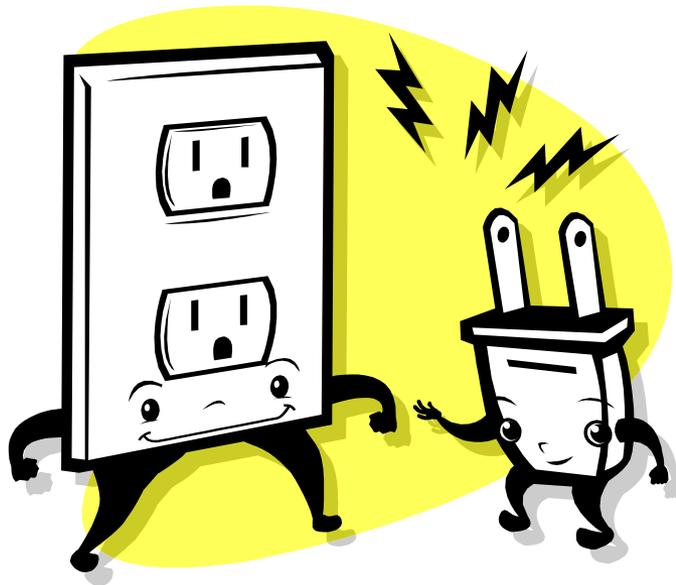


高速電力線搬送通信設備作業班(第15回)資料 ~ 三相線上利用検討
実測およびシミュレーション解析の評価結果



2018年10月11日

高速電力線通信推進協議会(PLC-J)

高速PLC三相線上利用ケースにおける、実測 および シミュレーション (Sim)解析による評価結果を示す。

結果概要 :

- コモンモード電流、放射電磁界とも、周波数特性波形は実測と解析で近い値を達成できた。
- 周波数特性に現れる2つのピーク双方で、最大値も実測値を精度よく再現できた。
- VVVF3芯線の放射電磁界は、2芯線と比較して、3線目の終端条件による顕著な増加はなかった。

検証方式の全体概要

■ 検証方法

シミュレーション系と実測系の双方で下図の配線モデルを構築し、3線の影響を検証した。

- ① シミュレーション系 : モーメント法(MoM)を用いて配線からの放射電磁界を計算した。
- ② 実測系 : シミュレーション系と同スケールのモデルをオープンサイト上に構築し、実測した。

■ 配線モデル

2線の検討結果⁽¹⁾を参考に、3線での放射電磁界及びコモンモード電流を計算及び実測した。

・2線と3線による違いの検討のため、2芯及び3芯のVVFφ2.0mmケーブルを用いた。

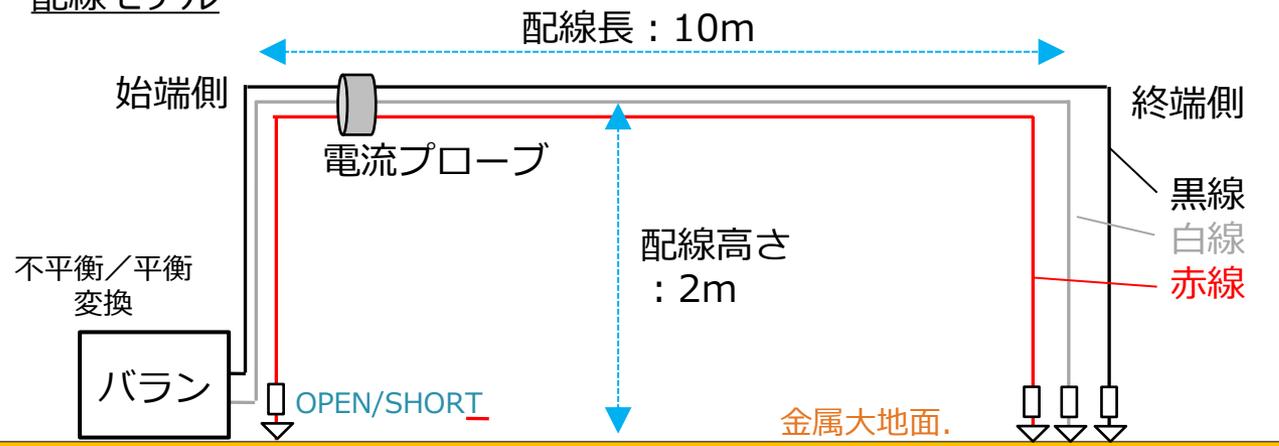
但し、シミュレーションでは被覆はモデル化せず、裸銅線とした。

・周波数範囲は2～30MHzとし、離隔距離3m,10mの放射電磁界を計算・実測した。

<参考文献> (1) 渡邊陽介, 徳田正満, 森田淳士, ”分岐のない電力線モデルの対地平衡度と漏えい磁界”,
電子情報通信学会論文誌 B Vol.J90-B No.3 pp.288-297 (2007)

実測およびSimの条件

配線モデル

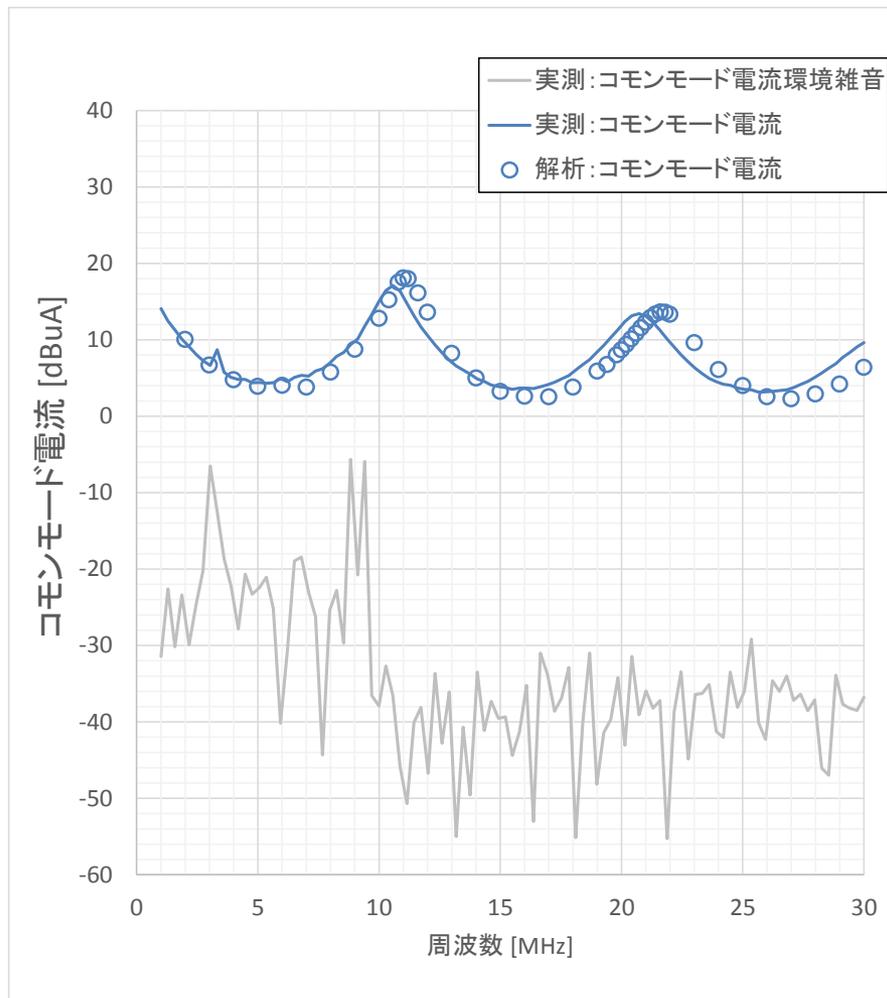


項目	モデル構成
配線	長さ10m、高さ2m
線種類	VVF2芯及び3芯
3線目終端	オープン 又は ショート
入力	balan
電圧印加線 終端処理	100Ωで接続
3線への 信号印加	線1&2(図中:黒・白) 線1&3(図中:黒・赤)

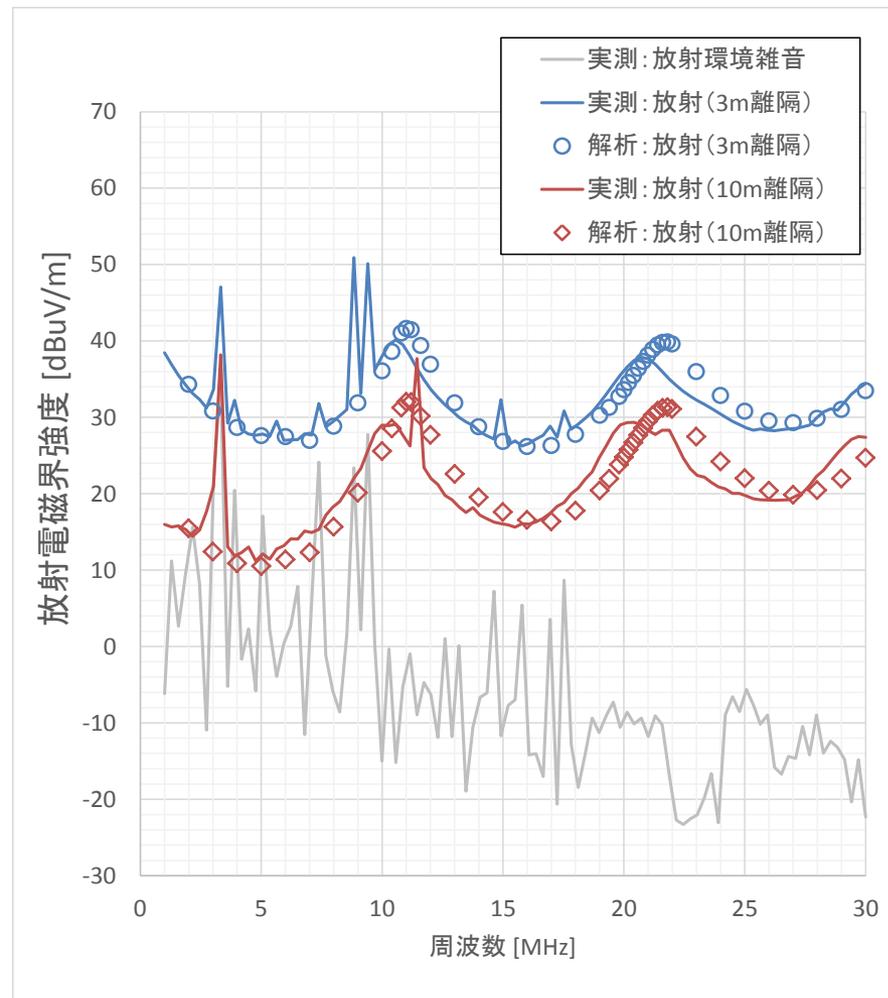
実測 対 シミュレーション解析 比較評価結果

【実測・解析比較】 2芯線

2芯線 コモンモード電流



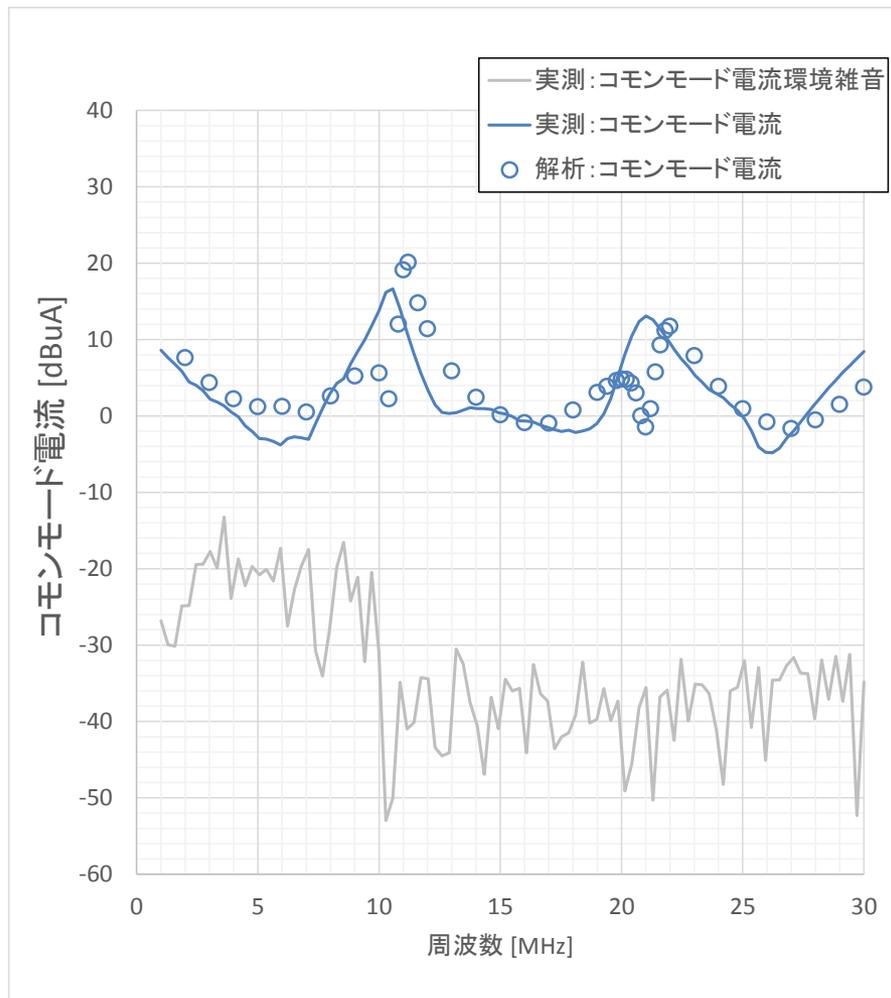
2芯線 放射電界強度



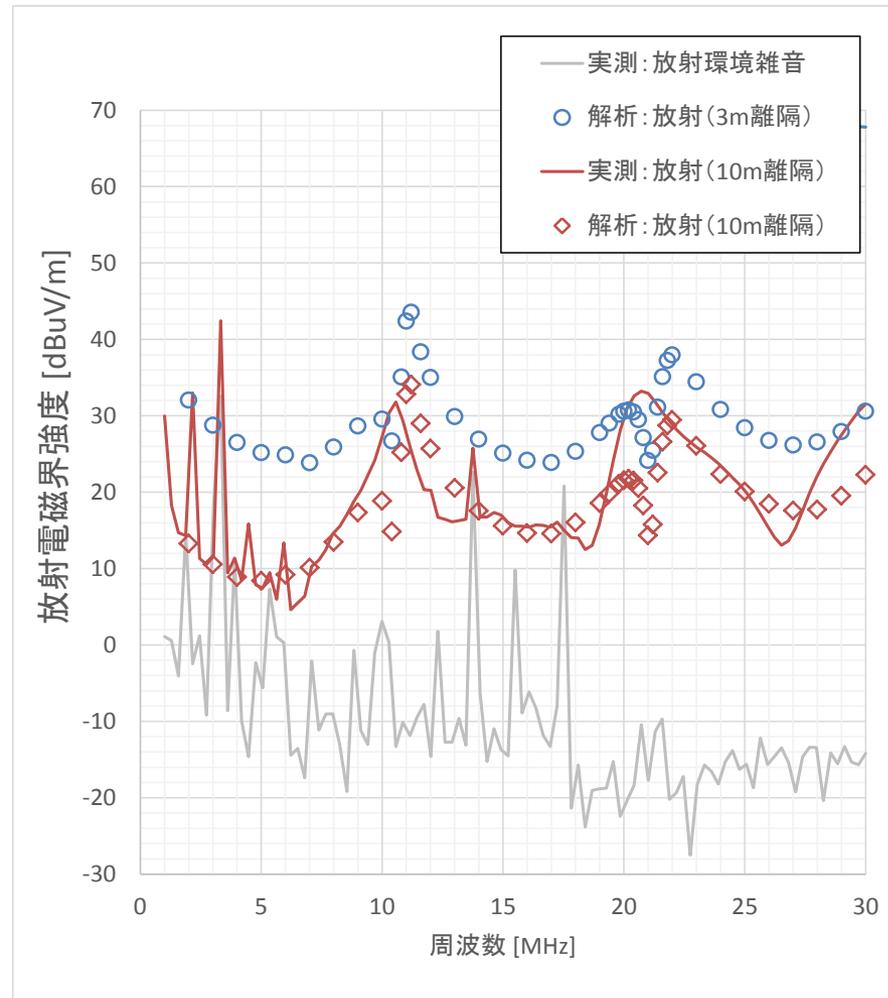
線路系は、全長(垂直部分と水平部分の和)約14メートルで共振する特性を得た。系のコモンモードインピーダンスが低いため、大きな定在波が波形に見られた。解析波形は実測に近く、また、11MHz及び21MHz付近のピークでのコモンモード電流、放射電磁界も、実測結果をよく再現した。

【実測・解析比較】 3芯線

3芯線 コモンモード電流



3芯線 放射電界強度



3芯線でも2芯線と同様、解析波形は実測に近く、また、11MHz及び21MHz付近のピークでのコモンモード電流、放射電磁界も、実測結果をよく再現した。

シミュレーション解析による、 その他の環境での 2芯線 対 3芯線 の比較評価結果

- ・VVVF3芯線の配置・終端条件を変えての評価
- ・芯線配置が三角形型の配線(ファクトライン)での評価

解析モデル及び条件

■解析内容

シミュレーションにより、3芯線における「線配置」、「印加線」、「3線目の終端条件」をパラメータとした計算を行い、それぞれの条件が放射電磁界に与える影響を検討した。

また、3線目の両端がShort及びOpenでの解析結果から、3線目の影響を考察した。

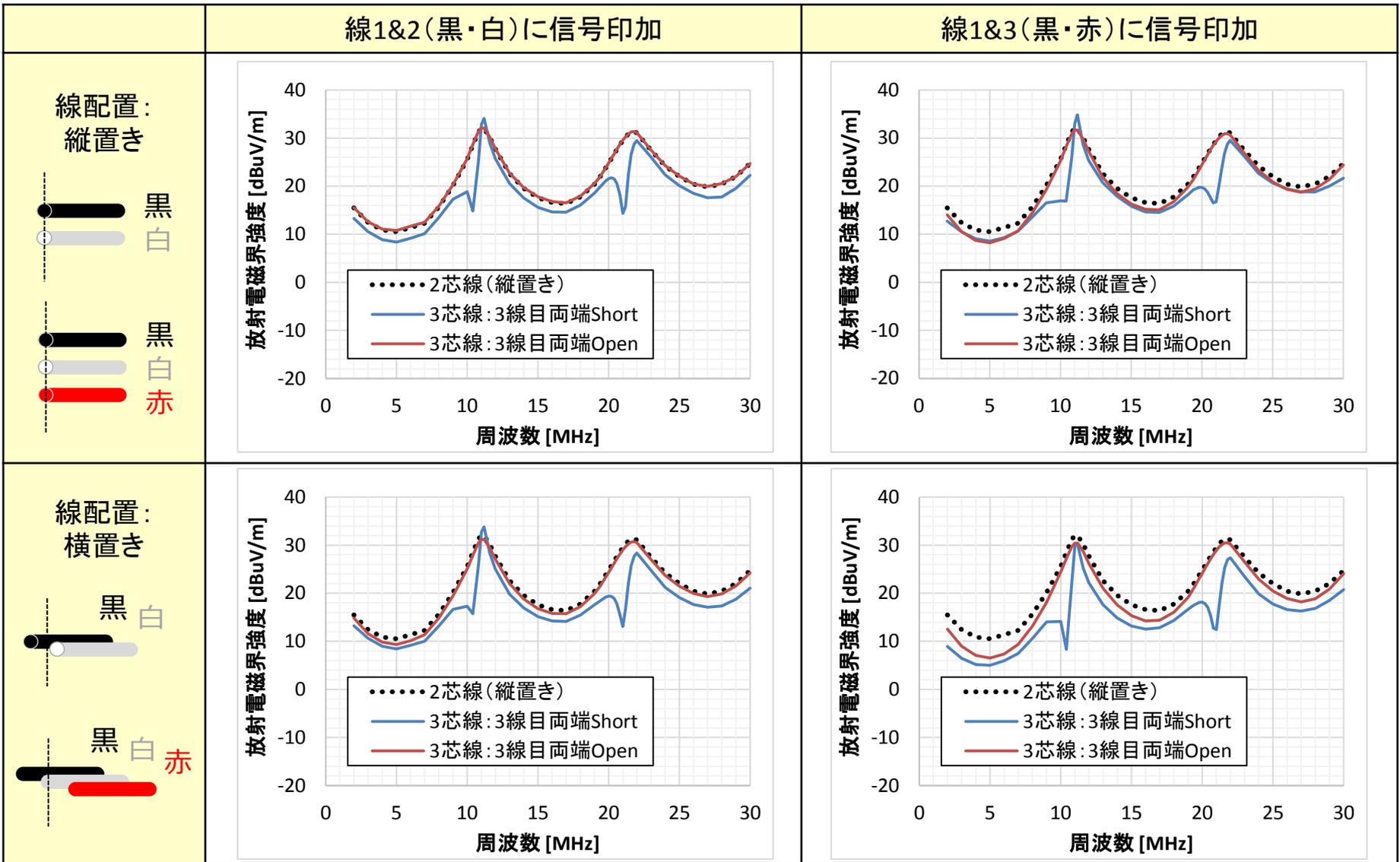
■解析モデル

「線配置」、「印加線」、「3線目の終端条件」以外の計算条件(線長、線間距離、バラン部、始端・終端条件など)は、実測と比較したモデルと同一とした。パラメータとした条件を下表に示す。

項目	線配置	印加線	3線目終端
水準①	配置: 縦置き 	線1&2 (黒・白)	両端 Short
水準②	配置: 横置き 	線1&3 (黒・赤)	両端 Open (1MΩで接地)

合計:
2 × 2 × 2 = 8条件

【2芯・3芯線比較】放射電磁界(離隔:10m)



いずれの条件でも、3線目の両端Openの放射電磁界は2芯線の場合とよく一致した。両端Shortでは、両端Openに比べて全体的にレベルが低下し、こちらも2芯線の場合に比べて大きな放射電磁界の増加は見られなかった。

【3線目の影響】 3線目：両端Short 2MHz

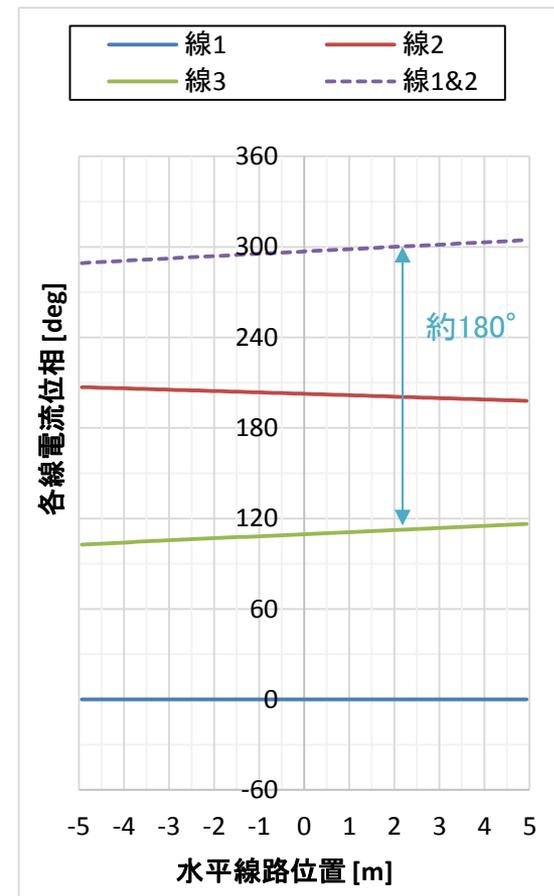
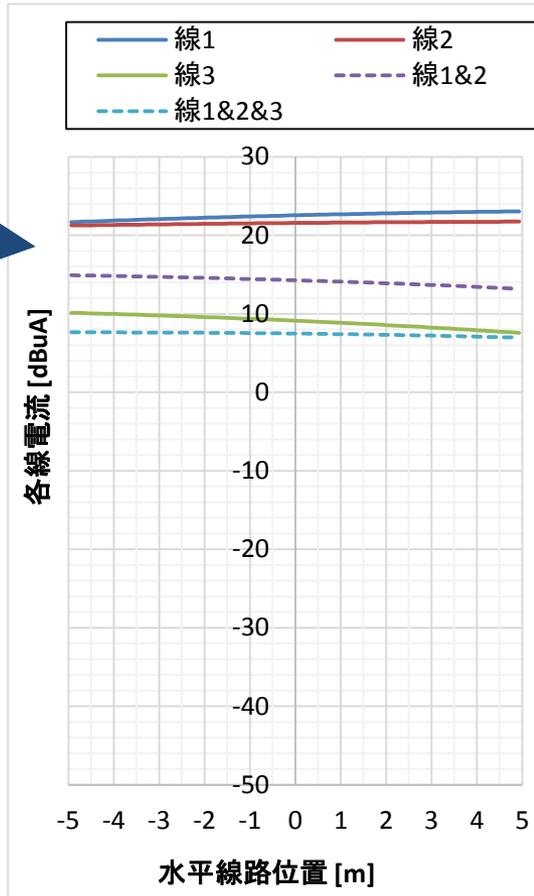
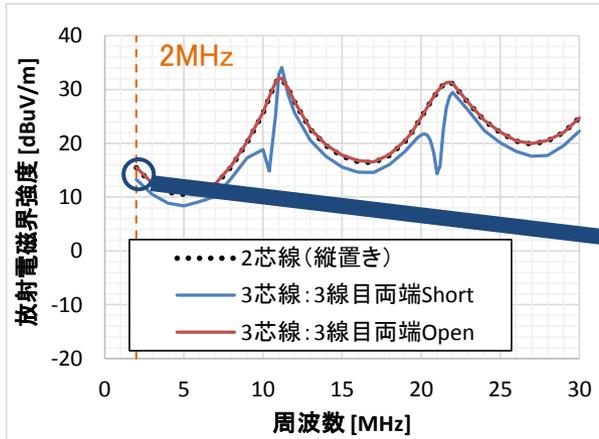
3芯線の解析結果から、各線の電流絶対値と位相をプロットし、3線目の影響を考察した。

⇒線配置：縦置き、線1&2に信号を印加、3線目：両端Short、2MHz(低周波)

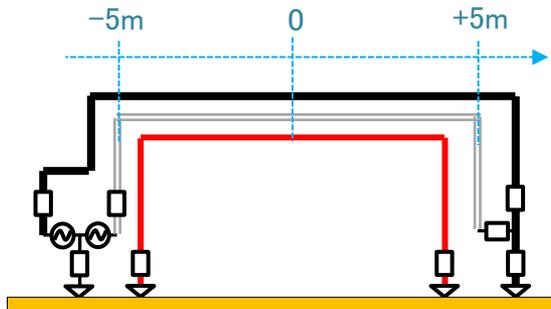
放射電磁界 離隔：10m
(縦線、線1&2に信号印加)

電流の位置特性：“絶対値”
(3線目：両端Short)

電流の位置特性：“位相”
(3線目：両端Short)



水平線路位置



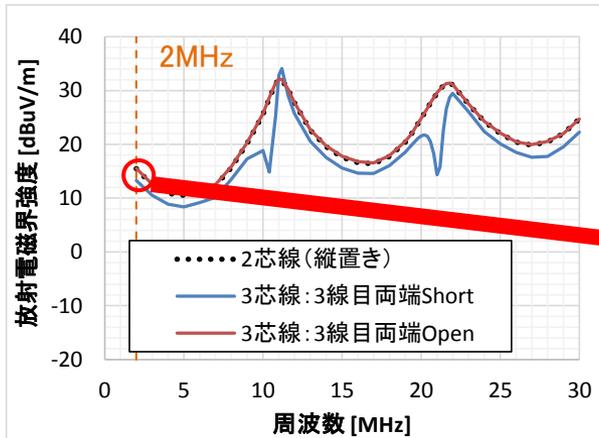
3線目が両端Shortの場合、2MHz(低周波)では、線1と線2の同相電流と約180°位相が違う電流が線3に流れた。つまり、3線目は合計の線1&2の同相電流を打ち消し、コモンモード電流を“小さくする”方向に作用した。

【3線目の影響】 3線目：両端Open 2MHz

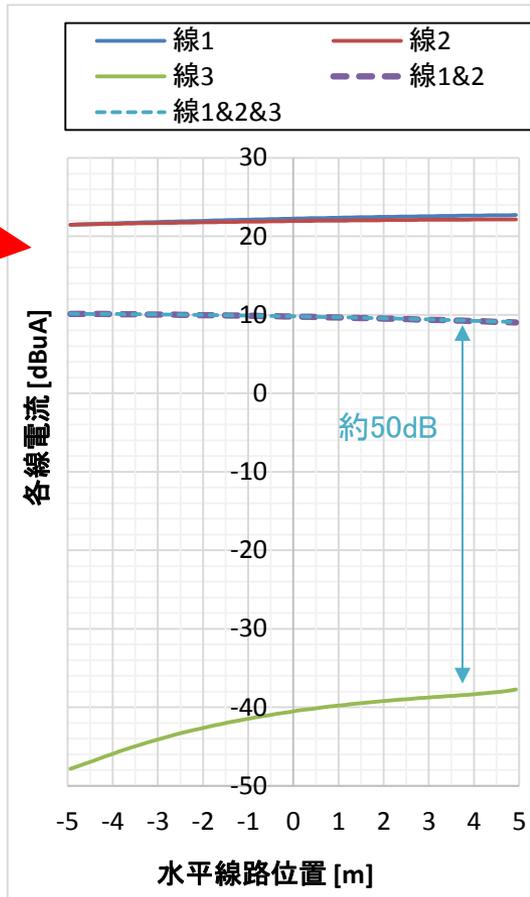
3芯線の解析結果から、各線の電流絶対値と位相をプロットし、3線目の影響を考察した。

⇒線配置：縦置き、線1&2に信号を印加、3線目：両端Open、2MHz(低周波)

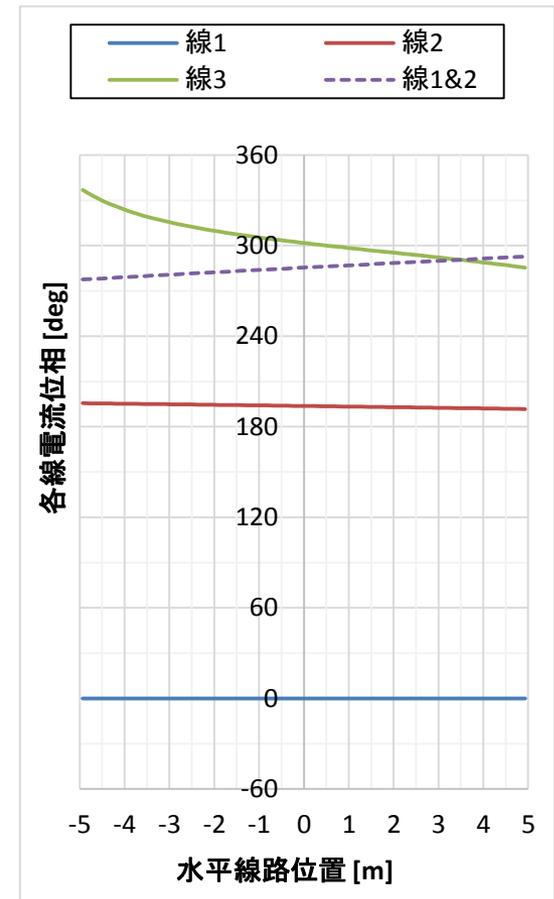
放射電磁界 離隔：10m
(縦線、線1&2に信号印加)



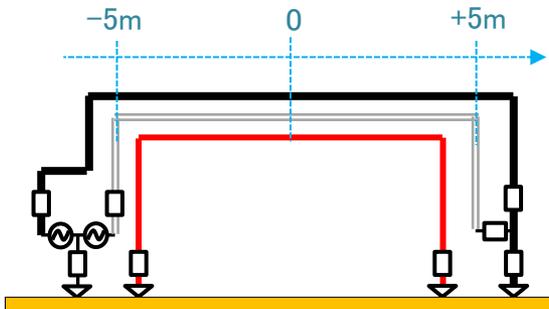
電流の位置特性:”絶対値”
(3線目：両端Open)



電流の位置特性:”位相”
(3線目：両端Open)



水平線路位置



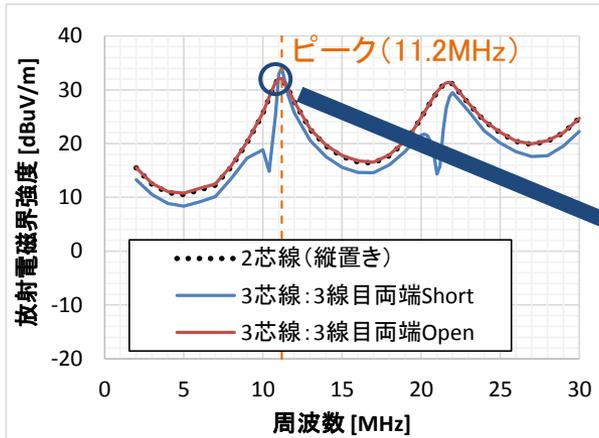
3線目が両端Openの場合、線3の電流は線1&2(線1と2の合成)電流と比べても約50dB以上小さかった。このため、3線目はコモンモード電流にも殆ど影響せず、放射電磁界も2芯線と同等だったと考えられる。

【3線目の影響】 3線目:両端Short ピーク

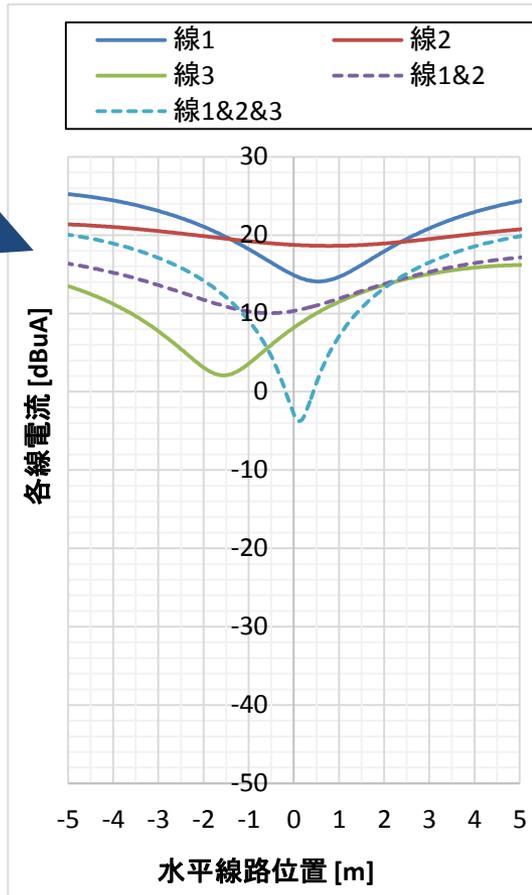
3芯線の解析結果から、各線の電流絶対値と位相をプロットし、3線目の影響を考察した。

⇒線配置:縦置き、線1&2に信号を印加、3線目:両端Short、ピーク(11.2MHz)

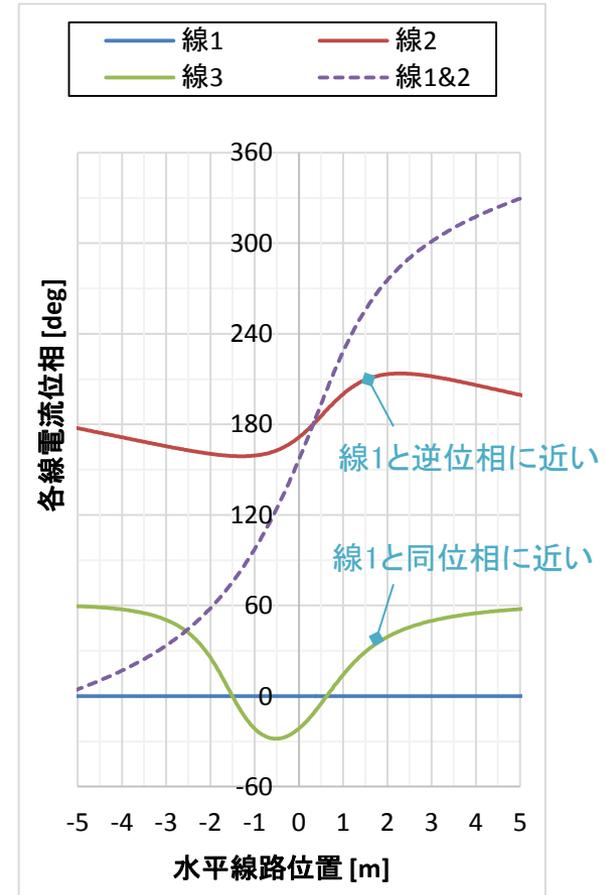
放射電磁界 離隔:10m
(縦線、線1&2に信号印加)



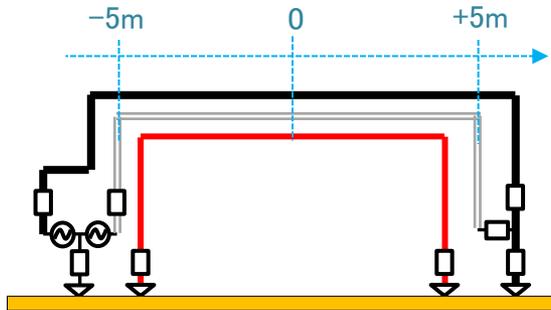
電流の位置特性:”絶対値”
(3線目:両端Short)



電流の位置特性:”位相”
(3線目:両端Short)



水平線路位置



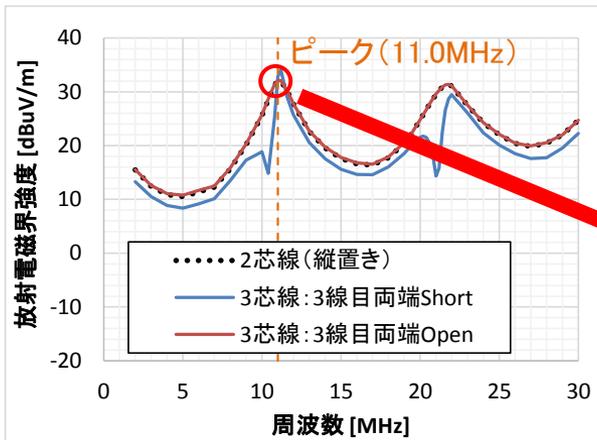
3線目が両端Short時のピークでは、線2、線3には線1と逆位相、同位相に近い電流が流れた。しかし完全に逆・同相ではなく、高い放射電磁界となったと考えられる。しかしこの場合でも、2芯線からは大きく増加しなかった。

【3線目の影響】 3線目：両端Open ピーク

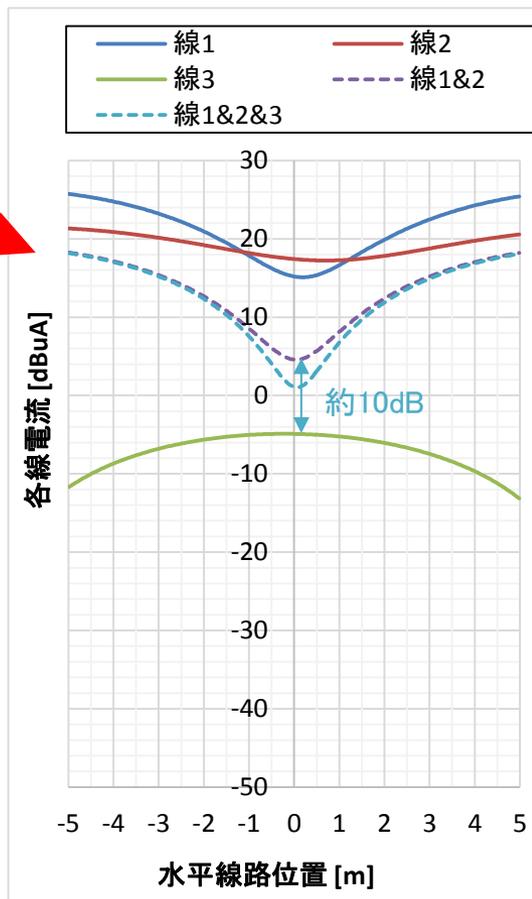
3芯線の解析結果から、各線の電流絶対値と位相をプロットし、3線目の影響を考察した。

⇒線配置：縦置き、線1&2に信号を印加、3線目：両端Open、ピーク(11.0MHz)

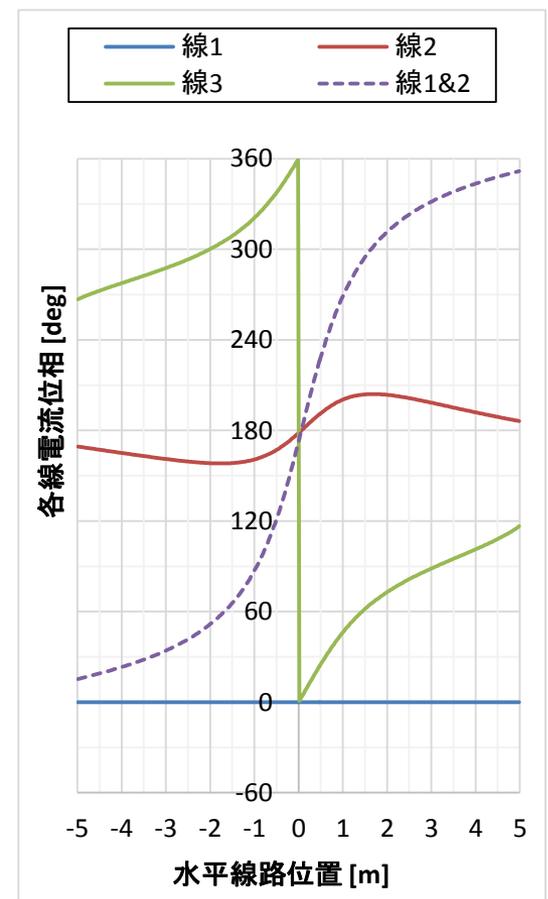
放射電磁界 離隔:10m
(縦線、線1&2に信号印加)



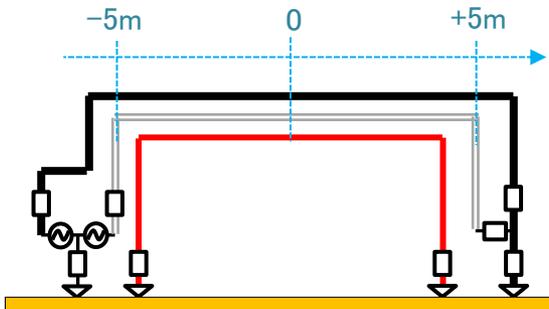
電流の位置特性:”絶対値”
(3線目:両端Open)



電流の位置特性:”位相”
(3線目:両端Open)



水平線路位置

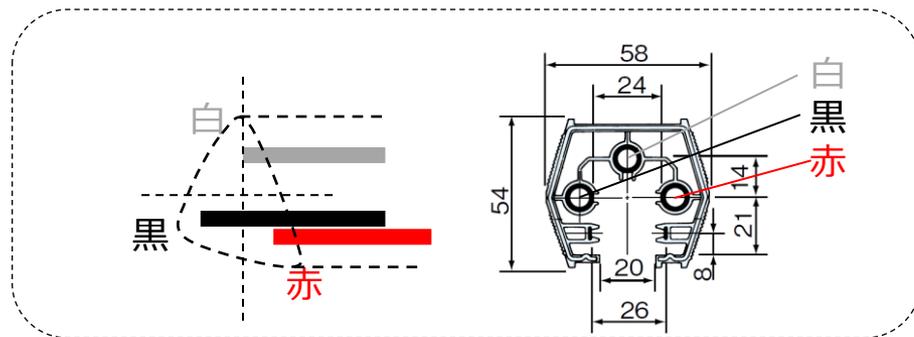


3線目が両端Openの場合、ピークにおいても線3の電流は線1&2(線1と2の合成)電流と比べて約10dB以上小さく、コモンモード電流への影響が小さかったため、放射電磁界も2芯線と同等だったと考えられる。

芯線配置が三角形型の配線での評価

3芯線が縦一列並び／横一列並ぶ配線での評価に続き、さらに、3本の芯線が一行に並ばない配線についてもモデル化し放射電磁界を計算した。

(配線を包むダクト、線同士の架橋部 はモデル化省略。 3本の線を三角形の頂点になるよう配置。)



参考: ファクトライン100
http://www2.panasonic.biz/es/densetsu/haikan/factline/lineup/factline100_60.html

3芯線モデル

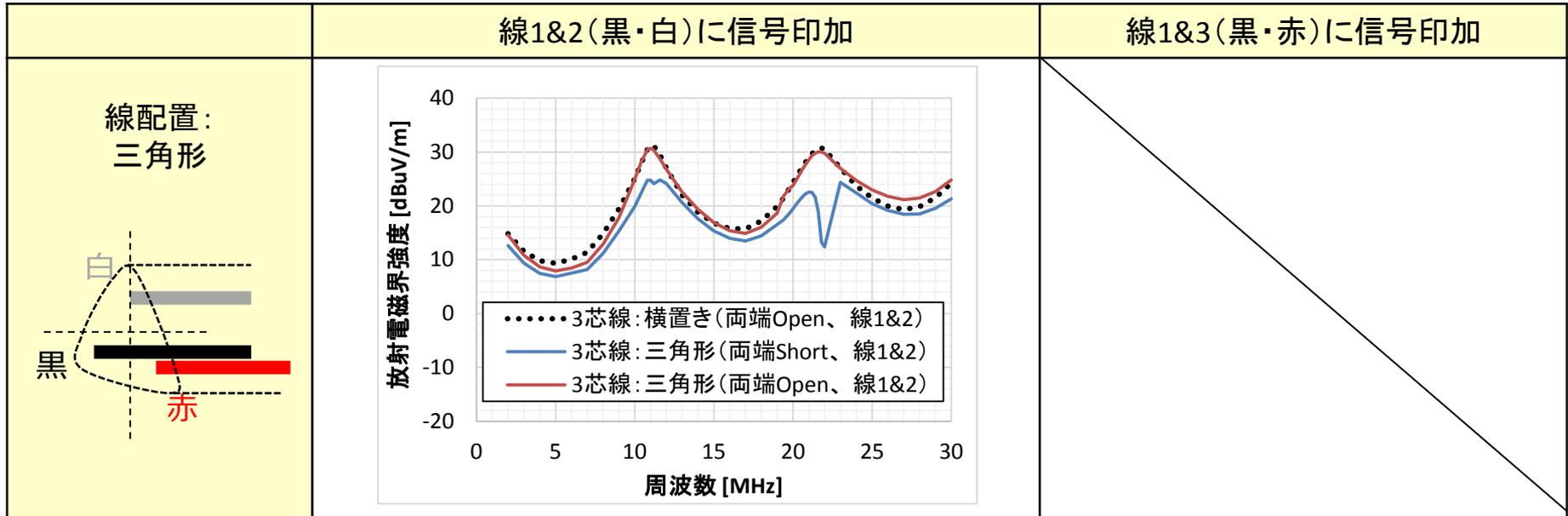
垂直配線はVVF3芯線
(横置きと同じ)

10m(3線中心間)

2m
(黒・赤線中心)

金属大地面

【三角形型芯線配置】 放射電磁界



※3芯線の配置:横線、両端Open、線1&2に 印加した場合の解析結果と比較

※線1&2(黒・白線)に信号印加した場合の平衡度が低いため、線1&2信号印加のみ計算

今回検討した三角形の線配置では、VVF3芯線からの放射の増加は見られなかった。
(3線目の両端がShort、Openの両ケースにおいて)

Appendix

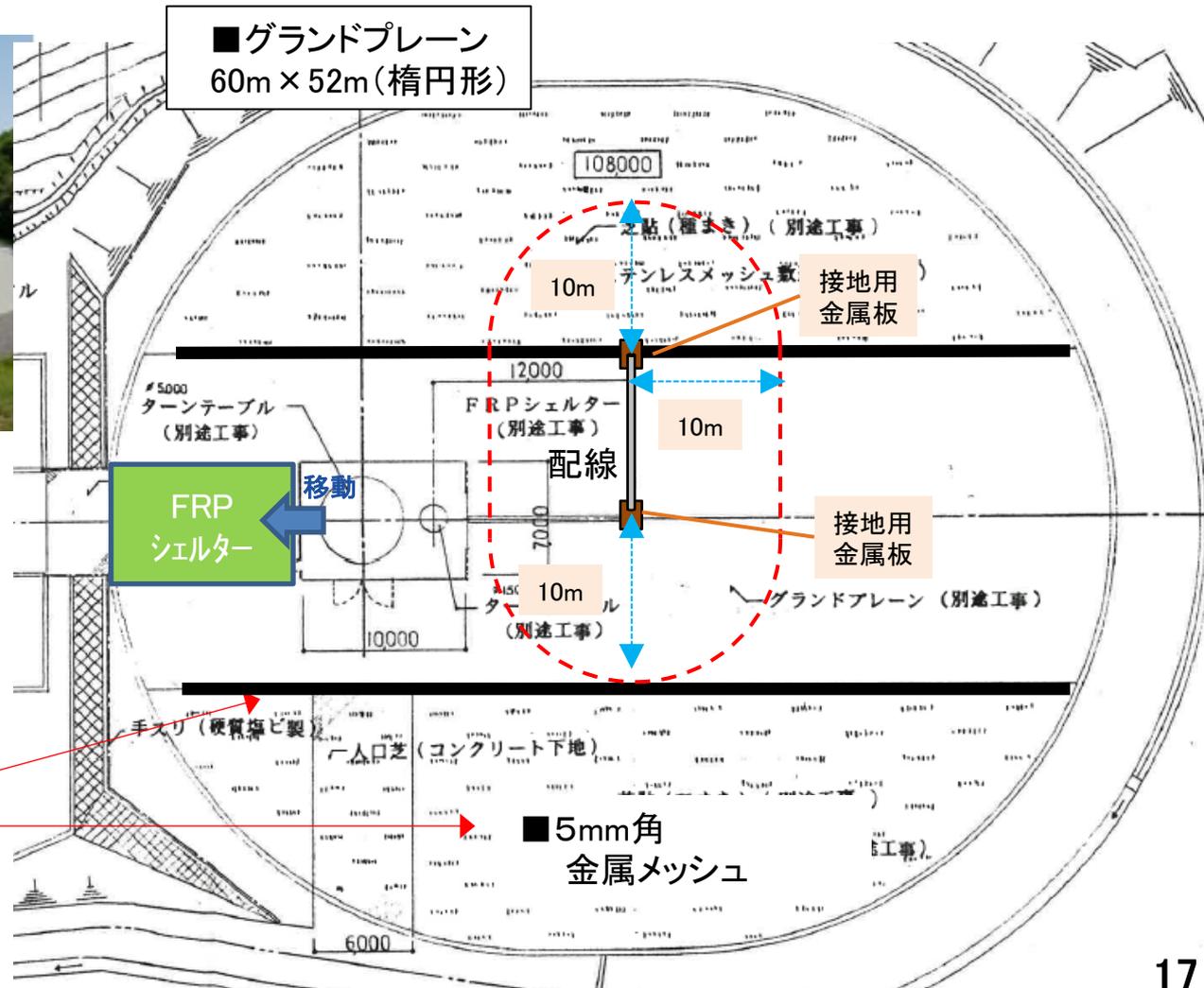
実測系(篠山オープンサイト)の詳細

実測系全体像

- パナソニック(株)プロダクト解析センターの篠山オープンサイト(兵庫県篠山市)に実測系を構築し、実測を実施した。



オープンサイト

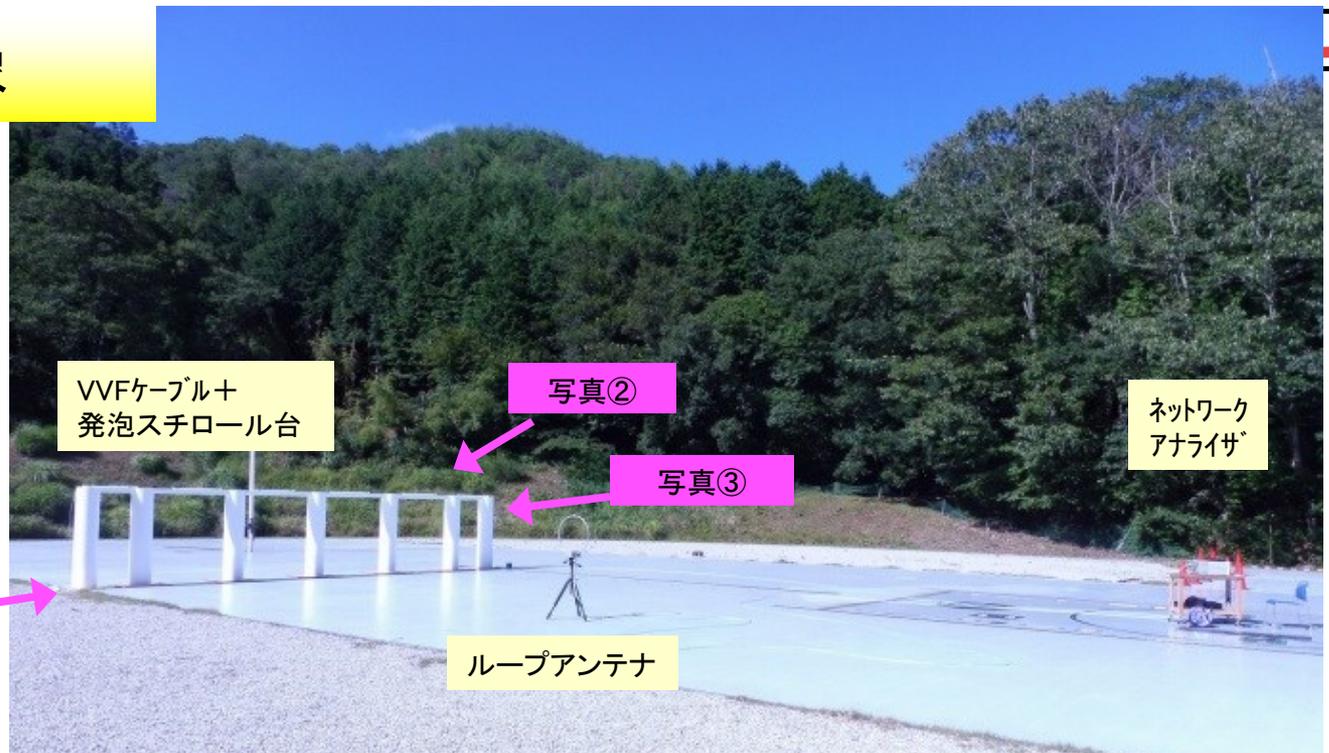


金属メッシュ



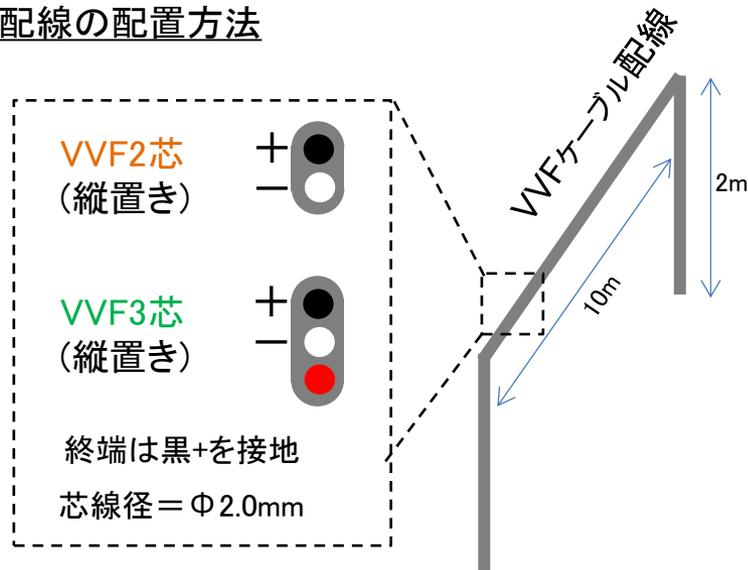
実測系全体像

■実測系全体外観

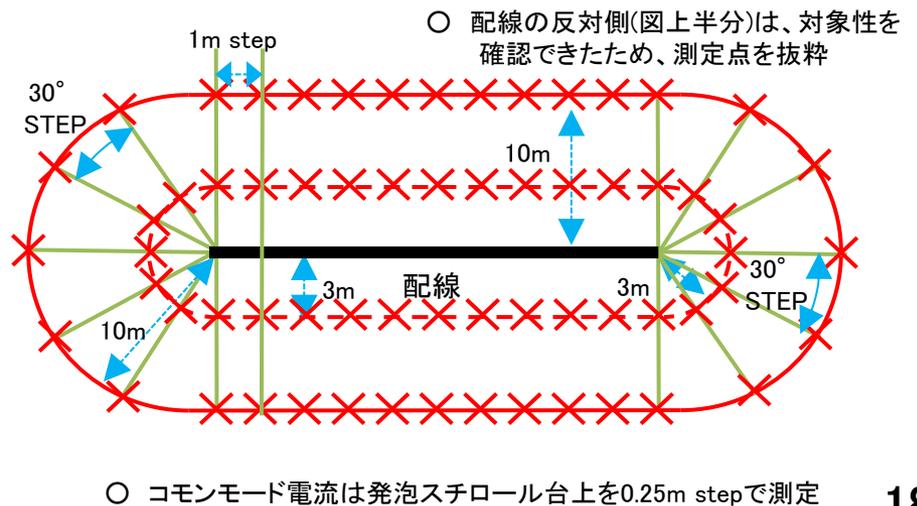


※写真①～③は次頁

■配線の配置方法

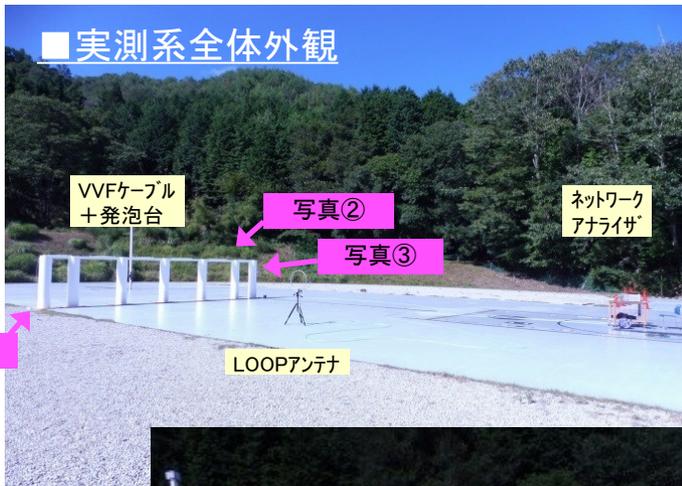


■放射電磁界測定位置(上面図)



実測系全体像

■実測系全体外観

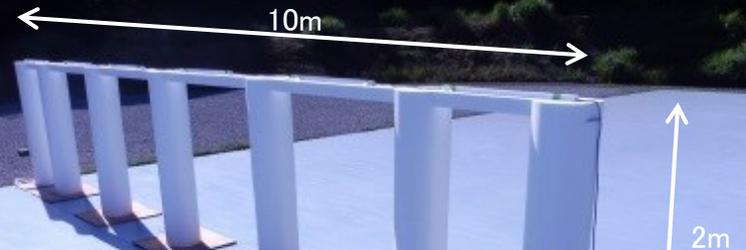


写真①:
ケーブル終端側



写真②:ケーブルの設置方法

VVFケーブル 縦置き
発泡スチロール台に固定



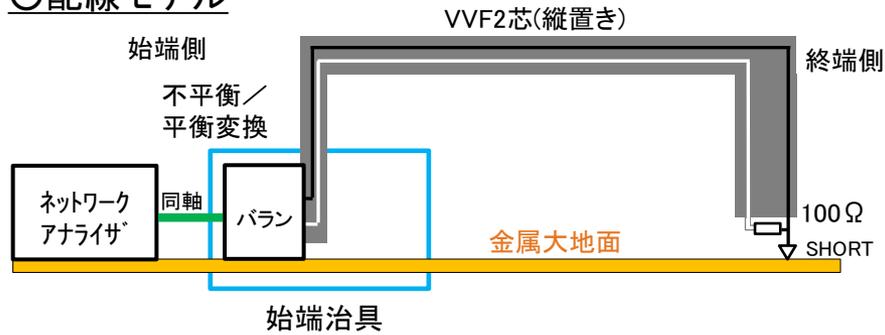
写真③:ケーブル始端側

至
ネットワーク
アナライザ

始端の接続方法

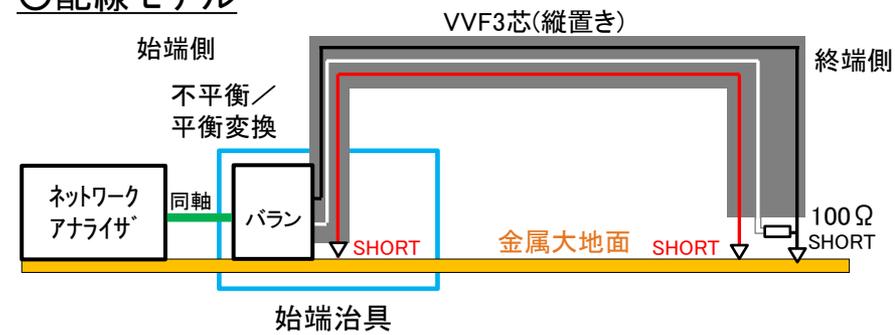
■ VVF (2線)

○ 配線モデル

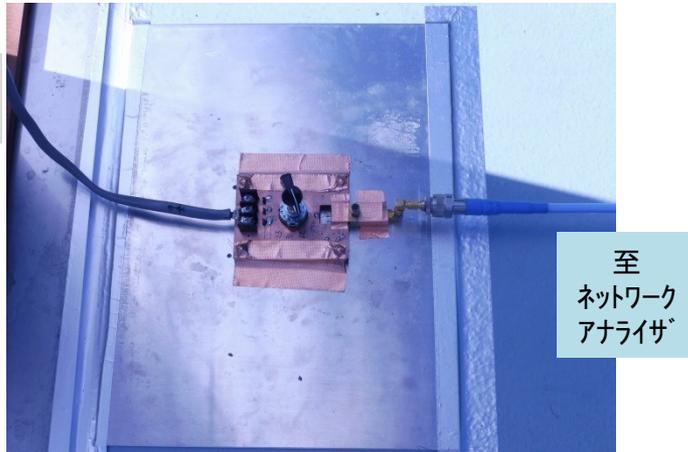


■ VVF (3芯)

○ 配線モデル

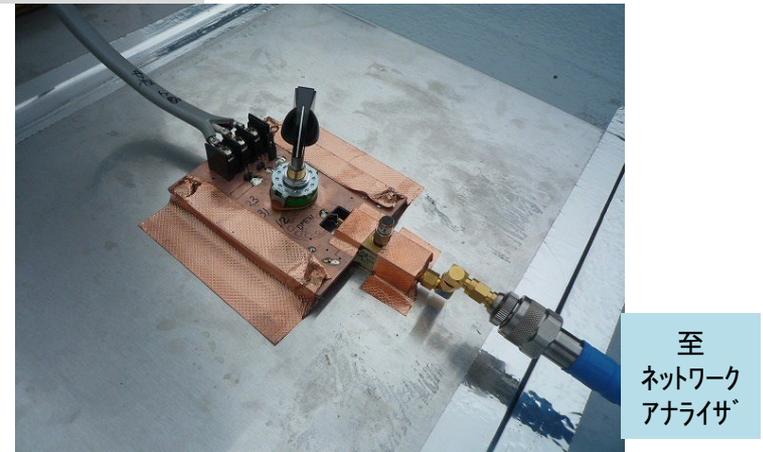


VVF
ケーブル



VVF2芯の始端治具の外観

VVFケーブル



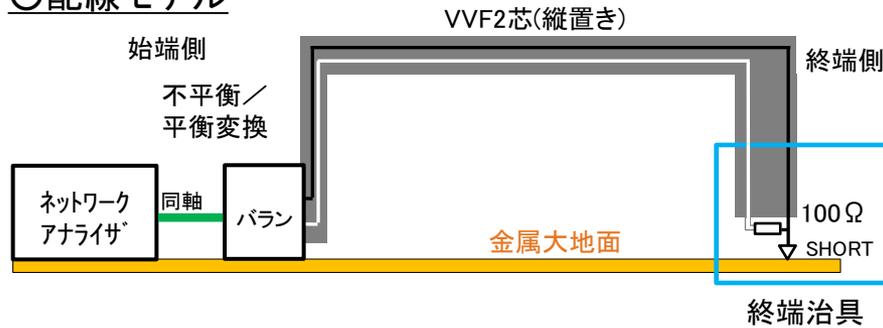
VVF3芯の始端治具の外観

※いずれも接地抵抗は0.5Ω@DC以下

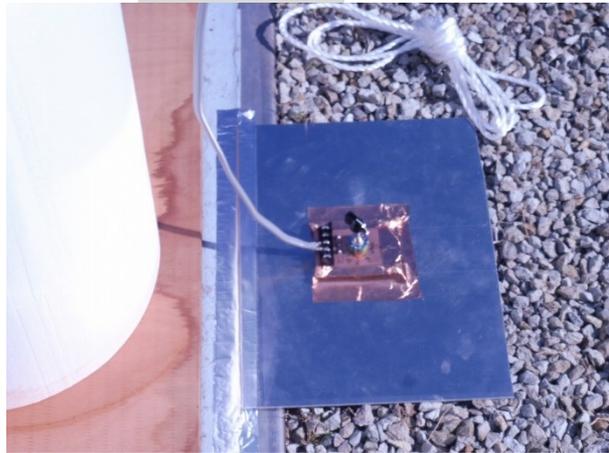
終端の接続方法

■ VVF (2線)

○ 配線モデル



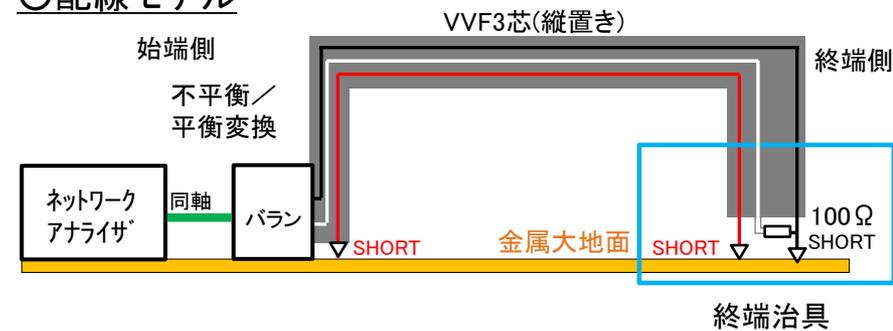
VVFケーブル



VVF2芯の終端治具の外観

■ VVF (3芯)

○ 配線モデル



VVFケーブル



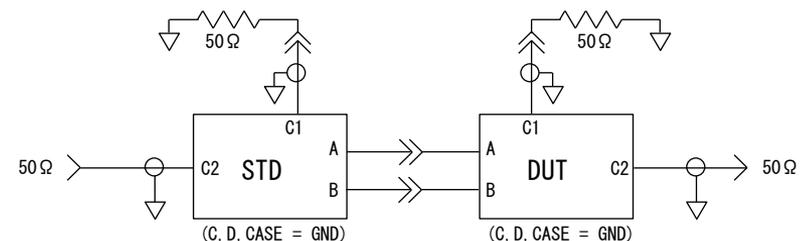
VVF3芯の終端治具の外観

※いずれも接地抵抗は0.5Ω@DC以下

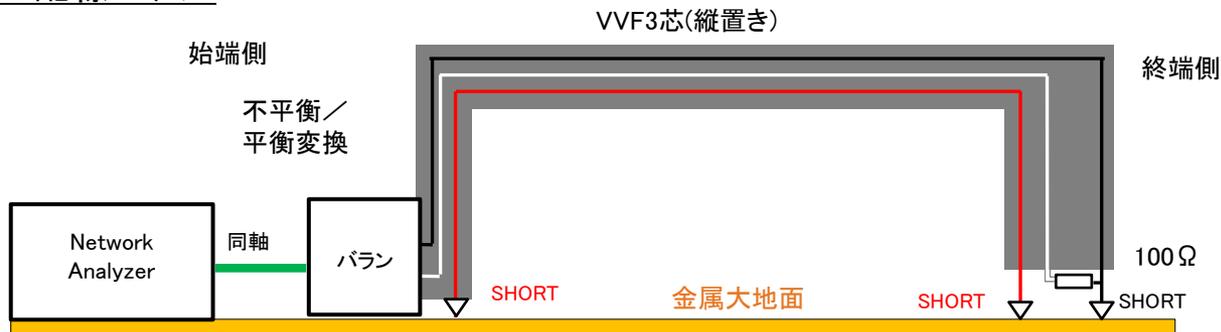
バランスのスペック・特性

メーカー	BH Electronics社
型番	040-0092
スペックシート	https://download.siliconexpert.com/pdfs/2012/3/24/14/20/28/839/bh_manual/040-0092.pdf
コイル間電圧比	1 : $\sqrt{2}$ (二次側100Ω 終端時)
挿入損失	1.8 dB max @1MHz - 15MHz 1.2 dB max @15MHz - 250 MHz (測定条件は、下図参照)
2次コイルのcenter tapと接地間のインピーダンス	インピーダンス Z_c (p.32参照) に同じ

挿入損失測定系等図 (スペックシート参照)



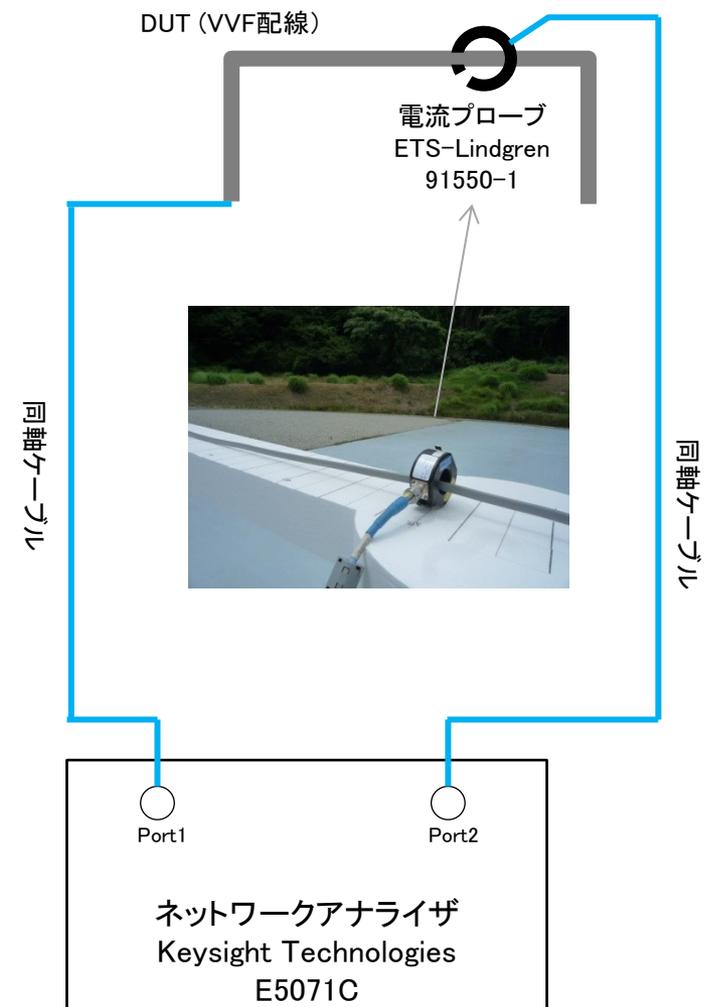
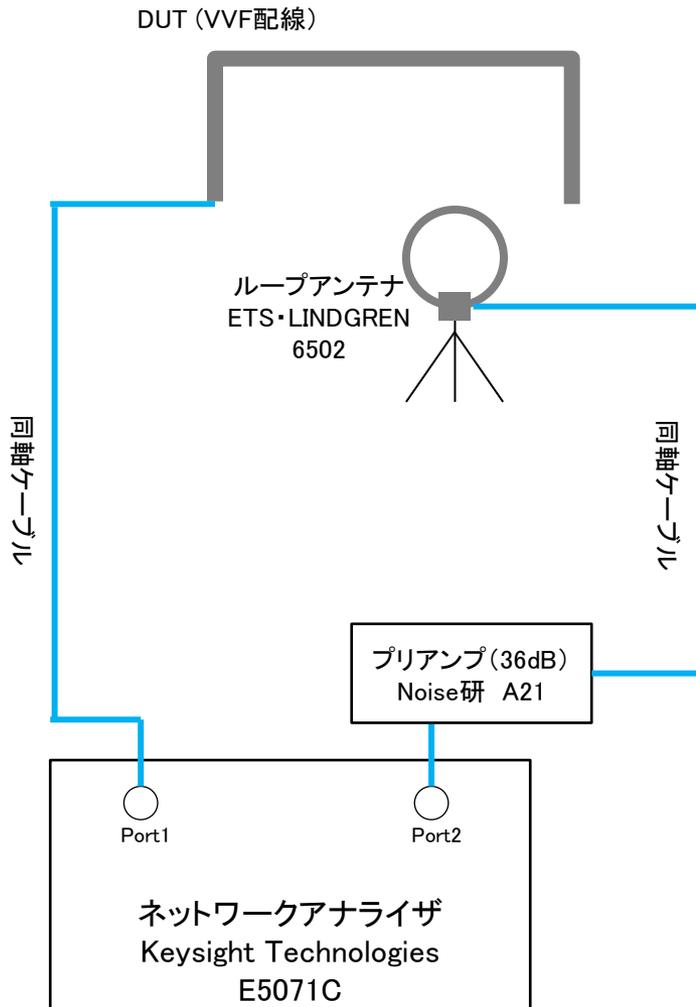
■配線モデル



線種	信号印加する 2線 (+/-)	1線目(黒)・2線目(白) の接地条件		3線目(赤)の接地条件	
		終端		始端	終端
		1線目(黒) (信号(+))印加	2線目(白) (信号(-))印加		
VVF2線 (縦置き)		接地	100Ωで黒線 に接続	- - -	
VVF3線 (縦置き)		接地	100Ωで黒線 に接続	接地	接地

■放射電磁界測定系

■コモンモード電流測定系



■機材一覧

機器名	型番	製造番号	製造メーカー	校正実施日	校正有効期限
ネットワークアナライザ	E5071C	MY46111878	Keysight Technologis	2018/6/6	2019/6/31
EMILシーバ	ESU8	100068	Rohde&Schwarz	2018/3/22	2019/3/31
電流プローブ	91550-1	00162003	ETS-LINDGREN	2016/12/9	2018/12/31
ループアンテナ	6502	00035128	ETS-LINDGREN	2018/6/18	2020/6/31
プリアンプ	00-0012A	BBB1591308	ノイズ研究所	2018/8/1	2020/8/31

■ネットワークアナライザ設定

IF帯域幅 : 10Hz

スイープ帯域 : 1MHz~30MHz

スイープポイント : 101点

アベレージ回数 : 5回

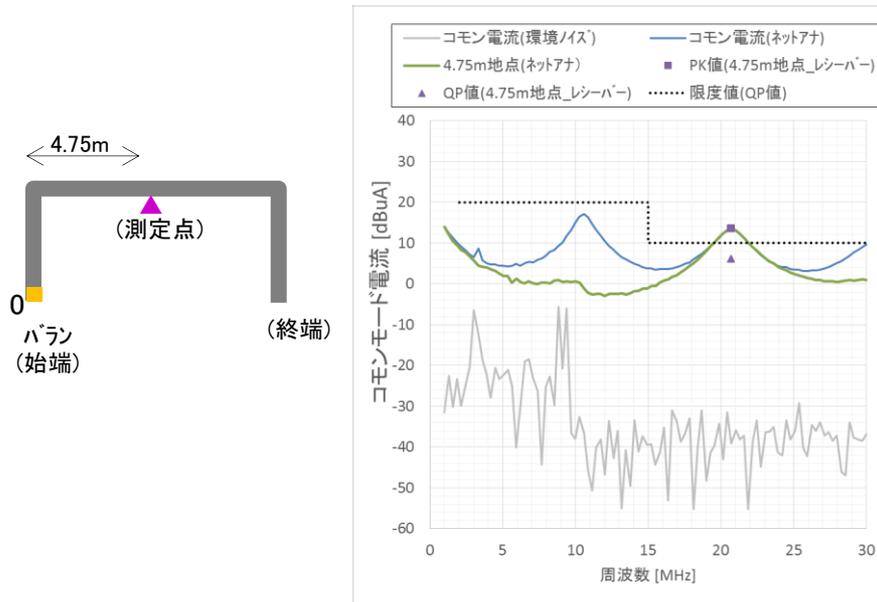
出力レベル : -45dBm (62dBuV@50Ω)

ネットアナ出力レベルの設定

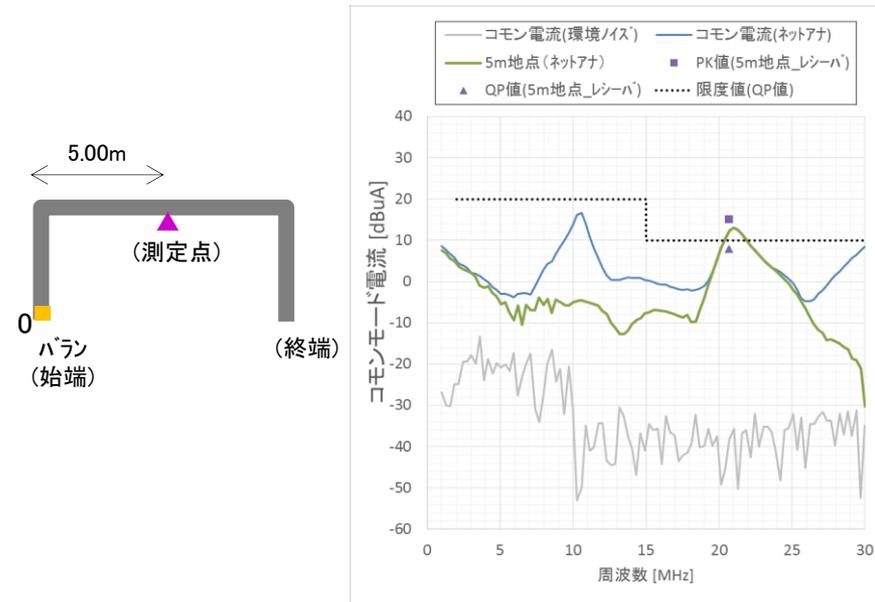
■設定方法

コモンモード電流のQP値とAV値が、屋外PLCの規制値を下回るように、ネットアナの出力レベルを調整し、出力レベルを-45dBmに設定した。

■コモンモード電流測定結果 (QP測定値はグラフ中▲印)



VVF2線のコモンモード電流測定結果
(出力レベル:-45dBm(62dBuV@50Ω))

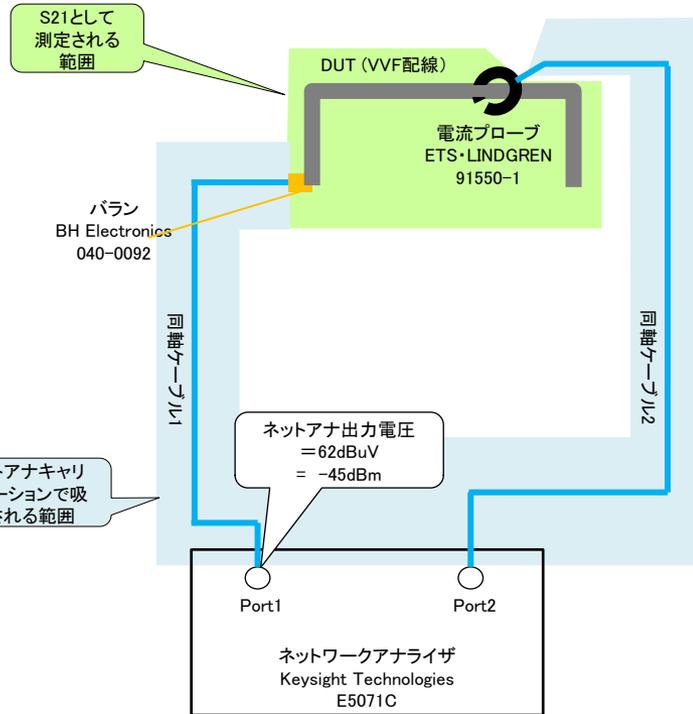


VVF3線コモンモード電流測定結果
(出力レベル:-45dBm(62dBuV@50Ω))

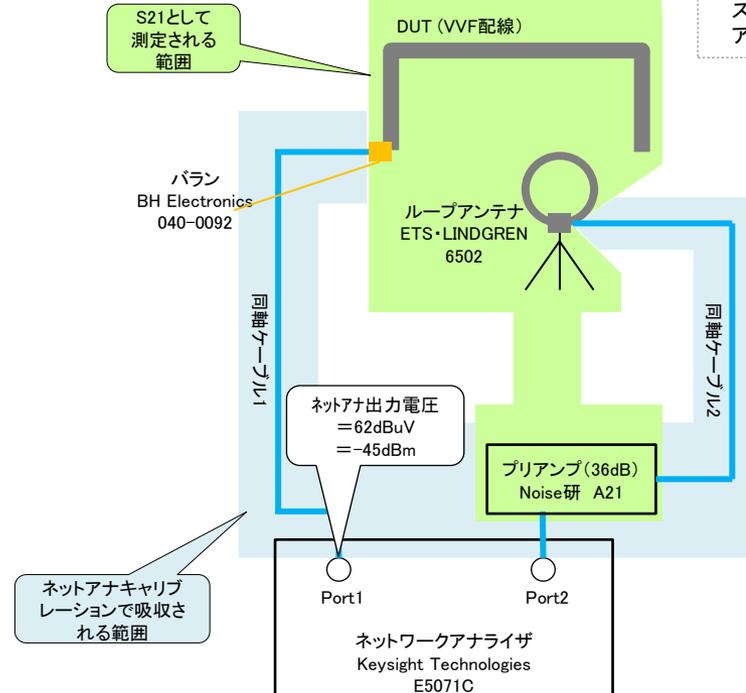
○コモンモード電流のQP値は屋外PLCの規制値以下であったことを確認した。

測定値 (S21) の絶対値への変換

■コモンモード電流 実測系(ネットアナ)



■放射電磁界強度 実測系(ネットアナ)



ネットワークアナライザ設定
出力 : -45dBm
IF帯域幅 : 10Hz
スイープ帯域 : 1MHz~30MHz
スイープポイント : 101点
アベリッジ回数 : 5回

コモンモード電流(絶対値) [dBuA]

$$= 62[\text{dBuV}] \quad (\text{ネットアナの出力電圧})$$

$$+ S21[\text{dB}] \quad (\text{S21の実測値})$$

$$- F[\text{dB } \Omega] \quad (\text{電流プローブファクタ})$$

$$+ CF1[\text{dB}] \quad (\text{同軸ケーブル1のロス(実測値)})$$

放射電磁界(絶対値) [dBuV/m]

$$= 62[\text{dBuV}] \quad (\text{ネットアナの出力電圧})$$

$$+ S21[\text{dB}] \quad (\text{S21の実測値})$$

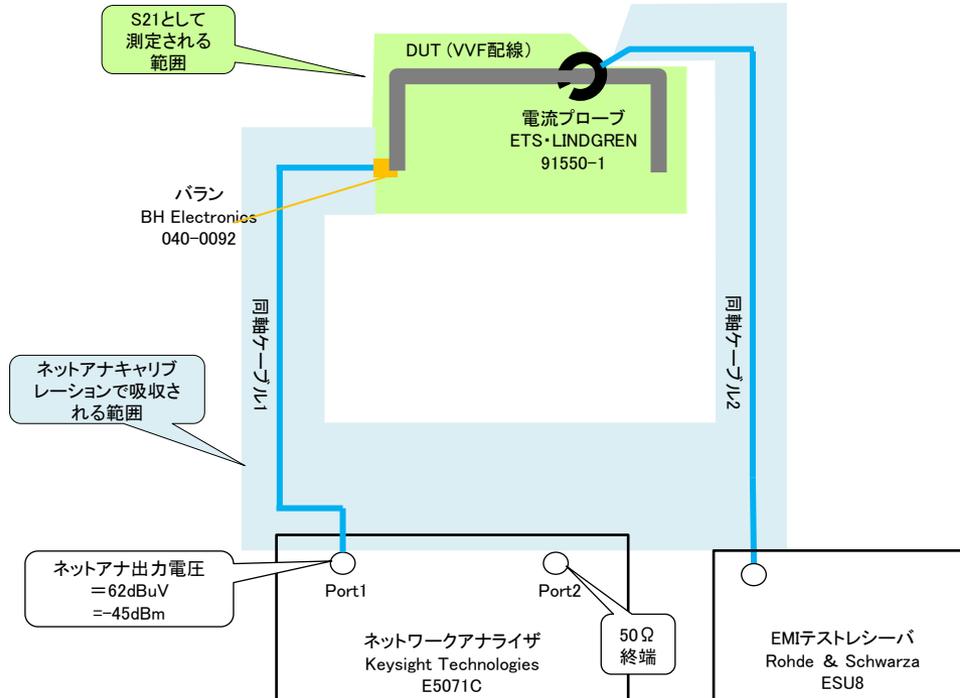
$$+ AF[\text{dB}(1/\text{m})] \quad (\text{アンテナファクタ})$$

$$+ CF1[\text{dB}] \quad (\text{同軸ケーブル1のロス(実測値)})$$

$$- \text{Gain}[\text{dB}] \quad (\text{外付補助アンプ利得の実測値})$$

レシーバによるコモンモード電流測定

■コモンモード電流 実測系(レシーバ)



コモンモード電流(絶対値) [dBuA]
 = EMIテストレシーバの実測値 [dBuV]
 + CF2[dB] (同軸ケーブル2のロス(実測値))
 - F[dBΩ] (電流プローブファクタ)

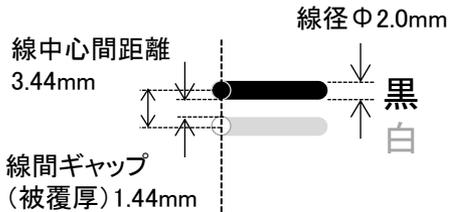
Appendix

シミュレーションモデルの詳細

解析モデル: 線路配置

2芯線モデル

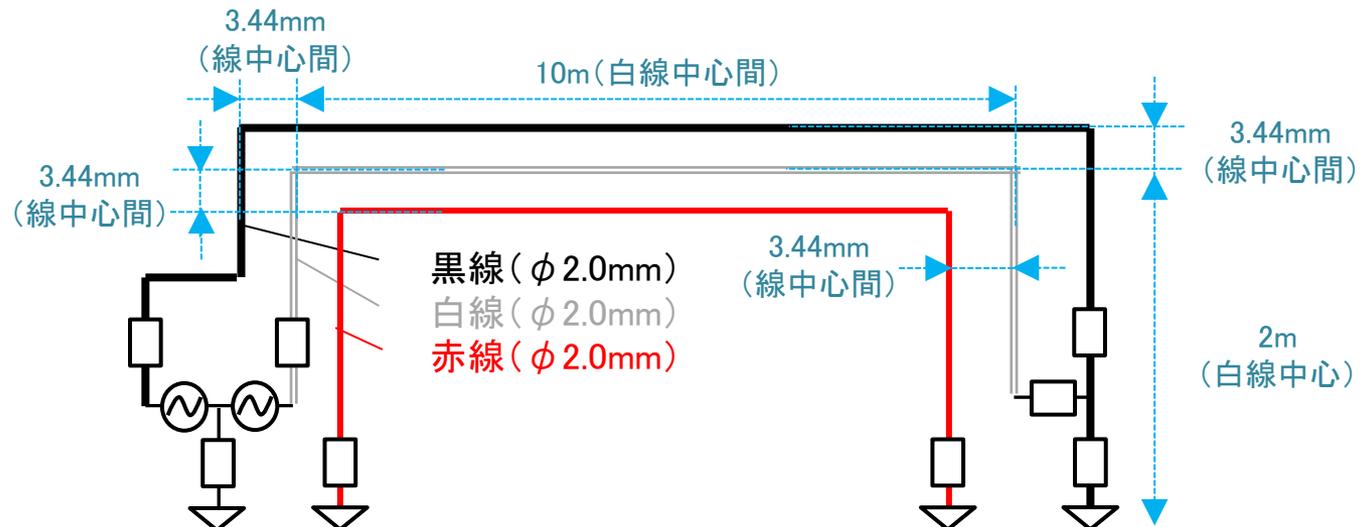
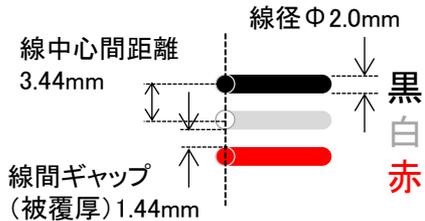
VVF線 縦置き



金属大地面

3芯線モデル

VVF線 縦置き



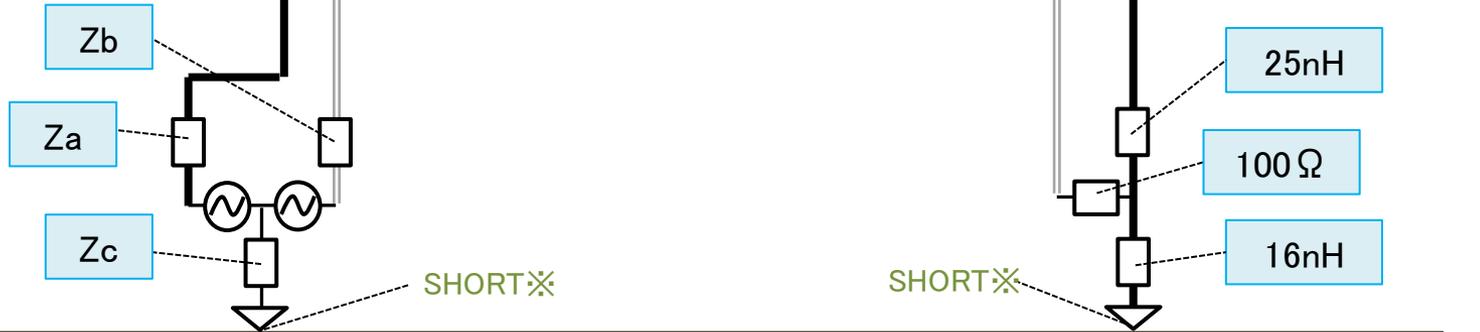
金属大地面

解析条件：始端・終端のモデルパラメータ

2芯線モデル

balan特性実測値
 をT型回路に変換

次頁に
 周波数
 特性を
 図示

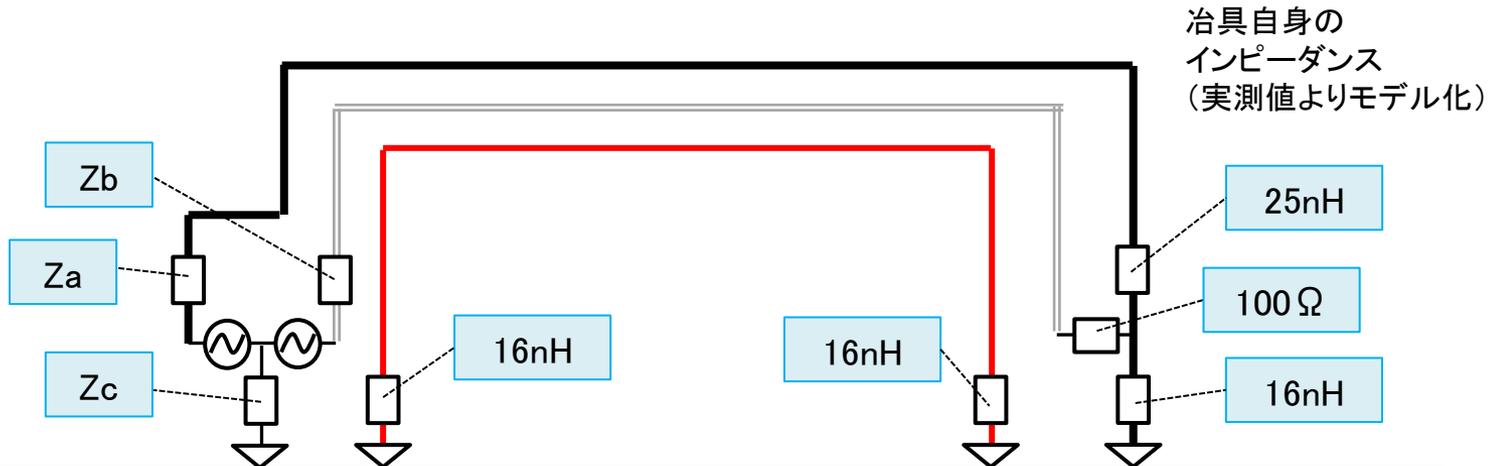


金属大地面.

3芯線モデル

balan特性実測値
 をT型回路に変換

次頁に
 周波数
 特性を
 図示



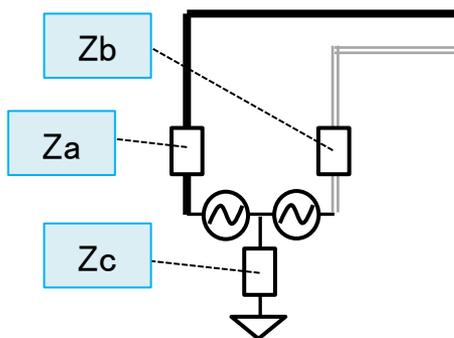
金属大地面.

SHORT※

SHORT※

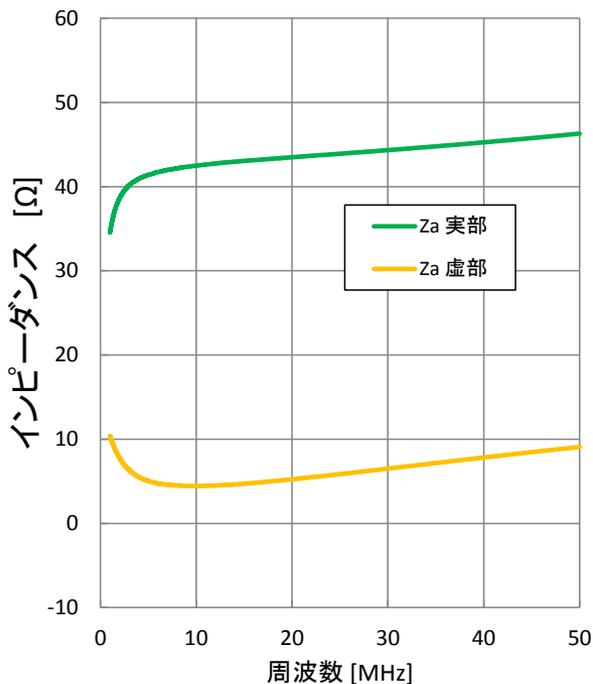
※接地抵抗は、実測の結果十分小さいため、無視する

解析条件：T型回路変換した balan パラメータ

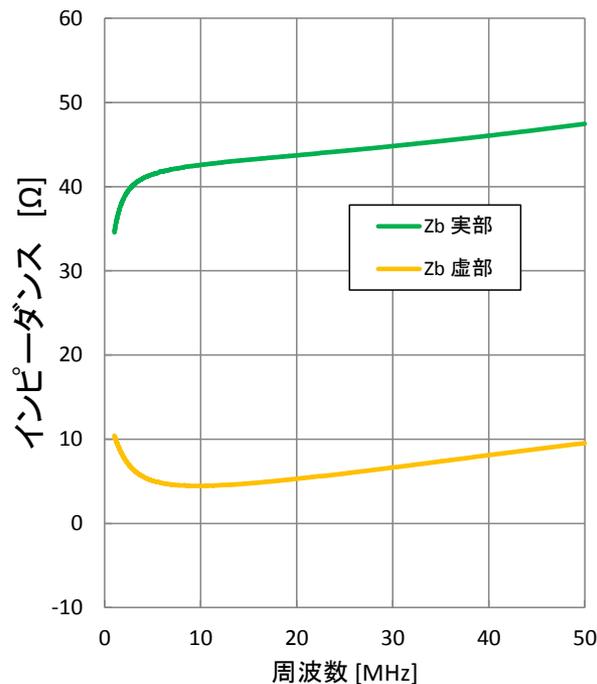


- バランの2次側をT型等価回路に変換するため、実測したバランの特性を基にその値を決定した。

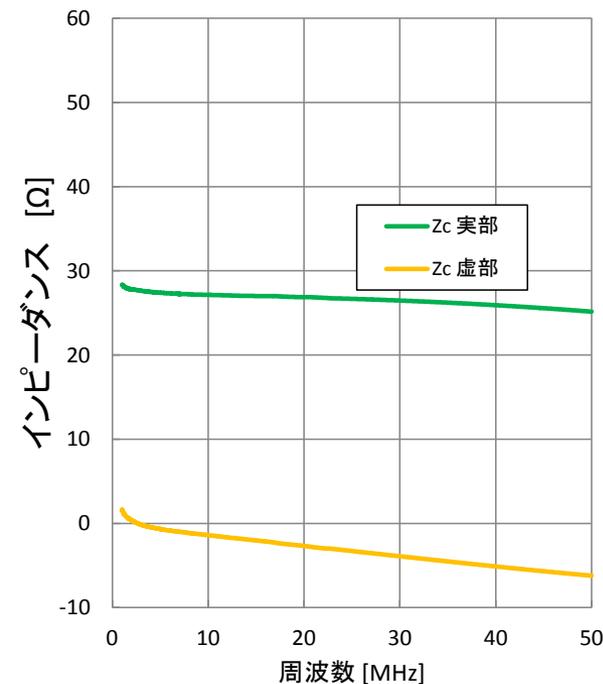
Za (実部&虚部)



Zb (実部&虚部)

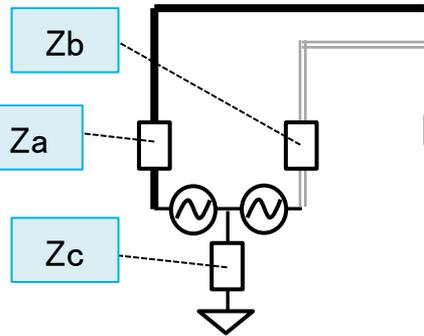


Zc (実部&虚部)



解析条件： balan パラメータ (DMZ, CMZ, LCL)

- 前頁で求めた balan 特性 Z_a, Z_b, Z_c より、以下のように DMZ、CMZ、LCL への換算を行った。



$$DMZ = |Z_a + Z_b| = 70 \Omega \sim 90 \Omega \quad (1 \sim 30 \text{ MHz})$$

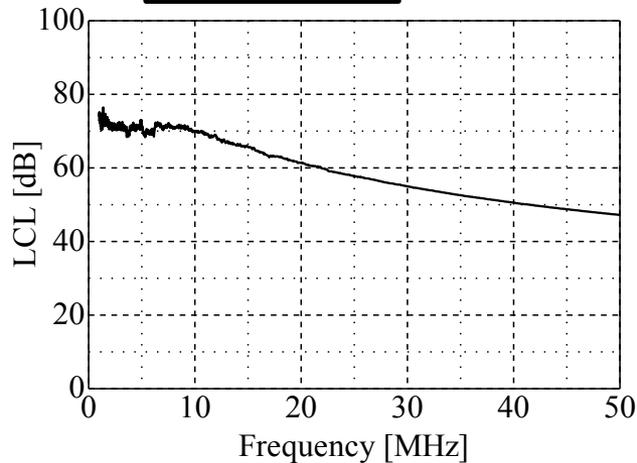
$$CMZ = |Z_a // Z_b + Z_c| = 50 \Omega \quad (1 \sim 30 \text{ MHz})$$

($Z_a // Z_b = Z_a, Z_b$ の並列インピーダンス)

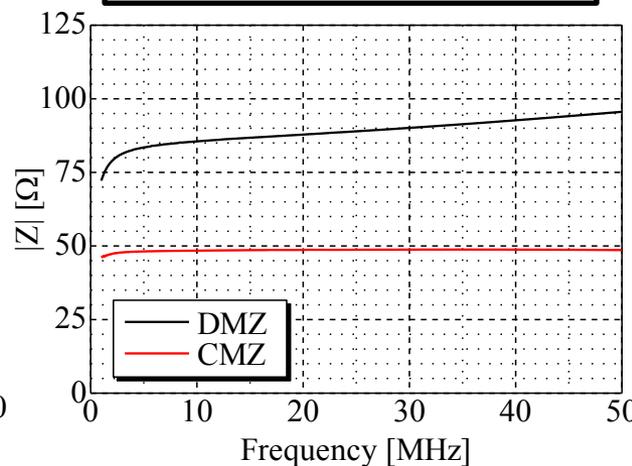
$$LCL = ((Z_a + Z_T/2) * (Z_b + Z_T/2) + (Z_T + Z_a + Z_b) * Z_c) / ((Z_b - Z_a) * Z_T/2)$$

($Z_T =$ ディファレンシャルモードインピーダンス = 100Ω)

LCL



DMZ, CMZ (絶対値)



DMZ, CMZ (位相)

