

第2章 誘雷放電電流の特性

2. 1 緒 言

送電線などの耐雷設計の基礎は、雷観測により得られるデータと室内放電実験の結果によっている。特に電流波形は根幹をなす重要なデータである。この波形は雷撃点で直接測定するのが最も信頼性が高いが、落雷はいつどこで発生するか予測することは極めてむづかしく、データを多数集積するのは容易ではない。ところが、誘雷実験では雷撃点が判明しているのに加え、能動的に雷を誘発させるため、データを得る期会が格段に増加し、正確な測定が可能である。また、この実験では同時に電界、光学測定などの測定が行なわれ、多面的な検討が加えられる。したがってデータとしての価値は高くなる。本章では、冬季の誘雷実験での電流測定回路と得られた電流波形について述べている⁽¹⁾。電流測定方法は、雷撃点に設置した同軸分流抵抗に光ファイバーケーブルを組合せた回路を用い、80m離れた地点でオシロスコープ(CRO)、データレコーダなどで記録を行なった。補助手段として磁鋼片などを併用した。昭和59年よりわく型アンテナによる電流測定を開始し、異常誘雷などの雷撃点の定まらない放電に対する波形測定を行なっている。56回の誘雷の内、51例の波高値と、17例の波形が判明した。

2. 2 電流測定回路

2. 2. 1 分流抵抗器と光ファイバーケーブルを用いた回路⁽¹⁾

ロケット誘雷放電は、引上げられたワイヤに沿って放電路が形成されるため、地上雷撃点に同軸分流抵抗器を設置すれば容易に電流波形の直接測定が行える。このとき、雷撃点で波形記録を行なうには、測定機材のしゃへいや、安全面で多くの問題があり、この対策が大がかりになる。このため、80m離れたロケット発射を行なう制御所に記録装置を設置し、雷撃時の接地電位上昇や、誘導な

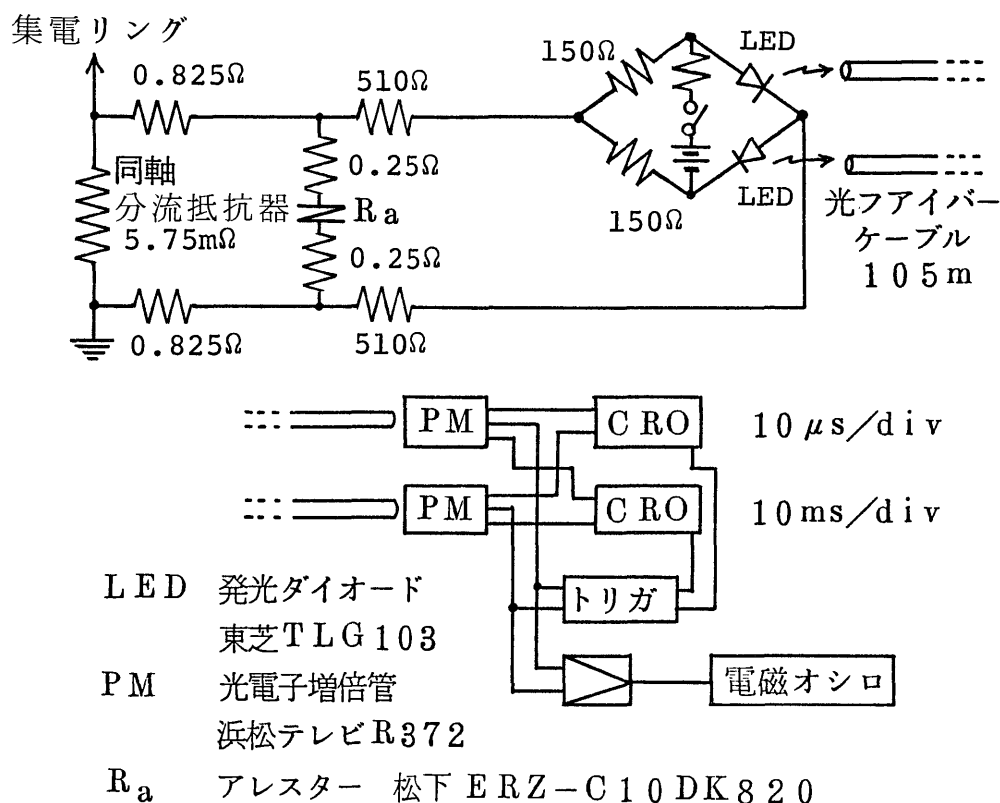


図 2. 1 初期の光ファイバケーブルを用いた雷電流測定回路

どで測定系が影響を受けないよう光ファイバケーブルで結んだ。昭和52年には光ファイバケーブル単品は入手できるようになった程度で、雷電流測定器としての製品はまだなかった。したがって、測定装置は入手可能な材料を組合せた自作品であった。昭和55年までは改良を加えながら、基本的には図 2. 1 に示す回路を用いた。集電リングに入った雷電流は銅パイプの通路を通り、同軸分流器に流れこむが、一部は発光ダイオード(LED)回路に流れ、電気／光信号変換が行なわれる。LEDの応答は1MHz入力に対して十分応答するため雷電流測定には使用できる。また、入力電流に対する発光の直線性を保つため、バイアス電流を流している。さらに正負極性の電流に応答させるため、LED 2個を極性別に分けブリッジ回路とした。このため、光ファイバケーブルと光／電気変換を行なう光電子増倍管は2組用意した。電流波形を再現するにはLEDの発光量の差を求める必要があり、2現象オシロスコープを差動操作して測定を行なった。20kA以上の入力に対してアレスタを組合せた回路で出力を圧縮する工夫もほどこし、最大50kAまで測定できる。出力の記録は、2台のオシロスコープで10μs/divと10ms/divの掃引を用いた。長時間の電流に対しては、連続性と継続時間を測定するため2kHzの応答を持つ電磁オシロを使用

した。測定系の誤差はLEDの温度特性でほぼ決り約10%である。直角波応答は $1.5\mu\text{s}$ であり、これ以上の急しゅん波では精度が悪い。以上の回路は著者が考案試作したもので特徴は、光ファイバーケーブルを初めて雷電流測定に応用した点であり、正負両極の電流に対し直線性のよい出力があり、圧縮回路で測定範囲を広くしている点である。波形測定に失敗した場合や、誘雷を利用した実規模雷実験で雷撃点に多くの測定装置が設置できない場合は磁鋼片で波高値を求めた。取付けは、電流路中心より5cmと10cmの位置とし、1kA以上が測定可能である。さらに場所によっては、0.3~3.5kAの1回巻付磁コイルや0.5~2.5kAの磁気抵抗素子装置⁽²⁾も利用した。

昭和52年に試作した光ファイバーケーブル回路は斬新であったが、その後、電力機器メーカーなどにより、高精度の工作機械や先端技術を用い、電流測定専用の発光ダイオード、低損失光ファイバーケーブル、フォトダイオードを用いたS/N比のよい取扱いの簡単な測定装置が開発された。このため、昭和55年にメーカー製の測定装置を導入した。図2. 2はこの装置の概略を示している。これは

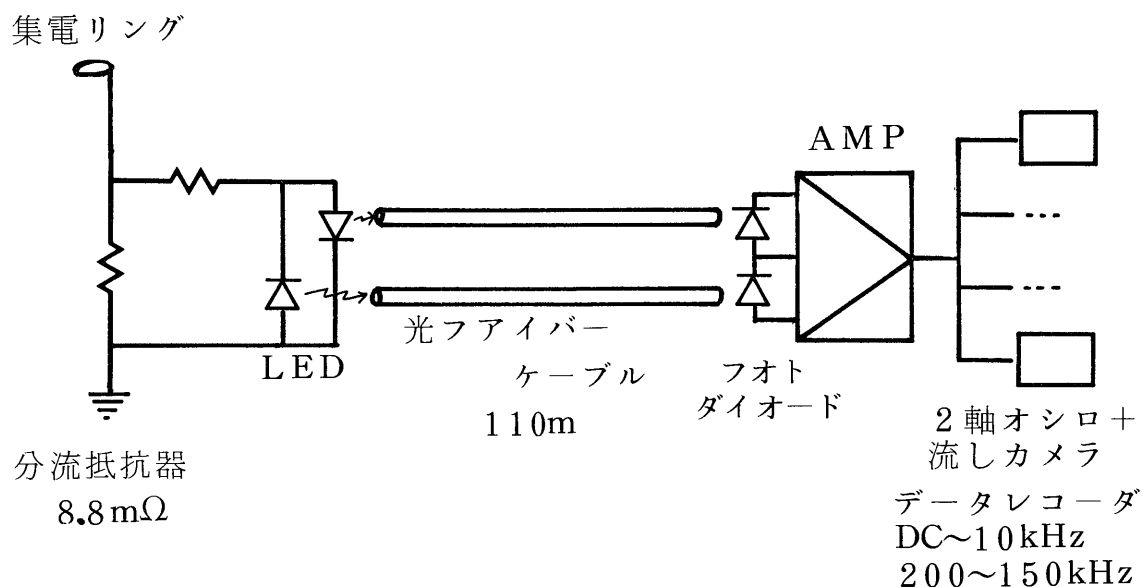


図2. 2 最近の光ファイバーケーブルを用いた雷電流測定回路

大電流で高速応答を目ざして製作され、正弦波入力で出力が-3dBになる周波数が10MHzである。応答を良くするためと、保守を容易にするため、バイアス電流は流さない方法を用いている。このため、測定範囲は400~40kAで、下限がある。記録装置も、電磁オシロに代ってDC~10kHzと200~150kHzの記録帯域を持つデータレコーダや、100MHzに応答するオシロスコープの表示を流しカメラで撮影し、3秒間の全現象を $10\mu\text{s}/\text{div}$ の時間掃引で記録できるような装

置も用いた。したがって、記録装置を含めた測定系の応答は10MHzとなった。

2. 2. 2 わく型アンテナによる測定回路⁽³⁾

誘雷実験の利点の一つに、雷撃点が定まっていることが上げられ、分流抵抗器を用いた直接測定が行なわれている。しかし、最近、誘雷を利用した雷実験が多くなり、集電リングの根元に各種のインピーダンスが挿入されるようになると、異常誘雷が目立って発生するようになった。このため、間接的な電流測定法であるわく型アンテナ法による電流測定を併用するようになった。この方法は雷電流により発生する磁界をわく型アンテナで受け、出力を積分することにより、もとの電流波形を推定するものである。

図2. 3は本実験で使用しているわく型アンテナによる測定回路の概要である。記録装置以外はすべて自作した⁽⁴⁾。わく型アンテナは1 m²の面積を有する1回巻のアンテナで、静電しゃへいを施し、雷撃点より1 km離れた位置に設置している。出力は時定数10msの積分器を通し、30mの同軸ケーブルを經由し、20～1 MHzの記録帯域を持つデータレコーダに記録した。積分器の応答は3 MHz程度までであるが、記録を含めた測定系の応答はレコーダの上限で決まり、1 MHzである。電流の最低感度は、1 km離れた地点で観測する場合、約500 Aである。この回路は、測定電流感度をできるだけ高め、積分時定数を長くし、ノイズの少ない出力とし、周波数応答を良くすることを目標として設計した。しかし、これらは矛盾することであり、最適な値を設定するのに多くの時間が費やされた。

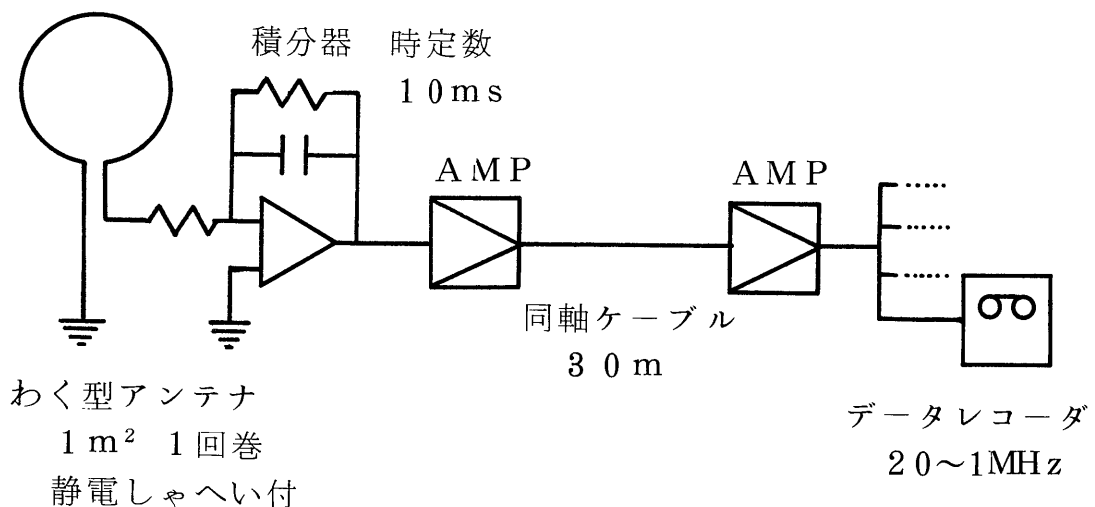
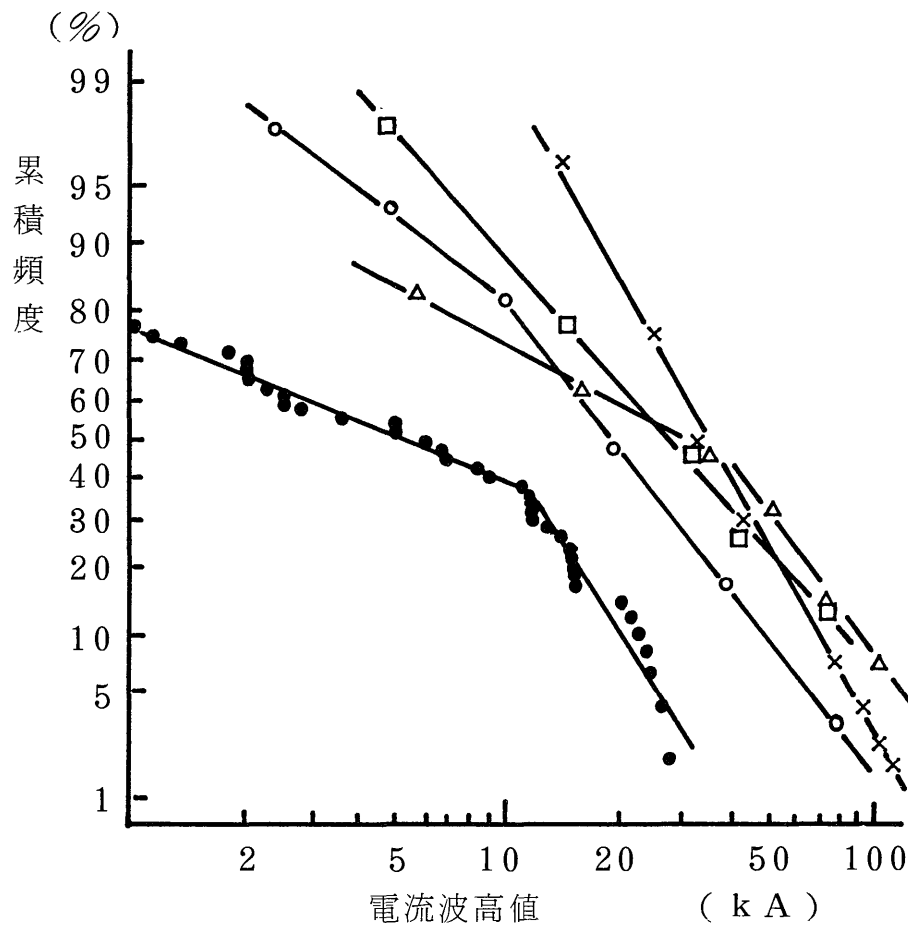


図2. 3 わく型アンテナによる雷電流測定回路

表 2. 1 誘雷電流の諸量

実験番号	波高値	(kA)	電荷	継続時間	備考
	磁鋼片	分流抵抗器	(C)	(ms)	
77-2 77-3	+2.2 -1.8				
78-1 78-3 78-4 78-6 78-7 78-8	+5.0 +1.0以下 +1.5 +1.6 (1.0A) -1.0以下				模擬人体
79-2 79-4 79-5 79-6 79-9 79-12 79-13	+3.6 -0.5以下 -0.5以下 -2.4 (-1.6) -1.4 -1.2	-2.0	-7以上	8 90 150 360以上 155	異常誘雷
80-5 80-10 80-11 80-15 80-17 80-18 80-19 80-21 80-22 80-24	+1.2 -2.0 +5.0 -1.1 +1.2 +0.5以下 +0.5以下 -1.3 -2.6 +0.5以下	-1.8	+9.0 -1.2 -8.0 +3.5 -2.0 -9.0	100 180 290 19 100 370 375	自動車 自動車 変圧器
81-6 81-7 81-9 81-10 81-11 81-13 81-16	-2.8 -9.0 (-2.2) +2.1 -6.6 0.1以下 +2.4	+4.9 +4.0 +14.8	+4.6 -1.0以下 -5.0 +2.0 -8 -2.6 +11.0	241 370 26	異常誘雷 両極性雷 変圧器 両極性雷
82-2 82-4 82-5 82-9 82-15 82-16 82-17 82-18 82-20 82-21 82-22 82-23 82-24	+1.6 +6 +2.5 +1.6 +1.6 -1.2 +1.0 +1.0	+15.0 +8.0 +9.0	+8.0 +2.1 +13.5 -1.9	27 12 41 203	配電線 異常誘雷 異常誘雷 配電線 異常誘雷 異常誘雷 異常誘雷
84-3 84-4 84-7 84-8 84-9 84-10 84-12 84-15 84-16 84-19 84-20	(-2.6) +2.3 -7.0 -6.0 (-1.1) -1.0以下 (-8.3) +2.7 -2.0 -2.0 -2.3	+19.0 -4.5 -2.6 +16.0 -1.3	+2.5 -13.0 -1.5 +1.6 -6.0	110 251 50 45 160	異常誘雷 異常誘雷 異常誘雷



- わく型アンテナ 栃木県 1959~1967 (夏) (6)
データ数 96
- △—△— 東京タワー 高さ 333m 1959~1967 (夏) (7)
磁鋼片 データ数 13
- 北陸電力株式会社 275kV 送電線 1969~ (8)
1976 (夏冬) 磁鋼片 データ数 240
- ×—×— 関西電力株式会社 275kV 送電線 1975~ (9)
1977 (夏冬) 磁鋼片 データ数 78
- 誘雷実験 石川県河北潟干拓地 1977~1984
(冬) データ数 51

図 2. 4 雷電流の累積頻度 (その 1)

2. 3 電流測定結果

2. 3. 1 電流波高値

電流波形は17例が明らかになっているが、波高値はレコーダの飽和や応答速度の上限により完全なデータは少ない。そこで、波高値は主として磁鋼片による値で検討する。表2.1は誘雷電流の諸量であり、磁鋼片により46例の波高値が判明している。異常誘雷などで測定のできなかったものについては、わく型アンテナや配電線の誘導から推定を行ない、データに加えてある。これで51例の波高値とした。これを対数確率紙上に累積させたのが図2.4である。雷電流は諸外国において数多く観測されており、波高値の中間値はおおよそ10～40kAの間に多く分布している⁽⁵⁾。図2.4の誘雷を除くデータとほぼ一致するが、誘雷放電は6kAとなっている。また、誘雷放電の約25%は1kA以下の小電流であり、他の例と著しく異なる。この原因は、送電線路では磁鋼片を太い塔脚に取付けるため、電流通路中心よりの距離が遠くなり、数キロアンペア以下の電流

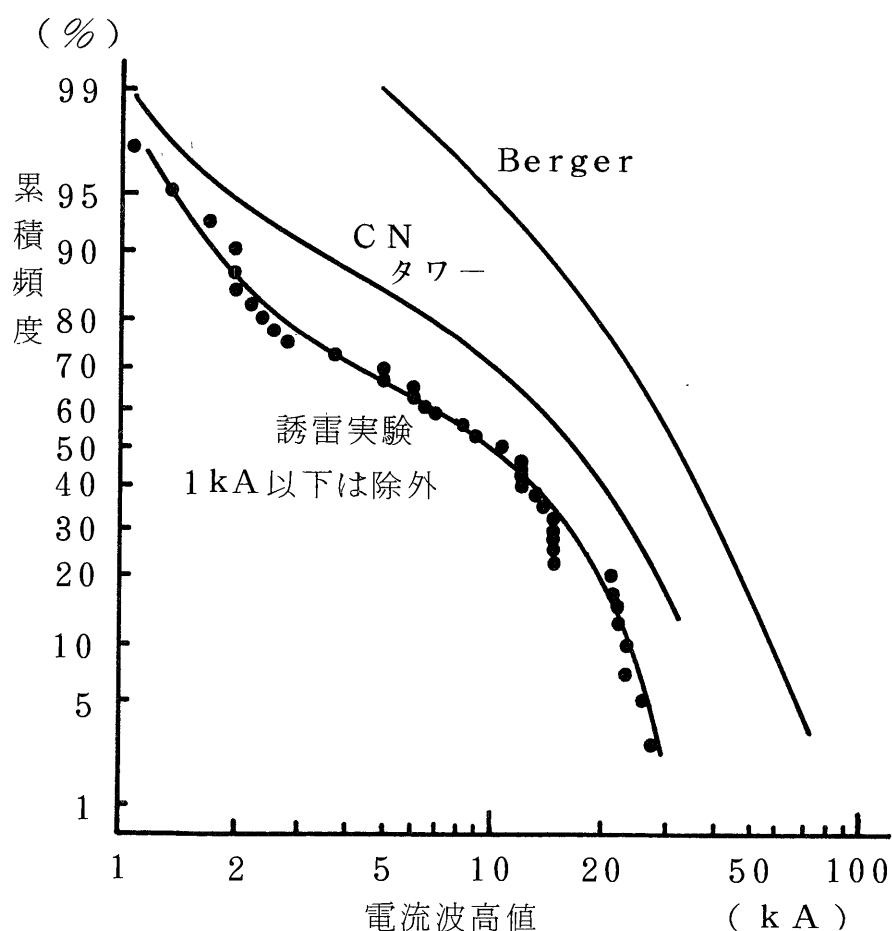


図2.5 雷電流の累積頻度 (その2)

にはほとんど感度がなくなり、見逃されているのであろう。誘雷実験では電流通路中心より 5 cm まで近づけることができ、高感度になっている。同時に、電界や光学測定も行ない、確実に落雷を判定している。さらに、低高度の冬季雷雲に向ってロケットを打上げ、本来ならば落雷とならないような小さな電荷しか持たない雲からも、強制的に放電を起こさせているためと考えられる。なお、最大電流は 27kA で他の分布より異常に小さい。しかし、データがもっと集積されれば大電流値も観測されるであろう。

誘雷実験での電流測定は高感度であるため、1 kA 以下の電流を除外したデータを図 2.5 に示している。カナダ CN タワー⁽¹⁰⁾と比較すれば、誘雷電流の方が一般的に小さいが、分布傾向はたいへん似かよっている。これは、よく雷電流の基準とされる Berger 氏のデータと比較⁽¹⁰⁾して、CN タワーは中電流分布が少ないが、誘雷とも共通する特性である。図 2.4 の東京タワーにおいても、小電流が見逃されているとすれば同様の特性を持つ。したがって、高構造物とロケット誘雷の落雷特性はここに類似点がある。100m 級の鉄塔の使用が予定される UHV 送電線路では、このような特性を持った落雷が予測され、耐雷設計の基礎資料として有効に利用されるであろう。

2. 3. 2 電流波形

誘雷放電では分流抵抗器により 17 例の波形が得られている。しかし、高速応答のオシロスコープ (CRO) で全体波形が測定できるようになったのは最近であり、すべての波形を詳細に検討することはできない。ここで、誘雷成功回数に比べ得られた波形数が少ないのは、異常誘雷の発生や、実規模雷撃試験を行なう場合には、分流抵抗器が設置できず、さらに、1 kA 以下の電流では測定器の最低感度外になる場合が多いなどの理由からである。

ここでは、冬季誘雷の特徴ある波形を列挙し、説明を加える。なお、以下に表示する実験番号は、年度とロケット打上の順序により付けた番号である。

(1) 上向きリーダだけで終る放電⁽¹⁾

実験番号 79-4 は、図 2.6 のような流し写真が得られ、上向きリーダだけで放電が終っている。この波形を図 2.7 に示す。電磁オシログラフで記録され、-200A 以下の電流が約 70ms 連続して流れている。測定装置が初期の応答は遅いが、バイアス電流を流す方式であったため、小電流のデータが得られた。負極性の小電流を代表する放電の一つである。



(a) 静止写真

(b) 流し写真

図 2. 6 上向きリーダだけの放電写真 (実験番号 79-4)

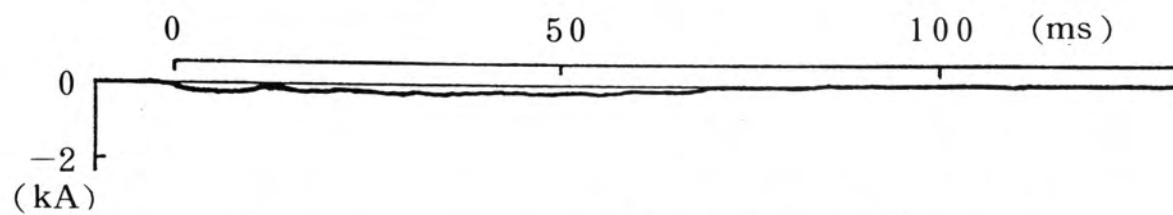


図 2. 7 上向きリーダだけの放電電流波形 (実験番号 79-4)

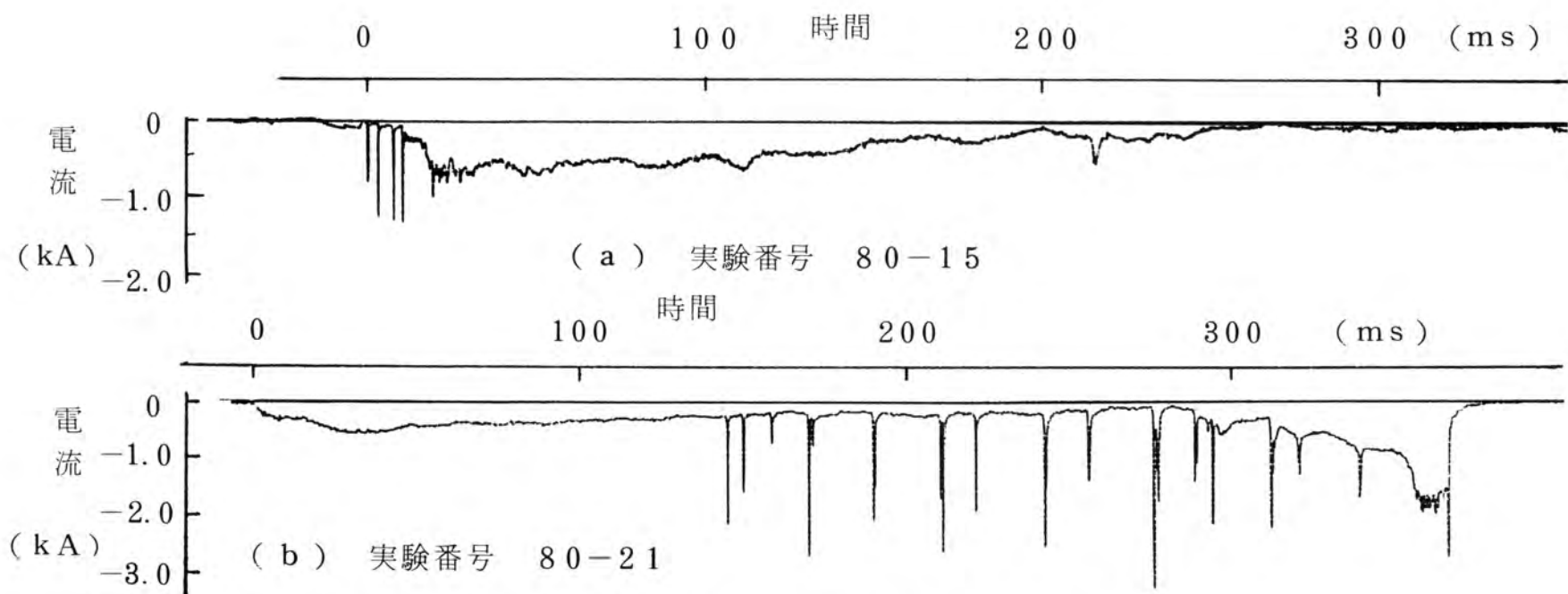


図 2. 8 パルス電流と連続電流が混在する電流波形

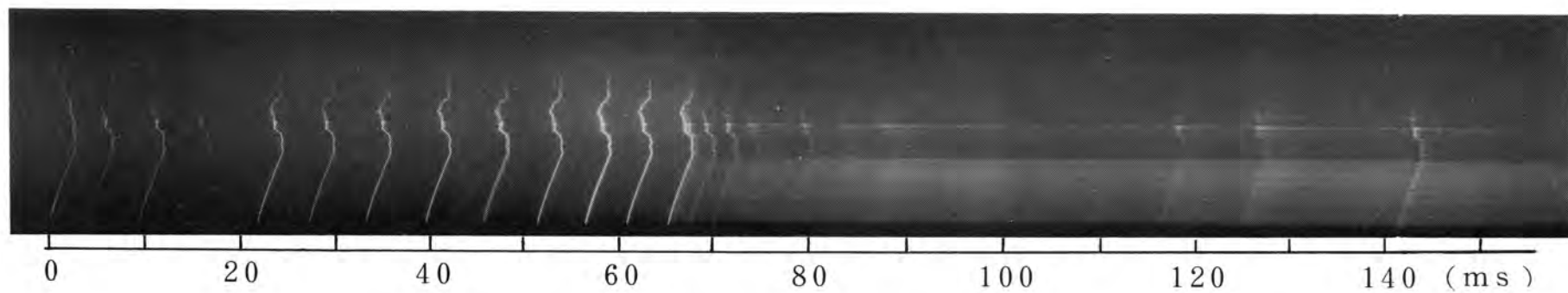


図 2. 9 パルス放電と連続放電が混在する放電 (実験番号 79-14)

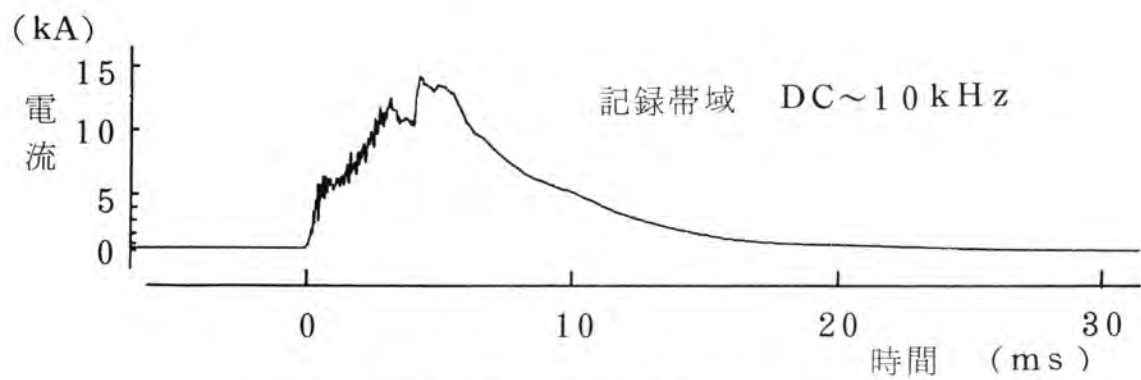
（２）連続電流とパルス電流が混在する放電⁽¹¹⁾

前述の連続電流にパルス電流が混るものもある。この例として実験番号80-15と80-21を上げ、図2.8に示す。80-15は最初10msの間に4回のパルス電流が発生し、その後280msにわたり連続電流が流れている。80-21では連続電流が370ms続き、その後半部分にパルス電流が重畳している。この流し写真の例として、実験番号79-14を図2.9に示す。最初はパルス放電で始まり、後半は連続放電とパルス放電が混在している。負極性放電を代表する放電である。パルス電流の波頭長は、実験番号84-7などの例（次項に波形を示す）から $2\mu\text{s}$ 以下が多い。この波頭長の放電には帰還雷撃がほとんど含まれている。パルス幅は $100\sim 300\mu\text{s}$ に分布している。パルス間隔は $1\sim 10\text{ms}$ が多くあり、このパルス電流を雷撃として扱えば、このような短い時間間隔で発生する多重雷は夏季にはほとんど見られない⁽¹²⁾。冬季雷は雲高が低く放電路が短いため、このような結果が得られると考えられる。また夏季雷のMコンポーネントの発生時間間隔分布⁽¹³⁾と類似する点もあり、連続雷撃と間欠雷撃の両特性を持つと考えられる。

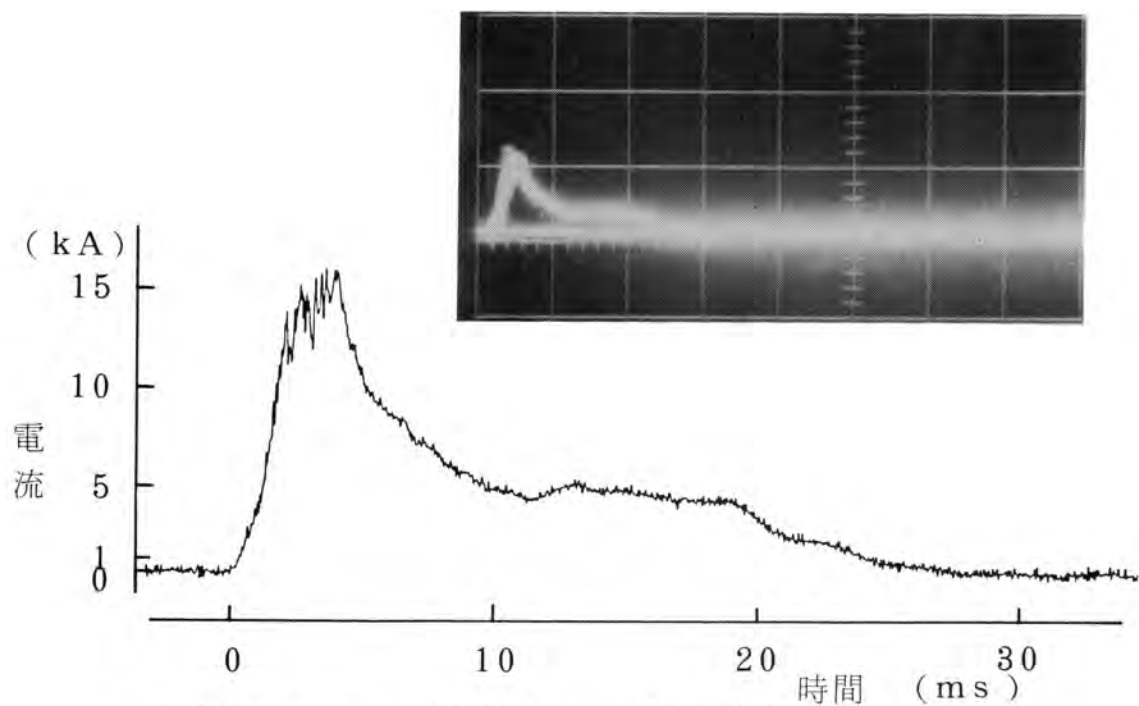
連続電流では継続時間が長く、たとえば実験番号80-21のような370msの雷が送電線導体を直撃すれば、60Hz回路で22サイクルに相当し、高速再閉路に対してたいへんな脅威となる。さらに、連続電流では放電路が長時間維持されるため、風や電磁力で放電路が移動して、多相事故に発展することもある。継続時間が長いことは、電荷量の増大となり、最大 -130C が測定されている。これは、導体直撃があれば素線切れ問題として考慮されなければならない、耐雷対策上不都合な点が多い。

（３）正極性放電⁽¹⁴⁾

冬季雷の特徴の一つに正極性放電が上げられる。この例として図2.10を示す。正極性放電に共通する波形は、継続時間が $10\sim 100\text{ms}$ と長く、連続電流と判定できる。最大電流は 27kA で、最大電荷 135C 、最大継続時間 240ms で、中間値はそれぞれ 6kA 、 25C 、 45ms である。負極性のそれは、 -6kA 、 -26C 、 203ms のため、負極性より継続時間は短い。大きな差は波頭長で数ミリ秒以上である。急しゅんな変化は波尾にもなく、全体が緩慢な変化をする。このような特性のため負極性放電とは異なった放電メカニズムが存在すると考えられる。また、波形記録装置は短時間高時間分解能の装置では波形全体を捕えることはできず、長時間記録装置の併用が必要である。



(a) 実験番号 81-16

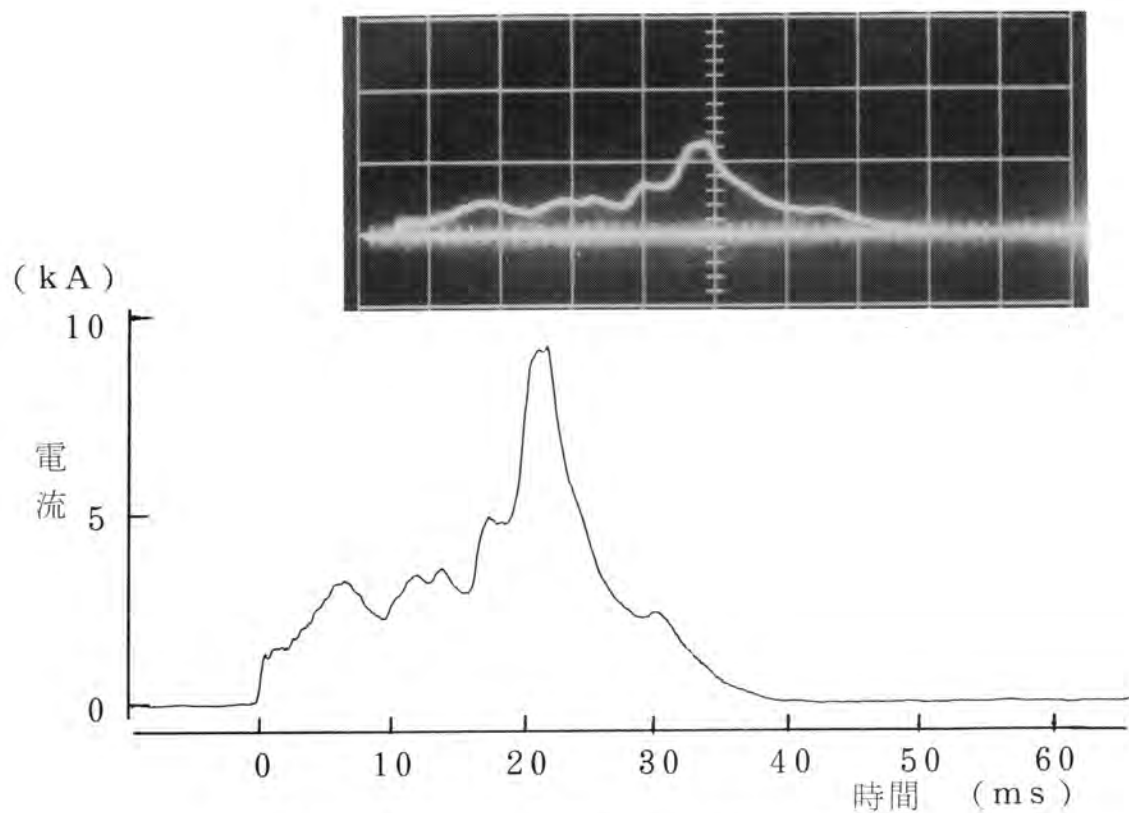


上：オシロスコープ波形写真 10ms/div

波高値 15kA

下：データレコーダ波形 記録帯域 DC~10kHz

(b) 実験番号 82-2

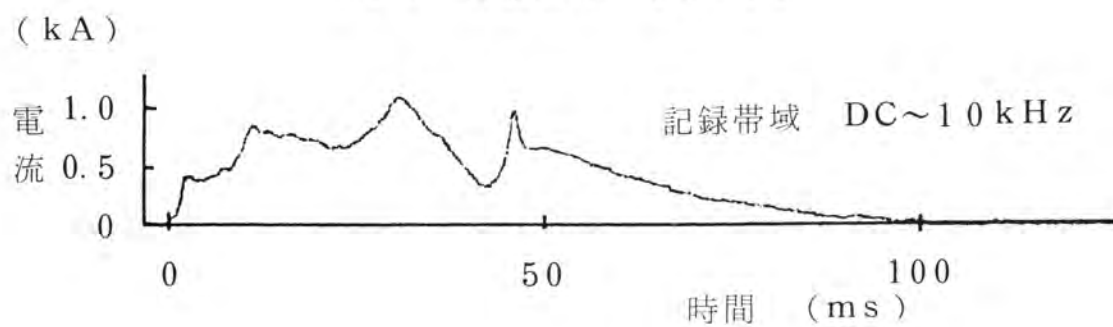


上：オシロスコープ波形写真 5ms/div

波高値 9.5 kA

下：データレコーダ波形 記録帯域 DC~10 kHz

(c) 実験番号 82-15



(d) 実験番号 80-19

図 2. 10 正極性放電の電流波形例

(4) 正負両極性放電⁽¹⁵⁾

正負両極性電流は2例観測された。現在の送電線の耐雷設計では検討されておらず⁽¹⁶⁾、冬季雷の特徴の一つである。日本海側の高構造物への冬の落雷で、ときどき観測されている⁽¹⁷⁾。図2.11はこの例で、実験番号81-11である。前部は、負極性の連続電流にパルス電流が重畳した典型的な負極性の特徴を持っている。次に、正極性電流が約10ms流れ、緩慢な変化をする正極性特有の波形を示している。後部に、負電流が再び現れている。雷鳴から求めた放電路⁽¹⁸⁾と流しカメラの観測では、地上付近の放電路は同一で、上空で枝分れしてそれぞれの電流を流している。この例は、ある落雷が隣の雷雲の放電の引金となった場合で、隣の雷雲が直接地上へ落雷することも考えられ、異地点同時雷撃の発生を示唆している。これを証明するような例は、誘雷実験で1回だけ発生し、写真撮影されている。したがって、冬季の送電線多相事故の一因として、異地点同時雷撃を考えることができる。さらにプラスチックケーブルなどに両極性電流が進入すれば、絶縁耐力が低下し、耐雷対策はたいへんきびしいものとなり、多くの問題を提起する波形である。

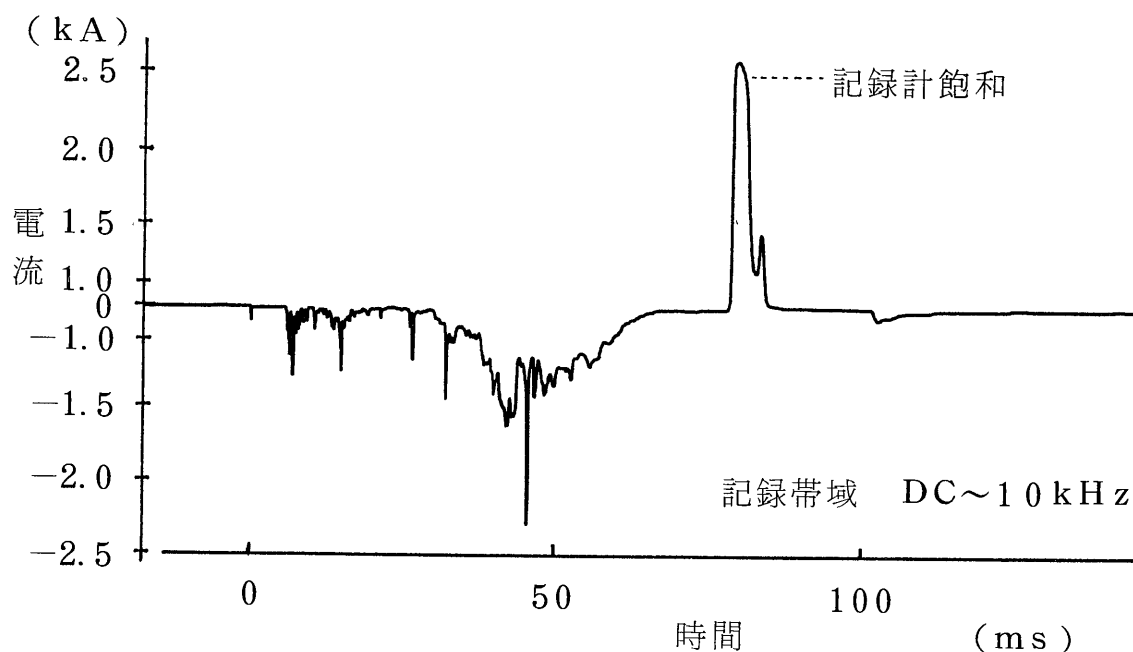


図2.11 両極性電流の波形例 (実験番号 81-11)

2. 3. 3 分流抵抗法とわく型アンテナ法の比較⁽⁴⁾

わく型アンテナ法による電流測定が始まったのは、昭和59年からであり、まだ多くのデータは得られていない。両方式の同時データが得られたのは実験番号84-7の1例だけである。ここではこのデータの検討を行なう。まず測定器の積分器時定数は10msのため、連続電流や正極性電流のような緩慢な変化の波形は測定できず、対象はパルス電流である。図2.12は両方式で得られた波形を

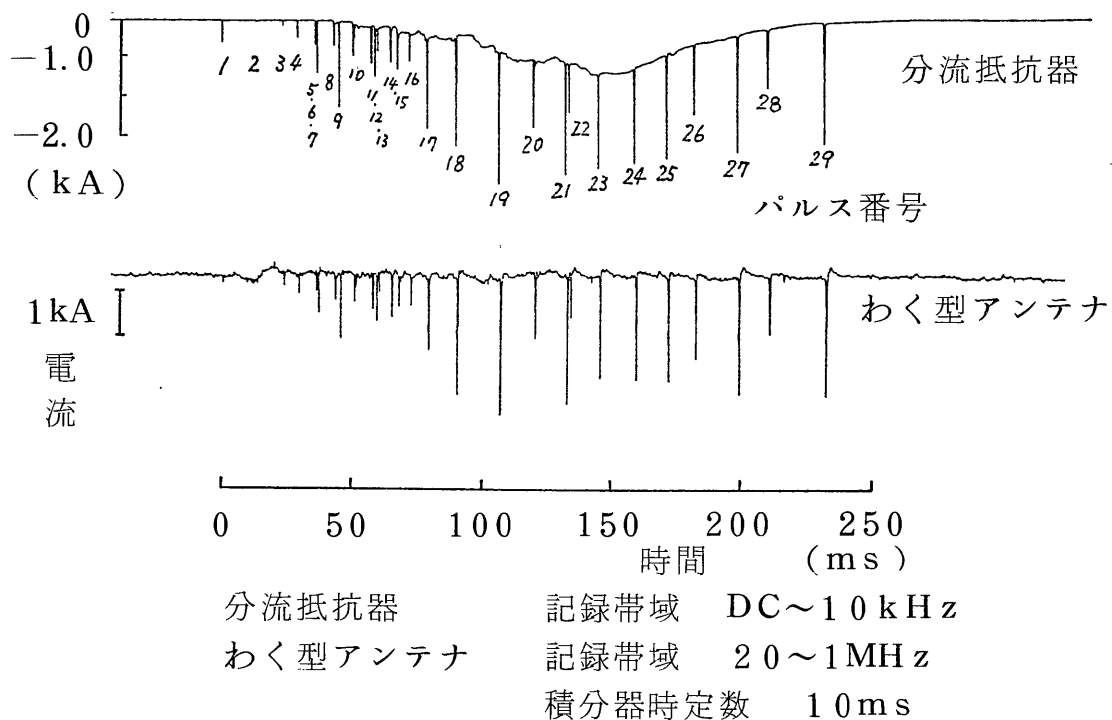
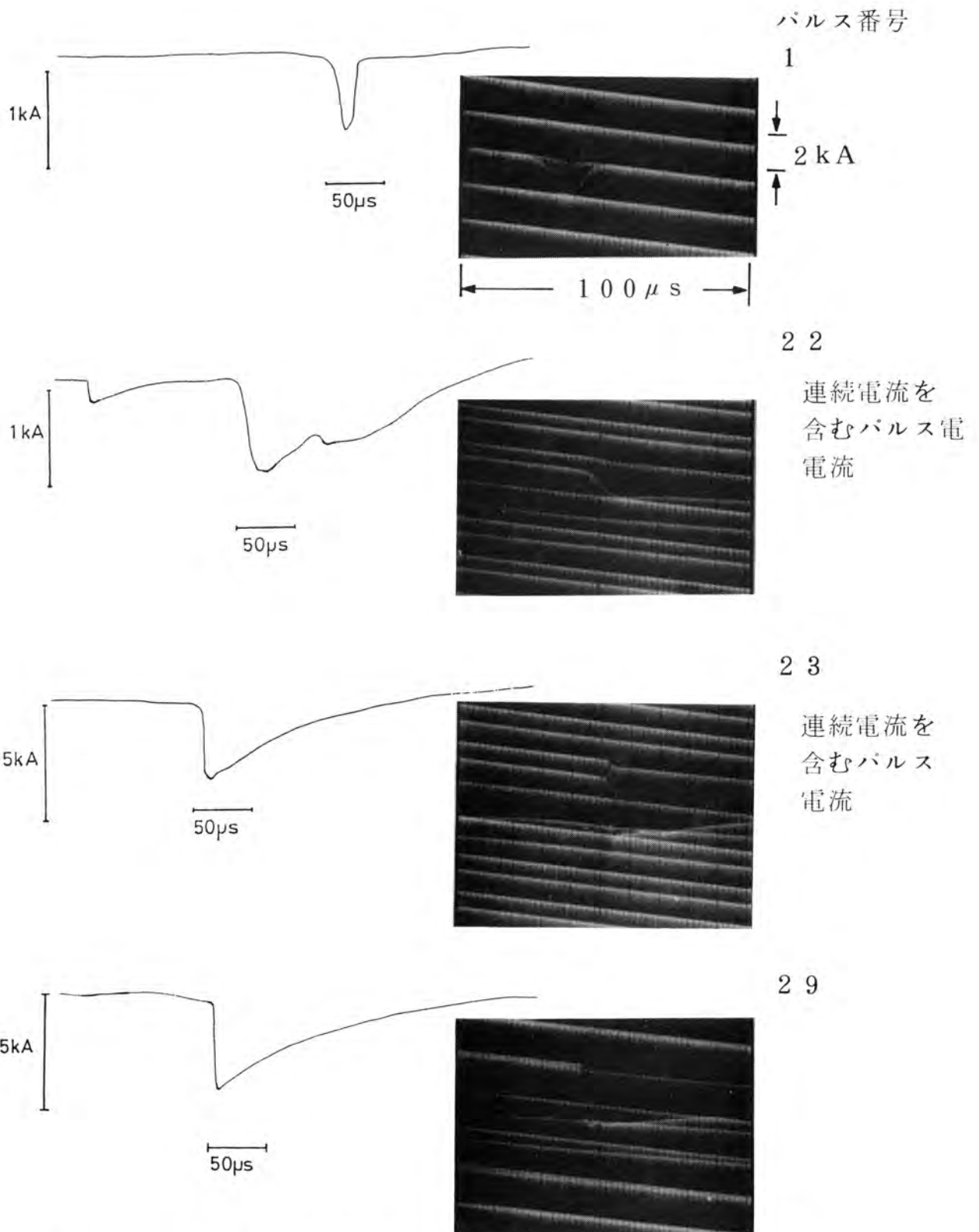


図2. 12 分流抵抗器法とわく型アンテナ法で得られた電流波形
(実験番号84-7)

比較している。このデータは連続電流にパルス電流が重畳する典型的な負極性波形であり、250msの継続時間を持つ。このパルス部分を比較したのが図2. 13である。わく型アンテナと分流抵抗での波形がいくぶん異なるのは、1km離れた地点での観測であり、有限な放電進展速度により、磁界が到達するのに時間差が生ずるためである。わく型アンテナの出力からもとの電流を推定する方法として、Norinder氏⁽³⁾や、Lin氏とUman氏⁽¹⁹⁾の文献が参考になるが、いずれも放電路を正確に知る必要があり、1km地点からの測定では雲中の放電路を含め、おおまかな屈曲まで明らかにしなければ誤差を少なくすることにはならず、困難が多い。そこで、放電路は垂直で、電荷の中心高度を2.1km⁽²⁰⁾と仮定し、均一電流が放電路に流れ、大地は完全導体として計算するならば、電流は2. 1式のように表わされる。



左：わく型アンテナ法による波形 記録帯域 20~1MHz

右：分流抵抗器法による波形 2軸オシロを常時掃引させ，流しカメラで撮影，それぞれの軸は10倍の感度差を持たせている

図 2. 1 3 わく型アンテナ法と分流抵抗器法のパルス電流の比較

(実験番号 84-7)

表 2. 2 分流抵抗器法とわく型アンテナ法で測定された
パルス電流一覧表 (実験番号 84-7)

ハ ル ス 番 号	分 流 抵 抗 器			わ く 形 ア ン テ ナ			帰 還 雷 撃 の 有 無
	時 間 間 隔 (ms)	波 頭 時 間 (μ s)	最 大 電 流 (kA)	時 間 間 隔 (ms)	波 頭 時 間 (μ s)	最 大 電 流 (kA)	
1		12	-2.2	13.5	12	-0.8	無 無 有 有 有 有 無 有
2				10.6	4		
3				5.8	2		
4				6.9	2	-1.6	
5	0.5	80	-1.1	0.5	90	-0.8	
6	0.3	60	-0.9	0.3	61	-0.8	
7	6.5	1	-1.8	6.4	2	-1.1	
8	2.1	1	-1.3	2.1	3	-0.7	
9	5.4	2	-2.2	5.4	2	-1.7	
10	7.0	1	-1.5	6.9	2	-0.9	
11	1.4	1	-0.9	1.4	1	-1.0	
12	0.9	2	-1.8	1.1	2	-1.2	
13	1.9		-1.3	5.0	20	-0.6	
14	2.8		-1.2	2.7	2	-1.0	
15	4.7	2	-1.3	4.6	2	-1.8	
16	6.9	1	-1.3	6.8	2	-0.9	
17	11.1	1	-3.0	11.4	2	-2.2	
18	17.1		-3.0	16.8	2	-3.5	
19	12.2		-4.5	14.0	2	-5.3	
20	12.6		-1.1	12.6	2	-1.6	
21	1.1	4	-3.2	1.1	5	-3.5	
22	11.7	12	-2.2	11.6	13	-1.0	
23	14.5	2	-3.9	14.2	1	-3.4	
24	12.5	3	-3.6	12.6	3	-3.1	
25	10.9	2	-3.9	10.9	2	-3.6	
26	17.4	1	-2.4	17.2	2	-1.6	
27	11.8		-3.7	11.8	2	-3.7	
28	21.8	3	-2.0	21.8	3	-1.3	
29		2	-3.0		4	-3.2	

波頭時間 : $1\mu\text{s}$ 以下は測定精度が悪いため, $1\mu\text{s}$ と表示

$$I = \frac{R_s C_f}{n \mu s \cos \theta h} \frac{2 \pi r \sqrt{h^2 + r^2}}{V_0(\text{A})} \dots \dots \dots (2. 1)$$

ここで R_s, C_f : 積分器の 定数決定因子 $R_s = 1\text{k}\Omega$, $C_f = 0.01\mu\text{F}$
 r : 雷撃点と測定器との距離 $r = 1\text{km}$
 n : アンテナの巻数 $n = 1$
 s : アンテナの面積 $s = 1\text{m}^2$
 θ : アンテナと放電路のなす角 $\cos \theta = 1$

μ : 透磁率 $\mu=1.257\times 10^{-6}$ H/m

h : 放電路の高さ $h=2.1$ km V_0 : 測定器の出力(V)

この結果は分流抵抗法と比較され表 2. 2 のようになる。波高値については分流抵抗法を基準にして、36～145%の間に分布している。平均は87%であった。小さな値が現われるのは、放電初期で、放電路の地上高が低かったためと考えられる。

誤差の最大原因は、放電路の傾きであり、屈曲についての補正を加えれば、波高値に限っては均一電流モデルで実用できることが明らかになった。波頭長については、放電モデルを Lin-Uman モデル⁽¹⁹⁾ を基に、誘雷放電に合うモデルを考える必要がある。また、積分回路の改良も今後の課題である。

2. 4 結 言

本章では誘雷実験の結果得られた電流波形について検討し、冬季雷の特性を明らかにした。この結果、夏季雷データを基に耐雷設計されている我国の送電線路に対し、再検討の必要性を提起した。以下がこれらの要点である。

(1) 誘雷放電は負極性34回、正極性22回で夏季にはまれにしか観測されない正極性放電が約40%を占めている。これは、北陸の冬季雷雲は強い北西の季節風の中で発生し、電荷構造が傾き、正極性落雷が増加する説⁽²¹⁾を支持するものである。

(2) 56回の誘雷の内51回は磁鋼片などで波高値を測定することができた。この内25%は1 kA 以下の小電流であり、中間値は6 kA、最大値は27 kA であった。夏季雷や、冬季雷の高構造物への落雷よりも小さな電流分布をし、誘雷は落雷しない電荷を強制的に放電させている結果であろう。電流分布傾向は高構造物への落雷と同じ特性を持つ。

(3) 波形の判明した17例の結果から、連続電流が長時間続くのが特徴として上げられる。最大375msを記録した。このため、電荷量が大きくなり、最大135Cの記録が得られた。

(4) 連続電流にパルス電流が重畳するのが負極性放電の典型例で、これは正極性には見られなかった。パルス電流の間隔は、1～10msが多く、夏季雷には見当らない特性である。

(5) 正極性電流は緩慢な変化をし、数キロアンペアの電流が数十ミリ秒続くことがあり、放電電荷も最大の135Cが正極性で得られた。

(6) 正負両極性電流が混在する波形が2例観測され、それぞれの極性の特徴を兼ね備えている波形であった。

(7) 以上のような特性を持つ雷が送雷線路へ落雷すれば、再閉路時間の再検討、素線切れ対策などが必要となる。また、多相、多回線事故の原因は、長時間継続電流による放電路の移動や、異地点同時落雷によると推定され、耐雷対策の再検討を促す重大問題を提起した。

第2章の文献

- (1) 角, 池田, 堀井: 「冬季北陸のロケット誘雷実験における雷電流測定と誘雷条件」, 電気学会論文誌, 102-B, P.289 (昭和57年5月)
- (2) 角, 市原, 池田: 「雷電流測定への磁気抵抗素子の応用」, 昭和55年電気学会全国大会, 1018, P.1288 (昭和55年4月)
- (3) H.Norinder: “Lightning Currents and Their Variations”, J.Franklin Inst., 220, P.69 (1935)
- (4) 角, 池田, 堀井: 「わく型アンテナ法によるロケット誘雷放電電流の測定」, 昭和60年電気学会全国大会, 1088, P.1386 (昭和60年4月)
- (5) M.A.Uman: “Lightning”, P.127 (1969) Mc.Graw Hill Co.
- (6) 鶴見, 他: 「雷撃電流の統計的検討」, 電気試験所彙報, 26, P.721 (1962)
- (7) 木下, 他: 「雷撃電流の実測例」, 電気評論, 53, P.949 (1968)
- (8) 北陸電力: 電気評論, 62, P.86 (1977)
- (9) 関西電力: 「関西電力委員会報告」, No.3-4 (1978)
- (10) W. Janischewskyj, et.al.: “Characteristics of Lightning Striking an Extremely Tall Tower”, VII Inter. Conf. on Atmospheric Electricity (1984)
- (11) 角, 池田, 堀井: 「ロケットによる誘雷実験」, 電気学会高電圧研究会, HV-81-39 (昭和56年10月)
- (12) M.A.Uman: “Lightning”, P.4 (1969), Mc Graw Hill Co.
- (13) 北川: 「雷放電の機構」, 気象研究ノート, 16, P.479 (昭和41年3月)
- (14) 角, 他: 「雷放電電流と発光測定」, 昭和55年度文部省科学研究試験研究報告ロケット誘雷による電気施設に対する雷害防止の研究, P.18, (昭和56年3月)
- (15) 角, 池田, 堀井: 「誘雷時の放電電流と流しカメラによる観測」, 電気学会高電圧研究会, HV-82-13 (昭和57年7月)
- (16) 耐雷設計基準委員会: 「送電線耐雷設計ガイドブック」, 電力中央研究所報告, 175031 (昭和51年3月)
- (17) K.Narita, et.al.: “Measurment of Lightning Stroke Current in Winter Season at Maki, Japan”, 1984 Inter. Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity, Florida, USA (1984)
- (18) 秋山, 他: 「雷鳴による放電路の解析」, 電気学会高電圧研究会資料, HV-82-15 (昭和57年7月)
- (19) Y.T.Lin, M.A.Uman, et.al.: “Lightning Return Stroke Model”, J.Geophys. Res., 85, C 3, P.1571 (1980)
- (20) M.Nakano: “Initial Streamer of the Cloud Discharge in Winter Thunderstorm of Hokuriku Coast”, J.Meteor. Soc. Japan, 57, P.454 (1979)
- (21) 竹内: 「北陸における冬季雷の研究」, 電気学会雑誌, 98, P.1156 (昭和53年12月)