

砕波による海洋表層混合の パラメタリゼーションと台風に対する応答

高木 雅史¹・森 信人²・二宮 順一³・志村 智也⁴・内山 雄介⁵・馬場 康之⁶
水谷 英朗⁷・久保 輝広⁸・渡部 靖憲⁹・大塚 淳一¹⁰・山田 朋人¹¹・猿渡 亜由未¹²

¹学生会員 京都大学 大学院工学研究科 (〒615-8530 京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail:eggdom0312@gmail.com

²正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³正会員 金沢大学助教 理工研究域 地球社会基盤学系 (〒920-1192 金沢市角間町)

⁴正会員 京都大学特定助教 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

⁵正会員 神戸大学教授 大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

⁶正会員 京都大学准教授 防災研究所 (〒649-2201 和歌山県西牟婁郡白浜町堅田2500-106)

⁷正会員 株式会社ハイドロ総合技術研究所 (〒530-6123 大阪市北区中之島3-3-23 中之島ダイビル 26F)

⁸非会員 京都大学技術職員 防災研究所 (〒649-2201 和歌山県西牟婁郡白浜町堅田2500-106)

⁹正会員 北海道大学准教授 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

¹⁰正会員 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所寒地水圏研究グループ (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34)

¹¹正会員 北海道大学准教授 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

¹²正会員 北海道大学助教 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

Feddersonらによって提案された表層乱流混合フラックスについてのバルク式におけるTKE flux係数 α は海洋表層混合の計算において非常に重要である。観測された海象データをデータ解析することによって、海洋の表層混合のパラメタリゼーションを行った。観測データから得られたTKE flux係数 α は、風向と波向との関係への依存性、さらに風向と波向に近い場合には弱い波形勾配に対する依存性が確認できた。最適化されたバルク式を用いて2013年の台風Haiyanの推算を行い、海面応答の解析を実施した。解析結果から、表層TKEの空間分布に差がみられ、台風特性にも影響がみられた。これらのことから、大気・海洋結合モデルにおける表層混合過程において波浪依存性が重要であることが示された。

Key Words : air-sea interface, upper ocean mixing, turbulent kinetic energy, wave dissipation, typhoon

1. はじめに

高潮・高波災害は、その生起頻度の低さから過去の観測値による評価だけでは不十分であり、数値モデルによる評価が非常に重要である。一般的に、数値モデルを用いた高潮・高波等の沿岸ハザード強度の評価や領域気象・海洋モデルや全球気候モデルを用いた台風や大気循環等の短期・長期評価を行う場合、数値モデル自体の精度に加えて風速等の外力の精度とこれらがどのようにやり取りされるかという交換則が重要となる。数値モデルと大気データ等の精度は年々向上している一方で、それらを結合する大気海洋境界における運動量や熱の交換、海面粗度および砕波による表層混合などの交換則については、現在も極めて簡易に扱われており、それについてのパラメタリゼーションは運動量を除いて¹⁾長年大きな

進展がない。上記のパラメタリゼーション内で、砕波によって生成される乱流運動エネルギーTKEがもたらす海洋表層混合は、これまでの風速依存によるパラメタリゼーションに加え、波浪を考慮することによる最適化が期待されている。このパラメタリゼーションは台風・高潮・高波・大気・海洋大循環等極めて広範囲に影響を与える。このことから、波浪の方向スペクトルやエネルギー散逸等、近年の観測データの蓄積により定量的に評価が可能になった詳細な海面情報を用いて、近年発達した数値モデルに適合するように海面境界過程のパラメタリゼーションを見直すことが必要とされている。

本研究では現地観測データを詳細にデータ解析することにより、波浪を考慮した砕波による表層混合についてのパラメタリゼーションの見直しを行う。また、最適化されたバルク式を大気海洋波浪結合モデルに実装させて

台風の数值計算を行い、パラメタリゼーションの最適化による台風の数值計算結果への影響を評価する。

2. 碎波による表層混合のパラメタリゼーション

(1) パラメタリゼーションの概要

本研究では、以下に示す Feddersen ら²⁾による波浪を考慮した碎波による表層混合の式を対象に、京都大学田辺中島高潮観測塔（水深10m）での2016～2017年観測データ³⁾を用いてパラメタリゼーションの見直しを行った。Feddersen らによる経験式を式(1)に示す。

$$K_q \frac{\partial k}{\partial z} = \alpha \bar{\varepsilon}_w \quad (1)$$

ここで、 K_q は渦粘性拡散、 k は乱流運動エネルギーTKE、 z は鉛直座標、 $\bar{\varepsilon}_w$ は碎波によるTKE fluxを表す。 α は0～1で決定されるモデル係数であり、碎波によって散逸された波エネルギーの中で乱流運動エネルギーとして水中に取り込まれる部分の割合を表しており、Feddersen らは浅海碎波から $\alpha = 0.25$ と類推している。大気海洋波浪結合モデルでは、式(1)とこの係数がそのまま広く用いられている。浅海碎波と whitecapping による深海碎波は、碎波形態、強度が大きく異なるため、現在のこれらの取り扱いには大きな疑問がある。そこで、この係数 α を観測データをもとに推算し、係数 α が既存の0.25と異なる定数になるのか、あるいは他のパラメータに依存するのかについて解析した。乱流運動エネルギーTKE (k)は流速データから式(2)を用いて求める。

$$k = \sum_i \frac{\overline{u_i'^2}}{2} \quad (2)$$

ここで、 $(u_1, u_2, u_3) = (u, v, w)$ 、 u, v, w は3方向の流速を表しており、 \bar{u}_i を平均流速、 u_i' を乱れ成分と定義すると、 $u_i' = u_i - \bar{u}_i$ である。また、碎波によるTKE flux ($\bar{\varepsilon}_w$)は波浪スペクトルを用いて以下に示す Komen (1984)の式⁴⁾から推定した。 F は波の周波数スペクトル密度、 E は波の全エネルギー、 ω は角周波数、 g は重力加速度、 f は周波数を表しており、 $\omega = 2\pi f$ を満たす。

$$\bar{\varepsilon}_w = \int 2.33 \cdot 10^{-5} g \hat{\omega} \left(\frac{\omega}{\hat{\omega}}\right)^2 \left(\frac{\hat{s}}{\hat{s}_{PM}}\right)^2 F(f) df \quad (3)$$

$$E = \int F(f) df \quad (4)$$

$$\hat{\omega} = \left[E^{-1} \int F(f) \omega^{-1} df \right]^{-1} \quad (5)$$

$$\hat{s} = E \hat{\omega}^4 g^{-2} \quad (6)$$

$$\hat{s}_{PM} = 3.02 \cdot 10^{-3} \quad (7)$$

さらに、渦粘性係数 K_q は以下の式から導出した。

$$K_q = C_{\mu 0} \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

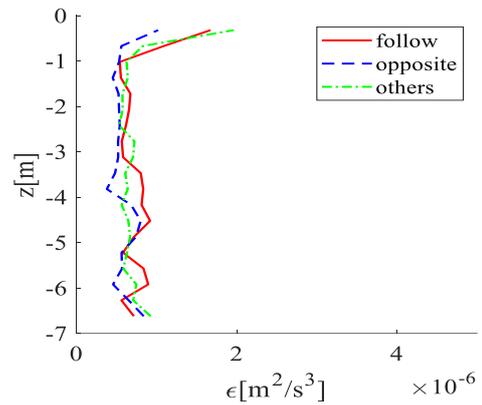


図-1 エネルギー散逸率 ε の鉛直分布

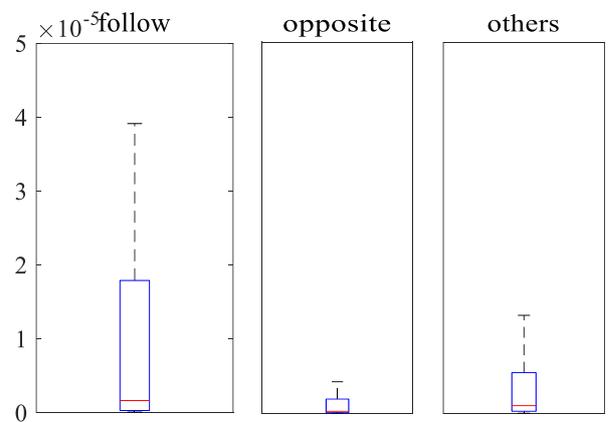


図-2 海面 TKE flux の観測結果

ε はエネルギー散逸率を表しており、 $C_{\mu 0}$ は定数である。本研究では $C_{\mu 0} = 0.107$ とした。

(2) パラメタリゼーションの結果

観測データから得られた結果を示す。海洋の表層混合において、波向と風向の関係が重要であると考えられるため、波向と風向が近い場合（差が30度以内、以下ケース follow とする）、向きが逆の場合（差が150度～180度、以下ケース opposite）、その他の場合（以下ケース others）の3通りに分けて解析した。

図-1は、エネルギー散逸率の観測データの解析結果を示している。このグラフはエネルギー散逸率の観測値を表層から底層まで水深ごとに平均して得られた鉛直分布を表している。エネルギー散逸率は表層で増加するという傾向がみられるが、これはTKEが表層付近で大きいことに起因しているものと考えられる。また opposite の場合、表層での散逸率が小さい。

続いて、観測された碎波による海面TKE flux $\bar{\varepsilon}_w$ の数値分布を図-2の箱ひげ図に示す。TKE flux $\bar{\varepsilon}_w$ はTKEの微分量に関連するため大きくばらつくが、follow の場

表-1 観測結果から得た係数 α

	follow	opposite	others
最大値	0.11	3.98	1.88
上位20%値	0.02	0.11	0.037
中央値	0.0028	0.019	0.0047
下位20%値	6.3×10^{-5}	0.0015	0.0003
最小値	1.4×10^{-7}	6.3×10^{-5}	1.6×10^{-7}

合における海面 TKE flux は, opposite, others の場合と比べて非常に大きく, opposite の場合の 5 倍ほどの値であった。

上述したパラメータを用いて観測結果から推定された式(1)における係数 α を表-1に示す。この結果は, 係数 α の値が風向と波向の関係に依存することを陽に取り入れたものである。風向と波向が逆向きの場合, 風向と波向が近い場合に比べて α の値が5倍ほど大きくなる。この結果は, 式(1)における乱流運動エネルギー k と式(8)におけるエネルギー散逸率 ε がケース follow の場合に大きくなるという結果と一致する。ただし, どのケースにおいても Feddersen らが浅海砕波を元に提案した $\alpha = 0.25$ と比較すると半分以下の小さな値になり, 一般的な浅海および深海砕波の違いの認識とも一致する。

さらに, TKE flux 係数 α のパラメータ特性を調べるために, 係数 α と波形勾配 H/L (H :波高, L :波長)の相関係数を求めた。follow の場合, 係数 α と波形勾配 H/L の逆数の相関係数が0.40程度となり, 弱い相関が確認できたが, opposite と others の場合には相関がほとんど見られなかった。そこで, 以下では follow の場合のみ波形勾配依存性を考慮する数値実験を実施する。

3. 台風シミュレーション

(1) 台風数値計算の概要

本研究では, 大気海洋波浪結合モデルのCOAWST⁹ (The Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport Modeling System)を用いて2013年台風30号 (Haiyan) の数値計算を行い, 台風下における表層TKE混合のパラメタリゼーションの違いによる気象・海象への影響を調べた。大気モデルにはWRF⁶ (Weather Research and Forecasting), 海洋モデルにはROMS⁷ (Regional Ocean Modeling System), 波浪モデルにはSWAN⁸ (Simulating WAVes Nearshore)を用い, それぞれのモデル間で物理量を交換可能な数値シミュレーションモデルである。計算は台風Haiyanの存在している期間を計算するために2013年11月5日0時(UTC)から11月10日0時までの5日間で行った。WRF・ROMS・SWANの水平方向の解像度はそれぞれ9kmに設定し, 格子数は444×222とした。今回検討するバルク式は, 風速

依存の表層混合式⁹ (Craig and Banner, 1994, 以下CB94) Feddersenらの式(1) (以下FT05)に加え, 観測結果を考慮した波浪依存の表層混合式 (Wdir, Wstp) とした。CB94の式を以下に示す。

$$K_q \frac{\partial k}{\partial z} = \alpha_{CB} u_*^3 \quad (9)$$

ここで, u_* は摩擦速度である。この式は, 砕波による海面への乱流エネルギーの入力を風速のみによって表したモデルであり¹⁰, 波浪を考えない海洋モデルの単純計算で広く使用されている。また, Wdir と Wstp で用いる TKE flux 係数 α を表-2に示す。 θ_{wind} , θ_{wave} はそれぞれ風向・波向を表す。Wdir では係数 α の風向・波向依存性を考慮し, Wstp では風向・波向依存性に加えて波形勾配依存性を考慮している。

(2) 台風数値計算の結果

台風 Haiyan の推算結果を示す。まずは, 風速依存式の CB94 (基準とする) を用いた場合の風向・波向の空間分布の推算結果を図-3~5に示す。風向は台風の南側(進行方向左)で南~西, 台風北側(進行方向右)で北~東である。一方, 波向は台風の南側で西~北, 北側で東~南である。これらの差の空間分布を見ると, 台風北側では風向と波向が以てているが, 南側では風向と波向が逆向きになる傾向が確認できる。また, 台風南側では風向と波向が逆向きになる海域が台風中心の後方で広く分布している。続いて, 同様に CB94 の場合の波形勾配の空間分布を図-6に示す。波形勾配は台風中心回りと台風前方(西側)が大きくなる傾向が確認された。

次に, 表層 TKE の空間分布について図-7に示す。表層 TKE の大きさは CB94 が最も小さい値であり, 分布範囲も狭い。波浪依存式を用いた FT05 では, 台風トラックの北側(進行方向右側)と南側(進行方向左側)における値の差が非常に大きい。また, 風向・波向依存性を考慮した Wdir では, トラックの南側と台風前方において TKE が大きくなり, 波形勾配依存性をさらに考慮した Wstp の場合, 台風北側後方における TKE の値がさらに小さい値となった。これらは図-5 および 6 に示した風向・波向・波形勾配の空間分布によるものである。

表-2 本研究で提案するバルク式

Wdir	$\alpha = 0.25 r_{dir}$ $r_{dir} = \begin{cases} 0.2 (\theta_{wind} - \theta_{wave} < 30^\circ) \\ 1.0 (\theta_{wind} - \theta_{wave} > 150^\circ) \\ 0.5 (\text{上記以外}) \end{cases}$ <p>(θ_{wind}: 風向, θ_{wave}: 波向き)</p>
Wstp	$\alpha = 0.25 r_{stp}$ $r_{stp} = \begin{cases} L/300H (\theta_{wind} - \theta_{wave} < 30^\circ) \\ 1.0 (\theta_{wind} - \theta_{wave} > 150^\circ) \\ 0.5 (\text{上記以外}) \end{cases}$

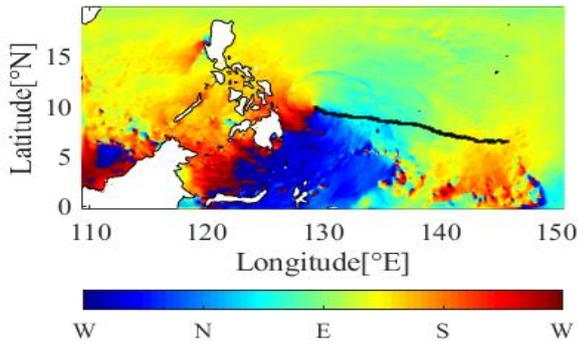


図3 台風周りの風向の空間分布
(黒線は台風トラック)

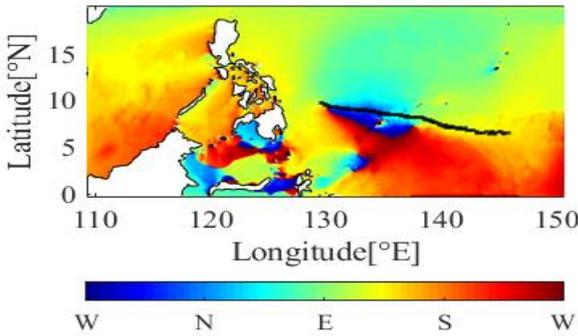


図4 台風周りの波向の空間分布
(黒線は台風トラック)

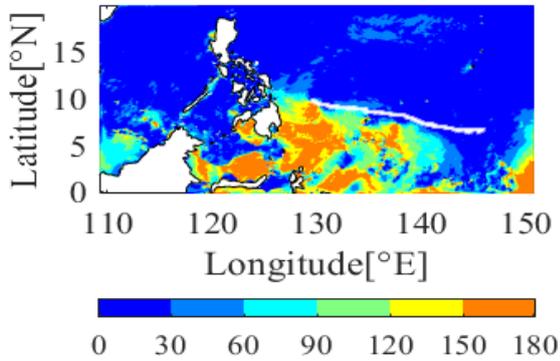


図5 台風周りの風向・波向の差の空間分布
(白線は台風トラック, 単位: 度)

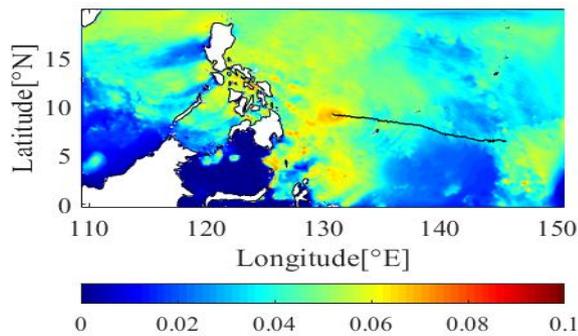
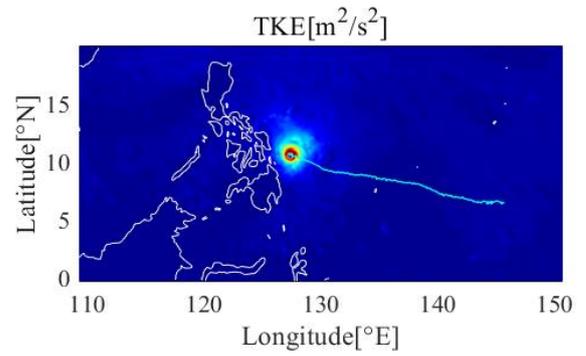
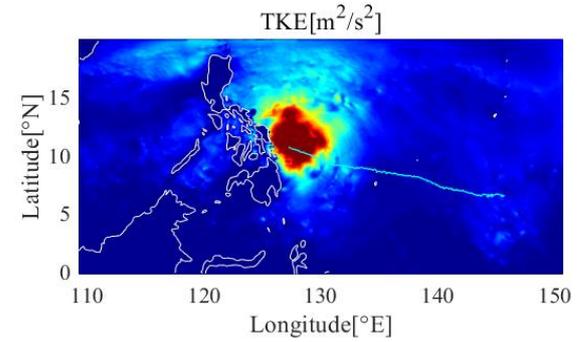


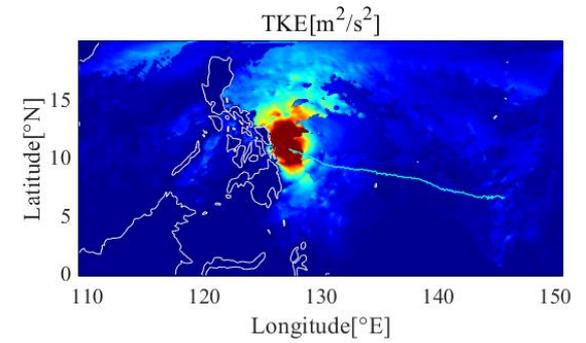
図6 台風周りの波形勾配の空間分布



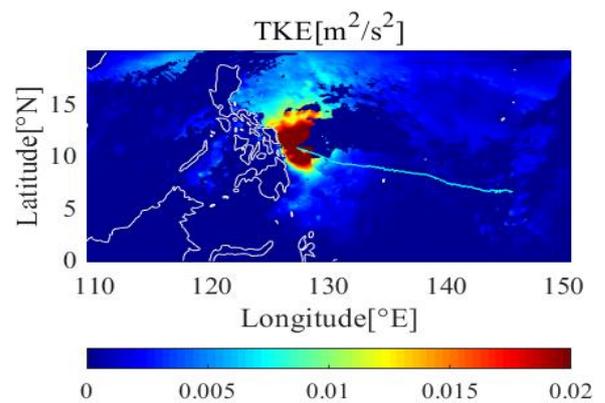
(a) CB94の場合



(b) FT05の場合



(c) Wdirの場合



(d) Wstpの場合

図7 台風周りの表層 TKE の空間分布
(水色線は台風トラック)

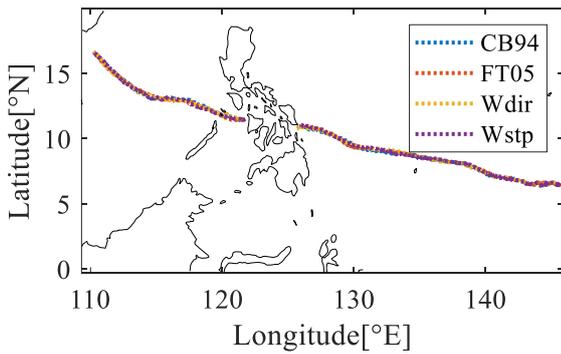


図8 台風トラック

(台風中心が海上に存在する時間のみ)

次に、表層 TKE の空間分布について図-7 に示す。表層 TKE の大きさは CB94 が最も小さい値であり、分布範囲も狭い。波浪依存式を用いた FT05 では、台風トラックの北側（進行方向右側）と南側（進行方向左側）における値の差が非常に大きくなっている。また、風向・波向き依存性を考慮した Wdir では、トラックの南側と台風前方において TKE が大きくなり、波形勾配依存をさらに考慮した Wstp の場合、台風北側後方における TKE の値がさらに小さい値となった。これらは図-5 および 6 に示した風向・波向き・波形勾配の空間分布によるものである。

上記のように、表層混合式の違いによる表層 TKE の空間分布への影響は非常に大きい。これによる台風マクロ特性への影響を調べる。

推算された台風のトラックを図-8 に示す。台風中心がフィリピン陸上に位置する期間は、データの値が不安定になるため、今回は除外している。台風中心がフィリピンを通過する前後で若干差はあるが、大きなトラックの差は確認されなかった。

続いて、最低中心気圧（以下 SLP）の時間変化を図-9 に示す。どのケースも多少のピーク時の時間差はあるものの、7日 18 時頃に最も発達し、フィリピン通過後は 8 日 18 時ごろまで衰弱し、その後再発達と再衰弱をするという推移がみられた。計算結果間では、最大 8 hPa 程の大きな差が確認された。FT04 の場合、CB94・Wdir・Wstp と比較すると発達が弱い傾向がみられた。しかし、風向・波向や波形勾配を考慮した場合、計算期間において最低中心気圧と表層 TKE の大小関係に一貫した傾向は確認されなかった。

表層混合の影響は、海面熱フラックスを通して大気に影響がフィードバックするため、台風中心から半径 500 km 以内の範囲における平均熱フラックスの表層混合式による差の時間変化を図-10 に示す。ここで、図での時刻は UTC で表されている。熱フラックスの差は日中に差が大きく、台風への熱供給へ 6~9% の影響があること

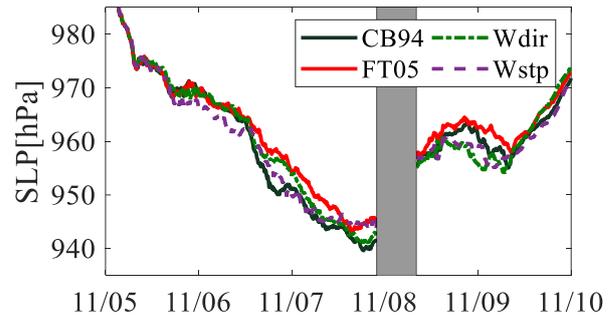


図-9 台風最低中心気圧の時間変化

(台風中心が海上に存在する時間のみ)

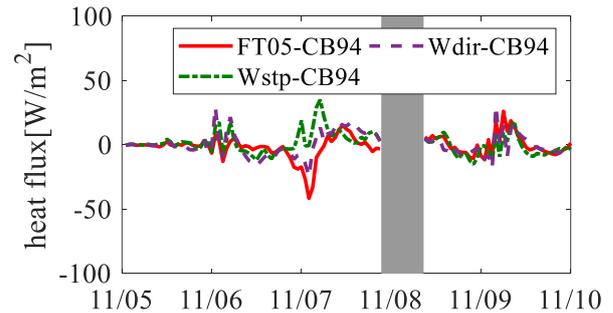


図-10 平均熱フラックスの時間変化

(台風中心が海上に存在する時間のみ)

が分かった。また、SLP と同様に、計算期間において熱フラックスと表層 TKE の大小関係に一貫した傾向は確認されなかったが、各ケースにおける熱フラックスと最低中心気圧の相関係数は 0.3~0.4 となっており、弱い相関があることが確認された。

4. 結論

海洋の表層混合におけるバルク式について、観測データの解析結果をもとに波浪の碎波エネルギーを用いたパラメタリゼーションを行った。次いで、最適化された TKE フラックスの式を用いて台風 Haiyan の数値計算を実施し、パラメタリゼーションの応答解析を行った。得られた結果を以下に示す。

- 1) 観測における碎波による海面 TKE flux の値は風向・波向の関係に依存し、follow の場合において、opposite の場合と比べて 5~10 倍の大きさであった。また、表層におけるエネルギー散逸率は follow の場合に大きい値であった。
- 2) 上記のパラメータを用いて推算された波浪依存の表層混合式(Feddesersenら, 2005)における TKE flux 係数 α は、風向・波向が近い follow の場合に小さい値となり、opposite の時の 1/5~1/10 の値であった。この係数 α は follow の場合に波形勾配の逆数と弱い相関があっ

た。

- 3) 大気海洋波浪結合モデルを用いた台風の数値計算結果では、表層混合式の影響は台風トラックにはほとんどないが、台風周辺の表層TKEの空間分布の推算結果には大きな差があった。
- 4) 表層TKEへの影響は混合層や表層での海水温を經由して最低中心気圧などの台風マクロ特性に影響を与えることが確認された。

以上の結果より、大気海洋波浪結合モデルを用いた数値計算において、風速に加えて波浪を考慮することの重要性が確認された。しかし、表層混合と台風マクロ特性の中間プロセスについて未解明なことが多いため、今後の課題とする。

謝辞：本研究は文部科学省統合気候モデル高度化研究プログラム、環境省環境研究総合推進費、科研費補助金、京都大学防災研究所一般共同研究のサポートのもと実施された。ここに記し、感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Jarosz, E., Mitchell, D. A., Wang, D. W., & Teague, W. J. : Bottom-up determination of air-sea momentum exchange under a major tropical cyclone. *Science*, 2007, 315(5819), pp.1707-1709.

- 2) Feddersen, F., Trowbridge, J. H. : The effect of wave breaking on surf-zone turbulence and alongshore currents: A modeling study. *J. Phys. Oceanogr.* 2005, 35(11), pp.2187-2203.
- 3) 猿渡 亜由未, 坂川 諒太, 大塚 淳一, 馬場 康之, 久保 輝広, 水谷 英朗, 二宮 順一, 山田 朋人, 内山 雄介, 森 信人, 渡部 靖憲: フェッチ制限下の風波砕波に伴う海面表層の応答. 土木学会論文集B2(海岸工学), 2018, 74(2), pp.I_67-I_72.
- 4) Komen, G. J., S. Hasselmann and K. Hasselmann.: On the existence of a fully developed windsea spectrum. *J. Phys. Oceanogr.* 1984, 14, pp.1271-1285.
- 5) Warner, J. C., Armstrong, B., He, R., and Zambon, J. B. : Development of a coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) modeling system. *Ocean Modelling*, 2010, 35(3), pp.230-244.
- 6) Mesoscale and Microscale Meteorology Laboratory, "Weather Research and Forecasting Model"
<https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>
- 7) Shchepetkin, A. F., J. C. McWilliams.: The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, 2005, 9(4), pp.347-404.
- 8) EuroGOOS, "Simulating Waves Nearshore(SWAN) - Nearshore Wave Model"
<http://eurogoos.eu/modelling/inventory/us-ioos-38/>
- 9) Craig, P. D., M. L. Banner.: Modeling wave-enhanced turbulence in the ocean surface layer. *J. Phys. Oceanogr.* 1994, 24, pp.2546-2559.
- 10) 二宮順一. 大気海洋波浪結合モデルにおける海面バルクフラックスの台風時大気海洋物理環境への影響評価. 京都大学. 2014. 博士論文.

(2019. 3. 13 受付)

REVISING WAVE INDUCED TURBULENT MIXING AND ITS IMPACT ON TROPICAL CYCLONE

Masashi TAKAGI, Nobuhito MORI, Junichi NINOMIYA, Tomoya SHIMURA,
Yusuke UCHIYAMA, Yasuyuki BABA, Hideaki MIZUTANI, Teruhiro KUBO,
Yasunori WATANABE, Junichi OTSUKA, Tomohito YAMADA and Ayumi
SARUWATARI

Wave-induced turbulent kinetic energy (TKE) plays an important role on the numerical simulation of sea surface mixing. This study has been conducted to improve the parameterization of sea surface turbulent energy fluxes induced by white-capping based on the observation data. The data indicates that TKE fluxes coefficient α proposed by Feddersen and Trowbridge (2005) has dependence on the difference between wave and wind direction. In addition, when the waves follow wind direction, α is weakly dependent on wave steepness. Based on the optimized bulk equation, the coupled atmospheric and ocean simulation of typhoon, Haiyan(2013), has been conducted. The results show the difference on the spatial TKE distribution near sea surface and macroscopic characteristics of typhoon. It is clear that wave-dependence on upper ocean mixing in atmosphere-ocean coupled model is important.