

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 12 日現在

機関番号：82109

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540454

研究課題名（和文） 台風海洋間の多階層渦による相互作用の解明と海洋酸性化に与える影響評価

研究課題名（英文） Interactions between air-sea multilevel eddies and their impact on oceanic acidification

研究代表者

和田 章義 (WADA AKIYOSHI)

気象庁気象研究所・台風研究部・主任研究官

研究者番号：20354475

研究成果の概要（和文）：

台風と海洋の相互作用を海洋大循環モデルに炭素平衡モデルを組み込んだ結合モデルと非静力学大気波浪海洋結合モデルを用いて研究した。数値シミュレーション結果から台風通過時に海面二酸化炭素フラックスが突発的に増加し、酸性化を引き起こすこと、高風速時において風速の増加に伴い抵抗係数が減少すること、クロロフィル a の増加に伴う海面水温変動は、海洋環境場に比べて台風強度に与える影響が小さいことが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：

Typhoon-ocean interactions were studied with an ocean general circulation model coupled with a carbon equilibrium model and a nonhydrostatic atmosphere model coupled with ocean wave model, a multilayer ocean model. Numerical simulations lead to clarify that sea-to-air CO₂ flux rapidly increases during the passage of a typhoon, resulting in ocean acidification, that drag coefficients reduce as surface winds increase under high winds, and that the impacts of variations in sea surface temperature with increases in chlorophyll *a* on typhoon intensity are smaller than those of preexisting oceanic conditions.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|------|-----------|
| 2010 年度 | 1,600,000 | 0 | 1,600,000 |
| 2011 年度 | 700,000 | 0 | 700,000 |
| 2012 年度 | 900,000 | 0 | 900,000 |
| 総計 | 3,200,000 | 0 | 3,200,000 |

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：気象・海洋物理・陸水学

キーワード：台風・台風海洋相互作用・摩擦抵抗・波浪・海洋大循環モデル・海洋環境場・炭素系化学平衡・非静力学大気波浪海洋結合モデル

1. 研究開始当初の背景

近年、台風の強度を精度良く予測するためには、台風下の海面水温だけでなく、海洋表層の水温、塩分の変動を加味する必要があるということが国内外で広く認識されつつある。北西太平洋海域は、台風の発生数及び非常に強い台風の数が地球上で最も多い海域であり、また海水温 26°C の海水が持つ貯熱量が高い海域の 1 つでもある [Wada and Chan, 2008]。台風は同時に、通過する海域を

冷やし、海洋の基礎生産量を増加される働きも担っている。このことから台風の急発達と海洋の相互作用及び海洋変動を研究する上で、北西太平洋海域は理想的な環境にあるといえる。

台風の急発達と海洋との相互作用に関して、エクマン輸送により海洋表層へ運ばれた冷水は、乱流混合により効率良く海洋混合層に取り込まれることによって、台風通過域の海面水温は低下する [Wada et al., 2009]。こ

の海水温の低下により、台風に伴うスパイラルバンド上のメソ渦を弱められ、台風の急発達抑制される [Wada, 2009]。台風通過域での海洋から大気への突発的な二酸化炭素フラックスの増加 [Nemoto et al., 2009] や海面でのクロロフィルのパッチ状の分布の形成 [和田, 2009] など、台風により海洋生態系が顕著に変化することから、台風海洋相互作用は海洋生物化学においても注目されている。一方で、北西太平洋海域における 100km スケールの暖水渦を通過する台風の強度は、抑制されにくいことも報告されている [Wada and Usui, 2007]。

国内外での関連する動向として、台風海洋相互作用に関わるワークショップが、2009年4月（及び2011年5月）に韓国済州島で開催された。また国外での強力な研究プロジェクトが2つ、北西太平洋海域で展開された。1つは韓国海洋研究所、済州国際大学、ロードアイランド海洋大学院学校の連携による、東シナ海での航空機・観測船等を用いたプロジェクト観測とハリケーン波浪海洋結合モデルによる台風予測実験を併せた国際研究プロジェクトであり、もう1つはアメリカ海軍研究所と台湾国立大学他の連携による、台風通過時の海洋応答に関する国際研究プロジェクト (ITOP) である。ITOP のワーキンググループには研究代表者もかかわっており、研究代表者は ITOP を支援する立場にある。この他国内では、海洋研究開発機構が平成 22 年度に西部太平洋海域で定点観測を実施し、Argo フロートを展開する計画があるものの、国外のプロジェクトと比較して、その規模は小さい。そのため、日本においても国際的に関心の高い台風海洋相互作用の研究を強力に推進し、国外プロジェクトと連携を取る必要がある。

今後の動向として、気象庁では全球大気モデルに海洋モデルを結合することにより台風予測の精度向上を図る動きがある。しかしながら海面境界状態が台風に伴うメソ渦の形成・発達等、台風発達過程には未解明な部分が残されている。また、広域な太平洋の大気・海洋場、特に海洋中規模渦がこのメソ渦の形成・発達に与える影響については、これまで着目されていない。台風通過時の海面水温低下過程に関しても、そのエクマン輸送の効果は、広域海洋場の環境の違いによる効果の違いを含め、議論の余地が残されている [Zheng et al, 2008; Wada et al., 2009; Ho et al., 2009]。この台風によるエクマン輸送の効果は海洋物質循環とも関わっており、海洋下層にある pH の低い表層海水が海面に運ばれる「海洋酸性化」効果を評価する試みは前例を見ない。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下の3つである。

(1) 数値モデル（非静力学大気波浪海洋結合モデル）を用いた理想的な数値実験により、台風発生から発達期におけるスパイラルバンド上でのメソ渦の振る舞いと、波浪や海面水温短期変動との関連、及びその結果として生じる台風の強度及び構造への影響を明らかにする。波浪による応力・波齢・波形勾配の中で、どの要素が海洋粗度長を推定するのに適切か、海面水温短期変動が台風中心気圧や台風構造に与える効果はどの程度かを特定する。

(2) 100km スケールの海洋中規模渦や先行する台風による冷水渦が、台風発達や構造変化及び台風に対する海洋応答としてのエクマン輸送や乱流混合にどの程度、影響を与えるのかを明らかにする。特定の台風事例に対する数値シミュレーションと海洋初期値を変えた感度実験を実施し、観測データも交えて比較検証することにより、その効果を明らかにする。

(3) 台風通過時の海洋応答の物理過程が海洋物質循環、特に海洋酸性化に及ぼす影響を評価する。現場観測データ等を元に全炭酸の鉛直プロファイルを推定・初期値として使用した、理想的な条件の元での数値実験を実施し、台風の通過前後で、海洋モデル内で診断される全炭酸や pH の変化量が台風強度、移動速度、海洋初期場の成層等によりどの程度変化するかを評価する。

3. 研究の方法

(1) 非静力学大気波浪海洋結合モデルを用いて、理想的な台風渦を初期値として数値実験を実施し、波浪等、海面境界での短期変動が、台風の急発達期に見られるスパイラルバンド上のメソ渦の生成・発達に与える影響を調査する。

(2) 非静力学大気波浪海洋結合モデルを用いて、実際にカテゴリ5まで発達した非常に強い台風について、大気客観解析データ、大気再解析データ及び海洋データ同化システムによる海洋再解析データから結合モデルの初期値・側面境界値を作成し、数値シミュレーションを数例実施する。

(3) 数値シミュレーション結果を地球観測衛星データ、漂流ブイ等現場観測データと比較することにより、台風の移動速度に対する海洋表層でのエクマン輸送や乱流混合が、台風による海面水温低下に与える効果を明らかにする。

(4) 非静力学大気波浪海洋結合モデルに物質循環モデルを組み込み、観測データから推定した初期値のもと数値実験を行い、台風通過前後の pH の変化を評価する。

4. 研究成果

ここに記載する研究成果は 10 件の投稿論文（5 件の査読付論文）、12 件の口頭発表及び 3 件の図書により、公開されている。以下、研究目的に掲げた 4 つの課題及びそれらに関わる成果について示す。

(1) 非静力学大気海洋結合モデル及び非静力学大気波浪海洋結合モデルを用いて、理想的な渦の時間発展に関する数値実験を実施した。

- ・摩擦抵抗係数が 10m 風速に依存して大きくなる定式を用いた場合、台風中心気圧がむしろ深まることを確認した。

- ・海面水温変動に対する台風強度予測への影響については、積分時間 36 時間以降にその効果は現われるものの、その変動を海面水温変動振幅 0.5°C のランダムノイズとして与えた場合でも、同様の効果が見られることを確認した。

- ・海面水温による台風渦の発達率の変化を支配する力学過程が、順圧不安定による台風渦のメソ渦への分離及び分離したメソ渦の融合による台風渦の発達という観点から矛盾なく解釈できることを示した。

(2) 非静力学大気モデル、非静力学大気海洋結合モデル及び非静力学大気波浪海洋結合モデルを用いて、2005 年台風 Hai-tang, 2009 年台風 Choi-wan, 2010 年台風 Fanapi の数値シミュレーションを実施した。

- ・2005 年台風 Hai-tang の非静力学大気海洋結合モデルによる数値シミュレーション結果から、台風による海水温低下は台風の目の壁雲の形成に影響を与える一方、エルニーニョやラニーニャといった経年変動による海洋環境場の違いは、台風の目の壁雲の外側に形成されるレインバンドの生成に影響を与えることが、異なる海洋初期値データを用いたアンサンブル実験により明らかとなった。

- ・また 2005 年台風 Hai-tang の非静力学大気波浪海洋結合モデルによる数値シミュレーション結果から、Taylor and Yelland(2001) の波形勾配による粗度長の定式を用いることにより、モデルにより再現された台風の 10m 風速が 40-50m/s を超えた時に摩擦抵抗係数の増加が抑制されることを示した。この摩擦抵抗係数増加の抑制は、粗度長が摩擦速度に依存する Janssen(1989) や Smith et al. (1991) の定式では再現されなかった。

- ・異なる海洋の粗度長の定式化による台風シミュレーションへの影響を調べるために、ITOP 期間の 2010 年台風 Fanapi について数値シミュレーションを実施し、Taylor と

Yelland(2001) の手法を用いた時、高風速時の抵抗係数の風速依存性については、風速に依存して抵抗係数は増加しなかったものの、抵抗係数がピークとなる風速は台風の発達段階により異なることが新たにわかった。

- ・大気境界層過程が台風シミュレーションに与える影響について、非静力学大気モデル内の大気境界層スキームを変えた感度実験を実施した。台風域内における台風の目の壁雲の外側の境界層が薄いほど、境界層内の動径風の非傾度風成分は大きくなる。この動径風の強化が台風の 2 次循環の強化へとつながり、その結果として台風強化が起こりやすくなることが明らかとなった。

- ・将来気候実験結果を用いたダウンスケール実験結果と傾度風平衡を仮定した台風の潜在強度を比較した結果、異常に強い台風における気圧降下の半分は、海面水温や大気環境場の将来時における変化で説明できるものの、残りの半分については、動径風の非傾度風成分等台風強化に関わる内部構造変化に起因する可能性があることがわかった。

(3) 大気再解析データ、海洋再解析データ及び漂流ブイデータを用いて、台風通過時の海洋応答の時間スケールを統計的に調査した結果、日別海洋再解析データは台風通過による乱流混合及び湧昇を良く再現していたものの、旬平均及び月平均海洋再解析データではあまり再現されなかった。このことは、台風通過によって生じる水温・塩分変動は、数日で顕在化しなくなることを示唆する。台風の移動速度が遅い場合については、より湧昇の効果が現われ、海洋混合層の水温はより低下していた。

- ・海洋再解析データから見積もられた西太平洋の海水温 26°C 以上の貯熱量は東太平洋の約 4 倍に相当し、気象庁再解析データによる環境場の対流有効位置エネルギー (CAPE) も西太平洋と東太平洋の間で同様の関係にあった。それにも関わらず、台風に関わる CAPE は、東太平洋と西太平洋では平均台風強度と整合的な値であり、貯熱量や環境場の CAPE に見られたような差は見られなかった。西太平洋と東太平洋の間に見られる台風強度の違いは、大気安定度よりも台風のサイズや台風の位置する緯度に依存することが明らかとなった。

(4) 炭素系化学平衡スキームの非静力学大気波浪海洋結合モデルへの組み込みについて、Dickson et al. (2007) に基づく炭素系化学平衡スキームを非静力学大気波浪海洋結合モデル及び海洋大循環モデルへ組み込んだ。

- ・1997 年の台風 Tina と Winnie の事例について、海洋大循環モデルにより、特に台風 Tina

通過時の海水温及び $p\text{CO}_2$ の急激な低下と海洋から大気への突発的な CO_2 フラックスの再現に成功した。台風通過による海洋の酸性化はこの突発的な CO_2 フラックス時のみ生じており、台風通過後には PH は元の値に回復していた。

・非静力学大気波浪海洋炭素平衡結合モデルを用いて、5種類の異なる定式化で計算された海面粗度長が、大気海洋間の運動量・熱交換係数を通じて台風シミュレーションに与える影響を、2009年台風 Choi-wan、2010年台風 Fanapi の事例について評価した。定式化の違いによる海面粗度長の違いは、大気海洋間の運動量・乱流熱輸送量に影響を与え、台風通過時にはこれによって海面気圧や最下層の気温など、大気に対するインパクトが大きくなった。また、台風通過後には、海面水温・塩分及び海面 $p\text{CO}_2$ に対するインパクトが大きくなった。このように台風域における高波による海面粗度の変化は、大気海洋間の運動量・乱流熱輸送を通じて台風の強度・構造及び台風に対する海洋応答にも影響を与えることが明らかとなった。

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 10 件)

- ① Wada, A., M. F. Cronin, A. J. Sutton, Y. Kawai, and M. Ishii, Numerical simulations of oceanic $p\text{CO}_2$ variations and interactions between Typhoon Choi-wan (0914) and the ocean. *Journal of Geophysical Research - Oceans*, 査読有, 118, JGRC20203. DOI:10.1002/jgrc.20203.
- ② Wada, A., N. Usui, and K. Sato, Relationship of maximum tropical cyclone intensity to sea surface temperature and tropical cyclone heat potential in the North Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 査読有, 117, 2012, D11118. DOI: 10.1029/2012JD017583
- ③ Kanada, S., A. Wada, M. Nakano, and T. Kato, Effect of planetary boundary layer schemes on the development of intense tropical cyclones using a cloud-resolving model, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 査読有, 117, 2012, D03107. DOI: 10.1029/2011JD016582
- ④ Wada, A., T. Midorikawa, M. Ishii and T. Motoi, Carbon System Changes in the East China Sea Induced by Typhoons Tina and

Winnie in 1997, *Journal of Geophysical Research - Oceans*, 査読有, 116, 2011, C07014. DOI: 10.1029/2010JC006701

- ⑤ Wada, A. and N. Usui, Impacts of oceanic preexisting conditions on predictions of Typhoon Hai-Tang in 2005, *Advances in Meteorology*, 査読有, vol. 2010, 2010, 756071, 15pages. DOI:10.1155/2010/756071
 - ⑥ Wada, A. and N. Kohno, Impact of surface roughness lengths on simulations of Typhoon Fanapi (2010) *CAS/JSC WGN Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 査読無, 42, 2012, 9.11-9.12. <http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/wgne/index.html>
 - ⑦ Wada, A., T. Midoriwaka and M. Ishii (2011): Rapid decreases in CO_2 during the passage of Tina and Winnie (1997), *CAS/JSC WGN Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 査読無, 41, 2011, 8.03-8.04. <http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/wgne/index.html>
 - ⑧ Wada, A., Impacts of short-term variation in sea-surface temperature and the sea state on the evolution of stationary tropical-cyclone-like vortex, *CAS/JSC WGN Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 査読無, 41, 2011, 9.07-9.08. <http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/wgne/index.html>
 - ⑨ Wada, A., Drag coefficient under extremely high winds of typhoon Hai-Tang (2005), *CAS/JSC WGN Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 査読無, 41, 2011, 9.09-9.10. <http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/wgne/index.html>
 - ⑩ Wada, A., T. Midoriwaka and M. Ishii (2011): Variation in air-sea CO_2 flux and pH induced by passage of typhoon Hai-Tang (2005), *CAS/JSC WGN Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell.*, 査読無, 41, 2011, 9.11-9.12. <http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/wgne/index.html>
- [学会発表] (計 12 件)
- ① Wada, A., Meghan, F. Cronin, Adrienne J. Sutton, Y. Kawai, and M. Ishii, Numerical simulations of interactions between Typhoon Choi-wan and the ocean. AGU fall meeting, December 5, 2012, San Francisco, Unites States.
 - ② Wada, A., Meghan, F. Cronin, Adrienne J. Sutton, Y. Kawai, and M. Ishii, Numerical simulation on the interactions between Typhoon Choi-wan

in 2009 and the mid-latitude Ocean. Asia Oceania Geosciences Society 9th Annual General Meeting & AGU_2012 Western Pacific Geophysics Meeting (AOGS 2012 - AGU WPGM), August 17, 2012, Sentosa, Singapore.

- ③和田章義, 2009 年台風 Choi-wan と海洋との相互作用, 日本気象学会 2012 年秋季大会講演予稿集, B358, 2012 年 10 月 5 日, 札幌市.
 - ④和田章義他, 2011 年台風第 12 号の強度変化と海洋との相互作用. 2012 年度日本気象学会春季大会講演予稿集, A467. 2012 年 5 月 29 日, つくば市.
 - ⑤和田章義他, 台風第 15 号の急発達に関する数値実験. 2012 年度日本気象学会春季大会講演予稿集, A468. 2012 年 5 月 29 日, つくば市.
 - ⑥ Wada, A., Numerical simulations on surface roughness lengths and drag coefficients under typhoons. JpGU International Symposium 2012. May 25, 2012, Makuhari, Japan.
 - ⑦ Wada, A. and N. Kohno, Impacts of surface roughness lengths on typhoon simulations. 30th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. April 18, 2012, Jacksonville, Florida.
 - ⑧和田章義他, 2011 年台風 Ma-on における台風海洋相互作用. 2011 年度日本気象学会秋季大会講演予稿集, P335. 2011 年 11 月 18 日, 名古屋市.
 - ⑨ Wada, A., Roles of the ocean in tropical cyclone intensity and its intensification. 8th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society. August 9, 2011, Taipei, Taiwan. 招待講演.
 - ⑩和田章義, 北太平洋海域における Argo データを用いた 台風最大強度と海洋貯熱量の関係の検証, 2011 年度日本気象学会春季大会. P423. 2011 年 5 月 23 日, 代々木, 東京.
 - ⑪和田章義、高野洋雄, 台風 Hai-Tang (2005) 強度予測に対する地表面過程の影響, 2010 年度日本気象学会秋季大会. P350. 2010 年 10 月 29 日, 京都, 京都.
 - ⑫和田章義、緑川貴、石井雅男、新野 宏, 台風 Hai-Tang (2005) 通過時の CO2 フラックスと pH の変化, 2010 年度日本気象学会秋季大会. P351. 2010 年 10 月 29 日, 京都, 京都.
- [図書] (計 3 件)
- ①和田章義, 台風と海洋, 台風研究の最前線, 気象研究ノート, 226, 2012, 190pp, 149-189. ISBN 978-4-904129-09-8.
 - ② Wada, A., Numerical study on the effect

of the ocean on tropical-cyclone intensity and structural change, Atmospheric Model Applications. In Tech, 2012, 296pp, 43-68, ISBN 979-953-307-335-3.

- ③ Wada, A., Tropical Cyclone-Ocean Interaction: Climatology, Climatology: New Developments. NOVA Publishers, 2012, 159pp, 97-152, ISBN: 978-1-62100-322-9.

[その他]

ホームページ (日本語)

http://www.mri-jma.go.jp/Dep/ty/IND/IND_wada/typhoon_eddy-sjis.html

ホームページ (英語)

http://www.mri-jma.go.jp/Dep/ty/IND/IND_wada/typhoon_eddy.html

2012 年 9 月 26 日 気象サイエンスカフェ東京 「台風研究のこれから～2011 年日本に上陸した台風が残してくれた課題～」

2010 年 4 月 14 日 科学技術週間一般講演 「台風はどこまで予測できるようになったのか?」

6. 研究組織

(1) 研究代表者

和田 章義 (WADA AKIYOSHI)

研究者番号: 20354475