

## 博士論文（要約）

論文題目      Ocean Surface Wave Effects on Development of  
Explosive Cyclone

（爆弾低気圧の発達に対する波浪の影響について）

氏 名      北 祐樹

第1章では、本研究の意義と既存研究のレビュー、および課題の整理を行った。爆弾低気圧 (Explosive Cyclone) は「24時間で24hPa以上中心気圧が低下した温帯低気圧」と定義され、主に冬から春にかけて発生する。台風より大きなスケールを持つ(1000~2000km)低気圧であり、強風や豪雪などにより災害をもたらす。台風と比べてもその発達メカニズムや内部の現象について未解明の点も多く、防災の観点から更なる理解が必要である。爆弾低気圧と類似する大気現象に熱帯低気圧がある。熱帯低気圧についての研究では波浪・水飛沫の影響を数値計算に導入するが再現性向上に繋がると、多くの先行研究で報告されている(e.g., Chen et al. 2013)。爆弾低気圧などの温帯低気圧に対しても波浪がその発達に影響を与えることを複数の研究が指摘しているが(e.g., Zhang and Perrie 2001)、大気・海洋・波浪がどのように影響し、低気圧の発達に関係するのか、体系的な理解はまだできていない。本研究は、爆弾低気圧下の大気海洋波浪相互作用を検証し、波浪が爆弾低気圧に与える影響を定量的に評価することを目的としている。

爆弾低気圧の発達の要因は主に3つあり、(i)大気上層の強い渦位アノマリ、(ii)海洋からの熱・水蒸気フラックス流入、(iii)雲形成・降水による潜熱解放、が指摘されている。波浪は海面摩擦や熱フラックスの因子となっており、(ii)や(iii)に影響を与えるため、波浪影響を導入することで爆弾低気圧の発達の変化が期待される。波浪は大気と海洋に様々な作用を及ぼす。波浪の発達により増大する摩擦抵抗により大気境界層の運動量を変化させ、大気海洋間の熱・水蒸気輸送に変化を与える。また、海洋に対して波浪は、波浪に伴う水粒子の運動や砕波によって海洋上層の混合を促進したり、流れや水温の環境に変化を与えたりする。本研究の目的は、爆弾低気圧の発達に対して波浪が与える影響を定量的に評価することである。まず、爆弾低気圧下における波浪の時空間発達を、波浪の長期再現推算を用いて解析することで、爆弾低気圧下で発生する大気海洋波浪相互作用の基礎的理解を構築する。また、波浪発達についての熱帯低気圧との相違点も明らかにする。そして、波浪が大気と海洋の境界層に与える作用を解析し、大気海洋波浪相互作用が爆弾低気圧の発達に与える変化を定量的に評価するため、大気海洋波浪結合モデルを用いて数値シミュレーションを行う。

第2章では、爆弾低気圧下の波浪発達と、低気圧自体の発達や構造との関係を理解し、低気圧下での大気海洋波浪相互作用の基礎的情報を捉えるため、1994~2014年に日本周辺の太平洋で発達した爆弾低気圧による波浪の解析を行った。日本の周辺海域においてWAVEWATCH IIIにより過去推算計算を行い、爆弾低気圧下で発生した波浪に対してコンジット解析を行った。

結果、爆弾低気圧自体の発達ピークに対して波浪の発達ピークが遅延することが示され

た。また、爆弾低気圧の前線が作り出す非対称な地表風の構造と発達によって、波浪スペクトルの特に狭い領域が爆弾低気圧の進行方向に対して右側と、温暖前線の寒気側に形成されることを示した。海面抵抗係数の因子である波齢や波形勾配、波向分散の特徴も掴むことができ、大気・波浪相互作用に関しても台風と爆弾低気圧は異なる特徴を有することが示唆された。

波浪発達に関する熱帯低気圧と爆弾低気圧の比較解析も行った。爆弾低気圧が最発達する以前は、その進行速度が熱帯低気圧より速く、波高がより低く抑えられるということが明らかとなった。また、爆弾低気圧は空間サイズが熱帯低気圧よりも大きいため、より広い領域に高波高を形成できる。さらに、波浪スペクトルの狭小領域は、爆弾低気圧が2つ形成する点とは異なり、熱帯低気圧では1つしか形成されないことも確認された。

第3章では、構築した大気海洋波浪結合モデルの説明を行っている。本研究では大気海洋波浪相互作用を陽的に計算するため、大気モデル WRF (Weather Research and Forecasting model)、海洋モデル CROCO (Coastal and Regional Ocean COmmunity model)、波浪モデル WW3 (WAVEWATCH III) を結合させ、2018年1月上旬に大西洋北西部で発生した爆弾低気圧を数値シミュレーションする。この爆弾低気圧を選んだ理由としては、近年のうちに最大級の発達率 (53hPa/day の気圧低下) を示した低気圧であること、大西洋北西部には沿岸・沖合に観測施設が多数設置されており、モデル結果と観測との比較が行いやすいという2点である。

大気海洋波浪結合モデル内では、6分ごとに変数を交換する。計算期間は2018年1月1～10日であり、北西大西洋を計算領域として数値シミュレーションを行う。大気モデル中の海面粗度  $z_0$  と摩擦速度  $u_*$  は波浪状態に強い影響を受ける。大気波浪結合モデルにおいて、 $z_0$  は波浪モデルで計算される Charnock 係数  $\alpha$  を Janssen (1989) の提案式を用いて計算した。波浪モデル WW3 を結合しない場合は、 $\alpha = 0.0185$  としている。 $u_*$  は Patton et al. (2019) の提案式を用いて、風とピーク波の角度差の影響を導入した。

海洋モデル CROCO の支配方程式は Uchiyama et al. (2010) が導出した、波-流れ相互作用を含めた式を用いる。本研究では、波浪 (非砕波) による鉛直混合が爆弾低気圧の発達に与える影響を評価するため、境界層乱流スキーム2つで検証した。第一に、Large, McWilliams, & Doney (1994) が考案した K-Profile Parameterization である LMD スキームに、Qiao et al. (2004) が提案した波浪混合効果を導入したモデルを用いる。第二に、Mellor-Yamada レベル 2.5 の乱流スキームを元に作られた GLS (generic length scale) スキームに、Babanin (2011) が提案した波浪混合効果を導入したモデルを用いる。

第4章では、大気海洋波浪結合モデルを用いて、爆弾低気圧の発達に対する波浪の有無による影響を評価するための感度実験を行った。波浪の時間発達の影響を大気モデルに導入することで、 $u_*$ と $z_0$ が全体的に増加する。それにより、海面熱フラックス（顕熱+潜熱）が増加し、一方で表層風速は微減することがわかった。爆弾低気圧の中心気圧は小スケールの大気擾乱によって変動するため、低気圧中心周辺の $5^\circ \times 5^\circ$ のエリアでの海面気圧平均値（ACSLP）を爆弾低気圧発達の強さの指標とした。また、海面熱フラックスは広域で低気圧発達に影響を与えるため、計算領域である北西大西洋の海面熱フラックスの平均値で評価することとした。

海面熱フラックス平均値は波浪の効果により増加し、ACSLPは大気モデルのみに比べて低下した。つまり、波浪の大気への作用により海面摩擦と海面熱フラックスが増加し、大気的不安定性を強化することで爆弾低気圧の発達が強化されたことが明らかになった。

LMDスキームとGLSスキームを用いて、波浪による海洋混合の影響を検証した。LMDスキームでは波浪の混合作用は海洋モデル中の渦粘性・拡散係数に作用するが、冬季における北西大西洋は混合層深度が100m超の領域が大半を占めており、最大でも20mしか届かない波浪の混合作用の水温や混合層深度への影響は限定的であった。

一方GLSスキームではLMDスキームでの波浪混合よりも影響が大きく、渦粘性・拡散係数と乱流運動エネルギーを増加させた。波浪の発達に併せて影響する深さは大きくなり、広い領域で混合層深度の深化が確認された。メキシコ湾流の南側では海面水温が低下した一方で、北側では水温の逆転層の影響により海面水温が消音することが確認された。

波浪と大気・海洋全てのモデルを結合することで、波浪が大気と海洋に及ぼす相互作用が爆弾低気圧の発達に与える変化を定量的に評価する。波浪と大気の相互作用により、海面熱フラックスが増加するため、メキシコ湾流の南側で海面水温が低下、北側では昇温することが確認された。また、海面摩擦も強化されるため、低気圧が海洋内部に発生させる慣性振動の振幅が増加することも確認された。

海面熱フラックスについて、大気海洋波浪結合モデルでは大気海洋結合モデルよりも、平均値の増加が確認された。これは海面熱フラックスに対して、波浪の海洋混合の効果より海面摩擦の強化の方が勝り、熱供給が結果的に増加したことを示す。そして、爆弾低気圧は熱供給の増加により発達が強化されたことも確認された。

第5章では、全体の結論を述べている。爆弾低気圧の発達の予測精度を上げるためには波浪の結合が重要である。爆弾低気圧への波浪影響は、海洋大気間の熱フラックスの変化を介

してメソスケールの大気循環を変えうる。そして、メキシコ湾流を離れ北側に伝搬した爆弾低気圧が、温度逆転層の暖水が湧昇することと、低気圧の発達から遅れて増大する波浪の影響との相乗効果により発達し続けるという現象は、これまで示されたことの無い北西大西洋の爆弾低気圧特有の現象である可能性が考えられる。以上、爆弾低気圧の発達への波浪影響を明らかにしたことで、本研究の目的は達成されたと言える。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 16H01846, 17J07627 の助成を受けたものです。NKEO ブイによる観測は、文部科学省科学研究費補助金・新学術研究領域「気候系の hot spot」から助成を受けたものです。

## 参考文献

- Babanin A V. (2011) Breaking and dissipation of ocean surface waves. Cambridge University Press
- Chen SS, Zhao W, Donelan MA, Tolman HL (2013) Directional Wind-Wave Coupling in Fully Coupled Atmosphere-Wave-Ocean Models: Results from CBLAST-Hurricane. *J Atmos Sci* 70:3198–3215
- Janssen PAEM (1989) Wave-Induced Stress and the Drag of Air Flow over Sea Waves. *J Phys Oceanogr* 19:745–754
- Large WG, McWilliams JC, Doney SC (1994) Oceanic With Vertical Mixing : a Review Layer and a Model a Nonlocal Boundary. *Rev Geophys* 32:363–403
- Patton EG, Sullivan PP, Kosović B, et al (2019) On the influence of swell propagation angle on surface drag. *J Appl Meteorol Climatol JAMC-D-18-0211.1*
- Qiao F, Yuan Y, Yang Y, et al (2004) Wave-induced mixing in the upper ocean: Distribution and application to a global ocean circulation model. *Geophys Res Lett* 31:2–5
- Uchiyama Y, McWilliams JC, Shchepetkin AF (2010) Wave-current interaction in an oceanic circulation model with a vortex-force formalism: Application to the surf zone. *Ocean Model* 34:16–35
- Zhang Y, Perrie W (2001) Feedback Mechanisms For The Atmosphere And Ocean Surface. *Boundary-Layer Meteorol* 100:321–348