

ヒョウタン形通信ケーブルの機械的諸特性

Mechanical Characteristics of Gourd Shaped Communication Cables

福田 重雄*
Shigeo Fukuda

堀口 二三男*
Fumio Horiguchi

堀 栄一**
Eiichi Hori

内 容 梗 概

ヒョウタン形ケーブルは、メッセンジャワイヤとケーブル本体をプラスチックで同時に押し出して一体とした自己支持形ケーブルで、1954年に日立電線が日本で初めて開発したものであるが、いろいろの特長をもっているため現在まで大量に使用されてきている。本報告ではこのケーブルの特性中特に重要と思われる事項のなかで、機械的諸問題について述べている。

機械的問題としては、クランプ方式によるケーブル導体にかかるひずみが検討され、最適クランプ方式が見いだされた。またケーブルが軽量のため、強風によって振動を起こすことがあるが、この防止対策としてねん回して架線することが最良の方法であることが理論的、実験的にも明らかにされた。

さらに振動防止の一策として、ヒョウタン形ケーブルのメッセンジャワイヤ部とケーブル本体部との間に窓を設けた新形構造が開発され、風洞実験、架線実験の両者によって振動防止効果の顕著な構造であることが確認された。

ヒョウタン形ケーブルの特長について述べる。

1. 緒 言

従来架空通信ケーブルとしては、メッセンジャワイヤにケーブルをハンガでつるす方法が長い間使用されてきたが、プラスチック応用ケーブルの発達に伴い、架空ケーブルとしてまったく新しい工事方法が採用されるようになり、いわゆる自己支持形ケーブルの開発が急速に進められた。

代表的な自己支持形ケーブルとしては、アメリカで開発された RD ワイヤおよびラッシングワイヤ方式がある。

日本においても、この種ケーブルの検討が行なわれ、RD ワイヤは経済的な小対電話線としての特長が認められ、多量に使用されている。しかし外被がないため伝送特性が天候に支配され、さらに架線工事で外傷を発生しやすく、障害の多いという欠点をもっている。

ラッシングワイヤ方式は、日本の国情からみて、アメリカのようなラッシング機を用いるには、あまりにも架線状態が複雑であるため実現不能であった。そのため工場でケーブル製造時にメッセンジャワイヤとケーブルをあらかじめワイヤでラッシングしたケーブルが採用されたが、架線工事中にラッシングワイヤが切れたり、ラッシングピッチがずれたりして、工事上、保守上の難点が多く、十分満足できるものではなかった。

これら各種ケーブルの検討の一環として、メッセンジャワイヤとケーブルコアを PVC 押出機で同時に被覆する方式の研究が日立電線によって進められ、この製造に成功し、日本における自己支持形ケーブルの新機軸をひらいた。このケーブルは断面形状がヒョウタンに似ているので、ヒョウタン形ケーブルと呼ばれており、1954年に製造開始以来、現在までのケーブル延条長は 6,000 km をこえている。

このヒョウタン形ケーブルは、幾多のすぐれた特長があるとともに、新製品であるため製造法、工事法で改良すべき課題も数多く出たが、逐次これらの研究課題は理論的、実験的解明により改善が進められてきた。

この報告では、ヒョウタン形ケーブルの改善の過程の中より、特に重要と思われる事項をとりあげた。

すなわち、ヒョウタン形ケーブルの断面は特殊な形状のため、強風にさらされる場所で振動を発生することがあり、この防止対策として検討された諸問題ならびに新しい構造として開発されたハンガ

2. ケーブル支持点に加わるひずみとその軽減対策

2.1 クランプ方式とひずみ

ヒョウタン形ケーブル開発当初のクランプ方式は、第1図(A)方式のようにつり線金具で直接ケーブルをクランプしたが、風の強い場所に架線されたケーブルに、クランプ部でケーブル心線が断線する事故が発生した。

断線の発生する場合はつり線金具の真下であり、断面から観察して振動疲労破断であることがわかった。すなわち風によってケーブルが振動し、集中的な曲げひずみがクランプ部に加わるためであるので、このひずみをできるだけ小さくするために、いかなる架線法がよいか、第1図の(A)、(B)方式について比較検討した。なお

(A) 方式: つり線金具で直接ケーブルをクランプした方法

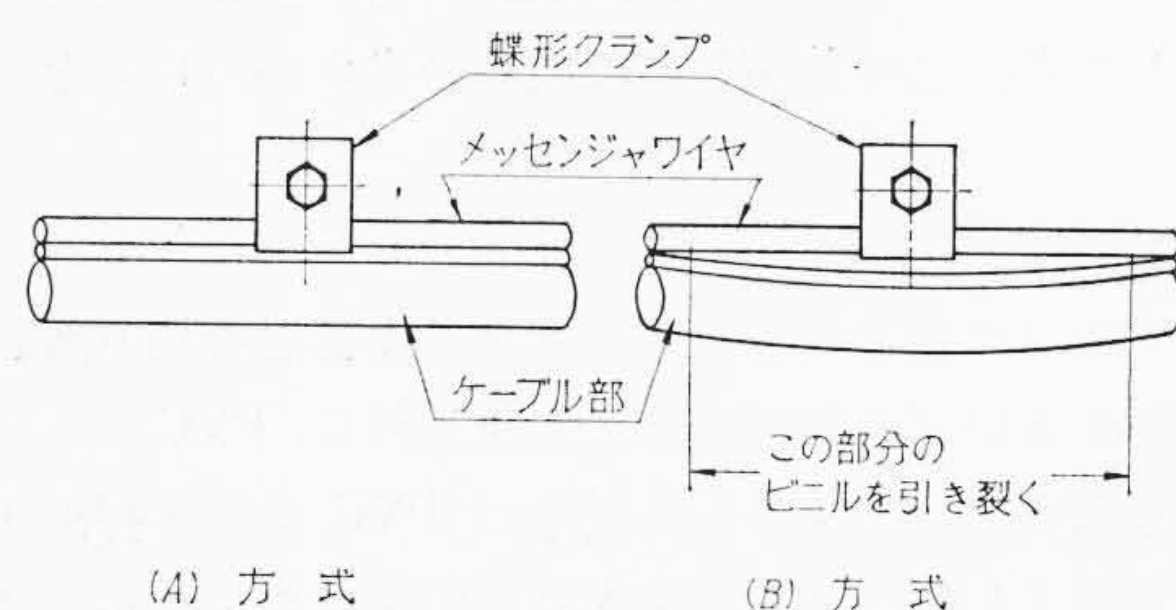
(B) 方式: ケーブル本体をつり線金具クランプ部でメッセンジャワイヤより切り離した方法

である。

実験は実際の架線状況に応じて、長さ約 6.5 m のケーブルに 200 kg の張力を加え、このケーブル試料の一端より 2 m の間隔をとってつり線金具のクランプを設けた。この場合において、振動により生ずる変位と同じように、ケーブルに横方向変位と上下方向変位を与えるようにした。第2図はその状況を示す。ひずみはビニルシースに第3図に示すように抵抗ひずみ線をはり付け、これにより測定した。

(A)、(B)方式について、横方向および上下方向変位によって生ずるクランプ部近傍の曲げひずみを示すと第4図および第5図のようになる。図中実線、点線は変位を与えた場合の往路および復路を示したものである。なお切り離し部分の長さはクランプ部を中心として 600 mm および 1,000 mm の2種類について行なった。

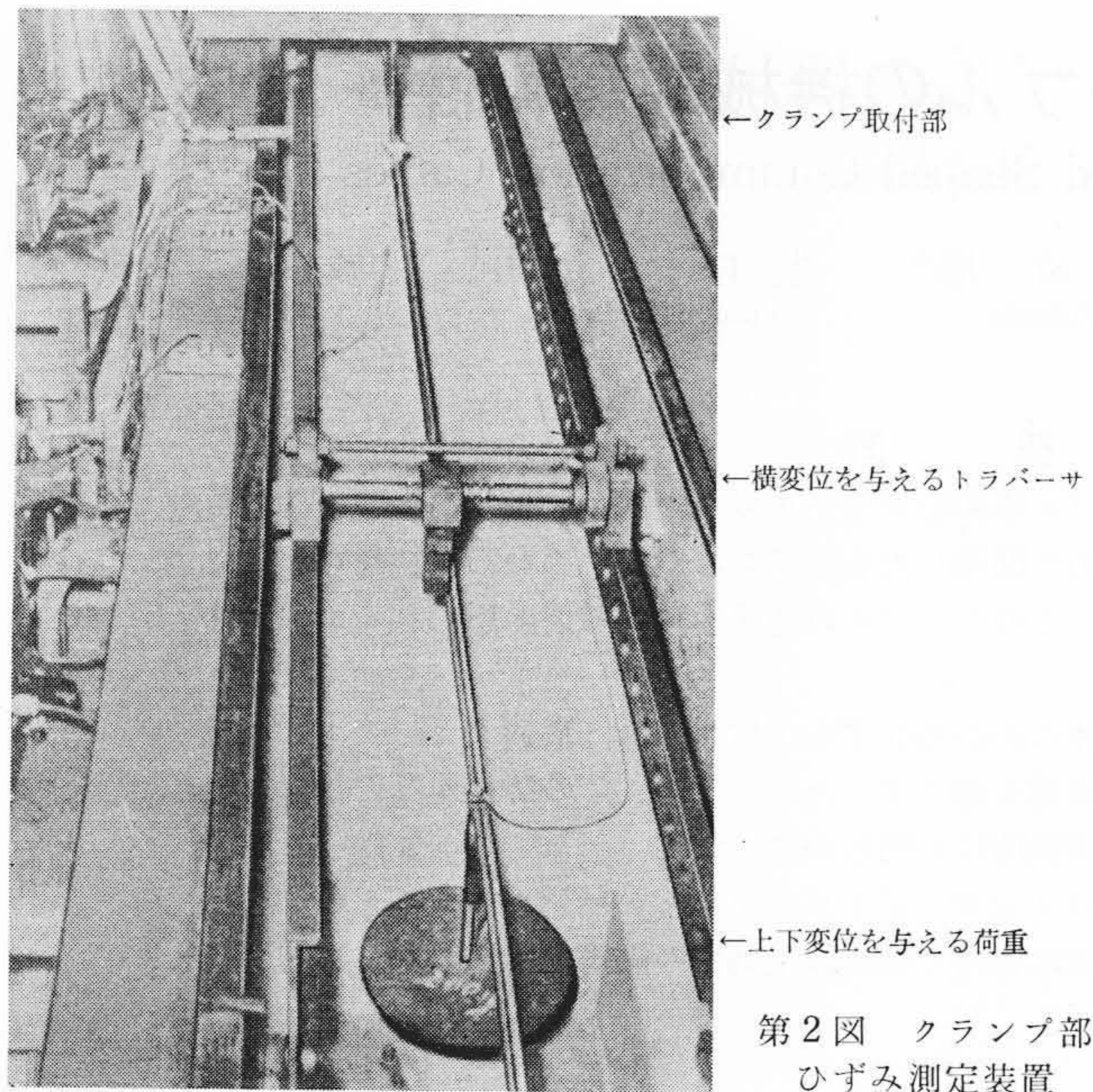
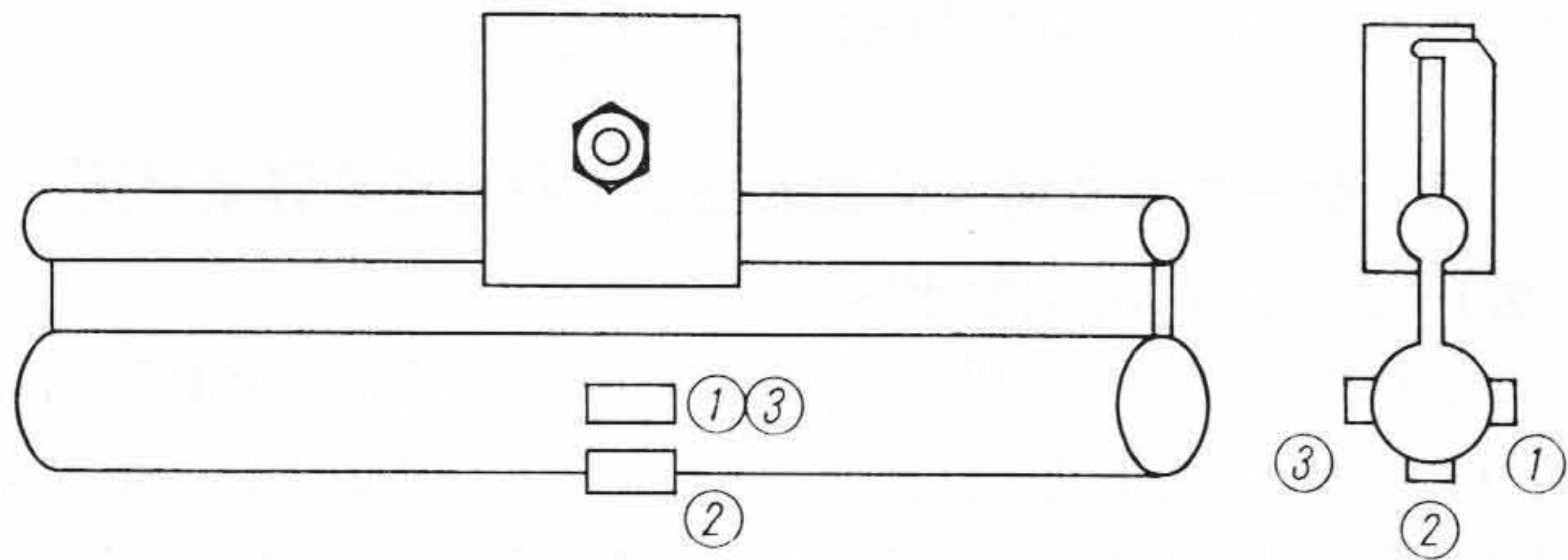
第4図および第5図よりみて明らかなように、ひずみの大きさは



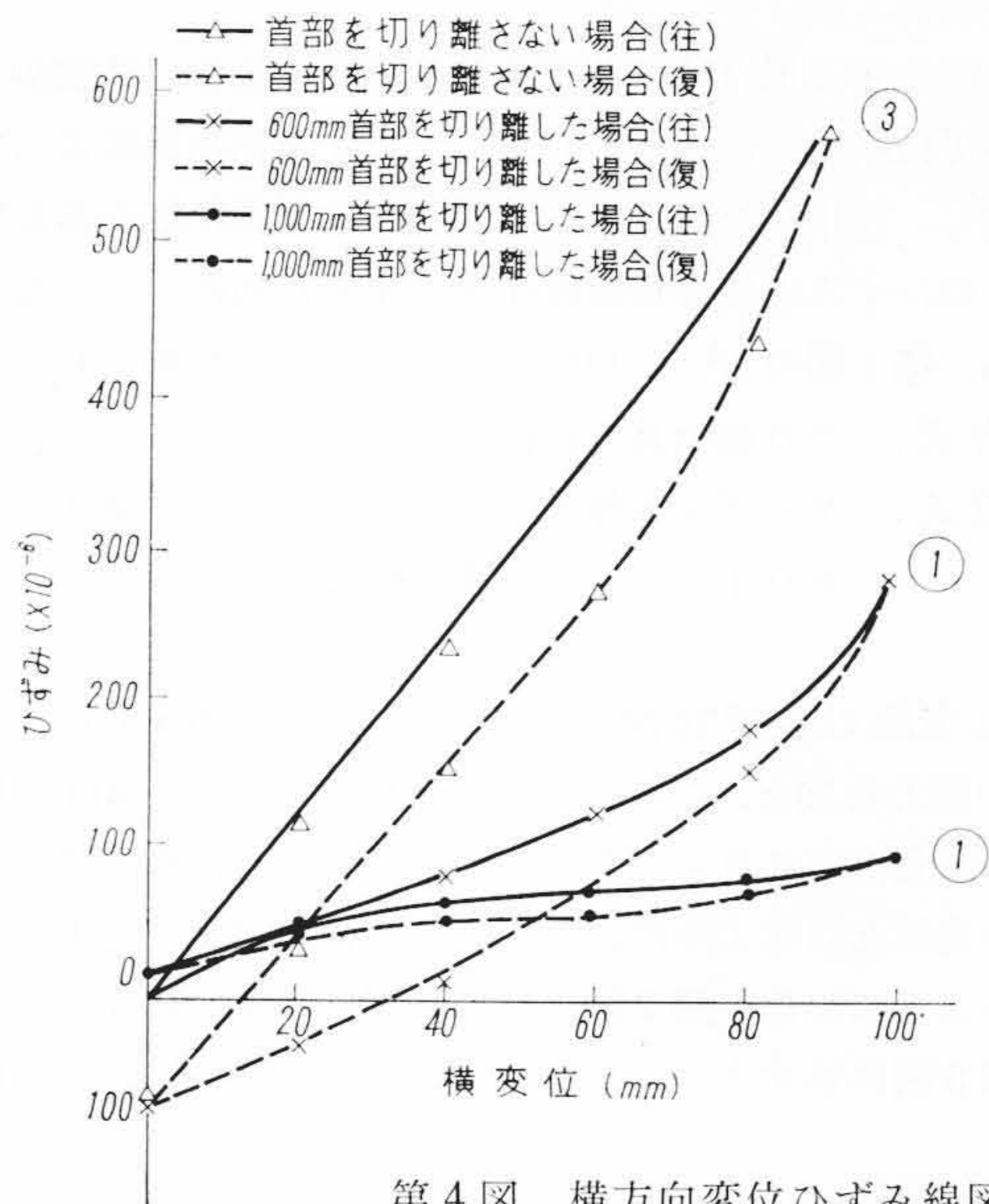
第1図 クランプ方式の差

* 日立電線株式会社電線工場

** 日立製作所中央研究所

第 2 図 クランプ部
ひずみ測定装置

第 3 図 抵抗ひずみ線のはり付け個所



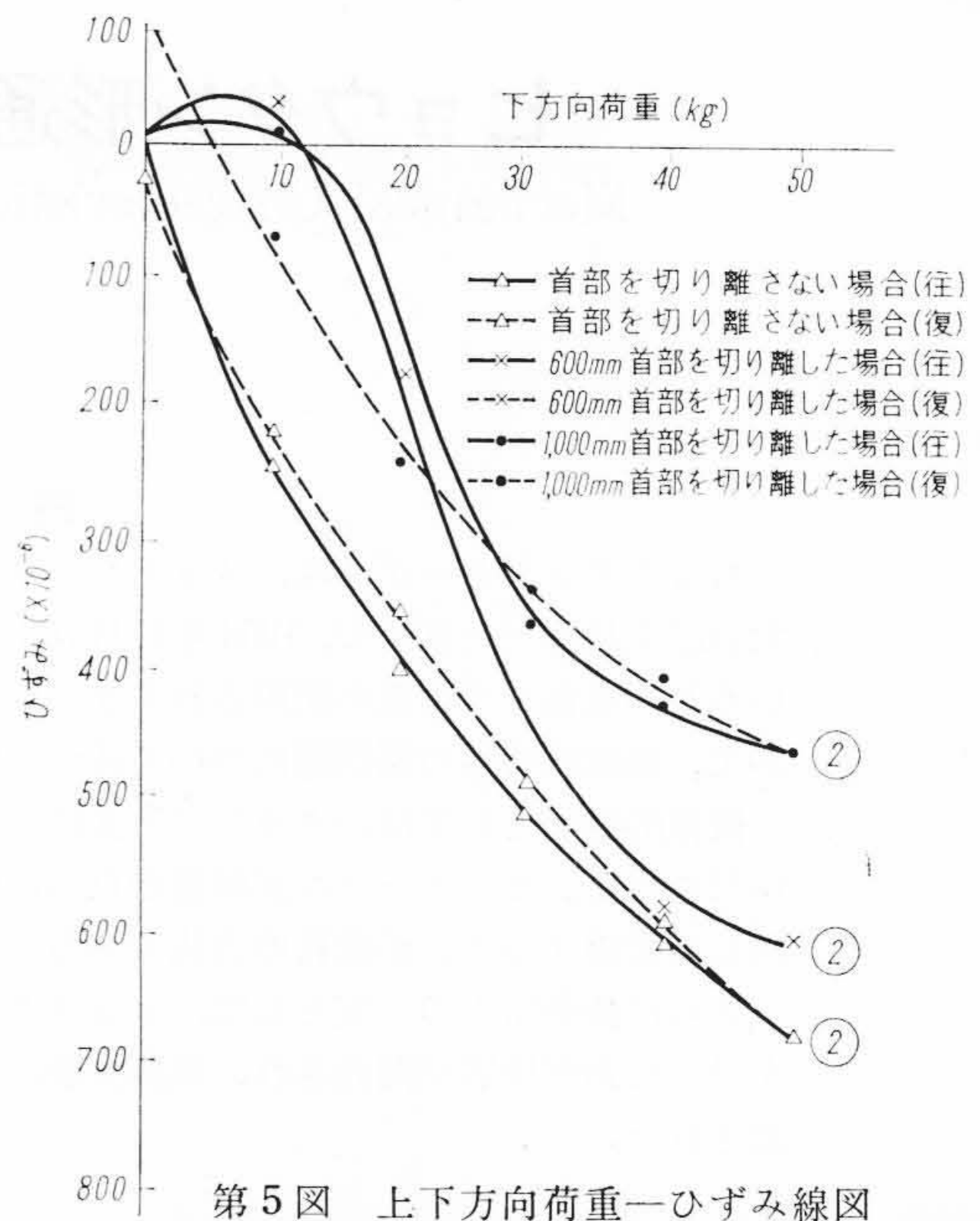
第 4 図 横方向変位ひずみ線図

クランプ部下部の切り離しが大きいかほどクランプ部下部のケーブルに加わる曲げひずみは小さくなっている。上下変位ではひずみの値は負に出ているが、これは荷重を下方向にかけたため、クランプ部のケーブルが下に凹む方向に曲げられたためと考えられる。

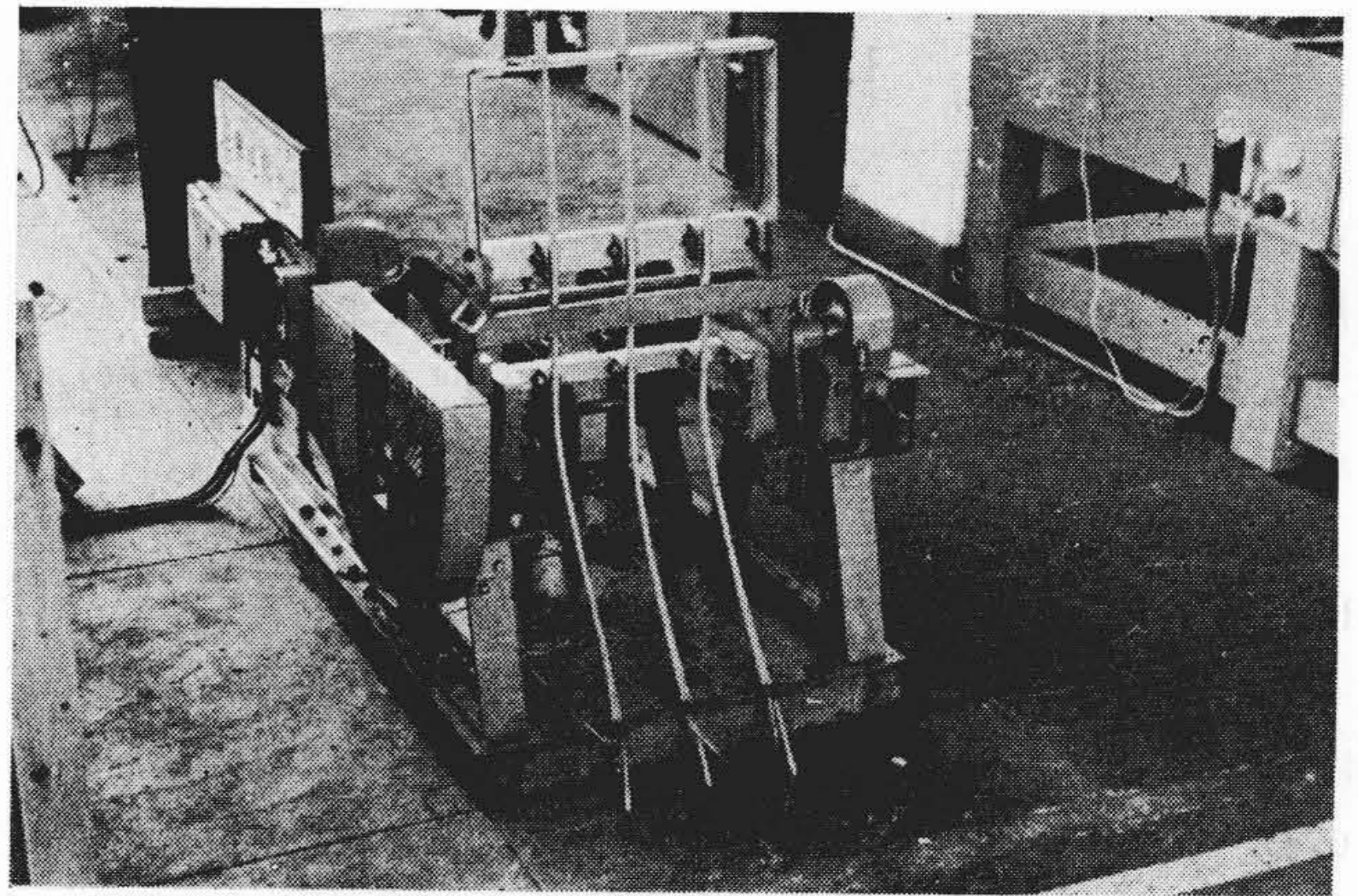
この結果よりつり線金具のクランプ部を切り離したほうが、ケーブル心線の曲げひずみが小さいので、1,000mm の切り離しを行なうように工法を変更したが、この対策以後は断線の発生がみられなくなった。

2.2 シース押出方式とひずみ

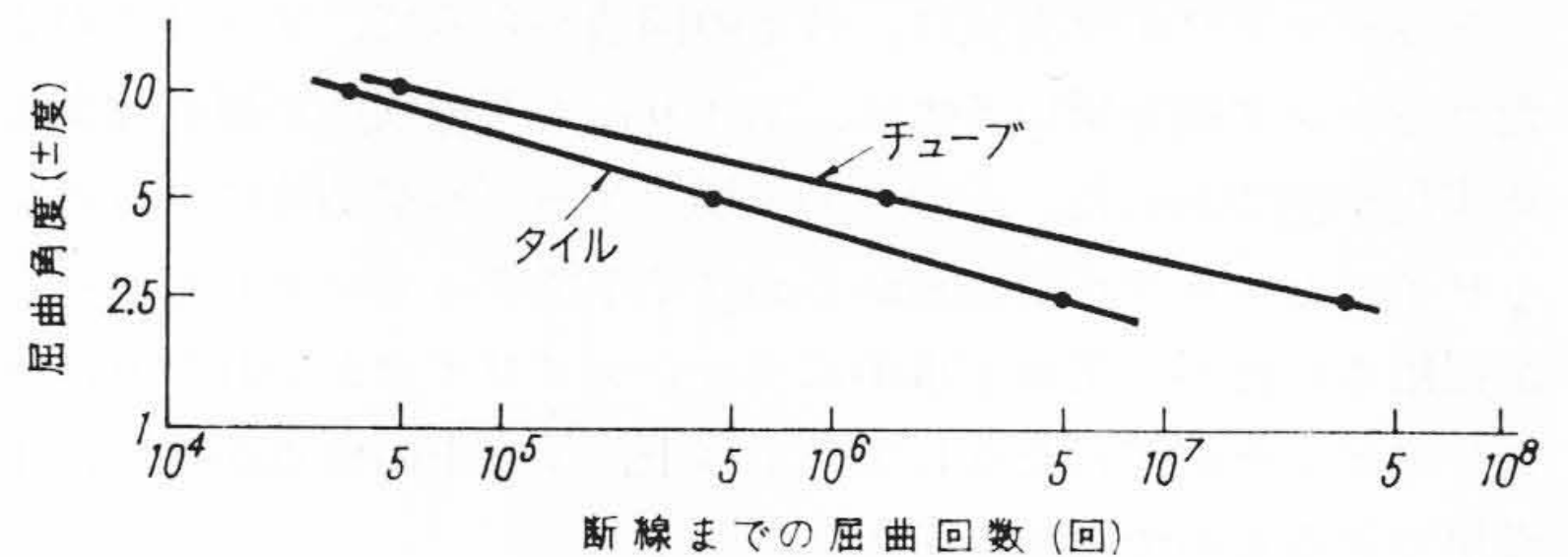
ランプ部下部のケーブル部とメッセンジャワイヤ部とを切り離してケーブル心線にかかるひずみを減少する対策以外に、PVC シース押出工法の改良も検討された。すなわち従来の PVC シース押出法は、ケーブルコアを堅くしめつける充実式の押出法であったが、こ



第 5 図 上下方向荷重—ひずみ線図



第 6 図 屈曲試験装置



第 7 図 押出方式による耐屈曲性の差

れをチューブ式押出法に改め、ケーブルコアと PVC シースの間をルーズにすることによって、振動、屈曲による心線にかかるひずみを減少させようとの考えである。

この効果を確認するため、第 6 図のような装置でケーブルを屈曲し、ケーブル心線の断線までの屈曲回数を測定した。なおこの実験では断線の確認を早くするため、クランプ部の真下は切り離さないで行なった。結果を第 7 図に示す。

この結果より、屈曲角度 ± 2.5 度を例にとってみれば、チューブ式押出法をとることにより、断線までの屈曲回数が充実式よりも約 6 倍に向上することがわかる。

この押出法の改良と、前述のクランプ部下部の切り離し工法を併用することにより、心線にかかるひずみは非常に小さくなり、ケーブルの振動による心線断線事故はまったく心配なくなった。

3. ヒョウタン形ケーブルの振動とその防止対策

3.1 振動発生の原因

ヒョウタン形ケーブルはプラスチックで構成されているため、ケ

ケーブル重量が従来の鉛被ケーブルより非常に軽く、また受風面積が丸形ケーブルより大きいので、海岸沿いとか、田畑の中で強風に直接さらされる場所などの特殊地形のところに架線されたケーブルは、振動を発生することがある。この振動発生の原因は次のように理解される。

すなわち第8図のようにヒョウタン形ケーブルに風があたると、翼の効果によって振動を繰り返すわけで、この振動は当然ケーブルの重量に関係があり、比較的軽量のケーブルに多く発生することになる。

このように振動を発生しやすい場所では、振動防止の対策が必要である。

3.2 ねん回による振動防止効果

振動防止の対策としてはいろいろの方法が検討され、送電線のダンパと同様に、適当なダンパを取り付けて振動を吸収することも試みられたが、効果的のものが見いだされなかった。しかしケーブルにあらかじめねじりを与えて架線すると振動が非常に小さくなることがわかった。この方法はなんらの材料も必要とせず、しかも効果的な方法である。ねん回して架線すると振動が減少するのは、次のような効果が発生することによるものと考えられる。

(i) 抵抗係数が小さくなる。

ケーブル単位面積当たりの風圧荷重は下式で与えられる。

$$P = \frac{1}{2} C \rho v^2$$

ここで P : 風圧荷重 (kg/mm^2)

C : 抵抗係数

ρ : 空気密度 ($\text{kg-s}^2/\text{m}^4$)

v : 風速 (m/s)

ヒョウタン形ケーブルの抵抗係数を風向に対してケーブルの受風角を変えて風洞試験により求めた結果は第9図のようであり、受風角により大幅に変化する。

ヒョウタン形ケーブルをねん回しないで架設すれば、抵抗係数は1.9であるが、ねん回すると0.3~1.9の間を変化することになり、平均的には1.1程度になり、丸形ケーブルの抵抗係数1.2に近くなる。

(ii) 上昇力と下降力が発生する。

ヒョウタン形ケーブルは翼のような効果があり、ねん回しない場合には第8図(A)のように上昇力のみ働くが、ねん回して(B)のような角度の場所ができるので、下降力が働くことになり、一径間全体を考えれば上昇力と下降力が平衡して振動のなくなることが理解される。

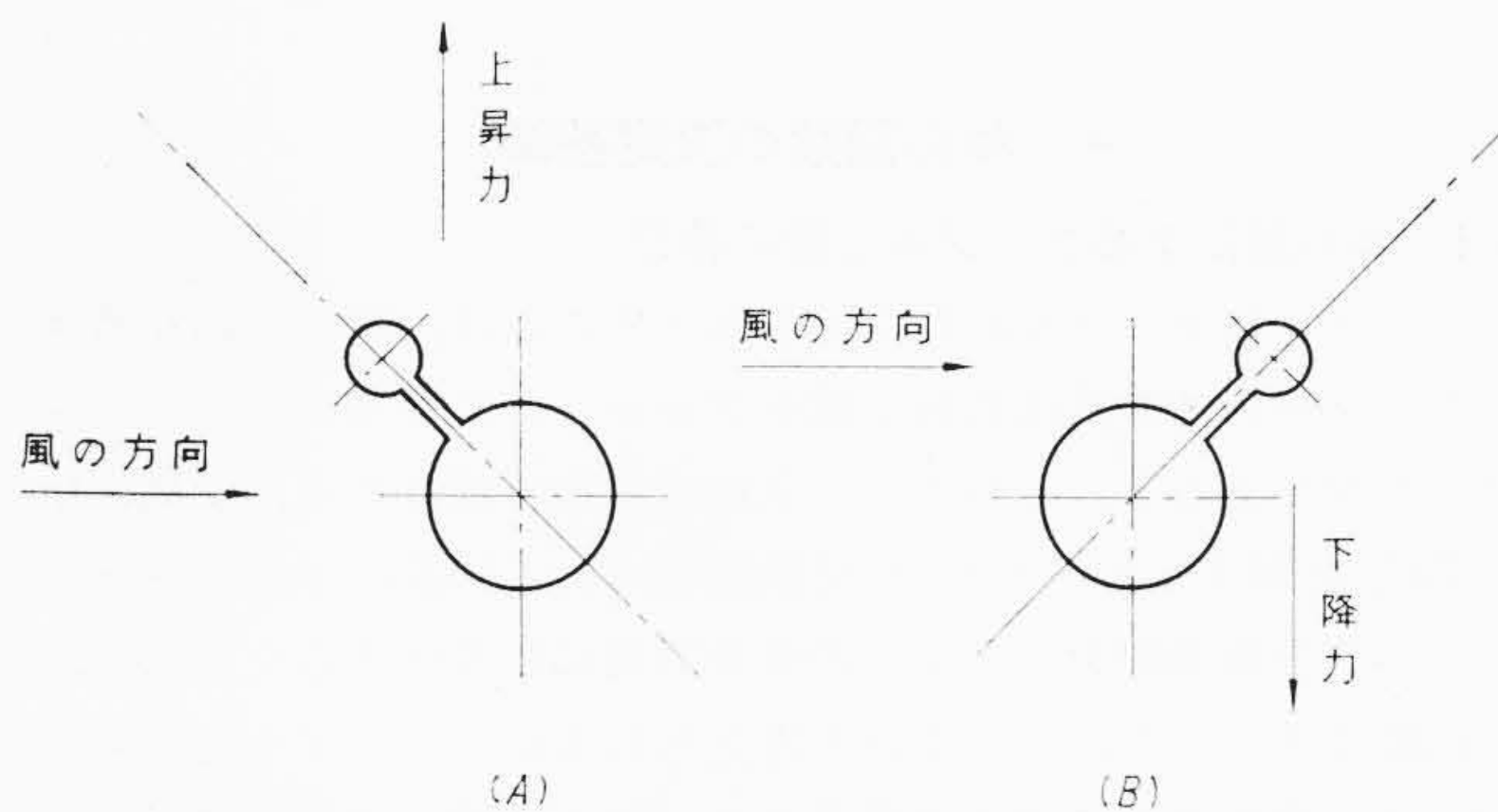
3.3 ねん回による振動防止の実験的確認

ヒョウタン形ケーブルをねん回して架線することにより、どの程度振動を防止できるか、これを確認するため実験を行なった。

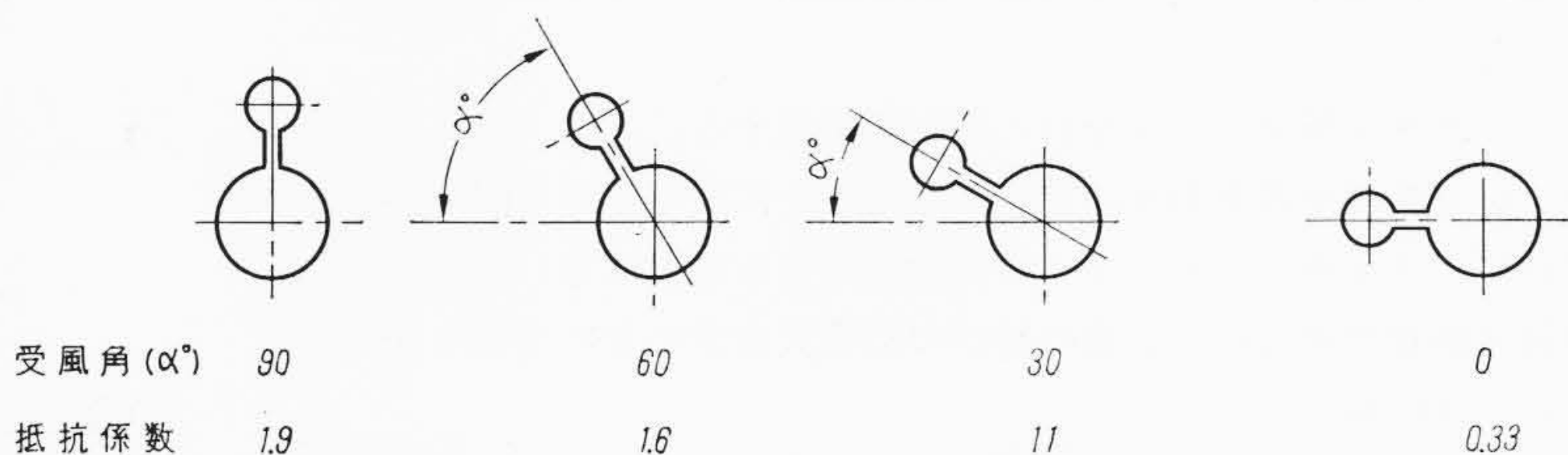
ケーブルの架線場所は強風に見舞われる機会が多い海岸とし、海岸に向かって数条平行に同一弛度で架線した。架線の条件は次のとおりである。

ケーブル	0.9mm 2対 PE 絶縁 PVC シースヒョウタン形通信ケーブル
径間	40 m
取付ケーブル間隔	0.5 m
弛度	0.196 m (径間の約0.5% 相当)
ねん回数	ねん回なし、6回

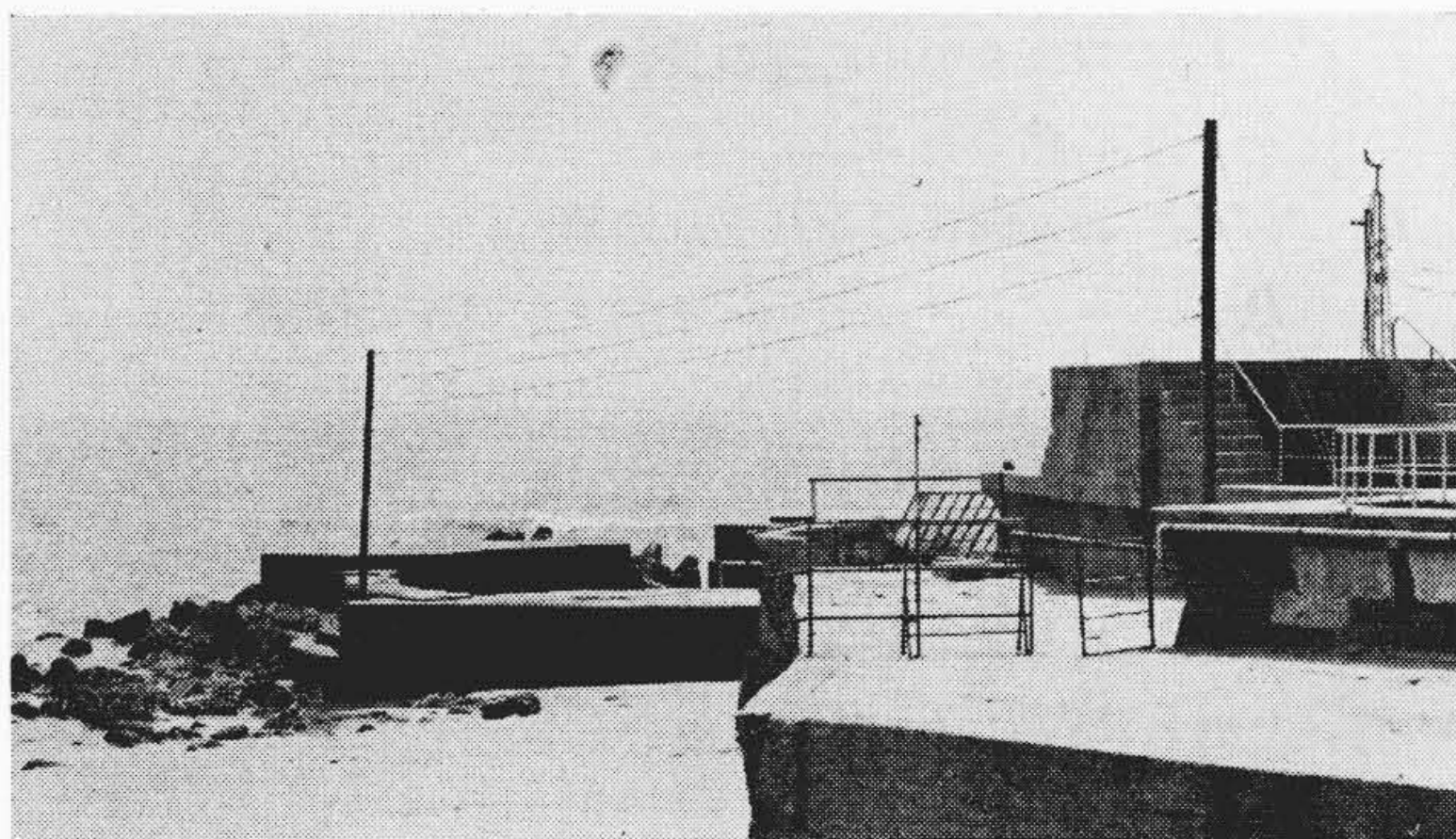
ケーブルの両端の引留には PG クランプを使用した。架線状況を第10図に示す。実験は強風時に行ない、スパン中央部のケーブルの振動を8mm シネに撮影し、その際の風速を風車式風速計(1分



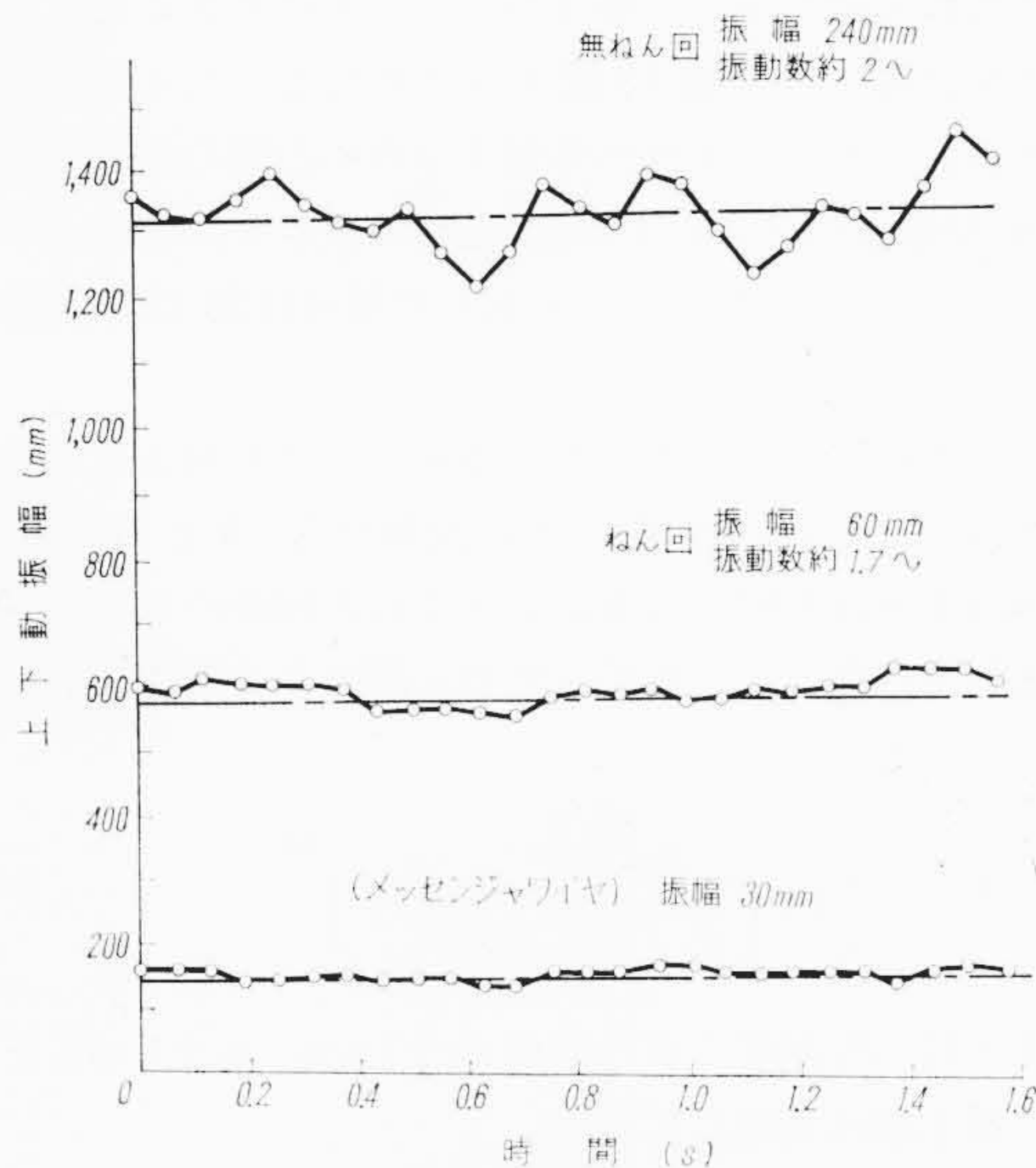
第8図 ヒョウタン形ケーブルの風向とこれに働く力



第9図 ヒョウタン形ケーブルの受風角と抵抗係数



第10図 ヒョウタン形ケーブルの振動実験場全景



第11図 ねん回による防振効果

間の平均風速)で測定した。

風向きが線路に約80度の角度で、風速が14~15 m/sの場合の測定結果を示すと第11図のようである。

第11図上段は無ねん回のケーブルの上下動を示したもので、波長は約13 m程度で振動振幅は最も大きかった。ねじりを与えると防振効果は著しく、無ねん回のものに比べて1/4に振幅が減少した。丸形断面のメッセンジャワイヤにおいても、この程度の振動を生ずることを考えるとねん回架線はきわめて有効であることがわかる。

4. ねん回数の決定基準

4.1 ねん回によるケーブル心線の伸び

ヒョウタン形ケーブルにねん回を与えることは、受風面積を減少し、ケーブル自体の風圧抵抗を減少させることになるが、ケーブルにねじりを与えると、そのスパン全体を考えた場合には、受風面積は約70%に減ずるわけであり、受風面積はねん回数には無関係となる。しかし受風面積をケーブルの長手方向に均等化するためには、ねん回数は多くしたほうがよいと考えられるが、ケーブル心線のねん回により発生するひずみの観点より、ねん回数にはある限界値があることになる。このねん回数の限界値について以下検討を行なってみる。

ヒョウタン形ケーブルをねん回して架線することは、コアをメッセンジャワイヤのまわりに巻きつけることになる。ねん回数が少なければ、メッセンジャワイヤの伸縮を考える必要はないが、コアの伸長は無視できない。心線の伸びの計算式を求めるに当たり記号を次のようにおく。

L : ケーブルコア中心線の長さ (=ケーブルねん回のピッチ)

l : 対よりの中心線の長さ

λ : 心線の長さ

L', l', λ' : ねん回後のそれぞれの値

$D/2$: コアとメッセンジャワイヤの中心間隔

α : コアのより合わせピッチ円直径

δ : 対より合わせピッチ円直径

P_1 : コアの集合ピッチ

P_2 : 対よりのピッチ

n_1 : L/P_1

n_2 : l/P_2

k : D/L

ケーブルにねん回を与えた場合の1ピッチの長さ L をとり出し、各部の長さを計算すると第13図のようになる。ねん回前は実線で示す寸法で表わされる。すなわち対よりの中心線の長さ l は直径 d の円筒に n_1 回巻きつけられており、心線の長さ λ は直径 δ の円筒に n_2 回巻きつけられているから、それらの関係は第13図実線のとおりである。

次にケーブルにねん回を1回与えると、コアも対よりもそのより合わせ数が、ねん回が同方向なら+1、反対なら-1と増減するから、それぞれ $n_1 \pm 1, n_2 \pm 1$ 回になる。よってねん回後の長さは、第13図の点線のとおりになる。したがってねん回による導体素線の伸びは次式で与えられる。

$$\frac{\lambda' - \lambda}{\lambda} = \frac{\pi^2/2}{\left[1 + \left(\frac{\pi d}{P_1}\right)^2\right] \left[1 + \left(\frac{\pi d}{P_2}\right)^2\right]} k^2$$

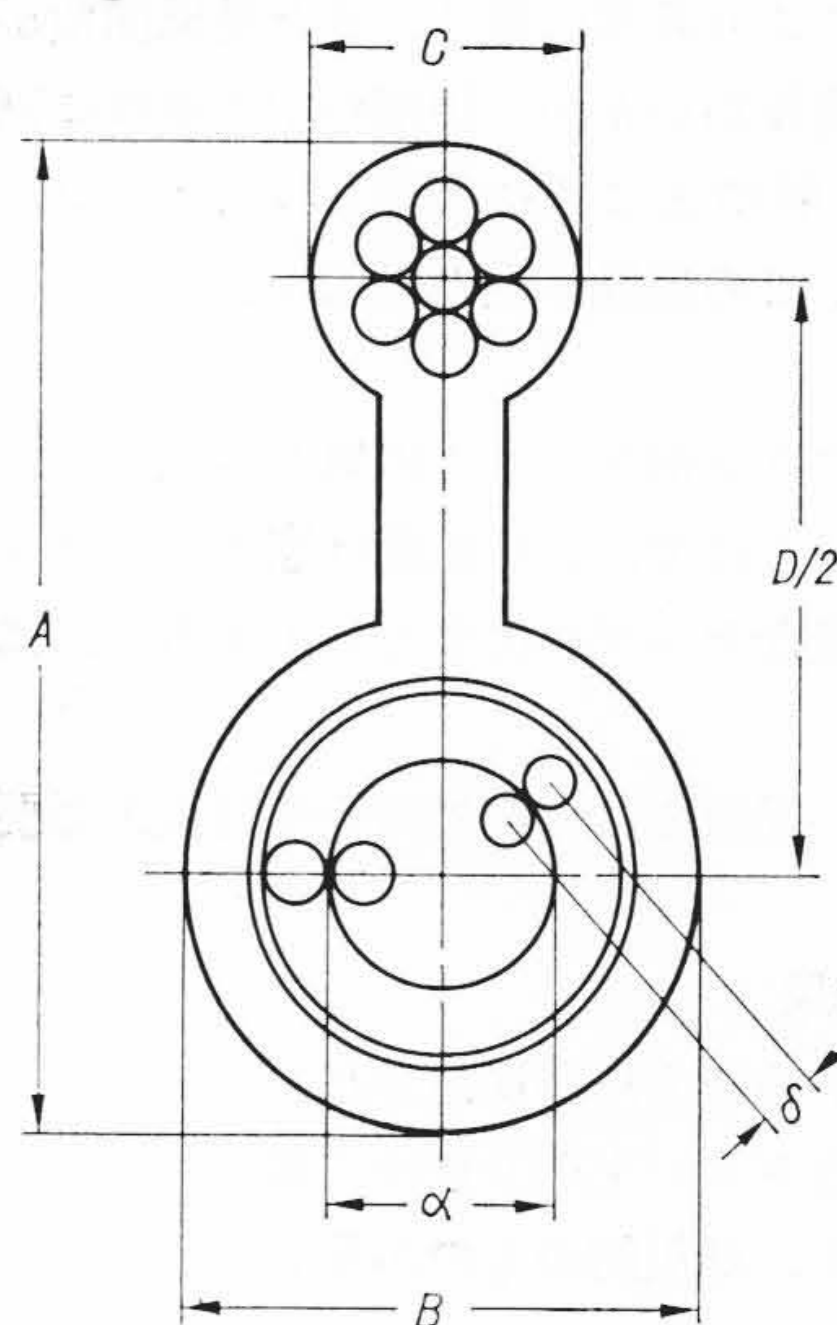
ただし $L \gg P_1, P_2$ が成り立つから $n_1 \pm 1 \doteq n_1, n_2 \pm 1 \doteq n_2$ とおいてよく、また微小項は省略してある。

上式を適用して、一例としてポリエチレン絶縁対形の0.9mm導体のヒョウタン形ケーブルの心線の伸びとねん回のピッチの関係を求めてみると第14図のようになる。

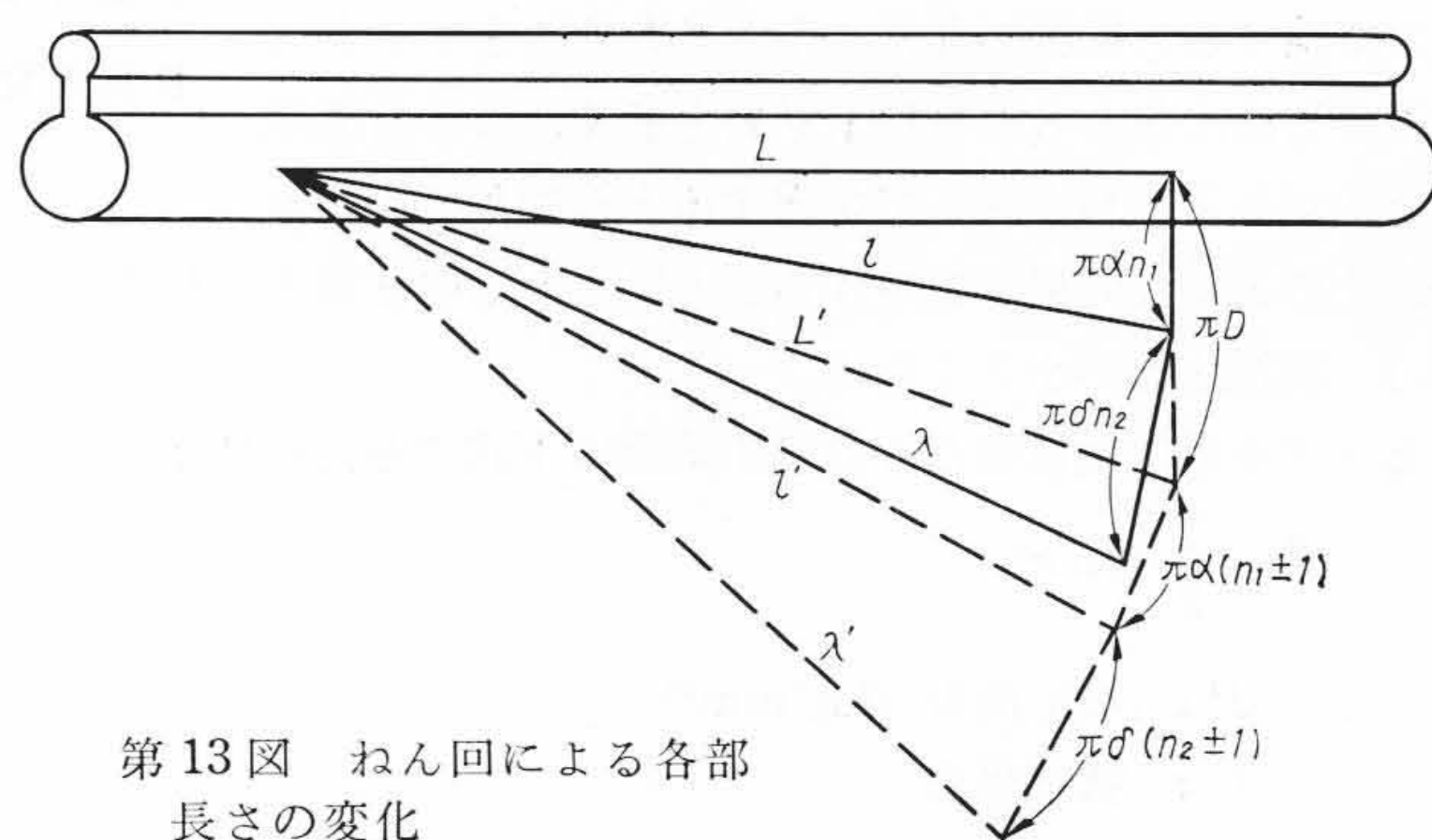
第14図で明らかなように、心線伸びは対数の多いケーブルほど大きい値を示し、ねん回ピッチの2乗に逆比例している。

4.2 ねん回数の決定基準

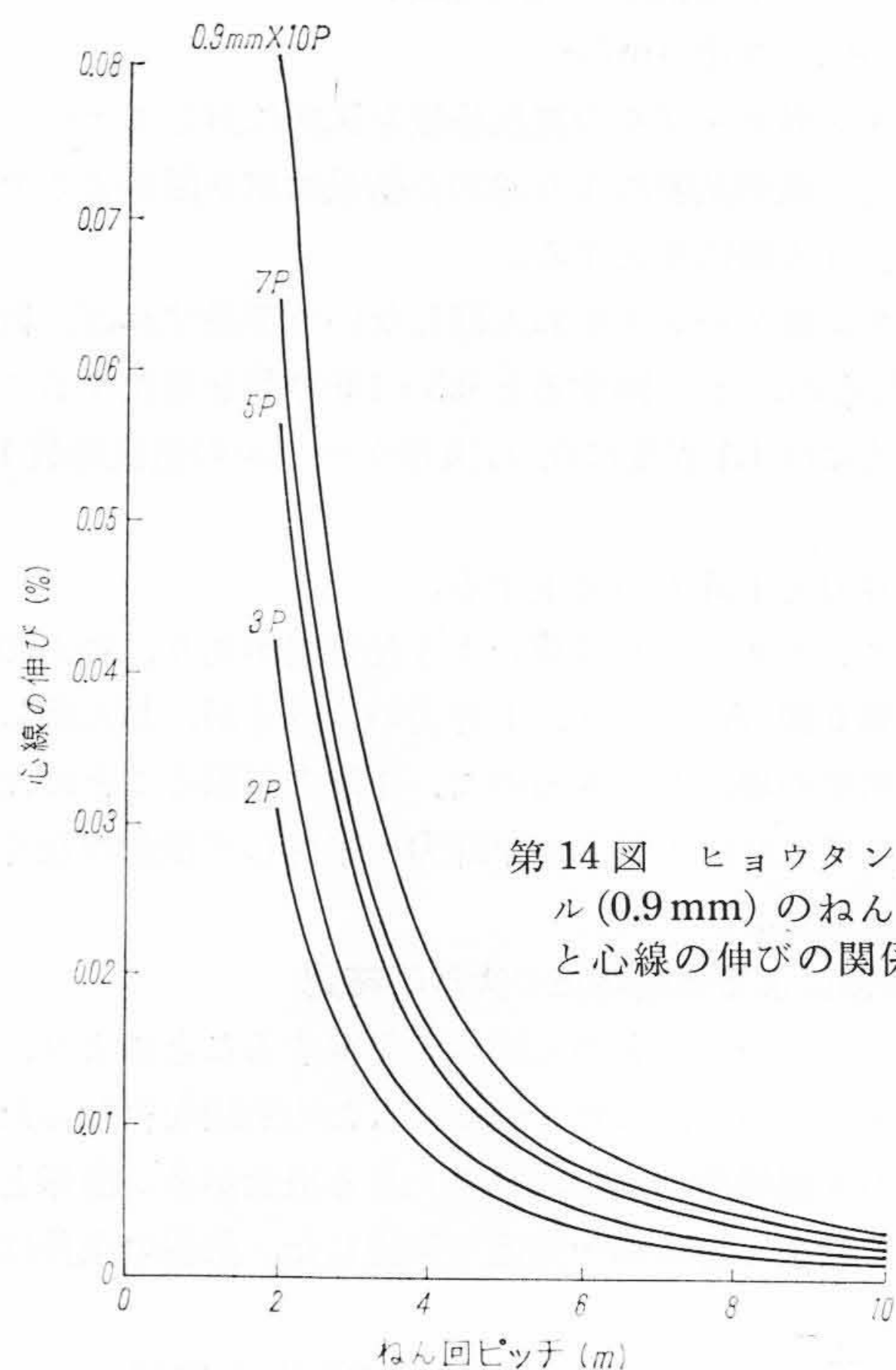
ねん回した場合の心線の伸びを、最高どの程度まで許容できるかは、心線材料の疲労より定めるのが妥当である。一般に材料の疲労限を知るには、多くの実験を必要とするが、大略の目安は第15図で示され、斜線部が繰返し応力の許容範囲となる。



第12図 ヒョウタン形ケーブルの構造



第13図 ねん回による各部長さの変化

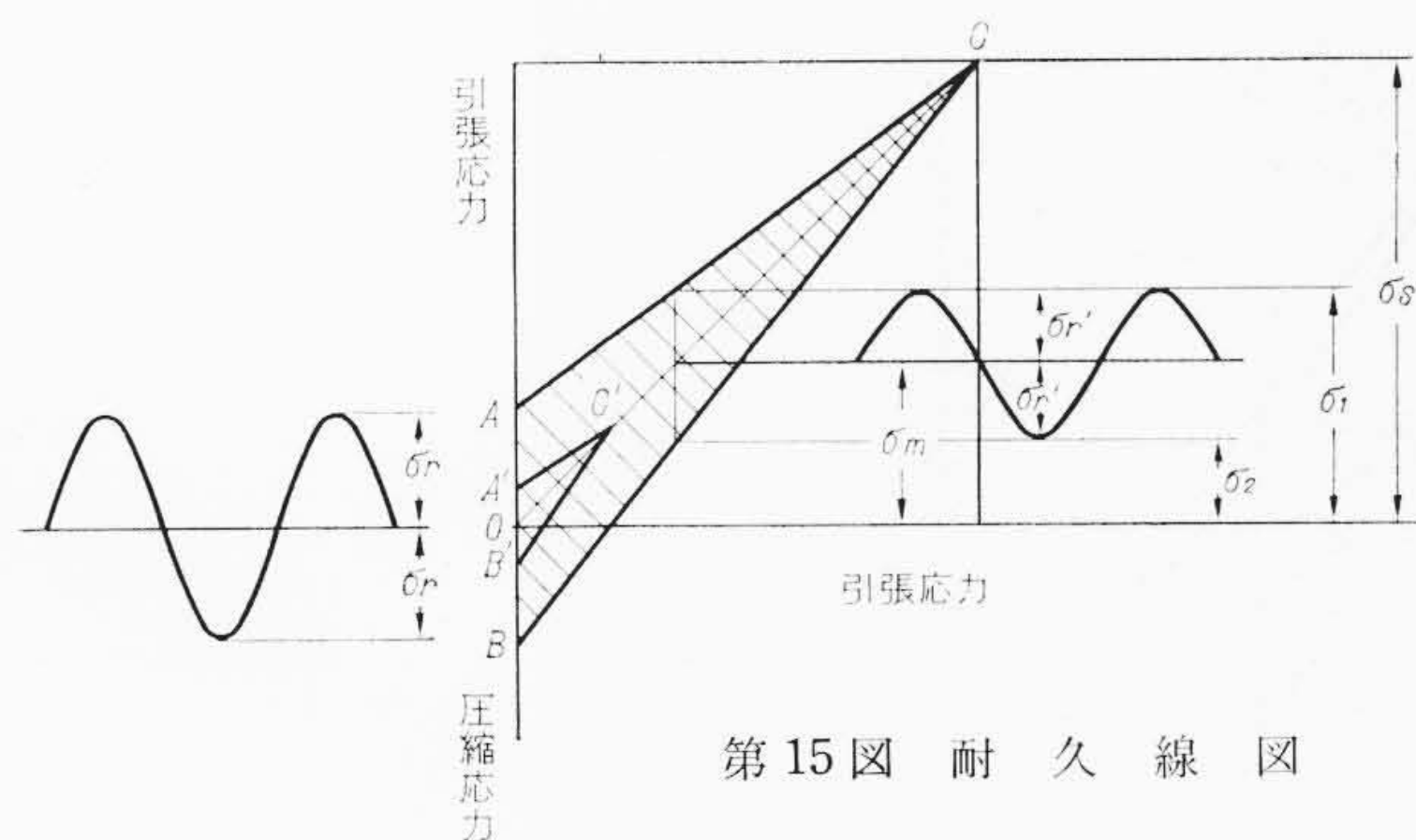


第14図 ヒョウタン形ケーブル(0.9mm)のねん回ピッチと心線の伸びの関係

図中に示した記号は

- σ_r : 両振疲労限 (kg/mm²)
- σ_r' : 片振引張疲労限
- σ_m : 片振引張疲労の平均応力
- σ_1 : 最大応力
- σ_2 : 最小応力
- σ_s : 材料の降伏点

両振の場合は、応力振幅 σ_r の大きさまで耐久範囲があるが、平均



第15図 耐久線図

応力が σ_m になると、応力振幅を σ_r' に減じなければ材料の耐久力がなくなることを意味する。

次に平均応力 σ_m に相当するひずみ ε_m を計算する。

第15図より明らかなように、応力振幅の比 μ は

$$\mu = \frac{\sigma_r'}{\sigma_r} = \frac{\sigma_s - \sigma_m}{\sigma_s} = 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_s}$$

$$\therefore \sigma_m = (1 - \mu) \sigma_s$$

$$\therefore \varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E} = (1 - \mu) \frac{\sigma_s}{E}$$

ここで E は材料のヤング率である。

上式より ε_m と μ との関係を計算すると第16図を得る。ただし導体材料の E, σ_s の値として、 $E=10,500 \text{ kg/mm}^2$, $s=5.5 \text{ kg/mm}^2$ (0.1% 永久ひずみ) を用いた。

ケーブルが振動する場合に生ずる応力の中で最大のは、クランプ近傍の繰返し曲げ応力である。この値を推定することはきわめてむずかしい問題であるが、ケーブルが1スパンを半波とした正弦波形で振動するものと仮定し、その場合のクランプにおける電線傾度による曲げ応力が比例するものと考え、曲げ応力はまた振幅に比例することになる。

ケーブルにねん回を与えると、振動振幅は約1/3以下に減少することから、 $\mu=1/3$ とおくことができる。第16図より ε_m の値を読み取ると、約 0.035% が得られる。すなわち、心線の伸びを 0.035% 与えるようなねん回を与えても、ケーブルの振動によって疲労断線が起らないことになる。

以上の結論は第15図の $\triangle ABC$ を応力の許容範囲に選んだことを前提としている。しかし実際使用する場合には、この範囲を少しでも逸脱することは好ましくない。

一般に交番荷重に対しては、基準応力の1/8以下に使用応力を制限している。すなわち、両振疲労の応力振幅を $\sigma_r/8$ 、片振引張疲労の極端な場合として、応力振幅が零のときには、その平均応力を $\sigma_s/8$ とする。したがって、応力の安全範囲は第15図のように $\triangle ABC$ から $\triangle A'B'C'$ に縮小する。

$\triangle ABC$ と $\triangle A'B'C'$ は相似形である。したがって $\triangle ABC$ で論じたことは、 $\triangle A'B'C'$ においてもそのまま適用されるので、ねん回によって生ずる導体のひずみとして安全である値は

$$\varepsilon_m/8 = 0.0044\%$$

となる。

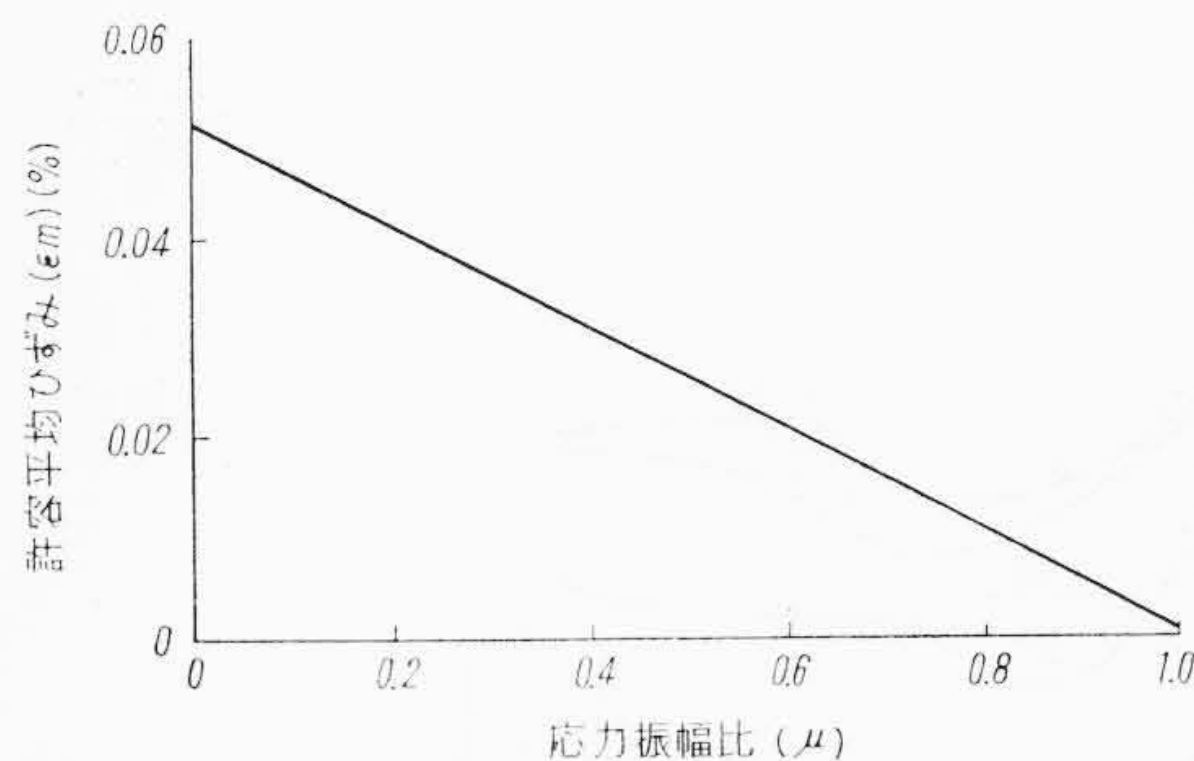
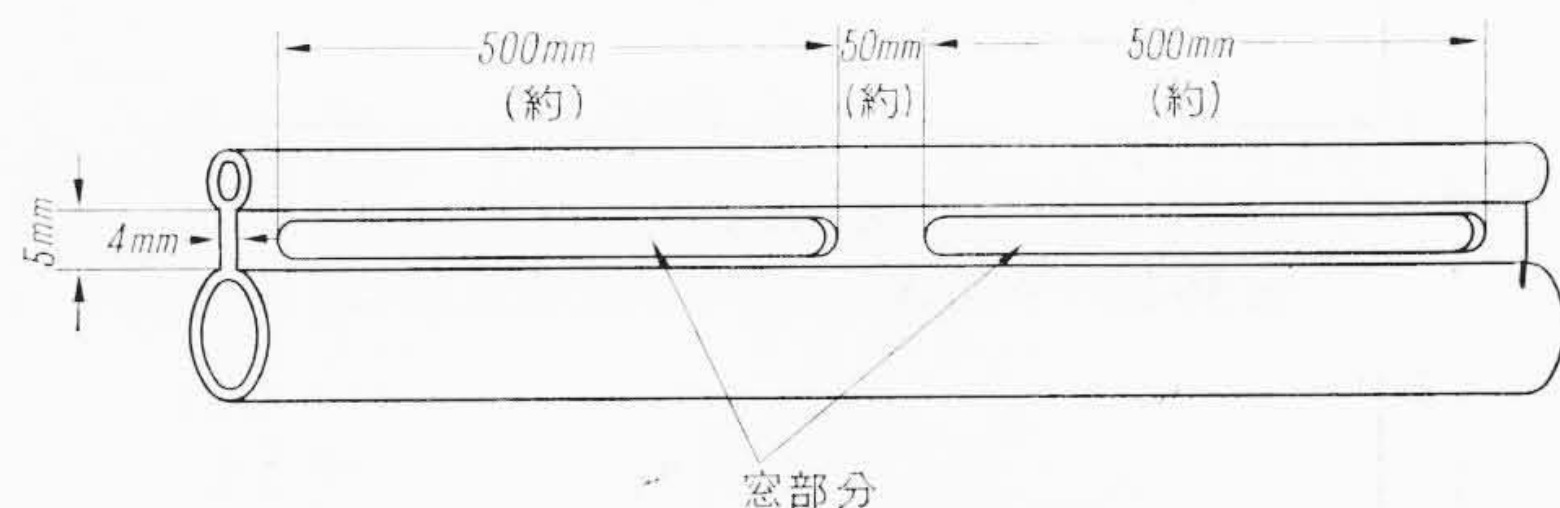
前述の計算式とこの安全値よりねん回ピッチの概略計算式を求めると次のようになる。

$$P = 3.5A$$

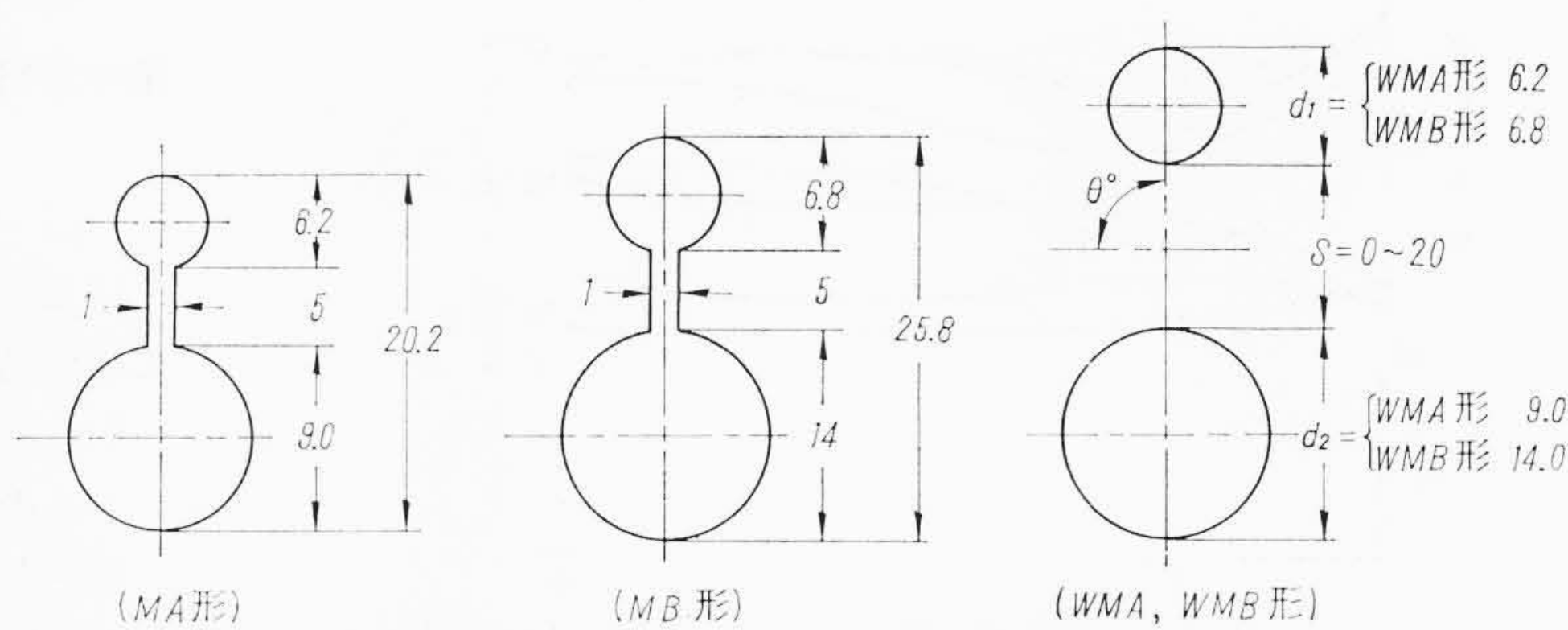
$$N = \frac{S}{P}$$

ここで P : ねん回ピッチ (m)

A : ケーブルの長径 (cm)

第16図 応力振幅 μ と許容平均ひずみ m の関係

第17図 ハンガヒョウタン形ケーブルの構造



第18図 風洞実験に使用したヒョウタン形ケーブルの模型 (単位 mm)

N : ねん回数

S : スパン (m)

5. ハンガヒョウタン形ケーブルと振動防止効果

5.1 ハンガヒョウタン形ケーブルの抵抗係数

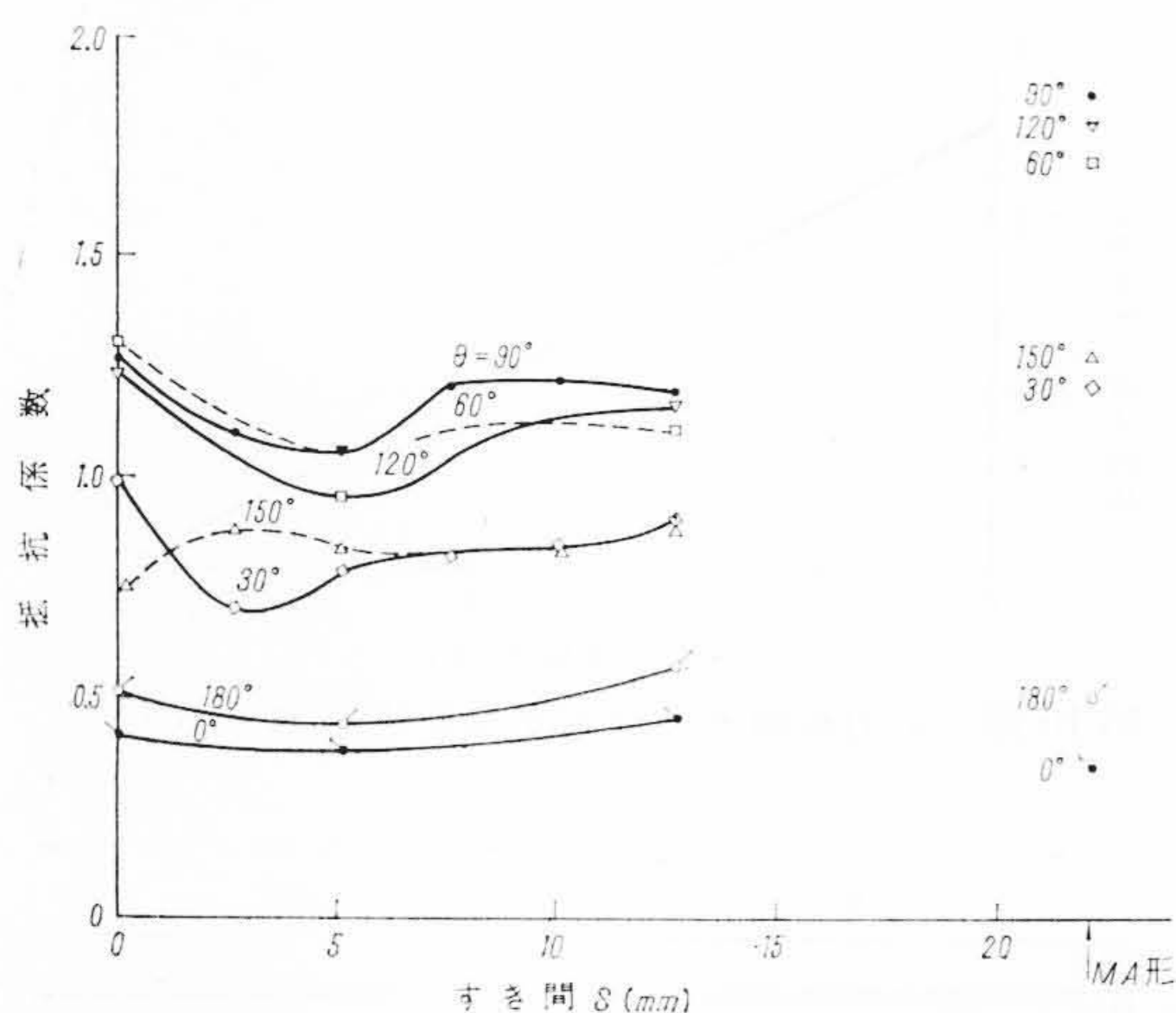
従来の丸形ケーブルをメッセンジャワイヤにハンガでつるしたものは、自己支持形ケーブルよりも振動の小さいことは経験されていることである。自己支持形ケーブルもこれと類似構造とすれば、振動の減少することが与えられる。そこで第17図のようなケーブル部とメッセンジャワイヤ部との間に窓を設けたケーブルの開発を行ない、製造方式を確立した。このケーブルをハンガヒョウタン形ケーブルと名づけた。

このハンガヒョウタン形ケーブルの窓の大きさをどの程度にすれば振動防止の効果があるかを、ケーブルの抵抗係数を風洞実験により測定し⁽⁴⁾、これより判定することにした。

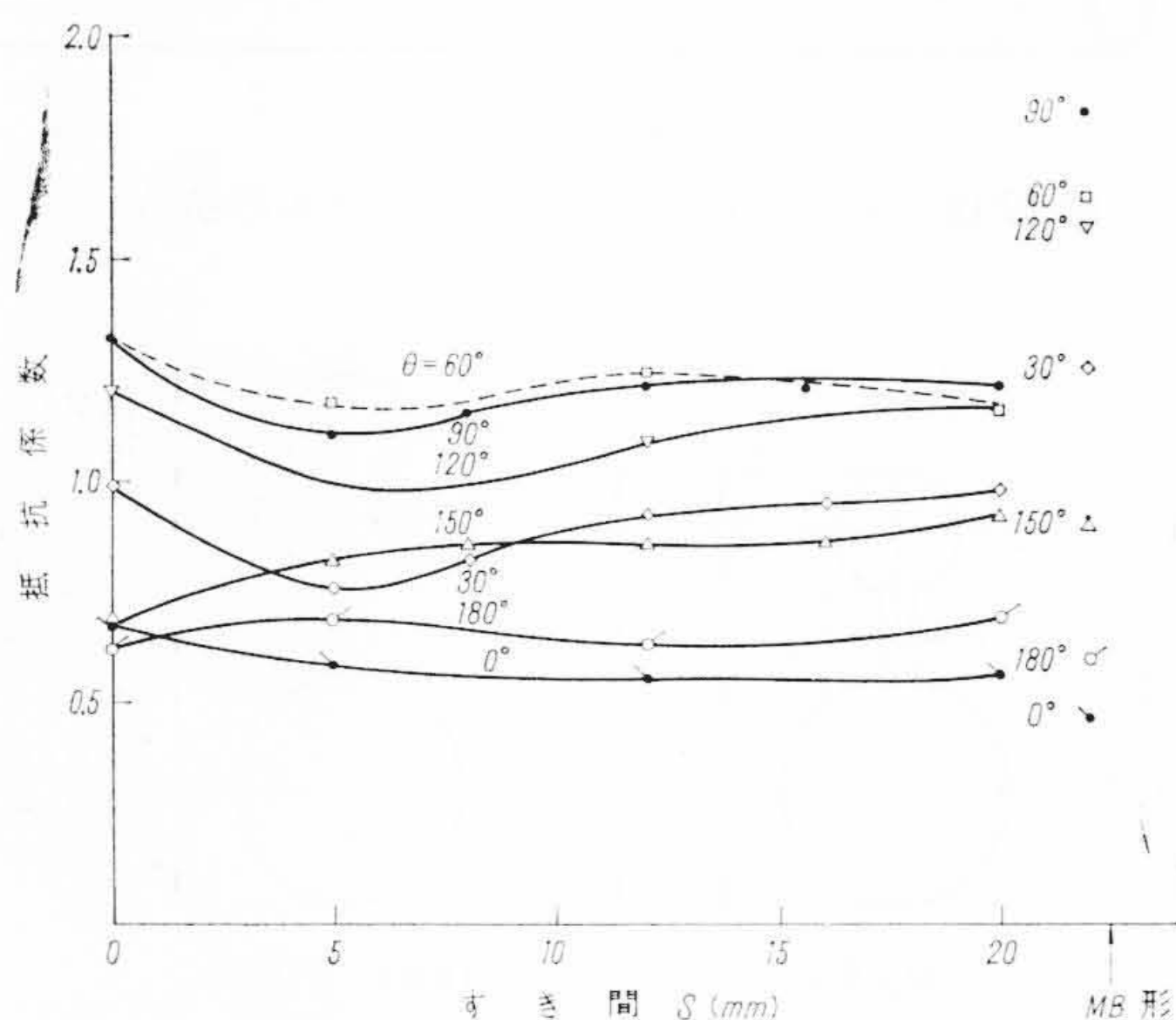
実験に用いたケーブルの模型の寸法は第18図のとうりである。模型の風向に対する傾き角 θ と風速をいろいろにかえて抗力を測定し、これより抵抗係数を計算して整理すると、第19図および第20図のようになる。

以上の結果を整理して考えると A 形、B 形を問わず傾き角 θ が 30度から 150度までの間では、窓のすき間を零から増していくと、抵抗係数はいちど減ったのち増し、 θ が 90度の場合 (平常架線時の状態) には、さらにすき間を増すと抵抗係数が再び減る傾向を示している。

上記実験の結果では θ が 90度の場合、WMA 形ではすき間が 4mm 前後、WMB 形ではすき間が 6mm 前後で抵抗係数が最小になることがわかった。しかし抵抗係数の最小値となる最適のすき間のパン



第 19 図 WMA 形のすき間と抵抗係数



第 20 図 WMB 形のすき間と抵抗係数

ドは第 19 図および第 20 図でわかるように、ある程度幅の広いものである。メッセンジャワイヤ部とケーブル部の大きさが著しく異なった場合は、抗力は大部分太いほうの円筒によって生ずるので、すき間を変えても大きく抗力の変わることはないと考えられる。またすき間を第 18 図の実験よりさらに広くすれば、2 本の円柱の相互干渉はしだいに減って抗力は単独円柱のものに漸近するはずであり、窓部のすき間を大きくしてもさほど効果のないことは明らかである。

すき間のない従来のヒョウタン形(第 18 図 MA 形, MB 形)とハンガヒョウタン形の抵抗係数を比較したところでは、明らかにハンガヒョウタン形の抵抗係数が小さく、窓をあけることにより風圧荷重が小さくなり、これにより振動発生エネルギーを小さくすることを意味している。

上記風洞実験の結果よりハンガヒョウタン形ケーブルの窓部のすき間を 4~5mm にすれば効果が十分期待できるとの結論が得られたので、第 17 図のようなケーブル構造を製造上の基準とした。

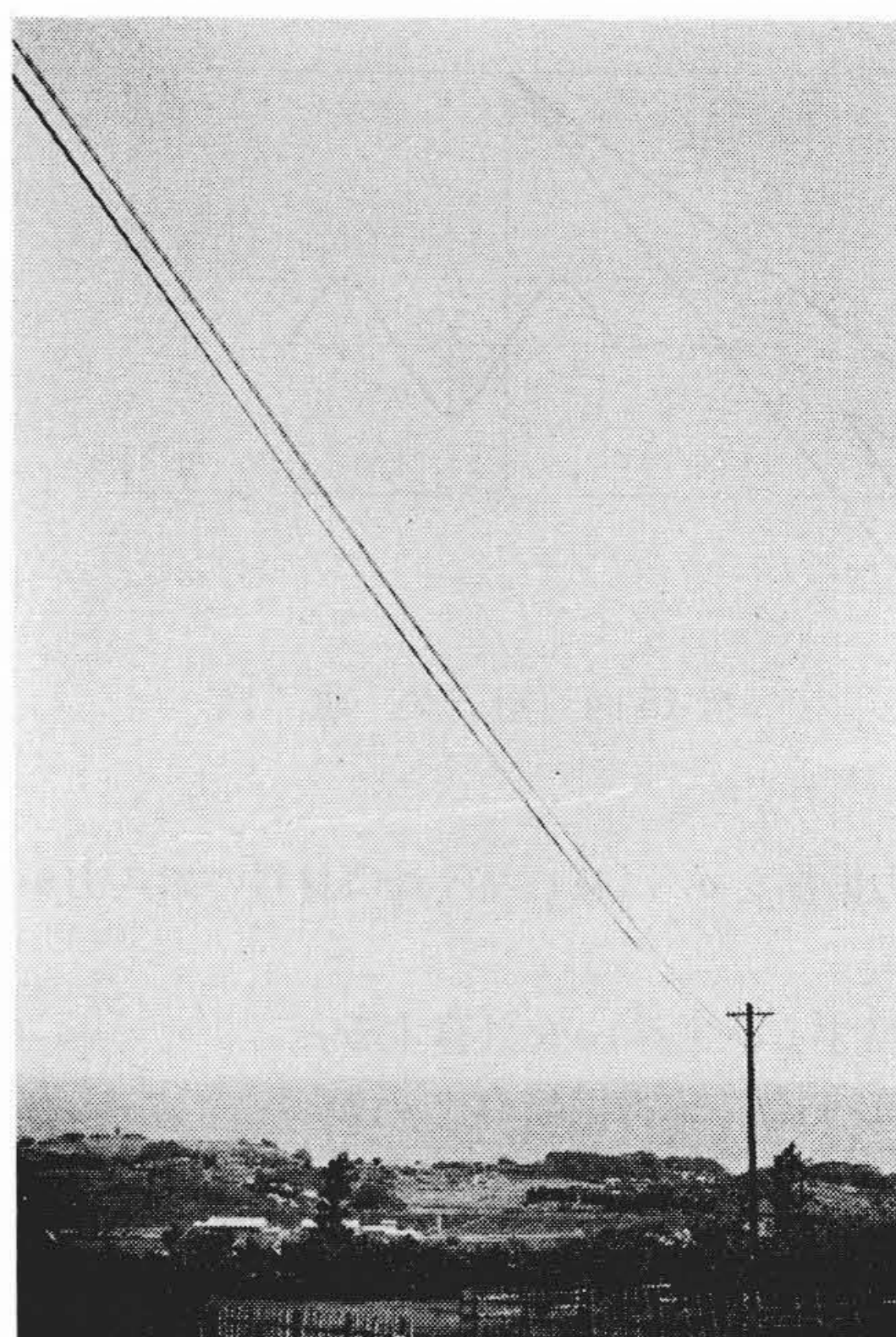
5.2 振動防止効果の実験的確認

第 10 図に示した実験場にハンガヒョウタン形ケーブルを架線し、振動防止の効果を実験により確認してみた。風速約 15 m/s のときの実験の結論を示すと、次のようである。

- (1) ヒョウタン形ケーブル(窓のない)をねん回したものは、ねん回さないケーブルの約 1/4 に振動振幅が減少した。
- (2) ハンガヒョウタン形ケーブルは、ヒョウタン形ケーブルのねん回さないものに比較して約 1/3 に振幅が減少した。

すなわち、実験によっても窓をあけたハンガヒョウタン形ケーブルは、ヒョウタン形ケーブルをねん回したとほぼ同程度の振動防止効果のあることが明らかにされた。

第 21 図に架線されたハンガヒョウタン形ケーブルを示した。線



第 21 図 ヒョウタン形ケーブル(ねん回して架線)とハンガヒョウタン形ケーブルの架線状況
(上部がハンガ形、下部がヒョウタン形ケーブルをねん回したもの)

路の左側はねん回して架線されたヒョウタン形ケーブルである。

6. 結 言

以上ヒョウタン形ケーブルにおける機械的特性の主要事項について検討結果を述べたが、これを次のように要約することができる。

- (1) ヒョウタン形ケーブルのクランプ部に加わるひずみはケーブルの首部を切り離すことにより非常に小さくなり、首部を切り離さない場合、ケーブルが風により振動して発生するケーブル導体の断線の心配がなくなる。
- (2) ケーブル首部を切り離すこと以外に、ヒョウタン形構造のシース押出方式をチューブ方式にすることによっても、ケーブル導体に加わるひずみは小さくなる。
- (3) ヒョウタン形ケーブルは強風にあうと振動を起こす欠点があるが、ケーブルをねん回して架設することにより振動を減少できるので、この方式はもっとも効果的な方法である。
- (4) ヒョウタン形ケーブルをねん回すると、抵抗係数が小さくなり、また飛行機の翼のように、風によって上昇力と下降力が働く場所が交互に表われ、一径間全体として考えると、これが平衡して振動がなくなることになる。
- (5) ヒョウタン形ケーブルをねん回して架設した場合のひずみについて検討し、ねん回の基準が明らかにされた。
- (6) 新しく開発されたハンガヒョウタン形ケーブルは、従来のヒョウタン形ケーブルと比較して抵抗係数は 2/3 程度となり、これにより風圧荷重の減少が期待できた。
- (7) ハンガヒョウタン形ケーブルの窓部のすき間は 4~5mm で抵抗係数が最小になる。ただしすき間をあまり大きくしても、さほど抵抗係数は小さくならないという貴重なデータが求められた。
- (8) ハンガヒョウタン形ケーブルは架線実験の結果でも上記抵抗係数の減少に伴い、強風時に振動の減少することが確認できた。ハンガヒョウタン形ケーブルは従来のヒョウタン形ケーブルをねん回したと同様な振動防止効果のあることが明らかにされた。

終わりにこの研究に対してご指導、ご援助をいただいた日立製作所中央研究所明山部長、日立電線株式会社間瀬部長、山本部長、庄司課長ならびに実験に協力された小形、仲沢の両君に深くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 堀：日本機械学会前刷集(23) 510 (1960)