

可視化手法を用いた波群中波の追い付き現象の計測

池 野 勝 哉*・Mohammad Dibajnia**・喜 岡 渉***

1. はじめに

現地の波は不規則であり主に短周期波、自由長波、拘束長波の3種類で構成されている。不規則波が岸へ進行する際、短周期成分は浅水変形を経て碎波減衰し、遡上域では低周波数帯の運動が卓越することが知られている。遡上域で低周波数帯が卓越する要因として、波の場に存在する自由長波が、または碎波により拘束を解かれた拘束長波が自由長波として汀線で反射し、重複波として遡上域に作用することと、碎波点の変動により長波が形成されるためだと考えられている。しかし、碎波点の変動によって生じる長波は拘束・自由長波によるものと比べ2次的であり主として拘束・自由長波について考慮すればよい。また、個々波の短周期波は波高がそれぞれ異なるため、追い付き現象により遡上波数は入射時に比べ減少するという報告もある。

従来より、波打ち帯の遡上機構についての研究は多くなされているが(例えば、間瀬・小林, 1993; 山本・谷本, 1994)、波打ち帯が長周期化される要因およびプロセスを具体的に示した事例は少なく、内部流速場からの考察は皆無に等しい。そこで本研究では、高速ビデオカメラによる任意点計測が可能な PIV 可視化手法を用いて、汀線付近の内部運動特性および、遡上域が長周期化される要因について波群中波の追い付きによる観点から検証することを目的とした。

2. 実験方法および実験条件

実験は長さ 26 m, 幅 0.6 m, 深さ 1.2 m の無反射式造波装置付き両面ガラス張り二次元造波水槽を用いた。実験装置および実験方法については、基本的に Dibajnia ら (2000) と同様である。すなわち、斜面底部 (勾配 1:30) の碎波帯内と遡上域付近には水面の変化による可視化画像の輝度分布の乱れが生じるため、レーザー光を下からあてることとした。このため、斜面横断方向に 45°の角度で鏡を内挿したアクリルボックスを設置し、アルゴン

レーザー光を水槽横のガラスから斜面と平行に照射し、鏡で 90°反射させ水路縦断面の撮影を可能にした。粒径 50 μm , 比重 1.02 のナイロン樹脂粒子を遡上域に調整しながらハイスピードカメラ (フォトロン製) を用いて撮影し、レーザーシート光の出力を 2~3 W, シート厚 5 mm, カメラのシャッタースピードを 1/500~1/1000 (s), 撮影間隔を 240~400 FPS とし、撮影した画像は解像度 640×480 pixel の TIFF 画像として取り込み、画像解析ソフト (VISIFLOW, AEA Technology) を使用して相互相関法による PIV 解析を行った。

実験条件は、振幅の違いによる分散性が顕著となる極浅海波を考え、高速ビデオカメラのメモリーの限界等も考慮し、波群の周期が 7 s, 波群中の波数が 5 つとなる表-1 のような条件で、2 成分合成波の最大波高が $H_{\text{max}}=12, 6, 2$ cm となる 3 ケースとした。沖側一様水深部の水深を 48 cm に固定し、撮影断面を断面幅 10~15 cm で中心位置を沖側から P01~P17 と名づけ、14~17 断面ずつ行った。この他にも容量式波高計と電磁流速計で 20 cm 毎に斜面上の水面と底面流速を計測した。なお、撮影開始は水面センサーをトリガー信号として用いているため同ケースの各断面の時間軸は一致している。

3. 個々波の干涉

実験で使用した波群について各ケースとも図-1 のように定義し、波群中の個々波を進行方向から順次①~⑤とする。このとき、 $H_{\text{max}}=12$ cm における波群中波の碎波および、波群特有の追い付き・合体・抑制現象について、沖から岸にかけて図示すると以下ようになる(図-2)。⑤の波が碎波した後、次から来る波群の①の波が⑤の波

表-1 実験条件

		T (s)	H_0 (cm)
波群	$H_{\text{max}}=12$	$T_1=1.4$	$H_1^*=H_2^*=6.0$
	$H_{\text{max}}=6$	$T_1=1.75$	$H_1^*=H_2^*=3.0$
	$H_{\text{max}}=2$	$T_1=2.0$	$H_1^*=H_2^*=1.0$

T_1, T_2, T_1 : 構成する 2 成分および波群の周期 (s)

H_1^*, H_2^* : 構成する 2 成分の入射波高 (cm)

* 工修 五洋建設(株)

** 正会員 工博 Baird & Associates

*** 正会員 Ph.D. 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科

に追いつき、合成波として特殊な碎波を経て進行する。さらに、その合成波は遡上域で遡上を抑制されている④の波に追いつくことにより④⑤①の合成波となるが、後方から進行してきた②の波に追いつかれ④⑤①②の大規模な遡上波として最大遡上し、その後、強力な引き波として沖で最も波高の大きかった③の寄せ波を抑制する。一方、沖から岸への進行に伴い③と④の波の間隔は一番開くため、引き波としては遡上を抑制された③の引き波が強力に④の寄せ波の進行を妨げる。個々波間の時間間隔の岸沖分布を図-3に示す。この図からは、岸側への進行に伴い⑤、①、②、③の波が近づき、③、④、⑤が離れる様子がわかる。特に δt_1 (①と⑤の間隔) に関してはその減少率がある地点を境に大きくなり、逆フーリエ変換で5秒以上に分離した長周期波の波高分布(図-3中の実線)と対応している。また、波群と分離した長周期波形状との対応を汀線からの距離 x について図-4に示す。沖側の波数が岸側では4つに減少している。その過程を可視化画像で見ると、①の波がだんだん⑤に近づくにつれて、二つの波間の谷が浅くなり、水位が上昇していた。その結果、碎波するはずの①の波が水位上昇のため碎波せずに進行し、早くも碎波した⑤に追いついていた。さらに図-4からは、入射時に最大波高であった波③は早く碎波するため(静水深19.7 cm断面)、汀線付近で

は①と⑤の合成波と同じ大きさとなり、 δt_2 (①と②の間隔) 減少のため減衰がやや遅れる②の波が最大波になっていることがわかる。また、長周期波はその波峰位相が波群の沖から岸への進行につれだんだんシフトし、180 cm地点ではより追いつき現象の顕著な位置にロックされ、自由長周期波とはなっていない。その結果、長周期波峰上に存在する波②が最大遡上波となっていた。 $H_{\max}=6$ cmの実験でも同様な現象が見られたが、 $H_{\max}=2$ cmの場合は個々波の振幅が小さいため追いつき現象は見られず、汀線付近の低周波数成分は個々波と明確な位相関係を示さなかった。

$H_{\max}=12$ cmについて、⑤の波に①の波が追いつく時のPIV解析により得られた流速ベクトル分布を図-5に、 $H_{\max}=6$ cmにおいてはその瞬間の流速ベクトル分布を図-6に示す。静水深5.3 cm断面である図-5右の下層部と上層部では明らかに異なる波が存在し、上層部の波は摩擦の少ない下層部の波の上面を滑るように遡上しており、瞬時にして水位が局所的に上昇している。また、

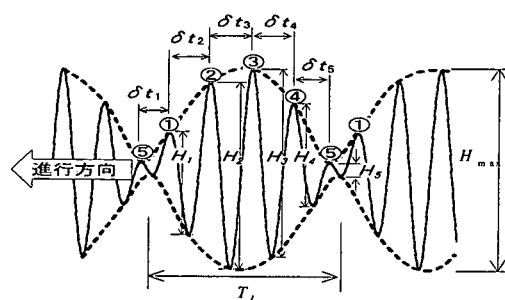


図-1 波群の定義

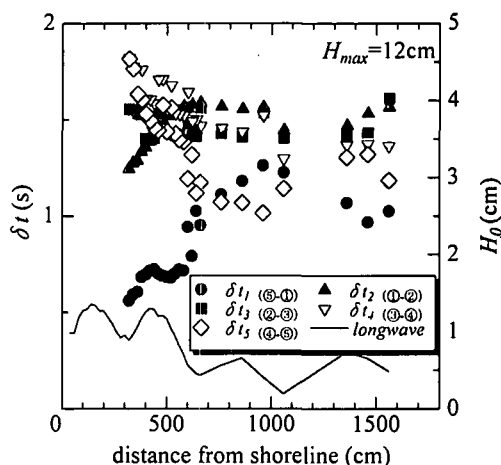
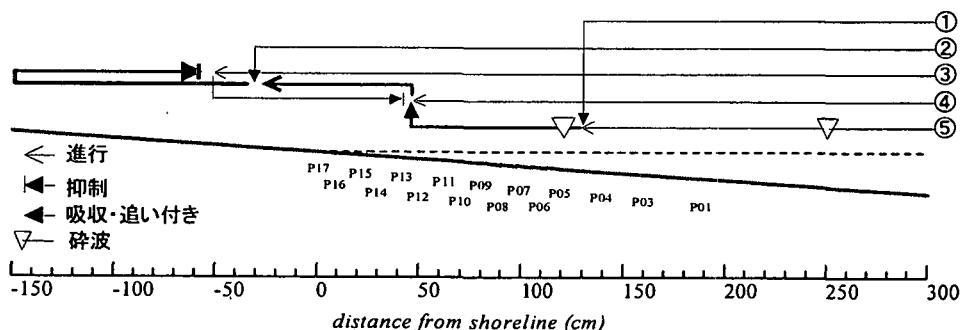
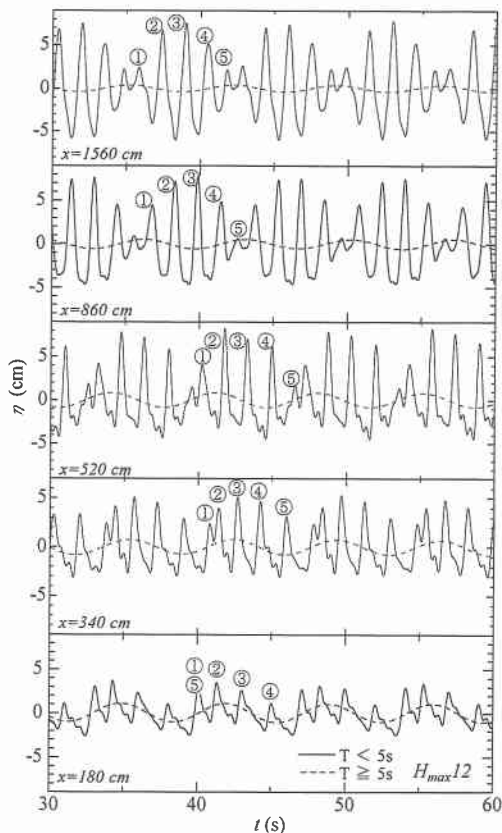


図-3 個々波の時間間隔と長周期波高分布

図-2 波群中の個々波の追いつき・合体・抑制現象 ($H_{\max}=12$ cm)

図-4 長周期波の分離 ($H_{\max}=12$ cm)

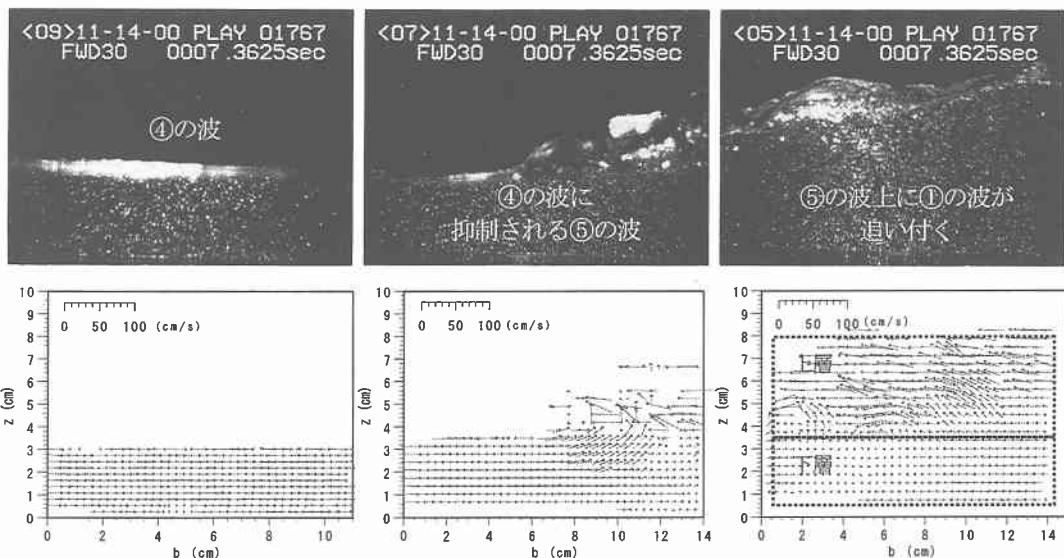
静水深 2.3 cm 断面である図-6 中央でも追い付き現象では同様に、上層部と下層部で異なる流速を持つ波が存在しており、追い付きにより水位上昇の他に、新たな大きい波が誕生する様子が分かる。このタイプの遡上高は摩擦の少ない遡上ゆえ、通常よりも大きくなることが分かる。

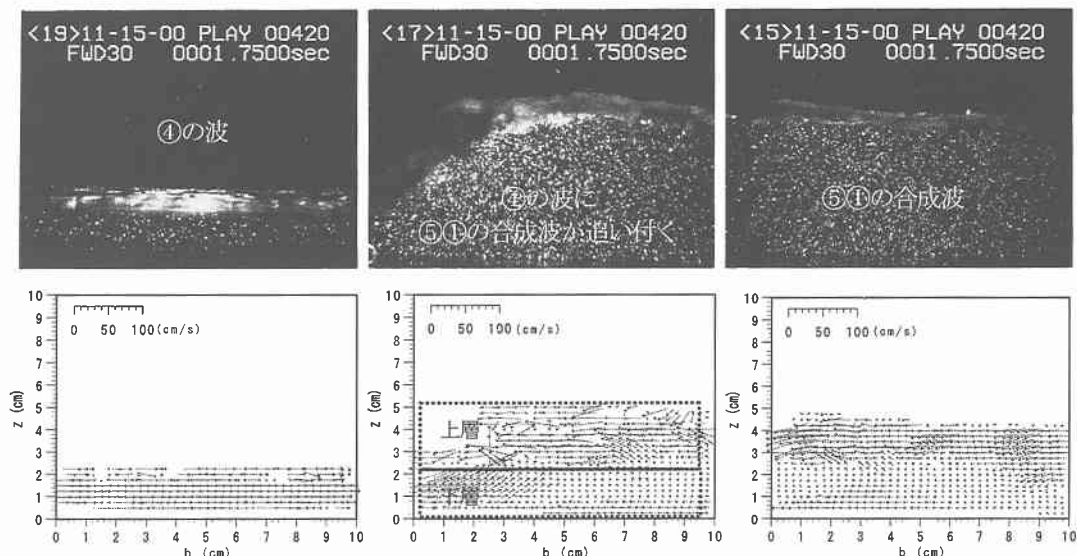
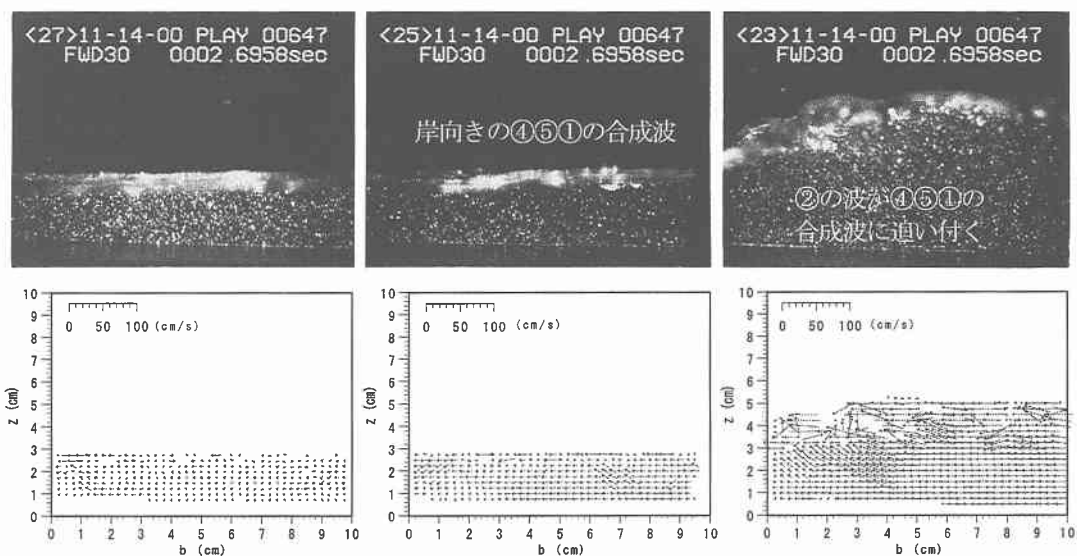
最後に、図-2 で説明した $H_{\max}=12$ cm 時の④⑤①の合成波を②の波が追い付く瞬間の流速ベクトル分布を図-7 に示す。この図は、④⑤①②の巨大な合成波が形成される直前の様子を示しており、図-4 で示したような長周期成分の峰が徐々に④⑤①の合成波の峰へとシフトし、最終的には④⑤①②の合成波と位相が一致し遡上が最大となることを裏付けている。

4. おわりに

可視化手法を用いて波の追い付きによる遡上域の長周期化や最大遡上する遡上波のメカニズムを明らかにした。得られた主要な結果は以下の通りである。

- (1) 遡上域の長周期化する支配的な要因には従来の考え方である短周期成分の減衰と、波群に含まれる長周期成分や引き波・寄せ波の相互作用による遡上波数の減少だけにとどまらず、個々波の追い付きにより新たに形成される長周期波の発生プロセスも含まれる。
- (2) 最大遡上する遡上波は、必ずしも沖側で最大波高であるわけではなく、波群を形成する個々波の波高や配置パターン、汀線までの距離により異なり、最後に追い付いた波が先行する波上を滑るように遡上す

図-5 ④⑤①の合成波 ($H_{\max}=12$ cm)

図-6 ④⑤①の合成波 ($H_{\max}=6$ cm)図-7 ④⑤①②の合成波 ($H_{\max}=12$ cm)

ることで決まる場合もある。

謝辞：本研究において，名古屋工業大学学部学生の遠田久道氏には実験およびデータ解析の際，御協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

酒井哲郎・田中秀明 (1985): 斜面上の砕波における水塊の突入と渦の挙動，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 70-74.

長尾昌明・神保誠二・沢本正樹 (1994): トレーサ追跡法と相関法を用いた孤立波砕波の流速分布測定，海岸工学論文集，第41巻，pp. 161-165.

長尾昌明・新井信一・上岡充男 (1997): PTVとPIVを組み合わせた砕波帯の流速分布測定，海岸工学論文集，第44巻，pp. 116-120.

日野幹雄・灘岡和夫・小俣 篤 (1985): 砕波帯内の乱れの組織的運動と水粒子運動について，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 1-5.

間瀬 肇・小林信久 (1993): Swash Oscillations の長周期変動，

- 土木学会論文集, No. 461/II-22, pp. 49-57.
- 宮本恭交・長尾昌明・新井信一・上岡充男 (1998): 周期波の碎波帯の可視化手法を用いた乱流計測, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 111-115.
- 宮本恭交・長尾昌明・新井信一・上岡充男 (1999): 孤立波碎波の水面形と流速分布の可視化計測, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 131-134.
- 山田文彦・滝川 滑・高山浩介 (1999): 画像解析による碎波変形過程の内部特性と碎波形式および空間波形との関係, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 135-139.
- 山本吉道・谷本勝利 (1994): 波群性に起因する長周期波と海岸への遡上に関する研究, 土木学会論文集, No. 503/II-29, pp. 109-118.
- Mohammad Dibajnia・池野勝哉・喜岡 渉 (2000): 可視化手法による波の遡上運動の内部機構解明, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 516-520.
-