

流れ中の波群集中に関する研究

Wave packet focusing in the flow

北海道大学工学部 ○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(Rogue 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浪の集中、(3)非線形相互作用の観点において長く調査されてきた一方、そのメカニズムは依然未解明である。一方、外洋においてタンカーやフェリーなどの大型船の原因不明とされる海難事故に巨大波の発生が関与している可能性もあり、その解明が待たれている。上記(3)については最も勢力的に研究が行われてきた一方、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)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¹⁾、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。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. (2020)の波群集中理論をさらに展開し、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、基本的な波一流れ相互作用を実験的に確認し、Watanabe et al. (2020)の波群集中条件に対する流れの影響を調査する。

2. 集中波形成の理論

Watanabe et al. (2020)によって、時刻 t に造波された波のエネルギーが時刻 t_b に位置 x_b に到達する条件として以下の角周波数の式があげられている。

$$\sigma(t) = \frac{g}{2}(t_b - t) \left[\int_0^{x_b} \frac{\cosh k(t) \sin 2k(t)h}{\sinh 2k(t)h + 2k(t)h} dx \right]^{-1} \quad (1)$$

上式の角周波数を満たす波を造波すると、それらの波全てが時刻 t_b において位置 x_b に到達し、重なる。上式の両辺を時間 t で微分すると以下の式が得られる。

$$\frac{\partial \sigma(t)}{\partial t} = -\frac{gF_1}{4F_2 + (t_b - t)\sigma F_3} \quad (2)$$

ここで $F_1 = \int_0^{x_b} \frac{\cosh kh^2}{2kh + \sinh 2kh} dx$

$$F_2 = \left(\int_0^{x_b} \frac{\cosh kh^2}{2kh + \sinh 2kh} dx \right)^2$$

$$F_3 = \int_0^{x_b} \frac{h(-2\cosh kh^2 + k\sinh 2kh)}{(2kh + \sinh 2kh)^2 (\tanh kh + k\operatorname{sech}^2 kh)} dx$$

k は波数であり分散関係式より k は角周波数 σ の関数である。上の $\frac{\partial \sigma(t)}{\partial t}$ の式に現タイムステップの σ と k を代入したものをういて次のタイムステップの σ を導き、最終的に分散関係式より k を導く。各タイムステップでこの作業を繰り返す行うことで、角周波数 σ の時間変化(図-1)を得ることができる。そして位相 θ をタイムステップごとに台形則を用いて σ の時間の積分で導き、その θ を造波機に出力することで集中波を形成するのである。図-2 は位相の時間変化の図である。図-1、2 を見ればわかる通り、時間の経過と共に、生み出される波の周期が大きくなる。図-1の角周波数が限りなく0に近づく時刻では生み出される波群の群速度が長波の群速度と等しくなる。その時刻以降に生み出される波群は群速度が一定値となり集中することができない。よってその時刻までに生み出された波群が、ある場所で集中して集中波を形成するのである。

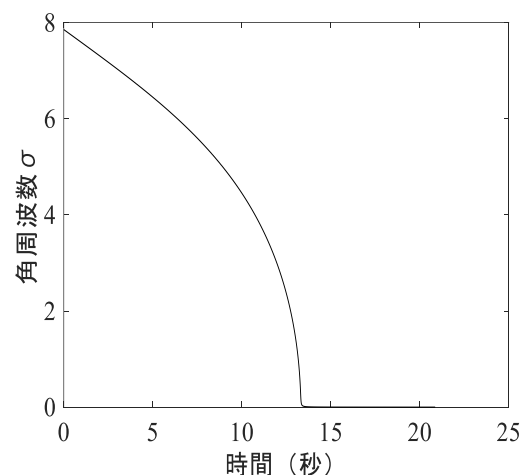


図-1 角周波数の時間変化

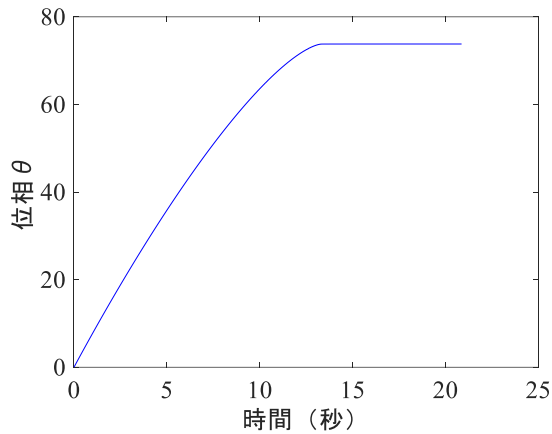


図-2 位相の時間変化

3. 実験方法

集中波を起こす前段階としての流れがある状態で規則波を発生させ、応答を調査し、流れのない条件と比較する実験と、2章で説明した波群集中理論を用いて集中波を形成する実験を行った。実験装置として造波水槽(全長24m 高さ80cm 幅60cm)、超音波ドップラー式流速計、容量式波高計を使用した(図1)。流速は各観測地点で、水面から水深32cmまでを1cmずつ測定した。基本的には水深が変化しても流速にあまり変化は見られなかったが、造波機から19mの流出孔付近では水面付近と底部付近で約10cm/秒ほど差が出た。計測された波は造波機から3m, 9m, 13m, 19mの地点を図示した(図-4)。

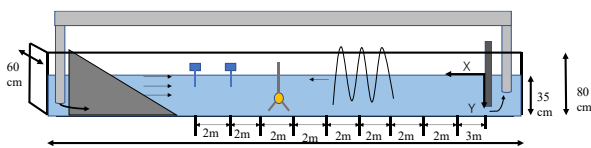


図-3 実験装置

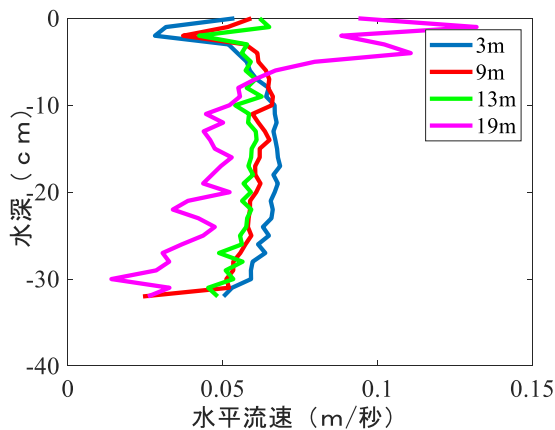


図-4 水平流速分布

3.1 規則波の応答調査の実験

規則波の応答調査の実験では、周期1.2秒・波高10cmの規則波を、水深35cm、流量一定の条件下で発生させた。波高・流速に関しては共に造波機から3mの地点

から2mおきに調査した。

3. 2 集中波を形成する実験

2章で説明した波群集中理論を用いて、一定水深において、流れのある状況とない状況でそれぞれ集中波を形成し、波群が集中する位置、波高を比較した。本実験では流れのない状況で造波機から14mの地点で波群が集中するように式(1), (2)中の $x_b=14m$ とする造波シグナルを作成した。流れのない状況では、造波機から6m, 10m, 14m, 18mの地点で波を計測し、流れのある状況では造波機から6m, 10m, 11.7m, 14m, 18mの地点で計測した。

4. 実験結果

4.1 規則波の応答調査の実験

実験結果として、流れのない状況と比較して波形に違いは見られなかったが、波高は流れのある方が約1cm、波高比にして10%程度大きかった(図-5, 6)。また、本来ならば造波機からの距離が長くなるにつれて流れの影響を受けて波高は徐々に単調増加するはずだが、本実験ではそのような結果は見られなかった(図-7)。今後は水深や流速の条件を変えて再度調査していく必要がある。

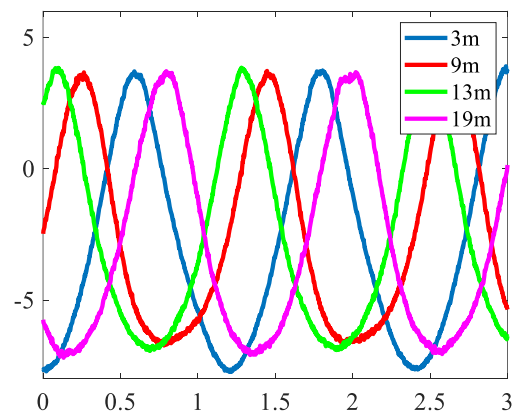


図-5 流れ中の波形

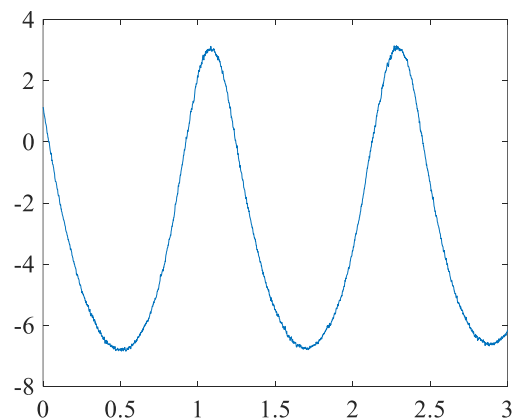


図-6 流れのない状況の波形

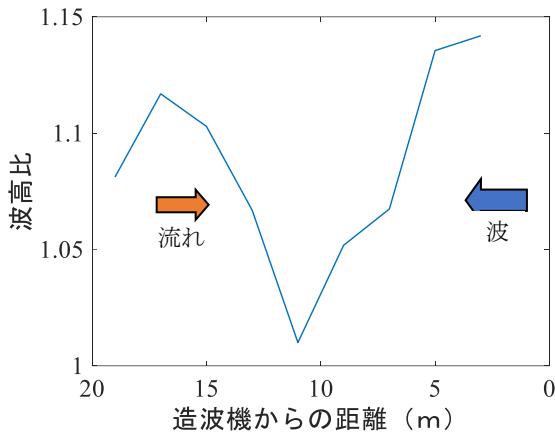


図-7 流れ存在時の波高の変化

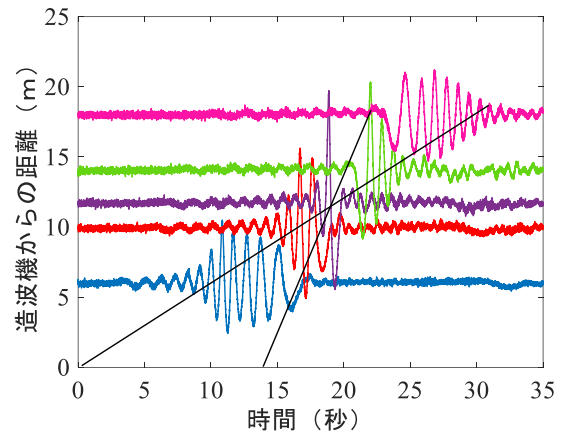


図-9 流れありで波群が集中する様子

4. 2 集中波を形成する実験

計測結果は、横軸が最初の波が造波されてからの時間、縦軸が造波機からの距離を表す図8, 9を用いて示した。図-8は流れのない状況での波群が集中する様子を表し、図-9は流れがある状況での波群の集中する様子を表す。これらの図に載っている黒い線は波群の特性曲線を表し、線の傾きは群速度を表すものである。本実験では流れのない状況で造波機から14mの地点で波群が集中するようにプログラムしたが、図-8を見ると、波群が集中するにつれて徐々に波群の長さは短くなり、高さは高くなっていった、設定した集中距離である造波機から14mの地点で集中波を形成されていることが分かる。流れのない状況では集中波（波高：11.0956cm）が形成され、流れのある状況では造波機から11.7mの地点で集中波（波高：13.9433cm）が形成されていた。流れのある状況の方が約2.3mほど手前で集中波が形成されていて、波高も約3cm大きくなった。規則波の応答調査の実験では流れがある状況の波高は流れがない状況の波高の1.1倍ほどであったが、集中波形成の実験では流れがある状況の集中波は流れのない状況の集中波より波高が1.25倍大きくなっていた。以上のことから、流れによって波群が集中する地点や集中波の高さは変化し、さらに規則波よりも集中波の方が流れによっておこる波高の増加が大きいことが分かる。以下の写真は流れがある状況とない状況での形成された集中波の様子である。

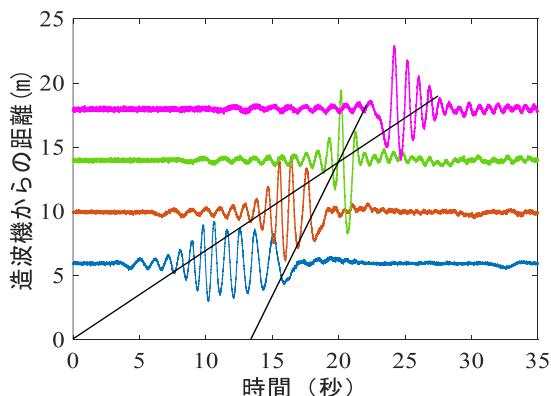


図-8 流れなしで波群が集中する様子

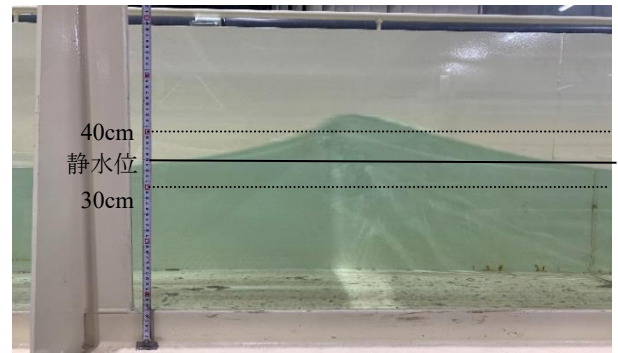


写真-1 流れ存在時の集中波

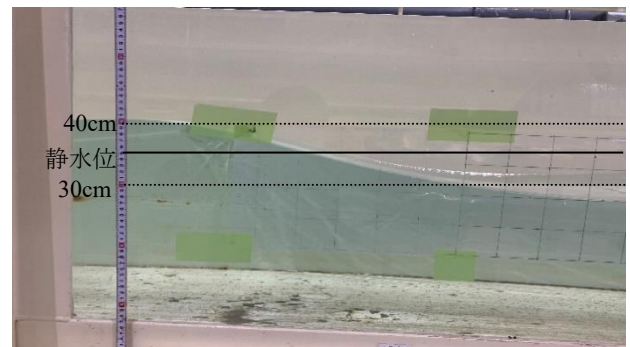


写真-2 流れがない状況の集中波

5. まとめ

本論文では流れ存在時での巨大波形成のメカニズムの解明のため、流れ存在時の規則波の応答調査の実験と、Watanabe et al. (2020)によって示された波群集中理論を用いた流れがある状況とない状況での集中波形成の実験を行った。規則波の応答調査の実験では、流れの影響を受ける距離が長いほど、波高は大きくなるはずであるが、観測結果からはそのような結果が得られなかった。また、集中波形成の実験では流れによって集中波の高さも大きくなり、波群が集中するまでの距離も短くなっていることが確認できた。さらに集中波の方が規則波よりも流れによる波高の増加が大きく、やはり巨大波形成に流れの影響は大きく関与していると言える。今後は、水深や周期を変化させたうえで規則波の応答調査の実験を再度行った後、流れの影響を考慮した波群集中理論を導

き，その上で再度集中波形成の実験を行う．

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)