

単一波群による長周期波

寛 田 博 章*・水 口 優**

1. はじめに

近年、係留船舶の動揺、港内の静穏度、遡上、漂砂などの工学的な問題に長周期波が密接に関わっていることが指摘されており、その研究も盛んになってきている。本研究の目的は、断面水槽内での波群造波に伴う長周期波についての定量的な検討を行うことである。

長周期波の発生因として、拘束波については基本波の波群性 (Longuet-Higgins & Stewart, 1962) が挙げられる。自由波については波群の浅水変形 (Molin, 1984; Liu, 1989)、基本波の波群構造に伴う砕波点の変動 (Symonds et al., 1982) などの理論がある。いずれも波群構造の変化に伴う自由波の発生である。また実験水槽において波群を造波する際、2 次オーダーの自由波が発生することは、Ottesen Hansen et al. (1980) の周波数空間での理論的研究以来良く知られている。この波群の造波に伴って発生する自由波が長周期波に関する実験的研究を困難にしてきた。池野・田中 (1995) はこの自由波を発生させない造波について周波数空間の扱いで実験的に検討を行っている。一方、Mizuguchi (1995) は波群の造波に伴って発生する長周期波について、radiation stress の概念を用いた時系列問題に対する解を得ると共に、自由波の発生を抑える造波についても提案している。

本研究では、拘束波の発生因としての基本波の波群性に着目し、最も単純な場合として一様水深で単一波群を造波する実験を行う。さらに得られた実験結果を Mizuguchi (1995) の解析解、及び Boussinesq 方程式の数値シミュレーションと比較しながら検討を行い、その定量的評価まで議論する。なお、自由波の発生を抑える造波方法についても実験的検討を行う。

2. 発生長周期波の理論と数値シミュレーション

本研究では、実験結果における現象を解明するため、実験結果を Mizuguchi の理論、及び Boussinesq 方程式

の数値シミュレーションと比較する。

2.1 Mizuguchi の解析解

Mizuguchi は radiation stress の変動を外力項とする線形長波方程式を基に、波群の造波によって発生する長周期波が次式で表されるとしている。

$$\bar{\eta}(x, t) = \eta_*(x - C_0 t) - n\eta_*\{n(x - Ct)\} \dots\dots\dots (1)$$

$$\eta_*(x - C_0 t) = -\{(n-1/4)gA^2(x - C_0 t)\} / (C^2 - C_0^2) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\bar{\eta}$ は長周期波の水位、(2) 式で表される η_* は、Longuet-Higgins & Stewart (1962) の拘束波の解 (略して LHS 解) を表す。(1) 式の右辺第 2 項が、造波板での境界条件 (水平流速 $u=0$) を満たすために発生する自由波の解を表す。 C_0 は基本波の群速度、 $C(=\sqrt{gh})$ は長波の波速、 n は C_0/C 、 n' は C_0 と基本波の波速の比、 g は重力加速度、 h は水深を表す。 A は波群の振幅関数である。なお、波群の造波に伴って発生する自由波の発生を抑える場合、基本波の造波板の変位に、次式で表される拘束波の流速をもつ変位を加えればよい。

$$u_p(0, t) = (C_0/h)\eta_*(t) \dots\dots\dots (3)$$

2.2 Boussinesq 方程式の数値シミュレーション

数値シミュレーションに用いた Boussinesq 方程式は、以下の基本的なものである。

連続式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q}{D} \right)^2 + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ = \frac{1}{3} h^2 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \right) \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここで、 η は水位変動、 Q は線流量、 $D(=h+\eta)$ は全水深である。計算は、スタッガード・リーブフロッグ差分法を用い、沖側境界で流量を線形理論で与え、空間スケールを十分長く設定し、岸側境界は完全反射とした。空間、及び時間の格子幅は、基本波の波長、および周期の 1/50 とした。

* 学生会員 工修 中央大学大学院 土木工学専攻

** 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

3. 実験の概要と実験結果

3.1 実験の概要

実験は、図-1に示すようなピストン型造波装置を有する断面水槽で行った。水深は一様水深とし、次式の様な、基本波が正弦波である単一波群を造波した。

$$\eta(t) = \begin{cases} A(t)\sin(2\pi t/T) & 0 < t < T_0 \\ 0 & t < 0, t > T_0 \end{cases}$$

ただし、

$$A(t) = (a_{\max}/2)\{1 - \cos(2\pi t/T_0)\} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $a_{\max}$ は包絡波の最大振幅、 T は基本波の周期、 T_0 は波群の継続時間を表す。(6)式を線形長波理論により流速 u に変換し、また、造波板の変位は微小であると仮定すると、

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = u(\xi, t) \approx u(0, t) \dots\dots\dots (7)$$

が成り立つ。ここで、 ξ は造波板の変位を表す。図-2は、(6)、(7)式より求めた造波板の変位の例である。

実験条件は、 $h=10$ cm、 $T=1.0$ s、 $T_0=8.0$ s と固定し、振幅を $a_{\max}=0.5, 1.0, 1.5$ cm と変化させた。水位の計測には新型容量式波高計（正豊工学製）を用い、これを造波板から 0.5, 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 10.0 m の6地点に設置した。データのサンプリング周波数は 50 Hz とし、データの解析には、反射波が返ってくるまでの 25 秒間のデータを用いた。

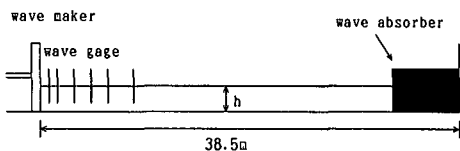


図-1 実験装置図

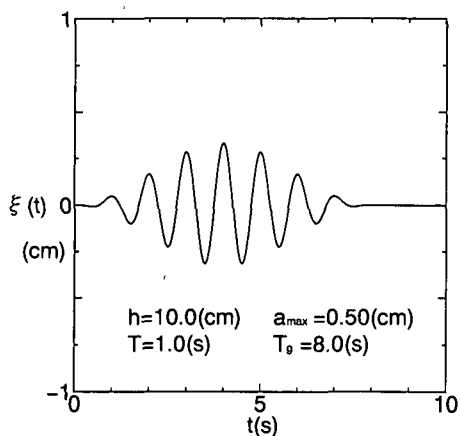
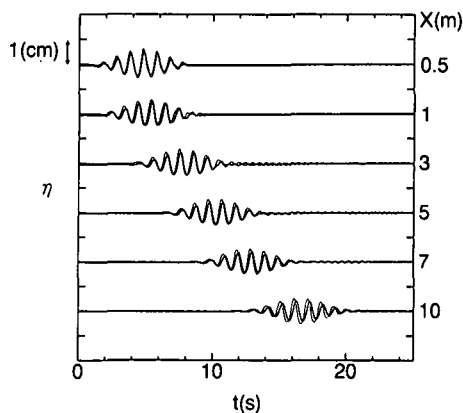
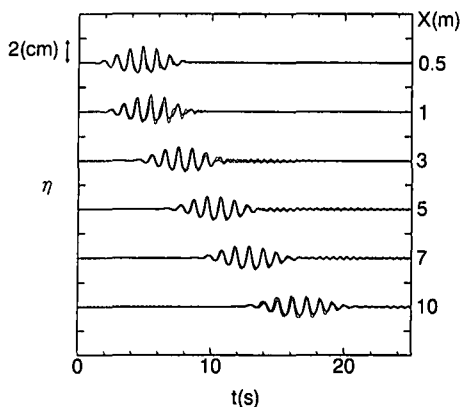


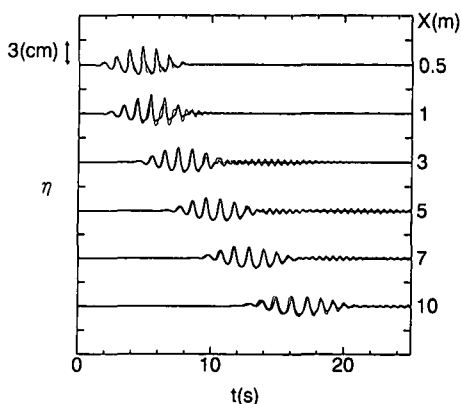
図-2 造波板の変位（自由波制御なし）



(a) $a_{\max}=0.5$ cm



(b) $a_{\max}=1.0$ cm

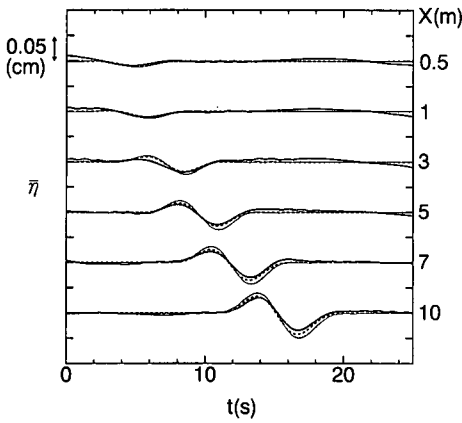
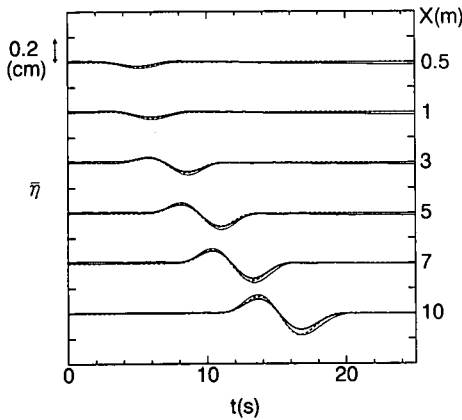
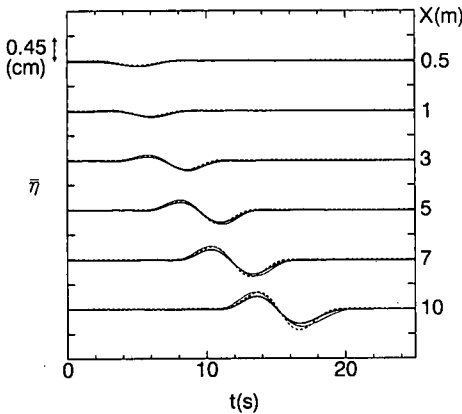


(c) $a_{\max}=1.5$ cm

図-3 水位の時系列データ（制御しない）
太実線は実験値、細実線は Boussinesq 方程式のシミュレーション結果を表す

3.2 実験結果とその検討

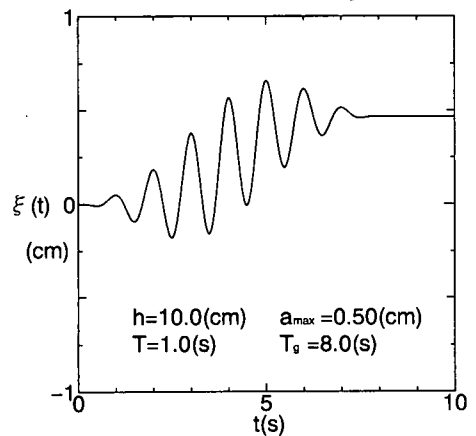
図-3(a), (b), (c)の太実線は、それぞれ $a_{\max}=0.5, 1.0, 1.5$ cm のケースの各地点で計測された水位の時系列データである。細実線は Boussinesq 方程式のシミュレーション結果を表す。

(a) $a_{\max}=0.5$ cm(b) $a_{\max}=1.0$ cm(c) $a_{\max}=1.5$ cm

図—4 長周期成分の時系列データ (制御しない)
太実線は実験値, 点線は解析解 (1) 式, 細実線は Boussinesq 方程式のシミュレーション結果を表す

レーション結果である。実験値, シミュレーション結果共に, $a_{\max}=0.5$ cm のケースでは, 基本波の波形が正弦的であるのに対し, $a_{\max}$ が大きくなるに従って基本波の波形が尖ってくる。それにあわせて, 倍周波数の波が波速の違いにより波群から分離する。波群は, $a_{\max}$ が大きいほど伝播に伴う扁平化が著しい。実験値と Boussinesq 方程式のシミュレーション結果は, 基本的には良く一致しているが, 倍周波数成分の伝播に関しては, Boussinesq 方程式の分散項における高周波数側の誤差が出ており, 実験値に比べ伝播速度が遅い。

図—3(a), (b), (c) の実験値に, 0.25 Hz 以下の成分は完全に取り込み, 0.4 Hz 以下の成分は完全にカットするような特性を持つ数値ローパスフィルターを施し長周期成分を取り出したものが, それぞれ図—4(a), (b), (c) の太実線である。図—4(a) については, 風などによる水位変動が長周期波の大きさに対し無視できなかったため, 最小自乗法を用いて放物線をあてはめ, それを取り除いた。点線は (1) 式で表される解析解, 細実線は Boussinesq 方程式のシミュレーション結果を表す。(2) 式の radiation stress の計算は, 造波波群が変形しないものとして計算を行った。 $a_{\max}$ が小さい場合, 実験値と (1) 式, Boussinesq 方程式のシミュレーション結果は良く一致している。しかし, $a_{\max}$ が大きくなるに従い, 実験値, Boussinesq 方程式のシミュレーション結果は伝播に伴う扁平化の度合いが大きくなっている。なお, 全てのケースの実験値において, 長周期波は波群の伝播に伴い発達しているように見えるが, (1) 式との比較によりこのメカニズムは以下のように解釈される。すなわち波群の造波により負の水位の拘束波が発生するが, それによる水平流速を打ち消すように正の水位の自由波が発生し, トータルの長周期波はこれらの重ね合わせとなる。その後の伝播において, おおのものが分離していくため,



図—5 造波板の変位 (自由波制御)

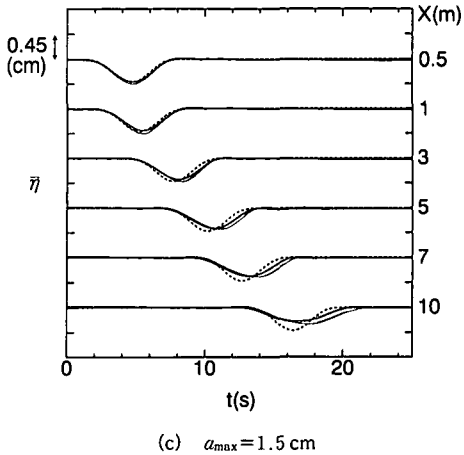
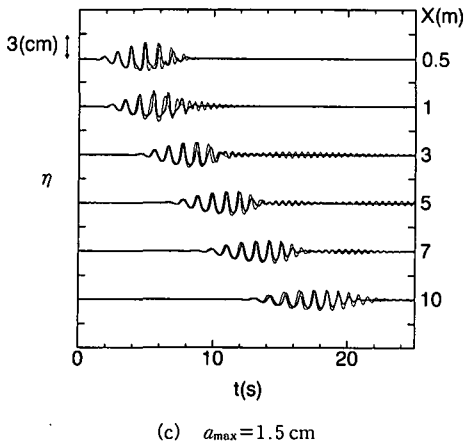
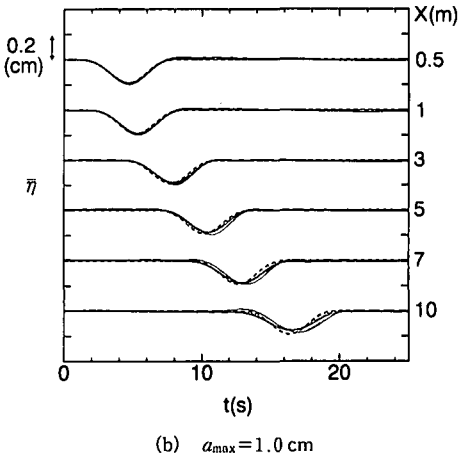
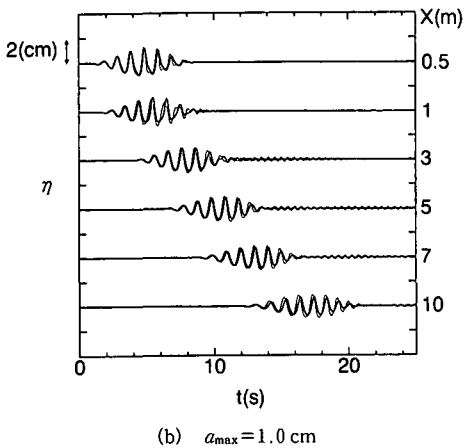
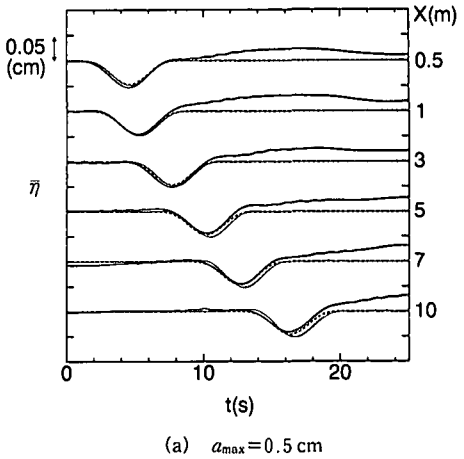
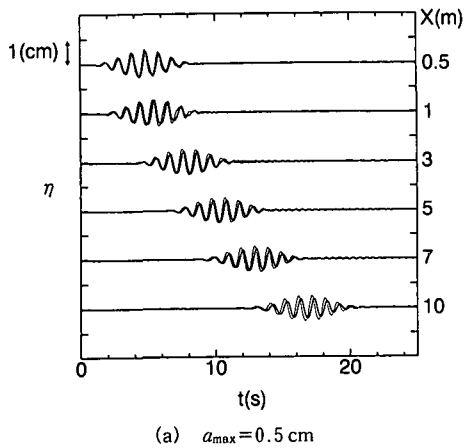


図-6 自由波制御を行った場合の水位の時系列データ図の説明については図-2を参照

図-7 自由波制御を行った場合の長周期成分の時系列データ
太実線は実験値、点線は解析解(2)式、細実線は Boussinesq 方程式のシミュレーション結果を表す

見掛け上、長周期波が発達していくように見える。なお、今回のケースにおいては、十分な伝播距離

$$x = \{L_g / (C - C_g)\} C_g = 28.4 \text{ m} \dots\dots\dots (8)$$

があれば、両者は完全に分離した定形波になると推測される。ここで、 L_g は波群の空間的長さを表す。

4. 自由波制御の造波実験

自由波制御、すなわち自由波を発生させない造波方法について検討を行った。基本波の水平流速成分に拘束波の水平流速成分(3)式を加えたものを造波板の変位に変換する。流速と造波板の変位との関係には、(7)式を用いた。図-5は、自由波制御を行った場合の造波板の変位の例である。実験条件は制御しない場合と同様に、 $h=10 \text{ cm}$ 、 $T=1.0 \text{ s}$ 、 $T_g=8.0 \text{ s}$ 、と固定し、振幅を $a_{\max}=0.5, 1.0, 1.5 \text{ cm}$ と変化させた。図-6(a), (b), (c)は、自由波制御を行った場合の各地点における水位時系列データである。図-7(a), (b), (c)は、図-6(a), (b), (c)のデータから長周期成分を取り出したものである。いずれのケースにおいても、造波板から近い地点では、自由波が制御され負の水位の拘束波のみ発生していることが確認でき、実験値は解析解(LHS解(2)式)、Boussinesq方程式のシミュレーション結果と良く一致している。実験値、およびシミュレーション結果の水位と長周期成分は、 $a_{\max}$ が大きいほど伝播に伴う扁平化の度合いが大きい。図-3(c)と図-7(c)との比較から、自由波制御した方が制御しない方に比べ、伝播に伴う波群の変形が著しい。長周期成分は自由波制御を行った方が大きくなることから、基本波と長周期波との干渉が波群、及び長周期波の扁平化の主たる原因であると推測される。

5. おわりに

実験において、単一波群を用いて検証することにより、

波群の造波に伴って発生する拘束波、及び自由波の発生、伝播のメカニズムを明確にすることができた。さらに、自由波制御の造波を Mizuguchi の(3)式に従って試みた。結果としてこの造波で自由長周期波の発生が抑えられることが確認できた。この方法の応用により、任意の自由長周期波を伴う波群を造波できると考えられる。なお、規則波造波の際の初期波形変化によって発生する自由長周期波の議論も可能である。

波群の造波によって発生する長周期波の定量的評価について、基本波のアーセル数が小さい場合、Mizuguchiの解析解、および Boussinesq 方程式の数値シミュレーションは共に有効である。これまで浅海域で疑問とされてきた LHS 解が妥当であることも確認できた。基本波に対し長周期成分が大きくなると伝播に伴い波群、および長周期波は扁平化する。今後の検討課題である。

参 考 文 献

- 池野正明・田中寛好 (1995): 自由長周期波制御により造波された波群拘束長周期波の浅水・砕波変形と構造物による重複波の特性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 156-160.
- Liu, P. L.-F. (1989): A note on long waves induced by short-wave groups over a shelf, JFM, Vol. 205, pp. 163-170.
- Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart (1962): Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to "surf beat", JFM, Vol. 13, pp. 481-504.
- Mizuguchi, M. (1995): Radiation stress approach to generation of long waves by a wave group in a flume, Coastal Eng. in Japan, Vol. 38, pp. 1-4.
- Molin, F. (1982): On the generation of long-period second-order free-waves due to changes in the bottom profile, Ship. Res. Inst. Papers, Vol. 68. Tokyo.
- Ottesen Hansen, N. E., S. E. Sand, H. Lundgren, T. Sorensen and H. Gravesen (1980): Correct reproduction of group-induced long waves, Proc. 17th ICCE, Sydney, pp. 784-800.
- Symonds, G., D. A. Huntley and A. J. Bowen (1982): Two-dimensional surf beat: Long wave generation by a time-varying breakpoint, JGR, Vol. 87, C1, pp. 492-498.