

プリント基板上の抵抗素子近傍の磁界分布計測

Measurement of magnetic field distribution

near resistor element on the PCB

伊藤 彩子, 春日 貴志, 井上 浩

Ayako Ito, Takashi Kasuga, Hiroshi Inoue

秋田大学

Akita University

キーワード: 磁界分布計測(measurement of magnetic field distribution), 抵抗(resistor), 入力インピーダンス(input impedance), プリント基板(printed circuit board)

連絡先: 〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学 工学資源学部 電気電子工学科 井上研究室
伊藤彩子, : 018-889-2492, **E-mail:** ayako@venus.ee.akita-u.ac.jp

1. はじめに

近年, 電子機器の高周波化・小型化に伴い, 電子機器内のプリント基板(Printed Circuit Board: PCB)の高速伝送化・小型化が進んでいる. 高周波領域での線路や電源, グランド面など基板構造からの不要放射についての研究が数多く行われている^{1,2,3}. しかし, PCB に接続される素子からの電磁放射に関する研究はあまりない.

本研究では, 抵抗素子からの電磁放射について解明することを目的としている. 抵抗素子には様々な種類があるが, 近年では温度特性に優れた超精密抵抗も開発されている. 本報告では, 超精密抵抗を含む 5 種類の抵抗を 50 系の伝送線路の終端抵抗として用い, 抵抗素子と線路からの電磁放射について検討するため, 線路のインピーダンス特性と線路と抵抗上の近傍磁界分布について実験した.

2. 抵抗および基板の周波数特性

2-1 抵抗のインピーダンス周波数特性

計測に用いた 5 種類の抵抗素子を図 1 に示す. (a)は金属被膜抵抗 51 (アルエスコンポーネンツ製), (b)はチップ抵抗 51 (市販品), (c)は超精密チップ抵抗器(ワイヤーボンド形)50 (アルファ・エレクトロニクス株式会社製), (d)は超精密抵抗器(モールド形)50 (アルファ・エレクトロニクス株式会社製), (e)は超精密抵抗器(ハーメチック形)50 (アルファ・エレクトロニクス株式会社製)である. (c), (d), (e)の超精密抵抗は温度に対して非常に特性が良く, 数 μm の金属箔を用いた物である. 各抵抗の寸法を表 1 に示す.

これら抵抗素子の高周波領域でのインダクタンス成分を調べるために, インピーダンスの周波数特性を測定した. 測定系を図 2 に示す. 抵抗のインピーダンス周波数特性は SPRING CLIP FIXTURE(16092A)を用いて RF インピーダンス

ノマテリアルアナライザ(HP4291A)により測定した。1MHzから1.8GHzまでのインピーダンス $|Z_L|$ の周波数特性を図3に示す。高周波で容量成分の影響が小さいと考え、全てインダクタンス成分としたときの結果は図4である。



(a) 金属被膜抵抗 (b) チップ抵抗
(c) 超精密チップ抵抗器 (ワイヤーボンド形) (d), (e)の写
真は寝かせた
状態である。
(d) 超精密抵抗器 (e) 超精密抵抗器
(モールド形) (ハーメチック形)

図1 抵抗試料の写真

表1 抵抗の寸法 [mm]

	幅 w_r	長さ l_r	高さ h_r
(a)	2	6	2
(b)	1.2	2	0.5
(c)	1.6	2.2	0.5
(d)	2.3	8	8
(e)	4.5	11.2	10.7

インダクタンス成分はワイヤ部分や抵抗内部から生じると考えられる。(a),(d),(e)の抵抗はワイヤ線があり,(c)の抵抗はボンディングワイヤによって接続される。それに対し,(b)の抵抗はワイヤを介さずに直接接続できるので、インダクタンス

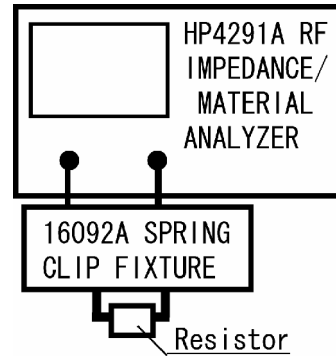


図2 抵抗の周波数特性の測定系模擬図

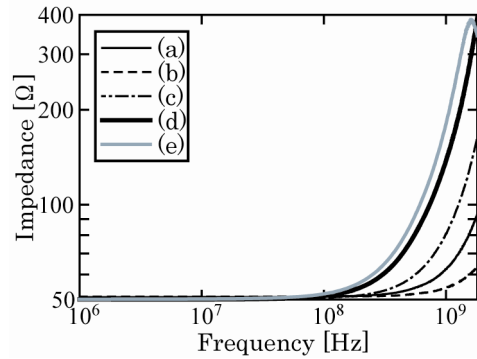


図3 各抵抗の周波数特性 (1MHz - 1.8GHz)

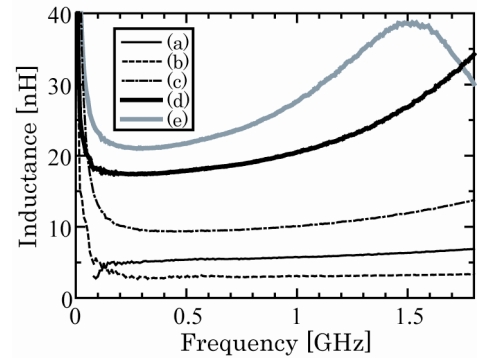


図4 各抵抗のLの周波数特性 (1MHz - 1.8GHz)

成分が小さい。また,(c),(d),(e)の超精密抵抗は抵抗内部のパターンが長いのでインダクタンス成分が大きいと考えられる。

2-2 テスト基板の構造

図5に抵抗素子からのノイズ放射を測定するテスト基板構造を示す。用いた基板の寸法 $51.4 \times 90\text{mm}^2$ とした。誘電体厚 1.53mm ,銅箔厚 $35\mu\text{m}$,誘電体の材質はガラスエポキシ,比誘電率は 4.4 である。線路幅は特性インピーダンスを 50Ω と

るように2.7mmとした。線路長70mmである。裏面は全面グランドである。給電側にはSMAコネクタを用い、線路終端はそれぞれの抵抗を半田付けしている。抵抗を基板の上に設置するため、基板に0.8mmのviaホールを通してランドと接続している。図では線路を2本配置しているが、今回は1線のみ注目した。

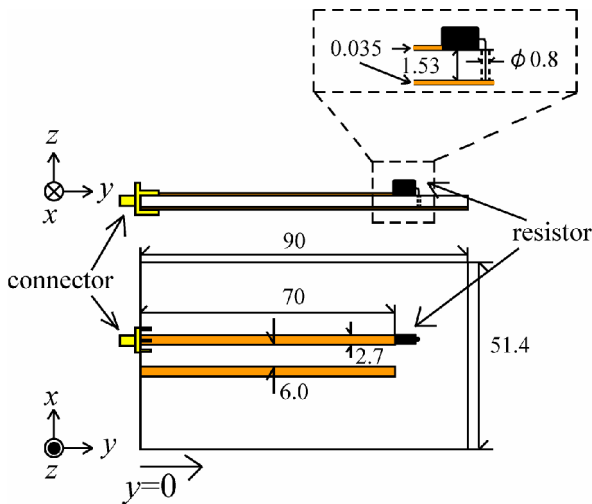


図5 テスト基板の構造および寸法 [mm]

2-3 線路の入力インピーダンスの周波数特性

線路を終端する抵抗のインピーダンスの変化で不整合が生じ、それによって線路上に電流、電圧の定在波が生じる。終端抵抗の位置を $y=0$ 、線路の長さを l としたとき、線路上の電圧値 $V(y-l)$ 、電流値 $I(y-l)$ 、入力インピーダンス Z_{in} は式(1)~(4)で求められる⁴⁾。

$$V(y-l) = V_o^+ [e^{-j\beta(y-l)} + \Gamma_l e^{j\beta(y-l)}] \text{ [V]} \quad (1)$$

$$I(y-l) = \frac{V_o^+}{Z_0} [e^{-j\beta(y-l)} - \Gamma_l e^{j\beta(y-l)}] \text{ [A]} \quad (2)$$

$$V_o^+ = V_g \frac{Z_0}{Z_0 + Z_g} \frac{e^{-j\beta l}}{1 - \Gamma_l \Gamma_g e^{-2j\beta l}} \text{ [V]} \quad (3)$$

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 + \Gamma_l e^{-2j\beta l}}{1 - \Gamma_l e^{-2j\beta l}} \text{ []} \quad (4)$$

ただし、 V_o^+ : 電圧の振幅値[V]
 Γ_l : 位相定数[rad/m]

- Γ_l : 線路と負荷抵抗の電圧反射係数
- Γ_g : 線路と給電側の電圧反射係数
- Z_0 : 線路の特性インピーダンス[]
- Z_g : 内部抵抗[]
- V_g : 入力電圧[V]
- y : 線路上の任意の距離[m]

であり、 y 軸原点は給電コネクタ、 l は信号線路長で0.07mである。

線路の入力インピーダンスは Γ_l によって変化する。入力インピーダンスの周波数特性を測定した。その測定系を図6に示す。基板とネットワークアナライザ(Agilent E8358A) をケーブルで接続し、測定した。周波数を300MHzから1.8GHzまで変化した測定結果は図7(1)~(5)である。この結果での $\text{Re}Z$ は入力インピーダンスの実数部、 $\text{Im}Z$ は虚数部、 $|Z|$ は絶対値である。

他の抵抗に比べインダクタンス成分の大きい(d),(e)の精密抵抗は入力インピーダンスの最大値が大きい。反対にインダクタンス成分が小さい(b)の抵抗は入力インピーダンスの最大値は小さい。しかし(a)の抵抗と(c)の精密抵抗を比較すると、インダクタンス成分の大きい(c)の精密抵抗は入力インピーダンスの最大値は小さい。

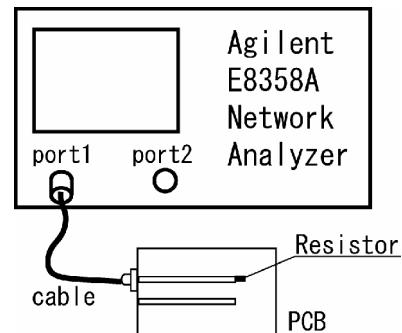
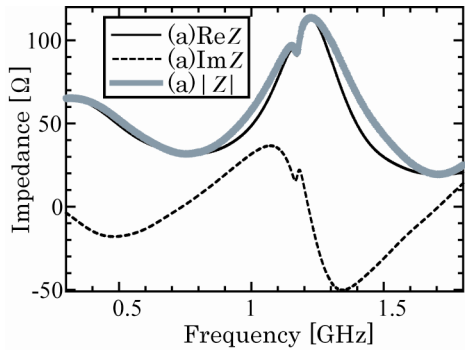
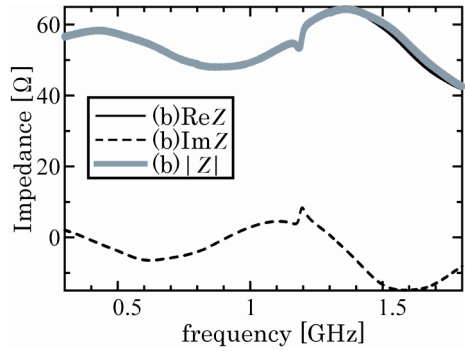


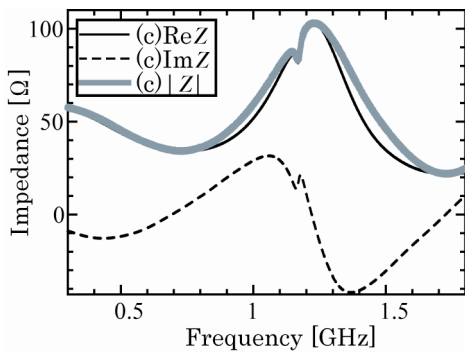
図6 入力インピーダンスの周波数特性の測定系



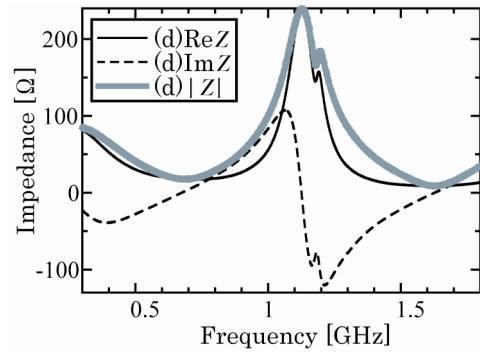
(1) (a)の抵抗で終端



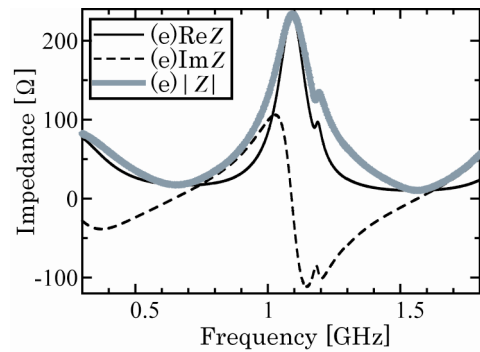
(2) (b)の抵抗で終端



(3) (c)の抵抗で終端



(4) (d)の抵抗で終端



(5) (e)の抵抗で終端

図7 入力インピーダンス周波数特性 (300MHz ~ 1.8GHz)

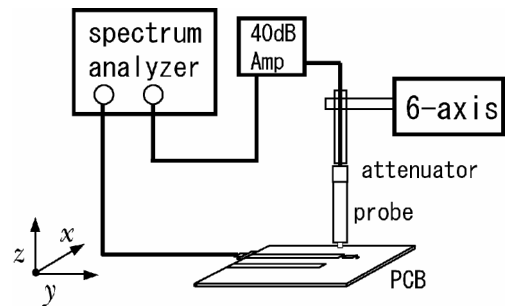


図8 磁界分布計測の測定系

3. 抵抗近傍の磁界分布計測

3-1 計測方法

近傍磁界分布の測定系を図8に示す。スペクトラムアナライザ(Agilent E4402B)のトラッキングジェネレータから線路へ107dB μ Vの信号を印加した。6軸ステージによって x, y, z 方向の移動を制御された磁界プローブ(NEC製CP-2S)で信号を検出する。検出電圧は40dBのアンプで増幅し、スペクトラムアナライザに出力する。

抵抗は給電点から見て左側の線路の終端抵抗として接続した。(d)のモールド形と(e)のハーメチック抵抗は、抵抗を立てた状態で接続した。

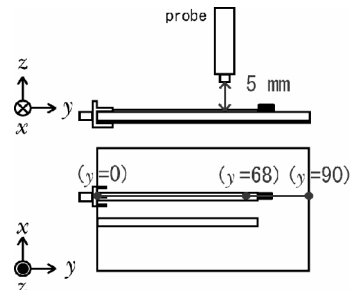


図9 y 方向の磁界分布の計測範囲

3-2 線路上の磁界分布計測

線路に不整合による定在波が生じると、線路上の磁界分布もその電流に伴って変化する。その変化を計測するため、線路に沿って y 方向に線路の中央、基板から 5mm 上の磁界 H_x の分布を計測した。その計測範囲を図 9 に示す。抵抗(a), (b), (c)はコネクタ部分 ($y = 0$ mm)から基板端 ($y = 90$ mm)を計測し、抵抗(d), (e)はプローブが当たらない範囲 ($y = 68$ mm) の計測とする。周波数 500MHz, 1GHz, 1.5GHz における各抵抗の磁界 H_x 分布は図 10(1)~(3)である。

線路上の電流と磁界分布は線路上の電流と密接に関連すると考えられるので、線路上の定在波を求める式(2), (3)から各周波数での電流を計算した。結果は図 11(1)~(3)に示す。

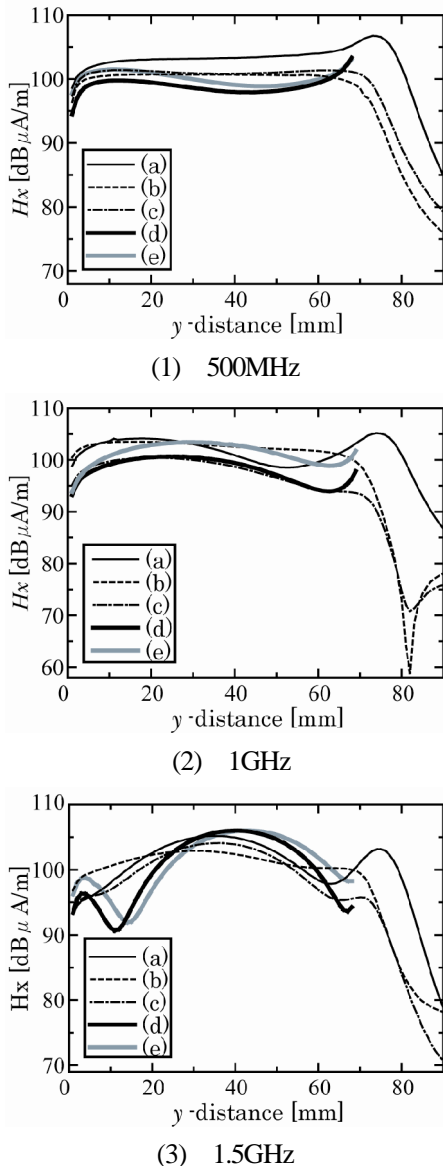


図 10 線路上を通る基板 y 方向の磁界分布

図 10 と図 11 を比較すると各抵抗の電流値の差は直接磁界強度に対応しているように見える。しかし、電流値の振幅の大きさは磁界強度に現れている。図 11 の計算では $Z = R + jL$, すなわち LR の直列等価回路を想定しており、容量成分を考慮していないため、インダクタンス成分の大きい。

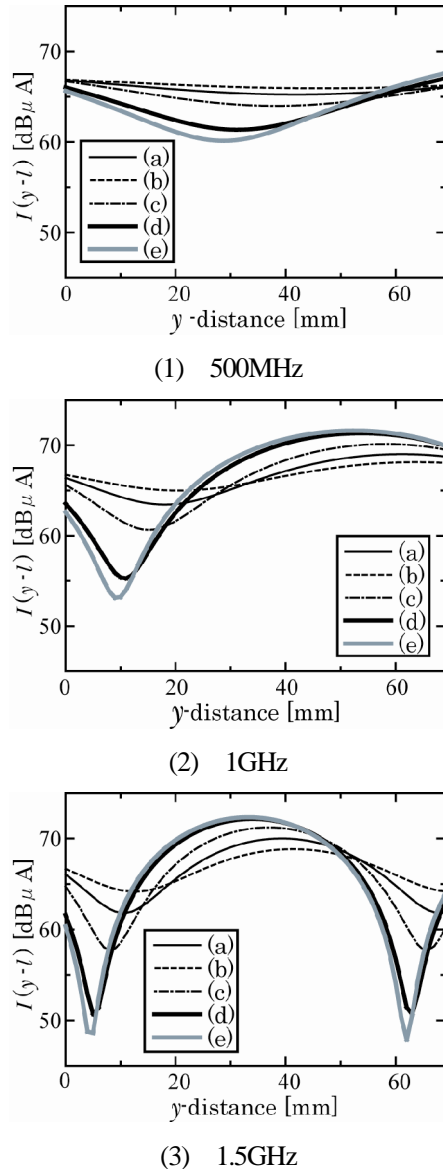


図 11 線路上の電流の計算

3-3 抵抗中央の高さ方向の磁界分布

図 10 で(a)の抵抗は抵抗上で磁界強度が大きいですが、抵抗の厚みを考慮せず、基板から一定の高さで計測した結果である。抵抗の形状と寸法の違いから、基板からの高さを一定にした測定では抵抗からの電磁放射の詳細な比較ができていないと考えられる。各抵抗の表面から一定の高さで磁界

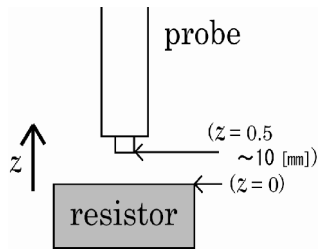
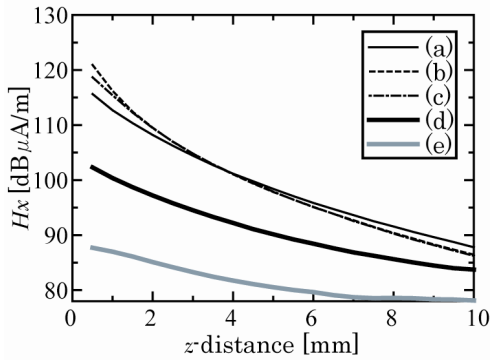
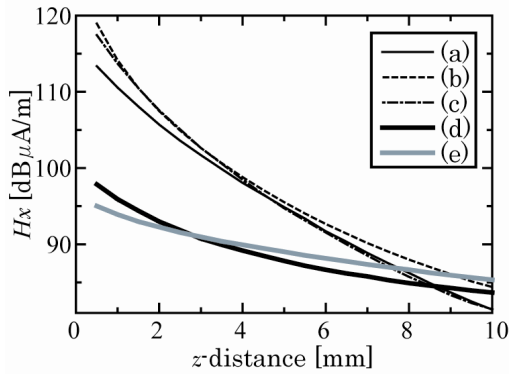


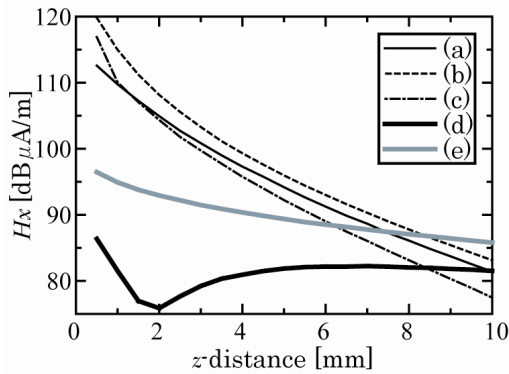
図 12 抵抗中央上 z 方向の磁界分布の計測範囲



(1) 500MHz



(2) 1GHz



(3) 1.5GHz

図 13 抵抗中央上の z 方向の磁界分布

強度の比較を行うために抵抗中央において z 方向の磁界 H_x の分布計測を行った。その計測範囲を図 12 に示す。抵抗上面を $z=0$ [mm] として $z=0.5$

~10[mm]を計測した。周波数が 500MHz, 1GHz, 1.5GHz のときの計測結果を図 13(1)~(3)に示す。(d), (e)の精密抵抗は周りをシールド様のものので覆われているせいか抵抗と近い距離での磁界強度は小さい。また (a), (b), (c)の抵抗が $z=0.5\sim 10$ [mm] で 30dB あるいはそれ以上減衰するのにに対し、抵抗(d), (e)は 10dB 程度、あるいはそれ以下のゆるやかな減衰である。

図 14 は抵抗表面から高さ 5mm における各周波数の磁界強度を示す。(a)~(d)の抵抗は周波数が高くなると磁界強度は小さくなっていくが、(e)の抵抗は 500MHz で最も小さい値となった。図 14 では抵抗表面から 5mm の高さで測定しており、図 10 の結果に比べ、(a)の抵抗も(b)や(c)の抵抗と磁界強度に差はないので、抵抗近傍の磁界分布を比較する時には高さも考慮する必要がある。

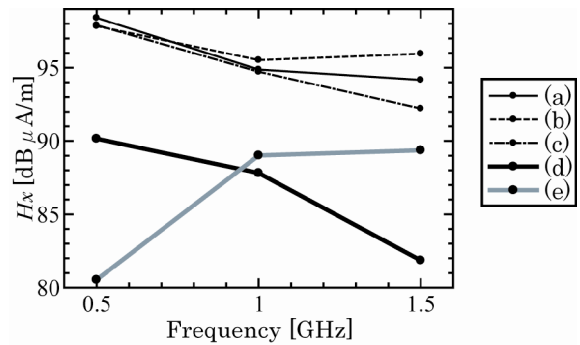
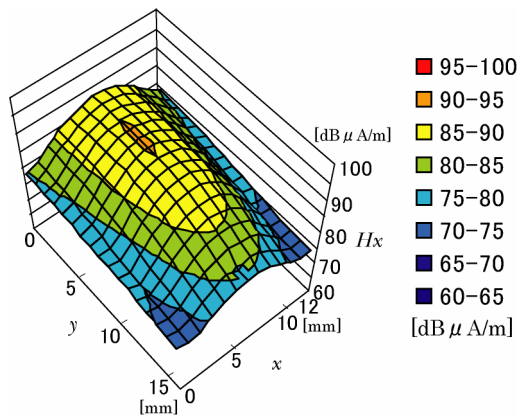


図 14 抵抗表面から 5mm 上の磁界強度

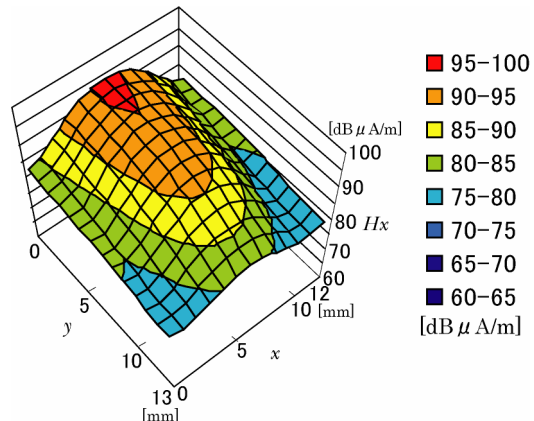
3-4 抵抗近傍の磁界 2 次元空間分布

抵抗近傍の電磁放射を調べるため、抵抗上の磁界分布を計測した。その計測範囲は抵抗外周よりおよそ 5mm 外の範囲で、抵抗表面から高さ 5mm 上の $x-y$ 平面である。各抵抗 500MHz, 1GHz, 1.5GHz での計測をした。その結果の一部は図 15(1)~(5)である。これら 5 つの磁界分布は各抵抗の 500MHz のときのものである。

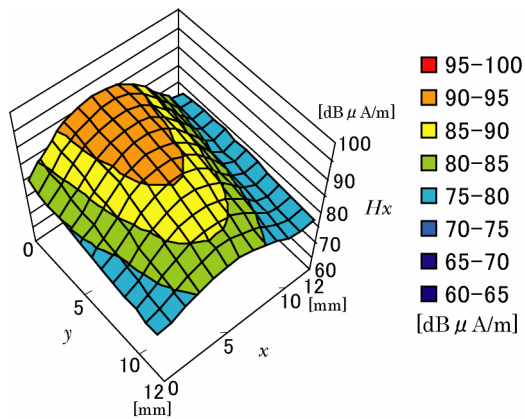
(a), (b), (c)の抵抗は抵抗上部で磁界は大きい。が、 x 方向に距離が離れた部分では磁界は小さくなる。それに対し、(d), (e)の抵抗の磁界分布は変化が小さい。抵抗の内部で構造は異なるが、磁界は基板上での電流の経路の影響が大きいと考えられる。(a), (b), (c)の抵抗は線路に近いので、線路からの電磁放射の影響が大きい。(d), (e)の抵抗は線路からの高さが 1cm 以上も離れた位置での計測なので、



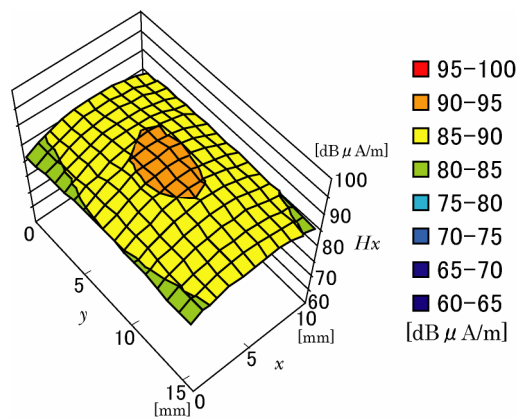
(1) (a)の抵抗近傍



(3) (c)の抵抗近傍



(2) (b)の抵抗近傍

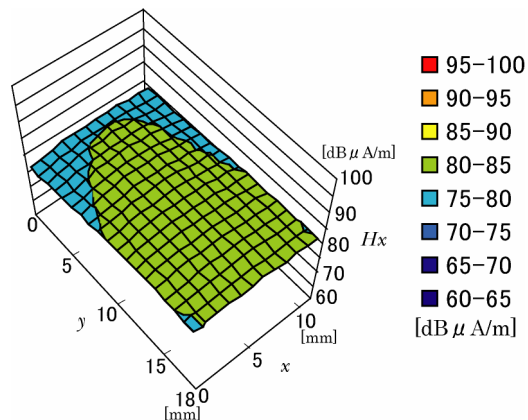


(4) (d)の抵抗近傍

線路の影響はない．特に(d)の抵抗は抵抗からの放射が現れている．

4. 検討

抵抗からの電磁放射について検討するため、抵抗近傍の磁界分布を計測した。図14では一定の高さでの磁界強度を比較したが、周波数や抵抗の種類によって磁界強度が異なった。図3より、抵抗素子のインピーダンスは周波数が高くなるとインダクタンスの影響で大きくなり、線路の特性インピーダンスと不整合が生じる。そのため高周波では線路上に定在波が分布し、終端抵抗への給電エネルギーは周波数によって異なり、抵抗からの電磁放射にも影響する。従って、素子の形状や構造の違いによる電磁放射の比較を行う上では抵抗からの高さを一定にする必要があり、線路と抵抗のインピーダンスの不整合について考慮する必要がある。



(5) (e)の抵抗近傍

図15 抵抗近傍の磁界分布

5. おわりに

5種類の抵抗素子の入力インピーダンスや線路上、抵抗上の磁界分布を計測した。その結果、高周波になる程、抵抗のインピーダンスは大きくなり、線路上の磁界分布が大きく変化することが明らかになった。また、抵抗からの高さを5mm一

定とした時，金属被膜抵抗，チップ抵抗，ワイヤーボンド形精密抵抗の放射が大きく，モールド形，ハーメチック形精密抵抗からの放射は小さい．分布計測により抵抗構造の違いによる特性の変化が明らかとなった．

今後，内部構造を考慮した検討が必要である．

謝辞

試料を提供していただいたアルファ・エレクトロニクス株式会社の佐藤氏，大石氏，実験に協力いただいた秋田高度技術研究所に深く感謝いたします．本研究は，秋田県地域結集型共同研究から一部援助を受けた．

参考文献

- 1) 高橋健一，春日貴志，井上浩：“ 平行する差動 2 信号線路の伝送特性 ”，信学技報，EMD2002-91，pp.17-20，(2002)
- 2) Mark I.Montrose：プリント回路の EMC 設計，オーム社，(1997)
- 3) Takashi Kasuga，Motoshi Tanaka，and Hiroshi Inoue：“ Estimation of Spatial Distribution of Wideband Electromagnetic Noise around a Printed Circuit Board ”，IEICE Trans.Commun.，vol.E86-B，no.7，pp.2154-2161，(2003)
- 4) David M.Pozar：Microwave Engineering - Second Edition - ，John Wiley & Sons，(1998)