

音響を利用して雨と雪を判別しながら降水量を計測できる装置の開発

石川県立大学生物資源環境学部 藤原洋一

要旨

冬季の積雪量が多い北陸地域において、降水形態（雨や雪等）を正確に判別することが可能であり、かつ安価な融雪装置を開発することが課題となっている。本研究は、雨雪間の衝突音の違いや安価な IC レコーダーの普及に着目し、音響特性に基づいて降水形態を判別する機能を開発することを目的に行った。低温実験室において、IC レコーダーとヒーターを内蔵した空き缶を設置した。空き缶に向けて 5 タイプの粒（あられ、水滴大、水滴小、結晶形の雪、球形の雪）を 3m の高さから落とし、衝突音を記録した。解析を始めるに当たり、各録音データから冒頭の 5 秒間を取り出した。波形の振幅が基準値より大きい部分（シグナルデータ）を抽出し、振幅が小さかった部分（ノイズデータ）を除去した。5 つの粒タイプで合計 89 個のシグナルデータが得られ、それらを無作為に 2 つ（同定期間 45 個、検証期間 44 個）に分離した。期間ごとにシグナルデータの特徴量（14 種類）を算出した。同定期間のシグナルデータを用いて粒タイプを判別するアルゴリズムを作成し、それらの精度を検証期間のシグナルデータを用いて検証した。アルゴリズムにはサポートベクターマシン、決定木、ランダムフォレストの 3 つのモデルを使用した。ランダムフォレストを用いた場合が最も判別精度が高く（68.2%）、決定木（61.4%）とサポートベクターマシン（54.6%）の順であった。

1. はじめに

降雪量の多い北陸地域では、冬季の融雪・除雪作業は必要不可欠であり、スプリンクラー等の融雪装置の設置や、除雪機を利用した作業等が行われている。現在一般的に使用されている融雪装置の多くは、気温が基準値以下になると自動で作動して地下水等を散水する。積雪時に確実に作動させるために基準温度を高く設定することが可能であるが、エネルギーや水の損失が多くなる。

融雪装置の作動制御において、降水形態（雨や雪等）の判別は重要である。従来では降水形態の自動判別には、温度や誘電率、粒径・落下速度が指標として用いられてきた（黒岩 1951）。しかし、いずれの指標を用いた場合も問題があることから、安価で導入することが可能であり、降水形態の判別精度が高く、降雪に対して速やかに作動する装置を開発することが重要な課題となっている。

降水形態によって音に差異があることは、感覚的に理解することができる。また、雨と雪はそれぞれ、特異的な音響特性をもつことが示されている（岩瀬 1997；上田ほか 2010）。これらのことから、音響特性に基づいて雨と雪を客観的に判別することの可能性が推察される。さらに、現在では安価な IC レコーダーが普及している。もし音に基づいて降水形態を自動的に判別する装置を開発することができれば、従来の判別装置よりも安価に増産することができ、融雪装置の増設等に貢献することができるかもしれない。本研究は、このような融雪装置の開発を念頭において、音響を利用して降水形態を判別する方法を開発することを目的に行った。

2. 方法

2. 1 衝突音の録音

降水形態（あられ、雪、雨）ごとの衝突音を記録するため、（国立研究開発法人）防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所の雪氷防災実験棟（山形県新庄市）で実験を行った。実験に先立ち、ICレコーダー（SD-901、オリンパス株式会社）を付けた空き缶（ブリキ製、縦22cm×横22cmの正方形、高さ6~8cm、モロゾフ株式会社）を実験室の床の上に設置した（図1）。ICレコーダーは、録音モード：MP3形式（256kbps）、40~17000Hzに設定した。空き缶の裏側にはヒーター（サミコン230SR100-150V、坂口電熱株式会社）を付け、缶の上に落ちたあられと雪が速やかに溶けるようにした。

実験に使用するために5タイプの粒（あられ、雪2種類（A・B）、水滴2種類（小・大））を作成した。あられと雪は雪氷防災実験棟の装置で人工的に作成されたものを使用した。あられは粒径4mm以上、雪Aタイプは結晶形で粒径0.5~5mm、雪Bタイプは球形で粒径約0.025mmである（防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所2015）。水滴は注射器を使用して作成し、針なしで作成したものを水滴大、針ありで作成したものを水滴小とした。

ICレコーダーで録音しながら、高さ3mの位置から空き缶の中央に向けて、あられ、雪A、雪B、水滴大、水滴小を順に落下させた。あられは一粒ずつ、合計50粒を落下させた。雪A・Bはいずれもスプーンで一杯ずつ、合計20杯を落下させた。水滴大・水滴小は注射器を使用して1滴ずつ、それぞれ合計50粒を落下させた。以上の落下作業を3セット繰り返した。

2. 2 解析方法

ICレコーダーで録音したデータをパソコンに取り込み、高速フーリエ変換をして周波数領域に変換した。その後、wavファイル形式で保存し、統計ソフトのRに読み込んだ。これ以降の作業・解析はすべてR上で行った。あられを1、水滴大を2、水滴小を3、雪Aを4、雪Bを5と定義した。なお、これら5種類の粒タイプごとに3セットの音データがあり、合計は15データとなった（表1）。次に、落下実験開始から5秒経過時点までのデータ（5秒間）を取り出し、それを各データの代表として扱った。seewaveパッケージのtimer関数（threshold=4.5%）を使用し、波形の振幅が最大値の4.5%未満である範囲を除去した。この作業によって振幅が4.5%以上の部分（シグナルデータ）と無音、もしくは微小なノイズ音の部分（ノイズデータ）が分離され、ノイズデータが除去された。このとき、除去されたノイズデータが0.275秒未満であった場合、前後のシグナルデータは一つのものとして扱った。同時に、シグナルデータが0.275秒以上離れていた場合、別のシグナルデータとして扱った。この作業によって15個のデータは合計89個のシグナルデータに分割された。

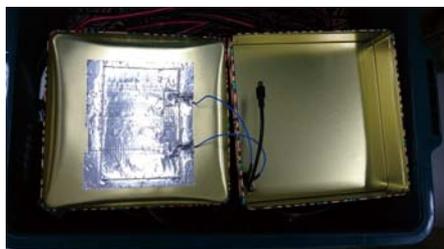
続いて各シグナルデータの特徴量を算出した。seewaveパッケージのspecprop関数を使用し、14個の特徴量を算出した。特徴量は、周波数スペクトラムの平均値、標準偏差、標準誤差、中央値、優占的な周波数、第一四分位数、第三四分位数、四分位範囲、重心（centroid）、歪度、尖度、平坦さ（spectral flatness measure）、エントロピー、精密周波数（frequency precision）である（Sueur et al. 2016）。

次に、特徴量に基づいて粒タイプを予測するためのアルゴリズムを作成した。まず、シグナルデータを無作為に二つに分けた。一つはアルゴリズムを作成するためのシグナルデータ（同定期間）として使用し、もう一方は、作成されたアルゴリズムの精度を検証するためのシグナルデータ（検証期間）として使用した。

同定期間のシグナルデータを使って、粒タイプを予測するアルゴリズムを作成した。アルゴリズムとして、サポートベクターマシン、決定木、ランダムフォレストの三つの解析を使用した。いずれも機械学習を行って予測モデルを構築するアルゴリズムである。サポートベクターマシンは、各データとの最

短距離が最大となる超平面を作成し、データを分割する。決定木は、データを属性値テストに基づいて部分集合に分割し、樹状構造で表記する。ランダムフォレストは、ブートストラップサンプルを行って相関の低い決定木を多数作成し、集団・機械学習を行う。

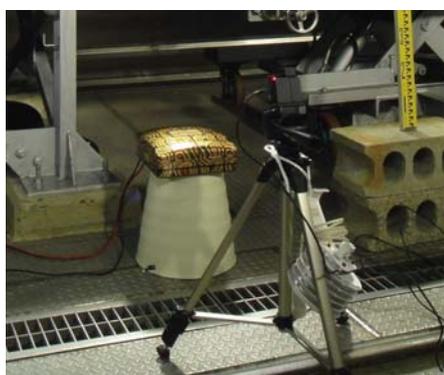
検証期間のシグナルデータを使って、各アルゴリズムの予測精度を求めた。また、同定期間を用いた場合の予測精度も確認した。



空き缶の裏に設置したヒーター



あられ



設置した空き缶



雪 A



落下作業の様子



雪 B



雨粒として使用した水滴小 (左)・大 (右)

図 1 実験に用いた装置や粒、作業風景の写真。

3. 3 結果および考察

アルゴリズムの予測精度の検証結果を表 1 に示す。検証期間を用いた場合の予測精度はサポートベクターマシンが 54.6%、決定木が 61.4%、ランダムフォレストが 68.2%であった。また、予測精度と 95%信頼区間ともに、ランダムフォレストが最も高かった。これらの結果から、本研究で用いたアルゴリズムの中ではランダムフォレストが最も優れていたことが示された。

決定木分析の結果、粒タイプを判別するのに有効な特徴量として、周波数スペクトラムの中央値と標準偏差、平均値、四分位範囲が選択された。このうち、中央値と標準偏差は統計的に有意であった（中央値： $P < 0.01$ 、標準偏差： $P < 0.05$ ）。この結果は、中央値と標準偏差が粒タイプ（降水形態）を判別する予測因子として適していることを示唆している。

野外では降水の衝突音は、降水量や音源からの距離、積雪量、地表面の材質、風の強さ等によって変化する（岩瀬 1997；細川・藤波 2012；橋本ほか 2017）。今後、本研究の成果を基にして、野外で有効なアルゴリズムの開発を進める必要がある。また、音響特性に基づいて降雨量を推定する手法が開発されており（細川・藤波 2012）、本研究で開発したアルゴリズムについても、さらに改良することで粒タイプの判別と同時に降水量を推定することが可能になると考えられる。

表 1 各アルゴリズムの精度の検証結果。予測精度と 95%信頼区間はパーセンテージで示した。SVM はサポートベクターマシン、DT は決定木、RF はランダムフォレストを示す。

| (a) 同定期間 | | | (b) 検証期間 | | | | |
|----------|-------|------------|----------|-----|------|-----------|---------|
| | 予測精度 | 95%信頼区間 | P 値 | | 予測精度 | 95%信頼区間 | P 値 |
| SVM | 77.8 | 62.9-88.8 | >0.0001 | SVM | 54.6 | 38.9-69.6 | 0.1447 |
| DT | 75.6 | 60.5-87.1 | >0.0001 | DT | 61.4 | 45.5-75.6 | >0.05 |
| RF | 100.0 | 92.1-100.0 | >0.0001 | RF | 68.2 | 52.4-81.4 | >0.0001 |

5. 引用文献

防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所（2015）雪氷防災実験棟
http://www.bosai.go.jp/seppyo/jikkentou/ces_youran.pdf

橋本龍朋・有岡和奏・大久保朱理・小松 颯・横山有太・高田 拓（2017）衝突音による雨の分類のための基礎実験結果. 独立行政法人国立高等専門学校機構高知工業高等専門学校学術紀要, 62: 55-62.

細川茂樹・藤波香織（2012）プローブ傘による降雨マップシステムの作成手法に関する研究. 情報処理学会第 74 回全国大会要旨, 145-146.

岩瀬昭雄（1997）積雪の音響特性と音響伝搬特性に及ぼす影響. 日本雪工学会誌, 13: 33-40.

黒岩大助（1951）積雪の誘電的性質. 低温科学, 8: 1-57.

Sueur J, Simonis C, Brown EC, Desjonqueres C, Gasc A, Marchal J, Villanueva-Rivera L, Witthoft CG (2016) Sound analysis and synthesis. <https://cran.r-project.org/web/packages/seewave/seewave.pdf>

上田麻理・平栗靖浩・藤本一寿（2010）視覚障害者のための傘の降雨騒音低減に関する基礎的検討: 傘の雨滴衝撃音の音響特性について. 日本音響学会誌, 66: 265-269.