

海洋表層鉛直混合におよぼす風応力と波浪の影響

A Study on Air-Sea Mixing due to Wind and Wave under Strong Wind Condition

森 信人¹・鈴木崇之²・木原直人³

Nobuhito MORI, Takayuki SUZUKI and Naoto KIHARA

Since major driving forces of vertical mixing processes are wind and wind wave mixing, the boundary condition of turbulent kinetic energy flux at the ocean face is formulated as cubic of friction velocity by Craig-Banner relation. It is not well verified in general conditions including wave conditions and shallow water environment. This study estimates effects of wave conditions on vertical mixing processes at the ocean upper layers in the stormy condition. The field observation was conducted during typhoon Melor in 2009. The observed water temperature distributions indicate importance of wind and wave induced mixing in the nearshore. The numerical results show that the wave induced vertical turbulent flux significantly influences on the water temperature and the current, respectively.

1. 序論

台風などの暴風時の海面境界過程は、吹送流、鉛直混合、波浪の発達と減衰等に密接に関連する（例えば、森・木原，2008）。25m/sを超える強風時に、海面抵抗係数がこれまで考えられてきた線形の関係を満たさないことが明らかにされており、ハリケーンの集中観測結果（CBLAST）では、熱輸送やエントロピーフラックスも運動量同様にバルク係数の見直しが必要であることが指摘されている（Black, 2007）。特に、ハリケーンの発達には海面における乱流エネルギー（TKE）フラックスが重要であり（Zhang, 2008）、これらのパラメタリゼーションには、強風時における大気・海洋両側の海面境界過程の観測と理解が必要とされている。

一般的に、海洋モデルにおける z_0 およびTKEフラックスは、一般的なCharnokの式とCraig・Banner (1994) の式(CB)で与えられる。

$$z_0 = \alpha_{CH} u_*^2 / g \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$K_k \frac{\partial k}{\partial z} = \alpha_{CB} u_*^3 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 u_* は摩擦速度、 k は乱流エネルギー、 K_k はTKEについての鉛直方向の拡散係数、 α_{CH} および α_{CB} は経験定数である。強風時の鉛直混合では、鉛直方向の渦動粘性係数や K_k が重要であり、風波やうねりなど一般的な気象条件や浅海砕波の影響を含む沿岸部において、海面におけるTKEフラックスの境界条件としてCB式が妥当であるかどうかはほとんど検証されていない。

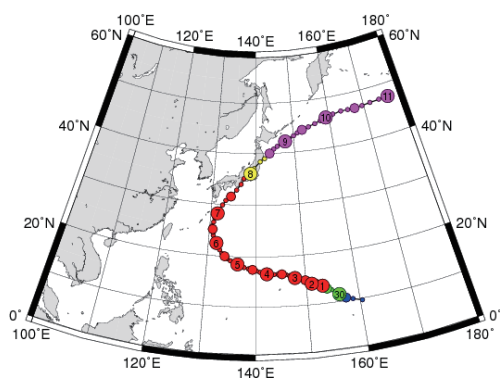


図-1 台風200918号/Melorのトラック(デジタル台風データ)

以上のような背景をもとに、本研究では、強風時における表層近くの物理過程の中で特に鉛直混合に着目し、台風接近時における沿岸部における海水混合についての現地観測を実施し、数値モデルを用いて、海水混合における風混合と波浪の影響について明らかにする。

2. 研究の概要

(1) 現地観測の概要

現地観測は、「沿岸災害減災に向けた大気・海洋相互作用としての砕波観測プロジェクト」(防災研・電中研)の一部として防災研・田辺中島高潮観測塔を用いて和歌山県田辺湾で実施した。観測期間は、2009年9月中旬～10月末であり、観測中に日本に上陸した台風200918号/Melor(図-1)をターゲットに解析を行った。計測項目は、大気圧、風速、気温、比湿、海塩粒子、海面温度、水温、波高、流速、CO₂フラックスである。風速は、超音波風速計を用い、水温は水深3m～30mに8台設置した水温計、流速はADCPを用いて計測を行った(図-2)。

1 正会員 博(工) 京都大学准教授 防災研究所
2 正会員 博(工) 横浜国立大学准教授 大学院工学研究科
3 正会員 博(工) 電力中央研究所主任研究員 流体科学領域

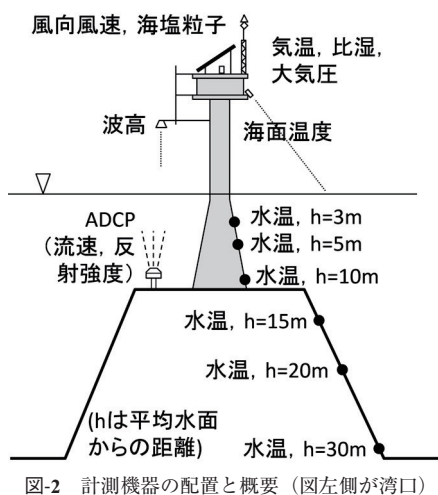


図-2 計測機器の配置と概要 (図左側が湾口)

(2) 計算モデルの概要

上記の観測期間に対応する田辺湾の数値計算には、プリミティブ方程式を支配方程式とする準3次元海洋モデルであるROMS (Shchepetkinら, 2005)を用いた。潮汐、乱流混合、短波・長波の熱交換の物理過程に加えて、大気圧による水面変化およびTKEフラックスを考慮した。これに併せて、ROMSとスペクトル型波浪モデル (SWAN) とを双方向結合し、波浪による海面粗度やTKEフラックス、ラディエーション応力等の物理過程についても考慮した計算を実施した (ROMS-SWAN; 詳細は森ら, 2009)。水平方向はデカルト座標系、鉛直方向は α 座標系を用い、計算範囲は、白浜を中心として東西約30km×南北30km、空間解像度は水平方向100m、鉛直方向20層とした。

乱流モデルについては、 k - ϵ モデルを用い、海面における境界条件としてCB式、SWAN-ROMSでは後述するように、波砕波エネルギーからTKEフラックスを与えた。表層での熱フラックスは、COARE-3.0ベースのバルク式を用い、気象条件は、気象庁のMSM-GPVデータ (長波放射量のみアメダスデータ) を与えた。開境界条件として、自由表面はSommerfeld境界条件、3次元流速には放射条件を与え、潮汐にはTPXO 7.2のデータを用いた。これらの条件下で、海面における熱収支が安定するように、温度成層が安定するまで2週間スピニングした後、台風襲撃時の計算を行った。

3. 結果と考察

(1) 観測結果

図-1に示したように、台風200918号は紀伊半島をかすめ、三重県に上陸した。紀伊半島への最接近は10月8日0時頃であり、図-3は、田辺湾における台風上陸前後の大気圧、潮汐、風向・風速、 $H_{1/3}$ および $T_{1/3}$ の時間変化である。台風最接近時は干潮時に重なり、このときの高潮

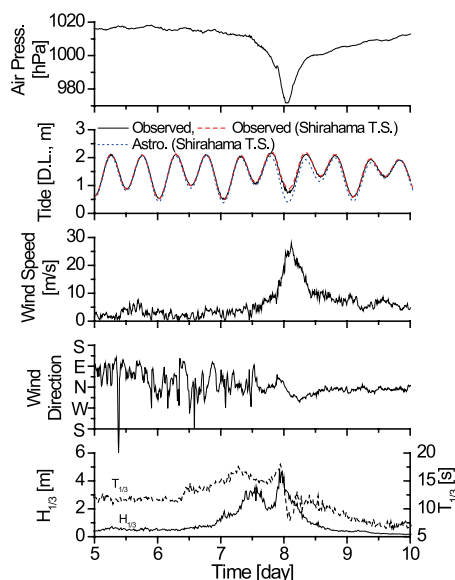


図-3 田辺湾における気象・海象条件の時間変化 (10/5～10/10の期間)

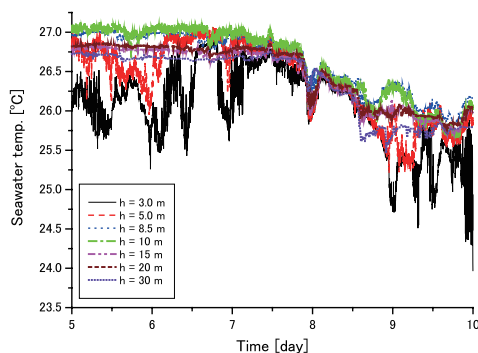


図-4 観測塔で観測された水温の鉛直分布

偏差は50cm、気圧は970hPa、風速は約30m/sであった。以下では、10月6日より前を通常時、7日を台風最接近直前、8日0時前後を台風最接近時、9日以降を通過後と表記する。図-3からわかるように、最低気圧観測直後に潮位偏差および風速のピークが出現している。このとき、風向は西から東に短時間で変化しており、これは台風の中心が田辺湾の東側を通過したことに対応している。波浪については、図からわかるように、風速の時間変化が単一ピークを示しているのに対し、有義波高のピークは2つあり、最接近の約12時間前の7日正午に波高3.2m、周期15秒のうねりが観測されている。周期は、台風最接近時直前に急激に短くなり、最接近後には7秒まで短くなっている。

図-4に示すのは、観測塔付近で計測した水温の鉛直分布の時間変化である。台風接近前の通常時は、中層

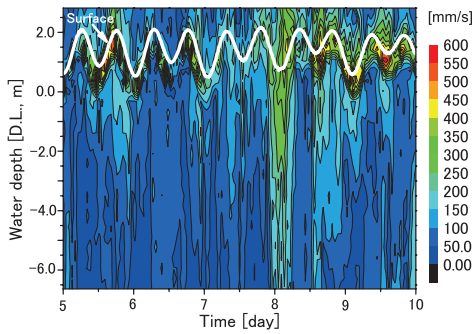


図-5 観測塔で観測された流速の鉛直分布

($h=10\text{m}$) の水温が最も高く、これより上下層では $0.5 \sim 1.0$ 度ほど低い。これは、外境界から流入している海流の影響であると考えられる。一方、台風の通過に伴い、全層において台風の通過前後で約1度の水温低下が観測されている。台風最接近時の水温の鉛直分布は、全層の温度が均一化し、この混合（均一化）は、台風最接近の18時間前（7日6時）から起こっており、通過後12時間程度持続している。また、特に最接近時に短時間で約 0.5 度の低下が見られるのが特徴的である。さらに、図-3に示したように、風速が増加したのは台風最接近直前であり、18時間前から生じている水温の混合を風速だけで説明することは難しい。台風接近前の海水混合の原因としては、外界からの移流効果と風以外の外力による混合が考えられる。以下では、主にこれら水温鉛直分布の変化に絞って考察を進める。

図-5に示すのは、ADCPで計測された流速の鉛直分布の時間変化である。通常時の水深2m以深では見られない 30cm/s 以上の速い流れが、台風最接近直後に計測されている。水温が一斉に低下した8日0時の最接近時に流速が最も大きくなっており、最接近前後の海水混合が風速依存の鉛直混合によるものであることがわかる。しかし、流速のデータを見る限り、台風最接近の18時間前から起こった第1回目の水温の混合に対応する急激な変化は見られない。一方、図-3に示した台風接近前日に来襲したうねりのピークが第1回目の水温の混合とほぼ同時刻であるため、うねりが海水混合におよぼす影響について検討を行った。図-6に示すのは、Srokosz・Longuet-Higgins (1983)の方法に従って、水面変位の周波数スペクトルから碎波率を求めた結果（上段）とADCPの反射強度（下段）である。ADCPの反射強度の図に示されている2本の実線は、水面変位と、波高の3倍の水深である。ADCPの反射強度は、音波の伝達距離と水中の浮遊物質に依存するものであり、水面近傍においては碎波により混入する気泡密度に大きく依存する。最接近時に水面近傍のADCP反射強度（下段）が最も大きくなるが、

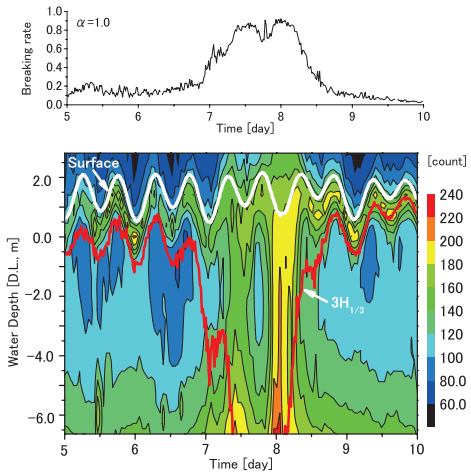


図-6 観測塔で観測された碎波率（上段）およびADCP反射強度の鉛直分布

その24時間前から反射強度の顕著な増加が見られ、この変化は碎波率（上段）の時間変化と良く対応している。これらの結果から、台風接近24時間前の混合には、うねりの碎波による気泡混入の影響が示唆される。

以上、台風200918号の観測結果より、台風による水温鉛直混合には、一般的な風応力による直接混合に加えてそれ以外の外力による混合があることが示唆された。定点観測結果からは、移流の影響について議論できないため、以下では、数値モデルによる計算結果と対比し、水温の鉛直混合に関する総合的な議論を行う。

(2) 数値計算結果

観測データで見られた台風接近に伴う水温の鉛直混合について理解するため、海洋モデルを用いた数値計算を行った。図-7に示すのは、海洋モデル単独による計算結果であり、観測塔に最も近い計算格子における流速、水温およびTKEの鉛直分布である（鉛直深さが観測データと異なることに留意）。流速は、通常時において最大でも 15cm/s であるのに対し、最接近時には約2倍の 30cm/s まで大きくなっている。水面近傍極表層（ $h<30\text{cm}$ ）を除くと、流速の鉛直分布の計算結果は観測結果と近いものとなっている。通常時に観測された水温は、観測値が中層でもっとも暖かく、表層と底層温度が1度ほどこれより低い。気温がSSTより低いため、温度分布が表層で不安定となっているのが特徴である。一方、計算の方では、外境界から流入する海水の温度分布を考慮していないために、通常時の温度が鉛直方向にほぼ一様になっている。この境界条件の違いにより、観測に比べて計算モデルの方が水温の鉛直混合が起きにくい状態となっている。紙面の関係上図には示さないが、TKEの鉛直分布は、最接近時に瞬間的に大きくなっているが、これ以外の時間帯ではほとんど0に近い。

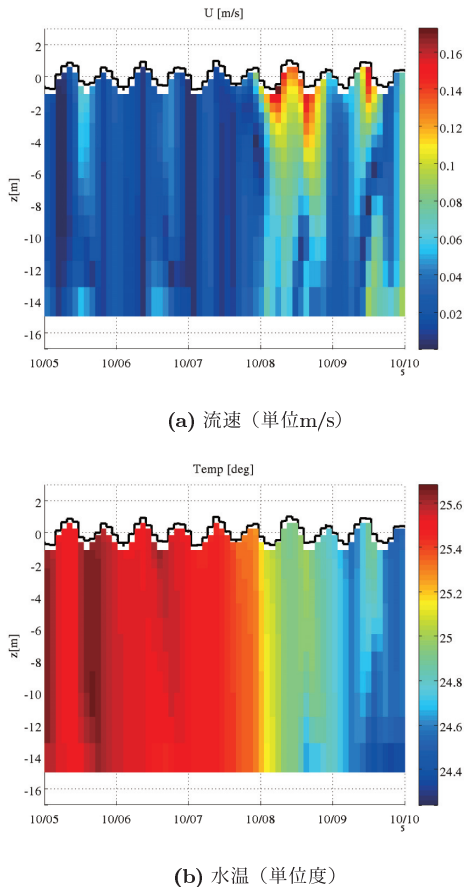


図-7 海洋モデルによる鉛直分布の時間変化
(観測塔位置)

それでは観測された水温の低下は、どこから来たのであろうか。図-8は、最接近時における流速とSSTの空間分布である。図からわかるように、地形依存の複雑な流況を示しており、南西にある反時計回りの渦と、北風による沿岸風による渦が見られる。沖に比べて沿岸部ではSSTが低く、岸から起きに向かう流速の大きな収束域において低温なSSTの移流が顕著に見られ、この水塊は周辺温度と比較して最大で0.75度程度低い。底層の流速と温度についても解析した結果、外海からの低温水の移流は見られず、沿岸部で冷やされた低温水の移流が、観測塔で記録された水温の低下と鉛直混合に対応している。他の時刻についてもSSTの空間分布を解析した結果、今回対象とした季節・時間スケールでは、SSTの変化は風波による温度躍層の混合よりも、沿岸方向からの低温水の沖側への拡大が支配的であることがわかった。これは、水深に応じた熱容量の差により浅海域のほうが大気温度の変化に鋭敏に反応するためと考えられる。風波の変化によるTKEフラックスの鉛直混合への影響を見るため、式(2)の係数 α_{CB} を1400から56000へ40倍増加させた計

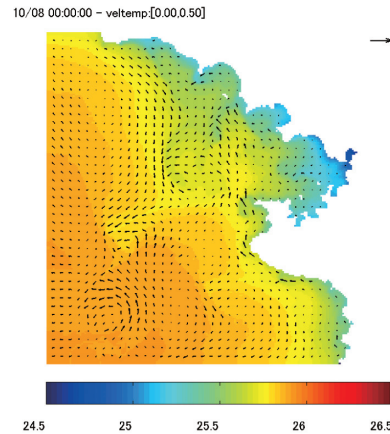


図-8 海洋モデルによるSSTの平面分布：10月8日0:00 矢印：流速 (参照矢印：0.5m/s)

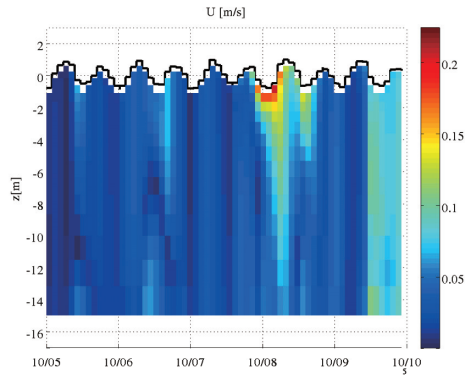
算を行った。図には示さないが、 α_{CB} を大きくすることにより、海面でのTKEフラックスが増加することになり、これにより水温の鉛直混合と流速分布自体が大きく変化する、およそ10%程度流速が小さくなる。しかし、CBの式を使う限り、鉛直分布の大きさを変化させることは可能であるが、最接近時の水温低下と最接近前に見られたような風速と無関係な鉛直混合を評価することは難しい。一方、通過後の流速と水温の変化は、 α_{CB} の値により大きく変化しており、これは強風時の混合の慣性によるものと考えられる。

風波だけでは表現できなかった水温の鉛直混合に波浪が与える影響を見るため、海洋・波浪結合モデルを用いた計算を実施した。結合モデルにおける z_0 とTKEフラックスは、 H_s と砕波エネルギー散逸率 ϵ_{wdiss} を用いて以下のように定義される。

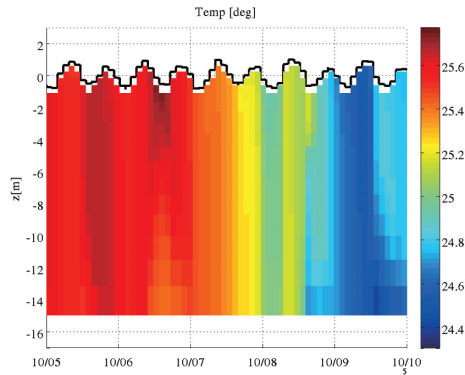
$$z_0 = \alpha_{zos} H_s \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$K_k \frac{\partial k}{\partial z} = \alpha_{wdiss} \epsilon_{wdiss} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 α_{zos} および ϵ_{wdiss} は係数であり、Terrayら(1996)とFeddersenら(2005)に従い、 $\alpha_{zos}=1/2$ および $\alpha_{wdiss}=1/4$ となる条件で計算を行った(これらの係数は経験的に与えられており、確定値ではないことに留意)。図-9はその結果であり、海洋モデル単独の結果である図-7の場合と比べて、式(3)および式(4)を用いて海面境界条件を波浪から与えた場合、通常時の流速が小さく、最接近時の流速の鉛直分布が急峻になり、観測結果に近い分布となっていることがわかる。一方、水温については、観測結果で見られた最接近前日の混合と、最接近時に一時的に低下する水温の鉛直分布の変化の両者を再現できており、海洋モデル単独の結果を大きく改善している。



(a) 流速 (単位m/s)



(b) 水温 (単位度)

図-9 海洋・波浪結合モデルによる再現計算結果 (観測塔位置)

最後に図-10に示すのは、観測と再現計算の水温の時間系列の相関係数の鉛直分布である。概して相関係数は表層で低く、低層で高いが、これは低層での時間変化が小さいための見かけ上のものである。図からわかるように、海洋モデル単独の計算では、 α_{CB} の値を通常より大きくしたほうが、全層において水温変化の再現性は高い。これは、碎波の影響を強くした方が表層での水温の変化をよく表すことができることを示唆している。一方、結合モデルの結果は、単独モデルと比較して $z=3\text{m}$ および 5m の表層付近における相関係数を大きく改善する。特に $z=5\text{m}$ では、単独モデルと比較して相関係数を最大0.2以上増加させ、観測との対応は非常に良くなっている。

4. 結論

本研究では、沿岸域における台風時の強風時の表層近

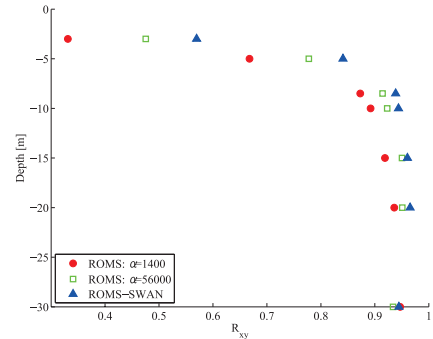


図-10 観測と計算の水温の時間変化の相関係数
 (●: 単独モデル $\alpha_{CB}=1400$, □: 単独モデル $\alpha_{CB}=56000$,
 ▲結合モデル)

くの強混合鉛直混合を対象に着目し、現地観測と数値計算を実施した。

台風接近時に顕著な水温の低下が観測され、極浅海で生じる低温水が沖に輸送されて沿岸部の水温を低下されることがわかった。また、海面での海面粗度やTKEフラックスを波浪のスペクトルから与えることにより、台風最接近時の水温低下が再現できた。

謝辞：本研究は、京大防災研共同研究費および科学研究費補助金による成果であり、ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 森 信人・木原直人 (2008)：地球環境における大気・海洋相互作用，混相流学会誌，22巻，1号，pp. 42-49.
- 森 信人・高田理絵・安田誠宏・間瀬 肇・金 洙列 (2009)：強風時の表層鉛直混合が高潮および物理環境へおよぼす影響，海岸工学論文集，第56巻，pp. 241-245.
- Black et al. (2007)：Air-sea exchange in hurricanes, Bull. Amer. Meteor. Soc., 88, pp. 357-374.
- Craig, P.D. and M.L. Banner (1994)：Modeling wave-enhanced turbulence in the ocean surface layer, JPO, Vol.24, No.12, pp. 2546-2559.
- Feddersen, F. and J. H. Trowbridge (2005)：The effect of wave breaking on surf-zone turbulence and alongshore currents, JPO, pp. 2187-2203.
- Shchepetkin, A.F., and J.C. McWilliams (2005)：The regional oceanic modeling system, Ocean Modeling, Vol.9, pp. 347-404.
- Srokosz, M.A. (1986)：On the probability of breaking in deep water. JPO, Vol. 16, pp. 382-385.
- Terray, E.A. et al. (1996)：Estimation of kinetic energy dissipation under breaking waves, JPO, Vol.26, pp. 792-807.
- Zhang, J.A. (2009)：First direct measurements of enthalpy flux in the hurricane boundary layer: The CBLAST results, Geophys. Res. Lett., 35, L14813, doi:10.1029/2008GL034374.