

着床式洋上風力発電施設とコンテナの衝突に関する検討*

秋田大学理工学部 池ヶ谷翼

秋田大学大学院理工学研究科 齋藤憲寿・渡辺一也

1. はじめに

秋田港は2022年12月より日本国内初の商業ベースでの大型洋上風力発電プロジェクトである洋上風力発電事業の13基の着工が終了し、本格的な商業運転を開始している。他にも秋田港は地区新産業都市の指定を受け、地域経済に重要な役割を持っている。このように秋田港には現在洋上風力発電施設や陸上風力発電施設などのエネルギー資源、コンテナや木材などの産業資源が多く存在していて北海道南西沖地震や能登半島地震のような津波が秋田港に襲来した場合どのような被害となるのか検討する必要がある。

既往研究として、重松ら¹⁾は漂流物模型を使用して波力を計測している。また、羽田ら²⁾は洋上風力発電施設に船舶が衝突した場合の力を計測している。漂流物と津波の実験では、耐久性のある構造物³⁾やシェルター等を用いた方法についても検討が行われている。さらに、高橋ら⁴⁾は構造物にロードセルを用い津波によって左右する荷重を計測していた。

本研究では実際の津波のフルードの相似則で着床式洋上風力発電施設とコンテナの模型を作製し、さらに無線化の計測方法を使用し、できるだけ実際の動きに近い模型実験を行う。

2. 模型縮尺の選定

フルードの相似則を行うために、実験で使用する水槽の水位と流速の数値を求める予備実験を行う。予備実験は水位を測る超音波水位計、流速を測るプロペラ流速計を用いて1点法で測定をする。貯水深は H 、浸水深 h と表す。 H は25 cm, 30 cm, 35 cmの3パターンであり、 h はどれも0 cmで固定してそれぞれ3回測定する。実験装置の概略は図1に示す。予備実験では図1のタワーとコンテナはないものとして予備実験を行う。実験水路は幅0.30 m、高さ0.50 m、全長11.0 mであり、海側5.0 m、陸側6.0 m、斜面勾配1/26の鋼製矩形水路を使用した。

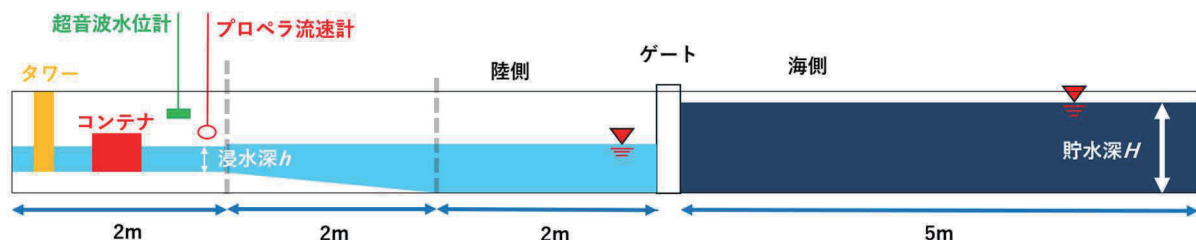


図1 実験装置の概略図

*Study on Impact of wind turbine and container by Tsunami by Tsubasa IKEGAYA, Noritoshi SAITO and Kazuya WATANABE

これらの実験から測定した最高水位と同時刻の流速を計算してフルード数を求める。その結果を表 1 に示す。

水槽内のフルード数は 1.10～1.20 であった。これは岡本ら⁵⁾の北海道南西沖地震の実測データと一致する。そのためこのフルード数を用いて水槽の水位と北海道南西沖地震の水位のデータ⁶⁾を相似させ、縮尺 1/25 で洋上風力発電施設とコンテナ模型の作製を行う。

3. 実験概要

コンテナ模型は 3D プリンタで作成した。洋上風力発電施設模型は塩ビパイプを利用した。コンテナ模型の概要は図 2 に、着床式洋上風力発電施設模型の概要を図 3 に示す。

1 つ目の計測方法として衝突時の力を求めるためコンテナの中に加速度センサを入れている。加速度・角速度・地磁気の 9 軸センサで姿勢や挙動など模型の状態がわかる。このセンサを用いて加速度だけではなく姿勢や挙動も観測することができる。

$$F = ma \quad (1)$$

式(1)は運動方程式を示す。 F :力(N), m :質量(kg), a :重力加速度(m/s^2)である。加速度を求めた後、模型同士を衝突させた時の力を測定するため式(1)を使用して力を求める。

2 つ目の計測方法として動画解析で計測をする。コンテナ模型に色を識別できる印をつけて置き、HSV OpenCV を利用して印を動画につけることで、動画上で変化した座標と時間がわかり、微分をして速度を算出し、もう一度微分して加速度を算出することができる。加速度を求めた後は式(1)を利用して力を算出することができる。これらの方法 2 つ同時に計測し、本実験では精度の良い動画解析を採用した。

コンテナ模型の中に加速度センサを入れ実験を行う。動画を着床式洋上風力発電施設とコンテナ模型の両方が移るように上から撮影する。また動画の印をつけるためコンテナ模型に色のついた球を 3 か所つけている。実験条件は表 2 に示す。 H は 25 cm で一定で実験していく。

表 1 予備実験の測定結果

H (cm)	最高水位 (cm)	同時刻の流速 (cm/s)	フルード 数
25	6.27	92.15	1.18
30	8.47	102.84	1.13
35	10.05	114.69	1.16

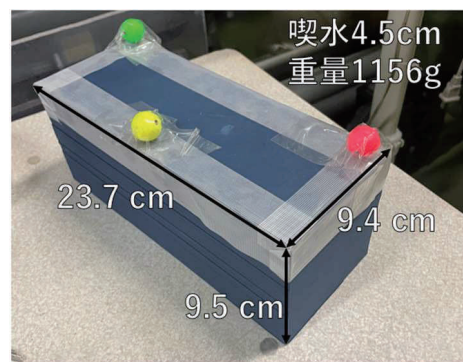


図 2 コンテナ模型の概要

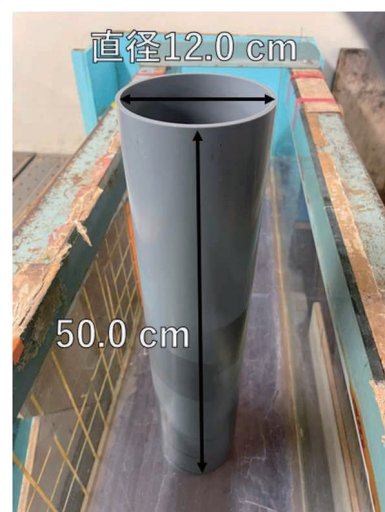


図 3 タワー模型の概要

表 2 実験条件

$H=25$ cm	h (cm)
第一波想定	0
第二波以降想定	7.5

4. 実験結果

(1) $H=25\text{ cm}$, $h=0\text{ cm}$ の場合

加速度の算出は動画解析の結果を利用する。1 回目の速度と加速度の結果を図 4 に示す。2 回目の速度と加速度の結果を図 5 に示す。3 回目の速度と加速度の結果を図 6 に示す。それぞれの赤線をタワー模型に衝突した瞬間のためその数値を力の値を求める数値に利用する。それぞれ上のグラフが速度を表していて、下のグラフが加速度を表している。

それぞれのグラフを比較してみると、1 回目 2 回目の加速度のデータは何度もプラスやマイナス方面の移動があるのに対し、3 回目の加速度のデータは 1 度のみ、マイナス方面に大きな加速がある。ただし、2 回目のグラフでは大きなマイナスの加速が複数あり、これは何度も着床式洋上風力発電施設模型に衝突したことが分かる。

次に $h=0\text{ cm}$ のコンテナ模型の挙動について図 7 に示す。1.00s が津波に衝突しコンテナ模型が動き出した瞬間である。下から上にかけてコンテナ模型が津波に流され、着床式洋上風力発電施設模型に衝突している。1, 2 回目は模型が回転しながら流れていて縦方向になり着床式洋上風力発電施設模型に衝突した。3 回目は回転せずにそのまま横方向で着床式洋上風力発電施設模型に衝突した。これらの違いで津波の力を受ける模型の面積に差があった。

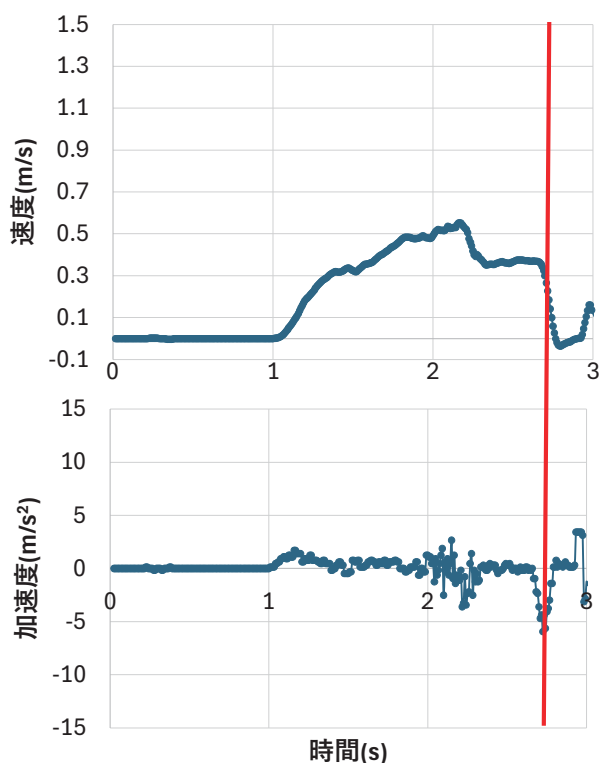


図 4 1 回目のデータ

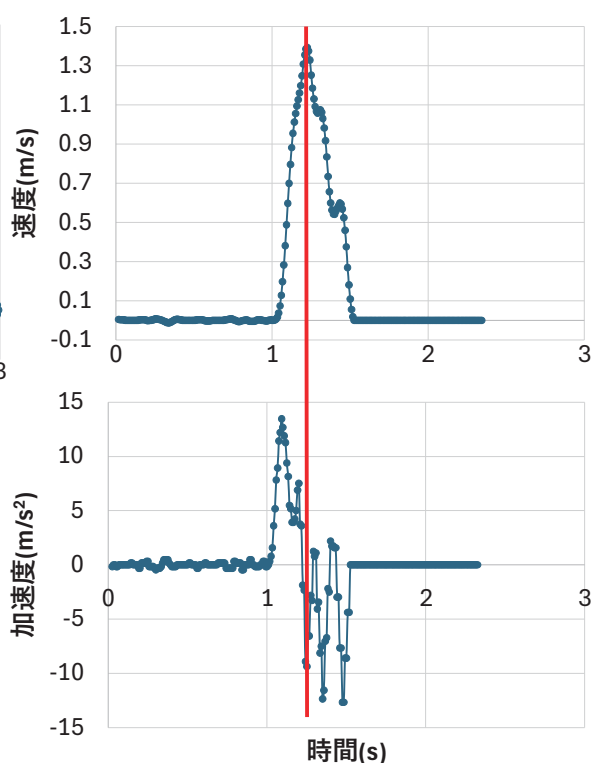


図 5 2 回目のデータ

最後に計測した加速度の値と、式(1)を用いて実際の力に変換した。その結果を表3に示す。1回目と2回目のデータよりも3回目のデータの方が、着床式洋上風力発電施設模型が受けた力が大きかった。その結果コンテナ模型は回転せずにそのままの方向で衝突した力は大きく、波による圧力が受ける面積の大きさにより力の大きさは変化することが分かった。

表3 $H=25\text{ cm}$, $h=0\text{ cm}$ の場合

$h=0\text{ cm}$	加速度(m/s^2)	力(kN)
1回目	3.59	63.44
2回目	6.57	115.94
3回目	8.23	145.31

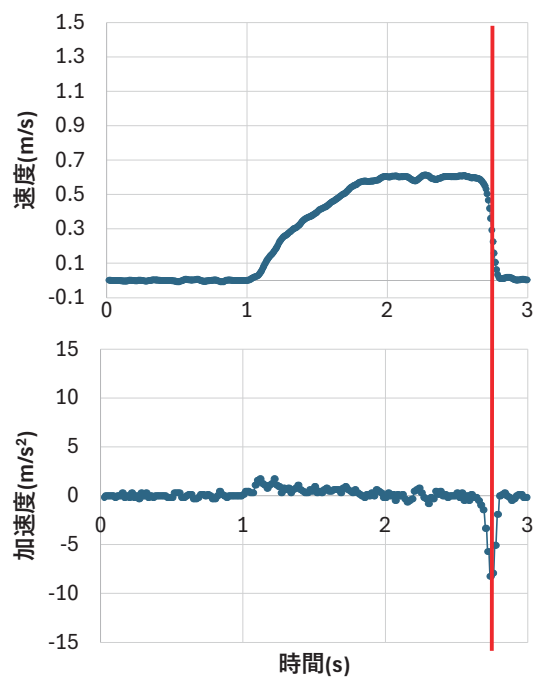


図6 3回目のデータ

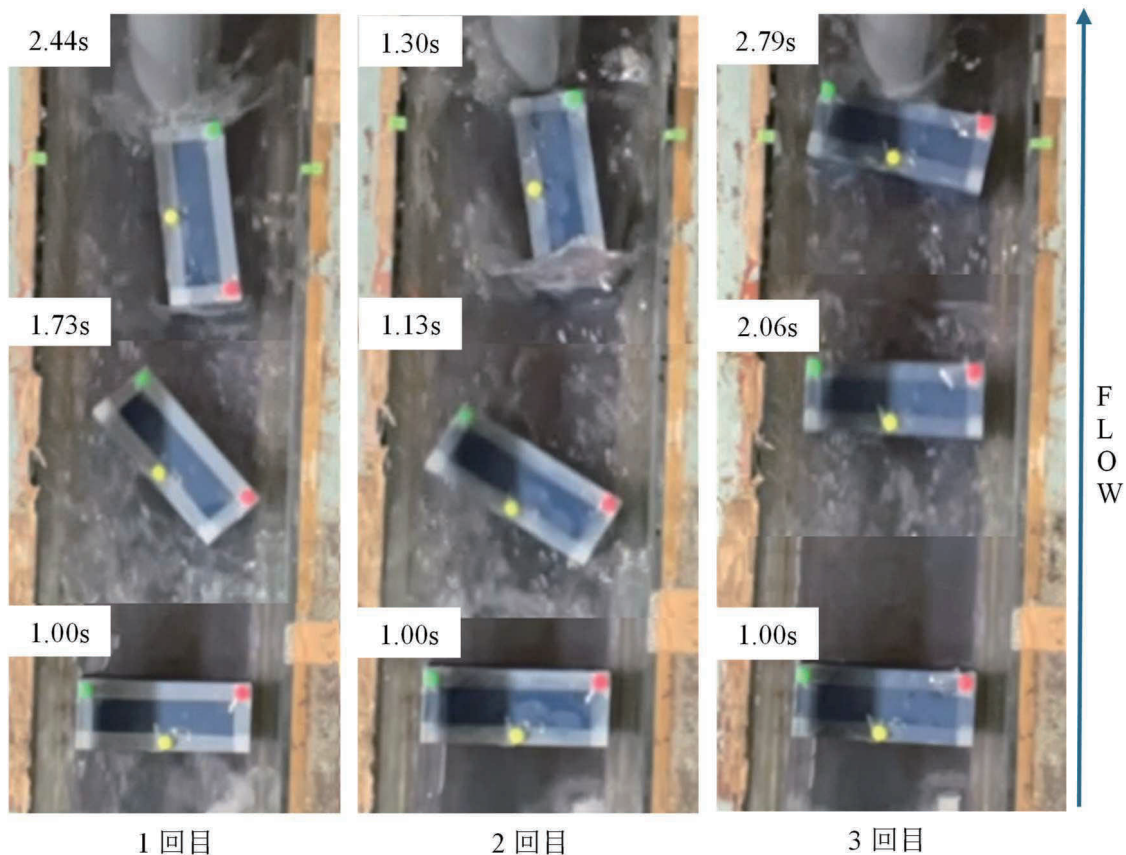


図7 コンテナ模型の挙動

(2) $H=25\text{ cm}$, $h=7.5\text{ cm}$ の場合

加速度の算出は動画解析の結果を利用する。1 回目の速度と加速度の結果を図 8 に示す。2 回目の速度と加速度の結果を図 9 に示す。3 回目の速度と加速度の結果を図 10 に示す。それぞれの赤線をタワー模型に衝突した瞬間のためその数値を力の値を求める数値に利用する。それぞれ上のグラフが速度を表していて、下のグラフが加速度を表している。

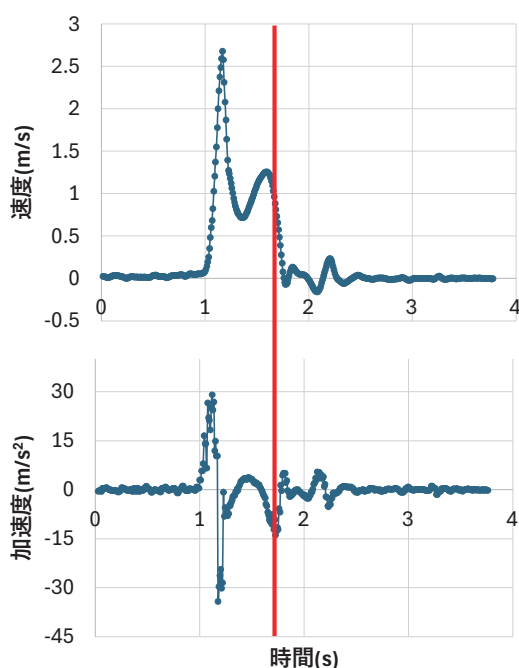


図 8 1 回目のデータ

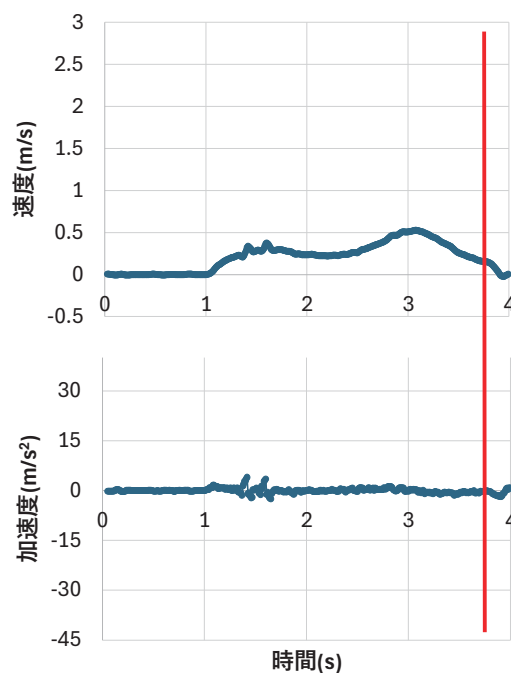


図 9 2 回目のデータ

それぞれのグラフを比べると 1 回目では最初に早い速度でコンテナ模型を津波が移動させて、後から波状段波によってコンテナ模型が再度加速させた。一方で 2 回目の実験では全体的に加速が少ない。そんな中で 1 回目とは違う点は、波状段波の方が、速度が速い結果になった。3 回目の実験では、速度の波形が 1 回目と 2 回目の違い、山が一つになっている。これは波状段波による影響が 1 回目と 2 回目の実験よりも少なかったと考える。

次に、図 11 に $h=7.5\text{ cm}$ のコンテナ模型の動きについて示す。3 回とも同じ動きをしたため代表して 1 回目の動きのみ示している。動

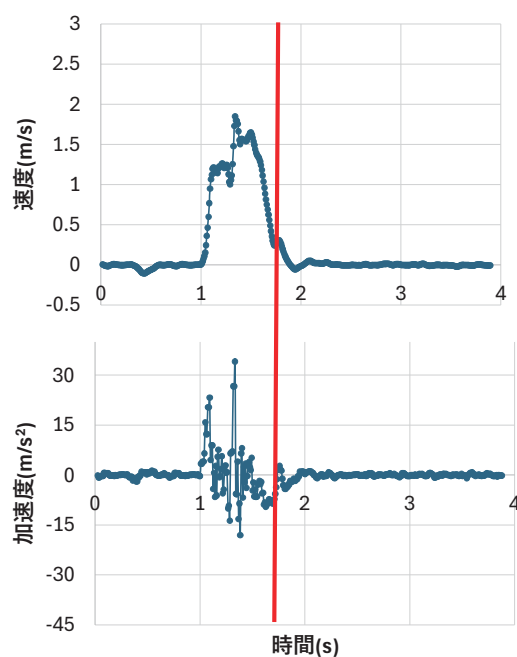


図 10 3 回目のデータ

きを見てみるとグラフと同じようにコンテナ模型が津波に衝突して動いた後、波状段波により再度コンテナ模型を加速させていることが分かった。

最後にグラフからその数値を算出した加速度の値と、加速度の値から力に変換してそこから力の相似を行い実際の力に直す。その計算データを表 4 に示す。それぞれの数値を比べてみると、2 回目の加速度、力がほかの計測データよりも大幅に少ないことがわかった。

最後に表 3 と表 4 を比較すると $H=25\text{ cm}$, $h=7.5\text{ cm}$ の場合の方が、 $H=25\text{ cm}$, $h=0\text{ cm}$ の場合よりも加速、力の大きさの幅が大きく、着床式洋上風力発電施設に衝突時加わった力が大きい結果となった。

5. おわりに

本研究では実際の津波からフルード数の相似を行い、測定方法を無線化にすることで、実際の動きに近い挙動を見ることができた。 $h=0\text{ cm}$ の場合ではコンテナ模型が津波と平行な状態で着床式洋上風力発電施設模型と衝突することや、津波に対して垂直な状態で着床式洋上風力発電施設模型と衝突することで着床式洋上風力発電施設模型に掛かる力が変化することが分かった。 $h=7.5\text{ cm}$ の場合では波状段波が起きるケースやその波状段波が計測に影響しないケースが得られた。

参考文献

- 1) 重松孝昌・中東大輔:二重式浮体津波避難シェルターの運動特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.67, No.2, pp.I_751-I_755, 2011.
- 2) 羽田 絢・中篠俊樹・二村 正・藤原敏文・井上俊司:浮体式洋上風力発電施設と船舶の衝突挙動に関する実験的研究, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol.32, pp.I_65-I_76, 2020.
- 3) 小尾博俊:津波避難タワーの構造形式と漂流物の衝突挙動に関する数値解析的検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.71, No.2, pp.I_1201-I_1206, 2015.
- 4) 高橋 陸・齋藤憲寿・渡辺一也:ロードセルを用いた津波漂流物の衝突に関する検討, 東北地域災害科学研究, 第 59 巻, pp.31-36, 2023.
- 5) 岡本憲助・松富英夫:津波氾濫流速の簡易推定法に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. B2-65, No.1, 296-300, 2009.
- 6) 松富英夫・首藤伸夫:津波の浸水深, 流速と家屋被害, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp.246-250, 1994.

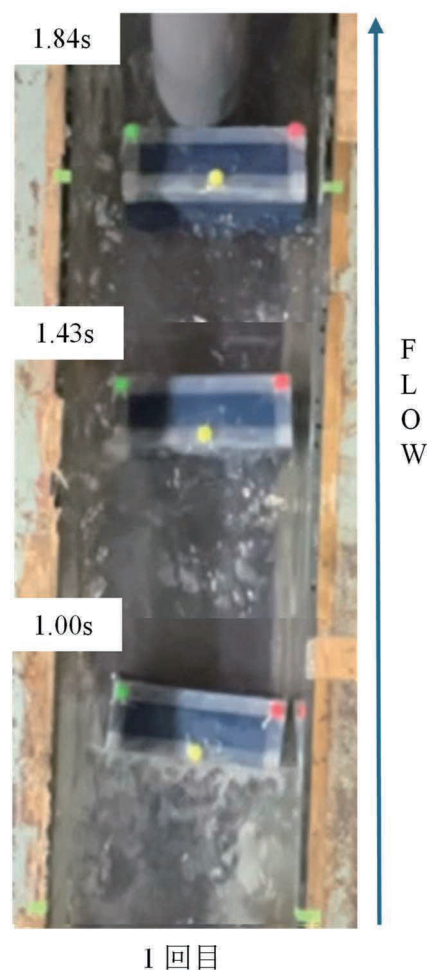


図 11 コンテナ模型の挙動

表 4 $H=25\text{ cm}$, $h=7.5\text{ cm}$ の場合

$h=7.5\text{ cm}$	加速度(m/s^2)	力(kN)
1 回目	11.56	203.91
2 回目	1.85	32.66
3 回目	8.07	142.50