

論 文

静電気火花によるノイズ電磁界の伝播特性

増田 閃一*, 蘭部 忠**, 伊藤 嘉苗***

(1983年1月10日受理)

Propagation Characteristics of Noise Waves Caused by
Electrostatic Discharge

S. MASUDA,* T. SONOBE** and K. ITOH***

(Received January 10, 1983)

It is investigated that the nature and behaviours of surface propagating voltage waves and radiant electromagnetic waves caused by the electrostatically induced spark or the discharge of electrification of human body. A cylindrical Faraday cage with one meter height and one meter diameter, having a circular hole on its top copper plate, is constructed. The effective diameter of the hole is changed within the range of 0 cm to 10 cm by replacing copper concentric circular plates having different inner diameters. Sparking is generated at the center of the top plate of the cage. Characteristics of the spark-induced propagating voltage and electromagnetic waves are studied in both the inside and outside of the cage using an antenna and magnetic probe in combination with a transient digitizer. The existence of surface propagating voltage waves traveling on the top copper plate is confirmed in detail, then the frequency components of the radiant electromagnetic waves are compared with those estimated from the distributed constant circuit. Besides, the frequency characteristics of the penetrating signal wave through the hole into the cage are investigated. It is discovered that the cage behaves like a cavity resonator at some frequency components. So, it is necessary to shield the cage sufficiently even for a weak radiant electromagnetic field.

1. まえがき

帯電した人体等から発生する静電気火花ノイズによる計算機システム、IC等の誤動作が問題となっている。従来、この方向の発表は静電気マージン何 kV という機器の試験法に関する議論、静電気対策の一般論が多い^{1,2)}。本論文はより基礎的研究として、コンソールパネル等のモデルとして穴のあいた大型ファラデーケージ(以下 F.C. と略)を作製し、静電気火花によって生ずる進行波電圧や輻射電磁界(電磁波)がどのような周波数成分をもつか、またこの穴を通ってどのように F.C.

内に進入して挙動するかを理論的かつ実験的に検討した³⁾。

2. 実験方法

2.1 ファラデーケージと実験回路

作製した円筒状 F.C. の写真を図 1 に示す。上面は直径 1 m 厚さ 0.5 mm の銅の円板で、側面は芯線直径 0.28 mm, 1 mm 角メッシュの銅網からなり下端部を接地し、床上におかれたアルミシートの上に乗っている。上部円板の中心上方に直径 39 mm の球状の火花電極が銅円板中央から 2 mm 上方にあり、銅円板の中心から 25 cm 離れた位置には直径 10 cm の穴があいている。この穴はコンピュータコンソールの種々の開口部を模擬するもので、外径が 10 cm で内径が各 5, 2, 0 cm の同心銅円板を載せることで穴の実効径を変えられるようになっている。

2.2 実験回路

基本実験回路を図 2 に示す。小型アンテナおよび磁気探針⁴⁾をセンサとして用い、これとトランジショントダイジタライザ(以下 T.D. と略)、テクトロニクス 7912 AD

* 東京大学工学部電気工学科 (113 東京都文京区本郷 7-3-1)

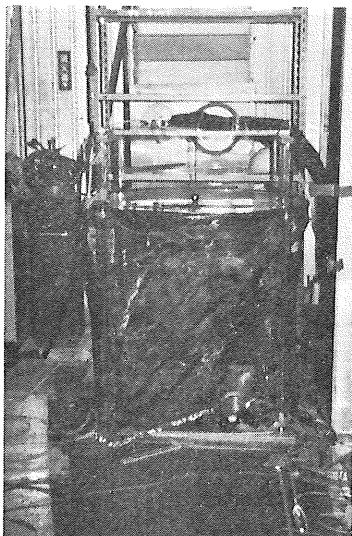
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Tokyo, 3-1, Hongo 7-chome, Bunkyo-ku, Tokyo, 113 Japan

** 住友重機械工業株式会社千葉製造所 (281 千葉市長沼原町 731-1)

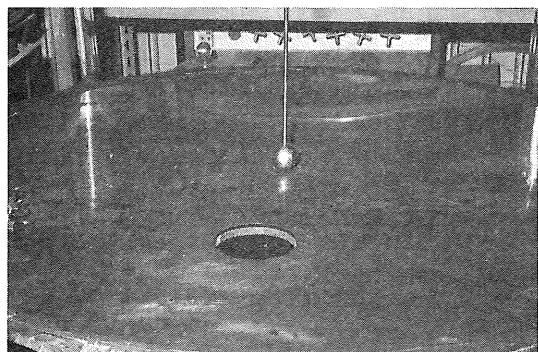
Chiba Works, Sumitomo Heavy Industries Ltd., 731-1, Naganumahara-cho, Chiba, 281 Japan

*** ミドリ安全株式会社 (150 東京都渋谷区広尾 5-4-3)

Midori Anzen Co. Ltd., 4-3, Hiroo 5-chome, Shibuya-ku, Tokyo, 150 Japan



(a) Whole view



(b) Top circular plate

図 1 ファラデーケージ

Fig. 1 Faraday cage.

帯域 2 GHz) を結合して F.C. の内または外に置き観測する。T.D. の電源は放電回路とは別系統から絶縁トラ

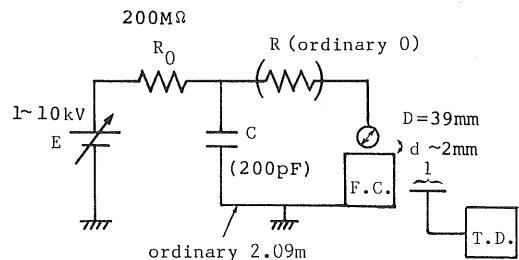


図 2 実験回路

Fig. 2 Experimental circuit.

ンスを介してとり、さらに T.D. の前段にノイズフィルタ (TDK ノイズフィルタ ZAC 2220-00) を、その 1 次側電源接続を F.C. の外側で行ない 2 次側を F.C. 内に入るようにし、フィルタケースを F.C. の銅網で密着させるようにして取り付けた。接地には 10 cm 幅の銅板を用いた。

3. 輻射電磁界と表面進行波

火花によりアンテナ、磁気探針により検出される信号には輻射電磁界（電磁界強度の距離特性で判定⁵⁾）と表面進行波（伝播時間-波形特性で判定）の 2 種類があることを確認した。電磁波の周波数成分は約 10, 50, 100 (主), 200, 400 MHz まで観察された。表面波は F.C. 内が有力となり、その主たる周波数成分は約 100 MHz であった。

3.1 穴の大小による電磁界進入の影響

アンテナ長 $l=5$ cm の T 形アンテナ（給電線長約 1 m）^{*1}を F.C. 内の穴から下方 2 cm, 外向径方向 12 cm (中心より 37 cm) の位置にアンテナ部を水平かつ径方向に設置し、火花に伴う進入波を検出の上 T.D. で波形観測した。結果を図 3 (a)～(c)に示す。穴の大きさを小さ

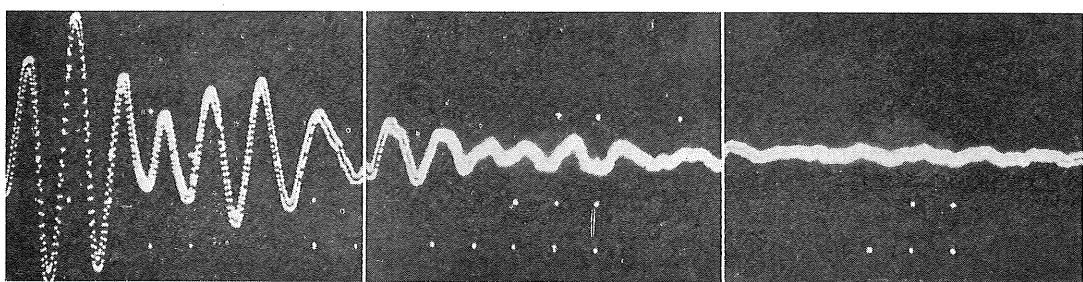


図 3 穴の大小による電磁界進入の影響

Fig. 3 Photos of some penetrating waves depending on the hole sizes.

*1 アンテナの利得-周波数特性は -19.2 dB (100 MHz), -18.4 dB (200 MHz), -14.0 dB (300 MHz), -11.1 dB (350 MHz, peak) とプロードな特性である。

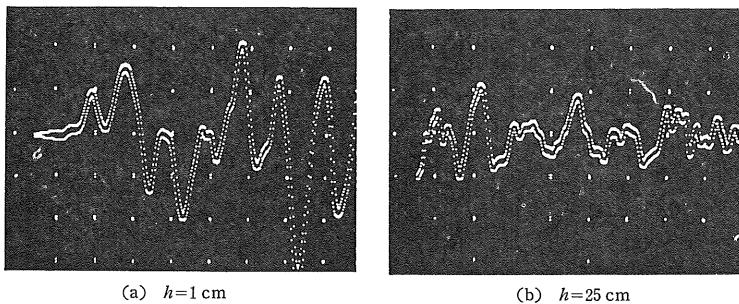


図4 密閉ファラデーケージ内の検出波形
Fig. 4 Waves in the Faraday cage in closed state.

くすることにより進入波の強度が小さくなつてゆく。主たる周波数成分は 100 MHz で変わらない。いま、穴の直径を D 、信号波の波長を λ とする。穴の示す減衰特性は D/λ と周波数 f の関数と考えられる。 $\lambda \approx 3\text{ m}$ であるから、図3(b)から $D/\lambda \approx 10^{-2}$ 程度までの波は減衰を受けても進入することがわかる⁵⁾。これは穴がループ状スロットアンテナとして動作しているから、と考えられる。

センサの感応する信号には大別して

- i) 火花放電の結果生ずる電荷ないしその移動に伴う表面進行波界
- ii) 輻射電磁界(放射界)
- iii) 電源等から入るノイズ

等が考えられる。図4(a)はアンテナを垂直形($l=10\text{ cm}$, 下端より給電)として、その上端を穴中央の垂直下方 $h=1\text{ cm}$ の位置に置き、穴をふさいだときの波形である。これは何らかの経路で(たとえばノイズフィルタ接続部等からの進入が考えられる) F.C. 内に漏れた電荷が F.C. の内側表面を伝播した表面進行波界によるもの、と考えられる。半周期 10 ns は F.C. の表面で電荷が往復する所要時間とよく合うからである。また 100 MHz で表皮深さは $10\text{ }\mu\text{m}$ 程度で銅板厚さ 0.5 mm よりはるかに小さく、これは F.C. 内表面を行なったことを示唆するからである。表面進行波界によるノイズを除去するには比誘電率および比透磁率を配慮してシールドを多重化することが必要となろう。図4(b)はアンテナの位置を垂直下方 25 cm に下げた場合の波形である。これは電源ノイズ等による影響が主と思われる。

4. ファラデーケージ外での輻射電磁界

4.1 放電用コンデンサのアース線路長の影響

放電用コンデンサのアース線路長を変え $l=5\text{ cm}$ の T 形アンテナを F.C. の外側におき放電球から距離 $d=$

4 m 離して測定し、電磁波の周波数成分を調べた結果を図5に示す。電磁波周波数に与える影響は銅平板と側面銅網とで作られる経路が主となるようである。なお、輻射電磁界を測定していることを確認するため、輻射電磁界強度は距離 d に反比例することから⁵⁾、 $d=4\text{ m}$ と $d=1.63\text{ m}$ で測定し、図6に示すようにその観測波形の最大振幅比(アンテナ測定部の距離を変えただけで他は同一条件であるから最大振幅で比較)の約 0.41($=1.63/4$)であることを確かめた。

4.2 輻射電磁界周波数成分の分布定数回路的説明

いま、火花放電系をコンデンサ C と無損失線路の結合系と考え、線路については分布定数回路的取扱いをし、共振条件を求めるとき式

$$g(\omega) = z_0 \tan \beta l + 1/\omega C = 0 \quad (1)$$

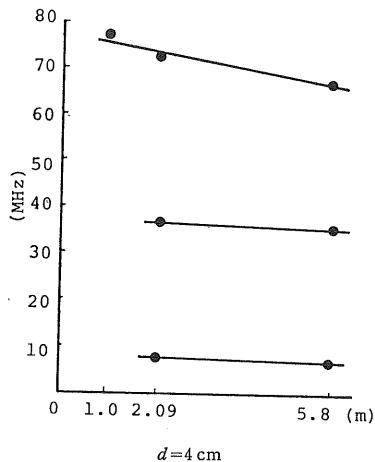


図5 コンデンサアース線路長に対する電磁波周波数成分

Fig. 5 Radiant electromagnetic frequency components depending on the length of grounding path of discharging condenser.

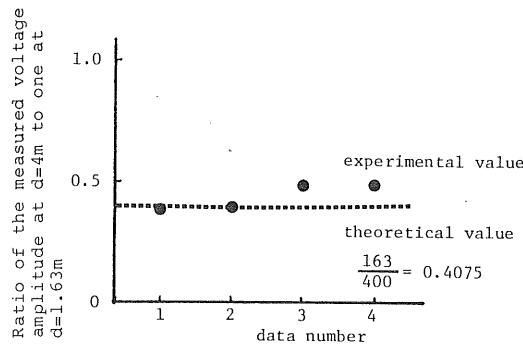


図 6 $d=1.63\text{ m}$ のときの振幅を 1 としたときの $d=4\text{ m}$ での最大振幅比率

Fig. 6 Ratio of the measured maximal voltage amplitude at $d=4\text{ m}$ to $d=1.63\text{ m}$.

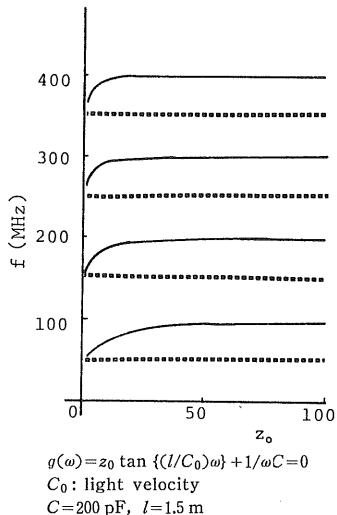


図 7 $g(\omega)=0$ の解 (共振周波数)

Fig. 7 Solutions of $g(\omega)=0$ (resonant frequency components).

ただし, z_0 : 線路の特性インピーダンス, β : 位相定数, l : 線路長.

が得られ, この解 $\omega=2\pi f$ の f が輻射電磁界周波数となる. 図 7 はニュートン・ラフソン法で求めた (1) 式の解である. 複数の周波数成分の生ずることがわかる (付 1).

4.3 磁気探針による観測

直径 4 mm のアクリル棒上に直径 0.12 mm のエナメル線を 30 回巻き, 給電部をバイレックスガラスにより保護した磁気探針を作った. 磁気探針による測定ではアンテナによる測定の場合に比べ, より強く磁界成分に感応すると考えられる. 磁気探針を放電球より $d=4\text{ m}$ 離れた位置で 1 m の高さにおいての実験結果の一例を図 8 に示す. (c) 軸方向で約 400 MHz の高い振動成分が認められる.

4.4 人体帶電による試験

図 9 の実験回路で人体帶電による試験を行なった. これにより, 図 2 でのコンデンサのアース線路による経路

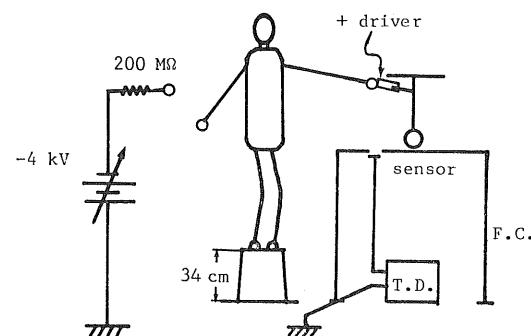
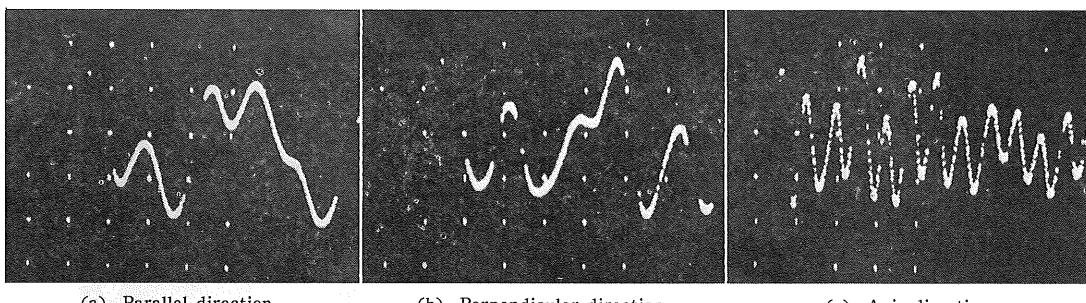


図 9 人体帶電による実験法

Fig. 9 Experimental setup by discharging of electrification of human body.



(a) Central axis of the magnetic probe is parallel to the radius axis of the F.C.

(b) Central axis of the magnetic probe is perpendicular to the radius axis of the F.C.

(c) Central axis of the magnetic probe is parallel to the cylindrical central axis of the F.C.

図 8 磁気探針での観測波形例

Fig. 8 Observed waves by magnetic probe.

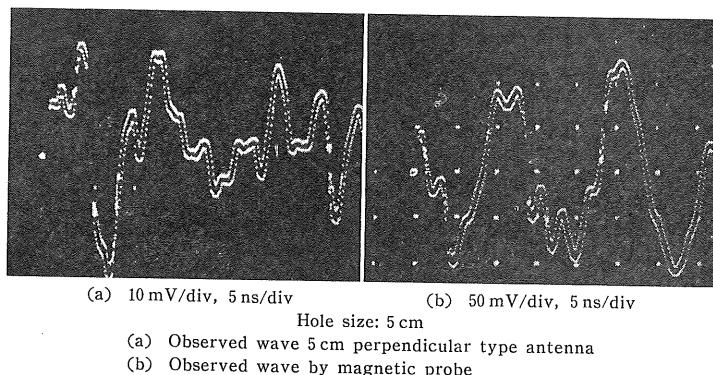


図 10 人体帶電による試験での観測波形例

Fig. 10 Observed waves of discharging test of electrification of human body.

は断ち切られる。安全性から帶電電圧は -4 kV と低くし、電撃による痛みを避けるため指先にドライバを握る。帶電させた後、放電球を支えている真ちゅう棒に接触させ、球-平板ギャップから放電させる。図 10 に波形例を示す。共振周波数として $\sim 70 \text{ MHz}$, $\sim 200 \text{ MHz}$, ... が得られ、放電用コンデンサを用いた場合と、周波数帯として大幅な違いはない。これは、高い周波数成分を決定する主因は、F.C. 等のキャビティ寸法によるため、と考えている。

5. ファラデーケージの周波数特性

コンソールパネル等を模擬する F.C. を、静電マージン何 kV というより、その伝達関数すなわち周波数特性で記述し把握することを考える。つまり、各周波数に対し、穴からの入力電圧に対する F.C. 内の各所での誘起電圧（出力電圧と考える）の特性を知るのである。

$l=5 \text{ cm}$ の垂直アンテナを F.C. 内に入れ鉛直下方距離を変え、観測波形の各種データを同一周波数成分で比較することで F.C. の周波数特性を調べた。結果を図 11 に示す。10 cm の穴を通して進入してくる輻射電磁界の周波数特性がうかがえよう。高い周波数成分 ($\sim 400 \text{ MHz}$ 以上) に対し、アンテナ上端が穴から 25 cm 下の場合での感應電圧が 1 cm 下での感應電圧より大きくなっている。これは F.C. が空洞共振器として共振現象を呈しているため、と考えられる。高い周波数成分で振動的傾向がみられるが 500 MHz 付近に半電力点の存在することが推定される。なお 1/4 波長が 10 cm となる周波数は 750 MHz である。図 12 に観測波形の一例を示す。

図 13, 14 に穴の大きさを 10 cm, 2 cm とし、アンテナ上端の (a) 50 cm 下/1 cm 下、(b) 25 cm 下/1 cm 下での感應電圧比を示す。F.C. の空洞共振器としての共振現象がみられる。また、振動的傾向もみられる。

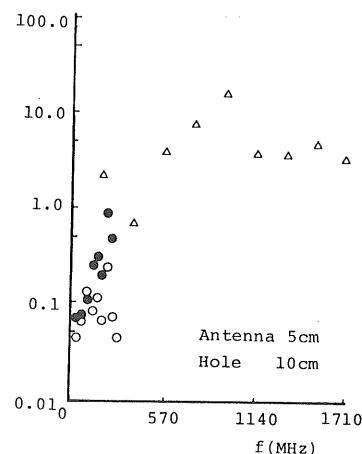


図 11 アンテナ上端が穴から 25 cm 下での感應電圧と 1 cm 下での感應電圧の比（離散フーリエ変換をして比較）

Fig. 11 Ratio of two induction voltages, one is that top position of antenna is at 25 cm under the hole, the other is that it is at 1 cm under the hole.

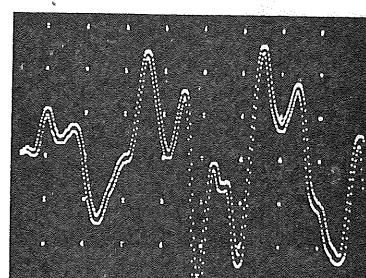
Hole size: 10 cm in diameter, Tip position of antenna: 50 cm under the hole.
0.2 V/div, 5 ns/div, E < 6 kV

図 12 観測波形

Fig. 12 Observed wave in the case.

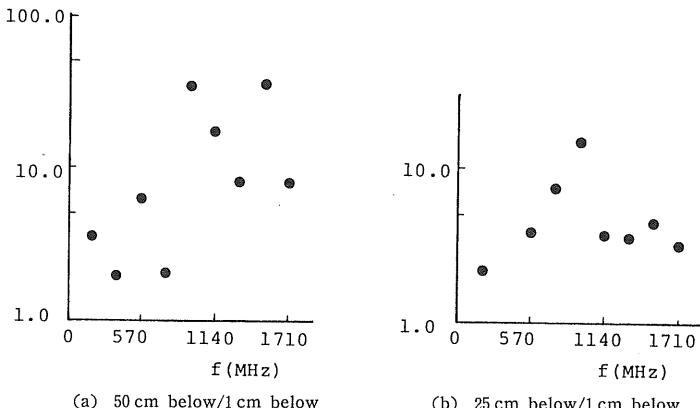


図 13 穴 10 cm, アンテナ上端位置の違いによる感応電圧比

Fig. 13 Ratio of induction voltage depending on the difference of tip positions of antenna on condition that the hole size is 10 cm in diameter.

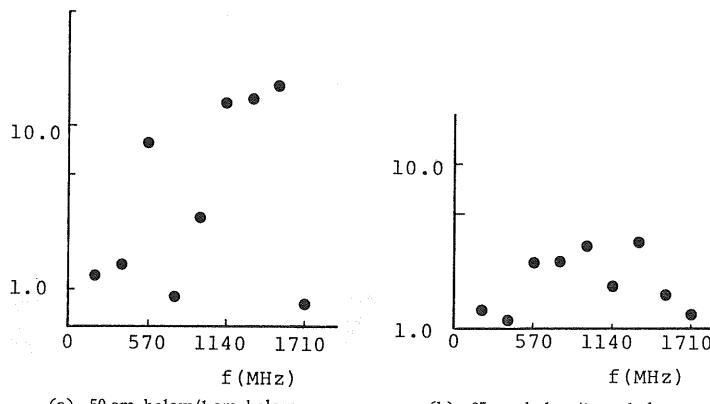


図 14 穴 2 cm, アンテナ上端位置の違いによる感応電圧比

Fig. 14 Ratio of induction voltage depending on the difference of tip positions of antenna on condition that the hole size is 2 cm in diameter.

6. あとがき

静電気火花により発生する電磁界がファラデーケージの内、外でどのように挙動するかを検討した。

次のことを結論する。

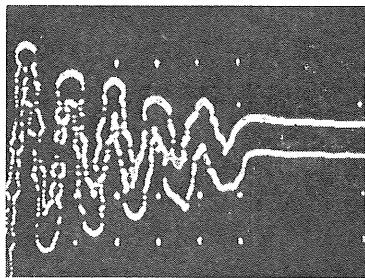
- 1) シールドが完全でないと表面進行波界がファラデーケージ内に進入することがある。これに対し、比誘電率、比透磁率を鑑み、シールドを多重にすることが有効と考えられる。
- 2) 静電気火花により発生する輻射電磁界は複数の周波数成分をもち、その周波数成分はコンソールパネル等の寸法に影響される、と思われる。
- 3) コンソールパネル等内に電磁界が進入すると、その空洞共振器としての働きからパネル内で共振を受

けることがある。このため、進入時の電磁界強度が弱くとも、パネル内で誤動作をきたすに足る強度になることがある。開口部の入力電圧に対するコンソール内での各周波数の誘起電圧特性を把握しておくことにより、進入時の電磁界強度がどの程度許容されるかを知ることができる。これはシールドの設計に対し、一つの指標を与えることができるようになる。

付 錄

付 1. 放電用コンデンサの端子電圧

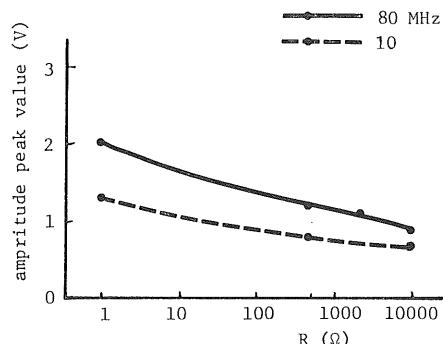
放電用コンデンサ C の端子電圧を測定した。観測波形例を付図 1 に示す。低い周波数成分として $f_{200} \approx 10 \text{ MHz}$ 帯が観測される。計測系を含む放電回路全体のインダク



C=200 pF, 1 kV/div, 100 ns/div

付図 1 放電用コンデンサ C の端子電圧の観測波形 (1)
app. Fig. 1 Observed waves of terminal voltage of discharging condenser C (1).

タンス L として約 $2.1 \mu\text{H}$ が見込まれ $C=200 \text{ pF}$ として集中定数回路としての理論共振周波数 $f_{200} \approx 7.5 \text{ MHz}$ をうる。次に $C=500 \text{ pF}$, $1,000 \text{ pF}$ での実験結果を付図 2 に示す。それぞれの共振周波数として $f_{500} \approx (5.6 \sim 6.3) \text{ MHz}$, $f_{1,000} \approx (4.3 \sim 4.5) \text{ MHz}$ をうる。 $C=500 \text{ pF}$, $1,000 \text{ pF}$ の理論共振周波数としては f_{200} をもとに $f_{500} \approx f_{200} \cdot \sqrt{200/500} \approx 6.3 (\text{MHz})$, $f_{1,000} \approx f_{200} \cdot \sqrt{200/1,000} \approx 4.5 (\text{MHz})$ となり、観測値とよく一致している。したがって、この 10 MHz 帯の振動成分は放電回路全体の

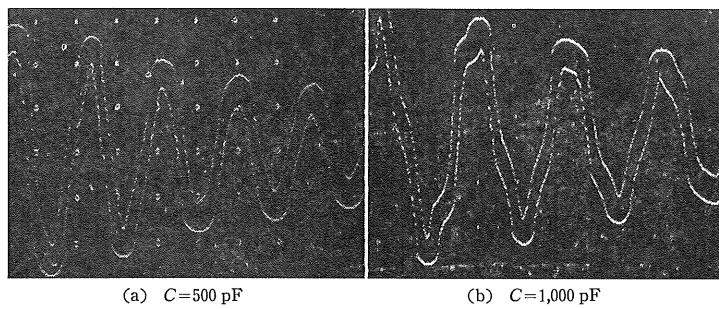


付図 3 放電抵抗 R による輻射電磁界強度
app. Fig. 3 Radiant electromagnetic field strength to discharging resistance R .

集中定数回路的振動姿態といえる。

付 2. 放電抵抗 R の影響

放電抵抗 R を 0Ω , 500Ω , $1 \text{k}\Omega$, $10 \text{k}\Omega$ と変えたときの実験結果を付図 3 に示す。 R を増すことにより輻射電磁界強度の小さくなることがわかる。共振周波数は若干低くなるが、 10 MHz 帯で $R=10 \text{k}\Omega$ のとき $3 \sim 6 \text{ MHz}$ 程度である。



付図 2 放電用コンデンサ C の端子電圧の観測波形 (2)

app. Fig. 2 Observed waves of terminal voltage of discharging condenser C (2).

参考文献

- 1) たとえば、伊藤健一：アースと静電気、p. 125、日刊工業新聞社 (1981)
- 2) 古谷勝美：静電気学会誌、4 (1980) 78
- 3) 増田閃一、蘭部忠、伊藤嘉苗：静電気学会講演論文集 '82, p. 230 (1982)
- 4) 林 泉、中野義映：電気学会誌、81 (1961) 38
- 5) 足立昭二：実戦的ノイズ対策 6：トランジスタ技術、p. 313, CQ 出版社 (1982)