

珊瑚礁リーフにおける波と流れの計算法の適用性

平山克也*・上原 功**・永松宏一***・平石哲也****

1. ま え が き

浅海域の波浪変形シミュレーションを行うために開発されたブシネスクモデルは、近年多数の研究者によりその適用性の拡張が検討されており、海底摩擦による波高減衰や碎波現象、開境界処理等が考慮されたモデルが提案され、斜面や離岸堤、潜堤や人工リーフなどの境界条件を有する領域での計算例が報告されている（例えば、佐藤ら, 1993; Cruz ら, 1995; 平石ら, 1995）。しかしながらその適用性の検討には、多くの場合、単純化された海底模型を用いた実験結果が用いられており、複雑な地形を有する実海域におけるモデルの適用性の検討は未だ不十分である。そこで本研究では、水深を場所の関数とした分散項に修正を加えた平面 2 次元のブシネスクモデル (Madsen ら, 1992) を用いて珊瑚礁リーフにおける波と流れの数値シミュレーションを行い、あわせて実施した縮尺 1/50 の平面模型実験より得られた実験値により解析結果を検証し、ブシネスクモデルの珊瑚礁リーフ海域における適用性を検討することを目的とした。対象とした珊瑚礁リーフ海域の海底地形を図-1 に示す。

2. ブシネスクモデルの分散項に関する検討

前述の図-1 にみられるように、水深が急変する海底

地形を有する珊瑚礁リーフ海域において、数値計算により波と流れ場を再現するためには、広い範囲で波の分散特性を満足するような数値モデルを用いる必要がある。そこで本研究では、対象海域の数値計算の実施に際して、まず、ブシネスク方程式の分散項に着目し、(1)一様勾配斜面、(2)台形潜堤のそれぞれの境界条件について計算を行い、実験値によりその再現性を検証して、本研究で対象とした珊瑚礁リーフ海域に適用可能なブシネスクモデルを決定した。

ブシネスク方程式の最も基本的なものは、非線形長波の方程式に分散項を加えたものである。水深を h , x および y 方向の線流量をそれぞれ P , Q とすると、1 次元の運動方程式の分散項は (1) 式のように表わされる。

$$\frac{1}{3}h^2\frac{\partial^3P}{\partial x^2\partial t} \dots\dots\dots (1)$$

また、Madsen ら (1991) は、分散項に補正係数を導入して、やや深い海域と浅海域での波の分散特性を同時に満足する式を提案した。1 次元の運動方程式の分散項を (2) 式に示す。ここで補正係数は $B=1/21$ とするのがよいとされている。また、 η は水位、 g は重力加速度である。

$$\left(B+\frac{1}{3}\right)h^2\frac{\partial^3P}{\partial x^2\partial t}+Bg\eta^3\frac{\partial^3\eta}{\partial x^3} \dots\dots\dots (2)$$

また、Peregrine (1967) は水深を場所の関数とした分散項を導出し、水深が平面的に変化する波浪場において広く用いられる式を提案した。1 次元の運動方程式の分散項を (3) 式に示す。

$$\frac{1}{2}h\frac{\partial^3(hP)}{\partial x^2\partial t}-\frac{1}{6}h^2\frac{\partial^3P}{\partial x^2\partial t} \dots\dots\dots (3)$$

さらに、Madsen ら (1992) は (3) 式の分散項を修正し、やや深い海域における波の分散特性をも満足する式を提案した。1 次元の運動方程式の分散項を (4) 式に示す。ここで補正係数は $B=1/15$ とするのがよいとされている。

$$\left(B+\frac{1}{3}\right)h^2\frac{\partial^3P}{\partial x^2\partial t}+Bg\eta^3\frac{\partial^3\eta}{\partial x^3} +\frac{h}{3}\frac{\partial h}{\partial x}\frac{\partial^2P}{\partial x\partial t}+2Bg\eta^2\frac{\partial h}{\partial x}\frac{\partial^2\eta}{\partial x^2} \dots\dots\dots (4)$$

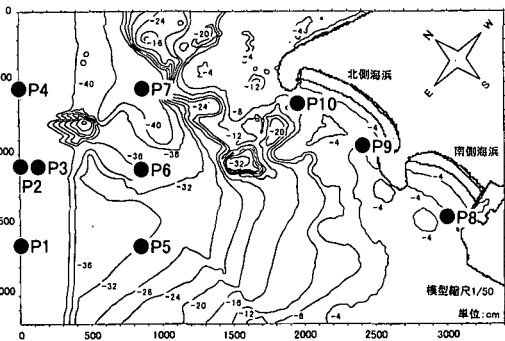
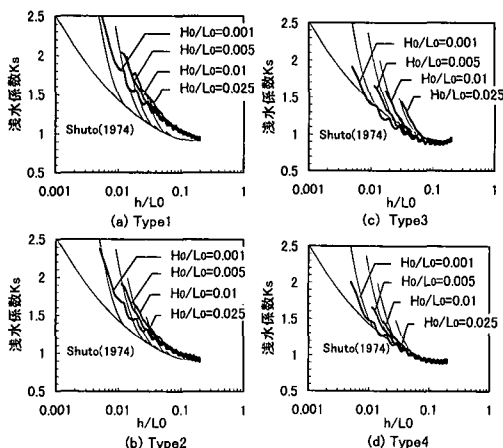


図-1 対象とした珊瑚礁リーフ地形

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部
** 正会員 若築建設(株)
*** 正会員 工修 エコー(株)
**** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部

図-2 浅水係数 K_s の変化

(1) 浅水変形

説明の簡略化のため、(1)式のブシネスクモデルの基本型を Type 1、(2)式の一様水深の修正分散項を有するモデルを Type 2、(3)式の水深変化を考慮した分散項を有するモデルを Type 3、(4)式の水深変化を考慮した修正分散項を有するモデルを Type 4 と定義する。

Type 1~4 のブシネスクモデルを用いて、1/20 勾配の一様斜面上の波の浅水変形を計算し、首藤による浅水係数の理論値 (1974) と比較した。入射波には周期 8.0 s の正弦波を用いた。空間格子間隔は $\Delta x = L/35$ (L は入射波の波長)、差分時間間隔は $\Delta t = T/80$ (T は入射波の周期) である。計算結果を図-2 に示す。図より、水深変化に対応しない分散項をもつ Type 1 および Type 2 により求められた浅水係数は、首藤の理論値に比べ、とくに水深が深いところで全体的に大きくなっていることがわかる。これに対し水深を場所の関数とした分散項をもつ Type 3 および Type 4 では概ね首藤の理論値によく一致している。ただし、Type 3 と Type 4 では、波形勾配が $H_0/L_0 = 0.001 \sim 0.01$ の範囲では浅水係数の再現精度に関して明確な違いはみられなかったが、 $H_0/L_0 = 0.025$ のとき Type 4 では、 $h/L_0 = 0.04$ 以下で首藤の理論値よりも小さな値となった。これは Type 4 の分散項を導出する際に緩勾配近似が用いられたためであると考えられる。

(2) 潜堤背後の波浪変形

Type 1~Type 4 のブシネスクモデルを用いて、図-3 に示す台形潜堤を通過する波の変形計算を行った。計算結果の検討には、土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会 (1994) が行った実験結果を用い、本研究では、入射波高 1.0 m、入射波周期 9 s とした CASE 4 について検討を行った。入射境界における水深波長比は $h/L = 0.012$ である。また、計算における空間格子間隔は

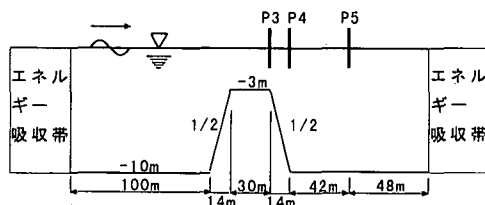


図-3 台形潜堤

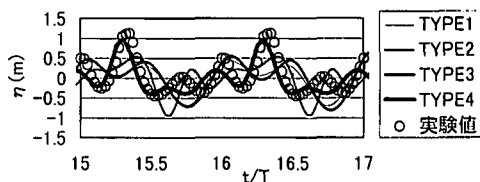


図-4 P5 における時間波形

$\Delta x = L/80$ 、時間差分間隔は $\Delta t = T/90$ である。図-3 中の P5 における時間波形を図-4 に示す。図より、分散項に修正を加えない Type 1 および Type 3 では、波の分裂後の波形を再現できていないが、水深変化を考慮しない分散項に修正を加えた Type 2 では、再現性は若干改善されることがわかる。さらに、水深変化を考慮した分散項に修正を加えた Type 4 による計算結果は、波の分裂後においても実験結果とよく一致することがわかる。

3. 珊瑚礁リーフ海域へのブシネスクモデルの適用

(1) 平面模型実験の概要

本実験は、珊瑚礁リーフ海域において現在建設が進められている人工海浜の安定性を検討するために実施した。本実験では沖側水深を -20 m と設定し、そこから 1/20 の勾配で実地形にすりつけた前述の図-1 に示す海底地形を用いた。模型の水平縮尺および鉛直縮尺は 1/50 である。模型表面は基本的にモルタルにより整形したが、岸側に位置する人工海浜部は、前面を捨石で被覆したヘッドランドと中央粒径 0.2 mm の模型砂により海浜を整形し、この部分を移動床模型とした。また、人工海浜周辺に分布する珊瑚礁リーフ部には、模型表面に砂を張りつけて底面粗度の増大を図った。

沖波条件の設定に際して、本実験のような移動床実験に関する相似則は未だ確立されていない。そこで、現地暴風波浪時の波浪諸元 ($H_{1/3} = 1.15$ m, $T_{1/3} = 8$ s, H.W. L. = +1.88 m) をもとに、フルードの相似則に従い、仮の沖波条件として、 $H_{1/3} = 2.3$ cm, $T_{1/3} = 1.13$ s, H.W. L. = +3.76 cm を設定し、さらに波高および周期を $H_{1/3} = 1.5 \sim 4.0$ cm, $T_{1/3} = 1.13 \sim 1.41$ s の範囲で変化させて、人工海浜周辺における波と流れ場の変化特性を把

握した。さらに、リーフ上の底質砂の移動限界と流速の関係（平山ら，1998）および平面予備実験の結果などから、移動床実験における沖波条件を $H_{1/3}=4.0$ cm, $T_{1/3}=1.41$ s と決定した。これは、現地で $H_{1/3}=2.0$ m, $T_{1/3}=10$ s に相当する。

(2) 適用ブシネスクモデルおよび計算条件

対象海域の数値計算は模型量で実施し、波高 1.3~4.0 cm（現地 0.65 m~2.0 m）、周期 1.13~1.41 s（現地 8~10 s）の規則波および不規則波を沖側より入射した。また、人工海浜周辺では、水深が 2.0 cm 以下となる計算格子について、計算の発散を防ぐために、水深 $h=2.0$ cm 一定とした。ここで、入射境界における水深波長比は $h/L_0=0.14\sim0.22$ 、波形勾配は $H_0/L_0=0.007\sim0.02$ である。ところで、本研究における波と流れの再現計算では、とくに北側人工海浜周辺（P9 および P10）における波浪場の再現に主眼をおいている。これは、波浪条件および地形特性から、北側人工海浜の養浜砂の安定がとくに懸念されるためである。そこで、この付近の海底地形の急激な変化に適応できる波浪変形モデルとして、2.で行った分散項の差異による波浪変形計算の検討結果より、本研究では Type 4 の分散項を有するブシネスクモデルを用いることとした。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \\ & \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \nu \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) \\ & \quad + \epsilon P + \frac{f}{D^2} P \sqrt{P^2 + Q^2} \\ & = \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \left(\frac{\partial^3 P}{\partial y^2 \partial t} + \frac{\partial^3 Q}{\partial x \partial y \partial t} \right) + Bgh^3 \left(\frac{\partial^3 \eta}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2} \right) \\ & \quad + h \frac{\partial h}{\partial x} \left(\frac{1}{3} \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial t} + \frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q}{\partial x \partial t} \right) + h \frac{\partial h}{\partial y} \left(\frac{1}{6} \frac{\partial^2 Q}{\partial y \partial t} \right) \\ & \quad + Bgh^2 \left\{ \frac{\partial h}{\partial x} \left(2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y} \right\} \\ & \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \nu \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} \right) \\ & \quad + \epsilon Q + \frac{f}{D^2} Q \sqrt{P^2 + Q^2} \\ & = \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \left(\frac{\partial^3 Q}{\partial y^2 \partial t} + \frac{\partial^3 P}{\partial x \partial y \partial t} \right) + Bgh^3 \left(\frac{\partial^3 \eta}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 \eta}{\partial x \partial y^2} \right) \\ & \quad + h \frac{\partial h}{\partial y} \left(\frac{1}{3} \frac{\partial^2 Q}{\partial y \partial t} + \frac{1}{6} \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} \right) + h \frac{\partial h}{\partial x} \left(\frac{1}{6} \frac{\partial^2 P}{\partial y \partial t} \right) \\ & \quad + Bgh^2 \left\{ \frac{\partial h}{\partial y} \left(2 \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial^2 \eta}{\partial x \partial y} \right\} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5)$$

基礎式の差分化にあたっては Madsen ら（1992）の方法にならったが、計算の安定化を図るため、分散項の時間差分には前進差分を用いた。また入射境界には境界線入射法（石井ら，1993）を適用し、岸沖境界、側方境界および人工海浜前面の無反射境界には、エネルギー吸収

帯（Cruz ら，1993）を設置した。さらにリーフ上の碎波を考慮するため、運動方程式に佐藤ら（1993）による碎波項を付加した。本モデルの基礎式を（5）式に示す。

本研究では、空間格子間隔 $\Delta x = \Delta y = 0.1$ m、差分時間間隔 $\Delta t = 7 \times 10^{-3}$ s として計算を行った。また、底面摩擦係数 f は佐藤ら（1993）にならい $f = 0.02$ としたが、珊瑚礁リーフ上および移動床部における底面摩擦係数は $f = 0.04$ と設定した。さらに、碎波指標について、佐藤ら（1993）は規則波の場合 0.6~0.7 と提案しているが、本研究では、人工海浜前面の波形および流速値の再現性を考慮して、0.45 として計算を行った。

(3) 規則波による計算結果

入射波高 2.3 cm、入射波周期 1.13 s ($H/L=0.013$) としたときの人工海浜前面の観測点にあたる P8, P9 および P10 における時間波形を図-5 に、同様に流速ベクトル長の時間変化の計算結果および実験結果を図-6 に示す。ここで図-6 では、流速ベクトルの向きは考慮されていないことに注意を要する。図中、それぞれ実線は計算結果を、白丸は実験結果を示している。なお、波の計測は造波開始 3 分後から開始しており、図の横軸の数値は計測開始後の波の通過数を意味している。

図より、計算値は実験値を概ねよく再現していることがわかる。沖合の海底地形が非常に複雑な北側海浜北側の P10 では、水位および流速値の時間変動の計算値は、波形およびその位相とも実験値とよく一致している。このことから Type 4 の分散項は、珊瑚礁リーフ海域における波浪変形計算に対しても有効であると考えられる。また、沖合の海底地形が緩やかな様斜面となっている南側海浜前面の P8 でも、同様に計算値は実験値とよく一致している。ただし、実験値の平均水位が初期水位よりも下降している現象については、P8 の地点が碎波帯内に位置しており、逆にこの付近では、計算値にみられるような set-up が生じると考えられることから、実験値の測定精度を再度検討する必要があるものと思われる。

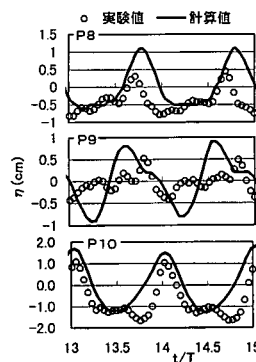


図-5 水位変化

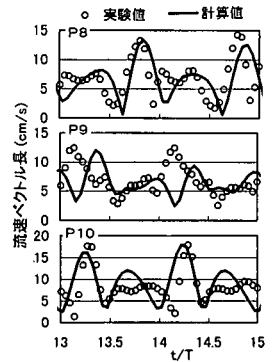


図-6 流速値変化

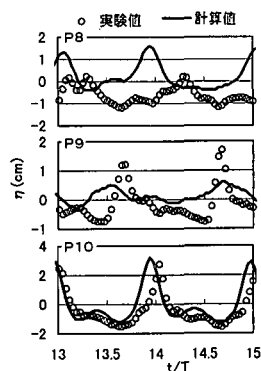


図-7 水位変化

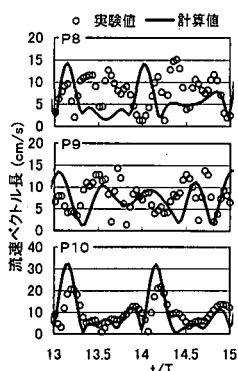


図-8 流速値変化

北側海浜南側のP9では、流速値の時間変動に若干の位相差がみられるものの、その波形は、計算値と実験値でよく一致している。ただし、水位変動の計算値は、実験値よりも若干大きな変化を示した。

つぎに、入射波高 4.0 cm, 入射波周期 1.41 s ($H/L = 0.016$) としたときの計算結果および実験結果を図-7, 図-8 に示す。先のケースと同様、P10 では、水位および流速値の時間変動の計算値は、実験値をよく再現している。一方P8では、流速変動の実験値には1周期の間に4つのピークがみられ、進行波による流速変動のピークのほかに、反射波によると思われる流速変動のピークが存在しているのに対して、計算値にはそのようなピークがほとんどみられない。これは、P8背後のヘッドランドにおいて、模型実験では砂利による消波を行っているにす

ぎず、波長が長い場合に消波性能が低下するのに対して、数値計算では波長に応じてエネルギー吸収帯の幅を変化させ、波の反射を抑制しているためであると考えられる。またこのような傾向は、P9における流速値の時間変動にも顕著にみうけられる。

(4) 不規則波による計算結果

入射波周期を $T_{1/3n} = 1.13$ s 一定とし、入射波高を $H_{1/3n} = 1.3 \sim 4.0$ cm ($H/L = 0.007 \sim 0.022$) と変化させたときのP8, P9およびP10における有義波高の変化を図-9に示す。図より、それぞれの入射波高において、各観測点における有義波高の計算値と実験値はよく一致することがわかる。また入射波高に対する実験値の変化をみると、入射波高 $H_{1/3n}$ が小さいときには入射波高の増加とともに増加していた各観測点における有義波高が、 $H_{1/3n} = 2.3$ cm 以上においては一定となる傾向がうかがえる。計算値はそれをよく説明している。

入射波高の変化に対するP8, P9およびP10における沿岸方向および岸沖方向の流速振幅の変化を図-10, 図-11, 図-12に示す。図中、●および○で示した $V(\pm)$ は流速変動の絶対値、▲および△で示した $V(+)$ は正の流速振幅の絶対値、■および□で示した $V(-)$ は負の流速振幅の絶対値のそれぞれ1/3有義値として定義されている。また白抜の印はそれぞれ実験値であることを意味する。なお、正方向はそれぞれ、岸沖方向では岸向き、

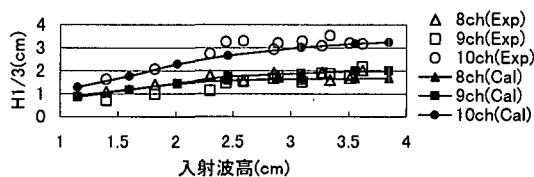


図-9 有義波高の変化

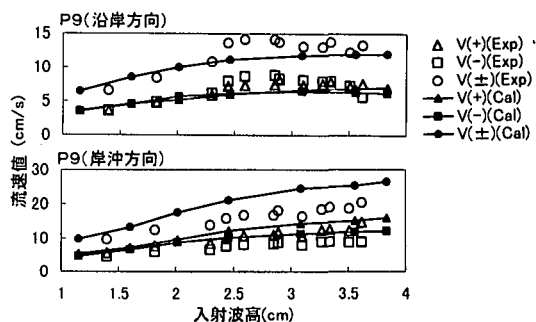


図-11 P9における流速振幅の変化

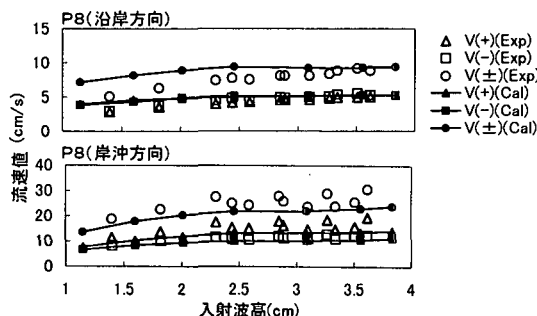


図-10 P8における流速振幅の変化

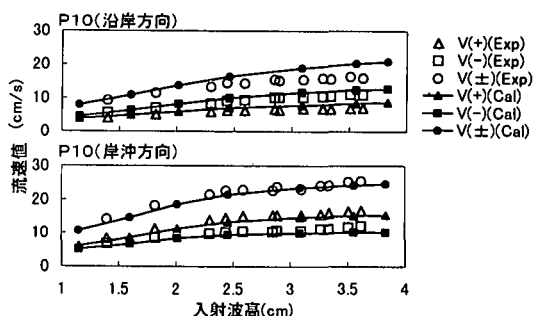


図-12 P10における流速振幅の変化

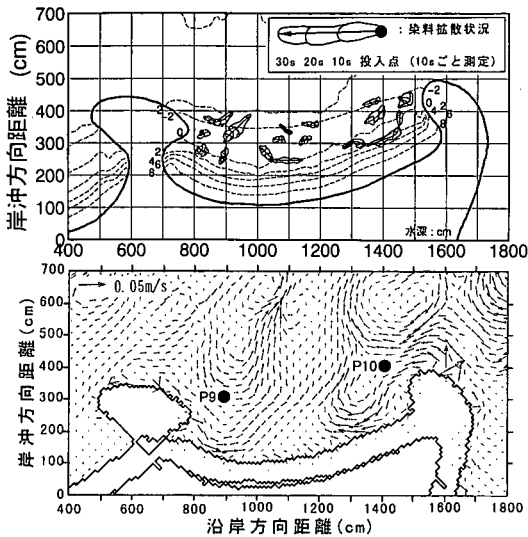


図-13 北側海浜周辺の流況分布

沿岸方向では南東(図-1 下向き)としている。図-12より、入射波に不規則波を用いた場合でもP10における流速値の再現性は極めて良好である。また有義波高と同様に、それぞれの流速振幅の計算値は、入射波高が $H_{1/3in}=2.3$ cmとなる付近を境に、流速振幅の実験値が単調増加から一定値に近づく傾向をよく説明している。さらに図-10および図-11より、P8およびP9においても、流速振幅の絶対値にそれぞれ若干の違いはあるものの、実験値の同様な傾向については概ね再現できていることがわかる。

つぎに、入射波高を $H_{1/3in}=2.3$ cm、入射波周期を $T_{1/3in}=1.13$ sとしたときの人工海浜周辺における流況の再現性について検討する。ここで海浜流の計算には、約100周期分の流速変動の平均値を求めるという方法を用いた。また模型実験では、水槽に投入した染料の移動状況を定時撮影して海浜流を観測した。模型実験では、北側海浜周辺で顕著な沿岸流が観察され、南側海浜周辺で海浜流はほとんど観察されなかったが、数値計算でもこの傾向は同じであった。北側海浜の流況の計算結果と実験結果を図-13に示す。図より、数値計算結果は、模

型実験で観察される北側ヘッドランド付近から南に向かう沿岸流や、中央ヘッドランド付近から沖へ向かう流れなどを非常によく再現していることがわかる。

4. 結 論

本研究では、珊瑚礁リーフ海域を対象として、任意水深に対応しかつ分散特性に関して修正を加えた分散項を有する平面2次元のブシネスクモデルを用いて波と流れの数値シミュレーションを行い、あわせて実施した平面模型実験による実験結果により計算結果を検証した。入射波に規則波と不規則波を用いた場合、少なくとも波形勾配が $H/L=0.007\sim0.022$ の範囲において、実用上十分な再現性が得られることを確認した。

参 考 文 献

- 石井敏雅・磯部雅彦・渡辺 晃 (1993): 非定常緩勾配不規則波動方程式における境界条件の改良と実用化の試み, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 31-35.
- Eric・Cruz・横木裕宗・磯部雅彦・渡辺 晃 (1993): 非線形波動方程式に対する無反射境界条件について, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 46-50.
- Eric・Cruz・青野利夫 (1995): 人工リーフ周辺の波浪変形モデルについて, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 181-185.
- 佐藤慎司・M. Kabiling (1993): Boussinesq 方程式を用いた三次元海浜変形の数値計算, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 386-390.
- 首藤伸夫 (1974): 非線形長波の変形—水路幅、水深の変化する場合—, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 57-63.
- 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会 (1994): 海岸波動, pp. 146-200.
- 平石哲也・上原 功・鈴木康正 (1995): ブシネスク方程式を用いた波浪変形計算法の適用性, 港研資料, No. 814, 22 p.
- 平山克也・丸山晴広・平石哲也 (1998): リーフ海岸の養浜砂の移動に関する基礎的な水理実験, 第23回海洋開発シンポジウム論文集 (印刷中).
- Madsen, P. A., R. Murray and O. R. Sorensen (1991): A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics, Proc. 15th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 371-388.
- Madsen, P. A. and O. R. Sorensen (1992): A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2. A slowly-varying bathymetry., Proc. 18th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 183-204.
- Peregrine, D. H. (1967): Long waves on a beach, J. Fluid Mech., Vol. 27, pp. 815-827.