

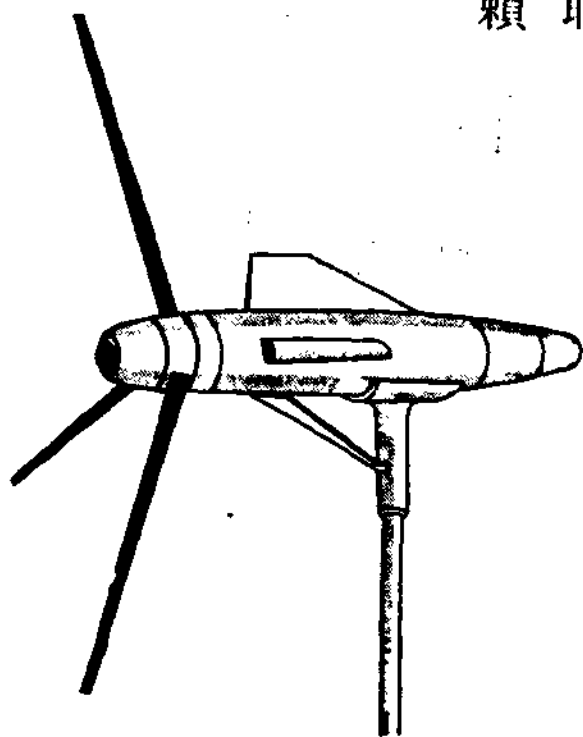
能源科技

SMALL WIND TURBINE

小型風車

設計及製造

牛山泉 共著
三野正洋
賴耿陽 譯著



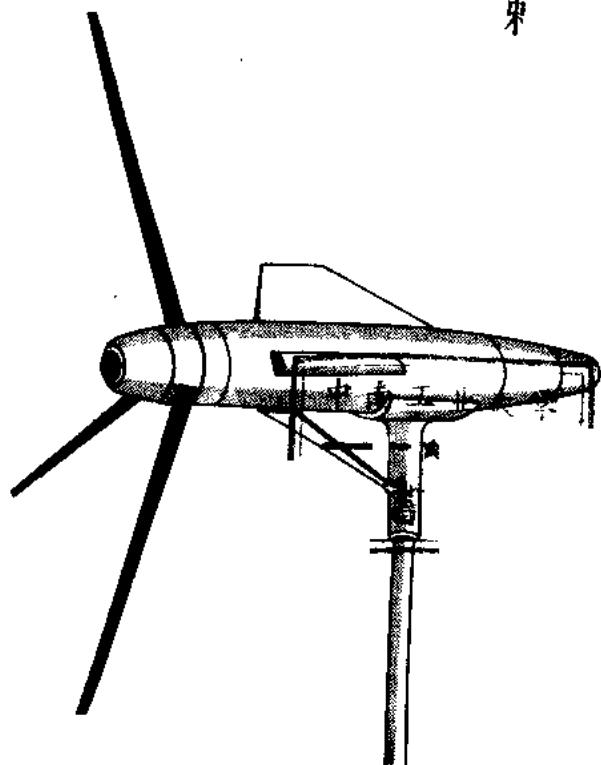
能源科技

SMALL WIND TURBINE

小型風車

設計及製造

牛三東 與 泉正陽 共著
東 正 陽 譯著



復漢出版社印行

序

對人類而言，能源為文明的基礎、也是生命的依靠，但人類古來對能源與空氣同樣，因太親近而未意識到其存在。直到1973年石油危機，乃至今天的能源難題，使人類不得不絞盡腦汁找出替代石油的能源。

目前尚未找到有力的替代能源，不過，真的沒有新能源嗎？吾人周遭有太陽熱及光、風力、水力、生質能等豐富的自然能源，而且，這些能源有更新性，其能源變換不放出污染物質。其中，風力是人類最早利用的親切能源。

以荷蘭風車為代表，中世到近世的歐洲各國，以風力為最大的動力源。美國在開拓時代以來，有600萬部以上的風車用於揚水、發電。最近，日本也積極開發風力的利用。

利用風力時，須結合氣象、航空、機械、電學、控制、土木、環境等廣範圍的知識，筆者專攻熱力學和空氣力學，長久蒐集、累積資料，編輯本書，內容可說是從入門到專門的踏板。

本書不用難解的數學式，致力於圖式化等，以便中學生以上的程度都能看懂。對業餘愛好者即使有若干難解之處，也可跳讀某種程度，瞭解概要，即可充分達成目的，有助於實際製造。但願本書有助於解決若干能源問題，雖非為技術教育編輯，若蒙採用為高工、專科、大學的風車研究用指南，實屬望外之幸。

小型風車技術實務/ 目次

第1章 風力利用概論	1
1.1 風的發生.....	1
1.2 風因時間所致的變化.....	2
1.2.1 風在一天中的時間	2
1.2.2 風的季節變化.....	2
變化(日變化).....	2
1.3 風的高度變化.....	3
1.4 風的變動性.....	5
1.4.1 氣流的擾亂.....	5
1.4.2 風向的變動.....	7
1.5 風的地域性.....	7
1.6 風的觀測與風資料的性質.....	8
1.6.1 風的觀測.....	8
1.6.2 風資料的性質.....	11
1.7 風力能的賦存量.....	12
1.7.1 地球總風力能的估	12
計.....	12
1.7.2 在日本的地理分佈	13
1.7.3 日本賦存量的估計	13
1.8 風力利用史與現狀(以小型風車爲中心).....	15
1.8.1 風車的起源.....	15
實用化.....	18
1.8.2 風車的普及.....	16
1.8.5 日本對風力能量的	
利用.....	20
1.8.3 風車的最盛期.....	16
1.8.4 風力發電的誕生與	
1.9 風力用途的未來.....	23
第2章 風車的設置場所	25
2.1 風車的設置場所.....	25
2.2 設置於平地的場合.....	25

2.3	設置於山脊或山頂的場合	26
2.4	以植物判定設置場所	27
2.5	影響風車系統的氣象障礙	27
2.5.1	亂流	27
2.5.2	強風	28
2.5.3	風剪	28
2.5.4	附冰與附雪	28
2.5.5	雷	28
2.5.6	塩害	29
2.5.7	砂塵	29
2.6	在建物上方或附近設置風車的場合	29
2.7	依風速判定設置場所	31
2.8	日本可望利用風力的地點	31
第3章	風車的基本知識	34
3.1	得自風車的能量	34
3.2	風車的種類與特色	40
3.2.1	水平軸風車的種類 和特色	43 40
3.2.2	垂直軸風車的種類	
3.2.3	特殊風車	46
3.3	風車性能的表示法	48
3.3.1	表示風車性能的特 性係數	48
3.3.2	風車的輸出及轉速 與風速的關係	50
第4章	風車系統的基本設計	52
4.1	所需能量的推定	52
4.1.1	電負荷的推定	52
4.1.2	機械性負荷的推定	55
4.2	風車系統的輸出與能量	60
4.3	風力的利用系統	65
4.3.1	風車的能量變換特 性	65
4.3.2	風力的利用系統	67
第5章	風車的空气力學設計	71
5.1	風車葉片	71

5.1.1 風車葉片的空氣力學.....	72	5.1.4 風車葉片的面積與Solidity	77
5.1.2 風車葉片的角度.....	73	5.1.5 風車葉片的平面形狀.....	78
5.1.3 風車葉片的斷面形狀.....	76		
5.2 風車葉片的設計法.....	80		
5.2.1 翼形的決定.....	80	5.2.3 風車葉片用翼素理論的設計法.....	90
5.2.2 風車葉片的圖式設計法.....	82		

第6章 風車系統的構造設計及機械設計.....101

6.1 風車的構造設計.....	101		
6.1.1 作用於風車葉片的離心力.....	101	6.1.4 螺旋槳的向動量與作用於尾翼之力.....	107
6.1.2 作用於風車葉片的抗力.....	102	6.1.5 風車系統的負荷條件.....	109
6.1.3 風車的種類.....	104	6.1.6 風車的安全設計.....	110
6.2 風車的機械設計.....	112		
6.2.1 風車的轉速控制.....	112	葉片.....	124
6.2.2 風車的方位控制.....	118	6.2.5 風車葉片與轂部的結合部.....	127
6.2.3 風車葉片的材質與構造.....	120	6.2.6 風車的增速機構.....	129
6.2.4 帆翼與沙伯紐斯的			
6.3 支持塔 (tower)	131		
6.4 支持塔的地基.....	135		

第7章 風力利用系統的構成要素.....137

7.1 發電機.....	137		
7.1.1 汽車用交流發電機的原理和構造.....	138	的性能.....	139
7.1.2 汽車用交流發電機		7.1.3 利用交流發電機的風力發電.....	140

7.1.4 其他發電機.....	142
7.2 蓄電池與反用換流器.....	144
7.2.1 蓄電池與其種類.....	144
7.2.2 蓄電池的原理.....	144
7.2.3 蓄電池的性質.....	145
7.2.4 蓄電池的用途.....	146
7.2.5 充電的知識.....	148
7.2.6 蓄電池的保養.....	148
7.2.7 反用換流器.....	150
7.3 揚水泵浦.....	152
7.4 充氣與防止凍結.....	157
7.5 風力能量的熱變換與積蓄.....	158
7.5.1 能量的利用結構.....	158
7.5.2 風力熱變換的方式.....	159

第8章 經濟性.....165

8.1 小規模風力發電系統的經濟性評價.....	165
8.2 小規模風力發電系統的電力成本.....	167
8.3 小規模風車系統的成本計算.....	169
8.3.1 兩種風車系統的成 本比較.....	169
8.3.2 計算成本所需資料.....	171

第9章 世界的小型風車.....175

9.1 美國.....	176
9.2 澳洲.....	193
9.3 加拿大.....	195
9.4 丹麥.....	197
9.5 英國.....	202
9.6 法國.....	204
9.7 西德.....	206
9.8 義大利.....	208
9.9 日本.....	209
9.10 瑞士.....	216
9.11 蘇俄.....	217

第10章 製造實務.....222

10.1 業餘者自製風力發電系統之例.....	222
10.1.1 茅野勝義氏之例222	10.1.2 金網均氏之例.....225
10.2 自製風車的大小和形狀.....	226
10.2.1 風車大小的限制226	10.2.2 製造的風車種類...226
10.3 木製螺旋槳的製造法.....	228
10.4 與發電機的配線.....	232
10.5 若干新構想.....	235
10.5.1 改善沙伯紐斯風	風車的起動性.....237
車性能的構想... 235	10.5.3 風向一定時的風車
10.5.2 改善垂直軸高速	系統.....237
10.6 家用機的構造例.....	239
10.7 軸承與滑環.....	242
10.7.1 軸承.....242	10.7.2 滑環.....243
10.8 簡易計算法.....	244
折疊圖的風力發電機.....	246

第 1 章 風力利用概論

本章敘述利用風力須知的自然風特性、其時間性變化（日變化、季節變化、年變化）、高度變化、變動性、地域性。其次從能量利用的立場說明風的觀測方法和觀測資料，再以風力能量賦存量的觀念，研討日本可利用風能的程度。

最後回顧風力利用史，介紹歐美、日本的風力利用技術水準。

1-1 風的發生

風對人是最親切的自然現象，有時風帶給人豐富的恩惠，有時造成颶風等強風而塗炭生靈，古代人類以風神之力敬畏風，至今仍有不少場合當作信仰的對象。但是，風是太陽熱引起的空氣流動。太陽能大都成為熱傳到地球，到達地球的太陽能約 2% 變換為風。日本如能利用國內的所有風能，足可供給目前日本全國所需能量。如圖 1-1 所示，在北半球及南半球的中緯度地域，高層通常吹西風，天候的變化源自高氣壓、低氣壓的移動，就此地帶而言，氣壓配置是從西向東移動，天候表現雨、風、溫度變化等各種氣象變化，此一般性氣象動態因陸地、海上、空氣溫度的差異，大大影響局部的氣象。

例如在山岳，正午的太陽將山上空氣晒熱，使它上昇，谷底的冷空氣爬昇，這是谷風的發生。晚上，空氣中的熱往上空放出，

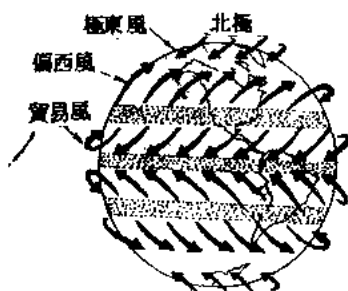


圖 1-1 地球上風的動態

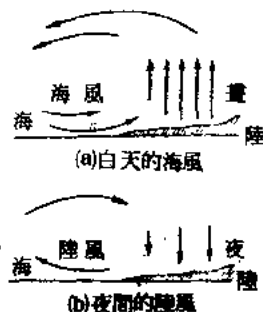


圖 1-2 海陸風的類型

空氣密度增大，沿山的斜面下降，這是山風的發生。另一例為海岸地方的海陸風，如圖 1-2 所示，正午與夜間因海陸的表面溫度不同，交互吹風，詳後述。

吾人須知風車所能利用的風是指地球規模的氣流移動與各地域局部地表狀態或氣溫差所致的空氣流動。

1-2 風因時間所致的變化

考慮風力的利用時，須瞭解隨時間而變化的風性質。特別是以小型風車發電時，通常以蓄電池貯藏能量，蓄電池的容量取決於風速低而不發生適量輸出的時間長短。

1.2.1 風在一天中的時間變化（日變化）

1 天中吹風的強度有某種程度的周期性，當然也因地域的氣壓配置而大有不同，但一般是地表的晚風弱，正午強，上空相反。

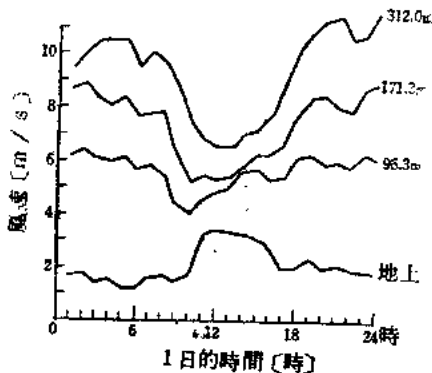


圖 1-9 川口無線塔各高度的風速日變化（1 月）

此相位在高度 100 ~ 150 m 附近逆轉，圖 1-3 示此狀態，這是高 300 m 的 NHK 無線塔（日本川口市）的資料。

海岸地方由於陸地與海面熱容量的差異，正午吹海風（從海吹向陸地），夜間發生陸風。

圖 1-2 及圖 1-4 說明海風、陸風。

海風、陸風都不很強，但對弱風用風車已很有效。

海風是從上午慢慢吹出，持續到夜半，深入內陸部10km，高度達500~1000m，風速不出5~7m/s的範圍。陸風更弱，風速不超過5m/s。海、陸風為太陽熱直接發生的風，夏季風力強，愈低緯度愈明顯。

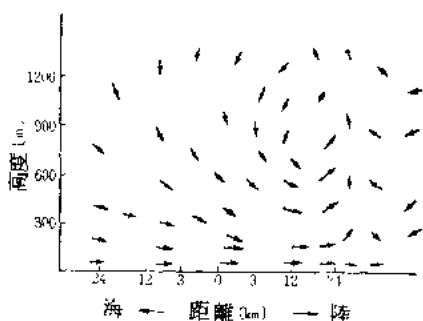
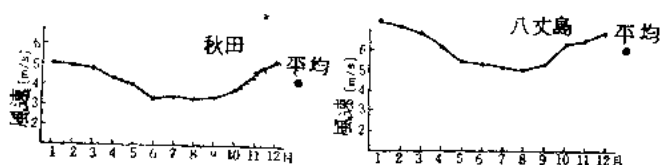


圖 1-4 海風之例（午後慢，上空無風）

1.2.2 風的季節變化

日本因地理位置而有顯著的季節性溫度差，因而，風的強弱差也相當大，風向的變動也大。寒冷的季節是北~西風強，夏天是南風多而弱。風向因季節而異的風稱為季節風。



●：10年間の平均風速

圖 1-5 月平均風速的年變化（1967~1976年的統計）

圖 1-5 為日本北方秋田市、南方八丈島的每月平均風速。

風速是八丈島較大，但季節風的吹法差不多。

1-3 風的高度變化

平坦地的風速如何隨高度而變化，圖 1-6 以空氣運動的立場區分

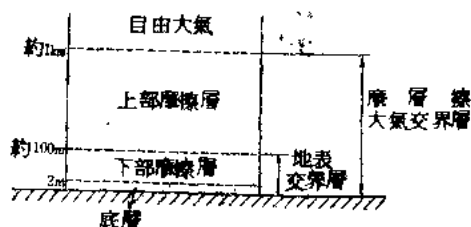


圖 1-6 下層大氣的構成

大氣，地面到 2 m 稱為底層，2 m 到 50 ~ 100 m 間為下部摩擦層，兩者合稱地表邊界層。更高到約 1 km 為上部摩擦層，到此以下的氣層總稱摩擦層，此摩擦層以上為自由大氣。

在地面到 100 m 的地表邊界層，空氣運動由渦動粘性和地面摩擦支配，風向約略一樣，風速是愈高愈強。

風速隨高度的變化有各種實驗式，一般用下式。

$$\text{(對數法則)} \quad V = V_1 \frac{\log \frac{h}{h_0}}{\log \frac{h_1}{h_0}} \quad (1.1)$$

或

$$\text{(指數法則)} \quad V = V_1 \left(\frac{h}{h_1} \right)^n \quad (1.2)$$

其中， V_1 ：高度 h_1 的風速

h_0 ：風速 0 的高度（下雪地 0.5 m，低草地 3.2 m，高草地 5 ~ 7 m）

指數 n 因大氣的熱安定度、地表面粗度而約為 $1/2 \sim 1/8$ ，在安定度中等而開闊的平地 $1/7$ ，大都市之類粗度大者常用 $1/3$ 。安定度不良時上下亂流混合旺盛，上下風速差小， n 小。安定度良好時，抑制混合，上下風速差大， n 增大。這也呈現於圖 1-3 的日變化，另一例是美國田納西州奧克里奇上空 1.6 km 的高度，1 天各小時的平均風速與各高度的關係如圖 1-7 所示，測定點為 10 處，除了高度低的 2 點之外，8 點用氣球計測，此資料為 5 年間的每日平均，可見一天各測定點的風速變化相當大，也可說高度高時風度愈大，白天風速差大，上下風速差小，夜間安定而風速差大。

各測定高度，平均 1 天的風速，求高度與風速的關係，如圖 1-8，此為奧克里奇平均風速的高度分佈，此曲線為典型的風速—高度分佈，在實際上很重要，例如高度 600 m 與 1000 m 處的風速是就對應於縱軸 600 m 及 1000 m 的橫軸值，分別得 7 m/s，8 m/s，即風速隨高度增加而增加。

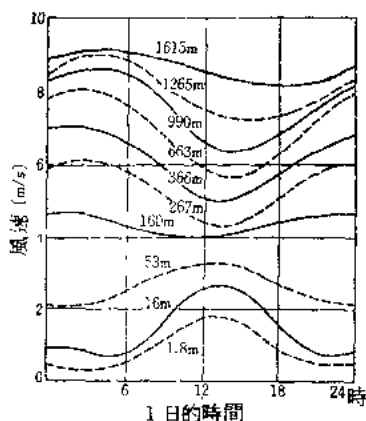


圖 1-7 奧克里奇各高度的風速日變化

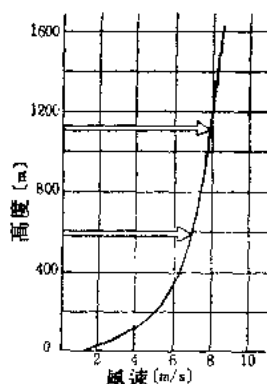


圖 1-8 奧克里奇的高度別風速分佈

車規範，最適經濟高度時，風速的高度分佈為極有用的資料。

高度所致風速變化的分佈及其最大值取決於地表平坦度、空氣與地表的摩擦、通風路的氣溫變化等，圖 1-9 為平坦地三種風速的高度分佈，它們的形狀大致取決於地表粗度，詳第 2 章。

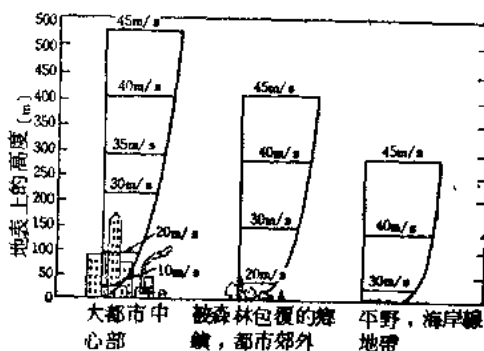


圖 1-9 地表上風速與高度的關係

1-4 風的變動性

1.4.1 氣流的擾亂

風速的自動記錄如圖 1-10 所示不斷變動，通常風速是指變動幅

約略中央的平均風速。

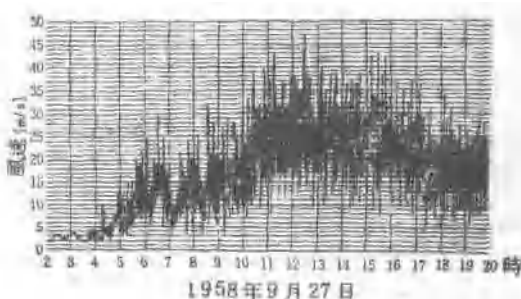


圖 1-10 浦河の強風記錄例
(Arakawa, 1969)

自然風是平均風速與各瞬間激烈變動的擾亂重合而成，含有擾亂的流動稱為亂流。亂流中有大小各種旋渦，可視為以各種速度零散運動者。對風速記錄進行頻譜解析，可知風速變動中，何一周期成分的變動能量較大。

擾亂造成的瞬間峯值稱為最大瞬間風速 (gust, 陣風)，最大瞬間風速相對於平均風速之比稱為突風率，因測定用風速計的特性或大擾亂的周期而異，一般為 1.5 ~ 1.7，圖 1-11 為最大瞬間風速與平均風速

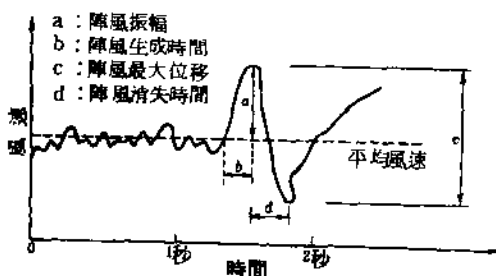


圖 1-11 陣風與平均風速

速的關係，擾亂的影響不只風速，也顯著呈現於風向，擾亂的原因主要在地面摩擦，此外，安定層或風速的鉛直分佈存在時，發生重力波，山的風下側發生山岳波，大氣中的地域運動會助長風的變動性，如第 2 章所述，地形或建築物的影響常增大風的變動幅，大都市的高層大樓也是原因之一，大樓風為其典型。

1.4.2 風向的變動

風爲向量，故以風向及風速兩要素表示，利用風車時，使風車旋轉面正對風向，可將風能利用到最大限度，因而螺旋槳形、多翼形等水平軸風車最好是風向變動少，來自一方向的風持久續吹。

風向的變動可依時間區分爲(a)年間或月間的風向傾向，(b)極短時間變動的氣流擾亂，(c)前兩者的中間平均風向。(a)的長時間變動狀況是畫出風配圖，可知風向的趨勢，風配圖可用風向別的統計(例如氣象廳觀測技術資料 42 號)作成。

(b)觀察風向計的動態，可知風向常變動，偏角不小，風向在短時間變動約 45° 。利用風力時，也需要數分~數小時的平均風向變化資料。

風向以風吹來的方向表示，低氣壓或高氣壓的移動等是以它們前進的方向表示，與風向相反。風向的表示是在圖 1-12 的東西南北的中間及再中間介入，共 16 方位，有必要更詳細表示方向時，以北方爲零度，取順時針方向的角度表示方向。

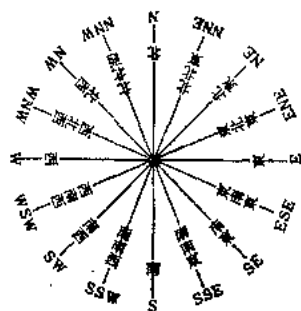


圖 1-12 風向 16 方位

1-5 風的地域性

風的性質極複雜，大別分爲氣壓配置所致的大規模風與地形、障礙物形成的小規模風。前者爲季節風等，後者常爲山或突出部中的岬等地表凹凸所致，各地域的風動態和強度常有特定的風向，其一稱爲「山風」(日文漢字爲下風)「出風」(此風將船吹往西北的日本海)，爲極強的地域風，不常吹，但在特定的氣壓配置一定吹出，有時以相當的大強度爲害。日本的地域風如圖 1-13 所示，也有的地方因地形而吹風向一定的強風，諸如谷間或海岸的絕崖等，風速約 2 倍於不受地形影響的場所。

近年建造的摩天大樓在周邊發生大樓風，在地形風中屬於極強，有時達周圍平均風速的數倍。

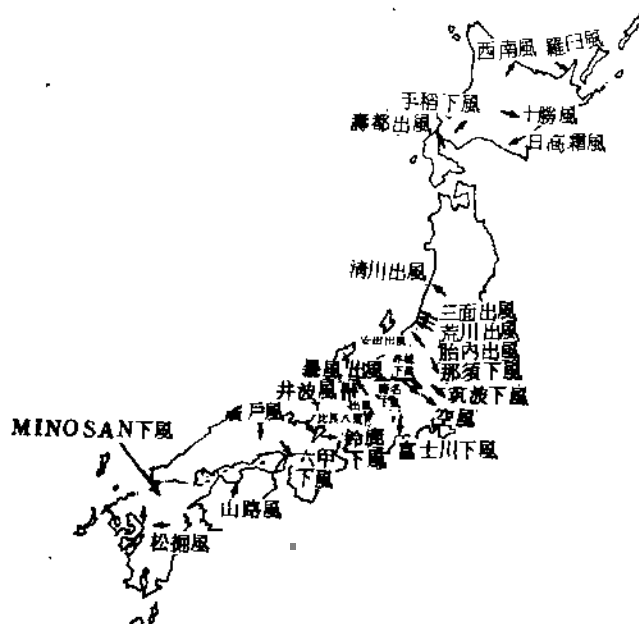


圖 1-13 日本地域風的分佈 (吉野, 1975)

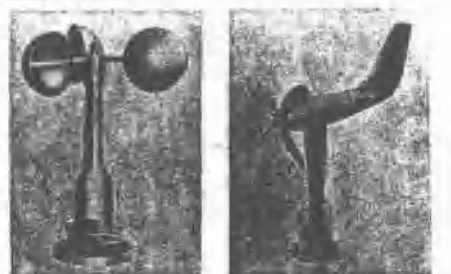
1-6 風的觀測與風資料的性質

1.6.1 風的觀測

欲利用風能時，須先觀測風，氣象機構（氣象台、測候所）觀測風時，對水平大氣流動以觀測時間 10 分鐘的平均值表示「平均風速」，亦即以規定時刻前 10 分鐘的平均值為該時刻的風速。對變動的風速，某瞬間的風稱為「瞬間風速」，不過風速計的時常數約數秒。

地上風通常以風速計測定，氣象機構的正規觀測是用圖 1-14 的風車形風向風速計（一般稱為螺旋槳形風速計或 aerovane）及風杯形風速計（三杯風速計）（但日本氣象官署 1975 年 1 月起廢止風杯形風速形）。

標準的風速計是選開闊的平坦場所，建造獨立的塔或柱，設於地上 10 m 的高度，開闊的場所是指風速計與障礙物的距離至少 10 於障礙



(a) 風杯形風速風速計 (b) 風車形自記風向風速計

圖 1-14 代表性風速計

物高度。為避免塔或測風台擾亂風流，風速計至少比塔或台高出 2 m 以上。

在建築物屋頂或用風力塔時，常為 10 m 以上，大都市等周圍有高建築物包圍時，有時超出 50 m。

風不斷變動，風速計（特別是以旋轉體為感部的風速計）無法追隨微細的變動。熱線風速計或超音波風速計的感部無旋轉部份，很可追隨風的微細變動，用於調查風的微細構造。

表 1-1 風速計的時常數

	加速時		減速時	
	0→5 m/s	0→50 m/s, 5→0 m/s	50→0 m/s	
三杯風速計	4.0s	0.4s	10s	1.4s
風車形風向風速計	1.5	0.15	3	0.25

（氣象廳 1970 超高層塔氣象資料第 2 號）

風速計的時常數大致如表 1-1 所示，三杯風速計稍大些，加速與減速時的時常數不同。螺旋槳形風速計若正對風不能表示正確的風速，圖 1-15 是受斜風的影響，由圖知風向為 20 度時風速降低約 10%。

正確的保養對風速計很重要，理由是風速誤差 10% 在能量會成 30% 的誤差，維持精度很影響測定器的價值。

除了上述的正式風速計外，簡單的手持式風杯形風速計或圖 1-16

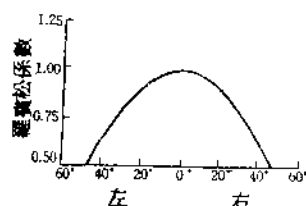


圖 1-15 aero-vane 遭受傾斜風時的係數變化（矢島幸雄）