

海中混入気泡による超音波後方散乱と熱輸送

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

¹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)

E-mail: saruwata@eng.hokudai.ac.jp

²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 (〒062-0931 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

E-mail: 08900@ceri.go.jp

³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)

⁴正会員 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)

⁵正会員 ハイドロ総合技術研究所 (〒530-0005 大阪市北区中之島 3-3-23)

⁶正会員 京都大学特定助教 防災研究所 (〒612-8236 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

⁷正会員 金沢大学助教 理工研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

⁸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)

⁹正会員 神戸大学教授 大学院工学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

¹⁰正会員 京都大学教授 防災研究所 (〒612-8236 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

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)

E-mail: yasunori@eng.hokudai.ac.jp

極めて強い台風が通過した際の和歌山県田辺湾 田辺中島高潮観測塔における海上現地観測結果に基づき、大気-海洋間熱輸送現象における気泡の寄与について調査した。対象イベント中は水面下に高濃度の気泡群が長時間に渡り残留する条件であった。ADCPの発信音波に対する後方散乱強度を風速から求めるモデルを構築した。本モデルにより得られる後方散乱プロファイルを基に気泡数密度とボイド率の鉛直分布を推定し、それに対する気泡界面を介した熱フラックスを算出した。暴風下の混入気泡による総熱フラックスは他の要因によるものと比べても極めて大きく、また気泡は水面下に深く輸送された先の海水と直接熱交換を行い効率的な熱の鉛直輸送に寄与すると考えられる為、その影響を評価する事は重要である。

Key Words: Air-sea heat exchange, bubble entrainment, ultrasonic backscatter, typhoon, heat flux model

1. はじめに

暴風波浪時の大気海洋間の熱、物質輸送速度を現行のバルクモデルにより見積ると過小評価となってしまう事が以前から指摘されている¹⁾。今後気候変動による台風の大規模化が危惧される中、暴風波浪場に適用可能な大気海洋間相互作用モデルが強く求められている。暴風時には継続的な碎波に伴い大量の気泡、飛沫が発生するが、それらによる気液界面総面積の増大と、気泡、飛沫の振動に伴う単位界面面積あたりの熱、物質輸送速度の増大が暴風下の大気海洋間熱輸送現象の過小評価の一因となっていると言われていたが、現行バルクモデルでは気泡、飛沫による寄与が考慮されていない。即ち気泡や飛沫の発生量の正確な見積もりと、それらによる熱、物質輸送速度の正当な評価を行う事がモデルの高精度化の為に重要である。

本研究は、極めて強い台風通過イベントに伴う気泡混入量並びに気泡による熱フラックスを、海上観測塔における現地観測データを基に見積もり、大気海洋間熱フラックスへの混入気泡の寄与について議論するものである。



図-1 田辺中島高潮観測塔の位置 (左) と写真 (右)。

2. 現地観測方法

現地観測は京都大学防災研究所 田辺中島高潮観測塔において行った(図-1)。本観測塔は和歌山県白浜町の太平洋側に南西方向に開けた田辺湾の湾口中央部にある

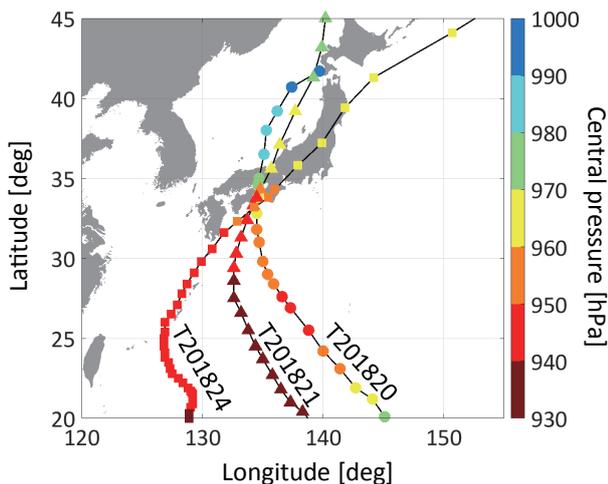


図-2 観測期間中、観測サイト付近を通過した台風経路（実線）と中心気圧（色）。データはデジタル台風より。

頂部水深約 10m, 周辺水深約 30m の海丘上に位置している。本研究で使用した観測項目は風速（海上 23m）、全天日射量、気温、海面放射温度、水温（水面から水深 5m まで 50cm 間隔, 10m まで 1m 間隔, 30m まで 5m 間隔）、ADCP エコー強度（ADCP は水深 10m 地点に上向きに設置）である。風速は Charnock²⁾ の粗度高さをを用いて 10m 上空風速 U_{10} に換算した。解析に用いるデータは全て 1 時間平均値とした。更に、海上 12.5m テラス北側に下向きにチルトさせて設置した web カメラにより海面を 10s 間隔で連続撮影した。取得した画像は 12m × 8m の実座標領域に正投影変換した。

本観測塔にて行った夏期連続観測期間のうち、解析対象としたのは 2018 年 8 月 16 日から 2018 年 11 月 16 日である。期間中 T201820, T201821, T201824 の 3 つの台風が観測サイトのほぼ直上を通過した（図-2）。これらの台風は、観測サイト接近時の中心気圧がそれぞれ 970 hPa, 950 hPa, 960 hPa, 観測塔での現地最低気圧

が 989 hPa, 977 hPa, 963 hPa, 現地最大風速が 26 m s^{-1} , 36 m s^{-1} , 26 m s^{-1} にも及ぶいずれも非常に強いものであった（図-3 (a) 参照）。

3. 現地観測結果

(1) 観測結果の概要

図-3 は 3 つの台風が通過した期間中における風速と気温、海面温度、水温の時間変化を表す。T201820, T201821 接近前は水温の成層化が確認されるが、台風の接近に伴い鉛直混合が促進され、特に底面付近の水温が顕著に変化した（図-3 (b)）。両イベント後は再び成層構造が回復するが、9 月 12 日以降表層水温よりも気温が下がり始めると一気に成層構造が崩壊し、観測期間後半では鉛直混合が進み水深方向にほぼ様な水温分布へと遷移した。

日中に最大風速を観測した T201821 では、観測塔に設置した web カメラにより暴波浪発達過程における海面画像が記録された（図-4）。海上風速 9 m s^{-1} 程度から白波が発生し始め、風速 10 m s^{-1} を超えた頃から常時白波が確認され始めた (a)。風速の増大に伴い徐々に白波被覆面積も増大していき (b)、風速 20 m s^{-1} を超えた頃には海面はほぼ一面白波で覆われる状態となった (c, d)。このとき海表面における白波の形成だけでなく、継続的な砕波により水面下に高濃度の気泡群が残留しているのが画像から確認できる。通常白波被覆率は白波とそれ以外の部分との輝度差に基く画像の二値化により抽出された白波部の面積率として定義されるが、暴風下では高濃度の残留気泡が青白く写る為、二値化閾値を定義する事ができなくなる。白波被覆率として定量的に表す事はできないが、本台風接近時の海表面には継続的に白波が形成され、海面下には常に高濃度の気泡が存在する状態であった。

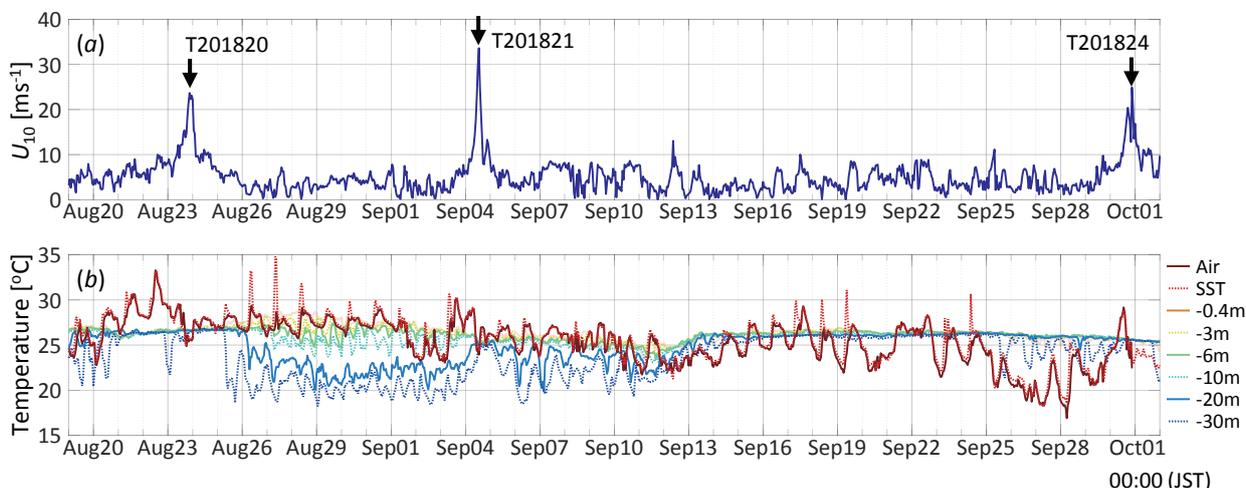


図-3 10m 上空風速 (a), 気温、海水面温度、水温 (b) の時間変化。

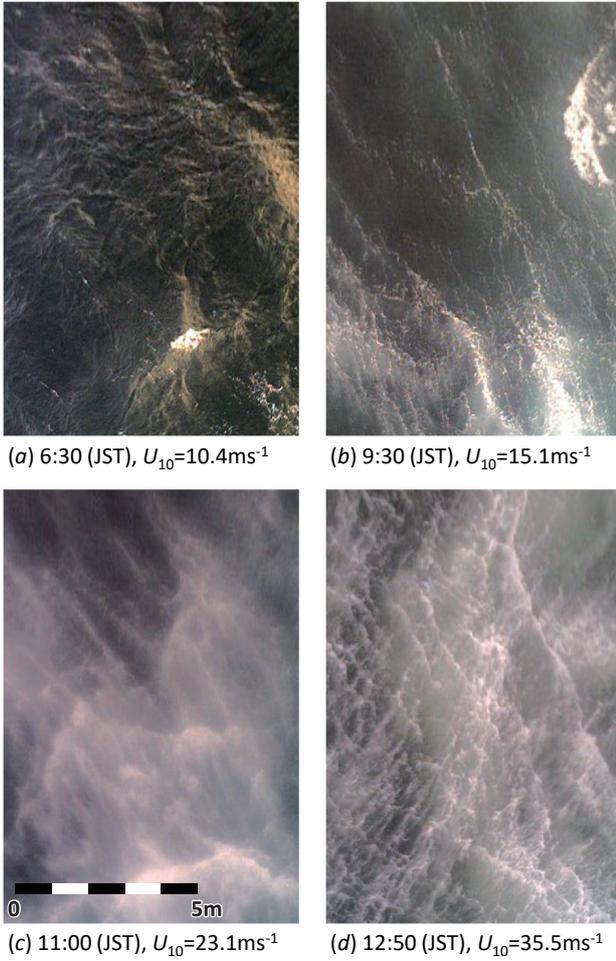


図-4 T201821 が観測地点に最接近した 9 月 4 日の各時刻における海面撮影画像。各図下部に記すのは撮影時刻と瞬時風速。

(2) 後方散乱モデルと気泡量推定

本研究では Deines³⁾ が提案した超音波の距離減衰やトランスデューサ内の熱雑音等の影響を考慮して ADCP エコー強度から後方散乱強度を求める方法を用いて、後方散乱プロファイルを求めた。

$$S_v = C_{ADCP} + 10 \log_{10} \left[(T_x + 273.16) R^2 \right] - L_{DBM} - P_{DBW} + 2\alpha R + K_c (E - E_r) \quad (1)$$

ここで、 S_v [dB] は後方散乱強度、 C_{ADCP} は使用機器によって決まる定数（本観測で用いた Workhorse ADCP Monitor の場合 $C_{ADCP} = -129.1$ dB）、 T_x [°C] はトランスデューサ温度、 R [m] はトランスデューサからの距離、 $L_{DBM} = 10 \log_{10} L$ 、 L [m] は ADCP の送信パルス長、 $P_{DBW} = 10 \log_{10} P$ 、 P [W] は送信パワー、 α は水の超音波吸収係数で使用機器の発信周波数 1200 kHz に対して $\alpha = 0.480$ dB m⁻¹、 $K_c = 127.3 / (T_x + 273.15)$ [dB count⁻¹] は変換係数、 E [count] はエコー強度、 E_r

[count] はリファレンスエコー強度であり本観測における平常時のエコー強度プロファイルに指数関数をフィッティングさせる事により定義した。本観測により得られたエコー強度と、上式により変換された後方散乱強度を図-5 (a) (b) に表す。Deines³⁾ によると平常時の典型的な後方散乱強度は 1200 kHz の超音波に対して -70 dB 程度と報告されており、本研究の後方散乱強度計算値は妥当なオーダーである事が確認された。

顕著な気泡混入の無い平常時では水面における散乱により ADCP 後方散乱強度は単純に水面でのみ高い分布となる一方、大量の気泡混入が生じる台風イベント時には気泡数密度に依存して水面から指数関数的に減少する鉛直プロファイルを示す（図-5 (b)）。本研究の観測結果からは ADCP 測定深さ (-8 m) よりも深いレベルにおける情報は得る事ができないが、解析結果では台風通過時には水深 8 m 地点においても平常時よりも有意に後方散乱強度が増大しており、それ以深の領域でも混入気泡の存在が推察される。そこで本研究では次式で表される後方散乱鉛直プロファイルモデルを提案する。

$$S_v = a10^{bz} + c \quad (2)$$

ここで z は平均海面から上向きに定義された鉛直座標、 a, b, c はモデル係数である。 c は後方散乱強度の海底方向への漸近値であり、観測結果から $c = -90$ dB とした。時々刻々の後方散乱プロファイルに (2) 式をフィッティングさせた時の係数 a, b と風速 U_{10} との関係は図-6 の様になる。 $z = 0$ レベルにおける後方散乱強度を表す a は風速と共に増大し、水深方向への散乱強度の減衰率を表す b は風速と共に減少する。本研究では気泡よりも水面からの散乱の影響の方が強いと考えられる $U_{10} \leq 9$ m s⁻¹ 条件下のデータを除外して、次式の様に係数 a, b のモデル化を行った（図-6 実線）。

$$\begin{cases} a = 40.02 U_{10}^{0.1730} \\ b = 1.819 U_{10}^{-1.134} \end{cases} \quad (U_{10} > 9 \text{ m s}^{-1}) \quad (3)$$

提案するモデルを用いて観測された海上風速から推定し直した後方散乱強度 S'_v が図-5 (c) である。低風速時はモデル化の対象外であるが、3つの台風通過時における S'_v は S_v をよく表している。(2) 式を延長する事により水面から海底までの後方散乱プロファイルを推定する事ができる。

本モデルにより後方散乱強度分布が与えられれば、Medwin⁴⁾ 及び Vagle & Farmer⁵⁾ により求められる単一気泡後方散乱断面積に基き、任意の混入気泡サイズ分布に対する気泡数密度 N 、並びにボイド率のプロファイルを推定する事が可能となる。即ち、単一径気泡群

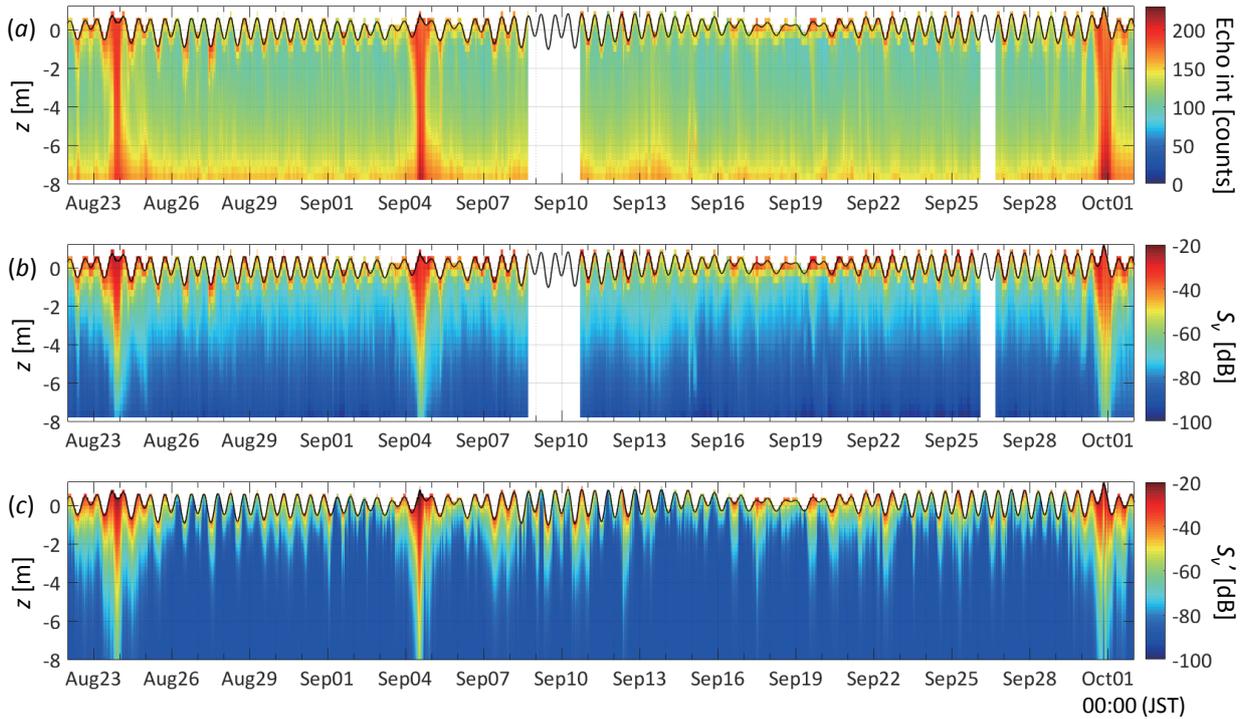


図-5 ADCP エコー強度 (a), 後方散乱強度 (b), 後方散乱強度のモデル推定値 (c) の鉛直プロファイル。

を仮定するときの後方散乱強度は次式の様に表される。

$$S_v = 10 \log_{10} \left(\sigma_{BS} N \frac{V}{R^2} \right) \quad (4)$$

$$\sigma_{BS} = \frac{r^2}{[(f_R/f)^2 - 1]^2 + \delta^2} \quad (5)$$

ここで σ_{BS} は単一気泡の後方散乱断面積, V は測定対象体積, r は気泡半径, f_R は気泡の共鳴周波数, f は ADCP 周波数, δ は減衰係数である。本研究では代表的な気泡直径として $100 \mu\text{m}$ を仮定し, (4) 式から気泡数密度 N を, 次式により対応するボイド率 α_v を求めた。

$$\alpha_v = (4/3)\pi r^3 N \quad (6)$$

図-7 は (2) 式により得られた後方散乱強度から推定した気泡数密度プロファイルを表す。海面から 1 m 以内の推定気泡数密度は $O(10^6 \text{ m}^{-3})$ に及び, 図-4 (c) (d) の画像でも確認された水面下の高濃度気泡群を表すものとする。暴風下で海中に混入した気泡は砕波下の乱流場で鉛直方向に輸送され, 水面下 15–25 m 程度までは輸送され得る事が明らかとなった。

本研究による推定気泡数密度と推定ボイド率を, 海上風速 12 m s^{-1} 条件下で現地観測を行った Farmer et al.⁶⁾ による結果と比較した (図-8)。本研究で対象としたのは風速 26 m s^{-1} を超える巨大台風イベントであるのに加え, 本研究では単一径の気泡群を仮定している為, Farmer et al. の観測結果と定量的に比較することはでき

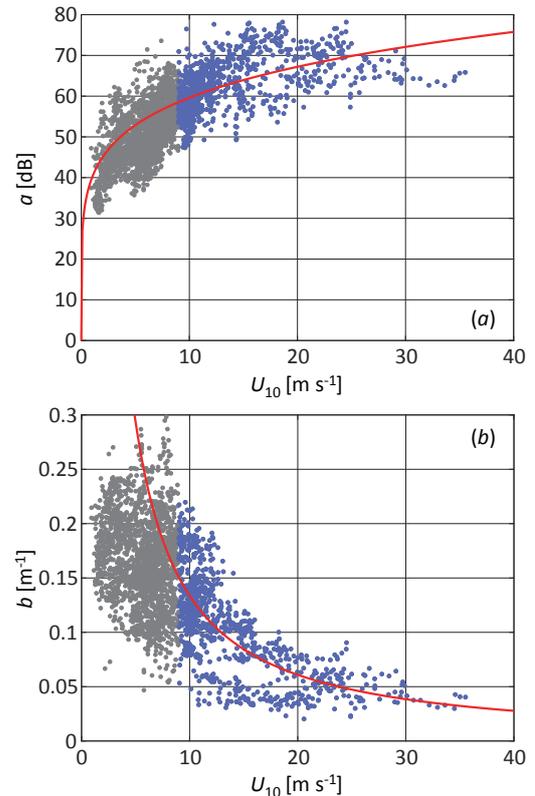


図-6 10 m 上空風速と係数 a (a), b (b) との関係。赤実線は (3) 式で表される本研究で提案する後方散乱モデル曲線, 青はモデル化に使用したデータ。

ないが, 本研究の気泡数密度とボイド率の鉛直プロファイルは現地観測と矛盾しない形状である。

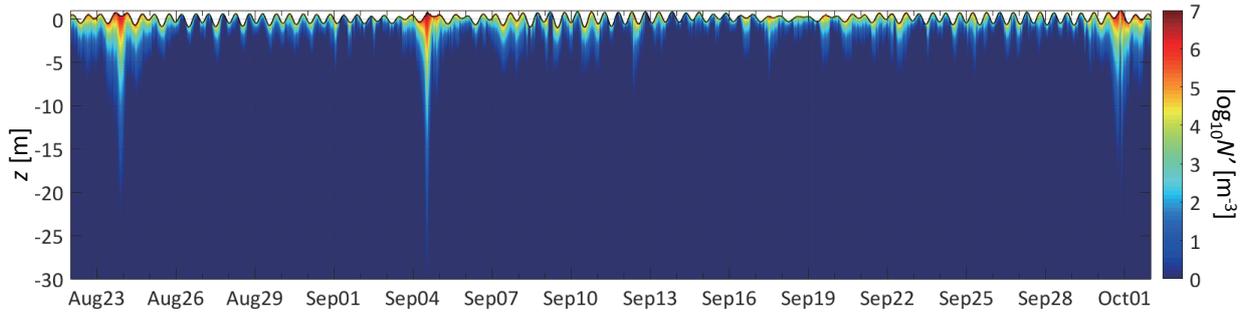


図-7 後方散乱モデルを用いて求めた推定気泡数密度プロファイル。

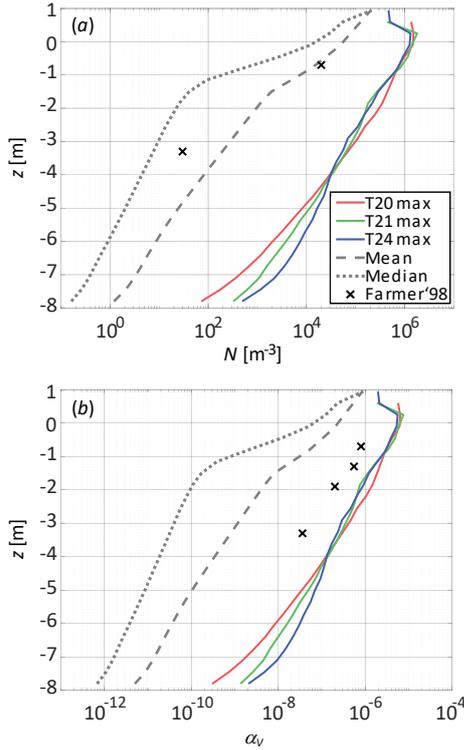


図-8 気泡数密度 (a) 及びポイド率 (b) の鉛直プロファイル。ラインは観測後方散乱強度により求めた推定値であり、実線はそれぞれ T201820 (赤), T201821 (緑), T201824 (青) 通過時の最大値, 破線, 点線はそれぞれ観測期間中の平均値と中央値。点は Farmer et al.⁶⁾ による現地観測結果。

(3) 気泡を介した大気海洋間熱フラックス

Niida & Watanabe⁷⁾ は気泡界面を介した気液間ガス輸送フラックスモデルを提案した。本研究ではそのモデルを熱輸送現象に拡張し、前節で推定した混入気泡量に対する熱輸送フラックス推定を行う。単位気泡界面面積当たりの熱輸送フラックス S_T を Niida & Watanabe モデルに基き次式の様求める。

$$S_T = k_T \Delta T \quad (7)$$

$$k_T = \alpha_T Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{2}} \frac{D_T}{2r} \rho c_p \quad (8)$$

ここで、 k_T は熱輸送速度、 ΔT は気泡内外の温度差、 α_T は気泡径に依存した定数で $r < 1.8 \text{ mm}$ のとき $\alpha_T =$

1.13, $Re = \rho d w_T / \mu$ はレイノルズ数、 ρ は海水の密度、 d は気泡直径、 w_T は気泡の浮上速度 (本研究ではストークス速度を与えた)、 μ は海水の粘性係数、 $Pr = \nu \rho c_p / k_w$ はプラントル数で海水の場合 6.30、 ν は海水の動粘性係数、 c_p は海水の比熱、 k_w は海水の熱伝導率、 D_T は海水の温度拡散係数である。気泡群による総熱フラックス Q_{bubble} は次式により求める。

$$Q_{bubble} = 4\pi r^2 S_T \int N dz \quad (9)$$

図-9 は観測期間中の Q_{bubble} と観測日射量 Q_{solar} 、バルクモデルにより算出された潜熱顕熱フラックス Q_{bulk} と降雨による熱フラックス Q_{rain} を表す (下向きが正)。混入気泡の全表面からの瞬間的な熱輸送速度を見積もった Q_{bubble} は海表面からのフラックスとなる日射や潜熱顕熱、降雨によるものと比べてもその絶対値は極めて大きい。T201820 では大気海洋間の温度差、即ち S_T が小さい為、全体の熱フラックスに対する気泡の寄与は比較的小さい。T201821 でも S_T は同程度であったものの混入気泡数が多かった為、気泡の寄与は非常に大きかった。観測期間後半では気温-表層水温間温度差が最大 10°C 程度となった為熱輸送速度が増大し、気泡数としては T201820 と同程度であったにもかかわらず T201824 通過時の気泡による熱フラックスは顕著に増大した。またその間、平常時の白波砕波程度であっても混入気泡の影響により有意な熱フラックスが生じる事も確認された。この様に台風イベントにおけるピーク風速時の Q_{bubble} は条件によってはその絶対値は潜熱顕熱フラックスよりもずっと大きく、また晴天時の日射による短波放射フラックスの数倍にもなり得る事が判明した。Andreas & Monahan⁸⁾ は風速 40 m s^{-1} の暴風時であっても、混入気泡による熱フラックスはバルクモデルによる推定潜熱顕熱フラックスの 4-5% 程度の寄与しかないと既往モデルに基き試算しているが、本研究の観測により気泡が熱平衡に達するまでの間、極めて大きなフラックスで熱輸送が行われ得る事が明らかとなった。更に通常のバルクモデルで想定する海表

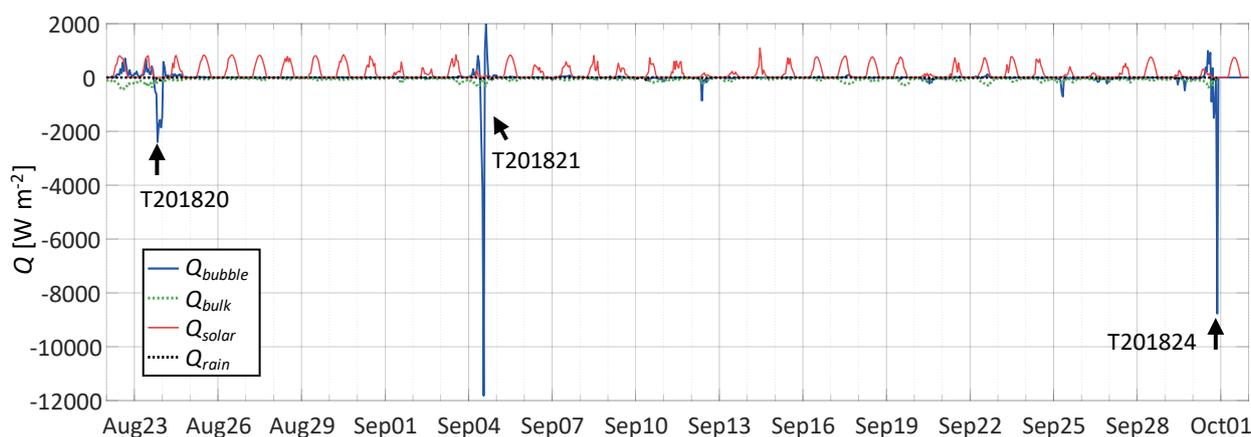


図-9 下向き熱フラックスの時間変化.

面を介した熱フラックスとは異なり，混入気泡は水中で直接周囲の海水と熱交換を行う事により効率的に熱の鉛直輸送を行う役割をもつ為，大気-海洋間熱輸送を評価する際に気泡モデルを導入する事は重要であると考える。

4. 結論

巨大台風通過時における海上現地観測結果に基き，超音波後方散乱モデルを提案すると共に，後方散乱強度に対する気泡量推定，並びに気泡を介した熱輸送フラックスの見積もりを行った。暴風イベント時の気泡界面からの熱輸送速度は極めて大きく，また水面下数mの深さにまで混入して直接内部の海水との熱のやり取りを行うという点において，気泡による熱輸送現象への寄与を評価する事は重要である。今後気泡による熱輸送量に関する定量的な検討を行っていききたい。

謝辞： 本研究の一部は京都大学防災研究所一般共同研究費及び科学研究費補助金 (18H03791, 18H01537) の補助を受けた。

参考文献

- 1) Wallace, D. W. R. and Wirrick, C. D.: Large air-sea gas fluxes associated with breaking waves, *Nature*, Vol.356, pp.694–696, 1992.
- 2) Charnock, H.: Wind stress on a water surface, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol.81, No.350, pp.639–640, 1955.
- 3) Deines, K. L.: Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers, *Proc. IEEE Sixth Working Conf. Current Measurement (Cat. No.99CH36331)*, pp. 249–253, 1999.
- 4) Medwin, H.: Counting bubbles acoustically: a review, *Ultrasonics*, Vol.15, No.1, pp.7–13, 1977.
- 5) Vagle, S. and Farmer, D. M.: The measurement of bubble-size distributions by acoustical backscatter, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol.9, No.5, pp.630–644, 1992.
- 6) Farmer, D. M., Vagle, S., and Booth, A. D.: A free-flooding acoustical resonator for measurement of bubble size distributions, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol.15, No.5, pp.1132–1146, 1998.
- 7) Niida, Y. and Watanabe, Y.: Oxygen transfer from bubble-plumes, *Phys. Fluids*, Vol.30, No.10, pp.107104, 2018.
- 8) Andreas, E. L. and Monahan, E. C.: The role of white-cap bubbles in air-sea heat and moisture exchange, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol.30, No.2, pp.433–442, 2000.

(2019. 3. 13 受付)

ULTRASONIC BACKSCATTER MODEL ESTIMATING HEAT TRANSFER BY BUBBLE CLOUD IN THE OCEAN

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

The contribution of bubbles to the air-ocean heat exchange during passages of extreme typhoons was investigated based on a field observation at the ocean. We proposed an ultrasonic backscatter model estimating bubble population and heat flux through the bubble interface. Bubbles produced in an extreme weather were found to be entrained to an ocean surface layer to rapidly exchange heat with the sea water, resulting in vertical transfer of heat in the ocean.