

風による旗や衣類のはためきの観察方法について

山崎和彦・石本 望・那須ゆうみ

生活環境学科 生理人類学研究室

Observation method of the fluttering of flags and clothing by the wind

Kazuhiko YAMASAKI, Nozomi ISHIMOTO and Yumi NASU

Department of Human Environmental Sciences, Jissen Women's University

The authors wanted to observe the fluttering of flags and clothing in the wind. Lacking access to a wind tunnel, we needed to assemble an experimental apparatus. This paper presents the experimental methods developed by the authors. It is divided into the following sections: anemometer assembly, wind distribution observation method, wind generation using a moving cart or a blower, method for equalizing the distribution of wind generated by a blower, method for generating wind by rotating arm, flag design, method for evaluating the frequency and amplitude of fluttering flags, definition of critical wind speed, and method of measuring the noise level of fluttering flags. The main results are also presented. Wind speed and flag flutter frequency were found to have a linear relationship.

Keywords : wind (風), fluttering (はためき), flag (旗), clothing (衣類), observation method (観察方法)

1. はじめに

体温調節において風は重要な要素である¹⁾。筆者らの研究チームは特に衣服内気流について研究を行い^{2), 3)}、外気流の影響についても着目している⁴⁾。鎧のごとく形状が変化しない衣類と、しなやかで外気流によりはためきが生じる衣類では、衣服内の換気効果が異なると思われるが、これを変数に加えると事象が複雑になる。そこで、温熱効果や換気効果からいったん離れ、形状や構造が単純である旗を主な対象とし、さらに衣類を加え、これらが風にはためく様子について数値をもって把握したいと考えた。

もし本学あるいは近隣の組織に風洞装置があり、その利用が可能であるなら、そうした装置に適した実験計画を立案するであろう。しかし、それが出来ないとなれば、自ら装置を組む必要がある。本論文の目的は、筆者らの体験に基づく技術面、および、得られた実験結果について紹介することである。

2. 風の評価

2-1. 風速

気象庁による平均風速および最大瞬間風速は、各々連続する 10 分間および 3 秒間の移動平均値である。風速は 4 Hz で測定されるので、後者は連続する 12 個の測定

値を平均したものとなる。

風速の測定方式には、プロペラ式、風杯式、熱線式、超音波式、ピトー管式等があり、形状、精度、測定範囲、使い勝手等は多様である。本論文において筆者らが使用したものは、プロペラ式は Mistral 製 Skywatch-Explorer2、風杯式は CUSTOM 製 CW-70、およびフィールドプロ製 03002VY、超音波式は Kaijo 製 WA-390、および Field Pro 製 WindMaster II であった。

プロペラ式および風杯式の CW-70 による風速の測定は、表示値を目視することによった。これ以外はデータロガー（日置製 LR8410 と LR8510）により 5 Hz にて瞬時値を取り込んだ。

2-2. 風の分布

気流の可視化には、煙やドライアイス等を利用する方法、炎の揺れの観察、タフト法、ミストや微粒子の拡散、赤外線画像法、シュリーレン法等がある。気象庁による風力階級では、各種風速と煙、砂ほこり、波、樹木等の様子の関係が示されている。

草原、水田、樹林等に臨めば、吹き渡る風に葉や枝の揺れる様が見てとれる。そこでこれに類するものの制作を試みた。そのひとつがポール式（図 1）である。

これは園芸用の棒（長さ 180cm、直径 1.5cm）にリボ

ン（ポリエステル、幅 5cm、長さ 30cm）を 30cm 間隔で取り付けただけの単純なものであるが、風圧に耐えて直立させる必要があり、多少の工夫が要る。



図1 風の分布の観察（ポール式）

地表面近くにあっては風速は減弱していると思われるが、人体が風を受ける領域では、ほぼ同様の風が吹いていることが分かる。

図2は、鉛直面における風の分布について、二次元的に観察するための装置（垂れ札式）である。これは縦150cm、横90cm、間隔5cmの鉄製枠に、紙片の端を折り曲げ、ホチキスで留めて垂らしたものであり、送風機からの距離に応じて風が拡散する様子、あるいは、いわゆる空気砲から発射された空気弾が到達する様子等を知ることができる。



図2 風の分布の観察（垂れ札式）

3. 風の発生

3-1. 台車による移動

静穏な廊下や室内を移動することにより相対的に気流が生じ、低速域では層流を得ることができる。

ただし、移動速度を制御する精度が問題となる。その他、移動速度には上限があって高速移動では傷害を負う危険があること、台車を移動させる実験者に疲労が生じること、室内サイズの影響を受けること等の問題がある。

図3～図5に実験の様子を示す。移動速度は、廊下の床面に5m間隔で視標を設置し、それらの通過時間をストップウォッチで測定することにより算出した。



図3 複数の旗を同時に観察している様子



図4 スカートの揺れの観察



図5 旗の設置位置の効果の観察

3-2. 送風機の利用

3-2-1. 廊下に設置

送風機の仕様は次の通りである。サンキテスノス製 LR-523、5 枚翼、直径 50cm、三相 200V、3.7kW、吐出風速 25m/秒、風量 280m³/分。これを自作の台に乗せて回転軸高を 90cm とし、本学本館 3 階東翼側の廊下（高さ 255cm、幅 195cm）の端に設置した（図 6）。



図 6 送風機を設置した様子

表 1 に風速分布について示す。送風機からの距離が増すにつれて風速が弱まるが、距離 20 ~ 40m の範囲においては風速は安定し、2.4m/秒程度であった。

表 1 送風機がもたらす風速の分布

		左 20cm	中心	右 20cm	左右平均	
距離 7m	180	4.68	4.62	3.15	4.15	
	150	6.94	6.47	3.38	5.60	
	床面高	6.94	6.91	6.20	6.68	
	(cm)	90	6.61	6.35	4.40	5.79
	60	5.03	5.28	3.89	4.73	
	30	2.20	2.93	1.70	2.28	
上下平均		5.40	5.43	3.79	4.87	
距離 10m	180	4.13	3.91	2.79	3.61	
	150	3.70	3.73	2.76	3.40	
	床面高	4.39	4.43	3.02	3.94	
	(cm)	90	4.03	3.41	2.51	3.32
	60	2.69	2.39	2.13	2.40	
	30	1.85	2.22	1.99	2.02	
上下平均		3.46	3.35	2.53	3.12	

3-2-2. 枠と羽板を設けた場合

風の影響について実験を行う際、風速分布は均一であることが望ましい。そこで送風機の吹き出し口に木枠および羽板を設置する効果について検討した。この結果については既に報告しており⁵⁾、ここでは主な結果について抜粋して示す。

図 7 は木枠と羽板を設置した側面図である（枠の全高 180cm、内幅 70cm）。表 2 は距離 5m 地点における風速分布を示したものである。二重線で囲った内側が人体が風圧を受ける範囲に相当する。羽板を設けることにより平均風速は低下し、風速は均一化した。

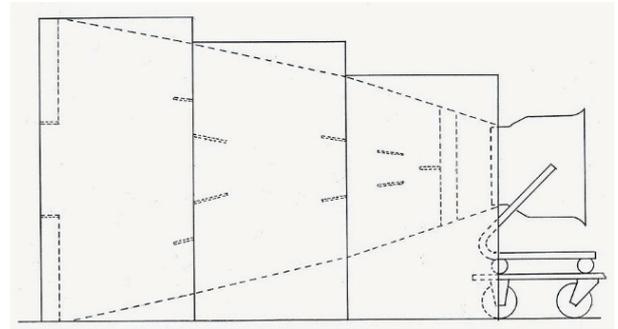


図 7 風速分布の均一化の試み

表 2 風速分布の比較（距離 5m、単位：m/秒）

条件	垂直方向(cm)	水平方向(cm)				
		30	15	0	15	30
枠なし	180	2.1	2.0	3.3	2.0	2.1
	150	5.0	5.7	7.0	5.7	5.0
	120	8.2	9.9	11.0	9.9	8.2
	90	11.5	12.3	12.0	12.3	11.5
	60	7.1	10.3	12.1	10.3	7.1
	30	9.0	8.1	9.1	8.1	9.0
枠のみ	180	3.0	4.4	4.5	4.4	3.0
	150	4.5	6.7	5.3	6.7	4.5
	120	9.0	8.3	8.2	8.3	9.0
	90	6.7	8.8	9.5	8.8	6.7
	60	8.0	7.3	8.4	7.3	8.0
	30	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
枠と羽板	180	5.0	7.0	6.6	7.0	5.0
	150	5.6	5.7	6.8	5.7	5.6
	120	5.5	5.9	6.5	5.9	5.5
	90	5.7	6.1	5.8	6.1	5.7
	60	5.4	5.5	5.1	5.5	5.4
	30	5.9	6.7	5.6	6.7	5.9

3-3. 回転式

3-3-1. 手動型

回転するアームの先端に旗を設置すれば、旗は風にはためく。その場合、旗には遠心力が作用し、また角速度とアーム長に応じて絶えず気流の向きが変化する。したがって、風の効果の評価において、空気に対する試料の直進性を重視するならば、回転式は採用できない。しかし、アームが十分に長く試料が小さい場合、近似値が得られる。そこで回転式による装置を作成した（図 8）。

アーム長（試料と回転軸間の距離。試料が室内の壁に触れることなく回転できる最大長）は 3.52m である。中央の回転軸の下方に取り付けられた円盤を手動により回転させた（図 9）。旗が揺れる様子は、アームの途中に小型ビデオカメラを固定して撮影した。



図8 回転式（手動型）



図9 円盤を両手で回転させる

3-3-2. 電動型

手動型の特徴は、極めてゆっくりした回転、すなわち微風条件を設定できることである。しかし手動ゆえに実験者は疲労する。そこで家庭用電動サイクル（プライム製 RM-08）を動力とした。最大風速は手動式では10m/秒前後であったが、12m/秒を設定することが可能になった（図10）。

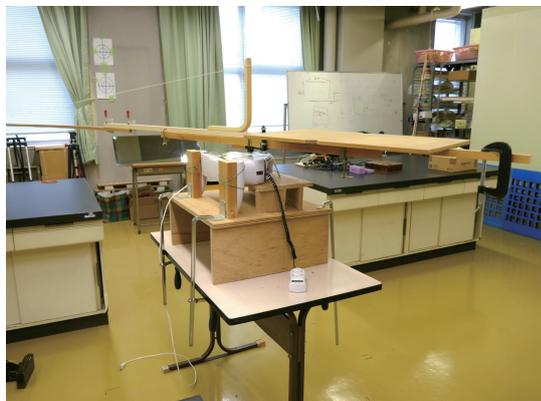


図10 回転式（電動型）

手動、電動の両型において、アームが回転する周囲に90度ずつ4等分されるよう、計4本の視標を配置した。

動画を再生する際、アーム先端が視標間を通過する時間をストップウォッチで測定し、移動速度（相対風速）を算出した。

4. 旗のデザイン

通常、旗は鉛直のポールに取り付けられる。そこでこれを基本としたが、はためきの騒音測定（後述）では、水平に取り付けた。ポールに取り付ける側は、あらかじめミシンにより袋状になるよう縫っておいた。

旗の形状は、四角形および三角形とし、縦と横のサイズを変化させた。図11に各種の旗形状の概念および実際に作成した旗を示す。

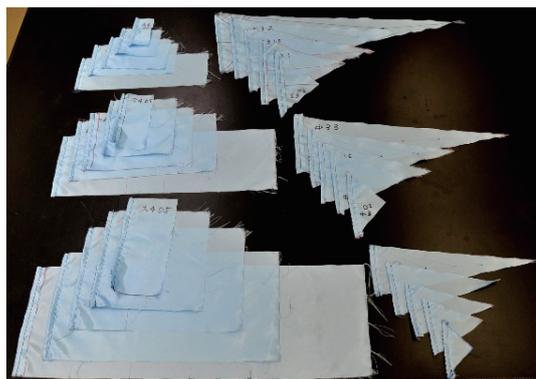
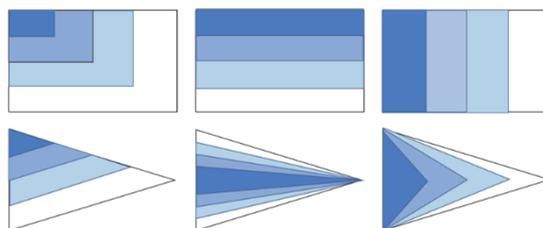


図11 旗の形状および制作した旗の例

布は織密度、通気性、剛性、厚さなど多様であり、旗については、通常、耐候性を有するしなやかな素材が使用される。筆者らはテトロンないしポリエステルを主体とし、これら以外の素材についても適宜検討した。

5. はためきの周波数、振幅、臨界風速、騒音レベル

旗や衣類が風にはためく様子について、広角型のビデオカメラを用い、4倍ないし8倍のスローモーション機能により撮影した。また、画像を解析する際、さらに2倍ないし4倍のスロー再生を行った。

撮影器材はキャノン製 iVISminiX、ソニー製 HDR-AS100V、ニコン製 KeyMission170 とした。後の二者は回転するアームに設置するため、小型軽量（電池を含め、各々 110g および 150g）でなければならず、共にリモート操作が可能である。

はためきの周波数は、所定のはためき回数（例えば5

～10回) に要する時間をストップウォッチで測定することにより換算した。

振幅は、旗を取り付けたポールに対する左右への振れ角度とした。その角度を測定するため、台車の上に角度を記した視標を設置し、旗の上方にビデオカメラを下向きに取り付けた (図 12)。

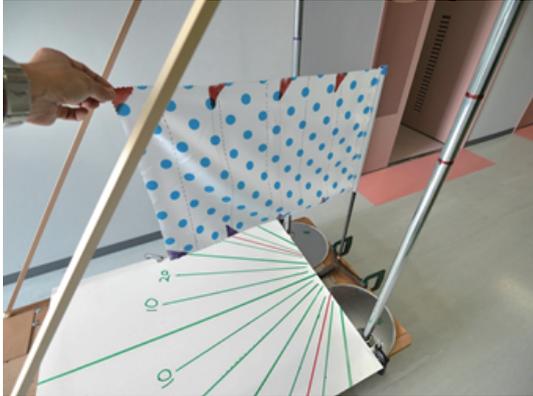


図 12 旗の振幅を求めるための視標 (カメラは旗の上部に、下向きに設置)

臨界風速とは、筆者らによる造語であり、旗が旗らしくはためくことを開始する最小風速と定義した。

騒音レベルの測定では、各種の旗を手動で回転するアームの先端に水平に設置した。アーム先端の直下 60 cm の所に、騒音計 (リオン製 NA-27) のマイクロフォンが上向きになるよう設置した (図 13)。

騒音レベル (A 特性、FAST) はペンレコーダ (三栄測器製 RT-3200) により記録した。

旗の移動速度を最大レベル (約 10m/秒) とした状態にて周波数分析を行った。測定器材は上記と同様であり、オールパスにて、1/3 オクターブバンド分析とした。

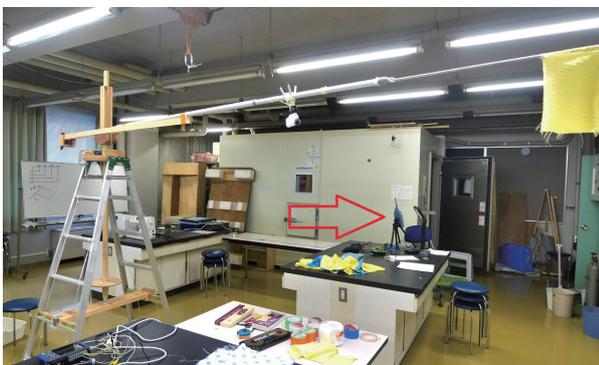


図 13 旗のはためきの騒音レベルの測定 (矢印が騒音計を示す)

6. 観察された結果の例

表 3 は図 1 に示した実験を行った際の結果である。スカート丈が短いほど、また風速が大きいくほど、スカートの揺れの周波数が高くなることは予想した通りであった。自然の風は絶えず変動する為、実験は極めて困難であることを認識した。

表 3 屋外実験の諸元と主な結果

・風速: 1.8 ~ 3.0m/秒 (CUSTOM、CW-70 による)
・マネキン: 女性 9 号
・ロングスカート (丈 90cm): 0.44 ~ 0.62Hz
・プリーツスカート (丈 54cm): 0.31 ~ 1.2Hz

図 14 は、送風機を廊下に設置し、一定の風速 (2.4m/秒) に暴露した時ののはためきの周波数について比較したものである。テトロン製の旗のサイズが大きくなるにつれて周波数は小さくなり、ロングスカートでは膝丈フレアスカートより周波数は小さいことが分かる。

スカートが風にはためく時の周波数は、縦および横の長さを 40cm × 60cm ないし 60cm × 90cm とする旗が揺れる様子を類似しているといえる。

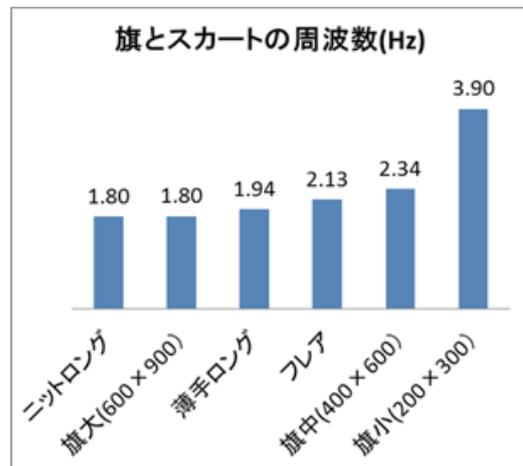


図 14 旗とスカートの周波数の比較 (風速 2.4m/秒)

図 15 は、台車を移動させて観察した一例である。旗の縦サイズ変化群では横を 27cm に固定し、横サイズ変化群では縦を 10cm に固定した。旗の素材はテトロンである。

風速の上昇に伴い、旗のはためきの周波数は増大するが、その関係については旗の横幅が支配的であり、横幅が小さいほど傾きが急であることが分かる。

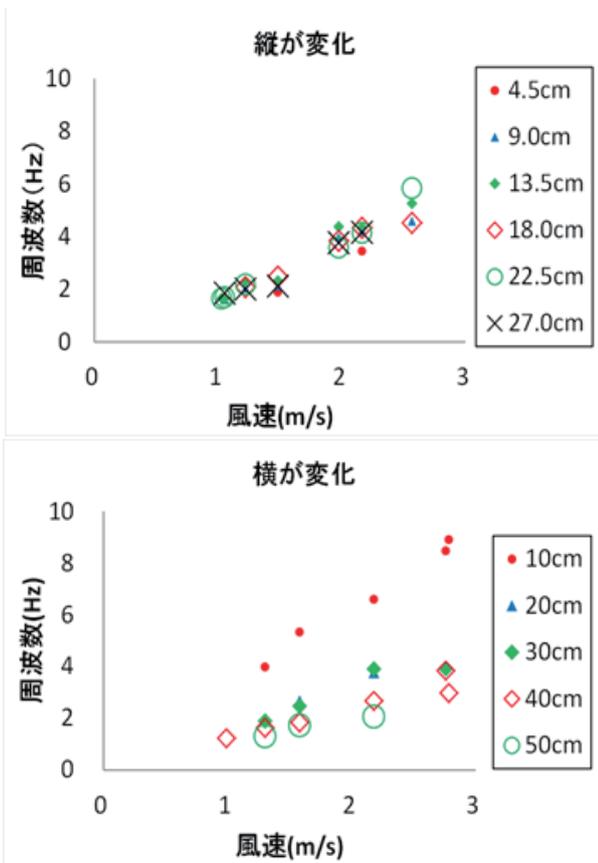


図 15 旗の縦と横の変化（四角形）

図 16 は回転式（電動型）を用いて観察した例である。ポリエステル製の最小の旗（縦 10cm、横 5cm）および最大の旗（縦 20cm、横 60cm）について示す。風速と周波数の関係は一次関数として表すことができ、小型（横が短い）であるほど、傾きが急となった。

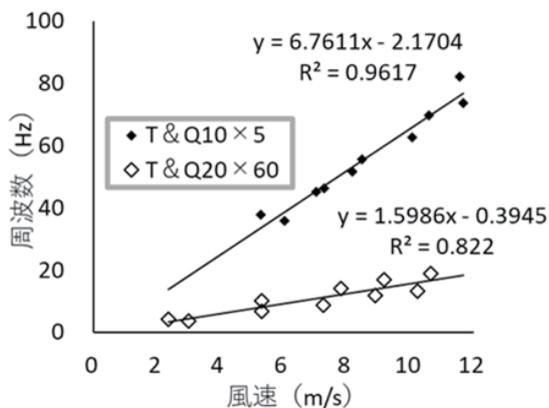


図 16 風速と周波数の関係（回転式による）

図 17 はテトロン製の四角の旗（縦 38.5cm、横 58cm）を基本型とし、縦方向のみを 1/4 にした場合、および横方向のみを 1/4 にした場合の 3 種について、周波数と振幅を比較したものである。振幅（振れ角）は、風速が増

すほど減少する。

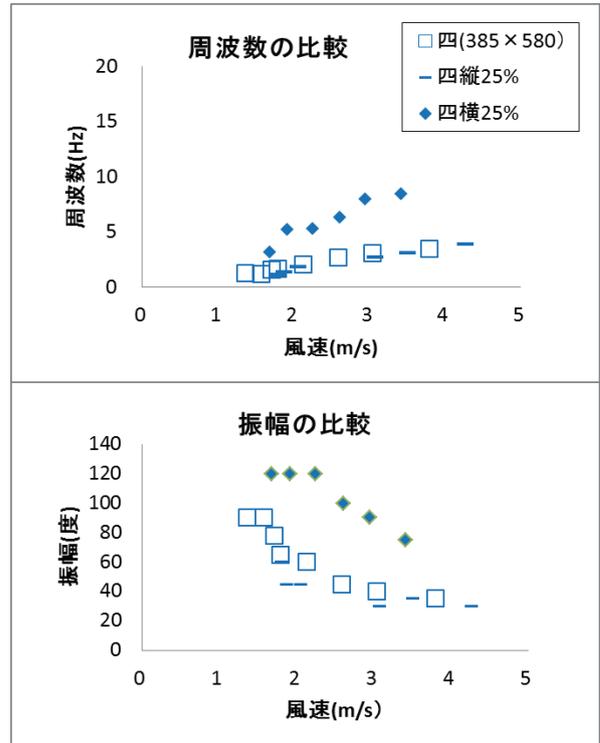


図 17 周波数と振幅（四角形）

図 18 は回転式（手動型）を用いて、各種素材およびサイズの旗の臨界風速について比較したものである。旗の形状については、縦方向と横方向を同一としている。なお「白タオル」「青タオル」は、各々通常のタオルおよびバスタオルを意味する。

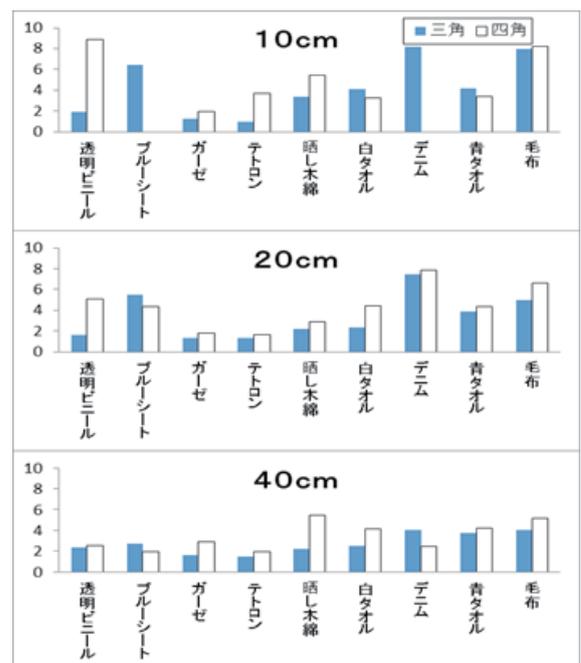


図 18 臨界風速の比較

四角形より三角形の方が、また、サイズが大きく、柔らかい素材ほど、低い風速において旗らしくはためくことが分かる。

図19は回転式(手動型)を用いて、異なる素材およびサイズの旗がもたらすはためき音について、周波数解析を行ったものである。凡例の□と△は旗の形状を、また数値は縦と横のサイズ(cm)を意味する。

騒音レベルは、レジ袋が最も高く、75.3dB(A)であるのに対し、三角形のサテンは62.0dB(A)であった。レジ袋やビニルによる旗がうるさく感じるのは、800Hz以上の高周波成分が高い為といえる。

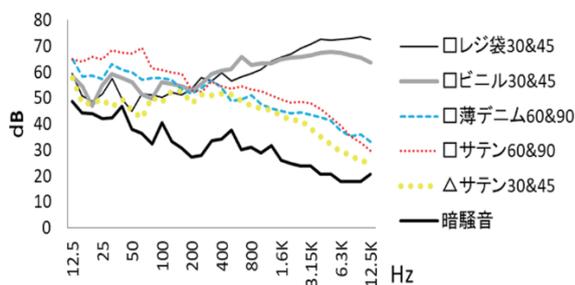


図19 旗がはためく音の周波数解析

7. おわりに

旗はなぜ風にはためくのかという問いに対しては、カルマン渦によるものであり、強風下で電線が鳴る現象(エオルス音)にもこれが関係しているといった回答が準備されている。旗が小型であるほど、そして強風下におかれるほど、旗がはためく周波数は高くなり、旗の形状については、尻尾のある三角形の方が四角形よりはた

めき易い、といったことは直感的に分かる。しかし、風速5m/秒下において、葉書サイズの旗、フレアスカート、ズボンがはためく時の周波数はどれほどかと問われたら、誰もが答えに窮するであろう。つまり、実験を行ってこそ、数値をもって把握できるのである。衣服内換気をもたらす要因として、自然対流と強制対流があり、後者については身体動作によるポンピング効果が知られている⁶⁾。衣類のはためきも強制対流に寄与している筈であり、被服衛生学領域において、排熱と保温の両面から検討する意義はあると思われる。

引用文献

- 1) 山崎和彦：人間の許容限界事典，V. 物理，5.. 風，朝倉書店，673-678 (2005)
- 2) 山崎和彦，鳥山菜穂，大久保千穂，前田亜紀子：衣服内気流の観察方法に関する基礎的研究，実践女子大学生生活科学部紀要，52, 109-114 (2015)
- 3) 山崎和彦，鳥山菜穂，永倉由貴，前田亜紀子：衣服内気流に及ぼす煙突効果とポンピング効果，日本生理人類学会誌，22(3), 121-128 (2017)
- 4) 山崎和彦，那須ゆうみ，永倉由貴，前田亜紀子：通気性の異なるスカートの衣服内気流に及ぼす効果，日本生理人類学会誌，26(4), 103-110 (2021)
- 5) 山崎和彦，前田亜紀子，大久保千穂：風の効果について実験するための送風機の特長，実践女子大学生生活科学部紀要，50, 187-190 (2013)
- 6) 山崎和彦：衣服科学，朝倉書店，37(1999)

和文抄録

筆者らは旗および衣類はどのように風にはためくのか観察したいと考えた。しかし、我々は風洞装置を所有しない。そのため実験装置を組み立てる必要があった。本論文は、筆者らが試した実験手法について紹介するものである。内容は次の通りである。風速計、風の分布の観察方法、台車の移動により風をもたらす方法、送風機を用いて風をもたらす方法、送風機が発する風の分布の均一化、アームを回転させることにより風をもたらす方法、旗のデザイン、旗のはためきの周波数と振幅の評価法、臨界風速の定義、そして旗のはためきの騒音レベルの測定方法であった。さらに、主な測定結果について紹介した。風速と旗のはためきの周波数の間には一次関数の関係が認められた。

2022年9月20日受領