

# Sletheiの風の入力エネルギー 計算式と当社測定値の検討

神 成 久 夫<sup>◎</sup>

## 1. 緒 言

送電線の振動を取扱う場合に問題となる風の入力エネルギーについてはBate, Farquharson & McHugh, Slethei, Diana 等の検討結果が発表されている。

本文では我国で広く採用されている Farquharson & McHugh の式及び Slethei の式を紹介し、その相違点を述べ実測値との対比を行っており、最終的には CIGRE から Study Committee No. 22 の Working Group 01 からの報告として提出された論文による Slethei の式が最も妥当と思われる値を提供するものであることを述べている。

## 2. エネルギーのバランス

送電線に風が当たると所謂カルマンの渦を生じ、その為に振動が発生する。この振動は当然のことながら電線に繰返し曲げ歪を生じさせ、遂には素線の断線と言う好ましからざる事故を起すことがある。従って振動による歪がどの程度になるであろうかと言うことは、送電線の技術者にとって一大感心事である。

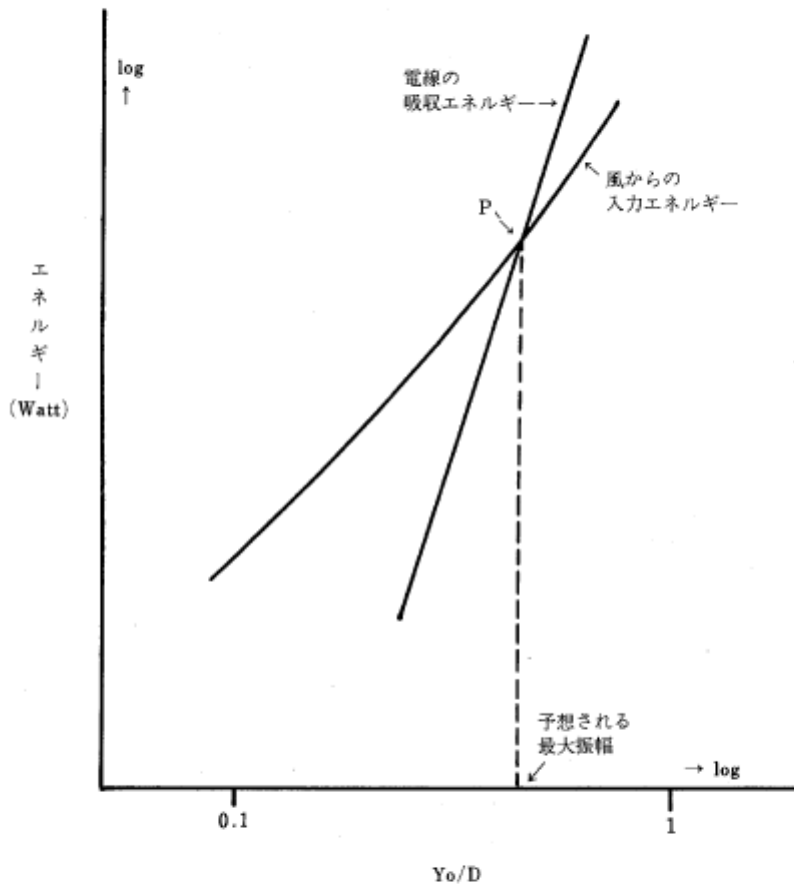
このような歪の値は、電線の特徴から予見されることが望ましい、即ち、架線時の振動振幅が知れば、この目的を達することが出来る。

振動振幅を知るには所謂エネルギーバランス法に依る。即ち、風からの入力エネルギーと電線の吸収エネルギーとのバランス点からこれを求めるのである。これを第1図に示し、交点Pが予想される最大振幅である。風からの入力エネルギーとしては従来 Farquharson & McHugh の式(\*1)が使用されて来たが、この式は振幅比 $Y_0/D$  (振幅 $Y_0$ を電線外径 $D$ で割った値)が0.36以下についての値を示しているのみで、実用上はこれを大きく延長して使用する必要があるのみならず、実際面でも得られた結果は過少であり Farquharson & McHugh が与えた値の2倍位の入

---

◎ かなり ひさお 研究部

力エネルギーがあると言う説(\*2)もあるが、特に風速の小さい範囲で更に大きな入力エネルギーを与えるとと言う立場の著者(\*3)も居る。Slethei がそれである。CIGRE の WG01 では、これを取上げて22-11に発表している。(\*4)



第1図 予想される最大振幅の決定

### 3. Sletheiの風の入力エネルギー

電線を円筒形と見做せば、其れに働く揚力は

$$F_L = C_L^* \cdot \frac{1}{2} \rho U^2 D q \quad (1)$$

$C_L^*$  : 動的な揚力係数

$\rho$  : 空気密度

$U$  : 風速

$D$  : 円筒の直径

$q = 1 + 0.77 \eta$

$\eta = Y_0/D$

$Y_0$  : 全振幅

従って、風の入力エネルギーは

$$P_w = f^3 D^4 \text{Function}(\eta) \quad (2)$$

$P_w$  : 単位長当りの入力エネルギー

であるとしているのが Bate, Farquharson & McHugh である。

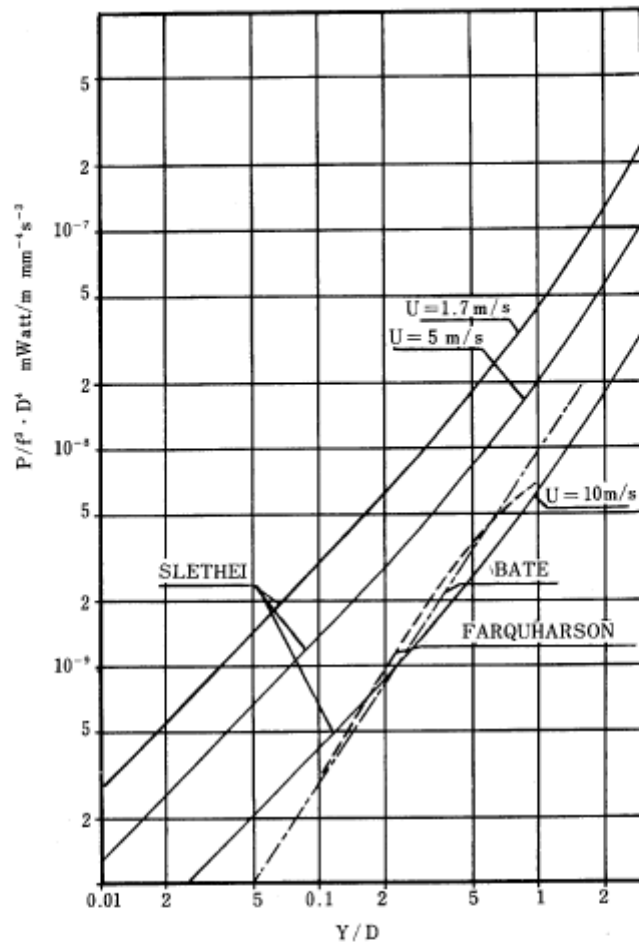
これに対して、Slethei は

$$P_w = f^3 D^4 \text{Function}(\eta) \cdot \text{Function}(U) \quad (3)$$

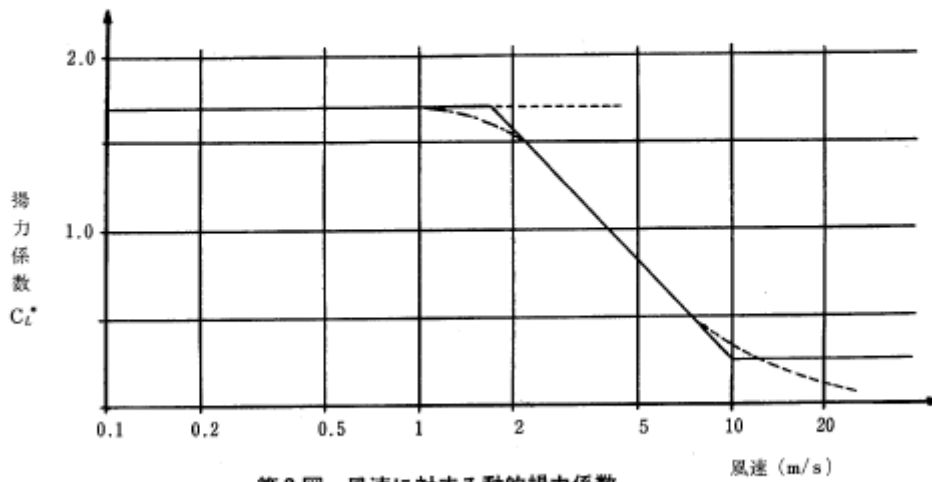
としている。即ち、Bate 等は  $C_L^*$  を一定と見なし、Slethei は  $C_L^*$  が風の乱れ、換言すれば其の時の風速に左右されるとしている。 $C_L^*$  は「動的な揚力係数」即ち電線が振動している時の共振状態での値を取るべきで、風速に支配されるのは当然のこと柄である。

なお、風の乱れによって風の入力エネルギー、又は微風振動の振幅が異なることは常に経験されることであり、風の乱れの強さは、風速に支配されることは Davenport (\*5) が指摘している処である。

第2図はこれ等の結果を示す。風速の低い範囲で Slethei の値が大きく離れていることに注目願いたい。第3図に風速  $U$  と動的な揚力係数  $C_L^*$  の関係を示す。



第2図 風からの入力エネルギー



第3図 風速に対する動的揚力係数

#### 4. Slethei の式の導入

長さ  $\Delta X$  当りの入力  $\Delta P_w$  は

$$\Delta P_w = \frac{1}{2} F(X) \cdot V(X) \cos \varphi \Delta X \quad (4)$$

$$F(X) = C_l^* q \cdot \frac{1}{2} \rho U^2 D$$

$$Y(X) = Y_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} X$$

$$V(X) = \omega \cdot \frac{Y_0}{2} \cdot \sin \frac{2\pi}{\lambda} X$$

$\varphi$  : 揚力  $F$  と速度  $V$  との位相差 (共振時は  $\cos \varphi = 1$ )

従って

$$\Delta P_w = \frac{1}{2} C_l^* q \cdot \frac{1}{2} \rho U^2 D \cdot \omega \frac{Y_0}{2} \sin \frac{2\pi}{\lambda} X \Delta X$$

$$q = 1 + 0.77 \left( \frac{Y_0}{D} \right) \sin \frac{2\pi}{\lambda} X$$

故に単位長当りの風の入力エネルギー  $P_w$  は

$$P_w = \frac{2}{\lambda} \int_0^{\lambda} dp \quad (5)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho}{K^2} \cdot C_l^* \cdot f^3 \cdot D^4 \left[ \frac{Y_0}{D} + 0.6 \left( \frac{Y_0}{D} \right)^2 \right]$$

$$= 1.62 \times 10^{-11} \cdot C_l^* \cdot f^3 \cdot D^4 (\eta + 0.6\eta^2) \quad \text{Watt/m} \quad (6)$$

但し

$$f = K \frac{U}{D} \quad (K \text{ はストローハル数: } 0.185)$$

の関係を使用している。これが Slethei が与えた風の入力エネルギーであり計算結果は第 2 図となる。

## 5. Farquharson & McHugh の式 (\*1)

Farquharson と McHugh の両氏は 6 種類のモデルを使用し、風洞実験より次のような実験式を求めている。この式では風速 U に関係しない。

$$P_w = d^4 f^3 \text{Function}(\eta)$$

$$\frac{P_w}{d^4 f^3} \times 10^8 = 2216 \left( \frac{\eta_P}{d} \right)^2 - 13106 \left( \frac{\eta_P}{d} \right)^3 + 36292 \left( \frac{\eta_P}{d} \right)^4 \frac{\text{Watt/ft}}{\text{in}^4 \cdot \text{s}^3} \quad (7)$$

$$0 < \frac{\eta_P}{d} < 0.18$$

$\eta_P$  : 片振幅 inch

d : 電線外径 inch

(7)式を MKS 系に直すと

$$P_w = 7.88 \times 10^{-14} \cdot d^4 f^3 \left\{ 554 \left( \frac{Y_0}{d} \right)^2 - 1638 \left( \frac{Y_0}{d} \right)^3 + 2268 \left( \frac{Y_0}{d} \right)^4 \right\} \text{Watt/m} \quad (8)$$

$Y_0$  : 全振幅

(8)式を計算した値を第 2 図に示す。

## 6. 電線の吸収エネルギー

電線の吸収エネルギー E は、試験スパンでの実測に依るものを採用するのであるが、一般的には次のような式で表示される。

$$E = \frac{\pi}{2} H \lambda^{-n} \left( \frac{Y_0}{2} \right)^m \quad (*4) \quad (9)$$

E : 単位長当り、1 サイクルの吸収エネルギー

$Y_0$  : 全振幅

H : 張力によって変わる係数

$\lambda$  : 波長

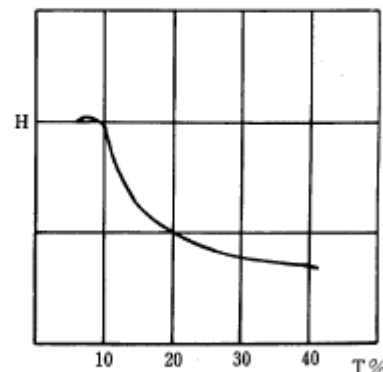
n, m の値は経験的に 3~3.5 および 2~2.5 位である。

この値は撚線構成によって変わる。

第 4 図に張力 T と H との関係を示す。

なお、n, m の値は多くの測定者に従えば

次の通りである。(\*5)



第 4 図 張力による H の値

第1表 各変数に対するSelf-damping への影響(\*6)

変数	Claren (total)	Lampio (total)	Seppa (total)	Seppa (free span)
張力	$T^{-1} \dots 0$	$T^{-2}$	$T^{-1} \dots 0$	$T^{-1.5} \dots -1$
振幅	$A^2$	$A^3$	$A^3 \dots 2$	$A^3 \dots \dots 2$
振動数	$f^2$	$f^{2.5}$	$f^3 \dots 3$	$f^3$
径間長	45m	45m 180m	36m	36m

又、張力に関しては吸収エネルギーが張力の1~1.5~2乗に比例する(第1表)としている著者もある。

## 7. 電線の素線に生ずる歪(\*4)

スパン中の最大歪を  $\epsilon_v$  および固定端の歪を  $\epsilon_1$  とすれば

$$\pm \epsilon_v = K_1 \cdot 2 \pi^2 \frac{Y_0}{2} \lambda^{-2} D \quad (10)$$

$$\pm \epsilon_1 = K_2 \cdot 3.27 \sqrt{\frac{T}{EI}} \cdot \frac{Y_0}{2} \cdot \lambda^{-1} D \quad (11)$$

$$\left. \begin{array}{l} K_1 \leq 1 \\ K_2 \leq 1 \end{array} \right\} \text{素線間のすべり係数}$$

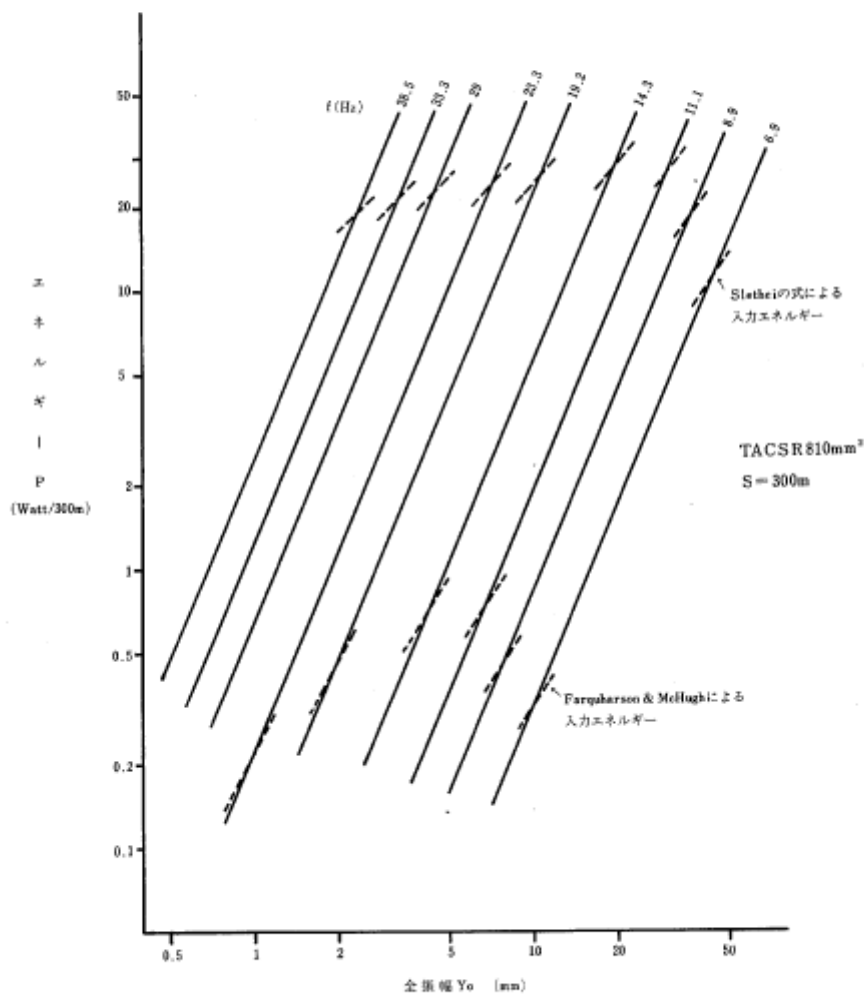
$K_1$ は張力、電線の構造、直径等によって変わるが、外層では $K_1 \cong 0.5 \sim 0.7$ 、大口径の鋼線では $K_1 = 1$ である。 $K_2$ は端末ではクランプの圧力により影響されるが、導体に適合したクランプでは $K_2 \cong 0.7$ 程度である。

## 8. 当社に於ける実験結果

### 8-1 風からの入力エネルギーと電線の吸収エネルギー

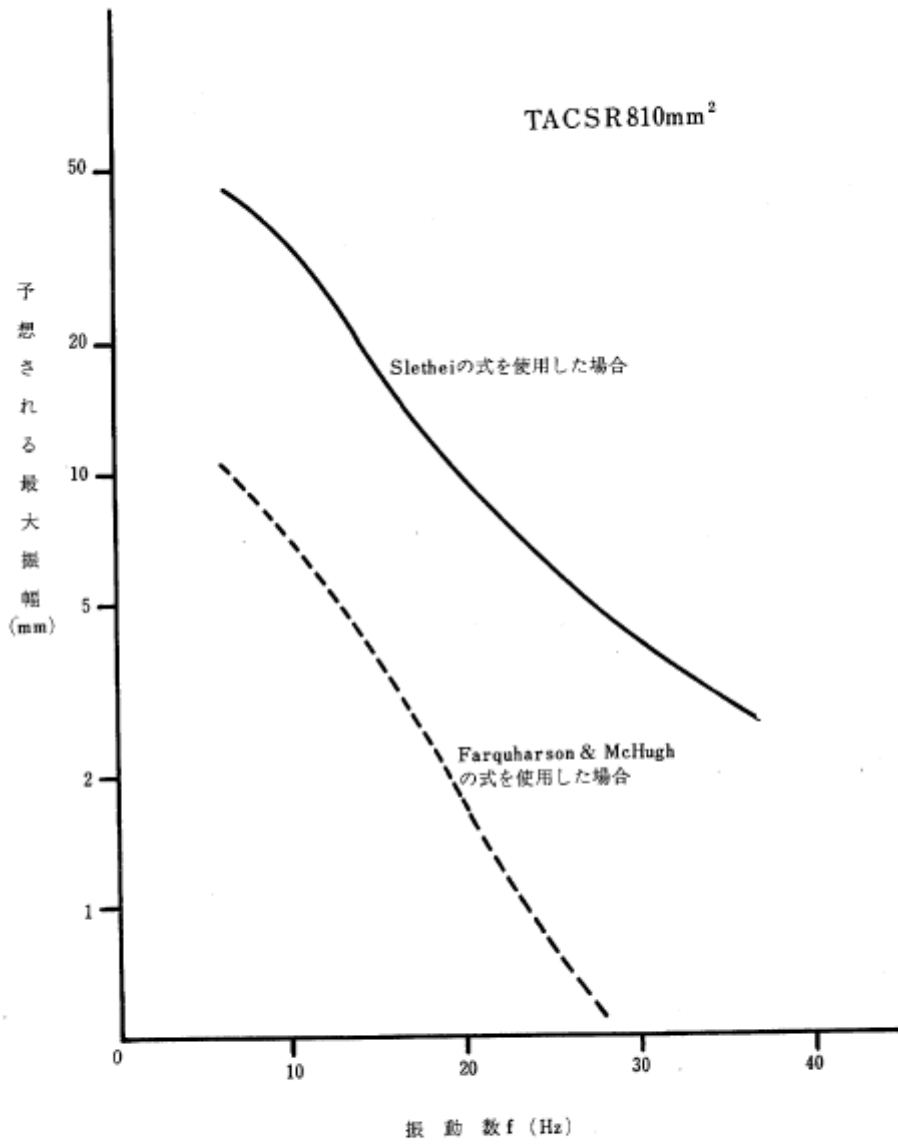
当社の試験設備105m径間に電線を架線し、中央加振により電線の吸収エネルギーを測定している。1例として第5図にTACSR810mm<sup>2</sup>の吸収エネルギーを示す。この第5図からn, mを逆算するとそれぞれ3.7, 2.38となっており、6の項で述べた値を参考にすれば、第5図の測定結果は大過ないものと言えよう。また電線の吸収エネルギー測定値と風からの入力エネルギー値と

の交点は振動振幅が第1図からもわかるように安定な点であるから、これより予想最大振幅が求められる。第5図の点線は風からの入力エネルギー計算式として Slethei の(6)式を用いた場合と Farquharson & McHugh の(8)式を用いた場合について示している。この第5図の交点のみを取出したのが第6図であり、これが各振動数に於ける予想最大振幅である。一般に各振動数での予想される振幅の最大値は電線外径D程は発生すると言われていることから見れば、Slethei の式による値は大体妥当な値を示していると思われる。しかし Farquharson & McHugh の式によると予想振幅は極端に小さくなり、Farquharson & McHugh の式を使用するときは同式に何らかの修正が必要であろう。



第5図 電線の吸収エネルギー

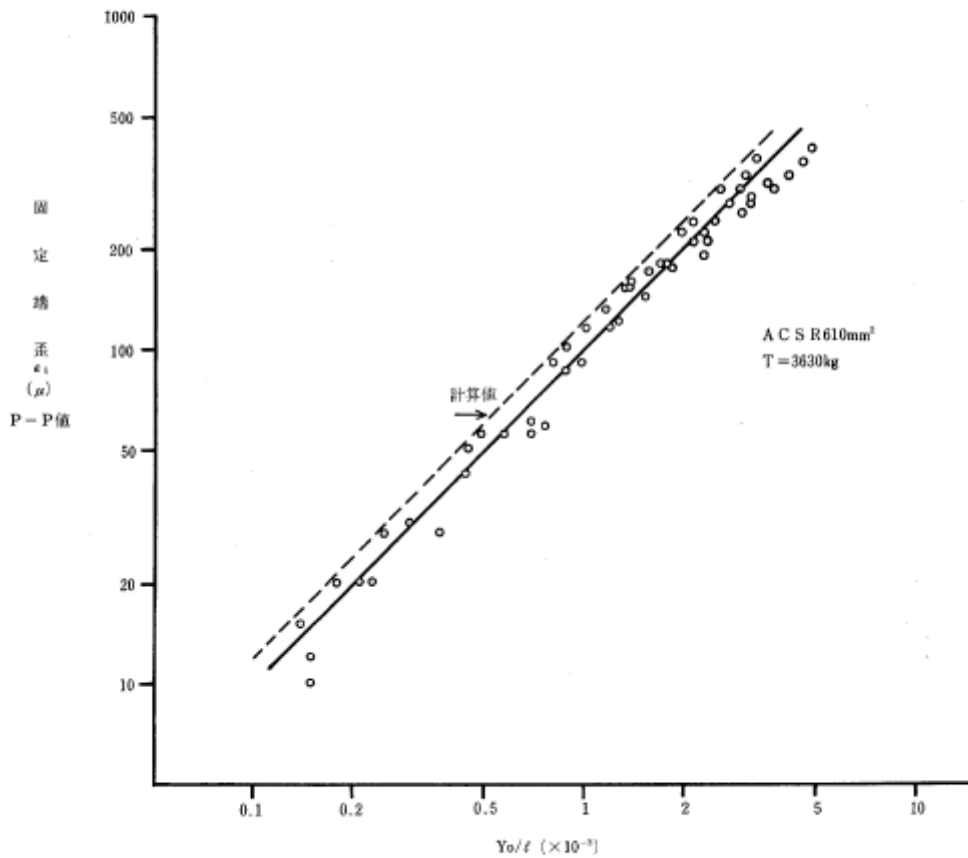




第6図 予想される最大振幅

## 8-2 固定端を生ずる曲げ歪 $\epsilon_1$

端末の電線素線にストレインゲージを貼り、振動数とループ最大振幅 $Y_0$ とより最大曲げ歪 $\epsilon_1$ を我々は次のような方法で整理している。張力 $T$ で架線されている振動の波の速さ、すなわち伝播速度 $C(=\sqrt{T \cdot g/w})$ よりループ長 $l(=C/2f)$ が算出される。また、ループの最大振幅 $Y_0$ は加速度計により測定できるから、第7図のように横軸に $Y_0/l$ 、縦軸に端末曲げ歪で表わすと対数目盛で大体直線(45°)となる。これは振幅 $Y_0$ と曲げ歪 $\epsilon_1$ は測定範囲内は比例関係にあることを意味している。図中実線は実験結果、点線は(1)式による計算値である。これより端末の曲げ歪の許容値を決めることにより、許容振幅が算出できる。第7図によると実験値と計算値では大きな差はなく、(1)式による計算値でも大過ないと思われる。



第7図 固定端の歪の実験値

## 9. 結 語

送電線の微風振動を電線種類、張力、地形、その他あらゆる条件を加味して机上計算し、予想できるようこの関係の技術者達は日夜努力されている。近年この予測を本報告で示したようにエネルギーバランス法が提案され、ある程度の目安が得られるようになってきている。しかし同法の風からの入力エネルギー計算式が発表者によって異なり、どの計算式が現状に合うか今のところ明確ではない。又、電線の吸収エネルギー測定値に於いても測定設備及び方法によって異なり、現のエネルギーバランス法は風からの入力エネルギー計算式及び電線の吸収エネルギー測定値とも不確定要素を含んでおり、今後の研究課題の一つと言えるであろう。

当社では、社内試験線による電線の吸収エネルギー測定値と風からの入力エネルギー計算式として Slethei の式を用いて微風振動を予測すると、今まで長年に亘り現場実測を行なって来た値と略一致するため Slethei の式を採用している。

### 【参考文献】

- (\*) F·B·Farquharson, R·E·McHugh「Wind Tunnel Investigation of Conductor Vibration with Use of Rigid Models」  
(AIEE Trans. Vol. 75 III (1956) PP.871~878)
- (\*\*) G·Diana, M·Falzo 「On Forces Transmitted to a Vibrating Cylinder by a Blowing Fluid」  
(MECCANICA No.1 (Vol. VI), 1971.)
- (\*\*\*) T·O·Slethei 「Wind Energy - Calculation of Aeolian Vibration Amplitudes」  
(CIGRE CSC 6 -68-WGI)
- (\*\*\*\*) CIGRE Study Committee WG01 「Aeolian Vibration on Overhead Lines」  
(CIGRE 1970. 22-11)
- (\*\*\*\*\*) A·G·Davenport 「The Relationship of Wind Structure to Wind Loading」  
(「Wind Effects on Buildings and Structures」Vol.I Symp.16 1963.)
- (\*\*\*\*\*) T·O·Seppa 「Self-Damping Measurements and Energy Balance of ACSR "DRAKE"」  
(IEEE71.CP161-PWR1971.)