高波浪時の波群特性に関する現地観測

Field Observations of Wave Group Transformation during High Waves

喜岡 渉¹・加藤 寛之²・北野利一³

Wataru KIOKA, Hiroyuki KATOH and Toshikazu KITANO

The characteristics of wave groups propagating over the continental shelf toward the coastal region are investigated using the envelopes computed by the Hilbert transform from field observations and related to the evolution of the amplitude and phase modulations. The measurements are performed by 3 wave gauges located over a few lengths of typical wind wave groups, in water of relatively shallow water depths. During the observation period, the significant wave height exceeds 3m for four days due to the passing of typhoon. It has been observed that the distribution of waves in a group approaching a shore becomes more uniform at the wave growth and wave decay stages of these high waves. During these periods the significant wave height tends to decrease with approaching the coastal zone.

1. はじめに

不規則波の波群特性については、これまでも統計的な検討に加えて、非線形 Schrödinger 方程式(松立・水口, 1997; Shemer ら, 1998; Dysthe ら, 2003; Benilov ら, 2005), Zakharov 方程式 (Mase・Iwagaki, 1986; Shemer ら, 2001), 強非線形ポテンシャルモデル (Barnes・Peregrine, 1995), および浅海における KdV 方程式 (Kit ら, 2000) を用いた理論的な検討が行われている。深海から中間水深を経て浅海へと伝播していく波群の変形特性については、主に狭帯スペクトルを持つ単一方向の波について理論的ならびに実験的に調べられており、個々波の波形勾配が大きく非線形性の強い波群は、相対水深 $kh < 1.36$ の海域ではスペクトルの広帯化とともに包絡波が扁平化することなどが明らかにされている (Shemer ら, 1998; 喜岡ら, 2003; Benilov ら, 2005)。最近, Dysthe ら (2003) は、非線形 Schrödinger 方程式に基づく深海波の 2 次元スペクトル変形計算によって、個々波の波形勾配が大きい場合、初期の帯幅にかかわらずスペクトルの広帯化が進むことを示している。

一方で、実際の現地データを用いて波群の変形特性を調べた研究例は少なく、Veltcheva (2002) など限られたものになっている。高波浪時の不規則波群の伝播変形については、来襲波のスペクトル帯幅、多方向性に加えて、海上風、流れ、碎波、および中間水深から浅海では海底地形、摩擦減衰の影響を受ける。観測結果から有意な変形特性を調べるためには、従来の理論的検討を参考にす

ると、波群長の数倍の伝播距離にわたる波浪データが必要である。本研究は、沖合数 km にわたって設置した波高計により台風接近時の水位変動・流速を観測し、有義波周期に対して相対水深 $kh=1.2$ 前後の水深から浅海域における波群の伝播変形特性について調べようとするものである。

2. 観測方法

愛知県の渥美半島太平洋側の赤羽根漁港から沖合へ 6 km, 水深 26.0 m の地点 (Station-A), 沖合 1 km, 水深 13.0 m の地点 (Station-B), さらに Station-B から岸側へ 221 m 離れた水深 11.4 m の地点 (Station-C) の 3 箇所に波高計 (Wave Hunter Σ) を設置し、水位変動、底面水圧および 2 成分流速を計測した。サンプリング間隔は 0.5 s で、各地点ともに 1 時間おきに 1 時間の同時測定を行った。赤羽根沖の太平洋沿岸には水深 200 m 以浅の陸棚が約 20 km にわたって形成されており、観測点付近は勾配 1/400 から岸に向かって 1/100 程度に変化するほぼ一様な海底地形となっている。

観測期間の 2006 年 8 月 3 日から 10 月 25 日までの間に 0607 ~ 0616 の計 10 個の台風が発生しているが、このうち台風の近海への接近により有義波高 H_s が 3 m を越える日が、8 月に 2 回、9 月と 10 月にそれぞれ 1 回ずつあった。8 月 8 日の観測期間中のピーク付近の波データは、海中への気泡巻き込みによる超音波パルスの異常により欠測している。ここでは、非線形性の強い波の伝播変形を取り扱っているため、水圧や流速値を用いた欠測値のリカバリーは行っていない。8 月と 9 月に観測された付近の伊良湖測候所の平均風速を図-1 に、1 時間ごとの沖 (Station-A) と岸 (Station-B) の有義波高 H_s , 有義波周期 T_s および主波向 θ_p を図-2 に示す。風向および波向は北を 0 ととり、東回りに正、西回りに負の角度で示し、汀線直角方向を 1 点鎖線で示してある。

1 フェロー Ph.D 名古屋工業大学教授 大学院工学研究科社会工学専攻
2 学生会員 名古屋工業大学大学院工学研究科社会工学専攻
3 正会員 工博 名古屋工業大学准教授 大学院工学研究科社会工学専攻

なお、図には示していないが、スペクトル尖鋭度パラメータ Q_b については、両地点ともに有義波高 H_s が 3 m を越えたピーク付近では 6～7 の値をとり、青木ら (1997) の観測と同様に、 Q_b は有義波周期 T_s の変動と対応した変化を示している。

3. 波群および長周期波の解析

不規則波群の個々の振幅と周期の抽出には、水位変動 $\eta(t)$ とそのヒルベルト変換 $\xi(t)$ より求めた次の包絡波形 $A(t)$ を用いた。

$$A(t) = [\eta(t)^2 + \xi(t)^2]^{1/2} \quad (1)$$

このとき複素信号 $a(t) = [\eta(t) + i\xi(t)]$ は次式のように表すことができる。

$$a(t) = A(t)e^{i\phi(t)} \quad (2)$$

図-1 平均風速の変化

図-2 有義波高、有義波周期および主波向き

ここに、

$$\phi(t) = \tan^{-1}[\xi(t)/\eta(t)] \quad (3)$$

角周波数 $\omega(t)$ の変調は、位相角 $\phi(t)$ を用いて

$$\omega(t) = \frac{\partial \phi(t)}{\partial t} \approx [\phi(t + \Delta t/2) - \phi(t - \Delta t/2)] / \Delta t \quad (4)$$

として求めることができる。式 (3) で $\tan^{-1}$ の計算によって生じる ϕ の不連続性は、 $\pm\pi$ を加えることによりあらかじめ補正した。

波群長などの波群特性を決定する方法としては、すでにさまざまな解析方法が提案されているが、ここでは 1 時間毎の水位変動時系列 $\eta(t)$ とそのヒルベルト変換から求めた包絡波形 $A(t)$ の平均値 A_{ave} を基準線とする波別解析 (ゼロアップクロス法) により波群振幅 A_g および波群周期 T_g を定義した。1 時間波浪データにおいて波群振幅の最大値を $(A_g)_{max}$ 、この値に対応する波群周期を $(T_g)_{max}$ 、波群振幅の平均値を $(A_g)_{mean}$ 、この値に対応する波群周期を $(T_g)_{mean}$ とした。

図-3 に高波浪時 (8 月 16 日 8 時) の実測水位変動 $\eta(t)$ 、包絡波 $A(t)$ とその振幅の平均値 A_{ave} 、および角周波数 $\omega(t)$ の変動を示す。波形勾配が比較的大きいこのケースでは、波群性は認められるものの、個々波の上下非対称性の影響を強く受けて包絡波形の変動が著し

図-3 実測波形の包絡波形

図-4 周波数帯の区分

図-5 基本周波数帯を用いた包絡波形

く、 A_{ave} を基準に求めた波群周期はきわめて短周期のものになってしまう。水位変動のマイナス側では包絡波とのずれが大きくなり、また個々波の角周波数の変動も著しい。そこで、基本周波数を $f_s (=1/T_s)$ として、 $0.5f_s \sim 1.5f_s$ を基本周波数帯、 $1.5f_s \sim 2.5f_s$ を倍周波数帯、 $0 \sim 0.5f_s$ を長周期帯と区分し、基本周波数帯の波成分に対して波群特性を解析することとした。このケースでの各周波数帯の区分は、スペクトル分布上で図-4のように与えられる。

基本周波数帯のみに分離した水位変動データを用いてヒルベルト変換により包絡波 $A(t)$ を求めると図-5のようになる。倍周波数帯を取り除いた基本周波数帯の波成分のみを扱うことにより、包絡波 $A(t)$ の振幅は峰側で個々波の水位を下回るものになったが、波群周期はより適切に求められる。基本周波数帯のみを扱った場合には、 $A(t)$ の振幅が小さいときのみ、角周波数の変調が起きており、その位相以外では個々波の周期 T_s とほぼ対応している。非線形波動理論によれば、個々の自由波成分の相互干渉が波群構造を基本的に支配し、自由波の倍周波数成分は拘束波として波形の上下非対称性に寄与する。波群特性の解析には、波群振幅の最大値 $(A_g)_{max}$ が個々波の最大波高と必ずしも対応しないことに留意しておく必要があるが、自由波成分をほぼ含むと考えられる基本周波数帯に着目すれば波群構造を調べることができる。

長周期帯の波成分には、拘束長周期波に加えて自由長周期波の入射波成分が混在するため、線形分散関係式を利用した通常の周波数分解に基づく入反射分離法を適用することはできない。ここでは、Hossainら(2001)のヒルベルト変換による時間領域での入反射分離手法を用

いて、距離 $\Delta l = 221$ m 間隔で設置した Station-B と Station-C の水圧、2成分流速の時系列データから作成した複素信号により、長周期波の入反射成分を分離した。分離精度は観測点距離 Δl に依存し、自由長周期波と拘束長周期波の共存する波浪場であることから、 T_s より求めた群速度 c_g と自由長周期波の波速 $c = \sqrt{gh}$ に関して

$$4\Delta l/c_g \leq T \leq 10\Delta l/c_g \dots \dots \dots (5)$$

および

$$4\Delta l/c \leq T \leq 10\Delta l/c \dots \dots \dots (6)$$

を同時に満たすような帯域に制限する必要がある。その結果、高波浪時については長周期帯のうち $0.05f_s \sim 0.1f_s$ の範囲の波成分を対象に入反射分離を行った。

4. 波群特性

波群特性の解析にあたっては、沖合の水深 $h = 26$ m 地点の Station-A と岸側水深 $h = 13$ m 地点の Station-B において測定された欠測部分を除く全ての水位変動データを用いた。有義波高 H_s が 3 m を越える高波浪時については、 T_s から線形波に対する相対水深 kh を求めると、おおよそ $kh = 1.1$ から $kh = 0.7$ に至る伝播変形を調べることになる。観測地点は、狭帯スペクトルを持つ単一方向の波群に対して、波群の伝播変形形態が切り換るとされている相対水深 $kh = 1.36$ より浅海側の領域に位置する。

基本周波数帯の波成分に対して包絡波形 $A(t)$ を求め、その水位変動の平均 A_{ave} を基準水位としてゼロアップクロス法で $A(t)$ から波群振幅 A_g と波群周期 T_g を定義した。図-6 に1時間毎の波群振幅の最大値 $(A_g)_{max}$ および平均値 $(A_g)_{mean}$ を基準水位 A_{ave} とともに示す。最大

図-6 波群振幅 $(A_g)_{max}$ 、 $(A_g)_{mean}$ および基準水位 A_{ave}

図-7 波群振幅 $(T_g)_{max}$ および $(T_g)_{mean}$ の変化

振幅 $(A_g)_{\max}$ は、基本周波数帯のみにについても時間帯ごとの変動が著しい。波群振幅 $(A_g)_{\max}$, $(A_g)_{\text{mean}}$ および基準水位 A_{ave} はともに図-2 に示した有義波高 H_s の変動にほぼ対応している。波群周期 $(T_g)_{\max}$ および $(T_g)_{\text{mean}}$ の変化を図-7 に示す。波群振幅 $(A_g)_{\max}$ に対応する波群周期 $(T_g)_{\max}$ は8月8日のピーク前後、有義波周期 T_s が長周期化した9月5日付近、および9月24日のピーク前後で際だって長くなっている。波群周期 $(T_g)_{\text{mean}}$ は、図-2 に示した有義波周期 T_s の変動にほぼ対応した変化を示している。高波浪時の時間帯については、常に $T_s > 8\text{s}$ であり、この時間帯では平均的に見ると $(T_g)_{\max}/T_s = 10 \sim 20$, $(T_g)_{\text{mean}}/T_s = 4 \sim 6$ の範囲で変化している。波群周期 $(T_g)_{\text{mean}}$ は特に有義波周期 T_s が長周期化した9月5日付近で長くなっており、高波浪のピーク時よりもその前後の時間帯、すなわち強風域が観測地点より遠くにあり、うねりとなって伝播してきた

波の方が若干長くなっている。

図-8 は、 $(A_g)_{\text{mean}}$ と A_{ave} の比率をプロットしたもので、1.2 付近を中心にして細かく変動していることがわかる。平均的に見ると、高波浪時の8月8日、16日、9月24日付近、および T_s が長周期化した9月5日付近で小さくなっており、特に岸側 Station-B における比率が低くなっている。図-9 に示す $(A_g)_{\max}$ と A_{ave} の比率についてもほぼ同様な傾向が見られる。高波浪時のピーク時間帯については、主に砕波による個々波のエネルギーカットが岸側水深 $h=13\text{m}$ の Station-B における包絡波形の平坦化を生じさせているが、その前後の時間帯や T_s の長周期化した時間帯においては、波の方向集中度性に加えて非線形性に起因する包絡波形の平坦化が生じている。特に8月8日ピーク前後の7日と10日の波群振幅 $(A_g)_{\max}$, $(A_g)_{\text{mean}}$ は、岸側で著しく減少している。この時間帯では、図-2 に示すように、 H_s についても岸側で減少する傾向が見られ、岸側と沖側の観測点における波高比は有限振幅性を考慮した浅水係数、屈折係数、および底面摩擦による波高減衰率をかけ合わせた比率 $1.02 \sim 1.04$ をかなり下回っている。すなわち、倍周波数成分も含めた個々波の伝播変形においても、波群の弱い扁平化の影響が現れている。

図-10 に波群周期 $(T_g)_{\max}$ と $(T_g)_{\text{mean}}$ の比の変化を示す。高波浪時の8月8日付近で若干大きくなっているものの、時間帯による明確な変化は見られない。平均的には $1 \sim 3$ の範囲の値をとり、最大振幅 $(A_g)_{\max}$ の周期 $(T_g)_{\max}$ は常に $(T_g)_{\text{mean}}$ より長周期である。

5. 長周期波

ヒルベルト変換による水圧波と流速の複素信号を用いて Hossain ら (2001) の分離手法により、岸側の Station-B と Station-C 間で $0.05f_s \sim 0.1f_s$ の周波数帯の長

図-8 $(A_g)_{\text{mean}}$ と A_{ave} の比率の変化

図-9 $(A_g)_{\max}$ と A_{ave} の比率の変化

図-10 $(T_g)_{\max}$ と $(T_g)_{\text{mean}}$ の比率の変化

図-11 長周期波の入射成分

図-12 流速のスカッタープロット

周期波の入射成分を分離した。分離計算は、高波浪時間帯を含む8月7日～10日および8月14日～18日にわたって行った。水圧波の入射成分と反射成分について、ゼロアップクロス法により1/3最大波高 H_s および平均波高 H_{mean} を求め、その結果を図-11に示す。来襲波浪のピーク時付近では、入射成分より反射成分の方が大きい。この差異は、波群個々波の碎波で増幅され、汀線より反射される自由長周期成分により生じる。入射成分は、ピーク直前よりほぼ同じ値をとるが、反射成分はピークに向かって増幅している。反射成分は、図-6に示した波群振幅 $(A_s)_{max}$ 、 $(A_s)_{mean}$ の増減にほぼ対応している。入射成分は、8月16日のピークの2日前より増幅しており、うねり性の波群に伴う長周期成分と見られる。このときは入射成分の振幅が反射成分に比べて若干大きくなっている。

入射成分に分離後の底面流速のスカッタープロットを8月8日のピーク時付近について図-12に示す。スカッタープロット中の矢印は、汀線に対して垂直方向を示している。入射波の流速ベクトルは複雑な軌道を描き、流速は汀線に垂直方向に卓越しているものの、様々な方向に変化している。反射波の流速ベクトルは、汀線垂直方向よりやや西向きに卓越した成分を持ち、入射波と比べると卓越方向に揃った軌道を描いている。卓越方向には間欠的に強い流速が出現している。このときの反射成分の波数 k_r は、入射成分の波数 k_i に比べて常に小さい値をとっており、 k_r から計算される波速は自由長波の波速 $c=\sqrt{gh}$ とほぼ一致した。

6. おわりに

高波浪時の現地波浪データを解析して、波群特性を調べた。その結果、波群個々波の有義波の伝播に伴う波高変化は、有義波周期 $T_s > 8s$ のとき、浅水変形・屈折変形・波高減衰から予測される波高よりかなり小さくなる時間帯があり、波の非線形性に起因する変形特性であることがわかった。有義波高のピーク値前後では、平均的に見ると波群個々波の振幅の変動は小さくなり、波群包絡波はやや扁平化する。長周期波の分離では、来襲波のピーク時付近では反射成分の方が入射成分よりも大きく、その時間帯では汀線に垂直方向の長周期流速が間欠的に大きくなるがあった。

謝辞：本研究は科学研究費基盤研究(B)の補助を受けて行われたものである。また、現地観測を行うにあたり、赤羽根漁業協同組合および愛知県三河港務所の多大なご支援を賜った。ここに記し、深謝の意を表します。

参考文献

- 青木伸一・喜岡 渉・山村易見・舟橋 香・相川久紀(1997)：台風の通過に伴う沿岸長周期波の増幅と伝播に関する現地観測，海岸工学論文集，第44巻，pp. 216-220。
- 喜岡 渉・武藤一平・林 直正・北野利一(2003)：高波浪時における波群および長周期波の伝播変形特性，海岸工学論文集，第50巻，pp. 246-250。
- Hossain A・北野利一・喜岡 渉(2001)：沖浜における長周期波の挙動，海岸工学論文集，第48巻，pp. 271-275。
- 松立博樹・水口 優(1997)：浅海域における波群の伝播変形と長周期波，海岸工学論文集，第44巻，pp. 211-215。
- Barnes, T. and D. H. Peregrine (1995)：Wave groups approaching a beach: Full irrotational flow computations, Proc. Coastal Dynamics 95, pp. 116-127。
- Benilov, E. S., J. D. Flanagan and C. P. Howlin (2005)：Evolution of packets of surface gravity waves over smooth topography, J. Fluid Mech., Vol. 533, pp. 171-181。
- Dysthe, K. R., K. Trulsen, H. E. Krogstad and H. Socquet-Juglard (2003)：Evolution of a narrow-band spectrum of random surface gravity waves, J. Fluid Mech., Vol. 478, pp. 1-10。
- Kit, E., L. Shemer, E. Pelinovsky, T. Talipova, O. Eitan and H. Jiao (2000)：Nonlinear wave group evolution in shallow water, J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., Vol. 126, No. 5, pp. 221-228。
- Mase, H. and Y. Iwagaki (1986)：Wave group analysis of natural wind waves based on modulation instability theory, Coastal Eng., Vol. 10, No. 4, pp. 341-354。
- Shemer, L., E. Kit, H. Jiao and O. Eitan (1998)：Experiments on nonlinear wave groups in intermediate water depth, J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., Vol. 124, No. 6, pp. 320-327。
- Shemer, L., H. Jiao, E. Kit and Y. Agnon (2001)：Evolution of a nonlinear wave field along a tank: experiments and numerical simulations based on the spatial Zakharov equation, J. Fluid Mech., Vol. 427, pp. 107-129。
- Veltcheva, A. D. (2002)：Wave and group transformation by a Hilbert spectrum, Coastal Eng. J., Vol. 44, No. 4, pp. 283-300。