

ラジオ電波でクレーン吊荷部に発生する高電圧の FDTD 法による解析

笠嶋善憲*

Analysis of High Voltage on Crane Hook Owing to Radio Wave by FDTD method

Yoshinori Kasashima

When a large crane is used near a radio broadcasting antenna it operates as an effective receiving antenna and a voltage is induced at the crane hook, which gives a worker an electric shock and makes an obstacle their work. The voltage and a current distribution on a hoist cable, a boom, and a mast of the crane are analyzed by FDTD method. As the result an equivalent circuit of the crane on which the high voltage is generated becomes a parallel resonance circuit. This paper shows the result of the analysis.

Keywords: Radio wave, Crane, Broadcasting antenna, Antenna, EMC

1. まえがき

大型クレーンを中波ラジオ電波の強い領域で使用するとクレーンが効率のよい受信アンテナとなって吊荷部（荷を吊るすフック部）に高い電圧が発生し、作業員に強い電撃を与えることは、半世紀ほど前より世界的に知られている¹⁾。実際に高い電圧が発生したクレーンの寸法を Fig.1 に示す。マスト長は 32m、ブーム長は 19m、吊ワイヤ長は約 50m、これらの合計長は約 100m であるが、このクレーンの吊荷部に約 1.2km 先の 100kW 出力、952kHz の中波ラジオ送信所の電波で $6,000 V_{p-p}$ の電圧が発生した。すなわち、大型クレーンは金属で構成されており、その高さ、全長が数十 m と中波ラジオ電波波長オーダーとなるため、効率のよい受信アンテナとなる。また、そのアンテナとしての形状がほぼ中央で折り返しているため、受信した電圧の再放射が少なく増幅・共振現象を生じて吊荷部にこのような高い電圧が発生する。このような電圧は高周波であり電力的にも僅かであるため、触れても直接感電死することはないが、強い電撃と触れた箇所にピンホール状の火傷の跡を残す。この電撃によるショックによる墜落等の二次災害も考えられるため、現場では吊荷

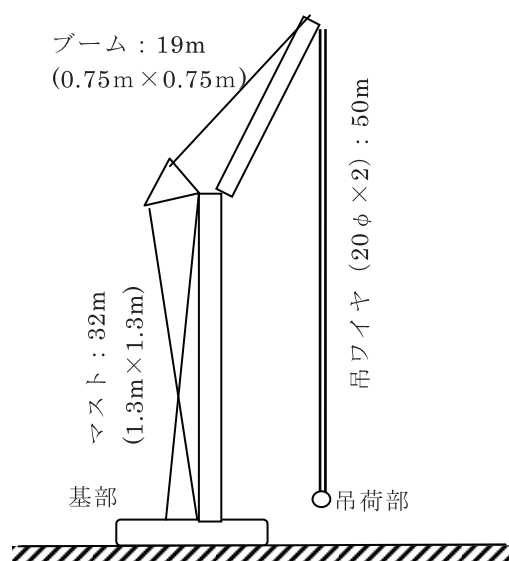


Fig.1 大型クレーン

* 電気電子情報工学科

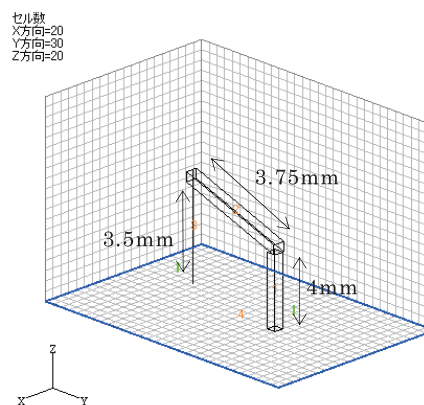
部箇所の絶縁対策を行っている。

著者は、過去にこの電気回路的対策としてこのようなクレーンの一部にループ状にアンテナ線を張り、その終端を可変コンデンサーで短絡、クレーン上の電波に同調することで吊荷部の電圧を減衰させる装置を研究、開発した。この装置は現在、使用されているが、この研究過程でこのような大型クレーンの吊荷部、大地間から見た等価回路は模型実験、現場実験等から受信電圧電源をもつ並列共振回路となることが分かった²⁾。

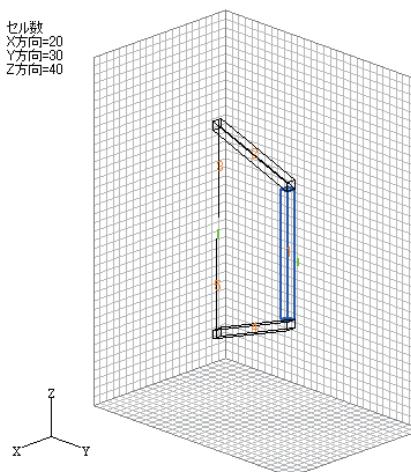
本論文では、FDTD(Finite Difference Time Domain)法を用いて、このようなクレーンに電波が当たった場合のマスト、ブーム、吊ワイヤ上の電圧・電流分布を解析し、このクレーンの等価回路が並列共振回路になることの理論的解析を行う。

2. 解析方法

アンテナの解析においては、電波波長とアンテナ寸法を同比率で縮尺しても同じ結果になることから、今回は実際の大型クレーン寸法の約 1/5,000 モデルを想定して、このモデルの受信アンテナ特性を FDTD 法により解析する。Fig.2(a)に解析モデルの原型を示す。大地は完全導体板、マスト長は 4mm、ブーム長は 3.75mm、吊ワイヤ長は



(a)原型モデル



(b)解析モデル

Fig.2 クレーンの解析モデル

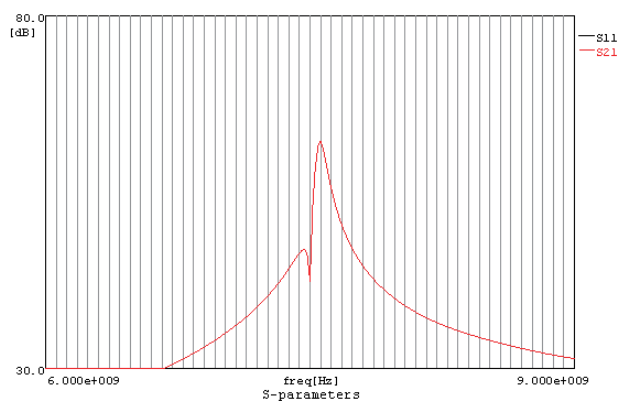


Fig.3 解析モデルの共振特性

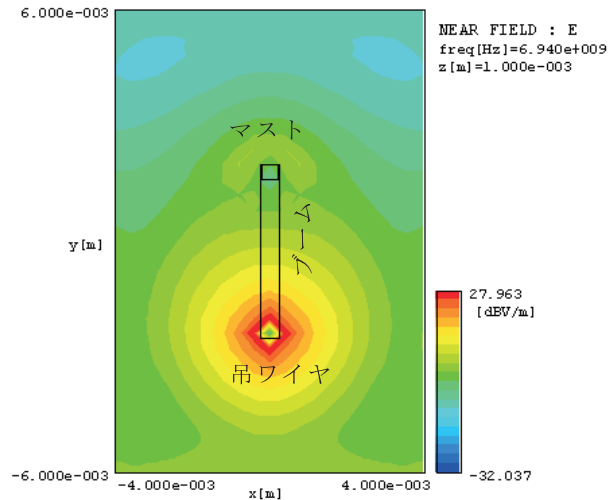


Fig.4 水平断面の電界分布

3.5mm でこれらは電氣的に接続されている。なお、吊ワイヤ先端部と完全導体板間は 0.25mm の間隔をとっている。Fig.2(a)に解析モデルで解析する場合は非常に広い完全導体板が必要、その結果計算領域が広くなり計算メモリ・計算時間が多く必要となるため、実際の解析は、完全導体板による原型モデルの電氣的イメージを考慮した Fig.2(b)の解析モデルを用いて行った。

Fig.2(b)の解析領域の周辺は Berenger の PML の吸収境界とし、解析モデルを散乱体と考え、これに垂直偏波の平面波の Gaussian パルス当て、解析モデル近傍の電界・磁界を求め、それをフーリエ変換し、解析モデルの共振特性、モデル導体上の電圧・電流分布を求めた。なお、このように散乱体としての FDTD 法による解析では、モデル導体上の電圧・電流値は直接には求まらないので、その電圧・電流分布の値は相対値となっている。

Fig.2(b)の解析モデルの共振特性を Fig.3 に示す。また、共振周波数での水平面から 1mm 高さの水平断面上の解析モデル周辺の電界強度分布を Fig.4 に示す。

以下にクレーン解析モデルの 3 つのパラメータでの解析結果を示す。

3. 一様な細い導体のクレーン

クレーンのマスト、ブーム、吊ワイヤを一様な細い導体とし、またブームを水平に近似した解析モデルを Fig.5 に示す。解析領域は x,y,z 軸方向のセル寸法 ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) を 0.25mm とし、全セル数を 43,200 個とした。細い導体は太さのないセルの一辺として入力するため、その計算上の太さはセル寸法の 0.135 倍で 0.034mm である³⁾。

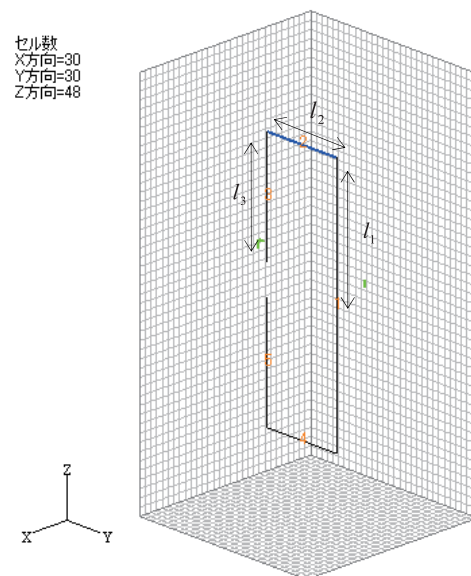


Fig.5 細い導体のモデル

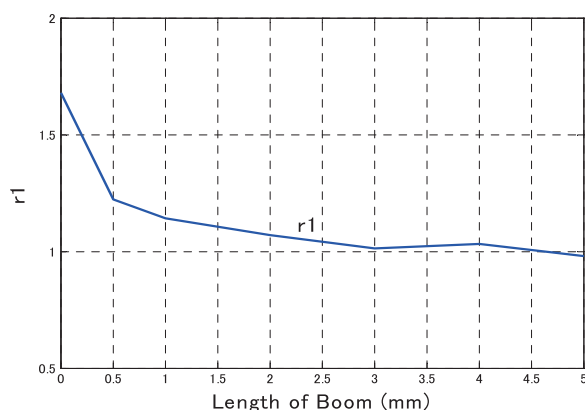


Fig.6 細い導体モデルの波長短縮率

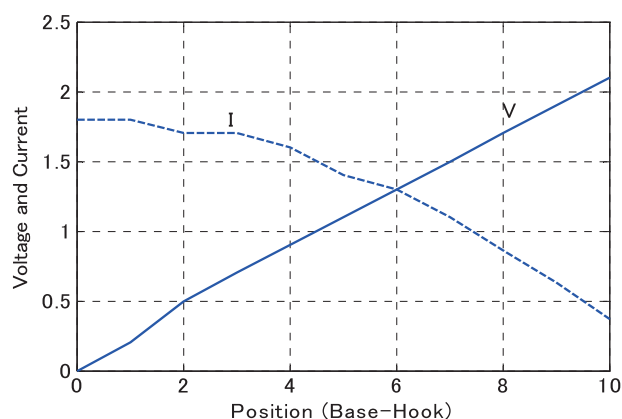


Fig.7 細い導体モデルの電圧・電流分布

Fig.5 のモデルでマスト長を l_1 、ブーム長を l_2 、吊ワイヤ長を l_3 とし、それらの合計長 $l (= l_1 + l_2 + l_3)$ を 10mm 一定として、 l_2 を 0.25～5mm に変化した場合の共振特性を解析する。

ここで、共振周波数を f_r 、その波長を λ_r とした場合、その解析モデルの全長 l と $\lambda_r/4$ の比を第 1 波長短縮率 $r1$ として次式のように定義する。

$$r1 = \frac{l}{\lambda_r/4} \quad (1)$$

この $r1$ は、アンテナ工学においては波長短縮率と呼ばれ 1/4 波長の垂直アンテナの場合理論的に約 0.95 になることが分かっている。

Fig.5 の解析モデルで l_2 に対する $r1$ の計算結果を Fig.6 に示す。Fig.6 の結果からは、 l_2 が約 2.5mm 以上になるとマストの電流と吊ワイヤの電流の影響が小さくなり、 $r1=1$ に近づく。すなわち、解析モデルは 1/4 波長の垂直アンテナの特性に近くなるとが分かる。一方、 l_2 が約 2.5mm 以下になると、もともとマストの電流と吊ワイヤの電流は幾何学的に逆位相になっているため極めて相互の影響が大きく、マストと吊ワイヤの電流は同相、一体的になり、その結果 $r1$ は 1.7 と 1/4 波長垂直アンテナの 2 倍近くなることが分かる。

次に、Fig.5 の解析モデルで $l_2 = 3\text{mm}$ の場合、共振周波数 f_r は 7.54GHz であるが、この周波数での解析モデル上の電圧・電流分布を Fig.7 に示す。なお、Fig.7 はマスト基部を点 0 としマスト、

ブーム、吊ワイヤの順方向に吊ワイヤ先端を点 10 として電圧・電流分布を示している。Fig.7 の結果からは、一様な細い導体の場合は折り返しの形状になっても $1/4$ 波長垂直アンテナと同じような正弦波状の電圧・電流分布になっていることが分かる。

4. 太いマスト・ブーム、細い吊ワイヤのクレーン

Fig.1 から分かるように大型クレーンのマスト・ブームの断面寸法は $1\sim 2\text{m}$ 角であり、かつそれらの周辺にはブームの起伏用、吊ワイヤ巻上げ用などの多くの金属物が付いているため、それらのアンテナとしての等価半径(直径)は $1\sim 5\text{m}$ にもなる。一方、吊ワイヤは 1 本から複数本のワイヤで構成されているが、そのアンテナとしての等価半径(直径)は数 cm ～数十 cm 程度で、前者に比べて一桁ぐらい小さい。マスト、ブームを太い導体とし、ブームを水平に近似、吊ワイヤを細い導体とした解析モデルを Fig.8 に示す。

Fig.8 の解析モデルでマスト・ブームの断面寸法を $0.25\text{mm}\times 0.25\text{mm}$ 、吊ワイヤの断面寸法はセル寸法の 0.135 倍の 0.034mm 、マストの長さ l_1 、ブームの長さ l_2 、吊ワイヤの長さ l_3 の合計長 $l(=l_1+l_2+l_3)$ を 11mm 一定にして、 l_2 を $0.25\sim 3.5\text{mm}$ に変化した場合の l_2 に対する $r1$ を Fig.9 に示す。Fig.9 の結果からは、 l_2 が 0.7mm 以上で $r1$ が $1.1\sim 1$ になり Fig.6 の結果に比べてマストと吊ワイヤの電流の相互の影響が、吊ワイヤが細い分、より近づかないと表れないことが分かる。ここで、アンテナ工学的には一本のアンテナの途中で太さが突然に変化し、特に開放端部が細いアンテナの場合は、太い導体部分がアンテナの主体になり、共振周波数を決定し、細い部分は太い導体部分の付加的キャパシタンスとして動作すると考えられる(アンテナのトップロード)。そ

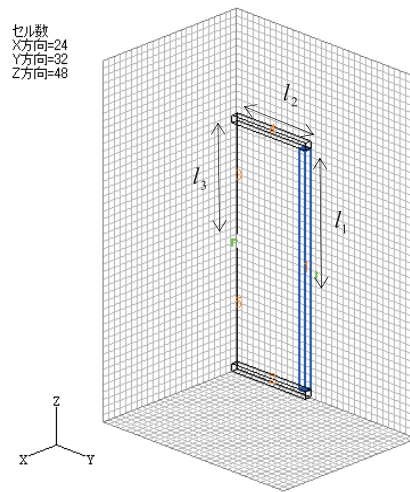


Fig.8 太さの異なるモデル

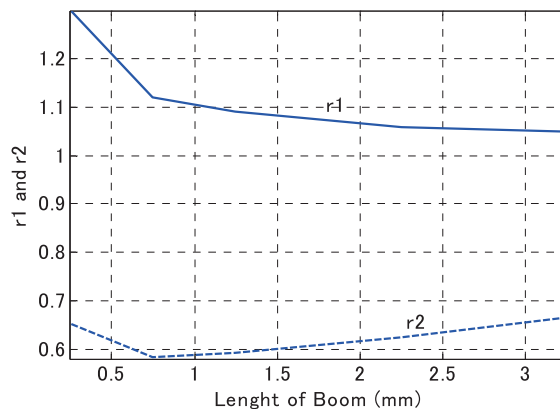


Fig.9 太さの異なるモデルの波長短縮率

のため、太い導体部分であるマストの長さ l_1 とブームの長さ l_2 の合計長を $l' (=l_1+l_2)$ として、クレーン全体のアンテナとしての共振周波数波長を λ_r とした場合、 l' と $\lambda_r/4$ の比を新たに第2波長短縮率 r_2 として次式に定義する。

$$r_2 = \frac{l'}{\lambda_r/4} \quad (2)$$

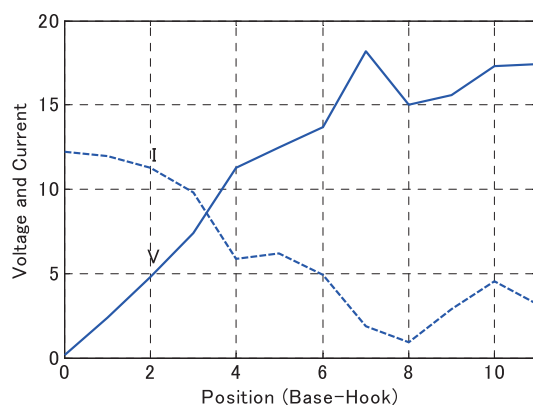


Fig.10 太さの異なるモデルの電圧・電流分布

Fig.8の解析モデルで、 l_2 に対する r_2 の計算結果をFig.9中に破線で示す。Fig.9の r_2 からは、 l_2 が大きくなると $l' (=l_1+l_2)$ が比例して大きくなり、共振周波数が下がる。また吊ワイヤはキャパシタンス的に作用している特性になっていることが分かる。

次に、Fig.8の解析モデルで $l_2 = 3\text{mm}$ の場合、共振周波数 f_r は7.13GHzであるが、この周波数での解析モデル上の電圧・電流分布をFig.10に示す。Fig.10の結果からは、マスト、ブーム間では電圧・電流分布は正弦波状であるが、吊ワイヤ部は必ずしもその正弦波状の延長ではなく、その変化も小さくなっている。すなわち、太い導体であるマスト、ブームがアンテナの主体となり、吊ワイヤはキャパシタンス的に付いている特性と分かる。

5. 荷を吊るしたクレーン

Fig.8の解析モデルクレーンの吊荷部位置に、実際の吊り荷を模擬した水平な導体板を付加した解析モデルをFig.11に示す。

Fig.11の解析モデルで、マスト長 l_1 を4mm、ブーム長 l_2 を3mm、吊ワイヤ長 l_3 を3.75mmと一定にして、吊ワイヤの先端に水平に接続されている導体

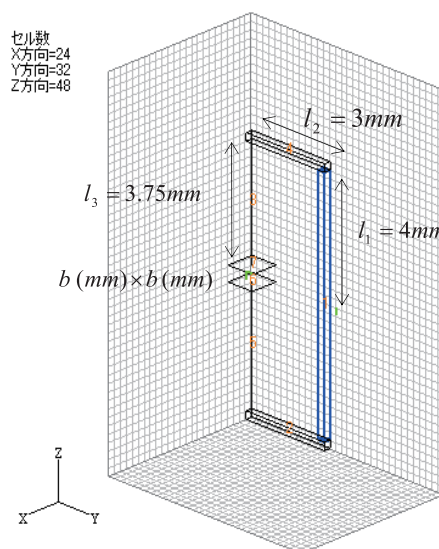


Fig.11 静電容量付モデル

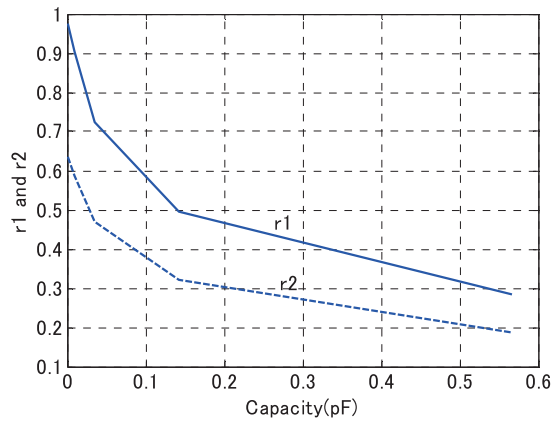


Fig.12 静電容量付モデルの波長短縮率

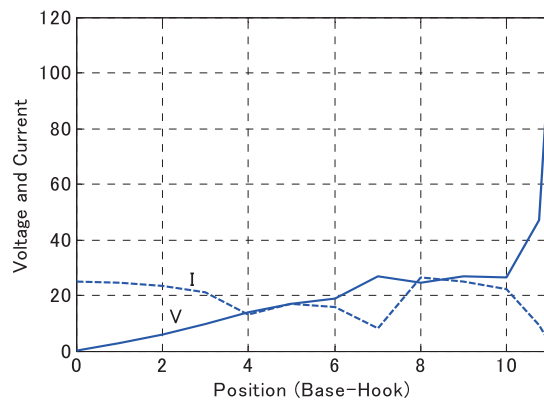


Fig.13 静電容量付モデルの電圧・電流分布

板の寸法 ($b \times b$) を $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ 、 $\sim 4\text{mm} \times 4\text{mm}$ と変化した場合の r_1, r_2 を Fig.12 に示す。なお、Fig.12 では導体板の水平面 (大地) に対する静電容量 (pF) に変換した値に対する r_1, r_2 を示している。Fig.12 の結果からは、クレーンの全長 (l, l') は一定であり、その先端の吊荷部、大地間に導体板の大地に対するキャパシタンスが並列に接続され、そのキャパシタンスの値にのみ依存している特性になっていることが分かる。

次に、Fig.11 の解析モデルで導体板の寸法が $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ の場合、共振周波数 f_r は 5.05GHz であるが、この周波数での解析モデル上の電圧・電流分布を Fig.13 に示す。電圧分布はマスト基部から吊荷部に向かって正弦波状に変化、導体板、大地間で共振により急激に増加している。一方、電流分布は導体板、大地間のキャパシタンスが回路の主体となった結果、マスト基部から吊荷部まで大きな変化がないことが分かる。

6. クレーンの等価回路

中波ラジオ電波によって大型クレーンの吊荷部、大地間に高い電圧が発生する現象の等価回路は既に分かっており、Fig.14 のようになる。受信電圧 E は次式となる。

$$E = E_0 \times h_e \quad (3)$$

ここで、 h_e ：クレーンの受信アンテナとしての実効長[m]

E_0 ：クレーンに当たる中波ラジオ電波の電界強度[V/m]

抵抗 R は次式となる。

$$R = R_l + R_e + R_r \quad (4)$$

ここで、 R_e ：クレーンの接地抵抗[Ω]

R_l ：クレーン導体のオーム抵抗(表皮効果も含む)[Ω]

R_r ：クレーンのアンテナとしての放射抵抗[Ω]

なお、放射抵抗はクレーン導体上の電流分布から理論計算が可能である。

共振回路の尖鋭度 Q は次式となる。

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} \quad (5)$$

ここで、 ω_0 ：共振角周波数[rad/s]

そして、吊荷部、大地間に発生する電圧 V は次式となる。

$$V = Q \times E \quad (6)$$

実測データではこの Q は 10 前後が多い。

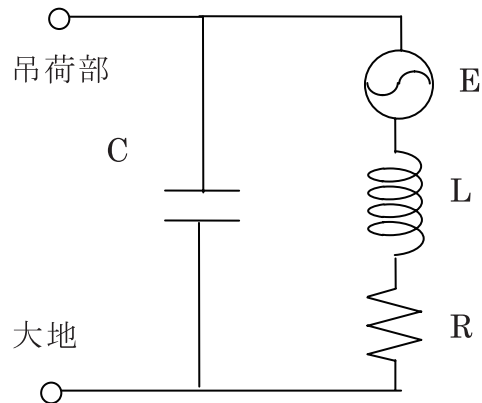


Fig.14 クレーンの等価回路

7. まとめ

既に研究で明らかになっている中波ラジオ電波による大型クレーン吊荷部、大地間に高電圧が生じる現象の等価回路の理論的裏づけを、クレーンの形状、導体の太さ、荷物の影響などをパラメータとした場合のクレーンの共振特性と電圧・電流分布を **FDTD** 法を用いて解析して説明した。クレーン導体を散乱体として **FDTD** 法で解析する場合、正確な値を得るには多くの計算時間を要する非常に小さいセルでの計算が必要である。今回は等価回路の妥当性を説明する目的のみで比較的粗いセルでの解析であったため、波長短縮率などの値の絶対値は不十分であった。今後、機会があれば詳細に計算してみたい。

参考文献

- (1) M. Seidel; Beseitigung von Hochfrequenzspannungen an einer Krananlage, NEDR(Techn Hausmitt), 11-12, pp.238-240, July 1955.
- (2) Y. Kasashima; Prevention of Electric Shock in a large crane near Radio Broad-casting Antenna, 1982 International Symposium on EMC in USA, pp.314-316, November 1982.
- (3) 宇野 亨; FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析、コロナ社、1998.

(平成 23 年 3 月 31 日受理)