



Title	経済性と信頼性に基づく鉄道通信設備の設計・評価手法に関する研究
Author(s)	川村, 智輝
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13528号
Issue Date	2019-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k13528
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/74320
Type	doctoral thesis
File Information	Tomoki_Kawamura.pdf



博士論文

経済性と信頼性に基づく鉄道通信設備の設計・評価手法
に関する研究

川村智輝

2018 年 12 月

北海道大学 大学院情報科学研究科
システム情報科学専攻

本論文は北海道大学 大学院情報科学研究科に
博士（工学）授与の要件として提出した博士論文である。

川村智輝

審査委員：	主査	北	教授
	副査	五十嵐	教授
		小笠原	教授
		原	准教授

経済性と信頼性に基づく鉄道通信設備の設計・評価手法 に関する研究*

川村智輝

概要

近年、情報通信技術の発達により、鉄道通信設備においても LSI 等の半導体部品を使用した通信機器の導入が進んでいる。半導体部品は、雷サージをはじめとした過電圧に対して脆弱であることから、雷サージ等の過電圧に対する通信機器の耐力は低下傾向にあり、通信機器の過電圧への対策がより重要になってきている。設備の過電圧対策を考えるうえでは、対策にかかる費用（経済性）と過電圧への耐性（信頼性）の両方のバランスを考えて設計を行う必要があるが、鉄道通信設備においては雷サージによる影響を定量的に予測するための手法や、雷サージを考慮した設備設計のための手法が確立されていない。加えて、通信機器への直流給電の導入に関して、電力損失の低減や信頼性の向上等の観点から近年注目が集まっているが、鉄道通信設備においてはその効果について定量的な整理が進んでいないという課題がある。

また、近年、鉄道においても無線通信を活用した状態監視システムが注目されており、列車や鉄道沿線の設備の監視を目的とした通信設備の導入が進められている。列車に設置される通信設備では、車両の増解結や列車の走行によって無線通信への影響を受けることになる。しかし、これらの影響を考慮した通信設備の設計・評価のための手法は確立されていない。同様に、鉄道沿線に設置される通信設備では、沿線の様々な遮蔽物や列車によって無線通信が妨げられるが、これらの影響を考慮してシステムの設計・評価を行うための手法は確立されていないのが現状である。

本論文では、鉄道通信設備を対象として、雷サージによって通信設備に印加される電圧と電流を予測するための解析モデルを構築すると共に、雷害対策と経済性の両方の観点から、鉄道通信設備の接地方式を設計するための手法を提案した。また、鉄道通信設備を対象として、直流給電の導入効果について経済性と信頼性の両面から定量的に評価するための手法について検討した。さらに、列車や鉄道沿線の通信設備を対象として、経済性と信頼性の両方の観点を考慮した設計・評価を行うための手法を開発した。

キーワード：鉄道通信設備，雷サージ，接地方式，直流給電，無線センサネットワーク

*北海道大学 大学院情報科学研究科システム情報科学専攻，博士論文，SSI-DT79175211，2018 年 12 月 3 日

Study on Design and Evaluation methods for Railway Telecommunication Systems based on Economic Efficiency and Reliability[†]

Tomoki Kawamura

Abstract

In recent years, the development of information and communications technology has been advancing the introduction of telecommunication equipments using semiconductor components. Since semiconductor components are vulnerable to overvoltage, countermeasures against overvoltage of telecommunication equipments are becoming more important. In considering countermeasures against equipment overvoltage, it is necessary to design with consideration of both cost of measures and resistance to overvoltage. However, in railway communication facilities, methods for quantitatively predicting the effect of lightning surge and methods for equipment design considering lightning surge are not established.

In addition, in recent years, introduction of telecommunication equipments for monitoring train and railway facilities is ongoing. In the telecommunication equipments installed in a train, wireless communication will be affected due to vehicle coupling and decoupling and train running. Likewise, in communication equipments installed along railway track, wireless communication is interrupted by various shielding objects and trains along railway track. However, method for the design and evaluation of the system in consideration of these effects is has not been established.

In this paper, the author developed a lightning surge analysis model for railway telecommunication systems. In addition, from the viewpoint of both lightning protection and economic efficiency, a method for designing the grounding systems of railway telecommunication systems was proposed. Moreover, the author examined a method for quantitatively evaluating the introduction effect of DC power supply from both aspects of economic efficiency and reliability for railway telecommunication systems. Furthermore, In addition, the author developed methods for designing and evaluating the telecommunication systems along railway track in consideration of both economic efficiency and reliability.

Key words: Railway Telecommunication Systems, Lightning Surge, Grounding Systems, DC Supply, Wireless Sensor Network

[†]Doctoral Thesis, Division of Systems and Information Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido University, SSI-DT79175211, December 3, 2018

目次

第1章 序論	1
1.1 本論文の背景	1
1.2 鉄道における通信設備の現状	2
1.2.1 鉄道における通信設備の概要	2
1.2.2 列車運行用の通信設備	3
1.2.3 設備の状態監視用の通信設備	6
1.3 関連研究の動向	7
1.3.1 雷サージ対策に関する研究	7
1.3.2 無線センサネットワークの評価・設計に関する研究	8
1.4 本論文の目的と構成	8
1.4.1 本論文の目的	8
1.4.2 本論文の構成	9
第2章 機器室の通信設備を対象とした経済性と信頼性に基づく設計・評価手法	11
2.1 概要	11
2.2 機器室の通信設備を対象とした雷サージの解析モデル	11
2.2.1 想定する通信設備の構成	11
2.2.2 想定する雷サージの種類	12
2.2.3 通信設備の雷サージ解析モデル	12
2.2.4 実験による提案モデルの検証	19
2.3 機器室の通信設備を対象とした接地方式の設計手法	26
2.3.1 想定する通信設備の構成・想定する雷サージの種類	26
2.3.2 通信設備の接地方式の設計手法	26
2.3.3 多目的最適化手法について	29
2.3.4 数値実験による手法の検証	30
2.4 機器室の通信設備を対象とした給電方式の評価手法	37
2.4.1 想定する通信設備の構成	37
2.4.2 経済性と信頼性に基づく給電方式の評価手法	37
2.4.3 通信設備の給電方式の経済性と信頼性の評価	38
2.5 まとめ	41
第3章 鉄道車両の状態監視用の通信設備を対象とした経済性と信頼性の評価手法	43
3.1 概要	43
3.2 想定する通信設備	43

3.2.1	想定する通信設備の構成	43
3.2.2	車両増解結を考慮したネットワーク構築	44
3.3	鉄道車両の状態監視用通信設備を対象とした経済性と信頼性の評価手法	45
3.3.1	ネットワーク構築シミュレーション	46
3.3.2	ルーティングテーブルの生成	47
3.3.3	消費電力量のシミュレーション	47
3.4	数値実験による提案手法の検証	50
3.4.1	試算条件	50
3.4.2	試算結果	51
3.4.3	車両の増解結の影響に関する試算	53
3.4.4	列車の走行による通信環境の変化の影響に関する試算	53
3.4.5	ルーティングテーブルの影響に関する試算	55
3.5	まとめ	56
第4章	線路沿線の状態監視用の通信設備を対象とした経済性と信頼性に基づく設計手法	57
4.1	概要	57
4.2	想定する通信設備	57
4.3	線路沿線の状態監視用の通信設備を対象とした経済性と信頼性に基づく設計手法	58
4.3.1	線路沿線の環境を考慮した中継ノード数の最小化	59
4.3.2	WSNの消費電力量・データ到達率のシミュレーション	63
4.3.3	需給調整契約を考慮したMGの運用方策	66
4.4	数値実験	67
4.4.1	試算条件	67
4.4.2	試算結果	68
4.5	まとめ	70
第5章	結論	71
5.1	本論文のまとめ	71
5.2	今後の展望	72
	参考文献	73
	謝辞	77

図目次

図 1.1	列車運行に関わる通信設備の構成例	3
図 1.2	機器室における通信設備の構成例	5
図 1.3	鉄道設備の状態監視用の通信設備の基本構成	6
図 2.1	対象とする設備	12
図 2.2	雷サージ解析モデル	13
図 2.3	ケーブル定数の算出例（通信ケーブル）	14
図 2.4	ケーブル定数の算出例（信号ケーブル）	15
図 2.5	耐雷トランスの構成	16
図 2.6	耐雷トランスの等価回路	16
図 2.7	耐雷トランスの提案モデルと定数	17
図 2.8	接地極間の影響	19
図 2.9	通信設備全体の実験構成	20
図 2.10	シース注入時の結果（通信ケーブル）	21
図 2.11	心線注入時の結果（通信ケーブル）	22
図 2.12	耐雷トランス注入時の結果	23
図 2.13	シース注入時の結果（通信設備全体構成時）	24
図 2.14	心線注入時の結果（通信設備全体構成時）	25
図 2.15	提案手法のフロー	27
図 2.16	パレート最適解の概念図	30
図 2.17	雷サージ波形	31
図 2.18	想定する雷サージの侵入経路	32
図 2.19	通信機器に生じる電圧値（解①の接地条件時）	34
図 2.20	通信機器に生じる電圧値（全ての接地を 50Ω の接地極で共通化）	35
図 2.21	条件 2 の結果	36
図 2.22	通信機器に生じる電圧値（図 2.21 の構成時）	36
図 2.23	検討対象とする鉄道通信設備の構成	37
図 2.24	試算対象とする給電方式	39
図 2.25	EENS の算出結果	40
図 2.26	EDNS の算出結果	41
図 3.1	想定する車両状態監視用 WSN	44
図 3.2	提案手法のフロー	46
図 3.3	消費電力量のシミュレーション	49
図 3.4	列車の条件	51

図 3.5	センサデータの配送経路の算出結果（増結時）	52
図 3.6	センサデータの配送経路の算出結果（解結時）	52
図 3.7	車両増結時のセンサデータの配送経路（条件 3）	54
図 3.8	車両増結時のセンサデータの配送経路（条件 4）	54
図 3.9	車両増結時のセンサデータの配送経路（条件 5）	55
図 4.1	想定する通信設備	58
図 4.2	提案手法の処理手順	59
図 4.3	ノード間の通信の可否の判定	61
図 4.4	遮蔽物のある領域を構成する線分の座標	62
図 4.5	二つの線分の交差判定	62
図 4.6	WSN の消費電力量・データ到達率のシミュレーションの構成	63
図 4.7	WSN の消費電力量・データ到達率のシミュレーションの処理フロー	64
図 4.8	数値実験の対象とする WSN（監視エリアの上面図）	69
図 4.9	提案手法による中継ノード配置の計算結果（監視エリアの上面図）	69
図 4.10	従来手法による中継ノード配置の計算結果（監視エリアの上面図）	69

表目次

表 2.1	ケーブル定数の算出用のパラメータ	14
表 2.2	耐雷トランスのパラメータ	17
表 2.3	各種シミュレーションパラメータ	20
表 2.4	接地極の接地抵抗値	21
表 2.5	判定に用いたパラメータ	31
表 2.6	条件 1 の結果	33
表 2.7	各種パラメータ	39
表 2.8	各設備の故障率と修復時間	39
表 2.9	電力購入コストの算出結果[YEN/YEAR]	40
表 3.1	提案手法によるシミュレーション結果	52
表 3.2	シミュレーション結果（条件 1, 2）	53
表 3.3	シミュレーション結果（条件 1, 3, 4）	54
表 3.4	シミュレーション結果（条件 3, 5）	56
表 4.1	提案手法による最適な WSN のシミュレーション結果	70
表 4.2	リアクティブ型ルーティングによるシミュレーション結果	70
表 4.3	再送回数変更時のシミュレーション結果	70

第 1 章 序論

1.1 本論文の背景

近年、情報通信技術の発達により、LSI 等の半導体部品を使用した通信機器の導入が進んでいる。半導体部品は、雷サージをはじめとした過電圧に対して脆弱であることから、雷サージ等の過電圧に対する通信機器の耐力は低下傾向にある。このため、雷サージのような過電圧が原因の通信機器の故障は近年増加しており、通信機器の過電圧への対策がより重要になってきている[1][2]。鉄道通信設備においても、半導体部品を使用した機器の導入が進んでおり、雷サージによる鉄道通信設備の障害や焼損等の増加が懸念される。設備の過電圧対策を考えるうえでは、対策にかかる費用（経済性）と過電圧への耐性（信頼性）の両方のバランスを考えて設計を行う必要があるが、鉄道通信設備においては雷サージによる影響を定量的に予測するための手法や、雷サージを考慮した設備設計のための手法が確立されていない。加えて、一般的な雷サージ対策の一つとして、共通接地による等電位化が挙げられるが[3]、鉄道通信設備では共通接地を介した雷サージの波及が懸念されており、共通接地化の効果と影響について、定量的に評価していく必要がある。

また、電力損失の低減や信頼性の向上等の観点から、データセンターを中心に通信機器に対する直流給電の導入に関する検討が近年進められている。データセンターには、通信機器や非常用の蓄電池等が設置されるが、これらは直流で動作するのが一般的である。このため、直流給電を導入することで、交流給電より電力変換の段数を削減することができ、電力変換効率の向上や、変換器故障の減少等の効果が期待できる[4]。鉄道においても、列車運行に関わる情報の伝達のために様々な通信機器が用いられているが、これらは直流で動作するものが多く、非常用蓄電池と併せて設置されるのが一般的である。このため、鉄道通信設備においても、直流給電を導入することで、電力損失の低減や信頼性の向上等の効果が期待できる。

さらに、近年の情報通信技術の発展に伴い、鉄道においても無線センサネットワーク（WSN）を活用した状態監視システムが注目されており、鉄道車両や鉄道沿線の設備等様々な設備を監視対象としたシステムの検討が進められている。WSN を構築するためには、無線センサノードや集約装置、中継ノードといった様々な通信設備を設置する必要があるが、WSN の多くはセンサノードや中継ノードのバッテリーによる駆動が前提のため、バッテリー寿命に合わせて定期的にバッテリーを交換する必要がある。このため、WSN の運用時のコストにはバッテリーの容量や交換頻度が密接に関わってくることになり、WSN の評価や設計を行う上では、WSN を構成する各ノードの消費電力量を事前に予測することが重要となる。加えて、WSN を構築する上では、無線センサノードからのデータをいかに確実に収集するかが重要となる。このため、信頼性の高い WSN を構築するためには、消費電力量に加えて無線センサノードからのデータの到達率を予測することが重要となる。しかし、鉄道車両の状態監視用の WSN では、車両の増解結によるネットワー

ク形状の変化や車両の走行に伴う通信環境の変化等の特徴があり、一般の WSN を対象とした手法ではセンサノードの消費電力量やデータ到達率を予測できないという課題がある。また、鉄道環境は、都市部や山間部に渡り線路上に長く広がっており、無線通信を妨げる遮蔽物が多数存在する。加えて、安全性や物理的な条件から、ノードの配置場所に制約を生じることがある。このため、鉄道環境において WSN を導入する上では、これらの特徴を考慮して WSN の設計を行う必要があるが、これらの影響を考慮してシステムの設計・評価を行うための手法は確立されていないのが現状である。

1.2 鉄道における通信設備の現状

1.2.1 鉄道における通信設備の概要

鉄道における通信設備は人体における神経と同じ役割を担っており、鉄道の運営に欠かすことのできない重要な要素となっている。また、鉄道を運行していく上では、安全性、確実性、効率性が要求されるため、必要な情報を速く、高い信頼性で、安価に提供する必要がある。

鉄道事業は、線路上に列車を走らせて輸送サービスを提供するものであり、次のような特徴がある[5]。

- ① 線路は長距離を線路上に連続しており、車両は列車として線路上を広範囲に分散移動している。
- ② 生産活動に従事する各種の業務機関は、線路に沿って分散しており、その職種も営業、運転、工場、設備保守などに多岐にわたっている。
- ③ 生産の管理運営は、各地に分散する業務機関を通じて車両や設備を合理的に運用することによって行われる。
- ④ 社会生活の基盤として、高い安全度と正確度が要求され、事故時など突発的事態に対して迅速、的確に即応できる機能を必要とする。

このように特殊な企業形態をなす鉄道事業を、円滑かつ能率的に運営するために、各機関の情報を有機的に、かつ迅速的確に結ぶのが鉄道における通信の使命である。従って、鉄道通信網は一般公衆通信に見られるような単なる通信手段でなく、鉄道輸送設備の一環をなしているものである。

最近では、情報量の増大に伴って通信網の占める位置は重要で、また通信ネットワークの発展による情報システムは鉄道運営に欠かせないものとなっており、鉄道通信システムの果たす役割はますます大きくなっている。

鉄道の通信システムは、列車の運転保安に関わる情報伝送を担う信号通信システムとして誕生したが、今日では、列車に対する信号現示や ATS 等の列車の安全を確保するための保安システムを担う信号システムと、指令員や乗務員、駅間・関係箇所などへの情報伝送や基幹回線を担う通信システムの2つに分かれている。また、最近では様々な設備を対象として、状態監視を行うための無線センサネットワークが注目を集めており、鉄道においても無線センサを用いた状態監視に関して検討が進められている。

以下では、本論文で対象とする鉄道通信設備の概要について述べる。

1.2.2 列車運行用の通信設備

鉄道通信設備は、その使用目的により、列車の運行に欠かすことのできない情報を伝えるための通信設備と、お客様サービス用の通信設備に大きく分けることができる。これらの情報をやり取りする箇所は、指令、駅、列車、沿線設備など多岐に渡っている。

列車の運行に関わる情報については、保安通信設備と呼ばれる専用の通信設備によって伝送される。列車運行に欠かすことのできない情報を伝えるための通信設備のうち、雨量計や風速計、地震計などの情報収集を目的とする通信設備以外のものは全て保安通信設備となる。保安通信設備は、国土交通省「鉄道の技術上の基準を定める省令」によって設置することが義務付けられており、停車場、変電所、運転指令所、電力指令所その他の保安上または運転上必要な箇所の相互間において、迅速に連絡通報できる必要がある。保安通信設備は、運転に関わる指示や情報が指令から伝達され、また列車や駅、沿線の情報が指令に集まるように構成されているのが特徴である。図 1.1 に、列車運行に関わる通信設備の構成例を示す。図 1.1 のように、指令や拠点駅等の固定地点間に導入されている通信設備は、主に有線通信網によって構成されており、公衆回線とは独立した通信網が構築されている。多くの鉄道事業者が、自営で通信網を設備し、管理・運用することによって、平常時はもちろん、災害時でも迅速な情報伝達ができるようになっている。

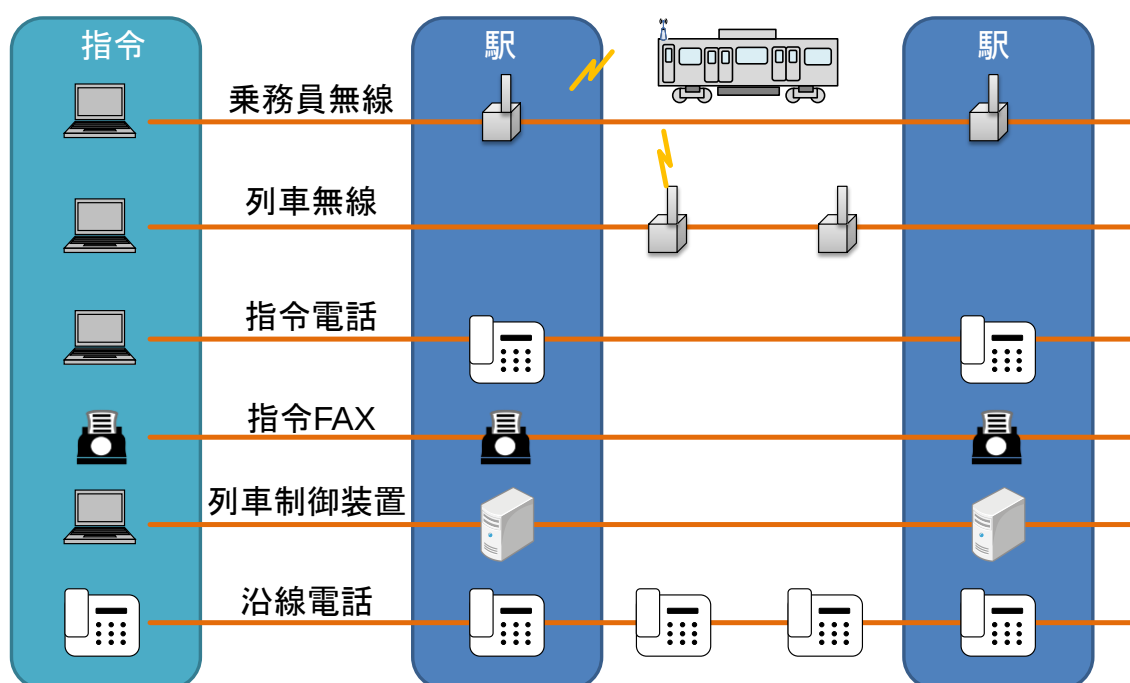


図 1.1 列車運行に関わる通信設備の構成例

以下に、図 1.1 で示した主な通信設備について述べる[6]。

(1) 指令電話（指令 FAX）

指令電話は、指令と各駅や現場事務所、変電所等との間で直接通話するための設備である。輻輳や話中の影響を避け、列車運行に関わる指示・情報を確実に伝える必要があるため、一般電話

とは別に鉄道事業者の自営通信網で構築している。

鉄道事業者によって異なる部分もあるが、指令には、列車の運行に関わる輸送指令、電力設備に関する指示を行う電力指令、信号通信設備を扱う信通指令、鉄道構造物を扱う施設指令などがあり、指令ごとに別々の電話回線が構成されている。

指令電話機としては、これまで磁石式やF式といった旧式のものが使われていたが、近年ではIP（Internet Protocol）電話機も導入されている。

（２）沿線電話機

鉄道沿線には、一定の間隔ごとに沿線電話機が設置されている。沿線電話機には、主に前述した指令電話回線が収容されており、保守作業員が作業時や緊急時に指令と直接通話できるようになっている。また、緊急時には列車の乗務員が地上に降りて指令との連絡用に使用することもある。さらに、一部の路線では、携帯形の電話機を接続するための端子が設置されているところもある。

（３）乗務員無線

乗務員無線は、運転士と車掌間での連絡、運転士もしくは車掌と駅、信号扱所の間での連絡に使用されるアナログ単身方式の無線システムである。周波数は、400MHz 帯が使用されている。

（４）列車無線

指令員と乗務員の間での連絡を行うための通信システムが列車無線システムである。列車無線システムは、保安通信設備として列車の運行に欠かすことのできない設備であり、2.でも述べたように、高い信頼性と伝送品質が求められている。例えば、新幹線列車無線に対しては、サービスエリアが全線の99.99%以上、伝送品質は全線の99%以上で通話SN比 $\geq 40\text{dB}$ ・ビット誤り率 $\leq 10^{-4}$ 、進行中の列車との接続率は99.9%以上、などが要求されている（一部の在来線列車無線でも同レベルの品質を実現している）。

上記のような列車運行に関わる通信設備は、主に駅の中や駅の近くに設置されることになり、機器室と呼ばれる建物（部屋）に信号設備と合わせて集約して設置されることになる。本論文においては、この機器室に設置される通信設備を対象として、設計・評価のための手法を考えた。

図 1.2 に機器室の構成例を示す。機器室においては、通信設備を雷から防護することを目的として様々な対策が施されており、以下の3項目を基本原則として雷サージ対策が施されている[7]。

- ① 機器への雷サージ電流の侵入防止
- ② 雷サージ電圧の抑制
- ③ 機器間の等電位化

ただし、③に関しては、接地の共通化によって実現できるものであるが、雷サージや地絡の対策としての効果や影響が把握できていないため、明確な対策方法として確立していない。このため、鉄道通信設備における現状の雷サージ対策は、主として上記の①、②を実現するための対策となり、具体的には避雷器・保安器、絶縁変圧器、独立接地などが挙げられる。

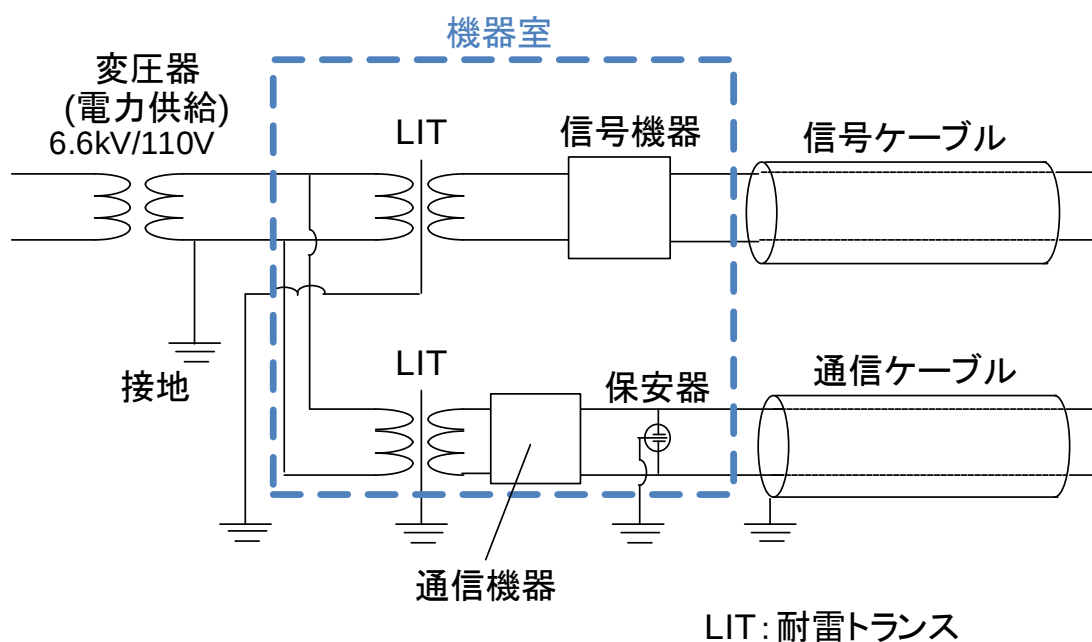


図 1.2 機器室における通信設備の構成例

(1) 避雷器・保安器

機器室の電源側では、高圧配電線路の降圧変圧器（あるいは電車線路の線条変圧器）の高圧（一次）側に避雷器、低圧（二次）側に保安器が設けられている。機器室の回線側では、保安器が設けられ、インピーダンスの整合や交流電化区間での誘導の低減も考慮した絶縁線輪が挿入されている場合もある。また、回線種別や設備箇所に応じて形状や仕様の異なる避雷器や保安器が存在する。近年は、低圧用の保安器を総称して **SPD** と呼ぶこともある。

(2) 絶縁変圧器

高圧配電線路から信号通信機器室に電源を供給する場合、信号設備の軌道回路が分布接地状態のレールに接続されるため、当初は、電力設備側で混触防止板付の線条変圧器が用いられ、混触防止板を接地する構成となっていた。その後、信号通信設備側では電源線から機器室内の設備に侵入する雷サージを低減するために、静電シールド付の絶縁変圧器（耐雷トランス）が挿入されるようになった。

(3) 接地

通信設備用の接地は、サージ対策のための **SPD** や耐雷トランスの接地、電位の安定や誘導の防止を目的とした筐体の接地やケーブルの接地などがあり、目的や用途に応じて接地抵抗の目標値がそれぞれ異なっている。このため、信号通信機器室周辺では複数の通信設備用の接地が存在する。

上記のように、機器室における通信設備においては、雷サージ対策のために様々な機器が設置

されるが、過度に対策機器を設置することは経済性を損なうため、通信設備の雷サージ対策を考える上では、雷サージへの耐性（信頼性）と対策機器の設置等にかかるコスト（経済性）のバランスを考えて設計を行うことが重要となる。

1.2.3 設備の状態監視用の通信設備

上記では、既に鉄道において導入されている主な通信設備について述べてきた。これに対して、近年様々な設備を対象として、状態監視を行うための無線センサネットワークが注目を集めており、鉄道においても無線センサを用いた状態監視に関して検討が進められている。

鉄道には、構造物、軌道、車両などの様々な設備があるが、これらの鉄道設備は時間の経過とともに劣化し、場合によっては故障が発生することになる。そのため、鉄道の安全安定運行を維持するためには、これらの鉄道設備のメンテナンスが欠かせないものとなる。現在、鉄道設備の多くは、一定の周期で検査が実施され、劣化や故障の度合いに応じて補修や整備などが行われている。このような一定周期での保守を行う方法に対して、設備の状態を常時監視し、その状態に応じて必要なタイミングで補修や整備などを施す状態監視保全に近年注目が集まっている。

状態監視保全を実現するための手段の1つとして、無線センサネットワークを利用した状態監視システムが挙げられる（図 1.3）。無線センサネットワークは、様々な物理量を計測してデータを無線で伝送する無線センサと、それらの計測データを集約するための集約装置から構成される。また、無線センサから集約装置に計測データを直接伝送できない場合には、中継ノードを経由して、計測データを目的地まで伝送する。さらに、集約装置に集められた計測データを、自社のネットワークやインターネット等を経由して本社や指令所、保守区などに伝送し、計測値の表示や異常の検知などを行うことで、状態に基づいた設備保守に活用する。

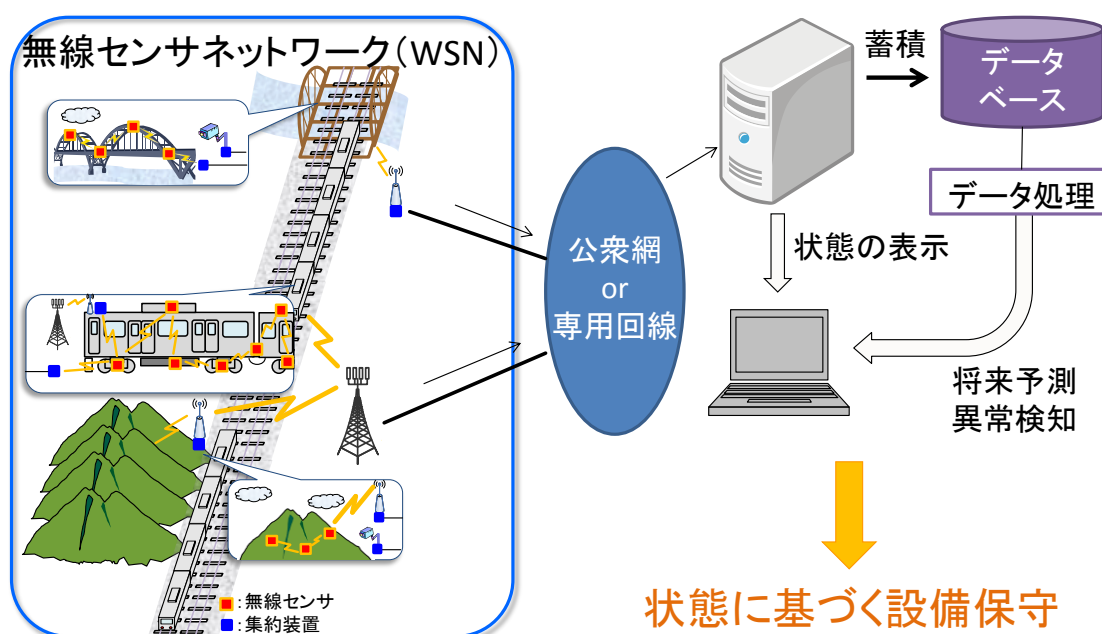


図 1.3 鉄道設備の状態監視用の通信設備の基本構成

鉄道における無線センサネットワークを用いた状態監視システムの例としては、以下のようなものが検討されている。

- ✓ 鉄道橋梁橋脚の状態監視[8]
- ✓ 鉄道トンネルの状態監視[9]
- ✓ 鉄道車両の状態監視[10]
- ✓ 軌道の状態監視[11]

1.3 関連研究の動向

通信設備の雷サージ対策，無線センサネットワークの評価・設計に関連する研究動向について以下に述べる。

1.3.1 雷サージ対策に関する研究

○ビル直撃雷に対するメッシュ接地の装置間誘電電圧抑圧特性[12]

この論文では、ビルに直撃雷を受けた時にビル内に配線した通信ケーブルや電源線、接地線等に発生する誘導電圧を計算するための手法が開発されている。また、床配線形態として枝状配線、単線配線、メッシュ配線方法の比較を行うことで、誘導によって通信装置間に生じる電位差を抑えるにはメッシュ配線が最適な配線形態であり、枝状配線等に比べて電位差を約 1/5 に抑える効果があることが明らかにされている。

○通信機器の雷防護回路設計法に関する考察[13]

この論文では、通信線路端末に生じる雷サージの統計的性質を用いて、通信機器の障害率と対応づけた最適防護回路を設計する手法を、加入者端末 1 次防護回路を例に示している。まず、防護回路を通して通信機器に侵入する雷サージの統計的性質を推定する手法を示し、各種防護回路要因と、侵入雷サージ発生頻度の関係を明らかにしている。また、上記の関係、防護回路要因と価格の関係を用いることで、機器の許容障害率に対応して、防護回路を最も安価に設計する手法を開発している。

○Analytical Study on Lightning Surge Propagation along Rail and Lightning Overvoltages on Railway Signaling Equipment[14]

鉄道信号設備の中でも雷害件数の多い踏切設備を対象に、落雷に伴い発生する雷サージ電圧や侵入する雷サージ電流が計算可能な雷サージ解析モデルを開発した。雷サージ解析モデルは、鉄道固有の導体であるレール部分のモデルと、機器の等価回路モデルから構成される。また、構築した解析モデルの精度を検証するため、フィールド試験を実施し、実用上十分な制度があることを確認している。

1.3.2 無線センサネットワークの評価・設計に関する研究

○General network lifetime and cost models for evaluating sensor network deployment strategies[15]

この論文では、センサネットワークの寿命とコストを評価するためのモデルが開発されている。センサノードの確率的な動作の模擬にセミマルコフ理論を用いている。WSN の動作サイクル毎の期待消費電力量と期待寿命のモデルは、再生理論、ランダム停止基準、ワルドの不等式を用いて構築される。また、このモデルは WSN のノードレベルの動作とネットワークレベルの動作の両方について考慮している。

○An Analytical Model for Lifetime Estimation of Wireless Sensor Networks[16]

この論文では、残存エネルギー、リンク品質、センサノードの位置といった様々な入力要素を考慮して、無線センサネットワークの寿命を推定するための解析モデルを提案している。提案されている解析モデルでは、データを収集するための基地局を複数配置した場合についての計算を可能としていることに特徴がある。また、任意のルーティングプロトコルの性能を評価するために使用することを可能としている。

○Relay Placement in Wireless Networks: Minimizing Communication Cost[17]

この論文では、無線センサネットワークの通信コストを最小にすることを目的として、 n 個のノードからなるネットワーク内に k 個の中継ノードを最適に配置する手法を提案している。また、中継ノード配置を決定するためのヒューリスティックなアルゴリズム RePlace を提案し、他のアルゴリズムと比較することで性能の評価を行っている。

○Optimal Placement of Relay Nodes Over Limited Positions in Wireless Sensor Networks[18]

この論文では、配置位置が限られた無線センサネットワークに対して、最適な中継ノード配置を算出する手法を提案している。この手法では、ノード間の通信の接続性を保証する最小限の数の中継ノードを追加することで、ルーティングツリーを構築する際の停止確率を最小化することを目的として計算を行っている。

1.4 本論文の目的と構成

1.4.1 本論文の目的

本論文では、機器室内の通信設備、鉄道車両の状態監視用の通信設備、線路沿線の状態監視用の通信設備の 3 種類の鉄道通信設備を対象として、経済性と信頼性の両方の観点から設備の設計・評価を行うための手法を開発することを目的としている。

(1) 機器室の通信設備を対象とした設計・評価手法

機器室の鉄道通信設備を対象として、雷サージによる鉄道通信設備の故障や雷サージ対策時の効果といった信頼性の観点での影響を評価するために、雷サージの侵入によって通信設備に印加される電圧と電流を予測するための解析モデルを開発する。また、鉄道通信ケーブルや耐雷トランスといった実際の通信設備を用いて雷サージ印加試験を行い、実測結果と提案モデルによる計算結果との比較を行うことで、開発した解析モデルの精度を検証する。さらに、開発した雷サージ解析モデルと数理最適化手法を組み合わせることで、雷サージへの耐性（信頼性）と接地方式のコスト（経済性）の両方の観点から、鉄道通信設備の接地方式を設計するための手法を提案する。最後に、鉄道通信設備の給電方式に関して、直流給電の導入まで含めて経済性と信頼性の両面から定量的に評価するための手法について検討する。

(2) 鉄道車両の状態監視用の通信設備を対象とした評価手法

経済性と信頼性の両方を考慮して、鉄道車両の状態監視を目的とした通信設備の評価を行うためには、車両の増解結や列車走行による通信への影響を考慮して、WSN の消費電力量やデータ到達率を予測する必要がある。本論文では、センサノードがバッテリーで駆動する鉄道車両の状態監視用 WSN を対象として、車両の増解結によるネットワーク形状の変化や走行による通信環境の変化を模擬するために時系列モンテカルロ法を用いて、センサノードの消費電力量とデータ到達率を予測する手法を開発する。

(3) 線路沿線の状態監視用の通信設備を対象とした設計手法

線路沿線の構造物や斜面等の状態監視を目的とした WSN においては、長距離に渡る監視が求められることから、センサデータを中継するための中継ノードを経済性と信頼性の両方を考慮して効果的に配置することが求められる。また、線路沿線の環境は、都市部や山間部に渡り線上に長く広がっており、無線通信を妨げる遮蔽物が多数存在する。加えて、安全性や物理的な条件から、ノードの配置場所に制約を生じることがある。このため、線路沿線の状態監視用の WSN を導入する上では、これらの特徴を考慮して設計を行う必要がある。本論文では、数理最適化手法と時系列モンテカルロ法を組み合わせることで、線路沿線の環境における無線通信を妨げる遮蔽物や配置不可能な場所の存在を考慮した上で、経済性と信頼性の両方を考慮して WSN の最適な中継ノード配置やルーティング手法を算出するための手法を開発する。

1.4.2 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りとなる。第 2 章では、機器室内の鉄道通信設備を対象とした経済性と信頼性に基づいた設計・評価手法について述べる。機器室内の設備構成を決定する上では、通信設備への雷サージ対策を考慮して設計・評価を行うことが重要となるが、鉄道通信設備を対象とした雷サージの解析手法は確立されていない。そこで、第 2 章においては、機器室内の鉄道通信設備を対象として、雷サージの侵入によって通信設備に印加される電圧と電流を予測するための解析モデルを提案する。また、雷サージへの耐性（信頼性）と接地方式のコスト（経済性）の両方の観点から鉄道通信設備の接地方式を設計するための手法、電力供給コストと供給信頼度の

両方を考慮した鉄道通信設備の給電方式の評価手法について検討することで、鉄道通信設備の望ましい設備構成を探る。

第3章では、鉄道車両の状態監視用の通信設備を対象とした経済性と信頼性に基づいた評価手法について述べる。鉄道車両の状態監視用の WSN においては、車両の増解結によるネットワーク形状の変化や列車の走行に伴う通信環境の変化等の特徴があり、一般の WSN を対象とした手法ではセンサノードの消費電力量やデータ到達率を予測できないという課題がある。そこで、第3章においては、車両の増解結や走行による通信環境の変化を模擬するために時系列モンテカルロ法を用いて、センサノードの消費電力量とデータ到達率を予測するための手法を提案する。

第4章では、線路沿線の状態監視用の通信設備を対象とした経済性と信頼性に基づいた設計・評価手法について述べる。鉄道環境の特徴としては、都市部や山間部に渡り線上に長く広がっており無線通信を妨げる遮蔽物が多数存在すること、安全性や物理的な条件からノードの配置場所に制約を生じること等が挙げられるが、これらの特徴を考慮して WSN を設計するための手法は確立されていない。そこで、第4章においては、数理最適化手法と時系列モンテカルロ法を組み合わせることで、鉄道環境における遮蔽物や配置不可能な場所の存在を考慮した上で、WSN の設計を行うための手法を提案する。

第5章では、本論文のまとめについて述べるとともに、今後の展望について述べる。

第 2 章 機器室の通信設備を対象とした経済性と信頼性に基づく設計・評価手法

2.1 概要

本論文では、機器室の鉄道通信設備を対象として、雷サージによる鉄道通信設備の故障や雷サージ対策時の効果といった信頼性の観点での影響を評価するために、雷サージの侵入によって通信設備に印加される電圧と電流を予測するための解析モデルを開発した。また、鉄道通信ケーブルや耐雷トランスといった実際の通信設備を用いて雷サージ印加試験を行い、実測結果と提案モデルによる計算結果との比較を行うことで、開発した解析モデルの精度を検証した。

さらに、開発した雷サージ解析モデルと数理最適化手法を組み合わせることで、雷サージへの耐性（信頼性）と接地方式のコスト（経済性）の両方の観点から、鉄道通信設備の接地方式を設計するための手法を提案すると共に、典型的な機器室を対象として、提案手法を用いた数値実験を行い、その有効性を検証した。

最後に、鉄道通信設備の給電方式に関して、直流給電の導入まで含めて経済性と信頼性の両面から定量的に評価するための手法を検討し、機器室の通信設備を対象として直流給電の導入効果の試算を行った。

2.2 機器室の通信設備を対象とした雷サージの解析モデル

2.2.1 想定する通信設備の構成

本章でモデル化の対象とする鉄道通信設備の構成を図 2.1 に示す。本章では、信号機器・通信機器の両方を含む信号通信機器室を想定し、機器室に引き込まれるケーブル部までをモデル化の対象とした。鉄道通信ケーブルは電力線等からの電磁誘導によって発生する誘導電圧が問題となっており、誘導電圧の制限値が存在する。そのため、ケーブルのシースを接地する構造とすることで電磁誘導対策をしている。これに対して、信号ケーブルは、シースを接地しないものが広く使用されていることから、シースを接地しない構成を仮定した。信号機器・通信機器の電源側には、電源側から侵入する雷サージを低減するために、静電シールド付きの絶縁変圧器である耐雷トランスが挿入される。また、通信機器の通信ポート側には、通信ケーブルから侵入する雷サージを低減するために、避雷管が挿入される。

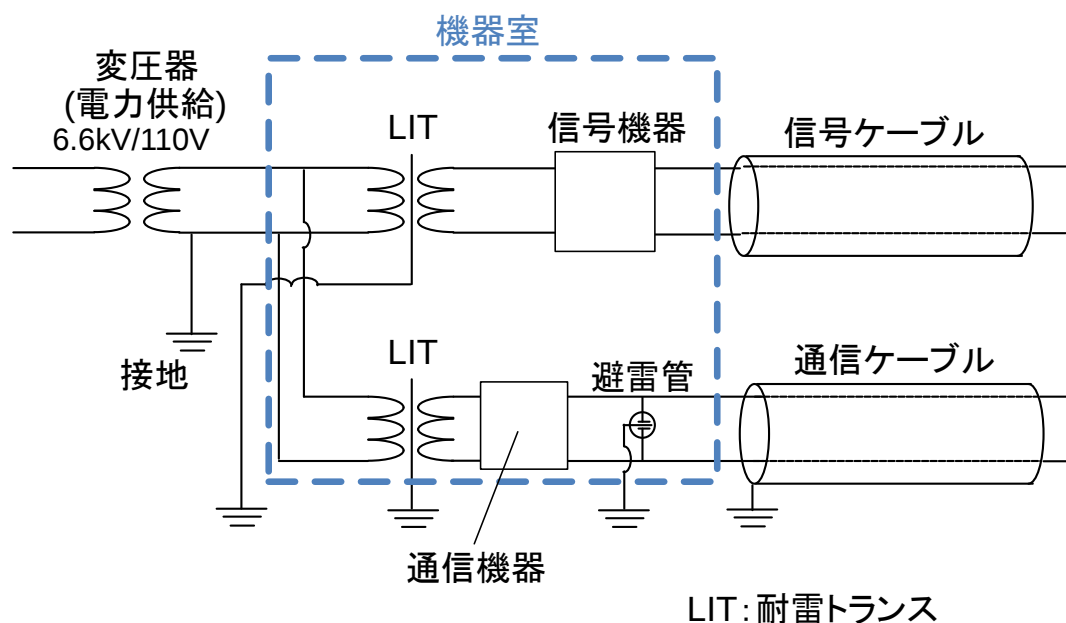


図 2.1 対象とする設備

2.2.2 想定する雷サージの種類

鉄道通信設備に影響を及ぼす雷害は、直撃雷、誘導雷、逆流雷の3つに分類される。直撃雷を受ける箇所としては、無線基地局等の屋外アンテナが想定されるが、その他の通信設備では直撃雷を受ける確率が非常に低く、侵入経路も限定される。

一方、誘導雷や逆流雷の場合は、直撃雷に比べて印加される電圧値や電流値は小さくなるが、動作電圧が低い通信設備では焼損や絶縁破壊等が発生する場合があります。また、従来の鉄道通信設備では、主に誘導雷や逆流雷を対象とした雷害対策が施工されている。そこで、本研究では、誘導雷や逆流雷を対象として検討を行った。

2.2.3 通信設備の雷サージ解析モデル

図 2.1 の設備を対象として構築した雷サージ解析モデルを図 2.2 に示す。本章では、回路網解析による解析を想定し、設備を構成する各要素を等価回路で表現することでモデル化を行った。各要素のモデル化の考え方を以下に示す。

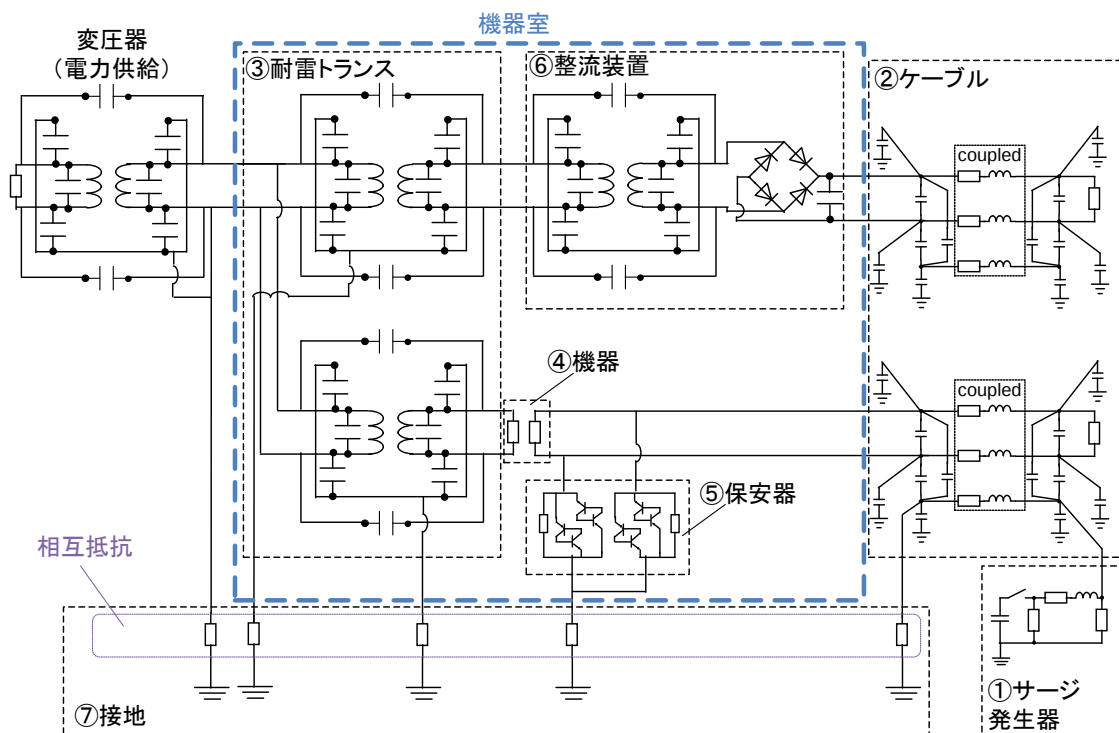


図 2.2 雷サージ解析モデル

- ① 雷サージ発生器：国際規格 IEC61000-4-5[19]で規定されている，雷インパルス試験波形である $1.2/50\mu s$ コンビネーション波形を注入するため，試験用のサージ発生器の等価回路[20]に基づき，図 2.2 の①の通りモデル化を行った。
- ② ケーブル：ケーブルは，心線とシースを分布定数回路の等価回路として，図 2.2 中の②の部分に示したようにモデル化した。なお，計算の際に必要な通信ケーブル・信号ケーブルの各種パラメータは仕様値を用いることとした。また，通信ケーブルは鉄道用通信ケーブルである X9030-CA を，信号ケーブルは鉄道用信号ケーブルである SVV ケーブルを対象としてモデル化を行った。定数の算出は，ケーブルの内部構造を基に，汎用電気・電子回路解析プログラム EMTP (Electro Magnetic Transients Program) のサブルーチンである Cable Constants を使用して行った[21]。信号ケーブルについても同様の考えに基づきモデル化した。ケーブル定数の算出の際に用いたパラメータを表 2.1 に示す。また，Cable Constants を用いてケーブル定数を算出した例を図 2.3 と図 2.4 に示す。図 2.3 と図 2.4 はケーブル長を 25m として定数を算出した例であり， R_{cc} は心線間の相互抵抗， L_{cc} は心線間の相互インダクタンスを， R_{cs} は心線－シース間の相互抵抗を， L_{cs} は心線－シース間の相互インダクタンスを表す。

表 2.1 ケーブル定数の算出用のパラメータ

	通信ケーブル (X9030-CA)	信号ケーブル (SVV cable)
inner radius of pipe	0.0118[m]	0.0115[m]
outer radius of pipe	0.0129[m]	0.0116[m]
outer radius of cable	0.016[m]	0.0135[m]
resistivity of pipe	2.65E-8[Ω・m]	2.65E-8[Ω・m]
μ_r of pipe	1.0	1.0
ε_r of inner pipe insulator	1.0	1.0
ε_r of outer pipe insulator	2.4	3.3
inner radius of tubular core	0.0[m]	0.0[m]
outer radius of tubular core	0.00045[m]	0.000625[m]
outer radius of first insulating layer	0.0008[m]	0.001425[m]
resistivity of tubular core	1.72E-8[Ω・m]	1.72E-8[Ω・m]
μ_r of tubular core	1.0	1.0
μ_r of first insulating layer	1.0	1.0
ε_r of first insulating layer	2.4	2.4

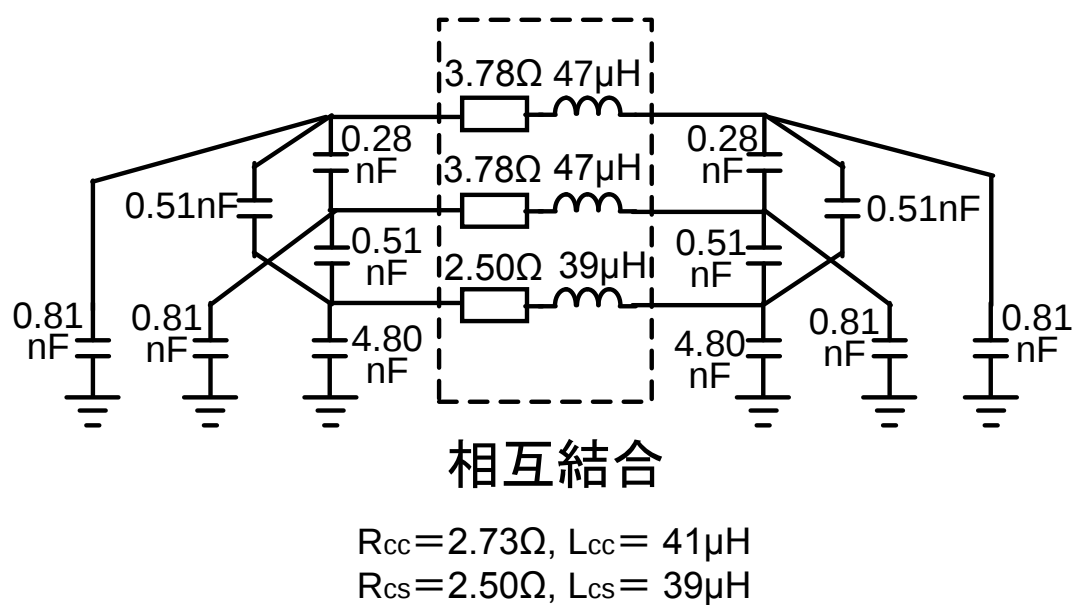


図 2.3 ケーブル定数の算出例（通信ケーブル）

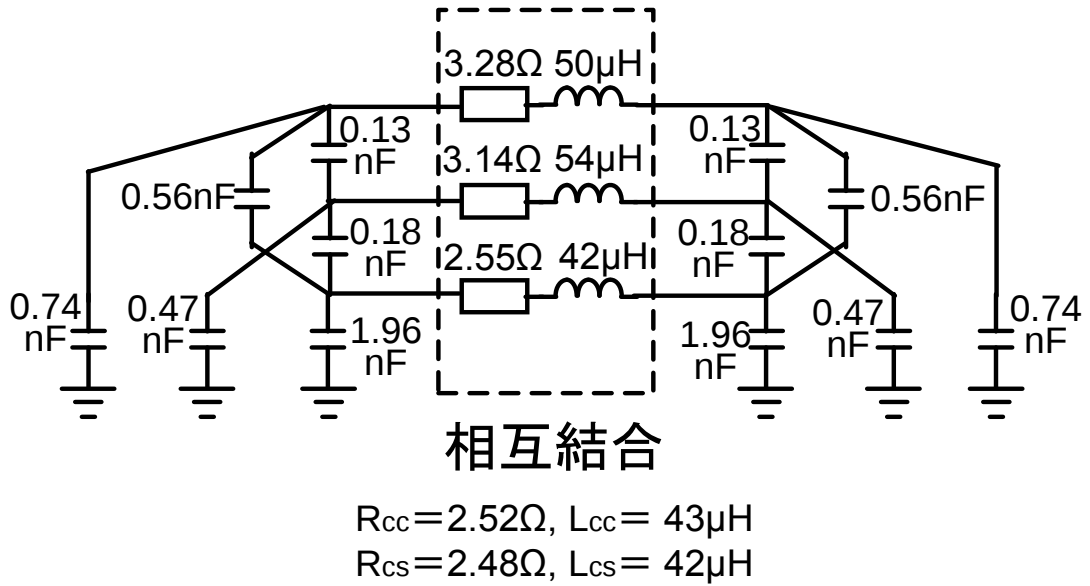


図 2.4 ケーブル定数の算出例（信号ケーブル）

- ③ 耐雷トランス（LIT）：耐雷トランスの構成を図 2.5 に示す。各巻線と接地間の静電容量を C_1 , C_2 , 入力側と出力側の静電容量を C_0 とすると、二線を一括として考えた場合の等価回路は図 2.6 のように示せる[22]。また、一次側と接地間に電圧 V_1 が加わった時、二次側と接地間の電圧 V_2 は次の式(2.1)のようになる。

$$V_2 = \frac{C_0}{C_0 + C_2} V_1 \quad (2.1)$$

式(2.1)より、一次側から二次側からのサージ移行率は

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{C_0}{C_0 + C_2} \quad (2.2)$$

となる。よって、 C_0 および C_2 を与えることで二線一括のモデルにおいてはサージの移行を模擬できることがわかる。ただし、図 2.6) に示したモデルは、変圧器を含まないモデルとなっているため、サージによる対地電圧の移行量の計算は可能であるものの、二線間の電圧値や変圧器の変圧動作を模擬はできない。

そこで、図 2.2 中の③の部分に示したように、二線間の電圧値や変圧器の変圧動作を模擬した拡張モデルを考案した。考案したモデルでは、変圧器の等価回路をベースとして、その u 相、 v 相それぞれにシールドとの間の静電容量、一次二次間の静電容量を定め、さらに u 相と v 相の間の巻線静電容量を定めることで、対地のサージの移行に加え、線間電圧の計算や変圧器の変圧動作の模擬が可能となった。また、モデル中の各定数については、3kVA の耐雷トランスを用いたインピーダンスの実測結果から導出した。導出したモデル中の各定数を表 2.2 に示す。ここで、表 2.2 中の C_{1u} は一次側巻線の u 相とシールドとの間の静電容量、 C_{1v} は一次側巻線の v 相とシールドとの間の静電容量、 C_{2u} は二次側巻線の u 相とシールドと

の間の静電容量、 C_{2v} は二次側巻線の v 相とシールドとの間の静電容量、 C_{1uv} は一次側の u 相と v 相との間の巻線静電容量、 C_{2uv} は二次側の u 相と v 相との間の巻線静電容量、 C_{0u} は u 相の一次二次間の静電容量、 C_{0v} は v 相の一次二次間の静電容量を示す（図 2.7）。

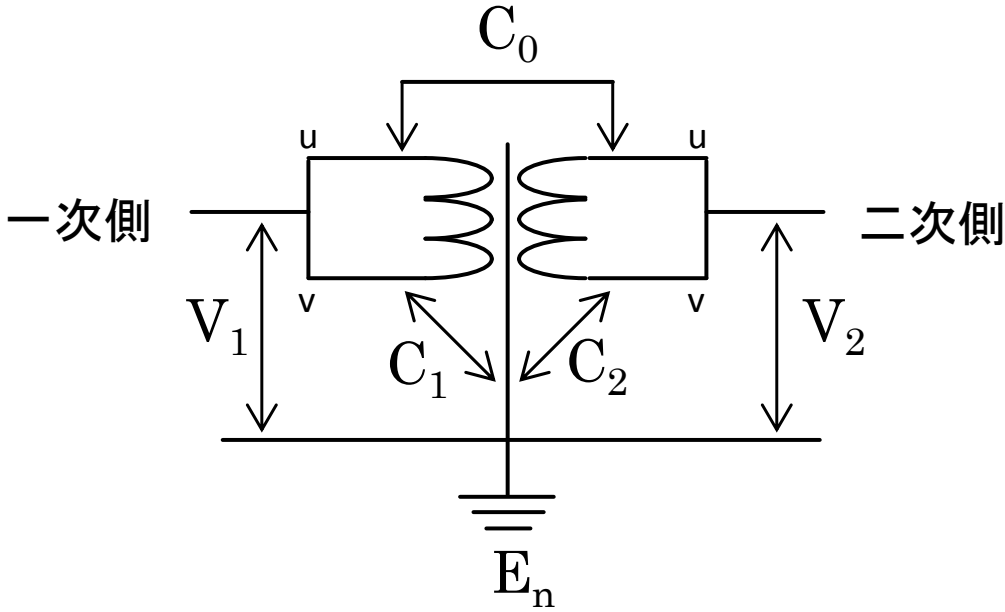


図 2.5 耐雷トランスの構成

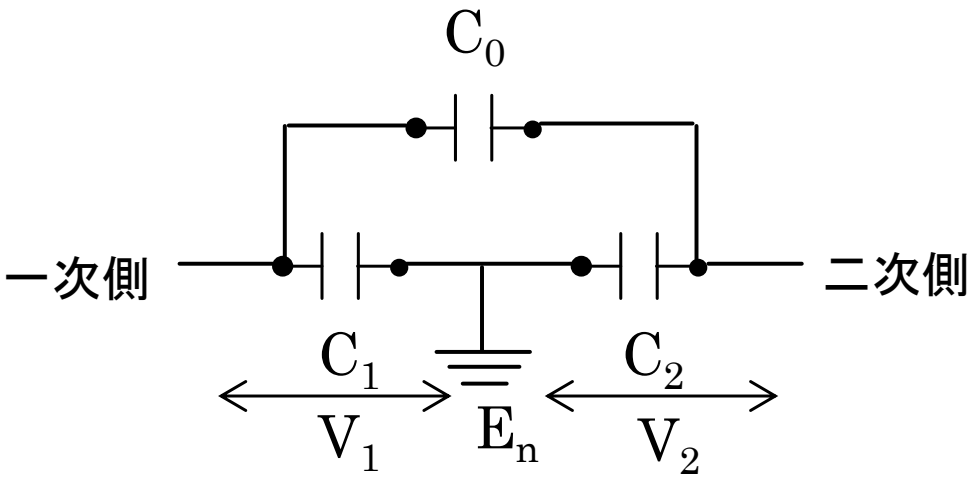


図 2.6 耐雷トランスの等価回路

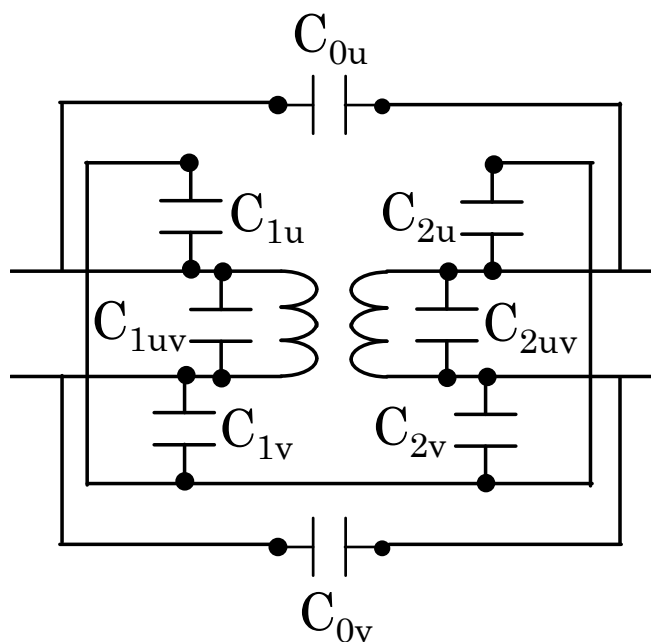


図 2.7 耐雷トランスの提案モデルと定数

表 2.2 耐雷トランスのパラメータ

	キャパシタンス[nF]
C_{1u}	0.409
C_{1v}	0.086
C_{2u}	2.23
C_{2v}	3.24
C_{1uv}	2.15
C_{2uv}	0.69
C_{0u}	0.00223
C_{0v}	0.00324

- ④ 機器：通信機器に印加される雷サージを模擬する方法として，通信機器をその入力インピーダンスの等価回路として表現する方法があり[23]，本研究においても同様の考えでのモデル化を行った。具体的には，機器については図 2.2 中の④に示すように，電源線側と通信線側をそれぞれ入力インピーダンスに基づく終端抵抗により模擬し， 10Ω の抵抗としてモデル化を行った。また，本研究においては，通信機器の雷サージによる故障の判定の際に重要となる通信機器に印加される雷サージを模擬することとし，機器内部の回路は考慮しないものとした。
- ⑤ 保安器：保安器は，鉄道通信機器用として一般に使われている避雷管を想定し，図 2.2 中の⑤の部分に示したようにモデル化を行った。避雷管は一般に 2 個のサイリスタを逆並列に接続した素子であるトライアックを用いてモデル化される[24][25]ことから，本研究においても

トライアックをベースとして避雷管の動作特性を模擬した。

また、避雷管の絶縁抵抗値はトライアックに並列に接続する抵抗により模擬した。なお、避雷管の雷サージ侵入時の動作開始電圧（インパルス放電開始電圧）と絶縁抵抗値については、実際に通信ケーブルと通信機器との接続箇所に用いられている避雷管[22]の仕様値に基づき、インパルス放電開始電圧＝800V、絶縁抵抗値＝100MΩとして設定した。

- ⑥ 整流装置：整流装置については、鉄道信号用として一般に使われているシリコン定電圧整流装置[26]の回路に基づき、図 2.2 中の⑥の部分に示したようにモデル化を行った。整流装置の整流動作については、ダイオード 4 つをブリッジ状に接続した全波整流回路により模擬している。

また、全波整流回路には直列に変圧器が接続されるが、シリコン定電圧整流装置の一次二次間の静電容量は整流器内蔵の変圧器により小さくなることが知られている[27]。ここで、変圧器の一次二次間の静電容量を C_0 、二次側巻線の対地静電容量を C_2 とすると、サージ侵入時に変圧器二次側に現れる静電移行電圧は次の式に比例した値となる[28]。

$$\frac{C_0}{C_0 + C_2} = \frac{C_0}{C_0 + C_2} \quad (2.3)$$

式(2.3)より、 C_0 が小さい程静電移行サージ電圧は低く抑えられることから、シリコン定電圧整流装置のサージ移行率は一般の変圧器と比較して低いと考えられる。

そこで、鉄道信号用シリコン定電圧整流装置のサージ移行性能を模擬するために、作成した耐雷トランスのモデルを整流装置内部の変圧器として用いた。

- ⑦ 接地極間の影響の模擬：多数の接地極が埋設される状況では、接地極同士が相互に影響し合うことが知られている[29]。今、接地極 A と接地極 B という長さ L の二つの接地極が距離 r だけ離れて埋設されている状況を考えると、二つの接地極間には次式で表される相互抵抗が存在する[29]。

$$R_{AB} = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\log_e \frac{2L}{r} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right\} + \frac{r}{2L} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right] \quad (2.4)$$

ここで、 R_{AB} ：相互抵抗[Ω]、 ρ ：大地抵抗率[Ω・m]、

r ：接地間距離[m]、 L ：接地電極長[m]である。

この相互抵抗の存在により、一方の接地極に電流が流れた際に他の接地極の電位が上昇することになる。接地極 A に電流 I_A が流れるとすると接地極 B には次式で示す電圧 V_B が発生することになる（図 2.8）。

$$V_B = R_{AB} I_A \quad V_B = R_{AB} I_A \quad (2.5)$$

本研究では、式(2.4)に示した接地極間の相互抵抗を用いて接地極をモデル化することで、接地極間の影響を模擬した。

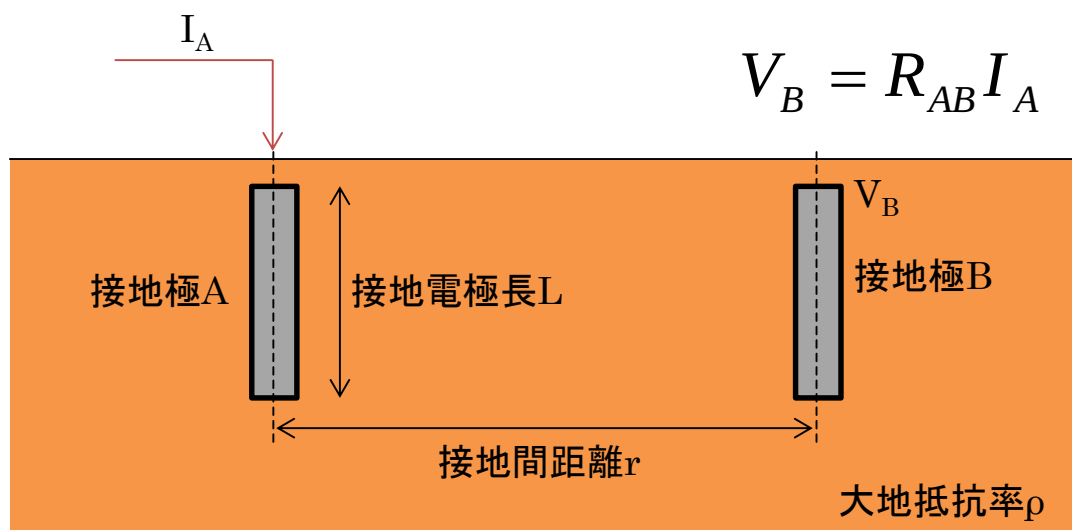


図 2.8 接地極間の影響

2.2.4 実験による提案モデルの検証

提案した解析モデルの精度を検証するため、鉄道通信ケーブルや耐雷トランスに対する雷サージ印加試験を実施して実測データを取得し、提案モデルによる計算結果との比較を行った。

[1]実験概要

実験では、2.2.3 で提案したモデルの各要素について、個別の解析精度を検証することを目的として、以下に示す 2 つの要素について雷サージ印加試験を行った。

- ・通信ケーブル
- ・耐雷トランス

加えて、信号通信機器室内に存在する通信設備全体としての解析精度を検証することを目的として、通信設備部分全体を接続した状態で雷サージ印加試験を行った。雷サージは $1.2/50 \mu s$ 波形の発生器を用いて印加し、波高値 300V の試験波形を注入した。

それぞれの試験方法について以下に述べる。

(1) 通信ケーブル

鉄道総研構内に敷設した、長さ 100m の鉄道通信ケーブル (X9030-CA) を用い、雷サージ印加試験を行った。試験は、

- ・ケーブルシースに雷サージ波形を印加
- ・ケーブル心線に二線一括で雷サージ波形を印加

の 2 パターンについて行い、ケーブル心線に発生する電圧およびシースに発生する電圧の測定を行った。

(2) 耐雷トランス

鉄道用耐雷トランスを用い、雷サージ印加試験を行った。試験は、トランスの一次側から雷サ

ージ波形を印加することで行い、二次側に発生する電圧の測定を行った。

(3) 通信設備全体

(1) の試験と同様に、鉄道総研構内の通信ケーブルを用い、その末端に保安器や抵抗、耐雷トランスを接続することで、信号通信機器室内に存在する通信設備全てを模擬した回路を構成した。また、雷サージの印加点としては、通信ケーブルのシースおよび心線一括とし、通信機器に発生する電圧の測定を行った。実験構成を図 2.9 に示す。

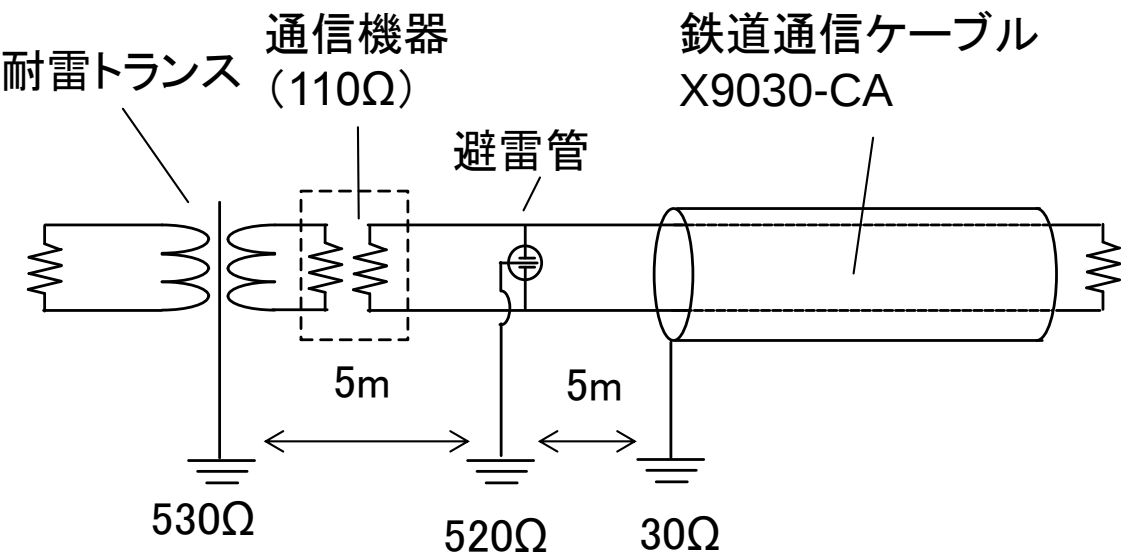


図 2.9 通信設備全体の実験構成

[2]提案解析モデルによるシミュレーション

提案解析モデルによるシミュレーションでは、2.2.3 で提案した解析モデルを用いて、上記の雷サージ印加試験と同等の条件で EMTP によるシミュレーションを実施した。シミュレーションで用いたパラメータを表 2.3 に示す。通信ケーブルについては、図 2.3 に示したケーブル長 25m の回路を 4 個直列に接続することで、100m のモデルとして使用した。また、接地極の接地抵抗値については表 2.4 に示す実測に基づく値を使用した。

表 2.3 各種シミュレーションパラメータ

大地抵抗率	200[Ω・m]
接地電極長	1[m]
ケーブル長	100[m]
ケーブル高	0[m]
機器抵抗	110[Ω]

表 2.4 接地極の接地抵抗値

通信ケーブルのシース	30[Ω]
避雷管	520[Ω]
耐雷トランス	530[Ω]

[3] 実験結果と計算結果の比較

(1) 通信ケーブル

通信ケーブルのシースに雷サージを印加した際に、通信ケーブルの心線とシースに発生する電圧について、実験により測定した結果と解析モデルによるシミュレーション結果を図 2.10 に示す。同様に、通信ケーブルの心線に一括で雷サージを印加した際の結果を図 2.11 に示す。

まず、実験結果についてであるが、通信ケーブルのシースから雷サージが侵入する場合、シース電圧と心線電圧は近い値となることがわかる。これに対して、通信ケーブルの心線から雷サージが侵入する場合には、シース電圧は心線電圧の約 1/8 となった。

次に、実験結果と提案モデルによる計算結果を比較すると、図 2.10 に示したシース注入時の心線電圧の最大値は約 12.6%，シース電圧の最大値は約 10.4%の差であり、最大値に至るまでの時間の差は心線電圧が約 $0.26 \mu s$ ，シース電圧が約 $0.31 \mu s$ であった。同様に、心線注入時の実測値と計算値を比較すると、図 2.11 より心線電圧の最大値は約 2.7%，シース電圧の最大値は約 5.4%の差であり、最大値に至るまでの時間の差は心線電圧が約 $0.72 \mu s$ ，シース電圧が約 $0.035 \mu s$ であった。

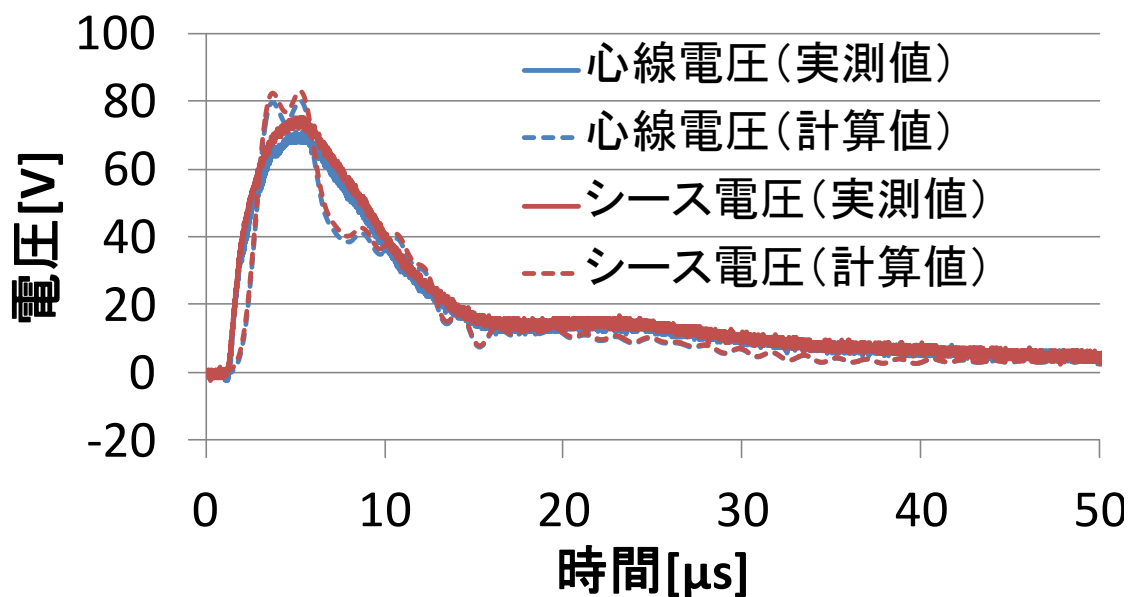


図 2.10 シース注入時の結果（通信ケーブル）

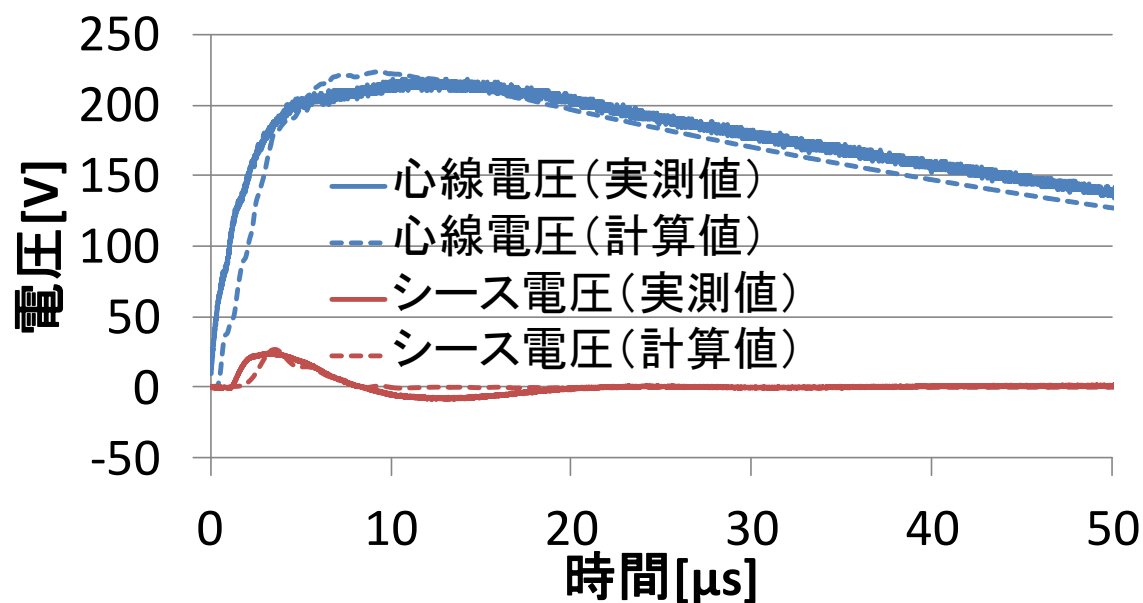


図 2.11 心線注入時の結果 (通信ケーブル)

(2) 耐雷トランス

耐雷トランスの一次側に二線一括で雷サージ波形を印加した際に、二次側に発生する電圧について、実験により測定した結果と解析モデルによるシミュレーション結果を図 2.12 に示す。

実験結果より、耐雷トランスの一次側に 300V の雷サージ電圧が二線一括で侵入した場合、二次側には約 20V の電圧が生じることがわかる。

次に、実験結果と提案モデルによる計算結果を比較すると、図 2.12 より、耐雷トランス二次側電圧の最大値は約 2.4% の差、最大値に至るまでの時間の差は約 0.13 μs の差であり、概ね一致していることがわかる。

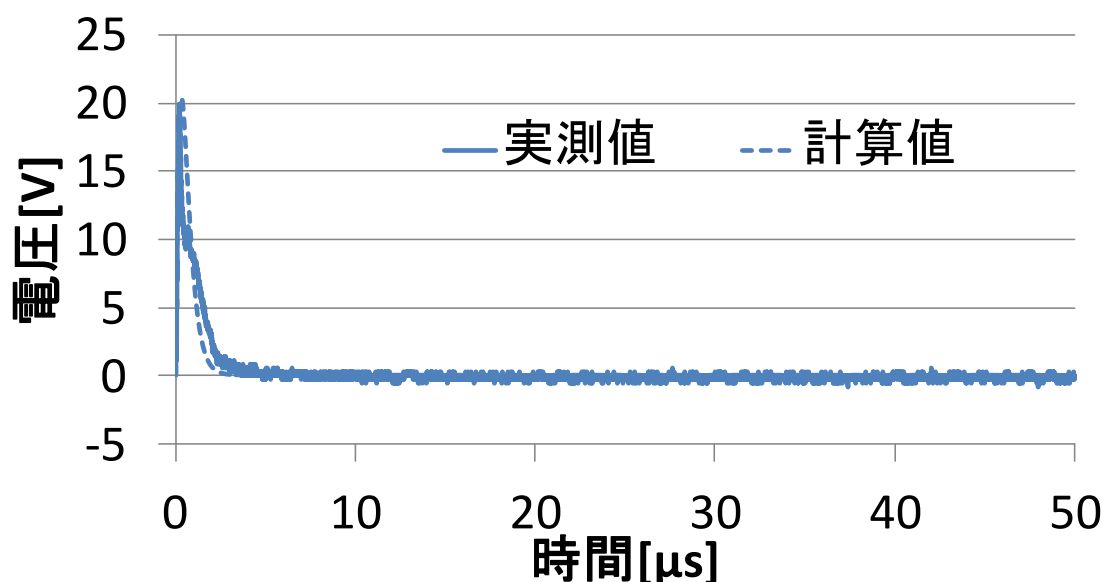


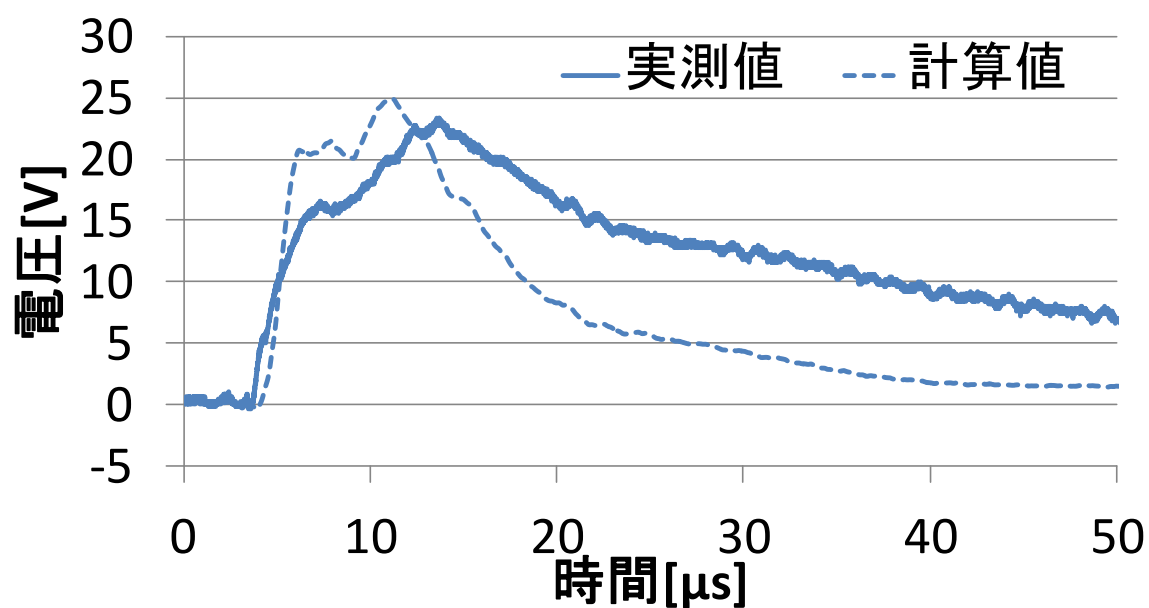
図 2.12 耐雷トランス注入時の結果

(3) 通信設備全体

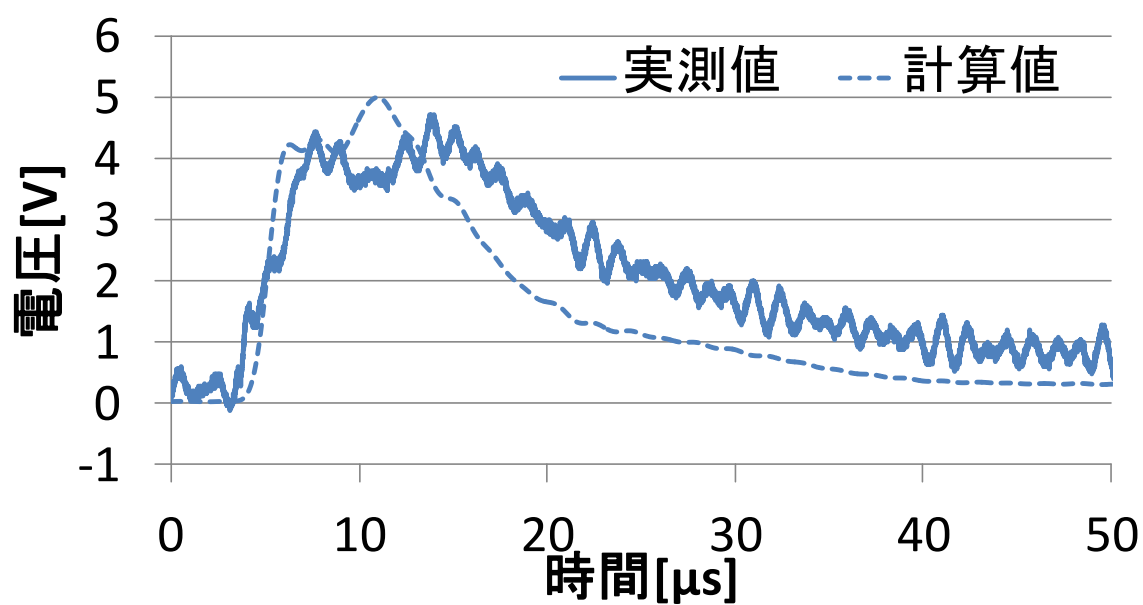
図 2.9 に示した実験構成において、通信ケーブルのシースに雷サージ波形を印加した際に、通信機器の通信側ポートと電源側ポートに発生する電圧の測定結果と解析モデルによるシミュレーション結果を図 2.13 に示す。同様に、通信ケーブルの心線に一括で雷サージ波形を印加した際の実測結果とシミュレーション結果を図 2.14 に示す。

まず、実験結果についてであるが、図 2.13 と図 2.14 より、通信ケーブルから雷サージが侵入する場合、通信機器の通信ポート側には比較的高い電圧が生じることがわかる。これに対して、通信機器の電源ポート側に発生する電圧は、通信ポート側に生じる電圧より低い値となり、ポート間で電位差が生じる結果となった。通信ケーブルから雷サージが侵入する場合、ケーブルシースの接地から大地と耐雷トランスの接地を介して通信機器の電源ポート側に雷サージが移行するが、この移行の際の減衰によってポート間の電位差が生じると考えられる。また、図 2.13 と図 2.14 の実測結果では、電圧波形に細かい振動が生じているが、これは実験回路に定常的に生じるノイズが原因となっており、雷サージの印加に関わらず発生していた。ノイズの発生原因としては、測定器の電源からのノイズや周辺の電気設備からの電磁誘導によるノイズが考えられる。

次に、実験結果と提案モデルによる計算結果を比較すると、図 2.13 に示したシースに雷サージ注入時の通信機器の通信ポート側電圧の最大値は約 6.4%、電源ポート側電圧の最大値は約 6.0% の差であり、最大値に至るまでの時間の差は通信ポート側電圧が約 $2.4\mu\text{s}$ 、電源ポート側電圧が約 $2.8\mu\text{s}$ であった。同様に、心線に雷サージ注入時の実測値と計算値を比較すると、図 2.14 より通信機器の通信ポート側電圧の最大値は約 3.4%、電源ポート側電圧の最大値は約 10% の差であり、最大値に至るまでの時間の差は通信ポート側電圧が約 $1.51\mu\text{s}$ 、電源ポート側電圧が約 $0.08\mu\text{s}$ であった。上記のように、通信設備全体を構成した解析においても、提案した解析モデルによって雷サージの侵入により生じる電圧値を十分な精度で予測できることが確認できた。

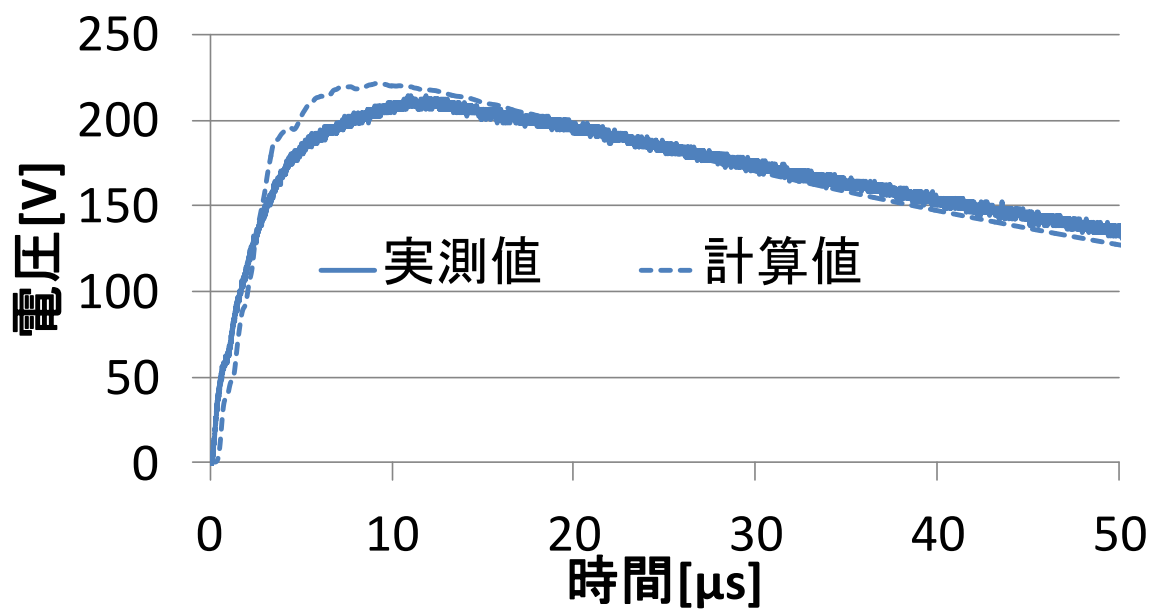


(a) 通信機器の通信ポートの電圧

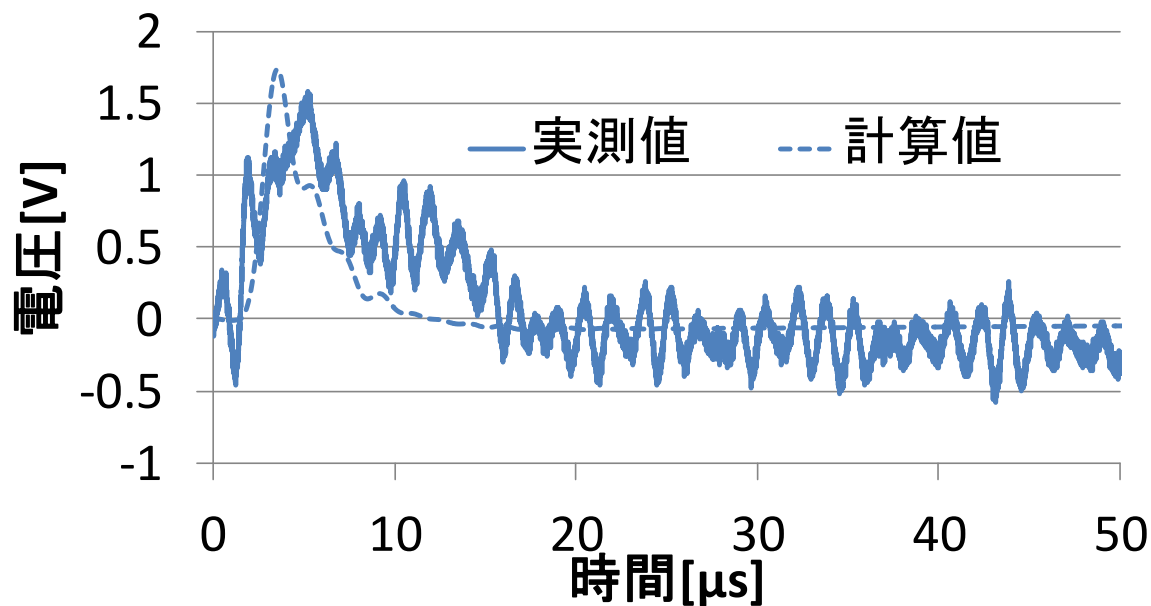


(b) 通信機器の電源ポートの電圧

図 2.13 シース注入時の結果（通信設備全体構成時）



(a) 通信機器の通信ポートの電圧



(b) 通信機器の電源ポートの電圧

図 2.14 心線注入時の結果（通信設備全体構成時）

2.3 機器室の通信設備を対象とした接地方式の設計手法

2.3.1 想定する通信設備の構成・想定する雷サージの種類

想定する通信設備としては、2.2 節の雷サージ解析モデルと同様の構成を想定した。また、想定する雷サージについても、2.2 節と同様に誘導雷や逆流雷を対象とするものとした。

2.3.2 通信設備の接地方式の設計手法

一般に、雷サージによる設備への影響を評価する際には、以下の2点を考慮する必要がある[30]。

- ・人体防護（感電）
- ・装置保護（装置破壊）

設備の接地方式を検討する際にも、上記2点を考慮したうえで、どのような接地方式が望ましいかを評価する必要がある。一般的には、接地抵抗値を低くする、耐雷設備を増やす等の対策を行えば耐雷性能を上げることができるが、施工上の難易度が上がり、設備数は増加することとなる。鉄道信号通信機器室においては、多数の接地極が存在するが、施工可能なスペースが限られることから、同等の耐雷性能なのであれば、可能な限り接地極数を削減するのが経済性の観点から望ましい。また、低い接地抵抗値を得ようとする、コスト面の増加に繋がるため、同等の耐雷性能なのであれば、可能な限り接地抵抗値を高く施工するのが経済性の観点から望ましい。

そこで、本論文では、雷サージ解析シミュレーションと数理最適化手法を組み合わせることで、人体保護・装置保護の2点を考慮し、接地極の数・接地抵抗値の観点から雷サージに対する最適な接地方式を算出する手法を検討した。接地の条件として、電極の長さや半径、電極間の距離等も存在するが、これらはシミュレーションの入力条件として候補値を事前に与えるものとした。

本論文で提案する手法による接地方法の最適化手順を図 2.15 に示す。提案手法では、まず対象となる機器室の装置の接続条件やパラメータ、接地の接続パターンおよび接地抵抗値の候補を入力し、シミュレーション手法を用いて、電流・電圧の予測計算を行う。

次に、予測計算結果と機器の耐電圧の値を用いることで、感電や機器の破壊が生じない範囲で、接地極数を最小かつ接地抵抗値が最大となる組合せを最適化手法により算出し、最適な接地方法として出力する。図 2.15 における各項目の詳細を以下に述べる。

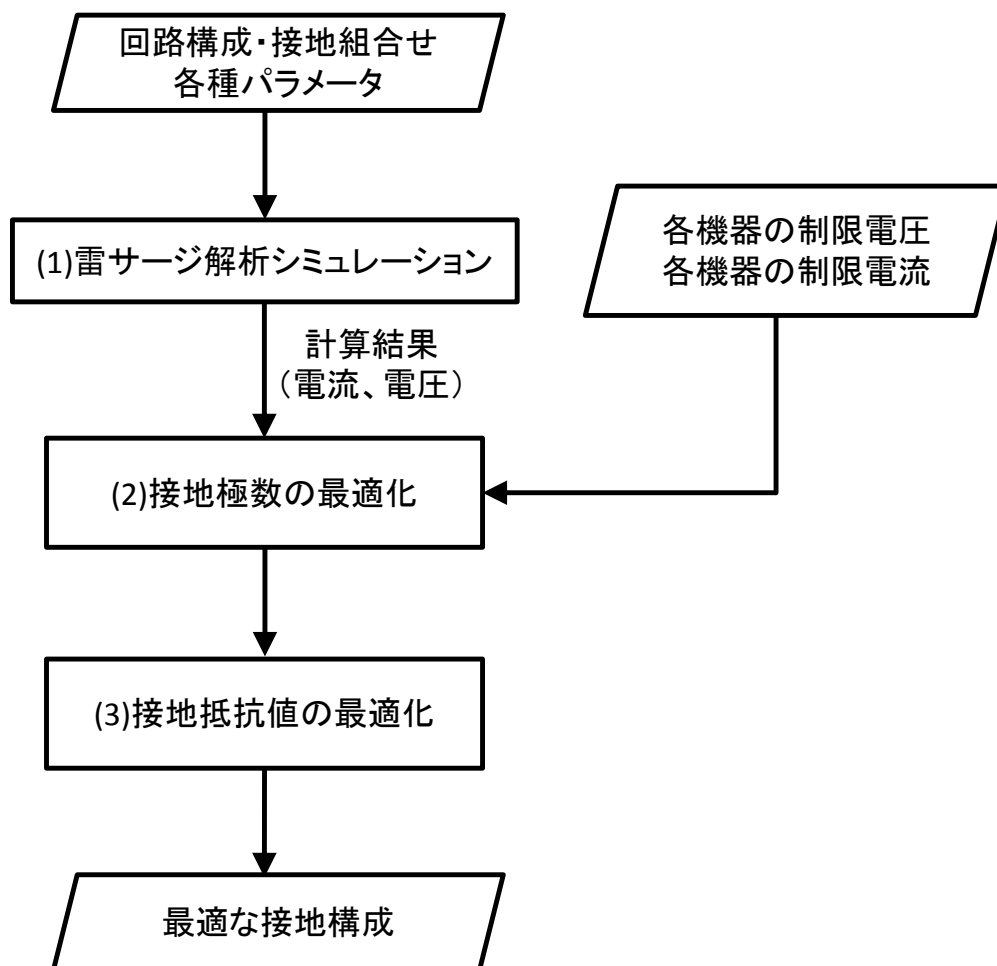


図 2.15 提案手法のフロー

(1) 雷サージ解析シミュレーション

雷サージ解析シミュレーションでは、図 2.2 に示した鉄道通信設備を対象とした雷サージ解析モデルを用いたシミュレーションを行うことで、雷サージによって鉄道通信設備に生じる電流・電圧を算出する。ここでは、回路網解析による解析を想定し、設備を構成する各要素を等価回路で表現したモデルを入力として与えるものとする。この回路モデルにおける接地の一部を共通化あるいは全てを共通化することで、印加される電圧・電流がどのように変化するかを計算することができ、共通接地時の影響を予測することが可能となる。

(2) 接地数の最適化

提案手法では、まず接地極数最小化の観点で最適化を行い、最小となる接地極数を算出する。その後、求めた接地極数の中で接地抵抗値が最大となる組み合わせを最適化により算出する。このように、提案手法では2段階の最適化により、接地極数最小かつ接地抵抗値が最大となる接地方式を算出する。

接地数の最適化では、一段階目となる接地極数最小化の観点での最適化を行う。具体的には、雷サージ解析シミュレーションの結果を用いて、接地極数の最小化を目的とする以下の最適化問題として定式化できる。

[目的関数]

$$\min(E_{num}) \quad (2.6)$$

[制約条件]

$$V_i(t) \leq V_i^{\max} \quad (2.7)$$

$$|V_{i_in}(t) - V_{i_out}(t)| \leq V_{i_dif}^{\max} \quad (2.8)$$

$$I_i(t) \leq I_i^{\max} \quad (2.9)$$

$$R_i^{\min} \leq R_i \leq R_i^{\max} \quad (2.10)$$

ここで、 E_{num} は接地極数、 R_i は接地極 i の接地抵抗値[Ω]、 $V_i(t)$ は時刻 t における機器 i に生じる電圧値[V]、 $V_i^{\max}$ は機器 i に生じる電圧の上限値[V]、 $V_{i_in}(t)$ は時刻 t における機器 i の入力側に生じる電圧値[V]、 $V_{i_out}(t)$ は時刻 t における機器 i の出力側に生じる電圧値[V]、 $V_{i_dif}^{\max}$ は機器 i の入出力間に生じる電位差の上限値[V]、 $I_i(t)$ は時刻 t における機器 i に生じる電流値[A]、 $I_i^{\max}$ は機器 i の電流の上限値[A]、 $R_i^{\min}$ は接地極 i の接地抵抗値の下限值[Ω]、 $R_i^{\max}$ は接地極 i の接地抵抗値の上限値[Ω]を示す。(2.7)式は各機器に生じる電圧に関する制約、(2.8)式は各機器の入出力間に生じる電位差に関する制約、(2.9)式は各機器に生じる電流に関する制約、(2.10)式は、各接地極の接地抵抗値に関する制約を表す。

ここで、制約条件の中で含まれる各機器の電圧値 $V_i(t)$ 、 $V_{i_in}(t)$ 、 $V_{i_out}(t)$ と電流値 $I_i(t)$ については、接地を共通化する箇所と接地極数、各接地極の接地抵抗値を入力として与え、(1)の雷サージ解析シミュレーションにより値を算出する。また、各機器に生じる電圧および電流の上限値を入力として与えることとなるが、これらは機器の仕様や感電の危険性等から設定することを考える。一般に、機器の耐電圧値は周波数に応じて変化するが、提案手法では雷サージ波形に対する耐電圧値の仕様を用いることを想定する。

(3) 接地抵抗値の最適化

接地抵抗値の最適化では、(2)で求めた接地極数に基づいて、接地極の接地抵抗値を最大化する観点での最適化を行う。目的関数は、各接地極の接地抵抗値の最大化として式(2.11)のように定義できる。

[目的関数]

$$\max(R_1, \dots, R_{E_{num}}) \dots \dots \dots (2.11)$$

接地抵抗値の最適化においては、(2.7)～(2.10)式及び(2.12)式を満足しつつ、(2.11)式の目的関数を最大とする最適化問題として定式化できる。

[制約条件]

$$E_{num} = E_{num_min} \dots \dots \dots (2.12)$$

ここで、 E_{num} は (2) の接地数の最適化により求めた接地極数を示す。式(2.12)は接地極数に関する制約であり、(2) で求めた接地極数と同一の接地極数に解を限定することを考える。

上記の最適化は、複数の接地極の接地抵抗値の最大化を目的関数とする多目的最適化問題となる。多目的最適化問題では、単目的最適化とは異なり優劣の付けられない解が複数存在する可能性がある。本論文においては、パレート最適解の概念に基づいて、接地抵抗値の最適化においては、複数の接地の接地抵抗値を最大化するパレート最適解集合を算出することを考える。

2.3.3 多目的最適化手法について

複数の目的関数を同時に考慮しながら最適解を探索することを多目的最適化 (Multi-objective Optimization Problems) と呼ぶ。一般的に目的関数間にはトレードオフの関係が存在し、ただ一つの最適解が存在するとは限らない。そのため、多目的最適化ではパレート最適解という概念が重要となる。パレート最適解とは、ある目的関数値を改善するためには少なくとも他の一つの目的関数値を改悪せざるをえないような解のことを示す。

パレート最適解は、多目的最適化問題における解の優越関係により定義される。多目的最適化問題における解の優越関係、パレート最適解の定義を以下に示す[31]。

(a) 優越関係

制約条件を $S(x)$ とすると、二つの解 $x_1, x_2 \in S(x)$ に対して、

- $f_i(x_1) \leq f_i(x_2)$ ($\forall i=1, \dots, j$) のとき、 x_1 は x_2 に優越する。
- $f_i(x_1) < f_i(x_2)$ ($\exists i=1, \dots, j$) のとき、 x_1 は x_2 に強い意味で優越する。

(b) パレート最適解

ある解 x_0 に優越する $x \in S(x)$ が存在しないとき、 x_0 はパレート最適解である。

多目的最適化問題では、一つの解のみを探索するのではなく、パレート最適解の集合が求められることになる。図 2.16 に 2 目的の最小化問題に対するパレート最適解の概念図を示す。

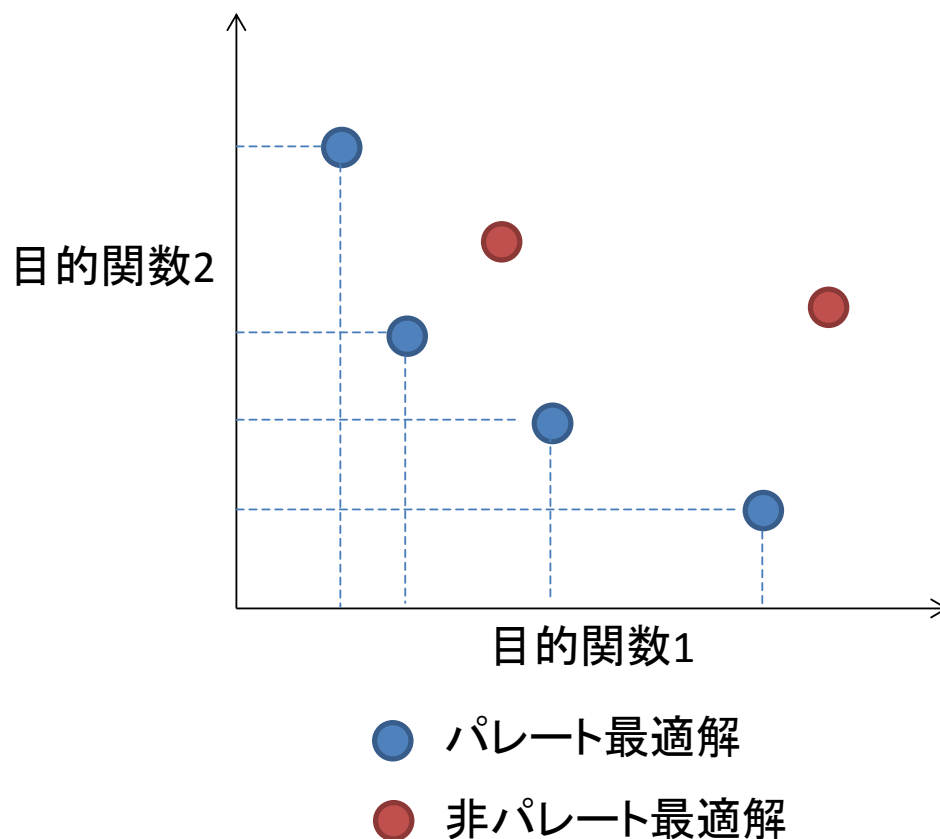


図 2.16 パレート最適解の概念図

多目的最適化問題に関する研究は、これまで遺伝的アルゴリズム (GA) や PSO (Particle Swarm Optimization) をベースとした手法により数多くの検討が行われてきた[32][33]。中でも、GA をベースとした手法である NSGA-II (Nondominated Sorting Genetic Algorithms-II) [34]は、優れた探索性能を実現する手法として、近年注目を集めている。

NSGA-II は Deb らによって開発された多目的最適化手法である。主な特徴として、高速非優越ソート、エリート主義、混雑度距離といった 3 つの要素が導入されている。これらの特徴により、効率的な個体の取捨選択が実現されており、多目的最適化問題に対して高い性能を示すことが知られている。本論文では、NSGA-II を用いて多目的最適化を行うことを考える。

2.3.4 数値実験による手法の検証

提案した鉄道通信設備の接地方式の設計手法の有効性を検証するため、図 2.1 に示した通信機器室を対象として、提案手法を用いて雷サージに対する最適な接地構成を算出した。

[1]計算条件

(1) 装置防護の判定に用いたパラメータ

本検討において設定した装置保護の判定基準を表 2.5 に示す。なお、装置の仕様が判明している場合は、当該項目を仕様値に置き換えて判定することで詳細な検討が可能である。

表 2.5 判定に用いたパラメータ

機器種別	判定項目	基準値
通信機器	$V_i^{\max}$	1kV
	$V_{i_dif}^{\max}$	1kV
信号機器	$V_i^{\max}$	1kV
	$V_{i_dif}^{\max}$	1kV

(2) 雷サージ波形

雷サージ波形としては、国際規格 IEC61000-4-5 等で規定されている、雷インパルス試験波形である $1.2/50\mu s$ コンビネーション波形を想定し、規格で規定される電圧レベルに基づき、2kV の電圧波形を入力することとした。図 2.17 に入力波形を示す。 $1.2/50\mu s$ 波形は誘導雷を想定した波形であり、機器の誘導雷への耐圧レベル等の判断に用いられているため、この波形に基づいて機器室の接地の設計を行うことが、提案手法の使い方の一つとして考えられる。このことから、 $1.2/50\mu s$ 波形を用いた接地の設計を想定して、今回は数値実験を行った。また、波形発生器の回路モデルは文献[20]のものを使用した。

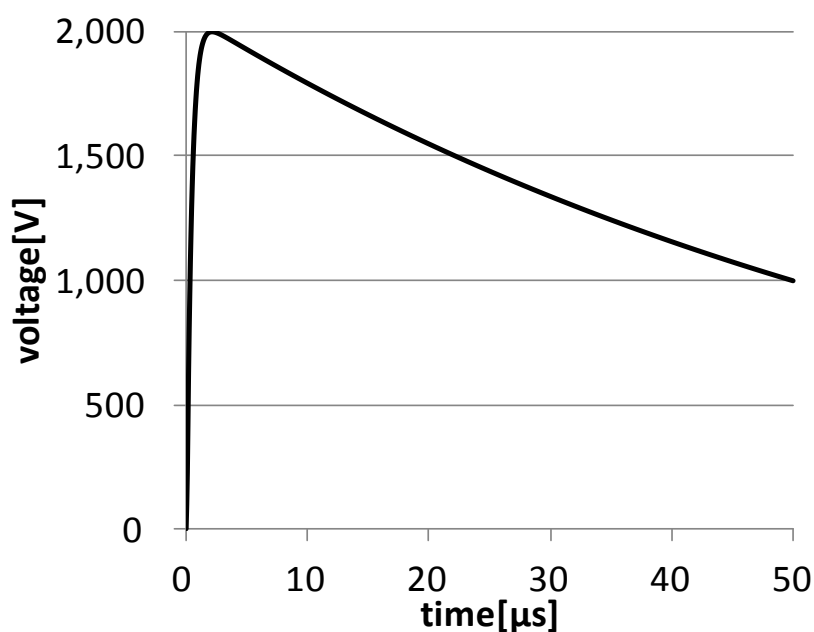


図 2.17 雷サージ波形

(3) 雷サージ解析モデル

雷サージ解析モデルに関しては、2.2.3 で示したモデルを使用するものとした。

(4) 雷サージ侵入経路

本検討において想定する雷サージの侵入経路を図 2.18 に示す。通信ケーブルの金属シースは接地をしているため、接地線からの回り込みにより雷サージが侵入することから、侵入経路①を想定するものとした。

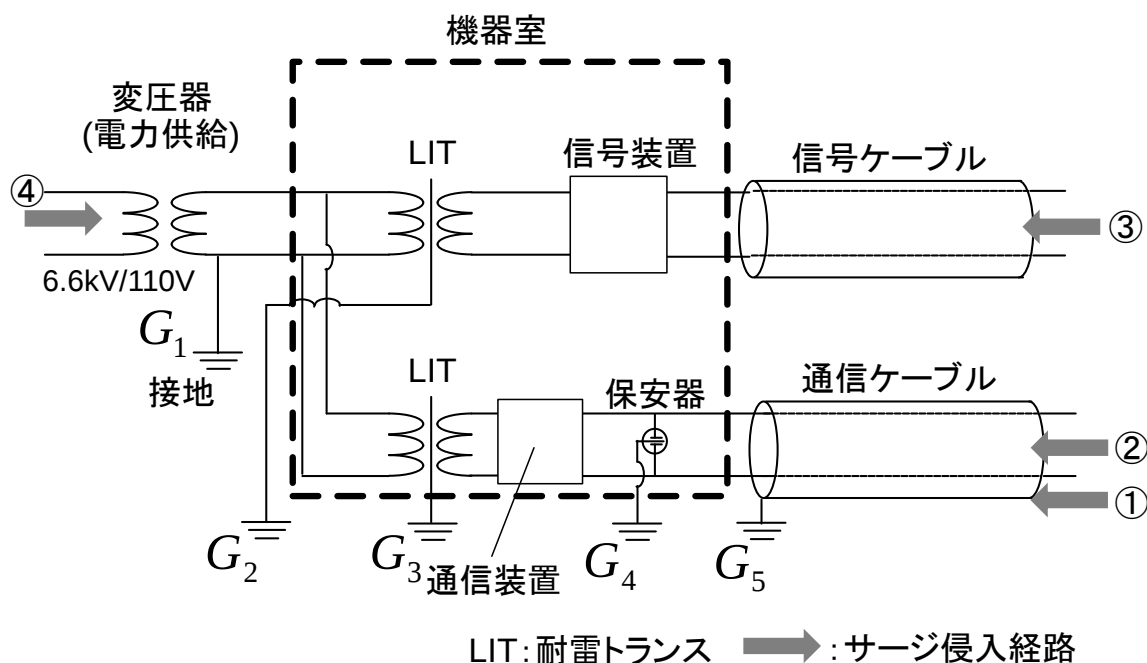


図 2.18 想定する雷サージの侵入経路

(5) 接地抵抗値の候補

接地抵抗値の候補については、以下の2パターンの条件での計算を行った。候補とした接地抵抗値は、実際に鉄道信号通信機器室で使用されている接地極の抵抗値であることから選択した。また、 5Ω の抵抗値は機器室の場所に応じて存在する場合としない場合があるため、2パターンの条件での計算を行った。

- ✓ 条件1 50Ω 、 100Ω の2種類
- ✓ 条件2 5Ω 、 50Ω 、 100Ω の3種類

[2]計算結果

提案手法により条件1の条件で求められた最適な接地の接続条件と接地抵抗値を表 2.6 に示す。また、表 2.6 の解①の接地条件で通信機器に生じる電圧値を図 2.19 に、全ての接地を 50Ω の接地極で共通化する条件で通信機器に生じる電圧値を図 2.20 に示す。ここで、最も通信機器に生じる雷サージ電圧が大きかったのは通信ケーブルのシースに侵入時であったことから、図 2.19 と図 2.20 はシースに侵入時の値を示している。同様に、条件2の条件で求められた最適な接地の接続

条件と接地抵抗値を図 2.21 に、図 2.21 の接地条件で通信ケーブルのシースに雷サージが侵入した際の通信機器に生じる電圧値を図 2.22 に示す。

まず、表 2.6 の結果より、条件 1 の条件では、接地極数が 5 極から 2 極まで削減できる可能性があることがわかる。ただし、いずれかの接地抵抗値については 50Ω までしか上げることができず、それ以上になると感電や機器破壊の危険性が生じるという結果になった。また、図 2.19 と図 2.20 を比較すると、通信ケーブルのシースアースまでを共通化の対象とすると、シースから侵入した電圧が通信機器の電源側に回り込むため通信機器に大きな電圧が生じるようになり、感電や機器破壊の危険性が高まることがわかる。このため、表 2.6 のように、通信ケーブルのシースアースのみを独立化させ、その他の接地極を共通化するという解が最適な解となったと考えられる。

これに対して、接地抵抗値 5Ω が候補に加わった条件 2 の条件では、図 2.21 のように、全ての接地を一つの接地極に共通化するのが最適という結果が得られた。図 2.20 と図 2.22 より、接地抵抗値を 50Ω から 5Ω に低減することで、通信ケーブルのシースに雷サージが侵入した際に通信機器の電源側に生じる電圧値も下がっており、危険電圧が生じなくなっていることがわかる。このことから、接地抵抗値を低くすることで、接地極数を削減できる可能性が高まることがわかる。

このように、提案手法を用いることで、接地極数や接地抵抗値の変化が雷サージの発生量に与える影響を考慮したうえで、鉄道通信機器室内の機器や接地の条件に合わせてどのような接地方式が最適かを検討することができると考えられる。

表 2.6 条件 1 の結果

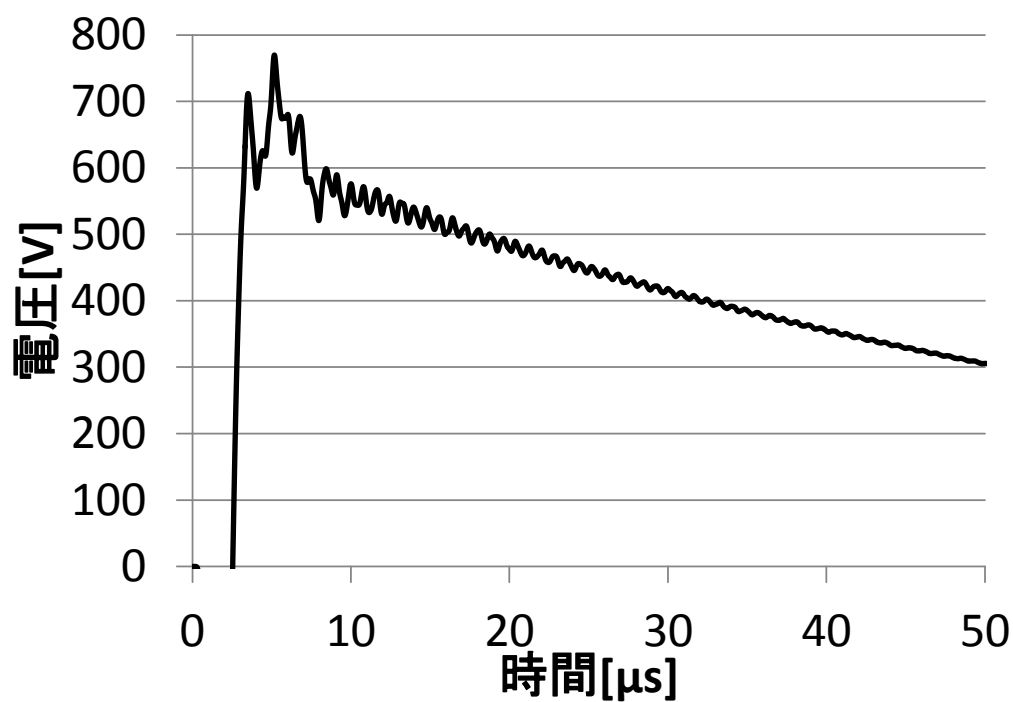
接地方式の最適解	接地極の接続状態					接地抵抗値	
	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	R _A [Ω]	R _B [Ω]
①	A	A	A	A	B	50	100
②	A	B	B	A	A	50	100
③	A	A	B	B	A	100	50
④	A	A	A	B	B	100	50

A: 接地極 A に接続

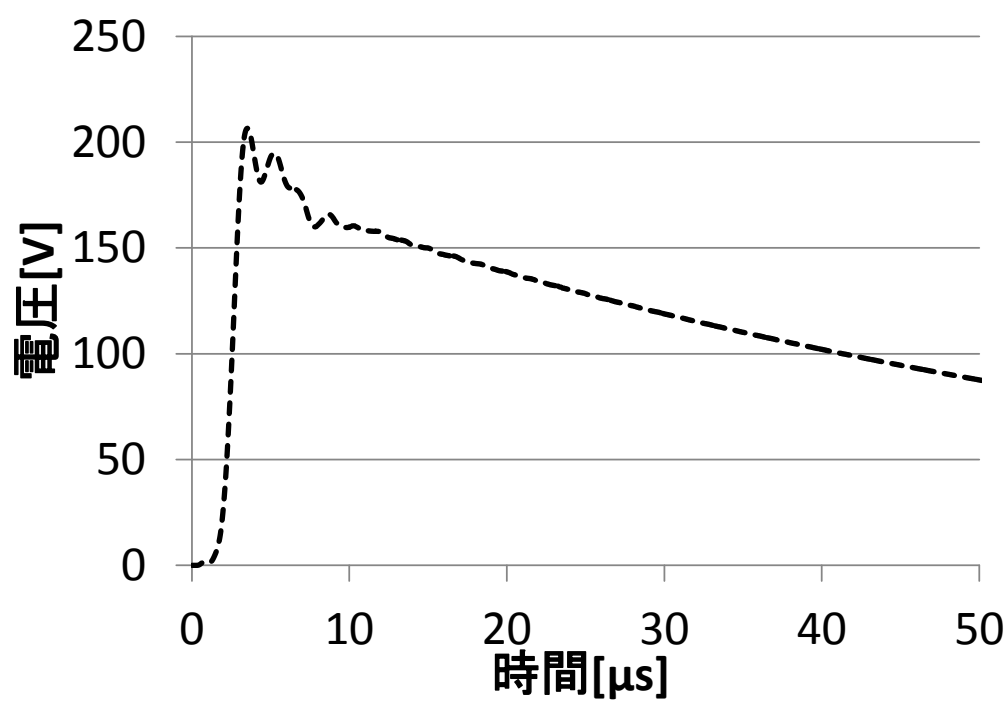
B: 接地極 B に接続

R_A: 接地極 A の接地抵抗値

R_B: 接地極 B の接地抵抗値

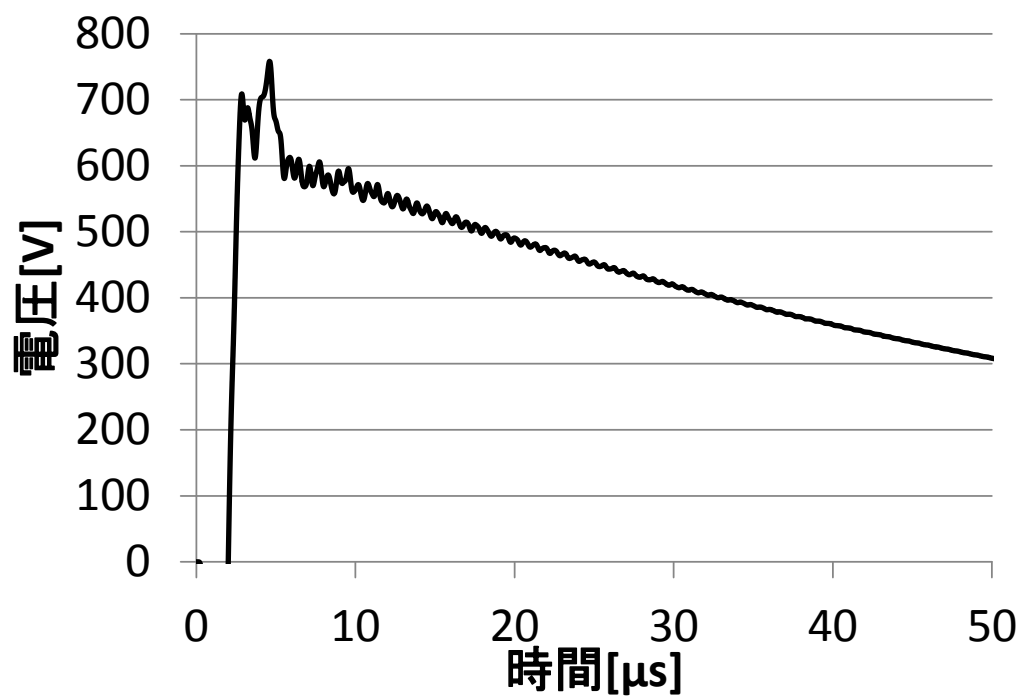


(a) 通信ポート

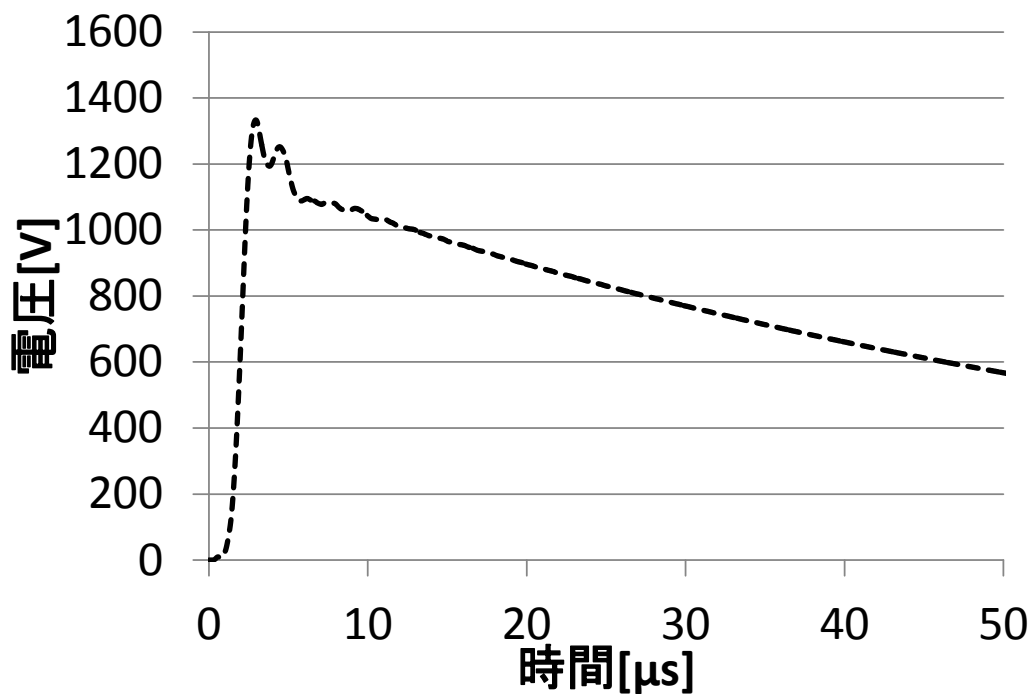


(b) 電源側

図 2.19 通信機器に生じる電圧値（解①の接地条件時）



(a) 通信ポート



(b) 電源側

図 2.20 通信機器に生じる電圧値（全ての接地を 50Ω の接地極で共通化）

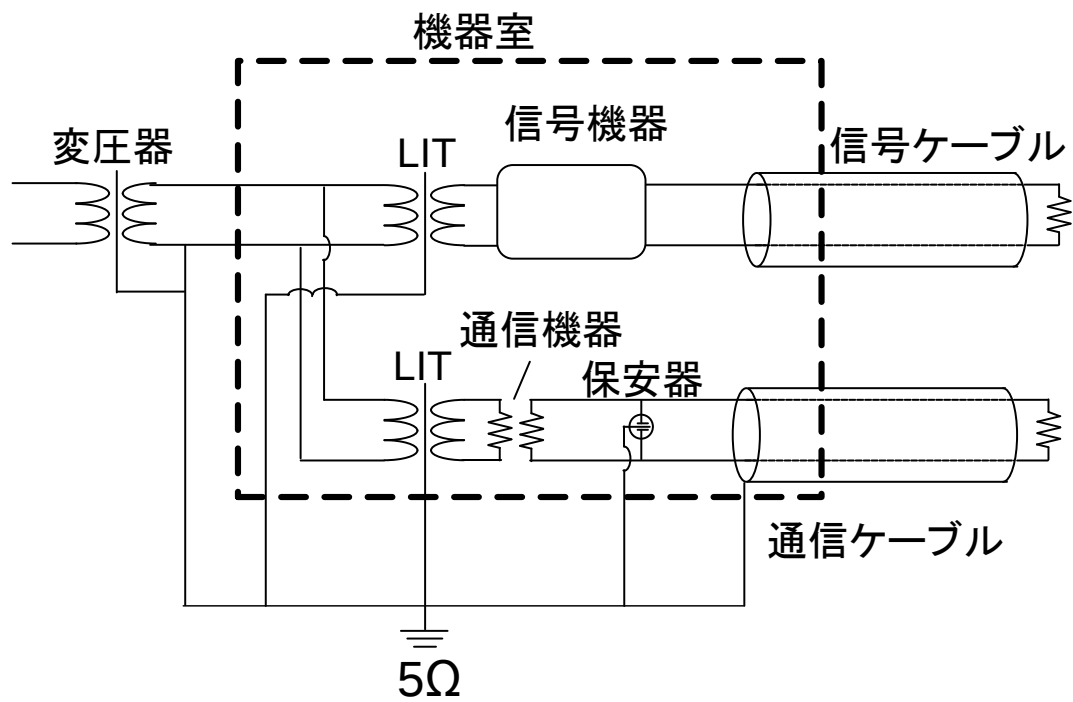


図 2.21 条件 2 の結果

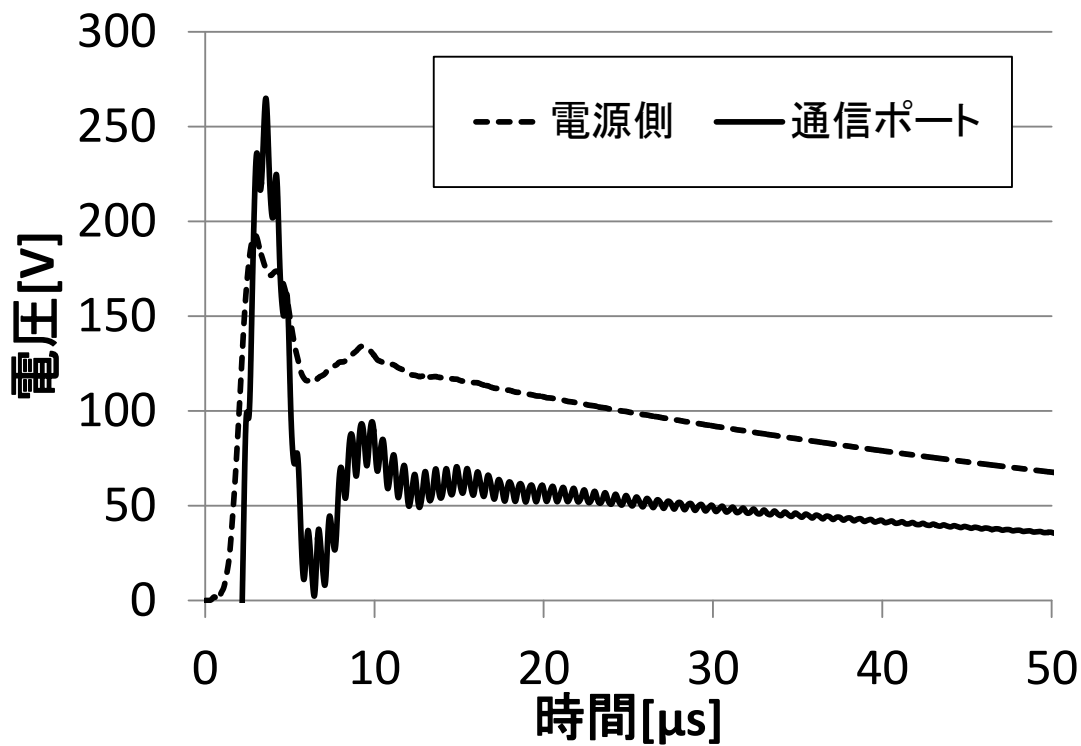


図 2.22 通信機器に生じる電圧値 (図 2.21 の構成時)

2.4 機器室の通信設備を対象とした給電方式の評価手法

2.4.1 想定する通信設備の構成

本研究では、通信機器・信号機器が設置されている機器室を想定し、機器室内の機器への電力供給の観点での経済性と信頼性の評価を行うことを考える。通信機器・信号機器については、直流で動作する機器と交流で動作する機器の 2 種類を想定した。また、機器室内には、非常用の蓄電池が設置され、停電の発生時に通信機器・信号機器への電力供給を行うものとし、通常時の電力供給は、電力系統からの買電のみで行うものとした。本研究で検討対象とする鉄道通信設備の構成を図 2.23 に示す。

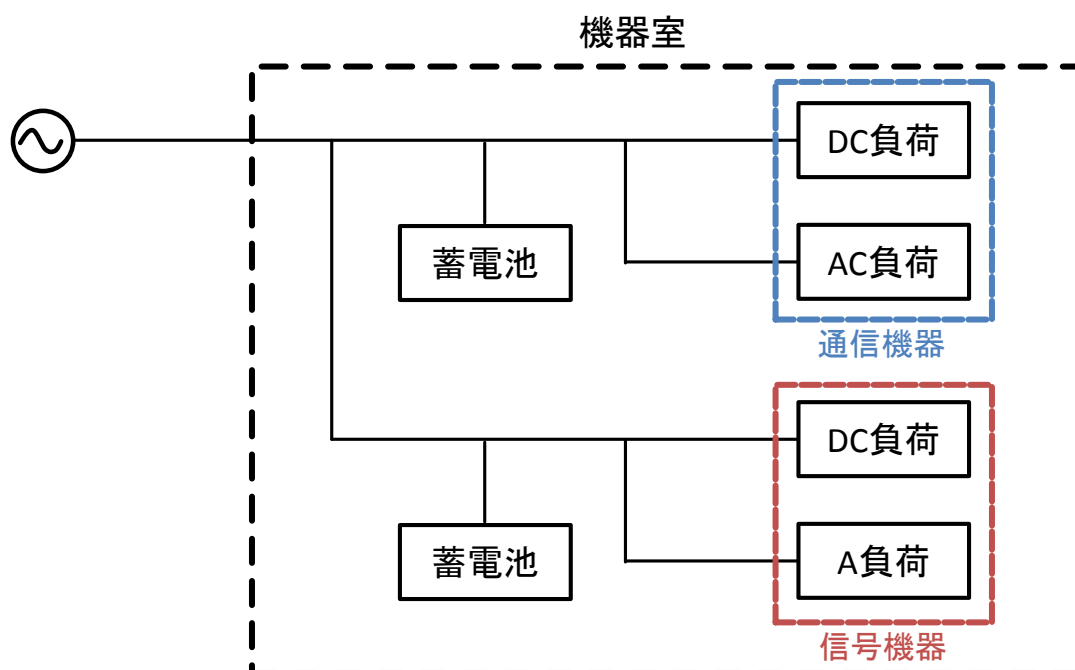


図 2.23 検討対象とする鉄道通信設備の構成

2.4.2 経済性と信頼性に基づく給電方式の評価手法

本研究では、鉄道通信設備の給電方式の違いによる経済性と信頼性への影響を考慮するために、時系列モンテカルロ法を用いて、機器室内における各変換器の効率と故障の両方を考慮した評価を行う。時系列モンテカルロ法では、設備の故障を乱数によって確率的に模擬し、その結果に基づいて停電や供給経路の有無を判断することで、供給支障量を算出する。時系列モンテカルロ法による給電方式の評価手順を以下に示す。

STEP1 設備の故障状態の設定

STEP2 設備の故障状態に基づく供給経路の判定

STEP3 各時間帯の供給支障量・電力購入コストの算出

STEP4 供給支障量・電力購入コストの年間期待値の算出

上記の手順の詳細を以下に示す。

(1) 設備の故障状態の設定

ここでは、疑似一様乱数と各設備の故障率から設備の故障を模擬し、各時間帯における系統や変換器の故障状態を設定する。

(2) 設備の故障状態に基づく供給経路の判定

ここでは、STEP1 で設定した各設備の故障状態に基づいて、系統や蓄電池から負荷への供給経路の判定を行う。

(3) 各時間帯の供給支障量・電力購入コストの算出

ここでは、STEP2 の供給経路の判定結果に基づいて、各時間帯における供給支障量と電力購入コストの算出を行う。系統から負荷への供給経路が存在する場合には、変換器効率を考慮した負荷との需給バランスに基づいて、買電量を決定し、電力購入コストを算出する。また、系統・蓄電池から負荷への供給経路が存在しない場合には、供給支障が発生するものとし、供給支障量を算出する。

(4) 供給支障量・電力購入コストの年間期待値の算出

ここでは、STEP1～STEP3 の計算を時間帯を更新しながら繰り返し行うことで得られる結果から、供給支障量と電力購入コストの1年間の期待値を算出する。供給支障量としては、供給支障電力量 (EENS) [kWh/年]と供給支障時間 (EDNS) [hour/年]の2つを算出するものとした。

本研究では、上記の計算によって算出する供給支障量と電力購入コストの年間期待値に基づいて、鉄道通信設備の給電方式を評価することを考える。

2.4.3 通信設備の給電方式の経済性と信頼性の評価

[1]計算条件

新幹線の機器室を対象として、直流給電の導入による経済性・信頼性の観点での効果に関する試算を行った。試算で用いた各種機器の容量、電気料金を表 2.7 に示す。各種機器の容量は、文献[35]の新幹線機器室の電源系統図を参考に設定した。また、電気料金は、電力会社の業務用電力の料金を参考に設定した。次に、各設備の故障率、修復時間を表 2.8 に示す。停電については電力系統の故障として模擬するものとし、故障率と修復時間は、文献[36]の需要家一軒当たりの年間停電時間および停電回数に基づいて設定した。その他の故障率と修復時間については、文献[37]に基づいて設定した。

また、機器室内の給電方式としては、以下の3パターンを想定し、経済性および信頼性の試算を行った。各給電方式における変換器を含む構成を図 2.24 に示す。なお、図 2.24 における変換器の効率は文献[38]に基づいて設定した。

①交流給電：通常の交流給電

②直流給電1：直流負荷の電圧に変換して給電

③直流給電2：蓄電池の電圧に変換して給電

表 2.7 各種パラメータ

通信機器	DC 負荷	40[kW]
	AC 負荷	20[kW]
蓄電池(通信機器用)	kW 容量	80[kW]
	kWh 容量	240[kWh]
信号機器	DC 負荷	20[kW]
	AC 負荷	40[kW]
蓄電池(信号機器用)	kW 容量	80[kW]
	kWh 容量	240[kWh]
電気料金		18.12[yen/kWh]

表 2.8 各設備の故障率と修復時間

	故障率[/year]	修復時間[hour]
系統	0.239	1.25
整流器	0.00447	16
インバーター	0.00482	26
コンバーター	0.00482	26

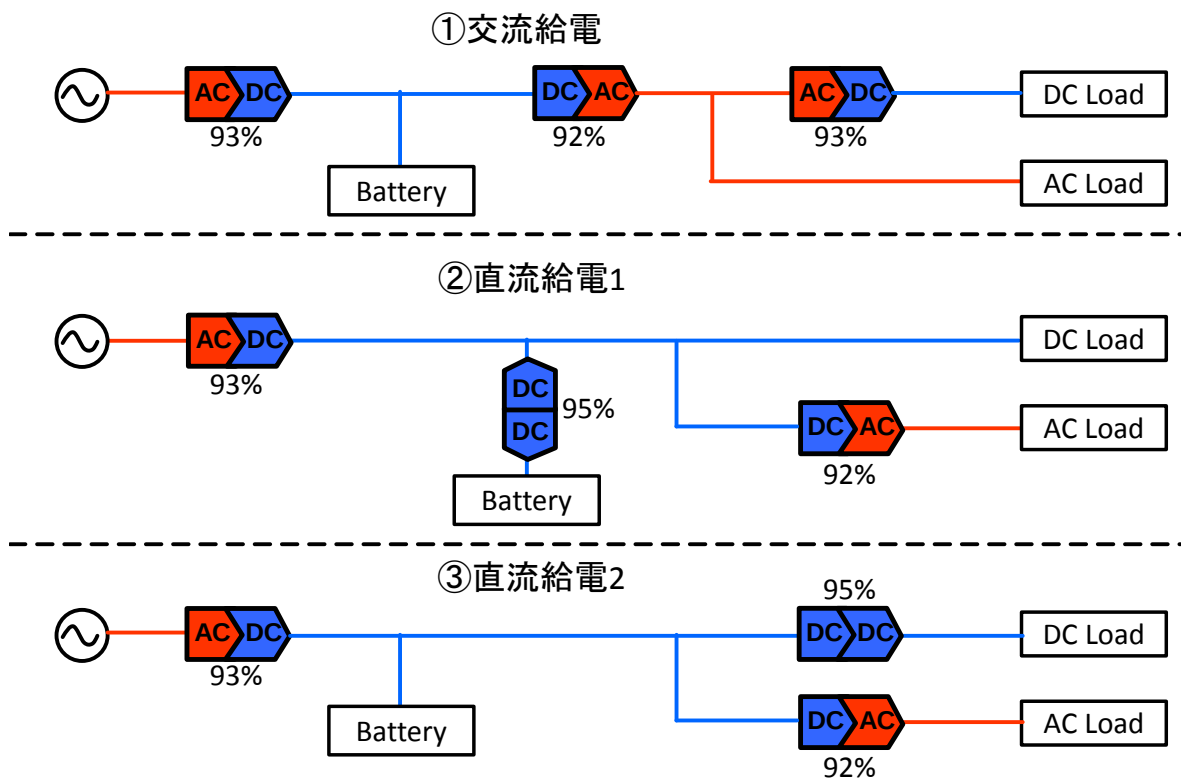


図 2.24 試算対象とする給電方式

[2]計算結果

上記の条件に基づいて、提案手法により各給電方式の電力購入コストを算出した結果を表 2.9 に、EENS と EDNS を算出した結果を図 2.25 と図 2.26 に示す。

表 2.9 より、交流給電と直流給電を比較すると、直流給電の方が電力購入コストを低減することができ、直流給電 1 の場合には交流給電よりも 7.5%程度電力購入コストを低減できることがわかる。直流給電 1 では、直流負荷への電力供給の際に交流給電よりも 2 段分の変換器を削減できることから、変換損失が削減され、電力購入コストについても低減されたと考えられる。

同様に、EENS についても、直流給電と交流給電を比較すると、直流給電の方がより小さい値に抑えられることがわかる。これに関しても、電力購入コストと同様に、電力変換段数の違いが原因として考えられる。

次に、EDNS についてであるが、図 2.26 より同一の給電方式でも直流負荷と交流負荷で傾向が違うことがわかる。これは、図 2.24 の通り、直流負荷と交流負荷では、直流給電 2 の場合以外は変換器の段数が異なることが原因として考えられる。また、図 2.24 より、いずれの給電方式においても交流負荷の変換器の段数は変わらないが、直流負荷については直流給電にすることで変換段数が削減できることがわかる。このため、交流負荷の EDNS は給電方式の影響を殆ど受けないが、直流負荷の EDNS については直流給電にすることで低減可能という結果になったと考えられる。

以上の結果より、交流給電と直流給電を比較すると、新幹線機器室においては、直流給電の方が経済性・信頼性の両方の観点で有利であり、直流給電を導入することで、電力購入コストや変換器故障による設備停止等を低減できる可能性があると考えられる。

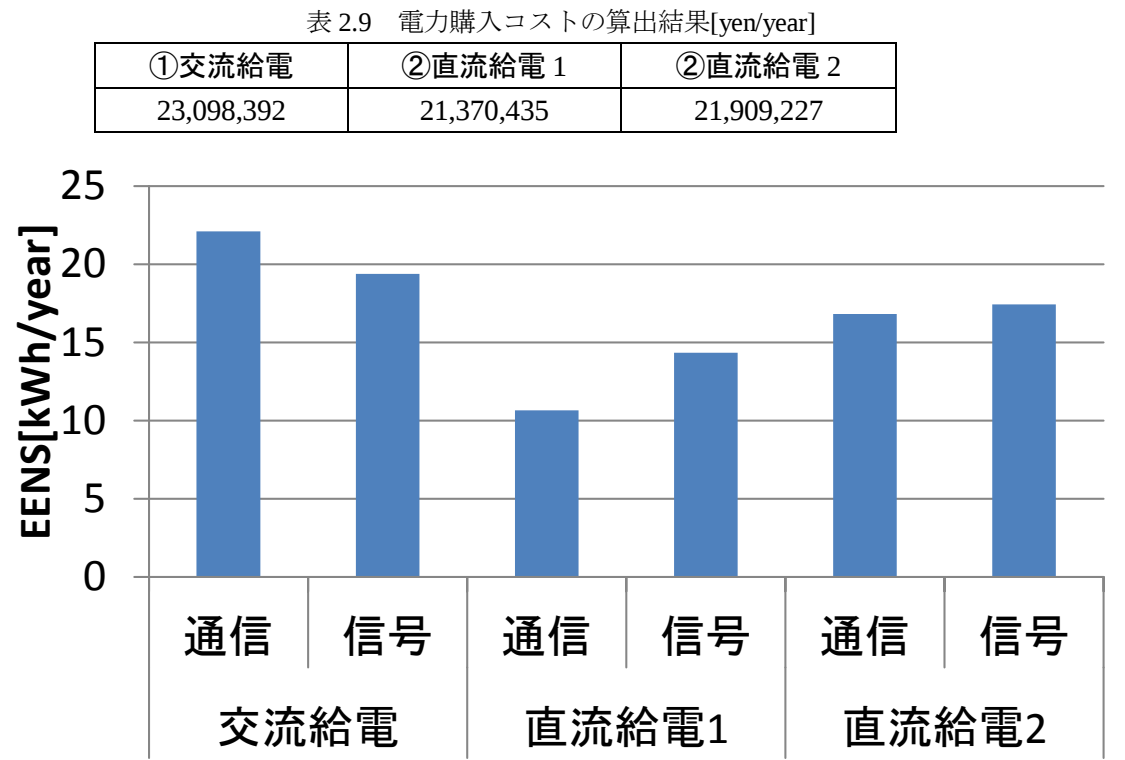


図 2.25 EENS の算出結果

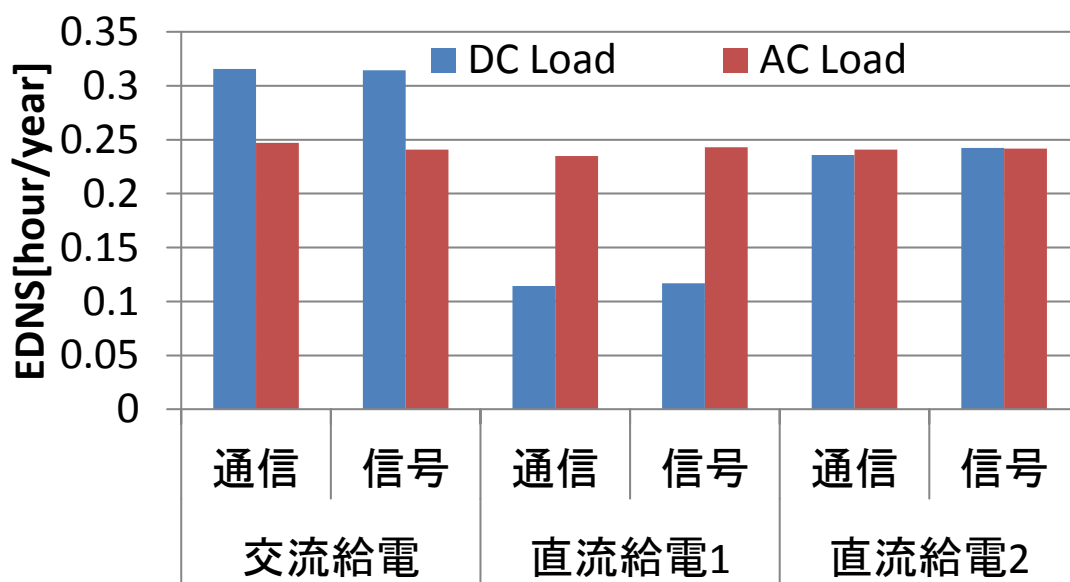


図 2.26 EDNS の算出結果

2.5 まとめ

本章では、機器室内の鉄道通信設備を対象として、雷サージの影響を予測するための解析モデルを提案した。さらに、提案した解析モデルの精度を検証するため、実際の鉄道通信設備を用いて雷サージ印加試験を実施し、解析モデルを用いた同一条件でのシミュレーション結果との比較を行った。検証の結果、通信ケーブルや耐雷トランスといった個別の機器で見た場合の最大値の誤差は 2.4%~12.6%程度であり、概ね一致することが確認できた。また、機器室内の鉄道通信設備全体を想定した構成においても、最大値の誤差は 3.4%~10%程度であり、提案した解析モデルを用いることで、鉄道通信設備における雷サージ解析を精度良く行えることが確認できた。

さらに、鉄道通信設備を対象として、雷サージ解析シミュレーションと数理最適化を組み合わせることで、雷サージ対策と経済性の両方の観点から機器室の接地方式を設計するための手法を提案した。また、典型的な通信機器室を対象として、提案手法を用いた数値実験を行い、その有効性を検証した。その結果、提案手法を用いることで、接地極数や接地抵抗値の変化が雷サージの発生量に与える影響を考慮したうえで、鉄道通信設備の経済的な接地方式を設計できることが確認できた。

最後に、経済性と信頼性の観点から鉄道通信設備の給電方式を評価するための手法を検討し、機器室を対象として複数の給電方式に対する経済性と信頼性の試算を行った。その結果、機器室に直流給電を導入することで、電力購入コストや変換器故障による設備停止を低減できる可能性があることがわかった。

第3章 鉄道車両の状態監視用の通信設備を対象とした経済性と信頼性の評価手法

3.1 概要

第2章では、機器室の鉄道通信設備を対象として、経済性と信頼性に基づいた設計・評価のための手法を提案した。

これに対して、近年の ICT の発展に伴い、鉄道車両の状態監視を目的とした無線センサネットワーク（WSN）に関する研究が進められている。鉄道車両の状態監視を目的とした WSN においては、列車上に無線センサノードや集約装置といった通信設備が設置されることになるが、WSN の多くは、センサノードのバッテリーによる駆動が前提のため、バッテリー寿命に合わせて定期的にバッテリーを交換する必要がある。また、バッテリー容量やバッテリー交換頻度が WSN のコスト（経済性）に大きく関わってくるが、これらを考慮して WSN を設計するうえでは、各センサノードの消費電力量を事前に予測することが重要となる。加えて、WSN の信頼性を考慮して設計する上では、センサノードからのデータが集約装置まで到達する確率を事前に予測することが重要となる。しかし、車両状態監視用 WSN では、車両の増解結によるネットワーク形状の変化や列車の走行に伴う通信環境の変化等の特徴があり、一般の WSN を対象とした手法ではセンサノードの消費電力量やデータ到達率を予測できないという課題がある。

そこで本章では、センサノードがバッテリーで駆動する車両状態監視用 WSN を対象として、車両の増解結や走行による通信環境の変化を模擬するために時系列モンテカルロ法を用いて、センサノードの消費電力量とデータ到達率を予測する手法を提案した。

3.2 想定する通信設備

3.2.1 想定する通信設備の構成

本章においては、列車は運転台のある先頭車両と1台以上のそれ以外の車両から組成され、駅間を運転できる状態のものを指す。また、本章で対象とする車両状態監視用 WSN は、先頭車両以外の各車両に無線センサノードが設置され、先頭車両に設置される集約装置で各車両からのセンサデータを集約することを想定する。本章で対象とする車両状態監視用 WSN の構成を図 3.1 に示す。

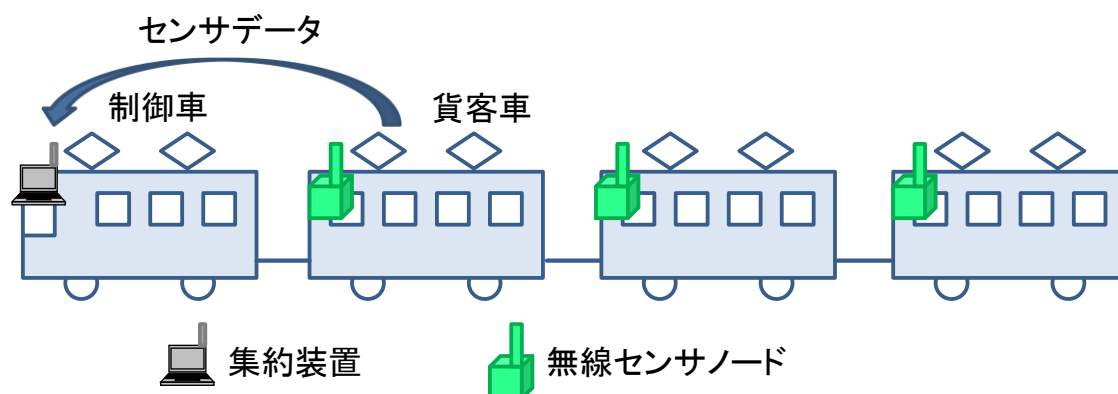


図 3.1 想定する車両状態監視用 WSN

3.2.2 車両増解結を考慮したネットワーク構築

車両の状態監視に WSN を適用するには、列車毎にセンサノードをグループ化し、そのグループ内でノード間の通信の可否を確認してネットワークを構築する必要がある。一般的に、このグループ化は人手による設定が必要である。そのため、車両の増解結が行われるとその都度人手によるグループの再設定が必要となり、設定ミスや発車までにかかる時間の増大が懸念される。一方で、グループ化せずにアドホックにネットワークを構築する場合、駅等の複数の列車が存在する場所において、近接する別列車の車両とネットワークを構築してしまい、列車毎にデータを集約できない可能性がある。

これらの課題を解決するために、著者らは車両増解結を考慮した車両状態監視用 WSN のネットワーク構築手法[39]を提案してきた。文献[39]で提案したネットワーク構築手法では、固有の車両番号などをノード ID としてノードを管理するものとしており、通信の宛先のノード ID をパケットに付加して送信することで、宛先のノードとの間の通信を行う。

また、一般的に、車両の増解結に伴う編成は事前に計画されていることから、集約装置は編成情報を車両の増解結後に取得できることを想定しており、集約装置は自身が含まれる列車内の全てのセンサノードのノード ID と何両目に接続されるかを編成情報から把握することができる。集約装置は車両増解結後の上記の情報に基づき、連結する車両のセンサノードとの間の通信の可否を確認し、その結果に基づいて同じ列車内に閉じたネットワークを再構築する。

本章においても、上記の車両増解結を考慮したネットワーク構築手法のように、車両増解結時にネットワークの再構築を行う WSN を想定する。

3.3 鉄道車両の状態監視用通信設備を対象とした経済性と信頼性の評価手法

本章で提案する手法では、車両状態監視用 WSN のセンサノードの消費電力量を通信の不確実性を考慮して予測する。このような不確実性を含んだ問題を解析する方法としては、大別してモンテカルロ法（確率論的方法）と状態列挙法（確定論的方法）の二つの方法がある。状態列挙法は、対象に対して起こり得る全ての状態とその確率を列挙して解析を行う方法であり、厳密解を得ることができる。しかし、問題の規模が大きい場合や、不確実性が大きい場合には、現実的な時間で解を求めることが困難となる。これに対して、モンテカルロ法は乱数を用いたシミュレーションを繰り返し行うことで近似解を求める方法であり、全ての状態を列挙する必要がないことから大規模な問題の解析を行うことができる。本章で対象とする車両状態監視用 WSN では、1 つの列車に車両数に応じて複数のセンサノードが設置されることを想定しており、それぞれのセンサノードが通信の不確実性によって様々な通信回数や配送経路を取る可能性がある。また、車両の増解結を考慮して消費電力量を計算するには、多数の列車の存在を考慮した解析が必要となる。このため、規模の大きい問題への対応が必要なことから、本論文ではモンテカルロ法を用いることとした。

提案する車両状態監視用 WSN の消費電力量予測手法のフローを図 3.2 に示す。提案手法では、まず車両増解結時のネットワーク再構築のシミュレーションを行い、その結果を用いてルーティングテーブルを生成する。その後、生成したルーティングテーブルに基づいて、車両状態監視用 WSN の動作を模擬し、消費電力量を算出する。図 3.2 における各項目の詳細を以下に述べる。

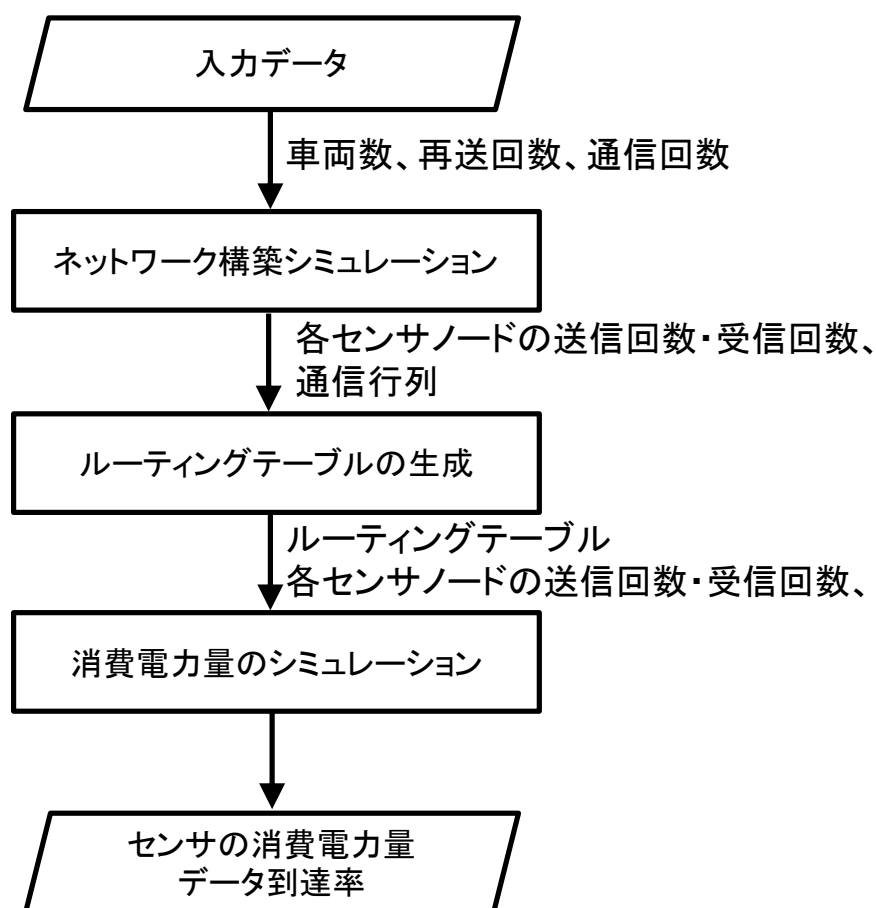


図 3.2 提案手法のフロー

3.3.1 ネットワーク構築シミュレーション

ネットワーク構築シミュレーションでは、車両増解結時のネットワークの再構築をネットワークシミュレータを用いて模擬する。以下に、ネットワーク構築シミュレーションにおける入力と出力を示す。

[入力]

- ・車両数
- ・再送回数
- ・通信環境（通信可能な距離、パケットロス率等）

[出力]

- ・各センサノードの送信回数
- ・各センサノードの受信回数
- ・通信行列

ここで、通信行列とは車両状態監視用 WSN 内の全てのノード（集約装置およびセンサノード）間の通信状況を表す行列である[39]。なお、通信状況は、ネットワーク構築の結果、通信可能とみなすかどうかを指し、通信可能とみなす場合を 1、通信不可能とみなす場合を 0 とする。本章においては、この通信行列を用いてルーティングテーブルを生成するものとする。

3.3.2 ルーティングテーブルの生成

ルーティングテーブルの生成では、ネットワーク構築シミュレーションの出力として得られる通信行列に基づいて、ルーティングテーブルを生成する。ここで、ルーティングテーブルとは、各センサノードが保有するデータを配送する際の配送先までの経路情報である。

ルーティングテーブルの生成の考え方としては、最短経路となるように、各センサデータの経路を生成するという方法が一つとして考えられる。しかし、最短経路では特定のセンサノードに負荷が集中し、結果としてバッテリー交換の頻度が高まる可能性がある。車両状態監視用 WSN のようなバッテリー交換のタイミングが限られる WSN では、可能な限りバッテリー寿命を長期化するの望ましい。そのため、必ずしも最短経路が最適な経路とは限らないと考えられる。そこで、提案手法においては、どのようなルーティングが車両状態監視用 WSN では望ましいかについて比較・検討を行えるようにするために、ルーティングテーブルは通信行列を用いて任意に設定できるものとした。

3.3.3 消費電力量のシミュレーション

消費電力量のシミュレーションでは、各時間帯における列車の位置や通信環境、車両増解結の有無、ルーティングテーブルを与え、車両状態監視用 WSN の各時間帯の通信回数や消費電力量、データ到達数を算出する。この際、パケットロスの発生については疑似乱数によって確率的に模擬する（モンテカルロ法）。また、上記の計算を時間帯を更新しながら指定する期間まで繰り返し行うことで、最終的に指定する期間までの消費電力量とデータ到達率を算出する。消費電力量のシミュレーションのフローを図 3.3 に示す。ここで、図 3.3 中の **time** は計算中の時間帯を、 Δt はシミュレーションの時間刻み幅を、**simulation period** はシミュレーションの期間を表す。以下に、図 3.3 における各項目の詳細を述べる。

（1）入力データ

消費電力量のシミュレーションでは、以下のデータを入力として与え、消費電力量の算出を行う。

- ・各時間帯における列車の連結車両
- ・各時間帯における列車の位置
- ・車両増解結の発生時刻
- ・ルーティングテーブル
- ・各列車位置における通信環境（通信可能な距離、パケットロス率等）
- ・バッテリー容量
- ・バッテリー交換計画
- ・ネットワーク再構築時の各センサノードの送信回数、受信回数
- ・センサデータの送信周期
- ・センサデータの再送回数
- ・無線センサノードの仕様（消費電力、送信時間等）
- ・シミュレーションの時間刻み幅

・シミュレーションの期間

(2) 各種状態の設定

各種状態の設定では、各時間帯における消費電力量およびデータ到達数の算出を行うために、各時間帯の車両の状態、ネットワークの状態、通信環境、バッテリー状態を設定する。

- 車両状態の設定：車両状態の設定では、各時間帯における列車の位置や列車に連結される車両の設定を行う。ここでは、時間帯に応じて列車の位置を更新することで、列車の走行を模擬する。また、時間帯に応じて列車に接続される車両を更新することで、車両の増解結を模擬する。
- ネットワーク状態の設定：ネットワーク状態の設定では、ルーティングテーブルの設定を行う。車両増解結が発生した際には、3.3.2 で算出するルーティングテーブルに基づいて、ここでルーティングテーブルを更新する。
- 通信環境の設定：通信環境の設定では、各時間帯における通信環境の設定を行う。ここでは、時間帯毎の列車位置に基づいて通信環境を更新することで、列車の走行による通信環境の変化を模擬する。
- バッテリー状態の設定：バッテリー状態の設定では、各時間帯におけるバッテリーの状態の設定を行う。ここでは、入力で与えるバッテリー交換計画（例えば、1 年周期で交換）に基づいたタイミングで各センサノードのバッテリーの残量を更新することで、バッテリー交換を模擬する。

(3) 各センサノードの動作の模擬

各センサノードの動作の模擬では、各種状態の設定で設定した状態に基づいて、各車両に設置されるセンサノードから集約装置までデータを伝送する際の各センサノードの通信回数やデータの到達数を算出する。この際、パケットロスの発生については疑似乱数によって確率的に模擬する。また、パケットロスが発生した際には、入力で設定した再送回数まで再送を行うものとし、データの再送までを考慮した各時間帯における各センサノードの通信回数（データの送信回数、データの受信回数）とデータの集約装置への到達数を算出する。

(4) 各時間帯の消費電力量の算出

各時間帯の消費電力量の算出では、(3) で算出する通信回数に基づいて、各時間帯の各センサノードの消費電力量を算出する。また、算出した消費電力量に基づいて、各センサノードのバッテリー残量を更新する。一般的に、WSN のセンサノードにおける消費電力量 W は以下の式(3.1)で表される[40]。

$$W = P_t \cdot T_t + P_r \cdot T_r + P_w \cdot T_w \quad (3.1)$$

ここで、 P_t ：送信時消費電力、 T_t ：送信時間、 P_r ：受信時消費電力、 T_r ：受信時間、 P_w ：待機時消費電力、 T_w ：待機時間である。

本研究においても、式(3.1)の考え方に基づいて各センサノードの消費電力量の算出を行う。具体的には、各時間帯における各センサノードの送信回数・受信回数を考慮して、以下の式(3.2)により各時間帯の消費電力量を算出する。

$$W_i(t) = P_t \cdot T_t \cdot Nt_i(t) + P_r \cdot T_r \cdot Nr_i(t) + P_w \cdot T_{wi}(t) \quad (3.2)$$

ここで、 $W_i(t)$ ：時間帯 t におけるセンサノード i の消費電力量、 $Nt_i(t)$ ：時間帯 t におけるセンサノード i の送信回数、 $Nr_i(t)$ ：時間帯 t におけるセンサノード i の受信回数、 $T_{wi}(t)$ ：時間帯 t におけるセンサノード i の待機時間である。

また、車両増解結時の消費電力量については、3.3.1 のネットワーク構築シミュレーションで算出されるネットワーク再構築時の各センサノードの送信回数・受信回数に基づいて同様に式(3.2)により算出する。

(5) 消費電力量・データ到達率の算出

消費電力量・データ到達率の算出では、(2)～(4)で示した計算を時間帯を更新しながら繰り返し行うことで得られる結果から、指定する期間までの消費電力量とデータ到達率を算出する。具体的には、指定する期間までの各センサノードの消費電力量は、各時間帯の消費電力量の合計値として算出する。同様に、各センサノードの指定する期間までのデータ到達率は、各時間帯のデータ到達数の合計値に基づいて算出する。

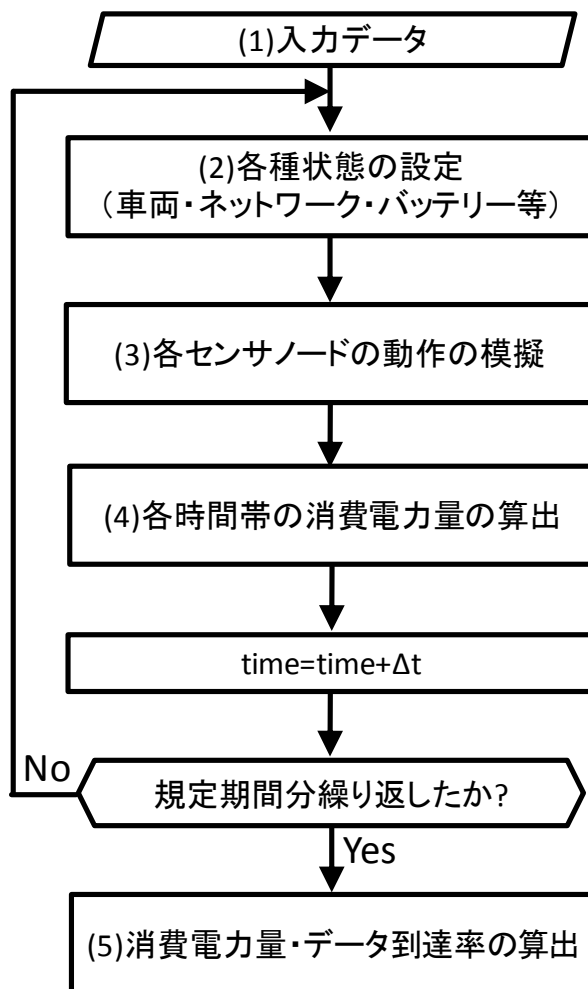


図 3.3 消費電力量のシミュレーション

3.4 数値実験による提案手法の検証

提案手法の有用性を検証するために、提案手法を用いて車両状態監視用 WSN の消費電力量を算出する数値実験を行った。数値実験の条件を次に示す。

3.4.1 試算条件

- 列車の両数としては、在来線列車の場合は 1 両編成～最大で 15 両編成のものまで存在するが、今回は平均的な両数における消費電力量を求めるために、中間程度の両数である 7 両編成の列車を想定した。具体的には、図 3.4 に示すように、先頭車両に集約装置が設置される 7 両編成の列車を想定（図 3.4 の①）し、後ろ 3 両を 2 時間経過後に解結し（図 3.4 の②）、そのさらに 2 時間後には後ろに 3 両を増結して元の状態に戻る（図 3.4 の①）というように、2 時間毎に車両の増結・解結を交互に行いながら走行する状況を想定した。
- 車両増解結時のネットワーク構築手法としては、文献[39]の通信行列付与シーケンスを用いた。通信行列付与シーケンスでは、集約装置は自身が含まれる列車の編成情報と通信行列を保有し、その通信行列に基づき、隣接ノード情報をセンサノードに配信する。配信に失敗した場合のみ通信行列を更新し、集約装置は通信行列を出力する。
- ネットワーク構築シミュレーションには、ネットワークシミュレータ OMNeT++[41]を用いた。
- バッテリー容量は 10[Wh]とし、バッテリー交換は行わないものとした。
- ルーティングテーブルについては、最短経路となるように生成した。
- センサノードの通信可能な距離は 2 両先の車両までとし、1 両先の車両と通信する場合の packet loss 率は 1%，2 両先の車両と通信する場合の packet loss 率は 5%とした。また、列車位置による通信環境の変化はないものと仮定した。
- 今回は、文献[39]で提案している手法を用いた車両状態監視用 WSN を想定したため、センサノードの消費電力は、文献[39]においてネットワーク構築手法のプロトタイプに用いた 920MHz 帯の無線モジュール（佐島電機株式会社製 LPR-9204[42]）の仕様値に基づき、送信時が 69.3mW、受信時が 52.8mW、待機時が 0.002mW とした。
- センサデータの送信周期は 10 分に 1 回とし、シミュレーションの時間刻み幅も 10 分とした。また、センサデータの再送回数は 2 回とした。
- シミュレーションの期間は 1 年とした。また、1 年間のシミュレーションを 1 万回繰り返して行うことで、車両状態監視用 WSN を 1 年間運用するときの消費電力量とデータ到達率を 1 万回のシミュレーションの平均値として算出した。

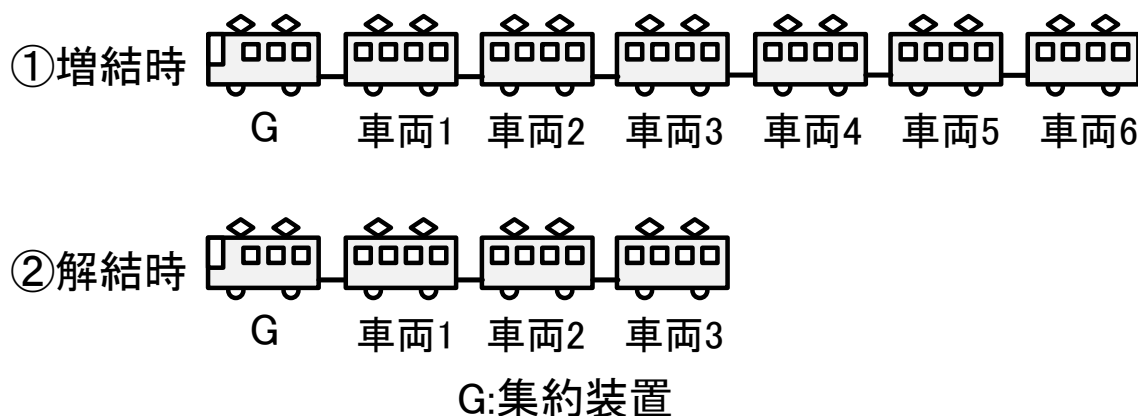


図 3.4 列車の条件

本章では、上記の条件（以下、条件 1）を基本とし、条件 1 に対して車両の増解結の条件を変更した場合（条件 2）との比較を行うことで、車両の増解結によるネットワークの再構築やネットワーク形状の変化を考慮して消費電力量を予測することの有用性を検証する。また、条件 1 に対して列車走行時の通信環境の変化を考慮した場合（条件 3、条件 4）と条件 1 の結果を比較することで、列車の走行やそれに伴う通信環境の変化を考慮して消費電力量を予測することの有用性を検証する。

3.4.2 試算結果

まず、条件 1 に基づいて、提案手法により各センサノードの消費電力量および集約装置までのデータ到達率を算出した結果、車両増解結時のネットワーク構築の際の各センサノードの送受信回数を算出した結果を表 3.1 に示す。ここで、表 3.1 中の N_t は車両増解結時のネットワーク構築 1 回当たりの各センサノードの送信回数、 N_r は車両増解結時のネットワーク構築 1 回当たりの各センサノードの受信回数、 S_i は車両 i に設置されるセンサノードを表す。また、車両増結時と車両解結時のネットワーク構築シミュレーションの結果を用いて、最短経路となるように算出したセンサデータの配送経路を図 3.5 と図 3.6 に示す。

表 1 より、車両増解結時の通信回数は、先頭車両に近い程多くなる傾向を示しており、先頭車両付近の $S_1 \sim S_2$ では増結時は最後尾の車両の 3～7 倍、解結時は 2 倍になった。また、図 3.5 と図 3.6 より、先頭車両に近いセンサノード程経由する回数が多くなっており、データ伝送時についても同様に通信回数が多くなるのがわかる。このため、消費電力量についても先頭車両に近い程大きくなる傾向を示したと考えられる。

また、条件 1 では、列車の後ろ 3 両は途中解結され、通信を行わない時間帯が存在するため、前側の 3 両と比較すると消費電力量が小さくなったと考えられる。このように、車両増解結を行う場合、途中から解結される車両と走行を続ける車両の間でセンサノードのバッテリー消費速度に差が出てしまい、車両毎のバッテリー交換のタイミングの管理が難しくなることが予想される。データ到達率に関しては、99.2%～99.9%とどのセンサのデータも 100%に近い到達率となり、最

後尾の車両に近い程到達率が低くなる傾向を示した。これは、最後尾の車両に近い程集約装置にデータが到達するまでに経由するセンサノードの数が多くなり、途中でパケットロスが発生する確率が高くなるためである。

表 3.1 提案手法によるシミュレーション結果

		センサノード					
		S1	S2	S3	S4	S5	S6
車両増結時	Nt	6	14	4	8	2	2
	Nr	6	14	4	8	2	2
車両解結時	Nt	4	4	2	-	-	-
	Nr	4	4	2	-	-	-
データ到達率[%]		99.9	99.8	99.7	99.5	99.4	99.2
消費電力量[Wh]		4.47	4.28	2.48	2.14	0.72	0.74

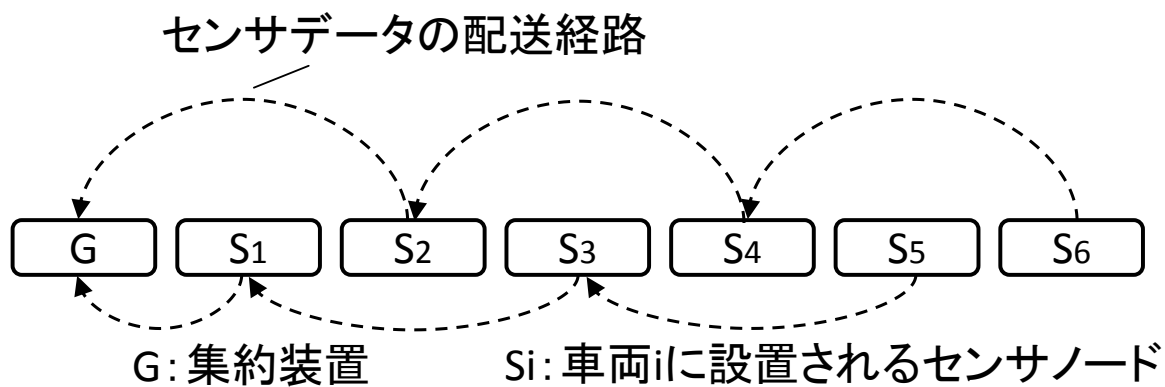


図 3.5 センサデータの配送経路の算出結果（増結時）

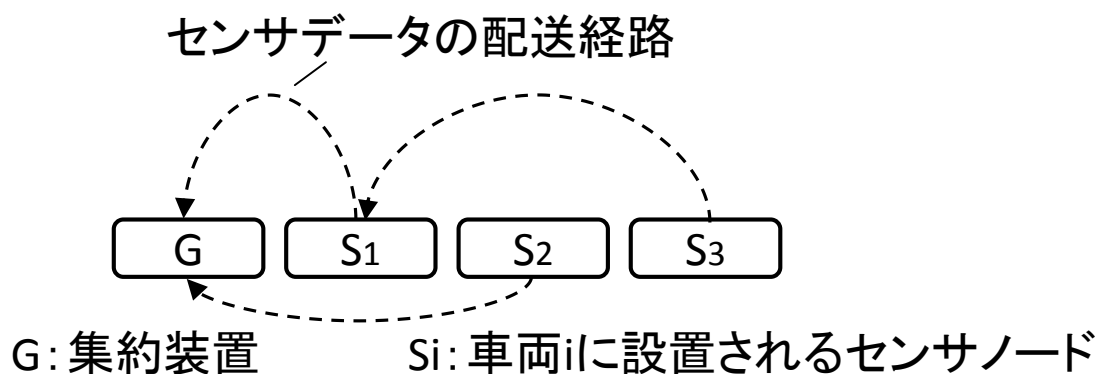


図 3.6 センサデータの配送経路の算出結果（解結時）

3.4.3 車両の増解結の影響に関する試算

次に、車両の増解結によるネットワークの再構築やネットワーク形状の変化を考慮することの有用性を検証するために、条件 1 について、車両の増解結を行わずに図 3.4 の①の状態で列車が走行を続ける場合（以下、条件 2）と比較を行うことで、車両の増解結が WSN の消費電力量に与える影響について検討した。条件 1 と条件 2 の比較結果を表 3.2 に示す。表 3.2 より、条件 1 と条件 2 では各センサノードの消費電力量に 5.1%～63.3%程度の差が生じていることがわかる。これは、条件 2 では車両増解結によるネットワークの再構築が発生しないためと考えられる。また、車両解結中はネットワークの規模が縮小されるため、各センサノードの通信回数・消費電力は減少することになるが、条件 2 では車両の解結によるネットワーク形状の変化がない。そのため、条件 2 は条件 1 よりも消費電力量が高い値を示したと推察される。

このように、車両の増解結によるネットワークの再構築やネットワーク形状の変化は消費電力量に大きな影響を与える可能性があるため、これらを考慮することは、車両状態監視用 WSN の消費電力量をより正確に予測するために重要であるといえる。

表 3.2 シミュレーション結果（条件 1, 2）

		センサノード					
		S1	S2	S3	S4	S5	S6
消費電力量[Wh]	条件 1	4.47	4.28	2.48	2.14	0.72	0.74
	条件 2	4.70	4.98	3.02	3.19	1.17	1.21

3.4.4 列車の走行による通信環境の変化の影響に関する試算

次に、列車の走行による通信環境の変化を考慮することの有用性を検証するために、条件 1 について、列車の位置に応じて通信環境が変化する以下の条件 3 と条件 4 の 2 つの場合との比較を行うことで、列車の走行が WSN の消費電力量に与える影響について検討した。

- 条件 3：車両増結中（図 3.4 の①）のセンサノードの通信可能な距離を 3 両先の車両までとし、2 両先までの車両と通信する場合のパケットロス率は 1%、3 両先の車両と通信する場合のパケットロス率は 5%とする。また、車両解結中（図 3.4 の②）の通信環境は条件 1 と同様とする。
- 条件 4：車両増結中（図 3.4 の①）のセンサノードの通信可能な距離を 1 両先の車両までとし、1 両先の車両と通信する場合のパケットロス率は 5%とする。また、車両解結中（図 3.4 の②）の通信環境は条件 1 と同様とする。

消費電力量の算出結果を表 3.3 に、条件 3 と条件 4 の車両増結時のセンサデータの配送経路の算出結果を図 3.7 と図 3.8 に示す。表 3.3 より、条件 1 と条件 3 では各センサノードの消費電力量に 3.7%～67.6%程度の差が、条件 1 と条件 4 では 12.3%～210%程度の差が生じていることがわかる。また、条件 3 と条件 4 は車両増結中の通信環境が条件 1 と異なるため、図 3.7 と図 3.8 のように車両増結時のセンサデータの配送経路が条件 1 と異なる結果となった。このため、条件 1 と条

件 3・条件 4 では、車両増結中の各センサノードの通信回数に差が生じ、異なる消費電力量を示したと考えられる。このように、列車の走行による通信環境の変化がセンサデータの配送経路に影響を与える場合においては、通信環境の変化の有無で消費電力量が大きく変わる可能性があることがわかる。このため、車両増解結が発生する車両状態監視用 WSN では、列車の走行による通信環境の変化を考慮することは、消費電力量の予測をより正確に行うために重要であるといえる。

表 3.3 シミュレーション結果（条件 1, 3, 4）

		センサノード					
		S1	S2	S3	S4	S5	S6
消費電力量[Wh]	条件 1	4.47	4.28	2.48	2.14	0.72	0.74
	条件 3	3.43	2.53	2.84	0.69	0.69	0.71
	条件 4	8.59	6.62	5.40	3.52	2.23	0.83

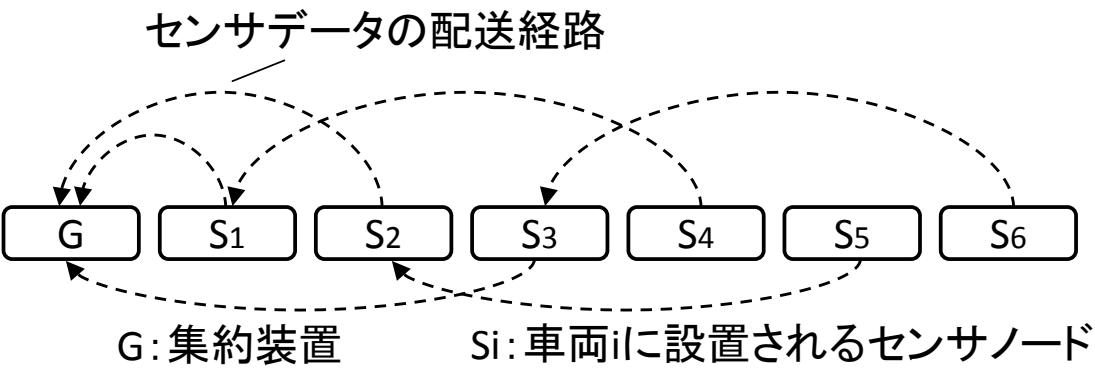


図 3.7 車両増結時のセンサデータの配送経路（条件 3）

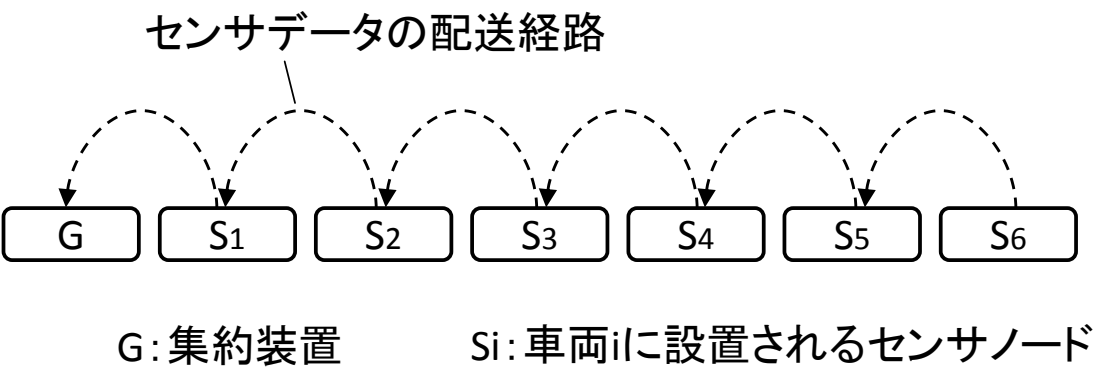


図 3.8 車両増結時のセンサデータの配送経路（条件 4）

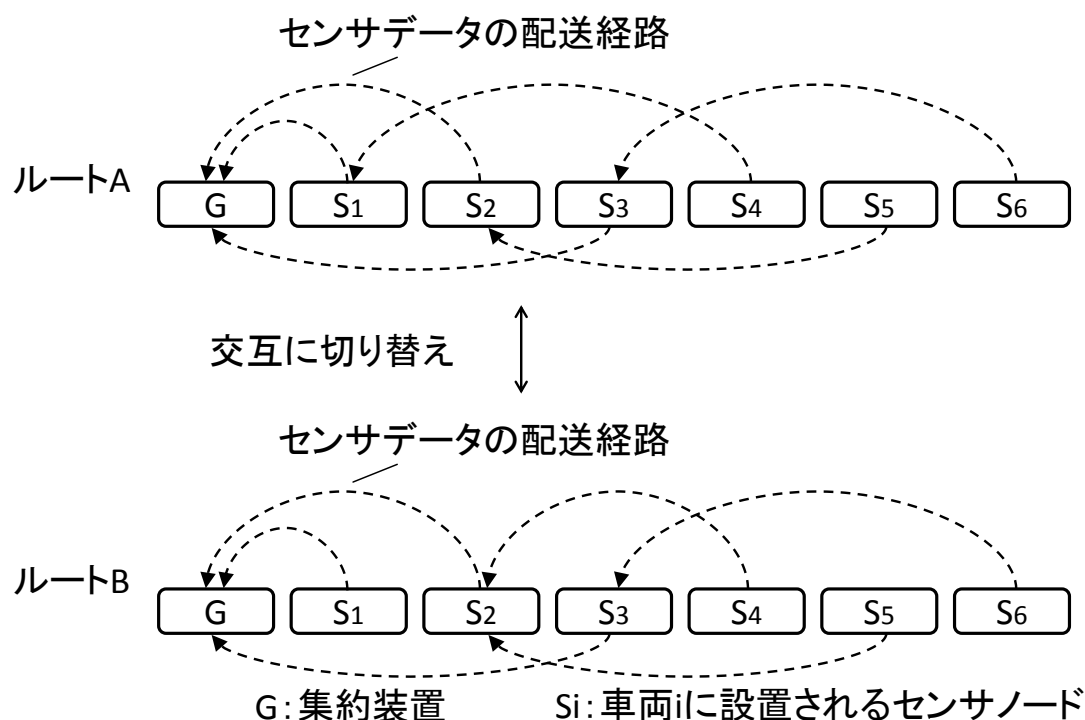


図 3.9 車両増結時のセンサデータの配送経路（条件 5）

3.4.5 ルーティングテーブルの影響に関する試算

最後に、ルーティングテーブルを任意に設定して消費電力量を予測できることの有用性を検証するために、他の条件に比べて消費電力量の偏りが大きい条件 3 について、ルーティングテーブルを変更した場合（以下、条件 5）と比較を行う。表 3.3 より、条件 3 では S1 に負荷が集中しており、S2 の消費電力量は比較的少ないことがわかる。このため、一部のセンサデータを S1 の代わりに S2 を経由するように経路を変更することで、消費電力量を平準化できる可能性がある。そこで条件 5 では、図 3.9 に示す経路 A と経路 B の二つの経路を車両増結時のネットワーク再構築の度に交互に切り替えるように、車両増結中のルーティングテーブルを条件 3 から変更することで、消費電力量を平準化することとした。条件 3 と条件 5 の消費電力量の比較結果を表 3.4 に示す。表 3.4 より、条件 3 から条件 5 のようにルーティングを変更することで、消費電力量の最大値を 3.43Wh から 2.98Wh へと約 13%低減できることがわかる。これにより、バッテリー交換頻度を同一とすると、ルーティングを変更することでセンサノードのバッテリー容量を約 13%低減できることになる。このように、提案手法を用いることで、車両状態監視用 WSN のバッテリーのコスト等の運用コストの面で効率的なルーティングを検討することが可能となる。

表 3.4 シミュレーション結果（条件 3, 5）

		センサノード					
		S1	S2	S3	S4	S5	S6
消費電力量[Wh]	条件 3	3.43	2.53	2.84	0.69	0.69	0.71
	条件 5	2.98	2.98	2.84	0.69	0.69	0.71

3.5 まとめ

本章では、センサノードがバッテリーで駆動する車両状態監視用 WSN を対象として、車両の増解結や走行による通信環境の変化を模擬するために時系列モンテカルロ法を用いて、バッテリーに関わるコスト（経済性）と通信の信頼性の観点での評価を行うための手法を開発した。また、車両状態監視用 WSN の消費電力量について、いくつかの条件で数値実験を行うことで、開発した手法の有用性に関して検証を行った。その結果、車両状態監視用 WSN において、車両の増解結によるネットワークの再構築やネットワーク形状の変化、列車の走行による通信環境の変化を考慮して消費電力量を予測することの重要性が示された。また、開発した手法を用いることで、車両状態監視用 WSN のバッテリーのコスト等の運用コストの面で効率的なルーティングの検討を行えることを示した。

第 4 章 線路沿線の状態監視用の通信設備を対象とした経済性と信頼性に基づく設計手法

4.1 概要

第 3 章では、車両状態監視用 WSN を対象として、車両の増解結によるネットワーク形状の変化や列車の走行に伴う通信環境の変化を考慮して、経済性と信頼性に基づいた評価を行うための手法を提案した。

これに対して、線路沿線の構造物や斜面等の状態監視を目的とした WSN においては、車両状態監視用 WSN と比較して、長距離に渡る監視が求められることから、センサデータの中継するための中継ノードを効果的に配置して WSN を設計することが求められる。また、線路沿線の環境は、都市部や山間部に渡り線上に長く広がっており、無線通信を妨げる遮蔽物が多数存在する。加えて、安全性や物理的な条件から、ノードの配置場所に制約を生じることがある。このため、線路沿線の状態監視用の WSN を導入する上では、これらの特徴を考慮して設計を行う必要がある。

そこで、本章では数理最適化手法と時系列モンテカルロ法を組み合わせることで、線路沿線の環境における無線通信を妨げる遮蔽物や配置不可能な場所の存在を考慮した上で、WSN の最適な中継ノード配置やルーティング手法を算出する手法を開発した。

4.2 想定する通信設備

本章においては、センサノード、中継ノード、集約装置から構成される WSN が線路沿線の環境に設置される状況を想定する。本章で対象とする線路沿線の状態監視用 WSN の構成を図 4.1 に示す。ここで、集約装置は、各センサノードからのデータを集める装置であり、センサノードは、監視対象物からデータを計測し、そのデータを無線により集約装置まで伝送する。また、中継ノードはセンサデータの中継する機能を持つ装置であり、センサノードから直接集約装置までデータを伝送できない場合は、中継ノードを経由してマルチホップ無線通信によりデータを伝送するものとする。また、センサノードと中継ノードはバッテリーによる駆動を前提とする。このため、WSN を継続的に運用するためには、センサノードと中継ノードに搭載されたバッテリーが枯渇する前にバッテリー交換の作業が必要となる。

また、鉄道環境の特徴としては、都市部や山間部に渡り線上に長く広がっており、電波伝搬を

妨げる遮蔽物が多数存在することが挙げられる。加えて、鉄道環境では、安全性や物理的な条件から、ノードの設置場所に制約を生じることがある。本章においては、上記のような遮蔽物が多数存在し、ノードの設置場所に制約がある鉄道環境において構築する WSN を対象とした設計手法を考える。

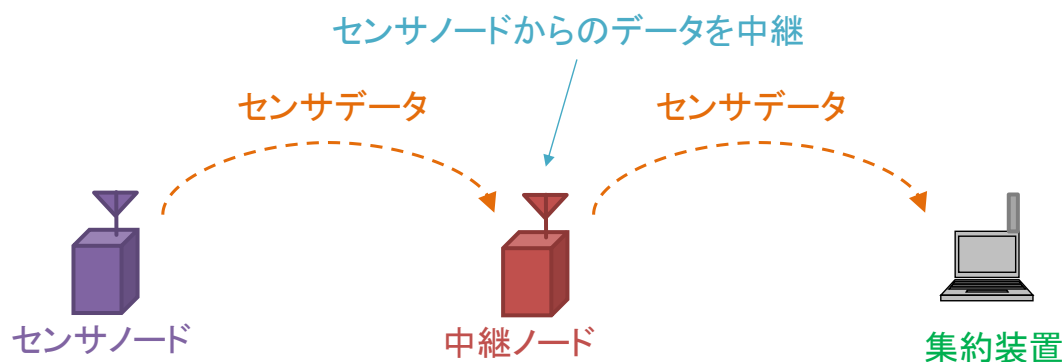


図 4.1 想定する通信設備

4.3 線路沿線の状態監視用の通信設備を対象とした経済性と信頼性に基づく設計手法

鉄道環境では、監視対象によっては沿線の長距離の区間を監視する必要がある。そのため、鉄道環境において WSN を構築するうえでは、各センサからのデータの中継することが重要となる。この際、各センサからのデータが集約装置まで届くのであれば、可能な限り中継ノードの台数は少ない方が経済的である。また、WSN における各ノードの消費電力量はバッテリーの交換頻度に影響を与えるため、可能な限り消費電力量が低い方がバッテリー交換のコストを低く抑えられることになる。

そこで、本研究では数理最適化手法と時系列モンテカルロ法を組み合わせることで、鉄道環境における遮蔽物や配置不可能な場所の存在を考慮したうえで、経済性の観点で最適な中継ノード数や中継ノード配置、ルーティング手法を算出する手法を提案した。

本論文で提案する手法の処理手順を図 4.2 に示す。提案手法では、まず鉄道環境における遮蔽物やノード配置が不可能な場所の存在を考慮した、WSN の中継ノード数の最適化を行う。次に、最適化の結果に基づき、時系列モンテカルロ法を用いた WSN の動作シミュレーションを行うことで、消費電力量とデータ到達率の算出を行う。その後、算出した消費電力量とデータ到達率に基づいて、中継ノードの消費電力量の観点での最適化を行い、最適な中継ノード配置とルーティング手法の組み合わせを算出する。図 4.2 における各項目の詳細を以下に述べる。

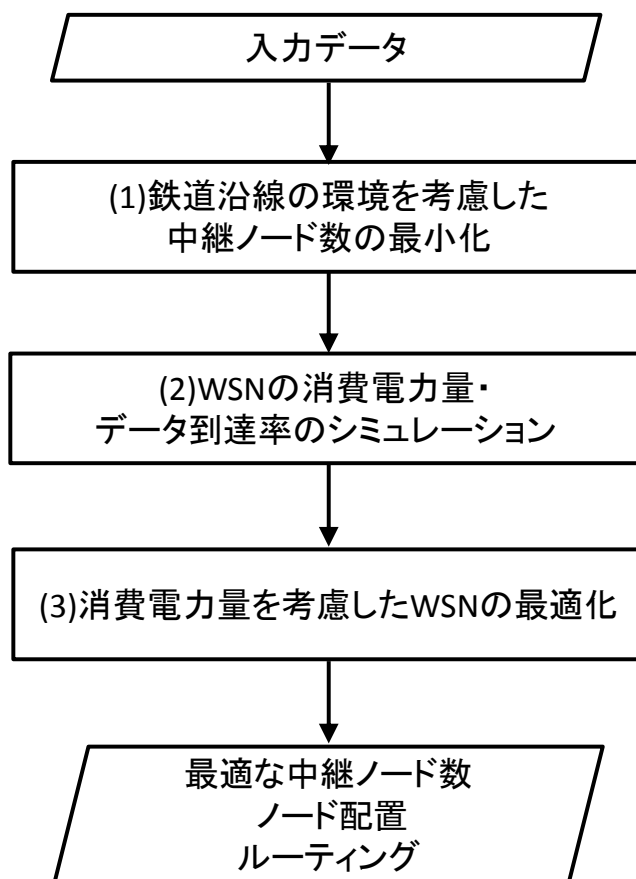


図 4.2 提案手法の処理手順

4.3.1 線路沿線の環境を考慮した中継ノード数の最小化

線路沿線の環境を考慮した中継ノード数の最小化では、線路沿線の環境における遮蔽物による無線通信への影響と線路沿線の中継装置の設置が困難な場所の存在を考慮した上で、通信が確立できる条件で中継ノード数を最小とできる中継ノードの配置を算出する。具体的には、中継ノードの台数の最小化を目的関数とする以下の最適化により中継ノードの配置を算出する。

[目的関数]

$$\min(R_{num}) \quad (4.1)$$

[制約条件]

$$r_{i,gat} = 1 \quad (4.2)$$

$$P_i(x, y) \neq N_j(x, y) \quad (4.3)$$

ここで、 R_{num} は中継ノードの台数、 r_{ij} は到達可能性行列であり、ノード*i*からノード*j*までデータが到達可能な経路がある場合 $r_{ij}=1$ 、到達可能な経路がない場合 $r_{ij}=0$ となる。また、 $P_i(x,y)$ は中継ノード*i*の位置（*x*座標、*y*座標）であり、 $N_j(x,y)$ は中継ノードを設置不可能な位置（*x*座標、*y*座標）である。(4.2)式は各センサから集約装置までのデータの到達に関する制約であり、 $r_{i,gat}$ はセンサ*i*から集約装置までのデータの到達可能性を表す。(4.3)式は中継ノードの位置に関する制約を表す。

ここで、制約条件の中に含まれる中継ノードを設置不可能な位置 $N_j(x,y)$ は入力として与えることとなるが、WSNを設置する環境の条件に合わせて設定するものとする。また、到達可能性行列については、集約装置の位置、センサの台数と位置、無線機の通信可能な距離、遮蔽物の位置といった条件を入力として与えることで、以下の手順によって算出する。

STEP1 通信距離に基づく隣接行列の生成

STEP2 ノード間の見通しに基づく隣接行列の更新

STEP3 隣接行列に基づく到達可能性行列の算出

上記の手順の詳細を以下に示す。

（1）通信距離に基づく隣接行列の生成

本論文では、グラフ理論における隣接行列を用いて、ノード間のデータの到達可能性を示す到達可能性行列を算出することを考える。隣接行列とは、グラフにおけるノード間の関係の有無を行列で表現したもので、*n*個のノードから成るグラフの隣接行列は $n \times n$ の正方行列となる。ここで、隣接行列を a_{ij} とすると、

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{ノード}i\text{からノード}j\text{へ辺がある} \\ 0 & \text{ノード}i\text{からノード}j\text{へ辺がない} \end{cases}$$

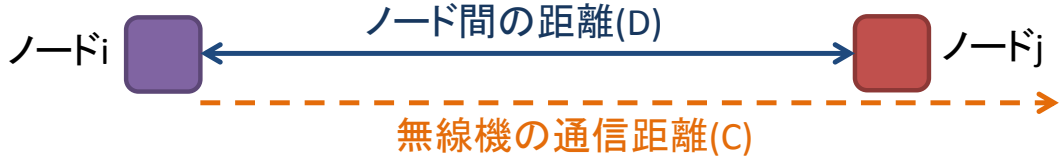
となる。本論文においては、集約装置、センサ、中継装置を隣接行列におけるノードとし、各頂点間の通信の可否を辺として表現することとする。つまり、ノード*i*からノード*j*への通信が可能な場合 $a_{ij}=1$ 、ノード*i*からノード*j*への通信が不可能な場合 $a_{ij}=0$ となる。

ここで、ノード間の通信の可否の判定は、入力条件として与えられるセンサや中継装置の無線機の通信距離を使用して、以下のように行う（図 4.3）。

- ・ノード間の距離 ≤ 無線機の通信距離 → 通信可能($a_{ij}=1$)
- ・ノード間の距離 > 無線機の通信距離 → 通信不可($a_{ij}=0$)

上記の判定を全てのノード間について行うことで、ここでは隣接行列を生成する。

if $D \leq C$: 通信可能($a_{i,j} = 1$)



if $D > C$: 通信不可 ($a_{i,j} = 0$)

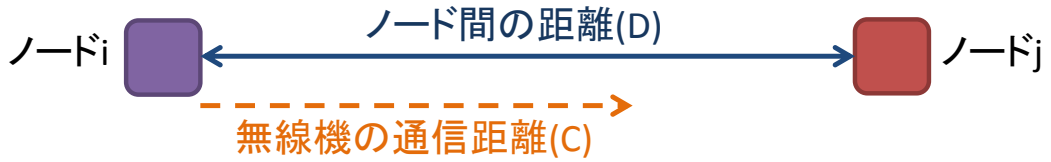


図 4.3 ノード間の通信の可否の判定

(2) ノード間の見通しに基づく隣接行列の更新

ここでは、(1) で生成する隣接行列を、ノード間の見通しの有無に基づいて更新する。ノード間の見通しの有無は、入力として与える遮蔽物の位置に基づいて判定する。遮蔽物の位置については、図 4.4 に示すように遮蔽物のある領域を構成する線分の座標を $L_i (x_1, y_1, x_2, y_2)$ として入力するものとする。本論文においては、この遮蔽物のある領域を構成する線分と、ノード間を結ぶ線分の交差判定を行うことで、ノード間の見通しの有無を判定する。ここで、二つの線分を $L_1 (x_1, y_1, x_2, y_2)$, $L_2 (x_3, y_3, x_4, y_4)$ とすると、以下の式(4.4)を満たす時二つの線分は交差することになる (図 4.5)。

$$tc \times td < 0 \quad (4.4)$$

ここで、

$$tc = (x_1 - x_2)(y_3 - y_1) + (y_1 - y_2)(x_1 - x_3),$$

$$td = (x_1 - x_2)(y_4 - y_1) + (y_1 - y_2)(x_1 - x_4) \text{ である。}$$

ここでは、上記の式(4.4)に基づいて交差判定を行い、判定の結果いずれかの線分同士が交差する場合は、見通し無しとして、隣接行列を $a_{i,j}=0$ (通信不可)として更新していく。

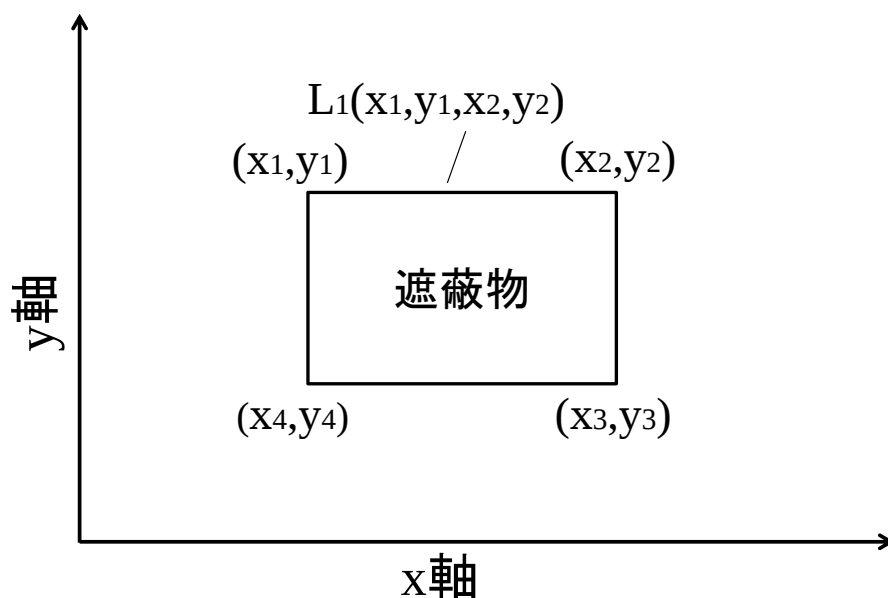
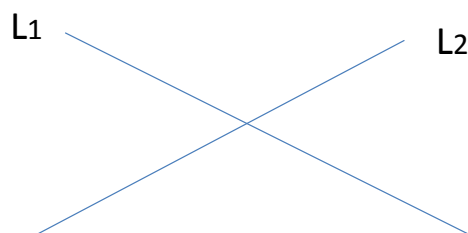


図 4.4 遮蔽物のある領域を構成する線分の座標

①二つの線分が交差する $\rightarrow tc \times td < 0$



②二つの線分が交差しない $\rightarrow tc \times td \geq 0$

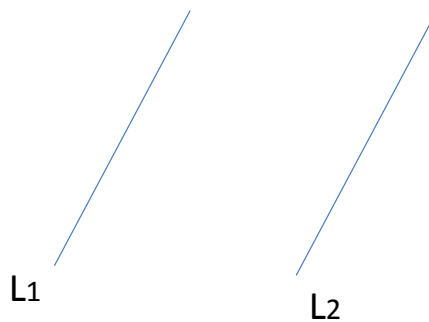


図 4.5 二つの線分の交差判定

(3) 隣接行列に基づく到達可能性の算出

ここでは, 上記で算出した隣接行列に基づいて到達可能性行列を算出する。到達可能性行列は, 以下の手順により算出することができる。

①隣接行列 A に単位行列 I を加える

② $A+I$ をブール代数演算のもと, 次の式(4.5)の状態が得られるまで r 回数分の乗算を繰り返す

$$(A+I)^{r-1} \neq (A+I)^r = (A+I)^{r+1} \quad (4.5)$$

上記の結果得られる $(A+I)^{r+1}$ が到達可能性行列となる。このように, 提案手法では無線機の通信距離とノード間の見通しに基づいて到達可能性行列を算出することで, 鉄道環境における遮蔽物の影響を考慮し, 中継ノード数を最小とするノード配置を算出する。

4.3.2 WSN の消費電力量・データ到達率のシミュレーション

WSN の消費電力量・データ到達率のシミュレーションでは, 4.3.1 線路沿線の環境における中継ノード数の最小化で求めた中継ノード数と中継ノードの配置に基づいて, WSN の消費電力量とデータ到達率の算出を行う。この際, 4.3.1 の結果として中継ノードの配置の候補が複数存在する場合は, 複数の配置に対するシミュレーションを行う。本研究においては, 鉄道環境における WSN の各ノードの消費電力量とデータ到達率を, 時系列モンテカルロ法を用いて予測する。ここで, 時系列モンテカルロ法とは, 乱数を用いた時系列のシミュレーションを繰り返し行うことで近似解を求める方法である。提案手法においては, ルーティング手法やデータの再送, 通信の不確実性を考慮したシミュレーションを行うために時系列モンテカルロ法を用いた。WSN の消費電力量・データ到達率のシミュレーションの構成を図 4.6 に示す。

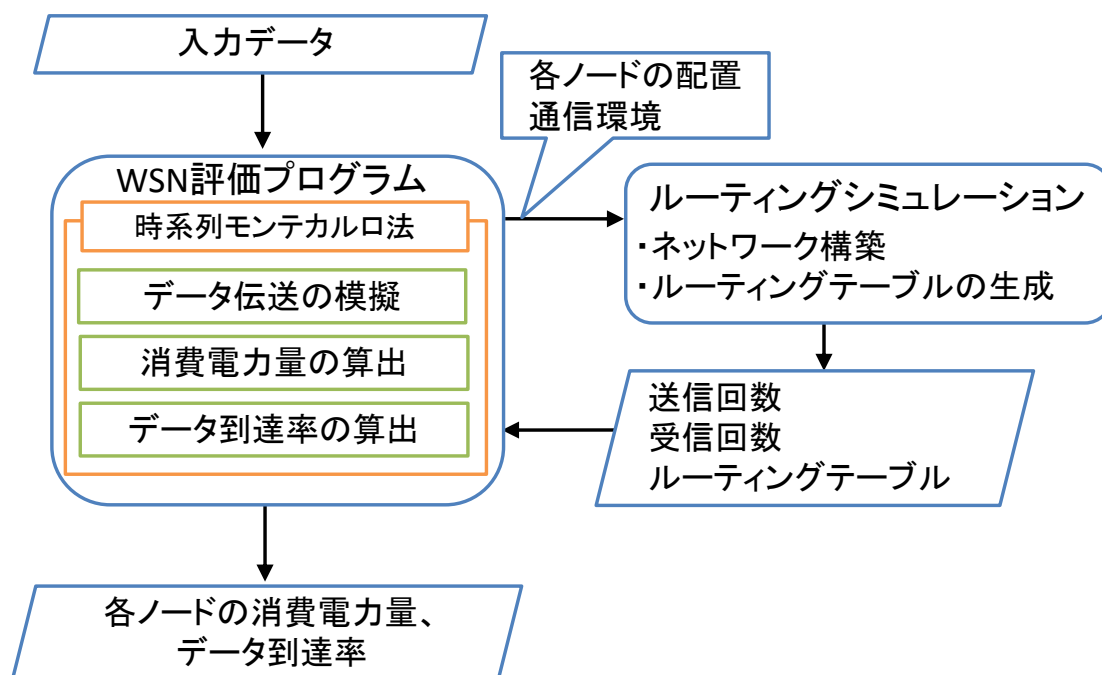


図 4.6 WSN の消費電力量・データ到達率のシミュレーションの構成

提案手法は、WSN 評価プログラム、ルーティングシミュレーションから構成され、上記の 2 つを組み合わせることで、WSN のルーティング手法を考慮してセンサ、中継装置の消費電力量とデータ到達率の予測を行う。WSN 評価プログラムでは、ルーティングを行うタイミングの判定、ルーティングシミュレーションの結果に基づいた WSN の動作の模擬を行い、WSN の消費電力量やデータ到達率を算出する。また、ルーティングシミュレーションでは、評価対象とする WSN のルーティング手法に基づいて、ルーティングのシミュレーションを行い、ルーティングテーブルを生成する。ここで、ルーティングテーブルとは、各ノードが保有する、データを配送先まで配送する際の経路情報である。WSN で用いられるルーティング手法としては、データ送信の直前に経路を決定するリアクティブ型、通信に先立ってあらかじめ経路を決定しておくプロアクティブ型、双方を組み合わせたハイブリッド型等がある。鉄道においては、様々な監視対象物が存在するが、一般的に監視対象物に応じて適するルーティング手法が異なるため、WSN を適用していく上ではルーティング手法まで含めた評価・設計を行うことが重要と考えられる。そこで、提案手法においては、どのようなルーティングが望ましいかを比較検討することができるよう、ルーティングまで含めて WSN の消費電力量とデータ到達率を予測するものとした。

次に、図 4.7 に WSN の消費電力量・データ到達率のシミュレーションの処理フローを示す。ここで、図 4.7 中の time は計算中の時間帯を、 Δt はシミュレーションの時間刻み幅を表す。また、時間帯は Δt の幅を持つものとする。提案手法では、各時間帯における通信環境や対象とする WSN のルーティング手法等を与え、鉄道環境における WSN の各時間帯の通信回数や消費電力量、データ到達数を算出する。この際、パケットロスの発生については乱数によって確率的に模擬する。また、上記の計算を時間帯を更新しながら指定する期間まで繰り返し行うことで、最終的に指定期間までの消費電力量とデータ到達率を算出する。以下に、図 4.7 における各項目の詳細を述べる。

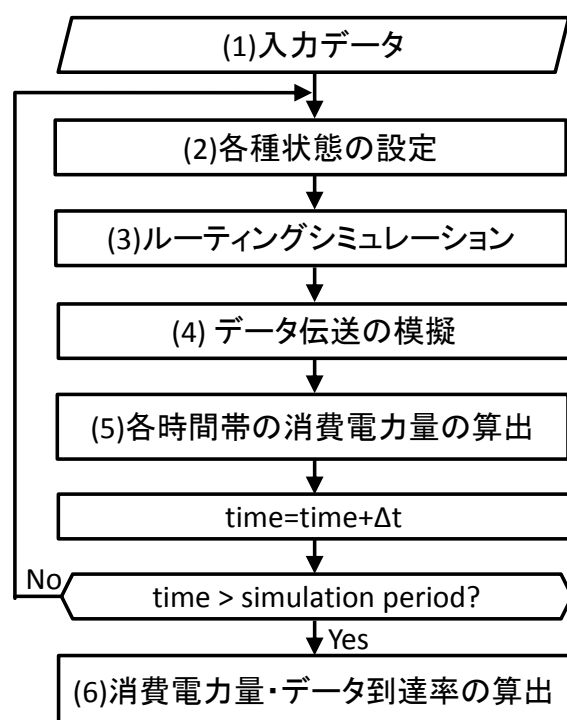


図 4.7 WSN の消費電力量・データ到達率のシミュレーションの処理フロー

(1) 入力データ

提案手法では、以下のデータを入力として与え、WSN の消費電力量とデータ到達率の算出を行う。

- ・各位置における通信環境（通信可能な距離、パケットロス率等）
- ・対象とする WSN のルーティング手法
- ・センサデータの送信タイミング
- ・センサデータの再送回数
- ・各無線センサノードの位置
- ・無線センサノードの仕様（消費電力、送信時間等）
- ・バッテリー容量
- ・シミュレーションの時間刻み幅、期間

(2) 各種状態の設定

各種状態の設定では、各時間帯における消費電力量およびデータ到達数の算出を行うために、各時間帯の通信環境、バッテリー状態を設定する。

(3) ルーティングシミュレーション

ルーティングシミュレーションでは、対象とする WSN で用いられるルーティング手法に基づいて、ネットワークの構築を行い、ルーティングテーブルを生成する。提案手法では、ネットワークシミュレータ等を活用することでルーティング手法の模擬を行うものとし、ルーティングのタイミングの判定を WSN 評価プログラム側で行い、ルーティングタイミングと判定された場合にルーティングシミュレーションを行う。以下に、ルーティングシミュレーションにおける入力と出力を示す。

[入力]

- ・センサノードの配置
- ・再送回数
- ・通信環境（通信可能な距離、パケットロス率等）

[出力]

- ・各センサノードの送信回数、受信回数
- ・ルーティングテーブル

(4) データ伝送の模擬

データ伝送の模擬では、各種状態の設定で設定した状態に基づいて、センサノードから集約装置までデータを伝送する際の各ノードの通信回数やデータの到達数を算出する。この際、パケットロスの発生については、入力で与えるパケットロス率に基づいて疑似乱数によって確率的に模擬する。また、パケットロスが発生した際には、入力で設定した再送回数まで再送を行うものとし、データの再送までを考慮した各時間帯における各ノードの通信回数（データの送信回数、データの受信回数）とデータの集約装置への到達数を算出する。

(5) 各時間帯の消費電力量の算出

各時間帯の消費電力量の算出では、(4)で算出する通信回数に基づいて、各時間帯の各ノードの消費電力量を算出する。また、算出した消費電力量に基づいて、各ノードのバッテリー残量を更新する。

本研究においては、各時間帯における各ノードのデータ送信回数・受信回数を考慮して、以下の式(4.6)により各時間帯の各ノードの消費電力量を算出する。

$$W_i(t) = P_t \cdot T_t \cdot Nt_i(t) + P_r \cdot T_r \cdot Nr_i(t) + P_w \cdot T_{wi}(t) \quad (4.6)$$

ここで、 $W_i(t)$ ：時間帯 t におけるノード i の消費電力量、 $Nt_i(t)$ ：時間帯 t におけるノード i の送信回数、 $Nr_i(t)$ ：時間帯 t におけるノード i の受信回数、 $T_{wi}(t)$ ：時間帯 t におけるノード i の待機時間である。

(6) 消費電力量・データ到達率の算出

消費電力量・データ到達率の算出では、(2)から(5)で示した計算を時間帯を更新しながら繰り返し行うことで得られる結果から、指定する期間までの消費電力量とデータ到達率を算出する。具体的には、指定する期間までの各ノードの消費電力量は、各時間帯の消費電力量の合計値として算出する。同様に、各センサノードの指定する期間までのデータ到達率は、各時間帯のデータ到達数の合計値に基づいて算出する。

4.3.3 需給調整契約を考慮した MG の運用方策

消費電力量を考慮した WSN の最適化では、4.3.1 で算出する最適な中継ノード数とノード配置の候補、4.3.2 で算出する WSN の消費電力量とデータ到達率に基づいて、中継ノードの消費電力量の観点での最適化を行う。

中継ノードの消費電力量は WSN を運用する上での中継ノードのバッテリーの容量やネットワーク寿命に影響を与えることになる。全ての中継ノードのバッテリー容量が同一と仮定すると、消費電力量が最大の中継ノードのバッテリーが最初に枯渇することになる。そのため、ネットワークの寿命は中継ノードの消費電力量の最大値に依存することになる。本研究においては、ネットワーク寿命の最大化の観点での WSN の最適化を行うものとした。目的関数は、センサノードの消費電力量の最大値の最小化として式(4.7)のように定義できる。

[目的関数]

$$\min(\max(W_1, \dots, W_i)) \quad (4.7)$$

消費電力量を考慮した WSN の最適化においては、(4.8)式及び(4.9)式を満足しつつ、(4.7)式の目的関数を最小とする最適化問題として定式化できる。

[制約条件]

$$A_i \geq A_{\min} \quad (4.8)$$

$$R_{num} = R_{num_min} \quad (4.9)$$

ここで、 W_i はノード i の消費電力量、 A_i はセンサノード i のデータ到達率、 $A_{\min}$ はデータ到達率の下限值、 R_{num_min} は(A)の鉄道環境を考慮した中継ノード数の最小化により求めた中継ノード数を示す。式(4.8)はデータ到達率に関する制約、式(4.9)は中継装置数に関する制約であり、(A)で求めた中継ノード数と同一の中継ノード数に解を限定することを考える。

ここで、制約条件の中に含まれる $A_{\min}$ は、入力として与えるものとする。また、 W_i と A_i については、ノード配置、ルーティング手法、データの再送回数を入力として与え、4.3.2 の消費電力量・データ到達率のシミュレーションにより値を算出する。ここでの最適化では、制約条件を満たす範囲で目的関数を最小化する、中継ノード配置、ルーティング手法、データの再送回数の組み合わせを算出する。これにより、消費電力量の観点での最適な中継ノード配置、ルーティング手法、データの再送回数の設計が可能となる。

4.4 数値実験

本節では、提案手法の有効性を検証するために、鉄道沿線に設置される WSN を対象として、提案手法を用いた数値実験を行う。

4.4.1 試算条件

著者らは、鉄道沿線において斜面状態監視のための WSN を構築し、実証試験を行ってきた[43]。本研究においては、上記の鉄道沿線の WSN を対象として数値実験を行った。数値実験の条件を次に示す。

- 数値実験の対象とした鉄道沿線環境における WSN を図 4.8 に示す。図 4.8 においては、地形データに基づいた鉄道沿線における遮蔽物の位置を O として、ノード配置が不可能な場所の位置を N として示している。また、斜面の監視位置は決まっており、センサノードの位置を S 、集約装置の位置を G として示している。本数値実験では、図 4.8 上のセンサノードから集約装置までセンサデータを到達させるための効果的な中継ノードの配置とルーティング手法を決定することを考える。また、センサノードおよび中継ノードの無線機の通信距離としては、無線機の実測結果に基づいて、遮蔽物が無い環境において安定的に通信が可能であった 170m として計算を行った。
- ルーティング手法としては、通信可能なノードをフラグディングにより確認し、最短経路を生成することで行うものとし、データ送信の度に経路を再構築する場合(リアクティブ型)、毎日 0 時に経路を再構築する場合(プロアクティブ型)、の 2 パターンの候補について検討

した。また、データの再送回数については0～3回の範囲を候補とした。

- センサノードおよび中継装置の消費電力は、市販の無線機の仕様に基づき、送信時が69.3mW、受信時が52.8mW、待機時が0.002mWとした。
- センサデータの送信周期は10分に1回とし、シミュレーションの時間刻み幅も10分とした。
また、消費電力量とデータ到達率はWSNを1年間運用する時の値として算出するものとした。
- 4.3.3 消費電力量を考慮したWSNの最適化の際に用いるデータ到達率の下限値は95%とした。

4.4.2 試算結果

上記の試行条件に基づいて、提案手法により中継ノードの配置を算出した結果の例を図4.9に示す。図4.9のように、鉄道環境を考慮した中継ノード数の最小化の結果、中継ノード数の最小数は3個となった。また、遮蔽物や配置不可能な場所を考慮したうえで、センサデータがゲートウェイまで到達可能な中継ノードの位置の一つとして、図4.9中のRで示す位置が得られた。

次に、中継ノード数の最小化の結果に基づいて、消費電力量とデータ到達率の観点での最適化を行った結果、ルーティング手法はプロアクティブ型、再送回数は1回とするのが最適という結果となり、この時のWSNの消費電力量とデータ到達率は表4.1のようになった。

また、比較のため、表4.1の条件に対して、ルーティング手法が異なる場合の結果を表4.2に、再送回数が異なる場合の結果を表4.3に示す。表4.2より、二つのルーティング手法でデータ到達率は変わらないが、リアクティブ型の方がより消費電力量が大きいことがわかる。この理由としては、今回の条件ではリアクティブ型のルーティングを行う頻度がプロアクティブ型より144倍と大きくなるため、ルーティングによる消費電力量が大きくなったためと考えられる。

次に、再送回数についてであるが、表4.3のように再送回数を増やすことでデータ到達率は上昇し、消費電力量についても増加する傾向が見て取れる。今回の最適化の条件として、データ到達率を95%としていることから、この条件を満たす範囲で最小の再送回数である1回が選択されたものと考えられる。

次に、遮蔽物の影響を考慮しない従来の中継装置の配置決定手法と提案手法との比較を行う。ここでは、4.3.1の中継ノード数を最小化する中継ノード配置の決定を遮蔽物の影響を考慮しないで計算することで、遮蔽物の影響を考慮しない手法による中継装置の配置を算出した。遮蔽物の影響を考慮しない手法による中継装置の配置決定結果を図4.10に示す。図4.10では、中継装置の数は2個となり、提案手法による結果よりも中継装置数が少ない結果となった。しかし、図4.10の中継装置の配置では、S2, S3, S5からのデータについては、遮蔽物により見通しがいいことから、集約装置までデータを到達させることができない。

このように、提案手法を用いることで、鉄道環境における遮蔽物による無線通信への影響を考慮したうえで、WSNの経済的な中継ノード数、ノード配置、ルーティング手法の設計が行えると考えられる。

表 4.1 提案手法による最適な WSN のシミュレーション結果

	S1	S2	S3	S4	S5	R1	R2	R3
消費電力量 (Wh)	1.13	1.12	1.12	1.13	1.13	5.56	3.77	3.77
データ到達率 (%)	99.7	97.8	97.7	99.8	99.3	-	-	-

表 4.2 リアクティブ型ルーティングによるシミュレーション結果

	S1	S2	S3	S4	S5	R1	R2	R3
消費電力量 (Wh)	10.2	9.16	9.16	10.2	10.2	24.7	22.9	19.8
データ到達率 (%)	99.7	97.8	97.7	99.8	99.3	-	-	-

表 4.3 再送回数変更時のシミュレーション結果

		S1	S2	S3	S4	S5	R1	R2	R3
再送回数=0	消費電力量 (Wh)	1.08	1.07	1.07	1.08	1.08	4.89	3.35	3.50
	データ到達率 (%)	95.0	81.5	81.5	95.0	90.3	-	-	-
再送回数=2	消費電力量 (Wh)	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	5.64	3.80	3.79
	データ到達率 (%)	99.9	99.8	99.8	99.9	99.9	-	-	-
再送回数=3	消費電力量 (Wh)	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	5.64	3.81	3.79
	データ到達率 (%)	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	-	-	-

4.5 まとめ

本章では数理最適化手法と時系列モンテカルロ法を組み合わせることで、鉄道環境における遮蔽物や配置不可能な場所の存在を考慮したうえで、WSN の最適な中継ノード配置・ルーティング手法を算出する手法を提案した。また、鉄道沿線に設置される WSN を対象として、提案手法を用いた数値実験を行うことで、提案手法の有用性に関する検証を行った。その結果、提案手法を用いることで、鉄道環境における遮蔽物による無線通信への影響を考慮したうえで、WSN の経済的な中継ノード数、ノード配置、ルーティング手法の設計が行えることが確認できた。

第 5 章 結論

5.1 本論文のまとめ

本論文では、機器室内の通信設備、鉄道車両の状態監視用の通信設備、線路沿線の状態監視用の通信設備の 3 種類の鉄道通信設備を対象として、経済性と信頼性の両方の観点から設計・評価を行うための手法を開発した。

第 1 章では、本論文の背景と鉄道通信設備の現状について述べ、雷害による鉄道通信設備への影響や、近年鉄道において様々な設備を対象として検討が進められている状態監視用の無線センサネットワークに関して述べた。さらに、雷害への対策や無線センサネットワークの設計・評価に関する先行研究について示し、これらを踏まえて本論文の目的・構成について述べた。

第 2 章では、機器室内の鉄道通信設備を対象として、雷サージの影響を予測するための解析モデルを提案した。さらに、提案した解析モデルの精度を検証するため、実際の鉄道通信設備を用いて雷サージ印加試験を実施し、解析モデルを用いた同一条件でのシミュレーション結果との比較を行った。検証の結果、通信ケーブルや耐雷トランスといった個別の機器で見た場合の最大値の誤差は 2.4%~12.6%程度であり、概ね一致することが確認できた。また、機器室内の鉄道通信設備全体を想定した構成においても、最大値の誤差は 3.4%~10%程度であり、提案した解析モデルを用いることで、鉄道通信設備における雷サージ解析を精度良く行えることが確認できた。さらに、鉄道通信設備を対象として、雷サージ解析シミュレーションと数値最適化を組み合わせることで、雷サージ対策と経済性の両方の観点から機器室の接地方式を設計するための手法を提案した。また、典型的な機器室を対象として、提案手法を用いた数値実験を行い、その有効性を検証した。その結果、提案手法を用いることで、接地極数や接地抵抗値の変化が雷サージの発生量に与える影響を考慮したうえで、鉄道通信設備の経済的な接地方式を設計できることが確認できた。最後に、経済性と信頼性の観点から鉄道通信設備の給電方式を評価するための手法を検討し、機器室を対象として複数の給電方式に対する経済性と信頼性の試算を行った。その結果、機器室に直流給電を導入することで、電力購入コストや変換器故障による設備停止を低減できる可能性があることが示された。

第 3 章では、センサノードがバッテリーで駆動する車両状態監視用 WSN を対象として、車両の増解結や走行による通信環境の変化を模擬するために時系列モンテカルロ法を用いて、バッテリーに関わるコスト（経済性）と通信の信頼性の観点での評価を行うための手法を開発した。また、車両状態監視用 WSN の消費電力量について、いくつかの条件で数値実験を行うことで、開発した手法の有用性に関して検証を行った。その結果、車両状態監視用 WSN において、車両の増解結によるネットワークの再構築やネットワーク形状の変化、列車の走行による通信環境の変化を考慮して消費電力量を予測することの重要性が示された。また、開発した手法を用いることで、車両状態監視用 WSN のバッテリーのコスト等の運用コストの面で効率的なルーティングの

検討を行えることを示した。

第4章では、数理最適化手法と時系列モンテカルロ法を組み合わせることで、鉄道環境における遮蔽物や配置不可能な場所の存在を考慮したうえで、WSNの最適な中継ノード配置・ルーティング手法を算出する手法を提案した。また、鉄道沿線に設置されるWSNを対象として、提案手法を用いた数値実験を行うことで、提案手法の有用性に関する検証を行った。その結果、提案手法を用いることで、鉄道環境における遮蔽物による無線通信への影響を考慮したうえで、WSNの経済的な中継ノード数、ノード配置、ルーティング手法の設計が行えることを示した。

5.2 今後の展望

本論文においては検討することができなかったが、以下の項目を今後の展望としたい。

- 機器室内の通信設備に関して、雷害への効果的な対策手法に関して検討
- 機器室内の通信設備を対象として、雷害対策と給電方式の両方を考慮して経済性・信頼性の観点で設計を行うための手法の確立
- 列車上の状態監視用の通信設備に関して、適切なバッテリー容量やバッテリー交換計画、効果的なルーティング等に関する評価

参考文献

- [1] 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, 125, 2, pp. 221-226 (2005)
- [2] 高度情報社会の雷害問題調査専門委員会：「高度情報社会の雷害問題の実情と研究課題」，電気学会技術報告, No.902 (2002)
- [3] 「建築物等の雷保護」，JIS A4201-2003(2003)
- [4] 田中憲光・馬場崎忠利：「データセンタ内における直流給電」，電学誌, 130, 5, pp.289-292(2010)
- [5] 松本雅行：「電気鉄道」，森北出版(2007)
- [6] 中村一城・川崎邦弘：「鉄道における通信システム」通信ソサイエティマガジン, No17, pp.44-53(2011)
- [7] 鉄道電気設備の耐雷害性の向上に関する調査研究委員会：「鉄道電気設備の耐雷害性の向上に関する調査報告書」，（社）日本鉄道電気技術協会(2010)
- [8] 阿部慶太・神田政幸・羽田明生・岩澤永照・関口琢己・諸橋由治・王林：「列車通過時加速度振幅比と傾斜角を用いた鉄道橋梁橋脚の状態監視手法」，鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.18, pp.205-212 (2014)
- [9] Bennett, PJ and Soga, K and Wassell, I and Fidler, P and Abe, K and Kobayashi, Y and Vanicek, M “Wireless sensor networks for underground railway applications: case studies in Prague and London”, SMART STRUCT SYST, 6, pp. 619-639(2010)
- [10] 流王智子・岩澤永照・川村智輝・羽田明生・川崎邦弘：「車両状態監視向け車両間ネットワークの構成手法」，鉄道総研報告, Vol.31, No.3, pp.41-46(2017)
- [11] 平栗滋人：「新しい状態監視保全技術」，RRR, Vol.72, No.7, pp.32-35(2015)
- [12] 佐藤正治・倉本昇一・井手口健：「ビル直撃雷に対するメッシュ接地の装置間誘電電圧抑圧特性」，信学論 B-II, 81, 1, pp.101-108(1998)
- [13] 井手口健・山根宏・古賀広昭：「通信機器の雷防護回路設計法に関する考察」，信学論 B, 65, 1, pp.1067-1074 (1983)
- [14] H. Arai, I. Watanabe, H. Motoyama, S. Yokoyama, and M. Ishii: “Analytical Study on Lightning Surge Propagation along Rail and Lightning Overvoltages on Railway Signaling Equipment”, Electr. Power Syst. Res., Vol. 85, pp. 64-74 (2012)
- [15] Z. Cheng, M. Perillo, and W. B. Heinzelman, “General network lifetime and cost models for evaluating sensor network deployment strategies,” IEEE Trans. Mobile Comput., vol. 7, no. 4, pp. 484-497(2008)
- [16] K. Biswas, V. Muthukkumarasamy, X. Wu and K. Singh, ”An Analytical Model for Lifetime Estimation of Wireless Sensor Networks”, IEEE Communications Letters, Vol.19, No.9,

- pp.1584-1587(2015)
- [17] M. Nikolov and Z.J. Haas, “Relay Placement in Wireless Networks: Minimizing Communication Cost,” IEEE Transactions on Wireless communications, vol. 15, no. 5, pp. 3587-3602(2016)
 - [18] M. Bagaa, A. Chelli, D. Djenouri and T. Taleb, “Optimal Placement of Relay Nodes Over Limited Positions in Wireless Sensor Networks,” IEEE Transactions on Wireless communications, vol. 16, no. 4, pp. 2205-2219(2017)
 - [19] “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test,” IEC 61000-4-5(2014)
 - [20] Carlo F.M. Carobbi, and Alessio Bonci. : “Elementary and Ideal Equivalent Circuit Model of the 1,2/50–8/20 μ s Combination Wave Generator”, IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, Volume 2, Quarter 4, pp.37-43(2013)
 - [21] 電力系統の雷サージ解析体系化のための調査専門委員会：「電力システムの過渡現象と EMTP 解析」，電気学会技術報告，No.872(2002)
 - [22] 通信保安体系出版員会：雷害対策ハンドブック,サンコーシャ(1992)
 - [23] 元満民生・桑原伸夫・井手口健・徳田正満：「通信機器に適用する雷サージ試験装置」，信学論 B-II, 78, 7, pp.535-544(1995)
 - [24] Julio Guillermo Zola: “Gas Discharge Tube Modeling With PSpice”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 50, No. 4, pp. 1022-1025(2008)
 - [25] 河野秀宏・富永哲欣・倉本昇一：「IT 機器を雷サージから防護するためのシミュレーション技術」，NTT R&D, 51, 12, pp.1003-1009(2002)
 - [26] 信号保安協会：信号保安,vol.40,6, pp.273-276(1985)
 - [27] 川野 卓・若林武夫：「電子踏切の雷害対策に関する研究開発」,鉄道総研報告，10, 11, pp47-52(1996)
 - [28] 長谷良秀：電力技術の実用理論 第3版 発電・送変電の基礎理論からパワーエレクトロニクス応用まで，丸善出版(2015)
 - [29] 酒井 洋・森 武昭・大矢 征：ノイズによる誤動作と対策，日刊工業新聞社 (1990)
 - [30] 接地システムの雷サージ・EMC への影響評価調査専門委員会：「接地システムの雷サージ・EMC への影響評価」，電気学会技術報告，No.1343(2015)
 - [31] 三宮信夫・喜多 一・玉置 久・岩本 貴司：「遺伝アルゴリズムと最適化」，朝倉書店(1998)
 - [32] E. Zitzler, M. Laumanns, and L. Thiele: “SPEA2: Improving the performance of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm”, Technical Report 103, Computer Engineering and Communication Networks Lab (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich (2001)
 - [33] C.A.C. Coello, G.T. Pulido, and M.S. Lechuga: “Handling Multiple Objectives with Particle Swarm Optimization”, IEEE Trans. Evolutionary Computation, Vol.8, No.3, pp.256–279 (2004)
 - [34] K. Deb and T. Goel: “Controlled Elitist Non-dominated Sorting First Genetic Algorithm for Better Convergence”, Proceeding of the First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization, pp.42–50 (2001)
 - [35] 鉄道建設・運輸施設整備支援機構：「北海道新幹線電気工事誌」(2017)
 - [36] 経済産業省資源エネルギー庁：「平成 29 年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書 2018）」(2018)

- [37] IEEE Std 493-2007, IEEE(2007)
- [38] NEDO「分散型電源電力供給次世代システム確立実証実験」，平成9年度研究報告書(1998)
- [39] 岩澤永照・羽田明生・流王智子・川村智輝・川崎邦弘・野末道子：「車両増解結を考慮した車両間ネットワーク構築」，平成28年電気学会産業応用部門大会, 5-38, pp. 283-288 (2016)
- [40] センサネットワーク調査専門委員会編：「センサネットワークの技術動向と最新事例」，電気学会技術報告，No.1112 (2008)
- [41] Varga, A.: “The OMNeT++ Discrete Event Simulation System”, Proceedings of the 15th European Simulation Multiconference (ESM’01), Prague, Czech Republic, pp.319–324 (2001)
- [42] 佐島電機株式会社ワイヤレス&エンデベッドソリューション：
URL: <http://www2.satori.co.jp/wireless/>
- [43] 野末道子・中村一城・流王智子・岩澤永照・岩城詞也・川村智輝・木下裕介・加辺徹：「鉄道設備モニタリングへの Wi-SUN 技術の適用についてー鉄道土構造物を対象としてー」，信学技報，vol. 117, no. 352, RCS2017-257, pp. 41-46(2017)

本研究に関して著者が公表した論文

- [1] T. Kawamura, K. Takeuchi and D. Yamaguchi: 「Study on Design Method of Optimal Grounding Systems of Railway Telecommunication Systems for Lightning Surges」，電気学会論文誌 B, 137 巻 11 号, pp. 717-723 (2017)
- [2] 川村智輝, 流王智子, 岩澤永照：「車両状態監視用無線センサネットワークにおける消費電力量予測手法」，電気学会論文誌 D, 138 巻 2 号, pp. 84-90 (2018)
- [3] 川村智輝, 竹内恵一, 山口大介：「鉄道通信設備の雷サージ解析モデルに関する検討」，電気学会論文誌 D, 138 巻 8 号, pp. 699-705 (2018)

本研究に関して著者が行った講演発表等

- [1] 川村智輝, 竹内恵一, 山口大介：「鉄道通信設備における雷サージ解析モデルに関する検討」，平成28年電気学会全国大会 (2016-3)
- [2] 川村智輝, 竹内恵一, 山口大介：「鉄道通信設備の雷サージ解析モデルの検討と実測による検証」，電気学会通信研究会, CMN-16-015～024, pp1-6 (2016-6)
- [3] T. Kawamura, K. Takeuchi and D. Yamaguchi: 「Study on Design Method of Optimal Grounding Systems of Railway Telecommunication Systems for Lightning Surges」, The Papers of Joint Technical Meeting on Electrical Discharges, Switching and Protecting Engineering and High Voltage Engineering, IEE Japan ・ Joint Conference of IWHV2016 & JK2016 on ED&HVE, ED-16-94～133, pp129-134 (2016-11)
- [4] 川村智輝, 流王智子, 岩澤永照：「車両状態監視用無線センサネットワークにおける消費電力量予測手法」，第23回鉄道技術連合シンポジウム (2016-12)
- [5] 川村智輝, 竹内恵一, 小澤圭広, 岩本功貴：「鉄道通信ケーブルの周波数依存特性に関する

- る検討」，平成 29 年電気学会全国大会 (2017-3)
- [6] 川村智輝，岩澤永照，岩城詞也：「鉄道設備の状態監視用無線センサネットワークの評価手法に関する検討」，第 24 回鉄道技術連合シンポジウム (2017-12)
- [7] 川村智輝，原亮一，北裕幸：「経済性と信頼性に基づく鉄道通信設備の給電方式の評価」，平成 30 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会 (2018-10)

謝辞

本研究の遂行および本論文の執筆にあたり、多くの方々から多大なるご指導・ご支援をいただきました。

本論文を取りまとめるにあたり、北海道大学大学院情報科学研究科電力システム研究室 北 裕幸 教授ならびに原 亮一 准教授には、終始懇切丁寧な御指導ならびに御鞭撻を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。

北海道大学大学院情報科学研究科 五十嵐 一 教授ならびに小笠原 悟司 教授にはご多忙な中本論文の副査を務めていただきました。深く御礼申し上げます。

鉄道総合技術研究所 信号・情報技術研究部 川崎邦弘 部長には、博士課程進学への許可をいただきましたことに加えて、研究の初期段階において多くの御指導をいただいたことを感謝いたします。

ネットワーク・通信研究室 中村一城 室長には、論文の査読などを通じて本研究への御助言をいただいただけでなく、業務の配慮をいただいたことを感謝いたします。

ネットワーク・通信研究室 竹内恵一 主任研究員、山口大介 副主任研究員には、第2章における雷サージ解析モデルの開発に関して貴重な御助言をいただくとともに、モデルの精度検証のために実施した実験で多大なる御助力を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

国際業務部 野末道子 主査(上級)、ネットワーク・通信研究室 羽田明生 副主任研究員、流王智子 副主任研究員、岩澤永照 研究員には、無線センサネットワークの設計や評価に関して多くの御助言をいただきました。心より御礼申し上げます。

最後に、常に協力を惜しまず、本論文作成に理解を示してくれた妻紗也佳に敬意を表するとともに、最大なる感謝を捧げます。

川村智輝

