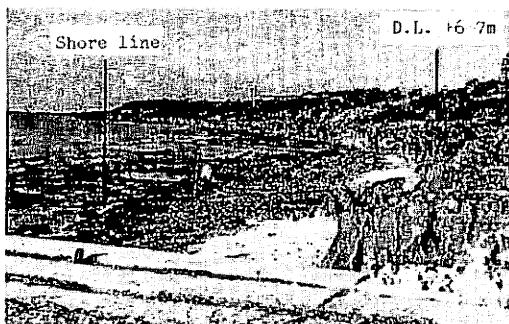


写真-2 (a) 静穏時の満潮時の汀線位置



(c) 09:22:15



(b) 09:22:00



(d) 09:22:30

写真-2 港川漁港付近で発生した波群津波(T 8712)

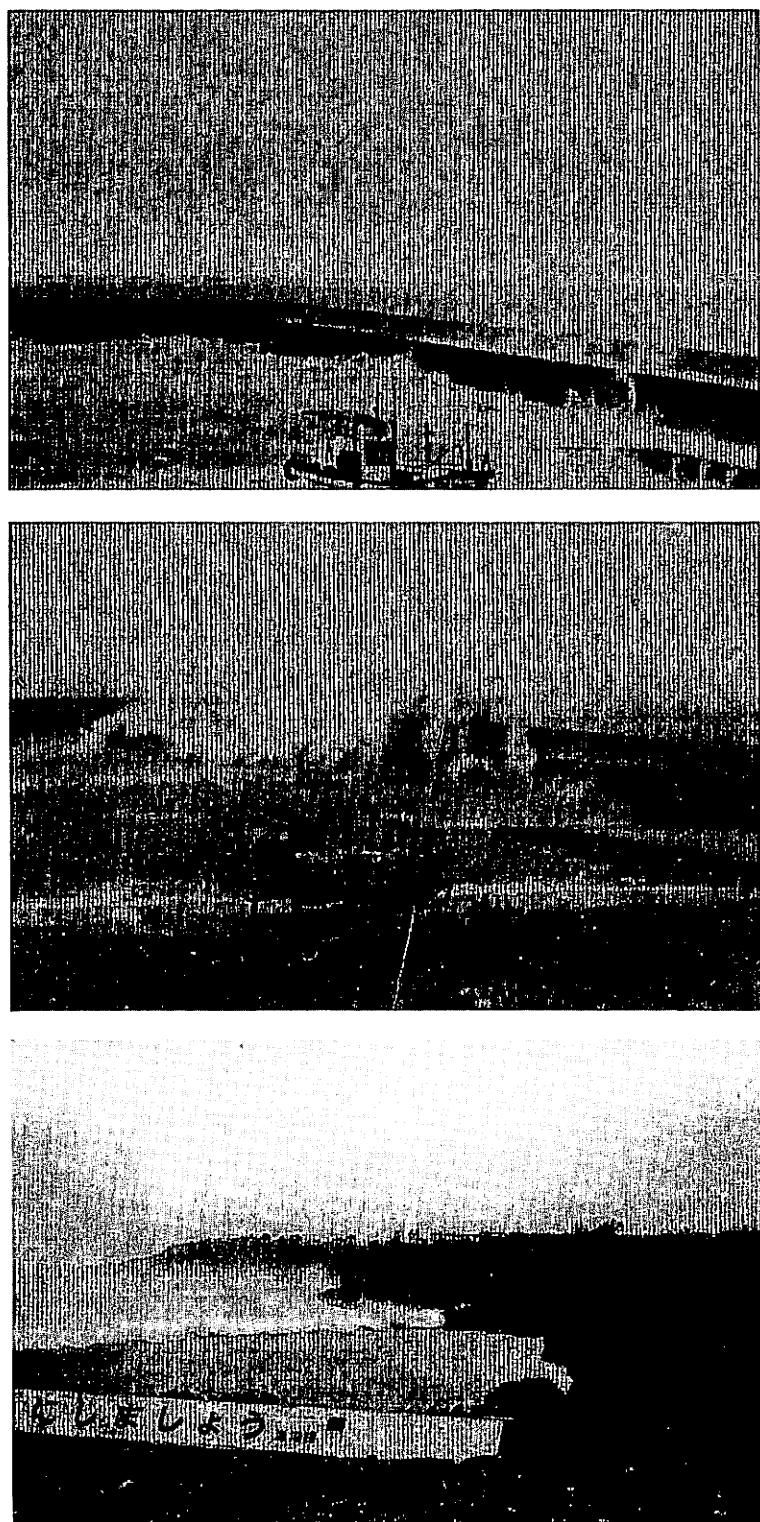


写真-3 繰り返し来襲する波群津波の猛威に耐える漁港(T9119)

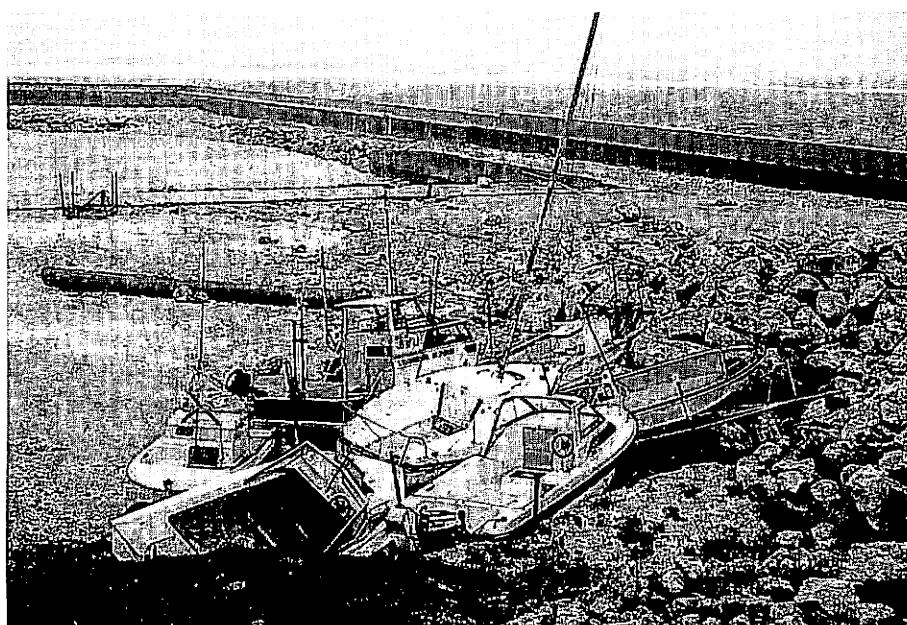


写真-4 漁船の被災状況(T 9119)

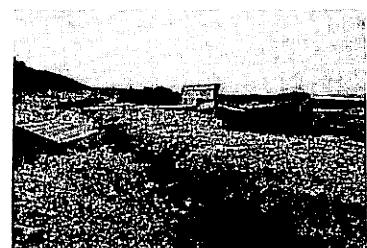
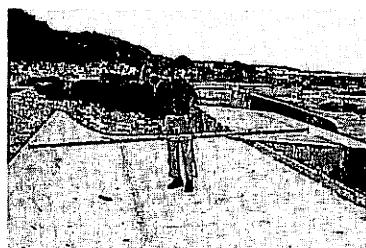
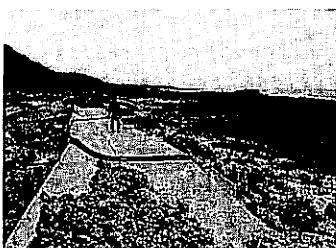
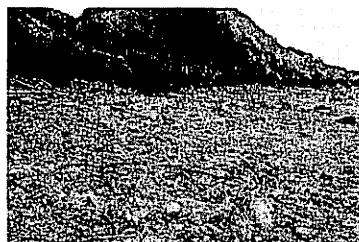


写真-5 久米島北海岸における護岸の被災状況(T 9021)

ここで、 $\zeta$ は水位変動、 $C$ は波速、 $C_g$ は群速度、 $K_x$ 及び $K_y$ はそれぞれ波数 $K$ の $x$ 及び $y$ 方向成分である。 $\zeta$ と振幅 $\xi$ との間には次式がなりたつ。

ここで、 $\chi$ は相関数である。また、 $f_D$ は碎波減衰項であり、平口・丸山らにならって次式で与えた。

$$\zeta = \xi e^{ix}$$

$$f'_D = \begin{cases} 0 & ; \text{碎波帯外} \\ \frac{\alpha_D S_D}{2h} \sqrt{\frac{\xi}{r_h - l}} & ; \text{碎波帯内} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $g$ は重力加速度、 $\alpha_D$ 及び $\gamma'$ は定数、 $S_D$ は平均海底勾配である。

一方、長周期波に関しては、次式で示すように、浅水方程式に波のRadiation Stressの項を付加したものである。

運動方程式：

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + F_x - M_x + R_x + g \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + F_y - M_y + R_y + g \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

連続の式：

$$\frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial t} + \frac{\partial U(h + \bar{\zeta})}{\partial x} + \frac{\partial V(h + \bar{\zeta})}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

ここで、 $\bar{\zeta}$ は平均海面の変動量、 $U$ 及び $V$ はそれぞれ流れの $x$ 及び $y$ 方向成分である。 $F$ は摩擦項、 $M$ は水平拡散項、 $R$ はRadiation Stress項を示し、それぞれ以下の式で示される（本間・堀川ら、1985）。

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \frac{C_f}{(h + \bar{\zeta})} \left\{ \left( W + \frac{W_b^2}{W} \cos^2 \alpha \right) U + \frac{W_b^2}{W} \sin \alpha \cos \alpha V \right\} \\ F_y &= \frac{C_f}{(h + \bar{\zeta})} \left\{ \left( \frac{W_b^2}{W} \sin \alpha \cos \alpha U + \left( W + \frac{W_b^2}{W} \sin^2 \alpha \right) V \right) \right\} \\ W &= \left\{ \sqrt{U^2 + V^2 + W_b^2 + 2(U \cos \alpha + V \sin \alpha) W_b} \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{U^2 + V^2 + W_b^2 - 2(U \cos \alpha + V \sin \alpha) W_b} \right\} / 2 \\ W_b &= \sigma H / \{ \pi \operatorname{sinh} k(h + \bar{\zeta}) \} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} M_x &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon \frac{\partial U}{\partial y} \right) \\ M_y &= \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon \frac{\partial V}{\partial y} \right) \\ \epsilon &= N \ell \sqrt{g(h + \bar{\zeta})} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} R_x &= \frac{l}{\rho(h + \bar{\zeta})} + \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \\ R_y &= \frac{l}{\rho(h + \bar{\zeta})} + \left( \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \\ S_{xx} &= E \left( \frac{C_g}{C} \cos^2 \theta + \frac{l}{2} \left( \frac{2C_g}{C} - 1 \right) \right) \\ S_{yy} &= E \left( \frac{C_g}{C} \sin^2 \theta + \frac{l}{2} \left( \frac{2C_g}{C} - 1 \right) \right) \\ E &= \frac{l}{8} \rho g H^2, \quad \rho g = I, \quad \rho = \frac{l}{g} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

### III) 人工リーフを設置した場合にトラップされる長周期波の振動モードと固有周期

この場合の基礎式は、波速を長波近似し、かつ線形化すると、次式のような波動方程式となる。

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} = gh \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \eta \quad (8)$$

ここで、 $\eta$ は水表面を示す。

ここで、 $\eta = \eta(x, y) \exp(-\sigma t)$  とすると、式(8)は次式のHelmholtzの方程式となる。

図-1にリーフ上で長周期波がトラップされる場合の基本振動モードを示す。この図に示すとおり、リーフ上で長周期波がトラップされる場合は、リーフの四辺で水位変動は節点となる。この境界条件と上の基礎式を満足する $\eta(x, y)$ の解は、次式で与えられる。

$$\eta(x, y) = \sum_{m=0}^{\infty} A_m \sin \left( \frac{m}{a} x \right) \sum_{n=0}^{\infty} B_n \sin \left( \frac{n}{b} y \right) \quad (9)$$

ここで、 $A_m$ 及び $B_n$ はフーリエ係数である。これらの式と、波数 $k$ の $x$ 及び $y$ 方向成分の関係、

$k^2 = k_x^2 + k_y^2$  から、この場合の固有周期が次式のように求められる。

$$T_{n,m} = \frac{2}{\sqrt{gh}} \left\{ \left( \frac{m}{a} \right)^2 + \left( \frac{n}{b} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (10)$$

この式に後で示すリーフの形状を代入して、例えば、 $m = 1$ 、 $n = 1$ なるモードに対する固有周期として、 $T_{1,1} = 31.0s$  が得られる。

一方、人工リーフと汀線位置で腹を有し、さらに、汀線位置における沿岸方向の振動が人工リーフの背後で腹を有するモードとなる長周期波の固有周期も上述と同様に求められ、この場合の固有周期は $T' = 44.0s$ となる。

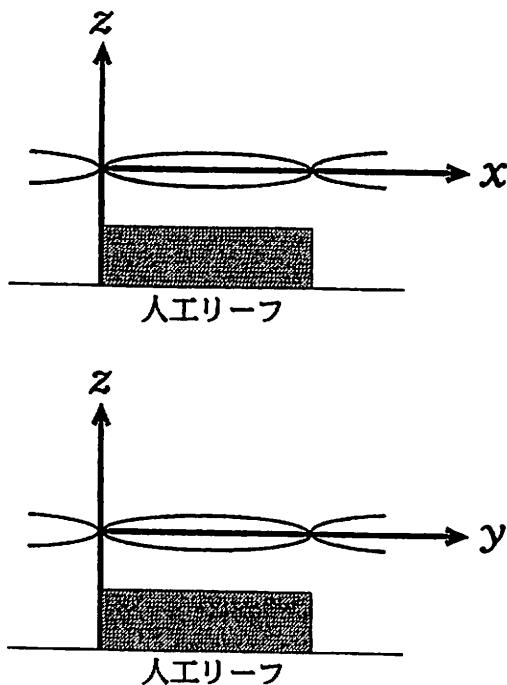


図-1 長周期波の基本モード

### III) 数値計算手法

長周期波の数値計算は、以下の手順によって行った。

#### (1)個々波の波高の平面分布の計算

まず、最大波高を有する個々波の波高分布を放物型波动方程式により求める。次に最小波高に関して同様な計算を行う。求めた最大波高と最小波高から平均波高と波高の変調率の平面分布を求める。

#### (2)位相差の計算

沖側境界で位相差をゼロとし、波の群速度を用いて沖側から岸側に向けて位相差を計算する。これは、入射波群に伴う波高が位相速度で岸側に伝播することを考慮するためのものである。

#### (3)浅水方程式による長周期波の数値計算

以上の計算値を基に、波の Radiation Stress を計算し、浅水方程式の非定常数値計算によって、水面変動の時間変化を得る。

長周期波の数値計算における沖側境界条件の設定には、日野・仲座(1988)らの手法を用いている。図-2 に境界条件の検証のために行われた数値計算結果を示す。計算では、正方形の計算領域を想定し、境界付近の水位を持ち上げて瞬間に離し、その後の水面変動を計算したものである。図示のとおり、領域内で出来た波は計算領域の四方でスムーズに透過しており、本

境界条件の妥当性が示される。

図-3 に、本研究で対象としたモデル海岸の断面と平面図を示す。図示のとおり、人工リーフの幅は 50.0m、長さは 200.0m、天端水深は 1.0m である。また、リーフ先端から沖側の法面勾配は 1/5 である。一方、人工リーフ設置前の自然の海岸は、海底勾配 1/30 の一様斜面海岸である。

計算では、入射波群の平均波高を 5.0m、波高変調率を平均波高の 50.0% とした。

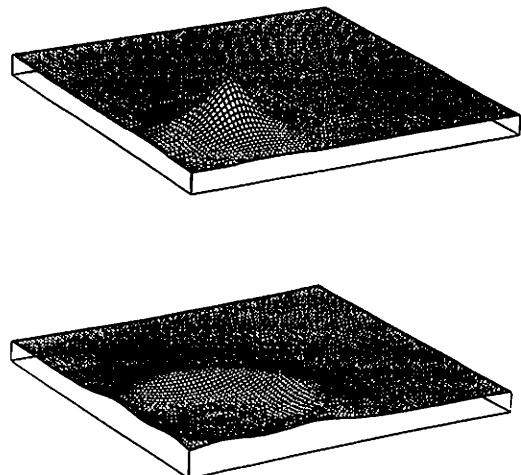


図-2 透過境界の条件の検証

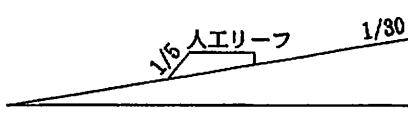
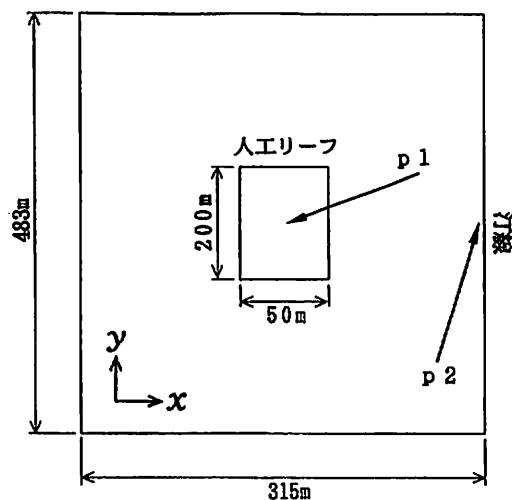
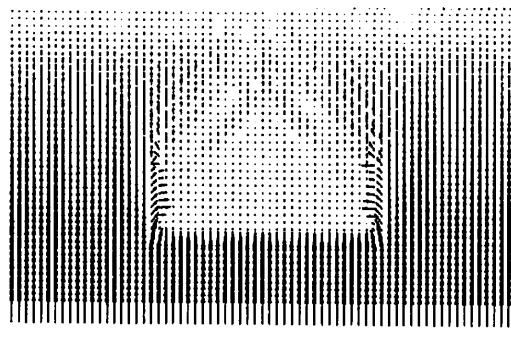


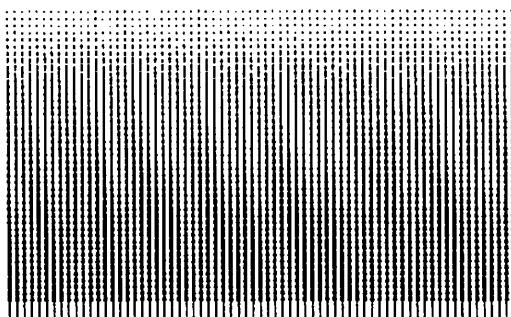
図-3 モデル海岸概略図

### 3. 計算結果及び考察

図-4(a)(b)に人工リーフを設置した場合と設置しない場合の波高分布を示す。ベクトルの向きは波向を示し、大きさは波高の大きさを示す。図示のとおり、人工リーフの背後は人工リーフの潜堤効果によって波高が比較的小さくなっている。



(a) 人工リーフ有

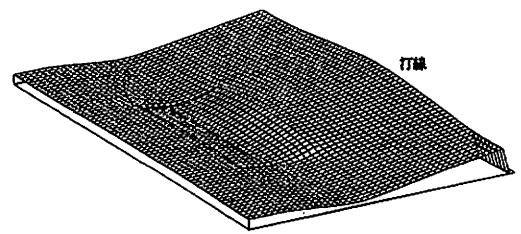


(b) 人工リーフ無

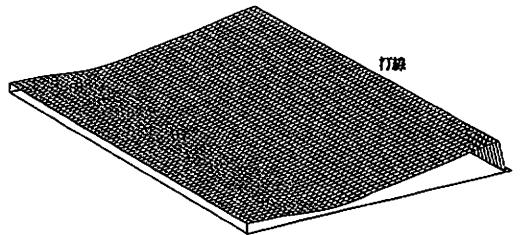
図-4 波高分布

図-5(a)(b)に波群の周期を100.0sとした場合の長周期波の振幅(r.m.s.値)の計算結果を示す。図示のとおり、人工リーフを設置した場合と設置しない場合とでは余り違いが見られない。設置した場合に、人工リーフの周辺で僅かに振幅の変化が見られるのみである。また、汀線近傍の値も沿岸方向にはほぼ一様である。

図-6に波群周期が40.0秒の場合における計算結果を示す(人工リーフを設置した場合)。この場合には、人工リーフと汀線との間に、汀線とリーフ後端部とに腹を有する長周期波がトラップされている。その結果、沿岸沿いに進行する長周期波の発生も認められる。図-7(a)(b)は、波群周期が30.0秒の場合の計算結果



(a) [Tg=100.0s] (人工リーフ有)



(b) [Tg=100.0s] (人工リーフ無)

図-5 長周期波の波高の平面分布

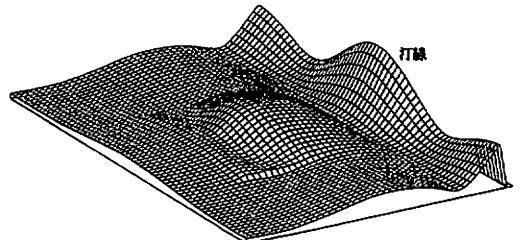
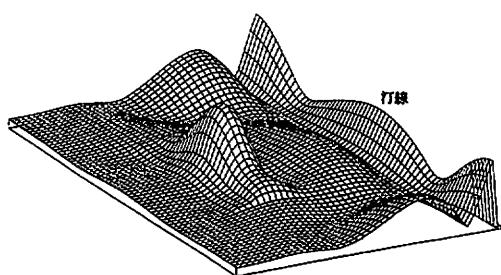


図-6 長周期波の波高の平面分布

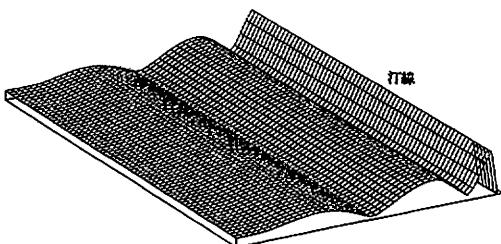
[Tg=40.0s] (人工リーフ有)

である。図示のとおり、人工リーフ上で一次のモードの長周期波がトラップされている。しかし、汀線沿の長周期波は小さくなっている。図(b)に示す人工リーフを設置しない場合の長周期波は沿岸方向に一様であり、図(a)の人工リーフを設置した場合と大きく異なる。図-8は、波群周期を27.5秒とした場合の計算結果である。この場合、リーフ上に三次のモードの長周期波がトラップされると同時に、リーフと汀線との間にも二次のモードの長周期波がトラップされている。

図-9は、図-3にP1及びP2の記号で示す位置で、人工リーフを設置した場合と設置しない場合における水面の周波数応答を示している。図(a)が人工リーフを設置した場合であり、図(b)は人工リーフを設置しない場合に対応している。また、図中の△印は



(a) [Tg=30.0s] (人工リーフ有)



(b) [Tg=30.0s] (人工リーフ無)

図-7 長周期波の波高の平面分布

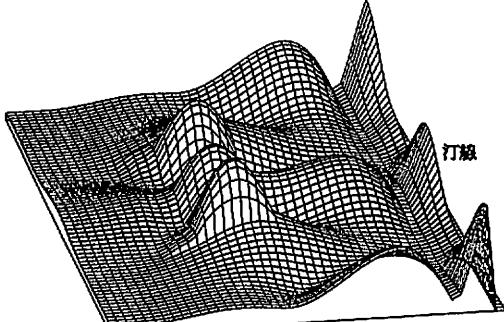
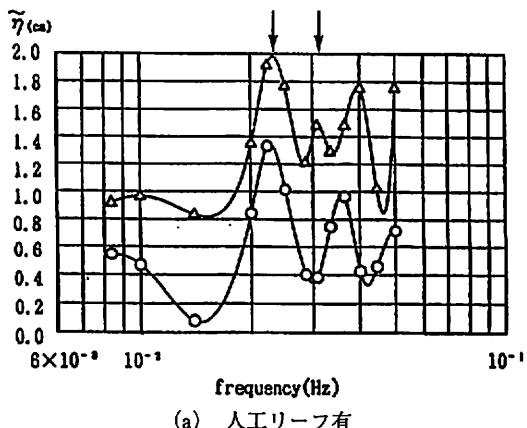


図-8 長周期波の波高の平面分布

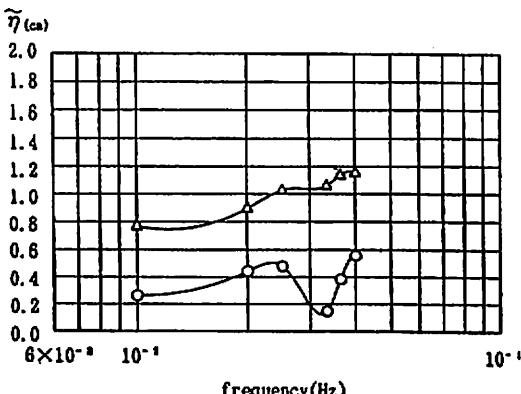
[Tg=27.5s] (人工リーフ有)

汀線位置(P2)の値であり、○印は人工リーフを設置する位置(P1)の値に対応している。図示のとおり、人工リーフを設置した場合の水面の周波数応答はいくつかのピークを有している。特に、矢印で示した位置における周波数は、前節で求めた線形理論による海岸の固有周期に対応しており、数値計算によるピーク周波数とほぼ一致する。一方、人工リーフを設置していない自然の海岸における汀線位置では、周波数応答曲線のピークは見られない(P1で、極大・極小が見られるのは、長周期波が岸沖方向に重複波を形成することによって生じる見かけ上のものである)。また、人工リーフを設置した場合の周波数応答値は、設置していない場合に比較して全体的に大きい。

以上で説明したように、人工リーフの設置によって



(a) 人工リーフ有



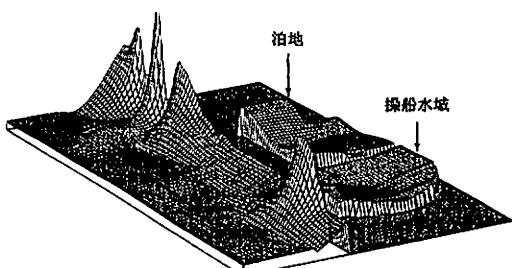
(b) 人工リーフ無

図-9 水位の周波数応答

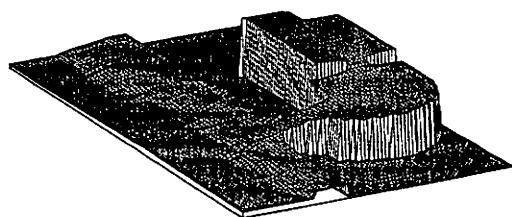
新しく発生した長周期波は、汀線付近でその振幅が最大となるため、沿岸漂砂や波の越波・週上問題に大きな影響を及ぼすことが十分考えられる。特に、人工リーフの平面規模が大きくなればなる程、長周期の波がトラップされ易くなることが予想される。人工リーフの設置は、これまで主として個々波の波高減衰効果のみの観点からその必要性が検討されてきたが、今後ここで述べた長周期波の発生という新しい観点からの検討が必要とされる。

最後に、長周期波に対する本シミュレーション手法を実際の現地海岸に適応した例を示す。

図-10(a),(b)は、現在計画・施工中の南大東漁港周辺に発生する長周期波や港内静振の計算結果である。この場合、波群中の平均波高は5.0mであり、周期は11.0sである。また、波群に伴う波高の変調率は平均波高の50.0%としてある。図示の通り、高波の線



(a) 波群周期Tg=38.0s



(b) 波群周期Tg=310.0s

図-10 南大東漁港周辺に波群によって引き起こされる長周期波の計算例

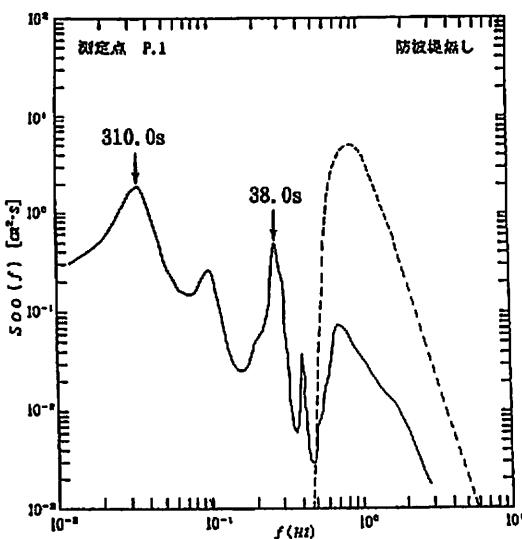


図-11 泊地内の水位の周波数応答

り返し平均周期（波群周期）が38.0sの波群が来襲する場合は、汀線付近の陸棚で長周期波のトラッピング現象が見られる。泊地内は、操船水域内の第一次のモードの静振が起引となって生じる静振が発生している。一方、図(b)に示す波群周期310.0sの入射波群の場合

には、汀線付近における長周期波のトラッピングは消え、漁港内部でのみ極めて大きな静振が発生している。図-11は、実験によって得られた泊地内の水位の周波数応答である。図示のとおり、数値計算でシミュレートした周期に対応する周波数でスペクトルのピークが現れており、このピーク周期に対応する港内静振は図-10で示した振動モードを取ることになる。

#### 4. おわりに

本研究では、明確な固有周期を持たない自然海岸に人工リーフを設置することによって新たに発生する長周期波の挙動を数値計算によって検討した。その結果、人工リーフ上やリーフと汀線との間に長周期波がトラップされ、それが沿岸方向に進行する長周期波をも引き起こすことが見いだされた。このメカニズムによって発生した長周期波は、沿岸漂砂や波の越波・週上問題にも大きな影響を及ぼすことが推測され、来襲波から海岸を護るために設置した人工リーフがかえって新たな災害を引き起こす可能性のあること等を示した。しかしながら、ここで議論した数値計算結果では波と流れとの干渉効果がまったく考慮されてなく、実験値や現地観測値との比較もなされていない。これらのことに関しては現在検討中であり、別の機会に報告する予定である。

#### 謝辞

本研究の一部は、文部省科学研究費、一般研究（B）（研究代表者：仲座栄三）の援助を受けて行われた。ここに記して感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 仲座栄三・津嘉山正光・田中聰・安里和政・有川勇三 (1992) : 碎波帯内の長周期波に関する研究, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.191-194.
- 平口博丸・丸山康樹(1986) : 斜め入射波に対する放物型方程式の適用性の拡張, 第33回海岸工学講演会論文集, pp.114-118.
- 本間仁監修・堀川清司編(1985) : 海岸環境工学, 東京大学出版会, p.582.
- Munk W.H. (1949) : Surf Beats, Trans. A.G.U., Vol.30, No.6, pp.81-92.