

## 積乱雲の出来る仕組みを調べて作ってみよう!!

茨城大学工学部機械工学科 松村研究室

代表 鈴木敏修(大学院理工学研究科機械工学専攻1年)

富田翔 霜田香純 大原俊弘

### 1.概要・目的

地表付近の気温が急激に上昇する暑い夏の日などに、積乱雲が急激に発達して激しい雷雨をもたらすことは良く知られている(図1)。積乱雲は、地表付近で暖められた湿り気を含む空気が軽くなって上昇し、一方で上層に達した空気が冷やされ下降するプロセスを繰り返すことで急激に鉛直方向に発達する"雲"として知られている。積乱雲内部では、上昇する暖かい空気と、上層から下降するチリや水滴が激しく衝突して雷を誘発する。近年の世界的な異常気象により、我々の身近でも"ゲリラ豪雨"や積乱雲が大きく成長した"スーパーセル"、あるいは積乱雲に伴って発生する急激な下降流である"ダウンバースト"など、人間の予想もつかないような激しい災害につながる例も増えている。最近では、スーパーコンピュータの発達などでこうした急激な気象変化の精度の良い予測も行われるようになってきている。その一方で、積乱雲の形成過程や発生する条件を物理的な現象として捉えた場合、どのような条件が揃った場合に積乱雲が発達して、そのとき積乱雲内部ではどのような流れが起きているのかについては、実験的に検証された例は少ないと思われる。



図1 積乱雲の例(気象庁ホームページより)

そこで、我々は流体力学・熱力学的な観点から積乱雲の形成と流れのパターンを可視化する装置を製作し、積乱雲の発生メカニズムを工学的な観点から実験的に解明することを目指す。特に、物理現象を実際に目で見ながら確認し、直感的に理解することの出来る、科学教材としても有用な実験装置を製作することを目的とする。

## 2.研究方針

本実験では、図 2 に示す自然対流を模擬した装置を製作して、積乱雲に見立てたプルーム(塊)が熱流体力学的にどのような挙動を示すのかを実験的に明らかにする。装置は、可視化容器内に煙あるいは着色水を入れておき、下面をヒーターにより加熱、上面を一定温度に冷却して、密度差による対流で界面から誘起される雲状のプルームがどのように成長するのかを観察するものを目指す。伝熱工学においては、この種の観察方法はしばしば見られるが、本試験装置では上下面をそれぞれ適切な境界条件に保った上で、積乱雲を模擬したプルームの生成条件を定量的(加熱量、密度差、温度など)に評価することが出来る。

図 2 に示す実験装置作成の前段階として、予備実験装置を作成した。この実験装置で予備実験を行い、加熱量・冷却量・伝熱面状態などの各種パラメータがどのように関係しているのかを明らかにする。調べた結果をフィードバックして、本実験装置を作成し、様々な条件で積乱雲の生成過程を観察するのが我々の研究方針である。

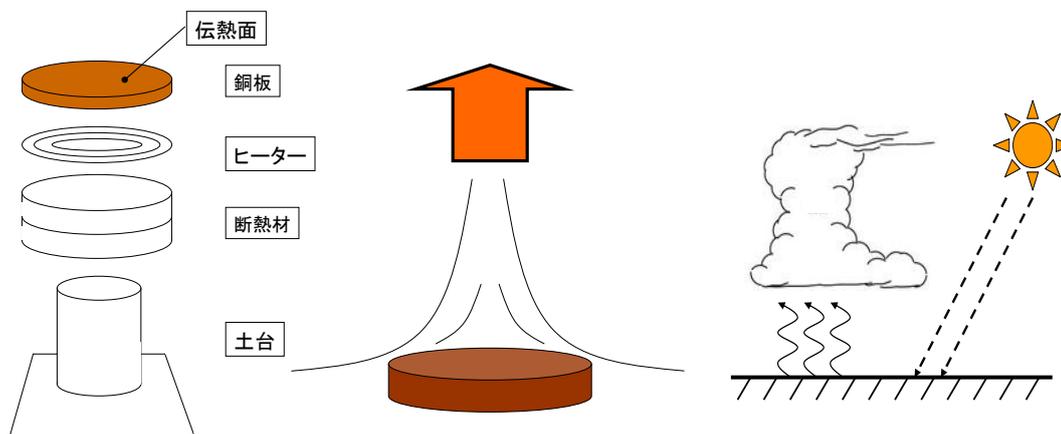


図 2 実験装置図

### 3. 予備実験装置

#### 3.1 銅円柱ヒーター

最初の装置作製にあたり、銅円柱の上底面を伝熱面とする装置を製作した。

##### 3.1.1. 実験装置作成

図 3 に実験装置の仕様を示す。直径 30mm、長さ 100mm の銅円柱の下底面に直径 8mm、深さ 73mm の穴をあけ、カートリッジヒーターを挿入した。そのカートリッジヒーターにより銅円柱を内部から加熱することで銅円柱の上底面を伝熱面とした。また、伝熱面の温度を測定するために上底面から 10mm 位置に直径 0.6mm、深さ 7mm の熱電対差込穴を 5mm 間隔に 3 つあけた。ここの 3 点の温度を測定し、温度差を求めることで伝熱面の温度を算出する。熱電対差込穴をあける際に、円柱側面に穴をあけるのは困難であったため、側面の一部を平面に加工し穴あけを行った。

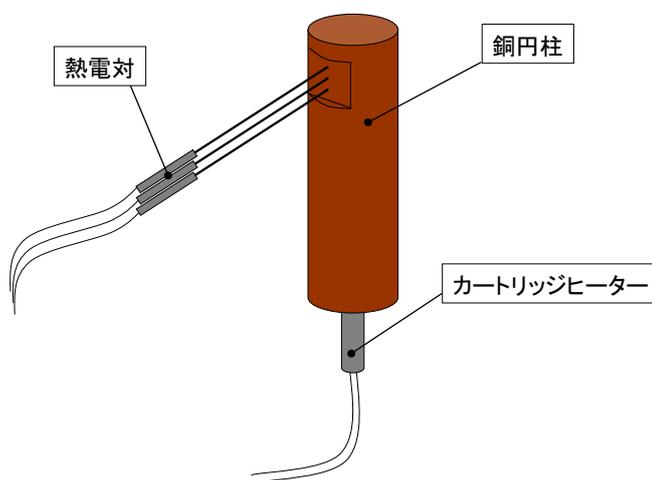


図 3 銅製円柱ヒーター

##### 3.1.2. 実験方法

伝熱面温度を算出するために実験を行った。以下に実験手順を示す。

1. 熱電対を上から CH1、CH2、CH3 と名付ける
2. カートリッジヒーターに電圧をかけずに 5 分間測定
3. カートリッジヒーターに 10V の電圧をかけて定常になるまで測定

##### 3.1.3. 結果・考察

測定結果を図 4 に示す。まず図 4 より、銅円柱の温度が定常にいたるまでにかかなりの時間がかかったことがわかる。また、図 4 の一部を拡大すると 3 点での温度差がほとんどなく、この実験体系では伝熱面温度を算出することができなかった。

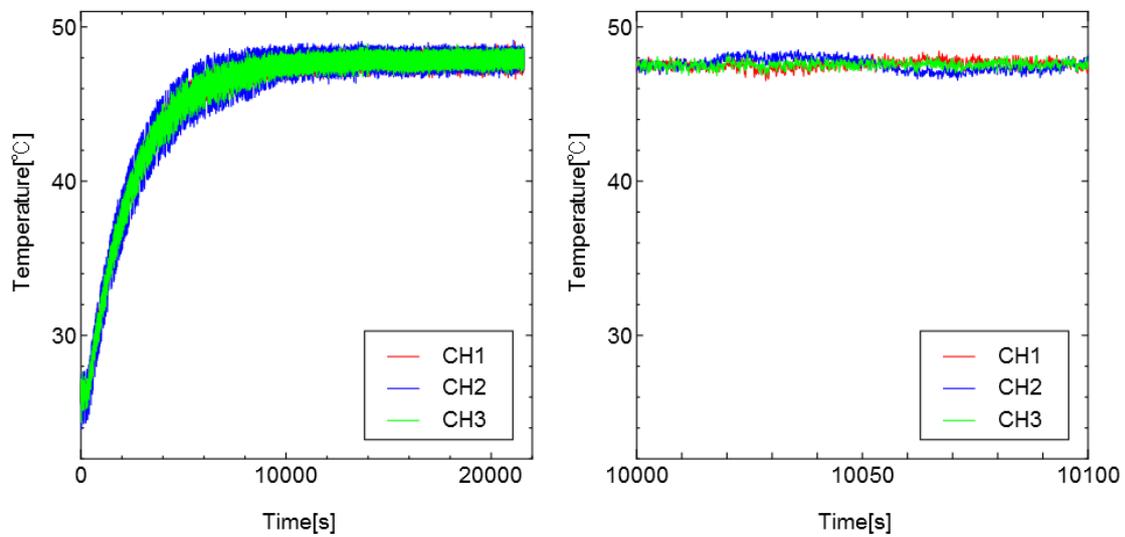


図 4 実験結果

### 3.1.4.改善点

- ・円柱では高さ方向の温度差が確認されず温度測定や温度制御が非常に難しい。  
→金属平板とシリコンラバーヒーターを用いることで温度測定・温度制御が容易になると推測される。

## 3.2 金属板ヒーター

二つ目の実験装置として、金属板とシリコンラバーヒーターを用いて金属板を伝熱面とする実験装置で実験を行った。

### 3.2.1.実験装置作成

図5に実験装置の仕様を示す。一辺が100mm、厚さが2mmの銅板とステンレス板を一枚ずつ用意した。それらの金属板を伝熱面にするため、金属板の下に100×200mmのシリコンラバーヒーターを設置した。シリコンラバーヒーターの下に断熱材として厚さ20mmの発泡スチロール板を三枚重ねた。また、金属板の温度測定にはK型熱電対を用いた。金属板の中心に直径0.5mm、深さ1.0mmの穴をあけ、熱電対を接着した。接着剤にはシリコンを用いた。シリコンラバーヒーターからの漏洩熱量を計測するため発泡スチロール板の温度を2箇所計測した。

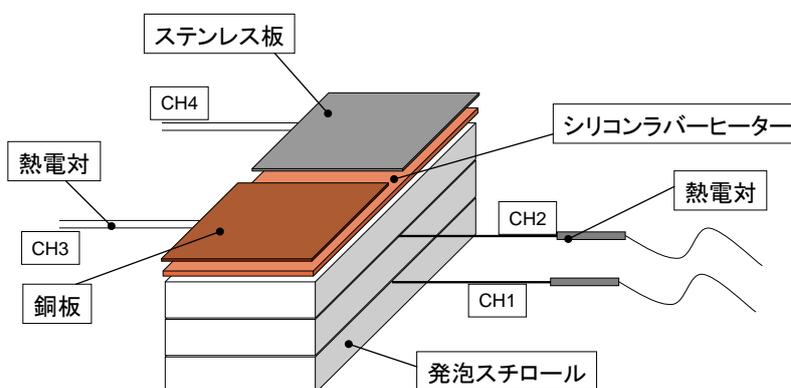


図5 金属板ヒーター

### 3.2.2.結果・考察

図6に実験結果を示す。図6から分かるように、シリコンラバーヒーターに20Vの電圧をかけると金属板・発泡スチロール板の温度は徐々に上昇し、約30分で一定の温度になった。シリコンラバーヒーターに直接接触している銅板とステンレス板はほぼ同じ温度になり、発泡スチロール板については、熱源から遠いと温度が下がっていく傾向がみられた。この結果は、シリコンラバーヒーターから下面への漏洩熱流束を求めるときに用いる。

銅板とステンレス板の温度測定においては大幅なぶれがみられた。一部を拡大した図をみると、発泡スチロール板の温度はほとんどぶれなかったのに対し、金属板の温度は2°C程度のぶれがみられる。この理由として2つ考えられる。1つ目は、金属板の温度を測定するのに自作の熱電対を用いたことが考えられる。今回は直径0.1mmのアルメル線とクロメル線をスポット溶接しK型熱電対を作成した。スポット溶接部を金属板にあらかじめあけといた穴に挿入し、シリコンで接着することで金属板の温度を測定した。自作であるため、溶接がうまくできてない可能性が考えられる。一方発泡スチロール板の温度の計測

は既製の K 型熱電対を使用したため、金属板の温度ほどぶれはみられなかった。2 つ目の理由として金属板はシリコンラバーヒーターに直接に接触しているためシリコンラバーヒーターに電圧をかけているスライダックからのノイズ等の影響を直接受けている可能性が考えられる。

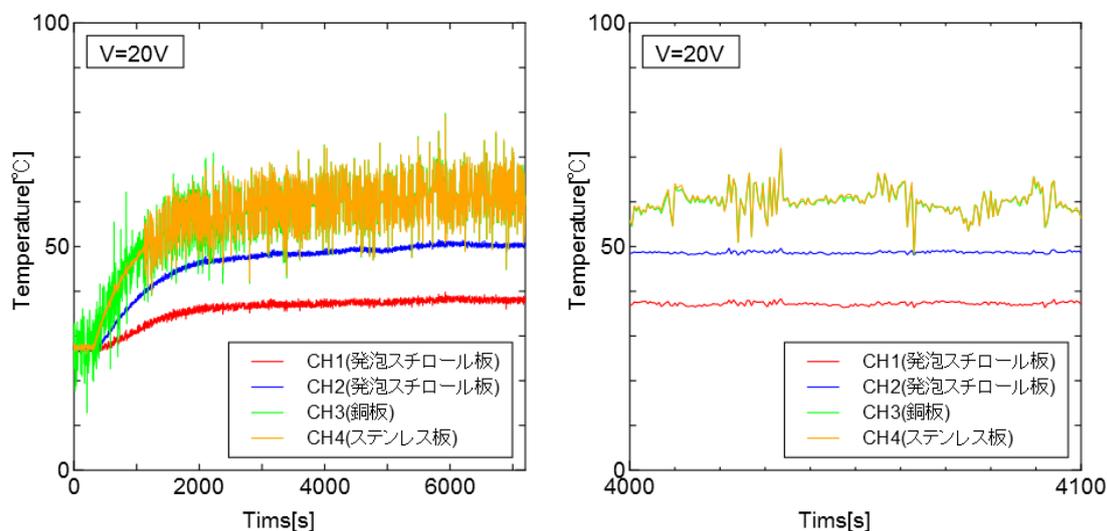


図 6 実験結果

### 3.2.3.改善点

#### ・自作熱電対の見直し

#### →スポット溶接部の確認、金属板への接着方法の再検討(銅箔粘着テープ等)

実験で用いる金属板の温度を測定するための熱電対の作成・校正を行った。今回、自作した熱電対は素線径が 0.1mm のクロメル線とアルメル線をスポット溶接(または半田付け)することで作成した。測定した電圧のばらつきを解消するために熱電対の作成・校正を慎重にやり直した。前回は 2 本の素線をスポット溶接することで、測温点をつくっていたが、今回は半田付けにより測温点を作った。しかし、スポット溶接時同様に測定にぶれが見られた。そこで、データロガーによる遮断周波数を 1.5Hz に設定し校正を行った。表 1 に校正条件の比較を示す。また図 7~10 に横軸が時間、縦軸が電圧の時系列データを設定温度毎に示す。図 7~10 の左側の図が周波数遮断をしていないグラフであり、右側の図が周波数遮断を行ったグラフである。図からもわかるように、遮断周波数を 1.5Hz に設定することでぶれを改善することができた。

表 1 校正条件の比較

	A(前回)	B(今回)
サンプリング間隔[ms]	500	500
レンジ[mV]	20	20
測定時間[s]	540	360
周波数遮断[Hz]	なし	1.5

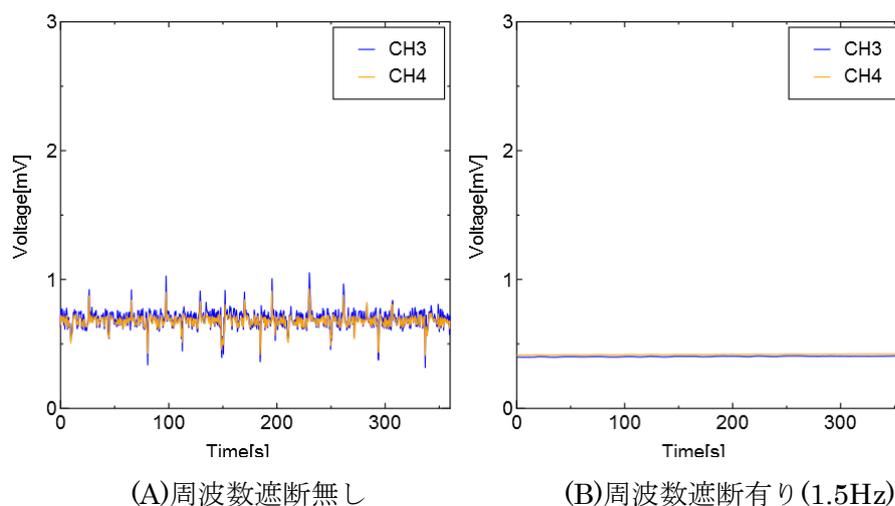


図 7 校正結果比較(設定温度:15°C)

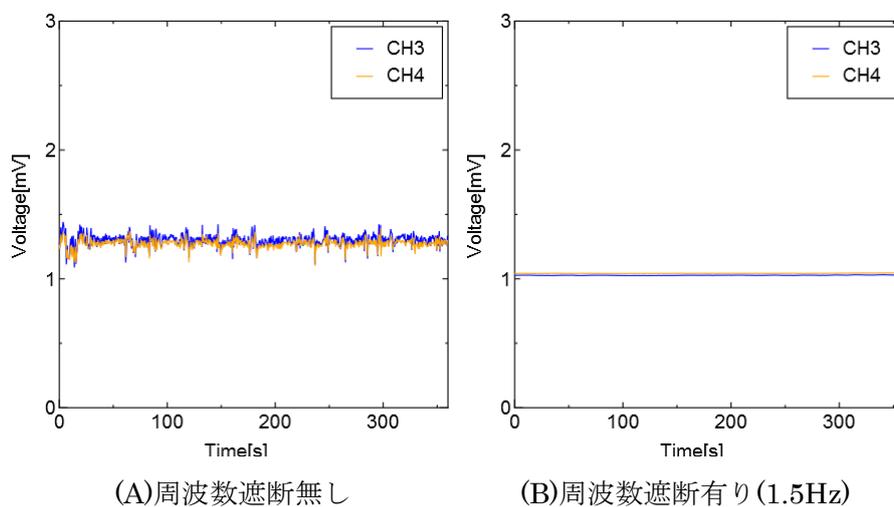
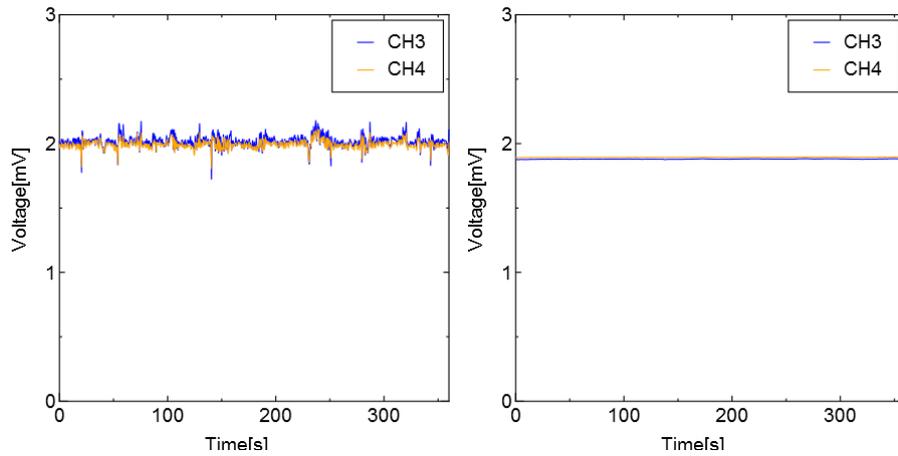


図 8 校正結果比較(設定温度:30°C)

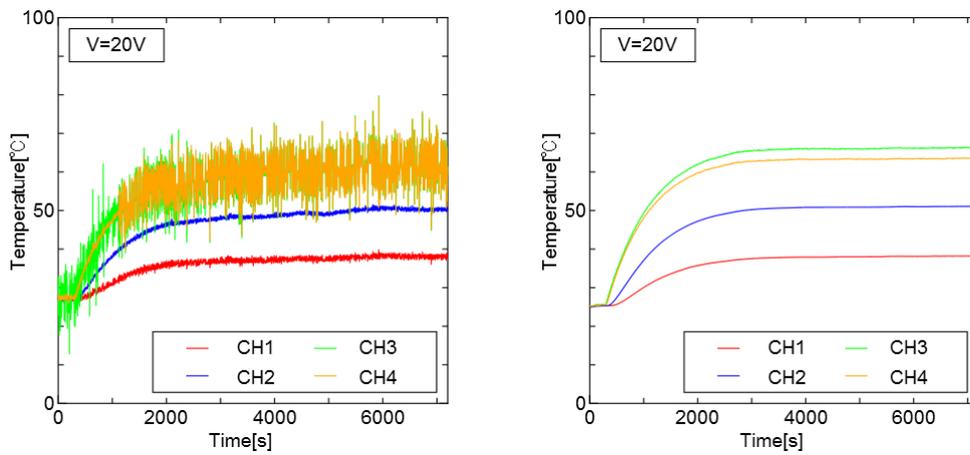


(A)周波数遮断無し

(B)周波数遮断有り(1.5Hz)

図9 校正結果比較(設定温度:50°C)

図10に改善した熱電対を用いて測定した温度を示す。図からわかるようにブレは解消された。



(A)周波数遮断無し

(B)周波数遮断有り(1.5Hz)

図10 実験結果比較

### 3.3 銅円板ヒーター

自然対流の可視化実験を行うために可視化容器としてプラスチック製の四面体を用いて、模擬実験装置の作成を行った。この装置は伝熱面とする銅円板の直径が 100mm のときのみ使用する装置である。図 11 にプラスチック製流体槽を示す。アングル材で組んだ土台にプラスチック製の四面体を置き、ジャッキにより伝熱面の高さを調節した。図 11 に装置の仕様を示す。四面体の寸法は縦 210mm×横 210mm×高さ 340mm となっており、自然対流の可視化のため用いる霧を見やすくするために正面以外の面には黒画用紙を覆った。



図 11. プラスチック製流体槽

伝熱面詳細図について説明する。図 12 に示すように伝熱面は銅円板(直径  $D=100\text{mm}$ 、厚さ  $t=2\text{mm}$ )、円形シリコンラバーヒーター( $t=2\text{mm}$ )、発砲スチロール( $t=20\text{mm}$ )から構成されている。シリコンラバーヒーターに電圧をかけることで発熱し、銅円板を加熱した。銅円板が均一に加熱されているかを検証するために、銅円板の表と裏に計 5 箇所(図 13 の温度測定ポイント)に K 型熱電対を設置し温度を測定した。実験装置全体図を図 14 に示す。図 14 に示すように銅円板、ヒーター(シリコンラバーヒーター円形タイプ、株式会社八光電機)、発砲スチロールを重ね、ジャッキの上に乗せることで伝熱面の高さを調節できるようにした。

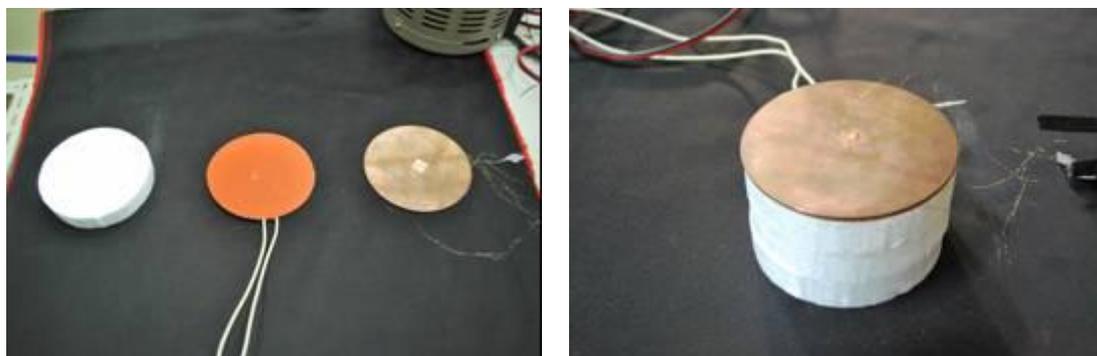
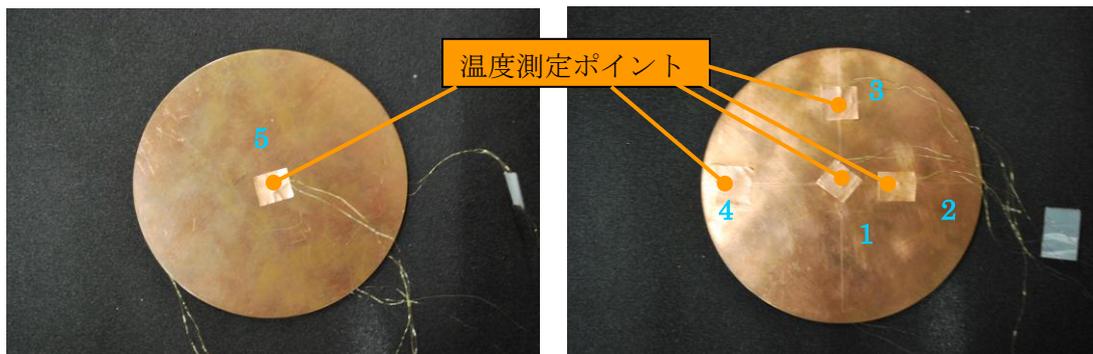


図 12. 発砲スチロール、円形シリコンラバーヒーター(100V50W)、銅円板( $D=100\text{mm}$ )



(a) 表

(b) 裏

図 13. 銅板熱電対取り付け位置

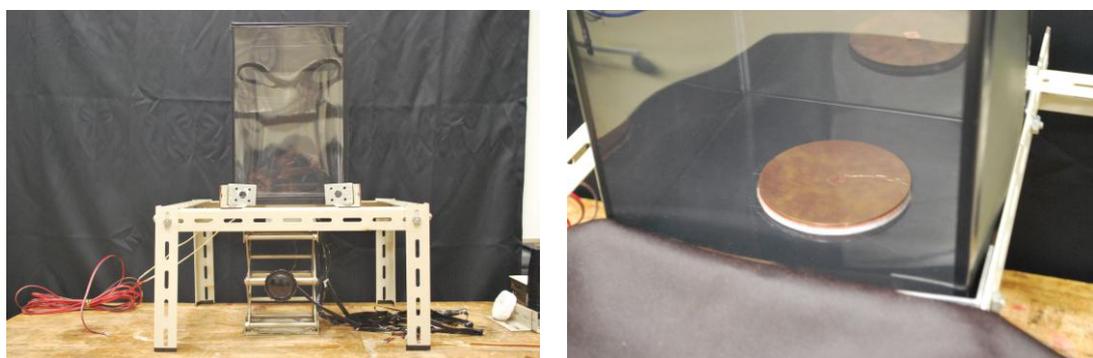


図 14. 実験装置全体図

また表 2 に条件を、図 15、表 3 に銅円板の温度測定結果を示す。グラフからもわかるように銅円板の温度は均一であることが確認された。

表 2. 条件

電圧[V]	ワット数[W]
20	8

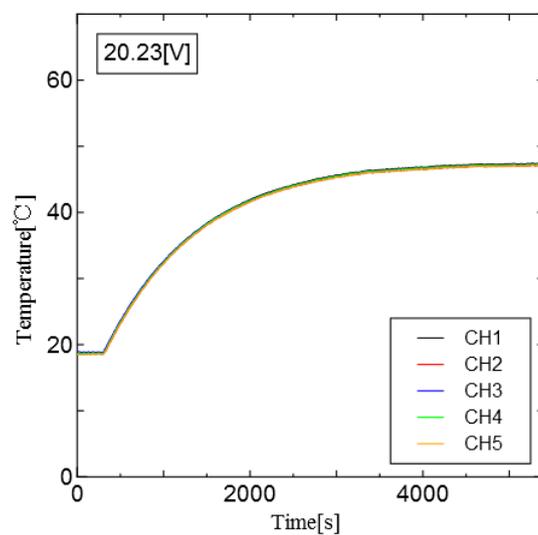


図 15. 実験結果

表 3. 実験結果

測定カ所	平均温度[°C]
1	47.3
2	47.0
3	47.2
4	47.2
5	47.0

### 3.3.1 可視化の方法

空気の可視化を行うために「投げ込み式超音波霧化ユニット」を用いた。投げ込み式超音波霧化ユニットは振動子を水の入った水槽に沈ませて通電することで、霧を発生させる装置である。図 16 に装置図、図 17 に使用例を示す。



図 16. 投げ込み式超音波霧化ユニット

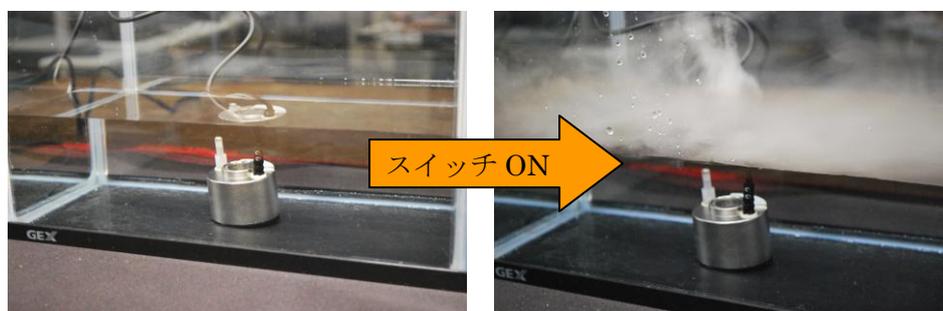


図 17. 使用例(水槽)

投げ込み式超音波霧化ユニットを流体槽内に組み込むために、ペットボトルを加工し霧発生装置を製作した。図 18 に霧発生装置を示す。

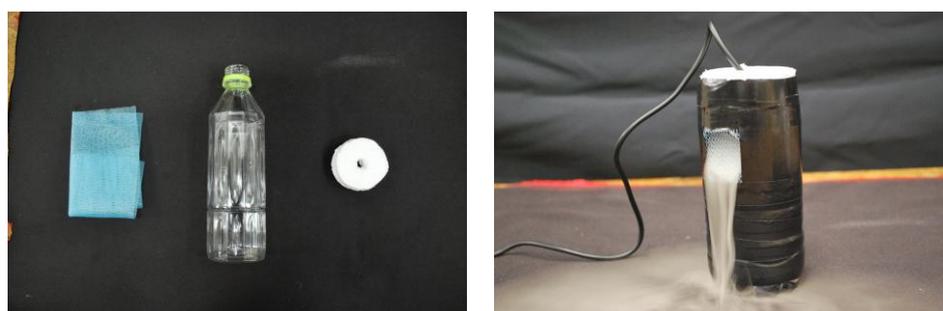


図 18. 霧発生装置作成

### 3.3.2 実験方法

スライダックによりシリコンラバーヒーターに電圧をかける。シリコンラバーヒーターが発熱することにより銅板の温度が上昇してくるので、熱電対で温度を測定し一定の温度になるまで待つ。銅板の温度が定常状態になったら霧発生装置のスイッチを ON にする。霧により対流現象の可視化を行い、考察をする。

### 3.3.3 結果・考察

図 19 に実験結果を示す。図 19 の左側の図が霧を発生させた直後の図であり、右側の図が自然対流によって起きる変化をとらえた図である。図 19 より、若干ではあるが霧の動きに上昇気流が見られた。しかし、霧が排出口から底面に落ちる時に対流が発生し、そちらの対流の方が支配的になってしまい、温度差による自然対流が乱されてしまった。



図 19. 実験結果(D=100mm、銅板表面温度 26°C)

### 3.3.4 改善案

霧が落下し、その勢いで対流が発生してしまう改善策として霧の排出口を二股にし、ホースを霧のガイドとして使う装置を作成することで、対流の影響を軽減させた。図 20 に改善した霧発生機を示す。



図 20 改良型霧発生機

改良型霧発生機を用いて可視化を行った結果を図 21 に示す。改良型霧発生機を用いることで、問題点であった霧の流入によって生じる対流が大幅に抑えられた。図 21 からわかるように地面を伝わってきた霧は温められた銅板上に来ると、垂直に上昇した。このことから、温められた銅円板によって誘起される対流が確認された。また図 21 の(b)の画像はスリット光を用いて撮影した結果である。(b)の画像より、銅円板中心から垂直に対流が起きていることが確認された。

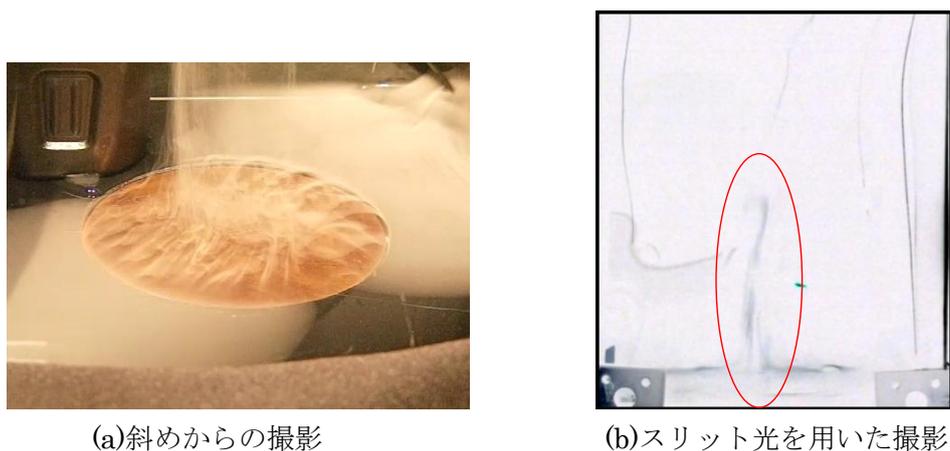


図 21. 改良型霧発生機を用いた実験結果

### ・スリット光を用いた撮影方法

図 21(b)に示すように、対流現象を任意の断面で観察するためにスリット光を用いて可視化実験を行った。図 22 にスリット光を用いた撮影の仕様を示す。流体槽側面を黒画用紙で覆い、黒画用紙中央縦方向に 2mm 程度の隙間を設け、スリット光を流体槽内部に差し込んだ。この方法で可視化実験を行うことで、対流現象を断面で捉えることができた。

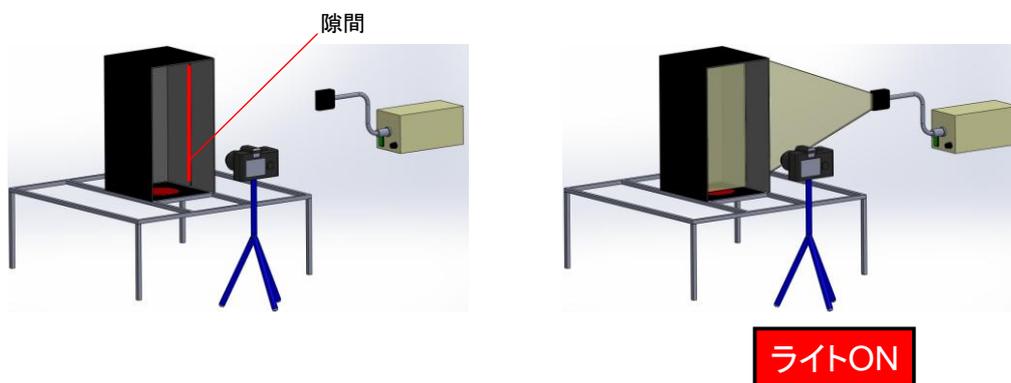


図 22. スリット光を用いた撮影

## 4.実験装置作成

### 4.1 装置概要

自然対流の可視化実験を行うために亚克力製の四面体を用いて実験装置の作成を行った。この装置は伝熱面とする銅円板の直径が 100、300、500mm のときに使用する装置である。図 23 に完成した実験装置図を示す。アングル材で組んだ土台に亚克力製の四面体を置き、ジャッキ付き台車により伝熱面の高さを調節した。図 24 に装置の仕様を示す。四面体の寸法は 700×700×1650mm となっている。

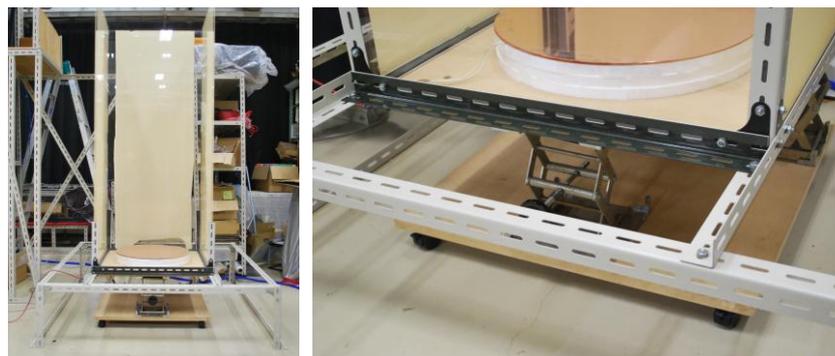


図 23. 実験装置図

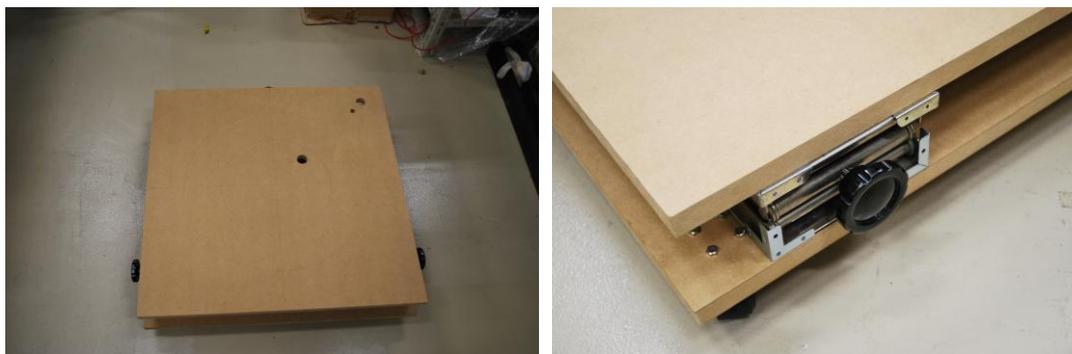


図 24. ジャッキ付き台車の作成

## 4.2 煙装置

自然対流の可視化のために「SMAKE STREAM Jr(SM400)」を用いる。SMAKE STREAM Jr(SM400)は専用のフォグリキットを煙として出力できる装置である。図 25 に装置図を示す。



図 25. SMAKE STREAM Jr(SM400)

また、煙を流体層の中に誘導するために耐熱ホースを用いた。図 26 に示す内径 25mm のホースと金網を用い霧の輸送機構を作成した。ホースに直径 10mm の穴を 5cm 間隔で空け、空けた穴に金網を張り流出していく霧の速度を抑えた。図 27 に霧を流体槽内に流出させたときの画像を示す。

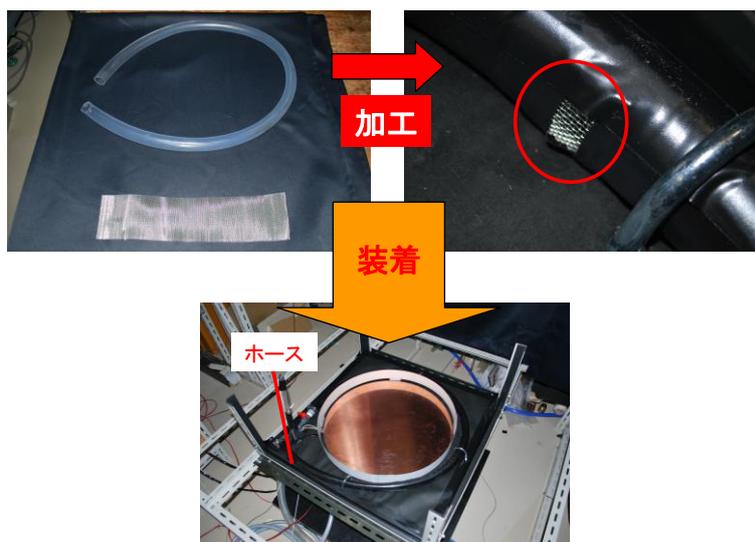


図 26. 霧輸送機構



図 27. 霧流入時

### 4.3 実験方法・条件

スライダックによりシリコンラバーヒーターに電圧をかける。シリコンラバーヒーターが発熱することにより銅板の温度が上昇してくるので、熱電対で温度を測定し一定の温度になるまで待つ。銅板の温度が定常状態になったら SMAKE STREAM Jr(SM400)のスイッチを ON にする。霧により対流現象の可視化を行い、考察をする。

### 4.4 実験結果・考察

表4に今回行った実験の条件を示し、円板上の流れを可視化した結果を図28～30に示す。円板直径  $D=100\text{mm}$  のとき、熱してある銅円板表面に沿って膜状に流れ、円板中心に到達した後、円板表面から離脱、プルームとなって鉛直上方に流れていくのが確認された。流体槽中でこのような現象が確認された理由を以下に述べる。銅板がラバーヒーターにより熱せられたので、流体槽内上部の空気と伝熱面付近の空気に温度差ができた。温かい空気が上昇することで霧も空気とともに上昇したことによりプルームが白い柱として発生したと考えられる。実際の積乱雲の生成は地面に近いところの空気と上空の温度差が大きくなることにより発生する。今回の実験の  $D=100\text{mm}$  の条件では、温度差によって誘起される理想的な上昇気流が確認できた。一方、円板直径  $D=300\text{mm}$  の場合では  $D=100\text{mm}$  の場合と比べ綺麗な1本の筋ではなく、銅円板上のいくつかのポイントで上昇してしまった。この現象は  $D=500\text{mm}$  の条件の時も確認された。これは剥離とよばれる現象であり、実際の積乱雲の生成メカニズムに近いものと考えられる。

#### 実際の積乱雲生成との比較

積乱雲ができやすい大気の状態とはどのようなものだろうか？気象情報で雷の予報と共に良く聞くのは、『**大気の状態が不安定**』になっている。つまり大気の熱対流が起りやすく、上昇気流が生まれやすい状態のことである。大気は、高度が上がるほど気温と気圧が下がり、下層で温められた空気は次第に上昇するが、同時に気圧も下がっていく。気圧が下がると気体の温度は低下するため、ある高度まで上昇したところで上って来た空気と周りの温度は同じになる。こうなればそれ以上の空気の上昇は起こらず、大きな対流は発生しない。しかし、下層により温かい空気が入り込んでいると、先程と同じ高度まで空気が上昇しても未だ周囲より温度が高い状態になる。その為空気の上昇が続き、対流が起りやすくなります。これが『**不安定**』な状態で、大気が不安定な状態が続くと、温められた空気の上昇が止まらないため、上昇気流が発生し積乱雲が発達しやすい状態になる。

図31に  $D=300\text{mm}$  の場合の可視化結果と実際の積乱雲の画像を比べてみる。積乱雲生成の画像から積乱雲は雲の層の一部分から垂直方向に発達していることがわかる。これは今回の実験でも確認された熱せられた面からの上昇気流によるものと推測される。 $D=300\text{mm}$  の可視化結果の画像も積乱雲同様、熱せられた面からの上昇気流により霧が垂直方向に立ち上っていることが確認された。

表 4 実験条件

円板直径 D[mm]	100	300	500
ラバーヒーター加熱量[W]	8	16.8	44
銅板温度[°C]	43.7	38.8	49.9
周囲流体温度[°C]	15.4	15.2	17.6
温度差[°C]	28.3	23.6	32.3

表 5 使用機器

機器名	使用
シリコンラバーヒーター円形タイプ 株式会社八光電機	直径 φ 100 定格電圧:100V 定格消費電力:200W
	直径 φ 300 定格電圧:100V 定格消費電力:420W
	直径 φ 500 定格電圧:200V 定格消費電力:1100W



図 28. D=100mm



図 29. D=300mm

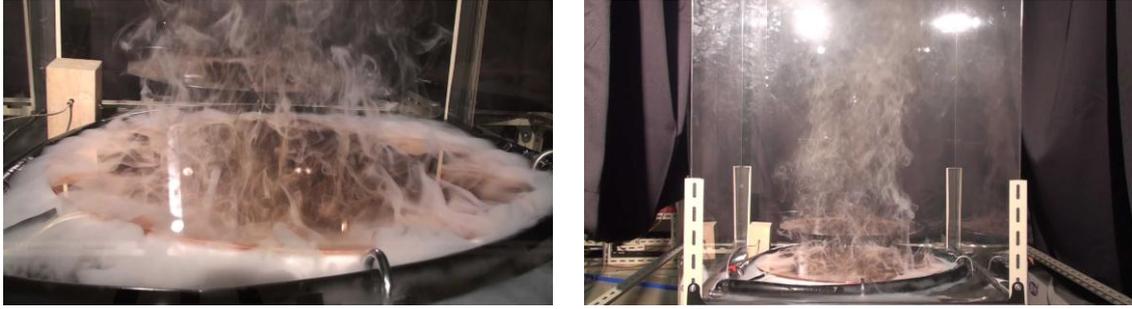
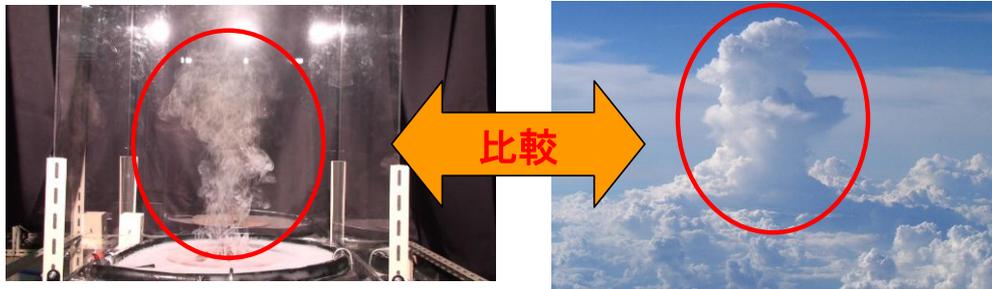


図 30.  $D=500\text{mm}$



(a)  $D=300\text{mm}$

(b) 積乱雲生成

図 31. 実験結果と積乱雲生成との比較

## 5 実験装置の評価

当初の目的である『物理現象を実際に目で見ながら確認し、直感的に理解することの出来る、科学教材としても有用な実験装置を製作』について評価していく。今回作成した実験装置は、積乱雲生成の過程を模擬するものである。実験結果より、伝熱面の条件によって自然対流の理想的な流れや、実際の積乱雲に近い気流の可視化に成功した。当初の目的である、積乱雲の生成過程をみる装置の製作は成功したと言える。加熱量や伝熱面の大きさを自由に変えることができるので、様々な対流現象が観察できる。また、今回の実験では間に合わなかったが、流体槽上部に任意の位置で冷却装置をつけることで、実際の積乱雲の生成過程により近づくと考えられる。このように、様々な条件を自らの手で調節し気象現象の再現をすれば、物理現象を直感的に理解し、実験が楽しくなる教材になると思われる。

## 6 まとめ

今回、積乱雲生成過程を観察するための装置を作成し、可視化に成功した。そこから明らかになった事柄を以下にまとめる。

- ・ 伝熱面の大きさ、ヒーターからの加熱量によって観察できる対流現象が変わった。  
D=100mm では1本の筋が垂直に立ち上った。  
D=300,500mm の場合は剥離という現象がおきた。
- ・ 今回の実験では温度差によって誘起される流れのみに焦点を置いていたので、霧の流入時に対流が極力起こらないような工夫をした。流入速度が出てしまうと、上昇気流がかき乱されてしまうので、流入には細心の注意を払った。
- ・ 今回の可視化実験の結果を実際の積乱雲の生成過程を模擬していることが確認された。

## 動画

実験の動画をのせてありますのでご覧になってください。

## 謝辞

本実験は株式会社八光電機様の助成を賜りました。加えて、知識を高める貴重な場を提供して頂き、ここに感謝の意を評します。また、テーマ考案の際にアドバイスを下さった先生方、研究室の皆さんに心より感謝を申し上げます。