落雷電界波形長時間記録装置の開発と観測結果

正員 河崎 善一郎 (大阪大)
 正員 松浦 虔士 (大阪大)
 正員 山本 賢司 (大阪大)
 非会員 長谷 正博 (名古屋大)
 非会員 中田 滉 (名古屋大)
 正員 仲野 蕢 (豊田高専)
 正員 竹内 利雄 (愛知技術短大)

Design of the Transient Memory of Extremely Large Size for Electric Field Changes due to the Lightning Discharge and Observation Results during Summer and Winter Thunderstorms

Zen-Ichiro Kawasaki, Member, Kenji Matsuura, Member, Kenji Yamamoto, Member (Osaka University), Masahiro Nagatani, Non-member, Hiroshi Nakada, Non-member (Nagoya University), Minoru Nakano, Member (Toyota College of Technology), Tosio Takeuti, Member (Aichi College of Technology)

A new transient memory, which has 1 Mbytes buffer memories and can record the electric field changes due to lightning discharges for at most 524 mill seconds, is designed to study the whole process of the lightning discharge. To realize the system, a commercially available personal computer and a memory board are used and the special software is also developed. As the sensor, a new type slow antenna, which maintains the features of both so called slow antenna and fast antenna, is also manufactured. The system itself is controlled by the personal computer, and then without any manual operation the observation can be carried out. With this system the observations during both summer and winter thunderstorm seasons were performed. During summer the system recorded the electric field changes with multi strokes and continuous current. During winter it recorded the whole process of lightning discharges from the preliminary breakdown through the return stroke, and continuous current. The utility of the system can be approved and some remarkable features of lightning discharges are obtained.

キーワード：落雷電磁界，トランジェントメモリー，夏季雷，冬季雷，連続電流

1. はじめに

雷研究の目的の一つとして、雷撃電流様相の把握が挙げられる。しかしながら、放電が雲内で開始するいわゆる自然雷の場合には、送電鉄塔などの高建築物への落雷の可能性が高いとはいえ、これを直接捕えて測定することは必ずしも容易ではない。加えて、塔の先端

端などから雷雲に向かう上向きリーダで開始するトリガ雷の場合、雷雲より大地に向かう下向きのリーダで開始する自然雷とは、雷撃電流特性の異なる可能性が高い⁽¹⁾。従って対象を自然雷とする限りにおいて、その電流測定は間接測定、リモートセンシングが主たる手段となる。

よく知られているように、雷撃電流とそれに伴って

測データとの比較も容易である。

〈2・2〉 回路の動作と制御 図2にアナログ入力信号部、A/D変換部およびトリガ信号作成部の回路図を示す。トリガ信号は測定の実行を行うもので、原則としてアナログ入力信号、すなわち電界の速い変化により内部トリガを発生するよう設計（雲間放電ではトリガされにくく設計してある）されている。図1のシステム構成においてアナログ入力信号は、バッファアンプを経由してA/D変換回路に導かれ、コントロール回路の制御によりデジタル化されメモリーに書

図2 アナログ入力回路とA/D変換部
Fig. 2. A circuit diagram of A/D converter.

込まれる。このデジタルデータは、A/D変換器の分解能とその処理時間の関係からあえて4ビットをむだにし、一時記憶用のメモリーへは16ビットが同時

* 制御ステートメント (ベシック) 注: I/Oは負論理
(A) 100 *START.PULSE
110 OUT &H00,0 'INITIALIZE
120 OUT &H00,&H60 OR SPLX 'START PULSE 'H'
130 OUT &H00,&H40 OR SPLX 'L'
(B) 200 *TRIGGER.ENABLE
210 OUT &H00,&H50 OR SPLX 'ENABLE
300 *BUSY.CHECK
310 IF INP(&H07) AND INP(&H08) = &HBF THEN *BREAK.OBS 'KEY
(C) 320 IF (INP(&H01) AND &H80) = 0 'O = BUSY
330 OUT &H00,0 THEN *BUSY.CHECK
340 TMS=TIMES: DT=DT+1 'TIME & DATE GET

図3 コントロールのタイムシーケンス
Fig. 3. A time sequence of control pulses.

図4 コントロール回路
Fig. 4. A circuit diagram of system control.

に書込まれることになる。一放電・落雷に対する測定の終了後、一時記憶用メモリー上のデジタルデータは、パーソナルコンピュータにより読出され、単一のファイルとしてまとめられハードディスクに格納される。

図3、図4はそれぞれコントロールのタイムシーケンス図およびコントロール回路図である。コントロール回路の各入出力端子はI/Oバッファを通してI/Oポートに接続されている。表3がI/Oポートの接続表で、各ビットの信号名は図3の信号名と対応している。ところで、上記回路の動作は以下のとおりである。まず、A/D変換とメモリー書込みを継続的に動作されるためにスタートパルスが送り出される。これには、図3のSTART PULSEの(A)に対応する制御ステートメントによるコマンドデータの送り出しが必要である。この信号によりスタートゲートが開かれ、A/D変換が開始される。そして、そのデータは順次メモリーに書込まれる。更にアドレスカウンタは有限であるため、観測の終了信号が検知されない限りメモリーの内容は連続的に繰返し更新されている。次にTRIGGER ENABLE信号(B)が送り出されると、トリガ信号待機状態になり、パーソナルコンピュータは、測定終了信号の検出を行う(C、D)。この状態でトリガ信号が検知されると、プリディレイカウンタがカウントを開始し、設定数に達するとゲートを閉じて一回の測定が終了する。そしてパーソナルコンピュータはメモリーの内容を読出し、かつ外部記憶装置に転送を行う。

表3 I/Oポート接続表
Table 3. A connection of I/O port.

入力ポート (PORT &HD0-16BIT)			出力ポート		
I 15	OBS END(BUSY)	8BIT PORT &HD1	O 15		8BIT PORT &HD0
I 14			O 14		
I 13			O 13		
I 12			O 12		
I 11	DATA BIT 11(MSB)	8BIT PORT &HD0	O 11		
I 10	10		O 10		
I 09	9		O 09		
I 08	8		O 08		
I 07	7		O 07	EXT READ CLOCK	
I 06	6		O 06	EXT RESET	
I 05	5		O 05	OBS START	
I 04	4		O 04	TRIG ENABLE	
I 03	3		O 03	READ BUSY	
I 02	2		O 02	1W/2M(CLOCK SET)	
I 01	1		O 01		
I 00	0(LSB)		O 00		

3. 夏季雷・冬季雷の観測

本システムを用いた観測を、夏季雷に関しては1989年度(於:滋賀県甲賀郡信楽町京都大学超高層電波研究センター MU レーダサイト, 期間:8月~9月), 冬季雷に関しては1988年度・1989年度(於:福井県三方郡美浜町, 期間:11月~12月)に実施した。いずれの場合にも、統計的な議論に足る十分な数の観測結果が得られていないので、以下にそれぞれのケーススタディーとして議論を展開し夏季雷・冬季雷の比較を行う。

<3・1> 夏季雷測定結果例 図5(a)が9月6日

(a) 夏季多重雷観測結果例 (524 ms 全体像)
(a) An example of observed electric field.

(b) 第二雷撃部拡大図 (32 ms)
(b) The second stroke of the example.

(c) 第二雷撃部詳細図 (512 μs)
(c) The detail of the second stroke.

図5
Fig. 5.

(a) 夏季に観測された正極性落雷 (524 ms)
(a) A positive lightning electric field.

(b) 帰還雷撃部拡大図 (512 μs)
(b) The return stroke electric field.

図 6
Fig. 6.

20 時 27 分 46 秒に記録された、落雷による電界変化の再生結果である。図中の L, R および C はそれぞれリーダ、帰還雷撃および連続電流分を示している。全体像 524 ms の再生結果より、その落雷の多重度が四であることがわかる。更に、第二雷撃と第三雷撃の間に 120 ms 程度継続する連続電流による電界の変化が認められる。同図で R2 と記した第二雷撃部分を、32 ms[(b)図], 512 μs[(c)図]とその時間軸を順次拡大してみると、ダートリーダ部とそれに続く帰還雷撃が認められる。なお、同時に縦軸も拡大し、その拡大率は以後すべての図中に $E_z * N$ (N は倍率にあたる整数) として示すこととする。

一方、図 6(a) が 9 月 19 日 13 時 42 分 34 秒に記録された正極性落雷に伴う電界変化波形で、524 ms の全体像より連続的リーダ部、それに続く帰還雷撃、更には 60 ms 程度の連続電流による電界変化が、また 512 μs の拡大図[(b)図]より帰還雷撃部の詳細を知ることができる。これらの再生結果からもわかるように、本システムは従来のいわゆるスローアンテナとファーストアンテナの両方の性質を有している。ところで、このような夏季雷の電界変化波形が、8 月 30 日、9 月 6 日、9 月 9 日および 9 月 19 日の計 4 日の発電日

表 4 対地放電の多重度と連続電流

Table 4. The multiplicity and continuous current.

多重度	総 数	連続電流有	無
1	7	4	3
2	4	4	0
3	5	2	3
4	2	2	0
5	2	0	2
6	1	0	1

表 5 連続電流の継続時間分布

Table 5. The duration of the continuous current.

継続時間 (ms)	度 数
~ 40	3
~ 80	4
~ 120	4
120 ~	1

に、合計 26 例記録されている。記録された放電数はそれぞれ、2, 21, 2, および 1 であった。表 4 にこれら 26 例の測定結果について、多重度、連続電流の有無をまとめる。

この結果からもわかるように、夏季雷においても対地放電のおよそ半数に連続電流分が認められるが、これが一般的な性質か否かは更に観測を継続して統計的な議論をする必要がある。表 5 が連続電流の継続時間の度数分布である。

〈3・2〉 冬季雷測定結果例 図 7(a) が 1988 年 12 月 17 日 5 時 21 分 58 秒に記録された正極性二重雷の全体像 (524 ms) である。雷撃間隔はおよそ 47 ms で、第一雷撃に 19 ms 先行しリーダの開始が認められる。更に雷撃間には、連続電流によると考えることのできる電界の変化が存在する。いま、第一雷撃に先行するリーダ部の時間軸を、32 ms に拡大すれば [(b)図]、通常「プレリミナリーブレイクダウン」⁽⁶⁾⁽⁷⁾と呼ばれている変化が確認できる。この変化には多数のインパルスが重畳されており、これらのインパルスは、(c)図に示す両極性のパルスで開始している。従って、512 μs に拡大した(d)図の帰還雷撃に相当する変化が認められなければ、ワイドマンら⁽⁸⁾により指摘された雲間放電の電界変化に類似している。なお、その立上り部分が両極性を示している点が興味深い。また(e)図の第二雷撃の帰還雷撃部には、より顕著な両極性が認められる。同日に落雷と判定できる測定結果が五例得られているが、そのうち四例が正極性落雷、更にそのうち三例が図 7 の結果と類似して、

(a) 冬季正極性二重雷 (全体像 524 ms)
(a) The positive double stroke flash.

(b) 第一雷撃部拡大図 (32 ms)
(b) The first stroke of positive lightning.

(c) 両極性インパルス
(c) A bipolar impulse.

(d) 第一雷撃部
(d) The first return stroke field.

(e) 第二雷撃部
(e) The second return stroke field.

図 7
Fig. 7.

インパルスが重畳されたリーダ部を含んでいる。図 7 からもわかるように、これらのインパルスは電界変化の開始部には顕著であり、帰還雷撃の時刻に近くなるほど小振幅ないしは存在しなくなるため、必ずしもステップリーダに起因するとは考えられない。実際にどのような物理現象と対応するのかは、今後観測・検討を重ねる必要がある。

一方、図 8(a) が、1989 年 12 月 9 日 5 時 52 分 28 秒に記録された 262 ms 間の電界変化波形で (1989 年冬季には 2 MHz のサンプリング周波数で観測した)、異なる極性の帰還雷撃や、図中に C として示したように連続電流に相当する変化分を含んでいる。更に、

同図中に示した範囲の 16 ms への拡大 [(b) 図] により、図 7 同様インパルスが重畳された「プレリミナリーブレイクダウン」が認められる。更に興味深いのは、五個の雷撃のうち四個が負極性で一個が正極性 [(c) 図] と、異なる極性の雷撃に対応する変化を含んでいる点である。ここに、(a) 図中に付した矢印の部分が帰還雷撃に相当する速い変化を含んでおり、上向き矢印が負極性、下向き矢印が正極性落雷である。ビデオカメラなどによる記録がないため、電界変化だけで判断するのは難しいが、多地点への落雷である可能性が高いものと考えることができる。

(a) 冬季に観測された多重雷波形 (262 ms)
(a) A multi stroke flush during winter.

(b) 第一雷撃部拡大図 (16 ms)
(b) The first stroke.

(c) 第二雷撃部拡大図 (16 ms)
(c) The second stroke.

図 8

Fig. 8.

4. む す び

高い時間分解能を有する「落雷波形長時間記録装置」を製作し、センサとして従来のスローおよびファーストアンテナの機能をもつ平板電界アンテナを用いて、夏季および冬季雷の観測を実施した。その結果以下の事が明らかとなった。

- (1) 設計仕様どおり、落雷に伴う電界変化を高い時間分解能で長時間記録できること。
- (2) 夏季雷対地放電の半数に連続電流による電界変化が存在すること。
- (3) 冬季雷中、リーダに先行する「プレリナリ

ーブレイクダウン」に多くのインパルス状成分が重畳すること。更に、このインパルス列は、両極性のパルスで開始すること。

「プレリナリブレイクダウン」に関し、確かに文献(7)では統計的性質が示され詳しく論じられているが、これはいわゆる夏季雷に関してであり、著者らが今後主として解明していこうとしている冬季雷については、今回のように広帯域・長時間の測定に基づくもの、言い換えれば今回の観測で記録したような多数のパルスを含む電界波形例は、著者らの知る限り報告されていない。今後観測を重ねデータを蓄積し、上に示した諸現象の、統計的な性質を明らかにしていく予定である。

(平成2年5月25日受付)

文 献

- (1) M. Uman: The Lightning Discharge, p.205 (1987) Academic Press
- (2) *ibid.*, p.134
- (3) *ibid.*, p.110
- (4) M. Brook, et al.: "Positive Lightning Strokes to Ground", *J. Geophys. Res.*, **94**, 6239 (1989)
- (5) 竹内:「北陸における冬季雷の研究」, 電学誌, **98**, 1156 (昭53-12)
- (6) B. F. J. Schonland: "The Pilot Streamer in Lightning and the Long Spark", *Proc. R. Soc. London Ser. A*, **220**, 25 (1953)
- (7) W. H. Beasley, et al.: "Electric Fields Preceding Cloud-to-Ground Lightning Flashes", *J. Geophys. Res.*, **87**, 4883 (1982)
- (8) C. D. Weidman et al.: "The Radiation Fields Wave Forms Produced by Intracloud Discharge Process", *ibid.*, **84**, 3159 (1979)

河崎 善一郎 (正員)

昭和24年1月17日生。53年3月大阪大学大学院博士課程修了。工学博士。54年4月～平成元年7月名古屋大学空電研究所勤務。平成元年7月大阪大学講師。環境電磁工学、雷放電物理に関する研究に従事。

松浦 虔士 (正員)

昭和13年1月1日生。37年3月大阪大学大学院修士課程修了。同年4月住友電気工業(株)入社。52年1月大阪大学工学部助教授, 63年3月同教授。工学博士。電気エネルギーの発生・伝送・制御に関する研究に従事。

山 本 賢 司 (正員)

昭和17年7月24日生。43年3月大阪工業大学電子工学科卒業。同年4月大阪大学工学部電気工学教室勤務。工学博士。主として、送配電線路の耐雷設計に関する研究に従事。

長 谷 正 博 (非会員)

昭和18年6月8日生。37年3月岐阜県立斐太実業高校電気科卒業。同年4月名古屋大学空電研究所勤務。主として、空電・人工雑音および雷観測機の開発に従事。文部技官。

中 田 滉 (非会員)

昭和21年2月25日生。39年3月富山市立北日本電波高校卒業。40年8月名古屋大学空電研究所勤務。主として、空電・人工雑音および雷

観測機の開発に従事。文部技官。

仲 野 實 (正員)

昭和14年11月6日生。44年3月京都大学大学院博士課程修了。同5月名古屋大学空電研究所勤務。平成元年11月同工学部助教授。平成2年4月豊田高専教授。雷放電物理、放電工学の研究に従事。理学博士。

竹 内 利 雄 (正員)

昭和6年3月30日生。28年3月名古屋大学理学部卒業。同年4月同大学空電研究所勤務。平成2年4月愛知技術短期大学教授。一貫して雷放電物理に関する研究に従事。理学博士。