

斜行する海洋波の群の再現 ～巨大波発生の謎に迫る～

1. 発表者：

早稲田 卓爾（東京大学大学院 新領域創成科学研究科 海洋技術環境学専攻 教授）

2. 発表のポイント：

- ◆斜行する波群を表現する理論的な枠組みを構築し、理論に基づき水槽実験を行った。
- ◆それにより、海洋に発生する3次元的な巨大波の形成過程が明らかになり、斜行する波群の再現に世界ではじめて成功した。
- ◆今後は、斜行する波群が実海域で存在することを実測により確認する予定であり、外洋に発生する巨大波による多くの海難事故の要因究明に役立つことが期待される。

3. 発表概要：

東京大学大学院新領域創成科学研究科海洋技術環境学専攻早稲田卓爾教授のグループは、シドニー大学の Amin Chabchoub 准教授らとの国際共同研究により、東京大学生産技術研究所海洋工学水槽にて斜行する波群の再現に成功した。外洋に発生する巨大波は多くの海難事故の要因と考えられているが、この成果により、3次元的な巨大波の形成過程が明らかになった。その鍵となったのは、波高の高い領域が、波の進行方向に対して斜行することである。その結果、群れのように連なって進行する波の頂の長さが短くなり、より現実的な様相を示す。

長距離を伝搬する海洋波は、光ファイバー中の強いレーザー光や、プラズマ中の波動の伝搬と数学的な記述が共通であることが知られている。おもに一方方向に伝搬し、進行方向にゆっくりと振幅が変調する波として考えられるが、海洋波では波の頂が無限に広がることを意味する。これまでの研究では、その波の頂が短い場合は、波の群れが安定して存在しえないことが分かっていた。今回、その波の群れが波の進行方向に対して斜めに進行することで、波の頂が短く、かつ、安定した波の群れが存在しうることを理論的に示し、実験により再現に成功した。

水槽実験は東京大学生産技術研究所海洋工学水槽にて実施した。長さ 50m、幅 10m、水深 5m の大水槽で、32 基の造波機を用いた造波実験を行った。波の伝搬は水面に浮かべたマーカの動きをステレオカメラにより計測することで、3次元的な再構築に成功した（実験映像参照）。理論に基づく数値計算結果とも良く一致した。再現したのは、波群が連続的に伝搬し、それぞれが息を吸うように振幅が増大と減少を繰り返す波列、それから、波列の小さな擾乱が一度だけ増大し減少する波列である。それぞれ、最大振幅は周囲の波の 3 倍にも到達する。

以上により、海洋波の伝搬には非線形性（注 1）が重要であることが示唆された。

本研究の成果は 2019 年 4 月 26 日付けで、米国科学アカデミー紀要（*Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*）にオンライン掲載された。

（備考）斜行する波群の実験映像（図 6、図 7）：

<http://movie-usa.glencoesoftware.com/video/10.1073/pnas.1821970116/video-1>

<http://movie-usa.glencoesoftware.com/video/10.1073/pnas.1821970116/video-2>

<https://www.pnas.org/lookup/suppl/doi:10.1073/pnas.1821970116/-/DCSupplemental>

4. 発表内容：

研究の背景と経緯

外洋に突発的に発生するフリーク波と呼ばれる巨大波は、周囲の波の3倍、時には5倍近くにもなると言われている（図1）。フリーク波との遭遇は多くの海難事故の要因と考えられているが、船体が大きな荷重により破損する可能性も指摘されている。北海油田では、波高25mに達する波が石油掘削プラットフォームを脅かしている。そのようなフリーク波の発生要因として、波の非線形性に起因する、波群（注2）の発達と考えられている。

水面の波は、代表的な周期と波長、伝搬する方向とで特徴づけられるが、振幅が一定ではなくゆっくりと変調する場合、その変化を時間と進行方向の距離の関数として表すことができる。その振幅の時空間の変化は非線形シュレーディンガー方程式（注3）で表されることが分かっているが、この方程式は、光ファイバー中の強いレーザー光やプラズマ中の波動の伝搬を表す方程式と形式的には同じである。そのため、これらの媒体で、類似した現象が発生することが分かっている。最近着目されているのは、振幅が急激に発達し、もともとのエネルギーと比べ何倍にも集中し、やがて、減衰する現象である。光ファイバー中のレーザーでは、強い信号を長距離伝達する手段の一つ、もしくは、単色光から虹色を作る手段として着目されている。しかし、それらの現象は、もともとは水面の波で発見されている。1960年代に水槽実験で初めて観察され、その後、水面の波に関する多くの理論・実験、そして数値計算による研究が進められてきた。

しかしながら、そのような非線形的な振幅の変調に起因する波浪エネルギーの増大が、実際に海洋で起こりうるかということは、いまだ、科学コミュニティの総意を得ていない。その理由の一つとして、非線形シュレーディンガー方程式で記述される水面波（図2A,C）では、波の頂が無限に広がるからである。これまでの研究では、その波の頂が短い場合は、波の群れが安定して存在しえないと考えられていた。

研究成果の内容と意義

シドニー大学の Amin Chabchoub 准教授、東京大学の早稲田卓爾教授ほかは、共同研究により、波群が波の進行方向に対して斜めに進行することで、波の頂が短く、かつ、安定して存在することを理論的に示し、実験により再現することに成功した（図2B,D）。

本来波の頂が短い波は、空間2次元的な波の場として表される。しかし、簡単な座標変換を導入することで、空間2次元+時間のシュレーディンガー方程式が、空間1次元+時間のシュレーディンガー方程式に縮退し、既知のフリーク波解が適用できると考えた。それにより得られたフリーク波を実空間で再現すると、波の進行に対して斜めに進行する波群が形成される。

斜行する波群を再現するために、多方向に進行する波を造波する機能を有する、東京大学生産技術研究所海洋工学水槽にて実験を実施した（図3）。長さ50m、幅10m、水深5mの大水槽で、32基の造波機を用いた造波実験を行った。水面に浮かべたマーカーの動きをステレオカメラにより計測することで（8. 参考文献 茂住東京大学修士論文、Mozumi et al. 2015 参照）、3次元的な波面を再構築した（図4）。理論に基づく数値計算結果とも良く一致した（図5）。再現したのは、孤立し形を変えないソリトン波群、波群が連続的に伝搬しそれぞれが息を吸うように振幅の増大と減少を繰り返すブリーザー波列（Akhmediev Breather）、それから、波列の一つの小さな擾乱が一度だけ増大し減少する波列（Peregrine Breather）である（図6、図7、実験映像参照）。それぞれ、最大振幅は周囲の波の3倍にも到達する。

この成果から、多方向に様々な波長の波が不規則に伝搬する現実的な海洋でも、3次元的な構造をもつ波群が形成され、巨大波へと発達する可能性が判った。

5. 発表雑誌：

雑誌名：米国科学アカデミー紀要 (*Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*) (2019年4月26日付けオンライン版)

論文タイトル：Directional soliton and breather beams

著者：Amin Chabchoub, Kento Mozumi, Norbert Hoffmann, Alexander V. Babanin, Alessandro Toffoli, James N. Steer, Ton S. van den Bremer, Nail Akhmediev, Miguel Onorato, and Takuji Waseda

DOI 番号：10.1073/pnas.1821970116

アブストラクト URL：<https://doi.org/10.1073/pnas.1821970116>

6. 用語解説：

(注1) 非線形性

複数の波列が重なり合った時、お互いに影響しあわないことを線形であるという。非線形性を考慮すると特定の組み合わせの波列が相互にエネルギーを交換する。この非線形性により波群が形成され、やがて、巨大波として成長する。

(注2) 波群

海洋の波浪は様々な波高の波が分布するが、代表的な波長と周期をもった波が群れになって伝搬することが知られている。波群はいわば粒子のように一つの波の連なりとして伝搬する。

(注3) 非線形シュレーディンガー方程式

水面の波の振幅の時間と空間の変化を表す方程式。水面の波だけでなく、光ファイバー中のレーザーの伝搬、プラズマやボーズアインシュタイン凝縮などでも使われる。

7. 参考文献

茂住 研人「水槽における方向波の3次元ステレオ計測」2015年 東京大学修士論文

Mozumi, K., Waseda, T., & Chabchoub, A. (2015, May). 3D stereo imaging of abnormal waves in a wave basin. In ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (pp. V003T02A027-V003T02A027). American Society of Mechanical Engineers.

Chabchoub, A., Waseda, T., Kibler, B., & Akhmediev, N. (2017). Experiments on higher-order and degenerate Akhmediev breather-type rogue water waves. *Journal of Ocean Engineering and Marine Energy*, 3(4), 385-394.

8. 添付資料 :

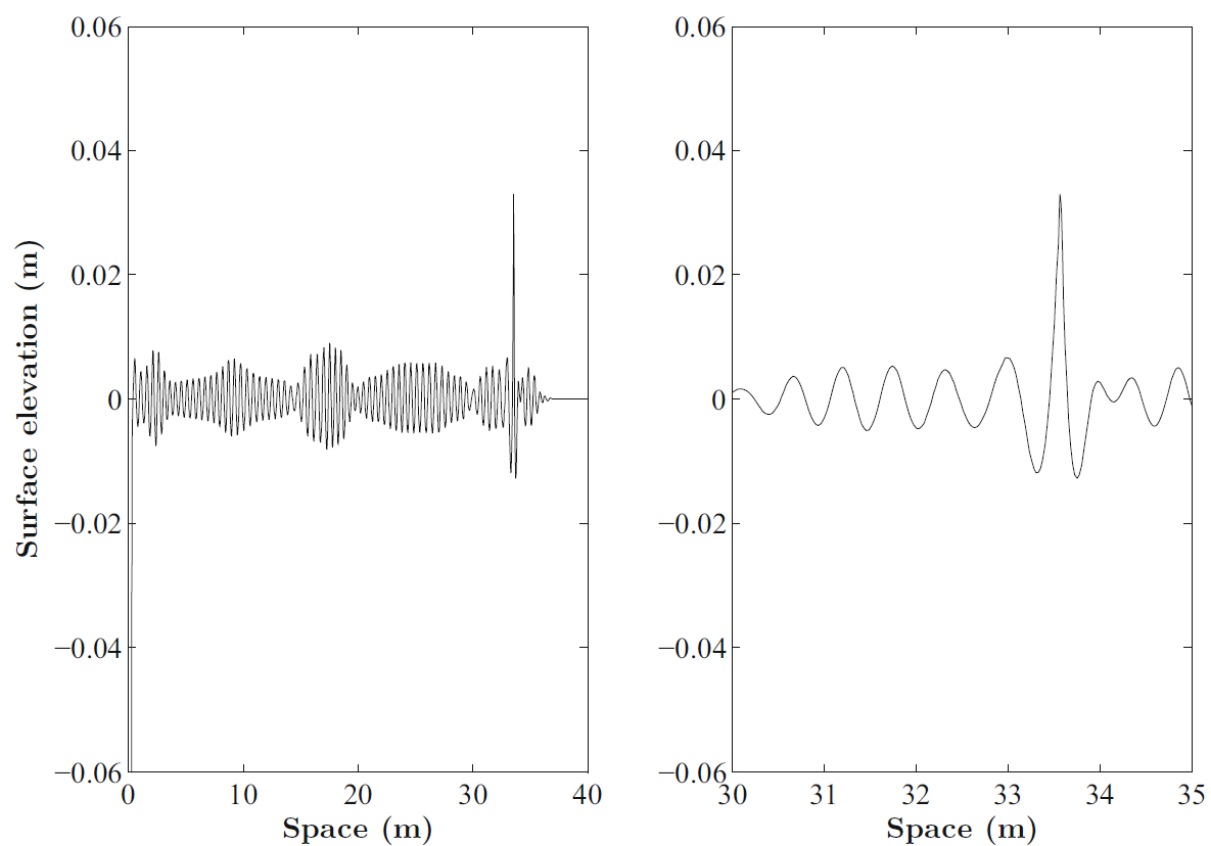


図 1 : 数値水槽で再現されたスーパーローグ波 (周囲の波高の 5 倍となる) の波形、右図は拡大図。出典 : Chabchoub, Waseda, Kibler, and Akhmediev (2017)より改変の上引用。

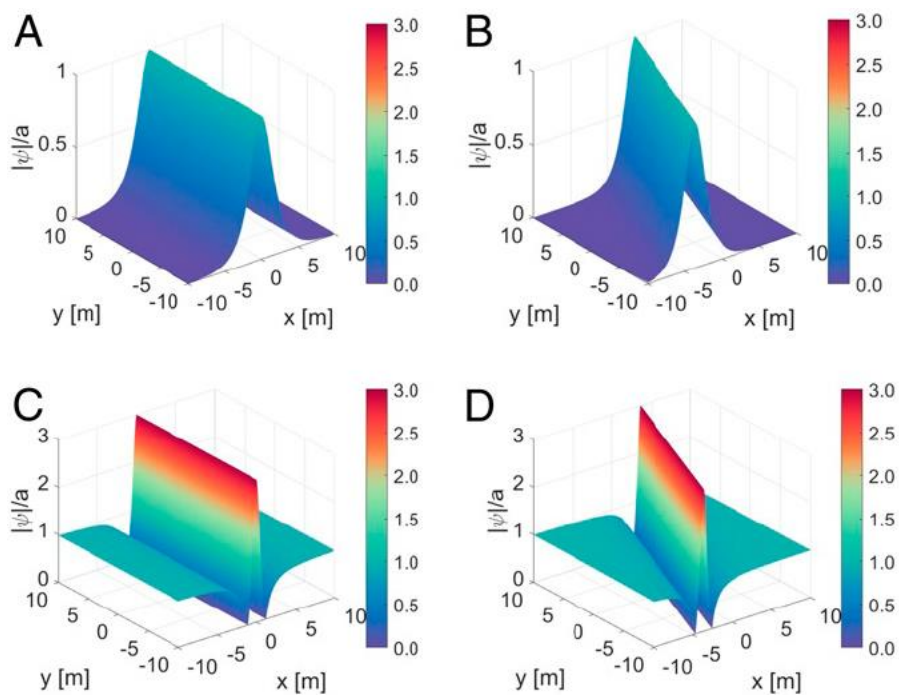


図2 A:包絡線ソリトンの振幅、B:斜行包絡線ソリトンの振幅
C:Peregrine Breather の振幅、D:斜行 Peregrine Breather の振幅

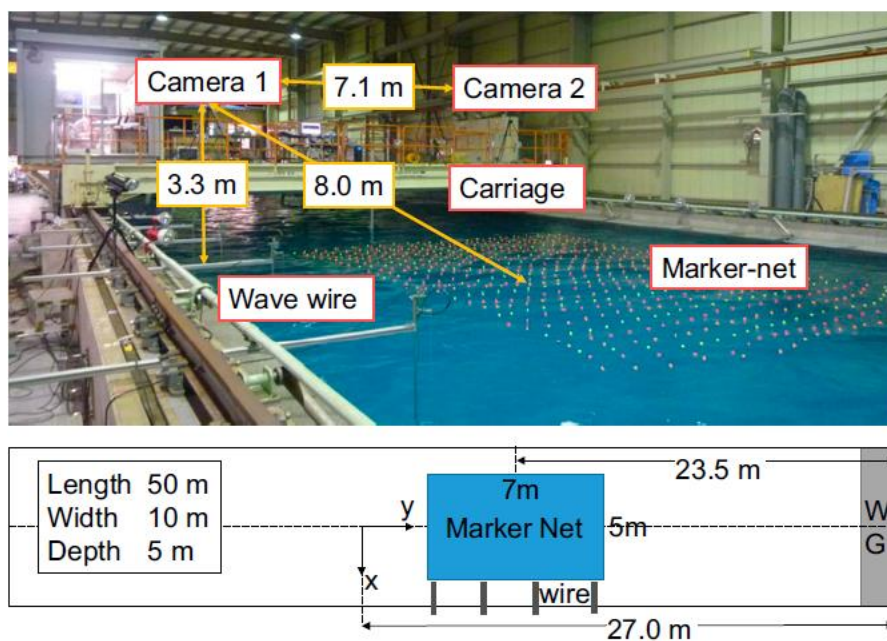


図3 (上図) 東京大学生産技術研究所海洋工学水槽での実験風景。展開されたマーカーネット、ステレオカメラの配置、波高計の配置を示す。(下図) 水槽平面図

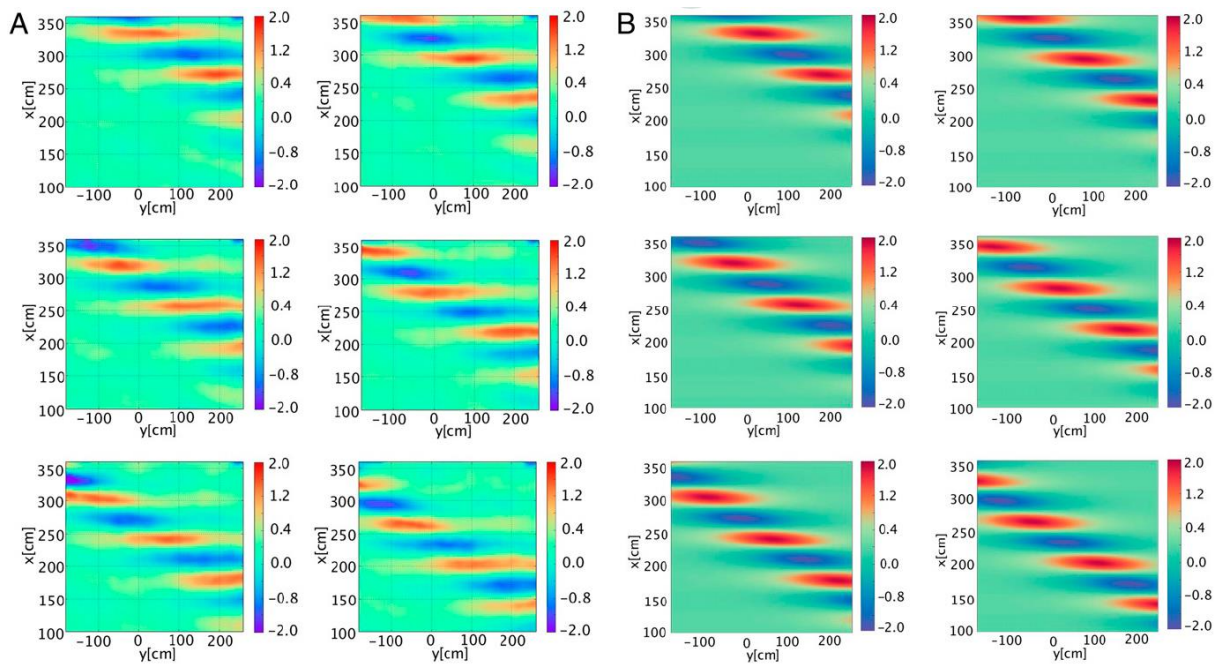


図 4 A:実験から再構築された水面変位。斜行する包絡線ソリトン波列 B:非線形シュレーディンガー方程式の数値解として得られた斜行包絡線ソリトン波列の水面変位

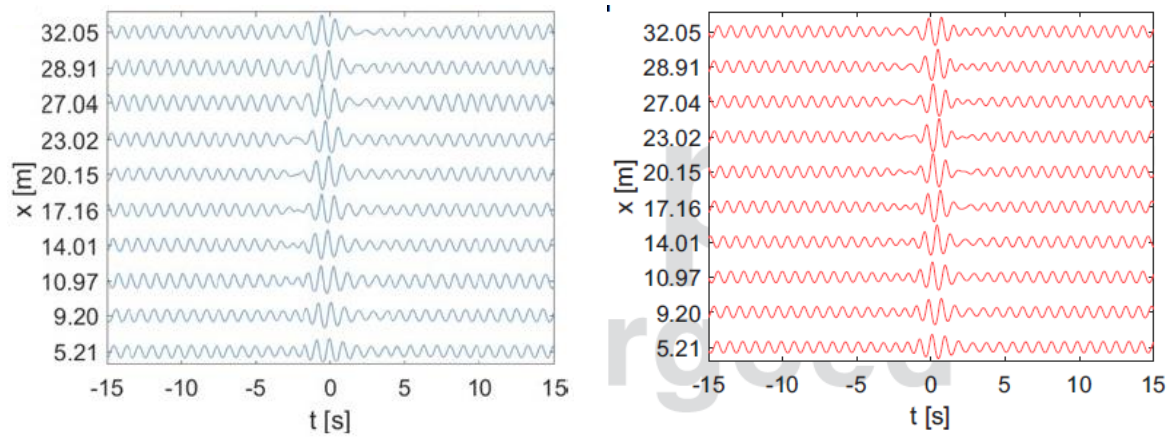


図 5 水槽実験で再現された、斜行する Peregrine Breather の時系列 (左) とシュレーディンガー方程式の数値解として得られた、斜行する Peregrine Breather の時系列 (右) 両者は良く一致し、つまり、非線形シュレーディンガー方程式が代表する力学過程が、実際の波浪の伝搬の特徴をよく捉えているということを示している。

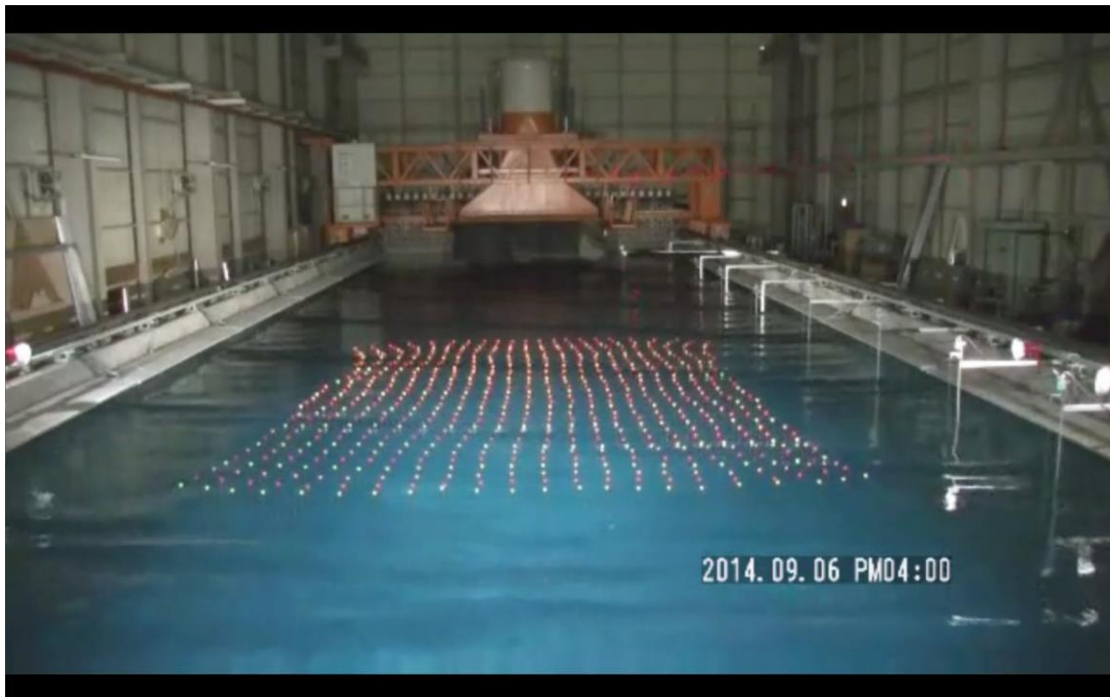


図 6 : 斜行する連続波列 (Akmediev Breather)

<http://movie-usa.glencoesoftware.com/video/10.1073/pnas.1821970116/video-1>

一つ一つの波の頂は壁面に直交しているが、波高が高い部分は壁面に対して斜めに移動する様子が分かる。斜めに影のように見えるのは、波群が斜行している様子を示している。

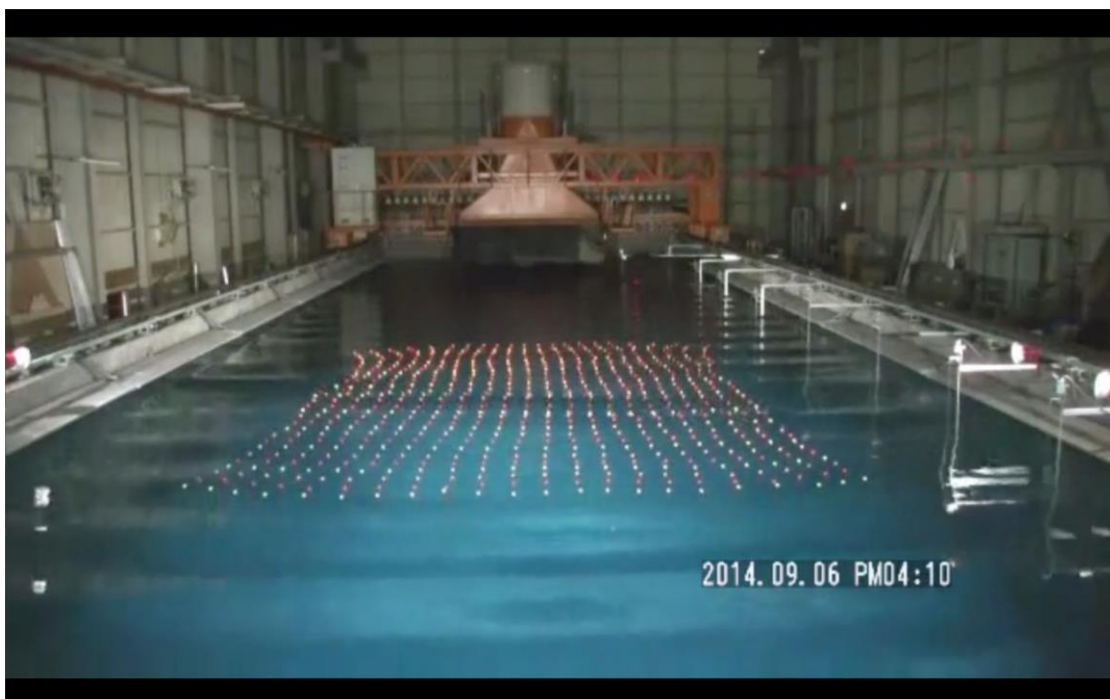


図 7 : 孤立的に増大し減少する斜行する波列 (Peregrine Breather)

<http://movie-usa.glencoesoftware.com/video/10.1073/pnas.1821970116/video-2>

何もないところから突然大きな波が現れ、どこかに消えていく波の様子を示す。波高の高い領域が斜行するため、それぞれの波の頂は短くなっている。