

# 超高圧同心円筒による送電線コロナ雑音の解析

## Analysis of the Corona-Noise Characteristics on Transmission-Lines Using High-Voltage Coaxial Cylinder

永野 宏 郎\*

Hiroo Nagano

### 内 容 梗 概

超高圧送電線のコロナ現象については、種々研究が行われているが、特に最近では、コロナ損よりもコロナ放電によるラジオ周波数帯への妨害（一般にラジオ障害あるいはコロナ雑音などという）が重要であって、コロナ雑音を考慮して超高圧送電用導体が選定されるようになった。

実際の送電線では経済的に、特に電線表面状態が大いに影響するような表面電位傾度をとる導体を用いるので、コロナに及ぼす要因がきわめて複雑で未解決な点が多い。

コロナ損およびラジオ障害を測定するには同心円筒による方法が便利であるが、実際の送電線のコロナ発生状態を模擬させるためには超大型の同心円筒（超高圧同心円筒と呼ぶ）が必要である。

ここにわが国でも屈指の超高圧同心円筒設備が設置されて、送電線コロナの解明に努めているので、その設備の概要と実験結果の一部を報告する。

### 1. 緒 言

経済的に大容量長距離送電を行う必要上、諸外国特にスエーデンにおいて 1946 年ころより 400 kV 送電線が建設され、これを契機として欧州の 400 kV 連繫系統が出現しつつあり、また欧州の超高圧送電に影響されて米国でも 330 kV 系統が運転に入っている。一方わが国では電源の大規模な開発が行われ、275 kV 系統の新北陸、丸山、佐久間、西東京など各幹線が続々建設され、近い将来 400 kV 級超高圧送電線の建設も検討される情勢になってきた。

これらの超高圧送電線は送電容量で決まる導体寸法では導体表面電位傾度が高く、コロナの発生が著しい。新北陸幹線が運転された結果、コロナによるラジオ障害が無視できなくなり、コロナ雑音の調査、研究が、電力会社、電気試験所をはじめ、電線製造メーカーにおいても本格的に取りあげられるようになった。

送電線のコロナは古くより研究されているが、電波網の発達した今日では、コロナ放電によるラジオ周波数帯への妨害（ラジオ障害、あるいはコロナ雑音）はコロナ損とともに超高圧送電用導体の選定に現在なお残された問題点となっている。

すなわち、超高圧送電線ではコロナ開始電圧以下になるよう導体を選定するわけであるが、導体表面状態、たとえば表面傷、付着汚物、水滴などによって部分的にコロナが発生する。またラジオ障害量は受信機入力側におけるラジオ信号とコロナ雑音電圧の比率で決まってくる。これらの事実のため、コロナ雑音の解明は非常に複雑となる。

これらのコロナ雑音の解明には試験送電線が必要であ

り、実験データも実際に近いものが得られるが、導体表面状況、気象条件、線種、導体方式（単導体および多導体）における相互比較を試験するには超高圧同心円筒が容易で、試験送電線では大規模になり困難である。この意味において、実際の送電線に発生するコロナに近い状態で模擬させるため大形の超高圧同心円筒が設置された。以下その設備の概要と実験結果の一部について報告する。

### 2. 超高圧同心円筒設備

#### 2.1 概要

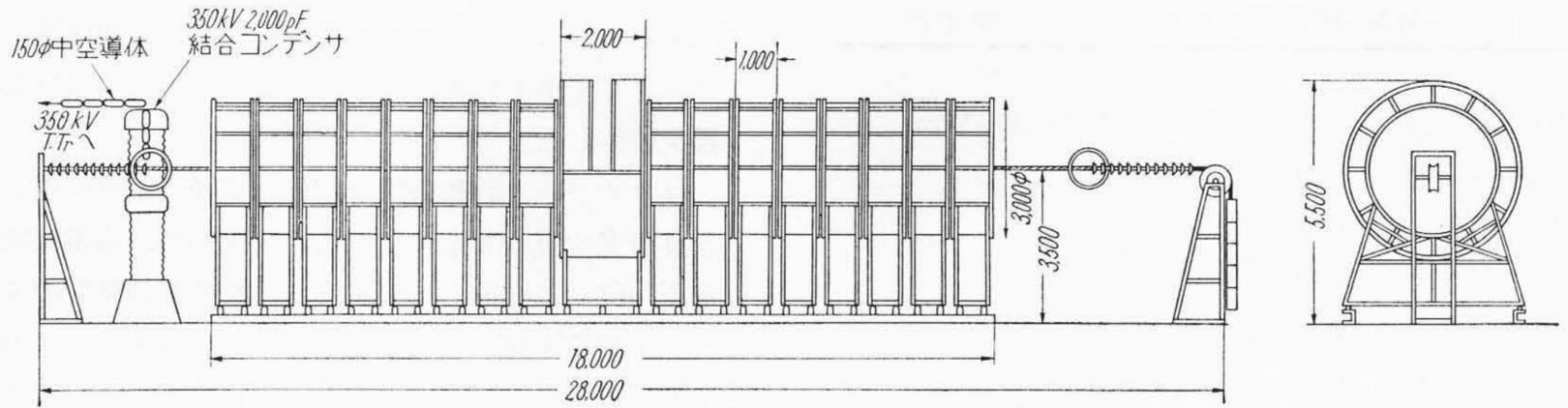
超高圧同心円筒の設計については先にも記したように得られるデータが実際の送電線になるべく近いよう、次の点を考慮した。

- (1) 電線表面より出るコロナストリーマの状態が実際の送電線に近いこと、これはコロナパルスの高さに関係し、したがってラジオ障害量に関係するからである。そのため、超高圧同心円筒の外径を大きくしてコロナストリーマが伸びるようにした。
- (2) 群導体（2～4 導体）を架線した場合(a)項の空間が広いこと。
- (3) コロナ損測定にはシェーリングブリッジの一辺に挿入し、誘導その他を除き測定が容易に行えること。
- (4) 外部雑音、特に超高圧同心円筒までの導体コロナ、空間雑音電波などの誘導の影響を少なくすること。
- (5) 製作、据付に便利な構造であること。
- (6) 400 kV 級送電線の模擬ができること。

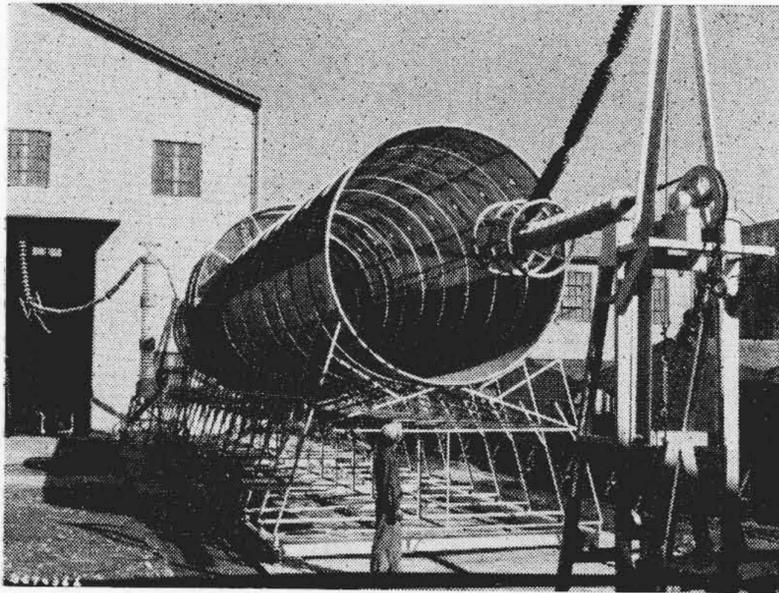
以上のことを考え第 1 図のような構造のものとした。すなわち、ラジオ障害量測定には外部の円筒を接地し、結合コンデンサ端子で ACSR のコロナ放電より生ずる高周波量を取り出し、外部コロナおよび、外部からの雑音

\* 日立電線株式会社電線工場

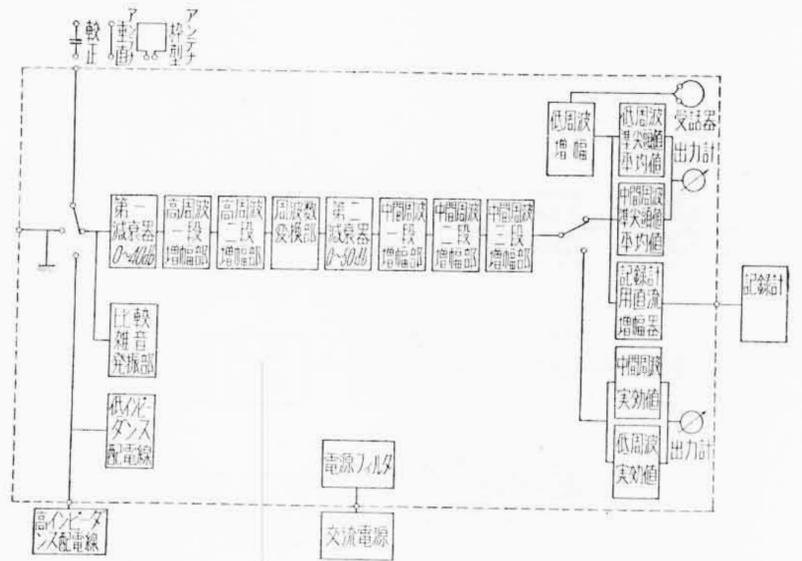
# 超高圧同心円筒による送電線コロナ雑音の解析



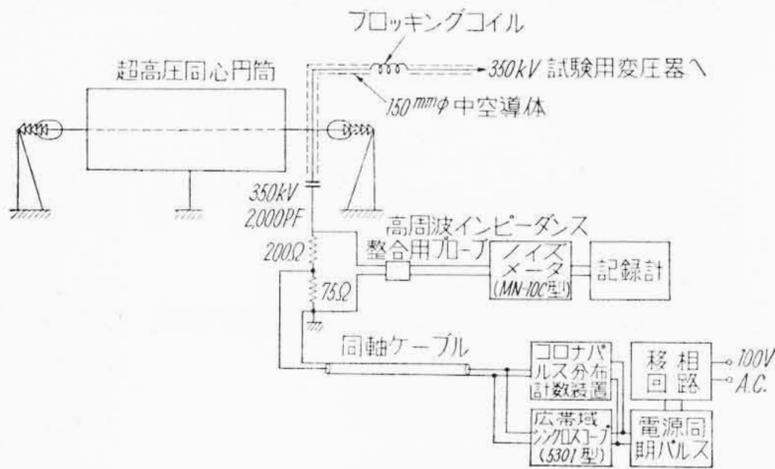
第1図 超高圧同心円筒概略図



第2図 超高圧同心円筒の外観



第4図 ノイズメータブロックダイヤグラム



第3図 超高圧同心円筒によるコロナノイズおよびコロナパルス測定回路

には5 mH程度の高周波塞流線輪によっておさえられるようにした。超高圧同心円筒に高電圧を印加するための導線は150 mmφの中空導体を用いた。これは平均地上高5 mとして対地電圧350 kVで導体表面よりコロナ放電を起さない条件として十分余裕をとった。

コロナ損測定時にはシェーリングブリッジの一辺に入れるため、超高圧同心円筒の外部円筒は大地より碍子で絶縁するようにし、適当にガード(保護電極)を選べること、製作時に便利なように長さ1 mごとに分割した。

ACSRを引止める両端の碍子にはコロナが出ないよう蝶形のコロナシールドリングを用い、また円筒端部は電界の集中をさけるため直径の大きなパイプを用いて端末効果を防ぐことにした。

以上の考え方により完成した超高圧同心円筒は第2図の写真に示すとおりである。なお最近では円筒上部の穴より入工降雨ができるようにし、降雨ノズルのバルブを調整することによって霧雨の状態から雨滴の大きい状態まで模擬させることができる装置をとりつけている。

## 2.2 超高圧同心円筒によるラジオ障害量の測定

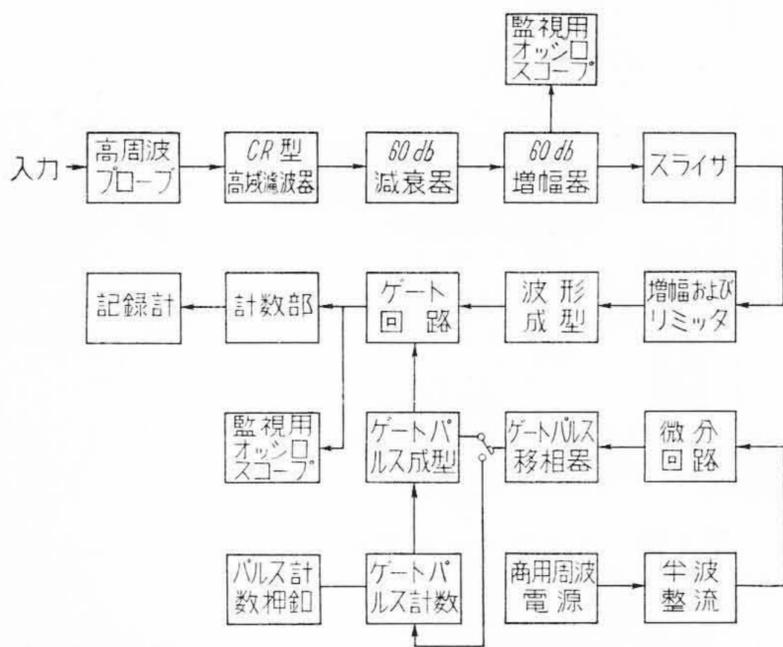
第3図に超高圧同心円筒によるラジオ障害量測定回路を示す。すなわちコロナシールドされた350 kV試験変圧器より150 mmφの中空導体で超高圧同心円筒に電圧が印加される。この途中で外部の高周波誘導を避けるため、5 mH程度の高周波塞流線輪を挿入してある。超高圧同心円筒内のACSRに発生するコロナは350 kV, 2,000 PFの結合コンデンサの接地側よりインピーダンス整合抵抗を通して取り出され、マッチングプローブを通して高周波同軸ケーブルでノイズメータに導かれる。一方インピーダンスマッチングを考えて結合コンデンサ整合抵抗を分圧してコロナパルス波形観測のためブラウン管オシロおよびコロナパルス分布計数装置に導かれる。

### (1) ラジオ障害量測定用ノイズメータ

ラジオ障害量をいかなる計器で測定するかはその計器が普遍性を有し、実際のラジオ障害量に近い値を示すことが必要である。この見地より外国の規格を参考として郵政省電波技術審議会で測定器規格が定めら

第 1 表 MN-10C 型ノイズメータの主要定格

項 目	定 格
測定電圧(電界範囲)	15~110 db (0 db=1 μV または 1 μV/m)
測 定 確 度	±2 db
中 間 周 波 数	455 kc
指 示 計	準尖頭値, 平均値, 実効値
ア ン テ ナ	垂直, ループ (各実効高 1 m)
準尖頭値検波時定数	充電 1 ± 0.5 ms, 放電 600 ± 120 ms
配電線結合部	入力インピーダンス 150 Ω, 15k Ω, 対称, 非対称電圧
周 波 数	0.20~30 Mc, 7バンド



第 5 図 コロナパルス計数装置ブロックダイアグラム

れ、送電線電波障害波委員会が採用している仕様によって製作された旭計器製 MN-10C 形ノイズメータを使用した。第 4 図は本装置のブロックダイアグラムを示し、また第 1 表はその主な定格を示す。

ラジオ障害量を測定するには検波回路として準尖頭値を用いるが、これは充電 1 ms, 放電 600 ms の時定数で測定したとき、最もラジオ障害値に近い値となることから定められたものである。放送波は 535~1,650 kc までであるので、測定周波数は 1 Mc 近傍をとることに定められている。また、搬送電話、搬送リレーに対しては 200~300kc 程度を対象とする。なお、この装置はパルスに対する規格が定められていないので、規格の異なる諸外国とのデータの換算には無理な点があり、これは今後この種計器に残された問題点であり、パルス計数装置との関連性を研究している。

(2) コロナパルス計数装置

コロナ雑音はコロナ放電によって生ずる多くのコロナパルスの集合である。このコロナパルスは後述するように、立上り 0.05 μs, 波尾 0.3~1 μs のもので、コロナ雑音量は主としてコロナパルスの高さや数に関

係する。このコロナパルスを調査するため第 5 図のブロックダイアグラムに示すようなコロナパルス計数装置を製作した。

コロナパルス計数装置は複雑な電子管回路を用い、改良研究を重ねたものである。すなわち、送電線印加電圧の位相に同期して正あるいは負の半波時間のみをゲート回路を開き広帯域に増幅し、コロナパルスの数と電圧の分布を自動的に計測するものである。特にコロナパルス波形の波尾の振動を防ぎ誤動作しないよう留意したものである。

3. 超高圧同心円筒印加電圧と送電電圧の関係

単導体の場合は送電線の導体表面電位傾度は

$$G_{1max} = \frac{V}{\sqrt{3} r \log_e \frac{D}{r}} \text{ kV/cm} \dots\dots\dots (1)$$

ここで  $G_{1max}$ : 導体表面電位傾度 (kV/cm)  
 $V$ : 送電電圧 (kV)  
 $r$ : 導体半径 (cm)  
 $D$ : 相間幾何平均距離 (cm)

複導体送電線の場合は同相線間隔が導体直径の数倍以上の場合は近似的には導体表面最大電位傾度は

$$G_{2max} = \frac{V}{2 r \log_e \frac{D}{\sqrt{2} r a}} \left(1 + \frac{r}{a}\right) \text{ kV/cm} \dots\dots (2)$$

ここで  $G_{2max}$ : 複導体表面最大電位傾度 (kV/cm)  
 $V$ : 送電電圧 (kV)  
 $r$ : 導体半径 (cm)  
 $2a$ : 同相線間隔 (cm)

以下同様な記号を使えば、

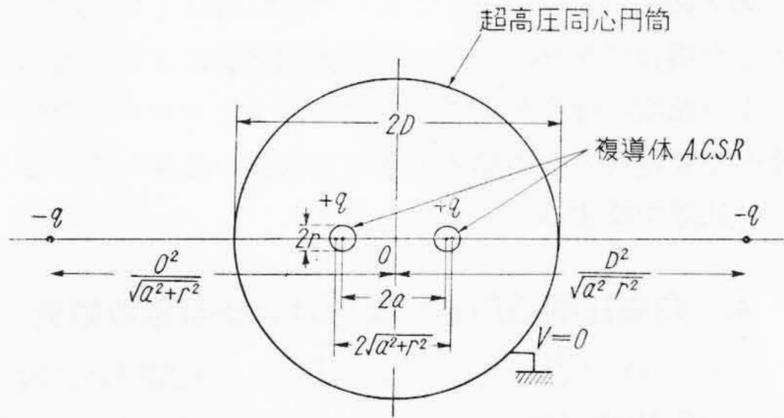
3 導体送電線の場合は

$$G_{3max} = \frac{V}{3 r \log_e \frac{D}{r^{\frac{1}{3}} (2a)^{\frac{2}{3}}}} \left(1 + \frac{2r}{a} \sin \frac{\pi}{3}\right) \text{ kV/cm} \dots\dots\dots (3)$$

4 導体送電線の場合は

$$G_{4max} = \frac{V}{4 r \log_e \frac{D}{2^{\frac{1}{8}} r^{\frac{1}{4}} (2a)^{\frac{3}{4}}}} \left(1 + \frac{3r}{a} \sin \frac{\pi}{4}\right) \text{ kV/cm} \dots\dots\dots (4)$$

一方、超高圧同心円筒内における場合は、単導体では同心円筒の計算式で簡単に



第6図 超高压同心円筒の線電荷等価配置図

$$g_{1 \max} = \frac{V_c}{r \log_e \frac{D_c}{r}} \text{ kV/cm} \dots\dots\dots (5)$$

ここで  $g_{1 \max}$ : 超高压同心円筒内の  
 導体表面電位傾度 (kV/cm)  
 $V_c$ : 超高压同心円筒印加電圧 (kV)  
 $D_c$ : 超高压同心円筒半径 (cm)  
 $r$ : 導体半径 (cm)

複導体の場合は導体に等価線電荷を考えそのイメージを第6図のように考えて計算すれば、近似的に、導体表面最大電位傾度は

$$g_{2 \max} = \frac{2 V_c (a+r) \left[ \frac{1}{\frac{D_c^4}{a^2+r^2} - (a+r)^2} + \frac{1}{2ar} \right]}{\log_e \left[ \frac{D_c^4}{a^2+r^2} - (a+r)^2 \right] - \log_e \left( \frac{D_c^2}{a^2+r^2} \right)} \text{ kV/cm} \dots\dots\dots (6)$$

ここで  $g_{2 \max}$ : 複導体表面最大電位傾度 (kV/cm)  
 $2a$ : 複導体線間隔 (cm)

その他の記号は(5)式のものと同じである。(6)式において超高压同心円筒では実用上

$$\frac{D_c^4}{a^2+r^2} \gg (a+r)^2 \dots\dots\dots (7)$$

であるから、(6)式より

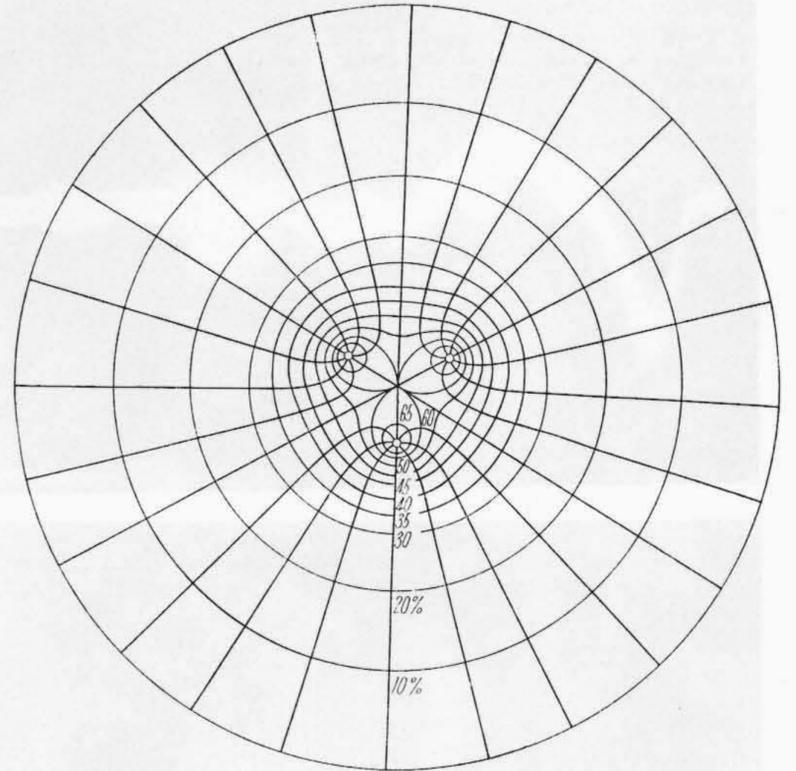
$$g_{2 \max} = \frac{V_c \left( 1 + \frac{r}{a} \right)}{2r \log_e \frac{D_c}{\sqrt{2ra}}} \dots\dots\dots (8)$$

同様な考え方により3導体の場合は

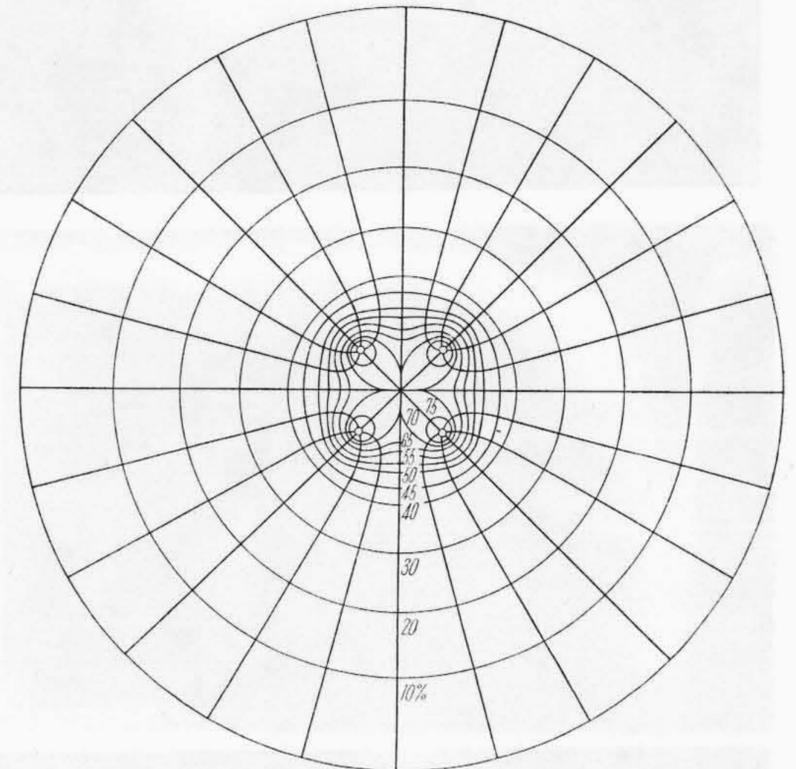
$$g_{3 \max} = \frac{V_c \left( 1 + \frac{\sqrt{3}r}{a} \right)}{3r \log_e \frac{D_c}{\frac{1}{r^3} (2a)^{\frac{2}{3}}}} \dots\dots\dots (9)$$

4導体の場合は

$$g_{4 \max} = \frac{V_c \left( 1 + \frac{3r}{\sqrt{2}a} \right)}{4r \log_e \frac{D_c}{\frac{1}{2^8} r^4 (2a)^{\frac{3}{4}}}} \dots\dots\dots (10)$$



第7図(Ⅰ) 超高压同心円筒内の電界分布図 (240 mm<sup>2</sup> ACSR 3導体の場合)



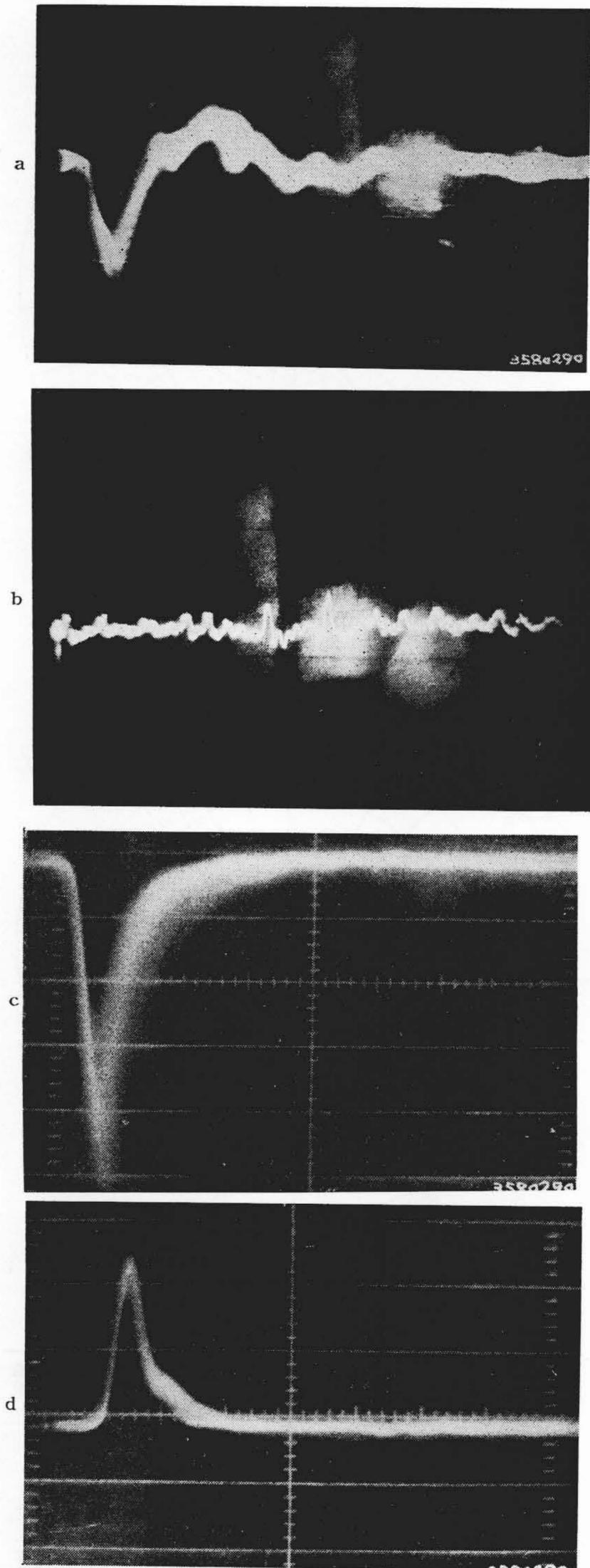
第7図(Ⅱ) 超高压同心円筒内の電界分布 (240 mm<sup>2</sup> 4導体の場合)

第2表 超高压同心円筒電圧と送電電圧の関係

送電電圧 (kV)	導体 (mm <sup>2</sup> )	導体本数	等価相離 (m)	超高压同心円筒印加電圧 (kV)	導体表面最大電位傾度 (kV/cm)
154	160	1	7.0	67	14.8
275	610	1	8.5	114.5	15.0
275	330	2	8.5	104.2	14.3
400	520	2	11.0	137.5	16.1
400	330	3	11.0	129.0	15.2
400	240	4	11.0	120.0	14.0

注: 2~4導体線間隔は40cmの場合

第2表はこれらの式を用いて各種導体に対する送電電圧と超高压同心円筒印加電圧の関係を示す。また超高压同心円筒内の電界分布の一例を電界解析機で求めたもの



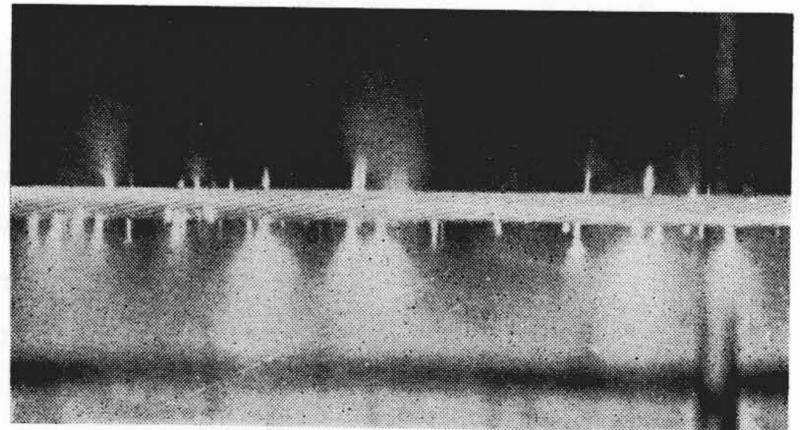
a. 超高圧同心円筒における正コロナパルス  
(シンクロスコープによるくり返し)  
b. 超高圧同心円筒における負コロナパルス  
(シンクロスコープによる単掃引)  
c. 大型針対平板電極の正コロナパルス  
(シンクロスコープによるくり返し)  
d. 大型針対平板電極の負コロナパルス  
(シンクロスコープによるくり返し)

第8図 コロナパルス波形

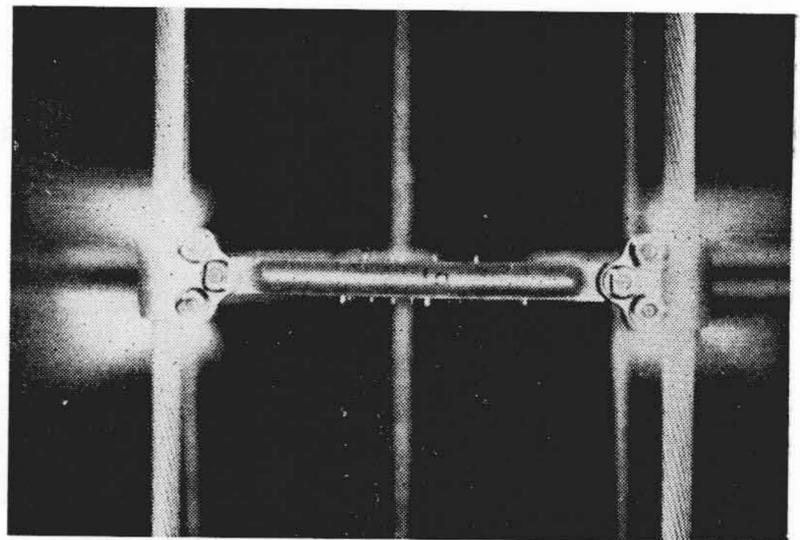
を第7図に示す。しかしこれらの式は導体を理想円筒と考へた場合であり、実際は電線表面状態によって導体表面電位傾度の分布が大きく変化し、またコロナが発生すると空間電荷のため導体表面電界状態が乱されてくることに注意を要する。

#### 4. 超高圧同心円筒によるコロナ現象の観測

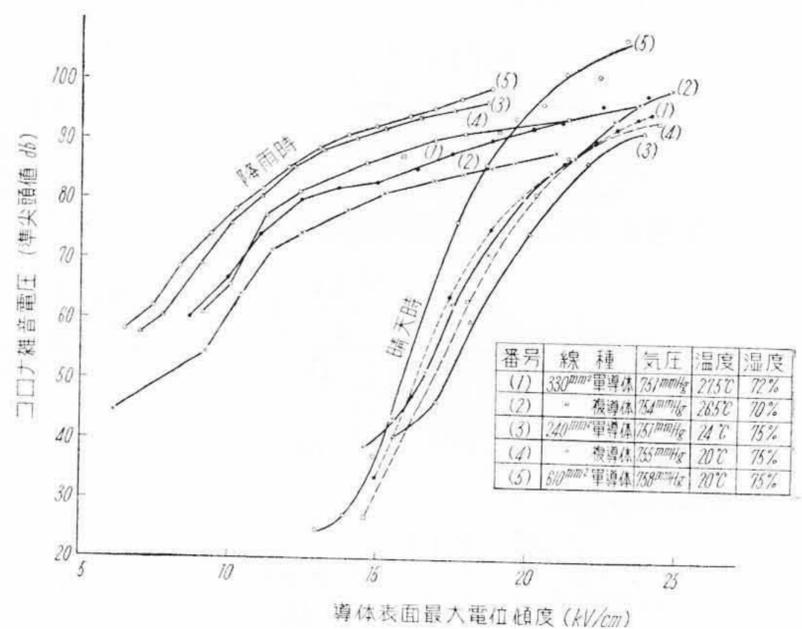
導体のコロナ発生電位傾度は、導体が理想円筒状態では F. W. Peek 氏らによって古くから研究されているが、実際の導体ではその表面状態が理想的でなく、撚線



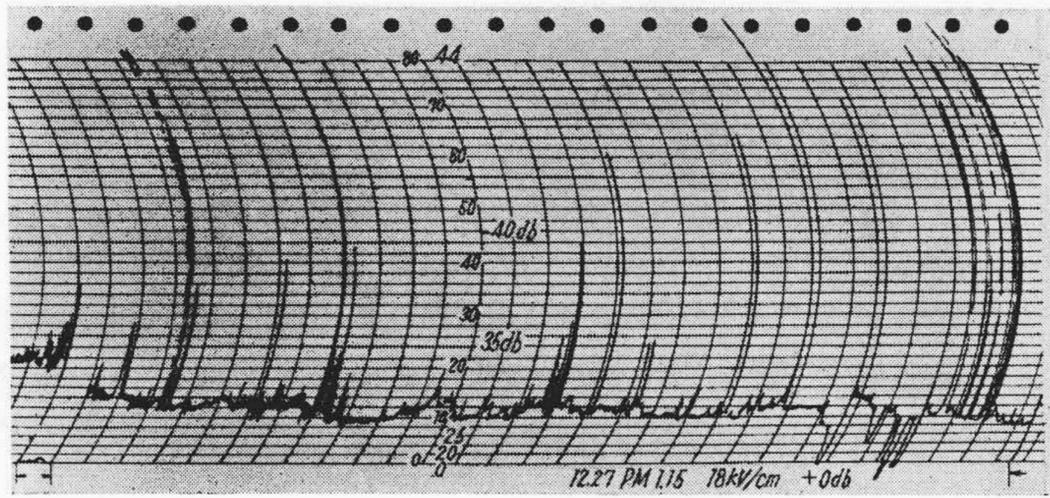
第9図 ACSR表面よりのコロナ発生状態



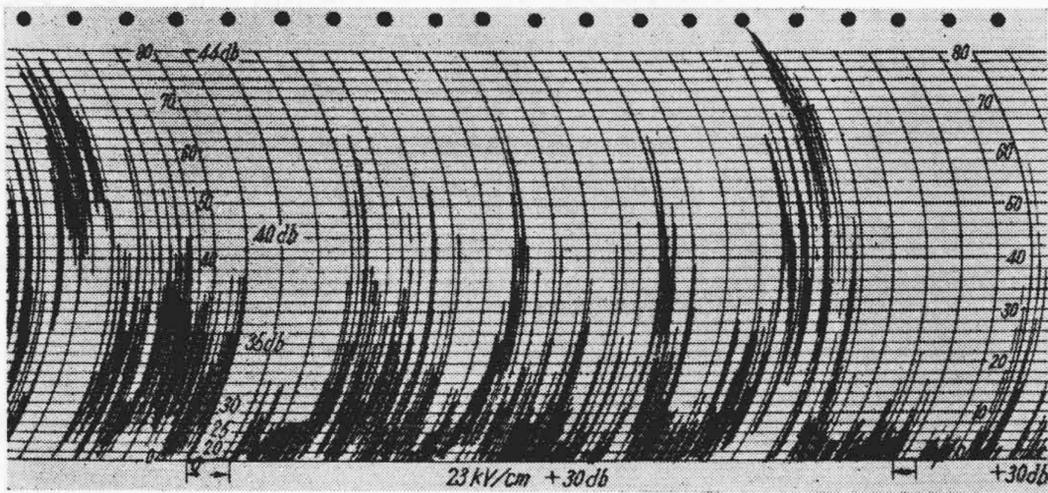
第10図 複導体用スペーサのコロナ発生状況



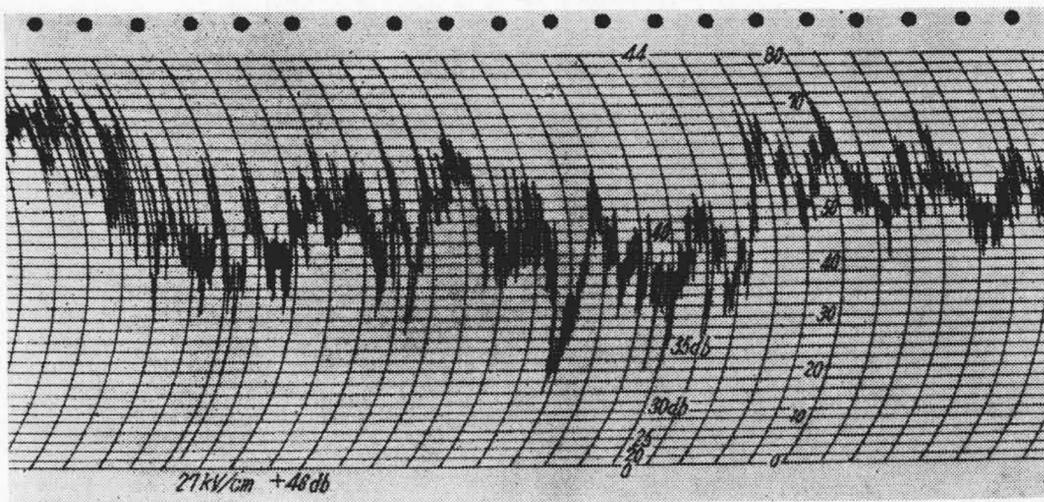
第11図 超高圧同心円筒によるコロナ雑音電圧特性



(a) 負コロナ領域



(b) 部分コロナ領域



(c) 全コロナ領域

第12図 コロナ雑音自動記録の一例(晴天時)

の外周素線、架線時の表面の微細な傷、付着汚物などがあり、また気象条件によっては導体表面に雨滴が付き部分的突起ができるなどの原因によってコロナ開始表面電位傾度は非常に複雑に変化する。

コロナ雑音は急峻な立上りのコロナパルスに起因し、コロナパルスの繰返し周波数およびその高調波によって高周波帯域にまでラジオ障害を及ぼすと考えられる。またコロナパルスの高さは直接ラジオ障害量に比例すると考えられるので、まずコロナパルスの波形を観測した。

コロナパルスは高電圧側の電源波形に重畳しており、これを広帯域オシロ(岩崎通信機製SS5301形)の入力として分圧する場合に、その分圧回路の時定数によって

コロナパルス波形が歪められるので実際の波形を記録することはきわめて困難である。したがって超高圧同心円筒とそのモデルとして直径700φの大形針対平板電極を用いてコロナパルス波形を観測した。これらの観察結果を要約すれば次のようになる。

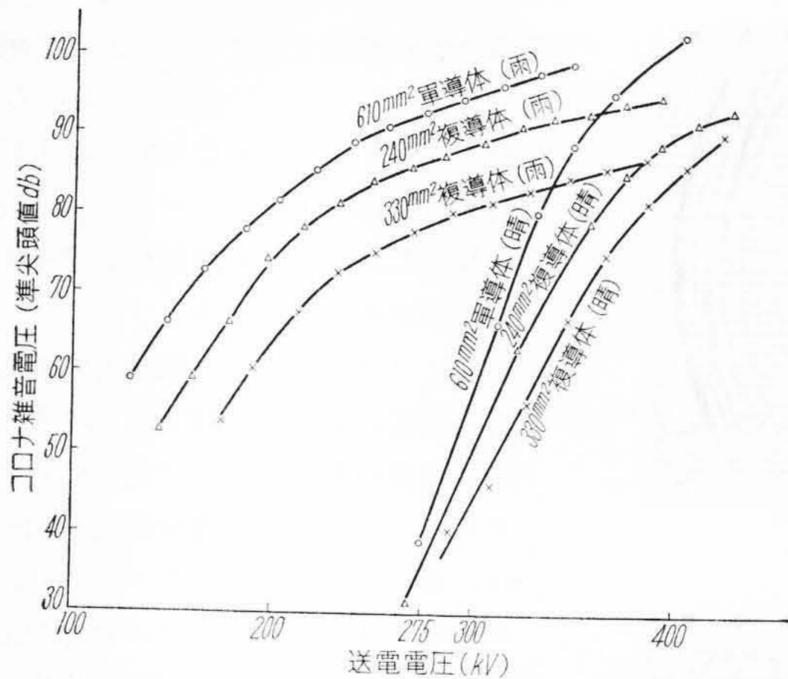
(a) コロナパルスは低い導体表面電位傾度において、晴天時には電源周波の負の半サイクルで起る(負コロナパルス)。次に電位傾度を増せば、負コロナパルスの数が増加し、コロナパルスの出る位相は電源の最大波高値を中心にして両側に発生する。次に導体表面電位傾度を増せば電源周波の正の半サイクルにおいてもコロナパルス(正コロナパルス)が発生する。そのコロナパルスの波高値は電線直径にもよるが、大体負コロナパルスの0.3V程度に対して正コロナパルスは数V~数十Vの範囲に変動する。また、降雨時には低い導体表面電位傾度でも正コロナパルスが、導体表面の付着水滴から発生するようになり、負コロナパルスと正コロナパルスが同時に発生するようになる。したがって、コロナによるラジオ障害は主として正コロナパルスによるものが大部分であると推定される。

(b) コロナパルス波形は正および負コロナパルスとも立上り約0.05μs、波尾0.3~1μsであって、コロナパルスの間隔は導体表面電位傾度によっても異なるが、負コロナパルス

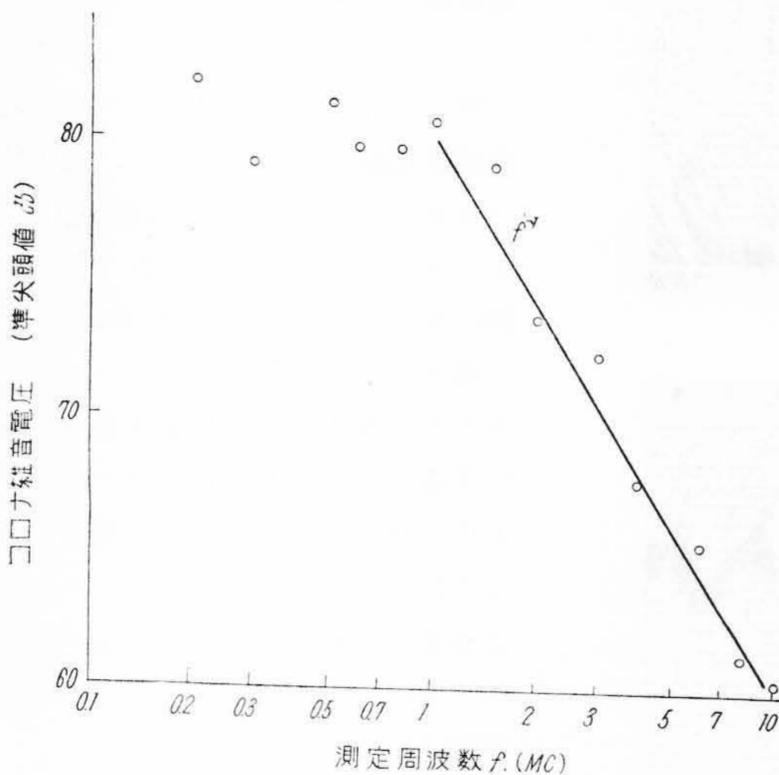
は1~5μs、正コロナパルスはmsの値である。

(c) コロナ放電を超高圧同心円筒および大形針対平板電極で夜間観察した結果では、正コロナ放電が始まると明らかに可視コロナが観察される。これより、正コロナパルスはコロナストリーマが非常に伸びやすいことがわかり、正コロナパルス波高値の大きいこともコロナストリーマの伸びる大きさに関係するものと推定される。

第8図はこれらのコロナパルス波形の観測結果を示す。また第9図は導体表面よりの正コロナ発生状態を夜間観測した状況を示し、第10図は複導体用スペーサの正コロナ発生状況を示す。



第 13 図 送電電圧とコロナ雑音電圧



(晴天時 610mm<sup>2</sup> ACSR 表面電位傾度 25 kV/cm)  
第 14 図 コロナ雑音電圧の周波数特性

### 5. コロナ雑音測定結果

第 11 図は各種 ACSR のコロナ雑音測定結果を示す。導体表面電位傾度が低い場合は主として負コロナパルスによる雑音の主であるが、電位傾度を増すと正コロナパルスが発生するようになりこの部分で、コロナ雑音の急激な立上りがみられる。この部分はいわゆる部分コロナ領域で、夜間超高圧同心円筒で観測すると電線表面の数箇所から可視コロナが出ていることがわかる。さらに電位傾度を増すと、コロナ雑音は飽和する傾向にあり、夜間の観測では第 9 図に示したようにコロナはほとんど全電線表面より発生していることがわかる。第 12 図はコロナ雑音電圧の自動記録結果の一例であって部分のコロナ領域ではコロナ雑音電圧の変動は非常に大きく、これ

より平均値を求めるには、ある規定短時間ごとの最大、最低レベルを数個サンプリングし、それを長時間統計的に処理する方法をとり、第 11 図の平均曲線を得た。

第 11 図に示すように、同一表面電位傾度において、導体径の大きなものほどコロナ雑音が増加する傾向にある。これは導体径が大となれば、導体の表面積が増し、コロナが発生する電線表面の不規則性が増すことと、また太い導体では細い導体に比べ、同一表面電位傾度において導体表面からの距離に対して電位傾度の減少率が少ないことからコロナストリーマが伸びやすく、したがってコロナパルスの波高値が大きくなりコロナ雑音が増大すると考えられる。このことは米国で用いられているような外径 40 mmφ 程度の Expanded ACSR はそれほどコロナ雑音を低下させる期待がもてなく、細い導体を用いた多導体方式はコロナ雑音を減少させる目的に適していることがわかる。

第 13 図は (1)(2) 式を用いて実際の送電線電圧に換算した場合の 610 mm<sup>2</sup> 単導体と 330 mm<sup>2</sup> 複導体、240 mm<sup>2</sup> 複導体のコロナ雑音電圧の比較を示す。

第 14 図は 610 mm<sup>2</sup> ACSR 単導体のコロナ雑音周波数特性である。これよりわかるように周波数 1 Mc まではほぼ同じコロナ雑音電圧であるが、1 Mc を過ぎると周波数に逆比例してコロナ雑音が減少する。このことはコロナパルスの繰返し周波数が最高 1 Mc 付近まで存在し、1 Mc 以上はその高調波による成分であることが推定される。したがってコロナパルスの間隔は最小 1 μs でコロナパルス波形観測でもわかるようにほとんどコロナパルスは重畳しないものと推定することができる。

### 6. 結 言

以上、超高圧送電線のコロナ現象の解析を超高圧同心円筒によって始めたので、その設備の概要と測定結果の一部を報告した。現在 400 kV 級送電線と人工降雨時のコロナの検討を行っているが、積極的にコロナ雑音を防止するような手段、たとえば導体表面の特殊処理などに関しても検討中である。またコロナパルスの解析には、コロナパルス計数装置を用いて、コロナパルス数、波高値などに及ぼす種々な要因を調べ、コロナの基礎的研究を行っている。

超高圧同心円筒は導体相互のコロナの比較、コロナパルスの研究など容易に試験が可能である。しかしコロナ雑音の伝播などの問題は長距離試験送電線において解明する必要がある。

最後に本実験に関し御指導をいただいた電気試験所三田博士、また御鞭撻をいただいた岩田部長、久本部長、山本課長、実験に協力された遠藤君に御礼申し上げます。