

# 学 士 論 文

題 目 伝搬モードに着目した伝導性妨害波の伝達特性の評価法を利用したモード変換発生箇所特定

指導教員 和田 修己 教授

京都大学工学部 電気電子工学科

氏 名 松田 光志

平成 27 年 1 月 13 日

# 目次

第 1 章	序論 (×)	1
第 2 章	伝搬モードごとの妨害波伝達特性評価	2
2.1	ミクスドモードポート、伝搬モードの定義 (△)	2
2.1.1	4 ポート (2 入力 2 出力) 回路における定義	2
2.1.2	3 ポート (1 入力 2 出力) 回路における定義	2
2.2	モード変換の発生原理 (×)	5
2.2.1	平衡度の異なる回路の接続によって発生する場合 (×)	5
2.2.2	負荷により伝送線路で発生する場合 (×)	5
2.3	S パラメータの合成 (△)	5
第 3 章	スイッチングハブの妨害波伝達特性	6
3.1	3 ポート (1 入力 2 出力) 回路を対象とする測定系 (△)	6
3.1.1	スイッチングハブを対象とする測定系 (△)	6
3.1.2	外部電源型スイッチングハブの AC アダプタ部分を対象とする測定系 (△)	6
3.2	4 ポート (2 入力 2 出力) 回路を対象とする測定系 (△)	7
3.2.1	外部電源型スイッチングハブの電子回路部分を対象とする測定系 (△)	7
3.3	得られた伝達特性の比較、検討	8
第 4 章	モード変換発生箇所ごとの考察	9
4.1	負荷により伝送線路で生じる場合 (△)	9
4.1.1	AC アダプタの出力側コネクタとスイッチングハブの接続	9
4.2	静電容量の非対称性により生じる場合 (×)	9
4.2.1	AC アダプタの線路と出力側コネクタ部分の接続	9
第 5 章	結論 (×)	11

第 6 章 付録	12
6.0.2 対称 2 線伝送路の伝搬モード . . . . .	12
参 考 文 献	14

## 第1章 序論(×)

回線終端装置に進入する伝導性妨害波について、これまではグラウンドを帰路とするコモンモードが支配的だったので対策が容易であったが、昨今は図 1.1 のように様々な多対の通信線と接続されるようになって、コモンモードの帰路はグラウンドだけでなく多線を取りうるようになった。ここでは、妨害波の伝達における伝搬モードについて 2 線を同相で伝搬するコモンモードのうち、他線を帰路とする 1 次コモンモード、グラウンドを帰路とする 2 次コモンモードとし、また差動で伝搬するディファレンシャルモードとした。

通信機器の電源より侵入し、通信ポートから回線終端装置に進入する妨害波について、これを伝搬モードごとに分離して取り扱うことができれば、伝達特性を求めやすく、また対策も講じやすい。だが、従来の測定系ではひとつの支配的なモードに対する測定しか行えない。そこで、多様な伝搬モードで侵入する妨害波に関する新たな評価技術を開発する必要がある。

また、家庭で使われる多くの電子機器にスイッチング素子が用いられていること、特に、太陽光発電設備などに付随する高効率電源(インバータ、コンバータ)が普及していることで、伝導性妨害波が電源系から混入する事例は増加している。

以上を踏まえて、接続機器が多様化している回線終端装置について、Ethernet などの多対ケーブルが接続されるポートに侵入する伝導性妨害波について検討し、その際の伝搬モードや伝達特性の評価技術を確立させ、モード変換を生じる箇所を特定し、妨害波対策の技術を提案することを本研究の目的とする。

## 第2章 伝搬モードごとの妨害波伝達特性評価

通信回線終端装置に伝導性妨害波が混入する様々な経路のうち、Ethernet ケーブルなどの通信ケーブルによって接続された他の通信機器からのものを考える。また、当該の通信機器への妨害波混入経路は電源系からとする。

具体的には、電源回路に特殊なフィルタを持たないスイッチングハブを対象として、スイッチングハブの電源ポートから侵入し、通信ポートから出力される妨害波の伝達特性を、複数の伝搬モードに分離して評価した。スイッチングハブの通信ポートの出力妨害波は、本来測定すべき回線終端装置が受け取る入力信号と厳密には異なるが、今回は通信機器と回線終端装置の間を STP ケーブルを平行に、たわみや曲げなく配置することで伝送線路とみなし、通信機器と回線終端装置の間でモード変換が起きないと仮定している。

### 2.1 ミクスドモードポート、伝搬モードの定義 ( $\Delta$ )

モード変換を論じるにあたって、そのポートには特定の伝搬モードのみが印加あるいは出力されるポートを想定すると扱いやすい。ここでは、電源入力側が2ポート、通信出力側が2ポートの計4ポートから成る測定対象について、測定ポートとは異なり、伝搬モードに一対一対応したポート（ミクスドモードポート）を定義し、同時に伝搬モードについても定義する。通信出力側が2ポートで、電源入力側を後述する CDNE によって1ポートとした計3ポートから成る測定対象についても同様に定義を行う。

#### 2.1.1 4ポート(2入力2出力)回路における定義

#### 2.1.2 3ポート(1入力2出力)回路における定義

電源側のポートについて。多くのスイッチングハブにおいて電源線として2線が用いられるため、2線の電源ケーブルとする。伝送線路の電圧を  $V_1, V_2$ , 電流を  $I_1, I_2$  とする。ディファレンシャルモードについては、2線にそれぞれ同振幅逆相の電流が流れる。ディファレンシャルモード電圧  $V_D$ , ディファレンシャルモード電流  $I_D$

は、それぞれ以下のように書け、これに対応したポートを入力ポートとする。

$$V_D = V_1 - V_2, I_D = \frac{I_1 + I_2}{2} \quad (2.1)$$

コモンモードにおいては2線にそれぞれ同振幅同相の電流が流れ、その電流の帰路はシステムグラウンドとなる。すなわち、コモンモード電圧  $V_C$ 、コモンモード電流  $I_C$  は以下のように書け、これに対応したポートを出力ポートとする。

$$V_C = \frac{V_1 + V_2}{2}, I_C = I_1 + I_2 \quad (2.2)$$

通信側のポートについて。通信ケーブルとしては8線(4対)で表皮にシールドをもつ STP ケーブルを用いて、STP ケーブルのコネクタは RJ45 とする。物理的ポートは、各通信線とシールド線をポートとして計8ポート定義できる。入出力ポートの定義にあたって、実際には、2本ずつのペアによって通信が行われることを踏まえ、1対2本の通信線とシールド線のみを考慮し他の6線は  $50\Omega$  終端する。出力ポートとして、ディファレンシャルモード、1次コモンモード、2次コモンモードに対応する3ポートをそれぞれ定義する。

2線の通信線の電圧をそれぞれ  $V_1, V_2$ 、電流を  $I_1, I_2$  とし、シールドの電圧、電流を  $V_3, I_3$  とする。ディファレンシャルモードにおいては通信線2線に同振幅逆相の電圧が加わり電流が流れるためシールドやシステムグラウンドに電流が流れることはなく、ディファレンシャルモード電圧  $V_D$ 、ディファレンシャルモード電流  $I_D$  は、それぞれ以下のように書ける。

$$V_D = V_1 - V_2, I_D = \frac{I_1 + I_2}{2} \quad (2.3)$$

1次コモンモードにおいては2線にそれぞれ同振幅同相の電流が流れる。その電流の帰路はシールドである。したがってシステムグラウンドに電流が流れることはなく、1次コモンモード電圧  $V_{CP}$ 、1次コモンモード電流  $I_{CP}$  は以下のように書ける。

$$V_{CP} = \frac{V_1 + V_2}{2}, I_{CP} = I_1 + I_2 \quad (2.4)$$

2次コモンモードにおいてはシールドを含む全ての線に同振幅同相の電圧が加わり電流が流れる。電流の帰路はシステムグラウンドである。ここで、STP ケー

ブルでは8線をシールド線が覆っており、すべての電流はシールド線を流れる。したがって、2次コモンモード電圧  $V_{CS}$ 、2次コモンモード電流  $I_{CS}$  は以下のように書ける。

$$V_{CS} = V_3, I_{CS} = I_3 \quad (2.5)$$

ベクトルネットワークアナライザ (VNA) の1つのポートを電源ポートに接続し、コモンモード妨害波の印加に用いる。他の2つのポートは通信ポートの先端に接続する。

妨害波の伝達特性について、通信機器の電源ポートと通信ポートの散乱行列 (Sパラメータ) が測定できる。これは測定ポートに対応するSパラメータであり、ここから入出力ポートに対応させたSパラメータ (以下、ミクスドモードSパラメータとする) への変換は、以下の関係を用いて行う。<sup>1) 4)</sup>

$$S_m = \begin{bmatrix} S_{11} & \frac{1}{\sqrt{2}}(S_{12} - S_{13}) & \frac{1}{\sqrt{2}}(S_{12} + S_{13}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(S_{12} - S_{13}) & \frac{1}{\sqrt{2}}(S_{22} + S_{33} - S_{23} - S_{32}) & \frac{1}{\sqrt{2}}(S_{22} - S_{33} + S_{23} - S_{32}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(S_{12} + S_{13}) & \frac{1}{\sqrt{2}}(S_{22} + S_{33} - S_{23} - S_{32}) & \frac{1}{\sqrt{2}}(S_{22} + S_{33} + S_{23} + S_{32}) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

#### スイッチングハブ部分のみの入出力ポート定義

DC電源線から電源系に混入した伝導性妨害波が通信側に伝達する特性を評価するため、図2.1の#1 - #4で表示される測定用のポートとは別に、ディファレンシャルモード、二次コモンモードの2つについて伝搬モードごとにポートを定義する。

電源側の場合について、図で表される電源  $V_1, V_2$ 、電流  $I_1, I_2$  を用いて、ディファレンシャルモード時の電圧  $V_D$ 、電流  $I_D$  および二次コモンモードの電圧  $V_S$ 、電流  $I_S$  を以下のように定義できる。

$$V_D = V_1 - V_2, I_D = \frac{I_1 - I_2}{2} \quad (2.7)$$

$$V_S = \frac{V_1 + V_2}{2}, I_S = I_1 + I_2 \quad (2.8)$$

通信側の場合について、図で表される 電源  $V_3, V_4$ , 電流  $I_3, I_4$  を用いて、ディファレンシャルモード時の 電源  $V_D$ 、電流  $I_D$  および二次コモンモードの 電圧  $V_S$ 、電流  $I_S$  を以下のように定義できる。

$$V_D = V_3 - V_4, I_D = \frac{I_3 - I_4}{2} \quad (2.9)$$

$$V_S = \frac{V_3 + V_4}{2}, I_S = I_3 + I_4 \quad (2.10)$$

測定した 4 ポート S パラメータ（物理ポートに対する S パラメータ）を入出力ポートに対応させたミクスドモード S パラメータを用いて妨害波の伝達特性について評価する。以下、測定結果の報告では  $S_{cd21}$  (ディファレンシャルモードで電源側のポートに入力された妨害波がコモンモードとして通信側のポートに伝達する特性)、 $S_{cc21}$  (コモンモードで電源側のポートに入力された妨害波がコモンモードとして通信側のポートに伝達する特性)、などを用いて議論している。

#### ポートの終端条件 (○)

電源側、通信側それぞれについて定める終端インピーダンスを記述。

#### 電源内蔵型スイッチングハブおよび外部電源型スイッチングハブの終端条件

入力側については、CDNE によって終端条件が定められる。

- ディファレンシャルモード : CDNE によって、 $100\Omega$  終端となる。
- コモンモード : CDNE によって、 $150\Omega$  終端となる。

DC 側については、 $50\Omega$  系で測定しているため、

- ディファレンシャルモード :  $100\Omega$
- コモンモード :  $25\Omega$

となる。



## 2.2 モード変換の発生原理 (×)

2.2.1 平衡度の異なる回路の接続によって発生する場合 (×)

2.2.2 負荷により伝送線路で発生する場合 (×)

## 2.3 Sパラメータの合成 ( $\Delta$ )

## 第3章 スイッチングハブの妨害波伝達特性

電源内蔵型スイッチングハブを測定した。一方で、外部電源型スイッチングハブは妨害波伝達特性の観点からは AC アダプタ部分とその他のスイッチングハブ部分のみ、と大きく分けられる。AC アダプタのみは CDNE を用いた 3 ポート測定によって、外部電源型スイッチングハブは DC 電源を用いた 4 ポート測定によって、それぞれ妨害波伝達特性の評価をした。また、これらを S パラメータ合成して比較した。これによって、妨害波の伝達箇所やモード変換が生じる場所を特定することができる。

### 3.1 3ポート(1入力2出力)回路を対象とする測定系(Δ)

#### 3.1.1 スイッチングハブを対象とする測定系(Δ)

測定系の構築(Δ)

モード変換特性(Δ)

#### 3.1.2 外部電源型スイッチングハブの AC アダプタ部分を対象とする測定系(Δ)

1. 測定系を示す。被測定対象は電源外付型スイッチングハブに同梱の AC アダプタ(2線)で、これを短く切断し用いる。
2. AC 入力側(商用電源)から侵入した伝導性妨害波がどの程度 DC 出力側に伝達するかの評価手法について述べる。

測定系の構築(Δ)

AC アダプタ(1.0A, 5.3V)の入力側は CDNE(Teseq M210)に接続し、CDNE の測定ポートは同軸ケーブルを介してベクトルネットワークアナライザ(Agilent E5017C)のポート1を接続する。入力側のコモンモード電流を低減させるために、同軸ケーブル上に、システムグラウンドに垂直にフェライトクランプ(鹿島 FC22)を配置す

る。フェライトクランプはシステムグラウンドに垂直に配置する。CDNE の AE ポートは、商用電源に接続する。

AC アダプタの出力側は銅板を介して 1 線ずつ、2 つの BIASTEE(Picosecond MODEL5545) に接続する。BIASTEE の DC 端子間には負荷として抵抗  $R_0$  を挿入する。また、RF 端子にはベクトルネットワークアナライザのポート 2,3 をそれぞれ同軸ケーブルにより接続する。BIASTEE を用いる理由は 2 つある。一方はベクトルネットワークアナライザのポートに DC を入力させないため、もう他方は出力側のディフュレンシャルモード電流を調整するためである。

高さ (システムグラウンドからの距離) について、伝送特性を安定させるため、電源ケーブルおよび AC アダプタ、BIASTEE はシステムグラウンドから高さ 100 mm の箇所に配置した。電源ケーブルは 2 本が非対称にならないよう、それぞれのシステムグラウンドからの高さを 100 mm にした。CDNE は銅板により治具を作成し、システムグラウンドと低インピーダンスで接続しながらも他の機器と同じ 100[mm] の高さに配置した。

各線長さについて、実際に測定した範囲は 1–500 MHz であるが、今回用いた CDNE の測定範囲周波数帯は 30 から 300 MHz である。300 MHz の妨害波の波長は 1 m であり、電源ケーブルを伝送線路とみなさないためにはケーブル長をその 1/20 程度に収める必要があるとされる。すなわち、今回は 50 mm 以下にすることが求められる。今回の実験では、図のように、AC アダプタの電線は 40 mm とした。図に示すとおり銅板と BIASTEE は直接接続し、BIASTEE と抵抗  $R_0$  は 10 mm の導線により接続した。

モード変換特性 (×)

## 3.2 4ポート (2入力2出力) 回路を対象とする測定系 (△)

### 3.2.1 外部電源型スイッチングハブの電子回路部分を対象とする測定系 (△)

測定系の構築 (△)

1. スwitchingハブ部分は、マイコンとパルストランスによって成っている。  
入力側の DC 電源がそれぞれを動作させていて、出力側の通信線は、パルストランスを介してマイコンに接続していて、また別のパルストランスを介し

て異なる通信線に接続されている。

2. 用いた測定系を示し、電源側（DC 電源）から侵入した伝導性妨害波がどの程度信号側に伝達するかの評価手法について述べる。

外部電源型スイッチングハブの電子回路部分に関して、電源側から入ったノイズが通信側にどの程度伝搬するか、という妨害波特性を測定する。DUT の通信線の STP ケーブルのうち、2 線を取り出して、RJ45-SMA 変換基板と銅板を介してベクトルネットワークアナライザの 1,2 ポートに接続する。残りの 6 線は  $50\Omega$  終端としている。また、電源側は 2 線それぞれに BIASTEE を接続し、二つの OUT/IN 端子をベクトルネットワークアナライザの 3,4 ポートに、また二つの DC 端子を DC 電源に接続する。BIASTEE は、ベクトルネットワークアナライザに直流成分を印加しないために用いる。

- DC 電源と BIASTEE の DC 端子間の接続には対撚り 2 線を用い、フェライトクランプを設置した。
- AC アダプタの線の長さを 40[mm] にした。
- BIASTEE の GND からの高さを 100[mm]、スイッチングハブの GND からの高さを 100[mm]、DC 電源の GND からの高さを 100[mm] とした。

高さについて、伝送特性を安定させるため、DC 電源、電源ケーブル、BIASTEE、スイッチングハブのいずれもシステムグラウンドから高さ 100 mm の箇所に配置した。電源ケーブルおよび RJ45-SMA 変換基板について、2 本の線がシステムグラウンドに対して非対称にならないようにした。

各線長さについて、実際に測定した範囲は 1-500 MHz であるが、今回用いた CDNE の測定範囲周波数帯は 30 から 300 MHz である。300 MHz の妨害波の波長は 1 m であり、電源ケーブルを伝送線路とみなさないためにはケーブル長をその  $1/20$  程度に収える必要があるとされる。すなわち、今回は 50 mm 以下にすることが求められる。

モード変換特性 ( $\Delta$ )

### 3.3 得られた伝達特性の比較、検討

## 第4章 モード変換発生箇所ごとの考察

モード変換が起きていると疑われる箇所についてモデル化し、等価回路を解いたりシミュレーションを行い、これと測定結果を比較する。

### 4.1 負荷により伝送線路で生じる場合( $\Delta$ )

#### 4.1.1 ACアダプタの出力側コネクタとスイッチングハブの接続

- 
- 
- 
- 
- 

### 4.2 静電容量の非対称性により生じる場合( $\times$ )

#### 4.2.1 ACアダプタの線路と出力側コネクタ部分の接続

ACアダプタのコネクタ形状が非対称性を持っており、ここがモード変換の一因であると考えられる。この点について、モデル化して考察する。

測定に使用したスイッチングハブ9の基板を確かめたところ、図4.1のようになっていた。

電源側はLSI-パルストランスに接続されていて、パルストランスは通信ポートに接続されている。これがスイッチングハブの主たる機能を成す。また、LSIからは動作確認用のLEDや、ループ検出機能のための別のLSIに接続されている。グラウンド側は、電源側と通信側とで分断されていて、キャパシタを介して両者が接続されている。このキャパシタの容量は500 nFであった。

したがって、通信側のグラウンド (STP のシールドと接続される) は電源側のグラウンドと導通していなかった。動作時も同様である。この理由として、両グラウンドを直結した場合に、電源側のグラウンドの揺れが通信側に通じることを防いでいるというのが考えられる。これらを短絡したり、キャパシタの値を変更して妨害波伝達特性にどのような影響があるかを調べる。

また、スイッチング内部におけるシステムグラウンド側と電源側の非対称性がモード変換の一因であると考えられるので、この点についても考察する。

スイッチングハブ外部の、電源の2線はシステムグラウンドに対して対称で、図 4.2 において  $C_V = C_g$  と考えられる。しかしスイッチング内部においては、 $C_V \ll C_g$  であり、この結果として、

$$\Delta V_C = V_C^2 - V_C^1 = -\frac{V_D^1}{2} \quad (4.1)$$

が得られる。

## 第5章 結論(×)

## 第6章 付録

### 6.0.2 対称2線伝送路の伝搬モード

簡単化のために2線の対称伝送線路について、コモンモードとディファレンシャルモードに分離する。2線における電圧・電流を  $[V]$ 、 $[I]$  とし、線路のインピーダンス行列とアドミタンス行列を  $[Z]$ 、 $[Y]$  とすると、それぞれ以下のように書ける<sup>2)</sup>、<sup>3)</sup>、<sup>4)</sup>。

$$[V] = \begin{bmatrix} V_1 & V_2 \end{bmatrix}^T, [I] = \begin{bmatrix} I_1 & I_2 \end{bmatrix}^T \quad (6.1)$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix}, [Y] = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

ここで、線路断面における電圧・電流を各モードの電圧・電流で表すために、変換行列  $[\mu]$ 、 $[\nu]$  によって

$$[V] = [\mu][v], [I] = [\nu][i] \quad (6.3)$$

のように変換する。ここで、 $[v]$ 、 $[i]$  は各モードの電圧・電流である。  
今回は特に対称性をもつため、

$$[\mu] = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

$$[\nu] = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 1 \\ \frac{1}{2} & -1 \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

とすると、線路電圧とモード電圧、および線路電流とモード電流の関係について、以下の図 6.0.2(a)、図 6.0.2(b) のようになる。



$$V_1 = \frac{1}{2}V_D + V_C \quad (6.6)$$

$$V_2 = -\frac{1}{2}V_D + V_C \quad (6.7)$$

$$I_1 = I_D + \frac{1}{2}I_C \quad (6.8)$$

$$I_2 = -I_D + \frac{1}{2}I_C \quad (6.9)$$

$$(6.10)$$

で、このとき

$$[z] = \begin{bmatrix} \frac{Z_{11}+Z_{21}}{2} & 0 \\ 0 & 2(Z_{11} - Z_{21}) \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

$$[y] = \begin{bmatrix} 2(Y_{11} + Y_{21}) & 0 \\ 0 & \frac{Y_{11}-Y_{21}}{2} \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

となり、 $[z]$ 、 $[y]$  をそれぞれ対角化できる。

## 参考文献

- 1) 和田修己, 松嶋徹, “多様な伝搬モードで通信装置に侵入する伝導性妨害波の評価技術と対策技術に関する研究,” NTT 共同研究 2013 年度研究報告書, Mar. 2014.
- 2) 池田哲夫, EMC 原理と技術 より ‘電磁気と回路と EMC -コモン・モード電流の発生-’, 美松, 2010/02.
- 3) 藤城義和, S パラメータによる電子部品の評価 第 4 回 モード変換 ,TDK, 2000/01.
- 4) 藤城義和, S パラメータによる電子部品の評価 第 5 回 モード変換 (続) ,TDK, 2000/04.

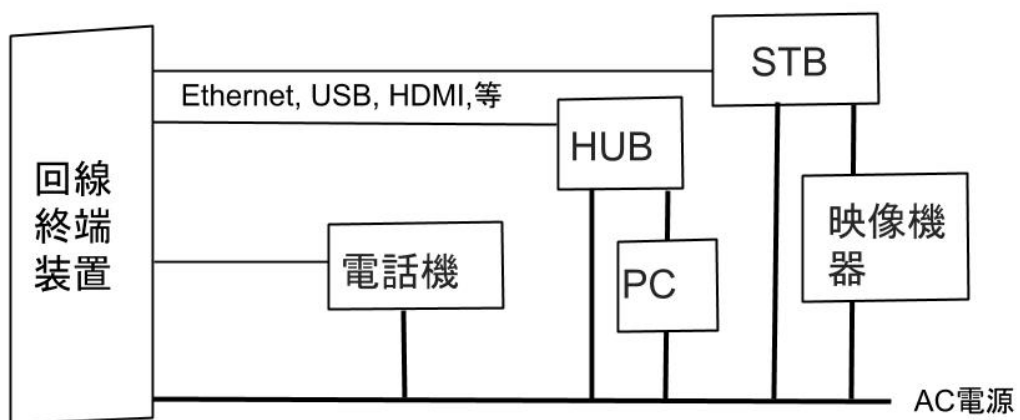


図 1.1: 回線終端装置に接続される様々な線

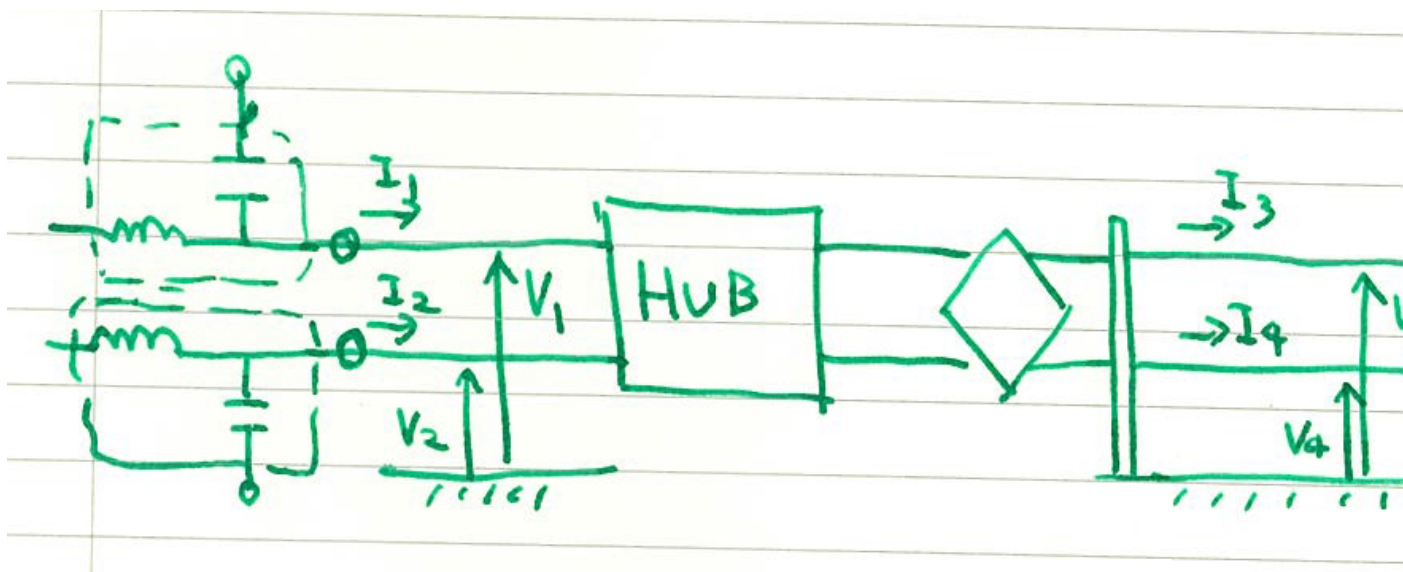


図 2.1: ポートの定義

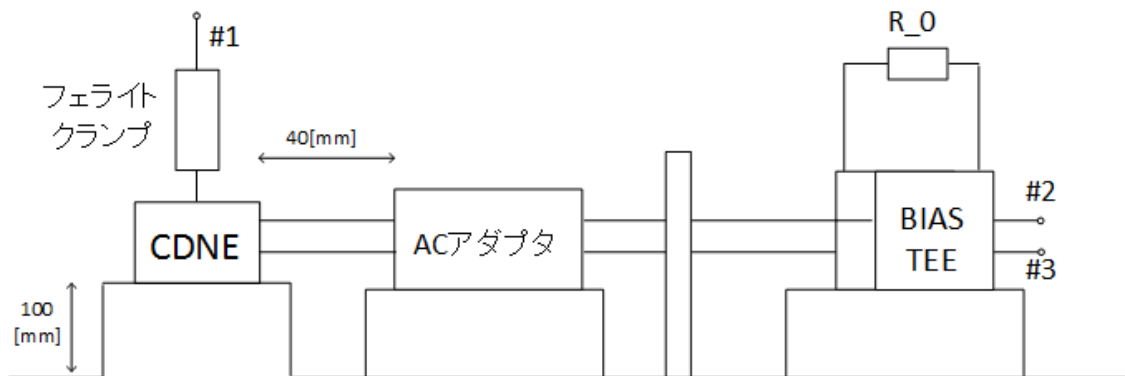


図 3.1: AC アダプタの測定系 (側面からの配置図)

表 3.1: ネットワークアナライザの設定

出力電力 (output power)	0dBm
sweep type	log scale
sweep point	1601
測定周波数帯	1MHz-500MHz
IF Band Width	100Hz

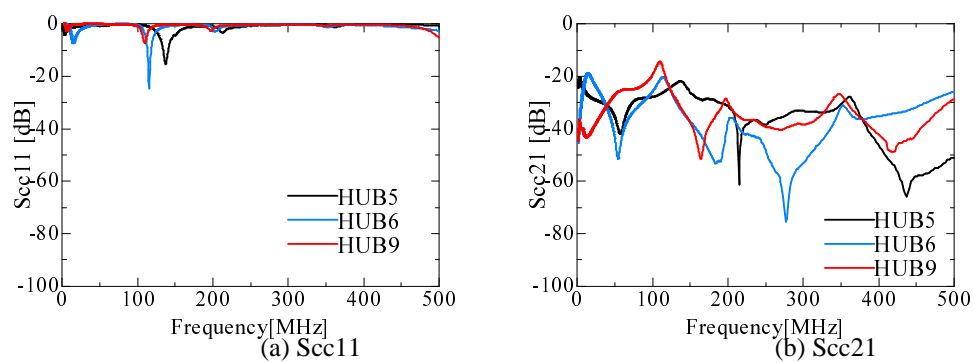


図 3.2: モード変換特性

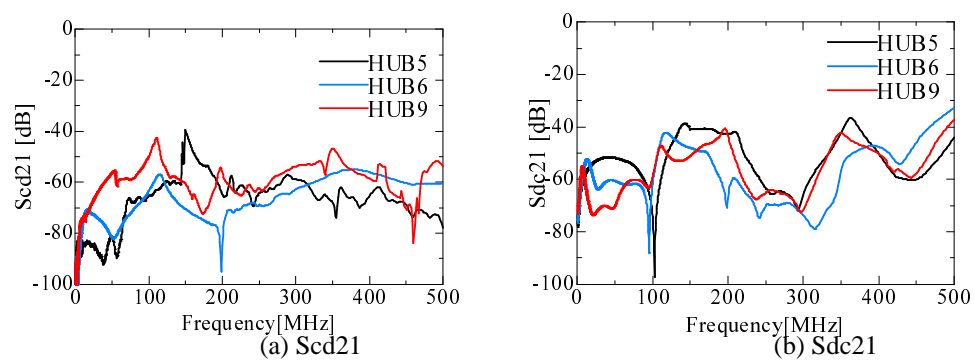


図 3.3: モード変換特性

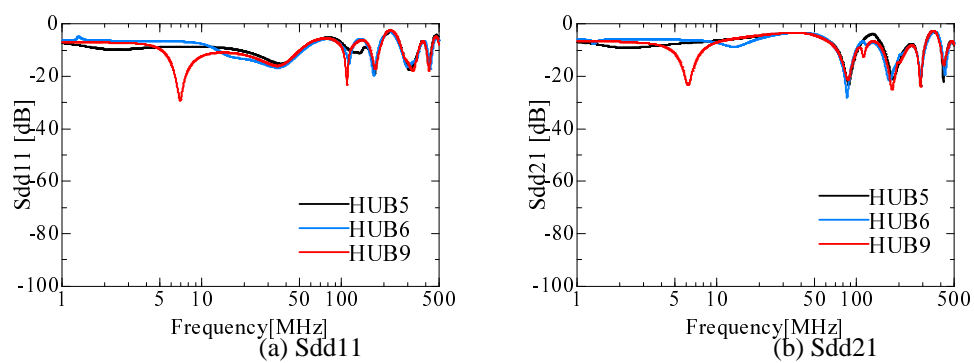


図 3.4: モード変換特性

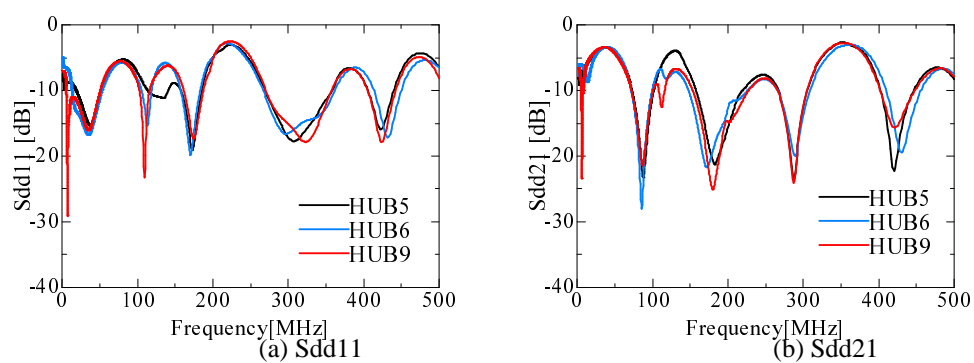


図 3.5: モード変換特性

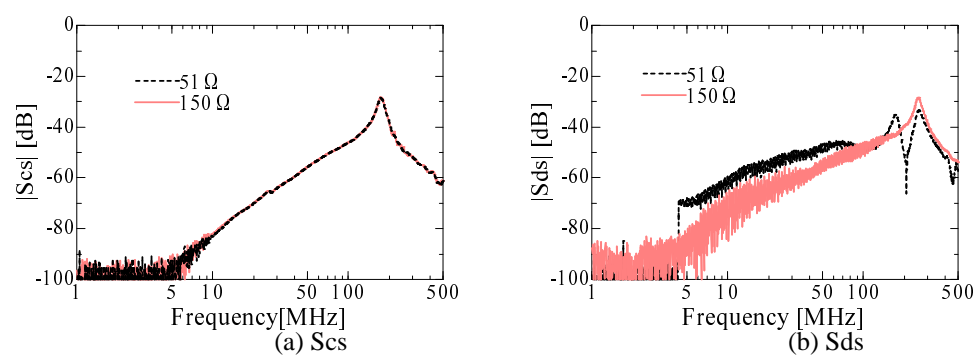


図 3.6: モード変換特性



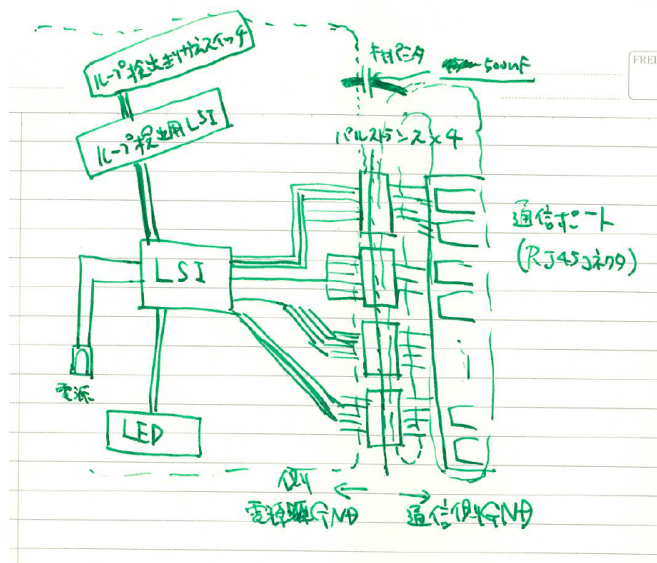


図 4.1: スイッチングハブ内部の基板構成

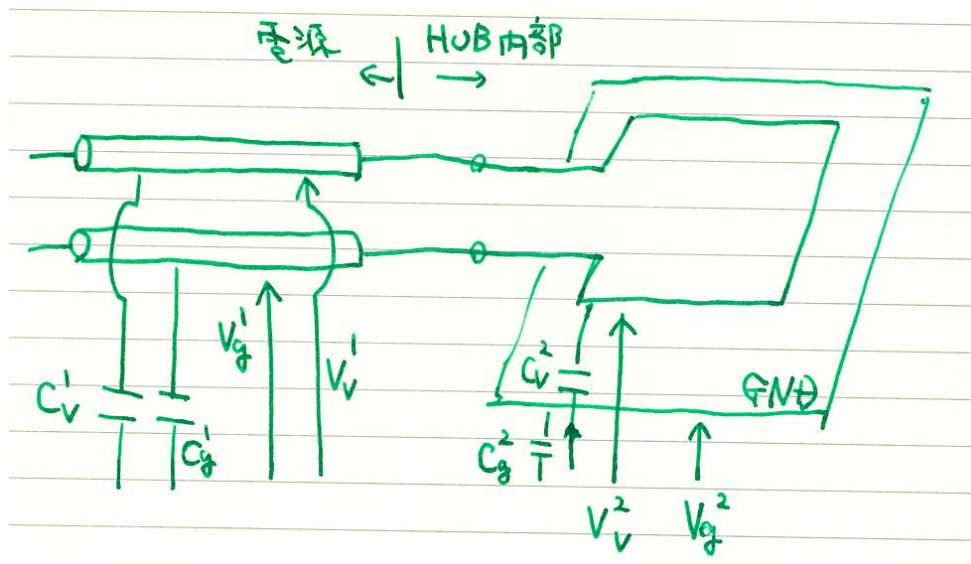
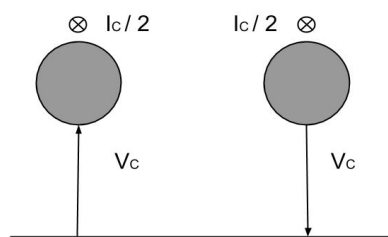
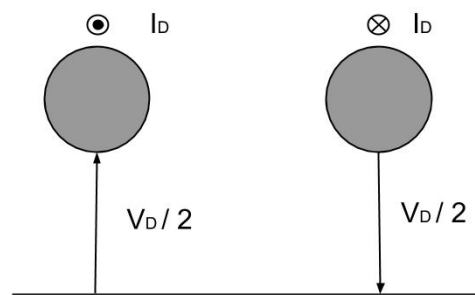


図 4.2: スイッチングハブ内外での電流、電圧について



(a) コモンモード



(b) ディファレンシャルモード

図 6.1: 対称二線路における伝搬モード分離について