

落雷シミュレーションと都市計画への適用

河野 俊彦 片桐 重和

Lightning Strike Simulation and its Application to the City Planning

Toshihiko KOUNO, Shigekazu KATAGIRI

ABSTRACT

In eighteenth century, at the advent of the modern science, lightening became known as the electrical phenomenon. Since then up until today, there have been numerous remarkable developments in the area of electricity. As a result, including the development of the personal computer, electricity is greatly contributing to the achievement of the better quality of life for human being. However, the research for the lightening, which can be considered as had helped to find the electricity, has not yet getting a hinge of its full understanding. The lightening discharge is a statistical phenomenon, the main constituent of which is the increase of electron through the ionization by collision. Another aspect of the lightening discharge is that the thunder path formation is in the form of stepping development. The electrical field is self-generated, and the next development stage of the lightening in terms of direction and the dilation length is depending on stochastic growth of the electrical field. In another words, although the electricity can generally be, it is not possible to present the thunder lightening in the form of standardized analytical representation. Thus, it is a phenomenon which lacks the reproducibility. In this situation, although we can not state that each part of the lightening discharge is revealed, by adopting the parameter of the lightening discharge which are already known, we can create the simulation of lightening development path, and plot these data as a three dimensional (3D) mapping, and we have conducted the prediction of the lightening for City Safety Planning. This research is crucial and will become more important from the standpoint of avoiding the disaster by lightening in the urban area, as we utilize electricity more and more in our everyday life, such as an intelligent building system, or the ubiquitous network.

キーワード： 雷放電、落雷シミュレーション、都市安全設計

Keywords: : lightning discharge , Simulation of lightening Strike , City Safety Planning

1. まえがき

フランクリンの風揚げ実験により雷は電気現象であると言う研究から近代科学が始まり、その後、電気分野における発展は目覚ましい。その結果、コンピュータの発展を含めて人類のより良い生活に大い

に貢献している。その端緒となった雷の研究は未だ解決を見るに至っていない。それは、雷放電の発生が衝突電離による電子増加が主体となる確率現象であり、かつ、雷道形成の過程がステップ的進展であり、自己形成による電界が次段階のステップ進展の

方向や伸び長を決める確率的な形成によっているからである。言い換えれば、他の電気現象に当てはまるような解析的表現で画一に表すことが出来ない。即ち、再現性に欠ける現象であるからである。

各部分の現象について必ずしも判明しているとは言えないが、雷放電の知り得ているパラメータを取り入れて、雷道進展のシミュレーションをコンピュータ上に実現して、落雷予測を検討する。

インテリジェントビルやユビキタス時代に突入する現代及び未来社会において、落雷による都市被害を避ける意味から、益々、重要な課題である。

2. 雷発生条件及び雷道進展過程

ここでは、シミュレーションに必要な、雷の諸特性を確定する意味で、以下のように検討する。まだ明確になっていないものもあるので、今後の研究課題となる。また、ここで示した諸特性も今後研究に於いて修正されるべきものもある。

まず、1) 如何なる条件で雷は発生するのか、その事前認識法(即ち、予知法)のあり方について検討し、次に、2) 発生した雷道の進展は地上の何処へ(どのビル等構造物へ)落雷する確率が高いか?について検討する。

1) 雷雲形成と雷放電の発生条件: 典型的な雷雲は、夏季においては積乱雲であって、① 地上4 kmを雲底とし、雲頂を1万 mにもなるように発達する。その内部において、② 上昇気流による摩擦帯電が生じて電荷分離を起こし、空間の電界を高めるべく発達するものである。夏季最盛期には、③ 積乱雲が発達し始めてからほぼ30分で成熟した雷雲になり、発雷し始めると言われている。(注意: ○中数字で示すのはシミュレーションを進める上で、これまでに分っている雷の諸性質或いはパラメータである。)

現在では、レーダーと落雷点評定アンテナによって落雷予測を発しているが、勿論のことレーダーは雲の大きさや位置が分っても電荷の発達状況はつかめない。また、落雷点評定アンテナでは少なくとも1発の雷放電があつてからその位置を評定するのであつて、必ずしも、引き続いてその位置に2度目、3度目の雷が発生するとは限らないので、細かい、ピンポイントな予知には不向きである。従つて、何時、何処に、雷が発生するかを予知するには、雷雲の発達状況を電界計によって常時監視する必要がある。全ての空間に電界計を配置することは困難なので、せめて地上にメッシュ状に配置して、アメダス情報のように中央に集めて、雷雲の位置と成熟度をウォチする必要がある。雷雲下の地上電界分布の特徴を掴んで、雷雲の位置と成熟度を知ることが出来

る。本報告ではこのシステムを“ライダス”と呼んでいる。雷雲の電荷構造を3層構造とした場合の雷雲下の地上における電界分布は電界シミュレーションによれば、図1ようになる。

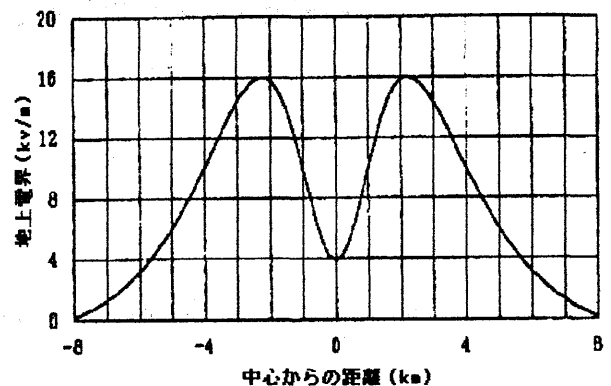


図1 夏季雷雲下の地表面における電界分布

同図によれば、東西直線に従った1次元表示であるが、雲中心軸地上電界は弱くへこんでいて、約2 km離れた位置で左右に山を持つように分布する。これは軸対象の断面図であつて中心軸から四方八方にこのような分布をするので、2次元に広がる地表面上の電界分布は、中心から2 km離れたところに輪のような山を持つ分布である。

このようなライダスシステムでは、地表面での電界分布を3~4 km間隔にメッシュ状に配置した電界計の計測情報を集めれば、上空での雷雲の中心位置が定まることになる。また、その雷雲が落雷可能な状態にまで発達していることも分ることになる。

雲底となる上空4 km付近における空気の絶縁破壊電界を越えた時に放電が開始することになるが、この標高に於いては、空気の気圧、気温が非常に低く(102.8 [Torr]、-10.8 [°C])になっているので、空気絶縁破壊電界を1気圧20°Cの場合に25 [kV/cm]として空気密度補正をすると、④ 4 km上空では空気絶縁破壊電界は17.0 [kV/cm]となる⁽¹⁾。

(注意: このような、雷雲が存在する空間での最大電界となる雲底付近の電界には諸説あるが、ここでは、空気絶縁電界の立場からこの値を採用した。)

この状態を地上に置いた電界計でウォチすることになるが、このように、雷放電が発生し得る電界になった時に地上の電界はどれだけになっているかを知らなければならない。

このことを把握するために、コンピュータ・シミュレーション結果を求める必要がある。そこで、雷雲モデルによる電界計算を行うことになる。雷雲の

電荷モデルは、雷雲内で分離した正（雲頂付近）、負（雲底付近）の2電荷群間における電界計算が必要になる。これには諸説あるが、ここでは、雷雲の下方に第3の正電荷群（これは雲内の2電荷群が発達した10分程度経過の時点から、地表面付近からの正イオン形成があって、上昇し雲底高の半分の高さに形成される。）構造を含めて、⑤ 雷雲電荷モデルは電荷3層構造とするモデルによって計算する。

計算手法は、電荷が雲内に点在するモデルから、アース（0V）面内に設けるイメージ電荷群（逆電荷群）を含めた6電荷群からなる点電荷群による電荷重畳法を用いる。この場合、境界条件としては、アース面で0Vであること、及び、良導体電極は他に無いので、アース面上の1点における電界値と雲底部での電界値（先に求めた値＝17.0 [kV/cm]）を設定しなければ計算可能にならない。これをどう決めるかであるが、幸いに、ロケット誘雷実験のデータがあるので、これから類推して設定することにした。

それは、アースワイヤーを引っ張って上昇するロケットを打ち上げた時点における地上電界値とそのロケットがどの高さに上がった時に誘雷したかを記録したデータである。これによると、地上電界の低い時点でロケットを発射したら誘雷しない。即ち誘雷失敗。グラフ表示の横軸に電界値、縦軸に誘雷した時の高さを採って示せば、その延長線が横軸と交わるところ即ちロケットを打ち上げなくても落雷する。これが自然落雷の時の地上電界である⁽³⁾。これらの実験結果から上記のように類推すると、⑥ 地上電界が 16 [kV/m] = 160 [V/cm] で自然落雷可能となる。

以上の電界計算結果によって、図1に示した地上電界分布が求まった。なお、この計算における諸パラメータは、雷雲内の電荷量は正、負共に同量で約74 [C] 程度、第3の正イオン群では19.5 [C] 程度となる。なお、典型的な一回の落雷で、約10～20 [C] の中和があると言われているので、残りの60～50 [C] あまりが雲内空間に於いて再配置され、かつ、電荷の増加が加わって、次の雷放電が引き起こされることになる。

2) 雷道進展過程と落雷点確定条件： さて、上記のように、雷放電の出発する時刻と位置が分っても、その落雷点が何処に定まるかは、雷道がどのように進むかによって、定かには確定出来ないが、確率的判定は可能に出来よう。即ち、雷道の進展に必要なパラメータを設定して、雷道進展シミュレーションを実行すれば、落雷点となり得る確率の高い建造物が絞れることになる。

それには、雷道進展過程をシミュレーションで実現する必要がある。① 雷雲から出発した雷道は、自発的に屈曲しながらステップ的に進む。 ② その1

ステップは平均50mであると言われている⁽²⁾。そして、この長さの確率分布は正規分布（平均値 μ 、標準偏差 σ によって定まる分布）に従うとする。そして、③ そのような1ステップが進む方向は、確率現象としてとらえることにする。方向を決めるには、2つの方位角度を決めなければならない。その1つは、真下方向からどれだけ離れているかを定める開き角（ α ）であり、もう一つの角は、東西南北どの方向に進むかの水平角（ β ）である。開き角（ α ）は真下方向0度を中心とする正規分布を当てはめ、水平角（ β ）はあらゆる方向に平等分布として選択させた。これを繰り返し繋げていくと、雷雲の雲底標高4kmの間であっても、道のりは5km前後となり、一回の雷道で100回程度の屈折を経ることになって地上付近まで伸びることになる。（注意：この1ステップ長の平均値は正しくは代表値として一つ前の版の放電ハンドブックに記載されているもので、誰が観測した結果なのかの出処が定かではない。一時代前の観測結果に基づいていると思える。測定器が発達した現代では、3次元空間での1ステップの長さを測ることは可能であるが、未だ、測定結果を得ていない。この点を明確にする観測結果が得られることを期待する。）そこで、もう少し明確に出来ない現時点では、1ステップ長はもっと短いかもしれないとして、平均30mの場合ではどうなるかのシミュレーションが必要となる。実行結果としては、図2に示すように、1ステップ長の発生状況が若干違う。これによって落雷点の及ぶ範囲にも図3に示すように多少の違いが生じる。

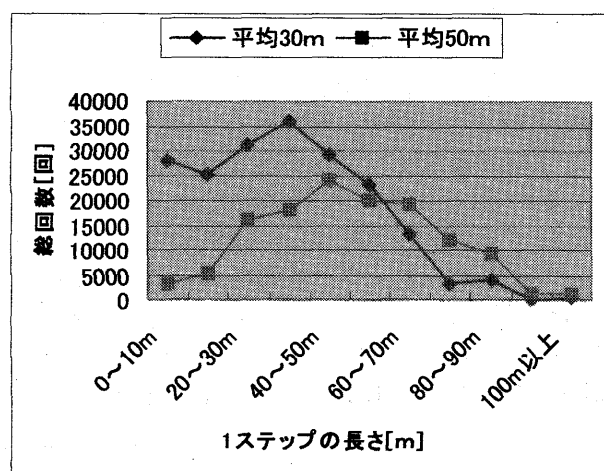


図2 平均ステップ長を30mと50mにした場合の発生ステップ長分布

ここで言う「落雷点の及ぶ範囲」を求めるには、以下のように取り扱う。即ち、最終段階では、地上構造物の影響を受けて落雷点が定まるが、その一步手前のステップまでは単純に確率的に進路が定まる。そして、地上構造物の高さ等の影響を受ける段階に来ると、その先端部の電界が非常に高くなってきて、④ 地上側から上に向かってリーダ状の放電路が発生して来て、⑤ それと上から伸びてきた雷道とが手を結ぶことによって、最終雷撃点が確定する。

このような③の条件による単純な確率的ステップ進展のシミュレーションを止める条件を次のように設ける。この段階で留めた時点での、上から伸びてきた雷道の先端の広がり分布を求めて、図3に示したような「落雷点の及ぶ範囲」を得た。この様な最終ステップの1ステップ前の段階までで留めた雷道の先端点を LLSSP と呼んでいる⁽⁴⁾。(最終雷道ステップのスタート点=Last Lightning Step Start Point の意味)

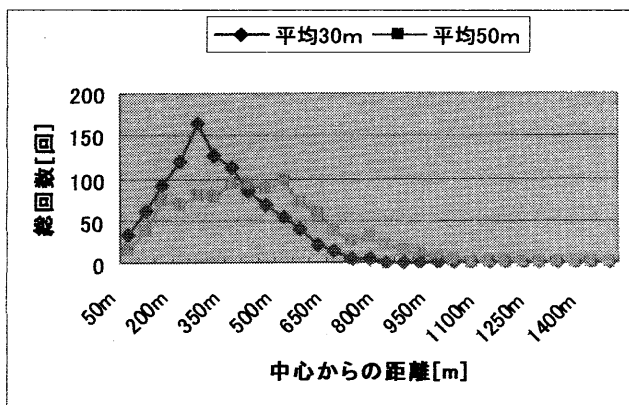


図3 1ステップの平均長を30m, 50mと変えて落雷シミュレーションした場合のLLSSP広がり分布の違い。

次に、④、⑤段階の、雷道進展の最後の段階としての地表面付近の振る舞いとしては、地上構造物の高さ等の影響を受けて以下のようにシミュレーションを進める。

最終ステップの条件は、a) ③までの単純確率のみによる進展をストップさせる条件として、地面から100m以下にステップ先端が入り込んで来たらその時点で止めて、この点をLLSSPとする。b) その様にして定まったLLSSPから真下方向に測った高さ(h_1)とLLSSPからその近辺の建造物の先端までの距離(h_2)との比較を取って、短い方に雷撃点

として終結する。この時、建造物の先鋭度によって、その先端の電界の高まり方が違って、即ち、アース側から上に向かって伸びるリーダ状放電の伸び長が違ってくる。即ち、c) 建物の形状による誘雷し易さが違ってくるので、これを各建物が固有に持つ誘雷指数として扱う⁽⁵⁾。よって、距離(h_2)は実距離よりも誘雷指数分だけ短く取ることとする。

なお、建物の形状によって異なる誘雷指数は次のようにして定める。

別に、それぞれに円盤状の背後電極を有する棒対棒モデル電極による電界計算を行って、アース側の棒先端電界を求めて、これから誘雷指数を定めた。即ち、高電圧を与える上電極は円盤部が雷雲とし、突起状の棒部が雷道と見立てる。また、アース側の下電極は円盤部が地面を突起状の棒が建物を表している。そして、両棒電極の先端間の距離は雷道の平均ステップ長50mとしてのスケール縮小化モデルとして電荷重畳法により計算した⁽⁶⁾。

規準形状としての建物(例えば、4階建てのビル)での電界計算結果を求め、これに対して、各建物形状で求めた電界との比を求めて用いた。即ち、規準建物が持つ誘雷指数を定め、それに電界比を乗じて、形状の違う各建物の誘雷指数とした。落雷シミュレーションへの実際の適用は誘雷指数が大きいほど、LLSSPから各建物への距離を短くするようにした。即ち、建物先端からLLSSPに向かって伸びる上向きのリーダ状放電の伸び長をその建物先端の電界の強さに比例して長くして、残りの距離を求めることにした。そうすれば、高い建物には誘雷し易いと言う効果を持たせることが出来る。

3. 落雷点確定のための3次元地図情報

雷雲からステップ的に進展して来た雷道は、最終段階で、地上の建造物の影響を受けて、雷撃点が定まるように、この落雷シミュレーションは実行されるので、3次元地図情報が必要になる。そこで、扱うプログラムの中に、各建物の高さと幅を数値化した3次元地図データを持たなければならない。

全国のデータが欲しいが、これは衛星データから得るものとする。ここではJR駅を中心とした、ある地方の市街地M(広島県福山市松永地区)を、モデル地区として採用した。その3次元データは、住宅地図をもとに、各場所の建物の大きさ(縦、横、高さ)を現地観測によって記録して地図データベースを一軒一軒入力して作成した。

雷雲の位置と地図の位置とを同一座標で表現しな

なければならない。色々な座標原点が考えられるが、ここでは、地方原点として、JR 松永駅を座標原点とし、東方向に X 軸正を、北方向に Y 軸正を取って数値データを入力した。これを、境界線なしに全国に地図情報をデータ化するなら、例えば、グローバル座標の原点を東京駅とし、それから各地域の原点（例えば、各県庁所在地の鉄道駅）までの距離を加える（東西南北の方向によっては、当然、引くこともある）。更に、1 地区の JR 駅を地域原点として、中間点である県庁所在地の駅原点からの距離を加える。したがって、雷雲の位置は、このような 1 地域原点（この最初のモデルでは JR 松永駅）からの距離として定める。雲底の高さは一律に、地上 4,000m とする。地面の高低は予め別途入力して考慮する。

4. 都市計画への適用

この落雷シミュレーションプログラムをフローチャートとしてまとめれば図 4 の様である。プログラムの中の 1)、2) は雷雲状況を計測して、雷雲の位置と成熟度即ち雷の発生時間を予知するシステムであって、実際の雷予知には欠かせない部分である。しかし、これを全国に徹底させるためには、ハード面で、電界計測機を約 3km 間隔で網の目状に配置する必要がある。これは大変な事なので、まず、重要な地区に限って配置して、実証試験をする

必要がある。また、この部分は切り離して用いるとすれば、どう言う活用があるかについて述べる。

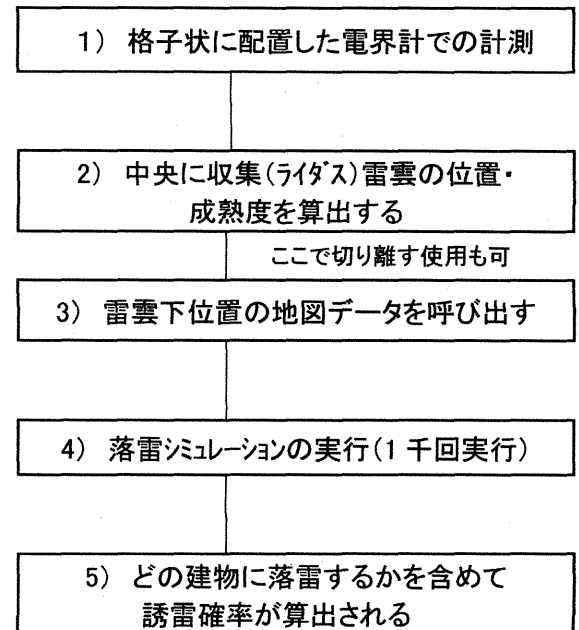


図 4 落雷シミュレーションのフロー説明

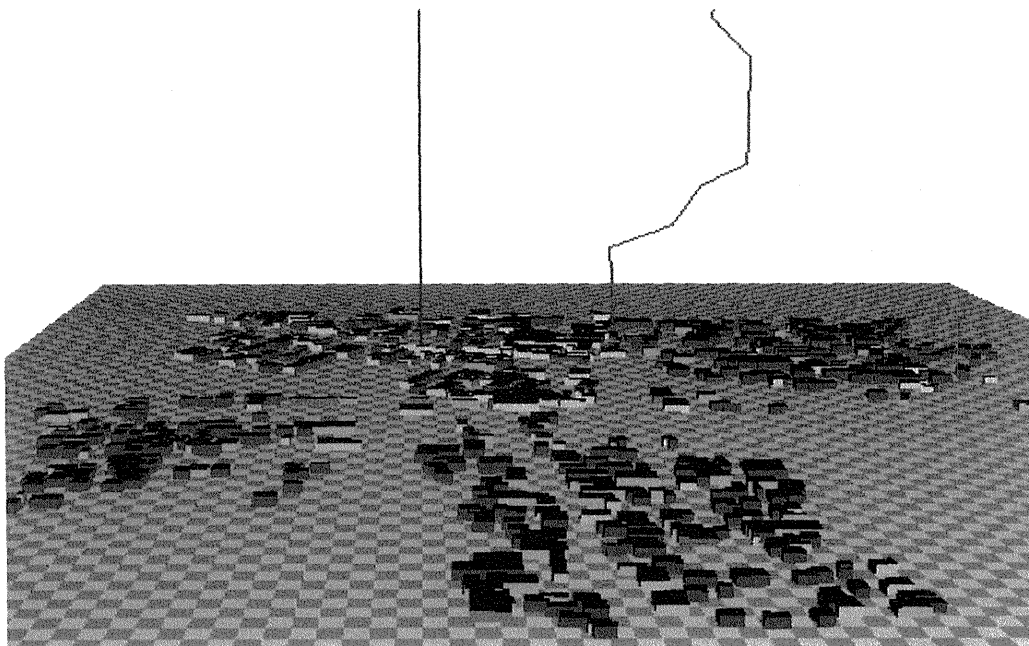


図 5 3 次元地図表現の市街地への落雷シミュレーション実行結果の 1 例

即ち、ある街の構造状態を3次元地図データとして持っているの、その上に雷雲が発生したとして、落雷シミュレーションを実施することは可能である。ここに、結果の一例を図5に示す。

しかし、コンピュータでは千回も万回もあつと言う間に実施してしまうので、その街構造に於いては何処に落雷する確率が一番高いか等が判明することになる。よって、ある街に新しい高層ビルディングを施工しようとした場合に、地図データに設計予定の3次元データを付け加えて、その上での落雷様相を調べることが出来る。

この雷現象は確率的現象であるので、1回のシミュレーション結果はほとんど意味を持たない。

この新しい建物を建築する前と後とでは、様相が異なってくるので、それによって、耐雷対策をどのようにしなければならぬかも知らくなる。場合によっては、これまで、落雷の可能性が非常に低かった場所が、落雷率が上がって来る場合もある。即ち、避雷針設置などの防雷対策の見直し等、都市計画点検に適用することが出来る。

5. おわりに

落雷現象の物理的完全解明はまだ不十分である。本論文では、その中でも、ステップ的振る舞いなどの必要な特性をもう少し解明しなければならない点を指摘した。それから、現時点までに解っているパラメータを下に、落雷シミュレーションを試み、かつ、この都市計画への適用を述べた。これは、この

分野の研究の第1歩であつて、若手研究者がこの分野に興味を持って、さらに、雷放電の真事実を観測から得て、より正確な落雷シミュレーションが実現することを期待する。

【参考文献】

- (1) 河野俊彦、他：「計算機シミュレーションによる落雷条件を考慮した雷雲下の電界計算」、*Research Letters on Atmospheric Electricity*, Vol.8, pp.91-97, 1988
- (2) 三次保憲(電気学会編)：「雷放電特性値(表)」、*放電ハンドブック*、pp.196, 1974
- (3) 桜野仁志、堀井憲爾、他：「冬季雷雲の規模から見たワット誘雷の特徴」、*電気学会論文誌B*、Vol.106-B, No.8, pp.685-692, 1986
- (4) 河野俊彦：「雷道進展の統計処理と落雷地点予測分布」、*電気学会放電研究会資料*、ED-96-213, pp.245-251, 1996
- (5) 河野俊彦、他：「落雷予測システムの構築に関する諸問題の検討」、*日本産業科学研究所報告*、第7号、pp. 29-39, 1994
- (6) 河野俊彦：「送電線の雷放電に関する二、三の基礎的研究」、*京都大学博士論文*、p.31, 1982