

高温超電導体・低損失誘電体材料の マイクロ波・ミリ波評価ソフトウェア

清水隆志 橋本経 馬哲旺 小林禧夫

埼玉大学 工学部 電気電子システム工学科
〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保 255
電話:048-858-3487, Fax:048-857-2529
E-Mail: yohsio@reso.ees.saitama-u.ac.jp

あらまし 埼玉大学小林・馬研究室では、マイクロ波およびミリ波帯におけるデバイス設計あるいは新材料開発のため、低損失誘電体材料の複素誘電率（比誘電率 ϵ_r 、誘電正接 $\tan\delta$ ）および高温超電導体の表面抵抗 R_s を高精度かつ高能率に評価できる自動測定ソフトウェアとシステムを長年にわたり開発してきた。本報告では、そのソフトウェアの概要を紹介する。

キーワード 低損失誘電体材料 高温超電導体表面抵抗 自動測定ソフトウェア

Microwave and millimeter wave evaluation software of high-temperature superconductor and low loss dielectric material

Takashi Shimizu Toru Hashimoto Zhewang Ma Yoshio Kobayashi

Dept. Electrical and Electronic System, Saitama University
Shimo-ookubo 255, Saitama, Saitama 338-8570, Japan
Phone: +81-48-858-3477, Fax: +81-48-857-2529
E-mail: yoshio@reso.ees.saitama-u.ac.jp

Abstract For a long time, at Kobayashi and Ma laboratory in Saitama University, the automatic measurement software and system are developed. It is able to evaluate complex permittivity of low-loss dielectric materials and surface resistance of high temperature superconductor accuracy and efficiency in microwave and millimeter wave region. And it is useful to design of microwave and millimeter wave filters or development of new materials. In this report, these contents are reviewed briefly.

Key word Low-loss dielectric materials High-Tc super conductor R_s Automatic measurement software

1. はじめに

近年の情報通信のマルチメディア化、グローバル化の進展に伴い、映像やデータを大量に伝送する高速大容量移動体通信網の構築を実現するために、マイクロ波・ミリ波帯の利用が期待されている。本研究室では、周波数有効利用の観点から高温超電導材料を用いたマイクロ波・ミリ波デバイスの実現が有望と考えて、それらの研究開発を精力的に推進している。それらのデバイス設計あるいは新材料開発のためには、低損失誘電体材料の複素誘電率（比誘電率 ϵ_r 、誘電正接 $\tan\delta$ ）および高温超電導体の表面抵抗 R_s を高精度かつ高能率に評価できる測定システムの構築が重要であると考え、これまで30年以上にわたり、それらに関する研究もまた行ってきた^{[1]-[3]}。

その長い歴史の中で、ハードウェア・ソフトウェアの急速な進歩とともに、研究室の総力を挙げて、開発したプログラムを維持管理してきた。現在では、低損失誘電体の評価は空洞共振器法に基づき、また高温超電導体の表面抵抗評価は誘電体共振器法に基づいて、Windows パソコン用自動測定プログラムを開発するに至っている^{[4]-[6]}。

本報告では、その Windows パソコン用自動測定プログラムの概要を紹介する。

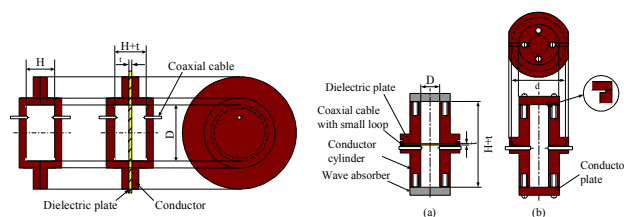
2. 測定原理

測定原理は、共振法に基づく。図1に低損失誘電体基板の複素誘電率測定用治具を示す。2つに分割した円筒導体の間に誘電体平板を挟んで構成される。また、図2に誘電体円柱の複素誘電率および導体平板の R_s の測定用治具を示す。2枚の導体平板の間に誘電体円柱を挟んで構成される。これら共振器の共振周波数 f_0 と無負荷 Q 、 Q_u の測定値より、 ϵ_r 、 $\tan\delta$ と R_s が求まる。

3. 自動測定システム

図3に自動測定システムの写真、および SU-Series Program、Windows パソコン、測定機器から構成されるブロック図を示す。

測定は周波数掃引法による。共振器を冷却器内に設置し、室温より最低到達温度(約 20K)まで十分冷却する。その後、無振動下で測定を行うために、冷却器のスイッチを止める。コンピュータは、温度が自然上昇する際に変化する共振波形をネットワークアナライザ上で追尾しながら、 Q_u 測定の最適状態に



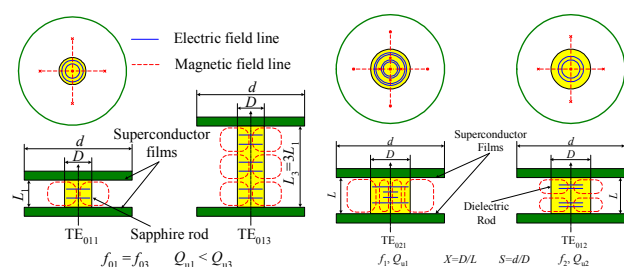
(a) 空洞共振器法

(5-40GHz)

(b) 円筒遮断導波管法

(30-100GHz)

図1 誘電体基板の ϵ_r 、 $\tan\delta$ 測定用治具



(a) 2 誘電体共振器法

(2-30GHz)

(b) 1 誘電体共振器法

(2-30GHz)

図2 誘電体円柱の ϵ_r 、 $\tan\delta$ および導体平板の R_s 測定用治具

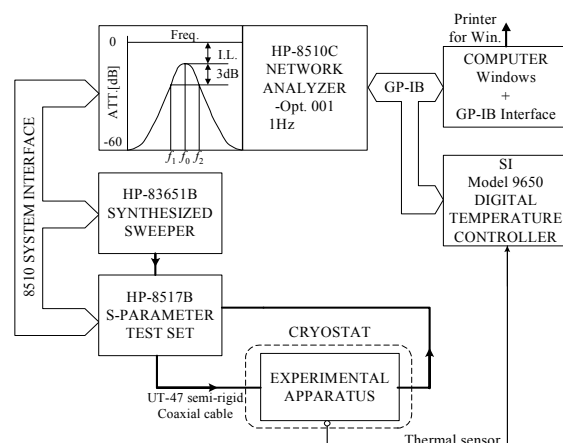


図3 自動測定システム (上:写真、下:ブロック図)

表 1 SU-Series Program の一覧

測定法	ソフト名	測定対象	測定範囲 測定精度		
			f_0 (GHz)	ϵ_r $\Delta\epsilon_r$ (%)	$\tan\delta$ $\Delta\tan\delta$ (%)
空洞共振器法	SU-PLATE	誘電体平板（水平方向）の複素誘電率	5 ~ 40	1.1 ~ 50 $\pm 0.2 \sim 0.5$	$10^{-3} \sim 10^{-6}$ $\pm 2 \sim 10$
遮断円筒導波管法	SU-CYLINDER	誘電体平板（水平方向）の複素誘電率	30 ~ 100	1.1 ~ 50 $\pm 0.2 \sim 1.0$	$10^{-3} \sim 10^{-6}$ $\pm 2 \sim 10$
2 誘電体共振器法	SU-ROD	誘電体円柱の複素誘電率 導体の表面抵抗	2 ~ 30	2 ~ 1000 $\pm 0.2 \sim 0.5$	$10^{-3} \sim 10^{-7}$ $\pm 5 \sim 20$
1 誘電体共振器法	開発中	誘電体円柱の複素誘電率 導体の表面抵抗	2 ~ 30	2 ~ 1000 $\pm 0.2 \sim 1.0$	$10^{-3} \sim 10^{-7}$ $\pm 5 \sim 20$
平衡形円板共振器	開発中	誘電体平板（垂直方向）の複素誘電率	2 ~ 30	1.1 ~ 10 $\pm 0.2 \sim 1.0$	$10^{-2} \sim 10^{-4}$ $\pm 5 \sim 20$
TM ₀₁₀ 空洞共振器	開発中	誘電体丸棒の比誘電率	1 ~ 30	1.1 ~ 50 $\pm 1.0 \sim 7.0$	$10^{-2} \sim 10^{-4}$ $\pm 10 \sim 30$

制御し続ける。それと同時に、温度計を監視し続け、1K の温度変化毎に f_0 と Q_u を自動測定する。この結果より、SU-Series Program が測定試料の ϵ_r , $\tan\delta$, R_s を計算する。

4. 自動測定プログラム - SU-Series Program -

モード整合法およびリッツガレルキン法による電磁界解析に基づき、低損失誘電体基板測定用プログラム(SU-PLATE、SU-CYLINDER)および誘電体円柱および導体平板測定用プログラム(SU-ROD)を開発した。表 1 に SU-Series Program の一覧を示す。これらのプログラムは、測定機器を GP-IB により制御する機器制御部と測定結果より複素誘電率または表面抵抗・比導電率等を計算する計算処理部から構成される。また、本ソフトウェアは GP-IB ボードを搭載した HT(HP)-BASIC が動作する Windows パソコン上で使用する。以下では、SU-CYLINDER に限定し、順を追って説明する。

4.1 SU-CYLINDER

SU-CYLINDER は 8 つのプログラムからなっている。表 2 にその構成を示す。ここでは、常温での GaAs 平板の複素誘電率測定を例にとり、その概要を説明する。

4.1.1 ERcav

• 初期設定

測定に使用するネットワークアナライザの選択、データの手動入力の有無、キャリブレーションの有

無等の設定を行う。ちなみに現在、使用可能なネットワークアナライザは、HP8510 系、HP8720 系、HP8757 系の 3 種類である。

• f_0 , Q_u 測定

図 4 に誘電体平板の f_0 , Q_u の測定結果画面を示す。まず、共振器を設置し、ネットワークアナライザ上に TE_{0m1} モードの共振波形を表示する。ここで、TE_{0m1} モードのモード判別には、CHART により作成されるモードチャートを使用する。次に、"SET WAVE"を実行し、ネットワークアナライザを制御し、ネットワークアナライザ上の共振波形を Q_u 測定の最適状態にする。最後に、"DATA IN"を実行すると、中心周波数と 3dB 帯域幅がコンピュータに取り込まれ、負荷 Q , Q_l と Q_u が計算される。これを複数回繰り返し、 f_0 , Q_u の平均値と測定誤差を計算する。

• 計算処理

f_0 , Q_u の測定値と共振器の寸法と比導電率および試料寸法の測定値を入力すると計算処理が行われ、縁端効果を無視した誘電体平板の比誘電率 ϵ_a と誘電正接 $\tan\delta_a$ が求まる。また、それらの平均二乗誤差 $\Delta\epsilon_a$, $\Delta\tan\delta_a$ も求まる。図 5 に誘電体平板の f_0 , Q_u の測定結果画面を示す。ここで入力する共振器の寸法と比導電率は、SIGMA および DandH を用いて測定した値である。

また、縁端効果を考慮した比誘電率 ϵ_r と誘電正接 $\tan\delta$ は、NAESTD にこれらの測定値を入力して、計算する。

表2 SU-CYLINDERの構成

SU-CYLINDER	ERcav	TE _{0ml} モード遮断円筒空洞を用いて、縁端効果を無視した誘電体平板材料の複素誘電率を測定する。
	ERonly	TE _{0ml} モード遮断円筒空洞を用いて、縁端効果を無視した誘電体平板材料の比誘電率を測定する。
	SIGMA	TE _{0mp} モードを用いて、導体円筒空洞の比導電率を測定する。
	DandH	TE _{nmp} と TE _{nmq} モードを用いて、導体円筒空洞の寸法を測定する。
	CHART	誘電体円板を挿入した円筒空洞共振器の f_0 対 ϵ_r のモードチャートを作成する。
	ERcav_T	TE _{0ml} モード遮断円筒空洞を用いて、縁端効果を無視した誘電体平板材料の複素誘電率の温度依存性を測定する。
	SIGMA_T	TE _{0ml} モード遮断円筒空洞を用いて、導体円筒空洞の比導電率の温度依存性を測定する。
	NAESTD	測定結果より縁端効果を考慮した誘電体平板材料の複素誘電率を計算する。

4.1.2 SIGMA

• 初期設定・ f_0 , Q_u 測定

ERcav の場合と同様にネットワークアナライザの選択、データの手動入力の有無、キャリブレーションの有無等の初期設定を行う。また、 f_0 , Q_u 測定に関しても ERcav と同様の手順で測定を行う。

• 計算処理

f_0 , Q_u の測定値と共振器の寸法を入力すると計算処理が行われ、測定温度での比導電率 σ_r と平均二乗誤差 $\Delta\sigma_r$ および 20 での値に換算された比導電率 $\sigma_{r(20)}$ が求まる。図 6 に円筒空洞共振器の比導電率の計算結果画面を示す。ここで入力する共振器の寸法は、DandH を用いて測定した値である。

4.1.3 DandH

• 初期設定・ f_0 測定・計算処理

ERcav の場合と同様に初期設定を行う。2 つの共振モードの共振周波数をそれぞれコンピュータに取り込む。その値よりただちに共振器の直径 D と長さ H が計算される。これを複数回繰り返し、これらの平均値と測定誤差を計算する。図 7 に円筒空洞共振器の寸法測定結果画面を示す。

4.1.4 CHART^[7]

• パラメータ設定

図 8 にモードチャート作成時のパラメータ入力画面を示す。測定に使用する円筒空洞共振器の寸法

と誘電体平板材料の厚さ t を入力する。次に、横軸 (ϵ_r)・縦軸 (f_0) の始点および終点とその間隔をそれぞれ入力する。最後に計算点数を入力する。また、横軸が誘電体平板の厚さであるモードチャートも作成可能である。

• 計算処理

入力されたパラメータをもとにモードチャートが作成される。計算にかかる時間は数秒程度である。また、このモードチャートは、プロッターに出力することも可能である。このモードチャートとネットワークアナライザ上に表示される最低次の共振モードを利用することで、測定に使用する TE_{0ml} モードの判別を容易に行うことができる。

4.1.5 ERcav_T

ネットワークアナライザと温度計を制御することで、1K 毎の温度依存性の自動測定を実現している。また、測定結果を横軸温度のグラフとして表示させることができる。本プログラムを用いた測定例は 5 章で述べる。

4.1.6 NAESTD

リッツガレルキン法を用いた厳密解析を行うことで、ERcav、ERcav_T 等による f_0 , Q_u の測定結果から、縁端効果を考慮した誘電体平板材料のミリ波複素誘電率を求める。また、計算にかかる時間は Pentium II 500MHz を用いた場合、1 点あたり、20 秒程度である。

第4回マイクロ波シミュレータワークショップ (2001/09/12 at 神奈川大学)

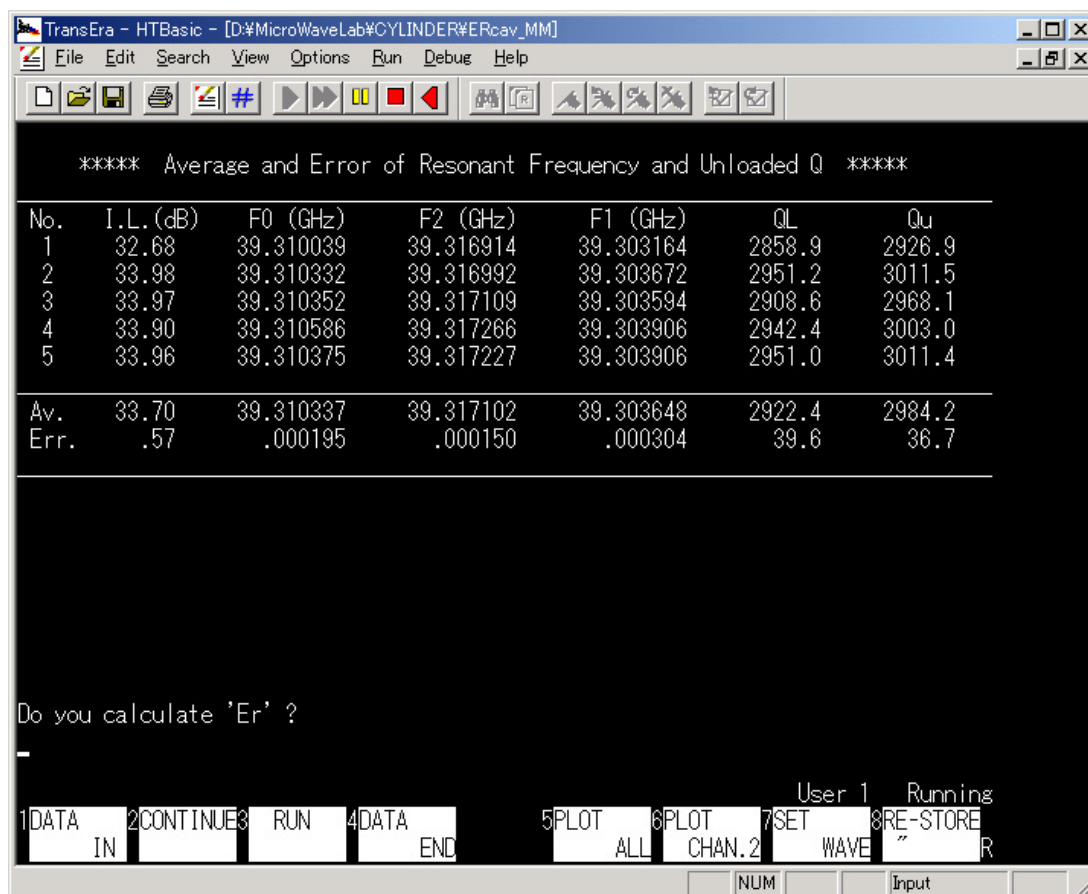


図 4 誘電体平板の f_0 , Q_u の測定結果画面

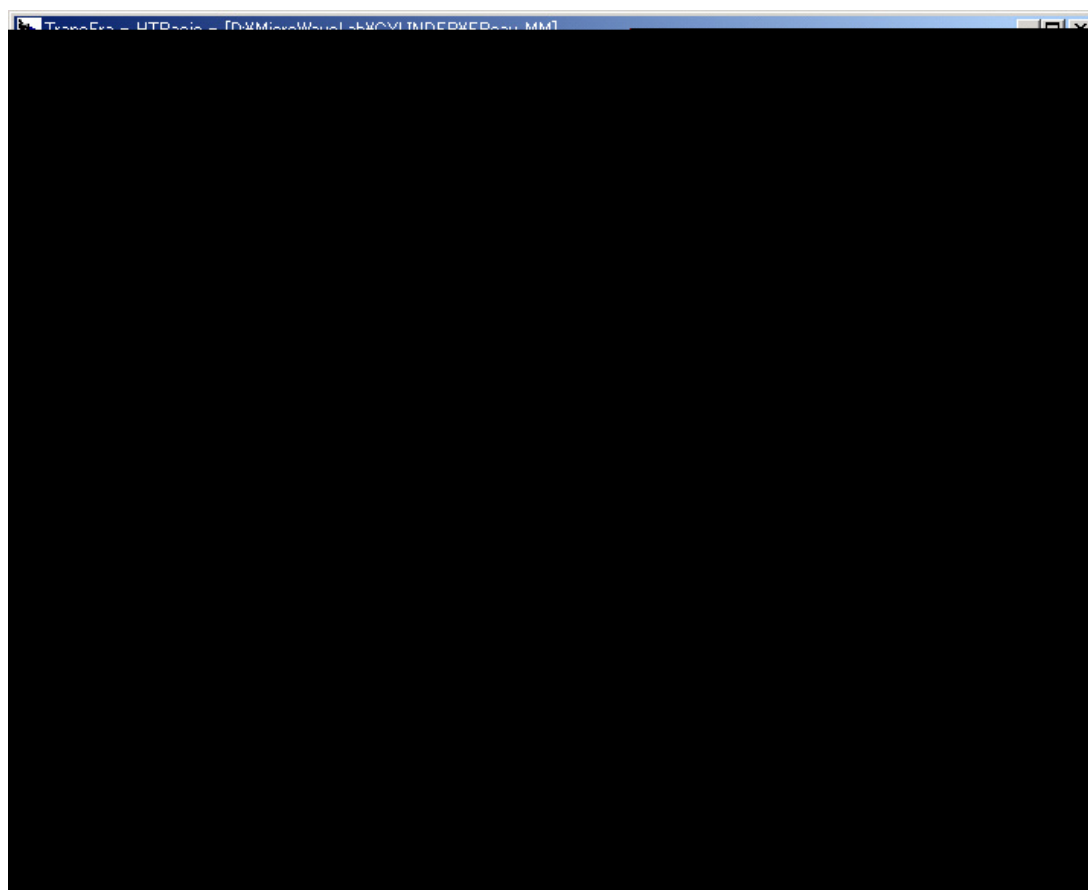


図 5 誘電体平板の ϵ_r , $\tan \delta$ の計算結果画面

第4回マイクロ波シミュレータワークショップ (2001/09/12 at 神奈川大学)

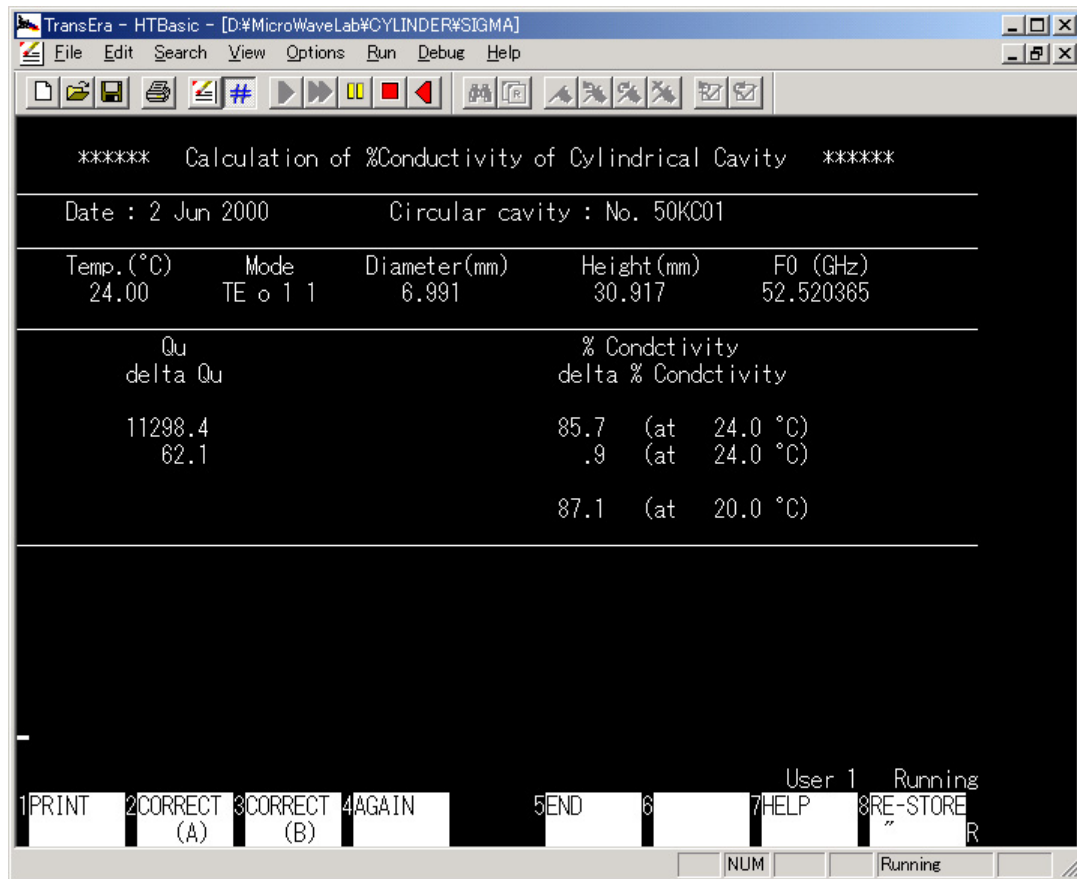


図 6 円筒空洞共振器の比導電率の計算結果画面

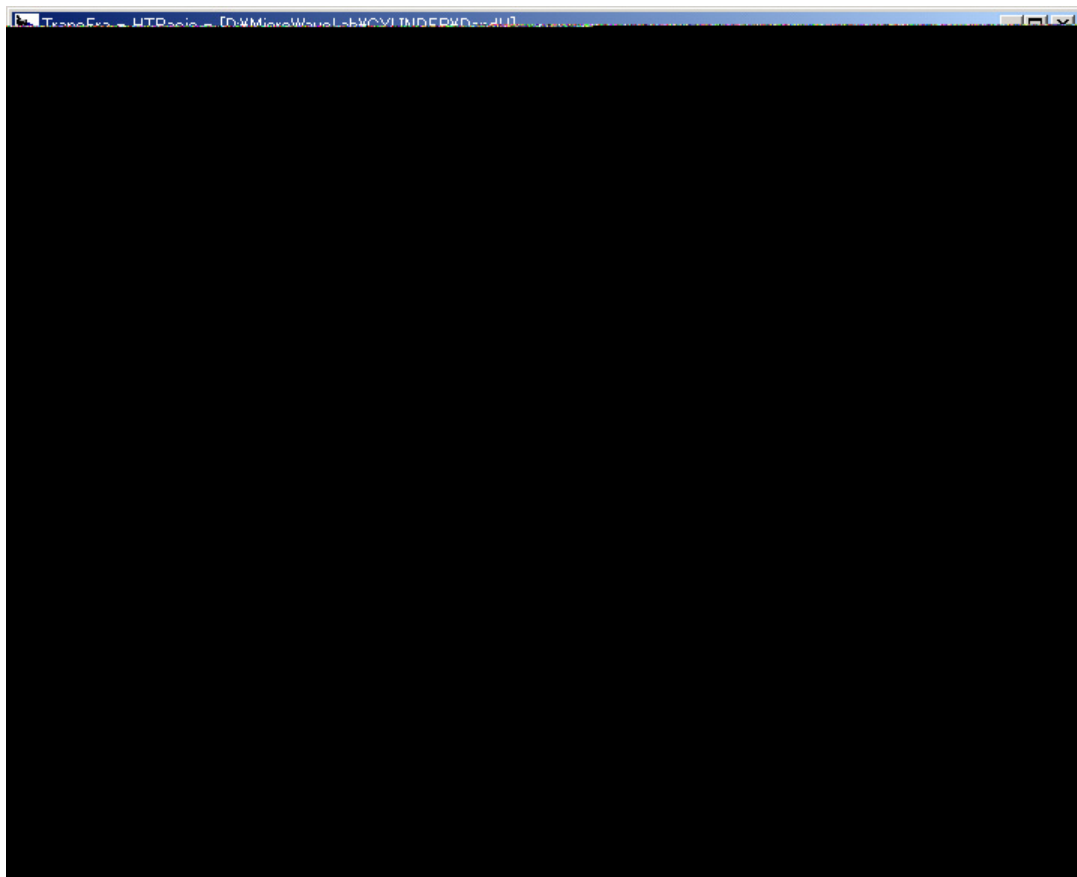


図 7 円筒空洞共振器の寸法測定結果画面

第4回マイクロ波シミュレータワークショップ (2001/09/12 at 神奈川大学)

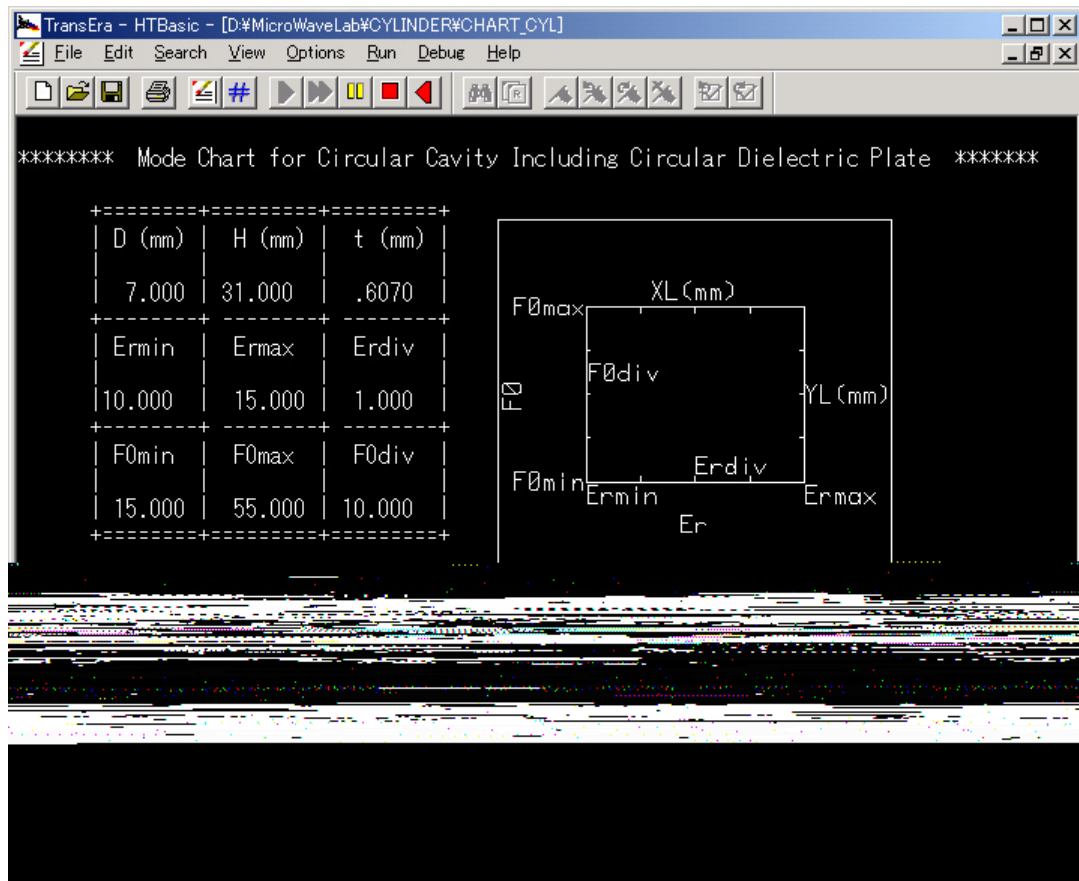


図8 モードチャート パラメータ入力画面

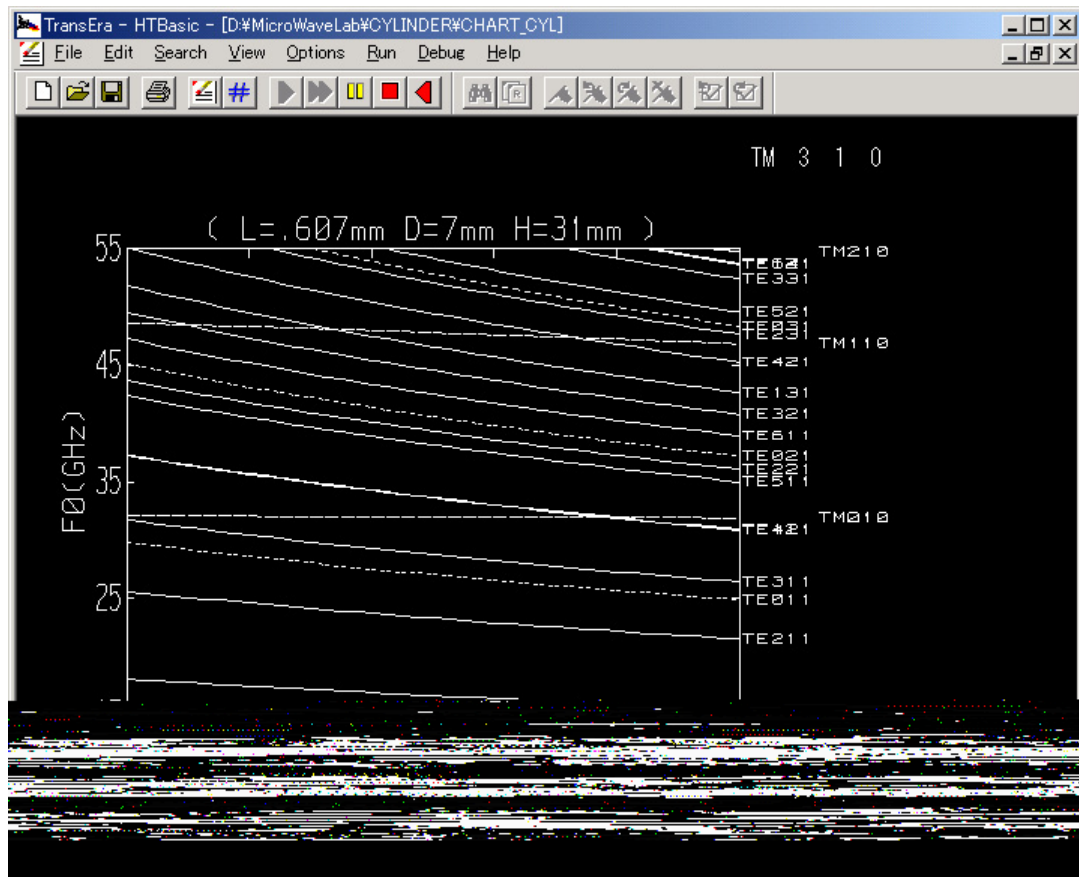


図9 モードチャート 出力画面

5. 温度依存性測定例

5.1 誘電体基板測定

5.2 -SU-PLATE / SU-CYLINDER -

図 10 は SU-PLATE による MgO 基板 (厚さ $t=0.501\text{mm}$ 、熱線膨張係数 $\tau_f=9.4\text{ppm/K}$) の ϵ_r , $\tan\delta$ の温度依存性の測定結果である。また、図 11 は SU-CYLINDER による GaAs 基板 ($t=0.607\text{mm}$ 、 $\tau_f=6.9\text{ppm/K}$) の測定結果である。これより、1K 毎の高精度測定が実現されていることが分かる。

なお、本測定法に関する測定範囲および測定精度は、それぞれ ϵ_r に関しては、 $1.1 \sim 50$ 、 $\pm 0.2 \sim 1.0\%$ であり、 $\tan\delta$ に関しては、 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 、 $\pm 2 \sim 10\%$ である。

5.3 誘電体円柱測定 -SU-ROD -

図 12 は SU-ROD による Sapphire 円柱 ($\tau_f=5.3\text{ppm/K}$) と、YBCO 薄膜(直径 $\phi=51\text{mm}$)の測定結果である。TE₀₁₁ および TE₀₁₃ モード用の 2 つの共振器を用いて 2 誘電体共振器法により測定を行った。この測定では Q_u 値が 800 万程度になるが、本ソフトを用いることにより R_s の高精度測定が可能である。また、低損失なサファイア円柱を用いることにより $R_s < 0.1\text{m}\Omega$ の測定が可能であり、その測定精度は、10%程度である。

なお、本測定法に関する測定範囲および測定精度は、それぞれ ϵ_r に関しては、 $2 \sim 1000$ 、 $\pm 0.2 \sim 0.5\%$ であり、 $\tan\delta$ に関しては、 $10^{-3} \sim 10^{-7}$ 、 $\pm 5 \sim 20\%$ である。

<参考文献>

- [1] 小林, "誘電体共振器、フィルタ、および材料測定の数値解析プログラム", 信学技報, ED99-167, MW99-85, pp.49-54, Aug. 1999.
- [2] Y.Kobayashi, J.Sato, "Complex permittivity measurement of dielectric plates by a cavity resonance method", Papers of Technical Group on Microwaves, Inst. Elect. Inf. Commun. Engns. Jap., EMCJ88-58, MW88-40, pp.43-50, Nov. 1988.
- [3] 加屋野, 榊原, 小林, "空洞共振器法による誘電体平板材料の複素誘電率の温度特性の自動測定", 信学技法, MW91-75, pp.117-124. 1991.
- [4] 小林, "マイクロ波・ミリ波帯における誘電体および超電導体材料の標準測定法", 信学技報, MW99-108, pp.1-6, Sept. 1999.
- [5] 吉川, 橋本, 小林, "ミリ波帯における YBCO 薄膜の表面抵抗測定", 信学技法, MW2000-80, pp.35-40. Aug. 2000.
- [6] T.Shimizu, Y.Kobayashi, "Millimeter wave measurements of temperature dependence of complex permittivity of GaAs plates by a circular waveguide method", 2001 IMS. Digest, THIF-51, pp.2195-2198, Jun. 2001.
- [7] G.Zhang, Y.Kobayashi, "Complex permittivity measurement of unknown dielectric plates by the cavity resonance method", ICEMI'97, Oct. 1997.

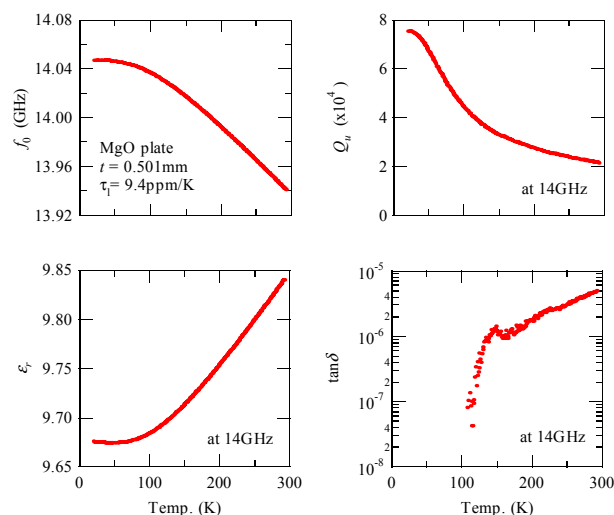


図 10 SU-PLATE による MgO 基板の測定結果

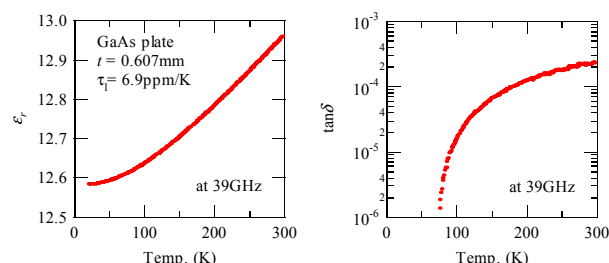


図 11 SU-CYLINDER による GaAs 基板の測定結果

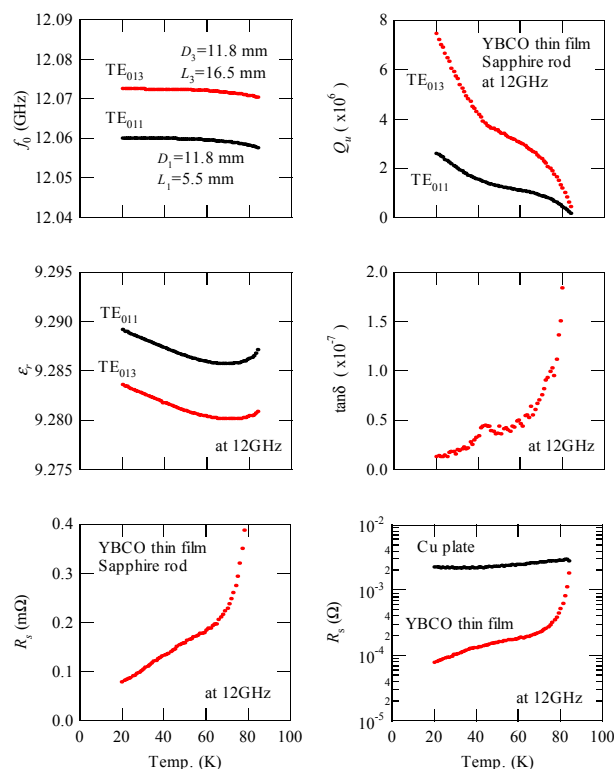


図 12 SU-ROD による Sapphire 円柱と YBCO 薄膜の測定結果