



Title	毛髪隲度計のヒステレシス現象について
Author(s)	井上, 直一
Citation	低温科学, 1, 19-26
Issue Date	1944-12-15
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/17380">https://hdl.handle.net/2115/17380</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	1_p19-26.pdf



# 毛髮濕度計のヒステレシス現象について

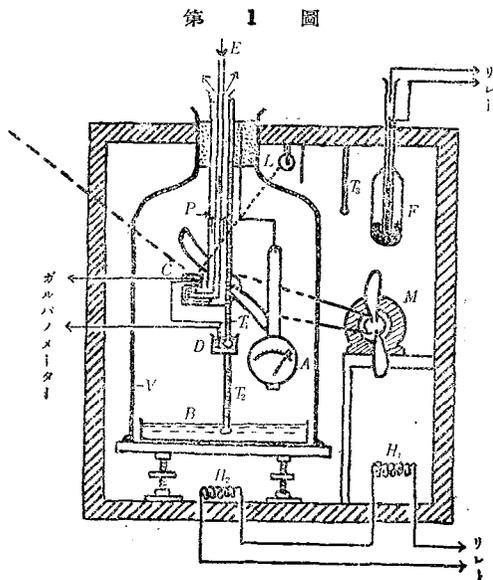
井 上 直 一

## 緒 言

気温の廣い範圍に亙つて使用出来る濕度計、特に低温に於て使用可能な濕度計の考案が目下要望されてゐる。從來零度以下の場合には、他に適當な品がないといふ理由で毛髮濕度計がよく使はれてゐるが、その誤差は可成り大きいのである。毛髮濕度計を低温で使用した後は若干の伸びが残り、飽和濕度中に相當時間放置しなければ恢復しないといふ事が既に古くから知られてゐる。<sup>(1)</sup> 低温に於ける毛髮濕度計の誤差は主としてこの現象に關係するものではなからうかと考へ、それが起る範圍及び程度を調べて見た。

## § 1. 實驗の方法

硫酸水溶液を用ひて第 1 圖に示すやうな恒温恒濕槽を作り、この中に市販のポリメーターを入



- |   |            |                                              |       |
|---|------------|----------------------------------------------|-------|
| A | ポリメーター     | H <sub>1</sub> H <sub>2</sub>                | 電熱器   |
| B | 硫酸水溶液      | L                                            | 光源    |
| C | 結露面、熱電對冷接點 | M                                            | モーター  |
| D | 熱電對溫接點     | P                                            | 露點濕度計 |
| E | 液體空氣注入口    | T <sub>1</sub> T <sub>2</sub> T <sub>3</sub> | 寒暖計   |
| F | トルオール寒暖計   | V                                            | 恒濕槽   |

れてその檢定を行つた。恒温槽中の濕度は、硫酸水溶液の密度を測定して Wilson<sup>(2)</sup>の表から算出した。但しこの表には零度以下の場合がないので、零度以上の値から外挿した値を使用した。又第 1 圖中の P に示すやうな露點濕度計も使用した。これは結露面が水平であつて、液體空氣でその面を冷し、その温度は銅-コンスタンタンの熱電對を用ひて測定するやうになつてゐる。然し低温では絶對濕度が小さい爲、面に出来る霜が極めて薄く、その發生の瞬間の判定が難しく、従つて誤差は相對濕度で 4% にも達するので、たゞ補助的に使用する事にした。

實驗はまづ室溫 20°C 附近の測定から始めたのであるが、その場合には恒濕槽中に、一定濃度の硫酸中を通した空氣と、水を通した

北海道帝國大學低溫科學研究所報告第 3 號。氣象集誌，第 2 輯，第 19 卷，459 頁。

(1) E. Griffiths, Proc. Phys. Soc. London 34 (1921), special number "A discussion on hygrometry" p. 30.

(2) R. Wilson: J. Ind. and Eng. Chem., 13 (1921) 326.

第 1 表 A (零度以上の場合)

操作 番 號 No.	實 驗 溫 度 °C	相 對 濕 度 (溶 液 中 の 水 分 %)	ポ リ メ ー 指 度 %	操作 番 號 No.	實 驗 溫 度 °C	相 對 濕 度 (溶 液 中 の 水 分 %)	ポ リ メ ー 指 度 %
20° 附近 (PIA)				29	20	5	19.5
1	20	100	100*	30	20	25.5	38.5
2	20	74	82	31	20	50.3	67
3	20	76.5	84	32	20	73.8	88.5
4	20*	48.4	56	33	20	100	100.5
5	20	25	36	34	20.5	73.5	80.5
6	20	5	19	35	20.5	50.3	59.5
7	20	25	35.5	36	20.5	25.5	38
8	20	48.4	64	37	20.5	50.3	62
9	20.5	74	87	38	20	73.5	86
10	20	95.5	100	39	19.5	50.3	62.5
11	20.5	100	103→101	40	20	73.5	86.5
12	21	74.2	81	41	18.5	50.3	62.5
13	21	48.4	59	42	20	100	102
14	21	25	37	43	18.5	50.3	61
15	20	5	19.5	44	20	5	20
16	20	25	37.5	45	21	50.3	67
17	20	48.4	63	46	21	73.5	87
18	20.5	73.5	86	5°C 附近 (PIB)			
19	21	91.6	98.5	1	5.0	100	100*
20	21	100	102	2	5.2	84.5	91
21	20.5	25	36.5	3	5.2	73	80
22	20	73.5	85	4	5.0	48.5	57
23	20	46.4	59.5	5	5.0	23.5	36
24	20	73.5	37	6	5.0	4	20
洗 滌 後				7	5.4	23.5	33
25	19.5	100	100*	8	5.5	48.5	67
26	20	74	78.5	9	5.0	73	90
27	20	50.3	58	10	5.3	100	108 101 (5.5時間)
28	20	25.5	38	11	5.4	73	80

\* は指針を 100% に調整

第 1 表 B (零度以下の場合)

操作 番 號 No.	實 驗 溫 度 °C	相 對 濕 度		ポ リ メ ー 指 度 %	操作 番 號 No.	實 驗 溫 度 °C	相 對 濕 度			ポ リ メ ー 指 度 %	
		硫 酸 水 溶 液 密 度 計 算 %	氷 平 面 上 の 値 %				硫 酸 水 溶 液 密 度 計 算 %	氷 平 面 上 の 値 %	露 點 濕 度 計 に よ る %		
-5°C 附近 (PIC)					-10°C 附近 (PID)						
1	-4.8	(95.3)	100	100*	1	-10.0	(91.1)	100		100*	
2	-5.2	83.8	88	91	2	-10.5	72.4	79.5	74.4	85	
3	-5.0	72	75.6	78	3	-10.8	47	51.6	50	60	
4	-5.2	47.6	50	57	4	-10.2	22.1	24.2	23.8	37	
5	-4.8	22.7	23.8	36	5	-9.8	3.8	4.2		19	
6	-5.0	4	4.2	18	6	-10.5	22.1	24.2	23.7	38	
7	-5.8	22.7	23.8	38	7	-10.1	47	51.6	47.9	73	
8	-4.8	47.6	50	67	8	-9.8	72.4	79.5	73	96	
9	-4.7	72	75.6	90	9	-9.7	84	92.2	87	104	
10	-5.0	83.8	88	97.5	10	-9.0	(91.1)	100		108	
11	-5.0	(95.3)	100	108→102 (24時間)	氷上の飽和蒸気中に 8 日間放置						
5°C 附近 (PII)					11	-10	(91.1)	100		100*	
1	-4.5	(95.3)	100	100	12	-10.2	84	92.2	87	96	
2	-5.2	72	75.6	93	13	-9.7	72.4	79.5	76	84	
3	-5.1	47.6	50	72	14	-11.1	47	51.6	47.6	59	
4	-5.1	22.7	23.8	41	15	-11.4	22.1	24.2	22.3	37	
5	-5.0	4	4.2	21	16	-9.5	3.8	4.2		19	
6	-5.1	22.7	23.8	40.5	17	-9.8	22.1	24.2	20.1	37.5	
7	-4.9	47.6	50	85	18	-10.2	47	51.6	49.5	69	
8	-5.0	72	75.6	96	19	-10.2	72.4	79.5	73.6	94.5	
9	-5.0	(95.3)	100	102	20	-10.0	84	92.2	85.6	103	
					21	-9.5	(91.1)	100		108→1025 (140時間)	
					24	-10.2	84	92.2	85.2	96	

空氣とを適宜混合して循環させ、その途中に乾濕球寒暖計を挿入しておいて、濕度を測定した。空氣の速度がわづか 20 cm/sec であつた爲、濕球寒暖計の指度は實際よりも少し大きく出るので、その補正を實驗的に豫めしておいた。

實驗溫度を 20°, 5°, -5°, -10°C の四種とし、各溫度に於て、最初ポリメーターを飽和水蒸氣中に暫らく放置しておいて指針を 100% に合せ、その後溫度を次第に下げて指度を讀み、次に溫度を漸次上げてその讀みをとつた。かくすれば各溫度の實驗を比較するに當つて、溫度の差による毛髪の伸縮の補正は考へなくてもよい事になる。零度以下の飽和濕度は容器中に水を入れて放置しておいて作つた。

§ 2. 實驗の結果

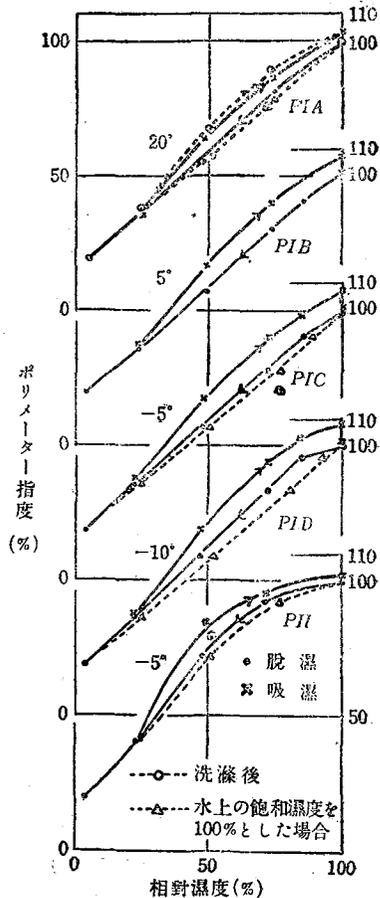
實驗は市販のポリメーター 2 種について行つた。それを *PI*, *PII* とする。

i) ヒステレシス現象 實驗の結果を第 1 表 A, B に表示し、その總括を第 2 圖に示す。これを見てすぐ氣がつく事は、100%—30% 位の間で、毛髪の脱濕と吸濕とに甚しいヒステレシスが現はれる事である。その値は最大 10% 以上にも達する。脱濕及び吸濕の操作を如何に遅くしても、このヒステレシスは消滅しない。例へば第 1 表中の 20°C No. 46 の實驗では、*PI* を相對濕度 73.5% の槽中に 4 日間放置したのであるが、その間指度は少しも變らなかつた。即ちこのヒステレシスは指示の時間的の遅れによるものではないのである。然し一循環の終りに飽和濕度に戻ると、最初指針は過飽和の目盛(約 108%)を示すが暫らく放置すると再び 100% に戻る。この遅れは低温になる程遅い。例へば 5°C では 5 時間、-5°C では 24 時間で、-10°C になると 140 時間たつても完全には恢復しない。これに反して 20°C では殆んど數分で 100% に戻り、又時には全然過飽和を示さない場合もある。

此の相對濕度とポリメーターの指度との間の檢定曲線に於けるヒステレシスの形は、何回繰返して實驗して見ても、相對濕度で 2% 位の誤差の範囲内で一致する。又低温になつてもあまり變らない。たゞ零度以下では、飽和濕度の次の觀測點の所で、曲線が急に折れるが、その點については後に述べる。

このヒステレシス現象は毛髪に附着した油脂や塵埃の影響であるかも知れないと思はれたので、

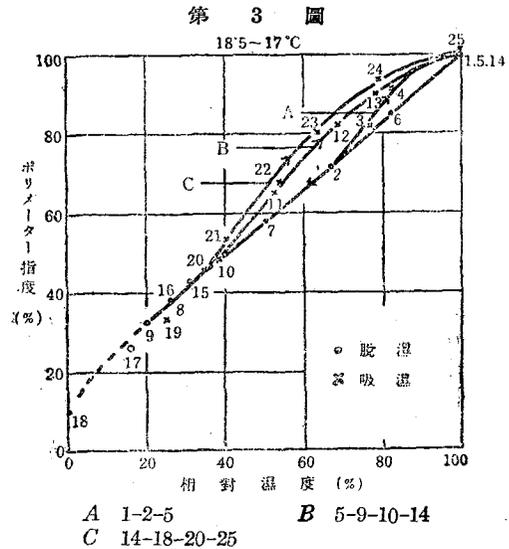
第 2 圖



毛髪をよく洗滌\*して見たがむしろ少しくヒステレシスが大きくなつただけであつて、本質的な差異は認められなかつた(第2圖 PIA 参照)。

このヒステレシス曲線の形は個々のポリメーターによつて著しく違ふのであつて、第2圖に於て PIC と PII とで示す如く、各々のポリメーターについてヒステレシスの検定をしておく必要がある。

又同じポリメーターでも脱濕の終點が違ふと、即ち 100% から段々乾燥して行つて途中から戻すと、ヒステレシスの大きさが異り、湿度の高い所から戻す程ヒステレシスは小さくなる。100% より出發して 67% より 100% へ戻り、次に 20% まで乾して又 100% へ戻り、最後に 0% まで乾して 100% へ戻つた實驗結果を第2表及び第3圖に示す。



第2表 實驗溫度 18.5~17.°C

操作 番 號	相對湿度 %		ポリメ ター指 度 %	毛髪 の伸 び $\Delta l$ %	操 作 番 號	相對湿度 %		ポリメ ター指 度 %	毛髪 の伸 び $\Delta l$ %
	乾濕球寒暖 計による	補正値				乾濕球寒暖 計による	補正値		
1		100	100*	100	14		100	100*	100
2	73	67	72	87	15	41	31	43	61
3	82	77	82	93	16	36	25	38	55
4	88	82	91	97	17		16	26	37
5		100	100*	100	18		0	10	0
6	88	82	85	95	19	35	25	33	48
7	59	50	58	77	20	43	34.5	45	64
8	36	26	38	55	21	49	40	53	72
9	30	20	33	48	22	62	54	67	84
10	47	38	48	67	23	70	63	80	92
11	60	52	65	83	24	84	79	94	98
12	75	68.5	82	93	25		100	101	100
13	83	78	90	97					

\* 指針を 100% に調整    ○ 露點湿度計による    △ 推定値

ii) 指度の遅れ 急激に湿度を變へたときに起る指度の遅れは、上述のヒステレシスとは違ふ現象である。扇風機で攪拌されてゐる空氣中で行つた遅れの實驗の一例を第4圖に示す。急激に變つた最後の湿度を  $F$ 、ポリメーターの指度を  $f$  として  $\log(f-F)$  と時間  $t$  との間の關係を見ると、第4圖の如く大體直線關係が成立するので Grundmann<sup>(1)</sup> の式

\* 最初ベンジン中で 10 分、エーテル中で 5 分、次に 60°C の蒸溜水中で 15 分洗滌後、室溫の蒸留水中に 2 時間浸し、溫度 80% の室の中で 16 時間空氣乾燥を行つた。

(1) W. Grundmann, ZS. f. Instrumentenkunde, 54 (1934) 441.

$$F-f = \alpha \frac{df}{dt}$$

が略々成立することを確かめた。それでこの式を用ひて遅れの係数  $\alpha$  を計算すると、第3表の如くなる。厳密にいへば  $\alpha$  は温度によつて多少違ふのであるが、こゝに算出した  $\alpha$  は温度 100~40% の平均の値である。又第3表中に遅れの時間としてあるのは、ポリマーの指度で10% 温度の急變を與へた場合、最後の温度に 1% まで近づくに要する時間である。この表に見られる如く、低温になる程遅れが大きくなる事は既に Grundmann<sup>(1)</sup> によつて報告されてゐる。

然しこの種の遅れは King 及び Cassie<sup>(2)</sup> が指摘した如く、毛髪中への水分の擴散によるものではなく、むしろ水分が吸収される際の

吸収熱の影響によるものであらうから、空氣の流動速度によつても遅れの時間は可成り違ふ事と思はれる。

### § 3. ヒステレシスに對する考察

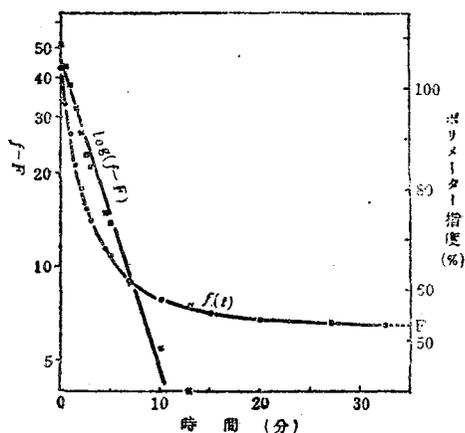
種々の相對湿度に於ける毛髪の伸びの割合は、個々の毛髪や又はこれに與へる張力等によつても多少違ふのであるが、その標準の値は既に古くから Gay-Lussac の値として知られてゐる。これに對して始めて理論的説明を與へたのは Sresnevsky<sup>(3)</sup> であつて、その後更に Whipple<sup>(4)</sup> によつてその説明は改良された。Whipple によれば、毛髪の温度による伸縮は、その中に存在する毛管間隙中に吸収された水の、水頭面直下に於ける負壓の爲に生ずる毛髪細胞の彈性的伸縮に他ならない。半径  $r$  の毛管内の水頭面の上の飽和蒸氣壓  $P$  は水面上のもの  $P_0$  よりはるかに小さく、その關係は Thomson (Lord Kelvin) の式で與へられる。即ち

$$P = P_0 e^{-\frac{2\sigma V}{rR\theta}} \quad (1)$$

こゝに  $\sigma$  は水の表面張力、 $V$  はその比容、 $\theta$  は絶對温度で  $R$  は氣體常數を表す。Whipple は

- (1) W. Grundmann, l. c.
- (2) G. King & A. Cassie, Trans. Faraday Soc. 36 (1940) 445.
- (3) B. Sresnevsky, Met. ZS. 13 (1896) 145.
- (4) F. Whipple, Proc. Phys. Soc. London 34 (1922), special number, "A discussion on hygrometry" p. 50.

第 4 圖



第 3 表

温度 (°C)	20	5	-5	-10
$\alpha$	1.4	3.0	4.0	4.9
遅れ (分)	3.3	6.8	9.1	11.3

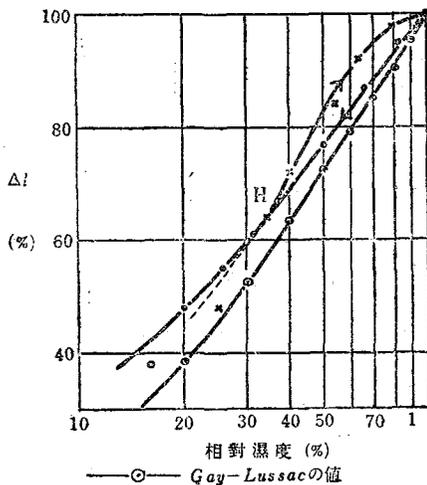
水の密度を  $\rho$ 、気圧を  $B$  とし、(1) 式より、水頭面直下の負圧 ( $Q$ ) を表す式

$$Q = R\rho\theta \log(P_0/P) - B \quad (2)$$

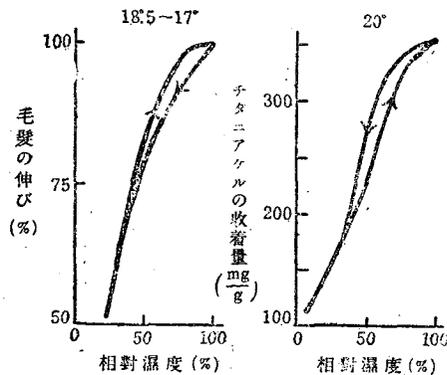
を導いた。これらの式は相対湿度が  $P/P_0$  なる空気中で、その水蒸気と (1) 式で示した関係で平衡状態に達するやうな半径  $r$  及びそれ以下の細い毛管の水頭面についてのみ成立するのである。もし毛髪中のすべての毛管が、脱湿に伴つて、(2) 式を満足するやうな負圧をうけて毛管半径を収縮し、常に (1) 式を満足するやうな平衡を維持するとすれば、毛髪の伸びと湿度の対数との間には直線的関係が成立する筈である。今試みに  $20^\circ\text{C}$  に於ける指度の検定曲線(第 3 圖 C) を毛髪の伸びと湿度の対数との関係に直して圖示すると、第 5 圖の如くなる。但し毛髪の伸び  $\Delta l$  は飽和湿度の際の伸びに對する百分率で示した。圖に於て脱湿曲線は湿度 30% 位まではほぼ直線であるが、吸湿曲線は直線とはならずヒステレシスによる異状を呈してゐる。

Weber<sup>(1)</sup> は毛髪湿度計は過飽和の際にも或る程度まで働くといふ事を報告してゐる。この事から Sresnevsky の毛管凝縮説を否定し、むしろ纖維素についての實驗結果<sup>(2)</sup> から推定せられるやうな毛質内への水の滲透による體積膨脹の説をとるものもある。然しながら第 6 圖に示すやうに、毛髪の伸びのヒステレシスは、普通の纖維素細隙やゲル等への水分收着量に見られるヒステレシスとは向きが反對であるのが特徴である。それで水の收着量と毛の伸縮との間には、直接何等の関係もないと見る方が至當である。むしろ Weber の發見した前記の現象、即ち過飽和濕

第 5 圖



第 6 圖



度の際の指度の動きは、既に述べたやうなヒステレシスと指度の遅れとによつて、飽和湿度中でも一時指針が過飽和を示す現象を差し引いた別の効果であるか否かをよく吟味すべきである。

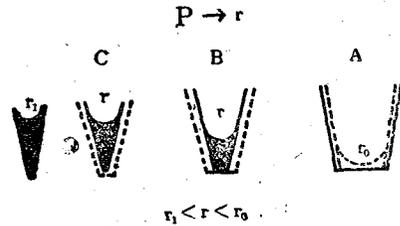
(1) A. Weber, Inaug.-Diss. Marburg (1912).

(2) J. Katz, Akad. Wetensch. Amsterd. (1924).

著者は一試案として次のやうな機巧を考へて見た。即ち毛髪中には第 7 圖に模型的に示すやうな大小種々の口廣の毛管間隙があるものとする。飽和湿度より次第に湿度を下げると、この毛管間隙中の水分は蒸發を始め、同時に毛管壁を縮め

つゝその水頭面の半徑を減少し、ある相對湿度で、(1) 式のやうな關係を満足する點に至つて平衡に達する。更に湿度を下げると、水頭面の收縮は (1) の關係に應じきれなくなるものが出來てくる、即ち第 7 圖の A がそれであつて、かゝる毛管間隙は空洞となり、その壁は負壓を失つて若干膨脹するであらう。

第 7 圖



低湿度になる程かゝる空洞は増加する。次にこのやうな状態から吸濕を行はせると、水頭面の存在する毛管では、水蒸氣はそのまゝ可逆的に毛管凝縮を起し、水頭面も (1) 式に従つて半徑を増大するが、空洞では底の半徑に相應する湿度となつても毛管凝縮を起さず、湿度が (1) の關係より若干大きくなつてから、初めて凝縮を始め水頭面を生ずる。この水頭面の生成が遅れる理由は、例へば Cohan<sup>(1)</sup> のやうな考へでも説明出来るであらう。このやうに考へると、この水頭面生成のおくれが毛髪<sup>(2)</sup> の伸びに與へる影響は、水の收着量に與へる影響と反對であることが説明出来る。即ち同じ相對湿度でも、吸濕の場合は脱濕に比べて空洞が多く、従つて毛髪は多く伸び收着水は少い状態にある。又ヒステレシスの大きさが脱濕の終點によつて影響される事實、即ち第 3 圖に示した現象もこの考へで説明出来る。

次に第 3 圖中 B と C との曲線に見られるやうに、ヒステレシスが生じ始める相對湿度は、脱濕の終點よりもはるかに大きく、而もいつもほぼ同じやうな 35% 附近の湿度であるといふ事實は何によるものであるかを考へて見る。樋口<sup>(2)</sup> によれば、チタニウムゲルに氣體が收着される場合、收着量に現れるヒステレシスの始點は、收着機巧が吸着より毛管凝縮へ移り始める點を意味し、收着される氣體分子半徑に應じて、常に一定の相對湿度となる。實驗によれば、水の場合は 20°C で約 30% である。樋口の理論によれば、この始點はチタニウムゲルに限らず、如何なる物質でも收着機巧が毛管凝縮である限り、同じ氣體では同じ値となる筈である。毛髪の伸びに現れたヒステレシスの始點も、上記の樋口の實驗とほぼ同じやうな値であつて、或ひは樋口の説のやうにこの點から收着の機巧が變り、従つてそれ以下の乾燥空氣中では、毛髪の伸縮も又違つた機巧で行はれるものと考へられる。

次に零度以下の實驗で、檢定曲線の 100% の次の觀測點のところ角が出来るわけは次の如

(1) L. Cohan, J. Ame. Chem. Soc. 60 (1938) 433.

毛管壁に吸着した水の表面は初め圓筒形となる故、半球形の水頭面上の飽和壓よりもはるかに大きい平衡壓を有するといふのである。

(2) 樋口泉, 理研彙報 18 (1939) 657.

く考へられる。100% に對する指針の調整は、氷上の飽和湿度中で行つた。ところが硫酸水溶液の密度より求めた湿度は、Wilson の表の零度以上の値から外挿法で算出したものである。従つてこれは過冷却の水の相を基準としたものに相當する。今試みにこの湿度を氷相を基準としたものに直して圖示すれば（第 1 表 B 第 4 列参照）、第 2 圖の點線の如くなり、この角はなくなる。そこで毛髪湿度計の 100% として何れの飽和湿度を採用すべきかと云ふ問題が起る。氣象學上の實用的目的から云へば、氷相に準據したものを採用すべきであらうが、毛髪の物理的性質の一基準状態を示すといふ目的から云へば、過冷却氷相の飽和湿度を採用すべきであらう、何故ならば、毛管凝縮説から云へば、毛髪中の水は毛管水であつて $-40^{\circ}\text{C}$ 位までは液相と考へられ、従つて毛髪の伸縮の原因であるところのこの毛管水水頭面の平衡蒸氣壓降下は、零度以下でも矢張り液相の水平面を基準として論ぜられてゐるからである。既に述べた如く、飽和湿度中で指度が最初過飽和を示し、次第に 100% に戻るが、その時間が低温になる程大きくなる理由は未だわからない。然しながら實驗に於て採用した氷上の飽和湿度は、今述べたやうな意味で完全な基準状態と見做されないといふ事が少くもその理由の一部になるのではなからうか。

#### 總 括

$20^{\circ}$ ,  $5^{\circ}$ ,  $-5^{\circ}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$  の各温度に於てポリメーター型の毛髪湿度計の檢定を行つて次の如き結果を得た。

1. 飽和湿度から脱濕し、次に再び吸湿を行つて飽和湿度に至る一循環過程に於て、相對湿度で 30~40% あたりから 100% にかけて顯著なヒステレシスが現はれる。
2. このヒステレシスは、相對湿度で 2% 位の誤差の範圍内で、再現可能な現象で、洗滌によつて多少大きくなるが、本質的には變らない。又低温になつてもその形は殆んど變化しない。然し個々の毛髪湿度計によつてその曲線の形は非常に違ふ。又脱濕の終點が低温になる程ヒステレシスは大きい。
3. 吸湿過程の終りの飽和湿度の中では、一時指度は 100% を越えるが、再び 100% にもどる。此の時間の遅れは低温になる程長い。
4. このヒステレシスの説明として、Sresnevsky の毛管凝縮の説をとり、脱濕の途中空洞が出來、しかも吸湿の場合は、この空洞に於ける水頭面の生成が脱濕の場合より遅れるといふ考へを補足した。又ヒステレシスの始點は、樋口の考への如く、毛管凝縮の機巧の起り始めを意味するものであらう。
5. 湿度を急變させた場合の指度の時間的遅れは、以上のヒステレシスとは全然無關係な現象である。この遅れは低温になる程大きい。

終りに臨み、本研究を命ぜられ且つ終始懇篤なる御指導を賜つた中谷教授に對し茲に謹んで感謝の意を表す。又實驗に當つて測定を手傳はれた山本忠彦君に厚く感謝する。