

架空送電線の弛角測定用クリノメータ

Suspension Angle Measuring Clinometer for Transmission Lines

山本義行* 金子喜八郎* 久本方** 大和和夫***
Yoshiyuki Yamamoto Kihachiro Kaneko Tadashi Hisamoto Kazuo Owa

内 容 梗 概

- 架空送電線の弛角測定用クリノメータに関してつぎの諸点を述べている。
- (1) クリノメータ応用の理論的根拠となる弛度計算法（既知の設計条件を入れ弛角を算出する方法）
 - (2) 本研究で検討した遠隔測定式静電容量型クリノメータの機構および構造
 - (3) このクリノメータを佐久間東幹線の架線工事に応用した一例
- これらを総括し、著者らの完成した弛角測定用クリノメータは、今後の能率的架線工事に広く活用できるものであることを確信している。

〔I〕 緒 言

最近架空送電線の建設および保守の方法に機械化が入れられ、各種の新しい機械、工具や運搬方式が採用されめざましい効果をあげている。

しかしこれらの工事の中で、もつとも重要な作業の一つである架空線の弛度を観測して決定する方法には、いまだに旧態依然として取残されている部面がある。

すなわち現在行われているトランシットによる弛度観測は、架空線が山地を通過するような場合に、山地特有の気象の急変によつて、緊線作業が中断され、ひいては工期をはなはだしく遅延させられることがある。

本論文においては、送電線の架線に際し、弛角測定用クリノメータを用いて直接弛角を測定し、設計弛度を確保する方法について述べる。

この架線法によると——従来のトランシットを用いる方法に比べ——架線工事が、濃霧や雨などの天候条件に支配されることなく、能率的に進めることができる利点があり、また保守の場合の弛度張力の観測にも役立つものである。

〔II〕 カテナリ解法による弛度計算

架空送電線のように、弛度をもつた懸吊線の弛度や張力の計算方法には、

- (1) パラボラ（拋物線）解法
- (2) カテナリ（懸吊線）解法

の二つがある。

しかし、パラボラ解法に比べ、カテナリ解法は計算式は複雑になるが誤差の少ない理論式が与えられるので、カテナリ解法が近頃広く用いられている。

送電線のカテナリ解法については、わが国においては野田博士⁽¹⁾によつて解明され、多数の数表や図表が作成

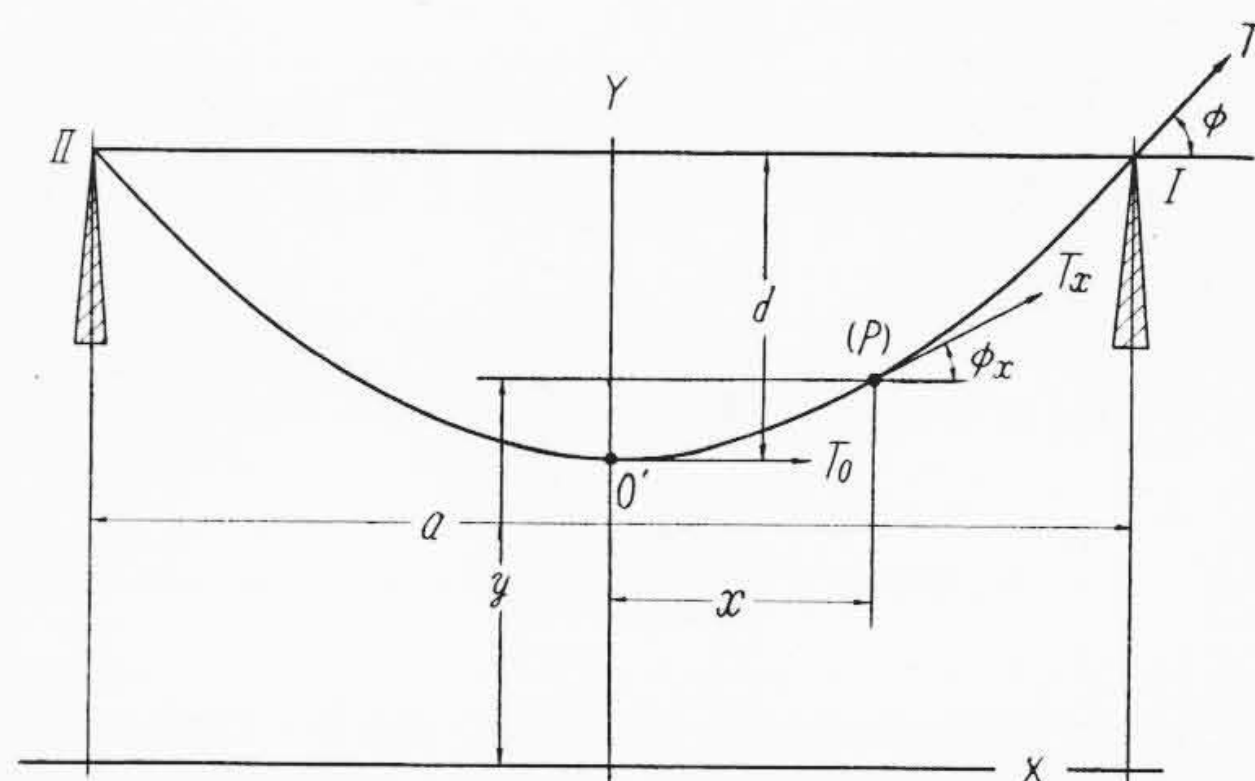
されており、また諸外国にも Martin's Table を始め各種の文献がある^{(2)~(6)}。

以下懸垂碍子の条件が加わらない簡単な場合について、クリノメータの基礎となる送電線の弛度計算法について述べる。この計算法のもつともいちじるしい特長は、パラボラによる解法が電線実長の変化を基としているの に比べ、Unstretched Length（張力のかからない前の電線の実長）の変化を基としていることである。

(1) 高低差のない場合の弛度計算

第1図に示す高低差のない場合の記号をつぎのようにする。

- a : 径間長 (m)
- d : 弛 度 (m)
- T_0 : 水平張力 (kg)
- T : 支持点張力 (kg)
- T_x : 任意点 P の張力 (kg)
- ϕ : 支持点の弛角 ($^\circ$)
- ϕ_x : 任意点 P の弛角 ($^\circ$)
- l_0 : 張力のかからない前の電線実長 (m)
- l : 張力のかかつた後の電線の実長 (m)
- E_0 : 電線の弾性係数 (kg)
- W_c : 張力のかからない前の電線の単位重量 (kg/m)



第1図 高低差のない場合

* 電源開発株式会社

** 日立電線株式会社電線工場 工博

*** 日立電線株式会社電線工場

今第 1 図の P 点における電線の単位重量を W_c' とすれば, W_c' は

$$W_c' = \frac{W_c}{1 + \frac{T_x}{E_0}} \dots\dots\dots (1)$$

である。今その電線に W_w kg/m の wind load と W_i kg/m の ice load が加わった時の合成荷重 W は

$$W = \sqrt{\left(\frac{W_c}{1 + \frac{T_x}{E_0}} + W_i\right)^2 + W_w^2} \dots\dots\dots (2)$$

となる。

今電線がのびる前の合成荷重を W_0 とすると

$$W_0 = \sqrt{(W_c + W_i)^2 + W_w^2} \dots\dots\dots (3)$$

(2), (3) 式から

$$W = \frac{W_0}{1 + k \frac{T_x}{E_0}} \dots\dots\dots (4)$$

ただし $k = \frac{(W_c + W_i) W_c}{W_0^2}$

上記のことを考慮して P 点の力の平衡を考えれば

$$d(T_x \sin \phi_x) = \frac{W_0 dl}{1 + k \frac{T_x}{E_0}} \dots\dots\dots (5)$$

$$d(T_x \cos \phi_x) = 0 \dots\dots\dots (6)$$

の 2 式をえ, これを解くことによつてつぎの式をうる事ができる。

$$l_x = C \left\{ \tan \phi_x + \frac{k T_0}{2 E_0} (\sec \phi_x \tan \phi_x + g d^{-1} \phi_x) \right\} \dots\dots\dots (7)*$$

$$x = C (g d^{-1} \phi_x + \frac{k T_0}{E_0} \tan \phi_x) \dots\dots\dots (8)$$

$$y = C (\sec \phi_x + \frac{k T_0}{2 E_0} \tan^2 \phi_x) \dots\dots\dots (9)$$

ただし $C = \frac{T_0}{W_0}$, l_x は \widehat{OP} を示す。

つぎに P 点の風に傾斜した面に対する垂直荷重 T_{vx} はつぎのような式で表わされる。

$$T_{vx} = \sqrt{(W_c l_0 + W_i l)^2 + (W_w l)^2} \dots\dots\dots (10)$$

(7), (10) 式から微小な項を略すことによつてつぎの式がえられる。

$$l_{0x} = C \tan \phi_x \left\{ 1 - \frac{(1-k) T_x \cos \phi_x}{2 E_0} \times (\sec \phi_x + \frac{g d^{-1} \phi_x}{\tan \phi_x}) \right\} \dots\dots\dots (11)$$

* gd は Gudermanian と読み, $\sin \phi = \tanh x$ の場合, $\phi = gdx$ または $x = g d^{-1} \phi$ と書直すことによつて, 双曲線函数を三角函数として表現できる。

(8), (9), (11) 式が elastic catenary の基本式である。

今電線の弛度および張力に及ぼす E_0 の影響を無視すればつぎのように書き直すことができる。なお電線の実長に対する E_0 の影響は無視することはできない。

$$\left. \begin{aligned} \frac{aW}{T_0} &= 2gd^{-1}\phi \\ \frac{d}{a} &= \frac{\sec \phi - 1}{2gd^{-1}\phi} \\ \frac{aW}{T} &= 2 \cos \phi gd^{-1}\phi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

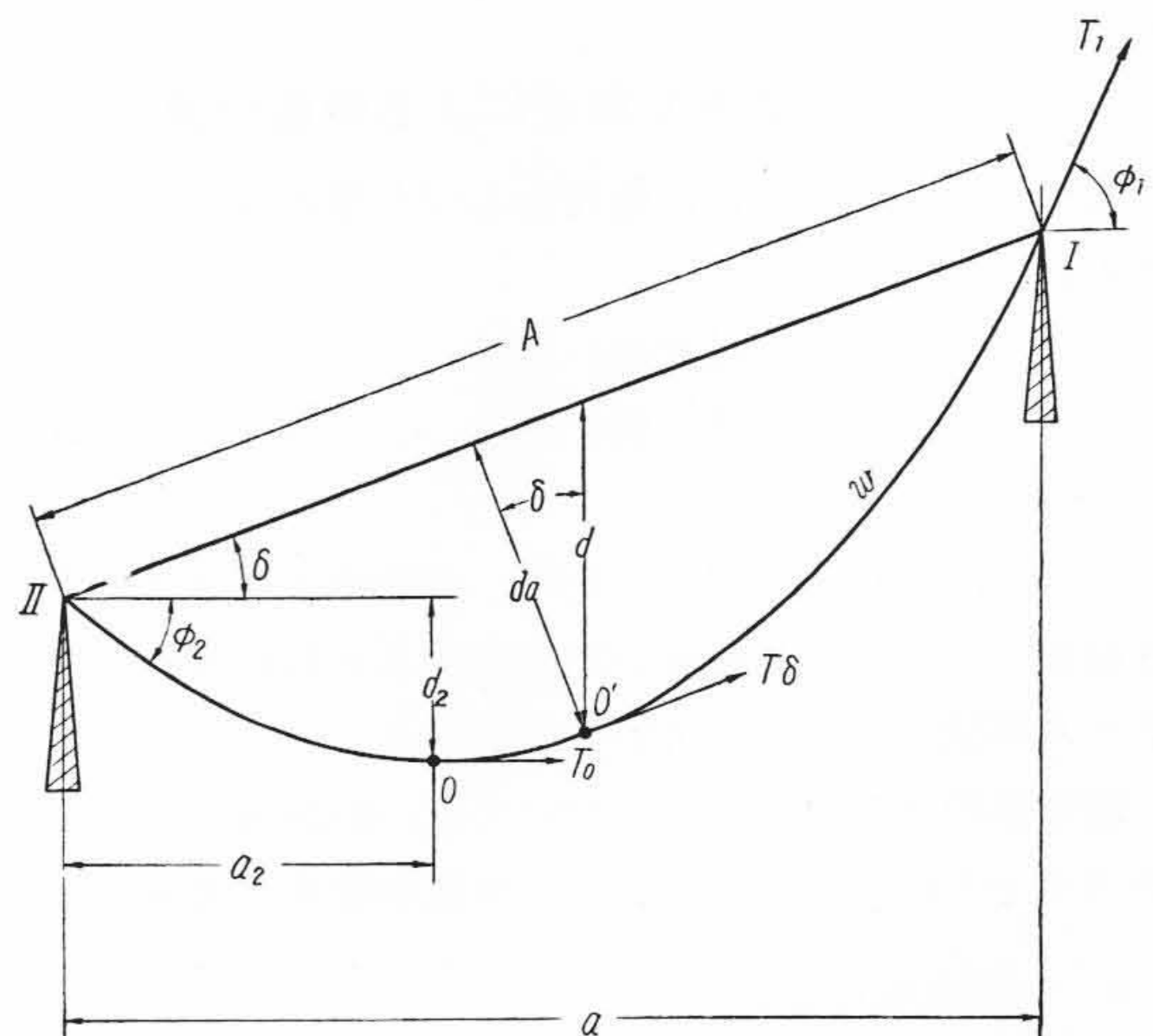
今

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= 2gd^{-1}\phi, & X &= 2 \cos \phi gd^{-1}\phi \\ Y &= \frac{\sec \phi - 1}{2gd^{-1}\phi}, & Z &= \frac{\tan \phi}{gd^{-1}\phi} \\ A &= \frac{\tan \phi \sin \phi}{gd^{-1}\phi \cdot gd^{-1}\phi} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

とおくと, (12) 式およびその誘導式は (14) 式のようにになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{aW}{T_0} &= X_0(\phi) \\ \frac{aW}{T} &= X(\phi) \\ \frac{d}{a} &= Y(\phi) \\ \frac{l_0}{a} &= Z(\phi) \left\{ 1 - \frac{T_0}{E_0} Z(\phi) \right\} \\ &= Z(\phi) - \frac{T}{E_0} A(\phi) \\ \frac{a}{l_0} &= Z^{-1}(\phi) + \frac{W}{2E_0} \cot \phi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

野田博士は $X_0, X, Y, Z, A, Z^{-1}, \cot, (gd^{-1} \sin)$ の各記号について, 弛角 ϕ の函数として, $0 \sim 25^\circ$ の間



第 2 図 高低差のある場合

の数表を提供している。

(2) 高低差のある場合の弛度計算

第2図に示す高低差のある場合の符号をつぎのようにする。

- A : 径間斜距離 (m)
- a : 水平径間長 (m)
- δ : 支持点間傾斜角 (°)
- W : 電線の単位重量 (kg/m)
- φ₁ : 高支持点の弛角* (°)
- φ₂ : 低支持点の弛角* (°)
- T₀ : 水平張力 (kg)
- Tδ : 斜張力** (kg)
- T₁ : 高支持点の支持点張力 (kg)
- d : 斜弛度 (m)
- d_a : d_a = d cos δ (O' と A との距離) (m)
- d₂ : 低支持点と最低点との垂直距離 (m)
- a₂ : 低支持点と最低点との水平距離 (m)

これらの符号を用いてカタナリを解くと、つぎの計算式がえられる⁽¹⁾。

$$\frac{aW}{T_0} = gd^{-1}\phi_1 - gd^{-1}\phi_2$$

$$\frac{aW}{T\delta} = \cos\delta (gd^{-1}\phi_1 - gd^{-1}\phi_2)$$

$$\frac{aW}{T_1} = \cos\phi_1 (gd^{-1}\phi_1 - gd^{-1}\phi_2)$$

$$\frac{AW}{T_1} = \cos\phi_1 (gd^{-1}\phi_1 - gd^{-1}\phi_2) \sec\delta$$

$$\frac{d}{A} = \frac{(\sec\phi_1 \cos\delta - 1) - \sin\delta (gd^{-1}\phi_1 - gd^{-1}\phi_2)}{gd^{-1}\phi_1 - gd^{-1}\phi_2} \dots (15)$$

$$\frac{d_a}{A} = \frac{(\sec\phi_1 \cos\delta - 1) - \sin\delta (gd^{-1}\phi_1 - gd^{-1}\phi_2)}{gd^{-1}\phi_1 - gd^{-1}\phi_2} \cos\delta$$

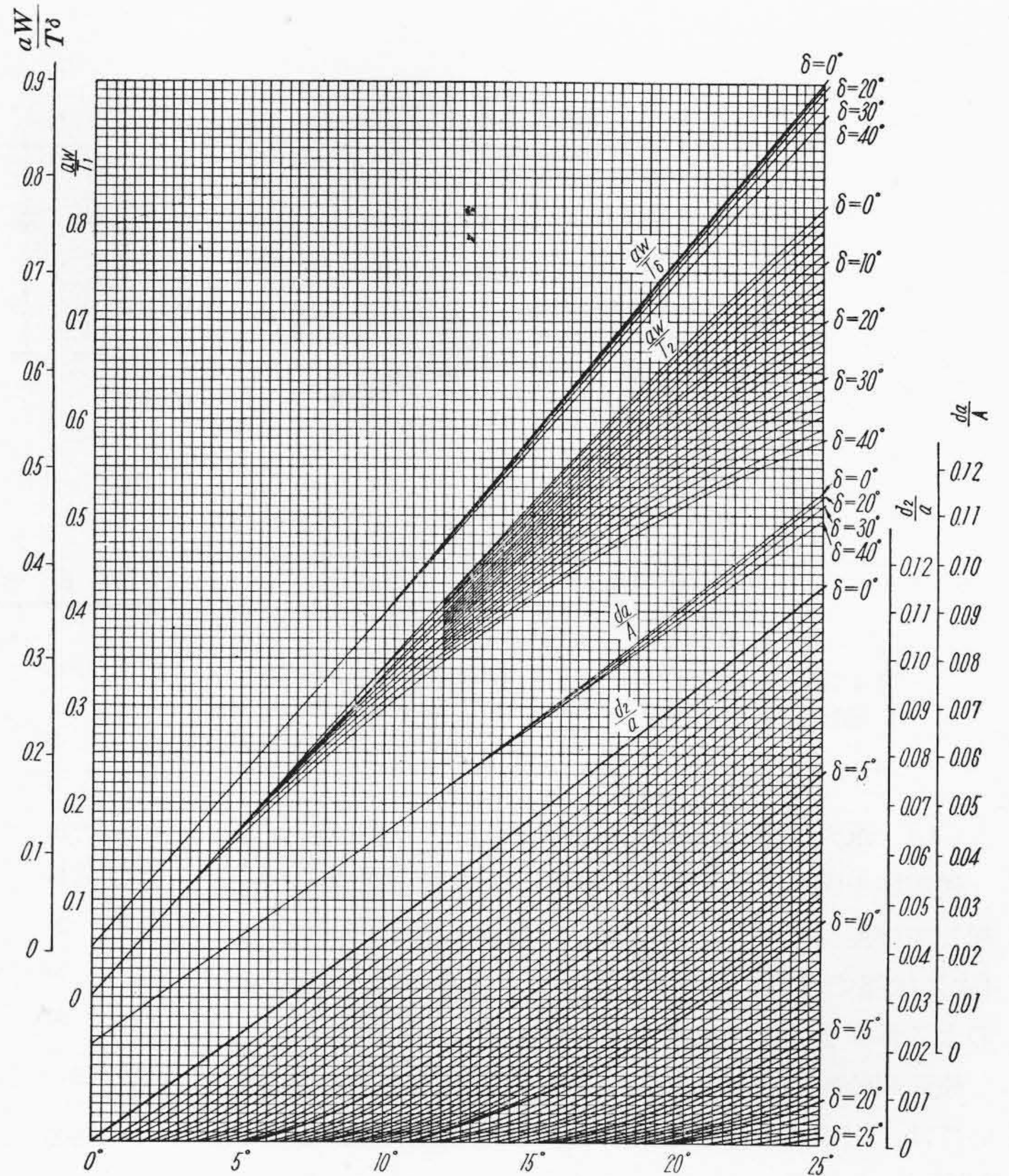
$$\frac{d_2}{a} = \frac{\sec\phi_2 - 1}{gd^{-1}\phi_1 - gd^{-1}\phi_2}$$

$$\frac{a_2}{a} = \frac{-gd^{-1}\phi_2}{gd^{-1}\phi_1 - gd^{-1}\phi_2}$$

$$\tan\delta = \frac{\sec\phi_1 - \sec\phi_2}{gd^{-1}\phi_1 - gd^{-1}\phi_2}$$

(15) 式に示す各計算式は、いずれも弛角 φ₁・φ₂ を変

* 弛角の正負のとり方は、第2図では φ₁ は正、φ₂ は負とする。
 ** 斜張力とは、斜径間Aに平行で、かつ最も離れた点における張力をいう。



第3図 弛度計算図表の一例

数として表わされている。

以上は皆風によつて傾斜した面内において成立つ関係であつて、今風によつて傾斜した面内の水平距離を a、仰角を δ、風の吹かない状態のそれを a₀ および δ₀ とすれば、a および δ と a₀ および δ₀ とはつぎのような関係がある。

$$\sin\delta = \sin\delta_0 \cos\gamma$$

$$a = a_0 \cos\delta \sec\delta_0$$

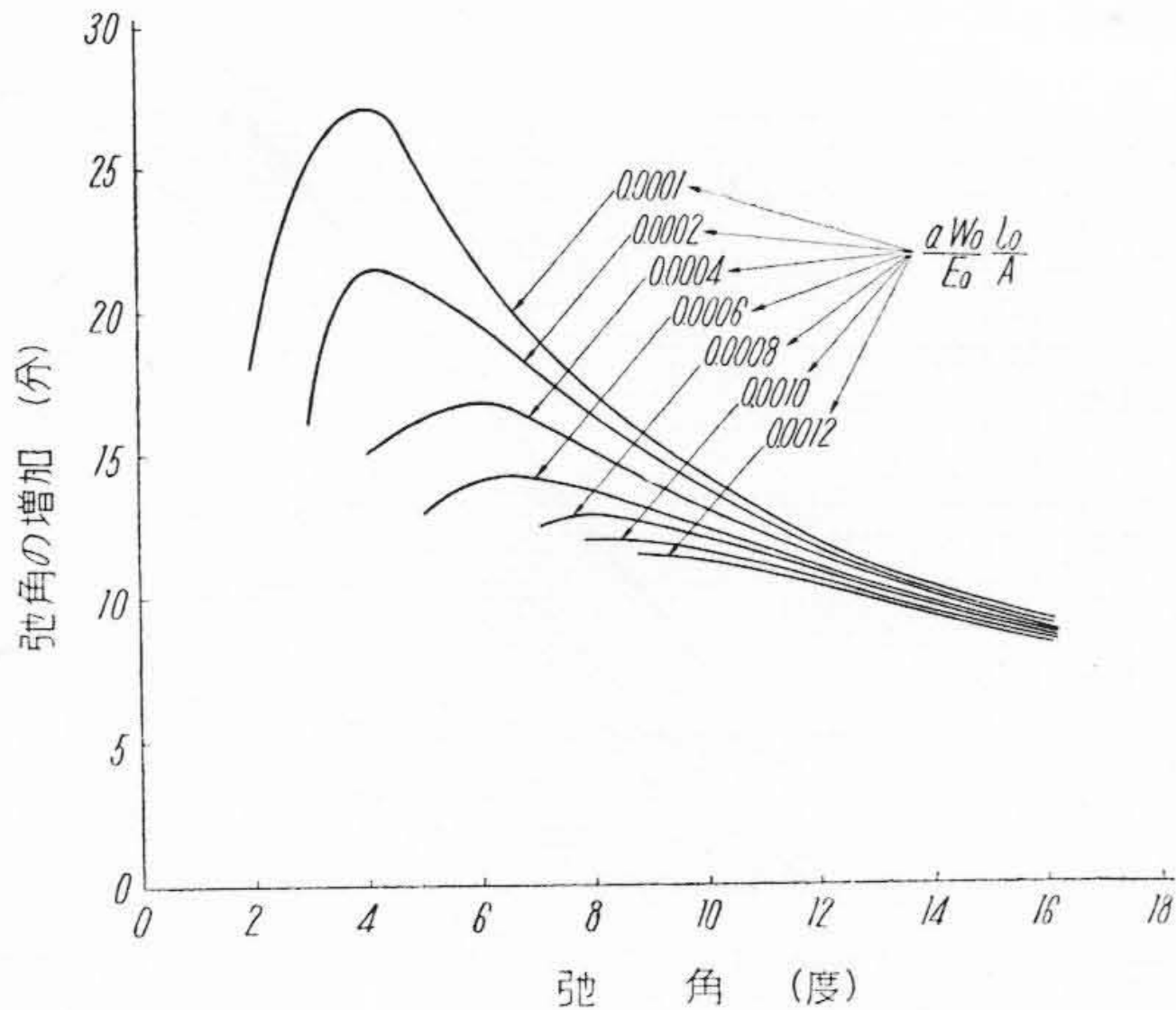
ただし γ は電線の傾斜角を示す。

すなわち既知の A, a, δ, W を用い、φ₁, φ₂ を実測すると、T₀, Tδ, T₁, d₂, a₂ は容易に求められ、d, d_a は少し面倒になるが、上述の既知の数値をもとにして算出することができる。

いまその図表の一例を第3図に示す⁽¹⁾。同図においては φ = (φ₁ - φ₂) / 2 を横軸にとり、δ をパラメータにして、

$$\frac{aW}{T\delta}, \frac{aW}{T_1}, \frac{da}{A}, \frac{d_2}{a}$$

を縦軸にとつている。



第 4 図 永久伸びによる弛角の増加 (610 mm² ACSR, 永久伸び 0.025%)

(3) 永久伸びによる弛角の補正

送電線を架線した後時日が経つと、電線は永久伸びを起して弛度を増す。そこで新しい線の架線に当つては(永久状態で希望する弛度になるようにするには)、電線の永久伸びを考慮に入れて、強めに張る必要がある。

佐久間幹線の 610 mm² ACSR(鋼心アルミ撚線)においては、山本博士の研究結果⁽⁷⁾を用い、永久伸びとして 0.025% を採用している。第 4 図に永久伸びによる弛角の増加を示す。

〔III〕 クリノメータの機構

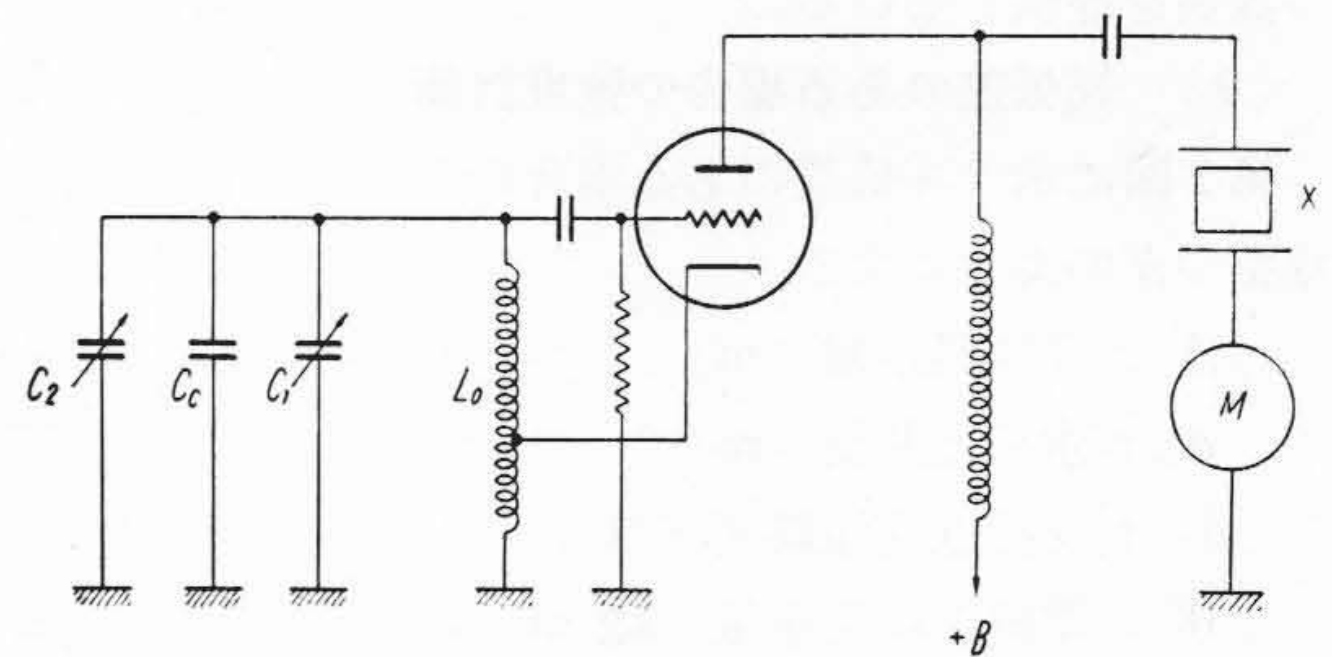
前述の (12) 式および (15) 式よりわかるように、送電線の弛角を実測することによつて、送電線の張力や弛度などの設計諸元を算出することができる。換言すると、弛角を送電線の設計値に合致させると、そのほかの設計条件は確保できる。

その際、弛角の測定に 5 分あるいは 10 分の誤差があると、弛度はどう変化するかを第 1 表に示す。たとえば、610mm² ACSR を径間長 400 m で高低差のない鉄塔の間に架線し、弛角 6 度 40 分(その際の弛度 11.68 m)の角度測定に 10 分の誤差があり弛角 6 度 50 分(その際の弛度 11.97 m となる)になつたとすると、弛度は約 0.3m の誤差となる。

架空送電線の弛度をこの程度の誤差範囲に確保するために、弛角測定用クリノメータとしては少なくとも 10 分の精度が要求されている。

弛角測定用クリノメータとしては、野田博士によつて開発された機械的機構をもつたものもあるが⁽¹⁾、鉄塔上で弛角を直接測定することは実用的に問題が多い。

そこで弛角を地上で遠隔測定することが考えられる。その際角度の伝達機構としては、機械的あるいは電氣的



第 5 図 クリノメータの原理

第 1 表 弛角の測定誤差による弛度および張力の変化

弛角 (φ)	弛度の変化 (d'/d)※		張力の変化 (T/T')※※	
	5'	10'	5'	10'
3°	1,028	1,056	1,028	1,055
5°	1,018	1,033	1,016	1,033
10°	1,008	1,017	1,008	1,016
15°	1,006	1,012	1,005	1.0105
20°	1,004	1,009	1,004	1.008
25°	1,004	1,007	1,003	1.006
30°	1,003	1,006	1,002	1.004

注 ※ $\frac{d'}{d} = \frac{\text{弛角 } \phi + (5' - 10') \text{ のときの弛度}}{\text{弛角 } \phi \text{ のときの弛度}}$
 ※※ 張力の場合も弛度に準ずる

(抵抗, インダクタンス, 静電容量, セルシンモータの応用など) 方法があるが, 検出感度, 変換部の機械的摩擦による誤差などを考えると, 静電容量の変化に変換する方法が最良であると判断される。

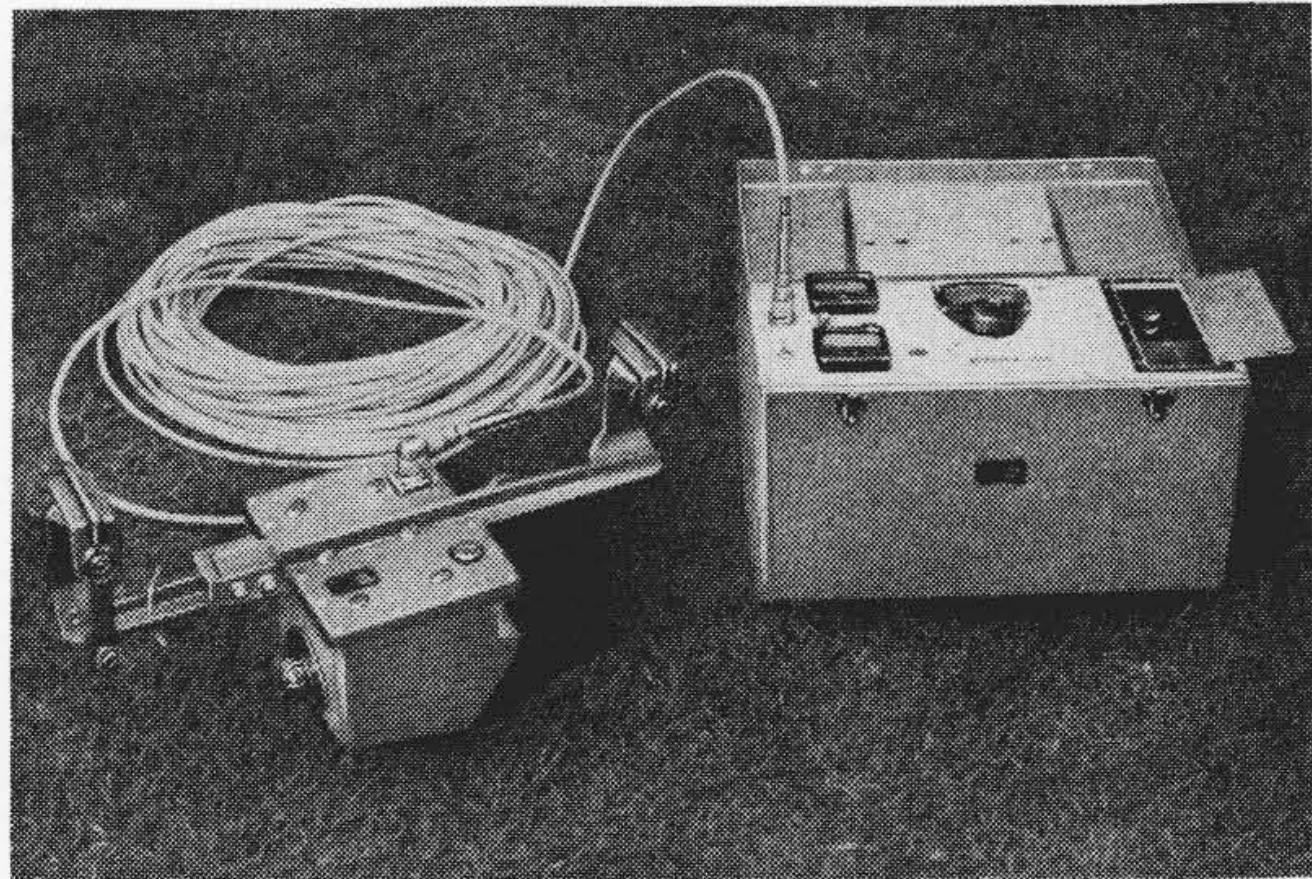
すなわち静電容量の変化を周波数変化とし, その変化を精度のよい検波器で検出すればよい。

著者らの試作したクリノメータは, この考案に基づいて設計したもので, その原理図を第 5 図に示す。同図よりわかるように, このクリノメータは, コイル L, コンデンサ C₁, C₂ および C_c より成る発振回路と, 一定周波数の水晶振動子 X をもつ共振指示計 M より構成され, 発振周波数は常に水晶振動子の共振周波数 f₀ に共振するように, C₁, C₂ および C_c を定めておく。

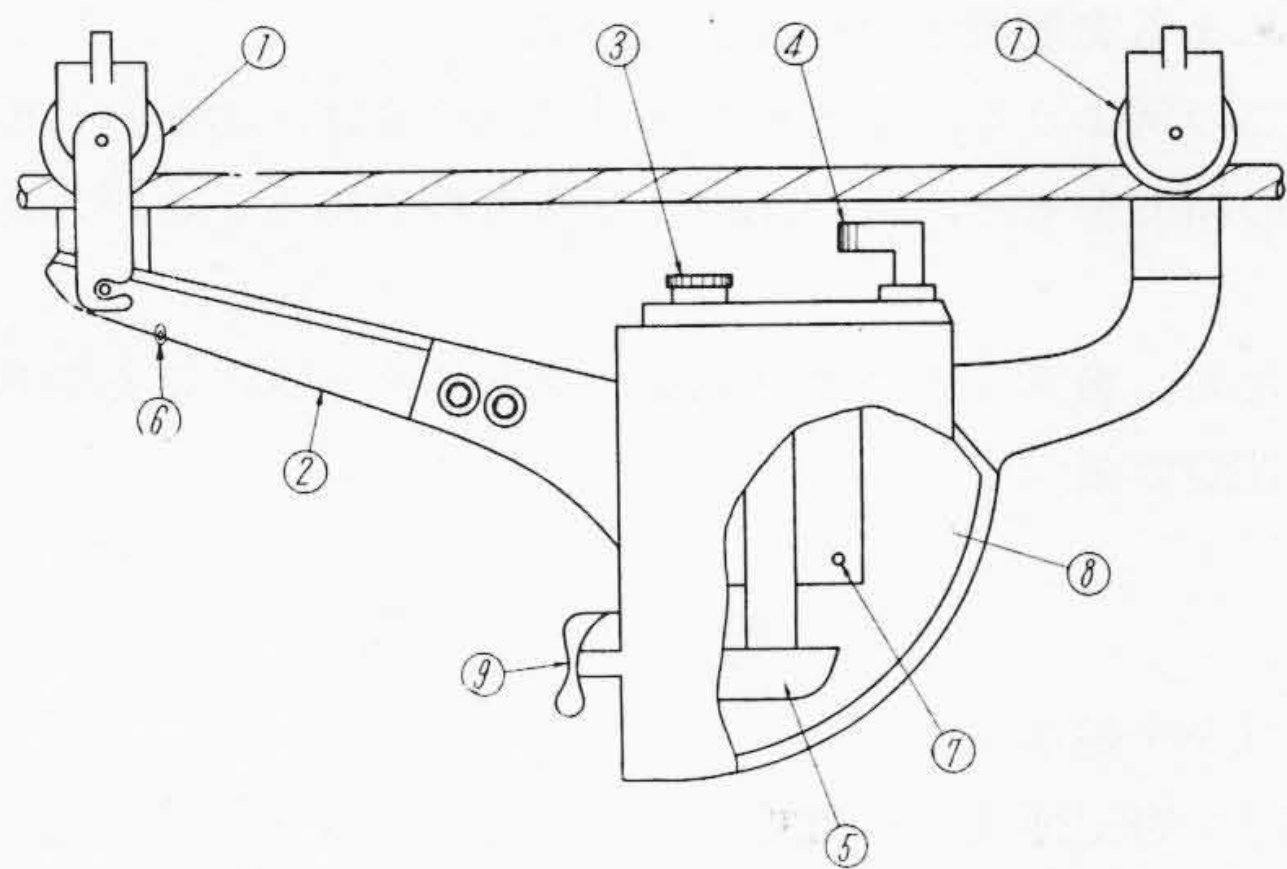
この場合, 当然共振指示計 M の振れは最大になる。共振時のコイルのインダクタンスを L₀, 静電容量を C₀ (C₀ = C₁ + C₂ + C_c, C_c はリード線の容量) とする。いま, C₂ が ΔC₀ の変化をすると, 共振周波数は f' となり, 周波数変化 Δf は

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_0 - f'}{f_0} = 1 - \sqrt{\frac{C_0}{C_0 \pm \Delta C_0}} \dots \dots (16)$$

となる。この周波数変化によつて, 共振指示計の振れは減少する。この変化量の検出感度は共振回路の Q によつて決定される。



第6図 クリノメータの外観



- ① ロール
- ② 本体フレーム
- ③ 油コック
- ④ リード線端子
- ⑤ 錘
- ⑥ ハンガ
- ⑦ 精密可変コンデンサ
- ⑧ 油タンク
- ⑨ 錘り止めクランプ

第7図 発信器の構造

共振器として水晶振動子を使用すると、水晶の Q は一般に10,000以上で、ほかの共振器ではえられない高い値であるので、検出感度は非常によい。

例えば、 $f_0=100\text{ kc}$ 、 $C_0=5,000\text{ pF}$ 、水晶の $Q=10,000$ とすると、 $\Delta C_0=0.5\text{ pF}$ となる。

このように検出感度のよいことは、単に測定精度を向上できるばかりでなく、弛角の静電容量への変換部の容

積を小さくすることができる。

そこで、 0.5 pF の静電容量を弛角で5分とし、コンデンサの静電容量を有線変化と考えると、1度の弛角は 6 pF となり、 $0\sim 30$ 度の弛角の測定には、コンデンサの変化量としては、 180 pF のものであればよいことになる。なおもし検出感度が悪くなると、測定精度を満足させるためには、容量変化の大きい大型の可変コンデンサが必要となる。

〔IV〕 クリノメータの構造

弛度測定用クリノメータは、第6図に示すように、発信器部、受信器部およびリード線より構成されている。

発信器部は、送電線の弛角を静電容量に変換する装置で、その構造を第7図に示す。

発信器本体は、送電線上を自由に移動できるように、球軸受付ローラをその両端に取付けてある。

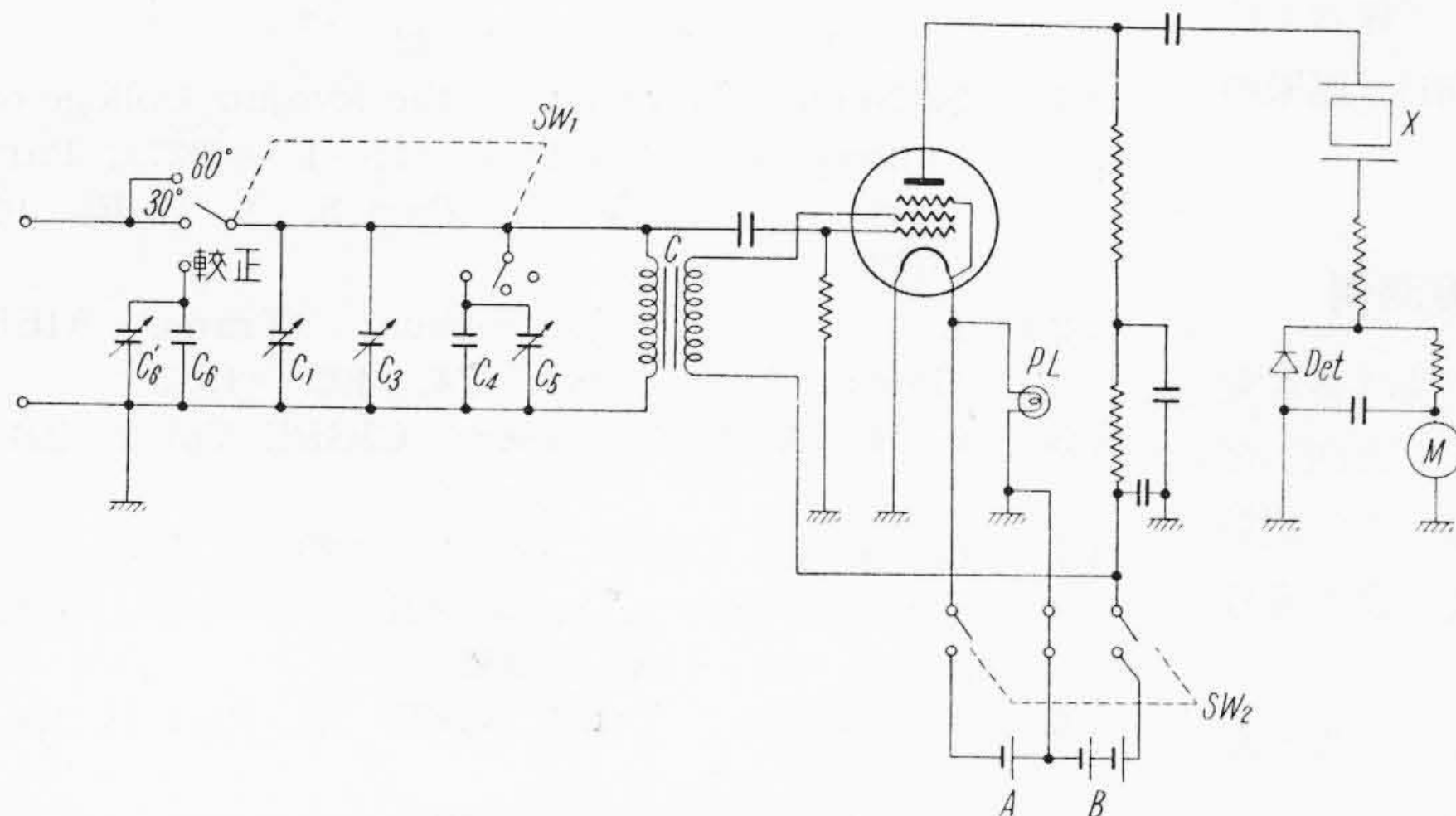
油タンク内にある精密可変コンデンサは、第5図の C_2 に相当し、回転軸に直結された錘りによつて、本体の傾斜に従い、自由にその容量を変化する。回転軸の摩擦力は極力小さくしてあるが、錘りの荷重はこの摩擦力に打勝つように選定してあり、回転軸の摩擦による誤差の発生を極力防いでいる。

油タンク内の油は、錘りの制動のためのものであるが、これはさらにコンデンサの回転軸の潤滑油の作用も果している。

受信器部は、計測部分に当り、発信回路および共振回路よりなる。第8図に回路図を示す。

発信器部と受信器部は同軸コード50mで接続する。

発信回路は、発信器部の精密可変コンデンサの静電容量(C_2)、同軸コードの静電容量(C_c)、受信器部の C_1 、



第8図 受信器回路



第9図 クリノメータの運搬



第 10 図 クリノメータによる弛角の測定

C_3 の静電容量とコイルのインダクタンス L によつてきまる周波数で発振する。この周波数としては、水晶の共振周波数 100 kc のものを選んだ。

発振器部の弛角による精密可変コンデンサの容量変化 ΔC_2 は、受信器部のコンデンサ C_1 の容量変化 ΔC_1 として伝達されるから、 ΔC_1 を弛角に目盛つて直読（角度目盛間隔、10分）できるようにしてある。

第 8 図のコンデンサ C_6 および C'_6 は、発振器部の弛角 0 度の場合の静電容量と同軸コードの静電容量の和に等しい値をもつコンデンサで、受信器部は C_1 , C_2 に変化を与えない場合でも、時間の経過によつて、発振周波数にわずかの偏移がある。そこで適時スイッチを校正に切り換えて、周波数の調整を C_3 によつて行い、 C_1 の角度目盛の 0 度の点検に使用する。

弛角の測定範囲は、0~30 度と 30~60 度の 2 段切り換えとし、目盛間隔を拡大してある。

なお、このクリノメータは、第 9 図に示すように、クリノメータ本体（発振器部、8.5 kg）とリード線および計測部分（受信器部、11 kg）とに分けて格納し、運搬の便を図つてある。

〔V〕 クリノメータによる弛角の実測例

前述の (12) および (15) 式で紹介した弛度計算式を用いて算出した弛角と、クリノメータを用いて実測した結果との比較を、電源開発会社佐久間東幹線（佐久間発電所—西東京変電所間）第一工区第 10 号鉄塔（鉄塔番号 421 号）の両側に例をとつて述べる。

この鉄塔は東京側が高低差のない場合、佐久間側が高低差のある場合に相当する。

第 2 表に上記鉄塔における弛角の計算値とクリノメー

第 2 表 弛角の計算値とクリノメータによる実測値との比較（佐久間東幹線の例）

測定線	東京側 (西東京変電所側)		佐久間側 (佐久間発電所側)	
	計算値	実測値	計算値	実測値
グランド線	3° 26' (5°C)	3° 26'	9° 3' (5°C)	9° 5'
1 番線	4° 54' (5°C)	5° 3'	10° 54' (5°C)	10° 52'
2 番線		4° 58'	11° 3' (15°C)	10° 58'
3 番線		5° 5'		11° 0'
備考	高低差のない場合 径間長 332m		高低差のある場合 径間長 409m 高低差 31m	

注：実測時の気温 5~10°C（推定）

タによる実測値との比較例を示す。

この例よりも、本論文のクリノメータは、おおむね所期の精度をもち、実用に供しうるものであることがわかる。

なお、参考までに第 10 図にクリノメータによる弛角の測定要領を示す。

〔VI〕 結 言

以上を総括すると、

- (1) 野田博士らの弛度計算式を用い、既知の設計条件を入れると、数表および図表の活用によつて、設計上の弛角は容易に計算することができる。
- (2) 著者らの完成した静電容量式クリノメータを用いると、弛角の測定が地上でできる利便がある上、可搬式であること、測定精度も ± 10 分という希望値をおおむね満して実用できることなどがわかつた。
- (3) 今後の送電線建設に当つて、このクリノメータを活用すると、架線が天候に支配されることなく、架線能率を向上させることができることがわかつた。

本論文を完成するに当たり、クリノメータの実用に御協力戴いた電源開発会社江口課長代理、クリノメータの試作、研究に当られた日立電線株式会社電線工場の堀口、瀬成田の諸氏に深謝して筆をおく。

参 考 文 献

- (1) S. Noda: Memoirs of the Ryojun College of Engineering, Part 1 1 (1) 1 (1927), Part 7, 5 (1) 1 (1932), Part 8, 5 (2-B) 92 (1932)
- (2) J. Lummis, H. D. Fisher: Trans. AIEE (Power Appa. Syst) 74, 402 (1955)
- (3) C. Hurel, O. Schneider: CIGRE Vol. 2 (201) (1954)
- (4) G. Silva: CIGRE Vol. 2 (223) (1954)
- (5) C. A. Jordan: Trans AIEE (Power Appa. Syst) 71, 1108 (1952)
- (6) M. Landan: Trans AIEE 70, Part II, 1564 (1951)
- (7) 山本, 岡, 福田: 日立評論 37, 662, 第 2 表 (昭 30-4)