

温度勾配を用いた超音波の屈折

庄司 将崇 大森 瑛太

1 要旨, 概要

物理の授業で, 地表付近と上空で気温が異なると, 音波が屈折するため, 遠くの音が聞こえにくくなったり, 聞こえやすくなったりすることを学習した。関連する先行研究では, 距離を 2 km とった草地において音波の屈折を測定²⁾ したり, それと同じ気象条件でシミュレーションを行い実測値と比較³⁾ したりしていた。

しかし, 実験室で温度勾配をつくり, 音波を屈折させたという報告はない。これはおそらく, 空気は主に対流によって温まるため, 部屋の中で温度勾配をつくること自体が難しいことや, 音は光と比べて波長が長いので, 広がりながら伝わり, 狭い空間ではそれが反射して直接波と干渉してしまうため, 小さいスケールでの観測が困難であるからだと思われる。

そこで, 私たちは, 「実験室の机上で音波の屈折を観測すること」を目的に実験を行った。実験には, 指向性が高いという理由から超音波 (40kHz) を使用した。また, シリコンヒーターと送風機を用いて, 実験室内に下側が温かく上側が冷たい空気層をつくることに成功した。その空間に, 水平方向から上向きに角度をつけて超音波を入射し, 受信機を鉛直方向に動かしながら, 各地点における p-p 値 (振幅の 2 倍) を測定した。その結果, 音波が理論通り上方に屈折することを確認できた。

本研究では, 実験室にて初めて音波の屈折を観測できただけでなく, 空気の温度やその温度勾配に依存して, 鉛直方向の受信機の位置と p-p 値の関係を表すグラフの形状自体が複雑に変化することが分かった。今後, その変化を定量化できれば, 屈折を利用した新しい原理による空気の温度測定が可能になるかもしれない。

2 問題提起, 研究目的

音波が空気中を伝わる速さ V [m/s] は, 近似的に気温 t [°C] を用いて次式のように表されることが知られている。

$$V = 331.5 + 0.6t \quad (\text{乾燥空気の場合})^1$$

したがって, 地表付近と上空で気温が異なると, 音速が変わり, 音波が屈折するため, 遠くの音が聞こえにくくなったり, 聞こえやすくなったりする。

関連する先行研究では, 距離を 2 km とった草地において音波の屈折を測定²⁾ したり, それと同じ気象条件でシミュレーションを行い実測値と比較³⁾ したりしていた。

しかし, 実験室で温度勾配をつくり, 音波を屈折させたという報告はない。これはおそらく, 空気は主に対流によって温まるため, 部屋の中で温度勾配をつくること自体が難しいことや, 音は光と比べて波長が長いので広がりながら伝わり, 狭い空間ではそれが反射して直接波と干渉してしまうため, 小さいスケールでの観測が困難であるからと思われる。そこで, 私たちは「実験室の机上で音波の屈折を観測すること」を目的に実験を行った。

3 研究方法, 結果, 考察

<準備物>

- ・超音波センサー 送受信セット (UR1612MPR UT1612MPR 秋月電子)
- ・オシロスコープ (GDS-1152A テクシオ・テクノロジー)
- ・ファンクションジェネレーター (AFG-2012 GW INSTEK)
- ・アルミ筒 (長さ 5.2 cm, 外径 3.2 cm, 内径 2.8 cm)
- ・送風機
- ・デジタル温度調節器 (ジャスト株式会社 TR-KN-TK)
- ・シリコンヒーター (株式会社八光電機 SBH2177 240439)
- ・x, y 移動ステージ
- ・物理スタンド
- ・メジャー
- ・木版 (装置の高さを調整するため)

<実験のセッティングについて>

温まった空気は上昇するため、初めはヒーターを下に向けて実験装置全体の上方に置き、上側が温かく下側が冷たい温度勾配ができた空間をつくらうとした。しかし、上側にヒーターを置いてしまうと、反射、干渉の影響が大きく、測定が困難であったため、ヒーターは下側に置き、下側が温かく上側が冷たい温度勾配をつくって実験を行うことにした。そのような温度勾配のつくり方は後ほど説明する。

また、予備実験において可聴音では指向性が低く、音波の屈折を確認することができなかった。そこで、指向性の高い超音波（40kHz）を用いることにした。超音波は空気中での減衰が激しい⁴⁾ため、送信機から受信機までの直線距離は0.40mと短めに固定して実験を行った。0.40mとした理由は、シリコンヒーターの大きさを考慮したためである。また、空気中での超音波の減衰率は、温度や湿度によっても変化するため、実験中はエアコンをかけ、同じ日に、できるだけ短時間ですべての測定を行うようにして、気温や湿度の影響を無視できるよう工夫した。

超音波は可聴音と比べると指向性が高いが、今回使用した超音波の指向角は約60°と、ある程度広がりながら伝わるため、次の2つの工夫をした。一つ目は、アルミ筒を送信機の前方1.8cmの位置に置くことである。アルミ筒の大きさや位置は、試行錯誤で音波の大きさが最大となるよう調整して決定した。二点目は、そのアルミ筒の先端をシリコンヒーターのすぐ近くに置くのではなく、ヒーターから4cm上に固定し、水平角度20°で上方に入射させたことである。シリコンヒーターから近いところに置いたり、水平角度15°で実験したりした際は、反射波と干渉し、うまく測定できなかった。一方、角度をつけすぎると、温度勾配ができていない空間を音波が通過する状況をつくれなくなるため、この実験では20°が妥当であると考えた。以上を踏まえた、実験のセッティングを写真1に示す。

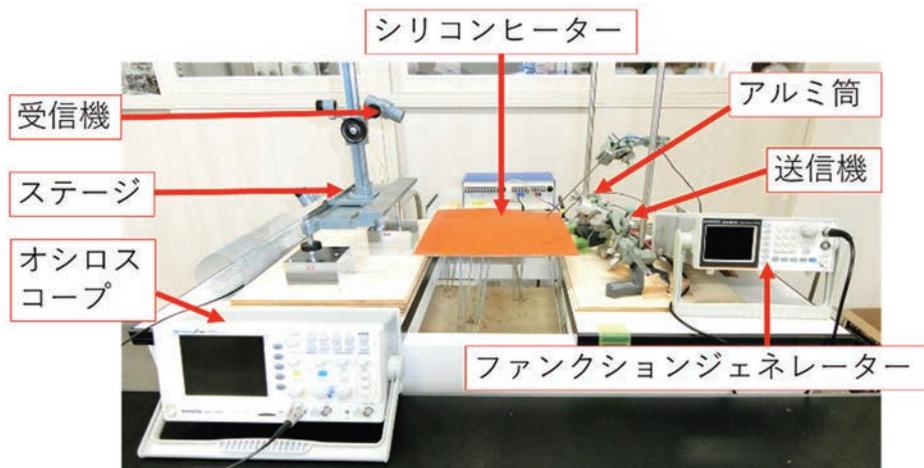


写真1 実験のセッティング

ここで、実験室で簡易的に温度勾配をつくる方法を説明する。30cm×30cmのシリコンヒーターを設定温度に保ち、送風機を用いて横から風速約0.33m/sの微風を当てると、下側が温かく上側が冷たい空気層をつくることができた。

微風を当てた理由は二つある。一つ目は、温まった空気が上昇し、温度勾配ができなくなることを防ぐためである。二つ目は、空気の対流によってオシロスコープに表示される値が大きく変動し、値が読み取れなくなることを防ぐためである。写真2に実験の様子を示す。送風機が実験装置から離れているのは、風速を約0.33m/sまで弱めるためで、試行錯誤でオシロスコープの値が最も安定する距離を探した。



写真2 送風機で風を送る様子

ここで、そもそも横から風を当てていても、空気が温まり温度勾配ができているのかを調べるため、熱電対を用いて空気の温度を測定した。結果は、図1のようになった。

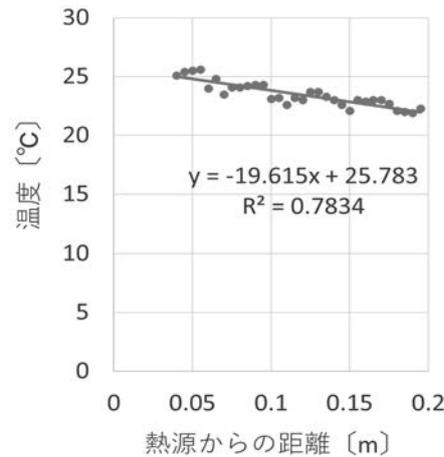


図1 空気の温度と熱源からの距離の関係

横軸は、熱源の高さを0とした時の熱電対の高さである。熱電対やデジタルマルチメーターに個体差があることや、表示される温度が整数であることなどが影響し、空気の温度を正確に測定することは難しかった。しかし、熱源からの距離が離れれば離れるほど、温度が下がっているという傾向は見られたため、風を当てていても温度勾配はできていると考えた。なお、実験では温度勾配ありの時となしの時で条件をそろえるため、どちらの実験においても送風機で風を送った。

<測定手順>

1. 超音波送信機を水平から20°上方に傾け、超音波を入射した。
2. 図2で示したように、受信機の高さを変えながら、オシロスコープでp-p値（音の大きさの指標で振幅の2倍にあたる）を測定した。この時、受信機が音波の入ってくる方向を常に向き⁵⁾、かつ受信機と送信機の距離を一定に保てるよう、伸びない糸を用いて調整した。これは、先述したように超音波は空気中での減衰が激しいため、送受信機間の距離が少しでも変わると測定値が大きく変わってしまうためである。p-p値は、それぞれの高さ毎に5回ずつ測定した。
3. シリコンヒーターの温度を40°Cで一定に保ち音波が通過する空間に温度勾配を作った。その後、①②と同様に実験した。ただし、温度勾配をつくと測定値のぶれが大きくなるため、それぞれの高さ毎に12回測定した。
4. シリコンヒーターの温度を60°C、80°C、90°Cで一定に保った場合でも同様に実験した。

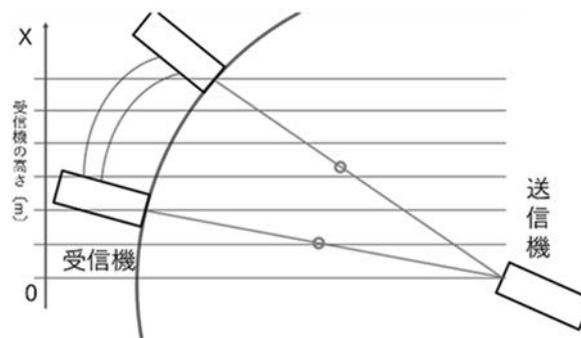
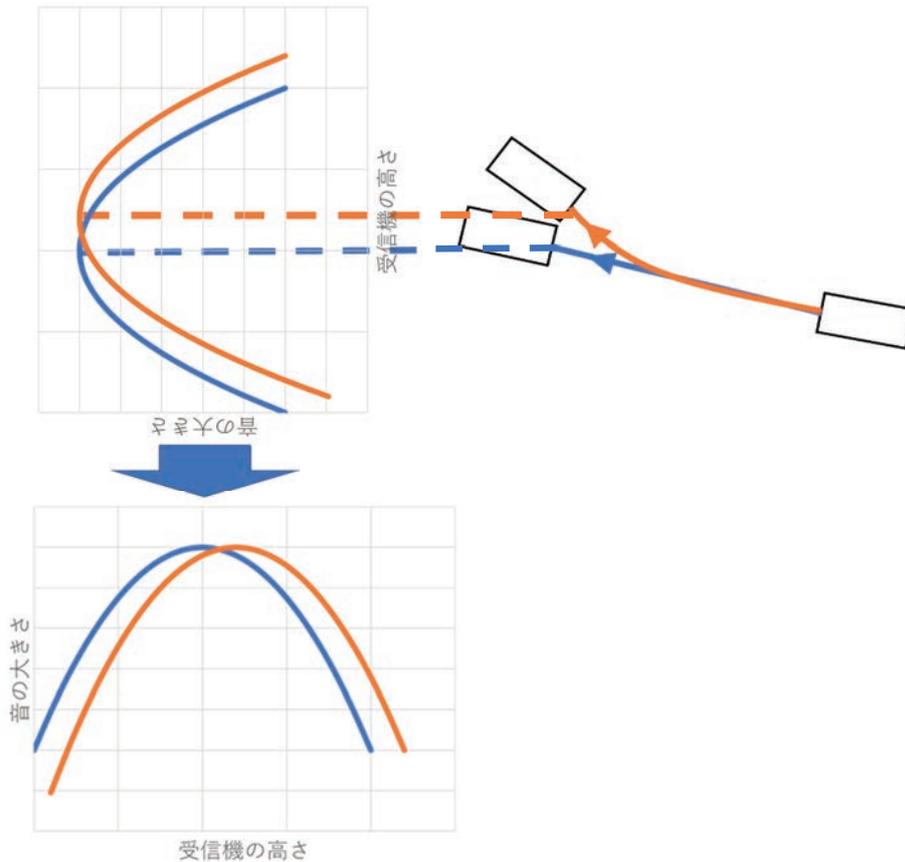


図2 受信機の移動の様子

<仮説>

下側が温かく上側が冷たい温度勾配ができているため、下図のオレンジの矢印のように、音は上方に屈折するはずである。そのため、横軸に高さを、縦軸に p-p 値をとったグラフは右にずれると考えた。



<データ処理の方法>

熱源なしのときは図3のように5回測定したデータの平均値をとった。例として高さ0mと0.005mのデータを示した。

高さ [m]	熱源なし					平均
	1	2	3	4	5	
0.000	83	83	83	81	82	82.4
0.005	77	80	78	79	79	78.6

図3

40°C, 60°C, 80°C, 90°Cのときは、図4のように12回測定したデータから最大値、最小値を除いた10回の平均値をとった。例として高さ0mと0.005mのデータを示した。

高さ [m]	40°C												平均
	1	2	3	4	5	6	8	7	9	10	11	12	
0.000	60	62	62	62	60	60	60	60	60	62	56	62	60.8
0.005	74	80	78	72	72	84	78	86	76	80	84	78	78.4

図4

<結果>

受信機の高さが送信機と同じ高さの時を0mとした受信機の位置(高さ)を横軸に、縦軸に p-p 値をとったグラフを図5に示した。どの設定温度のグラフも小刻みに上下しながら山の形となった。また、ヒーターの温度が高いほど p-p 値が全体的に大きくなった。

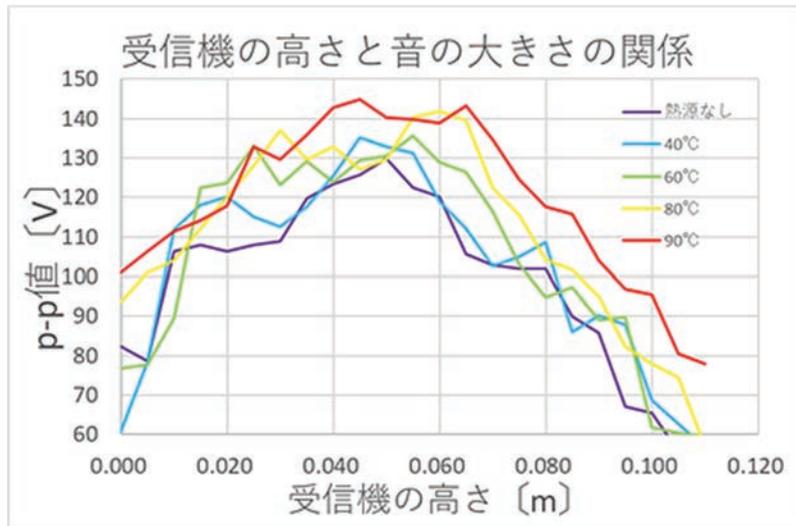


図5 受信機の位置と音の大きさの関係

<考察>

どのグラフも小刻みに上下しながら山の形となったのは、超音波送信機の特⁵⁾性だろう(図6参照)。先行研究より引用して説明すると、まず、超音波送信機から直線上に直接波が進行する。同時に、送信機の端からはエッジ波が発生する。この波は内側と外側で位相が異なり、直接波と干渉を起こす。各点で干渉が起こり、強めあったり弱めあったりするため、グラフの形は小刻みに上下しながら山の形となる。

また、ヒーターの温度が高いほど p-p 値が全体的に大きくなったのは、空気の温度が上昇し、減衰係数が小さくなった⁴⁾ からだと考えた。

更に、熱源の温度変化に伴ってグラフの形自体も変化してしまった理由を、次の二つの視点から説明したい。まず、「超音波の減衰」に注目すると、設定温度によって空気層の温度勾配の様子(高温・中温・低温の幅など)が異なり、受信機の高さ毎に通過する各温度の空気層の割合が変わることで音波の減衰の仕方が変化し、グラフの形が変わると考えた。次に、「音波の屈折」に注目すると、グラフの左側(受信機が下方にあるとき)では、ほぼ水平に近い角度で入射した音波を受信しているため、そもそもあまり屈折しない。一方で、グラフの右側(受信機が上方にあるとき)では、ある程度角度をつけて入射した音波を受信しているため、音波は十分に異なる温度の空気層を通過することができ、より屈折すると考えた。結果、グラフの形状は設定温度が上がるほど、右に末広りの形で伸びていくと考えた。

次に、受信機の高さ毎の p-p 値をそれぞれの温度毎に箱ひげ図で表したものを図7に示した。基準として、「熱源なし」のときの最大値の位置(受信機の高さ4.5cmのところ)に線を入れている。図中の矢印は、各設定温度において p-p 値が最大と思われるところを示している。

箱ひげ図より、熱源温度が高くなるにつれて、グラフの頂点だと思われる部分が右に約 5mm ずつずれていることが分かった。なお、温度が高くなるにつれてデータのばらつきが大きくなっていることも読み取れる。これは、空気の対流が激しくなったためだと考えられる。

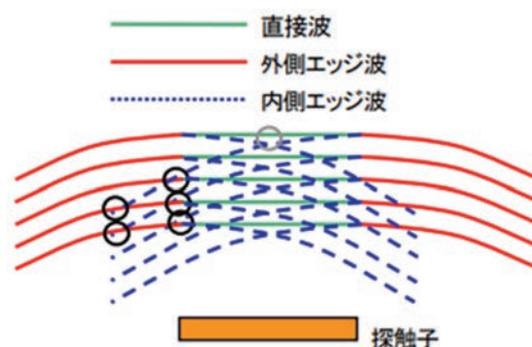


図6 参考文献5より引用

熱源なし

40°C

60°C

80°C

90°C

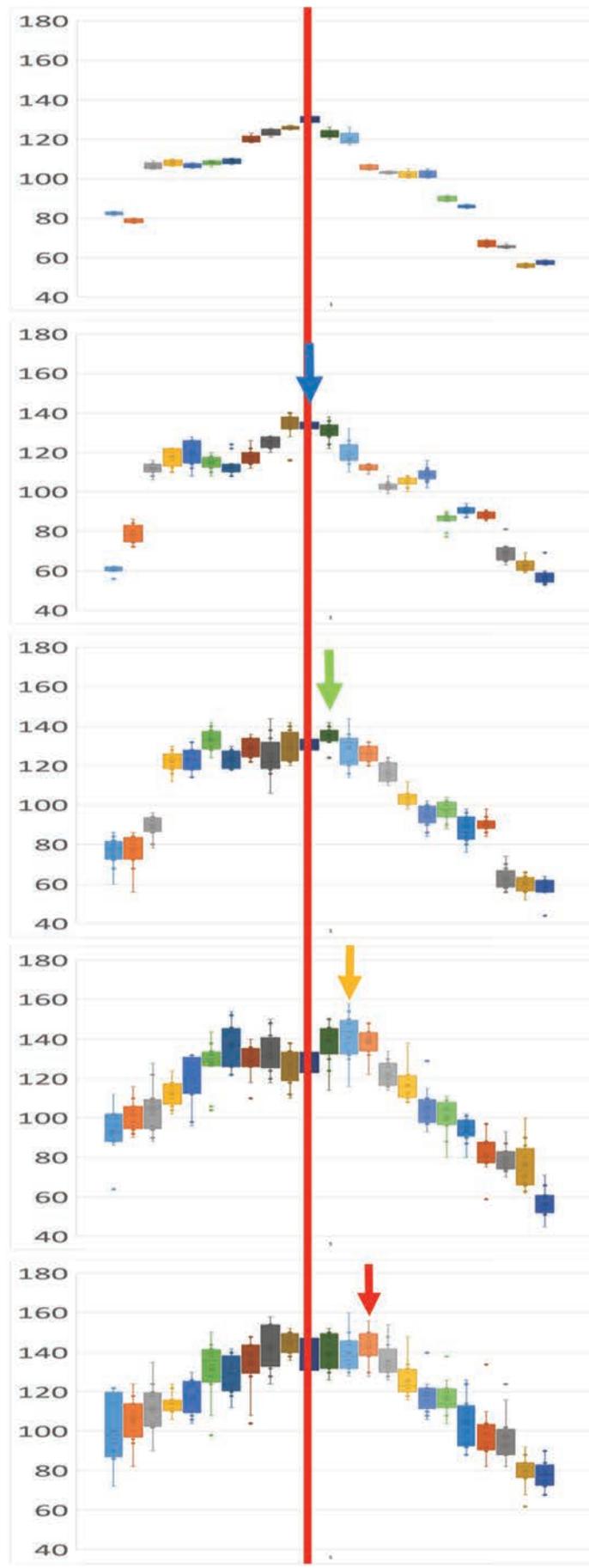


図7 測定値を箱ひげ図で表したもの

更に、屈折によるグラフのずれをより見やすくするために、データの平均値に対してガウシアンカーネル平滑化を行った。平滑化処理の際に使用するデータの範囲は、任意の点とその前後2つずつの点を合わせた計5個とした。

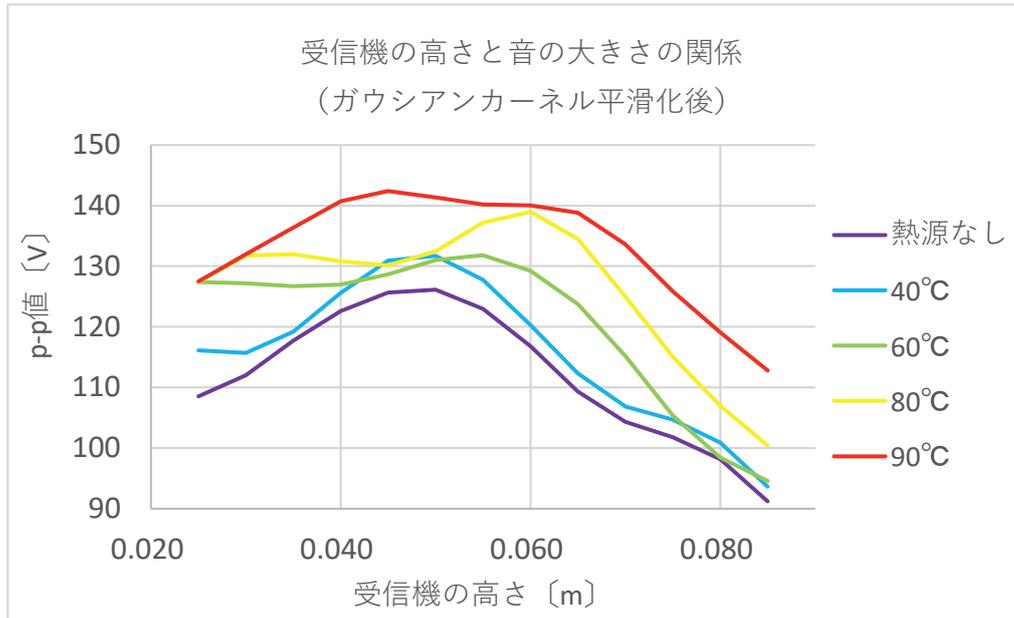


図7 平滑化処理を行ったグラフ

40°Cの時はあまりずれていないが、60°C、80°C、90°Cの時はグラフが右にずれていることが読み取れる。標準化や最小二乗法などの統計処理も試みたが、本実験ではグラフの左側と右側とでデータの傾向が異なることや、データが近似曲線に従っている根拠が得られなかったことから、ガウシアンカーネル平滑化を選択した。

4 結論 (課題)

本研究の成果は以下の3点である。

1. 実験室の机上という小さいスケールで、音波の屈折を観測できた。
2. 実験室内で、ヒーターと送風機を用いて、下側が温かく上側が冷たい空気層をつくることができた。
3. 音波の屈折を観測できたことから逆に、風を当てていても空気は熱放射で瞬時に温まっていることを発見できた。

追加で、受信機をより細かく2mmずつ動かし、ヒーターを40°C、60°C、70°C、80°Cに設定し、同様に実験を行った。その時のグラフの頂点のずれと熱源温度の関係を表したものが、図8である。試行回数を増やし、こうしたデータを集め数式化できれば、音の屈折を利用した温度測定が可能になるかもしれない。

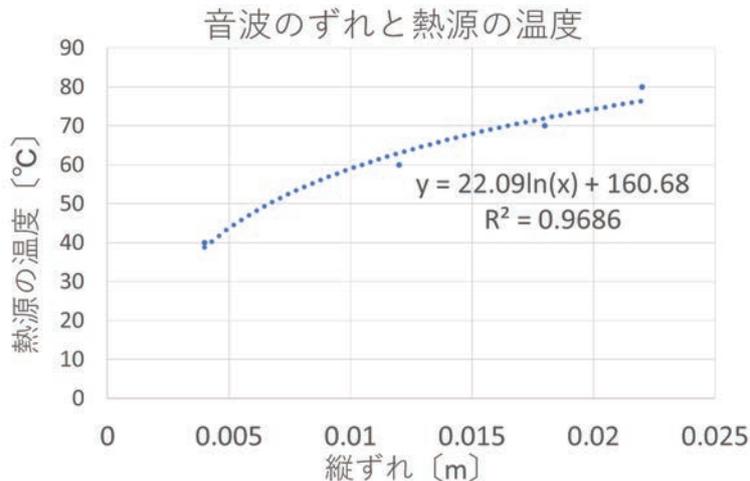


図8 音波の屈折と熱源温度の関係

また、今回はグラフの頂点のずれに着目したが、熱源の温度や、空気の温度勾配の様子に依存して、グラフの形状が複雑に変化することも分かったため、その変化を定量化できれば、逆に空気の温度測定に活かせるかもしれない。私たちは日頃、アルコール温度計や熱電対などを用いて気温を知ることができるが、それは温度計が空気と熱平衡状態になっていることが前提であり、また本研究のような実験においては、熱源からの熱放射で温度計自体が温まってしまうため、空気の温度を正確に知ることは極めて難しい。そこで、超音波の屈折を観測し、そこからスネルの法則を用いて空気の温度や温度勾配の様子を逆算するシミュレーションを開発できれば、新しい原理の温度測定が可能になるだろう。その実現に向けて、まずは、測定値のブレを軽減するためのより良い方法を模索したい。また、温度勾配がどのようにできているのかを正確に知る方法を検討する必要もある。

5.参考文献・引用文献

- 1) 物理.実教出版 (2023)
- 2) P.H.Parkin W.E.Scholes. The horizontal propagation of sound from a jet engine close to the ground, at Hatfield Journal of Sound and Vibration.1965.P.353～374
- 3) 大林組。「屋外での騒音伝搬に及ぼす気温と風との影響予測」.1997
- 4) ISO 規格による騒音伝搬予測計算法
- 5) 田中雄介 小倉幸夫.超音波探触子の送信時と受信時の指向性

6.謝辞

本研究にあたって、指導して下さった川西陽子先生、本田一恵先生をはじめ本校の先生方に深く感謝いたします。