

ペン書きオシログラフの直線書き機構の検討

Studies of Rectilinear Writing Mechanism on the Pen Writing Oscillograph

辻 省 吾* 奥 村 武 洋*
Syôgo Tsuji Takehiro Okumura

要 旨

ペン書きオシログラフは、DC～数十 Hz の現象の記録が可能ことからきわめて応用範囲の広い記録計である。

従来ペン書きオシログラフは円弧書きが主で、ひずみ波形を記録したが、今回直線ペン書きオシログラフ QGS-2 形高速二素子記録計を開発した。本稿はその直線記録機構と、直線変換運動に伴う問題点について検討した結果について述べたものである。

1. 緒 言

ペン書きオシログラフは、従来円弧書きが主で円弧状にひずんだ記録を行ってきたが、現象の時間的変化を一見して直感に訴えるとともに、二つ以上の測定量の相互関係を読みとることが記録計としての本来の姿であるから当然直線書きが望まれてくる。

ガルバノメータの回転運動をペン先の直線運動に変換する方法としては、エッジ方式およびスコット・ラッセル氏の変換機構が代表的なものである。エッジ方式は熱ペン式のものに用いられ、インク書きにはほとんど後者の方式のものが用いられているが、いずれにしても完全な直線ではなく近似直線である。

直線変換機構としては

- (1) 変換された直線の直線度がすぐれていること。
- (2) 記録振幅がガルバノメータの回転角に比例すること。
- (3) 変換機構が軽量で慣性率が小さいこと。
- (4) 機構部の摩擦が小さいこと。

などが要求される。

一方、直線書きの最大の問題点はスコット・ラッセル氏の機構を応用した場合、ペンの運動に伴ってパイプ内のインクに働く力が円弧書きペンの場合とは逆に、インクを逆流させる方向に働き、速い現象を記録させる場合記録がかすれることである。すなわち円弧書きペンではペンの運動によりインクをペン先へ押し出す方向に遠心力が働くが、直線書きでは直線変換運動により逆方向に遠心力が働くためである。

直線書きで鮮明な記録を行なわせる方法としては、インクをポンプにより加圧して供給する方法が考えられ、Brush 社などのものにこの方法がとられているが、圧力をペンの速さに応じ制御する必要

があり、したがって全体の構成が複雑になる。

QGS-2 形高速二素子記録計ではこの点に関し円弧書きペンの長所を採り入れ、ペンのインクパイプを二分して、一方のパイプには円弧運動のみを行なわせることによりインクを押し出す方向に遠心力が働き、他方のパイプ内のインクに働く逆方向の遠心力を相殺することを考え、ペンの構造のみによりこの問題に対処した。以下これら直線記録機構とその問題点について考察した結果を述べる。

図 1 は本記録計の外観を示すものである。

2. 直線変換の原理と変換誤差

(1) エッジ方式

図 2 (a) に示すように、ガルバノメータ回転軸に取り付けたペンによりエッジ部の上に置かれた記録紙を押し付けしゅう動するもので、この場合の記録線上の点 P と回転角 θ の関係は

$$x = -a \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$y = a \tan \theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

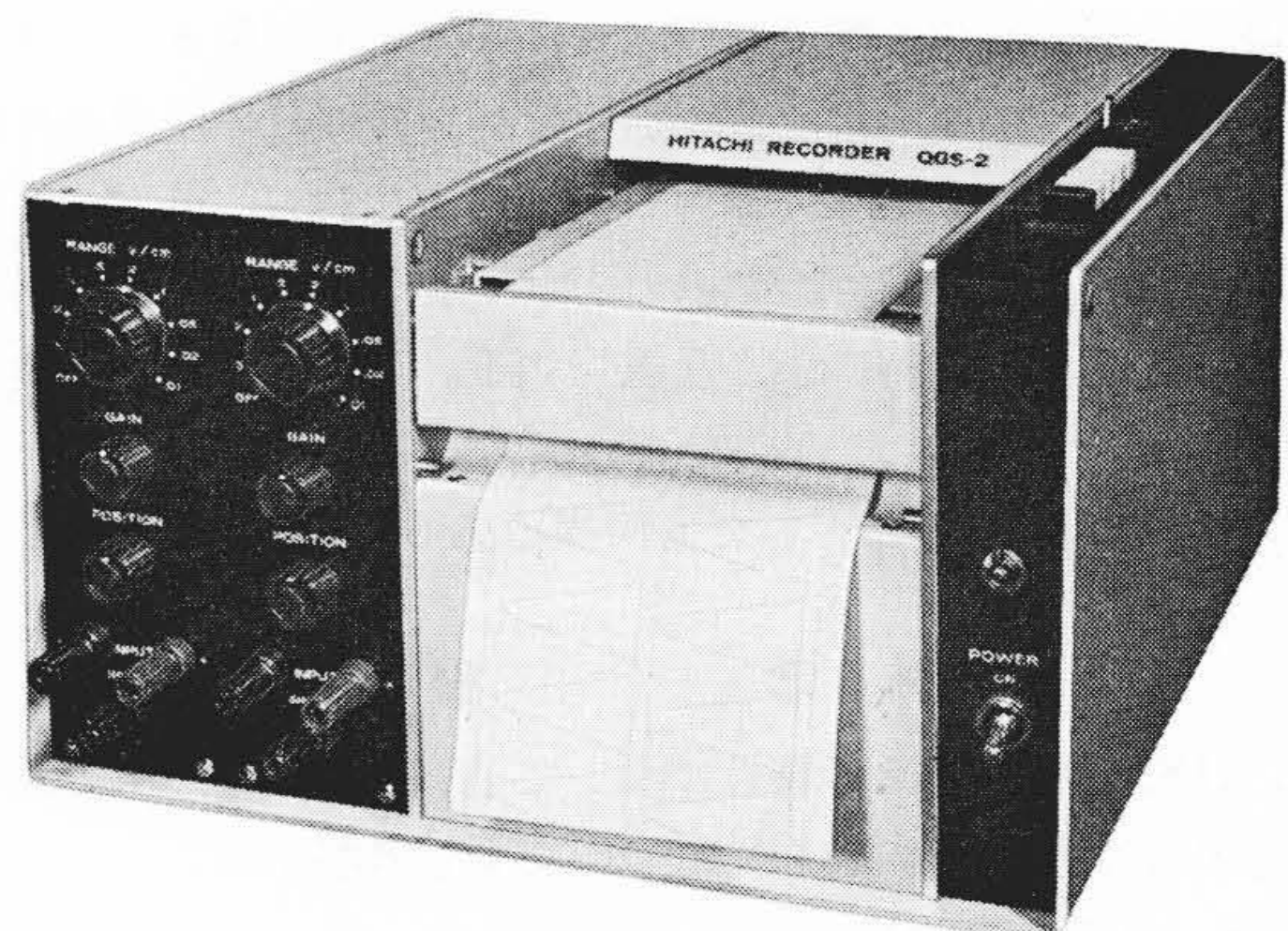


図 1 QGS-2 形高速二素子記録計

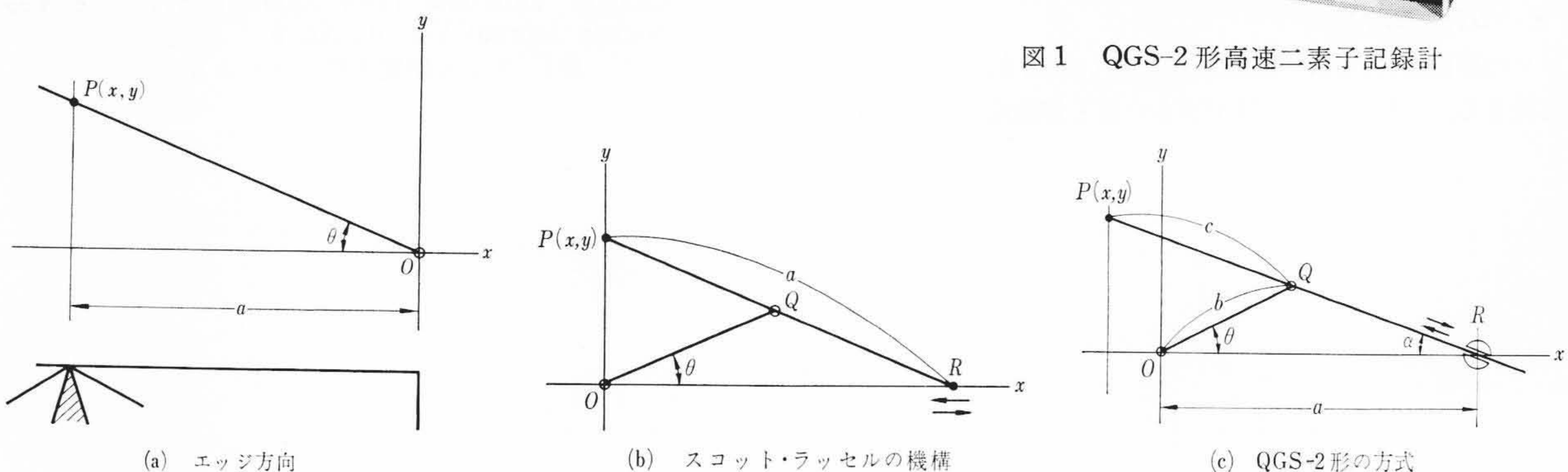


図 2 直 線 変 換 の 原 理

* 日立製作所那珂工場

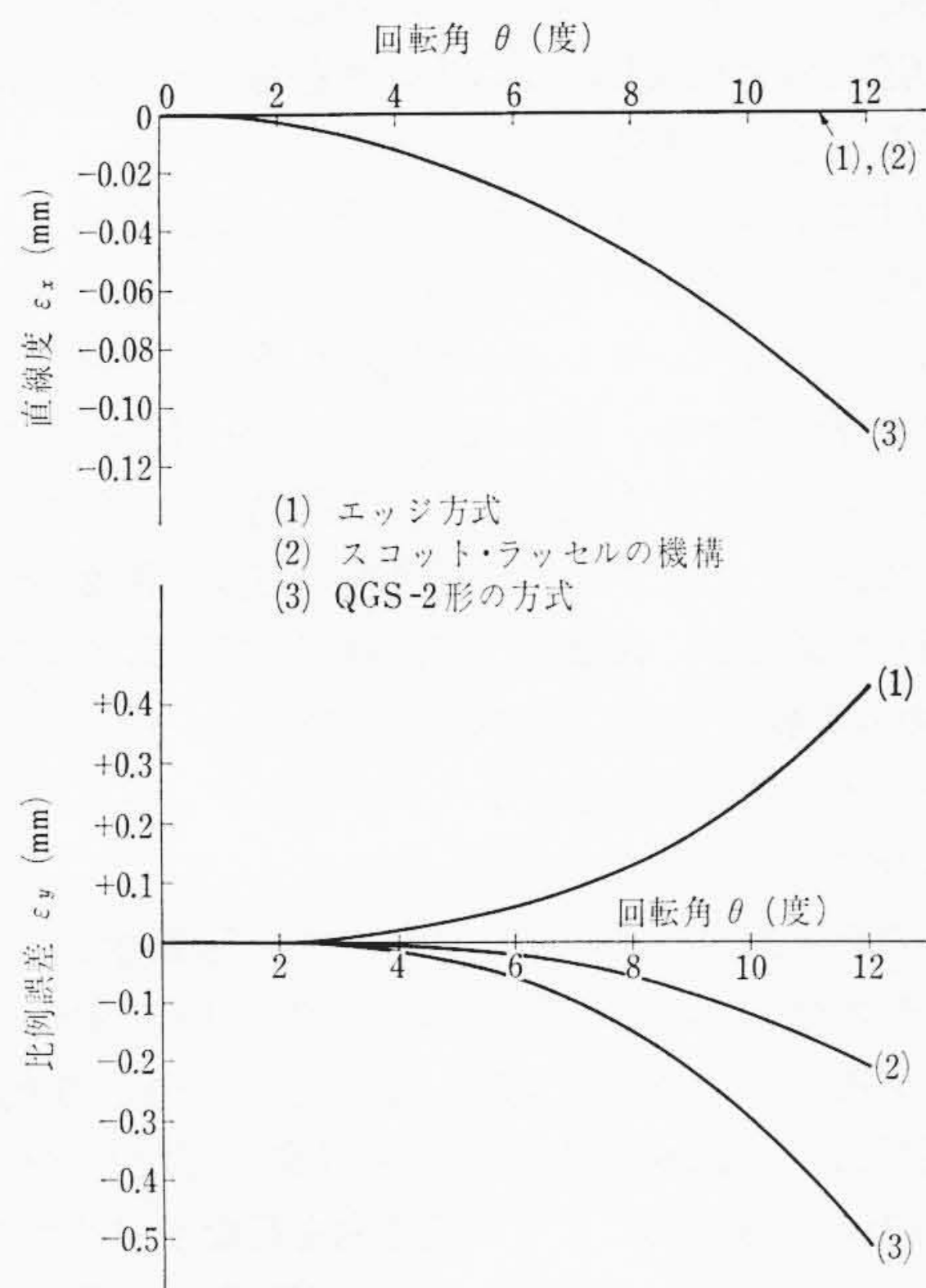


図3 直線変換誤差

となり、 θ が小さい範囲では

$$y \div a\theta + \frac{a}{3}\theta^3 \dots\dots\dots (3)$$

で近似される。

(2) スコット・ラッセル氏の機構

図2(b)において点Oを回転軸とし、 $\overline{PR}$ の一端Rはx軸上を自由に移動するものとすれば、 $\overline{OQ} = \overline{PQ} = \overline{QR} = a/2$ と各リンクの長さを等しくとると、回転角 θ に従って点Pはy軸上を移動するので θ とP点の関係は

$$x=0 \dots\dots\dots (4)$$

$$y=a \sin \theta \dots\dots\dots (5)$$

となり、 θ が小さい範囲では

$$y \div a\theta - \frac{a}{6}\theta^3 \dots\dots\dots (6)$$

で近似される。

この場合回転角 θ に従って $\overline{PR}$ 上の各点が描く軌跡は円運動となり、Q点では $\overline{OQ}$ を半径とする円運動となる。

(3) QGS-2形的方式

図2(c)に示すようにスコット・ラッセル氏の機構を応用したもので、R点を回転軸とするとともに軸に貫通する穴を設け直線変換に伴うx軸方向の運動を行なわせるもので、回転角 θ と直線運動を行なうP点との関係は、

$$x=b \cos \theta - c \cos \alpha = b \cos \theta - \frac{c(a-b \cos \theta)}{\sqrt{a^2+b^2-2ab \cos \theta}} \dots\dots\dots (7)$$

$$y=b \sin \theta + c \sin \theta = b \sin \theta \left(1 + \frac{c}{\sqrt{a^2+b^2-2ab \cos \theta}} \right) \dots\dots\dots (8)$$

となり、 θ が小さい範囲では

$$x \div (b-c) - \frac{b}{2} \left\{ 1 + \frac{c}{a+b} - \frac{ac}{(a+b)^2} \right\} \theta^2 \dots\dots\dots (9)$$

$$y \div \frac{b(a-b+c)}{a-b} \theta - \frac{b \{ (a+b+c)(a-b)^2 + 3abc \}}{6(a-b)^3} \theta^3 \dots\dots\dots (10)$$

で近似される。

直線変換に伴う誤差としては、記録された直線の直線度を表わすx軸方向の誤差 ε_x と、回転角 θ と記録振幅 y との比例誤差 ε_y (一般にこれを直線性という)がある。

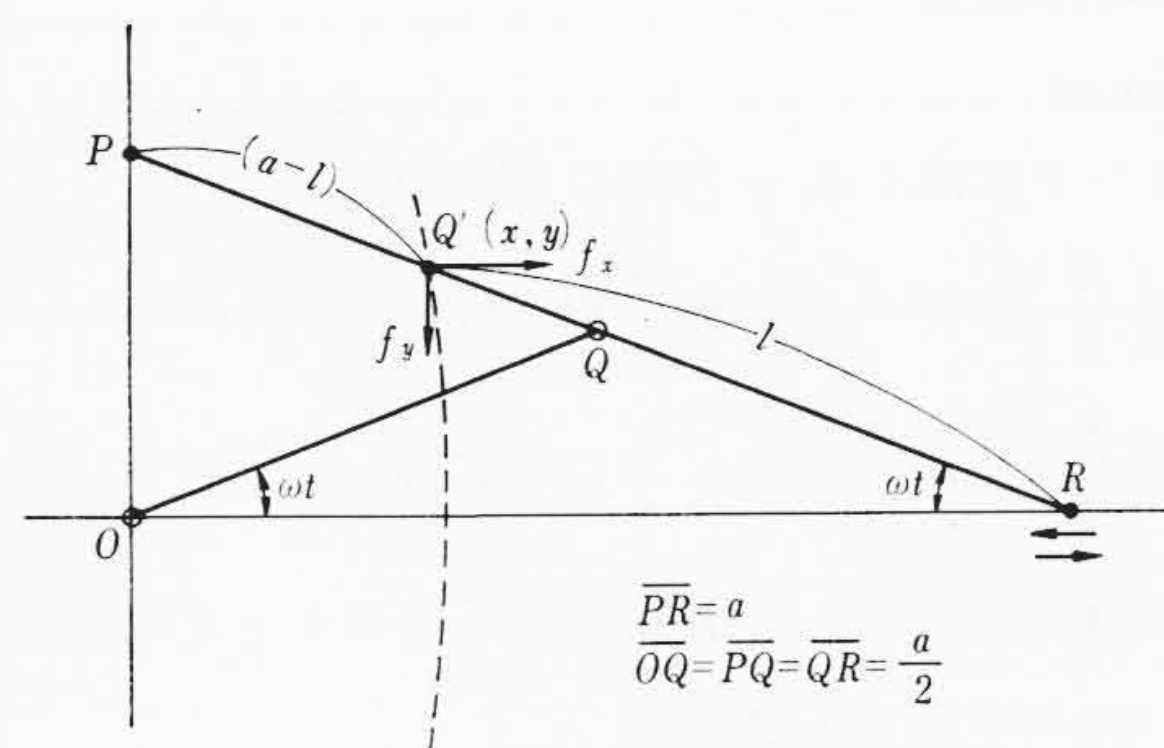


図4 ペンの運動と慣性力

QGS-2形の直線書きペン機構では、図2(c)において $a=95$ mm, $b=40$ mm, $c=85$ mm としてあり、 $\theta=0$ における $\overline{PR}$ をペンの実効長とすれば140 mmとなる。(1),(2)の方式のペンの実効長を140 mm, P点の最大振幅を ± 20 mmとして各方式の誤差を比較すると図3のようになる。

最大記録振幅 ± 20 mmを得るためのガルバノメータ可動軸回転角 θ は、(1),(2)の方式では8.2度、(3)の方式では11.5度となる。図3から直線度 ε_x 、比例誤差 ε_y とも(3)の方式が最も悪いが、熱ペン式のものに用いられる(1)の方式は別として、(2)の方式を採用した場合ガルバノメータ可動軸と記録位置が同一線上にあるため記録紙をこの位置に走らせることが機構的にむずかしく、またペン機構も複雑になり慣性性能の大きなものとなること、さらに図3(b)のR点にx軸方向の運動を行なわせる機構の摩擦が大きくなりがちなことから(3)の方式を採用した。この場合最大振幅における誤差は $\varepsilon_x \div 0.1$ mm, $\varepsilon_y \div 0.44$ mmで20 mm振幅に対し2.2%程度の誤差となるが、實際上記録紙の目盛で最大振幅の75%すなわち ± 15 mmの点で振幅調整し $\pm 1\%$ 程度の誤差にとどめている。

3. ペンの運動と遠心力

ペン先へのインクの供給は毛細管現象やペン先とインクタンク内のインク液面レベルの差による圧力によりインクが押し出されるが、ペンが運動するときはパイプ内のインクに運動に伴う遠心力が働き、これがインクを押し出す方向に働く場合は問題ないが、逆に押し戻す方向に働く場合はインクが円滑にペン先へ供給されないため記録がかすれたり、記録されない現象が生じてくる。

円弧書きペンではこの遠心力がインクを押し出す方向に働き、速い現象の記録も鮮明に行なうことができる特長がある。パイプ内のインクを剛体とみなし、等速運動を行なう場合に円弧書きペンのインクに働く遠心力 P を求めると次の式で表わされる。

$$F = \int_0^a \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \rho l \omega^2 dl = \frac{\pi}{8} D^2 \rho a^2 \omega^2 \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 D : パイプの内径

ρ : インクの密度

l : 可動軸からパイプの任意の点までの距離

ω : 角速度

a : パイプの長さ

すなわち角速度 ω の2乗に比例した力が働く。

一方スコット・ラッセル氏の機構およびこれを応用した直線書きペンでは、円弧書きペンとは逆にインクを押し戻す方向に遠心力が働き記録がかすれやすいことが最も大きい欠点である。

スコット・ラッセル氏の機構について等速運動を行なう場合の遠心力を求めると、図4でインクパイプ $\overline{PR}$ 上の各点は円運動を行ない、 $\overline{PR}$ を $(a-l):l$ に内分する点 Q' は次の式で表わされる。

$$x = (a-l) \cos \omega t \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$y = l \sin \omega t \quad \dots\dots\dots (13)$$

Q' 点のインクに働く x, y 方向の力 f_x, f_y は

$$f_x = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \rho dl \frac{d^2 x}{dt^2} = -\frac{\pi}{4} D^2 \rho dl (a-l) \omega^2 \cos \omega t \quad \dots\dots (14)$$

$$f_y = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \rho dl \frac{d^2 y}{dt^2} = -\frac{\pi}{4} D^2 \rho dl l \omega^2 \sin \omega t \quad \dots\dots (15)$$

f_x, f_y の $\overline{PR}$ に平行した成分の和が Q' 点のインクに働く力 f で、

$$f = f_x \cos \omega t + f_y \sin \omega t$$

$$= -\frac{\pi}{4} D^2 \rho dl \omega^2 \{ (a-l) \cos^2 \omega t + l \sin^2 \omega t \} \quad \dots\dots (16)$$

となり、インク全体に働く力 F は

$$F = -\frac{\pi}{4} D^2 \rho \omega^2 \int_0^a \{ (a-l) \cos^2 \omega t + l \sin^2 \omega t \} dl$$

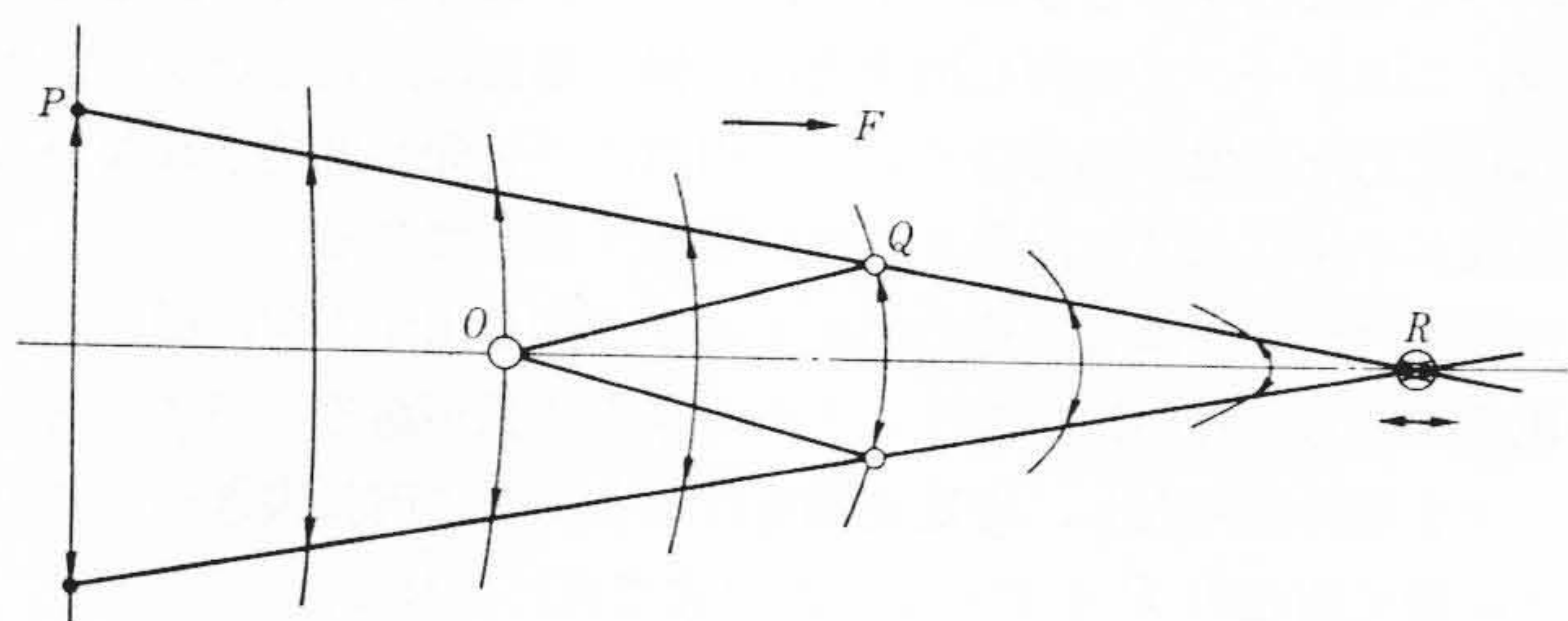
$$= -\frac{\pi}{8} D^2 \rho a^2 \omega^2 \quad \dots\dots (17)$$

で表わされ、円弧書きペンと大きさは等しいがインクを押し戻す方向の遠心力が働く。

図5は図2(c)に示す直線書きペンのインクパイプの各点の運動軌跡を示すもので、スコット・ラッセル氏の機構とほぼ等しい円運動を示し、この場合の遠心力 F も(17)式で近似される。図6はこの直線書きペンを使用した記録例を示すもので、10 Hz 以上の信号の記録は無理である。

この遠心力によるインクの逆流を防ぐ方法としては、インクをポンプにより強制的に加圧し供給する方法が考えられるが、この場合過不足なくインクを供給するためにはペンの記録速度に応じて圧力を制御する必要がある、このための装置が複雑になり、またきわめてむずかしい問題となる。

これに対し円弧書きペンの長所に着眼し、直線書きペンのインクパイプの一部に円弧書きペンと同じ円弧運動を行なわせる図7に示す直線書きペンを考案しこの問題に対処した。図8はこの直線書きペンをガルバノメータに取り付けた状態を示すものである。すなわちインクパイプの一部にインクを押し出す方向に遠心力が働くよう



(改良前)

図5 QGS-2形直線記録ペンのインクパイプの運動軌跡

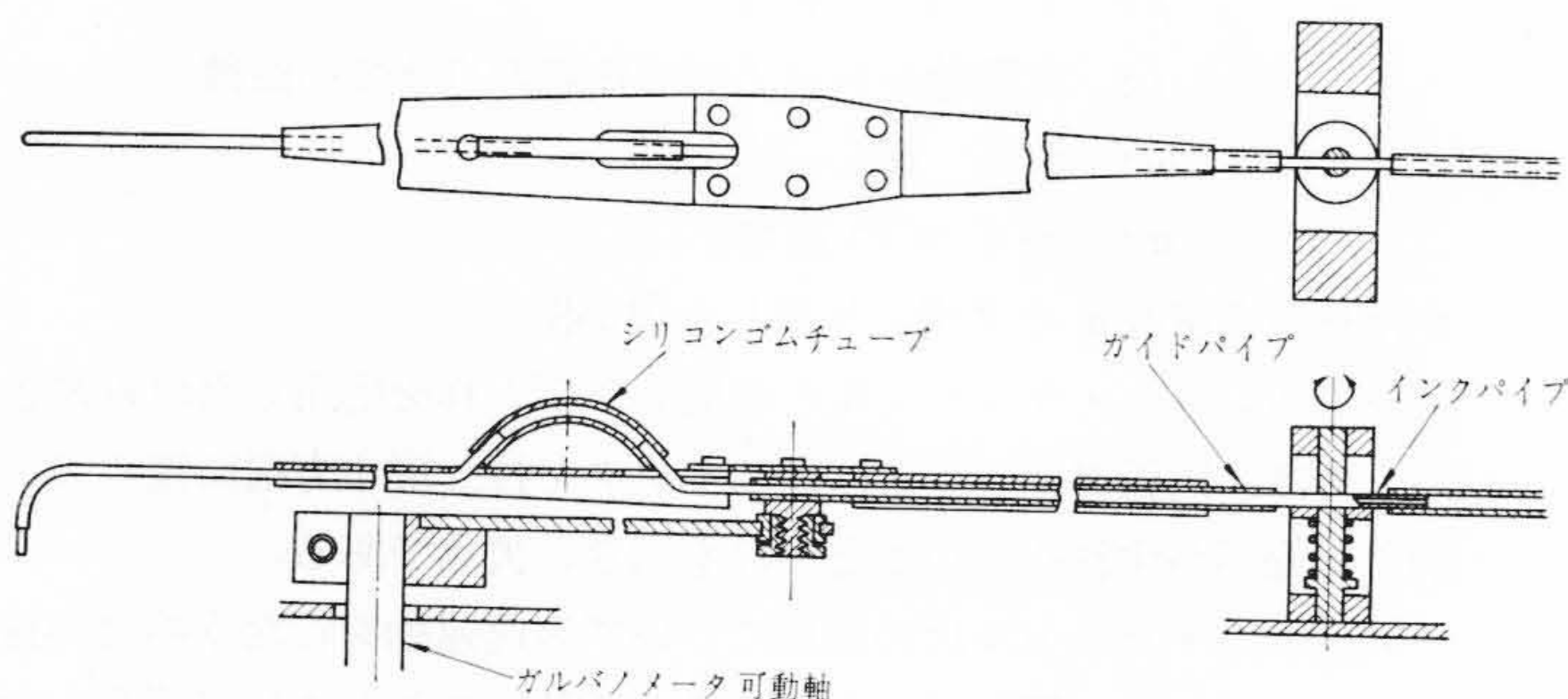
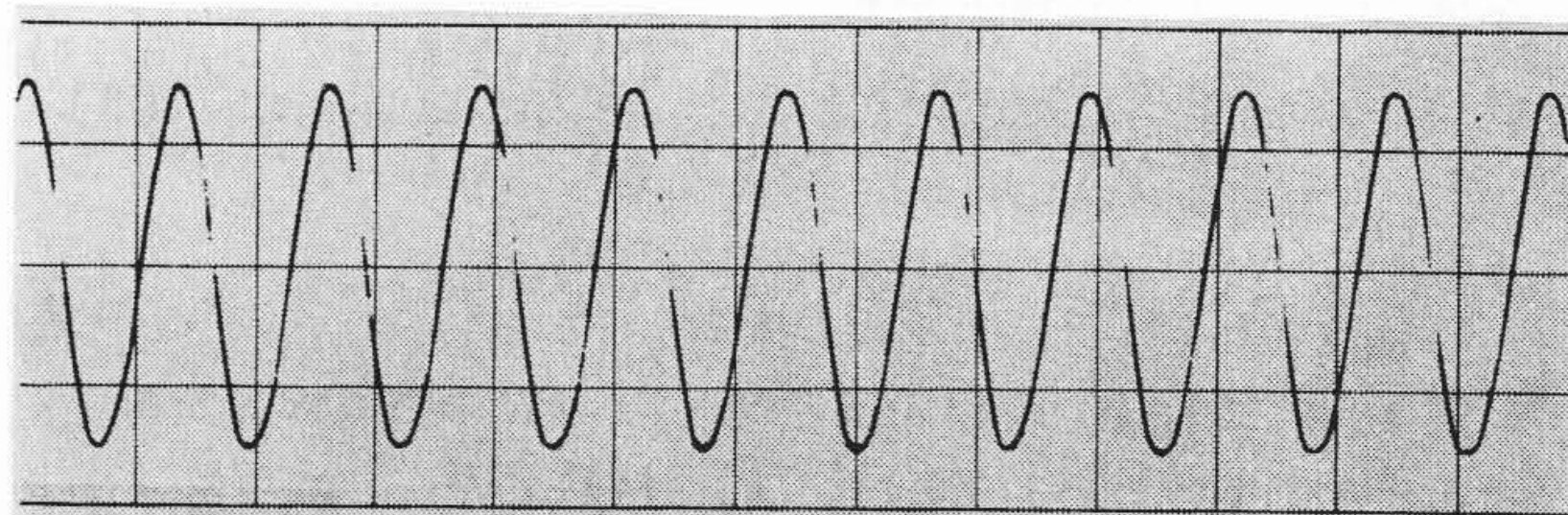


図7 直線書きペンの構造

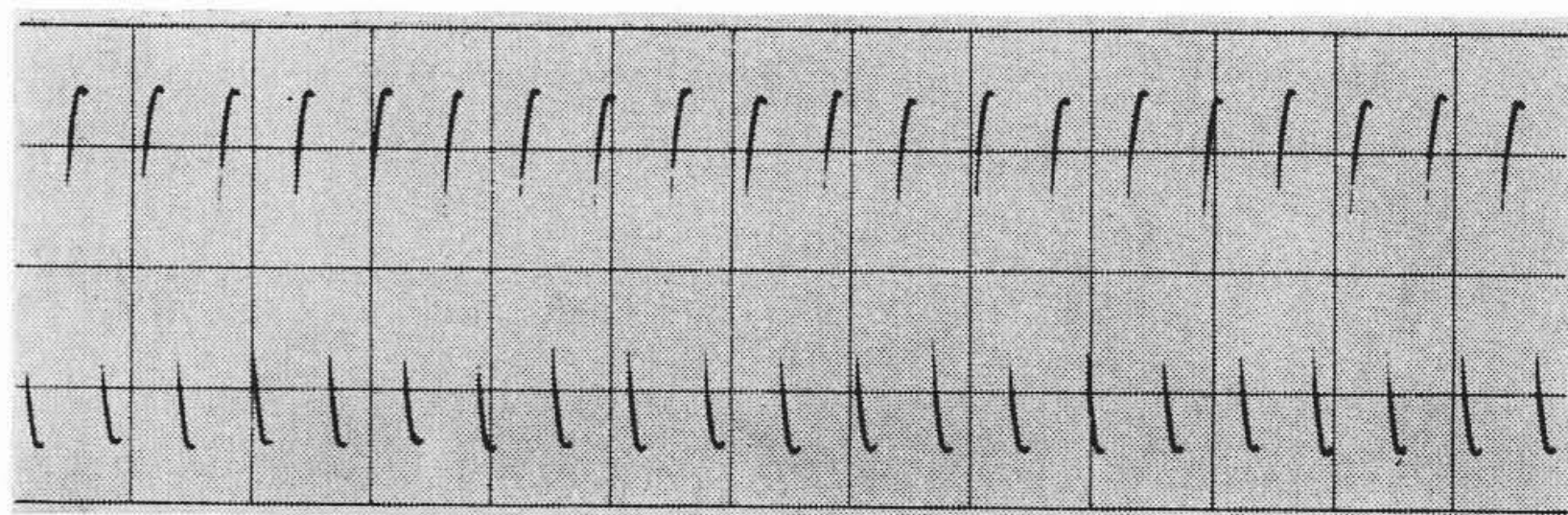
に円弧運動を行なわせ、全体としてこの遠心力がほかの部分の押し戻す方向の遠心力を相殺し、なおインクを押し出す方向に遠心力が働くようにしたものである。

図7に示すようにインクパイプを二分し、これをシリコンゴムチューブでつなぐ。前方のパイプはペンのフレームに固定されているが、後方のパイプはペンフレームに固定したガイドパイプの中を通して自由に滑動するから、図2(c)の R 点を回転運動の支点軸とし、これにインクパイプを固定して円弧運動のみを行なわせるようにしたものである。したがって直線変換の方式は図2(c)に示すものと全く同じであるが、図2(c)では直線変換に伴う x 軸方向の運動を R 点の支点軸に貫通した穴を設けて行なわせていたのに対し、この運動をパイプ同士の滑動とシリコンゴムチューブのたわみ性により消化させている。

図9はこの直線書きペンのインクパイプの運動軌跡を示すもので、後方パイプ内のインクに働くインクを押し出す方向の遠心力 F_1 を前方パイプ内のインクに働く押し戻す方向の遠心力 F_2 より大きくする必要がある。図9で後方の円弧運動を行なうパイプの長さ SR を l_0 、前方の直線変換により円運動を行なうパイプの長さ PS を $(a-l_0)$ とし、(11)式より F_1 を、また(17)式より F_2 を求めると



10Hz



20Hz

(改良前)

図6 記録例

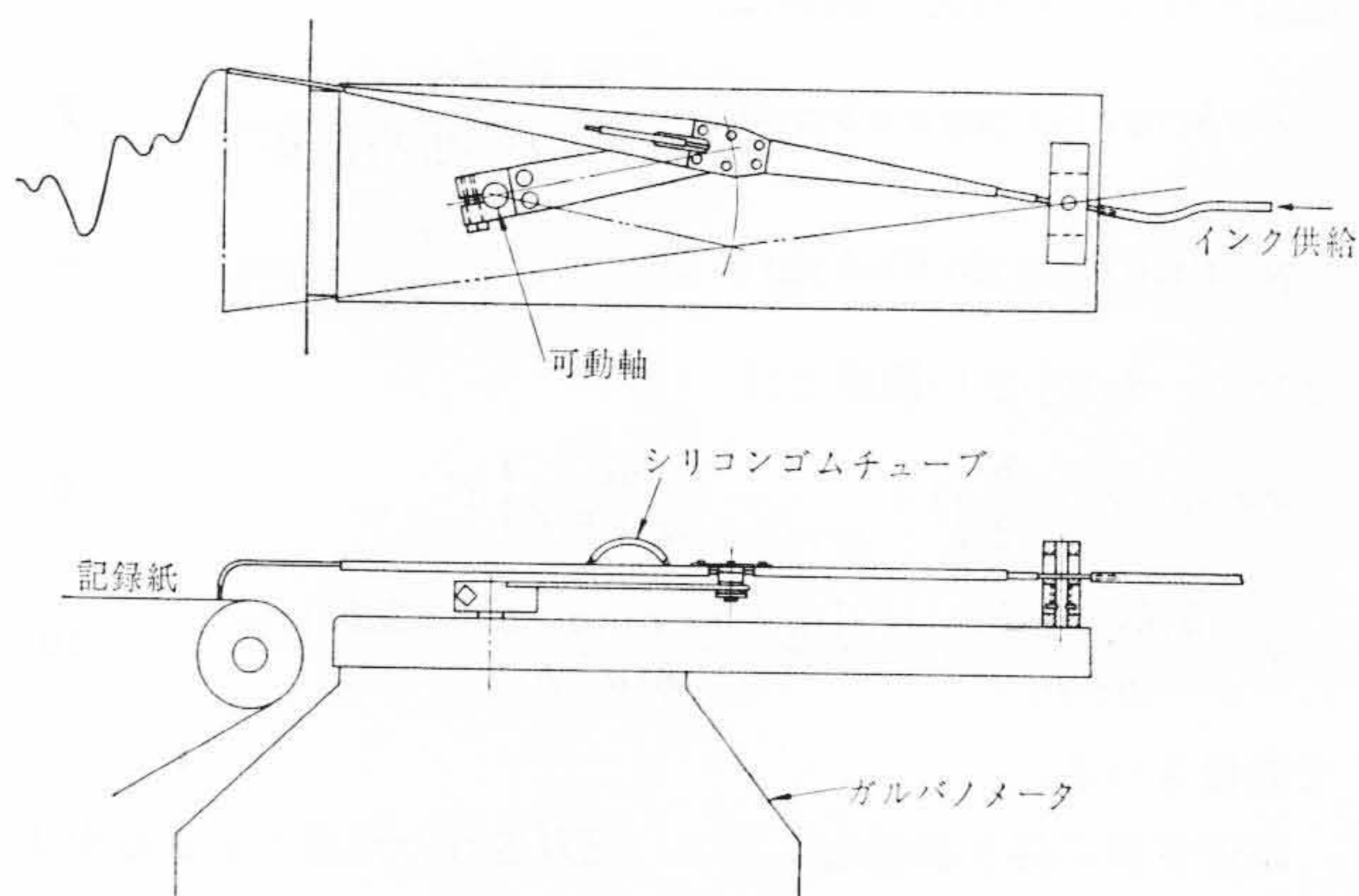
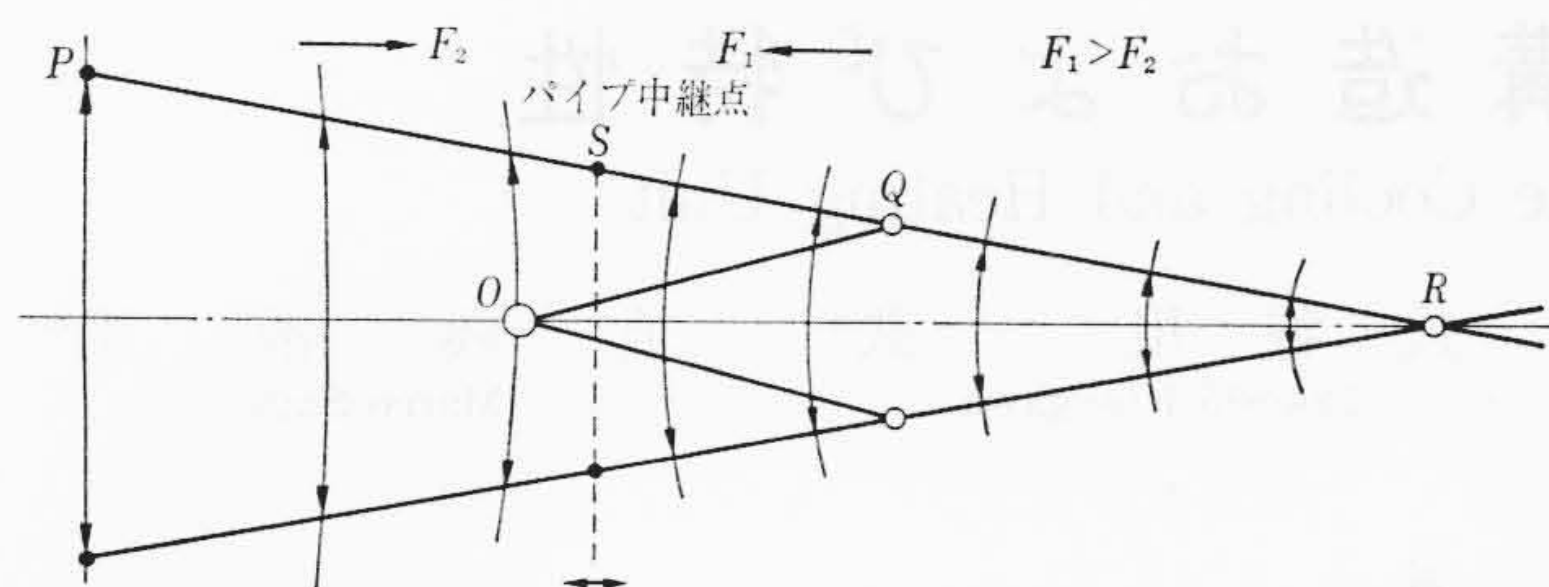


図8 ガルバノメータに取り付けた直線書きペン



(改良後)

図9 直線記録ペンの運動軌跡

$$F_1 = \frac{\pi}{8} D^2 \rho l_0^2 \omega^2 \quad (18)$$

$$\begin{aligned} F_2 &= \int_{l_0}^a f dl = -\frac{\pi}{4} D^2 \rho \omega^2 \int_{l_0}^a \{(a-l) \cos^2 \omega t + l \sin^2 \omega t\} dl \\ &= -\frac{\pi}{8} D^2 \rho \omega^2 (a-l_0) \{a-l_0 (\cos^2 \omega t - \sin^2 \omega t)\} \\ &= -\frac{\pi}{8} D^2 \rho \omega^2 (a-l_0) (a-l_0 \cos 2\omega t) \quad (19) \end{aligned}$$

となる。

本直線書きペンでは最大記録振幅 $\pm 20 \text{ mm}$ を得るためのガルバノメータ回転角は $\pm 11.5^\circ$ で、図9の支点軸 R を中心とするペン $\overline{PR}$ の最大回転角も約 $\pm 11.5^\circ$ とすると、ガルバノメータが等速回転運動を行なう場合 $\omega t \leq 11.5^\circ$ であるから $\cos 2\omega t \doteq 1$ となり、(19) 式より

$$F_2 \doteq -\frac{\pi}{8} D^2 \rho \omega^2 (a-l_0)^2 \quad (20)$$

となる。(18), (20) 式より $l_0 = \frac{1}{2} a$ のとき $F_1 = F_2$ となり、したがって常にインクを押し出す方向に働かせるためには円弧運動を行なわせるパイプの長さを全パイプ長さの 50% 以上にとればよい。

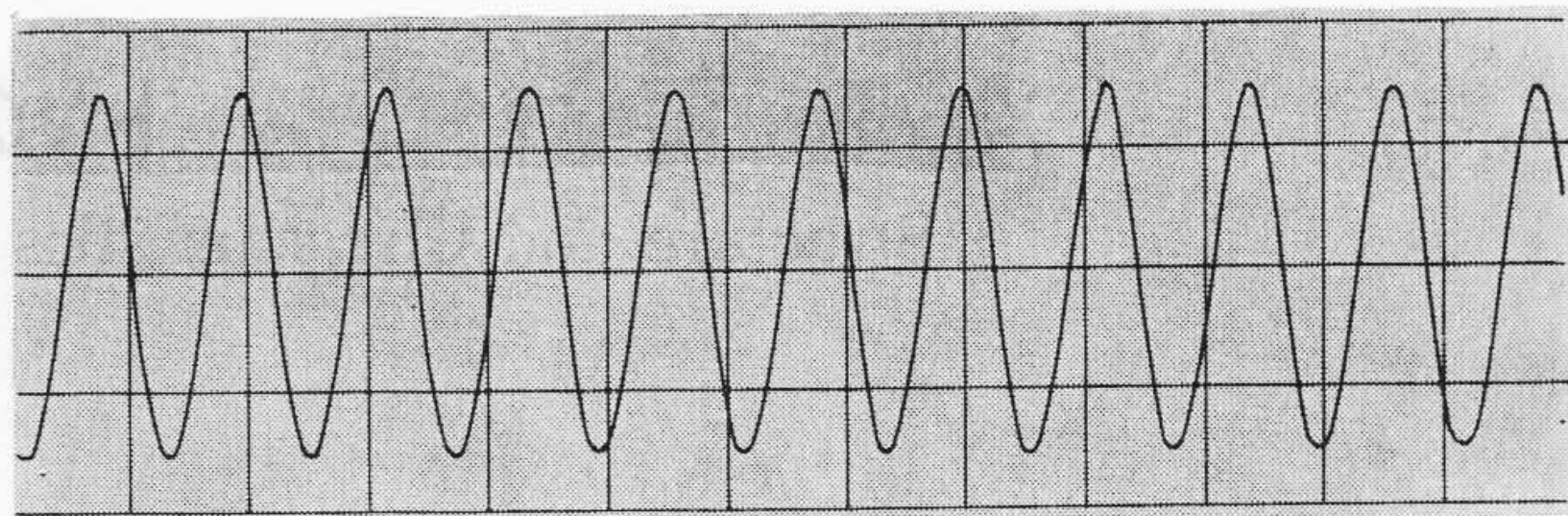
本直線書きペンでは粘性による抵抗力などを考慮して、これを約 55% にとっており、ペンの運動により常にインクを押し出す方向に遠心力が働くようにしてある。

図10はその記録例を示すもので、きわめて鮮明な記録を得ることができた。またさらに高い周波数の信号の記録でも同様好結果を得ている。

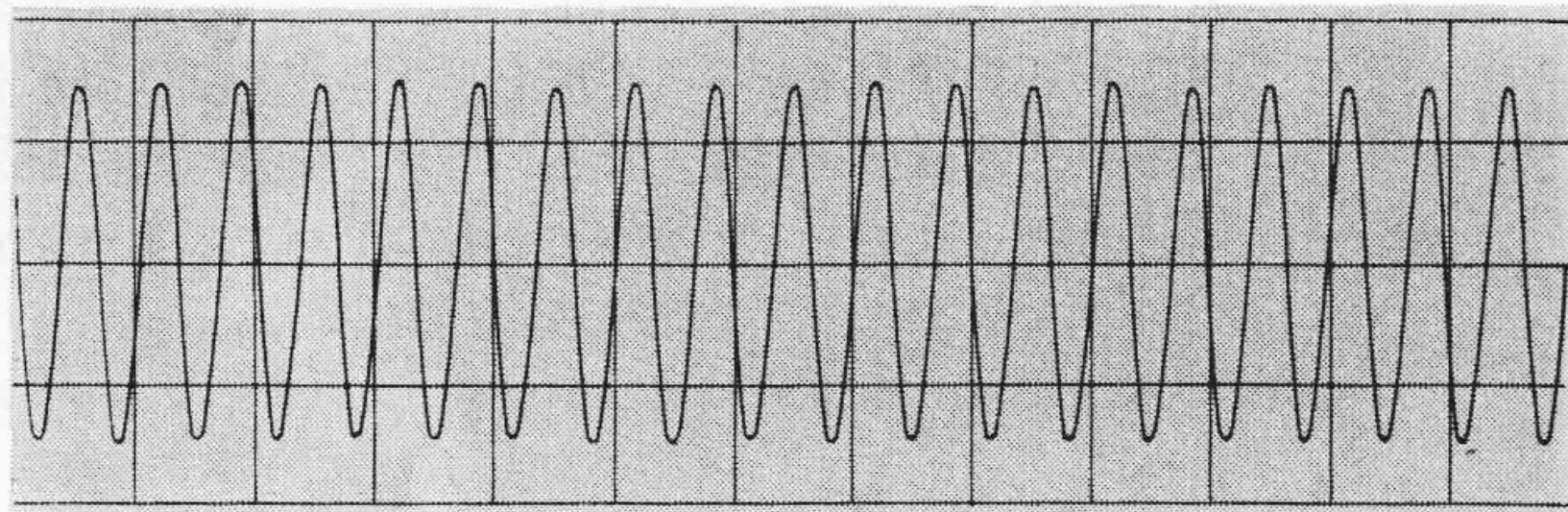
4. その他の問題点

直線書きペンではインクの問題以外でも円弧書きペンと相違する点が多い。

まず直線運動を行なわせる部分の摩擦や、可動軸とペンを連結す



10 Hz



20 Hz

(改良後)

図10 記録例

る支点部分の摩擦や遊びを小さくする必要がある。本記録計ではシリコンゴムチューブのたわみ性と、きわめて細いインクパイプそのものを直線運動を行なわせるスラスト軸として使用することにより直線運動の摩擦を小さくしてある。

また直線書きでは円弧書きよりペン機構部の慣性能率が大きくなり、周波数特性が悪くなりがちである。特に直線書きではガルバノメータ可動コイルの慣性能率よりペンの慣性能率が占める割合が大きくなり、固有周波数を高くとるためにはできるだけ軽い慣性能率の小さいペンにする必要がある。本ガルバノメータではペンを軽量化して慣性能率を小さくし、従来の円弧書きガルバノメータと同程度の固有周波数を得ている。

5. 結 言

直線ペン書きオシログラフ QGS-2 形高速二素子記録計に関し、直線記録ペンの検討結果について述べた。直線書きの場合インクのかすれは最も大きな問題であり、この点インクパイプを二分した構造により従来の円弧書きペンの長所を応用することにより解決することができた。

ペン書きオシログラフは測定範囲が広く、したがって応用範囲が広い。QGS-2 形は特にラボラトリタイプの記録計としての機能形態を備えたものである。