

REHSE「高校生による環境安全とリスクに関する自主研究活動支援事業」

## 2024年度 研究活動報告書

### 海底構造物を用いた津波の弱体化作戦

熊本県立熊本北高等学校 理数科 ARII 地学班

小田 創太, 後藤 一翔, 田代 悠人, 野口 凌雅, 森 勇惺, 渡邊 孟, 渡邊 陽斗

指導者 寺田 昂世

#### 要約

先行研究（小田ら 2019）により、津波が生じている際に海底の水流は津波と逆方向に動き、海底構造物によって津波を弱めることができると報告されている。本研究では、海底での水流と構造物の衝突によって波の勢いを弱めるだけでなく、水流自体にカルマン渦を複数発生させて渦同士を衝突させることができれば、さらに津波を弱められるのではないかと考え、実験装置を作成した。理論値の計算結果と実験結果より、海底構造物としてネジを用いることでカルマン渦を発生させることができ、ネジの配置や数によって津波を弱体化できる可能性が示された。

#### 1. 背景

日本は地震や津波などの自然災害が多い国であり、特に南海トラフ巨大地震による津波が直近で起こり得る災害として危険視されている。津波の安全対策としては堤防が一般的であるが、海底が深い沖合に堤防を設置することは難しく、沿岸への設置に留まっている。沿岸に辿り着く前に津波を弱体化させる事ができれば、被害の減少が期待できると考えた。先行研究（小田ら 2019）により、津波が生じている際に海底の水流は津波と逆方向に動くことが確認されている。本郷ら（2023）や木南ら（2019）によりダブルシリンダーを用いることで津波の弱体化の可能性が示された。しかし、実際にダブルシリンダーを用いる場合の材料費や環境への影響等も踏まえ、よりシンプルな構造物で研究を行いたいと考えた。

#### 2. 目的

流体の中に物体をおいたときに、カルマン渦という渦が物体の後方につくられることがある。海底での水流を海底構造物にぶつけてカルマン渦を複数発生させることができれば、渦同士が衝突することによって津波を弱めることができるのではないかと考えた。一般的にカルマン渦は円柱に当たった流体の後ろにつくられる様子で説明されることが多く、円柱状の構造物であればシンプルかつ海底に設置するものとして環境にも影響が少ないのではないかと考えた。これまでにカルマン渦と津波に関する報告はまだなく、新たな視点からの研究になるため、本研究では津波を発生させる実験装置を作成し、海底構造物としてネジを用いてカルマン渦を発生させることで、津波が弱まったか波高から検証をすることとする。また、装置内の波の速度からレイノルズ数を求め、臨界レイノルズ数と比較することで、理論的にはカルマン渦が発生しているかについても考える。

#### 3. 仮説

カルマン渦とは、流体の中に物体をおいたときに、物体の後方に向かってつくられる渦のことをいう（図1）。流体の速度や粘性などの条件によって層流や乱流がつくられるが、流体の特性の評価（層流か乱流かを判断する）に用いられるレイノルズ数が臨界レイノルズ数を超えたときに乱流の状態となり、カルマン渦が発生していると考えられる。本研究では、海底構造物としてネジを使用することで、ネジ

の巻き方に沿って複数のカルマン渦を発生させることができ、また、海中にカルマン渦が発生することで、渦同士が衝突して海底での水流の動きが遅くなり、津波が分散して波高も低くなると考えた。

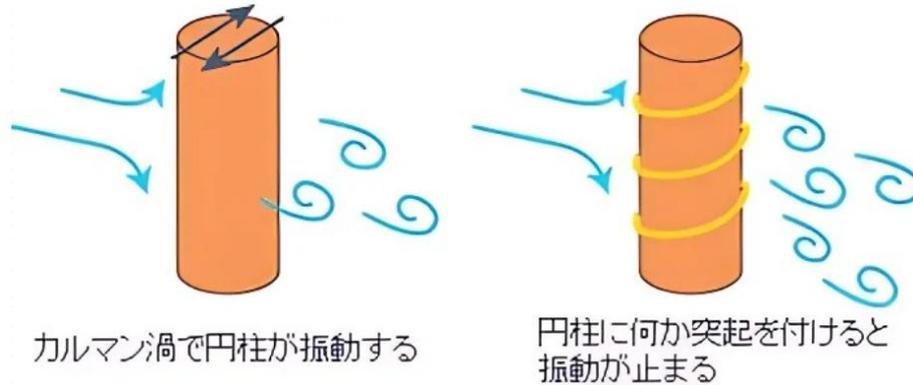


図1 カルマン渦のモデル図 (BIO WEATHER SERVICE より引用)

#### 4. 実験方法

横幅 92.2cm、奥行き 20cm、高さ 23cm の箱形の装置 (図 2) を作成した。本研究では水面の高さを計測するためにメモリを用いた。先行研究では溢れた水の質量を測るものもあったが、本研究では装置の一面をアクリル板にすることで、波の状態の動画を撮影できるように工夫した。アクリル板にしたことでメモリの設定の必要があり、最初はタコ糸でメモリを作っていたが、時間が経てば緩んでしまい、次はアクリル板にテープを貼ったが、きれいにまっすぐに貼れておらずデータの数値のばらつきが大きかった。最終的にラミネート加工した 5 ミリ方眼紙を奥の壁に貼り、これをメモリとした。海底構造物として、カルマン渦が発生しやすいように、渦巻状の溝があるネジを使用した。

水深が 4 cm となるように 3 メモリの高さまで水を入れ、装置の外側のおもりを落とすことで水底の板を跳ね上げさせて津波を発生させた。津波は自然界と発生原理を近づけたかったので、本研究では板を跳ね上げさせる方法を実現できるように蝶番で装置の底に板を固定し、常に同じ重さのおもりを落として板を跳ね上げるように工夫した。水底の板は 65 度の角度で跳ね上げるために、おもりの重さは 1455g とした。波の最高点の変化を記録することで、海底構造物の影響で津波の高さがどのように変化するか調べた。海底構造物として、カルマン渦が発生しやすいようにネジを設置した。ネジの位置と本数は、ネジなし (通常時)、1 列 2 本、2 列 2 本、1 列 3 本、2 列 3 本、1 列 5 本、2 列 5 本の 7 つの条件でそれぞれ 20 回ずつ行った。なお、波は浅くなるにつれて波高が大きくなる特性があるので、他の要素を排除するために今回は図左側の斜面に到達する瞬間の高さを陸到達時の高さとした。

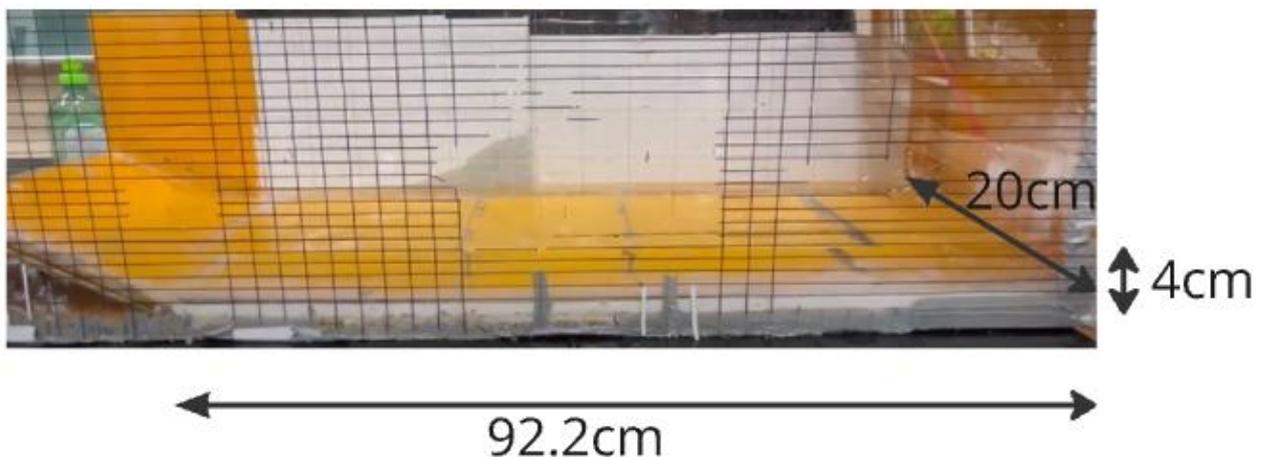


図2 実験装置の写真

## 5. 実験結果

各条件で 20 回ずつ実験を行い、陸到達時の波高（図 3）と変動量（図 4）の結果をそれぞれグラフで示した。陸到達時の波高は実験装置の斜面に到達する瞬間の高さを測定しているが、そもそもおもりを落として板を跳ね上げて波を発生させているので、波の高さ自体が毎回変動し、誤差が生じる可能性を考えた。波がネジに到達する直前の津波の波高も記録することで、陸到達時の波高との差を変動量とし、プラスマイナスで示した。陸到達時の高さについて t 検定を行ったところ、どの結果も  $p < 0.01$  であったので、ネジなし（通常時）の結果との有意差は見られた。各結果の標準偏差からエラーバーを作成した。

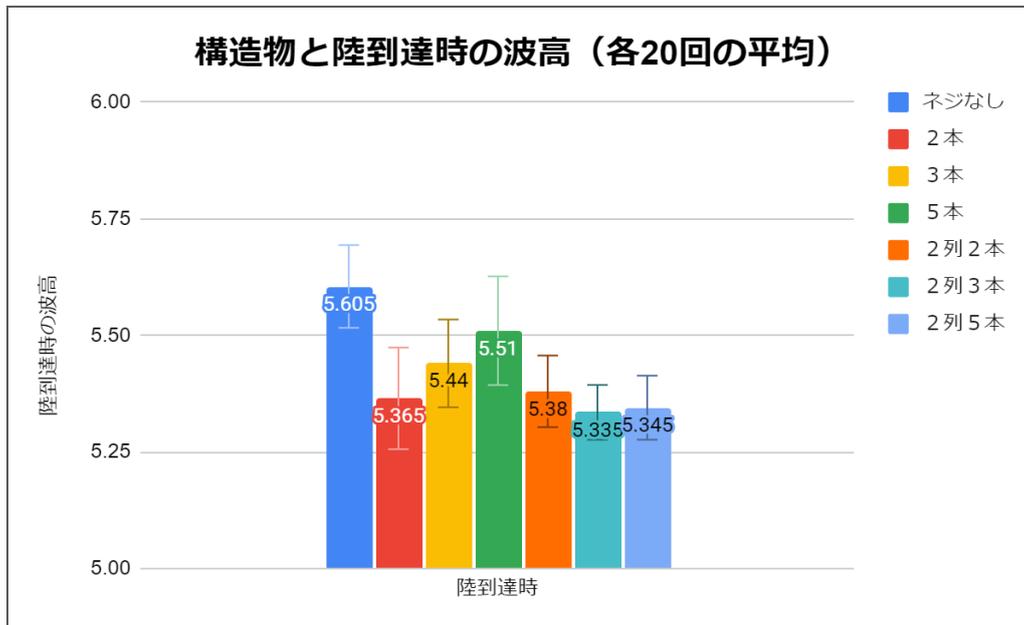


図 3 構造物と陸到達時の波高

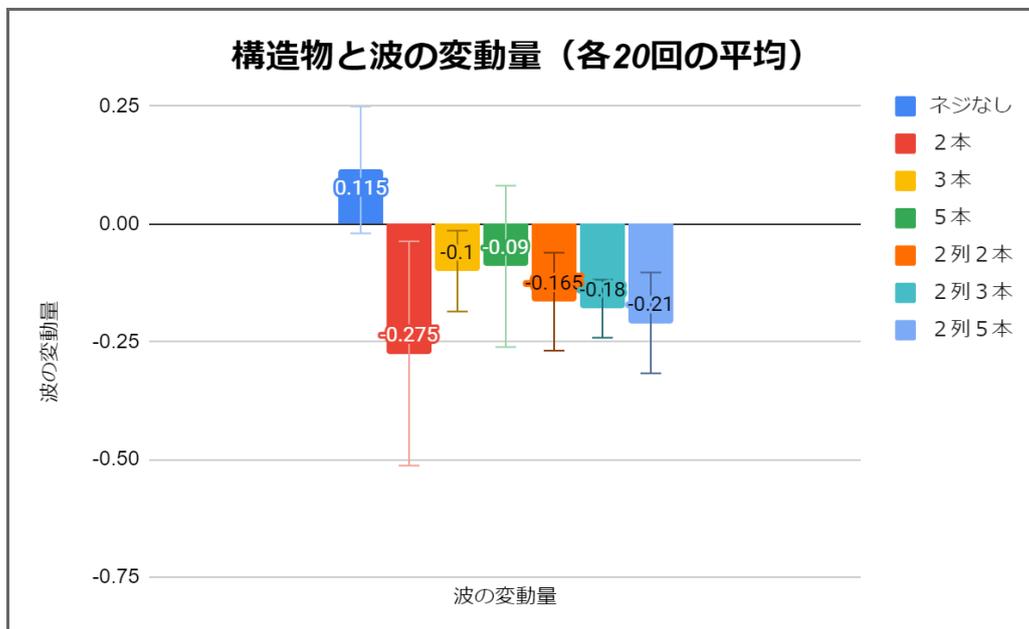


図 4 構造物と波の変動量

- ネジを設置していない状態に比べて、ネジを設置しているときはすべて波高が低下した。特に 2 列にして設置しているときには本数に関わらず大きく波高が低下した。
- 1 列にしてしているときにはネジの本数が 2 本のときが最も波高が低下し、本数を増やすにつれてあまり低下しなかった。

●変動量は 1 列 2 本のときが最も大きかったが、エラーバーから結果のばらつきも大きかったことがわかった。

●ばらつきの大きかった 1 列 2 本の結果を除くと、変動量は 2 列で 5 本のときが最も大きく、2 列では本数が増えていくほど変動量も大きくなっていることが分かる。

## 6. 考察

レイノルズ数とは、与えられた流れにおける粘性力（流れを抑制しようとする力）に対する慣性力（流体の運動量）の比率を示す無次元数である。流体ごとの臨界レイノルズ数と比較することで層流になるか乱流になるか判断を行うことができる。レイノルズ数が 2300 より低い（粘性力に支配されている）場合は層流になる。レイノルズ数が 2300 より高い（慣性力に支配されている）場合は乱流になる。

レイノルズ数の公式： $Re=VL/\mu$ （ $V$ =代表速度, $L$ =代表長さ、 $\mu$ =動粘度）

代表速度  $V$  は波の速度 0.68 [m/s]、代表の長さ  $L$  はネジの太さ 0.004 [m] とした。動粘度  $\mu$  は水 25°C では、 $0.893\times 10^{-6}$  [m<sup>2</sup>/s] である。

$$Re=VL/\mu \text{ より } VL=0.68\times 0.004=0.00272$$

$$VL/\mu=0.00272\div 0.893\times 10^{-6}=3045.9$$

計算によって求めた値について  $3045.9>2300$  が成り立つので、理論的には乱流が発生していると考ええる。実験装置の波の速度 0.68 [m/s] は、時速で考えると約 2.5 [km/h] となり、実際の沖合での波はこれよりも速い。 $V$  の値が大きい方がレイノルズ数も大きくなるので、実際の波においても乱流になり、カルマン渦が発生する可能性があるかと判断する。

カルマン渦が発生している様子を実際に観察したいと考え、実験装置作成の過程で出た木くずを水中に漂わせた状態で実験を行ったが、渦の様子を観察することはできなかった（図 5）。木くずでは形が均一でないことや、木くず全体で渦の形をつくらずに、木くず自体が回転してしまった場合は上手く観察できないことなどが影響していると考ええる。また、カルマン渦を発生させるための流体の動きが連続的であればより観察しやすくなると考えますが、今回の実験のように津波は一回の動きとなるため、観察することが難しいのかもしれない。



図 5 木くずによるカルマン渦の確認の様子

図 3 の結果より、海底にネジを設置したときは、どの条件においても津波を弱められることが確認できた。ネジの本数を増やしていくにつれて津波の波高は低くなっていくと考えていたが、1 列の状態においては 2 本のときが一番低下しており、3 本、5 本に増やすにつれて波高がネジなし（通常時）の状態に近づいていった。この結果については、ネジの間隔が渦の発生に影響しているのではないかと考える。また、2 列のときにはすべて 1 列 2 本のときと同様の波高まで低下しており、2 列の状態でのネジの本数による大きな差が見られなかったことから、同じ列で本数を増やすよりも、列自体を増やす方が

渦に影響を与えられるのかもしれない。

変動量について考えると、1列の2本のときに最も大きく変動し、1列5本のときに最も小さく変動しているが（図4）、どちらも他の結果に比べて大きくばらつきが見られているため、実験の精度が低かったことがわかる。図3で1列2本のときの波高が大きく低下した結果が見られたが、図4の変動量を見ても他の結果と比べて大きく表れすぎているように感じた。データのばらつきからも、おそらくネジを設置して初めてとったデータであったため、まだ実験の技術不足で発生させた波が高くなったり低くなったりしていたのかもしれない。もしくは実験器具の幅に対しては2本の幅がちょうどよくカルマン渦を発生させていたことも考えられるが、2列にしたときのデータでは2本のときよりも5本のときの方が変動量が大きいため、現段階では幅についてはまだわからない。実験の手法に課題があり、精度の低さが結果に影響を与えた可能性も考えられるが、波は基本的に発生源から円形に広がって行くことを考えると、本実験装置においては強制して直線に進ませていることで本来の波長から変わってしまい、実験結果にばらつきが出ている可能性もあると考える。

今回の実験ではもともと深さ8cmで行っていたが、測定の途中で水が溢れてしまうという問題があり、急遽4cmの高さでデータを取り直した。実際の自然界と比較した場合、南海トラフと四国の間の比較的平面な海洋底の深さ1000mを実験装置の深さ4cmで考えると、実験器具のネジが1.5~2cmの高さであるので、実際には約400~500mという高すぎる構造物を設置していることになってしまう。海洋底の深さ500mや200m付近の位置で構造物を設置したとすれば、構造物の高さは250mや100m程度と現実的な値になってくるが、海底の距離がそれぞれ10kmもなく、おそらく沿岸に近づくほど平面ではなく急な斜面になっていると考える（図6）。今回の実験装置は水平で横幅が92.2cmになっているので、今後斜面の角度や距離についても考える必要がある。さまざまな水深でのデータをとることで、さらに水の深さに対してのネジの適した割合や必要な距離について見えてくると考える。

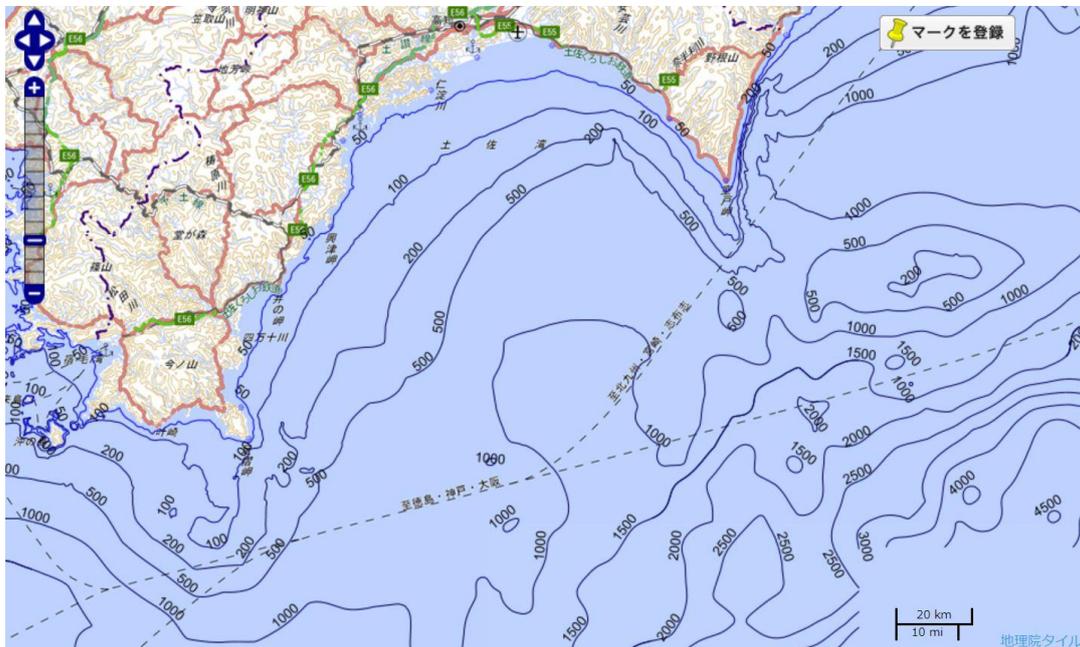


図6 四国南側の海底の地形図と海の深さ（みんなの海図より引用）

実験結果全体として、ネジを2列で行った実験ではどの本数でも波高の低下が顕著に見られ、データのばらつきも小さかった。今回の実験では2列までで行ったが、実際の沖合では3列や4列などにしていくことで段階的に津波を弱めることができると考えるため、今後3列目以降の実験も行いたい。また、実験器具の幅を変えて行うことや、実験器具をさらに大きくすることで壁に当たった波の干渉を抑えることができると考える。

## 7. 「環境安全とリスク」に関する意見と感想

考察でも述べた通り、実際に海底構造物を設置することを考えると、できるだけ小さくかつシンプルで環境への影響が少ないものが良い。石灰質なものであれば、海底の石灰岩と似た成分であり、海水汚染の問題も少ないのではないかと考える。また、円柱状のネジのような形のを海底に刺すだけであれば工事も複雑ではなく、壊れた場合の修復、構造物の追加も比較的簡単に行えるのではないかと考える。また、生物の新たな住処になるという効果も期待でき、完全に水域を分け隔ててしまう防波堤に比べると環境への影響は少ないのではないかと推察する。自然環境は人間だけのものではないので、人間の安全を考えた取り組みは、同様に環境の安全についても視野に入れておく必要があると思うし、実行したときにどのような影響が発生するかについてのリスクについてもできる限り予測しておく必要がある。まだこの研究は初期段階であるので、そこまで突き詰めては考えていけないが、今後研究が進んでいくにつれて、そういった実際に自然界に設置するとしたらという視点での研究も行う必要があると考える。

## 8. 今後の課題と展望

今回行った配置だけでなく、新たな配置でも試行回数を増やしていき、本数と幅、列の関係性を見出していきたい。今回の実験の目標は海底で渦を起こし、流速を遅くするものであったが、やはり海底の渦を確認できるようになるとより研究も発展していくと考える。南海トラフ沖の海底の深さを想定するのが遅く、実際の海の縮尺として計算をしたときに、ネジの高さが実際に設置する構造物としては大きすぎる比率になってしまったことを反省し、今後の研究では実際の自然を想定しながら実験装置の水深を変えたり、構造物の形状を変えたりしていきたい。

## 9. 参考文献

- (1) BIO WEATHER SERVICE, お天気豆知識カルマン渦, いであ株式会社, <https://www.bioweather.net/column/weather> (参照 2024-10-17)
- (2) 本郷星七・井手史人・岩田蒼唯・大村明尚・河津璃琥・谷口斗梧・安田陽向・今村美優・坂田華, 2023, 津波の被害を軽減させる海底構造物の可能性, 熊本北高等学校理数科 AR II 物理班
- (3) 木南幸帆・森遥香・油片愛翔・榎本倫太郎・小林憲輔, 2019, 津波被害を軽減させる海底構造物の形状, 金沢泉丘高等学校理数科 AI 課題研究 2 班, 石川県教員総合研修センター, <https://cms1.ishikawa-c.ed.jp/izumih/wysiwyg/file/download/30/1503> (参照 2024-6-11)
- (4) みんなの海図, マリーネットワークス株式会社, <https://mar-nets.com/> (参照 2024-10-8)
- (5) 小田沙也加・近藤泰生・竹内壮志・津田丞太郎・日比野雅俊, 2018, 津波の性質を利用した被害の軽減, 金沢泉丘高等学校理数科 AI 課題研究 6 班, 石川県教員総合研修センター, <https://cms1.ishikawa-c.ed.jp/izumih/wysiwyg/file/download/30/2060> (参照 2024-6-11)

## 謝辞

本研究に際し、メンターとしてお力添えをいただきました大阪大学の高橋賢臣先生、ご支援いただきました REHSE 高校生支援事業事務局の皆様にご心より御礼申し上げます。