

琉球大学学術リポジトリ

電力系統および電気配線におけるサージ現象の発生と伝搬メカニズムの解明および抑制に関する研究

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学 公開日: 2017-04-19 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 大城, 諒士, Oshiro, Ryoji メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/36485

博士学位論文
Doctoral Thesis of Engineering

電力系統および電気配線におけるサージ現象の発生と
伝搬メカニズムの解明および抑制に関する研究
**Study on Generation / Propagation Mechanism and
Suppression of Surge Phenomena Arising on Electrical
Power System and Distribution System**

2017年3月
March 2017

大城 諒士
Ryoji Oshiro

琉球大学
大学院理工学研究科
生産エネルギー工学専攻
エネルギー開発工学講座

**Processing Development Engineering
Material, Structural and Energy Engineering
Graduate School of Engineering and Science
University of the Ryukyus**

指導教員: 教授 金子 英治
Supervisor: Prof. Eiji Kaneko

本論文は、工学博士の学位論文として適切であると認める。

論文審査会

金子英治 

(主査)

米須章 

(副査)

浦崎直光 

(副査)

概要

我々の生活において家電製品や電気機器、電力設備は欠かすことができないことは言うまでもない。情報化社会の進展に伴い、これらの機器はネットワーク化、スマート化が進み、さらに IoT(モノのインターネット)化に伴って高効率化され、我々の暮らしを一層豊かにしていくと考えられる。しかしながら、これらの機器が進歩していく一方で、高電圧・低電圧に関わらず、電力系統あるいは電気配線に発生するサージ現象によって、これらの機器は事故や故障にさらされる危険がある。系統内に発生したサージ電圧や電流は、電力系統や電気配線を伝搬することで、発生源のみならず、発生源近傍の電気機器、あるいは遠方の電気機器をも破壊する可能性がある。高電圧系統においては、SPD (Surge Protective Device: サージ防護デバイス)を用いた過電圧抑制、鉄塔上部への架空地線の敷設などにより、発生したサージ現象への対策が進んできている。一方で、低電圧系統のサージ対策は十分とは言い難いのが現状である。また、サージ現象は発生時に最も高電圧となるため、サージ期間の初期において機器を破壊することがほとんどであるが、インピーダンスの異なる線路あるいはケーブルなどの接続点で発生する反射、または透過現象などが組み合わさり、より一層複雑化する。したがって、これらの現象をより詳細に調査する必要がある。

このような背景より、電気配線におけるサージ電圧や電流の抑制手段を講じるために、本研究では電力系統および電気配線に発生するサージ現象について解析した。

まず、家屋近傍に落雷が発生した条件におけるサージ現象を、FDTD(Finite Difference Time Domain)法をベースとした汎用サージ解析プログラム VSTL rev(Virtual Surge Test Lab. rev)を用いて解析した。そして、落雷点から放出された電磁波により誘導される過電圧や過電流、また、それらの伝搬現象について解析、加えて、電気配線への SPD の敷設効果について解析し、誘導雷に対する抑制手法に関して検討した。さらに、大地と垂直に配置された同軸形状のケーブルを、EMTP などの回路解析にて扱う手法を提案した。結果として、落雷点近傍における誘導雷サージであっても、サージ対策無しには屋内の電気機器を破壊するような電圧が発生することや、近年サージの抑制手法として導入されている、分電盤に SPD を配置する手法のみでは対策が不十分であることを明らかにした。そして、電気機器側にも SPD を導入することで、効率的にサージ現象が抑制されることを明らかにした。

また、大地に対して垂直に配置された同軸ケーブルを、EMTP などの様に回路的に取り扱う手法について検討した。それを回路的に取り扱うには特性インピーダンスが等しく、大地とケーブル外部導体間とのサージインピーダンス、およびケーブル長が異なる、複数の水平同軸ケーブルを直列に接続することで、垂直同軸ケーブルが模擬可能であることを明らかにした。さらに、同モデルと EMTP 内の鉄塔モデルを用いることで、鉄塔に組み込まれた垂直ケーブルに発生する解析も可能であることから、EMTP における本提案モデルの有効性を明らかにした。

氏 名 大 城 諒 士

Abstract

Electrical and electronic equipment have widely used in various fields, and these equipment are essential for our life. These equipment will make our life better by evolution such as, for example, networking, IoT(Internet of Things) and so on. However, insulation level or withstand level against the surge voltage or the noise can be lower as these equipment advance. The surge voltage or current might cause damage not only the equipment on vicinity of the surge source but also the equipment on the point far from this source. By installing SPD (Surge Protective Device) and grounding wires, the protection for high voltage system against the surge voltage or current is advancing. On the other hands, the protection for low voltage system is not sufficient, yet. In addition, propagation, reflection, and penetration phenomenon of electrical magnetic waves can make the surge phenomena more complex.

Therefore, for establishment of protection method against surge voltage or current, the some analyses and investigations were carried out in this research.

The simulation regarding the surge phenomenon induced on electrical distribution lines in a house were carried out by using VSTL rev (Virtual Surge Test Lab. rev) which is surge analysis program based on FDTD (Finite Different Time Domain) method. In these simulations, it is assumed that the lightning strikes on ground surface near by a house. Over voltages and currents which are induced by an electro-magnetic wave which are emitted from a lightning point, and propagation/reflection phenomenon of these voltages or currents, in addition, protection effect of SPD were analyzed and investigated. From these results, following things are cleared; 1. over voltages and currents which might cause severe damages are induced on wires in a house, even if a lightning does not strike directly on an electrical line/apparatus but strike near by a house, 2. in order to protect electrical equipment connected to distribution lines, to install SPD on not only distribution board but also on electrical equipment side is needed.

An EMTP model of a co-axial cable which is arranged vertically to ground was proposed. In EMTP, a vertical co-axial cable can be treated by connecting some horizontal co-axial cables in series, which have same characteristic impedance, however, whose each length and each surge impedance are different. In addition, it is cleared that the surge phenomenon arising on a power cable used in a transmission tower can be simulated in EMTP by combining the above mentioned vertical cable model with the IEEJ (Institute of Electric Engineers of Japan) multi-story transmission tower model.

Ryoji Oshiro

研究関連業績

学会誌論文

- (1)大城 諒士, 伊佐 真史, 金子 英治:「近傍雷撃による周辺低圧系統への誘導サージ現象」, 電気学会論文誌 B, Vol.130, No.7, pp. 687-693(2010)
- (2)Aiko Takahara, Ryoji Oshiro, and Eiji Kaneko:”Lightning Induced Surge on the Distribution Lines in the House near by the Lightning Point”,Journal of Energy and Power Engineering 6, pp.840-844(2012)
- (3)大城 諒士, 我那覇 和奎, 原田 繁実, 金子 英治:「垂直同軸ケーブルのサージ特性に関する検討」, 電気学会論文誌 B, Vol.136, No.2, pp.184-191(2016)
- (4)大城 諒士, 原田 繁実, 金子 英治:「建物近傍大地への落雷により発生する屋内配線サージ解析」, 電気学会論文誌 B, Vol.136, No.7, pp.628-635(2016)

国際学会発表論文

- (1)Ryoji Oshiro, Eiji Kaneko:” Analysis about Surge Voltage Arising on Vertical Power Cable”, IEEJ P&ES – IEEE PES Thailand Joint Symposium 2016, pp.59-62(March-2016)
- (2)Ryoji OSHIRO, Eiji KANEKO:” Investigation on Surge Phenomena Arising on Vertical Power Cable”, ICEE2016,ID 90075(July-2016)

国内学会, 研究会, 大会発表論文など

- (1)Ryoji Oshiro, Eiji Kaneko:” A Simulation Study Concerned with a Surge by the Lightning Strike Nearby an Electrical System ” The 9th International Workshop on High Voltage Engineering, Okinawa, Presentation No.HV-14-138,pp.85-88(November-2014)
- (2)Ryoji Oshiro, Eiji Kaneko:” A Proposal Concerned with a New Model of a Vertically Arranged Power Cable in EMPT ” The 9th International Workshop on High Voltage Engineering, Okinawa, Presentation No.HV-14-106,pp.85-88(November-2014)
- (3)大城 諒士, 金子 英治:「EMTP による垂直配置された電力ケーブルの模擬手法に関する提案」, 電気学会九州支部沖縄支所講演会 沖縄, 講演番号 OKI-2014-32, pp.117-119(2016年12月)

- (4)大城 諒士, 金子 英治:「EMTP における垂直同軸ケーブルの取り扱い手法に関する提案」, 平成 27 年 電気学会全国大会 東京, 講演番号 7-020, pp.27-28(2015 年 3 月)
- (5)大城 諒士, 金子 英治:「平板導体上の垂直同軸ケーブルのサージインピーダンスに関する検討」, 平成 27 年 電気学会 電力・エネルギー部門 名古屋, 講演番号 356, pp.9-5-7 - 9-5-8(2015 年 8 月)
- (6)大城 諒士, 金子 英治:「電力用ケーブルに発生するサージ現象に関する解析」, 放電・開閉保護・高電圧合同研究会 兵庫, 講演番号 HV-15-083, pp.69-72(2015 年 11 月)
- (7)大城 諒士, 金子 英治:「垂直電力ケーブルの EMTP モデルに関する検討」, 電気学会九州支所講演会 沖縄, 講演者番号 OKI-201503, pp.7-10(2015 年 12 月)
- (8)大城 諒士, 金子 英治:「引き下げ電力ケーブルに発生するサージ現象に関する検討」, 平成 28 年 電気学会全国大会 宮城, 講演番号 7-085, pp.128-129(2016 年 3 月)
- (9)Ryoji Oshiro, Yuto Hachiman, Eiji Kaneko:” Proposal of Treating Meathod Regarding a Vertical Power Cable in EMTP ” The 10th International Workshop on High Voltage Engineering, Okinawa, Presentation No.HV-16-162, pp.103-106(November-2014)

謝辞

本研究は琉球大学大学院 理工学研究科 生産エネルギー工学専攻の金子研究室にて行われたものである。本研究の細部にわたり有意義かつ適切な助言を賜りました金子英治教授に深く感謝を申し上げます。すばらしい指導者とすばらしい環境に恵まれ、この3年間充実した研究生生活を送ることができましたことにも重ね重ねお礼を申し上げます。

本論文を御査読ならびに御審査頂き、有益な御助言、御指摘を賜りました、米須章教授、浦崎直光教授に深く感謝の意を表すとともに、厚く御礼申し上げます。

第6章および第7章の解析の遂行にあたり、東芝三菱電機産業システム株式会社の横倉邦夫氏には、有益なアドバイスを賜りましたことに、改めて深く感謝申し上げます。

また、博士課程在学中、ともに研究に勤しんだ学生の皆様に対して感謝の意を表します。

最後に、妻や両親をはじめ、温かく見守ってくださった家族の皆様には深く感謝を申し上げます、謝辞とさせていただきます。

目次

第 1 章 緒論	1
1.1 まえがき	1
1.2 本研究の目的	2
1.3 本論文の構成	3
第 1 章 参考文献	4
第 2 章 サージ現象	6
2.1 まえがき	6
2.2 サージの発生, 伝搬, 反射・透過現象.....	6
2.2.1 サージの発生	6
2.2.2 サージ電圧および電流の伝搬現象.....	7
2.2.2 サージ(進行波)の反射および透過	11
2.3 水平導体のサージインピーダンス.....	14
2.3.1 水平導体のサージインピーダンス.....	14
2.3.2 垂直導体のサージインピーダンス.....	18
2.3.2.1 垂直導体のサージインピーダンスの定義.....	18
2.3.2.2 垂直導体のサージインピーダンスの導出	20
2.4 近接効果.....	24
2.5 まとめ	27
第 2 章 参考文献	27
第 3 章 雷現象と諸特性	29
3.1 まえがき	29
3.2 雷現象の概要	29
3.3 雷雲	29

3.3.1	雷雲の発生	29
3.3.2	夏季および冬季における雷雲	30
3.3.3	負極性対地雷放電の過程	31
3.4	雷電流の性状	33
3.4.1	雷電流の極性	33
3.4.2	雷電流の表示法	33
3.4.3	波高値	34
3.4.4	波頭長, 波尾長	35
3.4.5	帰還雷撃(リターンストローク)	36
3.4.6	多重雷と後続雷撃	36
3.5	雷サージ現象	37
3.5.1	直撃雷	37
3.5.2	逆流雷	38
3.5.3	誘導雷	39
3.6	家電機器の雷被害状況	41
3.7	まとめ	44
	第3章 参考文献	45
	第4章 低電圧配電システムの雷害対策	46
4.1	まえがき	46
4.2	雷害対策の基本	46
4.2.1	雷保護システム(LPS)	47
4.2.2	雷サージ保護対策(LPMS)	49
4.3	サージ防護デバイス(SPD)	52
4.3.1	ギャップ式避雷素子	52
4.3.2	半導体式避雷素子	55

4.4 まとめ	59
第4章 参考文献	59

第5章 落雷点近傍の家屋内電気配線に発生する

誘導雷解析	60
5.1 まえがき	60
5.2 モデル構成	60
5.3 解析結果	68
5.3.1 SPD 非敷設時におけるサージ現象	68
5.3.2 分電盤 SPD 敷設時におけるサージ現象	71
5.3.3 分電盤用および電気機器用 SPD 敷設時におけるサージの変化	75
5.4 まとめ	77
第5章 参考文献	79

第6章 FDTD 法による垂直同軸ケーブルにおける

サージ解析	80
6.1 まえがき	80
6.2 垂直同軸ケーブルに発生するサージ現象に関する実験	81
6.2.1 垂直同軸ケーブルのサージ特性検証実験回路	81
6.2.2 垂直同軸ケーブルのサージ特性検証実験結果	82
6.3 FDTD 法による垂直同軸ケーブルサージ解析	84
6.3.1 解析モデル	84
6.3.2 解析結果	86
6.4 考察	88
6.4.1 実験時に電圧プローブの取り付け位置で電流が変化する理由	88
6.4.2 実験と VSTL rev による解析とで電流の反射現象が異なる理由	88

6.5	まとめ	88
第 6 章	参考文献	89
第 7 章	EMTP による垂直同軸ケーブル模擬手法の提案	91
7.1	まえがき	91
7.2	VSTL rev による電力ケーブルのサージ解析	91
7.2.1	電力ケーブルモデル	91
7.2.2	FDTD 法による解析結果	94
7.2.3	EMTP を用いた垂直同軸ケーブルモデル	97
7.2.4	EMTP を用いた垂直同軸ケーブル解析結果.....	98
7.3	鉄塔に敷設された引き込みケーブルにおけるサージ解析	101
7.3.1	VSTL rev 解析モデル.....	101
7.3.2	EMTP 解析モデル	104
7.3.3	解析結果	108
7.4	ケーブルの分割手法について.....	111
7.5	まとめ	112
第 7 章	参考文献	113
第 8 章	結論.....	114
8.1	本研究で得られた成果.....	114
8.2	今後の展望	117

第1章 緒論

1.1 まえがき

我々の生活において、家電製品や電気機器、電力設備は欠かすことができないことは言うまでもない。情報化社会の進展に伴い、これらの機器はネットワーク化、スマート化が進み、さらに IoT(モノのインターネット)化に伴って、我々の生活を一層豊かにしていくと考えられる⁽¹⁾⁻⁽³⁾。しかしながら、これらの機器が高効率化・低電圧駆動化などのように進歩していく一方で、高電圧・低電圧に関わらず電力系統に発生するサージ現象により、事故や故障にさらされる危険がある。サージ現象は、落雷や開閉器の開閉動作などによって生じ、サージ現象自体の継続時間は短い。しかしながら、高エネルギーの短時間現象であるため、過電圧や過電流が発生し、電気機器を破壊する可能性がある。また、サージは電力系統や電気配線を伝搬することで、発生源や発生源近傍の電気機器のみならず、遠方の電気機器も破壊する可能性もある^{(1),(4)-(7)}。

高電圧系統において発生するサージは、SPD(Surge Protective Device:サージ防護デバイス)を用いた過電圧抑制や鉄塔上部への架空地線の敷設などにより、着実に減少している。その一方で、低電圧系統は高電圧系統に比べ、その対策の遅れが懸念されている。サージ電圧は、発生後のわずかな時間(数 μs から数 ms)で最も高電圧となるため、サージ期間の初期において、電気機器が破壊される場合がほとんどである。しかしながら、伝搬や、インピーダンスの異なる線路同士あるいは線路とケーブルとの接続点で発生する反射や透過現象のため、サージ現象はより一層複雑化する。したがって、このような現象を詳細に調査する必要がある。

電力系統や電気配線へ直接落雷した場合に発生するサージ電圧や電流が、電気機器や電力機器を破壊する可能性は十分にある。しかしながら、雷電流は電流値が大きく、高峻度かつ高周波であるため、雷電流からの誘導現象により系統内に過電圧が発生し、周辺の機器を破壊する現象も報告されている。電気機器は低電圧・省エネルギー化、あるいは通信機器等への接続によるネットワーク化されていく。それゆえ、電気機器はサージ現象に対して非常に脆弱になっていることが指摘されており、サージ電圧や電流を、より効果的に抑制するための議論が必要である⁽⁸⁾。

電力系統や電気配線上に発生するサージ現象について、EMTP(Electro Magnetic Transient Program)などを用いる回路解析が主として行われてきた。EMTPは、発電機や変圧器、送電線から負荷まで、あらゆる電力機器や電気機器を模擬することが可能で、電力系統のサージ解析においても有効なツールである⁽⁹⁾⁻⁽¹⁵⁾。しかしながら、サージ現象は電気配線や電気機器の配置など、三次元構造によっても影響を受けるが、EMTPでそれらを考慮するには高度な技術が要求される。そこで、近年、サージ解析にFDTD(Finite Different Time Domain)法がよく適用されている⁽¹⁶⁾⁻⁽²⁶⁾。FDTD法では、三次元の解析空間をメッシュ状に分割し、各格子点における電磁界について、マクスウェル方程式を直接計算する。そして、三次元構造物に発生するサージ現象を、精度よく解析

することが可能である⁽¹⁰⁾。電力中央研究所は、FDTD 法をベースとした汎用サージ解析ソフト VSTL rev(Virtual Surge Test Lab. rev)を開発し、それはサージ現象の解析に対して非常に有用なソフトであることが近年報告されている⁽¹⁸⁾⁽²²⁾⁽²⁵⁾。しかしながら、VSTL rev によるサージ解析においては、EMTP にて取り扱いが可能であるような電気機器を模擬することが難しく、かつ計算時間が膨大になることがしばしばある。一方で、EMTP では、多少モデルが複雑化しても、VSTL rev ほど計算時間は長くない。当研究の一例ではあるが、VSTL rev および EMTP にて同じ対象について解析した場合、ただしモデルの考案および作成時間を含めず、純粋な計算時間のみで比較すると、VSTL rev では 15 日もの計算時間を要するのに対し、EMTP では 5 分程度である。したがって、EMTP で三次元構造物のサージ特性を考慮するモデルが考案できれば、電力系統におけるサージ現象のより詳細な解析に大いに役立つと考えられる。

これまで述べてきたことを背景に、本研究では大きく二種類のサージ現象に関する検討を行った。まず、一つ目の検討として、サージ現象の一つである誘導雷現象に関する解析を VSTL rev を用いて行った。この解析では、雷電流により発生する電磁波が空間や電力系統および電気配線を伝搬しあるいは反射および透過するメカニズムや、その電磁波が原因で落雷点近傍の屋内電気配線に誘起される過電圧や過電流の発生メカニズムについて検討する。加えて、SPD の敷設方式による、サージ電圧の抑制効果についても検討する。

また、二つ目の検討として、VSTL rev による垂直ケーブルならびに鉄塔に併架されたケーブルに発生するサージ解析結果と、本研究で提案する EMTP モデルによる解析結果との比較検討を行い、EMTP モデルの提案をする。これは、電力系統のサージ解析において、鉄塔に併架された垂直電力ケーブルに発生するサージ現象を取り扱う EMTP モデルが存在しないことが背景にある。

1.2 本研究の目的

電力系統において停電や事故が発生すると、我々の身近生活から、生産活動などの経済活動にまで多大な損失を与える。高電圧・低電圧に関わらず、電力系統や電気配線、そこに接続された電気機器などに、多大な影響を与える原因の一つにサージ現象がある。そのため、サージ電圧や電流の発生メカニズムや、サージ現象が波及する原因である、電力系統および電気配線上の伝搬メカニズムについて議論する必要がある。

本研究では、低電圧系統のサージ現象について議論するにあたり、家屋近傍に落雷が発生した条件において、屋内電気配線に発生する誘導雷について、VSTL rev で解析した。その解析により、落雷点から放出される電磁波を起因とする、サージ電流や電圧の発生、発生したサージ電流や電圧が屋内の電気配線上を伝搬するメカニズムや、発生するサージ電圧の抑制手法について検討することを目的としている。

また、EMTP などの回路解析手法によるサージ解析において、送電鉄塔などに併架されるような垂直に配置された電力ケーブルに発生するサージ現象を取り扱う手法が無く、その提案が求められている。垂直配置されたケーブルのサージ特性を、EMTP により取り扱うことができれば、発電機や変圧器、その他電力機器が接続された電力系統に発生す

るサージ解析をより詳細なものとできる。その結果、電力機器の絶縁設計や、電力系統あるいは電気配線に発生したサージ電圧や電流の抑制に関する検討の指針の一つになると考えられる。そこで本研究は、垂直に配置された電力ケーブルや、鉄塔に併架された電力ケーブルに発生するサージ電圧を、EMTPにおける取り扱い手法の提案も目的としている。

1.3 本論文の構成

本論文は八章で構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

本章「緒論」では、電力機器がサージ現象に対して脆弱化している背景や、その現象に関する解析・検討が求められる背景、および本研究の目的について述べる。

第 2 章「サージ現象」では、サージ現象の発生、伝搬、反射や透過現象、サージインピーダンスの考え方、サージ現象に影響を与えるとされ注目されている近接効果について述べる。

第 3 章「雷現象と諸特性」では、雷雲の発生から放電が起こるまでの過程、落雷により生じる過電圧の種類、および日本における被害様相や被害を受ける機器の変遷について紹介する。

第 4 章「低電圧配電システムの雷害対策」では、低電圧配電系統や電気配線における雷サージ対策の規格や考え方、サージ防護装置の役割について紹介する。

第 5 章「落雷点近傍の家屋内電気配線に発生する誘導雷解析」では、建物近傍への落雷による周辺への電磁波の放出ならびに、その伝搬により建物内電気配線に発生するサージ現象について、大地抵抗率の影響やサージ防護デバイスの有無による影響について述べ、サージ過電圧の抑制について講じている。

第 6 章「FDTD 法による垂直同軸ケーブルにおけるサージ解析」では、垂直同軸ケーブルを用いたサージ実験および FDTD 法をベースとしたサージ解析プログラム VSTL rev で実験を模擬した解析を行い、ケーブル上に発生するサージ電圧の特徴や伝搬現象などについて述べる。第 7 章では EMTP による解析モデルの提案について紹介するが、提案したモデルの精度を確認するための比較対象として、VSTL rev の結果を用いることから、VSTL rev の解析精度を確認しておく必要がある。そのため、本章では、VSTL rev のサージ解析精度に関する検討した結果についても述べる。

第 7 章「EMTP による垂直同軸ケーブル模擬手法の提案」では、電力系統にて扱われるケーブルに発生するサージ現象について解析する。そして、サージ電圧の発生や伝搬現象、またサージインピーダンスなどの観点から、実電力系統に発生するサージ現象の特徴について述べる。次いで、EMTP による垂直同軸ケーブル模擬手法の提案として、VSTL rev による解析結果と、EMTP 提案モデルとの解析結果の比較について述べる。EMTP 解析モデルの提案においては、実電力系統を使った実験が不可能であるため、VSTL rev の解析結果を正として、両解析結果の比較を実施した。この比較結果を、提案モデルの解析精度確認とし、提案モデルの有効性を示したことについて述べる。

第 8 章「結論」では本論文を総括する。

第1章 参考文献

- (1) 社団法人 電気設備学会:「電気・電子機器の雷保護 -ICT 社会をささえる-」, オーム社 (2011)
- (2) 森山 浩:「建築設備における ICT・IoT の活用」, 電気設備学会, Vol.36, No.7, pp433-436(2016)
- (3) http://mono-wireless.com/jp/tech/Internet_of_Things.html, (閲覧日 2016年8月22日)
- (4) 横山 茂:「配電線の雷害対策」, オーム社(2005)
- (5) 森田 公:「電流さい断とそれに続く現象」, 電気計算, Vol.46, No.8, pp.49-52(1978)
- (6) 加藤 正平:「一目でわかるサージ現象」, 電学誌, Vol.113, pp.1049-1052(1993)
- (7) K.Yokokura, H.Takahashi, M.Homma, E.Kaneko, I.Ohshima:”Estimation Method for Virtual Current Chopping Generation of Low Surge Vacuum Circuit Breaker Applied in Motor Circuit”, T.IEE Japan, Vol.155-B, No.6, pp.648-653(1995)
- (8) 低圧配電システム雷害対策調査委員会:「低圧配電システムにおける雷害対策」, 電気学会技術報告, 1354号(2015)
- (9) 雨谷 昭弘, 長岡 直人, 馬場 吉弘, 菅 雅弘:「電気・電子回路解析プログラム EMTP 入門」, オーム社(2001)
- (10) 関岡 昇三:「誘導雷サージ解析のための解析式を用いた配電線等価回路」, 電学論 B, Vol.136, No.136, pp.610-616(2016)
- (11) 久保 佑太, 長岡 直人, 馬場 吉弘, 雨谷 昭弘:「回路解析による直撃および近傍雷により生じる太陽電池パネル対地過渡電圧計算」, 電学論 B, Vol.134, No.3, pp.248-255(2014)
- (12) 真空遮断器・開閉器の開閉サージと適用技術調査専門委員会:「真空遮断器・開閉器の開閉サージと適用技術」, 電気学会技術報告, 第 422 号(1992)
- (13) 配電線雷撃応答特性調査委員会:「配電線の雷撃応答特性」, 電気学会技術報告書, 第 678(1998)
- (14) 成田 知巳, 太田 浩, 財満 英一, 石井勝:「UHV 鉄構縮小モデルの雷サージ特性と EMTP モデル化」, 電学論 B, Vol.133, No.9, pp.716-722(2013)
- (15) 松浦 進, 野田 琢, 中村 真敏, 坂井 洋志:「雷サージ解析のための引き込み線および屋内配線のモデリング」, 電学論 B, Vol.130, No.2, pp246-258(2010)
- (16) 宇野 亨:「FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析」, コロナ社(2004)
- (17) サージ現象に関する数値電磁界解析手法調査委員会:「数値過渡電磁界解析手法」, 電気学会(2008)
- (18) 野田 琢・横山 茂:「FDTD 法に基づくサージコードの開発」, 電学論 B, Vol.121, No.5, pp.625-632 (2001)
- (19) 立松 昭芳・野田 琢・横山 茂:「FDTD 法による配電線誘導雷電圧計算手法の開発」, 電中研報告書, No.H04009 (2005)
- (20) 野田 琢・松原 廣治・横山 茂:「FDTD 法による解析結果を用いた新しい雷サージ計算用鉄塔モデル」, 電中研報告書, No.H04012 (2005)
- (21) 立松 明芳・野田 琢:「FDTD 法を用いたサージ解析における避雷器模擬手法の

- 開発とその配電線誘導雷電圧計算への適用」, 電学論 B, Vol.130, No.3 号, pp373-382(2010)
- (22) 三木 貫, 野田 琢:「表皮効果および近接効果を考慮可能な導体分割に基づく線路直列インピーダンス計算手法の改良」, 電学論 B, Vol.128, No.1, pp.254-261(2008)
- (23) A.Ametani, K.Kawamura, A.Shendge, N.Nagaoka, Y.Baba:”Wave Propagation Characteristics on a Pipe-Type Cable in Particular Reference to the Proximity Effect”, IEEJ Trans.PE, Vol.133, No.12, pp.954-960(2013)
- (24) T.Asada, Y.Baba, N.Nagaoka, A.Ametani, I.Lafaia, J.Mahseredjian:”A Study on Basic Characteristics of the Proximity Effect on Multi-Conducutors”,電気学会全国大会論文集, pp.9-5-1 - 9-5-6(2015)
- (25) 山本 和男, 高見 潤, 岡部 成光:「太陽光発電システムの架台に雷撃があった場合にパワーコンディショナの DC 側で発生する過電圧」, 電学論 B, Vol.132, No.11, pp.903-913(2012)
- (26) 大城 諒士・伊佐 真史・金子 英治:「近傍雷撃による周辺低圧系統への誘導サージ解析」, 電学論 B, Vol.130, No.7, pp.687-693(2010)

第2章 サージ現象

2.1 まえがき

サージ現象は、系統の周波数である 50Hz や 60Hz に比べて、急峻あるいは高周波という特徴から、架空送電線や電気配線を集中定数や単純な導体として考えることはできず、分布定数回路として考慮する必要がある。しかしながら、サージ現象において考える分布定数回路は単純なものではない。例えば、導体が大地面に対し、水平か垂直(以下、水平導体および垂直導体と呼ぶ)であるかで、導体と大地間とのキャパシタンスや電磁波の伝搬様相が異なり、サージインピーダンスの考え方が変わってくる。さらに、導体条数や相導体の配置によっても、その様相が変化し、一層複雑な現象となる。そのため、サージ現象を考えるにあたり、分布定数回路の考え方や、サージ現象が電気配線や機器の配置によってどのように変化するかという事を理解しておくことは重要である。そこで、本章では、サージの発生、伝搬現象および水平導体、垂直導体のサージインピーダンスに関する考え方、サージ現象に影響を与えるとして注目されている近接効果など、サージ現象に関する事柄について述べる。

2.2 サージの発生、伝搬、反射・透過現象

2.2.1 サージの発生

電力系統あるいは電気配線において発生するサージ現象は、落雷による雷電流がもたらす電位上昇や、開閉器などの動作による放電現象や過渡現象により発生した、過電圧あるいは過電流の伝搬と定義される⁽¹⁾。サージ現象は発生源付近において電気機器の故障原因となるだけでなく、送電線や配電線を伝搬することで系統中へ波及し、しばしば停電や瞬低、地絡などの事故の原因となる。サージ現象を引き起こすような電流・電圧はその値が、系統電圧や電流に比べ非常に大きい。

例えば送電線に落雷が生じ、その急峻な大電流が送電線や配電線を伝搬するとき、これらの回路は、送電線あるいは配電線と大地間、また相間にサージインピーダンスを持つ分布定数回路として振る舞い、結果として過電圧が発生する⁽²⁾⁽³⁾。

また、遮断器などの開閉動作に起因した、開閉器特有のサージ現象も存在する。真空遮断器で遅れ小電流(負荷側のインピーダンスにおいてインダクタンス成分が支配的な回路)を遮断する際に、交流電流が本来の電流零点より前に、数 A から数十 A の電流が、急峻に零に変化する現象(電流裁断現象)が発生する。この時、裁断電流値に応じたインダクタンスのエネルギーが負荷側線路の浮遊キャパシタンスに供給され、急峻かつ系統電圧に比べ高い電圧が、遮断器電極間に印加され絶縁破壊にいたる。さらに、遮断器電極間の絶縁破壊と、この絶縁破壊後に供給される放電電流の消弧を繰り返す多重再発弧現象なども存在する⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。進み小電流(負荷側のインピーダンスにおいてキャパ

シタンス成分が支配的な回路)の条件では、遅れ小電流遮断時とは異なるサージ現象が発生する⁽⁸⁾。

サージ現象は様々な条件で発生し、様々な性質を持つため、ひとくくりにとまとめることはできないが、その発生源は放電現象と密接に関連している。

2.2.2 サージ電圧および電流の伝搬現象⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾

サージ電圧や電流の伝搬現象を、図 2.1 に示す分布定数回路を用いて考える。図中の i [A]は各地点における電流、 v [V]は各地点の端子間電圧、 R, L, G, C は単位長さあたりの線路抵抗[Ω/m]、線路インダクタンス[H/m]、線路間コンダクタンス[S/m]、および線路間キャパシタンス[F/m]をそれぞれ示している。図 2.1 のような微小変位 Δx における線路定数の値は、各単位長パラメータに Δx を乗じた値で与えられる。したがって、ある時間 t において、地点 x と $x+\Delta x$ との間には、キルヒホッフの法則より式(2.1)が成り立つ。

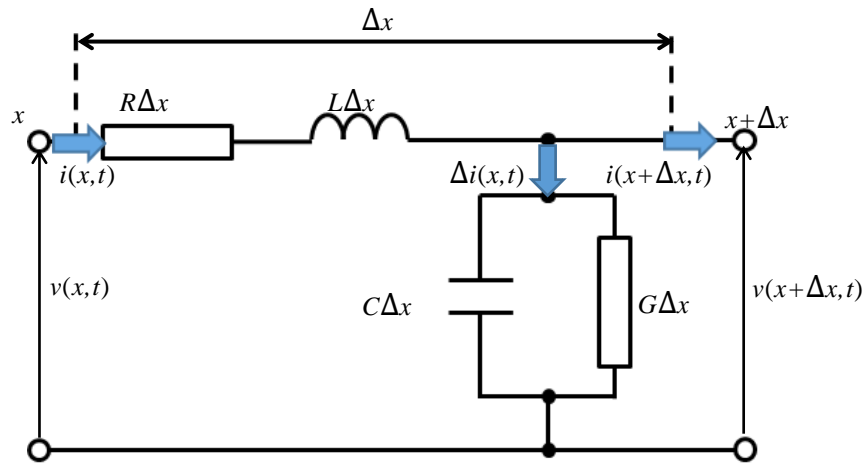


Fig. 2.1 Distributed constant circuit

$$-\frac{\partial}{\partial x} i(x, t) = Gv(x, t) + C \frac{\partial}{\partial t} v(x, t) \quad (2.1)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} v(x, t) = Ri(x, t) + L \frac{\partial}{\partial t} i(x, t)$$

分布定数回路を無損失回路($R=G=0$)として考え、整理すると式(2.2)を得る。

$$\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial (c_0 t)^2} \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial (c_0 t)^2}$$

また,式(2.2)中の c_0 は式(2.3)で示される。

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.3)$$

式(2.2)の一般解はダランベールの解により与えられ, 解の一つとして, 距離の次元を有する式(2.4)が得られる。ここで式(2.4)は, 時間 t と変位 x の一次結合を変数として有する任意の関数であり, 初期条件や境界条件によって決定される。

$$v = f_1(x - c_0 t) + f_2(x + c_0 t) \quad (2.4)$$

$$i = g_1(x - c_0 t) + g_2(x + c_0 t)$$

ここで, 式(2.1)の第1式を x について積分すると

$$\begin{aligned} i &= C \int \frac{\partial}{\partial t} v(x, t) dx = -C \int \left[\frac{\partial f_1(x - c_0 t)}{\partial t} + \frac{\partial f_2(x + c_0 t)}{\partial t} \right] dx \\ &= -C \int \left[\frac{\partial f_1(\xi_1)}{\partial t} + \frac{\partial f_2(\xi_2)}{\partial t} \right] dx = -C \int \left[\frac{\partial f_1(\xi_1)}{\partial \xi_1} \frac{\partial \xi_1}{\partial t} + \frac{\partial f_2(\xi_2)}{\partial \xi_2} \frac{\partial \xi_2}{\partial t} \right] dx \\ &= -C \int \left[-c_0 \frac{\partial f_1(\xi_1)}{\partial \xi_1} + c_0 \frac{\partial f_2(\xi_2)}{\partial \xi_2} \right] dx \end{aligned} \quad (2.5)$$

となる。変位 x と時間 t の一次結合に関して, 式(2.6-a), (2.6-b)が成り立つとする。

$$\xi_1 = x - c_0 t \quad (2.6-a)$$

$$\xi_2 = x + c_0 t \quad (2.6-b)$$

この時, ある時刻 t における x の微小変位 dx は式(2.10-a)より $dx = d\xi_1$, 式(2.10-b)より $dx = d\xi_2$ となる。したがって, 式(2.5)は,

$$\begin{aligned} i &= -c_0 C \left[- \int \frac{\partial f_1(\xi_1)}{\partial \xi_1} dx + \int \frac{\partial f_2(\xi_2)}{\partial \xi_2} dx \right] \\ &= -c_0 C \left[- \int \frac{\partial f_1(\xi_1)}{\partial \xi_1} d\xi_1 + \int \frac{\partial f_2(\xi_2)}{\partial \xi_2} d\xi_2 \right] \\ &= -c_0 C [-f_1(\xi_1) + f_2(\xi_2)] + A \end{aligned}$$

$$= c_0 C [f_1(x - c_0 t) + f_2(x + c_0 t)] + A \quad (2.7)$$

となる⁽⁹⁾。ここで A は積分定数で、物理的には線路中の直流分に対応する。通常、直流分は零であるため、

$$A = 0 \quad (2.8)$$

また、係数 $c_0 C$ は、式(2.3)より

$$c_0 C = \frac{C}{\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2.9)$$

となる。ここで、(2.9)を(2.9)'とおく。

$$\sqrt{\frac{C}{L}} = Y_0 = \frac{1}{Z_0} \quad (2.9)'$$

さらに、式(2.8)と(2.9)を、式(2.7)へ代入し、整理することで式(2.10)が求まる。

$$i = \frac{1}{Z_0} [f_1(x - c_0 t) - f_2(x + c_0 t)] \quad (2.10)$$

式(2.4)の電圧に関する式および式(2.10)の電流に関する式において、第一項は時間 t の増加とともに正方向へ進行する波を示し、第二項は負方向に進行する波を示す。

例えば、直撃雷のように、線路上に自由電荷の分布が与えられると(図 2.2)、その電荷も正負の方向に分かれて伝搬する。このような、線路上を伝わる電荷、電流、電圧の分布を進行波といい、架空送電線においては光速に等しい速度で移動するとされる。

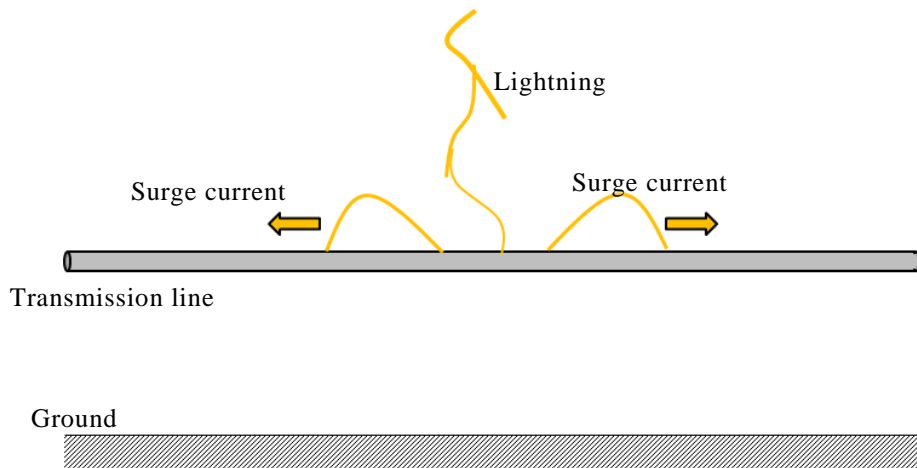


Fig. 2.2 Propagation of surge current/voltage

図 2.3 に示すように、電気配線などを方形波のサージ電圧が伝搬する状況を考える。この進行波が矢印の方向に移動し、線路上の A 点に到達した際、A 点の電位は e [V] となる。進行波は Δt [s] 後に B 点に到達すれば、B 点の電位も e [V] になる。ここで、線路の単位長当たりの静電容量を C [F/m] とすると、 Δx [m] 間に蓄えられる電荷 Δq [C] は

$$\Delta q = eC\Delta x \quad (2.11)$$

となる。

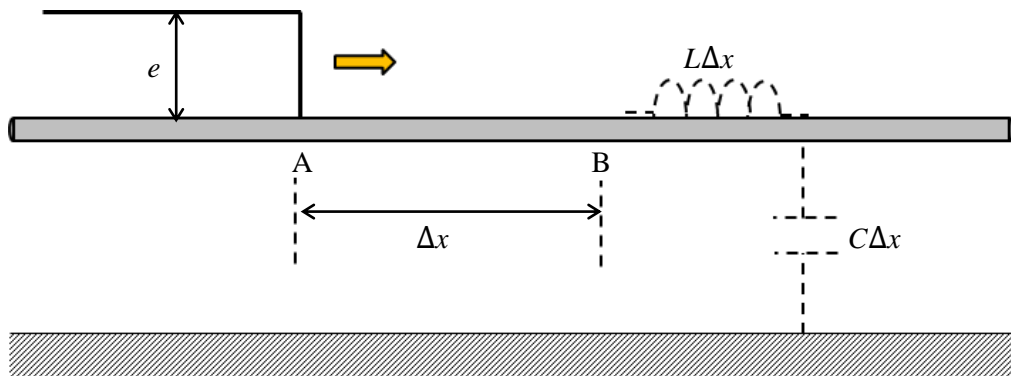


Fig. 2.3 Propagation of surge current/voltage on distributed constant circuit

この時、充電電流は、

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = eC \frac{\Delta x}{\Delta t} = eCv \quad (2.12)$$

として求まる。式(2.12)中の $\Delta x/\Delta t$ は進行波の伝搬速度を示し、これを伝搬速度 v [m/s] としている。1 条の送電線を、巻数 1、単位線路長当たりのインダクタンスを L [H/m] としたとき、 Δx 間におけるインダクタンスは $L\Delta x$ となる。したがって、電流 i によって生じる磁束 $\Delta\phi$ は、

$$\Delta\phi = iL\Delta x \quad (2.13)$$

として求まる。また、B 点に発生する電位 e' は、 Δt [s] 間の $\Delta\phi$ [Wb] の変化により発生する起電力である。すなわち、

$$e' = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -\frac{iL\Delta x}{\Delta t} = -iLv \quad (2.14)$$

を得る。式(2.12)と同様に、 $\Delta x/\Delta t$ を進行波の伝搬速度 v とした。

また、式(2.12)で求まる充電電圧と、式(2.14)で求まる起電力の大きさは等しい。ここで、式(2.12)あるいは式(2.14)において、電位 e と電流 i との比を取ると、

$$\frac{e_{(2.12)}}{i_{(2.12)}} = \frac{e}{eCv} = \frac{1}{Cv} \quad (2.15)$$

$$\frac{e_{(2.14)}}{i_{(2.14)}} = \frac{iLv}{i} = Lv$$

となる。ここで、式(2.15)の二式は等しい事より、 v の値は式(2.16)となる。

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad [\text{m/s}] \quad (2.16)$$

式(2.16)の値は、式(2.4)や(2.10)の c_0 に対応する。また、(2.15)に示す送電線上の任意の点における進行波電位 e と進行波電流 i との比は、特性インピーダンスや波動インピーダンス、サージインピーダンスと呼ばれ無損失線路においては

$$Z_0 = \frac{1}{Cv} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad [\Omega] \quad (2.17)$$

となり、式(2.9)'に一致する。

2.2.2 サージ(進行波)の反射および透過

サージ現象を考える上では、分布定数回路における伝搬現象のみならず、インピーダンスの異なる線路の接続点で発生する反射現象や透過現象も重要なものである。図 2.4 に示す様に、サージインピーダンス Z_1 , Z_2 を持つ二つの線路が点 P で接続されている状況を考える。この時、点 P への入射波を e_i , i_i 、点 P での反射波を e_r , i_r 、透過波を e_t , i_t としたとき、これらの間には式(2.18)~式(2.20)が成り立つ。

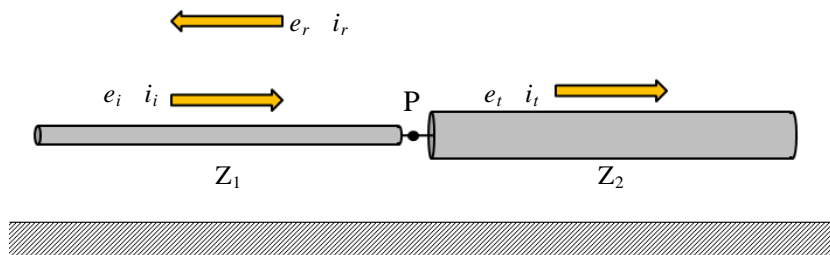


Fig. 2.4 Surge propagation phenomenon on circuit having different impedance

$$i_i = \frac{e_i}{Z_1} \quad i_r = \frac{e_r}{Z_1} \quad i_t = \frac{e_t}{Z_2} \quad (2.18)$$

$$i_i - i_r = i_t \quad (2.19)$$

$$e_i + e_r = e_t \quad (2.20)$$

式(2.18)~(2.20)より e_r と e_t および e_i , i_r と i_i および i_t との比を求めることで、以下の四式を得る。

$$\frac{e_t}{e_i} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.21) \quad \frac{e_r}{e_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2.22)$$

$$\frac{i_t}{i_i} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2.23) \quad \frac{i_r}{i_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2.24)$$

式(2.21), 式(2.22), 式(2.23), 式(2.24)は、それぞれ、電圧透過率、電圧反射率、電流透過率、電流反射率と呼ばれる。上式から明らかなように、インピーダンス条件により反射波や透過波の値が変化することが分かる。

(1) 条件 $Z_1=Z_2$: 式(2.22)および式(2.24)より、反射電圧 $e_r=0$, 反射電流 $i_r=0$ となり、電圧および電流について反射は発生しないことが分かる。式(2.21)および式(2.23)より、透過電圧 $e_t=e_i$, 透過電流 $i_t=i_i$ となり、入射電圧および入射電流が Z_2 導体上をそのまま伝搬していくことを示している。

(2) $Z_1>Z_2$ の条件において、透過波 e_t は降下し、 i_t は増大して進行する。特に $Z_2=0$ (P 点接地あるいは短絡条件)においては、式(2.21)および式(2.23)より、透過電圧 $e_t=0$, 透過電流 $i_t=2i_i$ となる。式(2.22)および式(2.24)より、反射電圧 $e_r=-e_i$, 反射電流 $i_r=-i_i$ となる。 $Z_2=0$ 条件における、式(2.21)~式(2.24)について、図 2.5 と図 2.6 を用いて説明する。

図 2.5 と図 2.6 は、 $Z_2=0$ における電圧および電流の伝搬・反射・透過現象のイメージ図である。ここで、電圧とは線路と大地間との電位差である。図 2.5(a) は、点 P に到達する前のある時刻 t_1 , および t_2 における電圧の伝搬様相を示している。説明にあたり、伝搬電圧および電流はステップ波形とする。

まず、電圧について説明する。図 2.5(a)では、電圧は左側から点 P に向かって伝搬している。時刻 t_1 において、線路上の $x=0$ から $x=x_1$ における電圧は E であるが、 x_1 から点 P までの電圧は 0 である(図 2.5 上段の Voltage distribution on the line 参照)。時刻 t_2 には、電圧は点 P 近傍まで到達し、 $x=0$ から点 P までの電圧は全て E となる。図 2.5(b)に示すように、電圧(入射波 e_i) が点 P 到達後、その電圧は反射現象によって逆極性となり、入射波とは逆方向

に伝搬する(反射波 e_r)。また、この条件下での透過波は点 P における電圧を示している。時刻 t_3 では、反射波が $x=x_2$ 地点に到達し、 x_2 から P 点までの電位は、入射波と反射波とで打ち消し合いで 0 となる(式(2.20))。 t_3 以降も反射波は、 t_2 以前に入射波によって発生した線路上の電圧を打ち消しながら伝搬していく。

電流については、点 P へ到達するまでの伝搬過程は電圧と同じである。点 P における反射後、負の反射電流が負の方向へ伝搬しているため、図 2.6 に示すように、正の反射電流が正の入射電流に重畳しながら伝搬していく。そのため、反射波が到達した地点の電流値は 2 倍になる(式(2.19))。また、この条件における透過電流は、点 P における電流値を示している。

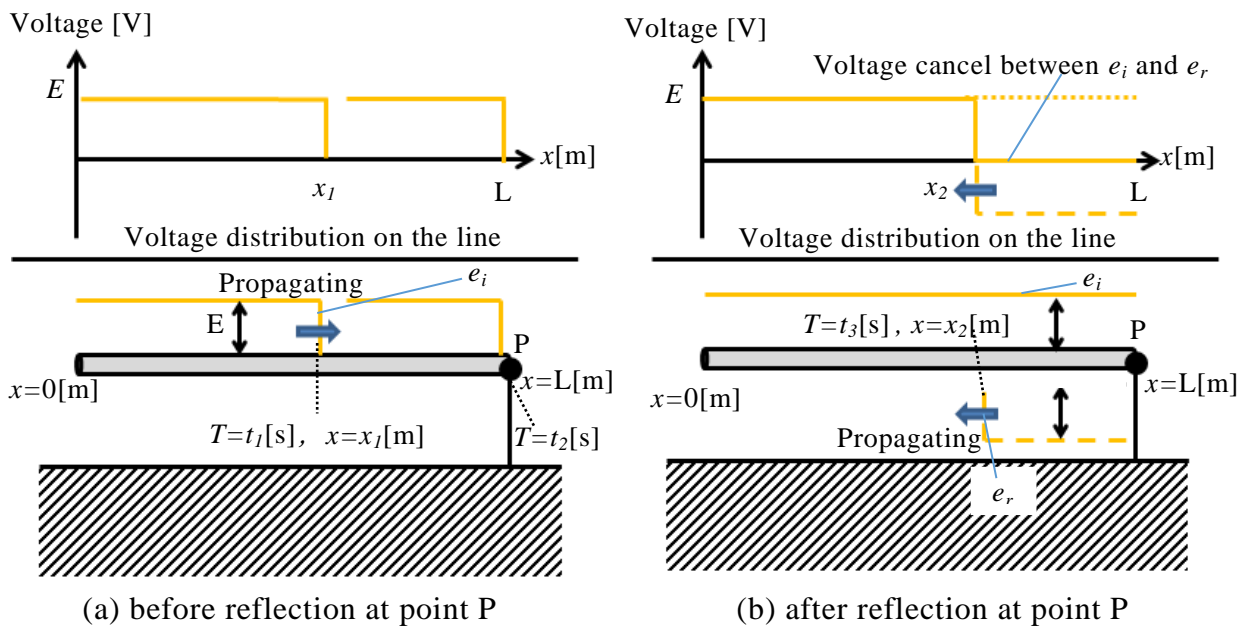


Fig.2.5 Propagation phenomenon of voltage

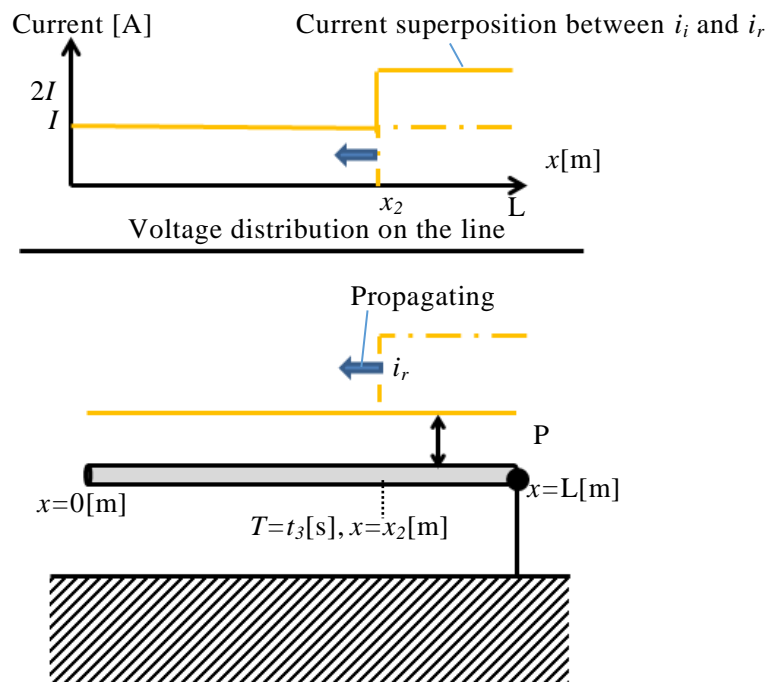


Fig.2.6 Propagation phenomenon of current after reflection at point P

(3) $Z_1 < Z_2$ の条件において、透過波 e_t は増大し、 i_t は降下して進行する。特に $Z_2 = \infty$ (P 点開放条件) においては、反射波 $e_r = e_i$, $i_r = i_i$ となる。したがって、透過電圧 $e_t = 2e_i$ となる。この条件において、点 P にて反射された電圧は、入射電圧と同じ極性かつ同じ大きさである。そのため、反射電圧は、入射電圧によって発生した線路電圧に重畳しながら線路上を伝搬する。

電流について、透過電流 $i_t = 0$ となる。また、反射電流 $i_r = i_i$ となり、入射電流と同極性かつ同じ波高値であるが、電流の伝搬方向が入射波とは逆である。したがって、負の電流が線路上の入射電流を打ち消す様に伝搬していく。

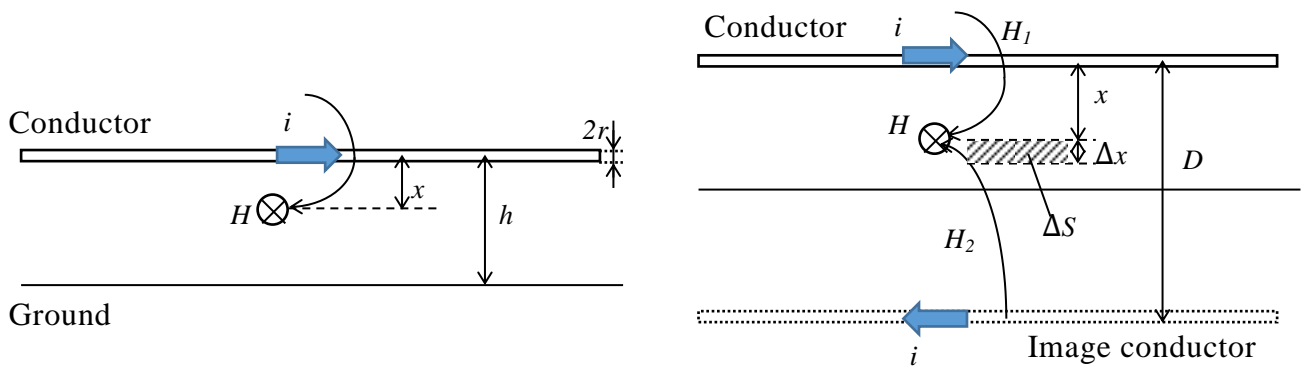
2.3 サージインピーダンス

過電圧に耐えるための絶縁設計において、サージインピーダンスは重要な指標の一つである。さらに、サージ解析を行うにあたり、前節で述べたサージの伝搬や反射現象に加え、サージインピーダンスも重要なパラメータの一つであり、理解しておく必要がある。そこで、本節では、サージインピーダンスの考え方や、導体配置の違いにより生じるサージインピーダンスの違いについて述べる。

2.3.1 水平導体のサージインピーダンス

送電線など、大地に対して水平に配置された導体上を、十分遠方の波源から電磁波が伝搬してくる場合、電磁波は平面波の伝搬として仮定することができ、線路に生じる電圧や電流は伝送路理論で解析することが可能である。水平導体のサージインピーダンスを求めるには様々な手法があるが、ここでは水平導体のインダクタンスおよびキャパシタンスから導出する手法を紹介する。

図 2.7(a)のように完全導体大地に対して水平に、高さ h [m] の位置に配置された半径 r [m] を有する導体のインダクタンスは、鏡像法を用いることで、図 2.7(b)のように同導体の往復 2 線路のインダクタンスから求めることが可能である⁽¹¹⁾。図(b)中の D は、実導体と鏡像導体との間の距離を表している。また、図中 x は、実導体中心からの距離を示している。



(a) Situation of a horizontal conductor

(b) Situation of two parallel conductors

Fig. 2.7 Concept of calculation of a horizontal conductor's inductance

図 2.7(b)の状態において、実導体および鏡像導体上を往復電流 i が流れている場合、距離 x の範囲における磁界 H は式(2.25)で求めることができる⁽¹¹⁾。

$$H = H_1 + H_2 = \frac{i}{2\pi x} + \frac{i}{2\pi(D-x)} \quad (2.25)$$

したがって、微小距離 Δx と単位長さで決まる微小面積 ΔS を貫く磁束 ϕ は式(2.26)となる。

$$\phi = BdS = \mu_r \mu_0 H(1 \cdot dx) = \mu_r \mu_0 H dx \quad (2.26)$$

式(2.26)中の μ_r は比透磁率、 μ_0 は真空の透磁率である。

導体間を鎖交する単位長当たりの全磁束 Φ は、式(2.26)を実導体表面($x=r$)から鏡像導体の表面($x=D-r$)で面積分すると、

$$\begin{aligned} \Phi &= \int_r^{D-r} \phi dS = \int_r^{D-r} \mu_r \mu_0 \left(\frac{i}{2\pi x} + \frac{i}{2\pi(D-x)} \right) 1 \cdot dx \\ &= \frac{\mu_r \mu_0 i}{2\pi} [\ln(x) - \ln(D-x)]_r^{D-r} \\ &= \frac{\mu_r \mu_0 i}{\pi} \ln \left(\frac{D-r}{r} \right) \end{aligned} \quad (2.27)$$

と求まる。ここで、 $D \gg r$ の条件では式(2.27)は

$$\Phi \approx \frac{\mu_r \mu_0 i}{\pi} \ln \left(\frac{D}{r} \right) = \frac{1 \times 4\pi \times 10^{-7}}{\pi} i \ln \left(\frac{D}{r} \right) = 4i \times 10^{-7} \ln \left(\frac{D}{r} \right) \quad (2.28)$$

と近似される。配電線や送電線は大気中に配置されるため、比透磁率 $\mu_r = 1$ とした。したがって、2 導体のインダクタンス L は

$$L = \frac{\Phi}{i} = 4 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{D}{r} \right) \quad (2.29)$$

となる。また、 $D=2h$ (実導体－鏡像導体間距離) とすることで、 $2h$ 隔てて平行に配置された 2 線のインダクタンス L は

$$L = \frac{\Phi}{i} = 4 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{2h}{r} \right) \quad (2.30)$$

となる。ゆえに1線の L' は

$$L' = \frac{L}{2} = 2 \times 10^{-7} \ln \left(\frac{2h}{r} \right) \quad (2.31)$$

として求まる。導体内部の電流分布を考慮すると式(2.31)は式(2.32)として考える必要があるが、送電線として使用される導体の比透磁率 μ_s が1である事、 $H \gg r$ が成り立つため、結果として、第二項が第一項に比べ非常に大きくなる。したがって、第一項は無視できることから、最終的にはインダクタンスは式(2.37)として考えることができる。

$$L' = \left[\frac{\mu_s}{2} + 2 \ln \left(\frac{2h}{r} \right) \right] \times 10^{-7} \quad (2.32)$$

続いて、水平導体と大地との間のキャパシタンスについて考える。インダクタンスを求めた状況と同様に、図 2.8(a)のように、大地と平行に高さ h [m]の位置に半径 r [m]の導体が配置されているとする。この時のキャパシタンスは、図 2.8(b)の様に鏡像法を用いて求めることが可能である⁽¹¹⁾。

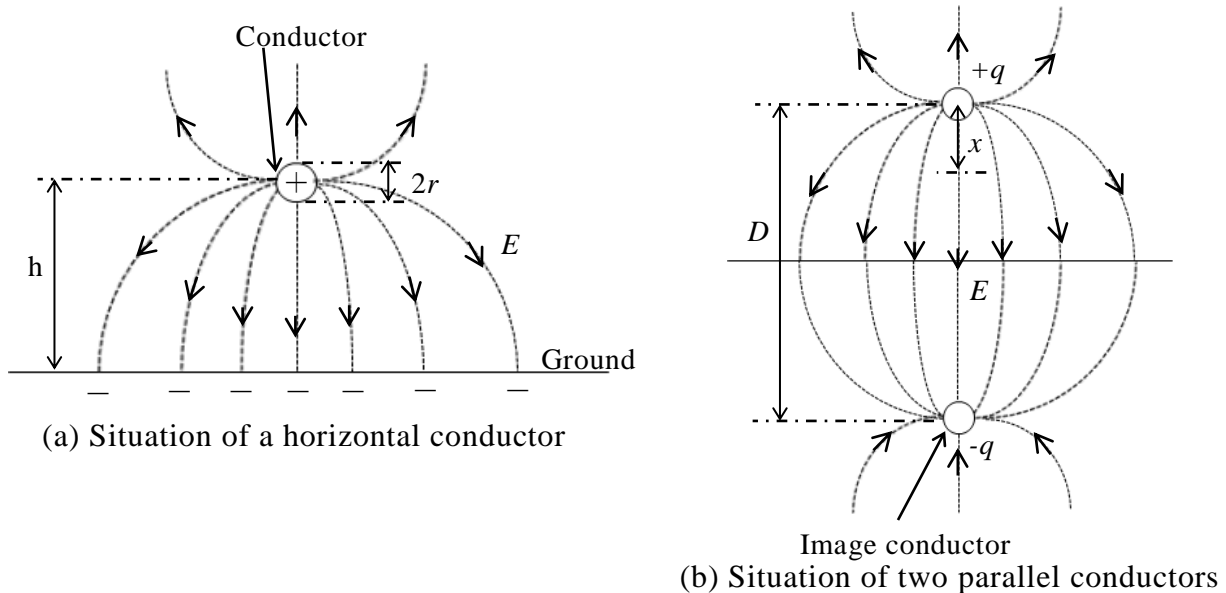


Fig. 2.8 Concept of calculation of a horizontal conductor's capacitance

図 2.8(b)の状態において、各導体にそれぞれ $+q$ [C/m]と $-q$ [C/m]を与えたとき、二本の導体間を最短で結ぶ線上の点 x における電界の強さは

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0 x} + \frac{q}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0(D-x)} \quad (2.33)$$

となる。式(2.33)中の ϵ_r は比誘電率， ϵ_0 は真空の誘電率である。式(2.33)で求めた電界 E を，実導体の表面($x=r$)から鏡像導体の表面($x=D-r$)まで線積分することで，両導体間の電位差 V は式(2.34)で表され，両導体間のキャパシタンス C は式(2.35)として求まる。

$$\begin{aligned} V &= \int_r^{D-r} E dx = \int_r^{D-r} \left(\frac{q}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0 x} + \frac{q}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0(D-x)} \right) dx \\ &= \frac{q}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} [\ln(x) - \ln(D-x)]_r^{D-r} \\ &= \frac{q}{\pi\epsilon_r\epsilon_0} \left[\ln\left(\frac{D-r}{r}\right) \right] \\ &\approx \frac{q}{\pi\epsilon_r\epsilon_0} \left[\ln\left(\frac{D}{r}\right) \right] \end{aligned} \quad (2.34)$$

(ただし， $D \gg r$ とした。)

$$C = \frac{q}{V} = \frac{\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln\left(\frac{D}{r}\right)} \quad (2.35)$$

ここで $D=2h$ (実導体－鏡像導体間距離) とすることで，実導体と鏡像導体間のキャパシタンス C が求まる。さらに水平導体と大地間のキャパシタンス C' は，水平導体間のキャパシタンスを 2 倍することで求めることができる。送電線は大気中に配置されているため，水平導体－大地間の比誘電率 ϵ_r は 1 である。ゆえに，水平導体－大地間のキャパシタンス C' は

$$C' = 2C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{2H}{r}\right)} = \frac{2\pi \times 8.854 \times 10^{-12}}{\ln\left(\frac{2H}{r}\right)} \quad (2.36)$$

となる。式(2.31)と式(2.36)より，水平導体のサージインピーダンスは

$$Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = \sqrt{\frac{2 \times 10^{-7} \ln\left(\frac{2h}{r}\right)}{2\pi \times 8.854 \times 10^{-12} \ln\left(\frac{2h}{r}\right)}} = \sqrt{\frac{10^{-7}}{\pi \times 8.854 \times 10^{-12}}} \ln\left(\frac{2h}{r}\right)$$

$$\approx 60 \ln\left(\frac{2h}{r}\right) \quad (2.37)$$

と求まる。式(2.37)は水平導体のサージインピーダンスの式としてよく知られている⁽²⁾⁽¹²⁾。

2.3.2 垂直導体のサージインピーダンス

2.3.2.1 垂直導体のサージインピーダンスの定義

垂直導体のサージインピーダンスは図 2.9 に示すように、垂直導体の頂上に大きさ I_0 のステップ電流を印加した時に電圧測定線と垂直導体頂上との間のギャップに現れる頂上電圧 V_0 と、 I_0 との比として定義され(式(2.38))、これは直接法によるサージインピーダンスと呼ばれる⁽¹²⁾⁻⁽¹⁴⁾。

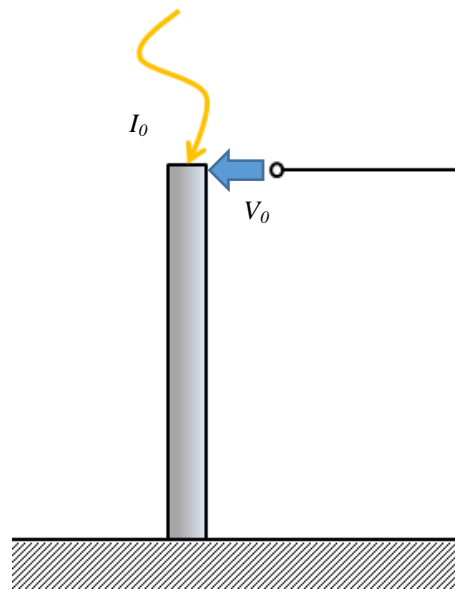


Fig. 2.9 Definition of surge impedance at top of a vertical conductor

$$Z_V \stackrel{\text{def}}{=} \frac{V_0}{I_0} \quad (2.38)$$

実際に行われる垂直導体のサージインピーダンスの測定手法を、図 2.10 を用いて説明する。大地面上に、高さ h [m]、半径 a [m]の垂直導体が配置されている。図 2.10 に示すように、垂直導体の頂上付近まで、電圧測定線(零電位線)を大地に対して水平に配置する。この時、零電位線は、垂直導体の高さと比較して十分遠方から配置される。そして、垂直導体の頂上からステップ電流 I_0 を印加した際に、垂直導体頂上と零電線間のギャップに現れる電圧 V_0 を測定する。この状況において、垂直導体は接地されているため、電圧および電流は負の反射係数で印加点まで伝搬する。2.2 節で説明したように、電流印加点に、大地からの反射波が到達すると、電圧は減少し、電流は増加する。この時、式(2.38)を計算して、インピーダンスの時間変化を求め、その時間変化における最大値がサージインピーダンスとして与えられる。サージインピーダンスは、例えば、雷撃時に碍子連にかかる電圧などの算出に用いられる⁽¹⁵⁾。

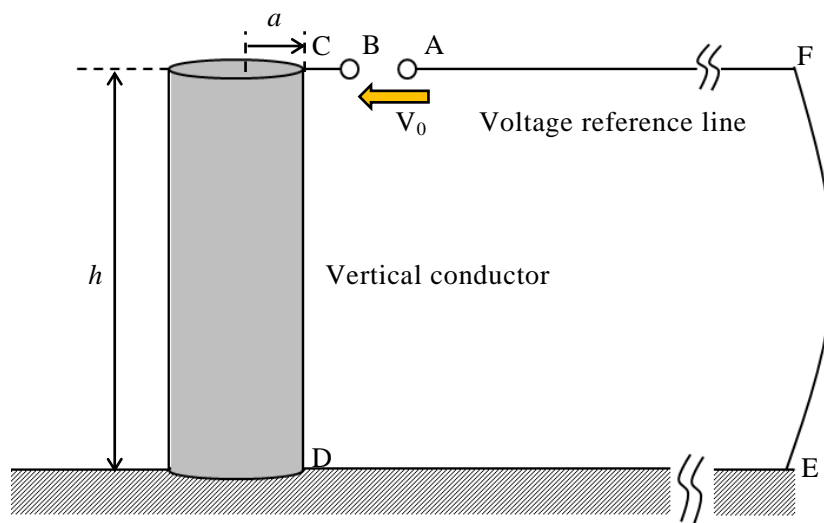


Fig. 2.10 Measurement method of voltage at top of conductor

図 2.10 において、波高値 1A のステップ電流 I_0 を印加する。その時、ギャップ AB に生じる電界を E とすると、垂直導体のサージインピーダンス Z は

$$Z = - \int_A^B \frac{V}{I} ds = - \int_A^B \frac{E}{1} ds = - \int_A^B E ds \quad (2.39)$$

で与えられる。ここで電界 E は次の二つの成分からなる。

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_e + \mathbf{E}_m \quad (2.40)$$

式(2.40)において、電界 \mathbf{E}_e は電荷により生じる電界であり、スカラーポテンシャル ϕ の勾配(gradient)によって表されるベクトルである。 \mathbf{E}_m は、電磁誘導によって生じる電界であり、ベクトルポテンシャル \mathbf{A} の時間微分に関連づけられる。すなわち式(2.40)は

$$\mathbf{E} = -\text{grad}\phi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (2.41)$$

としてよく知られた形となる⁽¹⁶⁾。

2.3.2.2 垂直導体のサージインピーダンスの導出

ルンドホルムらは、式(2.40)の E_e を計算せずに、サージインピーダンス Z を導出するループ電圧法を考案した⁽¹⁵⁾。図 2.11 において、ループ電圧法を適用するにあたり、ループ ABCDEFA に沿って電界を積分することにより、導体頂上の電圧を求めている。ただし、垂直導体、測定線および大地は完全導体と仮定している。今、式(2.40)の両辺を任意の積分路に沿うように積分し、電界 E_e の周回積分が 0 となることを考慮することで式(2.42)を得る。

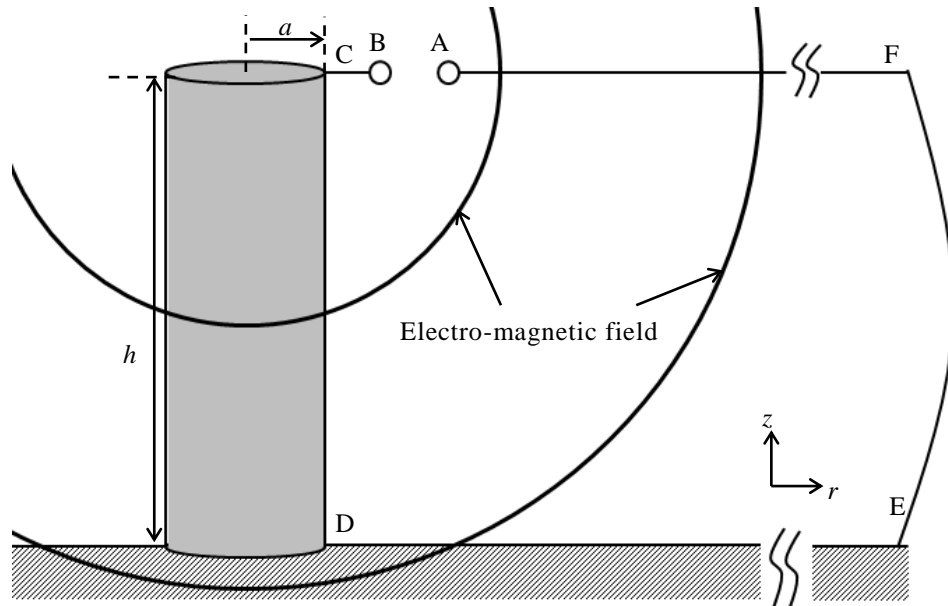


Fig. 2.11 loop voltage method

$$\oint E ds = \int_A^B E ds + \int_B^C E ds + \int_C^D E ds + \int_D^E E ds + \int_E^F E ds + \int_F^A E ds \quad (2.42)$$

$$\oint E ds = \oint E_m ds = - \oint \frac{\partial A}{\partial t} ds$$

この閉回路の積分路のうち、BC, CD, DE, FA は完全導体であることから、

$$\int_B^C E ds = \int_C^D E ds = \int_D^E E ds = \int_E^F E ds = 0 \quad (2.43)$$

さらに、F および E は無限遠としているため、EF 上の電界も 0 となる。

$$\int_E^F E ds = 0 \quad (2.44)$$

式(2.49)と式(2.50)を式(2.48)に代入することで、ギャップ間電圧 V_{AB} を得る。

$$\int_A^B E ds = \oint E_m ds = - \oint \frac{\partial A}{\partial t} ds = -V_{AB} \quad (2.45)$$

ここで印加電流は、波高値 1 のステップ電流 I_0 とすると、サージインピーダンスは

$$Z = \frac{V_{AB}}{I_0} = \frac{V_{AB}}{1} = V_{AB} \quad (2.46)$$

として求まる。以上の手法は V_{AB} を求めるために、ループ ABCDEFA に誘起する電圧からサージインピーダンスを求めるため、ループ電圧法と呼ばれている。

それに対し、次に示すように、ベクトルポテンシャルを使用して、電磁界解析により頂上電位あるいはサージインピーダンスを求める場合を電磁界理論という⁽¹²⁾⁽¹³⁾。ルンドホルムやワグナーは、電磁界理論を用いて垂直導体のサージインピーダンスを導出している⁽¹⁵⁾⁽¹⁷⁾。図 2.12 の様に、半径 a [m] の円柱状導体が完全導体に対して垂直に配置されており、 z 軸を導体の中心軸、 r を導体の半径方向軸、原点は大地面上にあると考える。頂上より注入された一定波高値のステップ電流 I_0 は、光速 c で導体上を z 軸に沿って伝搬するため、時刻 t における電流の伝搬距離は ct となる。電磁界理論では、大地は完全導体として実像と虚像によるポテンシャルを考える。この時、直線電流が、導体より離れた位置に作るベクトルポテンシャルは、電流の方向成分のみとなるため、それ以外の成分は 0 となる⁽¹⁴⁾。

$0 \leq ct \leq \sqrt{a^2 + h^2}$ の条件 (印加電流の先端が頂上と大地との間にある条件) において、点 P におけるベクトルポテンシャルは

$$A_z = -\frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{i}{R} dz = -\frac{\mu_0 I_0}{4\pi} \ln \left(\frac{ct + z - h}{z - h + \sqrt{r^2 + (z - h)^2}} \right) \quad (2.47)$$

となる⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。

$\sqrt{a^2 + h^2} \leq ct \leq 2\sqrt{a^2 + h^2}$ の条件 (反射波が大地面から頂上に向かう過程) においては、反射電流の影響も考慮する必要があり、そのベクトルポテンシャルは

$$A_z = -\frac{\mu_0 I_0}{4\pi} \left\{ \ln \left(\frac{ct + z - h}{z - h + \sqrt{r^2 + (z - h)^2}} \right) + \ln \left(\frac{ct - z - h}{-z - h + \sqrt{r^2 + (z - h)^2}} \right) \right\} \quad (2.48)$$

となる⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。半径 a の円柱表面上で式(2.48)を計算することで、式(2.49)を得る⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。

$$V_{AB} = -\frac{\mu_0 I_0 c}{4\pi} \ln \left(\frac{ct - \sqrt{(ct)^2 - a^2}}{ct} \right) \quad (2.49)$$

ここで、 $K = \left(\frac{a}{ct}\right)^2$, $ct \gg a$ とし、 $(1-K)^{\frac{1}{2}}$ をテイラー展開により近似することで、(2.49)'が導かれる。

$$\begin{aligned} V_{AB} &= -\frac{\mu_0 I_0 c}{4\pi} \ln \left(\frac{ct - ct(1-K)^{\frac{1}{2}}}{ct} \right) \approx -\frac{\mu_0 I_0 c}{4\pi} \ln \left(\frac{ct - ct \left(1 - \frac{K}{2}\right)}{ct} \right) \\ &= -\frac{\mu_0 I_0 c}{4\pi} \ln \left(\frac{\left(\frac{K}{2}\right)}{1} \right) = -\frac{\mu_0 I_0 c}{4\pi} \ln \left(\frac{a^2}{2(ct)^2} \right) = \frac{\mu_0 I_0 c}{2\pi} \ln \left(\frac{a}{\sqrt{2}ct} \right)^{-1} \\ &= \frac{(4\pi \times 10^{-7}) \times I_0 \times (3 \times 10^8)}{2\pi} \ln \left(\frac{\sqrt{2}ct}{a} \right) \approx 60I_0 \ln \frac{\sqrt{2}ct}{a} \quad (2.49)' \end{aligned}$$

(ただし、 $1 \gg K$ と仮定しているため、テイラー展開による近似式中に現れる K に関して、2次以項は無視した。)

ここで、 ct を電磁波が導体上を1往復する距離 $2h$ とおき、導体半径を r とすれば

$$Z = \frac{V_{AB}}{I_0} \approx 60 \ln \frac{2\sqrt{2}h}{r} \quad (2.50)$$

として、垂直導体のサージインピーダンスの最大値を与える式が得られる⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。

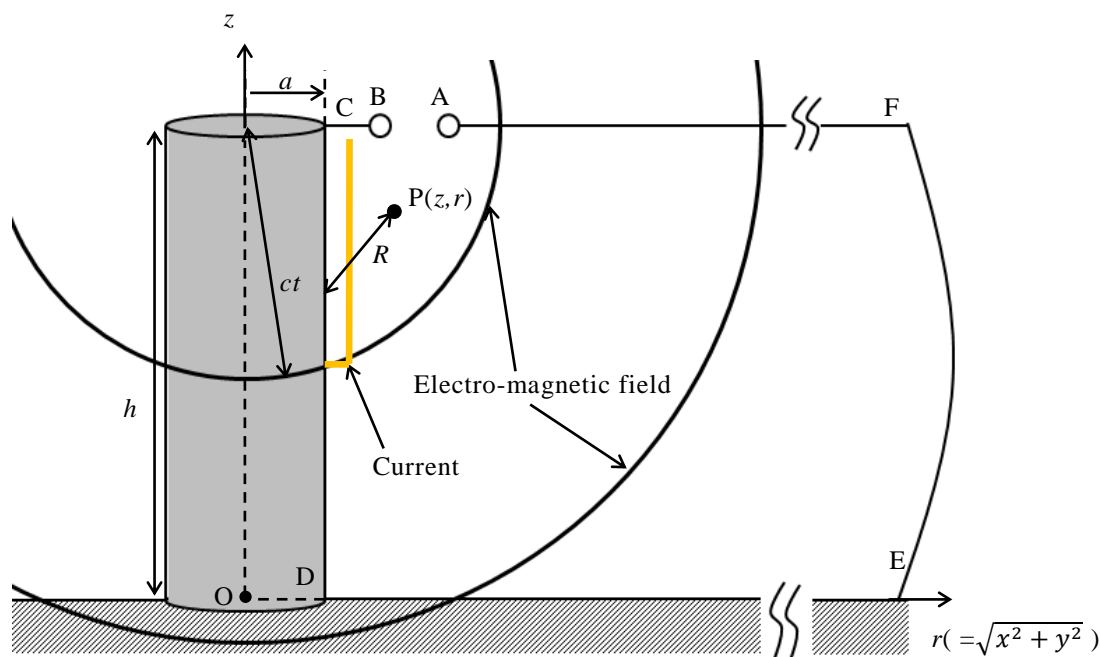


Fig. 2.12 Concept of electro magnetic theory

しかしながら、式(2.50)は実験値に比べて高い値になることが多数報告された。そこで、原らは垂直導体へのサージ電流印加実験と検討を重ね、サージインピーダンスが導体の高さ h [m]と半径 r [m]との比 h/r の対数値に比例することを確認している。そして得られた結果より、式(2.54)を式(2.55)のように補正することで垂直導体のサージインピーダンスを与えた⁽²⁰⁾。

$$Z = 60 \left(\ln \frac{2\sqrt{2}h}{r} - 2 \right) \quad (2.51)$$

その他に馬場は、TEM 波理論に基づくものではあるが、実導体と映像導体の自己インダクタンスと相互インダクタンスおよび電流が導体上を光速で伝搬すると仮定し、式(2.52)を導出している⁽²¹⁾。

$$Z = cL = 60 \left(\ln \frac{4h}{r} - 1 \right) \quad (2.52)$$

$r=0.1\text{m}$, $h=120\text{m}$ の垂直導体において数値電磁界解析により求めた垂直導体のサージインピーダンスの値が 480Ω であったことに対し、馬場の導出式では 450Ω と比較的高精度であることが示されている⁽²¹⁾。垂直導体のサージインピーダンスについて様々な議論がなされているが、いずれの式においても h/r の対数値でその最大値が変化することが分かる。

2.4 近接効果

サージ解析において、サージインピーダンスが重要なパラメータであることは前節で述べた。加えて、導体が大地に対して水平であるか、垂直であるかにより、その値が変わることについても述べた。

さらに、近年、サージインピーダンスに影響を与える要因の一つとして、近接効果が注目されている⁽²²⁾⁽²³⁾。近接効果とは、導体が近接している状態において、導体上を流れる電流分布が変化する効果である。

例えば偏心同軸形状の二導体系を考えたとき、芯線に流れる電流は、外部導体に近い側の表面に多く分布するような現象である。文献(23)の中で雨谷、長岡、馬場らは、図 2.13(a)に示すようなパイプ導体(接地側)内に導体が配置されているモデルを用い、近接効果による特性インピーダンスへの影響について検討している。図 2.13(b)は 2 種類のモードにおける特性インピーダンスについて、 d (外部導体中心-内部配線中心間距離)を 4.5cm(case1), 4.0cm(case2), 2.5cm(case3), 1.25cm(case4), 0cm(case5)と変化させた条件での特性インピーダンスの変化を示している。結果として、偏心が大きいほど特性インピーダンスが低くなっており、これは近接効果によるものと説明している⁽²³⁾。

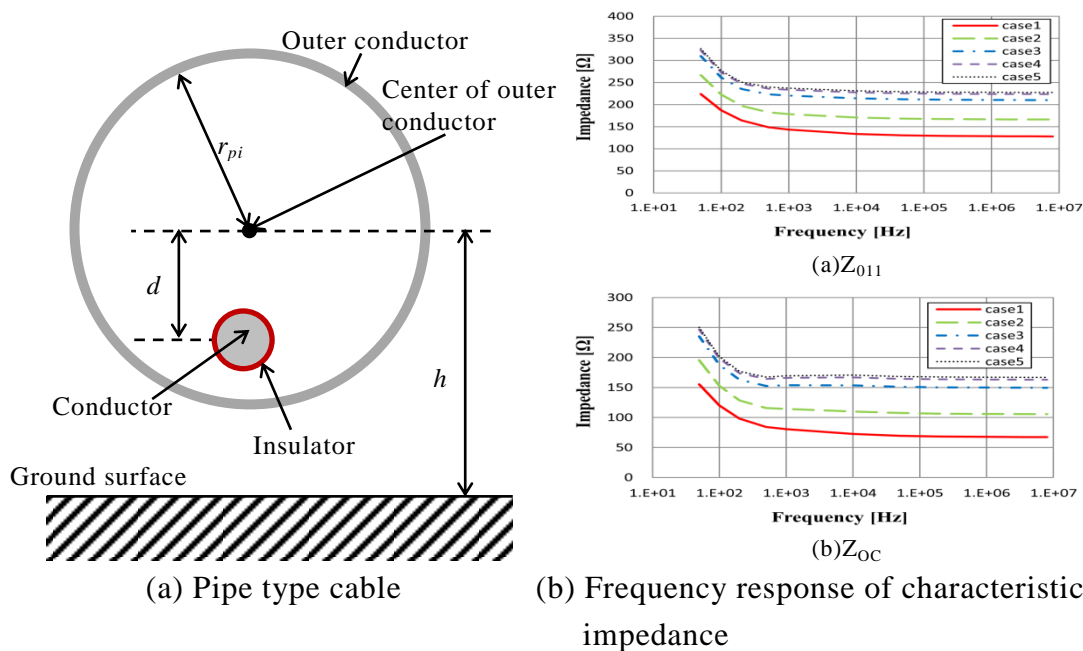
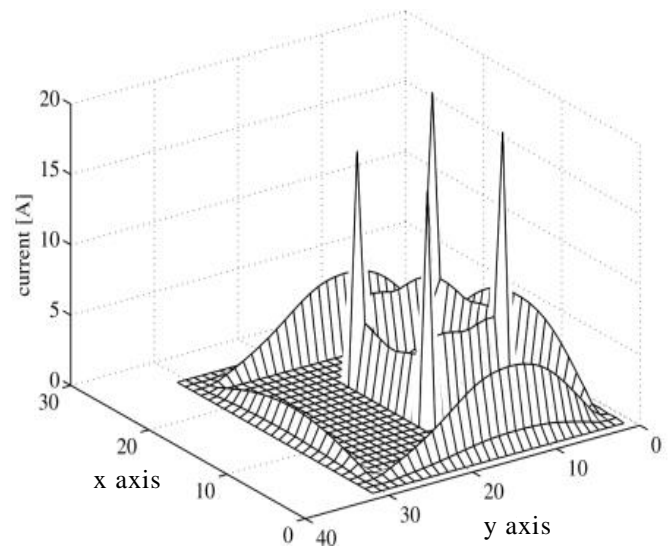
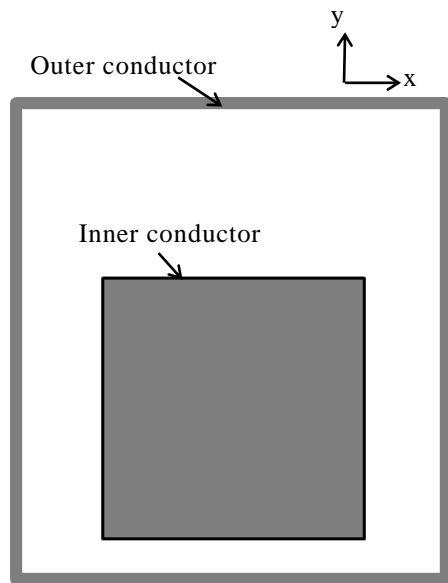


Fig. 2.13 Investigation regarding proximity effect by Doshisha University⁽²³⁾

さらに雨谷らは、文献(24)で近接効果が多導体を流れる電流の向きにより、導体表面を流れる電流の集中する箇所が異なる事を報告している。

三木や野田は、FDTD 法⁽²⁵⁾における表皮効果と近接効果の取り扱い手法を提案している⁽²²⁾。図 2.14(a)の様に、内部導体を通して、外部導体を帰路とするように導体が配置されている。この時、内部導体にサージ電流が印加されると、図 2.14(b)のように内部導体の角や表面に電流が多く分布すること(表皮効果)や、導体間距離が近い位置ほど電流が集中するというような結果を得ている⁽²²⁾。

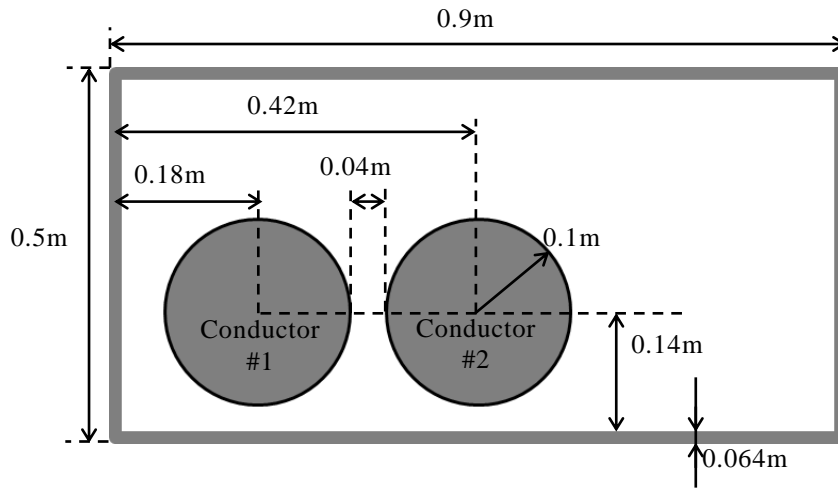


(a) Eccentric and rectangular conductors

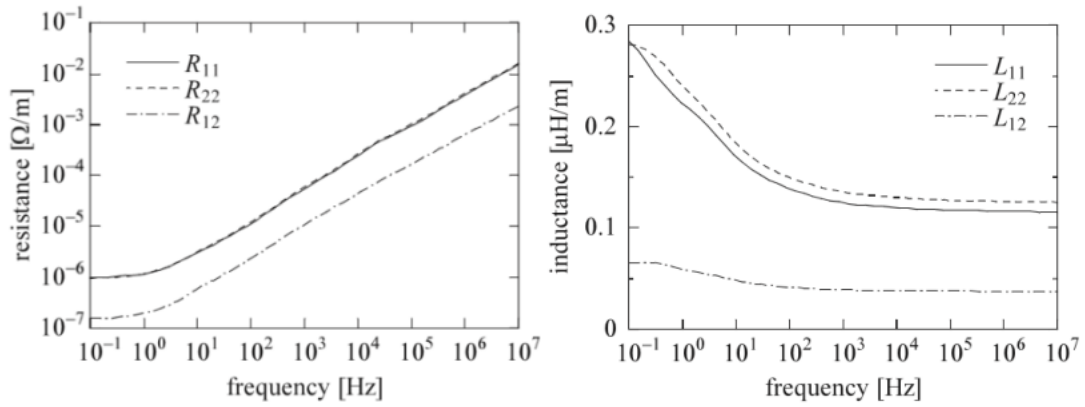
(b) current distribution(at 5kHz)

Fig. 2.14 Investigation regarding proximity effect by CRIEPI in Japan⁽²²⁾

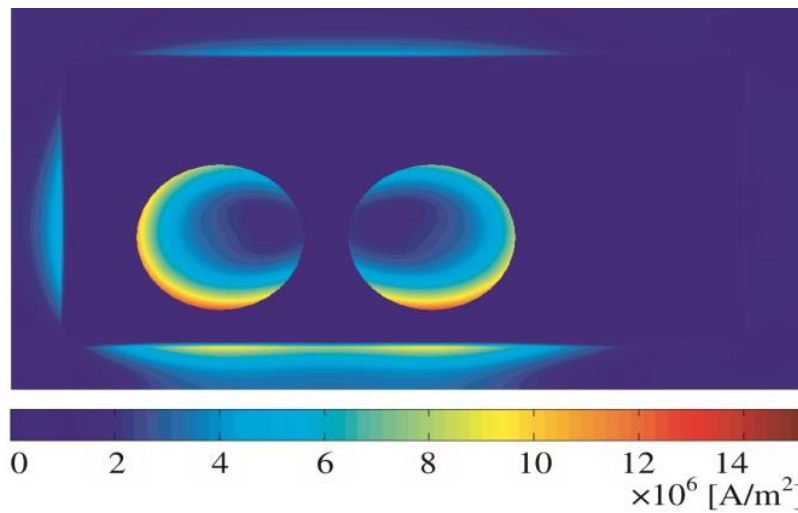
また、三木らは、図 2.15(a)のような配置における各円筒導体(#1, #2)を電流復路、外部導体を電流の往路とした条件における、導体#1 および導体#2 の主回路インピーダンス、および内部導体間の相互インピーダンスの値を算出している。図 2.15(b)左図は各電流経路(#1~外部導体, #2~外部導体)の主回路抵抗値(R_{11}, R_{22}), 導体#1-導体#2 間の相互間抵抗値 R_{12} を、2.15(b)右図は各電流経路の自己インダクタンス(L_{11}, L_{22}), 導体#1-導体#2 間の相互インダクタンス L_{12} を示している。図 2.15(b)に示すように、導体#1 を含む電流経路の自己インダクタンス L_{11} が、導体#2 を含む電流経路のインダクタンス L_{22} に比べて低く、導体#1 には導体#2 に比べ、多くの電流が流れることを示している。図 2.15(c)は両内部導体の始端を一括し、外部導体との間に、周波数 5Hz, 1V の電位差を与えた条件での電流分布を示している。この条件においては、内部導体の表面を流れる電流が、外部導体に近い位置側に多く集中していること、導体#1 は導体#2 に比べ外側導体と接近している面積が大きく、導体#1 表面の電流分布領域が導体#2 におけるそれに比べて大きいことが分かる⁽²²⁾。



(a) conductor arrangement



(b) line series impedance



(c) current distribution (at 5Hz)

Fig.2.15 Investigation regarding proximity effect by CRIEPI in Japan (another situation)⁽²²⁾

2.5 まとめ

本章ではサージ現象を考えるにあたり重要な項目である、サージの発生要因、伝搬・反射・透過現象、サージインピーダンスの考え方、そして近接効果について述べた。サージ現象は、システムの周波数である 50Hz や 60Hz に比べて、急峻あるいは高周波という特徴から、架空送電線や電気配線を集中定数や単純な導体として考えることはできず、分布定数回路として考慮する必要がある。そのため、まず分布定数回路における電圧や電流の伝搬現象、異なるインピーダンスの接続点において生じる反射現象や透過現象が、サージ現象に与える効果について述べた。結果として、分布定数における電圧や電流の伝搬速度、サージインピーダンスや特性インピーダンスと電圧や電流との関係について理解した。さらに、接続点におけるインピーダンスの状態により、反射現象が電圧や電流を増加および減少させることを理解した。

また、導体が大地に対して水平配置なのか垂直配置なのかで、サージ電圧や電流の伝搬様相やサージインピーダンスが異なる事、複数の導体の配置がサージインピーダンスに影響する近接効果について紹介した。水平配置におけるサージインピーダンスは、大地から導体中心までの高さ h_h [m]と導体半径 r_h [m]とで決まる対数值 $\ln(2h_h/r_h)$ に比例することが分かった。また、垂直配置においてサージインピーダンスは、大地から導体までの高さ h_v [m]とその導体半径 r_v [m]との対数值 $\ln(2\sqrt{2}h_v/r_v)$ に比例することを理解した。

第2章 参考文献

- (1) 例えば加藤 正平:「一目でわかるサージ現象」, 電学誌, Vol.113, pp.1049-1052(1993)
- (2) 社団法人 電気設備学会:「電気・電子機器の雷保護 -ICT 社会をささえる-」, オーム社 (2011)
- (3) 横山 茂:「配電線の雷害対策」, オーム社(2005)
- (4) 森田 公:「電流さい断とそれに続く現象」, 電気計算, Vol.46, No.8, pp.49-52
- (5) K.Yokokura, S.Masuda, H.Nishikawa, M.Okawa, H.Ohashi:”MULTIPLE RESTRIKE VOLTAGE EFFECT IN A VACUUM CIRCUIT BREAKER ON MOTOR INSULATION”, IEEE Trans. on PAS, Vol.PAS-100, No.4,pp.1940-1948(1981)
- (6) K.Yokokura, H.Takahashi, M.Homma, E.Kaneko, I.Ohshima:”Estimation Method for Virtual Current Chopping Generation of Low Surge Vacuum Circuit Breaker Applied in Motor Circuit”, T.IEE Japan, Vol.155-B, No.6, pp.648-653(1995)
- (7) J.Panek, K.G.Fehrle:”OVERVOLTAGE PHENOMENA ASSOCIATED WITH VIRTUAL CURRENT CHOPPING IN THREE PHASE CIRCUITS”, IEEE Trans. on PAS, Vol.PAS-94, No.4, pp.1317-1325(1975)
- (8) 「真空遮断器・開閉器の開閉サージと適用技術」, 電気学会技術報告書, 第 422 号 (1992)
- (9) 関根 泰次, 雨谷 昭弘:「分布定数回路論」, コロナ社(1995)
- (10) 小郷 寛, 小亀 英己, 石亀 篤司:「基礎からの交流理論」, オーム社(2008)

- (11) 関根 泰次, 河野 照哉, 豊田 淳一, 川瀬 太郎, 松浦 虔士:「送配電工学」, オーム社(2011)
- (12) 奥村 浩士, 木嶋 昭, 谷 茂:「鉄塔—架空地線系のサージ特性の電磁界理論による解析」, 電学論 B, Vol.106, No.12, pp.37-44(1986)
- (13) 奥村 浩士, 木嶋 昭:「鉄塔サージインピーダンスの電磁界異論による一計算法」, 電学論 B, Vol.105, No.9, pp.17-24(1985)
- (14) 川合:「送電鉄塔の衝撃電圧特性」, 電学誌, Vol.79, pp.11-16(1959)
- (15) R.LUNDHOLM, R.B.FINN JR., W.S.PRICE: “Calculation of Transmission Line Lightning Voltage by Field Concepts”, TRANS. OF THE AIEE PAS, Vol.76 Part 3, pp.1271-1283(1957)
- (16) 関根 松夫, 佐野 元昭:「電磁気学を理解する」, 昭晃堂(2004)
- (17) C.F.WAGNER:”A New Approach to the Calculation of the Lightning Performance of Transmission lines”, TRANS. OF THE AIEE PAS, Vol.75 Part 3, pp.1233-1256(1956)
- (18) 加藤 正平, 岡部 成光:「鉄塔サージ解析におけるループ電圧法の考察」, 電学論 B, Vol.115, No.5, pp.517-523(1995)
- (19) 原 武久, 山本 修, 林 宗明, 樋口 武光, 上之園 親佐:「垂直導体サージ伝搬特性の基礎的検討」, 電学論 B, Vol.108, No.11, pp.533-540(1958)
- (20) 原 武久, 山本 修, 林 宗明, 上之園 親佐:「垂直導体および垂直複導体サージインピーダンスの実験式」, 電学論 B, Vol.110, No.2, pp.129-137(1990)
- (21) 馬場 吉弘:「垂直導体の特性インピーダンス理論式について」, IEEJ Trans. PE, Vol.129, No.3, pp.469-470(2009)
- (22) 三木 貫, 野田 琢:「表皮効果および近接効果を考慮可能な導体分割に基づく線路解く列インピーダンス計算手法の改良」, 電学論 B, Vol.128, No.1, pp.254-261(2008)
- (23) A.Ametani, K.Kawamura, A.Shendge, N.Nagaoka, Y.Baba:”Wave Propagation Characteristics on a Pipe-Type Cable in Particular Reference to the Proximity Effect”, IEEJ Trans.PE, Vol.133, No.12, pp.954-960(2013)
- (24) T.Asada, Y.Baba, N.Nagaoka, A.Ametani, I.Lafaia, J.Mahseredjian:”A Study on Basic Characteristics of the Proximity Effect on Multi-Conducutors”,電気学会全国大会論文集, pp.9-5-1 - 9-5-6(2015)
- (25) 宇野 亨:「FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析」, コロナ社(2004)

第3章 雷現象と諸特性

3.1 まえがき

高度情報化社会が進展し、なお加速し続ける現在、一般家庭などで使用される電気・電子製品はネットワーク化、低電圧化、集積化、高周波駆動化などされてきている。これらの機器はさらなる高機能化あるいは多機能化により、我々の生活をより一層快適なものにしていくだろう。しかしながら、これらの機器が高度化されていく一方で、外部ノイズやサージ現象に対する耐力の低下が懸念され、低電圧配電システムにおける雷サージ対策の確立が求められている。そのため、雷サージを調査するにあたり、落雷の発生、落雷によるサージの特徴、被害状況などを理解することは非常に重要である。そこで、本章では、落雷過程の始まりである雷雲の発生過程、それに続く雷放電過程、雷放電時の雷電流波形の定義や雷電流の特性、雷電流によって発生するサージ現象、ならびに過去に落雷により故障した家電機器の被害推移の調査結果について紹介する。

3.2 雷現象の概要⁽¹⁾⁽²⁾

落雷に電氣的性質があることを実証したのは1572年のフランクリンらである。

夏季には、夏の強い太陽光により地表付近の空気が強く加熱され、それがもとになって生じる積乱雲の一部が雷雲に成長し、雷放電を発生し始める。その一部は、大地への放電、すなわち落雷となる。落雷により落雷点にできる痕跡は、直径数 cm 以下であるため、雷放電路もこの程度の太さと考えられている。このような放電路に、瞬間的とはいえ大電流が流れるため、放電路は30000℃程度にまで加熱される。そのため、放電路は白く輝くと共に、瞬間的に空気は高圧力となって膨張し、次の瞬間には収縮する。雷鳴はこの空気の膨張と収縮によって発生する。

3.3 雷雲⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

3.3.1 雷雲の発生

雷放電の源となる雷雲の発生には、大規模かつ強力な上昇気流が必要とされる。雷雲は夏に多く発生するが、地表面の気温が高い事だけが発生条件ではなく、周囲の大気が上昇気塊より低温になることも必要とされる。

雷雲は、背丈の高い雲で夏季には12000m以上の高さになる。雷雲中の電荷分離機構の説明として、代表的な一つは次に示すとおりである(図3.1)。雷雲中には強い上昇気流があり、この中で大きなあられと小さな氷粒が衝突し、あられにはマイナスの電荷が帯電して重力の作用により下方に移動、小さな氷粒にはプラスの電荷が帯電し、上昇気流によって、雷雲の上方に運ばれる。そのため雷雲内では、上方に正電荷、下方に負電荷が蓄積される。

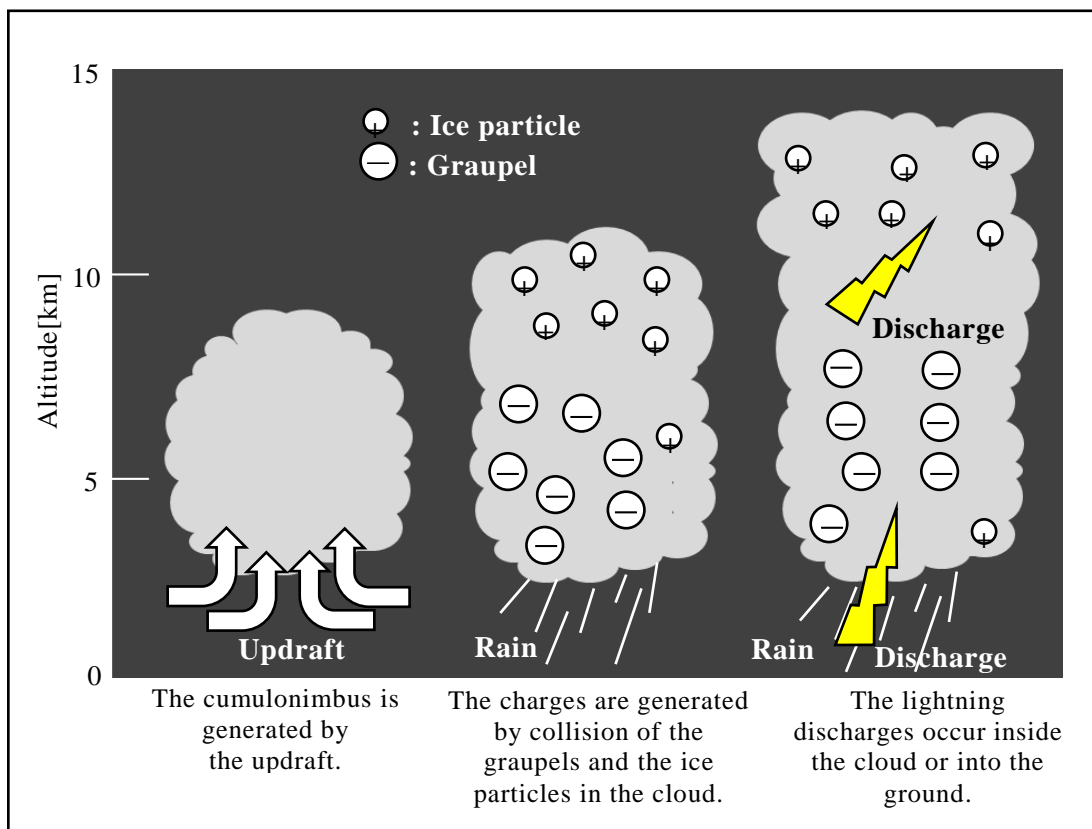


Fig. 3.1 Generation of thunder cloud⁽⁴⁾

3.3.2 夏季および冬季における雷雲

夏季雷と冬季雷とでは雷の性質が異なる。図 3.2 に夏季の雷雲と冬季の雷雲を示す。夏季雷と冬季雷の違いは以下に示す点とされている。

- 同一周囲気温で雷雲の位置をそろえると、図 3.2(b)の様に、夏季雷に比べて冬季雷では地上高が数 km 程度底上げされた状態になる。
- 夏季雷では、雲底の高度が高いため十分な負電荷の蓄積が雷雲内で生じる。それに対し、冬季雷では正電荷が安定的に分布するのに比べ、負電荷は短い時間で消滅する。

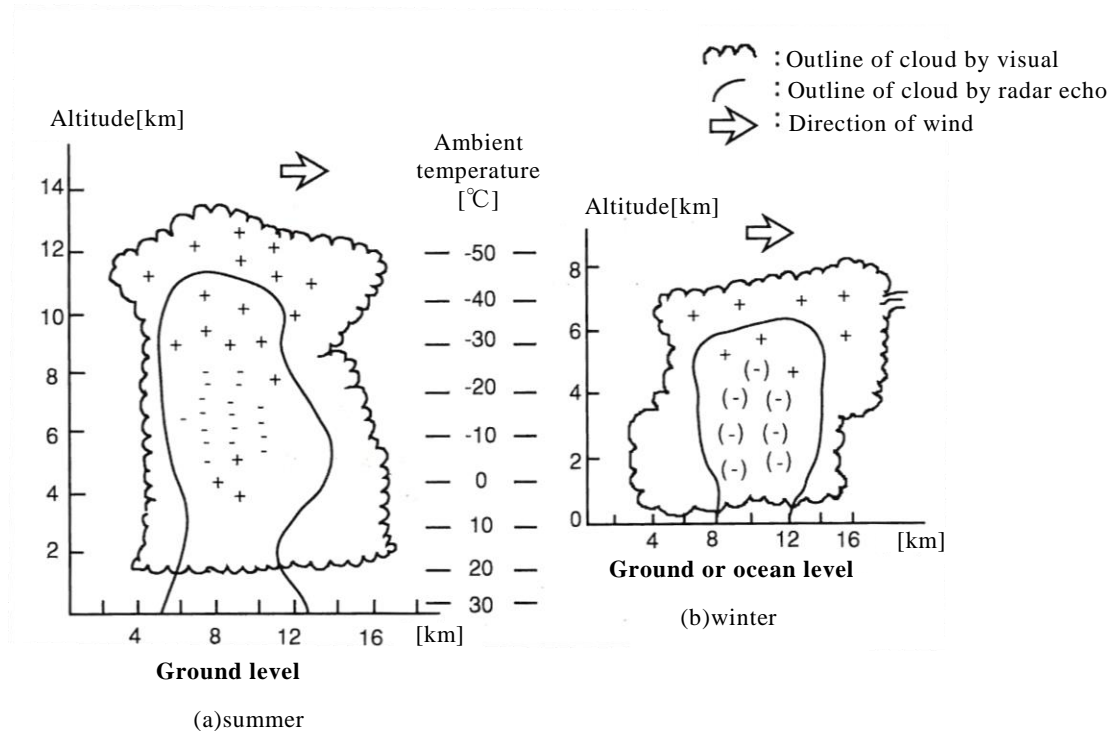


Fig. 3.2 Difference between summer and winter thunder clouds⁽⁴⁾⁽⁵⁾

3.3.3 負極性対地雷放電の過程

雷放電の一例を、図 3.3 を用いて説明する。落雷を目視にて観測した際、図 3.3(a)に示すように、一条の雷光のように見える。しかしながら、ある負極性の落雷を時間経過で見ると、実際には図 3.3(b)に示すように、まず雷雲からステップリーダと呼ばれている先行放電が出発し、進展と休止を繰り返しながら大地へ向かう。ステップリーダの先端が大地面へ接近すると、大地側から上向きの放電が出発し、両者が結合した途端、大地から多量の電荷が先行放電路の電荷を中和するために注入される。この時、帰還雷撃(リターンストローク)が雷雲に向かって進行する。負極性対地放電を時間経過で見ると、この落雷の進展過程は以下のとおりである。

- 1) 雷雲が十分に発達することで、雲底部より部分放電の一種であるステップリーダが発生する。ステップリーダは、大気中の絶縁を破壊しながら、数 10m 程度進展すると $30\mu\text{s}$ から $90\mu\text{s}$ 程度休止するというような、段階的進行を繰り返しながら、次第に大地へ接近する。ステップリーダの平均進展速度は $1.5 \times 10^5 \text{ m/s}$ 程度である。
- 2) ステップリーダの先端が大地に接近すると、その直下大地面および周辺の電界が非常に高くなり、樹木や建物などの地上物体から、ステップリーダの先端に向かって上向きの放電が発生する。このうちの一つがステップトリ

ーダの先端と結合することで、電路が形成され、雷雲は大地と接続される。その後、ステップリーダーはリターンストロークへ移行する。最終的なステップリーダーの先端と落雷点との距離を雷撃距離という。

3) リターンストロークが始まると、ステップリーダーと逆極性の電荷が、放電路を通じて大地から雷雲に向かって進展し、放電路の電荷および雷雲の電荷の一部を中和する。リターンストロークの所要時間は、数 $10\mu\text{s}$ から数 $100\mu\text{s}$ 程度である。また、強い輝度の雷光は、リターンストロークの過程で生じる。

4) 1)から 3)の過程で、一回の放電が完了する。しかし、雷雲中の導電率は比較的小さく、一回のリターンストロークで、雷雲の負電荷の大部分を中和することができないことが多い。そのため、ある時間(数 10ms から数 100ms)後、同じ経路を通じて第二、第三の雷撃が生じることが多い。このように、雷撃が複数ある場合の落雷は多重雷と呼ばれる。

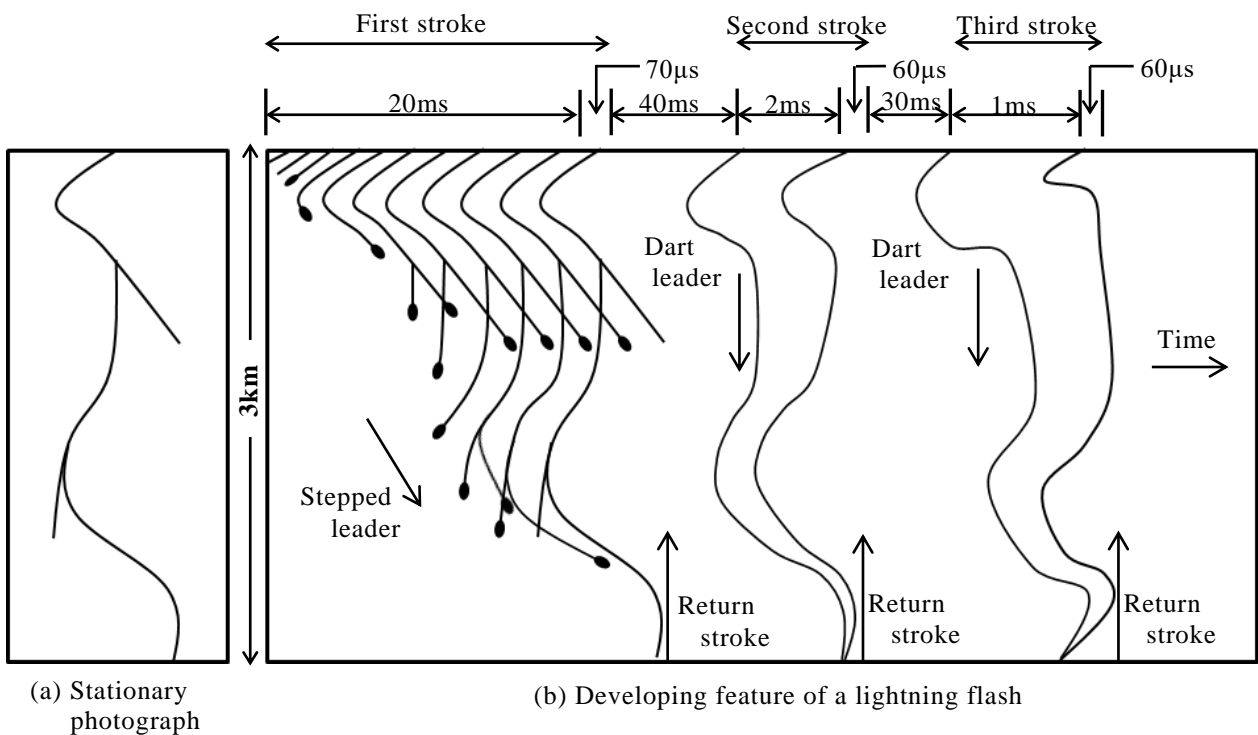


Fig. 3.3 Growth process of the negative ground discharge⁽¹⁾

図 3.3 は、三つのリターンストロークからなる落雷の例である。多重雷では、二番目以降のリターンストロークに伴うリーダーは、第一雷撃のように段階的には進行せず、連続的で枝分かれしないダートリーダーとなる。第二雷撃以降の雷放電では、ダートリーダーが雷雲から大地に進展し、大地に到達した瞬間にリターンストロークに移行する。この過程を繰り返されることで、雷雲中の負電荷が中和される。ダートリーダーの進展速度は、ステップリー

ダの平均進展速度に比べ、数 10 倍程度速い事が知られている。また、連続するリターンストロークの時間間隔については、数 10ms から数 100ms 程度とされている。

3.4 雷電流の性状⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

3.4.1 雷電流の極性

雷電流の測定の際、雷雲から大地へ向かう方向を正にとる。したがって、雷放電時に雷雲内で消滅する電荷の極性が、雷電流の極性に一致する。雷雲下部の負電荷によって対地雷撃が生じるため、負極性の雷が多くなる。正極性の雷も生じるが、その割合は小さく、負極性の割合が 90% 程度とするデータが多い。しかしながら、冬季の雷では正極性の割合が増加すると報告されている。

3.4.2 雷電流の表示法

従来から、実験的に発生させる雷インパルス電流の波形は、図 3.4 で定義され、雷電流の表示もこれにならうと考えられている⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁵⁾。インパルス波形は、二重指数関数で、数 μs で急峻に立ち上がり、数 $10\mu\text{s}$ から数 $100\mu\text{s}$ で減衰する波形である。インパルス波形を示す代表的なパラメータに、波頭長 $T_f[\text{s}]$ 、波尾長 $T_r[\text{s}]$ 、そしてピーク値 $I[\text{A}]$ がある。同波形は、立ち上がりの初期部やピーク値近傍において、その値が直線的に増加しないため、同波形におけるピーク値の 10% および 90% の点を通る直線が時間軸と交わる規約原点 O_1 が定義されている。また、点 O_1 から同直線が点 C (ピーク値) に達するまでの時間差を立ち上がり時間 T_f 、規約原点 O_1 から減少時の 50% 値 Q_2 までの時間差を波尾長 T_r として定義している。上述したように、インパルス波形においては、電流発生後は急峻に電流値が立ち上がり、ピーク値以降は緩やかに減少するため、 T_f は T_r に比べ非常に短い。そのため、雷電流による誘導現象は T_f の時に最も厳しくなる。実際の雷電流には、波頭部に極値が存在するものや、波形に多数のパルスが重畳するものがあり、図 3.4 では定義できない波形も存在する。その様な波形の一例として、ログスキーコイルを用いて観測された雷電流波形を図 3.5 に示す。図 3.5 の電流波形は、波頭部に極値を二つ有し、また波頭部に複数のパルスが重畳しており、図 3.4 で定義される雷インパルス波形とは大きく異なっていることが分かる。

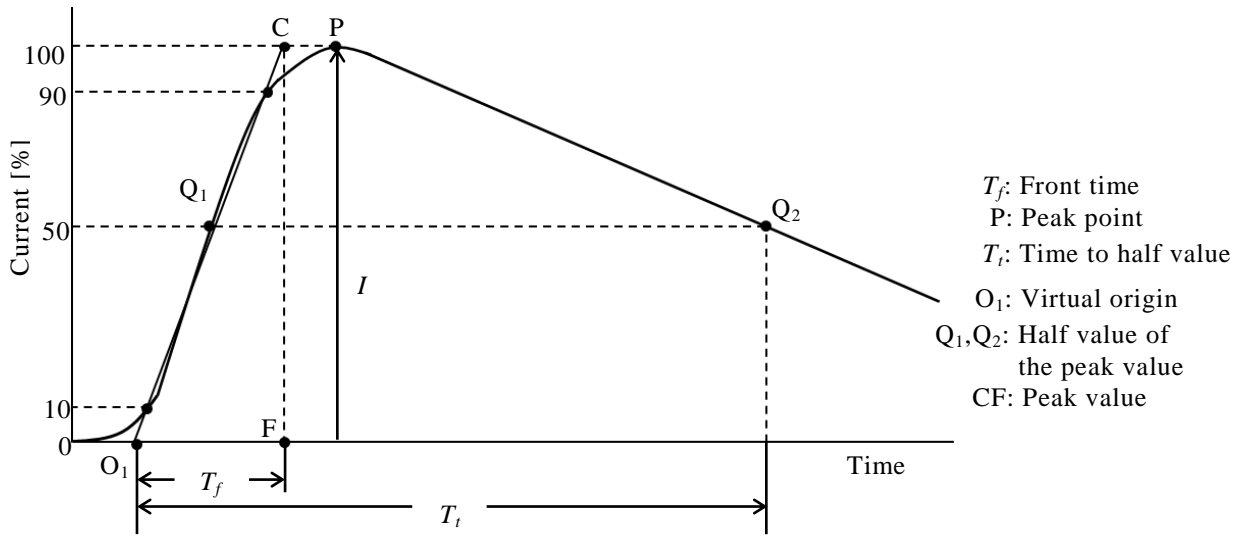


Fig. 3.4 Definition of lightning impulse current waveform⁽¹⁾⁽⁵⁾

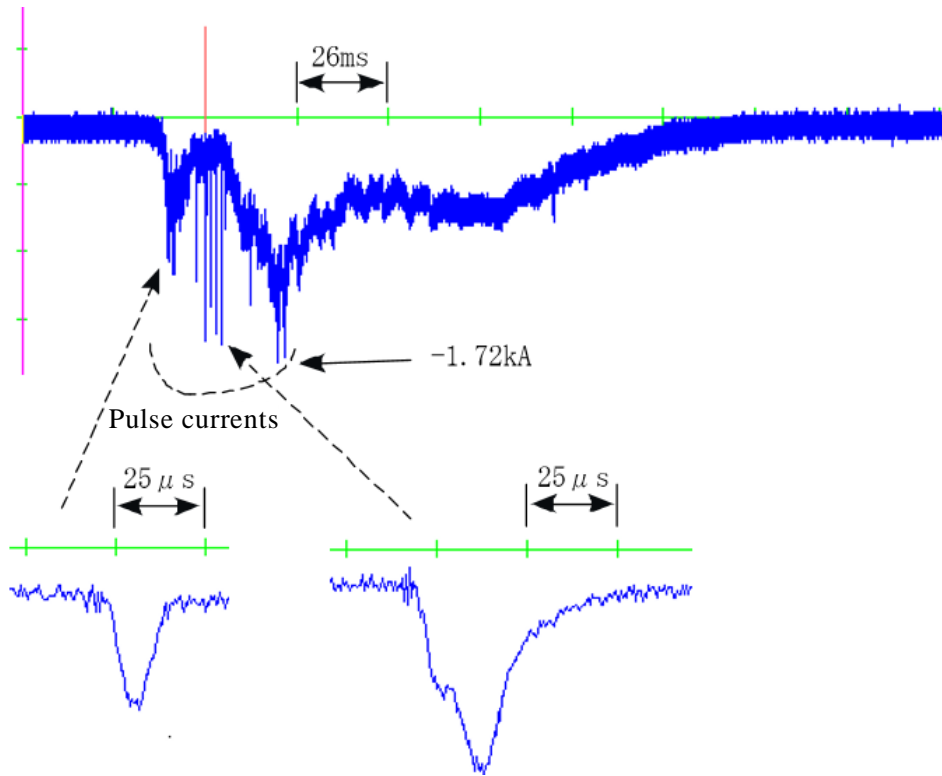


Fig. 3.5 Actual lightning current including pulse currents⁽⁶⁾

3.4.3 波高値⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

波高値とは、図 3.4 の I で示される値であり、雷電流の波高値は数 kA から 300kA 程度の広い範囲にまでおよぶ。図 3.6 に、実測結果から雷電流波高値の発生頻度分布を各機関が統計的にまとめた例を示す⁽⁴⁾。これによると、測定者ごとにばらつきはあるものの、100kA 以下のものが大部分で、30kA 以下のものが 50%を、10kA から 20kA のものが 90%を占めていることが分かる。

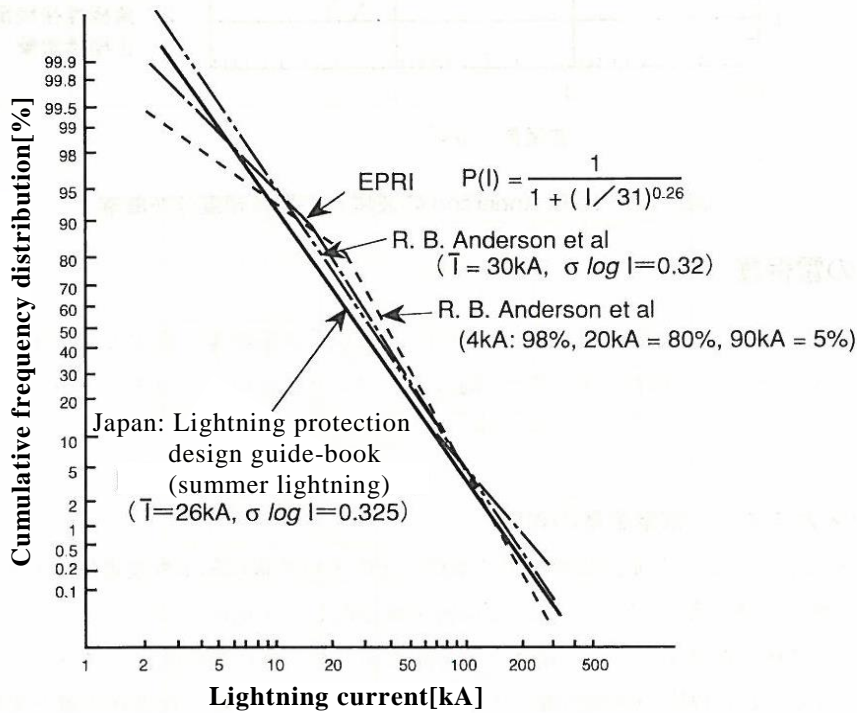


Fig. 3.6 Cumulative frequency distribution of lightning current amplitude⁽⁴⁾

3.4.4 波頭長, 波尾長

波頭長とは、波形の立ち上がり時間として定義され、図 3.4 の T_f で表される。波頭長は、いくつかの観測結果より、多くは $2\mu\text{s}$ から $10\mu\text{s}$ の範囲にある。しかしながら、近年、 $1\mu\text{s}$ 以下の波頭長を有する雷電流の観測結果も報告されている。図 3.7 は複数の測定者による波頭長の範囲を測定した結果を電気設備学会がまとめたデータである。測定者ごとにはばらつきはあるものの、 $2\mu\text{s}$ から $6\mu\text{s}$ の部位が共通しているがわかる。さらに、同図から、 $1\mu\text{s}$ 以下の非常に急峻な波頭を有する雷電流も存在することが分かる。

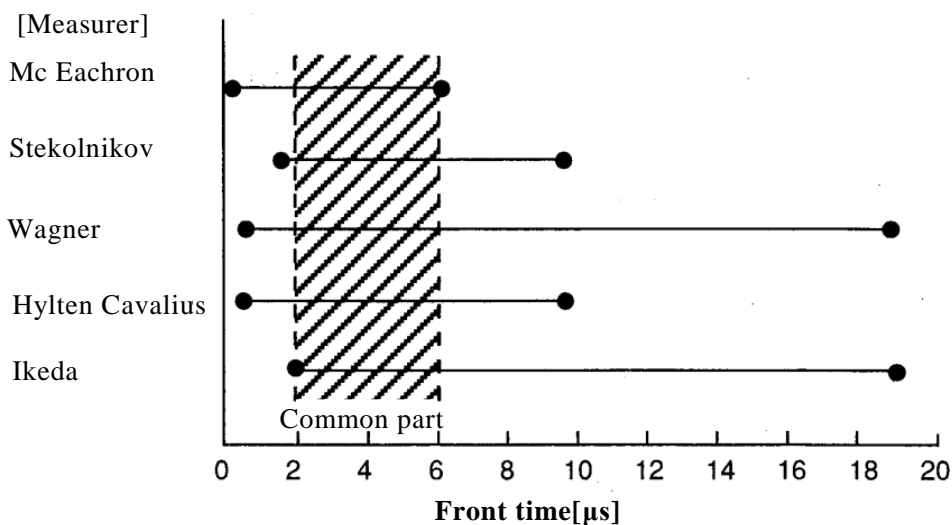


Fig. 3.7 Range of Front time of lightning currents⁽⁴⁾

波尾長は、規約原点から、減衰過程におけるピーク値に対する 50% 値までの時間差を表しており、図 3.4 の T_f で示される。図 3.8 は、R.B.Anderson の取りまとめた波頭長の累積頻度分布を示している。負極性雷のデータから、後続雷(図 3.8 中の 2:Subsequent negative flash)は、第一雷撃(図 3.8 中の 1:First negative flash)に比べて波尾長が短いことが分かる。また、正極性雷(図 3.8 中の 3:Positive flash)の方が、負極性雷に比べて波尾長が長くなる傾向にあることも分かる。日本の冬季の日本海沿岸では、正極性雷撃が多く、かつその波尾はかなり長いため、エネルギーが大きいという観測結果も報告されている⁽¹⁾。

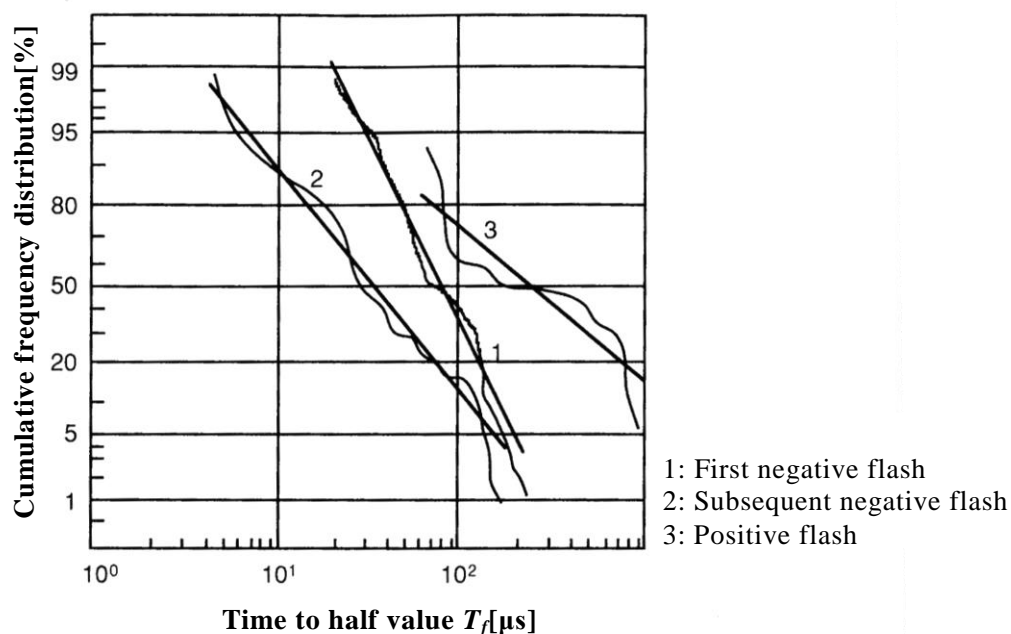


Fig. 3.8 Cumulative frequency distribution of time to half value T_f ⁽⁴⁾

3.4.5 帰還雷撃(リターンストローク)

雷放電過程において、雷雲と大地面とが接続された後、先行放電により形成された放電回路の電荷を中和するように、先行放電と逆極性の電荷が大地から注入される。この間に生じる雷電流は帰還雷撃(リターンストローク)とよばれ、雷放電において主放電電流が流れる過程である。図 3.3 に示したように、リターンストロークが地表面から雷雲方向へ進展する速度は、過去の観測データによると、第一雷撃で 9.6×10^7 m/s 程度、後続雷撃以降では 1.2×10^8 m/s 程度との報告があり、さらに速いものでは 1.8×10^8 m/s の観測例も報告されている。

3.4.6 多重雷と後続雷撃

雷放電は一回の雷撃で終わることは少なく、多くの雷放電は複数の雷撃を含む多重雷となる。この多重雷において、第一雷撃と後続雷とでは雷電流パラメータ値が異なる事が観測により明らかにされている。それらを含めて IEC62305-1(JIS Z 9290-4 附属書 JA)で

示されるパラメータがまとめられた表の一部を表 3.1 に示す。表 3.1 より負極性では第一雷撃に比べて、後続雷撃の電流値は低く、雷撃継続時間は短いが波頭長が急峻になる傾向がある。後続雷撃の電流変化率は、第一雷撃に比べて大きいため、後続雷撃において、誘導現象が厳しくなる。本研究では、表 3.1 を参考にし、第 5 章で述べる誘導雷解析の雷電流パラメータを決定した。

Table 3.1 Lightning current parameters⁽¹⁾

Parameter	Cumulative frequency value			Type of stroke
	95%	50%	5%	
I[kA]	4(98%)	20(80%)	90	First negative short
	4.9	11.8	28.6	Subsequent negative short
	4.6	35	250	First positive short (single)
Front time[μs]	1.8	5.5	18	First negative short
	0.22	1.1	4.5	Subsequent negative short
	3.5	22	200	First negative short (single)
Stroke duration[μs]	30	75	200	First negative short
	6.5	32	140	Subsequent negative short
	25	230	2000	First positive short (single)
Total flash duration[ms]	0.15	13	1100	Negative flash (all)
	31	180	900	Negative flash (without single)
	14	85	500	Positive flash

3.5 雷サージ現象⁽³⁾

電気配線や電力設備にとって脅威となる雷サージ現象は、直撃雷、逆流雷、および誘導雷に大きく分けられる。

3.5.1 直撃雷⁽³⁾

送電線や配電線などの電気配線、鉄塔やコンクリート柱などへの構造物への落雷により発生するサージ現象が直撃雷と呼ばれる。雷電流の様に、急峻に変化する電流が、送電線などの導体へ注入されるとき、発生するサージ電圧 V_S と雷電流 i_L との間には式(3.1)の関係が成り立つ。例として、大地と水平に配置された送電線に発生する直撃雷の関係を図 3.9 に示す。

$$V_S = i_L \times Z_S \quad (3.1)$$

Z_S は配電線や送電線のサージインピーダンスを示し，第二章にて説明したように導体の形状や地上高により決定される。通常送電線や配電線の相導体では，300 から 550 Ω 程度の値とされている。また導体の半径が小さいほどサージインピーダンスは大きくなり，通常の高電圧配電線では 450 から 550 Ω 程度となる。

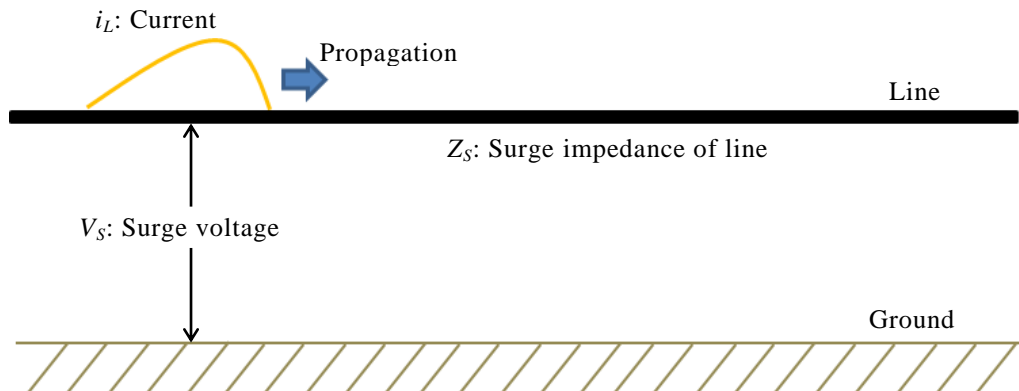


Fig. 3.9 Direct stroke surge

例えば，サージインピーダンスが 400 Ω の送電線上を，10kA の雷電流が伝搬しているとき，発生するサージ電圧は 4000kV となることが式(3.1)から分かる。一例であるが文献(3)によると高圧配電線の絶縁は通常 100kV 程度とため，10kA 程度の落雷でもサージ対策なしでは容易に絶縁破壊に至る可能性があることが分かる。

3.5.2 逆流雷⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

逆流雷は，横山により名づけられた雷サージ現象の一つである。これは，雷が高建築物などに落雷した際に，そこに接続される配電線に雷電流の一部が流れ，その電流により引き起こされるサージ現象である。直接落雷するわけではないため直撃雷とは区別され，雷電流の一部が流れ込むことから後述する誘導雷とも区別される。図 3.10 は，逆流雷の一例を示している。高所にある無線中継所やテレビ等などの庁舎への落雷時には，雷電流は鉄筋などを経由して接地部へと流れ込む。このとき接地抵抗が比較的高いと，接地部における大地の電位が上昇し，雷電流が逆に配電線などに侵入してくることに由来し，逆流雷と呼ばれる。

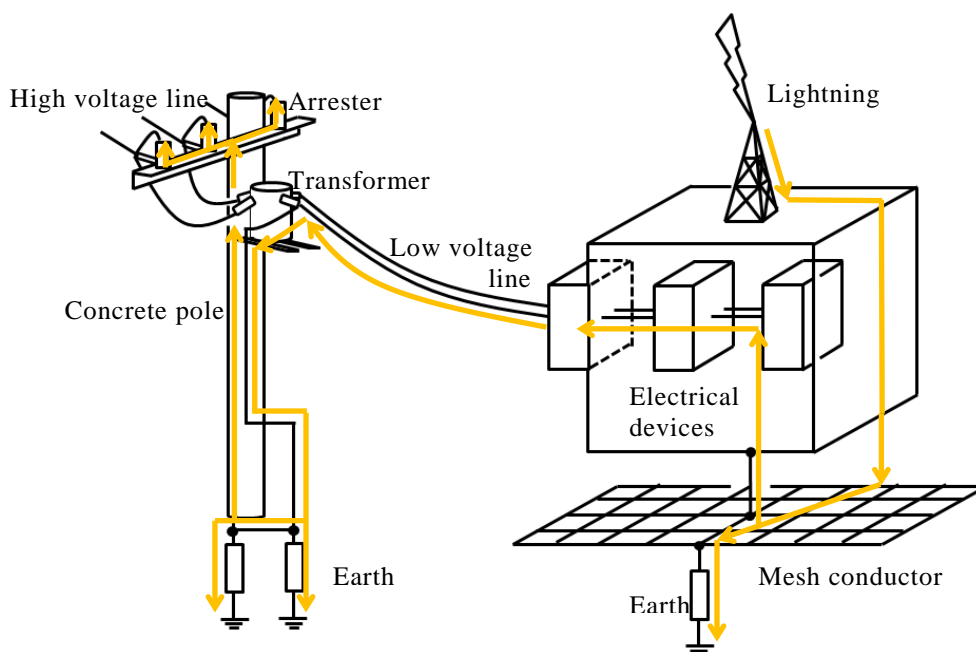


Fig. 3.10 Backflow current surge⁽³⁾

3.5.3 誘導雷⁽¹⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

雷電流は電流値が大きく、かつ変化率も非常に大きいため、落雷時には落雷点近傍の電磁界が急激に変化する。そのため、雷電流を起因とする電磁誘導により、落雷点(雷道)近傍における配電線や電力系統へ電圧が誘導される。これが誘導雷と呼ばれるサージ現象であり、ある配電線を流れる雷電流により、他の配電線に発生する誘導現象とは区別される。過去より誘導雷が発生する要因の説明として拘束電荷説があった。この説では、雷雲に蓄積された電荷が、落雷や雷放電により消失することで、線路に誘起されていた電荷が解放され、線路の両端に伝搬するために起電力が誘導されるという説である。その他にも、先行放電段階の誘導電圧を重視する説などが挙げられた。

しかしながら、配電線などに脅威を与える誘導雷は、雷放電のリターンストロークの過程で生じるとされている。図 3.11 は北陸電力株式会社福井火力発電所内の煙突落雷時における、雷電流波形および落雷点近傍の配電線へ生じる誘導雷電圧波形の同時測定回路を示している⁽¹⁾⁽⁸⁾。図 3.12 は、図 3.11 による同時測定結果であり、同図左側には煙突への雷電流(Lightning current to stack)、右側に配電線に誘導された電圧の波形(Induced overvoltage)が示されている⁽⁹⁾。左側の横軸は $20\mu\text{s}/\text{div}$ であるのに対し、右側の横軸は $1\mu\text{s}/\text{div}$ と短いことに注意してほしい。この観測において、誘導電圧は主放電電流が流れるとき(電流変化が大きいとき)に生じると報告されている。したがって、誘導雷の主成分はリターンストロークの過程で生じることが明らかにされた⁽¹⁾⁽⁹⁾。

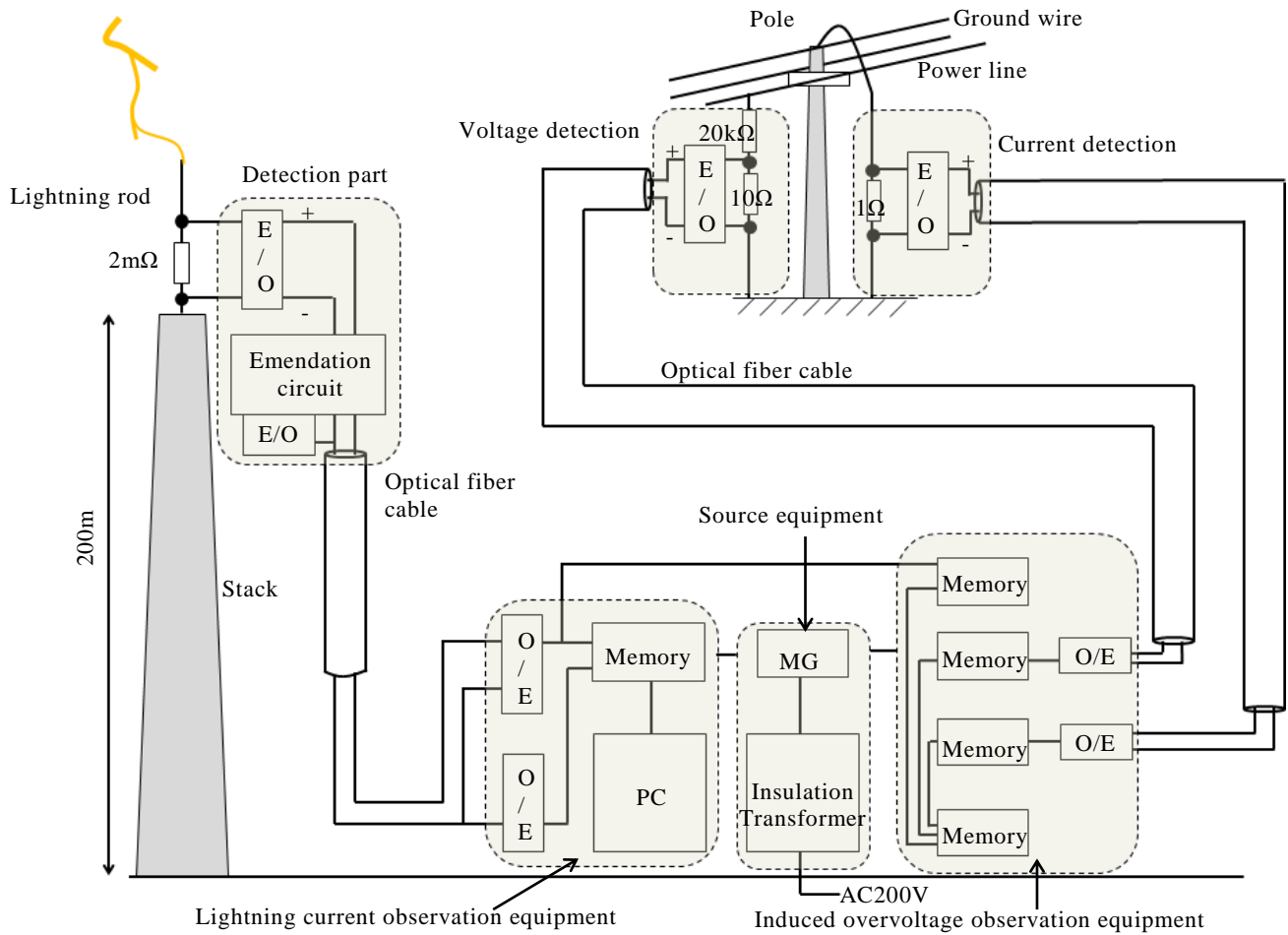


Fig. 3.11 Observation setup of voltage induced by lightning stroke⁽¹⁾

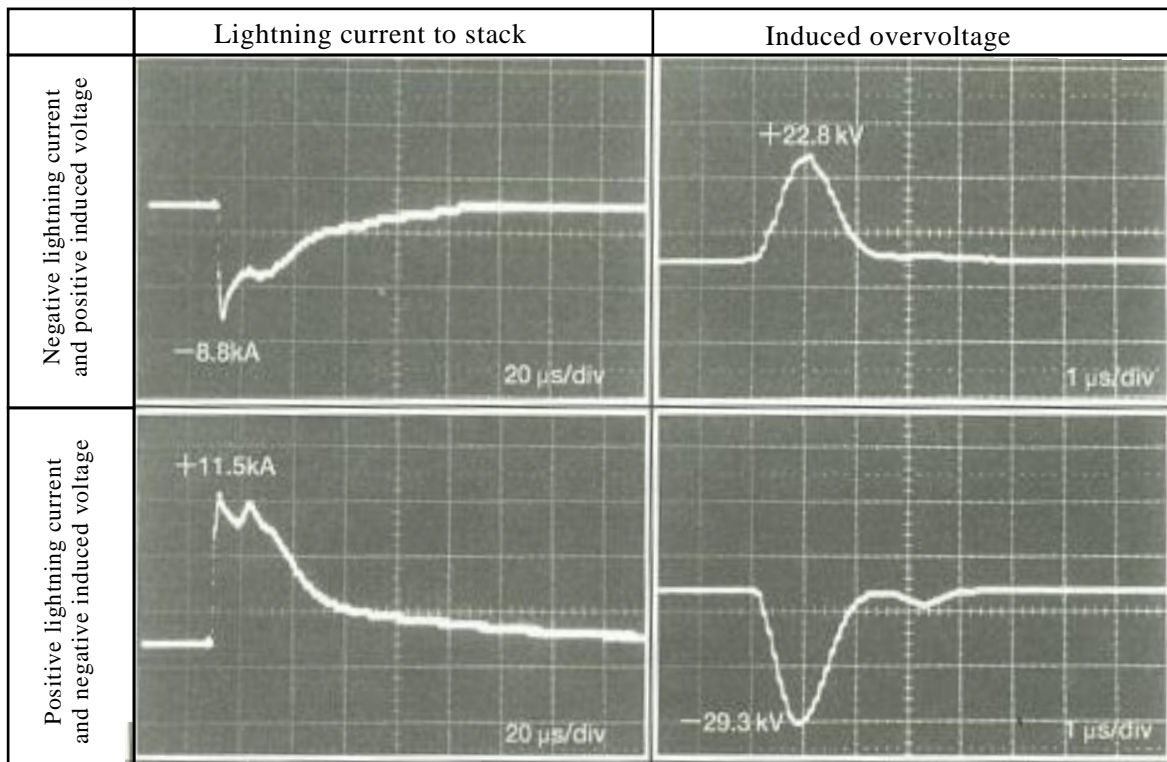


Fig. 3.12 Measuring result of voltage induced by lightning stroke⁽¹⁾

3.6 家電機器の雷被害状況⁽¹⁾⁽⁷⁾⁽¹⁰⁾

高電圧の電気配線や電気機器の雷害対策については、様々な検討によりその被害は減少傾向にあることが報告されている。一方で、低電圧の電気配線の雷害対策に関しては、変圧器二次側のモデル化や、電気配線に発生する雷過電圧の実験検討例はあるものの、その詳細は把握できているとは言い難い。これは、低電圧系統よりも、事故の波及範囲が広い送電線や、高電圧電気配線の雷害対策が優先されてきたことが主要な原因と言われている。家電機器の雷被害は、1960年代に始まった電子化とともに発生し始め、1980年代に入りエアコン、炊飯器、洗濯機などにマイコンが搭載され雷被害の問題が顕在化した⁽⁶⁾。近年、これらの機器は構成部品の低電圧化、チップ化、高周波化や高密度実装、多機能化などにより、低電圧かつ微弱なエネルギーで駆動できるようになったことで、低レベルの雷サージやノイズに敏感になっている。さらに、電源線と通信線の双方に接続された機器の普及に伴い、図 3.13 に示すように、複数の経路から雷が侵入するという脅威にもさらされる。加えて、エネルギーの有効活用のためのスマート化、IoT(モノのインターネット)化などに伴い、雷被害は複雑化すると予想される。

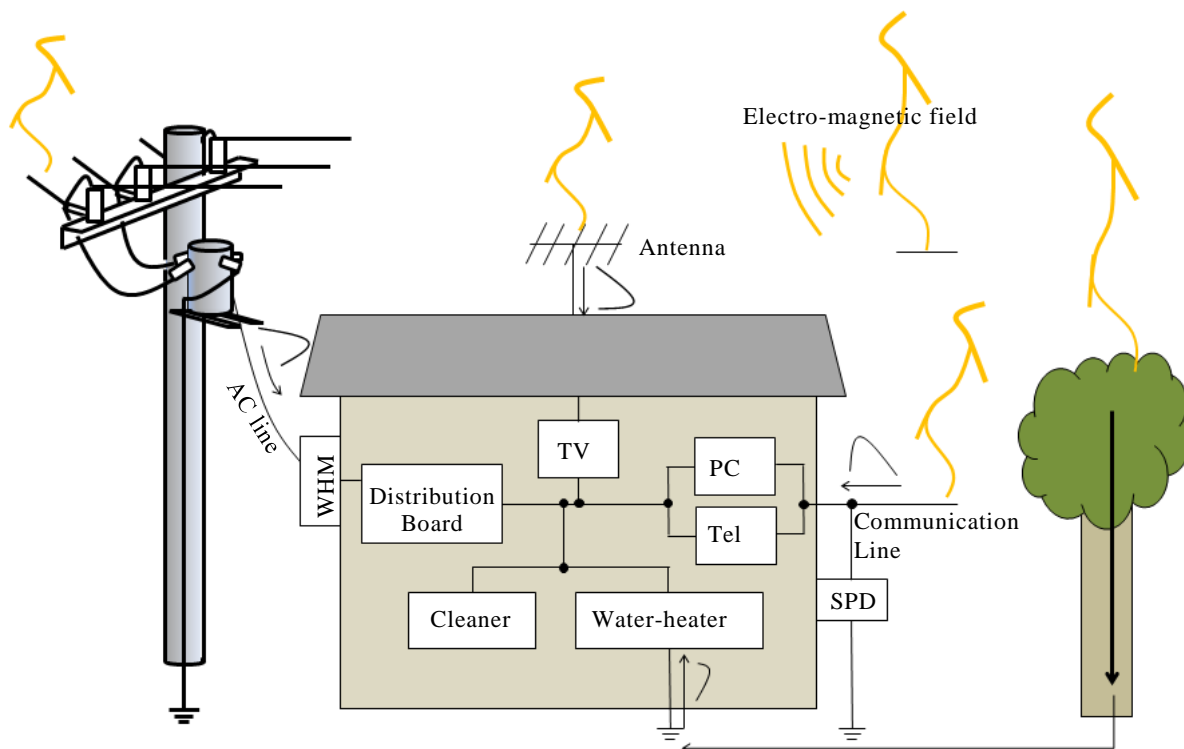


Fig. 3.13 Entering paths of lightning surge

細川，横山，福田らは，一般需要家で使用されている機器全般における雷被害様相について調査し，その結果をまとめている⁽¹⁰⁾。表 3.2 に雷被害機器のワースト 5 を，図 3.14 から図 3.18 には，各年代の雷被害発生状況を，図 3.19 に機器別の被害発生率の推移を示す。1987-91 年では，テレビ，ビデオなどのアンテナ系機器の被害が全被害の 50%と圧倒的に多かったらしい。しかしながら，ICT 化が始まった 1996-97 年では，電話・ファクシミリ，給湯器の被害が増加するとともにパソコンの被害が報告された。さらに，本格的な

高度情報化社会を迎えた 2004-05 年および 06 年では、テレビの被害は減少したが、パソコンの被害が急増していることが分かる。

Table 3.2 Transition of lightning damage⁽⁷⁾⁽⁸⁾

	1987-91	1996-97	2004-05	2006
1	Television	Telephone/Fax	Telephone/Fax	PC/PC accessory
2	Telephone	Television	PC/PC accessory	Telephone/Fax
3	VTR	Water-heater	Television	Television
4	Water-heater	VTR	Water-heater	Air-conditioner
5	Air-conditioner	PC/PC accessory	Air-conditioner	Water-heater

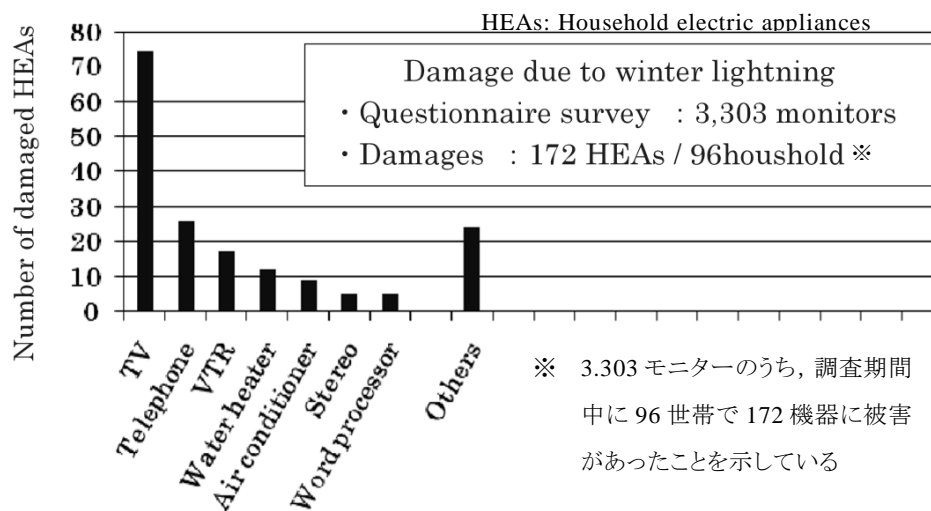


Fig. 3.14 Number of damaged HEAs(1987-91/Winter)⁽⁷⁾⁽⁸⁾

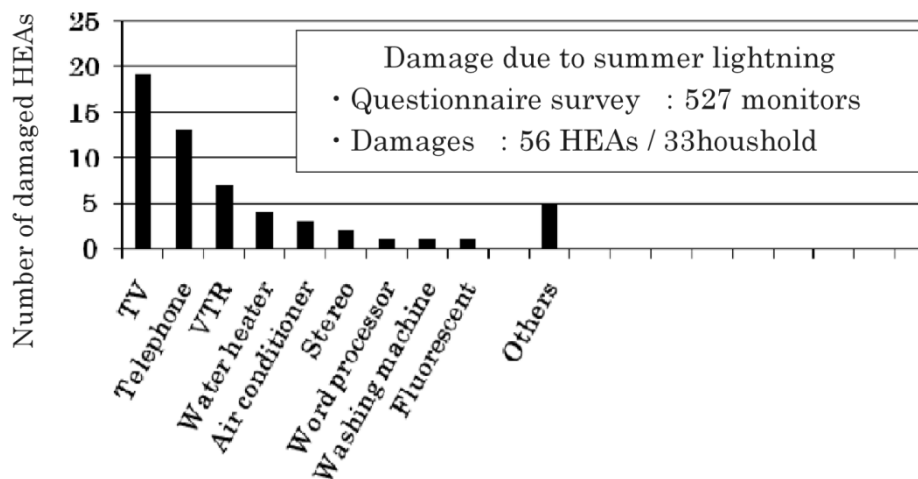


Fig. 3.15 Number of damaged HEAs(1987-91/Summer)⁽⁷⁾⁽⁸⁾

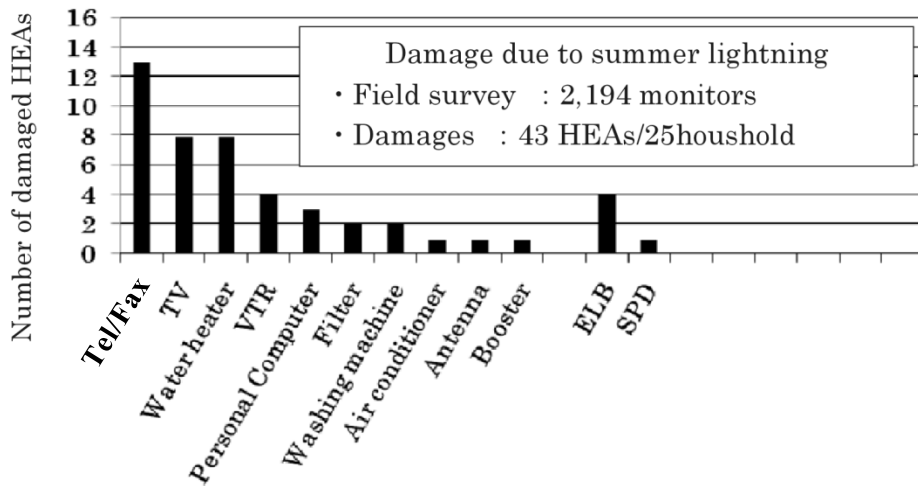


Fig. 3.16 Number of damaged HEAs(1996-97/Summer)⁽⁷⁾⁽⁸⁾

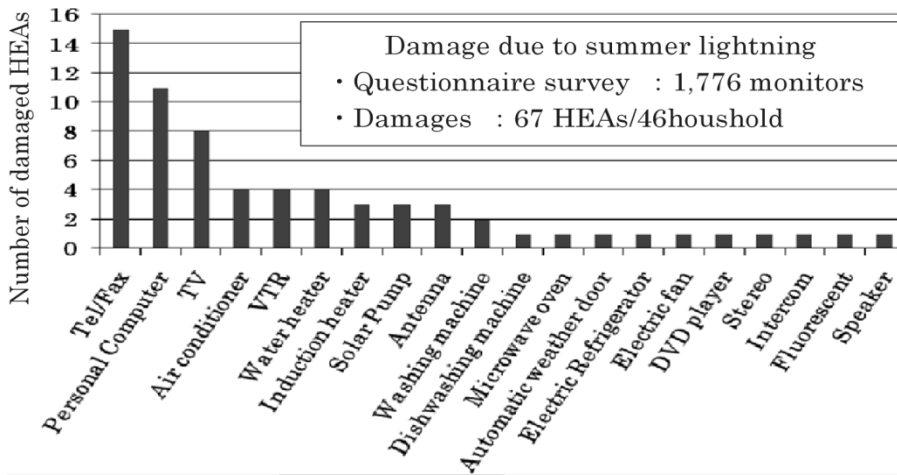


Fig. 3.17 Number of damaged HEAs(2004-05/Summer)⁽⁷⁾⁽⁸⁾

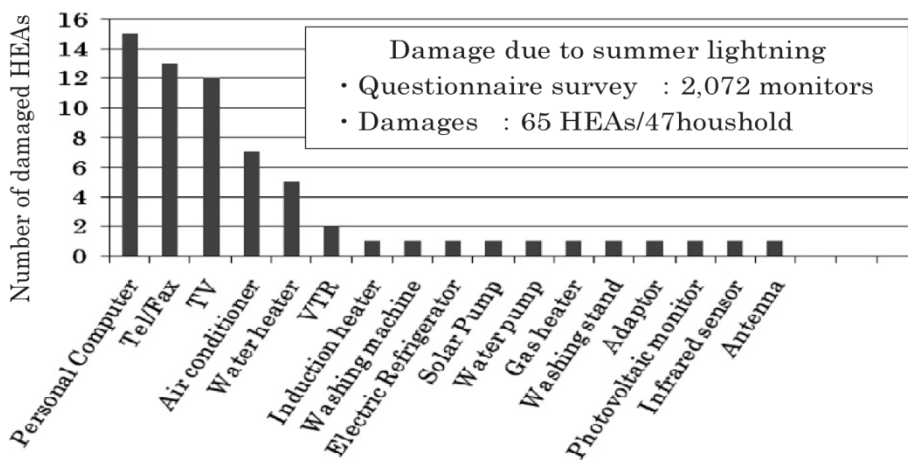


Fig. 3.18 Number of damaged HEAs(2006/Summer)⁽⁷⁾⁽⁸⁾

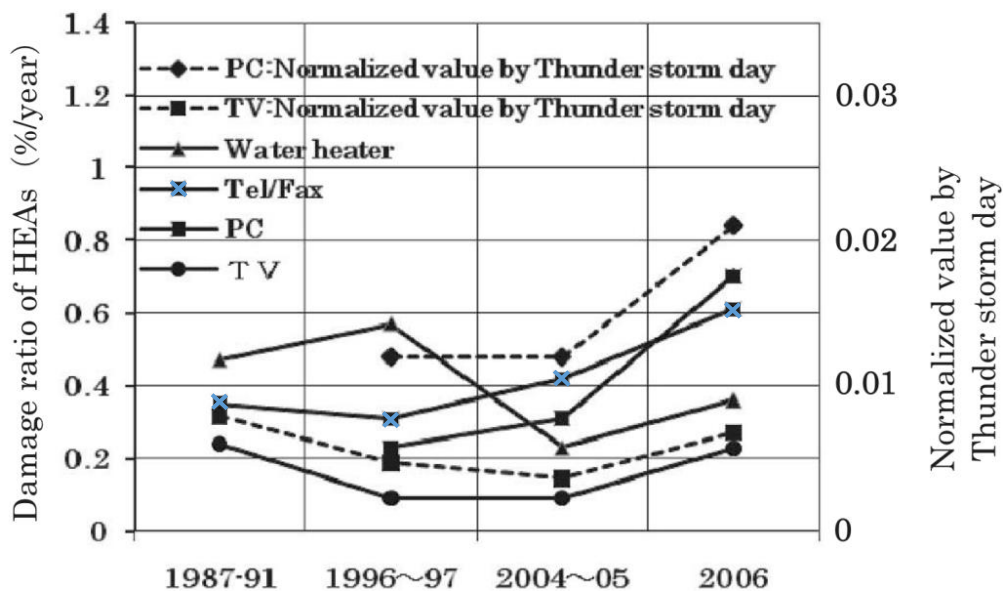


Fig. 3.19 Change of damage ratio of HEAs⁽⁷⁾⁽⁸⁾

3.7 まとめ

高度情報化社会が進展し、なお加速し続ける現在、一般家庭などで使用される電気・電子製品はネットワーク化、低電圧化、集積化、高周波駆動化されてきている。しかしながら、これらの機器が高度化されていく一方で、外部ノイズやサージ現象に対する絶縁耐力の低下が懸念され、低電圧配電システムにおける雷サージ対策の確立が求められている。雷サージを調査するにあたり、落雷の発生、落雷によるサージの特徴、被害状況などを理解することは非常に重要である。

そこで、本章では、落雷過程の始まりである雷雲の発生過程、それに続く雷放電過程、雷放電時の雷電流波形の定義や雷電流の特性、雷電流によって発生するサージ現象、ならびに過去に落雷により故障した家電機器の被害推移の調査結果などについて紹介した。

本論文では雷サージ解析として、家屋付近への落雷により発生する誘導雷を取り上げ、その抑制手段を講じることをテーマの一つとしている。誘導雷を検討するにあたり、雷電流の90%以下が約10kA以下である事や、誘導雷は雷放電過程の中でもリターンストロークの過程で最も厳しくなることを述べた。したがって、我々は、落雷地点近傍の家屋内電気配線に発生する誘導雷電圧並びにその抑制手法について検討するために、リターンストロークの過程を模擬した解析を実施することとした。

第3章 参考文献

- (1) 社団法人 電気設備学会:「電気・電子機器の雷保護 -ICT 社会をささえる-」, オーム社 (2011)
- (2) Lou van der Sluis:”Transients in Power System”, John Wiley & Sons Ltd.(2001)
- (3) 横山 茂:「配電線の雷害対策」, オーム社(2005)
- (4) 社団法人 電気設備学会:「雷と高度情報化社会」, 電気設備学会 (1995)
- (5) 配電線雷撃応答特性調査委員会:「配電線の雷撃応答特性」, 電気学会技術報告, 678号, p.9(1998)
- (6) 浅川 聡, 和田 淳, 横山 茂, 新藤 孝敏, 蜂屋 一雄, 兵藤 浩晃:「広帯域ロゴスキーコイルの開発と冬季雷における電荷量の評価-仁賀保高原風力発電設備における2005年冬季雷観測結果」, 電力中央研究所報告, No.H06010(2008)
- (7) 低圧配電システム雷害対策調査委員会:「低圧配電システムにおける雷害対策」, 電気学会技術報告, 1354号(2015)
- (8) S.Yokoyama, K.Miyake, H.Mitani, A.Takanishi:” SIMULTANEOUS MEASUREMENT OF LIGHTNING INDUCED VOLTAGES WITH ASSOCIATED STROKE CURRENTS”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.8, pp.2420-2429(1983)
- (9) Shigeru Yokoyama, Kunihiko Miyake, Hiroshi Mitani, Nobuharu Yamazaki:” ADVANCED OBSERVATIONS OF LIGHTNING INDUCED VOLTAGE ON POWER DISTRIBUTION LINES”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRD-1, No.2, pp.129-139(1986)
- (10) 細川 武, 横山 茂, 福田 正裕:「家電機器の雷被害様相の変遷と今後の課題」, 電学論 B, Vol.129, No.8, pp.1033-1038(2009)

第4章 低電圧配電システムの雷害対策

4.1 まえがき

低電圧配電システムにおける雷サージ対策は、従来、機器単体や電源側だけの対策が中心であった。しかし、微弱なエネルギーで動作する電気機器を、落雷のような巨大なエネルギーを持つ現象の影響から防護するためには、従来のような対策では不十分であり、高度にネットワーク化された電気機器をシステムとして把握した上で、雷サージの対策を検討するべきである。したがって、現行のサージ対策や抑制手法を知ることは非常に重要である。

そこで、本章では、雷サージ保護の基本的な考え方である LP(Lightning Protection)を始めとし、落雷による人畜への被害を防ぐための対策や、電気機器を保護するための対策について述べる。また、現在サージの抑制を実現するにあたり必要不可欠である、放電ギャップや酸化亜鉛素子などの SPD(Surge Protective Device)などの雷保護装置の特性について述べる。

4.2 雷害対策の基本⁽¹⁾⁽²⁾

本節では雷害対策の基本について述べる。対策については、図 4.1 に示すように、最上位に雷保護システム(LP)がある。そこから、1.建築物などと人命を保護する「建築物等の雷保護システム(LPS: Lightning Protection System), 外部雷保護システムおよび内部雷保護システム」と 2.建築物内部の電気・電子機器を雷サージから保護する「電気・電子設備の雷サージ防護システム (LPMS: LEMP Protection Measures System)」とに分類される。ここで、LEMPとは Lightning Electro Magnetic Impulse の略称である。

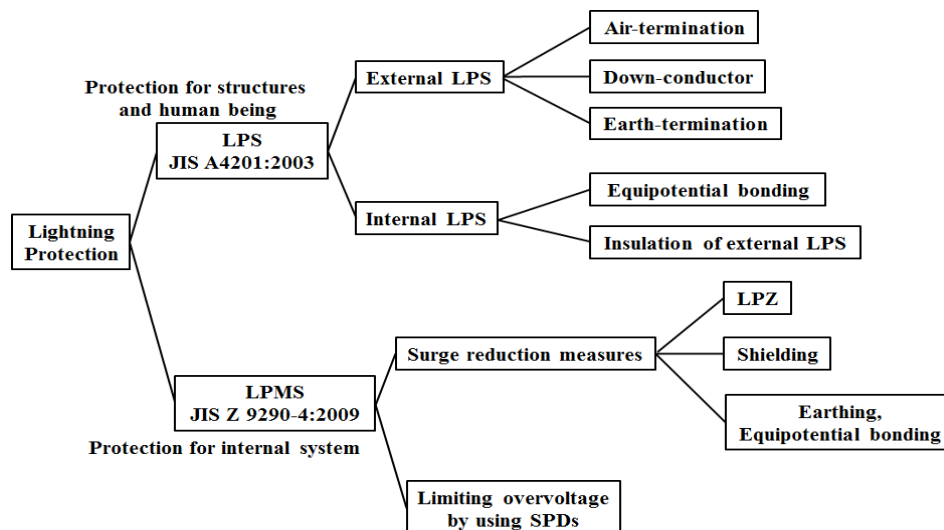


Fig. 4.1 Construction of standards relevant to lightning protection

また、LPS や LPMS の下位にも多数の対策が存在し、雷保護システムが構成されている。その中で、この二つのシステムの間には「等電位ボンディング」と「接地」が共通しており、効果的な雷害対策の実現には、機器単体の単独対策では効果が乏しく、総合的な雷保護システムの構築が重要である。

4.2.1 雷保護システム(LPS)

雷保護システム(LPS)は、落雷による建造物および人や家畜などの生命への直接的な被害を防ぐために構築されるべきものである⁽¹⁾。LPS は、外部 LPS と内部 LPS とで構成されており、4.2.1 節では両 LPS について述べる。

4.2.1.1 外部雷保護システム(外部 LPS)

外部 LPS の目的は、接地する雷を受雷部システムで確実に捕捉し、その雷電流を引き下げ導体システム経由で、安全かつ迅速に接地システムから大地へ放流することである。この目的を達成するため、外部 LPS は、1.受雷部(Air termination)システム、2.引き下げ導体(Down-conductor)システム、そして 3.接地(Earth-termination)システムとで構成される(図 4.2)。

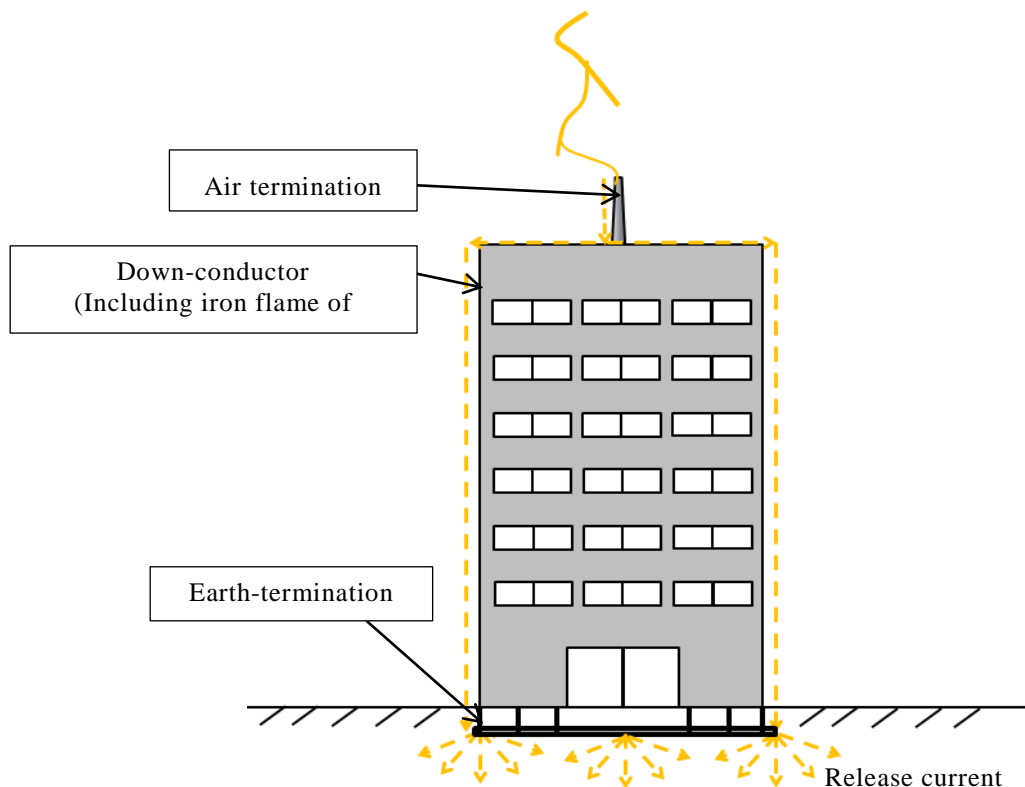
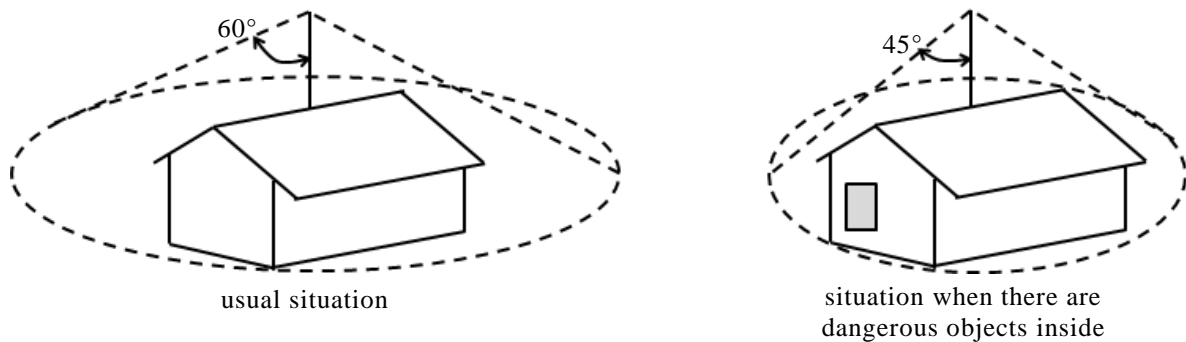


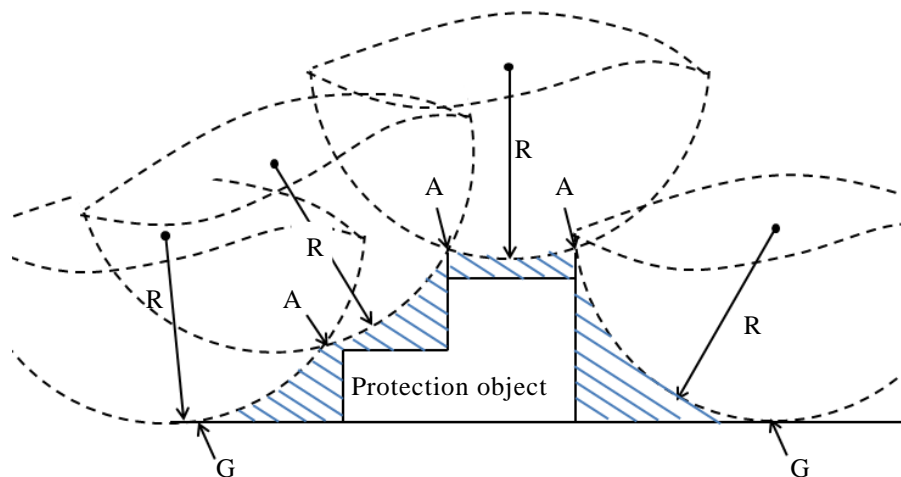
Fig. 4.2 External LPS

受雷部システムでの雷放電捕捉による保護範囲は、旧 JIS の保護角度法(図 4.3(a))では一律 60° (火薬、可燃性物質などの危険物を扱う建物については関しては 45°) に規

定されていた。しかし、現行の JIS では、雷保護レベルに応じた回転球体法を用いた方法を主とし、さらに角度法、メッシュ法なども追加している。図 4.3(b)は回転球体法のイメージ図を示している。回転球体法では、二つ以上の受雷部、または一つ以上の受雷部と大地とに同時に接するように球体を回転させるとき、球体表面の包絡面から被保護物側を保護範囲とする方法である。図 4.3(b)中のハッチング部は、その保護範囲を示している。



(a) previous JIS⁽³⁾



R: Radius of rolling sphere A: Lightning reception point
G: Point where lightning touches to ground

(b) Present JIS⁽⁴⁾

Fig. 4.3 Concept of External LPS

建築基準法では、同施行令第 129 条の 14 において「法 33 条の規定による避雷設備は、建築物の高さ 20m を超える部分を雷撃から保護するように設けなければならない。」と規定されている。したがって、建築基準法上は 20m を超える部分のみ受雷部を設ければよいとされている。第 3 章で述べたように、ステップトリーダがリターンストロークへ移行する際に、地上物体から生じるコロナ放電やストリーマは、ステップトリーダによる地表面上の電界の強さにより決まるとされている。雷撃距離については多くの研究例があり、一般的には式(4.1)で示される。

$$R = kI^n \quad (4.1)$$

ここで、 R は雷撃距離[m]、 I は雷電流波高値[kA]、そして k と n は定数である。各研究者により k や n の与え方は異なるが、IEC規格では式(4.2)が使用される⁽¹⁾。

$$R = 10I^{0.65} \quad (4.2)$$

式中の雷撃距離は図 4.3(b)中の R に一致する。雷電流が小さいほど、回転球体の半径は小さくなるため、小雷電流の落雷までカバーすることは非常に難しい条件となる。

4.2.1.2 内部雷保護システム(内部 LPS)

内部 LPS は 1.等電位ボンディング(Equipotential bonding)と 2.外部 LPS からの絶縁(Insulation of external LPS)とで構成される。外部 LPS により、雷電流が安全に大地に放流されるが、外部 LPS と建物内の他の金属部分との間に過電圧が発生し、危険な火花放電の発生が予想される。このような放電で、建物内に火災や爆発あるいは感電事故などの危険が発生する可能性もあり、これらを防止することが内部 LPS の目的である。したがって、内部 LPS で述べられる等電位ボンディングは、建物内の電気・電子機器保護のためのものではないが、電気・電子機器の保護にも密接に関係している。

4.2.2 雷サージ保護対策(LPMS)

雷サージ保護対策(LPMS)の基本の一つは、雷電流によって電磁的にケーブル内に発生が想定されるサージを抑制すること、あるいはケーブルまたは設備内に侵入してしまった過電圧を、機器の破壊しないレベルにまで低減させることである。4.2.2 節では LPMS として、LPZ(Lightning Protection Zone)や電気機器を雷電流により発生する磁気からの遮蔽、および接地と等電位ボンディングについて紹介する。

4.2.2.1 雷保護ゾーン(LPZ)の設定

JIS では雷保護ゾーン(LPZ)を導入しており、LPZ の概念は保護対象システム・機器を含んだ空間を電磁環境の異なる空間ごとに分割することである。LPZ の概念を図 4.4 に、およびその内容を表 4.1 に示す。LPZ₀や LPZ₁、LPZ₂、・・・LPZ_nというように境界を構築することで、保護対象システム・機器に至るまでに、雷による電磁界や雷電流が段階的に低減される。雷サージを低減する方法として、接地の共通化・等電位ボンディング、磁気遮蔽、SPD の設置および絶縁化がある。

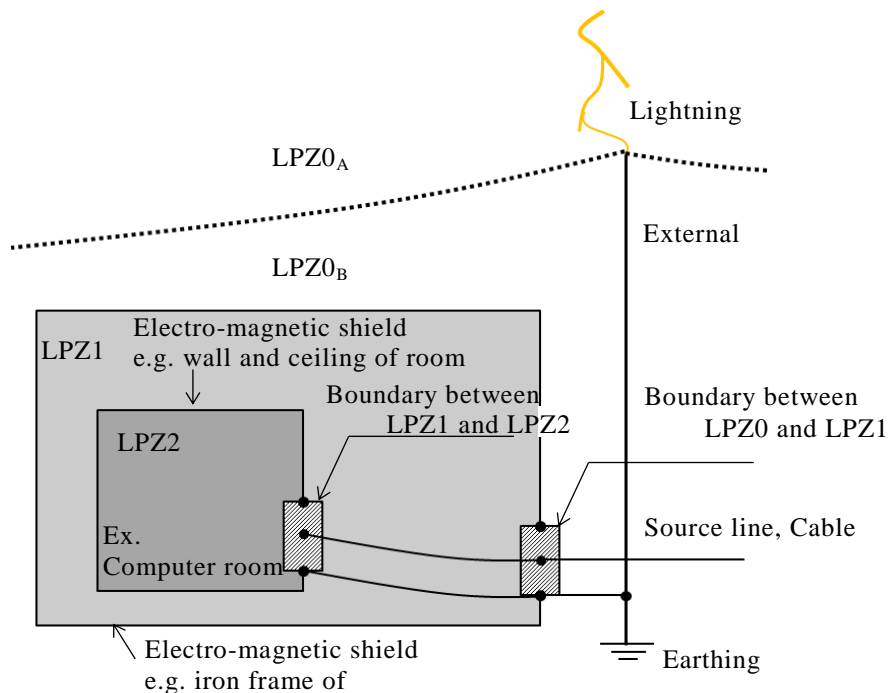


Fig. 4.4 Concept of LPZ⁽⁵⁾

Table 4.1 Classification and content of LPZ⁽¹⁾

区分	内容
LPZ0	雷による電磁界が減衰しない範囲。ここに配置されるシステム・機器は全雷電流、またはその一部により危険に曝される。
LPZ0 _A	雷保護システム(LPS)の保護範囲外であり、直撃雷と減衰していない雷による電磁界の危険に曝される。
LPZ0 _B	LPSの保護範囲内であり、直撃雷に対しては保護されているが、屋外であるため、減衰していない雷の電磁界の危険に曝される。
LPZ1	雷電流は境界での分流、SPDにより制限される。雷電磁界は建物などにより遮蔽され、低減される。
LPZ2	境界に設置したSPD、空間遮蔽の追加によって、雷電流・電磁界がさらに低減される。
LPZ3	同上

4.2.2.2 磁気遮蔽と誘導ループ面積の低減(Shielding)

雷電流により発生する磁界の影響を低減するためには、磁気遮蔽が有効な手段である。建物の鉄筋などの構造体を利用して、建物全体または部屋などを空間的に遮蔽する方法や(図 4.5(a))、電磁遮蔽ケーブルの使用、あるいは電気配線類を金属製の電線管やケーブルダクト内に収納するなどし、ケーブルのみを磁気遮蔽する方法がある。

ビルに設置されている多くの LPS の場合、構造体の鉄骨や鉄筋を引き下げ導体として使用するため、雷電流の一部が建物の柱や壁面に流れることになる。その影響により発生する雷サージの抑制には、ケーブルで形成される誘導ループ面積の極小化が挙げられる(図 4.5(b))。

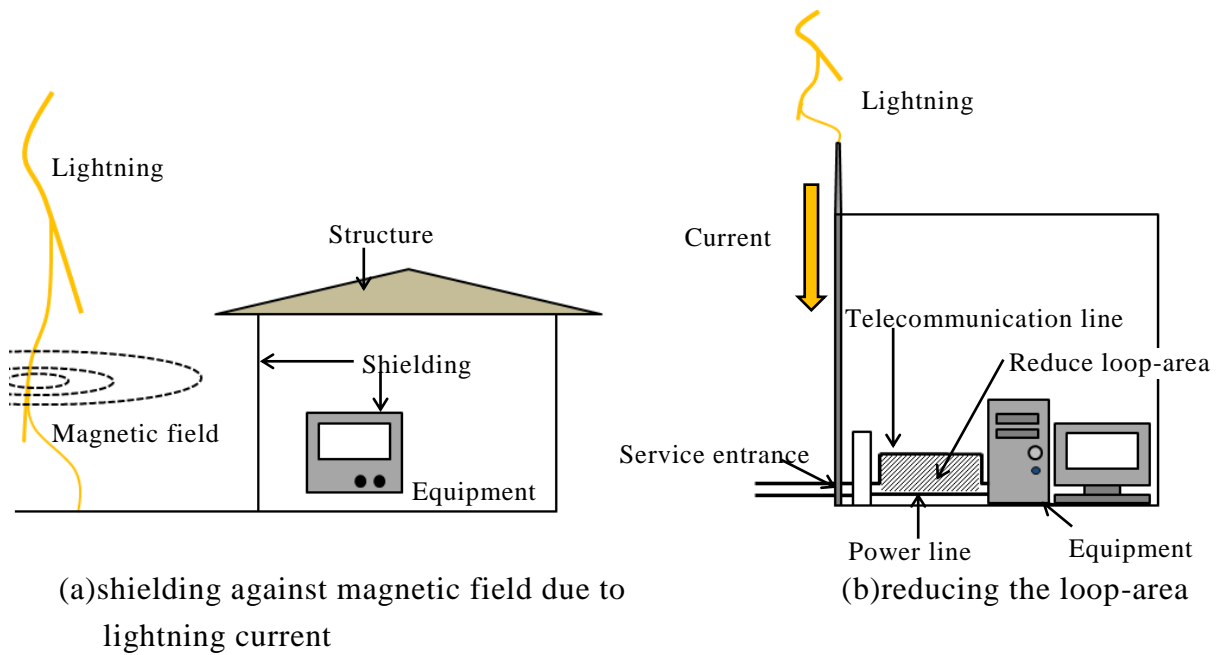


Fig. 4.5 Electro-magnetic shields and reduction of induction loop-area⁽¹⁾

4.2.2.3 接地と等電位ボンディング(Earthing and equipotential bonding)⁽¹⁾

雷サージを接地側に放流するために、電流の流れ込みに対し、電位上昇をできるだけ低く抑制するべきである。したがって、接地抵抗値は可能な限り低いことが要求される。また、サージ電圧や電流の進入時に、機器間の電位差を最小とするためには、それぞれの機器の接地を共通接地または接続接地する必要がある。しかしながら、日本では各種の接地システムが存在し、個別に接地されていることが多い。雷保護の観点からは例えば図 4.6 のように、共通接地を含めた等電位ボンディングが望ましい。

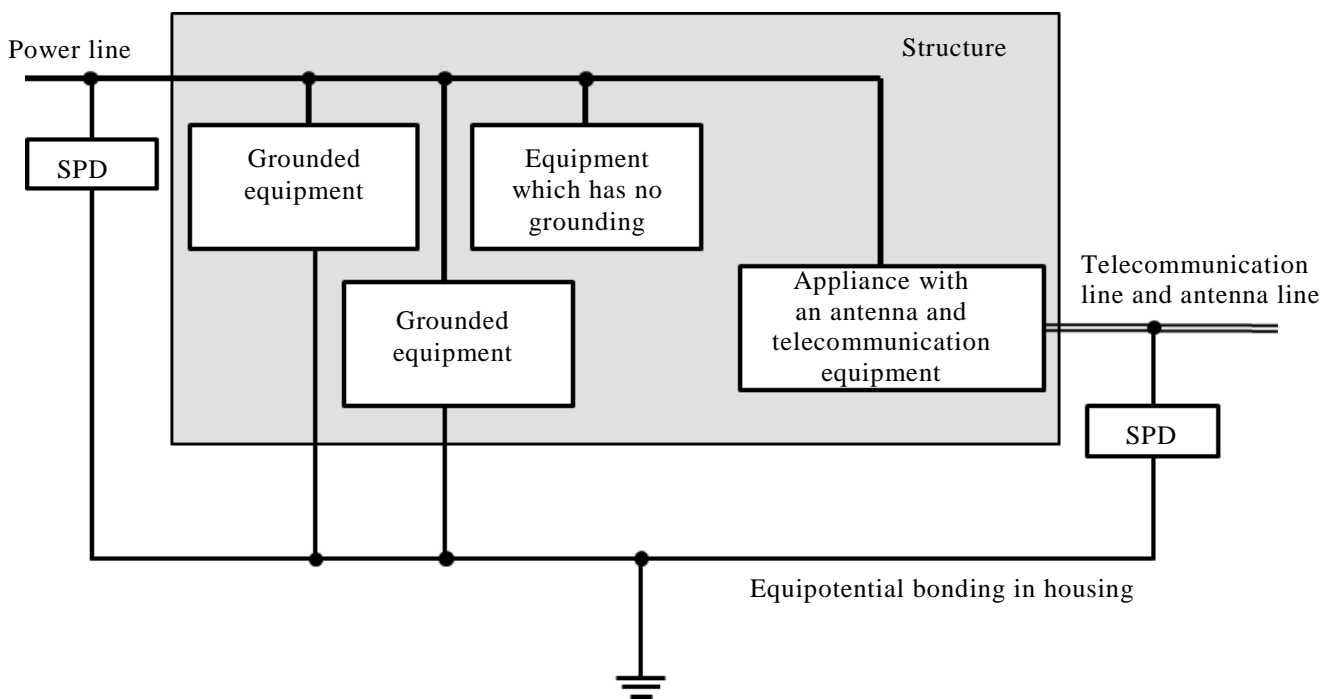


Fig. 4.6 Equipotential bonding in structure⁽¹⁾

4.3 サージ防護デバイス(SPD)⁽¹⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾

高度情報化をはじめとする各種機器の低電圧回路に、サージ防護機器として避雷素子や避雷器が用いられる。避雷素子は、過電圧により動作する以外では、回路に対して影響を与えず、過電圧のみに対して機能することが求められ、必要な条件として以下の条件が挙げられる。

1. 適用回路において通常電圧と過電圧とを判別し、過電圧に対してのみ動作すること。
2. サージによる過電流を確実にアースへ分流させ、過電圧を十分低い電圧に抑え、回路を保護すること。
3. 推定される流入サージ電流に対し、十分なサージ電流耐量を有すること。
4. 過電圧を処理したのち、自動的に復旧し、次の過電圧の侵入に備える特性を持つこと。

また、避雷素子はその動作原理や特性から、ギャップ式と半導体式に大きく分類される。4.3 節ではギャップ式避雷素子と半導体式避雷素子の構造や、電流電圧特性、ならびに過電圧発生時の動作について紹介する。

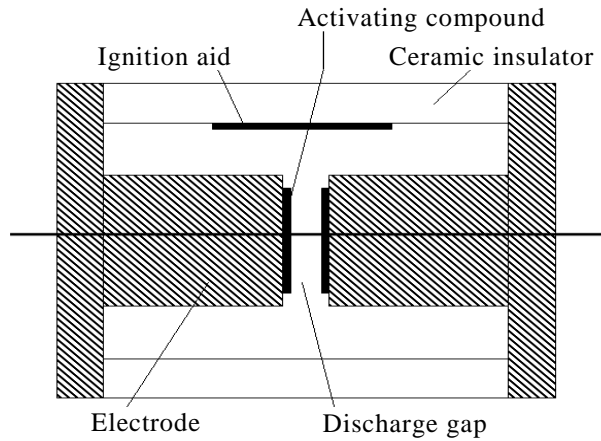
4.3.1 ギャップ式避雷素子

ギャップ式避雷素子は、ある一定電圧以上の電圧が印加されたとき、空隙間で火花放電を生じる現象を利用した素子であり、一般的に避雷管やガスチューブアレスタ(GDT)と呼ばれる。避雷管の一例として、図 4.7(a)に、主に製造されている避雷管の外観を、図 4.6(b)に、避雷管の断面図を示す。避雷管は、金属電極とセラミックにより密閉された容器内に、アルゴンガスなどの不活性ガスを封入した構造である。また、その特性向上のため、電極表面には活性剤の塗布や、セラミック管内面へトリガー線の線引きなどの処理が施されている。

避雷管は、静電容量が小さいため高周波の信号に影響することがなく、避雷管単体では数 GHz オーダーの周波数でも使用可能である。また火花放電後の制限電圧は、アーク電圧のみとなるため極めて低く、加えてサージ電流耐量が大きいという特徴を持つ。しかしながら、放電応答速度が半導体式に比べ遅く、放電開始電圧のばらつきが比較的大きい特性を持っている。



(a) appearance⁽⁸⁾



(b) cross section⁽¹⁾

Fig. 4.7 Ceramic type GDT(Gas Discharge Tube)

ギャップ式避雷素子の電圧特性として、直流放電開始電圧特性とインパルス放電開始電圧特性が挙げられる。直流開始放電電圧は、ギャップ式避雷素子の基本的な特性で、直流電圧を印加した際の放電開始電圧のことである。直流放電開始電圧の測定は、ギャップ式避雷素子に、約 100V/s の割合で緩やかに上昇する電圧を印加することで行われる。通常使用されているギャップ式避雷素子の直流放電開始電圧の範囲は、DC90V から高いもので DC1000V である。図 4.8 は、ギャップ式避雷素子の試験回路の一例を示している。ギャップ式避雷素子に、直流電圧を徐々に上昇させながら印加する。電極間の電圧が放電電圧に達した後も、さらに電源電圧を上昇させ、放電電流と放電電圧の特性を確認する試験である。図 4.9 は、放電電圧と電流の特性を示している。放電開始後は、グロー放電を経て、電源電圧の上昇(放電電流の上昇)にともなって、アーク放電に至るといふ検証結果である。グロー放電の状態では、ギャップ式避雷素子の端子電圧はほぼ一定のグロー電圧を示すが、さらに電流が増加すると、放電はアークに移行し、端子電圧は 10 から 20V 程度となる。

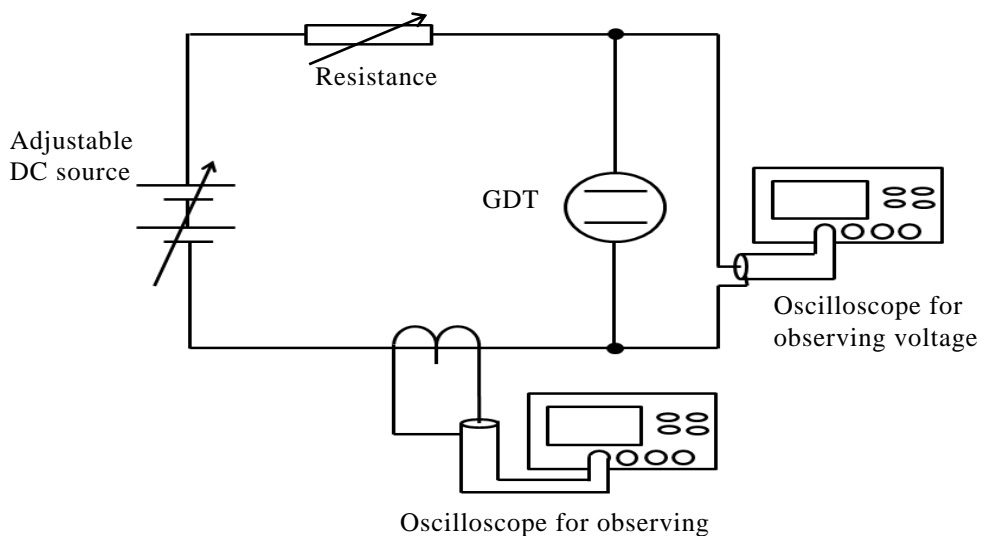


Fig. 4.8 Voltage and current characteristic of GDT measurement circuit⁽⁶⁾

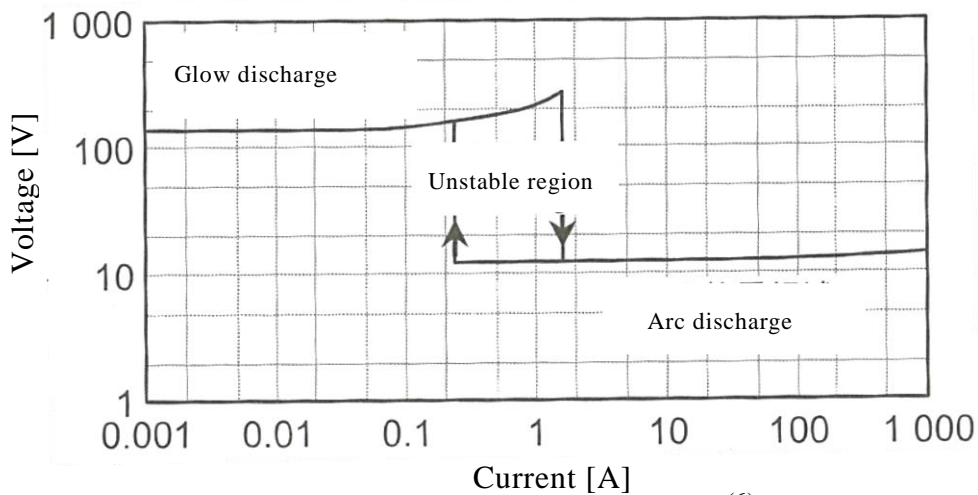


Fig. 4.9 V-I characteristics of GDT⁽⁶⁾

ギャップ式避雷素子のインパルス放電開始電圧は、直流放電開始電圧に比べて高いことが知られている⁽¹⁾。フィールドにおいて、実際に機器に加えられる異常電圧はインパルス波形であるが、ギャップ式避雷素子の特性としては、なるべく直流放電開始電圧に近い値で放電することが要求される。また、動作遅れ時間は一定ではなく、印加電圧が高くなるほど短くなる。図 4.10 は、インパルス電圧をギャップ式避雷素子に印加した際の、放電電圧波形のイメージである。ギャップ式避雷素子が放電を開始し、インパルス電流が数 A 以上になると、放電状態は直ちにアーク放電に移行し、端子間には低電圧の放電が継続される。アーク放電へ移行後、通電電流が減少するとグロー放電へ移行し、さらに電流が減少することで放電が持続できなくなり、放電停止に至る。ギャップ式避雷素子を使用する回路に、直流や交流の電源が重畳している条件では、ギャップ式避雷素子が異常電圧によって放電し、異常電圧が無くなった後も電源からの電流が流れ続ける現象があり、これは続流と呼ばれる。続流が生じるかどうかは、避雷管の $V-I$ 特性によって決まる。そのため、基本的に、ギャップ式放電素子単体を電源回路に適用することは、避けるべきである。

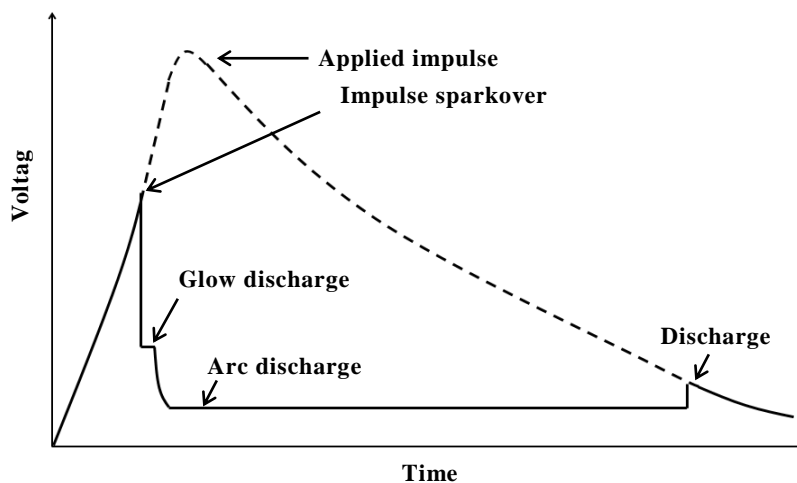


Fig. 4.10 Impulse sparkover voltage waveform of GDT⁽¹⁾

4.3.2 半導体式避雷素子

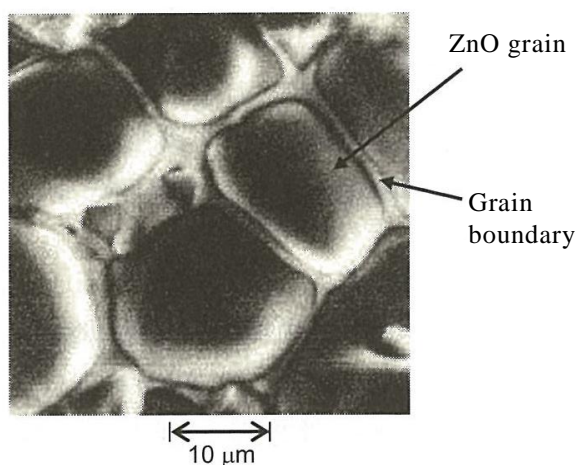
半導体式の避雷素子は、半導体の接合障壁あるいはセラミックの粒界において、ある電圧で電子なだれ現象が生じることを利用した避雷素子である。半導体式の特徴は、一般的にギャップ式のような火花遅れや続流の心配がないため、半導体回路を用いた電子回路のサージ対策に広く用いられている。現在、避雷素子として主流の ZnO バリスタ(酸化亜鉛バリスタ/アレスタ)は、酸化亜鉛にビスマスをはじめとする添加物を加えて焼結し、電極形成と絶縁処理を施した素子で構成される。図 4.11 に、ZnO 素子の一例、ZnO 素子の微細構造写真、そして ZnO 素子の微細構造モデルを示す。ZnO 避雷素子は、製品としてはバリスタやアレスタと呼ばれる。ZnO バリスタ/アレスタは、図 4.11(a)の様な素子間に電極を取り付け、図 4.11(b)のような形で製品として使用される。ZnO バリスタ/アレスタには、分電盤設置タイプやタップ内蔵型、電子回路用から、送配電用および変電設備用のものまであり、様々な分野で応用されている素子である。ZnO バリスタには、漏れ電流が小さい、制限電圧が低い、そしてサージ電流耐量が大きいというような特徴がある。



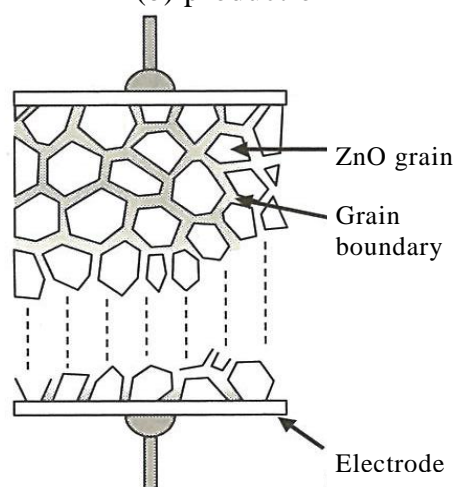
(a) appearance of ZnO element⁽⁹⁾



(b) production⁽¹⁰⁾



(c) electron microscopic photograph⁽¹⁾



(d) microstructure model⁽¹⁾

Fig. 4.11 ZnO varistor

ZnO アレスタ/バリスタは、印加電圧に応じて抵抗値が変化する非直線抵抗体であり、その V - I 特性は、一般的に式(4.3)で近似的に表される。また、ZnO アレスタ/バリスタの特性曲線は、図 4.12 のように 3 つの電流領域に分けられる⁽¹⁾。

$$I = KU^\alpha \tag{4.3}$$

I : ZnOバリスタに流れる電流, U : ZnOバリスタの両端電圧,
 K : 定数, α : 電圧非直線指数

$\alpha=1$ は通常の抵抗に相当するが、ZnOバリスタの α は50と非常に高い非線形性を示す⁽¹⁾。この高い非直線指数 α は、電流の全領域に適用されるのではなく、小電流領域や大電流領域ではZnO粒界、あるいは粒子の比抵抗の影響を受け徐々に低下する。小電流領域(結晶粒界の比抵抗 $10^{12}\sim 10^{13}\Omega\text{cm}$ に依存する領域)では、一般的に、適用回路電圧が印加されている状態における漏れ電流のレベルを知ることができる。この領域は負の温度依存性をもち、より低い電流領域ほどその依存性は大きくなる。大電流領域(結晶粒界の比抵抗 $1\sim 10\Omega\text{cm}$ に依存する領域)では、サージ電流耐量に近い電流値における制限電圧から、この比抵抗の影響が現れてくる領域でもある。図4.12から分かるように、サージ電流通電中のZnOアレスタ/バリスタの過電圧は、非直線抵抗により抑制され、この電圧は制限電圧(clamping voltage)と呼ばれる。制限電圧の指標として、図4.12中の V_{1mA} が使用されるが、これは過電圧 V がZnOアレスタ/バリスタに印加された際、放電電流が1mAとなる電圧値を示している。

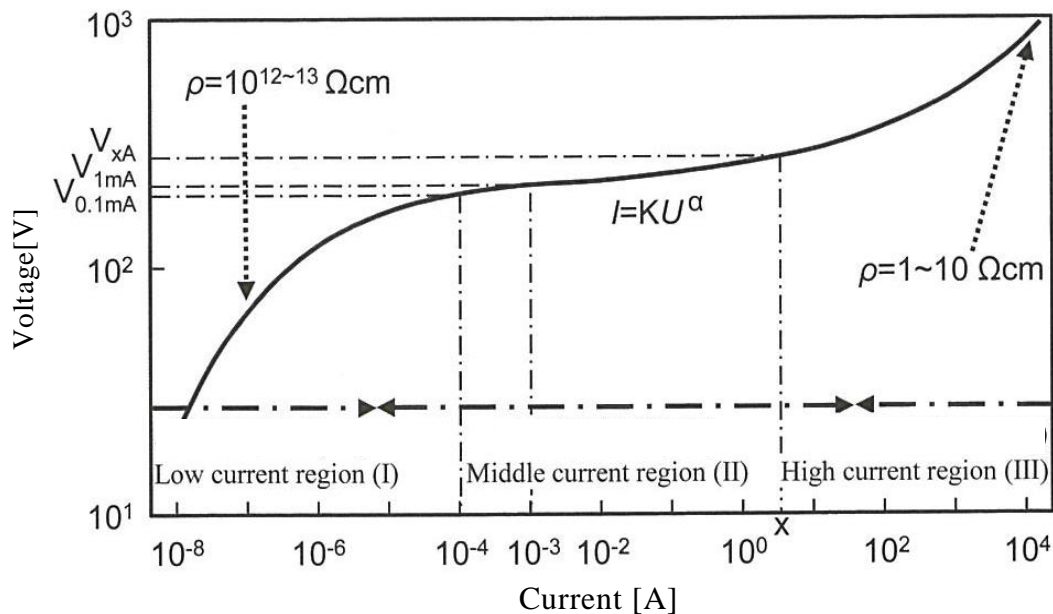
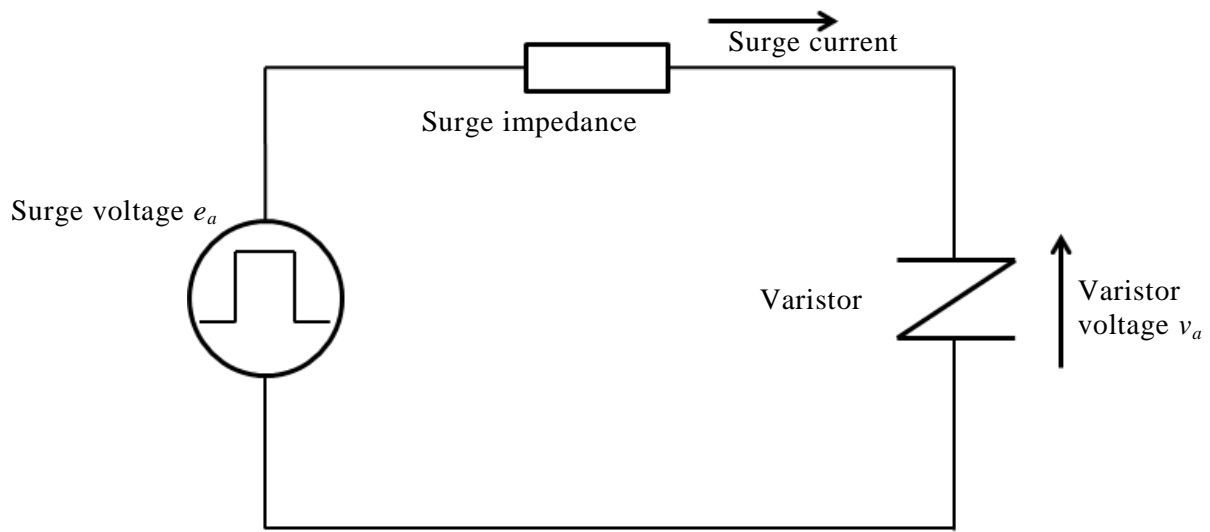


Fig. 4.12 V-I characteristics of ZnO varistor at each current region

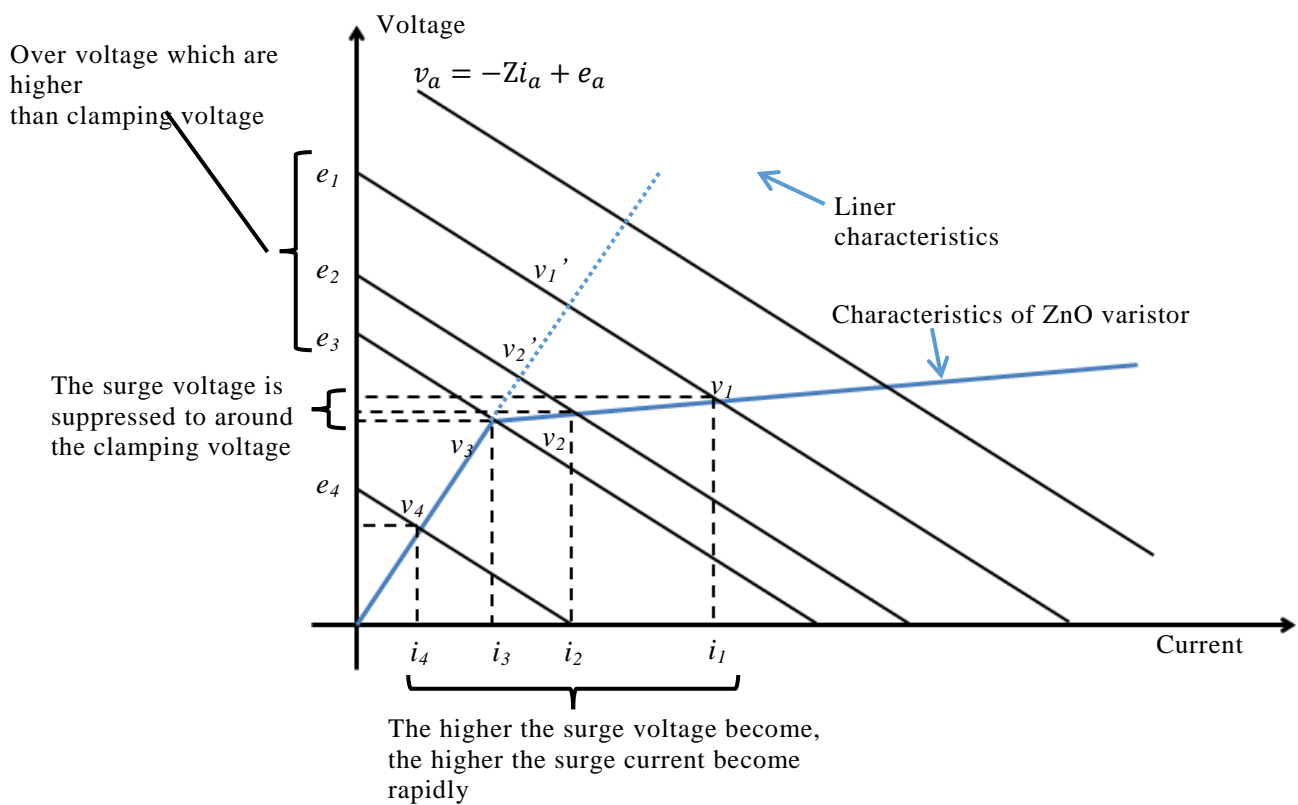
ZnO バリスタの保護動作を図 4.13 を用いて説明する。図 4.13(a)のようにサージ電圧 e_a が、あるサージインピーダンス Z をもつ電気配線を介し、ZnO バリスタに印加されたとする。このバリスタの $V-I$ 特性を図 3.13(b)の青線で示している。また、青点線は、バリスタの抵抗が線形であるとした時の特性を示している。この回路において、サージ電圧 e_a 、ZnO バリスタの極間電圧 v_a 、そして放電電流 i_a との関係として式(4.4)が成り立つ。

$$v_a = -i_a Z + e_a \quad (4.4)$$

式(4.4)より、ZnO バリスタの極間電圧は、放電電流に対して右下がりの特性を示すことが分かる。図 4.13(b)中の y 軸上に示されているサージ電圧値が、時間とともに e_3 から e_1 へと上昇しても、避雷器の非直線抵抗により ZnO バリスタ極間電圧の上昇は、 v_3 から v_1 の様に、非常に小さいものとなる。一方、バリスタの抵抗を線形とした場合の条件においては、電圧の上昇サージ電圧が v_3 から v_2' 、 v_1' と、非線形特性時に比べ、電圧の上昇が高いことが分かる。時間経過とともにサージ電圧が処理され、最終的に e_i が、ある程度まで減少し、バリスタへの印加電圧が元の系統電圧(e_4)に戻ると、ZnO バリスタの電流値は抑制され(i_4)、続流が消弧される。



(a) test circuit



(b) relationship between ZnO voltage and surge voltage

Fig.4.13 Operation characteristics of ZnO varistor assembled in circuit⁽⁷⁾

4.4 まとめ

本章では低電圧配電システムにおける雷害対策の基本的な考え方である LPS や LPMS, さらに, 現在多くの機器の雷サージ対策として使用されているギャップ式避雷素子や半導体避雷素子の特性・特徴について述べた。特に LPS と LPMS とに共通して実施される等電位ボンディングや SPD の敷設が雷サージを抑制する効果を持つということが分かった。雷サージの低減のため, 今後はこれらの措置を施した家屋や建物が増えると考えられる。また, SPD として使用される避雷素子についても述べた。避雷素子は, その特徴から, ギャップ式と半導体式とで区別され, その動作原理や非線形特性, 過電圧の抑制原理について理解を深めた。本章で述べた LPMS や避雷素子の特性を踏まえ, 第 5 章では等電位ボンディングを施した家屋内に発生する誘導雷における, SPD の有無による影響について検討を行う。

第 4 章 参考文献

- (1) 社団法人 電気設備学会:「電気・電子機器の雷保護 -ICT 社会をささえる-, オーム社 (2011)
- (2) 低圧配電システム雷害対策調査委員会:「低圧配電システムにおける雷害対策」, 電気学会技術報告, 1354 号(2015)
- (3) 木島 均:「接地と雷防護」, コロナ社(1997)
- (4) 社団法人 電気設備学会:「建築物等の雷保護 Q&A -JIS A 4201:2003 対応-, オーム社(2005)
- (5) 社団法人 日本電設工業協会:「雷サージ防護システムの構築実務」, オーム社 (2005)
- (6) 社団法人 電気設備学会:「雷と高度情報化社会」, 電気設備学会 (1995)
- (7) 横山 茂:「配電線の雷害対策」, オーム社(2005)
- (8) http://www.sankosha.co.jp/products/lightning/arrester/arrester_2pole_gdt/ (閲 覧 日 2016/ 8/3)
- (9) http://www.toshiba.co.jp/tandd/jp/tands/window/products/surge/zno_sosi.htm (閲 覧 日 2016/7/25)
- (10) <http://www.otowadenki.co.jp/knowledge/history/> (閲 覧 日 2016/7/25)

第5章 落雷点近傍の家屋内電気配線に発生する誘導雷解析

5.1 まえがき

現代社会の様々な分野において、電気機器の電子化やネットワーク化が進む一方で、機器の耐電圧性能の脆弱化によりサージ現象の影響を受けやすいという懸念がある。これらの電気機器にとって、問題となるサージ現象の一つに雷サージがある。第3章にて述べたように、電力系統に直接落雷した際の瞬低や停電といった被害は当然ながら、大地に放流される雷電流と接地抵抗により生じる接地電位の上昇が引き起こすサージである逆流雷、落雷時に生じる急激な電磁界変化が引き起こす誘導雷サージによる被害も多数報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。低電圧配電系統における雷過電圧の対策を講じるためにも、雷撃時に発生する過渡電磁波を受ける構造物や、低電圧配電系統でのサージ現象を検討する必要がある。

我々は電力中央研究所で開発された汎用サージ解析プログラム VSTL rev(Virtual Surge Test Lab. rev)を用い、大地への落雷時における落雷地点周辺の低電圧電力系統へ生じる誘導雷現象について解析および検討した⁽³⁾。VSTL rev は、Maxwell 方程式を差分的に解いていく手法である FDTD(Finite Difference Time Domain)法に基づくサージ解析プログラムである⁽⁴⁾⁽⁵⁾。FDTD 法は、回路方程式に基づき計算するような EMTP(Electro-Magnetic Transient Program)等とは異なり、回路方程式では取り扱いが困難な解析対象の幾何学的寸法をそのまま考慮できる。そのため、落雷時の急激な電磁界変化によるサージ現象を計算するのに適した手法といえる⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

以前、我々は論文(3)において、落雷地点近傍における誘導雷サージ現象について検討した。しかしながら、計算容量の問題から家屋内配線、集中定数抵抗により模擬した変圧器や、接地抵抗を集中定数で模擬した検討を行うにとどまった。

今回は、前回の検討に加え、屋外の配線、大地の抵抗率も考慮し、建屋近傍の大地面上に生じた落雷が、建物内の電気配線に及ぼす影響について解析した。本章では、屋内配線に発生する誘導雷サージと大地抵抗率との関係および SPD 敷設条件との関係について検討した結果について報告する。

5.2 モデル構成

VSTL rev は、解析空間のサイズを指定し、その空間中にモデルを作成し、解析するソフトである。本解析では、解析空間を、205.4m×196.0m×123.0m の直方体としている。また、解析空間を囲む 6 つの境界面すべてに、2 次の Liao の吸収境界条件⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾を適用することで、境界面に到達した電磁波が反射され、解析結果に影響を及ぼさないように処理している。また、Z=0m の X-Y 平面(吸収境界面)と、Z=10m までの X-Y 平面に囲まれた空間を大地とした。解析時間は 0.6μs とし、解析時間の刻みは Courant 条件を満足するように 9.52ps と、自動的に VSTL rev 内で決定される。解析空間をより細かなメッシュで刻むこと

で、その解析精度は上昇するが、計算時間が膨大になる。したがって、電気配線周辺や家屋周辺などには、比較的細かい刻みを適用し、その他の部位では比較的荒い刻みを適用することで、計算時間の短縮を図る必要がある。したがって、本解析では解析空間の場所によって、解析空間の刻みサイズを変更する不均一刻みモデルを適用している。表 5.1 に各方向の空間刻み個数 (NX, NY, NZ) と各空間刻みのサイズ (DX, DY, DZ) をまとめており、表内の塗りつぶされた部位は家屋が配置されている位置を示している。最小 0.005m から最大 1m とセルサイズに 200 倍もの違いがあるが、計算ではセルサイズの違いによる数値振動は現れていないことを確認している。

Table 5.1 Parameter of simulation space

NX	DX[m]	NY	DY[m]	NZ	DZ[m]
77	1.000	76	1.000	8	1.000
1	0.800	13	0.500	18	0.100
10	0.020	10	0.200	20	0.005
3	1.000	10	0.100	6	1.000
4	0.500	291	0.020	80	0.005
14	0.200	16	0.005	9	0.100
4	0.100	8	0.100	60	0.005
40	0.005	40	0.005	1	0.100
5	0.100	41	0.100	12	0.200
10	0.020	40	0.005	24	0.005
6	0.100	26	0.100	1	0.080
20	0.020	40	0.005	4	0.100
12	0.100	22	0.100	155	0.020
60	0.005	20	0.005	8	0.100
10	0.100	4	0.100	10	0.020
40	0.005	14	0.200	10	0.100
3	0.100	4	0.500	11	0.200
5	0.020	9	1.000	11	0.500
14	0.200	5	0.200	95	1.000
10	0.500	4	0.500		
26	1.000	77	1.000		
20	0.020				
80	1.000				

本解析に使用したモデルの概略を図 5.1 に示す。家屋の鉄骨部には直径 10cm の完全導体を使用し、大地表面上に高さ 5m、幅 10m、奥行 5m の建屋を想定している。

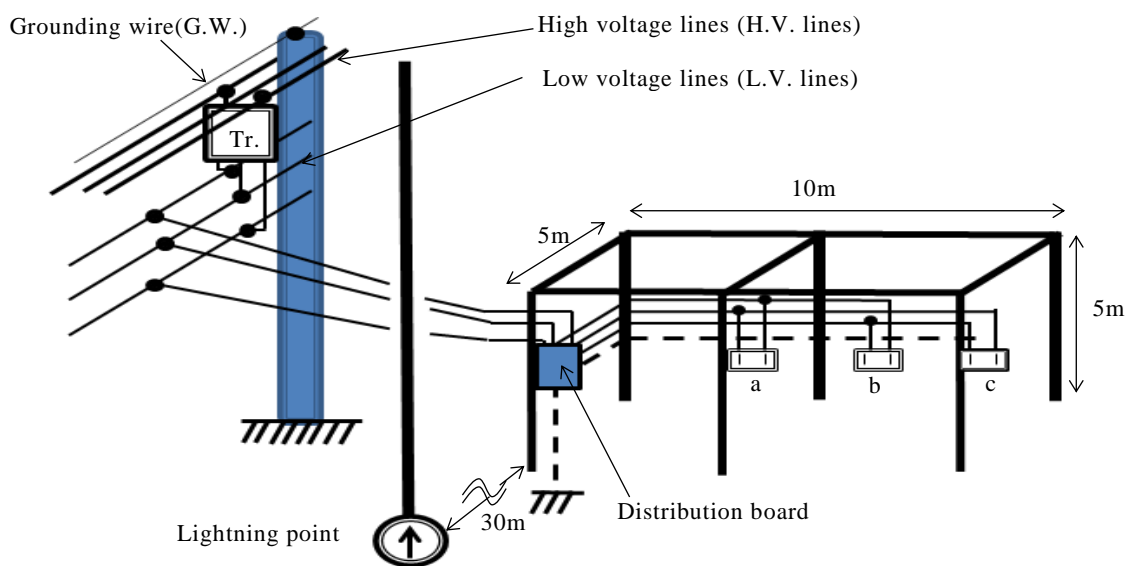


Fig. 5.1 Arrangement of analysis model

図 5.2 は屋内配線の配置図を示しており、図 5.2(a)は配線引き込み部周囲の配置を(b)はコンセントと分電盤および配線との位置関係を示している。

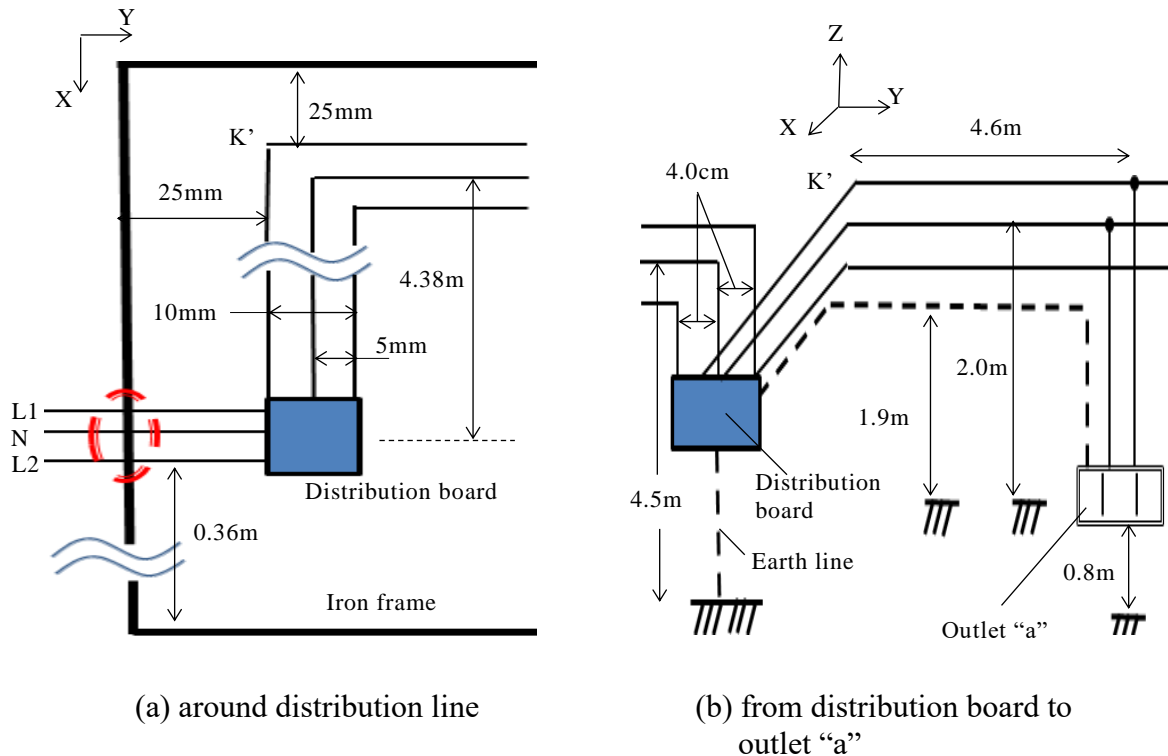


Fig. 5.2 Arrangement of inner distribution line at vicinity of distribution board

図 5.2(a)中の赤丸で囲まれた位置にて、三本の屋外低電圧配電線 L1, N, L2(直径 5mm)が屋内に引き込まれている。屋内に引き込まれた配電線は、分電盤にて直径 2.6mm の三本の導線に接続され、鉄骨内部の 25mm 内側および大地からの高さ 2m の位置を鉄骨に沿うように配置されている(図 5.2(a)および(b)参照)。屋内電気配線の配線方式としては、100V/200V の単相三線系統を模擬している。配線 L1 と N との中心間距離および L2 と N との中心間距離は 5mm, L1 と L2 との中心間距離は 10mm とし、VVVF ケーブルによる配線を模擬した。本解析では、ケーブルの被覆等の絶縁物は考慮していない。

図 5.2(b)に示すように、コンセント a は点 K' から 4.6m, b は 7.4m, c は 9.76m 離れた位置にそれぞれ設け、コンセントの位置で配電線を引き下げることで、大地からコンセント間の距離を 0.8m としている。コンセントは、配線 L1-N および配線 L2-N の組み合わせにより、100V 用を二つ(コンセント a, c)、配線 L1-L2 の組み合わせにより 200V 用を一つ(コンセント b)設けた。電気機器接地用の接地線として、分電盤下の大地から配線を設け、屋内配線と沿うように各コンセントまで配置することで接地線とした(図 5.1 および図 5.2(b)中の破線)。5.2(b)中では、接地線は一本で表現されているが、解析モデルでは分電盤から各コンセントへ一本ずつ接地線が敷設されている(図 5.3 参照)。

接地線は直径 5mm の細線導体で模擬しており、分電盤直下の大地表面にて接地電極と接続されている。 $1 \times 10^{-10} \Omega \text{m}$ のケースを除き、大地抵抗率を変化させた際の接地電極の接地抵抗を等しくするため、接地電極の形状を $100 \Omega \text{m}$ の条件では $5 \text{mm} \times 5 \text{mm} \times 120 \text{mm}$ の直方体、 $1000 \Omega \text{m}$ の条件では $5 \text{mm} \times 5 \text{mm} \times 2000 \text{mm}$ の直方体とし、地抵抗 R_e が約 550Ω とな

るように電極形状を変更した。接地抵抗の値を求める際に使用した H.B.Dwight の式を式 (5.1)に示す⁽¹⁰⁾。

$$R_e \approx \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{4L}{r} - 1\right) \quad (5.1)$$

ただし、上式において ρ は大地の抵抗率[Ωm], L は棒電極の長さ[m], r は棒電極の半径 [m]である。本解析では、接地電極として正方形の上面および底面を有する直方体を使用している。そのため、棒電極の半径 r として、正方形の辺長の半値 2.5mmを用いている。また $1 \times 10^{-10} \Omega\text{m}$ の条件では接地線は大地面上に直接接続されている。

図 5.3 (a)は SPD 非敷設時の分電盤モデル、同図(b)は SPD 敷設時の分電盤モデルを示している。同図(b)は、分電盤に SPD を敷設する条件を示しており、コンセントへの接地線と放電ギャップ用接地線とを、分電盤直下で一点接地としている⁽¹⁾。分電盤 SPD の有無の 2 パターンについて解析を実施したのは、近年の屋内低電圧配電システムにおいても分電盤 SPD が敷設されていない場合も想定されるためである⁽¹¹⁾。

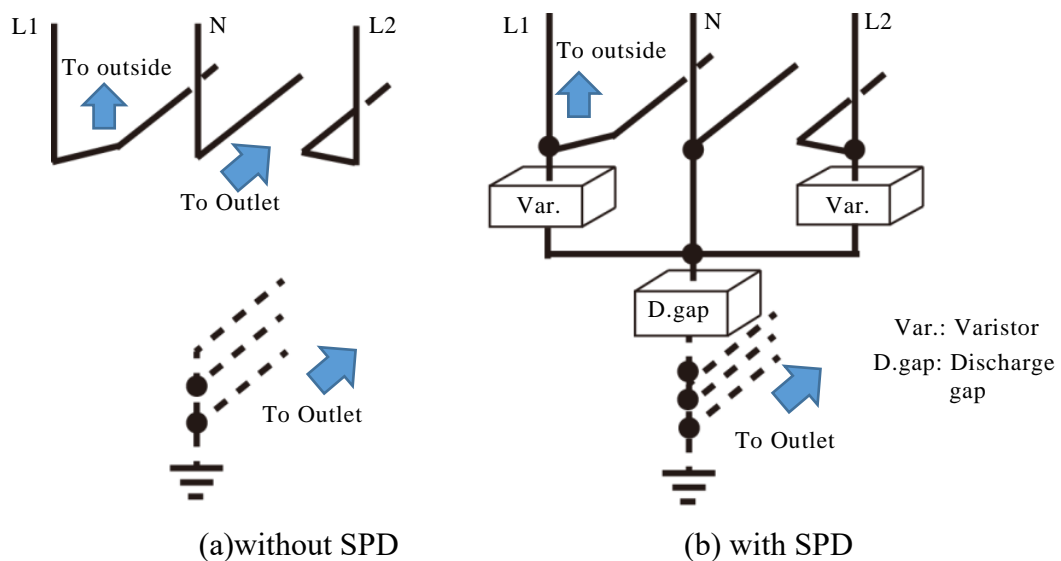


Fig. 5.3 Distribution board model⁽⁸⁾

図 5.4 に、分電盤にて配電線間に接続されているバリスタ、および配線と大地間に接続された放電ギャップの特性を示す。バリスタおよび放電ギャップは VSTL rev 内の集中定数素子避雷器モデルおよびアークホーンフラッシュオーバーモデルでそれぞれ模擬した。図 5.4(a)に示すように、バリスタは制限電圧 $V_{THV}(270\text{V})$ を上回る電圧が印加されると、制限電圧を保ちながら電流値が急激に上昇するモデルで模擬した。配電線と接地線間に接続された放電ギャップは、図 5.4(b)に示すように、印加電圧がアークホーンフラッシュオーバーモデルのリーダ進展開始電圧 V_{THD} 以下の領域ではギャップ間の抵抗値は $1\text{M}\Omega$ である。印加電圧が V_{THD} を超え、ギャップ間が橋絡にいたると、ギャップ間電圧が急激に減少するとともに、ギャップ間抵抗が 0.01Ω となり電流を流し続ける特性としている。

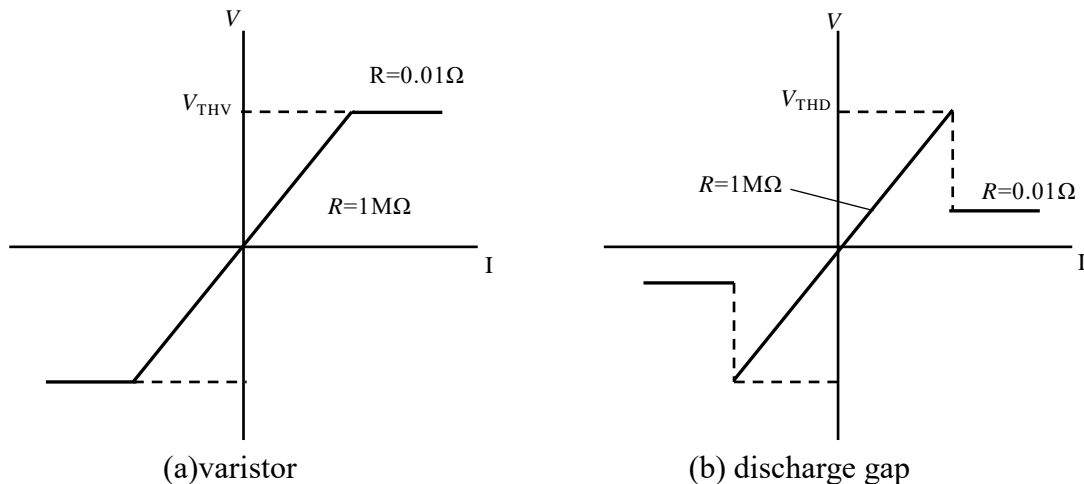


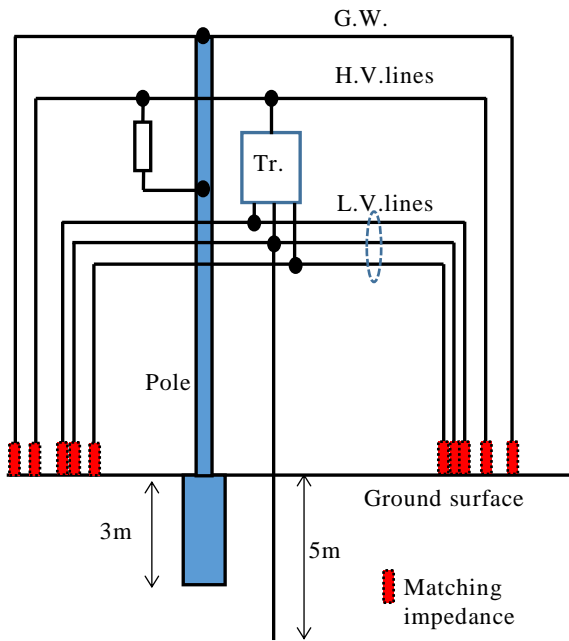
Fig. 5.4 Characteristic of SPD for distribution board⁽⁸⁾⁽¹¹⁾

屋外配電線の解析モデルを図 5.5 に示す。本モデルは文献(9)を参考にした。高電圧配電線は直径 6.4mm, 架空地線は直径 6mm, そして低電圧配電線は直径 5mm の細線導体で模擬している。各配電線端部および架空地線端部で生じる, 不要な反射による解析への影響を避けるため, 図 5.5(a)に示すように, それらの両端は約 420Ω の抵抗でそれぞれ接地することで整合した。抵抗率 100 Ωm の条件では, 直径 6mm, 長さ 165mm の接地電極を, 抵抗率 1000Ωm の条件では直径 6mm, 長さ 2700mm の電極を大地面に埋め込みむことで, 接地抵抗値が約 420Ω となるように電極形状を調整した。

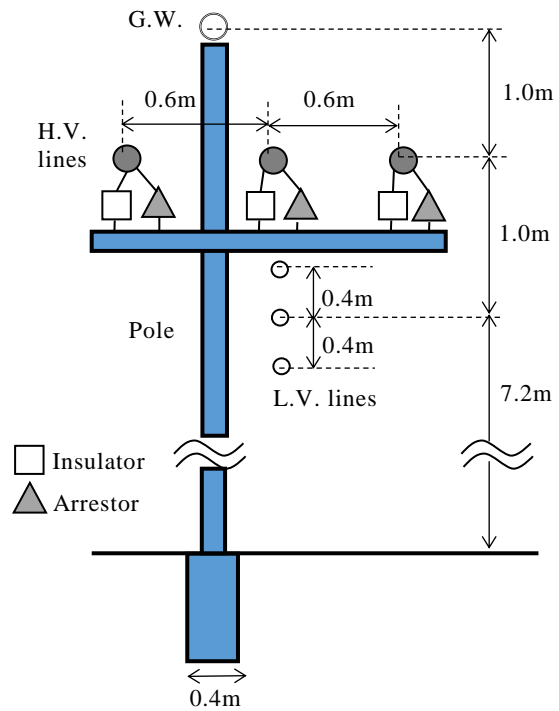
図 5.5(b)に示す電柱については, 直径 5mm 完全導体で模擬し, 架空地線は電柱に直接接続され, 高電圧配電線は支持碍子およびアレスタを介して接続されている。電柱の接地は, 電柱と大地内に敷設された 0.4m×0.4m×3m の直方体完全導体とを大地面にて接続することで模擬した。高電圧配電線と電柱との間に, アレスタを模擬した避雷器モデル(図 5.5(b)中 Arrester)と碍子を模擬した 2MΩ の集中定数抵抗を並列に接続している。高電圧配電線—電柱間のアレスタの特性は, 図 5.4(a)のバリスタと同様のタイプで模擬し, その制限電圧値を 40kV としている。低電圧配電線の N 線を中性線とし, 直径 5mm の接地線を介して, 接地電極(直径 20mm, 深さ 5m)と接続されている。

図 5.5(c)に, 柱上変圧器モデルを示す。柱上変圧器は, サージ領域での静電移行を考慮し, π型モデルを組み合わせた。また, 浮遊静電容量は集中定数で模擬している。キャパシタンス C1 は高電圧巻線間, C2 は低電圧巻線間, C3 は低電圧巻線—高電圧巻線間の浮遊静電容量をそれぞれ示し, その値は全て 5.0pF としている。

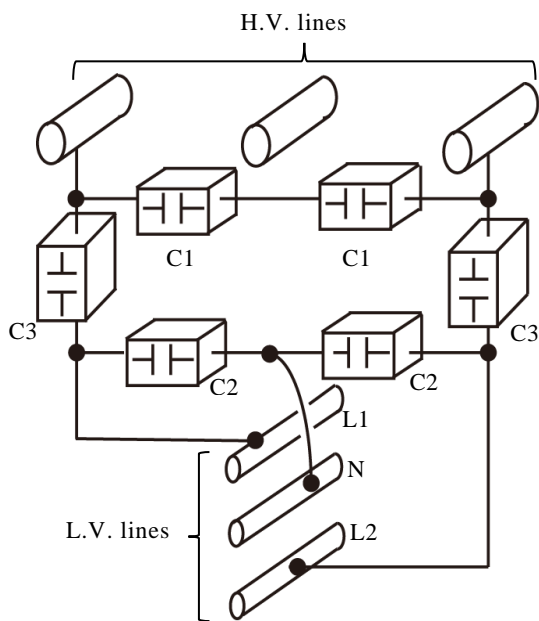
図 5.5(d)に, 家屋と落雷点, および屋外配線との位置関係を示す。落雷点は, 家屋から X 方向に 30m 離れた位置に設けた。また, 同図中▲印は各屋外配電線の整合位置, ●はコンクリート柱の位置, ■は落雷点の位置をそれぞれ示している。



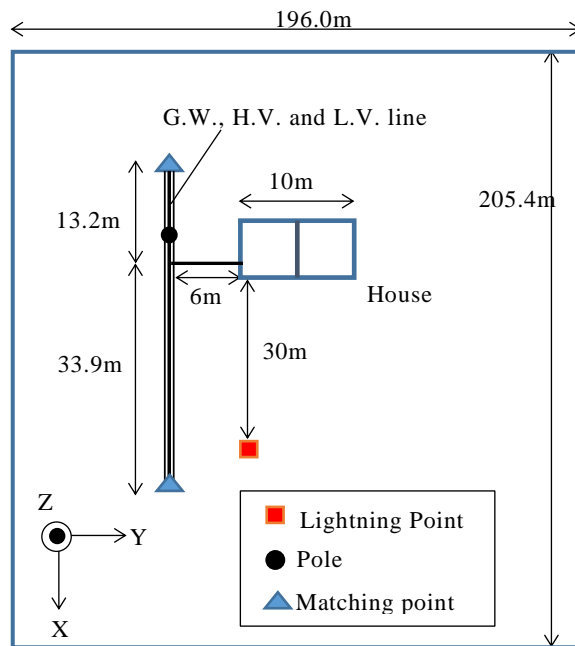
(a) outdoor line arrangement



(b) vicinity of concrete pole



(c) transformer model



(d) relationship among structure's positions

Fig. 5.5 Outdoor distribution line model

本解析の趣旨は、建物近傍大地への落雷により、その落雷点周辺の低電圧配電系統に生じる誘導雷現象を解析および調査することである。そのため雷撃の模擬としては、落雷過程において誘導現象が最も厳しいとされているリターンストロークの過程としている。通常、雷電流波形は数 μs で最大値まで立ち上がり、数十 μs かけて最大値の半分まで減少するような雷インパルス波形で定義される。しかし、一度の雷放電にて放電が複数回発生する場合（後続雷）が多く、後続雷においては数 μs に比べ、さらに早い立ち上がり時間を有する電流

も観測されている。誘導現象が、最も厳しくなるのは電流変化率の大きい立ち上がり部分であると考え、その部分を重点的に解析している。解析における雷電流波形を図 5.6 に示す。雷電流波形を $I(t)=I_{max}(1-\exp(-t/\tau))$ なる波形で与え、 I_{max} は 10000A とした。波頭長に比べて、波尾長は非常に長いと考え、雷電流の立ち上がり以降は一定値となるような波形とした。また、同図に示すように、雷電流波形の波高値が 10%と 90%を通る直線を描き、同直線の 0%(規約原点)から 100%に達するまでの時間を立ち上がり時間 T_f としている。IEC および JIS で推奨されている後続雷タイプの LEMP (Lightning Electro-Magnetic Pulse) の立ち上がり時間は $0.1\mu\text{s}$ とされている。 T_f が $0.1\mu\text{s}$ となるためには、直線の電流変化率 $di/dt(=I_{max}[\text{A}]/0.1\mu\text{s})$ と雷電流波形における 10%値($I_{10\%}$)から 90%値($I_{90\%}$)の平均電流変化率とを一致させる必要がある。その条件より、時定数 τ は式(5.2)により決定される。

$$\frac{di}{dt} = \frac{(I_{90\%} - I_{10\%})}{(t_{90\%} - t_{10\%})} = \frac{0.9I_{MAX} - 0.1I_{MAX}}{\tau(-\ln 0.1 + \ln 0.9)} = \frac{I_{MAX}[\text{A}]}{0.1[\mu\text{s}]} \quad (5.2)$$

時定数 τ を $0.0348\mu\text{s}$ と決定し、解析時間は $0.6\mu\text{s}$ とした。解析では、大地表面に落雷が生じた際の雷撃点近傍の家屋内配線に発生する誘導現象を取り扱うため、雷電流源を大地表面に接続し、雷放電は雲と大地表面間で発生しているものとしている。雷放電路として、VSTL rev 内の雷道モデル(TL モデル)を採用し、雷電流は大地面から、大地面に対して垂直方向に、 $100\text{m}/\mu\text{s}$ の速度で雷道上を伝搬するように設定した。

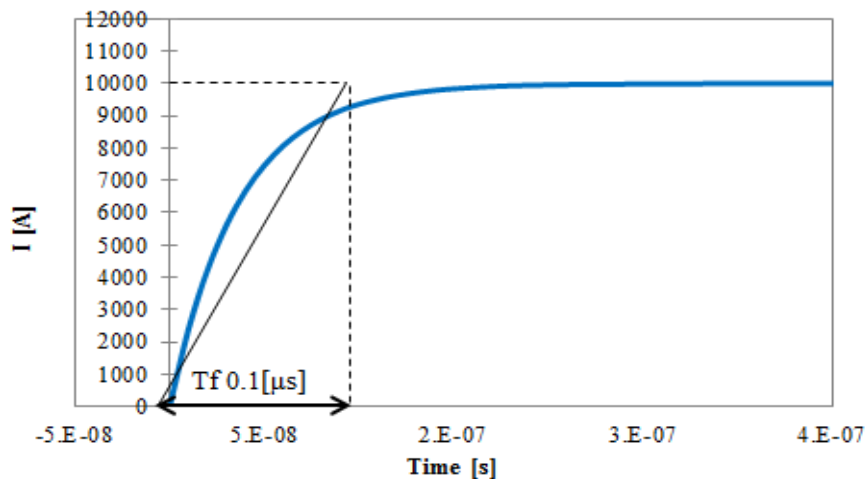
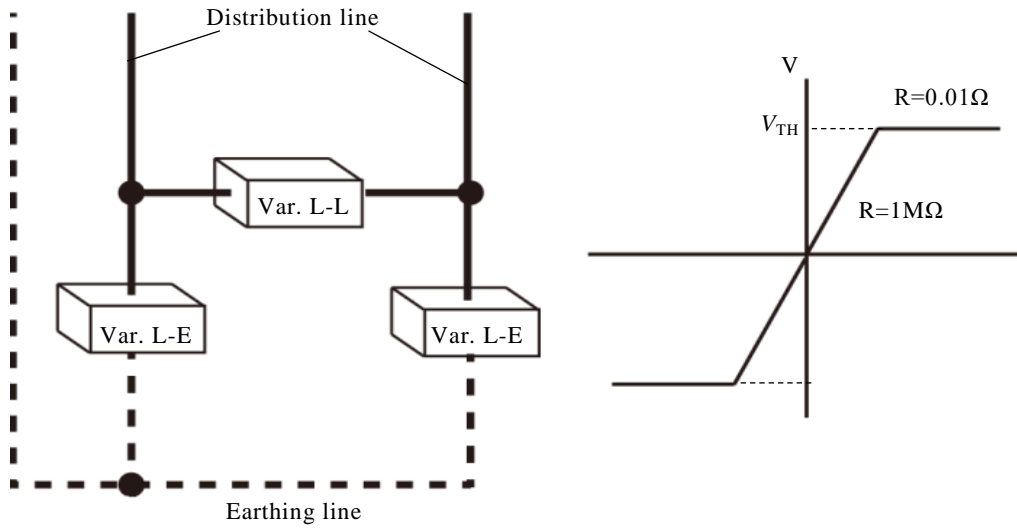


Fig. 5.6 Lightning current waveform

屋内配線に接続される電気機器に敷設する SPD モデルを図 5.7 に示す。図 5.7(a)に示すように、100V のコンセントについては、線間に制限電圧(V_{TH})270V のバリスタ、配線—接地線間には V_{TH} が 1800V のバリスタを接続することで模擬している。200V コンセントについては、線間に V_{TH} が 470V のバリスタ、配線—接地線間には V_{TH} が 1800V のバリスタを接続することで模擬している⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。同図(b)は電気機器に用いたバリスタの特性を示しており、印加電圧が V_{TH} 以下の領域までは $1\text{M}\Omega$ の抵抗値、 V_{TH} を超える領域では 0.01Ω の抵抗値となるような特性で模擬した。

Var.L-L: Varistor for line to line
 Var.L-E: Varistor for line to earthing line



(a)SPD circuit at each outlet (b) varistor's characteristic
 Fig. 5.7 SPD model for electrical device⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾

VSTL rev では、大地のパラメータとして任意の抵抗率および比誘電率を与えることが可能である。一般的に、大地の抵抗率は計算上 $100\Omega\text{m}$ が採用される⁽¹³⁾。今回、大地の条件として、大地抵抗率を完全導体とした条件である $1\times 10^{-10}\Omega\text{m}$ 、一般値 $100\Omega\text{m}$ 、さらに湿潤状態の砂や砂礫などを模擬するための $1000\Omega\text{m}$ 、大地の比誘電率は 10 一定とし、各状況下におけるサージ現象の比較を行った⁽¹⁴⁾。加えて SPD の有無をパラメータとし、サージ現象への作用について検討した。

5.3 解析結果

5.3.1 SPD 非敷設時におけるサージ現象

分電盤およびコンセント(電気機器)のいずれにも SPD を敷設しない条件にて, 誘導雷により発生する過電圧について解析した。図 5.8, 5.9 そして 5.10 に各コンセントの対地間に発生した電圧波形を示す。

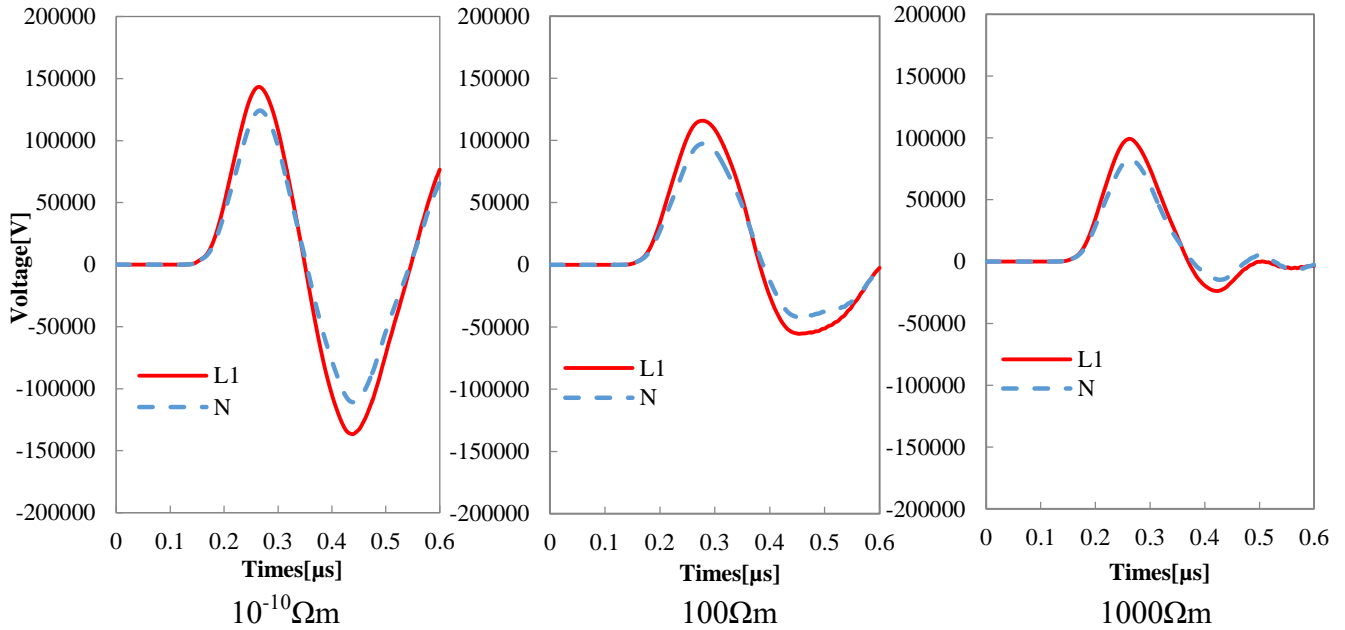


Fig. 5.8 Voltage between line and earth line at outlet “a”

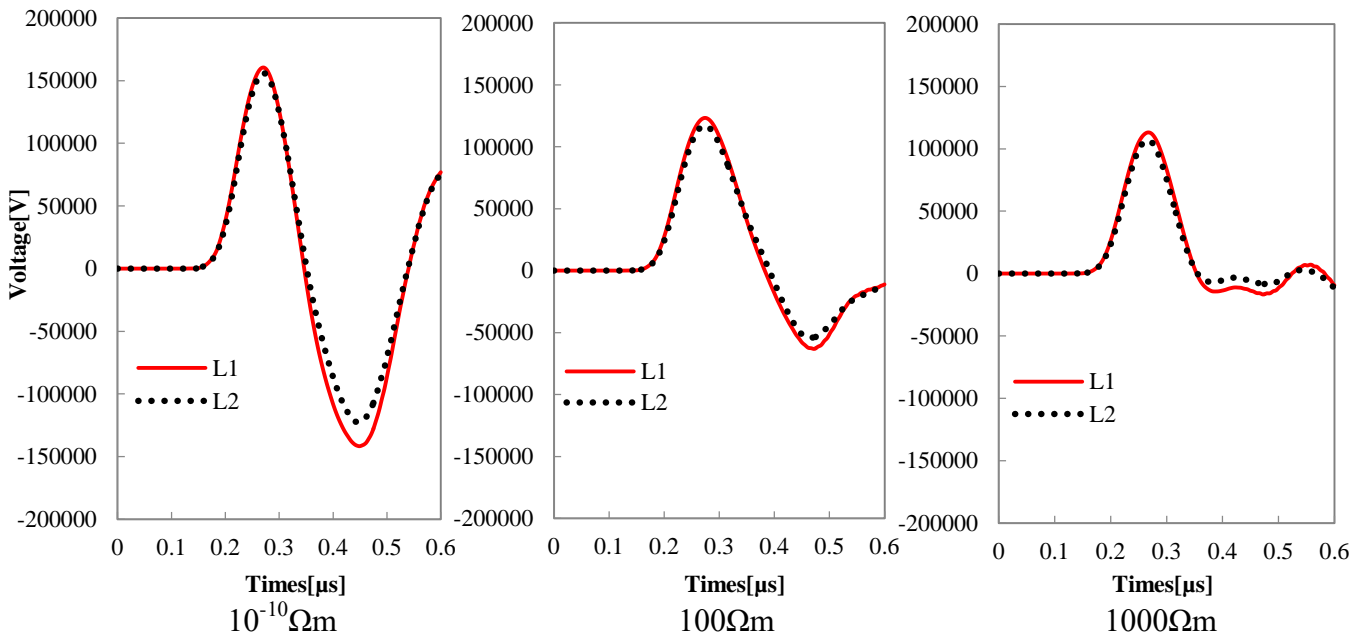


Fig. 5.9 Voltage between line and earth line at outlet “b”

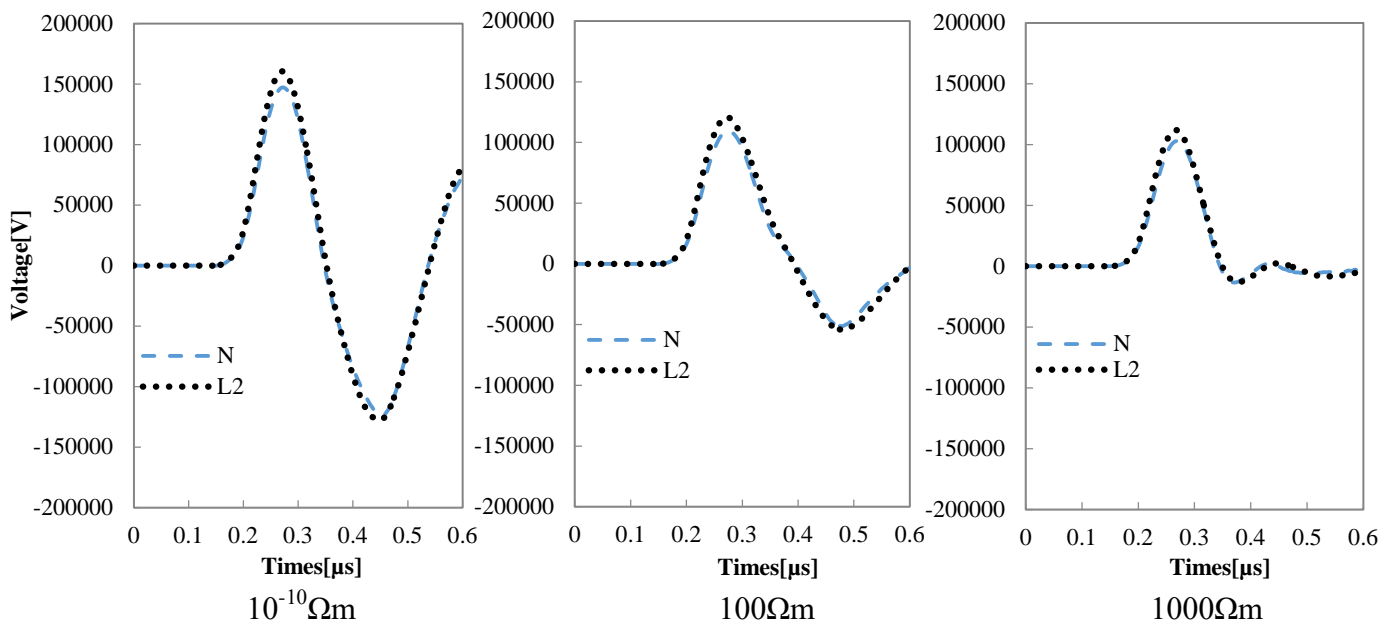


Fig. 5.10 Voltage between line and earth line at outlet “c”

各コンセントにおける対地間電圧波形は、大地抵抗率 $1 \times 10^{-10} \Omega\text{m}$ の条件では振動性の波形であるが、抵抗率の上昇に伴い、減衰性の振動は波形になっていることが分かる。サージ電圧は解析開始時刻($0 \mu\text{s}$)から遅れて約 $0.132 \mu\text{s}$ 後に発生している。光速と遅れ時間約 $0.132 \mu\text{s}$ より求まる伝搬距離は 39.6m であるが、これは落雷点から家屋までの距離と分電盤からコンセント a までの距離との合計にほぼ一致する。

このサージ電圧は、雷電流の立ち上がり部分(立ち上がり時間 $0.1 \mu\text{s}$)により誘導されたパルスである。各電気配線や接地線に誘導されたサージ電圧は、コンセントにおいて正反射され、分電盤や電柱接地点にて負反射される。 $1 \times 10^{-10} \Omega\text{m}$ の条件では、接地抵抗はほぼ 0 であるため、電圧反射率は -1 である。したがって、初めに到来したパルスとは逆極性、同程度の電圧がコンセントに再度伝搬するというような工程を繰り返すため、結果として振動性の波形になっている。大地の抵抗率が存在する条件では、接地抵抗が存在するため、波形は減衰を伴う振動性の波形になっている。

表 5.2 に、各大地抵抗率において、各コンセントに発生した対地間電圧の最大値を示す。最大で、 $1 \times 10^{-10} \Omega\text{m}$ において 161000V 、 $100 \Omega\text{m}$ では 127000V 、 $1000 \Omega\text{m}$ では 108000V の電圧が発生した。屋外変圧器にて、接地部を有する配線 N(中性点)では、いずれの大地抵抗率においても、発生する対地間電圧は、引き込み部から遠ざかるほど増大する傾向にあることが分かる。

また、大地抵抗率が増加するに従い、発生する過電圧は減少する傾向となった。道下・石井らは大地と水平に張られた線路上から数 100m 離れた雷撃による線路への誘導電圧について検討している⁽¹⁵⁾。文献(15)では、線路の片端は整合され、もう一端を開放した際の開放端におけるサージ電圧を計算している。そこでは、条件によっては大地の抵抗率が上昇するにつれ、また落雷点と線路との距離が近くなるほど誘導電位が減少するという計算結果が得られている。また、Goni らは、大地抵抗率の増加に伴い、誘導電圧が減少することを示している⁽¹⁶⁾。これらの検討結果から、大地抵抗率の増加とともに、誘導電圧が減少したこと

は妥当な結果であることがわかる。この結果は、大地抵抗率が高いほど抑制効果があるという事を示しているのではなく、いずれの抵抗率においても、表 5.2 に示した過電圧が発生する可能性があるという事を示している。

Table 5.2 Surge voltage between line and earth line at each outlet without SPD

Resistivity of ground [Ωm]	Voltage between line to earth line					
	outlet a		outlet b		outlet c	
	L1	N	L1	L2	N	L2
1×10^{-10}	143000	124000	160000	156000	147000	161000
100	116000	97400	127000	121000	113000	125000
1000	100000	83100	108000	99400	94000	102000

図 5.11 に、各大地抵抗率において、各コンセントの電気配線間に発生した過電圧波形を示す。通常、100V(200V)電気機器においては、その線間に制限電圧 270V から 670V 程度のバリスタが用いられるが、その値の 10 倍から数 10 倍以上の過電圧が発生しており、本解析結果から、対地間電圧と同様に、サージ対策なしには、例え誘導雷であっても機器を破壊するような過電圧が発生することが分かる。

いずれの大地抵抗率においても、落雷点に最も近いコンセント a にて最大過電圧が発生している。対地間電圧と同様に、大地抵抗率の上昇に伴い、振動性の波形から減衰性の振動波形に変化していくことが分かる。

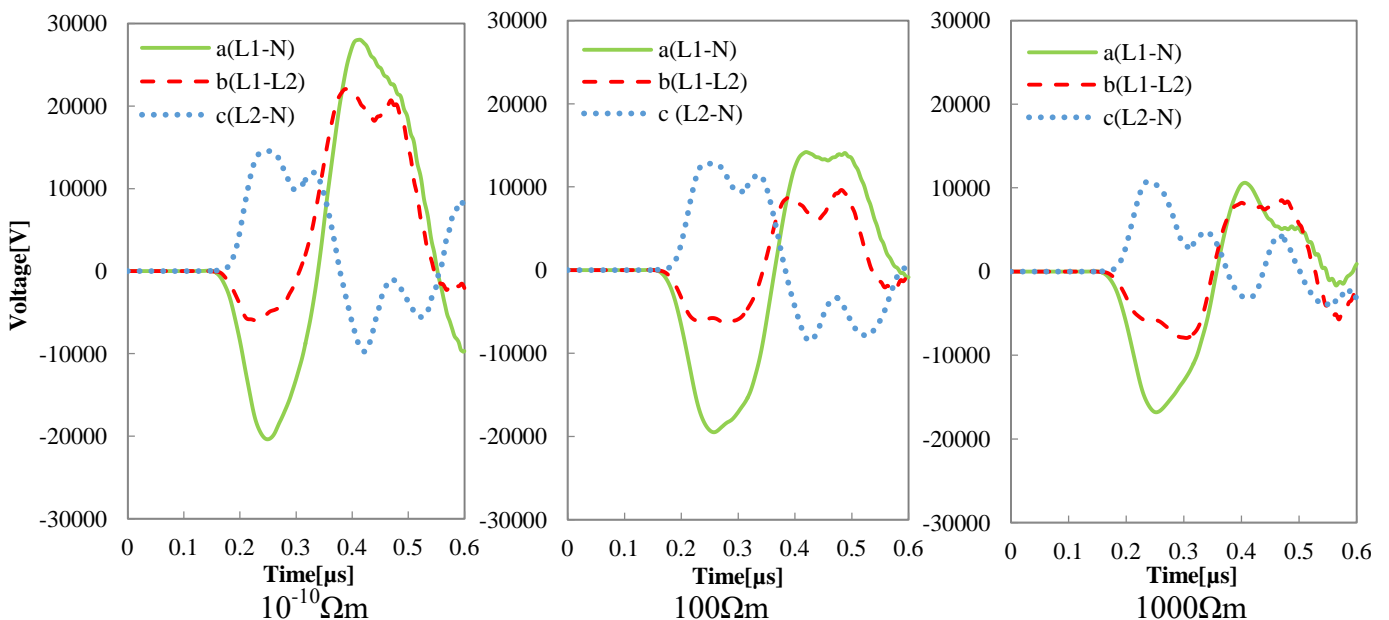


Fig. 5.11 Voltage between lines

表 5.3 に各大地抵抗率において発生した過電圧の最大値を示す。 $1 \times 10^{-10} \Omega\text{m}$ において線間に 28000V, $100 \Omega\text{m}$ では 19500V, $1000 \Omega\text{m}$ では 17200V の過電圧が発生し、抵抗率

の増加に伴い、過電圧値は減少していく傾向である。対地間電圧と同様に、いずれの抵抗率においても、表 5.3 に示した過電圧が発生する可能性があるという事を示している。

Table 5.3 Surge voltage between lines at each outlet without SPD

Resistivity of ground [Ωm]	Voltage between lines		
	outlet a(L1-N)	outlet b(L1-L2)	outlet c(L2-N)
1×10^{-10}	28000	22100	14500
100	19500	9630	12800
1000	17200	8680	11300

対地間サージ電圧および線間サージ電圧の値は、SPD で防護されるべき電圧値を超え、瞬間的な電圧とはいえ非常に高い値を示した。したがって、建物近傍への雷撃による誘導雷であっても、雷電磁波防護ゾーン LPZ1 を満たすだけでは不十分であり、SPD などの防護機器による対策が必要であることを示している。

5.3.2 分電盤 SPD 敷設時におけるサージ現象

一般家屋において施工されるサージ対策として、図 5.3(b)のように、分電盤の位置に SPD を敷設する手法がよく採用されている。近傍雷撃時に発生するサージ電圧の抑制効果を確認するため、分電盤の位置に SPD を敷設した状態での解析を実施した。図 5.12 から図 5.14 に各コンセントにおける対地間電圧を示す。

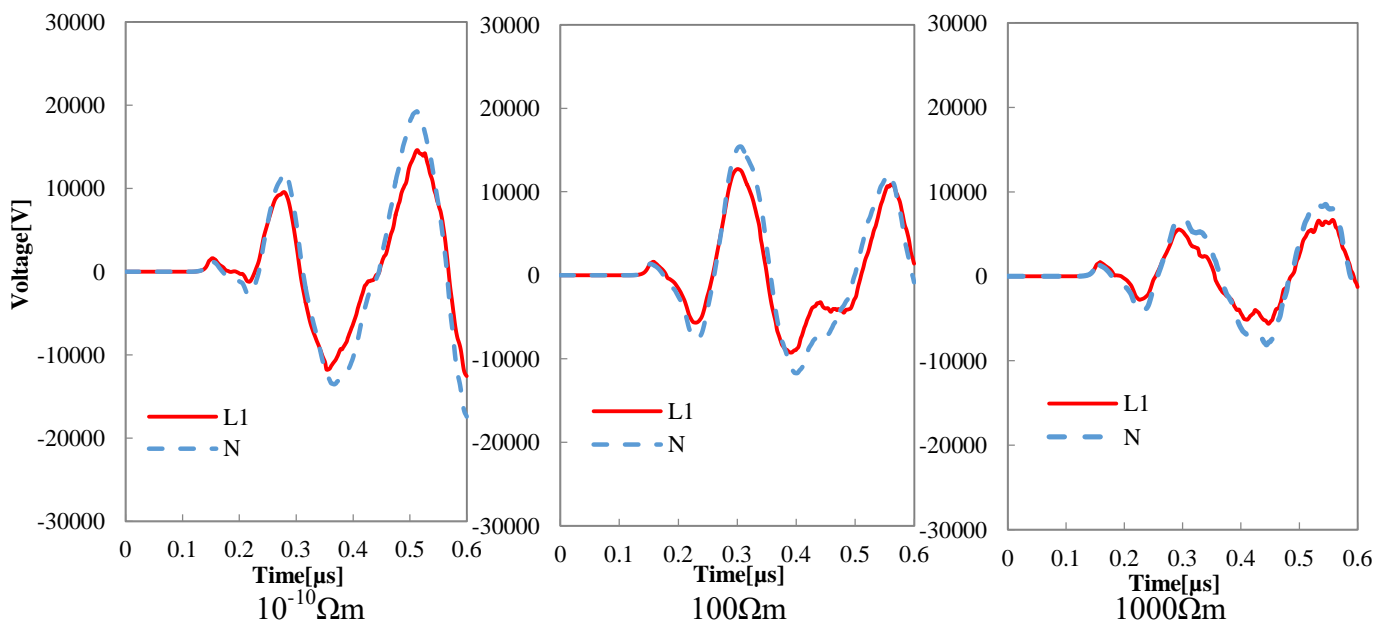


Fig. 5.12 Voltage between line and earth line at outlet “a”

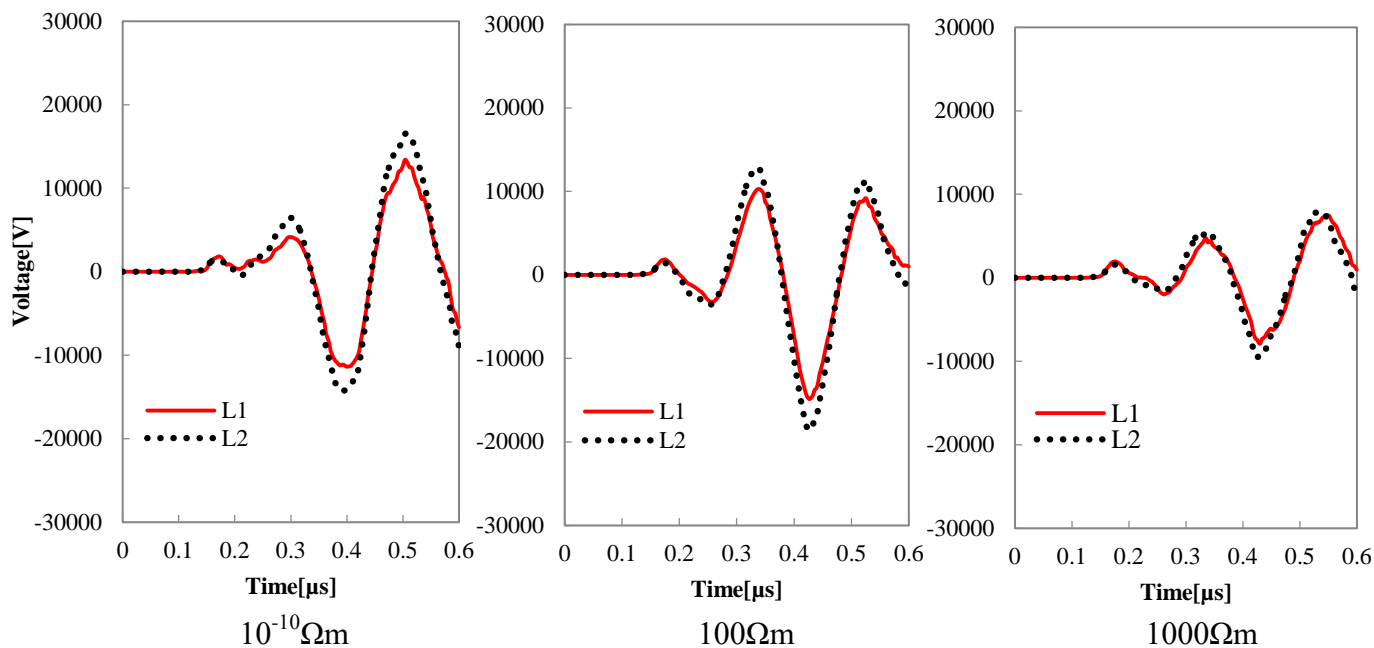


Fig. 5.13 Voltage between line and earth line at outlet “b”

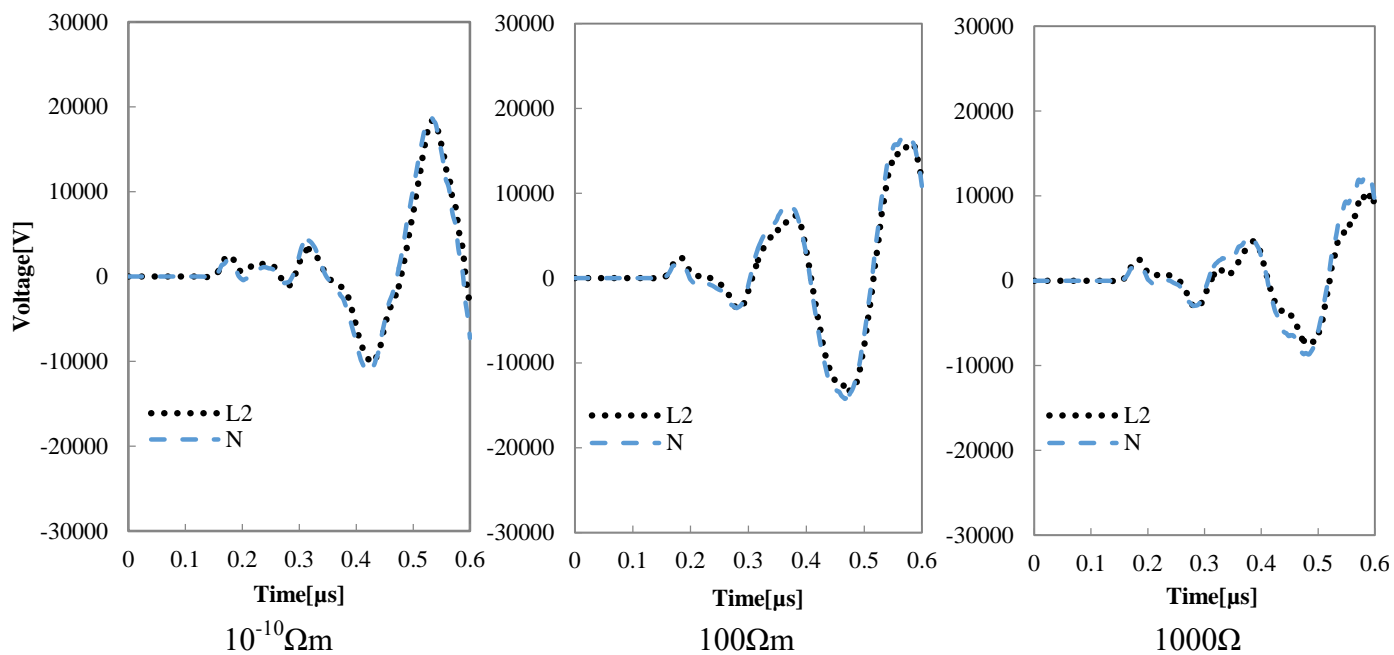


Fig. 5.14 Voltage between line and earth line at outlet “c”

SPD 非敷設条件の波形と比べると、対地間電圧波形の振動周期が短くなっていることが分かる。これは、分電盤 SPD が動作することにより、SPD の位置にて屋内電気配線が接地される状態となるためである⁽⁹⁾。

表 5.4 に、各コンセントに生じた対地間電圧の最大値を示す。対地間には $1 \times 10^{-10} \Omega m$ の条件では最大 19300V、100 Ωm の条件では 18600V、1000 Ωm の条件では最大 10400V の

電圧が発生した。傾向としては SPD 非敷設条件と同様に、大地の抵抗率の上昇に伴って、サージ電圧は減少した。

Table 5.4 Surge voltage between line and earth line at each outlet with SPD

Resistivity of ground [Ωm]	Voltage between line to earth line [V]					
	outlet a		outlet b		outlet c	
	L1	N	L1	L2	N	L2
1×10^{-10}	14600	19300	13400	16600	18700	18400
100	12700	15400	14900	18600	16800	15900
1000	6680	8510	7900	9540	12300	10400

図 5.15 に線間に生じたサージ電圧波形, 表 5.5 には各コンセントに発生したサージ電圧の最大値をまとめた。発生した過電圧は SPD 非敷設に比べ, 1/4 に減少しており, SPD によるサージ低減効果が確認できる。また, 非敷設時の条件に比べ電圧の振動周期が短くなっているのは, 対地間電圧と同様に SPD の位置で短絡された状態になるため, コンセントから見た反射点までの距離が SPD 非敷設条件に比べ短くなったためである。 $1 \times 10^{-10} \Omega\text{m}$ の条件では最大で 5540V, $100 \Omega\text{m}$ の条件では 4410V, $1000 \Omega\text{m}$ の条件では 3180V の過電圧が発生した。

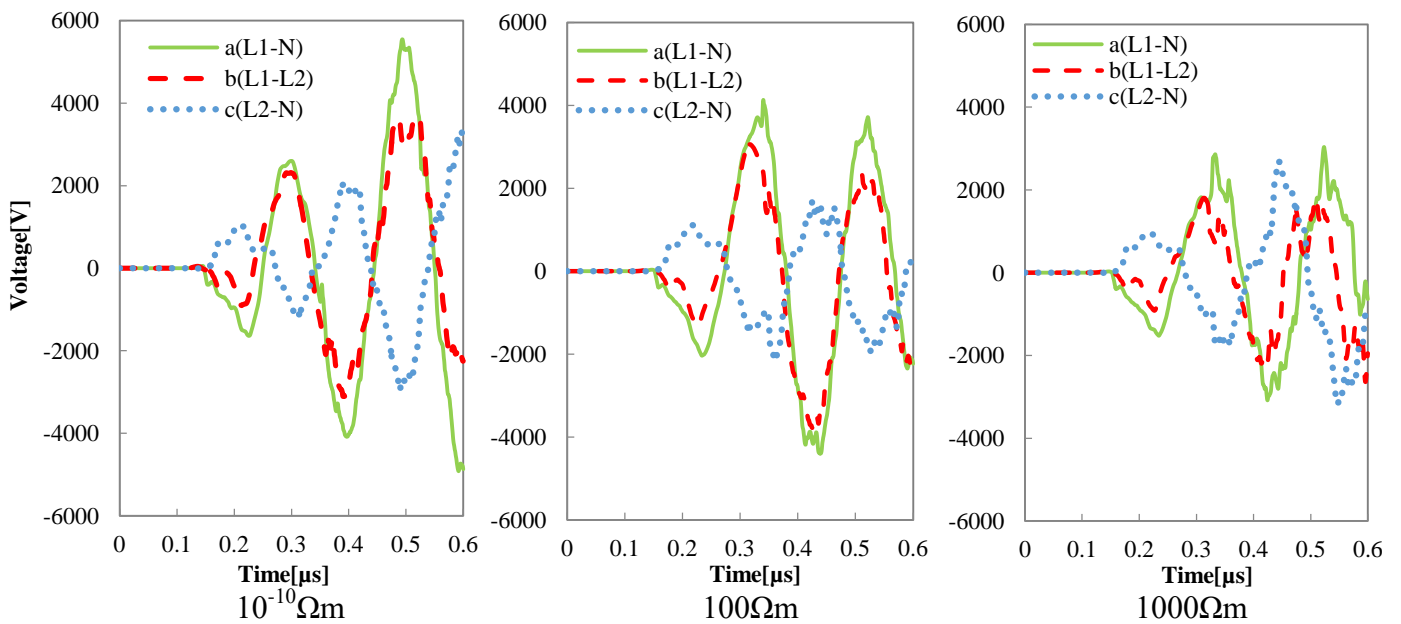


Fig. 5.15 Voltage between lines

Table 5.5 Surge voltage between lines at each outlet with SPD

Resistivity of ground [Ωm]	Voltage between lines [V]		
	outlet a(L1-N)	outlet b(L1-L2)	outlet c(L2-N)
1×10^{-10}	5540	3620	3370
100	4410	3800	2170
1000	3040	2640	3180

図 5.16(a)から(c)に、各大地抵抗率における SPD 周辺の電流波形を、(d)に電流測定点 5 箇所を示す。解析開始からサージ電流発生までの時間差は全条件において等しいため、電流波形は $0.1\mu\text{s}$ 時点から表示している。いずれの抵抗率においても、各バリスタに流れ込む電流値の合計(Fig.10(d)中のプローブ 1,3)がギャップに流れ込む電流値(図 5.16(d)中プローブ 4)に等しい。 $1\times 10^{-10}\Omega\text{m}$ の条件ではギャップに流れ込む電流が、接地線(図 5.14(d)中のプローブ 5)に流れ込んでいることに対し、 $100\Omega\text{m}$ や $1000\Omega\text{m}$ の大地抵抗率ではその一部が流れ込んでいる。関岡らの検討(17)では、大地の電位上昇は、雷電流の立ち上がりに対応して正に増加し、立ち上がり以降は減少して負極性に転じるというような結果が得られている。加えて大地の抵抗率が増加すると、雷電流の大地への流れ込みにより発生する大地電位上昇の影響が顕著に現れるという結果も得られている。大地抵抗率の増加に伴い、接地線に流れる電流値が増加したのは、筆者らの解析では二種類の大地抵抗率において接地線の接地抵抗値 550Ω を採用していることと関岡らの検討で提唱されている大地電位が変化する現象によるものと考えられる。

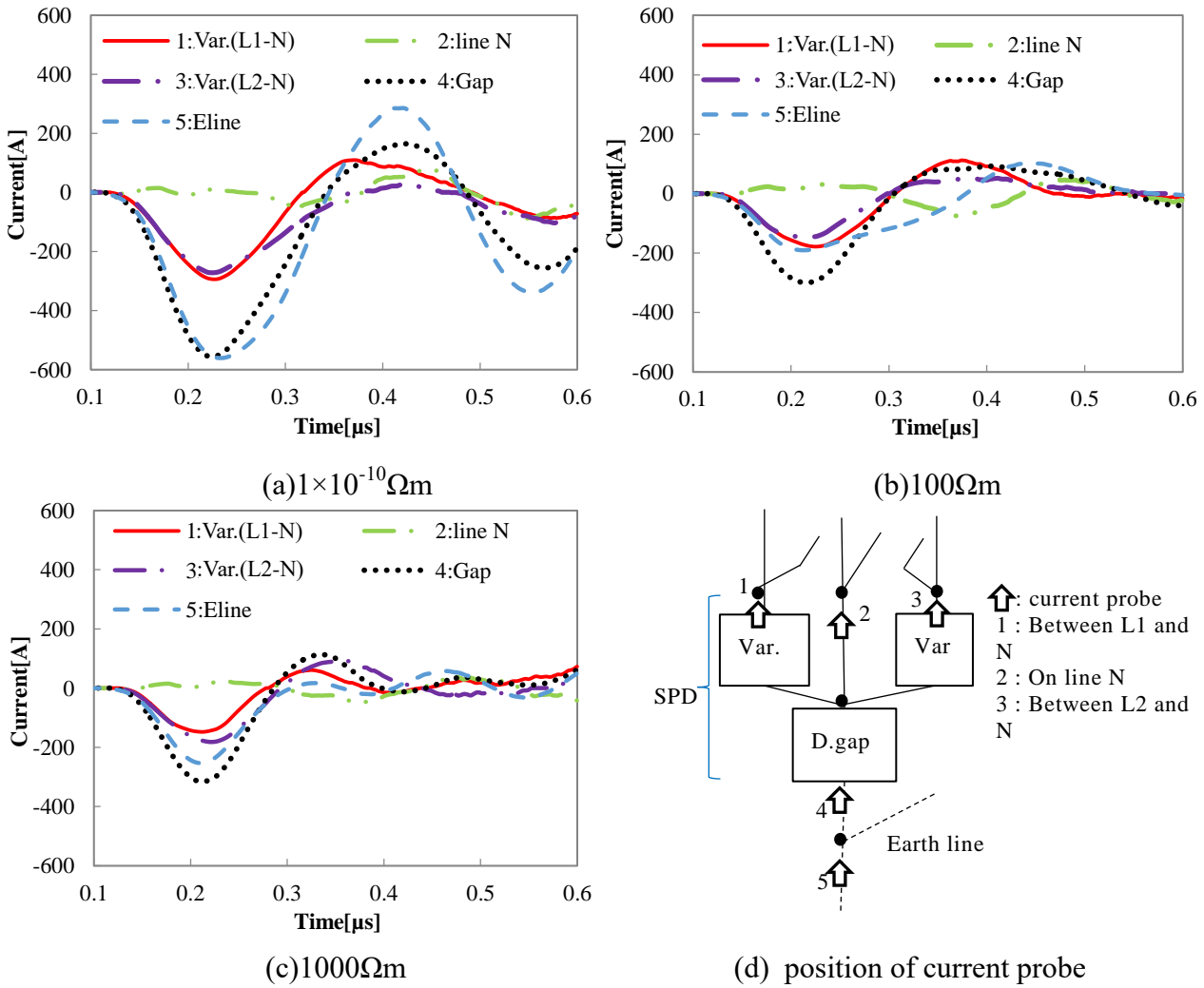


Fig. 5.16 Current wave form and position of current probes

図 5.17(a)は、屋外低電圧配線 L2 と分電盤 SPD 内バリスタの L2 から N へ流れ込む電流および分電盤接地線の電流波形の立ち上がり部を、図 5.17 (b)は同図(a)に示されているプローブの大まかな位置関係を示している。図 5.17(b)において、番号が 1 から 4 と大きくなるに従い、分電盤に近づいていくことを示している。サージの到達時間を比較すると、屋外配線を引き込む線の雷道に最も近い位置から順番に立ち上がっていることから、サージ電流は屋外低電圧線から屋内の低電圧線に向かう方向に伝播しているといえる。分電盤近傍において、接地線電流のほうがバリスタに流れる電流に比べて早く立ち上がっている。これは、バリスタ電圧が動作開始電圧まで上昇し、動作するまでの間は、N 線から電流が接地線に流れ込むためである。

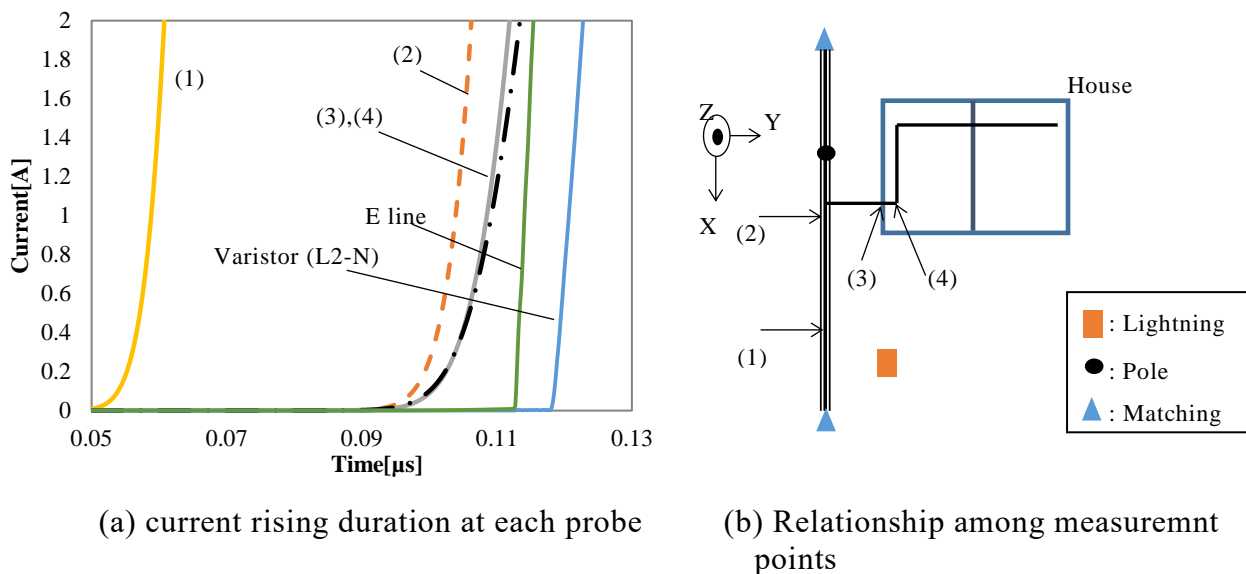


Fig. 5.17 Current reaching delay time among each point

5.3.3 分電盤用および電気機器用 SPD 敷設時におけるサージの変化

図 5.18 は、各大地抵抗率においてコンセント a に発生した対地間電圧を、図 5.19 は各大地抵抗率において各コンセントに発生した線間電圧を示している。図 5.18 中には、コンセント a の結果のみを示しているが、分電盤および電気機器側に SPD を敷設している条件では、各コンセントの対地間電圧はバリスタ制限電圧以下の 1800V に抑制された。線間電圧に関しては、コンセント a では 270V、コンセント b では 470V に抑制された。

図 5.20(a)は、コンセント側にも SPD を敷設した条件における、分電盤周辺の電流波形、(b)は分電盤のみに SPD を敷設した条件における分電盤周辺の電流波形、(c)は電流プローブの位置関係を示している。分電盤 SPD 周辺の電流については、 $1 \times 10^{-10} \Omega m$ の条件のみ載せている。分電盤のみに SPD を敷設した条件と、負荷側にも敷設した条件との間には、電流波形に若干の変化はあるものの、波高値や電流の伝搬方向はほぼ一致している。電流波形の変化は、コンセント側に敷設した SPD が動作することで、分電盤からコンセントの間に新たなループが形成され、電流がコンセント側へも分流することにより生じたと考えられる。

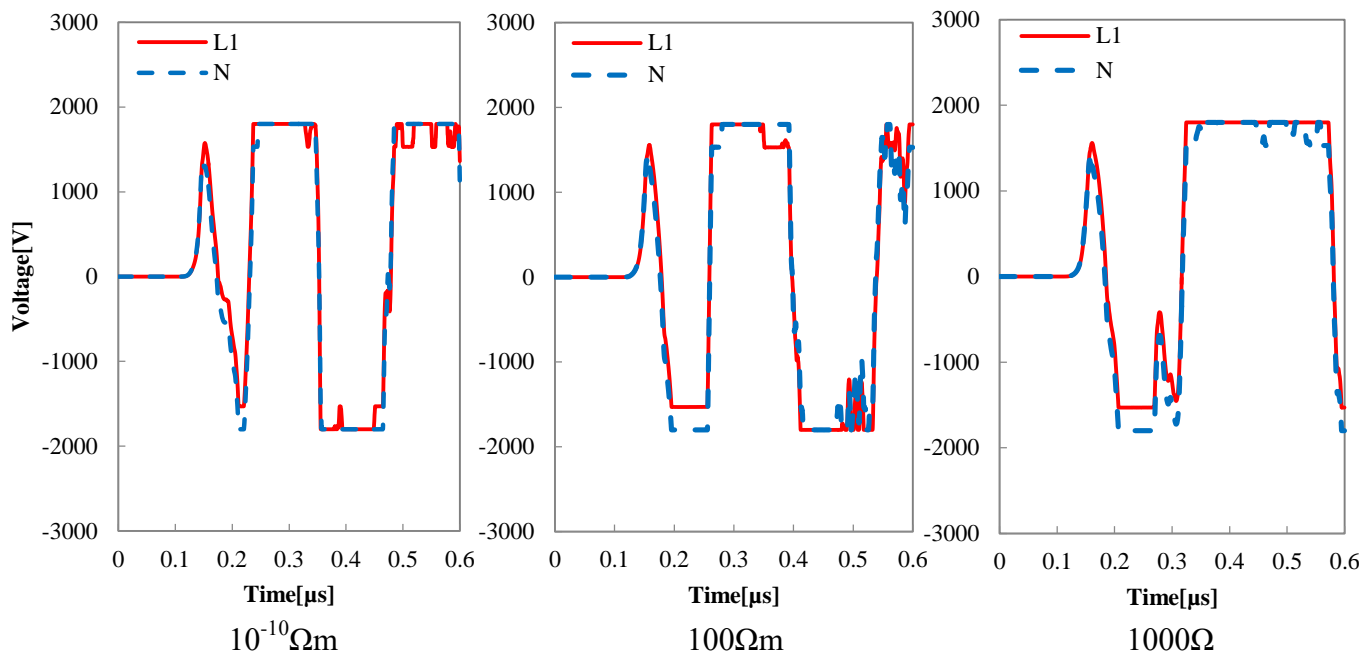


Fig. 5.18 Voltage between line and earth line at outlet “a”

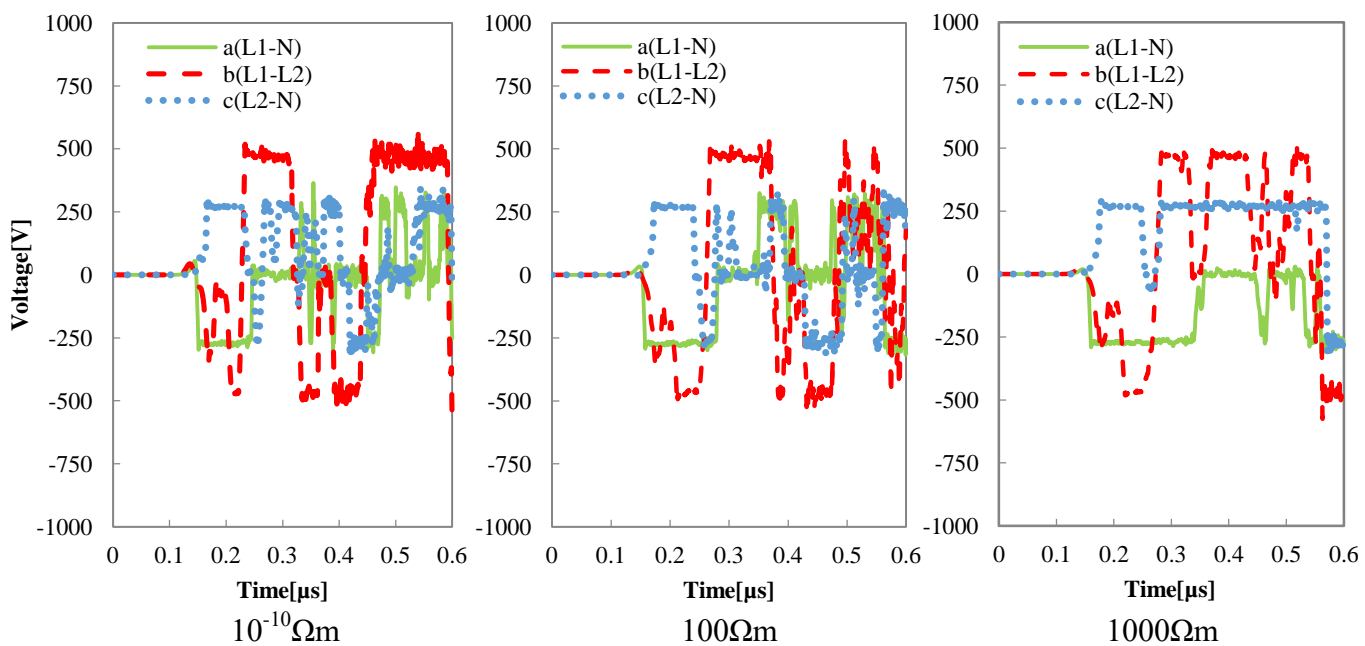


Fig. 5.19 Voltage between lines

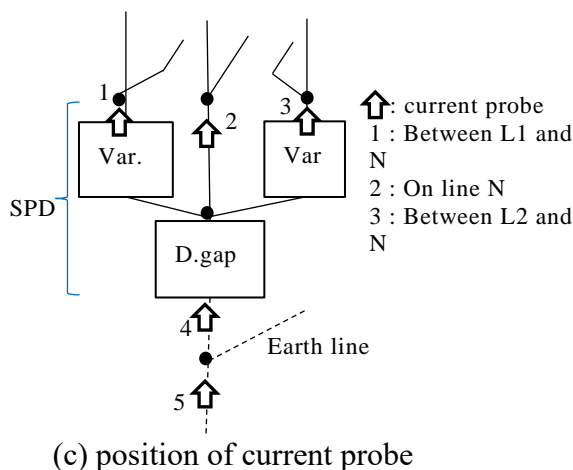
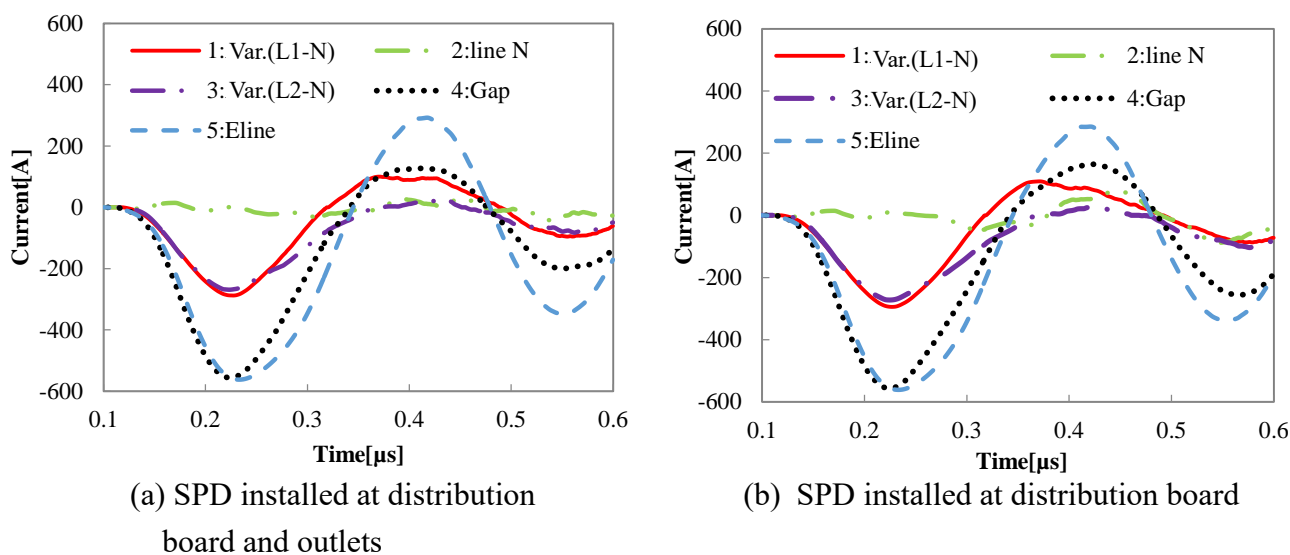


Fig. 5.20 Current wave form and position of current probe
(resistivity of ground: $1 \times 10^{-10} \Omega m$)

5.4 まとめ

本章では建物近傍大地への落雷時に、落雷点周囲の家屋内の電気配線(単相三線式)に発生する誘導雷サージ現象について、大地の抵抗率を 1×10^{-10} , 100, 1000 Ωm とした条件および SPD の有無をパラメータとし、VSTL rev を用いた解析を実施した。誘導雷による電気機器への脅威は、特にその過電圧が問題になるとされている。本解析では、近傍雷撃時には、落雷点から発生した電磁波が、空間ならびに電気配線を伝搬し、負荷へ到達することで、過電圧が発生することを示した。大地の抵抗率の変化によるサージ現象の変化が、文献(15)にて行われた実験結果と似た特徴が見られたこと、サージの測定地点への到達時間から考えられる伝搬時間の差や、SPD によるサージ現象の変化は合理的なデータであることが示された。本解析結果は、誘導雷サージであっても、SPD の敷設無しにはいかなる大地抵抗率においても、電気機器を破壊するレベルの過電圧が発生することを示した。また、分電盤のみに SPD を敷設した条件では、発生するサージ過電圧を減少させることはできたも

のの、完全に抑制できるとは言い難い。機器側にも SPD を敷設した条件では、当然ながらコンセントに発生する過電圧は SPD の制限電圧に抑制された。このとき、サージ電流は分電盤側の SPD に流れ込むことから、サージェネルギーのほとんどは分電盤側で処理されているといえる。機器側への SPD 敷設は、分電盤のみへの SPD 敷設条件時に発生した過電圧を処理し、誘導雷サージ過電圧の抑制になることを示した。したがって、分電盤のみならず、機器側にも SPD を敷設することが、誘導雷サージ電圧の抑制になるといえる。

第5章 参考文献

- (1) 「電気・電子機器の雷保護」電気設備学会, (2011)
- (2) 細川 武・横山 茂・横田 勤:「家屋内侵入雷サージによる被害様相の考察」, 電学論 B, Vol.125, No.2, pp221-226 (2005)
- (3) 大城 諒士・伊佐 真史・金子 英治:「近傍雷撃による周辺低圧系統への誘導サージ解析」, 電学論 B, Vol.130, No.7, pp.687-693(2010)
- (4) 宇野 亨:「FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析」, コロナ社, (1998)
- (5) サージ現象に関する数値電磁界解析手法調査委員会:「数値過渡電磁界解析手法」, 電気学会(2008)
- (6) 野田 琢・横山 茂:「FDTD 法に基づくサージコードの開発」, 電学論 B, Vol.121, No.5,pp.625-632 (2001)
- (7) 立松 昭芳・野田 琢・横山 茂:「FDTD 法による配電線誘導雷電圧計算手法の開発」, 電中研報告書, No.H04009 (2005)
- (8) 野田 琢・松原 廣治・横山 茂:「FDTD 法による解析結果を用いた新しい雷サージ計算用鉄塔モデル」, 電中研報告書, No.H04012 (2005)
- (9) 立松 明芳・野田 琢:「FDTD 法を用いたサージ解析における避雷器模擬手法の開発とその配電線誘導雷電圧計算への適用」, 電学論 B, Vol.130, No.3 号, pp373-382(2010)
- (10) 藤井 正視, 山崎 啓吾:「実務者のための接地技術(6)」, 鉄道と電気技術, Vol.16, No.1, pp.69-73
- (11) 饗庭 潔・岡部 成光・宮崎 輝:「侵入雷サージの家屋内線における電圧電流分布」, 電学論 B, Vol.127, No.11 pp.1168-1176 (2007)
- (12) 饗庭 潔・岡部 成光・宮崎 輝:「経路の異なる侵入雷サージによる家庭内電流様相と SPD の効果に関する研究」, 電学論 B, Vol.127, No.5, pp.673-680 (2007)
- (13) www.jeea.or.jp/course/contents/02203, 閲覧日 2015/2/13
- (14) <http://hagibor.co.jp/grounding/index.html>, 閲覧日 2015/2/13
- (15) 道下 幸志・石井 勝・河村 達雄:「大地導電率の配電線誘導雷電圧波形への影響」, Vol.112-B, No.3, pp.245-251(1992)
- (16) Md.Osman Goni, A.Ametani, E.Kaneko:「Effect of Lightning Electromagnetic Pulse on a Nearby Overhead Horizontal Conductor」, IEEJ Trans. PE, Vol.129, No.2, pp347-352(2009)
- (17) S.Sekioka, J.Takami, S. Okabe:”Insulator Voltage on Distribution Line due to Lightning-Induced Voltage and Ground Potential Rise” The Papers of Joint Technical Meeting on “Electrical Discharge”, “Switching and Protecting Engineering” and “High Voltage Engineering”, IEE Japan(IWHV2014), HV-14-139, pp.89-94(2014.8th.Nov.)

第6章 FDTD法による垂直同軸ケーブルにおける サージ解析

6.1 まえがき

サージ現象を取り扱うにあたり、大地に対して垂直に配置された導体のサージインピーダンスを、EMTP(Electro-Magnetic Transient Program)などを用いて電気回路的に取り扱うことが困難である。過去から数多くの議論がなされ、現在も鉄塔や電柱、あるいは風車に関する同問題を回路的に取り扱うための様々な検討がなされている⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾。ビルなどの建物内におけるケーブルの引き回しや、架空送電線から変圧器や遮断器などへ電力を引き込む際、あるいは雷電流の接地線として使用される電力ケーブルや同軸ケーブルは、大地面とは垂直に配置されることがしばしばある⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。EMTPでは大地面と水平に配置された架空送電線や同軸ケーブルなどは、CABLECONSTANTSやLINECONSTANTSなどを用いることで取り扱うことが可能である。しかしながら、垂直に配置された同軸ケーブルの取り扱い手法については、過去様々な研究がなされているものの、EMTPにおけるモデル化には至っていない。EMTPは発電機や変圧器、負荷などの様々なモデルを取り扱うことが可能、かつ計算時間が短い、先に述べたように解析対象の三次元構造を取り扱うことが困難である。

一方、FDTD(Finite Difference Time Domain)法は、前章で説明したように、解析対象の三次元構造をそのまま取り扱うことが可能で、かつマクスウェル方程式の空間および時間に関する偏微分方程式を、差分化することで直接解くことが可能である⁽¹²⁾⁽¹³⁾。FDTD法では、空間に関する偏微分方程式の差分化のために、解析空間を細かいセルに刻む必要がある。このとき、解析空間の刻みサイズに比べて小さい構造物の取り扱いが困難で、かつ複雑な構造物の解析において空間の刻みサイズを小さくする必要があり、計算時間が膨大になる。また、発電機や変圧器、その他負荷の模擬手法は確立されていない。そのため、EMTPによる垂直同軸ケーブルの取り扱い手法の提案が望まれている。

そこで本研究では、EMTPにおいて鉄塔に併架されるような、大地と垂直に配置された同軸ケーブルのモデル化を目的としている。提案のためには、実際の鉄塔や電力ケーブルを用いた実験結果と、提案モデルの解析結果とを比較し、その精度について議論する必要があるが、それは非常に困難である。そこで、実機の実験に相当する解析ソフトとしてVSTL rev(Virtual Surge Test Lab. rev)を採用した。VSTL revは、電力中央研究所が開発した、FDTD法をベースとした汎用サージ解析ソフトである。実寸大の鉄塔併架ケーブルの模擬手法を提案するにあたり、VSTL revとEMTP提案モデルとの結果を比較することで提案モデルの精度確認とする。そのため、VSTL rev自身のサージ伝搬現象や電圧および電流解析について、その解析精度を確認する必要がある。電力ケーブルは同軸構造であるため、測定などで用いられる同軸ケーブルを用いたサージ実験で代用し、その実験モデルをVSLT revで解析し、両結果を比較することでVSTL revの精度確

認とした。本章では、垂直同軸ケーブルを用いたサージ実験結果と VSTL rev による解析結果とを比較し、その解析精度について検討した結果について説明する。

6.2 垂直同軸ケーブルに発生するサージ現象に関する実験

6.2.1 垂直同軸ケーブルのサージ特性検証実験回路

垂直同軸ケーブルのサージ特性調査実験回路図を図 6.1 に示す。

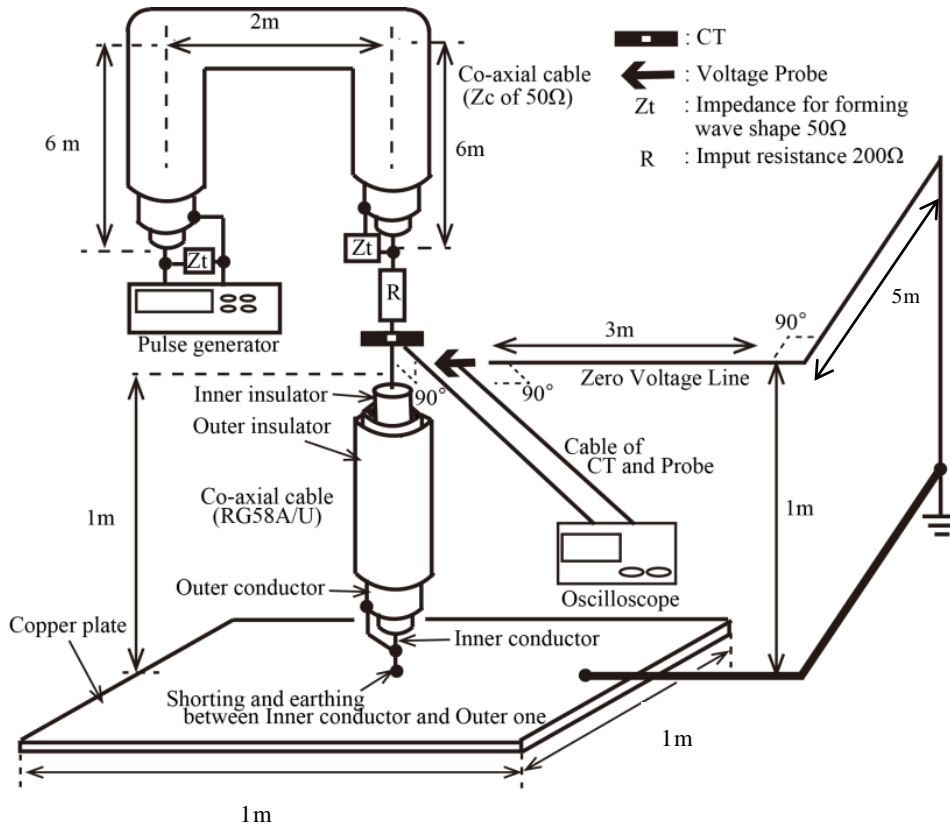


Fig. 6.1 Surge experiment arrangement

接地された 1m 四方の銅板上中央に、長さ 1m の同軸ケーブル(RG58 A/U タイプ)を銅板に対して垂直に配置する。このケーブルの銅板側の末端は、芯線および外部導体を短絡し、銅板に接続している。一方、頂上側の末端は、外部導体を開放状態とし、芯線は 200Ω の抵抗を介して、パルスジェネレータへと接続されている。波形成形のために、サージ電流印加用の同軸ケーブルの両端には、芯線－外部導体間に 50Ω の抵抗が接続されている。ケーブル芯線頂上の電圧測定のため、零電位線(図 6.1 中 Zero Voltage Line)を、接地点から垂直同軸ケーブルに対して垂直な配置となるように、芯線頂上の近傍まで設けている⁽¹⁴⁾。実験では、印加電流を芯線頂上にて変流器型電流プローブを用いて測定している(図 6.1 中の CT)。また、芯線頂上と零電位線間の電圧(以下、ギャップ間電圧とよぶ)および、頂上における芯線と外部導体との間の電圧(芯線－外部導体間電圧)を、電圧プローブを用いて測定している。測定は、印加電流とギャップ間電圧、お

よび印加電流と芯線－外部導体間電圧の二通り実施した。本測定に使用したパルスジェネレータ、オシロスコープ、電流プローブ、電圧プローブ、および電圧プローブ駆動用の直流電源の定格を表 6.1 に示す。

Table 6.1 Measurement equipment

Measurement equipment	Manufacture	Type	Specification
Pulse generator	Hewlett Packard	HP8031	
Oscilloscope	YOKOGAWA	DL9140	4ch, Freq. band: DC~1GHz, Sampling rate: 5GS/s
Current transformer	Tektronix	CT1	Freq. band: 25~1GHz, Ratio: 5mV/mA
FET voltage probe			Freq.: 1GHz, Input impedance: 2MΩ
DC source for voltage probe	Tektronix	1103	TEKPROBE Power Supply

6.2.2 垂直同軸ケーブルのサージ特性検証実験結果

垂直同軸ケーブルへのサージ電流印加実験結果として、図 6.2 にギャップ間電圧および印加電流波形、図 6.3 に芯線－外部導体間電圧および印加電流波形を示す。

図 6.2 より印加電流は 1.9ns 時点から、0.4ns で 4.2mA まで立ち上がり、オーバーシュート後には 2.8mA を維持し続ける。その後、立ち上がりから 6.6ns 後に、2.8mA から 5.0mA まで上昇した。ギャップ間電圧には、電流の立ち上がり時間に対応して 1.75V/ns の電圧変化率で上昇する期間 D1、立ち上がり以降に 0.085V/ns の電圧変化率で D1 に比べ緩やかに上昇する期間 D2、そして減少に転じる期間 D3 が現れている。ギャップ間電圧において電圧の立ち上がり(発生)時点から減少に転じるまでの時間 D1+D2 とサージの往復伝搬距離(垂直ケーブル長の 2 倍)とで求まるサージの伝搬時間はおよそ 0.30m/ns であり光速に一致している。したがって、電圧の減少および電流の上昇は、銅板からの反射波が、測定部位にて印加波形に重畳することで発生している。

芯線－外部導体間電圧測定時、印加電流の立ち上がり部位は、ギャップ間電圧測定時と同様の傾向であった。しかしながら、立ち上がり以降は 3.5mA を維持し、最終的に 3.5mA から 5mA 以上まで上昇する結果であった。オーバーシュート以降の電流値が、ギャップ間電圧測定時の電流値に比べて高いことが分かる。電圧プローブの位置を、ギャップ間電圧測定配置から、芯線－外部導体間電圧測定配置へと入れ替えることで、この差異が発生している。この現象については、6.4 節で説明する。芯線－外部導体間電圧は、0.6V/ns の電圧変化率で 0.42V までオーバーシュート(図 6.3 中の期間 S1)した後、0.18mV 近傍を振動し(図 6.3 中の期間 S2)、立ち上がりから 10.1ns 後に減少に転じている(図 6.3 中の期間 S3)。芯線－外部導体間電圧の立ち上がりから逆極性に転ずる時間差と、ケーブル長との関係より求まるサージの伝搬速度は約 0.20m/ns であり、ギャップ間電圧のそれに比べて 0.67 倍異なった。実験対象として使用した同軸ケーブルの芯線

—外部導体間の絶縁は、ポリエチレン充実にてなされており、ポリエチレンの比誘電率は2.2から2.7とされている⁽¹⁵⁾。電磁波の伝搬速度 v は、比誘電率 ϵ_r あるいは比透磁率 μ_r によって、 $v = c/\sqrt{\epsilon_r\mu_r}$ となる。ただし c は光速である。したがって、芯線—外部導体間電圧の伝搬速度が光速の0.67 ($= 1/\sqrt{2.2}$) 倍になったのは、絶縁物の比誘電率($\epsilon_r=2.2$)によるものである。

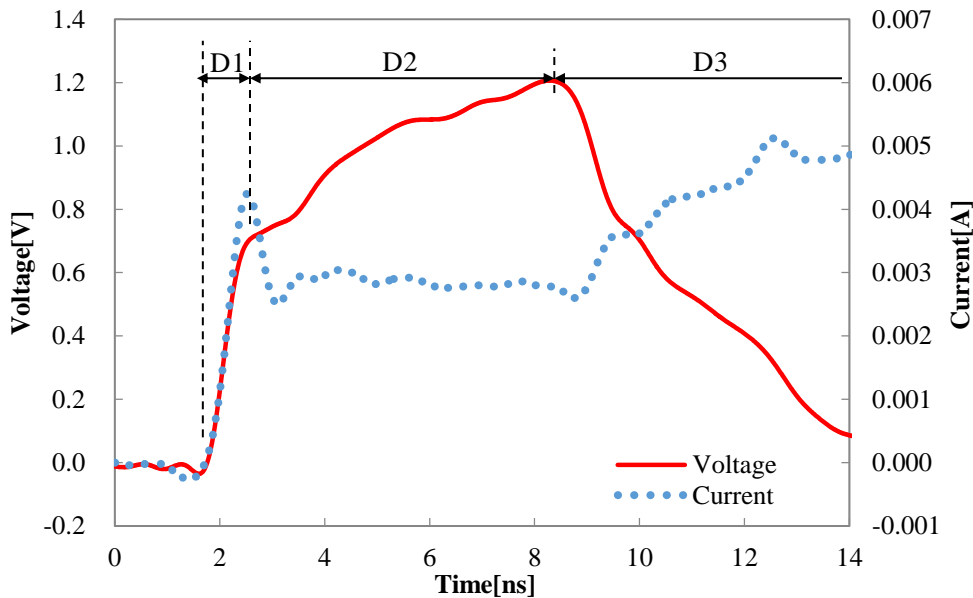


Fig. 6.2 Voltage across the gap and input current

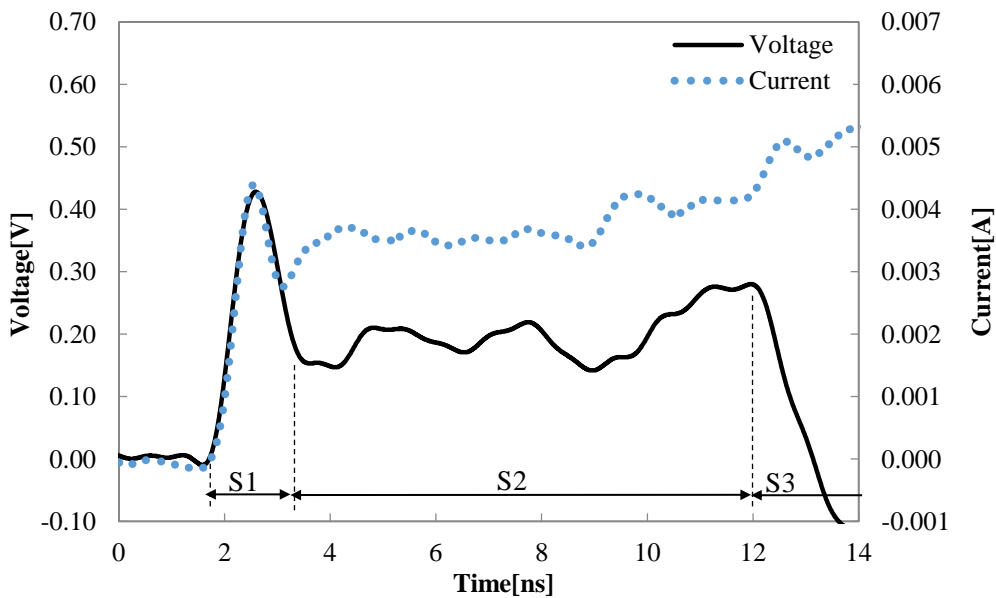


Fig. 6.3 Voltage between inner and outer conductors and input current

測定された電圧を、印加電流で除することで求めたサージインピーダンスの時間変化を図 6.4 に示す。同図中の実線はギャップ間のインピーダンス、破線は芯線—外部導体間インピーダンスの時間推移である。印加電流はステップ電流であり、銅板からの反射電流が重畳するまでは一定値であるので、ギャップ間のインピーダンスは電圧波形に対応して

451Ω まで上昇する傾向が見られた。芯線－外部導体間ではオーバーシュート期間では 150Ω に達するが、その後は 50Ω 付近を振動する傾向が見られた。50Ω はケーブルの特性インピーダンスと一致している。このことから、芯線－外部導体間電圧は、オーバーシュート期間を除き、特性インピーダンスと注入電流との積とで決定されることが分かる。

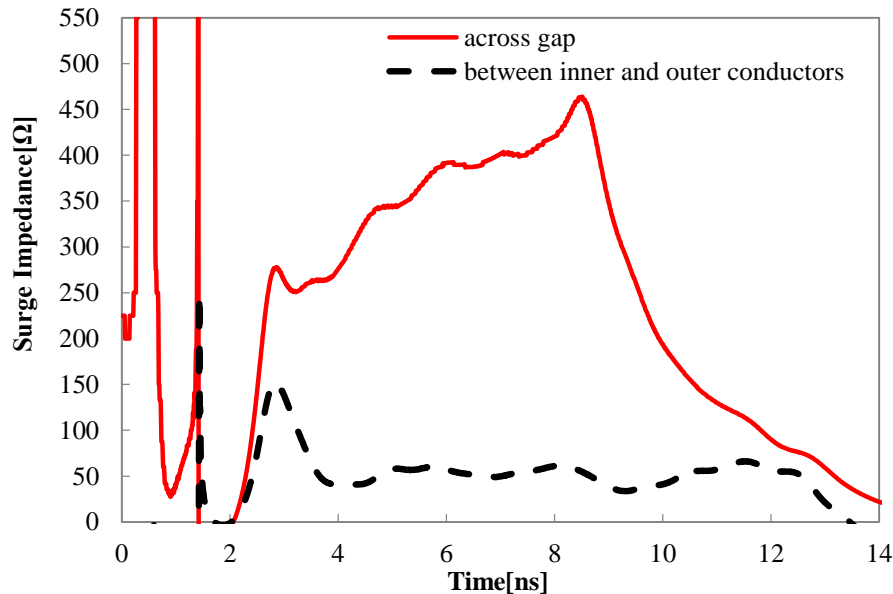


Fig. 6.4 Surge impedance

6.3 FDTD 法による垂直同軸ケーブルサージ解析

6.3.1 解析モデル

実験と同時に、同軸ケーブルのサージ応答について、VSTL rev で実験を模擬した解析を行った。図 6.5(a)は同軸ケーブルの径方向断面図を、図 6.5(b)はケーブルモデルの全体図を示している。電力中央研究所の立松により、VSTL rev にて同軸ケーブルを模擬する手法として、導体周囲の透磁率と誘電率とを補正する手法が開発されつつあるが実用化には至っていない⁽¹⁶⁾。そこで、本研究では、同軸構造を複数の直方体完全導体および直方体誘電体を、複数配置することで同軸ケーブルを模擬した(図 6.5(a))。図 6.5 中(a)の内部絶縁部に分割の一例を示している。解析において、RG58 A/U の内部絶縁物直径 $D_{i-ins.}$ 、外部導体直径 D_{o-c} および外部絶縁物直径 D_s については実寸サイズを用いている⁽¹¹⁾。芯線は撚り線構造のため、直径 D_i を 0.35mm、誘電体の比誘電率を 2.6 とすることで、特性インピーダンスが約 50Ω となるようにしている。内部および外部誘電体の抵抗率 ρ は $1 \times 10^{16} \Omega m$ としている。図 6.5(b)に示すように、解析空間を囲む六つの境界面には、2 次の Liao の吸収境界面を適用し、境界面において電磁波の不要な反射が生じないように処理している。大地部は、不完全導体として大地抵抗率 $1.0 \times 10^4 \Omega m$ 、比誘電率 80 を与えることでコンクリートを模擬した。その上に、銅平板を模擬した完全導体平板を配置し、実験時の配置とした。銅平板の一部を吸収境界面に接続することで、銅板の接地を模擬している。本モデルでは立ち上がり時間 0.4ns、波高値 2.8mA のステップ電流を、電流源を用いて芯線頂上から印加し、ギャップ間電圧および頂上部における芯線-外部導体間電圧について解析を実施してい

る。

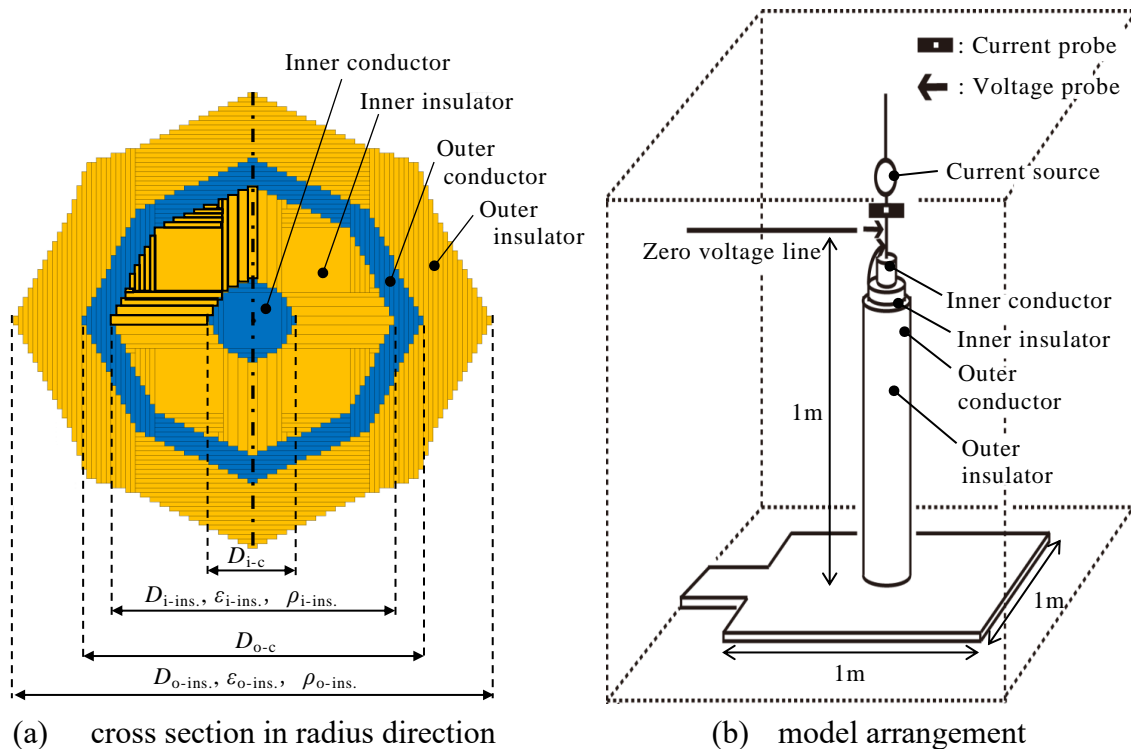


Fig. 6.5 Analysis model in VSTL rev.

VSTL rev の計算原理である FDTD 法は、Maxwell 方程式の電界および磁界に関する回転の式を空間および時間に関して差分化する手法のため、解析空間を各方向について分割する必要がある。表 6.2 に解析空間の刻み個数(NX, NY, NZ)と刻みサイズ(DX, DY, DZ)についてまとめた表を示す。

Table 6.2 Size of analysis space

NX	DX[m]	NY	DY[m]	NZ	DZ[m]
50	0.07500	50	0.07500	10	0.00050
20	0.05000	20	0.05000	10	0.00250
12	0.01000	12	0.01000	10	0.00500
10	0.00500	10	0.00500	12	0.01000
10	0.00250	10	0.00250	12	0.05000
10	0.00050	10	0.00050	12	0.01000
101	0.00005	101	0.00005	10	0.00500
10	0.00050	10	0.00050	10	0.00250
10	0.00250	10	0.00250	10	0.00050
10	0.00500	10	0.00500	10	0.00050
12	0.01000	12	0.01000	10	0.00250
26	0.05000	26	0.05000	10	0.00500
50	0.07500	50	0.07500	12	0.01000
				40	0.05000
				50	0.07500

解析空間には不均一メッシュを適用し、要所ごとにセルの刻みサイズを変えている。これは、比較的高い計算精度が要求されるケーブル近傍では解析空間を細かくし、それ以外の部位では刻みを徐々に大きくすることで、セル数を削減し、その削減に伴う計算時間の短縮を目的としている。表 6.2 中の塗りつぶされた箇所は、解析空間 X-Y 平面における、同軸ケーブルが配置されている位置を示している。

6.3.2 解析結果

図 6.6 にギャップ間電圧波形および印加電流、図 6.7 に芯線-外部導体間電圧および印加電流の VSTL rev による解析結果を示す。

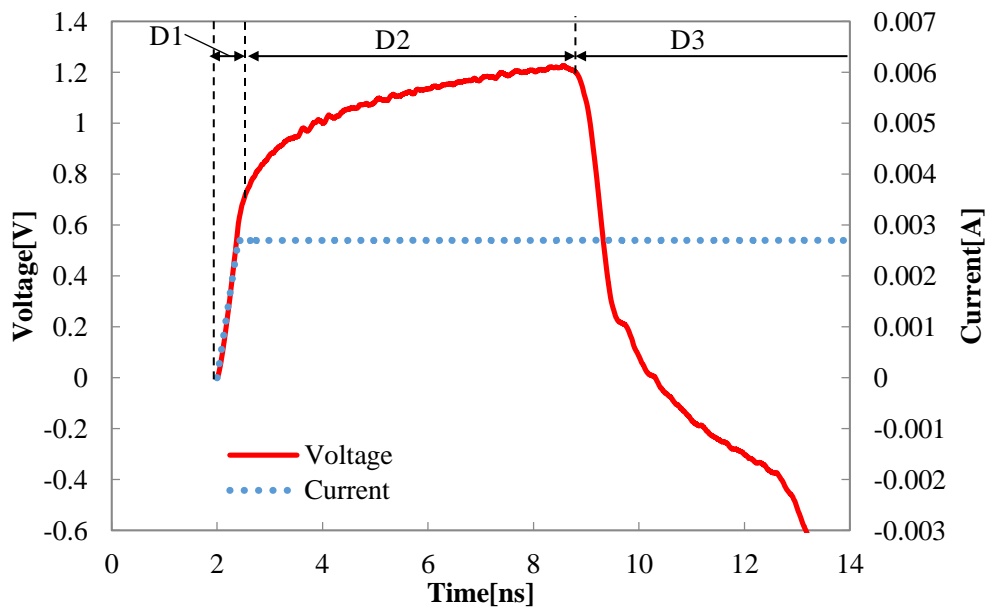


Fig. 6.6 Voltage across gap and input current

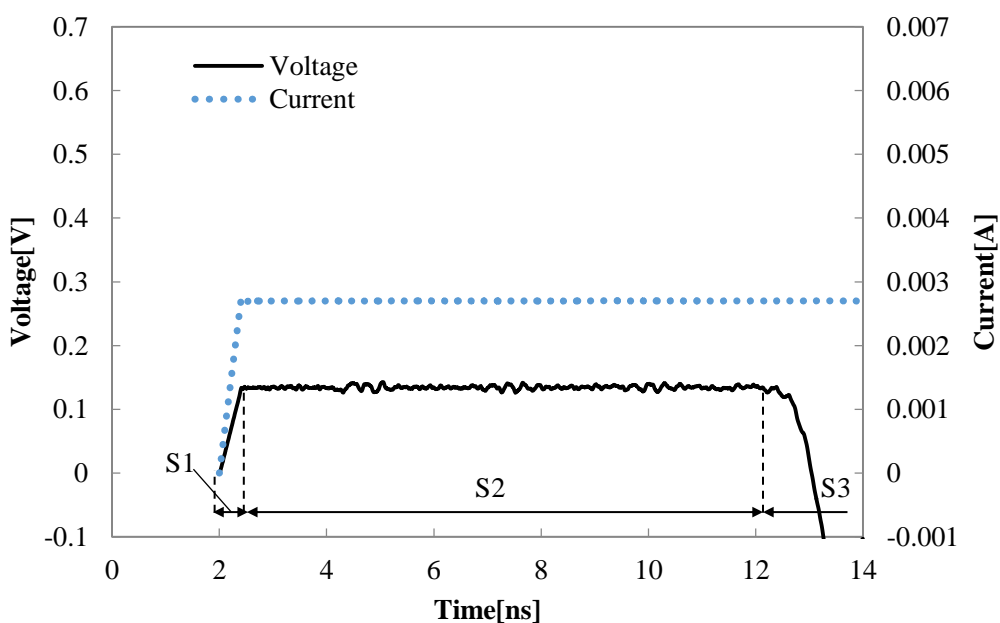


Fig 6.7 Voltage between inner and outer conductors and input current

図 6.6 および図 6.7 より, 印加電流は 0.4ns で 2.8mA まで立ち上がり, それ以降は 2.8mA を維持し続ける波形である。実験結果と同様に, ギャップ間電圧の変化には 3 つの期間が現れている。D1 期間には電圧上昇率 1.75V/ns で上昇している。D2 期間では, 電圧上昇率は 0.05V/ns と, D1 に比べて緩やかな上昇率で電圧が上昇し, 最終的に D3 で減少に転じていることが分かる。D1+D2 の時間およびケーブル長より求めたサージの伝搬速度は 0.3m/ns と求まり, 実験結果と同様に光速と一致した。

芯線-外部導体間電圧は 0.35V/ns の電圧変化率で 0.14V まで上昇し(図 6.7 中の期間 S1), 期間 S2 の間 0.14mV を維持, 最終的に減少に転じている(図 6.3 中の期間 S3)。芯線-外部導体間電圧について, 立ち上がりから逆極性に転ずる時間差とケーブル長との関係より求まるサージの伝搬速度は約 0.20m/ns であり, こちらも実験結果と同様の傾向で, 光速に比べて遅いことが分かる。

解析結果についても, 電圧を電流で除することで求めたサージインピーダンスの時間変化を図 6.8 に示す。実線はギャップ間のインピーダンス, 破線は芯線-外部導体間インピーダンスの時間推移である。ギャップ間のインピーダンスは電圧波形に対応して 450Ω まで上昇し, 芯線-外部導体間では常に 50Ω であった。解析結果からも, 芯線-外部導体間の電圧は注入電流とケーブルの特性インピーダンスで決定されることが分かる。以上の結果から, VSTL rev で作成した同軸ケーブルモデルが, 実験結果を再現していることが分かる。

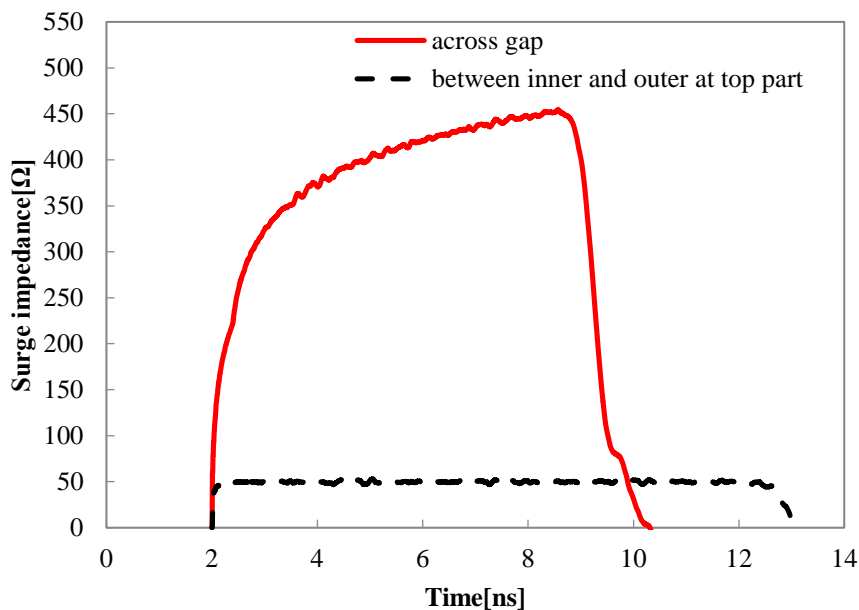


Fig. 6.8 Surge impedance

6.4 考察

6.4.1 実験時に電圧プローブの取り付け位置で電流が変化する理由

サージ実験時に、ギャップ間電圧測定と芯線－外部導体間電圧の測定とで印加電流値が異なった。両実験における条件の違いはプローブの取り付け位置のみである。芯線－外部導体間電圧測定時には、同軸ケーブルの同部位のキャパシタンスとプローブのキャパシタンスとが並列につながるため、見かけ上電流値がギャップ間電圧測定時に比べて高くなったと考えられる。実際には、解析結果のように印加される電流値は、唯一の値になるべきである。また、実験において、電流の真値に近い波形は、ギャップ間測定時の電流である。

6.4.2 実験と VSTL rev による解析とで電流の反射現象が異なる理由

実験では、反射電圧の重畳による電圧の減少と、反射電流の重畳による電流値の上昇が見られた(図 6.2 および図 6.3)。しかしながら、VSTL rev による解析では、電圧は減少するものの、電流は上昇しなかった(図 6.6 および図 6.7)。実験では、波形成形のために、垂直同軸ケーブルの芯線と、サージ電流印加用の同軸ケーブル芯線との間を 200Ω の抵抗で接続する必要があった。一方、解析では理想電流源を使用している。そのため、ケーブル頂上部におけるインピーダンスが異なる。したがって、実験と解析とでは、ケーブル頂上部における反射現象が異なり、結果として反射波重畳以降の波形が異なっている。しかしながら、芯線頂上電圧が大地にて反射された電圧が重畳することによる減少を再現できていることから、VSTL rev により作成した同軸ケーブルモデルは高い精度を持っているといえる。

6.5 まとめ

EMTP にて、垂直に配置された電力用ケーブルの取り扱い手法を提案が、より高度なサージ解析のために求められているが、鉄塔やそれに併架された電力ケーブルといった実機を用いた実験は困難である。したがって、近年サージ解析手法として注目されている FDTD 法による解析結果と、EMTP 提案モデルの解析結果とを比較することで、本研究では EMTP 提案モデルの精度確認としている。本研究では、解析ソフトとして FDTD 法を計算原理とする VSLT rev を用いた。VSTL rev による解析結果を正として EMTP モデルを提案するため、まず初めに、サージの伝搬現象や、発生するサージ電圧および電流の解析に関する VSTL rev の計算精度を確認する必要があった。そこで、測定用の同軸ケーブルを使ったサージ実験結果と、VSTL rev で作成した同軸ケーブルモデルにおける解析結果とを比較し、VSTL rev の精度を確認した。

実験では測定用同軸ケーブルを銅板上に垂直に配置し、頂上側の芯線へサージ電流(ステップ波)を印加した際の芯線－零電位線間電圧(ギャップ間電圧)、頂上部の芯線－外部導体間の電圧(芯線－外部導体間電圧)、および印加電流について測定を実施した。VSTL rev では同軸構造を取り扱うことが困難であるため、直方体型完全導体および直方体型誘電体モデルを複数並べることで、同軸構造を再現し、解析を実施した。

それぞれの結果から、ギャップ間電圧および芯線－外部導体間電圧において、以下に示す特徴が現れた。

・ギャップ間電圧

電圧変化の特徴:①電流の立ち上がりに対応して上昇する期間, ②立ち上がり時に比べて緩やかに上昇する期間, ③大地からの反射波が重畳し減少に転じる期間の三つの期間が現れる。

・芯線－外部導体間電圧

①発生する電圧値:発生する電圧値は特性インピーダンスと注入電流値との積で決定される。

②電圧の立ち上がり(発生)から減少に転じるまでの時間:芯線と外部導体間の絶縁物の比誘電率の影響を受け, 電圧発生から減少に転じるまでの時間差が, ギャップ間電圧のそれに比べて長くなる。

上述した特徴は, 実験及び VSLT rev による解析の両方にて得られた結果である。以上のことから, VSTL rev は三次元構造物のサージ解析について高精度であること, また, 直方体導体および直方体誘電体を並べて構成した同軸ケーブルモデルが VSTL rev における同軸ケーブルの解析モデルとして合理的なものであることを確認した。

第 6 章 参考文献

- (1) R.LUNDHOLM, R.B.FINN JR., W.S.PRICE: 「Calculation of Transmission Line Lightning Voltage by Field Concepts」, TRANS. OF THE AIEE PAS, Vol.76 Part 3, pp.1271-1283(1957)
- (2) C.F.WAGNER: 「A New Approach to the Calculation of the Lightning Performance of Transmission lines」, TRANS. OF THE AIEE PAS, Vol.75 Part 3, pp.1233-1256(1956)
- (3) 加藤 正平, 岡部 成光: 「鉄塔サージ解析におけるループ電圧法の考察」, 電学論 B, Vol.115, No.5, pp.517-523(1995)
- (4) 原 武久, 山本 修, 林 宗明, 樋口 武光, 上之園 親佐: 「垂直導体サージ伝搬特性の基礎的検討」, 電学論 B, Vol.108, No.11, pp.533-540(1958)
- (5) 原 武久, 山本 修, 林 宗明, 上之園 親佐: 「垂直導体および垂直複導体サージインピーダンスの実験式」, 電学論 B, Vol.110, No.2, pp.129-137(1990)
- (6) 馬場 吉弘: 「垂直導体の特性インピーダンス理論式について」, IEEJ Trans. PE, Vol.129, No.3, pp.469-470(2009)
- (7) 高橋 秀臣: 「鉄塔サージインピーダンスに関するジョルダンの式の誤り確認」, 電学論 B, 114 巻 1 号, pp.112-113 (1994)
- (8) Y.Baba and M.Ishii “ Tower models for fast-front lightning currents” Trans, IEE Japan. Vol.120-B, No.1, pp18-23, 2000

- (9) 野田 琢：「FDTD 解析に基づく雷サージ解析用鉄塔モデル」，電学論 B，127 卷 2 号，pp.379-pp.387 (2007)
- (10) 宇野 亨：「FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析」，コロナ社(1998)
- (11) 野田 琢，松原 廣治，横山茂：「FDTD 法による解析結果を用いた新しい雷サージ計算用鉄塔モデル」，電力中央研究所報告，H04012(2005)
- (12) N.Mori, Y.Yamashita, T.Yoshida, Y.Maruyama, T.Tanabe “ Surge Propagation characteristic of Cables Fixed to a Tower” T.IEE Japan, Vol.111-B, No.1, pp.99-107, ‘91
- (13) 森 望，井上 利之，山下 泰浩，吉田 俊朗，丸山 義雄，田辺 輝義：「鉄塔立上ケーブルのサージ伝搬特性」，電学論 B，111 卷，1 号，pp.99-107 (1991)
- (14) 西辻 正典，雨谷 昭弘，長岡 直人，馬場 吉弘：「垂直導体縮小モデル系での過渡現象測定に対する測定線の影響」，電学論 B，133 卷 6 号，pp.555-561(2013)
- (15) 例えば <http://www.yei-jp.com/technology/hiyudenritu/hiyudenritu.html>
閲覧日 2015 年 3 月 1 日
- (16) A.Tatematsu “ A Technique for Representing Coaxial Cables for FDTD-Based Surge Simulation” IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, Vol.57, Issue.3 pp.488-495(2015)

第7章 EMTP による垂直同軸ケーブル模擬手法の提案

7.1 まえがき

EMTP では、大地面と水平に配置された架空送電線や、電力ケーブルなどは CABLECONSTANTS や LINECONSTANTS などを用いることで取り扱うことが可能である。しかしながら、垂直に配置された電力ケーブルなどの同軸状ケーブルの取り扱い手法については過去様々な研究がなされているものの、EMTP におけるモデル化には至っていない⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。そこで、本研究では垂直に配置された電力ケーブルおよび鉄塔に併架された電力ケーブルを、EMTP にて取り扱う手法の提案を目的としている。

前章で述べたように、モデルの提案に当たっては、実際の電力ケーブルや鉄塔を用いた実験結果と、提案手法による解析結果とを比較することが最も望ましいが、それは非常に困難である。そこで提案手法の精度確認のために、VSTL rev を用いたモデルとの比較を行う。第6章ではその準備段階として、VSTL rev を用いた同軸ケーブルモデルの解析精度が高いことを示した。

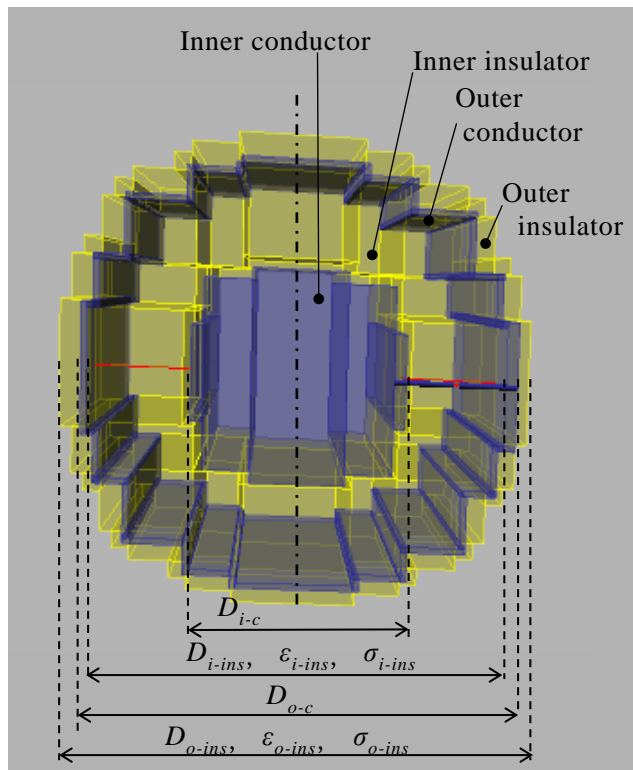
次の段階として、EMTP における実寸法の電力ケーブルの模擬手法の提案を行う。本章では VSTL rev で作成した垂直電力ケーブル解析結果と、EMTP における提案手法を用いた解析結果との比較を行ったので、その結果について説明する。

7.2 VSTL rev による電力ケーブルのサージ解析

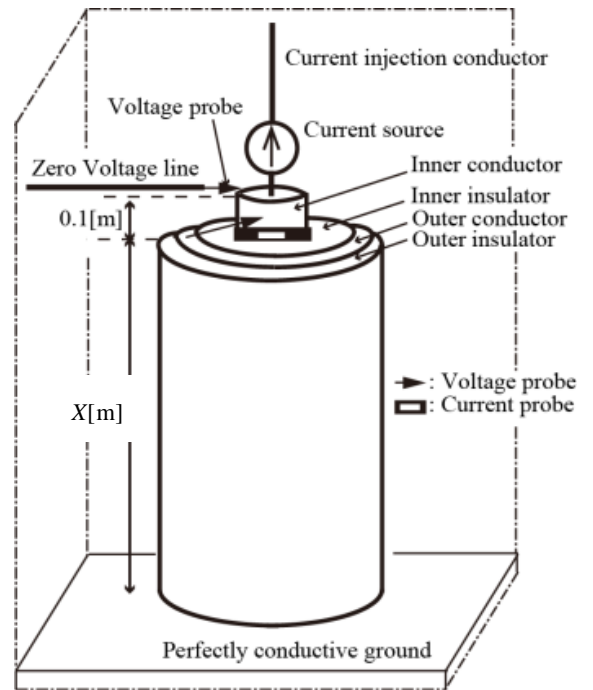
7.2.1 電力ケーブルモデル

前章で VSTL rev により同軸ケーブルにおけるサージ現象を取り扱うことが可能であることを確認した。次段階として、EMTP による垂直ケーブルのモデル化を評価するための比較対象を、VSTL rev で作成し、解析を実施した。図 7.1(a)は VSTL rev で作成したケーブルの径方向断面図、(b)は解析対象の配置図を示している。ケーブルの導体部は直方体完全導体で模擬し、絶縁部は直方体誘電体で模擬した。解析対象として、77kV 1000mm² の CV ケーブルを採用した⁽⁷⁾。図 7.1(a)中の各パラメータを以下に示す。

- ・内部導体外径 D_{i-c} : 38mm
- ・内部絶縁物外径 D_{i-ins} : 68mm, 比誘電率 ϵ_{i-ins} : 3.0, 抵抗率 ρ_{i-ins} : $1.0 \times 10^{16} \Omega m$
- ・外部導体外径 D_{o-c} : 72mm
- ・外部絶縁物外径 D_{o-ins} : 83.4mm, 比誘電率 ϵ_{o-ins} : 3.7, 抵抗率 ρ_{i-ins} : $1.0 \times 10^{16} \Omega m$



(a) radius direction



(b) arrangement

Fig. 7.1 Simulation model in VSTL

式(7.1)は芯線と外部導体間の静電容量, 式(7.2)は同軸構造における同部位のインダクタンス, 式(7.3)はケーブルの特性インピーダンスを求める式である。

芯線－外部導体間の静電容量 C

$$C = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (7.1)$$

ここで, ϵ_r : 誘電体の比誘電率, ϵ_0 : 真空の誘電率, r_1 : 芯線の外半径, r_2 : 外部導体の内半径である。

同軸構造の芯線－外部導体間のインダクタンス L

$$L = \frac{\mu_r\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (7.2)$$

ここで, μ_r : 磁性体の比透磁率, μ_0 : 真空中の透磁率である。ただし, 式(7.2)では芯線内の電流分布によるインダクタンスの項は無視している。

式(7.1)および式(7.2)を用いると、ケーブルの特性インピーダンス Z は、

$$Z = \sqrt{L/C} = \sqrt{\frac{\frac{\mu_r \mu_0 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi}}{\frac{2\pi \varepsilon_r \varepsilon_0}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\varepsilon_r \varepsilon_0}} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (7.3)$$

として求めることが可能である。

ここで式(7.3)に、 $\varepsilon_r = 3.0$ 、 $\varepsilon_0 = 8.8854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ 、 $r_1 = 19 \text{mm}$ 、 $r_2 = 34 \text{mm}$ 、 $\mu_r = 1.0$ 、 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ を代入し、

$$Z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\varepsilon_r \varepsilon_0}} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1 \times 4\pi \times 10^{-7}}{3 \times 8.8854 \times 10^{-12}}} \ln\left(\frac{34}{19}\right) \\ \approx 20$$

と求まる。

表 7.1 に、解析空間の刻み個数(NX, NY, NZ)と、各刻みサイズ(DX, DY, DZ)を示す。解析空間の空間刻みには不均一メッシュを使用した。解析空間の各方向のサイズは $X=Y=62.2\text{m}$ 、 Z 方向については解析対象に対応させ、解析空間サイズを 20.15m 、 48.65m 、 102.15m と変更している。表 7.1 の X および Y 方向における塗りつぶされた箇所は、解析空間の X - Y 平面において、ケーブルが構成されている大まかな位置を示している。解析空間の X - Y 平面中央(座標 $(X,Y)=(31.1\text{m}, 31.1\text{m})$)を中心に、ケーブルを空間刻み長が 0.001m の範囲に作成した。解析空間を囲む六つの面には二次の Liao の吸収境界面を適用し、境界面において電磁波の不要な反射が生じないように処理した。

ケーブル芯線の最上部より、電流源の端子から、立ち上がり時間 10ns 、波高値 1A のステップ電流を印加した際の、芯線頂上—零電位線間の線電位差(ギャップ間電圧)および頂上部における芯線—外部導体間電位差を解析した。図 7.1(b)に示すように、電流源のもう一方の端子は、半径 0.5mm の細線導体を用いて解析空間の境界面へ接続した。解析空間の大地には、抵抗率 $10^{-10} \Omega\text{m}$ を与えることで完全導体とした。芯線および外部導体は、大地に接続され、短絡接地の状態としている。ケーブル長は 5m 、 10m 、 30m の三条件について解析を実施した。田邊らや岡嶋らの検討によると、電力ケーブルを伝搬するサージ信号は、同ケーブルの有する半導電層の影響をうけ、波形や伝搬速度に変化が生じるという結果が報告されている⁽⁸⁾⁽¹²⁾。しかしながら、まずは垂直に配置された同軸ケーブルの基礎知見を得るために、本解析においては、内部導体表面の周囲に半導電層として 2mm の誘電体領域を設けているが、内部絶縁物と同じ誘電率と抵抗率を与えている。

Table 7.1 Number and cell size of simulation space in VSTL rev

NX	DX[m]	NY	DY[m]	5m		10m		30m	
				NZ	DZ[m]	NZ	DZ[m]	NZ	DZ[m]
15	2.000	15	2.000	10	0.100	10	0.100	10	0.100
25	0.040	25	0.040	20	0.200	45	0.200	48	0.500
200	0.001	200	0.001	150	0.001	150	0.001	25	0.200
25	0.040	25	0.040	75	0.200	10	0.200	150	0.001
15	2.000	15	2.000			75	0.500	10	0.200
								140	0.500

7.2.2 FDTD 法による解析結果

図 7.2 にケーブル高さを 5m, 10m, 30m と変化させた際の, VSTL rev による芯線頂上電位の解析波形を示す。ギャップ間電圧は印加電流の立ち上がりに対応して急激に上昇する期間, 立ち上がり時に比べて緩やかに上昇する期間, 大地面からの反射波の重畳により減少に転ずる期間が現れた。ケーブル長が増すにつれ, 発生電圧は増加する傾向にある。ギャップ間電圧の立ち上がり期間は高さによらず全条件で一致した。

図 7.3 には各ケーブル長における芯線-外部導体間電圧を示す。芯線-外部導体間電圧はケーブル長によらず, 立ち上がり後は一定値(本結果では 20V)を保ち, 大地面からの反射波が重畳されることで減少に転じている。

表 7.2 に各ケーブル長におけるギャップ間, および芯線-外部導体間のサージインピーダンス, 両部位に発生する電圧の伝搬速度を示す。ギャップ間電圧の伝搬速度に比べ, 芯線-外部導体間電圧の伝搬速度は 0.57 倍(約 $1/\sqrt{3}$ 倍)遅い。この 3 は, 同軸ケーブルの芯線-外部導体間に存在する誘電体が有する比誘電率と一致する。図 7.4 は, 解析開始時点から 13ns 時における, ケーブル高さ方向の断面内における電界分布を示している。図 7.4(a)にはケーブル全体の電界分布と色ごとの電界強度値を示しており, カラーマップ上の数値単位は[V/m]である。図 7.4(a)中の, 白点線で囲まれた領域に注目すると, 筒の外側は緑色にであるのに対し, 筒の内側は青色である。つまり, 筒の外側と内側とでは, 電界の伝搬速度が異なることを示している。図 7.4(b)は, 図 7.4(a)に示したケーブル部を拡大した図である。①は両外部導体(Outer conductor)の内側において電界値が約 200V/m の位置, ②は外部導体外表面上の電界値が約 200V/m の位置を示している。この図から, 芯線-外部導体間(両外部導体内側)の電界は, 外部導体上の電界に比べて遅れている。これは先述したように, 芯線-外部導体間に存在する誘電率によるものである。そのため, ギャップ間電圧に対して, 芯線-外部導体間の電圧の伝搬速度に差が生じたと考えられる。

続いて芯線-外部導体間に発生したサージ現象について検討する。同部位の電圧を印加電流で除して求めたインピーダンスの値は, 約 20Ω と求まり, <7.2.2>項にて同軸ケーブルのキャパシタンスとインダクタンスから求めた値と一致している。

表 7.2 に、各ケーブル長における芯線頂上のサージインピーダンスと、特性インピーダンスを示す。芯線頂上のサージインピーダンスは、ケーブル長が長くなるにつれ大きくなっていくが、特性インピーダンスは変化していないことが分かる。図 7.5 にケーブル長の対数値に対するギャップ間インピーダンスの値を示す。図中内のプロットを結ぶ線は、最小二乗法を用いた曲線である。第 2 章で示したように、半径 r [m]、高さ h [m] の円柱垂直導体の頂上と零電位線間のインピーダンスは h/r の対数値により求まる。本解析ではケーブル長のみを変化させているが、ギャップ間のサージインピーダンスは高さの対数値に対して直線的に変化していることが分かる。

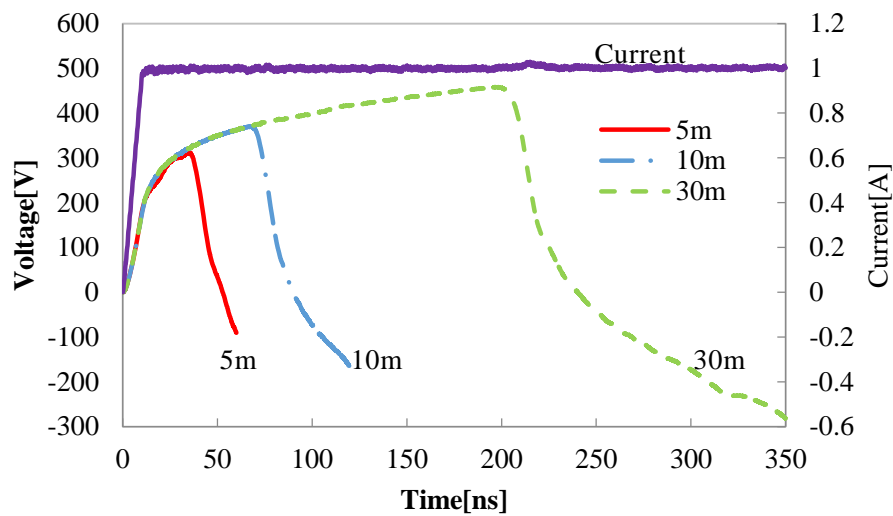


Fig. 7.2 Gap voltages in each height and applied current

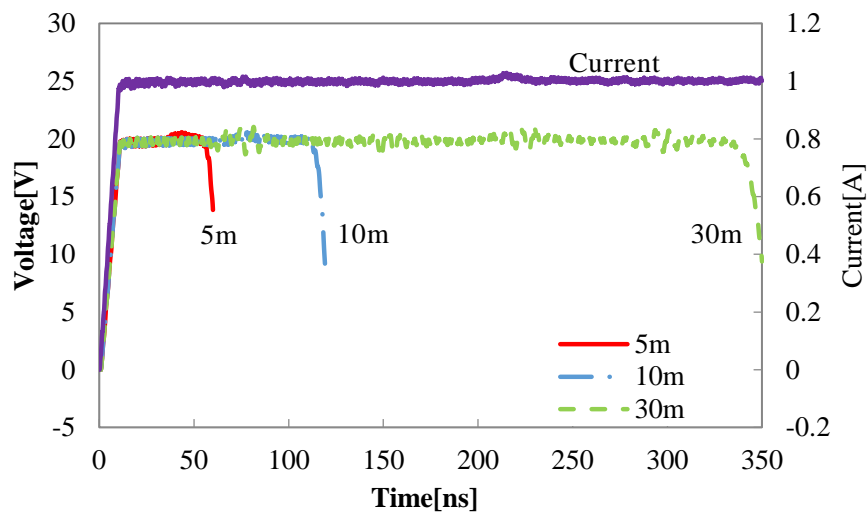
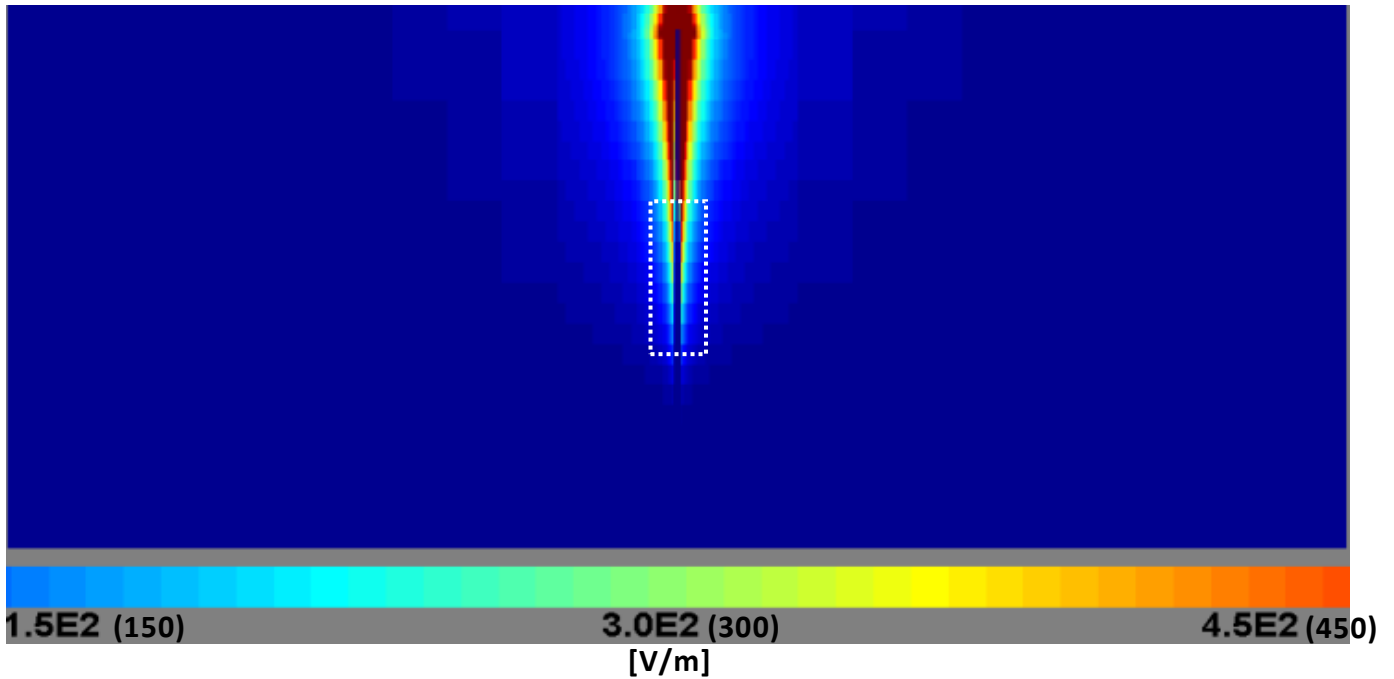


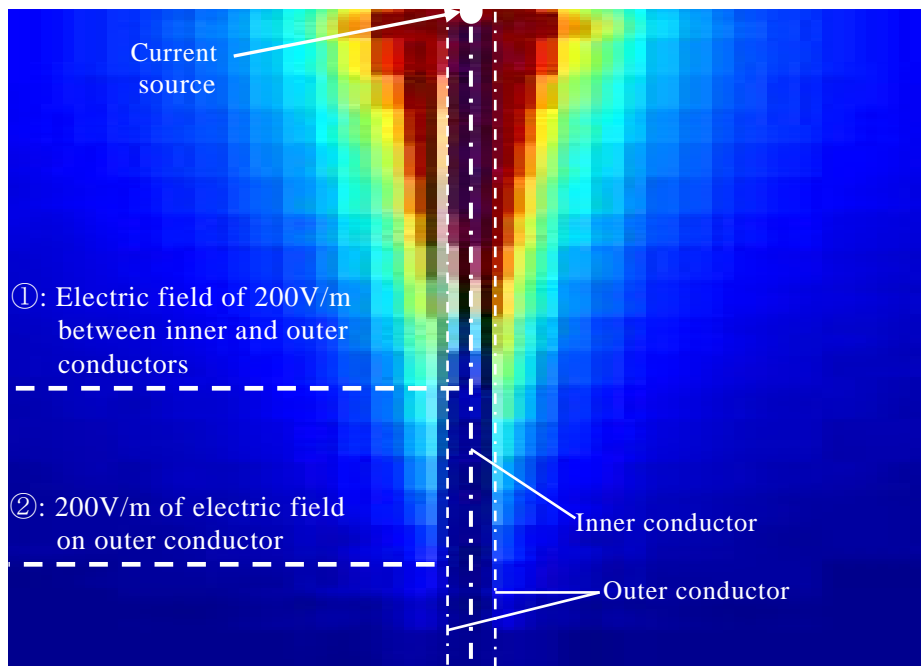
Fig. 7.3 Voltages between inner and outer conductors in each height and applied current

Table 7.2 Surge impedance and propagation velocity in each part

	Across gap			Between inner conductor and outer one		
Height [m]	5	10	30	5	10	30
Surge impedance [Ω]	312	373	433	20.0	20.0	20.0
Propagation velocity [m/ns]	0.28	0.29	0.30	0.16	0.17	0.17



(a) overall view



(b) expanded figure

Fig. 7.4 Electric field distribution of cable

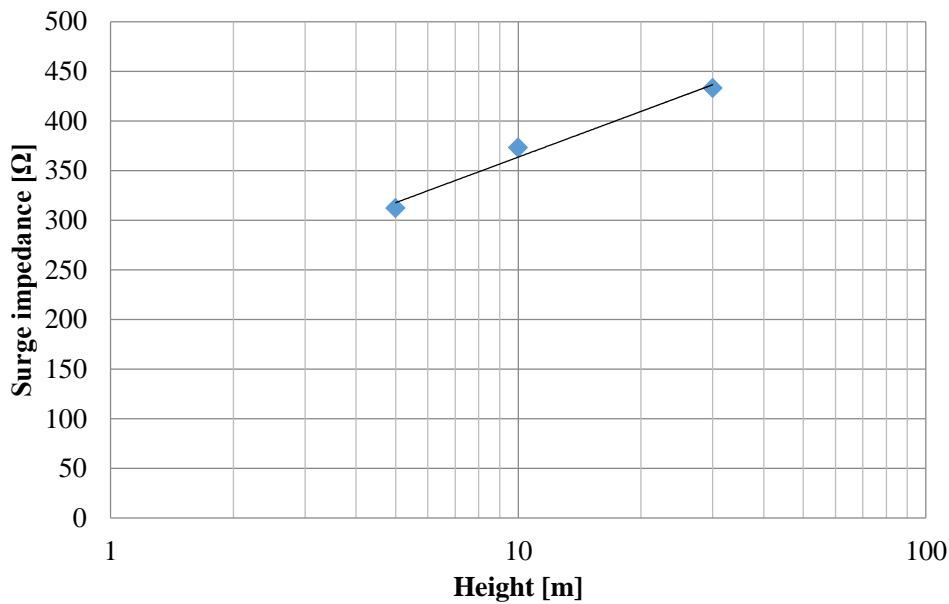


Fig. 7.5 Surge impedance across gap versus each height

7.2.3 EMTP を用いた垂直同軸ケーブルモデル

VSTL rev による解析結果から、電力ケーブルに発生するサージ現象は以下の特徴を有することが分かった。

- ・ギャップ間には電流の立ち上がりに対応して電位差が上昇する期間、その後緩やかに上昇する期間、反射波の重畳により電位差が減少する期間が現れる。
- ・同種の垂直同軸ケーブルにおいて、同一のステップ電流を印加すると、ケーブル長によらずギャップ間電圧の立ち上がりは一致する。
- ・ケーブルの芯線－外部導体間には、特性インピーダンスと印加電流値との積で決まる電圧が発生する。
- ・ケーブル頂上のギャップ間電圧に比べ、芯線－外部導体間の電位差は誘電体の存在により伝搬速度が遅くなる。

これらをふまえ、EMTP ではケーブルの径方向のパラメータが等しく、外部導体－大地間インピーダンスおよび長さの異なる複数の水平ケーブルを直列接続することにより、この特徴を再現した。図 7.6 にケーブル長 5m における EMTP モデルを、表 7.3 に各水平ケーブルのサージインピーダンスおよびケーブル分割長を示す。径方向については図 7.6 中の断面構造を有しており、半径、誘電率、導電率は 7.2 節で述べた VSTL rev と同様の値を用いている。したがって、ケーブルの特性インピーダンスは 20Ω である。

ケーブルの外部導体－大地間のサージインピーダンスは、電流印加点で最も低く、末端に近づくにつれ高くなる。また、最終段(5 番目のケーブル)にて、芯線および外部導体は接地されている。第 6 章の結果、および図 7.2 の解析結果から明らかのように、サージインピーダンスは、まず電流の変化率にしたがい急峻に変化し、以降は最大値まで緩やかに変化す

る傾向がある。これを表現するため外部導体—大地間のサージインピーダンスは接地点に向かって徐々に大きくする必要があった。簡易的に垂直ケーブルを EMTP にて取り扱う手法を探るため、VSTL rev による計算結果に EMTP の計算結果をフィッティングさせる形で、EMTP のケーブルパラメータを選定した。EMTP では、ステップ電流 1A を印加した際の電流印加地点の電圧(VSTL rev 解析におけるギャップ間電圧)について解析した。

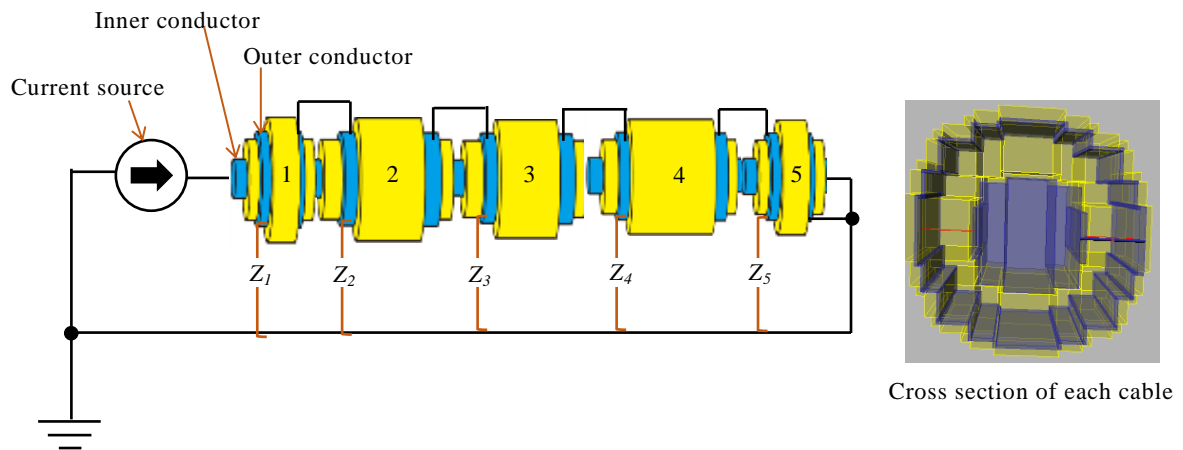


Fig.7.6 Simulation model in EMTP

Table.7.3 Surge impedance and cable length

Number	Length[m]	Surge impedance between outer conductor and ground[Ω]	Characteristic impedance[Ω]
1	0.3333	91.9 (Z_1)	20.2
2	1.5113	239.7 (Z_2)	
3	1.5113	281.3 (Z_3)	
4	1.5113	305.6 (Z_4)	
5	0.3333	336.2 (Z_5)	

7.2.4 EMTP を用いた垂直同軸ケーブル解析結果

図 7.7 に、ケーブル高さ 5m の条件における EMTP 提案手法および VSTL rev との、ギャップ間電圧の解析結果の比較を示す。参考のため、水平ケーブルを一本用い、垂直ケーブルを模擬したモデル(以下、一本モデルとする)での解析結果も示している。一本モデルのサージインピーダンスは計算から求めたものではなく、最終的に発生するピーク電圧が、VSTL rev の解析結果と一致するように調整した。一本モデルを用いた際の解析結果は、印加電流の立ち上がりに対応して最大値付近まで上昇し、最終的に大地からの反射波の重畳により減少しており、VSTL rev の結果とは一致していない。それに対して、提案手法を用いた場合、その結果は非常によく一致していることが分かる。したがって EMTP においては径方向のパラメータが等しく、外部導体—大地間のサージインピーダンスおよび長さの異なる複数の水平ケーブルを直列に接続することで、簡易的に垂直配置された同軸ケーブルの

取り扱いが可能であることが分かった。

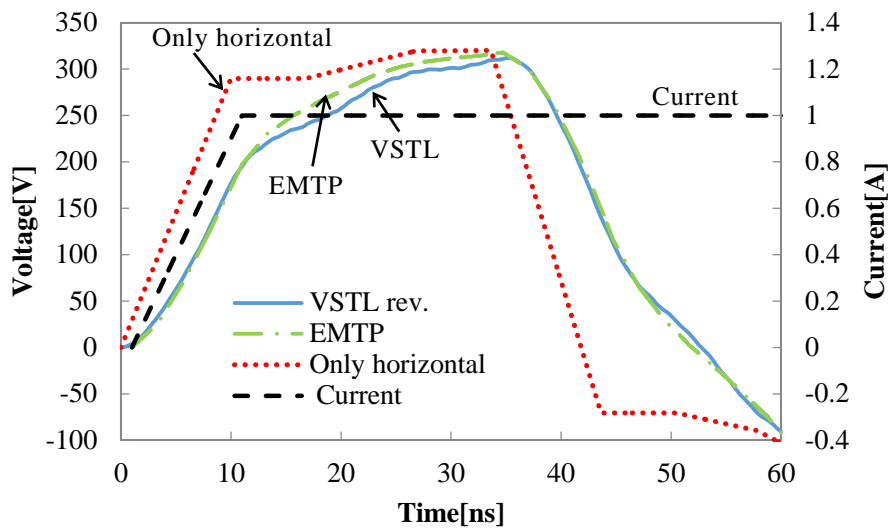


Fig. 7.7 Comparison result among VSTL rev., EMTP proposal model, and only one horizontal cable model

さらにケーブル長 10m および 30m についても検討した結果を示す。表 7.4 および表 7.5 は 10m および 30m における EMTP モデルをそれぞれ示しており、先に示した 5m モデルにさらに水平ケーブル数を直列に接続することで模擬している。

Table 7.4 Each horizontal cable's parameter in condition of the length of 10m

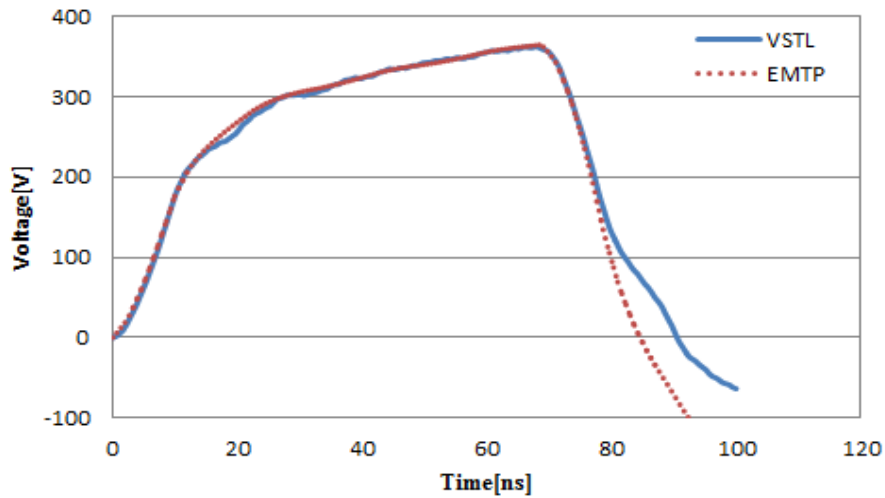
Number	Length[m]	Surge impedance between outer conductor and ground[Ω]	Characteristic impedance[Ω]
1	Same value shown in Table 7.3		20.2
2			
3			
4			
5	2.5	336.2	
6	2.5	358.0	
7	0.3333	375.0	

Table 7.5 Each horizontal cable's parameter in condition of the length of 30m

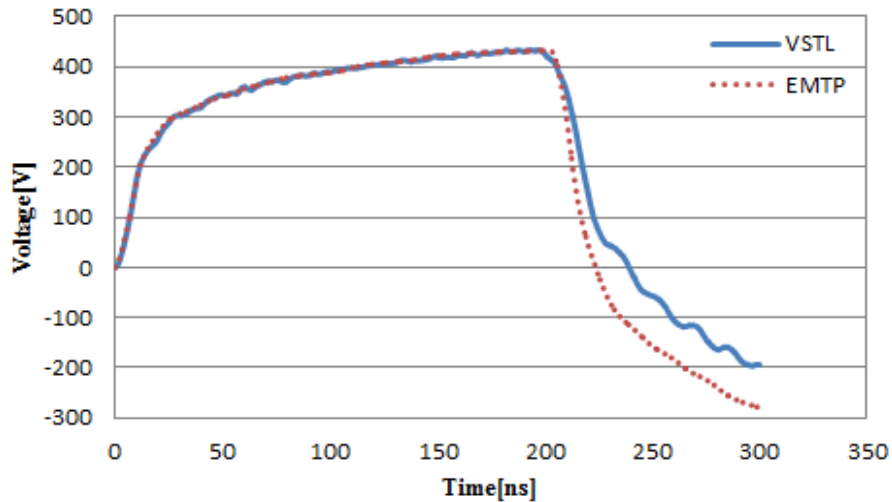
Number	Length[m]	Surge impedance between outer conductor and ground[Ω]	Characteristic impedance[Ω]
1	Same value shown in Table 7.3 and Table 7.4		20.2
2			
3			
4			
5			
6			
7	5	375.0	
8	5	399.0	
9	10	417.0	
10	0.3333	444.0	

図 7.8 にケーブル長 10m および 30m 時の VSLT rev と EMTP との比較結果を示す。両条件において計算結果はよく一致していることが分かる。10m の条件では 79ns 以降、30m の結果では 210ns 以降から、提案モデルと VSTL rev の解析結果にずれが生じている。VSTL rev においては電磁波の伝搬により生じる減衰が考慮されている。一方、EMTP における各水平ケーブルは、入力された電流や電圧波形を、電磁波の伝搬速度とケーブル長から求まる時間差後に出力端子から出力するようなモデルであるため、伝搬による減衰はほとんど考慮されていない。分割モデルを用いることで、大地からの反射波が到来するまでの間は、外部導体－大地間のインピーダンスの違いにより電圧波形が模擬されているが、反射波重畳以降ではそれが模擬できてないため、ずれが生じたと考えられる。後節ではあるが、7.3 節にてケーブルの減衰を模擬する手法について紹介する。

結果として、提案モデルは使用するケーブル長に合わせインピーダンスを調整することで垂直に配置されたケーブルを EMTP で取り扱うことが可能であることを示している。



(a) condition of 10m



(b) condition of 30m

Fig. 7.8 Comparison result between VSTL rev and EMTP proposal model

7.3 鉄塔に敷設された引き込みケーブルにおけるサージ解析

7.3.1 VSTL rev 解析モデル

図 7.9 に、VSTL rev にて作成した鉄塔に併架されたケーブルのサージ解析モデルを示す。解析モデルは電力用ケーブル、ケーブルヘッド、架空送電線、鉄塔および電圧測定用の零電位線から構成されている。解析空間のサイズを $64.72\text{m} \times 52.43\text{m} \times 60.00\text{m}$ とし、解析空間の刻みは、表 7.6 に示すように 0.002m から 2.0m の不当均一セルを用いた構成としている。また解析空間を囲む 6 つの面には、2 次の Liao の吸収境界面を適用することで、各境界面において電磁波が反射しないように処理をしている。ケーブルおよび架空送電線

については一相のみの解析としている。

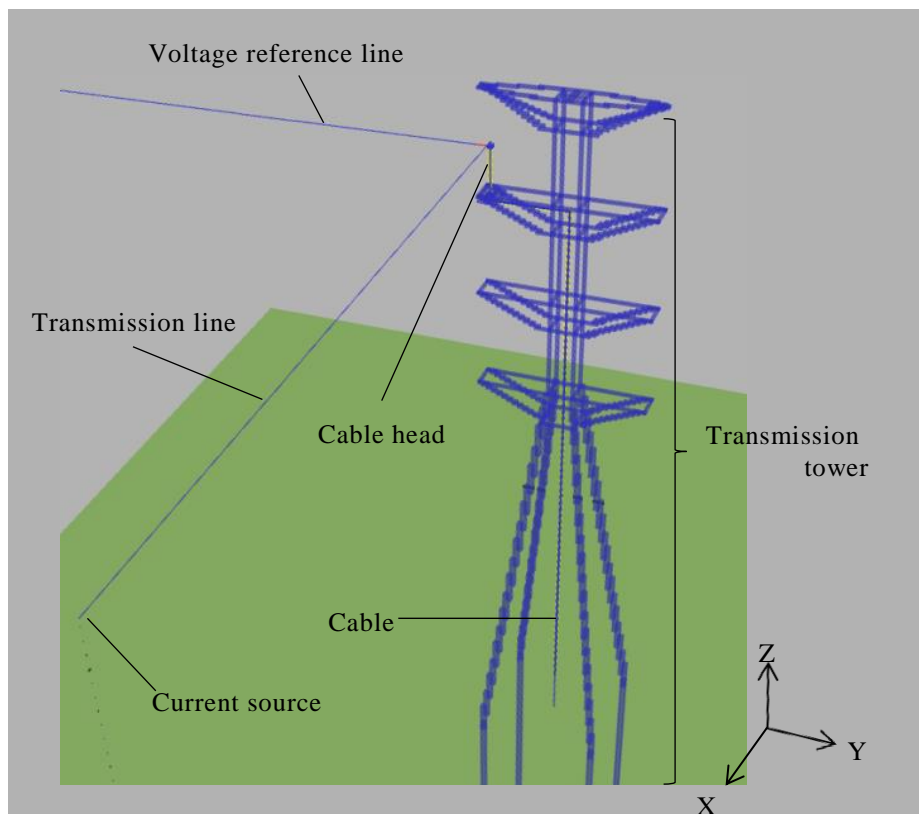


Fig. 7.9 Analysis model

Table 7.6 Parameter of analysis space

NX	DX[m]	NY	DY[m]	NZ	DZ[m]
5	2.000	5	2.000	10	1.000
6	1.000	6	1.000	2	0.100
8	0.500	8	0.500	77	0.200
60	0.100	33	0.100	91	0.100
500	0.002	260	0.002	1	0.050
55	0.100	1	0.080	225	0.002
8	0.500	24	0.100	16	0.100
6	1.000	150	0.002	150	0.002
4	2.000	26	0.100	20	0.100
4	0.400	215	0.002	10	0.002
1	0.200	28	0.100	1	0.080
4	0.040	8	0.500	19	0.200
4	0.010	6	1.000	34	0.500
10	0.002	5	2.000		
10	0.020				
10	0.200				
5	2.000				

続いて、図 7.10 に解析モデルの詳細を示す。

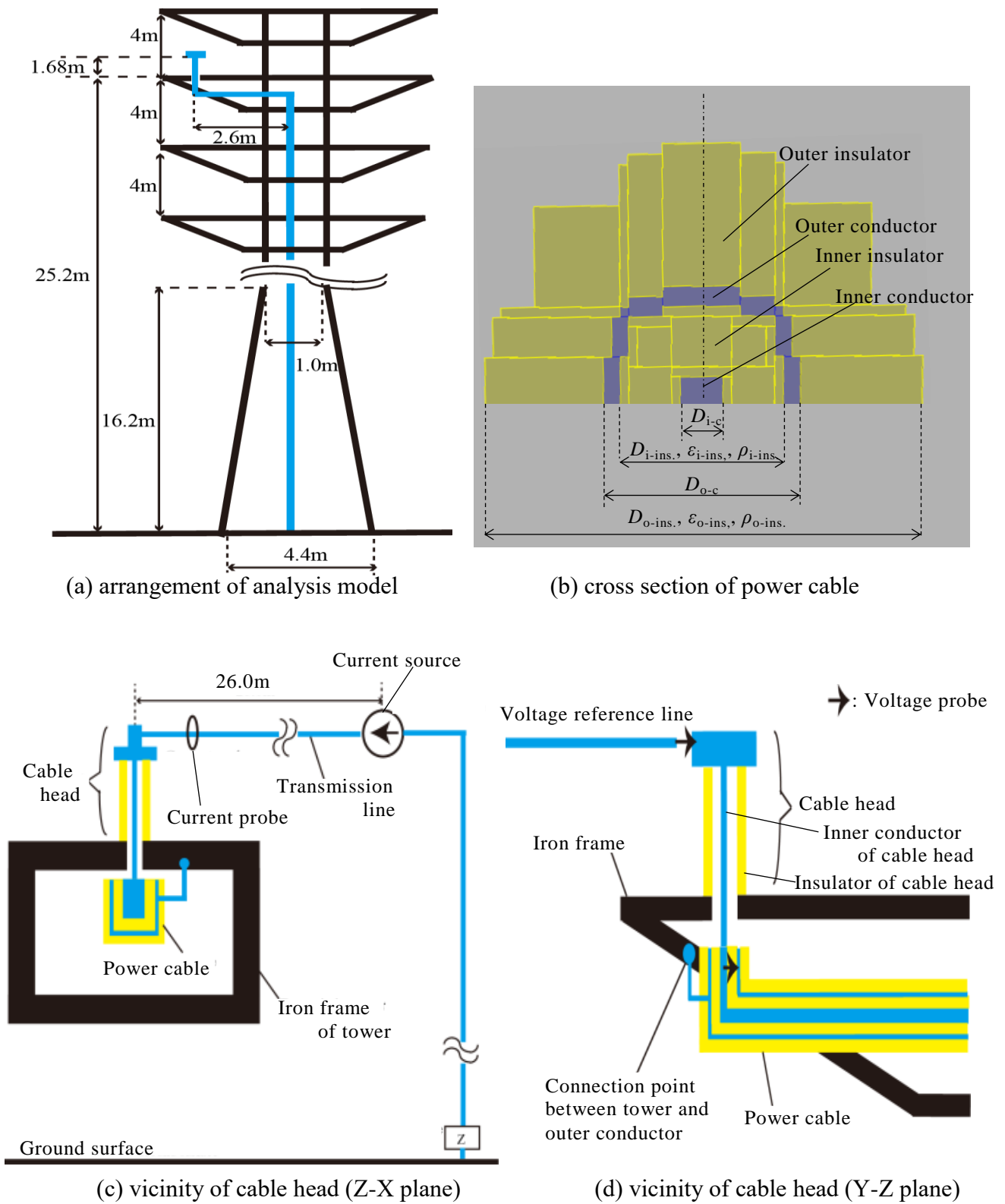


Fig. 7.10 Detail diagram of analysis model

図 7.10(a)は鉄塔の構造およびケーブルの配置を示している。鉄塔は高さ 29.2m で、格段のアーム間距離は 4m としている。また、ケーブルは鉄塔に沿うように配置しており、大地側において芯線は完全導体大地と接続されている。図 7.10(b)は電力用ケーブルの断面図を示しており、導体部は直方体完全導体を組み合わせ、絶縁部は直方体誘電体を組み合わせることで模擬している。ケーブル各部のパラメータを以下に示す。

- ・芯線外径 D_{i-c} : 10mm
- ・内部絶縁物外径 D_{i-ins} : 38mm, 比誘電率 ϵ_{i-ins} : 3.0, 抵抗率 ρ_{i-ins} : $1.0 \times 10^{16} \Omega\text{m}$
- ・外部導体外径 D_{o-c} : 46mm
- ・外部絶縁物外径 D_{o-ins} : 100mm, 比誘電率 ϵ_{o-ins} : 3.0, 抵抗率 ρ_{i-ins} : $1.0 \times 10^{16} \Omega\text{m}$

図 7.10(c)は、ケーブルヘッド近傍の Z-X 平面を示している。ケーブルヘッドから 26m 離れた位置に電流源を設け、電流源とケーブルヘッド頂上のシールド導体は、架空送電線で接続されている。本解析では、電流源から印加された電流が、架空送電線を伝搬し、ケーブルへ侵入してきた際のサージ現象について解析している。シールド導体は、ケーブルヘッド内の導体を介して、電力ケーブルの芯線に接続されている。シールド導体と鉄塔とを絶縁する碍子部として、誘電体モデルを使用し、その抵抗率を $1.0 \times 10^{16} \Omega\text{m}$, 比誘電率を 6 としている。図 7.10(d)にケーブルヘッド近傍の Y-Z 平面を示す。大地面に対して水平かつ、架空送電線および鉄塔に対して垂直な配置となるように、吸収境界面から零電位線を配置し、ケーブルヘッドシールド導体との間に電圧測定用のギャップを設けている。

本解析モデルの解析時間は、Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2680 v3, 24 コア, メモリ 63.9GB を用いて、1 データ当たり 15 日程度である。ただし、モデルの作成時間は含めていない。

7.3.2 EMTP 解析モデル

EMTP にて、垂直に配置された構造物のサージ現象の取扱いが困難である事は説明したとおりである。さらに、今回は垂直ケーブルのみではなく、鉄塔などの構造物をも模擬する必要がある。そこで、VSTL rev で作成したモデル(図 7.9)を、EMTP にて取り扱うにあたり、7.2 節で提案した垂直同軸ケーブルと、電気学会で提案された鉄塔 4 段モデルを用いることで模擬することとした。電気学会鉄塔 4 段モデルとは、EMTP において鉄塔のサージ現象を取り扱うために提案されたモデルである⁽²⁾⁽³⁾⁽⁷⁾。図 7.11 は、4 段モデルを示しており、各部位をサージの伝搬を表現するための LINE モデル、減衰定数を抵抗およびインダクタンスの並列インピーダンスで表現するモデルである⁽⁸⁾。LINE モデルは、配線長 (*Line length*), サージインピーダンス (Z_s), 電磁波の伝搬速度 (*Propoagation velocity*)をパラメータとする。図 7.12 に示すように、Line モデルは、入力された電流波形を、入力された時点から伝搬速度と配線長で計算される時間差後に出力する EMTP 用の解析モデルである⁽⁹⁾。

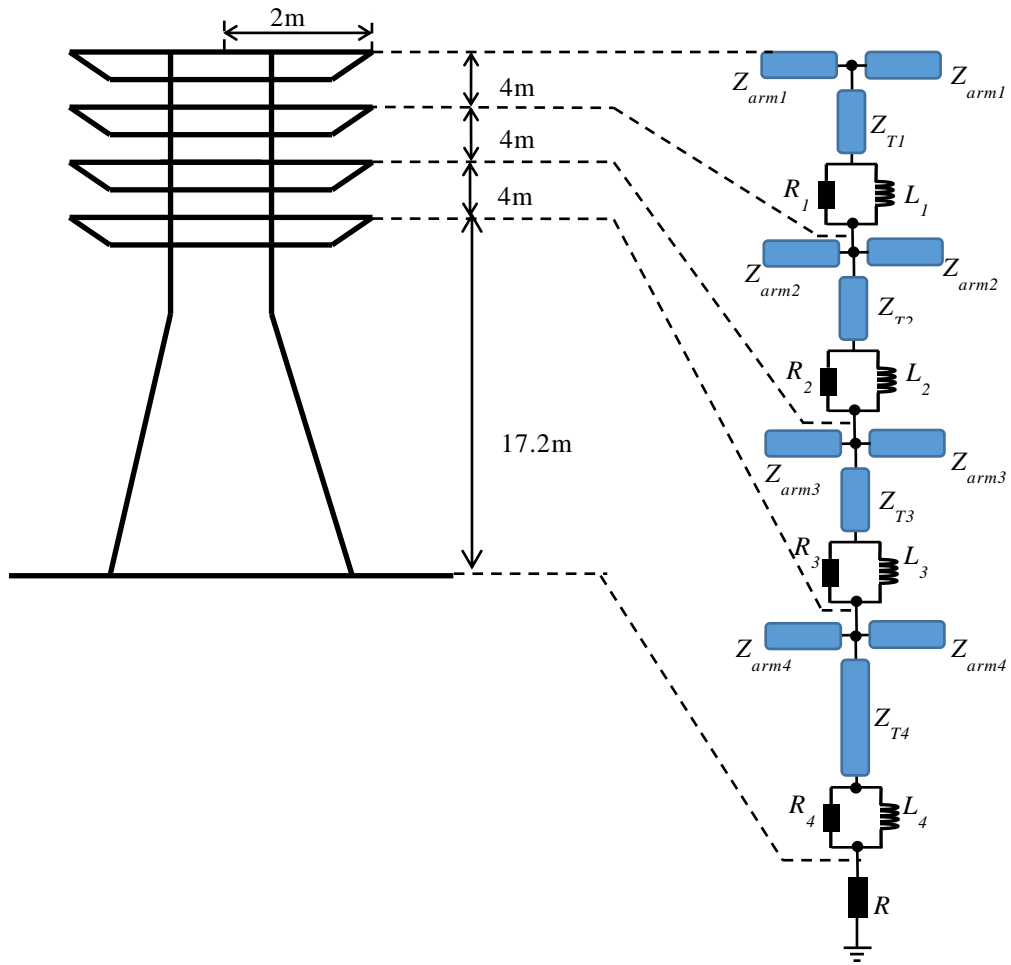


Fig. 7.11 Transmission tower 4 story model

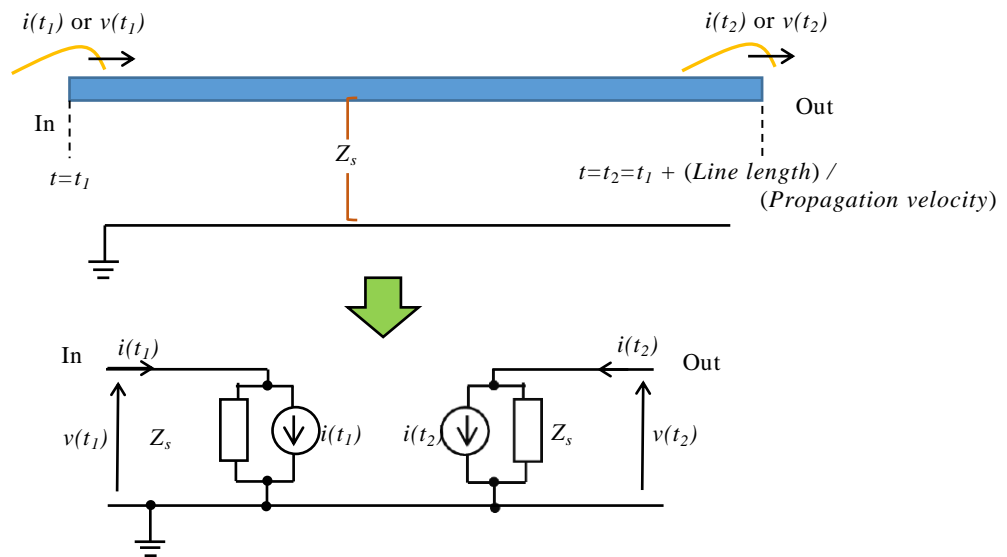


Fig. 7.12 Diagram of Line model

図中のアーム間のサージインピーダンス Z_{T1} から Z_{T3} は 220Ω , Z_{T4} は 150Ω が一般的な値として用いられる⁽⁸⁾。同部位の長さについては図に示すように Z_{T1} から Z_{T3} の LINE モデルは 4m , Z_{T4} は 17.2m として、鉄塔の垂直部位と等しい長さとしている。また電磁波は LINE モデル上を、光速($300\text{m}/\mu\text{s}$)で伝搬するようにしている。より詳細な伝搬現象を取り

扱うため、鉄塔モデルに加えアーム部位の模擬も行い、アーム部のサージインピーダンスはそれぞれ鉄塔部位のサージインピーダンスと等しくし、長さをそれぞれ 2m としている。各段のパラメータの詳細および算出法を以下に示す⁽⁸⁾。

1)サージインピーダンス

鉄塔上部 $Z_{T1}=Z_{T2}=Z_{T3}=220\Omega$ (鉄塔上部), $Z_{T4}=150\Omega$ (鉄塔下部)

2)サージの伝搬速度

伝搬速度 $v=c$ (光速 300m/ μ s)

3)時定数(L/R)

$L/R = \tau$ (鉄塔内往復伝搬時間) $=2H/v$ (ただし H は鉄塔高さ)

4)減衰定数

上部減衰定数 γ_1 と下部減衰定数 γ_2 を等しく、かつ全体の減衰定数 γ を 0.8 とする。すなわち $\gamma = \gamma_1 \times \gamma_2 = 0.8$ より, $\gamma_1 = \gamma_2 = 0.8944$

5) R および L の算出

上部の単位長当たりの抵抗値 r_1

$$r_{1or2or3} = \frac{-2Z_{1or2or3} \ln \gamma_1}{h_1 + h_2 + h_3}$$

(ただし h_i は各アーム間距離[m]である)

下部の単位長当たりの抵抗値 r_4

$$r_4 = \frac{-2Z_4 \ln \gamma_2}{h_4}$$

(ただし h_4 は最下段アームから大地までの距離[m]である)

を用いて,

$$R_i = r_i h_i, \quad R_1 = r_1 h_1, \quad R_2 = r_1 h_2, \quad R_3 = r_1 h_3, \quad R_4 = r_4 h_4$$

$$L_i = R_i \tau \quad (i=1,2,3,4)$$

上式より、各部位の抵抗およびインダクタンスを

$$R_1 = R_2 = R_3 = 16.4\Omega, \quad L_1 = L_2 = L_3 = 3.0\mu\text{H}$$

$$R_4 = 33.5\Omega, \quad L_4 = 6.2\mu\text{H}$$

と決定した。今回の解析においては完全導体大地を用いているため、接地抵抗 R_E は 0Ω としている。

続いて、図 7.13 に EMTP における解析モデルを示す。VSTL rev のモデルではケーブルの外部導体はケーブル最上部にて鉄塔と接続されているため、EMTP モデルにおいてもケーブル最上部の外部導体と鉄塔のアーム 2 段目とを接続している。また、ケーブル中のサージ減衰を模擬するため、最下段にてケーブル芯線と大地との間にインダクタンス(L_D : $35\mu\text{H}$)と抵抗(R_D : 183Ω)を並列接続したインピーダンスを、芯線－外部導体間にキャパシタンス(C_D : $0.7\mu\text{F}$)を接続している。

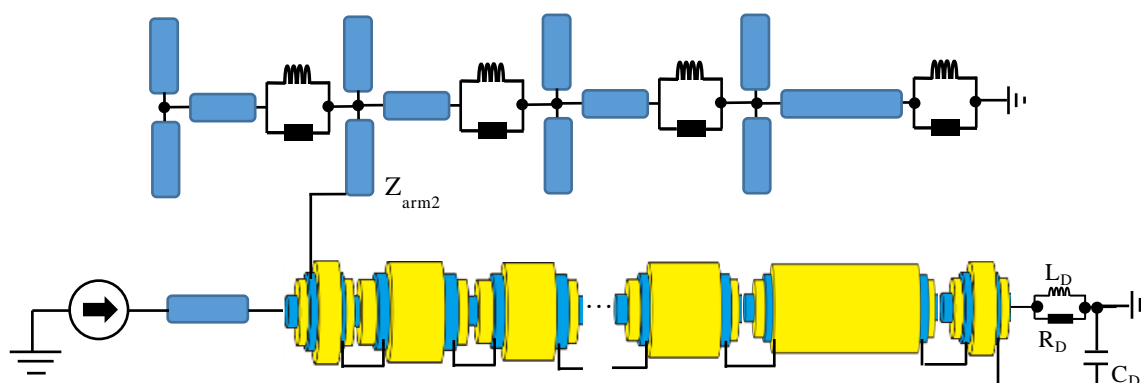


Fig. 7.13 Analysis model in EMTP

各ケーブルのパラメータを表 7.7 に示す。各ケーブルの特性インピーダンスは図 7.10 に示したケーブルの半径および誘電率から 46.5Ω を求めた。各部位の長さおよび外部導体－大地間のサージインピーダンスは表 7.3, 表 7.4 および表 7.5 にならうパラメータを採用した。

Table 7.7 Each horizontal cable's parameter for simulation of vertical cable

Number	Length[m]	Surge impedance between outer conductor and ground[Ω]	Characteristic impedance[Ω]
1	0.3333	88.0	46.5
2	1.5113	239.7	
3	1.5113	281.3	
4	1.5513	305.6	
5	2.5000	336.0	
6	2.5000	358.0	
7	5.0000	375.0	
8	5.0000	399.0	
9	7.4000	417.0	
10	0.3333	444.0	

図 7.14 に VSTL rev 解析および EMTP 解析にて使用した電流波形を示す。本解析では、サージ電流波高値 I_p および立ち上がり時間 T_f をパラメータとしている。 I_p と T_f の組み合わせは以下の三通りである。

$$(I_p=1\text{kA}, T_f=1\mu\text{s}), (I_p=10\text{kA}, T_f=1\mu\text{s}), (I_p=1\text{kA}, T_f=0.5\mu\text{s})$$

I_p について、落雷により発生する雷電流の 95% が 10kA であるため選択した。電流値によるサージ電圧の変化を確かめるため、10kA よりも高頻度で発生しうる 1kA を次いで選択した。

T_f について、規格で定義される $1.2\mu\text{s}$ に近い値として、 $1\mu\text{s}$ を選択した。また、 T_f によるサージ電圧の影響も考えるため、 $1\mu\text{s}$ の半値である $0.5\mu\text{s}$ を選択した。

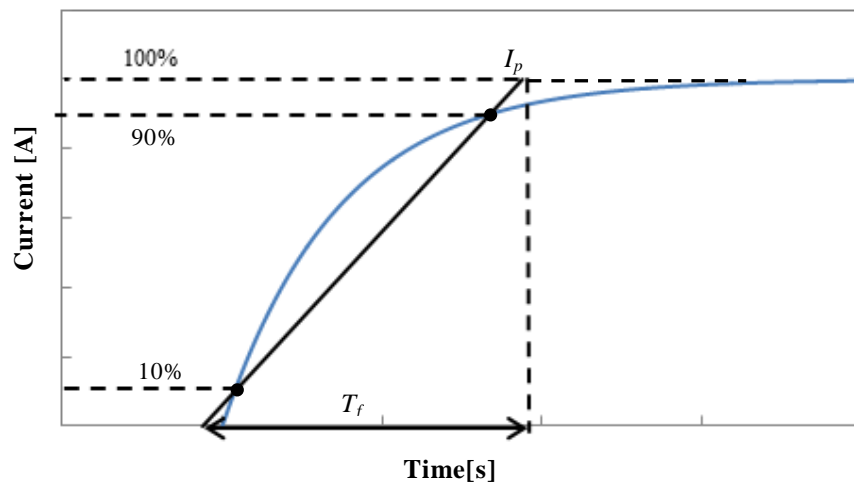


Fig. 7.14 Applied surge current

EMTP による解析時間は、Intel(R) Core(TM) i5-3470 CPU, 4 コア, メモリ 19.9GB を用いて約 1 分程度である。ただし、モデルの作成時間は含めていない。

7.3.3 解析結果

EMTP の提案モデルおよび VSTL rev を用い、ケーブルヘッドシールド導体と零電位線間の電圧(以下、ギャップ間電圧と呼ぶ)およびケーブル頂上の内部導体-外部導体間の電圧を計算した。図 7.14 は EMTP および VSTL rev のギャップ間電圧の解析結果の比較を、図 7.15 は内部導体-外部導体間電圧の解析結果の比較を示している。図 7.15 および図 7.16 の(a), (b)は立ち上がり時間 T_f を $1.0\mu\text{s}$ とし、サージ電流の波高値 I_p をそれぞれ 1kA, 10kA とした条件での解析結果を、(c)は T_f を $0.5\mu\text{s}$, I_p を 1kA とした条件における解析結果を示している。各結果を比べると、EMTP および VSTL rev の解析波形は非常によく一致していることが分かる。

ギャップ間電圧に関して、電圧が立ち上がりはじめ、図 7.15 中の矢印の位置で減少が始まっている。これは電圧発生開始から約 $0.2\mu\text{s}$ 後である。ケーブル頂上から印加された電流(電磁波)が、ケーブル中あるいは鉄塔上を伝搬し、再度頂上まで往復すると、その距離は

55.6m(ケーブル全長 27.8m)である。電磁波の伝搬速度は光速 $300\text{m}/\mu\text{s}$ と仮定すると、電磁波がケーブルを往復する時間は $0.185\mu\text{s}$ となる。また、ケーブルの内部導体は大地面で完全導体大地に接続されているため、電圧は負の反射係数で反射される。したがって、反射波重畳後、頂上電圧は減少し始める。一方、電流源側においては、電流源が無大抵抗を有していることから、電圧は正の反射係数で反射され、再度ケーブルの頂上へ伝搬する。この時、電流源にて反射された電圧の極性は、電流源に向かって伝搬する電圧の極性と等しいため、ケーブル頂上に達してもギャップ間電圧は減少し続ける。

その後、電流源にて反射された電圧は、ケーブルを介して大地へ伝搬し、再度、大地にて反射される。その際に極性が逆転する。したがって再度大地にて反射された電圧が、ケーブル頂上に到達した際には、ギャップ間電圧は上昇する。そのため、ギャップ間電圧は図 7.15 に示すような振動性の波形となる。

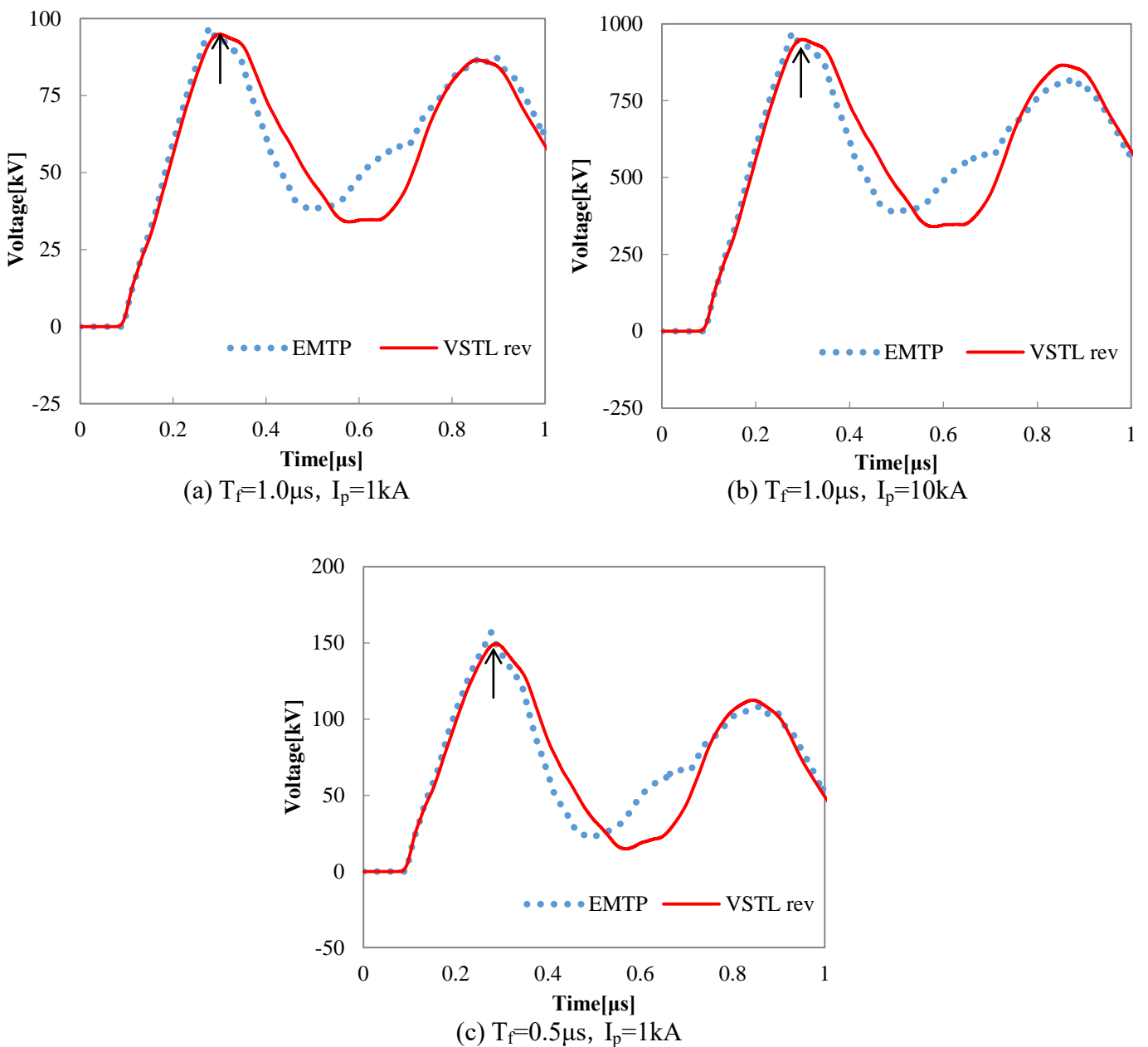


Fig. 7.15 Analysis result of voltage across the gap in EMTP and VSTL rev

芯線－外部導体間電圧に関して、電圧が立ち上がりはじめ、図 7.16 中の矢印の位置で再度電圧が上昇していることが分かる。また、電圧発生から再上昇までの期間は約 $0.3\mu\text{s}$ である。ケーブル全長 55.6m と、 $0.3\mu\text{s}$ を用いて伝搬速度を計算すると、約 $185.3\text{m}/\mu\text{s}$ となり、ギャップ間電圧の伝搬速度に比べ遅くなっている。これは 7.2.2 節で説明した現象のように、芯線－外部導体間の電圧は、同部位に存在する誘電体の影響で、伝搬速度が光速に比べ遅れるためである。

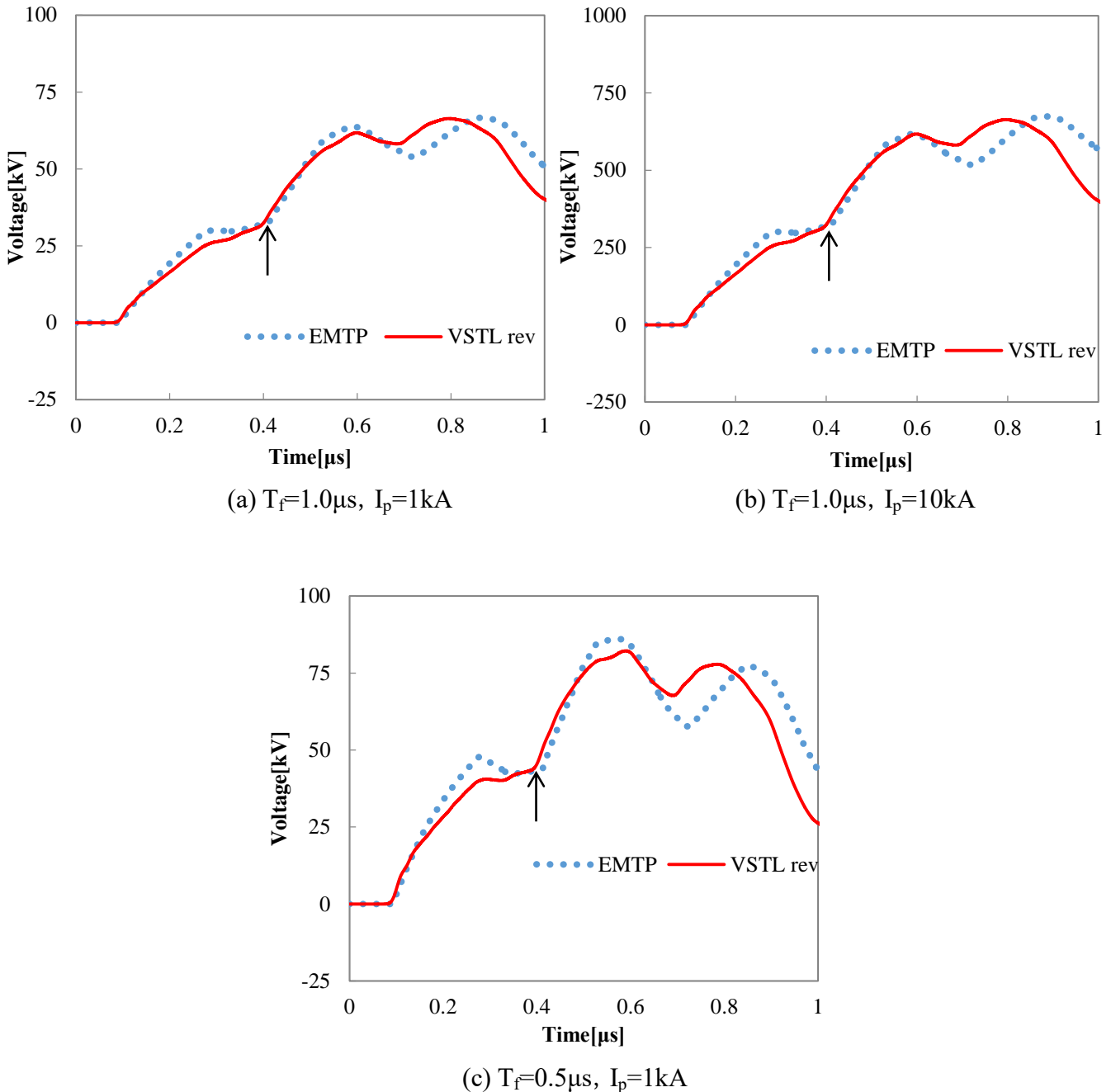


Fig. 7.15 Analysis result of voltage between inner and outer conductors in EMTP and VSTL rev

表 7.8 に EMTP および VSTL rev の解析結果における、ギャップ間電圧および芯線－外部導体間電圧の最大値、そして VSTL rev の解析結果を正とした際の EMTP 解析における

電圧最大値の誤差を示している。全条件において、両解析結果の最大値の誤差は 6%以下であった。この誤差ならびに波形が 0.65 μ s 以降一致していないのは、VSTL rev が伝搬による電磁波の減衰を模擬できることに對し、EMTP のケーブルモデルならびにラインモデルでは、減衰までは考慮できないことに起因している。今回、ケーブルモデルの最下段のみに、減衰インピーダンスを適用したため、誤差が生じたと考えられる。しかしながら、反射波の重畳するタイミングや、ギャップ間電圧に對して、芯線－外部導体間の電圧の伝搬速度が遅くなることなど、両解析結果における特徴は、よく一致している。

Table 7.8 Maximum surge voltage in each condition

T _f [μ s]	I _p [kA]	Surge voltage and error					
		Across the gap			Between inner and outer conductors		
		EMTP [kV]	VSTL rev [kV]	Error [%]	EMTP [kV]	VSTL rev [kV]	Error [%]
1	1	97.2	94.9	2.42	66.7	66.4	0.453
1	10	972	949	2.42	674	664	1.51
0.5	1	157	149	5.37	86.1	82.2	4.74

7.4 ケーブルの分割手法について

大地に對して垂直に敷設された同軸ケーブルを取り扱うには、大地－外部導体間のサージインピーダンスが異なり、径方向のパラメータが等しいケーブルを直列に接続することで模擬可能であることを示した。しかしながら、今回の模擬手法は、VSTL rev の結果に對して、EMTP モデルをフィッティングすることで得られた結果であり、大地－外部導体間のサージインピーダンスの値の決定法ならびに、各水平ケーブル長の決定法にまでは至っていない。表 7.9 は 27.5m の垂直電力ケーブルを、EMTP にて模擬した際の、各水平ケーブルの長さ(Length of each part)、各部位の合計長(Total length)ならびに各部位の大地－外部導体間のサージインピーダンスについてまとめている。また、図 7.16 は各部位の合計長を横軸、サージインピーダンスを縦軸とした図である。

これらの結果より、各部位のサージインピーダンスの値は、各部位の合計長の対数値と比例関係にあることが分かる。加えて、垂直導体のサージインピーダンスは、垂直導体の高さ h [m]および導体半径 r [m]の逆数の対数値に比例する。これは、垂直ケーブルについても適用されると考えられ、この結果は、分割部位のパラメータを決定するための重要な知見であると考えられる。

Table 7.9 Relationship between each cable and surge impedance

Length of each part[m]	Total length[m]	Surge impedance between outer and inner conductors[Ω]
0.333	0.333	88.0
1.5113	1.8443	240
1.5113	3.3556	281
1.5113	4.86673	306
2.5	7.36673	336
2.5	9.86673	358
5	14.86673	375
5	19.86673	399
7.6	27.46673	417

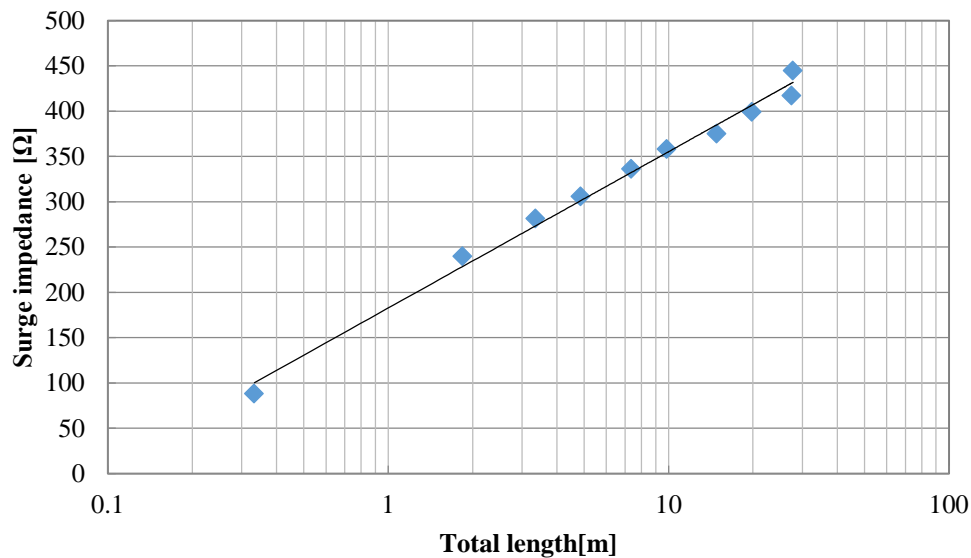


Fig.7.16 Relationship between cable length and surge impedance

7.5 まとめ

大地に対して、垂直に配置された実サイズの電力ケーブルを、EMTPにて取り扱う手法について提案した。ケーブルの半径やケーブルが有する絶縁物の誘電率などの径方向のパラメータが等しく、外部導体-大地間サージインピーダンスおよび、長さの異なる複数の水平ケーブルモデルを直列に接続する手法でそれが実現できることを述べた。これを利用し、垂直配置された電力ケーブル単体のサージ解析および、鉄塔に組み込まれた電力ケーブルのサージ解析をEMTPにて取り扱う手法の提案に関して検討した。

垂直ケーブル単体を、EMTPにて取り扱うには、サージ現象に関して重要な部位である初期部を適切に模擬し(本解析では5mまでの部位)、垂直ケーブル長に応じて

ケーブル長を追加していくことで、解析を要するケーブルのサージ現象を取り扱うことが可能であることを示した。また、鉄塔のサージ現象を EMTP で回路的に取り扱う手法である電気学会の鉄塔 4 段モデルに、垂直電力ケーブルを組み込むことで、EMTP において鉄塔に組み込まれたケーブルの模擬も可能であることを示した。結果として、本提案モデルは垂直ケーブル単体時の模擬のみではなく、電力系統に組み込まれた鉄塔の模擬にも適用できる有用なモデルであることが分かった。

第 7 章 参考文献

- (1) 原 武久, 山本 修, 林 宗明, 上之園 新佐: 「垂直導体および垂直複数導体サージインピーダンスの実験式」, 電学論 B, 110 巻 2 号, pp.129-137 (1990)
- (2) Y.Baba and M.Ishii “ Tower models for fast-front lightning currents” Trans, IEE Japan. Vol.120-B, No.1, pp18-23, 2000
- (3) 野田 琢: 「FDTD 解析に基づく雷サージ解析用鉄塔モデル」, 電学論 B, 127 巻 2 号, pp.379-pp.387 (2007)
- (4) 野田 琢, 松原 廣治, 横山 茂: 「FDTD 法による解析結果を用いた新しい雷サージ計算用鉄塔モデル」, 電力中央研究所報告, H04012(2005)
- (5) 森 望, 井上 利之, 山下 泰浩, 吉田 俊朗, 丸山 義雄, 田辺 輝義: 「鉄塔立上ケーブルのサージ伝搬特性」, 電学論 B, 111 巻 1 号, pp.99-107 (1991)
- (6) 田邊 修大, 馬場 吉弘, 長岡 直人, 雨谷 昭弘: 「FDTD 法による 2 層導体を有するケーブルの過渡応答解析」, 電学論 B, 121 巻 11 号, pp.1566-1571(2001)
- (7) N.Okazima, Y.Baba, N.Nagaoka, A.Ametani, K.Tenma, and T.Shimomura,” Propagation characteristics of power line communication signals along a power cable having semiconducting layers” IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, Vol.52, pp.756-759(2010-8)
- (8) 「発電所および地中送電線の耐雷設計ガイド」, 電力中央研究所報告 T40, (1995-12)
- (9) 雨谷 昭弘, 長岡 直人, 馬場 吉弘, 菅 雅弘: 「電気・電子回路解析プログラム EMTP 入門」, オーム社(2001-1)

第 8 章 結論

情報化社会の進展に伴い、電力機器や家電製品などの電気機器はネットワーク化、スマート化、また IoT 化によって、さらに高効率化され、我々の生活を一層豊かにしていくと考えられる。しかしながら、これらの機器が進歩していく一方で、高電圧・低電圧系統に関わらず、電力系統に発生するサージ現象による事故や故障の危険性にさらされる可能性がある。

高電圧系統において発生したサージに対しては、SPD(サージ防護デバイス)を用いた過電圧抑制、鉄塔上部への架空地線の敷設などにより着実にサージ対策が進んでいる。しかしながら、鉄塔に併架された電力ケーブルに発生するサージ現象に関しては、サージ電圧あるいはサージ電流の伝搬現象や、それに伴う反射・透過現象などを解析できる手法が無い。加えて、低電圧系統においては、サージ現象による過電圧および過電流の対策は十分ではないことが多数報告されてきた。

本研究では、低電圧電力系統のサージ現象について議論するにあたり、家屋近傍に落雷が発生した条件において、屋内電気配線に発生する誘導雷について、VSTL rev で解析した。その解析では、落雷点から放出される電磁波に伴って発生するサージ電流およびサージ電圧の発生、発生したサージ電流や電圧が、屋内の電気配線上を伝搬するメカニズムや、発生したサージ電圧の抑制手法について検討した。

また、サージ解析において、垂直に配置された電力ケーブルに発生するサージの伝搬現象を、回路的に取り扱う手法が無く、その提案が求められている。垂直配置されたケーブルのサージ特性を回路的に取り扱うことができれば、発電機や変圧器、その他の電力機器が接続された状態における電力系統に発生するサージ解析を、より詳細なものとして、電力機器の絶縁設計や、発生したサージ電圧や電流の抑制に関する検討の指針の一つになる。そこで、本研究では、垂直に配置された電力ケーブルや、鉄塔に併架された電力ケーブルに発生するサージ電圧を、回路的な過渡現象解析ソフトである EMTP にて取り扱う手法を提案した。

本章では、本研究にて得られた結果、および考察について章ごとにまとめて示す。そして最後に今後の展望を示す。

8.1 本研究で得られた成果

第 1 章 緒論

電力系統は我々のライフラインともいえ、その系統において停電や事故が発生すると、身近なことから、生産活動などの経済活動にまで多大な損失を与える。高電圧・低電圧に関わらず、電力系統・電力設備に多大な影響を与える原因の一つにサージ現象があり、その発生や伝搬に関するメカニズムについて議論する必要があることを述べた。そして、本研究の目的は、電力系統や電気配線に発生するサージの発生および伝搬メカニズム

の解明, ならびに他系統への波及に関する調査を行い, その対策を講じること, 加えて, より高精度なサージ解析のためのモデルの提案をすることである事を示した。

第2章 サージ現象

サージ現象は商用周波に比べて急峻, あるいは高周波という特徴から, 架空送電線や配電線を分布定数回路として考慮する必要がある。その際, 導体が大地面に対して水平・垂直(以下, 水平導体および垂直導体と呼ぶ)であるかによってサージインピーダンスの考え方が異なる。加えて, 導体条数や相導体の配置によっても様相が変わり, 一層複雑な現象となる事, サージ電圧や電流の発生, 伝搬現象および水平導体と垂直導体のサージインピーダンスに関する考え方, そして近接効果などについて述べた。

第3章 雷現象と諸特性

高度情報化社会が進展し, なお加速し続ける現在, 一般家庭などで使用される電気・電子製品はネットワーク化, 低電圧化, 集積化, 高周波駆動化されている。しかしながら, これらの機器が高度化されていく一方で, 外部ノイズやサージ現象に対する耐力の低下が懸念され, 低圧配電システムにおける雷サージ対策の確立が求められている。したがって, 雷サージを調査するにあたり, 重要となる, 雷雲の発生過程, 雷放電過程, 雷電流特性, 発生するサージ現象, ならびに家電機器の被害推移について知る必要があるため, それらについて述べた。

第4章 低圧配電システムの雷害対策

低電圧配電システムにおける雷サージ対策は, 従来, 機器単体や電源側だけの対策が中心であった。しかし微弱なエネルギーで動作する電気機器を, 落雷のような巨大なエネルギーを持つ現象の影響から防護するためには従来のような対策では不十分であり, 高度にネットワーク化された電気機器をシステムとして把握する必要がある。そうした上で, 雷サージの対策を検討することが非常に重要であるため, 雷サージ対策の基本的な考え方を始めとし, 雷保護装置の特性や必要性について述べた。

第5章 建物近傍大地への落雷により発生する屋内配線サージ解析

現代社会の様々な分野において, 電気機器の電子化やネットワーク化が進む一方で, 機器の耐電圧性能の脆弱化している。そのため, サージ現象の影響を受けやすく, 落雷時に生じる急激な電磁界変化が, 周辺の低電圧システムへサージを引き起こす誘導雷サージによる被害も多数報告されている。そこで, 低電圧配電システムにおける雷過電圧の対策を講じるためにも, 雷撃時に発生する過渡電磁界を受ける構造物や低電圧配電システムでのサージ現象

を検討する必要があった。そこで、本研究では、汎用サージ解析プログラム VSTL rev(FDTD 法をベースとしたサージ解析プログラム)を用い、大地への落雷時における落雷地点周辺の低電圧電力系統に生じる雷サージ現象について考察した。以前、落雷地点近傍における誘導雷サージ現象について検討したが、計算容量の問題から家屋内配線、集中定数抵抗により模擬した変圧器や完全導体大地を用いて接地抵抗を集中定数で模擬した検討を行うにとどまった。今回はさらに屋外の配線、大地の抵抗率も考慮し、屋内配線に発生する誘導雷サージと大地抵抗率との関係および SPD 敷設条件との関係について検討した。誘導雷による電気機器への脅威は、特にその過電圧が問題になるとされている。

本解析結果は、大地の抵抗率の変化によるサージ現象の変化が過去に多機関から公表された文献中の実験結果と似た特徴が見られたこと、サージの測定地点への到達時間から考えられる伝搬時間の差や SPD によるサージ現象の変化は合理的なデータであることが示された。また、落雷により発生した電磁波は空間および屋外の配電線を伝搬する。その電磁波が原因となって、屋内の電気配線にサージ過電圧が発生することを明らかにした。近傍雷撃による誘導雷サージであっても、SPD の敷設なしには電気機器を破壊するレベルの過電圧が発生する可能性を示した。この傾向は、いずれの大地抵抗率においても確認された。さらに、近年サージ抑制手法として採用されている分電盤に SPD を敷設した条件において、発生する過電圧を減少させることはできたものの、サージ電圧の伝搬および反射現象にともなって、振動性の高電圧が発生し、完全に抑制することは不可能であることを示した。分電盤 SPD に加え、機器側にも SPD を敷設することで、誘導雷サージが抑制されることが明らかになった。

第 6 章 FDTD 法による垂直同軸ケーブルにおけるサージ解析

EMTP のような回路解析において、大地に対して垂直に配置された同軸ケーブルの取り扱い手法の提案が望まれている。そこで本研究では、EMTP における大地と垂直に配置された同軸ケーブルのモデル化を目的としている。提案のためには、実機を用いた実験結果と提案モデルの解析結果とを比較し、その精度について議論する必要があるが、それは非常に困難である。実寸大のケーブルの模擬手法を提案するにあたり、VSTL rev と EMTP 提案モデルとの結果を比較することで提案モデルの精度確認とした。したがって、その前段階として VSTL rev 自身のサージ伝搬現象や電圧および電流解析について、解析精度を確認する必要があった。本章では垂直同軸ケーブルのサージ実験結果と VSTL rev による解析結果とを比較し、その解析精度について検討することについて述べた。

実験では測定用同軸ケーブルを銅板上に垂直に配置し、頂上側の芯線へサージ電流(ステップ波)を印加した際の、芯線－零電位線間電圧(ギャップ間電圧)、頂上部の芯線－外部導体間の電圧(芯線－外部導体間電圧)、注入電流について測定を実施した。VSTL rev では直方体型完全導体および直方体型誘電体を用いて、同軸構造を構成したモデルを作成し、解析を実施した。結果として VSTL rev を用いた同軸ケーブルのサージ解析は高精度かつ合理的であることを示した。

第 7 章 FDTD 法による垂直同軸ケーブルにおけるサージ解析

本章では、EMTP において、大地に対し垂直に配置された電力ケーブルなどの同軸ケーブルは、径方向の特性が等しく、外部導体－大地間サージインピーダンスおよび長さの異なる複数の水平ケーブルモデルを直列に接続することで、模擬できることを示した。

それを利用し、垂直配置された電力ケーブル単体のサージ解析および鉄塔に組み込まれた電力ケーブルを、EMTP にて取り扱う模擬手法の提案に関して検討した。

結果として、実サイズの垂直電力ケーブル単体を EMTP にて取り扱うにあたり、サージ現象の初期部を決定づけるケーブルの部位を適切に模擬し(本解析では 5m までの部位)、垂直ケーブル長に応じて分割ケーブルを追加していくことで、ケーブルのサージ現象を取り扱うことが可能であることを示した。また同電力ケーブルモデルを、EMTP 内の電気学会の鉄塔 4 段モデルに接続することで、鉄塔に組み込まれたケーブルの模擬も可能であることを明らかにした。

8.2 今後の展望

今後の研究は以下に示すような課題に沿って進んでいくと考えられる。一つ目はケーブルの分割手法の確立、二つ目はケーブルの減衰定数の決定法である。ケーブルの分割手法確立については第 7 章にて述べたので、本章では、ケーブルの減衰定数決定方法の確立について述べる。

ケーブル減衰定数決定法の確立

鉄塔に組み込まれた垂直ケーブルの、内部導体最下部と大地との間に抵抗とインダクタンスの並列インピーダンスを、内部導体－外部導体間にキャパシタンスを接続することで、ケーブルの減衰インピーダンスとした。これらのインピーダンスがない条件では、当然ながら減衰が生じず、VSTL rev の結果とは一致しない。また、これらの素子の値に不適切な値を選定することによっても波形が一致しない。そのため、第 7 章にて説明した電気学会鉄塔 4 段モデルの様に、垂直同軸ケーブルのケーブル長やケーブル頂上のインピーダンス値、あるいは特性インピーダンスを用いて減衰定数を求めるような手法の確立が必要とされる。