

中波放送波による大型クレーンへの電磁妨害と対策の一検討*

富田 一**

Electromagnetic Disturbance of Large-Scale Crane due to Medium Wave Broadcasting and Countermeasures*

by Hajime TOMITA**

Abstract: When a large-scale crane, such as a tower crane or a rough-terrain crane, is used under the influence of a high electromagnetic field caused by a broadcast wave at medium frequency, the voltage induced in the hook can reach 1kV and causes the electric shock to workers. The current induced in the crane can cause the overload-preventive device to malfunction. However, the intensity of induced current in a large-scale crane is not well understood.

On the other hand, mobile cranes are commonly used on shop floors and work sites where the crane is move frequently. In these cases, quick and easy methods for mitigating the high voltage induced in the hook are necessary. One countermeasure suppressing the voltage in the hook has already been put to practical use.

In this report, for a countermeasure against the malfunction of the overload-preventive device, the intensity of the induced current in a large-scale crane is estimated numerically using a crane model. A production version rough terrain crane of 50t at maximum rated load is taken as an example of a large-scale crane. The induced current in the boom of the rough terrain crane is measured by means of a grounding wire. The current intensity in the boom of the rough terrain crane is also calculated by means of the magnetic field strength measured around the boom. The results of the calculation and measurement show that the intensity of the current in a boom of the crane is estimated in the range of several amperes under the electric field of 0.79V/m.

To mitigate the high voltage induced in the hook of a large-scale crane, two methods which can be implemented in a short period are proposed. One method is to decrease the capacitance of the crane by inserting acrylic plates under outrigger floats. The voltage in the hook of the rough-terrain crane described above is attenuated to less than one-half of that before the countermeasure is implemented. The other method is to add a plain knit grounding wire in the hook. In this case, the voltage in the hook of the rough-terrain crane is attenuated to about one-half of that before the countermeasure is implemented

Keywords; Medium wave, Large-scale crane, Induced current, Induced voltage, Electromagnetic disturbance

1. はじめに

タワークレーン，クローラクレーン，ラフテレーンクレーンなどの大型クレーンが中波送信所の近くで使用されるとき，同クレーンが中波の受信アンテナとして作用し，クレーンのフックに高電圧が誘起されて玉掛け作業の従事者が電撃を受ける場合がある。また，マスト（あるいはブーム）に大きな誘導電流が流れる

ため，過負荷防止装置が誤作動する場合がある。これは過負荷防止装置を構成するストレインゲージとポテンシオメータの信号線に中波の誘導電流が重畳することに起因する。これらの電磁妨害は労働災害に結びつく可能性も高く，対策の確立が求められている。

このような背景のもとで，フックに誘起される高電圧対策を目的として，ブームにアンテナ線を張ってフックに誘起される高電圧を抑制する技術が開発されて

* 平成13年8月31日，第19回電気設備学会全国大会において一部発表した。

** 物理工学安全グループ Physical Engineering Safety Research Group

いる¹⁾。ただし、ブームが伸縮するような場合などに適用するには容易でない場合もある。

一方、後者の妨害である過負荷防止装置の誤作動については、対策の基礎資料となる誘導電流がほとんど把握されていない。

以上のことから、ここでは中波による過負荷防止装置への電磁妨害対策の基礎資料を得るために、簡易なクレーンモデルによる誘導電流及びフックへの誘導電圧の数値計算、また、実機を用いた測定を実施した。さらに、作業現場が移動することの多い移動式クレーンを対象に、短時間で電磁妨害を軽減する手法を検討した。

2. モデルによる数値計算

クレーンへの誘導電流及びフックへの誘起電圧の概要を把握するために、簡易化したクレーンモデルを作成し、汎用電磁界解析ソフトJMAG-WorksのTD (FDTD*1に基づく解析ソフト)を用いて数値計算を行った。

2.1 クレーンモデル

大型クレーンの電磁波障害が発生している一例をみると、クローラクレーンの場合、ブーム、ジブ、ワイヤ長がそれぞれ40m、20m、50mであった¹⁾。この場合のブーム、ジブ、ワイヤの合計長が110mであることを参考にFig. 1のクレーンモデルを作成した。

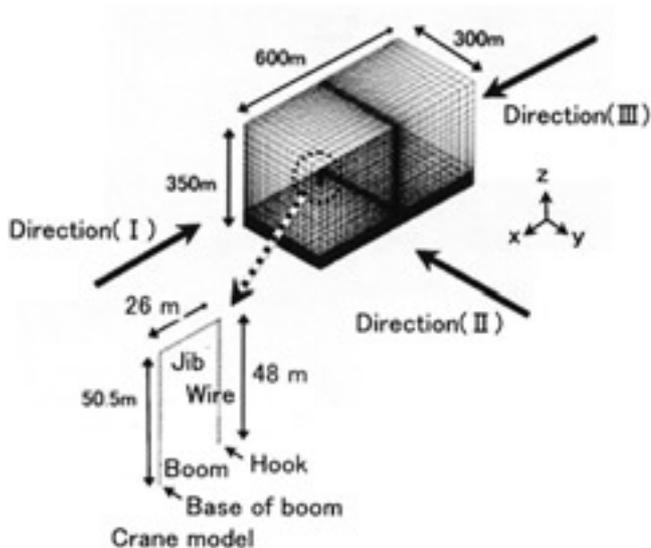


Fig. 1 Model of a large scale crane for FDTD.
FDTD数値計算のためのクレーンモデル

解析空間は縦300m、横600m、高さ350mの直方体であり、クレーンのモデルを除いて解析空間は空気層である。クレーンのモデルのブーム、ジブ、ワイヤの各長さは50.5m、26m、48mであり、フックの箇所であるワイヤ部分の開放端は地上より2.5mの高さである。モデルのブーム、ジブ、ワイヤの断面は、一辺が50cmの正形状であり、材質は鋼材とし、導電率、比透磁率は各 $0.58 \times 10^7 \text{S/m}$ 、1000である。

境界条件については、側面及び上部は吸収境界条件とし、導電率が $0.02 \sim 0.001 \text{S/m}$ 程度である大地部分については、現象の概要把握を目的として、完全導体とした。モデルが境界と接しているxz面は対称性を考慮して磁壁とした。

中波はz軸方向に偏波された電界強度1 V/mの平面波であり、平面波の伝搬方向はブーム方向 (Fig. 1の方向)、ワイヤ方向 (方向)、クレーンで構成された平面に対し垂直方向 (方向)の3方向とした。数値計算においては、空気層も含めた全体の要素数は46957、接点数は51312である。

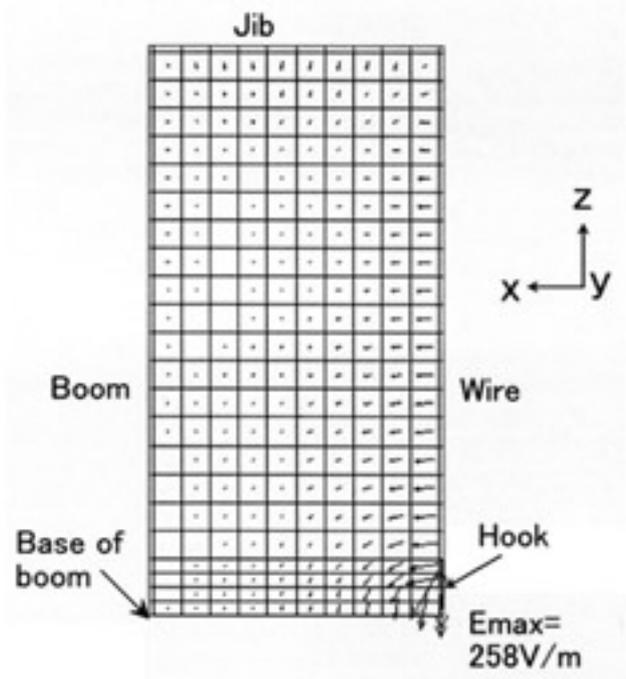


Fig. 2 Electric field distribution around the model of the crane ($f=624\text{kHz}$).
クレーンモデル周囲の電界分布 ($f=624\text{kHz}$)

*1 マクスウェルの微分方程式を差分化 (Finite Difference) し、時間領域 (Time Domain) で解く方法である。

2.2 数値計算結果

2.2.1 フックの電圧

Fig. 2 には、中波の周波数が624kHz、伝搬方向が Fig. 1 に示す の場合の電界分布を示す。フックと地上間の電界が最も強く、最大で258V/mである。電界からフックの電圧を求めると586Vとなる。中波の伝搬方向をパラメータとして、クレーンモデルに印加される中波の周波数とフックの電圧との関係性を求めると、Fig. 3 となる。ブーム、ジブ、ワイヤの長さを加えた合計長さ (= 124.5m) が、中波の波長の約 4 分の 1 となる624kHz (波長480m) において、フックの電圧は最大値である約600Vとなり、玉がけ作業の従事者が電撃を受ける程度の電圧がフックに発生する可能性があることを示している。

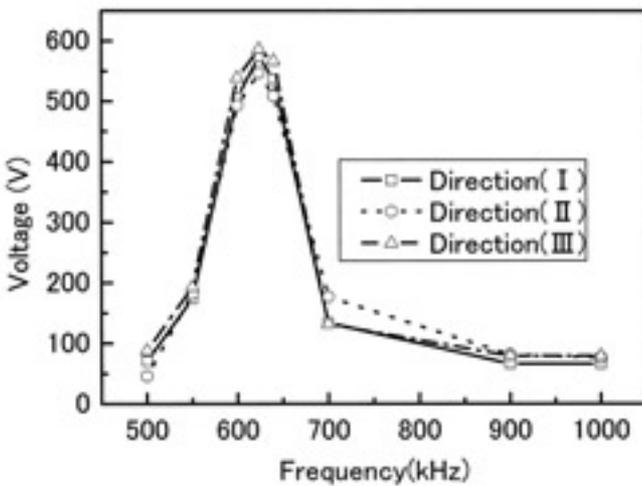


Fig. 3 Relation between the frequency of the medium wave and the voltage in the hook.
中波の周波数とフックの電圧との関係

2.2.2 誘導電流

Fig. 4 には、周波数624kHzの中波がFig. 1 の 方向より入射した場合のクレーンモデル周囲の磁界分布を示す。概略的には、ブームの基部の周囲からジブ、ワイヤの周囲にかけて磁界強度が減少している。ブームの基部の周囲での磁界強度は0.18A/mであった。得られた磁界強度から次式の線積分によってクレーンモデルの電流分布を算出するとFig. 5 が得られた。

$$i = \int H \cdot dl \quad (1)$$

ここで、

i : ブーム等にも流れる電流 (A)

H : ブーム等周囲の磁界強度 (A/m)

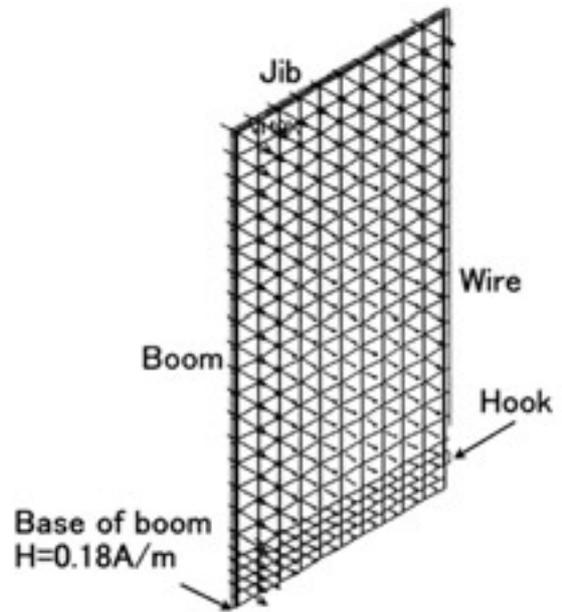


Fig. 4 Magnetic field distribution around the model of the crane (f=624kHz)
クレーンモデル周囲の磁界分布 (f = 624kHz)

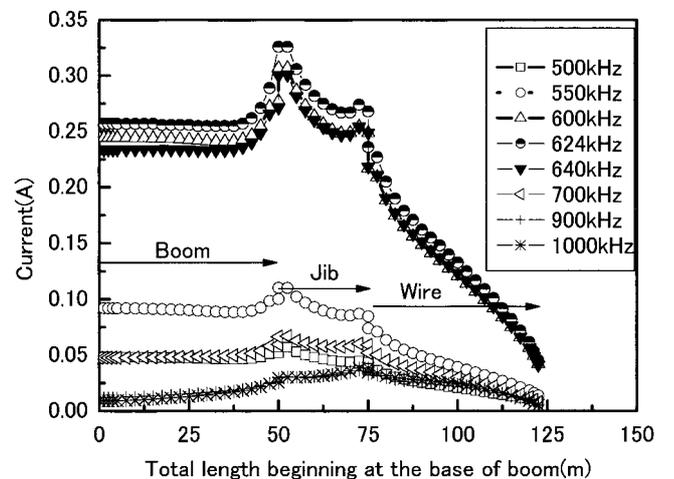


Fig. 5 Relation between the medium-wave frequency and the current distribution in the crane model.
中波の周波数とクレーンモデルの電流分布との関係

l : ブーム等周囲の線路長 (m)

ブーム基部では0.26Aとなり、ワイヤの部分ではフックに近くなるとともに電流値が減少している。中波周波数をパラメータとして、各部の電流分布をFig. 5 に示す。共振周波数付近である624kHzより周波数が離れると、624kHzの場合に比較してクレーンモデルの電流値は相対的に小さくなっている。

2.2.3 指向性

可逆の定理に基づき、クレーンを受信アンテナとして用いたときの利得と指向性は、そのクレーンを送信

アンテナとして用いたときの利得と指向性と同一である。そこで、Fig. 1 のクレーンモデルを送信アンテナとして、ブームの基部を給電点として指向性を計算した。大地面は完全導体とした。

Fig. 6 には仰角が0度の際の指向性を絶対利得で示す。中波が1.2MHz、換言すれば、波長がブーム、ジブ、ワイヤを併せた長さの1/2になるときは、ブーム、ワイヤ方向に強い指向性を有する。これはブームとワイヤに同相の電流が流れ、ダイポールアンテナが

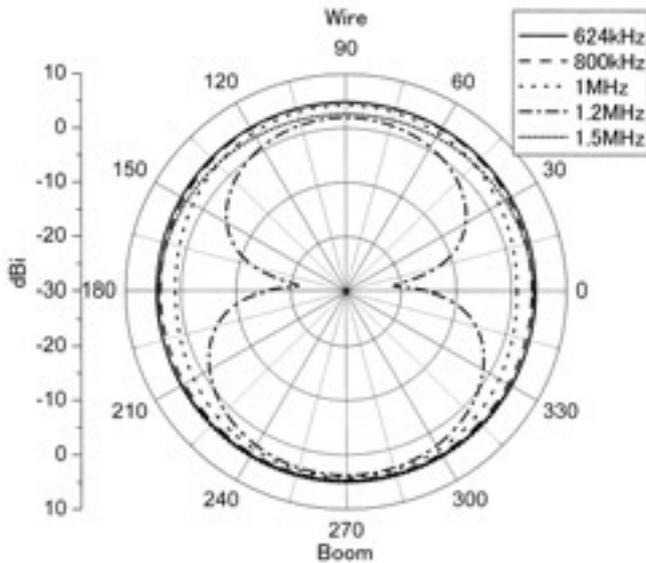


Fig. 6 Directivity of a crane model.
クレーンモデルの指向性

近接して2本存在する場合と等価となる。このときクレーンへの影響は中波の磁界成分が支配的となり、クレーンで構成された平面に鎖交する磁束が最大の時に、絶対利得が高くなる。1.2MHzより離れた周波数では、1.2MHzでみられたような電流パターンからずれるため、強い指向性はみられない。Fig. 3 の共振周波数である624kHzでは、方位に対する絶対利得の差は、最大0.43dBと小さいものであった。

3. 実機を用いたフィールド実験

3.1 実験方法

3.1.1 実験条件

周波数954kHz、出力100kWの中波送信所から約1.5km離れた荒川の河川敷において、つり上げ荷重7、25、50tのラフテレーンクレーン^{*2}(以下、クレーンという)(rough-terrain crane)を用いた実験を行った。使用したクレーンの設置条件をTable 1 に示す。

Table 1 の50t case の場合におけるクレーンの設置状況をFig. 7 に示す。

3.1.2 誘導電流測定方法

ブームの基部での電流は次のように測定した。クレーンの全て(4カ所)のアウトリガーフロートと地面間に厚さ10~30mmのアクリル板を挿入した後、車体

Table 1 Installation conditions of rough-terrain cranes.
ラフテレーンクレーンの設置条件

Maximum rated load	7t	25t	50t case(1)	50t case(2)
Boom length(m)	21.2	30.5	39.0	39.0
Boom angle(°)	60.6	81.4	80	80
Jib length(m)	2.8	7.9	9.0	14.5
Jib angle(°)	55.6	76.4	35	35
Wire length(m)	19.7	49.1	49.5	52.5
Hook height(m)	1.1	0.35	1.0	1.0
Total length (m)	43.7	87.5	97.5	106
Total length /wave length	0.14	0.28	0.31	0.34

と接地棒との間に接地線を接続した。この接地線に電流プローブを挿入して誘導電流を測定した。

この方法では、車体のインピーダンスに比較して、接地抵抗が十分に小さいことが必要なので、クレーンの車体及びアウトリガーフロート部分の静電容量を推定した。

一例として、つり上げ荷重50tのクレーンの場合について、複雑な形状の車体部分を単純な平板として静電容量(対地容量。以下同じ。)を推定した。車体底面のおおよその高さ0.75mと、底面を平板と仮定したときの面積24m²に基づく静電容量は280pFとなる。またアウトリガーフロート部分は、直径40cmの4枚の金属円板と地面間に厚さ30mm、比誘電率2.7のアクリル板が挿入されているとき、静電容量は400 pFとなる。

車体及びアウトリガーフロート部分の静電容量の合計は680pFとなり、954kHzでのリアクタンスは244となる。

電流プローブのインピーダンスは1以下であり、また、接地抵抗は実測によって55であったことから、本実験での接地線によるブームの基部における電

*2 四輪操舵の機構を持つホイールクレーンの一種で、不整地や比較的軟弱な地盤も走行可能。



Fig. 7 Setting of a rough-terrain crane.
ラフテレーンクレーンの設置状況

流測定は可能であると考えられる。ただし、アクリル板の挿入と接地線の接続によって、ブームに流れる電流が影響されることから、後述 (Fig. 12) のようにその影響が小さいことを確認した上で誘導電流の測定を行った。

3.2 実験結果及び検討

3.2.1 現場の電界強度

測定現場の電界強度をループアンテナ (HFH2-Z2) によって測定した結果をFig. 8 に示す。対象とする954kHzでの電界強度が118 dB μ V/m (= 0.79V/m) であり、他の中波放送の周波数 (593kHz, 694kHz, 810kHz, 1242kHz) での電界強度は694kHzでの92.5 dB μ V/mが最大である。954kHzでの電界強度に比較して他の中波放送波の電界強度は20dB以上小さく、1/10以下であるので、本測定では954kHzのみの考慮で十分であると考えられる。

3.2.2 フックの電圧

フックの電圧は高圧プローブ (入力インピーダンス: 500M Ω , 静電容量: 2 pF) によって測定した。

Fig. 9 にはつり上げ荷重50tクレーンをTable 1 の50t case の条件で設置した場合にフックに誘起された電圧の時間変化を示す。AM変調のために時間的に変動しており、フックのピーク値電圧は1065V_pに達

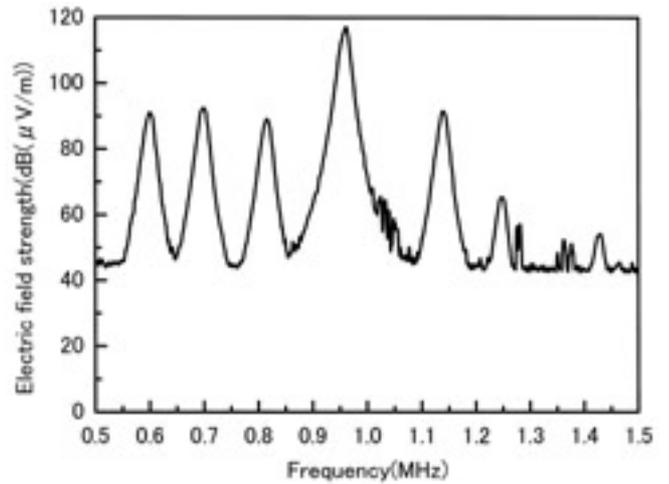


Fig. 8 Electric field strength at the experiment site.
実験の場所での電界強度

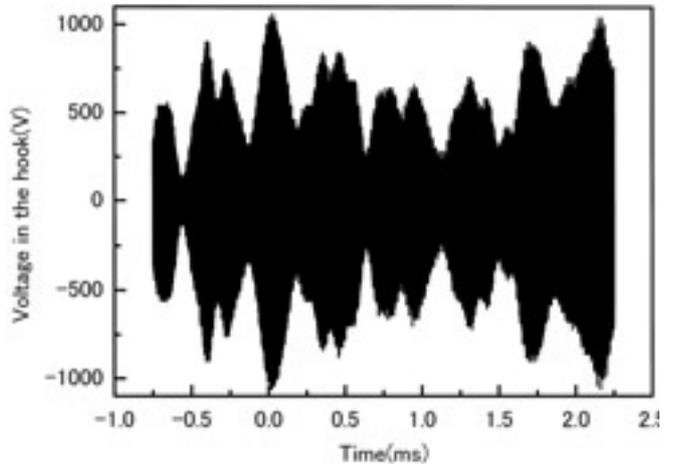


Fig. 9 Waveform of the voltage in the hook of the crane.
フックの電圧波形

している。

同様の測定によるTable 1 の各条件下でのフックのピーク値電圧をTable 2 に示す。つり上げ荷重7t, 25tクレーンのフックのピーク値電圧は各々40V_p, 75V_pであり、高周波の電圧であることを考慮するとフックへの接触による作業者の電撃はほとんど考えられないレベルであった。

作業者の電撃が問題となるフックのピーク値電圧が観測されたつり上げ荷重50tのクレーンについて、ブーム角度80°, ジブの長さ14.5m, フックの地上高1mに設定した条件下で、ジブ角度, ブーム長をTable 3のように変化させたときのフックのピーク値電圧を

Table 2 Peak voltage measured in the hook under the installation conditions shown in Table 1.
Table 1 の設置条件下でのフックのピーク値電圧

Maximum rated load	7t	25t	50t case(1)	50t case(2)
Peak voltage in the hook (Vp)	40	75	235	1065

Table 3 Installation conditions of the rough-terrain crane and the peak voltage in the hook.
ラフテレーンクレーンの設置条件とフックのピーク値電圧

Boom length(m)	Jib angle(°)	Total length (m)	Peak voltage in the hook (Vp)
39	35	106	1065
39	40	107	1038
39	50	109	1002
35	50	101	448
30	50	91	212
35	35	98	447
25	35	78	82

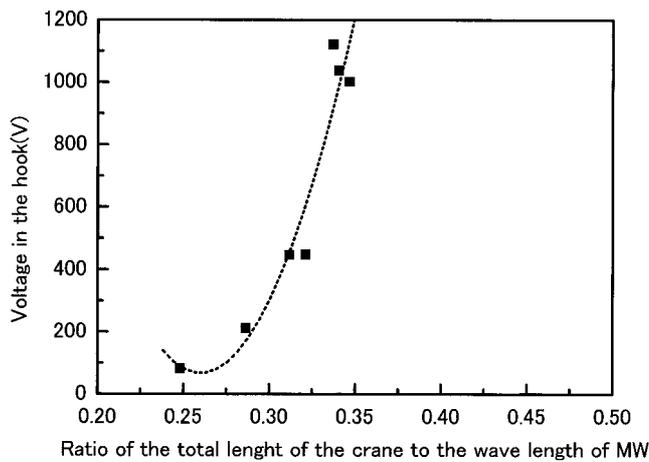


Fig. 10 Relation between the total crane length and peak voltage in the hook.
クレーンの全長とフックのピーク値電圧との関係

Fig. 10に示す。ブーム、ジブ、ワイヤを併せた長さが中波の波長 (314m) の0.34程度になると、フックのピーク値電圧は1000Vp以上となっている。

この条件下での指向性、利得を、モデル化したクレーンによって計算した。クレーンモデルは、ブーム長さ42m、ブーム角度80°、ジブ長さ14.5m、ジブ角度

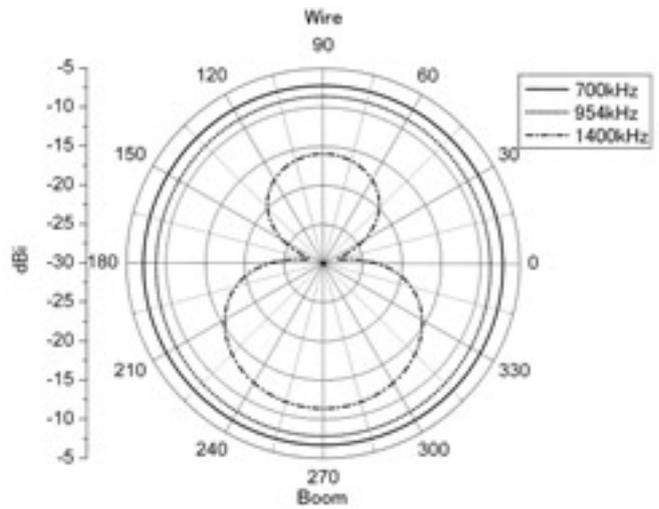


Fig. 11 Directivity of the rough-terrain crane model of 50t case(2)
50t case のラフテレーンクレーンモデルの指向性

35°、ワイヤの長さ48.68m、フックの地上高1mとした。断面は円形として、ブーム直径50cm、ジブ直径30cm、ワイヤ直径10mmとした。クレーンモデルの物性は導電率 $0.58 \times 10^7 S/m$ 、比透磁率1000とし、大地は導電率0.007S/m、比誘電率13とした。ブームの基部を給電点としてクレーンモデルを送信アンテナとしたときの仰角2度におけるクレーンモデルの指向性をFig. 11に示す。周波数が954kHzにおいては、方位に対する絶対利得の差は最大で0.96dBであり、ほとんど指向性が無い。

3.2.3 誘導電流

クレーンをTable 1の50t caseのように設定した

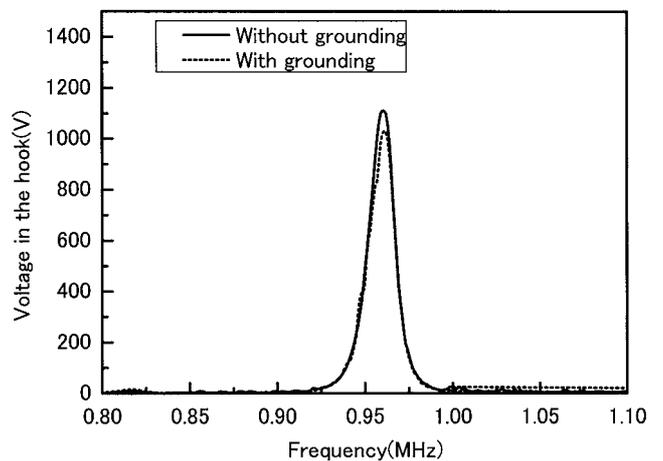


Fig. 12 Peak voltage in the hook with and without a grounding wire.
接地線の有無によるフックのピーク値電圧

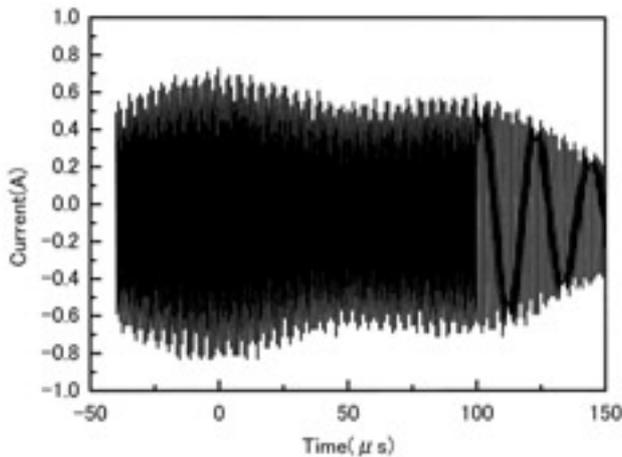


Fig. 13 Waveform of the current measured in the grounding wire.
接地線に誘導された電流波形

時の誘導電流を測定した。まず電流測定用接地線の有無によるフックのピーク値電圧の変化を測定した。その結果をFig.12に示す。

接地線がないときに比較して、接地線を接続した場合（アクリル板の挿入を含む。以下同じ）のフックピーク値電圧には約8%の減少があったが、接地線の有無によってフックの電圧が最大となる周波数は大きくは変動していないため、オーダ的には誘導電流の測定は可能であると考えられる。

Table 1 の50t case の場合について、接地線に流れる電流の時間変化をFig13に示す。AM変調のために時間的に電流が変動しているが、ピーク値電流は0.8Apであった。この電流値の妥当性をブーム周囲の磁界の測定値から検討した。磁界測定には直径6cmのシーデッドワイヤで作られた磁界プローブを使用した。磁界プローブはつり上げ荷重50tクレーンのブームに取り付け、地上からの高さを約8mとし、誘導電流による鎖交磁束が最大となるように固定した。954kHzにおけるピーク磁界強度は118.5dB ($\mu\text{A}/\text{m}$)_p (= 0.84A/m)であった。この磁界強度とブームの周囲長 (= 2.9m) の積からピーク値電流を求めると2.4Apとなる。電流プローブによる測定値0.8Apとは約1.6Apの差があるが、測定値が変動していること、また、近似的な計算値であることを考慮すれば、ほぼ近い値と推

Table 4 Peak current measured in the grounding wire.
接地線のピーク値電流

Maximum rated load		7t	25t	50t case(2)
Measured peak current (Ap)		0.03	0.075	0.8

定される。

電流プローブ及び磁界プローブの測定結果より、ブーム基部での電流は数アンペアと推定される。

Table 1 の条件下で、クレーンの車体と大地間に接続された接地線の電流の測定結果をTable 4 に示す。つり上げ荷重7t, 25tの設置条件におけるピーク値電流は、50tの設置条件のそれに比較して1/10以下であった。

4. フック電圧の低減対策

クレーンのフックに誘起される高電圧を低減する簡便な次の手法を実験的に検討した。

4.1 車体の静電容量を低減する方法

通常のクレーン作業時には、アウトリガーの地面へのめり込みに起因するクレーンの転倒防止を目的として、アウトリガーフロートと地面との間に、鉄板や鉄枠で補強された木製板などが挿入される。ここでは、Fig.14に示すように、アウトリガーフロートと木製板などとの間にアクリル板などの絶縁物を挿入して、クレーンの車体の静電容量を減少させる方法を採用した。

Fig.15には挿入されたアクリル板の厚みとフックに

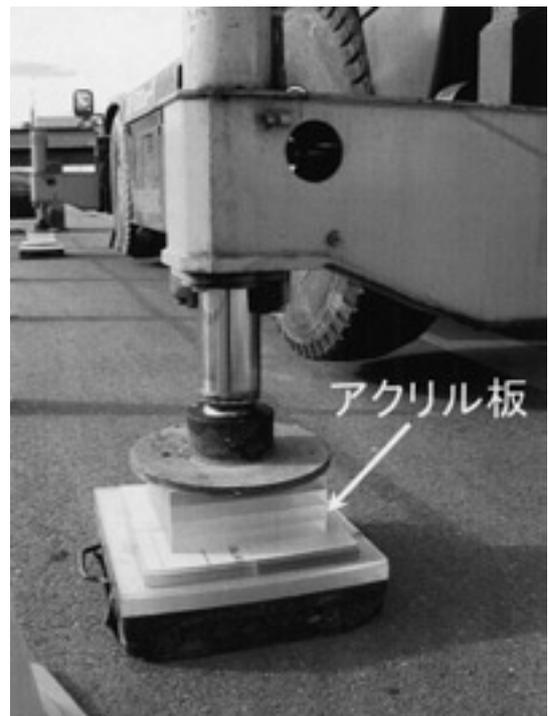


Fig. 14 Setting of a rough-terrain crane with an acrylic plate inserted under the outrigger float.
アウトリガーフロートの下にアクリル板が挿入された状況

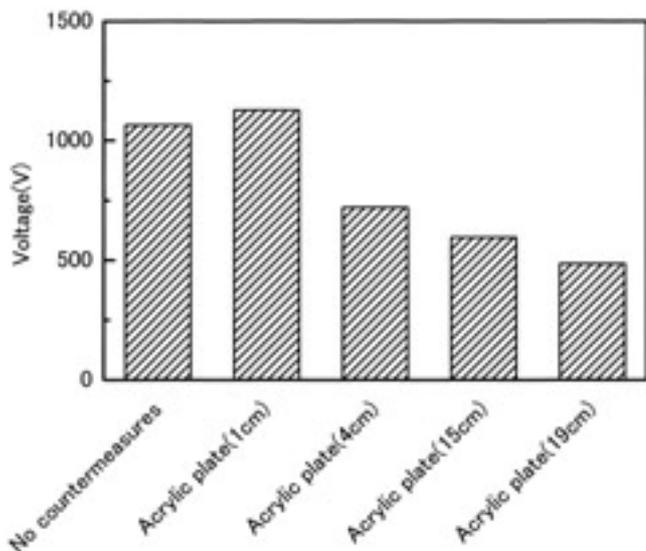


Fig. 15 Dependence of peak voltage in the hook on the thickness of the acrylic plate.
アクリル樹脂板の厚さとフックのピーク値電圧との関係

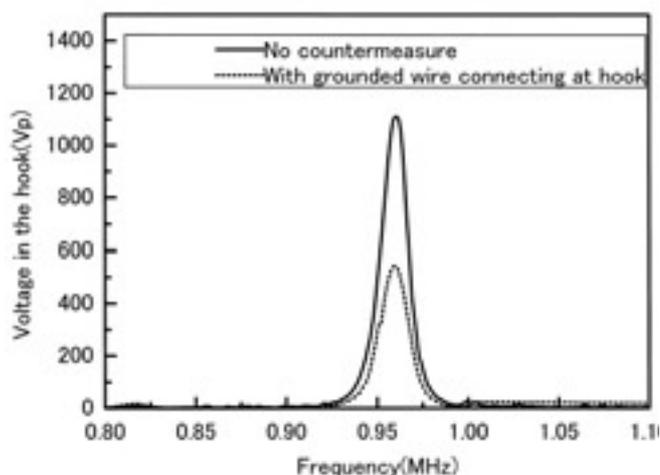


Fig. 16 Peak voltage in the hook with and without a grounding wire in the hook.
フックへの接地線の有無によるフックのピーク値電圧

誘起されるピーク値電圧との関係を示す。アクリル板の厚みが増加するとともに、フックのピーク値電圧も減少する傾向が示されている。アクリル板を挿入しない場合のフックのピーク値電圧に対して、19cmのアクリル板が使用されたときには、フックのピーク値電圧は、対策前の約46%に減少した。一方、アウトリガーフロートのピーク値電圧は未対策時が180Vpであるのに対し、厚さ15cmのアクリル板使用時には230Vpとなり、上昇する傾向であったが、その電圧は250Vp以

下で作業者に電撃を及ぼす危険性は低い。

以上のように、車体を大地から絶縁し、かつ静電容量を小さくし、共振周波数をずらす方法が有効である。

4.2 フックに平編み線を使用する方法

フックに接続された平編み線が地面に接触する接地効果によって、フックの電圧を低減する簡便な手法である。Fig.16に示すように、対策時のフックのピーク値電圧は、非対策時の約51%とほぼ半減した。

5. むすび

中波放送波に起因する大型クレーンの電磁波障害対策の資料を得るため、クレーンモデルを用いて数値計算、また、実機クレーンを用いた誘導電流、ブーム周囲磁界、フック電圧の測定及び電磁波障害対策の実験を行った。

本研究で得られた結果の概要は次の通りである。

1 V/mの様な電界強度の下に置かれたクレーンモデルを用いた数値計算によって、接地面を完全導体と仮定した場合には、ブーム、ジブ、ワイヤを加えた全長が中波の波長の1/4で共振状態となる。ほぼ共振状態におけるブームの基部周囲での磁界強度は0.18 (A/m) peakであり、ブーム基部での電流は最大で0.26Apであった。このとき、フックの電圧は約590Vpであった。

約0.79V/mの電界強度下におけるつり上げ荷重50tのクレーンを用いた実験によって、車体と大地間に流れるピーク値誘導電流は約0.8Ap、フックのピーク値電圧は約1065Vpとなった。このとき地上高約8mのブームでの磁界は約0.8 (A/m) peakであった。これらの結果より、ブーム基部での誘導電流値は数アンペア程度と推定される。

クレーンのアウトリガーフロートと地面間にアクリル板を挿入した結果、アクリル板を使用する前のフックのピーク値電圧である約1065Vpから500Vp以下に低減した。これは共振条件が変化したことによると考えられ、簡便かつ有効な方法となり得る。

フックに接地用の平編み線が地上に接触したとき、フックのピーク値電圧は約1065Vpから約550Vpに低減した。

謝辞

現場での実験に際し実験場所の提供を頂きました国土交通省岩淵出張所に深謝致します。

参考文献

- 1) 笠嶋善憲，高坂秀一：“ラジオ放送アンテナ近傍の大型クレーンにおける感電防止”，102巻2号，pp.110～114，電気学会論文誌B，1982.
- 2) 笠嶋善憲：“ラジオ放送アンテナ近傍の大型クレーンでの感電防止用パッシブ減衰装置の設計法”，111巻8号，pp.679～688，電気学会論文誌D，1991.

(平成15年1月6日受付)