



電子回路 I

— 高周波回路入門 —

2022年1月18日／1月25日

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
株式会社 光パスキューションズ
松浦 裕之

講義概要

- 高周波を扱う技術は昨今の最先端情報機器を支えています。また高速デジタル回路を想定通りに動作させるためにも高周波的センスが大変重要です。一方、ユーザが直接意識することはない「縁の下の力持ち」的な存在でもあります。
- この講義は、高周波に興味を持ってもらいその基礎を理解していただくことが第一であると考えています。さらに、MMIC(マイクロ波モノリシック集積回路)やRF-CMOSなど集積回路についても「さわり」を紹介します。
- 加えて、実際の設計で用いるコンピュータによる設計・シミュレーション、要素部品実装の例や注意点、計測方法、各種事例などについてもざっと解説します。
- 講義時間のわりには多くの内容を盛り込みました。数式は極力使わず説明していますので、基本的考え方やキーワードを覚えて、「高周波の気持ちができる」ようになってほしいと考えています。

講師自己紹介

- 1980年3月東京工業大学理工学研究科情報工学専攻修了。
- 同年4月横河電機に入社し医療機器の基礎技術の開発、計測器に向けた高速・高周波技術の開発に従事。1990年4月スタンフォード大学の客員研究員として米国に駐在し、マイクロマシン技術と化合物半導体技術を用いた計測用プローブの研究開発を担当。
- 1992年4月計測器応用を目的とする研究開発会社であった株式会社テラテックに出向し超高速・高周波回路設計や実装技術の研究開発を行った。
- 2001年4月から横河電機にて化合物半導体の光通信分野への応用開発およびその事業化を推進し、40 Gbps-DQPSK通信モジュールはじめ先進的なデバイスを製品化した。2011年7月に光通信事業撤退に伴い横河電機を退社。
- 2011年12月より国立研究開発法人 産業技術総合研究所 電子光技術研究部門 招聘研究員として、次世代高速光通信ネットワークのための制御回路やシステムの研究開発を担当している。
- 産総研勤務を継続しつつ、2017年7月にその開発成果を実用化するベンチャー企業「株式会社光パスコミュニケーションズ」(<https://h-path.co.jp>)を創業。遠隔地があたかも目の前にあるような環境を実現する仕組み「テレセッションシステム」、すなわち4K非圧縮映像を低遅延で双方向光伝送の事業化を推進中。

目次

- はじめに ----- 5頁
 - ◆ 高周波とは・マイクロ波とは・ミリ波とは / 身近な高周波・マイクロ波 / 光通信 / 周波数と波長
- 高周波・マイクロ波回路の基礎知識 ----- 14頁
 - ◆ 電磁波 / 抵抗・コンデンサ・コイル / 直列・並列 / 共振 / 複素インピーダンス / 誘電体・磁性体 / 集中定数回路と分布定数回路 / 伝送線路と定在波 / 特性インピーダンス / 線路の平衡・不平衡 / インピーダンス整合 (マッチング) / Sパラメータ / 反射係数 / スミスチャート
- 受動デバイスとその組合せ回路 ----- 60頁
 - ◆ 高周波基板 / 寄生 (浮遊) 素子 / アッテネータ / スタブ / 伝送線路フィルタ / アンテナの基礎
- 能動デバイスとその組合せ回路 ----- 74頁
 - ◆ 半導体 / ダイオード・トランジスタ / 増幅器 / 発振回路 / パルス信号取扱い / ターミネーション
 - ◆ 高周波・マイクロ波集積回路 (MMIC) / RF-CMOS
 - ◆ 自動車レーダ / GPS / 交通系ICカード / スマートフォン
- 開発ツール、実装および計測器 ----- 97頁
 - ◆ 回路シミュレータ / 電磁界シミュレータ
 - ◆ パッケージと実装 / 表皮効果 / コネクタ
 - ◆ 計測器 / スペクトラムアナライザ / ネットワークアナライザ / オシロスコープ / プローバ
- まとめ ----- 118頁

はじめに

高周波とは

- 高周波とは「高い周波数」の電磁波または電気信号。
- 「高い」とはどのくらい？
 - ◆ 一般に、周波数の高い振動や波動をいう。交流では数百ヘルツ以上、電波では数メガヘルツから数百メガヘルツの周波数のものをいう。⇔低周波
(出典:三省堂 大辞林)
 - ◆ 無線工学での高周波(出典:ウィキペディア)
高周波とは無線周波数のことで、無線通信の搬送波に使用される周波数の電気信号または電波を指す。「何キロヘルツ以上が高周波である」という定量的な定義があるわけではなく、高周波または無線周波数と呼ぶかどうかは用途によるのである。例えば、オーディオ信号・電子回路では音声周波数帯域と同程度の数10kHz程度であっても低周波に分類されるが、無線通信で使用される場合は10kHz以上が高周波である。
 - ◆ 美容・医療分野(出典:ウィキペディア)
超音波、もしくはラジオ波(高周波を意味する英語: Radio Frequencyから)と呼ばれ、体温を上昇させる目的で使われている。美容業界では、体温上昇による基礎代謝の向上に伴う痩身効果を期待して使われる。医療分野では、筋肉・内臓などを局所的に温める温熱療法や、電気メスで使用されている。一般的な機器では1MHz以下、もしくは3 MHzが使われる。また電気メスでは300 kHz~5 MHzが使われる。
 - ◆ 電波法では10 kHz以上と定義。

(参考)可聴周波数: 20 Hz~(15,000)~
20,000 Hz ただし個人差あり

マイクロ波とは、ミリ波とは

- **マイクロ波**(マイクロは、英: Microwave)は、電波の周波数による分類の一つである。「マイクロ」は、電波の中で短い波長域であることを意味する。一般的には波長 1 mから100 μm 、周波数 300 MHzから3 THzの電波(電磁波)を指し、この範囲には、デシメートル波 (UHF)、センチメートル波 (SHF)、ミリメートル波 (EHF)、サブミリ波が含まれる。
しかし、明確な定義がある用語ではなく、より狭い範囲やより広い範囲に対して用いられることもある。(出典:ウィキペディア)

$$\text{◎ 波長} = (\text{電磁波が1秒間に進む距離}) \div (\text{周波数}) = 30\text{万 km} \div (\text{周波数})$$

- ミリ波とは波長が1～10 mm、周波数が30～300 GHzの電波をいう。
(出典:ウィキペディア)
- 一般に周波数で比較したときの順序: **高周波 < マイクロ波 < ミリ波**

本講義でも、「高周波」や「マイクロ波」の範囲を厳密に定めず、広い定義で扱う。

身近な高周波・マイクロ波

● 携帯電話・スマートフォン



700 MHz～2.1 GHzのなかの
特定周波数帯



(参考)

1 kHz = 1000 Hz

1 MHz = 1000 kHz

1 GHz = 1000 MHz

1 THz (テラヘルツ) = 1000 GHz

プラチナバンド(ゴールデンバンド) ≒ 800 MHz前後

次世代5G(日本国内)は
3.7 GHz帯、4.5 GHz帯、28 GHz帯

身近な高周波・マイクロ波・ミリ波

● ラジオ



AMラジオ: 531 kHz ~ 1602 kHz
(9 kHz間隔)
FMラジオ: 76.1 MHz ~ 89.9 MHz
(0.1 MHz間隔)



● GPS

1575.42 MHzなど



● 電波時計

福島県おおたかどや山(40 kHz)
福岡県・佐賀県はがね山(60 kHz)
(JJY標準電波)



● テレビ



衛星放送BS
11.7 GHz ~ 12.2 GHz
衛星放送CS
12.3 GHz ~ 12.7 GHz



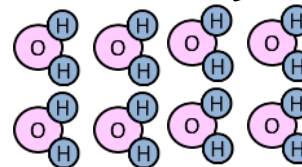
地上波デジタル放送
470 MHz (CH#13)
~ 770 MHz (CH#62)



● 電子レンジ

英語でMicrowave oven

2.45 GHz

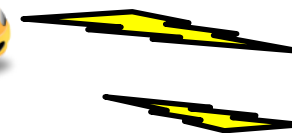


水の分子



● 自動車レーダ

60 GHz, 76 GHz, 79 GHz



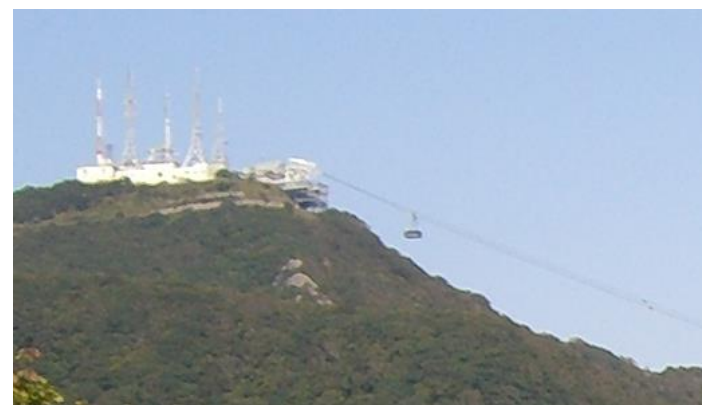
街のアンテナ色々

衛星放送



衛星放送、地上波テレビ

地上波放送、FM放送



携帯電話基地局

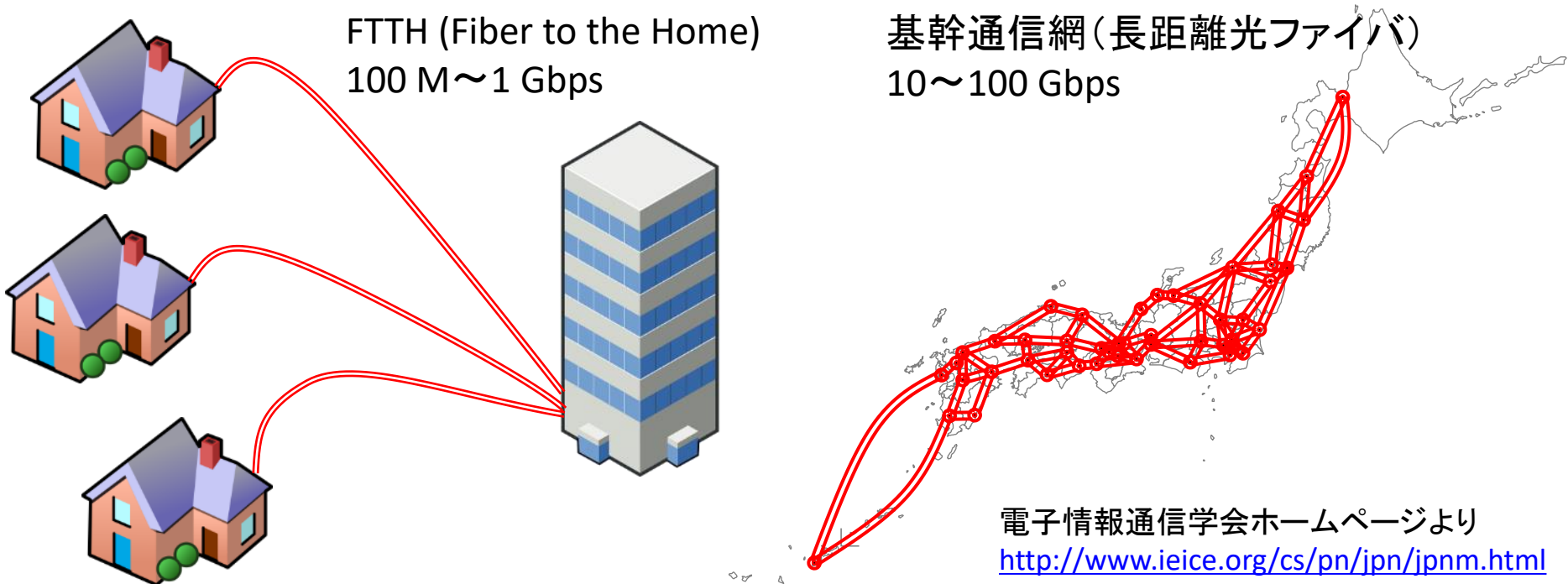
マイクロ波中継ほか



東京都武蔵野市、北海道函館市

参考：光通信

- 光ファイバを使った有線通信。
- 住宅は100 Mbps～1 Gbps(瞬間最大)のビットレートの接続。
- 基幹通信網は10～100 Gbps(常時)の接続。
最先端製品や学会レベルでは400 Gbps～1 Tbpsが議論されている。
- ビットレートと周波数は等価ではないが、高周波・マイクロ波領域の技術が使われている。



CPU

- 内部クロック周波数はGHz帯であり、高周波・マイクロ波の領域。

第 11 世代インテル® Core™ i9 プロセッサー

製品名	ステータス	発売日	コア の数	ターボ・ブースト利 用時の最大周波数	プロセッサベース 動作周波数	キャッシュ
Intel® Core™ i9-11900T Processor	Launched	Q1'21	8	4.90 GHz	1.50 GHz	16 MB Intel® Smart Cache
Intel® Core™ i9-11900KF Processor	Launched	Q1'21	8	5.30 GHz	3.50 GHz	16 MB Intel® Smart Cache
Intel® Core™ i9-11900K Processor	Launched	Q1'21	8	5.30 GHz	3.50 GHz	16 MB Intel® Smart Cache
Intel® Core™ i9-11900F Processor	Launched	Q1'21	8	5.20 GHz	2.50 GHz	16 MB Intel® Smart Cache
Intel® Core™ i9-11900 Processor	Launched	Q1'21	8	5.20 GHz	2.50 GHz	16 MB Intel® Smart Cache

Intel社ホームページより

<http://ark.intel.com/ja#@Processors>

<https://ark.intel.com/content/www/jp/ja/ark/products/series/202984/11th-generation-intel-core-i9-processors.html>

周波数と波長

直進性が弱い
情報伝送容量が小さい

直進性が強い
情報伝送容量が大きい

波長 100 km 10 km 1 km 100 m 10 m 1 m 10 cm 1 cm 1 mm 0.1 mm
周波数 3 kHz 30 kHz 300 kHz 3 MHz 30 MHz 300 MHz 3 GHz 30 GHz 300 GHz 3 THz

超長波 VLF 長波 LF 中波 MF 短波 HF 超短波 VHF 極超短波 UHF マイクロ波 SHF ミリ波 EHF サブミリ波

船舶通信
航空機ビーコン
標準電波

船舶・航空機通信
中波放送 (AMラジオ)
船舶・航空機ビーコン
アマチュア無線

船舶・航空機通信
短波放送
アマチュア無線

FM放送
マルチメディア放送
防災行政無線
消防無線
列車無線
警察無線
簡易無線
航空機管制通信
無線呼出
アマチュア無線
コードレス電話

携帯電話
PHS
MCAシステム
タクシー無線
テレビ放送
防災行政無線
移動体衛星通信
列車無線

警察無線
簡易無線
レーダー
アマチュア無線
無線LAN
コードレス電話
ISM通信

電波天文
衛星通信
簡易無線
加入者系無線アクセス
レーダー

マイクロ波中継
放送番組中継
衛星通信
衛星放送
レーダー
電波天文・宇宙研究
無線LAN
加入者系無線アクセス
ISM機器
アマチュア無線

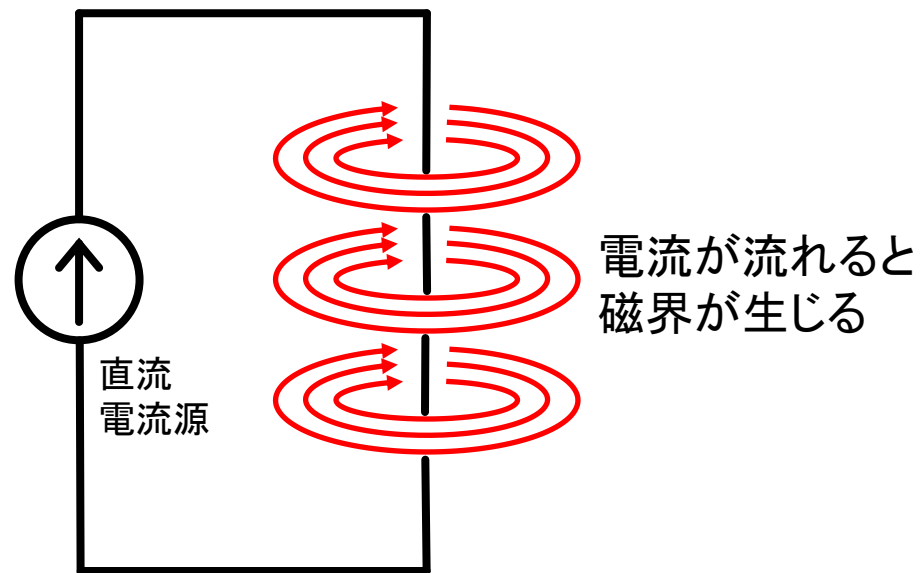
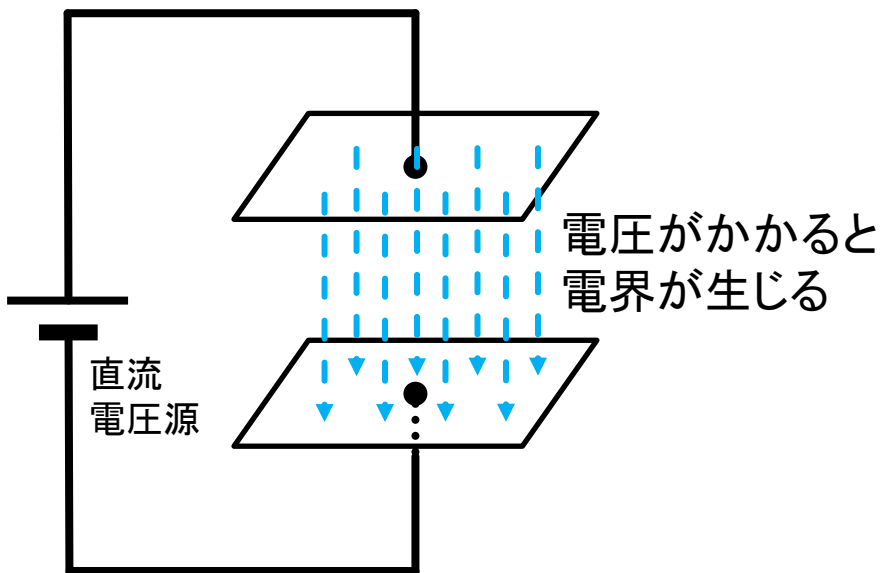
総務省ホームページより
<http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/myuse/summary/>

高周波・マイクロ波・ミリ波 回路の基礎知識

電界・磁界

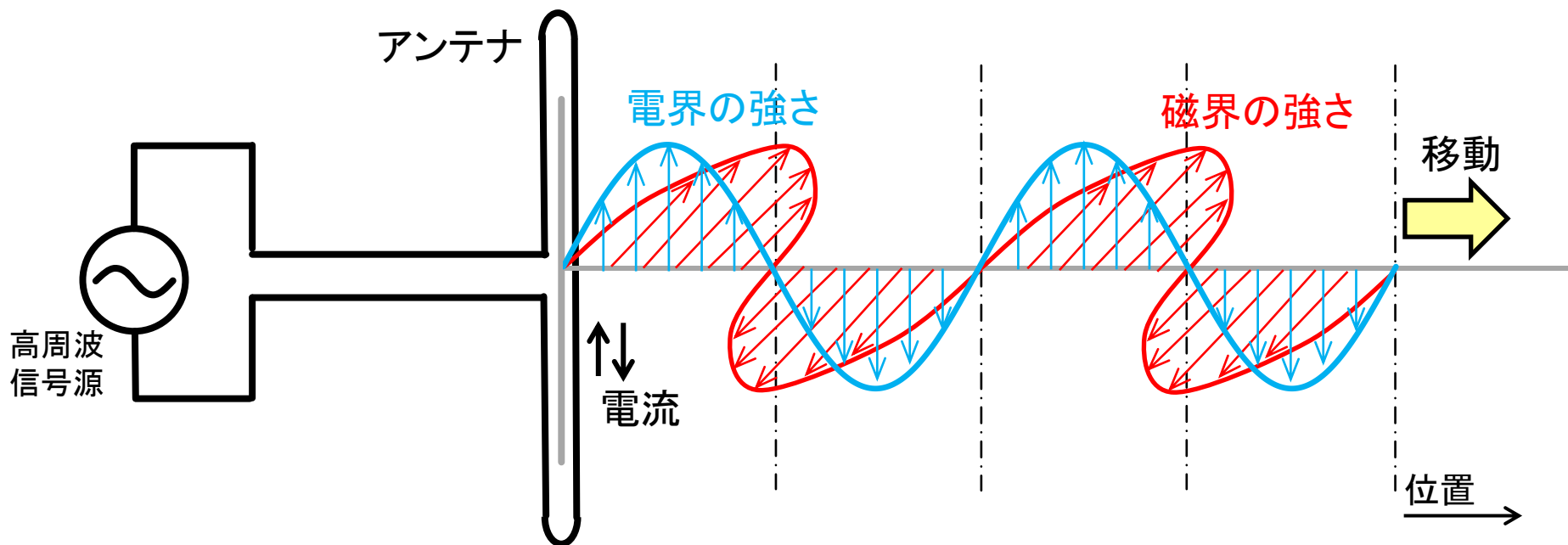
● 高周波という前に。。。 直流の話。

- ◆ 「直流」= 電圧や電流が時間的に変化しない状態。
- ◆ 電圧がかかると電界が生じる。
- ◆ 電流が流れると磁界が生じる。



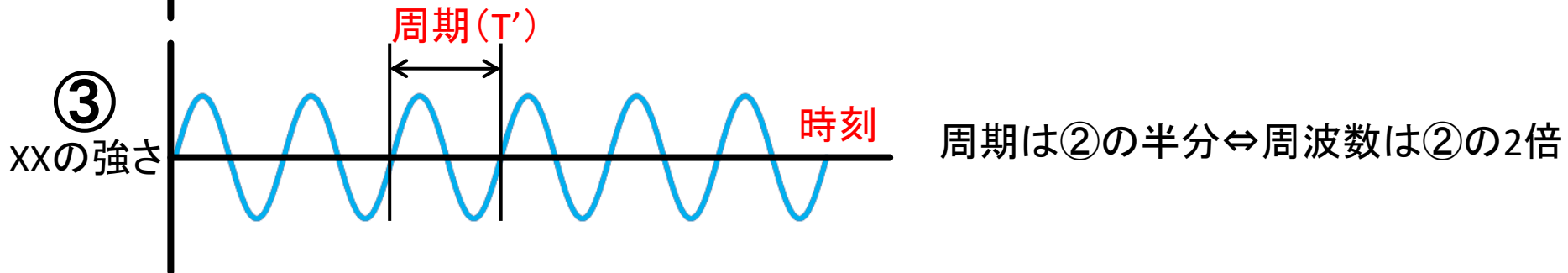
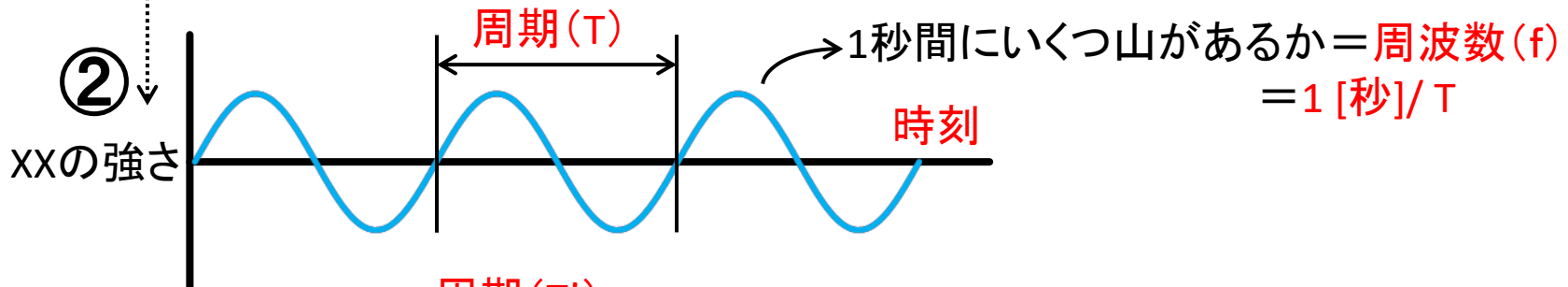
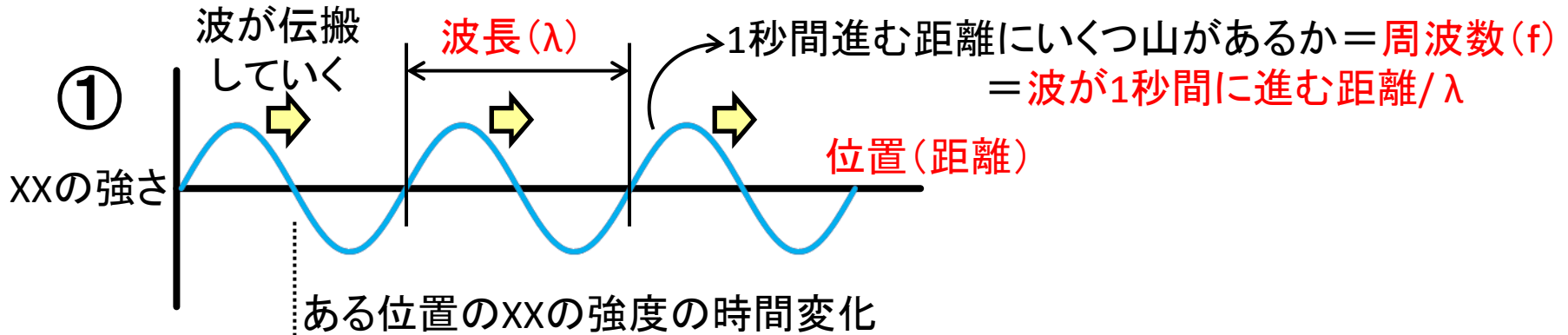
変化する電界 + 磁界 = 電磁波

- 電流（電圧）が周期的に変化すると、磁界と電界が変化しながら空中を伝搬していく。⇒電磁波 = 電波
- 光も電波も電磁波の1種：波長が違う。
- 下の図はある瞬間の電界と磁界の強さを表した図で、位置によって強さが異なっている。
- この状態が時間経過とともに右方向に移動していく。



波

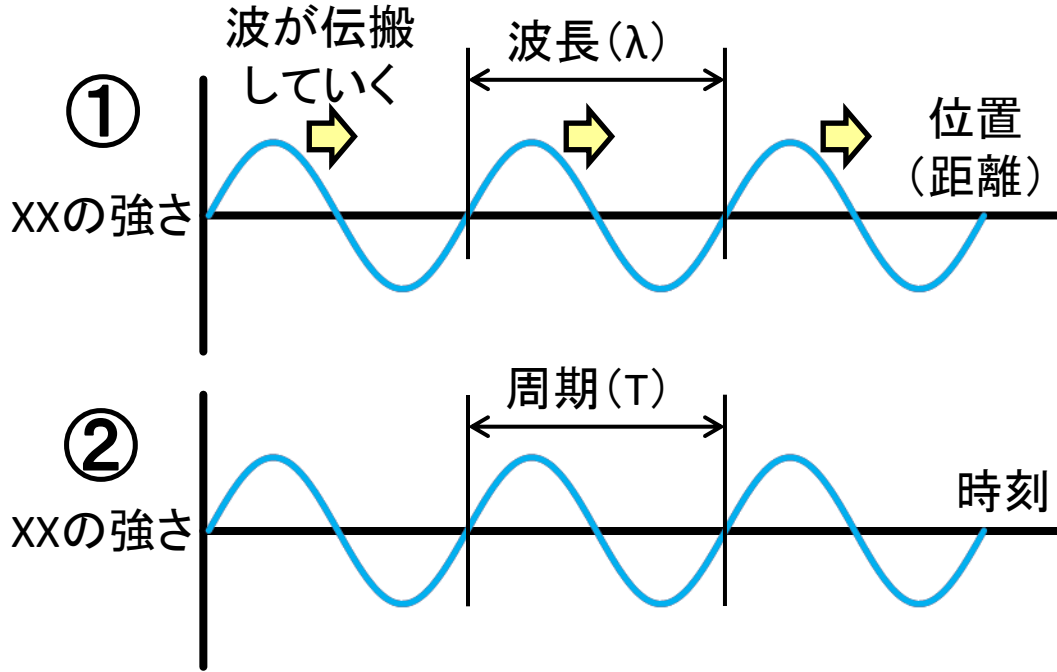
- 基本的な波のグラフ: 横軸が何であるか注意



波

● 周波数と波長と周期の例。

$$\text{周波数}(f) = \text{光速} / \text{波長}(\lambda) = 1[\text{秒}] / \text{周期}(T)$$



周波数(f)	波長(λ)	周期(T)
50 Hz	6000 km	20 ms
⋮	⋮	⋮
100 kHz	3000 m	10 μs
1 MHz	300 m	1 μs
10 MHz	30 m	100 ns
100 MHz	3 m	10 ns
1 GHz	30 cm	1 ns
10 GHz	3 cm	100 ps
100 GHz	3 mm	10 ps

k:10³, M:10⁶, G:10⁹, T:10¹², ...

c:10⁻², m:10⁻³, μ:10⁻⁶, n:10⁻⁹, p:10⁻¹², ...

波が1秒間に進む距離 = 真空中の電磁波なら300,000 km/s ≒ 地球を7まわり半
≒ 空気中もほぼ同じ

誘電体だと短くなる
電線や伝送線路でも短くなる } すなわち波長が短くなる

→ 例えば同軸ケーブルで200,000 km/s。真空中の2/3。

参考:光速

- 正確な数字 = 299,792,458 m/s <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%85%89%E9%80%9F>

にく(憎)くなく 二人 寄れば いつも ハッピー
29 979 2 4 5 8



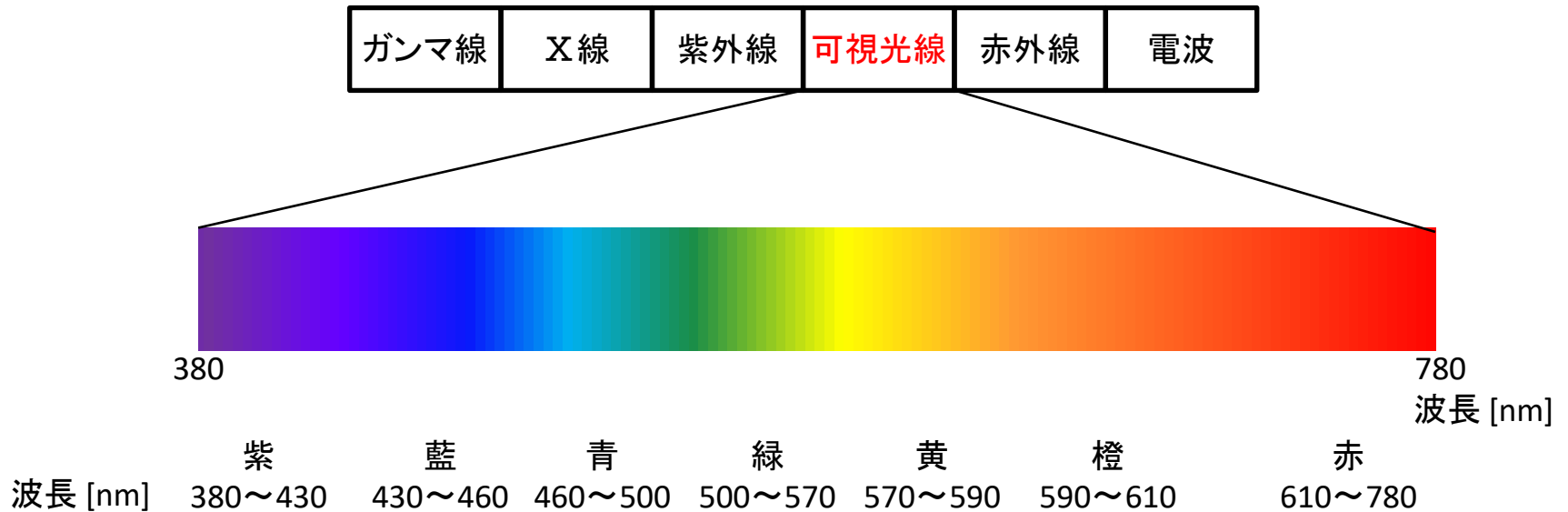
- 地球を7まわり半
赤道から北極まで $\div 10,000$ km
子午線の長さ $\div 40,000$ km
 $\Rightarrow 40,000 \times 7.5 = 300,000$ km
- 誘電体中の光速 = 真空中の光速 $\div \sqrt{\text{比誘電率}}$
- 磁性体中の光速 = 真空中の光速 $\div \sqrt{\text{比透磁率}}$
- 一般に光速 = 真空中の光速 $\div \sqrt{(\text{比誘電率}) \times (\text{比透磁率})}$
- 空気中の光速 \div 真空中の光速
(空気の比誘電率: 1.00059、空気の比透磁率: 1.00000037)
- 水中の光速 $\div 230,000$ km/s

参考：可視光

- 可視光の波長：

$$\text{周波数}(f) = \text{光速} / \text{波長}(\lambda) = 1[\text{秒}] / \text{周期}(T)$$

下界はおおよそ360-400 nm、
上界はおおよそ760-830 nmである。



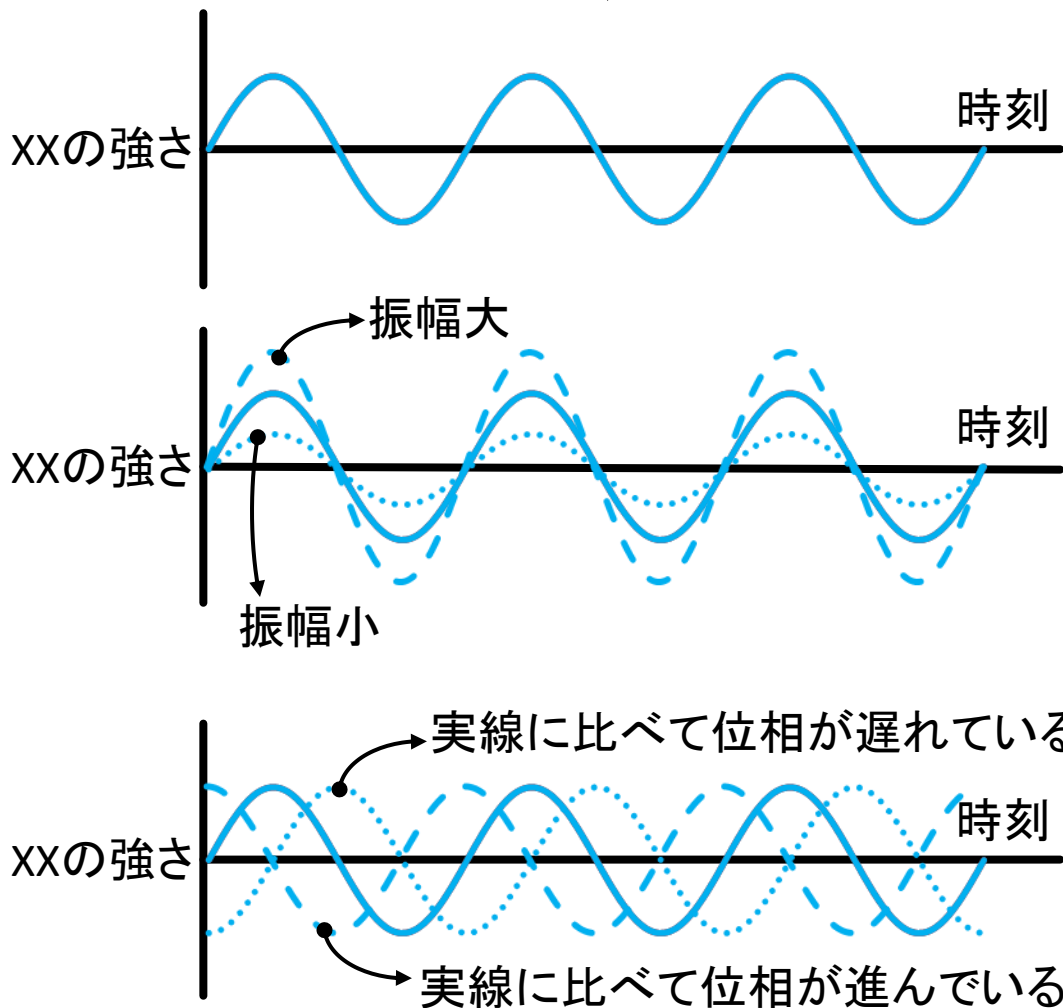
赤色と青色が混ざると紫色に見えるのはなぜ???

⇒目の特性が理由であり、波長の話だけでは説明がつかない。

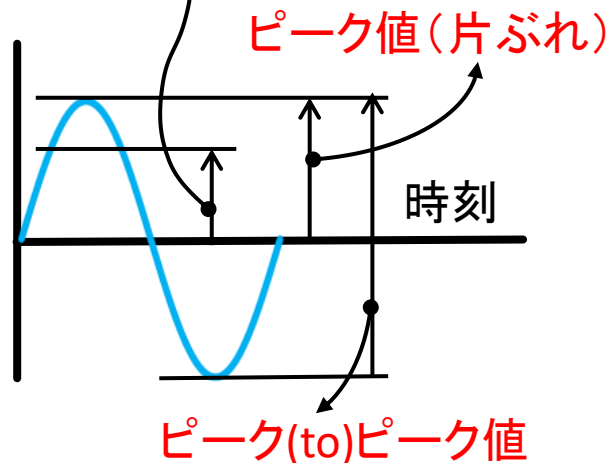
人間の目の「センサ」は赤、緑、青の3つで、赤と青が同時に来ると脳が紫と認識するから。同様に緑と赤が来ると黄色と認識する。

振幅・位相

- 強さを振幅で表し、時間推移を位相で表す。



実効値: 抵抗を負荷とした時
同じ電力を消費する
直流への換算値



日本の商用電源

実効値 = 100 V

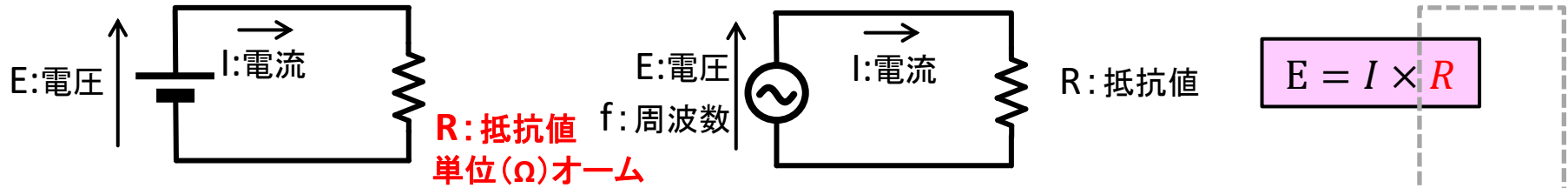
ピーク値 = 141 V ($=\sqrt{2} \times 100$)

ピークピーク値 = 282 V ($=2\sqrt{2} \times 100$)

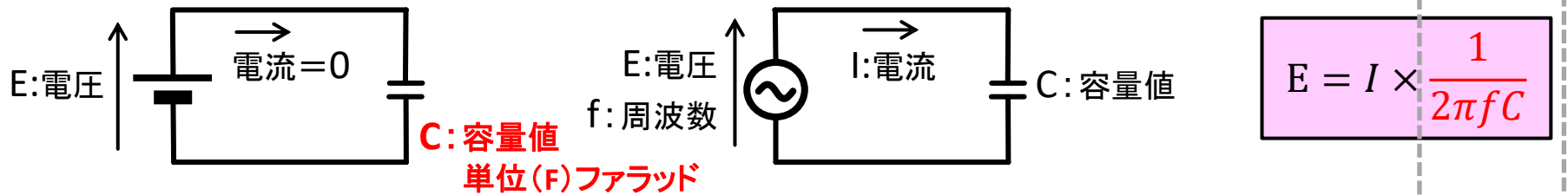
電熱器に直流100 Vを加えたのと
実効値100 Vの交流とは同じ電力消費

抵抗、コンデンサ、コイル

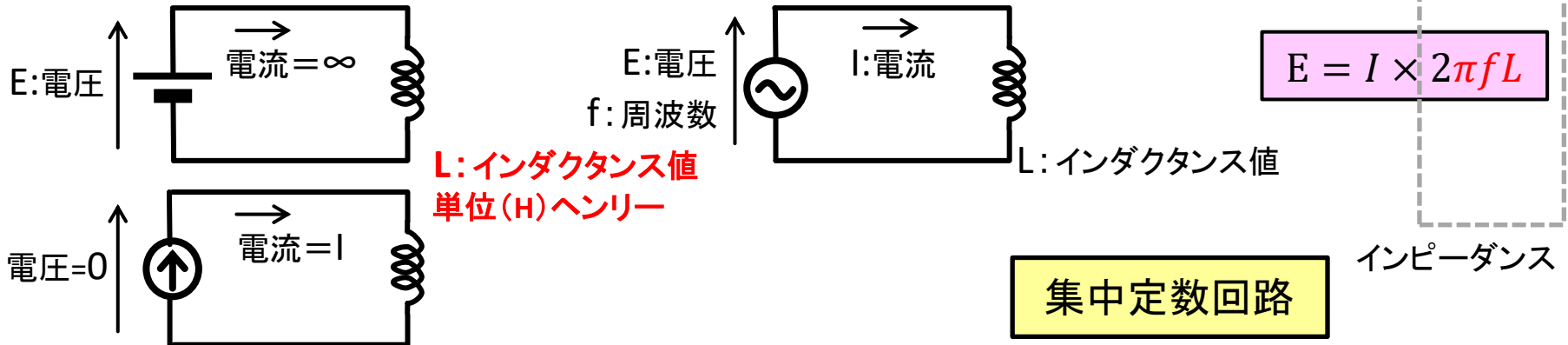
- 抵抗：流れる電流 (I) が印加電圧に比例する素子



- コンデンサ：直流は流れない、高周波では周波数 f に比例して電流が流れる。

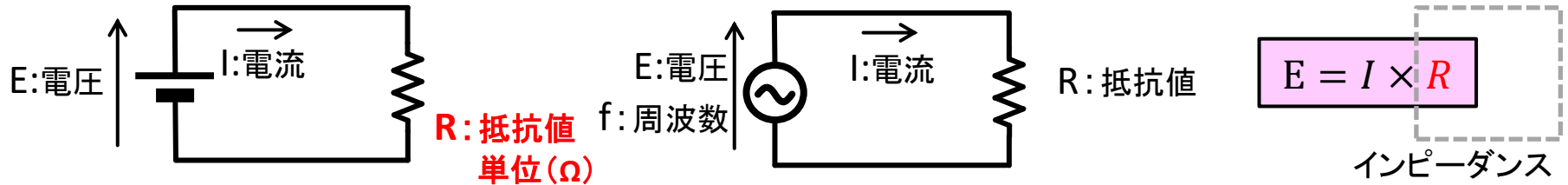


- コイル：直流は流れる、高周波では周波数 f に反比例して電流が流れる。

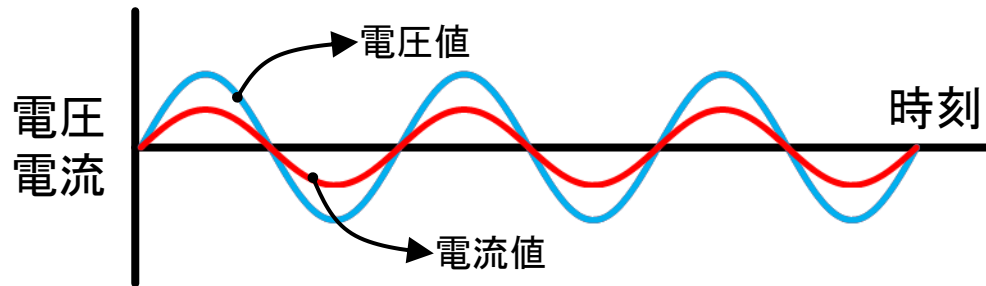


抵抗

- 流れる電流 (I) が印加電圧に比例する素子

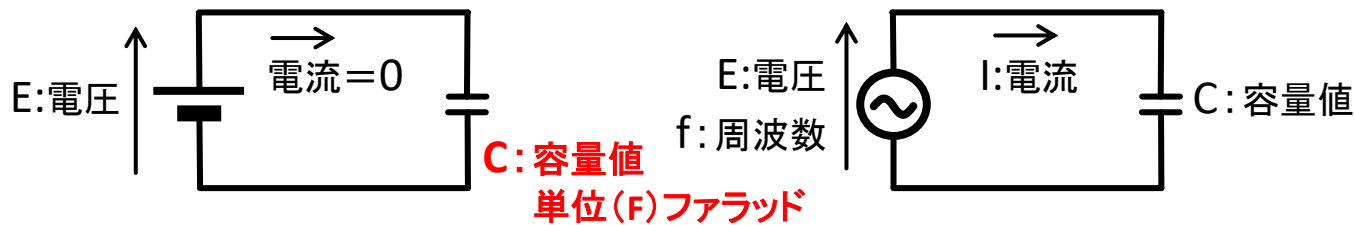


- 高周波(交流)を印加したとき、電圧と電流の位相は同じ。



コンデンサ (キャパシタ)

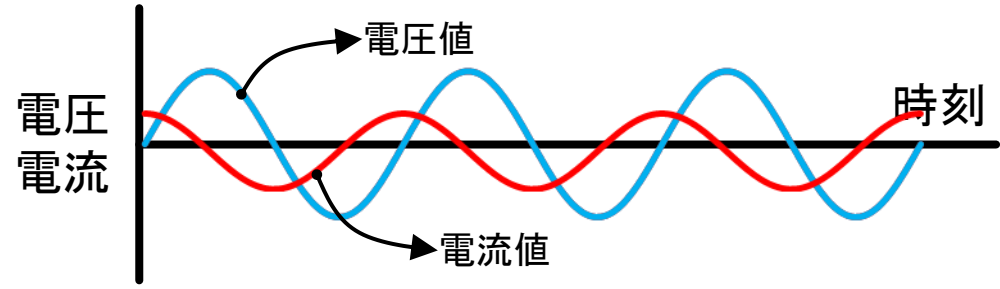
- 直流は流れない、高周波では周波数 f に比例して電流が流れる。



$$E = I \times \frac{1}{2\pi f C}$$

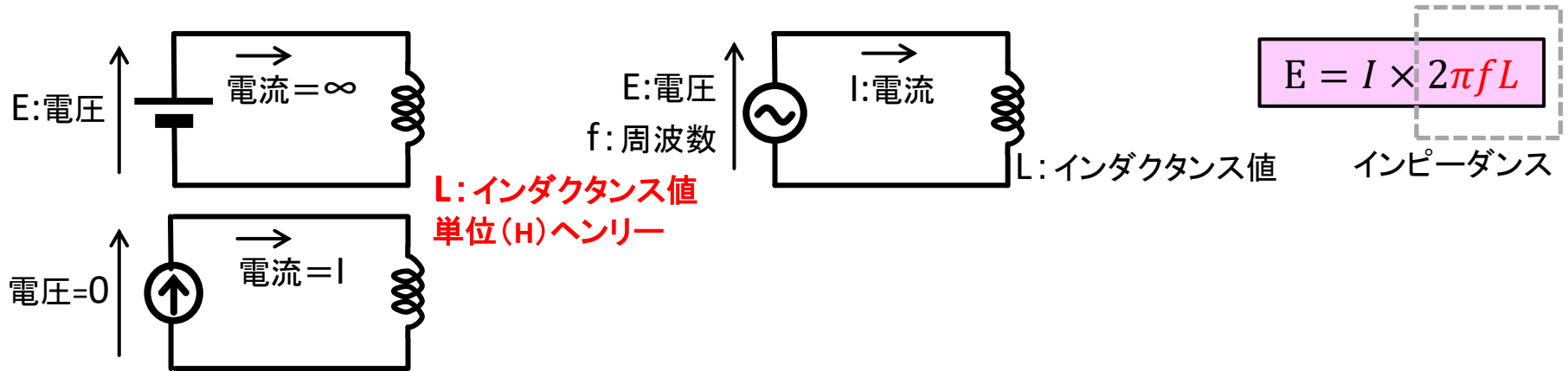
インピーダンス

- 高周波 (交流) を印加したとき、電流の位相は電圧の位相より 90° 進む。

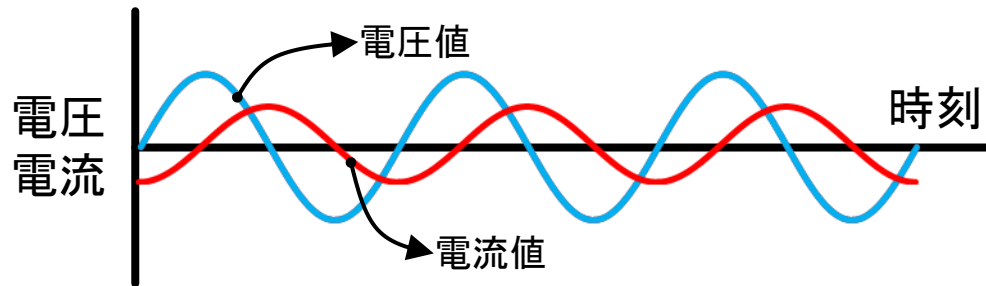


コイル(インダクタ)

- 直流は流れる、高周波では周波数 f に反比例して電流が流れる。

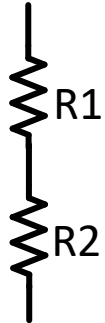


- 高周波(交流)を印加したとき、電流の位相は電圧の位相より 90° 遅れる。

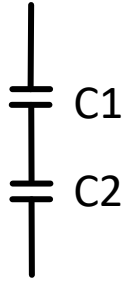


直列接続・並列接続

● 直列接続

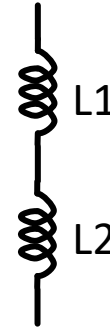


合成抵抗値 $R = R1 + R2$



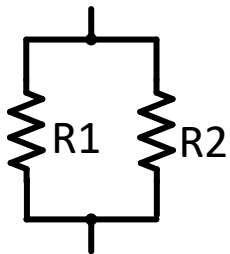
合成容量値 $C = \frac{1}{\frac{1}{C1} + \frac{1}{C2}} = \frac{C1 \times C2}{C1 + C2}$

上は掛け算
下は足し算

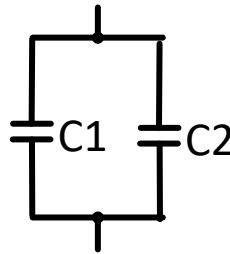


合成インダクタンス値 $L = L1 + L2$

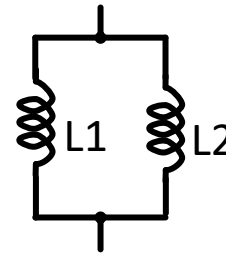
● 並列接続



合成抵抗値 $= \frac{1}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2}} = \frac{R1 \times R2}{R1 + R2}$



合成容量値 $= C1 + C2$



合成インダクタンス値 $= \frac{1}{\frac{1}{L1} + \frac{1}{L2}} = \frac{L1 \times L2}{L1 + L2}$

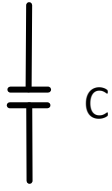
上は掛け算
下は足し算

複素インピーダンス

- 回路を複素数で表すと、大きさと位相の情報が一度に扱える。
 $\omega = 2\pi f$ 、虚数単位 = j とする。



インピーダンス $Z = R$



インピーダンス $Z = \frac{1}{j\omega C}$

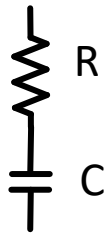


インピーダンス $Z = j\omega L$

- Z_1 と Z_2 の直列接続の合成複素インピーダンス $Z = Z_1 + Z_2$

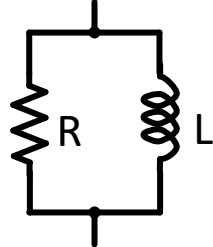
- Z_1 と Z_2 の並列接続の合成複素インピーダンス $Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}} = \frac{Z_1 \times Z_2}{Z_1 + Z_2}$ ⇐ 上は掛け算
下は足し算

- 合成複素インピーダンスの例



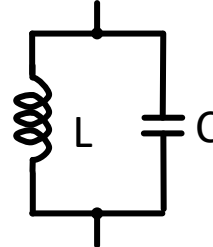
合成複素インピーダンス値

$$Z = R + \frac{1}{j\omega C}$$



合成複素インピーダンス値

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega L}$$



合成複素インピーダンス値

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{j\omega L} + j\omega C}$$

$$|Z| = \frac{1}{\omega C - \frac{1}{\omega L}} = \frac{\omega L}{\omega^2 CL - 1}$$

Z が ∞ になるのは $\omega^2 CL = 1$

$$\therefore \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

参考：□□□ダンス

- インピーダンス

- ◆ レジスタンス：抵抗成分（実部）－抵抗素子

- ◆ リアクタンス：誘導成分（虚部）－インダクタ（コイル）、キャパシタ（コンデンサ）

- アドミタンス：インピーダンスの逆数

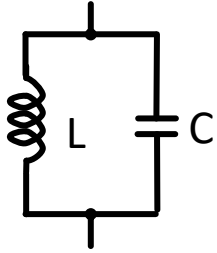
- ◆ コンダクタンス：抵抗成分（実部）－抵抗素子

- ◆ サセプタンス：誘導成分（虚部）－インダクタ（コイル）、キャパシタ（コンデンサ）

- インミタンス：インピーダンスとアドミッタンスの両方をさすとき

共振

● 並列共振

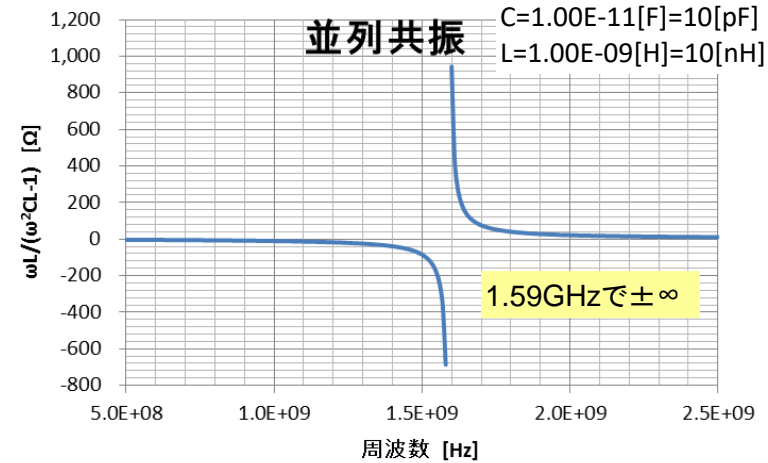


合成複素インピーダンス値

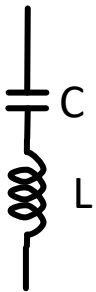
$$Z = \frac{1}{\frac{1}{j\omega L} + j\omega C}$$

$$|Z| = \left| \frac{1}{\omega C - \frac{1}{\omega L}} \right| = \left| \frac{\omega L}{\omega^2 CL - 1} \right|$$

$|Z|$ が ∞ になるのは $\omega^2 CL = 1$ $\therefore \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}, f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$



● 直列共振

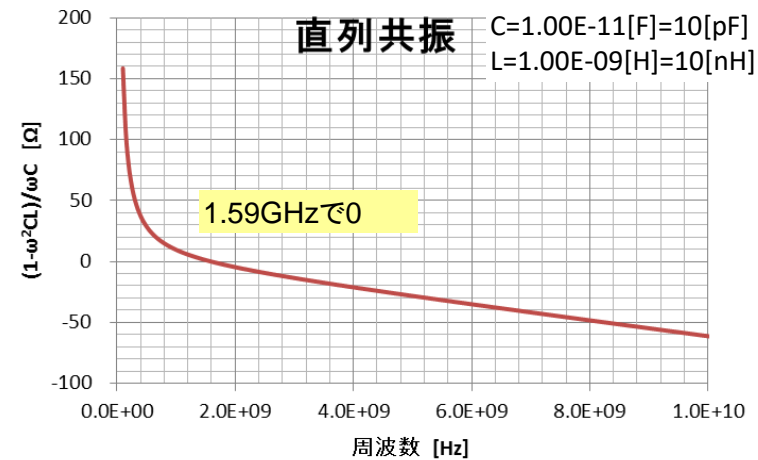


合成複素インピーダンス値

$$Z = \frac{1}{j\omega C} + j\omega L$$

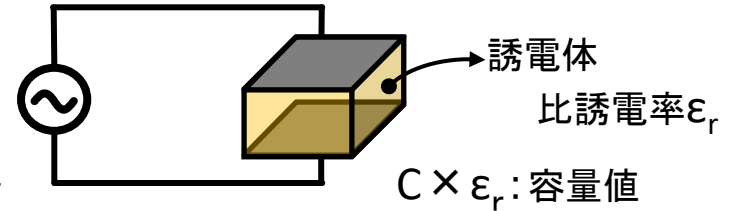
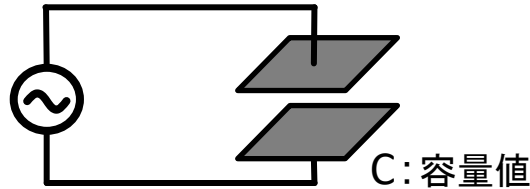
$$|Z| = \left| \frac{1 - \omega^2 CL}{\omega C} \right|$$

$|Z|$ がゼロになるのは $\omega^2 CL = 1$ $\therefore \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}, f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$



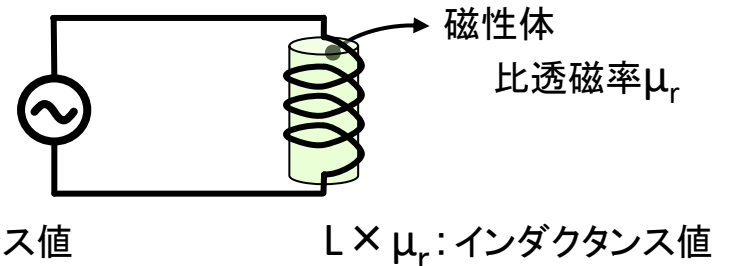
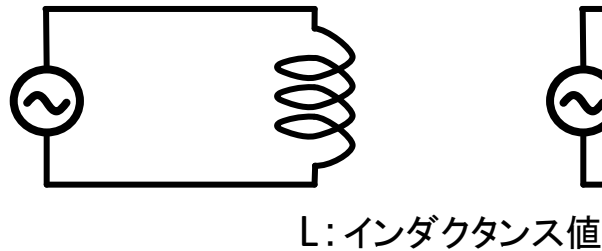
誘電体・磁性体

- 誘電体：絶縁体（＝電気を通さない）であり、コンデンサに挿入するとその容量が増大する。



誘電率 $\epsilon =$ 真空の誘電率 $\epsilon_0 \times$ 比誘電率 ϵ_r
電束密度 $D = \epsilon \times$ 電界強度 E

- 磁性体：コイルに挿入するとそのインダクタンス値が増大する。



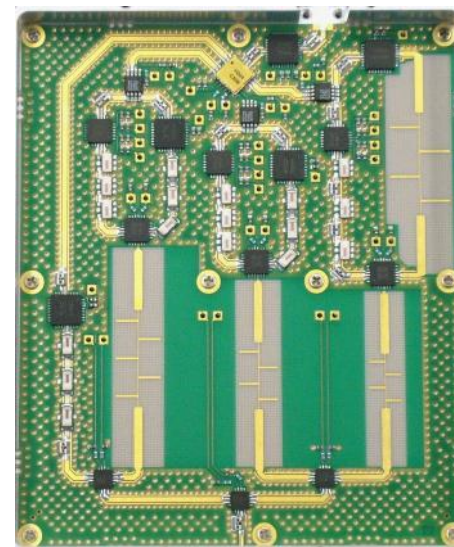
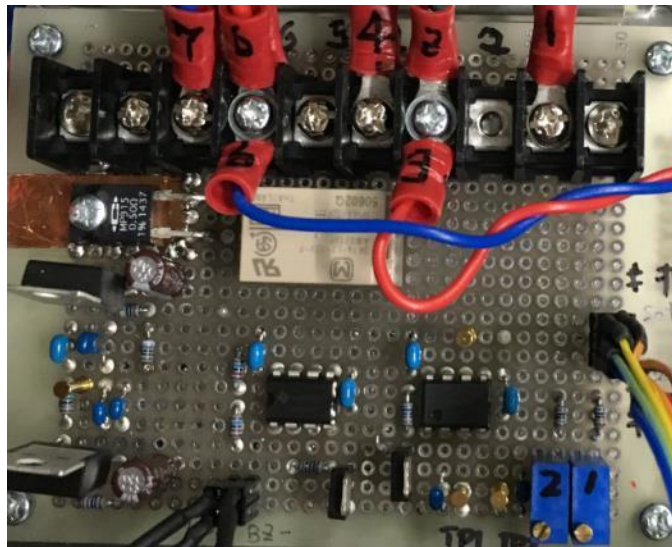
透磁率 $\mu =$ 真空の透磁率 $\mu_0 \times$ 比透磁率 μ_r
磁束密度 $B = \mu \times$ 磁界の強さ H

実装

● 電気回路ってどうやって組み立てるの？

- ① 「**でっかい**」リード線付の部品を端子にはんだ付けする
- ② プリント基板にリード線部品をはんだ付けする
- ③ プリント基板に「**小さな**」リード無し部品(=チップ部品)をはんだ付けする。
- ④ ②③に加え、プリント板の銅箔パターン自体が機能を持つ。(高周波領域)
- ⑤ シリコン基板の上に半導体技術で「**微小**」部品を作る。=IC(Integrated Circuit)。。。など

世界最初の
マイクロプロ
セッサ4004



<http://www.edic-systems.co.jp/category/1351698.html>

<https://www.i-programmer.info/history/machine-s/3345-birth-of-the-intel-4004-the-first-microprocessor.html>

周波数と波長の復習。。。。

- 周波数と波長：17頁

$$\text{周波数}(f) = \text{光速} / \text{波長}(\lambda) = 1[\text{秒}] / \text{周期}(T)$$

↓プラチナバンド

- 800MHzの携帯電話／スマートフォン

【空気(真空)中】 正確な値は 299792458 m/s

光速：(約)300,000 km/秒

波長：300,000 km /秒 ÷ 800 MHz

$$\Rightarrow 0.375 \text{ m} = 375 \text{ mm}$$

周期：1 ÷ 800 MHz ⇒ 1.25 ns

【比誘電率=10の物質中】

光速：300,000 km/秒 ÷ $\sqrt{\text{比誘電率}} = 300,000 \div \sqrt{10} \approx 95,000 \text{ km/秒}$

波長：95,000 km/秒 ÷ 800 MHz ⇒ $\approx 0.12 \text{ m}$

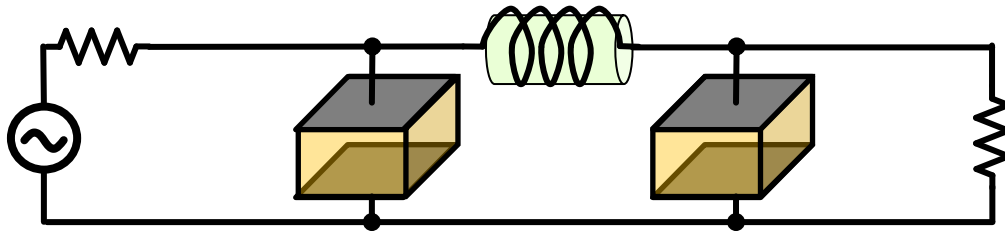
= 120 mm :そこそこ小さい！

周期：1 ÷ 800 MHz ⇒ 1.25 ns (真空中と同じ)

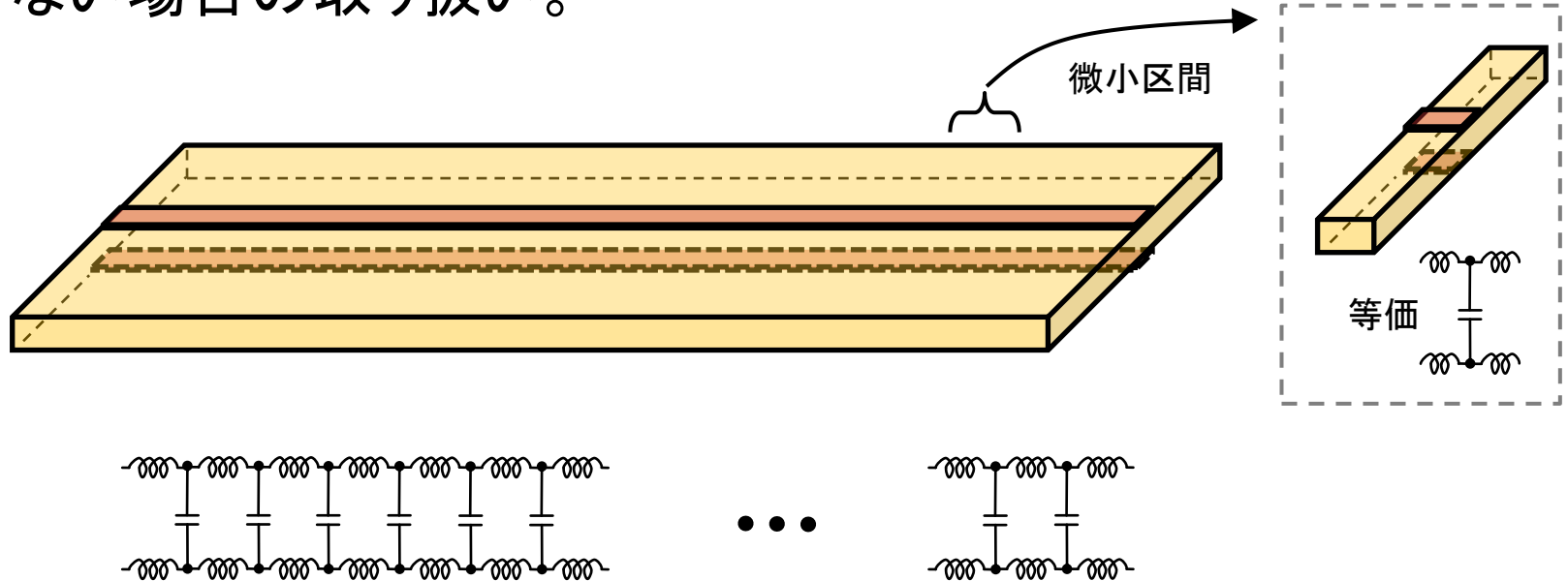
周波数(f)	波長(λ)	周期(T)
50 Hz	6000 km	20 ms
⋮	⋮	⋮
100 kHz	3000 m	10 μs
1 MHz	300 m	1 μs
10 MHz	30 m	100 ns
100 MHz	3 m	10 ns
1 GHz	30 cm	1 ns
10 GHz	3 cm	100 ps
100 GHz	3 mm	10 ps

集中定数回路と分布定数回路

- 集中定数回路: 抵抗・コンデンサ・コイルなどの素子の集合。素子の物理的寸法は問題にしない。

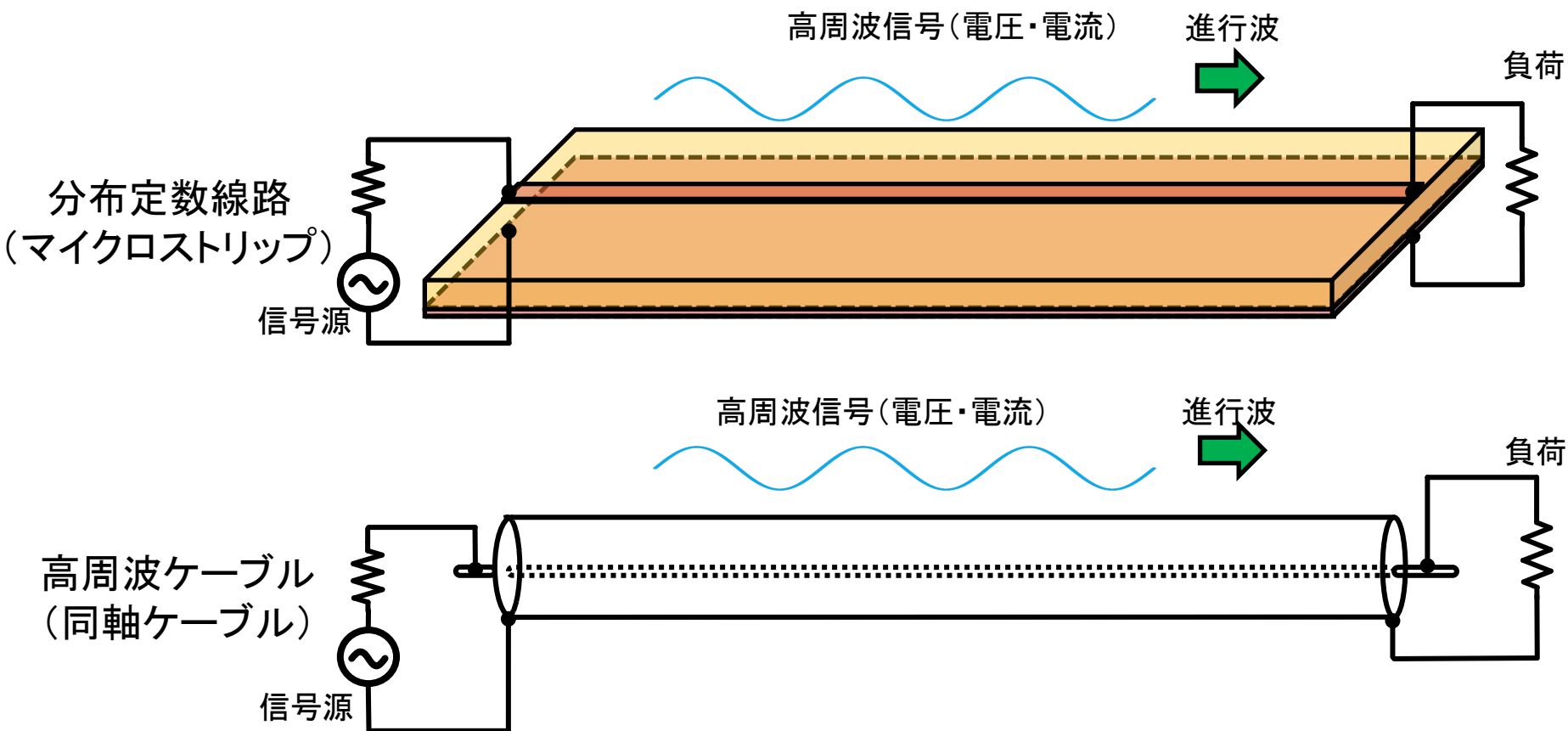


- 分布定数回路(線路): 素子の物理的寸法が、波長に対して無視できない場合の取り扱い。



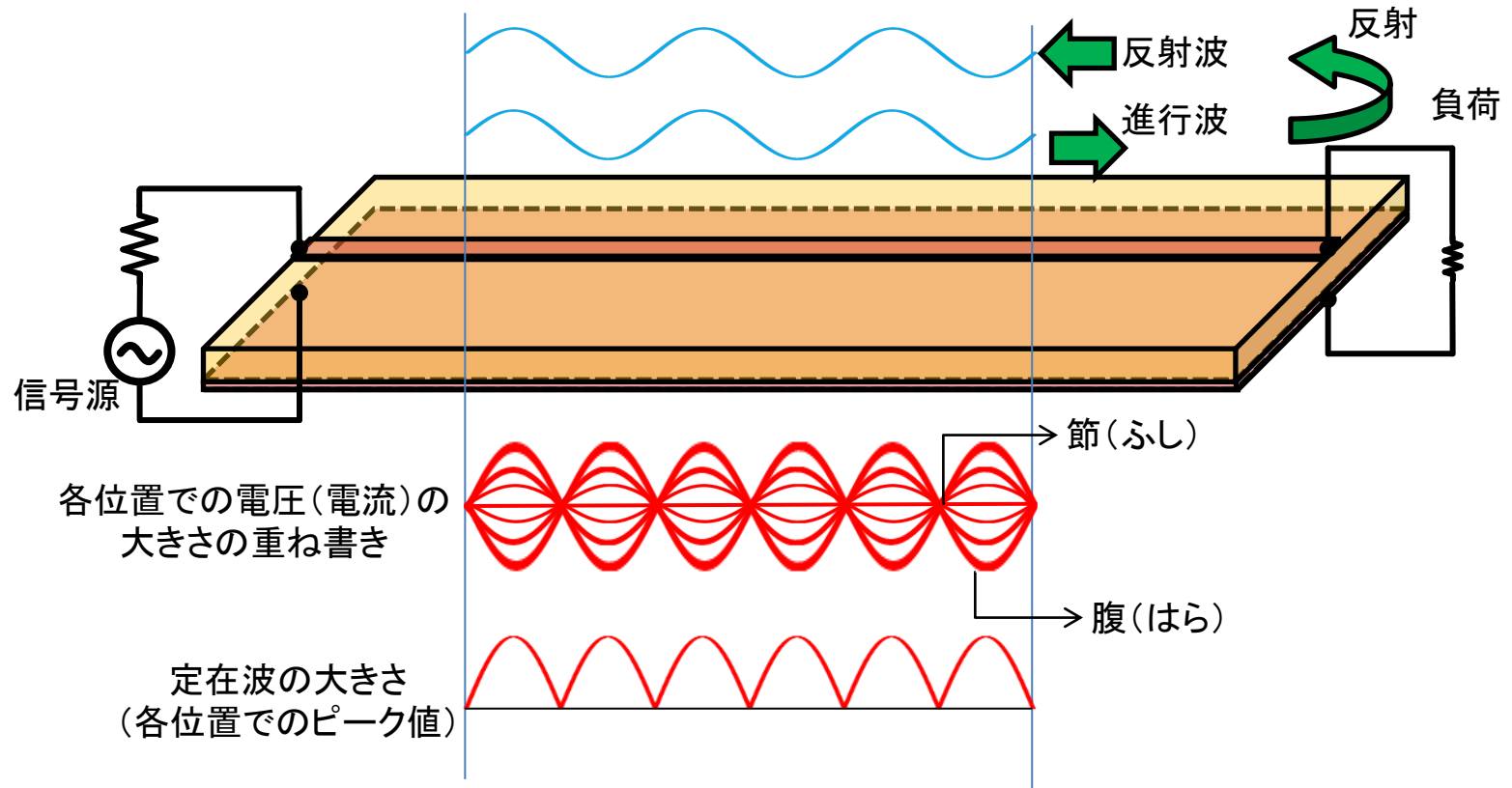
伝送線路

- 伝送線路に高周波信号を印加すると、伝送線路を光速オーダーの速度で伝搬する。(電圧・電流)



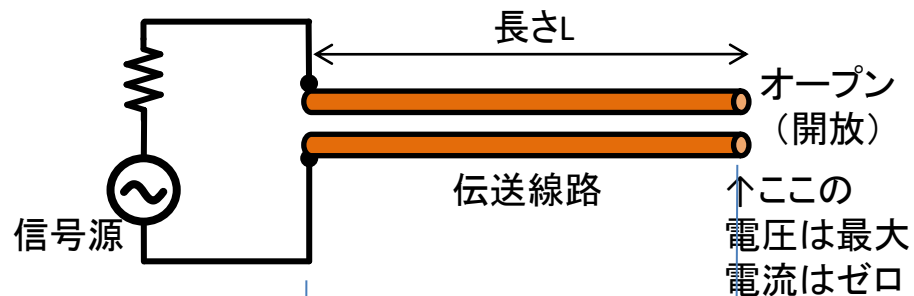
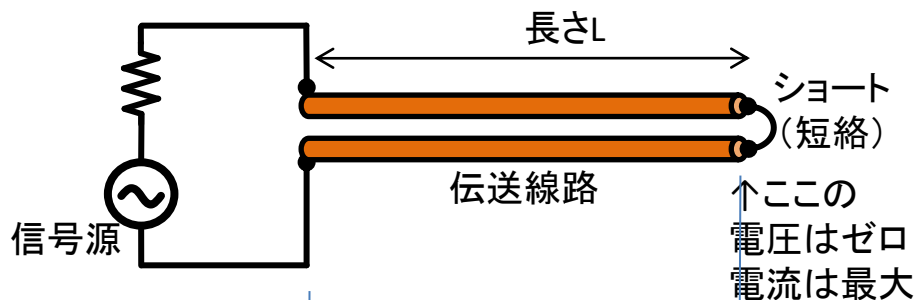
定在波

- 負荷で反射が起こると、進行波と反射波の干渉により、位置によって電圧（電流）の大きい場所と小さい場所とが現れる。

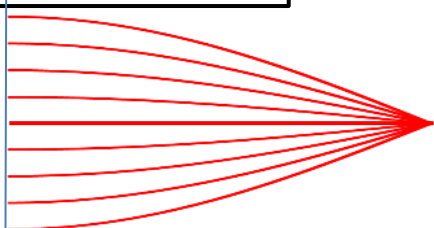


定在波

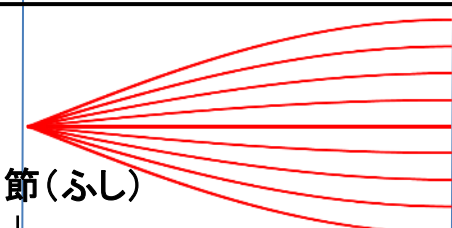
- 伝送線路の長さが波長の4分の1、2分の1の時の性質



L=4分の1波長の時の電圧(時間変化)



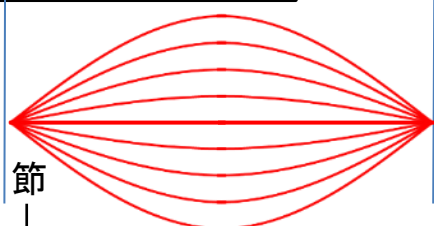
L=4分の1波長の時の電圧(時間変化)



節(ふし)

常に電圧がゼロ
=ショートと同じ

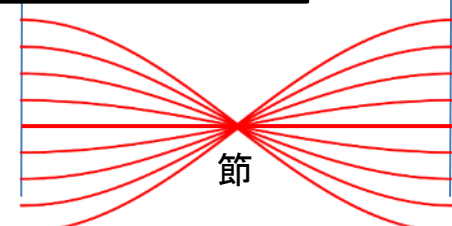
L=2分の1波長の時の電圧(時間変化)



常に電圧がゼロ
=ショートと同じ

腹

L=2分の1波長の時の電圧(時間変化)

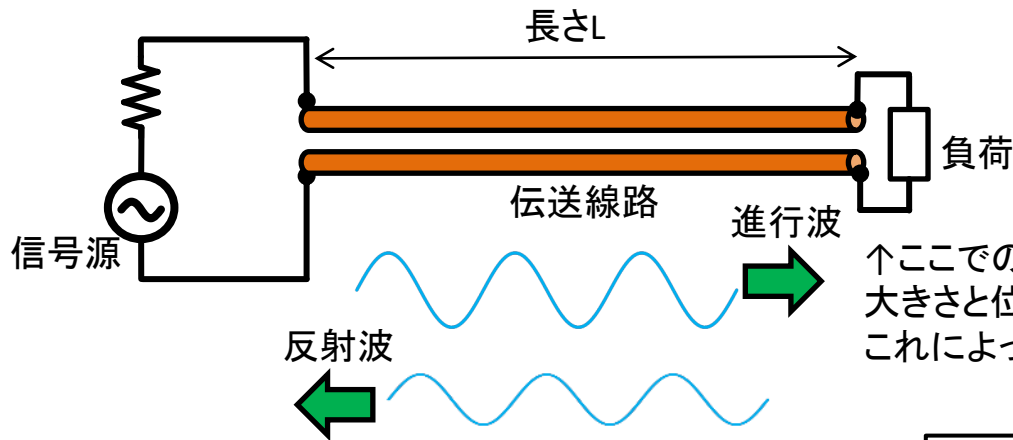


電圧が最大
=オープンと同じ

腹

定在波

- 長さが半端な値ならば。。。
- ショートでもオープンでもなければ。。。



- 縄を張って、左端でゆるする、右端がどうとまっているかで縄に定常的に生じる波のエンベロップ(定在波)が異なる。

↑ここでの反射の大きさと位相が様々。これによって定在波が決まる。

ショートなら同じ大きさ／逆位相。
オープンなら同じ大きさ／同位相。

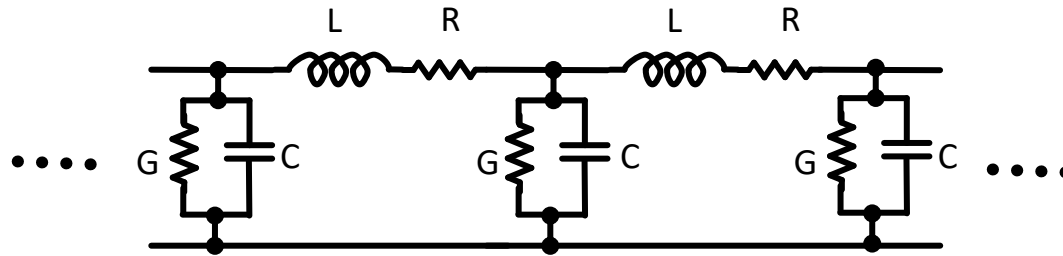
- 定在波比 (VSWR)
Voltage Standing Wave Ratio
定在波の最大振幅と最小振幅の比。
1:Xという表現をする。

負荷が特別な値の場合は反射が無い (反射の大きさがゼロ) で、定在波がたたない。
= 整合している、マッチングが取れている。(後述)

注: 定常波 = 定常的な波すなわち周期的な波。
⇔ 一回しか来ない波。
「定在波」と使い分けるべきだが、まれに混用される。

伝送線路の特性インピーダンス

- 特性インピーダンスとは線路の電圧と電流の比（もしくは電界強度と磁界強度の比）
- 分布定数回路の等価回路を次のように表す。



- 特性インピーダンス Z_0 の式

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

- 線路に損失がない場合は $R=G=0$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

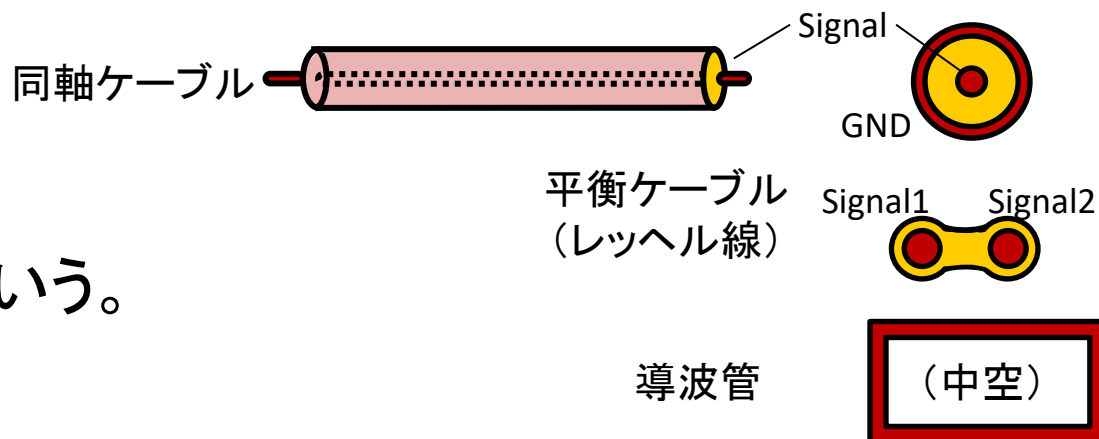
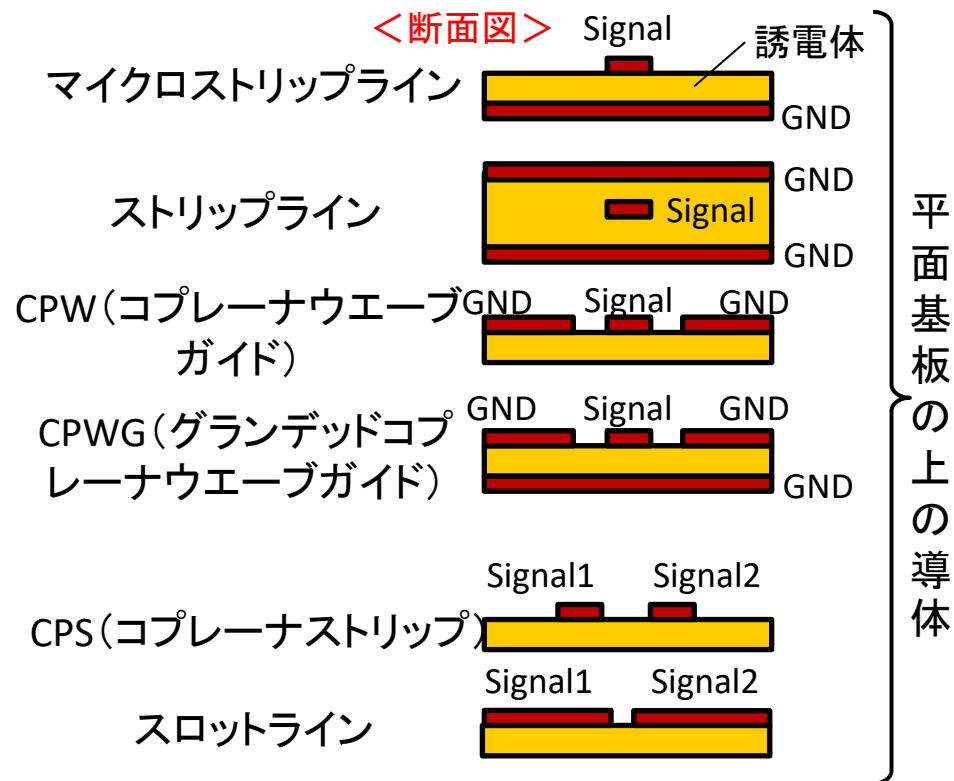
伝送線路

- 分布定数線路の色々
 - ◆ マイクロストリップライン
 - ◆ ストリップライン (トリプレート)
 - ◆ CPW (コプレーナウエーブガイド)
 - ◆ CPWG
 - ◆ CPS (コプレーナストリップ)
 - ◆ スロットライン

- 高周波ケーブル
 - ◆ 同軸ケーブル
 - ◆ 平衡ケーブル

- 導波管

- これらを伝送線路ともいう。

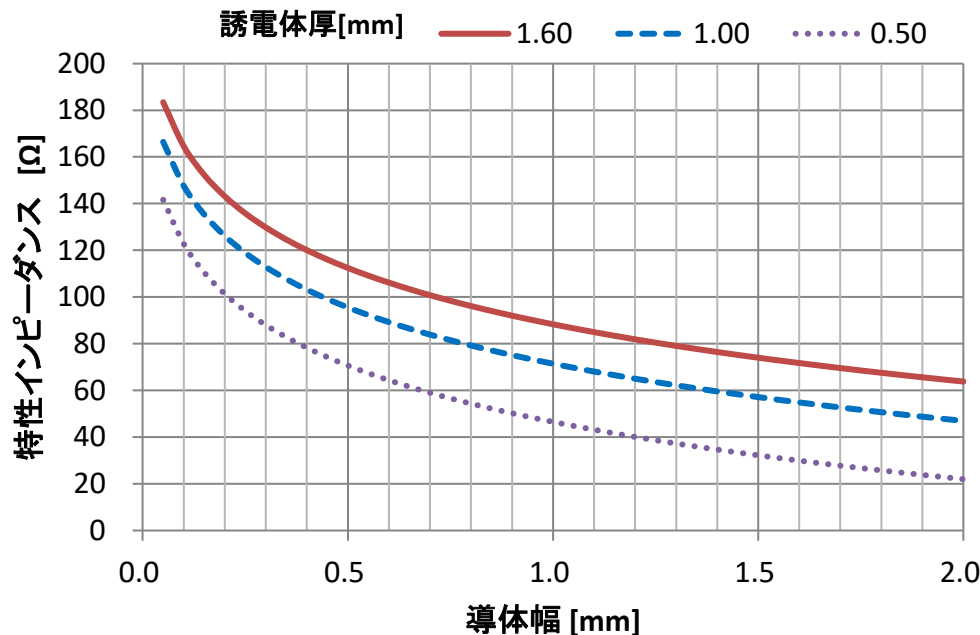
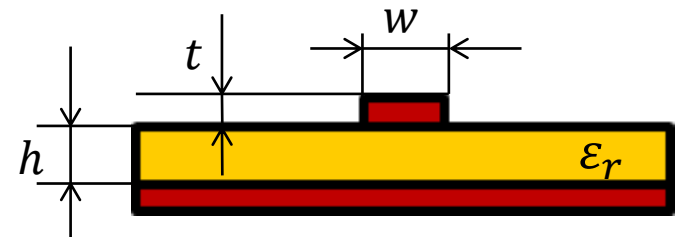


特性インピーダンスの例

近似式は多数あるが一例を示す。

● マイクロストリップラインの近似式

$$Z_0 = \frac{89}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \ln \left(\frac{5.98h}{0.8w + t} \right)$$



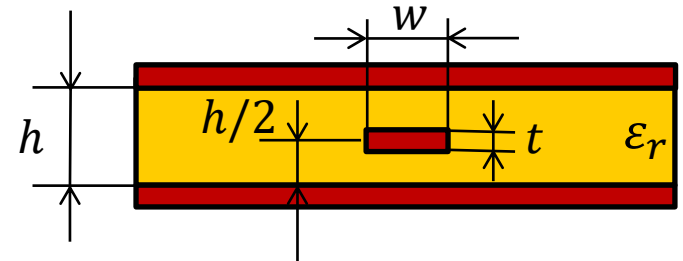
基板比誘電率 $\epsilon_r=4.73$
導体厚 $t=18\mu\text{m}$

● 「特性インピーダンス 計算」など検索サイト入力ツール多数あり

特性インピーダンスの例

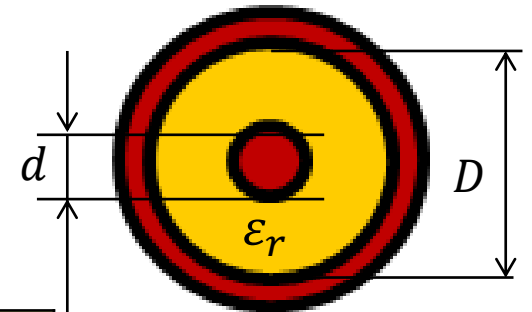
● ストリップラインの近似式

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{4h}{0.67\pi(0.8w + t)} \right)$$



● 同軸ケーブルの近似式

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \left(\frac{D}{d} \right)$$



同軸ケーブルの例

名称	特性インピーダンス [Ω]	内導体径 [mm]	誘電体径 [mm]	外径 [mm]	波長短縮率※
1.5D-2V	50	7/0.18	1.6	2.9	0.67
3D-2V	50	7/0.32	3.0	5.7	0.67
5D-2V	50	1.4	4.8	7.5	0.67
3C-2V	75	0.5	3.1	5.4	0.67
5C-2V	75	0.8	5.0	7.5	0.67
RG-58A/U	50	19/0.18	2.9	5.0	0.67
RG-174/U	50	7/0.16	1.5	2.5	0.67

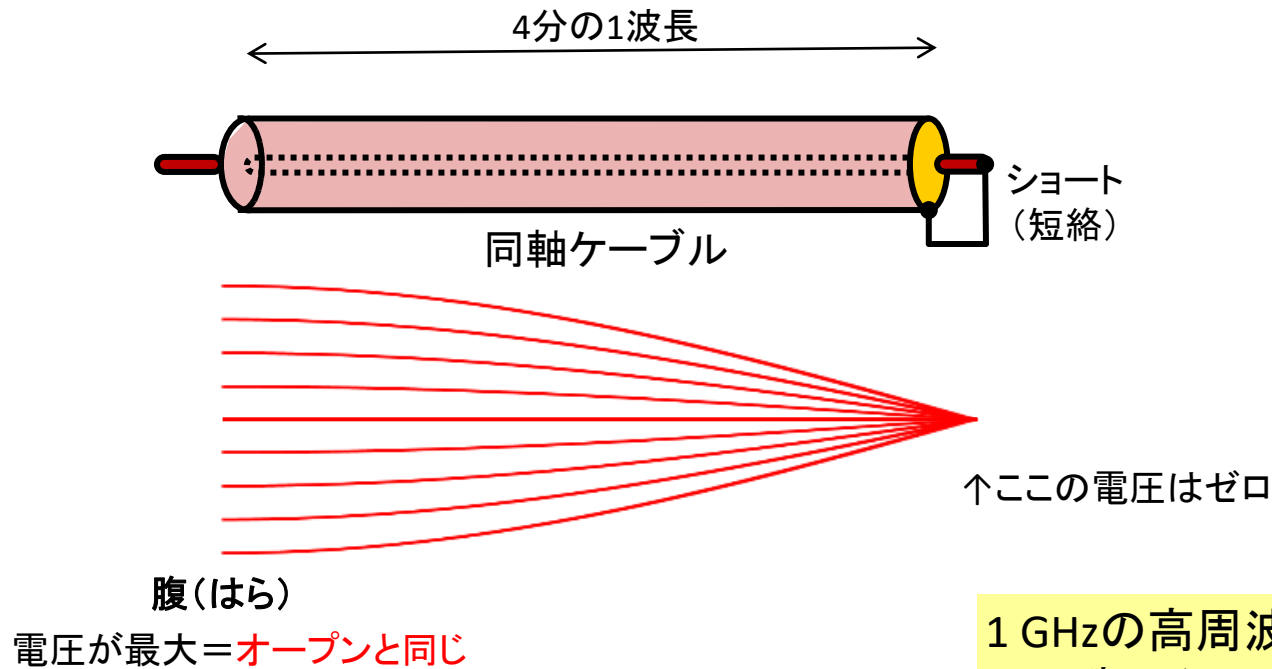
※波長短縮率とは誘電体があるため伝搬速度が遅くなっていることによる、波長の短くなる率を言う。

ポリエチレンは誘電率は2.2で、波長短縮率は

$$\sqrt{1/2.2} = 0.67$$

ショートしたつもりでもオープン

- 1 GHzの信号の4分の1波長は、、、
空気中の波長 = 30 cm
同軸ケーブル中の波長 = $30 \times 0.67 \div 20$ cm
4分の1波長 = 5 cm



1 GHzの高周波信号にとって
5 cm先のショートは無意味

- 10 GHzの4分の1波長は5 mm
- 100 GHzの4分の1波長は0.5 mm!

線路の平衡・不平衡

(注意: 平行、並行とは書かない)

- 平衡線路 (バランスド・ライン)

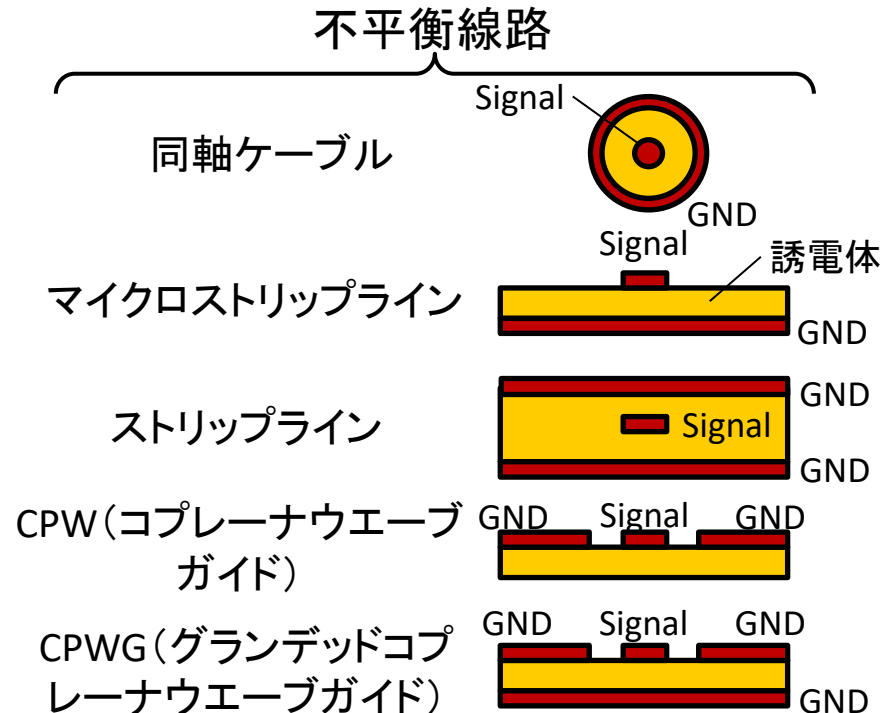
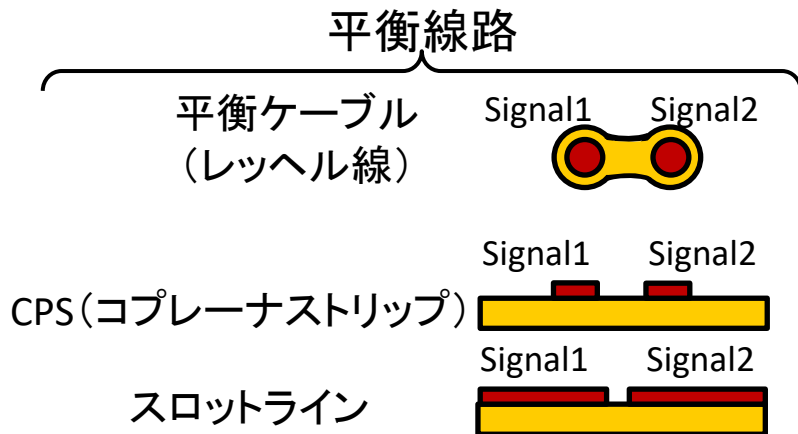
2本の線路が対等なもの。

例: レッヘル線、スロットライン、コプレーナストリップ

- 不平衡線路 (アンバランスド・ライン)

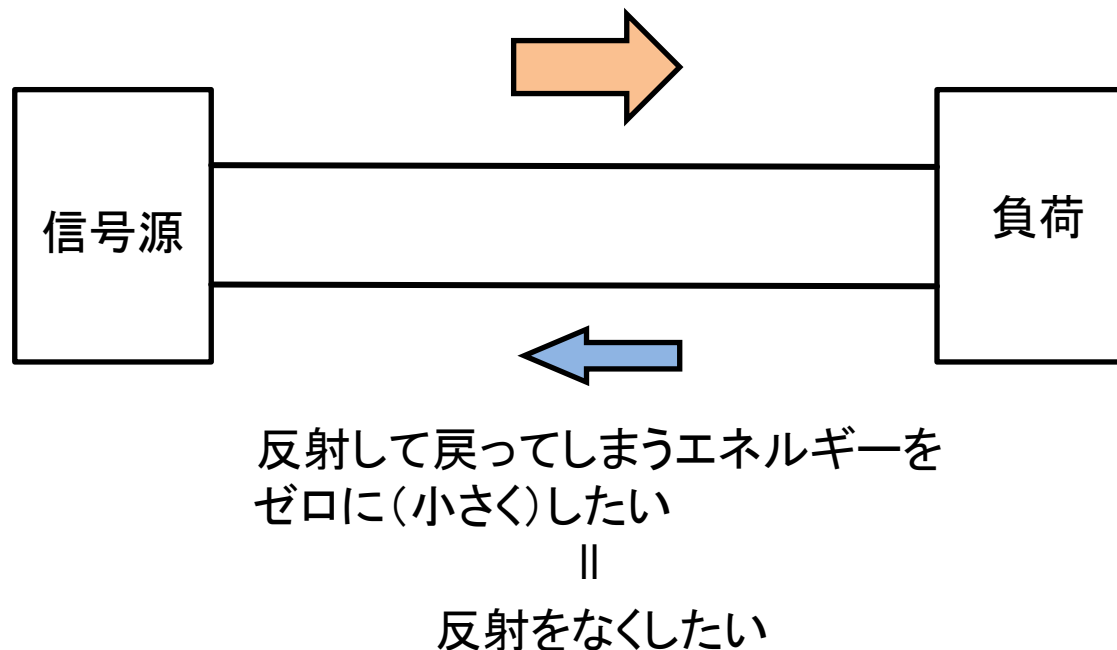
2本の線路が対等ではないもの。

例: 同軸ケーブル、マイクロストリップライン、ストリップライン、CPW、CPWG



マッチングの目的

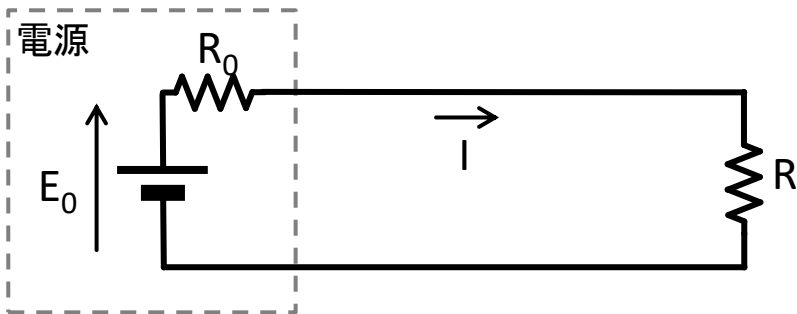
- 信号源から負荷の素子になるべく大きな電力を送りたい。
エネルギーの無駄を少なくしたい。



- その他にも、波形の乱れを防いだり、不要輻射を防いだり(後述)。

インピーダンスマッチング(直流)

- 下の図のように電源の内部抵抗が R_0 であるとき、負荷抵抗 R をいくらにすれば R に最大電力を取り出せるか。

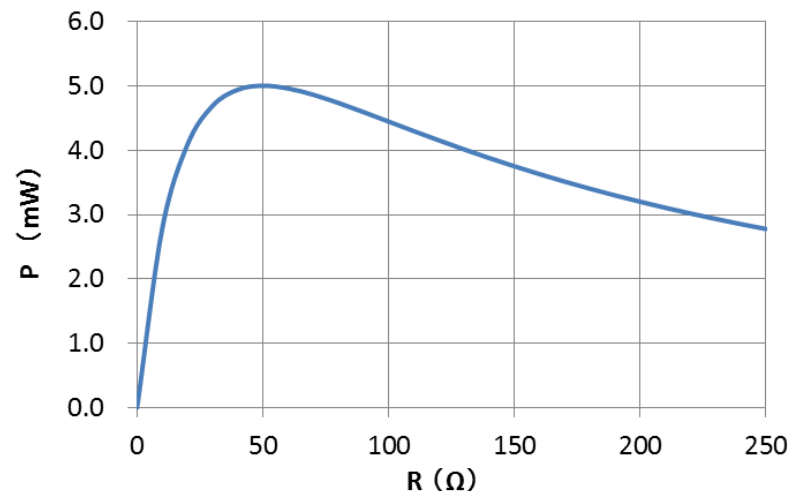


◆ R の電力 $P = (R$ 両端の電圧) \times (R に流れる電流 I) $= IR \times I = \left(\frac{E_0}{R_0 + R}\right)^2 R$

- ◆ $E_0 = 1(\text{V})$ 、 $R_0 = 50(\Omega)$ でグラフを描くと右のとおり。

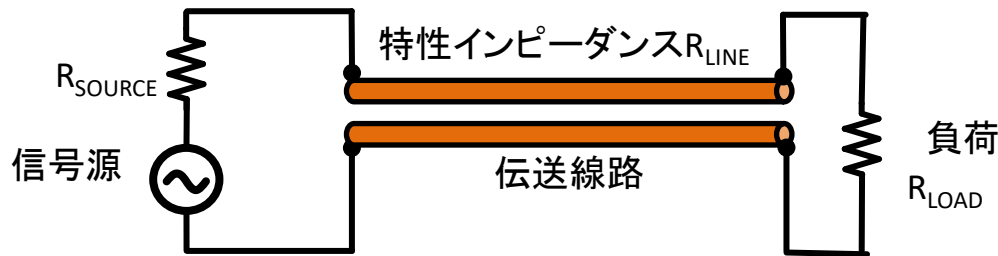
- R が小さいと内部抵抗 R_0 の電力が大きく、負荷抵抗 R の電力は小さい。
- R が大きいと電流が小さく負荷抵抗 R の電力は小さい。

- ◆ $R = R_0$ の時、負荷抵抗 R の電力は最大となる。



インピーダンスマッチング(高周波)

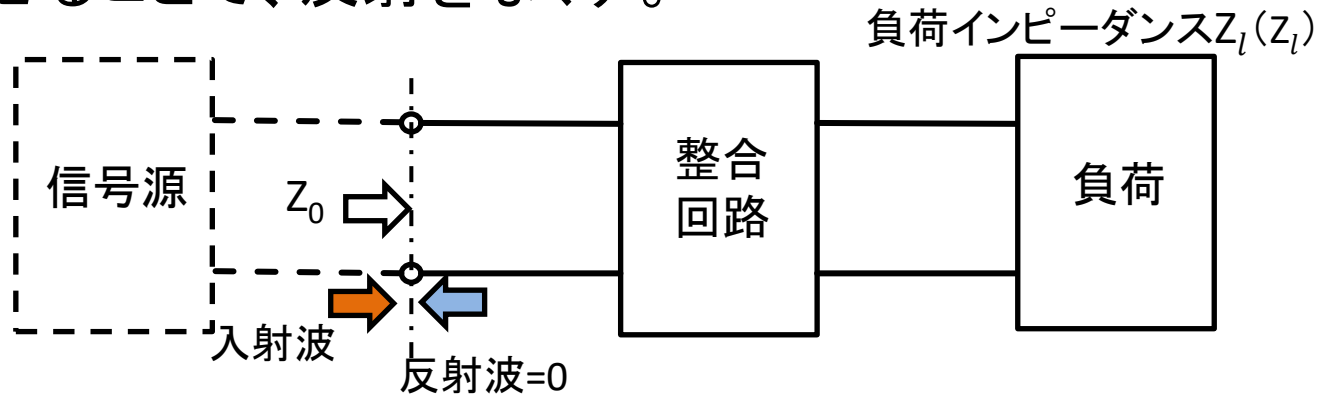
- 下の図のように電源と伝送線路と負荷とをつなぎ、高周波信号を印加するときも、負荷に最大の電力を取り出すためには $R_{\text{SOURCE}} = R_{\text{LINE}} = R_{\text{LOAD}}$ とする。



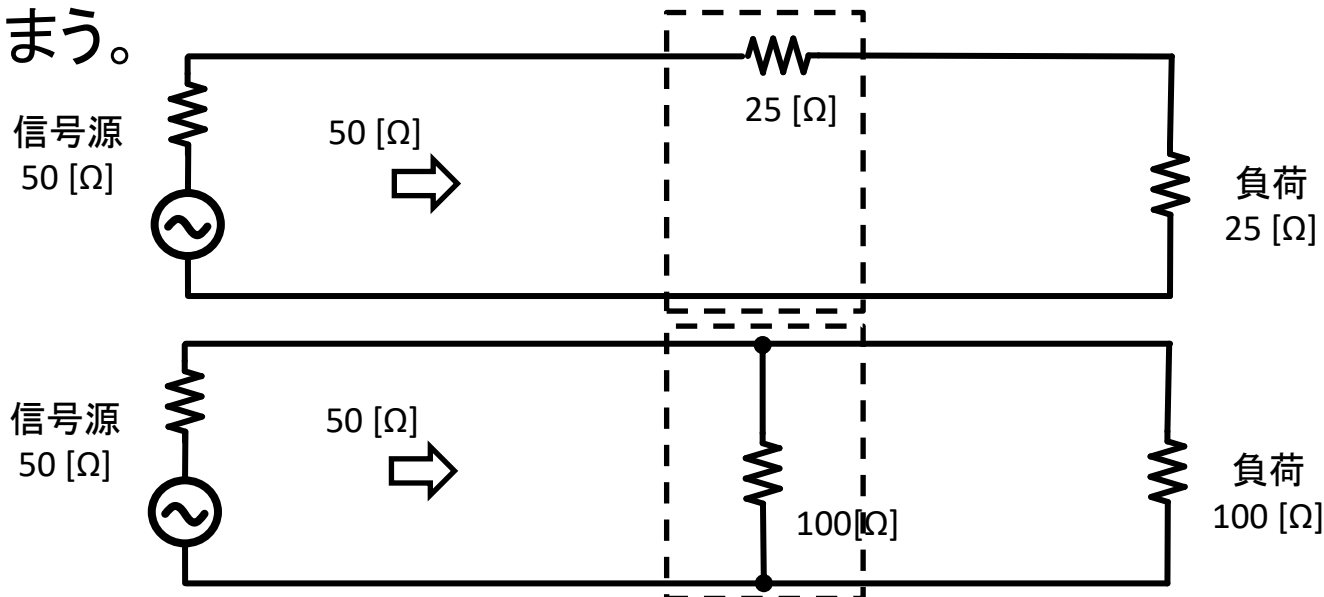
- すなわち信号源のインピーダンスと伝送線路のインピーダンスと負荷のインピーダンスを一致させる。
こうすれば、広い周波数範囲で(つまり波長によらず)効率よく電力を送ることができる。
以下に式を使って解説する。

インピーダンスマッチングの方法

- 負荷の前に整合回路を設けて、入力インピーダンスを信号源側と合わせることで、反射をなくす。

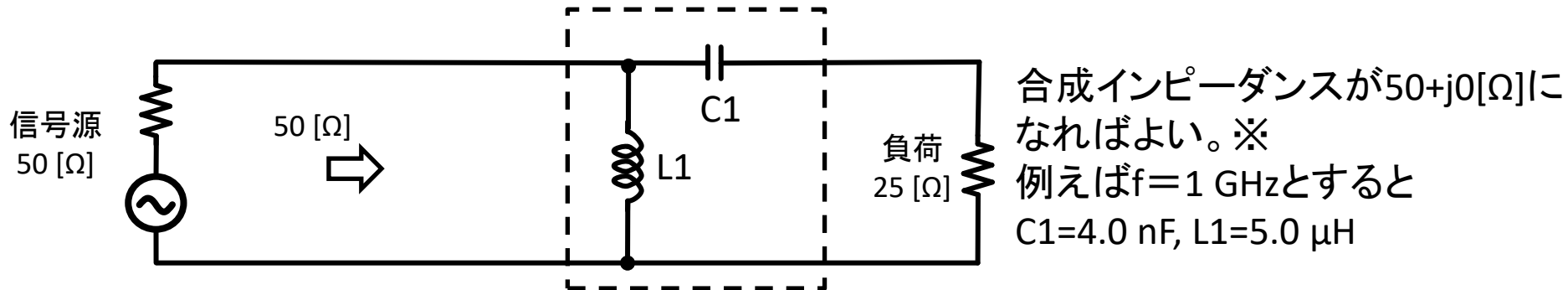


- 例えば、純抵抗負荷を整合抵抗で 50Ω に見せると電力損失が生じてしまう。



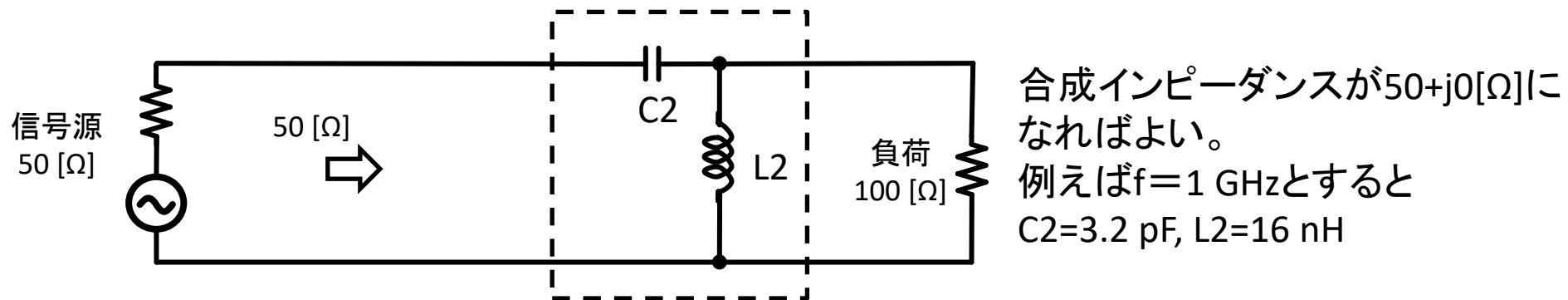
インピーダンスマッチングの方法

- 整合回路を適切なインダクタ、キャパシタで構成すれば損失はない。但し周波数が限定される。



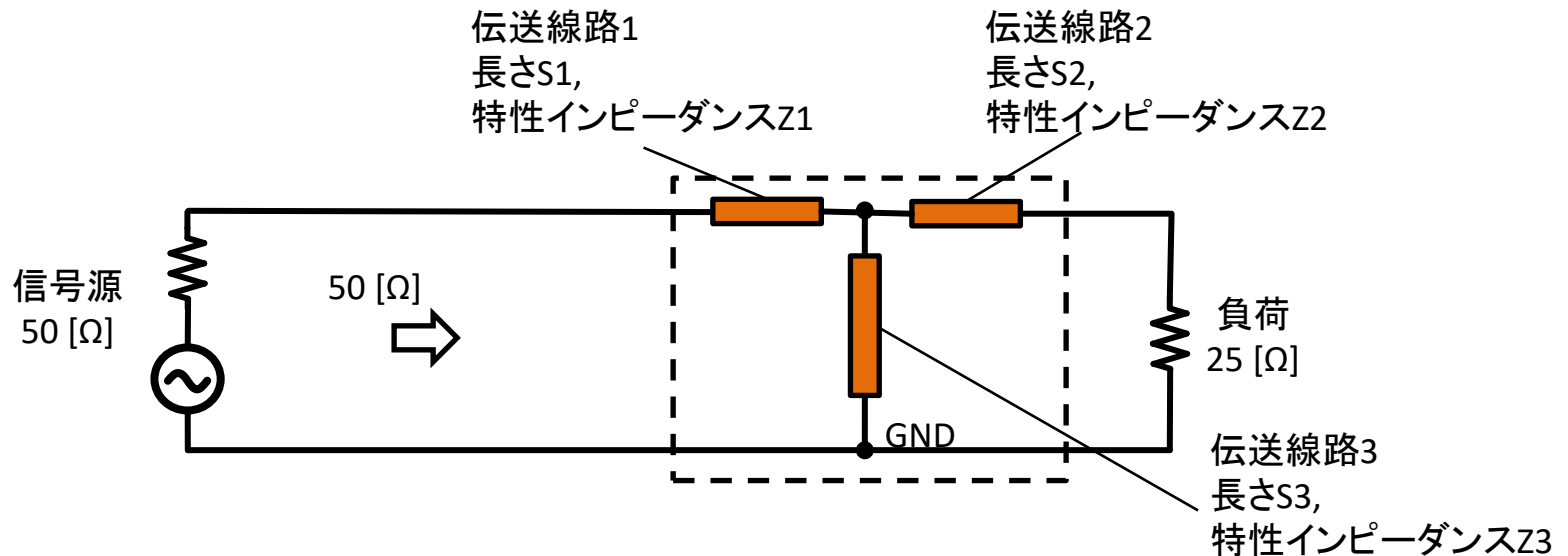
*「25 ΩとC1の直列接続」とL1の並列接続の複素インピーダンスを求め、その実部が50 Ω、虚部がゼロになるようにする。

$$\frac{\left(25 + \frac{1}{j\omega C1}\right) \times j\omega L1}{\left(25 + \frac{1}{j\omega C1}\right) + j\omega L1} = 50 \Rightarrow \omega \text{ を決めれば変数は } C1 \text{ と } L1 \text{ で、上記二つの条件で決定できる。}$$



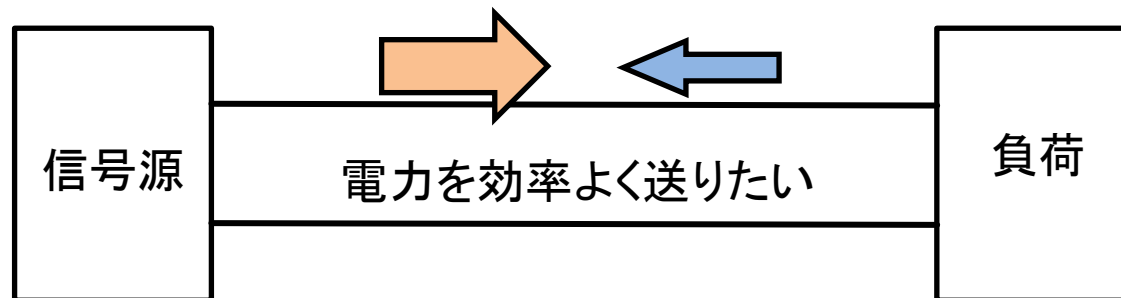
インピーダンスマッチングの方法

- 整合回路を適切な伝送線路で構成しても損失はない。
パラメータは長さ特性インピーダンス。
下図の伝送線路3はGNDにショートしている:ショートスタブという
ショートでなくオープンなのはオープンスタブという
- やはりマッチングが取れる周波数は限定される。

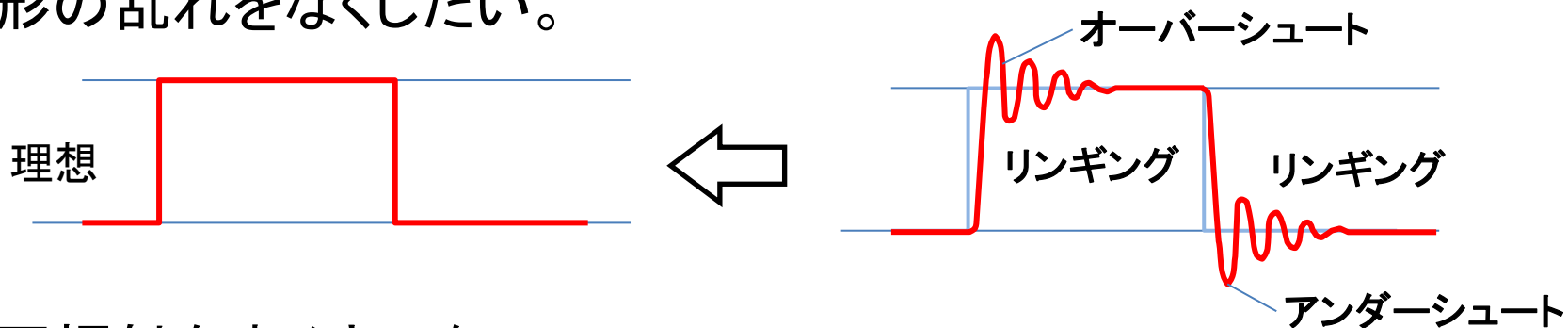


もう一度、なぜマッチング

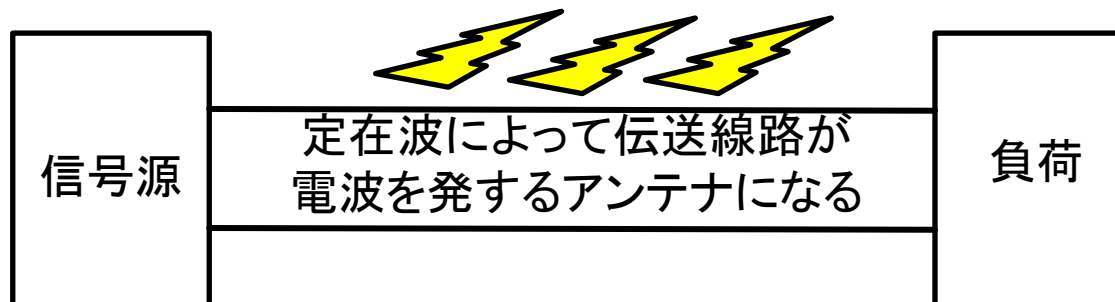
- 信号源から負荷の素子になるべく大きな電力を送りたい。
エネルギーの無駄を少なくしたい。



- 波形の乱れをなくしたい。

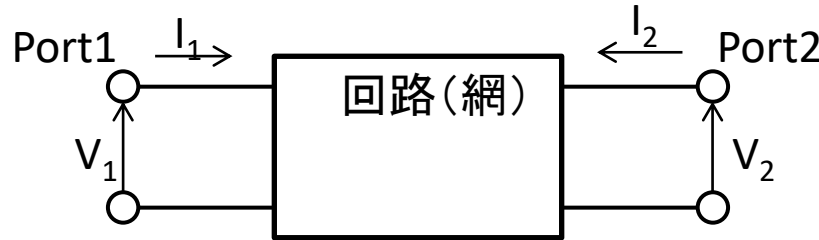


- 不要輻射を生じさせない。



四端子(したんし)パラメータ

- 回路の特性を表すのに2X2マトリクス(行列)を用いる。電圧電流を図のように定義する。



- Zパラメータ
$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

$Z_{11} = V_1/I_1$: ただし $I_2 = 0$ Z_{11} は入力インピーダンス
 $Z_{21} = V_2/I_1$: ただし $I_2 = 0$ Z_{21} は順方向伝達インピーダンス
 $Z_{12} = V_1/I_2$: ただし $I_1 = 0$ Z_{12} は逆方向伝達インピーダンス
 $Z_{22} = V_2/I_2$: ただし $I_1 = 0$ Z_{22} は出力インピーダンス

- 同様にYパラメータ
$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$
 の回路表現があり、低周波回路で広く使われる。

Sパラメータ

- ZパラメータやYパラメータは、適宜 I_1, I_2, V_1, V_2 をゼロにして他の値を測定することで決めることができる。
- しかし高周波ではそれを正確に行うことが難しく、入射波と反射波（透過波）を測定して回路の特性を表すことが多い。
これをSパラメータ（散乱パラメータ、Scattering Parameter）という。
- 下図の各入射波と反射波に関し、次の $S_{11} \sim S_{22}$ がSパラメータ。

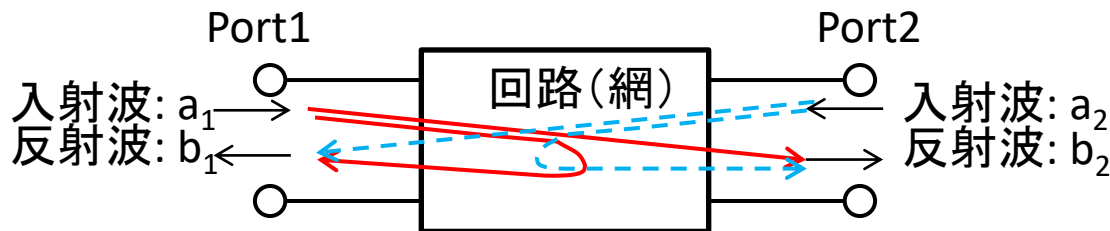
$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

$S_{11} = b_1/a_1$: ただし $a_2 = 0$ S_{11} は入力反射係数:入力リターンロス

$S_{21} = b_2/a_1$: ただし $a_2 = 0$ S_{21} は順方向伝達係数:ゲイン

$S_{12} = b_1/a_2$: ただし $a_1 = 0$ S_{12} は逆方向伝達係数

$S_{22} = b_2/a_2$: ただし $a_1 = 0$ S_{22} は出力反射係数:出力リターンロス



参考：Sパラメータとデシベル

- Sパラメータの各要素 $S_{11} \sim S_{22}$ は複素数の数値。すなわち振幅の変化の情報と位相の変化の情報を含む。
- 入射波、反射波(透過波)は「電圧」の次元。
すなわち電力(パワー)の平方根の次元であることに注意。
- 振幅比に関しては、しばしばdB(デシベル)で表現される。

電圧X [V]と電圧Y [V]の比をデシベルで表すと $20 \log_{10} \left(\frac{X}{Y} \right)$

電力P [W]と電力Q [W]の比をデシベルで表すと $10 \log_{10} \left(\frac{P}{Q} \right)$

デシベルの留意事項

- **電圧比と電力比とではデシベル値が2倍異なることに注意。**

電圧で 2倍： $20 \log_{10} 2 = 6$ [dB]

電圧で 10倍： $20 \log_{10} 10 = 20$ [dB]

電圧で100倍： $20 \log_{10} 100 = 40$ [dB]



電力で 2倍： $10 \log_{10} 2 = 3$ [dB]

電力で 10倍： $10 \log_{10} 10 = 10$ [dB]

電力で100倍： $10 \log_{10} 100 = 20$ [dB]

参考：電力の単位

- 電力の単位はワット [W]
1 [V]の電圧がかかり、1 [A]の電流が流れると1 [W]
1000 [W] = 1 [kW]
0.001 [W] = 1 [mW]
- 高周波ではしばしばdBm (デービーエム)で表す。
[dBm]は電力を1ミリワット[mW]を基準値とするデシベル(dB)の値で表した単位。
非常に大きな電力から非常に小さな電力までを、[dBm]という一つの単位を使うことで、少ない桁数の数字で簡便に表すことができる。
 - ◆ 0.001 [W] = 1 [mW] = 0 [dBm]
 - ◆ 0.000 001 [W] = 1 [μW] = -30 [dBm]
 - ◆ 0.000 000 001 [W] = 1 [nW] = -60 [dBm]
 - ◆ 0.000 000 000 001 [W] = 1 [pW] = -90 [dBm]
 - ...
 - 大きいほうは
 - ◆ 1 [W] = 1000 [mW] = 30 [dBm]

参考：電力・電圧換算表(50Ω系)

電力	電力	実効値	P-P値
[dBm]	[nW]	[mV _{RMS}]	[mVpp]
-60	1.00	0.141	0.400
-59	1.26	0.159	0.449
-58	1.58	0.178	0.504
-57	2.00	0.200	0.565
-56	2.51	0.224	0.634
-55	3.16	0.251	0.711
-54	3.98	0.282	0.798
-53	5.01	0.317	0.895
-52	6.31	0.355	1.005
-51	7.94	0.399	1.127
-50	10.00	0.447	1.265
-49	12.59	0.502	1.419
-48	15.85	0.563	1.592
-47	19.95	0.632	1.787
-46	25.12	0.709	2.005
-45	31.62	0.795	2.249
-44	39.81	0.892	2.524
-43	50.12	1.001	2.832
-42	63.10	1.123	3.177
-41	79.43	1.260	3.565
-40	100.00	1.414	4.000
-39	125.89	1.587	4.488
-38	158.49	1.780	5.036
-37	199.53	1.998	5.650
-36	251.19	2.241	6.340
-35	316.23	2.515	7.113
-34	398.11	2.822	7.981
-33	501.19	3.166	8.955
-32	630.96	3.552	10.048
-31	794.33	3.986	11.274
-30	1000.00	4.472	12.649

電力	電力	実効値	P-P値
[dBm]	[μW]	[mV _{RMS}]	[mVpp]
-30	1.00	4.472	12.649
-29	1.26	5.018	14.193
-28	1.58	5.630	15.924
-27	2.00	6.317	17.867
-26	2.51	7.088	20.047
-25	3.16	7.953	22.494
-24	3.98	8.923	25.238
-23	5.01	10.012	28.318
-22	6.31	11.233	31.773
-21	7.94	12.604	35.650
-20	10.00	14.142	40.000
-19	12.59	15.868	44.881
-18	15.85	17.804	50.357
-17	19.95	19.976	56.502
-16	25.12	22.414	63.396
-15	31.62	25.149	71.131
-14	39.81	28.217	79.810
-13	50.12	31.660	89.549
-12	63.10	35.523	100.475
-11	79.43	39.858	112.735
-10	100.00	44.721	126.491
-9	125.89	50.178	141.925
-8	158.49	56.301	159.243
-7	199.53	63.171	178.673
-6	251.19	70.879	200.475
-5	316.23	79.527	224.937
-4	398.11	89.231	252.383
-3	501.19	100.119	283.178
-2	630.96	112.335	317.731
-1	794.33	126.042	356.500
0	1000.00	141.421	400.000

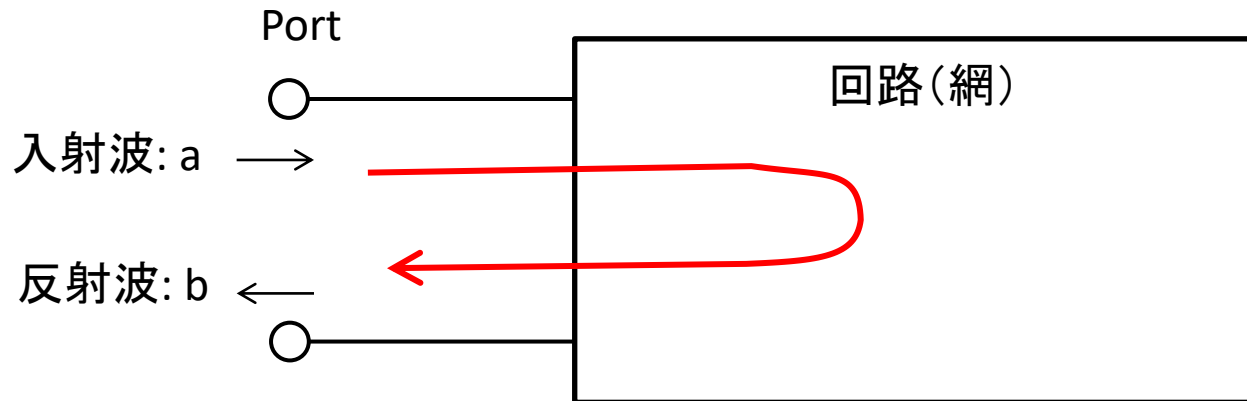
電力	電力	実効値	P-P値
[dBm]	[mW]	[V _{RMS}]	[Vpp]
0	1.00	0.141	0.400
1	1.26	0.159	0.449
2	1.58	0.178	0.504
3	2.00	0.200	0.565
4	2.51	0.224	0.634
5	3.16	0.251	0.711
6	3.98	0.282	0.798
7	5.01	0.317	0.895
8	6.31	0.355	1.005
9	7.94	0.399	1.127
10	10.00	0.447	1.265
11	12.59	0.502	1.419
12	15.85	0.563	1.592
13	19.95	0.632	1.787
14	25.12	0.709	2.005
15	31.62	0.795	2.249
16	39.81	0.892	2.524
17	50.12	1.001	2.832
18	63.10	1.123	3.177
19	79.43	1.260	3.565
20	100.00	1.414	4.000
21	125.89	1.587	4.488
22	158.49	1.780	5.036
23	199.53	1.998	5.650
24	251.19	2.241	6.340
25	316.23	2.515	7.113
26	398.11	2.822	7.981
27	501.19	3.166	8.955
28	630.96	3.552	10.048
29	794.33	3.986	11.274
30	1000.00	4.472	12.649

※インターネットで「dBm 換算」などで検索すれば計算ツール・サイト、換算表は多数見つかります。

反射係数

- 一般に入射波(a)と反射波(b)の比は、反射係数 Γ (ガンマ)と呼ばれる。

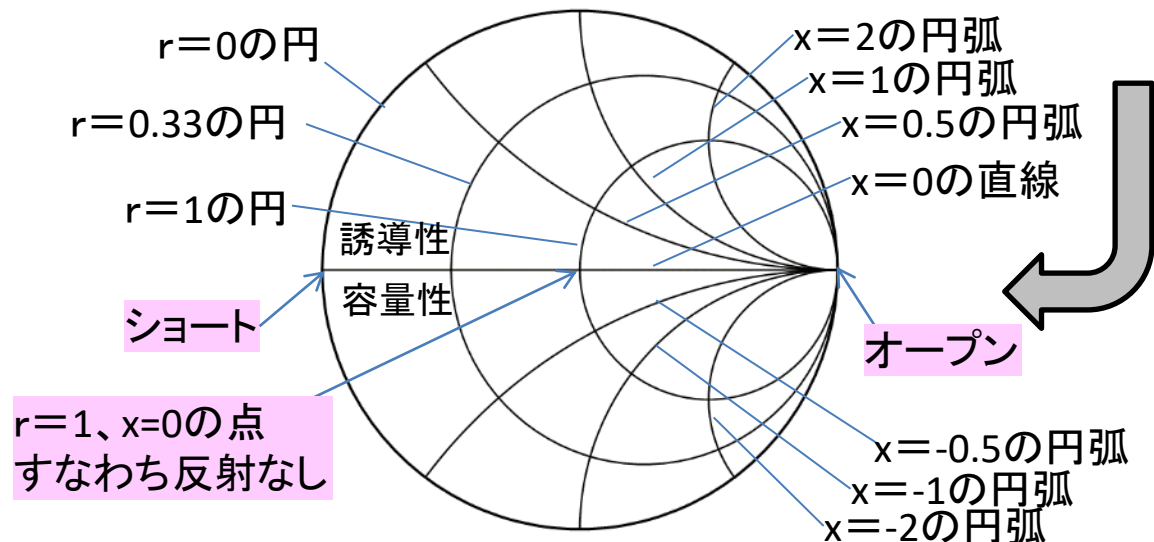
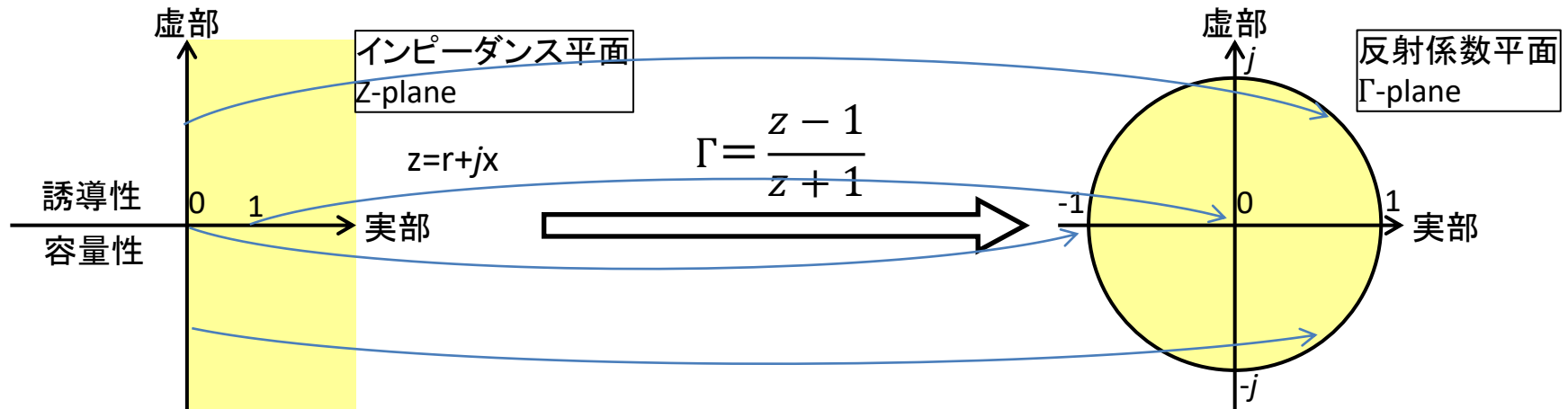
$$\Gamma = \frac{b}{a}$$



- あるポートからみた回路の特性を、インピーダンスではなく反射係数で表すと便利ながある。
つまり、これから示すスミスチャート。

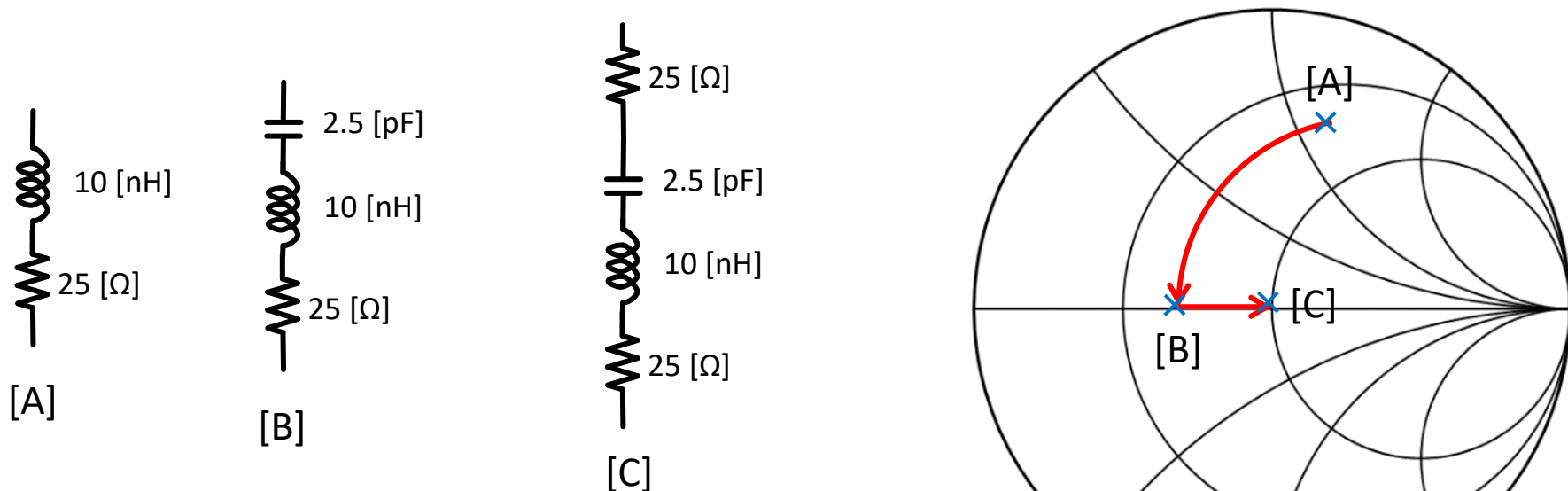
スミスチャート

- 反射係数 Γ とインピーダンス z には $\Gamma = \frac{z-1}{z+1}$ の関係がある。下図のように z の実部正の点は、反射係数平面では直径1の円内に写像される。



スミスチャートの使い方

- インピーダンスマッチングの目標は、負荷のインピーダンス(円の中央にない)を円の中央($r=1$ 、 $x=0$: 反射係数=1)に持ってくること。
- 例:「[A]の素子を周波数1 GHzで50 Ω にマッチングさせる」には10 nHを打ち消す2.5 pF(※)を直列につけて[B]にして、さらに25 Ω を直列につければ円の中央に持っていける。
- この回転量、移動量を作図的に求めることができる。



※2.5 [pF]の算出

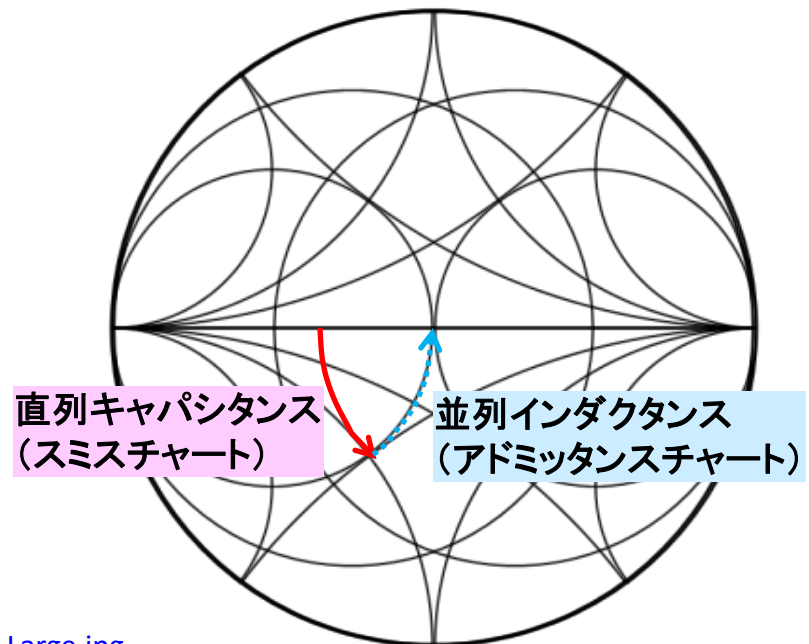
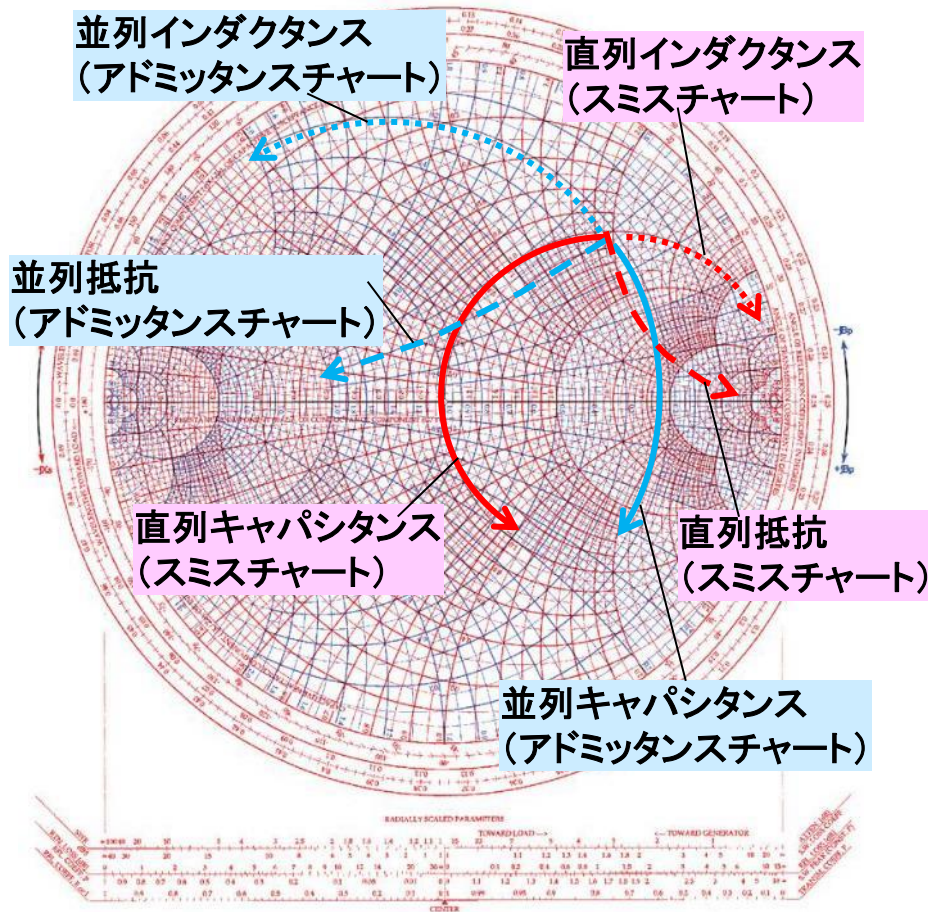
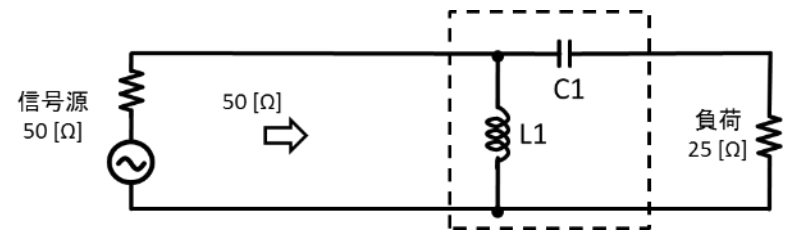
10 [nH]の1GHzでのリアクタンスは $2\pi fL = 2\pi \times 10^9 \times 10^{-8} = 20\pi$ [Ω]

1GHzで 20π [Ω]になるキャパシタCは $1/2\pi fC = 20\pi$ で $C = 1/40\pi^2 10^9 = 2.5 \times 10^{-12} = 2.5$ [pF]

インミタンスチャート

- スミスチャートは直列接続には使えるが、並列接続には使えない。並列接続には左右逆にしたアドミタンスチャートが便利。そこで両者を重ねたインミタンスチャートが使われる。

先ほどのインピーダンスマッチングの例



http://www.radiomagonline.com/oldradimage/media/2010/0910/009rad0702_Large.jpg

受動デバイスとその組合せ回路

受動と能動

- 受動素子 (Passive Component/Element) とは、電源から与えられた電力を消費したり、蓄積したり、放出したりするだけの素子であり、増幅や整流などの能動動作を行わない素子。
 - ◆ 例: 抵抗、キャパシタ(コンデンサ)、インダクタ(コイル)、誘電体基板、基板の上に作った素子(伝送線路、スタブ、ほか)
- 能動素子 (Active Component/Element) とは、主として電源から与えられた電力を使って、入力された信号を増幅したり、信号の波形や周波数を制御したりすることができる素子。
 - ◆ 例: トランジスタ、ダイオード、半導体集積回路、真空管、リレー

高周波・マイクロ波・ミリ波用基板

- 配線パターンが表裏(さらに内層)に形成された誘電体の板。
- 代表的な誘電体の種類
 - ◆ ガラスエポキシ: 低周波から広く用いられ安価であるが、損失は大きい。
 - ◆ テフロン: フッ素化合物。誘電率低い、損失はそこそこ小さい。
 - ◆ アルミナ: Al_2O_3 を板状に焼き固めたもの。損失は小さい。誘電率大。
 - ◆ サファイヤ: 超高周波用超低損失。高価。

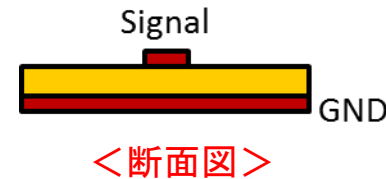
誘電体	誘電率の例	誘電正接の例
ガラスエポキシ	4.8	0.015
テフロン	2.2	0.0006
アルミナ	8.4~9.9	0.0001~0.018
サファイヤ	9.3/11.5	<0.0001

↑損失を表す数値
小さいほど優れている

波長短縮

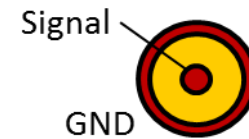
- 基板やケーブルは誘電体が使われていて、比誘電率が1より大きいから、真空中よりも伝搬スピードが遅くなり、波長が短くなる。
(真空中の伝搬速度 = 光の速度 = 30万 km/秒 = 30 cm/ns)
- 波長短縮率: 真空中に比べ波長がどのくらい縮むか。

例1: ガラスエポキシ基板 ($\epsilon_r = 4.8$) の50 Ω マイクロストリップ線路
波長短縮率 = 0.53



誘電体厚0.2 mm
線路幅0.34 mm
線路厚0.018 mm

例2: PE (ポリエチレン、 $\epsilon_r = 2.2$) が絶縁体の50 Ω 同軸ケーブル
波長短縮率 = 0.67



(5D-2V)
誘電体径4.8 mm
内導体径1.4 mm

抵抗／寄生（浮遊）素子

● 抵抗のいろいろ

◆ リード部品：引き出しが電線である部品。

高周波特性は良くはない：寄生（浮遊）容量、寄生（浮遊）インダクタ有。

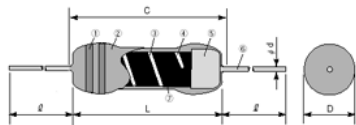
◆ チップ部品：引き出しが電極である小型部品。

◆ 厚膜抵抗：基板上に印刷技術で形成した抵抗。

◆ 薄膜抵抗：基板上にエッチング技術で形成した抵抗。

〔 超高周波用
半導体基板上で使用

リード部品



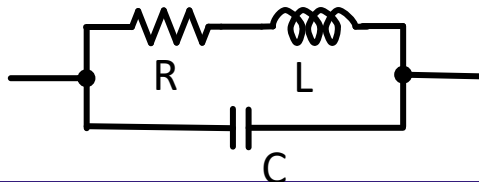
<https://www.koaglobal.com/ja-JP/product/mf.aspx>

チップ部品



<http://www.susumu.co.jp/product/category.html?cid=5>

寄生（浮遊）素子



サイズの例（抵抗に限らない）

1608：1.6 mm × 0.8 mm

1005：1.0 mm × 0.5 mm

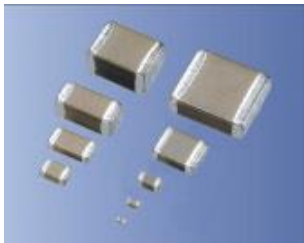
... ..

キャパシタ／寄生（浮遊）素子

● キャパシタ（コンデンサ）のいろいろ

- ◆ リード部品：端子引き出しが電線である部品。
高周波特性は良くはない：寄生（浮遊）抵抗、寄生（浮遊）インダクタ。
- ◆ チップ部品：端子引き出しが電極である超小型部品。
- ◆ 単層セラミック：電極で誘電体をサンドウィッチしたものの。主としてワイヤボンディングで接続。超高周波用。
- ◆ MIMキャパシタ：半導体基板上に薄い誘電体膜で作ったもの。
- ◆ インタデジタル：同一平面上の金属膜によるキャパシタ。

チップ部品



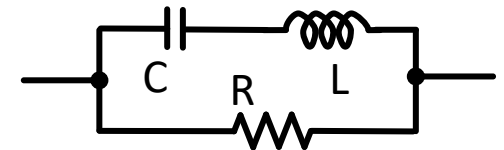
http://www.kyocera.co.jp/prdct/electro/pdf/capacitors/cm_j.pdf

単層セラミック

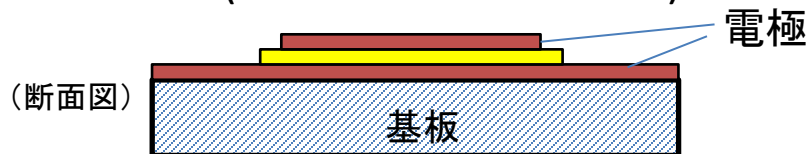


http://www.kyocera.co.jp/prdct/electro/pdf/capacitors/gh_j.pdf

寄生（浮遊）素子



MIM(Metal-Insulator-Metal)



インタデジタルキャパシタ
(上から見たパタン図)



インダクタ／寄生（浮遊）素子

● インダクタ（コイル）のいろいろ

◆ リード部品：引き出しが電線である部品。

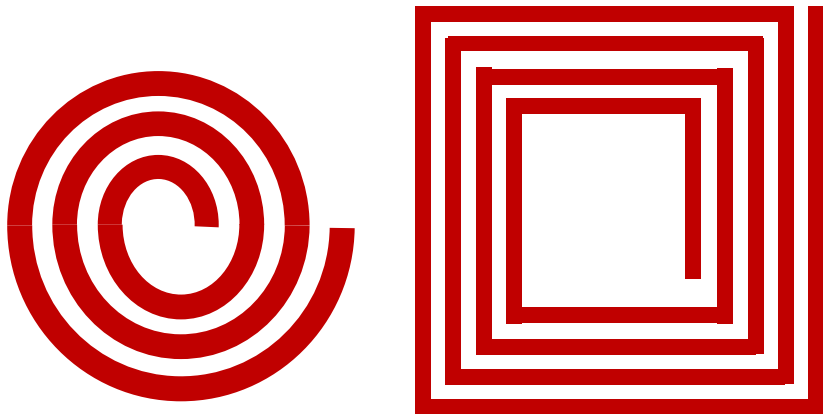
高周波特性は良くはない：寄生（浮遊）抵抗、寄生（浮遊）キャパシタ。

◆ チップ部品：引き出しが電極である小型部品。

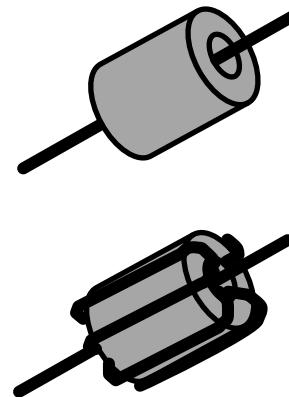
◆ スパイラルインダクタ：プリント板パターンやICの配線層パターンを使ったインダクタ。

◆ フェライトビーズ：磁性体を使ってインダクタンス値を増したコイルまたは電線。（高周波を阻止する素子）

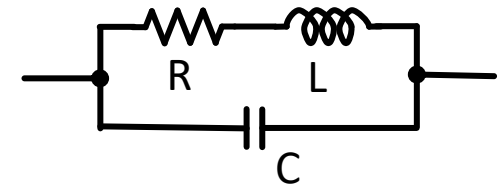
スパイラルインダクタ（上からみたパターン図）



フェライトビーズ

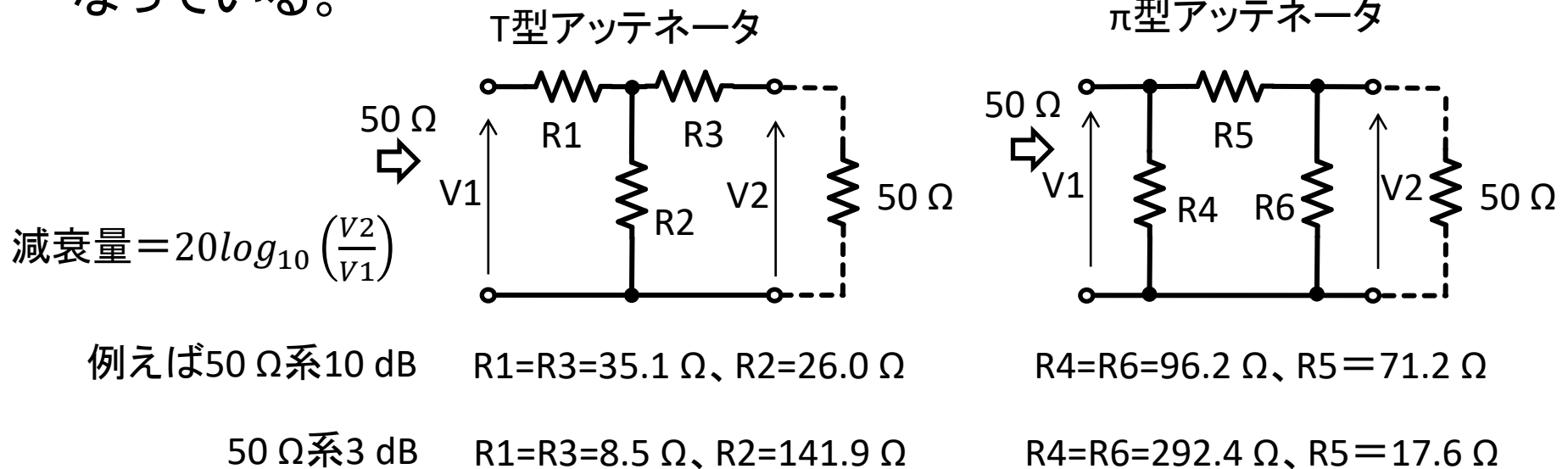


寄生（浮遊）素子



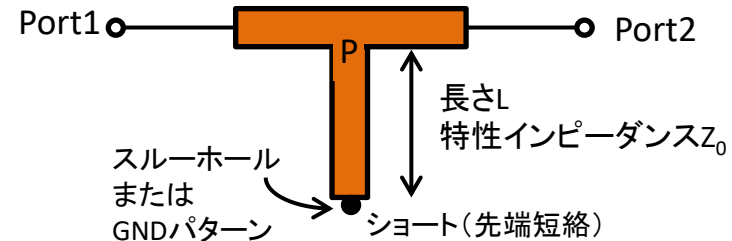
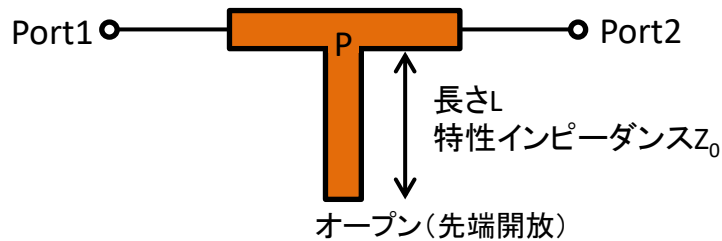
アッテネータ

- 抵抗素子を組み合わせ、信号を減衰させる機能をもつ。
- 回路構成がいくつかある。
 - ◆ T型アッテネータ
 - ◆ π型アッテネータ
- 使用インピーダンス(Ω)と減衰量(dB)を指定
- 片端を所定のインピーダンス(例えば50 Ω)で終端したとき、他端から見てもそのインピーダンスになり、かつ必要な減衰量になっている。



スタブ

- 伝送線路途中に接続した先端オープンまたはショート of 線路。オープンスタブ、ショートスタブと呼称。

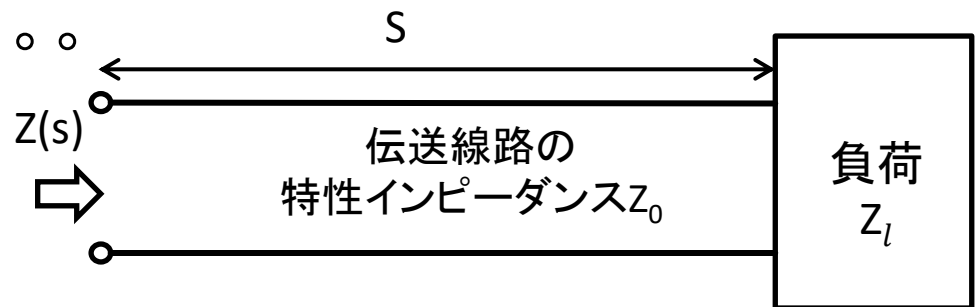


- スタブの長さをLとし、 $L=\lambda/4$ の時、接続点Pからみてオープンスタブは短絡に見え、ショートスタブは開放に見える。

(ひっくり返る！)

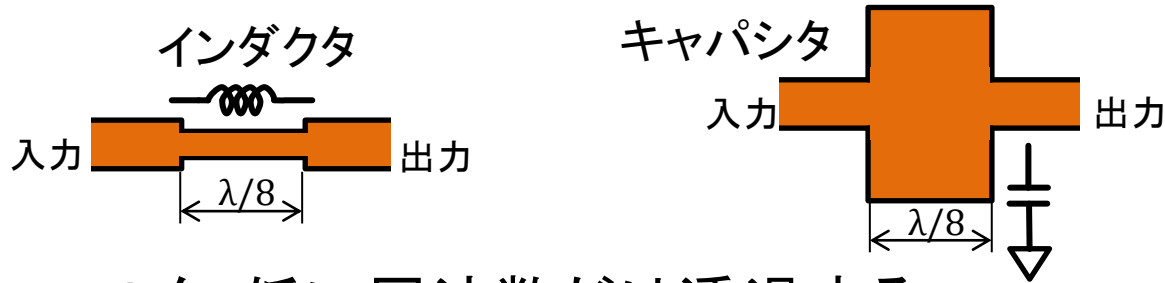
- $L \neq \lambda/4$ でなく任意の長さの時。。。○

$$Z(s) = Z_0 \times \frac{Z_l + jZ_0 \tan \beta s}{Z_0 + jZ_l \tan \beta s}, \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

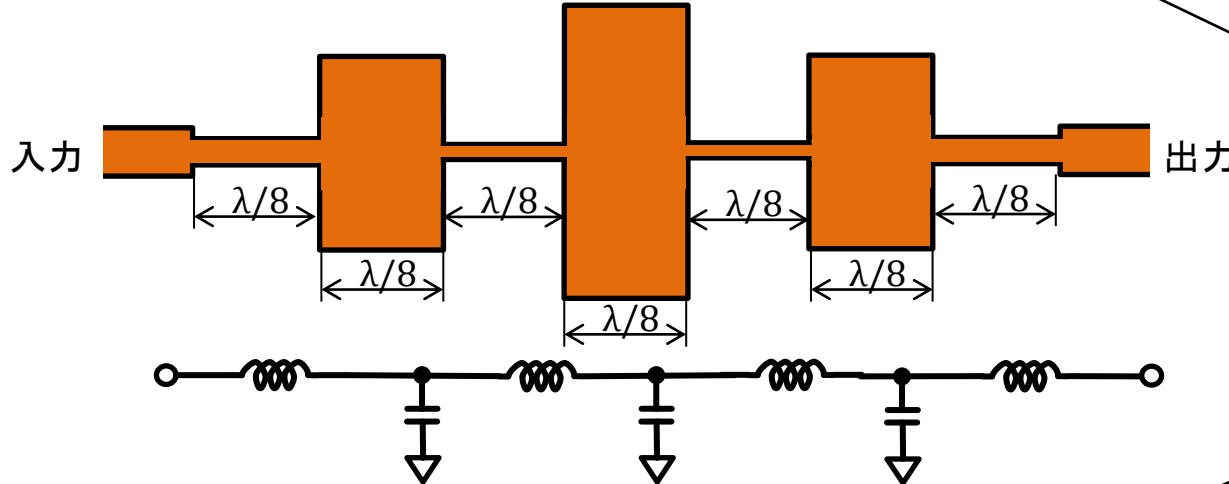


伝送線路フィルタ

- 伝送線路上にインダクタ、キャパシタを作る方法がある。

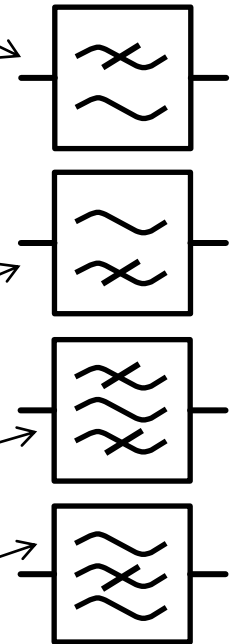


- ローパスフィルタ: 低い周波数だけ透過する。



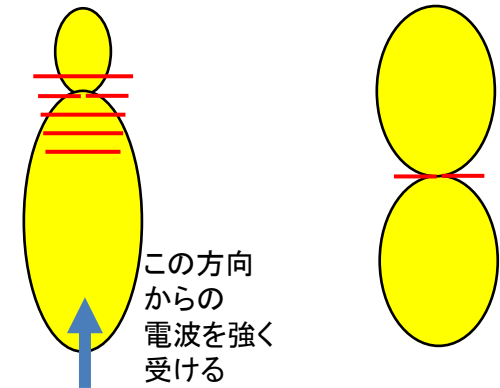
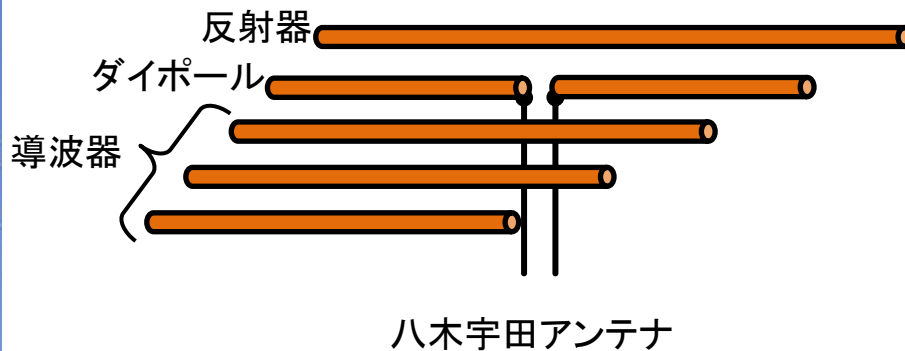
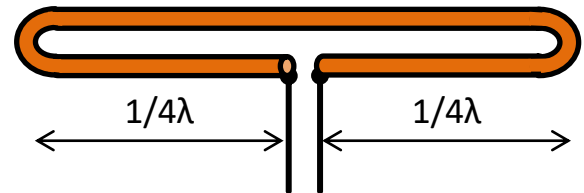
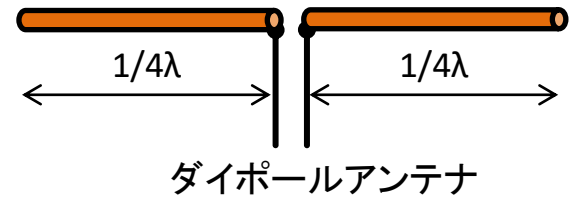
フィルタ記号
通したくないところに
/を入れる

- ハイパス・フィルタ: 高い周波数だけ透過する。
- バンドパス・フィルタ: 特定周波数帯だけ透過する。
- バンドリジェクトフィルタ: 特定周波数帯だけ透過させない。



アンテナの基礎

- ダイポール・アンテナ
- フォールデッド・ダイポール・アンテナ
直流ではショート状態なので静電気や雷からの受信機保護の点で有利。
- 八木宇田・アンテナ
ダイポールもしくはフォールデッド・ダイポールの前後に導波器(少し短い)、反射器(少し長い)を配する。実際には間隔と長さをコンピュータで設計する。
⇒導波器側からの電波を強く受ける(強く放射する)ことが可能(「指向性」が強くなる)



指向性(上から見たイメージ図)



アンテナの基礎

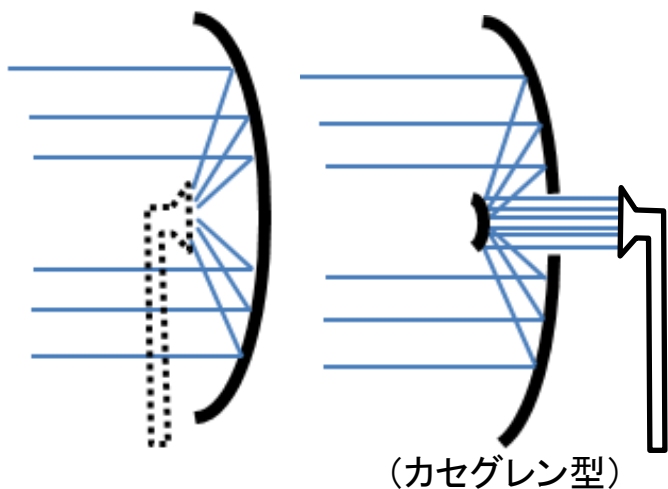
- パラボラ(放物鏡)アンテナ

平行線が到来したとき、放物線の焦点に集まるので、そこに電波を受信・放射する機能を置く。

- パッチアンテナ

プリント基板などの平面上に配線パターンで作る。

遠方からの平行電磁波を放物鏡で集める。
またはその逆に平行電磁波を発生する。

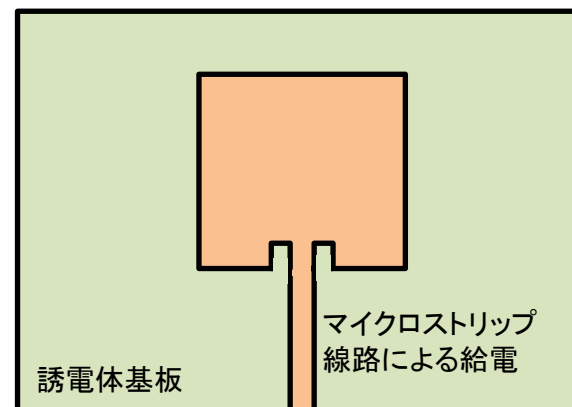


パラボラ(放物鏡)アンテナ断面図



衛星放送受信用
アンテナの例

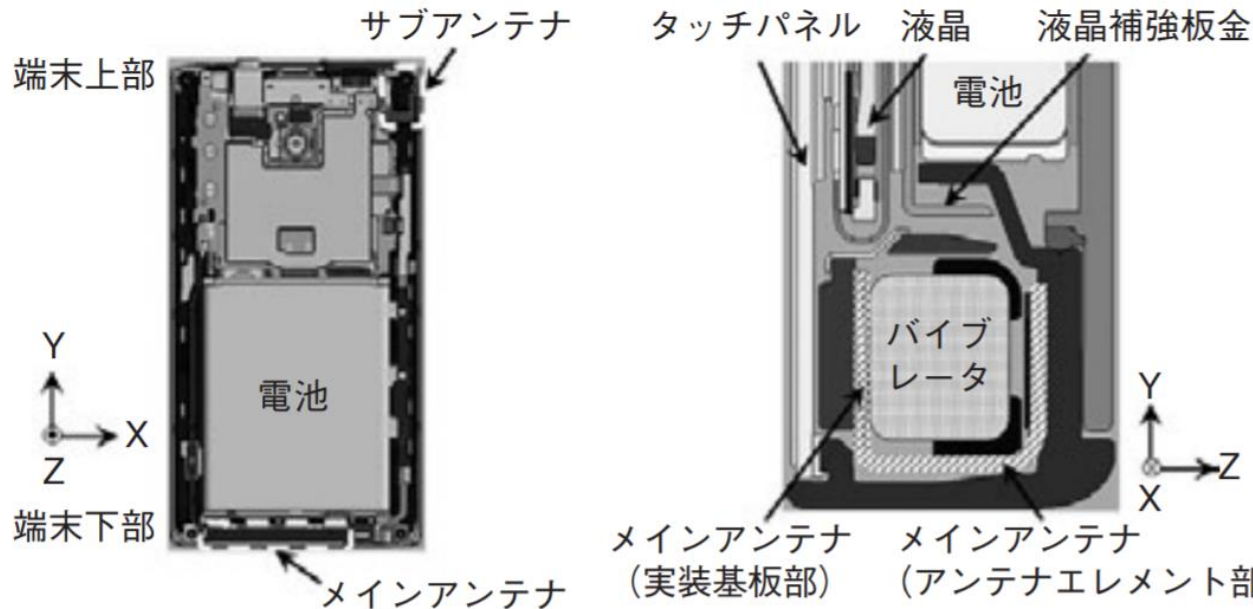
<http://www.maspro.co.jp/products/antenna/category04.html#item01>



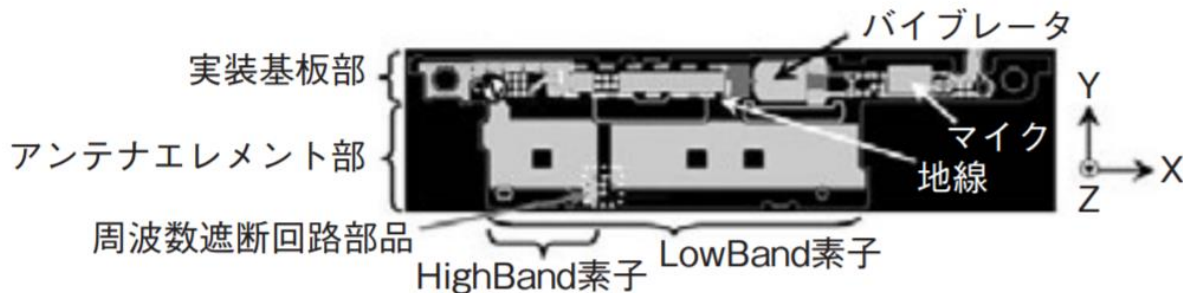
パッチアンテナ上面図

携帯電話・スマートフォン

● LTEスマートフォン開発の文献より



(a) 各アンテナの配置(端末内部背面図) (b) メインアンテナの周辺条件(端末下部断面図)

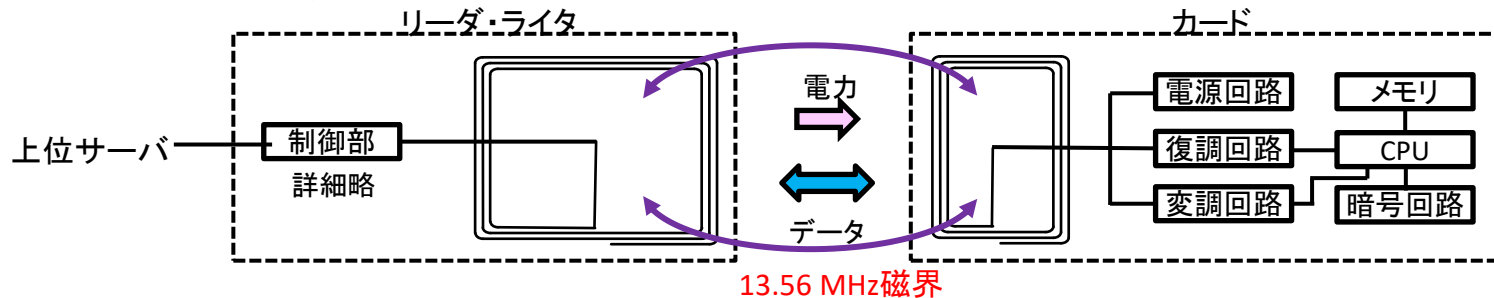


(c) メインアンテナ(フレキシブル基板)の配線パターン条件(端末下部)

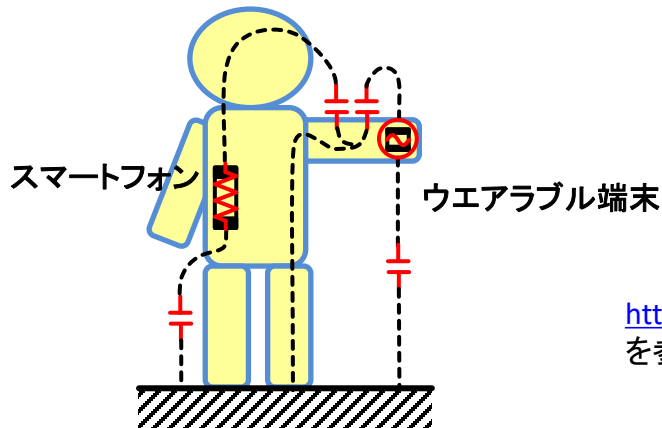
<https://www.panasonic.com/jp/corporate/technology-design/ptj/pdf/v5804/p0104.pdf>

参考：近距離アンテナ

- 前頁までのアンテナは遠方との通信が前提。遠方界。
- 近年は近距離の機器間での無線技術が使われるようになった。ウェアラブル機器（人体通信）、交通系ICカード、RFID（13.56MHz）、無線送電（一部のもの）など。
- 磁界が主な要素（例：交通系ICカード）



- 電界が主な要素（例：ウェアラブル端末）



<https://tech.nikkeibp.co.jp/atcl/nxt/mag/ne/18/00040/00002/>
を参考に作成

能動デバイスとその組合せ回路

半導体

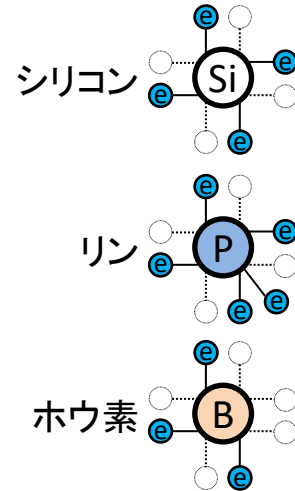
- 半導体とは、導体と絶縁体の中間の電気伝導率をもつ物質。
 - ◆ シリコン、ゲルマニウムなどの単一元素 (周期律表のIV族(14族))。
 - ◆ 複数の材料を混ぜた化合物半導体: ガリウムヒ素、インジウムリン、シリコンカーバイド、などがある。周期律表のIII族(13族)とV族(15族)を組み合わせるか、IV族(14族)中の二つを組み合わせるかである。

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H 1.008																	2 He 4.003
3 Li 6.941	4 Be 9.012											5 B 10.81	6 C 12.01	7 N 14.01	8 O 16.00	9 F 19.00	10 Ne 20.18
11 Na 22.99	12 Mg 24.31											13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.97	16 S 32.07	17 Cl 35.45	18 Ar 39.95
19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.87	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.38	31 Ga 69.72	32 Ge 72.63	33 As 74.92	34 Se 78.97	35 Br 79.90	36 Kr 83.80
37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.95	43 Tc [99]	44 Ru 101.1	45 Rh 102.9	46 Pd 106.4	47 Ag 107.9	48 Cd 112.4	49 In 114.8	50 Sn 118.7	51 Sb 121.8	52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3

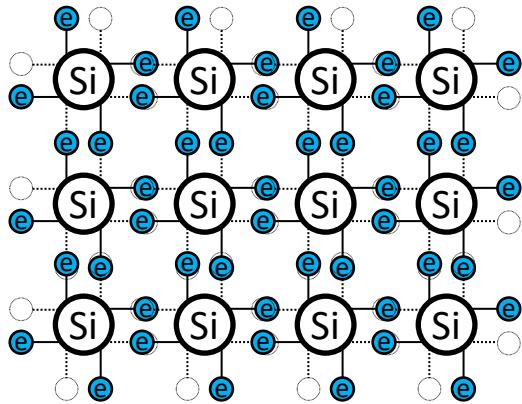
<http://www.u-kochi.ac.jp/~isshiki/isshiki/gadget/periodic.html> を基に改変

半導体

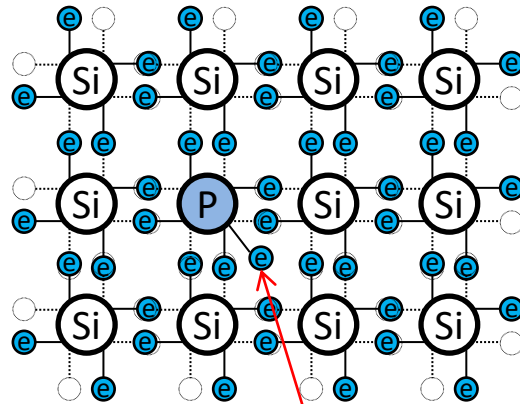
- 基本となる半導体元素に不純物を混ぜて物性を変える。
- 不純物の種類と混ぜる量により特性が変わる。
 - ◆ N型半導体: 電子が余った状態で、電気を導通させるのは電子。リン(P)など5価の物質を混ぜる。
 - ◆ P型半導体: 電子が足りない状態で、電気を導通させるのは正孔(電子のいない「穴」)。ホウ素(B)など3価の物質を混ぜる。



シリコン(不純物なし)

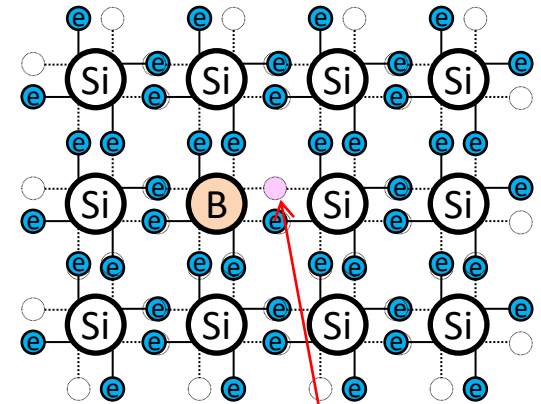


N型半導体



電子が余っている

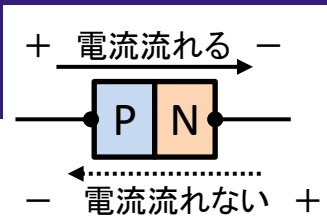
P型半導体



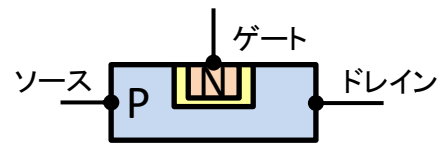
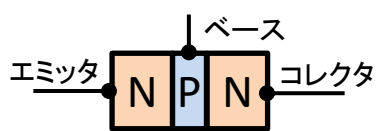
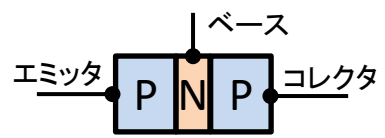
電子が足りない

- 不純物の種類と混ぜる量を変えたものを組み合わせることによって、各種機能をもつ素子が実現できる。

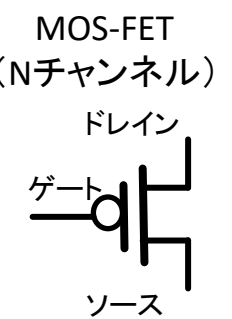
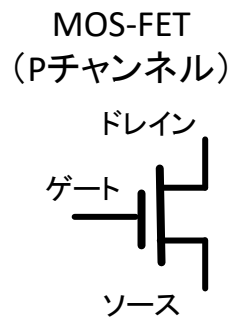
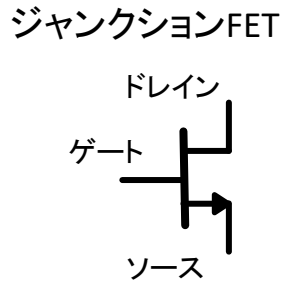
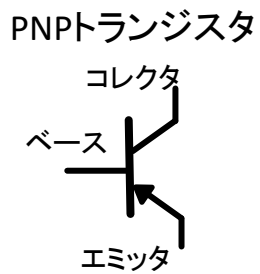
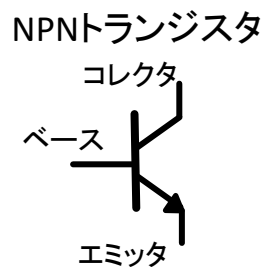
ダイオード、トランジスタ



- ダイオード (Diode) : 2端子で片方向にしか電流が流れない。
 - ◆ 接合型ダイオード : P型半導体とN型半導体をつき合わせたもの。
- トランジスタ (Transistor) : 3端子素子で制御端子でメインの電流をコントロール。



- ◆ バイポーラトランジスタ : ベースに与える電流でコレクタとエミッタとの間の電流を制御する。PNPトランジスタとNPNトランジスタがある。
- ◆ FET (Field Effect Transistor、電界効果トランジスタ) : ゲートに印加する電圧でドレイン (D) とソース (S) との間の電流を制御する)
 - ジャンクションFET (接合型～)、MOS-FET (Metal Oxide Semiconductor～、金属酸化膜半導体～) などがある。
 - 更にD-S間にP型半導体を使ったPチャンネルMOS-FETと、N型半導体を使ったNチャンネルMOS-FETやその他の構成がある。

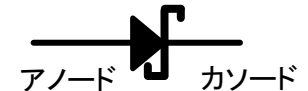


高周波用ダイオード、トランジスタ

● 高周波用ダイオード

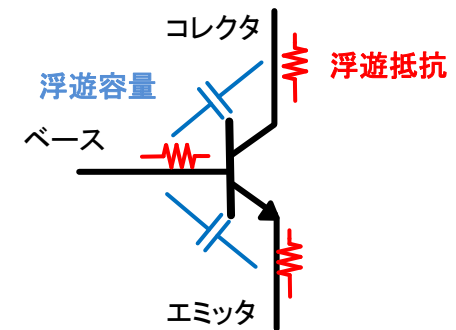
- ◆ 浮遊素子(キャパシタ、抵抗)を減らす(=寸法を小さくする)。
- ◆ 半導体材料や構成を変える。
 - 化合物半導体
 - 構成の変更、例えばショットキバリア構造(Schottky Barrier: 金属と半導体との間の接合で整流作用をする)をとる。

ショットキ(バリア)ダイオード



● 高周波用トランジスタ

- ◆ 浮遊素子(キャパシタ、抵抗)を減らす。
構造を工夫する。
微細化する。



- ◆ 半導体材料を変える。

シリコン

⇒ 化合物半導体: ガリウムヒ素 (GaAs)、インジウムリン (InP)、シリコンカーバイド (SiC) ほか

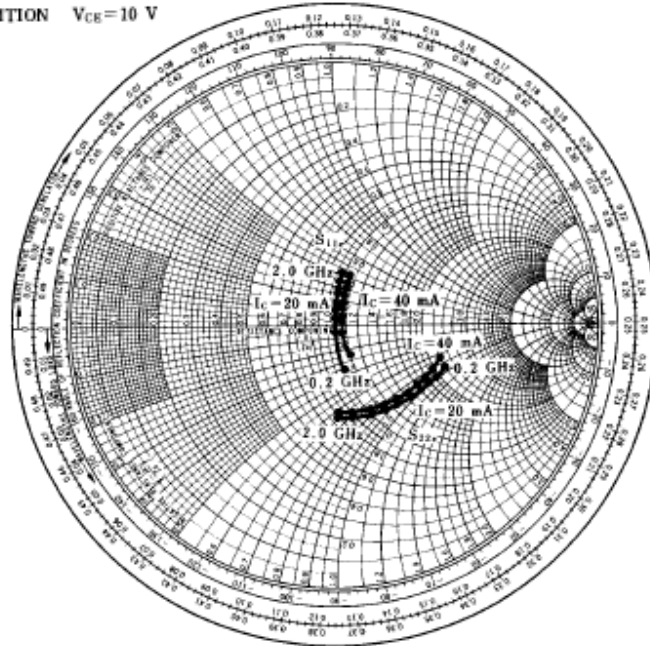
トランジスタのSパラメータの例

● 高周波用トランジスタのSパラメータの例

S_{11e} , S_{22e} -FREQUENCY

2SC3355 (ルネサスエレクトロニクス社製)

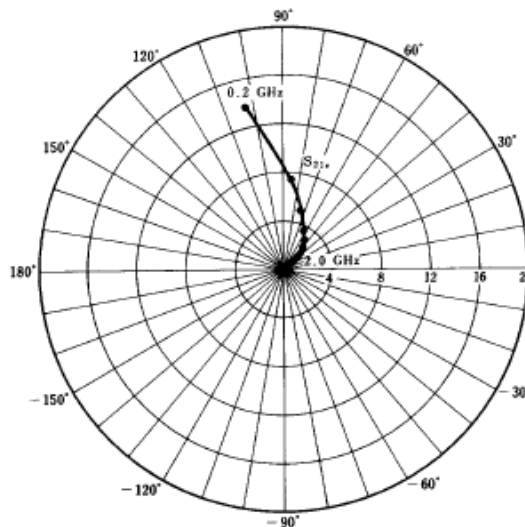
CONDITION $V_{CE} = 10\text{ V}$



スミスチャート

S_{21e} -FREQUENCY

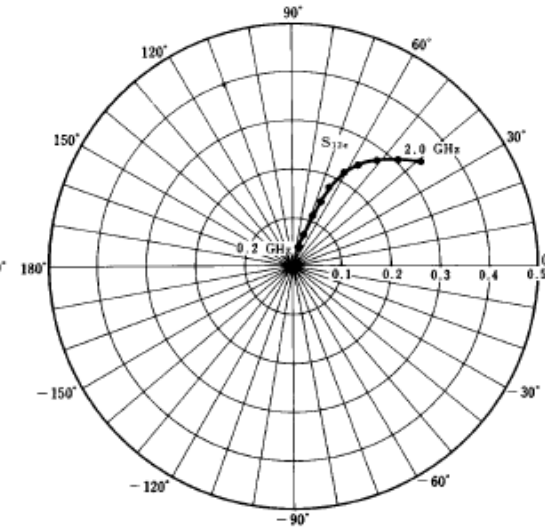
CONDITION $V_{CE} = 10\text{ V}$
 $I_C = 40\text{ mA}$



極座標

S_{12e} -FREQUENCY

CONDITION $V_{CE} = 10\text{ V}$
 $I_C = 40\text{ mA}$



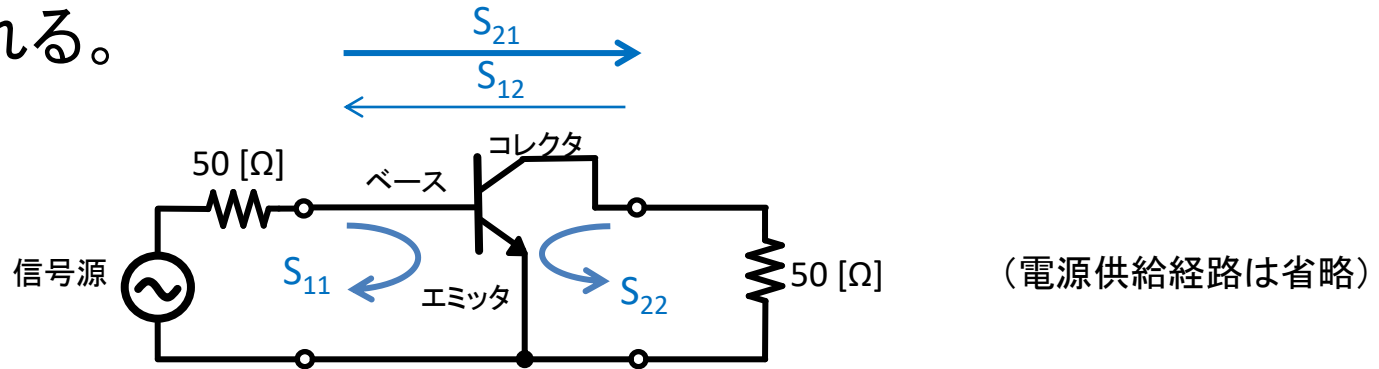
極座標

- データシートにSパラメータグラフやテキストで記載されているだけでなく、電子ファイルとして提供される。

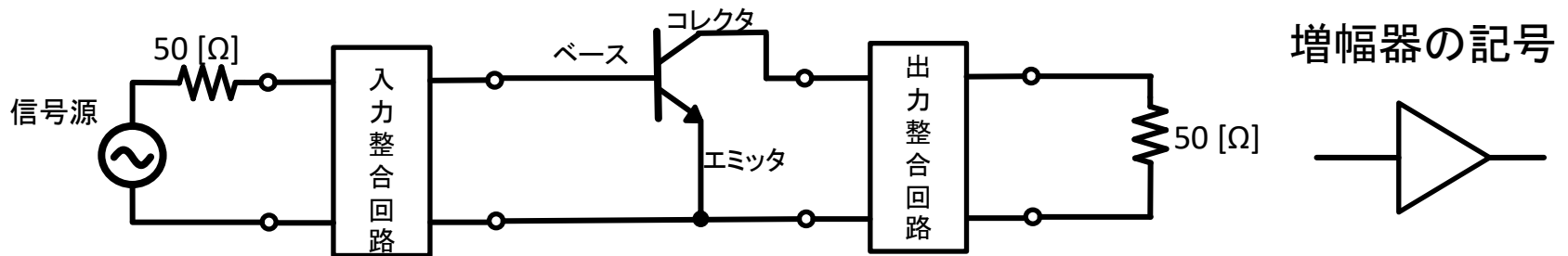
<http://documentation.renesas.com/doc/YOUSYS/document/P10355JJ3V0DS00.pdf>

増幅器

- トランジスタの応用の第一は増幅器(アンプ)。
- 高周波トランジスタの特性はSパラメータ(周波数ごとに値は異なる)で表される。



- 入出力に整合回路を設け反射が起きないようにする。
単一周波数で整合をとる(マッチングをとる)ことは比較的容易であるが、広い周波数帯域でとれるように工夫されている。



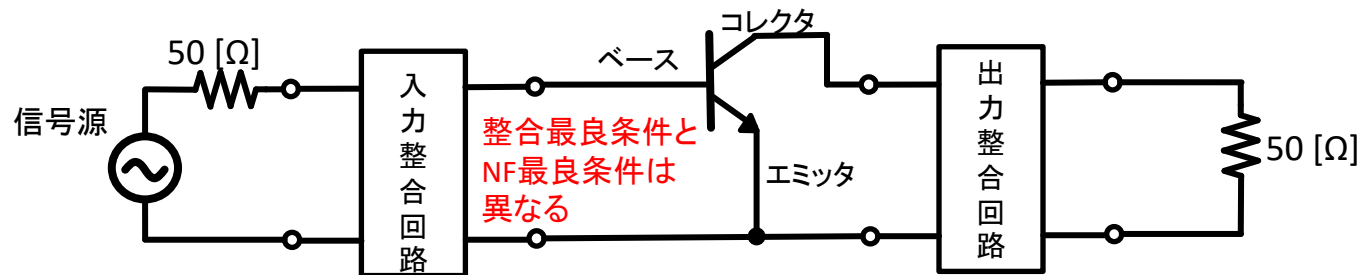
増幅器のノイズフィギュア

- 増幅器はノイズがないのが理想であるが、必ず発生してしまう。ノイズはS/N比(=信号をノイズで割ったもの)であらわされる。
- ノイズフィギュアNF(雑音指数)は増幅器の入力側のSN比と出力側のS/N比を比較したもの。

$$NF = \frac{(\text{入力S/N比})}{(\text{出力S/N比})}$$

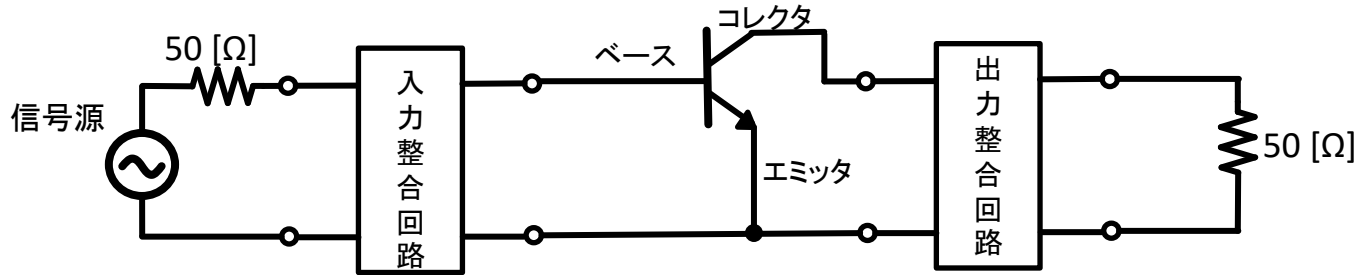
NFはデシベルで表されることが多く、増幅器でノイズの割合は増えるので正の数となる。0 dBに近い方がノイズが小さな増幅器。

- ノイズは入力で発生する分が支配的であり(増幅前の小信号なので)、入力の反射係数による。一般に前頁のような**整合最適条件**と、**NF最低の条件が異なる**ので、この点でも設計に工夫を要する。

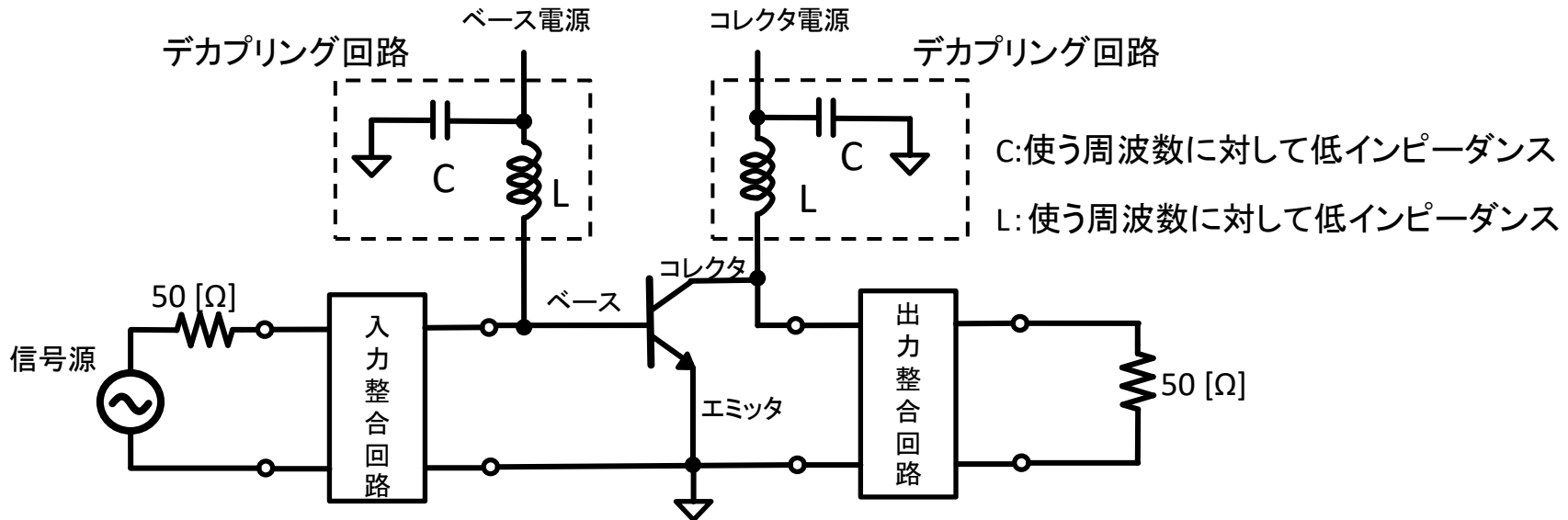


参考：直流バイアス

- これまでの図のように、高周波的特性を論じるときは、しばしば直流電源（直流バイアス）を省略する。



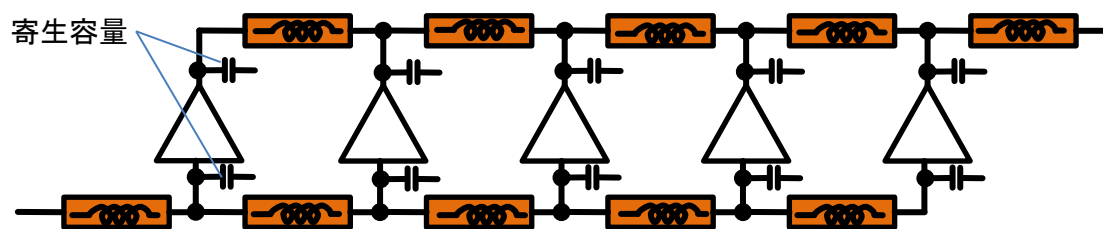
- 実際には電源がないと動かない。デカップリング回路で接続。
:トランジスタからみて直流は通す、高周波は通らない。



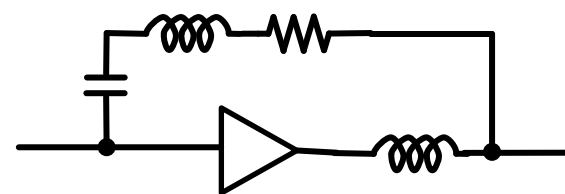
増幅器を広帯域・高出力電力にする方法

- 大電力増幅、かつ単一周波数でなく広い帯域で動作させたい場合、次のような回路構成がある。

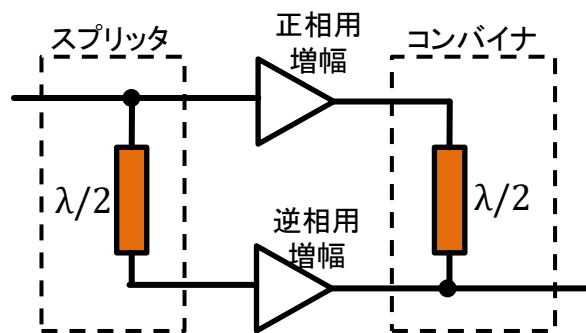
- ◆ 分布型：増幅器の入出力の寄生容量分をインダクタとして働くスタブで消す。
- ◆ 抵抗帰還形：帰還をかけてゲインを失う代わりに広帯域にする。
- ◆ プッシュプル型：逆位相で動作するアンプ2種で2倍の出力を取り出す。
- ◆ バランス型：同じアンプ2台で2倍の出力を取り出す。



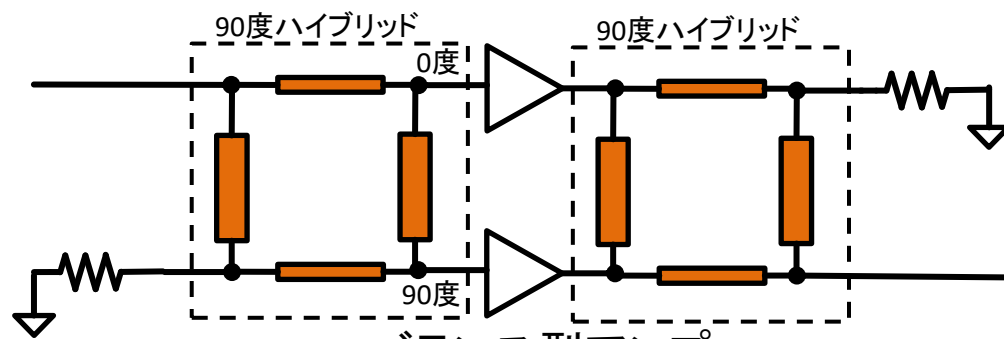
分布型アンプ



抵抗帰還型アンプ



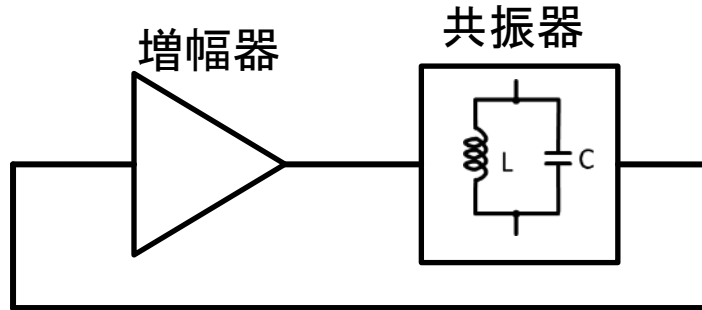
プッシュプル型アンプ



バランス型アンプ

発振回路

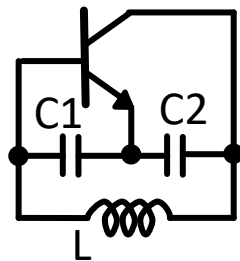
- 増幅器と共振器の組み合わせ。



振幅条件：ループ1周のゲインが1以上であること。
(増幅器が飽和して一定値になる)
位相条件：ループ1周の位相が一致すること。

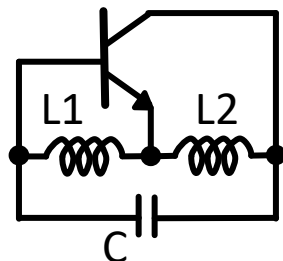
- 各種発振回路

コルピッツ回路



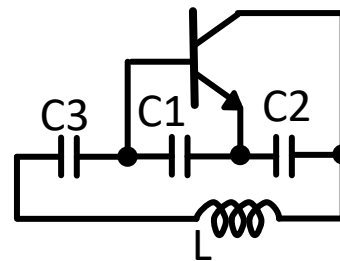
Lと「C1, C2の直列」の共振

ハートレー回路



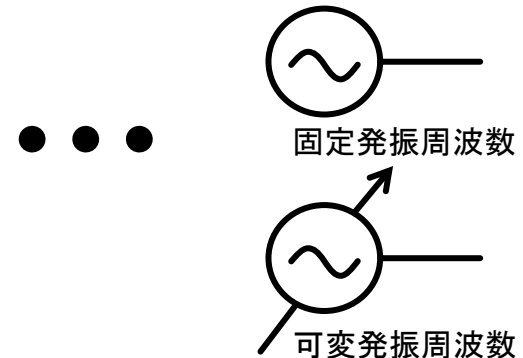
Cと「L1, L2の直列」の共振

クラップ回路



Lと「C1, C2, C3の直列」の共振

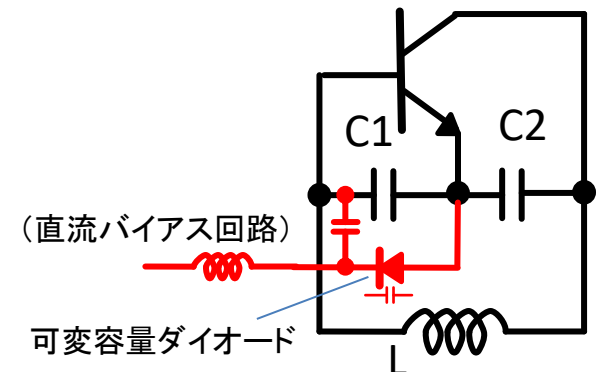
発振回路の記号



発振回路のいろいろ

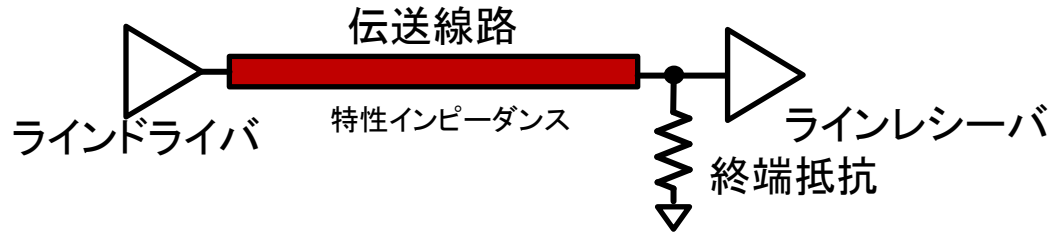
- 固定周波数発振器
- 周波数基準発振器: 水晶振動子などで常に正確な周波数を発振
- 可変周波数発振器: 外部からの設定で周波数を変えることが可能
しばしば電圧制御発振器 (VCO、Voltage Controlled Oscillator)
と呼ばれる。

逆電圧をかけると容量値が変化する可変容量ダイオード (バリキャップ、バラクタ) を、発振周波数を決めるコンデンサに並列につなぎ、発振周波数を変える。

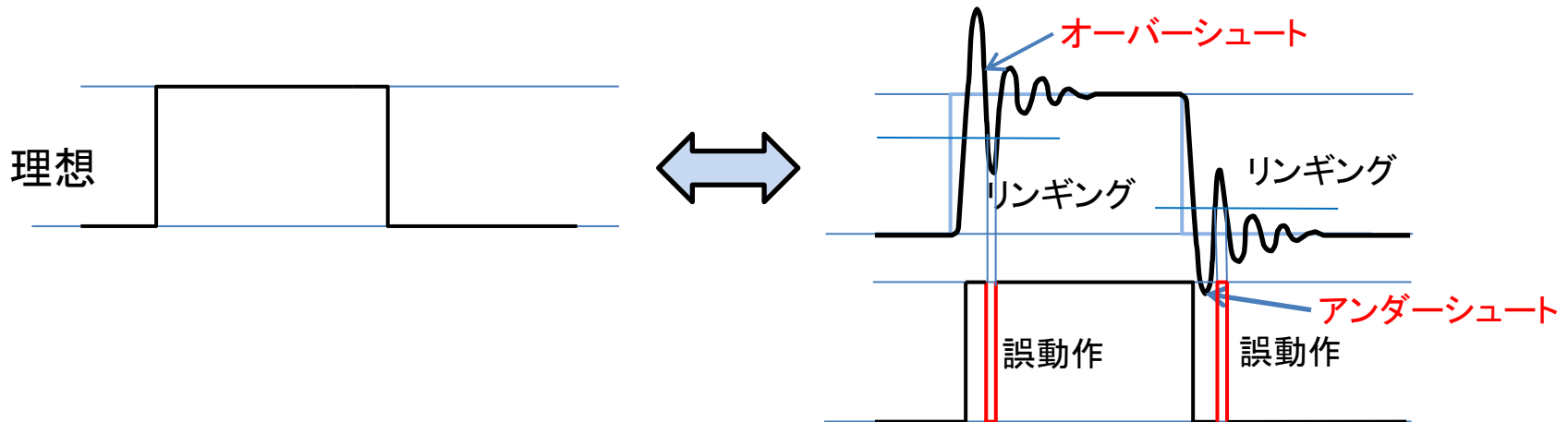


デジタル回路におけるパルス信号取扱い

- デジタル回路(ロジック回路)は1/0の世界であるが、その実現のためには高周波回路/アナログ回路的な技術要素がある。
- 例えば高速ロジック回路では伝送線路のインピーダンスを選び、終端抵抗で整合する必要がある。

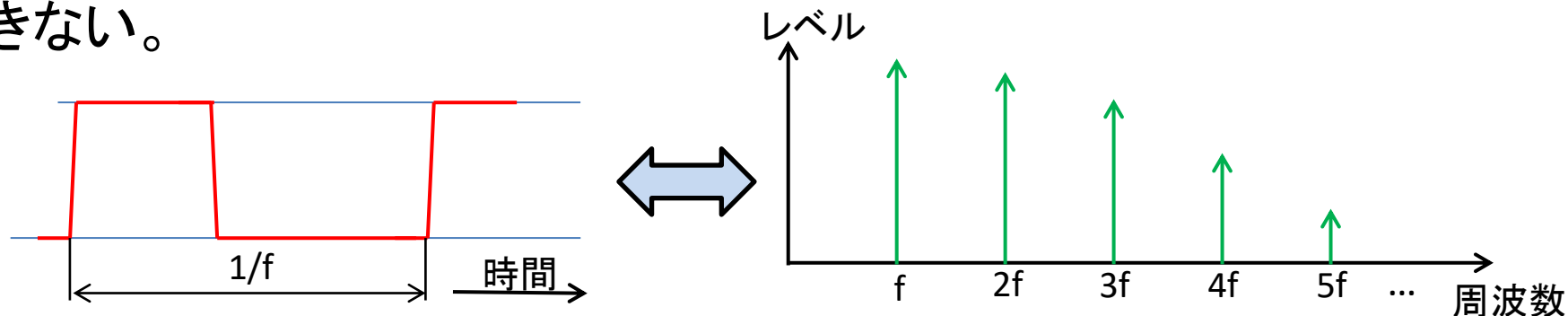


- 波形の乱れで誤動作が生じることがある。

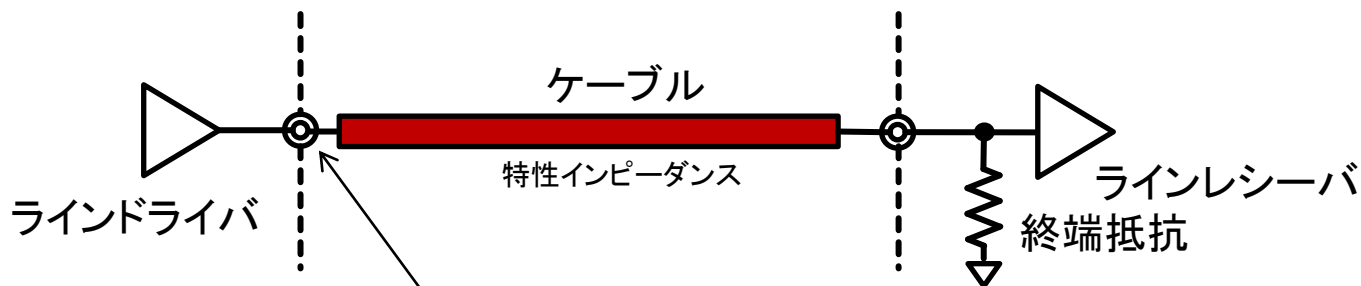


デジタル回路におけるパルス信号取扱い

- デジタル回路(ロジック回路)の立上り・立下りの速いパルスは高調波成分を多く含む。これを適切に扱わないと期待した動作ができない。



パルス波は多数の高調波を含み広帯域であるので、LCやスタブを用いたマッチングができない。周波数特性のない抵抗素子で対応、すなわち損失覚悟でアッテネータを挿入することもある。



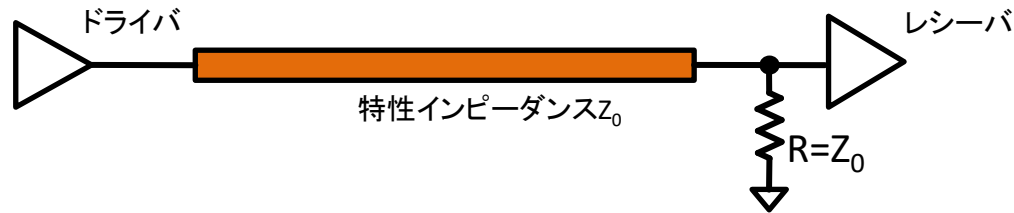
例えばマッチングが悪くて、反射波で誤動作する場合、
3dBのアッテネータを入れる。
伝送すべき信号は3 dB減少するが、反射波は往復で6 dB減少する。

ターミネーションいろいろ

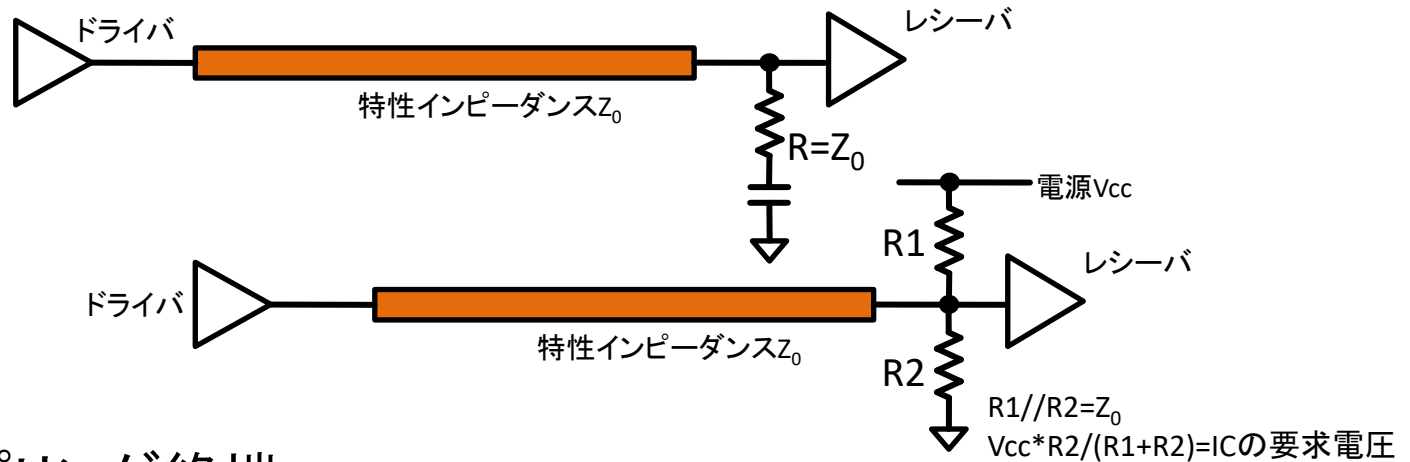
- ドライバ側抵抗直列終端



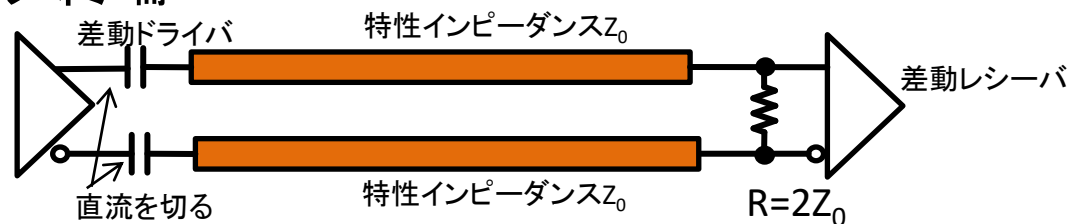
- 並列終端



- テブナン終端



- 差動、ACカップリング終端



- このほかにも、さまざまなバリエーションある。

マイクロ波集積回路(MMIC)

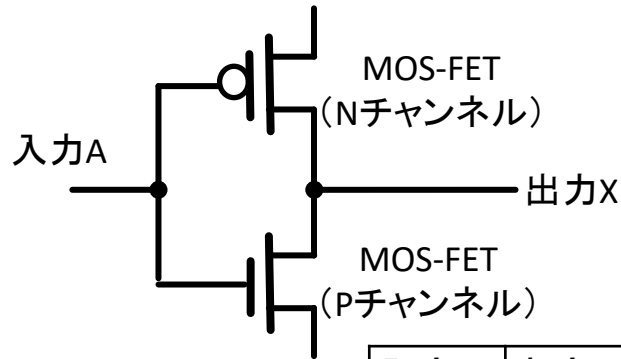
- 集積回路は多数の素子を一つの平面に構成したもの。
 - ◆ モノリシック集積回路:一つの半導体基板上に能動素子、受動素子、配線含め一括で作成。
しばしばMMIC(Microwave Monolithic Integrated Circuit、マイクロ波集積回路)と呼ばれる。
 - ◆ ハイブリッド集積回路:複数のチップに分かれた素子(能動素子、受動素子)を基板上で接続する。
- 特に高周波マイクロ波領域では半導体素子や今まで述べてきたような受動回路を集積し、後述するような各種の機能を実現する。
- 大量に作れるので価格が下がる(特にモノリシック集積回路)。
注意:逆に、当該商品が大量でない場合は採算が取れない。
- 寸法を小さくすることができるので、多数の機能をもつ機器の実現と、その小型化に寄与する。
- 寄生素子を減らすことにより性能アップすることが可能。

RF-CMOS

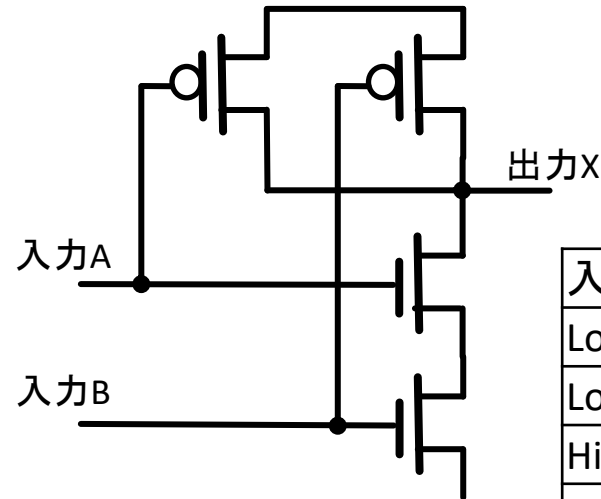
- CMOSはロジック用素子として広く用いられている。

NAND回路

インバータ(反転)回路



入力A	出力X
Low	High
High	Low



入力A	入力B	出力X
Low	Low	High
Low	High	High
High	Low	High
High	High	Low

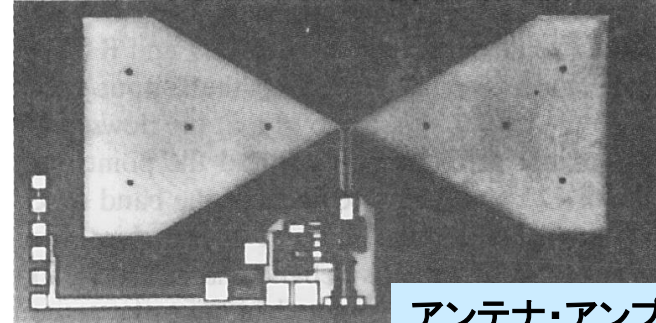
- RF-CMOSはCMOSでアナログ回路、特に高周波機能を実現したものという。
ロジックと高周波の両方が同じチップで実現できるので有用である。
- 但し特性が高周波専用に使え落ちることと、大量生産品に適応することが前提である。

MMICの一例

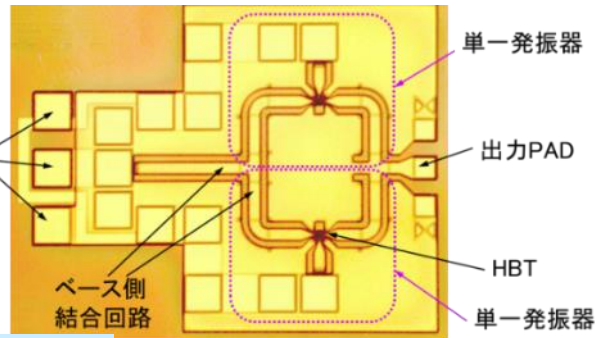
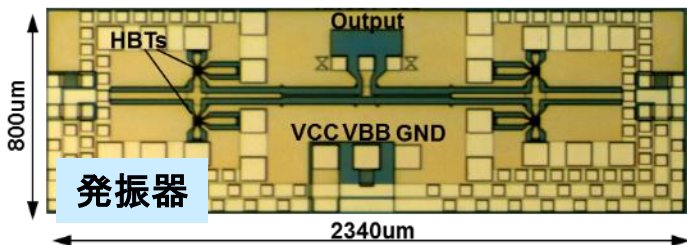
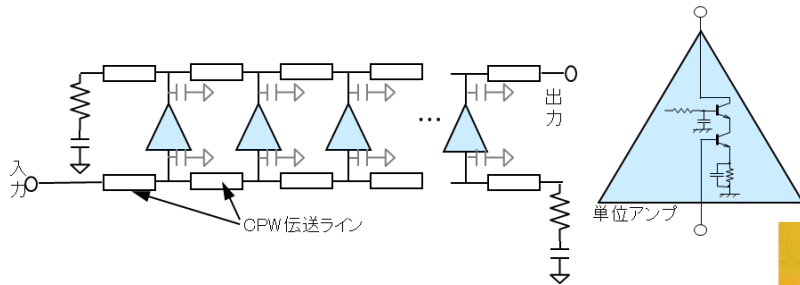
● MMICなどの一例 (各々の縮尺は異なる)



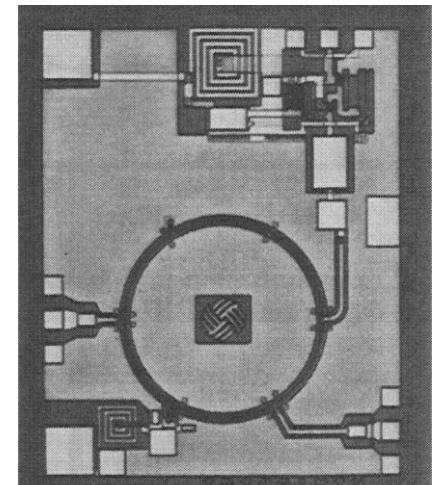
分布型アンプ



アンテナ・アンプ集積チップ



発振器

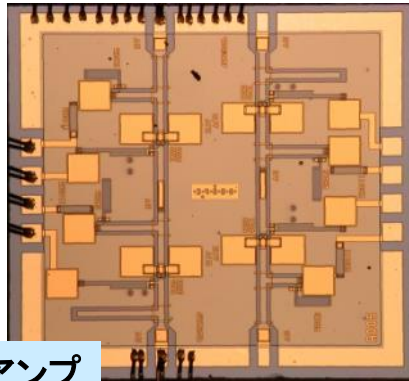


Ratrace・アンプ集積チップ

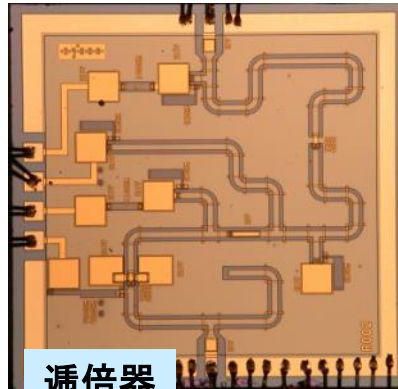
- H. Matsuuraほか, "Fully monolithic millimetre-wave mixer and IF amplifier with bow-tie antenna on GaAs substrate," E. Lett., vol. 33, no. 21, pp. 1800-1, 9th October 1997.
- H. Matsuuraほか, "Monolithic rat-trace mixers for millimeter waves," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 46, no. 6, pp. 839-41, 1998.
- 松浦裕之ほか, "超高速光通信用化合物半導体IC技術," 2009年 信学大会, BCI-1-7, pp. SS-103~SS-104, 2009.
- 内田賢治ほか, "四つの発振部を有する100GHz帯電力合成型モノリシックHBT発振器," 信学論C, vol. J84-C, no. 7, pp. 591-598, 2001.

MMICの一例

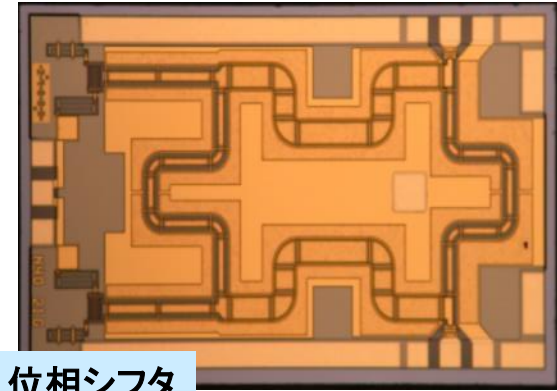
● MMICなどの一例 (各々の縮尺は異なる)



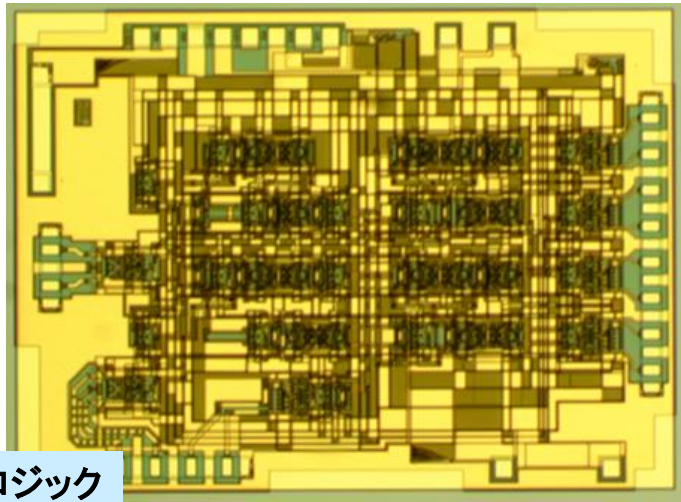
アンプ



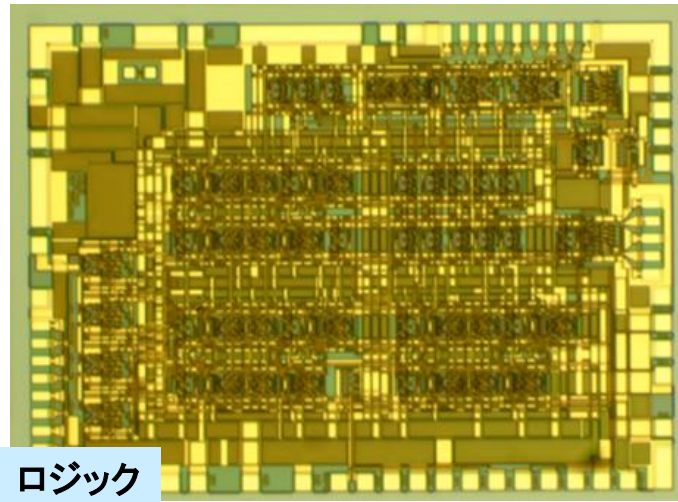
逓倍器



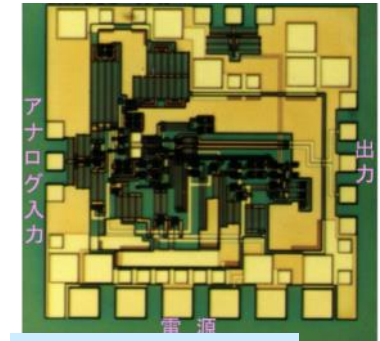
位相シフタ



ロジック



ロジック

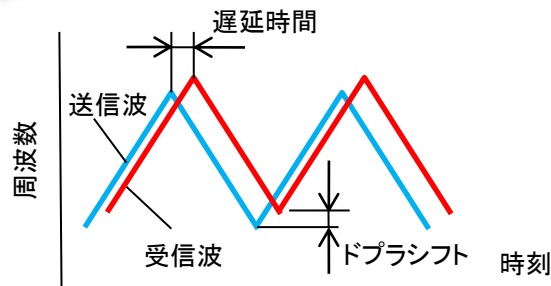
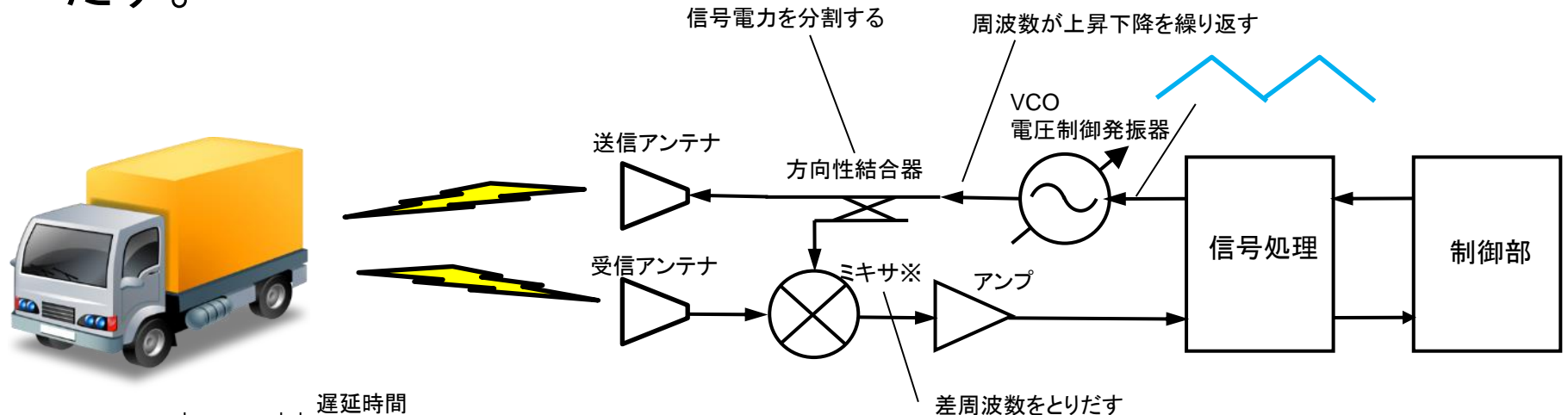


トラックホールド

松浦裕之ほか, “超高速光通信化合物半導体IC技術,” 2009年 信学大会, BCI-1-7, pp. SS-103~SS-104, 2009.
松浦裕之, “100Gbps超トランスポンダの要素技術,” 第3回超高速フォトニクスシンポジウム, pp.40-43, 2008.
H. Matsuura, “Optical phase modulation technologies for high speed transponders,” HDQC-WS, pp. 101-5, 2008.

自動車レーダの構成例

- 60 GHz、77 GHz、79 GHz帯の電波を使用。
- FM-CW方式: 三角波でVCOを振って送信周波数を周期的に変える。受信波は対象物との距離による遅延時間と、相対速度によるドプラシフトとの情報が含まれる。受信波をミキサ※でダウンコンバートして、信号処理で情報を取りだす。



※: ミキサは2つの入力信号の和周波数及び差周波数の信号を出力する素子

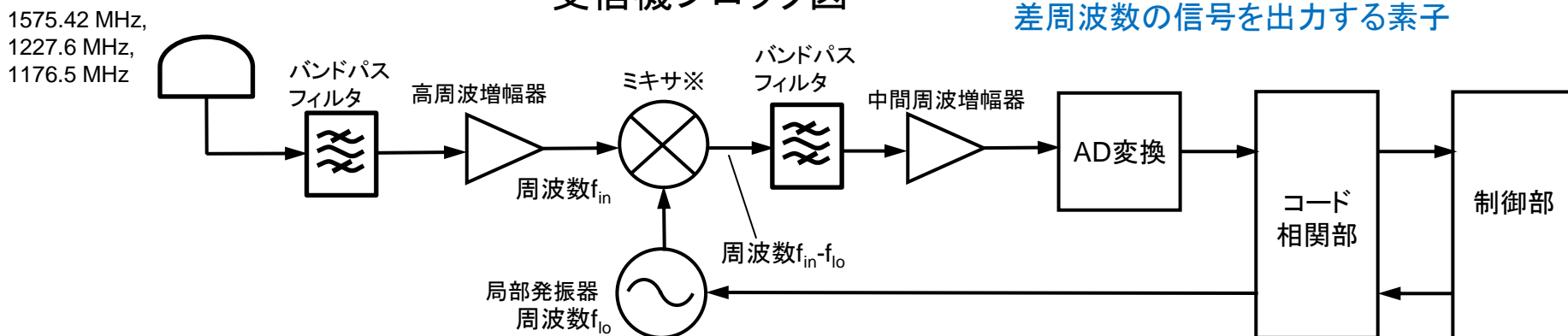
遅延時間から距離を算出
周波数シフト(ドプラシフト)の量から相対速度を算出する

GPS受信機の構成例

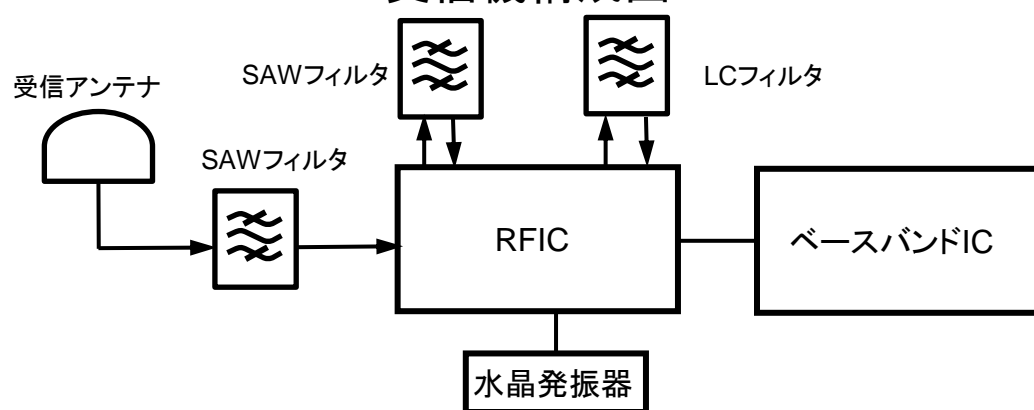
- GPS (Global Positioning System) は複数の衛星からの電波で正確な位置・時刻がわかるシステム。
- 受信機ブロックは、構成図のようにいくつかの部品からなる。
- さらに全体を一つにしたGPSモジュールを用いるのも实际的。

受信機ブロック図

※: ミキサは2つの入力信号の和周波数及び差周波数の信号を出力する素子



受信機構成図



GPSモジュール



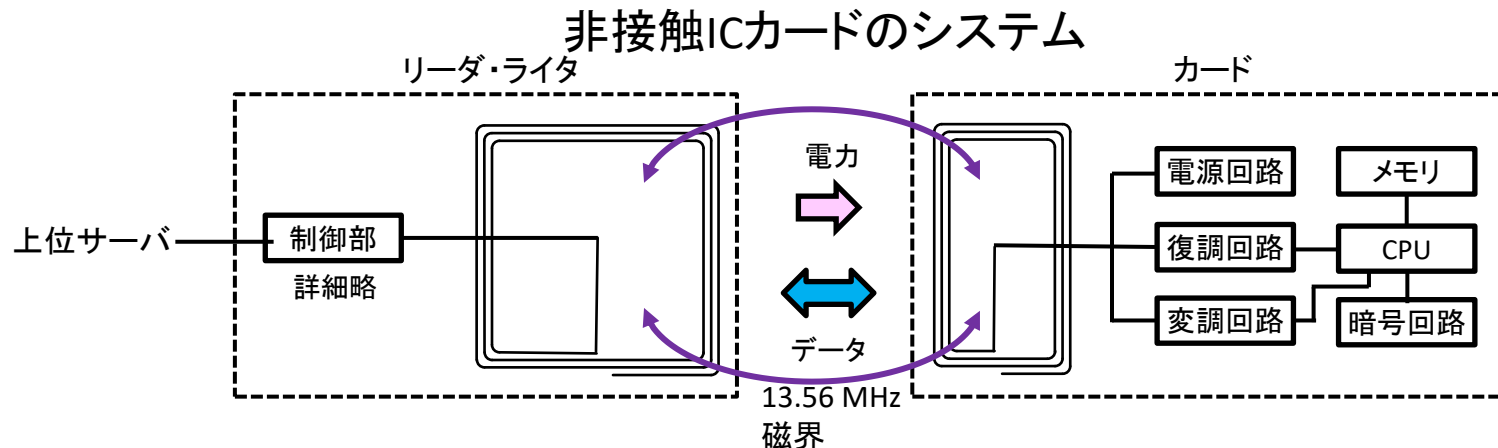
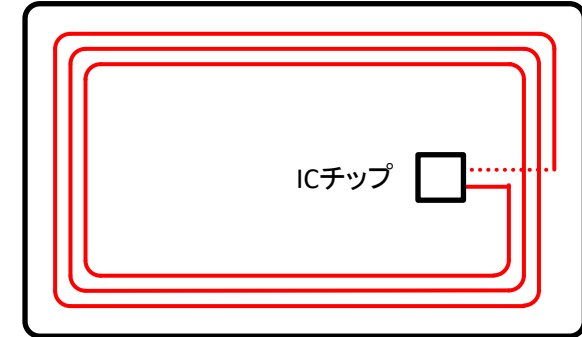
http://www.jrc.co.jp/jp/product/embedded_products/gps_module/

http://www.cqpub.co.jp/hanbai/books/45/45451/45451_p13-134.pdf

交通系ICカードの構成例

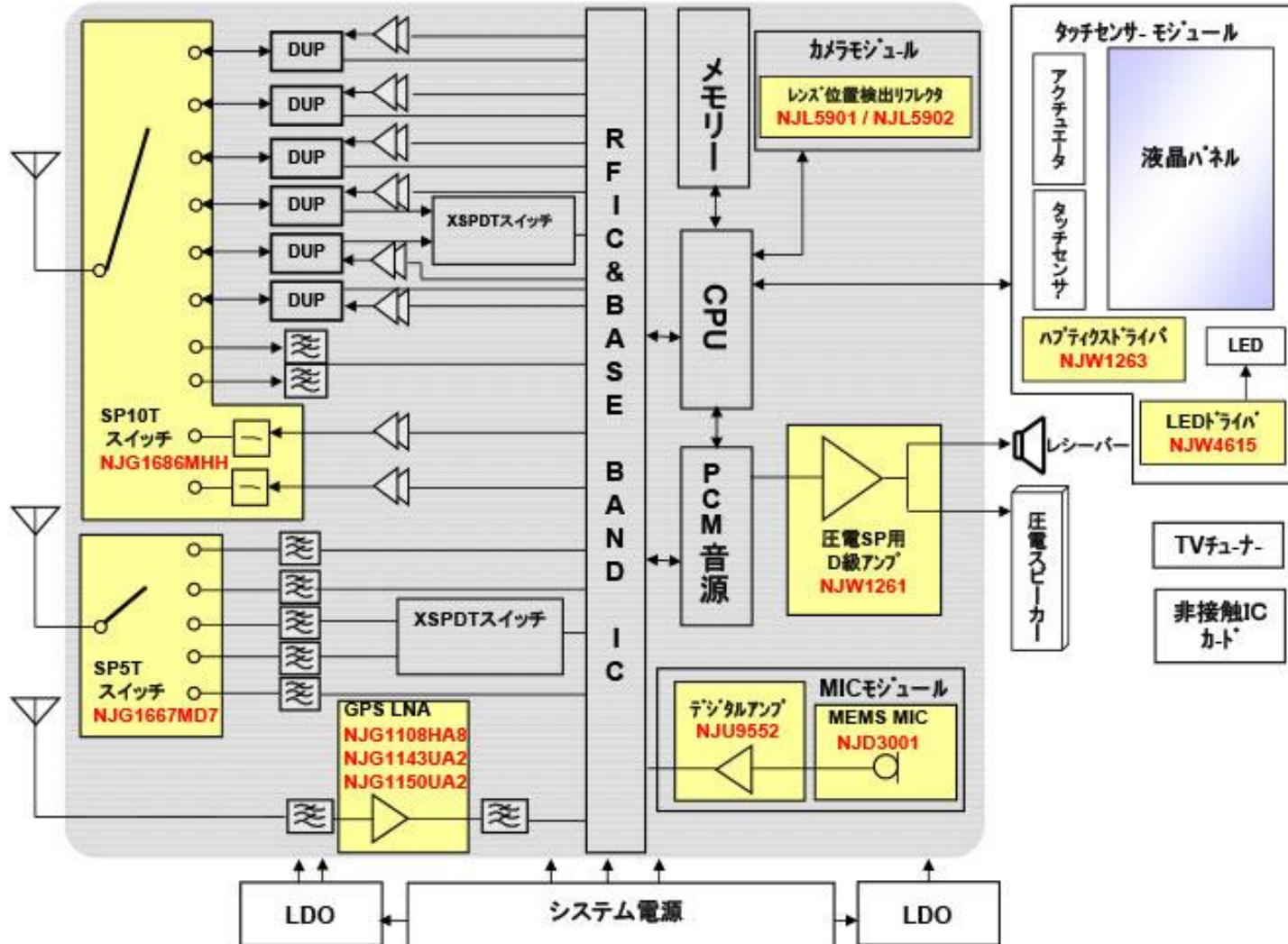
- 13.56 MHz磁界を使用。通信距離10 cm程度。
- 通信速度は212 kbpsと速いことが特長。改札口をスムーズに通るのに必要。
- 変調方式はASK (Amplitude Shift Keying) 10%、符号化方式はマンチェスター(0で信号が高から低へ、1で信号が低から高へ)。
- なお、このような通信はNFC(Near Field Communication)と呼ばれ、同様の非接触カードにいくつか規格がある。

非接触ICカード



スマートフォンの構成例

● 通信部分中心のブロック図。

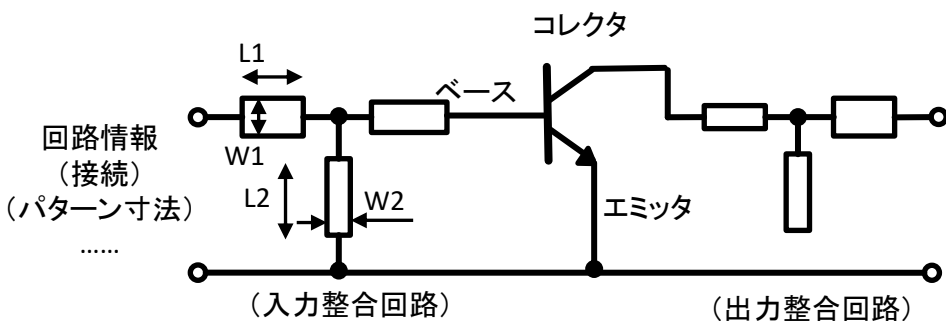


https://www.njr.co.jp/products/semicon/design_support/application/smart_phone/body.html

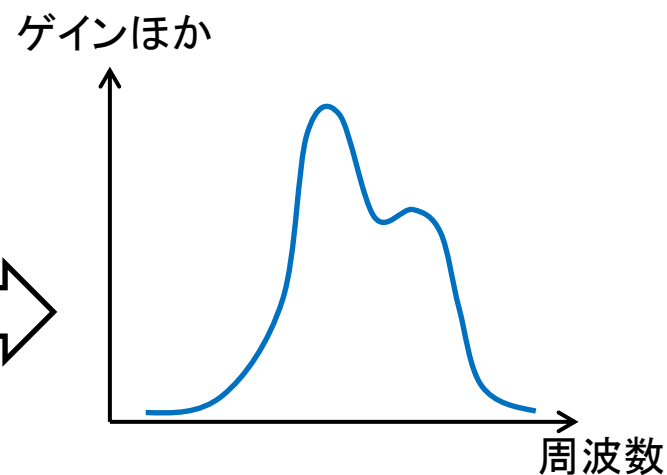
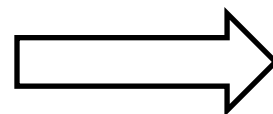
開発ツール、実装および計測器

回路シミュレータ

- 高速・高周波回路のシミュレータとしては周波数軸系と時間軸系に大別できる。回路図や各種条件を入力し特性をシミュレーションすることができる。
- 周波数軸系: 種々の要素の周波数特性を、接続情報やSパラメータ(実測データ)などを基に計算する。

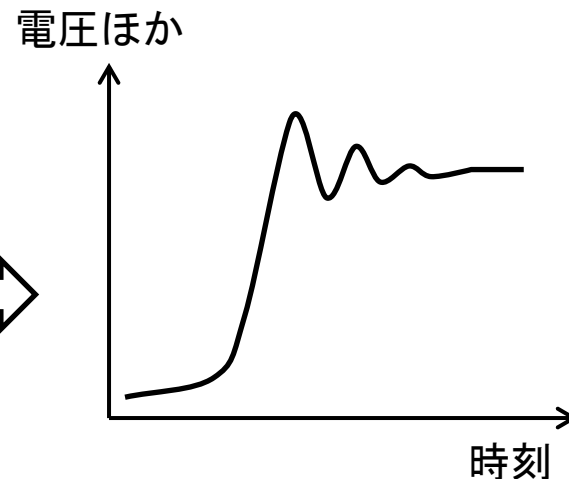
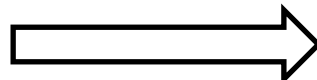
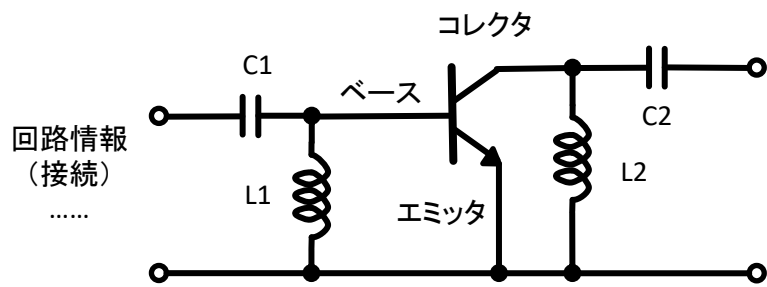


	f (MHz)	$ S_{11} $	$\angle S_{11}$	$ S_{21} $	$\angle S_{21}$
トランジスタ 特性 (メーカー情報)	200	0.173	-80.3	13.652	103.4
	400	0.054	-77.0	7.217	85.1
	600	0.013	-57.9	4.936	74.0
	800	0.028	81.8	3.761	62.3
	1000	0.062	82.2	3.094	58.3



回路シミュレータ

- 時間軸系: 各種等価回路パラメータから時間軸応答特性を計算する。(SPICE系)



NET LIST

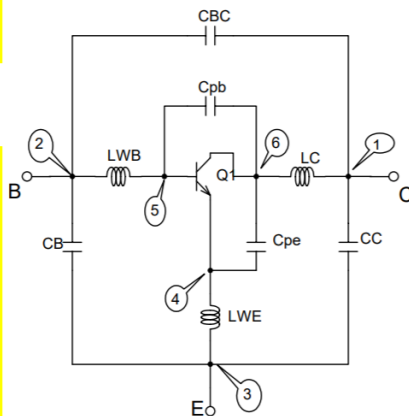
```
.SUBCKT 2SC4915 1 2 3
CB      2      3      20 fF
LWB     2      5      1.00 pH
LWE     4      3      738 pH
Cpe     4      6      208 fF
Cpb     5      6      158 fF
LC      6      1      1.00 pH
CC      1      3      60 fF
CBC     1      2      60 fF
Q1      6      5      4      NPN
+ AREA =
```

Spice model

トランジスタ
特性
(メーカー情報)

```
.MODEL NPN NPN
+ IS = 1.30 fA
+ BF = 131
+ NF = 1.00
+ VAF = 68 V
+ IKF = 138 mA
+ ISE = 265 fA
+ NE = 3.34
+ BR = 3.04
+ NR = 998 m
+ VAR = 174 V
+ IKR = 416 mA
+ ISC = 711 aA
+ NC = 1.04
+ RB = 15 Ohm
```

(以下略)



https://toshiba.semicon-storage.com/content/dam/toshiba-ss/std/download/rf_spara/2SC4915_SP_01.pdf

回路シミュレータ

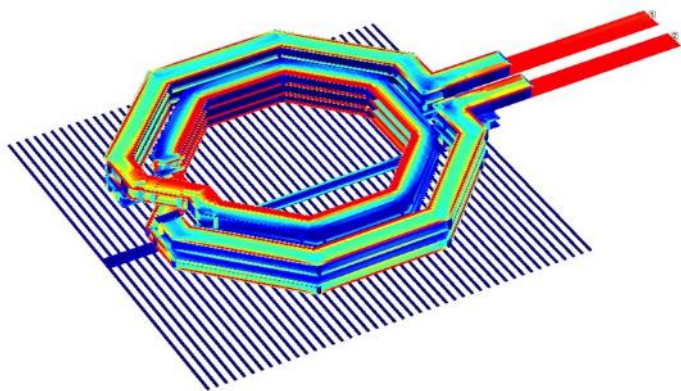
- 与えた条件での特性を計算するだけでなく「ゴール」を設定し、それとの差が少なくなるように指定パラメータ値を最適化する機能もあり。
ゴールの例：周波数1.0 GHz～1.2 GHzでゲイン ≥ 10 dB
指定パラメータの例：50 mm $\leq L1 \leq 100$ mm (複数も可)
⇒結果の例：L1=70mmで ゲイン= 12dB@1.0GHz
13dB@1.1GHz
10dB@1.2GHz
- 一般に、実物の試作を繰り返すよりも早く結果が得られる
- ただし、前提条件やゴールの設定を適切に行わないと、得られるべき結果に到達しないことがある。
実装できないとか、誤差が大きいとかにも注意。

電磁界シミュレータ

- 作るものの3次元モデルもしくは単純化したモデルをコンピュータ上に構築し、その電磁界分布などを解析するソフトウェア。
- アンテナの特性解析等も可能。
- 入力したモデルは細かなメッシュに分割され有限要素法で物理方程式を満足するように解を求める。
- 適切な境界条件やパラメータの設定と、使用できるCPU能力に応じた課題選択が必要。
必要に応じ回路シミュレータと電磁界シミュレータを交互に用い最適設計をおこなう。
- 適切に使えば、機械工作と高周波実測の繰り返しを行ったり、スケールモデル(目標物のN倍の大きさで、周波数をN分の1で試作)で実験したりするよりも効率的であることが多い。

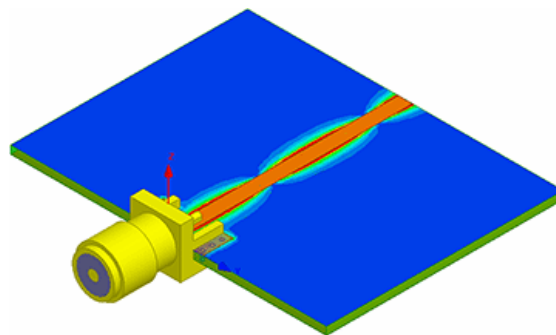
電磁界シミュレータ

● 電磁界シミュレータの結果例



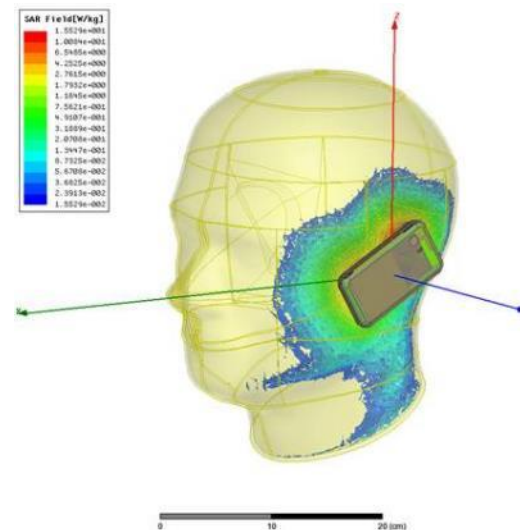
シリコン基板上に形成されたインダクタで、シリコン基板中の渦電流損を低減するためにすだれ状の電極を配置したもの。

<https://www.sonnet.site/product/application/spiral/>



プリント基板端部に実装したコネクタ。

<http://www.cybernet.co.jp/ansys/product/release/ansys16/elemag.html>

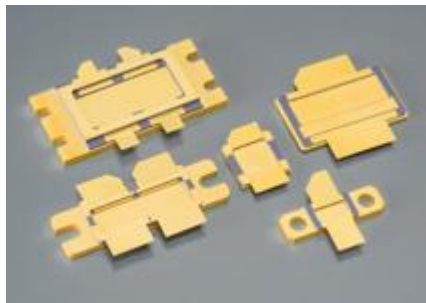


人体近傍におけるスマートフォン内蔵アンテナ。

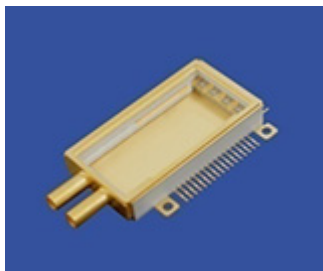
<http://www.cybernet.co.jp/ansys/case/analysis/319.html>

高周波・マイクロ波パッケージ

- インターネット検索結果の一例。



<http://www.ntktechnicalceramics.com/product/index.html>



<http://www.kyocera.co.jp/prdct/semicon/semi/fo/pkg.html>



<http://www.hygente.com/wp/wp-content/uploads/2013/04/butterfly.jpg>

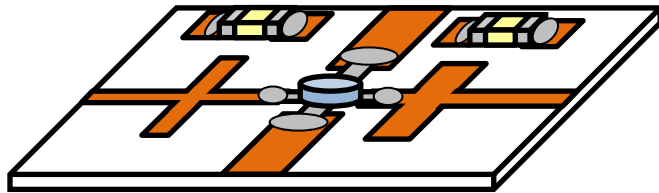
シングルチップ MMIC用パッケージ	10		30			50	70	90	(GHz)
	S	C	X	Ku	K	Ka	V	W	
	導波管ポート付きパッケージ <input type="button" value="more"/>								
	メタルウォールパッケージ								
	セラミックウォールパッケージ								
	表面実装パッケージ								

http://www.kyocera.co.jp/prdct/semicon/semi/wireless/mmic_pkg.html

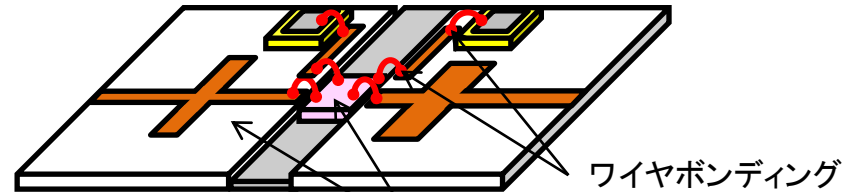
パッケージと実装

- 市販ICや高周波部品を基板上に組上げ、さらに取り扱いやすくするためケース(パッケージ)に入れる。
- 部品を基板上に組上げるには半田付やワイヤボンディングを使用。

基板にはんだ付けで部品実装

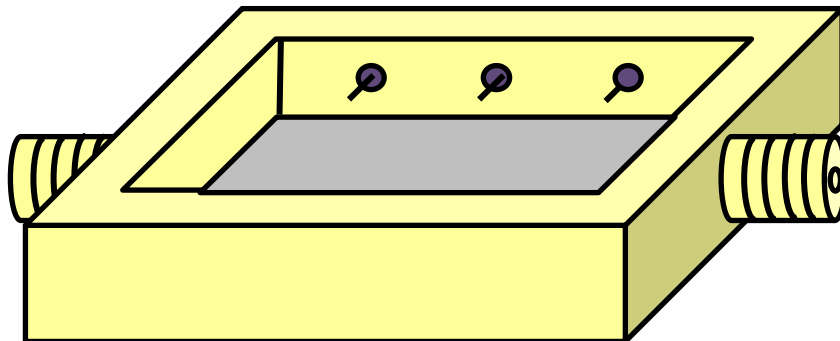


基板にワイヤボンディングで配線
部品はダイボンディング



表面高さを合わせる(ボンディング短くするため)

- ケースには高周波コネクタと電源フィードスルーをつけ、外部とインターフェースする。
必要に応じ気密封止(ハーメチックシール)をする。



高周波マイクロ波実装

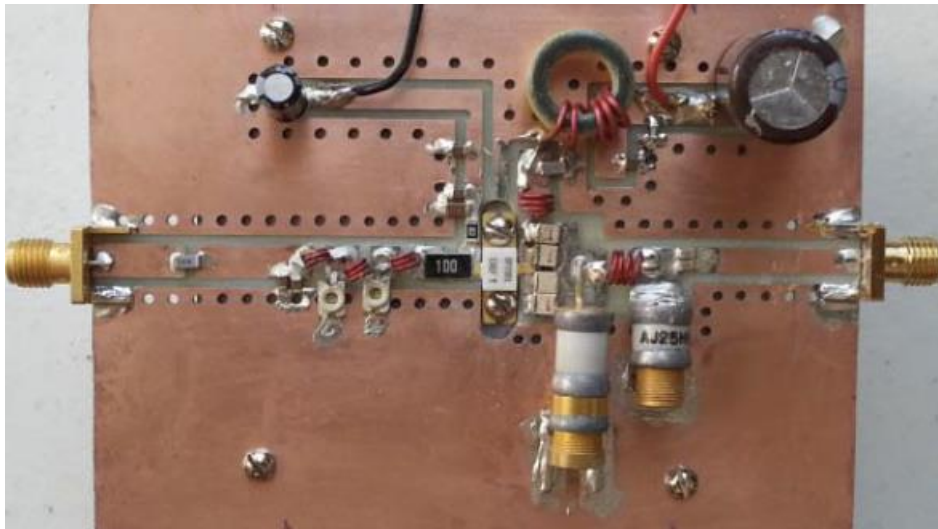
- インターネット検索結果の一例。



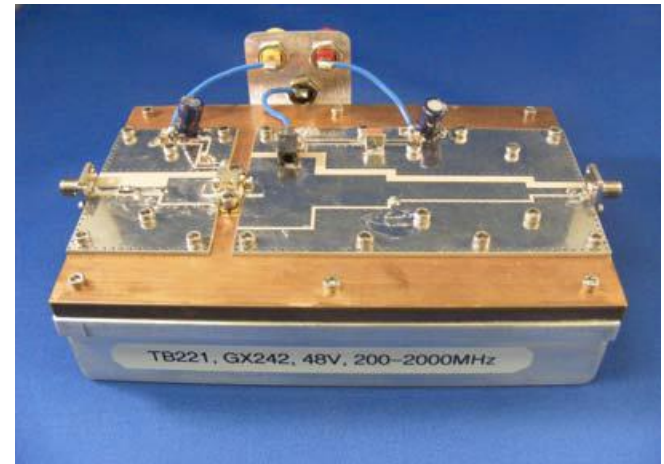
<http://www.digikey.jp/product-highlights/jp/ja/nxp-semiconductors-mmhc/1572>



http://www.aetjapan.com/hardware_detail.php?rfmw_amp_module



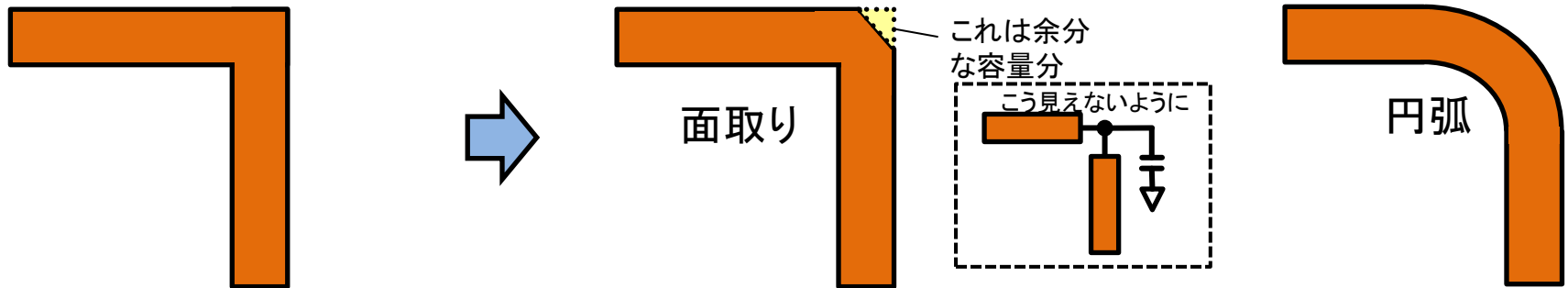
http://www.polyfet.com/IMS2015_TU1B-1_Ramon_Beltran.pdf



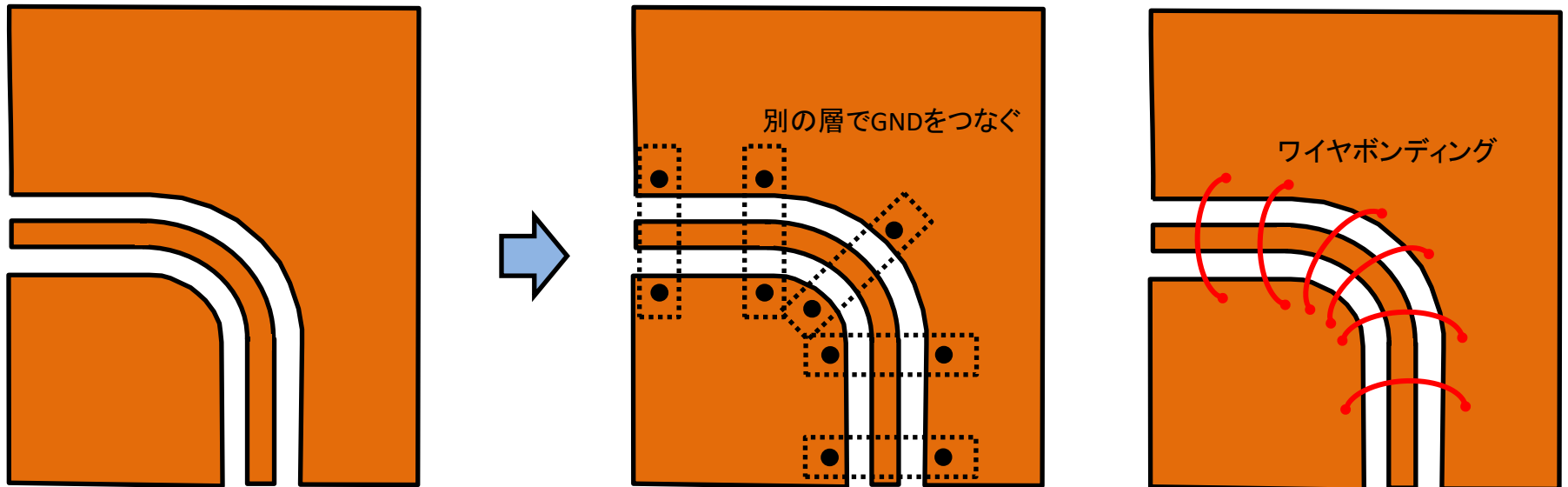
<http://www.polyfet.com/Intro%20to%20Polyfet.pdf>

実装：曲がり角に注意

- マイクロストリップラインの90度曲り部⇒面取りするか円弧に。

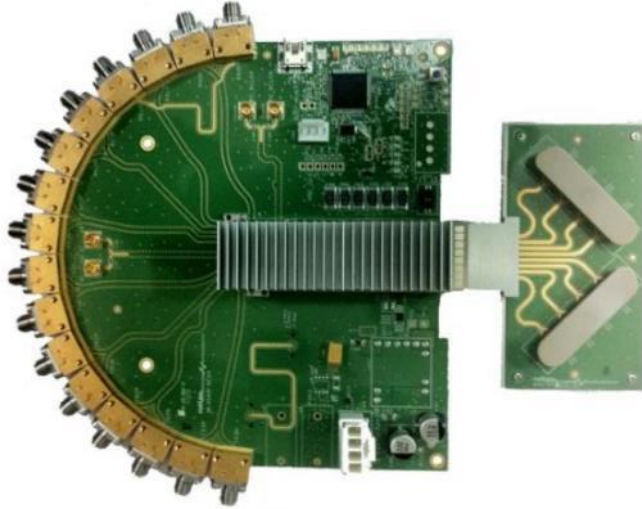


- CPW (CPWG) を90度曲げると内側と外側のGND長さに差が出る。
⇒VIAホールを介してGNDをつないだり、ワイヤボンディングする。



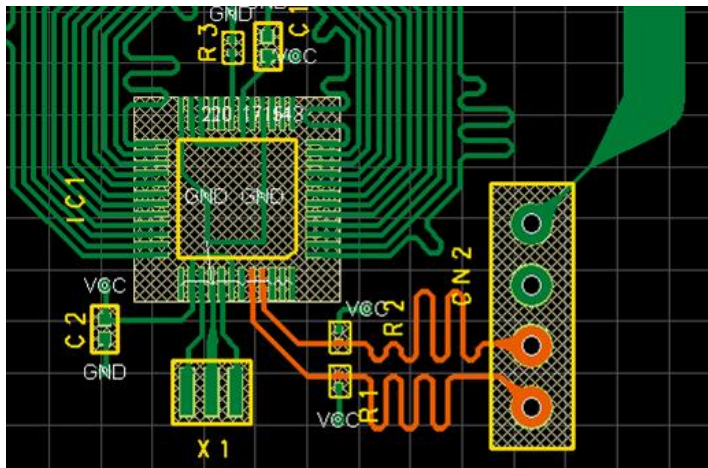
実装：同じ長さに

- コネクタの配置を工夫して等長に。



<http://www.i-waveco.com/maker/multilane/>

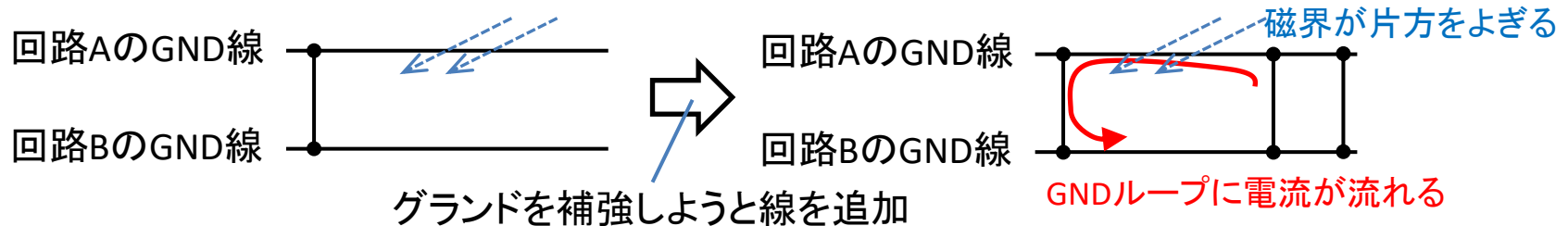
- 蛇行パターンで等長に。



<https://www.quadcept.com/ja/manual/pcb/post-117>

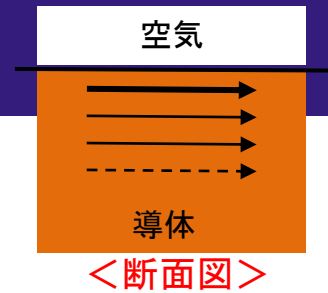
実装：GND(グランド)は入念に

- GNDや電源はふらつかない、ノイズが載らない、という「思い込み」で設計したとき、適切な配慮をしないとその前提が崩れる。
- GND線はなるべく太く、可能な限り「面」==「GNDプレーン」にする。
- 基板表裏のGNDはスルーホールを適切に打ち、GNDどうしをつなぐ。
- GNDのケースへの接続は点でなく「線」、願わくば「面」で確実にやる。
但し、ガッチリつけるとケースと基板の熱膨張係数の違いでクラックが生じる。材料の線膨張係数を合わせる(銅タングステンと、アルミナなど)またはバネ的なずれを許す機構などが望ましい。
- 電線に磁界(低周波、高周波)が鎖交すると、電圧が生じる。
電線だけでなくGND導体に磁界が鎖交してもその両端のGND間に電位差が生じ、GNDがループになっていると電流が流れる。
- しばしば、GND強化と相反する対策が必要＝ノイズ対応の難しさ。



- 電源には対GNDにパスコン(バイパスコンデンサ)を適切に配置してインピーダンスを下げる。
高周波特性の良いものを使用する。電解コンデンサ(数十～数百 μF)は低周波用、セラミックコンデンサは高周波用であり、通常は併用する。

表皮効果



- 表皮(ひょうひ)効果は導体を高周波が流れるとき、導体の表面ほど電流が多く流れることを言う。周波数が高いほど表面集中するので、等価的な抵抗は高くなる。
- 導体の電流密度 J は 深さ δ に対して、次式のように減少する。

$$J = e^{-\frac{\delta}{d}}$$

d は表皮深さと呼ばれ、電流が表面電流の $1/e$ (約 0.3679) になる深さである。導体の電気抵抗率を ρ 、透磁率を μ 、角周波数を ω としたとき次のようになる。

$$d = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$$

金属名	抵抗率 [Ωm]
銀	1.59×10^{-8}
銅	1.68×10^{-8}
金	2.21×10^{-8}
アルミニウム	2.65×10^{-8}
黄銅	$5 \sim 7 \times 10^{-8}$

- 表面だけ導電率を下げるために銀メッキや金メッキがしばしば行われる。さらに金メッキは錆びないという特長も持つので、高周波部品やケースは金メッキが多用される。

高周波コネクタ

- 表のように多数の種類がある。(さらに他にもあり。下記の上限周波数は使用する製品の規格を精査すること。)目的によって使い分ける。
- ねじを適切な力で締めるため、トルクレンチが推奨されるものあり。
- 嵌合面にごみなどの付着がないように気を付け、丁寧に扱う。



KeySight社ホームページより
http://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/5988-8015JA.pdf

コネクタ名称	別名	代表的周波数上限 [GHz]	中心導体外径 [mm]	外導体内径 [mm]	備考
BNC		4			汎用。50Ωと75Ωがあるが嵌合する。
N		8.5	3.04		
SMA		18	1.27		3.5mm, Kと嵌合するが推奨しない。
SMB		4			小型。
SMC		10			小型。
APC-7		18		7	精密測定用。
3.5mm	APC-3.5	33	1.52	3.5	精密測定用。SMA, Kと嵌合するが推奨しない。
K	2.92mm	40	1.27	2.92	SMA, 3.5mmと嵌合するが相互接続は推奨しない。
2.4mm		50	1.042	2.4	Vと嵌合するが相互接続は推奨しない。
V	1.85mm	65	0.803	1.85	2.4mmと嵌合するが相互接続は推奨しない。
W	1.1mm	110	0.434	1.1	アンリツ (Wiltron) 系、超高周波。
1mm		110	0.434	1	KeySight系、超高周波。
GPO	SMP	40			小型。
GPPO	SMPM	65			超小型。

高周波コネクタ

- インターネット検索結果の一例。



BNC

<http://akizukidenshi.com/img/goods/C/C-00095.jpg>



<http://akizukidenshi.com/img/goods/C/C-00137.jpg>



SMA

<http://jp.rs-online.com/web/p/sma-connectors/5265785/>



<http://jp.rs-online.com/web/p/sma-connectors/2955930/>



SMB

<http://jp.rs-online.com/web/p/smb-connectors/2955693/>



<http://jp.rs-online.com/web/p/smb-connectors/4205388/>



SMC

<http://jp.rs-online.com/web/p/smc-connectors/2955435/>



<http://jp.rs-online.com/web/p/smc-connectors/2955407/>



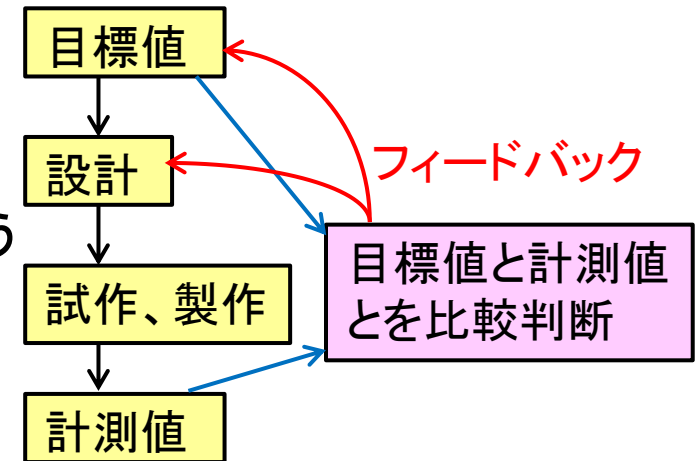
http://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/5988-8015JA.pdf

計測器

● 計測の重要性

目標と実特性の差異を把握し、判断するために必要

- ◆ 開発仕様の設定とそれを目標とした設計
- ◆ 対象の特性を適切に計測
- ◆ 計測結果と目標値との差異を判断
- ◆ 設計もしくは目標へのフィードバックを行なう



● 高速・高周波計測器

- ◆ 周波数領域の特性: スペクトラムアナライザ、ネットワークアナライザ、
- ◆ 時間領域の特性: サンプリングオシロスコープ、リアルタイムオシロスコープ
- ◆ その他測定器: インピーダンスアナライザ、パワーメータ、周波数カウンタ

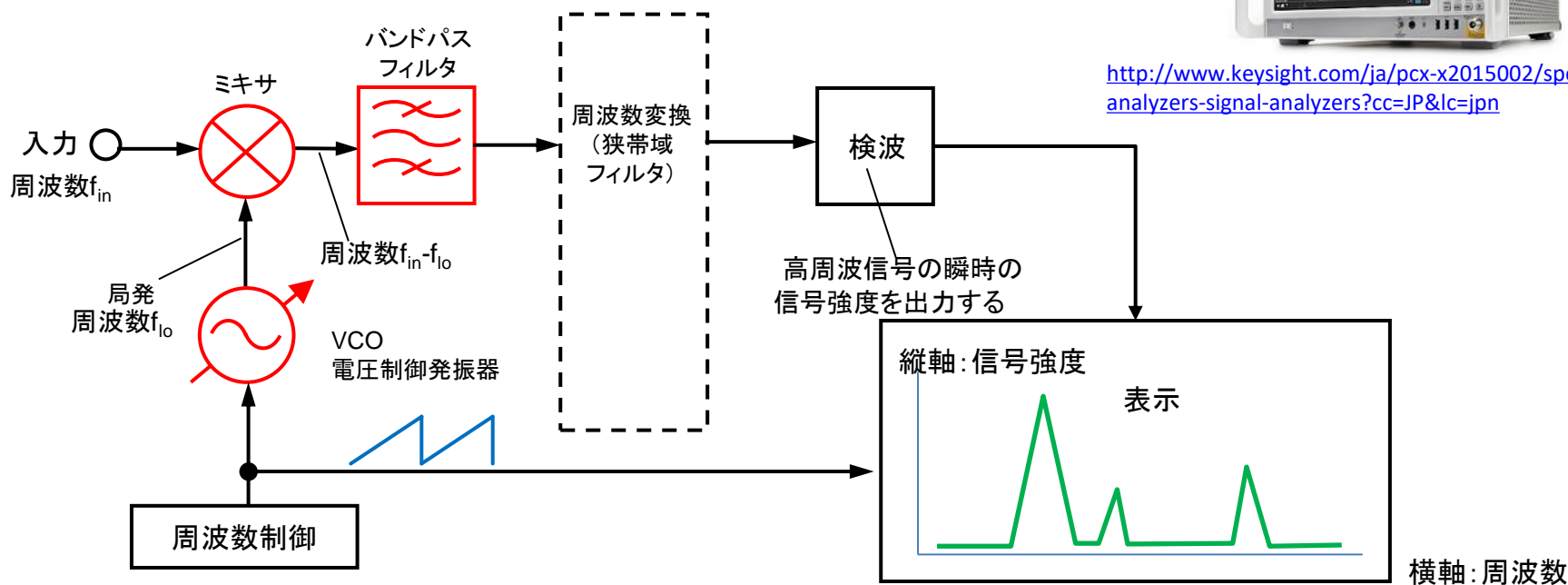
横軸

● 測定器とデバイスの接続

- ◆ 第一選択はコネクタで接続する方法
- ◆ 集積回路はテストフィクスチャーなどを介することがある

計測器：スペクトラムアナライザ

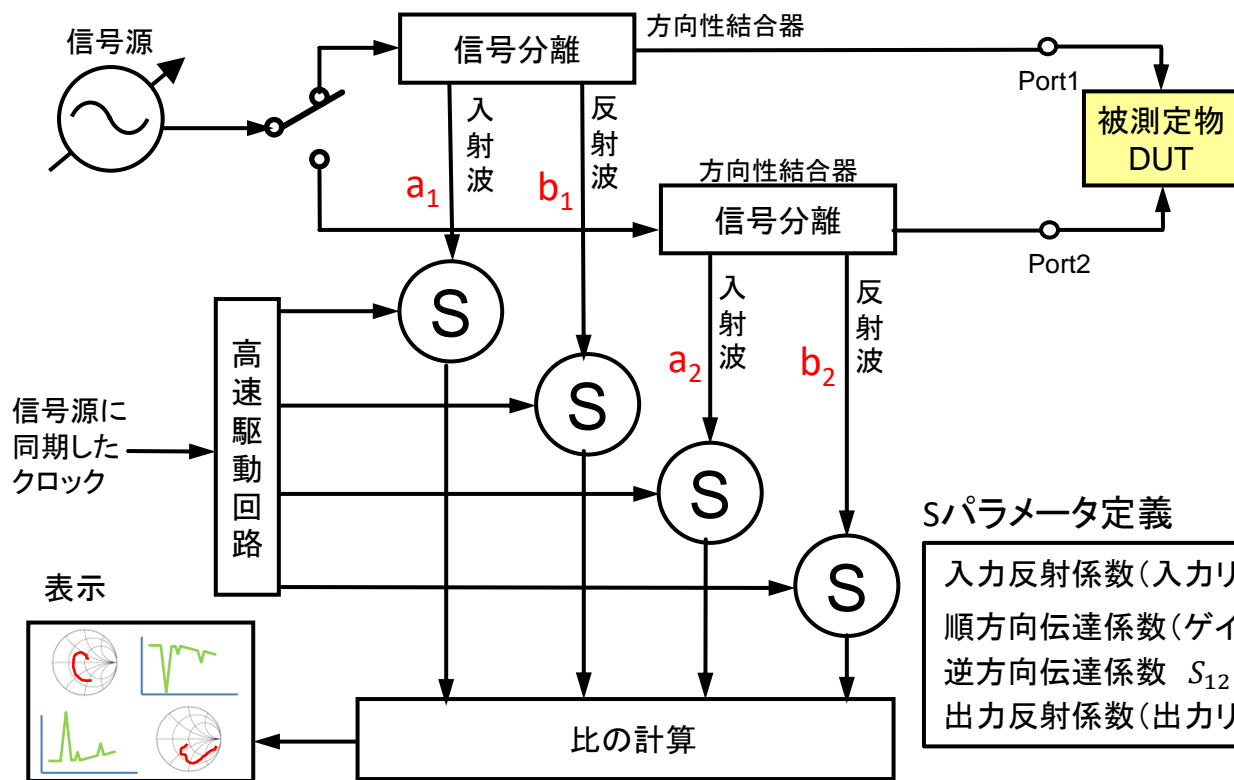
- 信号の周波数成分(スペクトラム)を測定する。
つまり、横軸=周波数、縦軸=信号強度、の表示をする。
下図の構成でミキサ、VCO、バンドパスフィルタが重要要素。
- 周波数解析のためにはバンドパスフィルタの透過周波数を掃引してもよいが、その代わりにVCOを掃引する。



<http://www.keysight.com/ja/pcx-x2015002/spectrum-analyzers-signal-analyzers?cc=JP&lc=jpn>

計測器：ネットワークアナライザ

- ベクトル・ネットワークアナライザの構成を図に示す。
PORT1とPORT2との間にDUTを接続し、各入射波、各反射波をサンプラで低周波数に変換し振幅・位相を測定、比をSパラメータとして表示。
- 測定前に校正(既知の標準デバイス使用)をして正確な測定を行う。
↳ Open, Short, Load (50Ω), Thru
- スカラー・ネットワークアナライザは、振幅比だけを測定する装置。

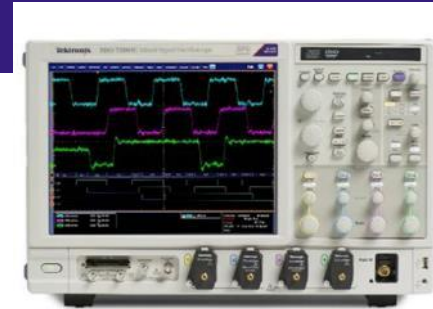


<https://www.anritsu.com/ja-JP/test-measurement/products/ms4640b-series>

Sパラメータ定義

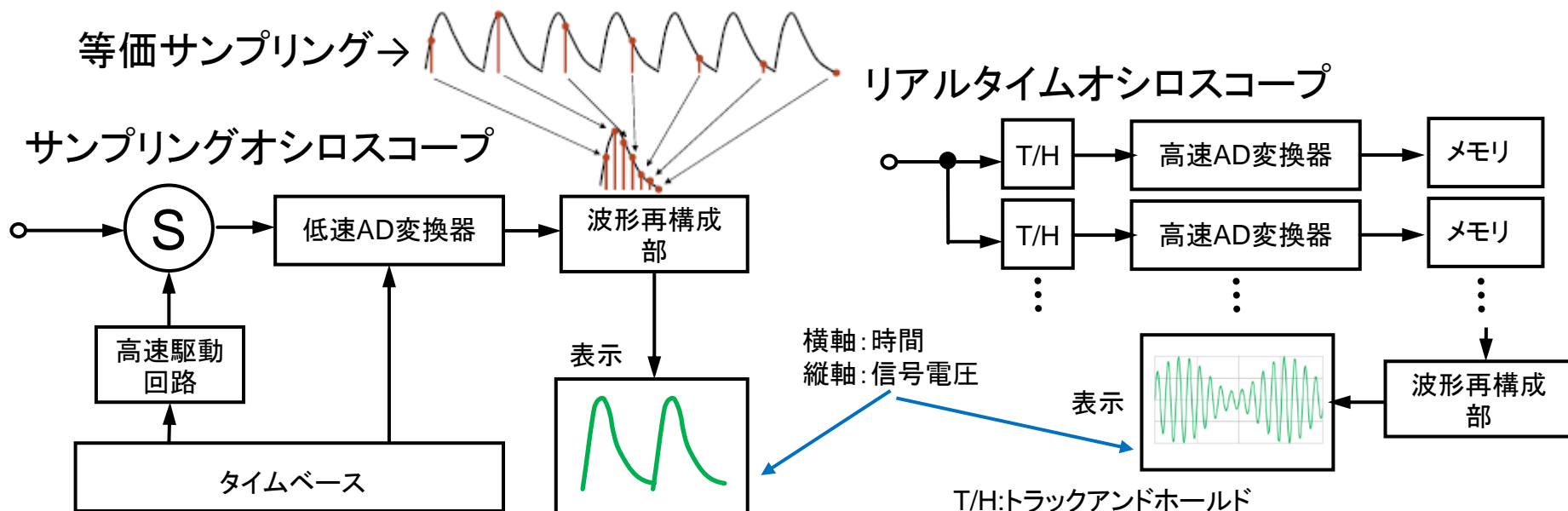
入力反射係数(入力リターンロス) $S_{11} = b_1/a_1$:ただし $a_2 = 0$
 順方向伝達係数(ゲイン) $S_{21} = b_2/a_1$:ただし $a_2 = 0$
 逆方向伝達係数 $S_{12} = b_1/a_2$:ただし $a_1 = 0$
 出力反射係数(出力リターンロス) $S_{22} = b_2/a_2$:ただし $a_1 = 0$

計測器：オシロスコープ



<http://jp.tek.com/oscilloscope/dpo70000-mso70000>

- 時間軸波形を測定する。
大別して二つの方式がある。
- サンプルングオシロスコープ
等価サンプルングの原理を用いて「繰り返し波形」であることを前提に、測定タイミングを少しずつずらして波形をサンプルングする
- リアルタイムオシロスコープ
超高速AD変換器を用いて、単発波形でも波形情報をメモリに蓄えて、観測できる。



計測器：その他

● インピーダンスアナライザ

- ◆ 前述のネットワークアナライザでも素子のインピーダンスを知ることができるが、もう少し簡便なもの。
- ◆ 対象は1Port素子(信号とGND側の1対:例=このインダクタの等価回路を知りたい)
- ◆ 各種方式があるが、例えば、素子に印加した高周波電圧と流れる電流の関係を測るなどの方法がある。

● パワーメータ

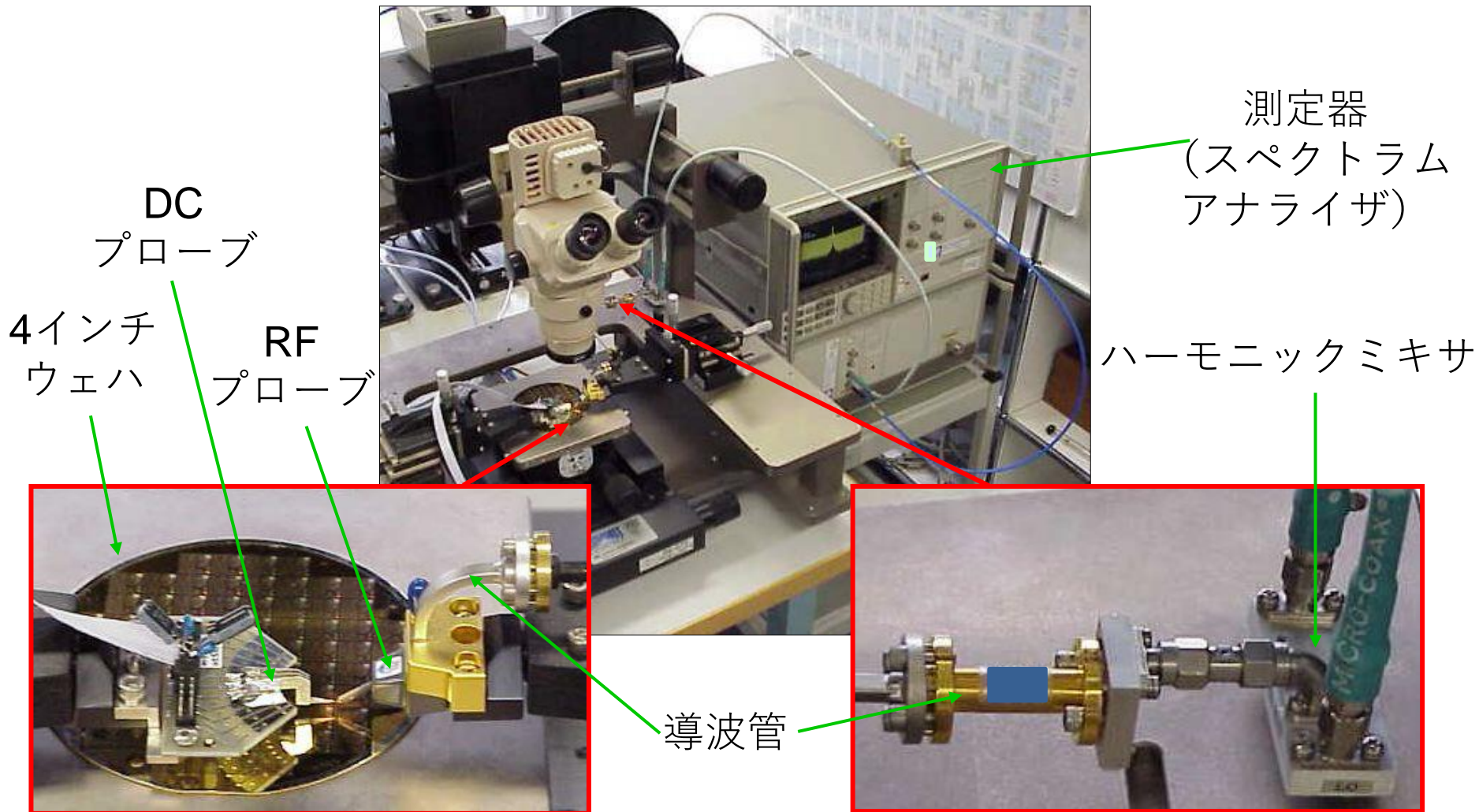
- ◆ 高周波の電力を測定する。
- ◆ 一般にスペクトラアナライザよりも精度の高い測定ができるが、周波数の弁別はできない。
- ◆ ダイオード検波をしたり熱に変えて測定するなどの方法がある。

● 周波数カウンタ

- ◆ 高周波の周波数を測定する。
- ◆ 一般に確度の高い測定が可能であったり、時間を精密に測ることができる。
- ◆ フリップフロップで一定時間内のパルス数を数えるのが基本であるが、高分解能化のため、端数を巧みに測る工夫がされている。

ウェーハプローバ

- 半導体を切断前のウェーハの状態です。
- 写真は超高周波測定の実例（導波管を使った「特殊」な測定）



まとめ

まとめ

- 高周波・マイクロ波・ミリ波技術の基礎とその応用例について解説しました。数式よりもいろいろな例を挙げることに努めました。「**高周波の気持ち**」をわかっていただけたでしょうか。
- まだまだ「入口」を紹介しただけですので、興味を持った方やこの分野を必要とする方は、専門書ほかで理解を深めてください。奥の深い内容がたくさんあります。
- 高周波に限らず「機械を触って中身を分解してみて／部品を壊して仕組みを知るべきだ、実物を触って覚えるべきだ！」という昔ながらのやり方があります。
しかしながら、現代そして将来において、インターネットや情報処理技術を活用することは必須であり、昔ながらの方法にプラスして効率よく習得することも重要でしょう。
- 従来の方法を知ったうえで、その習わしにとらわれない柔軟な思考や行動は良い結果を生むと考えます。