土木学会論文集B2（海岸工学）
Vol. B2-65，No.1，2009，211-215

地形急変部周辺における長周期変動を伴う波・流れ場の局所集中機構

Concentration of Slowly-Varying Nearshore Waves and Currents around the Edge of Two Different Bottom Slopes

田島芳満[1]・石指裕章[2]・佐藤愼司[3]

Yoshimitsu TAJIMA, Hiroaki ISHIZASHI and Shinji SATO

This study aims to investigate physical mechanisms of locally concentrated nearshore hydrodynamic forces under interactive fields of waves and currents on sharply changing coastal bathymetries. Laboratory experiments were first performed to represent the focusing phenomena and a newly developed measuring system based on image analysis techniques successfully obtained quantitative high-resolution data of locally concentrated wave fields. Numerical analysis were finally performed to further investigate the physical mechanisms of the observed features and it was found that, among the other various possible factors, the slowly varying wave-induced nearshore currents have one of the most significant impacts on local concentrations of waves around the sharp edge of bathymetry.

1. はじめに

2007年台風9号に伴う西湘海岸のバイパス崩落災害や，翌年の富山湾岸における寄り回り波による被災では，その被害が局所集中する傾向が見られた．両者に特徴的な共通点は，岸沖断面勾配が沿岸方向に急変する海浜地形を有していたことや，波群性高波浪とそれに伴う長周期波が卓越していたことである（田島ら，2008；加島ら，2009）．本研究では，このような長周期変動成分を含む波，流れ，および急変する地形の相互干渉による被災外力場の集中特性に焦点を当て，室内および数値実験を通じてその物理的メカニズムを明らかにすることを目的とする．

2. 室内実験

ここではまず平面水槽実験を実施し，地形急変部周辺における波・流れ場集中特性の再現を試みる．さらに画像計測システムを新たに構築し，実験で再現した波・流れ場の集中特性の面的かつ高解像度計測を試みる．

（1）実験概要

本実験に用いた平面水槽のレイアウトを図-1に示す．図に示した岸沖勾配1/20の水槽の右側半分には，勾配1/40の緩斜面模型を設置し，西湘海岸や富山湾の被災事例で見られた斜面勾配急変部を模擬的に再現した．また勾配急変部に最も近い斜面模型上に長方形の白色光源を埋め込み，合成着色料（青色2号）で均一に着色した水槽水の透過光を直上に設置したビデオカメラで撮影した．また汀線近傍の水深2cm地点では等深線と平行に鉛直護岸を設置した．また図に示した4地点にビデオカメラを設置し，護岸前面における水位変動を撮影した．鉛直護岸は黄色とし，青色水面境界の判別精度を向上させた．また斜面勾配急変部の急勾配斜面側（$-40<y$ (cm)<-20）では，鉛直護岸の一部を透明なアクリル板とし，その岸側に鏡を設置した．次に鏡にシート状のレーザー光をあて，反射光をアクリル板を透過して斜面と平行に水中照射した．実験ではアルミ粉をトレーサーとして投入し，レーザー光平面上のトレーサーを高速カメラで上部から撮影した．

以上の地形および護岸条件を有する平面水槽に対し，多方向造波装置を用いて規則波（周期T=1s，入射波高H_{in}=2.8cm）および二周波数成分（T=1.111s，0.909s，H_{in}=2cm）からなる群波を入射角 -20度で斜め入射させた．また造波時には長山ら（2002）の手法を用いて反射波成分の吸収制御を行った．ただし入射波信号には拘束波成分による影響は無視した．

（2）画像計測システム

上述した高速カメラを含む6台のカメラによる連続静止画像に基づき，画像計測システムを新たに構築し，護岸前面および白色光源上での水位変動，さらにレーザー光照射面における水平流速ベクトル分布を推定した．

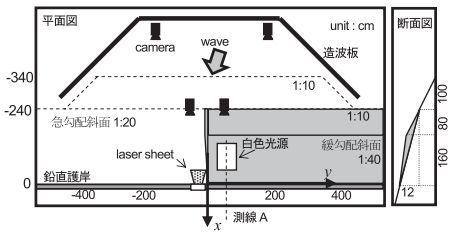

図-1　平面水槽実験レイアウト

1 正会員　Ph.D　東京大学准教授，大学院工学系研究科社会基盤学専攻
2 学生会員　東京大学修士課程学生，同上
3 フェロー　工博　東京大学教授，同上

まず全てのカメラ画像において，画素位置から実座標を推定するための座標変換パラメタを抽出した．座標変換には，田島ら（2008）と同様の手法を用い，各画像毎に定めた7個の基準点の位置関係を最も良く再現する座標変換パラメタを，重みつき最小自乗法を用いて算定した．また，レンズの歪みによる影響を画像座標中心からの距離の2次関数で表し，事前に撮影した正方格子画像に基づきその影響を除去した．

a）護岸前面における水位変動の推定

沖側から護岸を撮影した4台のカメラ画像から，図-**1**に示した-200<y(cm)<200の範囲における護岸前面の水位変動を推定した．各カメラの撮影範囲は沿岸方向に約1mとし，撮影時間間隔を1/30秒とした．

次に水面境界の判定には各画素における色情報（RGB値）に基づき，黄色と青色のコントラストが大きいS_1=R+G-Bを指標として用いた．図-**2**に元画像に対するS_1値の平面分布と，図中の枠で示した測線上のS_1値の分布を示す．図に見られるように水塊が護岸に沿って打ちあがっている図-**2**のような状況下においても，S_1値から水面境界が判別可能であり，本研究ではS_1=290を水面判定条件とした．水面境界位置の抽出には，まず元画像から閾値に相当する画素位置を線形内挿により算定し，既に求められた座標変換パラメタを用いて水面境界の実座標を算定した．座標変換による絶対実座標の推定平均誤差は約1.6mm（1画素）であったことから，絶対水位の誤差も同程度であると考えられる．

このようにして得られた画像解析に基づく護岸前面の水位変動と波高計による計測値との比較例を図-**3**に示す．図に見られるように，画像計測による水位変動の計測結果は波高計によるそれと良く整合している．

b）白色光源上の水位変動分布の計測

次に斜面模型に埋め込んだ白色光源の直上から撮影した画像から水深変動場の面的計測を試みた．撮影時間間隔は1/60秒とし，実験室内の照明を消した条件で，光源からの透過光のみを撮影した．次に静水時の画像に基づき，各画素のRGB値と同地点での計測水深hとを比較し，水深と最も良い相関を示したS_2=R+Gをパラメタとして水深hとS_2との関係を次式で近似した．

$$S_2 = \alpha \exp(-\beta h) \quad \cdots\cdots (1)$$

ここでαおよびβは係数であるが，沿岸方向の画素座標によりその最適値が微小に変化することが分かったため，画像上の沿岸方向座標の関数として定義した．得られた水深推定式から逆推定した水深の最大誤差は2.5mmであった．図-**3**には白色光源の沖境界付近に設置した波高計と本画像計測システムによる水位計測結果も比較する．画像計測では波峰近傍波形を滑らかに推定しているものの，波高計による計測結果をほぼ妥当に再現できている．

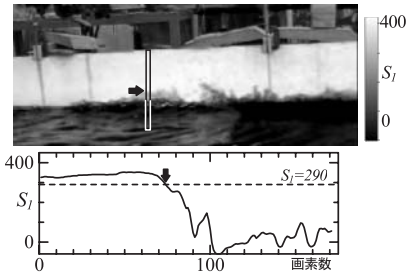

図-**2**　護岸画像上のS_1値の平面分布と鉛直測線上の分布

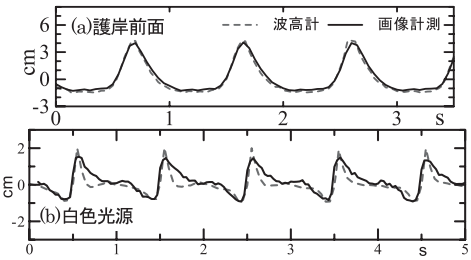

図-**3**　画像および波高計による水位変動計測結果の比較

c）護岸前面における水平流速分布の計測

最後に高速カメラで撮影した，レーザー光平面内のアルミ紛の連続画像を用い，PTV法を用いて平面内の流速分布を推定した．レーザー光を自由水面ではなく固定したアクリル板から透過させて水中照射したことにより，変動する自由水面でのレーザー光の屈折の影響を受けることなく，レーザー照射面位置を安定に固定することができた．PTV法では，トレーサーの誤認識によるノイズを除去するため，抽出した瞬間流速を水平格子間隔1cmおよび時間間隔0.1秒のデータ群に分類し，その平均値との偏差が標準偏差の1.8倍を超えるデータを除去した．

（3）実験結果

規則波および群波の両ケースにおける護岸前面での水位変動の時空間変化を図-**4**に示す．図には3分間の抽出データのうち15秒間のみを示した．図に見られるように，斜め入射波の影響により，護岸への波峰の到達時間には斜め入射による時間差が見られるが，その傾きは急勾配斜面側（-200<y(cm)<0）と緩勾配斜面側（0<y(cm)<200），およびその接続部周辺で大きく異なる．斜面勾配急変部周辺では，緩勾配斜面側への屈折・回折波による位相への影響が見られる．また群波を入射させた条件では，入射波浪と同様に5秒周期の波群構造が見られる．

次にこれらの護岸前面の時間波形をフーリエ変換に基づき周波数分解し，周期3秒を境に分割した長・短周期成分に対して自乗平均波高H_{rms}を，また短周期成分については，$H_{1/10}$も算定した．以上により算定した護岸前面

での平均水位，長・短周期成分の波高の沿岸方向分布を図-**5**に示す．図に見られるように，規則波と群波の条件では波高分布に顕著な違いが見られ，特に群波の条件では長周期変動成分（H_{rmsL}）が顕著に表れた．さらに群波の条件では，規則波の時には見られなかった勾配急変部近傍の緩勾配斜面上における波高の局地的なピークが見られ，西湘海岸被災事例での局所的波高増大特性と符合する結果となった．

次に白色光源上で推定した面的な水位変動データに対して，護岸前面の水位データと同様に長・短周期成分の自乗平均波高を算定して図-**6**に示した．護岸前面での波高分布と同様に，群波と規則波の条件では顕著な相違が見られ，特に群波の条件では長周期変動成分が卓越し，その応答が岸沖方向に卓越的であったことが分かる．

次に長周期波と短周期波の局所集中との相互関係を検証するため，白色光源上の測線A（図-**1**；y=60cm）および護岸に沿った水位変動データに対して，包絡波形$A(t)$と計測した長周期変動水位$\eta_L(t)$との位相関係を調べた．ここではList（1992）と同様の手法で包絡波形$A(t)$を算定し，Janssen・Battjes（2003）と同様に次式で任意地点における$A^2(t)$と，同地点における$\eta_L(t)$の相互相関係数を算定した．

$$R(\tau)=\left\langle A^2(t)\eta_L(t+\tau)\right\rangle/\sigma_{A2}\sigma_{\eta_L} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

ここで〈 〉は時間tに対する平均値，σ_{A2}および$\sigma_{\eta L}$はそれぞれ$A^2(t)$および$\eta_L(t)$の標準偏差である．また測線Aに沿った長周期変動成分については，岸沖方向前後5cmの水位データから，香取ら（1989）の波形追跡法を用いて入射波成分のみを抽出して用いた．

図-**7**に，測線Aおよび護岸前面に沿って式（2）で算定したRの時空間分布を示す．図の横軸は測線Aおよび護岸に沿った水平座標とし，縦軸は時間τを包絡波形周期$T_L(s)$=5で除した位相差$\Delta\phi=2\pi\tau/T_L$とした．また図の白い破線はRが極大値となる時の位相差$\Delta\phi$の分布を示す．図より，測線A上では沖から岸に向かって位相差が徐々に小さくなっており，この傾向はJanssen・Battjes（2003）や関・水口（2008）の実験結果と符合する．また護岸前面では包絡波形と長周期変動成分との位相がほぼ一致しており，長周期変動における水位の上昇と，短周期波成分包絡波のピークが同時に来襲していることが分かった．

最後に，PTV法により推定した護岸前面の水平流速分布を図-**8**に示す．レーザー光照射部分の水平流速は，特に沿岸方向にほぼ一様であり，規則波を入射させた条件についても同様の傾向が見られた．そのため，図-**8**には沿岸方向・岸沖方向の流速成分を，それぞれ図の領域内で沿岸方向に平均し，その岸沖方向分布を示した．さらに図には，後述する数値モデルによる断面平均流速の計算結果も合わせて示した．図に見られるように，群波と

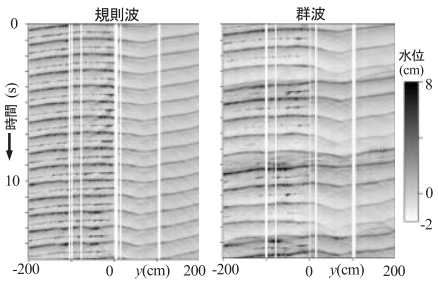

図-**4**　護岸前面における水位変動の時空間分布

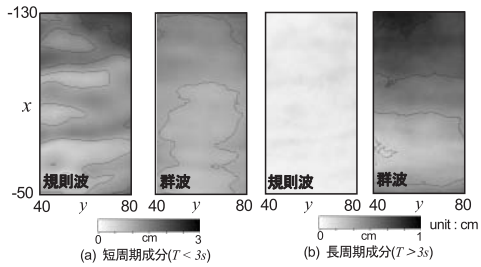

図-**6**　白色光源上における長・短周期成分の自乗平均波高

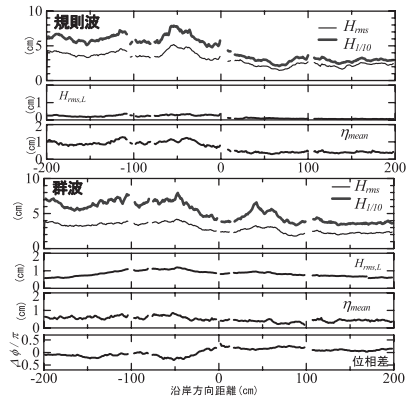

図-**5**　護岸前面における長・短周期成分の波高および平均水位

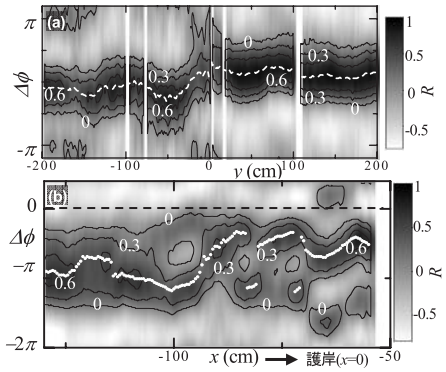

図-**7**　(a) 護岸前面および (b) 測線Aにおける包絡波自乗波形と長周期変動波形の相互相関係数

規則波では，入射波向きやエネルギー平均波高が同等であったにも関わらず，規則波を入射させた場合の方が群波の場合よりも沿岸流速が大きくなった．

3. 数値実験による検証

平面水槽実験では，同等のエネルギー波高と波向きを有する規則波と群波をそれぞれ入射させたが，両者の伝播特性には顕著な相違が見られた．ここでは，これらの沿岸流や長周期変動成分が波の局所集中特性に及ぼす影響を検証する目的で数値実験を行う．

長周期変動を伴うsetupや海浜流と通常波（短周期成分）との相互干渉を直接的に考慮可能な数値波動モデルとしては，ブシネスク方程式のような非線形分散波モデルが上げられる．しかしながらこれらのモデルでは，平均流や任意周波数の変動成分をすべて包含した水位・流速変動が計算され，上述した波の伝播変形特性に影響を及ぼすと考えられる諸因子の影響を分離して検証することが難しい．そこで本数値実験では，通常波成分の伝播計算には線形理論に基づく非定常緩勾配方程式を，長周期変動成分を伴う海浜流場の計算には非線形長波方程式を用いた別々の計算を行い，計算条件に応じて両者の計算結果を互いにフィードバックさせる．

（1）数値モデルの概要

ここで用いる数値モデルは，①短周期成分の波浪変形計算と②長周期変動を含む海浜流計算で構成される．波浪変形計算では短周期変動成分のみの挙動を計算することを目的とするが，波・流れ干渉や水深の変化による波浪伝播特性への影響を考慮した計算を行う必要がある．そこで本研究では大中・渡辺（1987）の流れによる影響項を付加した非定常緩勾配方程式を用いた．また砕波モデルについては，反射波を含む波と流れが重合する複雑な場における砕波減衰を算定する必要がある．本研究では平面波浪重合場への適用が容易で，潜堤周辺における複雑波浪場の予測計算で高い再現精度が確認されている田島ら（2006）のモデルを用いた．ここで2周波数成分からなる群波を入射させる場合には，成分波の伝播を別々に計算して重ね合わせたが，砕波限界条件および砕波減衰係数の計算時には合成波の諸量を用いた．

次に長周期変動を含む海浜流場の計算には，短周期波によるradiation応力項や底面摩擦項（Madsen，1994），拡散項（Larson・Kraus，1991）を付加した非線形長波方程式を用いた．短周期波成分によるradiation応力項については，特に群波の条件では包絡波形の変動に伴うradiation応力の長周期変動を算定する必要がある．本モデルでは，radiation応力の定義に従い，次式で水深積分した応力項を時々刻々の水位・流速条件を用いて直接計算し，

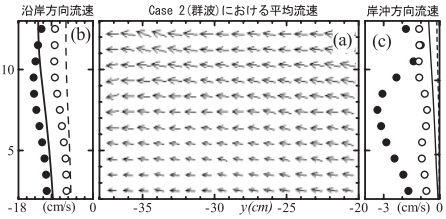

図-8　護岸前面における水平流速の（a）平面分布，（b）および（c）岸沖方向分布（●および○は規則波および群波の実測値，実線および破線はそれぞれの条件での計算値）．

表-1　数値モデルによる計算条件（考慮する項目に○）

ケース	砕波	平均成分		長周期変動	
		水位 (setup)	海浜流	水位	流速
A	×	×	×	×	×
B	○	×	×	×	×
C	○	○	×	×	×
D	○	○	○	×	×
E	○	○	○	○	×
F	○	○	○	○	○

$$S'_{ij} = \frac{1}{2}\zeta^2\delta_{ij} + \int_{-h}^{0} u_i u_j - w^2\delta_{ij}\,dz \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

規則波の条件ではこれらの時間平均値を，群波の条件では，フーリエ変換に基づき周期3秒以下の短周期成分を除去した時空間波形をそれぞれ海浜流場の計算に導入した．ここでδ_{ij}はKroneckerのデルタ記号である．

（2）数値実験条件

数値実験では波浪場と海浜流場の計算を順に行い，両者の計算結果をフィードバックするが，この際，**表-1**に示した計算ケース毎にフィードバックする計算結果を取捨選択した．これらの計算結果を比較することにより，長周期変動を伴う水位および流れ場の影響をその因子要素別に検証することが可能となる．計算地形は**図-1**に示した平面水槽を再現し，計算領域を斜面勾配急変部を中心に沿岸方向に8m，岸沖方向に4mとした．入射波は沖側境界の一様水深部で一様に与え，側方境界は水槽実験と同様に鉛直壁境界とし，境界前面には幅30cmのスポンジ層を設置して線流量に対する一次の減衰項を与えた．

（3）数値実験結果

規則波を入射させた条件に対する波浪場および海浜流場の計算例を**図-9**に示す．海浜流場は勾配急変部近傍を除き沿岸方向に一様であり，PTV法による計測結果と一致する．また**図-8**には計算した断面流速値をPTV法による計測結果と合わせて図示したが，規則波（実線），群波（破線）ともに，沿岸流速を妥当に再現できている．モデルは沖向き流速を過小評価しているが，これはモデルの計算結果が断面平均流速であり，戻り流れの影響が含まれないためであると考えられる．

次に**図-10**には，**表-1**に示した各ケースにおける護岸前面波高の沿岸方向分布を比較した．まず砕波減衰を無視

したケース（図-**10**（a））では，規則波および群波の両条件ともに緩勾配斜面上への屈折波による波高の周期的な極大化が見られる．次に図-**10**（c）を見ると，平均水位を考慮したCではBに比べて一様に波高が大きくなるが，その影響は海浜流の影響（CとDの差）に比べると相対的に小さい．一方，海浜流場を考慮したDでは，緩勾配斜面上の波高のピークが消え，実測値（図-**10**（b））を良く説明している．図-**10**（d）は同じ条件Dに対する相互フィードバック回数の計算結果への影響を示している．図-**9**に見られるように，波浪場は沖向きの流れ場の周辺で屈折して集中する傾向が見られ，それがD1のような波高の局所集中を引き起こしている．一方，D1の計算結果を反映した海浜流場に基づく波浪場の計算結果（D2）は，D1のピークを相殺する傾向を示しており，繰り返し計算によってこれらのピークが低減している．

次に群波のケースの比較では変動成分による影響のみに着目する目的で，長周期変動を含む海浜流場の計算結果を，一度だけ反映させた場合の波浪場の計算結果を比較した．ここでは，波群構造による極大波高の集中特性に着目するため，実験値，計算値ともに$H_{1/10}$を比較した．図-**10**（f）に見られるように，モデルは沿岸方向の波高分布特性を妥当に再現しているが，その絶対値は過小評価している．これは線形波理論に基づく本モデルが，実際の波の強非線形性に伴う鋭敏な波峰形状を再現していないことによると考えられる．またケースC，D，EおよびFを比較すると，長周期変動に伴う水位と包絡波のピークが一致することによる影響（DとEの差）は，波・流れ干渉による影響（CとDの差）に比べて相対的に小さいことが分かった．また本数値実験においては，流れの長周期変動は波の集中特性に甚大な影響は及ぼさないものの，ピーク地点を移動させる影響をもつことが分かった．

4. おわりに

新たに構築した画像計測システムを用いた平面水槽実験を行い，長周期変動を伴う波・流れ場の集中特性を面的かつ高解像度に捉えた．また非定常緩勾配方程式に基づく数値実験を実施し，波浪場の集中機構の説明因子をその要素別に分析した．これにより，沿岸域における長周期変動を伴う流れ場は，通常波の集中特性を著しく助長する影響を有することなどが明らかとなった．

本研究は，独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構「運輸分野における基礎的研究推進制度」による補助を受けました．深甚なる謝意を表します．

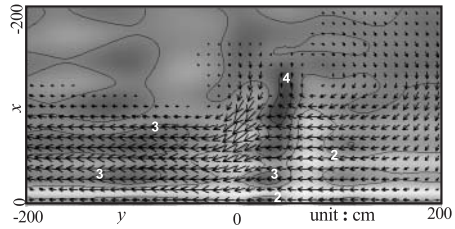

図-9　規則波入射時の海浜流（ベクトル）および波高（コンター）分布

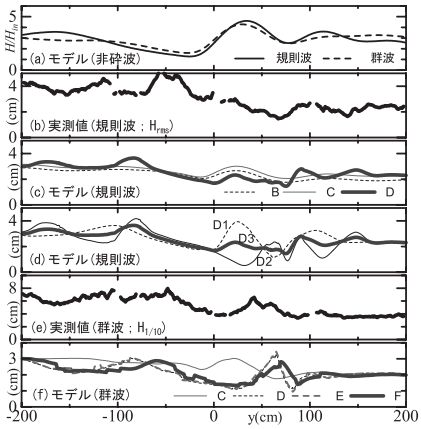

図-10 モデルによる短周期成分の護岸前面波高分布の比較

第36巻，pp.399-403

加島寛章・平山克也・平石哲也（2009）：長周期うねりの来襲特性に関する現地調査とその考察，海洋開発論文集，vol.25（印刷中）．

香取完和・平良達也・水口　優（1992）：波形追跡法による入反射波の分離，海工論文集，第39巻，pp.16-20．

関　克己・水口　優（2008）：一様勾配斜面での波群性入射波に起因する長周期波の挙動，土木学会論文集B，vol.64，pp.62-70．

田島芳満・佐藤愼司・鈴木淳也・下園武範・磯部雅彦（2006）：潜堤周辺の砕波・乱流特性を考慮した海浜流場予測モデルに関する一考察，海工論文集，第53巻，pp.106-110．

田島芳満・佐藤愼司・吉井拓也・細川順一・山田浩次・石川仁憲・三波俊郎（2008）：西湘海岸における2007年台風9号による被害の集中機構，海工論文集，第55巻，pp.1386-1390．

田島芳満・高川智博・浅野泰志・佐藤愼司・武若　聡（2008）：特性の異なる二つの台風による天竜川河口砂州の大規模変形，海工論文集，第55巻，pp.646-650．

長山智則・佐藤愼司・磯部雅彦・都築臨太郎（2002）：無反射多方向造波装置の開発と性能評価，海工論文集，第49巻，pp.11-15．

Janssen, T.T., Battjes, J.A. and A.R. van Dongeren (2003) : Long waves induced by short-wave groups over a sloping bottom, J. Geophy. Res. 108, C8, pp.

Larson, M. and N.C. Kraus (1991) : Numerical model of longshore current for bar and trough beaches, J. Waterway, Port, Coast. and Ocea. Eng., vol.117, No.4, pp.326-347.

List, J.H. (1992) : Wave groupiness variation in the nearshore, Coast. Eng., 15, pp.475-496.

Madsen, O. S. (1994) : Spectral wave-current bottom boundary layer flows, Proc. 24th Int. Conf. on Coast. Eng., pp.384-398.