

# 近傍空間磁界可視化システムの計測精度の検証

鈴木秀斗\*, 松本拓朗, 大村一郎 (九州工業大学)

## Verification of Measurement Accuracy of Near Magnetic Field 3D Imaging System

Shuto Suzuki\*, Takuro Matsumoto, Ichiro Omura(Kyushu Institute of Technology)

In order to develop a near magnetic field 3D imaging system, measurement accuracy of the system is verified in this paper. The measurement accuracy of the proposed system is clarified. Moreover, the distance from magnetic field source and the frequency dependency of the magnetic field strength distribution are examined.

**キーワード：**近傍空間磁界可視化システム, 計測精度, 磁界強度, ノイズ計測, 相互インダクタンス  
(Near magnetic field 3D imaging system, Measurement accuracy, Magnetic field strength, Noise measurement, Mutual inductance)

### 1. はじめに

パワーエレクトロニクス機器は高速スイッチング動作をするため、高周波の電磁ノイズ(放射ノイズ)を発生する。機器から放射されたノイズは、他の電子機器の誤動作や通信障害などのノイズ障害を引き起こす危険性がある。ノイズ障害を誘発しないために、機器は設計段階からのノイズ対策が施されている<sup>[1]</sup>。ノイズを事前に予測する設計手法は確立されていないため、現状の開発では試行錯誤による事後的なノイズ対策が中心となり、開発期間の長期化、コストの増大が問題となっている<sup>[2]</sup>。機器近傍の磁界を計測することで、ノイズの発生源が特定でき、ノイズ対策を効率的に進めることができる。

本稿では、機器が放射するノイズの磁界強度を機器近傍で計測する近傍空間磁界可視化システムを提案し、その計測精度を検証する。検証手法として、ノイズ発生源と本システムのモデル化により、理論値を算出し、計測精度の検証を行う。また、磁界発生源からの距離や周波数の影響についても併せて検討する。

### 2. 近傍空間磁界可視化システムの概要

近傍空間磁界可視化システムの構成を図 1 に示す。本システムは制御用 PC、センサ位置決定用三軸ステージロボット、ロボットコントローラ、スペクトラムアナライザ、ループコイルセンサから構成される。本システムは計測用プログラム開発環境である LabVIEW によって制御する。センサの位置決定を三軸ステージロボットにより行うこと

で位置精度 $\pm 1[\text{mm}]$ の自動計測が可能となる。計測空間内(最大横 800×奥行 500×高さ 300[mm])で、磁界強度の計測をスペクトラムアナライザによって行い、周波数範囲は 100kHz~3GHz の間で任意に設定できる。

近傍空間磁界可視化システムにおけるノイズ計測原理は次の通りである。

ループコイルセンサがノイズによる磁界変化をとらえると、電磁誘導の法則にしたがってループコイルセンサに起電力が発生する。生じた起電力をスペクトラムアナライザで解析し、ノイズ強度(磁界強度)[dBm]を計測する。計測された磁界強度は磁界強度分布作成プログラムにより空間と周波数ごとに磁界強度分布を可視化する。

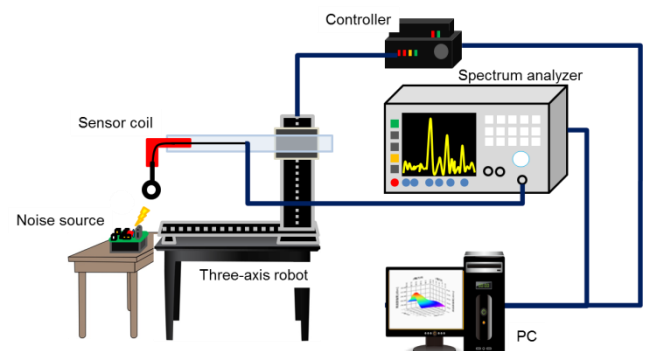


図1 近傍空間磁界可視化システムの構成

Fig.1. Structure of near magnetic field 3D imaging system

### 3. 計測精度の検証手法

#### 〈3・1〉 磁界強度(理論値)の算出方法

近傍空間磁界可視化システムの計測値と比較するため、磁界強度の理論値を算出する。計測対象用に磁界発生源を作製することで、ノイズ発生部位と周波数を特定でき、計測対象と近傍空間磁界可視化システムのモデル化が可能となる。磁界発生源と近傍空間磁界可視化システムは図 2 に示す簡単な相互インダクタンスモデルで等価的に表すことができる。等価モデルよりループコイルセンサに生じる起電力( $I_{2e} \times V_{2e}$ )[mW]を算出できる。

2つの円形コイルの相互インダクタンスは以下に示すノイマンの公式を用いることで算出できる。

$$M = \frac{\mu}{4\pi} \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{1}{r} d\mathbf{l}_1 \cdot d\mathbf{l}_2 \quad \dots\dots\dots(1)$$

(i). 磁界発生源

出力電圧 $V_{1e}$ は

$$V_{1e} = (j\omega L_1 + R_1)I_{1e} + j\omega M I_{2e} \quad \dots\dots\dots(2)$$

と表される。磁界発生源側に流れる電流に比べ、近傍磁界可視化システムに流れる電流は非常に小さいため、 $I_{1e} \gg I_{2e}$ より

$$V_{1e} = (j\omega L_1 + R_1)I_{1e} \quad \dots\dots\dots(3)$$

と表す。ここで、交流電圧  $V_{1e}$  はファンクションジェネレータにより出力し、電圧測定用に  $300\Omega$  の抵抗  $R_1$  を接続している。

(ii). 近傍空間磁界可視化システム

電磁誘導の法則により生じる電圧 $V_{2e}$ は

$$V_{2e} = j\omega M I_{1e} + j\omega L_2 I_{2e} \quad \dots\dots\dots(4)$$

と表される。 $V_{2e}$ は $R_2$ の両端電圧であるため

$$V_{2e} = R_2 I_{2e} \quad \dots\dots\dots(5)$$

と表される。

ここで、 $R_2=50\Omega$ はスペクトラムアナライザの計測用入力端子のインピーダンスである。

以上より、センサコイルに生じる起電力( $I_{2e} \times V_{2e}$ )[mW]を算出できる。求めた起電力は次式により磁界強度  $P$ [dBm]に換算される。

$$P[\text{dBm}] = 10 \log_{10}(I_{2e} \times V_{2e}) \quad \dots\dots\dots(6)$$

以上のように、磁界発生源から放射される磁界の磁界強度が算出でき、計測値との比較が可能となる。

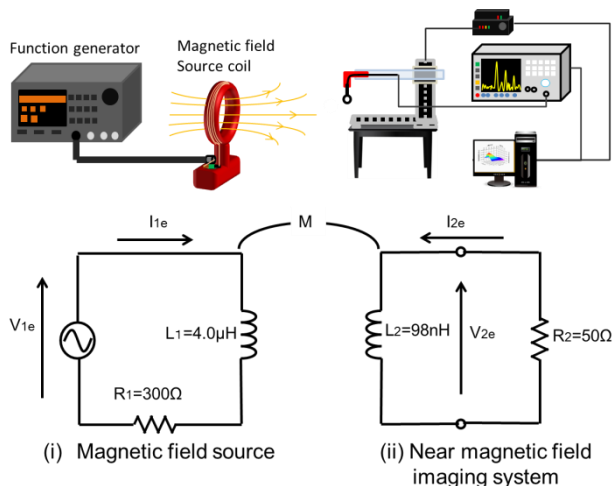


図 2 磁界発生源と近傍空間磁界可視化システムのモ

デル化

Fig.2. Equivalent model of Magnetic field source and near magnetic field imaging system

### 〈3・2〉 近傍磁界計測方法の概要

磁界発生源から放射された近傍磁界の計測方法は次の通りである。

図 3 に示すように磁界発生源を固定し、ループコイルセンサの移動方向は横方向を  $X$ [cm]、奥方向を  $Y$ [cm]とする。磁界発生源とループコイルセンサを近接させた状態( $Y=1$ )から各中心軸を合わせた状態( $X=0$ )を基準点[ $X=0, Y=1$ (cm)]とする。磁界強度の計測はループコイルセンサを  $1\text{cm}$  移動させるごとに行う。

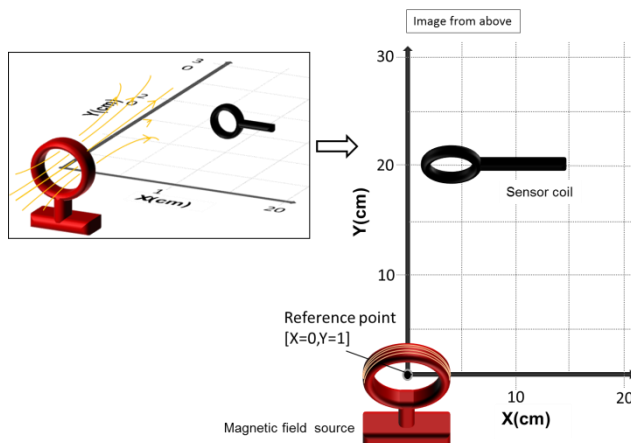


図 3 計測方法

Fig.3.Measurement method

## 4. 計測精度の検証

### 〈4・1〉 理論値の妥当性の確認

三軸ステージロボットの金属ステージの影響を少なくするため、磁界発生源を金属ステージから遠ざけた位置に固定する。磁界発生源であるファンクションジェネレータから  $5V_{p-p}$ 、 $10\text{MHz}$  の正弦波が出力され、図 4 に示すようにループコイルセンサを基準点[ $X=0, Y=1$ ]から  $Y$  方向へ移動させながら磁界強度を計測する。同一条件での理論値を算出し、比較したグラフを図 5 に示す。ただし、計算に用いる磁界発生源コイルとループコイルセンサ(ETS-LINDGREN 社製)の仕様は表 1 に示すとおりである。

理論値と計測値に良好な一致がみられることから、理論計算は妥当であるといえる。ループコイルセンサが磁界発生源から離れるに従い、磁界強度が低くなっている。磁界強度が $-80[\text{dBm}]$ 以下では、外部ノイズの影響を受けるため、理論値との間に誤差が生じている。

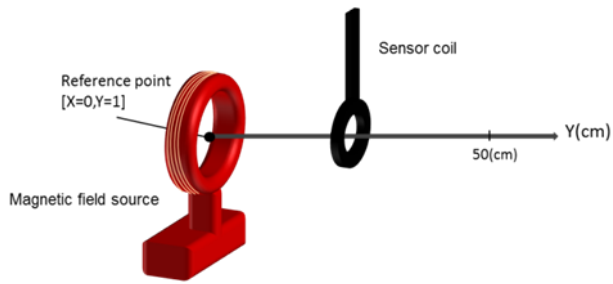


図 4 中心軸上計測の概観[X=0, Y=1~50(cm)]

Fig.4. Schematic of measurement along central axis

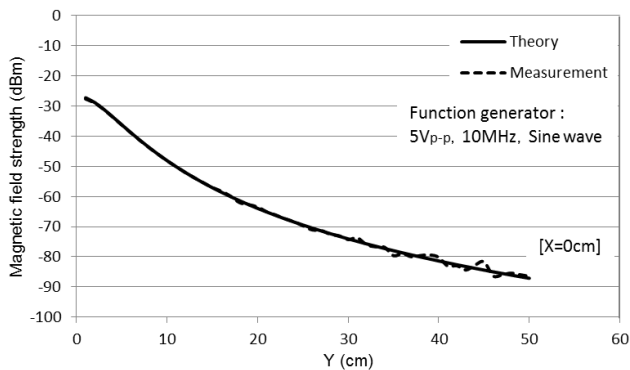


図 5 中心軸上磁界強度比較[X=0,Y=1~50(cm)]

Fig.5. Magnetic field strength comparison at central axis

表 1 磁界発生源コイルとループコイルセンサの仕様  
Table.1.Specifications of magnetic field source coil and loop coil sensor

	直径	巻き数	インダクタンス
(i)磁界発生源コイル	10cm	4 回	$L_1=4.0\mu\text{H}$
(ii)ループコイルセンサ	3cm	1 回	$L_2=98\text{nH}$

( $L_1$ 、 $L_2$ はインピーダンスアナライザにより計測)

#### 〈4・2〉金属による計測精度への影響

次に三軸ステージロボットの金属ステージによる影響について検証する。図 6 に示すように金属ステージ上に磁界発生源を固定する。磁界発生源であるファンクションジェネレータは 5Vp-p、10MHz の正弦波を出力する。ループコイルセンサを基準点[X=0,Y=1(cm)]から Y 方向へ移動させながら磁界強度を計測した結果と理論値との比較を図 7 に示す。

金属ステージの影響により理論値に比べ計測値が小さくなったことが確認できる。

以上より、機器から放射される近傍ノイズを計測する際は、金属による影響を受けないよう、機器を金属ステージから可能な限り離れた位置で計測する必要がある。

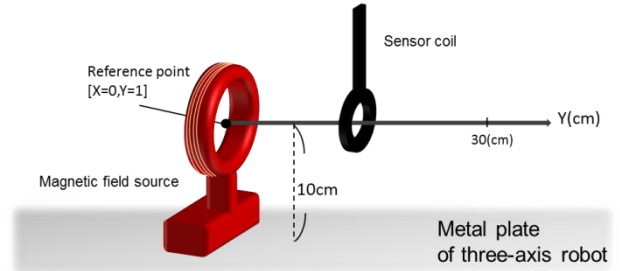


図 6 金属ステージ上計測の概観[X=0, Y=1~30(cm)]

Fig.6.Schematic view of measurement on metal plate

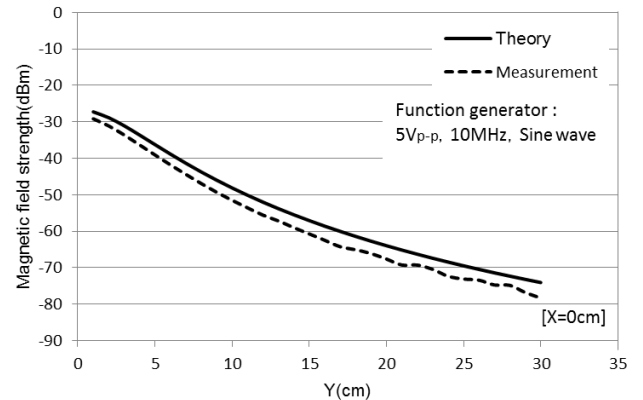


図 7 金属ステージ上磁界強度比較[X=0, Y=1~30(cm)]

Fig.7. Magnetic field strength comparison near metal plate

#### 〈4・3〉磁界強度分布の比較

磁界発生源から放射された磁界ノイズの磁界強度分布を可視化することで、ノイズの発生源を特定する。基準点[X=0, Y=1(cm)]から X=20cm, Y=30cm の平面(20×30[cm<sup>2</sup>])の磁界強度の計測結果及び理論計算結果を図 8 に示す。ここで、磁界発生源側ファンクションジェネレータの設定は 10MHz、5Vp-p、正弦波とする。

理論値により表示した磁界強度分布と同様の結果が計測でも再現できた。理論と計測結果両方に現れた窪み(磁界強度が規則的に小さくなっている部分)は、ループコイルセンサを貫く磁束の向きが互いに逆向きになるため、磁束が相殺され、局所的に起電力が小さくなるためである。

図 8 に示す磁界強度分布において①X=5cm、②X=10cm、③X=20cm における数値データをグラフ化した結果を図 9 に示す。

磁界発生源近傍である①の場合が理論値との誤差が最も小さくなることから計測精度が高い。一方、磁界発生源から一番遠い③の場合が理論値との誤差も大きく計測精度は低くなる。また③において、磁界強度が-80[dBm]以下では外部ノイズの影響を受けていることを確認できた。

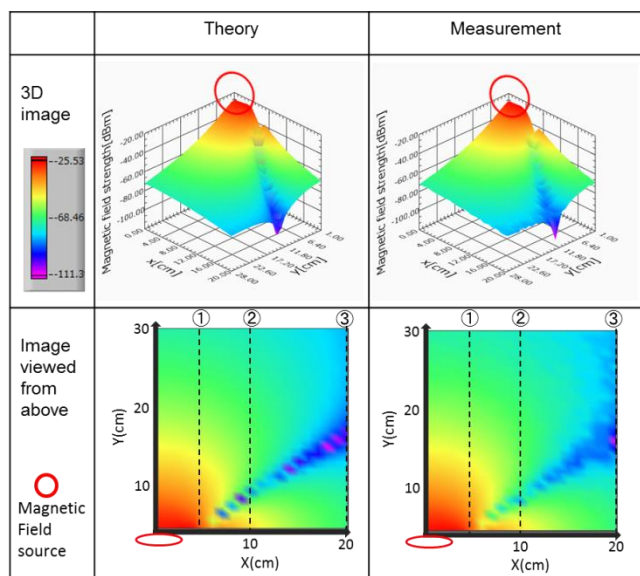


図 8 3D 磁界強度分布

Fig.8. 3D magnetic field strength distribution

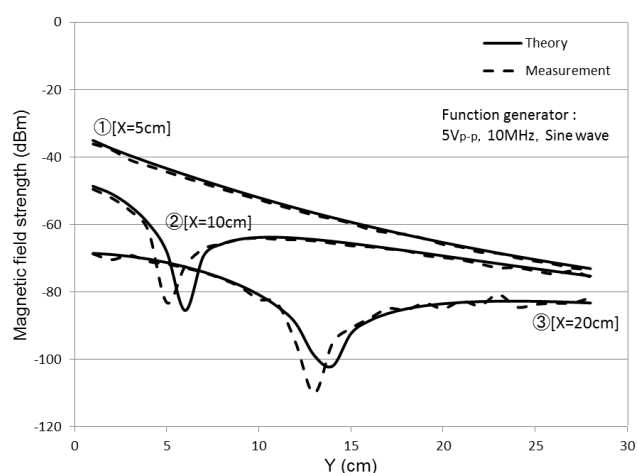


図 9 磁界強度分布内の磁界強度比較

Fig.9. Comparison of magnetic field strength

#### 〈4・4〉周波数特性

パワーエレクトロニクス機器から発生するノイズの周波数はさまざまであるため、近傍空間磁界可視化システムの周波数依存性を検証する。ループコイルセンサの位置を①基準点 $[X=0, Y=1(\text{cm})]$ と、② $[X=10, Y=10(\text{cm})]$ 2 通りの場合に固定した。磁界発生源の周波数を  $1\text{kHz}\sim 30\text{MHz}$  まで変化させ、各周波数の磁界強度を計測する。理論値と計測値の周波数依存性を図 10 に示す。ここで、磁界発生源側ファンクションジェネレータの出力は、 $20\text{V}_{\text{p-p}}$  の正弦波とする。

$10\text{MHz}$  以上の周波数領域で磁界強度が一定値に収束し、計測精度も向上している。磁界発生源近傍である①の場合では、 $10\text{kHz}$  以下の領域で外部の影響により理論値と計測値の誤差が大きくなり、磁界発生源から遠い②の場合では、 $100\text{kHz}$  以下の領域で外部の影響が大きくなることが確認できる。以上より、本システムは高い周波数領域で高い計

測精度を持ち、磁界発生源に近いほど広い周波数帯域持つことが分かる。

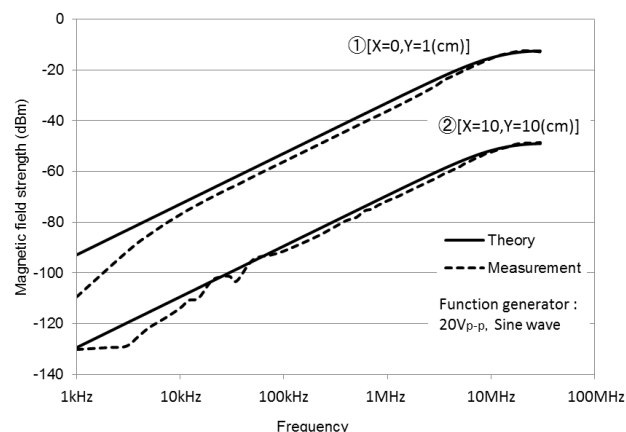


図 10 磁界強度の周波数依存性

Fig.10. Frequency dependency of magnetic field strength

#### 5. まとめ

パワーエレクトロニクス機器が放射するノイズの磁界強度を機器近傍で計測する近傍空間磁界可視化システムを提案し、その計測精度を検証した。システムの等価モデルによる理論解析と実測の比較により提案システムの計測精度が確認できた。また、磁界発生源からの距離及び周波数への依存性についても併せて検討した。その結果、提案システムは高い周波数領域で高い計測精度を持ち、磁界発生源に近いほど広い周波数帯域を持つことが明らかになった。

#### 文 献

- [1] Yang Yinghua, Gao Honglin, Wang Xinhua, Tnag Jinfei : "Study on Soft Switching Technology to Reduce Electromagnetic Interface of PWM Inverter", Energy Procedia Vol.17, pp.384-390 (2012)
  - [2] Tomoya Maekawa, Koichi Ogawa : "A Method of Estimating the Intra-EMC Problem Using the Weighted Magnetic Field Correlation Considering Noise Source Polarization", IEICE, Vol.J96-B, No.4, pp.398-409(2013)
- 前川 智哉, 小川晃一 : 「ノイズ源偏波を考慮した重み付け磁界相関を用いたイントラ EMC 評価手法」電子情報通信学会論文集, Vol.J96-B, No.4 pp.398-409 (2013)