

-10℃高度低下による上向放電誘発の可能性と COMSOL AC/DC モジュールによる静電場解析

米田 稔
株式会社セイケン
〒457-0024 愛知県名古屋市中区赤坪町 213-1

概要

東京スカイツリーの落雷観測結果を基に、-10℃高度と上向・下向放電の関係を整理した。さらに COMSOL AC/DC モジュールを用いて雷雲高度の違いによる静電場を解析し、-10℃高度低下と上向放電発生との関係を検討した。

キーワード: 雷、電場、電荷、電界強度、放電

はじめに

上向放電は高構造物に重大な雷害をもたらすことがあるが、その発生条件については未解明な点が多い。-10℃高度は雷活動を特徴づける重要な指標である。本研究では、スカイツリーで確認した落雷データおよび静電場解析シミュレーション結果を用いて、-10℃高度と上向放電発生の関係について検討した。

理論 / 実験設定

【上向放電の発生原理】

雷雲内の電荷によって地上構造物に電荷が誘導されると、構造物先端部では形状効果により電界が集中する。-10℃高度は雷雲内の電荷分離が活発となる領域の高度と関係する指標であり、-10℃高度が低下すると雷雲内の電荷領域も地上構造物に近づくと考えられる。その結果、構造物先端部の電界が強まり、電界が放電開始に必要な条件に達すると、構造物先端から上向きリーダが進展し、上向放電に至ると考えられる。特にスカイツリーのような高層構造物では、雷雲との距離が短くなることで先端部への電界集中がより顕著となり、上向放電が発生しやすくなる可能性がある。

観測結果

【東京スカイツリーにおける-10℃高度と上向・下向放電の発生状況】

東京スカイツリーにおける 2012～2014 年の落雷観測データを用いて、各落雷事例の-10℃高度と放電方向（上向・下向）との関係を調査した。

図 1 に 2012～2014 年の東京スカイツリーにおける-10℃高度と上向き電・下向き放電の発生状況の関係を示す。

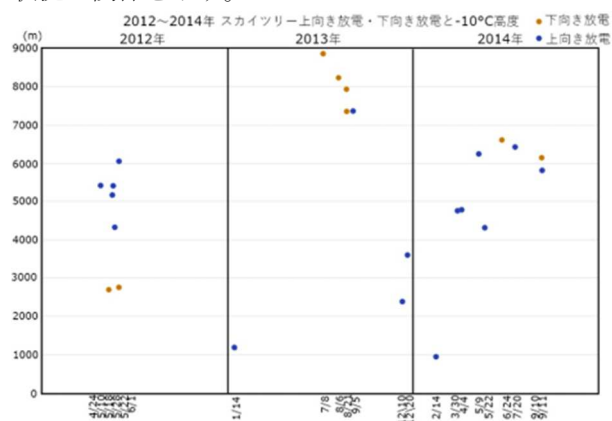


図 1. -10℃高度と上向・下向放電の発生状況
(2012～2014 年)

【東京スカイツリーにおける-10℃高度と上向・下向放電の発生件数および割合】

上向き放電は主として-10℃高度が 1000～6000m の範囲で発生している。一方、下向き放電は 6000～9000m の範囲に広く分布している。

表 1 及び表 2 に -10°C 高度区分ごとの放電件数および割合を示す。

表 1 より、 -10°C 高度が 6,000m を超えると下向き放電が優勢となり、特に 8,000m を超える事例では観測された全ての放電が下向き放電であった。これは、 -10°C 高度が高い場合には、雷雲から地表へ向かう下向き放電が発生しやすい可能性を示している。

-10°C 高度(m)	落雷回数			落雷割合	
	上向き放電	下向き放電	合計	上向き放電	下向き放電
8001~9000		5	5	0%	100%
7001~8000	1	7	8	13%	88%
6001~7000	3	5	8	38%	63%
5001~6000	5		5	100%	0%
4001~5000	8		8	100%	0%
3001~4000	1		1	100%	0%
2001~3000	2	2	4	50%	50%
1001~2000	1		1	100%	0%
1~1000	2		2	100%	0%

表 1. -10°C 高度区分別の上向・下向放電発生件数および割合 (2012~2014 年)

一方、 -10°C 高度が 5,000m 未満では上向き放電の割合が高くなり、2,000m 以下では観測された全ての放電が上向き放電であった。これは、スカイツリーのような高層構造物において、雷雲内の電荷領域が地表に近づくことで構造物先端の電界集中が強まり、雲に向かう上向き放電が発生しやすくなるためと考えられる。

-10°C 高度(m)	落雷回数			落雷割合	
	上向き放電	下向き放電	合計	上向き放電	下向き放電
6001~9000	4	17	21	19%	81%
1~6000	19	2	21	90%	10%

表 2. -10°C 高度 6000m を境界とした上向・下向放電発生件数および割合 (2012~2014 年)

さらに表 2 より、 -10°C 高度が 6,000m 以下では上向き放電が 19 件 (90%) を占めたのに対し、6,000m 超では下向き放電が 17 件 (81%) を占めた。以上の結果から、 -10°C 高度 6,000m 付近が上向き放電と下向き放電を分ける境界条件の一つである可能性が示唆された。

シミュレーション / 手法

【AC/DC モジュールによる解析条件】

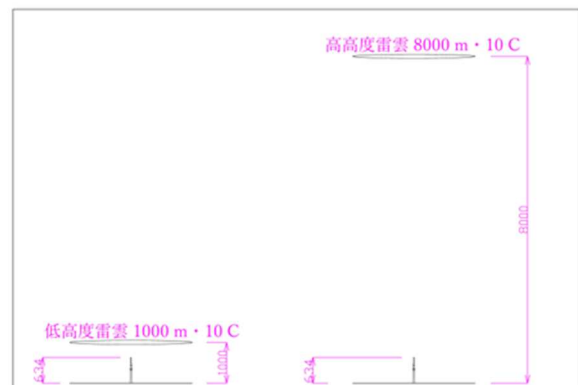


図 2. 低高度・高高度雷雲条件における解析モデル

雷雲高度の違いが高層構造物周辺の電気変位場に与える影響を比較するため、COMSOL Multiphysics の AC/DC モジュール (静電場) を用いて解析を行った。雷雲を電荷を与えた円盤状モデルとして設定し、地上構造物としてスカイツリーを配置した。雷雲高度は、観測結果を踏まえ、上向き放電が発生しやすい低高度条件 1000 m と、下向き放電が優勢となる高高度条件 8000 m の 2 条件とした。両条件とも雷雲モデルに同一の電荷 10 C を与え、雷雲高度のみを変化させて比較した。

〈低高度雷雲条件〉

空間次元：3D フィジックス：静電場 (es)
 スタディ：定常 雷雲高度：1000 m
 雷雲電荷：10 C
 接地：スカイツリー、地面

〈高高度雷雲条件〉

空間次元：3D フィジックス：静電場 (es)
 スタディ：定常 雷雲高度：8000 m
 雷雲電荷：10 C
 接地：スカイツリー、地面

静電場解析では、電位 V 、電場 E 、電気変位場 D の関係を $E=-\nabla V$ 、 $D=\epsilon E$ とし、ガウスの法則 $\nabla \cdot D=\rho$ に基づいて解析した。スカイツリーおよび地面を接地条件とし、雷雲モデルには総電荷 10 C を与えた。

シミュレーション結果

【電位分布による説明】

上向き放電-10℃と電気変位場

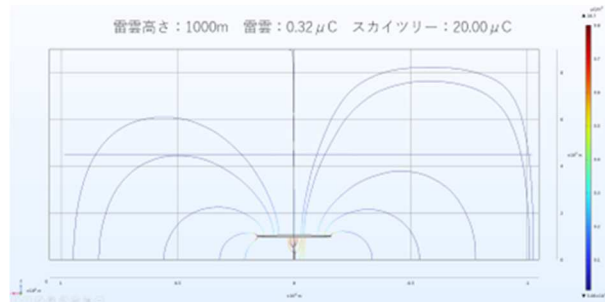


図3 上向き放電モデルにおける電位分布
(-10℃高度 1000m 相当)

下向き放電-10℃と電気変位場

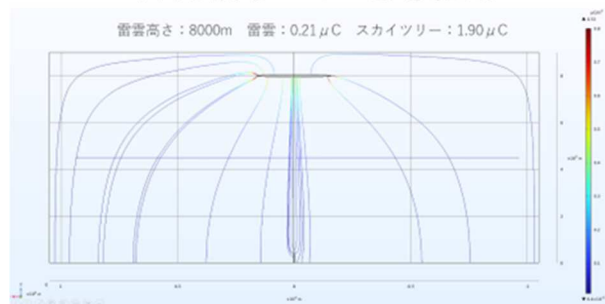


図4 下向き放電モデルにおける電位分布
(-10℃高度 8000m 相当)

図3および図4にCOMSOL Multiphysicsによる電位分布解析結果を示す。

図3は、-10℃高度 1000mを想定した上向き放電モデルである。解析条件は、雷雲高度 1000m、雷雲電荷 $0.32 \mu\text{C}$ とし、スカイツリーに誘導された電荷量は $20.00 \mu\text{C}$ であった。

解析結果より、雷雲内の電荷領域が地表構造物に近接するため、スカイツリー先端部に強い電界集中が生じていることが確認された。このことから、構造物先端から雷雲方向への上向き放電が発生しやすい状態であると考えられる。

一方、図4は、-10℃高度 8000mを想定した下向き放電モデルである。解析条件は、雷雲高度 8000m、雷雲電荷 $0.21 \mu\text{C}$ とし、スカイツリーに誘導された電荷量は $1.90 \mu\text{C}$ であった。

解析結果より、雷雲と構造物との距離が大きくなることで、スカイツリー先端部における電界集中は小さくなった。この場合、電位分布は雷

雲から地表方向へ伸びる形状を示しており、下向き放電が支配的となる可能性が示された。

さらに、図3ではスカイツリーに誘導される電荷量が $20.00 \mu\text{C}$ であるのに対し、図4では $1.90 \mu\text{C}$ と約 1/10 に減少している。これは、-10℃高度の低下に伴い雷雲内の電荷領域が地表構造物へ近づくことで、構造物先端の電界集中が強まり、上向き放電が発生しやすくなることを示唆している。

表1および表2より、-10℃高度が 6000m 以下では上向き放電が優勢であり、6000m を超えると下向き放電が優勢となる傾向が確認された。

また、図2および図3のシミュレーション結果では、-10℃高度が低い場合にスカイツリー先端へ誘導される電荷量が増加し、電界集中が強くなることが示された。

これらの結果から、-10℃高度の低下により雷雲内の電荷領域が地表構造物へ近づき、構造物先端からの上向き放電が発生しやすくなる可能性が示唆された。

一方、-10℃高度が高い場合には、雷雲と構造物との距離が大きくなり、構造物先端の電界集中が弱まるため、雷雲から地表へ向かう下向き放電が支配的になると考えられる。

以上の解析から、雷雲高度の低下に伴い、スカイツリー先端部への電界集中が顕著になることが確認された。そこで、雷雲高度による影響をさらに明確にするため、スカイツリー周辺および雷雲周辺の電気変位場を低高度条件 (1000 m) と高高度条件 (8000 m) で比較した。

電気変位場の比較では、低高度雷雲条件においてスカイツリー先端部への集中が顕著に認められた。この傾向を電位および電場の観点から確認するため、低高度雷雲条件 (1000 m) と高高度雷雲条件 (8000 m) について、それぞれの分布および最大値を比較した。

【電気変位場の詳細比較】

《上向き放電・

低高度雷雲条件（1000 m）》

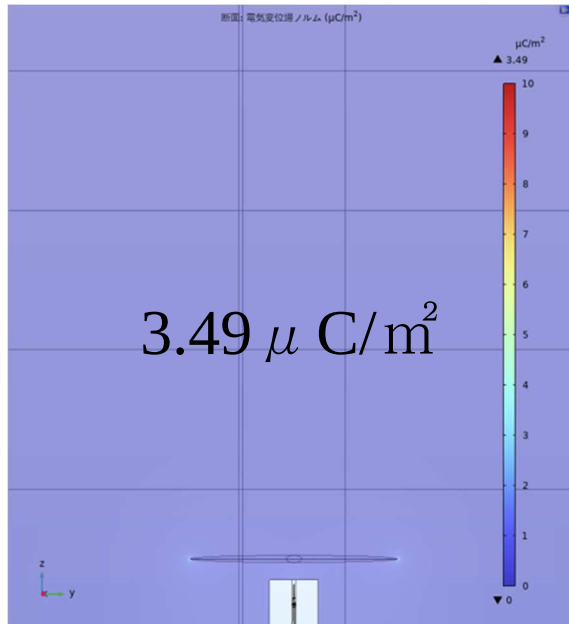


図 5. 雷雲の電気変位場（上向き放電）

《下向き放電・

高高度雷雲条件（8000 m）》

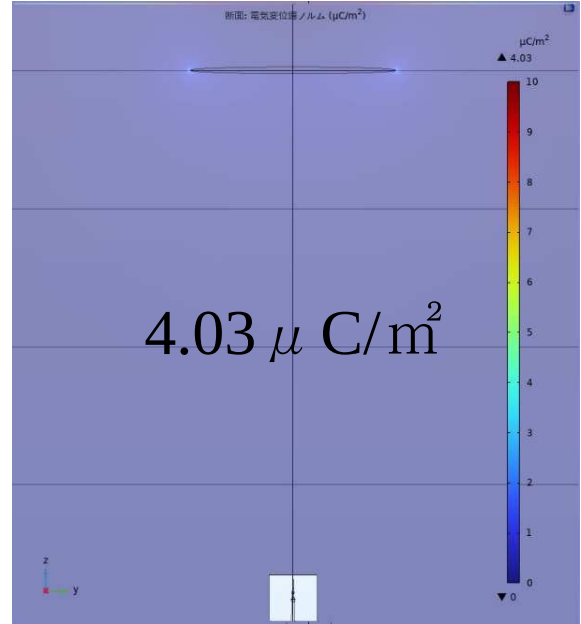


図 7. 雷雲の電気変位場（下向き放電）

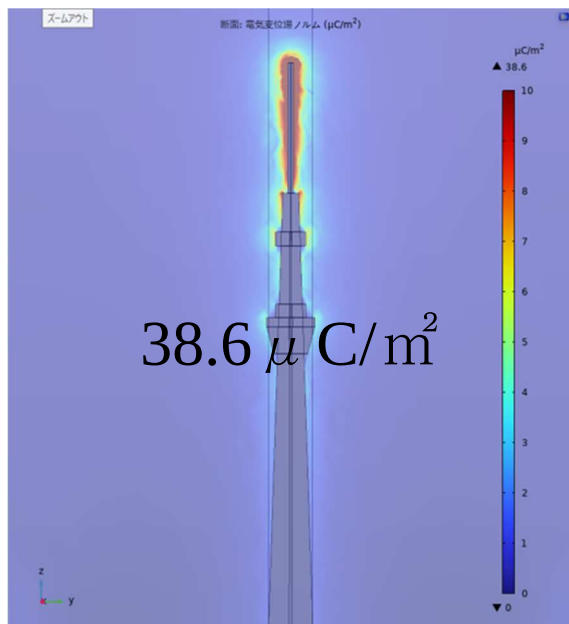


図 6. スカイツリー先端の電気変位場(上向き放電)

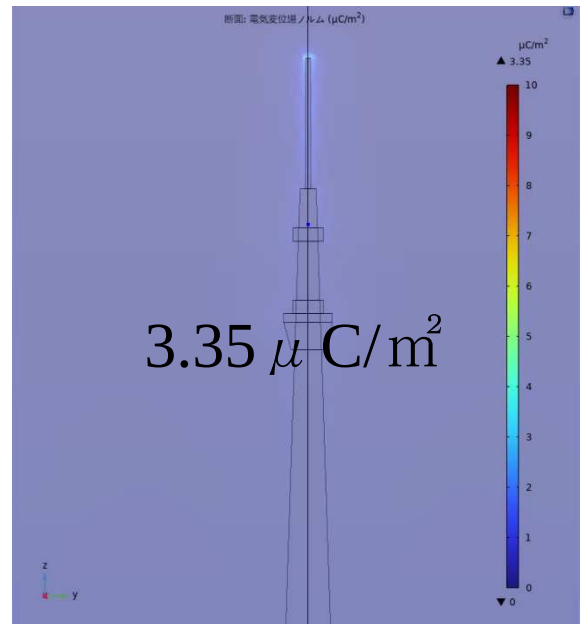


図 8. スカイツリー先端の電気変位場(下向き放電)

【電位・電場の詳細比較】

《上向き放電・

低高度雷雲条件 (1000 m) 》

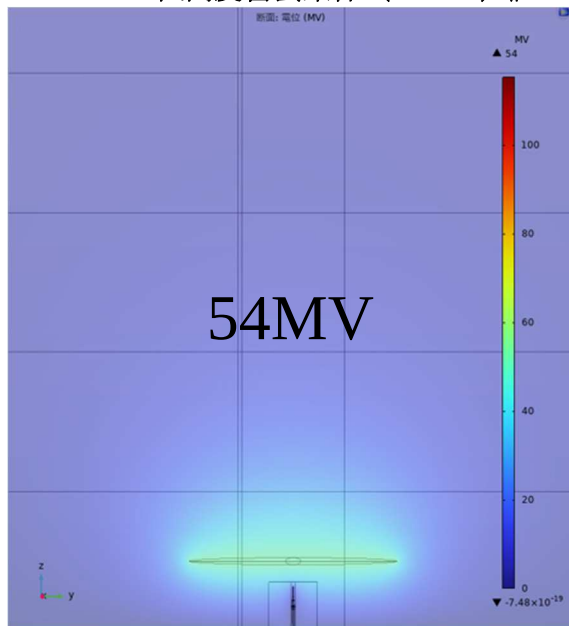


図 9. 雷雲の電位(上向き放電)

《下向き放電・

高高度雷雲条件 (8000 m) 》

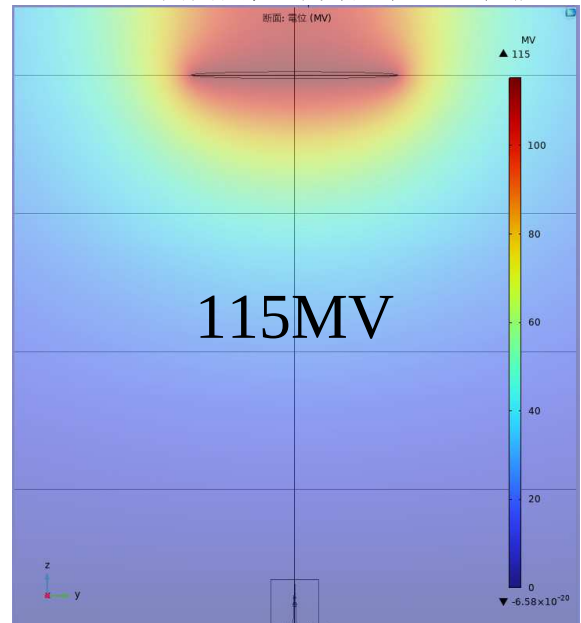


図 11. 雷雲の電位(下向き放電)

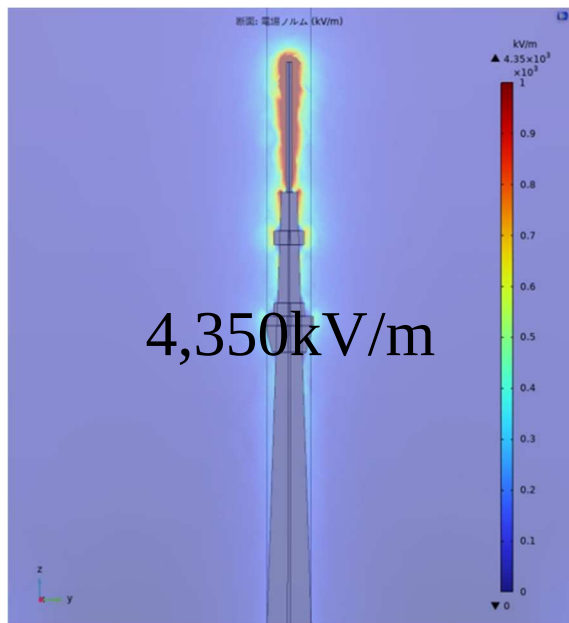


図 10. スカイツリー先端の電場(上向き放電)

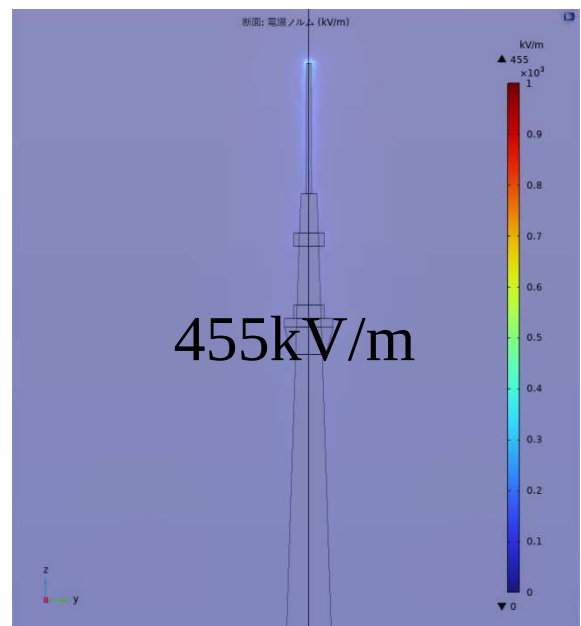


図 12. スカイツリー先端の電場(下向き放電)

【電気変位場の総合比較】

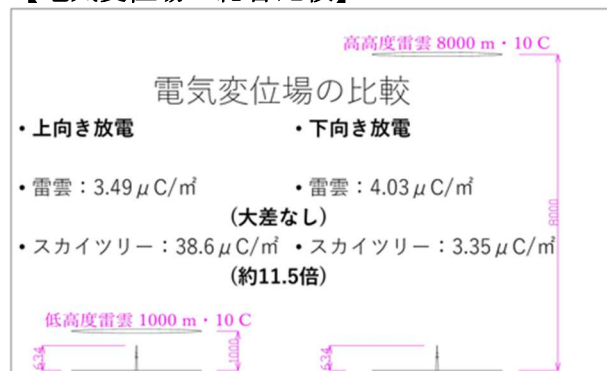


図 13. 雷雲高度の違いによる雷雲およびスカイツリー先端部の電気変位場の比較

図 13 に、低高度雷雲条件 (1,000 m) と高高度雷雲条件 (8,000 m) における雷雲およびスカイツリー先端部の電気変位場を示す。

雷雲の電気変位場は、低高度条件で $3.49 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 、高高度条件で $4.03 \mu\text{C}/\text{m}^2$ となり、大きな差は認められなかった。一方、スカイツリー先端部では、低高度条件で $38.6 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 、高高度条件で $3.35 \mu\text{C}/\text{m}^2$ となり、低高度条件では高高度条件の約 11.5 倍となった。この結果から、雷雲高度が低下して雷雲と高層構造物との距離が短くなると、雷雲側の電気変位場が大きく変化しなくても、構造物先端部への電気変位場の集中が著しく強くなることが示された。これは、雷雲高度の低下に伴って高層構造物先端部の電界集中が強まり、上向放電が発生しやすくなる可能性を示す結果と考えられる。

【電位・電場の総合比較】

雷雲高度の違いによる影響を定量的に確認するため、低高度雷雲条件 (1000 m) と高高度雷雲条件 (8000 m) について、電位およびスカイツリー周辺の電場を比較した。

電位は、低高度雷雲条件では約 54 MV、高高度雷雲条件では約 115 MV となった。一方、スカイツリー先端部の電場は、低高度雷雲条件では約 4,350 kV/m、高高度雷雲条件では約 455 kV/m となり、低高度条件では高高度条件の約 9.6 倍となった。

この結果から、雷雲高度が低下すると、雷雲の電位そのものは高高度条件より低いにもかかわらず、雷雲と構造物との距離が短くなることにより、スカイツリー先端部に強い電場が形成されることが示された。この電場集中が、上向放電の発生を促進する要因の一つになると考えられる。



図 14. 雷雲高度の違いによる雷雲電位とスカイツリー先端電場の比較

図 14 に雷雲高度 1000 m および 8000 m における雷雲電位とスカイツリー先端電場の比較を示す。雷雲高度 1000 m では雷雲電位は 54 MV、先端電場は 4,350 kV/m であった。一方、雷雲高度 8000 m では雷雲電位は 115 MV と高いものの、先端電場は 455 kV/m であった。したがって、雷雲高度が低下すると、雷雲電位が低い場合でも構造物との距離の短縮によって先端部の電場が著しく増大することが確認された。このことは、低い-10°C 高度で上向放電が発生しやすい観測傾向を説明する一因と考えられる。

考察

観測結果では、-10°C 高度が 6,000 m 以下の条件で上向放電の割合が高くなる傾向が認められた。特に、-10°C 高度が低い条件では、高層構造物からの上向放電が発生しやすくなる可能性が示された。

COMSOL AC/DC モジュールによる静電場解析では、雷雲モデル高度 1,000 m の場合、8,000 m の場合と比較してスカイツリー先端部への電気変位場および電場の集中が顕著となった。先端電場

は低高度条件で 4,350 kV/m、高高度条件で 455 kV/m となり、低高度条件では約 9.6 倍に増加した。一方、雷雲電位は低高度条件で 54 MV、高高度条件で 115 MV であり、雷雲電位そのものは高高度条件の方が大きかった。

この結果は、上向放電の発生には雷雲電位の大きさだけでなく、雷雲と高層構造物との距離が重要であることを示唆している。雷雲高度が低下すると、雷雲と構造物との距離が短くなり、構造物先端部に電界が集中することで上向きリーダが発生しやすくなると考えられる。

したがって、観測された -10°C 高度の低下と上向放電増加の関係は、雷雲電荷領域が地上構造物に近づくことによる先端電場の増大によって説明できる可能性がある。

結論

東京スカイツリー周辺の落雷観測結果と COMSOL AC/DC モジュールによる静電場解析から、以下の結果を得た。(1) 観測結果では、 -10°C 高度が低い条件ほど上向放電の割合が増加する傾向が認められた。(2) 静電場解析では、雷雲モデル高度を 8,000 m から 1,000 m に低下させると、スカイツリー先端部の電場が 455 kV/m から 4,350 kV/m へ増加し、約 9.6 倍となった。(3) 以上から、 -10°C 高度の低下に伴って雷雲内の電荷領域が地上構造物に近づくことが、高層構造物先端部の電界集中を強め、上向放電を誘発する要因の一つとなる可能性が示唆された。

参考文献

- [1] 電力中央研究所報告 東京スカイツリーにおける雷観測 (その 2)
- [2] COMSOL AC/DC モジュール
- [3] 気象庁データ