

海表面及び大気最下層でのダイナミクスが有する運動量交換への影響

北海道大学 学生会員 ○岡地 寛季
 北海道大学 正会員 山田 朋人
 北海道大学 正会員 渡部 靖憲

1. 背景

大気最下層で行われるフラックス交換は、台風をはじめとする極端現象予測において重要な物理過程である。極端現象下では、暴風や降雨、波浪を伴うため観測が困難であり、境界層での物理過程は十分に理解されていない。現行の気象モデルにおいて、運動量交換の指標となる運動量交換係数（以下、 C_D と記述する）は風速と共に単調増加として扱う。しかし、観測・実験によって確認が得られている範囲は、風速が20 m/s程度までである。 C_D はCharnockの式によって表現される粗度高さに依存するが、実際の暴風下に存在する砕波飛沫（以下、飛沫）や降雨は考慮されていない。Powell (2003) はハリケーン下でラジオゾンデを用いた観測を行い、水平風速の鉛直分布が風速の対数則分布とは異なる値であると示した。さらに、 C_D が風速30 m/s程度においてピークを有することを示した。またSoloviev and Lukas. (2010) は大気と海面の間に形成される飛沫を含んだ層がKelvin-Helmholtz不安定により崩壊することで C_D の下限値を決定すると提案した。岡地ら(2018)は、暴風下では降雨を伴うことから飛沫のみならず雨滴の影響を加味した C_D を提唱した。その結果、風速が25 m/sより小さい範囲で、 C_D に対して雨滴の影響が支配的となり、降雨強度が大きくなるにつれて C_D の値は小さくなる。一方で、風速が大きくなると飛沫の影響が支配的となり、 C_D の値は減少する。しかし、これらの C_D は暴風状態で起こる砕波

を考慮していない。そこで本研究では、波齢によって定義される粗度高さを用いて砕波を表現し、 C_D を求め、既往研究と比較した。

第二章に、 C_D の飛沫に対する依存性について述べる。第三章に砕波を考慮した粗度高さ及び C_D について示し、まとめを第四章に記述する。

2. 運動量交換係数の飛沫依存性

大気と海面の間では、常に運動量が交換されている。従来の C_D は式(1)によって表現される。

$$C_D = \left[\frac{\kappa}{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)} \right]^2 \quad (1)$$

ここで z_0 は粗度高さを表し、Charnockの式によって表現される。Charnockの式は

$$z_0 = \alpha \frac{u_*^2}{g}, \quad (2)$$

と表現され、 α は無次元粗度、 u_* は摩擦速度[m/s]、 g は重力加速度[m/s²]である。岡地ら(2018)は、Andreas(2004)が提唱した飛沫を加味した C_D に、雨滴の効果を付与した。式(3)に飛沫と雨滴の効果を加味した C_D を示す。

$$C_{D,sp,r} = \left[1 - \frac{\tau_{sp}}{\rho_a \times u_*^2} \right] \left[\frac{\kappa}{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)} \right]^2 - 2.7 \times 10^{-7} r_t R \left(\frac{\rho_w}{\rho_a} \right) \frac{\kappa}{u_* \ln\left(\frac{10}{z_0}\right)} \quad (3)$$

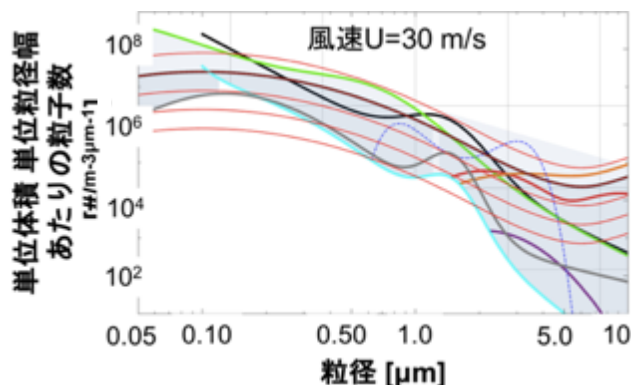


図-1. 先行研究で得られた飛沫粒径分布と近似的に表した飛沫粒径分布。コンターは粒径分布が分布している範囲を示す。赤線は粒径分布を近似的に示した曲線である。

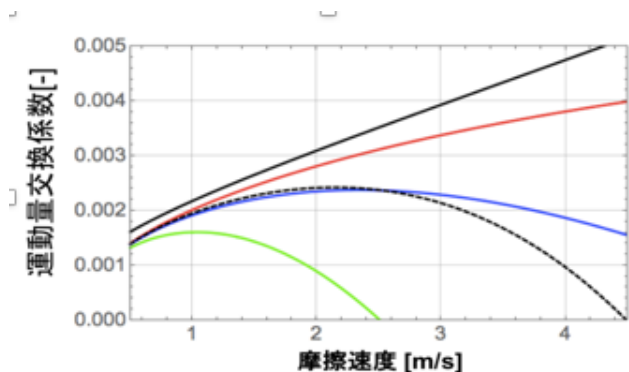


図-2. 図-1の近似した飛沫粒径分布を利用して得られた運動量交換係数と摩擦速度の関係を示す。黒実線は従来の運動量交換係数、破線は岡地ら(2018)が示した飛沫と雨滴を加味した運動量交換係数、その他の実線は飛沫粒径分布を変化させて得られた運動量交換係数である。

キーワード 運動量交換, 砕波飛沫, 雨滴, 砕波

連絡先 〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目北海道大学大学院工学研究科 TEL 011-706-6189

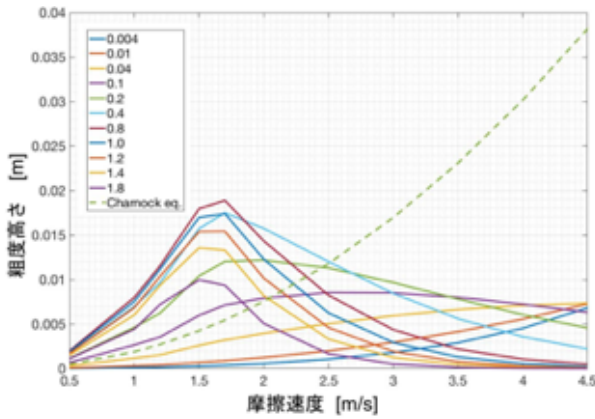


図-3. 摩擦速度と粗度高さの関係. 実線は砕波を考慮した粗度高さ, 波齢が 0.04 から 1.8 となっている. 破線で示すのは Charnock の式より求めた粗度高さである.

同式に含まれる ρ_a 及び ρ_w はそれぞれ大気と水の密度 [kg/m^3] を表す. τ_{sp} は飛沫の剪断応力 [N/m^2], R は降雨強度 [mm/h], r_t は海面に落下する際の雨滴の水平速度を 10m 高さの風速で除した値を表す. τ_{sp} は以下の式で表せる.

$$\tau_{sp} = \frac{4\pi}{3} \rho_w u \int r_0^3 \frac{dF}{dr_0} dr_0 \quad (4)$$

u は, 砕波によって飛沫が発生すると考え, 平均有義波高における風速を使用する. dF/dr_0 は飛沫の単位面積, 単位幅, 単位時間あたりの粒子数 [$\text{m}^{-2} \mu \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$] を表す. 図-1 に既往研究の飛沫粒径分布と, 近似的に表した粒径分布を記す. 飛沫の粒径分布は, 様々提案されているがオーダーは大きく異なる. 近似した粒径分布を元に C_D を式 (1) より求めた. その結果を図-2 に示す. 飛沫の粒子数が増加すると, 風速が大きい範囲で C_D が減少する. C_D の飛沫粒子数に対する依存性は高いため, 飛沫粒子数の観測は重要である.

3. 砕波を考慮した粗度高さ

Charnock の式では, 無次元粗度を一定値として扱う. しかし, 無次元粗度は風速のみならず, 海面の砕波状況にも依存する. そこで, Liu et al. (2012) は, 波齢と風速によって定義される粗度高さを示した. 式 (4) に波齢と風速によって定義される粗度高さを示す.

$$z_0 = \begin{cases} \left(0.085\beta_*^{\frac{3}{2}}\right)^{1-\frac{1}{\omega}} [0.03\beta_* \exp(-0.14\beta_*)]^{\frac{1}{\omega}}, & \sim 0.35 < \beta_* < 35, \\ 17.60^{1-\frac{1}{\omega}} (0.008)^{\frac{1}{\omega}}, & \beta_* \geq 35 \end{cases} \quad (5)$$

ここで, β_* は波齢, ω は飛沫によって影響を受けた時の補正係数である (Makin, 2005). 従来の粗度高さ ($\alpha = 0.0185$) と式 (3) より得られる粗度高さの比較を図-3 に示す. 波齢が増加すると粗度高さは増加するが, $\beta = 0.8$ を越えると減少するこ

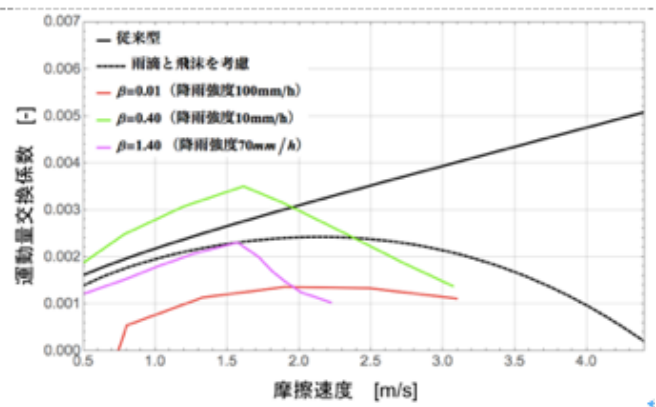


図-4. 摩擦速度と運動量交換係数の関係. 実線は従来の運動量交換係数, 破線は飛沫と雨滴の影響を考慮した運動量交換係数, その他は図-3 で示した粗度高さを利用して求めた運動量交換係数である.

とがわかる. また従来の粗度高さは風速に対して単調増加であるのに対して, 波齢によって定義される粗度高さは風速とともに増加するが, ピークを有している. さらに, 式 (1),

(3) を用いて C_D を求めた結果を図-4 に示す. 飛沫と雨滴の影響を加味した C_D と同様にピークを有しているが, ピークの値が変動していることがわかる.

4. まとめ

本研究は, 台風をはじめとする気象現象の形成及び発達の一因である大気と海面の相互作用に, 大気最下層に存在する雨滴・飛沫, さらに砕波がもたらす影響を明らかにすることを目的とする. 飛沫粒径分布を変動させた場合, 粒子数の増加に伴い風速が大きい範囲において C_D の値は減少する. 砕波の影響を考慮した場合, 砕波の状況に応じて C_D のピーク値が増減することが明らかとなった. 今後は, 飛沫及び雨滴, 砕波を加味した場合の C_D を用いて従来の気象イベントの再現計算を行い, 極端気象場へ与える影響を明らかにする.

謝辞: 本研究は, 科研費 (15H0404307; 17K1896317) 及び京都大学防災研究所一般共同研究 (29G-09) の成果の一部である.

参考文献

- (1) 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.
- (2) Soloviev, A. and Lukas, R.: Effects of bubbles and sea spray on air-sea exchange in hurricane conditions, *Boundary- Layer Meteorology*, Vol.136, pp.365-376, 2010.
- (3) 岡地 寛季, 山田 朋人, 渡部 靖憲: 大気海面間での運動量交換に与える砕波飛沫と雨滴の影響, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74, No.4, I_265-I_270, 2018.
- (4) Liu, B., Guan, C. and Xie, L.: The wave state and sea spray related parameterization of wind stress applicable from low to extreme winds, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, C00J22, doi:10.1029/2011Jc007786, 2012