

遡上波中の流れ構造とせん断力分布の遷移並びに水面勾配が与える影響

Transitional velocity and shear distributions in a runoff wave and influence by a water surface gradient

北海道大学院工学院 ○学生員 堀井正輝 (Masaki Horii)

北海道大学大学院工学研究院 正会員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

1. はじめに

波浪の遡上にかかわる工学的問題は多岐にわたる。2011東北地方太平洋沖地震津波では、次々と倒壊され瓦礫化した家屋が遡上先端部に捕捉され対流しながら遡上を継続する映像が報道された。また海浜においては、swash zoneで発達する局所的な前浜侵食など、遡上波内部の流体力が支配する現象について十分に理解されていない。遡上波については古くから遡上高を実験的に決定するための研究や水深積分型波動方程式による理論的あるいは計算による水面形遷移の調査分析が行われてきた(Synolakis 1987)一方、遡上波先端部の流体域が非常に薄く、計器の導入に制限があり、また波の遡上前後で計器が水中から露出すること起因する実験的な困難から一連の遡上過程における詳細な流体運動は未だ理解されていない。

本研究は、遡上波下のせん断力遷移の数値モデル化並びに、底質及び物質を駆動し輸送するメカニズムを明らかにすることを最終目的とし、高解像Particle Imaging Velocimetry (PIV)により得られた詳細な流速分布から一連の遡上過程の流れ構造の時空間変化に関する新たな知見を表わすものである。

2. 実験方法

図-1 に示す延長 200cm, 幅 10cm, 高さ 15cm の 全面透明アクリル製小型造波水槽中において斜面を遡上する孤立波下に混入された蛍光中立粒子の移動を水槽側方から高速ビデオカメラ(解像度 1280×1024, フレームレート 500 fps, シャッタースピード 1/2000)で撮影する。水槽一端に設置されたリニアサーボモーターで周期 2.6s の正弦運動で 1 周期分駆動するパドルにより、水深 40mm の水平底面区間において入射波高 12mm の波が造波される。波長 532nm の YAG レーザーシートが水槽底部から照射され、水平-鉛直平面上を照明する。水中に混入した粒径約 50 ~ 100 μ m の蛍光粒子はレーザー波長で励起し、ピーク波長約 630nm の蛍光を発する。高速ビデオカメラには 600nm 以上を透過するローパスフィルターが設置され、レーザーの水面からの反射の影響を排除し、粒子からの蛍光のみが撮影される。遡上波先端の薄い鉛直流体域(約 10mm)中の流れを解像するため、カメラにはマクロズームレンズが取り付けられ、30×30mm の撮影領域で解像度約 23 μ m/pixel の高解像画像計測を行った。斜面勾配 1/8, 1/10 及び 1/15 の 3 ケースに対して、汀線位置-30mm から遡上限界までの水平区間を 30mm 間隔でトラバースし、一連の遡上過程における流速分布を取得した(図-1 参照)。各計測地点において 15 回の試行計測を行い、流速のアンサンブル統計量を

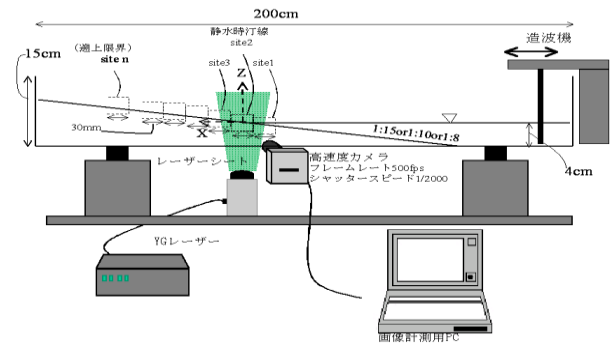


図-1 実験装置と計測領域の概略図

解析した。アンサンブル平均流速の鉛直方向差分により流速勾配並びにせん断力を評価した。なお、汀線を原点とし岸向きを正とする座標系に対して入射波が汀線を通過する時刻を $t=0s$ と定義した。全底面勾配とも、遡上過程を通して碎波の発生は観測されなかった。

3. 結果

(1) 遡上過程

遡上過程は、汀線近傍で急峻化した非線形波下に生じる強い水平圧力勾配が支配する初期の遡上フロントの放出、線形長波として近似し得る重力波の分散関係に従う伝達、そして汀線における波面の急峻化に起因する表面張力波の伝達の 3 つの代表速度、また薄膜流が支配する代表速度などによって特徴化できる(図-2 上)。本論文では前者の 3 つの代表速度について考えるものとする。

急峻化した波が汀線へ入射した直後、その非線形水面が急な水平圧力勾配を与えるため数 mm 程度の薄い流体層が放出され遡上フロントとして先行する(図-2, B2, B3, C2 と C3 の間)。その後、このフィルム状のフロントは重力波の分散関係に従う波速($c1=(gh)^{(1/2)}$, ここで g 重力加速度, h 水深)で進行する。

一方、汀線における入射波の水面形の高曲率化は表面張力波を生成する。この表面張力波は、遡上初期に高速で放出され先行するフィルム状フロントを追いかけ、1/10 勾配上では波浪の汀線通過後 0.154s-0.260s (図-2, B4-B5), また 1/8 勾配上では、約 0.101s (図-2, C3)に追いつき、その後遡上波を駆動して進行する。これは、表面張力波の分散関係 $\sigma^2=\gamma/\rho k^3 \tanh(kh)$ (ここで、 σ 角周波数、 γ 表面張力、 ρ 密度、 k 波数)から得られる長波近似された波速 $c2=(\gamma/\rho h \sigma^2)^{(1/4)}$ より、波の進行を通じた h の低下に対する波速の低下率が重力波速 $c1$ より相対的に低く、遡上途中で逆転することが原因と考えられる。この表面張力波の合流後、遡上波は薄い

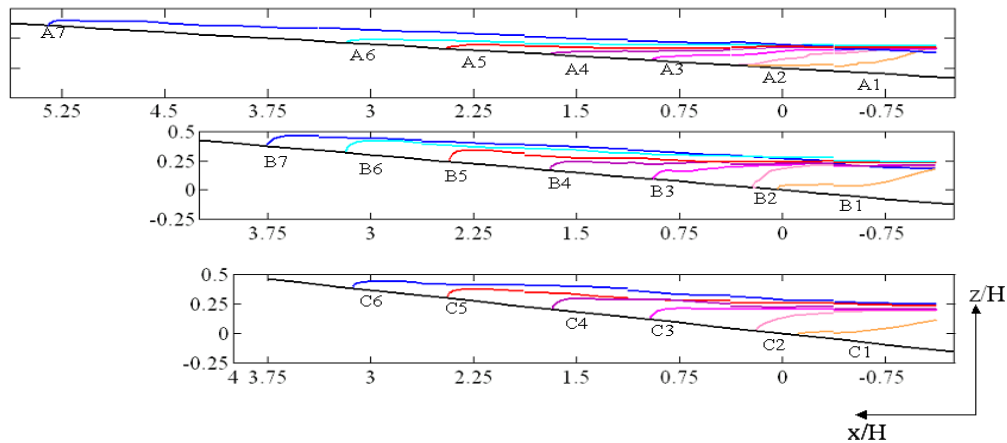


図-2 遡上波の水面形の時間遷移；1/15 斜面勾配(上)：それぞれ水面形は沖側から時刻 $t=-0.0565s(A1)$, $0s(A2)$, $0.085s(A3)$, $0.152s(A4)$, $0.234s(A5)$, $0.347s(A6)$, $1.062s(A7)$ のもの，1/10 斜面勾配(中)：沖側から時刻 $t=-0.084s(B1)$, $0s(B2)$, $0.0766s(B3)$, $0.154s(B4)$, $0.260s(B5)$, $0.418s(B6)$, $0.897s(B7)$, 1/8 斜面勾配(下)：沖側から時刻 $t=-0.097s(C1)$, $0s(C2)$, $0.101s(C3)$, $0.177s(C4)$, $0.325s(C5)$, $0.608s(C6)$, する(図-4 上並びに図-5 左上). その後，流体域上層では

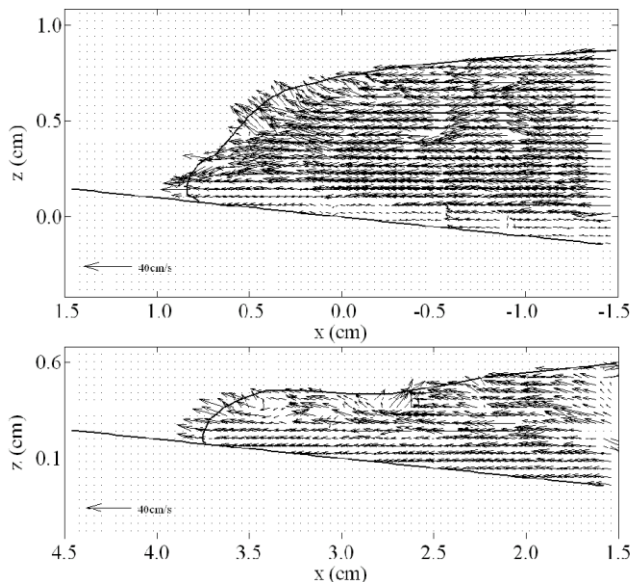


図-3 汀線位置(上)と汀線から 3 cm 岸側(下)における入射波下の流速分布と水面形(1/10 勾配)，黒色ベクトルは岸向き(遡上方向)流速ベクトルを表す。

フィルム状の形状から典型的な丸みを帯びた先端形状へと変化する(図-2, B5-B7, C3-C6). これら一連の遡上過程は，流体内の流速及びせん断力分布に大きな影響を与える。

図-3 は，1/10 勾配斜面に入射する波が $x=0cm$ (汀線位置)及び $x=3cm$ へ到達した位相の流速分布を表したものである。図-3 上を見ると，汀線で急峻化した波の下に働く動圧力によって，1-2mm の厚さのフィルム状の流体層が放出されているのが確認でき，図-3 下ではその層が加速され遡上しているのがわかる。

(2) 流速分布とせん断力分布

遡上フロントの背後では遡上の進行に伴い境界層厚が増大し自由水面せん断流のような流速分布の流れに遷移

する(図-4 上並びに図-5 左上). その後，流体域上層では

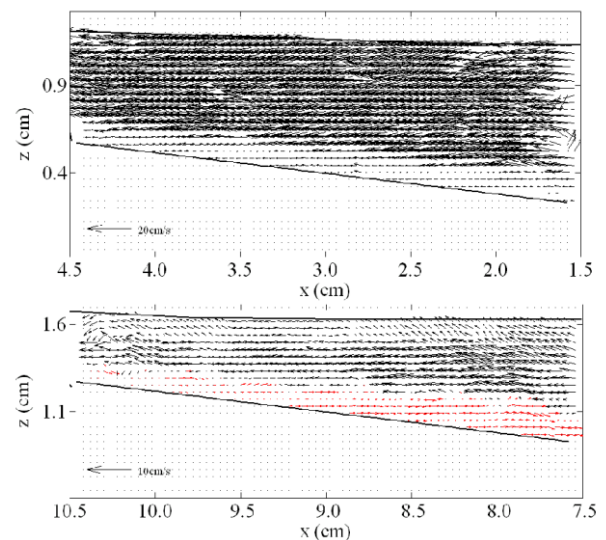


図-4 遡上流体の流速分布と水面形(1/8 勾配)；自由水面せん断流となる領域(上, $t=0.325s$)，逆流が発生している領域(下, $t=0.608s$)，赤色ベクトルは沖向き(逆流方向)流速ベクトルを表す。

依然遡上方向へ流れるにもかかわらず，底層において逆流が発生することが明らかになった(図-4 下). また図-4 下並びに図-5 右上から，水面付近の流速が内部中層の流速より小さくなっていることがわかる。このことから遡上域独特の逆流は底層のみならず，時間経過と共に水面近傍の表層でも発生する。即ち明確に水平流速分布の異なる底層，中層，表層の3層に分かれた流れ構造が形成される。さらに時間が経過すると，逆流する鉛直領域が拡大し，流体全域に渡って逆流が現れる。

また，図-5 下段のそれぞれの時刻におけるせん断力の鉛直分布から，自由水面せん断流を形成する領域($t=0.325s$)では，強い正の底面せん断力と $z=0.2cm$ 程に位置する境界層内に発達するせん断層の形成によって

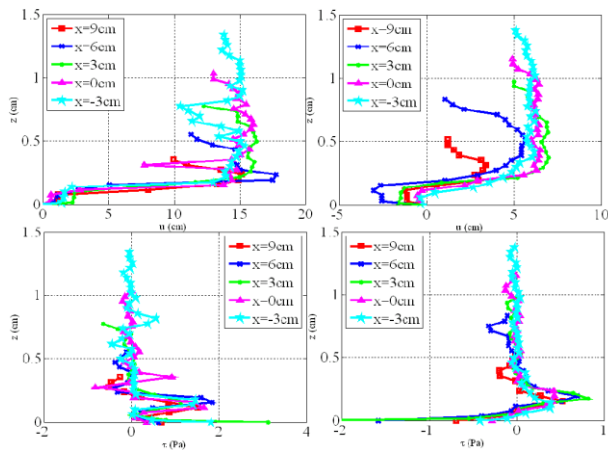


図-5 同一時刻における水平流速の鉛直分布の岸沖変化(上段)と水平せん断力の鉛直分布の岸沖変化(下段)；また左列が自由水面せん断流となる領域($t=0.325s$)，右列が逆流が発生している領域($t=0.608s$)

特徴付けることができる．一方逆流発生領域($t=0.608s$)において，底面せん断力は前者と符号が逆転し，底面から逆流境界層内で発達する正のせん断力ピークに至るまで薄い層内で鉛直方向に大きくせん断力が変化する．また，前述した表層部に発生する逆流に起因する負のせん断層が水面下に現れ，二つのせん断層をもつ極めて独特なせん断力分布が形成される．

また(2)で述べたことはどの勾配でも同じ傾向を見ることができた．

4. 遡上波の力学

上述した遡上波せん断流の時空間変化の特徴から流れの力学機構を解説する．

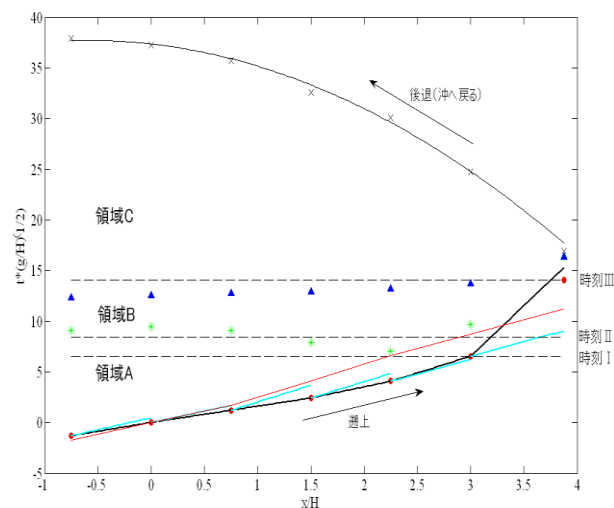


図-7 遡上波の特性曲線(1/10)勾配；赤●：遡上時のフロント位置，黒×：引き波時フロント位置，緑*：底層が逆流を開始する位置，青▲：全流体域が逆流を開始する位置．領域 A では全流体域が遡上方向へ流れる．領域 B では底面境界層内のみ逆流し上層では遡上方向へ流れる．領域 C では全流体域が逆流する．

図-7 は遡上域全域に渡って，時間と共に空間的流れ構造が変化していることを表わしている．同一時刻 I ではフロントからネックに至る遡上全域が領域 A に含まれ，遡上方向流れのみが形成されている一方，時刻 II において，フロント近傍が領域 A に位置し遡上を継続しているにもかかわらず，その背後では底面での逆流が発生する(領域 B)，そして再び全層が遡上方向に流れる領域 A へと遷移していることがわかる．即ち，フロント部は流体域全域が岸向き(順流)のせん断流速，その背後では底面近傍に逆流域が生じるため，同一時刻の遡上域内で底面せん断力の方向が反転する特異点が発生する極めて独特な流況が形成されることが明らかになった．さらに遡上限界となる時刻 III では，フロント近傍の流体内部でのみ遡上し，他の位置では全層逆流していることがわかる．

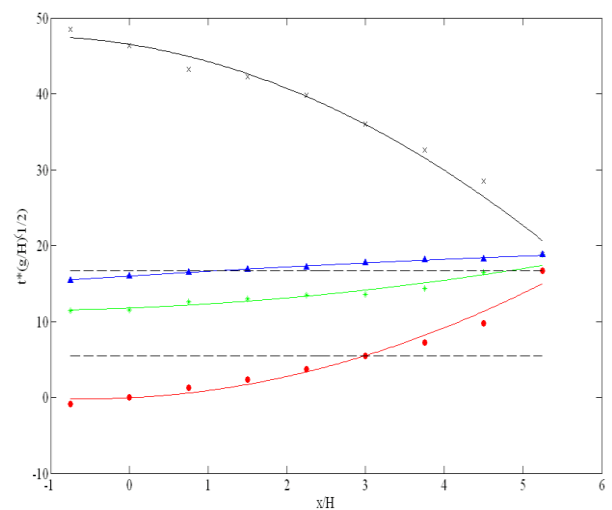


図-8 遡上波の特性曲線(1/15)勾配；時刻プロット以外は図-7と対応している．

勾配の異なる流況の比較から，初期遡上フィルムを放出する慣性力，境界層内にはたらくせん断力そして水面勾配と対応する圧力勾配による力学的バランスから流況の変化を説明する．図-7 に示す特性曲線において，1/15 勾配と大きく異なる特徴の一つは，汀線付近の領域 A が相対的に広く，領域 B が狭いことである．これは，加速して遡上方向へ流れる境界層流れと水面の勾配から決定される圧力勾配の力学的関係から逆流の発生を記述することで，説明することできる．

遡上フロント部では，流体全域がほぼ様な運動量変化(加速度)と正の圧力勾配がバランスし，またその背後において圧力勾配，せん断力そして流れの加速に伴う慣性力がバランスする安定した自由水面せん断流が形成される．一方，境界層がフルに発達し境界層流れが準定常状態となると，発達した境界層内外で水平運動量に差が生じ，加速が継続される上層と運動量の増加率の低い境界層内では圧力勾配とのバランスが崩壊し，沖方向へ向かう逆流が発生する．1/10 勾配ではその非線形性により，遡上する流体の加速度が流体全域で高く安定したせ

ん断流が継続して発達し相対的に領域 A が占める時間帯が長くなる。一方、この安定状態は前述した波浪の汀線近傍での急峻化に伴って発生した表面張力波の合流によって大きく変化する(図-7 緑プロット参照)。

図-7 の水色線プロットは実計測した水深で、各位置での重力波速 $(gh)^{1/2}$ をプロットしたもの、黒太線はフロントの次の測定地点までの平均速度をプロットしたもの、そして赤線プロットは、($x=0$ 原点で)波が遡上限界まで重力波速で進行するとした時のフロントの位置プロットとなっている。これを見ると、実計測した平均速度のほうが(遡上限界手前まで)重力波よりも高速で遡上しているのがわかる。このことから実際の遡上波は表面張力波などの影響を大きく受けて進行しているのがわかる。

海岸の前浜や津波の遡上で観察される局所侵食は、薄い遡上流体中にもかかわらず発達する強いせん断力だけでなく、境界層の発達と水面の局所変動に敏感に応答して発生し、流体の引っ張り及び収縮を伴う力学的に不安定な特異点の出現により促進されている可能性がある。

5. 結論

一連の遡上過程において、遡上波下の流況は時空間的に大きく変動する。汀線近傍で急峻化した波面はその圧力勾配によって放出され斜面遡上を開始すると同時に、高曲率となった波頂において表面張力波が形成される。遡上波フロントは表面張力波より高速で進行し先行して

遡上する。遡上の進行に伴い境界層厚が増大し、典型的な自由水面せん断流へと遷移し、底面から 1--2mm の位置に明確なせん断層が発生する。

遡上波の背後で境界層を通じた遡上波独特の逆流が発生することが明らかになった。遡上波下では逆流する鉛直領域が沖向きに増加し、さらに背後では流体域全層に渡って逆流が現れる。即ち、フロント部は流体域全域が岸向きのせん断流速、その背後では底面近傍に逆流域が生じ、さらに背後では流体全域に渡る戻り流れとなり、遡上域内で底面せん断力の方向が反転する。この特徴は、前浜侵食のメカニズムを説明する上で極めて重要なものと考えられる。さらに境界層内の逆流が進行するに従い、水面表層にも逆流層が出現し、底面及び水面近傍に2つのせん断層が形成される極めて独特な流況となる。

この逆流は、局所水面勾配と境界層内の慣性力の低下に起因することを本論文で結論付ける。即ち、遡上波先端から離れた領域では、発達した境界層内外で水平運動量に差が生じ、加速が継続される上層と運動量の増加率の低い境界層内では局所圧力勾配とのバランスが崩壊し、沖方向へ向かう逆流並びに底面せん断力の方向が逆転する特異点が発生する。

参考文献

Synolakis C. M. (1987): The runup of solitary waves, J. Fluid Mech., 185, pp. 523 -- 545.