マクラウド真空計毛細管中における 水銀糸の挙動について*

秋 山 好 胤**・橋 本 久 子**・中 山 勝 矢**

(昭和39年4月23日受理)

Capillary Depression in McLeod Gauges

Yoshitane AKIYAMA, Hisako HASHIMOTO, and Katsuya NAKAYAMA

(Electrotechnical Laboratory, Tanashi-machi, Tokyo, Japan)

The purpose of this report is to describe a source of the ambiguity in measuring a low pressure by using the McLeod gauge. It has been found that the capillary depression is obstructive of the accurate measurements in pressure. Particular attentions have been paid to the inner surface of glass capillary, because the reproducibility of the capillary depression strongly depends on the surface conditions of capillary.

The computation, of which the results theoretically predict the shape of meniscus, has been carried out with a high-speed digital computer, IBM-7090, according to Eq. 4. A table capable of obtaining the capillary depression, the meniscus height, and the contact angle for fine capillaries of 4 to 0.1 mm in inside diameter, has been made. Consequently, it has become possible to separate the ambiguity due to the contact angle from that due to the surface tension as shown in Fig. 6.

Comparing the observed values with this table, the following results have been revealed that :

- (1) All the observed values are in good agreement with the theoretical curves, independent of the capillary species,
- (2) The capillary depression is different depending on the glass species and the surface condition as shown in Fig. 6,
- (3) The contact angles are in 119° — 130° for the untreated Pyrex capillary, being in 138° — 160° for the Pyrex one roughened by Rosenberg's method⁽⁸⁾, as in Fig. 6 and 7,
- (4) Tapping is effective of reducing the extent of capillary depression, and
- (5) The surface tension seems to be variable.

1. まえがき

マクラウド真空計は、高真空において圧力の絶対測定ができる真空計として、多くの真空計のうちで最も信頼されており、他の真空計の校正の基準にするのにふさわしいものと考えられている。電気試験所でも、真空度の標準を維持するため、1955年に高精度の大型マクラウド真空計を設置し、以来この方面の研究を続けてきた。

マクラウド真空計によって圧力 P を測定する場合、圧縮操作後の水銀面の位置とはじめの圧力との関係は、

$$P = (A/V) \cdot h l \dots\dots\dots (1)$$

であり、相対誤差は

$$\left| \frac{\Delta P}{P} \right| = \left| \frac{\Delta A}{A} \right| + \left| \frac{\Delta V}{V} \right| + \left| \frac{\Delta h}{h} \right| + \left| \frac{\Delta l}{l} \right| \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで、 P は圧縮操作前の気体の圧力、 A は毛細管断面積、 V は球部容積、 h は2本の毛細管でよまれた水銀柱の頭差、 l は閉じた毛細管における水銀面から頭頂の基準線までの距離である。

われわれが用いている球部容積 999.8 cc, 毛細管内径 1.110 ± 0.002 mm のマクラウド真空計では、 $|\Delta A/A|$ と $|\Delta V/V|$ とに関する誤差を全部で0.3% 以

* 昭和38年11月22日第4回真空に関する連合講演会及び昭和39年2月15日真空協会研究例会にて講演。

** 電気試験所(東京都北多摩郡田無町)

Fig. 1 Capillary depression.

C: Capillary depression, Y: Meniscus height,
θ: Contact angle, x: Radius of capillary.

下におさえてある。したがって、 h と l との測定を 10^{-5} の精度でおこなえば絶対圧からの誤差を、 1×10^{-5} Torr において 1%、 1×10^{-4} Torr において 0.5% 以内にはいるはずである。しかしながら、実際には期待どおりにはいっていない。毛細管の内面を処理したり、「叩く」などの操作と注意深い測定とを繰返えしたとしても 2×10^{-4} Torr で標準偏差を $\pm 3\%$ 以下にすることはできなかった⁽¹⁾。

マクラウド真空計の毛管現象については、今まで全く無視されていたわけではない⁽²⁾が、「同一管径の毛細管における液面降下量は常に等しい」という誤解に災いされて、十分検討されていなかった。その証拠に、ほとんどのマクラウド真空計は、同一内径の毛細管を2本並べ

ているのであり、こうすることにより毛管現象による液面降下量が打ち消されると考えてきたようである。

われわれの報告の目的は、この誤解を正すことである。つまり管径様の同一毛細管においてさえも、毛管現象による液面降下量は決して定まった値を示さないことを実験的に示し、マクラウド真空計の精度向上を阻んでいる原因が、ここにあるということを明らかにした。

2. 毛管現象

あまり太くない管を水銀中にたてると、管の中の水銀面は、周囲の水銀の面よりも C だけさがることが知られている (Fig. 1)。これを毛管現象といい、 C を液面降下量 (capillary depression) という。また、管と水銀面との接触線を含む水平面から水銀面の頭頂までの距離 (y) をメニスカスの高さ (meniscus height) という。

この毛管現象については、すでに 1800 年頃より多くの人々が研究している。たとえば、液面の内外の圧力差 (ΔP) と表面張力 (σ) がつりあっている場合、液面の形が次の式で書き表わせることを、すでに 1805 年に T. Young⁽³⁾ と P. S. de Laplace⁽⁴⁾ が示した。

$$\Delta P = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 R_1 , R_2 は液面の曲率半径である。

原点をメニスカスの頂点におき、曲面は頂点を通る垂直軸を中心とした回転体であるとして、直角座標に書き変えると、(3)式は次のようになる。

$$\frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}} + \frac{y'}{x(1+y'^2)^{1/2}} = \frac{2}{a^2} (C+y) \dots\dots (4)$$

なおこの式では水平方向を x 軸に、垂直方向 (正方向を下向きに) を y 軸にしてある。また a は毛細管定数と呼ばれるもので、

$$a^2 = 2\sigma / \{(\rho_1 - \rho_2) \cdot g\} \dots\dots (5)$$

であり、 ρ_1 は液体の密度、 ρ_2 は気体の密度、 g は重力加速度である。この式は M. Laplace によって求められたもので⁽⁵⁾、Laplace の式といわれており、毛管現象による液面上昇および液面降下だけでなく、Fig. 2 のように、液体中の泡、面上に定着した液滴など、表面張力が働いていて、回転体と考えられる液面の現象について適用できる式である。

Capillary depression

Sessile drop

Capillary rise

Bubble under plate

Fig. 2 Liquid surfaces formed by the surface tension⁽⁶⁾.

Table 1 Data of calculation for equation 6.

H	ΔH	ΔX
0.1~4.0	0.05	0.005
4.0~6.0	0.10	0.002
6.0~11.0	0.20	0.002
10.0~30.0	1.00	0.001

(4)式は数学的には解けないことが、すでに証明されている⁽⁶⁾。それでこれまで何人かの人々⁽⁶⁾⁽⁷⁾が、内径1 mm以上の太い管について数値計算を試みた。しかし、その結果は精度も悪く、計算された内径の範囲も大きすぎて、マクラウド真空計の毛細管には適用できなかった。そのようなわけで、われわれは電子計算機 IBM-7090 を用いて、この式の詳しい数値計算を実施することにした。

計算は、 $X=x/a$, $Y=y/a$, $H=C/a$ において、

$$\frac{Y''}{(1+Y^2)^{3/2}} + \frac{Y'}{X(1+Y^2)^{1/2}} = 2(H+Y) \dots\dots(6)$$

と変形し、Runge-Kutta の数値計算法により、 X と Y および Y' の関係を求めた。パラメータ H は、Table 1の区分にとり、 $0 < X < 0.8$, $0 < Y < 0.8$ の範囲内で計

算した。Fig. 3に X, Y および H の関係を示す。毛細管定数 a は2.3~2.7mm程度であるから、この x, y, H より、ほぼ4~0.025mmの毛細管についての C と y の関係を求めることができる。一例として、 $a=2.60$ の場合の x, y, C の関係をTable 2に示した。なお直径5mm以上のデータは文献⁽⁷⁾から引用したもので、便宜上併記してある。

また、 Y' より液面と管壁との接触角を容易に求めることができる。すなわち、 Y' は(4)式の y' と等しく、この y' は液面の各点における傾斜をあらわし、接触角(θ)との関係は、

$$y' = \tan(\theta - 90^\circ) \dots\dots\dots(7)$$

となるからである。

毛管現象について、一般的に知られている式

$$C = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g} \cdot \frac{1}{x} \dots\dots\dots(8)$$

は液面を球面と仮定した時に成立つ近似式である。すなわちこの式は(8)式において、 $R_1=R_2$ =球面の半径とおけば、簡単に求めることができる。Fig. 3の点線は、(8)式から求めた。直径1mm以下では、1%以内の誤差で一致することがわかった。この計算には、(8)式を(4)式と同じ座標系で書きなおした(9)式を用いた。

$$C = \frac{2a^2y}{x^2+y^2} \dots\dots\dots(9)$$

Fig. 3 Plots of Y vs. X for various values of H , calculated by using Eq. 6. Dashed lines show the values obtained by Eq. 9. ($Y=y/a$, $X=x/a$, $H=C/a$, and a =capillary constant)

Table 2 Capillary depression (mm).
(Capillary constant = 2.60mm)

毛管内径 D (mm)	0.05	0.10	0.15	0.20	y (mm) =		0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
0.75	4.724	9.001	12.273	14.957	16.612	17.508											
1.0	2.673	5.190	7.484	9.298	10.779	11.878			12.630	13.088							
1.25	1.713	3.342	4.886	6.247	7.416	8.382			9.152	9.735	10.167	10.438					
1.5	1.188	2.354	3.439	4.450	5.360	6.161			6.830	7.413	7.845	8.194	8.452	8.617			
1.75	0.870	1.724	2.543	3.317	4.029	4.678			5.253	5.753	6.177	6.528	6.823	7.048	7.216	7.330	7.382

D (mm)	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	y (mm) =		0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20
2.0	1.318	2.558	3.659	4.572	5.287	5.811	6.160	6.364						
2.5	0.838	1.643	2.386	3.046	3.609	4.070	4.432	4.696	4.872					
3.0	0.575	1.133	1.661	2.146	2.580	2.956	3.273	3.532	3.729	3.877				
3.5	0.417	0.824	1.215	1.582	1.919	2.222	2.487	2.715	2.904	3.057	3.174			
4.0	0.314	0.622	0.921	1.204	1.470	1.714	1.935	2.130	2.299	2.443	2.561	2.653		

D (mm)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
5.0	0.193	0.384	0.570	0.750	0.923	1.086	1.238	1.378	1.505	1.619	1.720	1.807	1.881	1.942						
6.0	0.128	0.254	0.379	0.500	0.617	0.729	0.836	0.937	1.030	1.117	1.196	1.266	1.329	1.384	1.431	1.470	1.503			
7.0	0.088	0.176	0.263	0.348	0.430	0.510	0.587	0.661	0.730	0.794	0.855	0.910	0.961	1.006	1.047	1.082	1.112	1.137	1.157	
8.0	0.063	0.126	0.189	0.250	0.310	0.368	0.424	0.478	0.530	0.579	0.625	0.668	0.708	0.744	0.772	0.807	0.833	0.855	0.874	0.890
9.0	0.046	0.093	0.138	0.183	0.228	0.271	0.313	0.353	0.392	0.429	0.464	0.498	0.529	0.557	0.584	0.608	0.630	0.649	0.665	0.679
10.0	0.035	0.069	0.103	0.137	0.170	0.202	0.234	0.264	0.294	0.322	0.349	0.375	0.399	0.422	0.443	0.462	0.480	0.495	0.509	0.522
11.0	0.026	0.052	0.078	0.104	0.128	0.153	0.177	0.200	0.223	0.245	0.265	0.285	0.304	0.322	0.338	0.354	0.368	0.380	0.392	0.402
12.0	0.020	0.040	0.059	0.079	0.098	0.117	0.135	0.153	0.170	0.187	0.203	0.218	0.233	0.247	0.260	0.272	0.283	0.293	0.303	0.311
13.0	0.015	0.030	0.045	0.060	0.075	0.089	0.104	0.117	0.131	0.144	0.156	0.168	0.180	0.190	0.200	0.210	0.219	0.227	0.234	0.241
14.0	0.012	0.023	0.035	0.046	0.058	0.069	0.080	0.090	0.101	0.111	0.120	0.130	0.139	0.147	0.155	0.163	0.170	0.176	0.182	0.187
15.0	0.009	0.018	0.027	0.036	0.045	0.053	0.062	0.070	0.078	0.086	0.093	0.101	0.108	0.114	0.120	0.126	0.132	0.137	0.141	0.146
16.0	0.007	0.014	0.021	0.028	0.035	0.041	0.048	0.054	0.060	0.067	0.072	0.078	0.083	0.089	0.093	0.098	0.102	0.106	0.110	0.113
17.0	0.006	0.011	0.016	0.022	0.027	0.032	0.037	0.042	0.047	0.052	0.056	0.061	0.065	0.069	0.073	0.076	0.080	0.083	0.086	0.088
18.0	0.004	0.008	0.013	0.017	0.021	0.025	0.029	0.033	0.036	0.040	0.044	0.047	0.050	0.054	0.057	0.059	0.062	0.064	0.067	0.069
19.0	0.003	0.006	0.010	0.013	0.016	0.019	0.022	0.026	0.028	0.031	0.034	0.037	0.039	0.042	0.044	0.046	0.048	0.050	0.052	0.054
20.0	0.003	0.005	0.008	0.010	0.013	0.015	0.017	0.020	0.022	0.024	0.026	0.029	0.030	0.032	0.034	0.036	0.037	0.039	0.040	0.042
21.0	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.015	0.017	0.019	0.020	0.022	0.024	0.025	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.032
22.0	0.002	0.003	0.005	0.006	0.008	0.009	0.011	0.012	0.013	0.015	0.016	0.017	0.018	0.020	0.021	0.022	0.023	0.024	0.024	0.025

Note. D : Inside diameter of capillary (mm), y : Meniscus height (mm)

Fig. 4 Apparatus for measuring the capillary depression.

3. 実験

3.1 実験装置

測定装置の毛細管の部分に Fig. 4 に示す。内径17mmの太い基準管と、材質、管径、内面状態を変えた数本の毛細管が同一平面にならべてある。毛細管は2つのグループにわけ、一方はパイレックス製の、内径は 1, 1.5, 2 mmのもので、内面を機械的に処理したものと、未処理のもの計6本が組になっている。他は、T.R. ガラス製* で、内径は 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2mm の計5本で内面は処理していない。

内面の処理は、Rosenberg の方法によった⁽⁸⁾。すなわち、毛細管の内部に、内径の $\frac{3}{8}$ ～ $\frac{3}{4}$ ぐらいの真鍮線を通し、前後左右に平均に力がかかるようにして研磨した。研磨剤には、水で分散した粒径約 8μ の結晶白色アルミナを用いた。処理した毛細管はやや透明さを欠く程度である。毛細管の内径は、正確にその量を測定した約 0.1 cc の水銀を毛細管の中に入れ、その水銀糸の長さから求めた。管の均一性をみるため、水銀を移動させて数ヶ所で長さの変化を測定した。このばらつきは内径 1 mm の毛細管では 2% 以下、0.25mm のもので約 8% である。

* 珪酸(SiO_2)を多量に含んだ硼珪酸硝子でパイレックスより軟い。

3.2 測定方法

10μ まで測定できる読み取り顕微鏡を用いて、Fig. 4 の h , h' を測定した。 y は h , h' の差から直接求めた。 C は基準管の h_0 に、液面降下量 (文献 (7) による) を補正した基準線と、毛細管 h のとの差から求め

Fig. 5 The capillary depression plotted against the inside diameter of capillary. Note that values observed are widely scattered as vertical lines. The straight line shows a particular case as follows :

Surface tension $\sigma=450$ dyne/cm,
Contact angle $\theta=140^\circ$,
Density of mercury $\rho=13.5$ g/cm³, and
Acceleration of gravity $g=980.7$ cm/s².

Fig. 6 Plots of capillary depression vs. meniscus height in high vacuum for various inside diameters ($2x$), $\circ$: for untreated TR glass, $\times$: for untreated Pyrex glass, and $\bullet$: for treated Pyrex glass. The full curves are the theoretical ones following to Eq. 6, the dotted lines being for the contact angle.

た。 h , h' の読みとりの誤差は、内面処理をしないもので 30μ 、内面処理をした毛細管では、ガラスがやや不透明なため 50μ である。

排気系としては、水銀拡散ポンプとドライアイス・アルコール・トラップを用いた。毛細管の部分は、測定のために約 300°C で 7～8 時間ベークアウトした。水銀は乾燥素素により、下部の水銀溜めから、ゆっくりとおしあげるようにした。この上昇をとめ、そのまま水銀の停止した状態において測定した。大部分の測定は高真空中 (10^{-6}Torr 台) でおこなったが、ガス圧の影響もしるるために、10～100 Torr の圧力下での実験もおこなった。なお、「叩く」という操作も試みたが、これは毛細管の部分を、相当回数指ではじいたものである。

4. 実験結果

まず、毛細管の内径が一定のときに、液面降下がどの程度ばらつくものであるかを調べてみた。Fig. 5 がその結果である。棒の長さがばらつきの範囲、幅が内径のばらつきを示している。これを(8)式で検討してみよう。ある x の値に対して定まった C が得られるためには、 C と $1/x$ との関係は一本の直線になるはずである。ところが測定した値はこの直線の上にのらず、上下に大きくばらついている。(8)式の g や ρ の変化によって、これほどのばらつきが生ずるとは考えられないから、これは θ や σ が大幅に変わるためであるとしなければならない。Fig. 5 の直線は、 $g=980.7\text{ cm/sec}^2$, $\rho=13.5\text{ g/cm}^3$, $\theta=140^\circ$, $\sigma=450\text{ dyne/cm}$ とした時のものである*。

このばらつきをもっと詳しく検討するために、 C と y の関係を(4)式の計算結果と比較してみた。Fig. 6 は高真空における測定結果を、Fig. 7 は圧力を高くしたときのそれをプロットしたものである。毛細管の半径 (x) のある値に対して、一本の $C\sim y$ 曲線が対応することは(4)式からも導かれるが、適当に a を選んで、測定値によく重なるようにしたのが図の実線である。点線は接触角が同じになる点を結んだものである。ここでは、 $a=2.55\text{ mm}$ 、したがって、 $\sigma=430\text{ dyne/cm}$ を用いるのが最も妥当であった。これは全体の測定値の平均と考えられる。

Fig. 6 および、Fig. 7 から次のことがいえる。

- ① 全ての測定値は理論曲線の上になりにくく、とっている。
- ② ガラスの種類に無関係に同じ曲線にのるが、とりうる接触角の範囲がやや異なっている。
- ③ 内面処理をしたものも同じ曲線上にのるが、接触角は未処理のものの方が小さかった。バイレックス製のもので比べると、未処理のものは θ が $119\sim 130^\circ$ 、処理したものは $138\sim 160^\circ$ であった。
- ④ 管径の小さい場合には、測定値は接触角の大きいところに現われるように見うけられた。
- ⑤ ガス圧を高くすると、 $C\sim y$ 曲線にそった拡がりは大きくなった。
- ⑥ 毛細管の測定部分を叩いた場合には、 $C\sim y$ 曲線における拡がりはかなり少なくなった。
- ⑦ 測定誤差は $30\sim 50\mu$ であるが、測定値はその程度を超えて $C\sim y$ 曲線の上下にばらついている。

* 水銀とガラスの接触角は、多くの教科書やハンドブックなどで 140° 前後の値をとっている。

Fig. 7 Comparison on the C - y diagram between the capillary depression at low pressure ($\approx 10^{-6}$ Torr) and those at higher pressure (≥ 10 Torr). Pyrex glass capillaries of 1 mm inside diameter are used. (○: without tapping, ●: with tapping)

5. 考 察

Fig. 6 および Fig. 7 における測定値の線上ならびに線の両側への拡がりを検討するにあたって、まず種々のパラメータと C - y 曲線との関係を調べておこう。

まず、毛細管定数 a を考えよう。 a が変化するということは C - y 曲線を上下に移動させることである。 a には、(6)式で示したように、 σ , ρ , g という3つのパラメータが入っている。このうち大巾に変わるとすれば、それは σ である。つまり測定点のうち、線の両側への拡がりには σ の変化によるものと考えられる。

管径の一定でないことも同じような効果をもたらすと思われる。管径のばらつきのもっとも大きい 0.25mm の管では、ばらつきは 8% 以下で C に換算して数 mm となる。しかし、このばらつきは管全体のものであって、水銀を停止する位置はいつもだいたい決っていたから、この方からの影響は少ないと思う。

σ は水銀の表面の汚れや水銀自身の汚れによって大巾に変わることは確かだが、定量的なことはわかっていない。ただ細い管の方が変化がはなはだしいだろうということは容易に想像される。

第2のパラメータは θ である。 θ が変化した場合には、 C - y 曲線が上下に移動することはない。測定点の

線上の拡がりにはこれに原因しているとみてまちがいない。問題は、何故このように大巾に接触角が変わるのかという点にある。

接触角は、固、液、気の3相間における界面エネルギーの平衡関係で決まるべきものである。もし、水銀がガラス表面を自由に動けるなら、必ずや、エネルギー的に最も安定した接触角をとりうる位置に移るであろう。いろいろな接触角をとるということは、界面エネルギーが局部的に、あるいは前歴によって変化しているのか、水銀がガラス壁に沿ってスムーズに動きにくい何かがあるのか、のいずれかであろう。それには、水銀表面に集まった不純物や汚れ、酸化物、ガラスの表面の不均一な状態、などが考えられるが、いずれも確かな証拠はない。

内面処理をすると接触角が大きくなるというわれわれの得た結果は、粗い表面において接触角が増大するという一般的事実と一致している⁽⁹⁾。これについては、いろいろの説明が試みられているが、満足すべきものはない。

ガスを導入した状態で、接触角のとりうる範囲が拡がるのは、導入されたガスの影響で、さらに安定状態をとりにくくなるからではないかと想像される。「叩く」ことによってこの拡がりは少なくなり、ある θ の値に近づくのは、小さな機械的エネルギーによって、比較的安定

な状態に移るのだと考えてはいけないうか。とにかく、この点については、まだ未解決の問題が多く、それだけ興味もあるわけである。

6. 結 論

毛細管中の水銀の挙動を考察した結果、毛細管の液面降下量とメニスカスの高さとの関係が、理論曲線とよく一致することがわかった。また、水銀とガラスの接触角は、ガラスの表面状態を変えた場合、異なった値をとること、マクロな意味で同じ表面状態と考えられるものでも、かなり広範囲にわたって変化することがはっきりとした。

いままでの、同じ太さの毛細管を2本並べて水銀糸の傾差をとる測定の方法の根底には、接触角が一定であるという考えが横たわっている。測定の結果、接触角が大巾に変わることが明らかになったから、これまでの方法が正しくないことも明らかになった。もう少し詳しく述べれば、液柱の頭差というものは、そのままそこにかかる気体の圧力差を示しているものではなく、それに表面張力に起因する別の力が加わっているのだということが、明らかになった。だから、何らかの方法で液面降下量を補正しない限り正しくないということになる。

われわれの標準マクラウド真空計について観測された誤差も、この液面降下量のばらつきによるものであることが明らかになった。このばらつきは、 y を詳しく測定して C を求め補正すれば、或程度は除くことができると思われる。しかしそのためには実際問題として y を 1μ 以下で測定しなければならない。また水銀の不純物や、よごれを完全に除くことができれば、このばらつきを更に少なくすることができるであろう。しかし、これ等のことは今のところ実現不可能なことがわかった。

毛細管の内面を機械的に処理するという事は、接触角が大きくなり、接触角が変化しても液面降下量があまり変化しない領域に入ることを意味する。このことは、

マクラウド真空計による測定精度の向上に役立っている。また、叩いて測定するということは、ある一定の接触角に、とりまなおさず一定の液面降下量に近づける一つの方法であるから推奨できる。

7. あとがき

装置の製作および、内径の測定については、新日本計測研究所の青山日出夫氏に協力していただいた。Laplaceの式を中心とする表面張力の理論式については、東大工学部の金子尚武博士に、接触角に関する検討には当試験所の川崎弘司博士及び関田吉泰氏に助言をいただいた。終りにあたって厚く感謝する。また、この研究の推進にあたって御指導をいただいた真空技術研究室長の石井博博士に感謝する。

なおこの研究についてさらに詳しい報告を電試彙報に発表する予定である。

〔文 献〕

- (1) 石井・中山：真空技術 7, No. 3, 113(1957)
- (2) H. H. Podgurski and F. N. Davis : *Vacuum* 10, 337 (1960)
- (3) T. Young : *Miscellaneous Works* 1, 418 (1805)
- (4) P. S. de Laplace : "Supplement a la Théorie de l'Action Capillaire" p. 64 Book #10 of series : "Treatise de Mécanique Céleste" Duprat, Paris, 1798~1823
- (5) M. Laplace : *Oeuvres Complètes*, Gauthier Villars, Paris 4, 349 (1880)
- (6) E. Blaisdell : *J. Math. Physics* 19, 186 (1940)
- (7) F. A. Gould and T. Vickers, : *J. Sci. Instr.* 29, 35 (1952)
- (8) P. Rosenberg : *Rev. Sci. Instr.* 19, 131 (1929)
- (9) F. E. Bartell and J. W. Shepard : *J. Phys. Chem.* 57, 211 (1953)