

# 樹冠遮断で発生する飛沫水滴の直接測定の可能性 —降雨中大量蒸発のメカニズム解明に向けて—

森林総合研究所 九州支所 村上茂樹

## 1. はじめに

樹冠遮断による蒸発（以下、単に樹冠遮断と呼ぶ）のほとんどは降雨中に起きており（村上, 2012）、13mm/hに達することもある（Hashino et al., 2010）。しかし、相対湿度  $RH$  の高い降雨中にこのような大量の蒸発が起きるメカニズムは解明されていない。また、樹冠遮断は雨量に比例して増加することも知られているが、なぜ雨量と樹冠遮断が比例関係にあるのかも不明である。

Murakami (2006)は雲物理学の知見に基づき、雨滴が樹冠に衝突して発生する飛沫が蒸発するとの説を提唱した。例えば自由落下する直径  $10\mu\text{m}$ （典型的な霧粒の粒径）の水滴は  $RH=95\%$ 、気温  $20^\circ\text{C}$  ではわずか1.8秒で蒸発・消滅することから、高湿度下での大量蒸発を説明できる。さらに、雨量（雨滴数）が多いほど飛沫の発生が多くなるため、雨量とともに樹冠遮断が増加することも説明できる。飛沫蒸発を間接的に支持する研究はいくつかあるが、飛沫の粒径分布を直接測定した例はなく、飛沫蒸発の研究は進んでいない。雲物理学の研究分野で使われる測器を用いれば、直径  $0.2\sim 100\mu\text{m}$  の小水滴（エアロゾル）の粒径分布は測定可能であるが、上記のように飛沫粒径が  $10\mu\text{m}$  程度の場合は  $RH=95\%$  でも短時間のうちに蒸発・消滅するため、通常、測定は困難と考えられる。また、飛沫の移動速度は風速の影響をうけるため、粒径分布の測定を行うに際しては、風速の影響との関連において、飛沫の終端速度も検討しておく必要がある。

本研究では飛沫粒径を  $50\mu\text{m}$  以下と仮定し、その寿命と終端速度の温度・湿度・粒径依存性を見積もることにより、既存の測器で飛沫蒸発に関わる雨滴飛沫の粒径分布が測定可能かどうかを検討する。

## 2. 方法

自由落下する小水滴を考える。その粒径が約  $50\mu\text{m}$  以下の場合、小水滴の周囲の空気の流れは層流となり、Stokesの式を用いて終端速度、及びその緩和時間（終端速度の  $1-1/e = 0.63$  倍に達するまでの時間）を算出できる。小水滴の蒸発速度はHolterman (2003, 39ページの式(54))の近似式で計算する。この近似式では蒸発速度は水滴の初期粒径、及び乾球温度と湿球温度の差だけの関数となっている。以上の方法を用い、粒径  $2\sim 50\mu\text{m}$  の水滴について気温を  $10\sim 25^\circ\text{C}$ 、 $RH$  を  $95\sim 99.9\%$ （降雨中を想定）に変化させたときの蒸発・消滅に要する時間（寿命）と緩和時間を計算する。

## 3. 結果

図1に粒径  $2\sim 50\mu\text{m}$  の水滴の終端速度を、図2に緩和時間を示した。終端速度は  $0.1\sim 76\text{mm/s}$ 、緩和時間は  $0.1\sim 78\text{ms}$ （ミリ秒）であり、粒径  $50\mu\text{m}$  までの水滴は極めて短時間に終端速度に達する。なお、終端速度も緩和時間も温度と湿度にはほとんど依存しない。図3に小水滴の寿命を示した。 $RH$  が一定の下では寿命の温度依存性は小さい。しかし、寿命の  $RH$  依存性と粒径依存性はいずれも極めて大きい。気温  $15^\circ\text{C}$  で粒径  $2\mu\text{m}$  の場合、 $RH=95\%$  では寿命が  $0.09\text{s}$ 、 $RH=99\%$  では  $0.44\text{s}$ 、 $RH=99.5\%$  では  $0.88\text{s}$ 、 $RH=99.9\%$  では  $4.4\text{s}$  と  $RH$  が飽和に近づくとともに寿命は

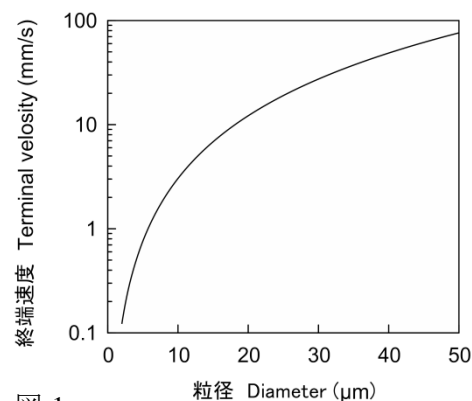


図 1

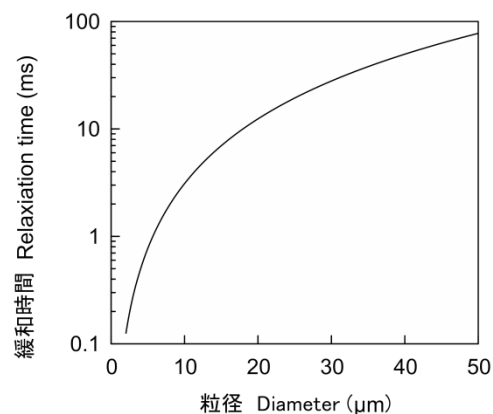


図 2

大幅に延びる。また、粒径が $2\mu\text{m}$ の場合と $50\mu\text{m}$ の場合では寿命がそれぞれ $0.09\text{s}$ 、 $48\text{s}$ と大きく異なる。

#### 4. 考察

粒径 $50\mu\text{m}$ までの飛沫水滴は極めて短時間に終端速度に達するため、周囲の空気の流れに乗って移動する。すなわち、飛沫発生時の水滴の初速度が大きくても、極めて短い時間に終端速度にまで減速する(Holterman, 2003)。従って、飛沫水滴の蒸発速度は風速に依存しない。

Murakami (2006)は $RH=95\%$ では粒径 $50\mu\text{m}$ の水滴は落下距離約 $2\text{m}$ で蒸発・消滅するとしている。より大きな粒径ではこれよりも寿命が延びるので、蒸発・消滅の前に水滴が林床に到達し、蒸発効率が落ちる。また、高さ約 $2\text{m}$ の農作物においても森林と同様に降雨の2割程度の樹冠遮断が測定されていることから(van Dijk and Bruijnzeel, 2001)、樹冠遮断が主に飛沫蒸発で生じているなら、その粒径は数 $10\mu\text{m}$ 以下と考えられる。

前述のように、粒径が小さい水滴は計測される前に消滅してしまうことが懸念される。しかし、図3のように $RH$ が飽和に近いと寿命が延びて水滴が測器のセンサーに到達するまで生き延びる。計測を長期間続ければ $RH$ が飽和に近い条件下(霧が発生するような場合)でのデータ収集が期待でき、粒径が $\mu\text{m}$ オーダーの飛沫水滴についての粒径分布も測定可能であると考えられる。

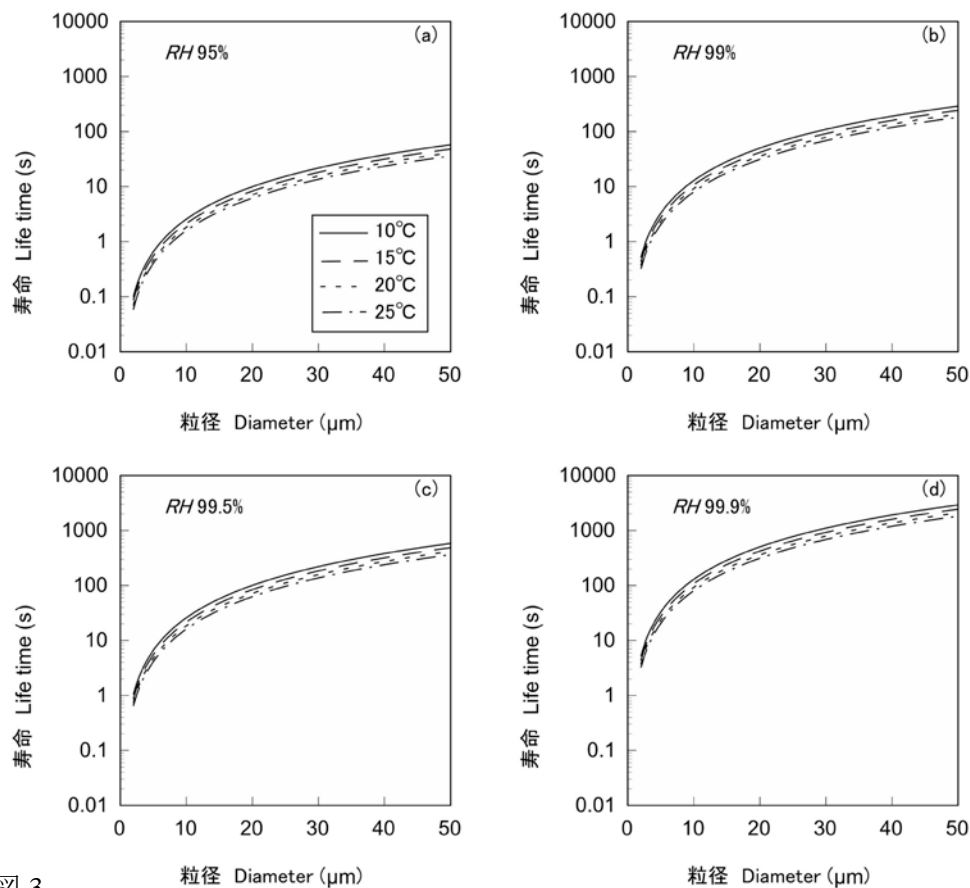


図 3

#### 引用文献

- Hashino, M., Yao, H., Tamura, T. 2010 *J. Water Resource and Protection*, 2, 872-879.  
Holterman, H.J. 2003 IMAG, Wageningen, The Netherlands. 67 pp.  
Murakami, S. 2006 *J. Hydrol.* 319, 72-82.  
村上茂樹 2012 水利科学, 324, 82-99.  
van Dijk, A. I. J. M., Bruijnzeel, L. A. 2001 *J. Hydrol.* 247, 239-262.

キーワード：樹冠遮断、飛沫蒸発、小水滴