

令和04年度 修士論文

# 雨滴粒径分布観測に基づく音響雨量計の開発

Development of an acoustic rain gauge based on drop size  
distribution observation

高知工科大学

工学研究科基盤工学専攻 環境数理コース

学籍番号 1255067

越野 寛之

Hiroyuki Koshino

指導教員 端野 典平

2023年3月8日 提出



# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 背景	1
1.2 目的	2
1.3 音響雨量計の制作	2
1.4 雨量ネットワーク	3
<b>第2章 観測器について</b>	<b>5</b>
2.1 音響雨量計	5
2.2 ディストロメータ (型式:CTC-LPM、製造会社:Thies)	5
2.3 簡易雨量計 (型式:CEM-TBRG、製造会社:Climatec)	5
2.4 アメダス	5
<b>第3章 手法</b>	<b>7</b>
3.1 音データの処理	7
3.2 回帰モデルの作成	7
3.2.1 作成した回帰モデルの評価	8
<b>第4章 解析結果</b>	<b>11</b>
4.1 単純な回帰分析による推定	11
4.1.1 佐岡	11
4.1.2 五王堂	11
4.1.3 岡ノ内	12
4.1.4 大栃	12
4.2 推定の評価	12
4.3 音響雨量計の特徴	13
<b>第5章 考察</b>	<b>19</b>
5.1 パワー分布と雨滴粒径分布の関係	19
5.2 背景音について	19
5.3 過小評価の原因について	19
5.4 音響雨量計の設置に関して	20
<b>第6章 まとめと今後の課題</b>	<b>24</b>
6.1 まとめ	24
6.2 今後の課題	24
<b>参考文献</b>	<b>25</b>



## 概 要

令和 3 年 8 月は日本付近に停滞している前線の活動が活発となった影響により、広範囲で大雨が観測された。近年、このような降水現象の頻度は中山間地域においても年々増加している。防災上、中山間地域における降水現象をリアルタイムで地上観測することは重要である。

本研究ではリアルタイム雨量ネットワークの構築を目指し、低価格でディストロメータのように雨量及び雨滴粒径分布を計測することを目的とし、音響雨量計の開発を行っている。雨滴の運動量を電気信号に変換して粒径分布を観測する手法は広く使われてきた。林ら (1997)[1] の試作した音響雨量計では、室内実験により雨音成分に対して雨量強度と雨滴体積及び落下速度の関係が示された。卒業研究では、音響雨量計の試作を行い、雨音を周波数ごとに分けて深層学習を用いた回帰推定を行った。その結果は、精度はよくないもののある程度観測雨量に近づけることができた。今回は雨音情報をピークパワー値の頻度とし統計解析及び回帰分析を行う。

雨量ネットワークの構築のために佐岡の研究フィールド以外にも大栃・五王堂・岡ノ内の 3 箇所に設置した。推定と観測の比較には、大栃はアメダス、他 2 箇所は付近に設置した簡易雨量計を用いる。佐岡地区で得た雨音データに正規化を行い、1/8000 秒ごとのパワー値について絶対値を取り、その後、80 個ずつにまとめて 1/100 秒ごとのパワー値に変換し、差分を用いてピークパワー値とした頻度分布を作成する。

回帰分析には令和 3 年 8 月 (24 日間) のデータを使用した。降水強度と雨音のピーク値の 30 分平均を用いて勾配降下法で回帰式を得た。この回帰式を用いて令和 3 年 9 月の雨量推定を行ったところ、相関係数は 0.89 で、RMSE は 2.87mm/hr となった。30 分ごとに推定値と実測値を比較すると欠損により推定することができていないデータもあるが、1 ヶ月の総降水量で比較すると良い推定結果が得られた。また、大栃と五王堂では設備の固定が不安定なこともあり転倒しており、改善する必要がある。



# 第1章 序論

## 1.1 背景

近年、気候変動の影響により降水量が増加傾向にある。令和3年8月は日本付近に停滞している前線の活動が活発となった影響により、高知県東部の中山間部を含む広い範囲に大雨が観測された。また、森林水文学の分野で南光(2020)[2]は、森林の内側と外側で雨滴粒径分布の観測を行うことで、森林内で発生する土壌侵食プロセスを定量的に予測することが可能であることを示した。防災の観点からもこのような降水現象を理解するために雨量及び雨滴粒径分布の観測が必要とされている。しかし、雨滴粒径分布を観測することの出来るディストロメータを中山間部に複数設置するには、資金・電力などの様々な難点がある。そこで、低価格な雨量計を開発することで、中山間部で地上気象観測する地点が増加し防災につながると期待できる。

雨音と雨の強さに関係があることは、日々の生活で多くの人が体感して理解していると思われる。気象庁(2014)は雨音の擬音語などを雨の強さの目安として経験的に用いている[3]。雨滴の運動量を電気信号に変換して粒径分布を計測する手法は広く使われていきた[4]。林ら(1997)[1]の研究で試作された音響雨量計は、金属缶の中にマイクを設置し録音していた。これを用いて室内実験により雨音成分に対して雨量強度と雨滴体積及び落下速度の関係が示された。このような雨音から雨量を観測するアイデアは、児童生徒の教材としても提案されている[6]。さまざまな音響雨量計の研究が進められてきたが、小型化・小電力化の課題とともに、実際の降雨現象を観測する上で十分実用的であるかといった課題があげられる。



雨の強さと降り方 (気象庁 HP より抜粋)

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	土砂降り
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、ゴーゴーと降り続く
猛烈な雨	80 ～	息苦しくなるような圧迫感、恐怖を感じる

## 1.2 目的

本研究では、雨音を用いて低価格に雨量及び雨滴粒径分布を推定できる音響雨量計を開発を行うことを目的とする。本研究で制作した音響雨量計を複数地点に設置し、雨量ネットワークの構築を行い音響雨量計の改善策について検討する。また、佐岡で収集した音データとディストロメータで得た雨量強度を用いて単純な回帰式を計算し、別期間・地点について雨量の推定・検証を行う。

## 1.3 音響雨量計の制作

卒業研究で制作した音響雨量計から改善を続けてきた。電力関係の効率化やラズベリーパイを Zero にすることで 5 万円程度から 3 万円程度に費用を削減することができた。設置している雨量計を図 1.1 に示す。本研究で制作した音響雨量計 1 つにかかる費用を以下の表に記す。



材料名	値段 (円)	個数
USB マイクロホン 無指向性 フラット型	1,827	1
PVC クリスタルボックス	619	1
Raspberry Pi Zero W	4,660	1
SD カード 64GB	1,230	1
ラズベリーパイゼロケース	1,764	1
VU インクリーザ	2,490	1
チャージコントローラ	3,750	1
太陽光パネル	6,280	1
収納ボックス	1,073	1
注入式重石	1,463	1
バッテリー	6,980	1
その他 (コード類、乾燥剤など)	+	
計	32,136+	

## 1.4 雨量ネットワーク

佐岡のほか大栃・五王堂・岡ノ内の3箇所に音響雨量計と簡易雨量計を設置した(図1.2)。上記の設置場所を選んだ理由として、佐岡は香美キャンパスから近く、物部川流域かつ中山間部なので実地試験として適している。大栃は音響雨量計を設置した近辺にアメダスがあり、アメダスの観測雨量と音響雨量計の推定雨量の比較を行うことができる。五王堂と岡ノ内は山嶺を挟んで東西に位置しているため、地形による降水現象の観測が期待できる。

佐岡では簡易雨量計・ディストロメータ、五王堂・岡ノ内では簡易雨量計、大栃ではアメダスの観測雨量を音響雨量計で推定した雨量との比較・検証に用いた。



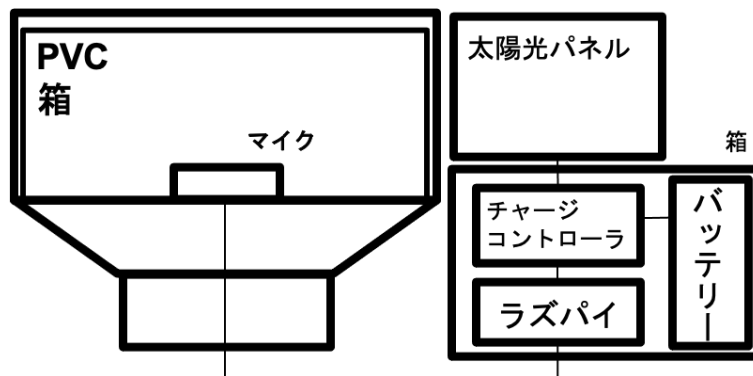


図 1.1: 設置している装置の模式図



図 1.2: 観測地点 (佐岡: 簡易雨量計・ディストロメータ、大栃: アメダス、五王堂・岡ノ内: 簡易雨量計)



## 第2章 観測器について

### 2.1 音響雨量計

岡ノ内に設置した音響雨量計 (図 2.1) と同様のものを他の地点でも設置した。実際に音響雨量計で得られる音データを図 2.2 に示す。サンプリングレートは 8000Hz、値は 0 ~ 255 の範囲の 8 ビット符号なし整数型で 5 分ごとに録音した。ただし、録音時間はファイル保存処理に要する時間を考慮して 4 分 50 秒としている。

### 2.2 ディスドロメータ (型式:CTC-LPM、製造会社:Thies)

佐岡に設置したディスドロメータ (図 2.3) は、レーザー式降水粒径分布測定装置と呼ばれている。照射した光学センサーを通過する物体の粒径と落下速度を検知する。検知した降水粒子の落下速度と粒径から雨量強度や降水の種類、雨滴粒径分布を測定する。設置にかかる費用は 100 万円を超え、精密機械なので安定した電力を供給する必要がある。ディスドロメータは最低 0.005mm/h の霧雨まで観測することが可能である。

### 2.3 簡易雨量計 (型式:CEM-TBRG、製造会社:Climatec)

佐岡・五王堂・岡ノ内に設置した簡易雨量計 (図 2.4) は、まずに水が溜まることで転倒し、その回数を記録することで一定時間内の降水量を測る観測機器である。簡易雨量計の転倒まずは降水量 0.2mm に相当する容積となっている。

### 2.4 アメダス

気象庁が設置しているアメダスは、簡易雨量計同様の仕組みで降水量を測る観測機器である。雨量以外にも風・気温・湿度などの観測を行っている。アメダスの転倒まずは降水量 0.5mm に相当する容積となっている。





図 2.1: 音響雨量計 (岡ノ内)

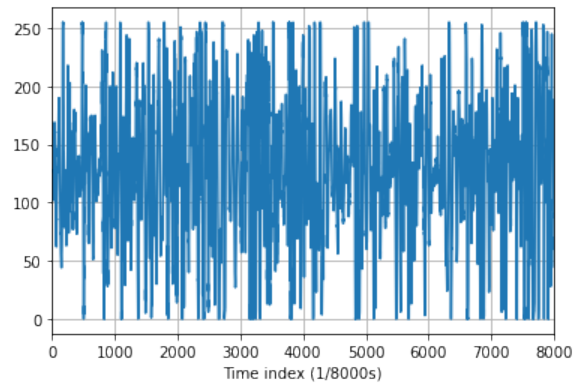


図 2.2: 音データ



図 2.3: ディストロメータ



図 2.4: 簡易雨量計



## 第3章 手法

### 3.1 音データの処理

音響雨量計で観測した音データ (図 2.2) からピークパワー値の分布を求める手順を以下に記す。

1. 0 ~ 255 の値で記録された音データに対して正規化を行う。
2. 正規化して 0 ~ 1 の値となった音データを図 3.1 のように  $-0.5 \sim 0.5$  の範囲になるように調整する。
3. 正規化した音データに対して絶対値をとる。
4. 80 個ずつ総和をとり、1/100 秒ごとの値とする。
5. 前後の差分の積からピーク (図 3.2) を見つけ、ピーク値の強度を求める。
6. ピークパワー値を 40 の階級にわけ、ファイルごとに度数分布を作る。

### 3.2 回帰モデルの作成

回帰モデルでの推定を行うために多項式の回帰を行なった。回帰モデルは、2 次の多項式

$$\hat{y} = ax^2 + bx + c \quad (3.1)$$

となる。この回帰モデルの 3 つの係数を勾配降下法を用いて求める。

本研究では、2021 年 8 月 7 日から 2021 年 8 月 31 日の 24 日間のデータを訓練データとして用いる。教師データとしてディストロメータで観測した 30 分平均雨量強度と入力データとして上記で定義した音データのピークパワー値の 30 分平均値を用いる。回帰係数を求めた結果、

$$\hat{y} = -0.43420142 + 1.2038738x + 0.0437152x^2 \quad (3.2)$$



となった。これを用いてそれぞれの地点で推定・検証を行う。

### 3.2.1 作成した回帰モデルの評価

回帰式 (3.2) を用いて同期間の推定雨量を求め、ディストロメータの観測雨量と比較を行なった (図 3.4)。評価の指標として RMSE(Root Mean Square Error) と  $R^2$ (決定係数) を求めた。RMSE は説明誤差の指標であり、実測値と推定値の差を 2 乗し、平均化したものを平方根で元の単位に戻したものである。 $R^2$  は推定された回帰式の当てはまりの度合いの指標であり、観測値と推定値から全変動・回帰変動・残差変動の 3 つを求める必要がある。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3.3)$$

全変動の平方和

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.4)$$

回帰変動の平方和

$$\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (3.5)$$

残差変動の平方和

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.6)$$

決定係数

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3.7)$$

これらで回帰モデルについて計算を行なった結果、RMSE は 1.891mm/hr、 $R^2$  は 0.819 となった。図 3.4 では、横軸が 1 目盛 30 分、縦軸が 30 分平均雨量強度を示しており、赤線が音響雨量計の推定値、緑線がディストロメータの観測値を示している。音響雨量計とディストロメータの雨量強度の変動が非常に類似していることを確認することができる。



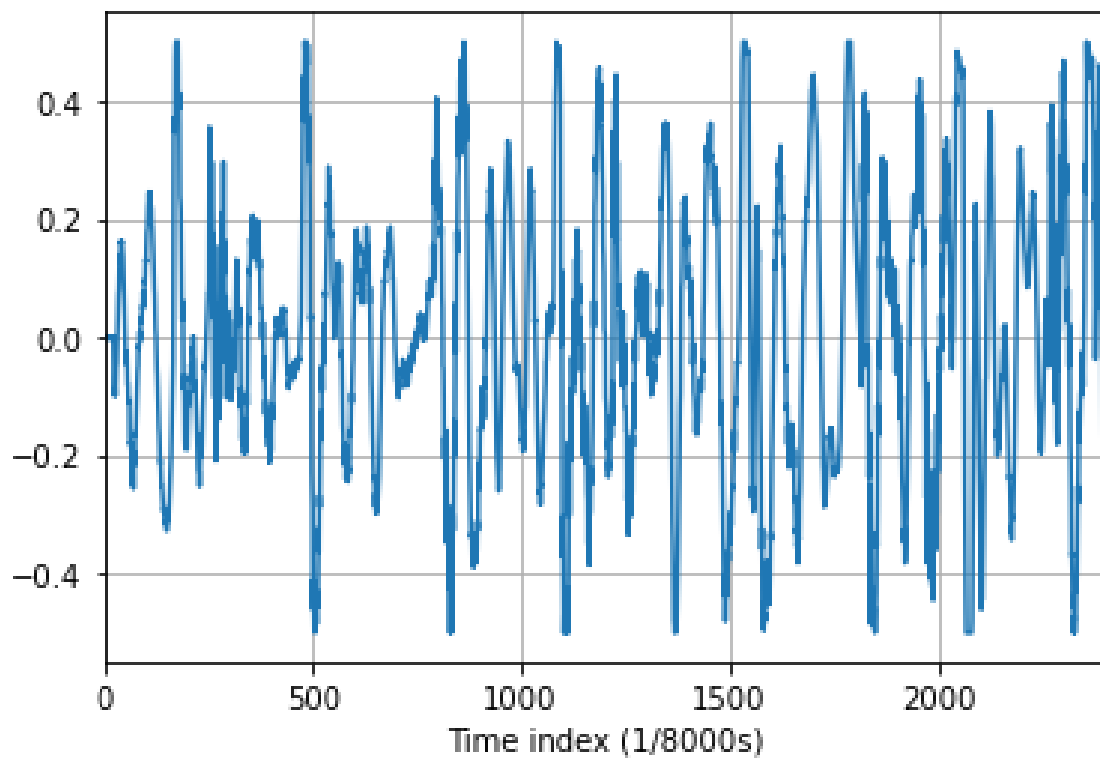


図 3.1:  $-0.5 \sim 0.5$  の範囲で正規化した音データ

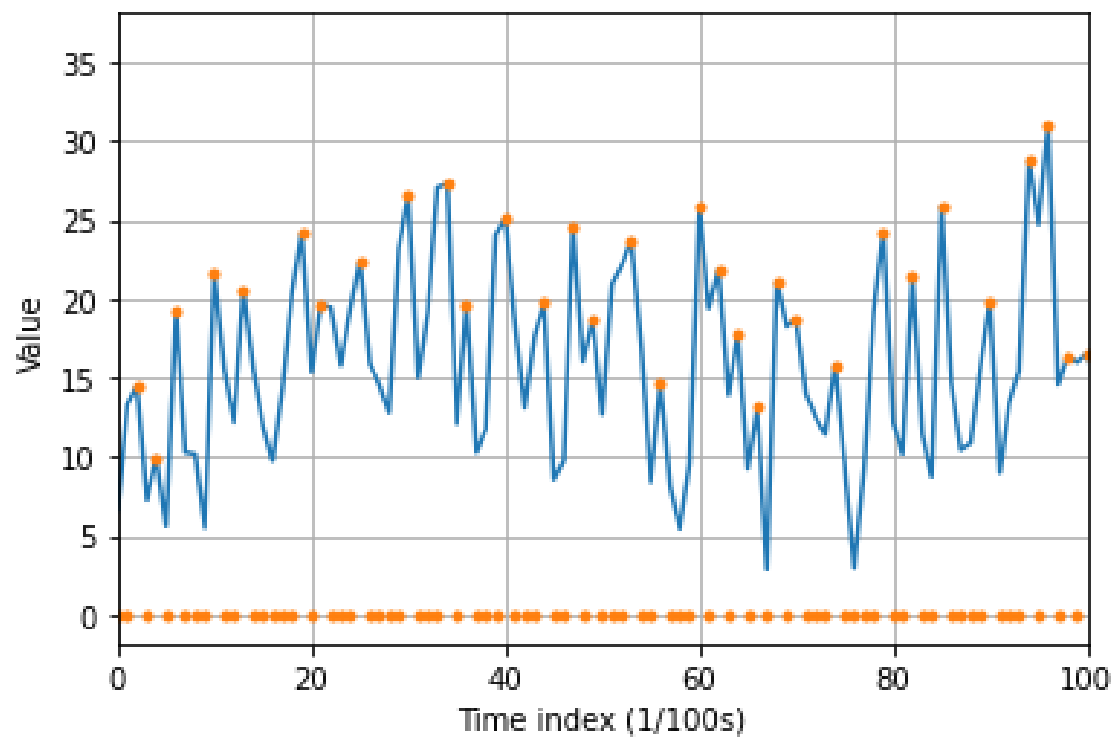


図 3.2: ピーク値の決定



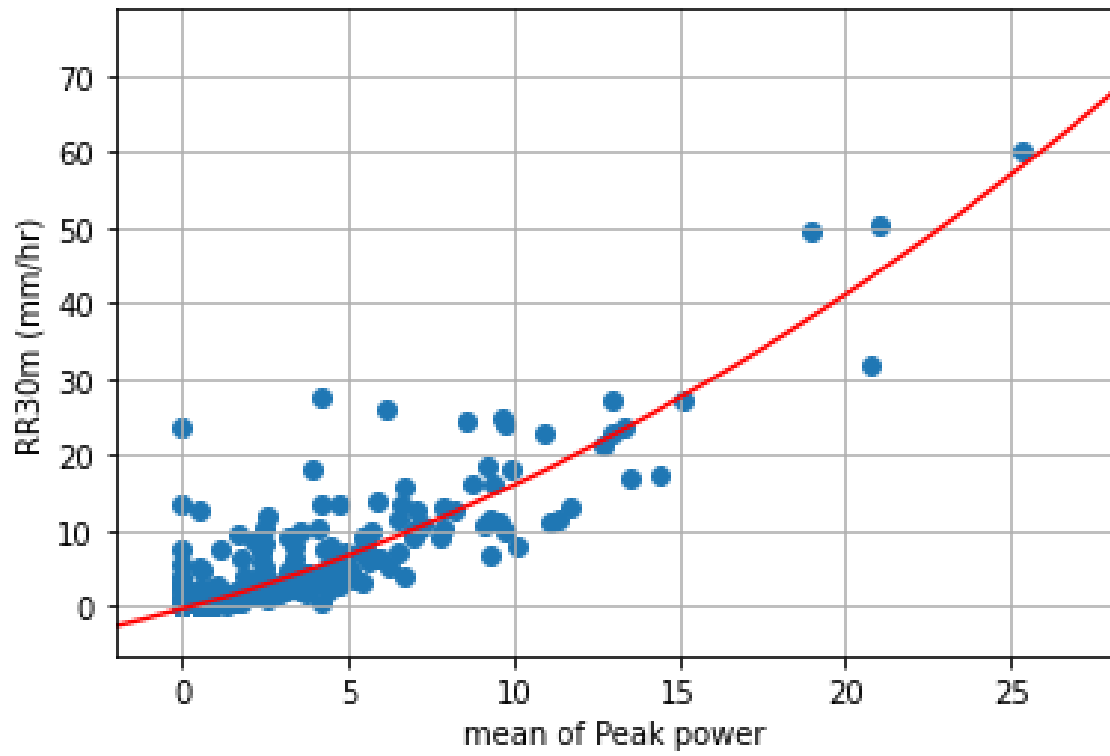


図 3.3: 推定に用いる回帰式

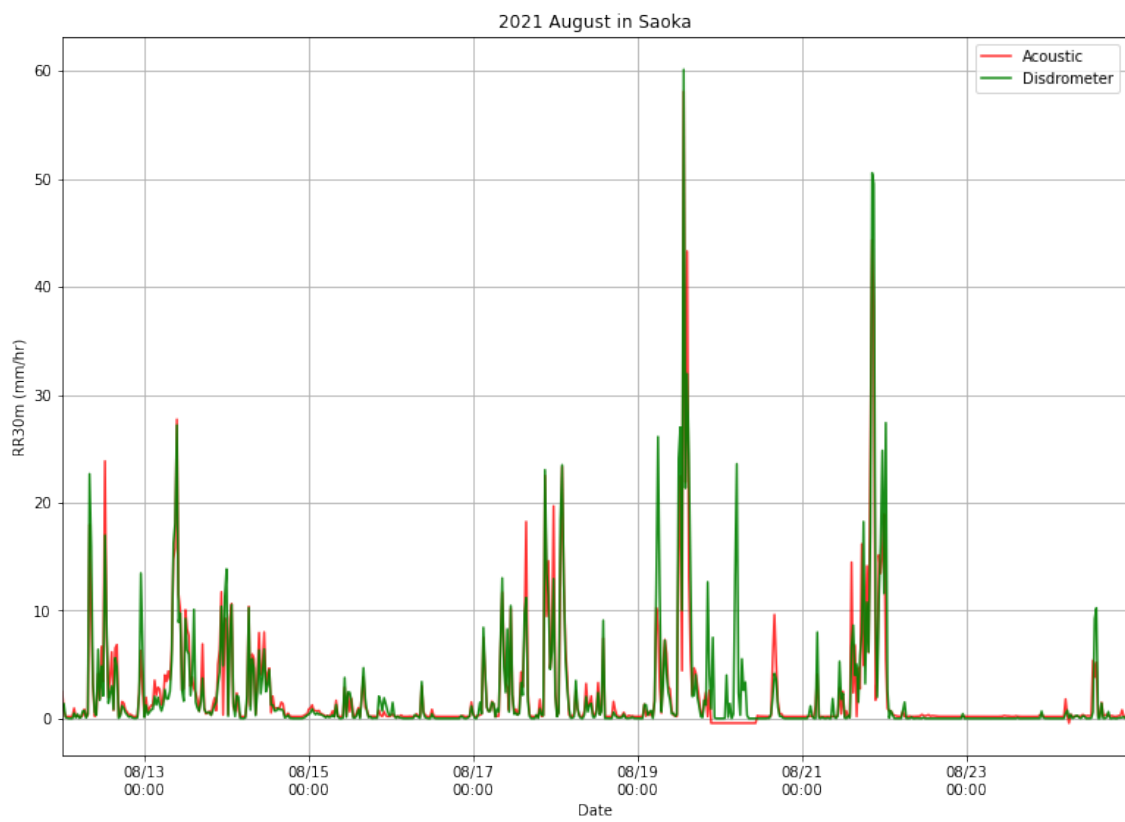


図 3.4: 同期間の推定値と観測値



## 第4章 解析結果

### 4.1 単純な回帰分析による推定

本研究では、求めた回帰式 (3.2) を用いて 2022 年 7 月の佐岡・五王堂・岡ノ内・大栃の 4 箇所  
で雨量推定を行った。それぞれの地点について観測値と推定値の比較を行なった。

#### 4.1.1 佐岡

観測値と推定値の時系列変化を図 4.1 に示す。図 4.1 において、横軸は 1 目盛 30 分間の時間軸、  
縦軸は 30 分間平均雨量強度であり、それぞれ赤線が音響雨量計の推定値、青線が簡易雨量計の観  
測値、緑線がディストロメータの観測値である。

音響雨量計とディストロメータの散布図を図 4.2、音響雨量計と簡易雨量計の散布図を図 4.3 に  
示す。どちらも横軸が観測値、縦軸が推定値であり、赤線は  $x = y$  の直線である。

観測値と推定値の時系列変化の図 4.1 では、降水のはじめと終わりはよく捉えることができた。  
ディストロメータとの比較 (図 4.2) では、観測値と推定値の関係が  $x = y$  周辺に散らばっており、  
精度よく推定することができた。簡易雨量計との比較 (図 4.3) では、ディストロメータの観測値に  
比べて過小評価の傾向であった。

#### 4.1.2 五王堂

観測値と推定値の時系列変化を図 4.4 に示す。図 4.4 において、横軸は 1 目盛 30 分間の時間軸、  
縦軸は 30 分間平均雨量強度であり、赤線が音響雨量計の推定値、青線が簡易雨量計の観測値で  
ある。

図 4.3 と同様に音響雨量計と簡易雨量計の散布図を図 4.5 に示す。

観測値と推定値の時系列変化の図 4.4 では、佐岡と同様、降水のはじめと終わりはよく捉えるこ  
とができた。簡易雨量計との比較 (図 4.5) では、推定ができている部分と推定できていない部分  
があった。



### 4.1.3 岡ノ内

図 4.4 と同様に、観測値と推定値の時系列変化を図 4.6 に示す。

図 4.5 と同様に音響雨量計と簡易雨量計の散布図を図 4.7 に示す。

観測値と推定値の時系列変化の図 4.8 では、佐岡・五王堂と同様、降水のはじめと終わりはよく捉えることができた。簡易雨量計との比較 (図 4.9) では、全体的に過小評価する傾向があった。

### 4.1.4 大栃

3 地点と異なりアメダスの観測が 1 時間ごとに記録されていくので、音響雨量計で 30 分間平均雨量強度の推定を行ったのち、1 時間平均雨量強度を計算した。

図 4.4 と同様に観測値と推定値の時系列変化を図 4.8 に示す。ただし、横軸は 1 目盛 1 時間の時間軸、黒線がアメダスの観測値である。

図 4.5 と同様に音響雨量計とアメダスの散布図を図 4.9 に示す。ただし、横軸がアメダスの観測値である。

観測値と推定値の時系列変化の図 4.8 では、3 地点と同様、降水のはじめと終わりをよく捉えることができた。アメダスとの比較 (図 4.9) では、観測値と推定値の関係が  $x = y$  周辺に散らばっており、精度よく推定することができた。

## 4.2 推定の評価

場所 (観測器の種類)	RMSE(mm/hr)	$R^2$	Bias(mm/hr)
佐岡 (ディスドロメータ)	0.786	0.887	0.205
佐岡 (簡易雨量計)	1.321	0.830	0.027
五王堂 (簡易雨量計)	2.948	0.418	-0.196
岡ノ内 (簡易雨量計)	3.853	0.317	-0.984
大栃 (アメダス)	0.751	0.948	0.250



### 4.3 音響雨量計の特徴

各地点の拡大した図を図 4.10 に示す。各地点の拡大図 (図 4.10) から音響雨量計の推定では背景音の影響で常に 0.2mm/hr 程度の推定を確認した。



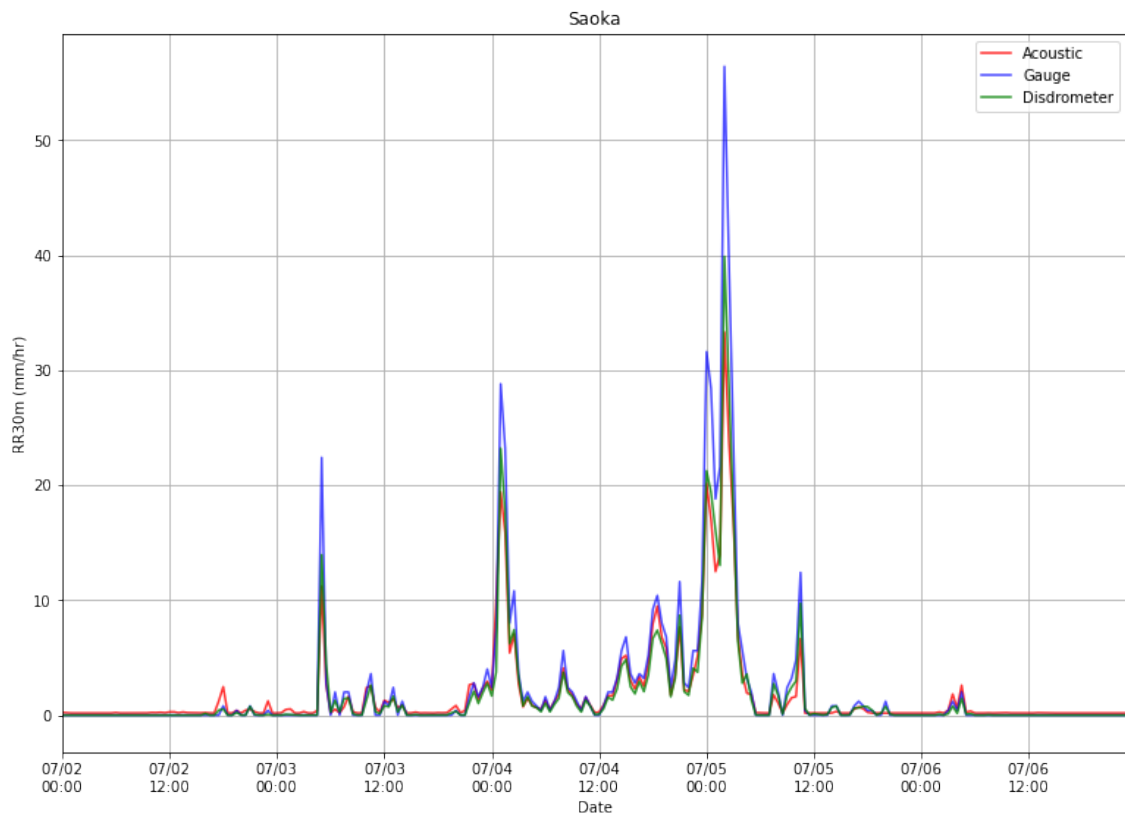


図 4.1: 佐岡:30 分雨量推定

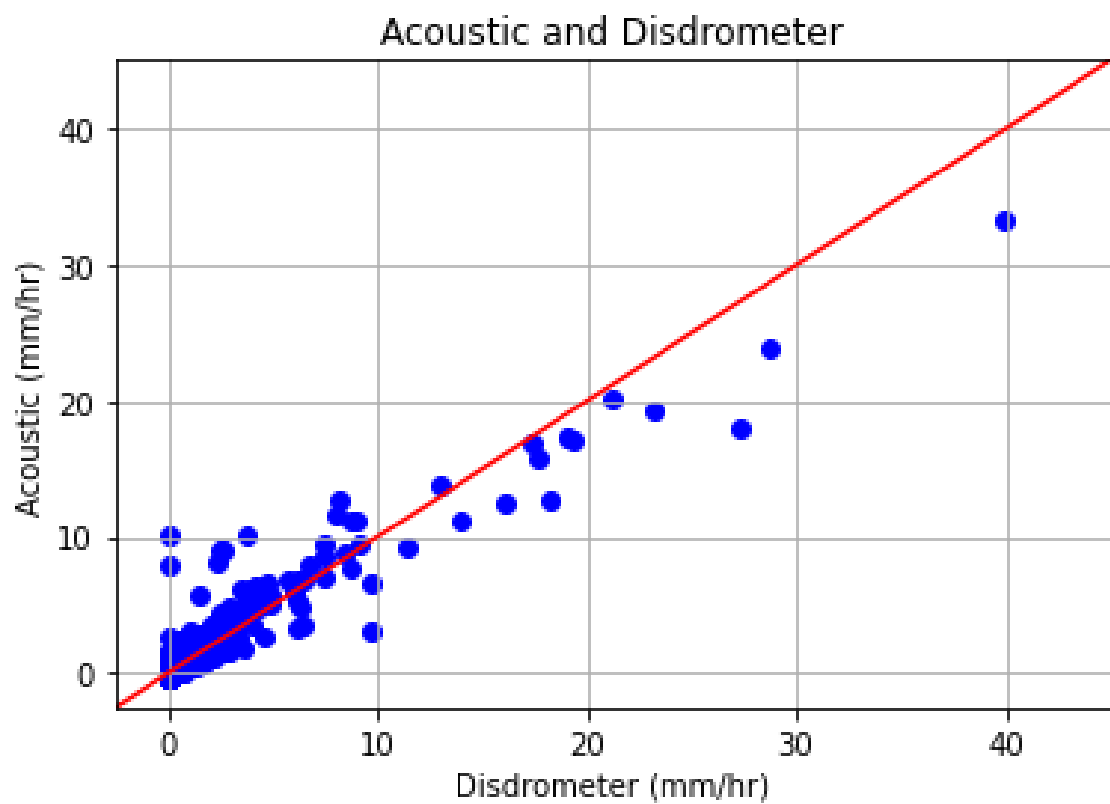


図 4.2: 佐岡: 音響雨量計とディスドロメータとの 30 分雨量強度の散布図



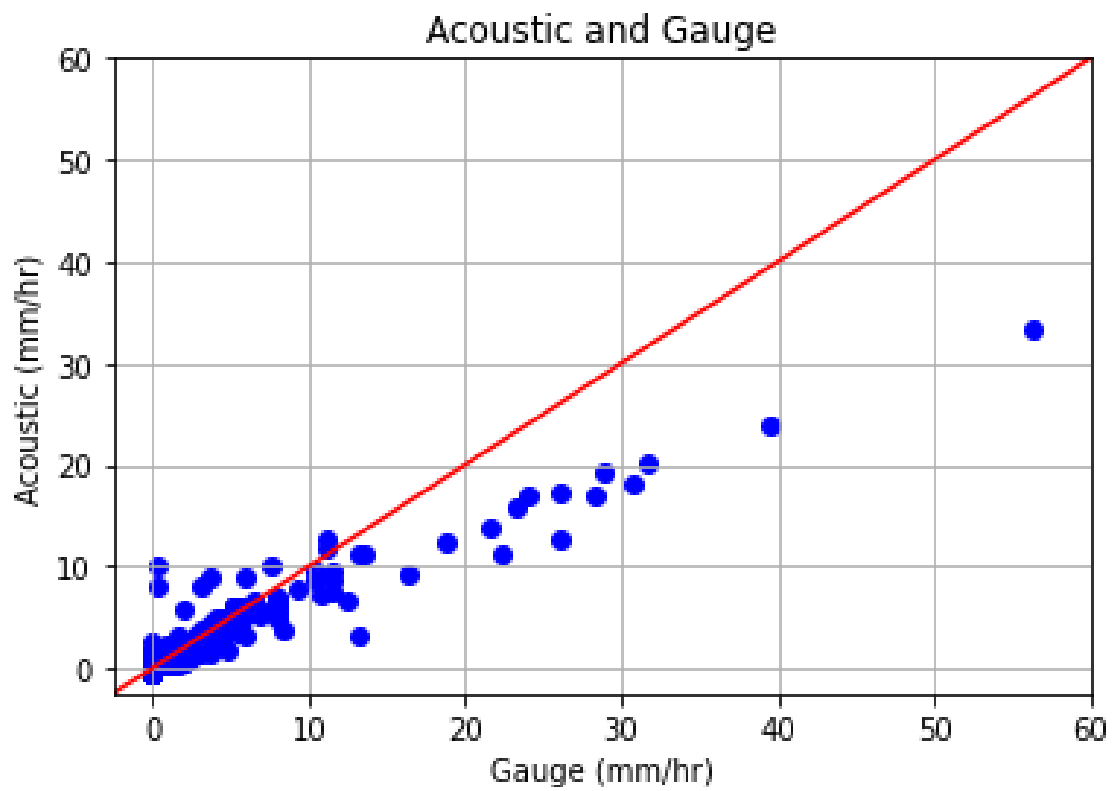


図 4.3: 佐岡: 音響雨量計と簡易雨量計との 30 分雨量強度の散布図

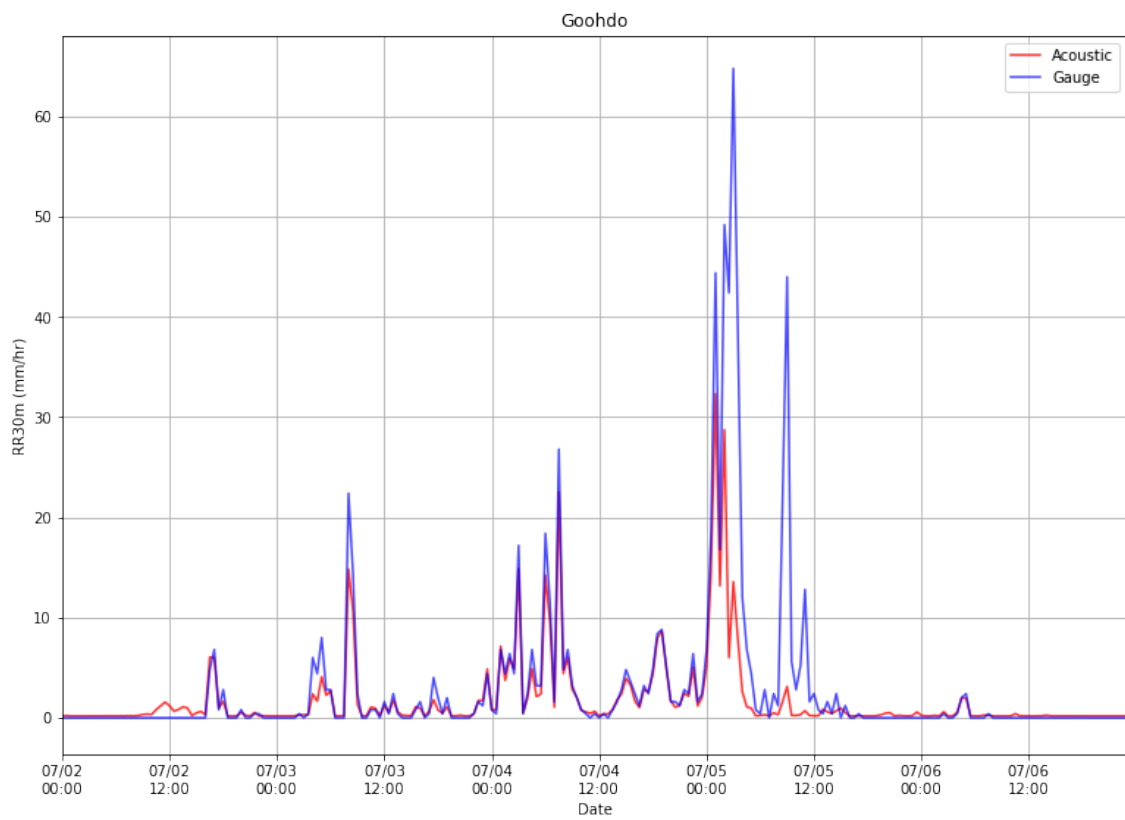


図 4.4: 五王堂:30 分雨量推定



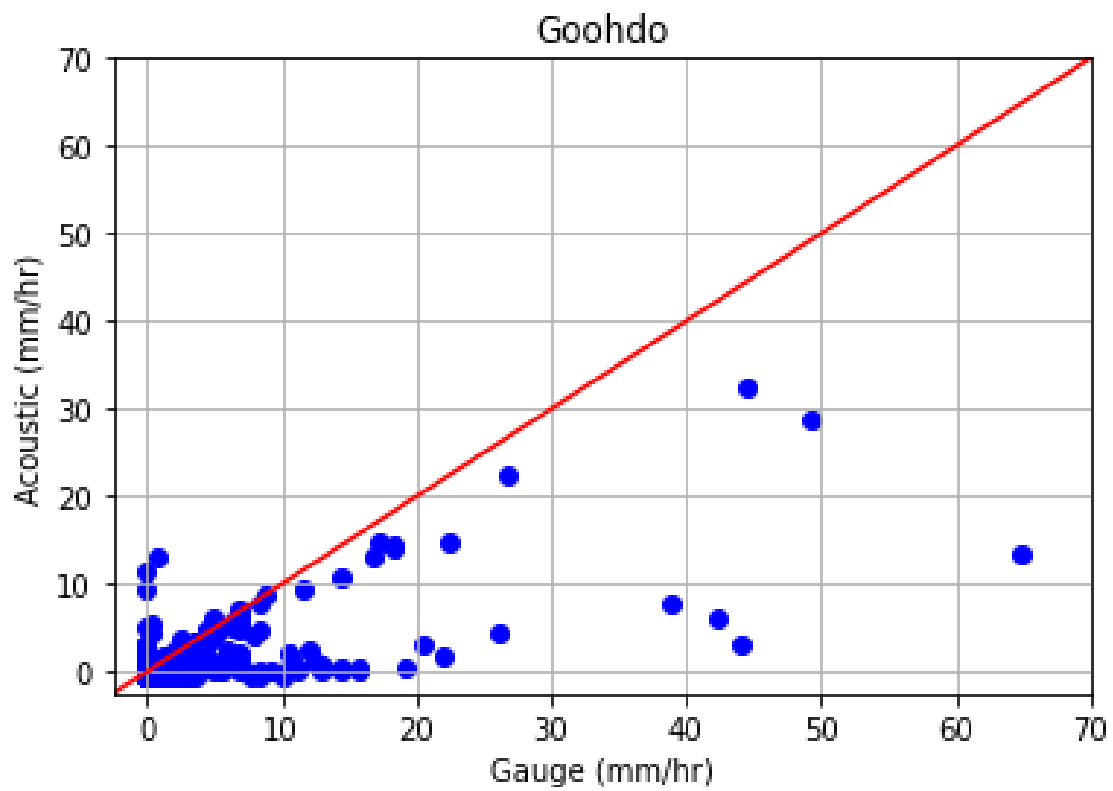


図 4.5: 五王堂: 音響雨量計と簡易雨量計との 30 分雨量強度の散布図

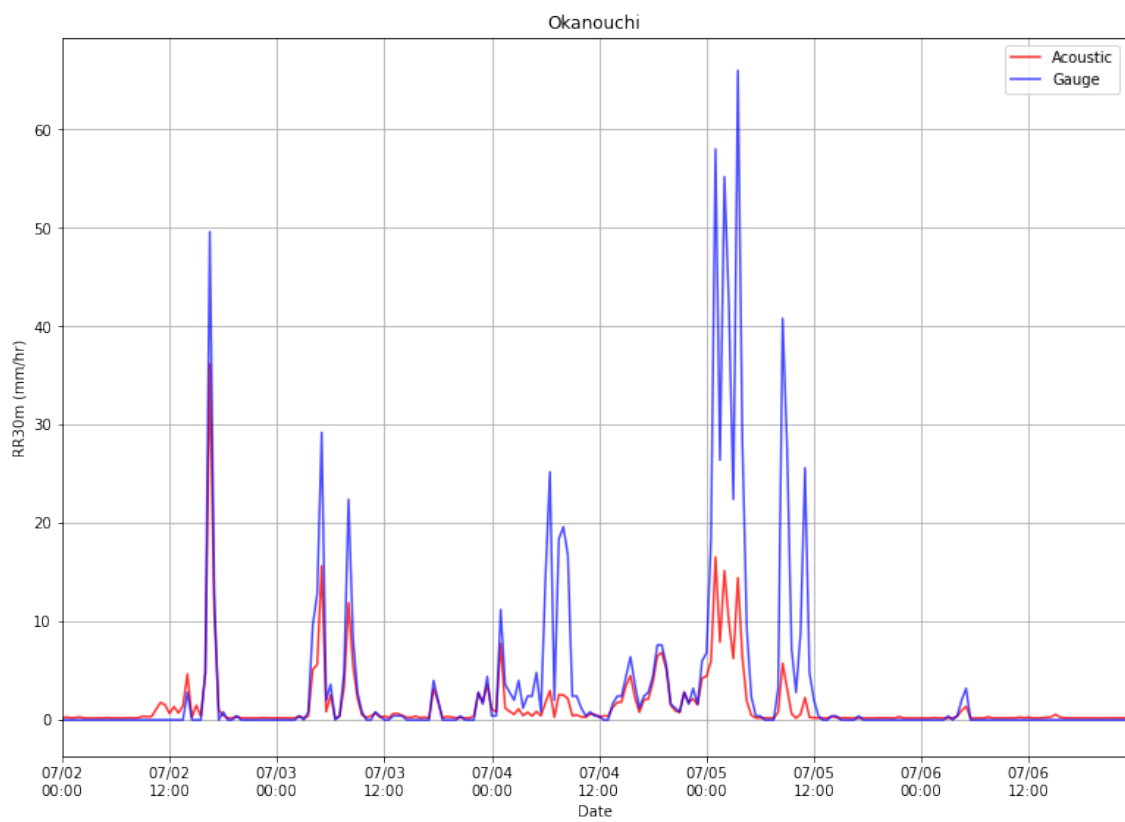


図 4.6: 岡ノ内:30 分雨量推定



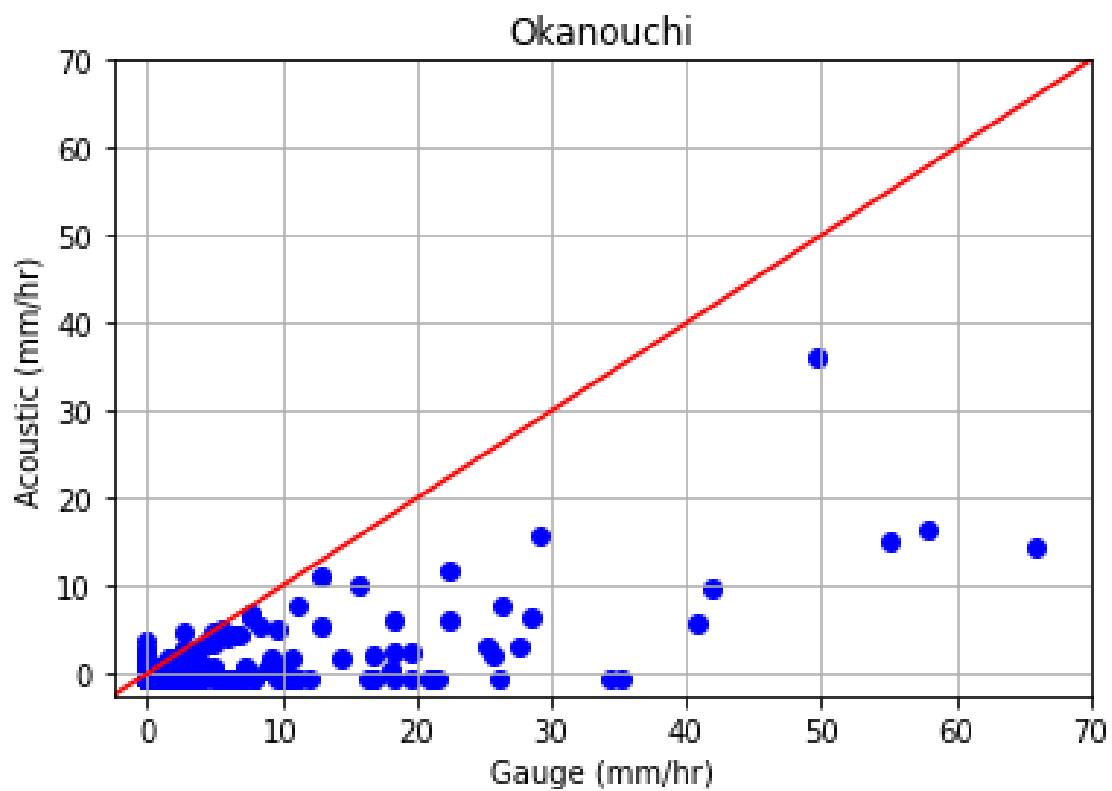


図 4.7: 岡ノ内: 音響雨量計と簡易雨量計との 30 分雨量強度の散布図

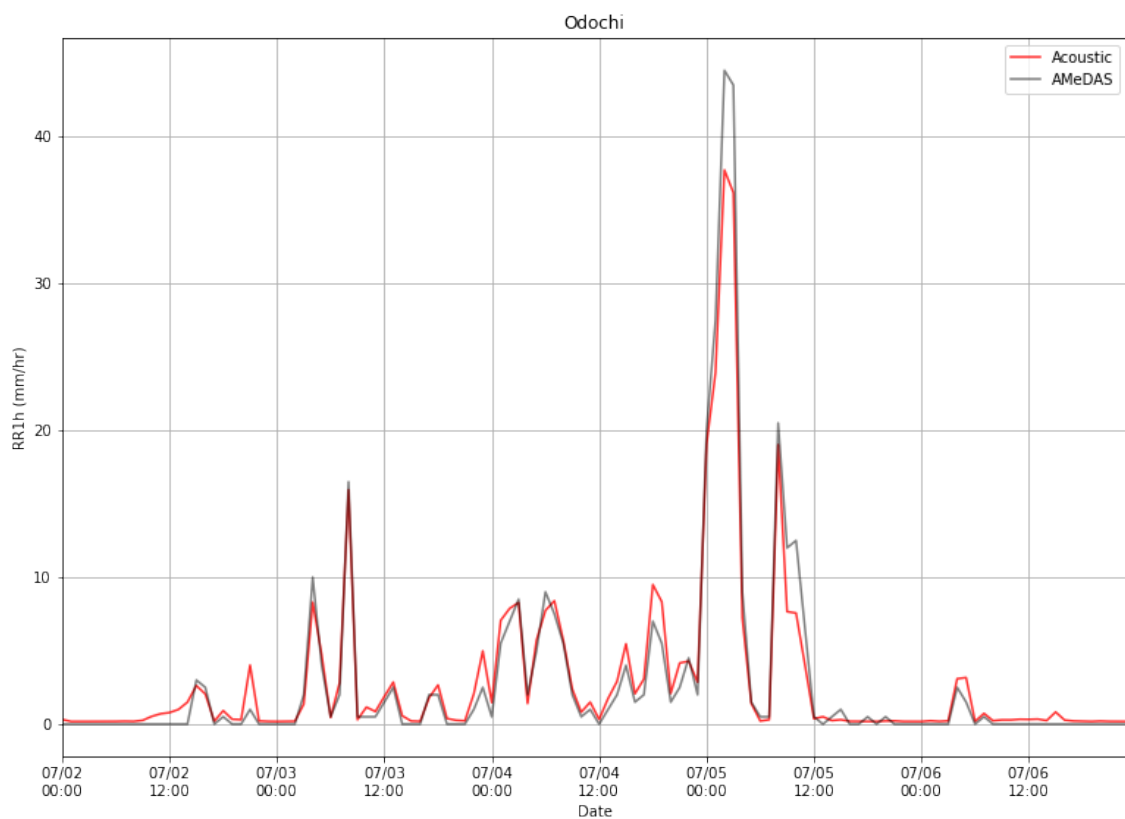


図 4.8: 大栃:1 時間雨量推定



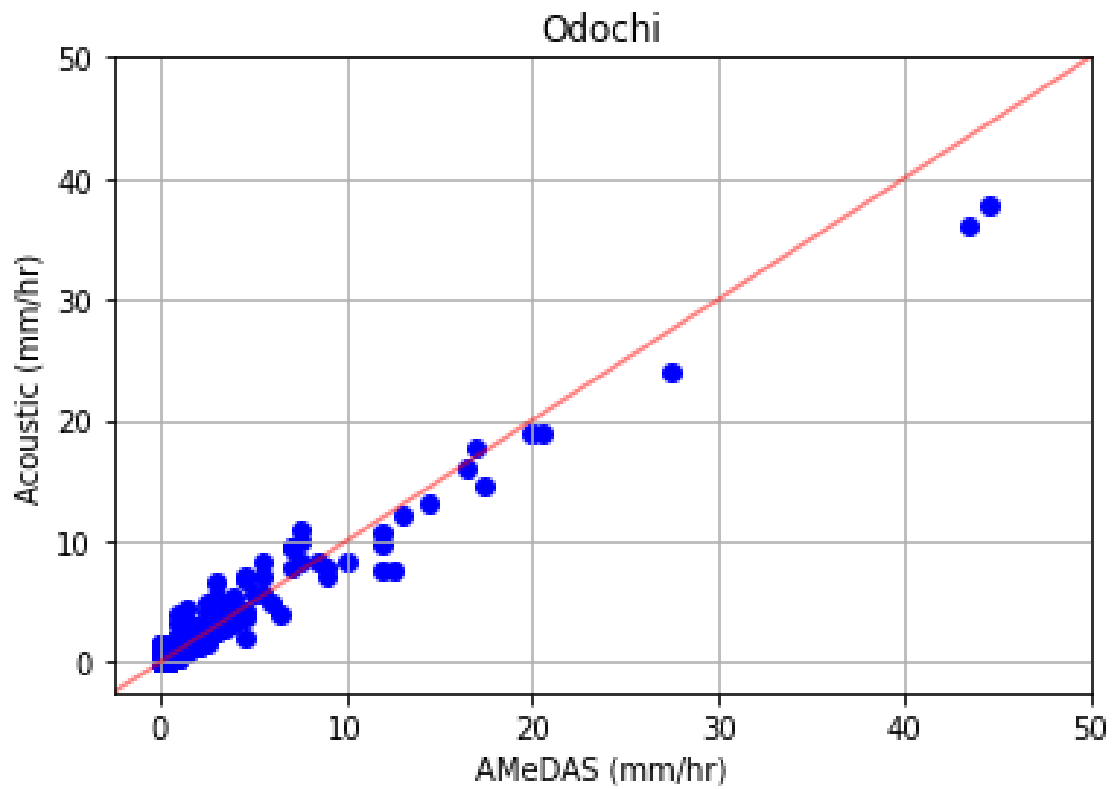


図 4.9: 大柵: 音響雨量計と簡易雨量計との 1 時間雨量強度の散布図

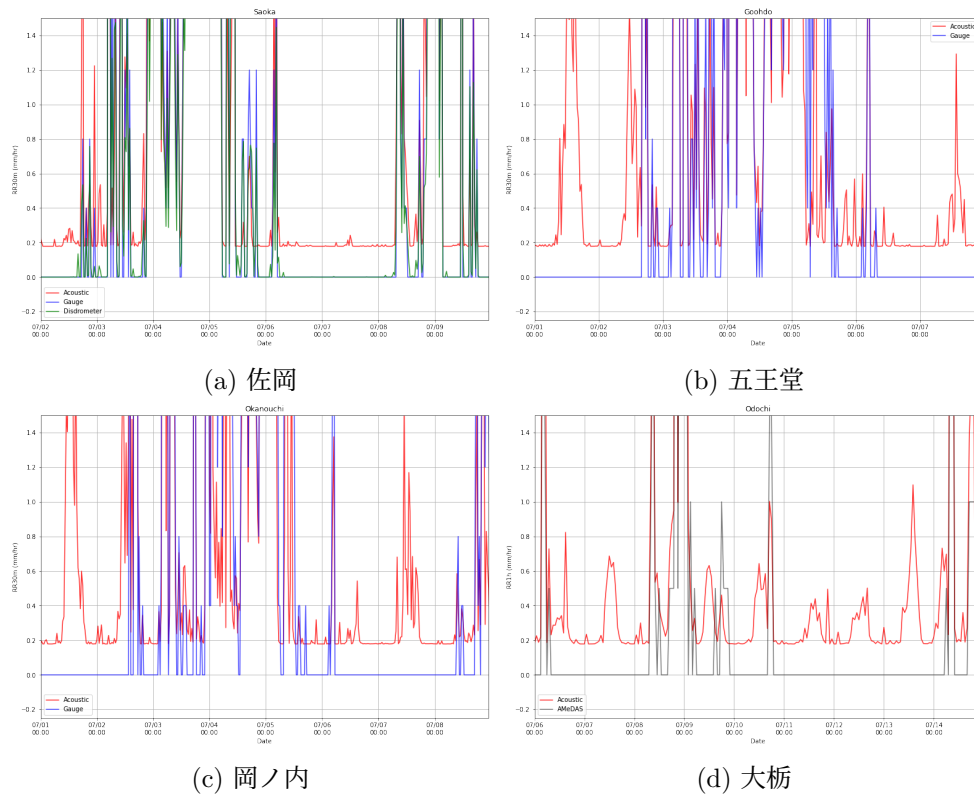


図 4.10: 拡大図



## 第5章 考察

### 5.1 パワー分布と雨滴粒径分布の関係

2021 年の 8 月と 9 月で 5 分間の雨量強度が大きい上位 5 個を抜き出し、パワー分布 (図 5.1) と雨滴粒径分布 (図 5.2) の図を作成した。これらの図から、雨量強度が大きいとパワー分布の強度は右側に分布し、雨滴粒径分布では直径が大きい粒子の分布が見られる。このことから、単純な回帰式でも、ピークパワー値の平均値で雨量推定を行うことができる。また、回帰分析を行う際に説明変数を各ピークパワー値を用いれば、雨音から粒径分布の推定ができる可能性がある。

### 5.2 背景音について

雨音の特徴を調査するために、室内実験を行った (図 5.3a)。2 階の高さからマイクロシリンジを用いて、PVC 箱に滴下した。その結果を図 5.3b に示す。この図 5.3b から、500Hz 以下に強い信号が見られ、その倍音となる周波数で信号が確認できた。晴れの日にはマイクで録音される鳥の鳴き声などは、今回の確認した水滴の周波数に比べて高い周波数に多く出てくる。そのため、音データをフーリエ変換して高周波数をカットして背景音の影響を抑えることができれば、回帰推定の精度を上げることができる可能性がある。

### 5.3 過小評価の原因について

Michael ら (2020)[7] はディストロメータは雨量強度を 16.5% の過小評価する傾向があり、これは直径が 0.5~3.5mm の雨滴数を過小評価するためであることを示した。本研究で佐岡に設置した簡易雨量計とディストロメータでその関係性を調査を行った。5 分間ごとの雨量強度の散布図を図 5.4 に示す。横軸が簡易雨量計、縦軸がディストロメータの雨量強度である。Michael ら [7] と同様、ディストロメータと簡易雨量計の雨量強度を比較すると、相関係数は 0.95、バイアスは -0.178mm/hr で 26.6% の過小評価する傾向があった。つまり、真値をディストロメータとして音響雨量計の雨



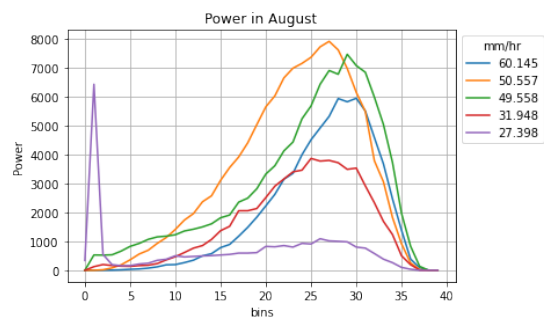
量推定を行ったため、簡易雨量計の観測雨量と比較したところ過小評価の傾向があったと考えられる。

五王堂ではマイクの故障により推定ができていない期間があった。

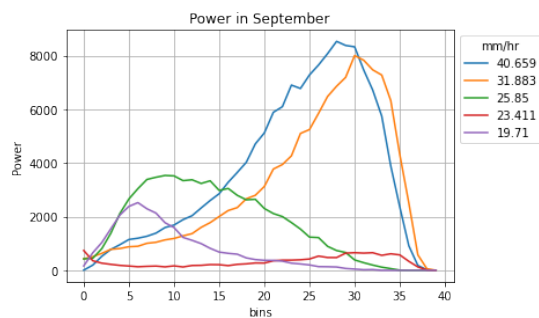
## 5.4 音響雨量計の設置に関して

設置を続けていると図 5.5 のように風の影響によって本体やバッテリー部分が転倒することが起きた。PVC 箱を密閉していると箱の内部で結露 (図 5.7) が起こり、1 年ほどで図 5.6 のような劣化が起こる。五王堂ではマイクの振動板が結露の水で故障し、録音することに失敗した。



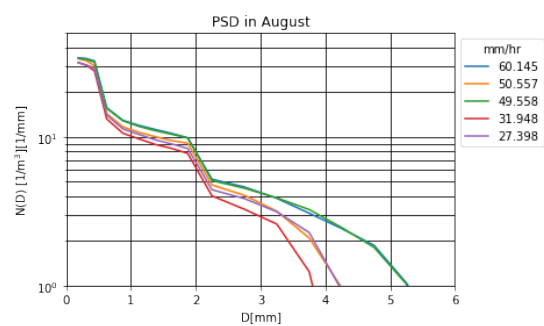


(a) 8月

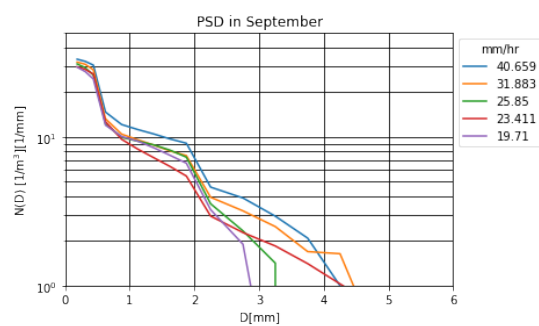


(b) 9月

図 5.1: パワー分布: 横軸は仕分けた強度、縦軸はパワー値

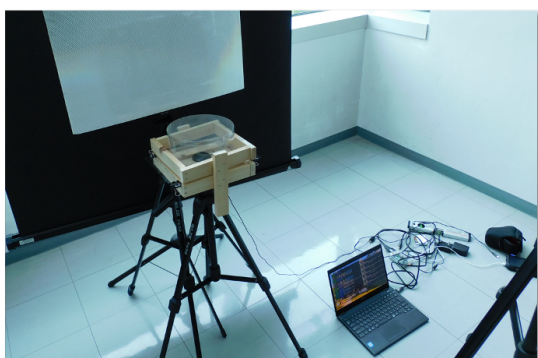


(a) 8月

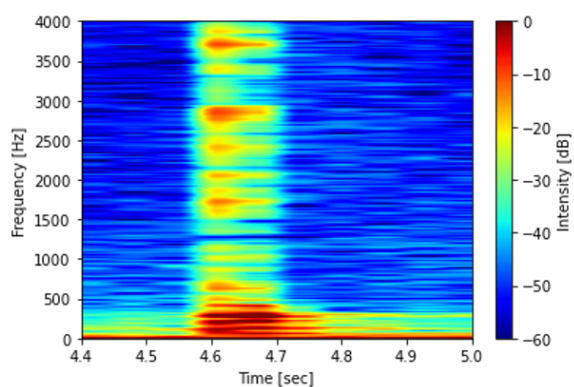


(b) 9月

図 5.2: 雨滴粒径分布: 横軸は粒子の直径、縦軸は数密度に直径を割ったもの



(a) 室内実験の様子



(b) 3 $\mu$ l を滴下した音のスペクトログラム

図 5.3: 室内実験



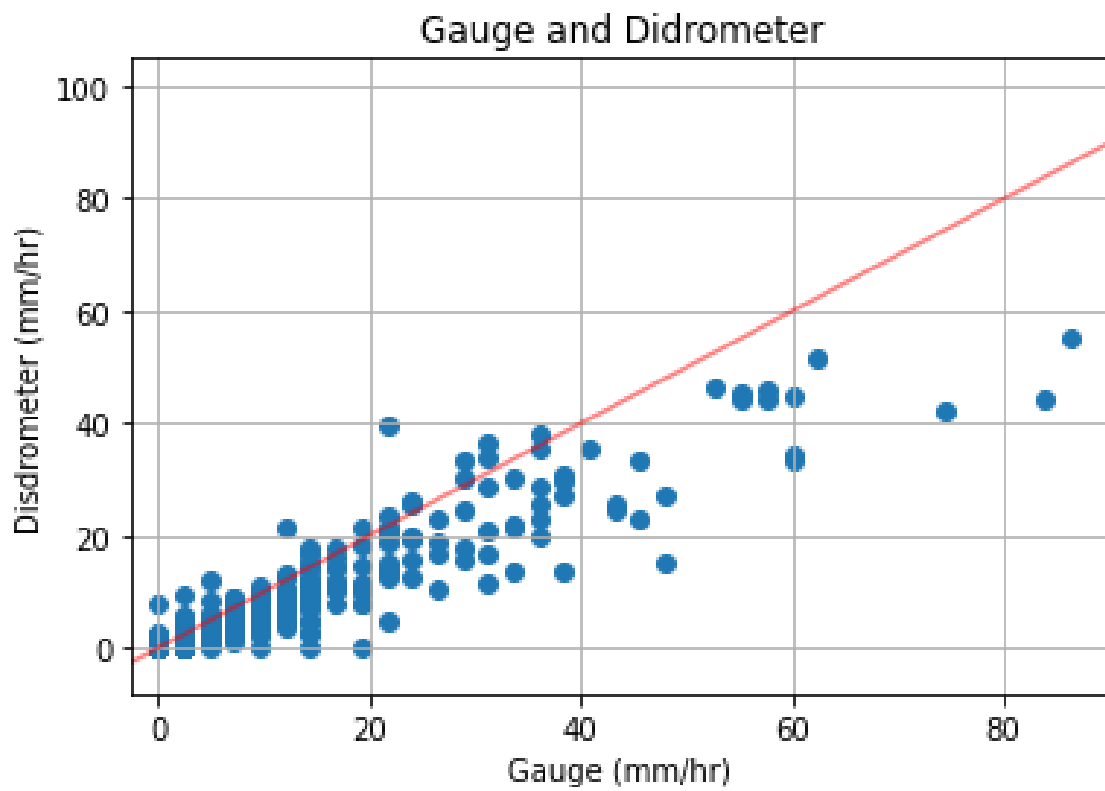


図 5.4: 佐岡に設置した簡易雨量計とディストロメータの雨量強度



(a) 五王堂: 本体の転倒



(b) 大枋: バッテリー箱の転倒

図 5.5: 設置のトラブル





図 5.6: 劣化したマイクと PVC 箱



図 5.7: PVC 箱内部が結露した状態



## 第6章 まとめと今後の課題

### 6.1 まとめ

低価格な装置で降水のタイミングや雨量の推定が可能であることを示した。特にアメダス (大柄) での 1 時間平均雨量推定では、観測雨量と同等の推定結果を得ることができた。しかし、ディストロメータの雨量強度を真値として求めた回帰式を求めたため、簡易雨量計の観測結果に比べて過小評価の傾向が確認された。アメダスと比較して簡易雨量計で顕著に出た理由としては、転倒するますの容積が小さく、記録時間が細かいことが考えられる。

本研究で求めた回帰式 3.2 を用いて音響雨量計による推定では背景音の影響によって常に 0.2mm/hr 程度の雨量が推定される。

### 6.2 今後の課題

今回は音のデータについて背景音の除去を行っていないため、風などの環境音が雨量推定に関わっている可能性がある。また、雨が衝突する PVC ボックス表面が乾いた状態と十分濡れた状態で、音量と雨粒の大きさの関係が異なる可能性がある。そのため、深層学習を用いて風の情報やボックス表面の状態を含めた回帰モデルを作ると精度が向上する可能性がある。



## 謝辞

本研究の雨量ネットワーク構築の实地にあたり、ご助力いただいた方々に深謝いたします。

- 高銀地域経済振興財団 令和4年度助成金
- 香美市役所物部支所

本研究において、高知工科大学環境理工学群端野平典准教授には、学会の発表に関する助言や音響雨量計の設置・開発のアイデアなどについて多くのご指導を頂いたことに深く感謝いたします。



## 参考文献

- [1] 林尚志, 鶴田泰士, 石川忠晴 (1997); 音を利用した雨量計の試作とテスト.
- [2] 南光一樹 (2020); 雨滴測定から見えてくる葉や枝での雨の振る舞い.
- [3] 気象庁 HP 「雨の強さと降り方」 [https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo\\_hp/amehyo.html](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/amehyo.html)
- [4] Joss, J., and A. Waldvogel (1967); Ein Spektrograph für Niederschlagsstärken mit automatischer Auswertung Pure Appl. Geophys, 68, 240-246.
- [5] 橋本龍朋, 有岡和奏, 大久保朱里, 小松颯, 横山有太, 高田拓 (2016); 衝突音による雨の分類のための基礎実験結果
- [6] 吉本直弘, 松尾亮太郎 (2016); 雨滴の大きさの違いを捉える雨音の簡易観察装置の開発
- [7] Michael Fehlmann, Mario Rohrer, Annakaisa von Lerber, and Markus Stoffel (2020); Automated precipitation monitoring with the Thies disdrometer: biases and ways for improvement