

リーフ上とその周辺の波による流れ場の形成に関する数値計算とその検証

VERIFICATION OF WAVE-INDUCED CURRENT ON A REEF SIMULATED WITH BOUSSINESQ-TYPE WAVE TRANSFORMATION MODEL

平山克也¹・長谷川準三²・南 靖彦³

Katsuya HIRAYAMA, Junzo HASEGAWA and Yasuhiko MINAMI

¹正会員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 (独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部波浪研究室

³ 工修 (独法) 港湾空港技術研究所 海洋・水工部波浪研究室

Wave-induced currents in a surf zone have been simulated with Boussinesq-type wave transformation model considering wave breaking and runup. In this paper, two kinds of the averaged current fields estimated by different ways are shown. One is calculated with the gradient of radiation stress given by the distribution of wave height and the other is directly given by momentum flux, simulated in surf zone.

Both the averaged current fields estimated by the numerical simulation on a sloping beach or an actual reef agree with the results of model experiments in the flow pattern and velocity. Thus, it is confirmed that the depth-averaged flows in surf zone are calculated by using Boussinesq-type wave transformation model with good accuracy though the vertical distributions of water flow including the undertow are not focused.

Key Words : Wave transformation, wave-induced current, reef, Boussinesq model

1. はじめに

浅瀬が広がり静穏な海域が形成されるリーフ内は、しばしば海洋構造物建設の候補地として選定される。高山ら¹⁾は、リーフ前面での碎波とそれによる平均水位上昇を考慮して、リーフ上の波高分布を推定する実験式を提案した。また、平石ら²⁾は、外洋に顕在する孤立リーフに対して多方向不規則波を作用させた平面模型実験を実施して、リーフ内では波高が低減する代わりに速い流れが発生し、構造物の設計に支配的な要因となることを指摘した。

一方、申ら³⁾は、海浜地形の沖合に設置された不透過の離岸堤背後に形成される流れ場の再現計算を行い、波の遡上を考慮しないブシネスクモデルを用いた場合には、水平流速ベクトルを時間平均して得られる平均流よりも、平面波高分布の計算結果から算定したradiation応力を用いて別途推定される流れのほうが、模型実験で計測された流れの分布特性をよく説明できることを示した。さらに、平山・平石^{4)・5)}は、浅海域での波の碎波と遡上変形を計算できるブシネスクモデルを用いて、模型実験で計

測された現地リーフ地形上の平面波高分布を良好に再現できることを示した。しかしながら、リーフ上の流れ場の再現性に関しては特に言及されていない。

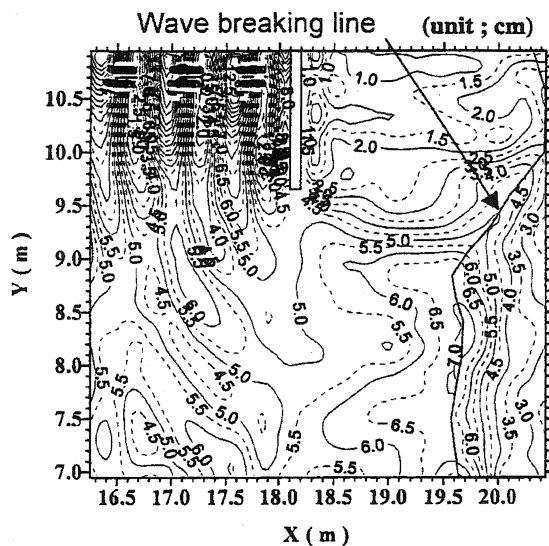
そこで本研究では、海浜地形の場合と同様に、リーフ周辺の波高分布の計算結果を用いてradiation応力を求め、これから算定されるリーフ上の流れ分布、および波の遡上を考慮したブシネスクモデルによって直接算定される流れ分布をそれぞれ模型実験結果と比較し、リーフ上の波による流れの計算精度を検証する。

2. 離岸堤背後の波・流れ場の再現性

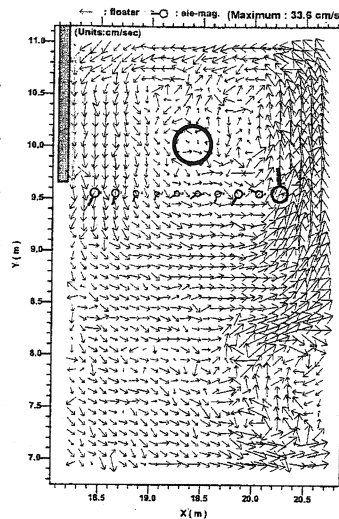
申ら³⁾が実施した一様斜面上の離岸堤周辺の波・流れ場を対象とした模型実験とその再現計算に対し、新たに碎波・遡上モデルが組み込まれたブシネスクモデルを用いて同様の再現計算を行い、その精度を検証した。

(1) 申ら³⁾による研究

勾配1/20, 長さ20m, 幅9m, 深さ0.6mの平面波動水槽を用いた水理模型実験では、汀線から3m離れた碎波帯



(a) 離岸堤周辺の波高分布



(b) 離岸堤周辺の平均流速分布

図-1 離岸堤周辺の波と流れ場の形成に関する模型実験結果 (申ら³⁾)

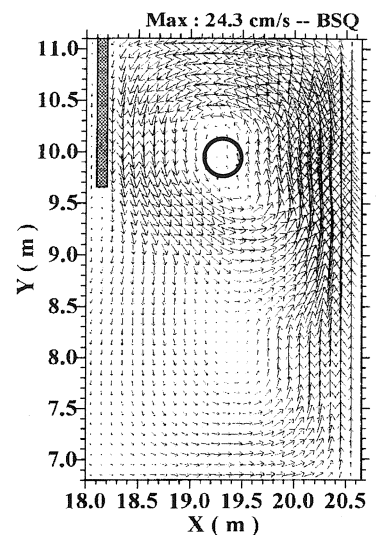


図-2 radiation応力による平均流速分布 (申ら³⁾)

外 (水深15cm) に、側方の固定境界からの長さが1.5mの不透過の離岸堤を設置し、沖の造波境界 (水深45cm一定) から波高5cm, 周期1.0s (波形勾配0.032) の規則波を入射させた。実験の結果、離岸堤を含む岸沖方向4.0m×沿岸方向4.6mの範囲で計測された波高分布、およびその岸側半分にあたる離岸堤背後で計測された平均流速分布 (定常流) は、それぞれ図-1のようであった。

一方、Madsenら⁶⁾ による式に碎波による水平運動量混合項および底面摩擦項を加えたブシネスクモデルを用いて行った再現計算 (空間格子間隔 $\Delta x = \Delta y = 0.1\text{m}$, 時間差分間隔 $\Delta t = 0.05\text{s}$) では、算定された波高分布は実験結果と比較的よく一致するものの、流量fluxから直接算定される水深平均流速を時間平均して得られる平均流速分布は、流れの強さや離岸堤背後に形成される循環流中心の出現位置に違いが生じたようである。そこで彼らは、ブシネスク計算で得られた波高と波向の分布からradiation応力を算定し、これを入力した海浜流モデルによって別途、平均流速分布を算定した (図-2)。そして、この方法による算定結果では、実験で出現した循環流の中心位置をよく再現することを確認している。ここで、実験で得られた平均流速の最大値に対する計算値の比を再現率と定義すると、その値は約72%であった。

(2) 碎波・遡上を考慮したブシネスクモデル

平山・平石^{4) 5)} は、乱れエネルギーの生成項に時間発展型のBoreモデルを適用した乱流モデルに基づく碎波モデルと、汀線移動や海底面の露出を許容する遡上モデルを新たに開発した。そしてこれらをMadsenら⁶⁾ の式を基礎とするブシネスクモデルに組み込み、海浜や現地リーフ地形上の碎波・遡上計算を行って、海浜遡上時の汀線移動や引き波時のリーフ崖の露出なども表現しつつ、碎波帯内外の波高分布を極めて高精度に算定できることを示した。

上述の再現計算で申ら³⁾ が用いたブシネスクモデルで

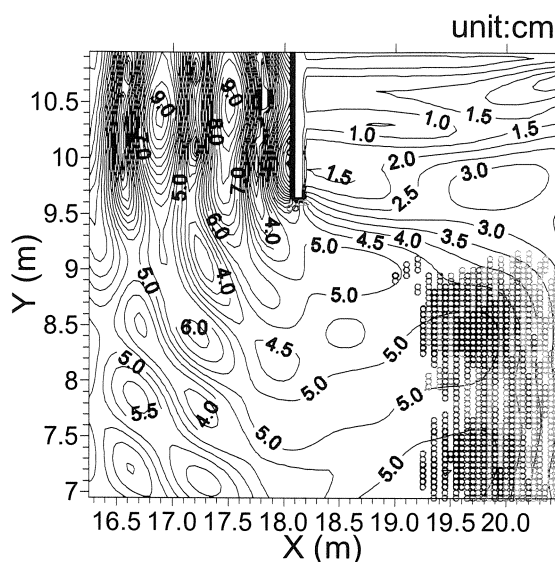
は、遡上境界処理が行われていないため、汀線近傍の波高や平均水位の分布が正しく算定されていない可能性がある。また、碎波による波浪減衰を表現するために設定された渦動粘性係数の分布は、一様勾配斜面上の碎波を対象として経験的に得られたものであった。つまり、流量fluxから直接算定される平均流速分布が実験結果をうまく再現しなかったことには、境界処理に関するこれらの不正確さも影響していたものと考えられる。

そこで以下では、より汎用的かつ客観的な碎波・遡上モデルを備えたブシネスクモデルを用いて、再度、申ら³⁾ による模型実験の再現計算を行い、離岸堤背後に形成される定常流の算定に対する適用性を検証した。

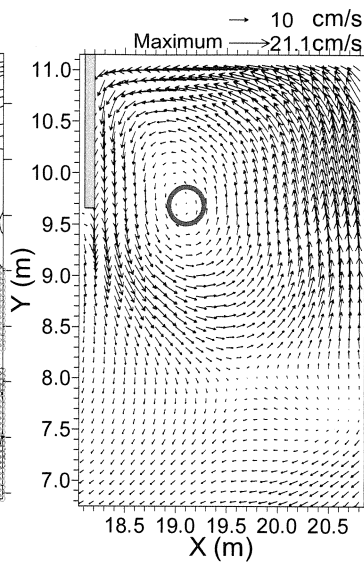
(3) 実験結果に対する再現計算

本研究で用いた、碎波・遡上モデルを備えたブシネスクモデルで計算された離岸堤周辺の波高分布および平均流速分布を図-3に示す ($\Delta x = \Delta y = 0.05\text{m}$, $\Delta t = 2.5 \times 10^{-3}\text{s}$)。図-3(a)中の各点は鉛直方向圧力勾配による碎波判定 (< 0.7) が行われた場所を示し、濃い色ほど碎波時の水位が高い。これらの最も沖側の点を結んだ碎波線の位置や離岸堤背後の波高分布などは、実験結果 (図-1(a)) を非常によく再現している。ただし、ブシネスクモデルの弱非線形性のために、今回の計算においても、実験結果にみられる碎波直前の波高増大に関しては十分に再現できていないことに注意を要する。

つぎに、流量fluxから直接算定される離岸堤背後の平均流の分布を実験結果と比較した (図-1(b)および図-3(b))。申ら³⁾ が行った再現計算の結果では、循環流の中心が離岸堤による遮蔽域の外に出現し、実験結果に対する平均流速の最大値の再現率は、約34%であった。これに対し、遡上計算を行った本研究では実験結果と同様に離岸堤の背後に循環流の中心が現れるなど、本研究で行ったブシネスク計算で直接算定された平均流速分布は、全体的に実験結果の傾向を表現できていることを確認し



(a) 離岸堤周辺の波高分布



(b) 離岸堤周辺の平均流速分布

図-3 離岸堤周辺の波と流れ場の形成に関する再現計算結果（本研究）

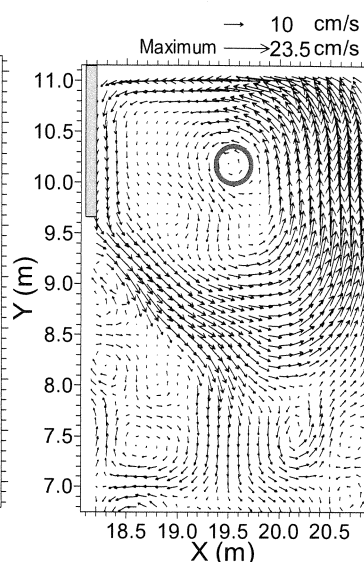
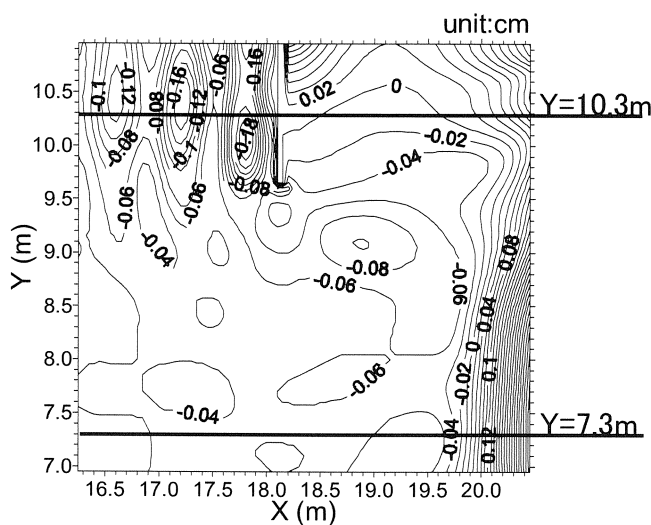
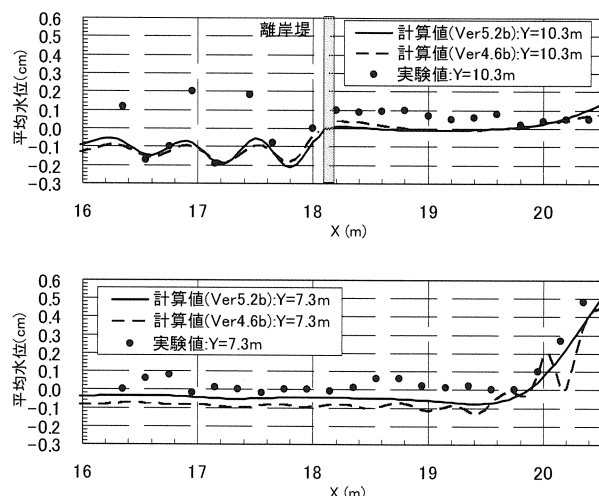


図-4 radiation応力による平均流速分布（本研究）



(a) 再現計算結果（本研究）



(b) 2測線上で得られた平均水位分布の比較

図-5 離岸堤周辺および2測線上の平均水位分布

た。また、平均流速の最大値の再現率も約63%にまで改善された。これらは、砕波と遡上が計算できるブシネスクモデルによって、砕波による波高減衰と平均水位上昇、および波の遡上変形が、汀線付近までより正確に算定できたことに起因するものと考えられる。

さらに、ブシネスク計算で算定された波高分布と、別途エネルギー平衡方程式法を用いて算定した波向分布からradiation応力を求め、それらの勾配を海浜流モデルに代入して得られた平均流速分布を図-4に示す。ここで算定された循環流の中心位置は、申ら³⁾が得た結果（図-2）よりも若干岸側に出現するものの、循環流の傾向などは流量fluxから直接算定したものと比較的良好に似ている。平均流速の最大値の再現率は約70%であり、流量fluxから直接算定されたものよりもやや高い。しかし、離岸堤背後の遮蔽域での流れは全体的にやや遅く、実験

や流量flux、radiation応力によって申ら³⁾が得た結果の傾向とは異なっている。この原因の1つには、離岸堤背後の波向分布の算定に、厳密には波の回折変形を算定できないエネルギー平衡方程式法を用いたことが挙げられる。一方、例えば平山・峯村⁹⁾による方法を採用して、ブシネスク計算において直接、波向（波速）ベクトルを算定することも考えられる。しかしながら、この方法は進行波を対象としたものであるため、回折波と側方境界からの反射波が重畳する海域などのように、卓越波向が複数存在する波浪場へそのまま適用することは困難であった。

最後に、本研究で用いたブシネスクモデルで計算された、離岸堤周辺および2測線上の平均水位分布を図-5に示す。このうち、平面分布（図-5(a)）を図-3(a)に示した波高分布と比較すると、波高が増大する海浜前面の砕波帯外で平均水位が低下し、波高が減衰する離岸堤背後

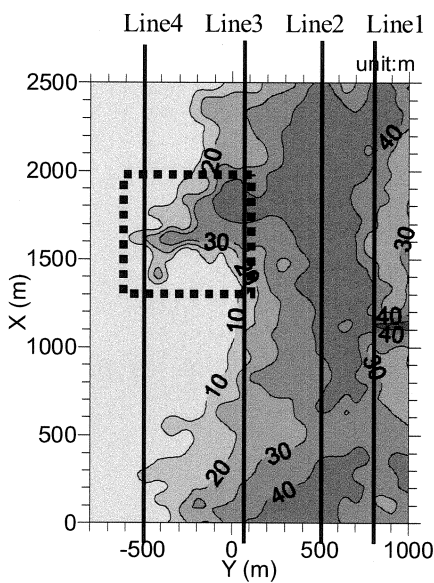
や碎波帯内で平均水位が上昇していることが確認できる。また、前面に離岸堤がない海浜での測線 (Y=7.3m) 上の平均水位分布をみると、実線で示した本研究による計算値は、●印で示した実験値よりも全体的に小さめであるが、碎波帯内で平均水位が上昇する傾向などはよく再現されていることがわかる。さらに、前面に離岸堤を設置した海浜での測線 (Y=10.3m) 上では、離岸堤背後で平均水位が一定または上昇する様子が算定されている。なお、点線で示した計算値は、経験的な渦動粘性係数に基づく碎波モデルを用い、遡上計算を行わないブシネスクモデルで算定された結果であり、申ら³⁾が行った再現計算とほぼ同様な値が得られていると考えられる。これらの結果に比べ、本研究で行った再現計算は特に前者でより実験値に近い値を算定していることが確認できる。

3. 現地リーフ地形上の波・流れ場の再現性

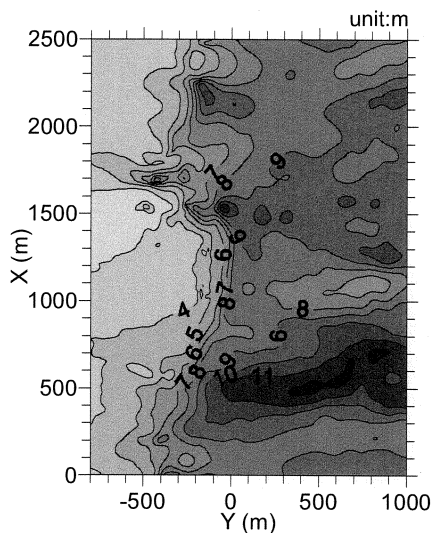
現地リーフ地形上の波浪変形を対象とした模型実験とその再現計算に対し、radiation応力から算定されたリーフ上の平均流の分布、および碎波・遡上モデルを備えた平面2次元ブシネスクモデルによって直接算定された平均流の分布をそれぞれ実験結果と比較した。

(1) 平面模型実験の概要

本研究で着目した現地リーフ地形上の波浪変形実験は、平山・平石⁵⁾が碎波・遡上モデルを備えたブシネスクモデルによる再現計算の対象としたものと同様である。すなわち、多方向不規則波造波装置を備えた長さ30m、幅



(a) 等深線図と4測線の定義



18m, 深さ1m (有効実験体積) の平面水槽に, 現地量で水深-60m以浅のリーフ地形を模型縮尺1/150で再現して, リーフ周辺の波浪・水理特性を調べた. 特に, 本研究で注目した海域の等深線図を, 後述する波高・水位分布の4測線と合わせて図-6(a)に示す. また, プシネスク計算で得られた平均流速分布の実験結果に対する再現性は, 図中の点線で囲った範囲において確認するものとした. なお, 実験および計算範囲全体の鳥瞰図を図-6(b)に示した. また, 特に断らない限り, 以下ではすべて現地量で記載した.

海底地形は, ほぼLine1 ($Y=+800\text{m}$) の沖側に沿ってリーフ外縁をなすバー地形が連なり, その岸側のLine2 ($Y=+550\text{m}$) に沿って比較的平坦な海域が広がっている. さらに岸に進むと, ほぼLine3 ($Y=+60\text{m}$) に沿って

裾礁をなすリーフエッジが連なり, その岸側のリーフラットは背後の本島まで広がっている. Line4 ($Y=-500\text{m}$) はほぼリーフ上に位置しているが, リーフ崖までの距離は場所によって大きく変動している.

(2) 実験結果に対する再現計算

本研究では, 現地のH.W.L.に相当する潮位+2.16mとし, 有義波高 $H_{1/3}=10.2\text{m}$, 有義波周期 $T_{1/3}=14.9\text{s}$, 方向集中度 $S_{\max}=25$ の多方向不規則波を, Y軸に対して反時計回りに+10.5度の主波向きで入射させた場合の実験結果に対する再現計算を実施した. 結果を図-7に示す. なお, このケースは平山・平石⁵⁾が対象とした波浪諸元とは若干異なることに注意されたい.

まず, プシネスク計算で算定された波高分布 (図-

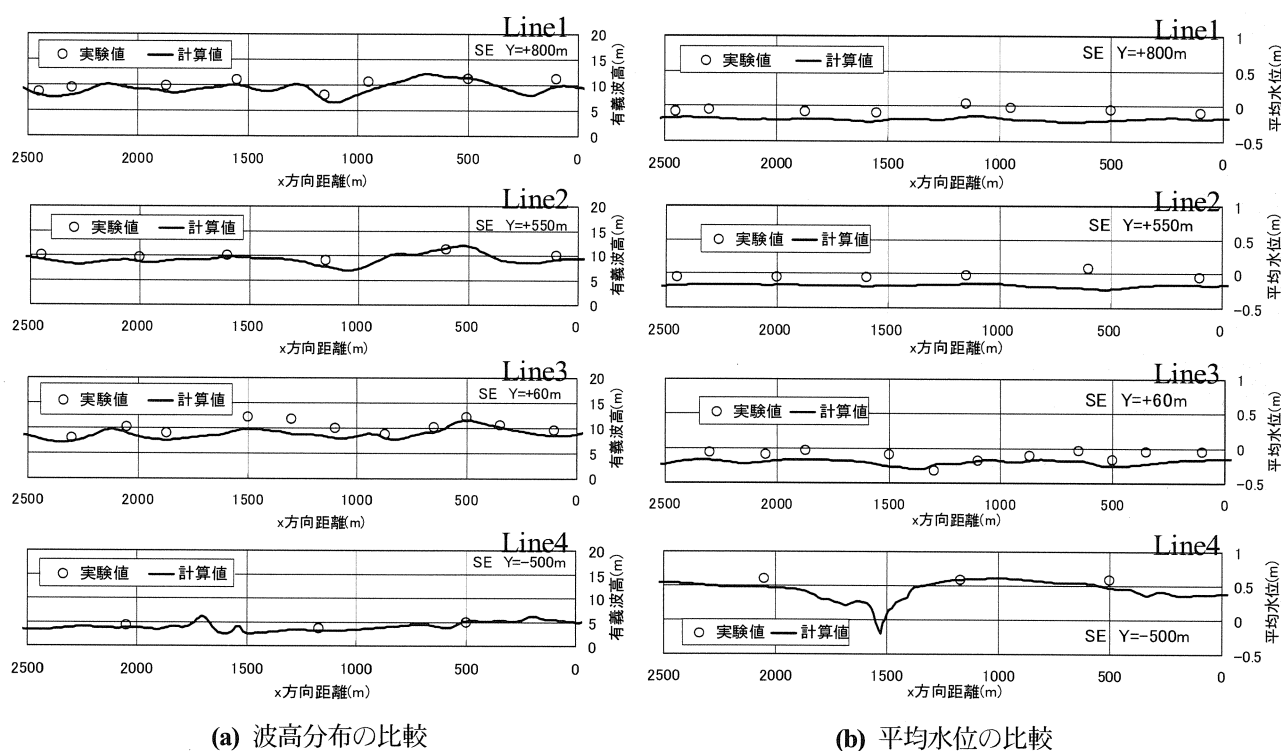


図-8 現地リーフ上の波浪変形実験に対する再現計算結果 (有義波高および平均水位)

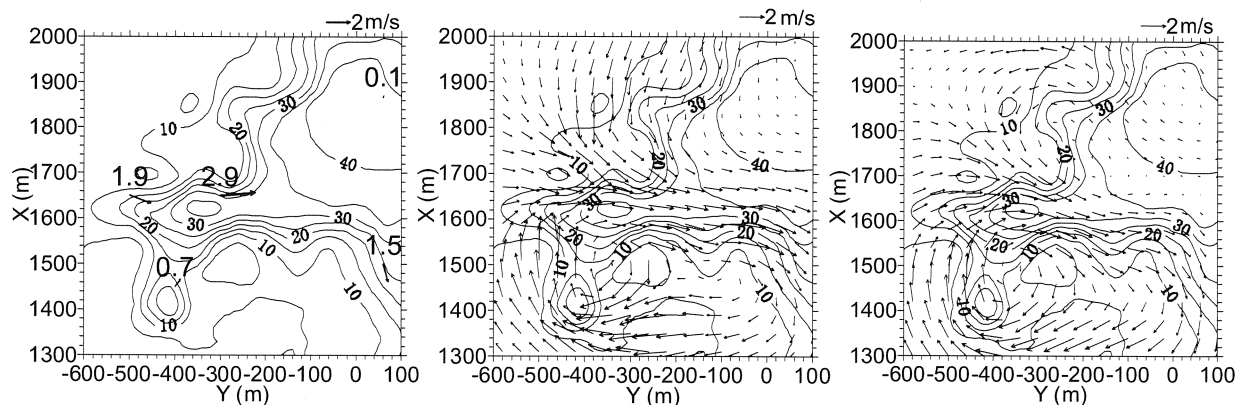


図-9 現地リーフ上の波浪変形実験に対する再現計算結果 (平均流速ベクトル)

7(a))をみると、リーフより沖では、岬のように突き出た海底地形上で屈折変形による波の収斂が生じていることがわかる。一方、リーフ崖で生じる砕波のために急激に減衰して段波状となった波は、砕波による乱れの継続やリーフ上の底面摩擦効果のために、リーフ内へ進むにつれて緩やかに減衰する様子が算定されている。これは、断面水路内にリーフ模型を設置して得た高山ら¹⁾による実験式と同様である。しかし、砕波せずにリーフの切れ目に侵入した波は、浅水変形等により波高が増大し側方からリーフ内へ遡上するため、リーフ内においてもリーフの切れ目周辺の波高は大きくなっている。

これらに対応して平均水位分布(図-7(b))は、リーフ沖の岬地形上およびリーフの切れ目で低く、リーフ崖からリーフ内へ進むにつれて次第に高くなっている。

さらに、ブシネスクモデルで直接算定されるリーフ周辺の平均流速分布(図-7(c))では、リーフ崖付近で段波に対応した岸向きの流れが、また、リーフの切れ目付近では、リーフ内の水位上昇をもたらした水塊が流れ込んで生じる沖向きの流れが現れている。一方、図-7(a)に示す波高分布と別途算定した波向分布から、radiation応力を介して算定した平均流速分布(図-7(d))は、離岸堤背後を対象とした場合とは異なり、流量fluxから直接算定される平均流速分布とよく一致している。これは、エネルギー平衡方程式法を用いて算定した波向分布が、リーフ地形による屈折変形をよく表しているためと考えられる。ただし、平均流速の最大値は流量fluxから直接算定される値の約70%程度であり、特にリーフの切れ目から沖への流れがやや弱い。また、図-7(d)では、リーフ崖に沿う流れよりもリーフ内に侵入する流れが出現しやすいなど、図-7(c)とは異なる流況も観察される。なお、このように進行波が卓越する海域では、エネルギー平衡方程式法に代えて、平山・峯村⁷⁾による方法を用いたブシネスクモデルによっても、波向(波速ベクトル)分布を算定できると思われる。

つぎに、模型実験で計測された4測線上の各地点での有義波高と平均水位、および図-6中の点線枠内の5点で計測された平均流速ベクトルに対する、ブシネスクモデルによる再現計算の結果を図-8および図-9に示す。

リーフ沖のLine1およびLine2上では、○印で示すような屈折による波高変化が計測され、実線で示すブシネスク計算ではこれらを非常によく再現したが(図-8(a))、平均水位の低下量は実験結果よりも若干過大に算定された(図-8(b))。また、X=1000~1500m付近でリーフ崖に沿うLine3上でも、波高分布に関して計算結果は実験結果をよく再現したが、リーフ崖による砕波直前の非線形な波高増大、およびそれに伴う平均水位の低下については若干過小に算定された。しかし、リーフ内のLine4上では、砕波後の波高減少や平均水位上昇に関して計算結果は実験結果を非常によく再現しているだけでなく、X=1500~2000m付近に存在するリーフの切れ目では、砕波せずに侵入した波による波高の高まりやそれに伴う平均水位の低下などもよく算定された。

リーフの切れ目付近の流れ場を対象として、模型実験では5地点において図-9(a)のような平均流速ベクトルが計測されたが(図中のベクトル値は流速を表し、単位はm/s)、流量fluxから直接算定される平均流速ベクトル(図-9(b))の向きや大きさはこれらを非常によく再現している。計測された平均流速値に対するこれらの再現率は、沖から93%、88%、73%、149%、98%であった。さらに、radiation応力を介して求めた平均流速ベクトル(図-9(c))も、リーフの切れ目付近の流況については実験結果とよく一致していることを確認した。ただし、平均流速値について同様に実験結果に対する再現率を示すと、沖からそれぞれ205%、70%、56%、121%、75%であり、リーフ沖では過大評価、リーフの切れ目ではやや過小評価となっていることが数値上でも確認された。これらのことから、リーフ上とその周辺に形成される波による流れ場の算定には、砕波と遡上を考慮したブシネスクモデルを用い、流量fluxから直接算定される平均流速を採用するのが良いと考えられる。

4. おわりに

本研究では、砕波と遡上を考慮したブシネスクモデルを用いて、一様斜面上の離岸堤周辺および切れ目を有する複雑な平面リーフ地形周辺の波・流れ計算を実施した。そして、それぞれ別途得られた実験結果との比較から、砕波帯内外の波高変化だけでなく、砕波後の平均水位上昇やそれらに伴って発生する平均流などの平面分布が、radiation応力を介さずとも直接、ブシネスクモデルによって高精度に算定できることを確認した。

参考文献

- 1) 高山知司・神山 豊・菊池 治：リーフ上の波の変形に関する研究，港研資料，No.278，32p，1977。
- 2) 平石哲也・平山克也・高田悦子・上原功・吉野博之・原崎恵太郎：南太平洋地域における孤立島嶼の波浪外力に関する模型実験，海工論文集，第49巻，pp.1466-1470，2002。
- 3) 申 承鎬・高畑栄治・入江 功・吉田明德：Boussinesqモデルを用いた沖合の構造物による波浪・海浜流の数値計算の適用性，海工論文集，第46巻，pp.206-210，1999。
- 4) 平山克也・平石哲也：ブシネスクモデルによる砕波・遡上計算法とその適用性，海工論文集，第51巻，pp.11-15，2004。
- 5) 平山克也・平石哲也：平面2次元ブシネスクモデルによる砕波・遡上計算法の開発と現地適用，海工論文集，第52巻，pp.11-15，2005。
- 6) Madsen, Per A. and Ole R. Sørensen : A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part2. A slowly-varying bathymetry, *Coastal Eng.*, 18, pp.183-204, 1992。
- 7) 平山克也・峯村浩治：河口部における波高増幅率の簡易算定手法，海洋開発論文集，第21巻，pp.313-318，2005。