

論文の内容の要旨

論文題目 Model of Lightning Stroke and Associated Electromagnetic Impulse
(雷放電に伴う電磁界インパルスと雷放電路モデル)

氏名 宮 崎 悟

雷放電に伴う電圧波、電流波、電界および磁界などの電磁界インパルス (Lightning Electromagnetic Impulse; LEMP) は、電力システムの故障、建築物内の電気設備の故障、電子機器の誤動作やデータ消失などを引き起こすことがある。これら各種システム、機器を合理的に雷から保護するためには、雷放電機構を知るとともに、雷放電に伴う電磁界インパルスの特性を理解する必要がある。しかし、雷放電は不規則に発生する非常に速い現象であるため、その理解は未だ十分でない。本論文では、雷放電に伴って発生する電磁界の観測結果を再現する雷放電路モデルの研究を通じて、雷放電路を流れる電流の空間分布、時間変化を明らかにし、次に数値電磁界解析手法の適用範囲、対象を拡大し、構造物に落雷した際の LEMP の特性を解明した。

雷放電路については、まず後続雷撃の雷放電路上の電流の空間、時間分布の解明をはかった。これを直接観測することは不可能であるが、後続雷撃に伴う典型的な電磁界波形と、これまでに提案されているモデルで計算された波形とを比較検討することによりこれを推定した。さらに、推定した電流の空間、時間分布を満足するモデルを 2 種類提案した。提案モデルは、従来のモデルでは実現できなかった、後続雷撃に伴う典型的な電磁界波形の全ての特徴の再現が可能である。これを簡易なモデルで達成したのは本研究が初めてである。

次に、より重要な第一雷撃に伴う電磁界波形の再現を目的とする雷放電路モデルを検討した。第一雷撃の至近での電磁界波形の観測例がないため、モデルの評価を完結できないが、本論文の提案モデルは、これまでに観測例がある数 km から数百 km の距離で観測された第一雷撃の電磁界波形を再現する。提案モデルを用いた計算により、雷電流波高値と帰還雷撃速度が第一雷撃と後続雷撃で同じ場合、第一雷撃に伴う電磁界波形の波高値は後続雷撃に伴うそれより小さくなることが示唆された。これは遠方の電磁界観測で推定される第一雷撃電流分布の、鉄塔などでの直接観測の結果とのずれの原因を究明する上で、重要な結論である。更に、第一雷撃に伴う電磁界波形の波頭部分のスローフロントと呼ばれる緩やかな変化の成因について検討し、それを雷放電路上の電荷の拘束が解かれる様相に求めたモデルを新たに提案した。

後続雷撃のダートリーダが大地と結合する過程の解明のため、後続帰還雷撃発生段階のモデル化を試みた。本論文では、地上から上向きに伸びる短いコネクティングリーダを考慮に入れ、ダートリーダとの結合点から電流波が上下両方向に伝搬するモデルを提案し、ロケット誘雷実験で

観測された、至近距離での電界、磁界の時間微分波形を計算により再現した。提案モデルは、帰還雷撃電流波が大地から上向きにのみ伝搬する従来のモデルより良好に、観測結果を再現する。

さらに、上向きリーダで開始する雷放電についても、雷雲中から大電流パルスが地上に向けて伝搬するモデルを提案した。提案モデルは、大電流上向き雷放電に特有の、両極性パルス電磁界波形を再現する。上向き雷放電に関するモデルはこれまで提案されたことがなく、本論文が初めてである。提案モデルにより、下向きリーダで開始する落雷の帰還雷撃と同様に、上向き雷の雷撃電流波高値を、遠方で観測される電磁界波高値から推定できる可能性が示された。

LEMP の特性を検討するに当たっては、まずその計算方法について検討した。雷が地上の構造物に直撃した際は、雷放電路上の電流と構造物の電磁的な結合が LEMP に大きく影響するので、系の電磁界を記述するマクスウェル方程式が直接解ければ、正確にこれを評価できる。電磁界の数値解法として、モーメント法と時間領域有限差分(FDTD)法がこれまで適用されてきたが、本論文ではこれらを比較し、双方とも LEMP の評価において有用との結論を得た。導体系の詳細な表現にはモーメント法の方が優れる。

LEMP 解析に電磁界の数値解法を適用するために考案された、雷放電路の電磁界モデルを使用して、高構造物に雷撃した際に、それが雷電流や発生する電磁界に与える影響を詳細に検討した。電磁界モデルでは、雷放電路を導体で表現する。数値解法にはモーメント法に基づく Numerical Electromagnetics Code (NEC-4)を用いた。従来の研究では、高構造物によって雷電流やそれに伴う電磁界の波高値が大幅に増大するとされていた。しかし本論文では、大地に雷撃する場合と高構造物に雷撃する場合のモデルの関係を合理的に考察することにより、雷電流波高値の増加は実際には数%に止まることを論証し、さらに有限な大地の導電率を考慮に入れることにより、遠方の電磁界波高値の増分も、100m 級の高構造物で 10%程度に過ぎないことを示した。

構造物に落雷した際に、その内部に生じる LEMP の特性の解明と、内部の電気設備の保護法について、同じく NEC-4 を用いて検討した。IEC/JIS 規格では内部の電気設備の保護のため、各種接地導体を接続して電位を等しくする等電位ボンディングが推奨されている。その際設置する SPD のエネルギー耐量選定基準について検討した。アンテナ解析用に開発されたコード NEC を、低周波数領域の準定常状態の計算となるエネルギー耐量評価に適用したのは本研究が最初で、独創的な点である。

同じ手法で、雷撃時に建物内に誘導される磁界の分布について検討した。これまでは、構造の決まった建物の中の誘導磁界を計算した例ばかりで、誘導磁界の低減方法は数値的には殆ど検討されていなかった。本論文では、建物の鉄骨による誘導磁界の低減機構を詳細に検討し、合理的に誘導磁界を低減させる金属メッシュの敷設法を提案した。

以上の本研究の成果により、負極性後続雷撃だけでなく、ほとんど検討されてこなかった負極性第一雷撃や、全く検討されたことがなかった上向き雷の放電路上の電流分布について、多くの新しい知見が得られた。更に、従来の研究では誤った結論が導かれていた高構造物への雷撃に伴う LEMP の特性、これまで徹底な検討のなかった直撃された建物内部に生じる LEMP の特性を、数値電磁界解析によって解明し、理解を深めることができた。これらの成果は、雷防護システムにより経済的な設計、各種電気設備やシステムの雷防護性能向上に貢献する。