

Research Reports of the National Institute
of Industrial Safety, NIIS-RR-2004 (2005)
UDC 537.8:341.226.5

中波によってラフテレーンクレーンに誘起される電磁界測定と対策の一検討*

富田 一**

Measurement and Countermeasures of Induced Electromagnetic Field on a Rough-terrain Crane due to Medium Frequency*

by Hajime TOMITA**

Abstract: The sum length of the boom, jib, and wire of a large-scale crane may reach about 1/4 of the medium frequency wavelength. Such cranes may be effective medium frequency receiving antennas. Thus, the induced voltage at the hook of a crane located near a medium frequency broadcasting station may become high, which may result in electric shock to workers.

To suppress hook voltage, a conductive wire is fixed along the boom of the crane and grounded *via* an inductor and a variable condenser, which change the resonance frequency. Alternatively, the height of the crane body may be changed to decrease its capacitance to alter the resonance characteristics. A feedback circuit to cancel the induced voltage at the hook has also been proposed.

Recently, guidelines from ICNIRP and the Ministry of Internal Affairs and Communications have been proposed to protect the human body against the bioeffects of electromagnetic fields. To provide information to workers involved in working with cranes and to increase our understanding of the conditions in electromagnetic environments in typical crane work, the electromagnetic field around the hook of a rough-terrain crane in a high electric field of medium frequency was measured. The experiments indicated a field of more than 800V/m in the vicinity of the hook. To mitigate this high electric field on the shop floor, a parallel resonance circuit was formed between the chassis of the crane and the ground to change the resonance characteristics, and the electric field in the vicinity of the hook decreased to 500V/m.

Keywords; Electromagnetic field, Rough-terrain crane, Medium frequency, Resonance circuit

* 平成16年11月21日,電気学会東京支部新潟支所研究発表会で一部発表した。
** 物理工学安全研究グループ Physical Engineering Safety Research Group

1. はじめに

クレーンのブームあるいはマストが数十mオーダーになると、ジブ、ワイヤを併せた長さが中波の波長の1/4程度となる場合がある。このとき、クレーンが中波放送送信所の近くにあると、クレーンが中波の良好な受信アンテナとなることから、フックに高電圧が誘起され、作業者に電撃災害が発生する可能性がある。そこでフックの高電圧低減を目的として、すでに次の方法が提案されている。すなわち実機クローラクレーンを用いてマストにアンテナ線を張り、これに直列接続されたインダクタンスとバリコンによってクレーンの共振周波数をシフトさせる方法¹⁾、クレーン車体部分の静電容量を変化させることによってクレーンの共振特性を変化させる方法²⁾、フック部に誘起された高電圧をキャンセルするためにフィードバック回路を付加する方法³⁾が提案されている。

近年では高電圧による電撃災害に加えて、電磁界の生体への影響が懸念されており、ICNIRPからのガイドライン⁴⁾、総務省からの電波防護指針⁵⁾が出されている。そこでクレーン作業に従事する作業員への情報提供、クレーン作業での典型的な電磁界暴露の現状把握を目的として、実機のラフテレーンクレーンを用いて、中波の強い電界強度環境下におけるフック周囲の電磁界強度を測定した。その結果、フック近傍では800V/mを超える電界強度が測定された。この電界を緩和するために、現場で実施可能で簡便な方法として、車体部分で並列共振回路を形成する手法を適用した結果500V/mに減少した。本論文ではこれらの結果等について報告する。

2. モデル実験

2.1 実験方法

モデル実験に用いた実機ラフテレーンクレーンの基本的な設置条件は、フックに1000V程度の高電圧が測定されたTable 1の条件とした。モデル実験では基本的な特性を把握するために、鉄製ワイヤ (1.6mmφ) を用いて、実機クレーンを簡略化し、長さのみを1/100としたFig. 1のモデル (以下、ワイヤモデルという)

による基礎実験を行った。ワイヤモデルの車体、ブーム、ジブ、吊りワイヤの各部の長さはそれぞれ3cm, 39cm, 14.5cm, 48.5cmであり、これらを併せた長さ (ここでは、「クレーンの全長」という) は105cmである。ワイヤモデルを銅板上に設置し、車体相当部の一端はN型コネクタに接続し、フック部に相当する開放端は銅板から1cmの高さに固定した。

フックに高電圧が誘起されるような電磁妨害はクレーンが受信する電波の波長と共振する場合であることから、対策としては、想定される共振周波数を変化させる方法についての実験のために、ブームの基部に並列共振回路を付加するFig. 2の方法を採用した。

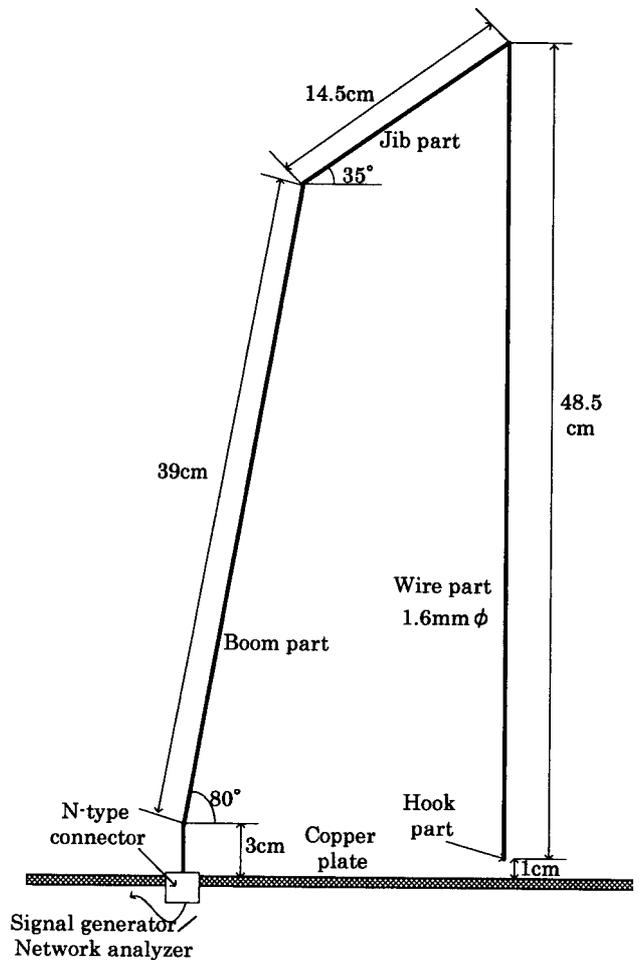


Fig. 1 Crane model made of steel wire. ワイヤ製クレーンモデル

Table 1 Installation conditions of a rough-terrain crane with a rated capacity of 50t. 定格荷重50tラフテレーンクレーンの設置条件

Height of boom base [m]	Boom length [m]	Boom angle [°]	Jib length [m]	Jib angle [°]	Wire length [m]	Hook height [m]
3	39	80	14.5	35	48.5	1

2.2 基礎実験の結果

1) 共振特性

Fig. 1 において、ネットワークアナライザ (MS4661A) をワイヤモデルに接続し、反射係数S11の測定による共振特性の測定結果をTable 2 に示す。共振周波数は73.84 MHz、インピーダンスは8 Ωであって、クレーンモデルの全長が印加信号の波長のほぼ1/4で共振している。

一方、ラフテレーンクレーンではブームは車体に接続されており、車体部分では静電容量が形成されることを考慮して、Fig. 2 に示すように、ブーム基部に8.2pFを直列に接続すると、付加した静電容量による容量性リアクタンスによって、共振周波数はクレーンモデルが誘導性リアクタンスとなる98.16MHzと高周波側に移動しており、インピーダンスは40 Ωであった (Table 2)。

2) 並列共振回路付加による特性

Table 2 の②の条件下で、並列共振回路の付加による共振特性の変化を調べるために、車体相当部に電流センサCT-2を接続して実験した。このときの共振周波数は電流センサの影響によってTable 3 の③のように92.84 MHzに移動している。電流センサを接続した条件下で、0.47 μHのインダクタンスをコンデンサと並列に接続した結果、共振周波数は53.22MHzと低くなり、92.84 MHzにおけるワイヤモデルのインピーダンスは4 kΩとなった (Table 3 の④)。

Table 3 の場合について、信号発生器より92.84 MHz、出力1mWをワイヤモデルに入力したとき

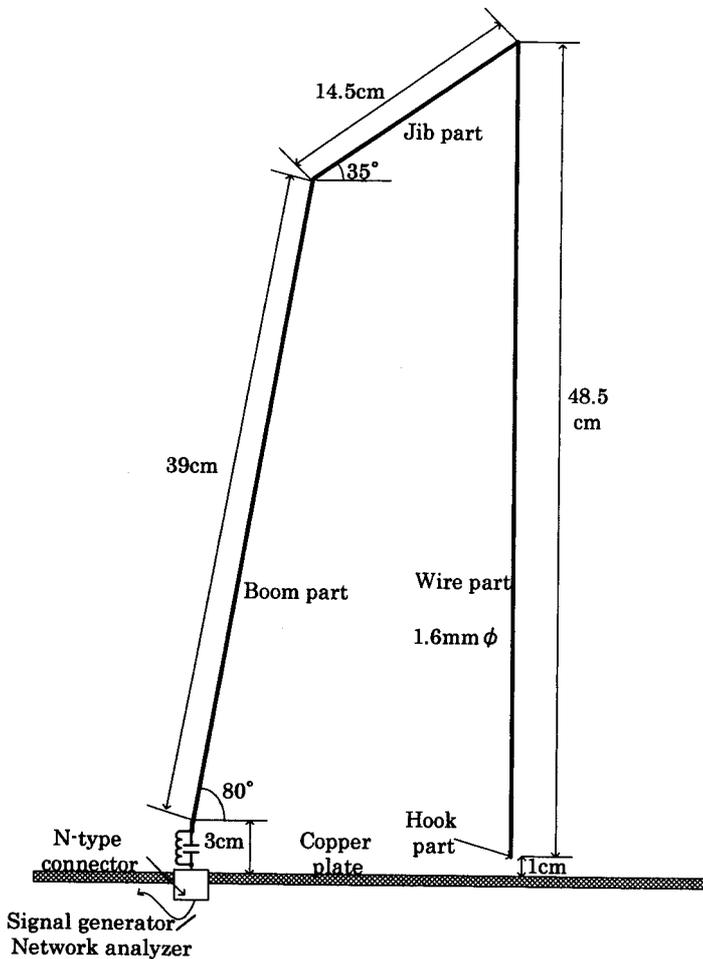


Fig. 2 Crane model made of steel wire with a parallel resonance circuit.
並列共振回路の付加されたワイヤ製クレーンモデル

Table 2 Resonance characteristics of the crane model made of steel wire.
ワイヤ製クレーンモデルの共振特性

No	Condition	Resonance frequency [MHz]	Impedance
①	Crane model made of steel wire	73.84	8Ω ∠ -1°
②	Crane model made of steel wire of which 8.2pF was added in series at the bodywork part	98.16	40Ω ∠ 13°

Table 3 Frequency characteristics of a crane model with addition of the parallel resonant circuit.
クレーンモデルへの共振回路付加による周波数特性

No	Condition	Resonance frequency [MHz]	Impedance
③	Crane model made of steel wire of which 8.2 pF was connected in series and a current sensor was inserted at the bodywork part	92.84	99Ω ∠ -2°
④	0.47 μH was connected in parallel with 8.2 pF in condition ③	53.22	4kΩ ∠ -24° at 92.84MHz

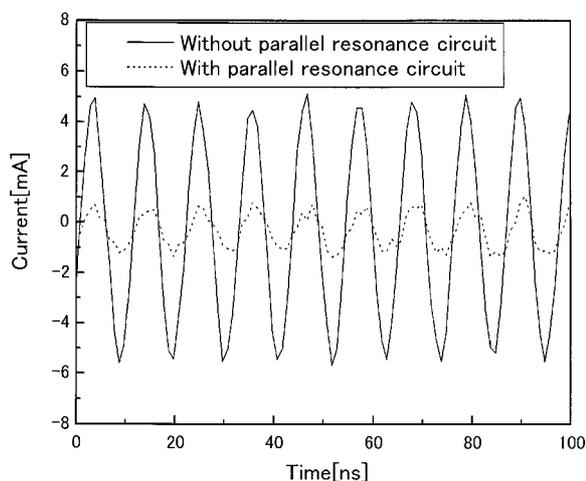


Fig. 3 Current waveforms at the base of the boom part with and without the resonance circuit.
共振回路の有無によるブーム基部での電流波形

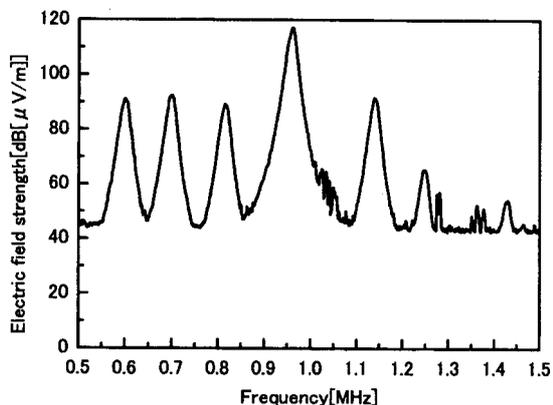


Fig. 4 Electric field strength distribution at the experimental site.
実験現場の電界強度分布

の電流波形をFig. 3に示す。③ではピーク値が5.6mA、並列共振回路を付加した④では1.04mAとなった。並列共振回路を付加することによって、電流のピーク値は付加前の0.186倍に減少している。また、③に比較して、並列共振回路付加によってフック部での電圧も減少し、フック周囲の電磁界も小さくなると考えられる。

3. 現場実験

3.1 実験の方法

3.1.1 実験現場

実機ラフテレーンクレーン（以下、クレーンという）

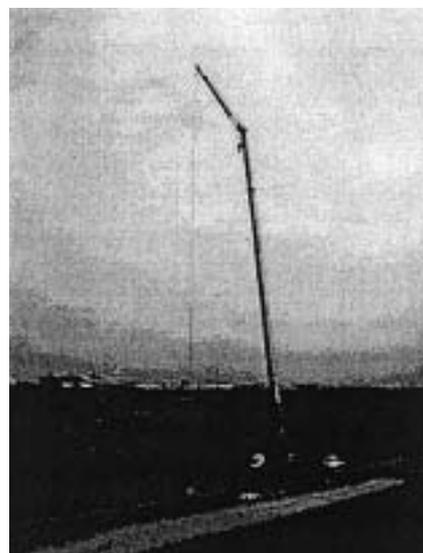


Fig. 5 Setting scene of the rough-terrain crane.
ラフテレーンクレーンの設置状況



Fig. 6 Reinforcing board.
板木

を設置した実験現場は、周波数954 kHz、出力100 kWの中波の放送送信所より約1.5 km程度離れた河川敷であり、Fig. 4に示すように対象となる中波の電界強度は118 dB [μV/m] すなわち約0.8 V/mであった。クレーン設置場所に近接する障害物は無く、ブーム、ジブ、ワイヤで形成される面は中波の到来方向とは約65°の角度をなしている。実際のクレーンの設置状況をFig. 5に示す。

3.1.2 実機クレーンの設置条件

クレーンの基本的な設置条件についてはTable 1と同様にした。ブーム長については主として最大長である39mとし、電界のブーム長依存性の測定時にはブー

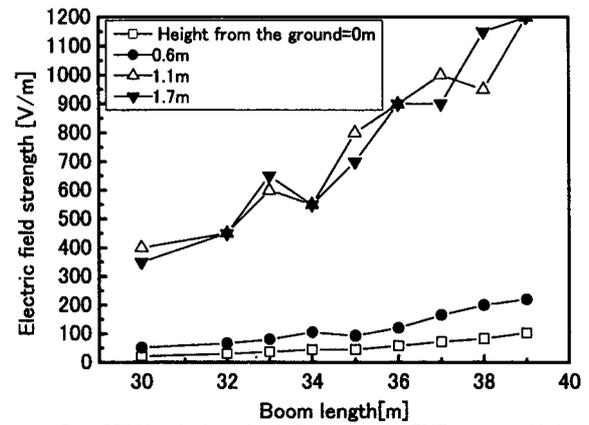
Table 4 Dependence of total capacitance of the crane body and inductance at resonance on crane height
クレーンの静電容量と共振時インダクタンスの車高依存性

Crane height [m]	0.5	0.6	0.7
Total capacitance of the crane body [pF]	1750	1680	1631
Inductance at resonance [μ H]	15.9	16.6	17.1

ム長を30~39mの範囲で変化させた。このときアウトリガフロート部には、めりこみ防止用に、鉄枠で固定された木製の板木（厚さ10cm）（Fig. 6）を大地との間に挿入した（通常作業状態であり、以下、「対策なし」という）。

また、モデル実験の結果を考慮して、共振条件を変えるために、クレーンの車体部分に静電容量を形成し、これと並列共振するインダクタンスを接続した（以下、「並列共振回路付加時」という）。静電容量形成には各アウトリガフロート（40 cm ϕ ）と板木間にアクリル板（厚さ10mm）を挿入した。インダクタンスの電気的な接続を確実にするために、アウトリガフロートとアクリル板間及びアクリル板と板木間にはそれぞれ厚さ2 mm, 1 mmのアルミニウム板を挿入した。車体部分での静電容量形成のためには、車体下部の地表に約2 m \times 10mの金網（1 mm ϕ , 辺の長さ10mmの六角形）を敷き、アウトリガフロート部の板木側のアルミニウム板と金網とは導線によって接続した。このときの静電容量を計算すると次のようになる。アウトリガフロート部については、アクリル板の比誘電率3.0, 厚さ10mm, アウトリガフロートの直径40 cmであるので、334 pFとなる。4個のアウトリガフロート部での静電容量の合計は1335 pFとなる。車体部分は、シャーシーに車軸, マフラーなどがあって複雑な形状をしている。ここでは車体下部を平板に単純化して考え、実機のクレーン作業時における車体の最下部は地上から約0.5mであったことから、車体の地上高を0.5, 0.6, 0.7mの平板と仮定して、車体とアウトリガフロート部とを併せた静電容量を求めた。954 kHzで共振するインダクタンス値との関係性を求めるとTable 4になる。

電磁界測定にはEMR-200（電界：type8（測定可能な電界強度の最大値:800 V/m）, 磁界:type12）を用い、最大瞬時値を測定した。



* Over 800 V/m is the value indicated on the EMF meter and is inaccurate

Fig. 7 Dependence of electric field under and above the hook on boom length.
フックの真下と真上の電界強度のブーム長依存性

Table 5 Relation between inductance and hook voltage.
インダクタンス値とフック電圧

Inductance [μ H]	Hook voltage [Vp-p]
15.3	1.20
16.9	1.31
17.8	1.34

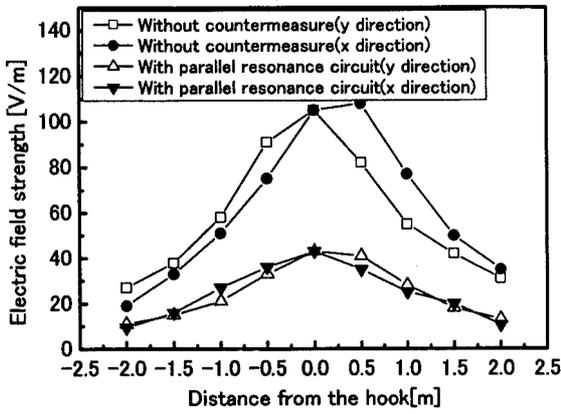
3.2 実験結果

3.2.1 電界強度

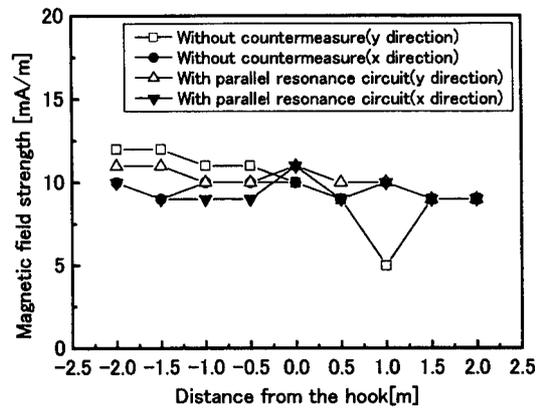
Table 1 の設置条件で、アウトリガフロートに板木を通常の作業時と同様に設置し、ブーム長を30~39mとした場合に、フック真下及びワイヤ部の電界強度をFig. 7に示す。ブームが長くなるとともにフック真下の電界強度も大きくなっている。ブーム長39mでは、地上高0.6mでの電界強度は220 V/mであり、このときのクレーンの全長と波長との比は0.33であった。

モデル実験では、ワイヤモデルの長さが入力信号の波長の1/4のときに共振となる結果であった。しかし、実機クレーンにおいては、ブーム, ジブ, ワイヤを併せた長さが中波の波長の1/4に近い0.28となるブーム長30mにおける地上高0.6mでの電界強度は52 V/mであった。これはTable 2の結果に示すように、車体が板木によって大地から絶縁され、車体部分に静電容量が形成されたために、共振周波数の波長がクレーン全長の1/4から変化したと考えられる。

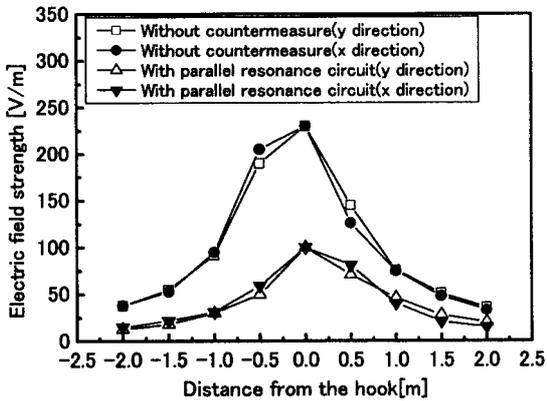
ブーム長39mの場合について、フック周囲の電界強



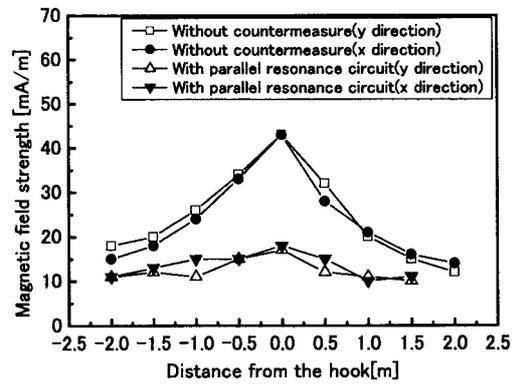
(a)Surface of earth
地表



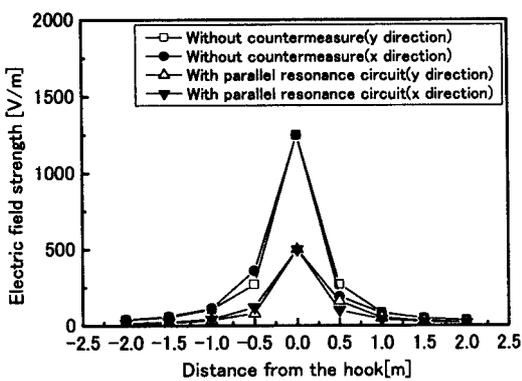
(a)Surface of earth
地表



(b)Height from the ground=0.6m.
地上高=0.6m

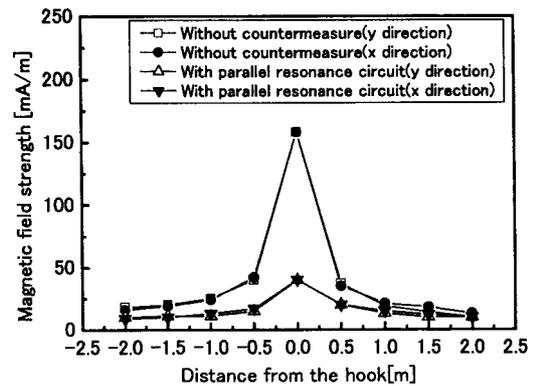


(b)Height from the ground=0.6m.
地上高=0.6m



*Over 800V/m is the value indicated on the EMF meter and is inaccurate.

(c)Height from the ground=1.2 m.
地上高=1.2m



(c)Height from the ground=1.2 m.
地上高=1.2m

Fig. 8 Electric field distribution around the hook.
フック周囲の電界強度分布

Fig. 9 Magnetic field distribution around the hook.
フック周囲の磁界強度分布

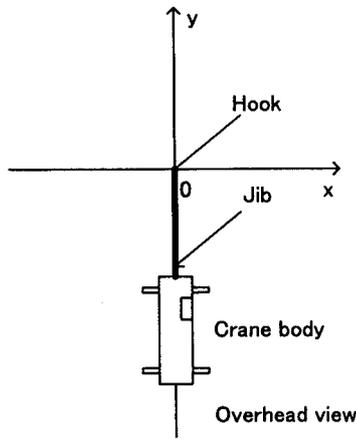


Fig. 10 Coordinate system at measurement of the electromagnetic field.
電磁界測定時の座標系

度分布を測定した。測定に先立ち、Table 5 に示すインダクタンスを接続し、フック部の電圧を高電圧プローブで2回測定した平均値は、Table 5 となる。インダクタンスが $15.3\mu\text{H}$ のときに最もフック部の電圧が小さかったことから、このときにフック周囲の電界も小さいと考えられる。以下、並列共振回路としては $15.3\mu\text{H}$ のみを使用した。そのときの電界強度測定結果をFig. 8 に示す。

Fig. 8 の測定においては便宜的に原点をフックとするxy座標を用い、y軸は車体の中心とワイヤを結ぶ線を地表に射影した線とし、車体から遠ざかる側を+としたFig.10に示す座標を用いた。

Fig. 8 によると対策なしではフック近傍である地上高1.2mでの電界強度は800 V/m以上であるのに対し、並列共振回路付加時には500 V/mとなった。地表及び地上高0.6mの結果からみて、フック周囲での電界強度は、並列共振回路付加によって対策なしの50%以下となり、クレーンの共振特性を変化させた効果が現れている。

3.2.2 磁界強度

(a) フック周囲

Fig. 8 に示す電界強度測定と同時に測定した磁界強度をFig. 9 に示す。地上高1.2mの場合、対策なしではフック近傍である地上高1.2mでの磁界強度は158mA/mであったが、並列共振回路付加時のフック近傍の磁界強度は40mA/mとなり、対策なしに比較して、約1/4に減少している。その他の場合も含めて全般的に磁界強度は、並列共振回路付加時には、対策なしに比較して50%程度小さくなっている。

(b) ブーム基部周囲

クレーンのブーム基部の部位をFig.11のように表し

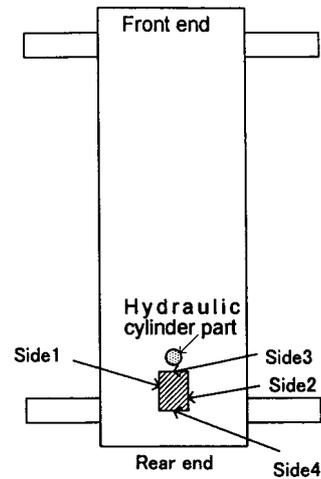


Fig. 11 Address term around the boom.
ブーム周囲の呼称

Table 6 Magnetic field strength and estimated induction current at the base of the boom.
ブーム基部周囲での磁界強度と推定誘導電流

	Length	Without counter-measure	With resonance circuit
Side 1 [mA/m]	0.8m	125	100
Side 2 [mA/m]	0.8m	290	150
Side 3 [mA/m]	0.6m	158	85
Side 4 [mA/m]	0.6m	90	120
Hydraulic cylinder part [mA/m]	0.3m ϕ	390	200
Estimated induction current at the base of boom [mA]		909	543

た場合に、ブーム周囲の磁界強度を測定した結果をTable 6 に示す。対策なしにおける磁界強度の最大値は390 mA/mであり、これらの磁界強度及び部位の長さに基づき、ブーム基部での誘導電流を推定すると909 mAとなった。一方、並列共振回路付加時では、ブーム基部周囲の磁界強度は最大で150 mA/mと対策前の38%に減少し、誘導電流の推定値も543 mAと対策前に比較して60%に減少している。

4. 共振特性の検討

Table 2 の結果のように、単純な導線での共振周波

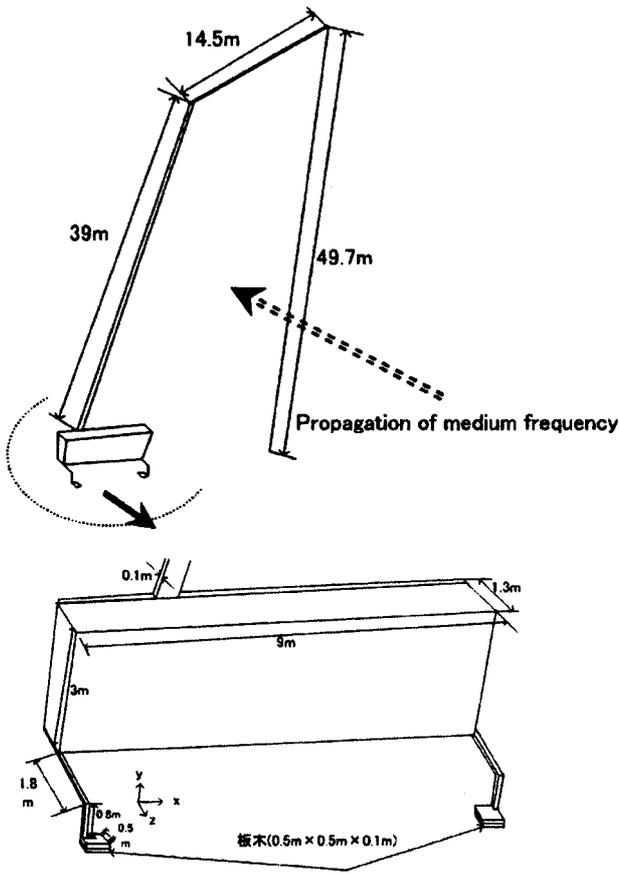


Fig. 12 Crane model for numerical calculation based on the finite element method (half model). 有限要素法による数値計算のためのクレーンモデル (1/2モデル)

Table 7 Physical properties for the numerical calculation model. 数値計算モデルの各物理定数

	Conductivity [S/m]	Relative permittivity	Relative permeability
Crane model	5.80E+06	1	1000
Reinforcing plate	1.00E-12	3	1
Soil	0.007	13	1
Air	0	1	1

数は、導線の長さが印加信号の波長の1/4のときとなるが、実機ラフテレーンクレーンにおいては、車体部分の静電容量によってクレーンの共振特性が変化している。すなわち、クレーン自体が誘導性リアクタンスとなるとときに共振が発生し、このときにはクレーンの

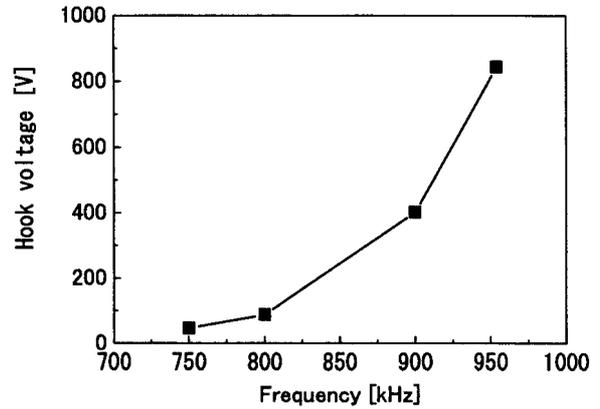


Fig. 13 Relationship between medium frequency irradiation of the crane model and hook voltage. クレーンモデルに照射される中波の周波数とフック電圧との関係

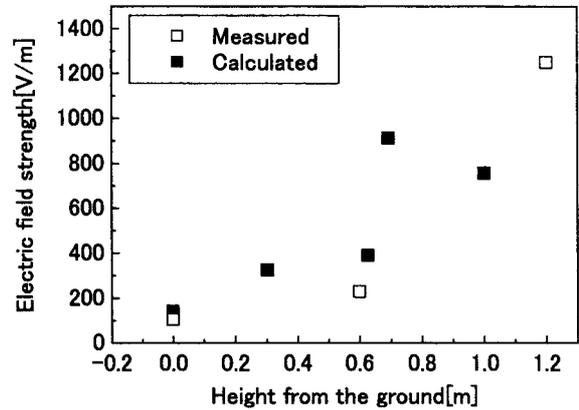


Fig. 14 Electric field distribution beneath and above the hook. フックの真下と真上の電界強度分布

全長は共振する波長の1/4よりも長くなる。

実機クレーンでの共振特性の確認のために、Fig. 12に示すクレーンモデル (クレーンの中心で分割した1/2モデル) を用いて J MAG-Worksの電磁波周波数解析ソフトによって数値計算を行った。同モデルのアウトリガと反対側の側面は側面の奥側と対称であると仮定し、磁壁境界条件を用いている。大地及びクレーンの導電率、誘電率、透磁率をTable 7に示す。クレーンモデルは本研究で用いたラフテレーンクレーンを基に簡易化している。ブーム、ジブ、ワイヤの長さそれぞれ39m, 14.5m, 49.7mであり、フック部は地上より1mの高さにある。ブーム、ジブ、ワイヤの厚さはいずれも0.1m、ブームの幅は0.5m一定としている。ジブのブーム側の幅は0.35mであってワイヤに近づくにしたがって狭くなり、ワイヤとの接続部では0.2mとな

っている。ワイヤは断面が0.1mの正方形形状で一様としている。車体は幅1.3m、長さ9mで高さを3mとした。車体の底部は地上高1mとし、板木は厚さ0.1mで一辺が0.5mの方形とした。このときクレーンで形成される面に対して垂直方向から電界強度約0.7V/mで垂直偏波の平面波を照射した場合を計算した。

Fig. 13はフック部の電圧の周波数依存性であり、平面波の周波数が954kHzでは844Vとオーダ的には測定値と同程度となっている。また、全長が平面波波長のほぼ1/4となる750kHzでは46Vであって、車体部分に形成された静電容量が共振特性に影響して、クレーン自体の共振周波数より高くなっていることがわかる。

954kHzでのフック真下の電界強度の計算結果を**Fig. 14**に示す。測定値と同様の結果となっており、現場での現象が数値計算からも裏付けられた。なお、計算値と測定値とが異なった値となった原因としては、現場実験（約0.8V/m）と数値計算（約0.7V/m）でのクレーン設置場所での電界強度の相違、車体の地表からの高さの相違、計算モデルにおけるフック周囲の要素分割が粗い点などが考えられる。

5. むすび

中波によってラフテレーンクレーンに誘起される電磁界特性の解明及び軽減、またクレーン作業員へのデータ提供を目的に、クレーンモデルによる基礎実験、実機による電磁界測定、及び数値計算を行い次の結果を得た。

1) 中波による電磁妨害について、実機クレーンの共振周波数は車体の設置状況に依存する。今回のラフテレーンクレーンのように、車体と大地間に静電容量が形成されると、クレーン自体が誘導性リアクタンスとなる場合に共振し、照射される中波の1/4波長よりもクレーンの全長が長い場合に共振

する。

- 2) 今回現場実験を実施したような電磁環境下では、フック近傍の電界強度の瞬時値は610V/m（中波である954kHzにおけるICNIRPでの職業人を対象とした6分間の暴露平均限度値に相等）を超える800V/m（瞬時値）以上であったが、磁界強度は0.158A/m（瞬時値）と限度値である1.68A/mの1/10程度であった。したがって、フック近傍で常時作業する場合には作業時間の管理などが必要となる可能性がある。
- 3) 電磁妨害軽減のためにクレーンの車体に並列共振回路を付加することにより、フック周囲の電磁界、フック電圧、マスト基部での磁界を、対策前の50～63%程度にすることが可能であった。

参考文献

- 1) 笠島善憲, 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, 電気学会論文誌B, 102巻2号, pp.110~114 (1982).
- 2) 富田 一: 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, NIIS-RR-2002 (2003), pp.73~81 (2003).
- 3) Y. Kasashima: Attenuator using antiphase voltage to reduce high voltage induced in crane by radio wave, IEEE International Symp. on EMC, pp.318~322 (1987).
- 4) Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic field (up to 300GHz), ICNIRP (1998.4).
- 5) 諮問第89号: 電波防護指針 (1997.4).

(平成17年1月11日受理)