

風波砕波による海洋表層混合を考慮した台風モデリング  
Revised Wave-induced Turbulent Kinetic Energy on Numerical Simulation of Typhoon

○高木雅史・森信人・二宮順一・志村智也・宮下卓也・馬場康之・久保輝広  
○Masashi TAKAGI\*Nobuhito MORI\*Junichi NINOMIYA\*Tomoya SHIMURA\*Takuya MIYASHITA\*  
Yasuyuki BABA\*Teruhiro KUBO

Sea surface turbulent mixing induced by wave dissipation is important from a view of sea surface temperature (SST) cooling and reduction of heat flux. In this study, improvements to the parameterization of sea surface turbulent kinetic energy (TKE) fluxes induced by wave breaking have been conducted based on the observation data. The data indicates that coefficient  $\alpha$  proposed by Feddersen and Trowbridge (2005) has dependence on wave and wind directions. Furthermore, the coupled atmospheric, ocean and wave simulations for two typhoons, 2013 Haiyan and 2014 Neoguri, have been conducted. The results show the difference on the spatial distribution of surface TKE between the parameterizations of TKE fluxes. The comparison between two typhoons suggests that ocean with thin warm mixing layer is likely to be effected by wave-related turbulence. Therefore, wave-dependent parameterizations are crucial for numerical simulation of sea surface mixing.

### 1. はじめに

大気海洋間の運動量や熱交換は台風・高潮などのハザード評価において重要な素過程である。そのうち、砕波による海面表層の乱流混合（以下表層混合）は風速以外にも波浪の影響を考慮したパラメタリゼーションが提案されている(Feddersen et al., 2005)が、検証が極めて不十分である。そこで、前報では観測データを用いて提案式の見直しを行い、砕波による海洋への乱流運動エネルギー（TKE）の流入が風向と波向の関係に大きく依存することを明らかにした。しかし、海洋表層混合式の選択による台風に対する影響評価については研究事例が少ない。本研究では、前報の観測結果も踏まえつつ、複数の台風を対象に台風推算における海洋表層混合式の影響の解析を行う。

### 2. 観測値を用いたパラメタリゼーション

Feddersen らが提案した波浪から海洋に供給される乱流エネルギーの海面境界条件式（以下 FT05）は次のように表される。

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

$K_v$ は鉛直渦拡散、 $k$ は乱流運動エネルギー（以下 TKE）、 $z$ は鉛直座標、 $\bar{\epsilon}_w$ は砕波による波浪エネルギー散逸量を表し、 $\alpha$ は波浪の砕波乱流エネル

ギーから海洋表層 TKE として流入する割合を示す係数である。前報では観測値の解析より、 $\alpha$ が風向・波向の関係に大きく依存することが示された。本研究において、風向と波向の相対角度と観測データから推定された $\alpha$ の関係を詳細に解析したところ、風向と波向が逆風条件を満たすときに急激に大きくなるという傾向が見られた。そしてこの傾向を陽に考慮することで、次式のように $\alpha$ の推定式を最適化した。

$$\alpha = 3.357 \times 10^{-6} |\theta_{wave} - \theta_{wind}|^2 + 0.01273 \quad (2)$$

ここで、 $\theta_{wave}$ は波向、 $\theta_{wind}$ は風向を表しており（それぞれ単位は度）、 $\alpha$ を風向と波向の相対角度に関する2次式で表現した。

### 3. 台風シミュレーション

台風推算における海洋表層混合式のパラメタリゼーションの影響を調べるため、一般的な風速依存の式(CB94, Craig and Banner, 1994)、波浪依存式(1)(FT05)、そして観測値の解析から得られた式(2) (Wdir: 風向・波向依存式)を大気海洋波浪結合モデル COAWST に導入して台風の数値計算を行った。計算対象は2013年台風30号 Haiyan と2014年台風8号 Neoguri であり、それぞれ海洋表層混合層が厚い状態と薄い状態で発達した台風である。まず、北西方向に進む台風 Neoguri の中心

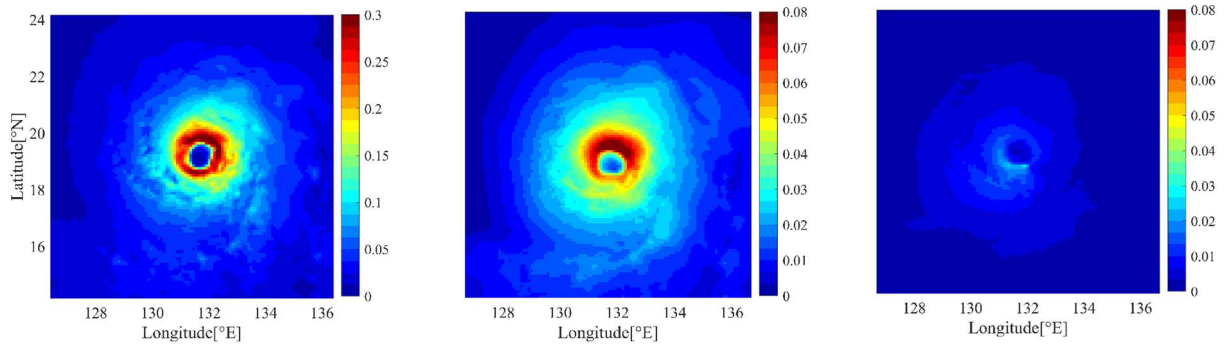


図 1：表層 TKE の空間分布  
(上から CB94, FT05, Wdir)

周りの表層 TKE の空間分布を図 1 に示す. TKE は CB94, FT05, Wdir の順で大きく、波浪依存の FT05 では進行方向右側で特に値が大きくなる傾向が見られた. 一方風向と波向のずれへの依存性を考慮した Wdir では FT05 と TKE の空間分布が異なり、風向と波向が近い進行方向右側後方で値が小さい.

続いて、Haiyan と Neoguri が最発達した時刻の最大風速地点における、海面水温 (SST) の時間変化を図 2 に示す. 領域気象モデル WRF に気象庁の海水温データ MGSST を結合した結果と比較すると海洋・波浪モデルを結合した COAWST の結果では詳細な海水温の時間変化が再現されている. また、Neoguri の台風通過前後に起こる急激な水温低下にケース差は見られないものの、台風通過後から徐々にケース差が開き、台風通過 48 時間後には Wdir と CB94 の SST に最大 0.5 度程度の差が見られた. 一方 Haiyan の通過前後では SST の変動が小さく、ケース差もほぼ見られなかった. さらに、この地点における表層混合層厚さ (MLD) の時間変化を図 3 に示す. SST と同様に、Neoguri では台風通過前後の変動が大きく、ケース差も最大 30~50m 程度確認できる. 一方 Haiyan の場合は台風通過による MLD の変動は小さく、ケース差も最大 10m~20m と小さい値だった.

このような台風に対する結果の差は海洋表層の水温鉛直構造が原因と推測され、台風通過前の混合層厚さが乱流フラックスへの感度に影響していることが明らかとなった.

#### 4. 結論

本研究では、現地観測データに基づいた表層混合の見直しを行い、砕波による波浪散逸エネルギー由来の海面乱流フラックスが風向・波向の関係に依存するという関係から新たな表層混合の推定式を導出した. また、大気海洋波浪結合モデルによる 2 つの台風推算により、海洋表層の水温構造が海面 TKE フラックスのパラメタリゼーションに対する感度に影響を及ぼすことが示唆された. これにより、特定の台風に対する風と波浪を共に考慮した表層混合の重要性が明らかとなった.

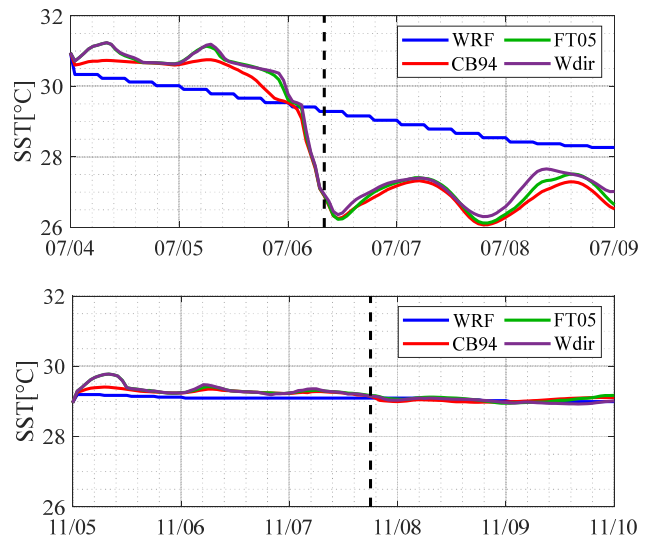


図 2：SST の時間変化  
(上から Neoguri, Haiyan)  
黒点線は台風の最接近時刻

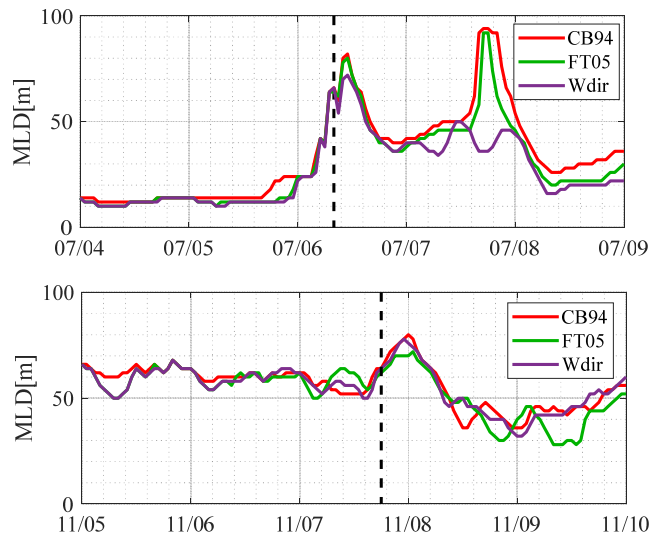


図 3：MLD の時間変化  
(上から Neoguri, Haiyan)  
黒点線は台風の最接近時刻