

光記録システムによる雷放電電流の実測と解析

依田正之・宮地巖・中村清隆*・鈴木義彦**

Lightning Current Measurement and Diagnostics by a Microcomputer and Optical Systems

Masayuki YODA, Iwao MIYACHI, Kiyotaka NAKAMURA,
and Yoshihiko SUZUKI

The authors have developed the portable high-resolution computerized optical systems with a sampling period of 100 ns and a recording time of 6.5 ms. By using the systems, a 35 kA-class positive lightning current was measured.

The obtained waveform consists of many current peaks. The frequent repeated discharges of below 1 C and the middle ones above 1 C appear in the early stage (0.4-1 ms) and in the grown period (1-2 ms) respectively. The rest of the waveform shows a serial discharge current of about 30 kA till the time of 5.8 ms when the current becomes to decrease.

Keywords = Positive lightning discharge; Triggred lightning by a rocket-wire technique; High-resolution computerized optical system.

1. ま え が き

近年、電力需要の増大と共に電力送電距離は次第に長距離となってきた。それに伴い諸電力施設に及ぼす雷の影響は非常に大きく、送配電系統故障原因の大部分を占めるようになってきている。

最近、多くの研究者によって雷放電現象が詳細に検討されている。例えば1977年から1985年までは石川県河北潟干拓地において、冬季ロケット誘雷実験が行われ、素晴らしい実験結果が得られた^{1,2,3)}。1986年から実験場を標高930mの石川県奥獅子吼山頂に移し、ロケット誘雷実験を引き続き行っている。雷現象は、高電界・大電流で時間的・空間的に限定できない現象である。そのため従来のアナログ技術や間接的な測定では詳細な解析を行うことは困難である。

筆者らは、高度情報化雷電流測定システムを開発し、1987年の冬季ロケット誘雷実験において2例の雷放電電流を実測できた。1つは10kA級であり、もう1つは35kA級の雷電流である。本報告は後者の35kA級の雷放電電流波形の特性を詳細に検討したものである。

2. 高度情報化雷電流測定 システムの概要および 構成要素の性能と特徴

本システムにおいては、雷放電電流を同軸シャント抵抗を通して検出し、A/D変換器によりデジタル化された信号を一旦高速メモリに保有する。次にデータは光変換され、光ファイバを通して受信側のマイクロコンピュータに送られる。従って本システムの特徴は、データがデジタル信号である点と光ファイバがセンサ部と測定機器を絶縁している点である。加えて無誘導性で周波数特性が高いことから精度の高い伝送が可能である^{4,5,6)}。

以下に構成要素の仕様を記述する。

(1) 電流検出部(同軸シャント抵抗)

許容熱容量	2.5 kW
許容周波数	1370 kHz
最大実効電流値	50 kA - 1 ms
電流波高値	100 kA
シャント抵抗値	1.0 mΩ
時定数	19 ns

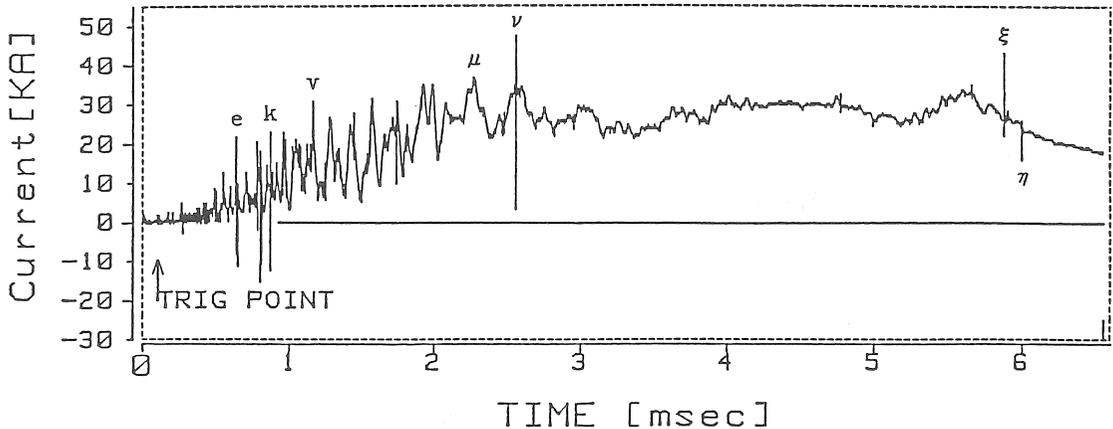


図1 正極性雷放電電流波形(35kA級)

(2)計測、メモリ部

A/D変換器	
サンプリング	10 MHzクロック (100ns)
分解能	8 bit (正負128±128bit)
トリガレベル	自由設定(±2デシマル以上)
メモリ容量	64 kByte
記録時間	6.5 ms (トリガ前 0.1 ms + トリガ後 6.4 ms)

消費電力動作時 - 6 VA

(DC12V、約500mA)

スリープ時 - 0.96VA

(DC12V、約 80mA)

(5)外形

寸法	750 mm(W)× 300 mm(D)× 50 mm(H)
重量	約80kg(バッテリー2個内蔵時)
シールド	3重構造シールド(銅・鉄・銅)

(3)通信部

チャンネル数	1 ch (送受信1組)
伝送方式	調歩同期(非同期)、 (NRZ信号)
伝送媒体	光ファイバーケーブル (最長1000 m)
伝送速度	9600bps
データ構成	1 スタートビット 8 ビットデータ 1 偶数パリティ 1 ストップビット

3. 正極性雷放電電流波形

図1に高度情報化雷電流測定システムによって実測された35kA級の正極性雷放電電流の電流波形を示す。この図は現象トリガ前 0.1ms、トリガ後 6.4msの全測定範囲の電流波形を現しており、雷放電は6.4ms以降も継続しているが、記憶容量不足のため波形は得られていない。初期(0.4-1ms)においては、1C以下の小電荷の繰り返し放電が、成長期(1-2ms)では、1C以上の中電荷の繰り返し放電が記録されており、それ以降電流が減少し始める5.8msまで平均30kAの連続放電が現れている。0.48msから1.65msの間は、図1を拡大して得られた図2および図3に示すようにグループaからγに相当する電流素波形が得られた。

(4)電源部

供給電源	DC12Vバッテリー(24Ah) ×2内蔵
変換電圧	DC12V→±5V

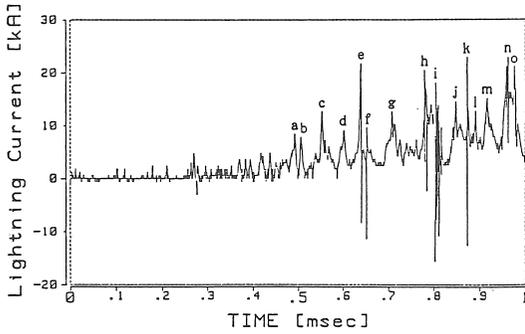


図2 放電電流波形拡大図 (0 - 1ms)

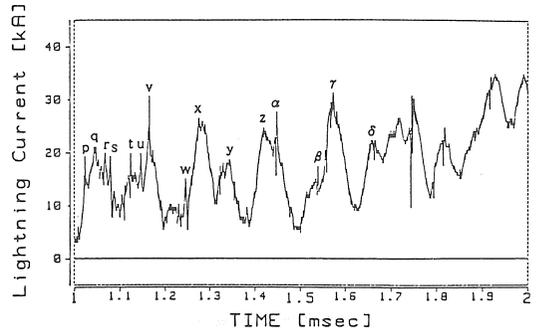


図3 放電電流波形拡大図 (1 - 2ms)

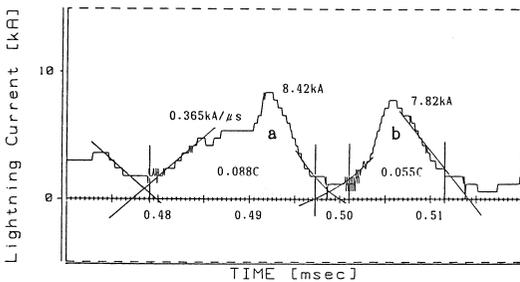


図4 雷放電電流素波形の例(初期)

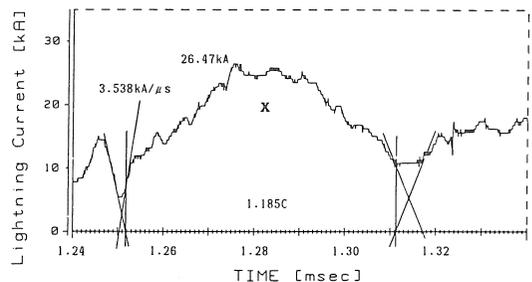


図5 雷放電電流素波形の例(成長期)

4. 雷放電電流素波形様相

連続して記録された素波形の境界部分は、前後の電流傾斜部が重畳したものと取り扱い、波頭部と波尾部とを直線的なランプ特性を用いて分離した。図4および図5はこの様にして求めたそれぞれ初期および成長期の例である。図中に波高値およびその波形に含まれる放電素電荷を併記した。横軸の数値は対応のために示した記録時間開始時刻からの経過時間である。以上の結果を要約したものが表1である。

本測定システムの記録時間 6.5msの間に含まれる放電電荷の総量は 142C に達している。

冬季正極性雷雲クラスタの空間分布を考えるならば、正極性雷雲下の負の上向きリーダが多数のクラスタを順次中和しながら進むとき、図1のように多重雷電流の素波形が縦続重畳して観測され、あたかも一つの長波尾放電のように見える波形となることが考えられる。

表1 雷電流素波形の要約

電流の ビーク	時点	放電 電流 kA	トリガ後 の時間 ms	間隔 μs	電流 上昇率 kA/μs	放電電荷 (注) C
変 動	a	8.42	0.3901	13.8	0.365	0.09
	b	7.82		46.6		0.06
	c	12.63		49.2		0.08
	d	9.02		50.4		0.07
	f	9.62		55.5		
	g	12.63				0.17
	m	15.44	0.8112		1.337	0.31
性	v	30.68	1.0634	110.4		0.73
	x	26.47		144.1	3.538	1.19
	z	24.66		153.3		1.68
	γ	31.28			0.238	αを含む 2.10
	μ	36.69	2.1691			βを含む 最大値
バ ル ス 性	e	13.23 21.65 -8.42	0.5343	2.3 1.0	3.661 -30.074	正極性
	ν	31.28 3.01 47.51	2.4571	0.3 0.4	-94.235 111.256	負極性 最大値

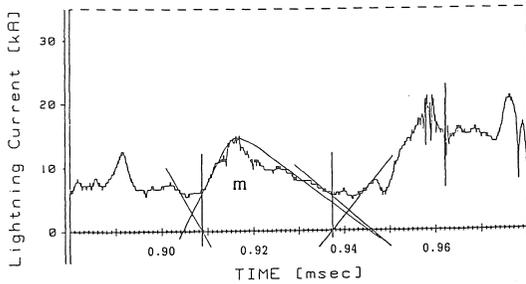


図6 雷放電電流の等価素波形の例
(11.7/27.7 μ s, 14.88kA)

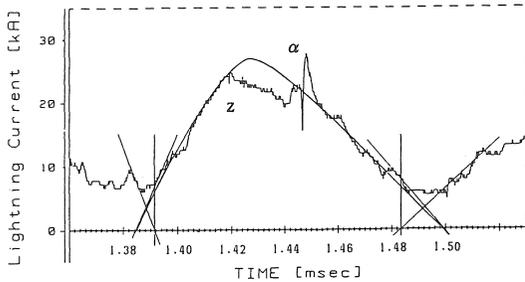


図7 雷放電電流の等価素波形の例
(43.4/83.0 μ s, 26.98kA)

表2 等価素波形の特性値

素波形 グループ	波高値 kA	放電素電荷 C	波頭長/波尾長		等価 波高値 kA
			μ s	時間比	
a	8.42	0.088	14.4/17.9	1.24	8.52
b	7.82	0.055	4.8/ 8.7	1.81	8.04
c	12.63	0.084	6.1/ 9.3	1.52	13.65
d	9.02	0.073	5.4/10.8	2.00	9.33
g	12.63	0.167	----	----	----
m	15.04	0.310	11.7/27.7	2.37	14.88
q	21.05	0.608	----	----	----
v	30.68	0.729	17.3/35.6	2.06	25.92
x	26.47	1.185	32.4/55.6	1.72	27.34
y	18.65	0.810	27.4/51.6	1.88	22.21
z, α	24.66 27.67	1.683	43.4/83.0	1.91	26.98
β, γ	17.44 31.28	2.091	----	----	----
			平均	1.83	

5. 等価素波形

デジタル記録の素波形を、従来用いられているインパルス電流の形で表現するため、図6および図7のようにアナログ波形で等価近似した。

このようにして求めた各等価素波形の特性値を表2に示す。これら等価波形の中には、規格で定められているインパルス電流波形 4/10 μ s, 8/20 μ s(時間比:2.5)に近いものもあるが、多くは継続時間が比較的長く、また波尾長と波頭長との時間比の値は大部分が2.0以下で、現象的には波尾の減衰が早いことを示している。

6. まとめ

サンプリング時間が100nsの高度情報化雷電流測定システムを用いて、1987年の冬季ロケット誘雷実験において10kA級と35kA級の雷放電電流のデジタル化波形を測定することができた。さらに後者の35kA級の雷放電電流波形を検討して以下のことが明らかになった。

- 1) 初期(0.4-1ms)においては1C以下の小電荷の繰り返し放電が実現し、成長期(1-2ms)では、1C以上の中電荷の繰り返し放電が記録された。それ以降5.8msまで約30kAの連続放電が現れ、その後電流は次第に減少する波形が得られた。記録時間(6.5ms)の間に含まれる放電の総電荷量は142Cに達した。
- 2) 冬季正極性雷からの雷放電は、多重雷電流の素波形が縦続重畳した形状を示し、あたかも1つの長波尾放電のような波形が得られた。
- 3) 各素波形をアナログ的にインパルス電流の形で等価的に近似すると、波尾長と波頭長の時間比は規格値より小さく、波尾長の減衰が早いことが判明した。

謝辞

名古屋大学教授 堀井憲爾先生を代表者とするロケット誘雷実験に1986年から参加する機会に恵まれたことを感謝し、さらにロケット誘雷実験関係者の方々にお礼申し上げます。

高度情報化雷電流測定装置の開発にあたり、多大なご尽力を頂いた本学電気工学科助教授 鈴木郊宇先生ならびに東洋電機(株)および(株)富士電機総合研究所の方々に感謝致します。

本論文をまとめるにあたり有益なご教示および激励を頂いた本学電気工学科教授 家田正之先生ならびに岩崎晴光先生に厚くお礼申し上げます。

最後に本研究室で卒業研究を行った卒研生諸君にお礼申し上げます。

(5)I. Miyachi, M. Yoda, Y. Suzuki, : "Multiple Stroke Lightning Discharges and Circuit-Breaker Capabilities Concerned", 9th Int. Conf. on Gas Discharges and their Applications, p. 447-450. Venezia, Italy, 19-23 September 1988.

(6)M. Yoda, K. Nakamura, I. Miyachi, K.Horii, : "Lightning Current Measurement and Diagnostics by a Microcomputer and Optical Systems", 6th Int. Sympo. on High Volt. Eng., New Orleans, USA, 28 August - 1 September 1989, Paper 10.08

(受理 平成2年3月20日)

参考文献

- (1)I. Miyachi, K. Horii, S. Muto, G. Ikeda, S.Aiba, : "Experiment of Long Gap Discharge by Artificially Triggered Lightning with Rocket", 3rd Int. Sympo. on High Volt. Eng., Milan, Italy, 28-31 August 1979, Paper 51.10.
- (2)I. Miyachi, K. Horii, : "Five Years' Experiences on Artificially Triggered Lightnings in Japan ", 7th Int. Conf. on Gas Discharges and their Applications, p. 468-471. London, UK, 31 August-3 September 1982.
- (3)K. Horii, G. Ikeda, S. Sumi, : "The Mechanism of Artificial Lightning Discharge Triggered with Rocket as an Extremely Long Gap Discharge", 4th Int. Sympo. on High Volt. Eng., Athens, Greece, 5-9 September 1983, Paper 42.06
- (4)M. Yoda, M. Imai, Y. Suzuki, I. Miyachi, : "Lightning Current Analysis through Reverse Voltage Application", 5th Int. Sympo. on High Volt. Eng., Braunschweig, Federal Republic of Germany, 24-28 August 1987, Paper 83.08.