磁気テープの磁化効果を用いた雷電流測定

正 員 和 田 淳 (名古屋大)

正 員 堀 井 憲 爾 (名古屋大)

Measurement of Lightning Current by Magnetizing Effect of Magnetic Tape

Atsushi Wada, Member, Kenji Horii, Member (Nagoya University)

The experiment of rocket-triggered lightning has succeeded to guide a lightning to a test power transmission line tower in 1986. By this success, it became possible to measure the lightning current flowing through the ground wire and each leg of tower simultaneously, and also to study the shield to the lightning stroke to the line. In the triggered lightning experiment to the line or tower, it is needed to measure the lightning current at the discharge stroke channel in air directly by the current measuring device carried by a small rocket. For the purpose, a new method using the magnetizing effect of magnetic tape by the lightning current was developed as a small and light device carried by the rocket.

In this paper, the characteristics and accuracy of the device are described with the measured results in the triggered lightning experiment to the test power transmission line in comparison with the results measured by Rogowski coil.

キーワード：雷電流，ロケット誘雷，磁気テープ，磁化効果

1. はじめに

昭和 52 年度に開始された我が国のロケット誘雷実験は、技術的改良を重ねることにより昭和 61 年度に世界初の送電線鉄塔への誘雷に成功した⁽¹⁾。この成功により、送電線鉄塔へ雷撃時の鉄塔および架空地線各部を流れる電流の同時測定が可能となった。これにより、鉄塔および架空地線を流れる電流の分流と鉄塔各部の電位上昇の測定、送電線雷しゃへの研究などに新しい手法が提供された。

送電線鉄塔への誘雷実験では、雷撃点を特定できないため雷撃点で電流を測定することは難しく、また鉄塔の各脚部および架空地線などに分流する電流の総和を求めることも困難であるため、雷道上で直接に電流を測定することが必要となる。そこで、ロケットに電流測定装置を取付け雷道上での電流測定を試みきた。

雷道上で電流測定を行う方法としては、メモリカード内蔵のログスキューコイル装置⁽²⁾、または磁鋼片をロケットに搭載する方法が考えられる。従来より、磁鋼

片に代わり磁気テープの雷電流による磁化効果を利用する雷電流測定が考えられてきた⁽³⁾。ここで述べる磁気テープの磁化効果を用いる電流測定装置は、装置の小形、軽量化によりロケットに搭載し雷道上での電流測定を可能にしたこと、およびデータ処理にデジタル波形解析装置を用いて測定精度を高めたことに特徴がある。

本論文の後半では、ロケット誘雷実験で磁気テープの磁化効果を用いて行った雷電流測定結果について述べる。特に雷道上での電流値と地上での測定値とを比較検討し、磁気テープの磁化効果を用いる雷電流測定法の有効性について述べる。

2. 測定原理

図 1 に示すように、あらかじめ交流で磁気テープを磁化して、磁化の方向をテープ面に沿って交流の周期で反転させておいた磁気テープを、図 1 に示すように棒状導体の側面におく。この導体に流れる電流の作る磁界のうち、テープ面に平行な成分のための磁化飽和

図 1 磁気テープによる電流測定
Fig. 1. Current measurement by magnetic tape.

現象により、導体近くのある範囲内の磁気テープの磁化方向が様になり、交流磁化が消去される。この交流磁化が消去される範囲、すなわち磁化消去長を読み取り電流波高値を求める。また交流磁化の消去部分の磁化方向より、流れた電流の極性がわかる。

磁気テープの磁化効果を用いた電流測定法の特徴は、安価であり、かつ装置が小形、軽量であるためロケットに搭載可能であること、また電源不要であるため取扱いが容易であることである。

3. 校正実験

実験に用いた磁気テープは 1 kHz の交流で磁化した。消去長の読み取り誤差を少なくするためには、交流磁化の周波数を高くして、記録波長（信号 1 周期に対応するテープ上の長さ）を細かくすることが望ましいが、数 kHz 以上の高周波になると磁気テープの記録時および再生時に損失⁽⁴⁾を生じる。すなわち、信号が高周波になるとテープがほとんど動かないうちに磁界の向きが反転し、交流減磁効果のため記録ができなくなる。また記録波長が短くなると、テープ再生時に磁化したテープより生じる磁束が再生ヘッドに有効に及ばず再生出力の低下につながる。これらの理由から交流磁化の周波数を 1 kHz に選んだ。

磁気テープを用いた電流測定は、テープを取付ける導体の形状および取付け位置が測定精度に影響する。導体の形状は直線状導体が望ましいが、屈曲した形状では実際にテープを取付けた状態で校正試験を行う。そこでロケット誘雷実験で使用している集電リング（ワイヤに沿って流れた電流を接地導体へ流入させるリング状導体）およびロケット先端の誘雷針を用い、電流波高値と磁化消去長の関係を求めた。校正実験で磁気テープの取付け時の誤差は ±5% 未満であった。

図 2 に磁気テープ装置を、図 3(a) に集電リングへの、(b) 図にロケットへの磁気テープの取付け状況を示す。集電リングは直径 10 mm の銅パイプ製であり、ロケット先端の誘雷針は直径 6 mm の鋼棒である。図

図 2 磁気テープ装置
Fig. 2. Magnetic tape.

(a) 集電リング

(b) ロケット

図 3 磁気テープの取付
Fig. 3. Attachment of magnetic tape.

図 4 実験回路

Fig. 4. Experiment circuit.

図 5 校正電流波形

Fig. 5. Test current waveform.

4 に校正実験の回路を、図 5 に校正電流波形を示す。

図 4 の ab の部分に図 3 の集電リングおよびロケット本体を取付け、6/12 μs の電流を通電して校正実験

図 6 インパルス電流通電後の磁気テープ再生波形

Fig. 6. Recorded wave in magnetic tape after flow of impulse current.

図 7 磁化消去長の定義

Fig. 7. Definition of demagnetized length.

を行った。電流波形を3種類(3/9 μ s, 5/22 μ s, 7/31 μ s)変えて実験を行った結果、この範囲では電流波形による消去長への影響はないことを確かめた。なお、磁気テープは、電流測定範囲を広げるためと測定値の信頼度を高めるために、磁性体の異なる3種類のテープ(通称ノーマルテープ、クロムテープ、メタルテープ)を並行に用いている。

図6は、周波数1 kHzで磁化したテープの時間掃引の再生出力が、インパルス電流通電により一部を消去された様子を示す。再生波形は、図2に示すように切取ったテープを再びカセットテープにつなぎ合せ、カセットデッキで再生して、デジタル波形解析装置[ヤーマン製、DATA 6000]を用いプリンタにて出力した。テープの掃引速度から換算した消去長の読取りは、図7に示すように最大値の $\pm 20\%$ 区間の平均値 $l_{20\%}$ を消去長と定め校正曲線を求めた。消去長を $\pm 20\%$ に選んだ理由は、 $\pm 20\%$ 以下では小電流における消去長が小さい場合の読取りが難しく、 $\pm 20\%$ 以上では消去長を読取るのにテープの長さを長くする必要がある。ロケットにテープを取付ける場合は、磁気テープの長さが約3 cmに制限される。そこで限られたテープの長さで電流測定範囲をできるだけ長くするため消去長を $\pm 20\%$ に選んだ。

図8に集電リングを用いての電流波高値と消去長の校正曲線結果を示す。テープの種類により校正曲線が違うのは、各テープの磁化特性が異なるためである。保磁力の大きなメタルテープは、保磁力の小さなノーマルテープに比べ同じ印加磁界に対して残留磁化の向きを反転させにくく、交流磁化の消去長が短くなる。テープの種類による特性の差を用い、ノーマルテープ

図 8 磁化消去長と電流波高値の関係

Fig. 8. Relation between demagnetized length and electric current peak.

図 9 導体電流の作る磁界

Fig. 9. Magnetic field produced by electric current flowing conductor.

を10 kA程度以下の低感度用の測定に、メタルテープを10 kA程度以上の高感度用の測定に用いることができる。なお図中の点は実験ごとの点に対応し、ばらつきは数%以内であるが、測定誤差は導体へのテープの取付け方により大きく左右されるので、実際には上記のばらつきよりも大きくなり、後述するように10%未満となる。

なお図8の曲線は、導体を通る電流の作る磁界から計算した値とほぼ一致する。ここで図9に示すように、電流 I の流れる導体中心から d 離れた磁気テープ面上の x 点における x 方向の磁界 H_x は次式となる。

$$H_x = \frac{I}{2\pi} \frac{d}{x^2 + d^2}$$

いま、 $H_x \geq H_0$ でテープの磁化飽和が起こるとすれば、消去長 x_0 と電流 I との関係は次式となり、図8に示す放物線とほぼ一致する。

$$I = 2\pi H_0 (x_0^2 + d^2) / d$$

4. ロケット誘雷実験における測定結果

平成元年度の冬季ロケット誘雷実験で、磁気テープ

図 10 試験送電線
Fig. 10. Testing transmission line.

図 11 磁気テープ取付位置
Fig. 11. Position of magnetic tape.

を用い雷電流測定を行った結果について述べる。

現在、ロケット誘雷実験は、地上に設置したアレスタなどの供試体へ雷を導き雷撃試験を行う通称地上誘雷と、送電線への雷撃特性を調べるため送電線の鉄塔や線路へ雷を導く通称鉄塔誘雷に大別される。鉄塔誘雷の対象は図 10 に示すように 7 基の鉄塔よりなる北陸電力(株)の試験送電線の 30 号鉄塔(高さ約 60 m)である。また図 11 に示すように、磁気テープ装置は地上誘雷に対しては集電リングおよびロケット先端の誘雷針に、鉄塔誘雷に対してはロケット先端の誘雷針に取付けてある。

表 1 に実験結果を示す。表中の誘雷方式で鉄塔、地上とはそれぞれ鉄塔誘雷、地上誘雷を意味する。

実験番号 12, 14 の地上誘雷で磁気テープを用いて測定した電流値は 2 種類のテープについて、それぞれ 11.5, 10.5 および 7.8, 7.2 の値となり、この平均として表中の値 11, 7.5 kA が求められた。これからみて実測データのばらつきは 10% 未満と考えられる。

表 1 磁気テープによる電流測定値
Table 1. Current value measured by magnetic tape.

実験番号	誘雷方式	ロケット側 極性 (kA)	集電リング側 極性 (kA)	ログスキー コイル (kA)
04	鉄塔	+ > 20		+25.6
06	地上	+ > 20	+ > 30	+39.0
08	地上	*	+ > 30	+35.3
11	地上	+ > 20	- > 30	+38.6
12	地上	*	- 11	-10.5
14	地上	*	+ 7.5	+6.0
16	鉄塔	+ 15		+13.0
18	地上	+ > 20	+ > 30	+43.5
19	地上	- < 0.9	- < 1.0	+2.0
20	地上	- < 1.3	- < 1.0	+1.5
22	地上	+ > 20	+ > 30	+42.0

* 未回収

実験番号 12 ではログスキーコイルは集電リングからアースに至るまで合計 4 台設置されていたが、そのうちの 1 台は動作不良、残る 3 台は集電リングからアースへ向かいそれぞれ -10.5, -9.0, -12.0 kA の値であり、磁気テープの値 -11 kA はログスキーコイルによる測定値のばらつきの範囲内であった。また実験番号 14 では、集電リングとアースの間でグラウンドワイヤ線とアレスタの雷撃試験が行われた。このときログスキーコイルによる測定値は、集電リング側で +6.0 kA、アース側では供試体が入った影響で、初め -12 kA のパルス状の波形の後 +9.9 kA に反転して約 20 ms で減衰する電流波形であった。集電リング側での測定値は磁気テープの測定値と 20% の誤差で対応している。

実験番号 16 の鉄塔誘雷の雷撃点は、写真撮影や音響法を用いた推定結果および実験後の架空地線点検により、図 10 に示すように 29 号鉄塔と 30 号鉄塔の径間の架空地線で、30 号鉄塔より約 17 m の位置であることが明らかとなった。図 10 の架空地線の A 点、B 点でログスキーコイルを用い測定された電流波高値は、それぞれ +8 kA および +5 kA で、この合計は 13 kA であった。この値は、空中で磁気テープで測定した電流値 +15 kA とほぼ一致したが、両者の 15% の違いが測定誤差によるのか、雷撃点での雷道電流波の反射によるのかについては更に検討を要する。

実験番号 04, 06, 08, 11, 18, 22 はすべて正極性電流で磁気テープの測定範囲を超える大電流雷放電である。一方、実験番号 19, 20 の地上誘雷では、非常に小さな電流が記録された。なお実験番号 11 では、ロケット側で測定した値と地上側で測定した値とが極性が逆になっている。極性が逆になった理由は不明で

図 12 アルミはくでしゃへいしたときの
電流波高値と磁化消去長の関係(2.5/10 μ s)
Fig. 12. Relation between electric current
peak and demagnetized length of magnetic
tape shielded by aluminium foil.

図 13 アルミはくでしゃへいしたときの
電流波高値と磁化消去長の関係(5.0/10 μ s)
Fig. 13. Relation between electric current
peak and demagnetized length of magnetic
tape shielded by aluminium foil.

ある。ログスキーコイルによる電流測定の結果は、波頭部に多数のパルスが重畳した波高値+38.6 kAの電流波形であったが、特に極性反転は認められない。

磁気テープを用いてロケット誘雷時の雷撃電流を測定する際、今後の改良点としては、電流測定範囲の拡大および電流しゅん度などの波形情報を得られるように工夫することである。この方法として、磁気テープを金属はくでしゃへいして消去長を小さくし、電流測定範囲を拡大することや電流波形のしゅん度による磁界の減衰量の差をしゅん度の測定に利用することが考えられる。

図 12、図 13 は、直径 6 mm の鋼棒と磁気テープの

間にアルミはくを入れ電流波高値と磁化消去長の関係を求めたものである⁽⁵⁾。実験には 1 kHz で交流磁化したメタルテープを用い、導体とテープの間に厚さ 15 μ m のアルミはくを 1 枚および 2 枚、4 枚を重ねて入れ磁気テープにしゃへいをしたものと、しゃへいなしのものについて磁化消去長の比較を行った。図 12 は導体に印加する電流波形が 2.5/10 μ s、図 13 は 5.0/10 μ s の結果である。電流波高値について、しゃへいなしの場合とアルミはく 4 枚によりしゃへいしたものとを比較すると、消去長が 30% から 50% 程度短くなり、電流測定範囲を現在の ± 20 kA から $\pm 40 \sim 50$ kA に拡大することが可能である。また、波頭長の違いについて比較を行うと、立上りが急しゅんな 2.5/10 μ s のほうが、5.0/10 μ s に比べ同じ電流波高値に対してアルミはくの枚数が増えるにつれ消去長の減少が大きい。

以上の結果のように、磁気テープを金属はくによりしゃへいを行うことで電流波形のしゅん度についての情報を得ることが可能である。なお、磁気テープの種類によっては磁性体塗布面の裏側にバックコーティングとして特殊塗膜が施されているものもあり、このしゃへい効果が出るので、磁性体塗布面が導体に向かい合うように設置する必要がある。

5. ま と め

実験の結果から、磁気テープの磁化効果を用いた雷電流測定装置は小形、軽量で耐久性に優れており、現場測定に非常に有効であることがわかった。特に装置をロケットに搭載し雷道上で電流測定を行ったことは今までにない新しい試みであり、送電線鉄塔への誘雷実験と共に行うことで、送電線鉄塔への雷撃特性の解明に役立つと思われる。

電流測定精度に関しては、従来より用いられている磁鋼片に比べデータの処理方法の点で優れており、テープの取付け方法を改良すれば更に高い精度が得られるものと考えられる。

今回得られた結果は、使用した磁気テープの上限、下限の電流測定範囲を越えるものが多く、今後低感度用と高感度用とを組合せ使用する必要がある。また、金属はくで磁気テープをしゃへいし、測定範囲の拡大と波頭しゅん度による磁界の減衰量の差を利用する電流しゅん度の測定についても可能性が示された。今後は、本測定法の測定精度向上と現場適用性の改良について、室内実験やロケット誘雷実験により更に研究を進める予定である。

最後に協力をいただいたロケット誘雷実験班の共同

研究者各位，および協力をいただいた中部電力(株)，北陸電力(株)，(株)北計工業にお礼申し上げます。なお，本研究は文部省科学研究費の助成を受けていることを付記する。

(平成2年5月25日受付，同2年10月12日再受付)

和田 淳 (正員)

平成2年3月名古屋大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程満了。同年4月同大学工学部電気工学科助手，現在に至る。主として，イ

ンパルス電圧試験法，放電現象，ロケット誘雷の研究に従事。

文 献

- (1) 堀井，他：「送電線鉄塔へのロケット誘雷実験」，電学論 B，107，(昭 62-9)
- (2) 和田・堀井・中村：「新型ロケットによる空間雷電流測定」，電気学会放電高電圧合同研資，ED-88-105；HV-88-66 (昭 63)
- (3) 鶴見・高木・山森：「磁気テープによる衝撃電流の測定」，昭 40 電気学会東京支大，207
- (4) 横山：磁気記録技術入門 pp. 16-20 (昭 63) 総合電子出版社
- (5) 清水・和田・堀井：「磁気テープの消磁効果を用いた雷電流測定法」，電気学会放電高電圧合同研資，ED-90-163；HV-90-50 (平 2)

堀井 憲爾 (正員)

昭和 27 年 3 月名古屋大学工学部電気学科卒業。同年 4 月電子技術総合研究所電力部入所。46 年 4 月名古屋大学工学部電気学科教授。高電

圧工学，放電現象，ロケット誘雷，超電導電力応用などの研究に従事。工学博士。44 年，54 年電気学会論文賞，61 年同電力賞受賞。放電研究グループ副会長。