

桜島火山におけるパーシベルによる降下火山灰の観測

PARSIVEL Tephra-fall Observations at Sakurajima Volcano

小園誠史⁽¹⁾・三輪学央⁽²⁾・眞木雅之⁽³⁾・前坂 剛⁽²⁾・味喜大介・井口正人

Tomofumi KOZONO⁽¹⁾, Takahiro MIWA⁽²⁾, Masayuki MAKI⁽³⁾, Takeshi MAESAKA⁽²⁾,
Daisuke MIKI and Masato IGUCHI

(1) 東北大学大学院理学研究科

(2) 防災科学技術研究所

(3) 鹿児島大学地域防災教育研究センター

(1) Graduate School of Science, Tohoku University, Japan

(2) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan

(3) Research and Education Center for Natural Hazards, Kagoshima University, Japan

Synopsis

The diameter and the fall velocity of tephra fall at Sakurajima volcano were measured on-site by a laser-optical Particle Size Velocity (PARSIVEL) disdrometer. Using the measured diameter and fall velocity, we obtained an empirical diameter-velocity relationship and a particle size distribution for tephra fall. The size distribution is explained by an exponential distribution as a first-order approximation. On the basis of high time resolution (each minute) measurements data, we found that both the diameter and the fall velocity of tephra fall systematically decrease with time. These results are useful for comparison with radar observations, and provide constraints on the dynamics of eruption column and tephra dispersion.

キーワード: 降下火山灰, パーシベル, 粒径分布, 桜島火山

Keywords: tephra fall, PARSIVEL, particle size distribution, Sakurajima volcano

1. はじめに

火山噴火における噴煙の放出現象は、火山周辺地域への降灰などの直接的な被害をもたらすため、火山防災の観点からもその現象のメカニズム理解が重要となる。京都大学防災研究所一般共同研究「気象レーダによる噴煙の実態解明と火山防災」では、気象レーダによる観測に基づき、噴煙現象のメカニズムを明らかにすることを目的の一つとしている。レーダのようなリモートセンシングによる観測の定量性や実証性を評価する際には、他手法によるより直接的な観測データとの比較が必要となる。レーダに

よる気象観測においては、雲などの観測対象物内の「粒径分布」が重要な推定可能量として挙げられる(e.g., 深尾・浜津, 2005)。噴煙を対象としたレーダ観測では、噴煙内の火山灰の粒径分布に関する情報を得られる可能性があるため、その観測との比較において、地表に降下してくる火山灰の粒径分布の測定が、重要な観測要素の一つとして挙げられる。

一般的に降下火山灰の粒径分布を測定するには、噴火中に降下火山灰を系統的に収集した後、実験室での篩分けなどによって粒径の測定をすればよいが、数分から十数分程度の時間間隔でほぼリアルタイムに取得されるレーダデータとの比較を行うには、よ

り高時間分解能で降下中の火山灰の粒径分布を直接測定することが求められる．気象分野においては，降雨・降雪粒子などを直接測定するディストロメータ（disdrometer）とよばれる観測装置が既に数多く開発・実用化されており（e.g., Joss and Waldvogel, 1967; Löffler-Mang and Joss, 2000; Kruger and Krajewski, 2002），レーダによる気象観測のデータ解析にも大きく貢献している．そこで本研究では，光学式のディストロメータであるパーシベル（PARSIVEL）を用いて，活発な噴火活動を継続している桜島火山の島内において降下火山灰を測定し，火山灰の粒径分布を高精度で求めることを目的とした．桜島ではKaバンドレーダを用いた噴煙観測が行われたことから，このレーダ観測データとの比較を可能にするために，本研究の測定も同時期に並行して実施した．

2. 手法

本研究では，降下火山灰の粒径分布を測定するために光学式ディストロメータのパーシベル（Parsivel2, ドイツOTT社製; Löffler-Mang and Joss, 2000）を使用した．パーシベルは，波長780 nmのレーザーによって， 180×30 mm (54 cm^2) の測定領域を粒子が通過する際に生じる電圧変化を検知し，それに基づき粒子の直径と落下速度を測定する装置である．粒径 $0.062 \sim 24.5$ mm，速度 $0.05 \sim 20.8 \text{ m s}^{-1}$ の間の範囲において，それぞれ32クラスに分類して測定することができるが，有意な最小検出限界は粒径約0.2 mm，速度約 0.2 m s^{-1} である．測定時間間隔は10秒から60分まで設定できるが，本研究ではレーダ観測の時間分解能も考慮して1分に設定した．桜島におい

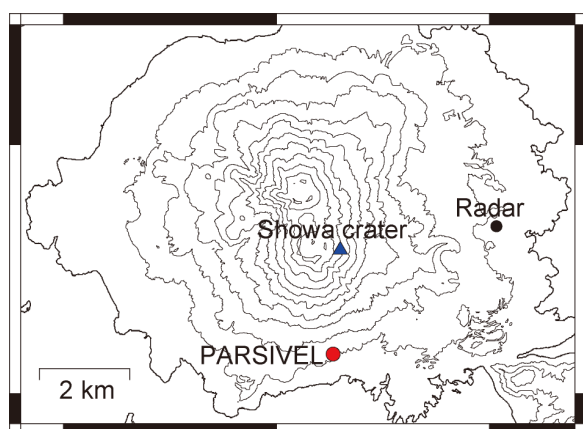


Fig. 1 Topographic map of Sakurajima volcano, with the location of Showa crater (blue triangle), and the observation sites of PARSIVEL (red circle) and Ka-band radar (black circle).

て実施されたKaバンドレーダによる噴煙観測の期間と合わせて，本研究では2014年3月19日から5月24日までパーシベルを桜島島内に設置し，連続測定を行った．レーダによって観測できる噴煙の分布方向や，噴火口からの距離，電源の供給が可能であることなどを考慮して，昭和火口の南2.35 km付近に位置する京都大学防災研究所の古里観測点にパーシベルを設置した（Fig. 1）．

3. 結果

観測期間中において，気象庁による桜島の噴火リストと照合することによって，2014年4月7日の3:00，5月10日の13:07，16:57，5月23日の10:26，10:33，21:20における少なくとも6回の噴火に伴う降灰を測定したことを確認した（Fig. 2a）．いずれの噴火でも，降灰量自体は降水量換算で激しい降雨時の場合よりも非常に少ないが，Kaバンドレーダでも観測に成功した5月10日13:07の噴火では，噴煙高度が4,500 mに達し，且つ噴煙が南方に流れてパーシベル設置点を

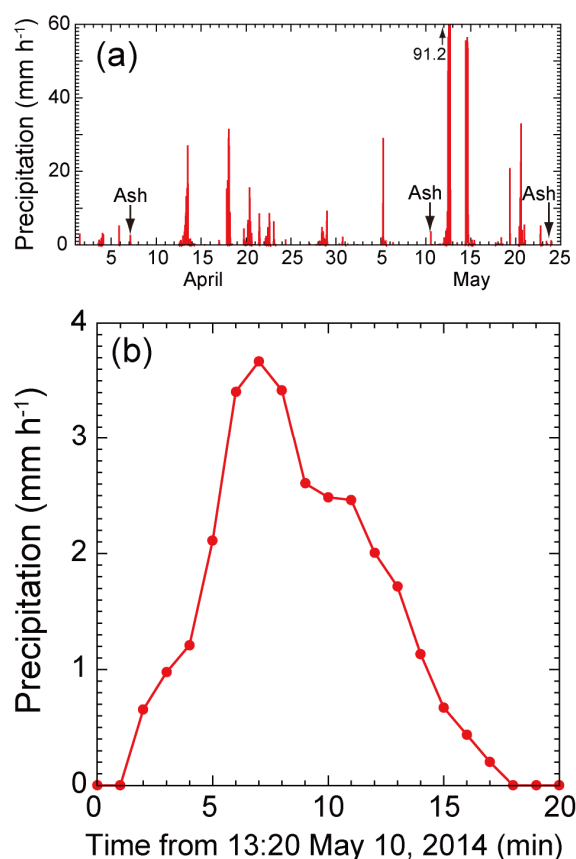


Fig. 2 (a) Time-series variations of precipitation during the period from April 1 to May 24, 2014 measured by PARSIVEL. (b) Enlarged view for a tephra fall event during the period from 13:22 to 13:37 on May 10.

通過したこともあり、降下火山灰の詳細なデータを得ることに成功した。Fig. 3に、5月10日の噴火においてKaバンドレーダで観測された噴煙のレーダ反射強度のPPI画像（眞木ら，2014）を示しており、噴煙のほぼ中心部がパーシベル設置点を通過していることがわかる。以下では、この噴火における測定結果の詳細について報告する。

5月10日13:07の噴火に伴う降灰は、パーシベルによって13:22～13:37の間に検知され、13:27に降灰量がピーク値をとることがわかった（Fig. 2b）。Fig. 4に、この期間における降下火山灰の粒径と落下速度の個数分布を示している。粒子の大部分は粒径2 mm以下、落下速度5 m s⁻¹以下であり、また粒径が大きいほど速度が大きくなるという正の相関がみられる。粒径と速度の関係は、大気中での降水粒子に関する経験式として知られるAtlas et al. (1973)の経験式($V = 9.65 - 10.3 \exp(-0.6D)$; V : 速度(m s⁻¹), D : 粒径(mm))に概ね一致するが、1 mm以下の範囲では、ある粒径に対してAtlas et al. (1973)の式よりもわずかに速度が大きいく傾向がある。測定データに対して最小二乗法によるフィッティングを行った結果、Atlas et al.

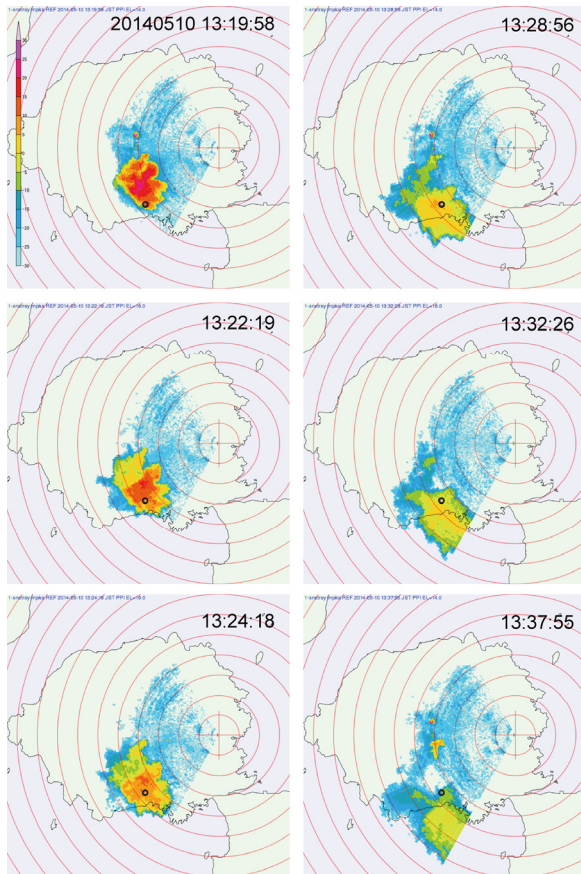


Fig. 3 PPI images of radar reflectivity of eruption clouds from the Sakurajima eruption on May 10, 2014, obtained from Ka-band radar observations. Circles show the observation site of PARSIVEL.

(1973)の式を参考にして $V = 8.64 - 8.47 \exp(-0.6D)$ ($R = 0.70$), 冪乗則に基づき $V = 4.04D^{0.83}$ ($R = 0.69$)の経験式を得た。

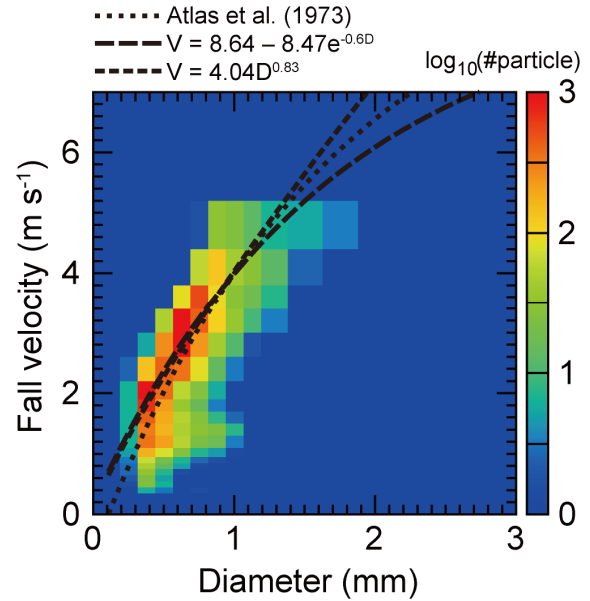


Fig. 4 A distribution of the number of ash particles during the period from 13:22 to 13:37 on May 10, 2014, in the parameter space of fall velocity and particle diameter. An empirical equation of velocity-diameter relationship for raindrops by Atlas et al. (1973), and least-square fitting curves for the data are also shown.

粒径と落下速度および粒子数のデータから、降下火山灰の粒径分布を推定することができる。粒子サイズ D に対する粒径分布 $N(D)$ は、サイズ区間幅当たりの粒子数濃度として $N(D) = n/(v\delta D\delta S\delta t)$ によって計算される。ここで n は粒子数、 v は落下速度、 δD はサイズ区間の幅、 δS は測定面積、 δt は測定時間である。Fig. 5に、Fig. 4のデータから求められた粒径分布を示している。ここで、同じ粒径でも落下速度が異なる場合があるため、各粒径クラスにおける平均速度を落下速度として用いることによって、代表的な粒径分布を求めた（Fig. 5の赤丸）。Fig. 4で求められた速度と粒径に関する経験式を用いた場合でも、ほぼ同様の粒径分布が得られた。平均速度を用いた粒径分布に対して、雨滴の粒径分布の式としてよく知られたMarshall-Palmer分布（Marshall and Palmer, 1948）などのように指数分布によるフィッティングを行ったところ、 $N(D) = 4.75 \times 10^5 \exp(-5.29D)$ ($R = 0.69$)の結果を得た（Fig. 5の実線）。この粒径分布をレーダデータの解析に活用することができる。

本研究ではさらに、1分間隔の高時間分解能で粒径と落下速度を測定したため、粒径と速度の詳細な時間変化を捉えることに成功した。Fig. 6に、粒径と速

度の個数分布の1分毎の時間変化を示しており、時間とともに粒径および速度が系統的に小さくなっていることがわかる。各時間における粒径と速度の平均値からも、この系統的变化を確認することができ、また4月7日や5月23日の他の噴火事例で取得されたデータでもこの特徴が共通して見られることがわかった (Fig. 7)。

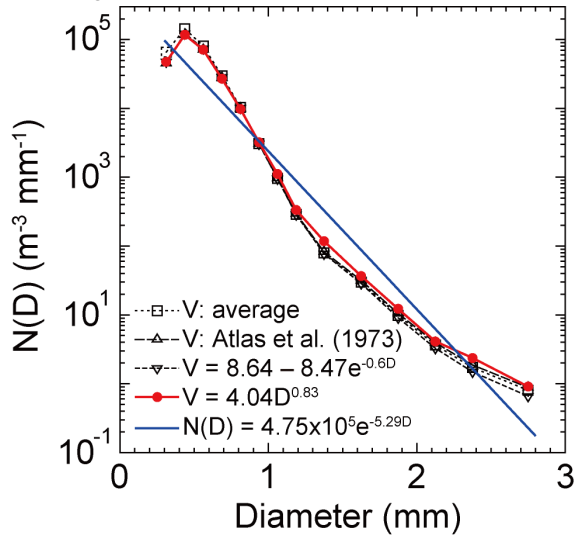


Fig. 5 Particle size distributions $N(D)$ of the tephra fall calculated using average fall velocity at each particle class (red), and a least-square exponential fitting line for these values (solid line). The values of $N(D)$ calculated using the empirical velocity-diameter relationships in Fig. 4 are also shown.

4. 議論

本研究ではパーシベルを用いて降下火山灰の粒径および落下速度を測定することに成功したが、一方で球形ではない降雪粒子のような粒子をパーシベルで計測する場合、大きな測定誤差が生じることが指摘されている (Battaglia et al., 2010)。この誤差は複雑な形状をもつ火山灰の観測でも生じ、それが粒径分布の推定結果などに影響を与える可能性があるため、詳細な室内実験や、2-DVDなどの他のディストロメータによる観測との比較によって、誤差の影響を今後評価する必要がある。

高時間分解能の測定によって得られた、粒径と落下速度が系統的に小さくなる時間変化の要因としては、粒径に依存した、上空の噴煙から離脱して地表に達するまでの間における落下速度の違いの効果や、噴煙からの離脱の時間差の効果などが挙げられる。これらの効果を考慮することで、粒径と落下速度の時間変化のデータに基づき、噴煙から火山灰が離脱する高度の推定などが可能であり、現在解析を進め

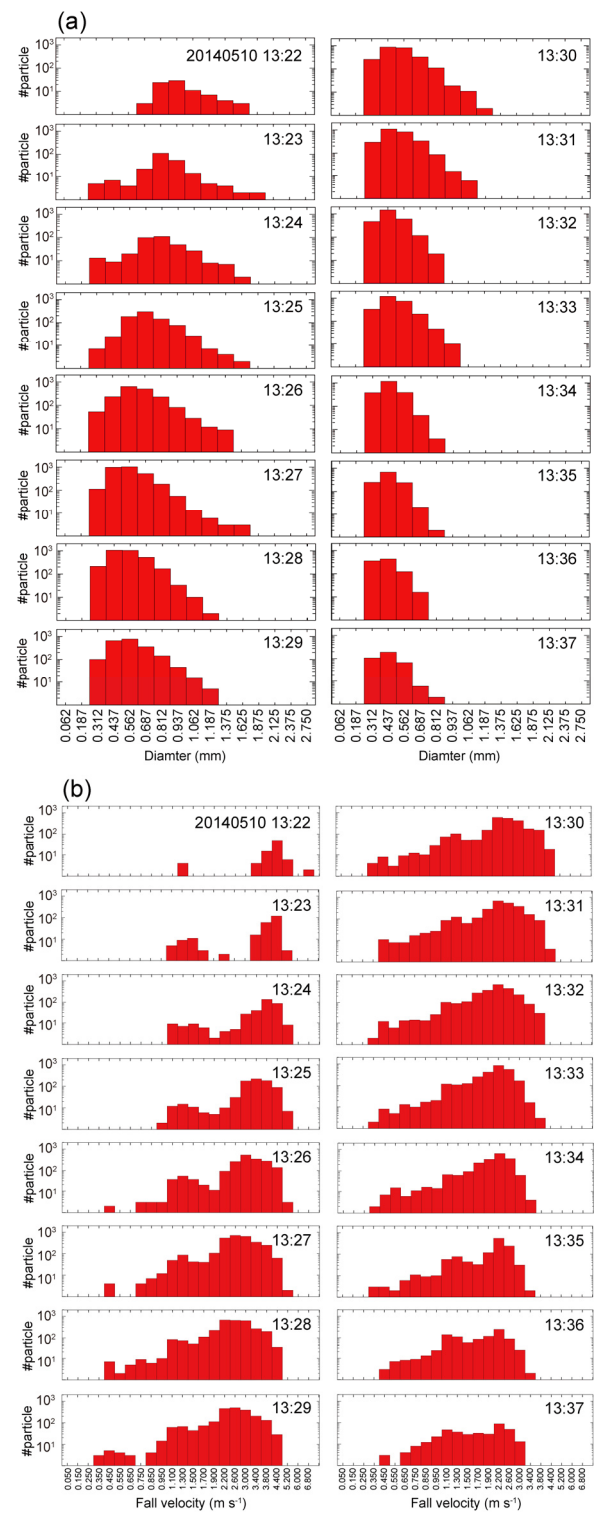


Fig. 6 Distributions of (a) particle diameter and (b) fall velocity, obtained each minute during the period from 13:22 to 13:37 on May 10, 2014.

ている。この粒径と落下速度の特徴的な時間変化は複数の噴火事例で共通して見られることから、噴煙や火山灰拡散のダイナミクスに制約を与える重要な観測結果になる可能性がある。

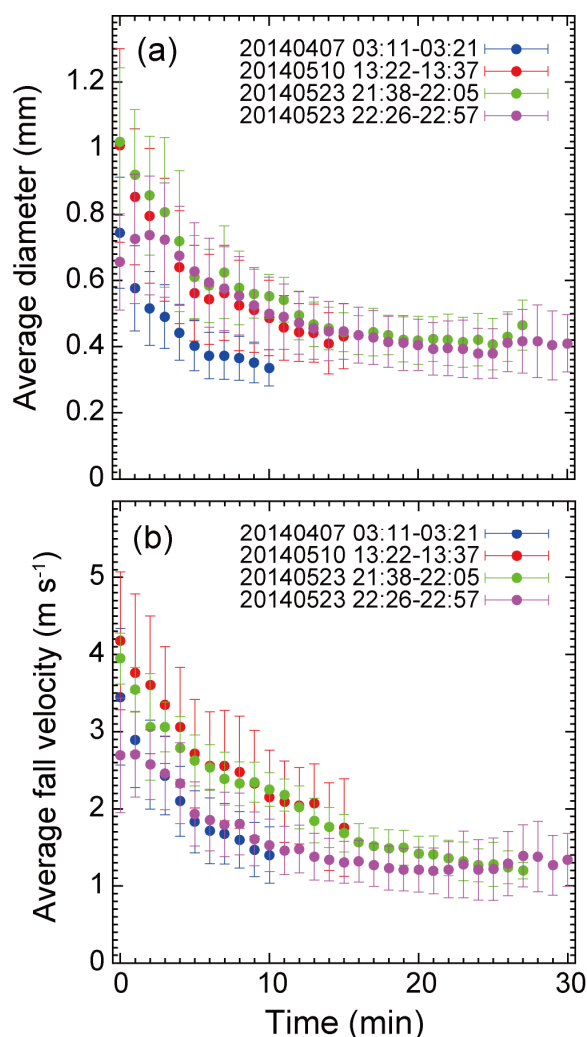


Fig. 7 Time-series variations of (a) average particle diameter and (b) average fall velocity for four tephra-fall events in April and May, 2014. Error bars show $\pm 1\sigma$ standard deviation.

5. おわりに

本研究では光学式のディストロメータであるパーシベルを用いて、桜島における降下火山灰の測定を実施した。その結果、Kaバンドレーダでも観測された2014年5月10日の噴火における火山灰の粒径と落下速度を高精度で測定することに成功した。その観測データをもとに落下速度と粒径の関係を求め、さらにレーダデータ解析においても重要となる火山灰の粒径分布を求めた。また、粒径と落下速度の1分毎の時間変化を測定することによって、粒径と速度が時間とともに系統的に小さくなる特徴があることを明らかにした。今後は、この粒径と速度の時間変化に関する詳細な解析や、レーダデータとの定量的な比較、他噴火事例の解析に取り組む予定である。

謝 辞

桜島における計測機器の設置および観測においては、京都大学防災研究所火山活動研究センターの皆様、および現・鹿児島大学の平嶺浩氏に多大なるご協力を頂きました。本研究の遂行にあたっては、京都大学防災研究所一般共同研究費（課題番号：25G-11）、防災科学技術研究所運営費交付金、JSPS科研費24244069の助成を受けました。記して感謝いたします。

参考文献

- 深尾昌一郎・浜津享助 (2005): 気象と大気のレーダーリモートセンシング, 京都大学学術出版会, 502p.
- 眞木雅之・井口正人・藤田英輔・前坂剛・出世ゆかり・小園誠史・桃谷辰也・山路昭彦 (2014): 気象レーダによる桜島火山噴煙の観測, 日本火山学会2014年秋季大会講演予稿集, C1-09.
- Atlas, D., Srivastava, R. S. and Sekhon, R. S. (1973): Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence, *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol. 11, pp. 1–35.
- Battaglia, A., Rustemeier, E., Tokay, A., Simmer, C. and Blahak, U. (2010): PARSIVEL snow observations: A critical assessment, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 27, pp. 333–344.
- Joss, J. and Waldvogel, A. (1967): A spectrograph for the automatic analysis of raindrops, *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 68, pp. 240–246.
- Kruger, A. and Krajewski, W. F. (2002): Two-dimensional video disdrometer: A description, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 19, pp. 602–617.
- Löffler-Mang, M. and Joss, J. (2000): An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 17, pp. 130–139.
- Marshall, J. S. and Palmer W. M. (1948): The distribution of raindrops with size, *J. Meteor.*, Vol. 5, pp. 165–166.

(論文受理日：2015年6月11日)