

ランチョンセミナー

電磁界解析ソフトを用いた
高周波帯超伝導
デバイスの設計

3月16日(木)

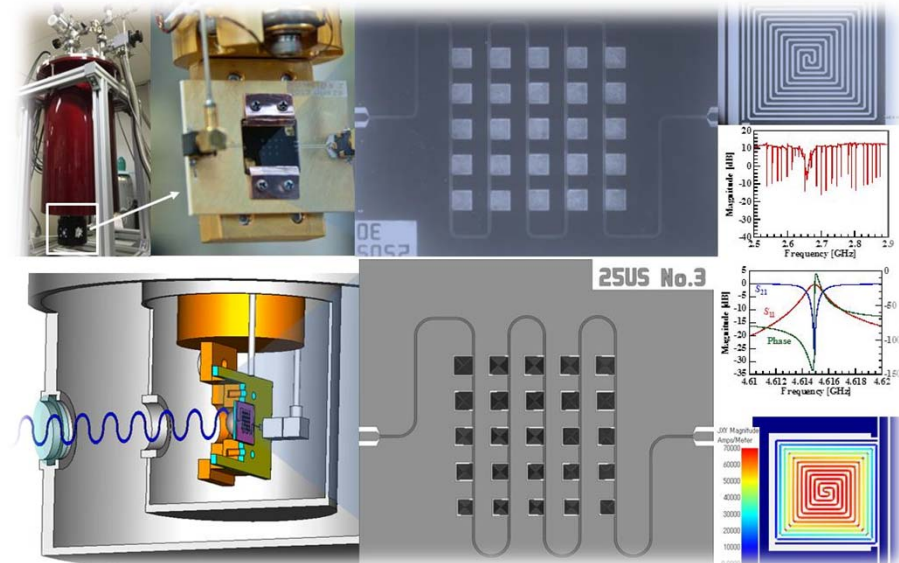
第64回応用物理学会春季学術講演会
2017年3月16日(木) パシフィコ横浜



電磁界解析ソフトを用いた 高周波帯超伝導デバイスの設計 ～超伝導体をどのように取り扱うか～

山形大学大学院理工学研究科

准教授 齊藤 敦



山形大学 工学部



旧米沢高等工業学校本館(重要文化財)

米沢

- ・米沢牛
- ・さくらんぼ
- ・ラ・フランス



講演概要

① 高周波帯超伝導デバイスの Q 値評価

- ・帯域通過フィルタ(透過形)
- ・ NMR 用ピックアップコイル(反射形)
- ・マイクロ波力学インダクタンス検出器(反作用形)

② 超伝導体の表面抵抗(R_s)と力学インダクタンス(L_k)

Q 値の定義と意味

定義

$$Q = \omega \frac{\text{Energy stored in cavity}}{\text{Average power loss in cavity}}$$

$Q \rightarrow$ 共振の鋭さ、エネルギー許容量
 $1/Q \rightarrow$ 損失、ロス

観測される値

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_e} + \frac{1}{Q_U}$$

負荷 Q 外部 Q 無負荷 Q 放射損失

$$\frac{1}{Q_U} = \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_r}$$

導体損失 誘電損失

講演概要

① 高周波帯超伝導デバイスの Q 値評価

- ・帯域通過フィルタ(透過形)

- ・ NMR 用ピックアップコイル(反射形)

- ・マイクロ波カ学インダクタンス検出器(反作用形)

② 超伝導体の表面抵抗(R_s)とカ学インダクタンス(L_k)

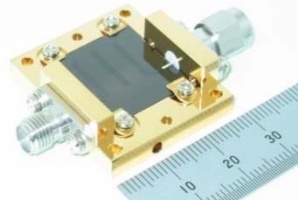
帯域通過フィルタ

～超伝導フィルタ～

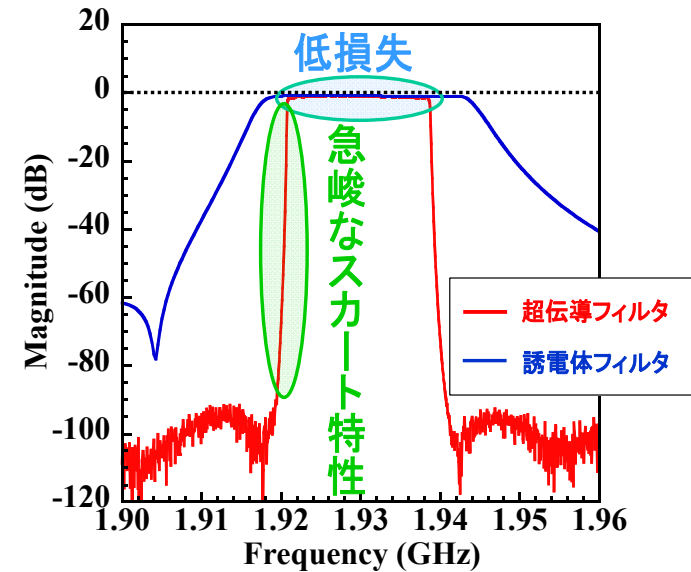
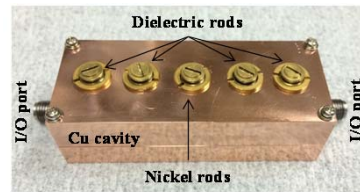
携帯電話用基地局



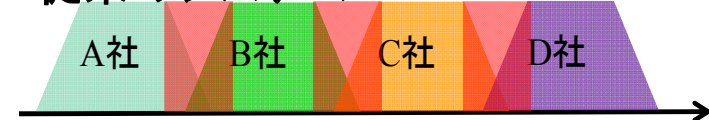
超伝導受信用フィルタ



超伝導送信用フィルタ



従来のシステム



超伝導フィルタ

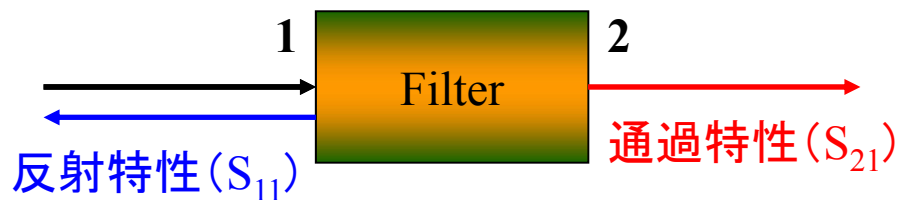
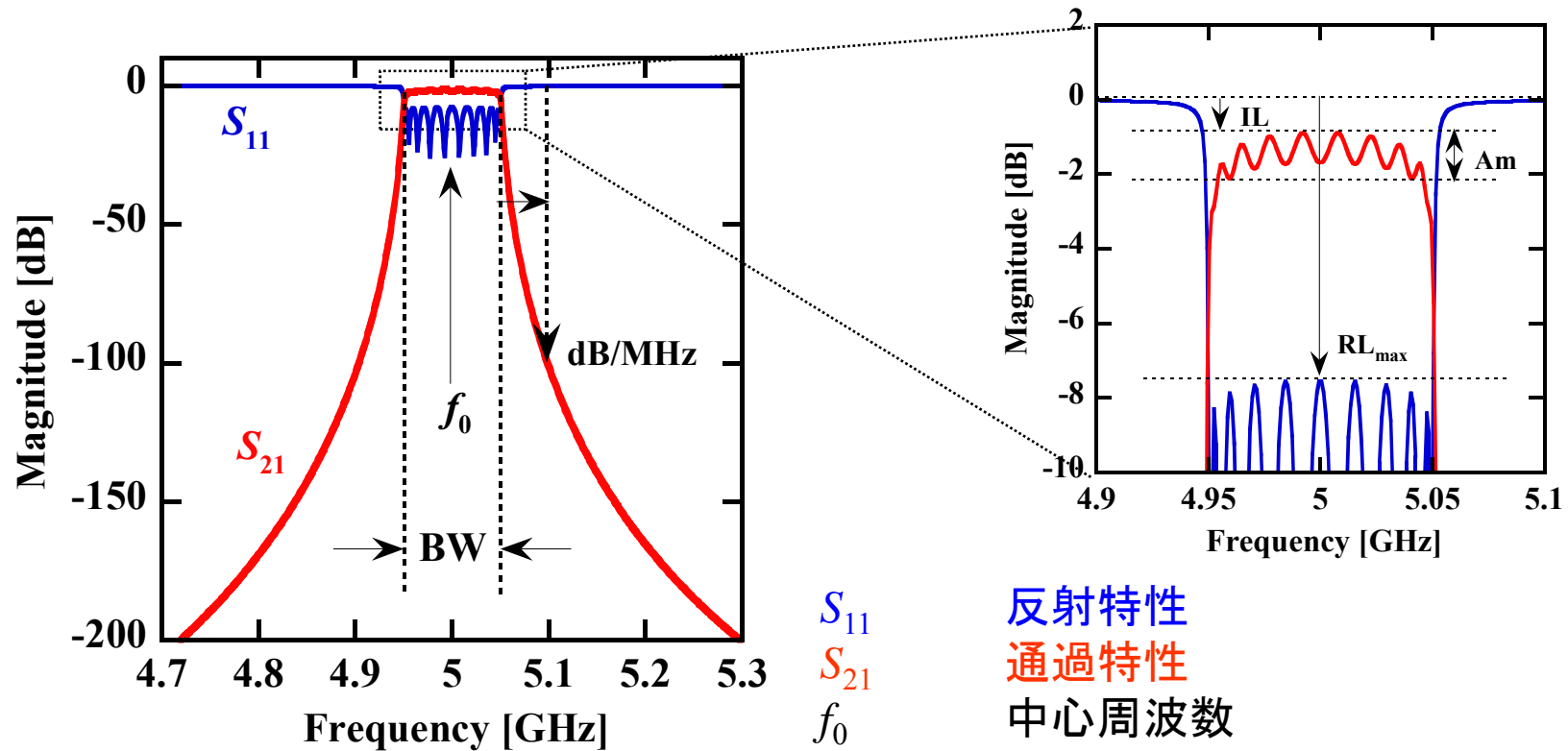


通信周波数

周波数資源の有効利用

フィルタ特性を表す用語

帯域通過フィルタの典型的な周波数特性

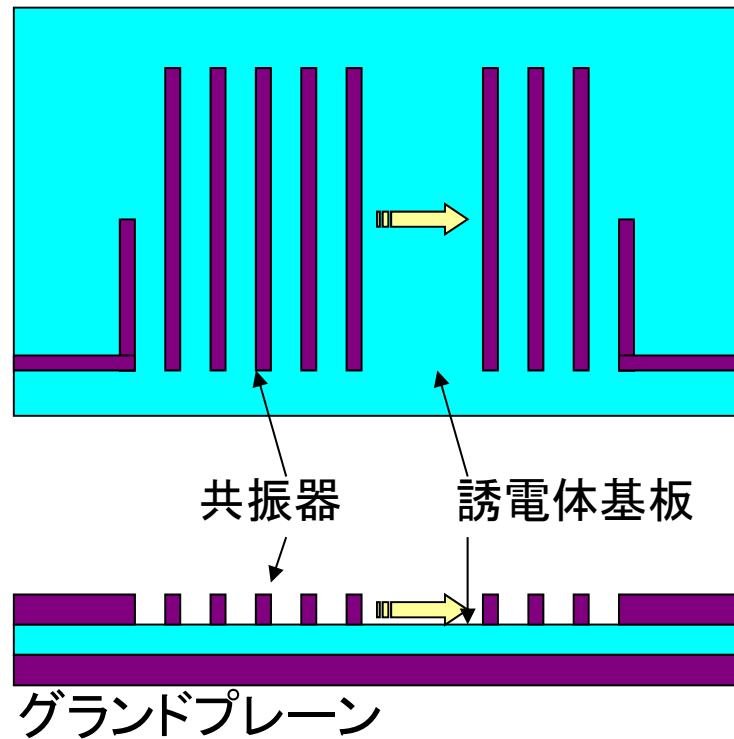


- | | |
|-------------------|------------------|
| S_{11} | 反射特性 |
| S_{21} | 通過特性 |
| f_0 | 中心周波数 |
| BW | 通過帯域幅 |
| dB/MHz | スカート特性 |
| IL | インサクションロス(挿入損失) |
| Am | 通過帯域リップル(最大リップル) |
| RL _{max} | 最大リターンロス |

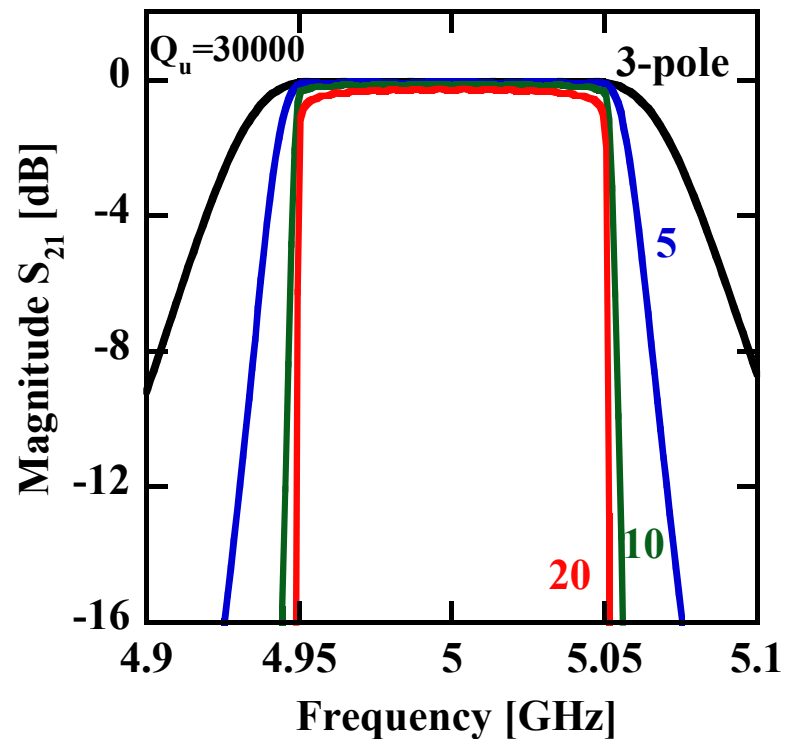
フィルタ特性と超伝導

～なぜ超伝導フィルタ？～

多段化によるスカート特性の急峻化と挿入損失の増加



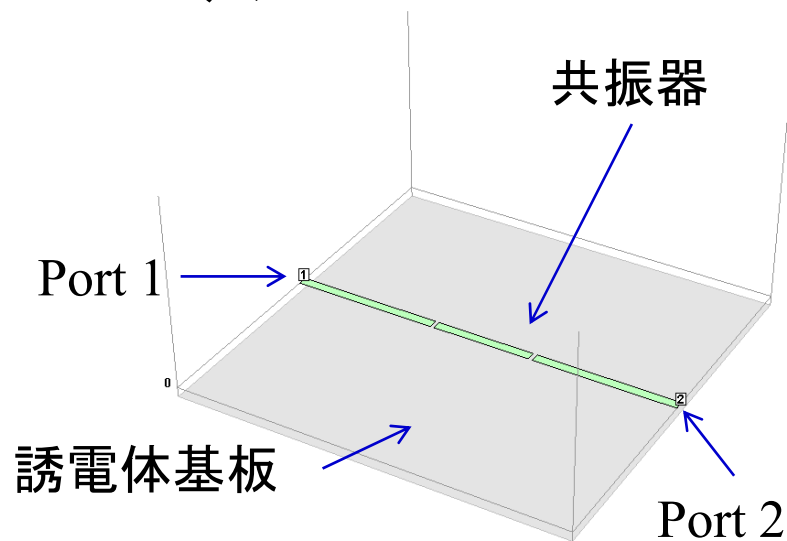
マイクロストリップライン構造



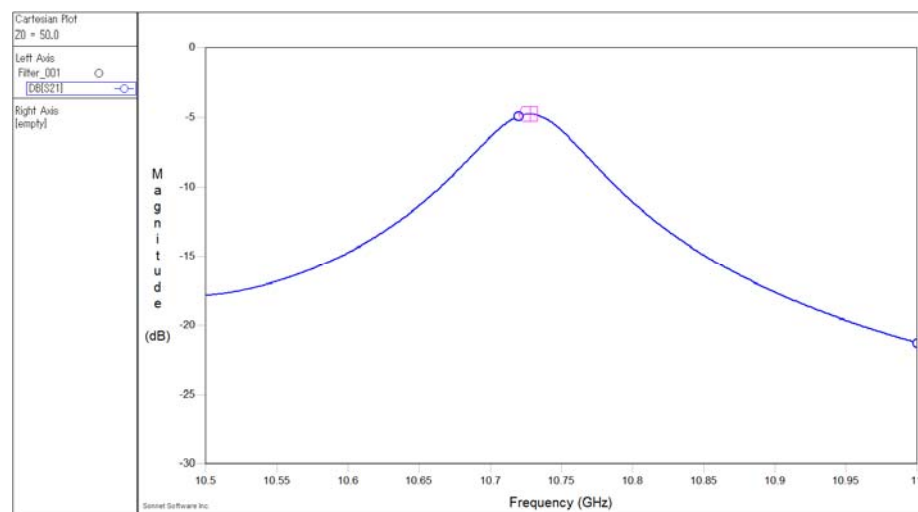
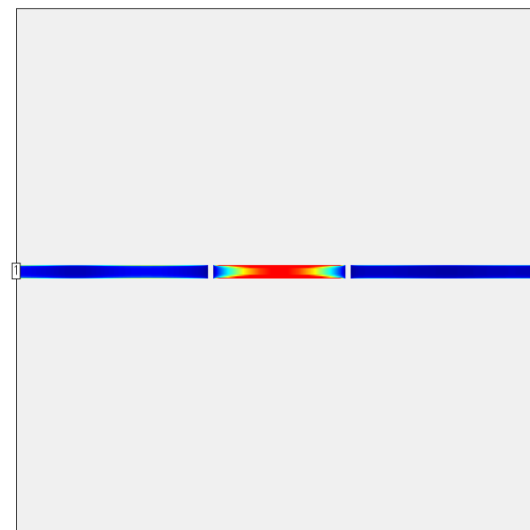
低挿入損失と急峻なスカート特性を同時に実現可能

透過形モデル

3D モデル



共振時の電流密度分布

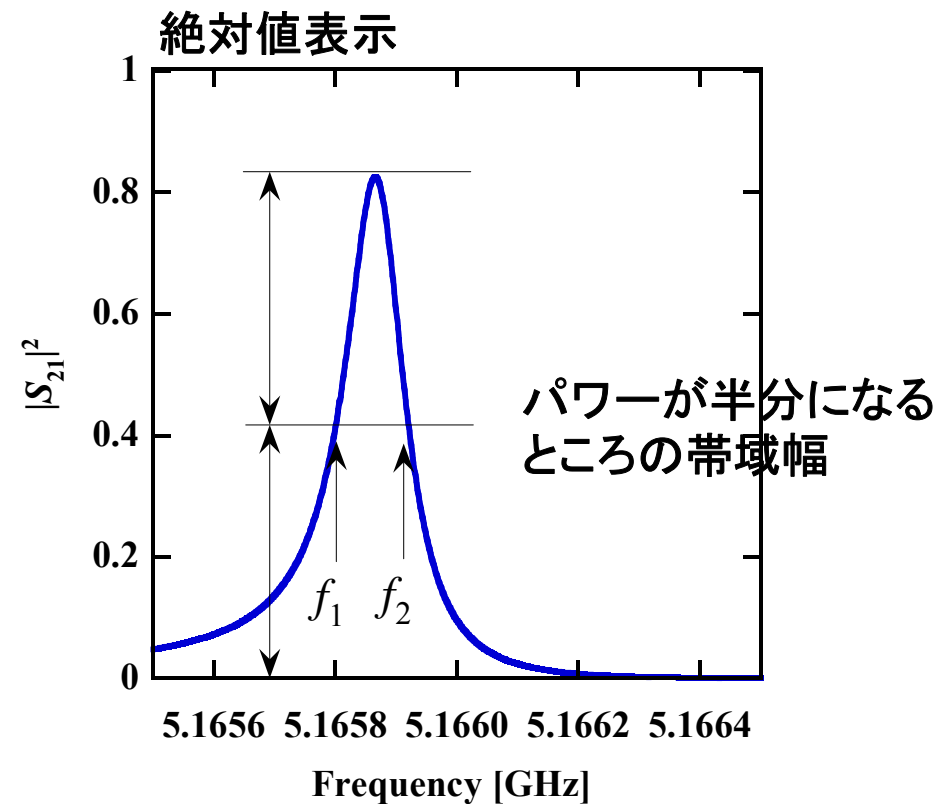
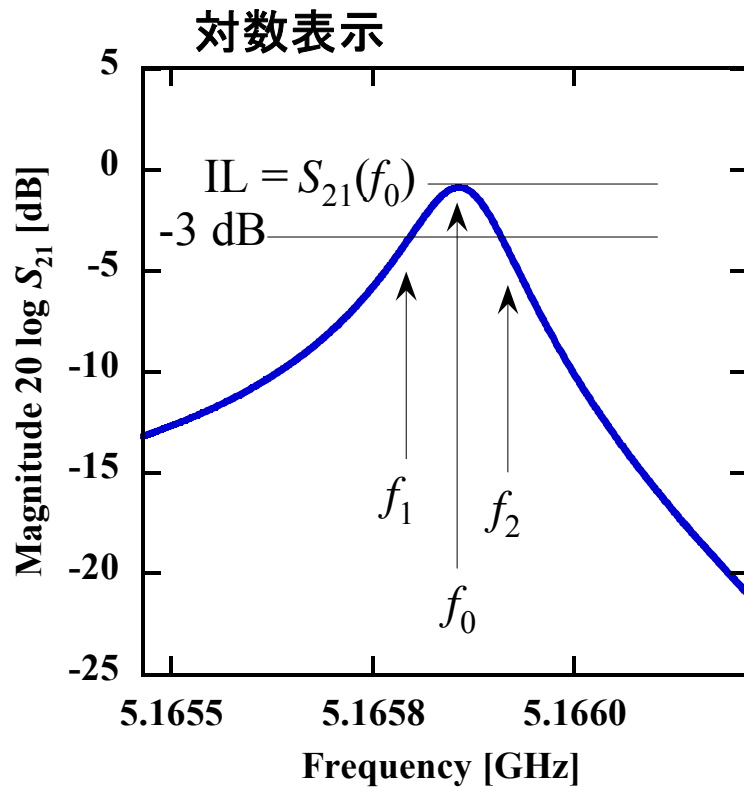


S_{21} 特性がピーク特性

S_{21} 特性 (ピーク特性) を用いた Q 値 (Q_L, Q_U) の求め方

$$Q_L = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$$

$$Q_U = \frac{Q_L}{1 - S_{21}(f_0)} = \frac{Q_L}{1 - 10^{-IL/20}}$$



共振ピークの IL から -3 dB に位置する帯域幅を読めばよい

講演概要

① 高周波帯超伝導デバイスの Q 値評価

- ・帯域通過フィルタ(透過形)
- ・ **NMR 用ピックアップコイル(反射形)**
- ・マイクロ波力学インダクタンス検出器(反作用形)

② 超伝導体の表面抵抗(R_s)と力学インダクタンス(L_k)

NMR (Nuclear Magnetic Resonance)

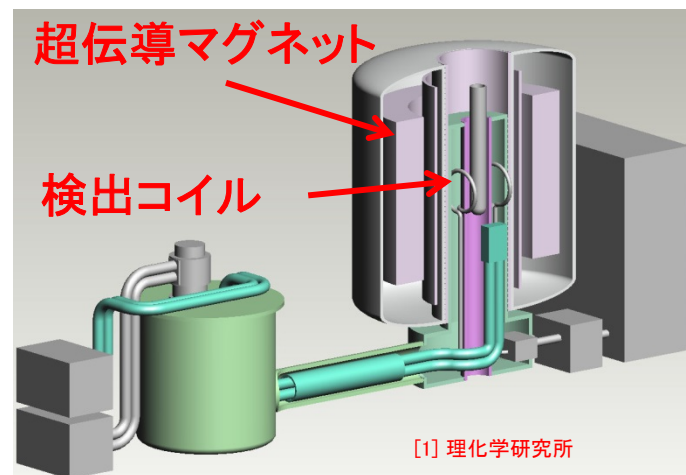
→ 核スピンのエネルギー吸収・放出現象の計測装置

=原子核(^1H , ^2H , ^{13}C , ^{15}N)が持つ磁気モーメント

利点 {
・非破壊測定
・未知試料の全構造決定

応用 {
・タンパク質などの分子構造解析
・新薬の開発

問題点: 感度が低い
測定時間が長い



高感度化のために

- ① 超伝導マグネットの高磁場 (24テスラ)
- ② 検出コイルの高感度化
 - ・検出コイルの冷却 (S/N比が3~4倍向上)
 - ・超伝導検出コイルの利用

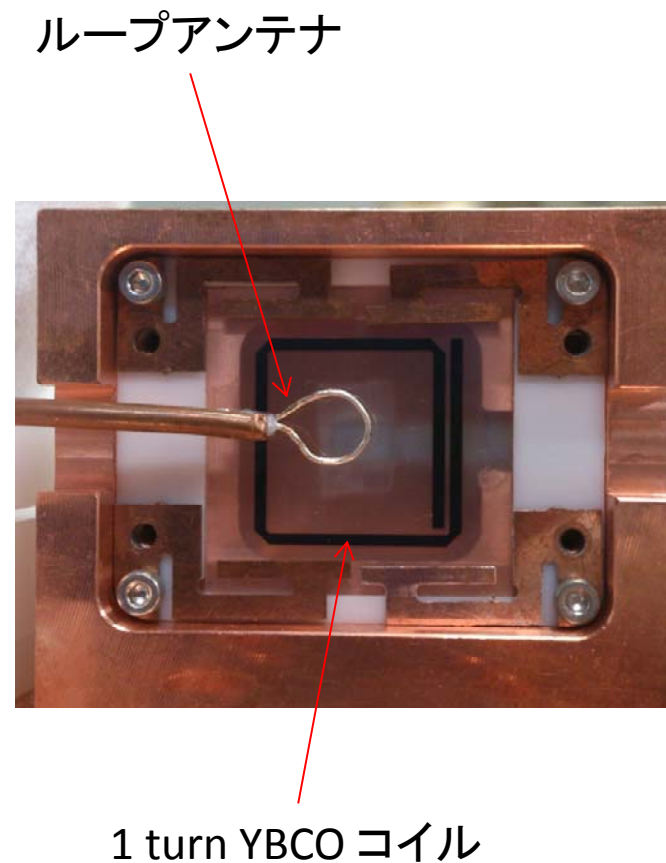
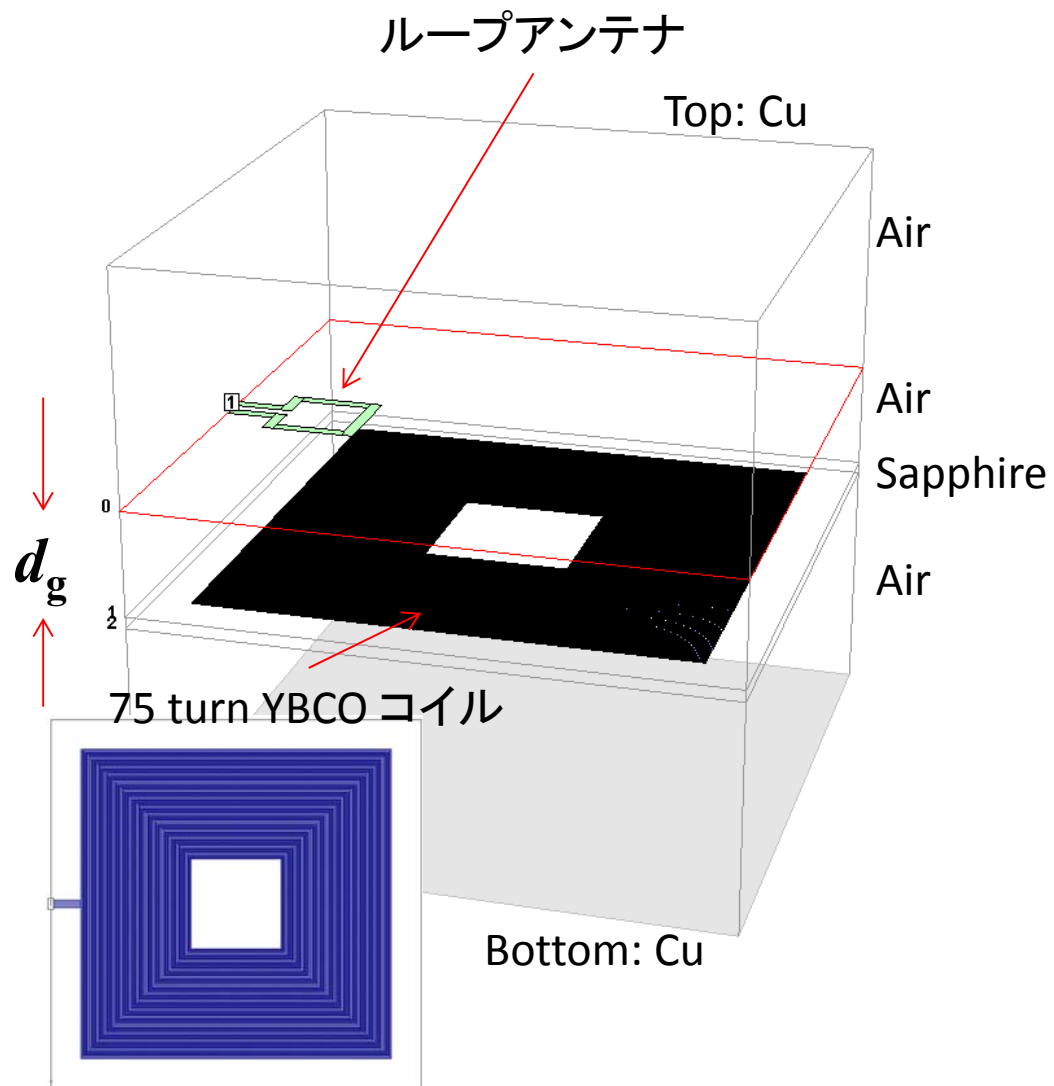
S/N と Q_U の関係式

$$S/N \propto \sqrt{\frac{\eta Q_U}{T_c - T_a}}$$

$$Q_U \propto \frac{1}{R_s}$$

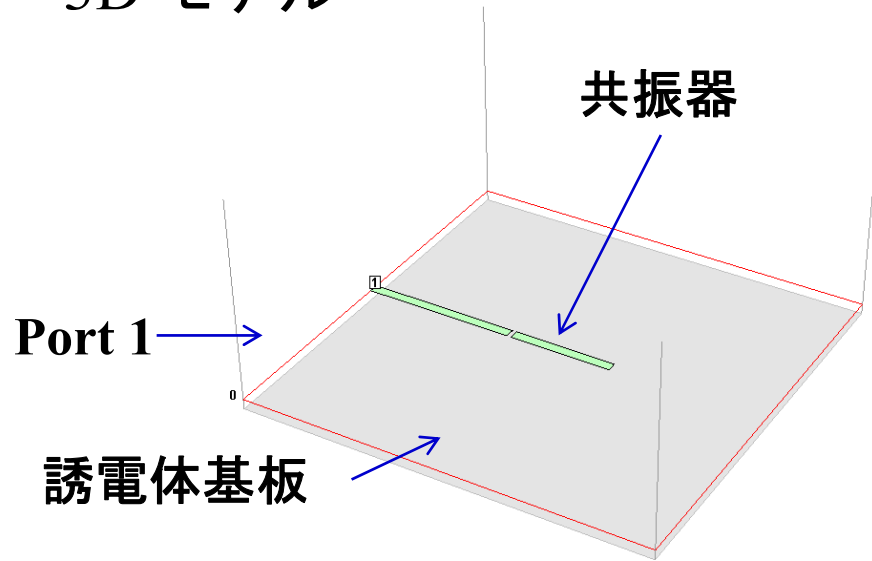
η : NMR検出コイルのフィリングファクター
 Q_U : NMR検出コイルの無負荷 Q 値
 T_c : NMR検出コイルの雑音温度
 T_a : プリアンプの雑音温度
 R_s : NMR検出コイルの表面抵抗 (高周波損失)

NMR 用ピックアップコイルのシミュレーションと実験の例

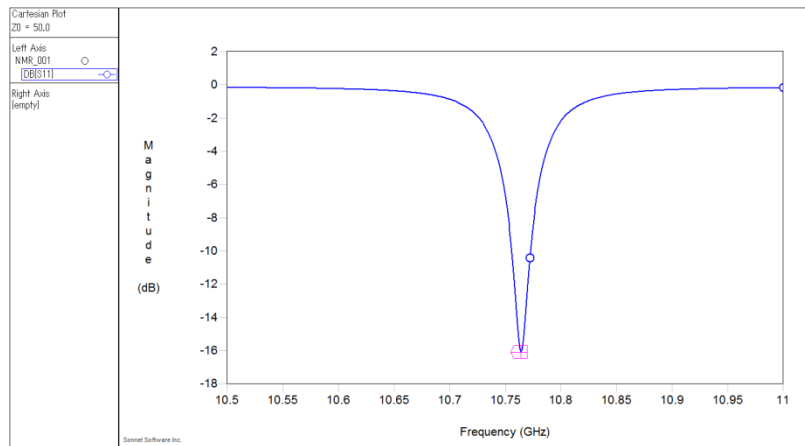
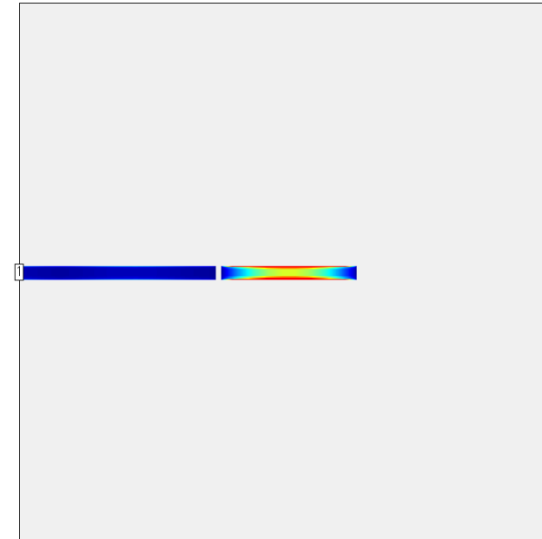


反射形モデル

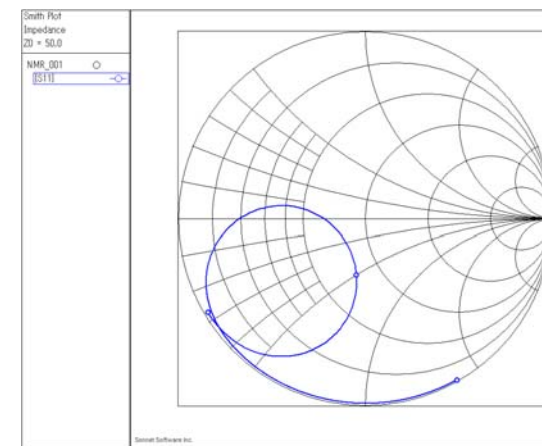
3D モデル



共振時の電流密度分布



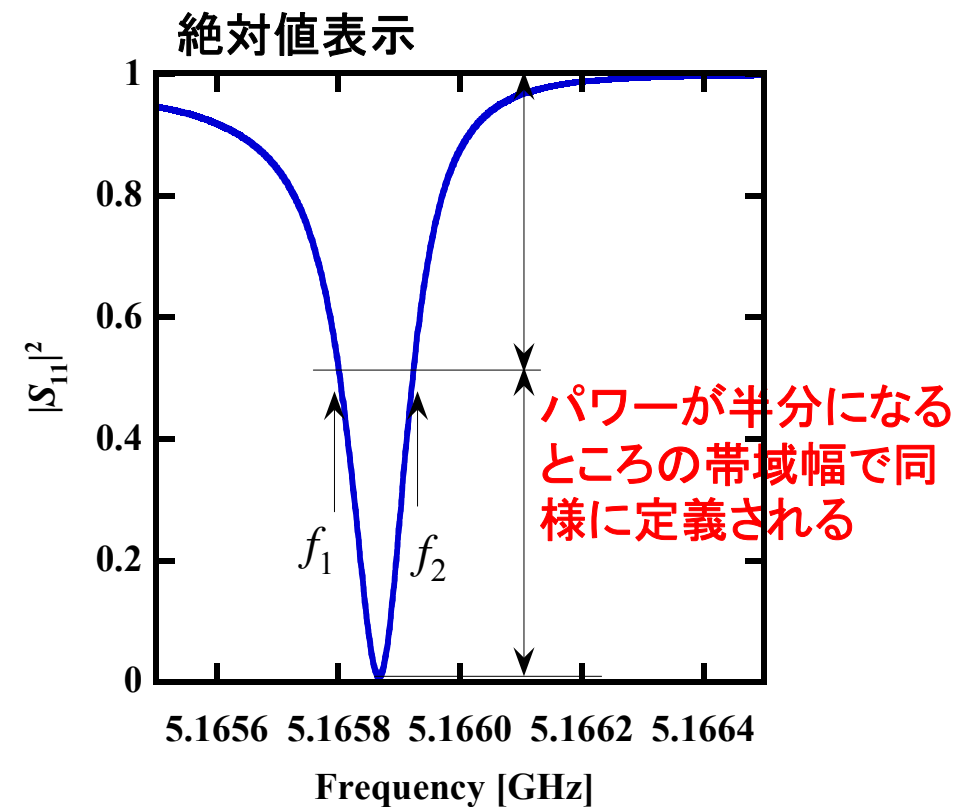
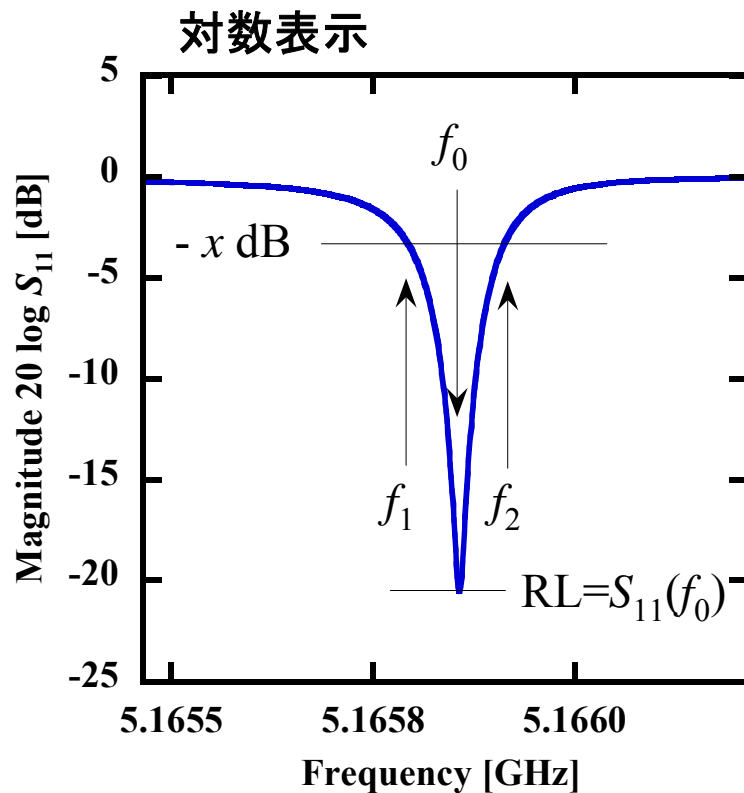
S_{11} 特性がディップ特性



スミスチャート

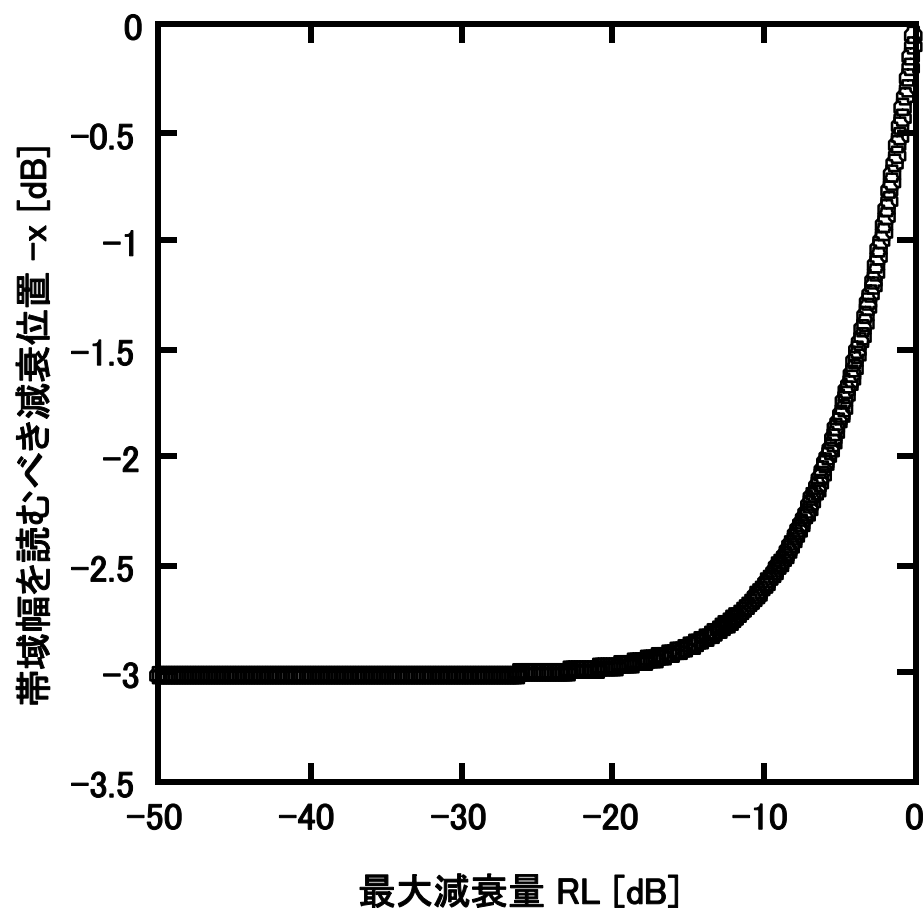
S_{11} 特性 (ディップ特性) を用いた Q 値 (Q_L) の求め方

$$Q_L = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$$



共振ディップの RL から $-x$ dB に位置する帯域幅を読めばよい
(よって, RL の大きさによって x は変化する)

最大減衰量と帯域幅を読むべき減衰量の関係



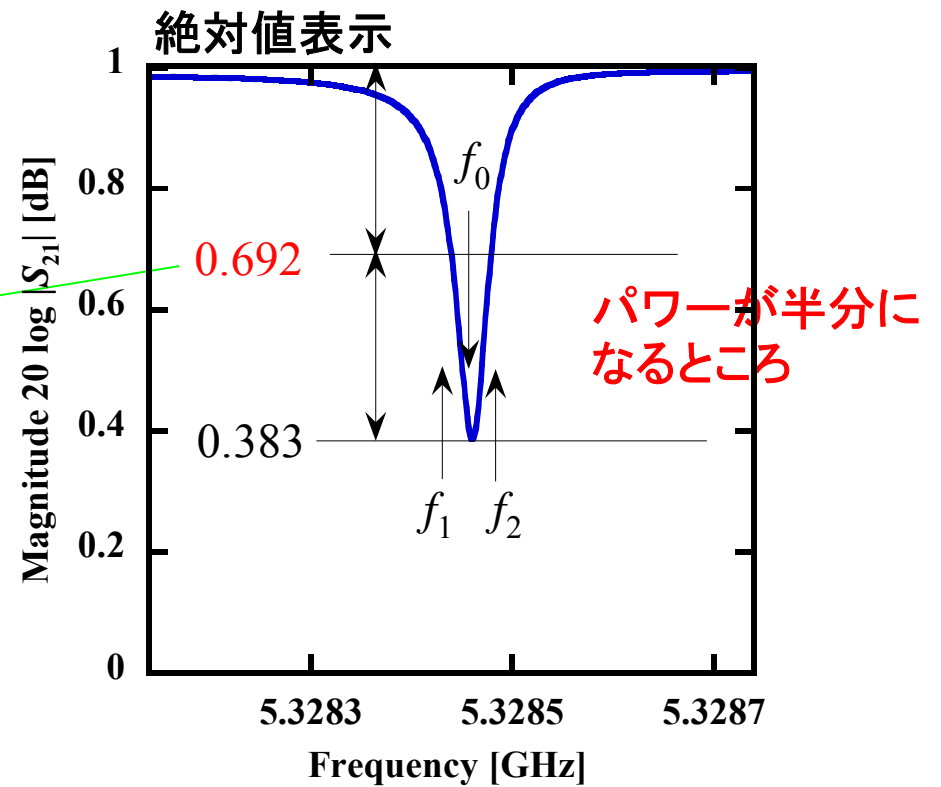
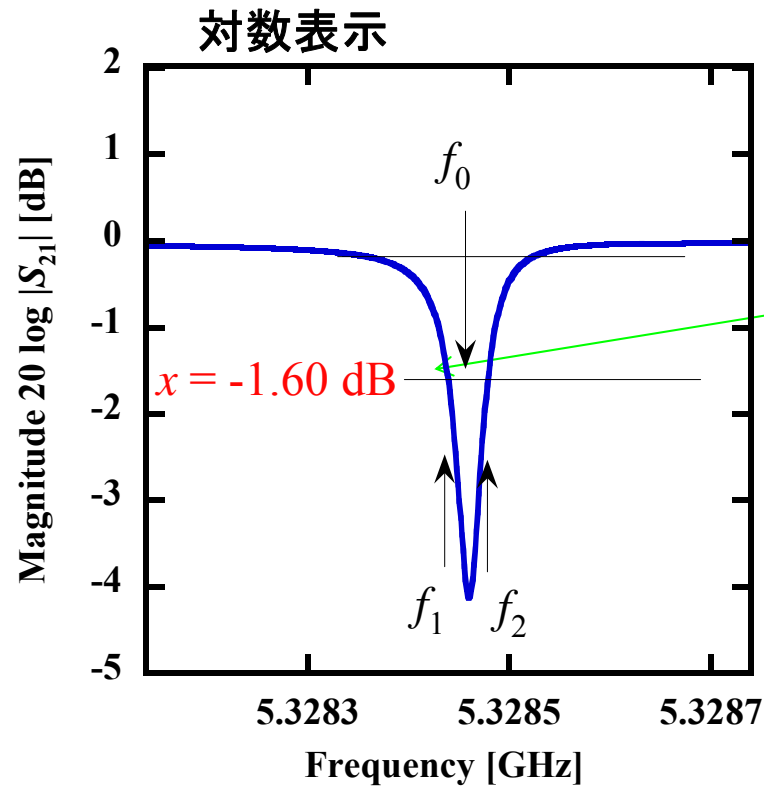
最大減衰量 RL [dB]	帯域幅を読むべき減衰量 $-x$ [dB]
-0.1	-0.049712183
-1	-0.471281046
-2	-0.885873929
-3	-1.245951332
-4	-1.554895326
-5	-1.816989476
-6	-2.03707202
-7	-2.22020246
-8	-2.371379615
-9	-2.495330536
-10	-2.596373105
-15	-2.875090736
-20	-2.967086219
-30	-3.005959182
-40	-3.009865684
-50	-3.010256527

-20 dB 以下 → **-3 dB で読む**
-20 dB 以上 → **右式の値で読む**

$$x = 10 \log 2 - 10 \log \left(10^{-RL/10} + 1 \right)$$

Q_L 値の評価

例えば, $RL = -4.1$ dB の場合



S_{11} 特性(ディップ特性)を用いた Q 値(Q_L, Q_U)の求め方

$$Q_L = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$$

$$Q_U = Q_L(1 + \beta)$$

$$\beta = \frac{1 \pm |S_{11}(f_0)|}{1 \mp |S_{11}(f_0)|}$$

結合係数 β は 2 値あるので、スミスチャートを見て確認する。

周波数特性の円が中心を含む場合 ($\beta > 1$) ... **Over coupled**

周波数特性の円が中心を含まない場合 ($\beta < 1$) ... **Under coupled**

周波数特性の円が中心をちょうどよぎる場合 ($\beta = 1$) ... **Critical coupled**

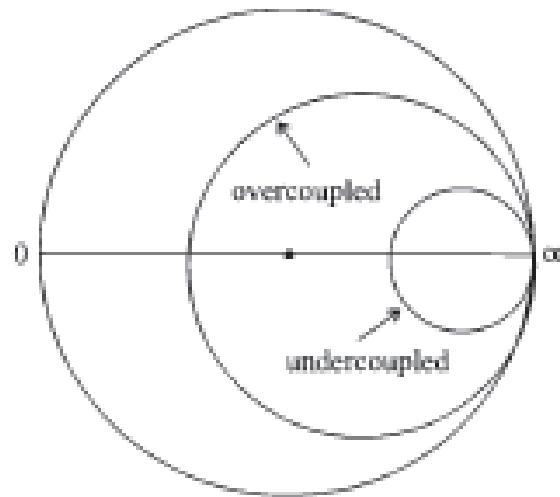


Figure 4.4.3. A Smith chart of two resonant circuits; one is overcoupled, the other is undercoupled.

講演概要

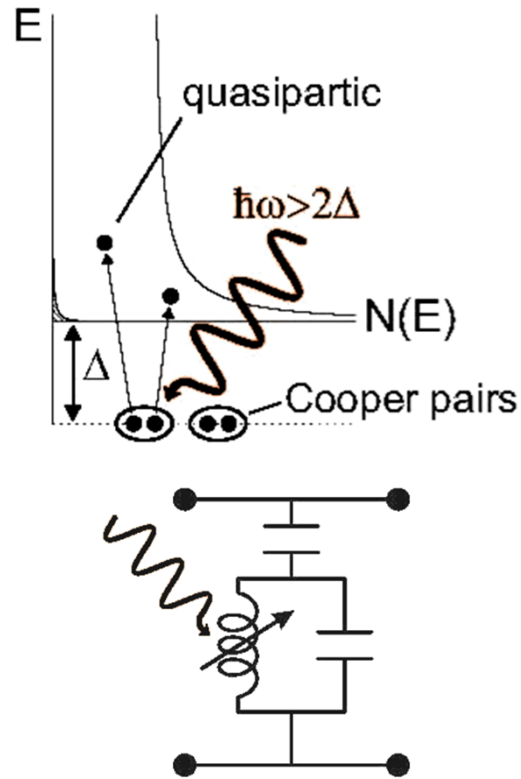
① 高周波帯超伝導デバイスの Q 値評価

- ・帯域通過フィルタ(透過形)
- ・ NMR 用ピックアップコイル(反射形)
- ・マイクロ波力学インダクタンス検出器(反作用形)

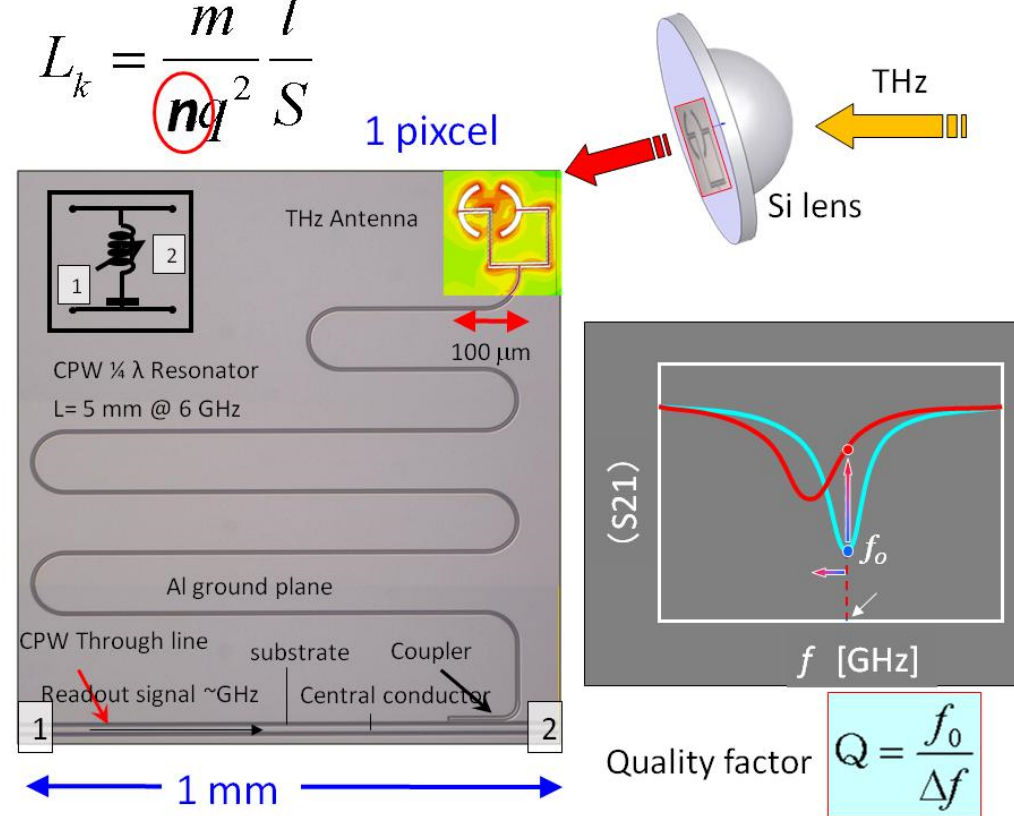
② 超伝導体の表面抵抗(R_s)と力学インダクタンス(L_k)

マイクロ波力学インダクタンス検出器

(MKIDs : Microwave Kinetic Inductance Detectors)



$$L_k = \frac{m}{nq^2} \frac{l}{S}$$



[1] R. Barends, PhD thesis, 2009

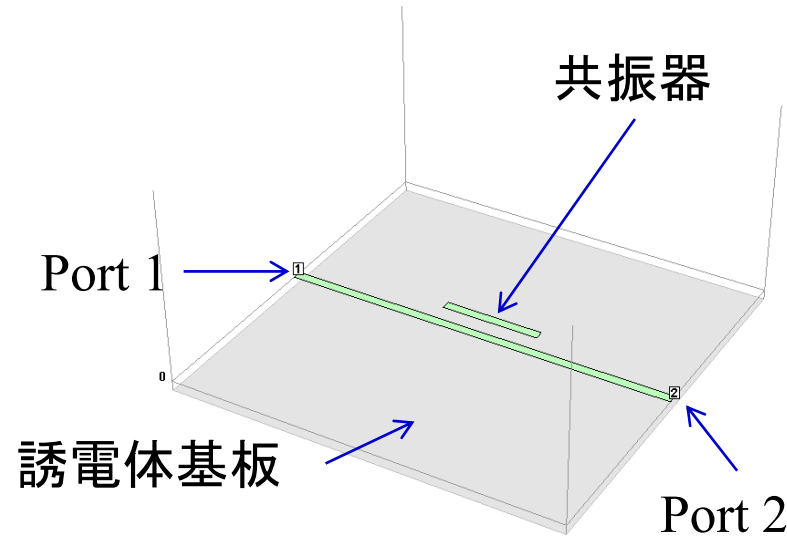
[2] S. Yates et al., 2008

フォトン吸収 → クーパー対崩壊 → 準粒子励起

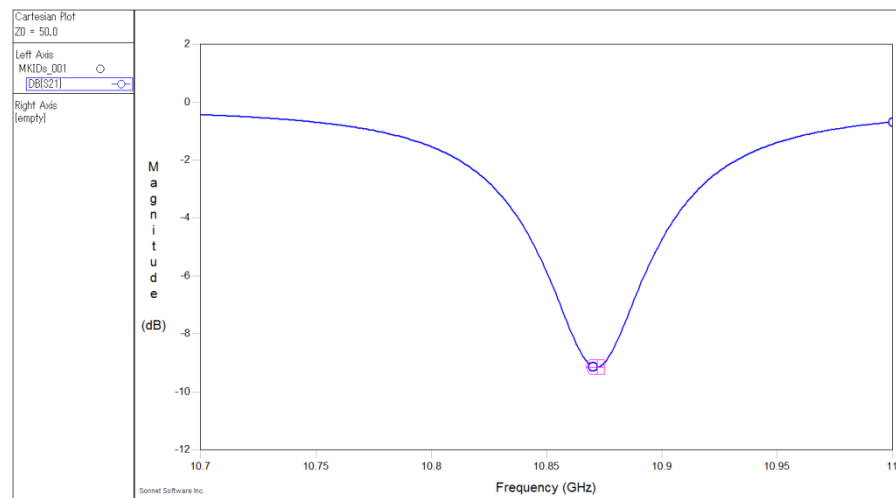
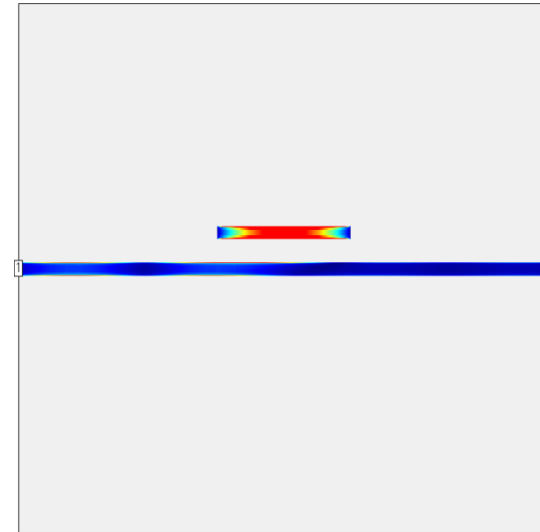
カイネティックインダクタンスが増加 → 共振周波数が低周波側へシフト

反作用形モデル

3D モデル



共振時の電流密度分布

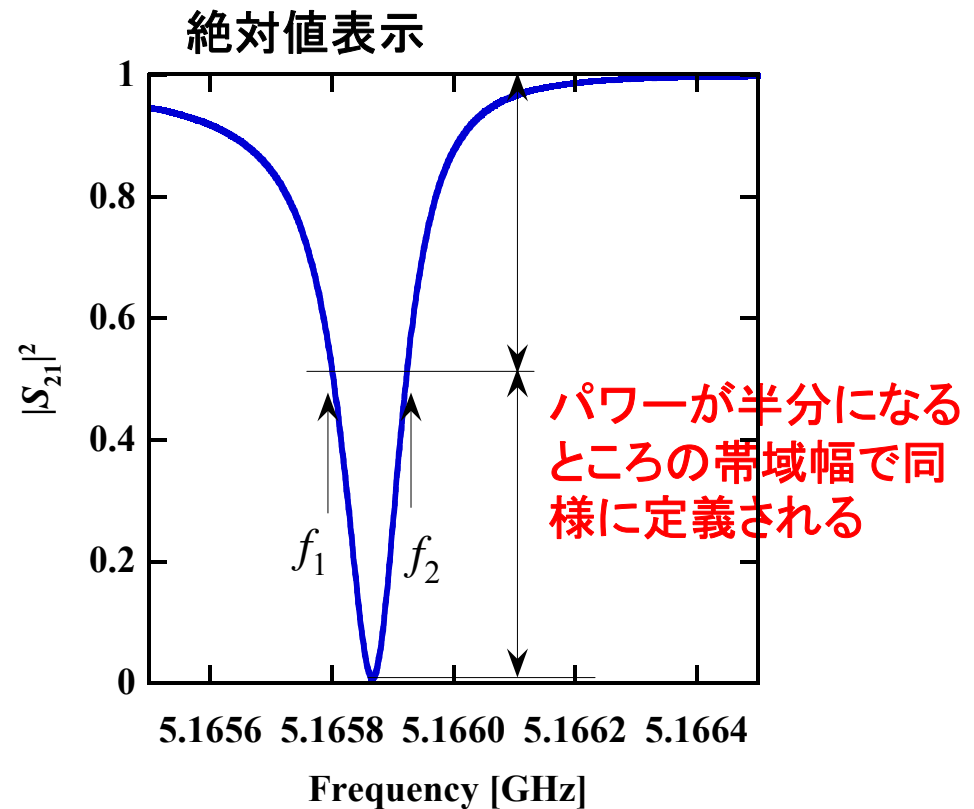
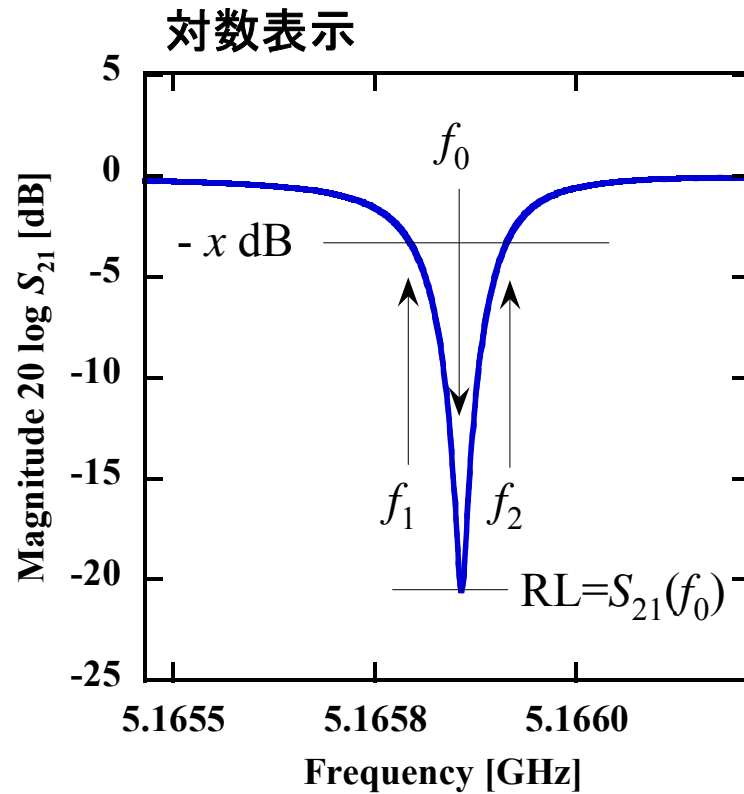


S_{21} 特性がディップ特性

S_{21} 特性(ディップ特性)を用いた Q 値(Q_L, Q_U)の求め方

$$Q_L = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$$

$$Q_U = \frac{Q_L}{S_{21}(f_0)} = \frac{Q_L}{10^{-RL/20}}$$



共振ディップの RL から $-x$ dB に位置する帯域幅を読む(反射型と同様)

Q 値評価のまとめ

共振器形	Q_L	Q_U
透過形	$Q_L = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$	$Q_U = \frac{Q_L}{1 - S_{21}(f_0)} = \frac{Q_L}{1 - 10^{-IL/20}}$
反射形	$Q_L = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$	$Q_U = Q_L(1 + \beta) \quad \beta = \frac{1 \pm S_{11}(f_0) }{1 \mp S_{11}(f_0) }$
反作用形	$Q_L = \frac{f_0}{f_2 - f_1}$	$Q_U = \frac{Q_L}{S_{21}(f_0)} = \frac{Q_L}{10^{-RL/20}}$

講演概要

① 高周波帯超伝導デバイスの Q 値評価

- ・帯域通過フィルタ(透過形)
- ・ NMR 用ピックアップコイル(反射形)
- ・マイクロ波力学インダクタンス検出器(反作用形)

② 超伝導体の表面抵抗(R_s)と力学インダクタンス(L_k)

表面抵抗が周波数の2乗に比例することをシミュレーションでどのように扱うか。

(広帯域モデルへの適応)

[表面抵抗 R_s]

定義

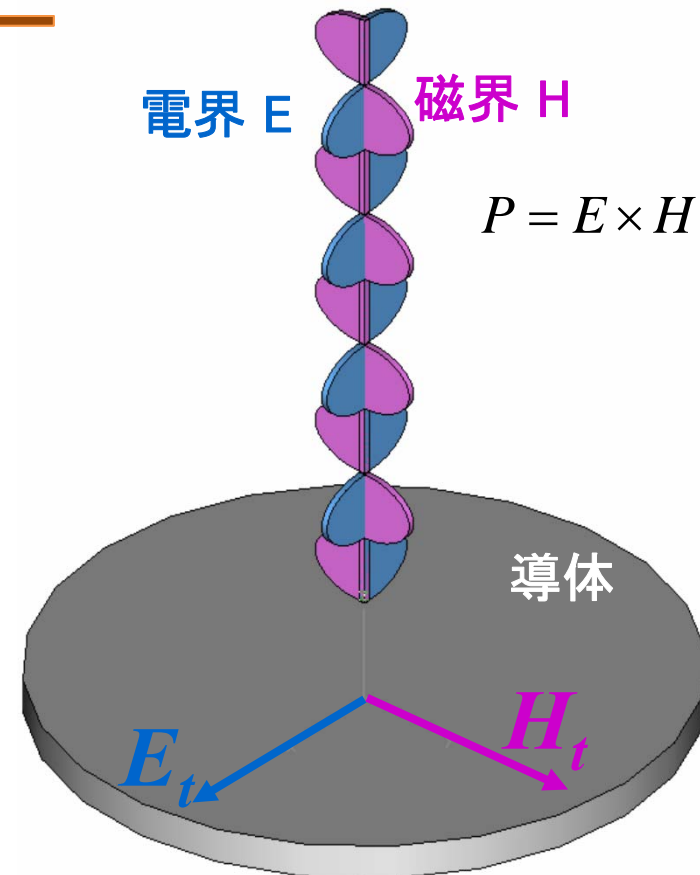
表面インピーダンス Z_s

$$Z_s = \frac{E_t}{H_t} = R_s + jX_s [\Omega]$$

表面抵抗 R_s と表面リアクタンス X_s

($f < 100 \text{ GHz}$)

	R_s	X_s
超伝導体	$\frac{\omega^2 \mu^2 \sigma \lambda^3}{2}$	$\omega \mu \lambda$
常伝導体	$\sqrt{\frac{\omega \mu \lambda}{2}}$	$\sqrt{\frac{\omega \mu \lambda}{2}}$



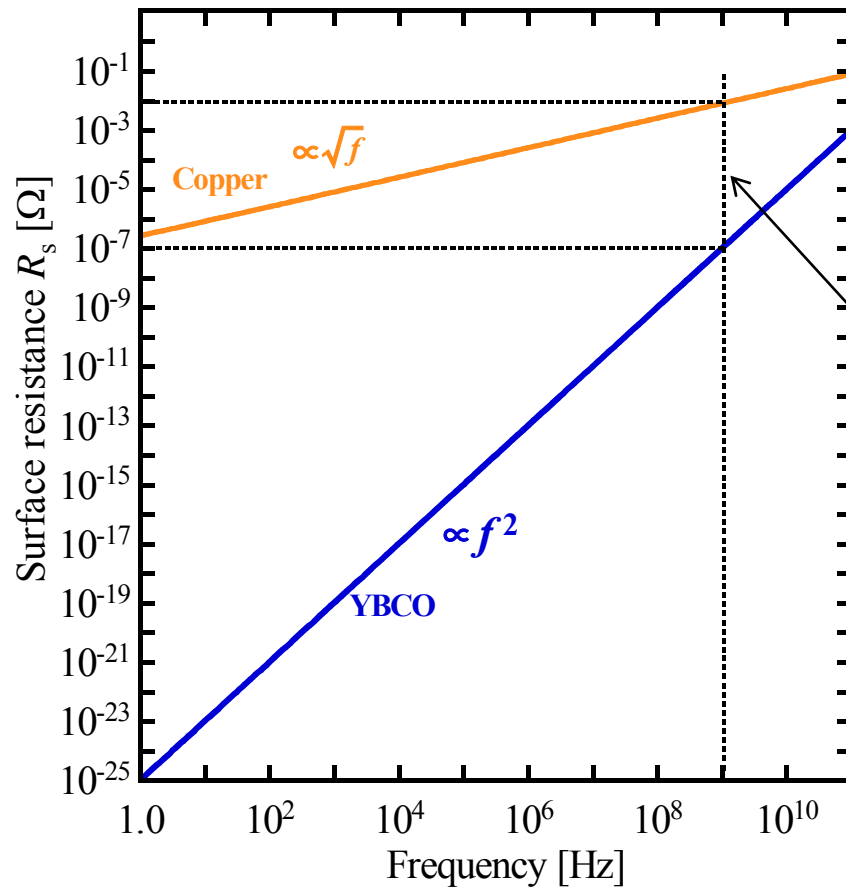
- E_t : 電界の正接
- H_t : 磁界の正接
- ω : 角周波数
- μ : 透磁率
- σ : 導電率
- λ : 磁場侵入長 (表皮深さ)

表面抵抗の周波数依存性

超伝導体

損失 $(R) = 0$ 直流

損失 $(R_s) \neq 0$ 交流



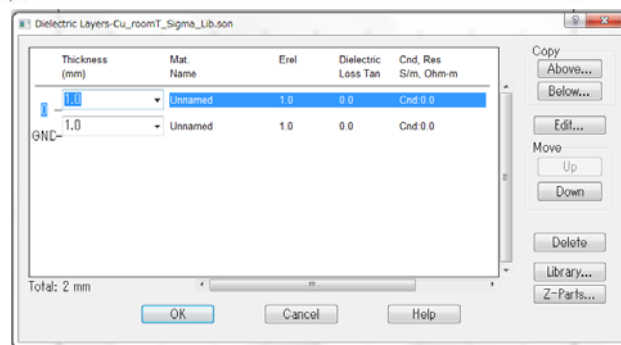
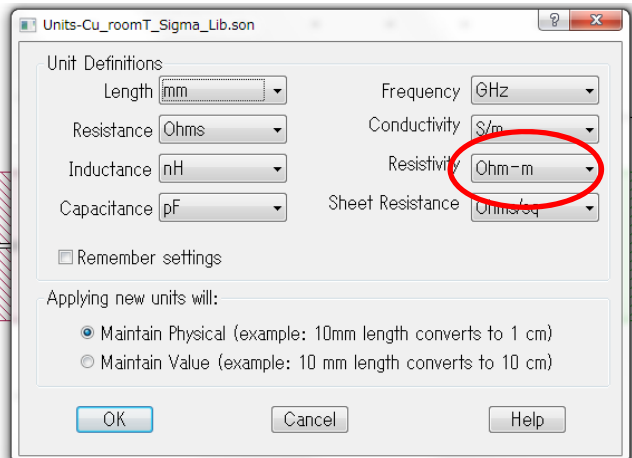
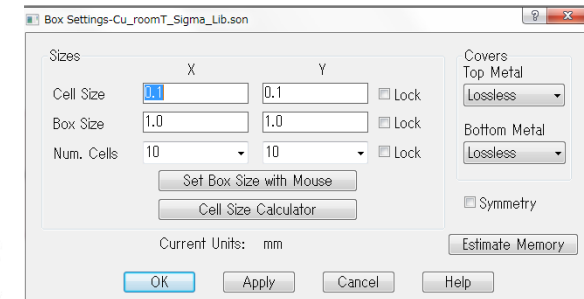
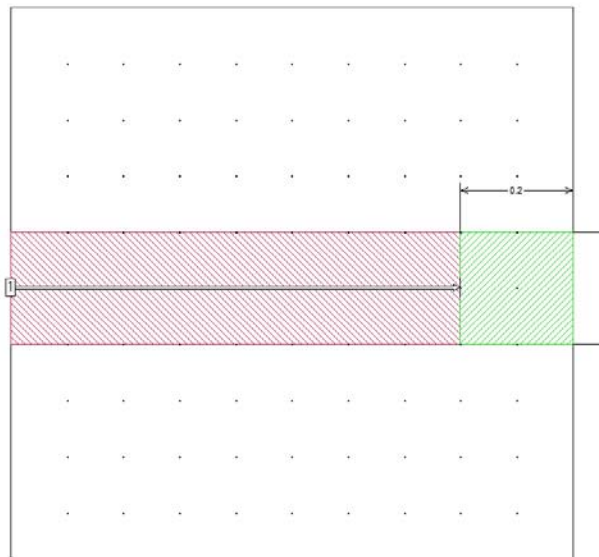
高周波ほど超伝導体の優位性は減少する。

1 GHz では、超伝導体の R_s はCu に比べて、約 5 桁低い

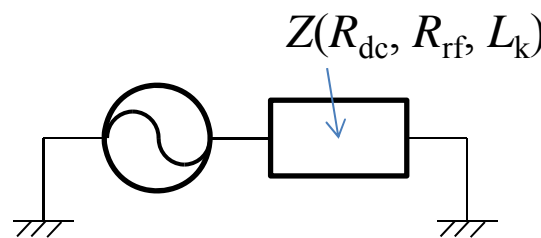
R_s 及び L_k を考慮した解析モデル

30 GHz まで解析することを考慮して 0.2×0.2 mm でモデル化

30 GHz の波長は10 mm \rightarrow 10 mm よりも十分短い 0.2 mm \rightarrow 集中定数モデル
 0.2×0.2 mm \rightarrow 幅方向と長さ方向が同じ $\rightarrow Z$ の Real (実部) Ω が Ω/sq と同じ



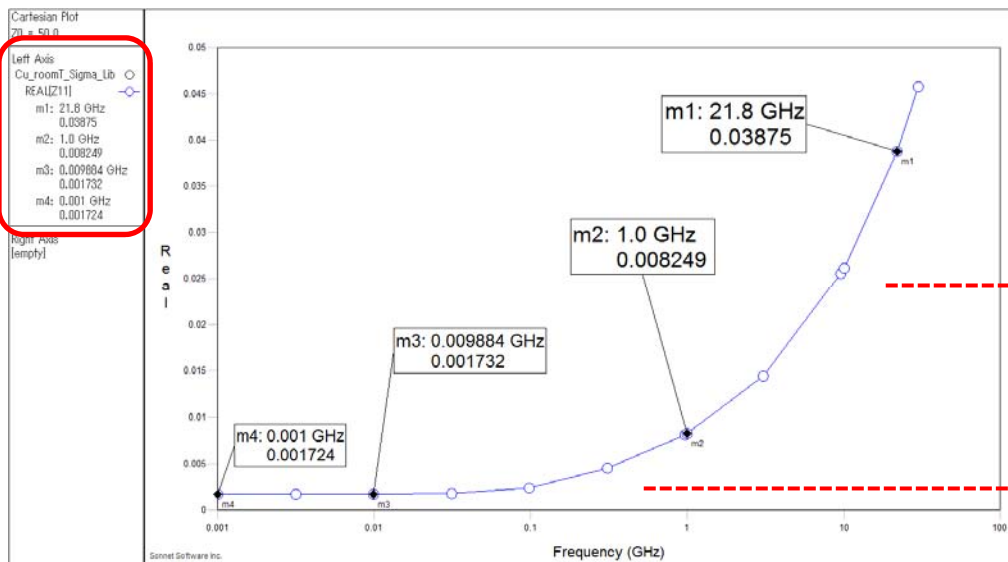
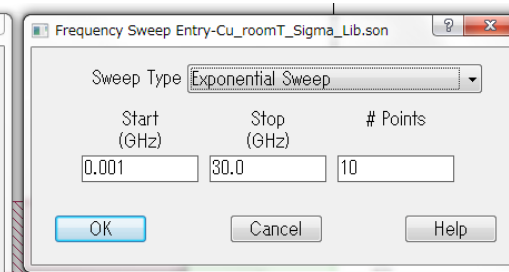
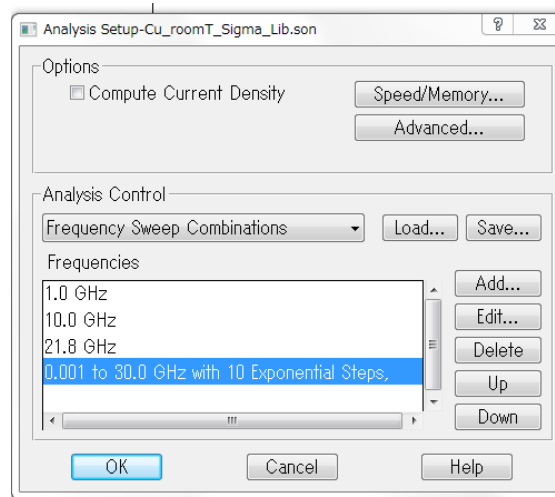
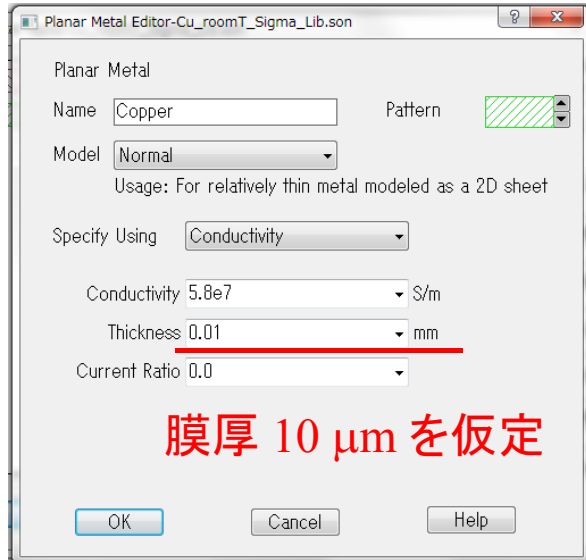
つまり、このモデルは、



と考えてよい。

Cu を想定した解析(1)

～Library を使ってみる(常温)～



周波数の1/2乗で増加することを意味する

このレベルは R_{dc} を意味する

Cu を想定した解析(2)

～ R_{dc} と R_{rf} を考える(常温)～

Sonnet マニュアルより

Rdc/Rrf

この方法では、2つの値、つまり R_{DC} と R_{RF} を入力することができます。1つめのパラメータ R_{DC} は、低周波数における損失を定義します（導体の厚さは表皮の厚さよりも十分薄くなっています）。驚くことに、他の電磁界解析では R_{DC} を0と仮定することによって、低周波数での損失をしばしば0にすることがあります。

2つめのパラメータは、表皮効果係数 R_{RF} です。 Em は高周波数での $\Omega\text{-m/sq}$ の値を算出するために、この数値を周波数（単位は Hz）の平方根に掛けます。

R_{DC} と R_{RF} の方程式は、次のとおりです。

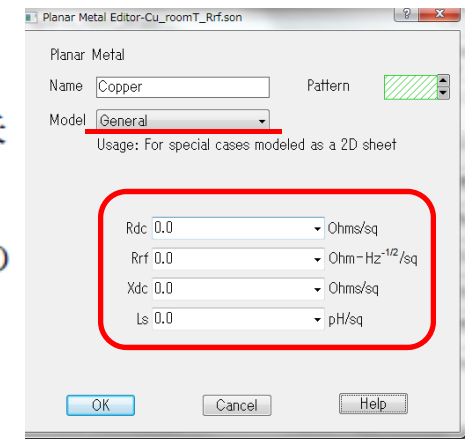
$$R_{DC} = 1/(\sigma t)$$

$$r_f = \text{Skin effect coefficient} = \sqrt{(\pi\mu)/\sigma}$$

$$R_{dc} = 1/(5.8e7 * 10e-6) = 1.72e-3$$

$$R_{rf} = \sqrt{(\pi * \pi * 4e-7 / 5.8e7)} = 2.6e-7$$

ここで σ は体積導電率で単位は mhos/meter、 t は金属導体の厚みで単位は meter、そして $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m です。 R_{DC} と R_{RF} の代表的な値は、それぞれ 0.004、 $3e-7$ です。おかしい損失の結果が得られてしまった場合、特に R_{RF} の指数部をチェックしてください。



Sonnet マニュアルより

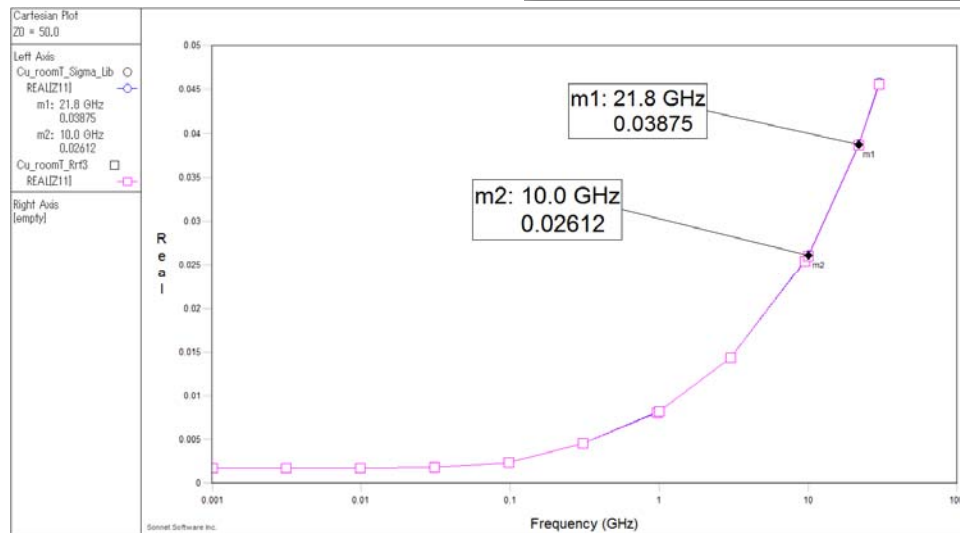
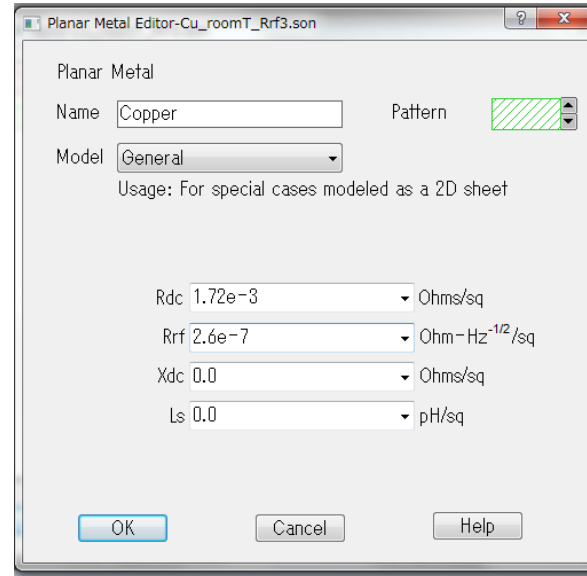
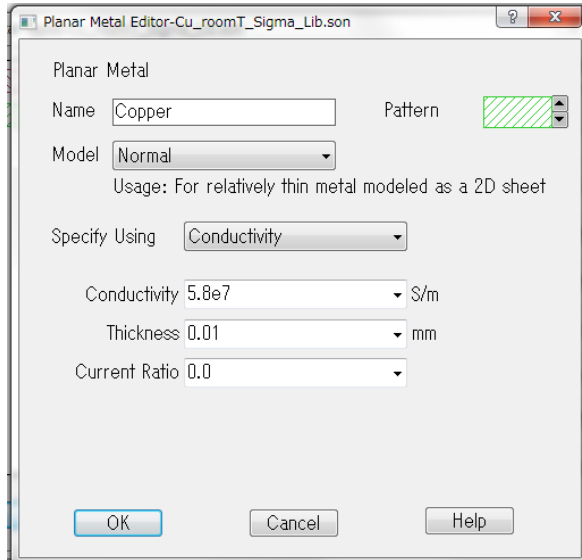
Properties of Commonly Used Metals

Metal	σ (S/M)	RDC (Ω /sq) $t = 1 \mu\text{M}$	RDC (Ω /sq) $t = 1 \text{ mil}$	RRF ($\Omega\text{Hz}^{-1/2}$ /sq) “Skin Effect” (microstrip)
Aluminum	3.72e7	0.027	1.1e-3	3.3e-7
Brass	1.57e7	0.070	2.5e-3	5.0e-7
Copper	5.80e7	0.017	6.8e-4	2.6e-7
Gold	4.09e7	0.024	9.6e-4	3.1e-7
Nichrome	1.00e6	1.000	3.9e-2	2.0e-6
Silver	6.17e7	0.016	6.4e-4	2.5e-7
Tantalum	6.45e6	0.155	6.1e-3	7.8e-7
Tin	8.70e6	0.115	4.5e-3	6.7e-7

Cu を想定した解析 (1) と (2) の比較

$$\sigma = 5.8e7, t = 10e-6(\text{Lib.})$$

$$R_{dc} = 1.72e-3, R_{rf} = 2.6e-7$$



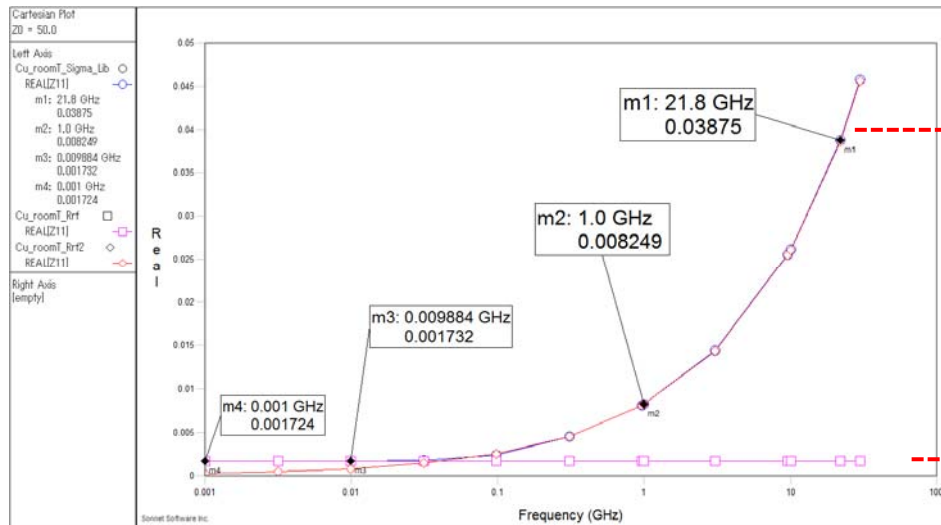
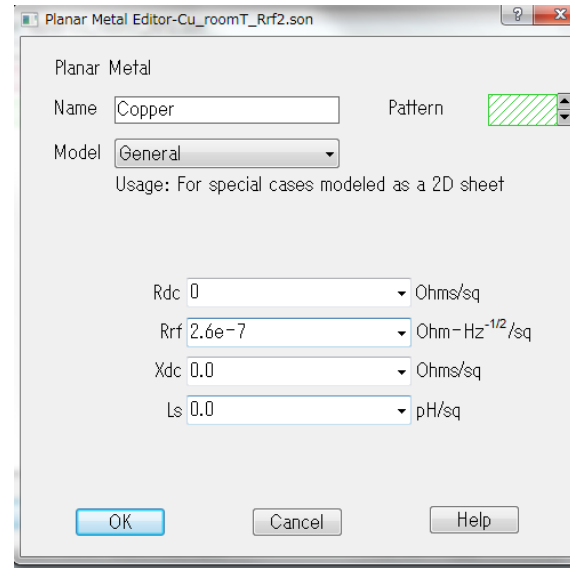
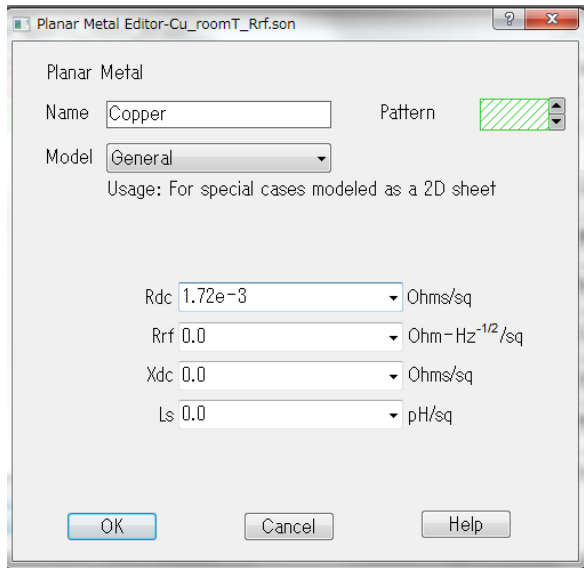
全く同じ結果となる

$$2.6e-7 * (21.8e9)^{(1/2)} = 0.038388$$

R_{dc} と R_{rf} を個別に計算

$$R_{dc} = 1.72e-3, R_{rf} = 0$$

$$R_{dc} = 0, R_{rf} = 2.6e-7$$



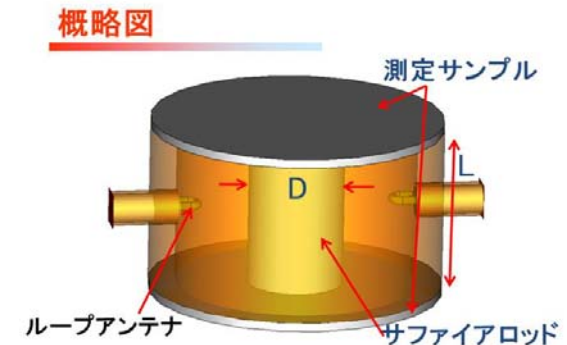
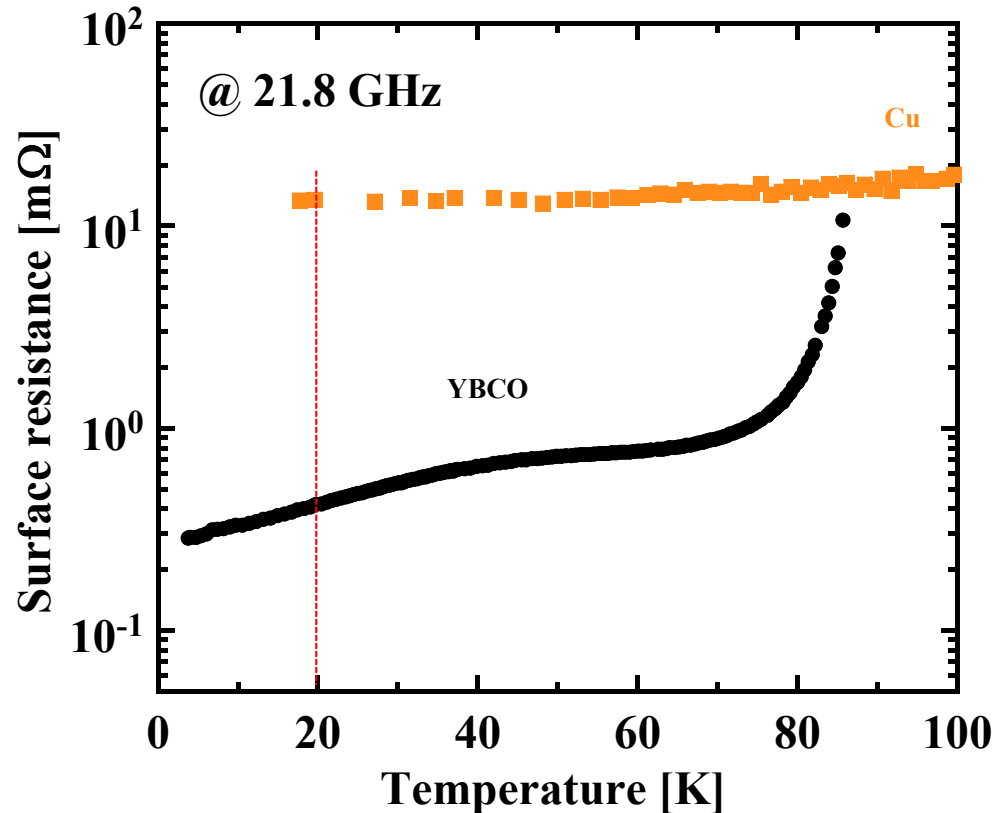
→ $R_{dc} = 0, R_{rf} = 2.6e-7$

FREQ^(1/2) の関係になっている。

→ $R_{dc} = 1.72e-3, R_{rf} = 0$

超伝導を用いた解析 ～YBCO の場合～

誘電体共振器法で測定した, Cu 薄膜(10 μm)と HTS 薄膜の表面抵抗 R_s の温度依存性



温度(20K)での Cu および YBCO の R_s の実測値を読み取る。

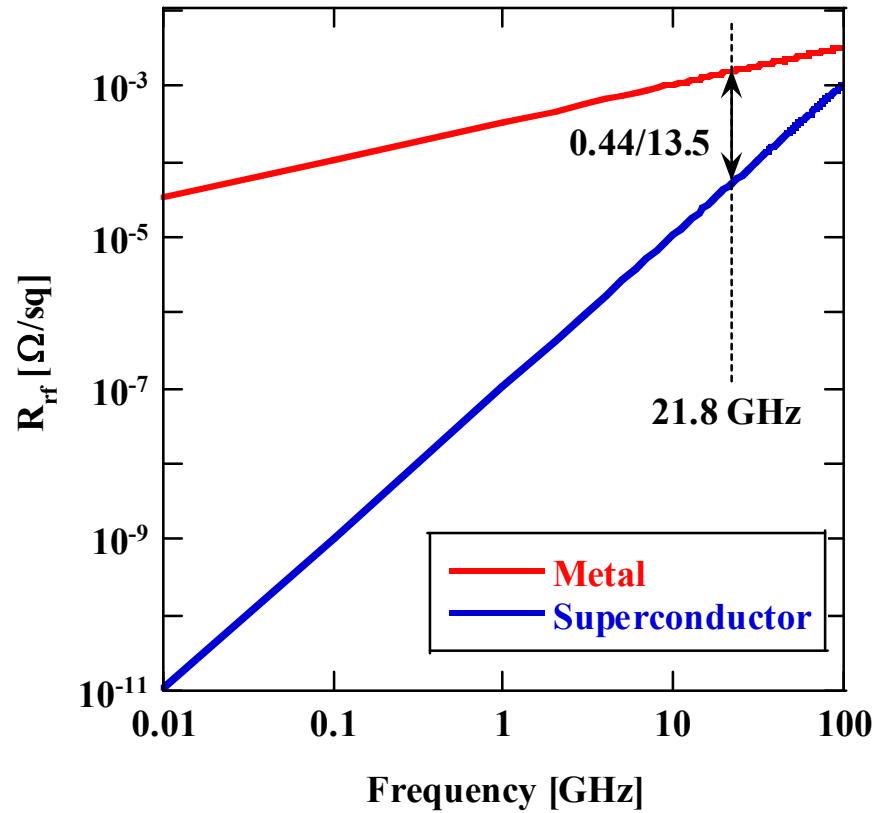
$$R_{s\text{Cu}}(@20 \text{ K}, 21.8 \text{ GHz}) = 13.5 \text{ m}\Omega$$

$$R_{s\text{YBCO}}(@20 \text{ K}, 21.8 \text{ GHz}) = 0.44 \text{ m}\Omega$$

従って, 20K, 21.8GHz で, 0.44/13.5 倍の高周波ロス成分を持ち, かつ FREQ^2 の依存性を持つばよい

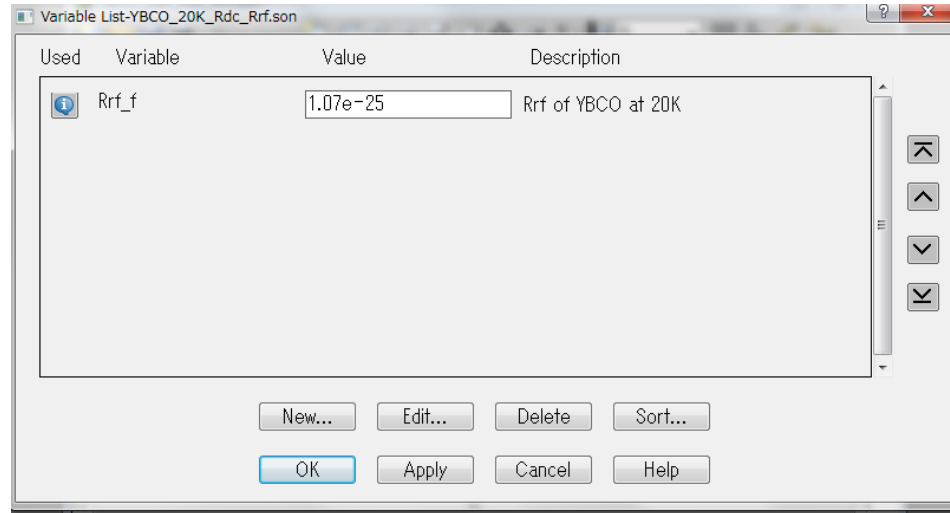
超伝導を用いた解析 ～YBCO の場合～

このような依存性を持った R_{rf} になればよい

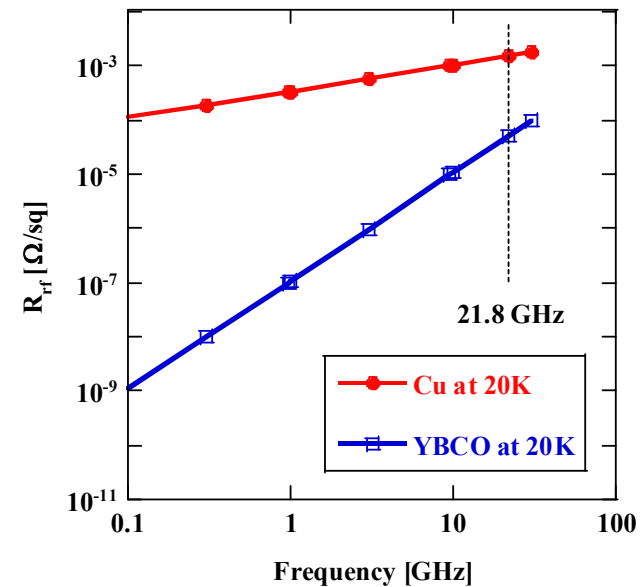
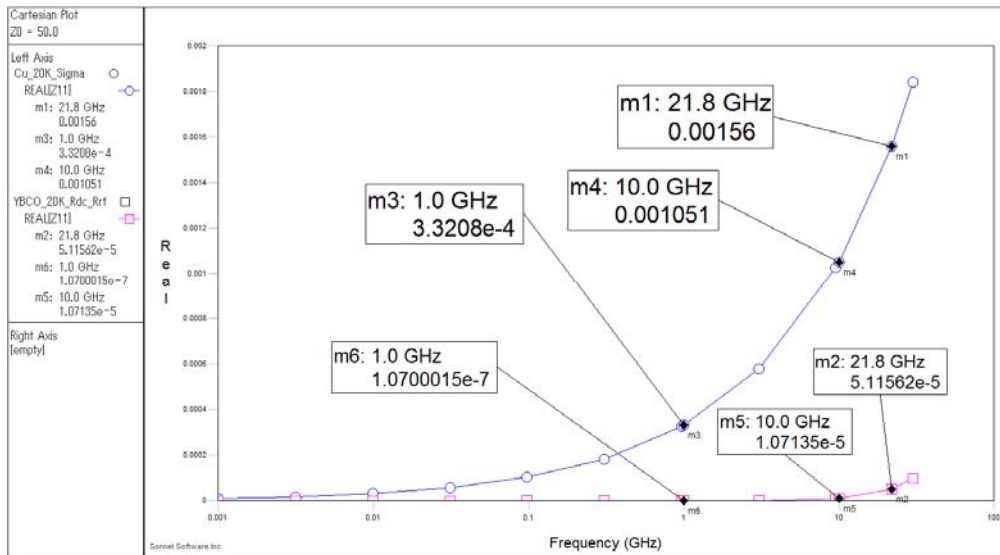


Material	$f=1$ GHz	$f=10$ GHz	$f=21.8$ GHz
Cu @ 20K	$3.32e-4$	$1.05e-3$	$1.56e-3$
YBCO	$1.07e-7$	$1.07e-5$	$5.08e-5$

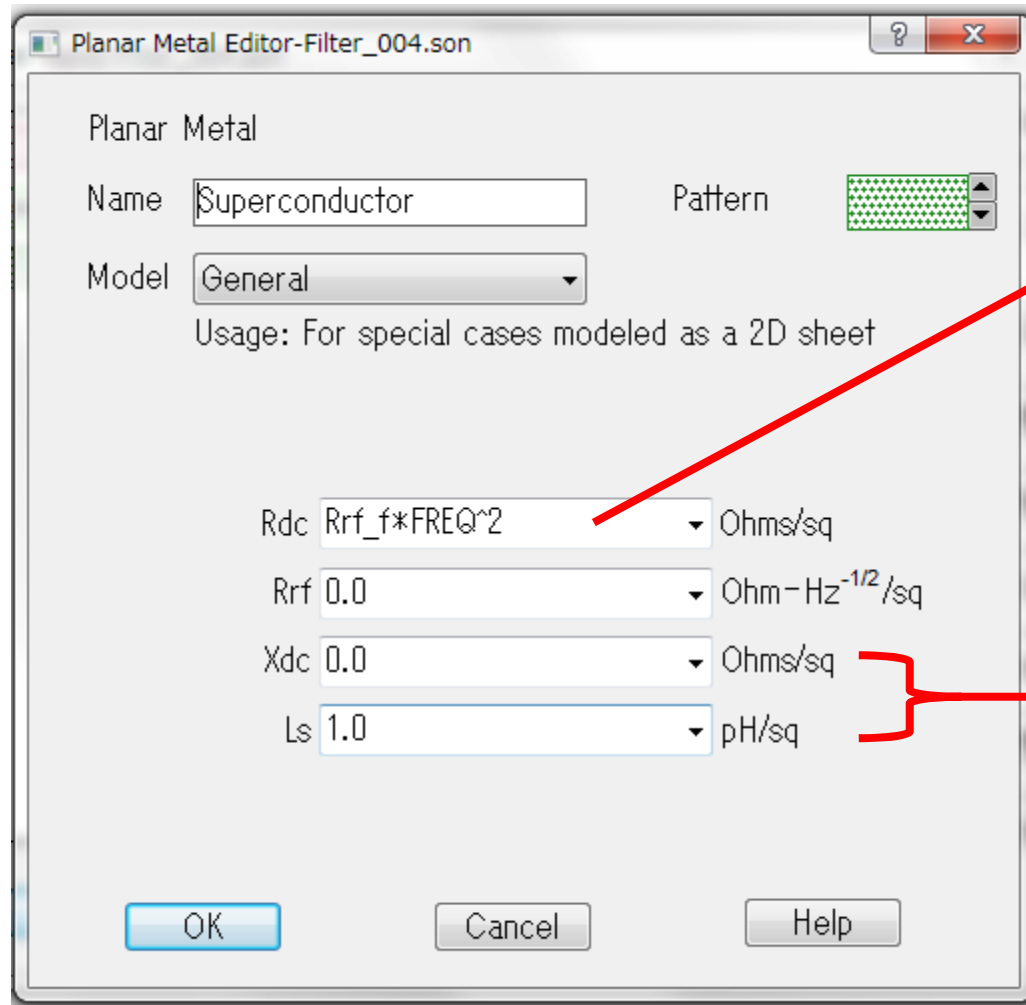
YBCO超伝導体のモデル化



前項の表とほぼ一致



超伝導体のカイネティックインダクタンス $L_k(L_s)$

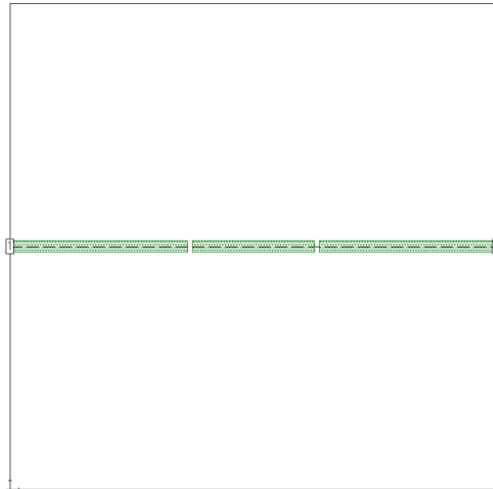


$R_{rf_f} * \text{FREQ}^2$

L_s に値を入力する
あるいは、 X_{dc} の欄に
 $X_{dc} + (2 * \text{PI} * \text{FREQ} * L_s / 1E12)$
を入力し、 R_{rf_f} と同様に
 X_{dc} と L_s を数値定義する

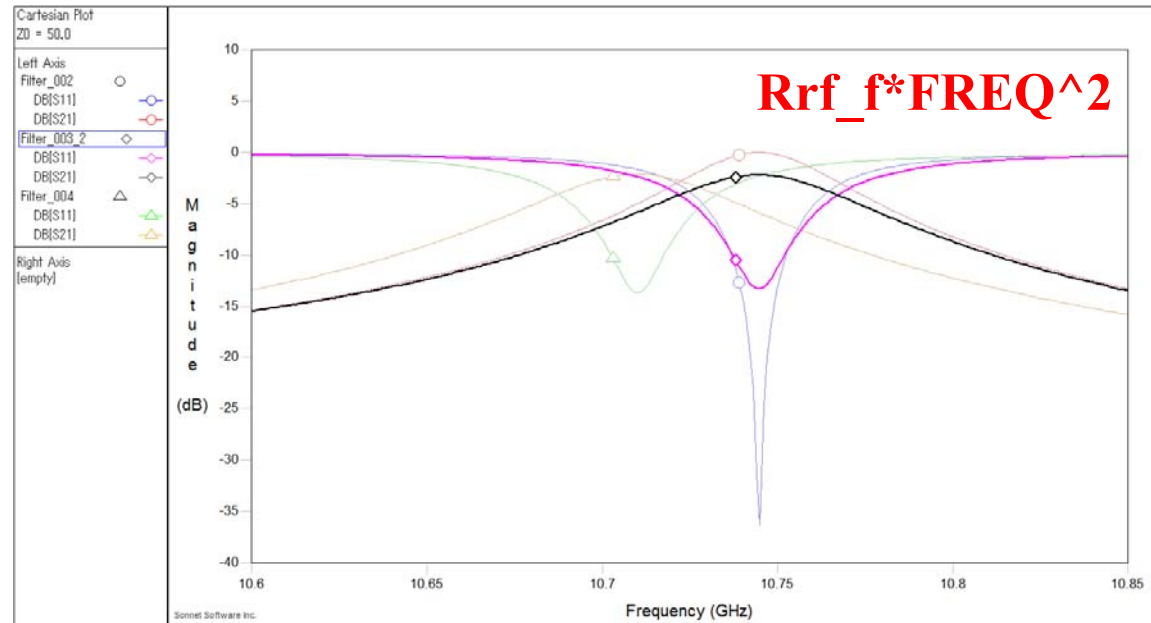
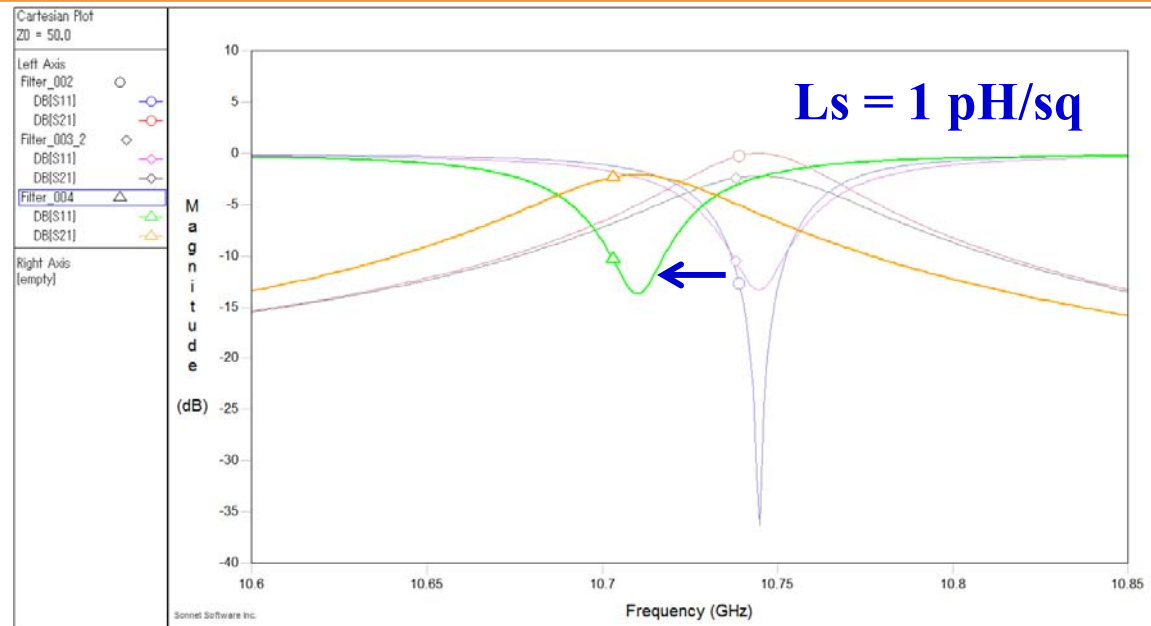
超伝導体を用いたモデル解析例

透過形モデル



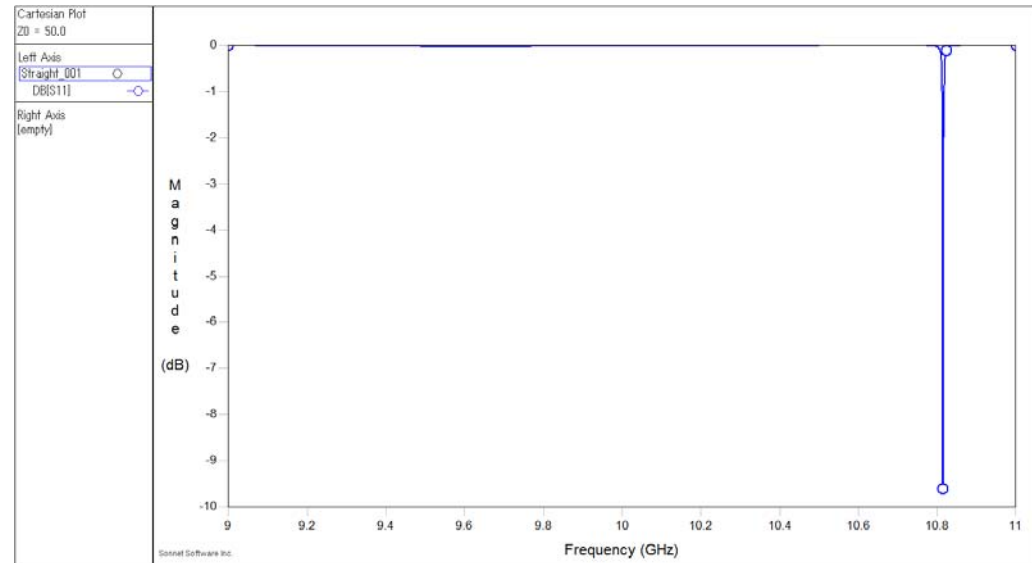
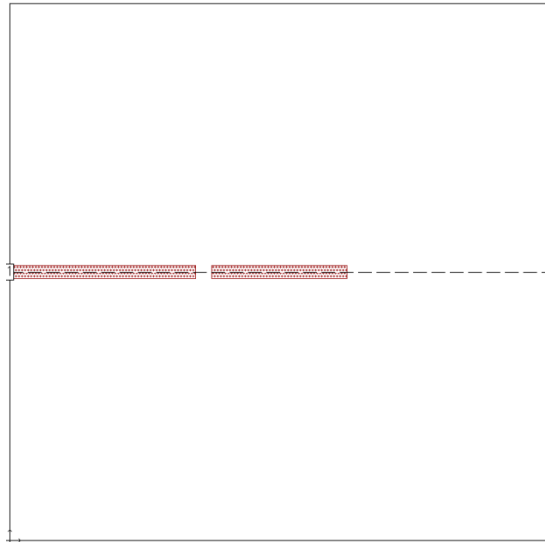
設定パラメータ

$R_{dc} \quad R_{rf_f} * FREQ^2 \quad \text{Ohms/sq}$
 $R_{rf} \quad 0.0 \quad \text{Ohm-Hz}^{-1/2}/\text{sq}$
 $X_{dc} \quad 0.0 \quad \text{Ohms/sq}$
 $L_s \quad 1.0 \quad \text{pH/sq}$

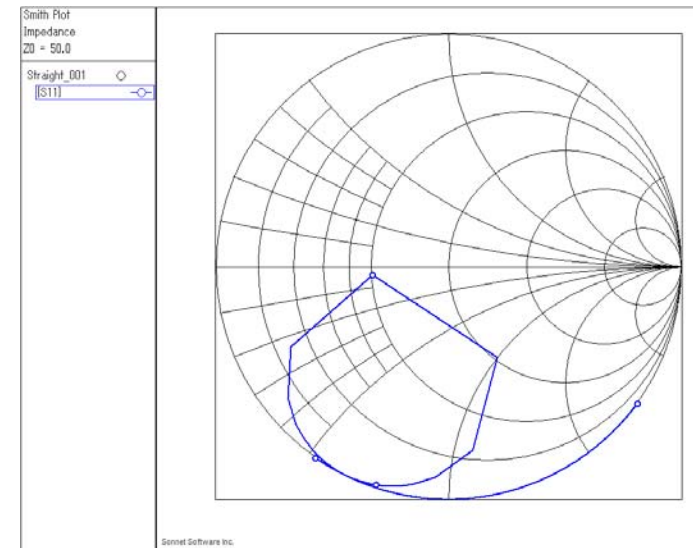


高 Q 値解析の例 (1)

反射型モデル (HTSを仮定)



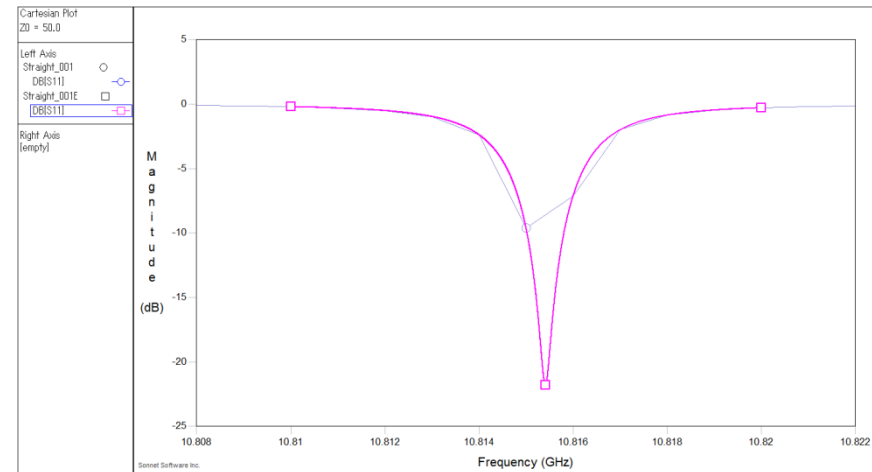
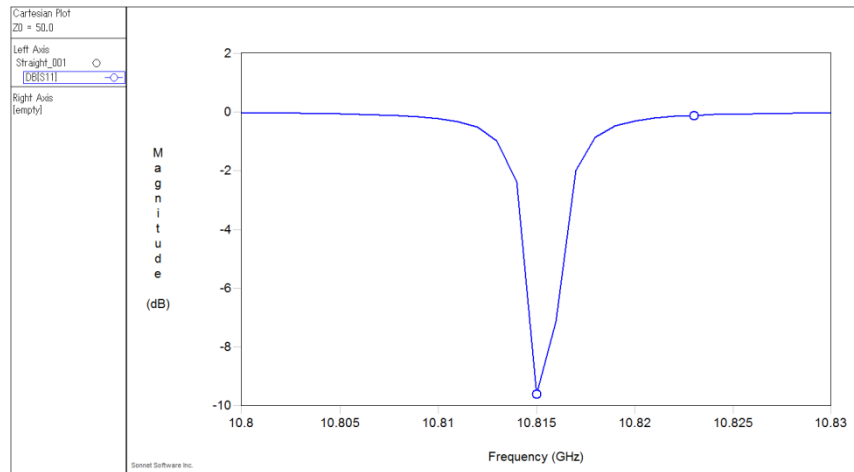
共振器長 5 cm、基板の比誘電率 9.8
→ 約 10 GHz の $\lambda_g/2$ 共振
→ 9-11 GHz の範囲で解析



Weak coupling ??

高 Q 値解析の例 (1)

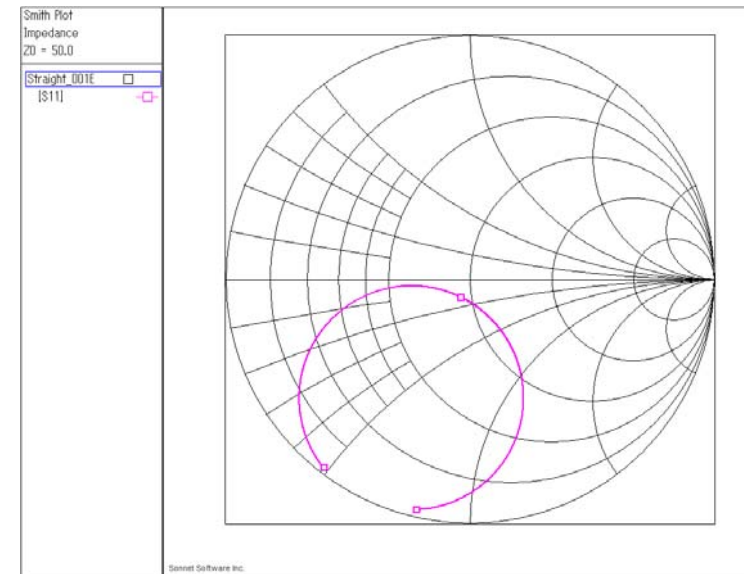
拡大すると



→ 10.81-10.82 GHz の範囲に縮小
→ 総解析ポイントを 10001 に増加
で再度解析

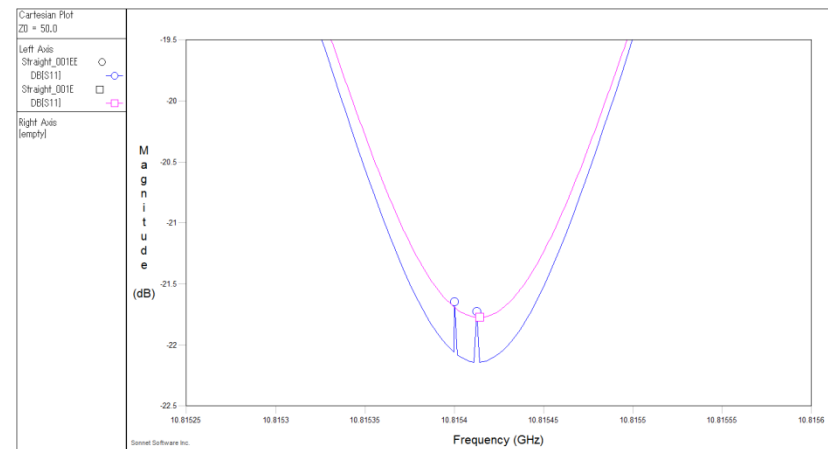
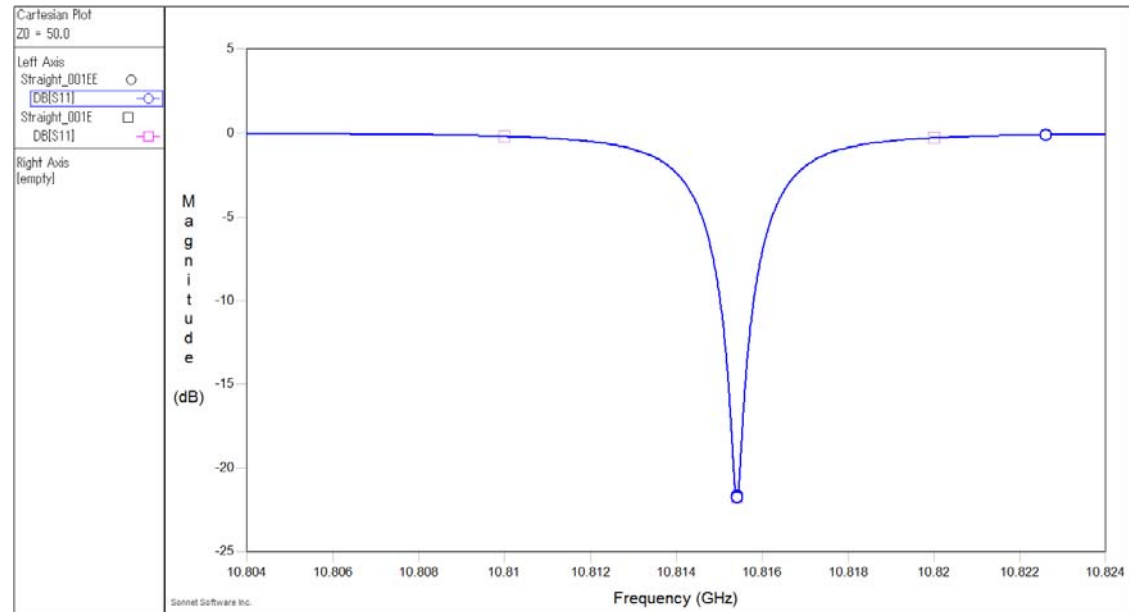
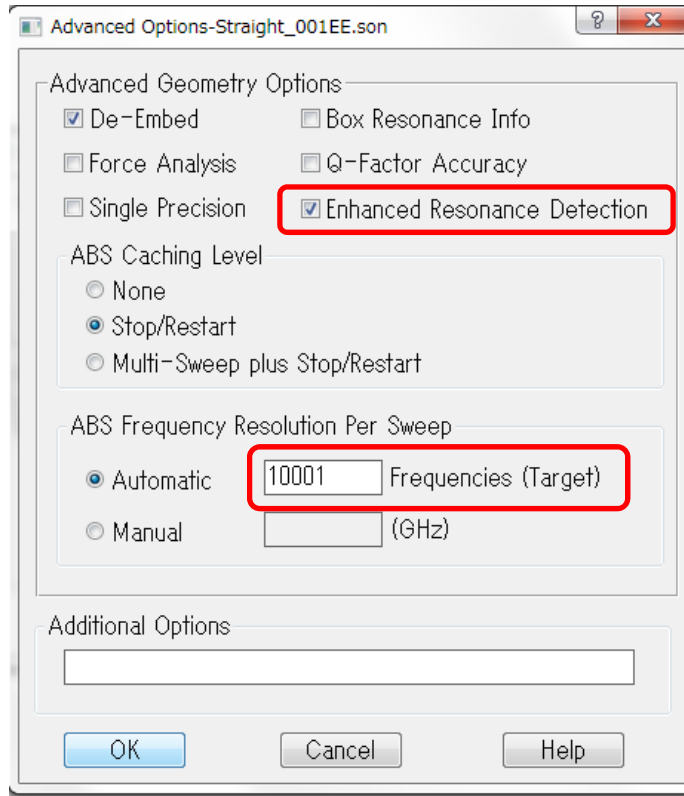
RL の値や coupling がより正確
に評価できる。

→ 正確な Q 値の評価



高 Q 値解析の例 (2)

あるいは、あらかじめ **Enhanced Resonance Detection** にチェックを入れる。



まとめ

① 高周波帯超伝導デバイスの Q 値評価

**透過形、反射形、反作用形、
それぞれの Q 値評価方法**

② 超伝導体の表面抵抗 (R_s) と力学インダクタンス (L_k)

**表面抵抗が周波数の2乗に比例すること
を材料パラメータとして用いる。**

ご清聴ありがとうございました。