# B-5

## C-V(容量-電圧)測定の最適手法

Hidekazu Tanaka

Tektronix®

KEITHLEY
A Tektronix Company

# はじめに

対象とさせて頂いているお客様：

初めて半導体の容量測定(C-V測定)を行いたいお客様

容量測定を行っているが、期待値と測定値に差があるお客様

“C-V測定” という単語について

本プレゼンテーションは、サイクリックボルタンメトリーに関する物ではありません。

# 容量測定の最適手法

1. 容量測定(C-V)の目的と、半導体使用回路の実際
2. 容量測定の種類と概要
3. 容量測定におけるtips (知っておくと便利なこと)
4. まとめ

# 1.容量測定(C-V)の目的と、
# 半導体使用回路の実際

# 容量測定の目的

◆ デバイスのユーザー観点

デバイスの端子間容量が知りたい。
当該デバイスを使った回路の設計時に容量値を使用したい。
デバイス選定時の判断材料として。

◆ デバイス設計者観点

デバイスの出来具合や、内部パラメータを算出したい。
設計通りの値になっているか確認したい。
設計にフィードバックしたい。

# 半導体の”容量”から分かる半導体の特性例

**例1：トランジスタのカットオフ周波数(どのくらいまで高周波で使えるか)**

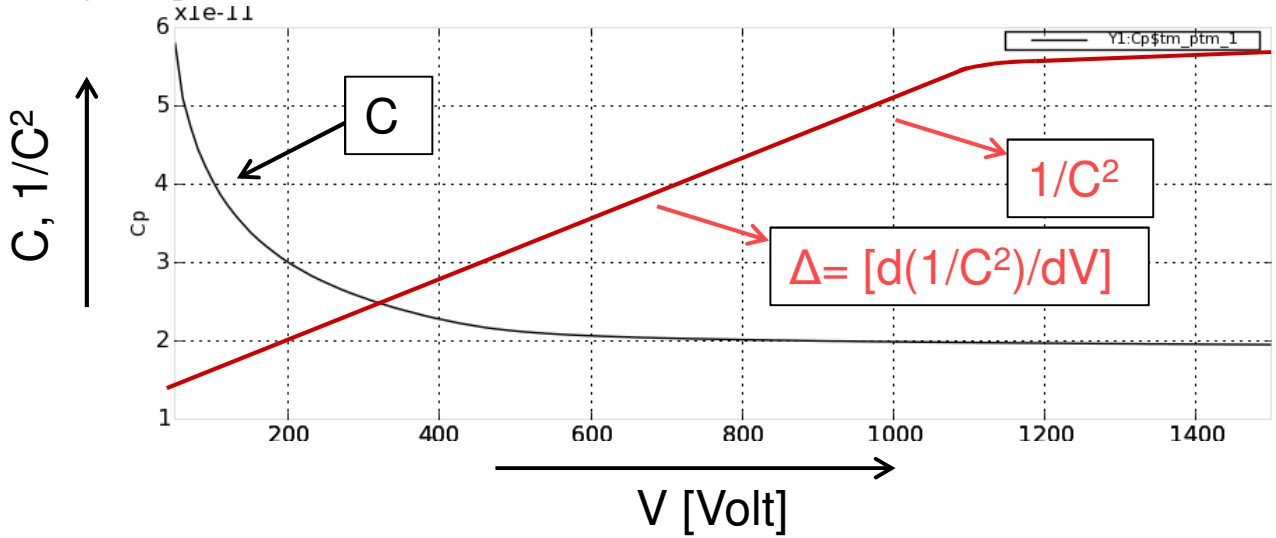
$$fc = (1/2\pi) \cdot 1/[R_g\{C_{gs} + (1-A_0)C_{gd}\}]$$

($A_0$=低周波での電圧利得, $R_g$=ゲート抵抗)

**例2：不純物濃度**

$$N(a)\ [1/cm^3] = 2.0 / (q \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot A^2 \cdot [d(1/C^2)/dV])$$

(q=1.602e-19, $\varepsilon_r$=半導体の比誘電率 , $\varepsilon_0$=真空誘電率、A=面積[$cm^2$] 、
[$d(1/C^2)/dV$]= CV測定において、$1/C^2$ とVの傾き。



# 半導体に”容量”が存在する事による
# デメリットの一例

**ダイオードの接合容量が大きい場合**

逆バイアスになった時に、高インピーダンスとなるまで時間がかかる。

**FETのCgsが大きい場合**

(1) FETがON->OFF、OFF->ONなど遷移する時に時間がかかる。
(2) FET自体をON/OFFするのに多くの電流(電荷)を要する。

**FETのCdsが大きい場合**

D-S間のTr/Tf(立ち上がり・立ち下がり時間が長くなる)

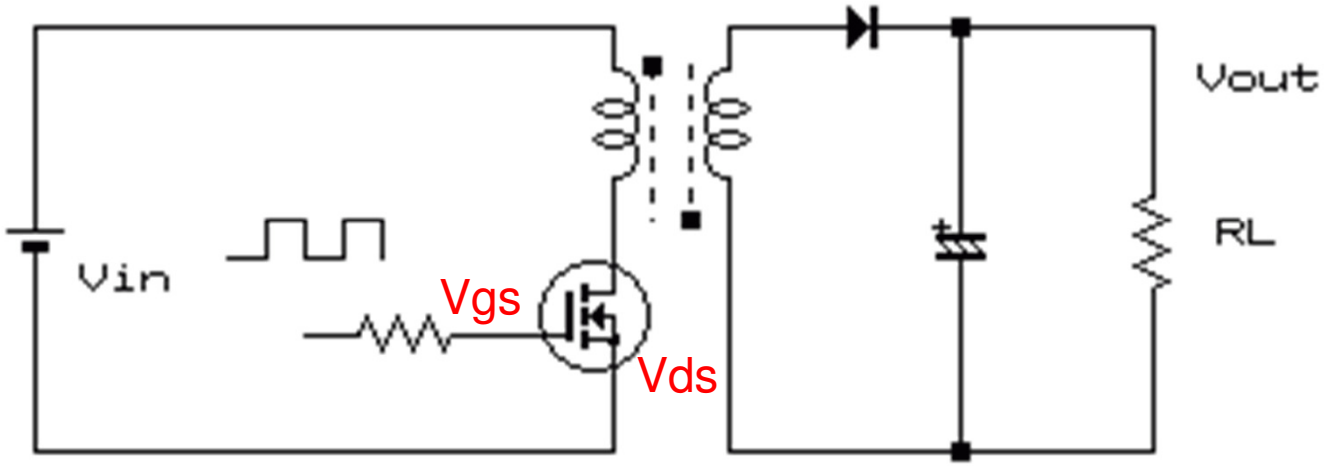
**FETのCgdが大きい場合**

Gate電圧が印加されてからD-S間がON状態になるまでの
伝搬遅延時間が長くなる

➔ 総じて、**「高周波では、各容量が大きいデバイスは使えない」**

# 例えばスイッチング電源
# (ACアダプタ、DC-DCコンバータ, etc.)

基本回路

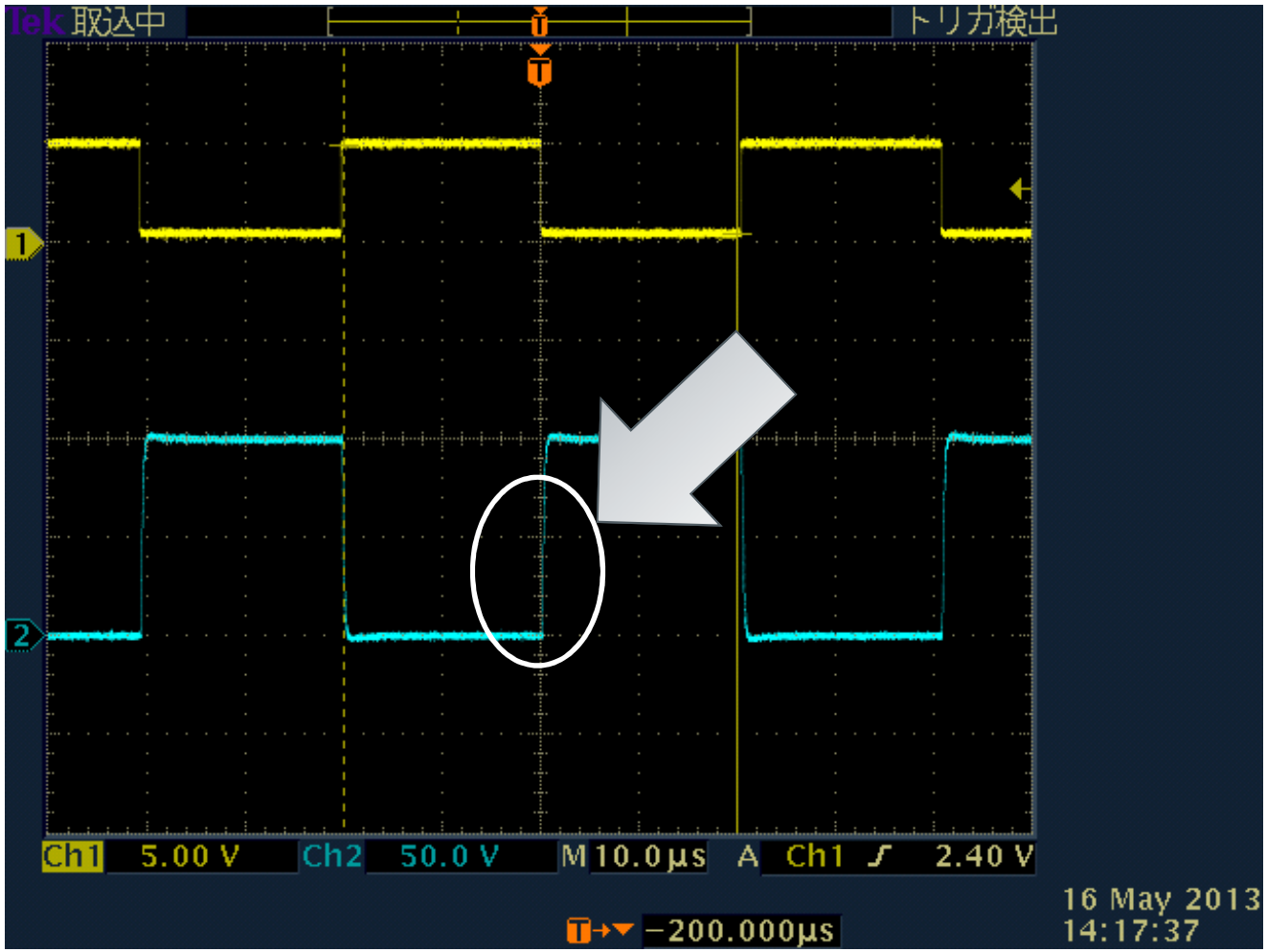



FET/Diodeなどを数百kHz～数MHz程度で
動作させる事が多い。

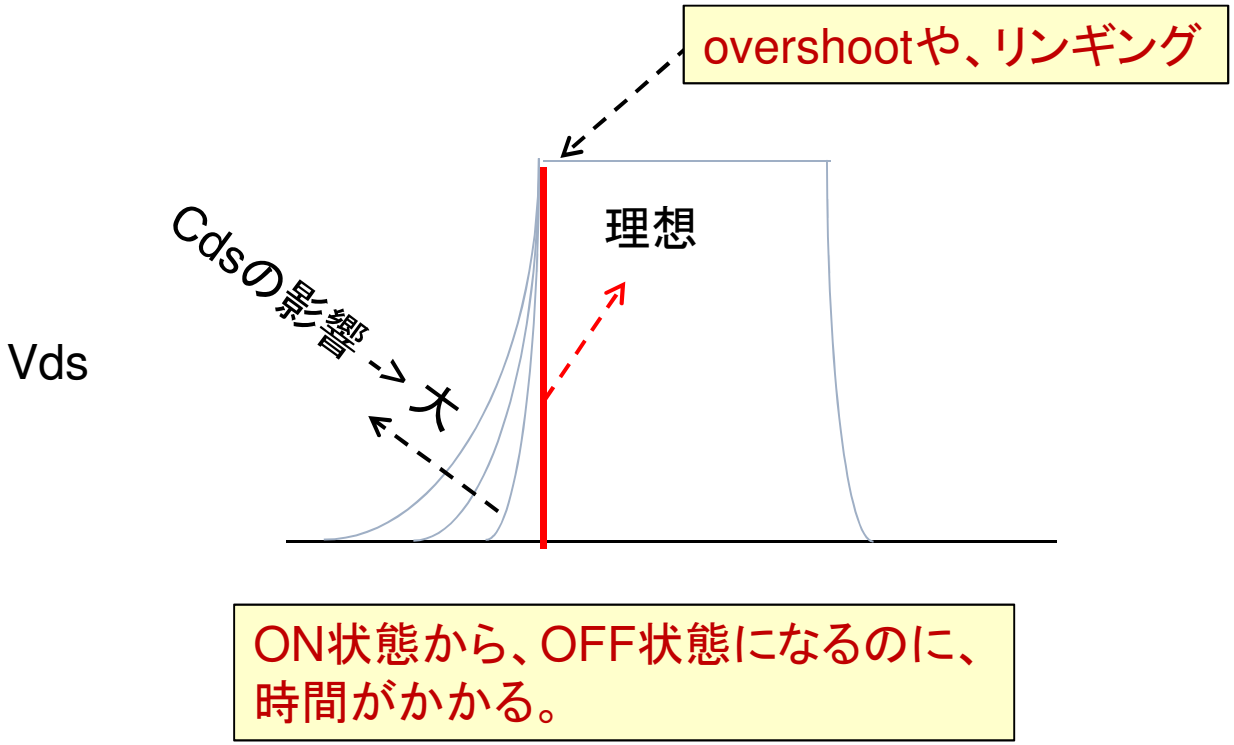
# 端子間容量が悪影響を及ぼす例
# (Cdsの例)

Vgs

Vds



# 端子間容量が悪影響を及ぼす例
# (Cdsの例)



# 2.容量測定の種類と概要

# 代表的な容量(C-V)測定手法

2.1 **LF C-V** (Low Frequency C-V)

非常に低い周波数で2つのSMUを使用して測定。
電圧を正弦波状に少しずつ変化させ、その時の電流を測定し、容量を算出。
0.01Hz～10Hz程度。電気化学系、材料・半導体膜の評価。
低移動度のデバイスや材料。

2.2 **QS C-V** (Quasi Static C-V)

1～10Hz程度。SMUなどの機材を使って、
少しずつ電圧を変えながら電流測定し、計算によって容量値を算出する。
電気化学系、材料・半導体膜の評価。低移動度のデバイスや材料。

2.3 **C-V (General C-V)**

一般的な容量測定。 1kHz～10MHz程度。一般半導体。

2.4 **HV C-V** (High voltage C-V)

高電圧容量測定。最近流行のSiC , GaNデバイスなどに。
周波数は2.3と代わらないが、印加電圧が0～10kV程度。
SiC/GaNなどの高耐圧半導体。

2.5 **RF C-V** (Radio Frequency C-V)

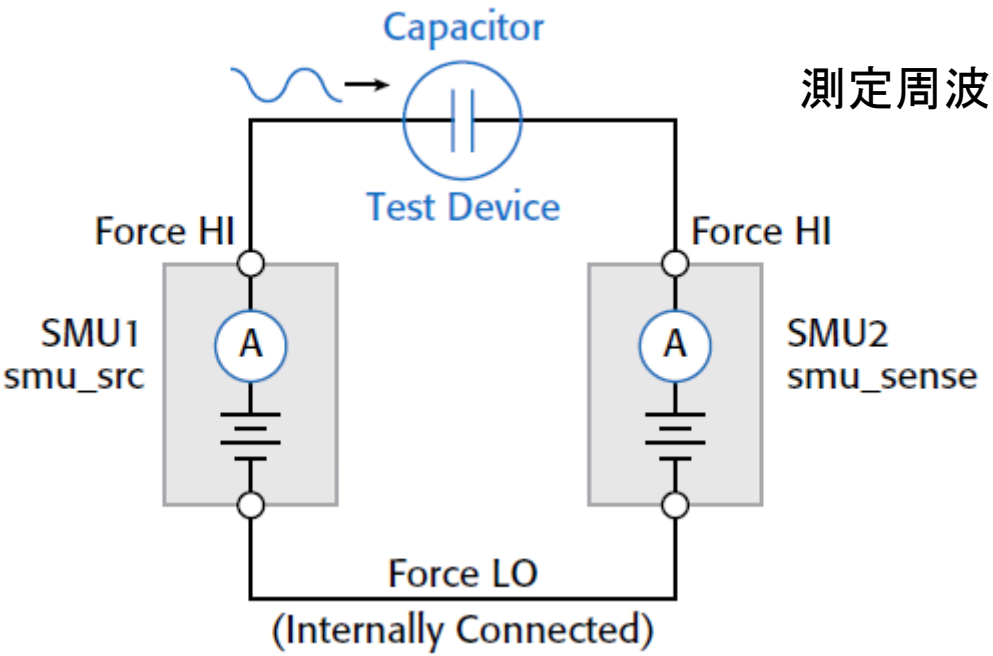
非常に高い周波数を使った容量測定。高移動度半導体。
無線系デバイスなど。10MHz～40GHz。RF用トランジスタetc

# 【参考】 その他の容量測定手法

◆ C-F(周波数) 特性
　容量の周波数に対する変化・変動

◆ C-t (時間) 特性
　容量の実時間に対する変化・変動

# 2.1 LFCV – Low Frequency C-V




測定周波数帯(例) : 10mHz～10Hz

SMU1 : DCV+ACV出力 , SMU2: AC I 測定 ,0V印加。
低い周波数なので、SMUでも正弦波状の電圧を印加する事が可能。

# LFCV – Low Frequency C-V

◆用途

低移動度材料向け。 Organic LED/FETなど
TFT, MEMS , 高インピーダンス(>$10^{15}\Omega$)材料、
低移動度の材料や半導体など

◆測定手法

SMUによる電圧印加・電流測定を一定間隔で実行。
これにより、電圧・電流の時間変化が得られる。
このデータを使用して、インピーダンスを算出、虚数部より
容量値を算出する。

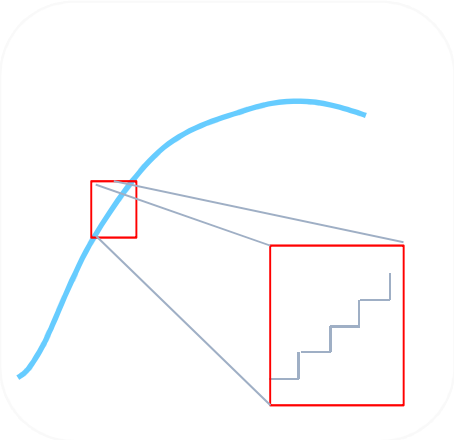
◆測定機材

2600シリーズSMUなど。(電圧源と電流計を含む機材)

◆コツ

Low側で電流を測定する方が望ましい。
(リーク電流が見えない、ノイズが少ないなどの観点から)
容量計の内部ACインピーダンスが1MΩ～1GΩなので、それよりも
充分高い抵抗を持つデバイスでないと誤差が生じる。

# LFCV – Low Frequency C-V



SMU1で少しずつ電圧を正弦波状に変化させながら
各ステップでの電流を読む。
例えば10ms毎に電圧を変えながら電流を読む。
電圧を変化させた直後に電流を読まない。
（電流が安定してから読む)

離散フーリエ変換(DFT)などを用いて、時間データより
$Z = V / I = |Zc|\exp(-j\theta)$　(V,Iはベクトル, θは位相差)を算出。
周波数は設定値を使用。虚数成分から、Cが判明。

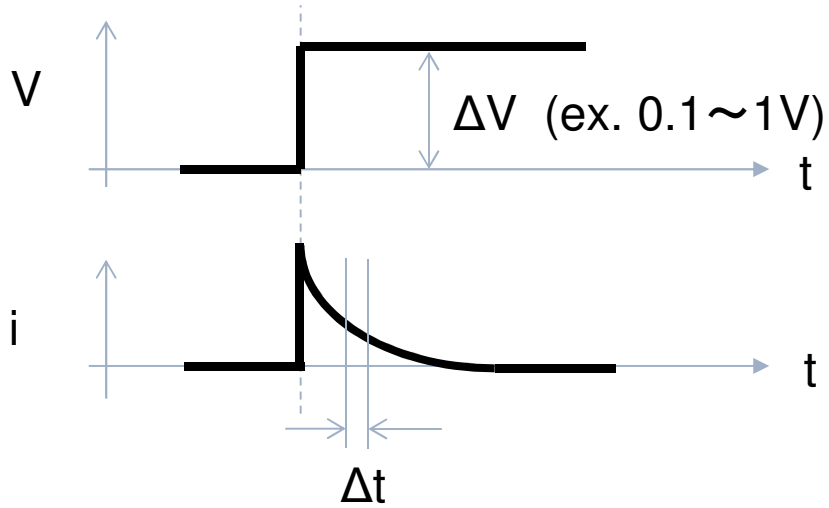
$Im(Z) = 1/(2\pi fC)$
$C = 1/(2\pi f \times Im(Z))$　: Im(Z)は、インピーダンスZの虚数成分

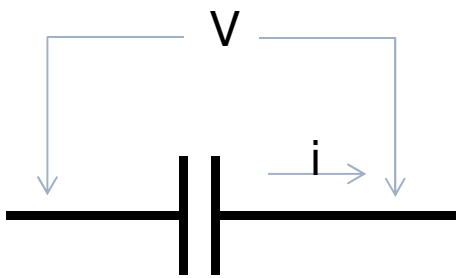
# 2.2 QSCV – Quasi Static C-V
## - その1 ステップ電圧法 -

$C = \Delta Q / \Delta V$ ,　$\Delta Q = \int i \ dt \fallingdotseq \Sigma (i \times \Delta t)$

$\therefore C \fallingdotseq \Sigma (i \times \Delta t) / \Delta V$

測定周波数(例)：1～10Hz
測定可能容量：1～400pF程度



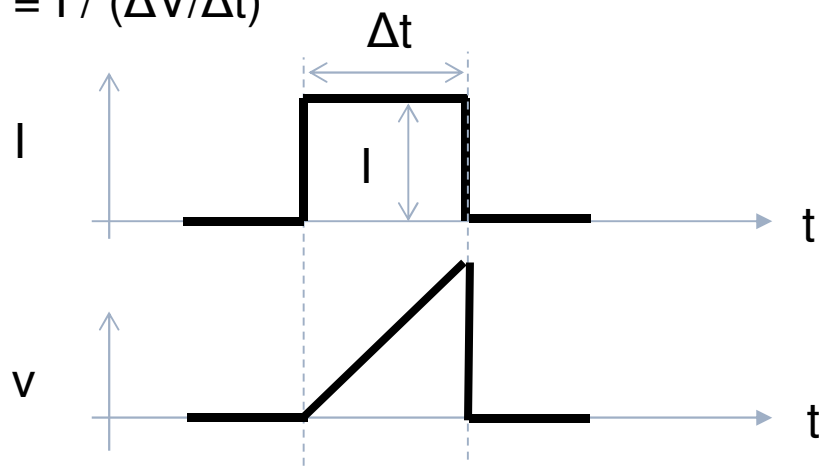



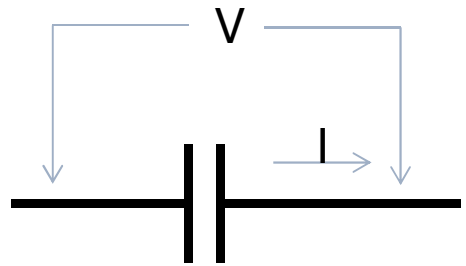

測定手法
　デバイスに対して、小さな電位差を与え、
　その時の電流変化分を積分する。
　この値より、デバイスの容量を算出する。

コツ
・いかに立ち上がり時間の短い電圧源を使用するか。
・いかに細かい間隔で正確に電流変動分をモニタできるか。

# 2.2 QSCV – Quasi Static C-V
## - その2 ランプレート法 -

$C = I / (\Delta V/\Delta t)$




測定手法

デバイスに対して、電流パルス与え、
その時の電圧変化の傾きを算出する。
パルス電流をこの傾きで除算することで、
デバイスの容量を算出する。

コツ

・いかにtr/tfの短い電流パルスを使用するか。
・電圧の傾きを正確に算出すること。

# 2.3 一般的なC-V測定

測定周波数帯(例) : 1kHz～10MHz程度

◆測定手法

トランジスタ(FET)の場合

JIS C 7030-1993

6.2.11(Ciss), 12(Crss), 13(Coss)

ダイオードの場合

JIS C 7031-1993

6.4 (端子間静電容量測定)

◆測定機材

容量計 , 外付け部品少々。

◆コツ

測定回路中に使用するキャパシタ・抵抗等の耐圧・周波数特性などに注意。

# 2.4 HVCV – High Voltage C-V

測定周波数帯(例) : 数10kHz～1MHz程度

測定手法は、Generic C-Vと同じ。
印加電圧源として、高圧電圧源が必要。

コツ
・測定回路中に使用するキャパシタ・抵抗等の**耐圧・周波数特性**などに注意。

# 2.5 RFCV – Radio Frequency C-V

測定周波数帯(例) : 10MHz～数10GHz

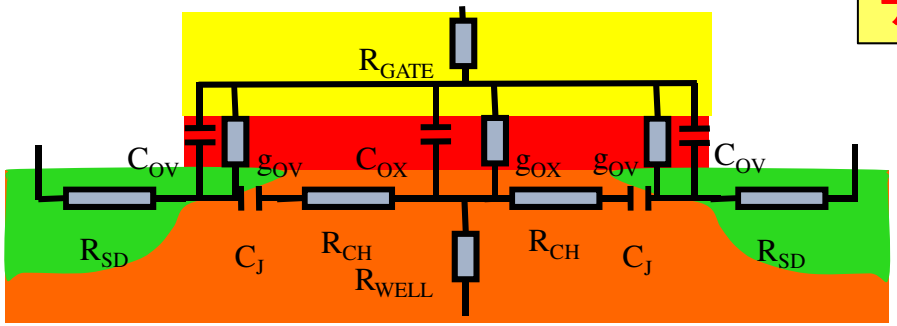
◆測定手法
測定回路等は、基本的なC-V測定と同様。

◆測定機材
容量計ではなく、ネットワークアナライザを使う。
高周波用Bias Teeを使用する。
ネットワークアナライザにて得られたSパラメータの値と、デバイスのディスクリートモデルから得られた式を比較して、容量を抽出する。

◆コツ
経路のSパラメータ、経路補正などが重要。
従って、Open/Load/Short補正を確実に行う。
接触を少しでも触ると測定系の状態が変わる。等価回路の確実な計算。
プローバを使う場合は、G-S-Gプローブ必須。

# RFCV – Radio Frequency C-V
# パラメータ抽出例

**等価パラメータはお客様の**
**デバイスモデリングによって異なります。**




Measure S11,S12,S21,S22 and Correct with De-Embedding Structure Data

↓

$$Y11 = \frac{(1-S11)*(1+S22)+S12*S21}{Z0*((1+S11)*(1+S22)-S12*S21)}$$

↓

$$Cox = \frac{Im(Y11)}{2*PI*FREQ}$$

← Standard Quantum Mechanical and Poly Depletion corrections can be applied to the extracted capacitance.

↓

Tox=(e0 * eox * Area)/ Cox,  Where  e0=8.85e-12, eox=3.9

$$Cgd = \frac{Im(Y12)}{2*PI*FREQ}$$

$$Cgs = Cgd$$

$$Cgb = Cox - Cgd - Cgs$$

$$Rg = \left| \frac{Re(Y12)}{Im(Y12)*Im(Y11)} \right|$$

$$Rd = \left| \frac{Re(Y21) - Re(Y12)}{Im(Y12)^2} \right|$$

$$Rs = \left| \frac{Re(Y11)}{Im(Y12)^2} - Rg - \frac{Cgd^2}{Cgg^2} \right| * Rd * \frac{Cgg^2}{Cgs^2}$$

# 2章のまとめ

| Technology | 利点 | 欠点 |
|---|---|---|
| LF C-V | 手持ちのSMUでできる<br>(容量計不要)<br>QSCVと比べて低ノイズ | リークが多いデバイスには向かない |
| QS C-V | 手持ちのSMUでできる<br>(容量計不要) | リークが多いデバイスには向かない<br>電流の測定誤差が容量値の誤差につながる |
| Standard C-V | 一般的で手軽 | 補正しないと誤差が発生する場合がある |
| RF C-V | 高周波特性において有用<br>(ただし複雑)<br>要モデリング | 高価な機材<br>高価な測定環境 |

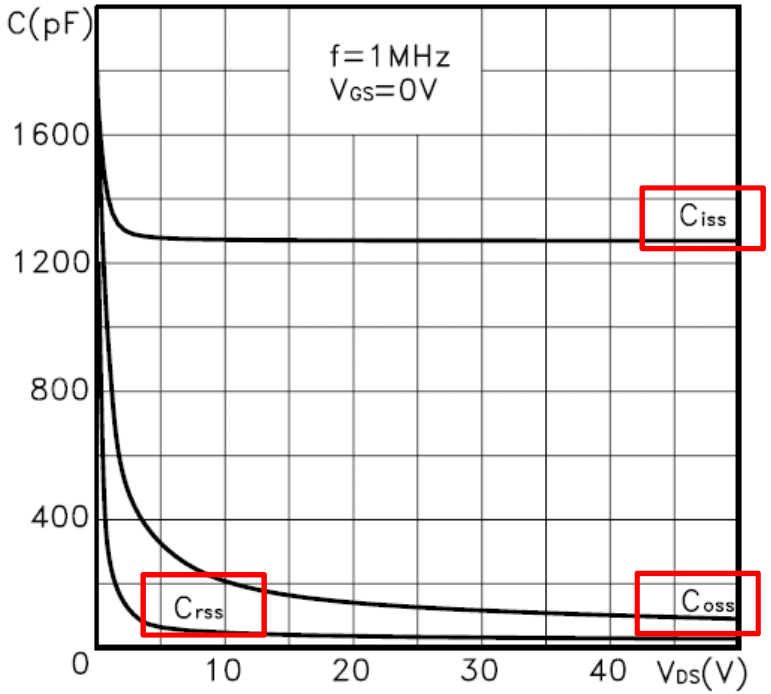
# 3.容量測定におけるtips
## (知っておくと便利なこと)

3.1 容量測定の基本
3.2 容量測定の実例(Cissの場合)
3.3 キャパシタ(コンデンサ)の種類
3.4 その他、キャパシタ実装の際、注意すべきこと

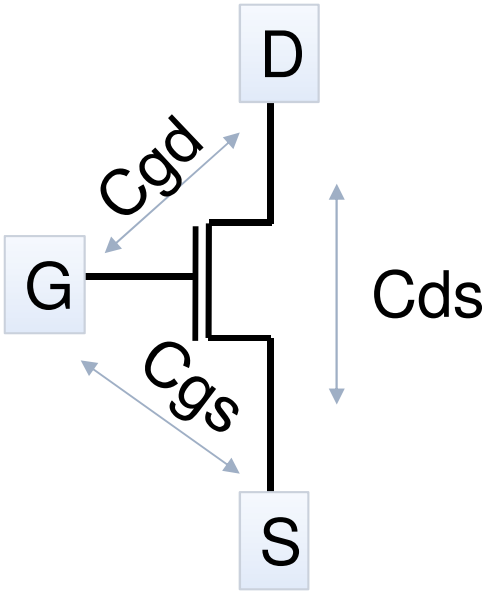
# 3.1 容量測定の基本
# ～　基本は、JIS規格　～

トランジスタ(FET)の場合
JIS C 7030-1993
6.2.11(Ciss), 12(Crss), 13(Coss)

ダイオードの場合
JIS C 7031-1993
6.4 (端子間静電容量測定)



# Ciss, Crss, Coss と、Cgs, Cgd, Cds
# ～　実は違います ～



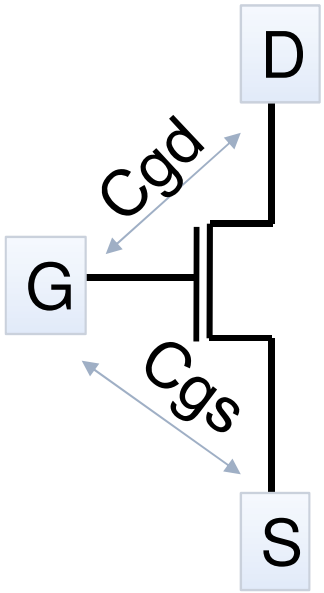

Ciss = Cgs + Cgd
Crss = Cgd
Coss = Cds + Cgd

各端子容量を別々に測定して、
和を取る方法もありますが…

# 3.2 Ciss測定の実例 - その1 -

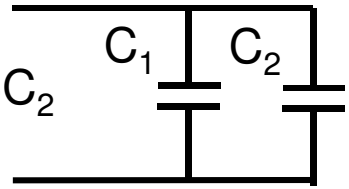
Ciss = Cgs + Cgd

【問題】
左下の図に**1本だけ**配線を書き加えて、
Cissが測定できるようにしてみて下さい。

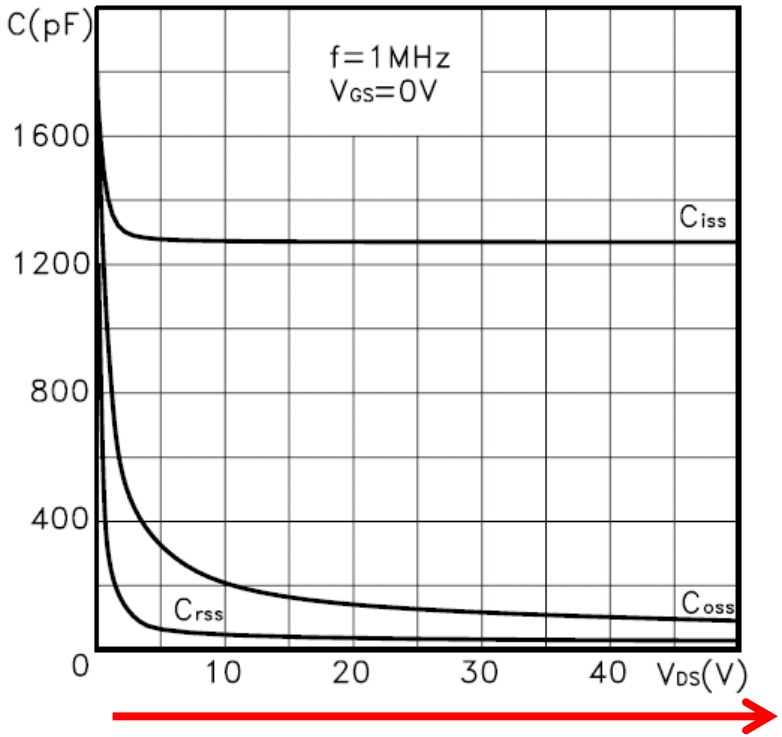


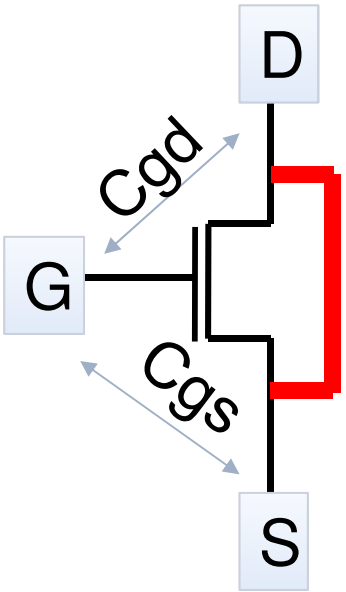

ヒント

$C_{total}=C_1+C_2$



# 3.2 Ciss測定の実例 - その2 –
## (更に壁が･･･)



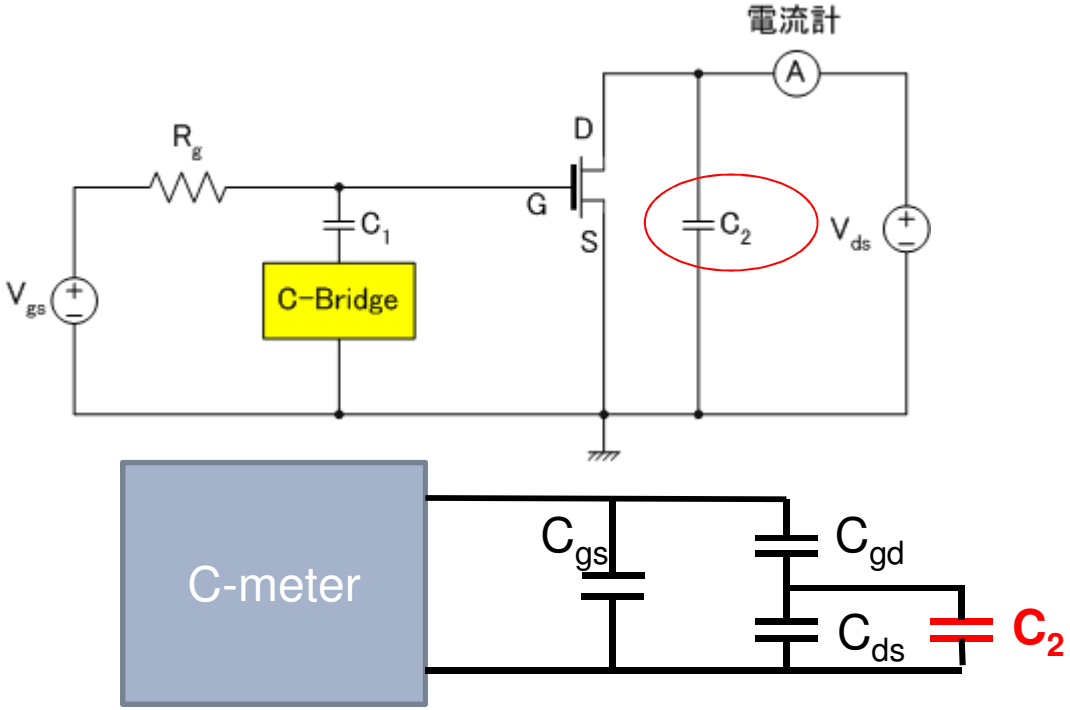

**この回路では、**
**Vdsを印加できない!**

# 3.2 Ciss測定の実例 - その3 -

容量は、AC信号で
測定するものです。

交流的にゼロΩで、
直流的に無限大のもの。

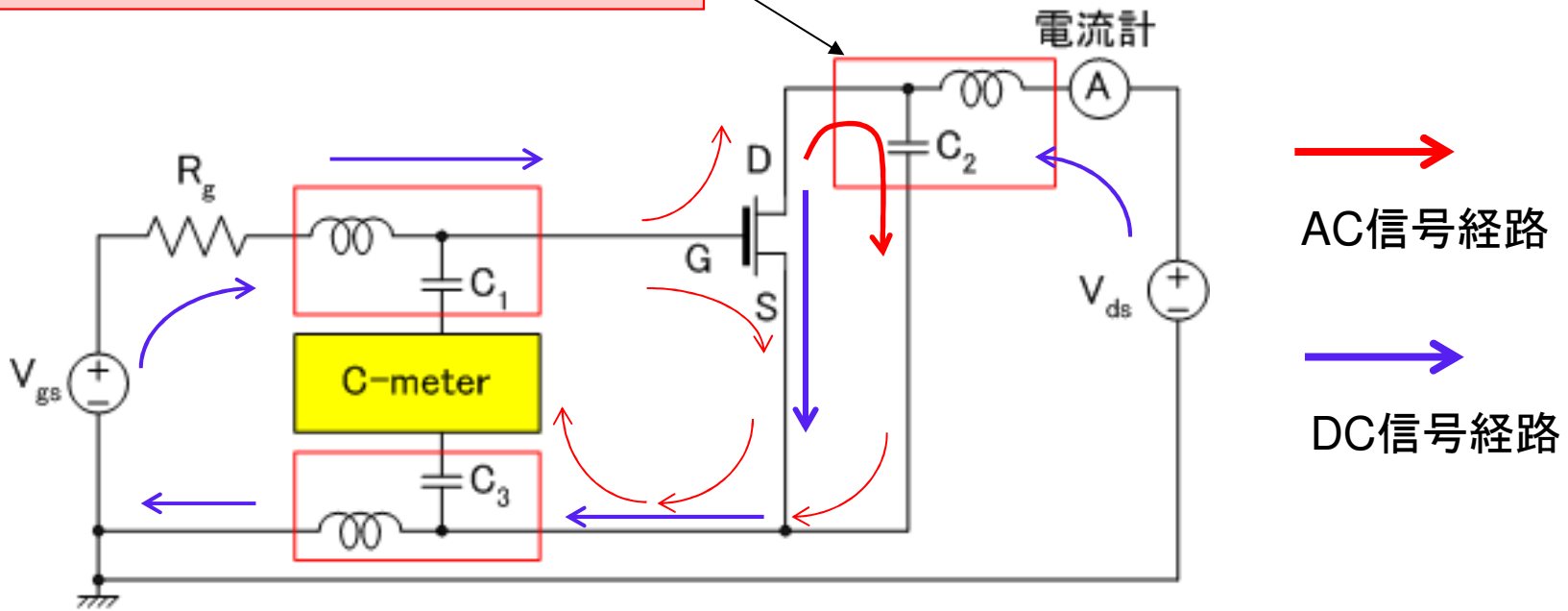
→ **容量の大きな**
**外付けキャパシタ**




f=1MHz , $C_{gs}$ =1.3nF , $C_{gd}$=50pFの場合、
$Z(C_{gd})$=3.18Ω 、 $Z(C_{ds}+C_2)$ = 0.16Ω。
よって、$C_{ds}+C_2$は無視できる大きさ。しかも$V_{ds}$も印加できる！

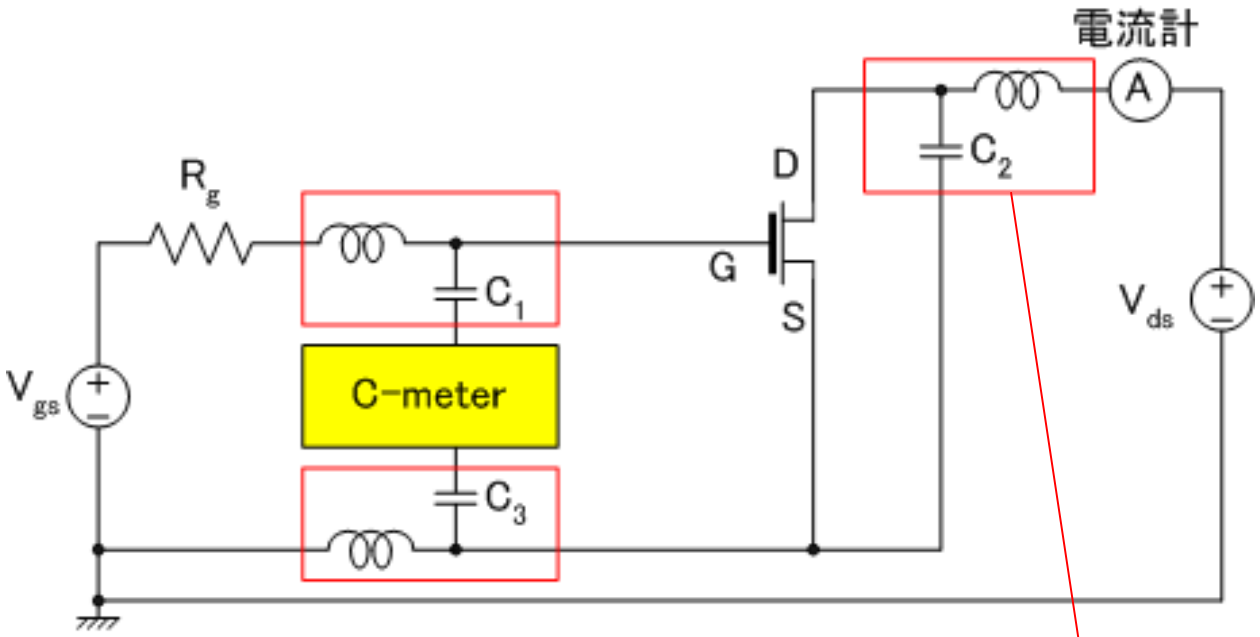
# 3.2 Ciss測定の実例 (具体的測定回路例)

このような、LとCで構成された
T字型回路を"Bias Tee"と言います




具体例として、JIS規格での測定において、C-Bridgeではなく、
容量計を使用する場合は、Bias Tee(赤枠)を3個用いて、
図のような配線を行う事になります。
($C_2$は、Bias Teeの一部として設置)
Coss, Crssも同様に考えることで、測定回路が得られます。

# 3.2 Ciss測定の実例
# (高電圧C-V測定 - SiC/GaNなど -)

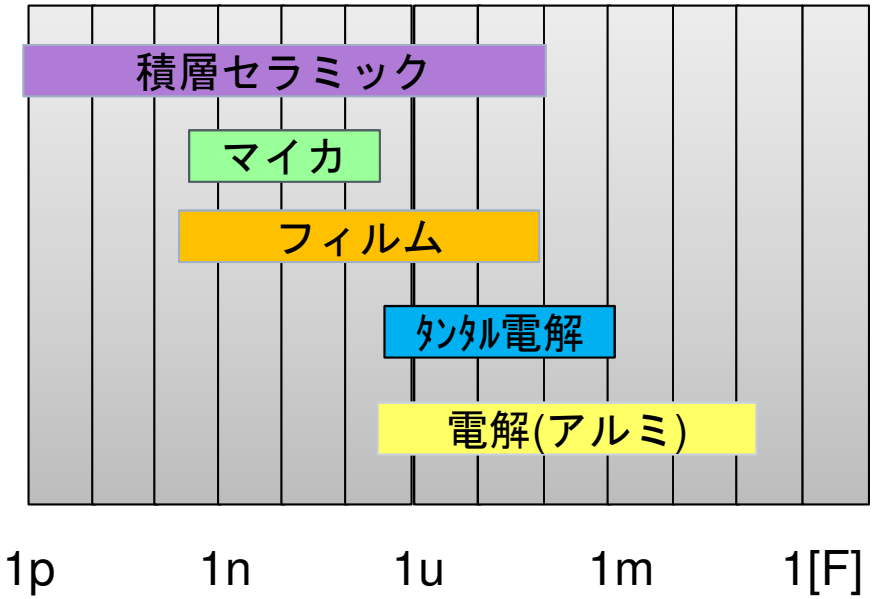



**C1, C3の耐圧は、Vgsと同程度あれば良い。**
**すなわち、数十V程度の耐圧で充分。**

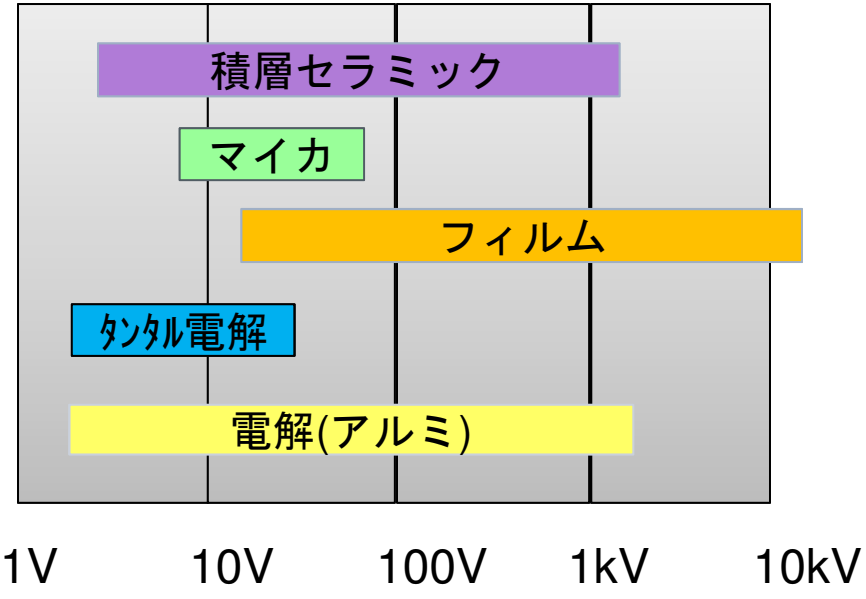
**C2の耐圧は、Vdsが高圧になるため、それに耐えられるキャパシタが必要となってくる。**

# 3.3 キャパシタ(コンデンサ)の種類
# – 容量と耐圧

一般的なコンデンサの静電容量範囲




一般的なコンデンサの耐圧範囲

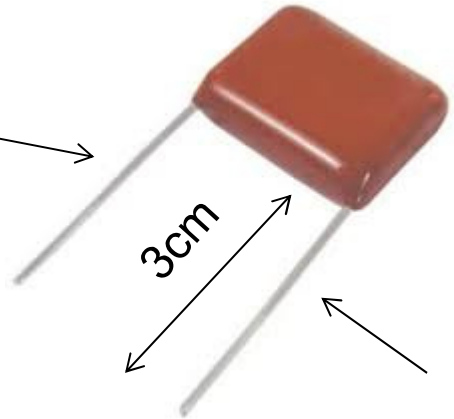



フィルムの材質は多種存在し、近年は、数kVクラス耐圧の
誘電体材を持つフィルムキャパシタも登場している。

ex. メタライズドポリプロピレン、 エポキシレジンモールド etc..

# キャパシタの自己共振周波数(周波数特性)

配線用のリード線は、インダクタとなりうる。




たとえば1uFの
キャパシタ

30nH　1uF　ESR　30nH

ESR :
Equivalent Series Resistance
(等価直列抵抗)

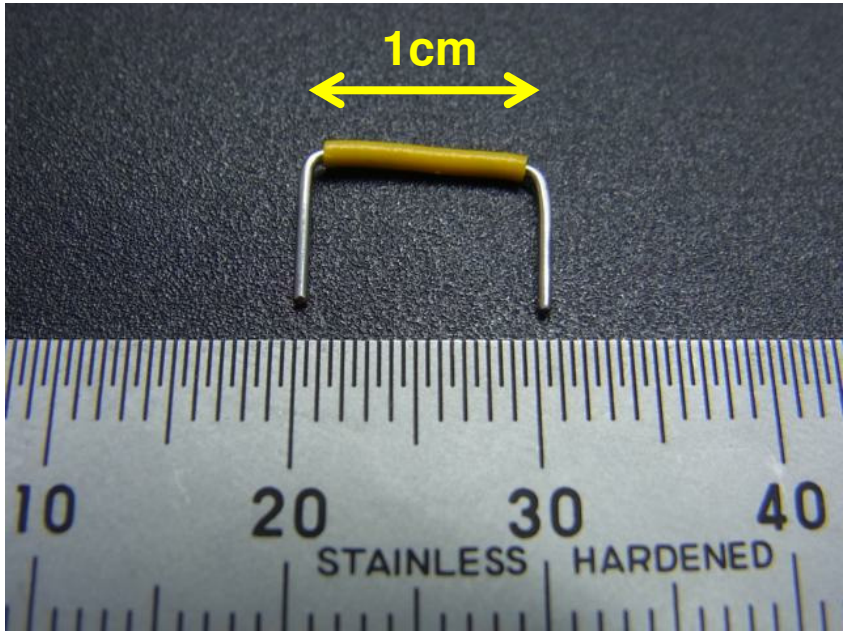
共振周波数は、**約650kHz**

➔ これより高い周波数では、インダクタにしか見えない

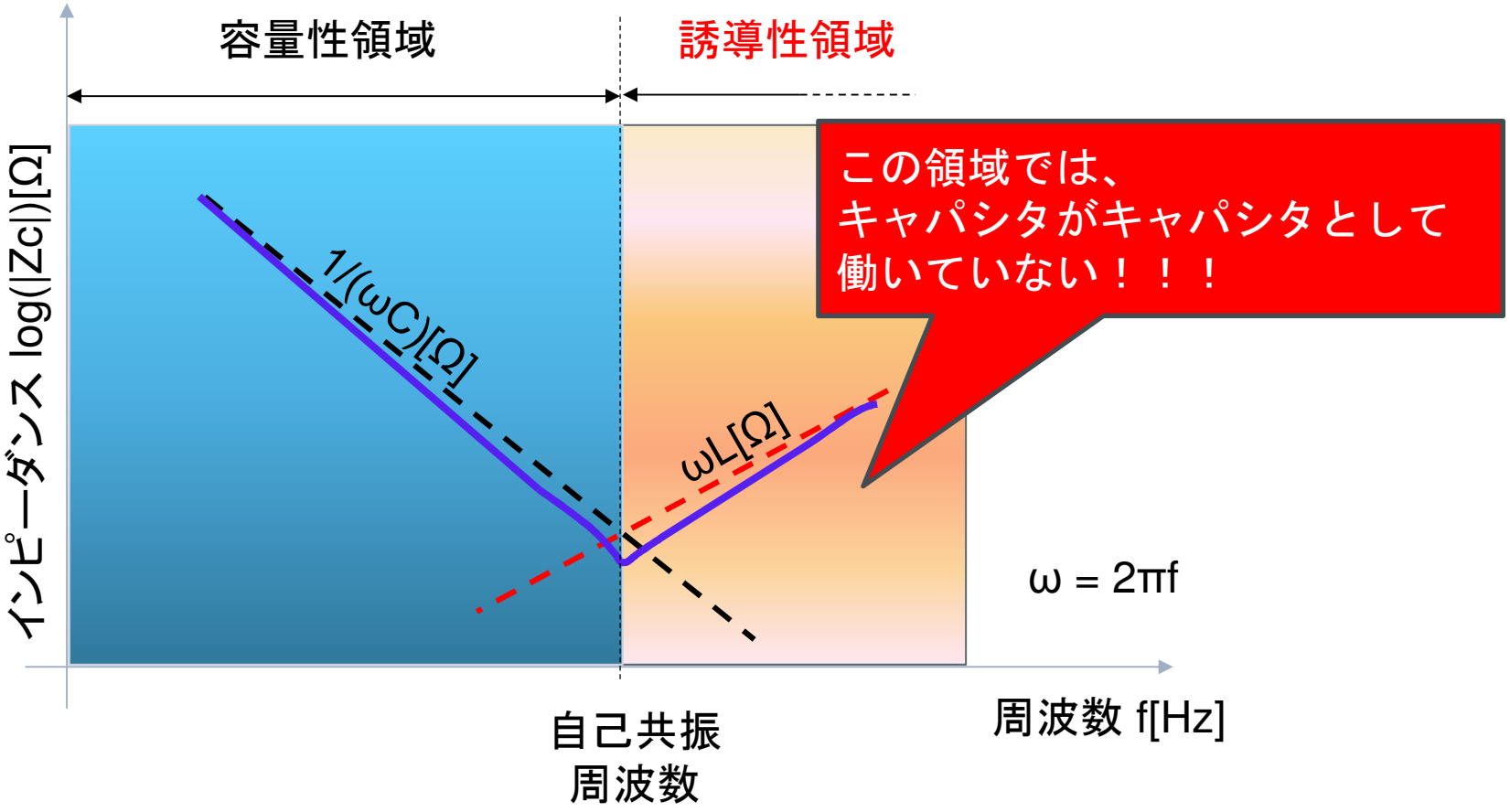
# リード線 – “1cm 10nH”の真偽

業界では、単線のリード線は10nH / cm と一般的に言われている。

下図のような単線では、0.016uH (16nH)



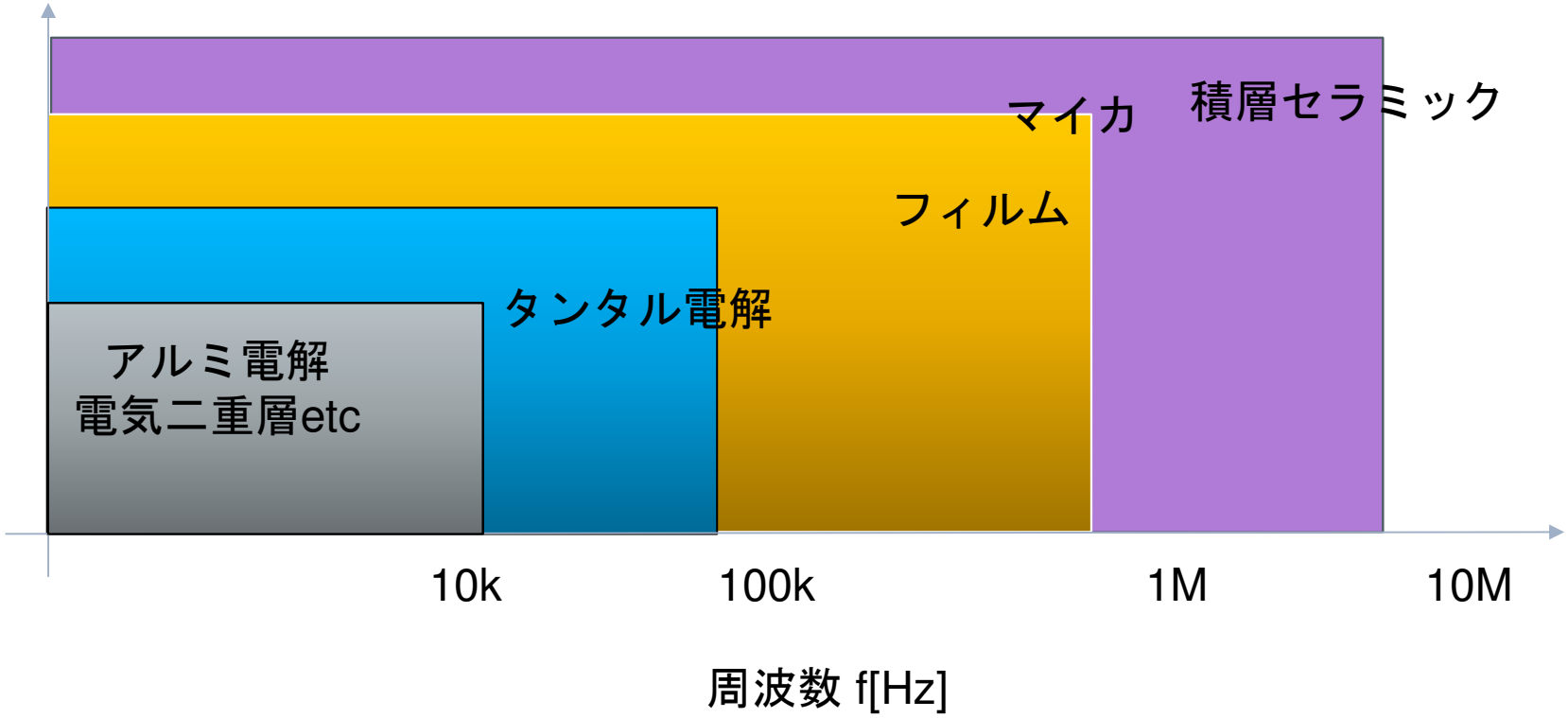
# キャパシタの自己共振周波数



# 誘電体材質の違いによる自己共振周波数の違い
# ～　どこまでキャパシタとして使えるのか？　～

**自己共振周波数の例**

1kHz～10kHz程度：アルミ電解
10kHz～100kHz程度：タンタル電解
100kHz～1MHz程度：フィルム等。リード線付きは、そろそろ限界。
1MHz～10MHz程度：積層セラミック、チップ形状のもの。



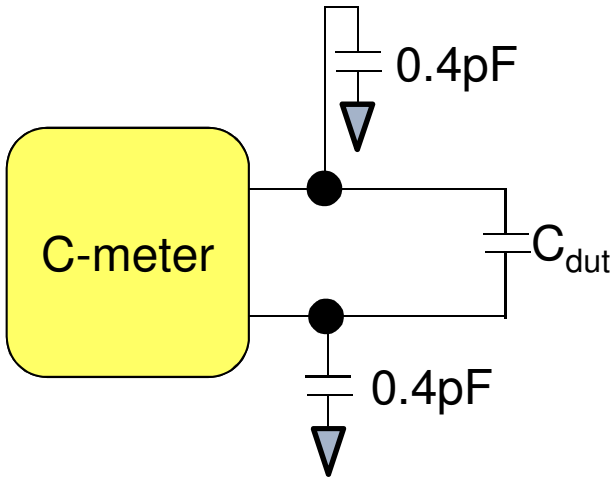
# キャパシタのまとめ

| 誘電体の種類 | 長所 | 短所 |
|---|---|---|
| 電解(一般) | 大容量 | 耐圧低い、極性あり<br>周波数特性悪い |
| タンタル電解 | 中容量<br>一般電解よりは周波数特性が良い | 耐圧低い、極性あり<br>逆電圧に弱い<br>ショートモードで壊れる |
| フィルム<br>(ﾎﾟﾘｴﾁﾚﾝ、ﾎﾟﾘﾌﾟﾛﾋﾟﾚﾝ、ｽﾁﾛｰﾙ等) | 比較的良い周波数特性<br>高耐圧(kVクラス)の物もある<br>低ESR | 高耐圧で大容量の物が少ない<br>高温環境不可 |
| マイカ<br>(雲母) | 良い周波数特性<br>高精度・安定(温度)<br>比較的高耐圧(数百V) | 容量の大きい物が無い<br>(数10nFクラスが最大) |
| セラミック | 良い周波数特性 | 耐圧低い、高めのESR、<br>uFクラス以上が少ない |

# 3.4 その他、キャパシタ選定の際、注意すべきこと
# ～　容量・温度係数　～

誤差:一般に公称値(表示値)の±5%～±20%。
　　一部のポリスチレン・マイカ・温度保証用などは、1%未満の物もある。
温度係数の表示記号 : JIS規格(JIS C 5101-10)や、EIA規格で決められている。

# 3.4 その他、キャパシタ実装の際、注意すべきこと
## ～　ターミナル　～




ex.　DUTの容量がpFオーダーであれば、ターミナル容量の影響が見える。

# 3.4 その他、注意すべきこと

1. 配線は可能な限り**短く**。
2. 容量測定の信号が通る配線では、**50Ω系のシールド線**を使う。
   (ただし耐圧に注意)
3. 手配線で、上手く測定できるか否かの境目は、**1MHzくらい**。
   (それ以上は職人的技術が?!)
4. **チップ部品**を使うと、インダクタ成分が抑えられる。
   (ただし、チップ部品は**耐圧が比較的低い**)
5. 容量計の**Open/Short/Load補正**を使う
   (きちんと補正すれば、外付け回路の誤差成分を吸収できる)
6. 比較的低容量のデバイスを測定する場合は、補正に加えて、
   OPEN状態の容量を測定し、その値を、
   デバイスを接続した時の容量値から**差し引く**。
   ($C_{dut} = C_{meas} - C_{open}$)

# まとめ

1. 容量測定の意味と、容量値の利用例
2. 容量測定の種類と概要
3. tips / know-how

本テキストの無断複製・転載を禁じます。テクトロニクス/ケースレーインスツルメンツ
Copyright © Tektronix, Keithley Instruments. All rights reserved.

www.tektronix.com/ja
www.keithley.jp/

**Twitter** @tektronix_jp
**Facebook** http://www.facebook.com/tektronix.jp