

低圧流量計とその応用 (第1報)

—低圧流量計の構造と特性—

山本徳太郎*

Gas Flowmeter and It's Application (Part 1)

—Construction and Characteristic of Gas Flowmeter—

By Tokutaro Yamamoto

Mobara Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

The writer deals in this article with the characteristics of a gas flowmeter developed by Prof. Ueda of the Nagoya University and its applications in a field of the electronic industry.

He first introduces the construction of the pivot type flowmeter along with the results of experiments conducted to know its characteristics. In the end, he concludes that the gas flowmeter is highly recommendable for practical study of out gas in exhausting vacuum tubes and materials because of its outstanding merits, such as (1) no breakage even by precipitant pressure change, (2) small time lag, and (3) its capability to follow a wide pressure variation in high pressure range.

〔I〕 緒 言

従来真空管材料等のガス放出量或は放出特性の問題に関しては(A)放出ガスをポンプで排気しながら途中毛細管を通して流出量を測定する所謂「流量法」(V. M. S. の方法)⁽¹⁾⁽²⁾ と (B) 放出ガスを一定容積に導き、その圧力増大から流出量を換算する所謂「ガス溜法」⁽³⁾ の二種が利用されてきた。

但しこれらの方法はそれぞれの特質がある反面、次のような欠点があつた。即ち測定に時間を要し、現象におくれること及び一定容積内にガスをため、然かも試料がこのガス雰囲気中にあるため、実際の排気工程とは相当違つた現象がおこりうる。我々の従事している電球並びに真空管工業に於ては特にこの感が深かつた。又試料としてはニッケルとか鉄等の単独材料が大部分で、実際の真空管を対象としたものは殆どみられないため、条件が実際と著しく違つていた。これを要するに材料の全放出ガス量の測定とか、放出速度の緩慢な変化或は時間的に或る量の遅れを仮定した変化しかみられなかつたという

も過言ではない。

そこで筆者は上記諸方法による単独材料に関する基礎的データを活用すると共に、これらの欠点を補い更に実際の立場にたつた真空管の排気スケジュールの研究とか、材料間のガス放出特性の相異を究明する必要があると考えていた。即ち上記の欠点を補つた方法として、電離真空計を完全に Stabilize してイオン電流を自記する方法等を考えたが、実際真空管の排気工程中には著しく圧力が増大する(例えば $10^{-1} \sim 10^{-2}$ mmHg) 瞬間があるため、これだけでは中々巧くゆかないことを知つた。ところが最近になつて名古屋大学の上田教授の低圧流量計⁽⁴⁾⁽⁵⁾ (Gas Flowmeter) が大体この目的にかなうことに気付き、早速これを応用することを試み、ほぼ所期の目的に達することが出来た。

そこで今後更に高度な利用と多方面に於ける活用を期待して、その概略をこゝにまとめて発表する次第である。以下順序として先ず実測した流量計の特性を第1報に於て述べ、次に真空管の排気スケジュールの検討、最後に各種材料のガス放出量と放出特性の試験に応用した結果を記載する。

* 日立製作所茂原工場

〔II〕 流 量 計 の 構 造

流量計に就いては前記の通り上田教授によつて 1~2 の文献が発表されているが、⁽⁴⁾⁽⁵⁾ その他にはまとまつて使用、研究されたものを余り見ない。そこで第 1 報に於ては先ず計器の構造、性能及び特性を明かにする。但し本報告にて取扱うものは Pivot 型のもののみであり、外に Suspension 型のものがある⁽⁴⁾。

本器の構造並びに寸法の大略は第 1 図の通りであり、動作原理は次の如く至極簡単である。即ちフランジ部分を測定しようとする装置或はポンプに継ぐ、若し排気管内に気流が存在すれば、これによつて雲母薄板に力が作用し、指針は直接この力によつて回転する。但し指針にはヒゲゼンマイがとりつけてあるから、両者の力が釣り合うところで静止する。従つてこの時の回転角 (θ) とガス流量或は流速との関係を予め較正しておけばよい訳である。

原理はこのように簡単であるが、従来これが実用されなかつたのは、 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ mmHg というような真空中では、板に作用する圧力が極めて小さく、到底実用にならないとの先入観によるものと思われる。⁽⁴⁾

底面の摺合コックは零点調節用のもので、これを回転することによつて、零点の位置を自由にえらびうる便がある。又排気管と容器部 (ケース) とは鑢付である。

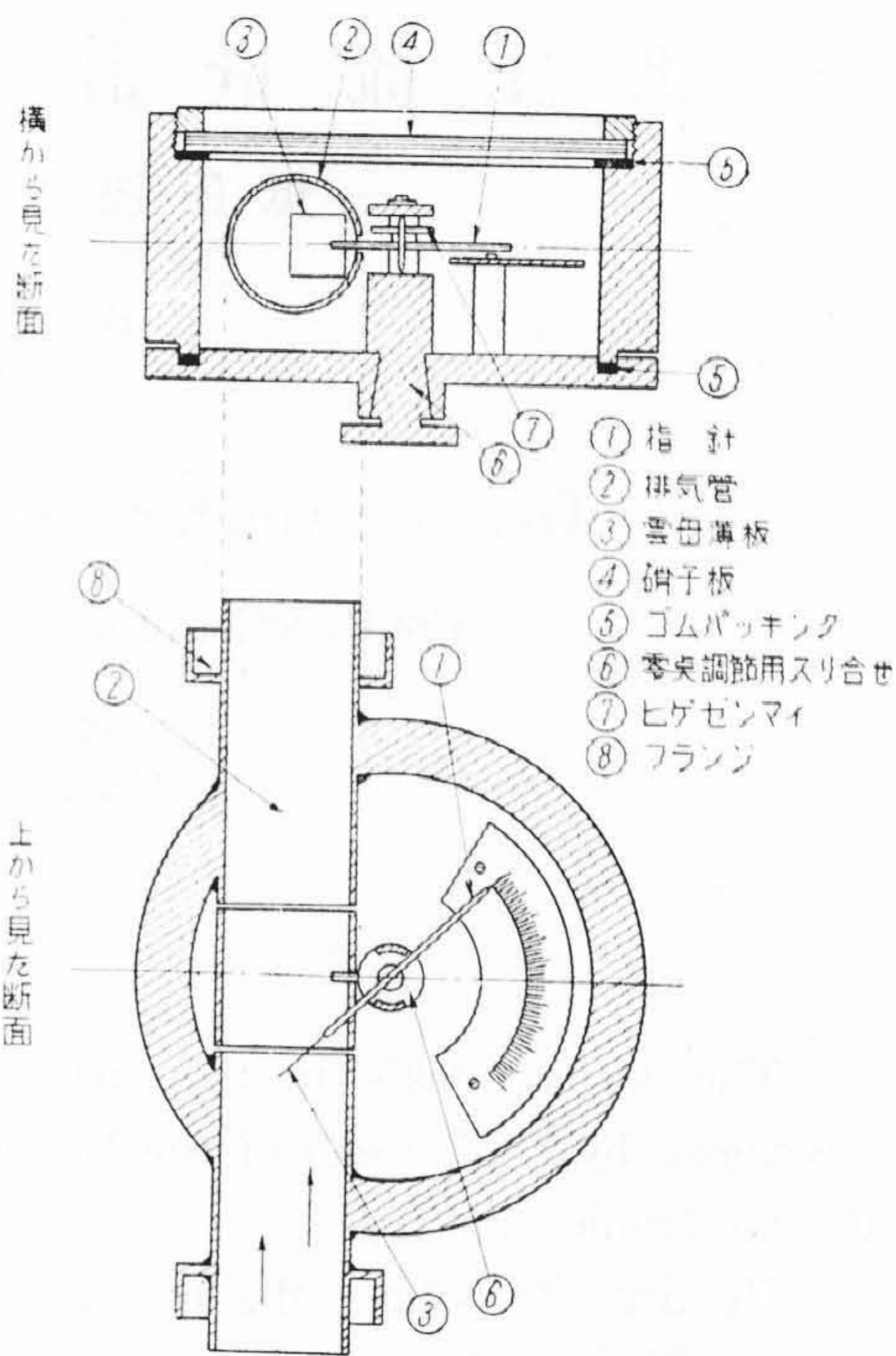
バキウムタイト (Vacuum Tight) は上下のゴムパッキングとコック部分の摺合によつてゐる。又図に見るように、全く機械的なモーメントによつて直接指針をうごかすものであつて、他に電磁的な力は関与しておらず、従つて測定に際し時間的遅れは殆ど問題とならないし、圧力の急激な増大に対しても破損しない等の特長がある。

〔III〕 動 作 原 理

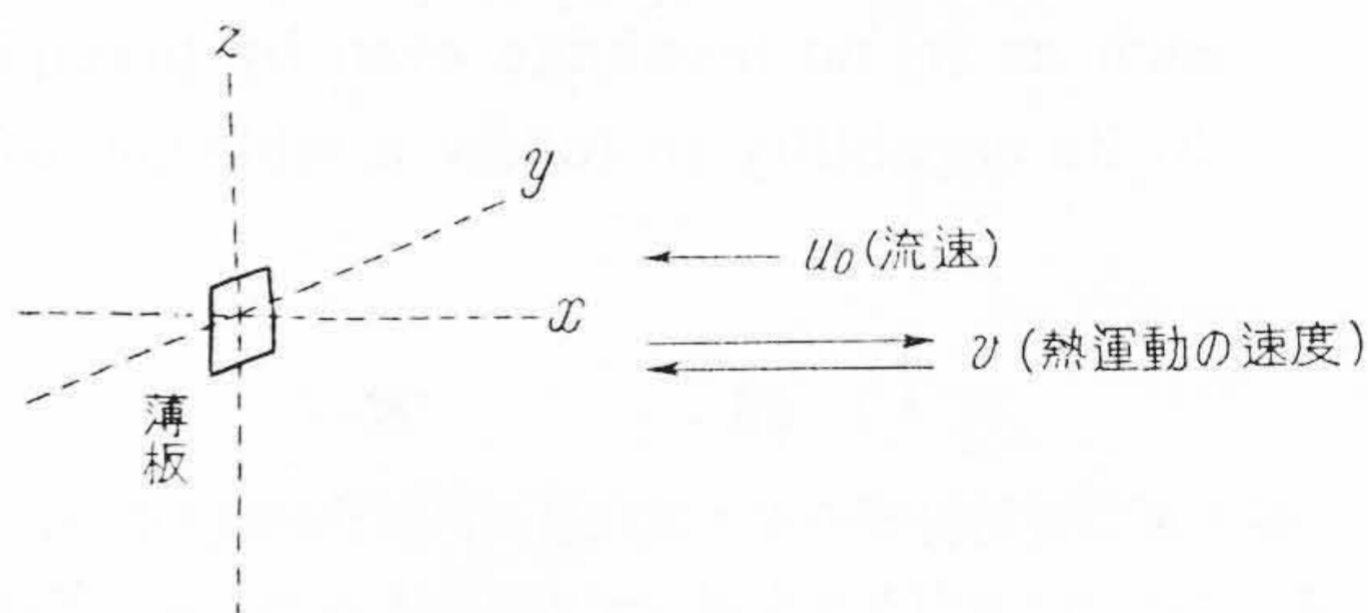
上述のような構造をもつた流量計の薄板が、気流から受ける圧力が如何なるものかを次に考えてみよう。この力は分子流 (Knudsen Flow) の場合と粘性流 (Poiseuille Flow) の場合とでは著しく違つて来る。⁽⁴⁾ そこで以下 2 つの場合に分けて考えることとする。

(A) 分 子 流 の 場 合⁽⁶⁾

いま簡単のために第 2 図に示すように、一定速度 u_0 (Mass Velocity) をもつた無限に広い流れの中に薄板がある場合を考える。但し x 軸方向の気体分子の熱運動のみを考え、その運動速度 v は Maxwell 分布 $f(v)$ をしているものとする。このような場合の分子は結局 $(v - u_0)$ の実際速度をもつて板にあたるから完全弾性反射をしたとすると、板のうける運動量は



第 1 図 流 量 計 の 構 造
Fig. 1. Construction of Gas Flowmeter



第 2 図 低 圧 流 量 計 原 理 説 明 図
Fig. 2. Explanatory Diagram of Gas Flowmeter

$$2m(v - u_0) \dots \dots \dots (1)$$

但し m は分子の質量

次に速度が $(v, v + dv)$ 間の分子で、単位時間にあたるものの総数をもとめると

$$\pm n f(v) dv \times (v - u_0) \dots \dots \dots (2)$$

但し n は単位体積中の分子数

$$\text{符号} \begin{cases} + \dots \dots \dots v > u_0 \text{ の場合} \\ - \dots \dots \dots v < u_0 \text{ の場合} \end{cases}$$

従つて (1), (2) 式より板のうける圧力 P は

$$P = \pm 2 \int_{-\infty}^{\infty} m n f(v) (v - u_0)^2 dv \\ = \pm 2 \rho \int_{-\infty}^{\infty} f(v) (v - u_0)^2 dv \dots \dots \dots (3)$$

但し ρ は気体の密度

(3) 式を変形、計算すれば

$$\begin{aligned}
 P &= 2\rho \left[-\int_{-\infty}^0 f(v)(v-u_0)^2 dv - \int_0^{u_0} f(v)(v-u_0)^2 dv \right. \\
 &\quad \left. + \int_{u_0}^{\infty} f(v)(v-u_0)^2 dv \right] \\
 &= 2\rho \left[-\int_0^{u_0} f(v)(v+u_0)^2 dv - \int_{u_0}^{\infty} f(v)(v+u_0)^2 dv \right. \\
 &\quad \left. - \int_0^{u_0} f(v)(v-u_0)^2 dv + \int_{u_0}^{\infty} f(v)(v-u_0)^2 dv \right] \\
 &= -4\rho \int_0^{u_0} f(v)(v^2+u_0^2) dv - 8\rho \int_{u_0}^{\infty} f(v)vu_0 dv \quad \dots\dots\dots(4)
 \end{aligned}$$

但し以上のように仮定した場合の $f(v)$ は気体運動論の方で既に明かにされており⁽⁶⁾⁽⁷⁾

$$f(v) = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{1/2} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \dots\dots\dots(5)$$

である。

又一般の分子の熱運動の平均速度は室温で約 500 m/sec 程度であるに対して、気体の流速 u_0 は普通の条件の下ではせいぜい 1 m/sec にすぎない。従つて(4)式の第1項は第2項に比して省略され、次の如く変形される。

$$P \approx 2\rho u_0 \int_0^{\infty} 4f(v)v dv = -2\rho u_0 \bar{v} \quad \dots\dots\dots(5)$$

こゝに \bar{v} は分子の熱運動の平均速度であり、

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$$

(但し M分子量)であることはこれ又よく知られているところである。

以上は無限に拡がった流れとしたが、この式が円管の場合にもそのまま成立すると考えると、

$$\begin{aligned}
 \text{気体の流量 } Q &= P \times \pi a^2 u_0 \\
 &= \frac{1}{3} \rho \cdot \bar{v}^2 \times \pi a^2 u_0 \\
 &= \frac{1}{3} \rho \cdot \frac{3\pi}{8} \bar{v}^2 \times \pi a^2 u_0 \\
 &= \frac{\pi^2 a^2}{8} \rho u_0 \bar{v}^2 \quad (\text{但し } a \dots \text{円管の半径})
 \end{aligned}$$

であるから、結論として圧力の式(6)は上式を代入することにより次の如く算出される。

$$P = -4 \sqrt{\frac{2\mu}{\pi^3 RT}} \times \frac{Q}{a^2} \propto -Q \dots\dots\dots(7)$$

但し $-$ 符号は圧力が x 軸に関して負の方向をとることを意味している。

即ちこのように分子流の場合に板のうける圧力は、気体の流量 Q ($\frac{\text{mmHg}\cdot l}{\text{sec}}$) のみに依存することが判る。

(B) 粘性流の場合

この場合に関しては、円管内におかれた時の計算はないが、円板が無限に拡がった流れの中にある場合にうける力は既に計算せられており⁽⁸⁾

$$F = -16r\eta u_0 \dots\dots\dots(8)$$

但し r は円板の半径

η は粘性係数 (この係数は圧力にはよらないが、温度によつて大きく変化する)

こゝでも(A)の場合と同様、円管中の流れに就いてもこの式が成立すると考えると、

板のうける圧力 P は

$$P = \frac{F}{\pi r^2} = -\frac{16}{\pi r} \eta u_0 = -\frac{16}{\pi^2 a^2 r} \eta S \propto S \quad \dots\dots\dots(9)$$

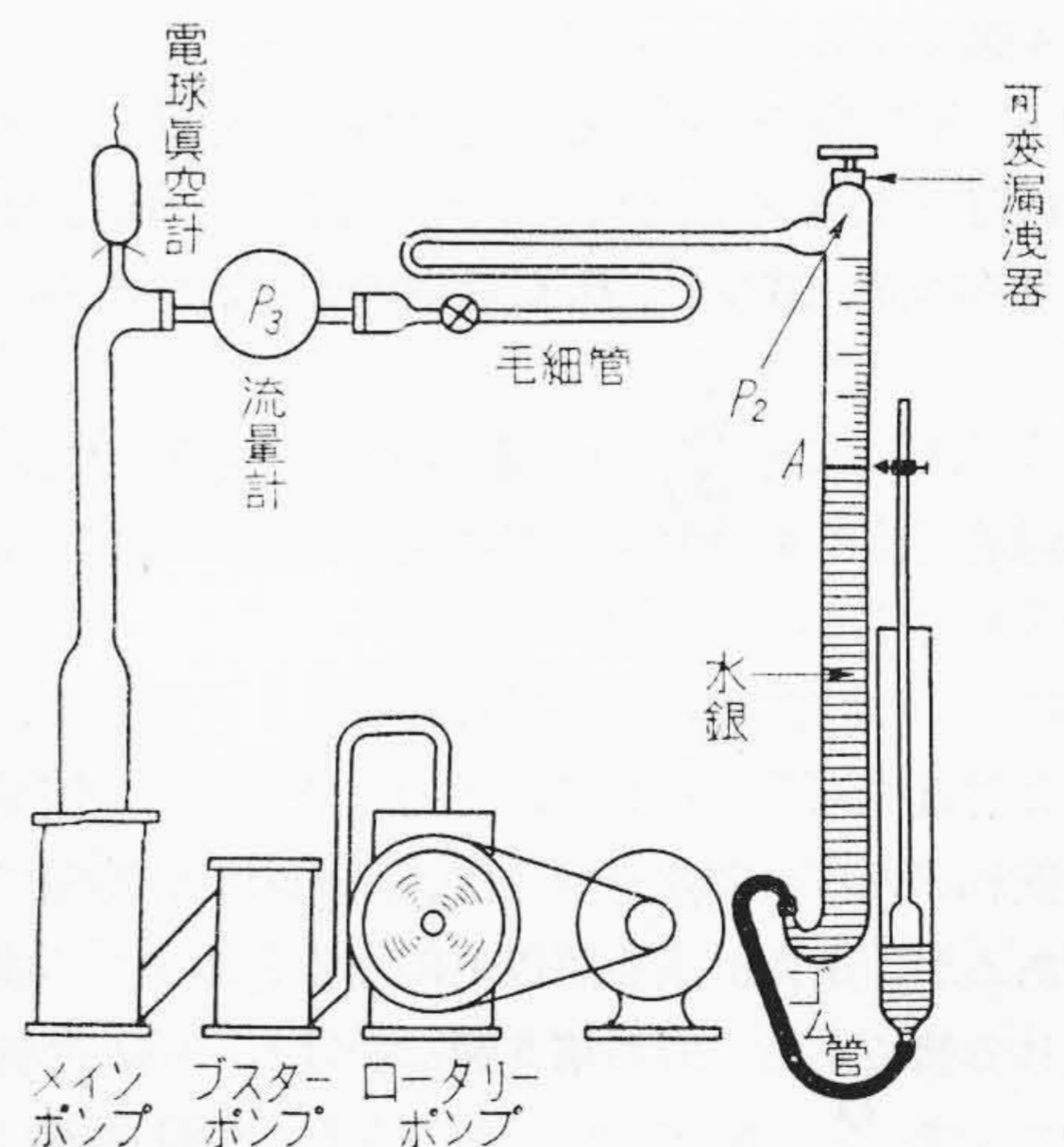
但し S は気体の流速

故に粘性流の場合は板の受ける圧力は気体の流速 S (l/sec) に比例して変化する。

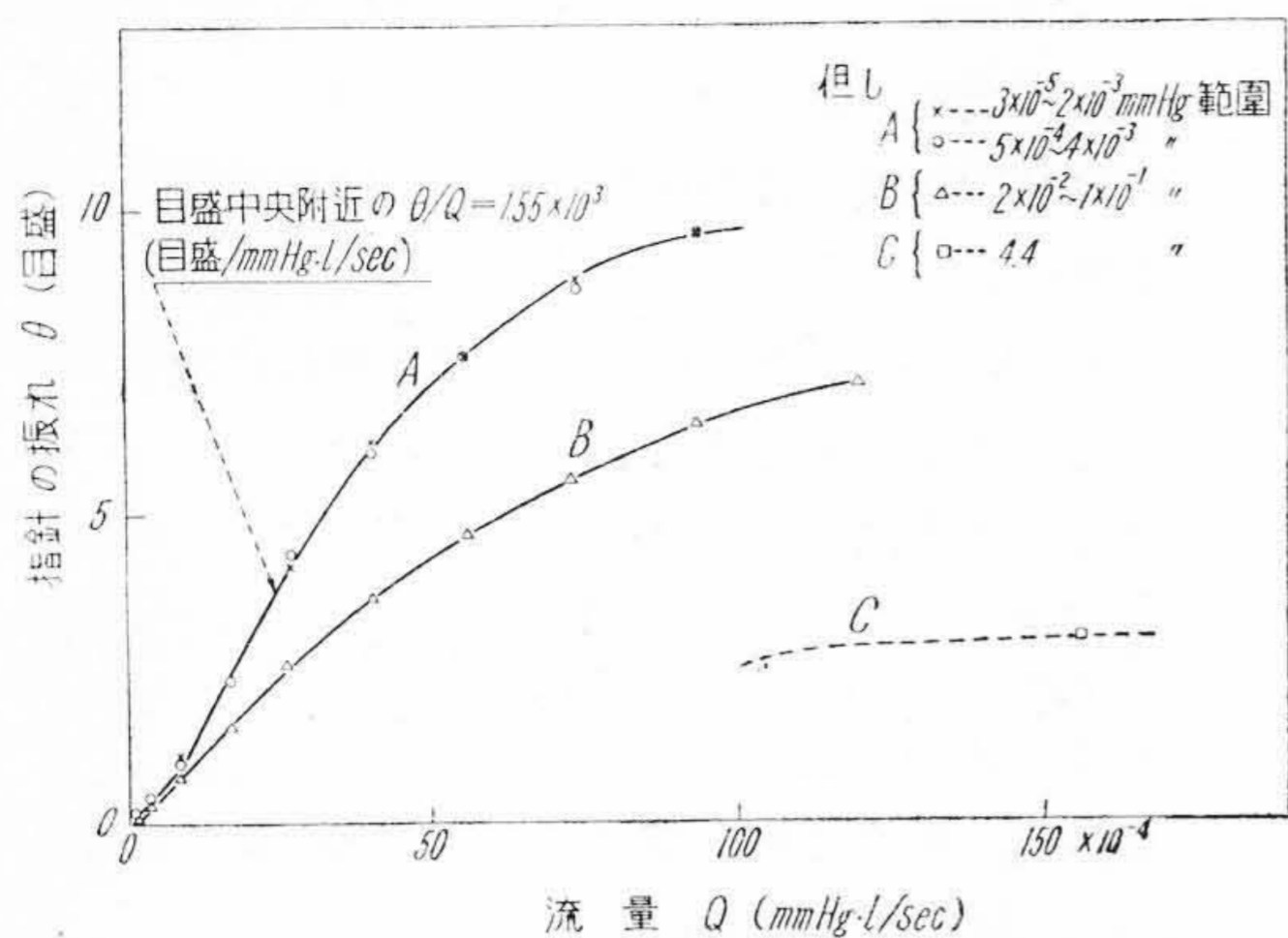
以上を要約するとガス体及びその温度が一定している限り、流量計の受ける圧力は分子流では流量(Q)、粘性流では流速(S)に比例して増減するということである。

[IV] 較正並びに特性曲線

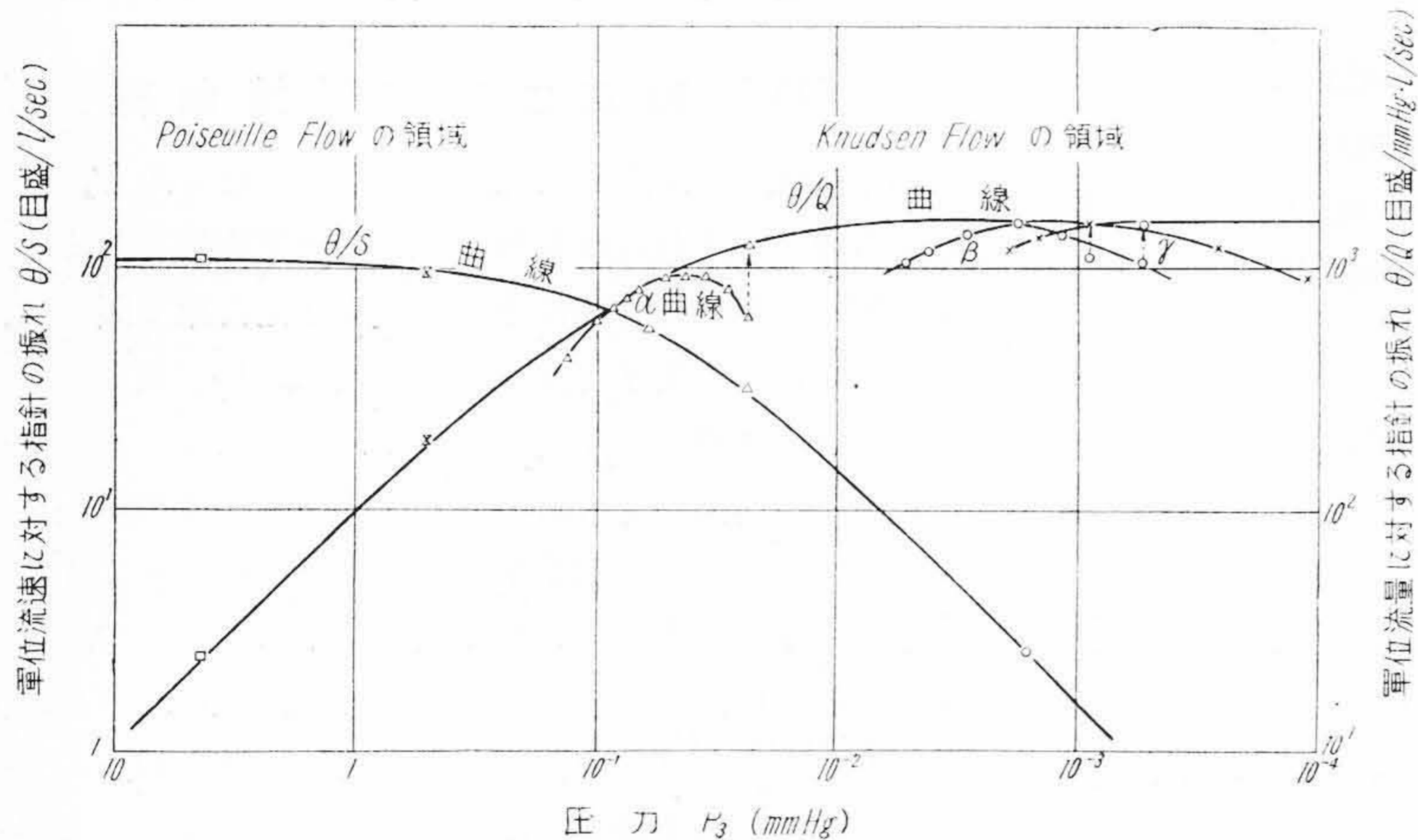
前章の理論に対し、実際の特徴はどうかを次に求めてみよう。それには拡散ポンプの排気速度を測るのによく用いる Howard 法にやゝ改良を加えた第3図の如きものを用いた。先ず可変漏洩器を用い、U字型マンメータ上部ガラス管内に圧力 P_1 のガスを導入し、ポンプを排気する。排気がすゝむにつれてマンメータのB端を徐々に押上げて管内圧力を常に一定値 P_1 にたもてばこのときのA端の動きから、排気速度が求まる。この圧力と速度の相乗積からポンプによつて毎時排気されるガス流量 Q ($\frac{\text{mmHg}\cdot l}{\text{sec}}$) が算出される。従つて種々の圧力の場合に就いてこれを繰返せば流量計の較正曲線として第4図(次頁参照)の如きものが得られる。但し流量計のときの圧力 P_3 は電離真空計のときの圧力 P_2 から補正算出しなければならない。



第3図 較正装置略図
Fig. 3. Skeleton Diagram of Calibration Equipment



第 4 図 較 正 曲 線
Fig. 4. Calibration Curves



第 5 図 特 性 曲 線
Fig. 5. Characteristic Curves

第 4 図より次の 2 つの特性が明瞭である。

(1) 単位流量に対する指針の振れ (θ/Q) は圧力の低い範囲では同一であり、凡そ A 曲線にのるが、圧力が高くなるに従い減少し、B, C 曲線の如く次第に右にずれる。

(2) 次に感度 $\frac{d\theta}{dQ}$ は目盛の中央附近で最大となり、左右両端 (特に θ の大きい方の端 = 目盛右端) では著しく減少してくる。

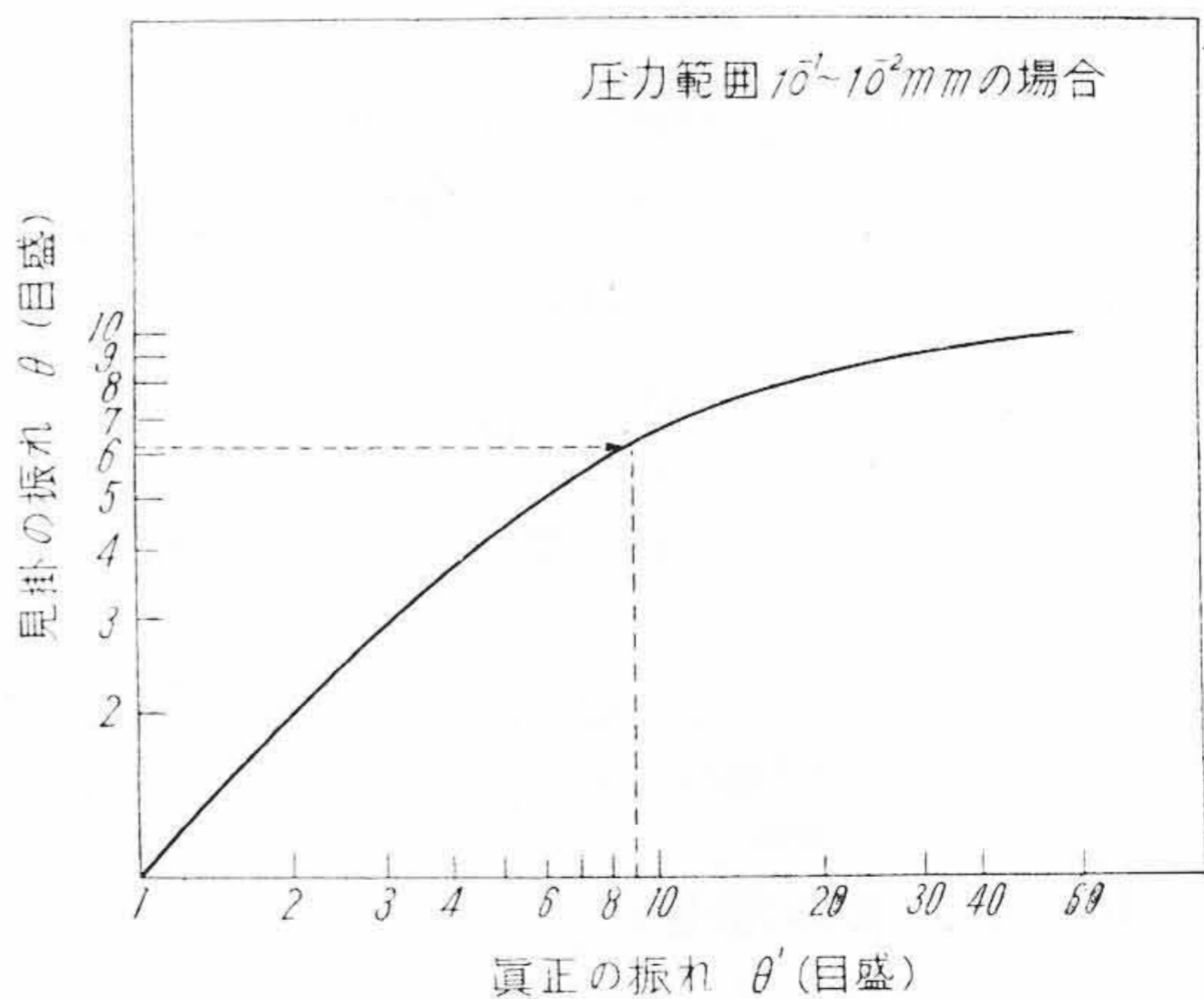
次に (1) の特性からいい得られることであるが、指針の中央附近のみを使用して、圧力 (P_3) 対単位流量に対する振れ (θ/Q) の関係を描けば、圧力の低い範囲では一定であるが、圧力が或る値以上になると減少する曲線が得られる筈である。即ち第 5 図に於ける θ/Q 曲線である。ここで $\frac{Q}{P_3} = S$ (流速) であるから、 θ/Q 曲線の代りに、圧力 P_3 と θ/S 曲線の間係を描けば第 5 図左半分となる。以上の θ/Q 及び θ/S 曲線はそれぞれ分子流、

粘性流の範囲内では一定であり、前章の理論どうりになっていることが判る。

更に (2) の特性からはどんなことがいい得られるかというに、感度が指針の位置によつて異なるというのだから次の如くである。計器の底部にある摺合コックをうごかし指針を一定位置附近で (上述では中央) 使用する限りに於て第 5 図の θ/Q 並びに θ/S 曲線の如くなるが、スケール (scale) 全域でふらせると、同図 α, β, γ 曲線の如くなる。換言すれば θ/Q 及び θ/S 曲線は α, β, \dots の如き曲線の包絡線 (Envelope) に当たっている。これは一般計器類と違つて注意しなければならないところであり、使いにくい点である。この原因は明かに両端に近づく程、気流に対する薄板の有効面積並びに衝突ガスが薄板

の回転に与える有効な圧力が減少するからである。

これは上述したように本計器の使いにくい点で短所であるが、これに対しては第 4 図より算出した第 6 図の如き補正曲線をつくつておけば、容易に両端に於ける感度の減衰を補正して、流量に全く比例的な真正目盛 (θ') に換算出来よう。一般に真空管等の排気に於ては、第 1 章にのべたように放出ガス量は 2~3 桁の大幅な変動を示すから、一定の精度を以て全域を測ろうとすると、この欠点がかえつて有効となる。何となれば予め



第 6 図 目 盛 補 正 曲 線
Fig. 6. Curve for Scale's Calibration

零点を左端より 1~2 目盛に調整して左端の感度減衰部を使用しないようにしておけば、比較的流量の少ない場合は中央位置即ち感度最大附近を用いることになり、多い場合には右の端の感度の悪い点を用いる結果となり、大幅な変動を一つの計器で読みとることが出来るからである。

〔V〕 真空漏洩の発見その他

理論的結論である (7)(9) 式にて明かなように、薄板に付く圧力 P は気体の種類に依存し、分子流と粘性流の場合にそれぞれ気体の分子量及び粘性係数によつて変化する。従つてこの原理を利用して、漏洩のある試験体(例えば排気セット、ベッセル、真空管等)の排気路に流量計をとりつけ、探傷ガス (Probe Gas) として水素等を用いれば漏洩箇處で指針の位置が変ることになる。即ち真空漏洩発見器として利用することが可能である⁽⁹⁾。

この場合に感度(測定し得る最小の漏洩口の大きさ)が問題となるが、実測結果では水素を用いて、ほぼ

$$1.0 \times 10^{-3} \frac{\text{mmHg} \cdot l}{\text{sec}}$$

であつた。

この値は我々が試作した差動式抵抗真空計による漏洩発見器の感度 $3 \sim 4 \times 10^{-6} \frac{\text{mmHg} \cdot l}{\text{sec}}$ に比べると甚だ大きい値であり、⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ 感度がわるいことになる。このことは本器が別に電磁気的作用を用いない至極簡単なものであることを考えれば已むを得ないと思う。而して現場によく見る漏洩には大きい場合が間々あるので、本計器程度の感度で十分間に合うことが相当あり得ると思う。

以上各章で述べたことは主として本器の性能、特長であつたが、次に少々不都合な点を明かにし、今後使用する方の参考としよう。

先ず現在の品物では指針が完全に調整されていないため、大気中と真空中の浮力の相異から僅か乍ら指針の傾

きを生じ、結果として大気中と真空中の零点が違つてくることである。従つて使用者はこの点に留意し、予め真空中の零点を求めこれを基準としなければならない。

〔VI〕 結 言

先に述べたように流量計に就いては未だまとまつた文献が余りないので先ず動作原理、性能特性等をしらべ検討した。その結果 1~2 の難点はあるが、最大の長所として (1) 急激な圧力変化にあつても破損しない。(2) 時間的に遅れが少い。(3) 比較的圧力の高い部分で大幅な変動に従いうる等が判明した。

これ等の特長をかね備えていることは、排気スケジュールの研究或は各種真空管材料のガス放出試験等の場合、好箇の条件であり、今迄のものより優れていると思う。従つて第 2 報以下ではこれを応用し、実用面に於ける種々な効果をのべ、各種方面に利用出来ることを実験的に示してみたい。

第 1 報の終りに臨み、全稿を通じ種々御教示を賜つた名古屋大学理学部教授上田良二博士並びに真空技術研究会の方々、更に日立製作所茂原工場久保副工場長、宮城技術部長、橋本設計課長に厚く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) 真空管材料規格: V.M.S. 58 (6-17)
- (2) 太田: マツダ時報 16 No. 3
- (3) Dällenbach: E.T.Z. 55 (1934)
- (4) 上田: 応用物理 17 No. 5 (1948, 5)
- (5) 上田: 応用物理 17 No. 11~12 (1948, 11)
- (6) Kennard: Kinetic Theory of Gases P. 302
- (7) 熊谷外: 真空 P. 313
- (8) Lamb: Hydrodynamics P. 605
- (9) 近藤: 日立評論別冊 No. 2 (1953, 2)
- (10) 久保、山本: 電気三学会聯合講演会 (1947, 11)
- (11) 山本: 日立評論 34 No. 2 (1952, 2)



第 35 卷 日 立 評 論 第 10 号

- ◎ 四国電力株式会社納松尾川発電所用
遠方監視制御装置 日立製作所・国分分工場 三田勝茂
- ◎ 全装可搬型変圧器 日立製作所・日立工場 斎藤亮二
- ◎ 二巻線変圧器と三巻線変圧器の並列運転 日立製作所・日立工場 栗田健太郎
- ◎ 川崎製鉄株式会社納千葉工場用
高炉スキップ巻上機用電気設備 日立製作所・日立工場 {田附川 克修
平 川 克 巳}
- ◎ フランス水車に起るキヤビテーションと
羽根車下部の流動状態に関する実験的研究 日立製作所・日立研究所 {山崎卓爾
田尻茂治}
- ◎ 高圧コイル絶縁に就いて 日立製作所・日立工場 河本幸郎
- ◎ 複式発条型刷子保持器の特性改善に就いて 日立製作所・日立研究所 {武政隆一
桑原繁太郎}
- ◎ 無電池式電話機 日立製作所・戸塚工場 山田博三
- ◎ 酸化物陰極真空管の寿命 (第2報) 日立製作所・茂原工場 北川賢司
——寿命に対する動作電流及び電極材料の影響に就いて——
- ◎ 塩化ビニル電線の高温特性の改善 日立製作所・日立電線工場 {吉川充雄
川和田 七 郎}
- 絶縁抵抗の感温性、熱安定性及び錫メッキ導体の影響——
- ◎ 電解法による鋳鉄中の非金属介在物の定量 日立製作所・亀戸工場 武藤徳平
- ◎ Si-Mn ばね鋼と Si-Mn-Cr 強靱鋼の
耐久性に及ぼす熱処理法の影響 日立製作所・安来工場 {新持喜一郎
永島祐雄
小柴定常
九 柴 重 雄
北西川谷 静 公雄}
- ◎ メッキの研究 (第1報) 日立製作所・中央研究所 {北西川谷 静 公雄}
- メッキ及び塗膜の厚さの測定——

東京都千代田区丸の内1ノ4
(新丸の内ビルディング内)

日 立 評 論 社

誌代	1カ月	¥100	〒12
	6カ月	¥490	(送料共)
	1カ年	¥840	(送料共)

「日立評論」綴込みカバー発売

(上製綴込み紐付) 特價1組 ¥100 (郵送料共)

「日立評論」の綴込み用として写真に示すような堅牢美麗な綴込カバーを発送致しております。

御希望の方には特に実費にてお頒ち致しておりますから、直接下記に御申込下さい。

日 立 評 論 社

東京都千代田区丸ノ内1丁目4番地
(新丸の内ビルディング7階)

振替口座 東京 71824

