

機関番号：3 2 6 6 3  
 研究種目：基板研究 (C)  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：2 0 5 6 0 2 7 9  
 研究課題名 (和文) 高構造物 (第2東京タワー) の雷サージ解析への電磁界解析法の適用  
 研究課題名 (英文) An application of method of numerical electromagnetic field computation to lightning surge analysis of Tokyo Sky Tree tower  
 研究代表者  
 加藤正平 (KATO SHOHEI)  
 東洋大学・理工学部・教授  
 研究者番号：8 0 1 0 3 5 7 1

研究成果の概要 (和文): 東京タワーと世界一の高さとなる東京スカイツリーのサージ特性を、数値シミュレーションと縮小モデル実験から調べた。東京スカイツリーはペンシルスタイルであるため、鉄塔自体の電位上昇は東京タワーよりも高くなるが、金属導体を東京タワーより多く使用するため、タワー内の配電線路に発生するサージ過電圧値は抑制される。このため、東京スカイツリーにおける雷対策は、避雷器のエネルギー耐量を倍増しさえすれば、これまでの耐雷設計指針を適用可能である。

研究成果の概要 (英文): We studied surge characteristics of Tokyo Tower and Tokyo Sky Tree, which is a height of the world's top as a broadcast tower, by numerical simulation and scale model experiment. Since Tokyo Sky Tree is a pencil style tower, surge voltage at the top of the steel tower itself becomes higher than the Tokyo tower. However, surge overvoltage induced on the distribution line in the tower is suppressed because of more metal structural conductors used than Tokyo Tower. Therefore, lightning protection in Tokyo Sky Tree can be based on the conventional guidelines except arresters of double maximum energy capacity than Tokyo Tower.

#### 交付決定額

(金額単位: 円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：雷サージ、電磁界解析、放送タワー、モーメント法、FDTD法、高構造物、誘導電圧

#### 1. 研究開始当初の背景

地上波デジタル放送の本格化のために、東京都浅草に新たに建設が決まった「すみだタワー」(第2東京タワー)は高さ620mと日本で最も高い放送塔である。世界的にも有数の高さの構造物であり、かつ放送という高

い信頼性が要求される機能を達成し、展望台などの観光資源として、ランドマークとして様々な期待がよせられている。地震国であるため、機械的な強度は十分に確保されねばならない。電気的な問題としては、電波の放射源、受信エリア等の電磁界問題は、放送タワ

ーとしての機能の実現に当然必要な検討事項である。これら以外に、平地に立つ高い建造物では、多数の落雷が発生することが、カナダの CN タワーで報告され、数 100kA の雷電流が鉄塔に流れ、電気電子機器設備に損害、障害を生じることを経験している。低層の建造物との違いは、アンテナに落雷した雷電流が大地に伝搬して、反射波が鉄塔塔頂に戻るまでの時間が数マイクロ秒となり、従来の設備の数倍の期間、雷過電圧が鉄塔内外に発生する。期間が長くなれば、当然、従来とはエネルギーが大きくなり、サージ吸収素子に大容量のものを必要とする。これらの現象を実験だけで明らかにすることは、とりわけ自然現象であるため、再現性や測定条件の固定、実験期間や費用との問題点が多い。

これを解決する方法として数値電磁界解析法が開発されてきた。この方法は物体の 3 次元モデルから電磁界、電圧や電流分布を求めることができ、コンピュータシミュレーションのため、様々なパラメータ解析も可能である。しかし、複雑な形状の問題に対しての有効性はまだ十分な検証がなされておらず、変電所や接地設備、送配電線路雷サージ解析等への適用を検討される段階にある。解析精度や各種問題への適用上の問題点等を明らかにする必要がある。

## 2. 研究の目的

これまでの電力設備の雷サージ解析には、等価回路を使用したシミュレーションと、実モデルや縮小モデルの実験的な測定の方法から研究され、設備の設計が行われてきた。しかし、等価回路を構成することが困難な建造物、とりわけ高い建物内は多数の電子機器が使用されるので、これらに対する落雷時の過電圧対策が必要となる。本研究の数値電磁界解析法は、複雑な電流路の解析が容易であり、さまざまな応用が期待される。その応用として、また過電圧解析による雷サージ対策を必要とされる第 2 東京タワー（東京スカイツリータワー）の電磁界解析を行う。これによって、東京タワーのように数 100m の高さの建造物から、超高層ビル、一般のビル、送配電設備の耐雷設計が可能な雷サージ解析法を開発する。

これまで送電線路サージ解析で作成されている小規模の解析モデルを改良し、あるいは新たに作成して、新しく建設される第 2 東京タワーの雷サージ特性を明らかにし、落雷時の過電圧を求め、必要な耐雷設備の検討を行う。また、実験的に結果の評価を行うために縮小モデルによる実験的な測定を行う。解析、及び実験結果より、数値電磁界解析法の、一般的な高構造物の雷サージ解析法への適用法を明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

高構造物の過電圧評価法はこれまでなく、一般的な評価法の検討を行った。建物自体の過電圧は、避雷針への雷撃によって避雷接地線に発生する過電圧を持って評価することが行われている。この評価では建物全体が大地に対してある時間の間、電位が上昇することを意味し、建物内での過電圧発生の評価に直接的に結びつかないことが明らかになった。そこで、本研究では、建物内の電力・通信配線に発生する過電圧を評価すべく、新しく、大地間にあるインピーダンスを有する導体を避雷針に接続し、建物各部間に発生する電圧でもって評価する方法を検討した。

具体的、数値的な評価のために、本研究では、雷サージ対策を考える数値解析モデルと、実験的な測定から計算機シミュレーションの妥当性を比較検討する縮小実験モデルを作成し、タワー内の電力線や信号線に発生する雷サージを評価する。これによって、避雷器の定格を選定するための基礎データを得ることができる。さらに、展望台内の人体への電磁界パルスレベルを求め、タワー内の人間や精密電子機器への影響を調べる。接地方法と雷サージ過電圧の関係、高さによる過電圧発生の変化を明らかにする。

数値電磁界解析法には様々な方法があるが、本研究では鉄塔のトラス構造の近似に適するモーメント法と、電磁界の空間分布の計算に適する FDTD 法を採用している。モーメント法は電流路となる金属パイプを細線で近似するが、東京スカイツリーのように近接する多数の直線状の導体の構造にはデータの作成上からも適した解析法と考え、解析に使用した。

## 4. 研究成果

### (1) モーメント法によるシミュレーション

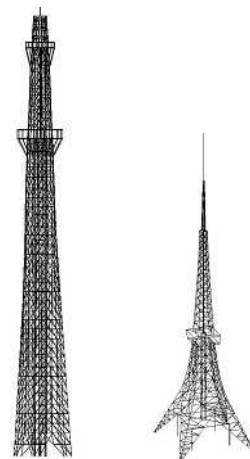


図 1 モーメント法によるタワーモデル

Fig.1 Tower models in MoM

直径 10cm で長さ 10m 前後のワイヤセグメントを使用して幾何学モデルを作成した。現東京タワーについても同様の方法によって、モデルを作成し、図 1 にモデルの概要を示す。大地は完全導体とし、鏡像を使用する。電源はアンテナ先端に設置し、雷道は垂直に上空へ 1.8km 伸ばし、電力線モデルは裸線を使用し、エレベ

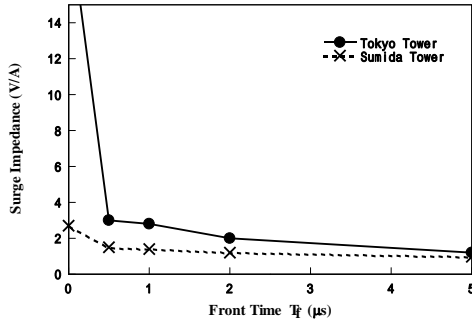


図 2 第一展望台における過電圧の波頭長との関係  
Fig.2 Relation between Surge Impedance and Front Time

ータシャフトに沿い、アンテナ基部まで設け、大地、各展望台、アンテナ部と 1k $\Omega$  で接続している。

図 2 に、2 重指数関数波の電流源を使用した場合の、新旧タワーの第一展望台における電力線電圧と波頭長の関係を示す。本報告では、印加電流の波高値で電圧を割った値をサージインピーダンスとして定義している。新タワーの電圧は、旧タワーの電圧の約 50% である。またいずれも、波頭長が大きくなると低下する特性であるが、新タワーは波頭長が小さい領域でも電圧が低いため、大きくは低下せず、1V/A 程度の電圧が現れる。一方、旧タワーは波頭長が短い領域で数 V/A 以上の電圧が現れている。

図 3 は、電流波形をパラメータとして、すみだタワーにおける過電圧分布を示す。雷撃点に最も近い塔頂よりは、第 2 展望台の方が電圧が大きくなっている。高層ビルの場合、中層部で過

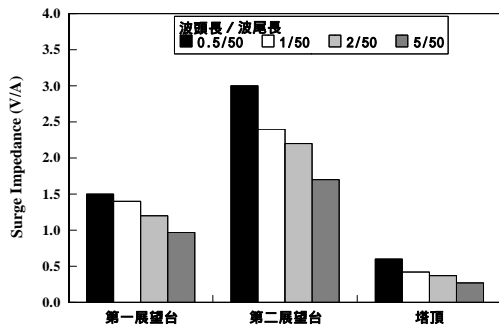


図 3 東京スカイツリータワーの過電圧分布

Fig.3 Induced voltage distribution on power line in Tokyo Sky Tree Tower

電圧が低下する分布になることが知られている

が、図 3 の結果はこれと異なる。

## (2) 縮小モデルと実験方法

実験室内で実験を行うために現タワー、新タワー各々の縮尺を 1/100、1/200 の縮小モデル、すなわちいずれも約 3m の高さで作成した。作成材料は真鍮、銅のパイプ、線を組み合わせた。図 4 に作成した縮小モデルを示す。

塔頂電圧は、送電線路鉄塔の測定法と同じく水平接地線で測定する。また、エレベータシャフトの外側に沿わせた導線をアンテナ基部、展望台、大地端の各部を 1k $\Omega$  でシャフトに接地して、タワー内の電圧を測定する。大地は実験室内に敷いた銅板で模擬する。

図 5 に、現東京タワーの塔頂電圧と印加電流波形を示す。大地からの反射波が到達する 23ns における電圧と電流から鉄塔のサージインピーダンスを求めると、185V/A が得られる。

図 6 に新東京タワーの塔頂電圧と印加電流波形を示す。図 5 の場合と同様に考えて鉄塔のサージインピーダンスを求めると、210V/A が得られ、現タワーより約 20% 高い。

図 7 は、新タワーにおけるアンテナ基部、各展望台、大地部の電圧波形である。大地の影響が表れる 20ns までの電圧のピークを調べると、塔頂や大地付近で大きく、展望台では低くなる。特に第 1 展望台が最小になっている。高層ビルの場合、中層部で過電圧が低下する分布特性と同じである。ただし、数値電磁界解析の結果とは電圧差が大きい。

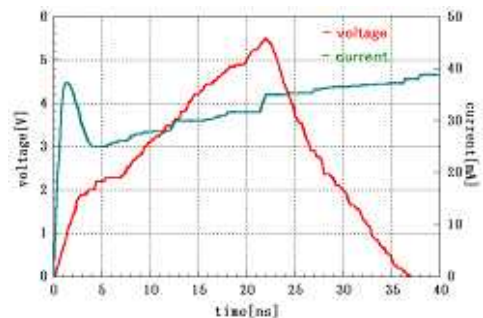


図 5 現東京タワーのサージ特性  
Fig.5 Current and voltage at the top of Present Tokyo Tower



図 4 縮小鉄塔モデル

Fig.4 Scale down Tower Models



新タワーは高さに比して断面積が小さく、ペンシル状となるため、サージインピーダンスが大きくなり、高い過電圧サージが発生する。また、時間的変化も異なることが明らかになった。実験結果を数値電磁界解析の結果と比較したところ、現東京タワーは良い一致が認められるが、新東京タワーの場合は、差が大きくなった。

### (3) FDTD 解析モデルと解析結果

CAD データを FDTD 法に変換することによってタワーのシリンダーモデルを作成した。すなわち、タワーのトラス構造の主構造体であるパイプ部のみで構成する。床や壁、窓のモデル化も可能であるが、タワーのデータ情報は非公開のため概観と主要構造体、床でモデルを作成している。材質は全て鉄とし、導電率  $6.0 \times 10^6 \text{ S/m}$ 、比透磁率 3000 を使用し、大地も含めた解析空間を  $266 \times 266 \times 3017$  セルにて構成した。

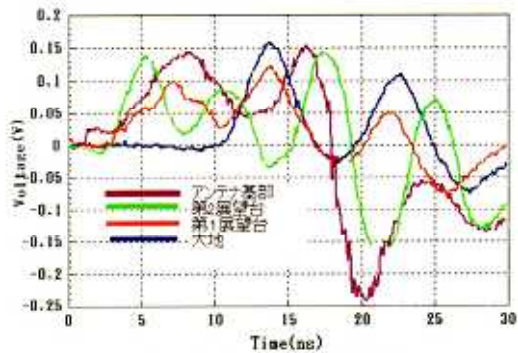
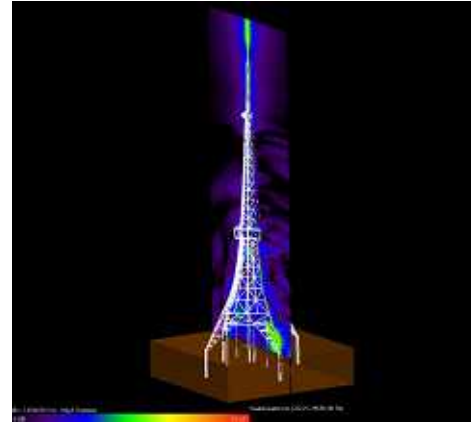


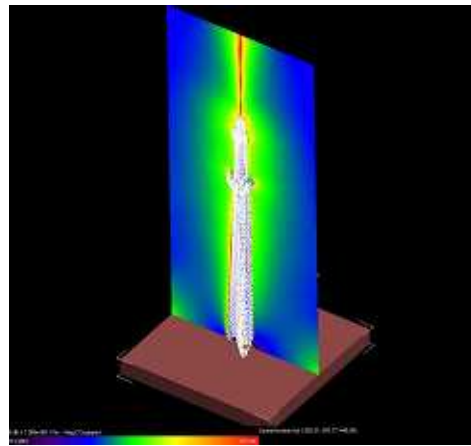
図7 新タワーの各部における電圧  
Fig.7 Voltages distribution in New Tokyo Tower

サージ電圧の評価のために、エレベータシャフトから 50cm 離して電圧測定線を塔頂から大地まで設けた。電圧を求めるために、この線路と各点との間に  $1k$  を挿入し、抵抗値と電流の積から各部の電圧を求める。

図8にFDTD法のシミュレーションに作成



(a) FDTD 法による東京タワーモデル



(b) FDTD 法による東京スカイツリーモデル

図8 FDTD法によるタワーモデル  
Fig.8 Tower models in FDTD

したタワーモデルを示す。同図のカラーは、電磁界の可視化のため電界の強度を表しており、赤から青へ電界は小さくなる。

図9に、使用した  $0.5/50 \mu\text{s}$  の雷撃電流波形を示す。電圧源を使用するため、鉄塔の各部の反射による変化が認められる。約  $4.5 \mu\text{s}$  付近から電流が減少しているが、鉄塔単体の特性を調べるために鉄塔の大地側は開放状態にしているためである。

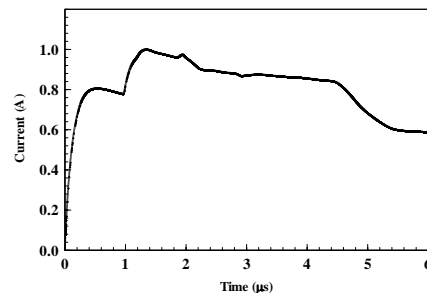


図9 塔頂雷撃電流波形  
Fig.9 Lightning current at tower top

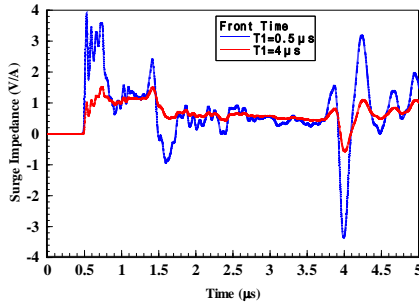


図 10 アンテナ基部におけるサージ電圧  
Fig.10 Surge voltage at antenna base

図 10 に、アンテナ基部の電圧波形を、波頭長をパラメータにして示す。第二展望台から地上までの構造体の増加及び径方向の増大によるインピーダンスの低下が見られる。波頭長が短い場合にはモーメント法よりは顕著な速い振動が生じている。波頭長が長くなるとサージ電圧は減少する。

図 11 に、大地からの反射の影響が表れる

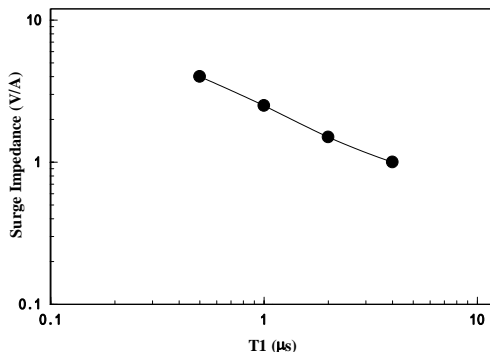


図 11 サージインピーダンスと波頭長の関係  
Fig.11 Relation between surge impedance and front time

までのアンテナ基部における電圧の最大値と波頭長の関係を示す。値や関係はモーメント法における結果とほぼ同じである。

以上のほかに、高構造物内に設置される受変電設備の変圧器のシミュレーションモデル、これに伴うコイルの新しい詳細なサージ現象を研究した。また、タワー内の誘導電圧解析法と配電線路サージ解析法との比較検討も行った。

実験時のサージ電圧測定に高サージインピーダンス形分圧器の適用を試み、その詳細な特性を実験的、解析的に調べた。縮小モデルの測定には十分な応答特性を実現することは困難であるが、実規模の測定には使用可能なことを明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 8 件)

- (1) 加藤正平:“高サージインピーダンス形抵抗分圧器”, 電気学会全国大会, 2011 年 3

月 16~18 日, 大阪大学(大阪)

- (2) 加藤正平:“配電線路誘導雷サージの数値電磁界解析, 電気学会エネルギー部門大会”, 2010 年 9 月 1 日, 九州大学(福岡)
- (3) 加藤正平:“スパイラル(らせん)導体の電気的研究(コイルのサージ特性)”, 電気学会東京支部埼玉支所研究発表会, 2010 年 3 月 4 日, 新都心ビジネス交流プラザ
- (4) 加藤正平:“コイルの過渡特性から考える等価静電容量, 電気学会全国大会”, 2010 年 3 月 17~19 日, 明治大学駿河台校舎
- (5) 加藤正平, 溝部都孝:“FDTD 法による新東京タワーの雷サージ解析, 電気学会全国大会”, 2010 年 3 月 17~19 日, 明治大学駿河台校舎
- (6) 加藤正平, 李 孜, 溝部都孝:“新旧東京タワーの雷サージ特性—縮小モデルによる検討”, 電気学会全国大会, 2009 年 3 月 17~19 日, 北海道大学
- (7) 加藤正平:“FDTD 法における非線形磁化モデルのサージ解析”, 電気学会全国大会, 2009 年 3 月 17~19 日, 北海道大学
- (8) Shohei Kato: “Surge Analysis of Twisted Pair in Conducting Tube by Method of Moment”, EUROEM 08, 2008 年 7 月 21~25 日, スイス・ローザンヌ

〔その他〕

ホームページ: <http://133.79.21.30/surge/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

加藤正平 (KATO SHOHEI)

東洋大学・理工学部・教授

研究者番号: 80103571