

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18290

研究課題名(和文)日本周辺海域の極値波浪特性の解明

研究課題名(英文)Characterizing extreme waves around Japan

研究代表者

和田 良太(Wada, Ryota)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：20724420

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、合理的な極値統計手法および不確実性の定量化手法を構築した。また推定精度を高めるために空間統計を利用した極値推定手法も新たに提案した。これら提案手法を用いて台風に支配される日本周辺海域の極値波浪推定を行った。台風下の波浪データはデータ量が少なく、また一般的に精度も低い。そこで独自の極値波浪データについて、他のモデルや観測との比較を通して台風下の再現精度について考察した。これらを踏まえて極値波浪解析を実施し、日本周辺海域の極値波浪マップを構築した。空間統計を利用した手法では、従来得られなかった空間的に滑らかな極値波浪の分布を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：In this research, we develop a rational method for the estimation of extreme waves and its uncertainty, In addition, we introduce spatial extremes method to decrease the uncertainty in the estimation. Extreme waves in Japan is dominated by tropical cyclones and characterized by the small data volume and low accuracy. We utilized our original wave model and evaluate the accuracy under tropical cyclones. We apply the methods developed to our data to construct a 100 year return period map for seas around Japan. The result shows smooth spatial variation that could not be seen in previous studies.

研究分野：極値統計、海洋工学

キーワード：極値統計 有義波高 台風 空間統計 海洋工学

## 1. 研究開始当初の背景

年間最大値などの極値データの漸近挙動は、極値理論により一般化されたパラメトリックな極値分布にて表現され、極値推定は得られた極値データから極値分布のパラメータを推定する事となる。波浪の極値推定に関する研究は、海洋資源開発が活発な北海などにおいて豊富なデータを元に進められてきた一方で、日本周辺海域は普段穏やかであるが、台風時には大きな波が発生する。台風下の波浪特性は平常時とは異なる独立同分布を持つため、台風のない北海において研究された極値推定手法は直接利用できない。また観測データが豊富な港湾内と異なり、開発が期待される沖合では、船舶による目視観測やごく僅かな波浪ブイのみで、波浪観測データが時空間的に限られている。船舶による目視データは観測精度、及び台風を回避した航路選択によるバイアス等が課題として挙げられる。日本周辺海域の極値波浪データは質・量ともに限られていることが極値波浪解析の大きな課題となる。

しかし、限られたデータから極値推定を行う手法は国内外において確立されていない。例えば、国外で広く利用される最尤法の信頼区間を求めるデルタ法はデータ量が多い時の漸近挙動を利用(Coles, 2001)しているため、データ量が少ない時には適用できない。上記例など国内で利用されている手法(合田、1988)は、限られた極値分布を基として経験的に導かれた手法であり、和田ら(2013年掲載予定[1])は信頼区間の推定結果の精度が低い事を指摘している。

構造設計では極値推定の精度が低い事を念頭に「100年再現期間値の不確実性を10,000年再現期間値により考慮する」等の方法が行われているが、この議論は極値推定における2つの不確実性(AleatoryとEpistemic)が混同されている。

*\*Aleatory Uncertainty:自然ランダム過程における不確実性(例:サイコロの出目の確率分布が既知でも、出目は振るまでわからないという不確実性)*

*\*Epistemic Uncertainty:知識不足による不確実性(例:サイコロの出目の確率分布そのものに対する知識の不足からくる不確実性)*

上記の議論は知識不足による不確実性を評価できていないという課題を自然ランダム過程の不確実性の範疇へと転嫁している。海域によっては10,000年再現期間値を考慮しても極値分布の推定誤差に対して十分な余裕を持っていない可能性があり、両者は明確に区別して扱われるべきである。

日本周辺海域における極値波浪解析独自の課題解決に加えて、不確実性を体系的に扱い、正しく定量化できる統計解析手法そのものの改善を視野に研究に取り組む必要がある。

## 2. 研究の目的

AleatoryとEpistemicの両方の不確実性を体系的に分類し、定量的に評価できる手法としてベイズ推定の事後確率分布の考え方に基づくLikelihood-Weighted Method(以下、LWM法)を提案している。LWM法では、データ精度とデータ量を陽的に推定に反映する事で、定量的な信頼区間を持つ極値推定が可能である。

本研究の目的は、日本周辺海域の極値波浪に関する統計的な特性を明らかにする事である。そのために、台風時の独自波浪シミュレーションと観測データの検証を通じた極値波浪データベースの構築によるデータの充実と、研究申請者が開発したデータ不足に由来する極値推定の精度を体系的、定量的に評価できるLikelihood-Weighted Method(以下、LWM法)を用いた「不確実性を含めた極値推定量」の表現を組み合わせた検討を行う。

## 3. 研究の方法

### 3-1 極値波浪データの精度に関する考察

日本周辺海域における波浪観測・シミュレーション結果を整理する。本研究では、既存の波浪モデルに加えて、東大が実施した21年間の独自波浪推算モデル(Todai WW3)<sup>[1]</sup>を対象に事例研究を実施した。台風時の波浪シミュレーションの精度は風データやモデル解像度に強く依存するなどを検討する。観測データとの対比を通して、モデル精度について議論する。

### 3-2 周辺海域の極値波浪推定手法について

上記の極値波浪データから極値推定を実施する。まず各海域の21年間データから極値推定を行い、その不確実性について評価する。これらの推定結果は、強い台風の通過経路により不確実性と空間的な分散が大きくなると予想される。次に極値波浪データを空間的に扱うことで推定精度の改善を試みる。ここでは海域の極値波浪の自然特性を考察し、日本周辺海域の極値波浪には共通する統計的特性があるという仮説を検証する。

### 3-3 日本周辺海域の極値波浪特性

構築した手法を元に日本周辺海域の局地波浪特性について考察する。特に台風の強さ(時間的な外挿問題)と台風の通過経路(空間的な内挿問題)を考えた際に、それぞれの時空間的なトレンドや再現期間値に与える影響について考察する。

## 4. 研究成果

本研究では、合理的な極値統計手法および不確実性の定量化手法を構築した。また推定精度を高めるために空間統計を利用した極値

推定手法も新たに提案した。これら提案手法を用いて台風に支配される日本周辺海域の極値波浪推定を行った。台風下の波浪データはデータ量が少なく、また一般的に精度も低い。そこで独自の極値波浪データについて、他のモデルや観測との比較を通して台風下の再現精度について考察した。これらを踏まえて極値波浪解析を実施し、日本周辺海域の極値波浪マップを構築した。空間統計を利用した手法では、従来得られなかった空間的に滑らかな極値波浪の分布を得ることができた。

#### 4-1 LWM の提案

本研究では、申請者が以前より取り組んでいた LWM (Likelihood-Weighted Method) に関する研究成果を纏めた。本手法はベイズ推定を利用し、不確実性を定量的に評価する点が特徴的である。

データ不足の限界を合理的に示す結果となり、工学的に利用に資する情報を提供するには更なる検討が必要となる。

#### 4-2 波浪モデルの比較考察

ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) の ERA-Interim や ERA-5 などの reanalysis モデルの波浪結果と東大にて実施された波浪推算モデル結果について、極値波浪の再現性を中心に比較検討を実施した。時空間解像度が低い ERA-Interim では台風の強い風が再現されておらず極値波高は低く再現されている。一方で高い解像度を持つ Todai WW3 は良い精度で一致していることを示した。

Year	NOWPHAS	ERA5	ERA-Interim	Todai WWIII
2010	6.45	4.5487	4.2145	5.4942
2011	10.52	9.688	5.7005	15.1885
2012	10.91	8.2417	4.4447	10.6444
2013	11.01	9.0425	7.1649	11.0665
2014	15.85	9.7571	5.0286	14.6032
2015	6.81	6.5085	7.5237	NA

表 1 : NOWPHAS データとの比較結果

#### 4-3 各海域からの極値波浪推定

東大にて実施された波浪推算モデル結果から台極値波浪データを抽出した。IBTrACS が示す日本周辺海域の台風経路と期間データを利用し、台風と関連する波浪データの POT (Peak Over Threshold) のみを抽出した。21 年間の波浪データにおける最大値を図 1 に示す。

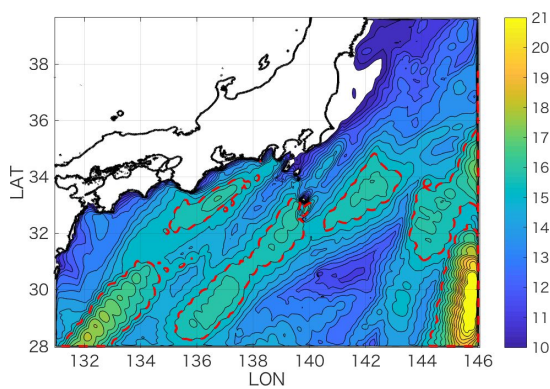


図 1 : Todai WW3 における 21 年間の最大有義波高データ (赤点線は 15.5m 以上)

各海域において同様の操作を行い、極値統計解析を実施した。極値統計解析では、本研究で提案した LWM を利用し、ベイズ推定における事後確率分布から定義される極値分布を利用し、100 年再現期間値を求めた。推定結果を図 2 に示す。

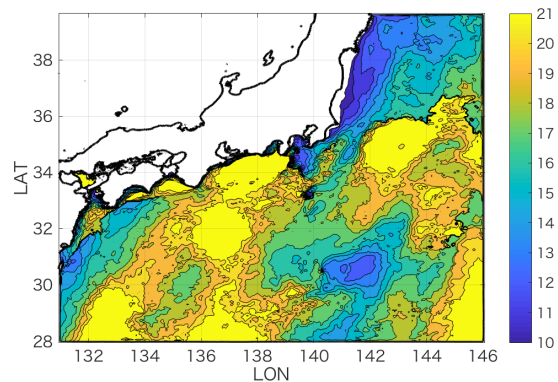


図 2 : 各海域における極値波浪データを利用した 100 年再現波高分布

#### 4-4 空間統計を利用した極値波浪推定

図 2 からわかるように 100 年再現波高分布は空間的な分散がとても大きく、また図 1 が示す大きな波高が発生している海域と一致して極値推定結果が極端に大きくなっている。強い台風が通過した経路だけで極値推定が異なる挙動を示しており、21 年間に発生した強い台風という限られた情報に依存していることがわかる。

台風の経路は空間全体に滑らかにばらつくことが予想される。そこで本研究では、台風の経路による影響を空間全体で考慮するために新たな手法を提案した。提案手法では、台風期間中の時空間全体の最大波高 (STM: Space Time Maximum) を極値として扱い、一方で各海域が経験する最大波高の空間分布を上記 STM に対する相対的な exposure として扱う。それぞれの確率分布を求め、両者が独立であることを示すことで、極値波浪分布を推定する。

図 3 に STM の極値分布推定結果を示す。また図 4 に exposure の推定事例を示す。最後に図 5 に STM と exposure を利用した推定結果を示す。

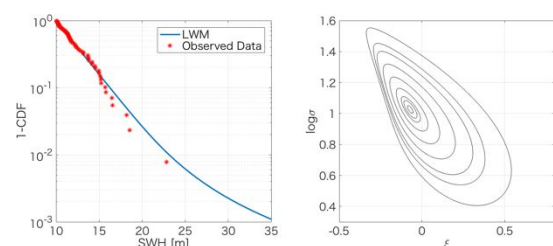


図 3 : STM の極値推定結果

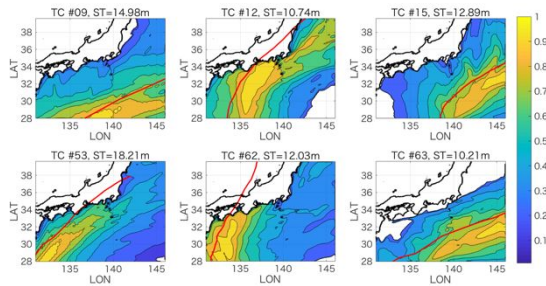


図4：Exposure モデルの事例

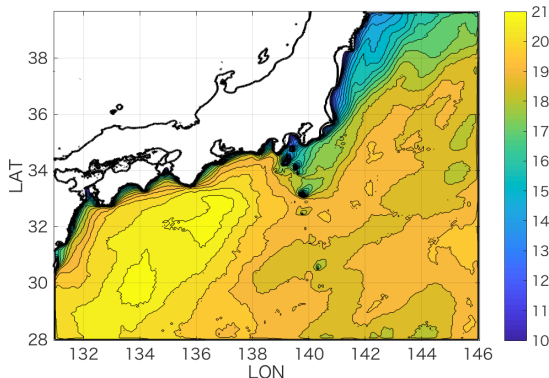


図5：STM と exposure を用いた極値波浪データを利用した 100 年再現波高分布

4-5 日本周辺海域の極値波浪について  
 本研究では、日本周辺の極値波浪を二つの異なる手法を用いて推定した。空間全体のデータを利用した提案手法では空間的な分散が小さくなっており、極値分布が滑らかになるだろうという予想を満足している。  
 極値波浪の推定結果は、STM の推定精度と exposure の推定精度に依存する。時間的外挿が必要となる STM では、更なるデータの拡充により推定精度改善が期待される。一方で各海域の極値分布は exposure により特徴付けられ、台風経路の通りやすさは過去データの内挿により十分に表現されている。

[1] A. Webb, T. Waseda, W. Fujimoto, K. Horiuchi, K. Kiyomatsu, K. Matsuda, Y. Miyazawa, S. Varlamov, J. Yoshikawa, A high-resolution, wave and current resource assessment of japan: The web gis dataset, arXiv preprint arXiv:1607.02251.

## 5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2件)

和田良太 (2017), 浮体式洋上風力発電システム設計における極値波高推定(解説), 査読有り、システム/制御/情報 Vol.60, No. 9, pp369-374, 206.

Wada, R., Waseda, T., & Jonathan, P. (2016). Extreme value estimation using the likelihood-weighted method. Ocean

Engineering, 査読有り, 124, 241-251.

[学会発表](計 2件)

Wada, R., Waseda, T., Webb, A. & Jonathan, P. (2017). Characterising extreme sea state severity using absolute spatial dependency. 1st Workshop on Waves, Storm Surges and Coastal Hazards, Liverpool, UK.

和田良太、早稲田卓爾、Webb, A. (2016). TodaiWW3を用いた日本周辺海域における極値波浪解析、日本船舶海洋工学会講演会論文集 第23号、pp341-343.

## 6 . 研究組織

(1)研究代表者

和田 良太 (WADA, Ryota)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教

研究者番号：20724420

(2)研究協力者

早稲田 卓爾 (WASEDA, Takuji)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：30376488