

送電線の統計的耐雷設計計算に関する一考察 (計算結果の図形化について)

岡 本 弘・宝 泉 和 明

A Certain Consideration about Statistical Designing Computation of Lightning Suppression of Transmission Lines (Realization of Computer Graphics of Calculated Results)

Hiromu OKAMOTO, & Kazuaki HOUSEN

Several computation results of the failure of suppression and the inverse flashover of three phase transmission line by the aid of "The Armstrong & Whitehead's Theory" and the computation data and successive computer graphic curve plotting for the use of transferring from "FORTRAN" to "BASIC" were performed for the representative cases of span lengths and tower heights. The most remarkable tendencies were seemed that for the longest offset at the middle phase (B), the larger percentage of failure of suppression presents dominantly than the cases for successive longer offsets from the top to the bottom (from (A) to (C) phase).

1. 緒 言

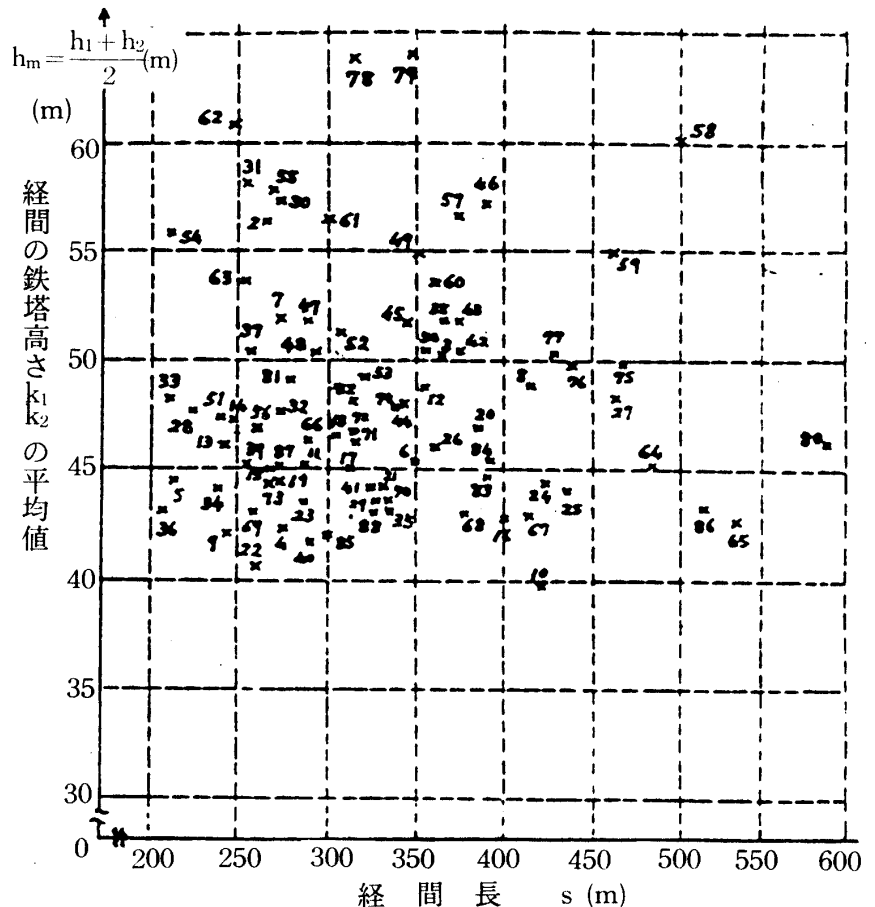
高層建造物と送電線路における避雷針及び架空地線の保護範囲ないし一般避雷論・送電線の耐雷設計に関しては、戦前の名著である“雷及び避雷”¹⁾(電気試験所技師宮本慶己氏著)に詳述されている。その後、戦中戦後に亘り元電気試験所技師三田昇氏の創案になる吸引空間理論²⁾が長期間送電線の耐雷設計の理論として普及賞用されて来たが、其の後続々として建設された275[kV]ないし500[kV]の所謂超高圧送電線路の耐雷設計に関しては、米国のArmstrong-Whitehead両氏の理論^{2),3)}(以後A-W理論と略称する)が実状を良く説明できると言われている。

このA-W理論によれば、雷撃距離を雷撃電流の関数として表わし、雷撃点を送電線導体を選ばれるか又は地面に設けられるかの境界線としては、地面を準線とし各相導体を焦点とする4本の放物線のつながりを考える。且つ上中下各相電力線導体への放電即ち遮蔽失敗をもたらす曝露空間(exposure area)と、架空地線への放電時の電位上昇に基づき逆閃絡を起す曝露空間の両者を考える。そして更に送電線路の径間長、鉄塔上の導体配列と地上高等の幾何学的寸法、雷撃

電流の波高値と出現確率などの諸条件をもとにして、遮蔽失敗と逆閃絡の事故数を算出し、鉄塔雷、径間雷の発生率分担状況を計算し、これからのデジタル数値を図形化することができた。ところが実際の送電線路は山野の傾斜勾配⁴⁾の地形を抜渉して立地条件が複雑多岐であり、結果を簡単に要約することが困難なため、水平な地上に線路が一直線に架設され、鉄塔高が雑多な場合をモデルとして求めることとし、86個の径間について、一々結果を出した積年の傾向を改め、径間長の短・中・長3ケース、左右の鉄塔高の平均値の異なる3ケース、上・中・下相とゆくにつれて、鉄塔中央軸からの出幅（offset）が次第に長くなるA型配置と中相のみ突出したO型配置とに二大別した18通りの条件につき計算してその結果を図形化することにより、手作業描画の労力を大幅に節減し、計算効率を著しく向上した。本報告は本学に於いて逐年続けて来たこの研究の成果の要旨を説明すると共に、今年より新たに準備を整えて実測を始めた雷電流観測用磁鋼片装置⁵⁾の概要をも併せて報告しようとするものである。

2. 供試条件と仮定

第1図は実在する送電線路の鉄塔91基の内、立上りなど特殊状況のものを除く86個の径間を選んで、径間長 S 〔m〕を横軸に、径間の両端の鉄塔高さの平均値 $(h_1+h_2)/2$ を縦軸に、径間番号をパラメータとして註記した散布図で、径間の条件は無作為に散在していて、各個の計算結果を出しても比較がしにくいので、両端鉄塔の高さを $Y1(1)=45.8$ 〔m〕、 $Y2(1)=54.8$ 〔m〕、 $S=480$ 〔m〕、左から右への支持点の上り勾配角 $\alpha=9.0/480=1^\circ05'$ 、鉄塔上の導体配置を(A)(O)の2種別にして比較することとした。但し $Y1(1)$ と $Y2(1)$ は左



第1図 径間長 S 〔m〕と両端鉄塔平均高さ h_m 〔m〕
によって表わした供試径間条件の分布図

右の各鉄塔上の架空地線の地上高〔m〕を意味し、(2), (3), (4)は電力線導体のそれぞれ上, 中, 下相を表わす。導体配置の二大別の(A)は通称「すんなり」鉄塔, (O)は「ずんぐり」鉄塔と言ひ習わし、第1表の諸寸法を有している。

第1表 導体配列(A)と(O)型におけるオフセット長さの相違の表

鉄 塔 の 別		左 側 鉄 塔				右 側 鉄 塔			
相 別		架空地線	上 相	中 相	下 相	架空地線	上 相	中 相	下 相
径間の両端での 地 上 高 [m]		45.8	39.5	30.5	21.5	54.8	47.0	33.2	22.1
オフ セット (m)	(A)配列	4.55	6.4	6.7	7.0	4.55	6.4	6.7	7.0
	(O)配列	8.2	9.7	13.4	10.8	8.2	9.7	13.4	10.8

即ち(A)(O)の区別はオフセットの突出した長さの相違であり、左側鉄塔と右側鉄塔の違いは高さの相違を表わしている。

次に今回の計算の順序を示す。

1) 計算条件の読み込み(その1)

雷撃密度即ち送電線路の経過地域において過去永年に亘り、1[km²] 当り年5回の落雷実績があるものと仮定する。わが国には群馬・栃木両県下や鈴鹿地方等雷多発地域とその反対の地域が混在するためこの雷撃密度 N_0 は簡単には決定し難いが、一例として $N_0=5$ (回/年・km²)と仮定して計算を進める。

雷道インピーダンス即ち雷雲から雷撃点迄の空間の放電通路における電圧と電流の比に相当するものを雷道インピーダンスと称し、従来より経験的に妥当とされている $Z=400[\Omega]$ を用いる。

雷撃侵入の経路は垂直方向が最も発生し易く、傾斜角(侵入角ともいう) ϕ が増えるに従い、発生確率が減少することが観測されている。この度合を表わす関数 $g(\phi)$ は次式で表わすがその次数 m を3と仮定して

$$g(\phi) = \frac{\cos^m \phi}{\int_{-\alpha}^{\alpha} \cos^m \phi d\phi} = \frac{3}{4} \cos^3 \phi, \text{ ただし } \alpha = \pi/2, m=3 \quad (1)$$

という関数を用いる。

雷撃電流 I_0 は大きい値ほど発生確率が減少することが観測されていてその確率関数として、次式を適用する。

$$P(I_0) = 4.75 e^{-\frac{I_0}{20}} + 0.1 e^{-\frac{I_0}{50}}, \quad (I_0 [\text{kA}]) \quad (2)$$

径間番号 M と径間長 S [m] および送電線のサージインピーダンス $Z_c=400[\Omega]$ を採用する。

2) 計算条件の読み込み(その2)

装柱データを入力する。即ち2回線鉄塔の片側回線を考えて、線路に直角な水平方向即ちオフ

セット方向を x 軸，鉛直方向を y 軸，線路方向の左側鉄塔から右側鉄塔へ向かう方向を z 軸とする。左側鉄塔を添字 1，右側鉄塔を添字 2 として，架空地線，電力線導体の上・中・下相の順にそれぞれ X 1 (J)，Y 1 (J)，X 2 (J)，Y 2 (J)，(J = 1, 2, 3, 4) の座標を読み込む。

架空地線と電力線導体の水平張力 T [kg] と比重 (単位長 1 [m] 当りの質量) w [kg/m] を仮定する。架空地線は公称断面積 120 [mm²] イ号アルミ合金燃線⁶⁾ w = 0.8456 [kg/m]，T = 3300 [kg重]，電力線導体は公称断面積 410 [mm²] ACSR⁷⁾ を用いるものとして，w = 1.673 [kg/m]，T = 4500 [kg重] を採用する。こうすることにより，径間に沿うての座標 z の各点でのたるみ (弛度) が算出できる。最大たるみは架空地線で $D_{Gmax} = 3.203 \times 10^{-5} \times S^2$ [m]，電力線導体で $D_{Cmax} = 4.647 \times 10^{-5} S^2$ [m] となって，線種，設計値の相違のため，径間中央部で，電力線導体は架空地線より甚だしく垂下するので，事故率の算定に影響を及ぼすこととなる。

3) 計算条件の読み込み (その 3)

遮蔽失敗⁸⁾を起す最小雷撃電流 I_{oc} [kA] を決めるため，アークホーン (招弧角) の 50% フラッシュオーバー電圧 V_{50} と線路のサージインピーダンス $Z_c = 400$ [Ω] とから，

$$I_{oc} = 0.9 \times \frac{2 V_{50}}{Z_c} \quad [\text{kA}] \quad (3)$$

を求めて計算に適用する。

次に鉄塔逆閃絡⁹⁾をもたらす最小雷撃電流 I_L を決めるために

$$I_L = \frac{V \pm E}{(K - C) Z_r} \quad (4)$$

という式を用いる。ここに V は招弧角の 50% フラッシュオーバー電圧，E は送電線に繋がる交流発電機電圧波高値で，線間電圧 V の $\sqrt{2}/\sqrt{3}$ 倍，又 V については

$$V = 1300 \left(1 + \frac{1.28}{t} \right) \quad (\text{kV}) \quad (5)$$

t = 印加されたインパルス電圧の波頭長 [μs]

$V \pm E$ と複号のある理由は V が印加される瞬間が E の位相角の 0° か 180° かによって，和又は差になることを考慮しているためである。

$K = 0.9$ = 上相導体の電位分布係数， $C = 0.33$ = 架空地線と導体間の結合率， $Z_r = 100$ [Ω] として $(K - C) \cdot Z_r = 57.0$ (Ω) となる。

逆閃絡を起す最大雷撃電流値として，自然雷の測定実績から，最大値 $I_{0max} = 250$ [kA] を採用する。

4) 計算条件の読み込み (その 4)

鉄塔雷と径間雷の 2 種に分ける必要上，径間 S をその 1/4 と 3/4 の長さに相当する地点を境とし

て区分して、左方鉄塔雷，径間雷，右方鉄塔雷として積算する。この際Sをzに沿うて10[m]ごとの小区間の連鎖 Δl に区分した事故率についてはシンプソンの公式⁹⁾を用いて，

$$SGM = \frac{2 \Delta l}{6} (u_{2n} + 4u_{2n+1} + u_{2n+2}) \quad (6)$$

として計算する。

ところが1/4および3/4地点に前後した10[m]未満の端数区間については台形近似¹⁰⁾を用いて，

$$\left. \begin{aligned} \text{左側端数区間：} SGML &= \frac{\Delta Z_1}{2} (u_{2n+2} + u_{s/4}) \\ \text{右側端数区間：} SGMR &= \frac{\Delta Z_2}{2} (u_{s/4} + u_{2n+4}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

但し $\Delta Z_1 + \Delta Z_2 = 10$ [m] (1/4区間長分割点について)

上式で求めたSGMLは左方鉄塔事故率に，SGMRは径間雷事故率に加算する。 $u_{s/4}$ についてもこれに準じた取扱いをする。

5) 計算の開始

第2図；計算全体のフローチャートおよび，第3図；遮蔽失敗事故率の計算プログラム部分フローチャートの両者を参照せられたい。

5. 1 V_{50} ， Z ， Z_c ， Z_r から，アークホーンが閃絡を起す最小雷撃電流値 I_{oc} ， I_L の計算を行なう。

5. 2 I_{oc} ， I_L から，導体又は架空地線と大地への閃絡距離 r_{ss} ， r_{ss} を(8)式により求め，これと装柱データを用いて，線路の微小区間 $\Delta l = 10$ [m] ごとに，指定された導体の上相から逐次下相迄の遮蔽失敗と架空地線の逆閃絡につながるexposure area（曝露空間）を決定してその上下限（各導体を中心として見た中心角） θ_1 と θ_2 を求める。

$$r_{ss} = r_{SG} = 6.72 I_{oc}^{0.8} \quad \text{又は} = 6.72 I_L^{0.8} \quad (8)$$

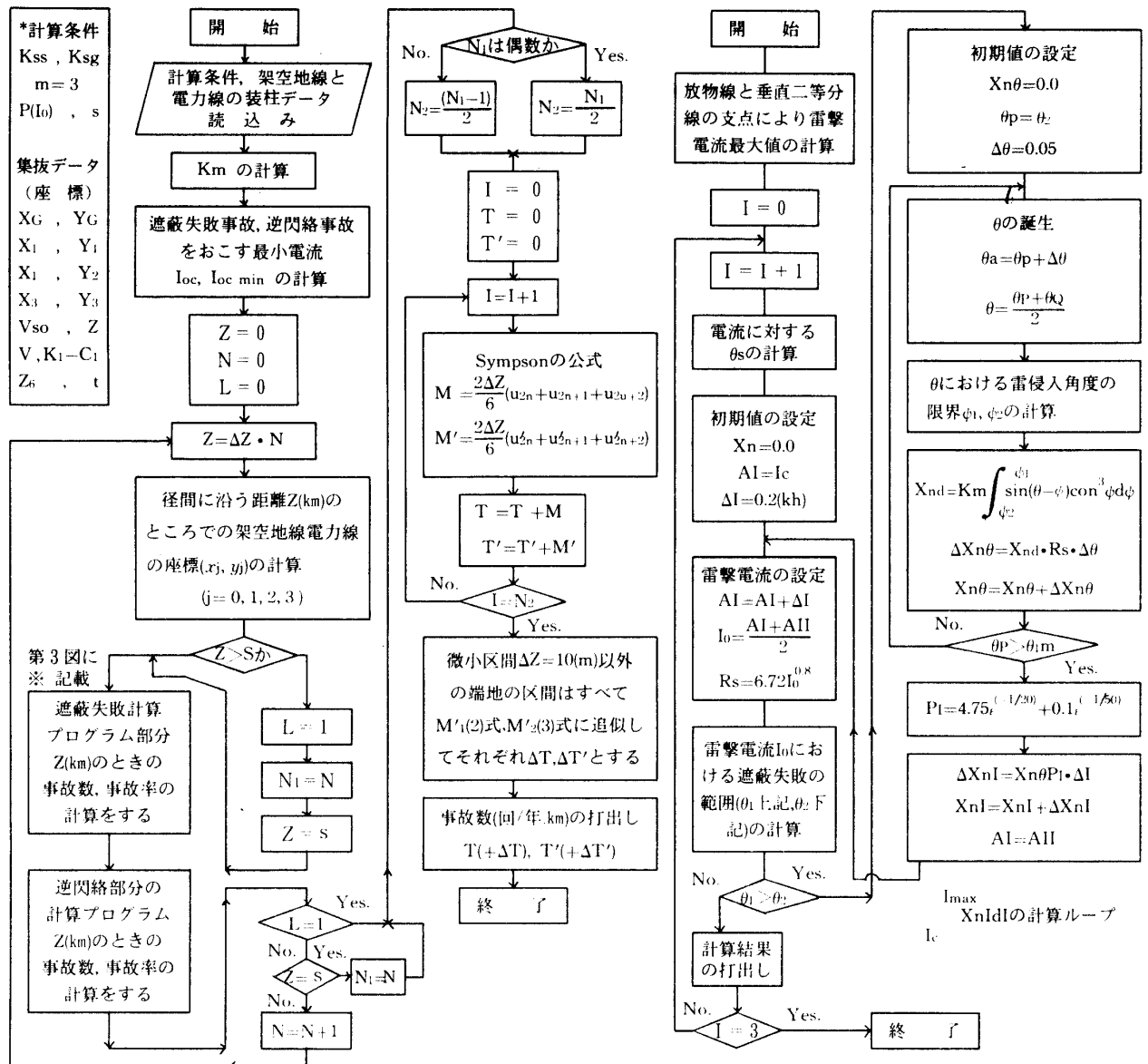
5. 3 exposure areaを半径 r_{ss} の異なる Δr のexposure arcごとに計算するに当り，exposure arcの微小区間（ r_{ss} ， $\Delta \theta$ ）のときの雷撃侵入角 ψ の下限 ψ_2 ，上限 ψ_1 を， $m=3$ の次数の下に(1)式で求め $\psi_2 \sim \psi_1$ の間の積分を行ない，さらにこれをexposure arcの全体について θ_2 から θ_1 の間の積分を行なう。

5. 4 上記の値に(2)式の雷撃電流発生確率 $P(I_o)$ を乗じて，その Δl 区間での雷撃発生事故率の要素を出す。

5. 5 以上の計算を I_{oc} から増分 ΔI を加えて， $\theta_1 = \theta_2$ になり，exposure arcがなくなる迄行なう。但し逆閃絡については $I_{ocmax} = 250$ [kA] が決っているから， $\theta_1 = \theta_2$ とならないので放物線と鉄塔主軸の鉛直線迄の θ の範囲となる。

5. 6 上記の積分値に雷撃密度 $N_o = 5$ [回/[年・km²]] を乗じて，遮蔽失敗事故数を求める。

5. 7 1個の相の計算が完了すれば，次の相に移って同様の計算を行なって各相の事故率を



第2図 耐雷設計計算全体のフローチャート

第3図 遮蔽失敗事故率の計算プログラム部分

求め, 3相を合計して遮蔽失敗事故率をまとめる。

5.8 逆閃絡についても I_{OCmin} を(4)式から求めて $I_{OCmax} = 250 [kA]$ 迄同様の計算を行なって逆閃絡事故率を求められる。

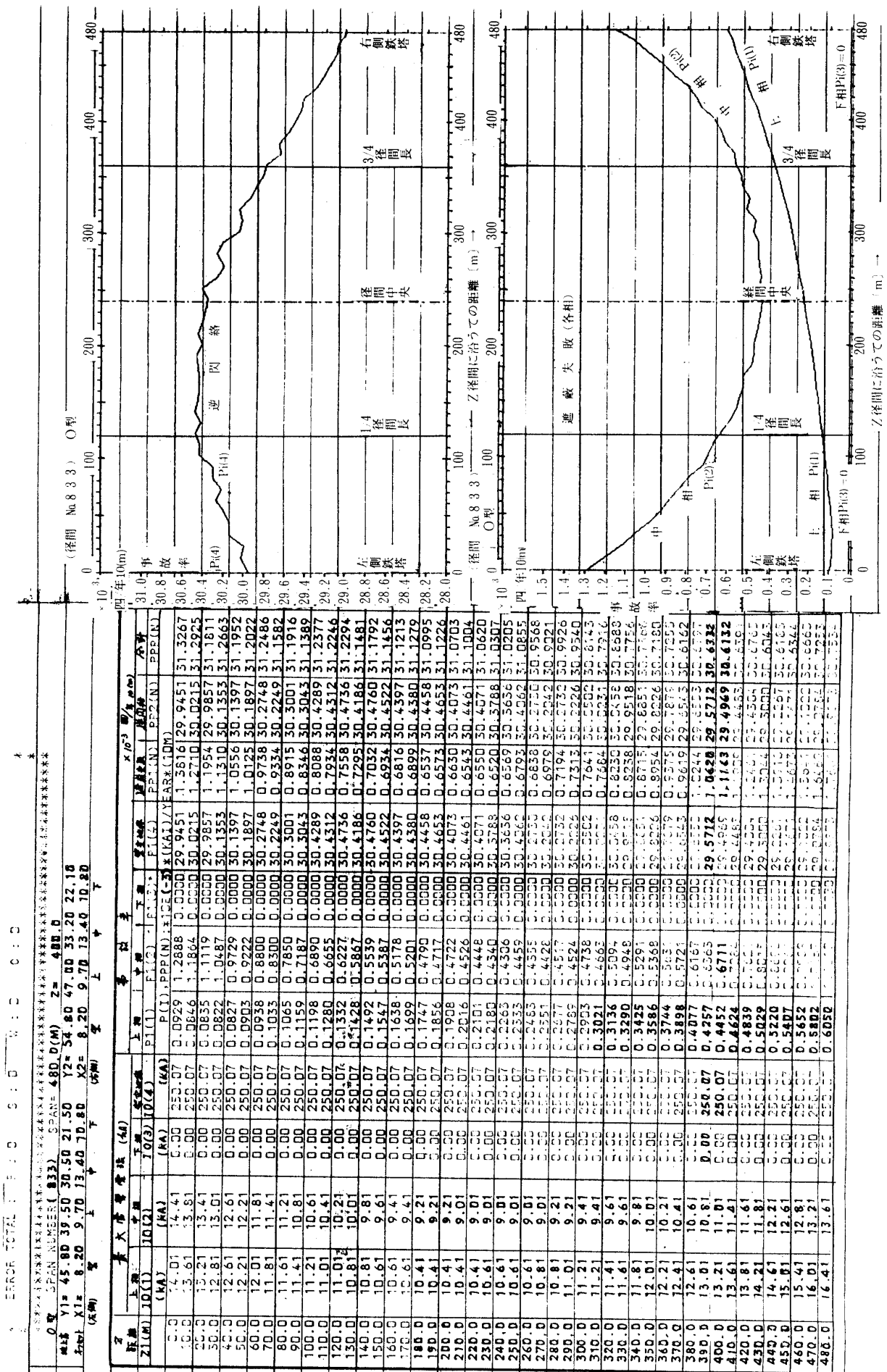
5.9 5.1から5.8迄の計算を径間の左端から右端迄区間ごとに行なった後, 径間の1/4, 3/4の地点で3区分して左側鉄塔雷, 径間雷, 右側鉄塔雷として総計しておく。

6) FORTRANによる数値表からBASICによる図形化へ

5.9迄の手続きにより, 各条件に対する数字データを出したが, これをBASICに変換して, 逆閃絡と遮蔽失敗とに分けて, 径間全体に亘り, 各種事故率がどの様に変化してゆくかをグラフ化できたので, その一例をA型とO型とについて代表的に選んで, 第4図と第5図に示している。

Technical drawing of a bridge section (A型) showing structural details, dimensions, and a cross-section diagram. The drawing includes labels for various components like 'A型', 'A型 | Z径間に沿うての距離 (m)', and 'A型 | Z径間に沿うての距離 (m)'. It also features a table with numerical data and a graph showing the relationship between distance and a specific parameter.

図4-18 (A)型鉄塔の送電線の最大雷撃電流、事故率の出力表と曲線図



3. シミュレーションの結果の考察

第4図、第5図は共に鉄塔高さY1(1), Y2(1)が比較的高くて且つ径間長480[m]の場合に対するZの座標の10[m]おきにとった相別最大雷撃電流と架空地線最大電流並びに遮蔽失敗・逆閃絡の事故率のデジタル数値出力表とこれに基づき描かれた事故率対Z座標の曲線図で、その違いは前者がA(すんなり型)鉄塔の場合で遮蔽失敗の現われる度合が上相中相の順で下相は径間の両端で僅か発生するのみであるのに対して、後者はO型(ずんぐり型)鉄塔の場合で全区間に亘り遮蔽失敗は中相、上相、下相の順に現われ、下相への落雷は皆無である。逆閃絡の事故率はO型がA型よりも約1%多いが、その分だけ遮蔽失敗の事故率が増えている。左から右への上り勾配は約1°5'で左程多くない様に考えられるが、右端の事故率が格段に多い。O型のごときは、上相の遮蔽失敗事故率がほぼ一定の割合で増えていることと、弛度最大の地点で逆閃絡の極大、遮蔽失敗の合計事故率の極小を呈している。

約20個の計算例のうち、長径間S=480[m]を代表として選んだ理由は、弛度が大で鉄塔部と径間中央部の差異が顕著なためである。第2表は径間の上り勾配の角度、第3表は総事故率の多寡、第4表は遮蔽失敗：逆閃絡の百分比、第5表は鉄塔雷：径間雷の百分比を示す。

第2表 径間の上り勾配の角度

鉄塔高種別	平均高 $\frac{h_1+h_2}{2}$ (m)	差 h_2-h_1 (m)	S=240(m)	S=360(m)	S=480(m)
高い	50.3	9	2° 9'	1° 26'	1° 5'
稍低い	45.3	8	1° 54'	1° 16'	0° 58'
低い	44.55	8.5	2° 2'	1° 21'	1° 1'
ほぼ平均	47.45	8.7		1° 23'	

第3表 逆閃絡と遮蔽失敗の合計事故率(×10⁻³回/年)

径間S(m) 鉄塔平均高	240	360	480
50.3	O型 864 A型 860	1112 1100	1610 1580
45.3	877 858	1130 1099	1642 1586
44.55	872 854	1125 1095	1635 1582
47.45	=====	1116 1097	=====

(斜線の左上はO型鉄塔、右下はA型鉄塔を表わす)

第4表 (遮蔽失敗事故率):(逆閃絡事故率)の百分比

径間S(m) 鉄塔平均高 $h_m(m)$	240	360	480
50.3	4 : 96 5 : 95	4 : 96 4.5 : 95.5	3 : 97 3 : 97
45.3	4 : 96 3 : 97	3 : 97 3 : 97	2.5 : 97.5 2 : 98
44.55	3 : 97 3 : 97	2.5 : 97.5 2.5 : 97.5	2 : 98 2 : 98
47.45	=====	3 : 97 3.5 : 96.5	=====

(斜線の左上はO型鉄塔, 右下はA型鉄塔の場合)

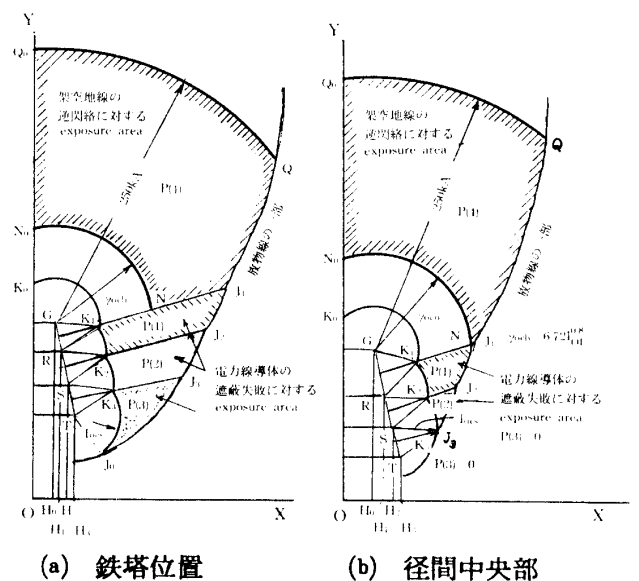
第5表 (鉄塔雷事故数):(径間雷事故数)の百分比

径間S(m) 鉄塔平均高 $h_m(m)$	240	360	480
50.3	50.0 : 50.0 50.1 : 49.9	50.1 : 49.9 50.2 : 49.8	49.9 : 50.1 50.2 : 49.8
45.3	50.0 : 50.0 50.1 : 49.9	49.9 : 50.1 50.1 : 49.9	49.8 : 50.2 50.1 : 49.9
44.55	50.0 : 50.0 50.0 : 50.0	49.9 : 50.1 50.1 : 49.9	49.8 : 50.2 50.0 : 50.0
47.45	=====	50.2 : 49.8 50.0 : 50.0	=====

(斜線の左上, 右下の区別は前表に同じ)

第6図(a)(b)はそれぞれ鉄塔部と径間中央部とで描いたexposure areaの様相を示し、径間中央部で電力線導体の弛度が架空地線のそれよりも大きいため、(b)では導体が地面に接近して、且つ距離 GR_1 が径間中央部で広がっていて、遮蔽失敗のareaは減り、逆閃絡のareaは拡張されることが肯ける訳である。

オフセットの数値は実情に合わせて選択したが、(O)型のオフセットに於いて電力線導体が架空地線よりも横に突出して、遮蔽角が大きい観を呈している。(A)型の場合の中相と下相とのオフセットを入替えたものを

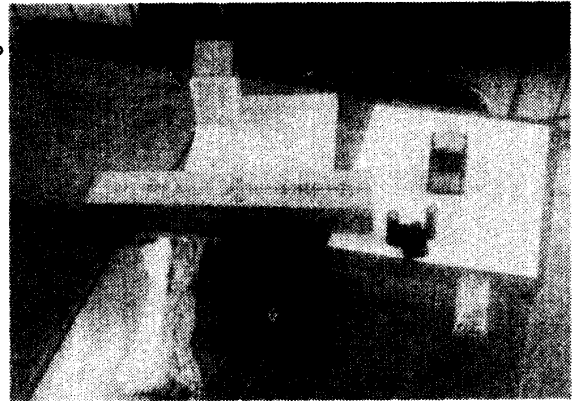


第6図 鉄塔位置と径間中央部での exposure area 比較図

(○) 型とした方が比較し易いのではないかと思います。

今後は山腹、尾根越え、谷渡りの如き複雑な地形をモデルにして計算を進めたい。

従来続けて来た理論と別に、避雷針への雷撃電流波高値を実地観測する意義を感じて、第7図の如く新規購入の磁鋼片装置とその保持器¹¹⁾を製作して5号館屋上の避雷針^{12)、13)}接地導線に取付け、落雷直後に検磁¹⁴⁾できる態勢を整えて待機中である。



第7図 磁鋼片4個、検磁計、減磁コイル、保持器一式

4. 結言と謝辞

本研究は卒業研究の一環として続け、今回一応の成果を得るに至ったが、計算条件が複雑で傾向の一端を発見したに過ぎない。環境条件の拡張、図形化の徹底を図るべきである。当初プログラムを構築した橋本晃氏（京セラ(株)勤務）、之を継承改良した小林秀圭、伊藤雅勝、中島孝明、BASIC変換とCGの道を開いた西川裕員、辻甚誠、現在従事中の前沢智広、山下宏晃の卒業研究生（当時）諸氏の熱心なる協力と管財課職員各位のご配慮に対し深甚なる謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 宮本慶己：「雷及び避雷」修教社書院，昭和16. 9月（絶版）
- 2) 電力中央研究所技術報告「送電線耐雷設計基準要綱」，昭和46. 9月，pp.29-34.
- 3) 同上 No.175031.「送電線耐雷設計ガイドブック」，昭和51. 3月，pp.19-67.
- 4) 木下仁志，山本賢司，川本紀夫：「超高圧送電線の中相雷事故多発の原因に関する一検討」電気学会電力技術研究会資料，PE78-4，1978. 4月
- 5) 一色貞三，当坂薫，美瀬忠夫：「動揺波高電流計（磁鋼片）とその応用の二三について」芝浦レビュー，昭和11. 6月（1936）vol15，No.6，pp.201-208
- 6) 電気学会標準規格，JEC-74（1976）「イ号アルミ合金電線」p.14，電気書院，昭和58. 10月
- 7) 同上，JEC-130（1976）「アルミ電線」p.14，電気書院，昭和58. 10月
- 8) 木下仁志，山本賢司，水島勇：「送電線における遮蔽失敗，逆閃絡事故比率の推定」電気学会技術報告，1977. 10月
- 9) 谷本勉之助：「実用数値計算法」p.2，森北出版(株)，昭和37. 8月
- 10) 岡本，市田，橋本，上条：「送電線の統計的耐雷設計計算の一考察」電気学会情報処理研究会資料，IP80-57，昭和55. 7月，p.97
- 11) 後藤幸弘：「磁鋼片保持器取付方法検磁に関する著者向け書翰」63. 7. 4. 受信
- 12) 沢田，小室，後藤：「巻地点における冬季雷観測（昭和60年度の結果）」電気学会高電圧研究会資料，HV86-26，昭和61. 11月，pp.81-89
- 13) 小室，沢田，後藤，成田：「昭和61年度巻地点における冬季雷観測結果」同上，HV87-29，昭和62. 10月，pp.57-66
- 14) 放電電流測定用品取扱説明書，E6702315，および検磁計校正曲線A，B，東芝発行，昭和63. 8月，No.15388