暴風雨下における液滴効果を加味した海面粗度パラメタリゼーション

Parameterizations of Droplet Impact on the Air–Sea Momentum Fluxes in High Wind

北海道大学大学院工学院　○学生員　大山高弘(Takahiro Ohyama)
北海道大学大学院工学研究院　正員　山田朋人(Tomohito Yamada)
北海道大学大学院工学研究院　正員　渡部靖憲(Yasunori Watanabe)
北海道大学大学院工学研究院　正員　猿渡亜由未(Ayumi Saruwatari)
土木研究所寒地土木研究所　正員　大塚淳一(Junichi Otsuka)
北海道大学大学院工学院　学生員　田代昇基(Koki Tashiro)

1. はじめに

台風の発達過程を予測する上で、大気から海洋への運動量輸送を決定する海面抵抗係数の推定は必要不可欠である。海面抵抗係数の推定は、風洞水槽実験や海洋上での観測によって行われてきたが、飛沫や降雨の効果を加味したものは日々の気象予測および気候変動予測には反映されてない。液滴の存在は大気海洋相互作用に影響を与えるものであり、台風のような暴風雨下において、風速の増加に伴う飛沫数の増加は、海面抵抗係数を減少させるとの観測事例が報告されている(Powell et al. 2003）。これに対し、Andreas(2004）は海洋上における風速と飛沫応力との関係式を提案した。Andreas(2004）は飛沫が海面付近の風速を弱めるという効果を理論的に検証し、海面から 10m の高さにおける風速 36m/s は 3m/s 程度減少するとの結果を示した。

同論文では海面からの飛沫が海面抵抗係数に与える影響についても述べているが、降雨の影響についての議論は行われていない。降雨が大気の最下層に与える影響については Caldwell and Elliot (1971)が風応力τ_{a0}と雨滴応力τ_Rとの関係式

$$\tau_R = \tau_{a0}(\rho_w/\rho_a)(a\,R)/C_{DN10}U_{10} \qquad (1.1)$$

を提案している。ρ_wは雨滴密度(kg/m^3)、ρ_aは空気密度(kg/m^3)、Rは降雨強度(mm/h)、C_{DN10}は海面抵抗係数、U_{10}は 10m 高さ風速、aは海面での雨滴の水平終端速度とU_{10}の比を表し、降雨により生じるせん断応力はこれらのパラメータに大きく依存している。Caldwell and Elliot (1971）は係数aを平均雨滴粒径 2 ㎜を対象として決定し、降雨強度の変化に対応したものではない。また風応力(τ_{a0})は次式である。

$$\tau_{a0} \equiv \rho_a {u_{*0}}^2 = \rho_a C_{DN10} {U_{10}}^2 \qquad (1.2)$$

本研究の目的は飛沫と降雨の影響の両方を考慮した海面抵抗係数の推定を行うことである。台風のような熱帯低気圧下では豪雨や気圧の低下による空気密度の減少が起きているという事を想定し、その効果も加味した検証を行う。2 章では降雨および砕波による飛沫の効果を含む海面抵抗係数の推定式を提案する。3 章では二次元造波水路(風洞型)を用いた実験結果に関する議論を行い、4 章において結論を記す。

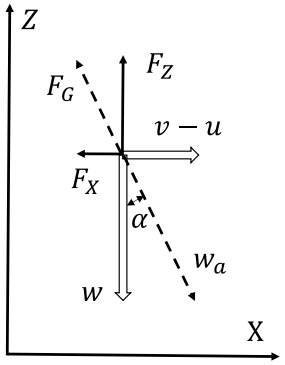

図-1 球形の雨滴が鉛直軸 Z に対して角度 α 方向に終端速度 w_aで落下している様子(Pederesen and Hasholt et al. 1995 を引用)。(w: 雨滴の鉛直速度(m/s)、v: 雨滴の水平速度(m/s)、u: 水平風速(m/s)、F_G: 摩擦抵抗力(N))

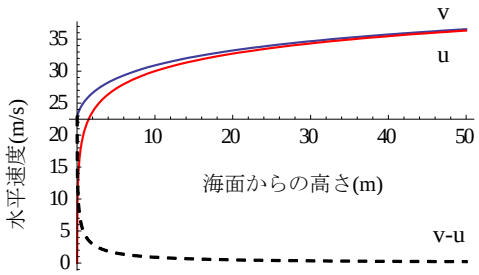

図-2　大気最下層での雨滴の水平速度 v (m/s)と水平風速 u (m/s)の鉛直分布及び、水平風速に対する雨滴の相対速度 v-u(m/s)

2. 海面抵抗係数の推定式

2.1 降雨による影響

大気最下層における水平風速の鉛直分布は対数法則に従い

$$U(z) = (u_{*0}/k)\ln(z/z_0) \qquad (1.3)$$

と表される。ここでkはカルマン定数(=0.40)、Zは海面らの高さ、Z_0は海面粗度(m)、u_{*0}は摩擦速度(m/s)である。　図−1は大気中を通過する雨滴の模式図であり、雨滴の運動方程式は次式とする。

$$F_G = \frac{1}{2}C_d\rho_a {w_a}^2 \frac{\pi}{4}d^2 \qquad (1.4)$$

$${w_a}^2 = w^2 + (v-u)^2 \qquad (1.5)$$

表-1　降雨強度ごとの雨滴が有する水平終端速度(m/s)

		水平風速U10(m/s)							
		5	10	15	20	25	30	35	40
降雨強度(mm/h)	平均粒径(mm)	水平雨滴速度U(z0)(m/s)							
5	0.9	3.42	6.83	10.2502	13.67	17.08	20.5	23.92	27.33
15	1.25	3.66	7.31	10.9676	14.62	18.28	21.94	25.59	29.25
30	1.44	3.8	7.59	11.3904	15.19	18.98	22.78	26.58	30.37
50	1.6	3.89	7.78	11.6833	15.58	19.47	23.37	27.26	31.16
75	1.74	3.97	7.93	11.9	15.87	19.84	23.8	27.77	31.74
100	1.85	4.02	8.03	12.05	16.07	20.08	24.1	28.12	32.13

ここでwは雨滴の終端鉛直速度(m/s)、vは雨滴の終端水平速度(m/s)、uは水平風速(m/s)、F_Gは摩擦抵抗力(N)、C_dは雨滴の空気抵抗係数、w_aは角度α方向への終端速度(m/s)、dは雨滴直径(mm)である。図-2 は球形の雨粒が速度w_aで角度αに落下している様子であり、雨滴が大気最下層を落下する時、雨滴の水平速度が次第に水平風速から逸脱する事を示す。落下中の雨滴にかかる水平と鉛直方向の力のつり合い式は

$$-\frac{1}{2}C_d\rho_a{w_a}^2\frac{\pi}{4}d^2\sin\alpha=\frac{\pi}{6}d^3\rho_wA_h \tag{1.6}$$

$$\frac{1}{2}C_d\rho_a{w_a}^2\frac{\pi}{4}d^2\cos\alpha=-\frac{\pi}{6}d^3\rho_wA_v+\frac{\pi}{6}d^3(\rho_w-\rho_a)g \tag{1.7}$$

である。ここで、A_h、A_vは各々水平加速度(m/s^2)、鉛直加速度(m/s^2)を表す。式(1.7)の右辺第二項は浮力である。また、雨滴が終端速度に達した時、同式は$A_v=0$となり、整理すると

$$\frac{1}{2}C_d\rho_a{w_a}^2\frac{\pi}{4}d^2\cos\alpha=\frac{\pi}{6}d^3(\rho_w-\rho_a)g \tag{1.8}$$

となる。そして図- 1 より

$$w=-dz/dt \tag{1.9}$$

$$\tan\alpha=(v-u)/w \tag{1.10}$$

が得られ、式(1.6)を式(1.8)で割ると次式で表される。

$$-\tan\alpha=\frac{\rho_wA_h}{(\rho_w-\rho_a)g}=-(v-u)/w \tag{1.11}$$

次に式(1.8)から次式を求め、

$$w^2=\frac{\frac{\pi}{6}d^3(\rho_w-\rho_a)g}{\frac{1}{2}C_d\rho_a\frac{\pi}{4}d^2}=\frac{4d(\rho_w-\rho_a)g}{3C_d\rho_a} \tag{1.12}$$

式(1.11)と式(1.12)を組み合わせ整理し、また$A_h=dvdt/$、$w=-dzdt/$であることから次式が得られる。

$$-(v-u)w\frac{3C_d\rho_a}{4d\rho_w}=A_h \tag{1.13}$$

$A_h=dv/dt$、$w=-dz/dt$であることから、式（1.13）にこれらを代入し整理すると次式で表される。

$$\frac{3C_d\rho_a}{4d\rho_w}(v-u)=\frac{dv}{dz} \tag{1.14}$$

表-1 は降雨強度ごとの平均粒径雨滴が有する海面到達時の水平終端速度を意味する。なお、雨滴粒径分布は

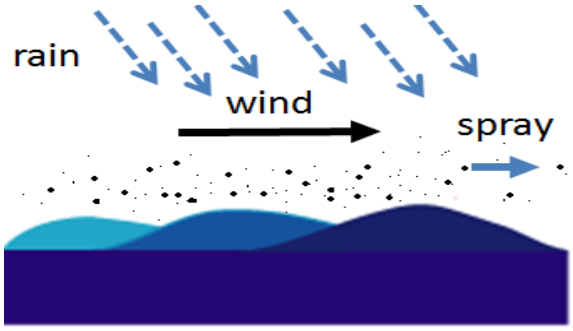

図-3　海洋上における降雨、海面飛沫の模式図

Marshall and Palmer 分布(Marshall and Palmer(1948))を使用している。式(1.2)中の係数 aを

$$a_{new}=v(z_0)/u(10) \tag{1.15}$$

とする。

2.2 降雨と飛沫の効果を加味したせん断応力式

海面近傍における飛沫のせん断応力を加味した風応力$\tau_{a,sp}$は

$$\tau_{a,sp}\equiv\rho_a{u_{*0}}^2=\tau_{a0}(0)+\tau_{sp}(0) \tag{2.1}$$

、海面粗度は

$$z_0=0.0185\,{u_{*0}}^2/g \tag{2.2}$$

、飛沫の応力式(2.3)は Andreas(2004)より

$$\tau_{sp}(0)=6.2\times10^{-5}\rho_w{u_{*0}}^4 \tag{2.3}$$

である。 (2.1)に降雨により生じる雨滴応力を加味すると全応力は次式で表される。

$$\rho_a{u_{*0}}^2=\rho_aC_{D10}{U_{10}}^2+\tau_{sp}(0)+\tau_R(0) \tag{2.5}$$

なお、この状況下における大気は constant stress layer であると仮定している。

2.3 海面抵抗係数式

風速の増加に伴い、従来の液滴効果を無視した海面抵抗係数に飛沫応力を加味した場合、式(2.1)、(2.3)より以下が得られる(Andreas(2004))。

$$C_{D10,sp}=\left[1-6.2\times10^{-5}\left(\frac{\rho_w}{\rho_a}\right){u_{*0}}^2\right]\left[\frac{k}{\ln(10/z0)}\right]^2 \tag{3.1}$$

次に、式(1.1)、(2.3)、(2.5)を用いて飛沫応力と雨滴応力を加味した海面抵抗係数を以下に示す。

$$C_{D10} = \left[\frac{k}{\ln(10/z_0)}\right]^2 - 6.2\times10^{-5}\left(\frac{\rho_w}{\rho_a}\right)\left[\frac{k\,u_{*0}}{\ln(10/z_0)}\right]^2 - k\left(\frac{\rho_w}{\rho_a}\right)\frac{2.7\times10^{-7}\mathrm{R}}{u_{*0}\ln(10/z_0)} \quad (3.2)$$

また熱帯低気圧下における気圧の低下による空気の密度変化を考慮する必要があり、飽和水蒸気圧(es)は

$$es = 6.112\times Exp\left[\frac{17.502t}{t+241.}\right]\times(1.0007+3.505\times10^{-3}p) \quad (3.3)$$

、空気密度は

$$\rho_a = \frac{1.293p}{1+t/273.15}\times\left(1-\frac{3.73\times10^{-4}\mathrm{es}}{p}\right) \quad (3.4)$$

で表される。ここでpは大気圧(hPa)、tは気温(℃)である。

2.4 液滴が水平風速分布式に与える影響

ここで式(1.2)の風応力式から摩擦速度は

$$\tau_a(z) = \rho_a[u_*(\mathrm{z})]^2 \quad (4.1)$$

で定義される。一方で式(1.2)、(2.5)から飛沫と降雨の影響を加味した摩擦速度を

$$u_{*0}(\mathrm{z}) = \left[{u_{*0}}^2 - \frac{\tau_{sp}(0)+\tau_R(0)}{\rho_a}\right]^{1/2} \quad (4.2)$$

で定義する。また一般的には大気境界層における粒子を含む流れは式(4.4)、(4.5)、(4.6)として記述される。

$$\tau_a(z) = \rho_a K_m(z)\frac{dU}{dz} \quad (4.4)$$

$$K_m(z) = ku_*(z)z \quad (4.5)$$

$$K_m(z) = kz\left[{u_{*0}}^2 - \frac{\tau_{sp}(0)+\tau_R(0)}{\rho_a}\right]^{1/2} \quad (4.6)$$

式(4.6)を式(4.4)に代入し、それらを式(2.5)に代入し、整理すると以下の式が得られる。

$$\frac{dU}{dz} = \left(\frac{u_{*0}}{kz} - \frac{\tau_{sp}(0)}{\rho_a kz u_{*0}} - \tau_R(0)\right)\Big/\left[1-\frac{\tau_{sp}(0)+\tau_R(0)}{\rho_a {u_{*0}}^2}\right]^{1/2} \quad (4.7)$$

図-4 は鉛直風速分布を示しており、飛沫に加え雨滴せん断応力の効果を加味することにより、飛沫のみの場合よりも水平風速の鉛直プロファイルがさらに減少することがわかる。

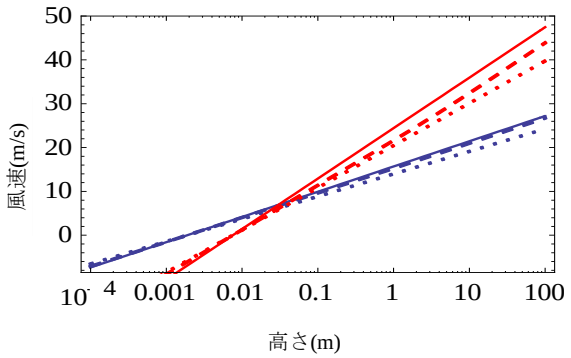

図-4　実線は液滴効果を無視、破線は飛沫の効果のみ、点線は飛沫と降雨両方の効果を加味した風速を示す。赤線はu_* = 1.0(m/s)、青線はu_* = 2.0(m/s)の場合である。ただし気温 27℃、気圧 940hPa、空気密度はρa =1.07[kg/㎥]である。

3. 風洞実験

土木研究所寒地土木研究所にて、ピストン式造波装置が一端に設置された長さ 27.0m、幅 0.6m、高さ 1.5m の二次元造波水路(風洞型）を用いて実験を行った(図-5 参照)。風は造波装置上部に設置された送風機で生成され、送風ガイド板を経由して造波装置前面の送風口から風洞内へ供給される。本実験では水深を 85cm、静水面から風洞カバーまでの距離を 65cm に設定した。鉛直風速分布、波高、表層流速を計測しており、また二台の高速度ビデオカメラを設置し上部カメラで飛沫を撮影した(図-6 参照)。風速は飛沫撮影領域から 80 ㎝風下に設置した超音波式風速計を用いて計測を行った。風速計は昇降可能である。昨年の実験では出力風速 10、12、13、14、15、16m/s の 6 ケース(case1～case6)を、送風のみで実験を実施した。昨年の実験に対して本年度は水深を 95 ㎝に設定し、風洞内空気層を減らし風速を増加したケース(case7)と、送風中に造波装置による 4 パターンの規則波

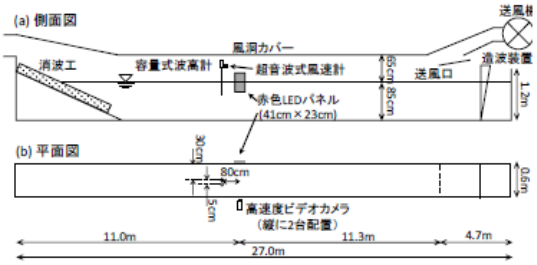

図-5　実験装置

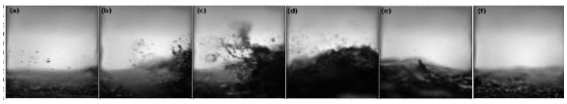

図-6　高速カメラによる飛沫撮影写真。

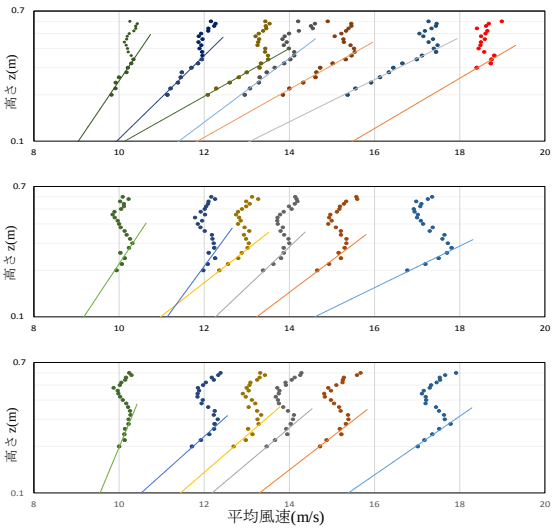

図-7　鉛直風速分布。(上)造波無 (case1～case7)、(中)造波波高 5 ㎝造波周期 0.6～0.8s (case1a～case6a)、(下)造波波高 5 ㎝造波周期 4.6s (case1b～case6b)

表-2　測定結果

実験ケース	z_0 (m)	U_{Ref} (m/s)	U_{10} (m/s)	u_* (m/s)	CD
case1	0.00002	10.3	13.9	0.42	0.00093
case2	0.0002	11.9	17.4	0.64	0.00137
case3	0.0027	13.5	22.9	1.12	0.00237
case4	0.0004	14.0	21.2	0.84	0.00156
case5	0.0014	15.3	24.7	1.11	0.00203
case6	0.0016	17.0	27.7	1.27	0.00209
case1a	0.0002	10.2	15.2	0.43	0.00079
case2a	0.000006	12.2	16.3	0.45	0.00078
case3a	0.0004	13.0	20.1	0.79	0.00156
case4a	0.00006	13.9	19.8	0.66	0.00111
case5a	0.0002	15.3	22.9	0.84	0.00137
case6a	0.0011	17.8	29.3	1.29	0.00193
case1b	0.00000005	10.2	12.6	0.26	0.000438
case2b	0.0002	12.2	18.3	0.68	0.001367
case3b	0.0002	13.3	19.8	0.73	0.001367
case4b	0.0001	14.0	20.4	0.71	0.001207
case5b	0.0001	15.3	21.6	0.75	0.001207
case6b	0.0001	17.8	33.3	1.16	0.001207
case7	0.0003	18.7	28.8	1.11	0.00148

(z_0: 地表面粗度、U_{Ref}: 静水面上 34 ㎝高さ風速(case1～case7)、静水面上26㎝高さ風速(case7)、静水面上28㎝高さ風速(case1a～case6a、case1b～case6b)、U_{10}: 10m 高さ風速、u_*: 摩擦速度、CD: 海面抵抗係数)

を造波したケースで風速計測を行った。本論文では case1a～case6a の造波波高 5 ㎝造波周期 0.6～0.8s の規則波と、case1b～case6b の造波波高 5 ㎝造波周期 4.6s の規則波を造波したものを使用する。造波周期は造波開始前に送風のみの状態で計測された風波のスペクトルピーク周期(0.6～0.8s)に設定したものと実海洋波周期を実験場スケール周期(4.6s)に換算し設定した場合の 2 パターンがあり、波高はそれぞれ 5cm と 10cm の 2 パターンで設定した。case1～case6、case1a～case6a、case1b～case6b は静水面から 20～60 ㎝高さ、case7 は静水面から 20～50 ㎝高さをそれぞれ 2 ㎝間隔で 2 分間計測したものを平均した値である。図-7 は縦軸を対数軸で表示した 2 分間平均風速の鉛直分布である。どのケースでも造波無、有とではプロファイル形状に違いがあり、造波有のケースでは顕著に S 字状のプロファイルが見られた。これは水深 95 ㎝のケースでも同様であった。この形状の理由については考察段階であるが、造波により発生する波が空気層に何らかの影響を及ぼしていると推測される。

4. 結論

図-8 は風速に対応した海面抵抗係数を示し、先行研究と本結果が掲載されている。赤線は本理論による飛沫と雨の効果を加味した結果で降雨強度は 30mm/h である。本理論結果による海面抵抗係数は飛沫の効果のみを加味した結果(Andreas(2004))よりも Powell(2003, 2007)の観測値に沿った値を示している。また本理論式による結論では摩擦速度約 4.0(m/s）(風速 60(m/s))まで議論が行える。さらなる強風速時での海面抵抗係数の推定については今後の課題である。

風洞実験データ解析から得られた海面抵抗係数は、弱風時にはいずれの観測値も本理論結果の赤線もしくは赤点線上に沿う結果となったが、Suzuki and Toba(2011)によりまとめられた先行研究データよりも低めの値をとっているため、本実験と先行実験の条件の違いについて調査を今後行っていきたい。また実験中の最大出力風速時

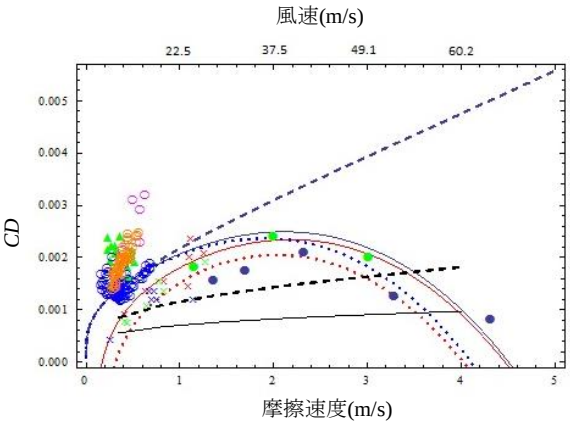

図-8　海面抵抗係数の推定。赤線は本理論による飛沫と雨の効果を加味した結果である。降雨強度は 30mm/h である。点線は空気密度の減少を考慮。赤×：風洞実験結果(case1～case7)。緑×：風洞実験結果(case1a～case6a)。青×：風洞実験結果(case1b～case6b)。Powell(2003,2007)の観測値が青点線や赤実線に沿っている。青破線は液滴効果無視、青線は飛沫の効果のみ(Andreas(2004))。黒実線、黒破線は Soloviev(2010)を参照。その他は引用実験値または観測値(Suzuki and Toba(2011))である。

には case7 の場合、Andreas(2004)の結果に、case6a の場合は本結果赤線に、そして case6b の場合は Soloviev(2010)の結果に近い値となった。しかしながら水深を上げての実験から得られた case7 は対数則が適応可能な範囲が狭すぎるため精度の低さが問題点である(図-7 より)。

白浜観測所で、近年から夏季に台風接近時の気象・海象データ計測を目的とした集中観測を実施している。これに加え、本研究室では観測塔上 10m、15m 地点に飛沫観測装置を、また数 m 高さおきに風速計を設置した。計測結果については今後研究を進めていく予定である。

参考文献

1) D. R. Caldwell and W. P. Elliott. “THE EFFECT OF RAINFALL ON THE WIND IN THE SURFACE LAYER” (1972)

2) J. S. Marshall and W. Mck. Palmer. “The distribution of raindrops with size” (1948)

3) Edgar. L. Andreas. “Spray Stress Revisited” Journal of Physical Oceanography Volume34 (2004):1429-1440

4) Alexander Soloviev and Roger Lukas. “Effects of Bubbles and Sea Spray on Air-Sea Exchange in Hurricane Conditions” (2010)

5) C. W. Fairall et al. “The effect of sea spray on surface energy transports over the ocean” (1994)

6) J. W. .BAO et al. “Parameterization of sea-spray impact on the air-sea momentum and heat fluxes” (2011)

7) James Lighthill. “Ocean spray and the thermodynamics of tropical cyclones” Journal of Engineering Mathematics 35 (1999): 11–42

8) Otsuka et al. “風波砕波下の飛沫と気泡の童子画像計画” 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2 (2013)

9) 鈴木靖・鳥羽良明 ”風波飽和度の概念に基づく海面摩擦係数測定データの再評価” 京都大学防災研究所年報 第 54 号 B (2011)