

XTAP 例題集		番 号	SSWD-01
例題名	6.6 kV 配電線の地絡サージ伝搬解析		
分 野	地絡サージ解析		
文 献	(1) 電気協同研究 配電自動化技術の高度化専門委員会, 「配電自動化技術の高度化」, 第 72 巻, 第 3 号(2016) (2) 九州電力株式会社, 九電テクノシステムズ株式会社, 事故点標定システムにおけるサージ伝搬速度の算出方法, 特許第 5085111 号, 2012.11.28		
概 要	<p>配電線で地絡事故が生じた場合, 現状では, 事故点の探査に多大な時間を費やしている。この問題を解決するため, これまでに様々な地絡点標定手法が提案されている。本例題では, 地絡点標定手法の 1 つである「地絡サージ到達時間差解析方式」を対象として, まず, その標定原理について解説する。次に, 各種配電設備のモデル化について述べ, 最後に, モデル化した配電設備を組み合わせた系統の地絡サージ伝搬の解析を行い, その結果から「地絡サージ到達時間差解析方式」による標定を検討する。</p>		

## 1 地絡サージ到達時間差解析方式

### 1.1 標定原理

地絡サージ到達時間差解析方式は, 地絡により生じるサージ波を, 地絡点を挟んだ 2 地点のセンサで測定し, その到達時間差から地絡点を標定する方式である<sup>(1)</sup>。図 1 に示すように, 配電線で地絡事故が発生すると, 配電線上を地絡点から電源側および負荷側それぞれに地絡サージが伝搬する。地絡サージは, 基本的に各相の電線を往路とし大地 (もしくは架空地線) を帰路とする零相成分である。地絡が, 2 箇所のセンサ付開閉器で挟まれた長さ  $l$  [m] の区間で生じ, これら 2 箇所のセンサ付開閉器で地絡サージが検出されたとする。地絡点に近い方 (至近側) のセンサ付開閉器で検出された時刻を  $t_1$ , 地絡点に遠い方 (遠方側) で検出された時刻を  $t_2$  とすると, その到達時間差は  $\Delta t = t_2 - t_1$  [ $\mu\text{s}$ ] となる。このとき, 区間内のサージ伝搬速度  $v$  [ $\text{m}/\mu\text{s}$ ] が既知であれば, 遠方側のセンサから地絡点までの距離, すなわち, 標定距離  $x$  [m] は (1) 式により求めることができる。

$$x = \frac{v\Delta t + l}{2} \quad (1)$$

ここで、分布定数回路論によると、配電線が付帯設備を一切有さない場合、サージ伝搬速度は光速（300 m/μs）に近い値となる。しかし、実際の配電線では、分岐や各種配電設備、そして電流検出センサの特性によって計測されるサージ波形は複合的に変歪し、サージの到達時間差から算出される速度は、光速とは異なった値となる。この伝搬速度は「見かけのサージ伝搬速度」と言うべき量であるが、本例題では簡単のためこれを単に「サージ伝搬速度」と呼ぶ。

光速とは異なる区間内のサージ伝搬速度を知るために、実配電線で人工地絡試験を行うことは現実的ではない。そこで、図2に示すように、対象区間外の開閉器を動作させ、これにより生じた開閉サージが当該区間を通過するときに計測される到達時間差から区間内のサージ伝搬速度  $v$  [m/μs] を算出する手法がある。このように、事前に区間内のサージ伝搬速度を算出しておき、地絡時にはこのサージ伝搬速度を(1)式に代入して地絡点標定を行う。なお、この手法は特許化<sup>(2)</sup>されている。

以上のように、分岐や各種配電設備、そして電流検出センサの特性により変化するサージ伝搬速度  $v$  は、標定精度に直接的に影響する重要なパラメータと言える。

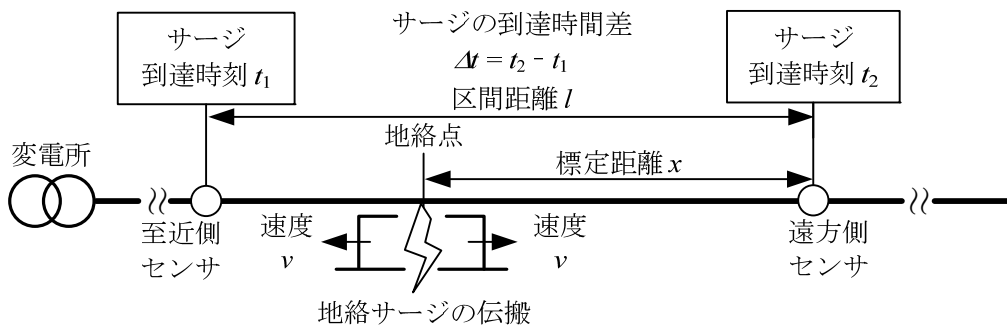


図1 地絡サージ到達時間差解析方式の標定原理

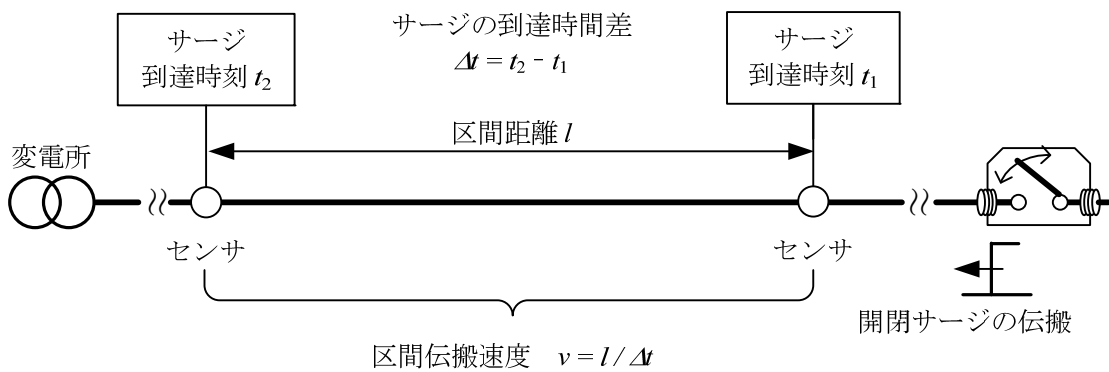


図2 サージ伝搬速度の取得

## 1.2 各種配電設備のモデル化

先に述べたように、配電線のサージ伝搬速度は、分岐や各種配電設備、そして電流検出センサの特性により変化する。そして、そのサージ伝搬速度が地絡サージ到達時間差解析方式の標定精度に大きな影響を及ぼす。このため、現実的な標定精度の検討を行うためには、分岐等を再現した実配電線のモデルを解析プログラム上に再現し、各種配電設備や電流検出センサの特性を考慮したシミュレーションを行う必要がある。これには、まず、各種配電設備および電流検出センサについて、解析モデルを作成しなければならない。地絡サージ到達時間差解析方式において、地絡点の標定は地絡サージの零相成分により行われる点に着目して、対地間静電容量等により零相回路に影響を与える以下の配電設備についてモデル化を行った。1.3、1.4 節でそれぞれの配電設備のモデル化について述べる。さらに、1.5 節で地絡サージを測定する電流検出センサのモデル化について述べる。

- ・ 配電線（架空地線とケーブル部分）
- ・ 柱上変圧器と高圧受電用変圧器

## 1.3 配電線のモデル化

地絡点から伝搬していくサージを解析するためには、配電線を分布定数回路として取り扱う必要がある。このため、配電線については、一定パラメータ分布定数線路モデルを用いて、図3に示すようなモデルを作成した。大地抵抗率は  $100 \Omega\text{m}$  とし、線路定数の計算周波数は  $100 \text{ kHz}$  とした。架空地線がある場合には、架空地線は  $200 \text{ m}$  以内に1回の頻度となるようコンクリート柱の位置で接地した。なお、この接地抵抗は  $40 \Omega$  とし、接地線のインダクタンス  $12 \mu\text{H}$  も模擬した。

ケーブル部分のモデル化にも一定パラメータ分布定数線路モデルを使用し、その線路定数は、XTLCにより算出した。ケーブル部分の金属シースの片端は、架空地線の場合と同様に、接地線のインダクタンスを模擬した  $12 \mu\text{H}$  を介して接地抵抗  $40 \Omega$  で接地した。

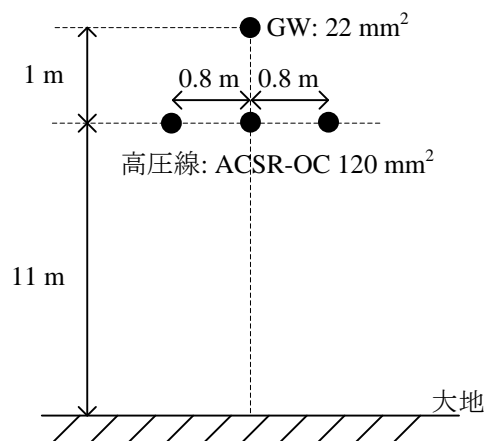


図3 高圧線と架空地線の装柱状態

## 1.4 柱上変圧器と高圧受電用変圧器のモデル化

零相成分に対するサージ応答を模擬するという観点から、柱上変圧器と高圧受電用変圧器のモデリングで最も重要なのは一次巻線と筐体間のキャパシタンスであると考えた。そこでこのキャパシタンスを一次側端子に按分して筐体間に接続し、一次側端子間には二次側の負荷に相当する抵抗を接続した。このようにして作成した柱上変圧器のモデルを図4に、高圧受電用変圧器のモデルを図5に示す。一次巻線と筐体間のキャパシタンスについては、容量5～50kVAの柱上変圧器を対象に実測したキャパシタンス値から次式の近似式を作成しこれを用いて当該変圧器の容量  $S_{rate}$  [kVA]（受電用変圧器の容量は契約容量）からキャパシタンス値  $C_s$  [pF] を求めた。

$$C_s = 21.64 \cdot \ln(S_{rate}) + 22.42 \quad (2)$$

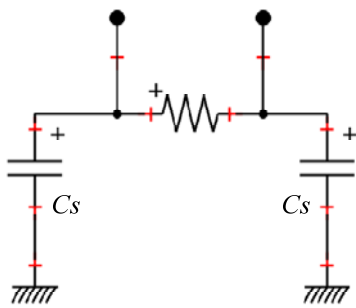


図4 柱上変圧器のモデル

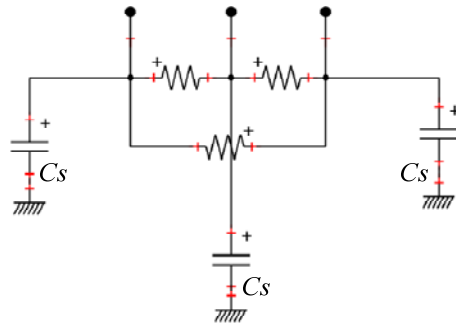


図5 高圧受電用変圧器のモデル

## 1.5 電流検出センサのモデル化

センサ付開閉器には、零相電流を測定する目的で零相計器用変流器 (ZCT) が内蔵されている。ZCTの本来の目的は、商用周波における零相電流の測定であるから、高周波成分を精度良く測定できるように設計されていない。そこで、ZCT出力に100kHzのカットオフ周波数のローパスフィルタ (LPF) を適用することで、ZCTの周波数特性を模擬する。さらに、LPFを適用することで、ZCTの型式や個体差による周波数特性のばらつきを打ち消すことができる。

## 2 解析回路・解析条件

図6に解析対象である6.6kV配電システムを示す。ここでは、配電用変電所から十分に離れた地点で地絡が発生した場合を想定している。システムには、変電所側のセンサ1から末端のセンサ3までの3台が距離2000mごとに一定で設置されているものとし、センサ1とセンサ2で挟まれる

区間を区間 A、センサ 2 とセンサ 3 で挟まれる区間を区間 B と呼ぶこととする。このように作成した系統を用いて、地絡サージ伝搬の解析を行い、「地絡サージ到達時間差解析方式」による標定を検討する。

その他の解析条件は以下の通りである。

- ・ 計算時間刻み：10 ns
- ・ 地絡発生時間：1  $\mu$ s
- ・ 地絡相：a 相
- ・ 計算開始時間：0  $\mu$ s
- ・ 計算終了時間：40  $\mu$ s

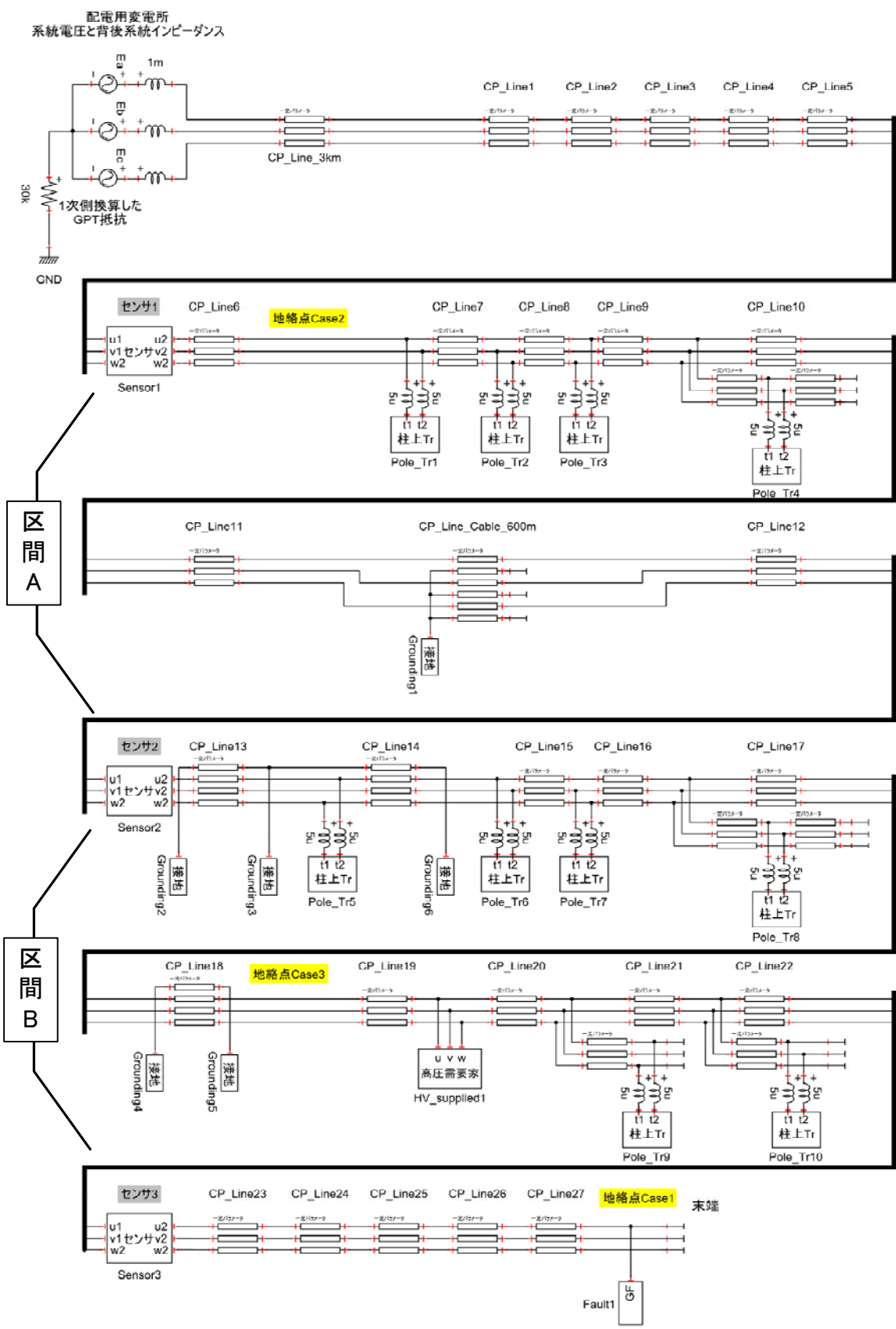


図6 解析回路

(地絡点を系統末端の地絡点 Case1 に設定した場合)

### 3 区間伝搬速度の計算

地絡サージ到達時間差解析方式による標定距離を算出するためには、まず、センサで挟まれた地絡点標定の対象とする区間の外側からサージを送出した場合の到達時間差から各区間の伝搬速度  $v$  を計算する必要がある。なお、上記で述べた対象区間外の開閉器を動作させ、開閉サージの到達時間差から区間の伝搬速度を算出する手法は、実配電線では供給支障の可能性のある地絡を起こせないためである。シミュレーションによる検討では、地絡を起こすことは簡単である。そこで、各区間の伝搬速度  $v$  は、地絡点 Case1 と示した系統の末端で地絡を発生させ、この地絡点から変電所側へ伝搬する地絡サージにより求めることとする。なお、各センサへのサージ到達の判定は、センサ出力が  $0.3\text{ A}$  を超えた時点とし、その時間差から区間伝搬速度を計算する。

地絡点 Case1 と示した地点で地絡を発生させた解析結果を図 7 に示す。同図より、サージの到達時間差から区間伝搬速度を算出すると、区間 A では到達時間差  $21.69\ \mu\text{s}$  から伝搬速度  $v_A$  は約  $92\ \text{m}/\mu\text{s}$ 、区間 B では到達時間差  $7.49\ \mu\text{s}$  から伝搬速度  $v_B$  は約  $267\ \text{m}/\mu\text{s}$  が得られ、区間の伝搬速度は大きく異なる結果となる。この差異は、ケーブル部分によるもので、ケーブルの大きな対地キャパシタンスの影響によりサージの反射が生じ、ケーブルを透過するサージは非常に小さくなる。このため、ケーブル部分を有する区間 A では、見かけ上、伝搬速度は非常に遅くなる。

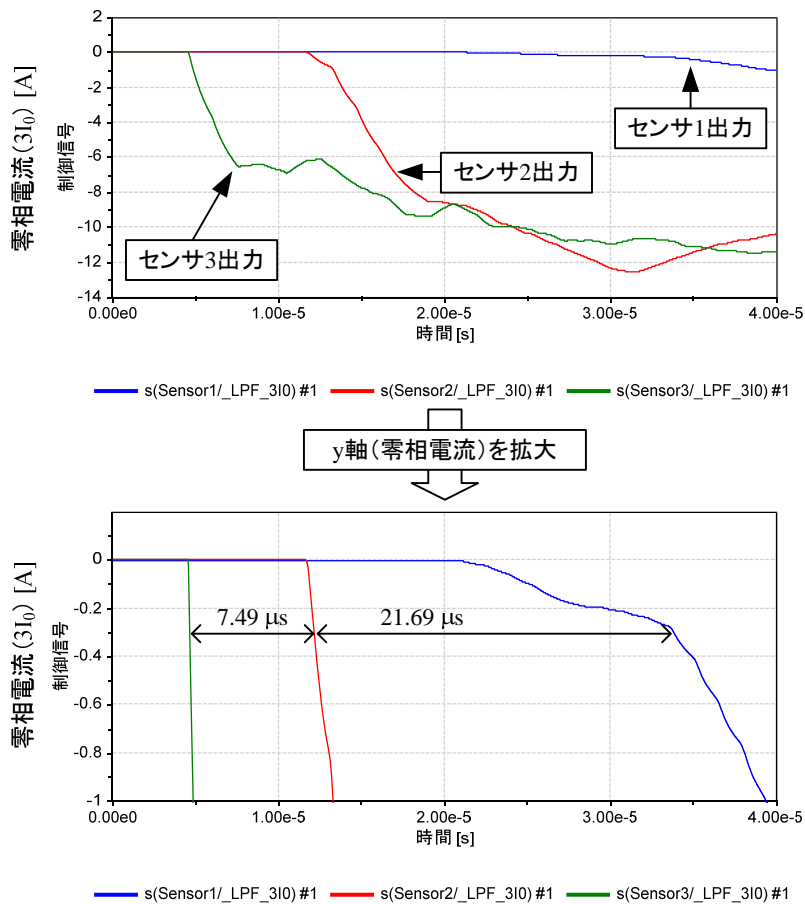


図 7 地絡点 Case1 で地絡した場合の各センサの出力とサージ到達時間差

## 4 地絡点標定

### 4.1 区間 A での地絡点標定

本節では、上記で計算した区間 A の伝搬速度  $v_A$  を用いて、区間 A 内の地絡点 Case2 と示した地点で地絡が発生した場合の標定を行う。図 8 に示す解析結果より、センサ 1 とセンサ 2 のサージ到達時間差  $\Delta t$  は  $12.10 \mu\text{s}$  が得られる。この結果から、(1) 式に  $v (= v_A = 92 \text{ m}/\mu\text{s})$ ,  $\Delta t (= 12.10 \mu\text{s})$  を代入して標定距離  $x$  を算出すると、地絡点はセンサ 2 から  $1557 \text{ m}$  の距離にあると求まる。解析の設定で、地絡点とした位置 (真値) はセンサ 2 から  $1800 \text{ m}$  の距離であるため、標定距離の誤差は  $243 \text{ m}$ , 誤差率は  $14 \%$  となった。

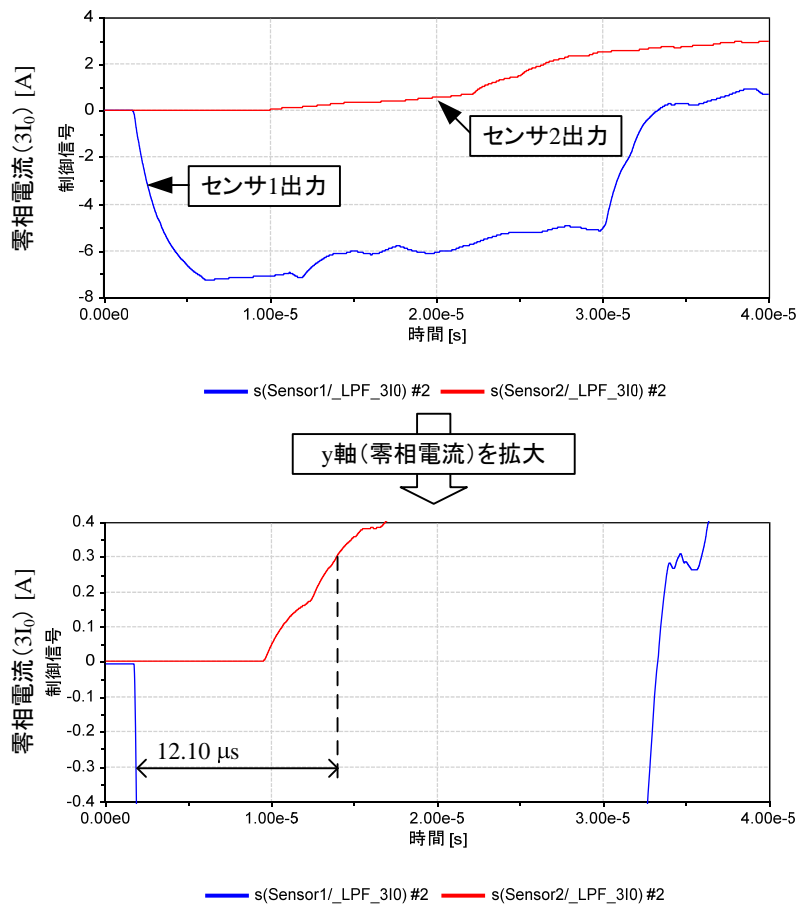


図 8 地絡点 Case2 で地絡した場合のセンサ 1, 2 の出力とサージ到達時間差

### 4.2 区間 B での地絡点標定

本節では、上記で計算した区間 B の伝搬速度  $v_B$  を用いて、区間 B 内の地絡点 Case3 と示した



地点で地絡が発生した場合の標定を行う。図9に示す解析結果より、センサ2とセンサ3のサージ到達時間差  $\Delta t$  は  $1.31 \mu\text{s}$  が得られる。この結果から、(1) 式に  $v (= v_B = 267 \text{ m}/\mu\text{s})$ ,  $\Delta t (= 1.31 \mu\text{s})$  を代入して標定距離  $x$  を算出すると、地絡点はセンサ2から  $1175 \text{ m}$  の距離にあると求まる。解析の設定で、地絡点とした位置(真値)はセンサ2から  $1200 \text{ m}$  の距離であるため、標定距離の誤差は  $25 \text{ m}$ , 誤差率は  $2\%$  となった。

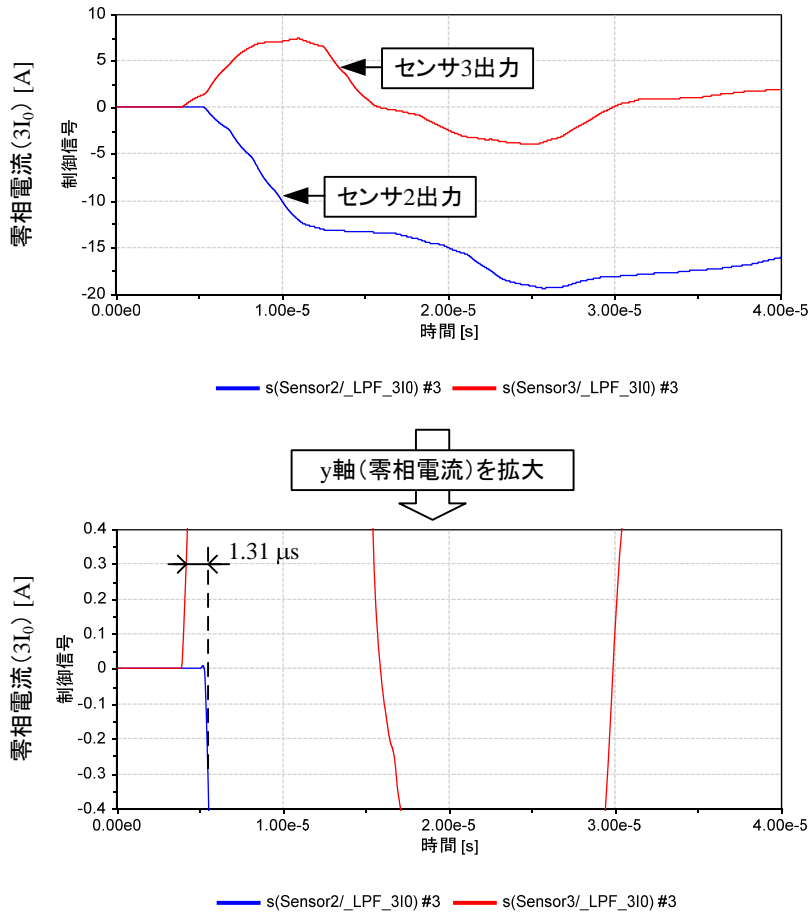


図8 地絡点 Case3 で地絡した場合のセンサ2, 3の出力とサージ到達時間差

以上

## 更 新 履 歴

日 付	例題ファイル バージョン	変 更 内 容
2017/08/25	1.0	初版作成（XTAP Version 2.01 用）