論文 Memoirs.

風速度の測定に就て

篠田 歸一

On the measurement of the wind velocity.

By Kiti SINODA.

風速の定義は鐵砲玉などの速度の定義の様に單純に出来るものではありません。同じ風でも風洞の真中の部分の風の様な殆んど一様な連續した空氣の流れと見得るもの(それでも随分 turbulence を含んでゐる疑はありますが)については、普通の鐵砲玉などの速度と同様に簡単に風速を定義することが出来ませう。しかし自然の風の様に數多の turbulence を含む空氣の流れでは、風速を定義するには或る範圍の廣さと時間との内の、turbulence を含んだ空氣の運動の平均値を與へる様なものを取らなければなりません。此の値は平均値を取る廣さ、時間によつて勿論變ります。それですから、もし風速を普通流體力學で定義してゐる様な極限值だとしますと、Richardson の言ふ様に風には速度が無いとも考へられることになり又もし Defant の言ふ様に平均の風を地球上の緯度に固有な大氣の大循環だと致しますと、地球上の各地の風速はその地の緯度によつて一定したものとなつてしまひます。しかしこゝで考へて見たいと思ふのは、普通氣象器械即 Robinson 風力計 Dines 風壓計、Pitot 管等を用ゐて得た風速についてあります。

Dines 風壓計、Pitot 管は同じ理論が用ゐられたもので、風壓 p と風速 v との間の

$$p = \frac{1}{2} \rho v^2$$

と云ふ關係を用ゐたものであります。こゝに ρ は空氣の密度であります。もし器械が眞に瞬間的の風速を記してゆくものと p を知れば v を求めることが出来ます。しかし實際は如何に短いとは云へ或る時間の間の平均の風速を記してゐますから、其の間の p の平均値 $\bar{p}$ からは其の間の v の自乗の平均値 $\bar{v^2}$ が知れまして、 v の平均値 $\bar{v}$ は得られません。 $\sqrt{\bar{v^2}}$ と $\bar{v}$ とは果してどれ位の差異があるものでせうか。

Robinson 風力計でもお椀の凸面と凹面とに對する風壓の差によつて(普通の流體力學では風壓は風向に直角な面に投じた物體の正射影の面積に比例すると言つ

てゐますが、實際はその面積だけではなく、風を受ける面の形にも関係があるのでなければ凸凹面の風壓に差は生じません風を受ける面の形による風壓の差異については Eiffel の風洞中の大仕掛な實驗があります。)廻轉するのでありますからこれも $\bar{v}^2$ を記す装置であります。

Robinson 係數に就ては今日までに多くの人々が種々の方法を用ゐて實驗し、種々の異なつた結果を得ました。實驗は要するに或る時間内の $\bar{v}$ とお椀の廻轉速度の平均との比を求めるのであります。併し Dines のやつた様な實驗法によりますと、もし Dines 風壓計の示度が正しく風速を表はしてゐるものと考えとしても得た係數は自然の風に用ゐた場合に $\bar{v}$ を與へるかも知れませんが turbulence のない風の中で absolute measurement をやつた場合には決して $\bar{v}$ を與へるものではありません。又自然の風の中に含まれてゐる turbulence も時により大小がありますから、平均としては係數を取ることが出来ても、實際個々の場合に就ては始終係數が違つてゐるべきものであります。今の所 absolute measurement と考へられて

第一圖

あつたのですが、~~私~~に私が直したのです。それで少しの差は出来たかも知れません。)

風洞の實驗から得た Robinson 係數が turbulence のない風の $\bar{v}$ を與へるとしても turbulence のある風に對しては補正を補さねば用ゐられません。風速が不變の場合には $\bar{v}$ と $\sqrt{\bar{v}^2}$ とが等しいので、風洞中で $\sqrt{\bar{v}^2}$ に對する Robinson 係數を測定したのですが、その係數が即 $\bar{v}$ に對する Robinson 係數となつたのです。併し turbulence のある風では $\bar{v}$ と $\sqrt{\bar{v}^2}$ とは等しくはないのです。大體の補正は次の考へから出来ませう。

ある $\bar{v}$ を與へる様な Robinson 係數を求める方法は、風洞の中で不變の風速を用ゐてやる方法であります。National Physical Laboratory でなされた風洞の實驗で得た Robinson 係數とその時の風速との間の關係は第一圖に示してあります。(此の圖は原圖には 哩/時 であらして

Robinson 風力計によつて記録された風速を v とし、これに對する風力計のお椀の中心の速度を w とします。お椀の運動が定常になつた時を考へますと、お椀の一つがその凹面を、他の一つがその凸面を風に垂直に向けてゐて、残りの二つは從つてお椀の側面を風に向けてゐる様な位置にある場合には次の關係が成立します。

$$k_1(v-w)^2 - k_2(v+w)^2 = 0 \quad (1)$$

こゝに k_1, k_2 は常數であります。勿論この式では粘性抵抗や機械の摩擦は無視してあります。

運動が定常になつてゐる以上、お椀の位置が何所にあらうとも w は變らない筈ですから、(1)の關係は定常運動のつゞいてゐる間常に成立つ筈であります。故に(1)の式は v と云ふ風速が器械に記録されつゞけてゐる間は何時でも成立ちます。(1)から

$$\frac{v+w}{v-w} = \sqrt{\frac{k_1}{k_2}}$$

即

$$v = \frac{\sqrt{k_1} + \sqrt{k_2}}{\sqrt{k_1} - \sqrt{k_2}} w = aw \quad (2)$$

が得られます。

自然の風に含まれた turbulence は實際はその intensity, その週期ともに複雑なものです。今は簡單のために平均の風速に加はる turbulence の項を正弦曲線で表はされるものと致しますと、 t 時の瞬間に於ける風の所謂 absolute velocity の値 V は

$$V = v_0 + v_1 \sin(p_1 t + \epsilon_1) + v_2 \sin(p_2 t + \epsilon_2) + \dots \quad (3)$$

であります。こゝに v_0 は平均風速であります。

風力計のお椀の速度もこの turbulence の影響を受けて、いくらかの不同を生じるものと致しますと(3)と同様に

$$W = w_0 + w_1 \sin(q_1 t + \delta_1) + w_2 \sin(q_2 t + \delta_2) + \dots \quad (4)$$

としてあらはされます。

近似的に定常運動の運動式が用ゐられるものとして、 τ を風力計を用ゐて平均風速を取る時間—日本では二十分間、英國では一時間と云ふ様な—と致しますと風力計の運動式は

$$\frac{1}{\tau} \int_0^\tau \{k_1(V-W)^2 - k_2(V+W)^2\} dt = 0 \quad (5)$$

となります。 τ に比して短い週期の turbulence は τ 時間の平均値を取ると平滑さ

れてしまいます。τ に比して長い週期の turbulence のある場合には v_0, w_0 が漸次に變化するものと考へて、 $v_1, v_2, \dots, w_1, w_2, \dots$ は τ に比して短い週期を持つてゐるものと致します。

さう致しますと(5)は結局

$$k_1 \left\{ \left(v_0^2 + \frac{v_1^2}{2} + \frac{v_2^2}{2} + \dots \right) + \left(w_0^2 + \frac{w_1^2}{2} \times \frac{w_2^2}{2} + \dots \right) - 2v_0w_0 \right\} \\ - k_2 \left\{ \left(v_0^2 + \frac{v_1^2}{2} + \frac{v_2^2}{2} + \dots \right) + \left(w_0^2 + \frac{w_1^2}{2} + \frac{w_2^2}{2} + \dots \right) + 2v_0w_0 \right\} = 0 \quad (6)$$

即

$$(k_1 - k_2) \left(v_0^2 + \frac{v_1^2}{2} + \frac{v_2^2}{2} + \dots + w_0^2 + \frac{w_1^2}{2} + \frac{w_2^2}{2} + \dots \right) - 2(k_1 + k_2)v_0w_0 = 0 \quad (7)$$

となります。

(i)、今もし簡単のために、 $v_1 = f_1v_0, v_2 = f_2v_0, \dots, w_1 = g_1v_0, w_2 = g_2v_0, \dots$ と致しますと(7)は

$$(k_1 - k_2) \left(1 + \frac{f_1^2}{2} + \frac{f_2^2}{2} + \dots + \frac{g_1^2}{2} + \frac{g_2^2}{2} + \dots \right) v_0^2 \\ - 2(k_1 + k_2)v_0w_0 + (k_1 - k_2)w_0^2 = 0$$

即

$$v_0 = \frac{w_0}{1 + \frac{f_1^2}{2} + \frac{f_2^2}{2} + \dots + \frac{g_1^2}{2} + \frac{g_2^2}{2} + \dots} \left\{ \frac{k_1 + k_2}{k_1 - k_2} \pm \sqrt{\left(\frac{k_1 + k_2}{k_1 - k_2} \right)^2 - 1} \right\} \quad (8)$$

となります。(8)を(2)と比較しますと

$$v_0 = \frac{aw_0}{1 + \frac{f_1^2}{2} + \frac{f_2^2}{2} + \dots + \frac{g_1^2}{2} + \frac{g_2^2}{2} + \dots} \quad (9)$$

を得ます。

(ii)、もし $v_1 = f_1v_0, v_2 = f_2v_0, \dots, w_1 = h_1w_0, w_2 = h_2w_0, \dots$ と致しますと(7)から

$$(k_1 - k_2) \left(1 + \frac{f_1^2}{2} + \frac{f_2^2}{2} + \dots \right) v_0^2 - 2(k_1 + k_2)v_0w_0 + \\ (k_1 - k_2) \left(1 + \frac{h_1^2}{2} + \frac{h_2^2}{2} + \dots \right) w_0^2 = 0$$

$$\text{即 } v_0 = \frac{w_0}{1 + \frac{f_1^2}{2} + \frac{f_2^2}{2} + \dots} \left\{ \frac{k_1 + k_2}{k_1 - k_2} \pm \sqrt{\left(\frac{k_1 + k_2}{k_1 - k_2} \right)^2 - \left(1 + \frac{h_1^2}{2} + \frac{h_2^2}{2} + \dots \right)} \right\} \quad (10)$$

式(2), $a = \frac{\sqrt{k_1} + \sqrt{k_2}}{\sqrt{k_1} - \sqrt{k_2}}$ から、 $k_1 = \left(\frac{a+1}{a-1} \right)^2 k_2$ を得ますから、これと(10)から

$$v_0 = \frac{w_0}{1 + \frac{f_1^2}{2} + \frac{f_2^2}{2} + \dots} \left\{ \frac{\left(\frac{a+1}{a-1}\right)^2 + 1}{\left(\frac{a+1}{a-1}\right)^2 - 1} + \sqrt{\frac{\left(\frac{a+1}{a-1}\right)^2 + 1}{\left(\frac{a+1}{a-1}\right)^2 - 1}} - \left(1 + \frac{h_1^2}{2} + \frac{h_2^2}{2} + \dots\right) \right\}$$

$$= \frac{w_0}{1 + \frac{f_1^2}{2} + \frac{f_2^2}{2} + \dots} \left\{ \frac{a^2 + 1}{2a} + \sqrt{\left(\frac{a^2 - 1}{2a}\right)^2 - \left(\frac{h_1^2}{2} + \frac{h_2^2}{2} + \dots\right)} \right\} \quad (11)$$

を得ます。

w_0 は Robinson 風力計の記録から知れてゐますから、Robison 係數 a を turbulence のない風で求められるとしますと、 $g_1, g_2, \dots$, 又は、 $h_1, h_2, \dots$, と $f_1, f_2, \dots$, とを知れば v_0 , 即風の平均速度を得られます。

Pitot 管や Dines 風壓計なども $p = cv^2$ と云ふ關係を基礎として居りますから、結局

$$v_0 = \sqrt{\frac{p}{c \left(1 + \frac{f_1^2}{2} + \frac{f_2^2}{2} + \dots\right)}} \quad (12)$$

と云ふ形で平均風速は表はされはす。

いま Dines が自然の風に就て得た Robinson 係數と National Physical Laboratory で風洞の風に就て得た Robinson 係數とを比較するために第一圖に表はした風洞の實驗から得た Robinson 係數を a の値として用ゐ、割合に週期の短い turbulence しか含まれてゐませんから大約瞬間的の風速をその時々表はしてゐるものとして Dines 風壓計の記録から turbulence の intensity を求め、又 Robinson 風力計のお椀の速度の變化の具合は記録されてはゐませんし又風の turbulence による變化に比し小さなものですから大體の計算にはこれを變化せぬものとして(9)又は(11)から其の時の turbulence を含む風に對する Robinson 係數をいくつかの場合について求めて見ますと第一表及第二表の様な値が得られます。

第 一 表

風速(%)	a	$f_1(\%)$	$f_2(\%)$	a'	觀 測 時 日
6.7	2.32	50	29	2.04	大 正 五 年 八 月 五 一 六 日
7.2	2.29	56	39	1.87	同 二 一 三 日
7.3	2.28	60	21	1.90	同 七 月 十 四 一 五 日
10.8	2.16	58	27	1.80	同 十 三 一 四 日
平 均				1.898	

a は同風速に對する風洞内の風に對する Robinson 係數

a' は自然の風に對する Robinson 係數

f_1, f_2 は本文式中にあり、

第 二 表

風速(%)	a	f ₁ (%)	a'	観測時日	風速(%)	a	f ₁ (%)	a'	観測時日
7.7	2.26	40	2.09	大正十五年 八月四—五日	4.4	2.57	90	1.82	六月
5.0	2.49	57	2.15		1.7	3.05	72	2.42	同月十九—廿日
8.3	2.23	60	1.89		4.8	2.52	81	1.89	同月十六—七日
4.6	2.54	60	2.15		12.0	2.15	50	1.90	同月十三—四日
4.7	2.53	49	2.26		3.8	2.67	80	2.02	五月廿二—三日
6.7	2.32	54	2.02	同 年 同 月 三 一 四 日	2.9	2.82	53	2.47	
5.4	2.44	59	2.09		1.9	3.01	62	2.53	同 年 同 月 二 十 一 二 日
6.8	2.31	54	2.01		2.3	2.93	50	2.59	
5.0	2.49	51	2.20	同 年 同 月 二 一 三 日	1.6	3.07	50	2.72	
7.3	2.28	57	1.97		4.3	2.59	55	2.25	同月十九—廿日
6.0	2.37	56	2.04		3.3	2.75	47	2.48	同月十六—七日
4.4	2.57	40	2.33	同 年 七 月 十 八 一 九 日	3.1	2.79	76	2.16	同 年 同 月 十 四 一 五 日
9.4	2.19	60	1.86		7.0	2.30	80	1.74	
6.3	2.35	56	2.03		平 均				2.138
9.4	2.19	53	1.92	同 月四—五日	第一表及第二表の平均				2.110
8.3	2.23	52	1.96	六月廿六—七日	a, a', f ₁ は第一表と同様				

Robinson factor

表によつて見ますと、自然の風に對する Robinson 係数は 2.72 から 1.74 の間に散在してゐることになります。その状態は第二圖に示した通りであります。そ

して平均を取ると Dines の與へた値より少しく小さい値、2.1 となります。これから考へて見ますと Dines の得た Robinson 係數の値 2.2 は多くの廣い範圍に散在してゐる値の平均値として取つたものらしく思はれます。

しかし此等の表をつくつた根本を顧みますと、(i) turbulence の項に正弦曲線での變化が假定されてあります (これは實際の turbulence の變化のわからない限り Robinson 係數として得た値にどんな影響をするかわかりません)、(ii) turbulence の intensity を風速に比例すると考へてあります。(これも前者と同様であります)(iii)粘性抵抗や摩擦が無視してあります (これは Robinson 係數を過大にします)(iv) Dines 風壓計の減衰作用が考へられてありません (これも Robinson 係數を過大にします)、(v) 風壓計の記錄に表はれた風の息から turbulence を一項又は二項しか取らず、又風壓計の平滑にしてしまつた turbulence が考へてありません (これは Robinson 係數を過小にします)、(vi) 風洞の中の turbulence はないものとしてあります (これは Robinson 係數を過大にします)、(vii) 尙風力計の廻轉速度も一様ではありません (これは Robinson 係數を過小にします)、(viii) Dines 風壓計と Robinson 風力計とでは平均の空氣の流れを取る廣さの範圍がちがつて居ります。(これはその時々によつて及ぼす影響がちがひます。)此等の影響を考へましても大體の結果には大差はありません。

この様に平均としては Dines の得た結果の様に大體 2.2 といふ Robinson 係數が得られはしますが turbulence の多少によつて係數の値にはかなり大きな差があります。この様な turbulence の功果は大なり小なり何れの風速測定裝置にも影響してゐます。要するに今日の風速測定裝置が風壓によつて風速を測つてゐることは考慮を要することでありませう。

此の論文の骨子となつてゐる Robinson 係數の計算式は此の論文の意味とは多少異つては居ますが、略同様のことに就て東京帝國大學の田丸教授が藤原先生に示されたものを拜借しました。此の論文に諸種の材料を呈供して下さいました本臺の諸氏、殊に多くの有益な多くの助言を與へられた藤原、小野兩先生に深く感謝致します。

尙小野先生の觀測値の平均に關する理論からも同様の結果が得られます。(於中央氣象台)