実雷撃に伴って観測された誘導電圧の水平電界を考慮した解析

正員 道下幸志 (静岡大学) 正員 石井 勝 (東京大学)

Analysis of Observed Lightning-Induced Voltages by Taking Account of Horizontal E-Field
Koji Michishita (Shizuoka University), Member, Masaru Ishii (University of Tokyo), Member

There have been reports on simultaneous measurements of the lightning current and the induced voltage on test distribution lines. The data in these reports are analyzed by a numerical model on the coupling of a lightning stroke and an overhead wire postulating several stroke models. The calculated induced voltage waveforms are compared with the actually measured waveforms, and the validity of each model of the lightning stroke is discussed.

キーワード：雷，雷撃モデル，高構造物，接地インピーダンス，誘導雷現象，配電線

1. まえがき

配電線等に生じる誘導雷現象は，雷害対策を考える上での主要な検討対象の一つである。

著者らは，水平電界を考慮した配電線誘導雷現象解析手法を提案し⁽¹⁾，この手法による計算結果の妥当性を，大地導電率が有限な場合や雷放電路が傾いている場合を含めて，誘導雷のモデル実験結果との比較により示した^(2, 3)。

誘導雷のモデル実験で用いられる雷道は銅線等により模擬されており，模擬雷道中の電流分布は伝送線路モデル (Transmission Line Model: 以下TLMと略す)⁽⁴⁾により精度良く近似される事となる。これに対して，実雷の場合には，雷放電路中の電流は伝送線路モデルのような簡単なモデルでは表されない事が指摘されている⁽⁵⁾。

本論文では，誘導雷解析においてしばしば用いられるTLMとTCSモデル (Traveling Current Source Model)^(5, 6)を雷放電路モデルとして用い，水平電界を考慮した誘導雷現象解析手法により誘導雷現象の解析を行う。この手法では，任意の雷放電路モデルを用いた誘導雷現象の解析が可能である。得られた計算結果を，実雷に伴って観測された誘導雷電圧波形と比較し，誘導雷現象を解析する際の雷放電路モデルとしての妥当性について論じる。

2. TCSモデル

TCSモデルでは，電流源が大地面から雷放電路に沿って上昇するというモデルであり，電流源の上昇速度は帰還雷撃の進展速度で与えられ，電流源から放電路に注入された電流は光速で雷放電路を大地面に向かって伝搬し，大地に流入すると仮定されている⁽⁶⁾。

図1に大地面における電流が同じで，帰還雷撃の進展速度が120m/μsの場合の，TCSモデル及びTLMによる雷放電

路上の各点における雷電流の時間変化を示す。TCSモデルでは雷電流の波高値は雷放電路上で一定にはならず，図の例では地上高 h が430mよりも大きい点では波高値は減少する。また，TCSモデルでは，放電路上の h が0でない点では雷電流の立上り部分はステップ状に変化するものと仮定されている。これらの点は，TLMとの大きな相違点である。

図1 TCSモデルとTLMの雷放電路上の各点(h :地上高)における雷電流の時間変化

Fig. 1 Time-varying current waveforms along the discharged channel for TLM and TCS model.

3. ロケット誘雷実験で観測された誘導雷現象

文献(7)には，ロケット誘雷実験時に試験配電線で観測された誘導雷電圧波形が雷電流波形と共に示されている。図2にロケット発射台と試験配電線の平面図を示す。誘導雷電圧の測定は，1号柱と9号柱で行われている。通常のロケット誘雷実験では，発射台が雷撃点となる。

図2 試験配電線とロケット発射台との位置関係⁽⁷⁾
Fig. 2 Plan of test distribution line and rocket launcher.

ロケット誘雷実験時に発生する帰還雷撃は、自然雷の後続雷撃と同様の性質を有すると考えられる。従って、解析にあたっては、後続雷撃に対する雷放電路モデルであるTLMとTCSモデルをそのまま用いた。

帰還雷撃は、大地に垂直な雷道を一定速度で上昇するものと仮定した。帰還雷撃の進展速度は、雷撃点から50m及び110mの点における垂直電界の測定結果と計算結果を比較する事により評価した。この距離帯の垂直電界波形は大地導電率の影響をほとんど受けない。解析に当っては、文献(7)の電流波形の測定結果に対して折れ線近似して得られたものを用いた。図3(a)に#9305の電界及び誘導雷電圧の解析に用いた電流波形を、また、同図(b)にはロケット発射台から110mの点で測定された垂直電界の測定結果と、TLM及びTCSモデルを用いて得られた計算結果を示す。観測された雷電流波形と計算に用いた電流波形の相違はほぼ読み取り誤差の範囲内であり、約3%以内で一致していると考えている。計算に用いた電流波形の測定結果に対する近似の精度は、以下の検討事例においても同様である。図3(b)の実測された電界波形と計算結果の比較的良好な一致は、何れのモデルを用いた場合にも、進展速度を $120\text{m}/\mu\text{s}$ ～ $180\text{m}/\mu\text{s}$ と仮定した場合に得られており、この値は、ロケット誘雷に伴って発生した後続雷撃の大地面付近の、光学的に観測された平均的な進展速度である $140\text{m}/\mu\text{s}$ ⁽⁸⁾とほぼ同じ値となっている。図2の試験配電線とロケット発射台の配置では、帰還雷撃進展速度が上述した範囲で変動しても誘導雷電圧への影響は軽微であるため⁽⁹⁾、帰還雷撃進展速度は $120\text{m}/\mu\text{s}$ と仮定して本章の計算を行う。

図4及び図5に文献(7)の#9305の測定された誘導雷電圧波形とTLM及びTCSモデルを用いた計算結果を各々示す。

図3 計算に用いた電流波形(a)及び垂直電界波形の測定結果と計算結果の比較(b)
(#9305⁽⁷⁾, V_r : 帰還雷撃進展速度)

Fig.3 Current waveform used in analysis (a) and reported electric field waveform at 110m away from the launcher of #9305 in (7) as well as calculations(b).

図4 誘導雷電圧波形の実測結果とTLMを用いた解析結果の比較(#9305⁽⁷⁾)

Fig.4 Reported induced voltage waveforms of #9305 in (7) and those calculated based on the TLM.

図5 誘導雷電圧波形の実測結果とTCSモデルを用いた解析結果の比較(#9305⁽⁷⁾)

Fig.5 Reported induced voltage waveforms of #9305 in (7) and those calculated based on the TCS model.

何れのモデルを用いた場合にも、大地導電率(σ)を $10\text{mS}/\text{m}$ と仮定した場合に実測結果と計算結果の波頭部が比較的良好に一致している。図4及び図5の計算結果では、大地導電率が小さくなると、雷撃点に近い9号柱の誘導雷電圧は大きくなり、1号柱の誘導雷電圧は小さくなっている。また、図には示さないが帰還雷撃進展速度が速くなった場合には、9号柱及び1号柱の誘導雷電圧は大地導電率が小さくなった場合と同様の変化をする。しかし、大地が完全導体の場合には帰還雷撃進展速度を50%増しの $180\text{m}/\mu\text{s}$ としても、誘導雷電圧の変化の度合は8%程度と小さく、1号柱と9号柱の誘導雷電圧の値が大きく相違するという実測結果は有限な大地導電率の影響と考えるのが妥当である⁽⁹⁾。

文献(7)では、#9305の事例について大地を完全導体と仮定して、測定された磁界波形と垂直電界波形を用いて誘導雷電圧波形の計算を行った結果、9号柱の誘導雷電圧波形は精度良く再現されるものの1号柱の誘導雷電圧は精度良く再現できなかった事が報告されている。

図6に文献(7)の#9313-2の9号柱における誘導雷電圧波形の測定結果と、大地導電率を10mS/mと仮定して計算された誘導雷電圧波形を示す。4 μ s以下の時間では、TLM及びTCSモデルを用いて計算された誘導雷電圧波形は実測波形と良く一致している事がわかる。図6の誘導雷電圧の立上り部分では、TCSモデルを用いて計算された誘導雷電圧波形がTLMを用いた計算結果よりも、測定された誘導雷電圧波形に類似している事がわかる。

図7には文献(7)の#9306の9号柱で測定された誘導雷電圧波形と、大地導電率を10mS/mと仮定して計算された結果を示す。この場合には、TLMを用いて計算した誘導雷電圧波形の方が波頭部において測定結果により類似している。図5や図6のように立上り部分が急しゅんな誘導雷電圧波形はTCSモデルを用いて精度良く再現されているのに対して、図7のTCSモデルを用いた計算結果と実測結果にはわずかな相違が見られる。これらの事例から、TCSモデルは比較的緩やかな立上り部分を有する誘導雷電圧の測定結果を再現するには、若干難がある事がわかる。これは、TCSモデルにおいて、図1に示すように、放電路上方の点では雷電流の立上り部分がステップ状に変化するものと仮定されているためである。

図6 9号柱の誘導雷電圧波形の実測結果と解析結果の比較 (文献(7)の#9313-2)

Fig.6 Comparison of reported induced voltage waveforms at pole 9 of #9313-2 in (7) and those calculated.

図7 9号柱の誘導雷電圧波形の実測結果と解析結果の比較 (文献(7)の#9306)

Fig.7 Comparison of reported induced voltage waveforms at pole 9 of #9306 in (7) and those calculated.

後述するように、TCSモデルでは、雷放電路と大地の接続点における雷電流の反射を考慮する必要があるが⁽¹⁰⁾、本論文の解析ではこの影響は考慮されていない。

4. 高さ200mの煙突への雷撃に伴って観測された誘導雷現象

文献(11)には、高さ200mの煙突頂部の雷電流波形と試験配電線誘導雷電圧波形の同時観測結果が示されている。図8に煙突と試験配電線の平面図を示す。試験配電線は単導体であり、線路両端の誘導雷電圧の測定が行われている。

図8 試験配電線と200m煙突の配置⁽¹¹⁾

Fig.8 Arrangement of 200m-high stack and test distribution line.⁽¹¹⁾

高構造物への雷撃に伴って発生した誘導雷現象の解析には、構造物の存在を考慮した雷撃モデルを用いる必要がある^(12,13,14)。本論文では文献(14)の構造物雷撃モデルを用いた。帰還雷撃開始点は、煙突頂部にあるものと仮定する。TLMを用いる場合には、リーダ結合点(煙突上端)から下方に伝搬する電流波は、上方に進展する電流波と同じ強度で反対の極性を有すると仮定した⁽¹⁴⁾。雷電流波は、煙突内は光速で、雷放電路内は帰還雷撃の進展速度で伝搬する。

TCSモデルを用いる場合には、電源は煙突頂部から帰還雷撃の進展速度で上方に移動し、雷電流波は放電路内も光速で伝搬するものと仮定した。また、電源のインピーダンスは文献(6)に示されたオリジナルのTCSモデルとは異なるが、雷放電路と同一と仮定した。文献(6)では、大地面と放電路の接続点での雷電流波の反射を考慮していないため、上向きに伝搬する電流反射波は存在せず、電源を電流源と仮定しても、そこでの雷電流波の反射は発生しない。文献(14)のモデルでは、雷道と煙突及び煙突と大地面で雷電流波の反射が発生するため、雷道を上向きに伝搬する電流波が発生する。電源の移動速度が光速よりも遅く、電源のインピーダンスが雷道インピーダンスと異なる場合には、電源においても雷電流波の反射が発生する。文献(11)の雷電流の測定結果では電源における雷電流波の反射を識別できないことから、電源部分での反射波は発生しないというオリジナルのTCSモデルで用いられた考え方に基いて、本論文では電源のインピーダンスは雷道インピーダンスと同一と仮定し、また、雷道インピーダンスを900 Ω と仮定しているため⁽¹⁴⁾、オリジナルのTCSモデルの電流源は電源と表記した。

TLM及びTCSモデルのいずれのモデルを用いる場合にも、

煙突内で発生する雷電流波の往復反射が考慮されており、煙突内の雷電流の分布は一致する。

図9に文献(11)の#96-04の測定された誘導雷電圧波形と、帰還雷撃進展速度を $30\text{m}/\mu\text{s}$ と仮定してTLMを用いて計算された結果を示す。計算結果と実測結果との比較的良好一致は大地導電率を $10\sim 100\text{mS}/\text{m}$ と仮定した場合に得られている。これは文献(11)の水平電界の測定結果から推定された結果と一致している。図9の事例のように雷撃点が線路の延長上に位置する場合には、有限な大地導電率の影響で、線路両端の雷撃点に近い線路終端点の誘導雷電圧の極性と雷撃点から遠い線路終端点の誘導雷電圧の極性とは反転する⁽²⁾。また、TCSモデルを用いた解析事例は図には示していないが、TLMを用いた解析結果との相違は軽微であった⁽¹⁵⁾。

図10に文献(11)の#96-05の測定結果と、帰還雷撃進展速度を $30\text{m}/\mu\text{s}$ 、大地導電率を $20\text{mS}/\text{m}$ と仮定してTLM及びTCSモデルを用いた計算結果の比較を示す。いずれのモデルを用いた計算結果も実測結果とほぼ一致している。

(a)誘導雷電圧波形 (雷撃点に近い点)

(b)誘導雷電圧 (雷撃点から遠い点)

図9 実測結果と計算結果の比較(#96-04⁽¹¹⁾)
(帰還雷撃進展速度: $30\text{m}/\mu\text{s}$)

Fig.9 Comparison of calculation and measurement of lightning-induced voltage of #96-04 in (11).

図11には文献(11)の#96-02の測定結果と、大地導電率を $20\text{mS}/\text{m}$ 、帰還雷撃進展速度を $120\text{m}/\mu\text{s}$ または $30\text{mS}/\text{m}$ と仮定してTLM及びTCSモデルを用いた計算結果を示す。図11の事例では帰還雷撃進展速度を $30\text{mS}/\text{m}$ と仮定した場合には雷撃点から遠い線路終端点の誘導雷電圧の測定結果と計算結果で差が大きくなっており、TLMを用いた場合には帰還雷撃進展速度を $120\text{m}/\mu\text{s}$ と仮定した場合に、TCSモデルを用いた場合には $90\text{m}/\mu\text{s}$ と仮定した場合に、実測結果と計算結果の比較的良好一致が得られた。

同地点で行われている光学的な観測結果により得られた最初の強い発光の進展速度の平均値は $30\text{m}/\mu\text{s}$ であり、最初

及び後続する強い発光の進展速度は $10\sim 200\text{m}/\mu\text{s}$ まで広く分布する事が示されている⁽¹⁶⁾。本論文で検討した誘導雷現象では、残念ながら光学的な観測との同時観測結果は得られていないが、本論文で実測結果と計算結果の比較的良好一致が得られた場合に用いた帰還雷撃進展速度である $30\sim 120\text{m}/\mu\text{s}$ は、文献(16)の強い発光の進展速度である $10\sim 200\text{m}/\mu\text{s}$ の分布の範囲内にある。

これまでに、実雷撃のもとで得られた雷撃点近傍の電界

(a)誘導雷電圧波形 (雷撃点に近い点)

(b)誘導雷電圧 (雷撃点から遠い点)

図10 実測結果と計算結果の比較(#96-05⁽¹¹⁾)

(大地導電率 $20\text{mS}/\text{m}$ 、帰還雷撃進展速度: $30\text{m}/\mu\text{s}$)

Fig.10 Comparison of calculation and measurement of lightning-induced voltage of #96-05 in (11).

(a) 誘導雷電圧波形 (雷撃点に近い点)

(b)誘導雷電圧 (雷撃点から遠い点)

図11 実測結果と計算結果の比較(#96-02⁽¹¹⁾)

(大地導電率 $20\text{mS}/\text{m}$ 、帰還雷撃進展速度: V_r)

Fig.11 Comparison of calculation and measurement of lightning-induced voltage of #96-02 in (11).

と誘導電圧の観測結果を、水平電界を考慮して解析した例^(17,18)はあるが、雷撃電流の実測結果は使用されず、水平電界の計算にもZenneckの近似式⁽¹⁹⁾を用いるなど、不満足なものであった。本論文における検討の結果、水平電界をより厳密に考慮した解析手法を用いて、有限な大地導電率のもとで、実測された雷電流から誘導雷現象の観測結果を再現できる事が明らかになった。

5. 結言

- (1) 実雷撃において観測された雷電流波形を使用して、水平電界を考慮した解析手法により計算された誘導雷電圧は、実測結果とほぼ一致した。以前、モデル実験との比較により有効性を検証した、有限な導電率をもつ大地上での誘導雷電圧解析手法は、実雷撃に伴う誘導雷現象もかなり精度良く再現できることが初めて明らかになった。
 - (2) 伝送線路モデル (TLM) を用いる事により、ロケット誘雷時に観測された誘導雷電圧波形は精度良く再現できる事が判明した。また、高さ200mの煙突への雷撃に伴って発生した誘導雷現象も、帰還雷撃開始点が煙突頂部に位置し、煙突頂部より上方を伝搬する電流波はTLMに従い、煙突内での雷電流波の往復反射を考慮した文献(14)の高構造物雷撃モデルを用いて精度よく再現する事が判明した。
 - (3) TCSモデルは、立上りが急しゅんな帰還雷撃電流波形の場合には精度よく実測結果を再現できるものの、緩やかな立上りをもつ帰還雷撃電流波形に伴って発生した誘導雷現象を再現するには多少難がある事が判明した。また、その理由も明らかにした。
- (平成11年09月06日受付, 平成12年05月11日再受付)

参考文献

- (1) 道下幸志, 石井勝, 河村達雄: 「水平方向電界を考慮した配電線誘導雷電圧解析法」, 電学論B, **111**, 628-634 (1991)
- (2) M. Ishii, K. Michishita, Y. Hongo, S. Oguma, "Lightning-induced voltage on an overhead wire dependent on ground conductivity", IEEE Trans., **PWRD-9**, 109-118, 1994
- (3) K. Michishita, M. Ishii, Y. Hongo, "Induced voltage on an overhead wire associated with inclined return-stroke channel-model experiment on finitely conductive ground", IEEE Trans. **EMC-38**, 507-513, 1996
- (4) M. A. Uman, D. K. McLain and E. P. Krider, "The electromagnetic radiation from a finite antenna", Amer. J. Phys., **43**, 33-38, 1975.
- (5) C. A. Nucci, G. Diendorfer, M. A. Uman, F. Rachidi, M. Ianoz and C. Mazzetti, "Lightning return stroke models with specified channel-base current: a review and comparison", J. of Geophys. Res., **95**, 20395-20408, 1990.
- (6) F. Heidler, "Traveling current source model for LEMP calculation", Proc. of 6th EMC Symp., Zurich, 29F2, 1985
- (7) P. P. Barker, T. A. Short, A. R. Eybert-Berard, J. P. Berlandis, "Induced voltage measurements on an experimental distribution line during nearby rocket triggered lightning flashes", IEEE Trans., **PWRD-11**, 980-995, 1996.
- (8) D. M. Mach and W. D. Rust, "Photoelectric return-stroke velocity and peak current estimates in natural and triggered lightning", J. of Geophys. Res., **94**, 13237-13247, 1989.
- (9) 本郷保二, 道下幸志, 石井勝: 「帰還雷撃電流進展速度が配電線誘導雷電圧分布に及ぼす影響—大地導電率も考慮した検討—」, 電学論B, **116**, 1015-1021 (1996)
- (10) F. Heidler and Ch. Hopf, "Lightning current and lightning electromagnetic impulse considering current reflection at the earth's surface", Proc. of the 22nd Int. Conf. on Lightning Protection, R4-05, Budapest, Sept. 1994.
- (11) 道下幸志・石井勝・浅川聡・横山茂・若井武夫: 「構造物近傍の試験配電線における誘導雷現象の観測結果」, 電学論B, **119**, 238-244 (1999)
- (12) T. Zundl, "Lightning current and LEMP calculation gained at the Peissenberg tower", Proc. of the 22nd Int. Conf. on Lightning Protection, R1c-08, Budapest, Sept. 1994.
- (13) H. Motoyama, W. Janischewskyj, A. Hussein, R. Rusan, W. A. Chisholm, J-S. Chang, "Electromagnetic Field Radiation Model for Lightning Strokes to Tall Structures", IEEE Trans. **PWRD-11**, 1624-1632, 1996
- (14) 道下幸志, 石井勝: 「誘導雷現象解析のための高構造物雷撃モデル」, 電学論B, **119**, 1130-1131 (1999)
- (15) 道下幸志, 石井勝: 「TCSモデルを用いた誘導雷現象の解析」, 平成11年電気学会電力・エネルギー部大会(論文II), No.557 (1999)
- (16) A. Asakawa, K. Miyake, S. Yokoyama, T. Shindo, T. Yokota, T. Sakai, "Two types of lightning discharges to a high stack on the coast of the Sea of Japan in winter", IEEE Trans. **PWRD-12**, 1222-1231, 1997
- (17) M. Rubinstein, M.A. Uman, P. J. Medelius & E. M. Thomson, "Measurement of the voltage induced on an overhead power line 20m from triggered lightning", IEEE Trans on **EMC-36**, 134-140, 1994
- (18) F. Rachidi, M. Rubinstein, S. Guerrieri, & C. A. Nucci, "Voltages induced on overhead lines by dart leaders and subsequent return strokes in natural and rocket-triggered lightning", IEEE Trans on **EMC-39**, 160-166, 1997
- (19) J. R. Wait, "Electromagnetic waves in stratified media", Pergamon Press (1962)

道下 幸志

(正員) 1962年9月24日生。1991年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。工学博士。同年4月静岡大学助手、1994年4月助教授、現在に至る。主として、雷に起因する環境電磁工学に関する研究に従事。IEEE, AGU Member.

石井 勝

(正員) 1949年3月11日生。1976年3月東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。同年4月東京大学助教授、生産技術研究所勤務、1992年同教授、現在に至る。主として系統絶縁、自然雷、高電圧現象の測定に関する研究に従事。IEEE Senior Member, AGU Member.