Scientific and Educational Reports of the Faculty of Science and Technology, Kochi University Vol. 5 (2022), No. 5

人工降雨装置が生成する雨粒と自然降雨の比較

中 陽・村田 文絵・笹原 克夫(高知大学理工学部)

要旨

高知大学には土砂災害の発生機構を明らかにするために使われている人工降雨装置があ る。人工降雨装置の生成する雨粒は、放水ノズルの高さや放水時の水圧といった物理的な制 約を受ける。この装置が生成する人工降雨と自然降雨の特徴を、光学式雨滴粒度分布計を用 いて比較した。自然降雨のデータとして高知市五台山にある牧野植物園で実施した 2016-2018年の観測データを用いた。人工降雨は直径 0.5~1 mm程度の雨滴が多く、数は自然降雨 のものより約 10~40 倍多くなった。つまり、人工降雨は自然降雨に比べて直径が小さい雨 粒を多く降らせることで対応する同じ降水強度の雨量を得るという結果となった。

キーワード:人工降雨、スプレー型人工降雨装置、自然降雨、雨滴粒度分布

はじめに

人工降雨装置は土砂災害の発生機構の解明や予測、森林内の土壌の雨滴侵食機構の解明、 マイクロ波やレーザー光の降雨減衰特性の調査等を目的として使われている。しかし、人工 降雨の雨滴粒径や落下速度が自然降雨とどの程度異なっているのかについての調査はほと んど行われていない。真木ら(2005)は防災科学技術研究所の大型降雨実験装置における人工 降雨の特徴について、ろ紙、衝撃力測定タイプのディスドロメータ、二次元ビデオディスド ロメータの3種類を使って観測を行った。そのうち二次元ディスドロメータの結果から、降 雨実験施設内の雨滴粒度分布は小さな雨滴が非常に多い分布で、天然の雨で観測される粒 径分布と大きく異なることを明らかにした。

高知大学では、土砂災害の発生機構の要因分析や発生予測手法を研究するために、小規模 な模型斜面を作り、人工降雨装置を使って斜面への雨が浸透して地下水が貯まる過程やそ れに伴う斜面の変形を調査している。その中で通常考えられる雨の性質は降水強度のみで ある。一方、斜面崩壊の発生には、土層の水理特性や強度等の物理特性に関する様々な要因 が影響を及ぼしている(e.g. 堤と藤田 2008)。雨滴の大きさと落下速度の違いは、地面に与え る衝撃力を変える。例えば Agassi et al. (1994)は、土壌表面が雨滴衝撃を受けると「クラス ト」と呼ばれる浸透を妨げる被膜が生成され、雨滴衝撃が大きいほど浸透能が低くなると述 べている。このように雨滴粒度分布は土層の物理特性等への変化を通して土砂災害の発生 機構にも影響を及ぼしている可能性がある。

本研究では、高知大学が保有する小型の人工降雨装置と光学式雨滴粒度分布計を用いて、 人工降雨装置が生成する降水の雨滴粒径を観測した。観測結果を高知市五台山で観測した 自然降水の観測結果と比較し、今後の人工降雨装置を用いた研究の解釈や改良に役立つ情 報を得ることを目的とする。

使用データ

雨滴粒度分布とは単位体積中に存在する雨滴の粒径ごとの雨滴数濃度のことである。 雨滴粒度分布を得るためにOTT社の光学式雨滴粒度分布計 Parsivel²を使用した。それぞ れ 32 クラスの粒径と落下速度のマトリクスにおける雨滴数の分布を観測する。自然降雨の 観測地点は、高知市牧野植物園(北緯 33 度 32 分 47.7 秒、東経 133 度 34 分 40.4 秒)で、 2016 年 1 月から 2018 年 12 月までの 3 年間のデータを用いた。時間分解能は 1 分である。

一方、人工降雨実験は、高知大学笹原研究室が所有する人工降雨装置に Parsivel²を設置 し実験を行った(図1)。雨を降らせるノズルが2つあり、ノズル間の水平距離は約1mであ った。2つのノズルの中央真下約1m下の位置に Parsivel²の観測領域を設置した。使用した ノズルはスプレーイングシステムスジャパン株式会社のFulljet スプレーノズル・広角ス プレーで、流量サイズは1.5Wのものを用いた。ノズルの水量は水圧計で制御される。水圧 は0.01~0.02MPa、0.05MPa、0.1MPa、0.2MPa、0.3MPaの5段階で変更し実験した。

雨滴粒度分布N(D)の導出は以下の式①で求めた。ここで n_{ij} は速度クラス j、粒径クラス i における雨滴数、A (mm²) は観測領域の面積、 Δt (s) は観測時間、 D_i (mm) は粒径クラス i に対応する直径、 ΔD_i (mm) は粒径クラス i に対応する直径クラス間隔、 V_j (m/s) は速度 クラス j に対応する落下速度である。この時、 $N(D_i)$ (mm⁻¹m⁻³) は粒径クラスごとの雨滴数 濃度を示す。

$$N(D_{i}) = \sum_{j=1}^{32} \frac{n_{ij}}{A \cdot \Delta t \cdot V_{j} \cdot \Delta D_{i}} \cdots (1)$$

本研究では雨滴粒度分布のパラメータとして中心粒径 Δ と一般化切片パラメータ Mv を用いた。Δ (mm)は雨滴粒度分布における粒径の代表値、Mv は雨滴粒度分布における雨滴数の代表値とみなすことができる。Δ (mm)は、粒径分布の高次モーメントの定義式(式 ②)の3次と4次のモーメントより求められる(式③)。

$$\begin{split} m_{n} &\equiv \int_{0}^{\infty} D^{n} N(D) \, dD & \cdots @ \\ D_{m} &= \frac{m_{4}}{m_{3}} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{m_{4}}{m_{3}} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{4^{4}}{m_{9}} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{4^{4}}{\pi \rho_{w}} \left(\frac{W}{D_{m}^{4}} \right) & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{4^{4}}{\pi \rho_{w}} \left(\frac{W}{D_{m}^{4}} \right) & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{2} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots @ \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots & \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6} \sum_{i=1}^{32} N(D_{i}) D_{i}^{3} \Delta D_{i} & \cdots & \\ \hline D_{m} &= \frac{\pi \rho_{w}}{6}$$





図 1 実験の様子と模式図。雨を降らせるノズルは 2 個ある (写真中の赤丸)。赤四角で囲 まれた装置がParsivel²である。

結果

図 2 と 3 は、横軸を雨粒の直径、縦軸を雨滴の落下速度とした 1 分あたりの平均分布を 示す。図 2 は人工降雨の結果で、それぞれ水圧が(a) 0.01-0.02MPa、(b) 0.05MPa、(c) 0.1MPa、 (d) 0.2MPa、(e) 0.3MPa の場合の結果である。図 3 は自然降雨の結果で、それぞれ降水強度 が(a) 15 mm/h 以上、(b) 35~45 mm/h、(c) 75~85 mm/h の場合の結果である。図 3 (b) の自然降 雨の降水強度が人工降雨の図 2 (a) に対応する。また、図 3 (c) の自然降雨の降水強度が人工 降雨の図 2 (b) ~ (e) に対応する。図 2 及び図 3 における黒実線は下記の式⑥で表される雨粒 粒径と落下速度の経験式 (Atlas et al. 1973) である。

$w(D) = 9.65 - 10.3 \exp(-0.6D) \cdots 6$

ここで式⑥のw(D)は落下速度(m/s)、Dは雨粒の直径(mm)である。図2の人工降雨では、 どの水圧でも式⑥の速度に達しないものが多く存在し、直径は 1.0 mm程度かそれ以下であ る。水圧を高くしていくと、直径の分布の広がりが小さく、また速度の分布の広がりが大き くなるように遷移する。加えて水圧が高くなるにつれて、直径2mmを超える雨粒はほとんど 見られなくなる。一方で自然降雨の結果は、式⑥に沿うような分布となっており、どの場合 でも直径1mm~2mm程度に雨粒が多く存在する。降水強度が強い雨は、直径2mm以上の大き



な雨粒も比較的多く存在し、直径の分布の広がりは人工降雨と比べて大きくなる。

図2 横軸を雨粒の直径、縦軸を雨粒の落下速度とした人工降雨実験における1分間平均値 のマトリクス。(a) は水圧 0.01-0.02MPa、(b) は水圧 0.05MPa、(c) は水圧 0.1MPa、(d) は 水圧 0.2MPa、(e) は水圧 0.3MPa の実験結果をそれぞれ示す。黒実線は式⑥で表される経験 的な雨滴落下速度(Atlas et al. 1973)を示し、陰影は雨粒の多さを表す。右下の枠内は各 データの平均降水強度を示す。



図 3 図 2 と同様の自然降雨における一分間平均値のマトリクス。(a) は降水強度 15 mm/h 以上、(b) は降水強度 35~45 mm/h、(c) は降水強度 75~85 mm/h の自然降雨の結果をそれ ぞれ示す。

図4と図5は、図2と図3の平均分布についてそれぞれ直径ごとに雨滴数を集計し、各 粒径クラスの雨滴数の全体に占める割合をヒストグラムで示す。図4の人工降雨は直径1.0 mm未満の範囲に全体の80%以上が存在する。1mm以上の雨粒の割合は水圧が高くなると減少 する。一方、図5の自然降雨は、直径1mm程度と1.5mm程度の2つのピークが存在する。人 工降雨のような、特定の直径に集中するような分布ではなく、大きい雨粒と小さい雨粒が混 在するような分布となる。



図 4 図 2 の人工降雨について直径ごとの雨滴数を集計し、その割合を示したヒストグラム。(a) は水圧 0.01-0.02MPa、(b) は水圧 0.05MPa、(c) は水圧 0.1MPa、(d) は水圧 0.2MPa、(e) は水圧 0.3MPa の実験結果をそれぞれ示す。



図 5 図 3 の自然降雨について直径ごとの雨滴数を集計し、その割合を示したヒストグラム。(a) は降水強度 15 mm/h 以上、(b) は降水強度 35~45 mm/h、(c) は降水強度 75~85 mm/h の自然降雨の結果をそれぞれ示す。



図 6 人工降雨と自然降雨の Q_m-log₁₀ M 散布図。人工降雨の結果は紫色の丸点で表し、水圧 0.01~0.02MPa、0.05MPa、0.1~0.3MPa 時をそれぞれ示す。一方、自然降雨の結果は四角の 点で表し、降水強度 15mm/h 以上を緑色、15mm/h 未満を青色で示す。また、特に水圧 0.01~ 0.02MPa 時の人工降雨に対応する降水強度 35~45mm/h の自然降雨、及び水圧 0.05MPa 及び 0.1~0.3MPa 時の人工降雨に対応する降水強度 75~85mm/h の自然降雨の結果をそれぞれ黄 色と赤色の四角の点で示す。

図 6 は、実験で観測した人工降雨と牧野植物園で観測した自然降雨より式③、④で得られる 1 分ごと D_m 、 $log_{10}N_e$ を用いた D_m - $log_{10}N_e$ 空間の散布図を示す。自然降雨において、降水強度 15 mm/h 以上の雨は、 D_m は 1 mm以上で $log_{10}N_w$ は概ね 3~5 の範囲に存在する。一方、降水強度 15 mm/h 未満の雨は、 D_m も $log_{10}N_w$ も分布の幅が広くなっている。それに対して人工降雨は、 D_m が 1 mm前後、 $log_{10}N_w$ が 5~6.5 程度の分布となる。また、水圧が高くなるほど D_m がより小さく、 $log_{10}N_w$ がより大きくなり自然降雨の分布から離れる。

考察

人工降雨は明らかに雨滴粒径と落下速度の経験式(Atlas et al. 1973)の落下速度を下 回るような分布をしていた(図 2)。一方、真木ら(2005)は、防災科学技術研究所(防災科 研)の降雨実験装置を用いて人工降雨の落下速度を計測し、経験式から求まる落下速度に近 い結果を示している。防災科研の実験装置の放水ノズルは地上から 16m の高さにある。一 方、本研究で用いた降雨実験装置のノズルの高さは 1m 程度である。防災科研のノズルの高 さと比較すると、研究対象のノズルの高さは明らかに低いことがわかる。高さ不足によって 雨粒が終端速度に達することなく観測領域に落ちてきたため、経験式で求まる落下速度よ り遅い部分に雨滴が集中したと考えられる。

人工降雨は、低圧時は観測される雨滴粒径の分布が相対的に広がる一方で、高圧時は雨滴の落下速度の分布が相対的に広がる傾向がみられた(図 2)。図7に人工降雨実験時の(a)高 圧時(水圧 0.2~0.3MPa)と(b)低圧時(水圧 0.01~0.02MPa 及び 0.05MPa)における放水ノズ ルからの放水の様子の模式図を示す。高圧時は、ノズルからの噴出角度が大きくなるため、 雨滴同士の衝突が起こりにくく、かつ噴出角度によって雨滴の落下速度が変わると考えら れる。一方、低圧時は、噴出角度が狭いため雨滴の落下速度が比較的均一になる一方で、降 水領域が狭く、雨滴同士の衝突併合が起こりやすいため、相対的に大きい雨滴の数が多くなると考えられる。



図7 人工降雨実験の降水の様子の模式図。黒丸は放水ノズル、青の実線は放水の軌跡、 黄色の長方形は Parsivel の観測領域、赤曲線は放水角度を示す。(a) は高圧時(0.2, 0.3MPa)、(b) は低圧時(0.01-0.02, 0.05MPa)の場合を示す。

測定された雨粒の分布は、人工降雨は雨滴粒径1mm未満にピークがあり、1mmを超える と急激に割合が少なくなる(図4)。一方、同程度の降水強度の自然降雨は直径1mm程度と 1.5mm程度にピークを持ち、大きい雨粒の割合が大きい(図5)。つまり、人工降雨は小さ い雨粒を数多く含む雨である一方、自然降雨は雨滴数が人工降雨より1~2桁以上少な く、その分大きい雨滴を含んで同程度の降水強度をもつ雨である。このように、本研究で 用いた人工降雨装置が作る雨は自然降雨と多くの異なる特徴を持っていた。

そこで、以下に人工降雨装置の雨を自然降雨の雨滴粒度分布に近づけるための考えられる工夫を3点挙げる。1点目はノズルの高さの変更である。眞木ら(2005)の大型人工降雨装置の結果を参照すると、ノズルをより高い位置に設置することで、自然降雨の落下速度により近づくと考えられる。2点目は異なる口径を持つ複数のノズルの使用である。図2~5より、自然降雨に比べ人工降雨は粒径の大きい雨粒が少ない。ノズルの口径によってつくられる雨滴直径の大きさが制約を受けると考えられるため、最初から自然降雨で観測される粒径を生成する異なる口径の複数のノズルを使用し、放水直後から自然降雨に近い粒径分布をつくる。また、3点目は最適な水圧に固定することである。現在の人工降雨装置は、水圧計で降水強度を制御しているが、低圧時と高圧時で放水形態が変わる(図7)。高圧になるにつれて、降水強度が強くなるのではなく降水領域が広がっていた。そこで、自然降雨に近い雨を再現するためには、水圧で降水強度を制御するのではなく、最適な水圧に固定する必要がある。今回はParsivel²の観測領域を固定して実施した実験結果に対して考えられる改良点を述べた。模型斜面にわたって自然降雨に近い雨を再現するのが理

想的であり、面的に自然降雨に近い雨の人工降雨装置を用いた再現について、今後検討が 必要と考えられる。

まとめ

本研究は光学式雨滴粒度分布計 Parsivel²を用いて、高知大学の人工降雨装置で再現され る人工降雨の特徴を自然降雨と比較した。人工降雨は、放水ノズルの高さ不足により、雨粒 の落下速度が自然降雨に比べて小さく、終端速度に達していなかった。また、人工降雨は同 程度の降水強度をもつ自然降雨と比べて、雨滴数が数十倍多い一方で、自然降雨が含む直径 2mm以上の雨滴はほとんどみられなかった。さらに、人工降雨の降水強度を調節するために 放水ノズルの水圧を変化させるが、Parsivel²の観測領域内における降水強度は水圧 0.05MPa以上でほとんど変化しなかった。これは水圧が高い時にノズルからの放水角度が広 がったためと考えられる。また、水圧が高くなるほど、同程度の自然降雨の降水強度にみら れる大きな雨粒が減り、また雨滴数が自然降雨と比べて1-2桁大きくなり、自然降雨と異な る雨滴粒度分布となった。自然降雨は人工降雨装置で再現される同程度の降水強度の降雨 と比べてより大きな雨粒を含み落下速度が大きいことから、自然降雨は人工降雨装置の降 雨をより自然降雨に近づけることで、土層の水理特性や強度等の物理特性をより自然に近 い状態で再現し、土砂災害の発生機構をより現実的に評価できる可能性がある。

謝辞

自然降雨の観測は高知県牧野植物園のご協力の下、資源植物研究センターの屋上に設置 して実施しました。ここに謝意を表します。

参考文献

Agassi M., D. Bloem, and M. Ben-Hur, 1994: Effect of drop energy and soil and water chemistry on infiltration and erosion, *Water Resources Research*, **30**, 1187-1193. Atlas, D., R.C. Srivastava and R.S. Sekhon, 1973: Doppler radar characteristics of

precipitation at vertical incidence, *Rev. Geophys.*, **11**, 1-35.

深尾昌一郎,浜津亨助,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*,143-150.

井上章二, 1980: 人工降雨装置による斜面侵食に関する研究(I), *日林九支研論*, **33**, 319-320.

真木雅之,森脇寛,佐藤照子,V.N. Bringi,M. Schönhube,播磨屋敏生,2005:防災科学 技術研究所大型降雨実験施設の雨滴粒径分布,*北海道大学地球物理学研究報告*,68,31-50.

Löffler-Mang, M. and J. Joss, 2000: An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 130-139.

恩田裕一編,2008:人工林荒廃と水・土砂流出の実態, 岩波書店,245pp.

Tokay, A., D. B. Walff and W. A. Petersen, 2014: Evaluation of the new version of the laser-optical disdrometer, OTT Parsivel², *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 31, 1276-1288.

堤大三,藤田正治,2008:斜面崩壊過程に与える土層の物理特性の影響に関する検討,水 工学論文集,52,565-570.