HOKKAIDO UNIVERSITY

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

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

毛髪濕度計のヒステレシス現象について

井　上　直　一

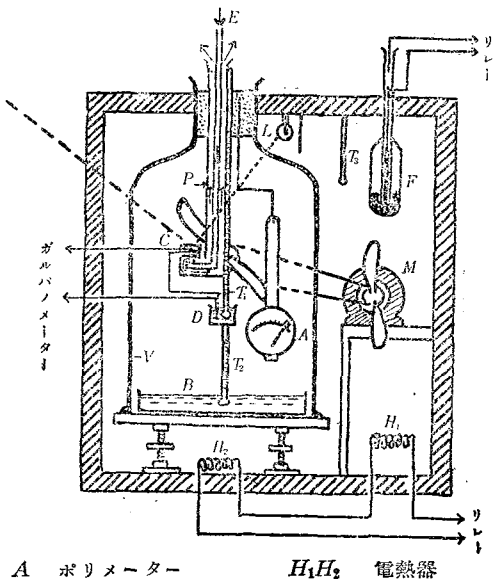
緒　言

氣溫の廣い範圍に亙つて使用出來る濕度計，特に低溫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髪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．毛髪濕度計を低濕で使用した後には若干の伸びが殘り，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．(1) 低溫に於ける毛髪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圖に示すやうな恒溫恒濕槽を作り，この中に市販のポリメーターを入れてその檢定を行つた．恒濕槽中の濕度は，硫酸水溶液の密度を測定して Wilson(2) 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，その溫度は銅-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．然し低溫では絶對濕度が小さい爲，面に出來る霜が極めて薄く，その發生の瞬間の判定が難しく，從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．

第　1　圖



A	ポリメーター	H_1H_2	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	$T_1T_2T_3$	寒暖計
F	トルオール寒暖計	V	恒濕槽

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（硫酸溶液水液）%	ポリメーター指度 %
20° 附近 (*PIA*)			
1	20	100	100*
2	20	74	82
3	20	76.5	84
4	20	48.4	56
5	20	25	36
6	20	5	19
7	20	25	35.5
8	20	48.4	64
9	20.5	74	87
10	20	95.5	100
11	20.5	100	103→101
12	21	74.2	81
13	21	48.4	59
14	21	25	37
15	20	5	19.5
16	20	25	37.5
17	20	48.4	63
18	20.5	73.5	86
19	21	94.6	98.5
20	21	100	102
21	20.5	25	36.5
22	20	73.5	85
23	20	46.4	59.5
24	20	73.5	37
洗 滌 後			
25	19.5	100	100*
26	20	74	78.5
27	20	50.3	58
28	20	25.5	38
29	20	5	19.5
30	20	25.5	38.5
31	20	50.3	67
32	20	73.8	88.5
33	20	100	100.5
34	20.5	73.5	80.5
35	20.5	50.3	59.5
36	20.5	25.5	38
37	20.5	50.3	62
38	20	73.5	86
39	19.5	50.3	62.5
40	20	73.5	86.5
41	18.5	50.3	62.5
42	20	100	102
43	18.5	50.3	61
44	20	5	20
45	21	50.3	67
46	21	73.5	87
5°C 附近 (*PIB*)			
1	5.0	100	100*
2	5.2	84.5	91
3	5.2	73	80
4	5.0	48.5	57
5	5.0	23.5	36
6	5.0	4	20
7	5.4	23.5	38
8	5.5	48.5	67
9	5.0	73	90
10	5.3	100	108 101 (5.5時間)
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 硫酸水溶液密度より計算 %	相對濕度 氷上の飽和水蒸氣平面値 %	相對濕度 露點濕度計による %	ポリメーター指度 %
−5°C 附近 (*PIC*)					
1	−4.8	(95.3)	100		100*
2	−5.2	83.8	88		91
3	−5.0	72	75.6		78
4	−5.2	47.6	50		57
5	−4.8	22.7	23.8		36
6	−5.0	4	4.2		18
7	−5.8	22.7	23.8		38
8	−4.8	47.6	50		67
9	−4.7	72	75.6		90
10	−5.0	83.8	88		97.5
11	−5.0	(95.3)	100		108→102 (24時間)
5°C 附近 (*PII*)					
1	−4.5	(95.3)	100		100
2	−5.2	72	75.6		93
3	−5.1	47.6	50		72
4	−5.1	22.7	23.8		41
5	−5.0	4	4.2		21
6	−5.1	22.7	23.8		40.5
7	−4.9	47.6	50		85
8	−5.0	72	75.6		96
9	−5.0	(95.3)	100		102
−10°C 附近 (*PID*)					
1	−10.0	(91.1)	100		100*
2	−10.5	72.4	79.5	74.4	85
3	−10.8	47	51.6	50	60
4	−10.2	22.1	24.2	23.8	37
5	− 9.8	3.8	4.2		19
6	−10.5	22.1	24.2	23.7	38
7	−10.1	47	51.6	47.9	73
8	− 9.8	72.4	79.5	73	96
9	− 9.7	84	92.2	87	104
10	− 9.0	(91.1)	100		108
氷上の飽和蒸氣中に 8 日間放置					
11	−10	(91.1)	100		100*
12	−10.2	84	92.2	87	96
13	− 9.7	72.4	79.5	76	84
14	−11.1	47	51.6	47.6	59
15	−11.4	22.1	24.2	22.3	37
16	− 9.5	3.8	4.2		19
17	− 9.8	22.1	24.2	20.1	37.5
18	−10.2	47	51.6	49.5	69
19	−10.2	72.4	79.5	73.6	94.5
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．

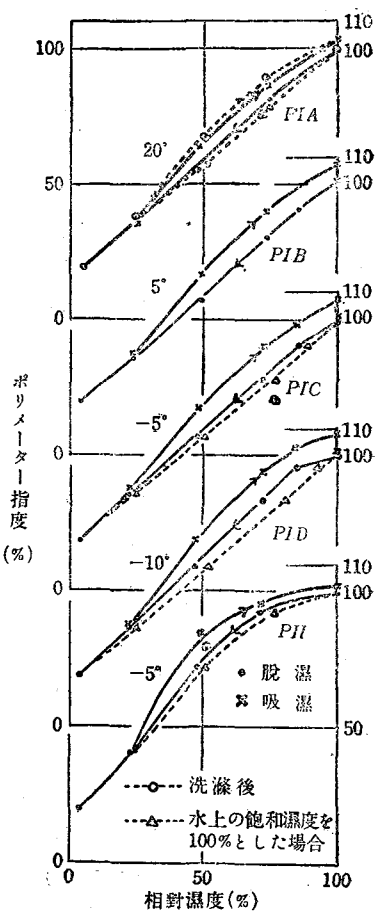
實驗溫度を 20°, 5°, −5°, −10°C の四種とし，各溫度に於て，最初ポリメーターを飽和水蒸氣中に暫らく放置しておいて指針を 100% に合せ，その後濕度を次第に下げて指度を讀み，次に濕度を漸次上げてその讀みをとつた．かくすれば各溫度の實驗を比較するに當つて，溫度の差による毛髪の伸縮の補正は考へなくてもよい事になる．零度以下の飽和濕度は容器中に氷を入れて放置しておいて作つた．

§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，毛髪の脫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．脫濕及び吸濕の操作を如何に遲くしても，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．卽ちこのヒステレシスは指示の時間的の遲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．この遲れは低溫になる程遲い．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．

第　2　圖



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% 位の誤差の範圍内で一致する．又低溫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．

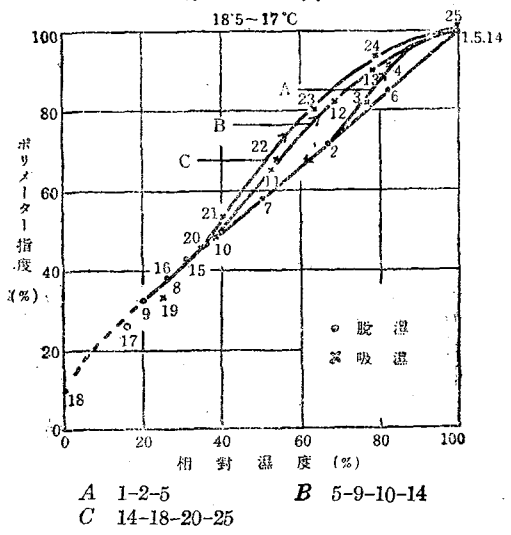
このヒステレシス現象は毛髪に附着した油脂や塵埃の影響であるかも知れないと思はれたので，

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* 參照）.

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檢定をしておく必要がある.

又同じポリメーターでも脫濕の終點が違ふと，卽ち 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，濕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% へ返り，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　3　圖



A　1-2-5　　*B*　5-9-10-14
C　14-18-20-25

第 2 表　實 驗 溫 度　18.°5～17.°C

操作番號	相對濕度 % 乾濕球寒暖計による	相對濕度 % 補正値	ポリメーター指度 %	毛髪の伸び Δl %	操作番號	相對濕度 % 乾濕球寒暖計による	相對濕度 % 補正値	ポリメーター指度 %	毛髪の伸び Δl %
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	28	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% に調製　　○　露點濕度計による　　△　推定値

ii) 指度の遲れ　急激に濕度を變へたときに起る指度の遲れは，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遲れの實驗の一例を第 4 圖に示す. 急激に變つた最後の濕度を 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[1] の式

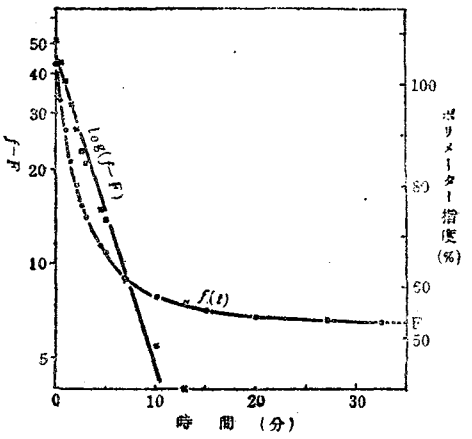
*　最初ベンジン中で 10 分，エーテル中で 5 分，次に 60°C の蒸溜水中で 15 分洗滌後，室溫の蒸留水中に 2 時間浸し，溫度 80% の室の中で 16 時間空氣乾燥を行つた.

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

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

が略ゝ成立することを確めた．それでこの式を用ひて遲れの係數 α を計算すると，第3表の如くなる．嚴密にいへば α は濕度によつて多少違ふのであるが，こゝに算出したα は濕度 100～40% の平均の値である．又第 3 表中に遲れの時間としてあるのは，ポリメーターの指度で10%濕度の急變を與へた場合，最後の濕度に 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，低溫になる程遲れが大きくなる事は既に Grundmann[1] によつて報告されてゐる．然しこの種の遲れは King 及び Casie[2] 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，むしろ水分が吸收される際の吸收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遲れの時間は可成り違ふ事と思はれる．

第　4　圖



第　3　表

溫　度　(°C)	20	5	−5	−10
α	1.4	3.0	4.0	4.9
遲　れ　(分)	3.3	6.8	9.1	11.3

§ 3. ヒステレシスに對する考察

種々の相對濕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說明を與へたのは Sresnevsky[3] であつて，その後更に Whipple[4] によつてその說明は改良された．Whipple によれば，毛髪の濕度による伸縮は，その中に存在する毛管間隙中に吸收された水の，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．半徑 r の毛管內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．卽ち

$$P=P_0e^{-\frac{2\sigma V}{rR\theta}} \qquad (1)$$

こゝに σ は水の表面張力，V はその比容，θ は絶對溫度で 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.

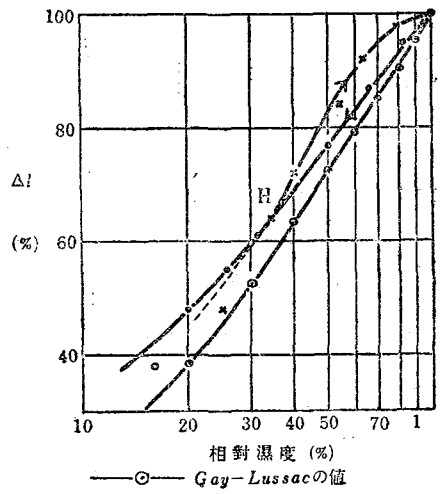
水の密度を ρ. 氣壓を B とし，(1) 式より，水頭面直下の負壓 (Q) を表す式

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

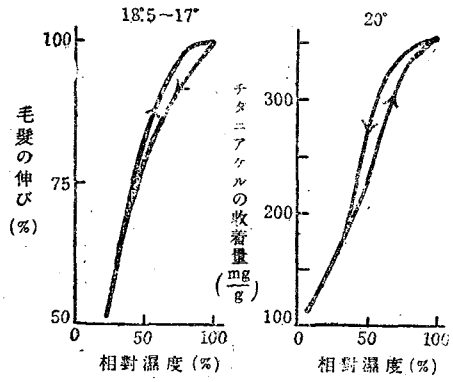
を導いた．これらの式は相對濕度が P/P_0 なる空氣中で，その水蒸氣と (1) 式で示した關係で平衡狀態に達するやうな半徑 r 及びそれ以下の細い毛管の水頭面についてのみ成立するのである．もし毛髪中のすべての毛管が，脫濕に伴つて，(2) 式を滿足するやうな負壓をうけて毛管半徑を收縮し，常に (1) 式を滿足するやうな平衡を維持するとすれば，毛髪の伸びと濕度の對數との間には直線的關係が成立する筈である．今試みに 20°C に於ける指度の檢定曲線(第 3 圖 C)を毛髪の伸びと濕度の對數との關係に直して圖示すると，第 5 圖の如くなる．但し毛髪の伸び Δl は飽和濕度の際の伸びに對する百分率で示した．圖に於て脫濕曲線は濕度 30% 位までほゞ直線であるが，吸濕曲線は直線とはならずヒステレシスによる異狀を呈してゐる．

Weber[1] は毛髪濕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 の毛管凝縮說を否定し，むしろ纖維素についての實驗結果[2] から推定せられるやうな毛質內への水の滲透による體積膨脹の說をとるものもある．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徵である．それで水の收着量と毛の伸縮との間には，直接何等の關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

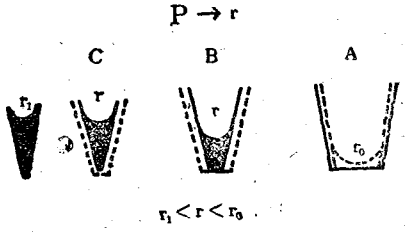


度の際の指度の動きは，既に述べたやうなヒステレシスと指度の遲れとによつて，飽和濕度中でも一時指針が過飽和を示す現象を差し引いた別の效果であるか否かをよく吟味すべきである．

(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．飽和濕度より次第に濕度を下げると，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，ある相對濕度で，(1) 式のやうな關係を滿足する點に至つて平衡に達する．更に濕度を下げると，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．低濕度になる程かゝる空洞は增加する．次にこのやうな狀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) 式に從つて半徑を增大するが，空洞では底の半徑に相應する濕度となつても毛管凝縮を起さず，濕度が(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遲れる理由は，例へば Cohan[1] のやうな考へでも說明出來るであらう．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說明出來る．即ち同じ相對濕度でも，吸濕の場合は脫濕に比べて空洞が多く，從つて毛髪は多く伸び收着水は少い狀態にある．又ヒステレシスの大さが脫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說明出來る．

第　7　圖



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濕度は，脫濕の終點よりもはるかに大きく，而もいつもほゞ同じやうな 35% 附近の濕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[2] 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，常に一定の相對濕度となる．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．毛髪の伸びに現はれたヒステレシスの始點も，上記の樋口の實驗とほゞ同じやうな値であつて，或ひは樋口の說のやうにこの點から收着の機巧が變り，從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で角が出來るわけは次の如

(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，氷上の飽和濕度中で行つた．ところが硫酸水溶液の密度より求めた濕度は，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．從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．今試みにこの濕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 列參照），第 2 圖の點線の如くなり，この角はなくなる．そこで毛髪濕度計の 100% として何れの飽和濕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用ふべきであらうが，毛髪の物理的性質の一基準狀態を示すといふ目的から云へば，過冷却水相の飽和濕度を用ふべきであらう，何故ならば，毛管凝縮說から云へば，毛髪中の水は毛管水であつて −40°C 位までは液相と考へられ，從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，飽和濕度中で指度が最初過飽和を示し，次第に 100% に戻るが，その時間が低溫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濕度は，今述べたやうな意味で完全な基準狀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°, 5°, −5°, −10°C の各溫度に於てポリメーター型の毛髪濕度計の檢定を行つて次の如き結果を得た．

1. 飽和濕度から脫濕し，次に再び吸濕を行つて飽和濕度に至る一循環過程に於て，相對濕度で 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，相對濕度で 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．又低溫になつてもその形は殆んど變化しない．然し個々の毛髪濕度計によつてその曲線の形は非常に違ふ．又脫濕の終點が低濕になる程ヒステレシスは大きい．

3. 吸濕過程の終りの飽和濕度の中では，一時指度は 100% を越えるが，再び 100% にもどる．此の時間の遲れは低溫になる程長い．

4. このヒステレシスの說明として，Sresnevsky の毛管凝縮の說をとり，脫濕の途中空洞が出來，しかも吸濕の場合は，この空洞に於ける水頭面の生成が脫濕の場合より遲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. 濕度を急變させた場合の指度の時間的遲れは，以上のヒステレシスとは全然無關係な現象である．この遲れは低溫になる程大きい．

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敎授に對し玆に謹んで感謝の意を表する．又實驗に當つて測定を手傳はれた山本忠彥君に厚く感謝する．