特 集

風観測技術

地上風の測器

Instruments for Surface Wind Observation

小野木 茂*

Shigeru ONOGI

1. 地上風の測器

地上風とは文字どおり地上に吹く風のことであるが、気象庁の行う地上気象観測業務による風向風速の観測では原則として地上高 10m における水平方向の風向風速を観測することとなっている。

このように地上気象観測業務としての地上風観測は水平風の観測であるが、環境アセスメントや農業などにおける防風、風況調査、橋梁などの耐風強度の設計、列車の横風事故などの調査や防止には、風の吹き上げ吹き下ろしなどの鉛直成分の観測も必要となってくるであろう。

この稿では地上における風速を観測するための測器について、種類、測定原理、特徴などを述べるとともに、風速計の校正についても簡単に述べる。

2. 風観測に使用する用語

風は大気の運動でありその大きさを方向と速さのベクトルで表す。この運動の方向が風向であり、速さが風速である。なお風向は風の向かってくる方向(風上方向)で表す。また、大気の移動した距離(風速の時間積分)のことを風程という。これら、風向・風速・風程に「瞬間」や「日」、「最大」などの接頭語をつけて種々の風向風速を表現する。たとえば最大瞬間風速、日風程、2分間平均風向風速などの用語がある。

また、気象庁が行う地上気象観測においては、単に「風速」といえば10分間平均風速のことを意味し、測器が測定したままの平均をしていない風速を瞬間風速という。

ただし2007年12月4日からは、3秒間の平均値(測器が測定する0.25秒毎の計測値12個の平均値)をもって瞬間風速の観測値としている¹⁾。瞬間風速のうちある決まった期間の中での最大のものを最大瞬間風速という。なお、古い文献や書物の中には「瞬間最大風速」という用例も見られる^{2,3)}。

風程は大気の動いた距離(=程)であるが、実際に観測しているのは風向風速計を通過した大気の長さであり、通過した大気の風向については問題にしていない。従って、風程は風のベクトル値としての時間積分ではなく、風速のスカラ値の時間積分である。

3. 地上風の測器の原理による分類と特徴

風速計には大きく分類して、風圧を利用するもの、風速を回転速度に変換するもの、大気中の音波の伝播を利用するものの3種類がある。このうち現在主流となっているものは風速を回転速度に変換するものであり、次に音波の伝播を利用する超音波風向風速計である。風圧を利用するものは現在では販売されていないようである。

ここでは、これら3方式の風速計について概略を紹介する。

3. 1 風圧を利用するもの

風に抗しておかれた物体が受ける風圧を測定することにより、風速を又は風向と風速を測定するものである。

* 気象庁気象研究所 物理気象研究部 主任研究官
Senior Researcher, Physical Meteorology Research Department, Meteorological Research Institute

(1) ダインス風圧計(ダインス自記風力計)

ピトー管を応用したもので、図1に示すような大がかりな装置であり、屋内部の槽の高さが約1mである。風圧は風速の2乗に比例するので、風が弱い場合の風圧を測定するのは困難となる。ダインス風圧計は水に浮かぶ浮子に2乗根を求めるという関数変換機能を持たせたもので、先人の工夫のすばらしさを見ることができる³⁻⁵⁾。

図1 ダインス式風圧計

上：屋外部 下：屋内部

(2) 風圧板

風が吹いてくる方向に対して面を向けるように置いた板の上辺に回転軸を取付けたもので、無風時の板は垂直に垂れ下がるが風速が上がる

図2 風圧板

に従って板の下端が風下側に後退する。風が強いほど板は水平に近くなるので受ける風圧があまり増加しなくなる。このため、目盛は2次関数よりは等間隔に近くなる。

(3) 富士山用試作器

冬季の霧氷の成長が速く、一晩に1m以上成長することも珍しくない富士山測候所では、電気ヒーターを内蔵した風向風速計を使用していた。しかし、ヒーターやブラシの故障などにより度々凍り付くことがあった。そこで何十年も前から近年まで、可動部分がない風向風速計が考案されてきた。その一つの方法として、垂直に立てた棒に加わる風圧を測定するものがある。

充分なヒーターを内蔵した金属棒の頂部に風圧を受ける球を取付けたものをバネのきいた基台に立て、複数設置した変位計で風圧による撓みを測定し、風向風速を求めるものである^{6,7)}。

図3 富士山測候所用

また、垂直に固定した防水型風向風速計試作器棒の上に、側面に均等に複数の穴をあけた球体や円柱体を置き、この穴で受ける風圧を測定して風向風速を求めるものも考案された⁸⁾。いずれもヒーターに多大な電力を必要とする上、風圧の2乗則のために弱風が測定できない欠点があった。

3. 2 風速を回転速度に変換する測器

風圧は風速の2乗に比例するが、大気の中に置いた風車は適切に設計すれば定常状態では風速にほぼ比例した回転速度で回る。この原理を応用したのが風杯型と風車型の風速計であり、現在も世界中で広く使われている。

(1) 風杯型風速計

半球形又は円錐形のカップ(風杯)3個ないし4個を垂直回転軸に取付けたアームに取付け、風を垂直軸の回転に変換して風速を測定するものである。

古くから実用化されたロビンソン風力計は風杯が4個ある四杯型であり、垂直軸の回転速度をウォームギア機構で適度に落とした後、変速比10:1のギアを4段連ねた構造である。ウォームホイールと各ギアの面には0から

9の数字が刻印されており、回転数すなわち風程が読みとれるようになっている。また、ウォームホイールのカムによって、一定風程(例えば100m)毎に電気接点が閉じ、風程をカウンタなどで計数できるようになっている。このようにロビンソン風力計は風速と風杯の回転速度とが比例することを前提に作られたようだが、実際には正比例からはかなりのズレがあり、複雑な関数計算をして風速を求めているようである^{7,9)}。

また、ロビンソン風力計は風に含まれる乱流の度合いによって風速対回転速度の関係が変化すること、約40m/sよりも低い風速では層流よりも乱流のほうが回転速度が高い^{7,9,10)}という欠点があった。

図4 ロビンソン風力計

コラム：風杯の回転方向

風杯型風速計の風杯の回転方向は上から見て右回り(時計回り)、左回り(反時計回り)のどちらであるか。調べてみると諸外国の製品では右回り、左回りのどちらの製品もある。それに対して、国内の気象測器メーカーで製造販売されているものは、すべてが右回りのようである。

この拙稿を執筆するにあたり風速計に関する資料を探していたところ、矢島(1963)⁷⁾は「風杯固定ねじは右ねじでよい、ウォームギヤの油の持ちのよさなどの製作、取扱いの易しさから風杯の廻転方向は、上から見て右廻りを正式とすることが決まった」と述べており、このことを決めたある委員会の議事録抄¹¹⁾にも「気象庁の正式測器として採用されている以上、一応回転方向は定めておく必要がある。風速計の特性に、回転方向は無関係であるが、云々」と前置きしたあと、同様の理由・結論が述べてある。

三杯型風速計はロビンソン風力計の上記の欠点を解決するために考案されたものである。主な改良点は風杯を3個にしたこと、風杯の縁を丸めてビードを付けたこと、風杯を取付ける腕の長さを適切にしたことの3点であるが^{7,9,12)}、このことにより、風速対回転速度の直線性が改善され^{7,9,13)}、乱流による影響が除去され、機械強度が増加し、軽量化による慣性モーメントの減少により風速変化に対する追従性が向上した。

また、回転軸に発電機を組み込んだものでは、風速にほぼ比例した電圧信号が得られるようになった。

(2) 風車型風向風速計

飛行機のような流線型の胴体の前端に風車を取付けた形の風向風速計である。胴体後部の垂直翼によって胴体が風上の方を向き、風車が回転することにより、風向と風速を同時に測定することができる。風車軸には発電機が取付けてあり、風速にほぼ比例した電圧が得られるようになっている。また、風車軸に風程接点も取付けられているものもある。

1980年以降には発電機に代わって、風車軸に取付けた有孔円盤が光を断続することによって得られるパルス信号の周波数を測定することにより、風速を求める方式のものが導入された。以後、気象官署や地域気象観測所(アメダス)の風車型風向風速計はすべて、風車軸の回転による光の断続(光路の断続や反射の断続)で得られるパルス周波数信号を測定するパルス式となっている。

風車型風向風速計は気象庁が全面的に採用していることもあってか、日本国内では標準的な風向風速計となっているが、諸外国では逆に三杯型と矢羽根風向計の組み合わせが主流のようである。

(3) ビラム風速計

直径約11cm、長さ約5cmの短い円筒の中に風車を組み込んだ構造の風速計で、風車の羽根の数は8枚のことが多い。風車の回転軸に取付けた歯車機構で回転速度を落とし、中央に取付けた指針でアナログ時計のように風程を指示する。製品としては三脚と矢羽根式の風向計がセットになっており、矢羽根によって風車が常に風上を向くようになっているものもある。

図5 ビラム風速計

気象観測に使用する風速計の起動風速(後述)が1m/s程度であった時代に、0.5m/sの起動風速であるピラム型風速計は、弱風の観測に適しており、小型で扱いやすいので工場での作業環境の測定や、運動競技などの際の風速測定に使用されることがある。

3.3 大気中の音の伝播を測定するもの(超音波風向風速計)

今まで紹介した風速計が測定する風に抗して測器を設置し、測器が受ける応力をなにかの物理量に変換して風速を測定するものであったが、超音波風向風速計の場合はできるだけ場の風を乱さずに風速を測定するものである。しかし、測定場に超音波の送受をするプローブとそれを支えるフレームを設置するので、多少場を乱すことは避けられない。

超音波風向風速計の測定原理にはドップラー法、シングラウンド法、伝播時間差法があるが、現在市販されているものはすべて伝播時間差法を採用していると思われる。この原理は測定体積中に対向させて置いた一組の送受波プローブから交互に超音波パルスを発射し、受信するまでの時間差から対向したプローブ方向の風速成分を求めるものである。3組のプローブを互いに異なる方向に配置すれば、鉛直流を含めた立体的な風向風速を測定することができる。

超音波風向風速計の特徴として、風速0m/sから測定できることと応答が非常に速いということがあげられる。このことから超音波風向風速計は地上気象観測の風向風速計としてだけでなく、水平風に比べて非常に弱い鉛直流の測定や、乱流の測定に使用される。

超音波風速計で注意すべき点は、フレームとプローブの影響である。風洞内の層流における測定実験では、測定体積の風上側にフレームがある場合は、ない場合に比べて風速が数%低く測定されることを筆者は経験している。測定するある1対のプローブに対しては他のプローブもフレームと同様な測定誤差の原因になりうる。さらに、測定しているプローブ自身が作り出す乱流も測定誤差の原因となりうる。もちろん、超音波風向風速計を取付けるための器具(フランジなど)は測定に大きく影響を与えるので、設置方向などに注意が必要である。

4. 回転風速計の詳細

ここでは、一般によく使用される風速を回転速度に変換して測定する回転風速計について詳しく述べる。

4. 1 用語

(1) 起動風速

風速計の起動風速は風杯や風車が停止状態から回り始める風速である。機械式ではない超音波風速計ではこの概念はないが、最低測定風速という意味で使われているようである。ロビンソン風力計のような古い測器では起動風速を2m/s以下とするのが困難であったが、機器の高性能化や軽量化の進んだ、現在の地上気象観測に使用する風速計では0.5m/sを下回る起動風速を持つものもある。

なお、風向計の起動風速は、風向に対して真横を向いた風向計が動き出し、風に正対するのに必要な最低風速である。風速計と風向計が一体となった風車型風向風速計では風速部の起動風速が十分に低くとも、風向部の起動風速が高いと、風車が風に正対できないために風速を弱く観測してしまうことがある。

(2) 距離常数

風速計の応答の速さを表す常数(定数)である。電気回路の場合は、ステップ状の入力電圧に対する応答が定常状態の約63%などのある決まった割合に達する時間を時定数といい、入力電圧が2倍になれば立ち上がりの速さも2倍になるので、時定数は変化しない。

風速計の場合は風杯や風車の回転速度を上昇させる力が風速の2乗に比例するので風速によって時定数が変化することになるが、風杯や風車の回転速度が定常状態の63%に達するまでの時間で風速を積分したもの、すなわち風程がほぼ一定となる。この風程のことを距離常数といい、測器によって決まった値を持つ。気象庁ではWMO(世界気象機関)のガイド¹⁰⁾に従って、1995年度以降に整備を開始した気象観測装置から、距離常数5m以下の風速計を採用している。

4. 2 風速信号の取出し方

風速計センサからの風速信号の取出し方は大きく分けて2種類ある。一つは風速にほぼ正比例するアナログ電圧として取出す発電式で、もう一つはパルス周波数として取出すパルス式である。これらのセンサの多くのものは電圧やパルス周波数の信号をそのまま伝送するが、風速センサ内でデジタル符号信号に変換して伝送するものもある。

(1) 発電式

風速計センサ内部に発電機を内蔵し、風速を電圧信号として取出す発電式にも、直流電圧と交流電圧の2種類

がある。発電式は、接続した電圧計の目盛を風速に読み替えることにより、簡単に瞬間風速を読みとることが可能であり、ペンレコーダのような汎用型のアナログ記録器に瞬間風速を連続記録させることが可能である。風速信号を得るために電源が不要である点も、フィールドにおける連続観測には有利である。

しかし、センサからの信号ケーブルが長くなると信号電圧が低下して測定値に誤差を生じることがあるし、電力機器などからの誘導電圧により測定誤差を生じることもある。また、発電機の磁石の経時劣化によって風速対電圧特性が変化することがある。

(2) パルス式

風速計センサ内部に電子回路などを内蔵して、風車や風杯の回転速度に正比例した周波数のパルスを出力し、この周波数を測定することによって風速を測定するものである。パルスの周波数を測定するので、発電式のようにケーブル長によって風速測定誤差が大きくなるようなことはないが、信号波形の劣化による計数誤りや誘導雑音の周波数を風速信号として計測する可能性がある。また、半導体素子を使用している場合が多く、雷撃に対する耐性は一般的に発電式ほどは高くない。

気象庁における最初のパルス式風速計の採用は、1980年から気象官署に展開されたJMA-80型地上気象観測装置の風向風速計であり、発電式のような重い磁石を回転させることから解放されたことで、風車の起動風速は0.5m/s程度に改善された。

(3) 風程接点と風速の計算

風速計の風程接点は、100mや60mなどの一定の風程になる毎に電気接点を閉じるもので、風杯や風車の回転軸に取付けた歯車によってカムがゆっくり回転して、電気接点を閉じる機構になっている。従って、回転軸の回転速度と風速の関係があらかじめ判っていれば、一定時間内の接点が閉じる回数を計数することで、容易に平均風速を求めることができる。特に、60m風程毎に接点が閉じるタイプのものでは風程接点の閉じる回数を10分間計数すると、計数値を10で除した値がその10分間の平均風速となる。すなわち10分間に閉じた風程接点の回数をN回とすると、10分間の風程は $N \times 60\text{m}$ 、この風程を10分間=600秒で割れば

$$N \times 60(\text{m}) \div 600(\text{秒}) = N \div 10(\text{m/s})$$

となる。

4. 3 回転風速計の回転速度特性

(1) 風速対回転速度特性

風速計の回転速度は風速に対して完全には正比例しない。しかし、気象庁の測器検定に合格する風速計では、風速対回転速度の正比例からの差は一定の基準内に入るように製作されている。

パルス式の風速計では、0.25秒毎に測定したパルス周波数と風速対周波数の関係からより正確な風速を求めることができる。

(2) 起動風速付近の回転特性

起動風速近くでは軸受の回転摩擦の影響で風速対回転速度の正比例からの差が大きくなる。また、静摩擦と動摩擦の関係によって一度回り出した風速計は風速が起動風速より多少低くなくても回り続けるヒステリシス特性を持っている。

図6 起動風速付近のヒステリシス特性

低い風速を対象として観測を

行う場合は、できるだけ低い起動風速の測器を使用する必要があるが、軸受の潤滑油によっては低温時に回転抵抗が増加することも考えられるので注意が必要である。

また、低い風速の観測データを利用する場合は、使用された風速計の低風速域の特性について把握しておくほうがよい。

(3) 風速計の回り過ぎの問題

距離常数のところで説明したように、たとえば距離常数8mの風速計を風速8m/sの風の中に風車が停止した状態で置くと、1秒間で風速8m/sの63%に相当する回転速度に達する。では、風速8m/sに相当する回転速度で風車が回っている風速計を静止大気中に置くと、1秒間で風車が8m/sの37%(=100-63%)に相当する回転速度になるかということ、そうではない。測器にもよるが2～4秒を要するものもある。

このように回転型の風速計は、風速が増加するときは速く追従し、風速が減少するときはゆっくり追従するの

で、自然風のような変動風を測定する場合は平均風速を実際より高く測定することになる。この性質は風杯型のほうが風車型より強く現れることが示されている^{13,15)}。

図7は1976～77年頃に調査した、気象研究所の気象観測用鉄塔で使用していた微風向風速計と、気象庁の地上気象観測で標準的に使用していた風向風速計の、立ち上

図7 気象庁標準型の風向風速計と微風向風速計の立ち上がり立ち下がり特性

がりとしち下がり特性である^{16,17)}。気象庁標準型の立ち下がり特性(τ_2)は立ち上がり特性(τ_1)の4～5倍であるのに対して、微風向風速計では2倍程度である。なおこの例の場合は一般的な時定数で定義する定常状態の約63%に達する時間ではなく、定常状態の3分の2(67%)に達する時間を測定している。

標準型の風車の羽根は一般的に見られるような長円形をしているが、微風向風速計は比較的長い棒の先端部分にのみ三角形の羽根が付いている構造であり、この構造の違いが図に見るような立ち上がり立ち下がり特性の違いを生んでいると考えられる。

(4) 風速計の角度特性

風車型風向風速計センサは胴体が風向の方向に向かないと正しく風速を測定できないが、風杯型では風向に無関係に風速を測定できる。では、地上風の観測時に吹き上げや吹き下ろしの風、すなわち鉛直成分を含む風速を測定する場合はどうなるか。これについては、風杯型の場合は水平に吹く風よりも吹き上げ吹き下ろしの風のほうが風速を高く観測することが知られており^{7,17,18)}、この現象に対して理論的考察

図8 風車型と風杯型の鉛直方向の角度特性

を行った例もある¹⁹⁾。風車型の場合は、風向と胴体のなす角度の余弦に比例した風速の角度特性であると予想されようが、実測では角度に対して余弦よりも急に感度が減少する特性を示している¹⁷⁾。

(5) 胴体バランス

風車型風向風速計センサでは風向の起動風速を超えて初めて風車が風上を向くわけであるが、ここでセンサの胴体のバランスが観測値に影響を与える可能性がある。そのため気象測器検定では、センサを倒して風向軸が水平になるように支持したときに、胴体をどの風向角度に置いても静止することを確認する。すなわち、胴体の重心が風向軸の中心と一致していることを確認している。このバランスが大きくくずれていると、風向風速計セン

サをわずかも傾けて設置した場合に、特定の風向頻度が高く出る可能性が生じるとともに、甚だしい場合は風車が風に正対しないこととなる。

5. 微風速における風速計の校正

風速計の校正には一般的には風洞を用いるが、風洞の風速を正確に測定するためにはピトー管を使用することが多い。また、風洞の整流部と縮流部(絞り部)との壁圧の差から風洞風速を求める方法もある。

ピトー管による動圧と静圧を、水を使用したマノメーターで測定する場合を考えると、風速 20m/s の時のマノメーターの水位差は約 26mm であり、読みとり誤差を 0.1mm 程度としても 0.1m/s 誤差の風速測定が可能である。しかし風速 1m/s では、マノメーターの水位差は約 $60\mu\text{m}$ となり、測定が困難となる。このように風圧式の風速計の原理と同様に、風洞による風速計の校正においても、微風速を正確に測定するのは難しい。

一方、屋外で使えるほどの耐久性がないものならば、微風速から測定できる風杯型や風車型のような機械式の風速計を製作することは今日の技術では可能であろうし、超音波風速計では測定性能として風速 0m/s から 0.01m/s の分解能で測定可能であるとした製品も見られる。これらの風速計を微風速標準で校正して二次標準とし、これを元に風速計を校正することは可能である。

(1) 微風速標準

問題はどのように安定した微風速を発生させるかである。この微風速の基準としては古くから走行台車式の“風洞”というのが考えられている。これは、風を吹かせる風洞ではなく、静止大気中を風速計のほう台車に乗って走行するものである。台車の走行速度を測定することは微風速を測定するよりは容易なことであるが、大気を安定に静止させる方法と、風速センサとそのケーブルを取付けた台車を正確な速度で走らせる方法が問題となる。

日本では独立行政法人産業技術総合研究所 計量標準

図9 走行台車式の風洞装置概念図

総合センターにこの微風速標準がある^{20,21)}。この装置は大気を静止させるために温度変化の小さい地下トンネル内に設置されており、走行距離 40m ほどの大がかりなものである。台車には駆動用のワイヤを取付けて、モーターで牽引する方式となっている。

走行台車式の風洞装置では、走行する台車が大気をかき乱すので、一度台車を走行させると大気が静止するまでに相当時間待つ必要がある。

(2) 微風速風洞

微風速標準である走行台車式の風洞は高い正確さは得られるが、校正に長い時間が必要となるなど、生産性を上げるには難がある。風速計の能率的な校正を行うには微風速風洞が現実的な方法である。

微風速風洞では前述のようにピトー管などの風圧を利用した風速の基準を使用することが不可能である。一つの解決方法として、風洞の風路に断面の小さい部分を構成し、その部分の風速を校正された風速計で測定し、風洞測定部との断面比率を持って風洞測定部の風速を推定する方法がある。この方法は製作は容易であるが、空気の流れが拘束されるような小断面に設置した風速計の測定風速からは、断面積の比だけでは風速を単純に換算できないのではないか、という不確かさが生じる。

これを解決する方法として、一定の流量を正確に確保できる音速ノズル(ソニックベンチュリノズル)を使用する方法がある。音速ノズルでは流入側と流出側の圧力比がある一定の範囲内であれば、ノズルを流れる流体の質量流量は正確に一定となり(誤差 0.1% 以下)、その流量はノズルのスロート部の面積で決定される。従って、風洞に流れる空気を吸い込む(又は吹き出す)送風機と風洞の測定部の間に、複数の音速ノズルを並列に設置し、それぞれを弁で開閉することにより、任意の流量を得ることができる。この原理により、測定部に極めて安定した微風速流を実現することができるので、前述の走行台車で校正した風速計を用いて、流量と測定部の流速の関

図10 音速ノズルを使用した微風速風洞

係を求めておけば、簡便に微風速域で風速計の校正を行うことができる。²²⁾

6. おわりに

以上、地上風を測定する測器について、現在使われていないものも含めて、測定原理や特性について述べてきた。また、環境計測などに必要となる微風速計を校正する方法についても、その概略を紹介した。これらのことがみなさまの参考となれば幸いである。最後になりましたが、微風速風洞の項について助言をいただきました独立行政法人産業技術総合研究所 計量標準総合センターの寺尾吉哉様にお礼申し上げます。

参考資料：

- 1) “気象庁における瞬間風速の観測方法の変更について”，報道発表資料 平成 19 年 10 月 26 日，気象庁，2007
- 2) 倉石六郎，“瞬間最大風速について”，測候時報 16 巻 11 号 P1-2，気象庁，1949
- 3) 佐貫亦男，“地上気象器械(共立全書 53)” P13, P64～65，共立出版，1953
- 4) 三浦榮五郎，“気象観測法講話” P144-148，地人書館，1944
- 5) 岡田武松，“気象器械学” P156-165，岩波書店，1944
- 6) 横田幸雄，“防水球型風向風速計の開発について”，測候時報 42 巻 1-2 号 P37-44，気象庁，1975
- 7) 矢島幸雄，“風向・風速計”，気象研究ノート 14 巻 2 号 P144-159，気象研究所，1963
- 8) 渡辺幸男，“防水型風圧式風向風速計”，測候時報 47 巻 1-2 号 P31-34，気象庁，1980
- 9) 矢島幸雄，“三杯風速計について”，測候時報 27 巻-5 号 P156-161，気象庁，1960
- 10) 矢島幸雄，“風杯型風程式風速計のロビンソン係数について”，研究時報 12 巻 4 号 P225-229，気象研究所，1960
- 11) “測器専門委員会議事録抄(昭和 36 年 1 月 26 日)”，気象庁，1961
- 12) 大田正次・篠原武次，“実地応用のための気象観測技術” P66，地人書館，1963
- 13) 矢島幸雄，“変動風速時における風速計の応答”，研究時報 12 巻 1 号 P55-57，気象研究所，1960
- 14) “Guide to Meteorological Instrument and Method of Observation 5th edition”，WMO，1983
- 15) 鎌本博夫・宮下正雄，“風速計の動特性について”，研究時報 12 巻 3 号 P147-154，気象研究所，1960
- 16) 花房龍男 他，“筑波研究学園都市に新設された気象観測用鉄塔施設”，気象研究所技術報告第 3 号，気象研究所，1979
- 17) 徳植弘・染谷清，“風車型風向風速計の特性と観測値についての考察”，研究時報 29 巻 11-12 号，気象研究所，1977
- 18) 光田寧，“種々の風速計の比較について”，京都大学防災研究所年報 13 巻 A P441-448，京都大学防災研究所，1970
- 19) 近藤純正，“大気境界層の科学—大気と地球表面の対話—” P83-92，東京堂出版，1993
- 20) 寺尾吉哉・高本正樹，“走行台車を用いた気体低流速標準の研究”，計測自動制御学会論文集，26 巻，1 号，P1-8，計測自動制御学会，1990
- 21) 寺尾 吉哉・高本 正樹・片桐 拓朗，“市販微風速計の計測値の信頼性”，計測自動制御学会論文集，28 巻，3 号，P301-305，計測自動制御学会，1992
- 22) 寺尾 吉哉・高本 正樹・片桐 拓朗，“風速計校正用微風速風洞の開発”，日本機械学会論文集(B編)，63 巻，607 号，P938-943，日本機械学会，1997

図の出典：

- 図 1 岡田武松，“気象器械学” P157，岩波書店，1944
三浦榮五郎，“気象観測法講話” P144, 146，地人書館，1944 を参考に描画
- 図 3 横田幸雄，“防水球型風向風速計の開発について”，測候時報 42 巻 1-2 号 P37-44，気象庁，1975 を参考に描画
- 図 4 “気象観測法” P50，中央气象台，1929 から複写 不要部分削除
- 図 7 花房龍男 他，“筑波研究学園都市に新設された気象観測用鉄塔施設”，気象研究所技術報告第 3 号，気象研究所，1979 からトレース
- 図 8 徳植弘・染谷清，“風車型風向風速計の特性と観測値についての考察”，研究時報 29 巻 11-12 号，気象研究所，1977 からトレース
- 図 10 寺尾 吉哉・高本 正樹・片桐 拓朗，“風速計校正用微風速風洞の開発”，日本機械学会論文集(B編)，63 巻，607 号，P938-943，日本機械学会，1997 を参考に描画