

信号伝送解析とノイズ低減技術の基礎

- *Signal transmission analysis and noise reduction technique* -

T. Suwada (*tsuyoshi.suwada@kek.jp*)

Accelerator Laboratory,

High Energy Accelerator Research Organization (KEK),

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

はじめに

- **ノイズとは?**
 - 日本語では、**雑音**、**揺らぎ**とも呼ばれる
- 自然界には様々な**雑音**が存在している
 - 地面の非周期的な微小振動 → **ATL則**の発見
 - 花粉の拡散運動 → **アインシュタイン**による**ブラウン運動**の発見、原子の存在を予言
 - 現在ではこのような雑音は、**1/f雑音**と呼ばれ**フラクタル**という新分野を確立
 - 微小電子回路における電流雑音 → パウリの排他律、量子干渉の観測、揺動散逸定理の発見
 - **雑音の背後には深遠な物理が存在し興味深い**

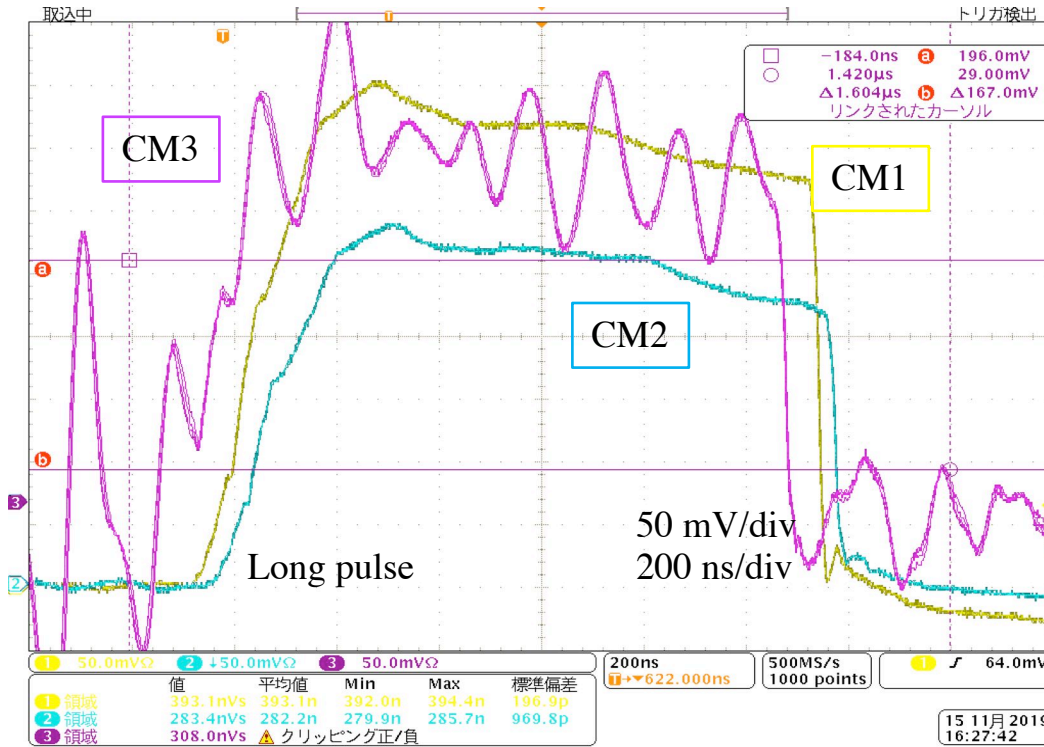
はじめに/続く

- 電子回路、電気回路における雑音
 - 熱雑音、ショット雑音、フリッカー雑音 ($1/f$ 雑音)等、様々な雑音の存在が知られている
 - 背後に物理は存在するが、一般的に取り除くべき厄介者として扱われる
 - 外来雑音による同軸ケーブルのシールド効果など
 - 解析手法はよく知られている
 - 信号伝送に伴う雑音の生成
 - 筆者が日頃の仕事を通して初めて経験
 - 厄介者であるがうまく制御すれば抑制可能

雑音対策を目指した本研究の発端



高エネルギー加速器研究機構



- 3台の電流モニターの信号波形 @KEK低速陽電子施設

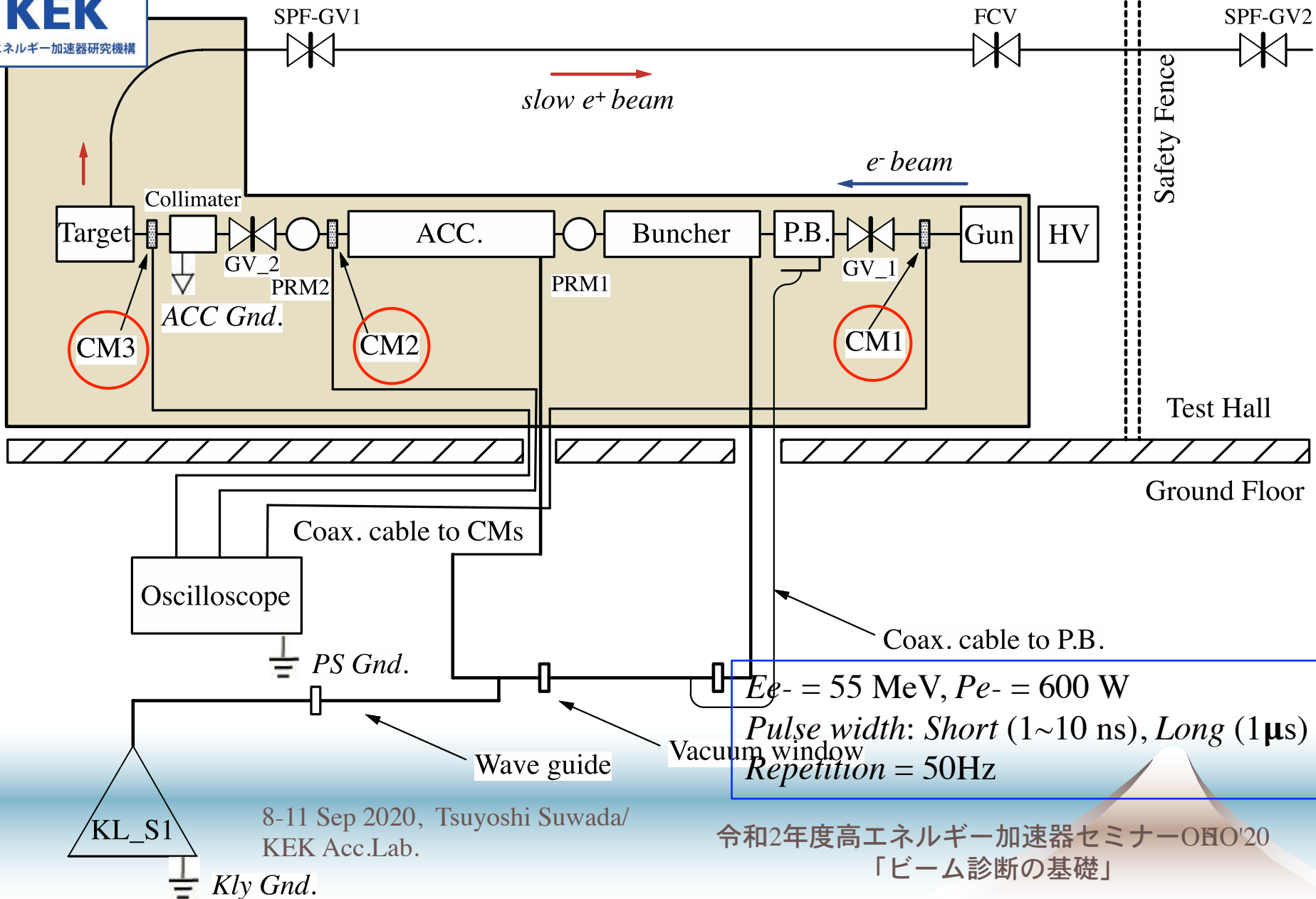
- CM1, CM2のノイズ振幅小
- CM3のノイズ振幅大

- 様々なノイズ対策を実施
チョークコイルを使用
複数、挿入位置を変える
広帯域フェライトコアを使用

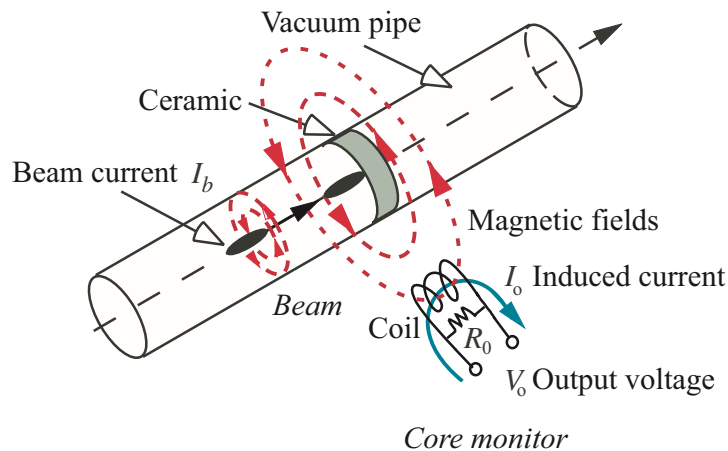
→ 全ての対策が失敗
→ ここでノイズ生成の原理に立ち返ることになる

3台の電流モニターの信号波形 @KEK低速陽電子施設

KEKにおける低速陽電子施設 (物性研究)

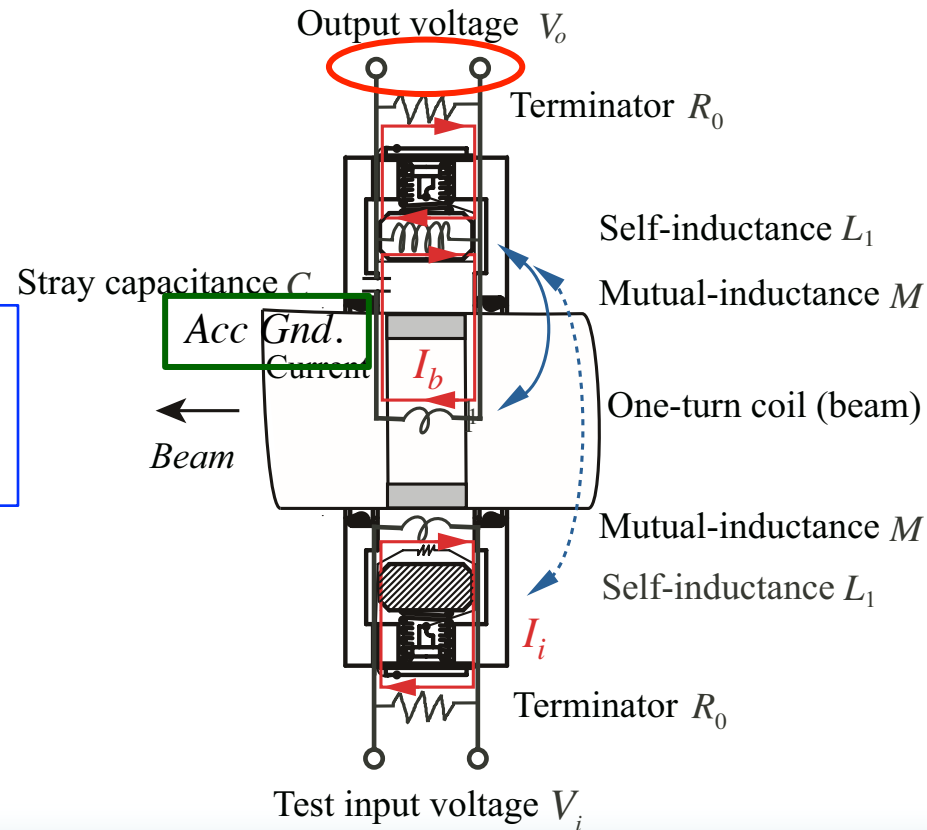


CMの基本原理とその構造



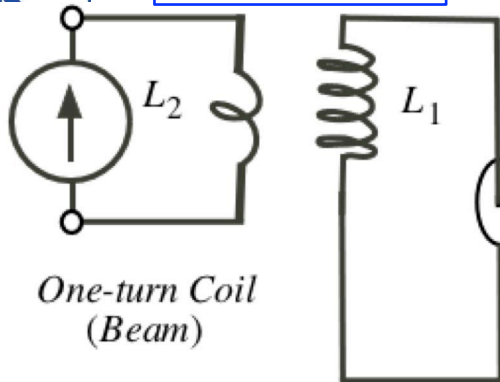
BNC Gnd.をAcc Gnd.から浮かす。
余計なGnd. Loopを作らない。

- ・ ビーム磁場をコイルで検出し、ビーム電流に比例した電圧に変換
- ・ ビームとコイルの相互作用(電磁誘導)を利用
- ・ 1:Nのトランスの電圧増幅器と等価



CM回路と測定系

1:N Transformer

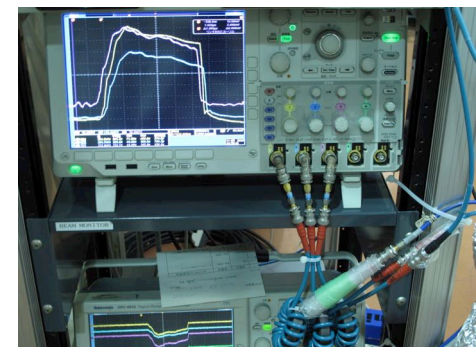
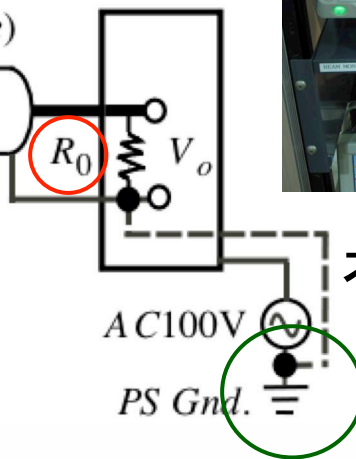


One-turn Coil (Beam)

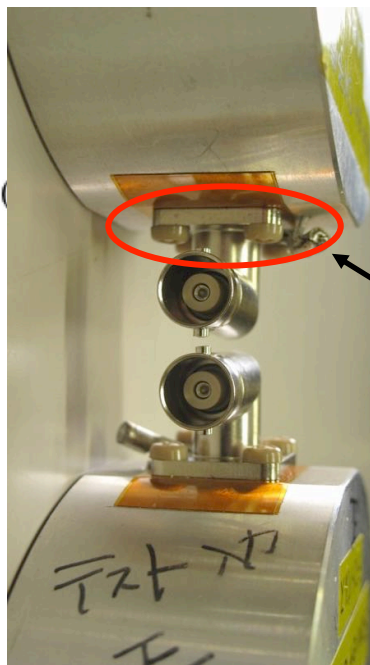
Transmission Line (Coax. Cable)

同軸ケーブル

Oscilloscope



オシロスコープ



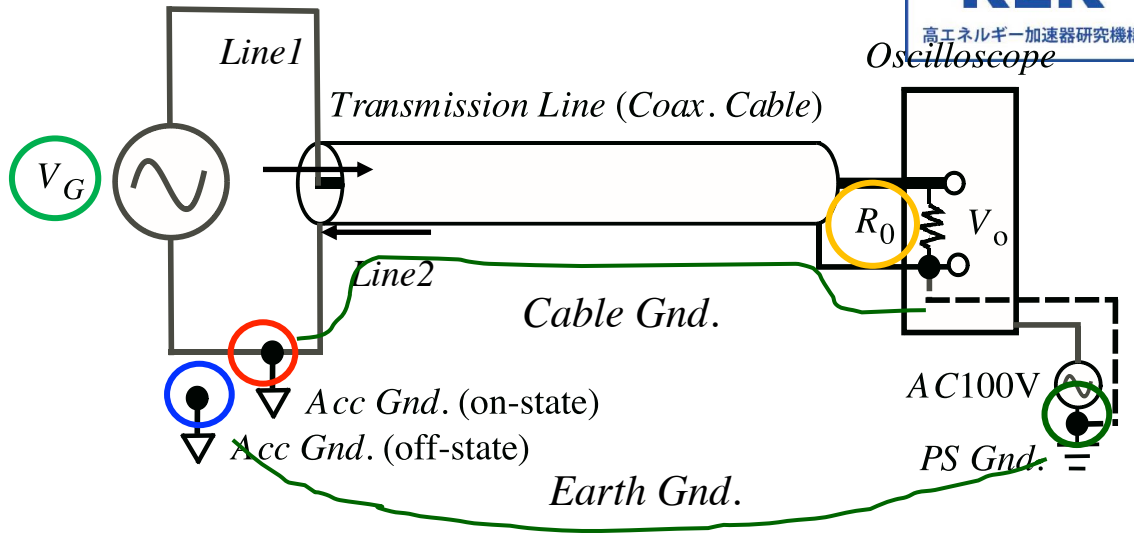
BNC端子

- ・ CM3: セラミックネジ/カプトンで Case Gnd. と絶縁
- ・ CM1, 2: 金属ネジ/カプトンで Case Gnd. と導通

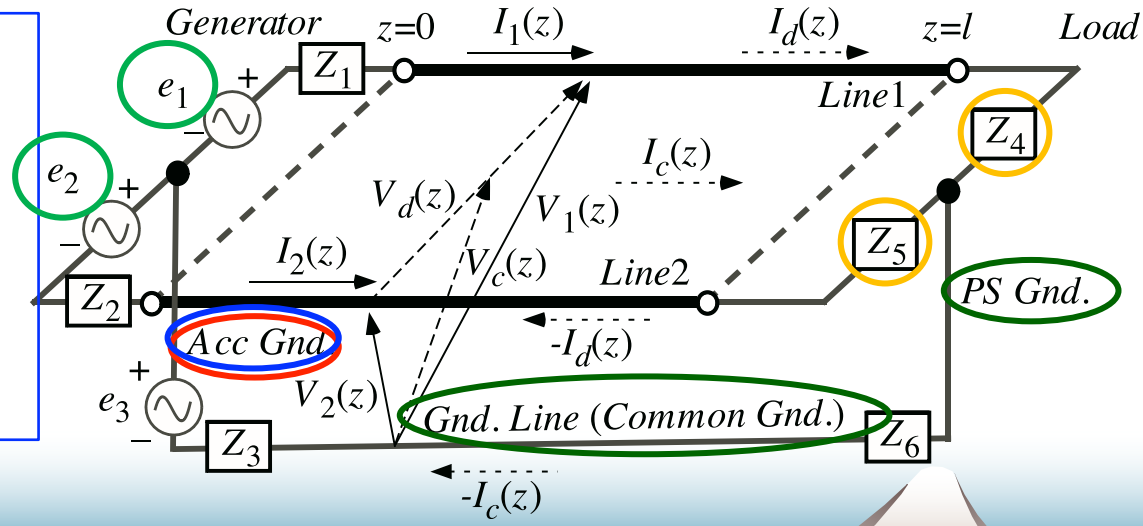
オシロの電源ラインを通してシャーシ、端子入力グランドがGndに導通

CM測定回路と等価回路

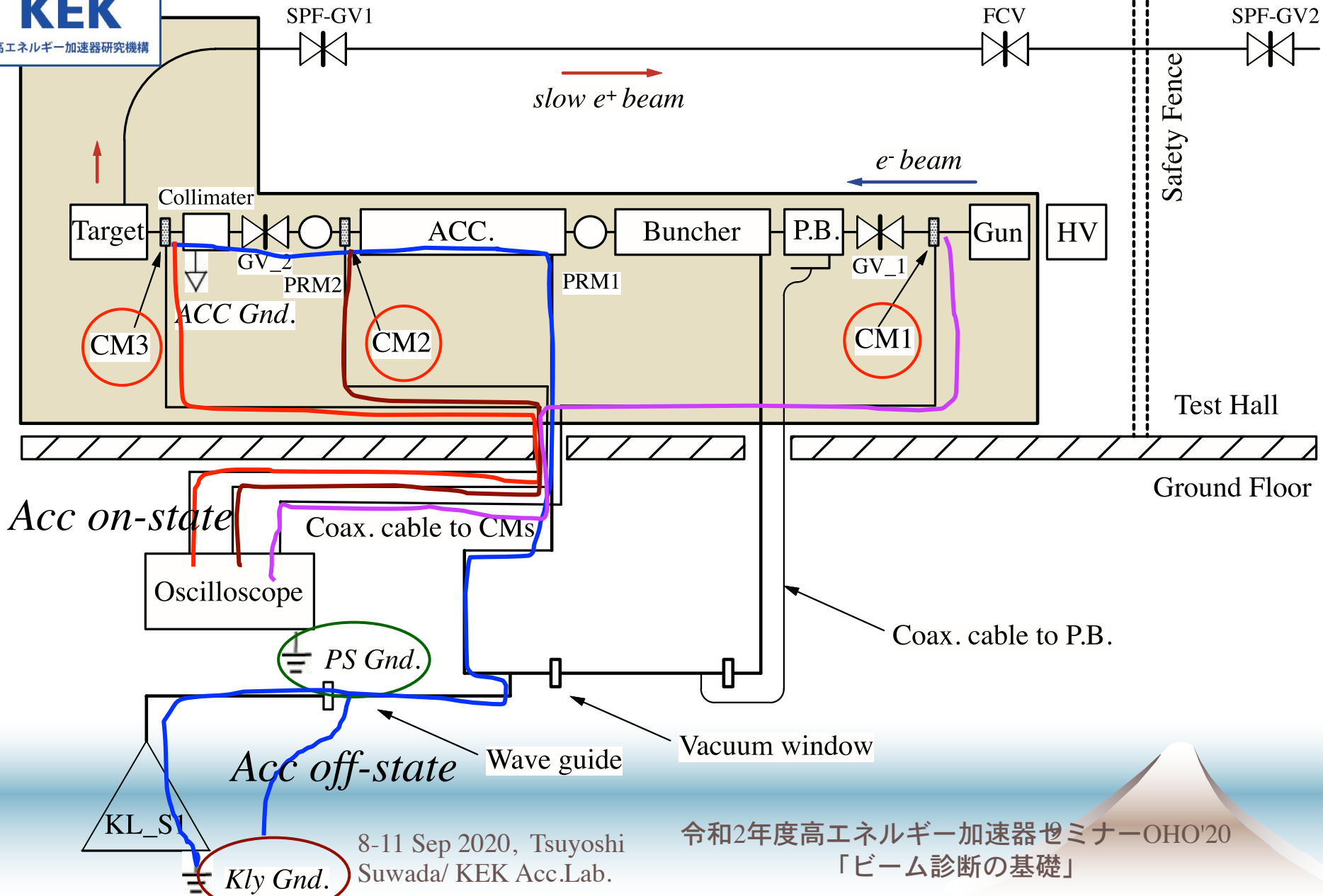
- L 応答信号源の導入 $V_G = (j\omega L(\omega))I_0$
- 元々は非対称配置 (負荷、電源)
- 信号源側のGnd.状態 (Acc Gnd.)が重要
 - *On-state*, Cable Gnd.を通して導通
 - *Off-state*, Earth Gnd.を通して導通
- オシロGnd.は自動的に分電盤 Gnd. (PS Gnd.)に短絡



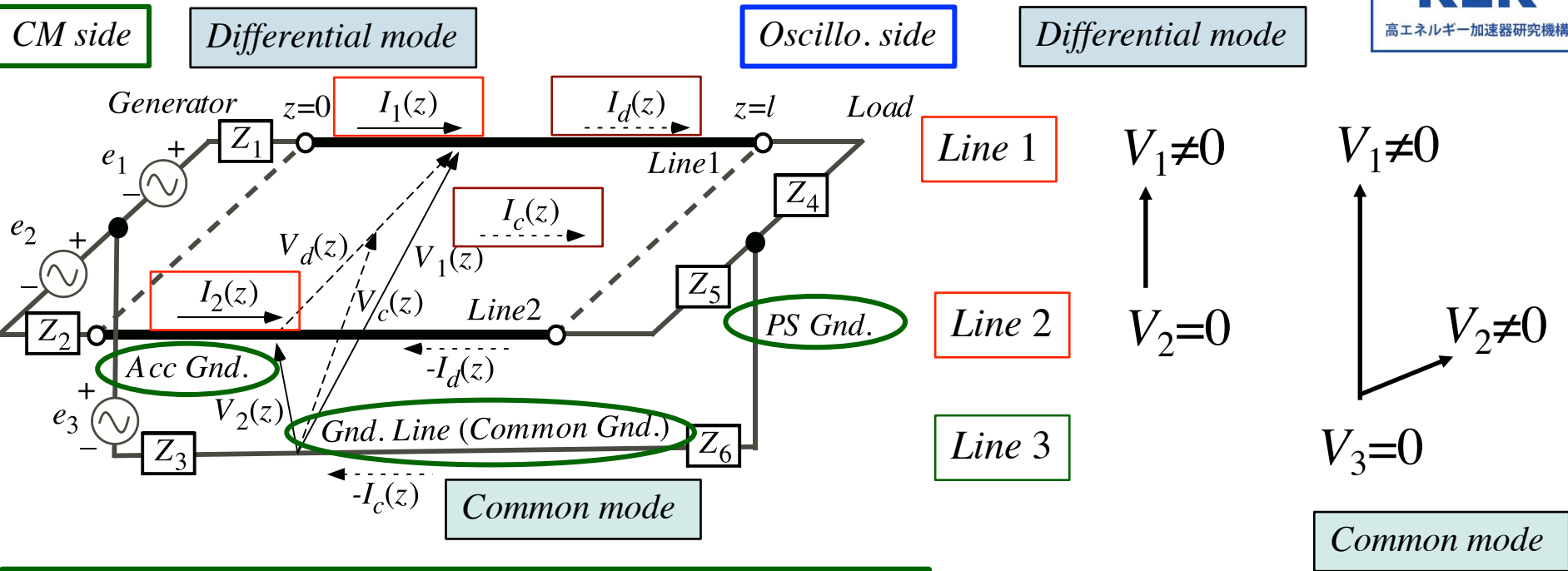
- ### 信号解析のための等価回路
- 対称配置(負荷、電源)が重要
 - Acc Gnd. 状態により伝送モードが異なる
 - on* → $Z_3=Z_6=0$, 2本線の信号伝送 *Differential mode*の生成
 - off* → $Z_3 \neq Z_6 \neq 0$, 3本線の信号伝送 *Differential mode & Common mode*の生成
 - Earth Gnd.に対しGnd. Lineを対応させる
 - ノイズ源をGnd. Lineに組み込む



KEKにおける低速陽電子施設 (物性研究)



CM解析のための等価回路と伝送モード



第3のGndラインの形成
 Vac. Pipe Gnd. → WG → Kly. → Kly.PS → PS分電盤 Gnd.
 → Osc. Gnd.

- 二本線の伝送線路ではDifferential (D) modeの伝送が基本.
- 三本線の伝送線路ではCommon (C) modeとDifferential (D) modeの伝送が基本.
- D mode: $V_2(z=0) = V_2(z=l) = 0$, C mode: $V_2(z=0) \neq V_2(z=l) \neq 0$
- インピーダンスの配置非対称性によりDからCへのモード変換が生じる → ノイズ発生/信号歪みの発生.

CM1, CM2 Acc. Gnd. On
 CM3 Acc. Gnd. Off

信号伝送理論

- **2本線の伝送線路, 不平衡回路/*unbalanced circuit/Single-ended circuit,***
伝送モード/*Differential mode*

$$V_1 \neq 0, V_2 = 0, I_1 = -I_2$$

- **3本線の伝送線路, 平衡回路/*balanced circuit,***
伝送モード/*Common mode, Differential mode*

$$V_c \equiv (V_1 + V_2) / 2, I_c \equiv I_1 + I_2$$

$$V_d \equiv V_1 - V_2, I_c \equiv (I_1 - I_2) / 2$$

詳細はテキストに記載

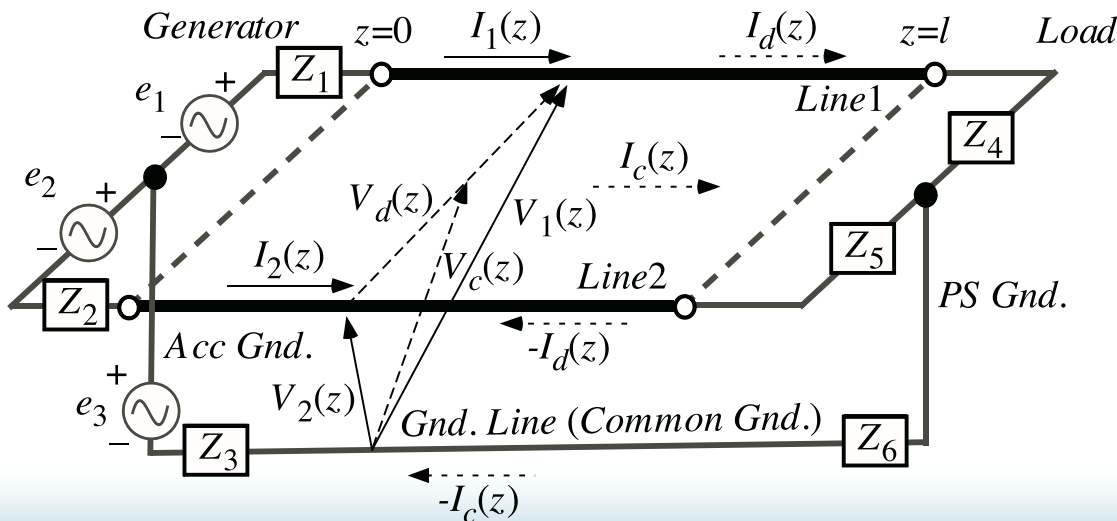
信号伝送理論/続く



高エネルギー加速器研究機構

・ *C mode*生成の要因, *Acc off-state*

- (1) 信号源の非対称性、 $e_1 \neq e_2$
- (2) 内部負荷の非対称性、 $Z_1 \neq Z_2$
- (3) 外部負荷の非対称性、 $Z_4 \neq Z_5$
- (4) *Gnd. Line*上に $Z_3 \neq 0, Z_6 \neq 0$ が存在
- (5) *Gnd. Line*上にノイズ源 $e_3 \neq 0$ が存在



・ *CM3*の場合,

Acc off-state

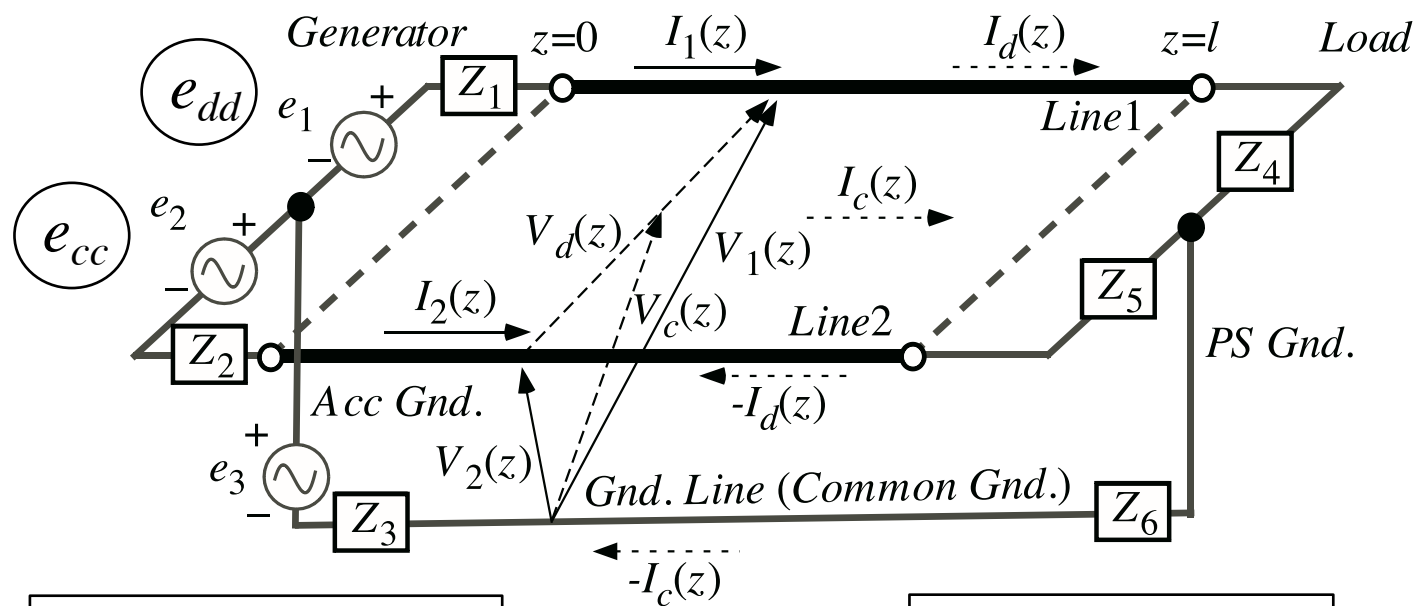
- (1) $e_1 = V_G \neq e_2 = 0$
- (2) $Z_1 \sim Z_2 \sim 0$
- (3) $Z_4 = 50 \neq Z_5 = 0 \Omega$
- (4) $Z_3 \neq 0, Z_6 \neq 0$
- (5) $e_3 \neq 0$ が存在?

・ *CM1, 2*の場合,

Acc on-state

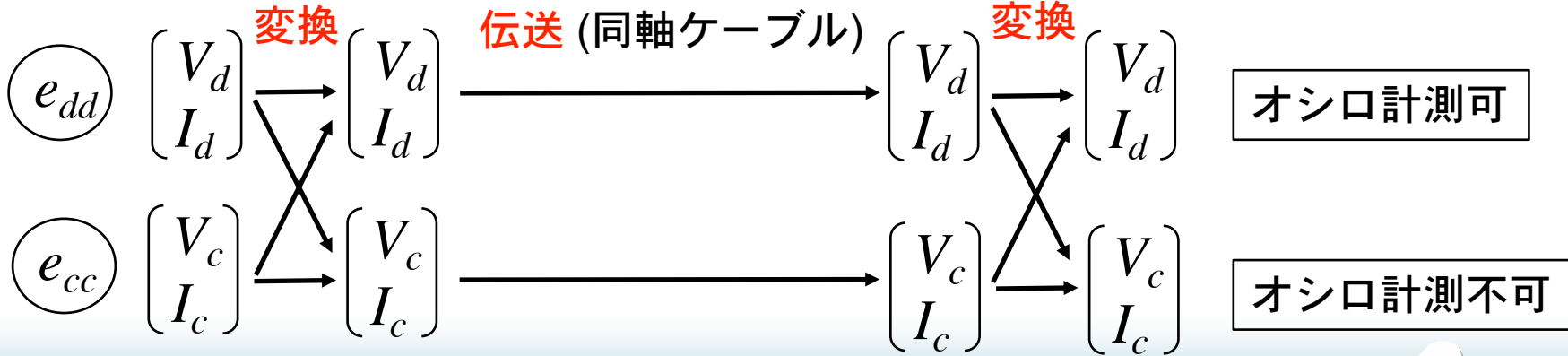
- (1) $e_1 = V_G \neq e_2 = 0$
- (2) $Z_1 \sim Z_2 \sim 0$
- (3) $Z_4 = 50 \neq Z_5 = 0 \Omega$
- (4) $Z_3 = Z_6 = 0$
- (5) $e_3 \neq 0$ が存在?

信号伝送理論/続<



モード生成 (信号源)

モード検出 (負荷)



信号伝送理論/続<

(left)

(right)

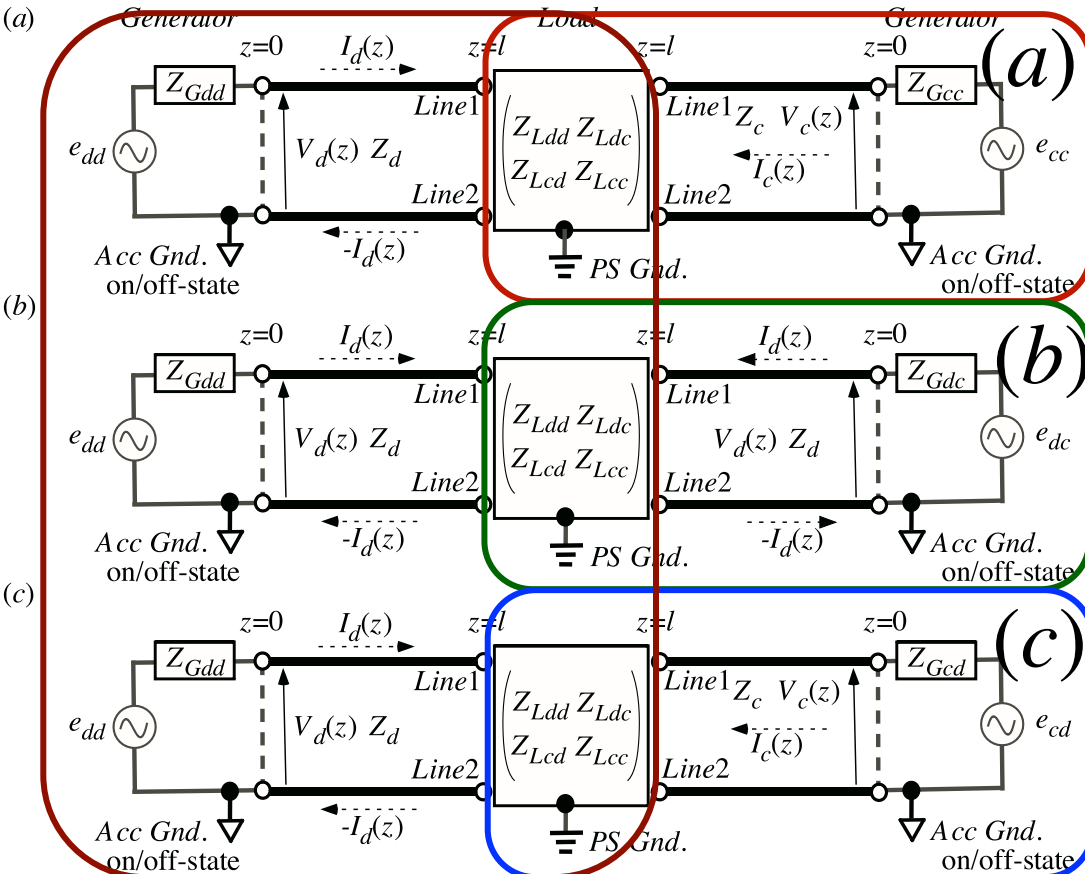


Table 1: 信号伝送モードの存在形態

対応図	電源	モード 電源側	モード ケーブル	モード 負荷側
(a)-(c) left	e_{dd}	d	d	d
(a) right	e_{cc}	c	c	$c \rightarrow d$
(b) right	e_{dc}	$c \rightarrow d$	d	d
(c) right	e_{cd}	$d \rightarrow c$	c	$c \rightarrow d$

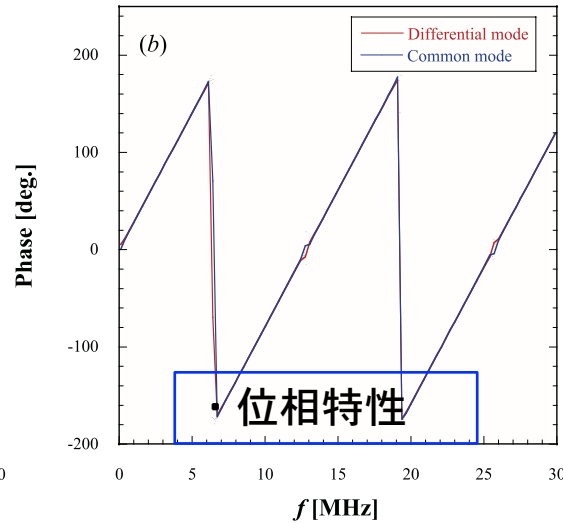
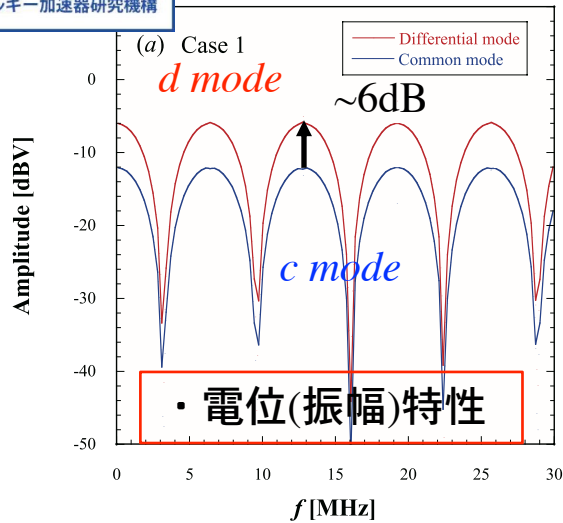
CM 1, 2, (a)-(c) left
CM 3, (a)-(c) right

モード伝送のシミュレーション解析

	<i>Acc</i> <i>Gnd.</i>	信号源	<i>Gnd Line</i> Z [Ω]	<i>Int.</i> Z [Ω]	<i>Ext.</i> Z [Ω]	備考
Case 1	<i>On</i>	$e_1=V_G(\omega)$, $e_2=0$	$Z_3 = Z_6 = 0$	$Z_1 = Z_2 = 0$	$Z_3 = 50, Z_4 = 0$	<i>CM1, 2</i> 相当 非対称負荷
Case 2	<i>Off</i>	$e_1=V_G(\omega)$, $e_2=0$	$Z_3 = +\infty, Z_6 = 0$	$Z_1 = Z_2 = 0$	$Z_3 = 50, Z_4 = 0$	非対称負荷
Case 3	<i>On</i>	$e_1=V_G(\omega)$, $e_2=0$	$Z_3 = Z_6 = (R+j\omega L)/2$ $R = 15\Omega, L = 0.33\mu\text{H}$	$Z_1 = Z_2 = 0$	$Z_3 = 50, Z_4 = 0$	<i>CM3</i> 相当 非対称負荷
Case 4	<i>On</i>	$e_1=V_G(\omega)$, $e_2=0$	$Z_3 = Z_6 = (R+j\omega L)/2$ $R = 15\Omega, L = 0.33\mu\text{H}$	$Z_1 = Z_2 = 0$	$Z_3 = 50, Z_4 = 50$	対称負荷

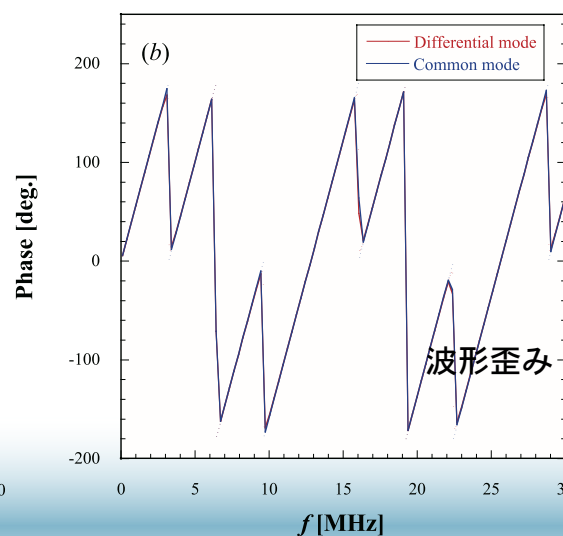
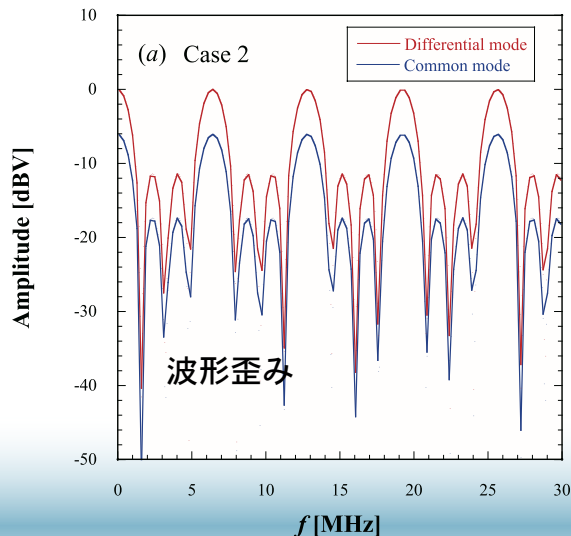
解析条件, Case 1-4, *Acc. Gnd. on/off* の効果, 構成要素の対称性の違いを解析する

モード伝送のシミュレーション解析/続き



Case 1, *Acc Gnd. on*

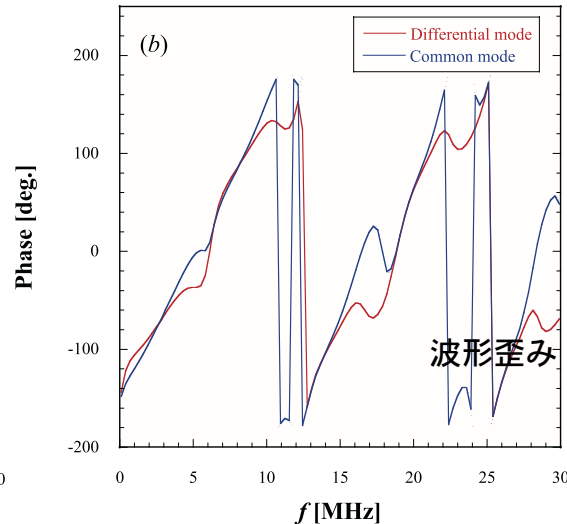
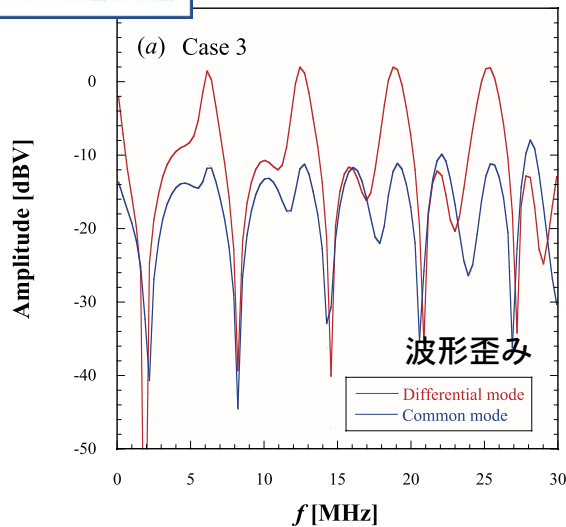
- ・ 基本スペクトル
- ・ 振幅、位相スペクトルに歪なし
- ・ 信号伝送に歪なし
- ・ *c mode*生成の抑制効果小



Case 2, *Acc Gnd. off*

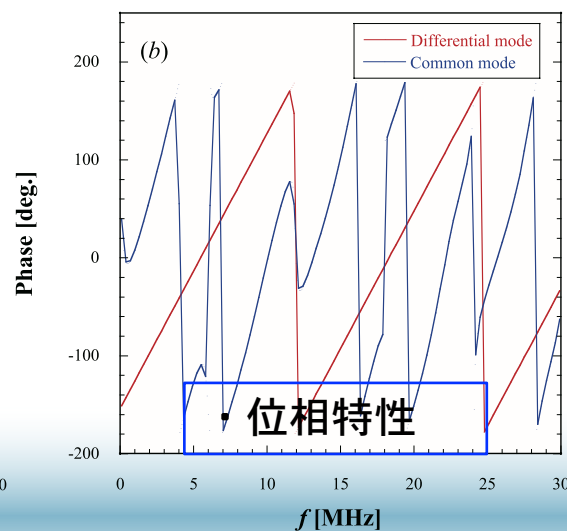
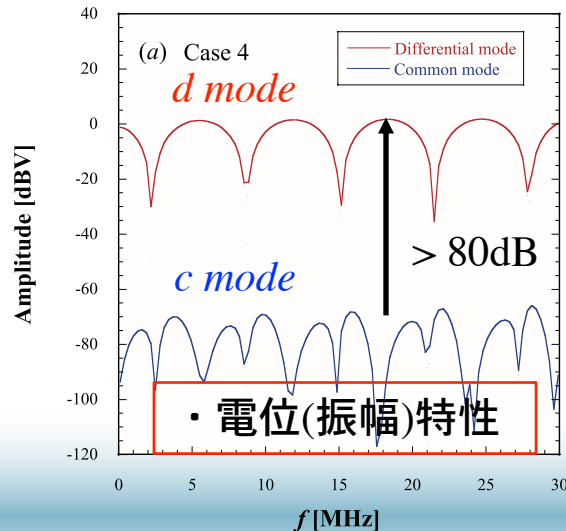
- ・ 振幅、位相スペクトルに歪あり
- ・ 信号伝送に歪あり

モード伝送のシミュレーション解析/続き



Case 3, *Acc Gnd. off*

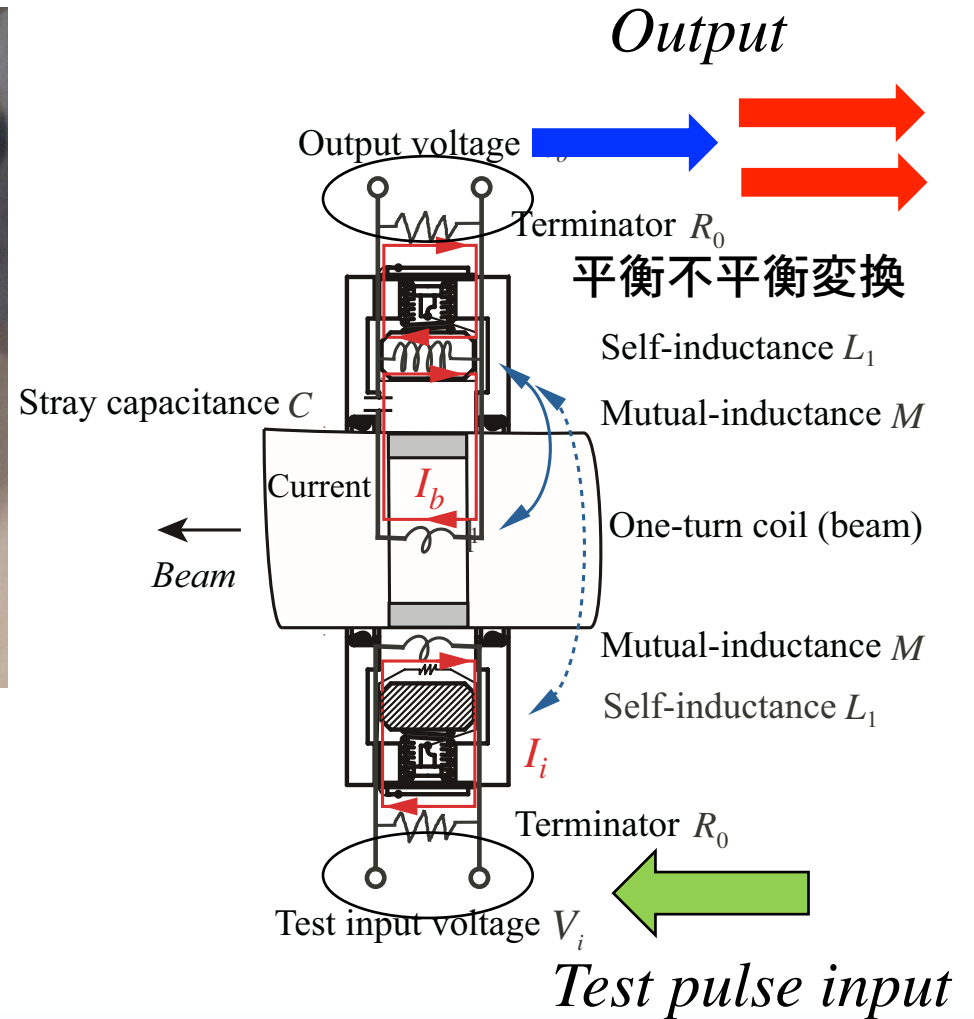
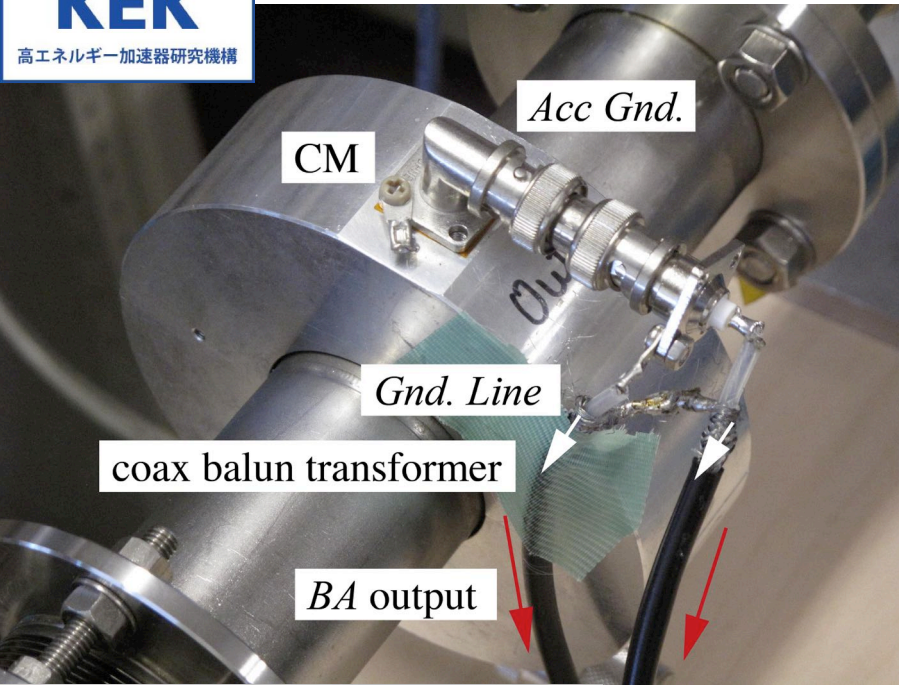
- ・ 振幅、位相スペクトルに歪あり
- ・ 信号伝送に歪あり



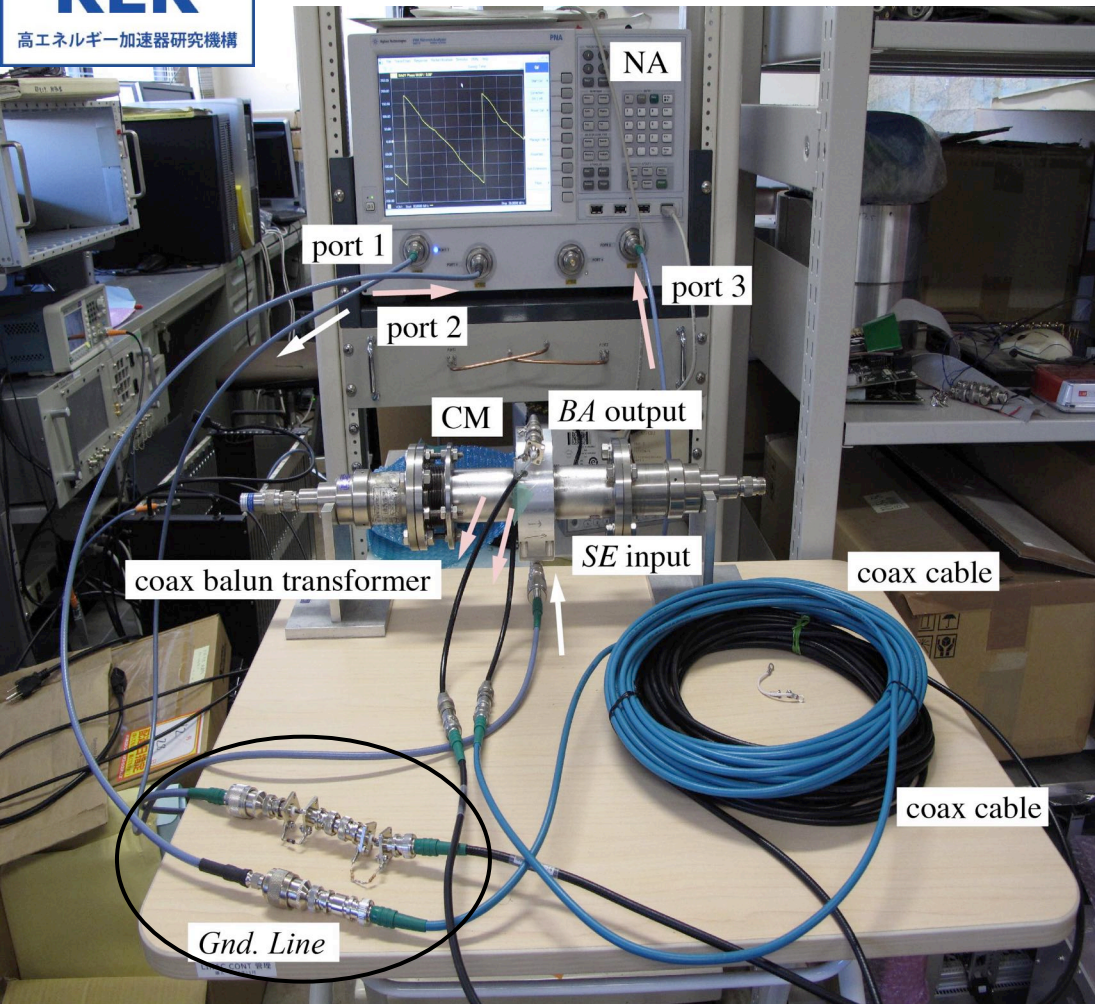
Case 4, *Acc Gnd. off*

- ・ 振幅、位相スペクトルに歪なし
- ・ *d mode* 信号伝送に歪なし
- ・ *c mode* 生成の抑制効果大

Cモード伝送の実験的検証



Cモード伝送の実験的検証/続き



Two-port Network Analyzer

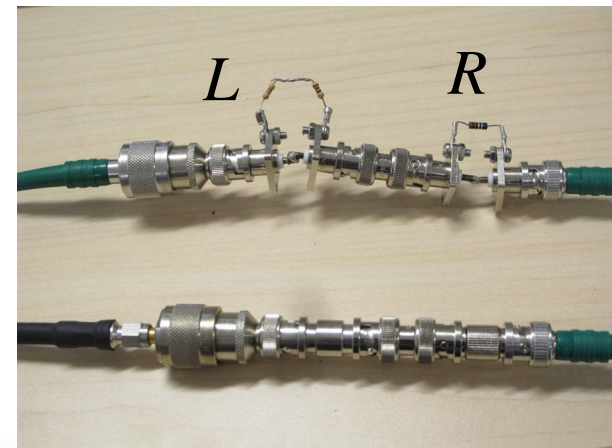
- 入出力2ポート

Multi-port Network Analyzer

- > 2ポート(多入出力)

*Gnd. Line*上にインピーダンスを挿入

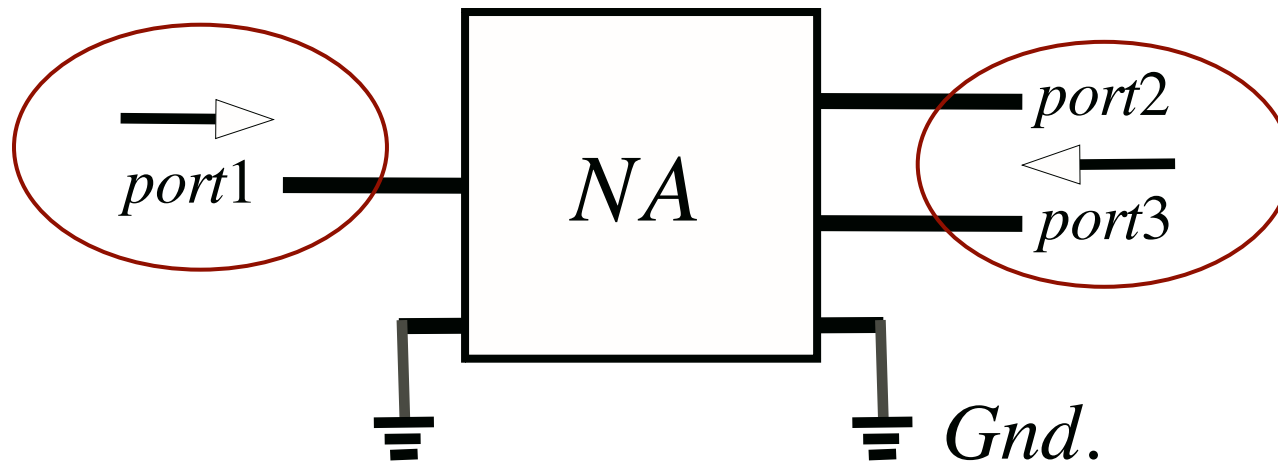
15m長同軸ケーブル2本



Cモード伝送の実験的検証/続き

Single-Ended

Balanced



Single-port Network Analyzer

- 入出力2ポート計測量/透過 S_{21}

Multi-port Network Analyzer

- 3ポート計測量/透過 S_{ds21} , S_{cs21} (振幅と位相の計測)

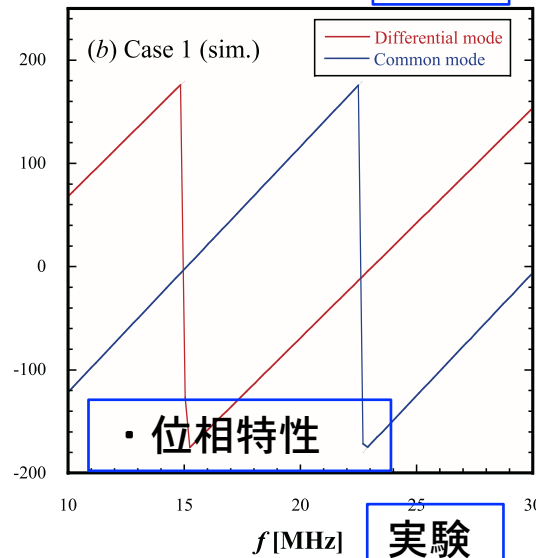
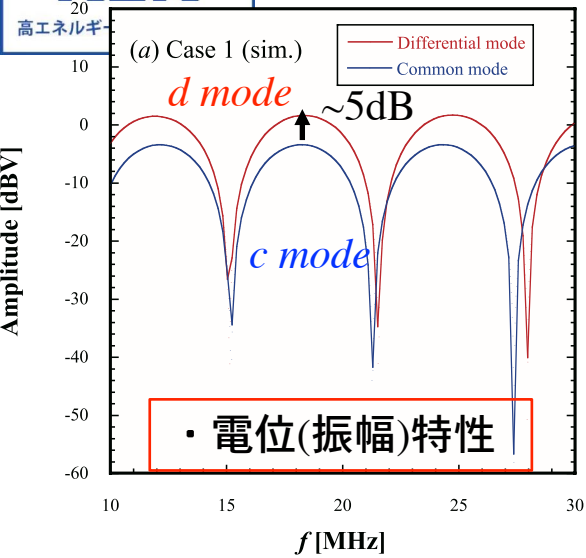
実験的検証のための解析/続き

sim./exp.	Acc Gnd.	信号源	Gnd Line Z [Ω]	Int. Z [Ω]	Ext. Z [Ω]	備考
Case I	<i>On</i>	$e_1=V_G(\omega)$, $e_2=0$	$Z_3 = Z_6 = 0$	$Z_1 = Z_2 = 0$	$Z_4 = 50, Z_5 = 50$	対称負荷
Case II	<i>Off</i>	$e_1=V_G(\omega)$, $e_2=0$	$Z_3 = +\infty, Z_6 = 0$	$Z_1 = Z_2 = 0$	$Z_4 = 50, Z_5 = 50$	対称負荷 Gnd. Line負荷
Case III	<i>On</i>	$e_1=V_G(\omega)$, $e_2=0$	$Z_3 = 0, Z_6 = 15$	$Z_1 = Z_2 = 0$	$Z_4 = 50, Z_5 = 50$	対称負荷 Gnd. Line負荷
Case IV	<i>Off</i>	$e_1=V_G(\omega)$, $e_2=0$	$Z_3 = +\infty, Z_6 = 15$	$Z_1 = Z_2 = 0$	$Z_4 = 50, Z_5 = 50$	対称負荷 Gnd. Line負荷

解析条件, Case 1-4, *Acc. Gnd. on/off* の効果の違いを解析

モード伝送のシミュレーション解析/続き

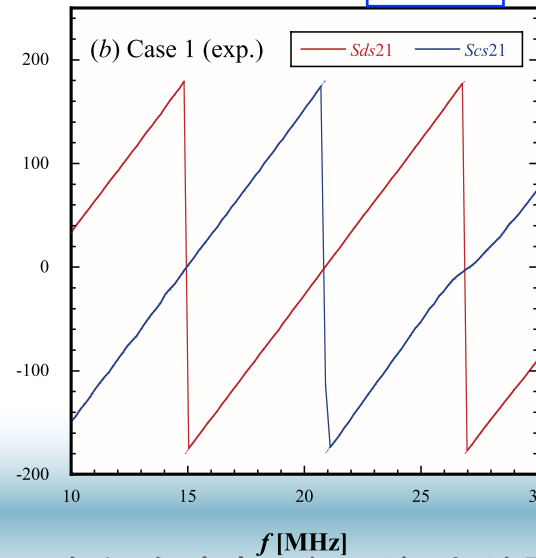
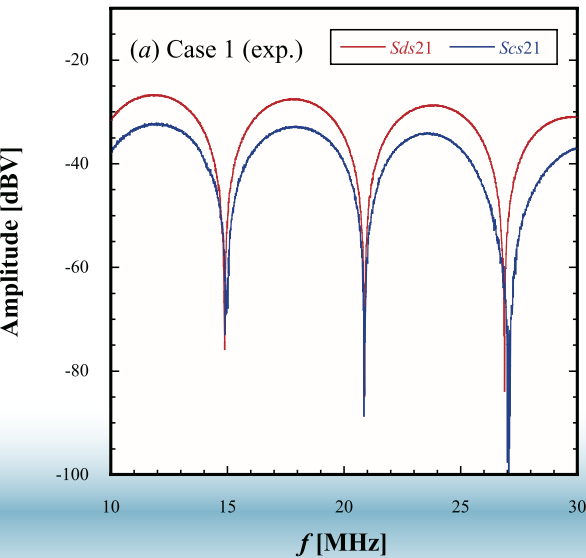
計算



Case I, *Acc Gnd. on*

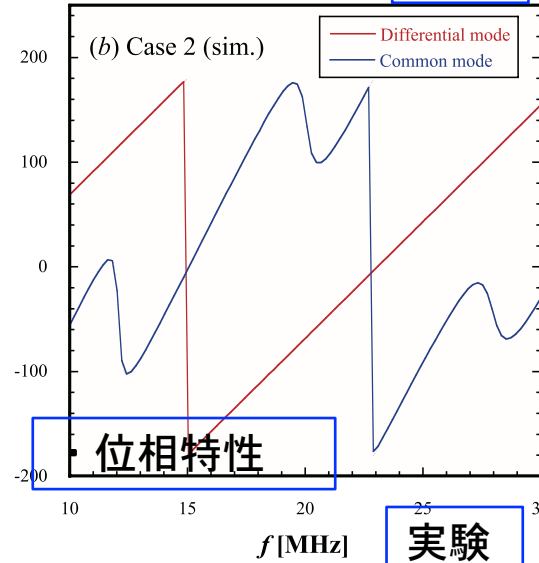
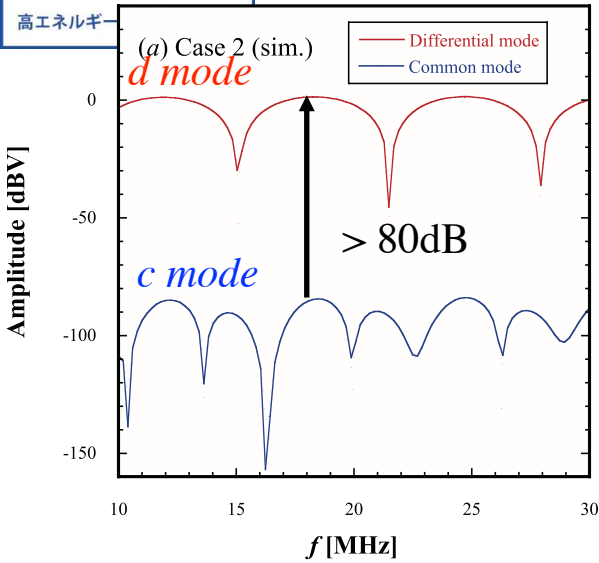
- 基本スペクトル
- 振幅、位相スペクトルに歪なし
- 信号伝送に歪なし
- 計算と実験はよく一致

実験

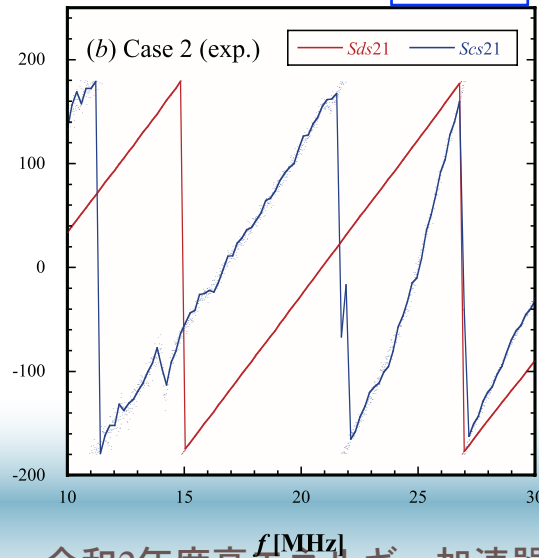
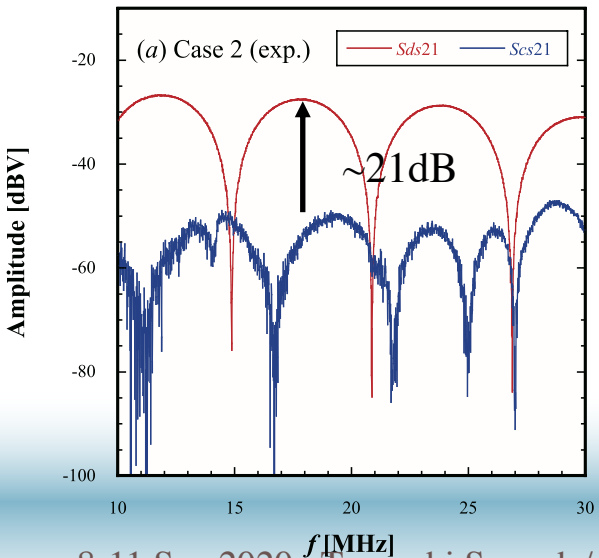


モード伝送のシミュレーション解析/続き

計算



実験

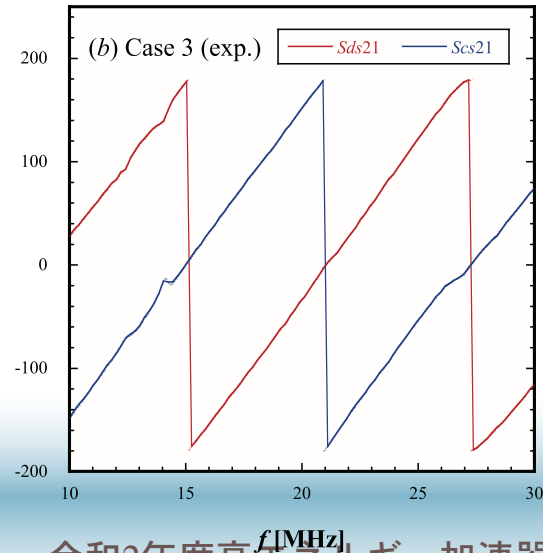
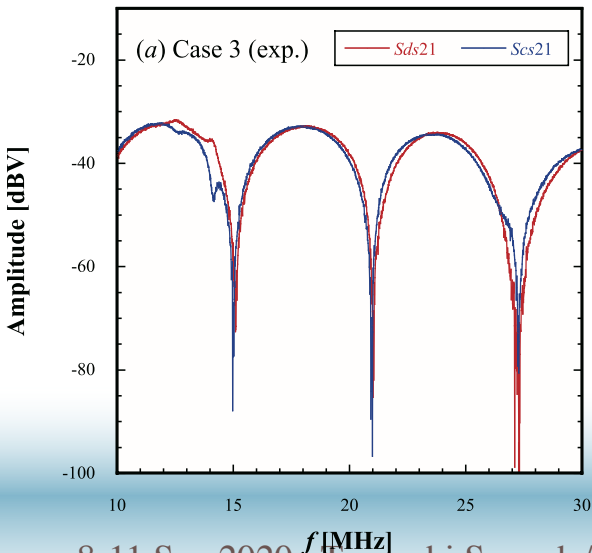
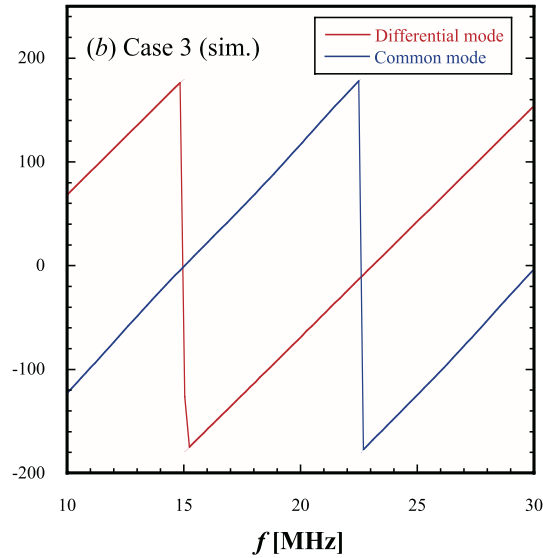
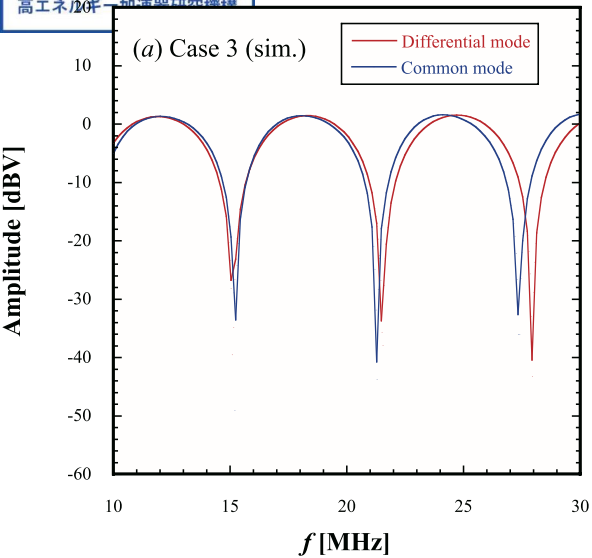


Case II, *Acc Gnd. off*

- *d mode* 振幅、位相スペクトルに歪なし
- *d mode* 信号伝送に歪なし
- *c mode* 生成の抑制効果大
- 計算と実験は一致はよくない

→ 実験において非対称性が残存、計算における非対称性は理想的

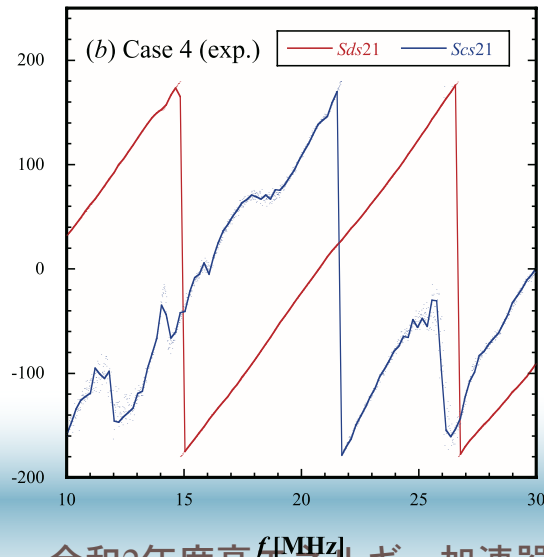
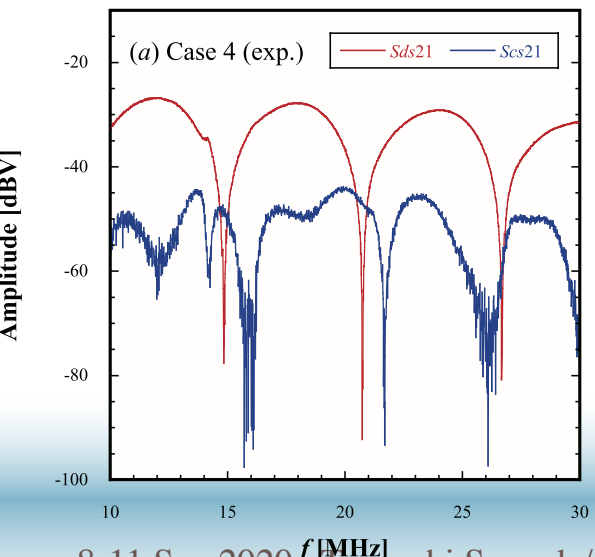
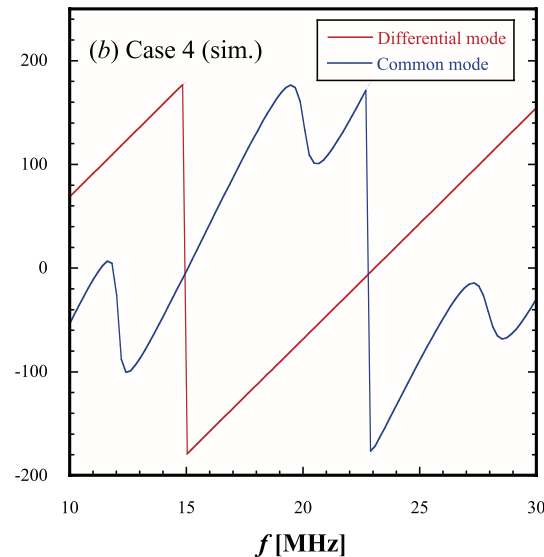
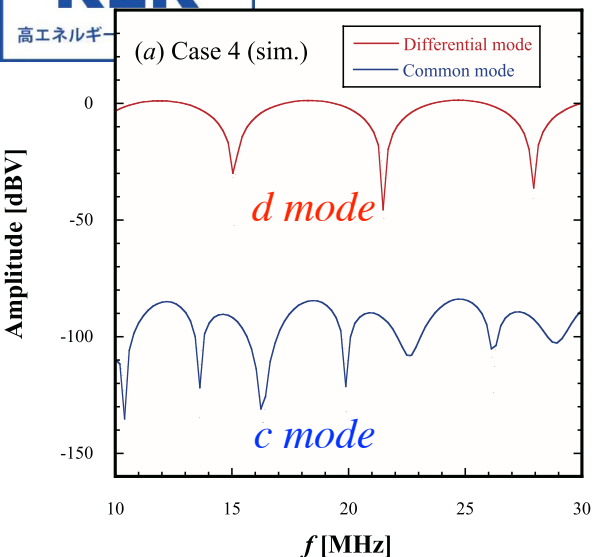
モード伝送のシミュレーション解析/続き



Case III, *Acc Gnd. on*

- ・ 振幅、位相スペクトルに歪なし
- ・ 信号伝送に歪なし
- ・ *c mode*生成の抑制効果小
- ・ 計算と実験は一致は一致

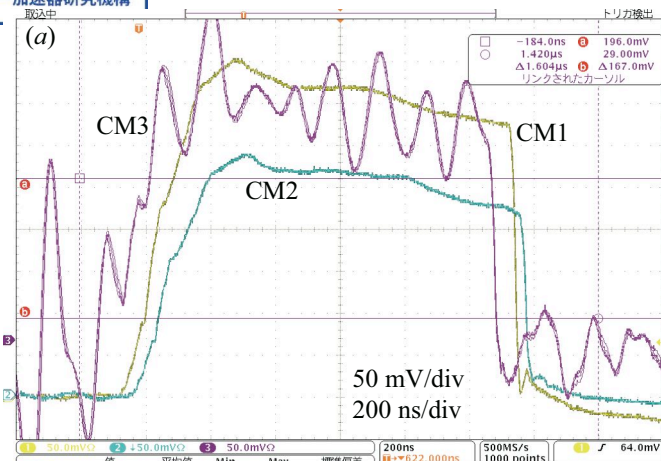
→ この例が示すように、*c mode*の抑制効果が小さいと伝送路における非対称性が存在すると容易に *c* → *d mode*変換が生じる



Case IV, *Acc Gnd. off*

- *d mode* 振幅、位相スペクトルに歪なし
- *d mode* 信号伝送に歪なし
- *c mode* 生成の抑制効果大
- 計算と実験は一致はよくない

→ この例が示すように、*c mode* の抑制効果が大い
と伝送路における非対称性、*Gnd. Line* 負荷の存在
にも関わらず *c* → *d mode*
変換を効果的に抑制する



CM3ノイズ
対策前

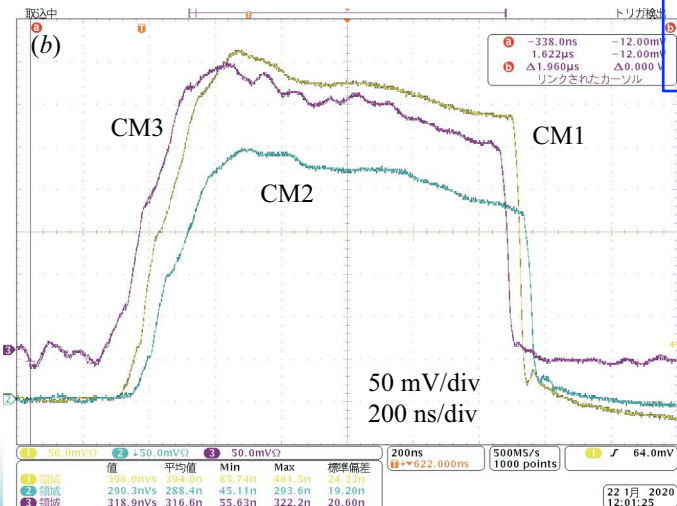
Acc Gnd. off

観測CM信号波形

- ・ CM1, 2、ノイズ小
- ・ CM3、ノイズ大

ノイズ対策後の信号波形

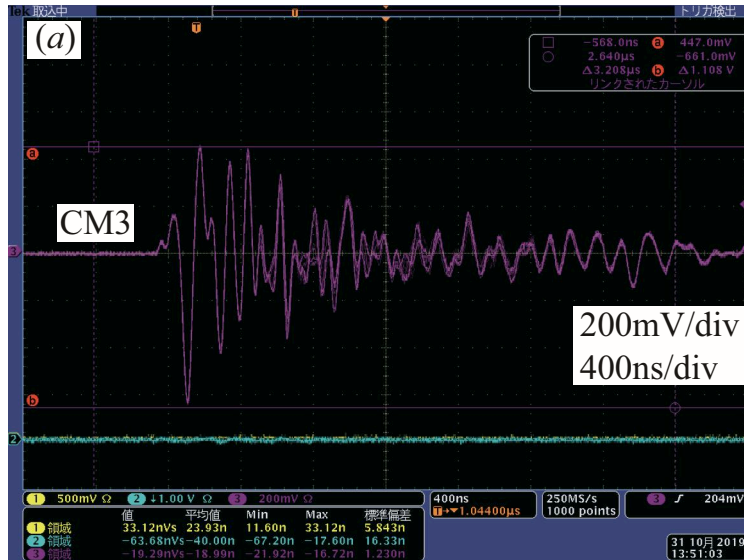
- ・ CM1, 2 : 元々 *Acc Gnd. on*
- ・ CM3 : *Acc Gnd. off*
→ *Acc Gnd. on*へ移行
- ・ ノイズ対策は有効



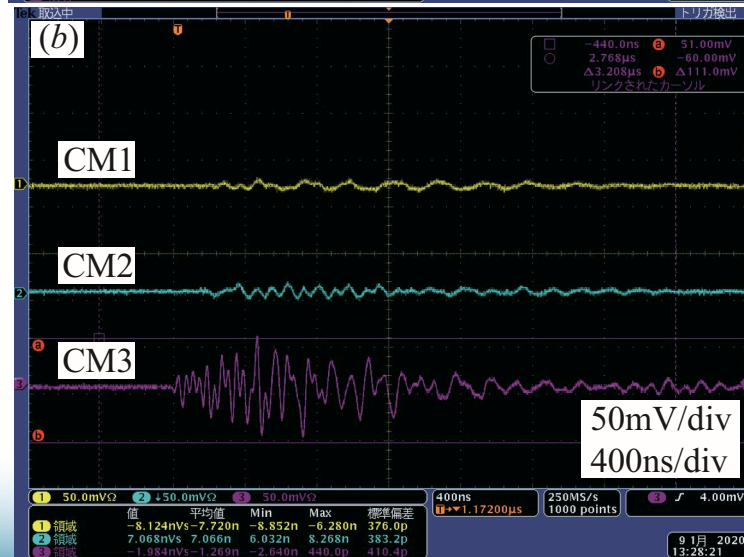
CM3ノイズ
対策後

Acc Gnd. on

ノイズ低減技術/続き



観測ノイズ波形@対策前
@ビーム無/クライストロンON

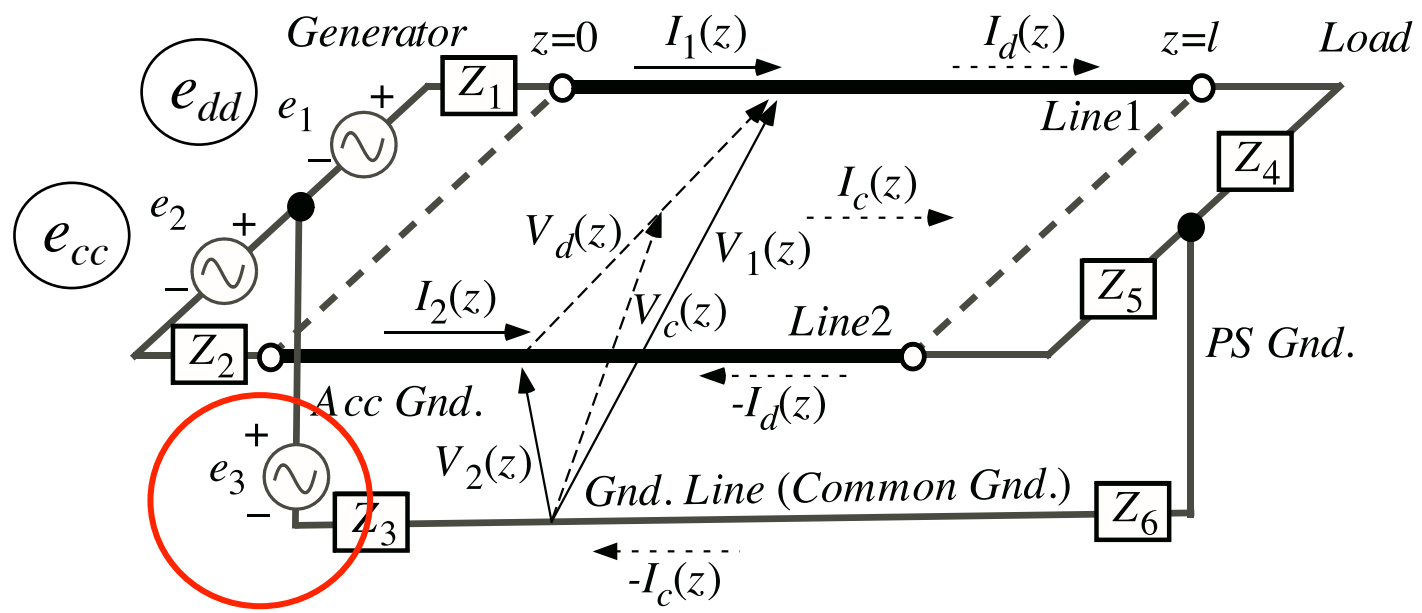


観測ノイズ波形@対策前

- ・ *CM3*: ノイズレベルは~1/10に低減したが、*CM1, 2*のノイズレベルよりはやや大きい!

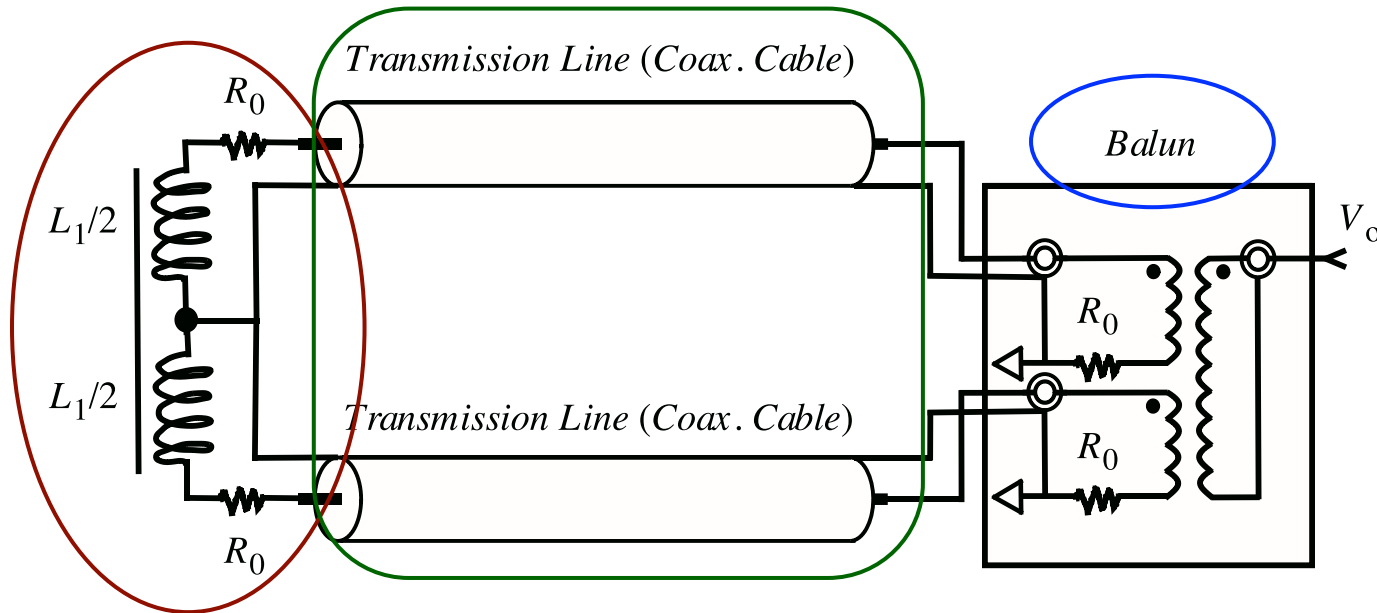
→ この結果を物理的にどう考えられるか?

信号伝送理論/続く



- $Gnd. Line$ 上にクライストロン由来のノイズ源(e_3)を想定
- このノイズは揺れるグラウンドと呼ばれる
- e_3 は $c mode$ を生成する
- 伝送途中で $c \rightarrow d mode$ 変換が生じ、この $d mode$ が本来のCM信号に重畳し観測されると考える

ノイズ低減技術の本質



- ・ 伝送路は高対称性で配置
- ・ インピーダンス整合を取るために内部負荷 R_0 を対称配置
- ・ グランド位置に注意、特にアースグランドとの短絡
- ・ バランを使えば $c \rightarrow d mode$ 変換ができ市販オシロが使用可

まとめ

1. コアモニターを取り上げ、信号伝送の解析とノイズ対策技術について解説した。
2. ノイズ生成には、*Gnd. Line*をどのように考えるのか (揺れる*Gnd. Line*)、伝送固有モードには*Differential mode*と*Common mode*があること、また*Common mode*が*Differential mode (Mode conversion)*に変換してしまうという厄介な問題(通常の*Choke Coil*では除去できない)であることが理解できる。
3. モニターと計測装置はできるだけ最短距離に設置し、両*Gnd.*を同電位に保つようにすることが肝要. グランド位置にも注意が必要。
4. 両*Gnd.*の同電位が困難な場合(遠く離れている場合)、伝送路のインピーダンス配置の対称性をよくすれば、*Mode conversion*をより効果的に抑制できる。