

西表島網取湾における長期定点観測による台風時の海水流動特性

石川 綾乃¹・小笠原 敏記²・村上 智一³・河野 裕美⁴・水谷 晃⁴・
下川 信也³

¹ 学生会員 岩手大学 総合科学研究科地域創生専攻 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田4丁目3-5)

E-mail: g0119003@iwate-u.ac.jp

² 正会員 岩手大学教授 理工学部システム創成工学科 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田4丁目3-5)

E-mail: togasa@iwate-u.ac.jp

³ 正会員 (国研) 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部門 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

⁴ 東海大学 沖縄地域研究センター (〒907-1541 沖縄県八重山郡竹富町上原 870-277)

温暖化シナリオ A1B の想定の下、強大化する台風は沿岸地域に暴風だけでなく、高潮も発生させる。高潮の浸水予測計算の精度を向上させるためには、風から海面に作用するせん断応力を表すための海面抵抗係数を正しく評価する必要がある。しかし、過去に発生した台風の風速で検討されてきた海面抵抗係数のバルク式が、強大化する台風によって発生する暴風にも適切なものは疑問である。このような現状から、より多くの温暖化時における台風の観測データが要求される。

本研究では、沖縄県西表島網取湾において、4年間にわたる長期観測で得られたデータを基に、温暖化時の強大台風と匹敵する台風下での海水流動の特性について検討する。その結果、網取湾を通過する台風経路の違い、すなわち、25m/s を越える風速を持つ台風であっても湾内への風向の違いによって、水面表層から下層までの流速の発達および下層への運動量輸送過程に明確な違いがあることを明らかにした。

Key Words: typhoon, current, field observation, bay

1. はじめに

温暖化シナリオ A1B (エネルギー・システムの技術革新がバランスして生じるシナリオ) の想定で強大化した台風が東京湾に襲来する場合、毎秒 40 m 近い暴風が湾内で発生することが予測される¹⁾。このような台風は、沿岸地域に暴風だけでなく、大雨、時には高潮も発生させる。その結果、ライフラインや私的財産の消失、さらには犠牲者も発生させることが容易に考えられる。

台風は、境界層、境界層より上の領域、上昇気流領域および台風の眼の4つの動的に異なる領域で構成される²⁾。工学的な視点から見ると、人命や公共施設に多大な影響を及ぼすと考えられる境界層に着目する必要がある。その力学的メカニズムの解明は重要な課題と言える。特に、高潮の浸水予測計算の精度を向上させるためには、風から海面に作用するせん断応力を表すための海面抵抗

係数^{3),4),5)}を正しく評価する必要がある。

しかしながら、過去に発生した台風の風速は、温暖化で予想される強大な台風よりも小さいため、検討されてきた海面抵抗係数のバルク式⁶⁾が、今後強大化する台風によって発生する暴風に適切なものは疑問である。その一つに、Powellら⁷⁾はGPSゾンデを用いた観測データから、風速が毎秒 40 m を越えるようになると、海面抵抗係数が小さくなると言った新たな知見を明示している。

このような現状から、より多くの温暖化時における台風の観測データが要求される。村上ら⁸⁾は、沖縄県西表島網取湾において、最大瞬間風速が毎秒 50 m を越えるような台風下の流速の鉛直分布を提示している。そこで本研究では、同観測場所で4年間にわたる長期観測から得られたデータを基に、温暖化時の強大台風と匹敵するような台風下での海水流動の特性について検討する。

2. 観測の概要

ここでは、西表島網取湾における風況、流況および波浪の長期観測方法および観測期間における台風経路について述べる。

(1) 観測位置およびその方法

観測は、沖縄県西表島網取湾において実施された(図-1)⁸⁾。網取湾は、北緯24度19分44秒、東経123度42分7秒にあり、地理的条件より強大台風が来襲しやすい位置にある。また、主要な河川が無いいため、淡水による海への流れ(密度流)の影響は無視することができる。

流況(流向・流速)および波浪の定点観測には、WavesADCP(周波数:600kHz, ビーム数:4本, ビーム角度:20°)を用いた。平均海面から水深 $h=12.4\text{ m}$ の海底に固定し、解像度の高いデータを得るため、層厚を50cm, アンサンブル間隔を10分(その間の観測回数:100回)に設定した。また、流速の精度を確保するため、データ取得率が全ての月で8割を超える $h=3.4\text{ m}$ 以深の流速値を用いる。なお、流速の測定誤差は、0.01 m/s程度である。風況(風向・風速)の観測は、WavesADCP設置位置から約400m離れた陸上に設置された風速計を用いた。なお、周辺環境の影響により欠損期間もあったことから、図-1中に示す西表島アメダス観測所で得られる風況データも利用した。観測期間は、2015年から2018年までの4年間である。4年間の連続観測により、網取湾の平均的な気象・海象条件を把握することができる。

(2) 観測された台風について

4年間の観測期間において、10個の台風が西表島付近(台風の中心が図-1に示す西表島アメダス観測所の250km以内に入ったもの)に来襲した。図-2は、観測され

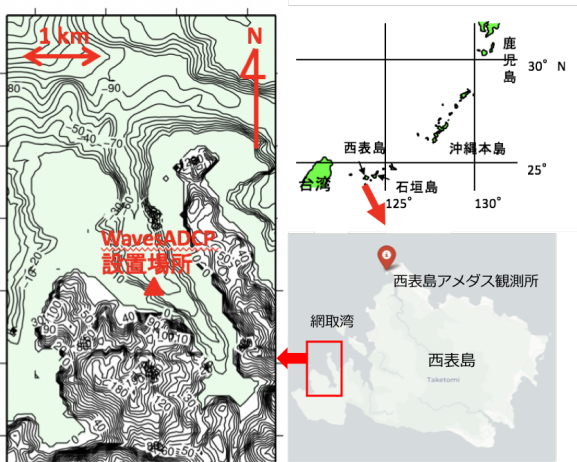


図-1 網取湾および西表島アメダス観測所の位置と観測機器の設置場所

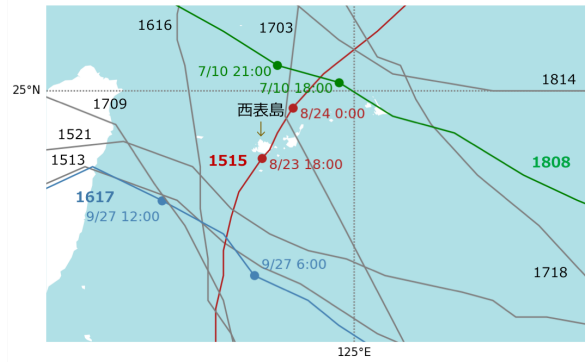


図-2 2015年~2018年の間に西表島に接近した台風の経路

た全10個の台風経路を示す。西表島に接近したときの位置として、北東側を通過した台風は、台風1718号(Talim), 1808号(Maria), 1814号(Yagi)の3個、南西側を通過した台風は、1513号(Souderor), 1521号(Dujan), 1617号(Megi), 1709号(Nesat)の4個、東側および西側を通過した台風は1703号(Nanmadol)および1616号(Malakas)のそれぞれ1個である。また、西表島に上陸した台風は1515号(Goni)である。観測期間において、西表島から見て北東および南東側を通過する台風が比較的多いことがわかる。

表-1は、各台風における最大瞬間風速およびその風向を表すと共に、観測点での最大を記録した有義波高 H および流速を示す。なお、風速・風向に関しては西表島アメダス観測所の記録であり、台風1814号の有義波高はデータ欠損である。最大瞬間風速を見ると、30 m/sを越えるような台風が7個あり、その中でも最大の瞬間風速54.1 m/sを記録した台風は、西表島に上陸した台風1515号(図-2の赤線)である。

有義波高は、風速の強さの割りに大きくないことが確認できる。特に、最大瞬間風速が秒速40 m台の台風(1513号, 1521号, 1808号)は、風向が全て西南西の方向であり、半島によって風速が弱められた可能性が考えられる。また、最大流速においても、風向と地形(吹送距離)が影響を及ぼすものと推察される。

3. 観測結果

(1) 平常時の風況・流況特性

網取湾の平常時における風況および流況を把握するため、季節的特徴を表した2015年2月と5月におけるそれぞれの風況および流況配図を図-3に示す。ここで、図中の角度は方角を表しており0°が北を表す。図-3(b)の流況配図の2月および5月は水深 $h=3.4\text{ m}$ および 4.4 m の観測値を用いた。図-3(a)の風況を見ると、2月は南南西から南西方向に5 m/sを越える比較強い風が吹いてい

表-1 西表島付近に来襲した台風の番号（名前）および各諸量（風速・風向：西表島観測所アメダスの記録，-：データ欠損）

番号（名前）	最大瞬間風速 [m/s]	最大瞬間風速時 の風向	有義波高 H_s [m]	最大流速 [m/s]
1513 (SOUDEOR)	46.5	西南西	1.34	0.50
1515 (GONI)	54.1	南	2.75	0.70
1521 (DUJUAN)	44.9	西南西	1.76	0.56
1616 (MALAKAS)	37.2	南南東	0.64	0.29
1617 (MEGI)	36.4	東北東	1.06	0.54
1703 (NANMADOL)	17.8	西北西	0.6	0.31
1709 (NESAT)	29.3	南	0.29	0.21
1718 (TALIM)	30.3	西	1.65	0.30
1808 (MARIA)	42.4	西南西	1.64	0.42
1814 (YAGI)	14.8	西北西	-	0.15

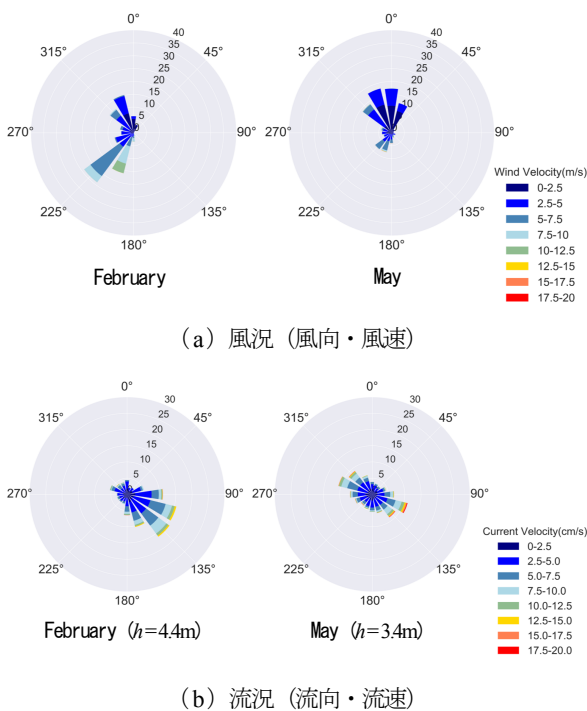


図-3 2015年2月と5月における風況および流況配図

る。一方、5月は北から北西方向に5m/s未満の弱い風が吹いている。したがって、冬から春に季節が変わると北風から南風へと風向が変化し、冬は春よりも風が強い季節風を示すことがわかる。また、図-3(b)の流況を見ると、2月は南東方向に5~10cm/sの弱い流速が支配的である。同様に、5月も南東方向の流れが比較的多いが、北西方向の流れも生じており、2月に比べて大きな流速が生じている。

2月と5月で風向が明らかに異なるが、両月で南東方向の流れが卓越する。この要因として、WavesADCPの設置場所から南西方向に約15m離れた場所にサンゴ礁の周縁部があるため、南西方向の風で生成された流れでもサンゴ礁の地形的影響を受けて、南東方向に流れの向

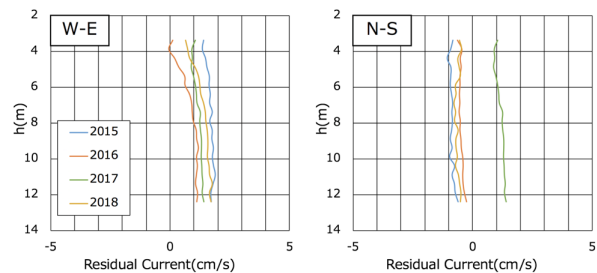


図-4 2015年~2018年の各年8月の1ヵ月平均における残差流の鉛直分布（至軽風（0.3~1.5m/s）以下での流速データ，西→東，南→北：流速+の値）

きを変化したものと推察される。また、5月は上述したように北向きの風が支配的であるが、南西・南南西に10m/sを越える風が低頻度であるが吹いているため、5月においても南東方向の流れが生じたものと考えられる。

次に、潮汐以外の要因による非周期的な流れが湾内に存在するの否かを明らかにするため、風速が至軽風（0.3~1.5m/s）以下の状態における残差流について検討する。図-4は、各年8月の1ヵ月平均における東西および南北方向に対する残差流の鉛直分布を示す。なお、西から東および南から北への流れを正の値として表す。東西成分では、残差流はいずれの年もわずかに西から東への流れが見られるが、その値は小さく、鉛直一様な分布である。この傾向は、南北成分においても同様であり、2017年に若干南から北への流れが見られるが、概ねゼロに近い値と見なせる。また、年間を通して大きな変化は確認されなかった。これより、強風によって生じる網取湾内の流れは、風および地形による影響を受けて生成された結果と見なして良いものと言える。

(2) 台風時の湾内流動特性

代表的な台風経路に着目し、それぞれの台風時におけ

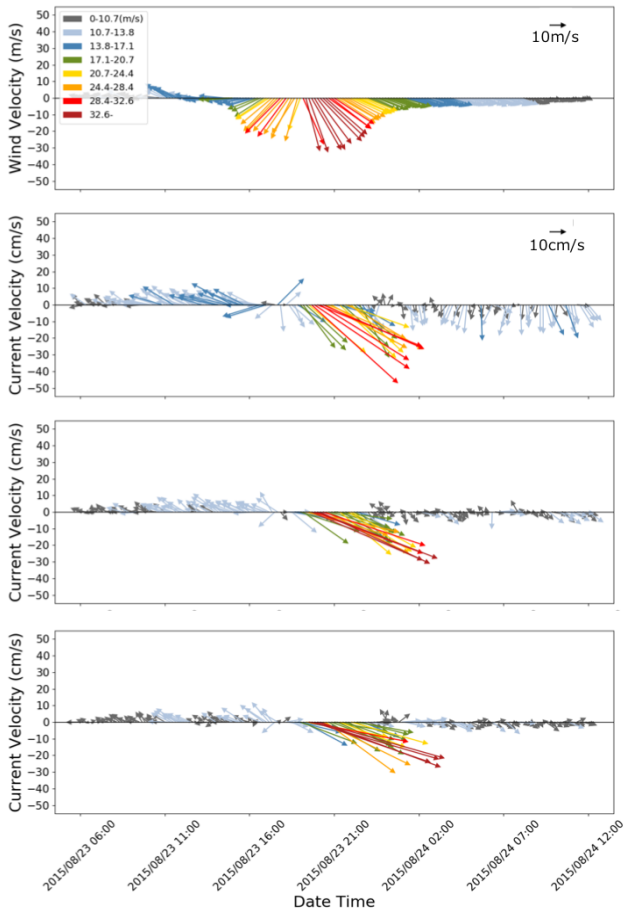


図-5 台風 1515 号 (西表島に上陸) 襲来時の風向・風速および表層・中層・下層の水平流向・流速の時間変化 (上段: 風向・風速, 2 段目: 水深 $h=3.4\text{m}$ の流速, 3 段目: 同 $h=8.4\text{m}$, 下段: 同 $h=12.4\text{m}$)

る湾内の風況および流況の特性を明らかにする。図-5～7は、台風 1515 号 (2015 年 8 月 23 日 6 時 0 分～8 月 24 日 12 時 0 分)、1617 号 (2016 年 9 月 26 日 10 時 0 分～9 月 28 日 2 時 0 分) および 1808 号 (2018 年 7 月 10 日 6 時 0 分～7 月 11 日 6 時 0 分) 接近時の風況 (風向・風速) および表層 (水深 $h=3.4\text{m}$)、中層 (同 8.4m)、下層 (同 12.4m) での水平方向の流況 (流向・流速) を示す。

図-5 を見ると、西表島に上陸 (8 月 23 日 18 時頃) する台風 1515 号 (図-2 の赤線の台風経路) では、台風が接近するに連れて北西から南西方向に風向きが変化し、南西方向に 20m/s を越えるような風速になる。上陸すると、南から南東方向の風向きとなり、 30m/s を越えるような風速が 3 時間程度継続していたことが確認できる。流況では、上陸前までは、北西方向の流れで、 30cm/s 未満の流速である。しかし、 30m/s を越えるような南方向の風が卓越するようになると、流れもその影響を受けて発達し、南東方向に 60cm/s を越えるような流速の値を示す。この流れは、表層に限らず中層および下層でも確認することができ、 70cm/s を越える南東方向の強い流れ

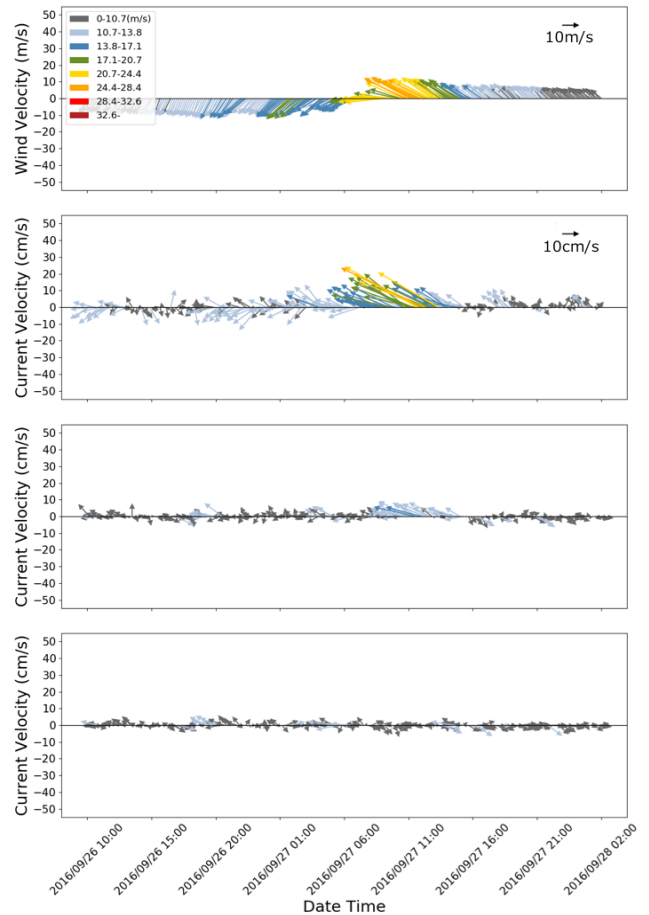


図-6 台風 1617 号 (西表島に対して南西側経路) 襲来時の風向・風速および表層・中層・下層の水平流向・流速の時間変化 (図-5 と同様)

が生じている。また、風速が 20m/s より小さくなると、流速も弱くなり、中層以深では 10cm/s 未満と極端に小さくなるのがわかる。

次に、図-6 に示す台風 1617 号 (図-2 の青線の台風経路) において、西表島の南側 (9 月 27 日 6 時頃) を通過するまでは、南西方向に 20m/s 未満の風が吹いており、南西側を通過するようになると、北西方向に風向きを変化させ、 20m/s を越えるような風速になる。その後、風向は変わらないものの徐々に風速が減少する。流況では、風向が南西方向のときには、流速は発達することなく、その向きも不規則である。風向が北西方向に変わると、表層では風向に従うような流れが発達し、北西方向に 40cm/s 程度の流速になる。しかし、表層で流速は卓越しているが、中層から下層へと深くなるに連れて、 10cm/s 未満と非常に小さな値を示していることがわかる。

さらに、図-7 に示す台風 1808 号 (図-2 の緑線の台風経路) において、西表島の北東側 (7 月 10 日 21 時頃) を最接近して通過するまでは、南から南東方向の風向を示し、風速は徐々に増加しており、 20m/s を越えるようになる。その後、風向きを北方向へと急激に変化させ、

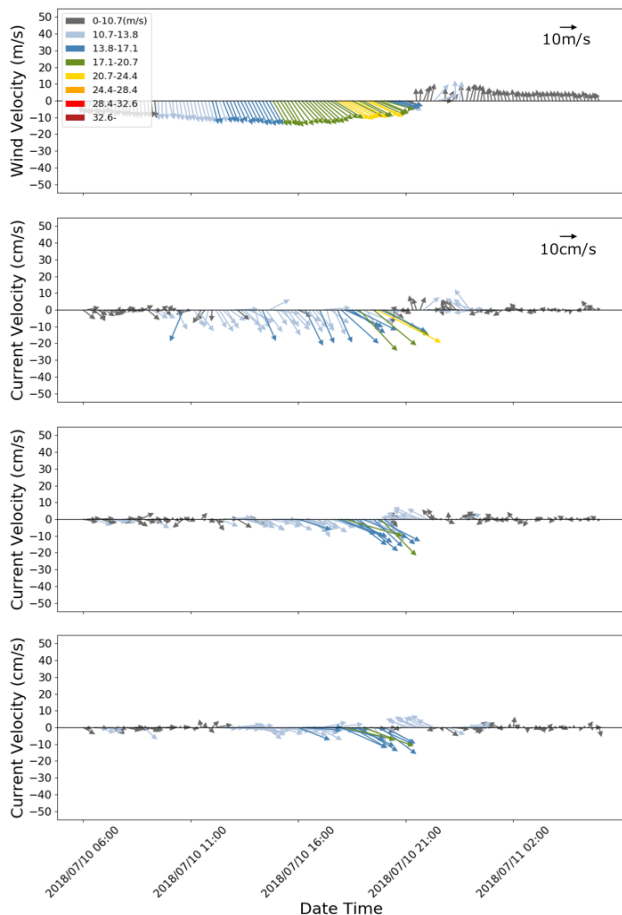


図-7 台風 1808 号 (西表島に対して北東側経路) 襲来時の風向・風速および表層・中層・下層の水平流向・流速の時間変化 (図-5 と同様)

風速は 10 m/s 未満になる。流況では、南方向へと吹く風の影響を受けて流れは発達し、表層での流速が 40 cm/s 程度になる。台風 1515 号ほど顕著ではないが、中層から下層において南東方向に 20 cm/s 程度の流れが一時的に発達していることが確認できる。

以上より、網取湾における風況・流況は、台風の経路によって大きく異なることが明らかになった。特に、南向きの風が吹くような台風の場合、すなわち、湾口から湾奥への風向きでは、湾内の流れは表層だけでなく、海底でも十分な発達が見られることがわかった。

4. 考察

ここでは、表層から海底までの流況に明確な違いが生じた台風 1515 号および 1617 号に着目し、流速の鉛直構造および乱流特性について考察する。

図-8は、台風 1515・1617号における水平流速の鉛直分布の時間変化を示す。なお、図中の右図は最大の流速値のときの鉛直分布である。台風 1515 号では、風向が南西方向の 18 時 0 分では、風速が 20 m/s を越える状況で

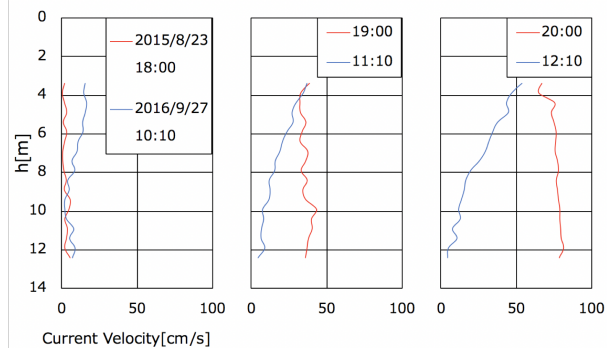


図-8 台風 1515 号 (赤色) および 1617 号 (青色) における水平流速の鉛直分布の時間変化 (右図の流速分布は最大時である)

あっても流速が発達せず、表層から下層まで鉛直一様に小さな値を示す。風向が南東方向になる 19 時 0 分になると、流速は鉛直一様に 50 cm/s 弱まで発達する。南東方向の風が継続している 20 時 0 分には、流速が表層よりも下層の方が大きくなり、80 cm/s を越えるようになる。一方、台風 1617 号では、風向が南西から北西方向に変わる 10 時 10 分では、流速が下層に比べて表層で発達する。その 1 時間後 (11 時 10 分) には、表層の流速はさらに発達し、速度勾配が大きくなる。最大風速下の 12 時 10 分では、表層で 50 cm/s を越える流速になるが、下層では時間的な変化が小さく、速度勾配がより強くなる。

このように鉛直分布が異なる要因として、網取湾の奥行きが約 4 km と短いため、湾奥から湾口へと北西方向に風が吹く場合、地形の影響および吹送距離が短くなるため、吹送流の発達が制限される。一方、湾口から湾奥へと南東方向に風が吹く場合、吹送距離が十分にあるため、強風によって沖合から水塊が輸送されることにより、表層から下層までの水塊が流動するものと推察される。

次に、両台風によって生じる流れの混合運動による乱流特性を明らかにするため、流れの乱流運動に伴う応力として、レイノルズ応力 τ を次式より求める。

$$\tau = -\rho \overline{u'w'} \quad (1)$$

ここで、 ρ は海水の密度 ($= 1,030 \text{ kg/m}^3$)、 u および w は水平および鉛直方向における各乱流成分である。図-9は、台風 1515 号および 1617 号におけるレイノルズ応力 τ の鉛直分布の時間変化を比較したものである。なお、それぞれのレイノルズ応力の値は、風速が 10 分ごとに変化することから、1 時間の統計的平均を意味する。台風 1617 号では、レイノルズ応力は上層から下層まで概ねゼロであることから、下方への運動量の輸送が少ないことがわかる。対比的に、台風 1515 号では、時間の経過に伴いレイノルズ応力が増加して行くことがわかる。また、表層に比べて下層の方がレイノルズ応力が増加している

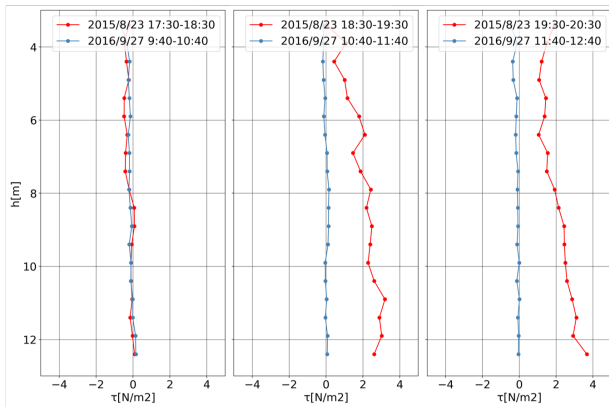


図9 台風1515号(赤色)および1617号(青色)におけるレイノルズ応力の鉛直分布の時間変化

ことから、下層への運動量輸送が大きく、強大台風による海水混合の大きさを示唆するものである。

5. まとめ

西表島網取湾において長期観測で得られた実測データを基に、台風通過時における湾内の流動特性を検討したところ、次のような結果が得られた。

- (1) 強風で生じる湾内の流れは、潮汐以外の要因による非周期的な流れは存在せず、風および地形による影響を受けて生成されることを明らかにした。
- (2) 湾内の風況・流況は、台風の経路によって大きく異なり、湾口から湾奥への風向きするとき、吹送距離が十分にあるため、湾内の流れは表層だけでなく、海底でも発達することがわかった。
- (3) また、表層よりも下層でレイノルズ応力が増加することから、下層への運動量輸送が大きく、強大

台風による海水混合の大きさを示す結果となった。

謝辞：現地観測では、東海大学沖縄地域研究センターの崎原健氏の多大なご協力を頂いた。本研究は、科学研究費補助金基盤研究(C)18K04377 および 20K04699 による成果である。また、東海大学と防災科学技術研究所との共同研究による成果である。ここに併せて謝意を表す。

参考文献

- 1) 村上智一, 深尾宏矩, 吉野純, 安田孝志, 飯塚聡, 下川信也: 温暖化による台風強化に伴う東京湾での最大級高潮と波浪の時空間分布, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 67, pp.I_396-I_400, 2011.
- 2) Carrier, G.F., Hammond, A.L., George, O.D.: A model of the mature hurricane, J. Fluid Mech. 47 (1), 145-170, 1971.
- 3) Garratt, J.R.: Review of drag coefficients over oceans and continents, Mon. Weather Rev., 105 (7), 915-929, 1977.
- 4) Large, W.G., Pond, S.: Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds, J. Phys. Oceanogr., 11 (3), 324-336, 1981.
- 5) Wu, J.: Wind-stress coefficients over sea surface from breeze to hurricane, J. Geophys. Res., Oceans, 87 (C12), 9704-9706, 1982.
- 6) Edson, J., (10 others): On the exchange of momentum over the open ocean, J. Phys. Oceanogr., Vol. 43, pp.1589-1610, 2013.
- 7) Powell, M. D., Vickery, P. J. and Reinhold, T. A.: reduced drag coefficient for high wind speeds in tropical cyclones, Nature, vol.422, pp.279-283, 2003.
- 8) 村上智一, 河野裕美, 下川信也, 水谷晃: 西表島網取湾における最大瞬間風速 50m/s を超える台風時の流速・波浪観測, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 72, pp.I_469-I_474, 2016.

(Received March 16, 2020)

(Accepted July 27, 2020)

CHARACTERISTICS OF SEA CURRENT UNDER TYPHOONS DUE TO LONG-TERM FIXED OBSERVATIONS IN AMITORI BAY, IRIOMOTE ISLAND

Ayano ISHIKAWA, Toshinori OGASAWARA, Tomokazu MURAKAMI, Hiroyoshi KOHNO, Akira MIZUTANI and Shinya SIMOKAWA

In the global warming scenario A1B, a powerful intensity typhoon causes not only strong wind but also high tide in coastal areas. To improve the accuracy of the storm surge forecast simulation, it is necessary to correctly evaluate the wind drag coefficient, which represents the shear stress acting on the sea surface from the wind. However, it is uncertain whether the bulk formula of the wind drag coefficient based on the past typhoons is suitable for the storm surge caused by a strong typhoon. From this situation, we require the observation data of many typhoons generated by global warming.

In this study, we study the characteristics of currents under a typhoon, which is comparable to a strong typhoon during warming, based on data obtained from long-term observations over four years at Amitori Bay, Iriomote Island, Okinawa Prefecture. The fixed observation of velocity and waves used a WavesADCP. As a result, it was clarified that the flow velocity and the momentum transport depends on the typhoon path even if the typhoon has a wind speed exceeding 25 m/s.