



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	交流架空送電線から発生するコロナハム音の諸特性、予測法ならびに低減対策に関する研究
Author(s)	田辺, 一夫
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	乙第5562号
Issue Date	1999-12-24
DOI	https://doi.org/10.11501/3163876
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/51630
Type	doctoral thesis
File Information	000000349066.pdf



博士論文

交流架空送電線から発生するコロナハム音の諧特性、
予測法、ならびに低減対策に関する研究

1999年12月

田辺 一夫



①

博士論文

交流架空送電線から発生するコロナハム音の諸特性,
予測法, ならびに低減対策に関する研究

A Study on Characteristics, Prediction Methods, and Reduction Countermeasures of
Second Harmonics of Audible Noise Generated from AC Transmission Lines

1999年12月

田 辺 一 夫

目 次

1. 緒言	1
1.1 研究の背景	1
1.2 内外における研究状況	5
1.3 研究の目的	7
1.4 本論文の概要	7
2. 実験設備、測定方法、ならびに解析方法	19
2.1 UHV 赤城実規模試験線	19
2.2 UHV コロナケージ	28
2.3 EHV コロナケージ	33
2.4 小型コロナケージ	36
2.5 単相傾斜試験線	38
2.6 UHV 赤城実規模試験線における空間分布測定設備	40
2.7 谷間の模型	42
3. 交流架空送電線のコロナハム音	48
3.1 まえがき	48
3.2 コロナ放電	48
3.3 コロナ放電音とコロナ放電電流	51
3.4 まとめ	54
4. コロナハム音の発生量	60
4.1 まえがき	60
4.2 電線を取り巻く空間の広さの影響	60
4.3 電圧（最大導体表面電位の傾き）の影響	62
4.3.1 単導体電線における結果	62
4.3.2 多導体電線における結果	65
4.4 導体方式の影響	67
4.4.1 注水時における結果	67
4.4.2 等価軽雨時における結果	70
4.5 エージングの影響	72
4.6 風騒音対策用スパイラル線の影響	74
4.7 その他のパラメータ（気象条件、電線の架線形状）の影響	74
4.8 まとめ	76
5. 試験線によるコロナハム音の実証試験結果	78
5.1 まえがき	78

5.2	累積頻度分布	78
5.3	降雨強度特性	80
5.4	霧あるいは高湿度の影響ならびに雨上がりの場合	84
5.5	降雪あるいは着雪の影響	84
5.6	まとめ	84
6.	平地における音場分布	86
6.1	まえがき	86
6.2	音場分布の測定結果	86
6.3	音場分布の統計的解析 (ランダムウォークモデルの導入)	89
6.4	ランダムウォークモデルによる音場分布の統計的性質のシミュレーション	95
6.5	ランダムウォークモデルの適用範囲	96
6.6	まとめ	98
7.	音場分布に対する地形 (谷間) の影響	103
7.1	まえがき	103
7.2	V字谷模型による測定結果	103
7.3	音圧レベルの空間平均値	106
7.4	音場のシミュレーションアルゴリズム	107
7.5	シミュレーション結果と測定値との比較	110
7.6	ランダムウォークモデルとの比較	110
7.7	まとめ	111
8.	コロナハム音の予測法	113
8.1	まえがき	113
8.2	コロナハム音レベルの時空間平均値としての考え方	113
8.3	コロナケージデータと試験線による降雨強度特性データとの対応関係	114
8.4	近似的な降雨強度特性の傾斜	116
8.5	時空間平均値の予測法	119
8.6	予測法の精度と適用範囲	119
8.7	海外で開発された予測法について	120
8.8	まとめ	121
9.	コロナハム音と風騒音の協調低減対策	123
9.1	まえがき	123
9.2	非対称化による協調低減対策	123
9.3	添線による協調低減対策	125
9.4	素導体表面形状の加工による協調低減対策	130
9.5	まとめ	132

10.	結言	133
	謝辞	135

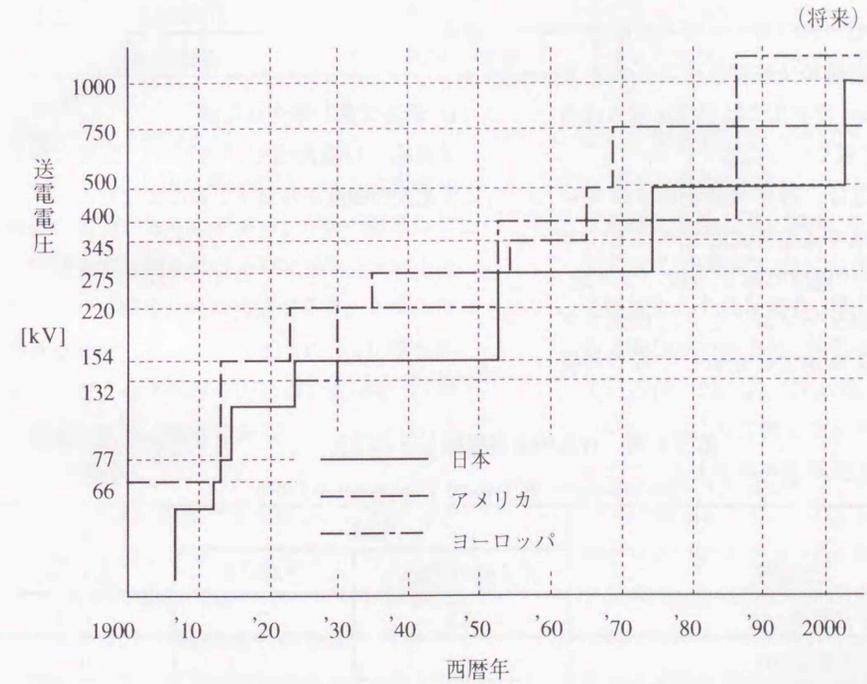
1. 緒言

1.1 研究の背景

(1) UHV 交流架空送電の動向

我が国における送電電圧の変遷を第 1.1 図に示す。昭和 30 年代中頃からの急速な電力需要の伸びを賄うために、最高送電電圧が次々と更新され、現在、東京電力（株）の 1000kV 送電線の大部分（柏崎刈羽原子力発電所から東山梨変電所の

約 210km と東群馬変電所から新今市変電所の約 100km）が既に竣工し、500kV ではあるが運転されている[30]註。残りの部分（新今市変電所から新しいわき変電所の約 100km）についても建設中であり、西暦二千年初頭には 1000kV への昇圧が予定されている[30]。また、関西電力（株）においては直流±500kV 送電線の建設が始まっている。



第1.1図 送電電圧の年次推移

Fig. 1.1 Changes in maximum AC transmission voltage throughout the world.

注：本章では、参考文献を年代順にまとめ、和文と英文を各々[], { }で区別して示す。また、以下本論文では、各章毎の参考文献を各々の章末に示す。

(2) 交流送電と他の送電方式との比較

今日の交流送電は長年にわたる運転実績から、安価で、大容量、かつ信頼性の高い送電方式として、確固たる地位を築いており、その設計、建設、運用、ならびに保守技術は成熟の域に達しているものの、さらに日々改良が図られている。

直流架空送電は、交流架空送電に比較して送電線はやや小型で、送電距離は長く、また送電容量は大きい。しかしながら、直流送電方式は未だ運転実績に乏しく、日本のように高信頼度の電力供給を要求される場合には向かないとされ、さらには、多端子送電の実績がないため、電力系統の構成に制約があるとされている。発電端から受電端までの建設コストをみた場合、直流送電方式では両端に交直変換所を必要とするため、巨長 300km 程度までは交流送電方式の方が安価であるとされている[22]。

なお交流架空送電は、近年の架橋ポリエチレンケーブルによる地中送電方式と比べても、コスト、送電容量の点で優位である。GIL（ガス絶縁送電線）、極低温ケーブル、さらには光ファイバーケーブルによる送電と比較してもその優

第 1.1 表 代表的な送電線とその諸元

Table 1.1 Specifications of Typical Transmission Lines

No.	送電線	電線		g _{max} [kV/cm]
		素導体外径[cm]	素導体数	
1	VEPCO500kV 送電線[4]	4.2	2	17.8
2	BPA 500kV 送電線[20]	6.4	1	16.7
3	AEP 765kV 送電線[10]	3.0	4	21.8
4	ロシア 1150kV 送電線[28]	2.52	8	21.5
5	日本 500kV 送電線[25]	2.85	4	15.5
6	日本 1000kV 送電線[25]	3.42	8	14.9

位性には変わりはない。

(3) 運転されている代表的な送電線の諸元

送電電圧 500kV 以上で、世界で運転されている代表的な送電線の諸元を第 1.1 表に示す。

一般に、わが国の送電鉄塔の地上高は海外のものに比べて高く、導体方式も大型である。このためコロナ放電（コロナ放電に起因する各種の環境問題）に関係の深い電線表面の電界強度、すなわち最大導体表面電位の傾き g_{max} は海外のものに比較して低い。したがって我が国では通常の場合、コロナ放電にともなう各種の環境問題は、海外の送電線に比較して発生し難いといえる。

(4) 環境問題と架空送電線

送電線の環境問題を、高電圧、設備、ならびに大電流の観点から第 1.2 表にまとめる。

第 1.2 表 送電線の原因別環境問題

Table 1.2 Environmental Issues Involving High-Voltage Transmission Lines

原因	現象	対象	備考
設備	テレビ電波障害	テレビ受信機	ゴーストの発生、受信電界の低下
	風騒音	人	卓越音による障害
電圧	静電誘導	人、動物	電圧、電流による感知
	電界影響	人、動物、植物	生理的影響
	コロナ雑音	ラジオ受信機 テレビ受信機	聴取障害 画像障害
	コロナ騒音	人	ランダム騒音、コロナハム音による障害
	オゾン	人、植物	光化学オキシダント濃度の助長
電流	電磁誘導	人、動物	電流によるショック
	磁界影響	人、動物、植物	直接的影響、ペースメーカーなど

1) 高電圧による環境問題

高電圧による環境問題には、コロナ放電と電界に起因するものがある。コロナ放電によって発生する現象にはコロナ騒音、ラジオ雑音、テレビ雑音、コロナ損があり、これらの特性を総称してコロナ特性というが、環境問題としてとらえられるのはコロナ騒音、ラジオ雑音、テレビ雑音である。

・コロナ騒音

コロナ放電に起因する可聴音、すなわちコロナ騒音が注目されるようになったのは、米国で 500kV 送電が開始されてからである。コロナ騒音には、不規則性の騒音成分（ランダム騒音）と純音成分が含まれている。純音成分には電源周波数と等しい周波数成分とその偶数倍の周波数成分がある。このうち、電源周波数の二倍の周波数を持つ純音成分が、一般に他の純音成分に比べて大きく、これを特にコロナハム音という。「500kV 以上の送電線では可視コロナとコロナ騒音について配慮する必要がある」との警告が Project EHV[1]から 1962 年に発せられた。はたして、

コロナ騒音問題が、米国の交流 500kV 送電線（第 1.1 表 No. 1）において、1965 年に世界で最初に発生した。以来、コロナ騒音は EHV 級以上の送電線における導体方式を決定する要因として注目され、精力的な研究からその諸特性が解明され、精密な予測法も確立している[9, 22, 27, 58, 92, 106, 107]。

米国における苦情はランダム騒音に対するもので、最大導体表面電位の傾き g_{max} が高く、コロナ騒音のうちランダム騒音の占める比率が大きいためであった。わが国の一般的な送電線の g_{max} は 16kV/cm を超えないものの、電線にスパイラル線[12][128]が取り付けられると条件が変わる。スパイラル線は、風が電線に吹き付けた場合にその下流に形成されるカルマン渦に起因する風騒音を防止するためのものである。しかし、スパイラル線は電線表面に突起をつけることとなり、コロナ放電を発生しやすく、送電電圧が 500kV 以上の送電線では、これに起因する可聴音、すなわちコロナ騒音が環境問題となることがある。

ちなみに、直流送電線においても不規則性のコロナ騒音のみが発生する。しかしながら、一般に、絶縁設計から決まる電線の幾何的配置でイオン流帯電[26]を考慮したうえでの導体方式であれば、直流送電線からのコロナ騒音レベルは暗騒音と比較して大差ない。このため直流送電線からのコロナ騒音は、実用的には主要な設計要因ではない。ただし、直流送電線の場合には、年間の大部分の時間率を占める晴天時の方が、降雨時等、電線が濡れている場合よりも騒音レベルが大きいことに留意しておく必要がある。

・ラジオ雑音、テレビ雑音

コロナ放電が発生すると電流パルスが電線上に流れ、送電線沿線でラジオ雑音あるいはテレビ雑音問題が発生することがある。テレビ雑音については、設備として健全な送電線からは発生することはないか、あるいは発生しても極めて小さいとされている[27]。ラジオ雑音については、世界各国でその予測法や防止法が検討され、それらはほぼ確立している[109, 124, 125]。しかし近年は、ラジオ雑音、テレビ雑音を含めた電磁波（電波）の問題は EMC（Electro Magnetic Compatibility）として捉えなおされており、更なる今後の展開があるものと考えられる。

・電界、静電誘導

静電誘導についての検討で有名なものは[3][107]である。送電線の地上1mの電界強度は、海外では100V/cm程度に、またわが国では、人の頻繁に往来する場所では30V/cm[29]にと規制されている。

2) 設備に係わる環境問題

設備に係わる環境問題には、テレビ電波障害、風騒音、景観の問題がある。送電線の大型化の始まる昭和40年代から、テレビ電波障害（テレビゴースト）や風騒音の苦情が発生し、その対策が行なわれてきた。風騒音に

ついては、フランス EDF や米国 BPA からわずかに報告されているだけである[96, 128]。しかしわが国では大型の送電線が多数存在し、これに強く安定した季節風が吹きつける。その結果、「ゴーゴー」という大きな音が発生するため、これを防止せざるを得ず、その対策には多大な努力がはらわれている。

また近年は、自然環境の保全に対する社会意識の高まりから、送電線のルート選定には景観問題も反映されるようになってきている。

3) 大電流に起因する環境問題

大電流に起因するものとしては、電磁誘導がある。送電線沿線の環境保全と係わりがあるのはフェンス等への誘導であり、幼児の離脱電流 5mA[107]が対策の目安と考えられる。通信線への誘導は、当該事業者間で解決すべき問題であり、環境問題とは捉え難い。また近年、にわか注目を集めている磁界の生物影響については、未だ十分なデータがなく、今後の研究が待たれるところである。

(5) 送電線の建設・設計からみた環境問題

送電線の設計は、まずルートが決定され、送電容量と送電距離の関係から電圧階級が決定され、必要とされる電流から電線（導体方式）が決められる。次いで常規電圧および各種の過電圧に耐える対地・相間距離、がいし装置などの絶縁設計により送電線の構造が仕上がる。

以上をもとに、各種の環境量の予測が行なわれる。わが国では、まず、一般住民が立ち入る場所では、線下の静電誘導を考慮して、地表付近の電界値が電気設備技術規準に決められた30V/cm以下になるように、電線地上高が決められる。

こうして、送電線の電線（導体方式）や電線配置が決まると、風騒音やテレビ電波障害、コロナ雑音、コロナ騒音のうちの不規則性の騒音

について予測が行なわれ、環境問題が生じないか評価される。この結果、影響があると判断された場合には、何らかの対策を講じることとなる。

コロナ騒音に注目すると、例えば、前述のスパイラル線の取り付けは、不規則性の騒音も増大させるが、コロナハム音をさらに増大させる傾向にある。このコロナハム音は、暗騒音によるマスク効果が期待できないことや、建物等の遮音効果が期待できないことから、人に感知されやすい傾向にあり、送電電圧が500kVを超える交流送電線の重要な電線設計要因として注目されている。

1.2 内外における研究状況

交流送電線のコロナ特性に関しては、国内外ともにコロナ損やラジオ雑音の研究を中心に始められた。コロナ騒音の研究については、先に述べたように、米国500kV送電線からの騒音に対する苦情の発生[10, 20]を契機に盛んになった。我が国においても、海外の研究[2]に基づいた検討から、UHV送電線の電線設計において、送電線沿線の環境保全と経済性との両立を図るためにはコロナ騒音の研究が不可欠であるとの認識を持つに至り、その後は様々な研究がなされてきた。

ランダム騒音に関する研究は多岐にわたり、コロナケージ、試験線による諸特性の解明、予測法の開発、その低減対策の開発がなされている。さらには、商用送電線における短期、長期の測定も実施され、予測法の信頼度についても検討されている。このランダム騒音は主として降雨時に発生する。したがって、この場合の特性を解明すべく研究が行われ、さまざまな電線（素导体径、素导体数、素导体間隔）、任意の電圧、任意の電線配置についての騒音レベルの予測が可能とされている。この場合、電線からのランダム騒音の発生量は、素导体径、素导体数、素导体間隔、ならびに電圧をパラメータ

（各々は独立）とする簡単な実験式から求められる。さらに、ランダム騒音は円筒波伝搬をするとしている。その発生機構はコロナ放電路中の空気の急激な膨張であるとされ、騒音は多数のコロナ放電からの爆発音によるN波が合成されたものであるとされている。

第1.3表に、コロナ騒音に関する研究を行ってきた機関と主な設備をまとめた。

これらの機関からの研究成果の大部分は、コロナ騒音のうちのランダム騒音に関するものであり、コロナハム音に関しては少なく、さらに、その予測法の研究成果に限ると、電力中央研究所[32]、EPRI[107]、Pirotte[27]によるもののみと考えられる。

国内外において、コロナハム音の研究成果が少ないのは、次のような理由のためと考えられる。

- 1) 海外においては、風騒音対策用のスパイラル線[12][128]が取り付けられることがない
- 2) 海外においては、電線の最大導体表面電位の傾きが日本の場合と比較して高いために、ランダム騒音が騒音レベルに占める率が大きく、ランダム騒音のほうが‘うるさく’聞こえ、これについて集中的に検討された
- 3) 電線からのコロナハム音の発生量は、ランダム騒音の場合に比べて気象条件、電線表面状況等の影響を大きく受け、その定量化が困難であった
- 4) 空間定在波が形成され、場所によっても測定を実施する時間によっても騒音レベルが変化し、その取り扱いが困難であった

第 1.3 表 コロナ騒音に関する主な設備と研究機関

Table 1.3 Test Lines, Operating Lines and Research Institutes Concerning Audible Noise from Transmission Lines

機関	所在地 所属	試験線, 送電線 コロナケージ	電圧	文献
塩原実験場	栃木県塩原町 電力中央研究所	3相垂直2回線試験線 1410m	600kV _{L-L}	[1, 4]
		UHV コロナケージ 8×8 m ² , 24 m	700kV _{L-G}	[4, 8, 9, 10, 12, 14, 18, 19, 23, 24][99, 123, 127, 129]
赤城試験センター	群馬県宮城村 電力中央研究所	3相垂直2回線試験線 600 m	1400kV _{L-L}	[16, 18, 19, 20, 27, 32] [117, 123, 127, 128]
Gochang 実験場	Gochang, 韓国 KEPCO	3相垂直2回線試験線 700 m	780kV _{L-L}	[130]
KEPRI	Changwon, 韓国 KEPCO	コロナケージ 6×6 m ² , 20 m	500kV	
Project UHV	Lenox, 米国 EPRI, GE	3相水平1回線試験線 523 m	1500kV _{L-L}	[6], [15, 8, 9, 11, 13, 15, 17, 27, 34, 35, 40, 49, 51, 52, 53, 54, 65, 70, 72, 74, 97, 107]
		コロナケージ 7.6×7.6 m ² , 15.2 m		
Lyons 1200kV 試験場	Lyons, 米国 BPA	3相水平1回線試験線 2021 m	1200kV _{L-L}	[7] [69, 77, 80, 82, 86]
AEP-ASEA UHV Project	North Liberty, 米国 AEP, ASEA	1相試験線 915 m	2255/√3kV	[14, 16, 24, 33, 41, 55, 62, 63, 66, 68, 83, 114, 119, 121]
		コロナケージ 6.1×6.1~9.1×9.1 m ² , 30.5 m (2基)		
Suvereto 1000kV 試験場	Suvereto, イタリア ENEL	1相試験線 1000 m	800kV×2	[18, 26, 71, 90, 103]
		コロナケージ (直径7mの円形), 40 m		
ベリラスト	モスコ, ソ連 電力電化省	3相試験線 900 m	1150/√3kV	[56]
IREQ	Varennes, カナダ Hydro Quebec	2相試験線 300 m	1500/√3kV	[22, 36, 38, 58, 64]
		コロナケージ 5×5 m ² , 150 m (3基)		
Renardieres 研究所	Renardieres, フランス EDF	3相試験線 1200m	1005/√3kV	[2, 26, 28, 115]
		コロナケージ 5×5 m ² , 150 m (3基)		
BPA500kV 試験場	Ostrand, 米国 BPA	3相送電線 654(539) m	525/√3kV	[20]
Apple Grove 775kV Project	West Virginia, 米国 Westinghouse	3相試験線 732×3 m	775/√3kV	[7, 12, 37, 43, 57, 60]
CERL	Leatherhead, イギリス CEGB	2相試験線 732 m	765/√3kV	[26, 29, 30, 59, 89]
Anneberg 試験場	Anneberg, スウェーデン Chalmers 工科大学	1相試験線 600m	600kV	[42, 113]
その他	小規模基礎実験・理論検討			[11, 13, 21, 31][31, 32, 46, 47, 48, 110, 111, 118, 126]
	影響評価			[5][21, 39, 44, 45, 50, 67, 75, 76, 78, 79, 84, 85, 87, 91, 98, 101, 102, 103, 104, 108]
	低減対策			[15][23, 61, 73, 94]
	測定法			[17][19, 50, 93, 122]

1.3 研究の目的

コロナ騒音特性を改善するために、我が国のUHV 交流架空送電線の電線には、一般に6 導体以上の多導体が必要とされている[19,25]。さらに、スパイラル線の取り付けはコロナ騒音なかでもコロナハム音を増大させる。このため、素導体数を増すか、または素導体径を大きくして大型の電線を採用し、騒音レベルを抑制する必要に迫られる。しかし、むやみに大型の電線を用いることは、電線重量、鉄塔強度、ならびに工事量等の増大を招き、送電線建設費が高くなる。したがって、コロナ騒音の抑止と経済性との協調を図ることが肝要であり、送電線周辺のコロナハム音レベルを的確に予測し、その影響を評価し、送電線の計画、設計、建設に反映させることが重要となる。

本研究は、このようなコロナハム音の諸特性を明らかにし、その予測法を開発するとともに、コロナハム音レベルの低減を図ることを目的として行われた。

1.4 本論文の概要

コロナハム音につき、500kV 以上の送電線の計画、設計、建設、ならびに運用に資することを目的として、

- (1) 発生量の把握
 - (2) 音場分布の解明
 - (3) レベル予測法の開発
 - (4) 低減対策の適用性の検討
- を行った。以下、各章毎の概要を示す。

第 1 章

本研究の背景につき概説した。

第 2 章

本研究で使用した設備と測定法、データの解析法について述べる。

第 3 章

電線から発生するコロナ放電を起因とするコロナ騒音には、不規則音成分(ランダム騒音)と純音成分が含まれている。純音成分には電源周波数と等しい周波数成分とその偶数倍の周波数成分があることを実験的に確認した。

第 4 章

コロナハム音の発生量に対する下記の各種パラメータの影響を、主としてコロナケージを用い、実験的に明らかにした。

- 1) 電線を取り巻く空間の広さ
- 2) 電圧(最大導体表面電位の傾き)
- 3) 導体方式(素導体径, 素導体数, 素導体間隔)
- 4) エージング
- 5) 風騒音対策用スパイラル線
- 6) 気象条件, 電線の傾斜

第 5 章

UHV 赤城実規模試験線(以下、赤城試験線)を用いて行ったUHV 級導体方式のコロナハム音の長期連続測定結果について述べる。

第 6 章

送電線各相からのコロナハム音の直接波ならびに大地面からの反射波が相互に干渉し合い、複雑な定在波を線下に形成すること、またこの場合のコロナハム音レベルの確率密度はランダムウォークモデルに従うことを赤城試験線における測定結果から明らかにした。

第 7 章

谷間のような地形形状は、コロナハム音を多重反射させコロナハム音レベルの空間平均値を上昇させることを、谷間の模型を用いた実験から明らかにした。さらに、送電線下における音

場のシミュレーション手法を新たに開発した。

第8章

第4章のコロナケージによる発生量の測定結果と第5章の赤城試験線における長期連続試験結果との比較をおし、送電線周辺におけるコロナハム音レベルの実験的予測法を提案した。

第9章

電線から発生するコロナハム音を小さくするには、基本的には大型導体方式の採用によって最大導体表面電位の傾きを低くすることが基本であり、また有効でもあるが、建設費の高騰を招く。そこで、コロナ放電の観察から得られた知見に基づき、素導体配列の非対称化および添線の付加について検討した。その結果、これらはコロナハム音の低減に有効であるばかりでな

く、経済性との協調もとれ、実線路にも適用可能であることが明らかとなった。

第10章

本論文の結論をまとめるとともにコロナハム音に関する今後の研究について提言した。

文献

後の章での引用に便利のように、コロナ騒音に関する文献を、歴史的経緯も考慮して発表年代順に取りまとめた。和文と外国語とに分類してあり、文献番号を各々、[]と{ }で示した。なお、外国語の文献の末尾には第1.4表に示した発表機関ないしは国名を付している。

第1.4表 略号

Table 1.4 Abbreviations

略号	意味
GE	General Electric Company (ゼネラエレクトリック社)
EDF	Electricite de France (フランス電力公社)
HQ	Hydro Quebec Electric Commission (ハイドロケベック電力公社)
WH	Westinghouse Electric Corporation
AEP	American Electric Power Company (アメリカ電力会社)
ENEL	Ente Nazionale Per L'energia Electrica (イタリア電力公社)
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers (アメリカ電気電子学会)
BPA	Bonneville Power Administration (ボンネビル電力庁)
IREQ	Institute of Research of Hydro Quebec (ハイドロケベック研究所)
CEGB	Central Electricity Generating Board (中央発電局)
ASEA	Allmanna Svenska Elektriska Aktiebolaget
SWD	スウェーデン
DOE	アメリカ エネルギー省
BBN	Bolt, Beranek & Newman, Inc.
VEPCO	Virginia Electric and Power Company
JPN	日本

コロナ騒音関係の文献 (和文)

- [1] 沢田, 福島, 須永他, 「交・直流架空送電線の電波障害および誘導障害」, 電中研技一研報 No.23, 1973年8月
- [2] 福島, 「コロナ騒音 (Audible Noise) の海外における研究状況と主な成果」, 電中研技一研調査報告 No.74051, 1974年12月
- [3] 超超高压送電技術専門委員会, 「超高压架空送電線の静電誘導」, 電気協同研究, 31巻, No. 5, 1975年11月
- [4] 福島, 田辺, 沢田, 「交流送電線の部分放電音 (コロナ騒音) (IV) —電線コロナ騒音の予備的検討」, 電中研報告 No. 176067, 1977年6月
- [5] 海外電力調査会, 「米国における送電設備の許認可と建設」, ワシントン事務所委託調査報告 No.5, 1977年7月
- [6] 福島, 「UHV 交流送電線の騒音と雑音 (V) —コロナ騒音の降雨強度特性と Project UHV から我国へのデータ変換法」, 電中研報告 No.177057, 1978年5月
- [7] 笹野, 「UHV 交流送電線の騒音と雑音 (VI) —BPA ライアンズ 1200kV 試験送電線のラジオ雑音とコロナ騒音」, 電中研報告 No.177059, 1978年6月
- [8] 福島, 沢田, 西山, 原田, 笹野, 須永, 甘楽, 田辺, 鈴木, 「UHV 交流送電線の騒音と雑音 (VIII) —UHV コロナケージによる導体コロナ特性の測定—」, 電中研報告 No.177088, 1978年7月
- [9] 笹野, 沢田, 福島, 甘楽, 鈴木, 「UHV 交流送電線の騒音と雑音 (IX) —UHV コロナケージによる 1000~1200kV 級送電線のコロナ特性の測定—」, 電中研報告 No.178060, 1979年7月
- [10] 田辺, 鈴木, 甘楽, 「UHV 交流送電線の騒音と雑音 (XI) —UHV コロナケージによる 10 導体電線のコロナ騒音の測定」, 電中

導体電線のコロナ騒音の測定」, 電中研報告 No.179073, 1980年7月

- [11] 荒井, 中井, 角田, 「交流コロナ騒音と発生音波パルス」, 電気関係学会関西支部連合大会, G1-4, 1981年
- [12] 田辺, 福島, 鈴木, 甘楽, 原田, 「UHV 交流送電線の騒音と雑音(XII) —風騒音防止用スパイラル線の影響および電線表面処理の効果 (10×810mm²)」, 電中研報告 No.181024, 1981年12月
- [13] 荒井, 中井, 味口, 角田, 「電線上突起からの交流コロナ騒音」, 放電研究, No.89, 1982年2月
- [14] UHV 送電研究推進委員会・障害分科会, 「UHV 交流送電線の障害対策に関する基礎研究」, 電中研総合報告 No.110, 1982年5月
- [15] 齊藤, 西山, 「家屋の防音効果に関する基礎試験結果について」, 九州電力研究期報, Vol.58, No.82002, 1982年
- [16] 福島, 笹野, 田辺, 中野, 西山, 原田, 鈴木, 甘楽, 富田, 杉本, 出口, 「UHV 赤城試験線による環境影響の実証試験 (I) —ACSR810mm², 10 導体の試験経過と主要成果」, 電中研報告 No.182043, 1983年5月
- [17] 電気学会, 「高電圧試験ハンドブック (3.9 節)」, オーム社, 1983年
- [18] 田辺, 「交流送電線のコロナハム音 (I) —発生量予測のための基礎的検討—」, 電中研報告 No.184023, 1984年9月
- [19] UHV 送電実証試験委員会, 「UHV 交流送電に関する実証研究」, 電力中央研究所, 委員会報告: Z85801, 1985年3月
- [20] 笹野, 田辺, 鈴木, 中野, 富田, 福島, 原田, 西山, 「UHV 赤城試験線による環境影響の実証試験 (II) —ACSR810 mm², 8 導体 (スパイラル線有り) のコロナ特性」, 電中研依頼報告書 No.183518, 1984年4月
- [21] 中野, 富田, 田辺, 福島, 「電源周波数が

- コロナ騒音レベルに及ぼす影響」, 昭和 60 年電気学会東京支部大会, No.14, 1985 年
- [22] UHV 送電特別委員会報告「UHV 直流送電に関する研究」, 電力中央研究所, 委員会報告: Z85802, pp.40-43, 1985 年 6 月
- [23] 田辺, 「交流送電線のコロナハム音—発生量に対する g_{max} および素導体数の影響—」, 電気学会全国大会, No.1131, pp.1463, 1986 年 3 月
- [24] 田辺, 「交流送電線のコロナ騒音の経年変化」, 電気学会全国大会: 1127, 1987 年 3 月
- [25] 安井, 「UHV 送電線の対コロナ雑音設計」, 電気学会 B 部門誌, 107 巻, 4 号, pp. 197-203, 1987 年 4 月
- [26] 須永, 中野, 「送電線から発生するイオン流およびコロナ騒音」, 静電気学会誌, 11 巻, No. 41, pp. 238-245, 1987 年
- [27] 笹野, 富田, 田辺, 出口, 原田, 「UHV 交流送電線のコロナ特性」, 電力中央研究所, 総合報告: T 04, 1987 年 12 月
- [28] 鈴木, 「21 世紀への挑戦—UHV の海外状況: UHV の海外状況—」, OHM, pp. 46-50, 1992 年 1 月
- [29] 電気設備技術基準, 第 4 節, 第 112 条
- [30] 武部, 「100 万 V 送電線—環境への優しさ—コスト低減を目指して—」, 電気学会 B 部門誌, pp.1325-1330, 1996 年 11 月
- [31] 田辺, 田矢, 征矢, 磯崎, 「交流送電線下の谷間地形におけるコロナハム音—空間分布特性の実験的検討とシミュレーション—」, 電気学会 B 部門誌, 117 巻, 5 号, pp.679-686, 1997 年 5 月
- [32] 田辺, 「UHV 交流架空送電線のコロナハム音予測法に関する実験的検討」, 電気学会 B 部門誌, 117 巻, 8 号, pp.1173-1180, 1997 年 8 月

コロナ騒音関係の文献 (外国語)

- {1} Abetti P.A., Laforest J. J., Lindh C. B., MacCarthy D. D., "Results from the first year operations of Project EHV," AIEE Trans. on PAS, Vol. 81, pp. 968-977, February, 1963 (GE)
- {2} Magnien M., Clade J., Gray C., "The Electricite de France test station for corona studies on future EHV lines," CIGRE Paper-427, 1966 (EDF)
- {3} Lacroix R., Charbonneau H., "Radio interference from the first 735 kV line of Hydro-Quebec," IEEE Trans. on PAS, Vol. 87, No. 4, pp. 932-939, April 1968 (HQ)
- {4} Wagner C. L., Smith H. M., Taylor Jr. E. R., Laprade J. H., "Verification tests of VEPCO 500 kV system," IEEE Trans. on PAS, Vol. No. 4, pp. 1032-1044, April 1968 (WH)
- {5} Anderson J. G., "American research on Ultra-High-Voltage AC transmission at Project UHV," IEE Conference Pub. No. 44, pp. 366-369, September 1968 (GE)
- {6} Taylor Jr. E. R., Chartier V. L., Rice D. N., "Audible noise and visual corona from HV and EHV transmission lines and substation conductors-Laboratory tests," IEEE Trans., Vol. PAS-88, No. 5, pp. 666-679, May 1969 (WH)
- {7} Chartier V. L., Bankoske J. W., "Waltz Mill 1100 kV station conductor selection and laboratory verification," IEEE Trans., Vol. PAS-88, No. 6, pp. 825-833, June 1969 (WH)
- {8} Juette G. W., Zaffanella L. E., "Radio noise currents and audible on short section of UHV bundle conductors," IEEE Tans. Vol. PAS-89, No. 3, pp. 902-913, May/June 1970 (GE)
- {9} Juette G. W., Zaffanella L. E. "Radio noise, audible noise, and corona loss of EHV and UHV transmission lines under rain: Predetermination based on cage tests," IEEE Trans., Vol. PAS-89,

- No. 6, pp. 1168-1178, July/August 1970 (GE)
- {10} Barnes H. C., Caleca V., "Initial experiences on the 765 kV system of American Electric Power Company," CIGRE Paper 31-06, August/September 1970 (AEP)
- {11} Anderson J. G., Schamberger J. M., "UHV transmission research results Project UHV 1968-1969," CIGRE Paper 31-06, August/September 1970 (GE)
- {12} Shankle D. F., "RI, audible noise and electrostatic induction problems," 1971 Electric Utility Engineering Conference, Subject 33, March 1970 (WH)
- {13} Anderson J. G., Zaffanella L. E., Juette G. W., Kawai M., Stevenson J. R., "Ultrahigh-Voltage power transmission," Proceeding IEEE, Vol. 59, No. 11, November 1971(GE)
- {14} Barnes H. C., "Prospects for UHV transmission and status report of the AEP-ASEA UHV Research Project from the AEP view point," ASEA Journal, Vol. 44, No. 5, pp. 101-108, 1971 (AEP)
- {15} Anderson J. G., Doyle J. R., O'Brien E. J., "Project UHV-Construction and technical plan," IEEE Trans., Vol. PAS-91, No. 1, pp. 204-211, January/February 1972 (GE)
- {16} Pokorny W. C., Schloman R. H., Barnes H. C., Miller Jr. C. J., "Investigation of corona effects from wet bundle conductors for application to UHV configurations," IEEE Trans., Vol. PAS-91, No. 1, pp. 211-222, January/February 1972 (AEP)
- {17} Anderson J. G., Zaffanella L.E., "Project UHV test line research on the corona performance of a bundle conductor at 1000 kV," IEEE Trans., Vol. PAS-91, No. 1, pp. 223-232, January/February 1972 (GE)
- {18} Cortina R., Sforzini M., "Effect of audible

- noise on EHV and UHV line design," IEEE Radio Noise Subcommittee WG1-AC Lines Meeting in New York, NY. February 1972 (ENEL)
- {19} IEEE Audible Noise Task Force of RN Subcommittee, "A guide for the measurement of audible noise from transmission lines," IEEE Trans., Vol. PAS-91, No. 3, pp. 853-856, May/June 1972 (IEEE)
- {20} Perry D. E., "An analysis of transmission line audible noise levels based upon field and three-phase test line measurements," IEEE Trans., Vol. PAS-91, No. 3, pp. 857-865, May/June 1972 (BPA)
- {21} Leonard M. C., "Transmission goals: Maximum rating with minimum environmental impact," Electrical World, June 1, 1972
- {22} Trine N. G., Maruvada P. S., "A semi-empirical formula for evaluation of audible noise from line corona," IEEE Canadian Communication and EHV Conference, Cat No. 72 CHO 698-1-REG 7, pp. 166-167, November 1972 (IREQ)
- {23} "Silencing transmission lines," Electrical Times, pp. 30, December 7, 1972 (CEGB)
- {24} Barnes H. C., Thoren B., "Three years results from the AEP-ASEA UHV research project," CIGRE Paper 31-03, 1972 (AEP)
- {25} Balderston Jr. G., Schamberger J. M., Juette G. W., Zaffanella L. E., "UHV AC transmission-line design based on Project UHV test results," CIGRE Paper 31-12, 1972 (GE)
- {26} Paris L., Sforzini M., Clade J., Porcheron Y., Mott C. W., Oakeshott D. F., "A study of the design parameters of transmission lines above 1000 kV," CIGRE Paper 31-15, 1972 (ENEL-EDF-CEGB)
- {27} Pirotte P., "Audible noise produced by corona on AC and DC overhead lines," CIGRE Pa-

- per 36-02, 1972
- {28} Coquard A., Gary C., "Audible noise produced by electrical power transmission lines at very high voltage," CIGRE Paper 36-03, 1972 (EDF)
- {29} Barber P. B., Cranmer J. M., Dembinski E.M., Looms J. S. T., "Measurements of acoustic and radio noise from U. K. transmission lines," CIGRE Paper 36-05, 1972 (CEGB)
- {30} Daniel T. N., Whittaker E. B., "The reduction of audible corona discharges on AC transmission lines," IEE Conference Pub. No. 90, pp. 197, 1972 (CEGB)
- {31} Ianna F., Wilson G. L., Bosack D. J., "Spectral characteristics of acoustic noise from metallic protrusions and water droplets in high electric field," IEEE Conference Paper C 73164-I, January/February 1973
- {32} Hoburg J. F., "Current-driven, corona-terminated water jets as sources of charged droplets and audible noise," IEEE Conference Paper C 73165-8, January/February 1973
- {33} Barnes H. C., Thoren B., "The AEP-ASEA UHV system test station and line," IEEE Conference Paper C 73319-I, July 1973. (AEP)
- {34} Comber M. G., Zaffanella L. E., "Audible noise reduction by bundle geometry optimization," IEEE Trans., Vol. PAS-92, No. 5, pp. 1782-1791, September/October 1973 (GE)
- {35} Comber M. G., Zaffanella L. E., "The use of single-phase overhead test lines and test cages to evaluate corona effects of EHV and UHV transmission lines," IEEE Trans., Vol. PAS-93, No. 1, pp. 81-90, January 1974 (IREQ)
- {36} Hylten-Cavallius N., Train D., "The IREQ Ultra High Voltage laboratory and test facilities," IEEE Trans., Vol. PAS-93, No. 1, pp. 176-186, January/February 1974
- {37} Kolcio N., Ware B. J., Zagier R. L., Chartier V. L., Dietrich F. M., "The Apple Grove 750 kV PAS-93, No. 3, pp. 831-840, May/June 1974 (AEP, WH)
- {38} Trin N. G., Maruvada P. S., Poirier B., "A comparative study of the corona performance of conductor bundles for 1200 kV transmission lines," IEEE Trans., Vol. PAS-93, No. 3, pp. 940-949, May/June 1974 (IREQ)
- {39} Teplitzky A. M., "Electric utility noise in the community," Inter-Noise Paper, pp. 421-426, Washington D. C., September 30-October 2, 1974
- {40} Balderston Jr. G., Gens R. S., Comber M. G., Zaffanella L. E., "Progress report of EPRI's Project UHV," CIGRE Paper 31-02, Vol. 25, No. 2, 1974 (GE)
- {41} Barnes H. C., Thoren B., "The AEP-ASEA UHV Project result to 1973, and planning of a system test station and line," CIGRE Paper 31-10, 1974 (AEP, ASEA)
- {42} Jancke G., Carlshem W., Engstrom R., Johansson T., Smedsfelt S., "The Swedish 800 kV system," CIGRE Paper 31-11, 1974 (SWD)
- {43} Baldwin C. J., Young F. S., "UHV transmission research at Waltz Mill," CIGRE Paper 33-14, 1974 (WH)
- {44} Wells R. J., "Subjective analysis of the noise from high voltage transmission lines," IEEE Proceedings of a Workshop on Psychoacoustics, 74 CHO 967-0-PWR, pp. 48-54, 1974
- {45} IEEE Radio Noise and Corona Subcommittee, "Psychoacoustics - Proceedings of a workshop on power line noise as related to psychoacoustics," IEEE 74 CHO 967-0-PWR, 1974 (IEEE)
- {46} Sforzini M., Cortina R., Sacerdote G., Piazza R., "Acoustic noise caused by A. C. corona on conductor; Results of an experimental investigation in the anechoic chamber," IEEE Trans., Vol. PAS-94, No. 2, pp. 591-601, March/April 1975 (ENEL)
- {47} Trinh N. G., "Analysis of the second harmonic (120 Hz) audible noise generated by line coronas," IEEE Conference Paper A 75501-7, IEEE/PES Summer Meeting, San Francisco, CA., July 20-25, 1975 (IREQ)
- {48} Tong D. W., Wilson G. L., Johansen I., "Effects of surface wettability on audible noise and capillary absorption as a noise reduction scheme," IEEE Conference Paper A 75-566-0, IEEE/PES Summer Meeting, San Francisco, CA., July 20-25, 1975
- {49} Baker A. C., Comber M. G., Ottosen K. E., "Investigation of the corona performance of conductor bundles for 800 kV transmission," IEEE Trans., Vol. PAS-94, No. 4, pp. 1117-1130, July/August 1975 (GE)
- {50} IEEE Task Force of the Radio Noise and Corona Subcommittee of the Transmission and Distribution Committee, "Audible noise from power lines-Measurement, legislative control and human response," IEEE Trans., Vol. PAS-94, No. 4, pp. 2042-2048, November/December 1975 (IEEE)
- {51} General Electric Company, "Transmission line reference book 345 kV and above," EPRI, 1975 (GE)
- {52} Comber M. G., Nigbor R. J., "Audible noise performance of the first three-phase ultra-high voltage transmission test line at EPRI's Project UHV," IEEE Trans., Vol. PAS-95, No. 4, pp. 1105-1114, July/August 1976 (GE)
- {53} Comber M. G., Doyle J. R., Schneider H. M., Zaffanella L. E., "Three-phase testing facilities at EPRI's Project UHV," IEEE Trans., Vol. PAS-95, No. 5, pp. 1599, September/October 1976 (GE)
- {54} Balderston Jr. G., Kolorik P. L., Zaffanella L. E., "Three phase UHV test line-Facility description and preliminary results," CIGRE Paper 31-01, 1976 (GE)
- {55} Scherer Jr. H. N., Thoren B., "The AEP-ASEA UHV Project-Progress up to 1975," CIGRE Paper 31-02, 1976 (AEP, ASEA)
- {56} Bourgsdorf V. V., Emeljanov N. P., Lyskv J. I., Liashenko V. S., Rokotian S. S., Smimov B. I., "Design of the EHV 1150 kV AC transmission line," CIGRE Paper 31-03, 1976 (USSR)
- {57} Dietrich F. M., Kolcio N., "Corona and electric field effects at the Apple Grove Project and an 800 kV line in the USA," CIGRE Paper 31-08, 1976 (WH)
- {58} Trinh N. G., Maruvada P. S., "A method of predicting the corona performance of conductor bundles based on cage test results," IEEE Trans., Vol. PAS-96, No. 1, pp. 312-325, January/February 1977 (IREQ)
- {59} Barber P. B., Morris A. G., "Audible noise and television interference from wet power-transmission conductors and bundles," IEEE Conference Paper A-77-086-2, IEEE, PES Winter Meeting, New York, NY, January 30-February 4, 1977 (CEGB)
- {60} Kolcio N., Diplacido J., Dietrich F. M., "Apple Grove 750 kV Project-Two year statistical analysis of audible noise from conductor at 775 kV and ambient noise data," IEEE Trans., Vol. PAS-96, No. 2, pp. 560-570, March/April 1977 (WH)
- {61} Nourse G. R., "Development and trial installation of an aluminum tubing audible noise suppressor for 765 kV lines," IEEE Conference Paper A 78136-4 IEEE/PES Winter Meeting, New York, NY, January 29-February 3, 1978 (AEP)

- {62} Pokorny W. C., Roy W. R., Schlomann R. H., Zelingher S., "AEP-ASEA UHV research project - Design philosophy, test program and initial results," IEEE Conference Paper A 78124-0, IEEE/PES Winter Meeting, New York, N. Y., January 29-February 3, 1978 (AEP, ASEA)
- {63} Kirkham H., Nourse G. R., Hajny M. R., "AEP-ASEA UHV research project - Instrumentation and data system," IEEE Conference Paper A 78164-6, IEEE/PES Winter Meeting, New York, NY. January 29-February 3, 1978 (AEP, ASEA)
- {64} Heroux P., Trinh N. G., Maruvada P. S., "Reduction of audible noise from EHV transmission lines," CEA Engineering and Operating Division Meeting, March 26-30, 1978 (IREQ)
- {65} General Electric Company, "Three-phase UHV AC transmission research," EPRI Final Report, EL-823, July 1978 (GE)
- {66} Provanzana J. H., Adielson T., Hatfield E. J., Keeler A., Klybas K., "AEP-ASEA UHV research project-Test line and station design", IEEE Trans., Vol. PAS-97, No. 5, pp. 1853-1861, September/October 1978 (AEP, ASEA)
- {67} Molino J. A., Zerdy G. A., Lerner N. D., Tremaine S. G., "Initial psychoacoustic experiments on the human response to transmission line audible noise," DOE Report, DOE/ET/6010-1, December 1978 (NBS)
- {68} Scherer Jr. H. N., Ware B. J., Thoren B., Pettersson K., "The AEP-ASEA UHV Project to 1977," CIGRE Paper 31-08, 1978 (AEP, ASEA)
- {69} Annestrand A., Parks G. A., Perry D. E., "Bonneville Power Administration's 1200 kV transmission line project," CIGRE Paper 31-09, 1978 (BPA)
- {70} Comber M. G., Zaffanella L. E., Young F. S., "Three-phase UHV AC transmission line research at EPRI's project UHV," CIGRE Paper 31-10, 1978 (GE)
- {71} Bagala E., Galli F., Malaguti C., Paris L., Sforzini M., Valtorta M., "Italian 1000 kV project and related test facilities," CIGRE Paper 31-16, 1978 (ENEL)
- {72} Nigbor R. J., Pokorny W. C., "Corona performance of aged and new 765 kV conductors-A test cage comparison," IEEE Conference Paper A 80029-9, IEEE/PES Winter Meeting, New York, NY. February 3-8, 1979 (GE, AEP)
- {73} Christina S., D'Amore M., "A design method to reduce corona and field effects of EHV AC transmission lines," IEEE Conference Paper A 80005-9, IEEE/PES Winter Meeting, New York, NY. February 3-8, 1979 (Italy)
- {74} Comber M. G., Nigbor R. J., "Audible noise performance of regular and asymmetric bundles and effect of conductor aging on Project UHV's three-phase test line," IEEE Trans., Vol. PAS-98, No. 2, pp. 561-572, March/April 1979 (GE)
- {75} Molino J. A., Zerdy G. A., Lerner N. D., Harwood D. L., "Psychoacoustic evaluation of the audible noise from EHV power lines." IEEE/PES Proceedings, Atlanta, GA., April 1979 (NBS)
- {76} Shah K. R., "Regulation of line impact varies by state." Electrical World, pp. 72-74, April 15, 1979 (DOE)
- {77} Perry D. E., Chartier V. L., Reiner G. L., "BPA 1100 kV transmission system development-Corona and electric field studies." IEEE Trans., Vol. PAS-98, No. 5, September/October 1979 (BPA)
- {78} Shah K. R., "Review of State/Federal environmental regulations pertaining to the electrical effects of overhead transmission lines: 1978." DOE Report, DOE/EV-0048/1, October 1979 (DOE)
- {79} Molino J. A., Zerdy G. A., Lerner N. D., Harwood D. L., "Use of the acoustic menu in assessing human response to audible (corona) noise from electric transmission lines." J. Acoust. Soc. Am., Vol. 66, pp. 1435-1445, November 1979 (NBS)
- {80} Gens R. S., Gehring E. H., Eastvedt R. B., "BPA 1100 kV transmission system development-Planning, program and objectives." IEEE Trans., Vol. PAS-98, No. 6 pp. 1916-1921, November/December 1979 (BPA)
- {81} Kolcio D., DiPlacido J., Haas R. J., Nichols D. K., "Long-term audible noise and radio noise performance of American Electric Power's operating 765 kV lines." IEEE Trans., Vol. PAS-98, No. 6, pp. 1853-1859, November / December 1979 (AEP)
- {82} Rogers L. E., Gilbert R. O., Lee Jr. J. M., Braken T. D., "BPA 1100 kV transmission system development - Environmental studies." IEEE Trans., Vol. PAS-98, No. 6, pp. 1958 - 1967, November / December 1979 (BPA)
- {83} Thoren B., "EHV and UHV power transmission-Present status and future prospects," The Transactions of the SA Institute of Engineers, pp. 318-332, December 1979 (ASEA)
- {84} Bolt, Beranek & Newman, Inc., "Initial study on the effects of transformer and transmission line noise on people, Volume 2: Sleep interference, EPRI Final Report, EA-1240, December 1979 (BBN)
- {85} Bolt, Beranek, & Newman, Inc., "Initial study on the effects of transformer and transmission line noise on people, Volume 3: Community reaction," EPRI Final Report, EA-1240, December 1979 (BBN)
- {86} Stearns R. D., "Corona and electric field performance of the Lyons test line utilizing the symmetric 8 x 41 mm, 3-phase configuration." BPA 1200 kV Project report, EL-80-3, April 8, 1980 (BPA)
- {87} Keast D. N., "Assessing the impact of audible noise from AC transmission lines." IEEE Trans., Vol. PAS-99, No. 3, pp. 1021-1031, May/June 1980
- {88} Chartier V. L., Sarkinen S. H., Stearns R. D., Burns A. L., "Investigation of corona field effects of AC/DC hybrid transmission lines." IEEE Trans., Vol. PAS-100, No. 1, pp. 72-80, January 1980 (BPA)
- {89} Barber P. B., Couchman D. L. V., Morris A. G., Swift D. A., "Audible noise and electromagnetic radiation emitted by AC corona discharges from water droplets." Proposed Paper for 6th Int. Conference on Gas Discharges and Their Applications, Edinburgh, September 1980 (CEGB)
- {90} Cortina R., De Michelis F., Rosa F., Yamaguti Y., "Results of measurements of corona effects (loss, radio interference, audible noise) on large conductor bundles and large diameter tubes," CIGRE Paper 36-06, 1980 (ENEL)
- {91} Coleman D. M., "Impacts of overhead high voltage transmission lines." J. Environmental Systems, Vol. 10, No. 4, pp. 283-304, 1980-81
- {92} Chartier V. L., Stearns R. D., "Formulas for predicting audible noise from overhead high voltage AC and DC lines," IEEE Trans., Vol. PAS-100, No. 1, pp. 121-130, January 1981 (BPA)
- {93} IEEE Corona and Field Effects Subcommittee, "Measurement of audible noise from transmis-

- sion lines." IEEE Trans., Vol. PAS-100, No. 3, pp. 1440-1452, March 1981 (IEEE)
- {94} Molino J. A., Zardy G. A., Lerner N. D., Harwood D. L., "Modification of transmission line audible noise spectra to reduce environmental impact." IEEE Trans., Vol. PAS-100, pp. 2120-2126, April 1981 (NBS)
- {95} Popeck R. A., Knapp R. F., "Measurement and analysis of audible noise from operating 765kV transmission lines." IEEE Trans., Vol. PAS-100, No. 4, pp. 2138-2148, April 1981 (Detroit Edison)
- {96} Arbey H., Moreau M., Delcambre J., "Les bruits aulians des lignes electriques," CIGRE 22-81, No. 232-05, June 1981 (EDF)
- {97} General Electric Company, "Three-phase UHV AC transmission research 1977-1979," EPRI Final Report, EL-1820, May 1981 (GE)
- {98} Cortina R., Rosa F., Serravalli W., Brosic E., Piazza R., "Experimental investigation in the anechoic chamber on the loudness of acoustic noise caused by A. C. corona." IEEE Trans., Vol. PAS-100, No. 9, pp. 4225-4235, September 1981 (ENEL)
- {99} Fukushima M., Sasano T., Sawada Y., "Corona performances of conductor bundles measured in corona cages and its application," CIGRE Paper 232-01, CIGRE Symposium 22-81, Stockholm, 1981 (JPN)
- {100} Stearns R. D., "Corona and electric field performance of the BPA prototype 1200 kV transmission line," CIGRE Paper 232-06, CIGRE Symposium 22-81, Stockholm, 1981 (BPA)
- {101} Gagliardi F., Piccolo A., Rossi F., "Evaluation methods of effects of lines on the environment," CIGRE Paper 232-10, CIGRE Symposium 22-81, Stockholm, 1981 (ENEL)
- {102} Paris L., Sforzini M., Paoli P., Vigotti R., "UHV transmission line extra costs required for the reduction of environmental interferences," CIGRE Paper 232-11, CIGRE Symposium 22-81, Stockholm, 1981 (ENEL)
- {103} Mongeluzzo R., Piccolo A., Rossi F., "Modeling environmental effect of EHV and UHV transmission lines," Electric Power Systems Research, No. 4, pp. 235-245, 1981 (ENEL)
- {104} Lerner N. D., Lehman D. J., "Annoyance of noise from power lines," Human Factors, Vol. 23, No. 3, pp. 273-283, 1981 (NBS)
- {105} Trinh N. G., Maruvada P. S., Flamand J., Valotaire J. R., "A study of the corona performance of Hydro Quebec's 735kV lines," IEEE Trans., Vol. PAS-101, No. 3, pp. 681-690, March 1982 (IREQ)
- {106} IEEE Corona and Field Effects Subcommittee, "A comparison of methods for calculating audible noise of high voltage transmission lines," IEEE Trans., Vol. PAS-101, No. 10, pp. 4090-4099, October 1982 (IEEE)
- {107} General Electric Company, "Transmission line reference book 345 kV and above/Second edition," EPRI EL-2500, 1982 (GE)
- {108} Carpinelli G., DeMartinis U., Piccolo A., Rossi F., "On the environmental disturbances of EHV and UHV transmission lines," Mathematics and Computers in Simulation, No. 24, pp. 215-223, 1982 (ENEL)
- {109} CISPR Publication 18-1, "Radio interference characteristics of over-head power and high-voltage equipment, Part-1: Description of Phenomena," 1982 (CISPR)
- {110} Kirkham H., Gajda Jr. W. J., "A mathematical model of transmission line audible noise-Part 1: Background and model development," IEEE Trans., Vol. PAS-102, No. 3, pp. 718-728, March 1983 (AEP)
- {111} Kirkham H., Gajda Jr. W. J., "A mathematical model of transmission line audible noise-Part 2: Comparison with experiment," IEEE Trans., Vol. PAS-102, No. 3, pp. 718-728, March 1983 (AEP)
- {112} Rayman E. F., Hopkins R. A., "ESCOM's 800 kV transmission system and substations," L'energia Elettrica, No. 12, pp. 472-478, 1983 (South Africa)
- {113} Landquist J., "Methods for predicting AC transmission line audible noise by short-term single-phase tests," IEEE Trans., Vol. PAS-103, No. 2, pp. 283-293, February 1984 (SWD)
- {114} Scherer Jr. H. N., Ware B. J., Marsico R., "Electrical, structural and environmental criteria for EHV and UHV transmission lines," CIGRE Paper 22-05, 1984 (AEP)
- {115} Gary C., Dufourent N., Pourbaix F., "400 kV line of reduced size," CIGRE Paper 22-12, 1984 (EDF)
- {116} Cauzillo B. A., Cortina R., Nicolini P., DeMedeiros J. C., Bryant M. E., "Design criteria of UHV overhead lines based on experience acquired in the 1000 kV Project," CIGRE Paper 22-14, 1984 (ENEL)
- {117} Sawada Y., Fukushima M., Yasui M., "Akagi 1000 kV Project in CRIEPI-Corona test facilities and results up to 1983," CIGRE Paper 36-05, August/September 1984 (JPN)
- {118} Cristescu D., Ungureanu M., Postolache P., "New results on the corona effect on alternating current voltage-Correlations, losses, radio interference, acoustic noise," CIGRE Paper 36-06, 1984 (Rumania)
- {119} Scherer Jr. H. N., Ware B. J., Thoren B., Pettersson K., "The AEP/ASEA UHV Projects-Results to 1983," CIGRE Paper 38-04, 1984 (AEP, ASEA)
- {120} Klinger M., Annestrand S. A., Parks G. A., Lee Jr. J. M., "Experience of a 6-year 1200 kV transmission line test and development program at the Bonneville Power Administration," CIGRE Paper 38-08, 1984 (BPA)
- {121} Vinh T., Shih C. H., King J. V., Roy W. R., "Audible noise and corona loss performance of 9-conductor bundle for UHV transmission lines," IEEE Trans., Vol. PAS-104, No. 10, pp. 2764-2770, October 1985 (AEP, ASEA)
- {122} IEEE Corona and Field Effects Subcommittee, "IEEE standard for the measurement of audible noise from overhead transmission lines," ANSI/IEEE Std 656-1985, 1985 (IEEE)
- {123} Fukushima M., Tanabe K., Nakano Y., Tomita S., "Research activities on transmission line audible noise in Japan," Paper C3-2, 12th International Congress on Acoustics in Toronto, July 1986 (JPN)
- {124} CISPR Publication 18-2, "Radio interference characteristics of over-head power and high-voltage equipment, Part-2: Method of measurement and procedure for determining limits," 1986 (CISPR)
- {125} CISPR Publication 18-2, "Radio interference characteristics of over-head power and high-voltage equipment, Part-3: Code of practice for minimizing the generation of radio noise," 1986 (CISPR)
- {126} Tanabe K., "Second harmonics of audible noise from AC transmission lines - Random walk model on space distribution -," IEEE Trans. on PWRD, Vol. 6, No. 1, pp. 216-222, January 1991 (JPN)
- {127} Tanabe K., "Hum Noise performance of 6, 8, 10 conductor bundles for 1000 kV

transmission lines at the Akagi test site: A comparative study with cage data," IEEE Trans. on PWRD, Vol. 6, NO. 4 pp. 1799-1804, October 1991 (JPN)

{128} Tanabe K., Takebe T., Isozaki M., "Reduction of audible noise using asymmetrical bundles for 1000 kV transmission lines: Full-scale test results of the Akagi test line," IEEE Trans. on PWRD, Vol. 11, No. 3, pp. 1482-1491, July 1996 (JPN)

{129} Isozaki M., Akagi Y., Tanabe K., Yamamoto K., Kubokawa H., "Development of low Noise

conductors for 1,000 kV transmission," CIGRE '96 (JPN)

{130} Lee D. I., Kim J. B., Shin K. Y., Yang K. H., Ahan H. S., and Koo J. Y., "Audible Noise Performance of 6-Rail Conductors on a 765-kV Double Circuit Test Line," IEEE Trans. on PWRD, Vol. 12, No. 03, pp. 1343-1351, July 1997 (Korea)

2. 実験設備, 測定方法, ならびに解析方法

2.1 UHV 赤城実規模試験線

(1) 試験線

UHV 赤城実規模試験線 (以下, 赤城試験線) [1,2,3]の基本仕様は第2.1表に示すとおりである。また, 試験線の概念図 (縦断面図) とコロナ特性試験に重要な電線配置を, 各々, 第2.1図と第2.2図に示す。赤城試験線は, 群馬県赤城山麓の中腹に位置し, 試験線下は比較的平坦で, 第2.2図に示すように平均勾配 1/10 の斜面である。

試験線および母線のがいし装置には, 当所で開発したコロナ特性の良好な低コロナシールドリングを取り付けている。UHV 課電設備の単線結

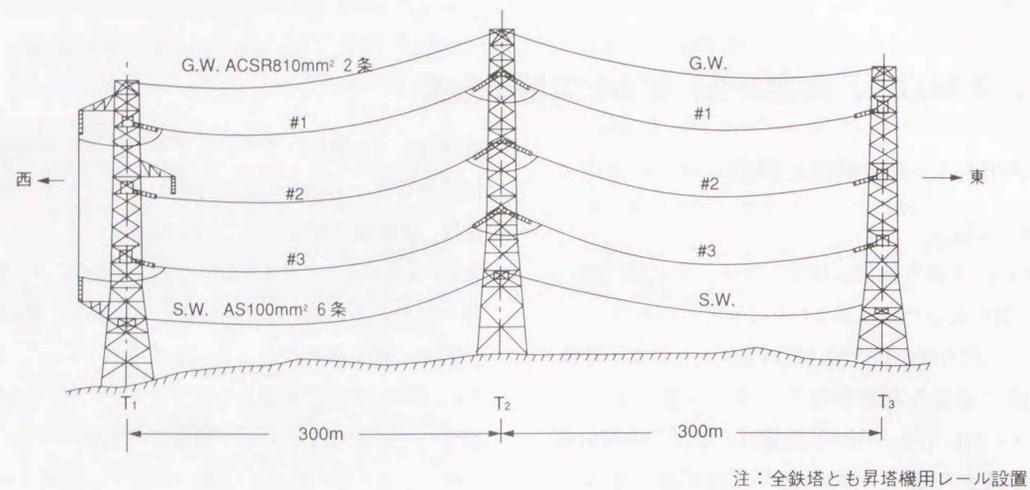
線図は第2.3図に示すとおりであり, 電圧の調整は負荷時タップ切り替え変圧器によっている。母線は, 試験線に架線される試験電線よりもコロナ放電の発生を少なくするために, ACSR810mm², 12 導体を採用している。また, 母線は試験線に二回線逆相順の課電ができるように構成されている。さらに, UHV 課電圧測定用の結合コンデンサ (700pF, 耐電圧 900 kV_{L-G}), および襲雷時の試験変圧器の保護に, 主・副接地器が各相の母線下に設置されている。

第2.1表 試験線の仕様

Table 2.1 Specifications of Akagi Test Line

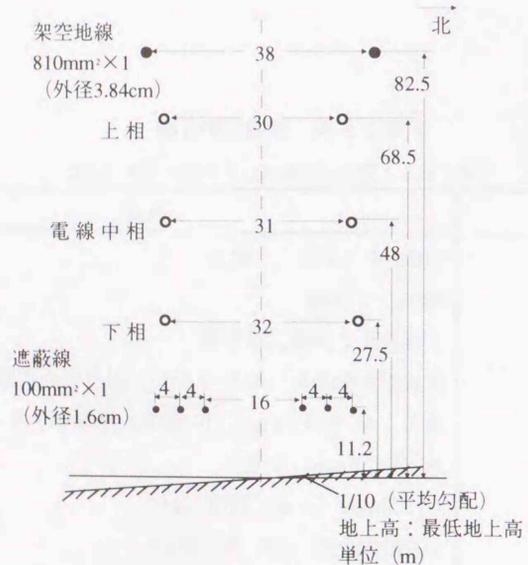
項目	仕様
最高電圧, 周波数	1400kV (線間), 50Hz
亘長・径間数	600m, 2 径間
装柱	3 相垂直 2 回線, 逆相順
鉄塔型	直線型耐張鉄塔 (中間 1 基), 引き留め鉄塔 (端部 2 基)
導体方式	最大: ACSR810mm ² , 10 導体, 素導体間隔 40cm
架空地線	ACSR810mm ² (2 条)
遮蔽線 (注 1)	AS100mm ² (3 条/回線×2)
がいし装置	4 連耐張装置 (42t, 54t がいし)
下相電線地上高	平均 32m, 最低 27.5m (常時気象条件)

注 1) 昭和 59 年 8 月撤去



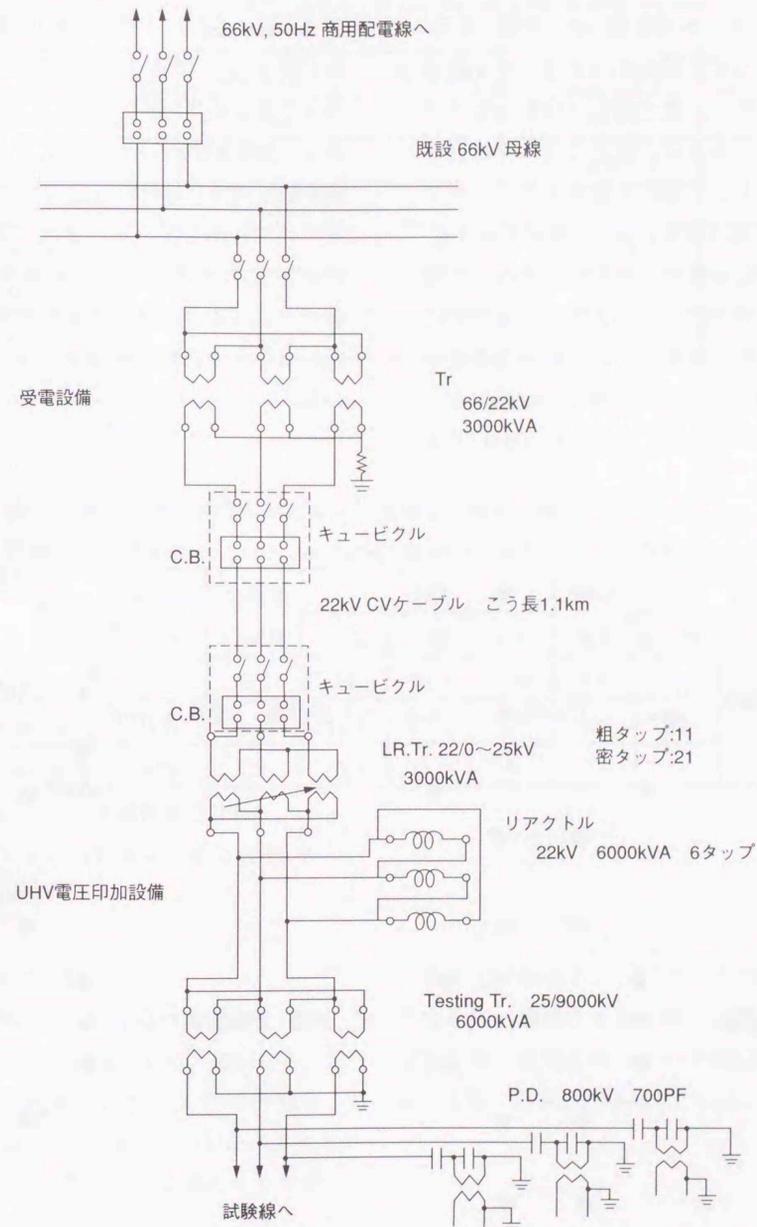
第2.1図 赤城試験線の概要

Fig. 2.1 Schematic Illustration of Akagi test line.



第2.2図 赤城試験線の電線配置

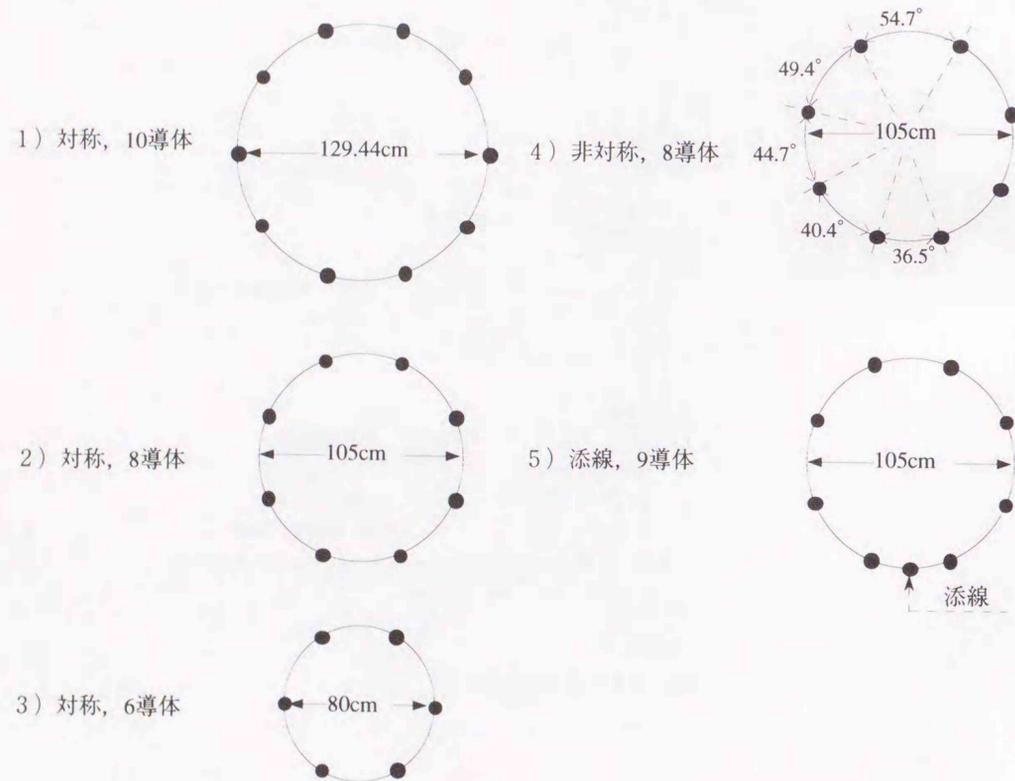
Fig. 2.2 Conductor configuration of Akagi test line.



第2.3図 赤城試験線の電圧印加回路

Fig. 2.3 Schematic of substation of Akagi test line.

課電圧は、UHV 電圧制御装置によって任意に制御することが可能である。すなわち、制御棟あるいは測定棟（第 2.6 図参照）から手で負荷時タップ切り替え変圧器のタップ切り替え指令を出す（手動操作）、設定電圧に自動追尾させる（自動操作）、あるいは後述のデータ収録装置からの指令によって電圧を制御することができる。また UHV 電圧制御装置は、襲雷警報装置からの警報や課電設備からの警報を受信した場合には、受電電源（22kV）の開放、接地器の動作指令を出力して、課電設備を保護する機能も持っている。課電圧の範囲は線間 0~1400kV で、密タップ 1 段当たりの電圧変化は約 15kV である。



第2.4 素導体配列
Fig. 2.4 Bundle geometries.

(2) 試験電線

赤城試験線において実証試験を行った電線は第 2.2 表に示した 7 種類であり、最大導体表面電位の傾き g_{max} は第 2.3 表に示すとおりである。各々の素導体は、鋼心アルミより線（ACSR）である。素導体配列を第 2.4 図に示す。スパイラル線を取り付けた場合の g_{max} は、計算が容易ではないので省略している。また、素導体配列が非対称方式と添線方式である場合にも、素導体各々における最大方向の表面電界強度が大幅に異なるため、これらの場合についても省略している。

第 2.2 表 赤城試験線における試験電線

Table 2.2 Conductor Bundles used in Demonstration Test at Akagi Test Line

	導体方式			スパイラル線	素導体配列
	線種	素導体径[cm]	素導体数		
1	ACSR 810mm ²	3.84	10	なし	対称
2	ACSR 810mm ²	3.84	10	対角密着 4 条	対称
3	ACSR 810mm ²	3.84	8	なし	対称
4	ACSR 810mm ²	3.84	8	対角密着 4 条	対称
5	ACSR 810mm ²	3.84	6	なし	対称
6	ACSR 810mm ²	3.84	8	対角密着 4 条	非対称
7	ACSR 810mm ²	3.84	9	対角密着 4 条	添線

注 1) 添線にはスパイラル線なし

第 2.3 表 赤城試験線の最大導体表面電位の傾き（電圧：1000kV）

Table 2.3 Maximum Conductor Surface Gradients at Voltage of 1000 kV

	導体方式	素導体配列	遮蔽線の有無	電線			架空地線	遮蔽線		
				下相	中相	上相		内側	中央	外側
1	810mm ² ×10	対称	あり	11	10.7	10.9	8.6	6.0	7.6	9.7
2	810mm ² ×8	対称	あり	12.8	12.4	12.6	8.0	5.5	7.1	9.1
3	810mm ² ×6	対称	なし	15.3	15.0	15.3	7.3	—	—	—

注 1) 電線は全て ACSR、素導体間隔 40cm

注 2) 最低地上高における計算値、電圧 1000kV

注 3) 単位：kV/cm

(3) コロナ特性測定設備

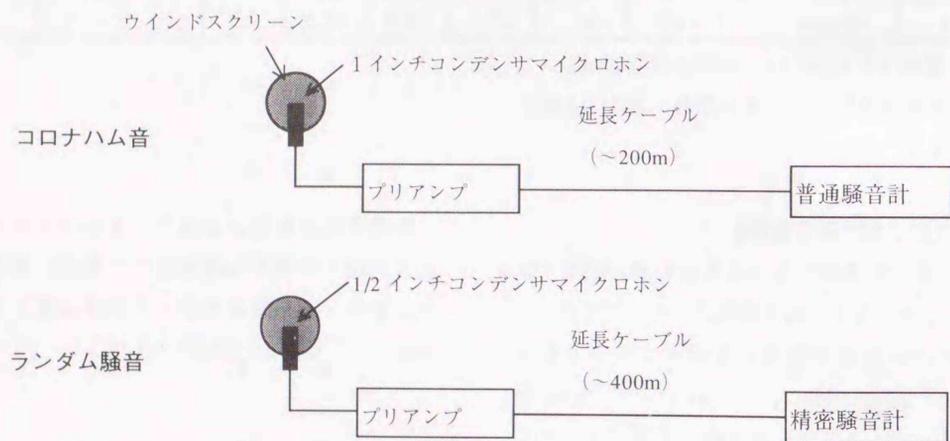
コロナ特性試験のために各種の測定設備があり、コロナハム音の測定設備はその一部である。コロナハム音測定設備の仕様とブロック図を第 2.4 表と第 2.5 図に示す。また、コロナハム音測定用のマイクロホンを含めた各種のセンサ配置を第 2.6 図に示す。

各測定装置本体およびデータ収録装置は 2 号鉄塔北側に位置する測定棟に設置し、測定値、気象条件、課電条件をデータ収録装置によって毎分 1 回、自動的に収録している。

第 2.4 表 測定器の仕様

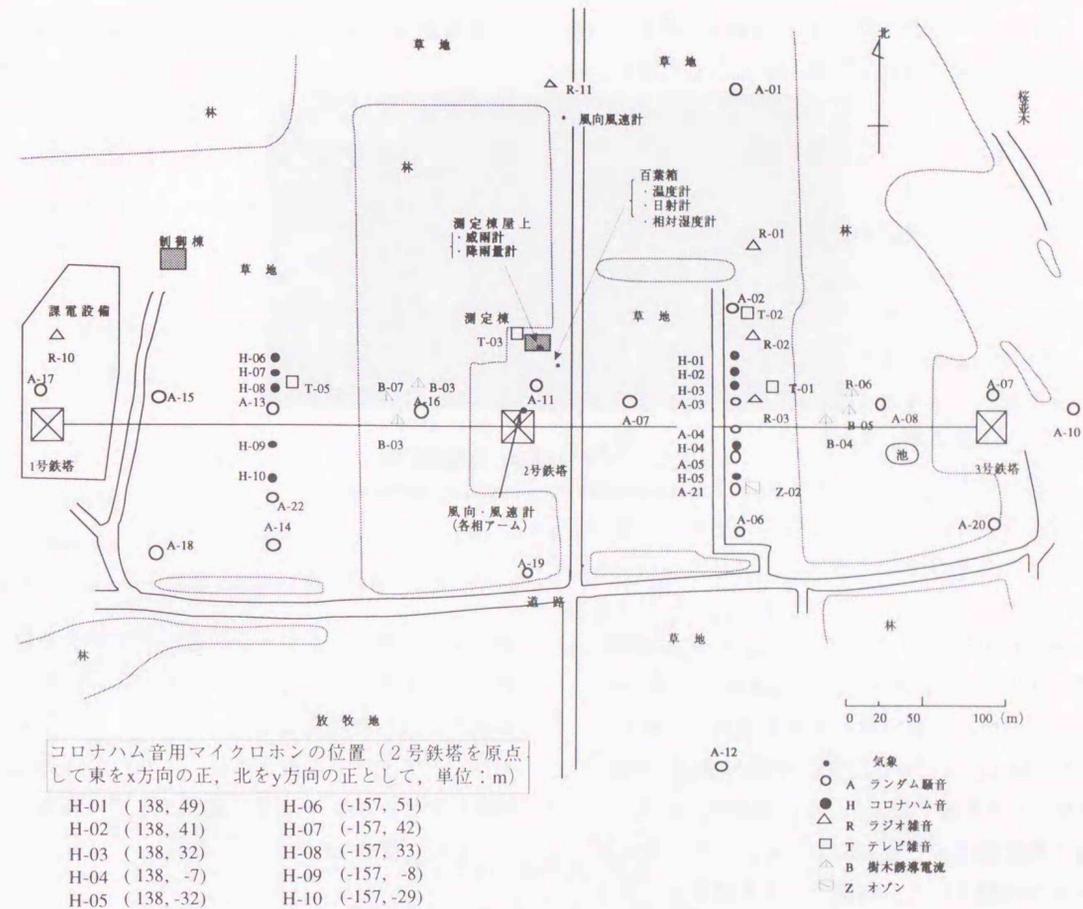
Table 2.4 Specifications of Measuring Devices

測定要素	機器	仕様
コロナハム音	マイクロホン	コンデンサ型, 外径 2.54cm, 感度-34dB/Pa, バイアス電圧 30V
	ウインドスクリーン	全天候, ウレタンフォーム製, 風雑音減衰効果: 23dB(A), 17dB(F)
	プリアンプ	入力インピーダンス 100k Ω , 不平衡, 出力インピーダンス 600 Ω
	普通騒音計	JIS-C1502(77)に準拠, 聴感補正回路: F, A, C, 100Hz フィルタ (フィルタ幅 \pm 5Hz)
ランダム騒音	マイクロホン	コンデンサ型, 外径 1.27cm, 感度-32dB/Pa, バイアス電圧 60V
	ウインドスクリーン	全天候, ウレタンフォーム製, 風雑音減衰効果: 23dB(A), 17dB(F)
	プリアンプ	入力インピーダンス 100k Ω , 不平衡, 出力インピーダンス 600 Ω
	精密騒音計	IEC-Pub. 179 に準拠, 聴感補正回路: F, A, C, 100Hz フィルタ (フィルタ幅 \pm 5Hz)
降雨量	広開口径転倒樹型雨量計	口径 632.6mm, 0.02mm/転倒
風向, 風速	風車型風向風速計	風向: 0~360 $^{\circ}$, 5%以内 風速: 0~10m/s \pm 0.5m/s 以内, 0~35m/s \pm 0.5%以内



第 2.5 図 コロナハム音とランダム騒音の測定系統図

Fig. 2.5 Block diagram of measuring system for hum noise and random noise.

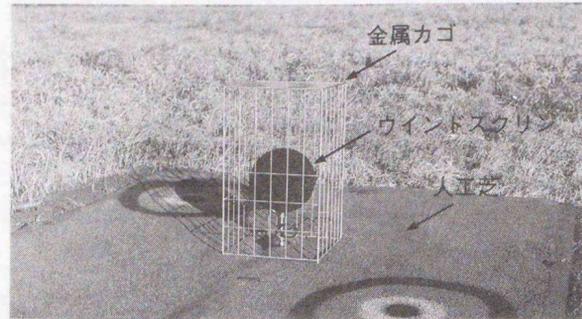


第 2.6 図 赤城試験線周辺のセンサの配置

Fig. 2.6 Sensor arrangements at Akagi test line.

コロナハム音は 100Hz の純音であるため、試験線に架線されている電線 (相電線) に対して垂直な面と地面に対して水平な面との交線方向にも、また相電線に対して垂直な面内において、地面に対して鉛直方向にも複雑な定在波が形成される。したがって、試験線下近傍のコロナハム音を検出するために、第 2.6 図に示すように、各径間の中央付近に 5 個のマイクロホンを設置

している。また、鉛直方向の定在波の影響を避け、かつ、電線からのコロナハム音の直接波と地表面からの反射波が常に同相で加算されるように、マイクロホンを地表面近傍 (冬には 30cm, それ以外の季節には 20cm) に設置した (第 2.7 図参照)。このようにすると、S/N 良く電線からのコロナハム音を測定できる。



第2.7図 マイクロホンの設置状況
Fig. 2.7 A microphone for measuring audible noise.

第2.5図に示したように、マイクロホンの直後にはプリアンプを挿入し、最長200mの2重シールドケーブルで測定室の普通騒音計に接続している。騒音計には中心周波数100Hz、通過帯域幅±5Hzの狭帯域フィルターが内蔵され、100Hz以外の周波数成分を除去している。また、マイクロホンの周辺には、防護のための簡単な金属カゴと人工芝を付設した(第2.7図参照)。

また、ランダム騒音測定設備も必要に応じてコロナハム音を測定できるようになっており、マイクロホンの地上高はコロナハム音用のものと全く同じように設置している。その仕様とブロック図は第2.4表と第2.5図に並記されている。

気象条件測定用センサは第2.6図に示すように試験線周辺に分散配置し、データはすべてデータ収録装置に記録される。各測定器の測定原理、精度、測定範囲は第2.5表に示すとおりである。気象条件として特に重要な降雨については、受雨面積を標準の雨量計の10倍にした広開口径転倒柵型雨量計ならびに2台の感雨計を用いている。

データ収録装置は、コンピュータを中心としたデータロギングシステムである。各種の測定

器によって測定したアナログ量、デジタル量のデータを毎分コンピュータに取り込み、簡単な演算を施し物理量として、一時コンピュータのハードディスクに書き込む。これらの一時記憶されたデータは1日毎に磁気テープに転送され、分析に使用される。

(4) 実証試験の手法

統計的に信頼性の高い結果が得られるように、多数のデータを収集することを基本とした。このため長期連続試験を中心に実施することとし、測定設備とデータ収録装置は通年連続運転している。また、コロナハム音の空間分布の測定などは短期試験として随時行った。

課電電圧は、わが国のUHV送電線の目標電圧である1100kVを中心とした。1000, 1200, ならびに1300kVの課電、および暗騒音の測定を目的とした無課電も行った。

(5) 降雨強度の分析法

広開口径転倒柵型雨量計は、0.02mmの降雨があると転倒柵が一回転倒する。1分間に1回の転倒では1.2mm/hの降雨強度となるが、これで

は分解能が悪いので、次式で降雨強度Rを算出する。

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{0.02 \times 60}{T} \text{ [mm/h]} \quad 30 \geq T \geq 2 \\ R &= 0.02 \times N \times 60 \text{ [mm/h]} \quad T = 1 \end{aligned} \right\} (2.1)$$

ここで、

T : 連続する転倒の時間間隔 [分]

N : 転倒回数

である。

したがって、上式による最小降雨強度は0.04mm/hである。

降雨強度に対するコロナハム音の特性を分析する際には、さらに第2.6表に示す降雨強度区分を用いた。

(6) コロナハム音データの分析法

まず、降雨時のデータ分析においては、雨量

計の転倒柵の転倒が30分間ない場合には、その間は降雨はないとし、降雨時のデータからは削除した。

一方、降雨がないと判定した上で感雨計が不動作の場合を晴天時とした。したがって、降雨時でも晴天時でもない時間帯もあることとなる。

降雨時ならびに晴天時のデータ分析において、風速が5m/sを超えている場合には、周囲の樹木や鉄塔、電線を含めた構造物からの風切音が発生したりするので、データから削除した。

さらに、雪や霧については、これらの天候量を定量的に評価するための測定器を準備できなかったため、目視によりその天候であることが確認されているときに得られたデータについてのみ分析した。

第2.6表 降雨強度区分

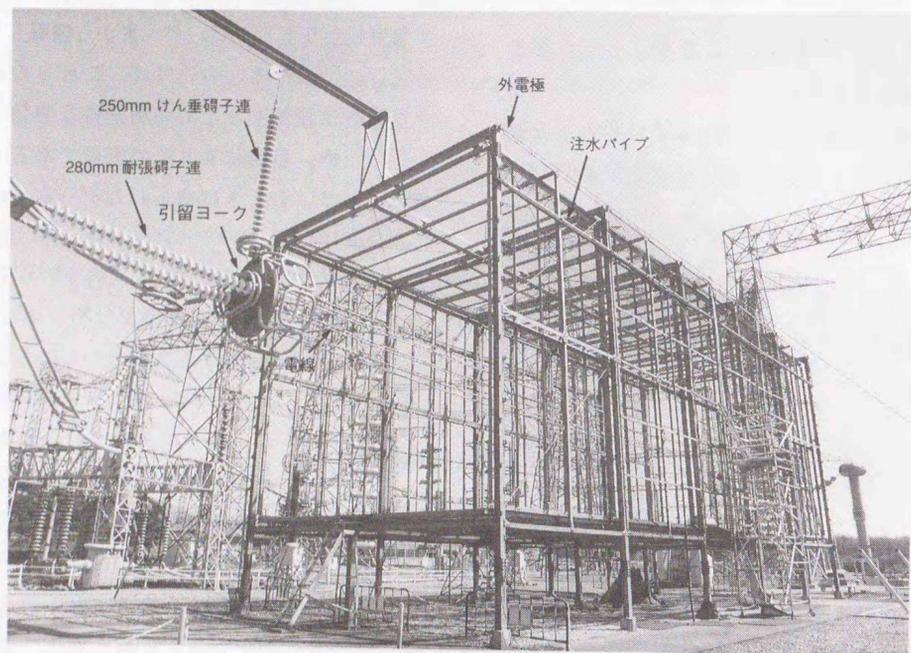
Table 2.6 Categories of Rainfall Rate

降雨強度 区分	降雨強度		雨量計の転倒柵 の転倒回数 回/min.
	範囲 mm/h	基準値 mm/h	
1	0.04~0.12	0.07	1/30~1/10
2	0.133~0.3	0.2	1/9~1/4
3	0.4	0.4	1/3
4	0.6	0.6	1/2
5	1.2	1.2	1
6	2.4	2.4	2
7	3.6	3.6	3
8	4.8~6.0	5.4	4~5
9	7.2~10.8	8.8	6~9
10	12~19.2	15.2	10~16
11	20.4~	—	17~

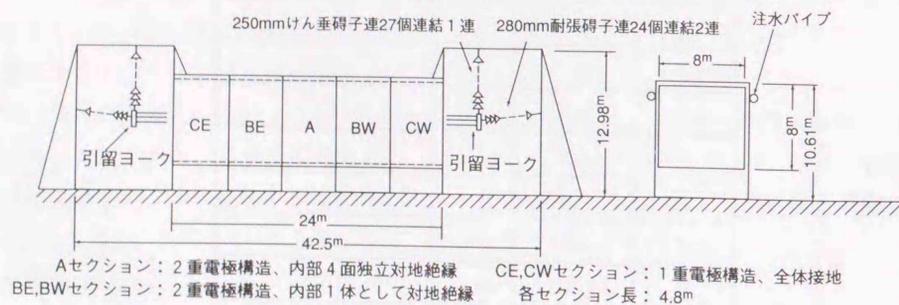
2.2 UHV コロナケージ

(1) 構造

第 2.8 図に構造の概略を示す[2,4]。電線周囲の静電界分布およびコロナ放電によって発生するイオンの移動距離が、UHV 級送電線のそれらと同等になるように、8m×8m の正方形断面としている[4]。外電極は 5 分割し、端部の外電極は接地している。中央部の 3 スパンの外電極は 2 重



(1) 写真

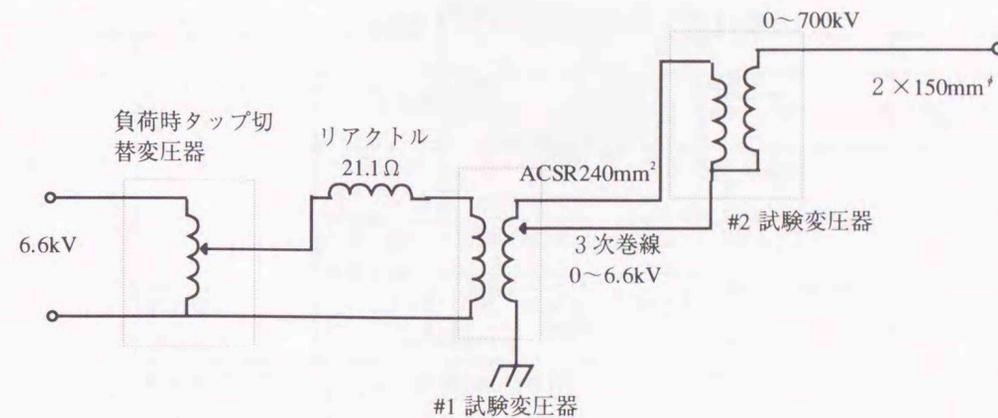


(2) 概略図

第2.8図 UHVコロナケージの写真と概略図

Fig. 2.8 Photo and schematic illustration of UHV corona cage.

構造とし、内側の電極はポストがいしで大地より絶縁し、電線から発生するコロナ電流を抽出できるようにしている。外側の電極は、外来電磁波の遮蔽用である。電線は、同一地上高にセットした両端のヨークで引留められる。このため電線は、Aセクションで最低地上高となるカタナリー曲線となる。



第 2.9 図 UHV コロナケージの課電系統

Fig. 2.9 Energizing system of UHV corona cage.

(2) 注水装置

人工降雨実験用の注水装置には、噴射音を小さくするために、小さい細孔を穿けた（外周の 1/3 に渡り直径 0.6mm の孔を 9 個/m）アルミパイプ（外径 50mm、肉厚 1mm）を採用し、コロナ騒音測定に支障のないようにしている。注水量は約 30mm/h で、この場合の注水音レベルは 100Hz の 1/3 オクターブバンドレベルで 18~21dB(A)、騒音レベルで 50~52dB(A)である。

(3) 電線交換装置

試験電線の交換を迅速に行えるように、耐張がいし連、懸垂がいし連をウィンチあるいは油圧装置で上下できる電線交換装置を有する。

(4) 課電設備

第 2.9 図に示すように、6.6kV を電圧調整用の負荷時タップ切り替え変圧器に入力し、波形調整用のリアクトル (21.1Ω) を通した後に、縦続接続した 2 台の 350kV 試験変圧器により最

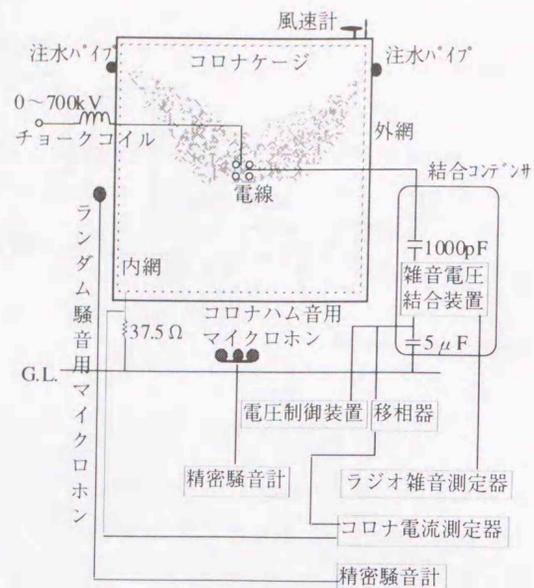
大 700kV_{L-G} まで昇圧している。コロナ放電を防止するために、母線は縦続接続用には ACSR240mm²、2 導体、後段の試験変圧器からコロナケージ内の試験電線までは 150mm^φ、2 導体としている。また、コロナ放電が発生しやすい屈曲部やエッジのある部分には、コロナシールドリングを設けている。

課電圧は結合コンデンサにより測定する。

(5) 測定方法

コロナハム音、コロナ電流、ランダム騒音、ラジオ雑音を測定するための設備を有する。測定系統を第 2.10 図に示す。また、測定装置の主要な仕様を第 2.7 表に示す。さらに風速は、コロナケージの上部に設置した微風速計により測定した。

自然降雨時の降雨強度は、コロナケージの床面下に設置した広開口径転倒柵型雨量計により、先の式 (2.1) を用いて算出した。



第2.10図 UHVコロナケージの測定系統
Fig. 2.10 Measuring system of UHV corona cage.

・ランダム騒音

コロナケージの壁面、電線と平行方向の中央に設置したコンデンサマイクロホンによって、周波数 20Hz~20kHz 程度までの可聴音を受信し、精密騒音計により A 特性の騒音レベルを測定した。マイクロホンと試験電線の直距離は 5.12m である。

・コロナハム音

コロナハム音測定用のマイクロホンは、100Hz の波長の 1/4 間隔に配置した 3 個のエレクトレットマイクロホンによって受けた音波を合成することによって指向性マイクロホンとなっている。合成された信号は 100Hz の狭帯域フィルターを通した後、精密騒音計に入力し、F 特性で音圧レベルを測定した。

指向性マイクロホンは、試験電線から直距離 6.37m、電線と平行方向の中央で、地表か

ら約 20cm の高さに設置した。このように設置することによって、電線からのコロナハム音は地表面で反射されるため、マイクロホンで受けるコロナハム音は 2 倍となり、SN 比が良い状態で測定できる。したがって、測定値は、電線からの直接波と地表からの反射波がほぼ同相で加算された半自由空間の場合の値となり、自由空間の場合の値に比べて 6dB 高くなっている。

・ラジオ雑音

結合コンデンサによって抽出したラジオ周波数帯の電流を、旧 JRTC 規格のスペクトラムアナライザに入力し、455kHz のレベルを測定した。

第 2.7 表 測定器の概略仕様(UHV コロナケージ)

Table 2.7 Specifications of Measuring Devices of UHV Corona Cage

項目	測定装置	仕様	メーカー
電圧	結合コンデンサ	分圧比：1/5000	日新電機
	電圧制御装置	分解能：1 kV, 自動電圧制御機能あり	高岳製作所
ランダム騒音	マイクロホン	コンデンサ型, 外径：1.27cm, 感度：約-32dB/Pa バイアス電圧：60V	リオン
	防風スクリーン	直径：20cm, 風雑音減衰効果 28dB(A), 19dB(F) 材質：ウレタンフォーム	
	精密騒音計	JIS C1505 に準拠, 聴感補正回路：A, F, C メータ動特性：Fast, Slow	
	周波数分析器	1/1, 1/3 オクターブバンド, 中心周波数：4 Hz~20kHz	
コロナハム音	マイクロホン	エレクトレット型, 外径：1.27cm, 感度：約-26dB/Pa	リオン
	防風スクリーン	直径：12cm, 風雑音減衰効果 26dB(A), 15dB(F) 材質：ウレタンフォーム	
	騒音計	JIS C1505 に準拠, 聴感補正回路：A, F, C, メータ動特性：Fast, Slow 内臓フィルタ中心周波数：100, 200, 300Hz	
ラジオ雑音	雑音電圧結合装置	トランス結合方式, 出力インピーダンス：75Ω 通過帯域：350~1100kHz	日新電機
	ラジオ雑音測定器	旧 JRTC 規格, 測定周波数範囲：0.15~30MHz 帯域幅：10kHz, 充/放電時定数：1±0.5/600±120ms 機械的時定数：350ms	アドバンテスト
コロナ電流	移相器	位相調整範囲：-180~180度	寿通信器
	コロナ電流測定器	差動入力方式, 帯域幅：1.25Hz	アドバンテスト

・コロナ電流

コロナケージの中央部の内網(幅：4.8m)によって抽出した電流は、コロナ電流と充電電流の合成電流である。合成電流から充電電流を差し引くために、結合コンデンサによって抽出した電圧信号を移相器により 90 度進ませ、充電電流成分と同相の信号を生成した。この充電電流と同相の信号と合成電流をそれぞれ差動アンプに入力し、充電電流分をキャンセルさせ、コロナ電流分だけを測定した。勿論、乾燥時のコロナ放電がない場合に、結合コンデンサからの電圧信号の大きさと位相は、差動アンプの出力がゼロになるように調整している。

(6) 試験手法

1) 人工注水試験手法

注水時および注水停止後の騒音レベルを測定した。騒音レベルは次の手順で測定した。最大導体表面電位の傾き g_{max} が測定対象とするものの下限になるように課電圧を調整し、注水を開始した。騒音レベルが安定するのを待って注水時の騒音レベルを測定した。その後、注水を停止してから、15 秒, 30 秒, 1 分, 1 分 30 秒, 2 分, 2 分 30 秒, ならびに 3 分の時点の騒音レベル(停止後の時間経過特性)を測定した。次に、 g_{max} が 2kV/cm だけ上昇するように課電圧を調整

し、同様の測定を行う。このようにして、順次 2kV/cm ずつ上昇し、測定対象とする g_{\max} の上限まで達した後に、 g_{\max} を 1kV/cm だけ下げて測定を行った。さらにその後は、2kV/cm ずつ g_{\max} を降下させながら、上昇時に測定した g_{\max} の中間の g_{\max} で測定し、上昇時と下降時とで履歴特性のないことを確認した。以上により、 g_{\max} を 1kV/cm おきに行った場合の注水時および注水停止後の騒音レベルについての一組のデータが得られる。さらに、商用送電線での g_{\max} (凡そ 13~16kV/cm) の付近においては複数回の測定を実施し、その平均値を求めた。

さらに、暗騒音として、無課電における注水時騒音レベルと注水停止後の時間経過特性を所定の g_{\max} における測定の前後に測定する。

なお、風速を常時監視し、2m/s 以下において注水が安定し、かつ周囲の構造物からの風切音がない状態で測定を行なった。

2) 自然降雨時における試験手法

自然降雨時における測定は、注水の制御以外を上記に準じて行った。

(7) 分析法

1) ランダム騒音レベル

まず、測定値に暗騒音補正を行う。補正は式 (2.2) によった。

$$P_{\text{cor}} = 10 \log \left[10^{\frac{P_m}{10}} - 10^{\frac{P_{\text{BGN}}}{10}} \right] \text{ [dB(A)]} \quad (2.2)$$

ここで、

P_{cor} : 補正後の騒音レベル [dB(A)]

P_m : 測定値 [dB(A)]

P_{BGN} : 暗騒音レベル [dB(A)]

である。

次に、UHV コロナケージでは長さ 24m の

電線から発生する騒音を測定しているが、これを無限長電線、電線中心から 1m 点の出力音圧レベル P_G に式 (2.3) [5]により変換した。

$$P_G = P_{\text{cor}} + 10 \log \left(\frac{\pi r}{2 \tan^{-1}(L/2\pi)} \right) \text{ [dB(A)]} \quad (2.3.1)$$

$$= P_{\text{cor}} + 8.4 \text{ [dB(A) ref. } 20\mu\text{Pa]} \quad (2.3.2)$$

ここで、

L : 電線長 [m]

r : マイクロホンと電線の直距離 [m]

である。

このようにして得られた注水時の出力音圧レベルを、注水時ランダム騒音発生量とした。さらに、注水停止後 1分、1分 30秒、2分の時点の出力音圧レベルを加算平均し、等価軽雨時ランダム騒音発生量とした。

2) コロナハム音レベル

マイクロホンで測定できるコロナハム音と同一周波数成分の騒音レベルは、電源電圧とある位相関係を持った電線からのコロナハム音と位相の不規則な暗騒音が合成された値となる。このような場合には、暗騒音を合理的に補正できないため、コロナハム音発生量を算出する際には、次のようにして測定値 P_m から出力音圧レベル P_G を求めた。

まず、式 (2.3.1) 右辺第 2 項を測定値 P_m に加算し、無限長電線、電線中心から 1m 点の出力音圧レベルとする。次に、A 特性への補正值 -19.1 を加え、さらに、自由空間における値 P_G に変換するため -6dB を加算し、式 (2.4) を得る。この式を用いるにあたっては、暗騒音レベルよりも 10dB 以上高い測定値を採用した。

$$P_G = P_m - 15.2 \text{ [dB(A) ref. } 20\mu\text{Pa]} \quad (2.4)$$

このようにして得られた注水時の出力音

圧レベルを注水時コロナハム音発生量とした。さらに、注水停止後 1分、1分 30秒、2分の時点の出力音圧レベルを加算平均し、等価軽雨時コロナハム音発生量とした。

3) コロナ電流

コロナケージの中央部の内網 (4.8m) により抽出したコロナ電流が 37.5Ω の抵抗に誘起させる端子電圧 v_m [V] を、式 (2.5) により、単位長さあたりのコロナ電流 i_G [μ A/m] に変換した。

$$i_G = \frac{v_m 10^6}{37.5 \times 4.8} \text{ [\mu A/m]} \quad (2.5.1)$$

あるいは、デシベル単位では

$$I_G = V_m + 74.9 \text{ [dB ref. } \mu\text{A/m]} \quad (2.5.2)$$

である。ここで、

$$V_m = 20 \log v_m \text{ [dB ref. V]} \quad (2.5.3)$$

$$I_G = 20 \log i_G \text{ [dB ref. } \mu\text{A/m]} \quad (2.5.4)$$

である。

自然降雨時のデータについても、上記の式によりコロナハム音発生量とし、別途測定した降雨強度と合わせて一組のデータとした。

2.3 EHV コロナケージ

(1) 構造

第 2.11 図に実験に使用した EHV コロナケージの概略構造を示す。外電極の断面は、直径 4.2m の円形である。本来は全長 55m であったが、後述の単相傾斜試験線を設置するために、その端部 18m だけを残したものである。

(2) 課電設備

UHV コロナケージの課電設備と同様である。

(3) 測定方法

コロナハム音を測定した。測定システムを第 2.12 図に、また、測定装置の主要な仕様を第 2.8 表に示す。

自然降雨時の降雨強度は、UHV コロナケージの床面下に設置した広開口径転倒榊型雨量計により、先の式 (2.1) により算出した。

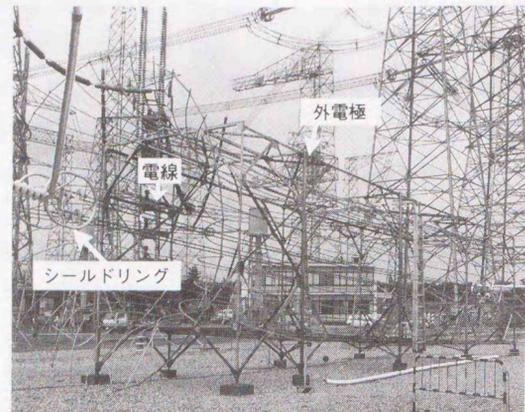
コロナハム音測定用のマイクrohンは、電線から等距離の位置に 2 本設置している。これらは、乾燥時に電線からコロナ放電が発生していない場合 (電線からはコロナハム音が発生していない) に、両マイクrohンで受音する 100Hz 音の位相差が 180 度になるように設置されている (EHV コロナケージの近くに試験変圧器が設置されているため、試験変圧器からの 100Hz 音がマイクrohンに受音される。乾燥時に電線からコロナ放電が発生していない場合には、変圧器音が主な 100Hz 音である、第 2.12 図参照)。

マイクrohンと試験電線間は直距離 4.4m で、第 2.12 図のように電線と平行方向の中央に設置した。

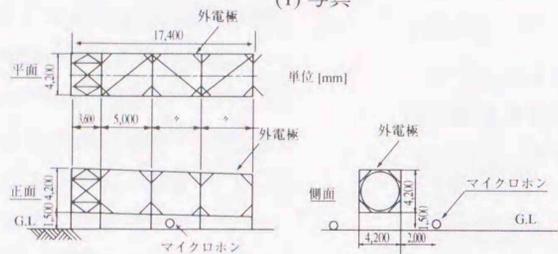
また、マイクrohンは地表から約 20cm の高さに設置した。このように設置することによって、電線からのコロナハム音は地表面で反射されるため、マイクrohンで受けるコロナハム音は 2 倍となり、S/N の良い状態で測定できる。この場合測定値は、電線からの直接波と地表からの反射波がほぼ同相で加算された半自由空間での値であり、自由空間での値に比べて 6dB 高くなる。

(4) 試験手法

降雨の安定した時を見計らって、コロナハム音の電圧特性を測定した。



(1) 写真



(2) 概略図

第2.11図 EHVコロナケージの写真と概略図

Fig. 2.11 Photo and schematic illustration of EHV corona cage.

(5) 分析法

下記の式により測定値からコロナハム音の発生量へ換算し、別途測定した降雨強度と合わせて一組のデータとした。

試験変圧器が EHV ケージの近くに設置されているため、以下のようにしてこれからの 100Hz 音の影響を除去した。マイクロホン 1 ならびに 2 (第 2.12 図) で受音する試験変圧器音 (100Hz) の位相差が 180 度になるように、これらを設置した。これにより、式 (2.6) を用いて変圧器音を除去し、電線のみから発生するコロナハム音 S_1 , S_2 を算出することができる。

$$S_1 = S_2 = 10 \log(10^{10} + 10^{10} + 2 \cdot 10^{20} \cos \phi_{12}) - 6 \text{ [dB(A)]} \quad (2.6)$$

ここで、

S_1 : マイクロホン 1 で受音した電線のみからのコロナハム音レベル

S_2 : マイクロホン 2 で受音した電線のみからのコロナハム音レベル

P_1 : マイクロホン 1 で受音した電線からのコロナハム音と変圧器音の合成レベル

P_2 : マイクロホン 2 で受音した電線からのコロナハム音と変圧器音の合成レベル

ϕ_{12} : P_1 と P_2 の位相差

である。

この S_1 , S_2 に対し、前述 (第 2.2 節(7)2) の変換を施し、自由空間におけるコロナハム音発生量 P_G を、式(2.7)の換算式により得る。つまり、 S_1 , S_2 に

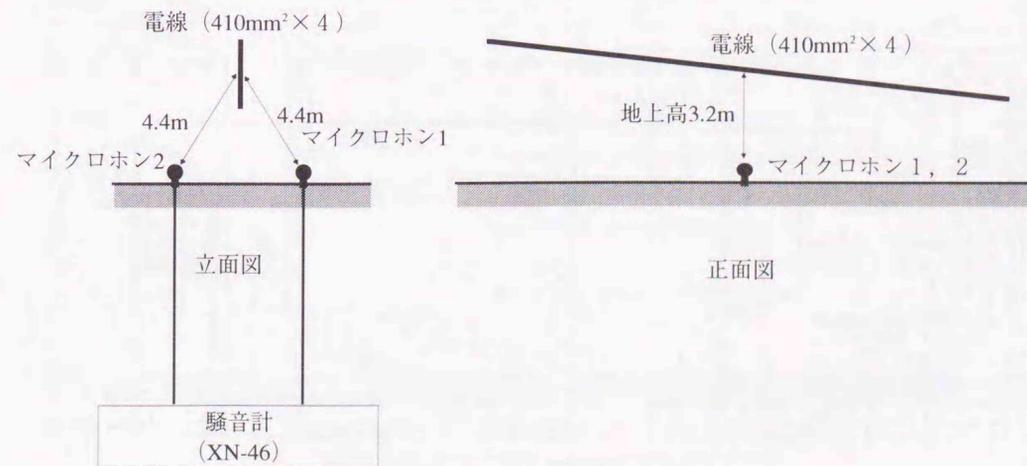
式 (2.3.1) 右辺第 2 項を加算し、A 特性への補正值 -19.1 を加え、さらに、自由空間における値に変換するため -6dB を加算し、コロナハム音発生量 P_G へ変換した。前述 (第 2.2 節(7)2) と同じ理由で暗騒音補正ができないため、コロナハム音発生量 P_G を算出する際には、暗騒音レベルよりも 10dB 以上高い測定値を採用した。

$$P_G = \left\{ \begin{array}{l} S_1 \\ \text{or} \\ S_2 \end{array} \right\} - 17.1 \text{ [dB(A)]} \quad (2.7)$$

第 2.8 表 測定器の概略仕様 (EHV コロナケージ)

Table 2.8 Specifications of Measuring Devices of EHV Corona Cage

項目	測定装置	仕様	メーカー
電圧	結合コンデンサ	分圧比: 1/5000	日新電機
	電圧制御装置	分解能: 1 kV, 自動電圧制御機能あり	高岳製作所
コロナハム音	マイクロホン	コンデンサ型, 外径: 1.27cm, 感度: 約-32dB/Pa バイアス電圧: 60V	リオン
	防風スクリーン	直径: 12cm, 風雑音減衰効果 26dB(A), 15dB(F) 材質: ウレタンフォーム	
	騒音計(XN-46)	JIS C1505 に準拠, 聴感補正回路: A, F, C, メータ動特性: Fast, Slow, チャンネル数: 8, チャンネル間の位相差ならびに各チャンネルの位相測定可能, 内臓フィルタ中心周波数: 100Hz, フィルタ幅 4Hz	

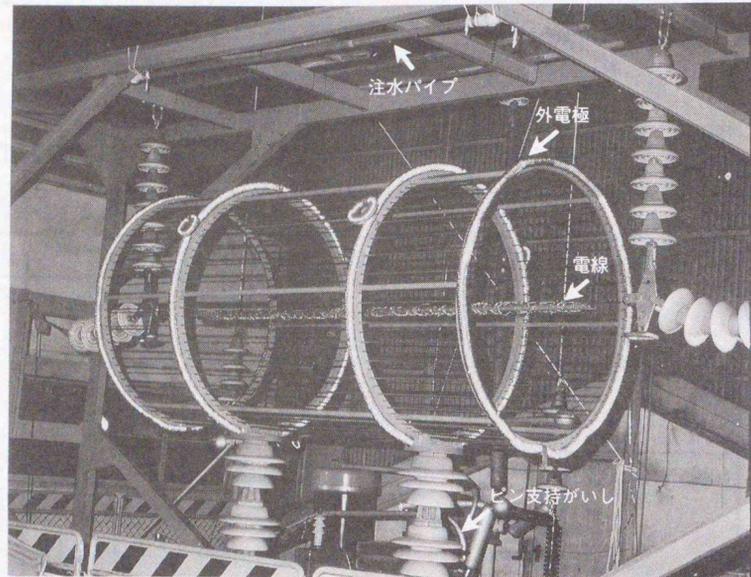


第2.12図 コロナハム音の測定系統 (EHV コロナケージ)
Fig. 2.12 System for measuring hum noise (EHV corona cage).

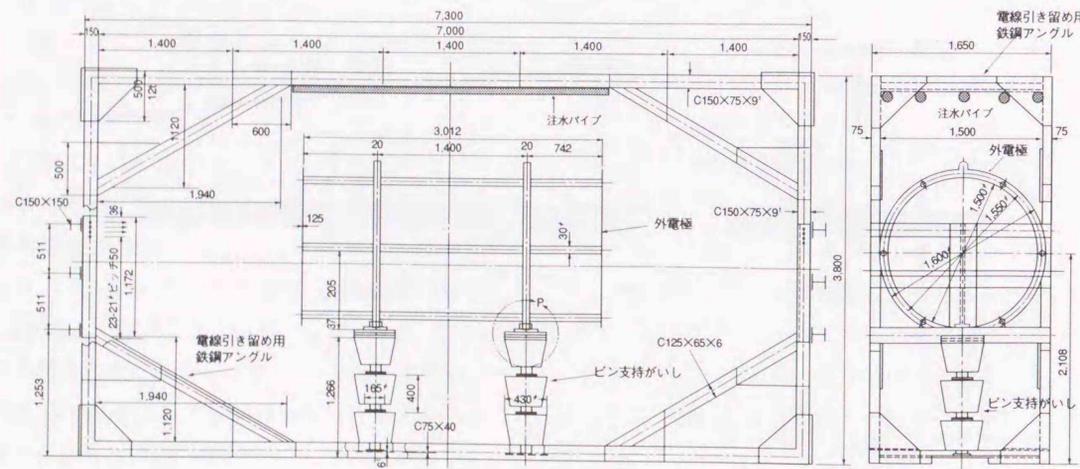
2.4 小型コロナケージ

(1) 構造

第 2.13 図に実験に用いた小型コロナケージの概略構造を示す[6,7]。全長 3m, 断面は直



(1)写真



(2)概略図(単位: mm)

第 2.13 小型コロナケージの写真と概略図

Fig. 2.13 Photo and schematic illustration of small corona cage.

径 1.55m である。外電極はピン支持がいし (AA-616A) 3個により大地より絶縁 (絶縁耐電圧: 注水時 360kV) している。

ケージは屋内に設置している。

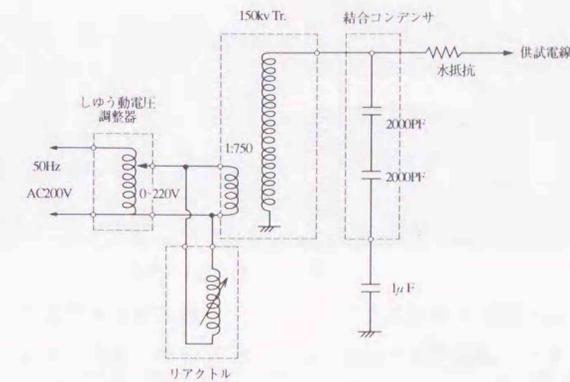
(2) 注水装置

ケージの中心から 1.5m 上方に、注水パイプを 5 本配置した。電線の全長にわたって均一に、かつ小降雨強度を安定して降らせるために、5 種類の噴霧ノズルを 30cm 間隔で各々の注水パイプに取り付けている。降雨強度は 0.6, 1.2, 5, 18, および 54mm/h である。

(3) 課電設備

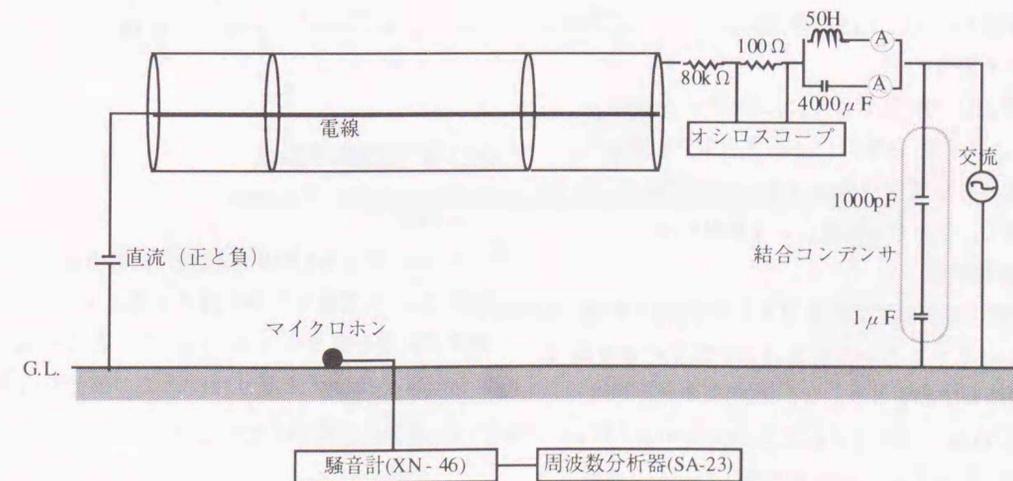
第 2.14 図に示すように、AC200V, 50Hz を、

摺動電圧調整器, 補償用のリアクトルを通した後に, 試験変圧器により最大 150kV_{L-G} まで昇圧している。不要なコロナ放電を防止するために母線は 5cm^φアルミパイプとしている。また, コロナ放電が発生しやすい屈曲部やエッジのある部分には, コロナシールドリングを設けている。課電圧は, 結合コンデンサにより測定する。



第2.14図 小型コロナケージの課電系統図

Fig. 2.14 Energizing circuit of small corona cage.



第2.15図 小型コロナケージの測定系統図

Fig. 2.15 Measuring system of small corona cage.

第 2.9 表 測定器の概略仕様 (小型コロナケージ)

Table 2.9 Specifications of Measuring Devices of Small Corona Cage

項目	測定装置	仕様	メーカー
電圧	結合コンデンサ	分圧比: 1/1000	日新電機
50Hz 音	マイクロホン	コンデンサ型, 外径: 1.27cm, 感度: 約-32dB/Pa バイアス電圧: 60V	リオン
	騒音計 (XN-46)	JIS C1505 に準拠, 聴感補正回路: A, F, C, メータ動特性: Fast, Slow, チャンネル数: 8, 内臓フィルタ中心周波 数: 100Hz, フィルタ幅 4Hz, チャンネル間の位相差ならび に各チャンネルの位相測定可能	
	周波数分析器 (SA-23)	1/1, 1/3 オクターブバンド, 中心周波数: 4 Hz~20kHz	
コロナ電流	デジタルメータ	2,20,200mA レンジ	リーダ電子

(4) 測定方法

実験では, 50Hz 音, コロナ電流を測定した。測定システムを第 2.15 図に, また, 測定装置の主要な仕様を第 2.9 表に示す。

・ 50Hz 音

50Hz 音測定用のマイクロホンは, 電線直下の床面 (地上高 5cm, 電線との直距離 2.06m) に設置した (第 2.15 図参照)。

・ コロナ電流

第 2.15 図に示すように, コンデンサ(4000 μ F) とコイル (50H) によるフィルタを構成し, 直流コロナ電流成分と 50Hz 交流電流成分を分離し, 各々を電流計により測定した。

(4) 試験手法

5 種類の降雨強度で注水できるので, 各々の場合においてコロナハム音とコロナ電流の電圧特性を短時間で測定した。

(5) 分析法

下記のようにして 50Hz 音の音圧レベルと電線から発生するコロナ電流を求め, 降雨強度と合わせて一組のデータとした。

1) 50Hz 音の音圧レベル

測定値をそのまま用いた。

2) 電線から発生するコロナ電流

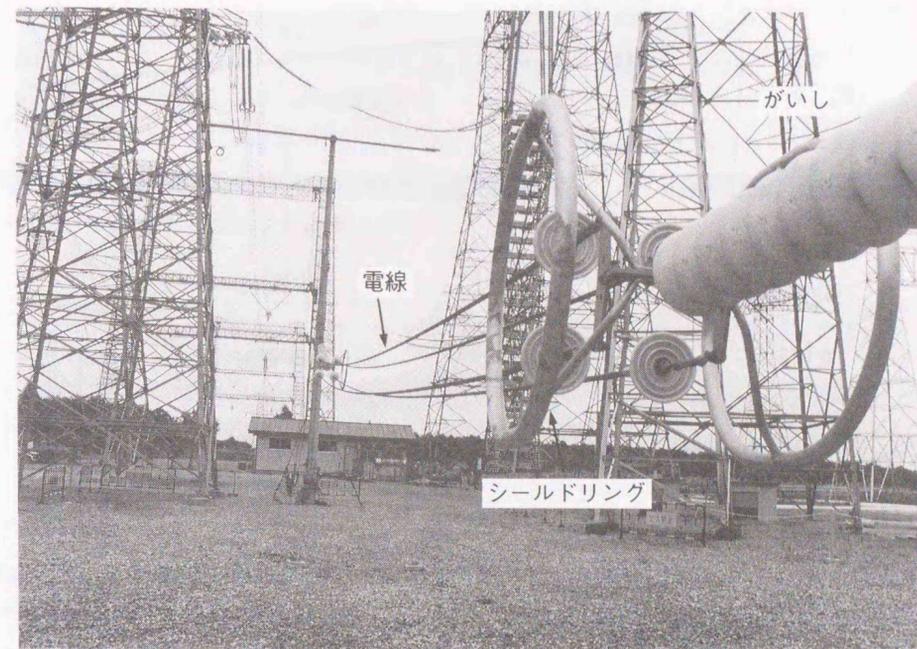
第 2.15 図の測定系において, 直流コロナ電流測定値 $i_{DC,m}$ を, 式 (2.8) により単位長さあたりのコロナ電流 i_{DC} [A/m] に変換した。

$$i_{DC} = \frac{i_{DC,m}}{3} \quad [A/m] \quad (2.8)$$

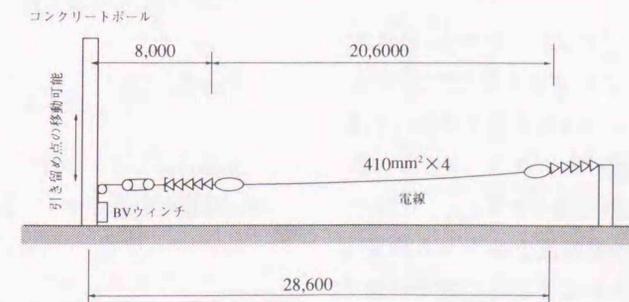
2.5 単相傾斜試験線

(1) 構造

第 2.16 図に単相傾斜試験線の概略構造を示す。全長 23m の電線の片端の高さを変えることで, 電線の傾斜を変えられる。両側の引き留め部にはシールドリングを取り付け, この部分からのコロナ放電を抑制している。



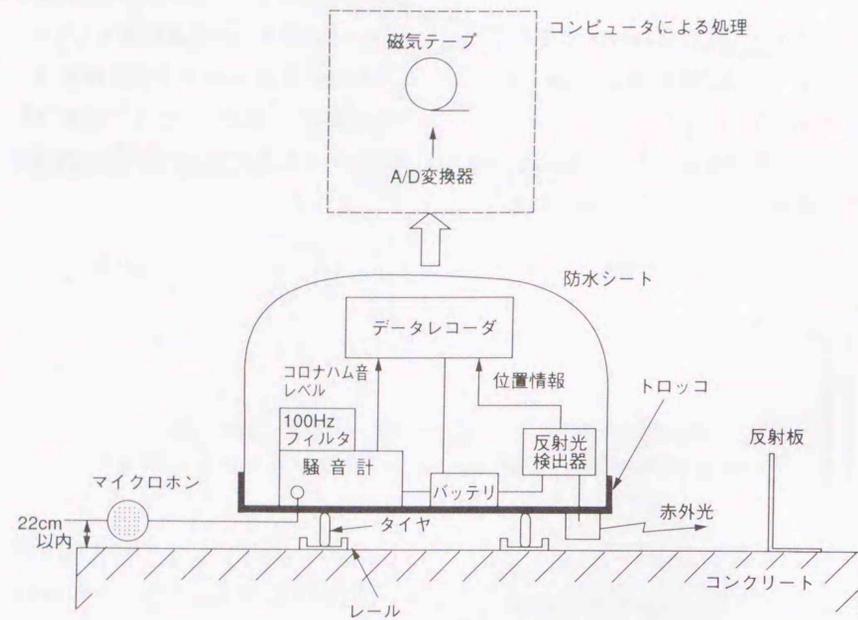
(1) 写真



(2) 概略図 (単位: mm)

第 2.16 図 単相傾斜試験線の写真と概略図

Fig. 2.16 Photo and schematic illustration of single-phase inclining test line.



第2.18図 (2) 測定系統とデータの処理法

Fig.2.18 (2) Block diagram of measuring system and analysis method for hum noise level.

2.7 谷間の模型

(1) V字谷, U字谷の模型

谷間を模擬したV字谷ならびにU字谷の模型(以下, V字谷模型, U字谷模型と称する)を第2.19図に示す。これら無響室(幅5m, 奥行き6m, 高さ4m)内に設置し, 音場を測定した。模型の縮尺率は1/50とし, 音源の周波数は100Hzの50倍の5kHzとした[9, 10]。

斜面角は0から50度まで10度毎に変更できる。斜面角が0度の場合は平地に相当し, 音場に対する斜面角の影響を評価する場合の基準となる。

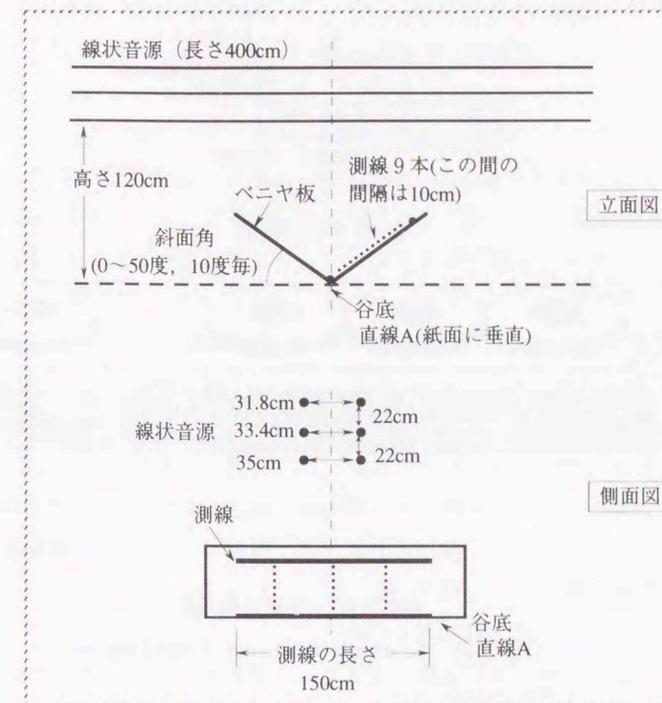
模型は厚さ2cmのベニヤ板で製作した。ベニヤ板の反射率は, 周波数5kHzではほぼ1と考えてよい。

(2) 線状音源

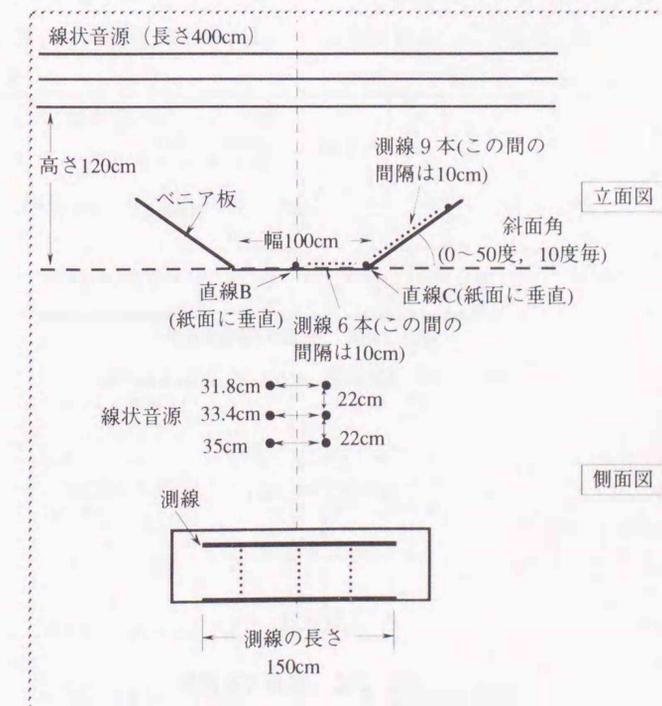
送電線の各相の電線から発生するコロナハム

音を模擬するために, 線状音源を作製した。第2.20図(1)に示すように, 線状音源は, 直径約2.2cmの点状音源をT型アルミングルに沿って直線状にならべたものである。また点状音源は, 第2.20図(2)に示すように, 直径約2.2cm, 厚さ0.05cmの真鍮製の金属円盤に圧電セラミックスを接着し, これをノード支持した簡単な構造である。個々の点状音源には製作上の誤差や圧電セラミックスの特性差があるので, 調整用の回路を設け, 全点状音源の入力電圧に対する出力音圧レベルが等しくなるようにした(第2.21図参照)。線状音源の音響特性については付録2.1に示した。

(1) V字谷

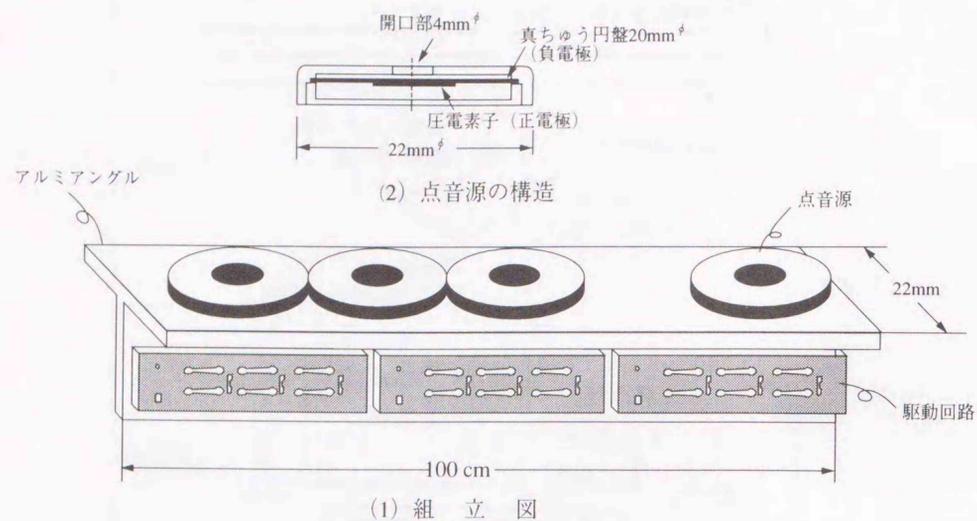


(2) U字谷



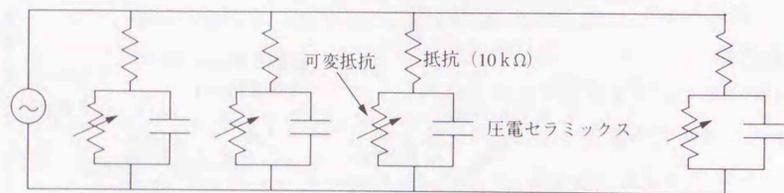
第2.19図 V字谷, U字谷の模型と実験条件

Fig. 2.19 V-shaped valley model, U-shaped valley model and experimental conditions



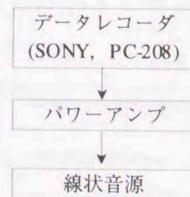
第2.20図 音源の概略図

Fig. 2.20 Schematic illustration of sound sources.



第2.21図 音源の駆動回路

Fig. 2.21 Driving circuit of sound sources.



第2.22図 音源の系統図

Fig. 2.22 Block diagram of sound source.

わが国で一般的な 3 相、垂直、逆相 2 回線送電線を模擬するために、実験では長さ 100cm の線状音源を 4 個連結して 400cm とし、これを 6 組使用した。また、各相の電線から発生するコロナハム音は送電電圧の位相差に相当する 120 度の位相差を持つため、実験においても、この位相差を持たせた 5kHz の信号を 6 組の線状音源に入力した。入力信号は、信号発生器の出力を 120 度位相差を持つように位相遅延回路を通してデータレコーダに録音したものを、再生して使用した (第 2.22 図参照)。

線状音源と谷間の模型との相対的な位置関係は、先の第 2.19 図に示したとおりである。送電線の下相に相当する線音源の高さは、谷底から 120cm である。

(3) 音圧レベルの測定

ベニヤ板の表面上、高さ 0.3cm における音圧レベルを測定した。測定系統図を第 2.23 図に示す。マイクロホン、位置センサ以外は無響室外に設置し、音場を乱さないようにした。

測定には、直径 0.3cm の補聴器用のマイクロホンをを用いた。これを、モータとレールより成る簡易的な装置で、直線的に、かつ連続的に

第 2.19 図に示した測線 (マイクロホンを移動し音圧レベルを測定するライン) に沿って移動できるようにした。マイクロホンの位置は、モータの回転に連動させたマイクロスイッチによって得た。このマイクロスイッチは、モータが 1 回転するとパルスを 1 個発生する。これら音圧レベルと位置情報を、レベルレコーダとデータレコーダに記録した。データ分析は、データレコーダからの音圧レベルと位置情報を A/D 変換器を通してコンピュータに入力し、行った。

なお、音圧レベルとマイクロホン位置はレベルレコーダ上にアナログ記録し、測定時のモニタとして利用した。これにより、予期しない外乱による測定エラーを避けるようにした。

測定に際しての音源の単位長パワーレベルは、概ね 104 [dB ref. 20 μ Pa] である。ただし本実験では、各測定点における音圧レベルの相対差に意味があるので、音圧レベルは測定に用いた周波数分析器の校正信号 (0.5V) を 50 [dB ref. 20 μ Pa] として相対値で表記した。



第2.23図 V字谷、U字谷の音場測定系統図

Fig. 2.23 System for measuring sound distribution in V-shaped valley model and U-shaped valley model.

文献

- [1] 笹野, 富田, 田辺, 出口, 原田, 第1章[27], pp.85-94
- [2] Tanabe K., 第1章 {127}
- [3] Tanabe K., Takebe T., Isozaki M., 第1章 {128}
- [4] 福島, 沢田, 西山, 原田, 笹野, 須永, 甘楽, 田辺, 鈴木, 第1章[8]
- [5] 田辺, 第1章 [32]
- [6] 田辺, 福島, 鈴木, 甘楽, 原田, 第1章 [12]
- [7] 田辺, 第1章 [18]
- [8] Tanabe K., 第1章 {126}
- [9] 山下, 「騒音予測のための模型実験技法の研究」, 小林理学研究所報告, Vol. 19, No. 1, 1979年
- [10] 騒音・振動 (下巻), 日本音響学会編, pp. 64, 1982年
- [11] 音響工学源論 (下巻), 伊藤, pp. 209, 1958年

付録2. 1 線状音源の音響特性

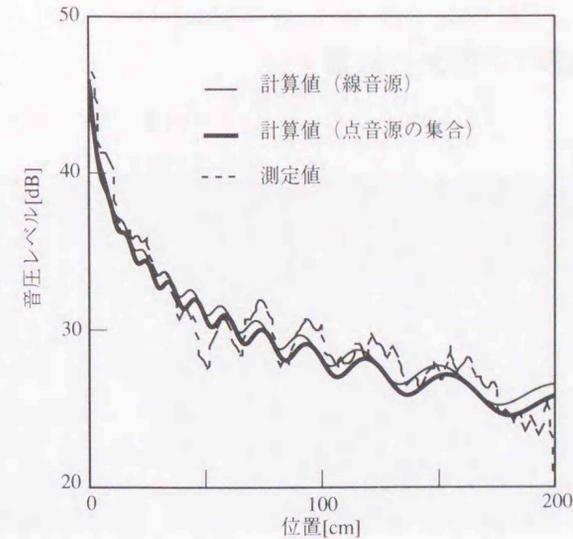
長さ 100cm の線音源 2 本を直線状に連結し, 200cm の線状音源として, 音響特性 (音源中央における音圧レベルの距離減衰特性) を無響室内において測定した。結果を付 2.1 図に示す。同図中には, Kirchhoff の法則[11]にしたがって, 点音源が 2.2cm 間隔で配置されているとした場合, ならびに音源の長さが 200cm の一様な有限長線

音源の場合の音圧レベルを計算した結果を並記している。

線状音源から発生する音圧レベルの測定結果には ± 1.5 dB 程度のゆらぎがあるものの, 測定した距離 200cm までは, 無限長線音源の距離減衰特性 ($10 \log r$, ここで r は無限長電線から測定点までの直距離) にしたがって減衰していることがわかる。また測定結果は, 点音源が約 2.2cm 間隔で配置されているとした場合の音圧レベルの計算結果と, 山谷の位置等, 傾向が良く一致している。

点音源が 2.2cm 間隔で配置されているとした場合の音圧レベルの計算結果と有限長の一様線音源とした場合の計算結果とは, 山谷の位置が少し異なるだけである。したがって, 位置が少なくとも 2λ (約 14cm) 以上離れると, 音圧レベルのゆらぎは音源が有限長であることに起因していることがわかる (ここで, 位置が少なくとも 2λ 以上離れるとした理由は, 音響学的考察から自明である。すなわち, 点音源が並んでいる直線あるいは線音源に非常に近い部分では, 点音源を 2.2cm 間隔で配置した音源では点音源の特性があらわれやすく, 線音源では線音源の特性があらわれるため, その距離減衰等の音響特性は, 明らかに異なるはずである)。

このように位置が 2λ (約 14cm) 以上離れると, 点音源を並べた有限長音源でも有限長の線音源の場合の計算値とほぼ同じ傾向を示すことから, 製作した線状音源は, 模型実験用のコロナハム音の模擬音源として使用できるものと考えられる。



付2.1図 線状音源の音響特性
Fig. A-2.1 Sound characteristics of line sources.

3. 交流架空送電線のコロナハム音

3.1 まえがき

降雨時、降雪時、霧の場合、高湿度時、さらには電線に着氷雪した場合には、交流送電線の電線からコロナ放電が発生し、これに起因するコロナ騒音（ランダム騒音とコロナハム音）が発生することがある[1,2]。

本章では、UHV ならびに小型コロナケージと赤城試験線による観測ならびに測定について述べる。すなわち、電線からのコロナ放電の発生状況、コロナ騒音のスペクトラム分析結果、ならびにコロナ電流の発生状況などについて述べる。

3.2 コロナ放電

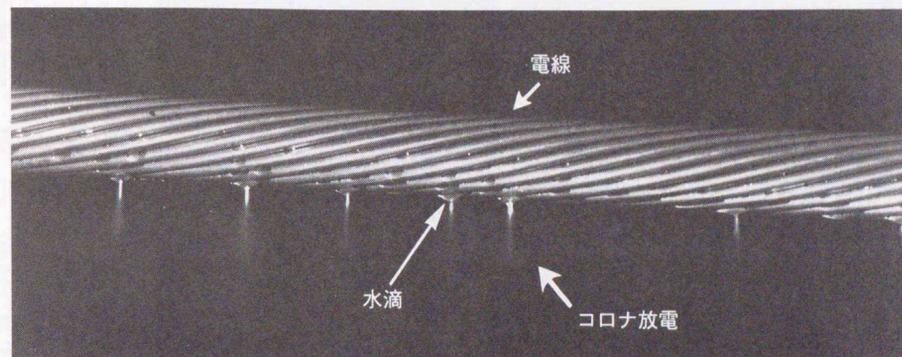
第 3.1 図は、電線上から注水 (0.6mm/h) をした場合のコロナ放電の写真である。電線に付着した水滴からストリーマコロナが発生している。電線が十分にエージングしている場合には、コロナ放電は電線のカテナリー曲線に沿って流れる水滴と共に移動すること、またすぐ隣の水滴から発生する放電と相互に干渉し、間欠的に発生することなどが、夜間の観測からわかった。

風騒音対策のために、電線にスパイラル線を取り付けることがある[2,3]。第 3.2 図は、この場合の注水時のコロナ放電である。スパイラル線の下端から、定常的に強いストリーマコロナが発生していることがわかる。観測によれば、スパイラル線の下端に規則的に付着した水滴からコロナ放電が発生していた。

第 3.3 図は、多導体を構成する全素導体からの

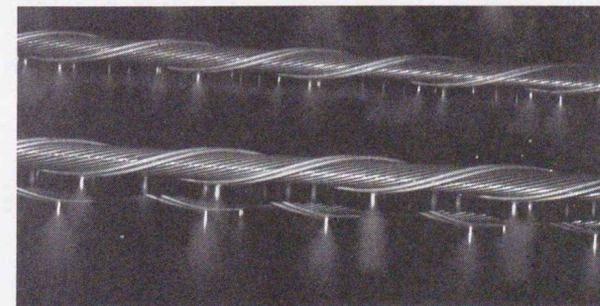
コロナ放電の様子（注水時と注水停止後 1 分から 2 分の時点）である。注水時には、天中の素導体、地中の素導体、ならびに地線の素導体からのコロナ放電が見られるが、注水停止後には、天中の素導体からのコロナ放電は止まり、地中の素導体ならびに地線の素導体からのコロナ放電のみが見られるようになる。また、多導体電線を構成する素導体のうち、上側に配置された素導体よりも下側に配置したもののほどコロナ放電が活発である。

通常、多導体を構成する素導体は円周上に配置され、この円周よりも外側の素導体表面では電界強度が強く、内側では電界強度が低い。また、水滴は素導体の下面に付着するため、上側の素導体においては水滴は円周の内側の素導体表面に付着し、下側の素導体においては水滴は円周の外側の素導体表面に付着することとなる。したがって、上側の素導体においては電界の低い部分に水滴が付着し、対照的に、下側の素導体においては電界の高い部分に水滴が付着する。さらに、電線に付着した水滴の曲率半径は電線の曲率半径よりも小さいため、その表面の電界強度が局所的に増大し、コロナ放電が発生しやすくなる。これらから、上側に配置された素導体に比べ、下側に配置した素導体ほどコロナ放電が活発になると考えられる。



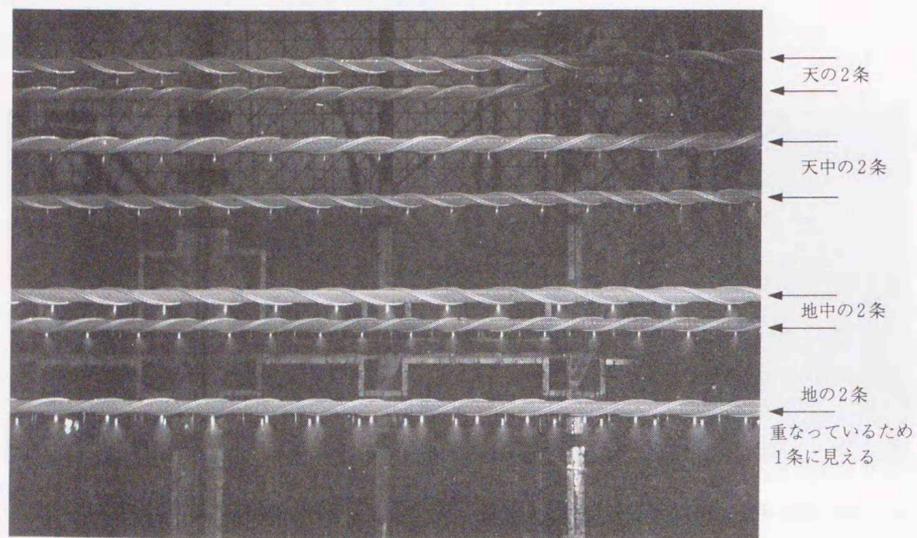
第3.1図 注水をした場合のコロナ放電写真 (注水量=0.6 mm/h, $g_{\max}=14.5$ kV/cm)

Fig. 3.1 Corona discharge under artificial rain (rainfall rate=0.6 mm/h, $g_{\max}=14.5$ kV/cm).

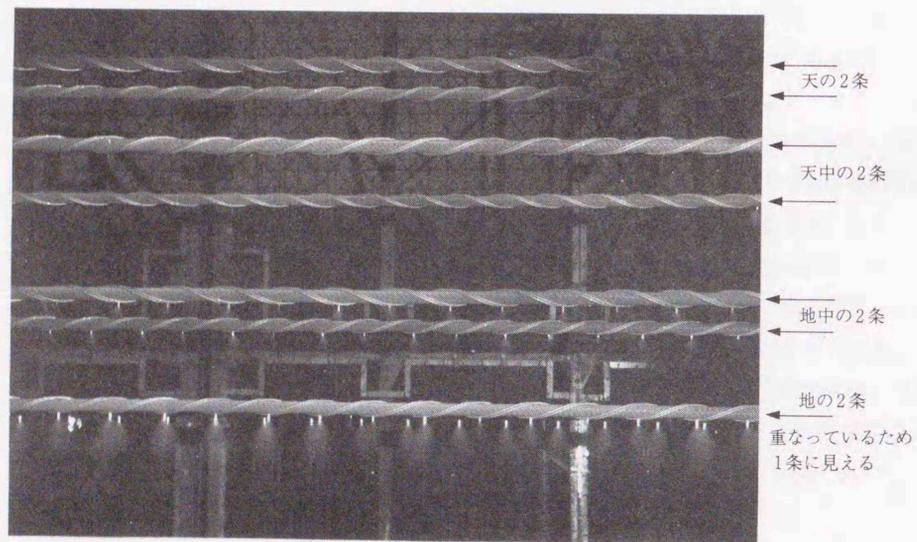


第3.2図 スパイラル線を取り付けた電線からのコロナ放電 (注水量=30mm/h, $g_{\max}=16$ kV/cm)

Fig. 3.2 Corona discharge from conductor bundle with spiral wires (rainfall rate=30 mm/h, $g_{\max}=16$ kV/cm).



(1) 注水時



(2) 注水停止後1~2分

第 3.3 図 注水時と注水停止後のコロナ放電の様子 (610mm²×8 スパイラル線有, $g_{max}=16$ kV/cm)

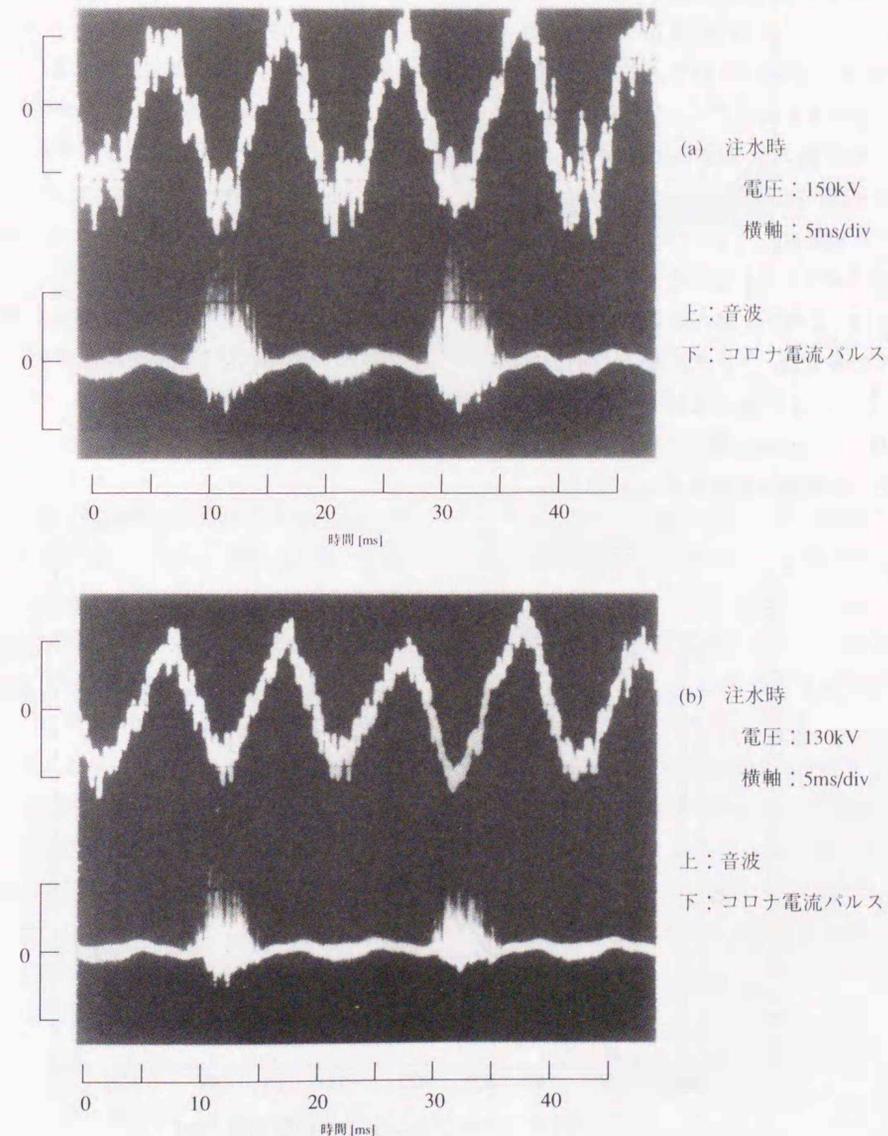
Fig. 3.3 Corona discharge from conductor bundle under conditions of heavy rain and wet conductor (610 mm²×8 with spiral wires, $g_{max}=16$ kV/cm).

3.3 コロナ放電音とコロナ放電電流

計測したコロナ放電音 (コロナ騒音) 波形とコロナ電流波形を第 3.4 図に示す。

この場合のコロナ騒音の波形からは、大きな 100Hz の純音成分にランダム騒音が重畳して

いることがわかる。また電流の波形には、20ms 毎の課電圧の正負各々に発生するコロナ放電電流が見える。

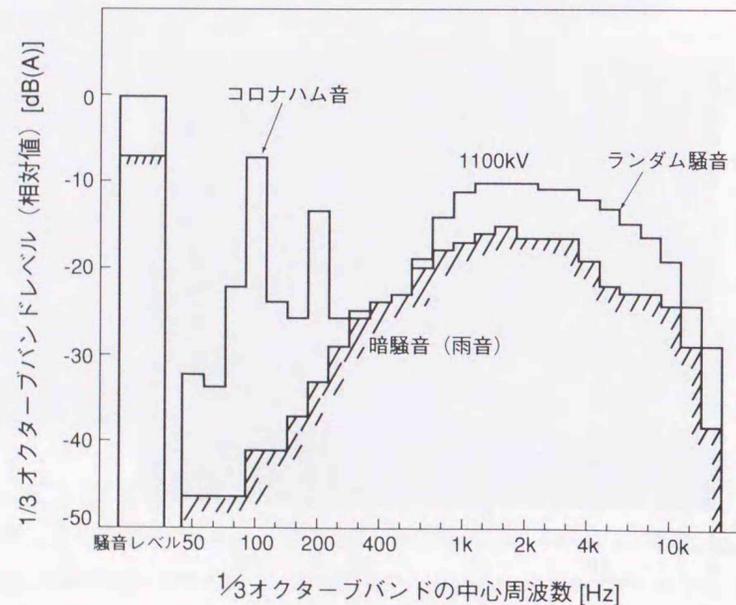


第3.4図 コロナ騒音波形とコロナ電流波形 (ACSR240 mm²×1, マイクロホンと電線の直距離: 2 m)
Fig. 3.4 Waveforms of audible noise and corona current.

第 3.5 図は、コロナ騒音の周波数スペクトラムである。図には、雨音の周波数スペクトラムも示している。コロナ騒音には、500Hz 以上の周波数成分よりなる不規則性の騒音成分（ランダム騒音）と純音成分が含まれている。

第 3.6 図は、1kHz 以下の周波数成分を詳細に見たものである。電源周波数と等しい周波数成分（50Hz）と、その偶数倍の周波数成分（100, 200Hz）がある。通常、電源の倍周波数成分が他の成分よりも大きく、これをコロナハム音と称し、わが国の西地域では 120Hz、東地域では 100Hz の周波数成分をもつ。

ランダム騒音は、「ジリジリ」、「ザーザー」、あるいは「バリバリ」と聞こえる。第 3.5 図に示したように、このランダム騒音は雨音と周波数分布が似ているため、ランダム騒音は雨音にマスクされやすい。可聴域における周波数成分は凡そ 500Hz から 20kHz 程度であるが、その周波数成分としては超音波領域までのびている。

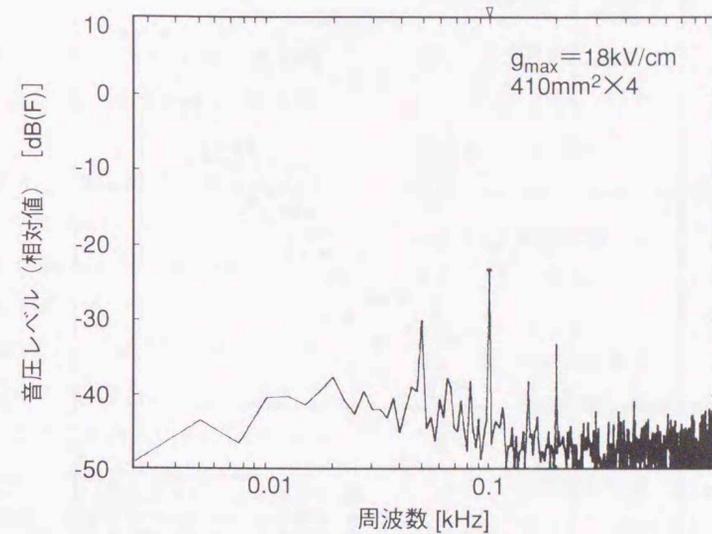


第 3.5 図 コロナ騒音の周波数スペクトラム (810mm²×8、スパイラル線有り)

Fig. 3.5 Frequency spectra of audible noise (810 mm²×8 with spiral wires).

コロナハム音は、「ブーン」と聞こえる。コロナハム音は、次の理由から、人に感知されやすい傾向にあり、交流架空送電線の環境問題の一つとして注目されている。

- 1) 自然界にあまりない音質であり、マスク効果が期待できない
- 2) 周波数が低く、建物等の遮音効果があまり期待できない
- 3) 後述する空間定在波によって、位置によりコロナハム音レベルが変わる
- 4) コロナハム音の周波数である 100 あるいは 120Hz の音に対しては、耳は指向性が悪く、人は漠然とその音のなかに埋もれてしまう感覚を抱いたり、上空から来る音のために圧迫感を覚えやすく、不快感あるいは不安感を抱きやすい



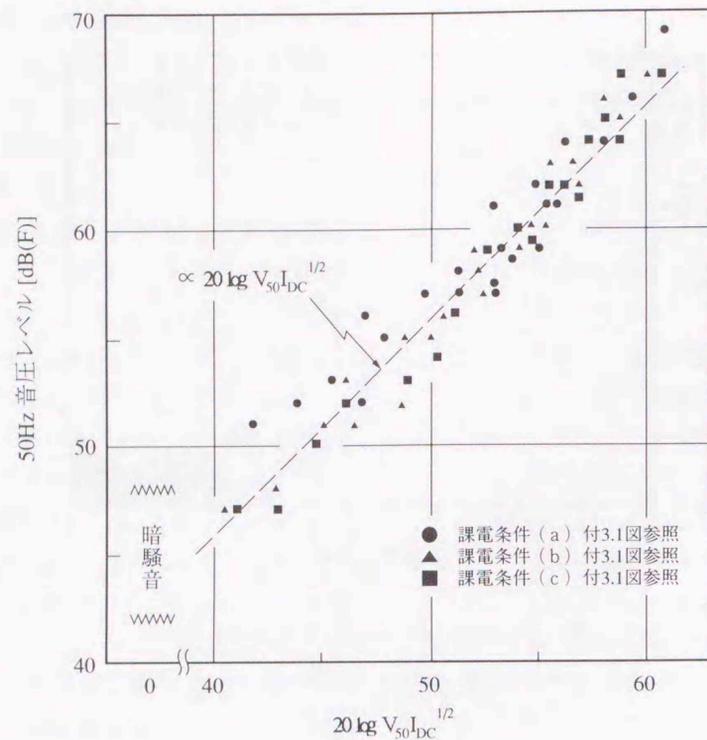
第 3.6 図 コロナ騒音の 1kHz 以下のスペクトラム

Fig. 3.6 Frequency spectrum of audible noise below 1 kHz.

純音成分、特に電源周波数の倍周波数の成分の発生機構については、「放電音が概周期的に発生しているため」[4]とする説と、「電線表面から発生した正負のイオン群が交流電界によって励振されるため」[例えば 5,6]とする説の二説がある。文献[7]では、放電音が概周期的に発生する場合の騒音スペクトルを解析し、倍周波数成分の発生機構として「放電音が概周期的に発生しているため」とする説は否定的であるとしている。

ここでは、まず、電源周波数（50Hz）と同一の周波数成分について考えてみる。電線に直流電圧を印加し、直流コロナ放電を発生させた状態で微小な 50Hz の交流電圧を印加した場合、50Hz 音圧

レベルとコロナ電流は第 3.7 図の関係にある。電線に交流電圧が印加されている場合でも、電線周囲の正と負のイオン量には差があることを考慮すれば、見かけ上は電線周囲に単一の空間電荷が存在することとなり、先の直流電圧を印加した場合と類似した状況である。このように考えると、電線に 50Hz の交流電圧が印加されている場合でも、50Hz 音は電線周囲のイオンが 50Hz の交流電界によって励振されることから発生していると考えられる（付録 3.1 参照）。すなわち、正負のイオンの発生量に差がある場合に 50Hz 音が発生すると考えられる。



第3.7図 50Hz音圧レベルの $V_{50}I_{DC}^{1/2}$ に対する関係
(V_{50} : 交流課電圧 [V], I_{DC} : 直流コロナ電流 [A/m])

Fig. 3.7 Sound pressure level of 50 Hz pure tone as a function of $V_{50}I_{DC}^{1/2}$
(V_{50} : A. C. Voltage [V], I_{DC} : D. C. Current [A/m]).

次に、電源周波数の倍周波数の成分については、次ぎのような定性的な検討を行った。付録 3.3 に詳述するように、空間電荷の挙動[8]から、中性空気分子は電圧の1周期の間に外向きと内向きの力をそれぞれ2回ずつ受ける。したがって、電圧の周波数が50Hzであれば100Hz音、電圧の周波数が60Hzであれば120Hz音が発生すると考えられる。

3.4 まとめ

UHVならびに小型コロナケージと赤城試験線による観測ならびに測定から、電線からのコロナ放電の発生状況、コロナ騒音のスペクトラム分析結果、ならびにコロナ電流の発生状況を検討した。主要な結果を以下に示す。

- 1) コロナ放電は、電線に付着した水滴から発生する。電線にスパイラル線を取り付けた場合には、スパイラルの下端に水滴が規則的に付着し、ここから定期的に強いコロナ放電が発生する。
- 2) 多導体電線を構成する素導体のうち、上側に配置した素導体よりも下側に配置した素導体からのコロナ放電が活発である。
- 3) 電線から発生するコロナ放電に起因するコロナ騒音には、ランダム騒音と純音成分が含まれている。純音成分には、電源周波数と等しい周波数成分と、その偶数倍の周波数成分がある。純音成分のうち、電源周波数の倍周波数の周波数成分をコロナハム音という。

文献

- [1] 笹野, 富田, 田辺, 出口, 原田, 第1章 [27]
- [2] Tanabe K., Takebe T., Isozaki M., 第1章 {128}
- [3] 田辺, 福島, 鈴木, 甘楽, 原田, 第1章 [12]
- [4] Trinh N. G., 第1章 {47}
- [5] General Electric Company, 第1章 {52}
- [6] 田辺, 第1章 [18]
- [7] 福島, 「送電線のコロナ騒音」, 電力中央研究所, 総合報告 T01, pp.55, 昭和61年9月
- [8] Clade J. J., Gary C. H., Lefevre C. A., "Calculation of corona losses beyond the critical gradient in alternating voltage," IEEE Trans., Vol. PAS-88, No. 5, May 1969
- [9] Morse P. M., Ingard K. U., "Theoretical Acoustics," New York, McGraw-Hill, 1968
- [10] 今村, 「物理とグリーン関数」, 岩波書店, 第2版, pp.22-25, 160, 167, 1979-6

付録 3. 1 50Hz 音の発生について

電源周波数が50Hzで同心円筒電極系の場合を考える。

電線表面からコロナ放電が発生すると、空気中に生成された電子は、課電圧の正の半サイクルではすぐに電線に引き込まれ、負の半サイクルでは中性分子に付着し、負のイオンとなる。もちろん、正の半サイクルには正イオンが空間に生成される。このため、電線から外円筒電極までの空間には、中性分子と正負イオンが存在することとなる。

この正負イオンは、空間電界(課電圧による静電界と自分自身による電界の和)によってエネルギーを供給されるので、音波を発生する可能性がある。その波動方程式は

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\frac{\gamma-1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}) \quad (\text{A.3.1.1})$$

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \nabla \cdot (\rho \mathbf{E}) \quad (\text{A.3.1.2})$$

で表わされる[9]。

ここで、

- p : 音圧 [Pa]
- c : 音速 [m/s]
- t : 時間 [s]
- γ : 空気の比熱比
- \mathbf{J} : 電流密度 [A/m^2]
- \mathbf{E} : 空間電界強度 [V/m]
- ρ : 空間電荷密度 [C/m^3]

である。式 (A.3.1.1) 右辺の $\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}$ は空間に供給される熱エネルギー [$\text{J}/\text{s}/\text{m}^3$]、式 (A.3.1.2) 右辺の $\rho \mathbf{E}$ は空気中の微小体積に加わる力 [N/m^3] を表わしている。

空間電界は、主として電線から外円筒電極に向かう径方向のみであり、イオンはこの空間電界の力を受けて運動する。したがって、熱エネルギーがイオンに供給されるモデルである式 (A.3.1.1) を、ここで考えている場合に適用するよりも、微小体積に加わる径方向の力によって音波が発生すると考え、式 (A.3.1.2) を適用する方が自然である。したがって、以下、式 (A.3.1.2) により議論を進める。

50Hz の音が発生するためには微小体積に働く力も50Hzである必要があり、電源周波数が50Hzの場合には、主要な力として、 $\rho_{DC} \mathbf{E}_{50}$ 、 $\rho_{50} \mathbf{E}_{DC}$ が考えられる。

したがって、式 (A.3.1.2) は

$$\nabla^2 p_{50} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p_{50}}{\partial t^2} = \nabla \cdot (\rho_{DC} \mathbf{E}_{50}) + \nabla \cdot (\rho_{50} \mathbf{E}_{DC}) \quad (\text{A.3.2})$$

となる。ここで、

- \mathbf{E}_{DC} : 直流空間電界強度 [V/m]
- \mathbf{E}_{50} : 50Hz 空間電界強度 [V/m]

ρ_{DC} : 直流空間電荷密度 [C/m³]

ρ_{50} : 50Hz 空間電荷密度 [C/m³]

である。

いま、付 3.1 図に示す課電条件において、電線から正極性あるいは負極性の放電を起し、電極間に単極性のイオンのみを存在させた状態で、微小な交流電圧を重畳させる場合を考えると、式 (A.3.2) において、右辺の第 1 項が優勢となる。近似的に、直流イオン密度は

$$\rho_{DC} = \frac{\sqrt{I_{DC}}}{\sqrt{\frac{2\pi\eta}{\epsilon_0} \sqrt{(r^2 - a^2) + \frac{2\pi\eta\epsilon_0 a^2 E_{DC0}^2}{I_{DC}}}}} \quad (\text{A.3.3})$$

と表わされる (付録 3.2 参照)。ここで、

I_{DC} : 直流コロナ電流 [A/m]

η : イオンの移動度 [m²/s/V]

ϵ_0 : 真空の誘電率 [F/m]

r : 円筒座標における径方向の座標 [m]

a : 電線半径 [m]

E_{DC0} : 電線表面の直流電界強度 [V/m]

である。

50Hz 空間電界強度としては近似的に交流課電圧 V_{50} によるものを用いると、式 (A.3.2) の右辺第 1 項の力 \mathbf{F}_{50} は

$$\mathbf{F}_{50} = \rho_{DC} \mathbf{E}_{50} = \frac{V_{50} \sqrt{I_{DC}}}{\sqrt{\frac{2\pi\eta}{\epsilon_0} \ln(b/a)}} \frac{1}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (\text{A.3.4})$$

と表わすことができる。ここで、

b : 外円筒電極径 [m]

$\hat{\mathbf{r}}$: 径方向単位ベクトル

であり、簡単化のため

$$\sqrt{(r^2 - a^2) + \frac{2\pi\eta\epsilon_0 a^2 E_{DC0}^2}{I_{DC}}} \approx r \quad (\text{A.3.5})$$

とした (根号の中は、凡そ $r^2 - a^2 + 333 \cdot 10^{11}$ であり、 $a^2 \ll r^2$ の場合にこの近似は成立する)。式 (A.3.2) において、時間項を $\exp(-i\omega t)$ とし、

$$p_{50} = p_{50}(r) e^{-i\omega t} \quad (\text{A.3.6.1})$$

$$\mathbf{F}_{50} = \mathbf{F}_{50}(r) e^{-i\omega t} \quad (\text{A.3.6.2})$$

とすれば、式 (A.3.2) は、次のヘルムホルツ方程式となる。

$$\nabla^2 p_{50}(r) + k^2 p_{50}(r) = \nabla \cdot \mathbf{F}_{50}(r) \quad (\text{A.3.7})$$

ここで、 k は波数である。本式を、速度ポテンシャル ϕ を用いて書き直す。速度ポテンシャルと音圧の関係は

$$p_{50}(r) = \rho_A \frac{d\phi_{50}(r)}{dt} \quad (\text{A.3.8})$$

である。ここで、 ρ_A は空気密度 kg/m³ である。時間項 $\exp(-i\omega t)$ を考慮し、式 (A.3.7) は

$$\nabla^2 \phi_{50}(r) + k^2 \phi_{50}(r) = -\frac{1}{i\omega\rho_A} \nabla \cdot \mathbf{F}_{50}(r) \quad (\text{A.3.9.1})$$

$$\nabla^2 \phi_{50}(r) + k^2 \phi_{50}(r) = -f_{50}(r) \quad (\text{A.3.9.2})$$

と変型できる。ここで、

$$f_{50}(r) = \frac{1}{i\omega\rho_A} \nabla \cdot \mathbf{F}_{50}(r) \quad (\text{A.3.9.3})$$

とした。

式 (A.3.9.2) の解は、音源を無限長とすれば、電線表面においては粒子速度は零であるので、ノイマン型の境界条件

$$\left. \frac{d\phi}{dr} \right|_{r=a} = 0 \quad (\text{A.3.10})$$

を導入し、さらに、無限遠で外向波を表す 2 次元

ヘルムホルツ方程式に対するグリーン関数 G を用いて、

$$\phi_{50}(r) = \int_V G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') f(\mathbf{r}') dV' = \int_0^{2\pi} \int_a^b G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') f(\mathbf{r}') r' dr' d\phi' \quad (\text{A.3.11.1})$$

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{i}{4} \sum_{m=0}^{\infty} \epsilon_m \cos m(\varphi - \varphi') H_m^{(1)}(kr) \times \left\{ J_m(kr') - \frac{J_m'(ka)}{H_m^{(1)}(ka)} H_m^{(1)}(kr') \right\} \quad (\text{A.3.11.2})$$

と表すことができる [10]。ここで、

\mathbf{r} : 円筒座標における観測点 (ベクトル)

\mathbf{r}' : 円筒座標における源の点 (ベクトル)

φ : 円筒座標における観測点の偏角

φ' : 円筒座標における源の偏角

ϵ_m : ノイマン因子

J_m : m 次ベッセル関数

$H_m^{(1)}$: 第 1 種 m 次ハンケル関数

i : 虚数単位

である。式 (A.3.11) において、 φ' に関しては、 $\cos m(\varphi - \varphi')$ の $0 \sim 2\pi$ までの積分であるため $m=0$ の項のみが残り、速度ポテンシャルは

$$\phi_{50}(r) = i\pi^2 H_0^{(1)}(kr) \times \int_a^b r' \left(J_0(kr') - \frac{J_0'(ka)}{H_0^{(1)}(ka)} H_0^{(1)}(kr') \right) f_{50}(r') dr' \quad (\text{A.3.12})$$

となる。

式 (A.3.4), (A.3.8), (A.3.9), (A.3.12)

より、音圧 p_{50} は

$$p_{50}(r) = i \sqrt{\frac{2\epsilon_0}{\eta}} \frac{\pi^{3/2} V_{50} \sqrt{I_{DC}}}{\ln(b/a)} H_0^{(1)}(kr) \times \int_a^b \left(\frac{J_0(kr')}{r'^2} - \frac{J_0'(ka)}{H_0^{(1)}(ka)} \frac{H_0^{(1)}(kr')}{r'^2} \right) dr' \quad (\text{A.3.13})$$

となる。ここで、

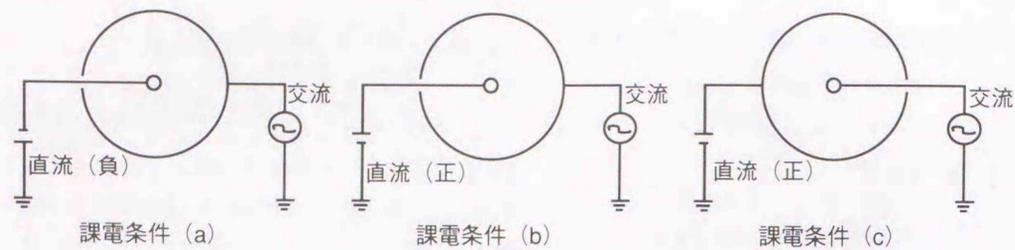
$$\frac{J_0'(ka)}{H_0^{(1)}(ka)} = \frac{J_1(ka)}{H_1^{(1)}(ka)} \quad (\text{A.3.14})$$

の関係を用いた。

式 (A.3.13) の右辺の積分項は電極の幾何学的配置によって決まる量であり、これを $I_1(a, b)$ とすると、式 (A.3.13) は

$$p_{50}(r) = i \sqrt{\frac{2\epsilon_0}{\eta}} \frac{\pi^{3/2} V_{50} \sqrt{I_{DC}}}{\ln(b/a)} H_0^{(1)}(kr) I_1(a, b) \quad (\text{A.3.15})$$

と表わすことができる。本式は、音圧が交流課電圧と直流コロナ電流の 1/2 乗の積に比例することを表わしている。本文第 3.7 図には式 (A.3.7) から得られる傾向も相対値で並記している。ここで、 I_{DC} は $100 \sim 500 \mu\text{A}$ 、 V_{50} は $0 \sim 50\text{kV}$ の範囲にある。実験結果と式 (A.3.7) から得られる傾向は一致し、空間電荷の振動が純音を発生させていることがわかる。すなわち、一般のスピーカーの振動板のかわりに、イオンが振動し音波を発生させているので、この現象は、イオンスピーカとも言えるものである。



付3.1図 小型コロナケージ実験における課電条件

Fig. A-3.1 Energizing conditions of experiment using small corona cage.

付録 3. 2 式 (A.3.3) の導出

付 3.2 図において、円筒の単位長さあたりに流れる直流コロナ電流 I_{DC} は

$$I_{DC} = 2\pi r \rho_{DC} \mu E_{DC} \quad (A.3.15)$$

である。 E_{DC} と ρ_{DC} の関係は、

$$\nabla \cdot E_{DC} = \frac{\rho_{DC}}{\epsilon_0} \quad (A.3.16)$$

である。式 (A.3.15) から

$$\rho_{DC} = \frac{I_{DC}}{2\pi r \mu E_{DC}} \quad (A.3.17)$$

であるので、境界条件として、電線表面における電界強度を次式のように仮定し、

$$E_{DC} = E_{DC0}, \text{ at } r = a \quad (A.3.18)$$

式 (A.3.16) から電界 E_{DC} を求めた後に、 ρ_{DC} を導出すると、式 (A.3.3) が得られる。

付録 3. 3 交流課電時の空間電荷の挙動

付 3.3 図には、50Hz の交流高電圧が印加された

場合の空間電荷の動きが示されている(同心円筒電極、電線半径 0.006m, 外円筒電極半径 0.6m, 課電圧 90kVrms) [8]。図中の実線と破線の曲線は、それぞれいくつかの正電荷、負電荷の位置の経時変化を示す。

発生した空間電荷は、課電圧と空間電荷による電界にしたがって振動し、その一部は電線に戻ることもなく外円筒に向かって移動している。

縦軸の距離 10 cm の位置において、電荷の動きから中性空気分子に伝達される力を考える。

1) 図中記号 A の時間帯

負の電荷群が電線方向から到達する。この時間帯では、正の電荷群も返って来るが、直前に発生した電荷群の方が明らかに電荷量が多いので、負の電荷群の方が電荷量が多く、トータルでは外向きの力が働く。

2) 図中記号 B の時間帯

B の時間帯では負の電荷群が返って来る。この時間帯では正の電荷群も内側からやって来るが、後で発生した負の電荷群の方が先に発生した正の電荷群より電荷量が多いので、トータルとしては内向きの力が中性空気分子に伝達される。

3) 図中記号 C の時間帯

C の時間帯では直前に発生した正の電荷群が内側からやって来る。この時間帯では、負の電荷群も外側から返ってくるが、直前に発生した電荷群の方が電荷量が多いので、トータルとして正の電荷群の

電荷量が多く、この時間帯では外向きの力が中性空気分子に伝達される。

4) 図中記号 D の時間帯

D の時間帯では正の電荷群が返って来るため、内向きの力が中性空気分子に伝達される。

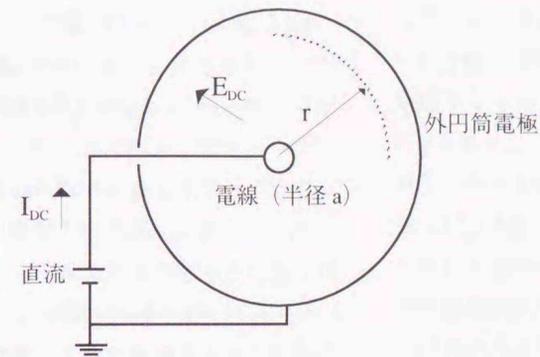
5) 図中記号 E の時間帯

E の時間帯では、直前に発生した負の電荷群が内側からやって来る。この時間帯では、正の電荷群も外側から返ってくるが、直前に発生した電荷群の方が電荷量が多いので、トータルとして負の電荷群の

電荷量が多いため、この時間帯では外向きの力が中性空気分子に伝達される。

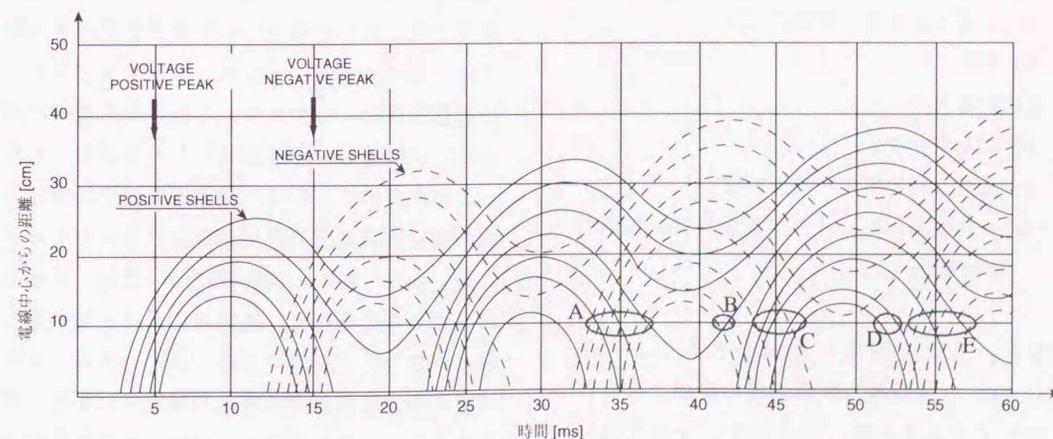
6) 以降 2) からを繰り返す。

したがって、電圧の 1 周期の間に、中性空気分子は、外向きと内向きの力をそれぞれ 2 回ずつ受けることとなり、電圧の周波数が 50Hz であれば 100Hz 音、電圧の周波数が 60Hz であれば 120Hz 音が発生すると考えられる。



付3.2図 同心円筒電極における座標と諸量の定義

Fig. A-3.2 Definition of coordinate and quantities in cylindrical electrode.



付3.3図 正負イオンの動き (電線の半径: 0.6cm)

Fig. A-3.3 Space-charge movement (conductor radius: 0.6 cm).

4. コロナハム音の発生量

4.1 まえがき

コロナハム音の発生量には様々なパラメータが影響する。コロナハム音に対する各種のパラメータの影響を調べるにはコロナケージによるのが簡便であり、本章でも主としてコロナケージによる実験から得られた結果を述べる。

従来からランダム騒音の発生量に対しては、電圧、導体方式、電線表面状況（エージングの度合）、付属品（特に風騒音対策用スパイラル線）、ならびに気象条件が影響するとして検討されてきた。

コロナハム音についても上記のパラメータは重要であり、本論文でも検討する。さらに、コロナハム音の発生機構はランダム騒音とは違うと考えられ、かつ電線表面に付着した水滴の挙動が大きく発生量に影響すると考えられたため、電線を取り巻く空間の広さならびに電線の傾斜の影響についても検討する。したがって、本論文では下記のパラメータについて検討する。

- a) 電線を取り巻く空間の広さ
- b) 電圧
- c) 導体方式
- d) エージング
- e) 風騒音対策用スパイラル線
- f) その他のパラメータ（気象条件、電線の架線形状）

なお、ここで使用した鋼心アルミより線（ACSR）の断面積と素導体径の関係、ならびにスパイラル線の取り付け方を、それぞれ付録4.1、付録4.2に示す。

4.2 電線を取り巻く空間の広さの影響

ランダム騒音の発生機構は、電線表面あるい

は電線表面に付着した水滴からのコロナ放電路の急激な熱膨張であるため、ランダム騒音の発生量に対しては電線を取り巻く空間の広さの影響は、実用上ないと考えられる。

コロナハム音の発生機構には次の二つの説がある。

- 1) 電線周囲の空間におけるイオンの運動によって発生する。
- 2) コロナ放電路の熱膨張、すなわち、コロナ放電によるパルス音が課電圧の正と負のサイクルで発生し、これらが重畳することにより発生する。

これまでの研究からは、前者の説が有力であり[1, 2]、電線を取り巻く空間の広さによって発生量が異なる可能性がある。このことは、電線からのコロナハム音の発生量を計測するに当たって、重要な問題である。すなわち、どのような設備なら、実際の送電線における発生量と等しい計測ができるかが問題となる。

電線からのコロナ放電に起因するコロナ騒音、コロナ損、ラジオ雑音等の発生量を計測する際には、商用送電線、試験線、コロナケージが用いられてきた。このうち、各種の発生量の計測には、試験線ないしはコロナケージが用いられることが多い。これは、商用送電線では導体方式の変更や課電圧の変更が容易でないか不可能に近いからである。試験線については、実規模のものを考える限り、送電線における発生量と等しいことには疑問の余地はなく、また、ある程度自由に導体方式の変更や課電圧の変更が可能である。しかしながら、試験の容易さの観点から見ると、試験線とコロナケージでは後者の方が格段に有利である。

したがって、コロナケージを試験設備として

考え、電線からどの程度の空間があれば、送電線における発生量と同等であるかを検討することとする。

電線周囲の空間におけるイオンの運動がコロナハム音を発生させるとすると、イオン密度と空間電界強度が重要なパラメータである。これらの量は、電線表面付近で最大値をもち、電線から遠ざかるにつれて徐々に小さくなると考えられ、コロナハム音の発生量も同様な変化傾向をとると考えられる。

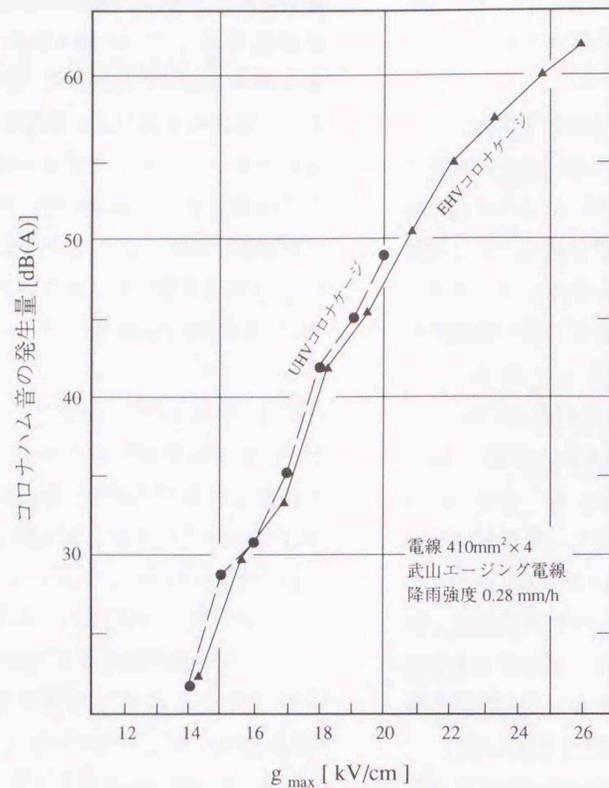
UHV コロナケージ（正方形断面 $8 \times 8 \text{m}^2$ ）とEHV コロナケージ（円筒形断面、直径 4.2m）では外電極の大きさが異なる。すなわち、UHV コロナケージでは電線の中心から外電極までの最短距離は 4m であるのに対して EHV コロナケージは 2.1m と、電線中心から外電極までの距離はほぼ 2 対 1 の関係にある。この違いを利用して、コロナハム音の発生量に対する電線を取り巻く空間の広さの影響の有無を検討した。

比較実験に使用した素導体は電力中央研究所

横須賀研究所（神奈川県横須賀市）構内で約 18 年間課電曝露した ACSR410mm² である。これを 4 導体電線（410mm²×4、素導体間隔 40cm）とし、後述の架線形状の影響を避けるために両コロナケージにおいて電線の傾斜角（2.9 度）をほぼ等しくして架線した。さらに、実験は自然降雨時に両ケージに同時に課電し、短時間内に g_{max} 特性を測定し、両コロナケージにおいて等しい降雨強度の場合のデータが得られるようにした。

第 4.1 図は UHV コロナケージと EHV コロナケージにおいて得られたコロナハム音の発生量を比較したものである。UHV コロナケージと EHV コロナケージにおいて得られたコロナハム音の発生量はほぼ一致している。

したがって、コロナケージによって、コロナハム音の発生量を測定するには、EHV コロナケージにおける電線と外電極径との間の距離（2m 程度）があれば、少なくとも実用上は差し支えないと考えられる。



第4.1図 コロナハム音の発生量に対する外電極径の影響

Fig. 4.1 Dependence of generation of hum noise on outer electrode diameter.

4.3 電圧（最大導体表面電位の傾き）の影響

4.3.1 単導体電線における結果

十分にエージングの進んだ数種類の単導体電線について、UHV コロナケージにおける人工注水試験からコロナハム音の発生量およびコロナ損と最大導体表面電位の傾き g_{max} との関係を検討した。

(1) コロナ損と g_{max} との関係

第4.2図にコロナ損と g_{max} との関係を示す。一般に、コロナ損 w と g_{max} との関係は

$$w = b(g_{max} - mg_0)^2 \quad (4.1.1)$$

で表わされる[3]。

ここで、

b : 素導体数、素導体外径等の導体方式によって決まる定数

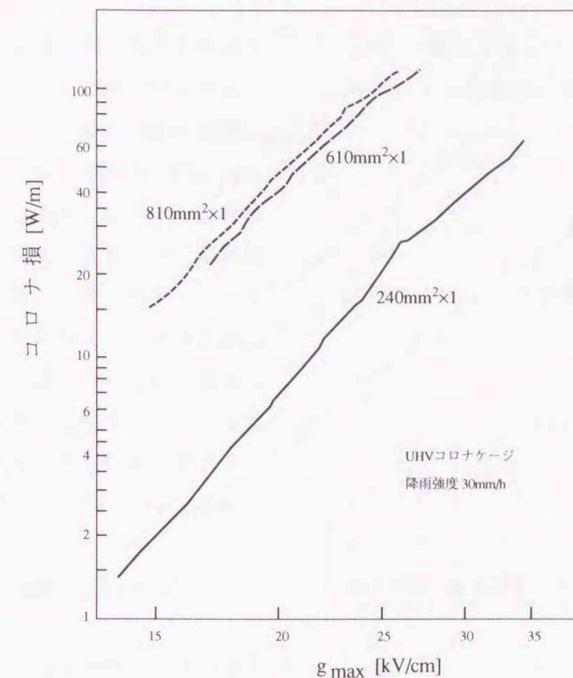
g_{max} : 最大導体表面電位の傾き [kV/cm]

m : 表面係数

g_0 : コロナ臨界電位の傾き [kV/cm]

$$g_0 = 30/\sqrt{2} \cdot (1 + 0.301/\sqrt{d/2}) \quad (4.1.2)$$

d : 素導体外径 [cm] である。



第4.2図 コロナ損と g_{max} の関係

Fig. 4.2 Corona loss as a function of g_{max} .

第4.1表 コロナ損と最大導体表面電位の傾きとの関係における定数

Table 4.1 Coefficients, b , and Surface Factors, m , in the Equation $w=b(g_{max}-mg_0)^2$

導体方式	降雨強度 [mm/h]	b	表面係数 m	g_0 [kV/cm]	平方誤差 [w/m]
240mm ² ×1	30	0.117	0.43	27.3	1
610mm ² ×1		0.451	0.37	26.1	1
810mm ² ×1		0.474	0.37	25.8	1

第4.2図のデータについて、前式に基づいて最小二乗法を用い、係数 b と m を求め、第4.1表に示した。最小二乗法により求めた係数の適合度合を示すために、表中には平方誤差も示している。

(2) コロナハム音発生量と最大導体表面電位の傾きとの関係

コロナハム音発生量とコロナ損には緊密な関係があると考えられることから、コロナ損 w と

最大導体表面電位の傾き g_{max} との間の関係式(4.1.1)を参考に、コロナハム音の発生量も $(g_{max}-mg_0)$ のべき乗に比例するとし、次式で両者を関係づけた。

$$p_{HR} = c(g_{max} - mg_0)^{\alpha} \quad [\text{Pa}] \quad (4.2)$$

ここで、

P_{HR} : 注水時コロナハム音発生量 [Pa]
 c : 導体方式や降雨強度等によって決まる定数
 α : 定数

である。

注水時コロナハム音発生量をデシベル単位にすると、

$$P_{HR} = 20\alpha \log(g_{max} - mg_0) + C \quad (4.3)$$

である。ここで、

P_{HR} : 注水時コロナハム音発生量 [dB(A)]
 $C = 20 \log c$

である。

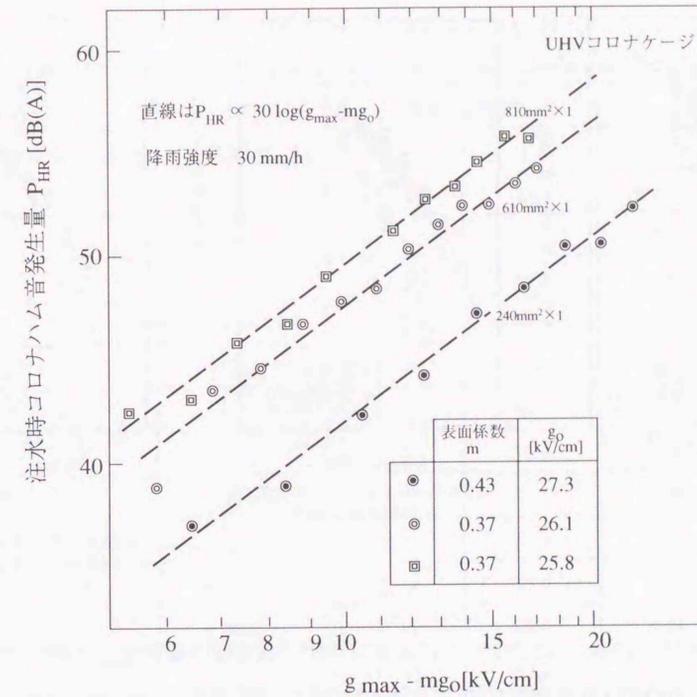
すなわち、 α は $\log(g_{max} - mg_0)$ に対するコロナ

ハム音発生量の傾斜を与える。

先のコロナ損と g_{max} の関係を表わす際に最小二乗法で求めた m と g_0 を用い、 P_{HR} を $\log(g_{max} - mg_0)$ に対して示すと第 4.3 図のようになり、導体外径によらず、 $\log(g_{max} - mg_0)$ に対する P_{HR} の傾斜は一定であることがわかる。これらのデータから、再度、最小二乗法を用い傾斜 α と定数 C を求めると、 α はほぼ 1.5 となる。第 4.3 図に並記したように、最小二乗法により求めた定数 α 、 m 、 C を用いた直線（図中の破線）はデータの変化傾向を良く表わしている。したがって、注水時のコロナハム音の発生量は

$$P_{HR} = 30 \log(g_{max} - mg_0) + C \quad (4.4)$$

と表わすことができる。



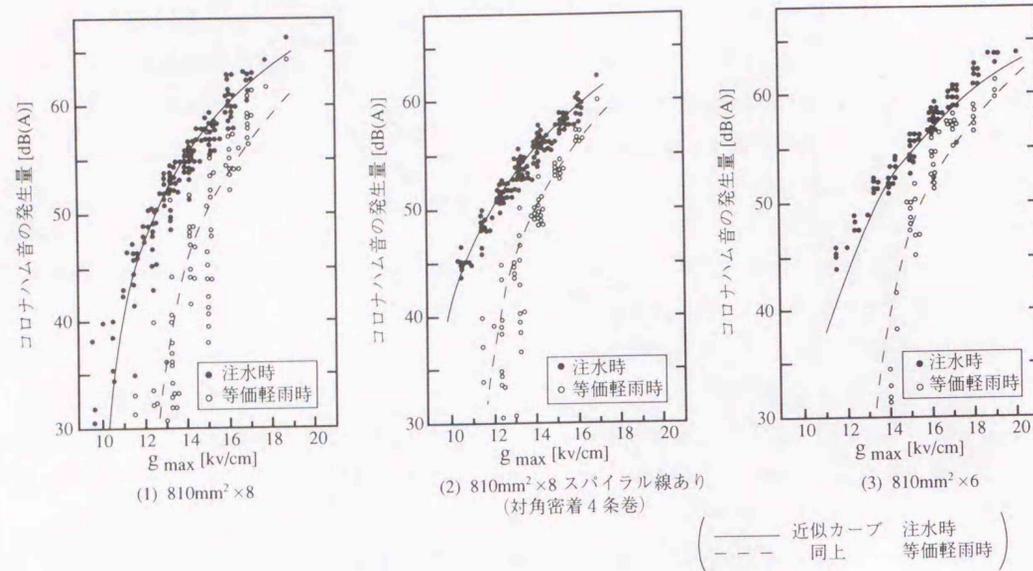
第4.3図 コロナハム音の発生量と最大導体表面電位の傾き g_{max} との関係 (g_0 : コロナ臨界電位の傾き)

Fig.4.3 Generation of hum noise as a function of g_{max} (g_0 : Peek's critical gradient).

4.3.2 多導体電線における結果

十分にエージングの進んだ電線に関して注水時および等価軽雨時のコロナハム音発生量と g_{max} との関係の例を第 4.4 図に示す。 g_{max} が一定でも、注水時も等価軽雨時もコロナハム音発生量のバラツキが大きい。商用送電線の代表的な g_{max} である 15kV/cm において 810mm²×8 の

場合には、注水時コロナハム音発生量のバラツキは ±2dB、等価軽雨時の発生量のバラツキは ±9dB にも及ぶ。これは、素導体の下面に付着した水滴の挙動あるいは注水停止後の水滴数の減少過程に気象条件や電線表面状況が大きく影響することを示唆している。



第 4.4 図 UHV コロナケージによるコロナハム音発生量の g_{max} 特性

Fig. 4.4 Generation of hum noise as a function of g_{max} in UHV corona cage tests.

第 4.4 図に先のコロナハム音の発生量と g_{max} の間の関係式を適用した。

すなわち、注水時ならびに等価軽雨時のコロナハム音レベルと g_{max} の関係を

$$P_{HR,WC} = c(g_{max} - mg_0)^{1.5} \quad [\text{Pa}] \quad (4.5)$$

あるいは

$$P_{HR,WC} = 30 \log(g_{max} - mg_0) + C \quad (4.5)'$$

$$C = 20 \log c$$

とし、定数 C と mg_0 を最小二乗法により求めた。

ここで、 p , P はそれぞれ $[\text{Pa}]$, $[\text{dB(A)}]$ 単位のコロナハム音発生量、 c , C は定数、添字の HR , WC はそれぞれ注水時、等価軽雨時を示す。

先の第 4.4 図に最小二乗法により求めた定数 C と mg_0 を用いたカーブを並記している。これらの結果は、式(4.5)が多導体電線(第 4.4 図(1)(3))に対してもスパイラル線取付時(第 4.4 図(2))に対してもコロナハム音発生量をよく表わすものであることを、示している。

十分にエージングの進んだ電線について、最小二乗法により求めた各種の多導体電線に関する定数 C と mg_0 を第 4.2 表に示した。

第 4.2 表 実験結果より推定した mg_0 と C

Table 4.2 Coefficients mg_0 and C Estimated Using Experimental Results

導体方式		スパイラル線 取付法	等価軽雨時		注水時	
素導体数	素導体断面積 [mm ²]		mg_0 [kV/cm]	C [dB]	mg_0 [kV/cm]	C [dB]
6	610	なし	—	—	10.42	35.4
6	810	なし	12.77	36.4	9.81	33.4
6	810	対密 4 条	11.32	34.9	9.69	34.7
8	330	なし	12.16	32	9.56	29.2
8	410	なし	12.9	36.1	11.07	35.3
8	610	なし	12.95	39.7	9.56	36.3
8	610	対密 4 条	11.77	35.1	9.77	35.1
8	810	なし	12.03	36.8	9.6	36.1
8	810	対密 4 条	10.9	35.4	8.23	33.3
8	810	対角 2 条	8.96	33.9	8.26	33.1
10	810	なし	11.51	32.8	9.09	35.7
10	810	対密 4 条	10.55	36.8	8.54	36.2
10	810	対角 2 条	9.04	38.6	8.23	38.3

注 1) 電線は全て ACSR, 対密 4 条: 対角密着 4 条巻

注 2) 素導体間隔 40cm

4.4 導体方式の影響

4.4.1 注水時における結果

(1) 素導体外径の影響

先の第 4.3 図には素導体数が 1 で、素導体が ACSR240mm² (素導体外径 2.24 cm), 610mm² (素導体外径 3.42 cm), ならびに ACSR 810mm² (素導体外径 3.84 cm) の場合の注水時コロナハム音発生量と g_{max} の関係を示している。

式(4.4)で近似した場合の定数 C を素導体外径 d に対して示すと、第 4.5 図のようであり、

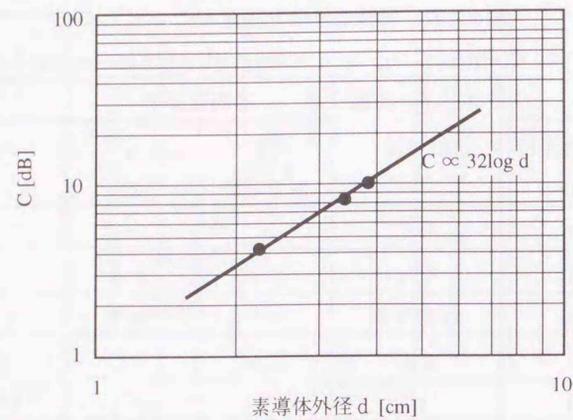
$$C \propto 32 \log d \quad (4.6)$$

あるいは

$$c \propto d^{1.6} \quad (4.6)'$$

に近い特性と考えられる。

通常、超高压 (187 kV) 以上の送電線に使用される電線の素導体外径は 2.24 ~ 4.62 cm (ACSR240mm² ~ 1160mm²) であり、実験条件はこの範囲をほぼカバーしている。また、素導体外径 d と定数 c の関係が、式(4.6)' のように d のべき乗の形で近似できることは、ランダム騒音の場合と同じである[4]。



第4.5図 注水時のコロナハム音発生量に対する素導体外径の影響

Fig. 4.5 Generation of hum noise in heavy rain as a function of conductor diameter.

(2) 素導体数の影響

UHV コロナケージにおいて素導体が 610mm^2 (素導体径 3.42cm)、導体数が 1, 2, 4, ならびに 6 の場合 (複導体以上の場合の素導体間隔は 40cm) の注水時コロナハム音発生量を測定した。

測定値を式(4.5)で近似し、発生量を $(g_{\text{max}} - mg_0)$ に対して示すと第 4.6 図のようである。また、定数 C を素導体数 n に対して示すと、第 4.7 図のようであり、

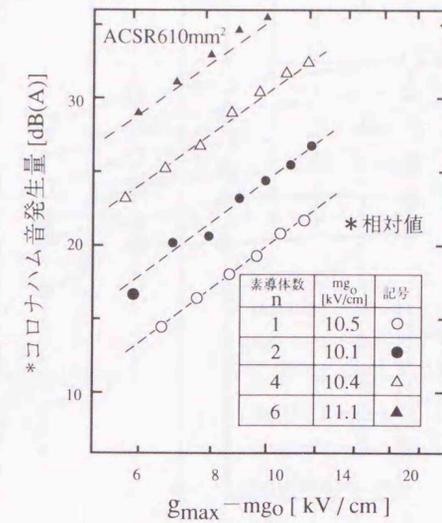
$$C \propto 20 \log n \quad (4.7)$$

あるいは

$$c \propto n \quad (4.7)'$$

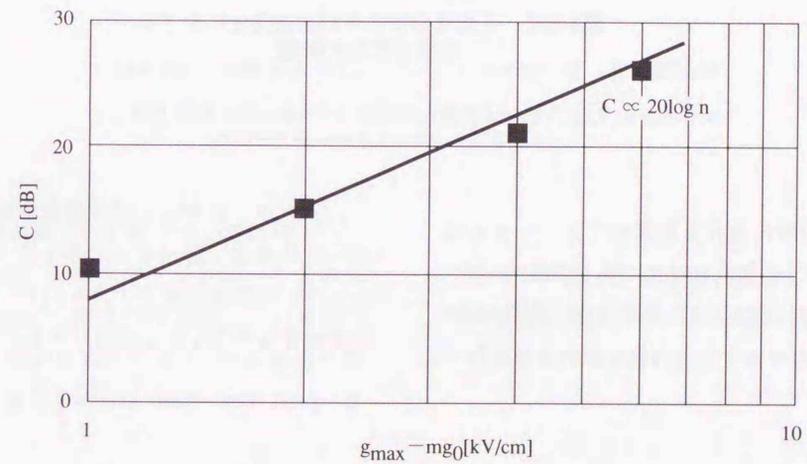
に近い特性と考えられる。

通常、超高压 (187kV) 以上の送電線に使用される電線の素導体数は 1~8 であり、実験条件はこの範囲をほぼカバーしている。また、素導体数 n と定数 c の関係が、式(4.7)' のように n のべき乗の形 (べき乗数 1) で近似できることは、ランダム騒音の場合と同じである[4]。



第4.6図 コロナハム音の発生量に対する g_{max} の影響

Fig. 4.6 Influence of g_{max} on generation of hum noise.



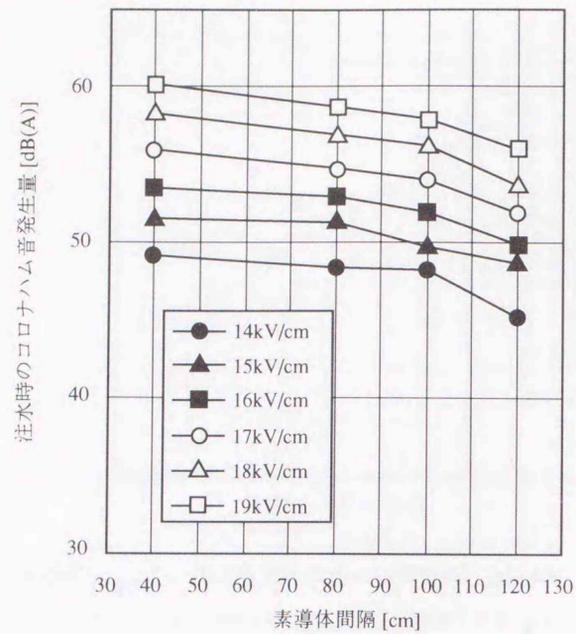
第4.7図 注水時のコロナハム音の発生量に対する素導体数の影響

Fig. 4.7 Generation of hum noise as a function of number of subconductors.

(3) 素導体間隔の影響

UHV コロナケージにおいて素導体が 410mm^2 (素導体径 2.85cm)、導体数が 4 の場合の注水時コロナハム音発生量を測定した。

素導体間隔は 40cm から 120cm まで変えている。結果を第 4.8 図に示す。最大導体表面電位の傾きが一定の場合、発生量は素導体間隔が大きくなるに従って減少する。



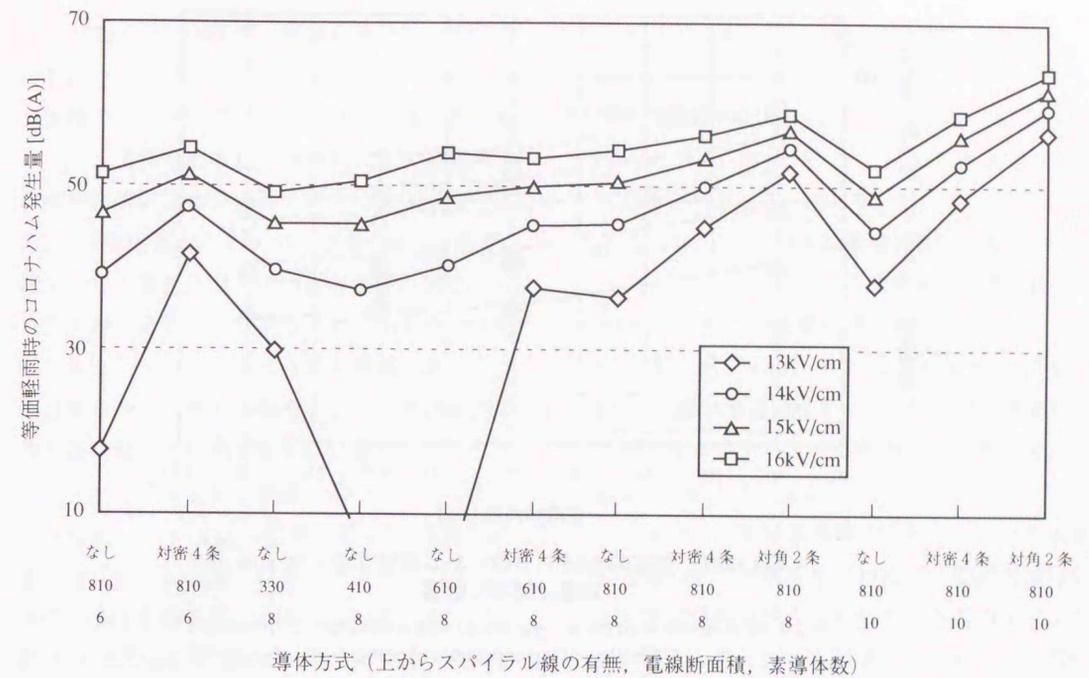
第4.8図 注水時のコロナハム音発生に対する素導体間隔の影響

Fig. 4.8 Generation of hum noise in heavy rain as a function of subconductor spacing

4.4.2 等価軽雨時における結果

等価軽雨時の場合のコロナハム音発生量に対する、素導体外径ならびに素導体数の影響は先の注水時の場合のように明確な傾向は見られ

ない。しかしながら、最大導体表面電位の傾きが一定の場合、第 4.9 図に示すように素導体数ならびに素導体外径が大きいほど、コロナハム音発生量も大きくなる傾向にある。

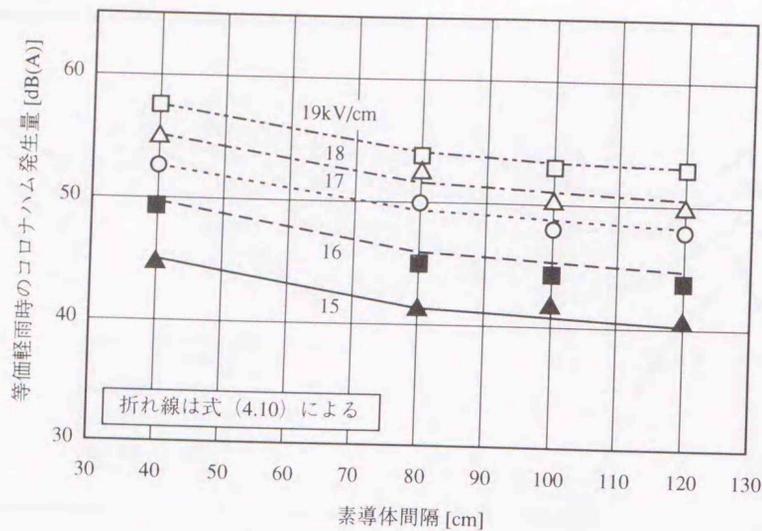


第4.9図 各種導体方式のコロナハム音発生量 (等価軽雨時)

Fig.4.9 Generation of hum noise for various conductor bundles.

一方、素導体間隔の影響については以下のようである。UHV コロナケージにおいて素導体断面積が 410mm² (素導体径 2.85cm)、導体数が 4 の場合の等価軽雨時のコロナハム音発生量を測定した。素導体間隔は 40cm から 120cm ま

で変えている。電線は十分にエージングの進んだものである。第 4.10 図に結果を示す。最大導体表面電位の傾きが一定の場合、発生量は素導体間隔が大きくなるに従って減少する。



第4.10図 等価軽雨時のコロナハム音発生量に対する素導体間隔の影響

Fig.4.10 Generation of hum noise under wet conductor condition as a function of subconductor spacing.

電線表面の最大導体表面電位の傾き g_{max} と平均的な電位の傾き E_{ave} との比 k , すなわち,

$$k(S) = 1 + (n-1) \frac{d}{S} \sin\left(\frac{\pi}{n}\right) \quad (4.8)$$

を用い, 第 4.10 図における素導体間隔 S の影響は

$$K_s = 45(k(S) - k(40)) \quad [\text{dB}] \quad (4.9)$$

と表わすことができる。ここで,

K_s : 素導体間隔 40cm の場合を基準とした場合のレベル低下値 [dB]

n : 素導体数

d : 素導体外径 [cm]

S : 素導体間隔 [cm]

$k(40)$: 素導体間隔が 40cm の場合の k の値である。

4.5 エージングの影響

電線が新しく(新線), その表面に油があると, 電線のはほとんど全表面に細かい水滴が多数付着し, この場合にはコロナ放電が活発であり, ランダム騒音の発生量も大きい。電線が屋外に曝されていると, 降雨等により表面の油が少なくなってくるため, 水滴は電線の下面にのみ付着するようになり, コロナ放電はそれほど活発ではなくなり, ランダム騒音の発生量も低くなる[5]。すなわち, 電線の表面の油の量がランダム騒音の発生量に影響し, 電線のエージングとは, その表面の油が無くなっていく過程である。

屋外で無課電曝露した電線について, UHV コロナケージによって等価軽雨時のコロナハム音発生量を測定した。電線は ACSR410mm², 4 導体, 素導体間隔 40cm である。結果を第 4.11 図に示す。最大導体表面電位の傾き g_{max} を一定とした場合, 曝露期間が長くなるに従ってコロナハム音発生量は低下し, その低下量は g_{max} が低

いほど大きい。ここで, 曝露期間が零は新線を示す。

電線のエージングは, その表面の油が無くなっていく過程である。その初期には, 電線表面の油が降雨による洗浄等で徐々に少なくなっていくものの, 電線の内側からの油の供給もあり, 結果として電線表面の油の量はあまり減少せず, コロナハム音発生量はそれほど低下しないと考えられる。しかし, ある程度の期間が経つと, 内側からの油の供給も少なくなり, 電線表面の油の量が時間の経過とともに急激に少なくなり, コロナハム音発生量も同様に低下していくと考えられる。さらに十分に期間が経つと, 電線の表面の油はほとんど無くなり, コロナハム音発生量はある値に落ち着くと考えられる。そこで, 第 4.11 図から, 曝露期間に対するコロナハム音発生量の経時変化を

$$P_{wc} = (A + B/g_{max})e^{-t} + P_{wc}(\infty) \quad [\text{dB}] \quad (4.10)$$

の形で整理すると,

$$A = -76.3, B = 1415$$

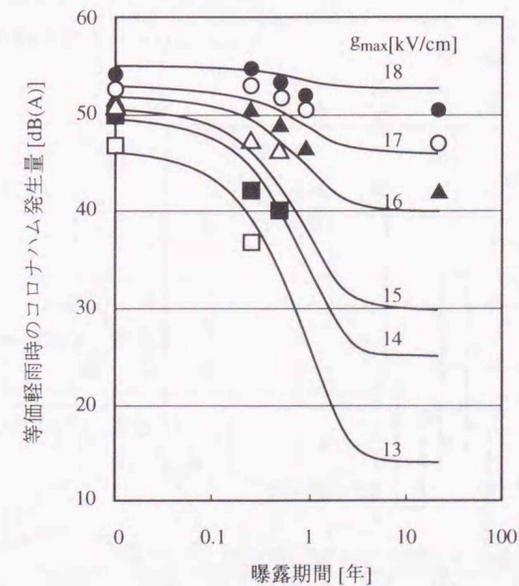
と求められる。ここで,

$P_{wc}(\infty)$: 非常に長期間経った場合のコロナハム音発生量 [dB(A)]

t : 曝露期間 [年]

である。式 (4.10) より得られるカーブを, 第 4.11 図に合わせて示す。カーブは, 曝露期間に対するコロナハム音発生量の低下傾向を比較的よく表わしている。

ここでは, 無課電曝露の場合のコロナハム音発生量の低下傾向をまとめたが, 商用送電線においては常時電圧がかかっているためエージングの進行も早く, さらに早くコロナハム音発生量が低下するものと考えられる。



第4.11図 コロナハム音発生量に対するエージングの影響

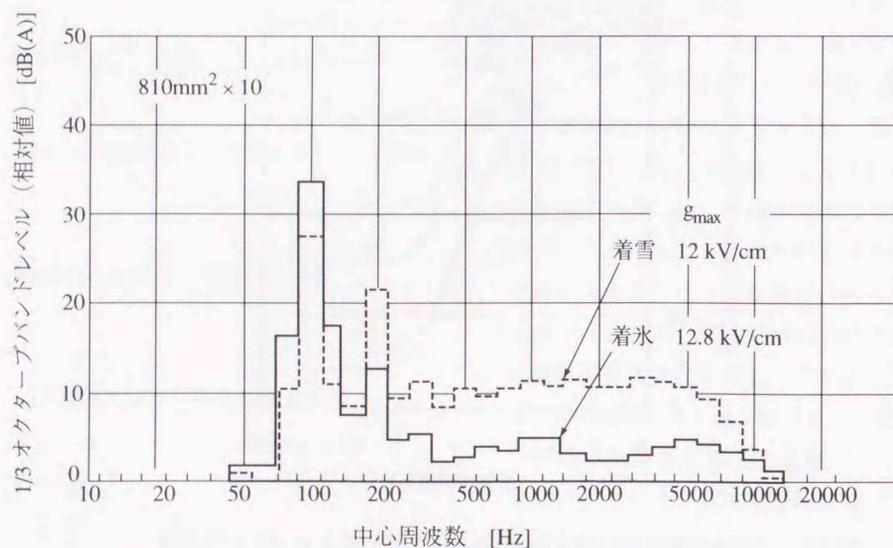
Fig. 4.11 Effect of aging on generation of hum noise.

4.6 風騒音対策用スパイラル線の影響

風騒音対策として、送電線には一般にスパイラル線が取り付けられる。

第 4.9 図におけるスパイラル線なしの場合、スパイラル線を対角密着 4 条巻きした場合ならびに対角 2 条巻きした場合を比較すると、スパイラル線なし、対角密着 4 条巻き、対角 2 条巻きの順にコロナハム音発生量が低いことがわかる。

UHV コロナケージにおける夜間の可視コロナ観測によれば、等価軽雨時の注水停止後 1 分から 2 分の時点では、スパイラル線の下端に付着した水滴からコロナ放電が発生していることがわかった。すなわち、スパイラル線は電線表面に突起を作ることとなり、コロナ放電を発生させ易くするとともに、その下端に水滴を形成させ、コロナハム音発生量を増大させる。



第4.12図 着氷雪時の交流コロナ騒音の周波数スペクトラム例

Fig. 4. 12 Frequency spectra of audible noise from conductor bundles with ice or snow loading.

4.7 その他のパラメータ（気象条件、電線の架線形状）の影響

(1) 気象条件の影響

電線の表面に付着する水滴（降雨、結露）、降雪、着氷雪はコロナハム音の発生量に大きく影響するが、これらについて自然の状態を実験的に実現するのは相当困難である。このため、一般的には、屋外における長期の連続試験結果を統計的に解析し、これらの影響を検討する。

このため、ここでは UHV コロナケージにおいて、冬季に散水し、電線下部に着氷（最大長 30cm のつらら）させた場合と、降雪があり電線に冠雪した場合の測定例を述べるに留める。この場合のコロナ騒音のスペクトラムを第 4.12 図に示す。騒音計の A 特性[6]を通していてもかわらず、コロナハム音が突出していることがわかる。逆に、ランダム騒音成分は等価軽雨時などよりも減少する。すなわち、ほとんどコロナハム音だけが発生する。

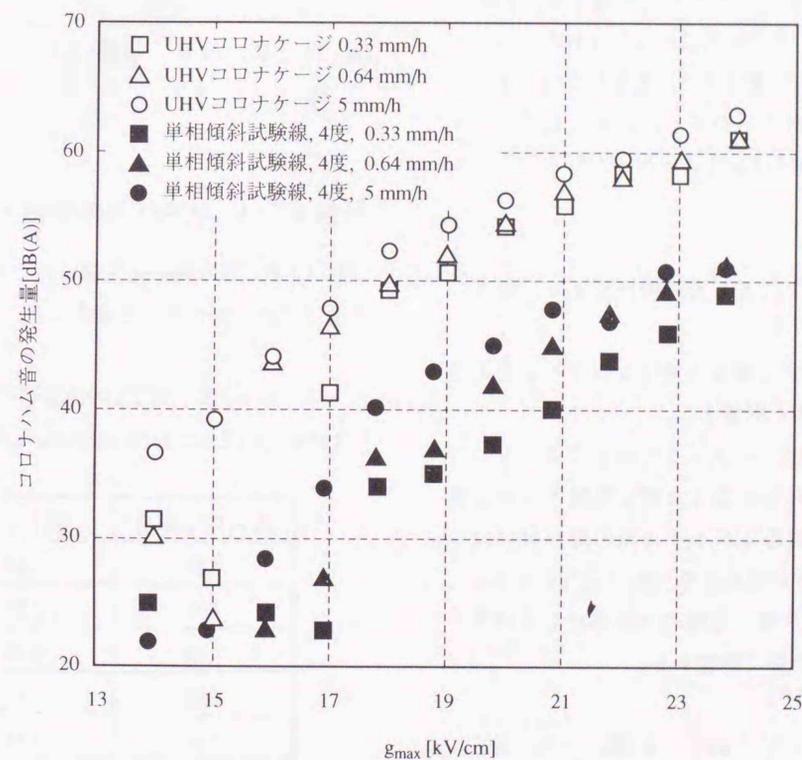
(2) 電線の架線形状の影響

第 4.13 図は UHV コロナケージにおける場合（電線の両端はほぼ等しい高さ、弛度 20cm 程度）と単相傾斜試験線（電線の両端の高低差約 1.3m、傾斜約 4 度）における場合の発生量の測定結果を比較したものである。

電線は電力中央研究所横須賀研究所（神奈川県横須賀市）構内で約 18 年間課電曝露した ACSR410mm² である。これを 4 導体電線（410mm²×4、素導体間隔 40cm）とした。

図において等しい降雨強度の場合を比較する

と（□と■：0.33mm/h、△と▲：0.64mm/h、○と●：5mm/h）、単相傾斜試験線における発生量の方が UHV コロナケージにおける場合よりも明らかに低いことがわかる。



第4.13図 発生量に対する架線形状の影響

Fig. 4.13 Influence of hanging configuration of conductor bundles on generation of hum noise.

電線に付着した水滴の挙動を観察したところ、単相傾斜試験線においては、電線下面に付着した水滴は電線の傾斜に沿って高いほうから低いほうに流れつつコロナ放電を発生し、端部のコロナシールドリングの部分で落下する。ただし、コロナシールドリングの部分から水滴が落下する時には、シールドリングによるシールド効果があるため、コロナ放電は発生していない。一方、UHV コロナケージの場合にも水滴は電線の傾斜に沿って高いほうから低いほうに流れるが、弛度の最低点付近で停止し、この状態でコロナ放電を発生する。このため、電線下面に形成される水滴数を、単相傾斜試験線と UHV コロナケージとにおいて比較すると、UHV コロナケージにおける水滴数の方が多く、結果としてコロナハム音発生量が大きいものと考えられる。

4.8 まとめ

コロナケージによる実験的検討より、以下の事項が明らかになった。

- 1) 電圧ならびに導体方式はコロナハム音の発生量に大きく影響する。
- 2) 電線表面のエージングの進行によってコロナハム音の発生量は大幅に低減するが、風騒音対策用のスパイラル線の取り付けはコロナハム音の発生量を大幅に増大させる。
- 3) 降雪、着氷雪、電線の架線形状もコロナハム音の発生量に影響する。

今後の課題として、以下の事項につき、さらに詳細な検討が必要と考えられる。

- 発生量に対する素导体数、素导体外径の影響
- 発生量に対する降雪の影響
- 発生量に対する電線架線形状の影響

文献

- [1] 福島, 「送電線のコロナ騒音」, 電力中央研究所, 総合報告:T01, 1986年9月
- [2] Trinh N. G., 第1章{47}
- [3] 例えば, 電気工学ハンドブック, pp.1320, 1978年
- [4] 例えば, IEEE Corona and Field Effects Subcommittee, 第1章{106}
- [5] Booker J. R., "Natural aging of non-energized aluminum conductors," IEEE Trans., Vol. PWRD-1, No. 4, pp. 269-274, October 1986 (AEP)
- [6] 例えば, 騒音・振動(上), コロナ社, pp.72, 1978年

付録4.1 ACSRの断面積と直径

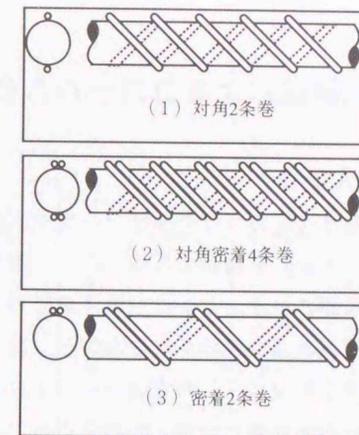
付4.1表に我が国の送電線においてよく使用される ACSR の断面積と直径を示す。

付4.1表 ACSRの断面積と直径
Table A.4.1 Cross Sectional Area and Diameter of ACSR

ACSR	
断面積 [mm ²]	直径 [cm]
240	2.24
330	2.53
410	2.85
610	3.42
810	3.84
1160	4.62
1520	5.28

付録4.2 スパイラル線の取り付け方

スパイラル線の取り付け方には、代表的なものとして3種類ある。これらを付4.1図に示す。



付4.1図 スパイラル線の取り付け方

Fig. A-4.1 Method of winding spiral wires.

5. 試験線によるコロナハム音の実証試験結果

5.1 まえがき

交流架空送電のコロナ騒音（ランダム騒音とコロナハム音）を検討する場合に、主要な気象条件は降雨である。これは、第3章に述べたように、電線表面に供給される水分が、電線の表面に水滴を形成し、この水滴からのコロナ放電が、コロナ騒音源として支配的なためである。降雨時のコロナ騒音の発生は、電線の種類、導體方式、相の配列、および課電圧が一定の場合、主として降雨状況によって決定される。したがって、極論すれば、試験送電線によるコロナ騒音の長期試験とは、コロナ騒音特性の自然降雨状況に対する応答を追及するものであるといえる。この降雨状況は、送電線近傍のある地点で、ある瞬間に計測される単なる降雨強度の意味ではない。電線表面の水滴の形成および付着状況は、その時点以前の雨の降り方の時間的経過と電線延長方向の雨の降り方の分布など、時間的、空間的な広がりを考慮した降雨の状況によって決定されると考えるべきである。すなわち、ある降雨強度の測定値には、多種類の降雨状況が対応するので、降雨強度とコロナ騒音（ランダム騒音、コロナハム音）レベルが一一に対応するとは限らない。したがって、降雨強度は、多数のデータを統計的立場から見る場合に限り、降雨状況の尺度となりえる。

本章では、上記の考えに基づき、UHV 赤城実規模試験線（以下、赤城試験線）において UHV 級導體方式のコロナハム音レベルを長期にわたり連続測定することによって多数のデータを収集し、その特性を統計的に検討する。

また、ここで得られたデータは、後の第8章で述べるように、コロナケージで計測したデータとの対応を検討することによって、予測法を

開発するために用いられる。

5.2 累積頻度分布

コロナハム音レベルの累積頻度分布を第5.1図[1,2]に示す。ほぼ同時期の晴曇天時に得られた測定結果も、暗騒音として比較のために並記してある。コロナハム音に対する暗騒音は、風、自動車などによる騒音の100Hz成分が主体をなし、雨音の影響は少ない。図より、コロナハム音レベルが暗騒音に対し十分なS/Nをもって計測できていることがわかる。

また、第5.1表は降雨時に各測定点で得られるコロナハム音の5%時間率騒音レベル（以下、5%値と称する。JIS Z8731-1983において、騒音レベルがあるレベル以上である時間が実測時間のx%を占める場合、そのレベルをx%時間率騒音レベルとすると定義されている）、50%時間率騒音レベル（以下、50%値と称する）、および次式による5箇所のマイクロホンによる測定値のパワー平均値を整理したものである。

$$P_{5,AVE} = 10 \log \left\{ \sum_{i=1}^N \frac{P_{5i}}{10} / N \right\} [\text{dB(A)}] \quad (5.1)$$

$$P_{50,AVE} = 10 \log \left\{ \sum_{i=1}^N \frac{P_{50i}}{10} / N \right\} [\text{dB(A)}] \quad (5.2)$$

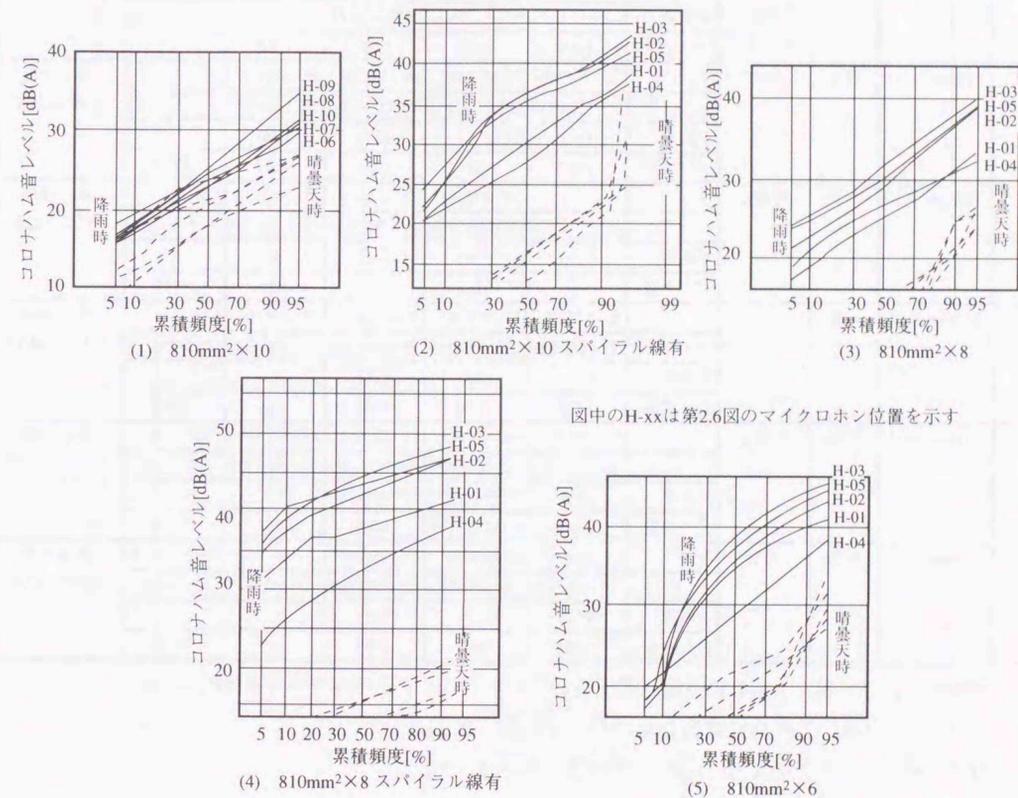
ただし、

N: 測定点数

P_{5i} : i (1~N) 番目のコロナハム音レベルの5%値 [dB(A)]

P_{50i} : i (1~N) 番目のコロナハム音レベルの50%値 [dB(A)]

である(式(5.2)は、後の第8章の式(8.1)に相当する)。



第5.1図 コロナハム音レベルの累積頻度分布（1100kV、降雨時）

Fig. 5.1 Cumulative distributions of hum noise level (1100 kV, foul weather).

第 5.1 表 赤城試験線による実証試験結果と予測値

Table 5.1 Measured Results and Predicted Values at Akagi Test Line

試験 番号	導体方式	素導体 配列	スパイラル線 の 取付方法	コロナハム音レベル [dB(A)]					備考	
				L ₅	L ₅₀					
					課電圧[kV]					
1	810mm ² ×10	対称	なし	予測値						第1径間 '83/8~'84/11
				データ数	1000	1100	1200	1300	0	
				L ₅	26~30[28]	30~35[32]	36~43[39]	40~46[42]	[21]	
				L ₅₀	20~22<21>	23~25<24>	27~32<29>	31~38<35>	<13>	
				予測値	(-)	(-)	(23)	(28)	-	
2	810mm ² ×10	対称	対密4	データ数	1827	5627	2921	1344	8723	第2径間 '82/2~'82/8
				L ₅	-	37~43[41]	43~49[47]	45~51[50]	[24]	
				L ₅₀	-	27~36<34>	36~45<42>	40~48<46>	<14>	
				予測値	(-)	(35)	(42)	(47)	-	
				データ数	-	6268	3853	852	3756	
3	810mm ² ×8	対称	なし	データ数	1774	3210	1448	708	2601	第2径間 '84/4~'84/11
				L ₅	28~35[33]	33~40[38]	37~46[43]	38~48[46]	[21]	
				L ₅₀	21~25<23>	26~32<29>	29~37<34>	32~41<38>	<12>	
				予測値	(17)	(28)	(34)	(40)	-	
				データ数	2061	7773	1884	579	2353	
4	810mm ² ×8	対称	対密4	データ数	2061	7773	1884	579	2353	第2径間 '82/11~'83/7
				L ₅	33~43[40]	38~48[46]	41~52[50]	48~55[53]	[33]	
				L ₅₀	27~41<37>	32~44<42>	34~51<48>	34~54<52>	<14>	
				予測値	(35)	(42)	(47)	-	-	
				データ数	2337	3697	1848	-	8526	
5	810mm ² ×6	対称	なし	データ数	2337	3697	1848	-	8526	第2径間 '85/2~'85/8
				L ₅	35~41[39]	38~45[43]	43~52[49]	-	[24]	
				L ₅₀	26~30<29>	30~39<36>	42~48<46>	-	<18>	
				予測値	(31)	(37)	(43)	-	-	
				データ数	-	-	-	-	-	

注1) L₅: 5%値, L₅₀: 50%値, 電圧0kVについては下記のパワー平均値のみ

注2) []内は, 式(5.1)に定義したパワー平均値, P_{5,AVE}

注3) < >内は, 式(5.2)に定義したパワー平均値, P_{50,AVE}

注4) ()内はコロナケージデータからの予測値

これらの図表から, 課電圧が一定の場合,

- 1) 素導体数が多くなるほどコロナハム音レベルが小さくなる
- 2) 同一の導体方式でもスパイラル線を取り付けるとレベルはかなり大きくなる
- 3) スパイラル線ありの場合はなしの場合に比べてデータの分散が小さい

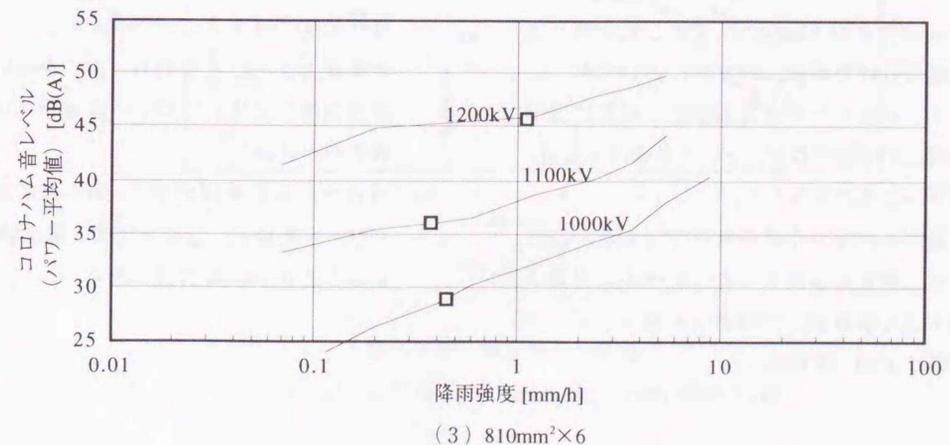
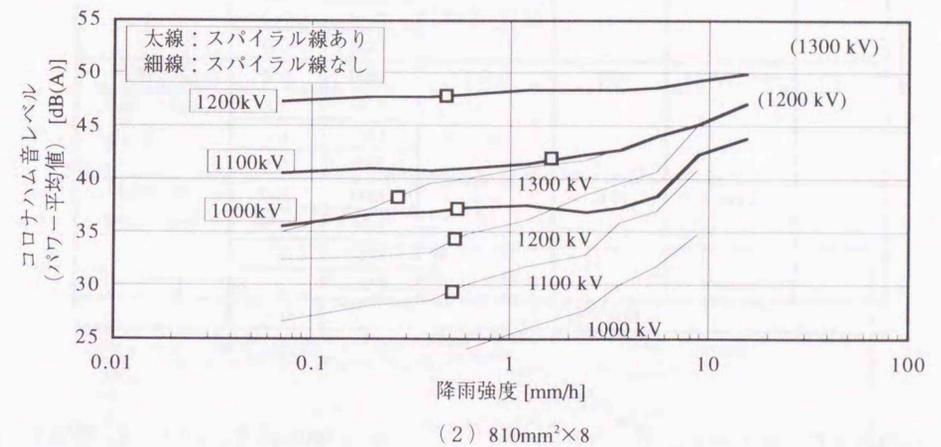
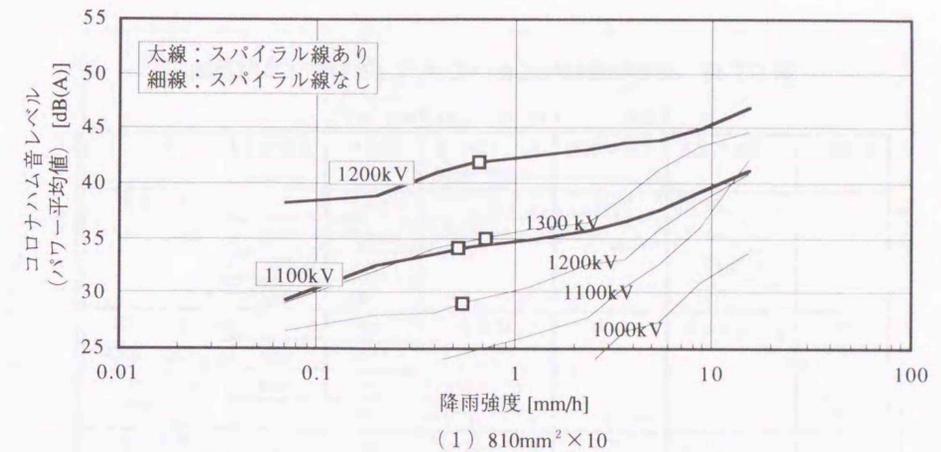
ことがわかる。

5.3 降雨強度特性

コロナハム音レベルを降雨強度区分毎に整理した。その降雨強度区分毎に, 5箇所のマイクロ

ホンによる測定値の50%値に関してパワー平均値を算出し, 降雨強度に対して図示したものが第5.2図[1,2,3,4]である。また図中の□印は, 第5.1表に示した, 5箇所のマイクロホンによる測定値の50%値に関するパワー平均値 P_{50,AVE}である。

さらに, 試験を実施した導体方式について, コロナハム音の測定値の50%値に関するパワー平均値 P_{50,AVE}に対応する降雨強度を, 第5.2表に整理している。



第 5.2 図 コロナハム音の降雨強度特性
Fig. 5.2 Hum noise levels as a function of rainfall rate.

第 5.2 表 降雨強度特性において $P_{50\text{AVE}}$ と対応する降雨強度

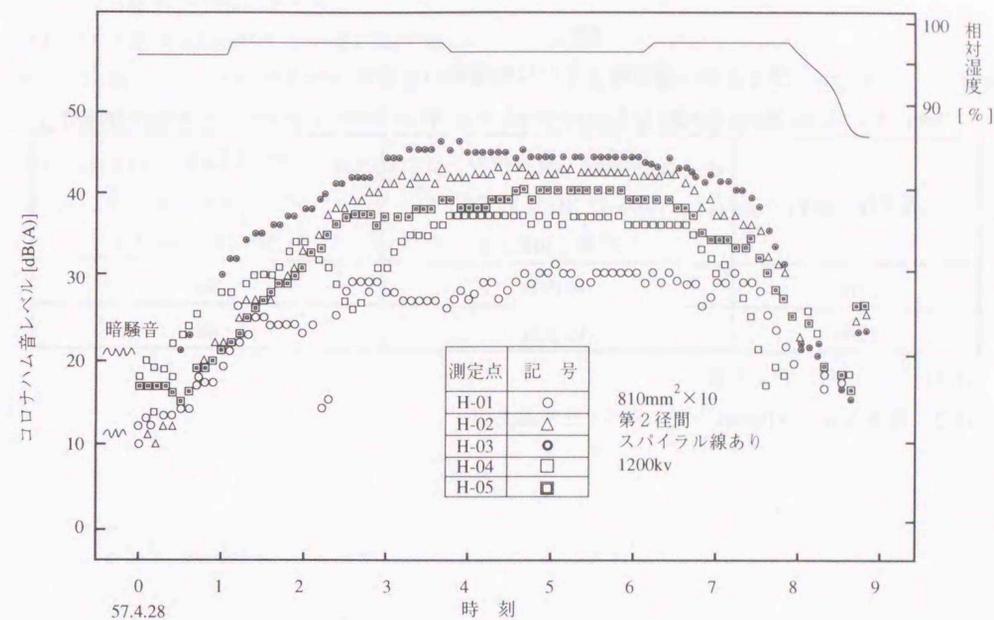
Table 5.2 Precipitation Rates at $P_{50\text{AVE}}$

試験番号	導体方式	素導体配列	スパイラル線の取付方法	課電圧 [kV]	降雨強度 [mm/h]	備考
1	810mm ² ×10	対称	なし	1000	—	第1径間 '83/8~'84/11
				1100	0.45	
				1200	0.55	
				1300	0.73	
2	810mm ² ×10	対称	対密4	1000	—	第2径間 '82/2~'82/8
				1100	0.52	
				1200	0.68	
				1300	0.63	
3	810mm ² ×8	対称	なし	1000	0.35	第2径間 '84/4~'84/11
				1100	0.5	
				1200	0.53	
				1300	0.28	
4	810mm ² ×8	対称	対密4	1000	0.55	第2径間 '82/11~'83/7
				1100	1.6	
				1200	0.5	
				1300	0.5	
5	810mm ² ×6	対称	なし	1000	0.45	第2径間 '85/2~'85/8
				1100	0.38	
				1200	1.1	
				1300	—	
幾何平均					0.55	

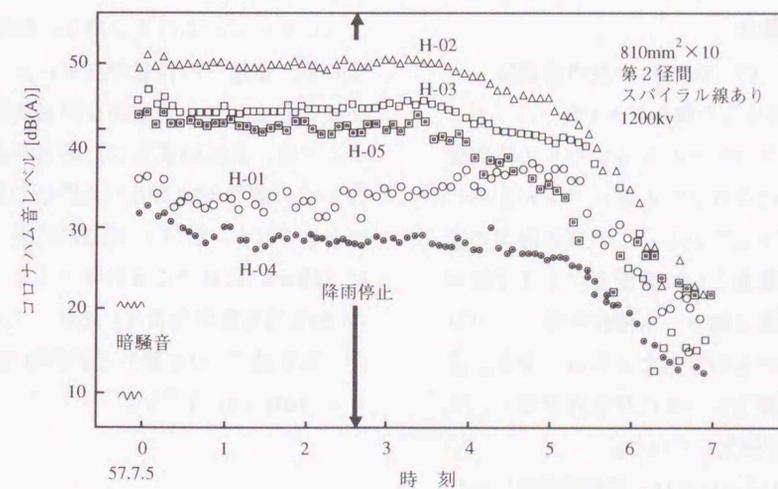
これらの図表より、以下の点が明らかとなった。

- 1) 降雨強度を約 1mm/h 以下とこれを超える範囲に分けた場合、いずれにおいても、コロナハム音レベルは降雨強度の対数にはほぼ比例して増加するが、その上昇率は 1mm/h 以下のほうがやや小さい。
- 2) 全般にスパイラル線を取り付けると、降雨強度に対するコロナハム音レベルの上昇率は小さくなるが、コロナハム音レベルそのものは 10dB 以上高い。

- 3) 約 1mm/h 以下においては、課電圧、すなわち最大導体表面電位の傾き g_{max} が低いほど降雨強度に対するコロナハム音レベルの上昇率が大きい。すなわち、 g_{max} が高いほど降雨強度に対するコロナハム音レベルの上昇率が小さい。
- 4) コロナハム音の測定値の 50% 値に関するパワー平均値 $P_{50\text{AVE}}$ に対応する降雨強度は、おおよそ 0.5mm/h 付近にある。



(1) 霧または高湿度により結露した場合



(2) 雨あがり

第 5.3 図 気象条件の影響

Fig. 5.3 Effects of weather conditions on hum noise level.

第 5.3 表 降雪時あるいは着雪時のコロナハム音レベル

Table 5.3 Hum Noise Levels in Snowy Weather or When Snow is present on Subconductors

課電圧 [kV]	降雪時・着雪時の	降雨時の
	コロナハム音レベル 50%値 [dB(A)]	コロナハム音レベル 50%値 [dB(A)]
1100	36 (92)	42
1200	44 (13)	48

注 1) () 内はデータ数

注 2) 導体方式は 810mm²×8, スパイラル線あり

5.4 霧あるいは高湿度の影響ならびに雨上がりの場合

夜間に高湿度 (97~98%) が長時間継続し、コロナハム音が発生した例を第 5.3 図 (1) [1] に示す。図は湿度とコロナハム音レベルの時間変化である。深夜にコロナハム音レベルが上昇し始め、早朝に低下している。この間の降雨の記録はないので、霧あるいは高湿度による結露が発生し、電線表面に細かい水滴が付着し、コロナ放電が発生したものと考えられる。なお、この間はランダム騒音レベルには変化がなく、コロナハム音のみが発生していた。

また、雨上がりにコロナハム音が長時間にわたり発生した例を第 5.3 図 (2) [1] に示す。

したがって、霧あるいは高湿度ならびに雨上がりのような気象条件下ではコロナハム音が長時間にわたって発生することがあるので、留意する必要がある。

5.5 降雪あるいは着雪の影響

コロナハム音に対する降雪の影響については、雪の質、電線への付着の有無によって大きく異なると考えられ、定量的な評価は困難である。ここでは、比較的安定した降雪があり、電線に数 cm の着雪が観測された場合の測定結果を一例として示す。第 5.3 表 [1] に電圧 1100kV および 1200kV における降雪時コロナハム音レベルの 50% 値を降雨の場合と比較して示す。この場合、降雪時の 50% 値の方が降雨時の 50% 値より 4~6dB (A) 小さい。

5.6 まとめ

赤城試験線において UHV 級導体方式のコロナハム音レベルを長期にわたり連続測定することによって、多数のデータを収集し、その特性を統計的に検討した。その結果、以下の点が明らかになった。

1) 降雨強度はコロナハム音レベルの発生量に大きく影響し、降雨強度の対数にほぼ比例して、

コロナハム音レベルは上昇する。

- 2) コロナハム音の測定値の 50% 値に関するパワー平均値 $P_{50,AVE}$ に対応する降雨強度は、約 0.5mm/h である。
- 3) 霧や高湿度時、さらには降雪・着雪時にもコロナハム音が発生する。

文献

- [1] 笹野, 富田, 田辺, 出口, 原田, 第 1 章 [27]
- [2] Tanabe K., 第 1 章 [127]
- [3] 田辺, 第 1 章 [32]
- [4] Tanabe K., Takebe T., Isozaki M., 第 1 章 [128]

6. 平地における音場分布

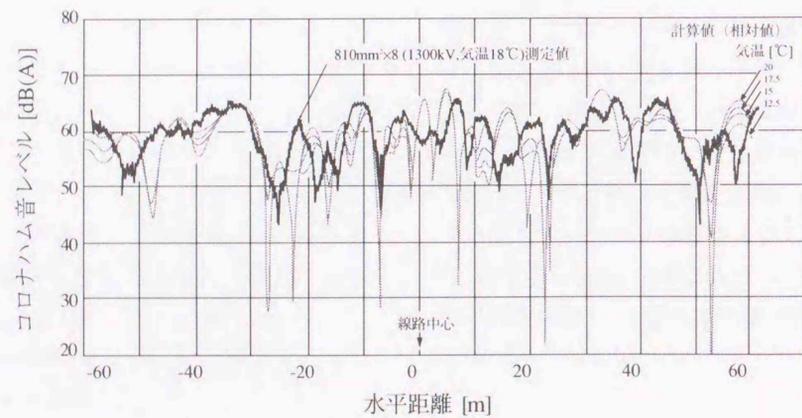
6.1 まえがき

コロナハム音は純音であるため、送電線の各相からの直接波ならびに大地面からの反射波が相互に干渉し合い、複雑な定在波を線下に形成する[1,2,3]。したがって、送電線下のコロナハム音レベルを把握するには、この空間分布を知る必要がある。また、この空間分布の把握は環境問題としてコロナハム音レベルを評価する際にも重要である。

本章では、まず赤城試験線における降雨時の音場分布測定結果を示し、次に平地における音場分布の統計的性質を述べる。

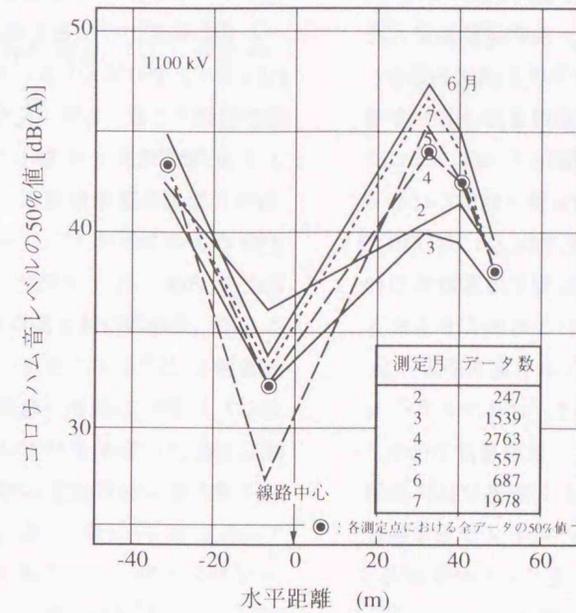
6.2 音場分布の測定結果

第6.1図[2]は空間分布測定設備により、短時間内に線路と直角方向のコロナハム音の分布を降雨の安定している時に測定した例である。図中には、各相の電線の位置、各相の発生量、ならびに気温による波長の違いを考慮したうえで、後述の式(6.1)による計算結果も示している。各相の発生量の違いは各相の g_{max} の違いによるものであり、UHV コロナケージによる試験結果から求めた。図から線路と直角方向に複雑な定在波が形成され、その音圧レベルの極大極小の差は20dBにも及ぶことがわかる。

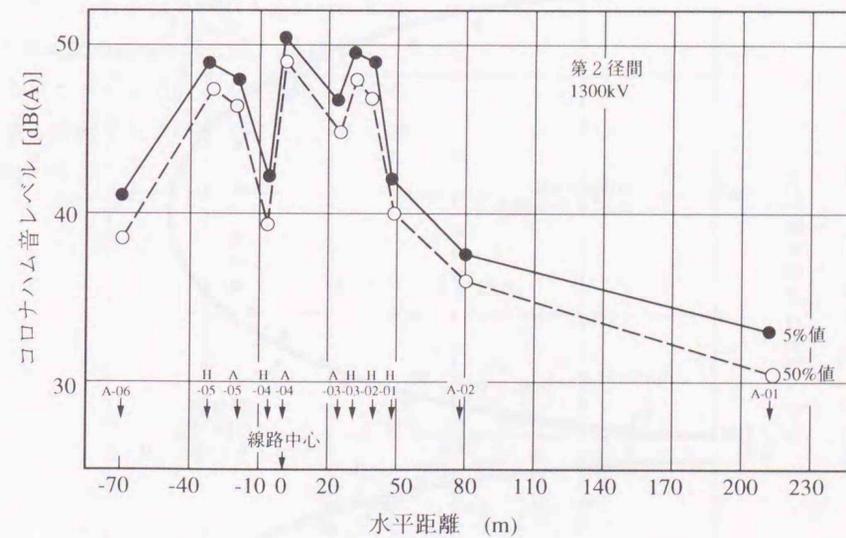


第6.1図 コロナハム音レベルの線路と直角方向の分布 (計算値と実測例)

Fig. 6.1 Calculated and measured lateral profiles of hum noise level.



(1) 810mm²×8, スパイラル線あり

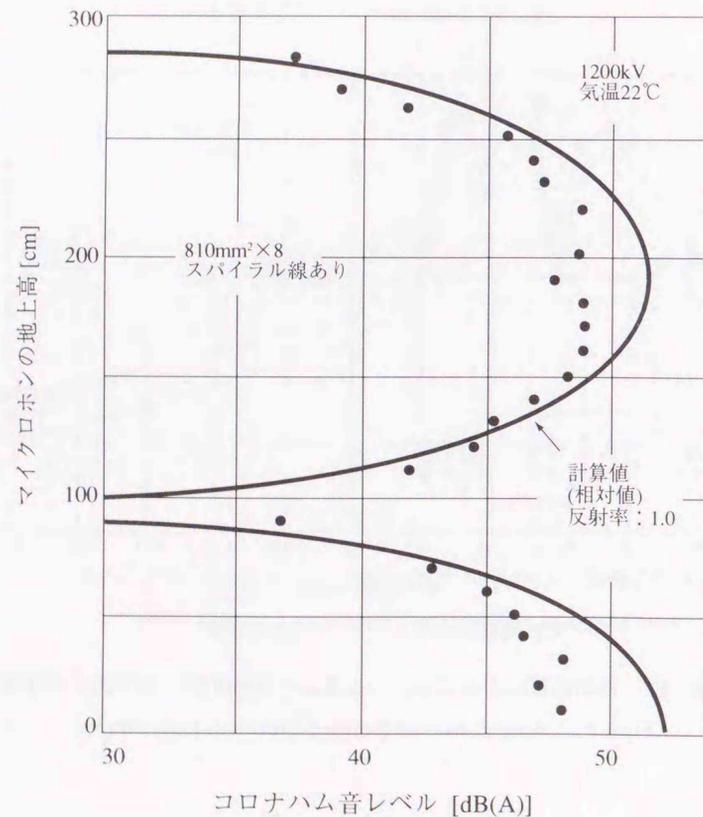


(2) 810mm²×10, スパイラル線あり

第6.2図 長期測定によるコロナハム音レベルの線路と直角方向の分布

Fig. 6.2 Lateral profiles of hum noise levels in long-term test.

第 6.2 図 (1) [2] は、線路と直角方向のコロナハム音レベルの分布として、長期連続測定した結果を月別に整理したものであり、同図 (2) [2] は、コロナ騒音測定設備も流用して、特に多地点のマイクロホンによって降雨日一日のコロナハム音レベルの 5% 値と 50% 値を整理したものである。これらの図から、各測定点におけるコロナハム音レベルの季節的な変化はあるものの、その変化の大きさは定在波による差よりも小さい。また、試験線中央から 100m を超えるような大きな距離スケールで見れば、コロナハム音レベルは減衰している。しかし、試験線直下付近、例えば試験線中央から ±50m の範囲では、離隔に伴うコロナハム音レベルの低下よりも定在波によるコロナハム音レベルの変化の方が大きい。



第6.3図 コロナハム音レベルの鉛直方向分布

Fig. 6.3 Height pattern of hum noise level.

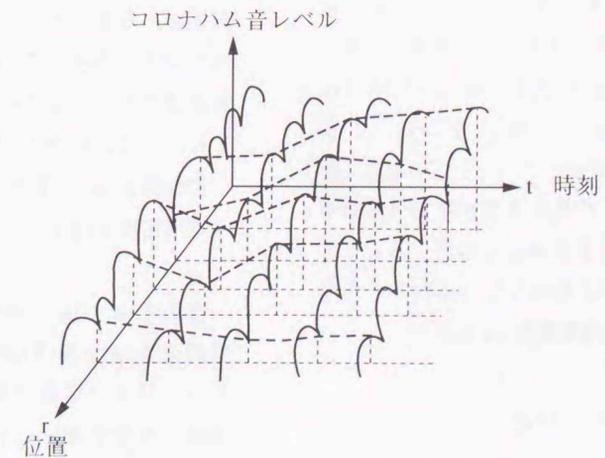
マイクロホンの地上高を変化させて、コロナハム音の鉛直方向分布を測定した例を第 6.3 図 [2] に示す。先の第 6.1 図と同様に、図中には、各相の電線の位置、各相の発生量、ならびに気温による波長の違いを考慮したうえで、後述の式 (6.1) による計算結果も示している。図は、地表面ではコロナハム音レベルが大きく、一旦、地上高 100cm 弱でコロナハム音レベルが下がり、さらに、人の耳の付近から地上高 200cm を超える範囲でコロナハム音レベルが大きくなっていることを示しており、地表面と鉛直方向にも明確な定在波が形成されていることがわかる。また、測定値と計算結果のパターンは良く一致している。

6.3 音場分布の統計的解析 (ランダムウォークモデルの導入)

(1) 時空間におけるコロナハム音の性質

送電線下のコロナハム音レベルは時間の経過に従って (時間的変動)、また位置によっても (空間的変動) 大きく変動する。すなわち、降雨強度がコロナハム音の発生量に影響し、また、気温の変化はコロナハム音の伝搬特性ならびに発生源である各相の電線の位置に影響し、各相電線からのコロナハム音の重なり方が変わるため、結果として線下のコロナハム音レベルが時間的に変動する。また、第 6.2 節に示したように、コロナハム音は純音であるため、線下に複雑な定在波を形成するので、測定位置によってコロナハム音レベルは大幅に変動する。

この時空間にわたるコロナハム音レベルの変動の様子を模式的に第 6.4 図に示す。本節では、このようなコロナハム音レベルの空間における統計的性質を検討することを主眼とし、その確率密度分布を導く。



第6.4図 コロナハム音の時間領域、空間領域における変化

Fig. 6.4 Temporal and spatial variations of hum noise level in time/space domain.

(2) ランダムウォークモデルの導入

送電線の各相の電線から、送電線下のある範囲の地点に到達するコロナハム音の音圧は等しく、また各地点に到達するコロナハム音の位相を一つの集合と捉え、この集合の確率密度は一樣と仮定する。その上で、

「絶対値が等しく、互いの位相が一樣確率密度をもつ N 個のベクトル ξ_i の和 ξ の絶対値 $|\xi|$ の確率密度」 (以下、 N -step ランダムウォークモデル [3])

によって

「地点全体のコロナハム音の音圧の確率密度」

を近似する。

以下、モデルを展開する。

いま、送電線が平地を通過している状態を考え、各相の電線を無限長の線音源とし、各相の電線ならびにそのイメージ音源からある点に到達するコロナハム音の複素音圧 ξ_j を

$$\xi_j = \frac{p_j}{\sqrt{r_j}} \exp\{i(\omega t - \phi_j - \frac{2\pi r_j}{\lambda})\} \quad (6.1)$$

とする。ここで、

- p_j : j 番目の音源のコロナハム音発生量 [Pa]
- r_j : j 番目の音源から今考えている点までの直距離 [m]
- ω : コロナハム音の角周波数 [rad/s]
- ϕ_j : 課電圧の位相 [rad]
- λ : コロナハム音の波長 [m]
- i : 虚数単位

である。

コロナハム音に対する地表面からの反射率を 1 とし、イメージ音源まで考慮した音源数を N とすると、ある点におけるコロナハム音の合成複素音圧 ζ は

$$\zeta = \sum_{j=1}^N \xi_j \quad (6.2)$$

である。ここで、 ξ_j の長さは N -step ランダムウォークモデルから 1 とする。したがって、 $|\zeta|$ の長さは N 以下にしか存在しない。 ξ_j の 2 次元平面上における確率密度関数 $\tau(\xi_j)$ は

$$\tau(\xi_j) = \frac{1}{2\pi} \delta(\xi_j - 1) \quad (6.3)$$

である。ここで、 δ はディラックのデルタ関数

である。

N -step ランダムウォークモデルから $\tau(\xi_j)$ は j によらないので、

$$\tau(\xi) = \tau(\xi_j) \quad (6.4)$$

とする。

合成複素音圧 ζ の確率密度を求めるには、これと逆フーリエ変換の関係にある特性関数を導くのが便利である[4]。合成複素音圧 ζ と複素音圧 ξ_j は式 (6.2) の関係にあるため、 ζ の特性関数 $A_N(\rho)$ は $\tau(\xi)$ の 2 次元逆フーリエ変換の積で表わすことができ[4, 5]、

$$\begin{aligned} A_N(\rho) &= \prod_{j=1}^N \int_{-\infty}^{\infty} \tau(\xi_j) e^{i\rho \xi_j} d\xi_j \\ &= \prod_{j=1}^N \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\rho \xi_j} \delta(\xi_j - 1) d\xi_j \\ &= \left(\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\rho \xi} \delta(\xi - 1) d\xi \right)^N \end{aligned} \quad (6.5)$$

となる。ここで、 ρ は複素ベクトルであり、また、 $\rho \cdot \xi$ はベクトルの内積を表わす（ここで ρ と ξ について、時間関数 $f(t)$ とフーリエ変換の関係にあるスペクトル密度 $F(\omega)$ の関係に対応させて考えてみる。この場合の t は時間、 ω は角周波数であり、 $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ (T : 周期) である。したがって、次の対応関係にあることとなる。

- 特性関数 $A_N(\rho)$ <-> 時間関数 $f(t)$
- 確率密度 $\tau(\xi)$ <-> スペクトル密度 $F(\omega)$
- ρ <-> 時間 t
- 音圧 ξ <-> 角周波数 ω

時間関数 $f(t)$ を周期 T をもつ波の合成で表わすのがフーリエ逆変換であるので、特性関数は、波高値が確率密度 $\tau(\xi)$ で、その擬似的な角周波数が ξ である波の合成で表わされていると考えることができる。また、 $\rho = 2\pi / \xi$ である。

複素ベクトル ρ と複素音圧 ξ を 2 次元平面上に適当に定めると、

$$A_N(\rho) = J_0^N(\rho) \quad (6.6)$$

となる。 J_0^N は 0 次のベッセル関数である。

特性関数 $A_N(\rho)$ と合成複素音圧 ζ の確率密度関数 $\tau_N(\zeta)$ はフーリエ変換対の関係にあるので、 $\tau_N(\zeta)$ は

$$\tau_N(\zeta) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} J_0^N(\rho) e^{-i\rho \zeta} d\rho \quad (6.7)$$

である。 ρ と ζ を 2 次元平面上に適当に定めると、

$$\tau_N(\zeta) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \rho J_0(\rho|\zeta|) J_0^N(\rho) d\rho \quad (6.8)$$

となる。いま、 $\tau_N(\zeta)$ は ζ の偏角 θ にはよらず、

$$\begin{aligned} \tau_N(|\zeta|) &= \int_0^{2\pi} |\zeta| \tau_N(\zeta) d\theta \\ &= 2\pi |\zeta| \tau_N(\zeta) \end{aligned} \quad (6.9)$$

となる。したがって、 $\tau_N(|\zeta|)$ は

$$\tau_N(|\zeta|) = |\zeta| \int_0^{\infty} \rho J_0(\rho|\zeta|) J_0^N(\rho) d\rho \quad (6.10)$$

となる。

次に、式 (6.10) の音圧の確率密度関数 $\tau_N(|\zeta|)$ を音圧レベル P の確率密度関数 $\tau_N(P)$ に式 (6.11) により変換する。

$$\begin{aligned} \tau_N(P) &= \frac{d|\zeta|}{dP} |\zeta| \tau_N(|\zeta|) \\ &= \frac{\ln(10)}{20} |\zeta| \tau_N(|\zeta|) \end{aligned} \quad (6.11)$$

ここで、 P は

$$P = 20 \log(|\zeta|) \quad (6.12)$$

である。また、 $\tau_N(P)$ の累積確率分布 $Q_N(P)$ は

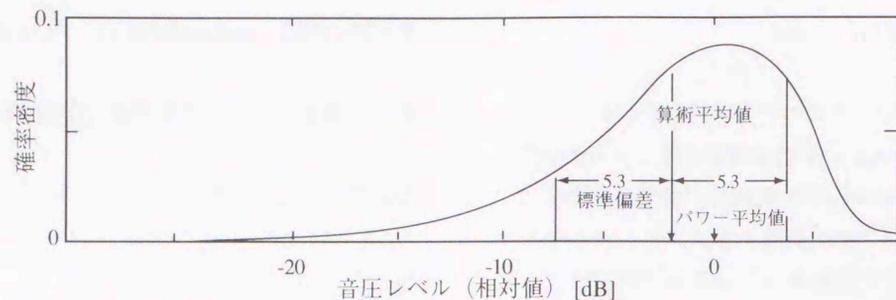
$$Q_N(P) = \int_{-\infty}^P \tau_N(P') dP' \quad (6.13)$$

である。

式 (6.10) の確率密度関数 $\tau_N(|\zeta|)$ について、 N が 3 以上では解析的に値を求められない ($N=2$ の場合については付録 6.1 を参照)。その場合についてはコンピュータによる数値計算により、式 (6.10) ~ (6.13) を用い、音圧レベルの確率密度関数 $\tau_N(P)$ 、さらに累積確率分布 $Q_N(P)$ を計算した。

3 相垂直 2 回線送電線では、地表面のコロナハム音を考えると、音源数は 6 である。

この場合の音圧レベルの確率密度関数 $\tau_6(P)$ 、さらに累積確率分布 $Q_6(P)$ を第 6.5 図[3]と第 6.6 図[3]に示す。図中の傾斜 45 度の右上がりの直線は式 (6.13) から求めたもので、もう一つは後述のデータをプロットした例であり、縦軸は適当な変換により累積確率分布が傾斜 45 度の右上がりの直線で表わせるようになっている。第 6.1 表にはこの場合の音圧レベルの加算平均値、標準偏差 σ 、パワー平均値 P_{ave} (音圧の二乗平均値の常用対数の 10 倍)、および 50% 値を示している。第 6.5 図と第 6.6 図の横軸はこの P_{ave} を用いて規格化している。すなわち、横軸の 0dB は $P_{ave} = 7.8\text{dB}$ に対応する。



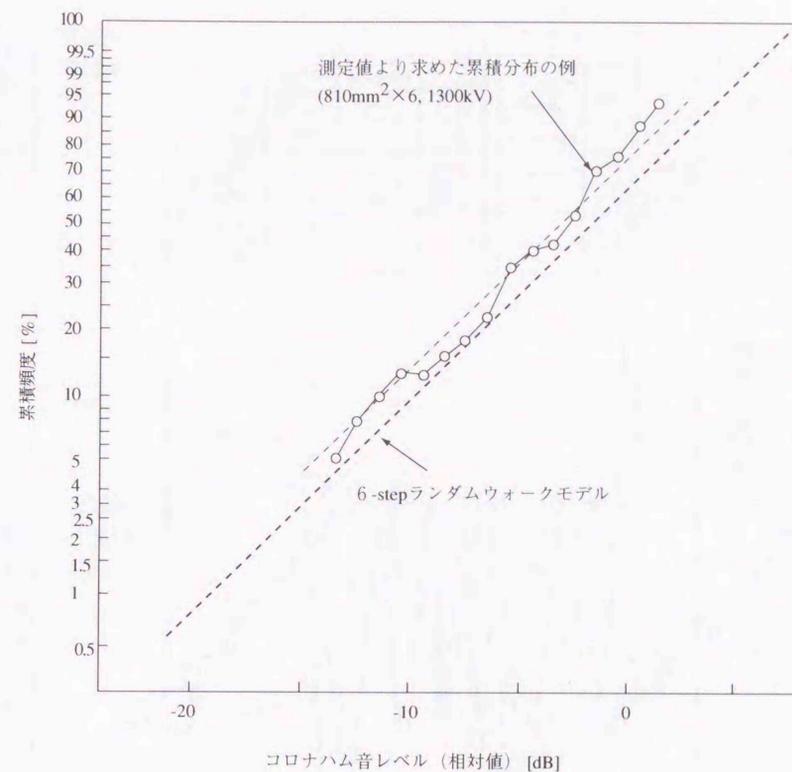
第6.5図 N-stepランダムウォークモデルによるコロナハム音レベルの確率密度 (音源数: 6)

Fig. 6.5 Probability density function of hum noise level when the number of noise sources is 6.

第 6.1 表 N-step ランダムウォークモデルの統計量 (単位: dB) [3]

Table 6.1 Hum Noise Level Statistics of N-Step Random Walk Model (Unit: dB)

音源数	加算平均値	標準偏差	パワー平均値	50%値
2	0	12.5	3.0	3
3	1	4.9	4.8	3.4
4	3.8	5.3	6	5
5	4.6	5.2	7	5.8
6	5.6	5.33	7.8	6.5
7	6.2	5.3	8.5	7.2
8	6.8	5.4	9	7.7
9	7.3	5.4	9.5	8.2
10	7.9	5.4	10	8.7
11	8.3	5.4	10.4	9.1
12	8.8	5.5	10.8	9.4



第6.6図 コロナハム音レベルの累積確率分布 (音源数: 6)

Fig. 6.6 Cumulative distribution of hum noise level when the number of sources is 6.

(3) N-step ランダムウォークモデルの検証

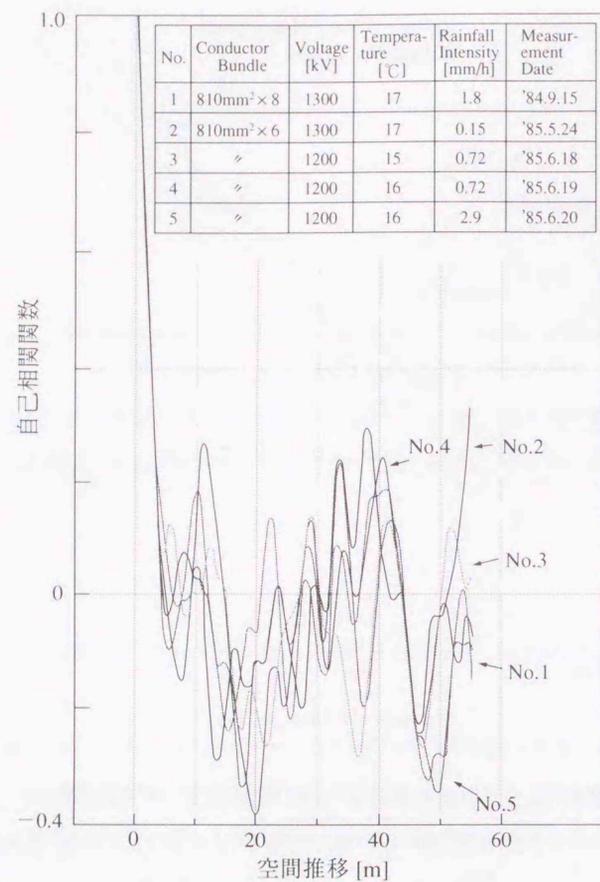
1) データの独立性

試験線下において空間的に連続に測定したコロナハム音レベルの線路と直角方向の分布から、線下のコロナハム音レベルの平均値や確率密度について検討する際には、互いに独立なデータによるべきである (付録 6.2 参照)。例えば、残響室における音圧 (時間関数) の空間相関は、音波の波長を λ とした場合、 $\lambda/2$ 毎に零となることが示されており [6], 残響室における音圧の統計的性質を検討するには、この $\lambda/2$ 毎にサンプリングしたデータから行われている。第 6.7 図 [3] は、複数の、試験線と直角方向のコロナハム音レベルの (空間) 分布

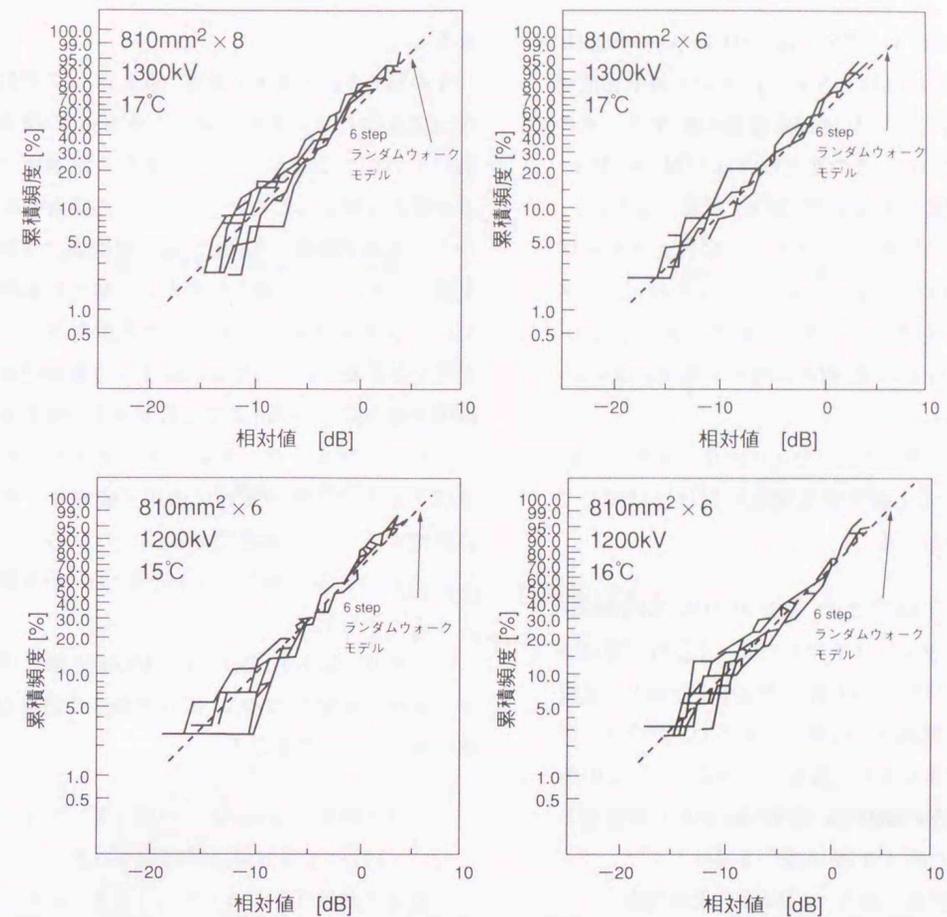
の自己相関関数 [7] である。図より、明確な周期性は認められない。したがって、完全に独立なデータを得ることは困難であることがわかるが、先の残響室における音圧の空間相関が $\lambda/2$ 毎に零となることを参考に、データを 3.4m 程度 (気温 15 度の場合の波長に相当) にサンプリングすれば、最悪でも相関を 0.4 以下とすることができる。

2) モデルの検証

先の第 6.6 図と第 6.8 図 [3] に測定結果から求めた累積確率分布を示している。第 6.8 図は多数測定した空間分布から得た各々の累積確率分布を測定時の課電圧、導体方式、および気温毎に分類して示している。



第6.7図 コロナハム音レベルの線路と直角方向の分布に関する自己相関関数
Fig.6.7 Auto-correlation function with respect to lateral profile of measured hum noise level.



第6.8図 種々の条件における線路と直角方向の分布に関する累積分布
Fig. 6.8 Cumulative distributions with respect to measured lateral profile of hum noise in various cases.

累積確率分布は右上がりの傾斜 45 度の直線によくのっており、N-step ランダムウォークモデルは測定結果とよく対応している。

すなわち、「地点全体のコロナハム音の音圧の確率密度」は N-step ランダムウォークモデル:「絶対値が等しく互いの位相が一樣確率密度をもつ N 個のベクトル ξ_i の和 ξ の絶対値 $|\xi|$ の確率密度」によって近似できることがわかる。

6.4 ランダムウォークモデルによる音場分布の統計的性質のシミュレーション

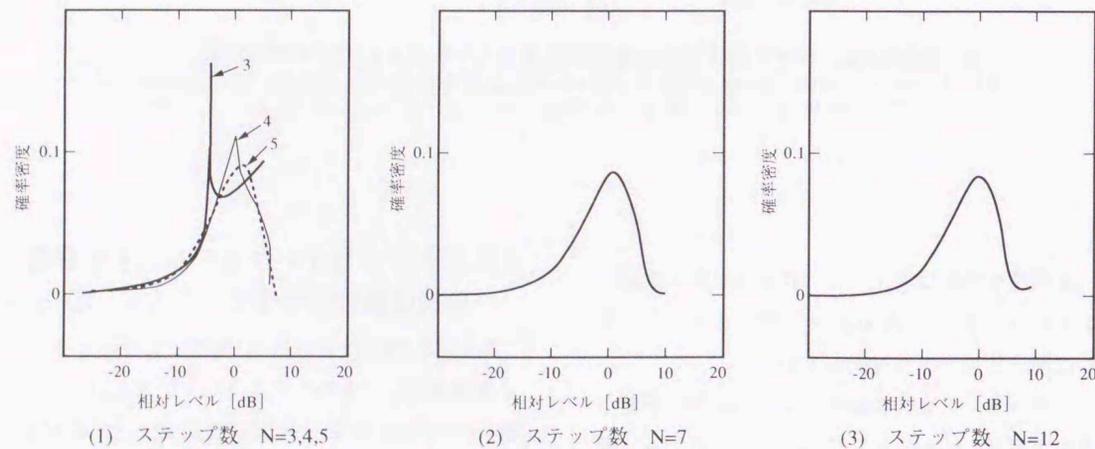
第 6.9 図[3]には音源数 N(実際の音源とイメージ音源を足したもの)が 3, 4, 5, 7, および 12 の場合の音圧レベルの確率密度関数 $\tau_N(P)$ を示している。これらの横軸は N が 6 の場合と同様に先の第 6.1 表に並記した各々の N に対応する P_{ave} を用いて規格化している。3 相 1 回線送電線や 4 回線送電線の場合のコロナハム音レベルの確率密度関数がこれからわかる。

音源数 N が 3 の場合には、音圧レベルが 4.8dB (音圧では 1 に相当する) において確率密度がピークを持ち、一旦、確率密度が下がり、その後上昇している。この変化傾向は、 N が 4 以上の場合と異質であるが、付録 6.3 に示すように、音圧が 1 と 3 の付近 (1 ステップ目と 2 ステップ目の位相差が $0, \pi$, ならびに 2π の付近。2 ステップ目と 3 ステップ目の位相差が $0, \pi$, ならびに 2π の付近) の位相差に対する傾斜が緩やかなためである。

また、先の第 6.5 図と第 6.9 図からステップ数が 6 を超えると確率密度関数の形はほぼ同じであることがわかる。

6.5 ランダムウォークモデルの適用範囲

ランダムウォークモデルでは、「各相の電線から発生したコロナハム音が空气中を伝搬し、送電線下のある範囲内では等しい音圧で、かつランダムな位相で重なる」と仮定しているの、この条件を満足する空間的な範囲を知ることが重要と



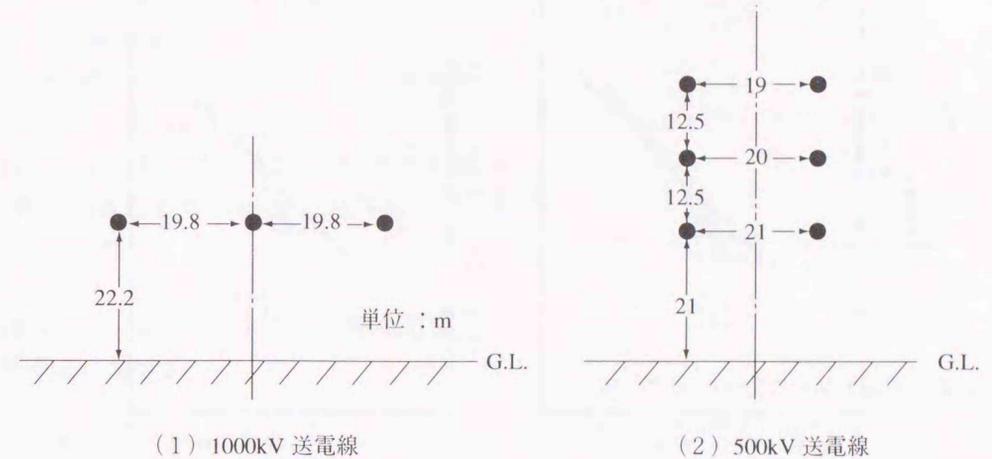
第6.9図 N-stepランダムウォークモデルによるレベルの確率密度分布
Fig. 6.9 Probability density function for hum noise level obtained using N-step random walk model.

なる。

先の第 6.6 図と第 6.8 図は、第 2.18 図の空間分布測定設備による線路中央から $\pm 60\text{m}$ の測定結果についてランダムウォークモデルが適用できるか否かを検討したものである。この検討の結果から、赤城試験線 (1000kV 級 3 相垂直 2 回線送電線) においては、線路中央から $\pm 60\text{m}$ の範囲内ではランダムウォークモデルが適用できることが明らかとなった。この $\pm 60\text{m}$ という数値は試験線の上相の高さ 68.5m よりも若干小さい値である。

しかしながら、ランダムウォークモデルが送電線下のどの程度の範囲に適用可能かを、厳密に決定することは困難である。このため、コンピュータによる音場シミュレーションから検討することとした。

ここでは、第 6.10 図に示す 1000kV 級 3 相水平 1 回線送電線と 500kV 級 3 相垂直 2 回線送電線の場合について考える。



第6.10図 送電線の装柱

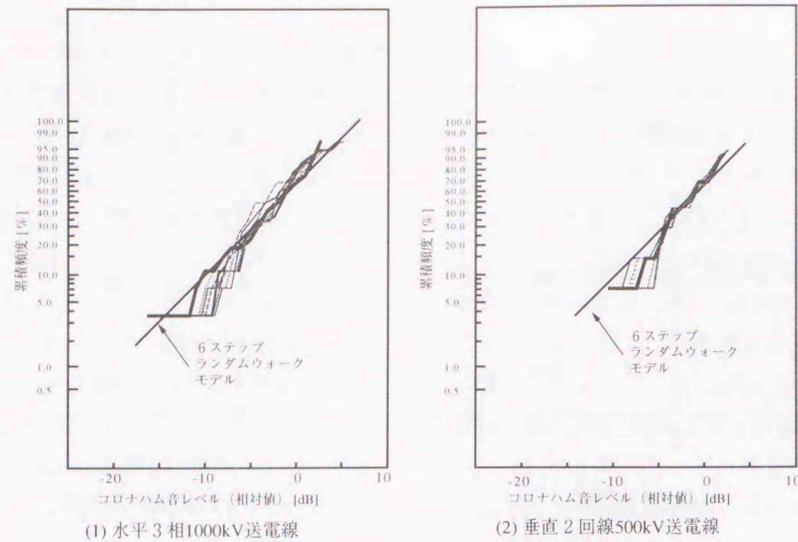
Fig. 6.10 Conductor configurations.

- (1) まず、各々のケースにおいて各相からのコロナハム音の発生量は等しいとし、式 (6.1) から、コロナハム音の線路と直角方向の分布を気温をパラメータに計算した。ここで、1000kV 級 3 相水平 1 回線送電線の場合には地上 1.5m の位置の音圧レベルを、500kV 級 3 相垂直 2 回線送電線の場合には地表面での音圧レベルを計算した。したがって、いずれの場合もステップ数 N は 6 である。計算範囲は線路中心から両方向に上相の高さの範囲とした。
- (2) 次に、計算したコロナハム音の線路と直

角方向の分布から自己相関関数を計算した。この結果、先の第 6.3 節(3)における検討結果と同様に、音波の波長間隔でサンプリングすれば、比較的独立なデータが得られることがわかった。

- (3) 第 6.11 図[3]は各々のケースの累積確率分布である。各々の累積確率分布は右上がりの傾斜 45 度の直線に、比較的よくのっている。

したがって、ランダムウォークモデルは線路中心から両方向に上相の高さ程度の範囲内では適用できると考えられる。



第6.11図 水平3相1000kV送電線と垂直2回線500kV送電線に対するランダムウォークモデルの適用
Fig. 6.11 Application of random walk model to horizontal 3-phase 1000 kV transmission line and 3-phase, vertical double-circuit 500 kV transmission line.

6.6 まとめ

本章では、送電線下のコロナハム音レベルの空間分布特性とその統計的性質について検討した。主要な結果を以下に示す。

- 1) コロナハム音は送電線と直角方向に複雑な定在波を形成し、その音圧レベルの極大極小の差は20dBにも及ぶ。
- 2) コロナハム音は地表面と鉛直方向にも定在波を形成する。
- 3) 試験線中央から100mを超えるような大きな距離スケールで見れば、コロナハム音レベルは減衰しているものの、試験線直下付近、例えば試験線中央から±50mの範囲では、離隔に伴うコロナハム音レベルの低下よりも定在波によるコロナハム音レベル変化の方が大きい。
- 4) 上記に着目し、N-step ランダムウォークモデル：「絶対値が等しく互いの位相が一樣確率密度をもつ N 個のベクトル ξ_j の和 ξ の絶対

値 $|\xi|$ の確率密度」を導入し、「地点全体のコロナハム音の音圧の確率密度」を近似することを試み、その有効性を明らかにした。

- 5) ランダムウォークモデルの適用範囲は送電線中心から、送電線と直角方向の両側に、およそ上相の高さの範囲内である。

文献

- [1] General Electric Company, 第1章{107}
- [2] 笹野, 富田, 田辺, 出口, 原田, 第1章[27]
- [3] Tanabe K., 第1章{126}
- [4] 宮脇., 「雑音解析」, 朝倉書店, pp. 25-28, 昭和57年
- [5] 「岩波理化学辞典」, 岩波書店, pp. 941, 昭和58年
- [6] Cook R. K., Waterhouse R. V., Berendt R. D., Edelman S., and Thompson M. C., "Measurement of correlation coefficients in reverberant sound field," Journal of Acoustical

Soc. of America, Vo. 27, No. 6, pp. 1073, November 1955

- [7] 「時系列モデル入門」, A.C. Harvey, 東京大学出版会, pp. 25-27, 昭和60年
- [8] 森口, 宇田川, 一松, 「数学公式 III-特殊関数」, 岩波書店, 第15刷, pp. 194, 昭和52年

付録6.1 音圧レベルの確率密度関数 (Nが2の場合)

式(6.8)からNが2の場合

$$\tau_2(\zeta) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \rho J_0(\rho|\zeta|) J_0^2(\rho) d\rho \quad (\text{A.6.1})$$

であり、式(A.6.1)は

$$\tau_2(\zeta) = \frac{1}{\pi^2 |\zeta| \sqrt{4 - |\zeta|^2}} \quad (\text{A.6.2})$$

となる[8]。 ζ の偏角の確率分布を考慮し、音圧の確率密度は

$$\tau_2(|\zeta|) = \frac{2}{\pi \sqrt{4 - |\zeta|^2}} \quad (\text{A.6.3})$$

となる。これを音圧レベルの確率密度に変換すると

$$\tau_2(P) = 0.1151 \cdot 10^{P/20} \frac{2}{\pi \sqrt{4 - 10^{P/10}}} \quad (\text{A.6.4})$$

となる。

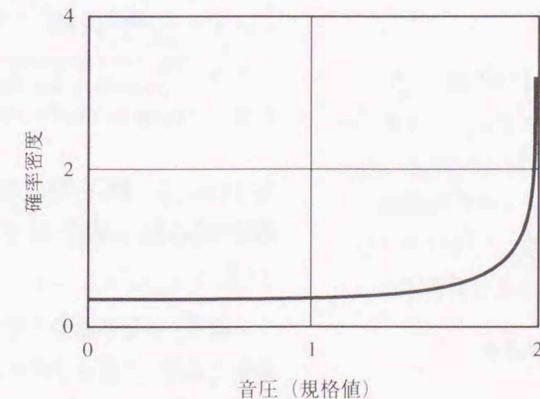
上記の音圧と音圧レベルの確率密度を、それぞれ付6.1図と付6.2図に示す。

Nが2の場合の確率密度は次のようにしても求めることができる。音圧 ζ は、2次元平面上で、1ステップ目と2ステップ目の偏角を θ_1 と θ_2 とすれば、

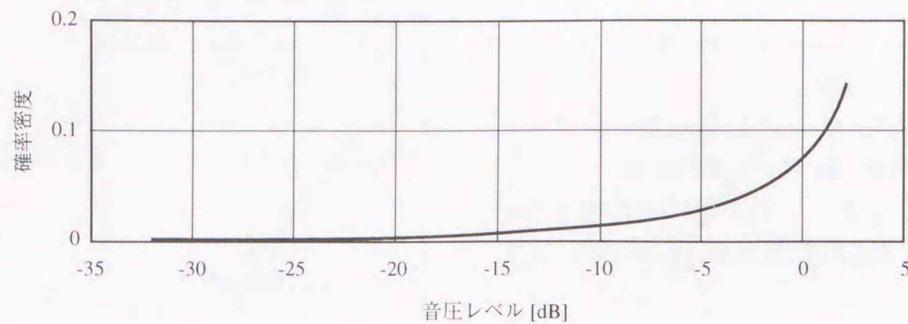
$$\zeta = \sqrt{2(1 + \cos\theta)} \quad (\text{A.6.5.1})$$

$$\theta = \theta_1 - \theta_2 \quad (\text{A.6.5.2})$$

と表わすことができる。



付6.1図 ランダムウォークモデルによる音圧の確率密度 (音源数=2)
Fig. A-6.1 Probability density function of sound pressure when the number of noise sources is 2.



付6.2図 ランダムウォークモデルによる音圧レベルの確率密度 (音源数=2)
Fig. A-6.2 Probability density function of sound pressure level when the number of noise sources is 2.

θ の確率密度 $\tau(\theta)$ は、 θ_1 と θ_2 の確率密度が $1/(2\pi)$ であるので、

$$\tau(\theta) = \frac{1}{2\pi} \quad (\text{A.6.6})$$

となる。音圧 ζ は θ に対して示すと付 6.3 図のようになる。

音圧 ζ が $(\zeta, \zeta + d\zeta)$ の間にある確率素分 $\tau_2(\zeta)d\zeta$ は

$$\tau_2(\zeta)d\zeta = \frac{1}{\pi} d\theta \quad (\text{A.6.7})$$

であり、 $d\theta$ は

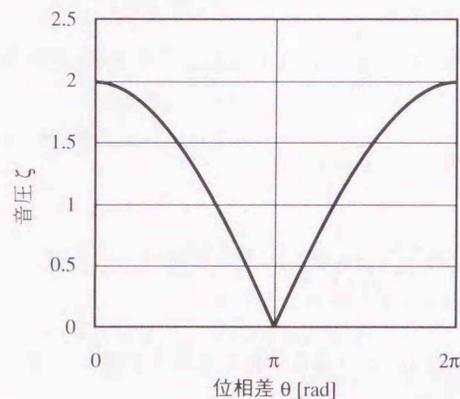
$$d\theta = \frac{2}{\sqrt{4-\zeta^2}} d\zeta \quad (\text{A.6.8})$$

であるので、結局、 $\tau_2(|\zeta|)$ は

$$\tau_2(|\zeta|) = \frac{2}{\pi\sqrt{4-\zeta^2}} \quad (\text{A.6.9})$$

となる。この式は先の式 (A.6.3) に他ならない。

また、付 6.1 図と付 6.3 図とから、位相差 θ に対する音圧 ζ の傾斜が緩やかなほど確率密度が大きくなっていることがわかる。



付6.3図 ステップ数Nが2の場合の音圧と位相差の関係

Fig. A-6.3 Relationship between sound pressure, ζ and phase difference, θ when the number of noise sources is 2.

付録 6.2 線下のコロナハム音レベルを統計的に扱う場合のデータの独立性について

一般に、ある分布をしている確率密度関数の平均値を m とし、測定された n 個の値を $m+x_1, m+x_2, \dots, m+x_n$ とする。 n 個の測定値から平均値 Y を求めるといふ試行を多数回行った場合、 Y の値の分散 σ_Y^2 は次の式で表わされる。

$$\begin{aligned} \sigma_Y^2 &= \overline{(Y-m)^2} = \frac{1}{n^2} \overline{(x_1+x_2+\dots+x_n)^2} \\ &= \frac{1}{n^2} (\overline{x_1^2} + \overline{x_2^2} + \dots + \overline{x_n^2} + 2\overline{x_1x_2} + \dots + 2\overline{x_1x_n} + \dots) \end{aligned} \quad (\text{A.6.10})$$

ここで、 $\overline{x_1^2}, \overline{x_2^2}, \dots, \overline{x_n^2}$ は同じ確率密度の分散であるから σ^2 で表わし、 x_1 と x_2 との相関を $\rho_{1,2}$ で表わすと

$$\rho_{1,2} = \overline{x_1x_2} / \sigma^2 \quad (\text{A.6.11})$$

であるから、 Y の分散は次式で表わされる。

$$\sigma_Y^2 = \frac{\sigma^2}{n} \left(1 + \sum_{i \neq j} \rho_{ij}\right), \quad i \neq j \quad (\text{A.6.12})$$

すなわち、標本点間の相互相関がなければ

$$\sigma_Y = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.6.13})$$

となる。逆に、相関があれば、その分散は大きくなる。

以上のことは、送電線下のコロナハム音レベルの空間分布を測定し、その平均値を算出する場合に重要であり、独立なデータでなければ、それらの平均値は真の平均値から大きくずれる可能性のあることがわかる。

また、一般に確率密度がある分布をしている集合の分散を σ とし、これから測定されるデータが互いに相関 1 のデータばかりであるとすれば、これらのデータは等しい値を持つため、分散は 0 となり、真の分散の値から大きくずれる結果となる。同様に確率密度についても、等しい値において確率を持つのみとなる。したがって、測定データから分散や確率密度を検討する際にもデータの独立性は重要である。

付録 6.3 ステップ数 N が 3 の場合の音圧の確率密度関数について

ステップ数 N が 3 の場合の音圧 ζ は次のように考えることができる。

音圧 ζ は、2次元平面上で、1ステップ目、2ステップ目、3ステップ目の偏角を θ_1 と θ_2 と θ_3 とすれば、

$$\begin{aligned} \zeta &= \\ &= \sqrt{3 + 2\cos(\theta_1 - \theta_2) + 2\cos(\theta_2 - \theta_3) + 2\cos(\theta_3 - \theta_1)} \end{aligned} \quad (\text{A.6.14})$$

と表わすことができる。ここで

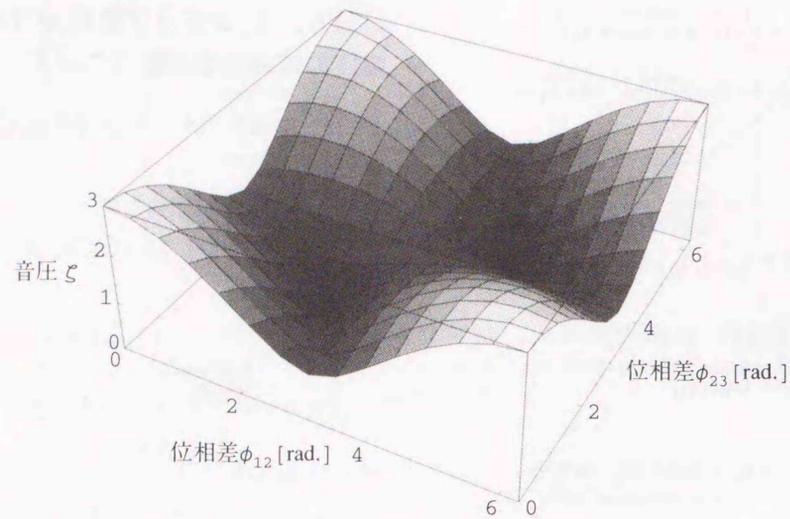
$$\begin{aligned} \phi_{12} &= \theta_1 - \theta_2 \\ \phi_{23} &= \theta_2 - \theta_3 \\ \phi_{31} &= \theta_3 - \theta_1 = 2\pi - (\phi_{12} - \phi_{23}) \end{aligned} \quad (\text{A.6.15})$$

とすると、 ϕ_{12}, ϕ_{23} の確率密度 $\tau(\phi_{12}), \tau(\phi_{23})$ は、 θ_1 と θ_2 の確率密度が $1/(2\pi)$ であるので、

$$\tau(\phi_{12}) = \tau(\phi_{23}) = \frac{1}{2\pi} \quad (\text{A.6.16})$$

となる。

付 6.4 図に音圧 ζ を ϕ_{12}, ϕ_{23} に対して示した。図より、音圧が 1 となる付近 (例えば、 $\phi_{12} = \pi, \phi_{23} = 0$ の点) は位相差 ϕ_{12}, ϕ_{23} に対して音圧の傾斜が小さく、確率密度が大きくなることを示している。このことは、音圧が 3 の付近についても同様である。



付6.4図 ステップ数が3の場合の音圧と位相差の関係
 Fig. A-6.4 Relationship between sound pressure, R and phase differences, ϕ_{12} , ϕ_{23} when the number of noise sources is 3.

7. 音場分布に対する地形（谷間）の影響

7.1 まえがき

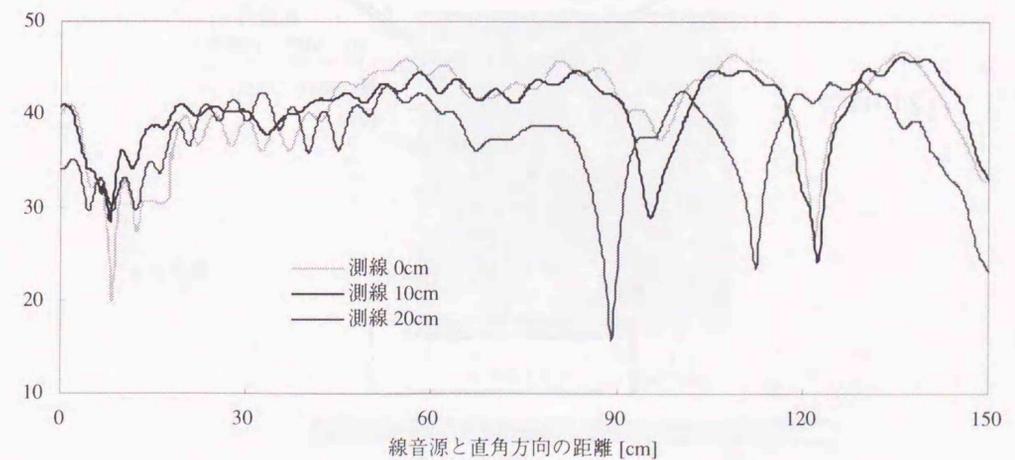
我が国においては、500kV 以上の大型送電線は山相を通過することが多く、谷間を横断するような場合も多々ある。このような場合には、谷間を形成する斜面が音波を多重反射することもあり、先の平地の場合とは違った音圧レベルの確率分布と空間分布を持つようになると考えられる。この場合の音場の空間分布特性ならびに統計的性質を知ることは、環境問題としてコロナハム音レベルを評価するうえで極めて重要である。なお、コロナハム音のような、純音の場合の音場についての統計的性質に関しては、残響室内における検討[1]があるが、ここに述べる送電線下の場合とは条件が異なる。

7.2 V字谷モデルによる測定結果

第2章のV字谷モデル（第2.19図再掲を参照）による、斜面角30度の場合の音圧レベルの連続

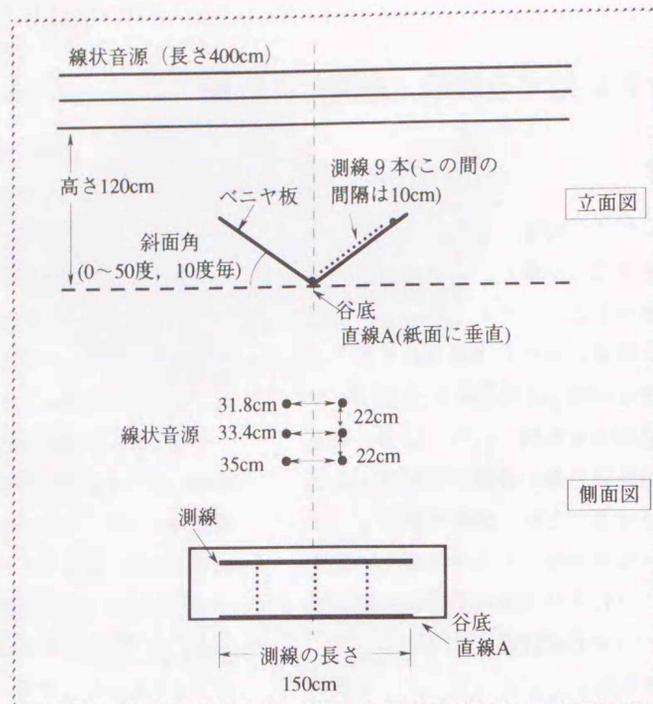
測定例を第7.1図に示す。谷底の中央を示す直線Aから斜面に沿った直角方向の距離をもって、測線を示した。すなわち、直線Aと平行で、直線Aと一致するものを測線0cm、直線Aから10cmのものを測線10cm、直線Aから20cmのものを測線20cmとした。音圧レベルの極大極小の差は最大で30dBにも及ぶことがわかる。

第7.2図(1)~(3)（斜面角10, 30, 50度）は各測線における音圧レベルの測定結果をもとに、音場を等音圧レベル線図で表わしたものである。斜面角が大きくなるにしたがって、音源と平行方向に音圧レベルの変化が顕著になってくるのがわかる。また、斜面角が大きくなるに従って音圧レベルの高い部分が増えている様子もわかる。これは、斜面角が大きくなるにしたがって反射回数が多くなり、向かい合う斜面が音波を多重反射するためと考えられる。

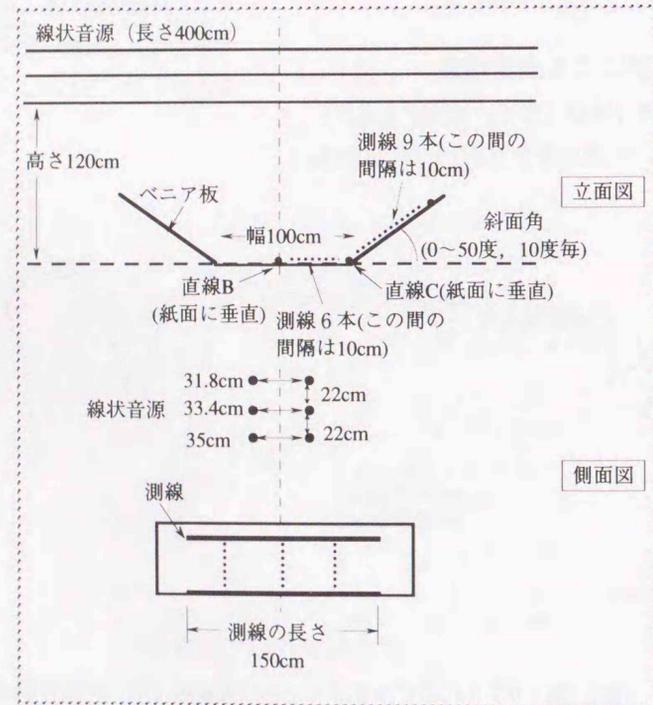


第7.1図 V字谷における音圧レベルの連続測定例（斜面角30度）
 Fig. 7.1 Profiles of measured sound pressure level in the case of a V-shaped valley (slope=30 degrees).

(1) V字谷



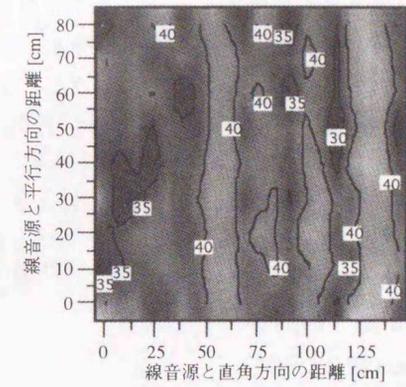
(2) U字谷



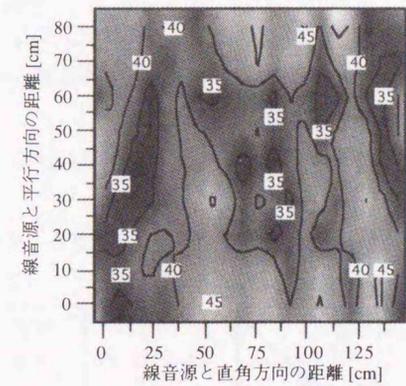
第 2.19 図 V 字谷, U 字谷の模型と実験条件 (再掲)

Fig. 2.19 V-shaped valley model, U-shaped valley model and experimental conditions.

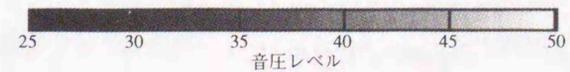
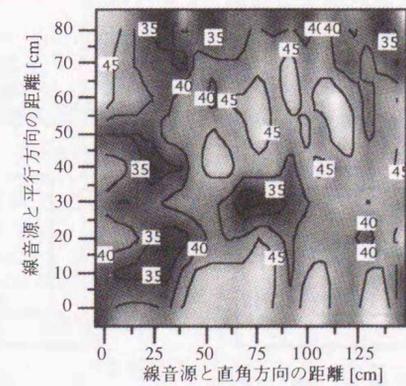
(1) 斜面角 10 度



(2) 斜面角 30 度



(3) 斜面角 50 度



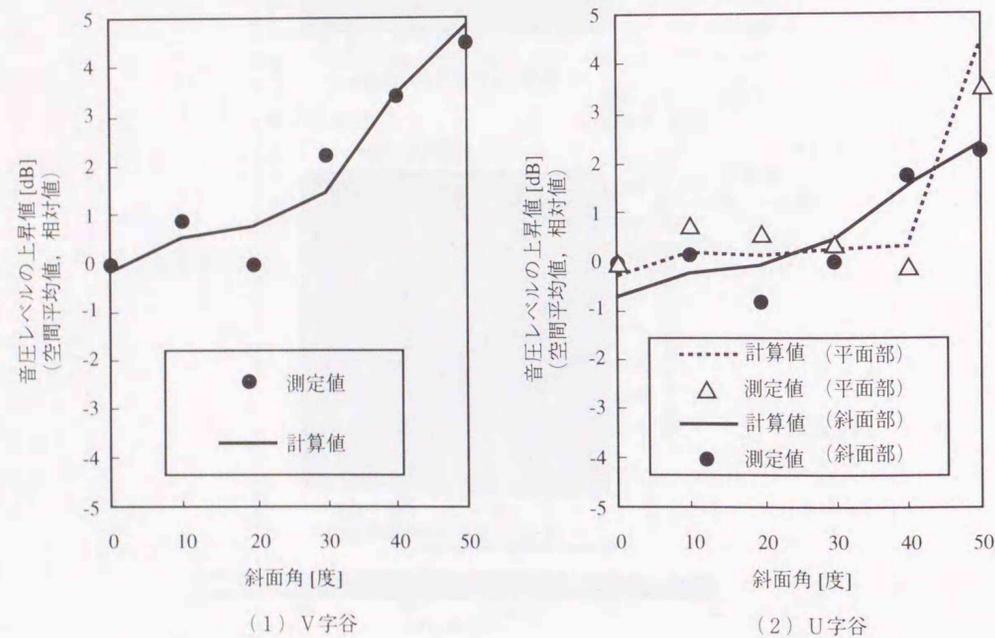
第 7.2 図 V 字谷における音圧レベル分布の測定例

Fig. 7.2 Measured distributions of sound pressure level in the case of a V-shaped valley.

7.3 音圧レベルの空間平均値

平地の場合を基準として、音圧レベルの空間平均値(式(7.1)によるパワー平均値)の上昇値を、V字谷の場合は第7.3図(1)に、またU字谷の場合は第7.3図(2)に示した。V字谷の場合には測線0, 10, ならびに20cmに沿った測定値から音圧レベルの空間平均値を求めた。また、U字谷の底の平面部では、平面の中央、すなわち直線B上の測線、直線Bから10cm離れた測線、ならびに直線Bから20cm離れた測線に沿った測定値から音圧レベルの空間平均値を求めた。さらに、U字谷の斜面部の場合には、斜面の始まる直線C上の測線、直線Cから10cm離れた測線、ならびに直線Cから20cm離れた測線に沿った測定値から音圧レベルの空間平均値を求めた。

図中の折れ線は音場シミュレーションからの



第7.3図 音圧レベルの上昇値に対する斜面角の影響
 Fig. 7.3 Influence of slope on spatial mean value of sound pressure level.

計算結果であり、次節以下で詳述する。空間平均値を求める際のデータは1波長間隔毎にサンプリングし、各データ間の独立性を保ち、空間平均値を求める際の誤差を少なくなるようにした[2]。

$$P_{ave} = 10 \log \left[\frac{\sum_{i=1}^N 10^{P_i/10}}{N} \right] \quad (7.1)$$

ここで、

- P_{ave} : 空間平均値 [dB]
- P_i : 音圧レベルのサンプリング値 [dB]
- N : サンプリングされたデータ数

である。

7.4 音場のシミュレーションアルゴリズム

種々の送電線下の谷間における音場の空間分布特性ならびに統計的性質を知るためには、音場の空間分布をシミュレーションできることが望ましい。以下に、本研究で開発したシミュレーションアルゴリズムとこれによるシミュレーション結果を示す。

(1) 音場シミュレーションにおける仮定

音場をシミュレートするにあたり下記の仮定を設けた。

- 1) 音源はカテナリー曲線で架線されている各相の電線であり、これを複数の線音源で近似する。
- 2) 音波が空气中を伝搬する際の吸収は無視する。
- 3) 地表面は場所によらず反射率を1とする。
- 4) 地表面は複数の平面で近似する。

実際の電線はある体積を持ったものであり、さらに多導体のこともある。なおかつ、コロナハム音が発生するのは電線周囲の空間と考えられ、実際には音源は線音源ではないが、音波の波長で数波長離れた位置においては、1)の仮定は近似的に成り立つ。また、2)については、音波の空気による吸収は、コロナハム音の周波数100Hzにおいては非常に小さい[3]ため妥当である。さらに、3)については、地面はその性状(土質、地面を覆う媒質が何であるか等)により、厳密には、ある複素インピーダンスを持つものとして取り扱うべきであるが、100Hz程度の周波数においては、黒土、芝生、アスファルト、ならびに水の場合でも、その反射率は1として実用上は差し支えない[4]。仮に、地表面の反射率の絶対値が1未満としても、シミュレーションにより得られる空間平均値は高めとなる。このことは、あるコロナハム音レベルを許容値とするような

電線設計を考える場合には、大型の導体方式を採用するかコロナハム音の低減対策を施すことにつながり、送電線の建設コストは増すが環境保全上は安全側である。

(2) Kirchhoffの法則による音場計算の考え方
 音源の座標を (x, y, z) 、観測点の座標を (x', y', z') として、Kirchhoffの法則[5]は

$$p(x', y', z', t) = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{1}{r} g(x, y, z, t - \frac{r}{c}) dV \quad (7.2)$$

と表わすことができる。ただし、

- p : 音圧 [Pa]
- g : 音源の分布関数
- t : 時間 [s]
- c : 音速 [m/s]
- r : 音源と観測点の距離 [m],
 $r = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + (z' - z)^2}$

である。式(7.2)は、時刻 t の音場は音源を微小な点音源の集合体と見なし、各点音源から時刻 $(t - r/c)$ に発生した対称球面波の総和により求められることを示している。

今、音源の分布関数 g ならびに音圧 p を、それぞれ角周波数 ω を使って、

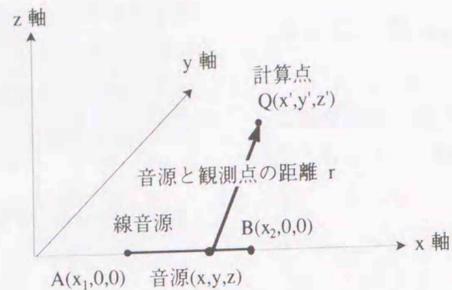
$$g(x, y, z, t) = g_s(x, y, z) \exp(-i\omega t) \quad (7.3)$$

$$p(x', y', z', t) = p'(x', y', z') \exp(-i\omega t) \quad (7.4)$$

のように、表わすと、式(7.2)は

$$p'(x', y', z') = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{\exp(ikr)}{r} g_s(x, y, z) dv \quad (7.5)$$

と変形できる。ただし、



第7.4図 音場計算のための座標
Fig. 7.4 Coordinates for simulation of sound field.

i : 虚数単位
 k : 波数 ($= \omega/c$)

である。

第7.4図に示すように、直交座標系 (x, y, z) において、点 $A(x_1, 0, 0)$ から点 $B(x_2, 0, 0)$ までの有限長線音源がある場合、線音源を点音源の集合と見ると、先の式 (7.5) から、任意の点 Q における音圧 p' は式 (7.6) で表わすことができる。

$$p'(Q) = \frac{1}{4\pi} \int_{x_1}^{x_2} \int \int \frac{e^{ikr}}{r} g_s(x, y, z) dx dy dz \quad (7.6)$$

音源が線音源の場合にはその分布関数 g_s は

$$x_1 \leq x \leq x_2 \quad g_s(x, y, z) = \delta(y)\delta(z) \quad (7.7.1)$$

$$x_1 > x, x_2 < x \quad g_s(x, y, z) = 0 \quad (7.7.2)$$

と表わせ (ここで、 δ はディラックのデルタ関数)、結局、線音源からの音圧 p' は式 (7.8) で表わすことができる。

$$p'(Q) = \frac{1}{4\pi} \int_{x_1}^{x_2} \frac{e^{ikr}}{r} dx \quad (7.8)$$

線音源が複数本ある場合の全音圧 p_t は、各線音源からの音圧 p_i を足し合わせればよい。すなわち、

$$p_t = \sum_{i=1}^N p_i \quad (7.9)$$

ここで、

N : 線音源の総数

である。

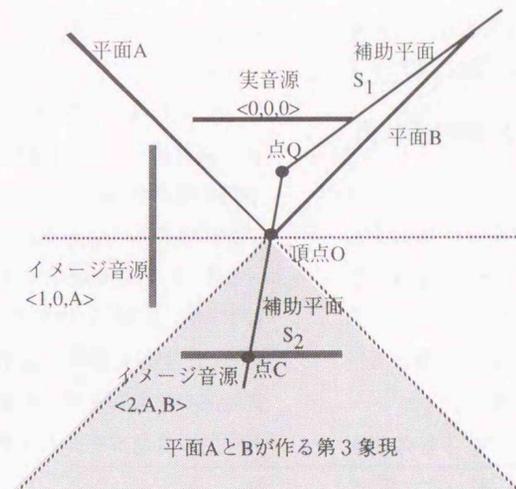
音圧レベル P は式 (7.9) の絶対値の常用対数をとって、さらにこれに 20 を乗ずることにより得られ、式 (7.10) で表わすことができる。

$$P = 20 \log(|p_t|) \quad (7.10)$$

(3) シミュレーションアルゴリズム

1) イメージ音源の発生方法

V字谷の場合を例に考える。V字谷の斜面に対するイメージ音源を境界条件を満たしながら生成する方法は、基本的には鏡像の原理につくされているが、若干の注意が必要である。



第7.5図 イメージ音源の生成と打ち切りアルゴリズムの説明図 (図は2次元のV字谷の場合を表す)

Fig. 7.5 Explanation of algorithm for creating and quitting imaginable sound sources in the case of a V-shaped valley.

第7.5図に示すように実音源が凹状のV字谷を形成する平面 A, B の上方にあるとする。ここで、実音源を番号 $\langle 0, 0, 0 \rangle$ とする。実音源の平面 A に対するイメージ音源は、鏡像の原理から、平面 A を対称面とした位置に発生し、 $\langle 1, 0, A \rangle$ とする。ここで、最初の記号はイメージ音源の通し番号、二番目の記号は一回前の反射面、三番目の記号がイメージ音源を発生した反射面を表わす。ただし、二番目の記号が 0 であるときは前に反射がない、すなわち、前が実音源であることを示す。

次に、 $\langle 1, 0, A \rangle$ の反射面 B に対するイメージ音源は平面 B を対称面とする位置に生じ、番号 $\langle 2, A, B \rangle$ となる。

しかし、この $\langle 2, A, B \rangle$ の反射面 A による新たなイメージ音源は発生しない。すなわち、幾何学的には、あるイメージ音源を発生した面と次に考える反射の候補面により区分される象現のうち実音源と反対側の象現 (第7.5図では網掛け部) に現在のイメージ音源が存在する場合

には、それ以降のイメージ音源の発生はない。これは、イメージ音源を発生した面 (第7.5図では平面 B) を通過して、次に考える反射の候補面 (第7.5図では平面 A) に至る波線が、実音源と反対側の象現 (第7.5図では網掛け部) に発生したイメージ音源からは存在しないことによる。

以上がイメージ音源を連鎖的に生成するアルゴリズムと連鎖を打ち切る考え方である。

2) 観測点の音圧に寄与するイメージ音源

先のイメージ音源の生成アルゴリズムによる全てのイメージ音源が、今、計算しようとしている点 Q (第7.4図参照) の音圧レベルに寄与するわけではない。これを平面 B に対するイメージ音源 $\langle 2, A, B \rangle$ を例にとり述べる。まず、第7.5図に示すように、点 Q と平面 B の端の辺を含む補助平面 S_1 と S_2 を考える。このとき、平面 B に関して、点 Q と反対側の空間で、かつ、これらの平面 S_1 と S_2 によって挟まれる空間内に存在するイメージ音源が点 Q の音圧レベルに寄与する。

すなわち、第7.5図ではイメージ音源のうち、点Cから右の部分が、点Qの音圧レベルに寄与する。

7.5 シミュレーション結果と測定値との比較

先の音場シミュレーションアルゴリズムをもとにプログラムを開発し、V字谷とU字谷の場合の音場をシミュレートした（実音源は6本の線音源）。V字谷の場合も、U字谷の場合も、斜面角0度から50度まで、10度毎にシミュレーションを行った。その結果から、V字谷の場合には測線0, 10, ならびに20cmに沿った計算値から音圧レベルの空間平均値を求めた。また、U字谷の底の平面部では、平面の中央、すなわち直線B上の測線、直線Bから10cm離れた測線、ならびに直線Bから20cm離れた測線に沿った計算値から音圧レベルの空間平均値を求めた。さらに、U字谷の斜面部の場合には、斜面の始まる直線C上の測線、直線Cから10cm離れた測線、ならびに直線Cから20cm離れた測線に沿った計算値から音圧レベルの空間平均値を求めた。これらを先の第7.3図に並記している。測定結果と同様に、空間平均値を求める際の音圧レベルは1波長間隔毎にサンプリングし、データ間の独立性を保つようにした。シミュレーション結果は相対値であるため、これから求めた音圧レベルの空間平均値も相対値として扱い、測定値との平方誤差が最小になるようにプロットした。

シミュレーション結果はなめらかな曲線ではない。これは斜面角に対する音圧レベルの上昇値は単調に増加するが、その増加率は一定でな

いことを示している。

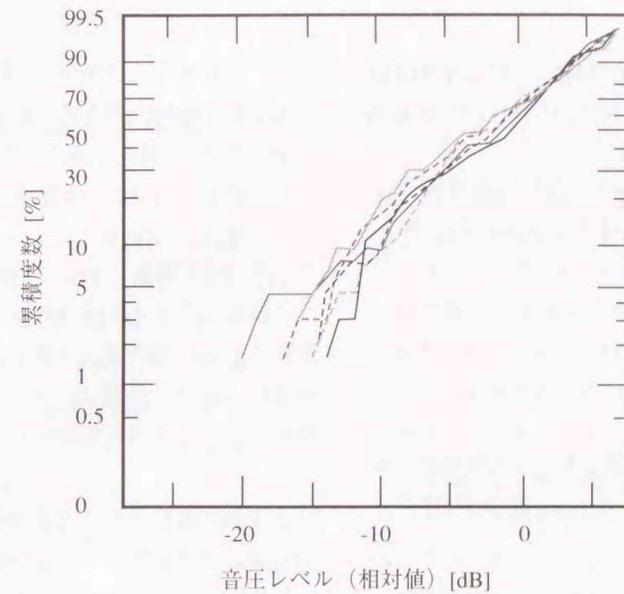
シミュレーション結果と実験結果はよく対応し、ここに示した音場シミュレーションアルゴリズムを用いれば任意の斜面長、斜面角をもつ谷間の場合の音圧レベル上昇値（空間平均値）が計算できることが示された。

また、V字谷を形成する斜面部の斜面角に対する平均的な音圧レベルの上昇率は、0.1dB/度である。U字谷の場合には平坦地の幅にもよるが、斜面部の斜面角が約30度を超えると音が籠り、平均的な音圧レベルの上昇率は約0.1dB/度である。

7.6 ランダムウォークモデルとの比較

音圧レベルの空間平均値に対する斜面角の影響については先に述べたとおり（第7.3図参照）であるが、音圧レベルの確率分布も重要である。前章に述べたように、平地の場合の音圧レベルの確率分布はランダムウォークモデル（絶対値が等しく、互いの位相が一樣確率密度をもつN個のベクトル ξ_j の和 ξ の絶対値 $|\xi|$ の確率密度）から導かれる分布とよく一致する。本節では谷間の場合について検討する。

そもそもランダムウォークモデルでは「絶対値が等しく、互いの位相が一樣確率密度をもつN個のベクトル ξ_j の和 ξ の絶対値 $|\xi|$ 」を考えているので、このモデル自体は、原理上地形によらず成立すると考えられ、本モデルを谷間の場合についても適用してみることにする。



第7.6図 谷間におけるコロナハム音レベルの累積度数分布とランダムウォークモデルとの関係

Fig. 7.6 Relationship between cumulative distribution of hum noise level in ravines and random walk model.

次に音源数すなわちステップ数については、以下のように考えた。平地の場合の地表面では、送電線の相数（電線の数）をもって音源の数、すなわち、ランダムウォークモデルにおけるステップ数とすればよいが、谷間の場合には斜面での音波の多重反射があるため、音源の数を見積ることは困難である。しかしながら、第7.5図に示したV字谷の上空に線音源が1本ある場合を考えてみると、点Qに対しては、少なくとも平面AおよびBからの音波の反射があるので、イメージ音源まで考慮して、音源数が3を下回ることはない。これに対して、上空に線音源が1本ある平地の場合は、音源数は2である。すなわち、谷間の場合の音源数の方が、平地の場合よりも多い。

さらにランダムウォークモデルからは、ステップ数が6以上となると音圧レベルの確率分布はほぼ変わらないことが、先の第6.4節から確認できる。

以上を考慮して、ステップ数が6の場合にラ

ンダムウォークモデルに従う分布であれば右上がりの45度の直線になるように縦軸を設定したうえで、音場シミュレーションの計算結果（3相垂直2回線送電線がV字谷を横断する場合で、V字谷の斜面角が0, 10, 20, 30, 40, ならびに50度の計6ケース）についての累積頻度分布を第7.6図に示している。ここで、横軸の0は各斜面角の場合の空間平均値に対応する。

音圧レベルが低い場合を除き、各斜面角のカーブはほぼ右上がりの45度の直線にのっており、近似的には谷間の場合でも、音圧レベル分布はランダムウォークモデルで近似できると考えられる。

7.7 まとめ

本章では、送電線下のコロナハム音レベルの空間分布特性に対する地形（谷間）の影響について検討した。主要な結果を以下に示す。

- 1) 谷間はコロナハム音を多重反射させ、谷間においてはコロナハム音レベルの空間平均値

は上昇する。V字谷の場合、その上昇率は谷間を形成する斜面角に対しておおむね0.1 dB/度である。

- 2) 谷間の場合でも、音圧レベルの確率分布は近似的にはランダムウォークモデルに従う。

文献

- [1] 服部昭三, 「拡散音場における音響機器の校正法に関する研究」, 電気試験所,

第669号, 1966年12月

- [2] K. Tanabe, 第1章[126]
[3] 山下, 「騒音予測のための模型実験技法の研究」, 小林理学研究所報告, Vol. 19, No.1, 1979年
[4] 河井, 中島, 日高, 「地表面上の騒音伝搬」, 竹中技術研究報告, 第28号, pp.79~89, 1982年11月
[5] 音響工学源論(下巻), 伊藤, pp. 209, 1958年

8. コロナハム音の予測法

8.1 まえがき

コロナ騒音のうちのランダム騒音レベルについては、多数の国内外の研究があり、電線からのランダム騒音発生量と伝搬特性(音圧が電線からの直距離に反比例して減少)から、送電線下の任意の地点において予測計算をすることができる[例えば1-9]。

しかし、コロナハム音の研究は国内外ともに比較的少なく[3,7,9-12]、その特性解明は充分には進んでいない。この理由として、次のように考えられる。海外においては、一般に風騒音対策用のスパイラル線[12,13]が取り付けられることはなく、そのうえ、電線の最大導体表面電位の傾きが日本の場合と比較して高い。このため、ランダム騒音が騒音レベルに占める率が大きく、ランダム騒音のほうが‘うるさく’聞こえ、これについて集中的に検討されてきたためと考えられる。

本章では、次の測定結果の比較から、送電線下におけるコロナハム音レベルの実験的予測法を提案する。

- 1) 第4章のコロナケージによるコロナハム音発生量の測定結果
- 2) 第5章のUHV赤城実規模試験線(赤城試験線)におけるコロナハム音の実証試験結果

8.2 コロナハム音レベルの時空間平均値としての考え方

送電線下のコロナハム音レベルは時間の経過に従って(時間的変動)、また位置によっても(空間的変動)大きく変動する。

時間的な変動要因としては、降雨強度と気温が考えられる。降雨強度は時々刻々変動し、これに従ってコロナハム音の発生量も変動する。この降

雨強度のコロナハム音レベルに対する影響は第5.3節に述べたとおりである。また、気温の変化は、コロナハム音の波長を変えると同時に、電線の弛度に影響するため発生源である電線の位置を変動させる。このため、各相の電線からのコロナハム音の重なり方が変わるため、結果として線下のコロナハム音レベルが時間的に変動する。

空間的な変動要因は、送電線下に形成されるコロナハム音の複雑な定在波であり、測定位置によってコロナハム音レベルは大幅に変動する。この送電線下に形成されるコロナハム音の複雑な定在波については、第6章ならびに第7章に述べたとおりである。

このような送電線下のコロナハム音レベルは一義的に決定することができないため、その代表値として、時間的および空間的な平均値(時空間平均値)を考えることが実際的である。

(1) 空間的平均

送電線近傍のコロナハム音レベルの平均的なレベルを考える。第6.5節に示したように、その範囲は送電線の中央から、送電線と直角方向の両側に、上相(送電線の各相のうち最上部に位置する相)の高さまでとする。平均する方法としては、地域環境騒音を定量的に把握、評価する際にしばしば用いられるパワー平均[14]を用いる。

(2) 時間的平均

従来から騒音レベルの評価に用いられてきた50%値を用いる。これは、測定結果が種々の降雨強度ならびに気温に対してのものであるため、50%値が統計的な時間的平均値と見なせるためである。

(3) 時空間平均値

上記の空間と時間にわたる平均を組み合わせ、時空間平均値 P_{AVE} を

$$P_{AVE} = 10 \log \left\{ \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{N} \right\} [\text{dB(A)}] \quad (8.1)$$

で定義する。ただし、

N : 測定点数

P_i : i (1~ N) 番目のコロナハム音レベルの 50% 値 [dB(A)]

である。

第 5 章の 5 箇所のマイクロホンによる測定値のパワー平均値はこの考え方に基づくものである。

8.3 コロナケージデータと試験線による降雨強度特性データとの対応関係

ランダム騒音と同様に[15], コロナケージ試験から得られる等価軽雨時のコロナハム音発生量(先の式(4.5)と第 4.2 表参照)から、送電線下のコロナハム音レベル T_{wc} を式 (8.2) により計算する。ここで、式 (8.2) は各相の電線からのコロナハム音が互いに無相関に加算された場合のコロナハム音レベルを計算している。第 6.5 節に示したように、計算点は、送電線の中央から、

送電線と直角方向の両側に、上相(送電線の各相のうち最上部に位置する相)の高さの範囲までとする。

$$T_{wc} = 10 \log \left\{ \sum_{j=1}^6 10^{(P_{wcj}(g_{max}) - 10 \log r_j) / 10} \right\} [\text{dB(A)}] \quad (8.2)$$

ただし、

P_{wcj} : j 番目の相の等価軽雨時コロナハム音発生量 [dB(A)]

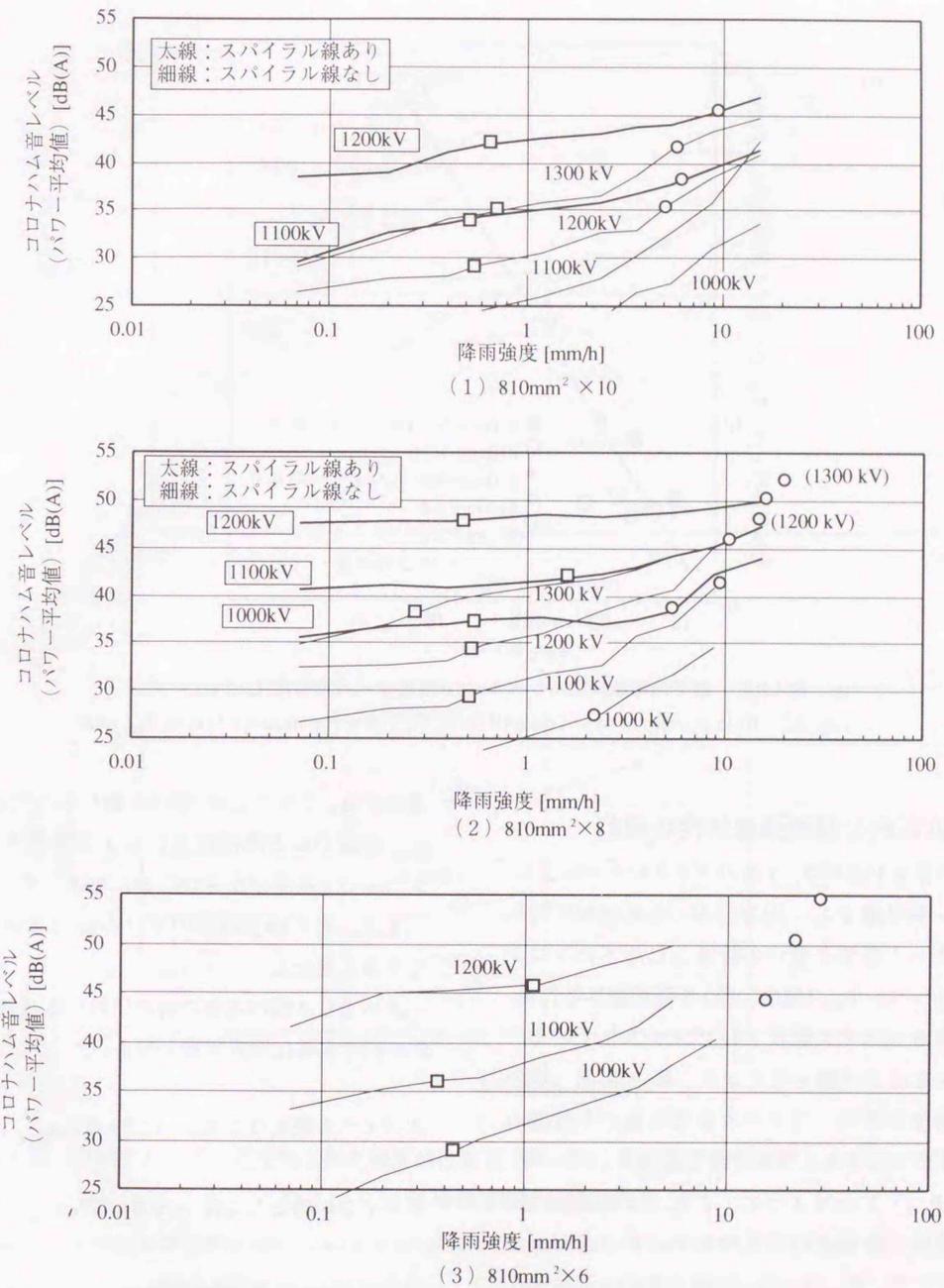
r_j : j 番目の相と計算点間の直距離 [m]

である。

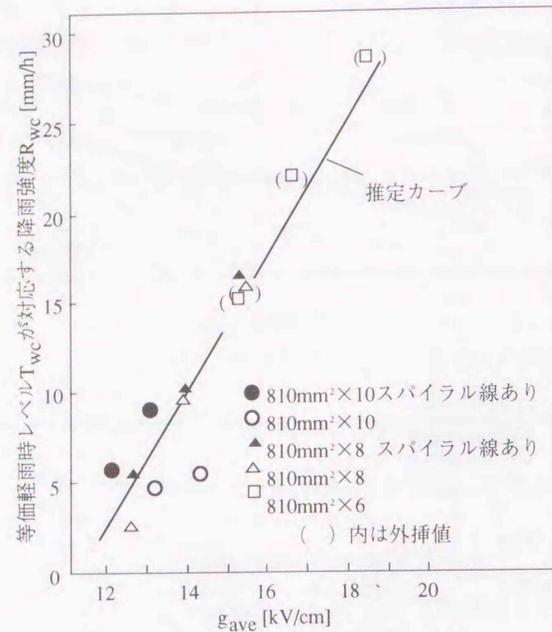
計算結果を第 8.1 図の各々の課電圧に対する降雨強度特性曲線上あるいはその延長上に○印でプロットしている。

図より T_{wc} は 2~30mm/h の降雨強度に対応していることがわかる。 T_{wc} の対応する降雨強度 R_{wc} を各相の電線の g_{max} の平均値 g_{ave} に対して示すと第 8.2 図[16]のようであり、 R_{wc} は式 (8.3) の実験式で表わすことができる。

$$R_{wc} = 3.8 g_{ave}^{-43} [\text{mm/h}] \quad (8.3)$$



第 8.1 図 コロナハム音の降雨強度特性とコロナケージデータより計算した T_{wc} の関係 (○: 降雨強度特性曲線上あるいはその延長上の T_{wc} , □: 降雨強度特性曲線上の P_{AVE})
 Fig. 8.1 Rainfall rate characteristics of hum noise level and T_{wc} calculated using corona cage data (○: T_{wc} on the rainfall rate characteristic or its extension, □: P_{AVE} on the rainfall rate characteristic).



第8.2図 線下の等価軽雨時レベル T_{wc} が対応する降雨強度 R_{wc} と g_{ave} の関係
Fig. 8.2 Relationship between rainfall rates, R_{wc} at wet conductor levels, T_{wc} and

8.4 近似的な降雨強度特性の傾斜

先の第8.1図には、5個のマイクロホンによるパワー平均値 P_{AVE} (図中□印)と等価軽雨時のコロナハム音発生量から計算した線下のコロナハム音レベル T_{wc} (図中○印)を降雨強度特性曲線上あるいはその延長上にプロットしている。これらをつなぐ直線を考えると、第8.3図(図中○: 等価軽雨時コロナハム音発生量から計算した線下のコロナハム音レベル T_{wc} , □: パワー平均値 P_{AVE})に示すように、これらは測定した降雨強度特性曲線をほぼ近似していることがわかる。そこで、 P_{AVE} と T_{wc} をつなぐ直線を近似的な降雨強度特性と考えることとする。

第8.4図[16]に、降雨強度の対数に対する近似的な降雨強度特性の傾斜を g_{ave} を横軸にして示す。

この傾斜は g_{ave} の増加に対してほぼ直線的に

減少する。このことは、第5.3節に述べたように、 g_{max} が高いほど降雨強度に対するコロナハム音レベルの上昇率が小さいことに対応している。

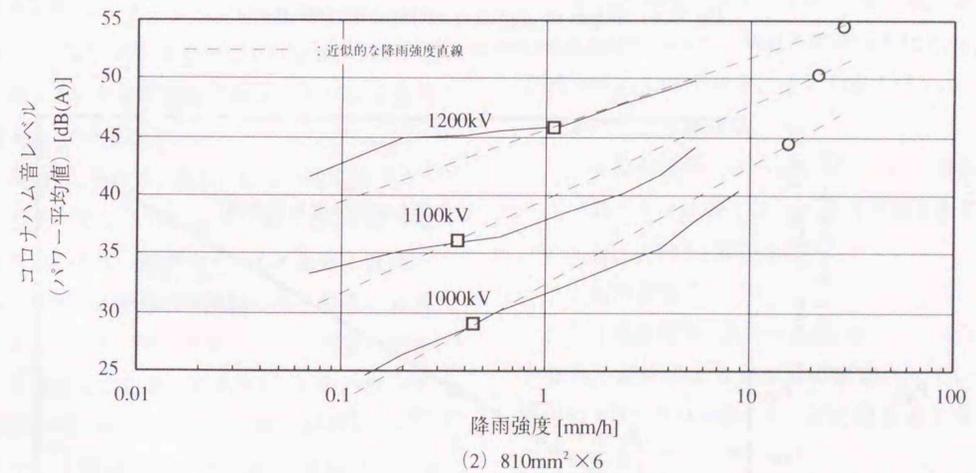
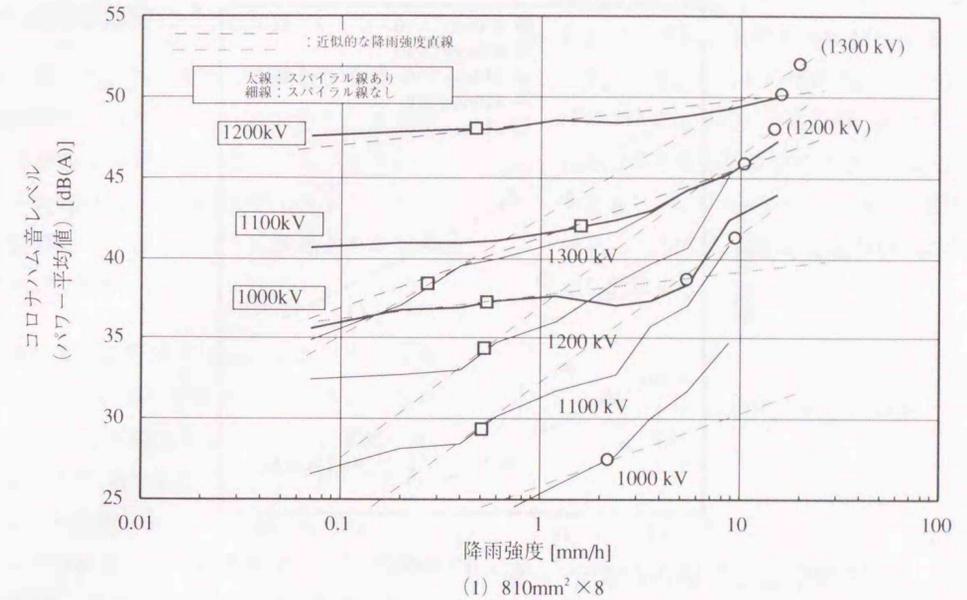
また、その傾斜はスパイラル線の有無によって大きく異なる。

スパイラル線の有無の各々に対する傾斜 S_{sp} , S の回帰直線は次式で表わせる。

$$\text{スパイラル線あり: } S_{sp} = 12.5 - 0.71g_{ave} \quad (8.4.1)$$

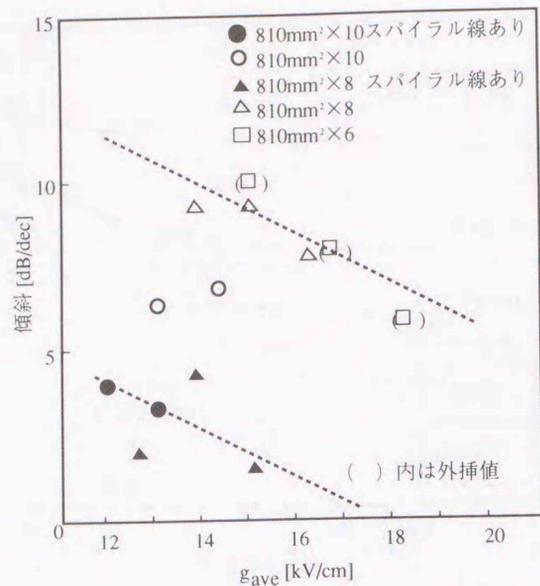
$$\text{スパイラル線なし: } S = 19.6 - 0.71g_{ave} \quad (8.4.2)$$

以上から近似的な降雨強度特性を等価軽雨時のコロナハム音発生量 P_{wc} , 降雨強度 R_{wc} , 傾斜 S_{sp} , S を用いて決定できる。



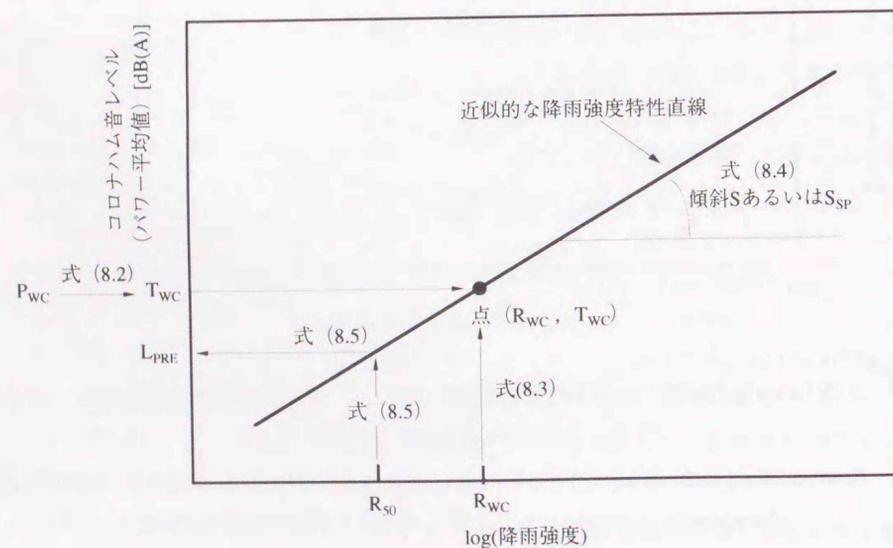
第8.3図 コロナハム音の近似的な降雨強度特性直線の例 (○: 降雨強度特性曲線上あるいはその延長上の T_{wc} , □: 降雨強度特性曲線上の P_{AVE})

Fig. 8.3 Example of approximate lines of rainfall rate characteristics of hum noise (○: T_{wc} on the rainfall rate characteristic or its extension, □: P_{AVE} on the rainfall rate characteristic).



第8.4図 近似的な降雨強度特性直線の傾斜と g_{ave} の関係

Fig. 8.4 Slopes of approximate lines of rainfall rate characteristics as a function of g_{ave} .



第8.5図 予測法の説明図

Fig. 8.5 Explanation of the developed method for predicting hum noise level.

8.5 時空間平均値の予測法

前節において、コロナケージ試験より得られる等価軽雨時のコロナハム音発生量 P_{WC} と送電線下の平均的なコロナハム音レベル、すなわち時空間平均値 P_{AVE} との関係が明らかになった。これを整理して、以下のように予測法を提案する(第8.5図参照)。

- 1) 予測対象は送電線下におけるコロナハム音レベルの時空間平均値 P_{AVE} とする。すなわち、 P_{AVE} は、試験線あるいは商用送電線における長期間、かつ複数の測定点において得られる測定値から求められる値である。
- 2) コロナハム音レベルの予測を行う送電線の導体方式、電線の幾何学的配置、および課電圧のパラメータを設定すると、最大導体表面電位の傾きが計算できるので、先の式(4.5)と第4.2表から等価軽雨時コロナハム音発生量 P_{WC} が求まる。
- 3) この P_{WC} から式(8.2)を用い送電線下のコロナハム音レベル T_{WC} を計算する。予測計算点は地表面で、線路中心から、線路と直角方向の両側に、送電線の上相の高さ程度の範囲とする。これは第6.5節から、この範囲であれば複雑な定在波が形成され、そのパワー平均値が式(8.2)による各相の電線からのコロナハム音が互いに無相関に加算された場合のコロナハム音レベルとよい相関を持つと考えられるからである。
- 4) 式(8.3)から、近似的な降雨強度特性直線上において、 T_{WC} の対応する降雨強度 R_{WC} を計算する。
- 5) さらに、式(8.4)から、近似的な降雨強度

特性直線の傾斜 S_{SP} あるいは S を求める。

- 6) 以上で、近似的な降雨強度特性直線上の点 (T_{WC}, R_{WC}) とその傾斜 S_{SP} あるいは S を決定できる。さらに、送電線の通過する地域における年間降雨強度の50%値 R_{50} [mm/h] を考慮し、コロナハム音レベルの時空間平均値 P_{AVE} に対する予測値 L_{PRE} [dB(A)] を式(8.5)から計算する。

$$L_{PRE} = T_{WC} + \begin{cases} S \\ \text{or} \\ S_{SP} \end{cases} \log(R_{50} / R_{WC}) \quad (8.5)$$

8.6 予測法の精度と適用範囲

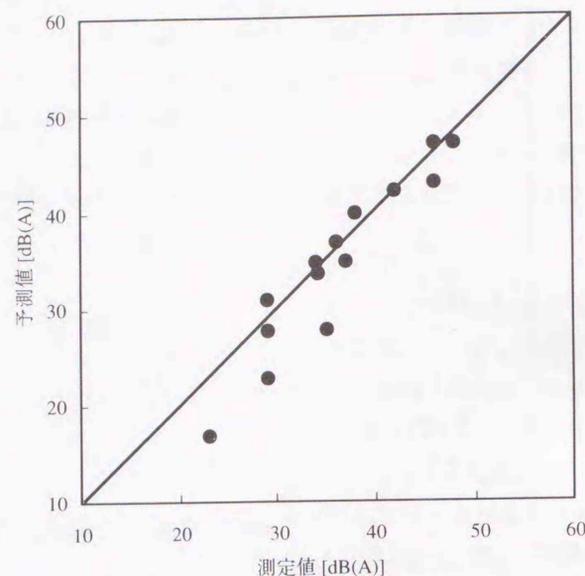
予測値と赤城試験線における測定値の比較を第8.6図[16]に示す。両者の相関係数は0.96、平方誤差は約3dBであり、よく対応している。

予測法の適用範囲は

- ・表面が十分にエージングしている電線
- ・スパイラル線：無し、対角密着4条巻
- ・ g_{max} ：12~24kV/cm
- ・素導体数：6~10
- ・素導体外径：2.53~3.84cm

である。試験により発生量が測定されていない電線については内挿によりその発生量を求めることとする。

なお、先の第4章ではコロナハム音の発生量に対する素導体間隔、電線表面のエージングの影響、電線の傾斜の影響について述べたが、これらについては試験線あるいはこれと同等の設備による実証試験を行っていないため、本予測法には組み込まなかった。



第8.6図 赤城試験線における測定値と予測値の比較
Fig. 8.6 Comparison between measured results at Akagi test line and predicted values.

8.7 海外で開発された予測法について

海外におけるコロナハム音の予測法として一般に知られているのは、EPRI [7], Pirotte[3]によるもののみである。第8.1表に、これらと本論文における予測法とを比較した。予測法で重要なことは、電線からのコロナハム音の発生量を見積もることと、伝搬特性ならびに定在波の取り扱いである。

EPRIから提案されている予測法においては、発生量についてはコロナケージの注水時 (Heavy Rain)における測定値を数式化し、これを予測計算において用いている。すなわち、予測計算対象は強雨時のコロナハム音レベルのみである。伝搬特性についてはコロナハム音は円筒波伝搬であるとし、各相からのコロナハム音の発生位相差と伝搬による位相を考慮した上でベクトル合成し、線路と直角方向の分布を計算する。しかし第8.2節に述べたように、コロナハム音レ

ルについては、時空間平均値を予測できることが、設計に際して有用と考えられ、本論文で提案した予測法において用いている無相関に加算する方式は、この考え方によるものである。

Pirotteによる予測法は送電線下のレベルを算出することを目的とせず、単に素導体数 n 、素導体外径 d ならびに最大導体表面電位の傾き g_{max} による発生量の相対比較をしているにすぎない。

このような事情から、これらの予測法と直接比較することは困難であるが、本論文に提案した予測法は次の点でより実用性の高いものと考えられる。

- 1) 年間に占める時間率の大きい軽雨時を対象としている
- 2) 送電線下に形成される定在波を考慮して、送電線下におけるコロナハム音レベルの時空間平均値を予測できる
- 3) 対角密着4条巻きの場合だけではなく、スパイラル線の有無を考慮できる

第8.1表 海外の予測法との比較

Table 8.1 Comparison Between the Prediction Method Proposed Here and Prediction Methods by Foreign Institutes

目的	本論文	EPRI[7]	Pirotte[3]
	時空間平均値の算出	直角方向分布の算出	
発生量の算出方法	軽雨時を対象 降雨強度変換あり	注水時のみを対象 g_{max} 特性: $A = 47.5 - \frac{505.5}{g_{max}} \quad (8.6)$ 素導体径 d の補正: $C_d = 106 - \frac{41}{d} \quad (8.7)$ 素導体数 n の補正: $C_n = 24.1 - \frac{390}{n+10}$ for 4.63cm (8.8.1) $= 47.4 - \frac{1000}{n+10}$ for 2.30cm (8.8.2)	次式の χ が等しい値を持つ導体方式の発生量は同等 $\chi = \sqrt{nd}g_{max} \quad (8.9)$
伝搬特性	円筒波伝搬 空気吸収なし 地表面の反射率=1	円筒波伝搬 空気吸収なし 地表面の反射率=1	—
定在波の取り扱い	パワー平均値を算出	直角方向分布の算出を主とする 直角方向分布の包絡線にも注目	—

8.8 まとめ

適切な導体方式の選定によりコロナ騒音の抑止と経済性との協調を図ることは重要である。このためには送電線周辺のコロナ騒音レベルを的確に予測し、その影響を評価し、導体方式の選定に反映させることが肝要である。

本章では、赤城試験線におけるコロナハム音の実証試験結果とコロナケージにおけるコロナハム音発生量の測定結果の比較から、実験式よりなる、送電線周辺のコロナハム音レベルの予測法を提案した。

本予測法は、コロナハム音レベルの近似的な降雨強度特性直線上の座標とその直線の傾斜を実験式から求めることを骨子とし、求められた近似的な降雨強度特性直線から年間降雨強度の50%値 (通常、

この値は 0.5mm/h 程度で軽雨時に相当する) におけるコロナハム音レベルを計算するものである。

予測法の適用範囲は

- ・表面が十分にエージングしている電線
- ・スパイラル線：無し，対角密着4条巻き
- ・ g_{max} : 12~24kV/cm
- ・素導体数：6~10
- ・素導体外径：2.53~3.84cm

である。コロナケージなどによる実験により、コロナハム音の発生量が測定されていない電線については内挿によりその発生量を求める。

本予測法は、これまでに提案されている他機関からのものと比べて、年間に占める時間率の大きい軽雨時を対象としている点、送電線下におけるコロナハム音レベルの時空間平均値を予測できる点などから、実用性が高い。

文献

- [1] Juette G. W., Zaffanella L. E., 第1章(9)
[2] Trine N. G., Maruvada P. S., 第1章(22)
[3] Pirotte P., 第1章(27)
[4] Trinh N. G., Maruvada P. S., 第1章(58)
[5] Chartier V. L., Stearns R. D., 第1章(92)
[6] IEEE Corona and Field Effects Subcommittee, 第1章(106)
[7] General Electric Company, 第1章(107)
[8] 笹野, 沢田, 福島, 甘楽, 鈴木, 第1章(9)
[9] UHV 送電実証試験委員会, 第1章(19)
[10] Tanabe K., 第1章(126)
[11] Tanabe K., 第1章(127)
[12] Tanabe K., 第1章(128)
[13] 田辺, 福島, 鈴木, 甘楽, 原田, 第1章(12)
[14] 遠藤, 「地域環境騒音の把握に関するパワー平均と算術平均の比較」, 騒音制御, Vol. 8, No5, 1984年
[15] UHV 送電研究推進委員会・障害分科会, 第1章(14)
[16] 田辺, 第1章(32)

9. コロナハム音と風騒音の協調低減対策

9.1 まえがき

コロナハム音は 100Hz あるいは 120Hz の純音であり, その周波数が低いため, ランダム騒音ほど家屋による遮音効果や雨音によるマスク効果が期待できないので, これを低減するには送電線側で対策をするのが基本となる。

電線から発生するコロナハム音を小さくするには, 基本的には, 大型の導体方式を用い, 最大導体表面電位の傾きを低くすることが有効である。しかし, 大型の導体方式の採用は建設コストの高騰を招く。

送電線の基本導体方式の選定に際しては, 前述の予測法などを参考にして, コロナハム音に関しても適切な導体方式を選定するのが望ましい。その上で, 特に静寂を要求される地域を通過する送電線に対しては, 1 径間あるいは数径間のみの局所的な低減対策を施し, 当該地域のコロナハム音レベルを抑制することが肝要である。このことは, コロナハム音の伝搬特性(無限長電線の場合には, 音圧レベルが $10 \log$ (距離) で減衰する)から, 送電線から数百 m 離ればコロナハム音レベルが低下することから可能となる。

その低減対策として, 第3章に述べた注水時ならびに注水停止後におけるコロナ放電の観察結果から得られた知見に基づいて, 素導体の配置を考慮した非対称配列方式ならびに添線方式[1]が考えられる。

また, 送電線の素導体には風騒音対策を行うために従来からスパイラル線の取り付けが行われている[1]。しかしながら, スパイラル線は, 素導体径の $1/5 \sim 1/6$ 程度の径をもつため, 素導体の表面に高い突起をつける結果となり, コロナ放電が発生しやすい状況を引き起こし, コロナ騒音,

特にコロナハム音の発生量を増大させる。したがって, 風騒音とコロナ騒音の両者がある程度低減できるような突起部ならびに他の素線の高さ, 形状を選択したうえで, これらを電線製造時に撚り合わせる新型電線の開発が考えられる。この新型電線は, スパイラル状の突起が電線製造時に組み込まれるため, 従来の素導体とは異なる断面形状を有する。

9.2 非対称化による協調低減対策

先の第3章の知見から, 多導体電線を構成する素導体の内, 下側に配置したもののほど放電が活発である。そこで, 下側の素導体の水滴付着位置における表面電界強度を下げれば, コロナ放電を抑制でき, ひいてはコロナハム音の発生量を低減できると考えられる。

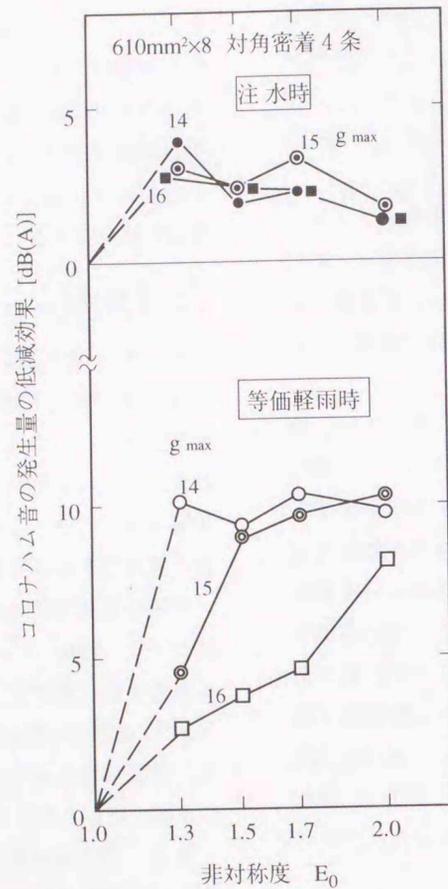
非対称素導体配列の電線(以下, 非対称方式)について, UHV コロナケージにおいてコロナハム音発生量の低減量を測定した結果を第9.1図に示す。素導体の配列は第9.2図に示すものであり, 素導体数を変えずに上側の素導体を少しずつ下側にずらして行ったものである[3]。

第9.1図に非対称度に対するコロナハム音発生量の低減効果を示した。ここで, 電線表面の電位の傾きは各素導体によって大幅に異なる。このため, 対称配列電線の場合の最大導体表面電位の傾き g_{\max} を基準とし, この時の課電圧と等しい電圧を印加して, コロナハム音の発生量を測定している。この比較法は, 送電線の場合にも送電電圧を変えることなく, 非対称方式を用いた場合に対応し, 実際的である。

図より, 注水時の場合には, 非対称化することによってコロナハム音発生量は低下するものの, 非対称度が 1.3 を超えると, かえって低減効果が少なくなる。これは, 非対称化によって上

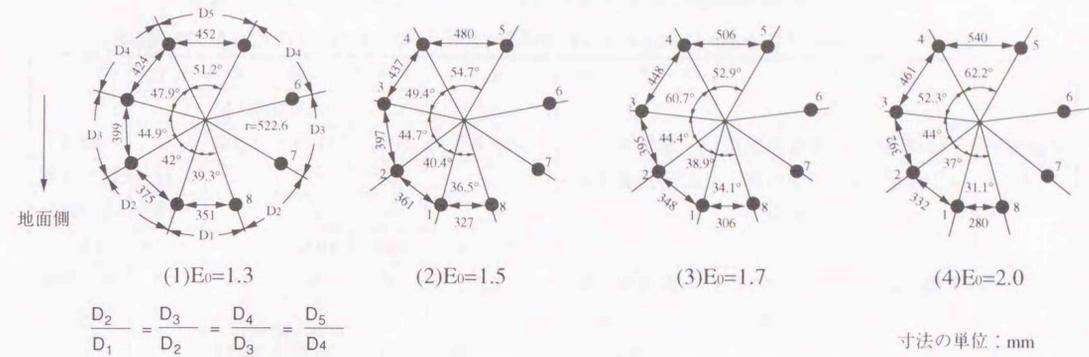
側の素導体の g_{max} が上昇している状態において、注水時には水滴が衝突するため、コロナ放電が活発になるためと考えられる。等価軽雨時の場合には、非対称度が大きくなるしたがって、低

減効果が増す。しかし、 g_{max} が低いと、低減効果は、非対称度に対して飽和する傾向にある。



第9.1図 非対称方式によるコロナ騒音低減効果

Fig.9.1 Reduction of hum noise level using asymmetric bundles.



第9.2図 非対称方式の素導体配列 (E_0 : 非対称度= D_5/D_1)

Fig. 9.2 Positions of subconductors in asymmetric bundles (degree of asymmetry $E_0 = D_5/D_1$).

また、非対称方式の各素導体における水滴付着方向（素導体から真下方向の矢印）ならびに最大方向（素導体が存在する円周の中心から素導体の中心に結んだ直線の延長方向の矢印）の電線表面電位の傾きを第9.3図に示す。対称配列電線に比べて、非対称化すると、下側の素導体の水滴付着部における表面電位の傾きが低下している。

さらに、同図中に示すように、UHV コロナケージと赤城試験線における導体表面電位の傾きの分布はほぼ一致していることがわかる。このことは、UHV コロナケージによって、非対称方式の場合でも、後述の添線方式の場合でも、商用送電線あるいは試験線における電界分布を模擬できることを示している。

赤城試験線における非対称方式（非対称度 1.5）のコロナハム音に関する実証試験結果を第9.1表に示す。表には、比較対象として先の第5.1表の No.4（ $810\text{mm}^2 \times 8$ 、対称配列、スパイラル線：対角密着4条巻）の場合の試験結果も並記している。これらの比較から、非対称方

式ではコロナハム音の低減が見られ、試験線においても非対称とすることによりコロナハム音が低減することがわかる。

9.3 添線による協調低減対策

非対称方式と同様に、多導体電線の下側に位置する素導体の水滴付着位置における表面電界強度を下げることを目的として、多導体電線の最も下側に位置する素導体の中間付近にさらにもう一本の素導体（添線）を添えたものを添線方式と称する。

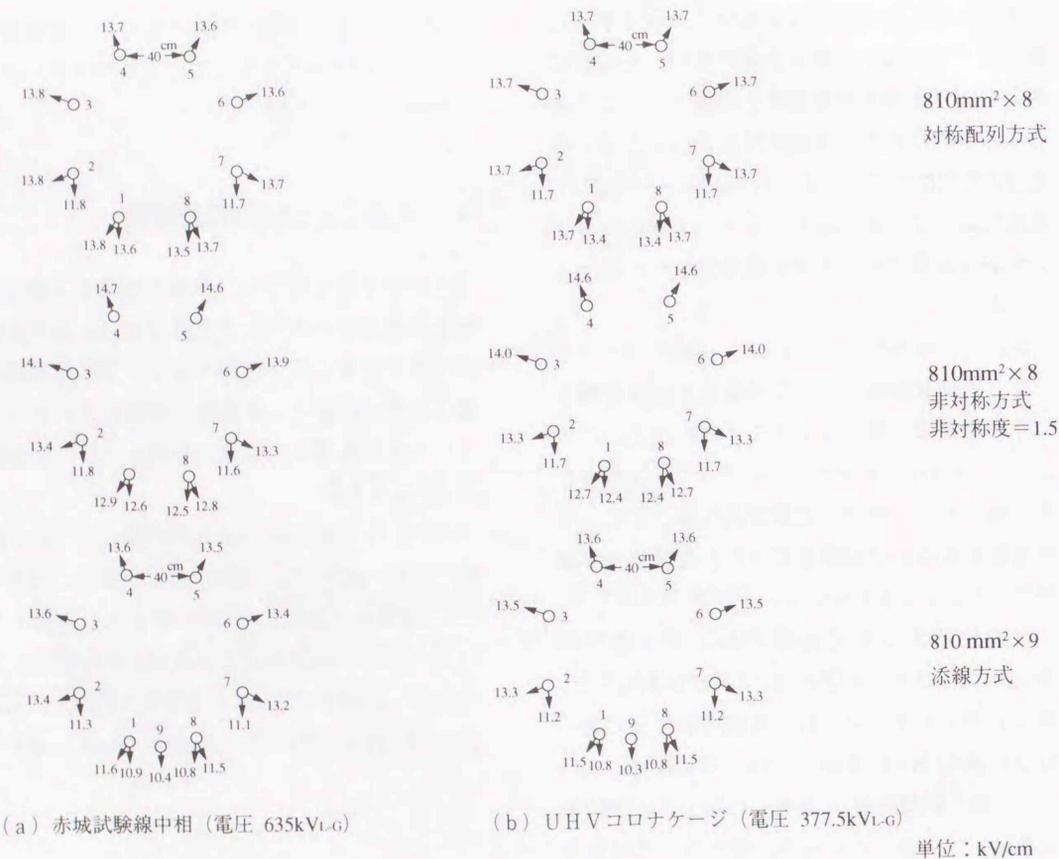
対称配列の $810\text{mm}^2 \times 6$ 電線の場合について添線の効果を検討した。添線の位置を第9.4図[4]に示す。素導体が構成する円周の最下点を基準として、下方に $a=185\text{mm}$ と $a=50\text{mm}$ の位置に、また上方に $a=40\text{mm}$ の位置に素導体を追加した（以下、それぞれ -185mm 、 -50mm 、 40mm と記す）。

第9.1表 赤城試験線による非対称方式と添線方式電線の実証試験結果

Table 9.1 Measured Results of Asymmetric Bundle and Added System at Akagi Test Line

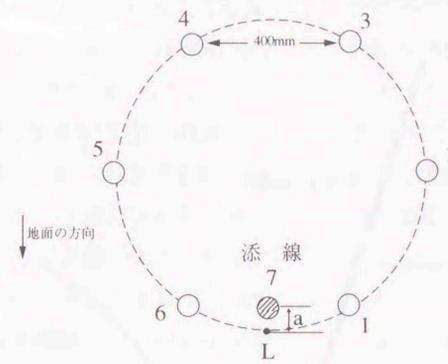
試験番号	導体方式	素導体配列	スパイラル線の 取付方法	L ₅ L ₅₀ データ数	コロナハム音レベル [dB(A)]				備考
					課電圧[kV]				
					1000	1100	1200	0	
1	810mm ² ×8	非対称 E ₀ =1.5	対角密着4条	L ₅	40	42	--	21	第1径間 '87/09~ '87/12
				L ₅₀	29	37	--	15	
				データ数	807	1940	--	1952	
2	810mm ² ×9	非対称 添線	対角密着4条 添線には スパイラル線なし	L ₅	33	38	46	22	第1径間 '88/03~ 89/07
				L ₅₀	25	31	38	17	
				データ数	3341	9562	5097	11927	
参考	810mm ² ×8	対称	対密4	L ₅	40	46	50	33	前掲 第5.1表
				L ₅₀	37	42	48	14	

注1) コロナハム音レベルはパワー平均値, 注2) L₅: 5%値, L₅₀: 50%値



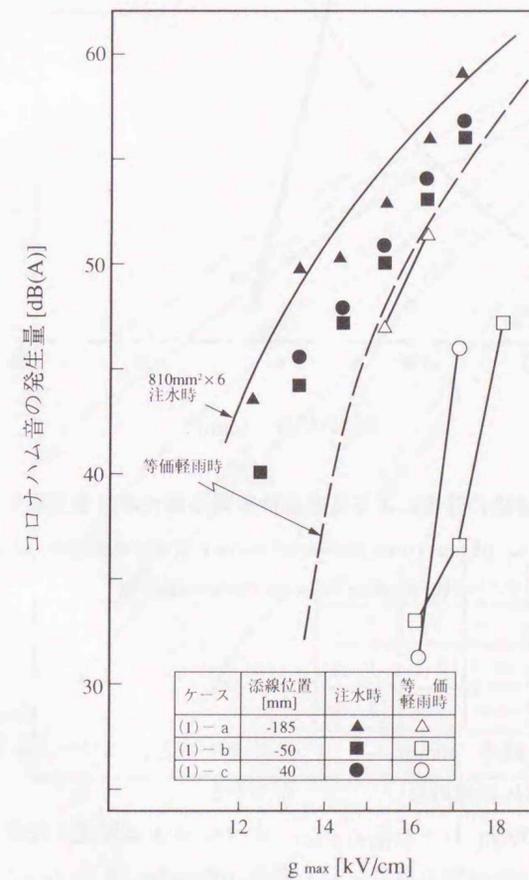
第9.3図 赤城試験線とUHVコロナケージにおける導体表面電位の傾きの分布 (810mm²×8)

Fig. 9.3 Distribution of conductor surface gradient for Akagi test line and UHV corona cage.



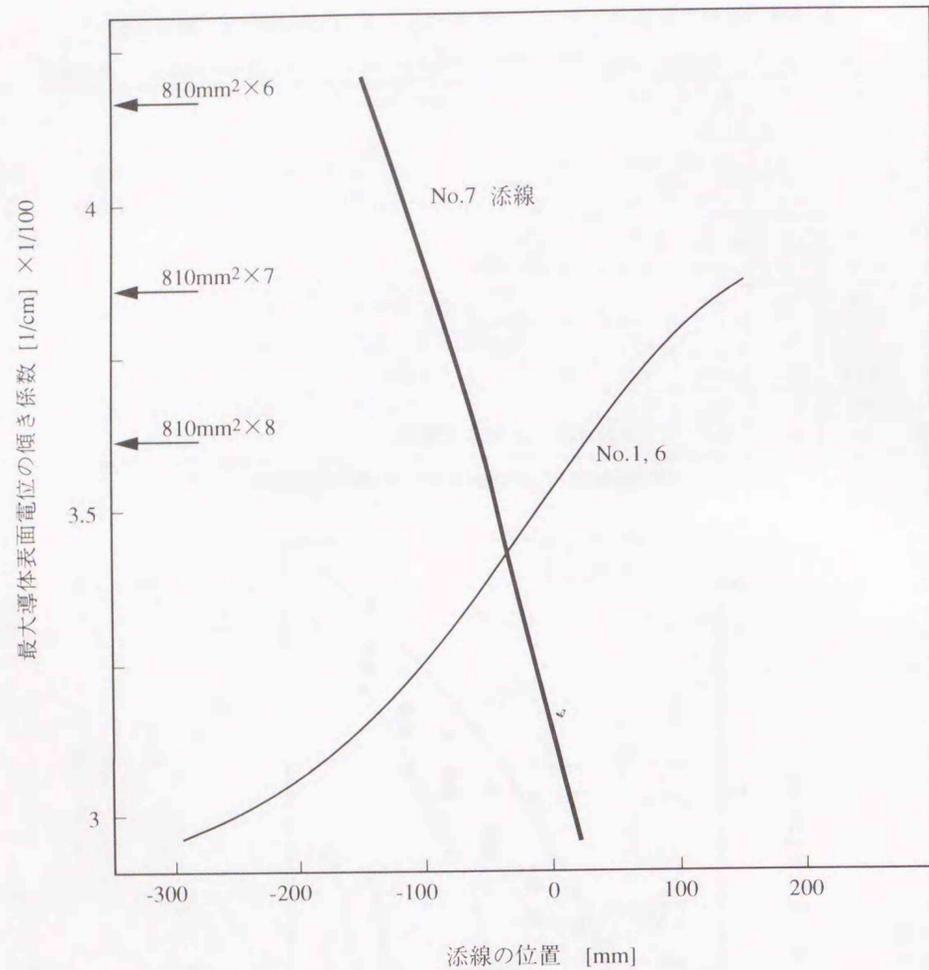
第9.4図 添線方式電線

Fig 9.4 Arrangement of subconductors in added system.



第9.5図 添線方式によるコロナハム音の低減効果

Fig 9.5 Hum noise reduction effects achieved by added system.



第9.6図 添線の位置による各素導体表面の最大導体表面電位の傾き
 Fig. 9.6 Dependence of maximum conductor surface gradient of individual subconductor on position of added subconductor.

第 9.5 図に示すように、添線を 40mm、-50mm の位置に添架した場合には、添線のない場合に比べ、 g_{max} が実用的な 18kV/cm 以下の範囲において、等価軽雨時コロナハム音発生量が大幅に (10dB 以上) 低下する。しかし、-185mm の場合は添線のない場合と同等になり低減効果はない。この様に、添線を適切な位置

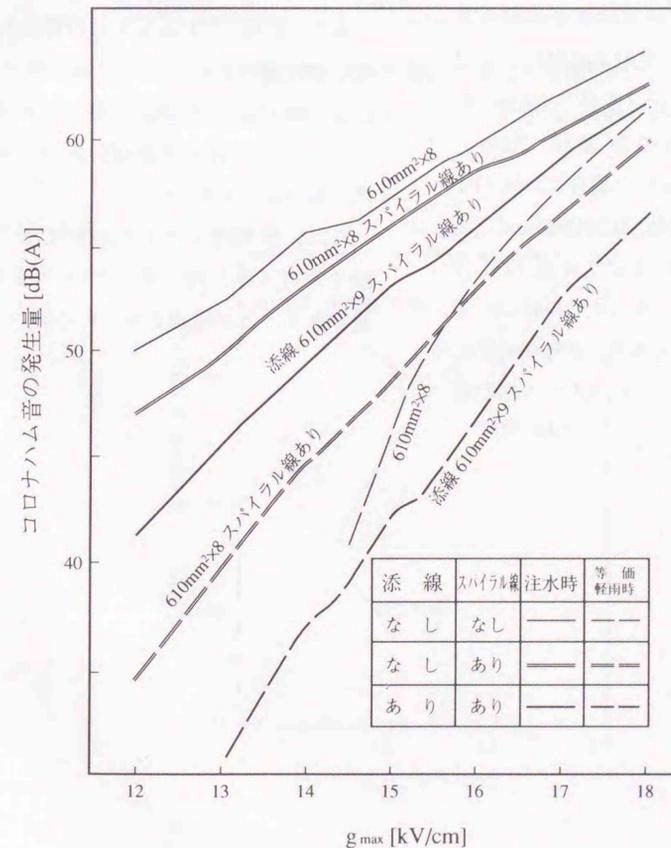
に添架すると、コロナハム音を低減できることがわかる。

第 9.6 図 [4] は添線の位置に対する地上側の素導体 (図中 No. 1 と 6) と添線 (図中 No. 7) の最大導体表面電位の傾き g_{max} を示したもので、添線の位置によって、添線はもちろんのこと、地上側素導体の g_{max} も大きく変化する。図の縦

軸は 1kV の課電圧に対する g_{max} に相当する最大導体表面電位の傾きの係数であり、対称配列の場合の $810mm^2 \times 6$ 、 $810mm^2 \times 7$ 、および $810mm^2 \times 8$ (いずれも素導体間隔は 40cm) の g_{max} も示している。電線の下面に水滴が付着した場合、他の素導体に比べ、添線および地上側の素導体がコロナハム音の発生量に大きく寄与するものと考えられ、これらの g_{max} 曲線が交差する -30mm 付近に添線を配置するのが発生量を低減するには有利であると考えられる。この場

合の添線および地上側の素導体の g_{max} は対称配列の 8 導体電線の場合よりも小さい。

スパイラル線を取り付けた場合にも、添線によるコロナハム音の低減効果があることを第 9.7 図 [4] に示す。添線の位置は $610mm^2 \times 8$ 対称配列電線の素導体が構成する円周の最下点である。 g_{max} が 14.5~18kV/cm の広い範囲において、スパイラル線の有無によらず添線を加えることによりコロナハム音の低減効果があることがわかった。



第9.7図 添線方式によるコロナハム音の低減効果 (添線 $610mm^2 \times 9$)
 Fig. 9.7 Hum noise reduction effects achieved using added system.

赤城試験線における添線方式のコロナハム音に関する実証試験結果を先の第9.1表に示す。表には、比較対象として先の第5.1表のNo.4 (810mm²×8, 対称配列, スパイラル線: 対角密着4条巻) の場合の試験結果も並記している。これらの比較から、添線方式ではコロナハム音の大幅な低減が見られ、試験線においても、添線を加えることによりコロナハム音が低減することがわかる。

9.4 素導体表面形状の加工による協調低減対策

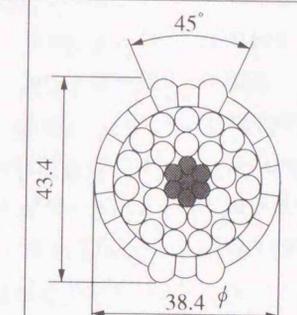
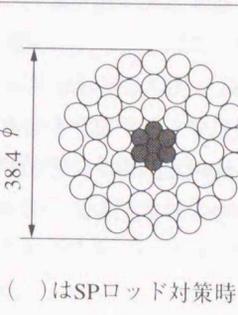
従来、風騒音対策としては、素導体の風下側の流れを乱すために電線表面にスパイラル線が取り付けられてきた。例えば、商用送電線によく用いられる素導体 ACSR810mm² (直径 3.84cm) の場合にはスパイラル線の直径は 7mm, ACSR410 mm² (直径 2.85cm) の場合にはスパイラル線の直径は 6mm, 素導体 ACSR240mm² (直径 2.24cm) の場合にはスパイラル線の直径は 4mm である。すなわち、スパイラル線は、素導体径の 1/5~1/6 程度の径をもち、素導体表面の高い突起となる。したがって、スパイラル線の取

り付けは、その表面に付着した水滴からコロナ放電が発生しやすい状況を引き起こすため、コロナ騒音、特にコロナハム音の発生量を増加させる。

第9.8図は、1000kV送電線用に開発された新型電線の断面形状である[5]。この新型電線は最外層からの突起部の突き出し量を極力抑え(2.5mm)、コロナ放電を抑制し、結果としてコロナハム音発生量の増加を抑えることを狙ったものである。新型電線は製造工程においてスパイラル線の働きをする突起部を電線最外層に組み込んだもので、架線工事後のスパイラル線の取り付け工事が不要となり工事コストが削減できる利点もある。

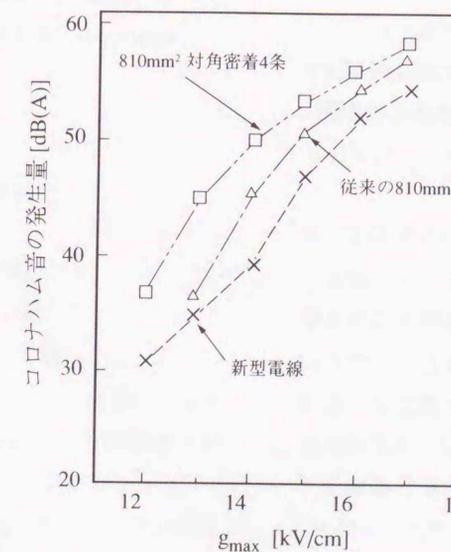
第9.9図は、この新型電線の場合とスパイラル線を取り付けた場合との比較であり(UHVコロナケージにおける測定結果)、新型電線の場合のコロナハム音発生量は、スパイラル線を取り付けた場合よりも低い[5]。

なお、風騒音レベルについても、この新型電線はスパイラル線を取り付けた場合と同等に低減できることが確認されている[5]。

線種		新型電線 (LN-ACSR960mm ²)	従来の電線 ACSR810mm ² (参考)
概略構造			
外径 [mm]	最大	43.3	38.4
	等価	40.3	38.4(44.5)
質量[kg/m]		3.108	2.7(3.141)

第9.8図 新型電線の緒元と断面形状

Fig.9.8 Specifications and cross section of developed conductors.



第9.9図 低騒音電線によるコロナハム音低減効果 (等価軽雨時, 8導体)

Fig 9.9 Improvement of hum noise characteristics using Low-Noise-ACSR under wet conductor condition (8-conductor bundle).

9.5 まとめ

送電線の基本導体方式（送電線路の全線にわたる電線）の選定に際しては、前述の予測法などを参考にして、コロナハム音に関しても適切な導体方式を選定するのが望ましいが、特に静寂を要求される地域を通過する送電線に対しては、1径間あるいは数径間のみの低減対策を施し、当該地域のコロナハム音レベルを抑制することが可能である。

電線から発生するコロナハム音を小さくするには、基本的には、大型の導体方式を用い、最大導体表面電位の傾きを低くすることが有効である。しかし、大型の導体方式の採用は建設コストの高騰を招く。

そこで、コロナ放電の観察から得られた知見に基づき、非対称方式ならびに添線方式について、コロナケージならびに実規模試験線を用いてその低減効果と実用性を実験的に検討した。

主要な結果を以下に示す。

- 1) 非対称方式ならびに添線方式によってコロナハム音レベルの低減が可能であることが明らか

かとなった。非対称方式では素導体配列を変更するだけでありスパーサの交換のみですみ、また、添線方式は素導体1本を添えるだけであるため、導体方式を大型にするほどにはコストは高くない。さらに、実規模試験線による様々な気象条件のもとでの長期連続試験から、これらの対策が実際の送電線においても使用できることを実証した。

- 2) スパイラル状の突起を電線製造時に組み込んだ新型電線も、コロナハム音の低減に有効であることがコロナケージによる試験から明らかになった。

文献

- [1] Tanabe K., 第1章 {128}
- [2] 田辺, 福島, 鈴木, 甘楽, 原田, 第1章 [12]
- [3] General Electric Company, 第1章 {107}
- [4] 笹野, 富田, 田辺, 出口, 原田, 第1章 [27]
- [5] M. Isozaki, Y. Akagi, K. Tanabe, K. Yamamoto, H. Kubokawa, 第1章 {129}

10. 結言

我が国のUHV交流架空送電線の電線には、コロナ騒音特性を改善するために、一般に6導体以上の多導体が必要とされている。さらに、スパイラル線の取り付けはコロナ騒音なかでもコロナハム音を増大させるため、素導体数を増すか、または素導体径を大きくして大型の電線を採用し、騒音レベルを抑制するの必要に迫られる。しかし、むやみに大型の電線を用いることは、電線重量、鉄塔重量、ならびに工事量等の増大を招き、送電線建設費が高くなる。したがって、コロナ騒音の抑止と経済性との協調を図ることが肝要であり、送電線周辺のコロナハム音レベルを的確に予測し、その影響を評価し、送電線の計画、設計、建設に反映させることが重要となる。

このため、コロナハム音につき、500kV以上の送電線の計画、設計、建設、ならびに運用に資することを目的として、

- (1) 発生量の把握
- (2) 音場分布の解明
- (3) レベル予測法の開発
- (4) 低減対策の適用性の検討

を行った。

本研究の主要な成果を以下に示す。

1. コロナハム音の発生状況

コロナハム音の発生量について、UHVコロナケージならびに実規模試験線により実験的に検討した。その結果、以下の点が明らかとなった。

発生量は導体方式、電圧、ならびに降雨強度等の気象条件に大きく影響される。また、電線表面のエージングの進行によって発生量は大幅に低減するが、風騒音対策用のスパイラル線の取り付けは発生量を大幅に増大させる。

2. コロナハム音の音場分布

(1) 平地におけるコロナハム音の性質を調べるため、音場分布の空間的な統計的性質につき理論的実験的検討を行った。その結果、コロナハム音は送電線下に複雑な定在波を形成するため、コロナハム音レベルの統計的分布はランダムウォークモデルにより説明できることが明らかとなった。

(2) 地形の影響を調べるため谷間（V字谷、U字谷）におけるコロナハム音の音場分布につき理論的実験的検討を行った。その結果、送電線が谷越えをするような場合には、谷を形成する斜面がコロナハム音を反射し、谷間に音が‘籠る’現象があることを明らかにした。V字谷を形成する斜面部の斜面角に対する平均的な音圧レベルの上昇率は、0.1dB/度であった。U字谷の場合には平坦地の幅にもよるが、斜面部の斜面角が約30度を超えると音が籠り、平均的な音圧レベルの上昇率は約0.1dB/度であった。

また、音場分布を計算機によりシミュレートするアルゴリズムを開発した。

3. コロナハム音の予測法

送電線下のコロナハム音レベルは時間的にも、空間的にも変動する。したがって、送電線下のコロナハム音レベルを評価するには‘時空間平均値（時空間にわたる平均値）を用いることが実際的であると考えた。

降雨時に発生するコロナハム音について、UHVコロナケージを用いた人工注水試験から発生量を計測した。そのデータから、送電線下におけるコロナハム音レベルの時空間平均値を計算する予測法を開発した。本予測法は導体方式、送電電圧、降雨強度、ならびにスパイラル線の有無を考慮できる比較的簡単な実験式からなり、送電線の電線設計において容易に使用できる、

実用性の高いものである。

4. コロナハム音と風騒音の協調低減対策

コロナケージによる注水実験と実規模試験線による長期連続試験から、各相電線の素導体配列の非対称化と添線の付加によりコロナハム音が低減できることを明らかにした。また、実規模試験線による長期連続試験から、これらの対策が実際の送電線においても有効であることを実証した。

以上1から4により、

- (1) これまで不明であったコロナハム音の諸特性が明らかとなった

- (2) コロナハム音レベルの実用的な予測が可能となった

- (3) 低減対策の実用性を実規模試験により明らかにした

これらの成果は、500kV以上の送電線、特に、わが国初のUHV送電線の設計にすでに活用されており、送電線の実際的な計画・設計・運用に際し、有用であると考えられる。

本研究をさらに発展させるためには、今後コロナハム音の発生量に対し、次のような検討が必要と考えられる。

- 1) 電線表面状態の影響の定量化
- 2) 降雪の影響
- 3) 電線架線形状の影響

謝辞

本論文を作成するに当たり、終始、懇切なる御指導と御鞭撻を賜った

北海道大学 大学院工学研究科システム情報工学専攻 医用システム工学分野 清水孝一 教授
に深く感謝致し、厚く御礼申し上げます。

また、本研究の実施に当たり、次の方々に御助言を賜りましたことを、ここに厚く御礼申し上げます。

北海道大学 松本伍良 名誉教授

北海道大学 大学院工学研究科 伊藤精彦 教授

電力中央研究所 中村 宏 氏 (元 電力中央研究所理事)

西山 文彦 氏 (元 電力中央研究所)

粕江研究所 福島充男 理事

我孫子研究所 笹野隆生 課題推進担当

粕江研究所 横山茂 研究参事

粕江研究所電気絶縁部 須永孝隆 上席研究員

企画部 藤波秀雄 次長

横須賀研究所電力部 高須和彦 部長

東京電力(株) 送変電建設本部 多摩支店 八王子工務所 武部俊郎 所長

送変電建設本部 架空送電グループ 渡辺昌人 グループマネージャ

電力技術研究所 送変電グループ 磯崎正則 主任研究員

送変電建設本部 線路設計グループ 深澤正俊 グループマネージャ

総合研修部 架空送電グループ 横田友孝 グループマネージャ

送変電建設所 架空送電グループ 征矢光行 副長

送変電建設本部 架空送電グループ 赤木康之 副長

四国電力(株) 大西 勝 (元 監査役)

電力部 送電課 森下博 課長

電力部 送電課 片岡佳英 副長

さらに、次の方々には御助力ならびに御協力を頂きましたことを深謝致します。

電力中央研究所 赤城試験センター 甘楽忠典 課長

電力中央研究所 粕江研究所 塩原実験場 三宅久仁彦 場長 ならびに 関係各位

情報研究所 鈴木 正 上席研究員

粕江研究所需要家システム部 中野幸夫 上席研究員

粕江研究所電気絶縁部 富田誠悦 上席研究員

東光電気工事 中尾増次郎 氏 (故)

飯田林吉 氏 (元)

大木電設工業 大崎 弘 氏 (元)

学位論文内容の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学)

氏名 田辺 一夫

学位論文題名

交流架空送電線から発生するコロナハム音の諸特性, 予測法, ならびに低減対策に関する研究

近年, 送電線の高電圧化・大型化にともない, その計画・設計・運用に際しては, 環境問題に対する十分な配慮が必要となってきた。交流送電線の電線からはコロナ放電が発生することがあるが, この放電に起因する環境問題にコロナ騒音がある。コロナ騒音には約 500Hz から 20kHz 程度までの可聴周波数成分を有する不規則性の騒音成分 (ランダム騒音) と電源周波数とその偶数倍の周波数の純音成分とがある。この純音成分のうち, 通常, 電源周波数の 2 倍の周波数成分 (日本の西地域では 120Hz, 東地域では 100Hz) の騒音レベルが大きく, これをコロナハム音という。このコロナ騒音は UHV 交流送電線の電線設計における支配要因とされ, とくにその対環境設計においては極めて重要な要因である。

ランダム騒音に関しては, 早くから国内外において注目され, その性質は詳細に解明されているが, コロナハム音についての研究成果は散見される程度である。このようにコロナハム音に関する研究成果が少ないのは, 定在波の形成, 電線表面状態や気象条件等の影響による大幅な発生量の変動のために, その取り扱いが難しかったためと考えられる。しかしながら, コロナハム音は, (1) 純音であるため, 地表面や建物による反射により空間的に定在波を形成し, 騒音レベルが位置によって大きく変わること, (2) 自然界にはあまりない音質であること等から人に感知されやすく, 環境問題としては, むしろ, ランダム騒音よりも重要度が高い。

このため, 送電線沿線の環境保全を図るためには送電線下のコロナハム音レベルを的確に予測し, その環境影響を評価した上で電線設計に反映させることが肝要である。このような要請に応えるため, 本研究ではコロナハム音に関し, 以下の項目について理論的実験的検討を行ってきた。すなわち, (1) 発生状況, (2) 音場分布, (3) 騒音レベル予測法, (4) 低減対策である。

まず, コロナハム音の発生状況について, UHV コロナケージならびに実規模試験線等により実験的検討を行った。これより, コロナハム音の発生状況について考察を加え, 次の諸点を明らかにした。(1) 発生量は導体方式, 電圧, ならびに降雨強度等の気象条件に大きく影響される。(2) 電線表面のエージングの進行によって発生量は大幅に低減するが, 風騒音対策用のスパイラル線の取り付けは発生量を大幅に増大させる

次に, コロナハム音の音場分布について実験的解析を行った。まず, 平地に

おける音場分布の空間的な統計的性質について調べた。コロナハム音は送電線下に複雑な定在波を形成する。したがって、線下のコロナハム音を評価するには音場分布の空間的な統計的性質を把握することが重要である。実規模試験線によるコロナハム音レベルの測定結果から得られる統計的分布とランダムウォークモデル（各相から発生するコロナハム音はランダムに加算されるとするモデル）によるシミュレーション結果はよく一致し、コロナハム音レベルの統計的分布についてはこのモデルが適用できることを明らかにした。このランダムウォークモデルによって、送電線の任意の相数（音源数）における場合のコロナハム音レベルの統計的分布の予測も可能となった。また、コロナハム音の音場分布に対する谷間の影響について調べた。送電線が谷越えをするような場合には、谷を形成する斜面がコロナハム音を反射し、谷間に音が‘籠る’ような現象があることを、代表的な谷間地形であるV字谷ならびにU字谷（中央部に平坦地あり）のモデルによる実験から初めて明らかにした。V字谷を形成する斜面部の斜面角に対する平均的な音圧レベルの上昇率は0.1dB/度であり、U字谷の場合には平坦地の幅にもよるが斜面部の斜面角が約30度を超えると音が籠ることが分かった。さらに、音場分布をシミュレートするためのアルゴリズムを新たに開発した。本手法によりV字谷ならびにU字谷の場合について音場分布を求めた。シミュレーション結果と実験結果とを比較すると、斜面角に対する音圧レベルの変化や音圧レベルの上昇値などにつき、よい一致が得られた。

これらの解析結果をもとに、コロナハム音の予測法を開発した。送電線下のコロナハム音レベルは、時間的にも空間的にも変動する。したがって、送電線下のコロナハム音レベルを評価するには‘時空間平均値（時空間にわたる平均値）’を用いることが实际的である。降雨時に発生するコロナハム音について、UHV コロナケージと実規模試験線による試験データから、この時空間平均値を計算する予測法を新たに開発した。本予測法は導体方式、送電電圧、降雨強度、ならびにスパイラル線の有無を考慮できる比較的簡単な実験式からなり、送電線の電線設計において容易に使用でき、実用的であることが特徴である。

本研究の結果を総合することにより、コロナハム音と風騒音の協調低減対策を考案した。実規模試験線による長期連続試験から、各相電線の素導体配列の非対称化と添線の付加によりコロナハム音を低減できることを実証し、あわせてこれらが実際の送電線に適用できることを明らかにした。

以上、本研究の成果により、（1）これまで不明であったコロナハム音の諸特性が明らかとなった。（2）実用性の高いコロナハム音レベルの予測が可能となった。（3）コロナハム音の低減対策の実用性を実規模試験により確認した。

これらの成果は、すでにわが国初のUHV送電線の設計に活用されている。また、将来の新設送電線の計画・設計・運用に際し有用であると考えられる。

