

衝突音による雨の分類のための基礎実験結果

橋本龍朋^{*1}・有岡和奏^{*2}・大久保朱理^{*3}・小松 颯^{*1}・横山有太^{*4}・高田 拓^{*5}

Experimental Results of Rain Classification by Collisional Sound

Ryuto HASHIMOTO, Wakana ARIOKA, Akari OKUBO,
Sou KOMATSU, Yuta YOKOYAMA and Taku TAKADA

Summary

To better understand rain, audio measurement is as important as visual measurement. The main factors of the sound of rain are the sounds generated by the collision of raindrops with the ground or a manmade structure. Raindrop sound is related to size, velocity and surface density of raindrops. In this study, we made an observational system which can record collisional sounds of drops of water. By using this measurement system, we investigate the relationship between the sounds, size and surface density of raindrops by analyzing and comparing the collisional sounds of artificial raindrops with actual sounds of rain. As a result of analyzing the basic sounds obtained from one drop of water, it became clear that characteristic peaks appear near 0.9 kHz and 2 kHz. When a drop of water was dropped down continuously, wave spectra included the additional peaks of lower frequency near 0.2 kHz and higher frequency more than 10 kHz. Further we examined the waveform of actual rain sounds. Because of small raindrop size, however, a clear waveform was not obtained. In order to classify the relationship between the sounds and the surface density of raindrops, further experiments and analysis are needed.

1. 序 論

日本は、その国土の大半が温暖湿潤気候に属する「雨」の多い国である。また、四季の変化も大きいため一口に雨と言っても様々な降り方がある。古来、日本人は雨に様々な名前を付けて区別してきた。この区別は“季節”と“降り方”の2つに大別される。季節で区別した例として、春先にしっとりと降り続く雨を「春雨」、6月から7月にかけての雨の季節を「梅雨」と呼ぶ。降り方で区別した例としては、数日間

表1 雨の強さと降り方

| 雨の強さ | 1時間雨量 (mm) | 人の受けるイメージ |
|---------|------------|------------------------------|
| やや強い雨 | 10~20 | ザーザーと降る。 |
| 強い雨 | 20~30 | どしゃ降り。 |
| 激しい雨 | 30~50 | バケツをひっくり返したように降る。 |
| 非常に激しい雨 | 50~80 | 滝のように降る。 |
| 猛烈な雨 | 80~ | 息苦しくなるような 圧迫感。 恐怖を感じる。 |

気象庁HPより抜粋

¹ 高知工業高等専門学校 電気情報工学科 2年生
² 高知工業高等専門学校 物質工学科 2年生
³ 高知工業高等専門学校 環境都市デザイン工学科 2年生
⁴ 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 講師
⁵ 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 准教授

しとすと降り続く「地雨」や、短時間に集中して激しく降る「村雨（叢雨）」などがある。この他にも、一時的に降ったり止んだりする「時雨」、霧のように細かい雨である「霧雨」など雨の呼び名は非常に多くの種類があり、日本人の雨に対する愛着や感性の豊かさが窺い知れる。一方、天気予報などで用いられる雨の種類は、一般に雨の強さ（1時間雨量）によって表1のように決められている¹⁾。しかし、天気予報で「やや強い雨」と言われていても、実際には同じ雨量の雨でも違いがあるように感じる。

雨の特徴を物理的に考えてみると、雨粒の大きさ、単位面積・単位時間あたりの雨粒の個数（雨粒の面密度）、雨粒の落下速度の3要素で構成される。これに加えて各々の雨の時間変化が雨の特徴を決めていると考えられる。図1に雨粒の3要素を示す。このように雨粒の大きさ、雨粒の面密度が大きく、さらに雨滴の落下速度が速いほど雨の降り方は強く感じられる。雨粒の大きさと雨粒密度を乗じたものが雨量として認識される。また、雨粒の大きさと落下速度には、落下中の抵抗力とのつり合いから終端速度として表される関係がある。

$$v_f = \frac{\rho V g}{c r} = \frac{4\pi r^2 \rho g}{3c}$$

v_f : 終端速度 ρ : 水の密度 V : 雨粒の体積（球形と仮定）
 g : 重力加速度 c : 比例定数 r : 雨粒の半径

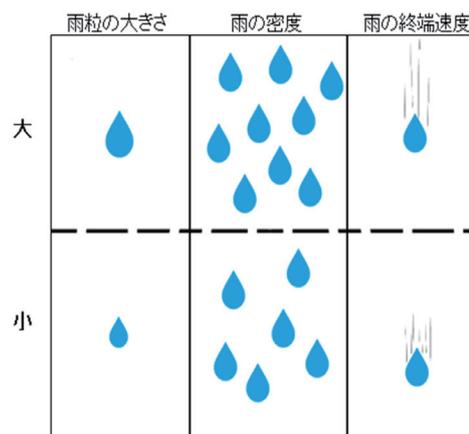


図1 雨の強さを決める3要素

一方で、人が雨の違いを認識するとき、視覚とともに重要なのは聴覚によるものである。雨音の主な要因は雨粒が地面や家屋などに衝突するとき生じる音であり、雨粒の大きさや落下速度、雨粒密度に関係すると考えられる。雨音に関する先行研究として、視覚障害者の聴取妨害を抑えるために傘の雨滴衝突音の特性などが調べられている²⁾。また、傘に衝突した雨音の周波数スペクトルから雨量を推定する研究も行われている³⁾。ただし、人工雨と自然雨の違いや、衝突面の素材、衝突角度などが複雑に関係しており、自然雨の雨音から雨の特徴量を精度よく推定するにはさらなる検討が必要である。そこで本研究では、雨音を収集することのできる装置を考案し、高所から水滴を落下させた場合の衝突音と実際の雨音の波形や含まれる周波数成分を解析・比較することにより、雨音と雨粒の大きさ、雨粒の面密度の関係性を探る。

2. 実験方法

本研究ではまず、雨を構成する水滴1滴による衝突音の集音・解析を行った。次に、水滴1滴の連続落下、および多数の水滴の連続落下の場合の衝突音の集音・解析を行い、最後に自然雨の衝突音を測定し、人工的に水滴を落下させた場合との比較を行った。以下で、開発した集音装置の概要と実験方法および音声データの解析方法について説明する。

2.1 雨音の集音装置の製作

図2は、製作した装置の概観である。運搬を容易にするために、キャ

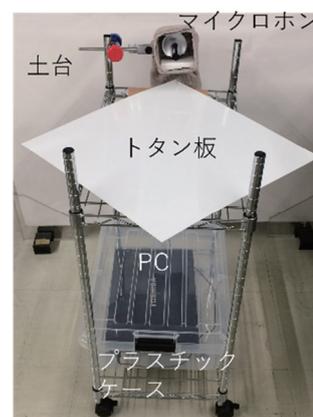


図2 実験装置の外観

スタ付きのメタルラックを土台とした。装置は二段構造で、上部には雨音を観測するための衝突板（3種類使用）と衝突板の振動がラックに伝わらないように木の土台を板の下に置き、直接水滴に当たらないよう保護したマイクロホン(MMP-04)を配置する。下部には、マイクロホンと接続したPCを置く。PCは雨など外部からの影響を受けないようにプラスチックケースで覆った状態にしておく。

2.2 水滴衝突音の測定

落下させる水滴は、じょうろやスポイト、穴をあけたペットボトルを用いて形成した。図3にそれぞれの写真および穴径を示す。雨音の基本的な波形を確認するため、小さな穴（直径1.1 mm）を1つ空けたペットボトル（小）、スポイト（直径2.1 mm）、大きな穴（直径2.5 mm）を1つ開けたペットボトル（大）を用いて水滴を1滴のみ落下させる実験を行った。自然雨での雨粒の大きさは、一般に直径0.2 mm～6 mmであることが知られている。また、人工雨の雨粒は、水滴落下孔より若干大きくなると考えられる。次に、同じ大きさの水滴が1滴ずつ連続落下する場合の衝突音の波形を確認した。その後、じょうろ、小さな穴が複数空いたペットボトル、大きな穴が複数空いたペットボトルを用い、多滴が連続落下する場合の衝突音の波形を確認した。最後に、自然雨の衝突音を測定し、人工的に水滴を落下させた場合との比較を行った。

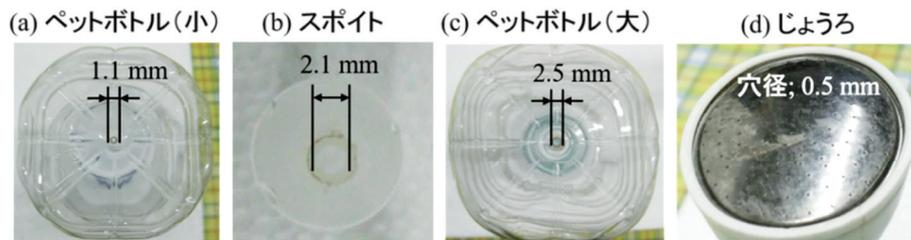


図3 水滴落下孔の大きさ

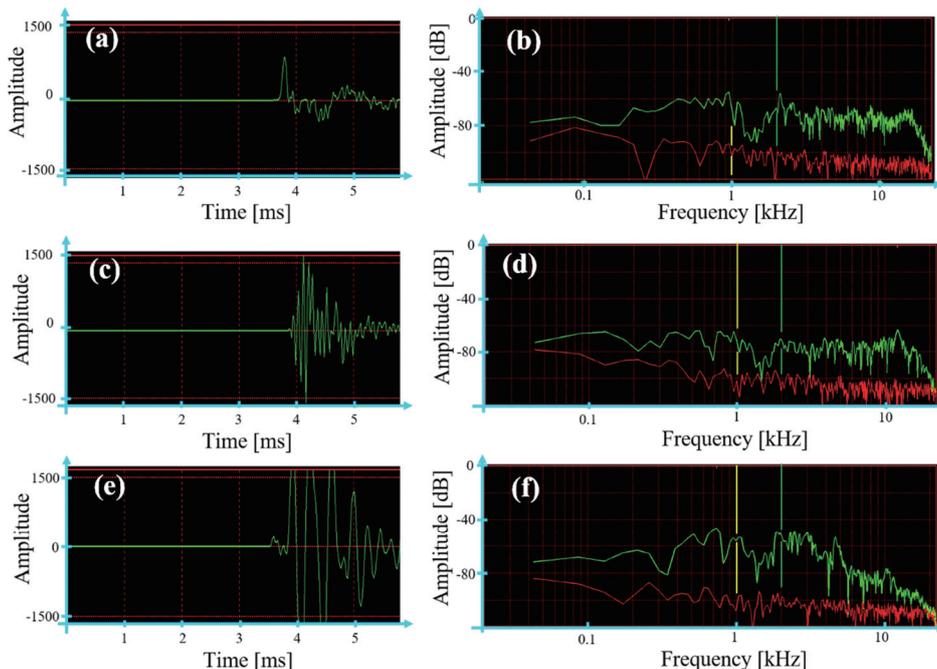


図4 5.1 mの高度から2.5 mmの水滴落下孔を用いて水滴1滴を落下させたときの衝突音の波形および波のスペクトル

(a, b) トタン板、(c, d) アクリル板、(e, f) 発泡スチロール板

図4に、水滴1滴をトタン板(a, b)、アクリル板(c, d)、発泡スチロール板(e, f)に落下させたときの衝突音の波形(a, c, e)および波のスペクトル(b, d, f)を示す。このとき、2.5 mmの水滴落下孔を用いて、5.1 mの高さから落下させた。衝突音の波形を見ると、トタン板では振幅の大きな波形が1つ確認できるが、アクリル板と発泡スチロール板では振幅の大きな波の周りに振幅が少し小さな波が多数確認できる。これは、衝突音が共鳴もしくは反響していることを示していると考えられる。波のスペクトルでは、いずれの衝突板においても黄色の縦線で示してある0.9 kHz～1 kHz付近、緑色の縦線で示してある2 kHz付近にピークが存在することが分かる。また、1.5 kHz付近の音が小さくなっている。赤線のスペクトルは水滴衝突前のバックグラウンドのスペクトルである。このスペクトルは各測定において基本的に同じであるため、以降の波のスペクトルの図では省略する。

以上の結果から、アクリル板と発泡スチロール板では衝突時に音が反響するため波形が複雑になることが分かった。水滴衝突音の基礎検討にはできるだけ単純な波形のほうが適しているため、以降の測定では衝突板にトタン板を用いた。

2.3 雨音の解析について

本実験では、収集した雨音の解析にフリーソフトのWaveSpectra⁴⁾を利用した。WaveSpectraでは集音と並行してFFT（高速フーリエ変換）することができるため、特徴的なピーク周波数の検知に使用した。

3. 雨滴衝突音の解析例

3.1 水滴1滴を落下させた場合の衝突音の解析

水滴が落下衝突する時の最も基礎的な波形を確認するために、まず水滴を人工的に1滴だけ落下させた場合の衝突音を解析した。具体的には、2.1で示した装置を用いて、トタン板に水滴の大きさ、落下高度を以下のように変えて水滴を落下させ、衝突音をマイクロホンで収集し、WaveSpectraを用いて解析した。

- ・水滴落下孔の大きさ：1.1 mm、2.1 mm、2.5 mm
- ・落下高度：1.4 m、3.1 m、5.1 m

図5に、水滴落下孔の大きさを2.1 mmに固定して落下高度を変えた時の波形(a, b, c)と、落下高度を5.1 mに固定して水滴の大きさを変えた時の波形(d, e, f)を示す。高度を変えた場合、衝突音の波形はほぼ同じであるが、振幅は落下高度が高いほど大きくなる傾向がみられた。水滴落下孔の大きさを大きくした場合、わずかに振幅が大きくなる傾向がみられた。また、落下高度が高い場合や、水滴落下孔の大きさが大きい場合は、振幅が小さく周期の短い波が多数現れている。これは、落下途中や衝突後に飛散した水滴の衝突音が混在したためであると考えられる。

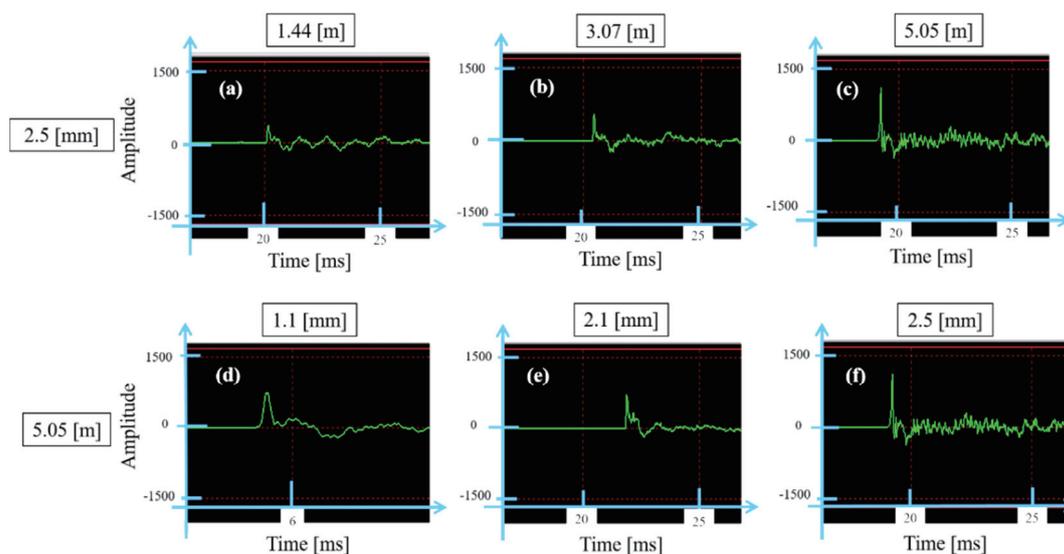


図5 水滴落下孔の大きさを固定して落下高度を変えた場合(a, b, c)、および水滴の落下高度を固定して水滴落下孔の大きさを変えた場合(d, e, f)の衝突音の波形

3.2 水滴1滴を連続落下させた場合の衝突音の解析

次に、1滴の水滴を連続落下させた場合の衝突音を解析した。具体的には、トタン板に5.1 mの高度から2.1 mmの水滴落下孔を用いて、1秒間に10滴程度落下させ、衝突音を解析した。図6に、10滴程度衝突した1秒間の波形(a)、およびサンプル数131,072 (3.0秒間に相当)で解析した波のスペクトル(b, c)を示す。黄色の線で示した1 kHz付近と緑色の線で示した2 kHz付近にピークがみられる。これらのピークは1滴のみの衝突の場合も同様にみられた。この他に、赤色の線で示した0.2 kHz付近や、それよりも低周波部分にいくつかのピークが現れている。図6(c)は低周波部分(0～150 Hz)のスペクトルである。白色の線で示した10 Hz付近にピークが現れている。これは、1秒間に10滴程度落下させた場合の水滴の振動数に対応している。10 Hz以上に複数みられているピークは、衝突振動数の高調波の可能性がある。

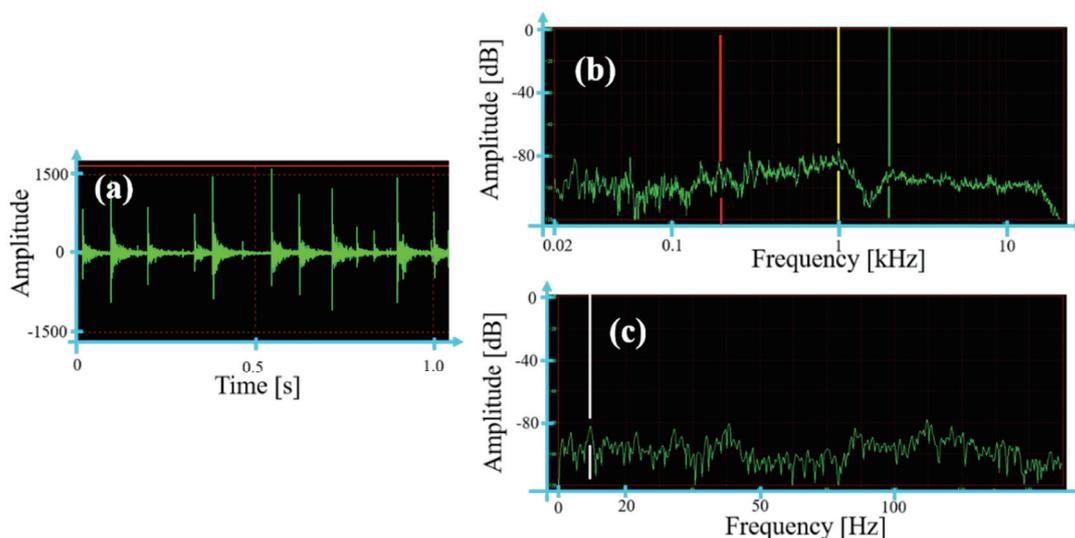


図6 水滴1滴を連続落下させた場合の衝突音の波形および波のスペクトル (a)衝突音の波形、(b)高周波域の波のスペクトル、(c)低周波域の波のスペクトル

3.3 多滴を連続落下させた場合の衝突音の解析

続いて、多数の水滴を連続して落下させた場合の衝突音を解析した。具体的には、1滴の場合と同じように、水滴落下孔の大きさや落下高度を以下のように変えて水滴を落下させた。

- ・水滴落下孔の大きさ：じょうろ(0.5 mm)
- ・落下高度：6.7 m、15 m

図7に、じょうろを用いて水滴を異なる高度から落下させた場合の結果を示す。波形を見ると、高度が2倍程度に高くなっても、平均的な振幅の大きさはほとんど変化していないことがわかる。波のスペクトルも落下高度による変化はあまりみられない。また、1滴の場合と同様に1 kHzおよび2 kHz付近にピークがみられる。これらのピークは水滴1滴の衝突音によるものと考えられる。1滴の連続の場合は、0.2 kHz以下の低周波数に振動数に関連した弱いピークが複数みられたが、多滴連続落下の場合、0.2 kHz付近にはっきりしたピークが現れている。また、10 kHz以上の高周波部分にもピークがみられているのが特徴的である。10 kHz以上のピークについては、多滴落下の衝突音によって生じたものと考えられる。0.2 kHz付近のピークが水滴の振動数に関連するとした場合、この波の周期はおよそ5 msである。水滴1滴を連続衝突させた場合(図6(b))に比べて高い周波数にピークが現れているのは、多滴実験の方が雨粒の落下間隔が短く単位時間あたりの面密度が大きいためであると考えられる。図8に、落下高度6.7 mのデータについてFFTのサンプリング時間を1/8に狭めた結果を示す。波の波形からも、周期の短い波のほかに、振幅は非常に小さいが周期5 ms程度の波がみられる。この波は雨粒の単位時間あたりの面密度に関連する可能性があるため、異なる大きさの水滴や落下速度での実験を行うことで、雨音の周期から雨粒の面密度の推定が可能になると考えられる。

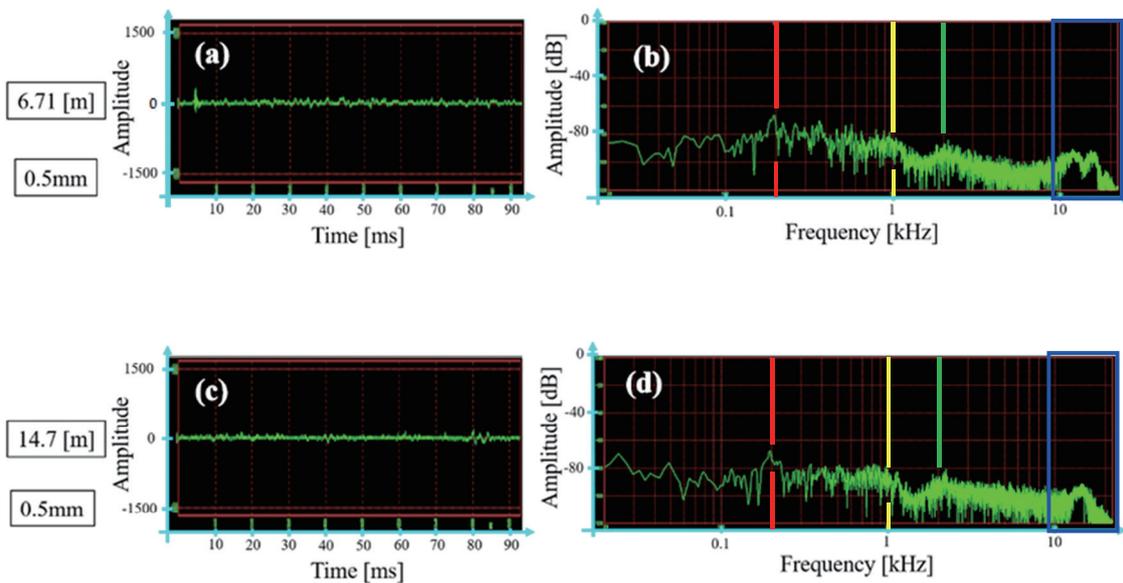


図7 多滴を連続落下させた場合の波形および波のスペクトル
(a, b) 落下高度6.71 m、(c, d) 落下高度14.7 m

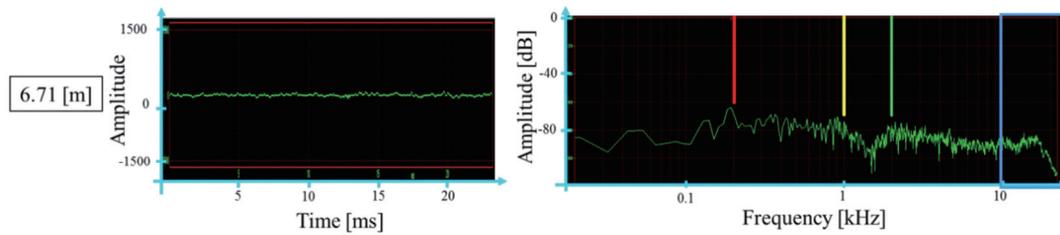


図8 図7 (a)のFFTサンプリング時間を短くしたときの波形および波のスペクトル

3.4 自然雨の衝突音の解析

最後に、自然雨の雨音の収集・解析を行った。しかし、測定した雨粒の大きさが上記の実験で利用した水滴に比べて小さかったと考えられるため、衝突板を使った実験でも衝突音の振幅は非常に小さく、図9のように明確な波形が得られなかった。今後は、より大きな雨粒の雨で実験を行ったり、マイクの集音性を高めたりするなどの工夫が必要である。また、自然雨では、風などの周辺環境の影響により、雨粒の大きさや単位時間当たりの面密度、落下速度が時間的に変化するため、雨音にも違いが生じるはずである。そのような違いについて比較するためにも、様々な雨で実験を行う必要がある。

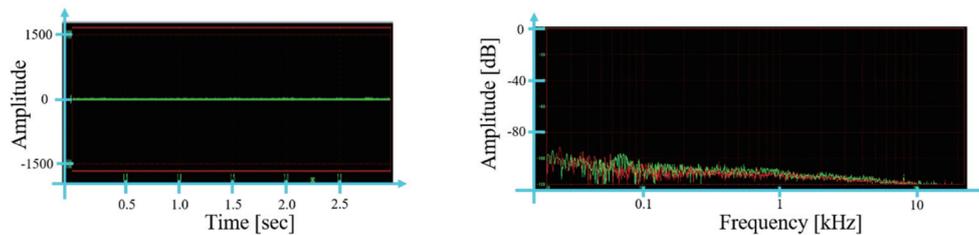


図9 自然雨の衝突音の波形および波のスペクトル

4. まとめ

本研究では、雨音を収集することのできる装置を製作し、高所から人工的に水滴を落下させた場合の衝突音と自然雨の衝突音の波形や含まれる周波数成分を解析・比較することにより、雨音と雨粒の大きさ、雨粒の面密度の関係性を調査した。水滴1滴を落下させたときの衝突音の波形から、水滴の大きさおよび落下高度が大きいほど衝突音が大きくなることがわかった。波のスペクトルの解析からは、1 kHz付近および2 kHz付近にピークが現れることがわかった。水滴1滴を連続落下させた場合、これらのピークに加えて水滴の衝突間隔に対応した0.2 kHz以下のピークが現れることを確認した。多滴を連続落下させた場合、1滴のときにみられたピークに加えて0.2 kHz付近や10 kHz以上の高周波部分にもピークが現れた。特に0.2 kHz付近のピークは周期がおよそ5 msであり、連続的に落下する水滴による波を示していると考えられる。一方、自然雨の測定では、雨粒が非常に小さく雨音の振幅が小さかったため、明確な波形が得られなかった。自然雨の集音に関しては、今後集音方法等を改善する必要がある。

連続的に水滴を落下させた場合の低周波の波は、雨粒の単位時間あたりの面密度に関連すると考えられる。自然雨の衝突音は、様々な大きさの水滴が連続的に地面や家屋に衝突して発生するものであるため、今後様々な条件の雨で衝突音を測定することで、雨音の周期から雨粒の面密度の推定が可能になると考えられる。

謝 辞

本実験装置は一般財団法人WNI気象文化創造センターからの助成金により製作することができました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 気象庁ホームページ http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/amehyo.html
- 2) 上田麻里, 平栗靖浩, 藤本一寿, “視覚障害者のための傘の降雨騒音低減に関する基礎検討—傘の雨滴衝撃音の音響特性について—”, 日本音響学会誌, 66巻, 6号, pp.265-269, (2010).
- 3) 細川茂樹, 藤波香織, “プローブ傘による降雨マップシステム作成手法に関する研究”, 情報処理学会第74回全国大会, pp.3-145-3-146, (2012).
- 4) WaveSpectraホームページ <http://efu.jp.net/soft/ws/ws.html>

受理日：2016年11月7日