

海浜流の非定常過程に関する数値的検討

NUMERICAL SIMULATION OF TRANSIENT CURRENT

中村聡志

Satoshi NAKAMURA

正会員 工修 港湾空港技術研究所 海洋・水工部 沿岸環境領域 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

An analytical model for long shore transient current and a numerical model for transient current are proposed. The time evolution of long shore current by oblique incident waves shows analytically and asymptotic long shore velocity in the surf zone is defined the function of bottom friction coefficient. Numerical simulation of near shore current evolution by oblique incident wave groups shows periodic low-frequency current motion is driven by periodic and phase aligned motion of wave groups.

Key Words : numerical model, transient current, time evolution, oblique wave groups

1. はじめに

海浜の地形変化および水環境を決める要因として、海浜流による物質の移動現象が重要であり、これまで多くの理論的研究・実験研究によって、海浜流系の発生・発達メカニズムが示された。また、沖での波の連なりと沿岸浅海域でのサーフビートとの関連や、沿岸の長周期の水理現象について現地観測が数多く行われ、沿岸流の非定常性を示す結果が得られている。栗山ら¹⁾は沿岸流に含まれる長周期(200s~500s)の波動が沿岸流の流下方向に伝播していく現象を観測し、その発生要因をラジエーション応力の時間的な揺らぎや沿岸流のせん断不安定に求め、観測データの解析を行っているが、明確な結論は得られていない。また、武若ら²⁾は、同一の現象を空中撮影した動画像から得られた流速場の空間分布を用いて、沿岸流速変動が生じる要因を分析した。この中で沿岸流の観測値に見られる長周期の波動は、入射波の波向が局所的に変動する時間帯で生じていると結論付けている。本論文は、こうした沿岸に見られる海浜流の非定常な挙動を波の場の空間分布および時間変動によって励起される海浜流の非定常な応答と考え、その特性を解析的・数値的に検討し、沿岸流の発達過程と底面摩擦との関係、波群の入射に対する沿岸流の応答を数値的に明らかにすることによって、現地観測された沿岸流速の長周期変動現象が生じる原因について考察を行ったものである。

2. 沿岸流解析モデルの過渡応答

静止した水域を岸に向かって波が入射する場合の水塊の運動と水塊の岸沖運動の後に平均水面のセットアップ・ダウンが形成される平均水位の過渡応答については、日野ら³⁾によって実験的・解析的に検討がなされ、岸沖流と平均水面の収束については、波の入射開始から比較的短時間(20波程度)で収束状態に達することが示されている。沿岸流については多くの解析解が定常状態を仮定して解かれており、発達過程や過渡応答を表したものは少ない。そこで、ラジエーション応力と底面摩擦力を導入した2次元長波運動方程式を用いて、一様勾配斜面に波が斜め入射する場合の沿岸流過渡応答の解析解を求める。日野らの実験結果から、平均水位と岸沖流は初期には変動するが20波程度で定常状態に達することから(このことは数値検討の結果でも後で示される)、長波流れの基礎式で平均水位と岸沖流を擬似的に定常状態にあると仮定し、また、浜を通過する質量輸送を0とおくことによって、沿岸方向の運動方程式から次式が得られる。

$$d \frac{\partial V}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{S_{xy}}{\rho} \right) - \frac{f_w}{2} |V| V \quad (1)$$

ここで、 d は水深、 V は沿岸流速、 S_{xy} は波によって生じるラジエーション応力、 f_w は底面摩擦係数、 t は時間、 x は沖向きを正とする距離軸、水平拡散項については無視している。さらに、式(1)を静止状態($V(0)=0$)からの発達過程($V(t) \geq 0$)の条件で解き、 S_{xy} に波のエネルギー

ギー表示式を用い、砕波帯内の波高水深比 γ は一定、砕波点での波向を θ_b 、平均水位変動は小さい ($d \ll h$) と仮定して式を整理すると、砕波帯内の沿岸流速 $V(t)$ は次式で得られる。

$$V(t) = V_\infty \tanh(T^*) \quad (2)$$

ここで、

$$V_\infty = \sqrt{\frac{g\gamma^2 h \theta_b \tan \beta}{2f_w}} \quad (3)$$

は、沿岸流速の漸近値、 h は初期水深、 $\tan \beta$ は海底勾配、

$$T^* = t \sqrt{\frac{gf_w \gamma^2 \theta_b \tan \beta}{8h}} \quad (4)$$

は、無次元化された経過時間である。静止水面に規則波が斜め入射する場合、砕波帯内の沿岸流速の発達過程は、砕波状況と地形、底面条件によって決まる無次元時間経過、式(4)、によって徐々に増加し、十分に時間が経過した後は、式(3)の流速に漸近することが分かる。

この沿岸流解析モデルでは、砕波位置での波向について、波の屈折・変形計算から別途求める必要がある。一例として、次節で数値計算を行う一様勾配 $\tan \beta = 1/60$ の海岸に水深12mの沖から 10° の角度で入射する波高1m・周期9sの波の変形計算($\gamma = 0.65$)で得られる砕波点での波向を用いて、海底摩擦係数 f_w の違いによる、砕波点での沿岸流の漸近流速 V_∞ と沿岸流速の99%収束($T^* = 2.65$)までの時間 t を計算した(表-1)。沿岸流速の漸近値と収束までの時間は、底面摩擦係数に依存し、一般的に用いられる $f_w = 0.01$ では、130波以上の経過時間が必要であり、平均水位と岸沖流の応答に比べて安定までの経過時間が長い。これは、沿岸方向に一樣な波によって生じる岸に平行な小さな起流力と底面摩擦力が釣り合うよう流速が決定されるためである。

表-1 海底摩擦係数と沿岸流漸近速度、収束時間(波数)

f_w	V_∞ (m/s)	t (s)
0.01	0.85	1224 (136波)
0.05	0.38	547 (60波)
0.25	0.17	245 (27波)

3. 海浜流数値モデルと応答計算

(1) 海浜流数値モデル

離岸流の消長や寄せる波の遡上の不規則性でわかるように、海浜流や波の遡上は、極めて非定常な現象であり、これらを励起する波の振幅と位相の変化によって空間的・時間的に変動する。沖から来襲した波は、浅海域を伝播する過程で海底地形や構造物の影響を受け、屈折、浅水変形、砕波変形、回折、反射によって、波高や波向きが変化する。こうした波浪変形を波の位相を含めて精度よ

く推定することが、波の遡上を含めた海浜流を計算する上で重要となる。波の振幅と位相を計算するモデルとして、波の不規則性を考慮して波と流れを同時に計算するBoussinesq方程式を用いたモデルがあるが、数値境界条件の処理や適用範囲の問題、大領域計算における計算時間の問題があるので、ここでは波の不規則性を犠牲にするけれども、これらの問題の比較的少ない非定常緩勾配方程式を用いる。非定常緩勾配方程式は波の主要な変形を扱うことができ、規則波であるために波の変形が顕著に現れる特徴を持つ。また、波の連なり(波群)の効果に対しても入射波の振幅の変調を行うことにより簡単に評価することができる。そこで、海浜流の過渡応答を検討するために、Nakamura⁴⁾の砕波を考慮した非定常緩勾配方程式に波と流れの干渉項を追加した式(5)を用い、波の伝播変形計算と波の一周期積分操作で計算されるラジエーション応力の空間分布を外力とする長波方程式、式(6)、(7)を相互に干渉させつつ、時間発展的に求解した。汀線境界については、段波モデルによる平均水位上昇による浜への遡上を計算した。

$$\frac{D^2 \phi}{Dt^2} + (\nabla \cdot U) \frac{D\phi}{Dt} = \nabla \cdot (c c_g \nabla \phi) - k^2 c^2 (1-n) \phi - f_D \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (d) + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} (d \hat{u}_\alpha) = 0, \quad d = h + \hat{\eta} \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (d \hat{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(d \hat{u}_i^2 + \frac{1}{2} g d^2 \delta_{i\alpha} \right) = -F_i - \tau_i + g d \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (7)$$

ここで、 ϕ : 水表面ポテンシャル、 $\hat{\eta}$: 平均水面変動、 h : 初期水深、 $U = (\hat{u}_x, \hat{u}_y)$: 海浜流ベクトル、 c, c_g : 波速と群速度、 n : 群速度波速比、 k : 波数、 f_D : 砕波減衰係数、 F_i, τ_i : 式(5)で逐次計算される ϕ (波動成分の η, u, v)を波の一周期の間で積分することによって得られるラジエーション応力による起流力と底面摩擦抵抗を表す。微分演算子は以下の通り、

$$\frac{D}{Dt} = \left(\frac{\partial}{\partial t} + U \cdot \nabla \right), \quad \nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right).$$

(2) 斜め入射規則波に対する海浜流の応答計算

数値計算は沿岸方向に500m、岸沖方向に1000m(沖向きを正とする)、格子間隔5m、斜面勾配1/60の計算領域を設定し、静止状態から沖側境界(水深12m)に波高1m周期9sの規則波を斜め入射させるステップ応答計算を行った。沿岸境界は繰り返し境界(沿岸方向に計算領域が連続する境界)とし、規則波の入射角度を沖側境界で波長の整数倍の位相が生じる角度とすることにより、無限に続く一様勾配海浜での海浜流の計算を行った。

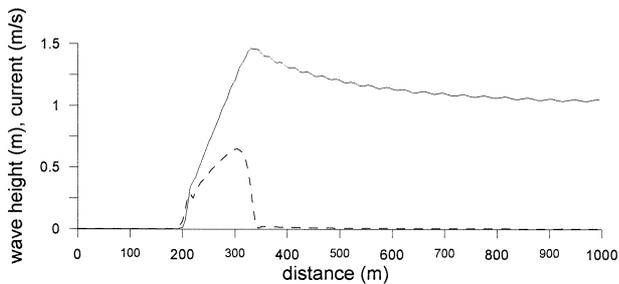


図-1 波高と沿岸流速の岸沖分布

図-1は、沖側境界から 10.1° の角度で波高1m周期9sの規則波が入射する条件で計算した場合の沿岸流速がほぼ定常に達した時点での波高の岸沖分布(実線)と沿岸流速分布(破線)の結果である。平均汀線位置は190m, 砕波開始位置は345m, 砕波波向角は 5.3° , 波高の最大値1.46mは335m地点で生じ, 沿岸流速の最大値は315m地点で生じ, 0.65m/s であった(砕波判定は $\gamma=0.65$ とし, 底面摩擦係数は $f_b=0.01$ とした)。

図-2は、沖側境界から 10.1° で波が入射する場合の沿岸流速の最大値が発生する315m地点における平均水位(細線), 岸沖流速(点線), 沿岸流速(実線)の応答を入射波の数で整理したものである。岸沖流速は沖向きを正とする。静止水面上に入射する規則波に対する過渡応答として, 入射10波目に先頭波が到達し, 10~30波の間に平均水位と岸沖流速の変動が生じるが, その後は安定している。これは, 初期静水状態から波を入射させる場合, 先頭波到達時に波の進行方向の波高分布が急激に変化するため, 岸沖方向の起流力 F_x (図-3中の太線)が大きく変動する。その後, 先頭波が汀線で反射し, 重複波が安定的に形成され, 波高の岸沖分布が安定するまで, 平均水面と岸沖流速が振動するためである。この先頭波到達時の平均水位・岸沖流速の変動の大きさは, 入射波を徐々に増大させるよう入射条件を変更すると減少する。一方, 沿岸流速については, 先頭波の到達時の変動は小さく, 時間とともに漸増する。これは, 一様勾配斜面に規則波が斜め入射する場合, 沿岸方向の波高分布はほぼ一様であり, ラジエーション応力 S_{yy} の沿岸方向勾配が極めて小さいため, 沿岸方向の起流力 F_y (図-3中の細線)が生じにくいからである。この時の沿岸方向の起流力 F_y は, 主にラジエーション応力 S_{yy} の岸沖勾配によって生じており, その大きさは, 岸沖方向の起流力 F_x に比べて一桁小さい。

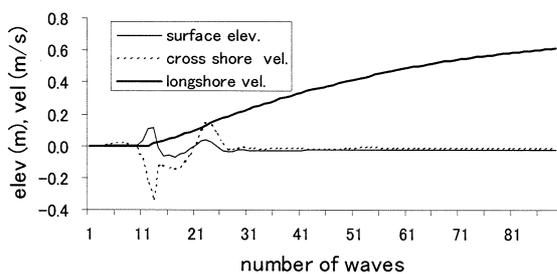


図-2 平均水位・岸沖流速・沿岸流速の応答

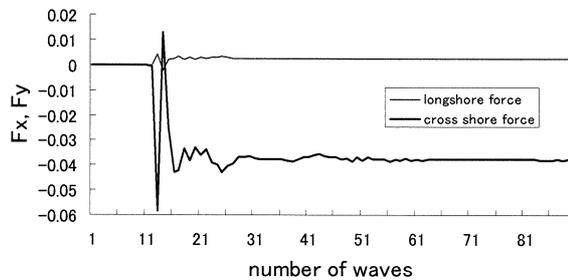


図-3 岸沖方向起流力と沿岸方向起流力

波の入射角が大きくなると, 砕波開始位置での波向角が大きくなり, 砕波帯内の沿岸流速漸近値(式3)が大きくなり, 収束に掛かる時間(式4)が短くなることから, 解析モデルから分かる。解析モデルでは, ラジエーション応力 S_{yy} の岸沖勾配のみを起流力としているけれども, 入射波向が大きくなると砕波帯内の波向も大きくなり, ラジエーション応力 S_{yy} の沿岸方向勾配も大きくなると考えられる。図-4に数値計算モデルにおける波の入射角と沿岸流の発達過程について示す。図は, 入射角が 10.1° , 20.6° , 30.8° の場合の岸沖距離315m地点における沿岸流速の時間変化を示す。入射角が大きいほど砕波点での波向角も大きく, 漸近する流速値は大きくなる。また, 収束に掛かる時間も入射角が大きいほど短くなる傾向は, 解析モデルと変わらない。さらに入射角度を 44.7° , 61.5° と大きくすると, 61.5° では砕波に至る前の屈折変形によって波高が減少し, 砕波点の位置が岸寄りに移動するため, 沿岸流速の岸沖最大値の生じる位置も岸寄りに移動し, 砕波帯外となる岸沖距離315m地点における沿岸流速の値は, 減少に転じる。

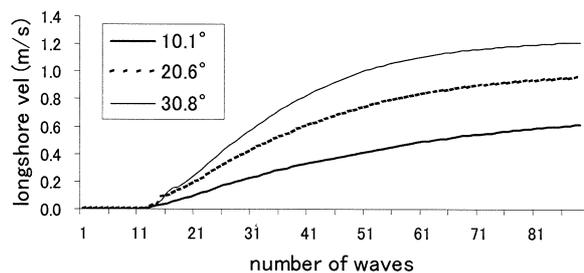


図-4 入射角による沿岸流速の応答

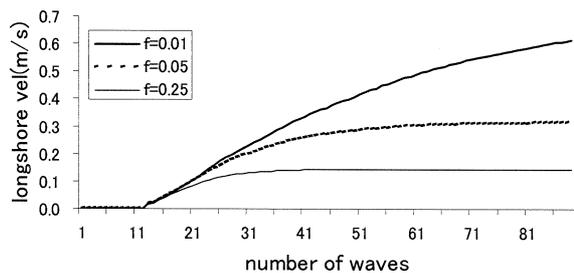


図-5 底面摩擦係数による沿岸流速の応答

次に、底面摩擦力と沿岸流速の応答との関係（入射角 $=10.1^\circ$ の場合）を図-5に示す。沿岸流速の漸近する値は、底面摩擦係数が小さいほど大きく、また収束するまでの時間は長い。この沿岸流速の漸近値 V_∞ と収束時間 t_c との関係は表-1とほぼ同じ値となっている。底面摩擦係数の相違によって、砕波帯内の沿岸流速の値、および、収束に掛かる時間が変化することから、海浜流計算における海底摩擦係数の選定は、波の諸元の変化時間（波の連なりや不規則性）を考慮する必要があると思われる。一般に海浜流の数値計算においては、底面摩擦を全域一様と仮定したり、沖から岸に向かい増加させたりして、流速値の合わせこみを行うが、こうした合わせこみ調整は、定常状態を仮定したものであり、ここで示した沿岸流の収束時間や過渡応答を考慮したものではない。海浜流の計算、特に離岸流や波の遡上など非定常な現象を扱う場合には、これら応答についても考慮して海底摩擦係数の合わせこみを行う必要がある。

(3) 斜め入射振幅変調波に対する海浜流の応答計算

波群が入射する場合の海浜流の応答を調べるために、前節での規則波の代わりに振幅変調波を用いて、平均水位、岸沖流速、沿岸流速の応答を計算した。前節と同様の計算領域に静止状態から、5波を一波群とする繰返し周期で、入射波の振幅を25%変動させた平均波高1m、周期9sの波群を斜め入射角 $=10.1^\circ$ で作用させた。この時、斜め入射する波の峰と同じように波群の高波・低波の位相が揃った状態で伝播しており、岸沖方向に波群が伝播すると同様に、沿岸方向にも波群の位相による波高の分布の極大・極小を繰返す分布が移動する状態となる。図-6は、ある岸沖断面における砕波帯内の沿岸流速が極大値となる位相での波高と沿岸流速の分布である。この時、砕波域での波高は極小から極大に向かう位相であり、砕波開始位置は沖へ移動している。砕波開始付近の波高の岸沖勾配が大きくなることによって、岸向き流速が生じるとともに、沿岸方向の波高勾配も大きくなることによって、沿岸流速が生じている。同断面での沿岸流速極小位相の波高と沿岸流速の岸沖分布は図-7となり、砕波域での波高は極大から極小に向かう位相である。砕波開始位置は岸へ移動し、砕波開始付近の波高の分布は、岸沖・沿岸方向ともに小さい。

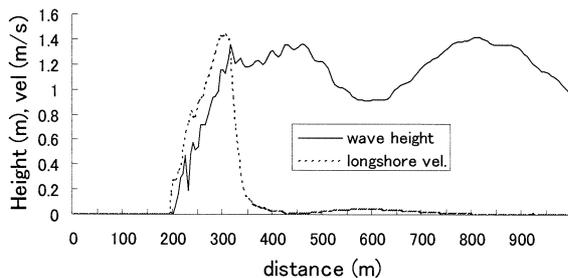


図-6 波高と沿岸流速の岸沖分布（沿岸流速極大位相）

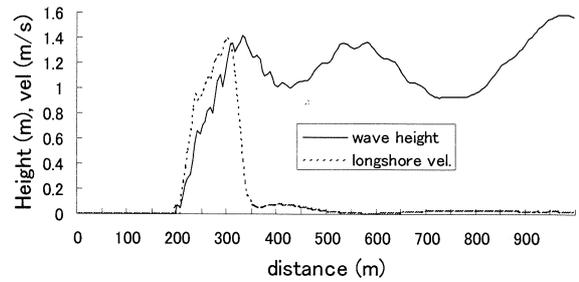


図-7 波高と沿岸流速の岸沖分布（沿岸流速極小位相）

図-8に沿岸流速の最大値が発生する岸沖距離315m地点における平均水位、岸沖流速、沿岸流速の応答を示す。図-2と同様に岸沖流速は沖向きを正とする。静止水面上に入射する波群に対する過渡応答として、入射10波目に先頭波が到達し、規則波の場合と同様に平均水位・岸沖流速は初め大きく振動するが、その後は波群の繰返し波数で、一定の変動幅で振動している。一方、沿岸流速については、先頭波の到達時に変動することなく、徐々に増加する傾向を示しているが、岸沖流速と同様に波群の繰返し波数で流速値は振動している。これは、沿岸流速の極大位相・極小位相で述べたように、規則波の斜め入射の場合と違って、波の入射角度で波群中の高波の位相が揃って入射するために、岸沖の波高に高低が生じるとともに沿岸方向にも高低が生じるために、波群の移動に伴った岸沖および沿岸方向の起流力が生じるためである。この時の沿岸方向の起流力はラジエーション応力 S_{xy} の岸沖勾配だけでなくラジエーション応力 S_{yy} の沿岸勾配によっても生じており、岸沖方向の起流力に比べて同程度の大きさとなる（図-9）。

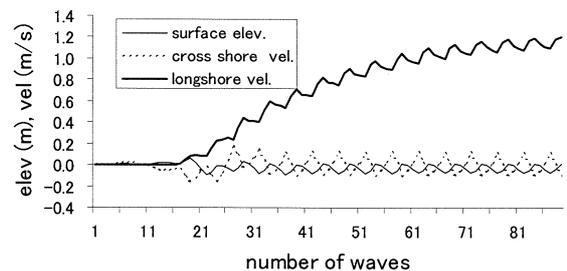


図-8 平均水位・岸沖流速・沿岸流速の応答（波群入射）

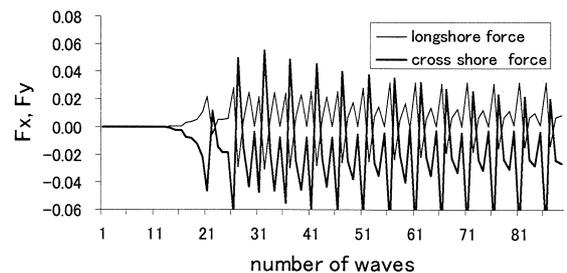


図-9 岸沖方向起流力と沿岸方向起流力（波群入射）

4. おわりに

静止水面上に斜め入射する波に対する沿岸流の過渡応答を数値的・解析的に示した。沿岸流速の安定には、水位・岸沖流の安定に比べて長時間が必要であり、その流速の最大値と収束までの時間は、砕波時の波向と底面摩擦係数に依存することを示した。次に、波の変形計算と海浜流計算を相互に干渉させつつ時間発展させる数値モデルを用いて、規則波の斜め入射および波群の斜め入射に対する海浜流の発達過程を比較検討した。規則波の斜め入射時には、沿岸流は徐々に増加し、130波程度 ($\theta_b = 10.1^\circ$, $f_w = 0.01$ の時) で安定した状態となる。波群の斜め入射時には、沿岸流・岸沖流ともに波群の繰り返し周期の変動が明瞭に現れる。このとき沿岸方向の起流力はラジエーション応力 S_{yy} の沿岸勾配の寄与、すなわち、斜めに進行する波群による波高の沿岸分布、が大きい。規則波と波群の入射時の応答特性から、一様な波の状態の海岸に一団の波群が来襲した場合には、波向の局所的

変動とともに海浜流の変動が生じる。このことは、波の場の変動による海浜流の非定常な応答として、武若らの示した沿岸域の長周期波動の特徴を説明できることになる。

参考文献

- 1) 栗山善昭, 灘岡和夫, 武若聡, 岡安章夫, 片山裕之, 森信人, 内山雄介, 中島剛, 田村仁, 堀口敬洋, 澤田浩一: 浅海域における長周期水理現象に関する総合的現地観測, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.231-235, 2000.
- 2) 武若聡, 三崎尚一郎, 岡本宴徳: 画像計測による沿岸流速分布の推定, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.116-120, 2001.
- 3) 日野幹雄, 沢本正樹: 非定常過程としての海浜流の研究(1), 海岸工学論文集, 第24巻, pp.596-599, 1977.
- 4) Nakamura, S: A numerical model for low-frequency harbor oscillation induced by wave group deformation, Proc. of 6th intl. conf. on hydrodynamics, pp.262-266, 2004.