

送電線のギャロッピングとその防止装置

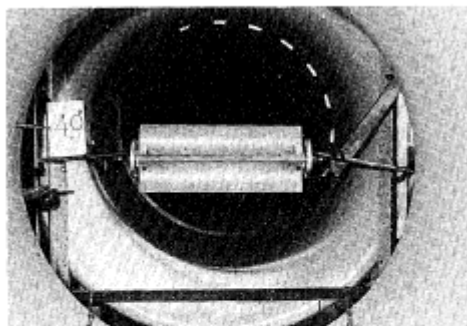
神成久夫・沢田光弘[◎]

1. ま え が き

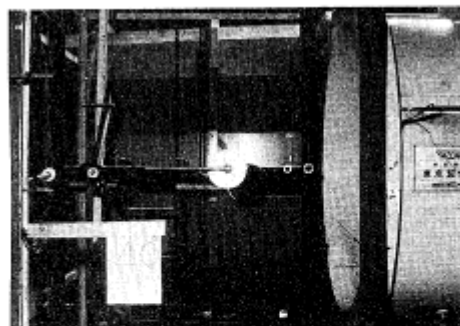
送電線のギャロッピング現象は、氷の付着した電線に強風が作用した時に生じる低振動数、大振幅の振動として、古くから知られ且つ研究されてきた。類似した現象に橋梁のギャロッピング、飛行翼のフラッターリング等がある。しかしいまだにその防止方法についての確実な解決法は見い出されていない。

Den Hartog^{*)}は、この現象を着氷雪によって断面形状の変形した電線に、一定水平方向の強風と電線の上下振動の際に生じる垂直風との合成風圧力が、振動的に働くとして定性的な説明を与えた。

この報告はDen Hartogによるギャロッピング現象の基礎的な説明に基き、ギャロッピングの生じ易い断面形状として良く知られているD断面、及びギャロッピング抑止効果を有していると思われる断面形状(第4図)について、静的な風洞実験を行って攻撃角に対する揚力、抗力を求め電子計算機を用いて各断面におよぼす風の仕事を計算した。計算した仕事の量から、D断面ギャロッピングの機構および空気力学的ダンパーの効果を検討した。



(正面)



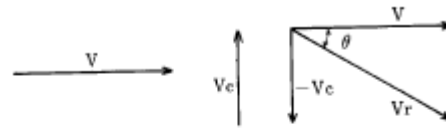
(側面)

風洞実験装置×断面取付状況

◎ かなり ひさお 旭電機㈱ 研究部
さわだ みつひろ 旭電機㈱ 研究部

2. ギャロッピング現象

Den Hartogはギャロッピング現象を次の様に説明した。第1図の様に電線が上方に速度 V_c で運動しているとすれば、電線は速度 V_c 、水平方向から速度 V の風を受ける。即ち、



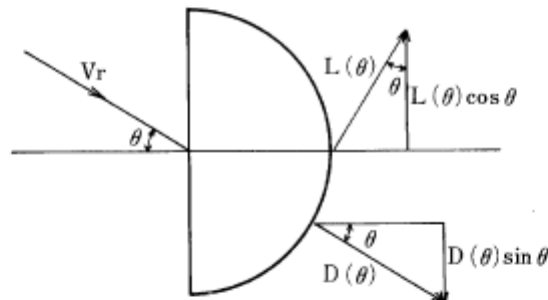
第1図 相対風速の説明図

$$\text{相対速度 } V_r = \sqrt{V^2 + V_c^2} \quad (1)$$

$$\text{攻撃角 } \theta = \tan^{-1} V_c/V \quad (2)$$

と等価的な風を受ける事になる。この様に一定水平風速状態にもかかわらず、電線の運動によって大きさ、方向の異った風が電線に作用する事になり、その風圧力は逐次変化する。

電線着氷等により断面形状を変え、風圧力が振動を助長する方向に加わる場合が考えられる。このような断面形状の一つにD断面が良く知られている。第2図のD断面に速度 V_r 、攻撃角 θ の風が当たった場合を想定する。D断面は風向と水平に $D(\theta)V_r^2$ 、風向と垂直に $L(\theta)V_r^2$ の力を受ける。これらの $D(\theta)$ 、 $L(\theta)$ をそれぞれ抗力係数、揚力係数と定義する。



第2図 D断面の実効揚力の説明図

このD断面が鉛直方向のみに運動していると仮定すると、D断面に加わる力のうち鉛直成分だけが運動に寄与するものと考えられる。これを実効揚力 F とすれば次式で与えられる。

$$F = \{L(\theta)\cos\theta - D(\theta)\sin\theta\} V_r^2 \quad (3)$$

$$\text{ただし } \cos\theta = V/V_r \quad (4)$$

$$\sin\theta = V_c/V_r \quad (5)$$

簡単にするため電線の一部を考えて、電線の静止位置を原点、垂直変位を y として一自由度の振動方程式⁽²⁾で書き表わすと、

$$m\ddot{y} + \lambda\dot{y} + ky = F \quad (6)$$

ただし m : 単位長当りの質量
 λ : 減衰係数
 k : 等価ばね係数
 F : 外力

(6)式に(3)式を代入して書き直すと、

$$\ddot{y} + \frac{1}{m} \left[\lambda - \left\{ \frac{L(\theta)V}{\dot{y}} - D(\theta) \right\} \sqrt{V^2 + \dot{y}^2} \right] \dot{y} + \frac{k}{m} y = 0 \quad (7)$$

上式が時間 t を陽に含まない事から、ギャロッピングがオートノームな系であることがわかる。又この系が増大的振動するためには(2)式の振動方程式の2根が正の実部を有する共役複素数でなければならない。即ち次の2つの条件を満足しなければならない。

$$\lambda - \left\{ \frac{L(\theta)V}{\dot{y}} - D(\theta) \right\} \sqrt{V^2 + \dot{y}^2} < 0 \quad (8)$$

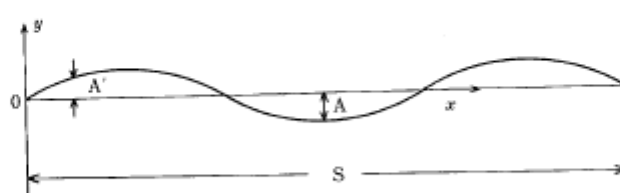
$$\left[\lambda - \left\{ \frac{L(\theta)V}{\dot{y}} - D(\theta) \right\} \sqrt{V^2 + \dot{y}^2} \right]^2 - 4 km < 0 \quad (9)$$

減衰係数 λ が他の項に比して小さいものとすれば、(8)式、(9)式から

$$D(\theta) \frac{\dot{y}}{V} < L(\theta) < \frac{\dot{y}}{V} (D(\theta) + 2 \sqrt{\frac{km}{V^2 + \dot{y}^2}}) \quad (10)$$

となる。上式から系が増大的状態になるためには、 $\dot{y}/V = \tan \theta$ であるから、 $L(\theta)$ が $D(\theta) \cdot \tan \theta$ より大きくなければならない。この条件は θ が小さい範囲では、Den Hartogの導いた条件 $dL(\theta)/d\theta > D(\theta)$ と一致する。又系が振動的状態であるためには、 $L(\theta)$ が(10)式の右辺を越えてはならない。

ギャロッピング生起の条件はこの様に(10)式で与えられるが、解を求める事は困難なので、ここでは解を仮定して系に与えた時、系に作用する外力のなす仕事を計算して、近似的にギャロッピングの評価を行う。仕事の計算は系が完全に保存的であるものとして取扱う。即ち、減衰成分を含まず、完全に固有振動数で正弦運動していると仮定して、単に風のなす仕事を計算したものである。



第3図 送電線の座標軸

第3図の様に電線的一端を原点とし、座標を水平方向に x 、垂直方向に y を取る。径間中のある

点が振幅 A' 、角振動数 ω で正弦運動しているとすれば

$$y = A' \sin \omega t \quad (11)$$

$$\dot{y} = Vc = A' \omega \cos \omega t \quad (12)$$

(12)式を(3)式に代入すると

$$F = \{L(\theta)V - D(\theta)A' \omega \cos \omega t\} \sqrt{V^2 + A'^2 \omega^2 \cos^2 \omega t} \quad (13)$$

実効揚力 F を電線の運動距離にわたって積分することによって、風が電線になす仕事 P が求められる。従って、1サイクル当りの風のなす仕事 P は次式の如く表わされる。

$$\begin{aligned} P &= \int_{cycle} F dy \\ &= \int_{cycle} \left\{ L(\theta)V - D(\theta)A' \omega \cos \omega t \right\} \sqrt{V^2 + A'^2 \omega^2 \cos^2 \omega t} dy \quad (14) \end{aligned}$$

しかるに

$$dy = A' \omega \cos \omega t dt$$

$$y = 0 \quad \rightarrow t = 0$$

$$y = A' \quad \rightarrow t = \pi/2\omega$$

ゆえに

$$P = 4 \int_0^{\frac{\pi}{2\omega}} \left\{ L(\theta) - D(\theta)A' \omega \cos \omega t \right\} \sqrt{V^2 + A'^2 \omega^2 \cos^2 \omega t} \cdot A' \omega \cos \omega t dt \quad (15)$$

$$\text{ただし } \theta = \tan^{-1} \frac{A' \omega}{V} \cos \omega t \quad (16)$$

線路に実在波が正弦状に分布しているとすれば、 A' は次式で表わされる。

$$A' = A \sin \frac{n\pi x}{S} \quad (17)$$

ただし A' : 任意の点における振幅

A : ループの最大振幅

S : 全径間長

x : 径間の任意の点

n : ループ数

(17)式を(15)式に代入して仕事 P を全径間にわたって積分すると、1サイクル当りの全径間になされる仕事 P_T が求められる。

$$\begin{aligned} P_T &= 8n \int_0^{\frac{\pi}{2\omega}} \int_0^{\frac{\pi}{2\omega}} \left\{ L(\theta)VA \omega \sin \frac{n\pi x}{S} \cos \omega t - D(\theta)A^2 \omega^2 \right. \\ &\quad \left. \sin^2 \frac{n\pi x}{S} \cos \omega t \right\} \\ &\quad \times \sqrt{V^2 + A^2 \omega^2 \sin^2 \frac{n\pi x}{S} \cos^2 \omega t} dt \cdot dx \quad (18) \end{aligned}$$

ただし、攻撃角 θ は(2)式より、

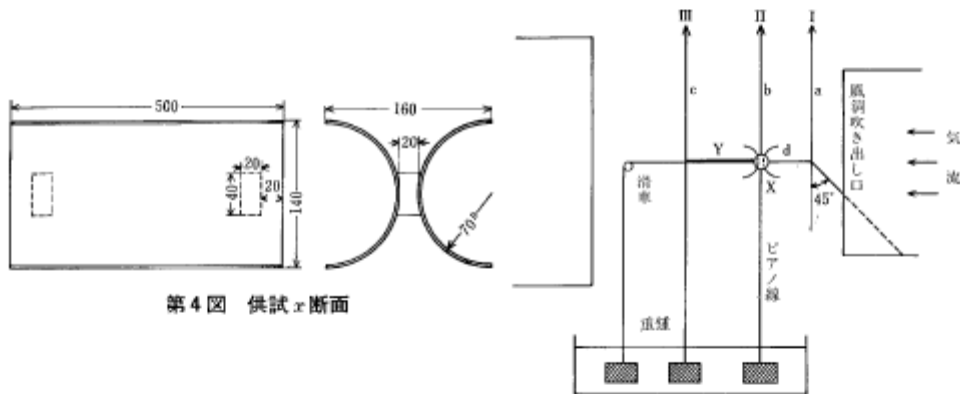
$$\theta = \tan^{-1} \frac{A\omega}{V} \sin \frac{n\pi x}{S} \cos \omega t \quad (19)$$

(18)式の $L(\theta)$ 、 $D(\theta)$ は簡単な θ の関数として表わすことはできないが、静的風洞実験によって求めることができる。なお(18)式の計算は実験結果を代入して数値積分を行った。

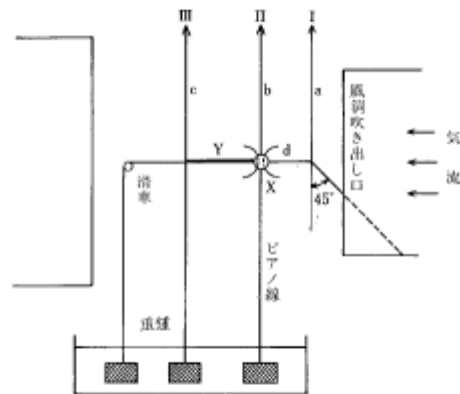
3. 風洞実験

運輸省船舶技術研究所所属のゲッチンゲン型 1 m 風洞を使用して実験を行なった。

実験はギャロッピング抑止効果を有していると思われる第 4 図に示す断面形状（以下 x 断面と呼ぶ）の試料を風洞にピアノ線に懸架して、攻撃角 θ —揚力 $L(\theta)$ 、抗力 $D(\theta)$ 特性を測定した。測定法はポフ⁽³⁾に従った。第 5 図に実験装置図を示す。使用した天秤は定格 20 kg の三分力ばかりである。図中の X は攻撃角を与えるための分度器で、試料を 10 度毎に回転させることができる。又 Y は水平軸に関するモーメントを測定するための腕である。



第 4 図 供試 x 断面

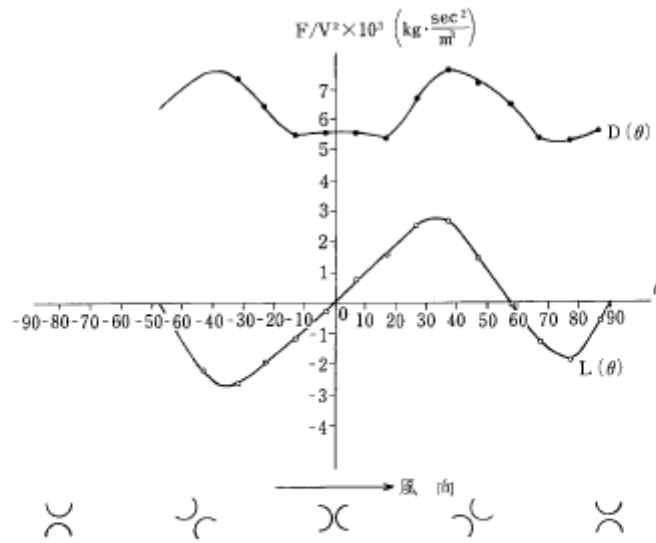


第 5 図 風洞の実験装置図(横から見た図)

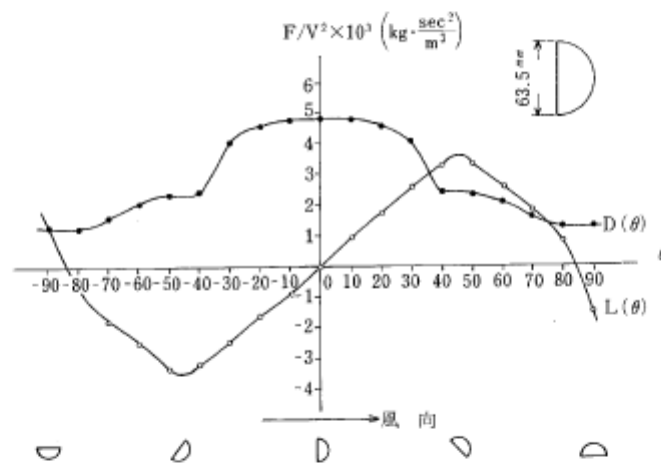
第 6 図に測定した x 断面の攻撃角—揚力、抗力特性を示す。なお水平軸に関するモーメントは揚力、抗力に比して小さいので省いた。D 断面については、多くの研究者によって風洞実験が行われて来たが、第 7 図に F. C Heers⁽⁴⁾の実験値を示す。

第 6 図、第 7 図を比較すると以下の事がわかる。

- 抗力は概して風向と垂直な面への投影面積に略々比例すると考えられる。抗力特性は D 断面と x 断面とでは反対の傾向を持っている。
- x 断面の揚力は攻撃角 57° 付近で再び 0 になり、しかも抗力より大きな値をとることはない。一方 D 断面は攻撃角 $35^\circ \sim 75^\circ$ の領域で揚力が抗力より大きくなる。



第6図 x断面図の風洞実験結果



第7図 D断面の風洞実験結果 (Cheersによる)

4. 計算結果および検討

4-1 計算対象径間

当社長井試験径間を模して、風の仕事を計算した。試験径間の概要および模擬した電線の仕様を以下に示す。

径間長	$S = 340 \text{ m}$	使用電線	ACSR 410mm ²
水平張力	$T = 2800 \text{ kg}$	電線重量	$m = 1.673 \text{ kg/m}$
		電線外径	$D = 28.5 \text{ mm}$

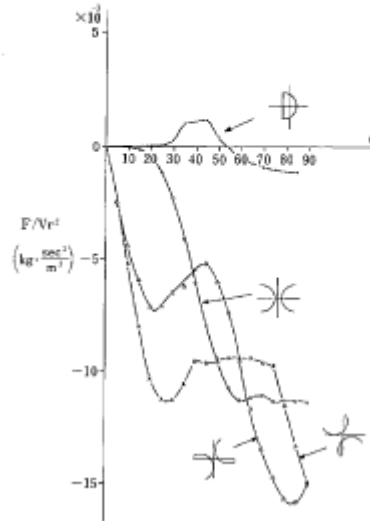
断面積 $A=480.75\text{mm}^2$

ヤング率 $E=8,359\text{kg/mm}^2$

4-2 実効揚力係数

(3)式で表わされる実効揚力係数 F/Vr^2 をD断面、 α 断面について計算し結果を第8図に示す。ただし、 $L(\theta)$ 、 $D(\theta)$ の値は第6図、第7図から読み取った。図中 α 断面の3曲線は第6図の $L(\theta)$ が0点を示す3箇所(受圧面の形状の違い)について計算したものである。第8図から実効揚力係数はD断面は正の値であるのに対し、 α 断面では殆ど負の値しか取らないことがわかる。この事実は、D断面には振動を増大させる方向に力が加わり、 α 断面には逆に振動の増大を防げる方向に力が作用することを示している。

実効揚力係数
(3)式による計算結果



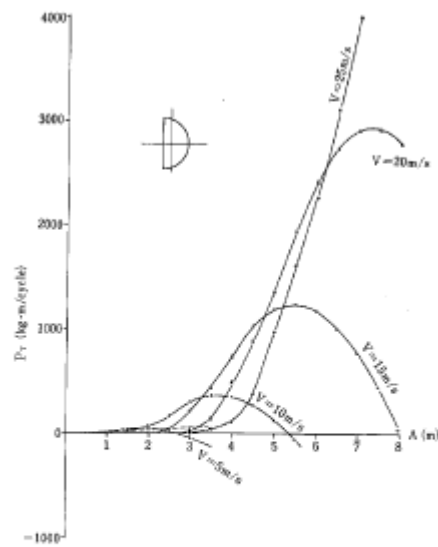
第8図

4-3 D断面でおゝわれた電線に働く仕事

送電線のギャロッピングの典型的な例として、線路の全径間がD断面でおゝわれた場合の風のなす仕事を計算した。計算は風洞実験で求めた攻撃角一揚力、抗力特性(第7図)を直線に分割して $L(\theta)$ 、 $D(\theta)$ に関する一次式として表わし、(18)式にシンプソンの公式を適用して、電子計算機によって、数値積分を行った。第9図に計算結果を示す。横軸はループ中央の振幅A、縦軸は全径間に作用する風の仕事 P_T である。

振動モードはループ数3($\omega=3.548\text{rad/sec}$)の振動に限定した。

振動系が保存的であるとすれば、 $P_T=0$ ならば仮定した振動の状態を維持し、 $P_T>0$ ならば増大振動、 $P_T<0$ ならば減衰振動となる。第9図は P_T



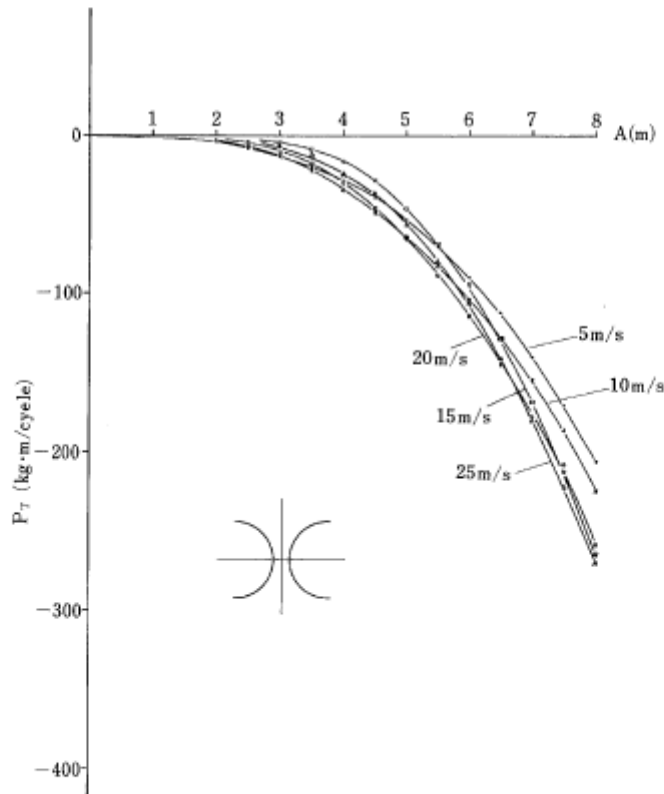
全径間のD断面に作用する1サイクル当りの仕事

第9図

< 0 の状態であり、ギャロッピングの振幅は風速の増すに従って増大することがわかる。すなわち、比較的弱い風速が初期条件となり、風速が増大するにつれ徐々に大振幅ギャロッピングへと成長するものと考えられる。

4-4 x断面に働く仕事

単位長の x 断面に作用する風の仕事を(15)式を用いて計算した。D断面と同様に角振動数は3.548 rad/secとした。第10図～第12図に結果を示す。第10図は x 断面が攻撃角 $\theta=0^\circ$ 、第11図は攻撃角 $\theta=57^\circ$ 、第12図は攻撃角 $\theta=-57^\circ$ のとき値である。図から空気力学的ダンパとしての効果は第12図の攻撃角 $\theta=-57^\circ$ のときが一番有効であることがわかる。なお風洞実験では風向を一定としているが現実には地形によって風向の変化や吹き上げ等があり、受風面が常に同一形状に保つことはできないから、第12図は実験した x 断面のうち最大値を示す。



第 10 図

x断面の単位長に作用する1サイクルの当りの仕事

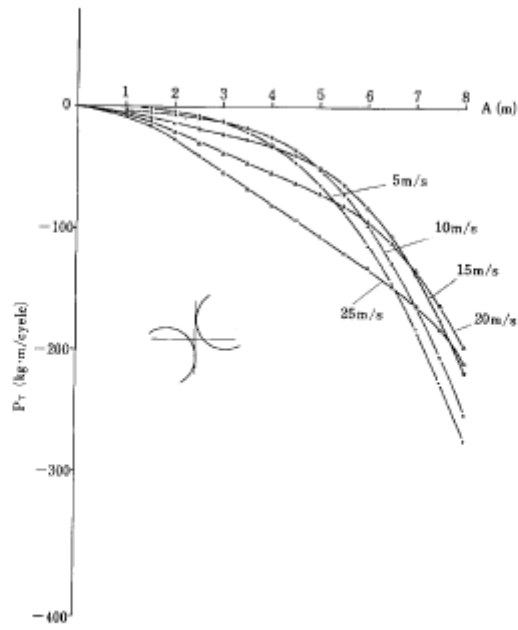


図 11

x断面の単位長に作用する1サイクル当りの仕事

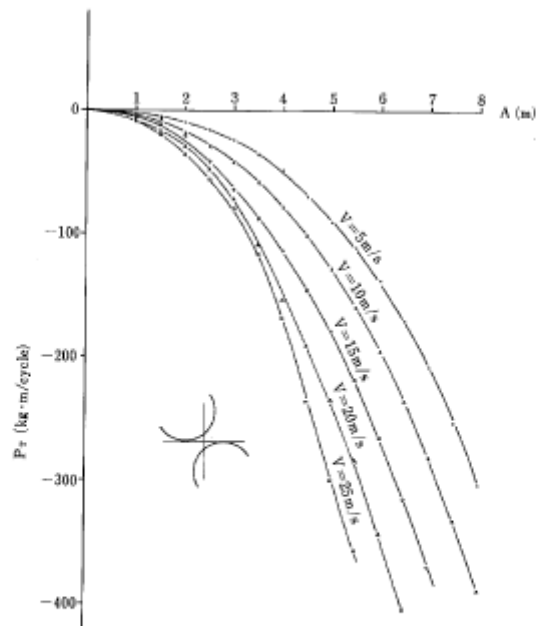


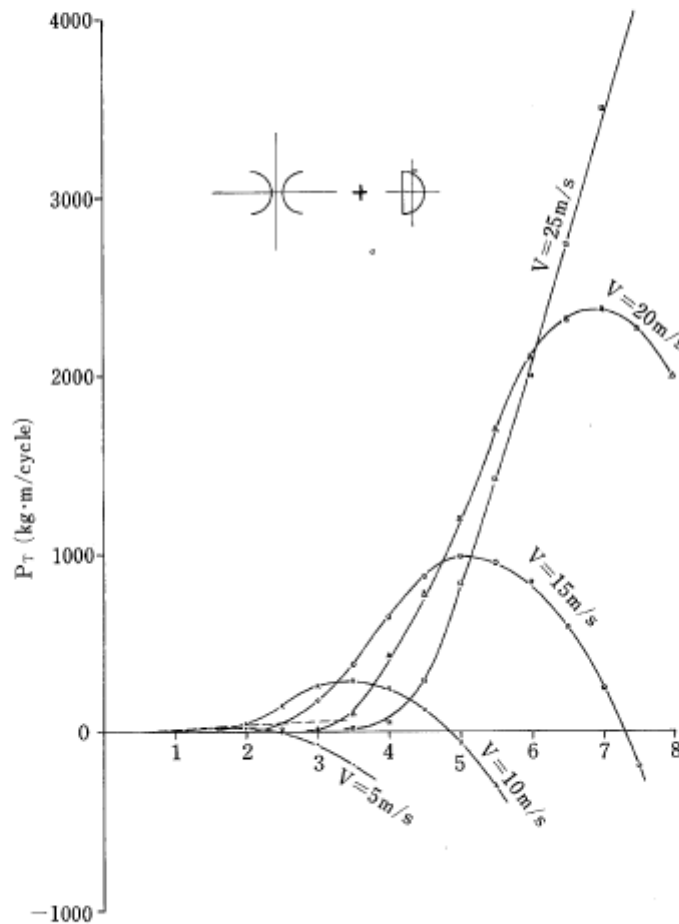
図 12

x断面の単位長に作用する1サイクル当りの仕事

4-5 D断面（全径間）にx断面を取付けた場合

x断面を全径間D断面で覆われた電線に取付けた場合を想定する。ただしx断面は振動の腹に取付けられ、その部分が空間的に直線と見做せるものとする。かくして、全振動系に作用する風の仕事は、(18)式で求めたD断面に及ぼす仕事と、(15)式で求めたx断面に及ぼす仕事の和で表わされる。第13～第15図に4-3と同様受風面形状の違う3点について示す。ただし、いずれの場合も1ループ当りx断面の長さは1mのものを取付け、ループ数3の振動を仮定しているから取付けたx断面は3個である。

x断面を取付けることにより、第13図～第15図はD断面の第9図よりも、 P_T の値は減少するからギャロッピングの抑止効果がうかがえる。



長さ1mのx断面を取付けた時の全径間に使用する1サイクル当りの仕事

図 13

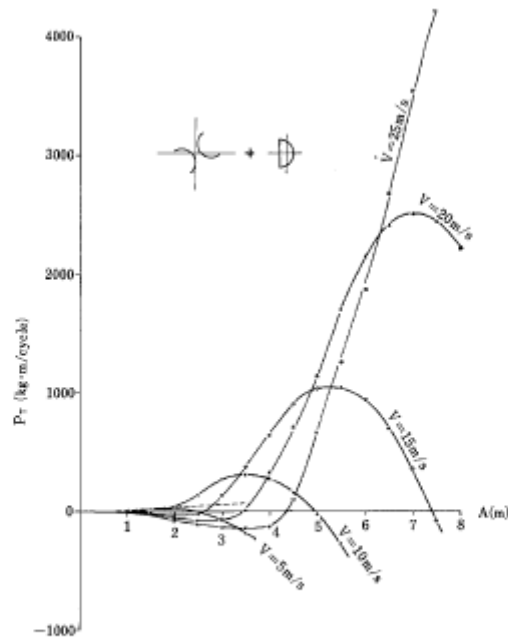


図 14

長さ 1 m の x 断面を取付けた時の全径間に使用する 1 サイクル当りの仕事

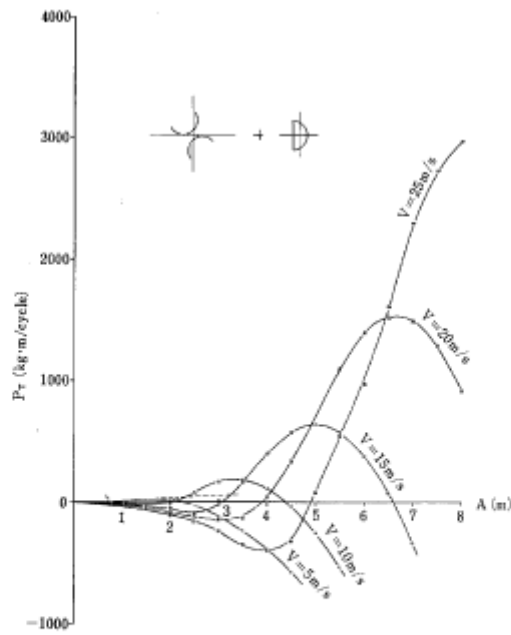


図 15

長さ 1 m の x 断面を取付けた時の全径間に使用する 1 サイクル当りの仕事

しかし、いずれの場合にも $>P_{r0}$ を与える振幅の領域が残存し、ギャロッピングの発生領域の完全な除去はなされていない。

4-6 減衰

これまで振動系の減衰を考慮しなかったが、ギャロッピングに与える減衰の影響は大きい。電線の減衰を測定するのに、die-down法と強制振動法の2方法がある。しかしいずれの方法を用いても、ギャロッピングの際に生じるであろう大振幅に適用できる減衰定数の適確な値を実験室的に求める事は非常に困難である。我々は110mの試験径間を用いて、die-down法によって減衰定数を求めた。測定は基本振動数のみについて行ったが、これは長井試験線340m径間の3ループの振動数と略々等しい。

電線の減衰の要因には、索線間の摩擦等の電線の内部構造による構造的減衰と空気抵抗とが考えられる。ギャロッピングの場合、空気力は負の抵抗として働くから、厳密にはdie-down法によって求めた損失から、空気抵抗による損失を差し引かねばならない。しかし構造的減衰は速度に比例すると考えられるのに対し、空気抵抗は速度の自乗に比例すると考えられ、振幅の小さい領域では空気抵抗による損失は小さいものと考えられる。これは測定した範囲で対数減衰率 δ が振幅に対してほぼ一定であった事からも推定できる。(振幅の小なる範囲で)以上よりdie-down法で求めた損失をそのままギャロッピングの際の損失と考える。

対数減衰率 δ と抵抗係数 λ との関係は $\lambda < 1$ であれば次式で与えられる。

$$\lambda = \frac{m\omega\delta}{\pi g} \quad (20)$$

風のなす仕事を求めたと同様な方法で、1サイクル当りの損失 P_L を計算すると次式となる。

$$P_L = \frac{1}{2g} m s \omega^2 A^2 \quad (21)$$

第16図に張力 T に関する対数減衰率 δ の測定値を示す。振幅の変化は取りも直さず張力の変化であるから、振幅によって抵抗係数も変化するものと考えられる。電線の振動中心が変化しないと

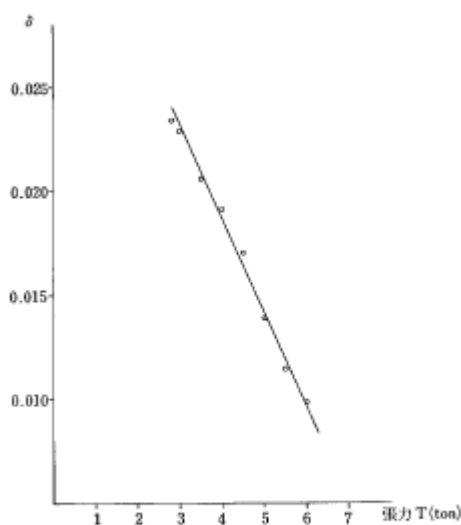


図 16
張力と対数減衰率の関係

して、振幅の平均値に対応する張力を求めると

$$T = \frac{4naE}{\pi S} A + T_0 \quad (2)$$

T_0 : 垂振動時架線張力

従って、張力 T に対する減衰定数 δ の値を第16図から読み取り、(2)式に代入すれば、平均振幅に対する1サイクル当りの損失 P_L が求まる。結果を第9図、第13図～第15図の点線で示す。図上ギャロッピングの発生する振幅の領域は、損失 P_L より風のなす仕事 P_T の方が大きい領域と理解される。

風速 5 m/s の場合について考察すれば、ギャロッピングの生じる領域は D 断面のみの第9図では存在するが、1 m 長の x 断面をつけた第13図～第15図では存在しないことがわかる。2 m 長の x 断面を取り付けることによりなおギャロッピングが生じにくくなることは当然である。従って、比較的弱い風速時の小振幅のギャロッピングが、強風時大振幅のギャロッピングの主たる初期条件になるものとするれば、x 断面を取り付けることにより風速のいかんにかかわらず、ギャロッピングの初期条件を押えることが不可能ではないと考えられる。

4-7 実規模試験

A. T. Edward にならって、前述の当社長井試験線にポリエチレン製 D 断面を取り付けて、D 断面ギャロッピング現象の観測を行ってきた。5～10 m/s 程度の風速において、試験線にギャロッピングと思われる振動が観測され、その振動モードは 2～3 ループで、振幅は 1 m (P-P) 程度であった。多くの場合、この振動以前に発達した微風振動があらわれた。又、風速 20 m/s 程度の強風においては、試験線は 3 m 程度の横流れをしながら、振幅 2 m (P-P) の縦振動をしていた。しかし、第9図に示すような大振幅の定常的な振動状態には達せず、振動ループも 2～10 の間で変化し一定のモードに着く事はなかった。この振動の際に碍子連の振動も認められ、振動の影響は隣接径間にも達していた。この事実は実際のギャロッピングにおいて、振動エネルギーが多方面に分散して失われている事を示している。それ故ギャロッピングを定量的に解析するためには、系の減衰を正確に把握する事が重要な問題である。

5. 結 論

自然のギャロッピングが主として縦振動であり、D 断面ギャロッピングが自然のギャロッピング現象を代表出来るものとし、又風については吹き上げ等を一切考慮せず、常に一定の水平な風が

電線に直角に当たる状態を仮定して解析を行なってきた。

これまでの解析結果を集約して以下に示す。

- (1) ギャロッピングは自励振動である。
- (2) ギャロッピング生起には少なくとも(10)式を満足しなければならない。
- (3) ギャロッピング生起には何んらかの電線運動を生じさせしめる初期条件が必要である。
- (4) 大振幅のギャロッピングは、振幅が次第に増大するにつれて風速も又増大するような一定のパターンが必要である。
- (5) 1ループおよび多数ループの大振幅のギャロッピングは生じにくく、2,3,4、程度のループの振動で生じる。
- (6) x 断面は空気力学的ダンパーとして効力を有するが、その効力は充分とは言えない。
- (7) 空気力学的ダンパーは抗力は大きく、揚力が小さくなる様な形状でなければならないが、幾何学的考察によってダンパーの形状を推定する事は可能である。
- (8) ギャロッピングの適確な評価には、鉄塔、碍子連、電線等を含めた線路全体の減衰定数の値が是非とも必要になる。

6. あとがき

Den Hartogの理論に基づいてギャロッピング現象を解析してきたが、正確な現象の把握は径間全体の減衰定数の値が求められるまで待たねばならないであろう。

又、空気力学的ダンパーとして x 断面は充分でないにしろ、ある程度効力を持つ事がわかったこれからのより効果のあるダンパーの開発の足掛りとなる事ができれば幸である。

最後に風洞実験の際にいつも親切に御教示下さいました船舶技術研究所の三輪部長および池田技官、そして東京農工大の斎藤教授に深く感謝いたします。

参考文献

- ※ 1. 「Transmission Line Vibration due to Sleet」 by J.P. DEN HARTOG
AIEE Transmissions Dec. 1932.
- ※ 2. 「非常型振動論—漸近的方法」
エヌ・エヌ・ポグリュエーフ、ユー・ア・ミトロポリスキー共著
共立出版株式会社 昭和36年12月発行
- ※ 3. 「空気力学実験法」
ポフ著
朝倉書店 昭和44年2月発行
- ※ 4. 「Factors Relative to High-Amplitude Galloping」 by J.J. RATKOWSKI.
IEEE. Trans. Apparatus and System Oct. 1963