

FDTD法を用いた歩幅電圧発生時の 人体の雷サージ解析

はじめに

近年の電子機器は省電力化や半導体の高集積化が進む一方で、雷の様な異常電圧に対する絶縁耐力は低下している。また、雷は電子機器及び構造物に経済的損失を与えるだけではなく時としては人命にも被害を与えてしまうため、雷被害を低減させることは重要である。

一方、解析によって雷現象を理解するためには、非常に広範囲の領域に存在する様々なオブジェクト（建造物、接地電極、大地、電子機器、人体、等）に対する長時間の過渡応答（ μ 秒スケール）を計算しなければならず、適切な解析モデルに対し、適切な解析手法を適応させることが必要となる。

今回の例では、このような雷の解析の第一歩として、接地電極、大地、人体といったオブジェクトに対して、3D形状が扱うことができ μ 秒スケールの過渡応答が解析可能であるFDTD法を使用した解析を行った。具体的な解析内容としては、落雷時の碎石（砂利）による歩幅電圧の低減効果を体内の電流密度から評価するものとした。なお、FDTD法を使用した解析には、電磁界解析ソフトX³FDTDを用いた。

解析モデル

図1に解析モデルの概要を示す。接地電極・大地・人体が含まれており、各物性値は表1の値を使用した。

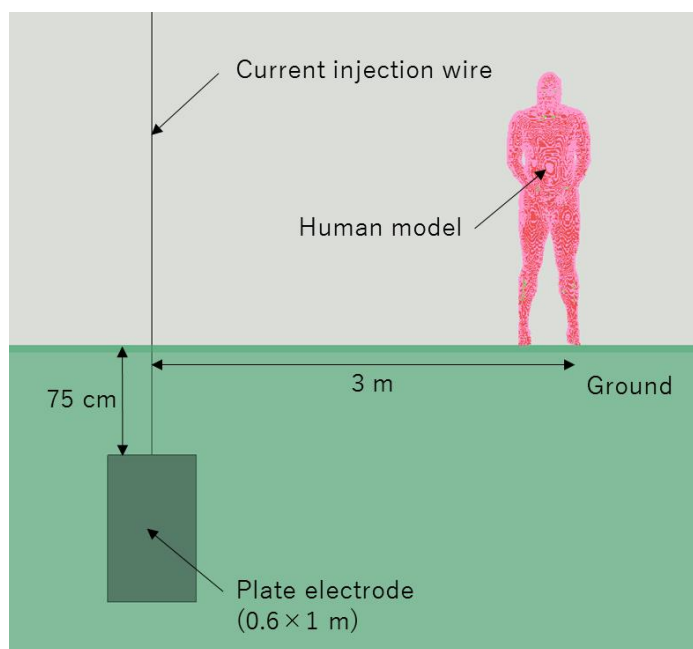


表1 各モデルの物性値

モデル	物性値
大地	抵抗率 1000 Ω m 比誘電率 10
碎石	抵抗率 1000 Ω m 比誘電率 7
接地電極、 電流印加線	完全導体

図1：解析モデルの概要

人体モデル[1]は西洋人男性の平均的な体形のモデルを直立した姿勢で配置した(図2)。この人体モデルは、39の人体組織(筋肉、皮膚等)の電気特性をFDTD計算に反映することが可能となっている。

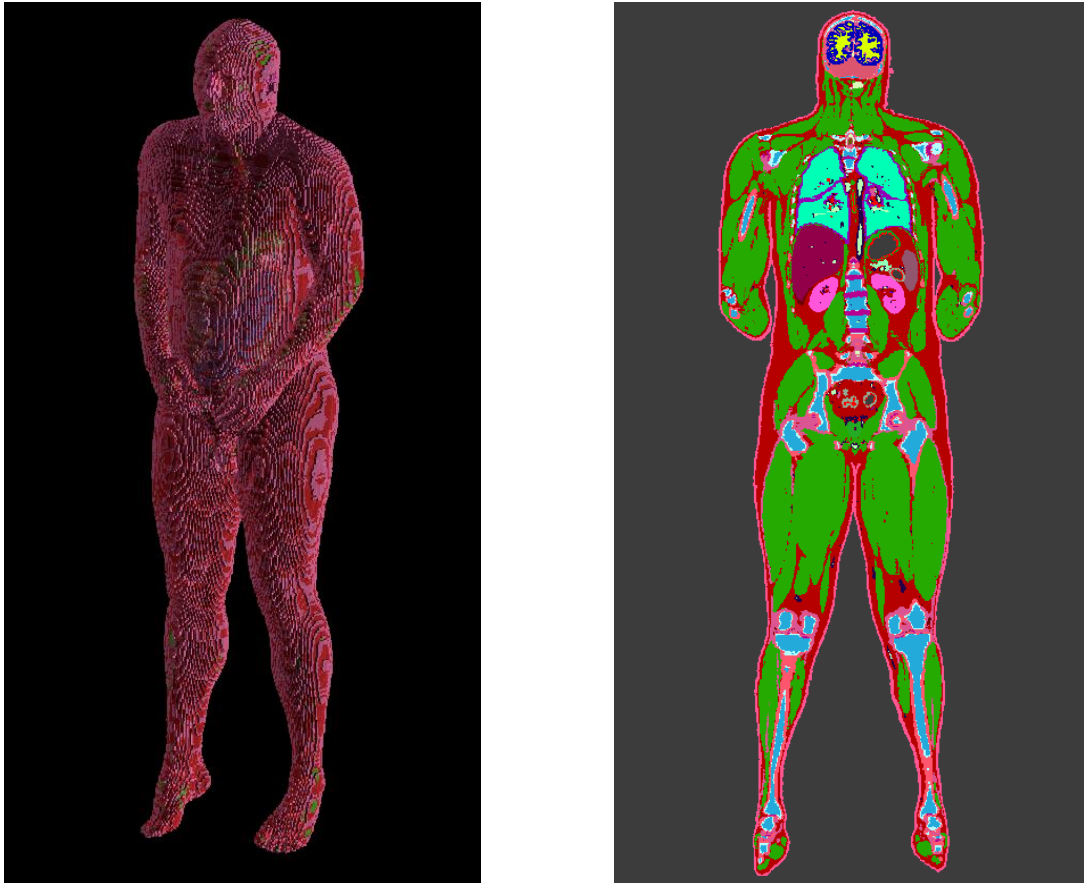


図2 人体モデルの外観と体内組織

歩幅電圧の低減対策[2]である碎石は図3のようにモデル化した。各碎石は2.5cm角の立方体とし、人体モデルの足元に2段(厚さ50mm)で配置した。

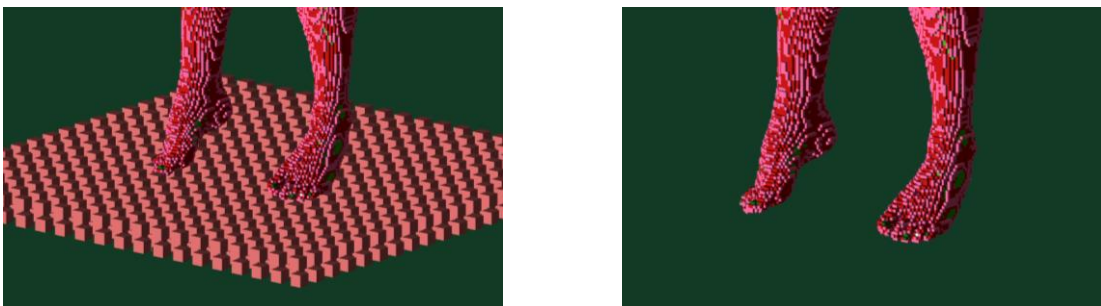


図3 人体モデルの足元に設置した碎石モデル。碎石有り(左)と碎石無し(右)

雷波形

電流印加線に入力する雷波形を図4に示す。雷波形はJIS Z 9290-1の第1正極性雷撃を使用した。また、解析範囲は過渡応答が表れる0-60 μ 秒とした。

解析範囲 (60 μ 秒)

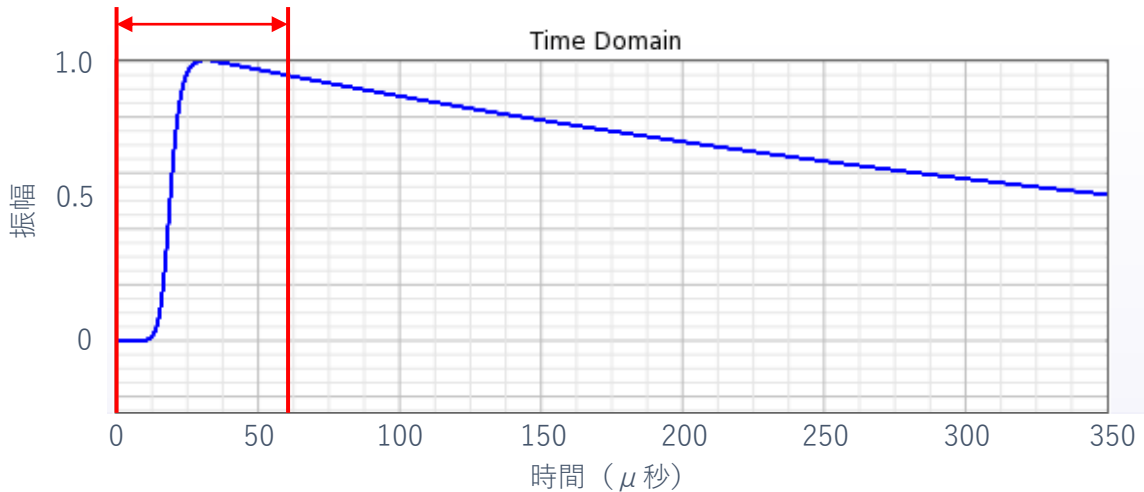


図4 雷波形と解析範囲

GPUによる高速化

60 μ 秒という解析時間はFDTD法としては長時間であるため、CPUに比べ並列演算性能に優れたハードウェアであるGPU(Graphics Processing Unit)を使用し計算を高速化した。表2に具体的な計算環境、条件及び計算時間を示す。

表2 計算環境、条件及び計算時間

マシン環境	GPU : Geforce GTX 1080 (NVIDIA) CPU : Core i7-4790 @3.60GHz (Intel) OS : Windows 8.1
解析ソフトウェア	XFtdt
メッシュ数	約 1100 万
使用メモリ量	約 550 MB
GPU計算時間	約 12 時間
CPU計算時間	約 310 時間 (予想値)

大地を流れる雷サージの周波数特性

雷サージは特定の周波数のsin波ではないため、ある帯域の周波数成分を含んでいる。多くの場合、1MHz以下の成分が支配的となる。雷サージの解析をする場合にはこの帯域の周波数特性を把握しておくが良い。例えば、接地電極に雷電流が流入された場合、交流電流の表皮効果の式からも明らかのように周波数の高い成分は大地表面を、低い成分は深く浸透して流れる。

図5に接地電極に雷電流が流入した場合の大地、人体の電流密度分布（定常状態）を周波数別にまとめた。ここでは、周波数特性が顕著に現れるように大地抵抗率を $1 \Omega\text{m}$ として解析している。また、周波数も100 MHzまで解析している。図5から、周波数の高低によって電流の流れる深さが異なることが一目でわかる。周波数が高い場合には、大地だけでなく、人体モデルに流れる電流も増加している。周波数によるこのような違いを、周波数特性のイメージとして持つておくが良い。

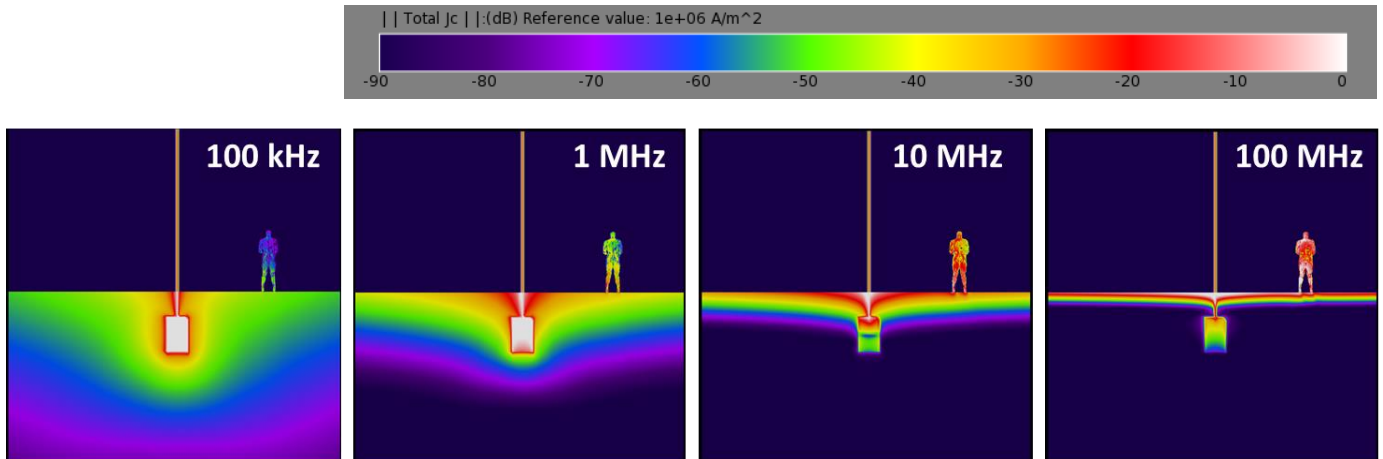


図5 各周波数における電流密度分布（定常状態）

境界面の反射を考慮した解析領域

雷サージの進展速度を $300\text{m}/\mu\text{秒}$ とすると、 $60\mu\text{秒}$ の解析時間の中では 18km 進むことになる。そのため、 $60\mu\text{秒}$ の解析をするための解析領域としては雷電流を印加する地点から 18km 以上を確保すると理想的であるが、これはFDTD計算に必要なメモリ量が膨大となり現実的ではない。そのため、境界面に吸収境界条件（LiaoやPML等）を設定し反射波を抑える工夫をする。しかしながら、FDTD法における吸収境界はエネルギーを完全に吸収（0にする）するわけではない点に注意が必要である。つまり、解析領域を過度に大きくするとメモリ量の制限が現れ、過度に小さくすると境界面からの反射の影響が現れてしまうのである。このため、適切な解析領域を求めることが重要となる。

今回は、同じモデルの接地電極付近の電位上昇値について解析領域変えて解析し、解析領域のサイズと境界面からの反射の影響を調査した。図6に4つの解析領域（1辺： 20m , 200m , 1km , 10km ）における接地電極付近の電位上昇値を示す。

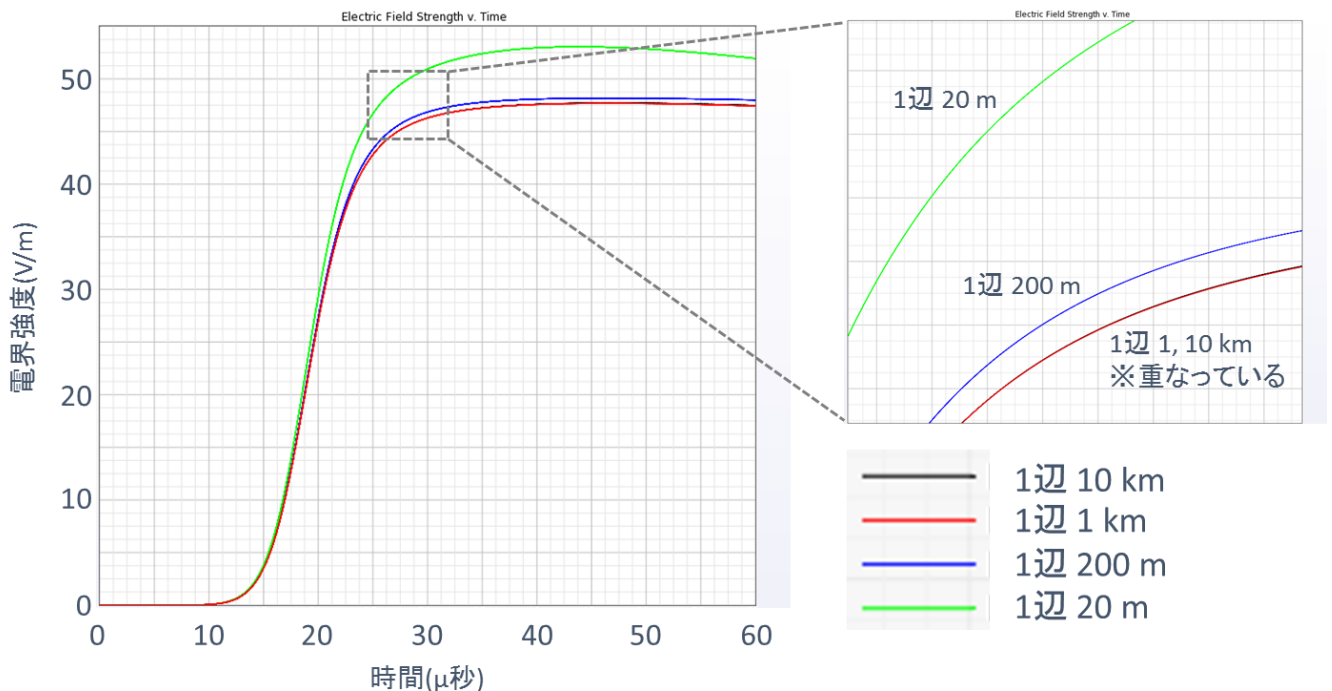


図6 解析領域と接地電極付近の電位上昇の関係

図6の $30\mu\text{秒}$ 付近における1辺 10km の結果には、サージが立ち上がって（ $10\mu\text{秒}$ 時点）から $20\mu\text{秒}$ 程しか経過していないため、観測地点（接地電極付近）に境界面からの1次の反射波も到達していないと考えられる。そのため、この 10km のグラフを反射波の影響のない結果として、各解析領域の結果を比較する。比較の結果、1辺 1km に縮小した場合、 10km と同様の結果が得られたため、今回の解析では1辺 1km の立方体を解析領域とした。

解析結果

図7に碎石無しの場合と有りの場合の電流密度分布（20 μ 秒経過時）を示す。

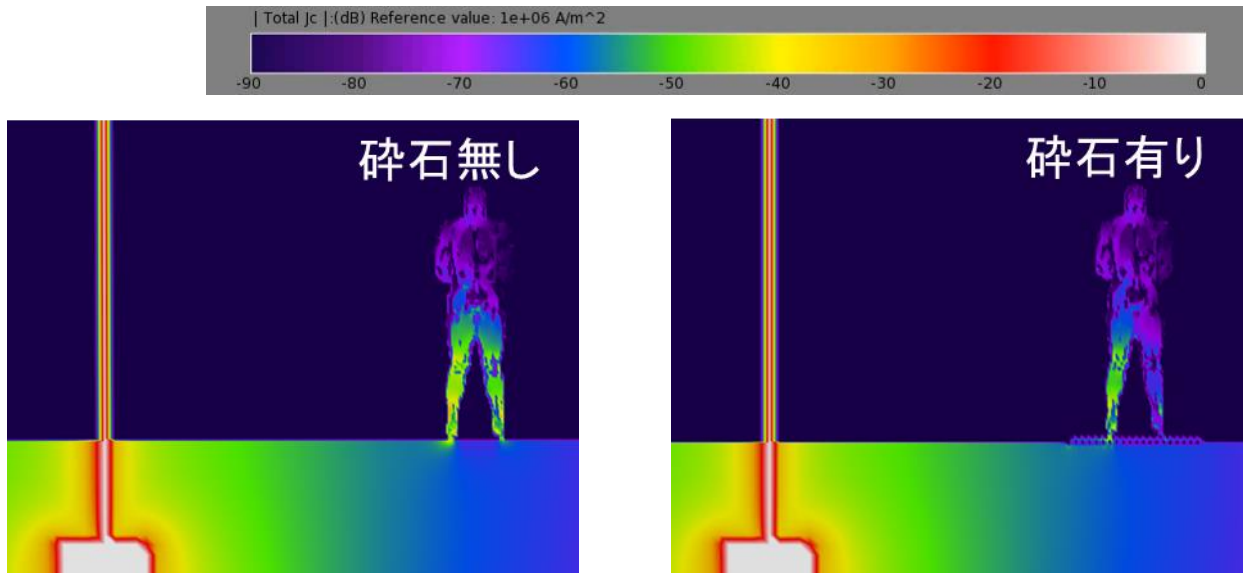


図7 20 μ 秒経過時の電流密度分布、碎石無し（左）と碎石有り（右）

図7から、20 μ 秒経過時には頭部付近にまで電流が流れていることがわかる。これは碎石の有無によらず同様の傾向であった。しかしながら、碎石がある場合には全体的に人体内部の色が暗くなっており、電流は低減されていることがわかる。このような分布は全体の傾向を把握する際に効果的である。

次に、図8に右足内部の電流密度の時間変化を比較した結果を示す。ここでは、特定の測定点（人体モデルの右足内部）の電流密度の時間変化を抜き出している。この結果から、碎石無しの場合と比較して、碎石有りの場合には電流密度は1/2以下に低減されていることがわかる。

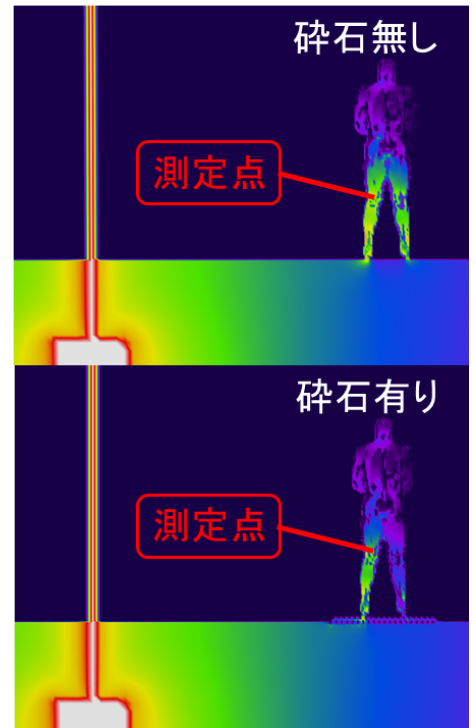
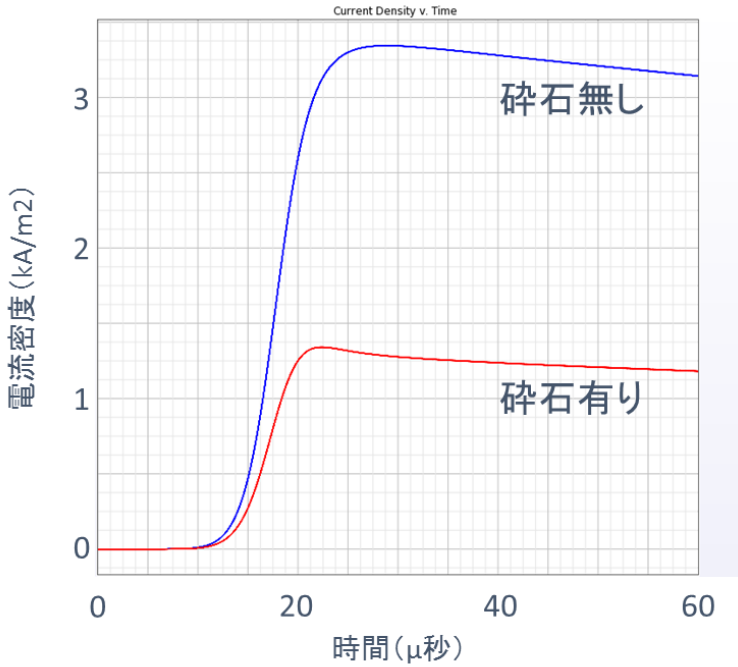


図8 右足内部の電流密度の時間変化（左）、測定点の位置（右）

まとめ

本稿では、GPUを使用したFDTD計算により接地電極・大地・人体を含めた雷サージ解析を現実的な時間で実施し、碎石による歩幅電圧の低減効果を評価した。しかしながら、本解析ではスパークオーバー等の雷サージ特有の現象を考慮できていないため、今後モデルに落とし込む必要があると考える。また、接地電極の過渡特性が先行報告[3]と良い一致を示すことは確認しているが、人体周囲の電流値についても実験結果との比較は必要と思われる。

[全ての事例はこちら](#)

[お問い合わせ等はこちら（製品HP）](#)

[1] IT'IS tissue database, v2.3

[2] JIS Z 9290-3 8.1.1 一般的対策

[3] 電気学会技術報告第1343号「接地システムの雷サージ・EMCへの影響評価」