

# A Study on Steady-State Resistances of Horizontal Grounding Mesh and Conducting Plates

Takeo FUJIWARA\*, Keisuke NAKAMURA\*, Akihiro AMETANI\*, Naoto NAGAOKA\*, Yoshihiro BABA\*

(Received March 12, 2014)

This paper investigates the steady-state resistances of horizontal grounding electrodes based on experimental measurements, FDTD (Finite-Difference Time-Domain) simulations and analytical formula. The resistance of a grounding mesh is compared with that of a horizontal conducting plate considering the area and the shape. Finally an approximate formula to estimate grounding resistance is developed.

**Key words :** Grounding electrode, grounding mesh, conducting plate, steady-state resistance, FDTD simulation

**キーワード :** 接地電極, 接地網, 平板状電極, 定常抵抗, FDTD シミュレーション

## 水平網状および平板状接地電極の定常接地抵抗に関する研究

藤原 健生\*, 中村 圭佑\*, 雨谷 昭弘\*, 長岡 直人\*, 馬場 吉弘\*

### 1. はじめに

水平接地極は多数の電極を互いに接続することで大地との接触面積を容易に大きくすることが可能であり, 低接地抵抗を得られるため広く利用されている<sup>1)</sup>. 日本では大地抵抗率の高い山岳地帯でも風力電などの発電設備が多く建設されている. 山岳地帯では岩場などを避けて設備を建設するため建設用地が限られており, 大規模な水平接地極は建設できない. 従って, 狭い敷地の中で, できるだけ接地抵抗を低くできる水平電極の検討が必要である. 接地網(メッシュ)の接地抵抗推定式では, その表面積を円板と等価と仮定しており, 電極の形状や

面積の影響は十分に検討されておらず, その特性は明らかであるとは言い難い<sup>2,3)</sup>.

本研究では, 水平接地極として棒状電極および板状電極を用い, その接地抵抗特性を測定し, 電極の形状や面積の影響について検討を行う. また, 数値電磁解析の一手法である有限差分時間領域法 (Finite-Difference Time-Domain Method : FDTD 法)<sup>4)</sup>を用いたシミュレーションを行い, 実験結果と比較・検討する. これらの結果に基づき網状電極における接地抵抗推定式を導出する.

---

\*Faculty of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone: +81-744-65-6352, FAX:+81-744-65-6801, E-mail: aametani@mail.doshisha.ac.jp

## 2. 水平単電極の接地抵抗理論式

### 2.1. 単電極

Fig. 1 に示すような十分な深さに埋設した水平単電極の接地抵抗理論式は Sunde<sup>2)</sup> によって次式で与えられる.

$$R(r) = \frac{\rho}{2\pi l} \left[ \ln \frac{l}{r} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{l}\right)^2} \right\} + \frac{r}{l} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{l}\right)^2} \right] \quad (1)$$

ここで,  $r$  は電極の半径[m],  $l$  は電極の長さ[m]である. さらに  $r \ll l$  として, (1)式は次のように近似できる.

$$R(r) = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{2l}{r} - 1 \right) \quad (2)$$

埋設深さを考慮する場合には地表面に対する影像を用いる. 電極の埋設深度が  $d$  [m] のとき, Fig. 1 に示すように全空間を抵抗率  $\rho$  [ $\Omega$ m] の媒質で満たし, 地表面に対して上方  $2d$  [m] の位置に影像を考える. 影像による影響は(1)式における電極の半径  $r$  を導体間の距離  $2d$  に置き換えたものに等しく次式で表される.

$$R(2d) = \frac{\rho}{2\pi l} \left[ \ln \frac{l}{2d} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2d}{l}\right)^2} \right\} + \frac{2d}{l} - \sqrt{1 + \left(\frac{2d}{l}\right)^2} \right] \quad (3)$$

影像を考慮した水平単電極接地抵抗  $R_h$  は(1)式と(4)式の和として与えられる.

$$R_h = R(r) + R(2d) \quad (4)$$

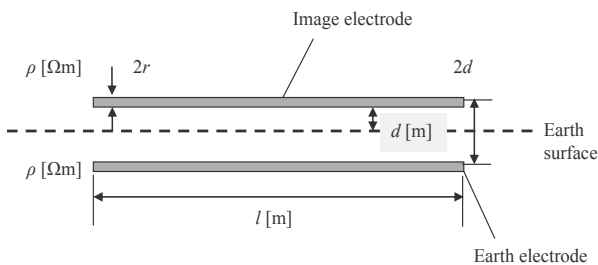


Fig. 1. A buried conductor.

### 2.2 板状電極

楕円状電極の短径を軸にして回転させた場合に得られる立体について, 周囲の抵抗率が  $\rho$  [ $\Omega$ m] で満たされている場合の抵抗  $R$  は次式で与えられている<sup>1,2)</sup>.

$$R = (\rho/4\pi r) \arcsin(e) \quad (5)$$

ここで,

$$e = \sqrt{1 - (l/r)^2} \quad (6)$$

$e$ : 離心率,  $l$ : 直径[m],  $r$ : 短径[m]

円板電極の場合, (5)式において  $l = 0$  とすることで接地抵抗  $R_{plate}$  が次式により与えられる.

$$R_{plate} = \rho/8r \quad (7)$$

平状電極の接地抵抗を算出する場合, 電極を円板とみなす手法が用いられる. 従って, 板状電極の面積を  $A$  [ $m^2$ ] とするとき, 次式により算出される等価半径  $r$  を(7)式に代入すればよい.

$$r = \sqrt{A/\pi} \quad (8)$$

埋設時における板状電極の接地抵抗理論式は影像による影響を考慮すると次式で与えられる<sup>2)</sup>.

$$R_{plate} = (\rho/4\pi)(1 - 4d/\pi r) \quad (9)$$

ここで,  $\rho$ : 大地抵抗率 [ $\Omega$  m],  $r$ : (8)式で与えられる等価半径[m],  $d$ : 埋設深さ[m]

## 3. 水平接地極単電極

本章では, 水平接地極として Fig. 2 に示すような最も単純な水平接地単電極について検討を行う.

### 3.1. 過渡応答実験

#### (1) 実験条件

実験配置図を Fig. 2 に示す. 接地電極としては半径 0.01 m, 長さ 0.6 m の棒状電極を用い, 0.3 m の深さにビニル被覆線(KHD 1.75)を介して埋設している.

本実験では, 電圧源に Pulse Generator (NoiseKen INS-4020)を用いており, 試験電極から 40 m 遠方に配置している. 電流印加線には同軸ケーブル(3D2V)を用いて埋設線直上まで導き, 5 k $\Omega$  の高抵抗を介して試験電極へ Fig. 3 に示すような立ち上がり約 15 ns, 波高値 1 A の電流を注入している. なお, 印加電圧は注入電流波高値が 1 A となるように設定している. 電圧基準線にビニル被覆線を用い, 電流注

入線に対して直交するように配置し、25 m 遠方で接地している。

Wenner の 4 電極法<sup>1)</sup>により接地抵抗・大地抵抗率計 KEW4106 (共立電気計器 社製)を用いて、実験場大地の抵抗率を測定したところ、2 層構造と推測され、深さ 2.5 m までの第 1 層は抵抗率 400 Ωm であり、以降の第 2 層は 520 Ωm であった。

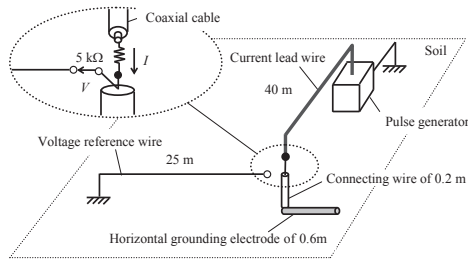


Fig. 2. Experimental setup.

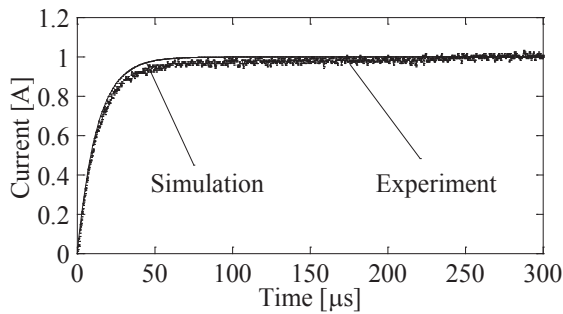


Fig. 3. Injected current.

(2) 測定機器

オシロスコープは DPO - 4104 (Tektronix 社製)であり、DC ~ 1 GHz の周波数帯域を有している。電圧測定には、受動プローブ P6139A (Tektronix 社製)を用いた。P6139A は DC ~ 500 MHz の周波数帯域を有しており、入力容量は 8 pF である。高圧プローブ P5100 (Tektronix 社製)は DC ~ 250 MHz の周波数帯域を有しており、入力容量は 2.75 pF である。電流測定には AC 電流プローブ CT -1 (Tektronix 社製)を用いた。CT-1 は 25kHz ~ 1GHz の周波数帯域を有し、感度は 5 mV/mA である。

3.2. FDTD 法の計算条件

解析空間図を Fig. 4 に示す。解析空間の刻み幅は全ての方向で  $\Delta s = 0.05$  m とし解析空間の大きさは X, Y, Z 方向全てにおいて 6.0 m としている。大地

は厚さ 2.5 m、抵抗率 400 Ωm、比誘電率 20 の物質を満たすことで模擬している。なお、解析空間を囲む 6 つの境界面は、Liao の 2 次吸収境界条件を用いて開空間を模擬している。半径 0.01 m、長さ 0.6 m の接地電極は完全導体で模擬しており、地表面下 0.3 m に配置している。また、埋設線としては導体を導電率  $\sigma = 10^{-12}$  [S/m]、比誘電率  $\epsilon_r = 1$  の直方誘電体で覆うことでビニル被覆線を模擬している。埋設線の始端に内部抵抗 5 kΩ の電流源を配置し、図 3 に示した波高値 1 A、立ち上がり約 15 ns の実験と同様の電流を注入している。電流注入線、および電位基準線は完全導体で模擬しており、遠方を吸収境界に接続することで無限長導体を模擬している。

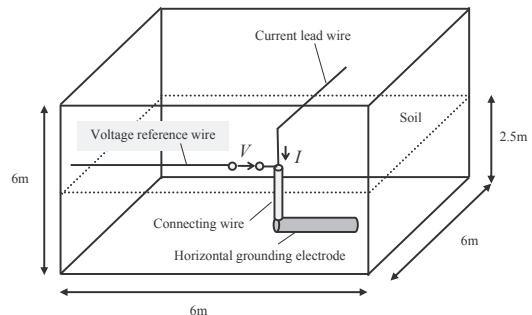


Fig. 4. Analytical space.

3.3. 実験および FDTD 計算結果

Fig. 5 に実験結果および FDTD 法計算結果を重ねて示す。注入電流に比べて波頭部の立ち上がりが緩やかになり、定常接地抵抗と電流の波高値の積算で求まる定常値へと収束する容量性の波形を示している。t = 300 ns 付近の定常部分では、実験結果は 416 V、FDTD 法計算では 406 V、Sunde の(4)式理論値は 404 V で、その差異は 3%程度に収まってお

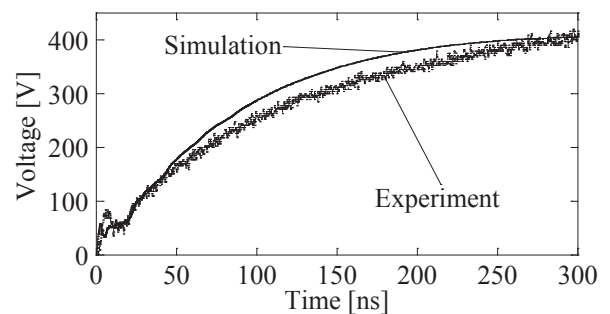


Fig. 5. Comparison of measured and FDTD simulation results.

り、良好に一致していると言える。また、定常領域に至るまでの過渡部についても実験結果と計算結果は概ね一致していることから、本解析モデルを用いた FDTD 法計算結果は妥当である。従って、FDTD 法による水平接地極の検討が可能であると言える。

#### 4. 水平接地電極の面積形状

本章では板状および網状電極を用いた実験および FDTD 計算により水平接地電極の面積と形状について検討する。

##### 4.1. 網状電極の接地抵抗理論式

###### 4.1.1. 円環状配置電極

直径  $D$  の円環状に配置された直径  $2a$  の電極を深さ  $d$  の位置に埋設した時の全電極の等価接地抵抗  $R_{torus}$  は次式で与えられている。

$$R_c(D) = (\rho/2\pi^2 D) \left( \ln(4D/\sqrt{2ad}) \right) \quad (10)$$

Fig. 6 のように等間隔で  $M$  個に分割されている網状電極の円環電極による模擬について考える。

###### (1) 等面積

Fig. 6 のメッシュの面積  $S$  に着目し、 $M$  個の円環状電極が並列に接続されているとする。 $M \rightarrow \infty$  の収束値が(7)式の板状電極接地抵抗に一致すると仮定すると、全円環状電極の接地抵抗  $R_a$  は次式で表される。

$$R_a = (1/M)R_c(D/\sqrt{M}) + R_p \quad (11)$$

ここで、 $M$ : メッシュ数、 $D$ : 電極半径、 $R_p$ =(7)式の接地抵抗[Ω]

###### (2) 等価外周

メッシュ数  $M$  のとき、総導体長  $l_M$  は網状電極の外周で定まる面積  $A$  [m<sup>2</sup>] を用いて次式で与えられる。

$$l_M = 2\sqrt{A}(\sqrt{M} + 1) \quad (12)$$

従って、総電極長に対する等価半径  $r_M$  は次式により算出できる。

$$r_M = l_M/2\pi \quad (13)$$

(10)式と(13)式で与えられる接地抵抗  $R_c$  と(7)式の接地抵抗  $R_p$  の和として全円環電極接地抵抗  $R_b$  を与える。

$$R_b = R_c(2\sqrt{A}(\sqrt{M} + 1)/\pi) + R_p \quad (14)$$

###### (3) 等価抵抗

(11)式と(12)式の平均としてメッシュ数  $M$  のときの網状電極の接地抵抗  $R_{mesh}$  を定義する。

$$R_{mesh} = R_a + R_b \quad (15)$$

##### 4.1.2. 単電極による模擬

Fig. 7 のような同一平面に等間隔  $s$  で配置された  $k$  本の水平棒状電極を考える。 $k$  本の電極には電流が等しく分流していると仮定すると、電極の接地抵抗  $R_k$  は次式で与えられる<sup>1,2)</sup>。

$$R_k = (1/k)(R_h(r) + (2/k)[(k-1)R_h(s) + (k-2)R_h(2s) + \dots + R_h(ks-s)]) \quad (16)$$

$$R_h(r) = (\rho/\pi l) \left( \ln(2l/\sqrt{2ad}) - 1 \right) \quad (17)$$

ここに、 $k$ : 電極本数、 $R_h$ : 水平単電極の接地抵抗 [Ω]; (4)式、 $\rho$ : 大地抵抗率[Ωm]、 $s$ : 電極間隔離距離[m]、 $r$ : 電極半径[m]、 $l$ : 電極長[m]、 $d$ : 埋設深さ[m]。

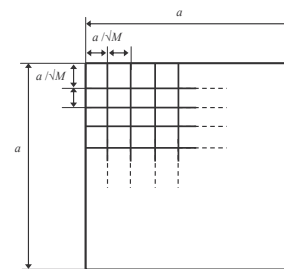


Fig. 6. Equally spaced grounding mesh.

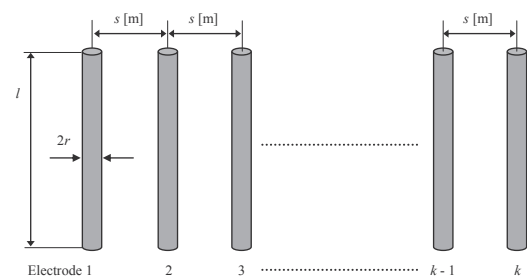


Fig. 7.  $k$  parallel conductors on the same plane.

網状電極で交差する  $m$  本の電極の接続を考慮すると全接地抵抗  $R_{mesh}$  は次式で表すことができる。

$$R_{mesh} = R_k // R_m = R_k R_m / (R_k + R_m) \quad (18)$$

## 4.2. 実験的検討

### 4.2.1. 実験条件

Fig. 8 に実験配置図を、Fig. 9 と Table 1 に実験対象とした水平接地電極の条件および測定結果を示す。なお、埋設深さは 0.2 m である。網状電極には直径 4 mm の銅製棒状電極を用い、平板電極としては  $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ mm}$  のアルミ板を用いた。また、円板電極に Fig. 9 に示すように平板を加工して作成した。実験場大地は 2 層構造をなし、深さ 1 m までの第 1 層は大地抵抗率が  $200\ \Omega\text{m}$  であり、それ以降の第 2 層は  $60\ \Omega\text{m}$  であった。

### 4.2.2. 実験結果

Table 1 に実験波形より読み取った  $t = 300\text{ ns}$  付近の電圧値、および電位降下法で測定した抵抗値を示す。Fig. 10(a) に  $0.85\text{ m}$  四方の平板電極 (Case B-1) と網状電極 (Case A) の過渡電圧波形を示す。次に、図 10(b) に平板電極 (Case B) と円板電極 (Case C) での過渡電圧波形を示す。

図より、 $t = 10\text{ ns}$  付近には  $60\text{ V}$  程度のピーク値が観測される。これは埋設線始端を観測点としているため、埋設線の有するインダクタンス成分の影響と考えられる<sup>3)</sup>。

Table 1 より、 $t = 300\text{ ns}$  付近の定常値に関して、実験結果を電位降下法による測定結果と比較すると 20% 程度の差異が生じている。これは測定に用いた接地抵抗計(共立電気計社製 KEW 4106)の最大動作誤差( $\pm 30\%$ )の範囲内である。Case B-1 で(9)式で与えられる板状電極の接地抵抗値は  $49\ \Omega$  であり、電位降下法で測定した値との差異は 6% にすぎない。従って、実験結果では  $t = 300\text{ ns}$  以降に定常領域が存在していると推測され、以下の検討では電位降下法による測定結果を用いる。

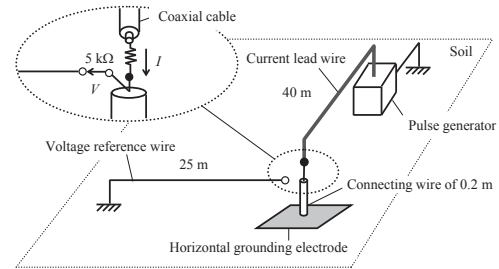
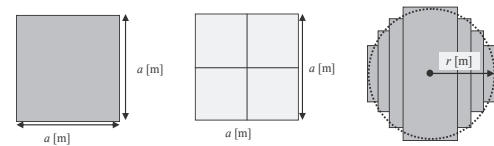
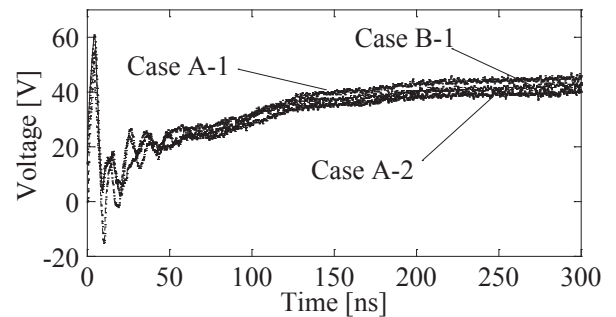


Fig. 8. Experimental setup with a connecting wire.

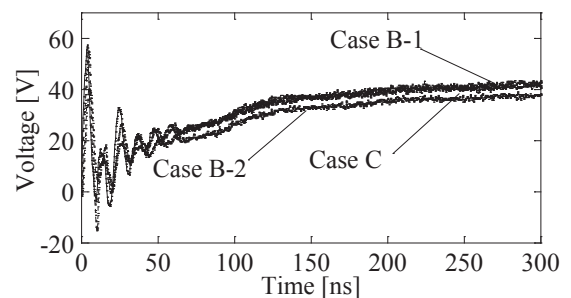


(a) Square plate (b) Mesh ( $M = 4$ ) (c) Circular plate

Fig. 9. Various grounding electrodes.



(a) square plate and mesh



(b) Square and circular plates

Fig. 10. Measured results of transient voltages.

### 4.2.3. メッシュと平板電極の等価性

Table 1 において網状電極 (Case A) と、一辺  $0.85\text{ m}$  の平板電極 (Case B-1) を比較すると、Case A-1 は 15% 大、Case A-2 では 0.4% 大となっており、同一

面積の平板では同一抵抗とはならないことが知られる。また、円板電極( Case C )の接地抵抗は Case B-1 より 2% 小にすぎない。

以上より、接地メッシュと板状電極の接地抵抗は一定の相似性を有していることが明らかである。なお、メッシュ係数は  $M=4$  の場合  $M_4=1.1$  とすればよい。

Table 1. Experimental conditions and measured resistances corresponding to Fig. 9.

Case	Type	$a$ [m]	$r^*$ [m]	Size[m <sup>2</sup> ]	$V_s$	$R_G^{**}$ [Ω]
A-1	Mesh	0.90	0.51	0.81	48.0	59.9
A-2	Mesh	1.10	0.62	1.21	43.9	52.1
B-1	Square Plate	0.85	0.48	0.72	42.8	51.9
B-2	Square Plate	1.00	0.56	1.00	37.7	46.5
C	Circular Plate	-	0.50	0.78	41.2	50.9

$\rho=200\Omega\text{m}$ , Applied current : rise time  $T_r \approx 15\text{ns}$ , amplitude  $I_0 \approx 1\text{A}$   
 $r^*$  : equivalent radius given by eq.(2.21)  $V_s$  : Voltage at  $t=300[\text{ns}]$   
 $R_G^{**}$  : measured result with fall of potential method  $V_a$ . Simulation at 300[ns]

### 4.3 メッシュ数の検討

実験ケースを Fig. 11 に示す。0.85 m 四方の平板電極と 0.85 m 四方の網状電極(  $M=4, 9, 16$  ) を 0.2 m の深さに埋設している。

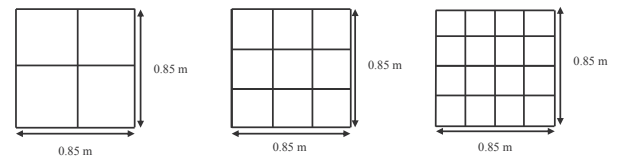
実験場の大地抵抗率は  $700\Omega\text{m}$  であった。また、電位降下法による各ケースの接地抵抗を測定した結果を表 2 にまとめて示している。Table 2 に平板電極と比較して  $M=4$  では 22%大、 $M=9$  では 2%大、 $M=16$  では 1%小となっており、メッシュ数が大となるにつれて平板電極の有する抵抗値へと収束することがわかる。また、0.85 m 四方の板状電極はメッシュ数を 9 とする網状電極と十分に等価と言える。

### 4.4 網状電極の接地抵抗理論式の精度検証

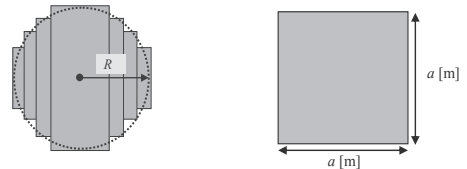
本節では 4.1 節で導出した網状電極における接地抵抗理論式と実測抵抗値、ならびに FDTD 法を用いた計算結果と比較することにより精度検証を行う。

#### (1) 実測値との比較

Table 3 に 4.2 節と 4.3 節にて電位降下法により得られた接地抵抗値、ならびに(16)式と(18)式により得られる計算結果をまとめている。表より、実測値と比較して、(16)式による結果は最大 7%の差異、(18)式では最大 14%の差異であり、単電極模擬による推定結果は概略妥当であると言える。



(a) Case D-1 (b) Case D-2 (c) Case D-3



(d) Case E (e) Case F

Fig. 11. Various electrodes used in experiments.

Table 2. Experimental conditions and measured resistances corresponding to Fig. 11.

Case	Type	$r^*$ [m]	$M$	$V_s$	$R_G^{**}$ [Ω]
Case D-1	Mesh	0.48	4	111.9	230
Case D-2	Mesh	0.48	9	97.1	193
Case D-3	Mesh	0.48	16	96.2	188
Case E	SQ-Plate	0.48	-	92.0	189
Case F	Circle	0.50	-	89.6	180

$\rho : 700 \Omega\text{m}$ , Size:  $0.72\text{m}^2$ ,  $M$  : the number of cells in the horizontal grid  
 $r^*$  : equivalent radius given by  $\sqrt{A/\pi}$ ,  $V_s$  : measured result at  $t=300[\text{ns}]$   
 $R_G^{**}$  : measured result with fall of potential method

#### (2) FDTD 法による精度検証

解析空間を Fig. 12 に示す。空間の刻み幅は  $\Delta s = 0.02 \text{ m}$  とし、空間の大きさは  $X$  方向 : 6 m,  $Y$  方向 : 6 m,  $Z$  方向 : 6.2m としている。大地は厚さ 2.2 m, 抵抗率  $200 \Omega\text{m}$ , 誘電率 20 の媒質で模擬している。計算は  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  の網状電極においてメッシュ数  $M=4, 9, 16, 64, 81$  を対象としている。(16)式と (18)式、ならびに FDTD 法による計算結果を Table 4 に示し、メッシュ数  $M$  との関係を図 13 に示す。表より、FDTD 法による計算結果と比較して、(16)式による結果は最大 30%の差異、(9)式では最大 11%の差異となっており、両式の結果は良好に一致している。また、Fig. 13 より、メッシュ数が大となるにつれて、板状電極の有する接地抵抗に収束しており、定性的にも一致している。以上より、接地抵抗推定式は実用上十分な精度を有していると言える。

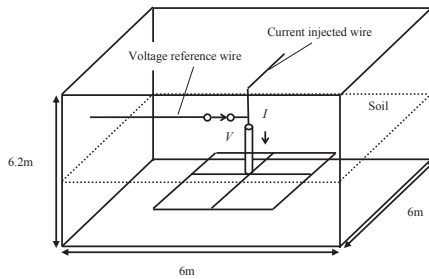


Fig. 12. Analytical space for an FDTD simulation.

Table 3. Measured result  $R_G$  and calculated results by equations (16) and (18).

Case	$\rho$ [ $\Omega\text{m}$ ]	$a$ [m]	$M$	$R_G$ [ $\Omega$ ]	Eq. (16)	Eq. (18)
A-1	200	0.9	4	59.9	68.2	58.5
A-2		1.1	4	52.1	57.8	50.8
D-1	700	0.85	4	230	202	213
D-2			9	193	183	192
D-3			16	188	173	181

$M$  : the number of the cells in the grid

$R_G$  : measured result with the fall of the potential method

Table 4. FDTD simulation result  $V_s$  and calculated results by equations (16) and (18).

Type	$M$	$V_s$	Eq. (16)	Eq. (18)
Mesh	1	42.3	47.6	58.5
	4	36.2	33.1	36.2
	9	29.7	30.0	32.2
	16	28.8	28.3	30.0
	25	28.2	27.3	28.6
	36	27.7	26.5	27.7
	49	27.4	26.0	27.0
	64	27.1	25.7	26.4
81	26.9	25.4	26.0	
Plate	-	25.3	-	-

Size of the grid : 2 m  $\times$  2 m, Earth resistivity : 200  $\Omega\text{m}$

$M$  : the number of the cells in the grid,  $V_s$  : the voltage value at  $t = 300$  ns

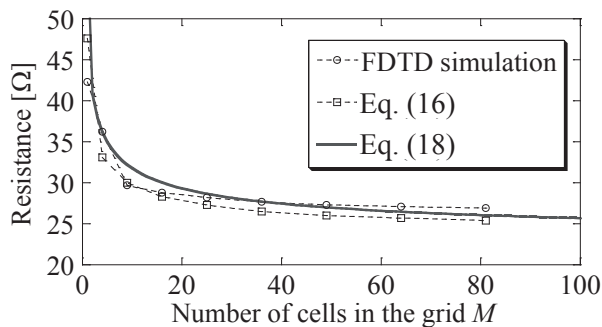


Fig. 13. FDTD simulation results and theoretical results as a function of  $M$ .

### 5. 結言

本論文では、棒状電極及び板状電極を用い水平接地電極の面積・形状に関して、過渡応答実験および数値電磁界解析の一手法である FDTD 法を用いた計算結果により検討を行った。また、網状電極における接地抵抗理論式を導出し、精度検証を行った。これらの検討結果より、次の結論を得た。

- (1) 水平単電極において、大地抵抗率が大きくなると、大地は絶縁体に近い特性を示し、電極終端まで電流が到達するようになるため、大地誘電率の影響が顕著になる。また、電極終端が開放状態と見なせるため、電極終端電位の過渡ピーク値が電極中央より大となる。
- (2) 網状電極においても板状電極と同様に等価半径から接地抵抗を求めることが可能である。
- (3) 網状電極を単電極、および円環電極により模擬することで導出した接地抵抗推定式は実用上満足できる精度を有している。

### 参考文献

- 1) 川瀬太郎, 現場の接地技術と接地システム, (オーム社, 東京, 1993), pp.1-140.
- 2) E.D.Sunde, Earth conduction effects in transmission system, (Dover Publications, Inc., New York, 1968), pp.1-373.
- 3) 雨谷昭弘, 森井浩, 久保隆, “接地電極過渡応答理論式の導出と測定結果の検討”, 電気学会論文 B, **131**(2), 205-214 (2011).
- 4) 宇野亨, FDTD 法による電磁界解析およびアンテナ解析, (コロナ社, 東京, 1998), pp.1-274.