

効率よく風を送るうちわ

広島大学附属高校

田中 晋平 藤野 功貴 前垣内 舜

I 要約

うちわとはエアコンなどの家電と違って電力を消費することのないものであり、節電にはうってつけである。しかし、電気を使わないという利点があるとはいえ、涼しくなれなければ意味がない。そこで従来のうちわよりも涼しくなれるうちわの作成を目標とした。うちわを常に一定の周期で扇ぐ装置を作成し、従来のうちわを扇いだ時に周りに生じる風の風速とその分布を測定した。その結果、うちわのしなりが分布に大きく影響しているということがわかった。

次に、うちわの風はうちわの表面を滑って生まれているのではないかと考え、壁を取り付けたうちわで実験を行った。その結果、最大の風速が従来のうちわと比較して小さくなったことから、表面を流れる風は存在していると考えられる。しかし取り付けた壁では風を完全に遮ることはできていないと考え、さらにうちわに穴をあけた実験を行った。うちわの表面を風が流れるかどうかは判断できなかったが、穴の位置によってうちわに作用する力のモーメントが異なり、うちわの仰ぎやすさについて考えることができた。これらを総合して小さな力で風を生じさせ、効率よく風を得るうちわを提案する。

II 研究の動機

研究を始めた2012年の夏は猛暑だった。節電が求められていたので冷房器具を使うのがはばかられる。そこで電気を使わず、涼しくなれるうちわに注目した。身の回りにあるうちわはほとんどが同じ形状をしている。その形状が本当に風を送るのに一番適しているのかと疑問を持った。もっと風を送るのに適しているうちわがあるのではないかと思い、最も少ない力、仕事で風を送ることができるうちわを作成したいと考えた。しかし、そもそもうちわによる風がどれほど生じているか分からないため、新しく作成するうちわとの比較の対象にするためにも、従来のうちわの周りの風の流れを調べることにした。

III 効率のよいうちわとは

風速と体感温度には次のような関係式がある。

リンケ体感温度 (°C)

$$L = t - 4 \times \sqrt{v} \quad (L: \text{体感温度}, t: \text{温度} [^\circ\text{C}], v: \text{風速} [\text{m/s}])$$

よって、風速が大きければ大きいほど体感温度は下がることから風速の大きい風を発生させることができるうちわを作成することが目的となる。そこで、2つのうちわがあるとす。両方に同じ力を加えて振ったとき、より風速の大きい風を生じさせた方が「効率のよいうちわ」と呼ぶことにした。うちわのどのような特徴が風をどのように起こしているかを調べ、うちわに必要な部分、不要になる部分を見極めていくことがこれからの実験の趣旨となる。まず、従来のうちわを測定し、うちわの持っている特徴ひとつひとつに焦点を当てて実験していくことにする。

IV 実験

1. 実験準備

いつも同じ条件でうちわを扇ぐようにするために腕ふり装置を作成した。腕ふり装置のうちわは点Oを中心として左右に弧を描く運動をするようにした。(写真1)

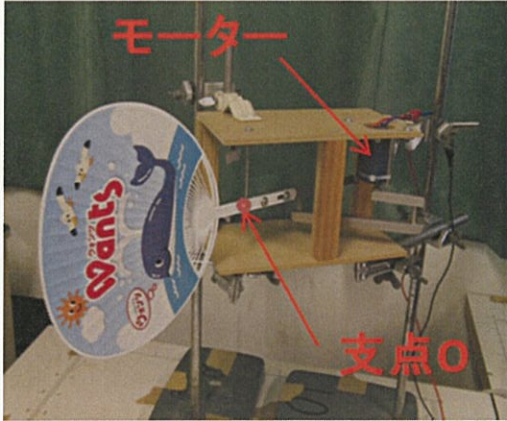


写真1



写真2

2. 実験方法・器具

(1) 実験装置 腕ふり装置 (支点はO, 風速計の位置をPとする。OP=Xcm) (図1)

電源装置

風速計 (熱線式風速/風量計 DT-8880, 測定間隔: 約0.8秒) (写真2)

(2) 方法 ①事前にうちわを8, 10, 12Vの電圧で動かした時, それぞれの振動数(1秒間あたりのうちわの往復回数)を測定したところ, 8Vでは1.56Hz, 10Vでは1.97Hz, 12Vでは2.49Hzとなっていた。以下の実験ではこの振動数に合わせて腕ふり装置にかかる電圧を調整して扇ぐことにする。

②うちわと風速計の距離X (OP間) を30~60cmの間に5cm刻みに測定ポイントを設定する。

③図1のように0°の線とOPのなす角 θ (風速計の位置) を-30°から30°まで5°ずつ左右に変化させ, 合計84箇所の測定ポイント (写真3) ごとに風速を30秒間測定する。測定した値は平均をとり, 測定ポイントの風速とする。

※上下方向に測定位置をずらして風速を測った結果, 中心から離れるほど風速は弱くなることが分かった。このため風速計を設置する高さは, うちわの中央の高さ合わせた。

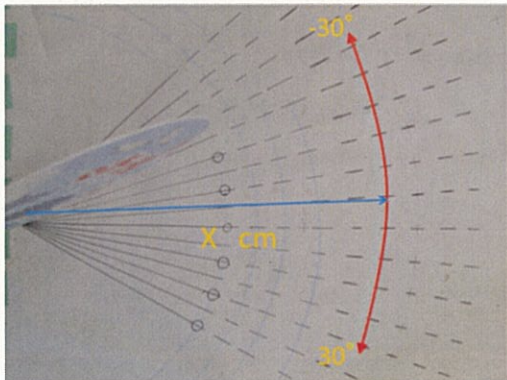


写真3

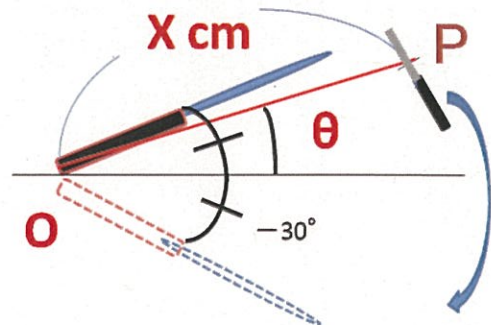


図1

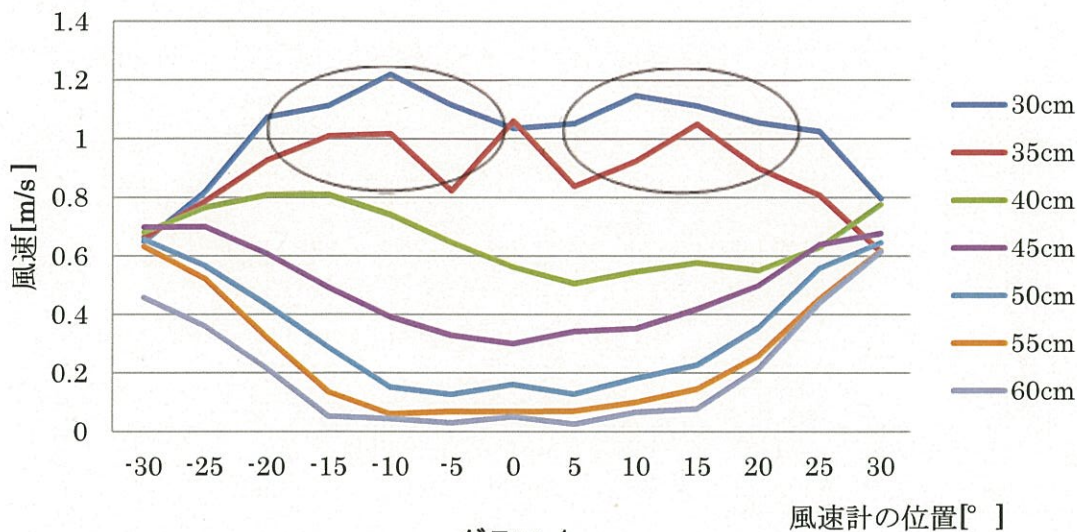
3. 実験1 従来のうちわによる実験

(1) 方法

振動数 1.56Hz, 1.97Hz, 2.49Hz の場合の $X=30\sim 60\text{cm}$, $\theta=-30\sim 30^\circ$ の各測定ポイントにおける風速を 30 秒間測定し、その平均値を求め、グラフに示す。

(2) 結果

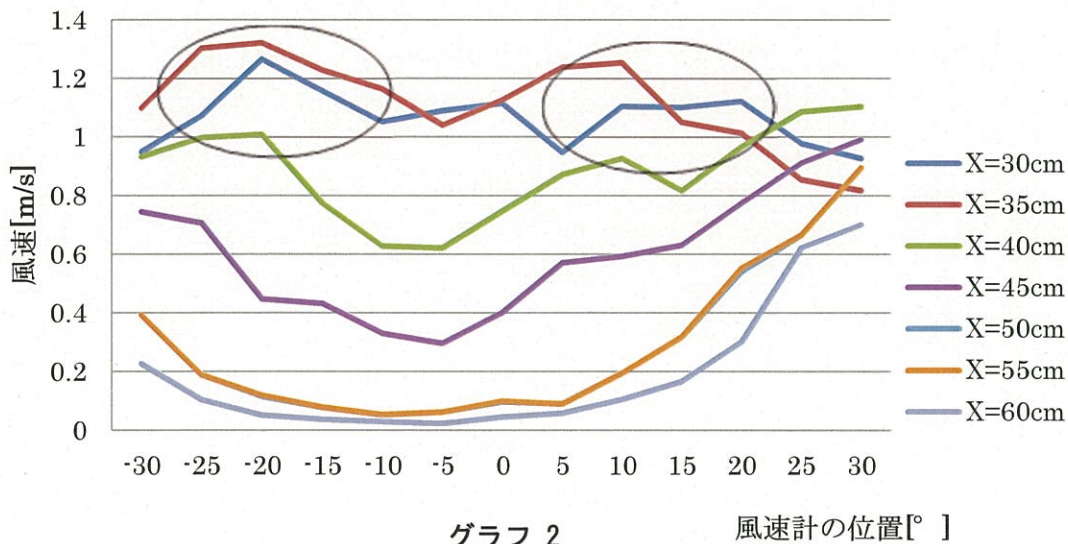
① 1.56Hz(電圧 8V)



グラフ 1

OP の距離 $X=30, 35\text{cm}$ では中央から $\pm 10^\circ$ 付近の 2 点で風速が大きくなる「ふたこぶ型」となり、 $X=40\text{cm}$ 以上では中央に近づくにつれて風速が小さくなる「谷型」となった。

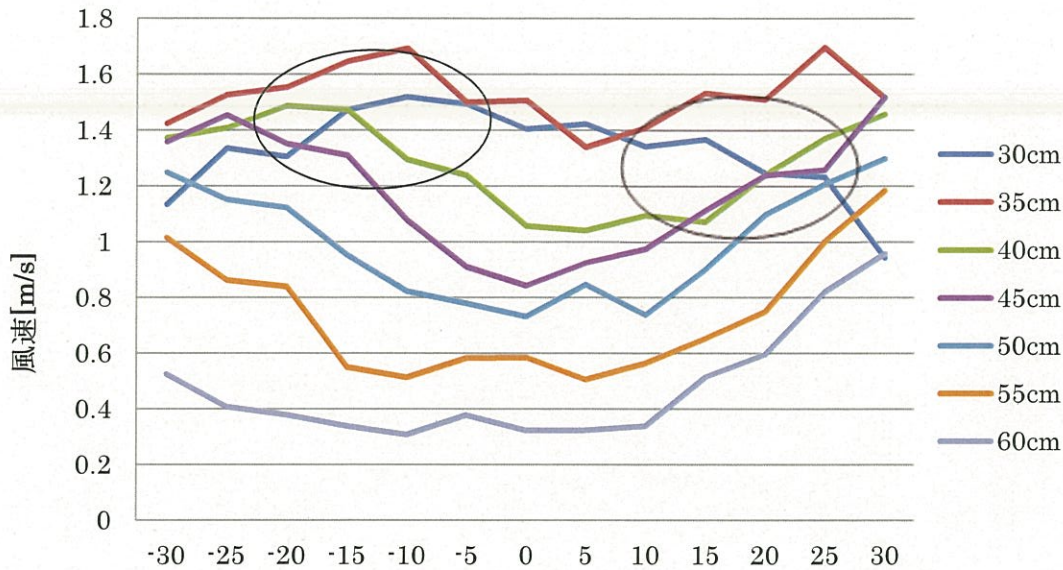
② 1.97Hz(電圧 10V)



グラフ 2

OP の距離 $X=30, 35\text{cm}$ では、中央の風速が小さく $\pm 20^\circ$ 近辺が大きい「ふたこぶ型」となり、 $X=40\text{cm}$ 以上では、中央の風速が小さく、大きい角度をとった時の風速が大きい「谷型」となった。

③2.49Hz(12V)



グラフ 3

風速計の位置[°]

2.49Hz の時は、X=35cm では「ふたこぶ型」、X=40cm 以上では「谷型」となった。振動数が大きくなると、うちわの往復運動の速さが速くなることから風速の最大値は大きくなっている。

4. 仮説 1

実験 1 の結果から、うちわによって生じる風がどのように流れるかについて考えた。うちわによって生じる風は、うちわの扇の部分の表面を沿って出てきていると考えた。振動数が大きくなり、うちわの動きが速くなると、うちわがしなることによって風の流れる方向が変化し、グラフの概形に「ふたこぶ型」のような違いが生まれるのではないかと考えた。

そこで実験装置によるうちわの動きをカメラで撮影し、「しなり」がどのように起こっているのかを観察した。「しなり」は、図 2 のように、うちわが±30°の位置に来た時に、うちわの扇の付け根から進行方向に向かって曲がるのがわかった。

このことから、ふたこぶ型になる理由の仮説を立てた。

うちわは、往復運動の両端での進行方向にしなった後に、弾性力によって逆向きに動き始める。「ふたこぶ型」の風速の特徴はこの弾性力によってうちわが起こした風を計測していると考えた。

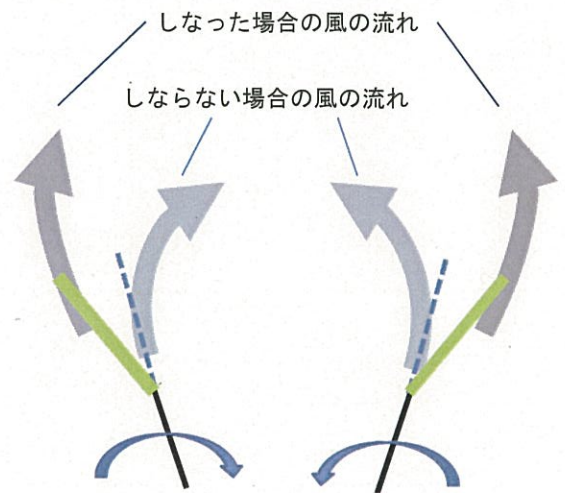


図 2

実験2 しなりを無くしたうちわ

(1) 方法

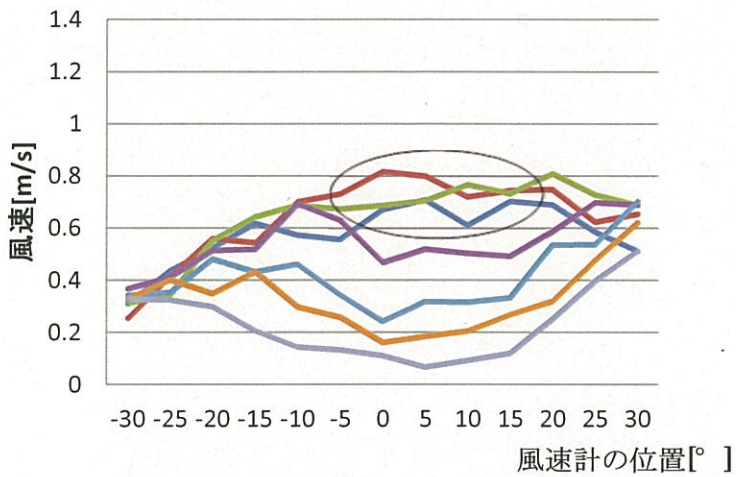
仮説1を確かめるために、写真3のようにうちわの柄の部分から扇の部分にかけてバalsa材で固定し、「しなり」が生じないようにして実験2を行った。振動数は1.56Hz, 1.97Hz, 2.49Hzになるようにモーターにかける電圧をそれぞれ調整した。



写真4

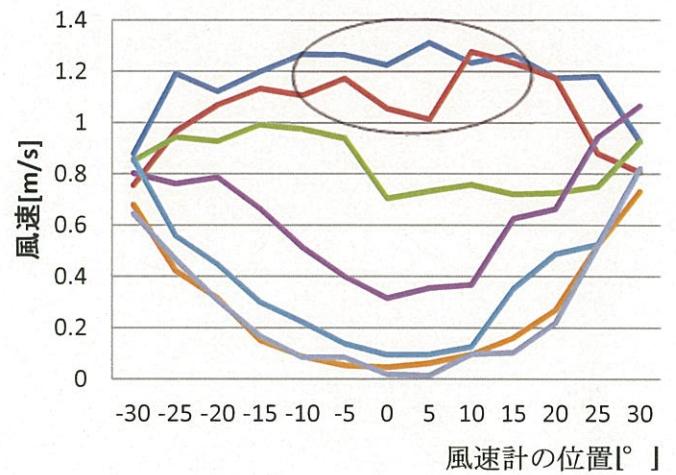
(2) 結果

① 1.56Hz



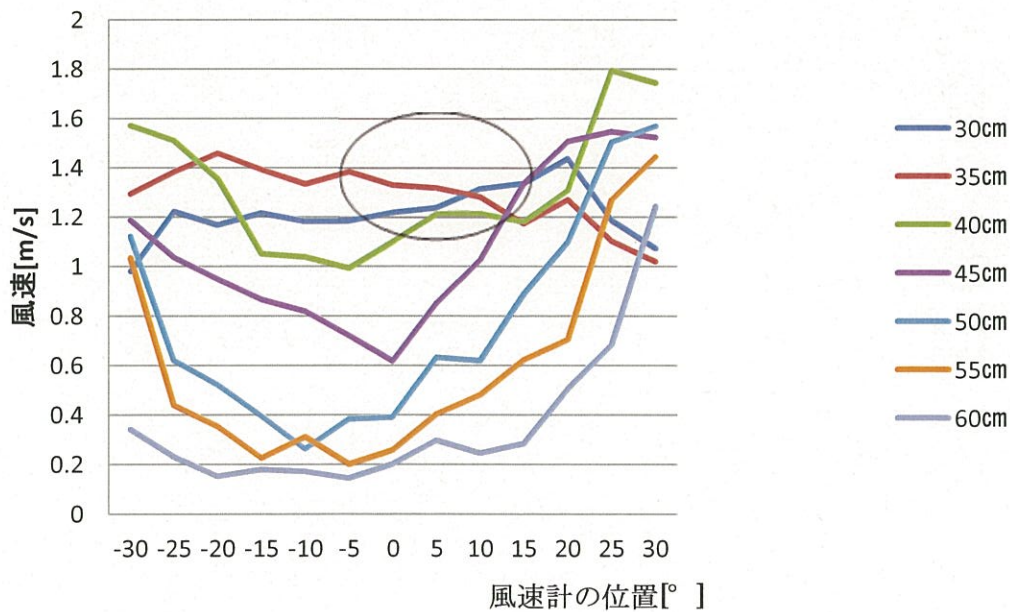
グラフ4

② 1.97Hz



グラフ5

③ 2.49Hz



グラフ6

(3)考察

しなりがある状態のうちわのグラフ1~3とは異なって、しなりをなくすと、速い風が左右に届いている特徴を示すふたこぶ型が消え、Xが小さい範囲では、山型になった。つまり、しなりがある状態では、左右の端付近に届いていた風が、しなりをなくすと、中央に来るようになった。

この結果から、うちわにはしなりが生じることで弾性力が生まれ、風の進む向きが広がって風の進行方向が左右に偏り、この特徴はうちわから距離が近い場合に顕著であったが、しなりをなくすと、弾性力は生じないので、風の流れが中央部に集まるという特徴があらわれると考えた。

5. 仮説 2

仮説 1 は、うちわによって生じる風が図 3 の壁なしのように、うちわの扇の部分の表面を伝わっているという考えに基づいている。この仮説が正しければ、図 3 のように壁を付けるとその高さに応じて風の流れが遮られ風速、風量ともに減るのではないかと考え、実験 3 を行った。

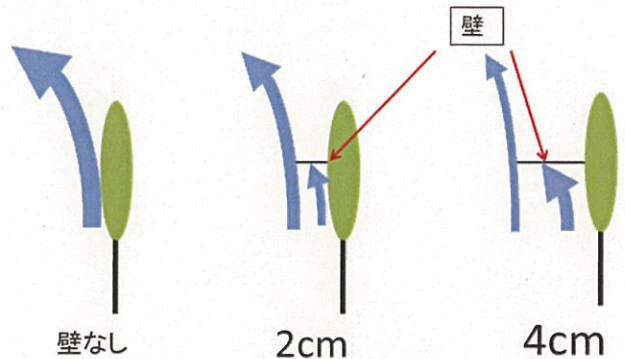


図 3

6. 実験 3 壁を取り付けたうちわ

(1)方法

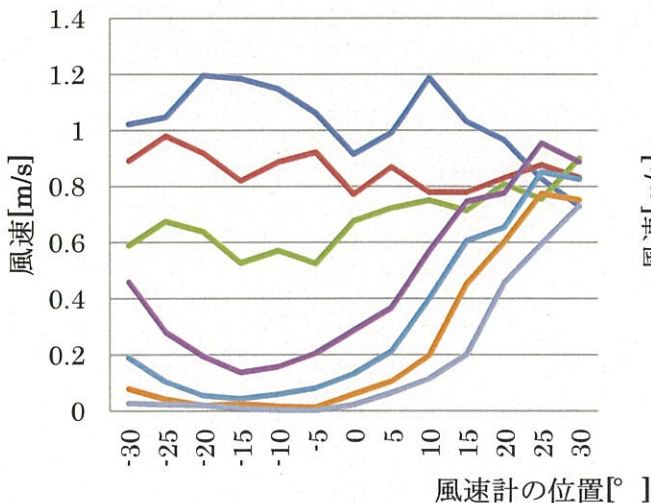
- ①うちわの両面に高さ 2cm, 4cm の壁を
写真 4 のようにそれぞれ取り付ける。
- ②振動は 1.97Hz で行う。



写真 4

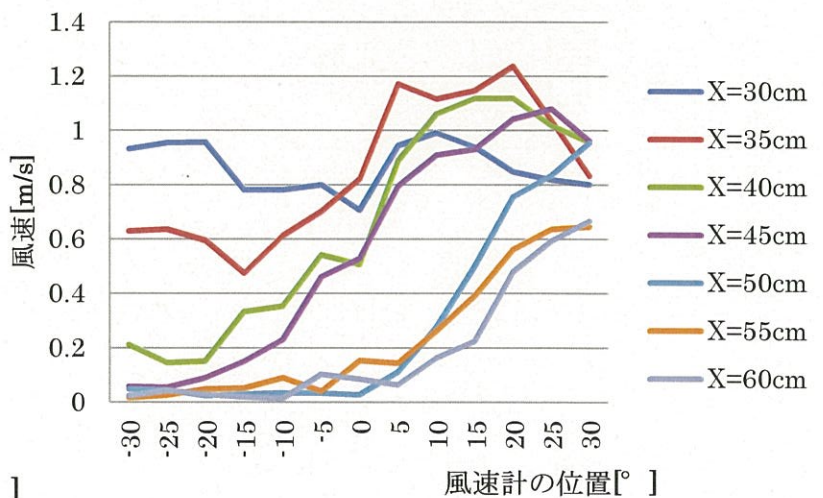
(2)結果

①壁 2cm



グラフ 7

②壁 4cm



グラフ 8

(3) 考察

壁 2cm と 4cm を取り付けたうちわが生じる風の特徴として、X の値が小さい場所ではグラフの形が壁を取り付ける前のグラフ 2 とよく似ていること、グラフ 7 と 8 の比較では $X=40\text{cm}$ の測定ポイントの θ がマイナスの領域の風速に大きく差があることが挙げられる。これらの特徴がおこる理由は、壁を立てることによって、うちわが扇ぐ風の量を減らすことができるが、X の値が小さい領域では、うちわが扇ぐ風の量が減っても、風速には大きな影響を及ぼさないのではと考えられる。また、壁によってうちわが扇ぐ風の量が遮られて少ない分、X の値が大きい領域に風が到達するとき、風が遠くに行けばいくほど、風速を失っていき、大きな風速差が生まれるのだと考えられる。

しかし、壁を取り付けたことで仮説 2 の通り、うちわが扇ぐ風の流れを遮り風の量を減らすことはできたが、風がうちわの扇部分の表面を流れていることは変わらない。そこで、図 4 のようにうちわの扇部分に穴を開け場合、扇の表面を流れる風の量が減るかどうかを調べる実験 4 をすることにした。

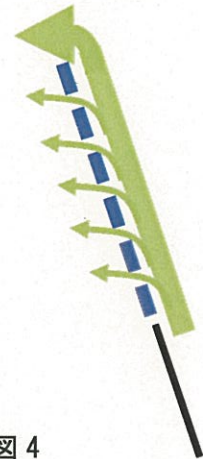


図 4

7. 実験 4 穴をあけたうちわ

(1) 方法

- ① うちわの扇の部分に写真 5, 6, 7 のように穴をあけ、それぞれ A, B, C とする。A は扇の中央上部に 2cm の穴を 1cm 間隔であける。B は扇の中央下部に 2cm の穴を 1cm 間隔であける。C は扇の中央全体を 2cm の穴を 1cm 間隔であける。
- ② 振動数 1.97Hz で実験を行う。
- ③ X を 30, 40, 50, 60cm にし、それぞれの測定ポイントで風速を測定する。

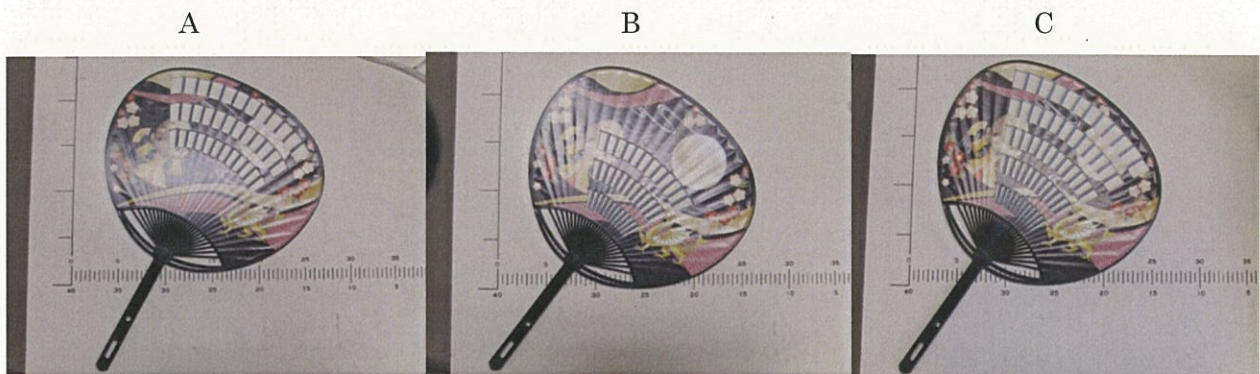


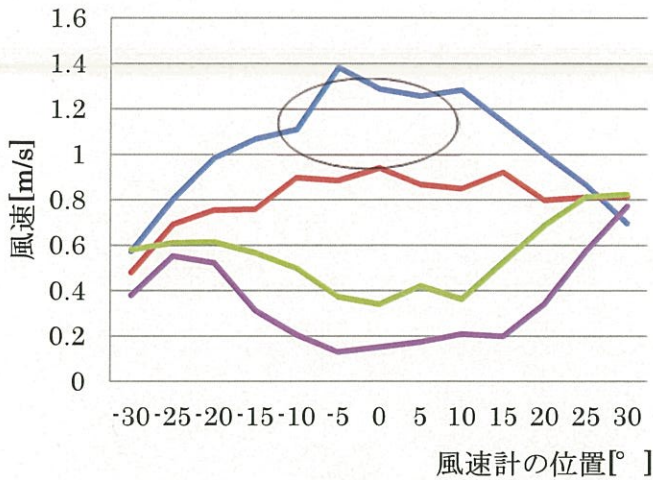
写真 5

写真 6

写真 7

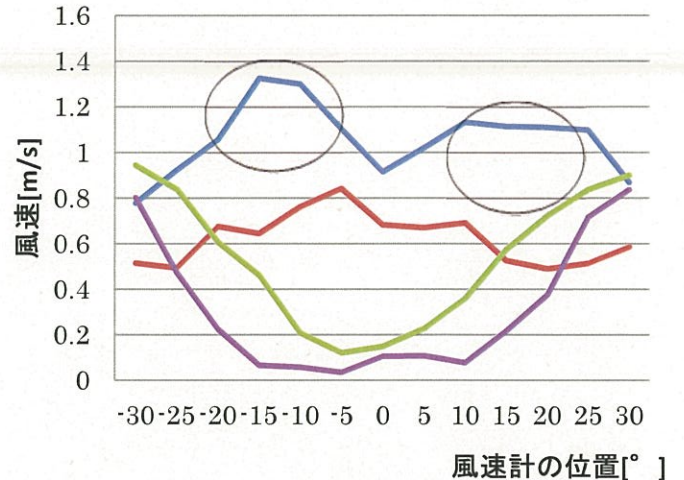
(2) 結果

① うちわ A



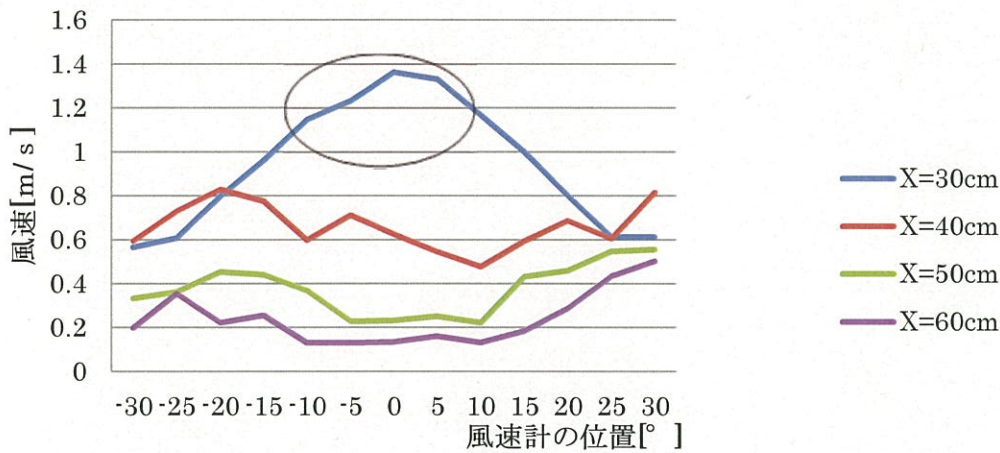
グラフ 9

② うちわ B



グラフ 10

③ うちわ C



グラフ 11

(3) 考察

A (グラフ 9) では、 $X=30\text{cm}$ では山型となっているので、実験 2 の結果から、この形のうちわではしなりが生じていないと考えられる。その要因として、扇の上部に穴をあけたことで、そこから空気が抜け、全体的にうちわが扇ぐ風の量が減り、扇にかかる空気抵抗が減ったことが考えられる。

B (グラフ 10) では、 $X=30\text{cm}$ では、グラフの形がふたこぼ型となっていて、実験 1、仮説 1 より、これはしなりが生じているからであると考えられる。この要因としては、B は A とは反対の扇の下部に穴をあけたことで、空気が抜けてうちわが扇ぐ風の量が減っても、回転中心部から遠い扇の上部では空気抵抗を受けやすいことが挙げられる。

C (グラフ 11) では、 $X=30\text{cm}$ では山型となり、また、大きく穴をあけたにもかかわらず風速があまり落ちていないことがわかる。

この 3 つの結果からはうちわの表面を風が流れるかどうかは判断できなかった。なぜなら X が小さい範囲では十分に大きな風速の値が観測されているからである。これは言い換えるとどの形もある程

度の強さの風は起きていることになる。

8. うちわの効率について

うちわを扇ぐときの効率について考えた。どのうちわも風速の大きい風を生じさせているのならば、より少ない力で扇げるうちわが効率がよいということになる。そこで3つのうちわA~Cにかかる空気の抵抗について、力のモーメントを使って仮説を立てた。

図5のようにうちわの残っている面の部分を1cm間隔で区分に分けて考え、1区分にかかる空気の抵抗は支点からの距離 r によって決まり、それぞれの位置 r_1, r_2, \dots にかかっているとみなした。

空気の抵抗とうちわの速度は次のように表せる。

$$F = kv \quad \dots \textcircled{1} \quad v = 2\pi r/T \quad \dots \textcircled{2}$$

(F [N] : 空気抵抗, v [m/s] : うちわの速度, r [cm] : 支点からの距離)

②を①に代入すると

$$F = 2\pi k r/T$$

空気抵抗の力のモーメントは

$$M = Fr = 2\pi k r^2/T \quad \dots \textcircled{3} \quad (M[\text{Nm}] : \text{空気抵抗の力のモーメント})$$

うちわの運動の周期 T は一定にしているので、 v は支点からの距離 r によってのみ変化していると考えられる。よって③から、 $M \propto r^2$ であるといえる。

従来のうちわとA, B, Cのうちわについて、表面が残っている部分について1cmごとの力のモーメントの総和をとったところ表1のような結果となった。

表1

うちわの種類	従来のうちわ	A	B	C
力のモーメントの総和	5524	2841	4137	2102

簡単な整数比で表すと 従来 : A : B : C \simeq 8 : 4 : 6 : 3 となる。

この整数比はそれぞれのうちわについての扇ぎにくさの比と考えられる。力のモーメントが大きいほど扇ぎにくいと言えるので、この逆比を扇ぎやすさの指標とすることにした。

よってうちわの扇ぎやすさは 従来 : A : B : C \simeq 3 : 6 : 4 : 8 と言える。

またうちわで顔を扇ぐ時、 $X=30\text{cm}$ の位置に顔があるとすると、顔の端から端までは $\theta = -15^\circ \sim 15^\circ$ の幅であった。よって $\theta = -15^\circ \sim 15^\circ$ の範囲の風速が最も大きいものが最も涼しく感じられると考え、うちわA, B, Cにおける $X=30\text{cm}, \theta = -15^\circ \sim 15^\circ$ での風速の平均をとることにした(表2)。

表2

うちわの種類	従来のうちわ	A	B	C
風速の平均 ($X=30\text{cm}$)	1.08	1.22	1.13	1.17
扇ぎやすさの比	3	6	4	8

表2の結果から従来のうちわよりも穴あきAやCがより小さなモーメントで大きい風速を得ることが

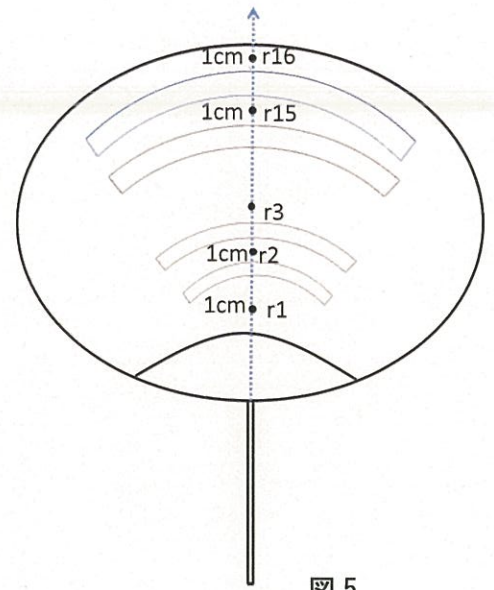


図5

できると言え、より効率が良いということがわかる。

V まとめ

うちわによってより大きい風速を出すことができれば、その分だけ涼しく感じられると考え、従来のうちわのまわりの風速の分布を調べる実験を行った。実験結果から大きな風速の風が左右に偏って届くことが明らかになった。この風速の分布にはうちわのしなりが影響しているのではないかと考え、仮説1を立てた。しなりを無くしたうちわでの実験を行ったところ、確かに風速の分布が変化し、中央に大きな風速の風がくることが分かった。

また、うちわの風はうちわの表面を滑って生まれているという仮説2を考え、壁を取り付けたうちわで実験を行った。その風速の最大値が従来のうちわと比較して小さくなっていることから表面を流れる風は確かにありそうである。穴をあけたうちわの実験結果からはうちわの表面を風が流れるかどうかは判断することができなかった。しかし穴の開け方の異なるうちわにはたらくの力のモーメントを考慮することによってうちわの扇ぎやすさについて考えることができた。

結論 効率よく風を送るには

- ・うちわのしなりをなくして風速の大きい風が前方中央に集まるようにする。
- ・うちわにはたらく力のモーメントを小さくして扇ぎやすくする。

よって、私たちが改良したうちわA及びCがこの条件に当てはまると言える。

VII 今後の課題

うちわを扇いだときに生じる風がうちわに沿って流れているのかを明らかにするため、空気の流れの可視化を行いたい。うちわの代表的な生産地である丸亀を訪れた際、伝統的なうちわの製作の様子を見学、体験させていただいた。その際日本の各地で使われていたあるいは現在も使われている様々な形状のうちわを見ることができ、とても興味深かった。これらのうちわや普及しているプラスチック製のうちわについて風の流れを明らかにたうえで、さらに涼しくなることのできる効率の良いうちわの作成を目指したい。



謝辞

本研究を進めるに当たり、実験及び実験結果の分析・考察に関して快くご指導・ご助言いただきました本校物理科の佐々木康子先生、梶山耕成先生、実験器具の作成にあたりご助言いただきました市川貴子先生、支援していただきました本校教職員の先生方、発表会などでご助言いただきました全ての皆様に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 永野 紳一郎、『うちわ型気流生成装置の開発と生成された気流の解明』
日本建築学会北陸支部研究報告集 第44号, 2001年 7月
- 2) 萩原 芳彦著、『よくわかる機構学』, オーム社
- 3) 山田 学著、『めっちゃ、メカメカ! リンク機構 99→∞』, 日刊工業新聞社