

# 多 導 体 送 電 線 の 捻 回 特 性

## Twist Characteristics of Multi-Conductor Transmission Lines

林 潔\* 鈴木 芳 正\*

Kiyoshi Hayashi Yoshimasa Suzuki

山 本 三 郎\*\* 星 野 弘 之\*\*\*

Saburo Yamamoto Hiroyuki Hoshino

### 内 容 梗 概

多導体送電線の機械的問題の中で重要な項目として取り上げられているのは捻回特性である。すなわち多導体送電線の各素導体が雪や風によって不平等な機械的負荷をうけると各素導体が捻れ、スペーサの配列が適当でないと捻れたままの状態でも復元しなくなり、送電線振動によって素導体が互にすれ合い導体を傷つけ、また電氣的にもコロナその他の面で好ましくない現象を起す。

これを検討するため実際の送電線に近い条件で 350m スパンの試験用送電線を使って実験を行った。その結果スペーサ取り付け位置と捻回特性との関係について次のことがわかった。

- (1) スペーサ取り付け間隔を短くすると捻回特性はすぐれたものとなる。
- (2) スペーサ間隔は両端鉄塔引留部付近で短くすることが有効かつ経済的と推定される。

### 1. 緒 言

長距離大容量送電線として多導体送電線（複導体，3 導体，4 導体）は同一断面積の単導体に比較して送電容量，コロナ開始電圧などの電気特性がすぐれているため，最近世界各国では多導体送電方式を使った超高压送電線が次々と運転に入っている。一方わが国においても，すでに複導体として 275 kV の西東京幹線が完成し，さらに電源開発株式会社では只見幹線を建設中で，今後も国内主要幹線として複導体乃至 4 導体の送電方式が検討される情勢になってきた。

しかし多導体送電線は技術的には，未解決の機械的問題が多く，素導体間隔を一定に保つにはスペーサを適当な距離間隔に挿入することが必要である。すなわち，素導体が風圧などによってその間隔が変りはなはだしい場合には導体が衝突し合うようになる。

このようにスペーサは多導体送電線には必要であるが，スペーサを取り付けた状態で風圧，着雪，着氷など素導体に不均等な負荷が加ると，多導体に捻れ力が働き縄のような捻れを生じ，この状態のまま復元しないことがある<sup>(1)</sup>。このため素導体相互がすれ合い，導体表面を傷つけ，素線切断を起すようなことにもなる。またこの状態はコロナの発生など電氣的な面に対しても望ましくない。この状態を防止するためにはスペーサの取り付け位置や構造についての研究が必要である。

これらの研究方法として一応力学的な理論計算を行うことも考えられるが，数式の取扱上相当な困難があり，ある程度の仮定を立てて簡略化した理論も成立するが，

実際とかなり異なった結果となる。また適当な模型送電線によって模擬実験を行い，力学的な縮少率から実際の場合を推定することも検討しているが，これを実施する場合素導体自身の捻り剛性，曲げ剛性（実際には相当に影響すると考えられる）に至るまで模型化することが困難であり数分の 1 に縮小することでさえ相当困難である<sup>(3)(4)</sup>。

本報告は実際に送電線を架線した条件とほとんど同一の 350m スパンの多導体送電線を用い，大規模な実験を行った結果である。

### 2. 捻回実験の方法

捻回実験の最終的目的地は前述のように任意のスペンに架線された多導体送電線に適当にスペーサを配置して捻回現象が生じて送電線に捻れが発生しても必ず復帰するような条件を求めることである。このような目的に対して実験の方法を検討すると次のような点が考えられる。

(1) 最終的には捻れが復帰するために必要とされるスペーサ配置を求めるのであるが各種のスペーサ配置についての比較ができるためには数量的な形での実験結果が得られるような実験が最初必要である。

(2) 実験設備からいってスペン長さは 350m と限定されるがそのほかの場合についてもある程度推測ができるような基礎的な資料が得られることが望ましい。

実験の具体的な方法を考えると施行の不可能，可能性の面からいって

(1) 捻回力の加え方はスペン中の一点に集中して加える方法が最も簡単である。実際に着氷，積雪して生ずる捻回力や風圧による力のようにスペン全体にわたって分布した捻回力を加えることはほとんど不可能であり，またこれに近い条件を得るような方法も困難で

\* 電源開発株式会社

\*\* 日立電線株式会社電線工場 理博

\*\*\* 日立電線株式会社電線工場



ある。

(2) 捻回力を測定して各種のスペーサ配置法の比較をする場合その測定法を考えると一点に集中した捻回力を加えて測定した値で比較する方法が一番簡単である。

以上のような考察から捻回実験の方法は次のようにした。

(1) スパン中央に捻回機を取り付けて捻回力を加え同時に捻回力を測定する。

(2) スペーサ配置の方法は結果に対する理論的予測がなかり困難であるから当面は等間隔配置とする。スパン中央には捻回機が取り付けられるが捻回機の取付箇所が等間隔に取り付けられたスペーサ間の中央となるようにする。したがって偶数個のスペーサがスパン中央に対して対称の位置に取り付けるようにした。

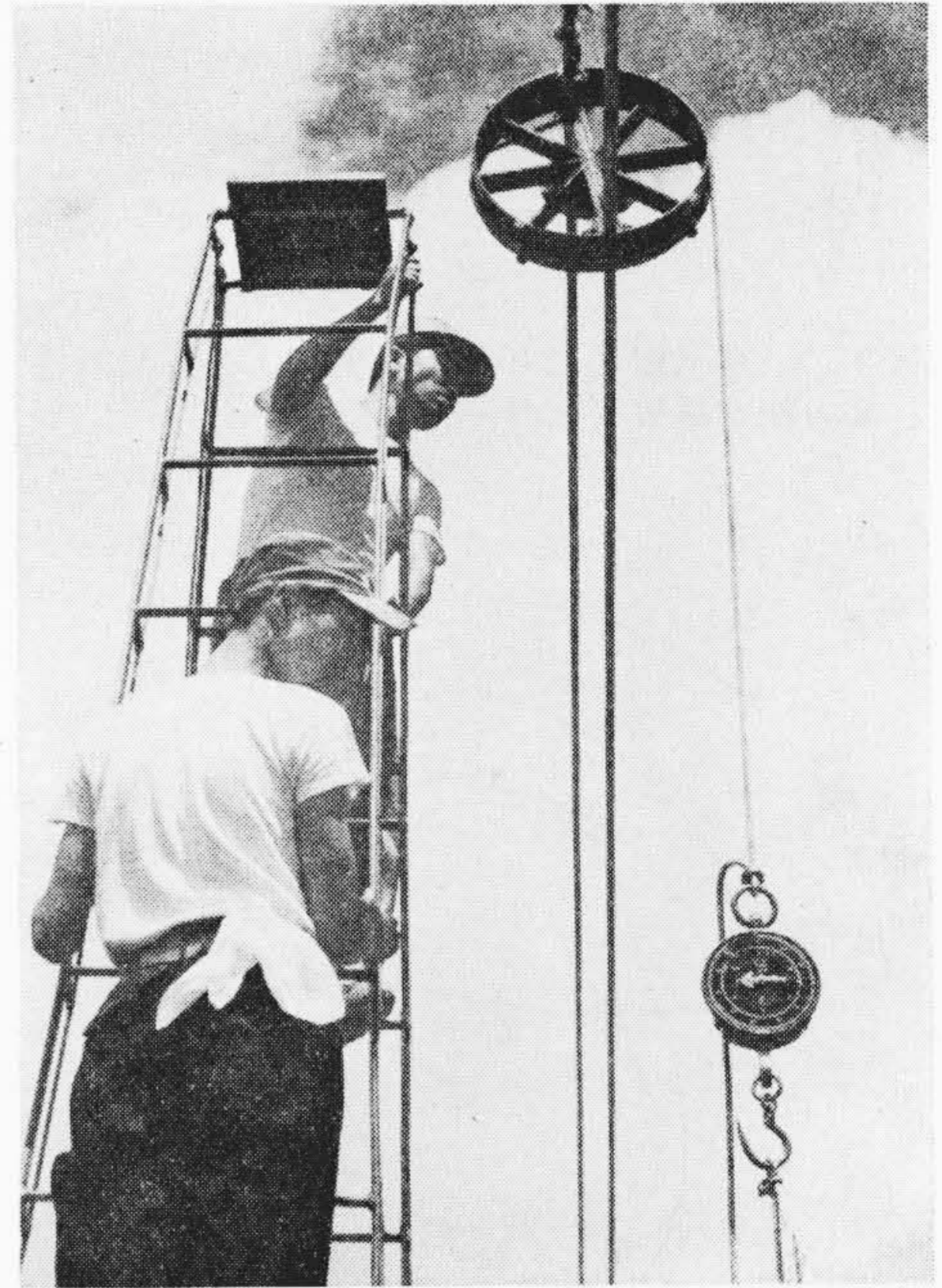
第1図に捻回機を示す。(a)は複導体用、(b)は3導体用である。第2図に捻回力測定の方法を示す。捻回機はいずれも円形プーリ状のものであり周囲に綱を巻付けそれを引張れば捻回力を与えることができる。第2図に示すように捻回機に巻付けられた綱の先端は張力測定用のスプリングバランスを介して滑車を通り巻取ウィンチにつながれており、ウィンチを巻けば捻回が進行していく。復元させる時はウィンチをゆるめればよい。捻回機には捻回した角度を測定するために全円形の分度器が取り付けられており捻回角を10~20度程度変化させてそのつどスプリングバランスを読み捻回力を測定する。この測定状況を第3図に示す。

これらの場合捻回機に2本の綱を巻付け反対方向に張力を加えることによって捻回機に捻りトルクのみが加えられるようにする方法がさらに合理的であるが実験の結

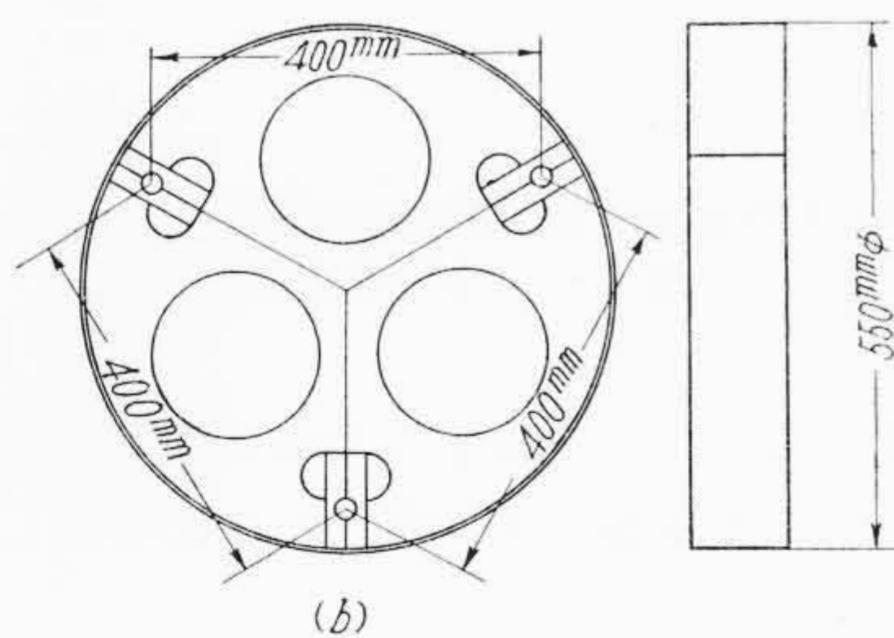
果図示の方法で捻回しても送電線全体の弛度がほとんど変化せず大差が認められないことから本方法を採用した。

### 3. 測定結果

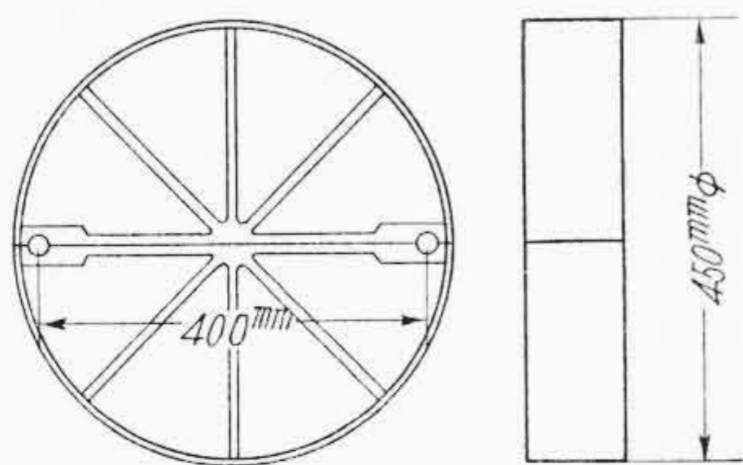
第4~12図に代表的な測定結果を示す。これらの測定結果の図示上問題となる点は捻回角度を増していくと綱の張力が減少する場合がある。この時には機械的な負性抵抗が現われちょうど挫屈現象のような結果を示す。この状態では捻回力の測定がきわめて困難であり、捻回角



第3図 捻回力測定状況

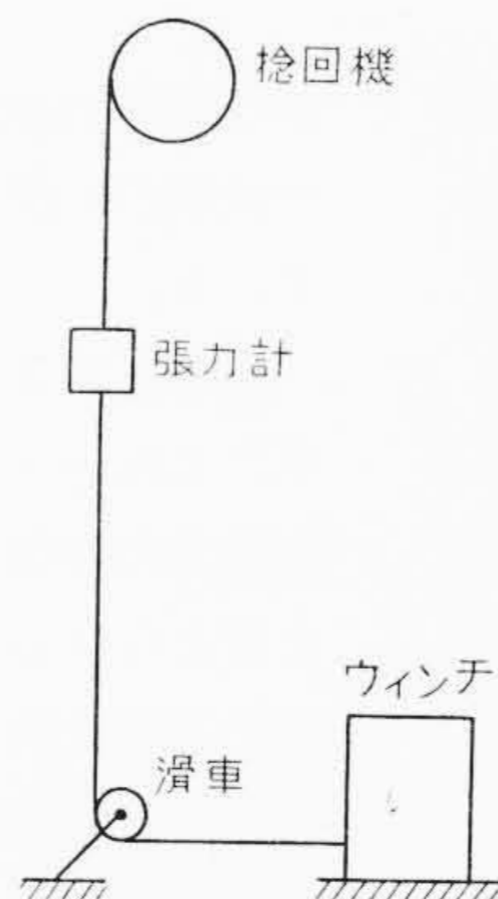


(b)

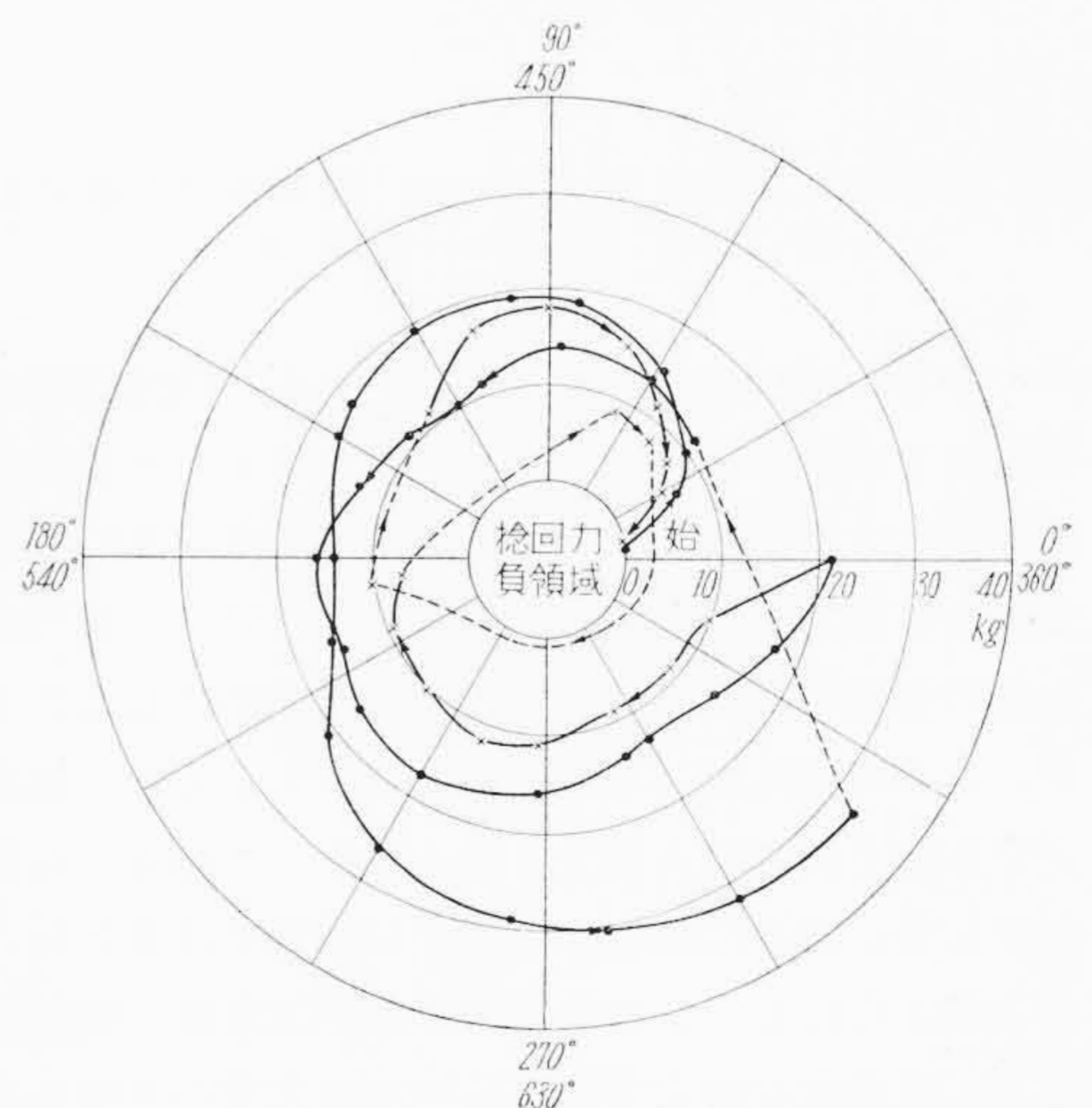


(a)

第1図 捻回機

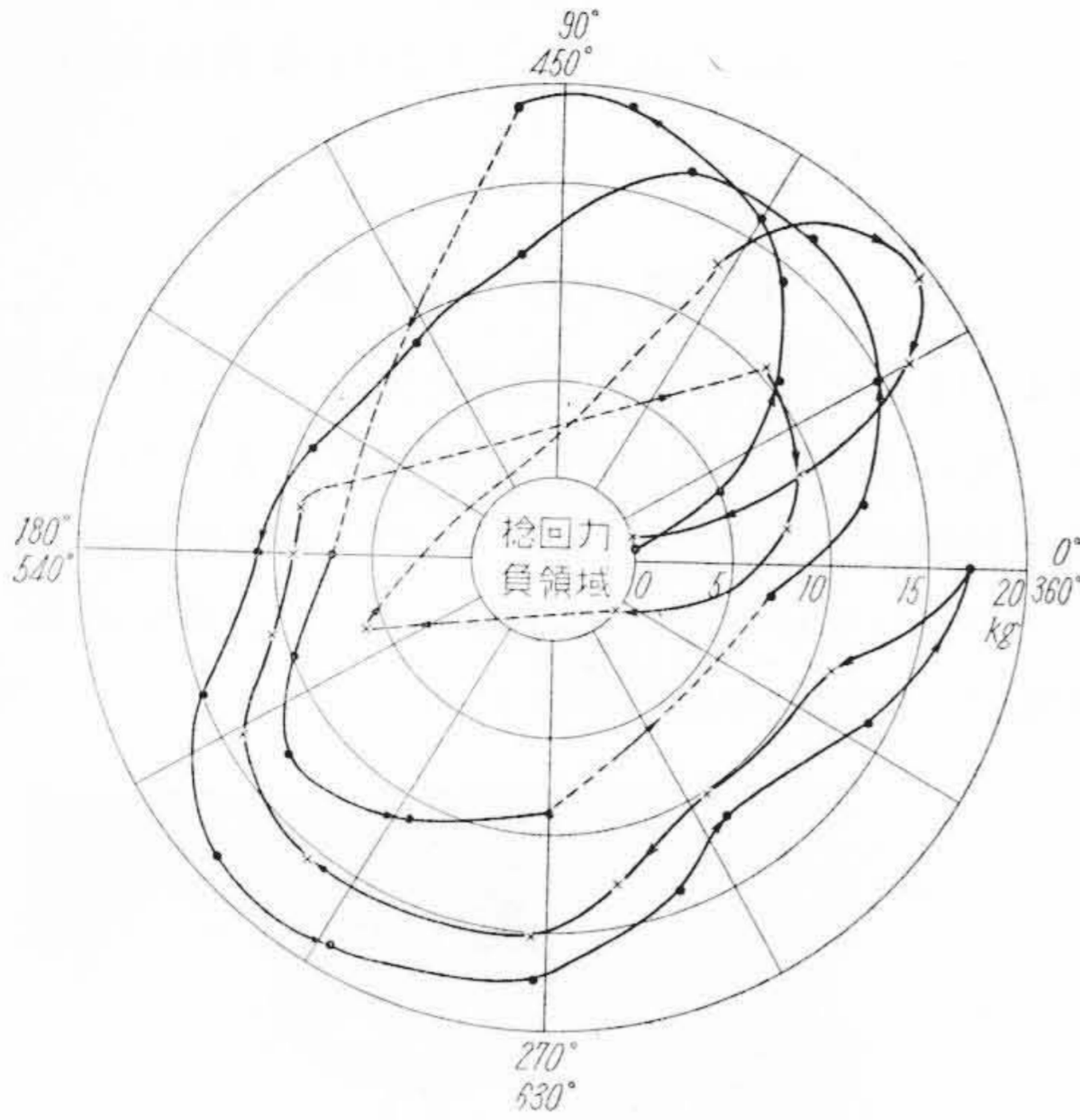


第2図 捻回力測定方法

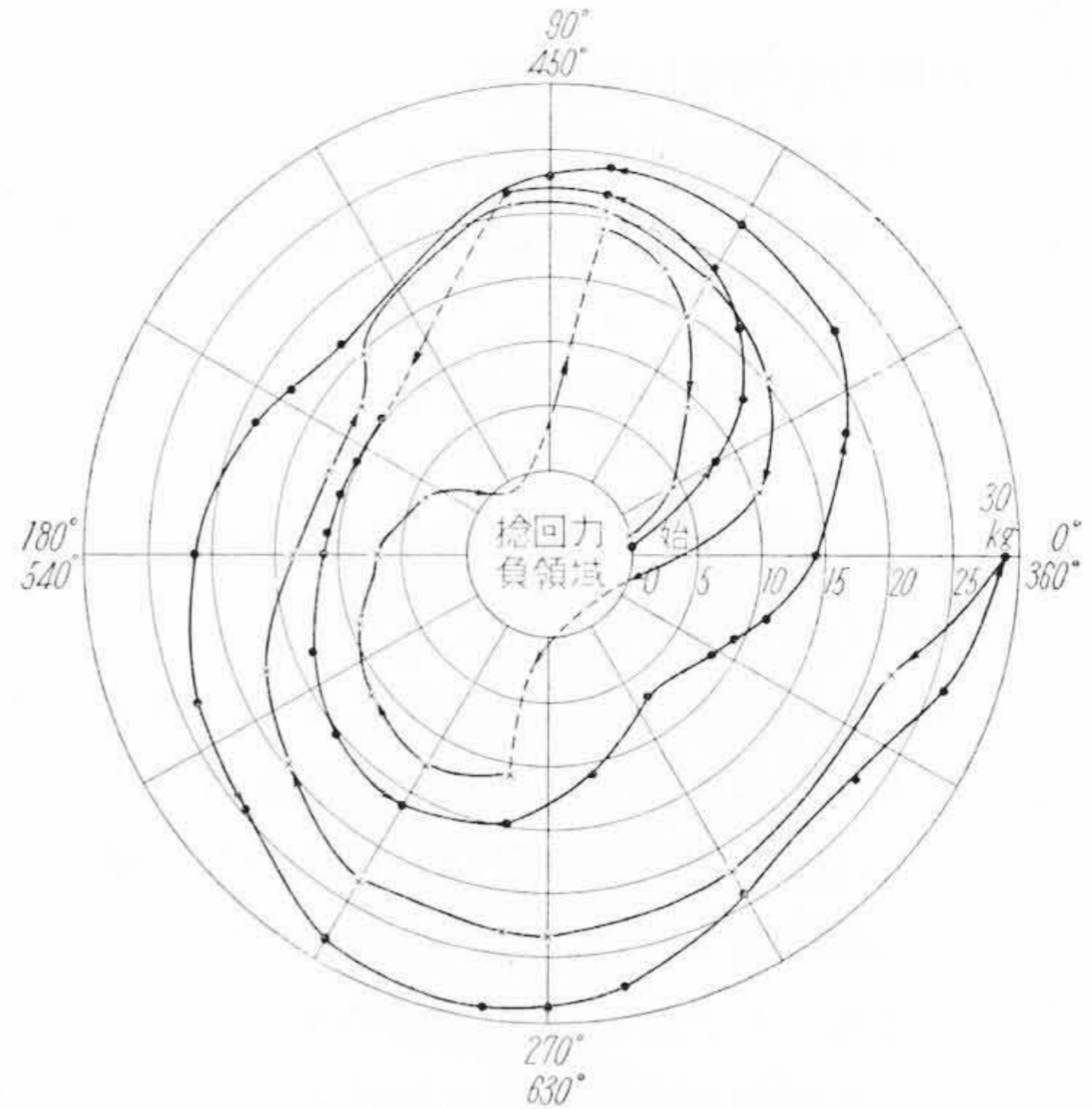


第4図 水平配列 240 mm<sup>2</sup> 複導体送電線の捻回力測定結果 (スペーサ間隔 40m)

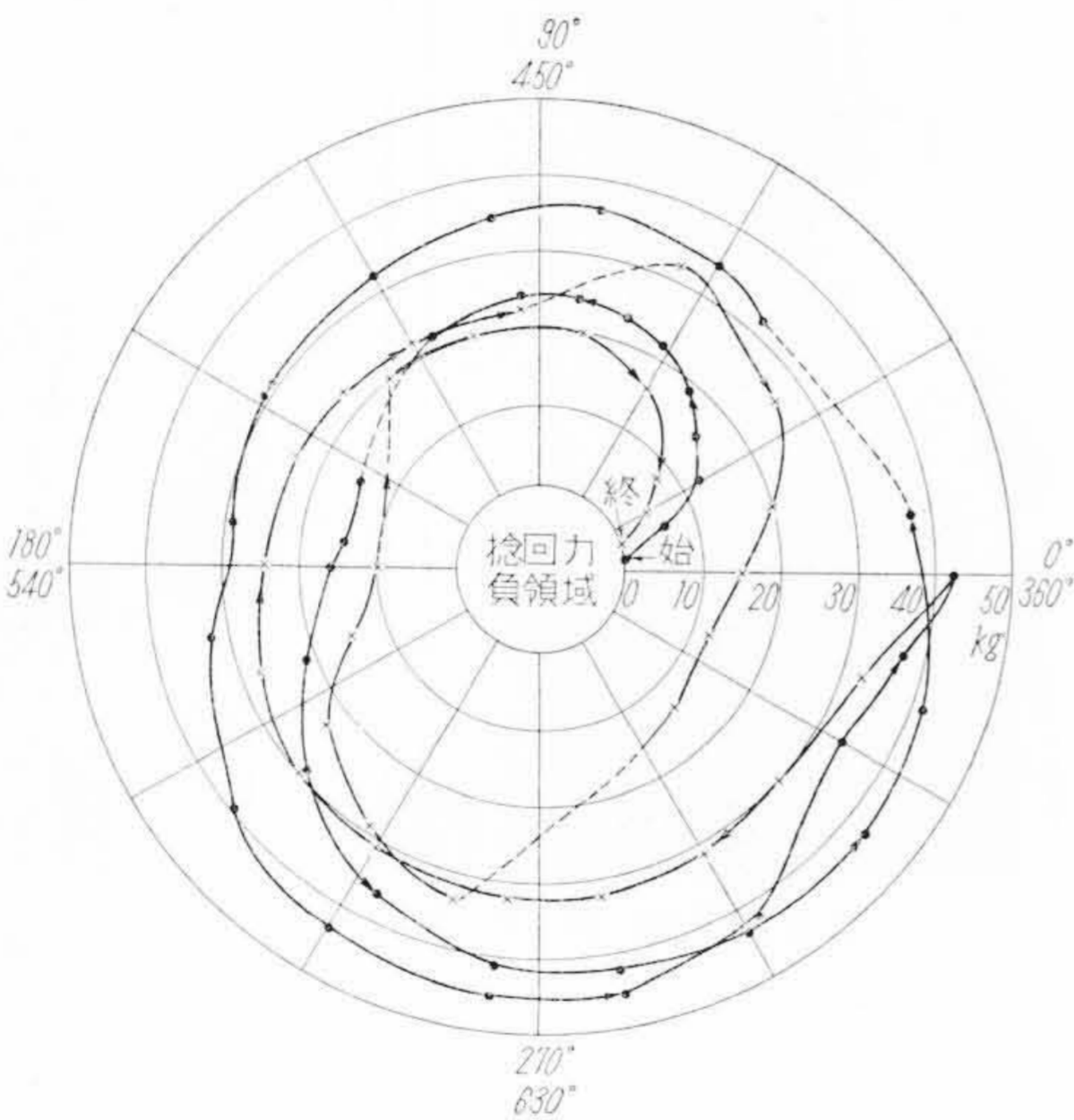




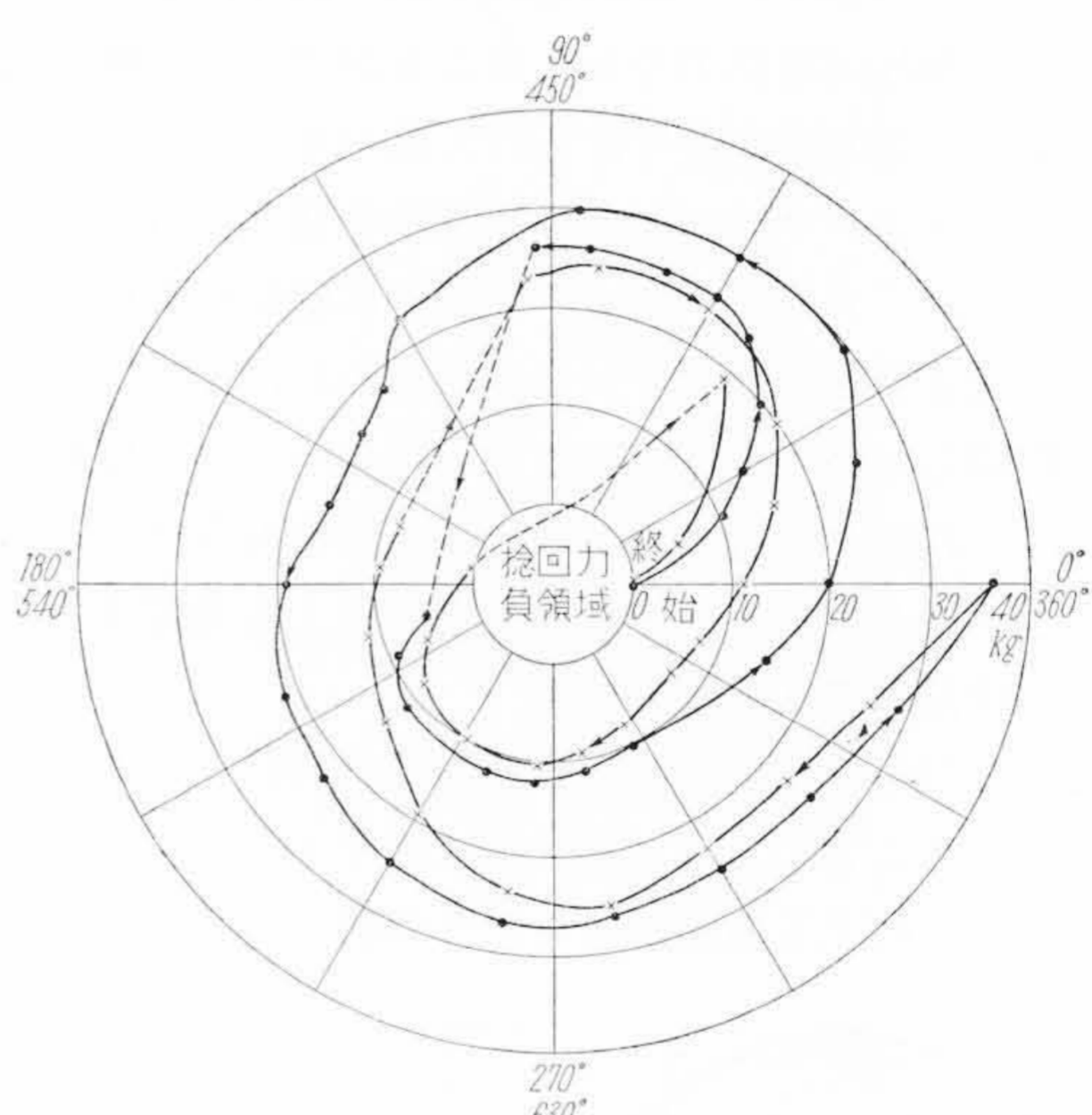
第 5 図 水平配列 240 mm<sup>2</sup> 複導体送電線の捻回力測定結果 (スペーサ間隔 80m)



第 7 図 水平配列 330 mm<sup>2</sup> 複導体送電線の捻回力測定結果 (スペーサ間隔 80m)



第 6 図 水平配列 330 mm<sup>2</sup> 複導体送電線の捻回力測定結果 (スペーサ間隔 40m)



第 8 図 水平配列 330 mm<sup>2</sup> 複導体送電線の捻回力測定結果 (セミヒンジ形スペーサ使用間隔 80m)

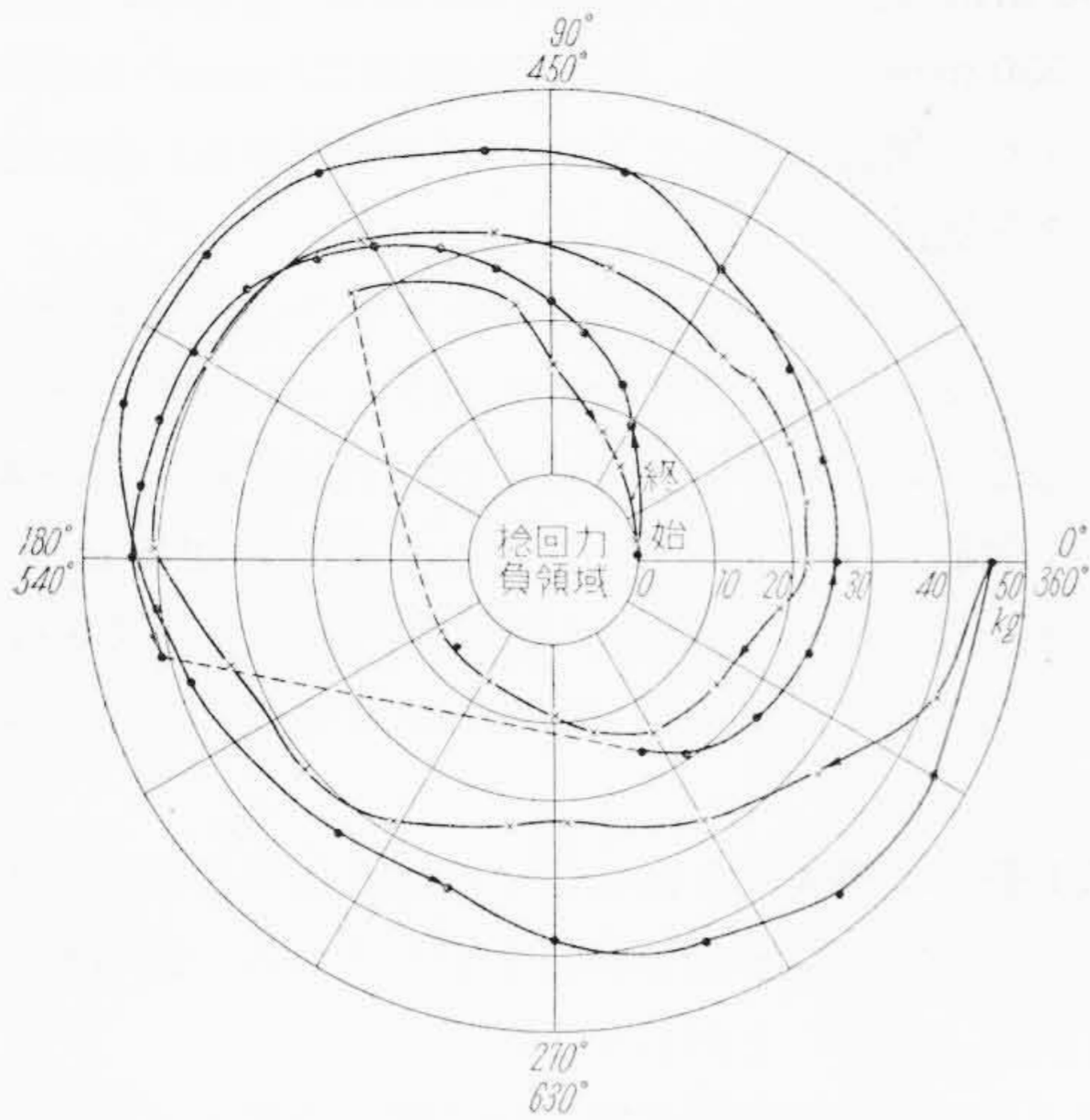
は不安定に急激に増大する。このような角度範囲は図中で破線で示すようにした。また巻取ウィンチをゆるめ捻回を復元する過程において捻回角が減少するにしたがって急激に張力が増大することがありスプリングバランスと綱の弾性によって捻回の復元が突発的に起ることがあり、この場合についても破線によって示した。捻回を復元する途上綱の張力をまったくなくした場合でも自力で復元しない場合には捻回復元力が零乃至は負となっていると考えられる。この状態は中心が零座標の極座標系によっては角度を図示できないので張力零の座標を中心より半径方向に若干はなれた所に選んだ。したがって捻回復元中に曲線が零座標の内側の負領域を通過している場

合は復元力が零以下となり外力を加えてある角度範囲だけ強制的に戻して、ふたたび復元力が生じたことを示している。

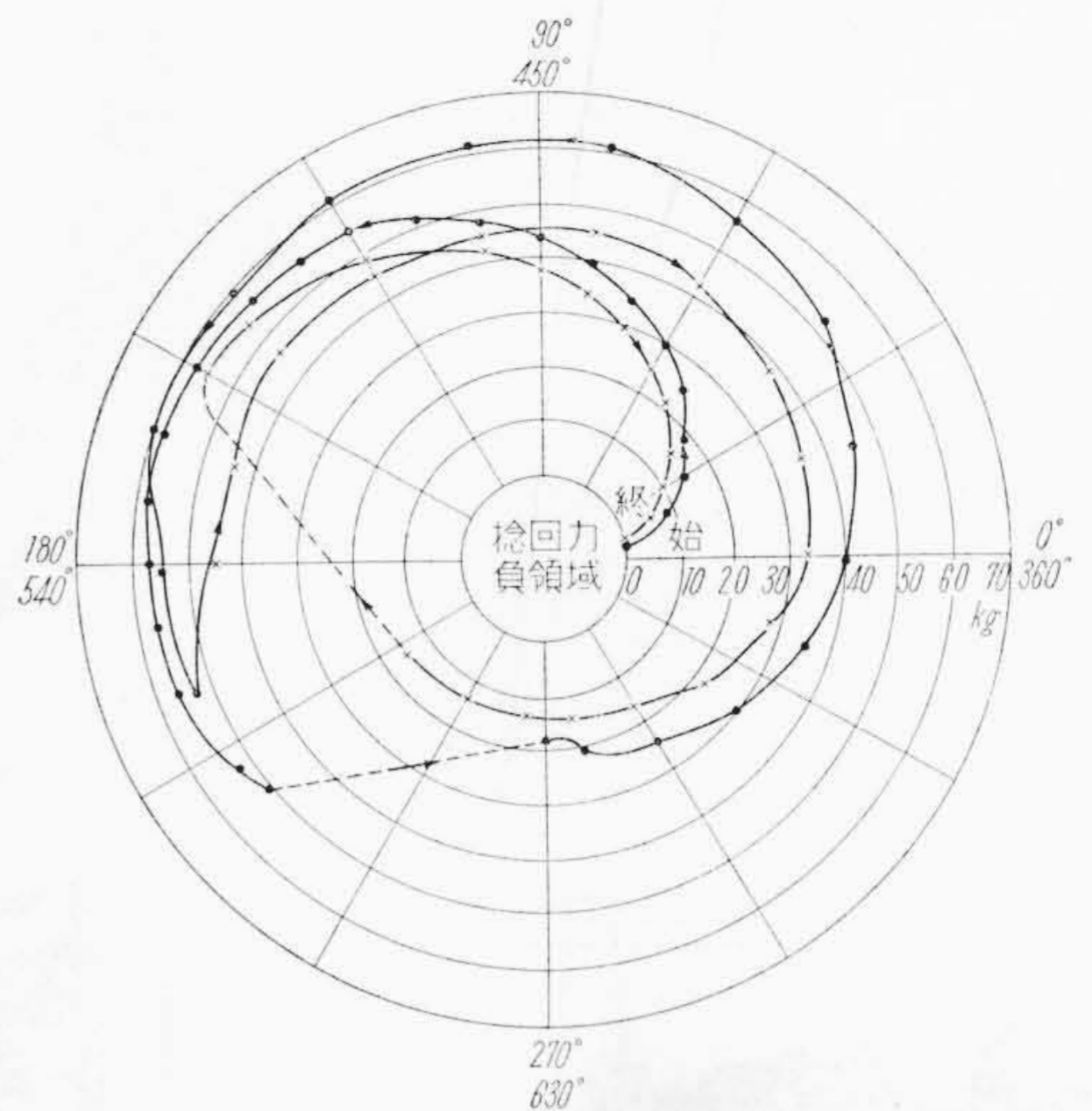
複導体と 3 導体の場合には捻回機の直径が異なっており、これをトルクの単位 (kg-m) で図示しなかったのは捻回力の作用中心が常に捻回機の中心と一致していないと考えられるからであり、3 導体の捻回力を複導体と比較する時は約 20% 増で考慮する必要がある。捻回進行過程の測定値は●印で示し、復元過程の測定点は×印で示した。

多導体送電線を捻回していくとある角度で導体が縄のように捻れる。この場合には最初導体が相互に接触して

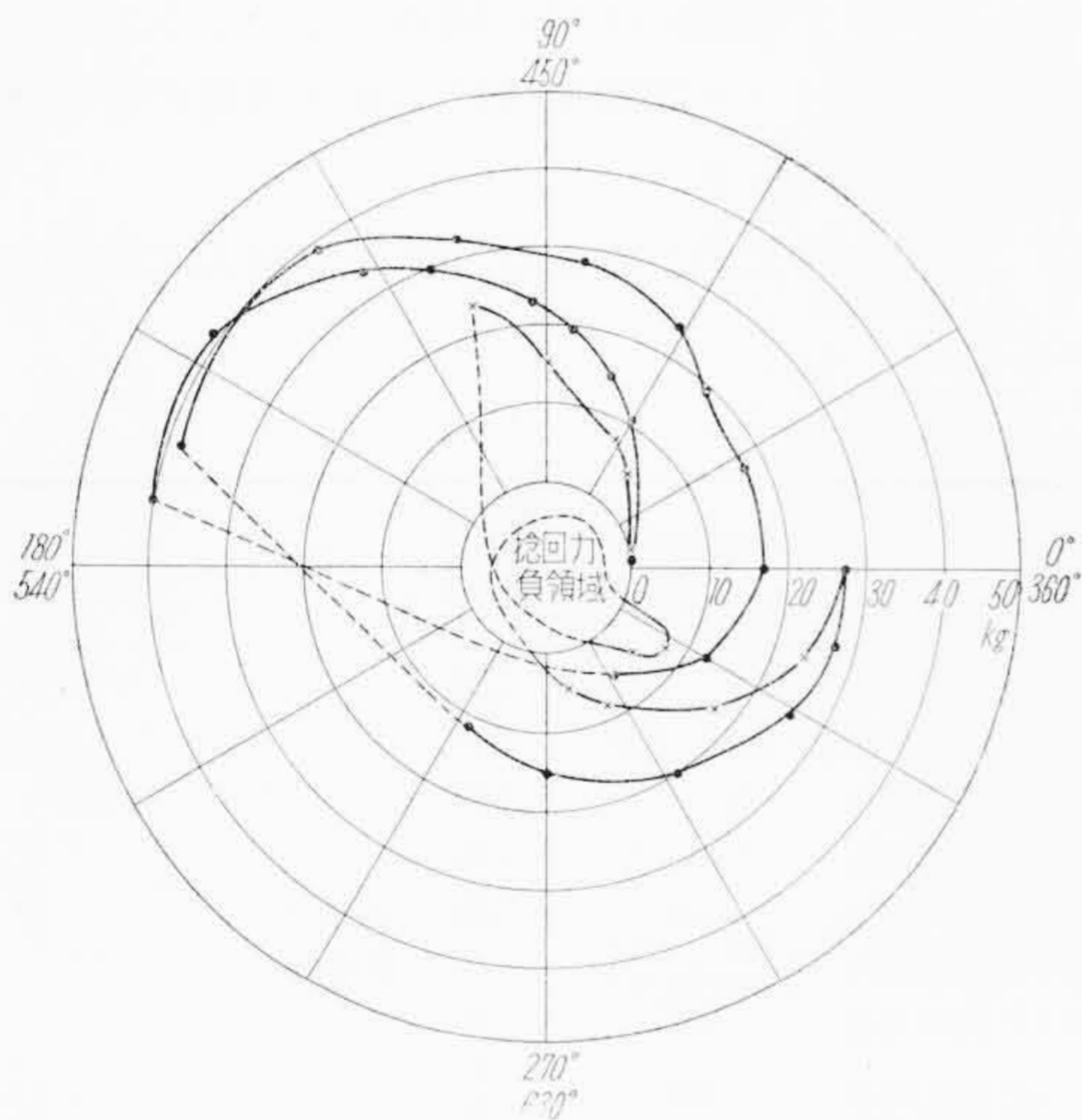




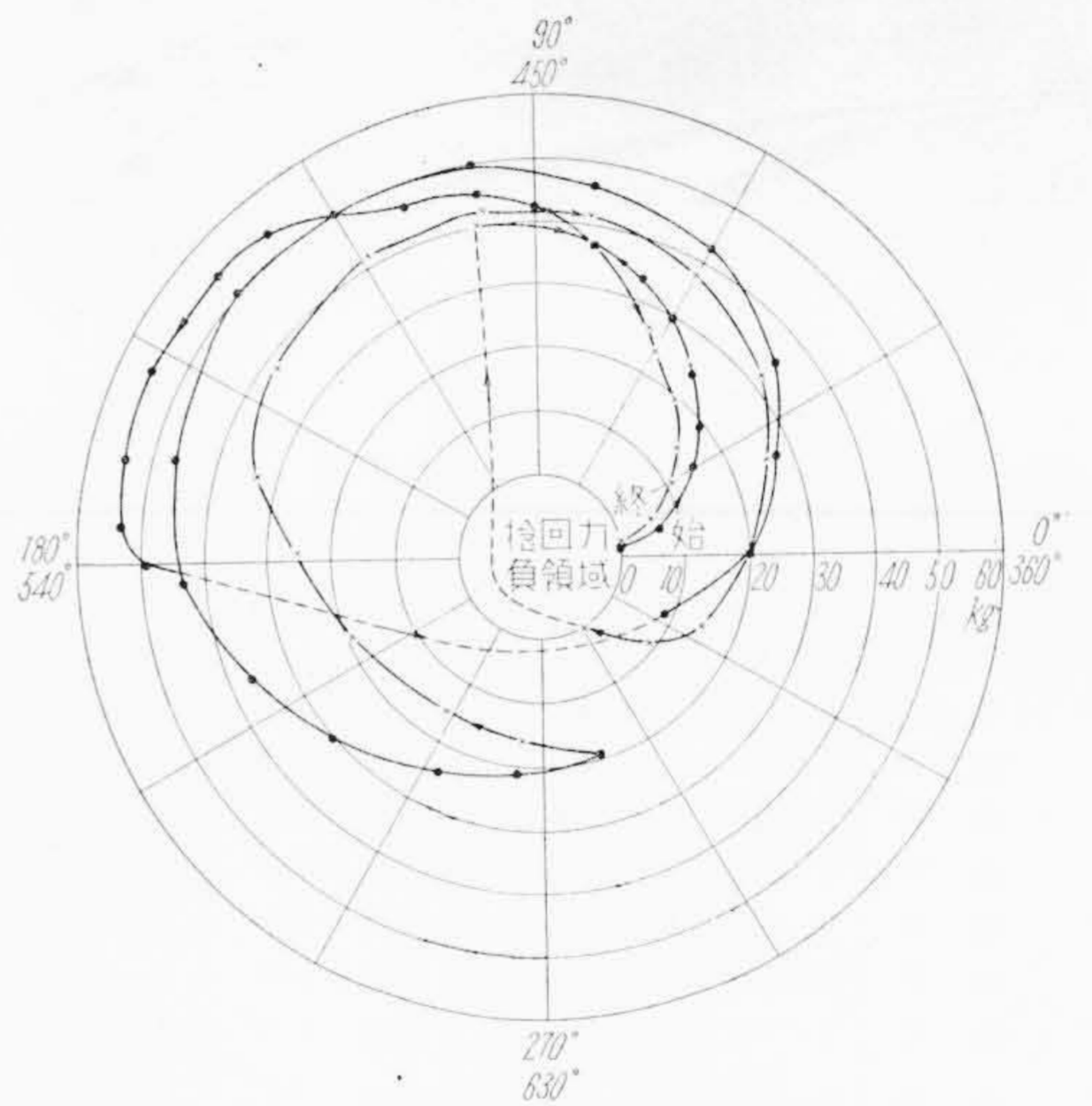
第 9 図 垂直配列 330 mm<sup>2</sup> 複導体送電線の捻回力測定結果 (スペーサ間隔 40m)



第 11 図 逆 3 角形配列 330mm<sup>2</sup> 3 導体送電線の捻回力測定結果 (スペーサ間隔 40m)



第 10 図 垂直配列 330mm<sup>2</sup> 複導体送電線の捻回力測定結果 (スペーサ間隔 80m)



第 12 図 逆 3 角形配列 330mm<sup>2</sup> 3 導体送電線の捻回力測定結果 (スペーサ間隔 80m)

交叉した形となり、次の瞬間に送電線全般にわたってほとんど一様にいきわたっていた捻れが交叉した点に集中してくる。そして捻れ角の大半が交叉した部分によって負担される。この状態を第 13 図に示す。このように交叉が生じた場合は捻回力が突発的に減少する。また捻回復元時にこの交叉は復元しにくく復元力が零乃至は負となるのはこの交叉が復元する際に起りやすい。

このような理由から捻回力を測定すると同時に捻れの集中した位置を調査した。その結果を第 1 表に示す。同時に捻回復元力が零となった角度を示した。スパン中央から見た場合この捻れの集中は両側に生ずるのでスパン中央部は一定の範囲にわたって捻転した形となる。この

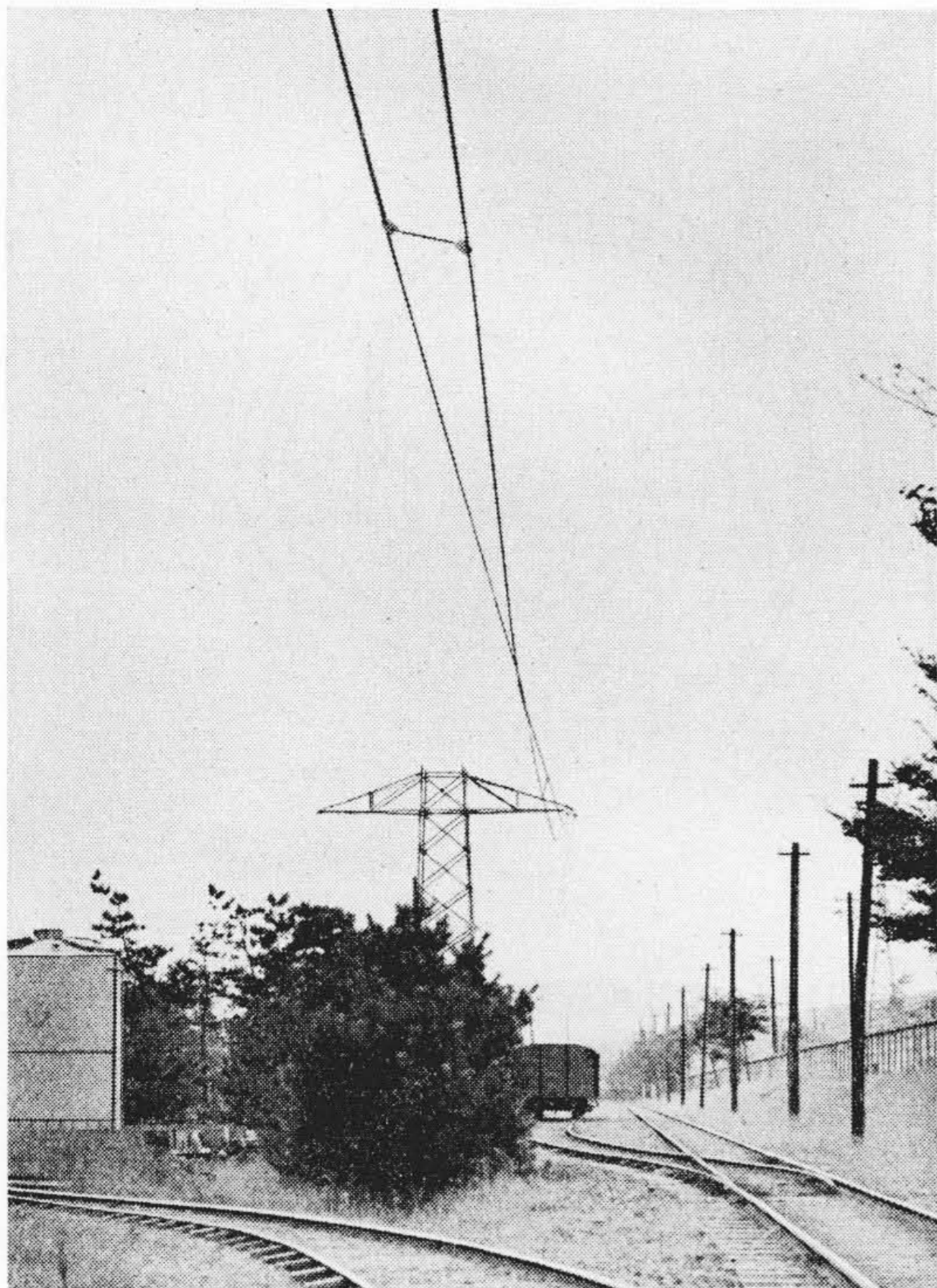
場合の捻転した範囲の長さについても第 1 表に示した。以上の実験には主としてボールソケット形のスペーサを用いたが特にセミヒンジ形のスペーサを用いた場合については備考に示した。

#### 4. 測定結果の総括

第 4~12 図の捻回力測定結果から次のことがいえる。捻回角の変化にしたがって増減する捻回力の平均の大きさをもって捻回力を代表させると

- (1) 同一の導体配列で同一の導体断面積を有する多導体送電線についてみるとスペーサ間隔は短い時の方が捻回力は大きな値となる傾向がある。水平配列





第 13 図 複導体の捻れ (水平配列 240mm<sup>2</sup> 複導体 スペース間隔 40m)

240 mm<sup>2</sup> 複導体, 水平配列 330 mm<sup>2</sup> 複導体, 垂直配列 330 mm<sup>2</sup> 複導体, 逆 3 角形配列 330mm<sup>2</sup> 3 導体のいずれの場合においてもスペース間隔が短い時の方が大きな捻回力を示している。

(2) 同一スペース間隔についていうと導体断面積の大きい場合の方が大きな捻回力となっている。また複導体より 3 導体の方が大きな捻回力がある。同一スペース間隔では捻回力の大きさは水平配列 240 mm<sup>2</sup> 複導体, 水平配列 330 mm<sup>2</sup> 複導体, 垂直配列 330 mm<sup>2</sup> 複導体, 逆 3 角形配列 330 mm<sup>2</sup> 3 導体の順に大きくなっている。

第 1 表には第 4~12 図に示した場合以外の実験結果を加えて捻回中の捻れ発生状況を示している。第 1 表をみると次のようなことがわかる。

(1) スペース間隔が短い時は捻れの発生する時の角度が大きい。水平配列, 逆 3 角形配列でスペース間隔 40m の場合約 300 度程度の捻回角となった時, 導体が交叉して捻れが発生している。垂直配列の場合にはこの点ではスペース間隔には特に関係しないようである。60m 以上のスペース間隔では約 200 度前後の捻回角で捻れが発生している。

(2) 捻回の復元力が零となり捻転が自力で回復しな

第 1 表 捻 回 中 の 捻 れ 発 生 状 況

導体数	導体方式		スペース間隔	捻回方向	捻れ発生位置		復元力が零となる角度	捻転した範囲の長さ (m)	備 考
	配置方法	断面積 (mm <sup>2</sup> )			南 側	北 側			
2	水 平	2×240	40	東側	340° で 1~2 間に発生	340° で 2~3 間に発生	な し	120	
2	水 平	2×240	40	西側	360° で 3~4 間に発生	360° で 2~3 間に発生	532°, 340°	200	
2	水 平	2×240	60	東側	180° で 1~2 間に発生	240° で 1~2 間に発生	な し	120	
2	水 平	2×240	60	西側	240° で 1~2 間に発生	126° で 1~2 間に発生	な し	120	
2	水 平	2×240	30, 25, 60, 60	東側	191° で 2~3 間に発生	270° で 2~3 間に発生	348°	150	注参照
2	水 平	2×240	30, 25, 60, 60	西側	240° で 2~3 間に発生	120° で 2~3 間に発生	525°, 330° (死角範囲大)	150	注参照
2	水 平	2×240	80	東側	115° で 1~2 間に発生	280° で 1~2 間に発生	327°	160	
2	水 平	2×330	40	東側	360° で 3~4 間に発生 525° で 1~2 間に移動	360° で 1~2 間に発生	180°	160 80	
2	水 平	2×330	40	西側	407° で 3~4 間に発生 670° で 1~2 間に移動	370° で 1~2 間に発生	な し	160 80	
2	水 平	2×330	60	東側	156° で 1~2 間に発生	156° で 1~2 間に発生	202°	120	
2	水 平	2×330	80	東側	144° で 1~2 間に発生	144° で 1~2 間に発生	350°, 155°	160	
2	水 平	2×330	80	東側	192° で 1~2 間に発生	192° で 1~2 間に発生	168°	160	セミヒンジ形スペース使用
2	水 平	2×330	120	東側	197° で 1 と鉄塔間に発生 425° で 1 と捻回機間に発生	197° で 1 と鉄塔間に発生 425° で 1 と捻回機間に発生	345°, 190°	240 60	
2	垂 直	2×330	40	東側	294° で 1~2 間に発生	294° で 1~2 間に発生	な し	80	
2	垂 直	2×330	60	東側	280° で 1~2 間に発生	280° で 1~2 間に発生	285°	120	
2	垂 直	2×330	80	東側	306° で 1~2 間に発生	306° で 1~2 間に発生	639°, 289°	160	
2	垂 直	2×330	80	東側	279° で 1~2 間に発生 585° で 1 と捻回機間に移動	279° で 1 と捻回機間に発生	513°	100 40	セミヒンジ形スペース使用
2	垂 直	2×330	120	東側	250° で 1 と捻回機間に発生	250° で 1 と捻回機間に発生	504°	60	
3	逆正三角形	3×330	40	東側	270° で 1~2 間に発生	270° で 1~2 間に発生	な し	80	
3	逆正三角形	3×330	70	東側	189° で 1~2 間に発生	189° で 1~2 間に発生	288°	140	
3	逆正三角形	3×330	80	東側	190° で 1~2 間に発生	190° で 1~2 間に発生	313°	160	
3	逆正三角形	3×330	120	東側	169° で 1 と捻回機間に発生	169° で 1 と捻回機間に発生	343°	60	

注: (1) 捻回器はスペースとスペースの中間に取り付け, 捻回器の位置はちょうどスパンの中央になるようにする。  
 (2) スペースは等間隔に取り付け, 特に複導体水平配列でスペース間隔 30, 25, 60, 60m とあるのは, スパン中央より 30, 25, 60, 60 m のスペース配置を示す。  
 (3) 捻回方向欄中, 東側, 西側とあるのは, おのおの側の導体が下方に運動するような捻回を示す。  
 (4) 捻れ発生位置欄中 1~2... とあるのはスペースの位置を示し, スペースは中央捻回器より両側に順番をつけ, 1, 2, 3, 4 とする。



くなることのないようにするためにはスペーサ間隔を40mまたはそれ以下とする必要がある。第1表から推定されるように40m以下のスペーサ間隔では復元力が零となる角度がなくなると考えられる。

(3) 捻転した範囲の長さが長い場合には復元が困難である。水平配列240mm<sup>2</sup>複導体で40mのスペーサ間隔の場合でも捻転した範囲の長い場合には復元力が零となる角度が生じている。すなわち捻転範囲の長さが200mとなった場合には復元力の零となる角度が生じている。

(4) 捻回方向が反対の場合異なった姿態の捻転が生ずるのは導体相互の微弱な弛度の差が影響するためと考えられる。

(5) 捻回機とその隣のスペーサの間で捻れが生じた場合があるが前述のようにスペーサ間隔の半分の位置に捻回機が取り付けられているのであるからこのような形の捻回は実際には起らないと思われる。

(6) 第10図の結果からみられるように垂直配列の場合は捻転が復元する時復元力が零乃至は負となっている角度の範囲が大きい。捻転を復元するためには人為的に広い角度にわたって復元方向への捻回力を加えなければならない。

(7) セミヒンジ形スペーサを使用した場合との差異は特に目だてて現われない。

(8) 捻回実験は2回程度程度の捻回を加えて行い実験を開始してから終了までの時間約45分であった。この程度の時間においては捻回前後の弛度の変化はほとんどない。

## 5. 結果の検討と今後の問題点

以上行った実験とその測定結果はスパン中央に集中した捻回力を加えて行った実験であり前述したように実際の積雪、着氷の場合と条件が異なっている。この観点に立って前節に総括された結果を検討する。

第1表に示された捻れの位置について考えると実験の場合と実際の場合大きな差異が考えられるのは捻回機とその隣のスペーサとの間に生ずる捻れである。実際の送電線ではちょうどスパン中央の捻回機のみを取りはずした状態のスペーサ配列となるから捻回機とスペーサの間に生じた捻れは消失してしまうことになる。このような現象は捻回機をスパン中央に取り付け集中した捻回力を加えるという特殊な実験の結果とみることができる。スパン全体にわたって分布した捻回力が生ずる場合について推論するとこのような場合にはスペーサ2個以上を含む範囲にわたって捻転が生ずると考えられる。スパン全体に分布した捻回力が生じた場合にはスパン中央に捻回機を取り付けて捻回した時よりも広い範囲にわたって

捻回力が作用し捻転範囲は前述のような実験の場合より広い範囲となるであろう。それゆえ両端引留部に近いところで交叉した捻れが生じた場合を考慮する必要性があり第1表から予想される場所では復元はいっそう困難となろう。また第1表の結果から逆説的にいえばたとえ40m間隔のスペーサ配置で120mの範囲に捻転が起り、その場合自力で復元しているから160mのスパンに40m間隔のスペーサ配置をすれば捻転は必ず自力で復帰すると考えられる(捻転範囲が120mであれば捻れ位置と引留部の長さは両端に20mあり全スパン長160mとなる)。これよりスパン長の大きい場合についての結果は前述の実験だけからは十分予測できない。また第1表を見ると水平配列240mm<sup>2</sup>複導体の場合180mのスパンに対して60m間隔でスペーサを配置すればよいことが推論される(導体架線時の懸垂線の形は張力/導体の単位長さ重量によって定まり、張力/導体の単位長さ重量が一定の時は長スパンでの導体姿態の中央部の形がそのまま短スパンでの導体姿態となる)。

上述の検討から今後残された問題点として次のような点があげられる。実験に用いた350mスパンの多導体送電線に対して現在までに結論として得られているのは比較的短スパンの場合である。

350mスパンに対しての完全な結論を得るためにはさらに鉄塔付近に捻れが生ずるような方法を工夫し自力で復元するかどうかを調査する必要がある。第1表の結果から推定すると鉄塔付近ではさらにスペーサ間隔を縮小する必要性が感ぜられる。

本実験は捻回角度と捻回力との関係を調査したものであって、実送電線においては上昇気流を生ずる箇所などの特殊箇所をのぞいては、一般にはこの実験値ほどの捻回力を生ずることは少ないと考えられる。スペーサ取付個数はこれらのことも考慮のうえその実状に合わせて決定すべきものと思う。

終りに日立電線株式会社電線工場、岩田、久本両部長、御援助をいただいた日立製作所国分工場および電線工場技術部の関係各氏、研究部、福田、柿崎、小形の諸氏および機械物理係の方々に感謝する。

## 参 考 文 献

- (1) G. Jancke, D. Zetterholm, E. Danielson: Bundle Conductors Meet all Swedish Requirements (Published by the Swedish State Power Board, Stockholm Sweden 1955)
- (2) 阪本, 吉田, 松林: 電気四学会連大講演論文集 p. 634 (昭 33-5)
- (3) 林, 吉田, 松林, 石井: 電気四学会連大講演論文集 p. 633 (昭 33-5)
- (4) 川上, 平野: 電気四学会連大講演論文集 p. 635 (昭33-5)