

CN5-(6) マイクロ波基本測定

v11.6 Aug.2019

【目的】

マイクロ波測定の基本原理を理解し、空洞周波数計によるマイクロ波発振周波数の測定、定在波測定器による定在波パターンならびにマイクロ波負荷インピーダンスの測定方法を習得する。

【原理】 [1]-[10]

・発振周波数の測定

マイクロ波帯の周波数測定には**スペクトラムアナライザ**を使用するのが一般的であるが測定器が高価である。これに対して、**空洞周波数計**は精度がやや劣るものの、安価に周波数測定を行うことができる。一例として、伝送路の途中に取り付けられた空洞周波数計の断面図とその回路モデルを図1に示す。結合孔を通して空洞に入った電磁界が**半波長共振**を起こすとき、図1右のように入射側から見込んだインピーダンスはゼロになる。このとき入射波は電源側に**全反射**されるため、透過量がゼロになるときの空洞周波数計の寸法 d が求めれば、(1)より共振周波数を理論的に計算できる。

$$f = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{1.841}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{d}\right)^2} \quad (1)$$

ただし、 c は光速、 d は空洞共振器の深さ、 a は空洞共振器の半径であり、 TE_{111} モードの場合を示す。

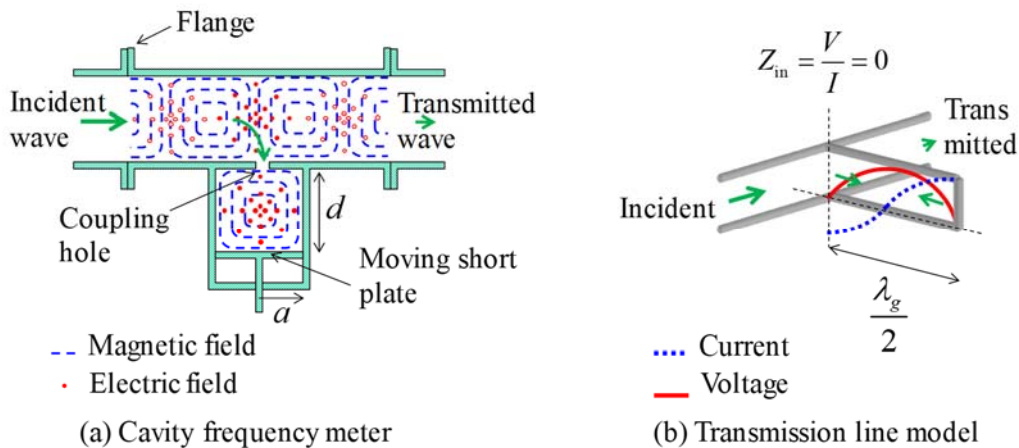


図1. 空洞周波数計の断面図と伝送線路モデル

・定在波パターンの測定

図2左のように導波管の中央にスロットを切り、ここから導波管内にプローブを挿入して内部電界を検出する。プローブに接続された検波器によって整流された信号は微弱なため、増幅器を挿入して指示計を振らせる。導波管 TE_{10} モードでは、スロットを横切る壁面電流成分が存在しないため、スロットは伝送特性に大きな影響は与えない。しかし、挿入したプローブは図2右に示すような伝送路途中に**並列キャパシタンス**を発生させる。このようなキャパシタンスの影響が無視できると仮定して伝送線路理論に従うと、電源を基準とした定在波の瞬時波形および、負荷面を基準にした定在波パターンは(2)となり、その**包絡線パターン**は(3)で与えられる。ただし、 θ は反射係数 Γ の位相角度である。

$$V(z) = e^{j(\alpha - \beta z)} + \Gamma e^{j(\alpha + \beta z)}, \quad (2)$$

$$|V(l)| = \left| 1 + \Gamma e^{j(\theta - 2\beta l)} \right| = \sqrt{1 + |\Gamma|^2 + 2|\Gamma| \cos(\theta - 2\beta l)} \quad (3)$$

(3)を用いて、最大点(腹)を基準として dB 表示した定在波パターンの一例を図3左に示す。定在波は管内波長の半分 $\lambda_g/2$ ごとに周期的に繰り返される。このパターンから管内波長 λ_g を求めることができる。また管内波長が求まると、空洞周波数計を使わなくても導波管内波長 λ_g と自由空間波長 λ_0 の関係式から発振周波数を逆算できる。

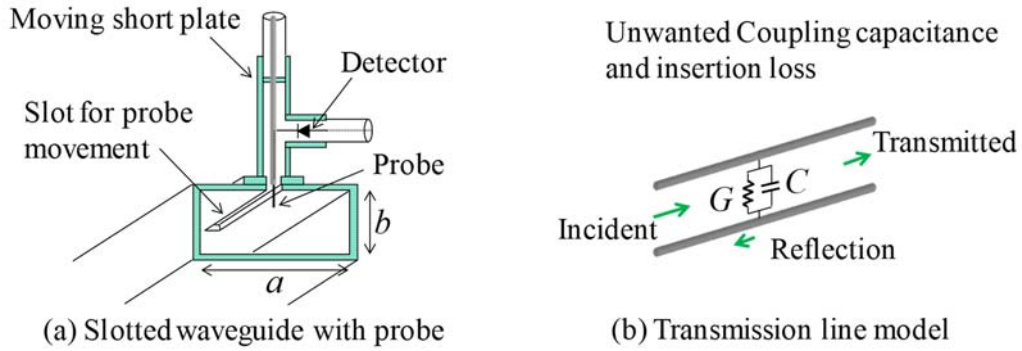


図2. 定在波パターン測定器の構造(左)とプローブ挿入導波管の伝送線路モデル(右)

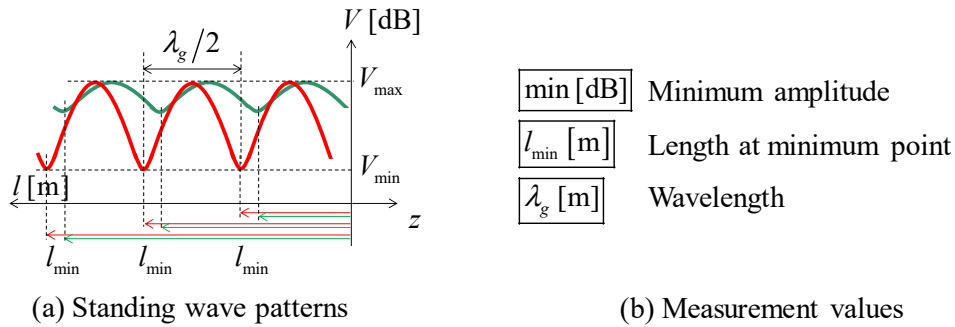


図3. 定在波パターンの例

・負荷インピーダンスの導出

測定した定在波パターンの最小絶対値 $|\text{Min}[\text{dB}]|$ を(4)に代入すると、定在波比 VSWR が求まる。

$$\text{VSWR} = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|} = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = 10^{\frac{|\text{Min}[\text{dB}]|}{20}} \quad (4)$$

次に求めた VSWR を(5)に代入すると反射係数の絶対値が求まる。※ VSWR は略して SWR や VS とも呼ぶ。

$$|\Gamma| = \frac{\text{VSWR} - 1}{\text{VSWR} + 1} \quad (5)$$

一方、測定した定在波パターンの最小点の位置 $l_{\min}[\text{m}]$ を(6)に代入すると、反射係数の位相角度が求まる。

$$\theta = \pi + 2\beta \left(l_{\min} + \frac{n}{2} \lambda_g \right) \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

さらに(5)と(6)から複素反射係数が求まる。

$$\Gamma = |\Gamma| e^{j\theta} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{z_L - 1}{z_L + 1} \quad (7)$$

複素反射係数が求まると、(8)から負荷インピーダンスが求まる。 Z_0 は線路の特性インピーダンスで通常は 50Ω とする。

$$z_L = \frac{Z_L}{Z_0} = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \quad (8)$$

【測定系】

図4に周波数測定ブロック図を示す。また、図5に定在波パターン測定ブロック図を示す。発振器から出力されたマイクロ波は入力レベル調整用の抵抗減衰器を通して定在波計に送られる。空洞周波数計は定在波パターン測定時には不要であるが、空洞寸法が共振点から外れていれば接続されていても伝送特性に影響はない。そして負荷で反射された反射波は入射波と干渉してスロット導波管内部に定在波パターンをつくる。アイソレータは負荷で生じた反射波が再び負荷側へ戻る多重反射を防ぐほか、発振器へ反射波が戻ることにより発振周波数が変動するのを防ぐ役目がある。プローブで受信した高周波電圧はプローブ内部に埋め込まれた検波器を通して定在波増幅器へ送られる。直流増幅に比べると交流増幅の方が簡単のため、増幅器は 1 kHz

の狭帯域増幅回路になっている。このため、図5の測定系では正弦波発振出力に1 kHzのパルス変調が加えられている。FET発振器の代わりにSGを使用する場合は、周波数9.3 - 9.6 GHz, +10 dBm, 1 kHz pulse mod. とする。

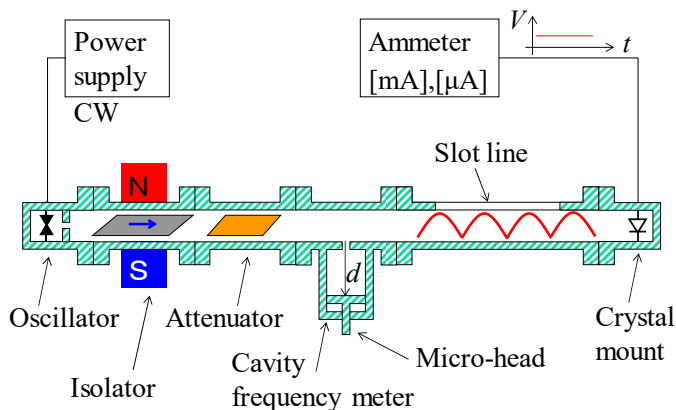


図4. 周波数測定回路

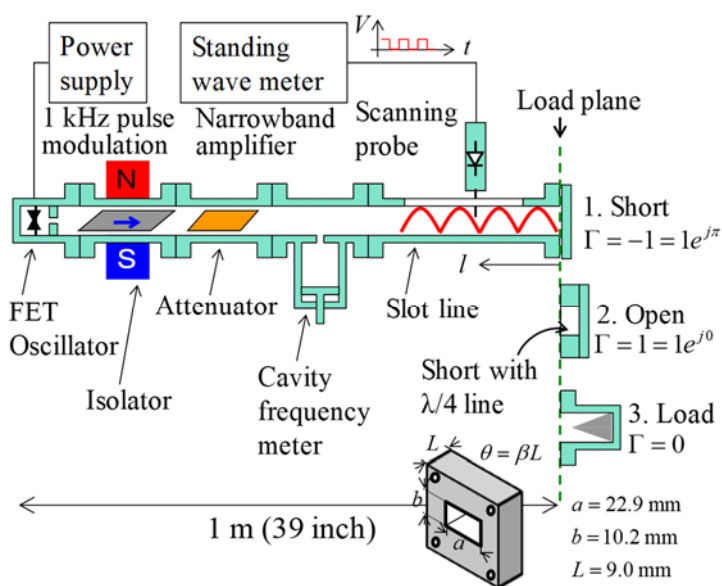


図5. 定在波パターン測定回路

【機材】

- (1) 教材用マイクロ波実験装置 島田理化 14T150A(発振器, 可変抵抗減衰器, 空洞周波数計, アイソレータ, 定在波測定器, クリスタルマウント, 定在波増幅器, 短絡負荷, 整合負荷, ストレート導波管を含む)
- (2) 直流電流計 3 mA, 0.1 mA
- (3) スミスチャート作図用の定規とコンパス

【注意】

- (1) 高周波回路部品は非常に高価なので細心の注意を払って測定を行うこと。特に振動や衝撃を与えないようにすること。
- (2) 導波管フランジを接続する際, 保護ワッシャーを両側に挟んでからナットを付け, ネジは締めすぎないこと。
- (3) 測定器の電源は一旦 ON にしたら, すべての実験が終了するまで ON のままにしておくこと。電源を OFF にすると発振器内部の半導体温度が下がり発振周波数が不安定になる。
- (4) 定在波測定器の増幅度を 30 dB 以上にしたとき, 測定レベルが非常に高感度となっているため, 指針が右一杯に振り切れないように注意すること。
- (5) 事前に付録の英文例題を読解してくること。

【レポート】

- (1) 実習結果や測定結果に関する表やグラフは必ず各自で作成すること。
- (2) 実験テキストのワードファイルはダウンロードできるが、原理と測定系の単なるコピー貼り付けは不可です。式の導出過程等を確認して自分のレポートを作成すること。
- (3) 実験テキストの誤植・ミスや分かりにくかった部分の改善案提示など、今後の学生実験にとって有益なアドバイスがあれば加点する。

【1. 測定】

1-1. 発振周波数の測定

- (1) <http://www.cn.kagawa-nct.ac.jp/~kusama/> の実験の中のマイクロ波定在波測定から、エクセルシート .xlsm をデスクトップに保存する。その中にあるワークシート「発振周波数測定」を開く。
- (2) 図4の周波数測定回路を組む。負荷に水晶マウントを接続し、同軸線で直流電流計と接続する。電流計の端子は赤を3 mA, 黒を+にする。水晶マウントは鉱石検波器と呼ばれ、交流マイクロ波信号を直流に変換する整流機能を有する。
- (3) 表1のように測定器の初期設定を行う。
- (4) 空洞周波数計のマイクロヘッドをゆっくり回して検波出力(直流電流)が急峻に低下する点(共振点)を探してエクセルワークシート上で共振特性を確認する。電流変化が鈍いところは粗く、電流変化が激しいところは細かくデータを取るように工夫すること。なお、空洞周波数計の共振特性は非常に鋭い。マイクロヘッドをはやく回しすぎると共振点を見逃すことがあるので注意しながら測定すること。
- (5) ペアで測定する際には、記録者はエクセルでグラフプロットしながら測定者に欲しいデータポイントを指示すること。
- (6) 最大の降下点を与えるマイクロメータの目盛りを読み取り、ワークシート「校正表」から発振周波数を求める。
- (7) 共振時のマイクロメータの目盛と発振周波数の値をワークシート内の空欄に記入する。
- (8) スペアナで高周波を直接測定し、空洞共振器で測定した発振周波数と比較する。

表1. 測定器の初期設定

	装置	初期設定	備考
1	発振器電源	MODSELECTOR を CW モード	常時 ON
2	可変抵抗減衰器	白いバーの一番下側の目盛を 2	
3	空洞周波数計	マイクロメータの目盛を 0	
4	直流電流計	フルスケールの 50-70 %	可変抵抗減衰器で調整

表2. 周波数測定結果

	マイクロメータ の目盛 d [mm]	直流電流 [mA]	共振時のマイ クロメータの 目盛 [mm]	校正表から読 み取った発振 周波数 [GHz]	スペアナの 周波数 [GHz]	SG 発振周波数 [GHz]
1						
2					スペアナ電力 [dBm]	SG 変調方式 と変調周波数
3						
4						
5						

1-2. 定在波パターンの測定

- (1) 先に保存した測定データシートの中のワークシート「定在波パターン測定」を開く。
- (2) 図5の定在波パターン測定回路を組む。負荷は3種類あるが、ア)短絡(負荷に短絡板を取り付ける)、イ)開放(負荷にλ/4

ラインを挟んで短絡板を取り付ける), **ウ) 整合** (負荷に整合導波管を取り付ける) の順序で各測定グループが1つずつ分担して測定する。時間の都合上, 3つの測定結果を共有してよい。

- (3) 図6示すように導波管の内寸 a をノギスで測定する。また, $\lambda/4$ ラインの物理長 L を測定する。なお, 電気長は $\theta = \beta L$ で与えられ, 位相定数 β は式(10)で与えられる。測定結果を表3に記録する。
- (4) 表4に示すように測定器の初期設定を行う。
- (5) 走査プローブを左右に動かして指針が最大になる場所を探す。 $\lambda/2$ 毎に周期性があるのでどこでもよい。
- (6) 最大値が得られるプローブの位置を保持したまま, 図7に示す Coarse と Fine の 2種類の GAIN を調整して指針を右下端の最大値 0 dB に一致させる。これを 0 dB 校正と呼ぶ。GAIN を調整しても 0 dB に達しない場合は可変抵抗減衰器を調整する。0 dB に達したら手順(9)に進む。
- (7) 図7に示すように右端の指針が 0 dB を超えるときは, 定在波増幅器の Coarse と Fine の 2種類の GAIN を調節して 0 dB を超えないように調整する。はじめから 0 dB を超えない場合は次のステップに進む。
 ※上記の手順を実施しても 0 dB に達しない場合は, 最終手段としてプローブ挿入長を調整する。ただし, プローブ挿入長を大きくするほど導波管内部の電界測定環境を大きく乱すことにつながるので注意が必要である。
- (8) 0 dB 校正が一旦完了したら走査プローブを導波管に沿って動かし, 1-3. の説明を参考に図3左の定在波パターンが描けるようデータ間隔を工夫しながらプローブ位置[mm]と振幅[dB]を記録する。なお, 最小点データは 4 つ必要となる。例えば, 定在波増幅器の値が 0 dB, -3 dB, -10 dB, -20 dB, -min dB を指示したときのプローブ位置を読み取るようにすると比較的早く楽にデータが取れる。整合の場合はパターン変化が小さいので, 増幅レンジの Expand を使用する。
- (9) 終了時は増幅レンジを 20 dB, Normal に戻す。

表3. 導波管寸法(測定する寸法は図6参照)

導波管内寸 (a > b)		$\lambda/4$ ラインの物理長	$\lambda/4$ ラインの電気長
a [mm]	b [mm]	L [mm]	$\theta = \beta L$ [rad]

表4. 測定器の初期設定

装置	初期設定	備考
1 発振器電源	MODSELECTOR を INT モード	常時 ON。SG を使う場合は 1 kHz のパルス変調をかけ, 入力電力を 0 dBm にする。
2 可変抵抗減衰器	白いバーの一番下側の目盛を 2	必要に応じて調整する。
3 空周周波数計	マイクロメータの目盛を 0	共振点から外しておけば何でもよい。
4 定在波増幅器	RANGE dB を 20 dB dB フルスケールの 40-60 %	常時 ON, Coarse / Fine で GAIN を調整する。※整合時のみ 30 dB で EXPAND 0

表5. 定在波パターン測定例(エクセルでグラフを描画しながらデータ取得する)

	負荷:短絡		負荷:開放		負荷:整合	
	プローブ位置 [mm]	定在波増幅器 の指示[dB]	プローブ位置 [mm]	定在波増幅器 の指示[dB]	プローブ位置 [mm]	定在波増幅器 の指示[dB]
1	100		100		100	
2	101		101		101	
...	
	190		190		190	

1-3. メータ読み方の注意(図7の詳細説明)

- (1) 図7右上に示す GAIN は増幅度をコントロールするつまみであり, **Coarse と Fine の 2種類**がある。
- (2) 図7左下に示す dB 指示値が -10 dB より小さくなった場合, そのままでは値を読めないなので, 増幅度 RANGE dB を 10 dB

上げて指示値から 10 dB 引き算して補正する。例えば、-20 dB 以下の場合 RANGE dB を 20 dB 上げて指示値から 20 dB 引く。

- (3) 整合負荷の場合はメータの変化が少なく、指示値はほぼ 0 dB から-2 dB の間にあるので、読み取り精度を上げるために EXPAND を 0 に変更して 1 番上の dB スケールを読み取る。
- (4) 周期的に現れる最大値は、0 dB 校正後は常に 0 dB に収束するはずであるが、発振器の出力変動によって 0 dB を超える場合がある。このときは測定値を 0 dB として許容するか、増幅度を 10 dB 落として + dB で記録する。

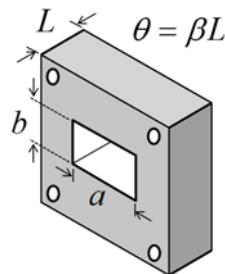


図 6. $\lambda/4$ ライン導波管寸法の測定

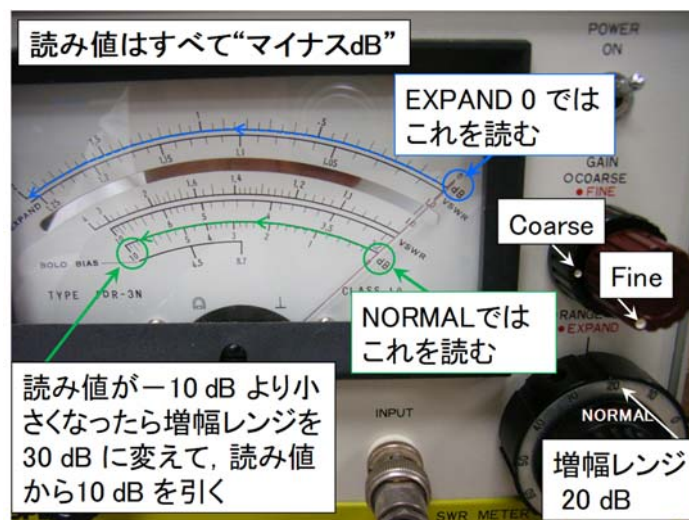


図 7. 定在波測定器のメータの読み方(1-3. 参照)

【2. シミュレーション】

2-1. Gnuplot による定在波パターンの可視化

定在波パターンをアニメーションで可視化するスクリプトを作成する。Linux で gnuplot(グニュープロット)というグラフ描画ソフトを使用する。

! Linux 操作方法が分からない場合は、ホームページ上の Linux 使用説明書を読むこと

<http://www.cn.kagawa-nct.ac.jp/~kusama/standard/standard.html>

→ Linux 標準類 → 端末操作と Emacs の使い方 および Gnuplot と tgif の使い方

(1) スクリプトの記述と保存方法

端末を開いて次のコマンドを入力する。Emacs(イーマックス)というエディタが起動する。ファイル拡張子は.gnu にする。

```
$ emacs plane_wave.gnu animation.gnu &
```

2つのファイルに、それぞれ表6と表7の内容を記述して保存する。コメントは入力しなくてよい。保存はショートカット `Ctrl + x s` キーまたは、ファイルメニューの **上書き保存** をマウスで選択する。

(2) スクリプトの使い方

記述した2つのスクリプトファイル `plane_wave.gnu` と `animation.gnu` を同じフォルダの中に置く。確認方法は、端末上で次のコマンドを入力する。次のように二つのファイルが確認できればOK。青字/ はフォルダを表す。

```
$ ls
```

```
Desktop/ plane_wave.gnu animation.gnu
```

次に、グラフ描画ソフト“gnuplot”を起動する。起動方法は端末上で次のコマンドを入力する。

```
$ gnuplot
```

Gnuplot というソフトウェアが立ち上がり、プロンプトが“\$ → gnuplot>”にかわるので、この状態で次のように入力する。

```
gnuplot> load 'plane_wave.gnu'
```

と入力する。そして、

```
Hit "Enter key" to start animation. . .
```

と表示されるのでその指示に従って、端末上で Enter キーを入力すればアニメーションがスタートする。

(3) 停止方法

連続描画を停止するときは、スクリプトを読み込んだ端末上(最後に Enter を押した端末)で Ctrl+c キーを押す。立ち上げたソフトウェア自体を終了させる場合は、次のように q (quit の略) を入力する。

```
gnuplot> q
```

(4) 実習事項

(ア) 反射係数の値(振幅と位相)を変えていろいろな定在波パターンを描画してイメージを掴む。実際に測定できるのは緑色のパターンだけである。実測する $\Gamma=1$ (短絡), $\Gamma=+1$ (開放), $\Gamma=0$ (整合) や $\Gamma=0.2, 0.8$, および、絶対値が 1 を超えない複素数(例えば $0.3-j0.5$) などを試してみる。描画結果のうち緑色のエンベロープのみ観察シートに描け。例えば、反射係数を $\Gamma=1$ とした場合、式(7)より $\Gamma=\Gamma e^{j\theta}$ であるから、 $|\Gamma|=1, \theta=\pi$ となる。

(イ) 定在波とエンベロープの描画に加え、入射波と反射波の様子も観察できるようにスクリプトを改良して考察せよ。ヒント: 例えば、plot x, exp(x), log(x), 1/x とすれば $y = x, e^x, \log(x) = \ln(x), 1/x$ の 4 つの関数を同時に描画できる。即ち、plot コマンドは最初の 1 回だけで、あとは描画したい関数をカンマで区切って入力すれば複数の関数を同時に描画してくれる。その他の Gnuplot 組み込み関数についてはウェブ検索すればより詳しい情報が掲示されている。

(5) 終了手続き

実習事項を確認したら、まず emacs を終了し、次に端末を使用する人のために記述した 2 つのスクリプトファイル(バックアップファイルの~も)を削除する。rm コマンドは remove の略である。

```
$ rm plane_wave.gnu* animation.gnu*
```

次のように、バックアップ ~ も含めて 2 つのファイルが削除されていることを確認できれば OK。

```
$ ls
```

```
Desktop/
```

表 6. スクリプト plane_wave.gnu の中身（静止画像を描画するためのスクリプト）

PDF をコピー＆ペーストする場合は、`と`の違い、`と`の違い、`と`の誤変換に注意！

# plane_wave.gnu	行頭の # はコメント行を表す
j=sqrt(-1)	# 虚数の定義
pai=acos(-1)	# π : 円周率
freq=10.0e9	# f : 周波数 [Hz]
cvel=3.0e8	# c: 光速 [m/s]
w=2.0*pai*freq	# ω : 角速度 [rad/s]
b=w/cvel	# β : 位相定数 [rad/m]
g= - 0.5	# Γ : 反射係数(実習ではこれを変化させる)
set yrange [-3:3]	# グラフ y 軸の表示範囲の設定
set xrange [-0.05:0.05]	# グラフ x 軸の表示範囲の設定
set samples 1000	# グラフを構成する点の数の設定
set grid	# グラフ背景にグリッド線をつける
t=0.0	# 初期時刻を 0 秒に指定する
plot real(exp(j*(w*t-b*x))+g*exp(j*(w*t+b*x))) with line,	# 定在波(入射波+反射波)を線で描く
abs(1.0+g*exp(2.0*j*b*x)) with line lw 3	# エンベロープを太い線で描く
pause -1 'Hit Enter key to start animation...'	# Enter が押されるまで待機する
load 'animation.gnu'	# animation.gnu を読み込む
← # “注” 最後の行に改行を入れておくこと。	

このバックスラッシュは
改行記号であり、日本語
キーボードの ¥ と同じ

表 7. スクリプト animation.gnu の中身（静止画像を動かすためのスクリプト）

# animation.gnu	行頭の # はコメント行を表す
t=t+1/freq/50	# 時間を 1 周期の 1/50 だけ進める
# pause 0.1	# PC 処理速度に応じて数値を適当に増やす
replot	# 直前の plot コマンドの内容を再描画
reread	# 直前の load コマンドの内容を再読み込み
← # “注” 最後の行に改行を入れておくこと。	

【3. 計算】

3-1. エクセルによる負荷インピーダンスの導出

原理の式(1)-(8)を用いて正規化インピーダンスを手計算で行うことは効率的ではない。時間の制約があるため、図 8 のようなワークシート計算表をはじめに作っておく。本実験で必要となるのは「C3 番から C23 番」の計算である。ただし、色付けされた部分は測定した数値を直接入力する部分である。データの表示形式や桁数も例題とできるだけ合わせる。計算式の幾つかを表 8 に示す。ケアレスミスを防ぐために単位系は mksA に統一する。

- (1) <http://www.cn.kagawa-nct.ac.jp/~kusama/> の実験の中のマイクロ波定在波測定からエクセルシート .xlsm をデスクトップに保存する。そしてその中にあるワークシート「インピーダンス計算」を開く。
- (2) 表 8 の計算式を C 列に入力して例題の正規化インピーダンスを計算する。例題の値である $\lambda_g=4.0$ cm, VSWR=1.5, $l_{min}=1.48$ cm を入力したとき、最終的な解が $Z_L=47.3+j19.7\Omega$ (50 Ω 系) となることを確認せよ。
- (3) これができたら C 列を E, F, G, H, I, J 列にコピーし、色付け部分を空白にしておく。
- (4) 完成したら、ファイル名に自分の名前と日付を付けてデスクトップに保存して終了する。

表 8. 入力するエクセル計算式の一例

光速 = 3e8, または =3*10^8, または =3*power(10,8) (注)エクセルで数式入力するには必ず=(イコール)を入れる

円周率 = PI(), または, =ACOS(-1), または =3.141592 (注)エクセルの組込み関数に大文字・小文字の区別はない

測定数値(発振周波数) ← 例題の場合 =9.958e9

測定数値(導波管横幅) ← 例題の場合 =22.9e-3

自由空間波長 = 考えよ

管内波長 = 式(9)

測定数値(管内波長) ← 例題の場合 =4.0e-2

位相定数 = 式(10)

測定数値(VSWR) ← 例題の場合 =1.5, 測定では =10^(|最小[dB]|/20)

測定数値(最小点の位置) ← 例題の場合 =14.8e-3

波長規格化長さ = 長さ/管内波長(測定値)

反射係数の絶対値 = 式(5)

反射係数の位相角度(ラジアン) = 式(6)

反射係数の位相角度(度) = 考えよ

反射係数の実部 = 考えよ

反射係数の虚部 = 考えよ

正規化負荷インピーダンスの実部 = 式(8)を参照 (ヒント:有理化して実部と虚部に分ける)

正規化負荷インピーダンスの虚部 = 式(8)を参照

負荷インピーダンスの実部 = 式(8)において特性インピーダンス $Z_0=50\Omega$ とする

負荷インピーダンスの虚部 = 式(8)において特性インピーダンス $Z_0=50\Omega$ とする

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	v 6.3e Jan2012	Impedance calculation sheet			Input measured data or theoretical values in colored cell					
2			Example 2.4		Short(meas.)	Short(theory)	Open(meas.)	Open(theory)	Load(meas.)	Load(theory)
3	Light velocity [m/s]	c	3.00E+08		3.00E+08	3.00E+08	3.00E+08	3.00E+08	3.00E+08	3.00E+08
4	Pai	π	3.141593		3.141593	3.141593	3.141593	3.141593	3.141593	3.141593
5	Frequency [Hz]	f	9.958E+09							
6	Waveguide width [m]	a	0.02290							
7	Freespace wavelength [m]	λ_0	0.03013		#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
8	Guided wavelength [m] (calc.)	λ_g	0.04000		#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
9	Compare "C8" with "C10". If large difference is obtained, it is a measurement error.		↑ Compare ↓		↑ Compare ↓	↑ Compare ↓	↑ Compare ↓	↑ Compare ↓	↑ Compare ↓	↑ Compare ↓
10	Guided wavelength [m] (meas.)	λ_g	0.04000							
11	Phase constant [rad/m]	β	157.08		#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
12	Voltage standing wave ratio	SWR	1.50							
13	Voltage minimum length [m]	l_{min}	0.01480							
14	Normalized length l_{min}/λ_g	l_{min}/λ_g	0.370		#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
15	Absolute reflection coeff.	$ \Gamma $	0.200		-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000
16	Phase angle of Γ [rad]	θ	7.791		#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
17	Phase angle of Γ [°]	θ	86.40		#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
18	Real part of Γ	Re[Γ]	0.013		#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
19	Imaginary part of Γ	Im[Γ]	0.200		#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
20	Real part of normalized impedance [Ω]	Re[z_L]	0.95		#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
21	Imaginary part of normalized impedance [Ω]	Im[z_L]	0.39		#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
22	Real part of impedance [Ω]	Re[Z_L]	47.30		#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
23	Imaginary part of impedance [Ω]	Im[Z_L]	19.67		#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
24					* If "C3-C23" is copied to "E3-J23", then relative equations are copied too.					

図 8. インピーダンス計算シートの一例。測定値(周波数, 導波管寸法, 管内波長, VSWR, l_{min})を入力すると、負荷インピーダンスが自動計算される。

3-2. 定在波理論パターンの描画

式(3)を使い、横軸に負荷面からの距離[mm] $100 < x < 190$ 、縦軸に電圧 V [dB] $-50 < V < 0$ をとって3種類の理論パターンを描画せよ。ただし、周波数は9.4 GHzとし、導波管断面寸法は $a=22.9$ mm, $b=10.2$ mm で TE₁₀ モード伝送とする。自由空間波長を $\lambda_0 = c/f$ (c はラテン語で光速を意味する *celeritas* の頭文字) とすると、理論的な管内波長 λ_g は(9)、位相定数 β は(10)で与えられる。 Γ と θ の理論値は表9を参照すること。

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - (\lambda_0/2a)^2}} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g} \quad (10)$$

$ \Gamma =$	x [mm]	$y = f(\Gamma , \theta, \beta, x)$	$20 \log_{10}(y/y_{\max})$
$\theta =$	100	$= \sqrt{1 + \Gamma ^2 + 2 \Gamma \cos(\theta - 2\beta x)}$	$= 20 \log_{10}(y/y_{\max})$
$\lambda_g =$	101	数式コピー	数式コピー
$\beta =$	102		
	⋮		
	⋮		
	⋮		
	190	※数式をコピーする際に x のみ相対参照とし、 $ \Gamma , \theta, \beta$ は絶対参照にする。	

図9. 理論パターン描画用のエクセルシート作成例。 $|\Gamma|$ と θ は数値を入力し、 λ_g と β は数式を入力しておく。

【4. 作図】

4-1. スミスチャートによる負荷インピーダンス導出[4]

図10に示すように反射係数を極表示したスミスチャートを用いても負荷インピーダンスを導出できる。ここでは、付録2の例題2.4からスミスチャート描画に必要なパラメータを抽出し、スミスチャートからインピーダンスを導出する。以下に描画手順を示す。

- (1) VSWR に相当する円の半径を決める。VSWR の値は実軸に目盛られた抵抗分 R/Z_0 の数値に等しい(例題では 1.5)。VSWR > 30 のときはほぼ全反射と考えてよい。当然、VSWR = ∞ のときは完全な全反射である。
- (2) 原点を中心として VSWR に相当する円を描く。
- (3) 左端の最小点を回転の始点とする。
- (4) 始点から波長換算した距離 l_{\min}/λ_g (例題では 0.37) だけ負荷方向へ回転させる。
- (5) 回転させた位置から原点に向かって直線を引き、交点座標を読む。(例題では $z_L=0.95+j0.4$ が得られれば OK)
- (6) 反射・開放・整合の理論値についても、例題と同様にして表9を参考にスミスチャートからインピーダンスを読み取る。

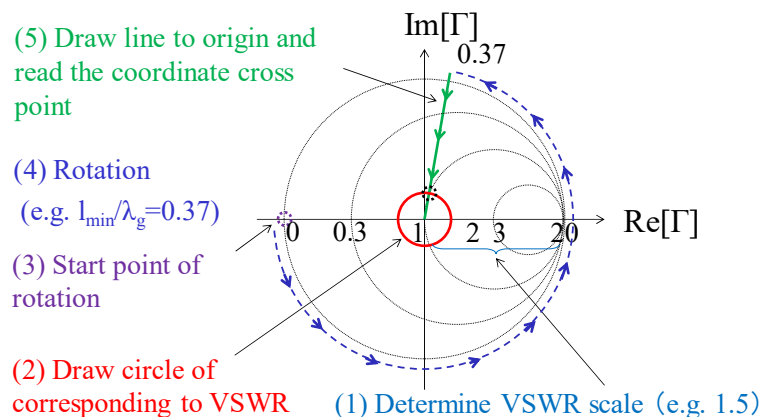


図10. スミスチャートによるインピーダンスの導出。図7のC列の例題では、VSWR=1.5、規格化長さ $l_{\min}/\lambda_g=0.37$ なので、手順通りに交点の座標を読み取ると $z_L=0.95+j0.4$ 程度が得られる。

表 9. 例題および理論値のスミスチャート描画に必要なパラメータ

	Ex. 2.4より抽出	Short (theory)	Open (theory)	Load (theory)	Ref.
$Z_L [\Omega]$	49.3+j19.7	1.000E-10	1.000E+10	50.0000	
Γ	0.0126+j0.1996	-1.0000	1.0000	0.0000	Eq.(6)
$ \Gamma $	0.2000	1.0000	1.0000	0.0000	=ABS(Γ)
VSWR	1.5000	5.000E+11	2.000E+08	1.0000	Eq.(3)
freq [Hz]	N/A	9.300E+09	9.300E+09	9.300E+09	
λ_0 [m]	N/A	0.0323	0.0323	0.0323	=c/freq
λ_g [m]	0.0400	0.0454	0.0454	0.0454	Eq.(9)
β [rad/m]	157.0796	138.2692	138.2692	138.2692	Eq.(8)
θ [°]	86.4000	180.0000	0.0000	0.0000	
l_{min} [m]	0.0148	0.0000	-0.0114	-0.0114	Eq.(5)
l_{min}/λ_g	0.3700	0.0000	-0.2500	-0.2500	

4-2. 測定データ整理

図8のエクセル計算には、表10に示す30個の測定データが必要である。まずエクセルで測定データ整理シートを開き、次の手順でデータ整理をする。

- (1) 測定データ整理シートにすべての値が入力されていることを確認する。
- (2) 周波数は 1-1. 発振周波数の測定 の測定値を記入する。E列からJ列まですべて同じ値でよい。
- (3) 導波管横幅は使用した導波管(Xバンド 8.2 GHz-12.4 GHz)断面 $a \times b$ の長手寸法 a を測定する。
- (4) 管内波長は 1-2. 定在波パターン測定 で得られた最小点 $l_{min}[m]$ と隣り合う最小点 $l_{min}[m]$ の間隔は常に $\lambda_g/2$ になっているので、これを2倍すれば管内波長が得られる(図3参照)。
- (5) VSWR は $=10^{(|Min[dB]|/20)}$ 、ただし $|Min[dB]|$ とは定在波パターンの最小値の絶対値を表す。
- (6) 最小点は周期的に複数存在するが、どれを使っても良いので $|Min[dB]|$ が得られた l_{min} を使用する。
- (7) これらの値を自作インピーダンス計算シートにコピーペーストすると、反射係数とインピーダンスが求められる。
- (8) 最後に表11の形式で結果一覧表を作成せよ。

表 10. 測定データの整理

	測定(短絡)	測定(開放)	測定(整合)	理論(短絡)	理論(開放)	理論(整合)
1 周波数 f						
2 導波管横幅 a						
3 管内波長 λ_g						
4 VSWR						
5 最小点 l_{min}						

表 11. 測定結果のまとめ

	複素反射係数 Γ		正規化インピーダンス Z_L	
	エクセル計算	スミス	エクセル計算	スミス
1 例題 2.4	0.200 86.4°	---	0.95+j0.39	0.94+j0.41
2 測定(短絡)	Excel	---	Excel	作図
3 理論(短絡)	Excel	1.0 180°	Excel	作図
4 測定(開放)	Excel	---	Excel	作図
5 理論(開放)	Excel	1.0 0°	Excel	作図
6 測定(整合)	Excel	---	Excel	作図
7 理論(整合)	Excel	0.0 0°	Excel	作図

【研究事項】（以下から選択）

- (1) 共振周波数の式(1)を導出せよ。
- (2) 理論パターンの式(3)について導出過程を説明せよ。ヒント:複素数 $a + jb$ の大きさは $\sqrt{a^2 + b^2}$
- (3) 実験部品として使用しているマイクロ波回路素子のアイソレータ(磁性体を使う回路素子), 空洞共振器, クリスタルマウント(鉱石検波器)の働きについて調査せよ。
- (4) 負荷の開放を伝送線路理論で考えると, 純粋な LC の並列共振となり, その負荷インピーダンスは $\pm j\infty$ となる。しかしながら, 高周波において負荷に何も取り付けられない状態(物理的な開放)ではインピーダンスに必ず抵抗分 R を生じて反射係数が小さくなる。この理由をアンテナの入力インピーダンスと放射抵抗の観点から説明せよ。
- (5) 定在波パターンを測定する際, 本測定ではマイクロ波を 1 kHz の矩形波でパルス変調している。定在波増幅器の周波数特性の観点からこの理由(直流増幅が難しい理由)を説明せよ。
- (6) スライドの最終頁に掲示されている以下の口頭試問について解答せよ。
 - A) What is a standing wave?
 - B) What is load impedance? What does short, open or load mean in reference to the electric circuit?
 - C) What can it do by Smith chart? Which is the reactance circle? Which is the resistance circle?
 - D) Where is the short, open, load on the Smith chart?
 - E) What is a waveguide? Describe the difference with other transmission lines using an example.

【参考文献】

- [1] C. G. Montgomery, Technique of Microwave Measurements, pp.473-514, MIT Radiation Lab. Series, 1947.
- [2] 香西, 極超短波入門, pp.109-165, オーム社, 1953
- [3] 布施, 高周波基本計測, pp.172-253, コロナ社, 1956
- [4] 鈴木, マイクロ波測定, pp.33-159, コロナ社, 1957
- [5] 大河内, 牧本, マイクロ波測定, pp.33-50, オーム社, 1959
- [6] 牧本, 解説 高周波測定, pp.156-224, オーム社, 1968
- [7] 鈴木, マイクロ波回路の基礎, pp.143-176, 啓学出版, 1971
- [8] 守山, 改訂 高周波計測, pp.71-96, 近代科学社, 1977
- [9] 阿部, マイクロ波, pp. 143-150, 東京大学出版会, 1983
- [10] 江村, 基本電子計測, pp.111-134, コロナ社, 1989
- [11] Pozar, Microwave Engineering, 3rd, pp. 64-72, Wiley, 2005
- [12] 山本, gnuplot の精義 第2版, pp.142-148, カットシステム, 2013

【付録1】演習事項のまとめ（事前課題として付録2の英文例題の読解をしてください。）

1. 実験

- (1) 周波数測定
- (2) 短絡負荷
- (3) 開放負荷($\lambda/4$ オフセット短絡と同じ)
- (4) 整合負荷, または未知負荷

2. シミュレーション

- (1) $\Gamma = -1, +1, 0, 0.2, 0.8$, および $|\Gamma| < 1$ の複素反射係数(例えば, $0.5 + j0.3$ など)を最低1つ含む合計6つ

3. エクセル計算

- (1) 付録2の例題計算
- (2) 定在波理論パターン描画(短絡, 開放, 整合の3つ)

4. 作図

- (1) 作図によるスミスチャートプロット(付録2の例題, 理論×3, 測定×3の合計7つ)
- (2) 付録3のスクリプトを使ったスミスチャートの作成

EXAMPLE 2.4 IMPEDANCE MEASUREMENT WITH A SLOTTED LINE

The following two-step procedure has been carried out with a 50Ω coaxial slotted line to determine an unknown load impedance:

1. A short circuit is placed at the load plane, resulting in a standing wave on the line with infinite SWR, and sharply defined voltage minima, as shown in Figure 2.14a. On the arbitrarily positioned scale on the slotted line, voltage minima are recorded at

$$z = 0.2 \text{ cm}, 2.2 \text{ cm}, 4.2 \text{ cm}.$$

2. The short circuit is removed, and replaced with the unknown load. The standing wave ratio is measured as $\text{SWR} = 1.5$, and voltage minima, which are not as sharply defined as those in step 1, are recorded at

$$z = 0.72 \text{ cm}, 2.72 \text{ cm}, 4.72 \text{ cm},$$

as shown in Figure 2.14b. Find the load impedance.

Solution

Knowing that voltage minima repeat every $\lambda/2$, we have from the data of step 1 above that $\lambda = 4.0 \text{ cm}$. In addition, because the reflection coefficient and input impedance also repeat every $\lambda/2$, we can consider the load terminals to be effectively located at any of the voltage minima locations listed in step 1. Thus, if we say the load is at 4.2 cm , then the data from step 2 shows that the next voltage minimum away from the load occurs at 2.72 cm , giving $\ell_{\min} = 4.2 - 2.72 = 1.48 \text{ cm} = 0.37\lambda$.

Applying (2.58)–(2.60) to this data gives

$$|\Gamma| = \frac{1.5 - 1}{1.5 + 1} = 0.2,$$

$$\theta = \pi + \frac{4\pi}{4.0}(1.48) = 86.4^\circ,$$

so
$$\Gamma = 0.2e^{j86.4^\circ} = 0.0126 + j0.1996.$$

The load impedance is then

$$Z_L = 50 \left(\frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \right) = 47.3 + j19.7 \Omega.$$

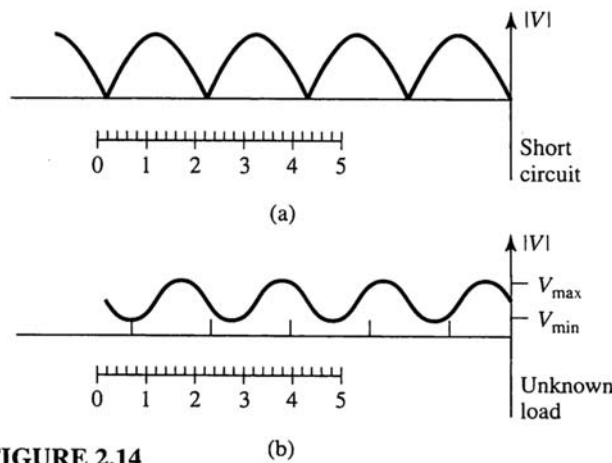


FIGURE 2.14

Voltage standing wave patterns for Example 2.4. (a) Standing wave for short-circuit load. (b) Standing wave for unknown load.

【付録3】 スクリプト smithchart.gnu の中身 [12]

(スミスチャートを描画するためのスクリプト 山本 ``gnuplot の精義 第2 版,’ pp.142-148, カットシステム, 2013)

PDF をコピー&ペーストする場合は `と ` の違い, `と ` の違い, ``と `` の誤変換に注意!

バックスラッシュ \ (または ¥) の後にスペースがあるとエラーの原因になるので注意!

```
#smithchart.gnu
set multiplot
set size square
set xrange [-1:1]
set yrange [-1:1]
set key off
unset border
unset xtics
unset ytics
set parametric
set samples 1000
j={0,1} # imaginary number
#####
# define function
#####
# normalized load impedance
z(r,x)=r+j*x
# reflection coefficient
G(r,x)=(z(r,x)-1)/(z(r,x)+1)
#####
# r constant circle (-10<x=t**3<10)
#####
plot [-10:10] real(G(0.0,t**3)),imag(G(0.0,t**3)) with lines lt 1, \
real(G(0.333,t**3)),imag(G(0.333,t**3)) with lines lt 1, \
real(G(1.0,t**3)),imag(G(1.0,t**3)) with lines lt 1, \
real(G(3.0,t**3)),imag(G(3.0,t**3)) with lines lt 1
#####
# x constant circle (0<t=t**2<10)
#####
plot [0:10] real(G(t**2,-3.0)),imag(G(t**2,-3.0)) with lines lt 2, \
real(G(t**2,-1.0)),imag(G(t**2,-1.0)) with lines lt 2, \
real(G(t**2,-0.333)),imag(G(t**2,-0.333)) with lines lt 2, \
real(G(t**2,0.0)),imag(G(t**2,0.0)) with lines lt 2, \
real(G(t**2,0.333)),imag(G(t**2,0.333)) with lines lt 2, \
real(G(t**2,1.0)),imag(G(t**2,1.0)) with lines lt 2, \
real(G(t**2,3.0)),imag(G(t**2,3.0)) with lines lt 2
unset multiplot
```

\バックスラッシュは
改行記号であり, 日本語
キーボードの ¥ と同じ

\バックスラッシュは
改行記号であり, 日本語
キーボードの ¥ と同じ

← # “注” 最後の行に改行を入れておくこと