対地雷撃に伴って発生する水平電界の簡易評価法

正員 道下 幸志 (静岡大) 正員 石井 勝 (東京大)

Simplified Evaluation of Horizontal E-Field Associated with Cloud-to-Ground Strokes

Koji Michishita, Member (Shizuoka University) Masaru Ishii, Member (University of Tokyo)

キーワード：雷撃，垂直電界，水平電界，大地導電率

1. はじめに

大地が有限な導電率をもつ場合に電流双極子が生じる電界の計算には，厳密解に Sommerfeld 積分⁽¹⁾が含まれることから，雷放電路を双極子で置き換えて数値計算する場合には膨大な時間が必要となる。このため，多くの近似解が提案されており，雷撃点までの距離が数 km 以内の場合には Norton 解⁽²⁾の精度が良いことが示されている⁽³⁾。また，Zenneck の式⁽⁴⁾も近似解の一つであり，雷撃点までの距離が 16 km 以上の対地雷撃により生じる電界波形では成立することが示されている⁽⁵⁾。文献(6)では，雷撃点までの距離が 7 km の場合にも Zenneck の式が成立すると報告されているが，水平電界の測定精度に問題がある。著者らは，垂直電界の混入が 1.4% 程度と測定精度が改善された水平電界センサを用いて，雷撃点までの距離が 5 km の垂直，水平電界の同時計測を行い，観測された水平電界波形に基づいて，Zenneck の式が低周波において問題があることを指摘した⁽⁷⁾。文献(7)では雷撃点までの距離を垂直電界波形から 2 km と推定したが，後に雷鳴記録から 5 km であることが確認された⁽⁸⁾。

本報告では，垂直電界から水平電界を求める近似解法を提案し，この解法の妥当性を検討する。

2. 水平電界の計算手法

大地面上に位置する大地に垂直な双極子の生じる垂直および水平電界の関係を，Norton 解から(2)の条件のもとに(1)式のように近似した。

$$\frac{Eh(f)}{Ev(f)} = \frac{z/D \{1 + 3/jkD + 3/(jkD)^2\} - u(1 + 1/jkD)}{1 + 1/jkD + 1/(jkD)^2} \quad (1)$$

ただし，

$$z' \ll D, |u^2| \ll 1 \quad (2)$$

$$u = 1 / \{\epsilon_r + \sigma / j2\pi f \epsilon_0\} \quad (3)$$

ここに， k ：波数($=2\pi f/c$)， c ：光速， z ：観測点地上高， D ：双極子までの水平距離， z' ：双極子地上高， ϵ_r ：大地の比誘電率， σ ：大地導電率， ϵ_0 ：空気の誘電率

また，大地導電率による高周波成分の減衰を表す減衰関数(Norton 解に含まれる)は 1 と簡略化した。

(1)式の適用範囲を検討するために，雷放電路の上限 H をパラメータとして水平電界波形の計算を行った。主放電電流波形は，波頭長 2.0 μ s，波尾長 78.0 μ s の三角波で近似し，100 m/ μ s で地上面から大地に垂直に減衰なく進展すると仮定した。微小な双極子の生じる電界を Norton 解から求め，それらを $z'=0$ から $z'=H$ まで積分して得られる水平電界波形のピーク値と，前述の手法で計算された垂直電界から，(1)式および同式の右辺を u とする Zenneck の式をラプラス

図 1 (1)式および Zenneck の式から計算される水平電界のピーク値の Norton 解から計算される水平電界のピーク値に対する比 (σ : 0.001 S/m, ϵ_r : 10, $z=0$ m)

Fig. 1. Ratios of peaks of horizontal electric field waveforms evaluated by Eq. (1) or wavetilt formula to that evaluated by Norton's approximation.

(a) 垂直電界

(b) 地上高 1 m の水平電界波形 (実測)

(c) 今回提案した手法により計算された水平電界波形

(d) Zenneck の式により計算された水平電界波形

図 2 5 km 離れた対地雷撃に伴う垂直電界 (a), 測定された水平電界 (b), (1) 式から計算された水平電界 (c), Zenneck の式から計算された水平電界波形 (d)

Fig. 2. Measured vertical (a) and horizontal (b) electric field waveforms, associated with a cloud-to-ground stroke at the distance of 5 km, and horizontal electric field calculated from Eq. (1) (c) and that from "wavelilt formula" (d).

変換して、時間領域で計算された水平電界波形のピーク値の比較を行った結果を図 1 に示す。

$D=100$ m で $H/D < 0.3$ の場合には、(1) 式から

計算される電界波形と Norton 解から計算される水平電界波形はよく一致しているが、 H が大きくなると相違が生じ、(1) 式では水平電界が過小に評価される。

$D=500$ m の場合には H が大きくなってもピーク値には 5% 程度の誤差しか生じないが、 D の増加につれて水平電界の波尾部分が過小評価されるようになる。

以上の検討から、(1) 式は $D > 100$ m では $z < 0.3D$ で適用可能と判断した。一方、Zenneck の式では、(1) 式とは対照的に、水平電界を過大評価している。

3. 実測波形との比較

文献 (7) の実測された電界波形に (1) 式および Zenneck の式を適用して計算された水平電界波形を図 2 で比較する。測定点の大地導電率および比誘電率は、 0.00039 S/m および 4 と推定されている⁽⁵⁾。両者の計算結果では水平電界波形の波尾の部分の形状が異なり、今回提案した手法では、 $120 \mu\text{s}$ 程度までは実測とよく一致していることから、図 2 の波形の $120 \mu\text{s}$ 以前の時間領域では、 z が 1.5 km 以下の双極子から放射される電界が優勢であったものと推定できる。

一方で、 $120 \mu\text{s}$ より後の部分では、今回提案した手法においても、測定された電界成分とは相違が生じている。これは、この時間領域の電界では地上高の大きい双極子からの寄与が大きくなることや、雷放電路の傾きの影響などのためと考えられる。

最後に本研究を行うにあたり、多くの御協力をいただいた東京大学生研北條準一博士、ならびに東北電力(株)関係各位に深く感謝の意を表します。

(平成 4 年 2 月 28 日受付)

文 献

- (1) J. Stratton: *Electromagnetic Theory* (1941) McGraw-Hill
- (2) K. A. Norton: *Proc. IRE*, 25, 1203 (1937)
- (3) A. Zeddam, et al.: *Electromagnetics*, 7, 541 (1987)
- (4) 虫明: 電子通信学会大学講座 18 (昭 36) コロナ社
- (5) 道下, 他: 平 4 電気学会全大, 1264
- (6) E. Thomson et al.: *J. Geophys. Res.*, 93, 2429 (1988)
- (7) 道下, 他: 電学論 B, 110, 986 (平 2-11)
- (8) 道下, 他: 平 4 電気学会全大, 1263

道 下 幸 志 (正員)

(平成 4 年 電学論 B, 112 巻 3 号, p. 251 参照)

石 井 勝 (正員)

(平成 4 年 電学論 B, 112 巻 3 号, p. 251 参照)