

底面勾配下における流れ中の集中包絡波

Wave packet focusing in flow under bottom gradient

北海道大学大学院工学院 ○学生員 小熊多佳史 (Takashi Oguma)
北海道大学教授大学院工学研究院 正会員 渡部靖憲 (Yasunori Watanabe)

1. はじめに

局所的に異常な高波高をもつ巨大波 (Freak Wave) について、(1)異なる周波数をもつ波群の重畳、(2)地形的あるいは流れによる屈折波の集中、(3)非線形相互作用の観点において調査されてきたが、そのメカニズムは以前解明されていない。一方、外洋においてタンカーやフェリーなどの大型船の海難事故において、巨大波が関与している可能性があり、その解明が待たれている。上記(3)については古くから最も勢力的に研究が行われてきたが、分散性が低下する浅水域においては、この効果による巨大波生成を説明できない。Watanabe et al. (2020)¹⁾は、上記(1)に対して、深水から極浅水に至る任意の水深変化をもつ波群の伝搬を通じた波群集中条件を導出し、波浪実験によって理論を証明している。一方、南アフリカ付近に位置するアガラス海流は波浪の屈折を通じた波浪の集中が観測されており²⁾、巨大波の生成要因の1つに上記(2)の流れの効果が強く関係している可能性が指摘されている。そこでWatanabe et al. (2021)³⁾はWatanabe et al. (2020)¹⁾の波群集中理論を拡張し、波一流れ相互作用を経た波群集中を理論的に与えた。おそらく巨大波の発生には上記(1)～(3)の全ての影響が関与しているものと考え、それぞれの効果の影響度合いを定量化し、海域に応じた支配パラメータを決定する必要がある。本研究はWatanabe et al. (2021)の波群集中理論をさらに展開し、底面勾配下における波一流れ相互作用を経た波群集中を理論的に与えると同時に、波一流れ水理実験によって検証することを最終目標とするものである。本論文では底面勾配下で水深が変化する状況で、逆流流速中の波群集中について調査していく。

2. 集中波形成の理論

本論文で導入する、底面勾配下における波一流れ相互作用を経た波群集中理論を導出する。まず波流れ共存場における分散関係式、群速度は以下の通りである。ここで U_0 は流速を表している。

$$\sigma^2 \left(1 - \frac{kU_0}{\sigma}\right)^2 = gk \tanh kh \quad (1)$$

$$C_{gu} = \frac{\frac{g}{2} \frac{\tanh kh + kh \operatorname{sech}^2 kh}{\sigma - kU_0} + U_0}{\frac{\frac{g}{2} (\tanh kh + kh \operatorname{sech}^2 kh) + U_0 \sqrt{gk \tanh kh}}{\sqrt{gk \tanh kh}}} \quad (2)$$

ここである時刻を t 、集中時刻を t_f 、集中位置を x_f とすると以下の(3)式が得られる。また時間 t で微分する事により、(4)式が得られる。

$$t_f - t = \int_0^{x_f} \frac{\sqrt{gk \tanh kh}}{\frac{g}{2} (\tanh kh + kh \operatorname{sech}^2 kh) + U_0 \sqrt{gk \tanh kh}} dx \quad (3)$$

$$-1 = \int_0^{x_f} \frac{\frac{g^2 \operatorname{sech}^4 kh}{8\sqrt{gk \tanh kh}} \frac{\partial k}{\partial t} \frac{\cosh 4kh + 16k^2 h^2 \cosh 2kh - 8kh \sinh 2kh - 8k^2 h^2 - 1}{(g \tanh kh + gk \operatorname{sech}^2 kh + 2U_0 \sqrt{gk \tanh kh})^2}}{dt} \quad (4)$$

また分散関係式を時間 t で微分する事により、以下の式(5)、式(6)が得られる。

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial \sigma}{\partial t} \frac{2(\sigma - kU_0)}{2U_0(\sigma - kU_0) + g(\tanh kh + kh \operatorname{sech}^2 kh)} \quad (5)$$

$$= \frac{\partial \sigma}{\partial t} \frac{2\sqrt{gk \tanh kh}}{g \tanh kh + gk \operatorname{sech}^2 kh + 2U_0 \sqrt{gk \tanh kh}} \quad (6)$$

ここで式(4)に式(6)を代入する事で式(7)が得られる。また σ は x に独立であるため、式(8)が得られる。この式(8)が流れ存在時の底面勾配下における波群の集中条件であり、式(8)を満たす波は集中時刻 t_f において全て集中位置 x_f に集中する事になる。

$$-1 = \int_0^{x_f} \frac{\frac{g^2}{4} \operatorname{sech}^4 kh}{dt} \frac{\frac{\partial \sigma}{\partial t} \frac{\cosh 4kh + 16k^2 h^2 \cosh 2kh - 8kh \sinh 2kh - 8k^2 h^2 - 1}{(g \tanh kh + gk \operatorname{sech}^2 kh + 2U_0 \sqrt{gk \tanh kh})^3}}{dt} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{4}{g^2 \int_0^{x_f} \operatorname{sech}^4 kh \frac{\partial \sigma}{\partial t} \frac{\cosh 4kh + 16k^2 h^2 \cosh 2kh - 8kh \sinh 2kh - 8k^2 h^2 - 1}{(g \tanh kh + gk \operatorname{sech}^2 kh + 2U_0 \sqrt{gk \tanh kh})^3}} \quad (8)$$

3. 実験

第二章で示した波群の集中条件を用いて造波プログラムを作成し、流れ存在時に底面勾配下で集中波形成実験を行った。実験では図-1に表された造波水槽を用い、造波機の中立位置を原点とし、波の伝播方向に x 軸をとった。造波水槽では造波機の $x=11\text{m}$ の地点から

底面勾配を有し、水槽底面は $x=10\text{m}$ から $x=11.9\text{m}$ の区間は $1/10$ の勾配を有し、 $x=11.9\text{m}$ 以降の区間は $1/20$ の勾配を有している。本論文では底面勾配の無い区間において水深 h が $h=50\text{cm}$ となるケースにて集中波形成実験を行った。底面勾配による水深変化の様子は図-2 に示している。また本実験では逆流流速下での波群集中について調査しており、底面勾配の無い区間において流速 $U_0=0.02925\text{/s}$ となる流れを用いて実験を行った。本実験では底面勾配を用いている事で x によって流速 U_0 は変化していく。本実験における x に応じた流速変化の様子は図-3 に示した。

図-3 を見るとわかるように、本実験で用いた流れは x の増加に伴い不規則な変化をしている区間が見取れた。本実験では図-3 に示した計測された流速値を造波プログラムに代入し、流速 U_0 として定義した。本実験で用いた造波プログラムにおける流速 U_0 の変化の様子は図-4 に示した。本実験では集中位置を造波機から 13m の地点と定め、 $x_f=13\text{m}$ として造波プログラムを設定した。図-5 は集中位置 $x_f=13\text{m}$ で集中する波群の角周波の時間変化を表している。本実験では初期波を造波後、時間と共に周波数の低い（群速度の速い）波を造波し、波群集中を実現する。

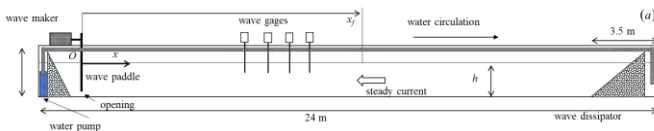


図-1 実験装置

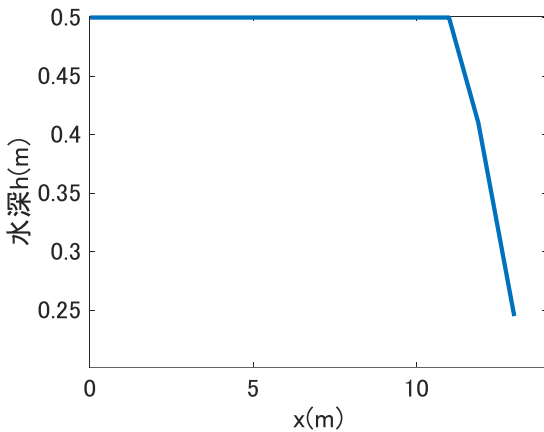


図-2 底面勾配による水深変化の様子

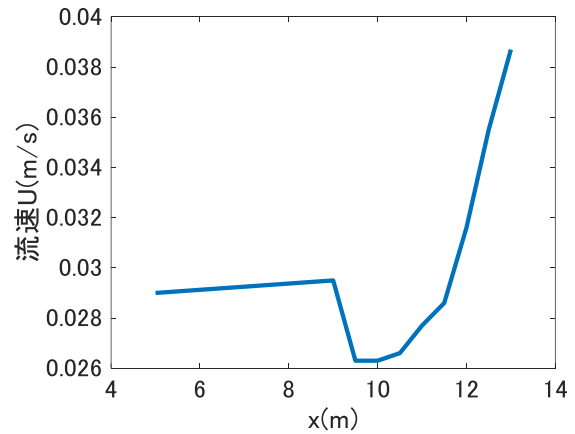


図-3 x 軸に応じた流速変化の様子

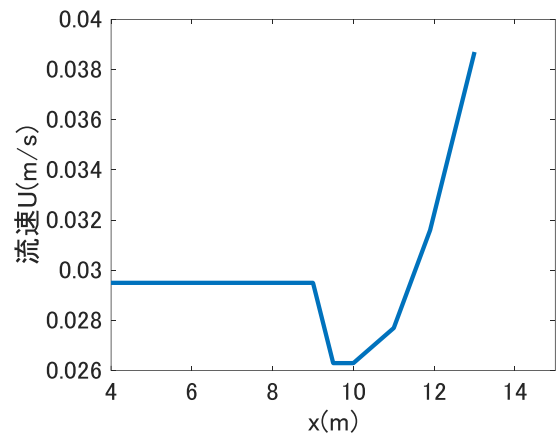


図-4 造波プログラムで使用した流速 U_0 の変化

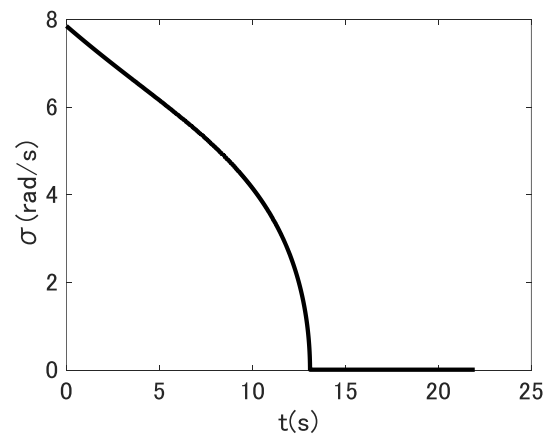


図-5 角周波数の時間変化の様子

4.実験結果

本論文で導入した流れ存在時における底面勾配下での波群の集中条件（式(8)）を用いて、事前に設定された集中位置にて集中波を起こす事ができた。図-6 は集中位置 $x_f=13\text{m}$ として造波された波の包絡波高 H が $x=13\text{m}$ に近づくにつれて増加する様子を表している。集中位置にて集中後は包絡波高 H は減少していくが、本実験では $x=14\text{m}$ の地点で再び増加していた。原因は

集中位置 $x=13\text{m}$ 以降の流れに乱れが生じている事が原因かと思われる。図-7 は初期波の振幅を A_0 、水位変動を η として、振幅の増幅率の空間分布を示している。本実験で導入した流れ存在時の底面勾配下における波群の集中条件によって、最大増幅率 3.59 を計測した。

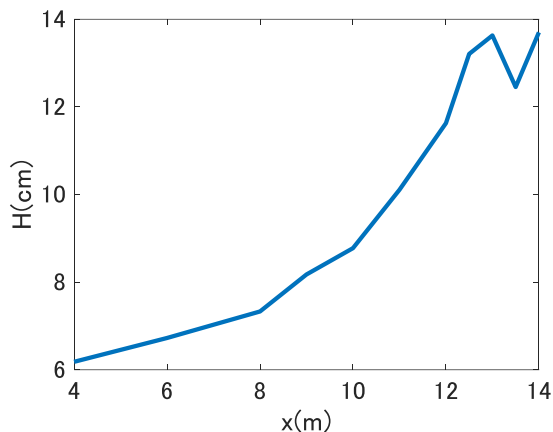


図-6 波高の空間分布

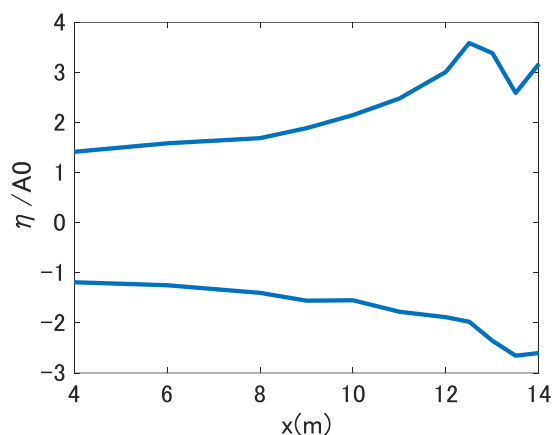


図-7 集中波群に対する、相対最高、最低水位の空間分布

5. 結論

本論文では流れ存在時における底面勾配下での波群の集中条件を導出し、波一流れ水理実験にて検証した。結果として、事前に設定した集中位置近郊にて集中波を形成する事に成功し、最大増幅率 3.59 を記録した。しかし本実験で使用した流れには各所で乱れが見られた事が原因で、波群の集中位置以降で再び波高が増加する事が見られた。今後は実験にて再現する流れにおいて各所で見られる乱れを矯正し、綺麗な流れを再現していく所存である。また水深 h が増加したケースで再度実験を行い、複数の流速を再現して、水深の変化や流れの変化に伴った増幅率の違いを観測していく所存である。

6. 参考文献

(1) Y. Watanabe, Y. Tsuda & A. Saruwatari: Wave packet focusing in shallow water, *Coastal Engineering Journal* (2020)

(2) I.V.LAVRENOV: The Wave Energy Concentration at the Agulhas Current off South Africa, *Natural Hazards* 17: 117-127 (1998)

(3) 渡部靖憲, 小熊多佳史: 一様流れ中における集中包絡波, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), No.77, Vol.2, pp.31-36, 2021.