



# 製品の信頼性を支える イー・エム・シー

上 芳夫  
電気通信大学  
産学官連携センター

2014/5/17

EMC'14/Tokyo 市民セミナー

2

## 1. EMCの概念

## 2. EMC標準化機関と規制

## 3. なぜ電波が出るのか？

### 3.1 電界、磁界と電圧、電流とは

### 3.2 実際の機器では何が問題か

## 3. おわりに

## 1. EMCの概念

情報通信系における**環境電磁工学**(Electromagnetic Compatibility)の日本における研究  
昭和52年(1977年)4月に

電子通信学会(現在は電子情報通信学会)

環境電磁工学研究専門委員会(EMCJ)が正式発足

設立趣意書:

最近の電子技術の発達はめざましく、その社会生活に与える恩恵には、はかり知れないものがあるが、その反面、電子機器の種類および数の増加により、**不要電磁エネルギーの発生や機器相互間の影響**が問題になってきている。……電気工学の分野だけでなく、他の分野の工学、理学、数学、社会学、経済学、医学等とのかかわり合いも深く、人間に関連するあらゆる学術技術を結集し、環境問題の一部として研究を推進めなければならない時期にきている。

電磁エネルギー利用の発達にともなって、変化してきた地球および天体の電磁氣的周囲環境の把握とその予測、さらに調和のとれた環境とするための制御方法、電気装置の在り方を追求し**電磁環境の調和と電磁エネルギーの有効利用**に資する工学、理学、医学、経済学、社会学等の多方面にわたる学際的研究の基礎学問分野

2014/5/17

EMC'14/Tokyo 市民セミナー

3

電子通信学会誌62巻7号 技術展望

佐藤利三郎“**環境電磁工学**(EMC)の研究技術これから”1979年7月

今や電氣を利用した機器の存在なくして、社会活動は考えられない状態になってお  
ります。……

… 近年環境問題が工学分野で問題視され、生きがいのある社会環境作りが求め  
られてきました。**環境を意識的に悪化させる行動をとるものはないにもかかわらず、  
良いことをしているつもり行動が結果的に環境悪化をもたらしている**ところに環境  
問題の解決の困難さがあります。…

… このような電磁環境が電氣・電子機器の諸動作にどんな影響を与えるか、生体、  
生體に変化を与えているのではないか、また、逆に電氣・電子機器の利用が社会活  
動の活発化につれ激増し、それから吐き出される不要な電波によって、電磁環境が  
どう変動、変化してゆくかなどを学問的に整理する必要がありましよう。…

近年、**エネルギー問題**が社会的に問題視され、…巨大な太陽電池を設置し、大電  
力を作り、そのエネルギーをマイクロ波に変換して地球に送電する計画が…**電磁環  
境問題**を発生して行くことを…

2014/5/17

EMC'14/Tokyo 市民セミナー

4

# EMC: Electromagnetic Compatibility

電磁両立性、電磁整合性

他に妨害を与えない

Emission

妨害波

伝導(性)妨害波：導体線を伝  
わって妨害を及ぼす雑音

他から妨害を受けない

Immunity

電磁耐性、排除能力

放射(性)妨害波：空間を伝搬  
して妨害を及ぼす雑音

Susceptibility

感受性

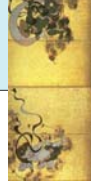
それ自身が正常に動作

イントラEMC、自家中毒



1752年 タコ糸の末端にワイヤーで接続したライデン瓶によって雷雲の帯電を証明する実験

画像出典: Wikipedia



機器の損傷、破壊

強大な電磁波

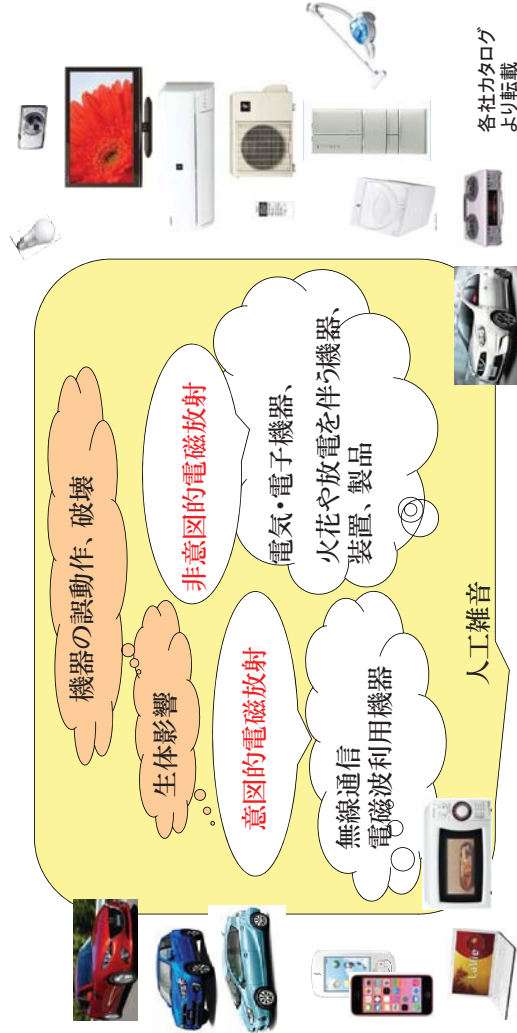
人身事故、  
機器の損傷、破壊

雷放電  
静電気放電

太陽活動  
電離層変動

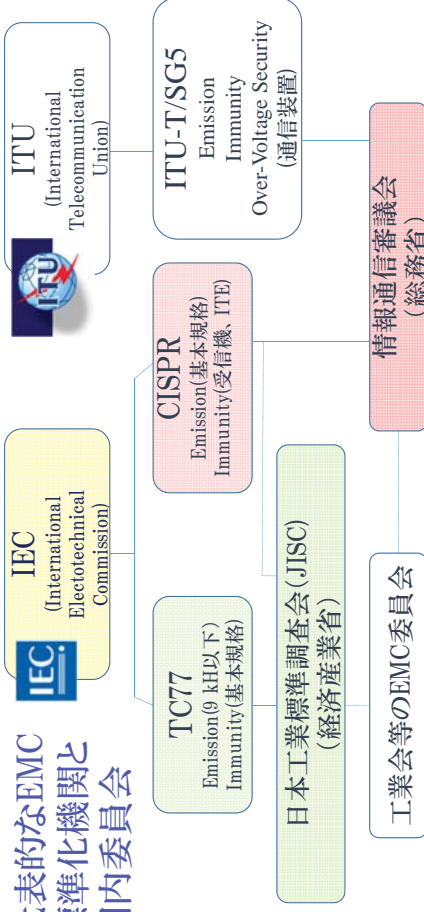
自然雑音

Dellinger現象



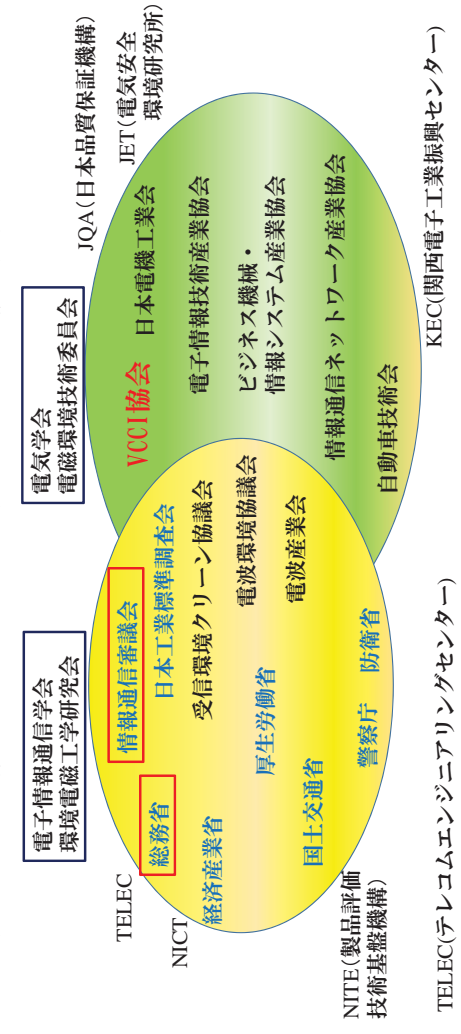
## 2. EMC標準化機関と規格

代表的なEMC  
標準化機関と  
国内委員会



CISPR: 国際無線障害特別委員会

# わが国のEMC規格制定・運用に関する主な機関等



2014/5/17

EMC14/Tokyo 市民セミナー

9

# これまでのEMC

年代	妨害源	被害側	法令・規格	研究・対策組織
1960	家庭電化	ラジオ障害 対策部品	電安法	電波障害防止協議会 (1954)
1980	コンピュータ 	TV障害	CISPR FCC	通信学会環境電磁工 学研究専門委員会 (1977)
1990	CB無線機など	電子機器障害 イミュニティ	CENELLEC	不要電波問題対策協 議会(1987)
2000	携帯電話	人体 電子機器障害	電波防護指針 ICNIRP	総務省生体電磁環境 研究推進委(1997)

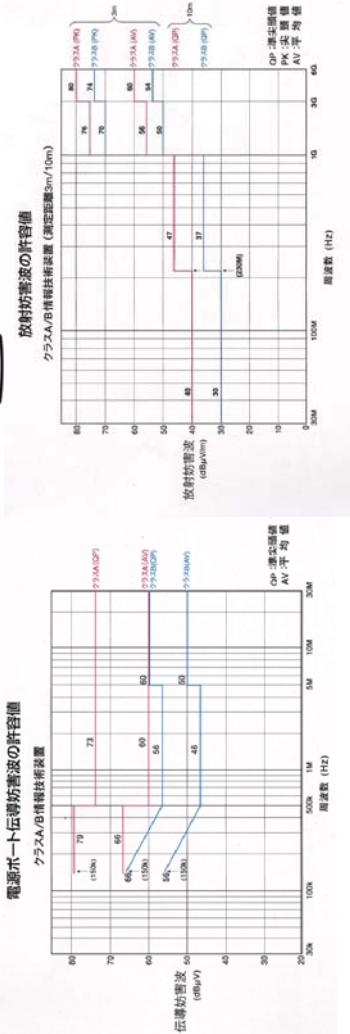
新しい電気・電子機器や放送通信システムの出現 ⇨ EMC問題

FCC=米連邦通信委員会 CENELLEC=欧州電気標準化委員会

2014/5/17

EMC14/Tokyo 市民セミナー

# 快適な電波環境を維持するために規制値は

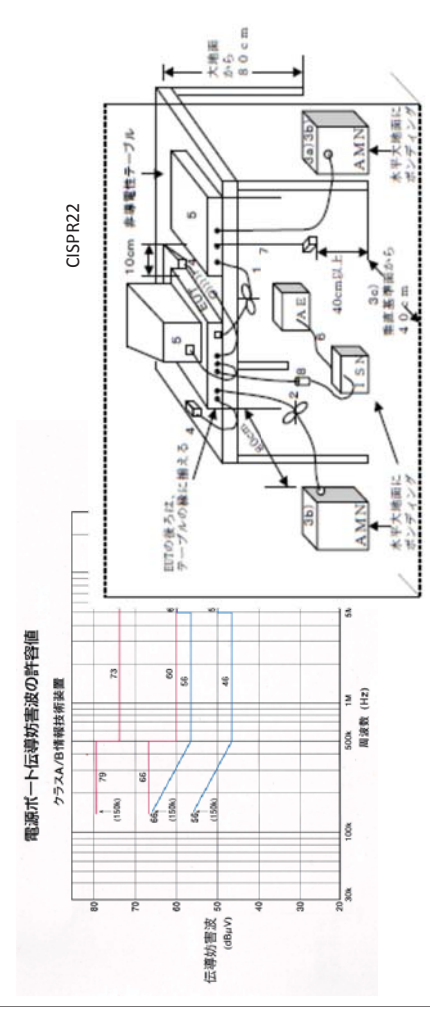


2014/5/17

EMC14/Tokyo 市民セミナー

11

# 伝導妨害波測定は

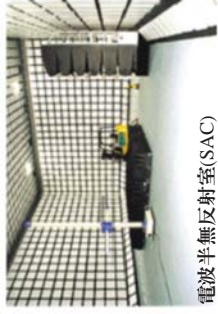
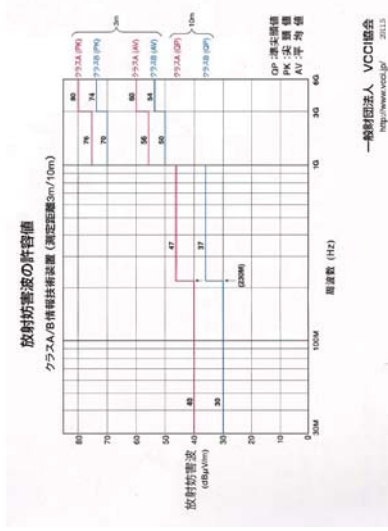


2014/5/17

EMC14/Tokyo 市民セミナー

12

## 放射妨害波測定は



電波半無反射室(SAC)



オープンテストサイト(OTS)

パソコンの裏には



外付けハードディスク



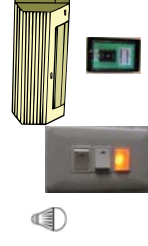
## 3. なぜ電波が出るのか？

無線通信機能を持たない電子機器から、何故電気雑音(伝導/放射妨害波)が放出されるのか？



デジタル/スイッチング技術の多用

### 3.1 電界、磁界と電圧、電流とは



「電気」と「電波」と「電磁波」は

「電気」での関連用語は、「電圧」、「電流」、「電力」

⇒ 主として電気回路で用いられる用語

「電波」とは、電波法第2条のIでは300万MHz以下の周波数の電磁波

「電磁波(界)」での関連用語は、「電界」、「磁界」、「ポインティングベクトル」

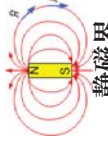
⇒ 主として電磁波論(電磁気学)で用いられる用語



アンテナ

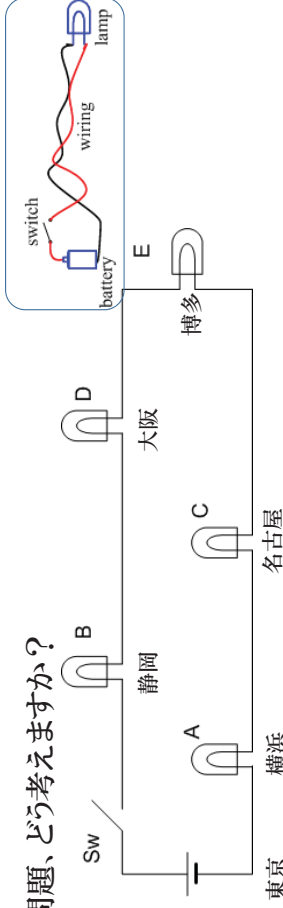


静電界



静磁界

この問題、どう考えますか？



東京 横濱 静岡 名古屋 大阪 博多

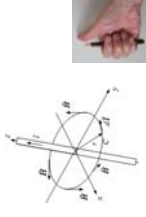
東京駅から博多駅まで2本の線を近接して張り、東京駅に直流電池を、新橋にスイッチを、横浜、静岡、名古屋、大阪、博多に電球を図のように付けた。系は無損失であるとする。  
 新橋のスイッチをオンにした瞬間、それぞれの場所に設置された電球はどの順番で点灯するでしょうか？

- (1) A-B-C-D-E (2) B-D-E-C-A (3) 同時

巨視的な電気磁気現象は、マクスウェルの方程式で！

マクスウェルの方程式---電界と磁界に関する連立方程式  
 ファラデーの法則

閉回路を時間変化する磁界が鎖交すると逆起電力が発生



アンペアの法則+変位電流の項

線路を電流が流れると磁界が発生し、電流と磁界の向きの間には、右ねじの関係にある

電界が時間変化する時、導体を流れる電流と同じように振舞う

電磁界と回路とは

スカラー量

電気回路学

$$V_{ab} = -\int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad \text{電圧}$$

$$I = \frac{dq(t)}{dt} \quad \text{電流}$$

電位の定義

$$\vec{E} = -\nabla \cdot \phi$$

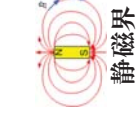
ベクトル量

電磁気学

電界(電場)  $\vec{E}$   
 磁界(磁場)  $\vec{H}$

アンペアの法則  
 時間変化!

大きさ  
 向き



$$V = RI$$

$$\sum_i I_i = 0$$

$$\sum_i V_i = 0$$

オームの法則

キルヒホッフの法則

回路網解析法

電磁界の発生は

$$I_d = \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot \vec{n} dS$$

(変位電流)  
 時間変化!

電界  
 電流

$$V = -\int_{\infty}^r \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

電圧  
 アンペアの法則

$$V = -\frac{d}{dt} \int_S \mu \vec{H} \cdot \vec{n} dS$$

電圧  
 ファラデーの法則  
 時間変化!

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I$$

電荷が存在すると、電界が発生しており、電位(電圧)が定義される。  
 電荷の移動することを、巨視的(電気回路的)には電流が流れると定義する。(導電流)  
 電流が流れると、磁界が発生する。  
 マクスウェルの偉業  
 電界が時間変化する時、変位電流が流れ、磁界が発生する。  
 磁界が時間変化する時、電界が発生する。(ファラデー)

直流では  
 $\nabla \times \vec{E} = 0$  電界と磁界とは独立!  
 $\nabla \times \vec{H} = \vec{J}$

# 電磁界の発生は

交流電流が流れると、時間変化する電磁界が発生

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \mu \vec{H}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t} \epsilon \vec{E}$$

↑  
マクスウェルの方程式

↓  
波動方程式が導出できる

$$\vec{E} = -j\omega \vec{A} + \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \nabla \nabla \cdot \vec{A}$$

放射界

電流(密度)を知ることができると  
電磁界が分かる!

$$\vec{H} \equiv \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A}$$

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J} e^{-jkr}}{r} dV$$

ベクトルポテンシャルの  
定義

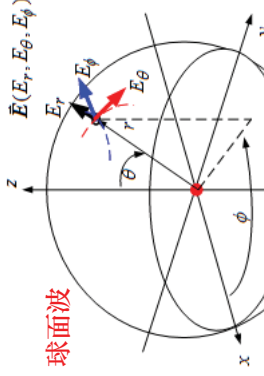
# 電磁波とは

波動方程式

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

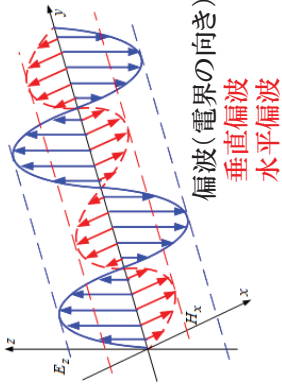
$r \rightarrow \infty$  放射電磁界  
 $\vec{E}(E_\theta, E_\phi)$  平面波

球面波



$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} \text{ ポインティングベクトル}$$

- 電磁界が運ぶ電力密度
- 右ねじの方向



偏波(電界の向き)  
垂直偏波  
水平偏波

# 電磁界の発生は

交流電流が流れると、時間変化する電磁界が発生

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \mu \vec{H}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial}{\partial t} \epsilon \vec{E}$$

↑  
マクスウェルの方程式

↓  
波動方程式が導出できる

$$\vec{E} = -j\omega \vec{A} + \frac{1}{j\omega\mu\epsilon} \nabla \nabla \cdot \vec{A}$$

放射界

電流(密度)を知ることができると  
電磁界が分かる!

$$\vec{H} \equiv \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A}$$

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \frac{\vec{J} e^{-jkr}}{r} dV$$

ベクトルポテンシャルの  
定義

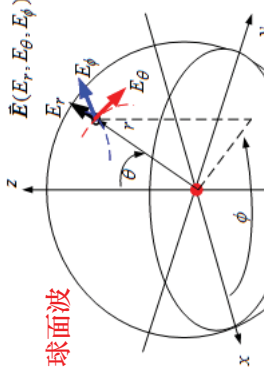
# 電磁波とは

波動方程式

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

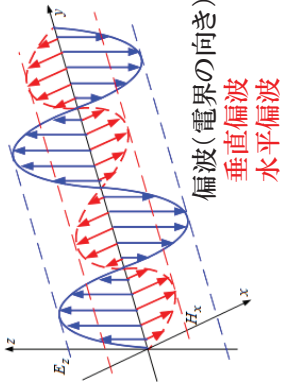
$r \rightarrow \infty$  放射電磁界  
 $\vec{E}(E_\theta, E_\phi)$  平面波

球面波



$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} \text{ ポインティングベクトル}$$

- 電磁界が運ぶ電力密度
- 右ねじの方向



偏波(電界の向き)  
垂直偏波  
水平偏波

# 基本放射アンテナモデル

微小ダイポール

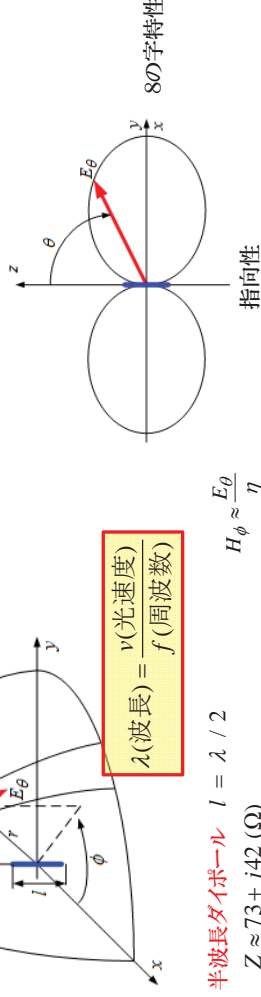
$$p = \frac{I_0 l}{j\omega}$$

電界

静電界

誘導電磁界

放射界



$$\lambda(\text{波長}) = \frac{v(\text{光速})}{f(\text{周波数})}$$

$$\text{半波長ダイポール } l = \lambda / 2$$

$$Z \approx 73 + j42 (\Omega)$$

$$H_\phi \approx \frac{E_\theta}{\eta}$$

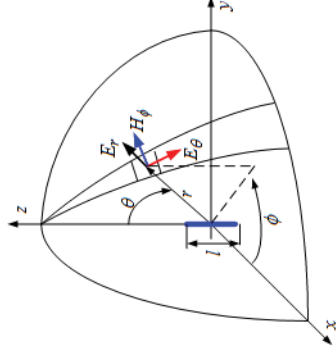
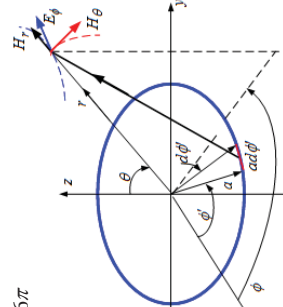
$$\eta = 120\pi (\Omega)$$

# 基本放射アンテナモデル

微小ループアンテナ

$$a < \lambda / 6\pi$$

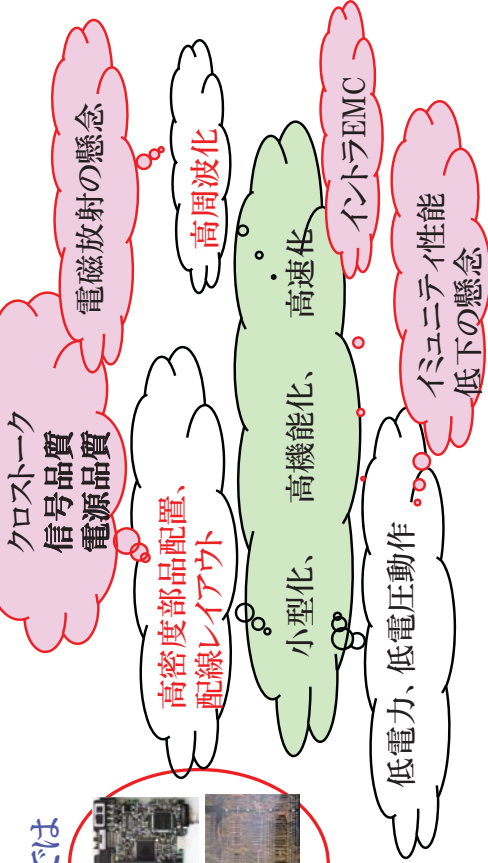
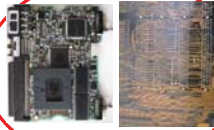
磁界



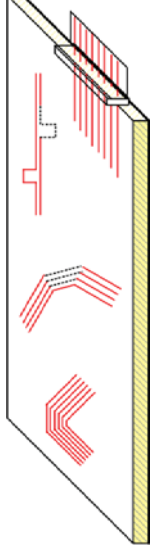
電子機器では、何がアンテナモデルになっているのか?  
放射源となる周波数成分はどこから生じているのか?

### 3.2 実際の機器では何が問題か

IT機器では



### 高密度な配線、部品配置

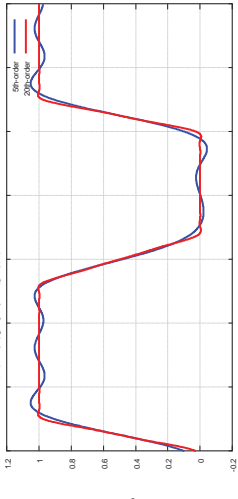
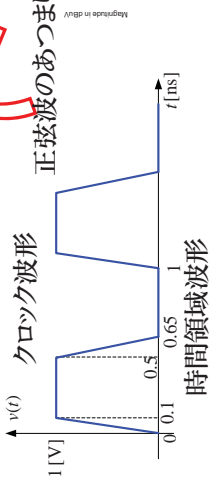


インフラEMC

信号品質(Signal Integrity)、電源品質(Power Integrity)、放射妨害波問題

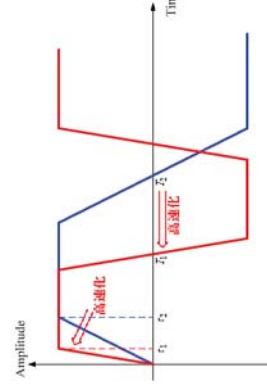
- ✓ ICのバンプと配線 結合問題
- ✓ 多線条線路におけるクロストーク
- ✓ 異層配線間におけるクロストーク
- ✓ 不連続効果(曲がり、ビア)
- ✓ 非等長線路効果
- ✓ 欠損グラウンド効果
- ✓ コネクタ

### デジタル波形とは

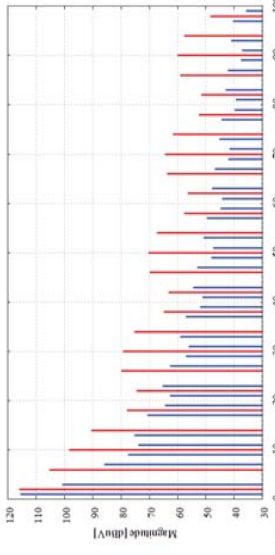


スペクトラム成分からの波形再生

### 高速になると



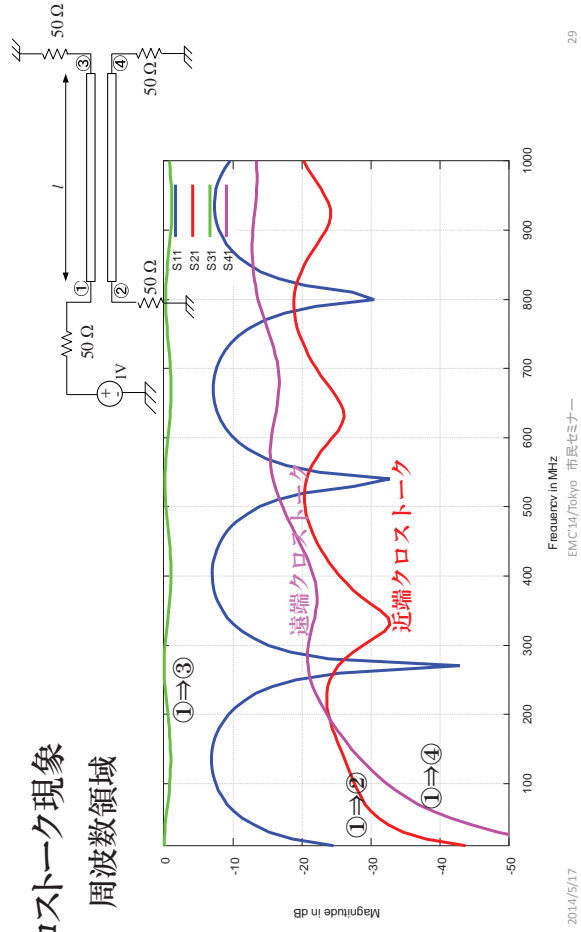
時間的に見ると



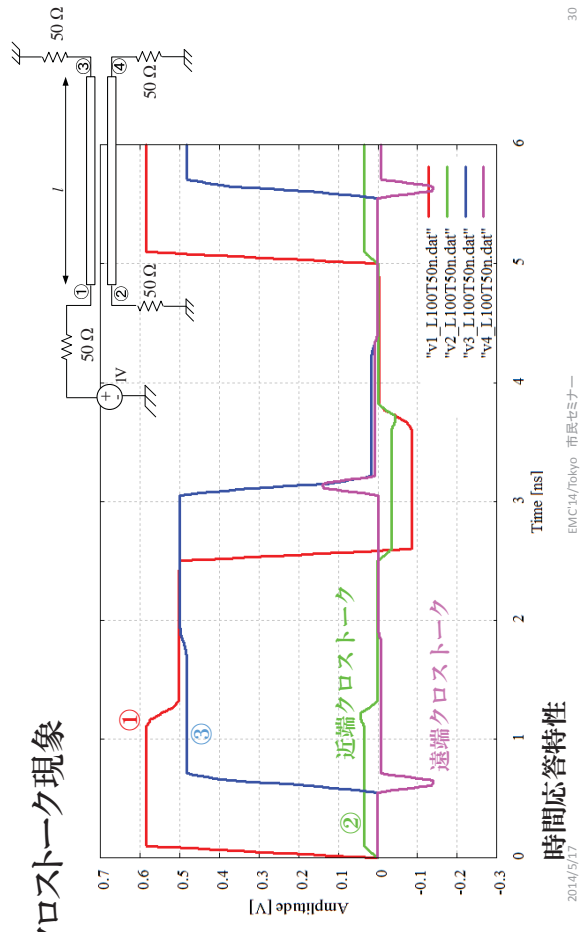
周波数的に見ると、高い周波数帯域まで  
大きなレベル成分が存在

大きな電力を必要とするスイッチング回路等では、高い周波数成分が無視でき  
るほどの低レベルにならない可能性が危惧!

# クロストーク現象 周波数領域



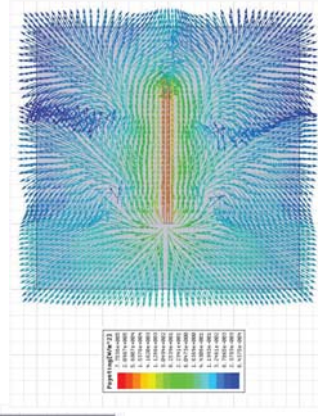
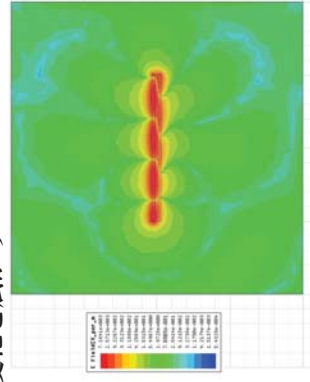
# クロストーク現象



# 平行線路の電磁界は

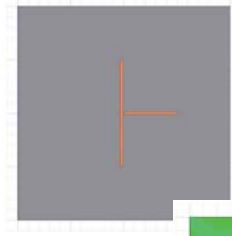


電界の変化と広がり

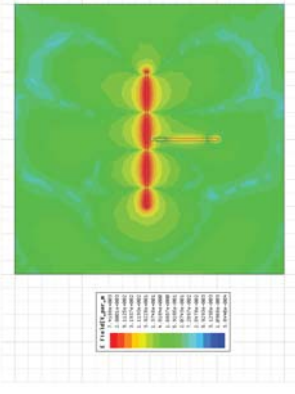


電流(ポインティング  
ベクトル)の広がり

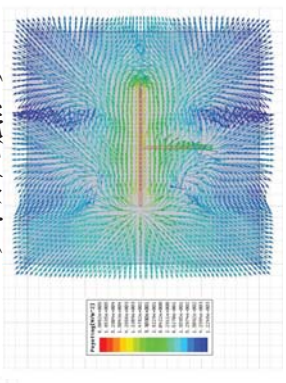
# 近接線路があると



電界の変化と広がり



電流(ポインティング  
ベクトル)の広がり

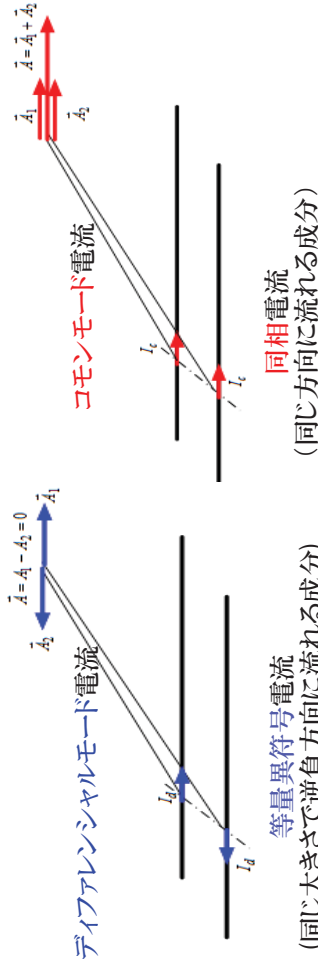




伝導性妨害波といっても

例えば、電源線を通れる妨害波(雑音)電流は、ダイアレンシヤルモード電流とコモンモード電流に分解できる

放射電磁界!



## コモンモードフィルター, コモンモードチョーク



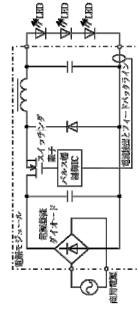
ノートパソコン用電源の直流側(パソコン側)に接続されたフェライト(製コモンモード)チョーク



USBコードに接続されたフェライトチョーク

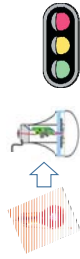


## スイッチング技術を利用する電源回路



スイッチング周波数は、キロヘルツのオーダーであるが、

スイッチング電源内蔵機器



LED照明灯、GCPC、パワーエレクトロニクス電源系

パワーエレクトロニクスでは、元の電圧、電流が大きい ⇒ 高い周波数範囲まで高いレベルの危惧!

## 3. おわりに

デジタル技術/スイッチング技術を応用する製品には**EMC問題が潜在化**しています。

製品自体の動作保証に加えて、**電磁環境の保全**を保証する技術を備える必要があります。

ご清聴を感謝します