



Title	社会基盤システム向け監視制御技術に関する研究
Author(s)	寺田, 博文
Citation	大阪大学, 2014, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/50567">https://doi.org/10.18910/50567</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

# 社会基盤システム向け監視制御技術 に関する研究

提出先      大阪大学大学院情報科学研究科  
提出年月    2014年7月

寺田   博文



## 論文一覧

- (1) 寺田博文, 土屋達弘, “将来の電力配電監視制御システムに求められる通信容量の考察”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J97-D, No.6, pp. 1142–1146, Jun. 2014.
- (2) 寺田博文, 佐藤裕, 土屋達弘, “鉄道車両制御の分散処理のための車上アプリケーション再構築とワークフロー管理方式の提案”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J96-D, No.10, pp. 2192–2203, Oct. 2013.
- (3) Yohei Kawada, Kojin Yano, Yoshihiro Mizuno and Hirofumi Terada, “Data Model and Data Access Control Method on Service Platform for Smart Public Infrastructure”, In *Proceedings of 10th International Conference on E-Business (ICE-B 2013)*, Paper Number: 27, July, 2013.
- (4) Hirofumi Terada, Tsukasa Onishi, and Tatsuhiro Tsuchiya, “A Monitoring Point Selection Approach for Power Distribution Systems”, In *Proceedings of 8th Annual System of Systems Engineering Conference (SoSE 2013)*, pp. 190–195, June, 2013.
- (5) Hirofumi Terada, Sato Yutaka, Tatsuhiro Tsuchiya and Tohru Kikuno, “Software Reconstruction and Module Management for Distributed Processing of Train Control”, In *Proceedings of 11th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems (ISADS 2013)*, pp. 125–130, March, 2013.
- (6) Hirofumi Terada, Tsukasa Onishi, and Tatsuhiro Tsuchiya, “Proposal of Environmental

Adaptation Middleware for the Next-generation Distribution SCADA System”, In *Proceedings of 5th China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2012)*, Paper Number: FP0160, September, 2012.

- (7) Yoshiki Kakumoto, Hirofumi Terada, Keiji Ishida, Shin’ichi Sekino, and Norihisa Komoda, “Component Oriented Software Framework for Train Car Systems”, In *Proceedings of IEEE International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control and Automation (CIMCA 2005)*, pp. 587–592, November, 2005.

## 内容梗概

社会基盤 (Public Infrastructure) システムは、生活やビジネスを支えるための電気（エネルギー）、水、通信、交通、建物、金融、行政サービスなどのインフラストラクチャを提供するためのシステムである。社会基盤システムを運用するためには様々なセンサ情報を収集してそれに基づき判断を行い、制御や実行をするための機構が必須であり、その役割を担うのが監視制御システム（SCADA System : Supervisory Control And Data Acquisition System）である。本論文では、ICT(情報通信技術)を活用した高機能・高性能の SCADA システムの実現について議論する。

社会基盤システムを構成する SCADA システムには以下の 2 つの要件がある。(1) 使用期間が長いため、拡張性を保持しなければならない。(2) 監視対象が広範囲・大量なため、最先端技術を必ずしも適用できるとは限らないという制約下で新機能を実現しなければならない。本論文では、著者が実際に開発に携わってきた鉄道車上監視制御システムと電力配電監視制御システムについて、これらの要件をどのように実現したかに焦点を当てて研究成果を説明する。

鉄道車上監視制御システムの研究に関しては、要件 (1) の実現を目的として行った、拡張性の向上を意図した分散処理の実現について述べる。実時間システムである鉄道車上監視制御システムの処理を複数の車両で分散実行することができれば、負荷分散により実時間性を満たしながら新たな処理を追加する余裕が生まれ、機能拡張性が向上する。また、協調制御という複数の車両間の機器を連携させる制御を行う場合、集中制御方式に比べて実行時間

が短縮できるため、現在の車上コンピュータの性能でも実時間制約を満たして実現することが可能となる。しかしながら、歴史的な経緯から現状の鉄道車両制御ソフトウェアは集中実行される1つの逐次プログラムとして実現されており、そのままでは分散実行することは不可能である。そこで本論文では、既存のソフトウェアを基にシステムの分散処理化を実現する。具体的には、まず、既存のソフトウェアを機能毎に分割することで、単体で実行可能な複数のモジュールを生成する。次に、これらのモジュールに必要なタイミング、周期で実行するための機構であるワークフロー管理方式を提案、実現する。このようにして開発したプロトタイプシステムを用いて、各処理に必要な実行時間を計測する。この結果を基に性能評価を行い、提案手法により機能拡張性が向上することを示す。

電力配電監視制御システムの研究に関しては、特に要件(2)の実現、すなわち既存技術活用による新機能実現を中心に説明する。太陽光発電等の小規模分散型電源普及に対する電力供給の安定化や、自然災害等に対するディザスタリカバリの効率化のために、電力配電システムの監視制御の高度化が求められている。本論文は、大量の太陽光発電(PV)が電力系統に接続された近い将来を想定し、まず、この場合に必要となるフィールドネットワークの通信容量の試算結果を示す。この試算結果により、将来の電力系統で電力品質を維持するためには、フィールドネットワークには現在より大容量の通信容量が必要であることを示す。SCADAシステムが新しい高速フィールドネットワークを活用して構築することができるのであればそれは理想的であるが、設備投資額の制約上、現実には既存の遅いネットワークを使い続けなければならない地域が多く生じる。通信容量が制限されるとき、決められた収集時間以内にすべてのセンサから情報を集めることは不可能であるため、本論文では、適切な監視箇所を選択する方式を提案する。この方式では、異常な電圧が生じる危険性が高い監視箇所の監視状態や計測値を、制約時間内でできるだけ多く収集することを目標とする。この方式を実装したプロトタイプツールを用いてシミュレーションを行い、シミュレーション結果を基に

提案方式の有効性を評価する．

本論文の構成は以下の通りである．2 章では社会基盤システムにおける監視制御システムの特徴と，著者が実際に開発に携わってきた鉄道車上監視制御システムと電力配電監視制御システムについて説明する．3 章では鉄道車上監視制御システムを対象として，分散実行のためのソフトウェアシステムのモジュール分離とモジュールの実行管理方法について提案する．4 章では電力配電監視制御システムを対象として，通信容量と収集周期の制約下で電圧監視を正常に行うための収集箇所選択方式について提案する．最後に 5 章で本論文のまとめについて記す．





## 謝辞

本博士論文は、筆者が大阪大学大学院情報科学研究科情報システム工学専攻博士後期課程在学中にディペンダビリティ工学講座においてまとめたものです。本研究を進めるにあたり、常日頃より適切なご指導を賜りました大阪大学大学院情報科学研究科情報システム工学専攻土屋達弘教授に心から深く感謝いたします。

学位論文審査において、貴重なお指導とご助言を頂いた大阪大学大学院情報科学研究科情報システム工学専攻今井正治教授、中前幸治教授、大阪大学大学院情報科学研究科情報数理専攻藤崎泰正教授に心から深く感謝いたします。

博士後期課程在学中の同期であり、同じ会社に勤務している日立製作所日立研究所櫻井康平氏の存在が、研究と仕事の両立を進めていく上で、大きな励みとなったことをここに記すとともに、心から深く感謝いたします。

3章で述べた次世代鉄道車上監視制御システムの研究に関し、ご指導ご鞭撻頂いた日立交通テクノロジー関野眞一氏、茨城工業高等専門学校長洲正治氏、日立製作所日立研究所佐藤裕氏、様々な顧客と直接関わる機会を与えてくださり、研究内容に関してご指導頂いた日立製作所交通システム社伊東知氏、石田啓二氏、綾部和則氏、特に実際の鉄道車両システムについて幅広く深くご教授頂いた日立交通テクノロジー高柳幸夫氏に心から深く感謝いたします。

4章で述べた次世代電力配電監視制御システムの研究に関し、ご指導ご鞭撻頂いた日立製作所情報・通信システム社前田章氏、HITACHI INDIA 原田泰志氏、日立製作所インフラ

システム社小野瀬健太郎氏，様々な顧客と直接関わる機会を与えてくださり，研究内容に関してご指導頂いた日立製作所インフラシステム社大西司氏，日立製作所日立研究所渡辺雅浩氏，特に実際の電力配電システムについて幅広く深くご教授頂いた日立製作所インフラシステム社井上汎氏に心から深く感謝いたします．

研究開発に向かう姿勢を厳しくご指導くださるとともに，博士後期課程への進学のかきかけを与えてくださった大阪工業大学情報科学部河野克己教授，博士後期課程への進学を決意するきっかけを与えてくださった日立製作所交通システム社戸次圭介氏，仕事を続けながら博士後期課程に進学することに対して，研究の進め方や悩みについて親身になって相談にのっていただきました大阪大学名誉教授，大阪学院大学情報学部菊野亨教授に心から深く感謝いたします．

研究と仕事の両立を支援していただいた日立製作所横浜研究所総務部の皆様，日立製作所日立研究所鮫嶋茂稔氏，日立製作所横浜研究所鍛忠司氏，福本恭氏，および所属部署の部下，後輩に心より感謝しております．

また，研究を進めるにあたり，ご支援，ご協力を頂きながら，ここにお名前を記すことが出来なかった多くの方々に心より感謝申し上げます．

最後になりますが，四十路を控えての博士課程入学を快く承諾し，いつも心の支えとなり，どのような状況においても応援してくれた素晴らしい妻 有記，娘 葵栄に心から感謝します．

ありがとうございました．

# 目次

第1章	はじめに	17
1.1	社会基盤システムの動向	17
1.2	研究の対象	18
1.3	本論文の構成	19
第2章	社会基盤システムの監視制御システム	21
2.1	対象とする SCADA システム	21
2.2	鉄道車上監視制御システム	24
2.3	電力配電監視制御システム	27
第3章	鉄道車両監視制御の分散処理のための車上アプリケーション再構築とワークフロー管理方式の提案	31
3.1	はじめに	31
3.2	鉄道車上監視制御システム	35
3.2.1	従来の鉄道車上監視制御システム	35
3.2.2	次世代の鉄道車上監視制御システム	37
3.2.3	協調制御における制御遅延の問題と分散処理の必要性	38
3.3	車上アプリケーション再構築とワークフローによる分散処理管理の提案	41
3.3.1	車上アプリケーションのモジュール分離	41

3.3.2	ワークフローによる分散処理管理の提案 . . . . .	45
3.3.3	信頼性の保証 . . . . .	49
3.4	評価 . . . . .	51
3.5	まとめ . . . . .	61
3.5.1	他の分野への応用可能性に関する考察 . . . . .	62
<b>第 4 章</b>	<b>電力配電監視制御のための監視箇所選定方式の提案</b>	<b>63</b>
4.1	はじめに . . . . .	63
4.2	現状の電力配電監視制御システム . . . . .	66
4.3	将来の SCADA ネットワークの通信容量の試算 . . . . .	69
4.3.1	想定するシステムの諸元 . . . . .	69
4.3.2	通信時間の分析 . . . . .	72
4.3.3	試算結果と考察 . . . . .	73
4.4	フィールドネットワーク導入における問題点 . . . . .	76
4.5	提案アプローチ . . . . .	77
4.5.1	監視箇所の選定 . . . . .	77
4.5.2	シミュレータの開発 . . . . .	80
4.5.3	信頼性の保証 . . . . .	84
4.6	評価 . . . . .	85
4.7	投資コストとの関係 . . . . .	93
4.8	まとめ . . . . .	95
4.8.1	他の分野への応用可能性に関する考察 . . . . .	96
<b>第 5 章</b>	<b>むすび</b>	<b>97</b>

5.1	まとめ . . . . .	97
5.2	社会基盤システム向け SCADA システムにおける今後の課題 . . . . .	100
	参考文献	101



## 図 目 次

2.1	鉄道運行システム	25
2.2	鉄道車上監視制御システム	26
2.3	電力供給システム	27
2.4	電力配電監視制御システム	28
3.1	鉄道車上監視制御システム構成の変遷	36
3.2	次世代鉄道車上監視制御システム	37
3.3	端末局におけるソフトウェアの動作	45
3.4	デモシステムの構成	51
3.5	車両毎の端末局処理時間、機能モジュールを先頭車両（1号車）に割当、	56
3.6	車両毎の端末局処理時間、機能モジュールを先頭車両（10号車）に割当、	56
3.7	車両毎の端末局処理時間、機能モジュールを3号車に割当、	57
3.8	車両毎の端末局処理時間、機能モジュールを全車両に均等に割当、	57
3.9	3両編成で各車両が10台の機器を有する場合の処理時間、1両目に6個、2、 3両目に7個の機能モジュールを配置、	60
4.1	電力配電監視制御システムの構成	66
4.2	通信プロトコルフォーマットの仮定	70
4.3	通信遅延の内訳	72



4.4	電圧逸脱のシナリオ分析結果 . . . . .	77
4.5	シナリオ 1 の SVR で電圧上限逸脱が起きる例 . . . . .	78
4.6	シミュレータ画面例 . . . . .	82
4.7	通信メディア別環境制約テーブル入力画面例 . . . . .	83
4.8	共通環境制約テーブル入力画面例 . . . . .	83
4.9	系統の情報 . . . . .	86
4.10	シナリオ 1 , 4 の電圧逸脱箇所 ( 14 箇所 ) . . . . .	88
4.11	シナリオ 2 の電圧逸脱箇所 ( 2 箇所 ) . . . . .	89
4.12	シナリオ 3 の電圧逸脱箇所 ( 4 箇所 ) . . . . .	89
4.13	提案方式による端末選択結果例 ( 矢印で示した部分 ) . . . . .	90
4.14	導入コストの比較結果 . . . . .	94

## 表 目 次

2.1	安全性レベル毎の SCADA の分類 . . . . .	23
3.1	分離したモジュール ( 機器モジュール ) . . . . .	43
3.2	分離したモジュール ( 機能モジュール ) . . . . .	44
3.3	ワークフロー管理テーブル . . . . .	48
3.4	端末局における各処理の最悪実行時間 . . . . .	52
3.5	機器構成 (10 両編成) . . . . .	55
4.1	現状の通信容量 . . . . .	68
4.2	機器毎のデータサイズ . . . . .	71
4.3	試算結果 . . . . .	75
4.4	仮定条件 . . . . .	87
4.5	シミュレーション結果 (電圧逸脱が発生する可能性がある監視地点のカバー率)	92



# 第1章 はじめに

## 1.1 社会基盤システムの動向

社会基盤 (Public Infrastructure) システムは，生活やビジネスを支えるための電気（エネルギー），水，通信，交通，建物，金融，行政サービスなどのインフラストラクチャを提供するためのシステムである．社会基盤システムを高度に統合した形態として，近年，スマートシティ構想が注目を集めている．スマートシティとは，最新の ICT(情報通信技術) を駆使して街全体の資源の有効利用を図ることで，省資源化を徹底した環境配慮型都市のことである [1]．スマートシティは，今後ますます懸念が高まる地球温暖化・エネルギー危機や，新興国における都市人口の爆発的増加と急激な都市化，先進国における少子高齢化やエネルギー，水道，交通などの既存設備の老朽化などの課題への解決策として期待されている [2]．

スマートシティの実現に向けて，世界各地で実証実験が始まっている．日本においても京都府関西文化学術研究都市（けいはんな学研都市）[3]，福岡県北九州市 [4]，愛知県豊田市 [5]，神奈川県横浜市 [6] で官民一体での実証実験が進められているほか，東京都はナショナルイベントが開催される 2020 年までに実現を目指すとしている．具体的な取り組みとしては，再生可能エネルギーの効率的な利用を可能にするスマートグリッド，電気自動車の充電システム整備に基づく交通システム，蓄電池や省エネ家電の導入などが挙げられる．

## 1.2 研究の対象

スマートシティ実現に向けたシステムの研究分野としては，社会基盤システムを実現する構成要素のそれぞれが運用とマネジメントにおいて独立しているシステム間で，連携して新しい機能を作り出すための System of Systems [7,8] の分野や，実世界（Physical System）に浸透した組み込みシステムなどが構成するセンサネットワークなどの情報を，サイバー空間（Cyber System）の強力なコンピューティング能力と結びつけ，より効率のよい高度な社会を実現するためのサービスおよびシステムの実現に向けた Cyber Physical Systems [9-11] の分野がある．

一方で，社会基盤システムを運用するためには様々なセンサ情報を収集してそれに基づき判断を行い，制御や実行をするための機構が必須である．その役割を担うのが監視制御システム（SCADA System：Supervisory Control And Data Acquisition System）である．本論文では ICT を活用した高機能・高性能の SCADA システムの実現について議論する．

社会基盤システムを構成する SCADA システムには以下の 2 つの要件がある．

- (1) 使用期間が長いため，拡張性を保持しなければならない．
- (2) 監視対象が広範囲・大量なため，最先端技術を必ずしも適用できるとは限らないという制約下で新機能を実現しなければならない．

社会基盤システムは一度導入されると，数十年程度使われ続けることが想定される．そのため，システムのフルリプレイスを行う前に装置のみを追加，交換することが必要である．また，社会基盤システムが導入される範囲は広範囲で，使用される装置なども大量なため，導入開始から終了までに長時間を要することが普通である．そのため，導入開始時に採用された技術が導入終了時には最先端でなく，導入後の運用で新機能が導入される場合，最先端でない技術を活用しながら新機能を実現することが求められる．本論文では，これら 2 つの

要件から生じる課題に対して実際の応用に則して解決策を述べる．具体的には，著者が実際に開発に携わってきた鉄道車上監視制御システムと電力配電監視制御システムについて，これらの要件にどう対処したかに焦点を当てて研究成果を説明する．

鉄道を運行するシステムは車両，車両基地，変電設備，信号設備，駅，指令所の領域から構成されており [12]，各々の領域で鉄道を安全・快適に運行するための SCADA システムが存在する．近年，回生ブレーキの有効活用による電力消費量の削減や [13,14]，車上への運行情報の提供による利便性向上 [15]，車上機器の監視データ蓄積による保守への活用等 [16]，高度化への期待が最も高いのは車両の領域である．本論文では，この車両の領域における SCADA システムを研究の対象とする．

電力システムは発電，送電，配電の領域から構成されており [17]，各々の領域で電気を安定的に供給するための SCADA システムが存在する．この中で発電，送電の領域に関しては ICT 導入への十分な投資が行われているが，配電の領域に関しては海外では現状設備投資が最も手薄な範囲であり，国内においても ICT の利用が唯一進んでいない領域である．また，低炭素化社会に向けた取り組みの活発化，再生可能エネルギー全量買取制度の開始，電気自動車の普及など，今後最も重要度を増すのが配電の領域である．本論文では，配電の領域における SCADA システムを研究の対象とする．

### 1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである．2 章では社会基盤システムにおける監視制御システムの特徴と，著者が実際に開発に携わってきた鉄道車上監視制御システムと電力配電監視制御システムについて説明する．3 章では鉄道車上監視制御システムを対象として，分散実行のためのソフトウェアシステムのモジュール分離とモジュールの実行管理方法について提案す

る．4 章では電力配電監視制御システムを対象として，通信容量と収集周期の制約下で電圧監視を正常に行うための収集箇所選択方式について提案する．最後に 5 章で本論文のまとめについて記す．

## 第2章 社会基盤システムの監視制御システム

### 2.1 対象とする SCADA システム

社会基盤システムは、住民の生活や企業のビジネスを支えるための電気（エネルギー）、水、通信、交通、建物、金融、行政サービスなどのインフラストラクチャを提供するためのシステムである。社会基盤システムを計画・構築・運用・維持するためには様々な計測値や状態情報等のセンサ情報を収集してそれに基づき判断を行い、制御や実行をするための機構が必須である。その役割を担うのが SCADA システムである。

1 章で述べたように、社会基盤システムにおける SCADA システムには以下の 2 つの要件がある。

- (1) 使用期間が長いため、拡張性を保持しなければならない。
- (2) 監視対象が広範囲・大量なため、最先端技術を必ずしも適用できるとは限らないという制約下で新機能を実現しなければならない。

まず、(1) の要件における SCADA システムの使用期間としては、数十年程度の長さを想定する必要がある。例えば鉄道車両内の鉄道車上 SCADA システムは一度導入されると約 15 年という長期間に渡って継続的に使用されることが求められる。また、例えば電力配電の SCADA システムは導入開始から約 30 年程度継続的に活用され続ける。そのため、システムのフルリプレイスを行う前に必要に応じて一部の装置のみを追加、交換できることが必要である。例えば鉄道車両に接続される装置については、15 年の使用期間中に機器の取り



替えが行われるだけでなく、新しい種類の機器が追加されたり、また、既存の機器を利用した新たな機能が導入されたりといった変化が、継続的に起こりうる。(1)の要件はこのような状況を前提としたものである。

また、社会基盤システムが導入される範囲は広範囲で、使用される装置なども大量なため、導入開始から終了までに長時間を要することが普通である。例えば電力配電の SCADA システムが導入される範囲は、国内の電力会社 1 社で、配電線の総距離にして数万 km 以上もの範囲に及び、監視制御の対象となる機器の数はサーバ 1 台あたり 10,000 台にも及ぶ。この大きさの規模のシステムを新たに導入する場合、導入開始から終了までには 10 年程度かかることが想定される。そのため、導入開始時に採用された技術が導入終了時には先進技術ではなくなっており、システムの導入が完了した後に新機能が導入される場合、そのような最先端でない技術を活用しながら新機能を実現することが求められる。(2)の要件はこのような状況を前提としたものである。

これら 2 つの要件の実現方式は、システムの特性によって異なる。ここではシステムの特性を安全性（許容できない危害が発生するリスクがないこと）に対する要求に応じて 3 つに分類し、それぞれのレベルにおける実現方法の特徴について考察する（表 2.1）。安全性レベル 1 の SCADA システムでは、対象とするセンサ情報が求められる時間内に全て確実に集まらない場合には、処理や判断が適切に行われず、サービスを受ける対象にとって安全が損なわれる。このような SCADA システムとしては、鉄道車上 SCADA や原子力発電所 SCADA 等が挙げられる。安全性レベル 2 の SCADA システムでは、対象とするセンサ情報が求められる時間内に全て確実に集まらない場合にも直接安全が損なわれることはないが、多く収集すればするほど処理や判断の質が向上する。このような SCADA システムとしては、電力配電 SCADA や道路交通渋滞情報 SCADA 等が挙げられる。安全性レベル 3 の SCADA システムでは、センサ情報を集めることがサービス提供や業務遂行にとって必要であるが、情報が

表 2.1: 安全性レベル毎の SCADA の分類

レベル	内容	例
1	安全に関わるが，他にバックアップ手段や インターロックがあるもの	鉄道車上 SCADA ， 原子力発電所 SCADA 等
2	安全に関わるが，誤動作の場合でも 直接危機に陥らないもの	電力配電 SCADA ， 道路交通渋滞情報 SCADA 等
3	安全に直接関わらないもの	電力量計測 SCADA ， 金融アンチマネー ロンダリング SCADA 等

集まらなかった場合でもサービスを受ける対象にとって安全に直接関わらないものである．  
このような SCADA システムとしては，電力量計測 SCADA や金融アンチマネーロンダリ  
ング SCADA 等が挙げられる．

安全性レベル 1 に属する SCADA システムについては，前述の拡張性の保持，および，旧  
来技術による新機能の提供という要件に対して，最悪時における応答性等の性能の劣化が起  
こりえないことを保証した上で，これらを実現する方法が必要となる．一方，安全性レベル  
2 の SCADA システムに関しては，実時間性への要求がレベル 1 と比べて緩いため，利用可  
能なシステムの能力を最適に運用することで，求められる拡張性や機能を最大限に実現する  
ことが課題となる．また，安全性レベル 3 のシステムについては，最悪時の性能への要求が  
小さいため，ベストエフォート型の手法を用いて提供する監視制御の有用性を最大化するこ  
とが，システムの設計，運用における主要な課題となる．具体的に利用可能な手法として，  
例えば，処理負荷やトラフィックが低い時間帯でのバッチ処理の実行や，データの再送を許  
すことによるデータ収集能力の最大化等が考えられる．

本研究は、鉄道システムと電力システムという2つの社会基盤システム向けの SCADA システムを対象に行った。鉄道システムに関しては、安全性レベル 1 に属する SCADA システムである鉄道車上監視制御システムを対象としている。また、電力システムに関しては、安全性レベル 2 が要求される電力配電監視制御システムを対象としている。以降、これら2つの SCADA システムについて説明する。

## 2.2 鉄道車上監視制御システム

図 2.1 に鉄道を運行するためのシステム全体像を示す [18]。鉄道システムはこれ以外に改札システムや旅行業支援システム等から構成される大規模システムである。鉄道を運行するシステムは車両、車両基地、変電設備、信号設備、駅、指令所の領域から構成されており [12]、各々の領域で鉄道を安全・快適に運行するための SCADA システムが存在する。車両の領域では鉄道車上機器の監視制御システム、指令所の領域では車両位置の監視制御システム、変電設備では変電所の監視制御システムなどである。近年、消耗品の経費節減などの運用コスト低減に貢献する技術として、回生ブレーキの有効活用によるブレーキシュー摩耗低減や電力消費量の削減に関する研究開発 [13, 14]、制御系で使用している情報の情報系への活用技術として、車上への運行情報の提供による利便性向上に関する研究開発 [15]、保守に関わるコスト低減と運行中の車両故障回避に貢献する技術として、車上機器の監視データ蓄積による保守への活用に関する研究開発等 [16]、高度化への期待が最も高いのは車両の領域である。本論文では、この車両の領域における SCADA システムを研究の対象とする。鉄道車上監視制御システムは、10ms オーダの周期で制御指令を出し、100ms オーダの周期で監視を行うリアルタイムシステムである。

図 2.2 に鉄道車上監視制御システムを示す。鉄道車上監視制御システムは、鉄道の運転士、

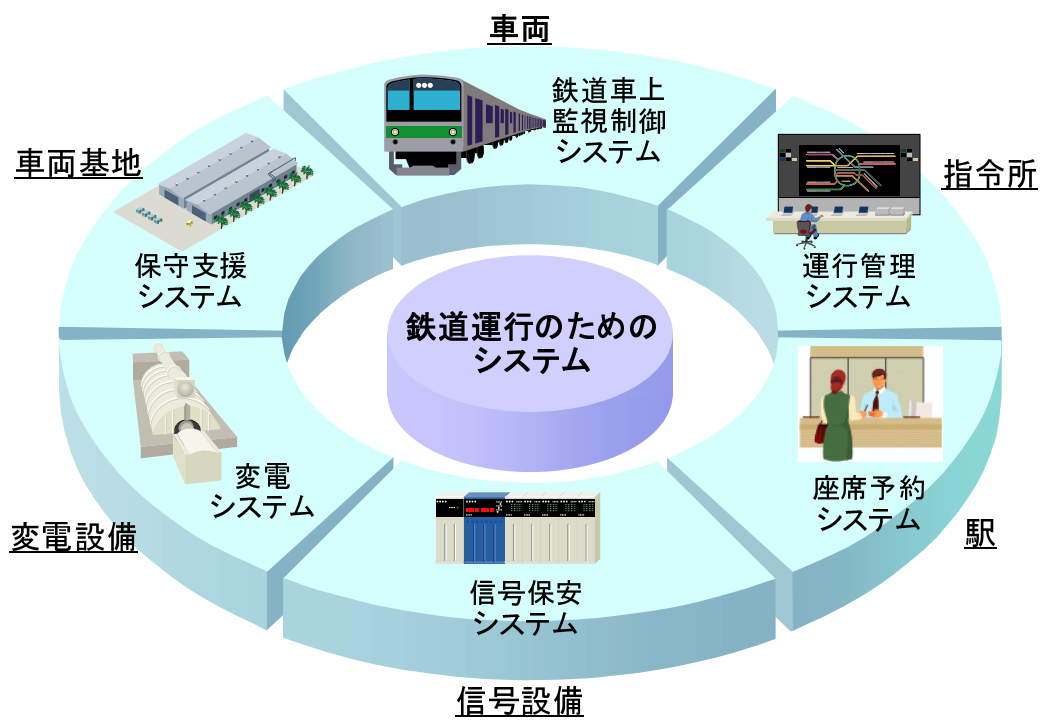


図 2.1: 鉄道運行システム

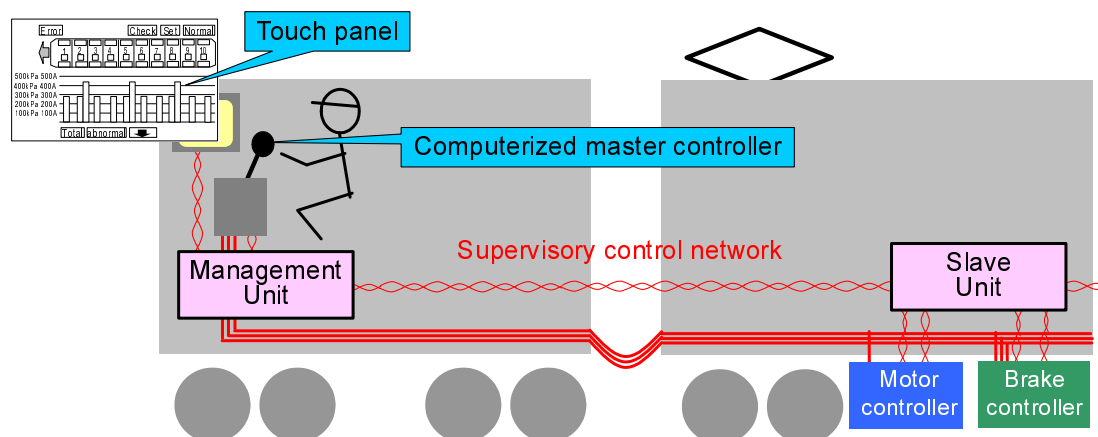


図 2.2: 鉄道車上監視制御システム

車掌や保守員による鉄道車両の操作を支援するものである。運転士は電子化されたマスターコントローラ（マスコン）を操作することにより鉄道を走らせることができる。車掌は運転台に設置されたタッチパネルで鉄道車両の状態を把握することができる。保守員は運転台に設置されたタッチパネルを操作して運行前の鉄道車両の検査を行うことができる。端末局は各車両に設置され、車両間をまたぐ SCADA ネットワークに接続されている。先頭車両の端末局は運転士、車掌や保守員が操作した指令をもとに SCADA ネットワーク経由で端末局に接続された機器を制御する。

鉄道車両は一度導入されると約 15 年という長期間に渡って継続的に使用されることが求められる。この間、端末局や SCADA ネットワークを更新することなく運用できることが求められる。一方、端末局に接続される機器については、新しい機器にリプレイスされたり、新しい種類の機器が追加されたり、既存の機器同士を協調させた新たな機能が導入されたりといった継続的な変化が伴う。そのため、SCADA システムとしてはこのような変化に対応するための拡張性を保持しておかなければならない。

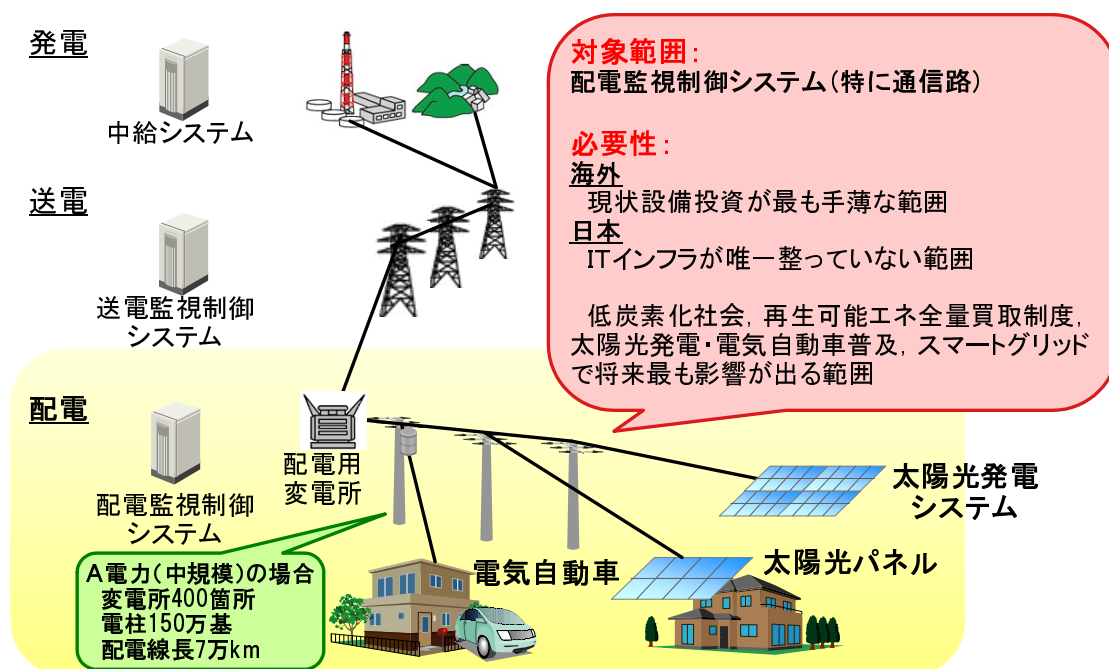


図 2.3: 電力供給システム

## 2.3 電力配電監視制御システム

図 2.3 に電気を供給するためのシステム全体像を示す。電力システムはこれ以外に設備を管理するシステム、電気料金を収集して計算するシステム、工事を管理するシステム等から構成される大規模システムである。電気を供給するシステムは発電、送電、配電の領域から構成されており [17]、各々の領域で電気を安定的に供給するための SCADA システムが存在する [19,20]。発電の領域では発電所の監視制御システム、送電の領域では送電線や変電所の監視制御システム、配電の領域では配電線の監視制御システムなどである。この中で発電、送電の領域に関しては IT 投資が行われているが、配電の領域に関しては海外では現状設備投資が最も手薄な範囲であり、国内においても IT 基盤が唯一整っていない範囲である。また、低炭素化社会に向けた取り組みの活発化、再生可能エネルギー全量買取制度の開始、

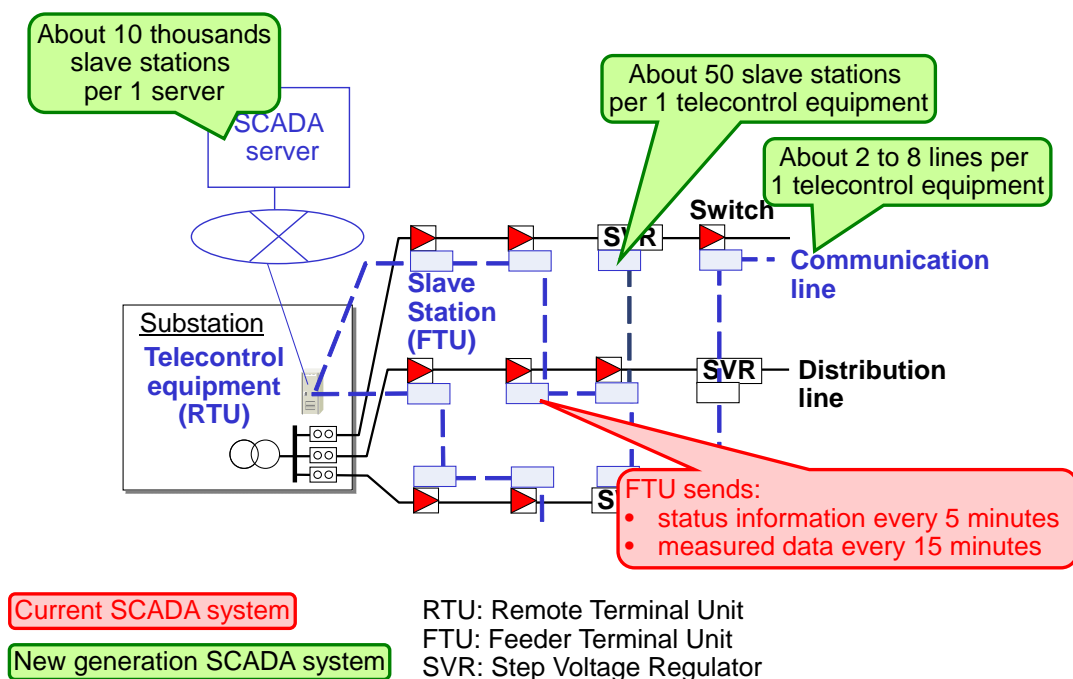


図 2.4: 電力配電監視制御システム

電気自動車の普及など，需要家が太陽光発電設備，蓄電池や電気自動車を持つこととなり，それらの設備や機器は配電系統に直接接続されることから，今後最も重要度を増すのが配電の領域である．本論文では，配電の領域における SCADA システムを研究の対象とする．電力配電監視制御システムが監視制御する範囲は，例えば中規模の電力会社の場合，変電所約 400 箇所，電柱約 1,500,000 基，配電線の長さ約 70,000km の範囲に及ぶ．

図 2.4 に電力配電監視制御システムの概要を示す．電力配電監視制御システムは，SCADA サーバ，変電所に設置された RTU(Remote Terminal Unit)，開閉器などの配電線に設置された FTU(Feeder Terminal Unit) から構成される．SCADA ネットワークは，SCADA サーバと変電所の RTU を接続するバックボーンネットワークと，変電所にある RTU と配電線にある FTU を接続するフィールドネットワークから構成される．1 つのフィールドネットワー

クには最大で約 50 台の FTU が接続される。1 つの RTU からは 2 から 10 のフィールドネットワークが接続される。1 台の SCADA サーバが監視する FTU の数は最大で約 10,000 台である。現状の電力配電監視制御システムでは、FTU は異常状態などの状態情報を数分ごとに SCADA サーバに送信している。また、電圧値などの計測値を 10～20 分ごとに送信している。

1 つの電力会社における電力配電監視制御システムが導入される範囲は広範囲であり、配電線 70,000km もの範囲に及ぶ。そのため、導入開始から終了までには 10 年程度かかることが想定される。一方導入された SCADA ネットワークは導入開始から 30 年程度活用され、新たな SCADA ネットワークのリプレイスが開始されてから 10 年程度は既存の SCADA ネットワークが残っていることとなる。そのため、新機能を導入する場合は既存の古い SCADA ネットワークを活用したまま実現することが求められる。





# 第3章 鉄道車両監視制御の分散処理のための 車上アプリケーション再構築とワーク フロー管理方式の提案

## 3.1 はじめに

近年，鉄道車上監視制御システムにおいては，車上制御ネットワークの通信容量大容量化 [21] に伴い，可制御性・可観測性の向上の余地が生まれている．より詳細な監視・計測データの収集・処理や新機器の接続が可能になり，列車内の複数の機器の協調制御をはじめとするネットワークを利用した様々な新機能の導入が期待されている．一方，車上制御ネットワークを用いるソフトウェアは，過去のハードウェアロジックによる実装をソフトウェアプログラムに変更する形で開発されてきている．ハードウェアロジックは先頭車両の運転台で常時車上機器を監視，制御できるよう集中形式で設計されていたため，このようにして開発されたソフトウェアシステムも同様な集中制御，具体的には，ソフトウェア全体を単一タスクとし，運転台においてハードリアルタイムタスクとして周期実行するという方式を採用している．なお，ハードリアルタイムタスクとは，処理の完了が各周期を超過することが許されないタスクを意味する [22] ．

このようなソフトウェア構成を用いている理由として，現状の鉄道運行においては十分な機能を実現していることや，ハードウェアロジックの時代からの運用実績があり信頼性が高

いという点が挙げられる。

一方，問題点としては，機能拡張性に乏しい点が挙げられる。たとえば，全処理が単一の構造上で実現されているため，モーター制御装置やブレーキ制御装置といった機器のリプレイスが行われた場合，新しい機器仕様に対応するためには，ソフトウェア全体を作り直す必要が生じてしまう。

さらに別の問題点として，鉄道制御において近い将来実用化が期待されている協調制御を実現しようとした場合，運転上求められる処理遅延を保証できないという点がある。ここで協調制御とは，複数の機器を協調させる高度な列車制御を指す。典型的な例として，乗り心地向上や，車輪やブレーキシュー等の消耗品の延命化を目的とした電気ブレーキと空気ブレーキとの協調が挙げられる。協調制御では，機器間で高速に情報送受信を行うことが必要であるが，現状のシステムの集中制御の構造では，ソフトウェアを実行している先頭車両を介して情報をやり取りする必要がある，その結果処理遅延の増大が避けられない。

鉄道車両は典型的には約 15 年という長期間に渡って継続して使用されることが求められ，この間，各車両で処理を行う端末局 (Terminal unit) の CPU やネットワーク装置を更新することなく運用できることが必要となる。そのため現状のハードウェアの性能の下で，機能拡張性をできるだけ実現するとともに，協調制御が導入された際に遅延を低減できるようにしておくことが重要である。また，このようにライフサイクルが非常に長いことと，信頼性が重要視されることから，現状の実績のあるシステムの改変は最小限に留めることが求められる。

そこで本研究では，鉄道車上監視制御システムのソフトウェアの構造を処理毎に複数のモジュールに分割することで分散的実行を実現し，ソフトウェアの拡張性の向上と遅延の少ない協調制御を可能にする手法を提案する。提案手法では，まず，機能構造を明らかにすることで，ソフトウェアをサブルーチンの単位にモジュール分離する。このモジュール化により，

各サブルーチンを別々の車両（端末局）で独立して実行することが可能となる．次に，これらのサブルーチンを管理して動作させるため，分離したサブルーチン毎に起動タイミングや起動端末局を指定できる機構を提案する．これを本研究ではワークフロー管理方式と呼ぶ．各端末局で事前に処理時間を見積もり，処理周期を超えないように実行するサブルーチンを調整をすることで，ハードリアルタイム性を保証して機能拡張を行うことが容易になる．また，協調処理を行う機器間で直接情報の送受を行うことができるので，協調処理の処理遅延を集中制御の場合よりも低減できる．

並列化，分散化によるシステムの性能向上は広く知られた手法であり，分散リアルタイムシステムの開発手法についてもよく研究されている [23–25]．しかし本研究の様に，現状で集中制御で実現されているハードリアルタイムシステムの分散化の報告例は少ない．この理由としては，ハードリアルタイムシステムでは処理周期を保証することが必要不可欠であるが，分散システムでは通信遅延など別々の計算ノードでの処理の協調に必要なオーバーヘッドのため，計算端末が増えても処理のスケジューラビリティが向上するとは限らないこと，また，そのようなオーバーヘッドを想定して処理をスケジュールする方法が複雑なことなどが考えられる．

本研究では，製品プロトタイプにおける各種処理時間実測値をもとに，典型的な機器接続例において処理時間を評価する．これにより，分散化に伴うオーバーヘッドがあっても，ハードリアルタイム性を損うことなく現状の処理を実現できるだけでなく，協調制御機能も含めた機能追加が可能なことを示す．

なお提案手法を製品プロトタイプに適用するのに際しては，これまでに開発を行ってきた，コンポーネント指向ソフトウェアフレームワーク [26] を活用している．このフレームワークでは，ソフトウェアの再利用の容易化のため，仕様の異なる列車で共通化可能なデータ伝送機能をプラットフォームの形で提供しており，提案手法でもこれを用いる．しかし，

上記の様に情報伝送にはオーバーヘッドが避けられない．本研究における処理時間評価では，モジュールの分散実行を行わず集中制御のままこのデータ伝送機能を利用した場合，求められる処理周期を満たすことができないことについても示す．

これまでに数多くのソフトウェアコンポーネントモデルが提案されている [27]．分散リアルタイムシステム向けのコンポーネントモデルとしては，COMDES II [28], Rubus [29] 等が，特定用途向けとしては特に自動車制御用に AUTOSAR [30] 等が存在する．しかし，鉄道制御用の既存のコンポーネントフレームワークは存在せず，また用いられた例もない．そこでシステム開発においては，特に既存のモデルに依拠することなく，現状の機器構成を前提として実際の車両制御に直接利用できる形でシステムの実装を行った．

本章の構成は以下の通りである．3.2 節では鉄道車上監視制御システムについて説明する．3.3 節では分散実行のためのソフトウェアシステムのモジュール分離とモジュールの実行管理方法について提案する．3.4 節では開発したプロトタイプシステムから得られた実測値を基に，システムの機能拡張性について評価を行う．最後に 3.5 節で本章のまとめについて記す．

## 3.2 鉄道車上監視制御システム

本研究が対象とする鉄道車上監視制御システムについて、これまでのシステム構成の変遷について説明する。

### 3.2.1 従来の鉄道車上監視制御システム

当初の鉄道車上監視制御システムは、全ての監視項目（例えば故障の有無）や制御信号に1本ずつの結線を行っていた（図 3.1(a) 参照）。そのため、車両間の結線数が 200 本程度あり、保守コストの削減が課題であった。監視や制御に関する処理論理は先頭車両においてハードウェアロジックで実装されていた。

近年では電子化ハンドルや運転台タッチパネルをはじめ車上ネットワークが導入され、監視制御情報はデジタル化されている（図 3.1(b)(c) 参照）。結線数は 80 本から 15 本程度まで大幅に削減され、保守コストの削減が実現された [31]。また、監視制御の処理がソフトウェア化されたが、既存システムの拡張として実現されたため、ハードウェアロジックによる実装をソフトウェア化する形で行われている。そのため先頭車両の車上監視制御ネットワーク端末装置において周期実行される集中制御となった。

以上のように、鉄道車上監視制御システムでは、機能処理は先頭車両において一定時間ごと起動される周期サイクル中に一連の処理を実行する集中制御方式によって実現されており、また、当時のハードウェアスペックが現在のように高性能ではなく、ミドルウェアやオブジェクト指向等の技術が組み込み系の制御システムに適用されていなかったことから、ソフトウェアの構造化が導入されておらず、処理が全て逐次処理となっているものが多い。このため、ハードリアルタイム性を保証した上で、新機器・機能追加、データ処理量増加等の拡張を行うことが困難な状況である。

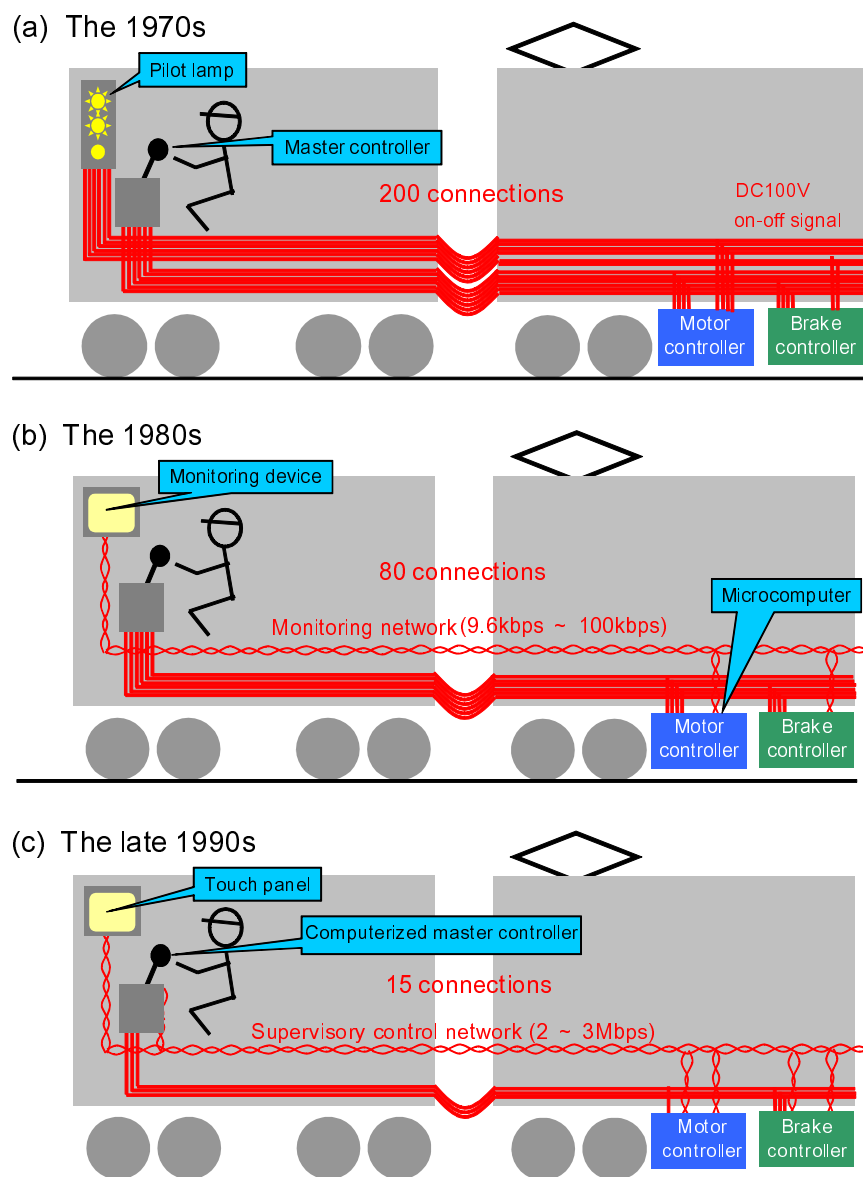


図 3.1: 鉄道車上監視制御システム構成の変遷

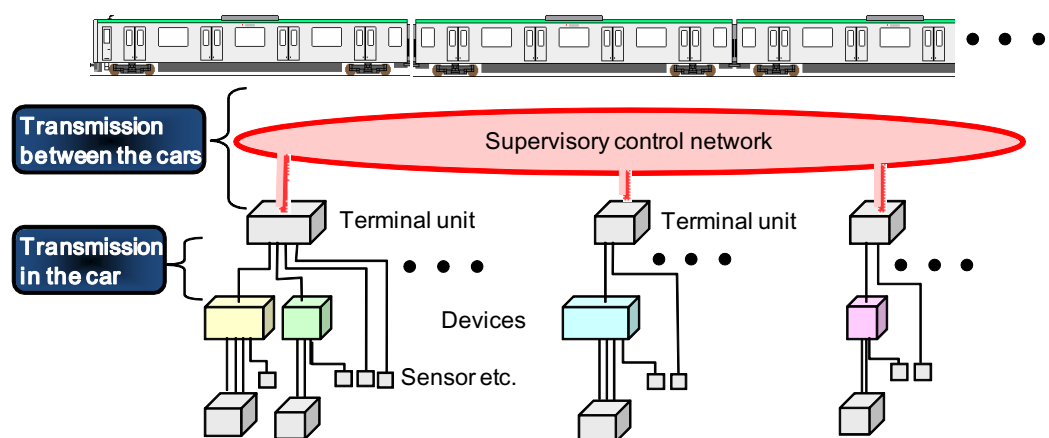


図 3.2: 次世代鉄道車上監視制御システム

### 3.2.2 次世代の鉄道車上監視制御システム

機器や機能，データの追加拡張に容易に追従可能とすることを実現するため，文献 [26] で我々は次世代の鉄道車上監視制御システムを提案し，プロトタイプを開発している．この鉄道車上監視制御システムでは，通信は車両毎にある車上制御ネットワーク端末局同士で通信を行う基幹伝送と，端末局と各車両に設置された車上機器との間で通信を行う機器伝送から構成されている（図 3.2 参照）．各車両に設置された機器のデータをその車両の端末局に収集し，端末局同士でデータを共有することができる．

この次世代の鉄道車上監視制御システムでは，ソフトウェアの再利用の容易化を実現するために，鉄道車上監視制御システムのソフトウェアを以下の 3 つの機能に分割している．

- (1) 異なる仕様の列車で共通化できるデータ伝送等の処理
- (2) 機器メーカーに依存するデータ変換等の処理
- (3) 列車毎に搭載する監視・制御等の処理



このうち、(1) の異なる仕様の列車で共通化できる処理はプラットフォームとして実装しており、残りの二つの処理を車上アプリケーションとして実装している。また、(1) と (2) の処理は各車両で実行される。

各車両で実行される (2) の処理の結果は、(1) によって各車両の端末局が主記憶上に保持する論理データベースに書き込まれる。(1) は各処理周期で論理データベースに書き込まれた内容を残りの全車両にブロードキャストし、全車両の論理データベースで情報の同期を行う。(3) は (1) が保持する論理データベースから情報を読み出し、処理を行い、結果を書き込む。(1) は先程と同様にブロードキャストにより全車両の論理データベースの同期を行う。以上の処理を繰り返す。

しかし、(3) の監視・制御等の処理に関しては、これ以上機能を細分化していなかったため、従来と同様、先頭車両にある車上制御ネットワーク端末局 (中央局) で周期サイクルごとに実行するという集中処理を行っている。そのため、負荷が中央局に集中し、ハードリアルタイム性を維持しながら追加や拡張を行うことが困難になっている。

### 3.2.3 協調制御における制御遅延の問題と分散処理の必要性

今後、機能の追加や拡張の対象となると考えられる機能として、協調制御が挙げられる [32, 33]。例えば、文献 [32] では、協調制御として空気ブレーキで電気ブレーキを補足する車両を想定し、空気ブレーキ力と電気ブレーキ力の和が指令されたブレーキ力になるように制御する電空協調制御の検討が行われている。

現在実際に運用している鉄道車上監視制御システムの開発にあたっては、安全側に十分な余裕を持たせた上でデータ送受信が 1 サイクル内で完了することを保証するため、各サイクルで受信したデータに対する処理は次のサイクルで行うという設計思想が適用されている。したがって現状の鉄道車上監視制御システムの集中処理の構造では、周期実行されるサイク

ルが以下の 6 サイクル必要となる。

(サイクル 1) 先頭車両の端末局がブレーキ操作を検知し，主変換制御装置が接続された端末局に電気ブレーキ力の問い合わせを行う，

(サイクル 2) 端末局が主変換制御装置に電気ブレーキ力を問い合わせる，

(サイクル 3) 主変換装置が端末局に電気ブレーキ力を応答する，

(サイクル 4) 主変換制御装置が接続された端末局が先頭車両の端末局に電気ブレーキ力を応答する，

(サイクル 5) 先頭車両の端末局は空気ブレーキ力を計算し制御出力を行う，

(サイクル 6) 各端末局がブレーキ制御装置に制御出力を行う。

しかし分散処理を導入し，電気ブレーキ力問い合わせの機能と空気ブレーキ力計算の機能を分散処理させることで，上記 (サイクル 4) にある電気ブレーキ力応答を先頭車両の端末局に送信することが不要となり，以下の 5 サイクルまで短縮することが可能となる。

(サイクル 1) 先頭車両の端末局がブレーキ操作を検知し，主変換制御装置が接続された端末局に電気ブレーキ力の問い合わせを行う，

(サイクル 2) 端末局が主変換制御装置に電気ブレーキ力を問い合わせる，

(サイクル 3) 主変換装置が端末局に電気ブレーキ力を応答する，

(サイクル 4) 端末局が空気ブレーキ力を計算し制御出力を行う，

(サイクル 5) 端末局がブレーキ制御装置に制御出力を行う。

各サイクルは周期実行されるため実行時間は同一なので、分散処理の導入による 1 サイクルの短縮は、約 17% の制御遅延削減となり、運転手にとっての大幅な操作性の向上となる。

以上示したのと同様、一般的に協調制御は複数の機器間における制御量の分担を行うものであり、分担量の計算が必須である。分散処理を導入することにより、分担する制御量を計算するための通信回数を減らすことができ制御遅延の短縮につながる。

### 3.3 車上アプリケーション再構築とワークフローによる分散処理管理の提案

本節では、協調制御機能の追加といった拡張を可能にするための、鉄道車上アプリケーションの分散処理化について提案する。3.2 節で説明した次世代鉄道車上監視制御システムを前提に、その拡張として提案を行う。まず、鉄道車上アプリケーションの機能構造を明らかにしてアプリケーションソフトウェアをモジュール分離する。モジュールはサブルーチンとして実装される。次に、分離したサブルーチン毎に起動タイミングや起動端末局(号車)を指定できるワークフロー管理方式を提案し、車上アプリケーションの分散処理を可能にする。ソフトウェアの構造を処理毎に複数のモジュールに分割したことで負荷分散が可能となり、ハードリアルタイム性を保証した機能拡張の許容処理時間が拡大する。

以降では、これらの手順を、実際の車上アプリケーションに対し適用した結果と共に説明する。このアプリケーションは、C 言語の 15k ステップ程度のプログラムである。

#### 3.3.1 車上アプリケーションのモジュール分離

鉄道車上アプリケーションは、3.2.2 節における (2) の機器メーカーに依存する処理機能と、(3) の鉄道車両の監視・制御機能からなる。本研究では、更に、これらの機能を分析し、起動タイミングが周期的およびイベント発生時に分かれること、および、周期的な場合は、機能毎に固有の周期があることが分かった。

この分析を基に、これらの処理を処理毎にモジュール分離した。以降、機器メーカーに依存する処理を行うモジュールを機器モジュール、鉄道車両の監視・制御機能の処理を行うモジュールを機能モジュールと呼ぶ。なお、機器モジュールは、機器毎に処理が独立しており、更に機器へのデータ送信と機器からのデータ受信とで完全に処理が分かれているため、機器

毎に送信用のモジュールと受信用のモジュールに分離できた。機能モジュールは、機器に対応しているものとイベントに対応しているものがあるが、これらも対応している機器、運転台タッチパネル操作等のイベント毎に完全に処理が独立しており、内容も論理データベースからのデータ読出し・処理・論理データベースへの書込みという一連の処理からなるため、各機器およびイベント毎に自然に分離できた。

機器モジュールはその機器が接続されている端末局で実行されることが必要である。機能モジュールはどの車両の端末局で実行されても良いが、協調制御の制御量分担のための計算機能は対象となる機器が接続されている端末局で実行されることが必要である。

機器モジュールは機器固有の周期で起動される。機器毎にデータ受信処理とデータ送信処理が存在し、それぞれ別の機器モジュールとして実行される。具体的な処理内容としては、機器メーカ依存のデータフォーマットを変換する等の処理がある。一方、機能モジュールは、周期毎に起動されるものと、イベント起動されるものとで構成される。周期起動される場合、周期は機能によって異なる。

表 3.1, 3.2 に分離したモジュールの一覧を示す。表 3.1, 3.2 に示される処理内容一覧は、大都市圏の通勤電車を想定したもので、どの処理も文献 [34–36] における車上アプリケーションのいずれかで用いられている。したがって、実際に実装される車上アプリケーションの機能は、この一覧の一部分と考えることができる。

表 3.1: 分離したモジュール ( 機器モジュール )

No.	種別	起動タイミング	処理内容
1	機器モジュール	周期起動 ( 機器固有 )	マスコン / データ生成 , 送信
2			マスコン / データ受信 , 異常検知
3			VVVF / データ生成 , 送信
4			VVVF / データ受信 , 異常検知
5			ブレーキ / データ生成 , 送信
6			ブレーキ / データ受信 , 異常検知
7			SIV / データ生成 , 送信
8			SIV / データ受信 , 異常検知
9			ATS 等 / データ生成 , 送信
10			ATS 等 / データ受信 , 異常検知
11			空調 / データ生成 , 送信
12			空調 / データ受信 , 異常検知
13			戸閉装置 / データ生成 , 送信
14			戸閉装置 / データ受信 , 異常検知
15			車内表示器 / データ生成 , 送信
16			車内表示器 / データ受信 , 異常検知
17			LED 表示器 / データ生成 , 送信
18			LED 表示器 / データ受信 , 異常検知
19			自動放送 / データ生成 , 送信
20			自動放送 / データ受信 , 異常検知
21			列車無線 / データ生成 , 送信
22			列車無線 / データ受信 , 異常検知

表 3.2: 分離したモジュール (機能モジュール)

No.	種別	起動タイミング	処理内容
23	機能モジュール	周期起動	運転制御指令伝送
24			受信データ有効性確認
25			故障検知ブザー出力確認
26			デッドマンブザー出力確認
27			制御データ出力確認
28			定速制御情報出力確認
29			編成情報確認
30			モニタ装置故障ランプ確認
31			ドア開閉状態確認
32			バッテリー状態確認
33			SIV 状態確認
34			空調状態確認
35			表示器制御
36			ATS 等状態確認
37			トランスポンダ状態確認
38			キロ程, 駅認識, 補正
39		イベント起動	列車設定 (モード選択, 運番, 種別, 行先駅, 当駅)
40			日時設定 (各機器)
41			パンタグラフ制御
42			ブレーキ装置車種設定
43			車輪径設定
44			空調初期設定
45			表示器種別・駅コード情報出力
46			室内灯, 表示灯点灯制御信号出力
47			緊急放送
48			放送選択
49			案内設定
50			模擬走行
51			列車検査
52			タッチパネル初期化

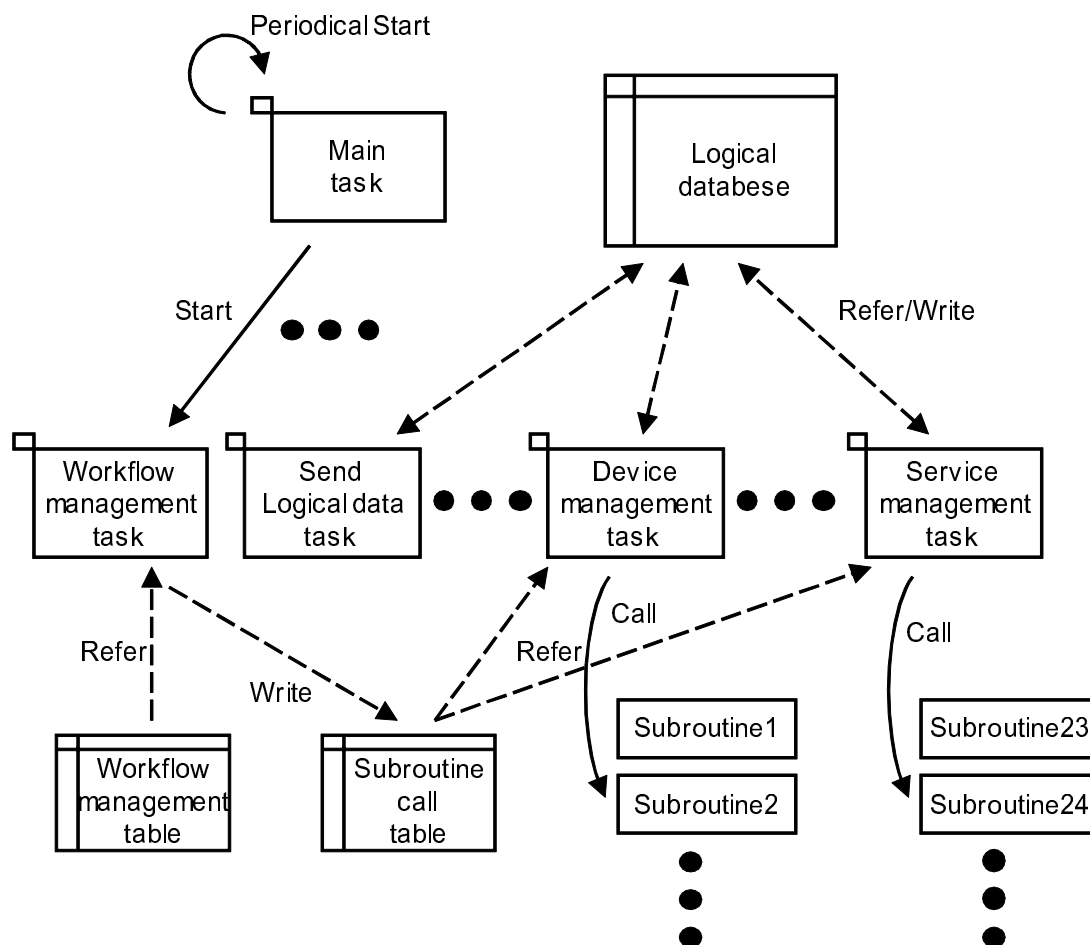


図 3.3: 端末局におけるソフトウェアの動作

### 3.3.2 ワークフローによる分散処理管理の提案

ここでは、分離したモジュールを複数の車両で分散処理するための仕組みを提案する。提案手法では端末局の処理周期毎に実行するモジュールを選択することで適切な処理フローを実現することから、この仕組みをワークフロー管理方式と呼ぶ。先に述べたように、モジュールは周期的に起動もしくはイベント起動される。周期的に起動される場合、その起動周期はモジュール毎に異なる。また、モジュールがどの車両で実行されるかは、機器モ



ジュールと機能モジュールで異なる。機器モジュールは、対応する機器が車両に装備されているならその車両で実行する必要がある。一方、機能モジュールは、どの車両で実行してもよい。

提案するワークフロー管理方式は、表を用いて、モジュール毎に起動方法と周期、および、実行する車両を指定し、その指定に従ってモジュールを起動・実行する仕組みである。この表のことをワークフロー管理テーブルと呼ぶ。この機構では、端末局で実行される処理の实体は、

- 周期実行されるタスク、および、
- タスクから起動されるサブルーチン（モジュール）

という2階層となっている。ここでタスクは、プラットフォームとして実装されているソフトウェアであり（3.2節での(1)）、サブルーチンは車上アプリケーションに属する（3.2節での(2), (3)）。タスクはどのサブルーチンを呼び出すかを、表を参照することによって知ることができる。この様子を図3.3に示す。

以下、まず、タスクについて説明する。タスクは以下の8種類である。これらのタスクは(1)から(8)まで逐次的に、周期的に実行される。

- (1) ワークフロー管理処理を行う。
- (2) 基幹伝送データを受信する。
- (3) 機器モジュールを初期化する。
- (4) ワークフローにより指定された機器モジュール処理（機器伝送データ受信，異常検知）を行う。

- (5) ワークフロー管理により指定された機能モジュール処理（制御指令作成，異常表示など）を行う．
- (6) ワークフロー管理により指定された機器モジュール処理（データ生成，機器伝送データ送信）を行う．
- (7) 基幹伝送データを送信する．
- (8) 構成制御処理を行う．

この周期は，列車運転における必要な制御レスポンスを保証する上で，10ms 程度であることが求められる．ワークフロー管理タスク (1) は，ワークフロー管理テーブル (図 3.3 の workflow management table) を参照して，今回の周期で起動する機器モジュールと機能モジュールのリストを作成し，起動テーブル (図 3.3 の subroutine call table) に書き込む．機器モジュール処理タスク (4, 6)，機能モジュール処理タスク (5) は，起動テーブルを参照して順次該当するサブルーチンを起動して処理を実行する．このとき，サブルーチンは処理に必要なデータの取得，および，全車両で共有するデータの記録を，論理データベース (図 3.3 の logical database) を用いて行う．なお，信頼性向上の観点から端末局は 2 重化されており，構成制御処理タスク (8) は 2 重系の両端末局で相互監視を行う処理である．

ワークフロー管理テーブルは CSV (Comma Separated Values) 形式で記述されている（表 3.3 参照）．表 3.3 に示すように，各行では，端末局番号 (車両番号)，モジュールの起動番号，初回起動までの時間，起動周期，起動サブルーチン名が指定される．ワークフロー管理テーブルは，全車両で共通のものを用いる．

ワークフロー管理タスクは，テーブルの行の情報に従い，現在実行中の周期において実行するサブルーチンを起動テーブルに書き込む．各行のそれぞれの要素は以下の情報を表している．端末局番号 (Car number) は，そのモジュールを実行する車両を表している．初回起動

表 3.3: ワークフロー管理テーブル

//Car //number	Sequence number	Starting offset	Period/ Event	Module name	
1,	1,	0,	1,	kbmop	//brake
1,	2,	0,	20,	kaimop	//air-conditioner
1,	3,	0,	EVENT,	tamop	//time adjustment
:					
:					
2,	1,	0,	1,	kvmop	//brake
2,	2,	0,	1,	kimop	//inverter
2,	3,	0,	1,	dicop	//inverter ctl
:					
:					
10,	1,	0,	1,	kvmop	//brake
10,	2,	0,	20,	kaimop	//air-conditioner
10,	3,	0,	10,	katsmop	//ATS
:					
:					

までの時間 (Starting offset) は、システムが起動後、何周期目からモジュールを実行するかを表す。これは、システム起動時に初期化にかかる時間が機器によって異なるためである。起動周期 (Period/Event) は、端末局の処理周期の何回毎にモジュールを実行するかを示す。イベント起動のモジュールについては、起動周期の欄を EVENT と記すことで指定する。イベント起動のモジュールが実行されるのは、直前の端末局の周期において、イベント発生が記録された場合である。イベントは、運転台における画面操作により発生する。

ワークフロー管理テーブルを用いることで、端末局毎の起動サブルーチン設定が容易となり、全端末局に負荷を適切に配分することが可能となる。また、簡単に新規機器やアプリケーションの追加変更が可能となる。更に、処理フローにおけるモジュールの実行順序も変更・調整できるため、あるモジュールの処理結果を基に、他のモジュールの制御を行うといった複数機器を連携させた協調制御の導入が容易になる。

### 3.3.3 信頼性の保証

故障の発生等の異常時において列車の安全を確保するため、以下の対策を行っている。まず、端末局や通信機器の故障により実時間制約が守られなかったり、通信や処理自体が行われなかった場合を想定した SCADA システムレベルの対策として、プラットフォームレベルで受信した基幹伝送データをアプリケーションが参照する際、そのデータが現在のサイクルで送られてきたものかをチェックする処理を行っている。これにより、故障により実時間でデータ取得が不可能だった場合に以前のサイクルでのデータを誤って読み込むことを防止している。具体的には以下のように実現している。各車両で受信する基幹伝送データには、論理データベース上に 2 箇所の書き込まれる位置が割り当てられており、それらの一方にサイクル毎に交互にデータが書き込まれる。また、書き込みと参照それぞれについて、どちらの箇所にアクセスしたかをあらわすフラグを割り当てる。参照の際に、書き込みが行われた位置が参照すべき位置と同じかを判断し、一致していない場合、以前のサイクルの情報とみなして処理をスキップする。

更に、各端末局は 2 重化されており、毎周期毎に片方の端末局が他方の端末局の監視を行うことで、端末局の異常検出を行う。端末局の周期処理はタイムアウト時間を設定しており、片方の端末局でメモリ入出力処理やサブルーチン処理などのソフトウェア異常が発生し、タイムアウト時間を経過したときには異常検出と判断して 2 重化された他方の端末局で処理を継続して実行させる。

一方、車両間の端末局同士を接続する車上ネットワークは、伝送路の断線やネットワーク機器の故障が起きても伝送が途絶しないようラダー構成としており、上記故障時にも迂回経路を介して情報が継続して伝送できるようにしている [21]。

ただし、このような情報システムレベルでの信頼性の確保は限定的であるので、鉄道運行の分野では物理的な手段で信頼性を保証できる範囲で、情報システムの導入を行うという運

用が現実ではなされている．たとえば，非常ブレーキへは運転台から直接結線されており，また，バックアップのため 2 系統を有している．このため仮に SCADA システム全体が障害状態に陥ったとしても，列車を確実に停止することができる．

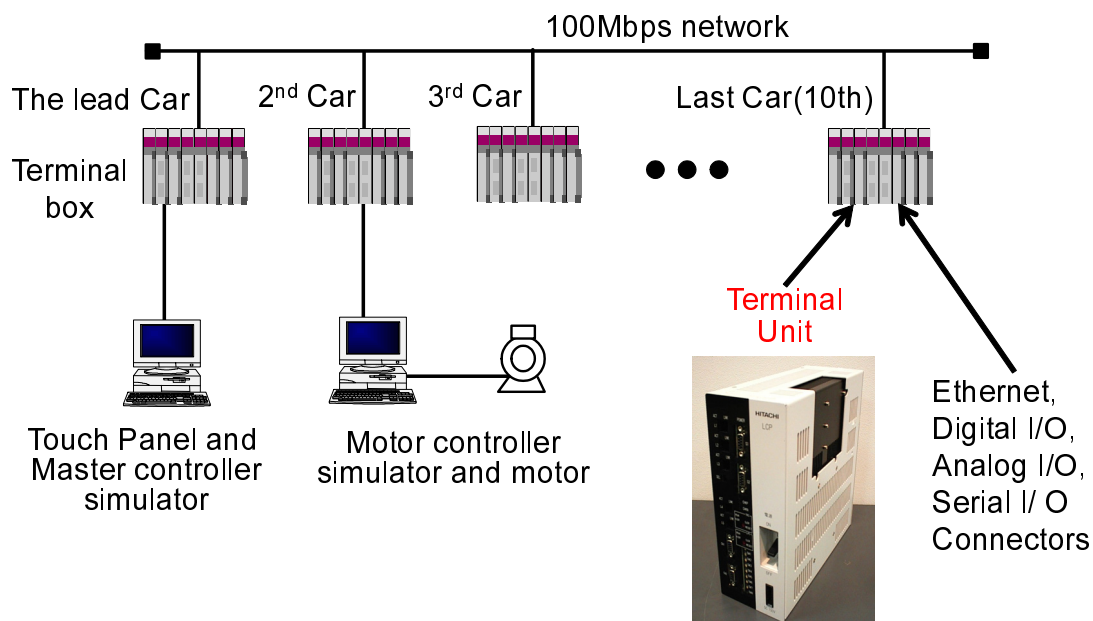


図 3.4: デモシステムの構成

### 3.4 評価

実装した端末局 (Terminal unit) の製品プロトタイプを用いて、各処理の実行に必要な最悪実行時間を計測した。図 3.4 に製品プロトタイプを活用したデモシステムの構成を示す。システム規模は首都圏の通勤電車を想定した 10 両編成の列車を想定した。各車両に端末局があり、車両間を 100Mbps のネットワークで接続している。端末局は 100Mbps のネットワークと接続するための Ethernet の I/O、デジタル信号を入出力するための I/O、アナログ信号を入出力するための I/O、シリアル通信を行うための I/O と接続されている。これら I/O への入出力を行うことで実環境をシミュレーションすることができる。各処理を行うソフトウェアプログラムは端末局の中に実装している。表 3.4 に各モジュールの最悪実行時間の実測値を示す。なお、ここでは、長時間プロトタイプを実行してモジュールの実行時間を記録することで、最悪実行時間を簡易的に計測した。周期的に処理が実行されるハードリアルタイム

表 3.4: 端末局における各処理の最悪実行時間

ステップ	機能	実行時間 (ms)
1	ワークフロー管理	1.05
2	基幹伝送データ（制御データ）受信	0.5
	基幹伝送データ（モニタデータ受信）	1.3
3	機器モジュール初期化	0.22
	機器モジュール処理（受信，異常検知）	0.182
4	機能モジュール処理	0.1
5	機器モジュール送信（データ生成，送信）	0.276
6	基幹伝送データ（制御データ）	0.28
7	基幹伝送データ（モニタデータ）	0.85
8	構成制御	0.61

システムの評価を行うため，平均実行時間ではなく最悪実行時間において制約を満たせているかどうかを確認した．より厳密な計測は，Chronos 等の最悪実行時間解析ツールを用いて実現できる [37]．

機能モジュールの処理時間は厳密には機能モジュール毎に異なるが，ここではプロトタイプで実装したある機能モジュールの実測値である 0.1ms という値を，各機能モジュールの最悪実行時間として近似的に用いた．これは，どの機能モジュールであってもその処理は，機器モジュール処理によって受信されたメモリ上の機器伝送データを参照し，重量や圧力等のデータに対する類似した単純な演算を行い，結果をメモリ上に書き込むという作業からなるため，実行時間の差は小さいと考えられるからである．

次に、プロトタイプシステムにおける各処理の実行時間の実測値を用いて、具体的な機器構成を想定した場合の各端末局での処理時間を計算することで、提案方式の性能評価を行う。周期によってタスクが起動するモジュールは異なるため、実行時間が最大となる周期でのそれを計算する。このような周期をクリティカルサイクルと呼ぶ。周期的に処理が実行されるハードリアルタイムシステムの評価を行うため、クリティカルサイクルにおいて制約を満たしているかどうかを確認した。すべての端末局の CPU スペックは同等と仮定する。このとき、端末局  $n$  におけるタスクの処理時間  $T_{total}(n)$  は式 (3.1) で表せる、

$$T_{total}(n) = T_{plt}(n) + \sum_{a \in A(n)} T_{apr}(a) + \sum_{m \in M(n)} T_{srv}(m) \quad (3.1)$$

ここで、 $T_{plt}(n)$  はプラットフォームの処理時間、 $T_{apr}(a)$  は機器  $a$  の機器モジュール（データ受信モジュールとデータ送信モジュール）の処理時間の和、 $T_{srv}(m)$  は機能モジュール  $m$  の処理時間、 $A(n)$  は端末局  $n$  に接続された機器の集合、 $M(n)$  はクリティカルサイクルで起動されるモジュールの集合である。

機能モジュールは、表 3.1, 3.2 に示すものを想定した。ここでモジュールは合計 30 個程度であるが、同じ周期に起動される機能モジュールは最大で、周期起動される 16 個とイベント起動される 1 個との和である 17 個であり、 $M(n)$  はこれらの一部分からなる集合となる。これは、イベント起動されるのは運転台画面操作における場合のみであり、同時に 2 つ以上のイベント起動は行われないためである。



機器の接続については，表 3.5 の通りとした．これは，首都圏の通勤電車を想定した 10 両編成の列車の典型的な機器接続例として，文献 [34–36] で調査したものである．マスコン（運転ハンドル）は両先頭車両にあり，VVVF（Variable Voltage Variable Frequency）装置は 3 ないし 4 両に 1 箇所，ブレーキ装置は全車両，SIV（Static Inverter）装置は編成の中央付近に隣り合わせに 2 両，ATS（Automatic Train Stop）等の保安装置は先頭車両どちらか 1 方，空調装置・戸閉装置・車内表示器・前面側面 LED 表示器は全車両，自動放送装置・列車無線は先頭車両どちらか 1 方にある．表 3.5 より，車両に接続される機器数は，最小で 5，最大で 10 である．

例えば車両番号 5 では，接続機器数が 7 台あり，式 (3.2) の計算結果に示すとおり，機能モジュールのサブルーチン処理時間を除く端末局の処理時間は 8.016ms である．

$$\begin{aligned}
 T_{total}(5) &= T_{plt}(5) + \sum_{a \in A(5)} T_{apr}(a) + \sum_{m \in M(5)} T_{srv}(m) \\
 &= (1.05 + 0.5 + 1.3 + 0.22 + 0.28 + 0.85 + 0.61) \\
 &\quad + (0.182 + 0.276) * 7 + \sum_{m \in M(5)} T_{srv}(m) \\
 &= 4.81 + 3.206 + \sum_{m \in M(5)} T_{srv}(m) \\
 &= 8.016 + \sum_{m \in M(5)} T_{srv}(m)
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

表 3.5: 機器構成 (10 両編成)

[illegible]

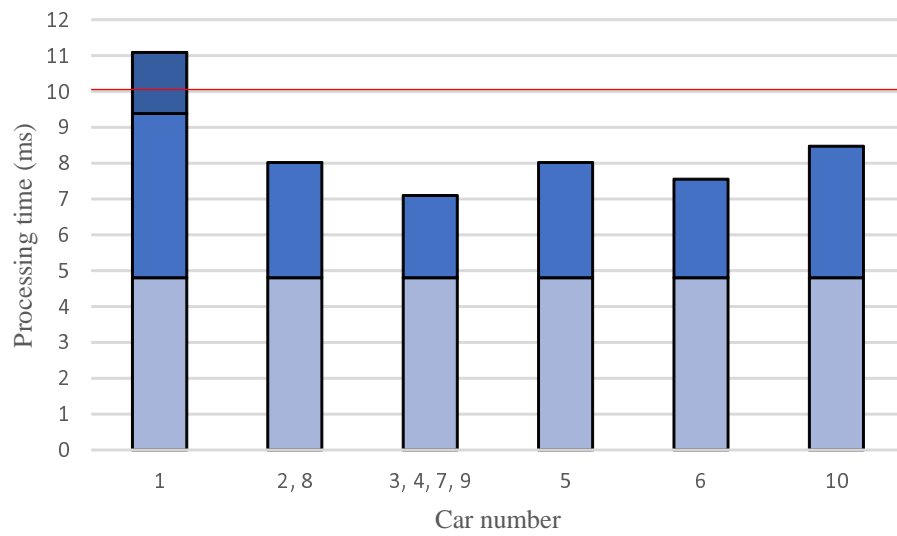


図 3.5: 車両毎の端末局処理時間．機能モジュールを先頭車両（1 号車）に割当．

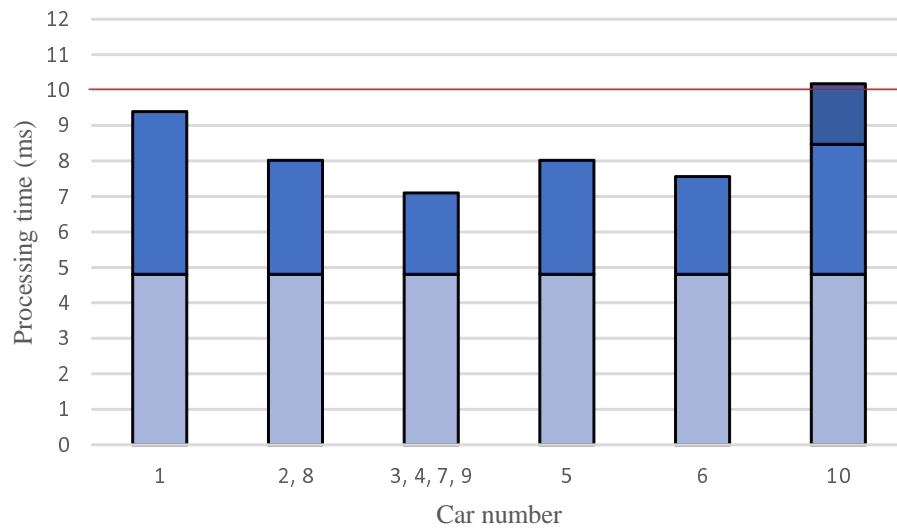


図 3.6: 車両毎の端末局処理時間．機能モジュールを先頭車両（10 号車）に割当．

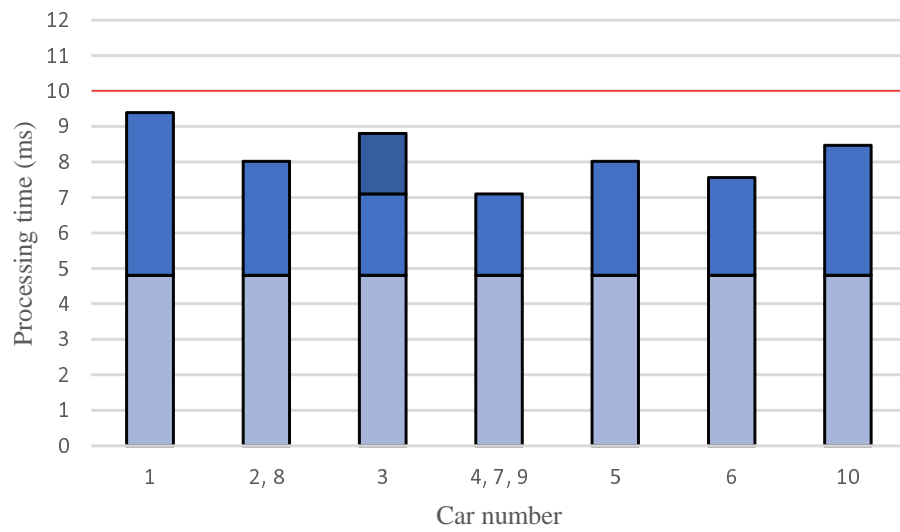


図 3.7: 車両毎の端末局処理時間．機能モジュールを 3 号車に割当．

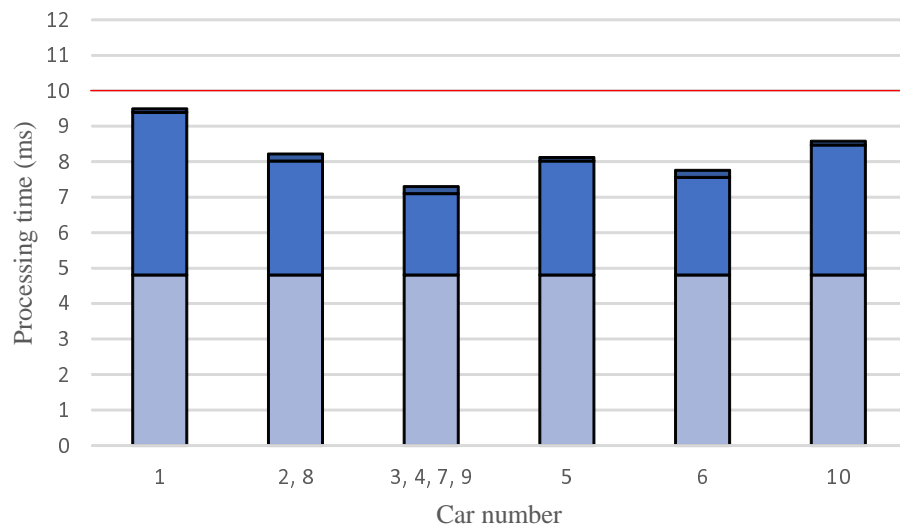


図 3.8: 車両毎の端末局処理時間．機能モジュールを全車両に均等に割当．

次に、機能モジュール最大 17 個の分散処理について考える．従来法 [26] と同様に先頭車両に集中配置した場合の結果を、進行方向の先頭車が 1 号車である場合を図 3.5 に、10 号車である場合を図 3.6 に示す．ここで、端末局の処理周期は 10ms としている．グラフは、それぞれの端末局におけるクリティカルサイクルでの処理時間を示している．積み上げ棒グラフの内訳は、下からプラットフォームの処理時間 (4.81ms)、機器モジュールの処理時間、機能モジュールの処理時間である．いずれの場合にも、先頭車両は端末局の処理周期を超えてしまい、ハードリアルタイム性を実現できない結果となっている．

これは、プラットフォームを導入したことにより、モジュール呼び出し (表 3.4 におけるステップ 1) のオーバーヘッドが 1.05ms 新たに必要となったことと、機器モジュール処理 (表 3.4 におけるステップ 3 と 5) のオーバーヘッドが 0.678ms 新たに必要となったことによるものである．なお、表 3.5 に示したように車両ごとに接続される機器数が異なるため、式 (3.1) の  $\sum T_{appr}(a)$  の値が車両ごとに異なり、その結果機能モジュールの処理時間を除く端末局の処理時間は図 3.5、図 3.6 に示したように車両ごとに異なったものとなっている．

一方、今回提案した車上アプリケーションの再構築とワークフロー管理方式により、機能モジュールの処理時間を除く端末局の処理時間が最も短い車両のひとつである 3 両目に機能モジュールを集中配置した場合の結果を図 3.7 に示す．この結果からすべての車両において端末局の処理周期を超えていないことが分かる．集中配置の場合は全ての機能モジュールが 1 車両のみで実行されるため、運用上機能異常が発生した場合に車両を特定してログ解析が容易に行えるというメリットがある．

更に、機能モジュールを平均的に全車両に分散した場合の試算結果を図 3.8 に示す．この結果からも、すべての車両において端末局の処理周期を超えることはなく、ハードリアルタイム性を実現できていることが分かる．分散配置の場合は新たな機器・機能の追加拡張やデータ処理量の増加に対して集中配置より端末局の処理周期の余裕度が高いというメリット

がある．なお，分散配置の場合は，複数の機能モジュールの処理時間に差がある場合には各車両の処理余裕時間と各機能モジュールの処理時間を基に処理時間の長い機能モジュールから順番に配置していく等のヒューリスティック手法 [38] を用いて配置することも可能である．

更に，本解析により協調制御の導入が実現できることが分かった．協調制御を考慮しない場合，上記分散配置の評価で処理時間の余裕が最小で 0.51ms，最大で 2.7ms 確保できる．ここで協調制御を導入した場合，機能モジュールが追加されることになるが，追加されるモジュールの処理時間は処理時間の余裕に比べて十分に少ない．具体例としては，電気ブレーキと空気ブレーキの協調制御の場合，追加される機能モジュールは，電気ブレーキ力を制御する VVVF 装置が接続された 2，5，8 号車の端末局に対して各々 1 つのみである．

最後に機器の拡張性について述べる．非常に多くの機器が車両に接続されている極端な状況として，全車両に 10 台の機器が接続されている場合を想定する．この場合，各車両で機能モジュール実行に利用できる時間は，1 サイクルあたり  $0.61\text{ms} (= 10 - (4.81 + (0.182 + 0.276) * 10))$  となる．このとき，車両が少なく端末局の処理時間の余裕が小さい場合でも，3 両以上の編成であれば，17 個の機能モジュールをサイクル内に実行することができる (図 3.9)．機器に表 3.5 にないものが含まれ，制御のために新たな機能モジュールが一つ追加された場合でも，サイクル内で全 18 個の機能モジュールを実行することができる．4 両編成の場合は更に機器に関する拡張性が大きくなり，最大で 17 個に 7 個追加した 24 個の機能モジュールを実行することが可能である．このように，機能モジュールの分散実行によって，機器の追加に対する拡張性も得られることが分かる．

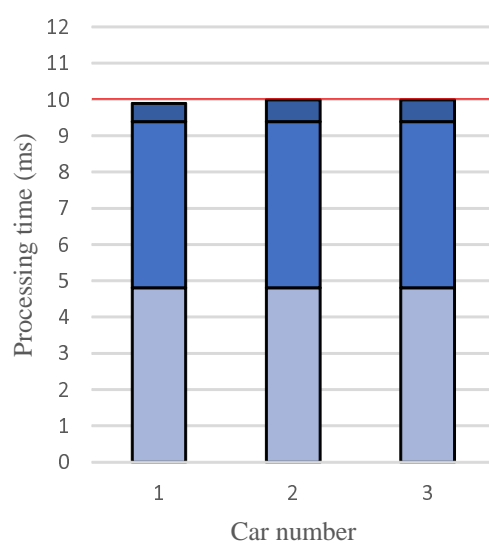


図 3.9: 3 両編成で各車両が 10 台の機器を有する場合の処理時間 . 1 両目に 6 個 , 2, 3 両目に 7 個の機能モジュールを配置 .

### 3.5 まとめ

本研究では、機器や機能の追加や協調制御の導入といった拡張を可能にするための、鉄道車上監視制御システムの分散処理化について議論した。以下に本研究の貢献を簡単にまとめる。

- 機能拡張性の向上を主目的とし、鉄道車両制御用として初めて、ソフトウェアを全車両で分散実行可能なシステムを開発した。
- 実績のある既存システムへの変更を最小限に留めるという制約下で、実際のソフトウェアシステムからモジュールを分離できることを示した。
- 開発したプロトタイプシステムから得られた実測値を用いて、分散化の目的である機能拡張性の向上が実現できることを示した。

提案した手法では、まず、既存の鉄道車上アプリケーションの機能構造を明らかにして、アプリケーションソフトウェアをモジュール分離する。次に、分離したモジュール毎に起動タイミングや起動端末局(号車)を指定できるワークフロー管理方式を用い、車上制御ネットワークの全ての端末局でのモジュールの分散実行を実現する。このようにして、鉄道車両制御用として初めて、アプリケーションのモジュールレベルでの分散実行を実現した。本研究では、これらの手順について、実システムへの適用結果を基に説明した。

更に、製品プロトタイプにおける各種処理時間実測値をもとに、典型的な機器接続例において処理時間を評価した。その結果、従来の集中処理方式では処理周期時間内に処理時間が収まらない場合に、提案した負荷分散方式によりリアルタイム性を満たした処理が可能になること、更に、追加する処理に割り当てられる時間が、車両によっては処理周期の4分の1程度確保できることが分かった。また、機器が非常に多い場合でも、負荷分散により必要



な処理を周期時間内に収められることを示した．これらの結果から，提案手法によりソフトウェアの機能拡張性を向上できることが結論できる．

### 3.5.1 他の分野への応用可能性に関する考察

提案した手法は，様々な機器がネットワーク接続され，情報を送受信しながら協調して動作し，かつ，リアルタイム性が求められる組込系の SCADA システムに同様に適用が可能であると考えられる．

同様の移動体の分野に適用が期待できる SCADA システムとしては，航空機内や船舶内などの移動体内の SCADA システムが挙げられる．航空機や船舶においても鉄道車両と同様に一度導入されると，長期間使われ続けることが想定される．そのため，システムのフルリプレイスを行う前に装置のみを追加，交換したりそれに伴い機能が追加拡張できることが求められる．特に，特定用途向けの航空機や船舶の場合，監視制御の周期や機器数が鉄道車両と同程度であり，提案した手法がそのまま活用できると期待できる．

他分野に適用が期待できる SCADA システムとしては，電力分野の発電所や水道分野のダムの SCADA システムが挙げられる．これらの SCADA システムに求められるリアルタイム性に関する制約は，鉄道車上監視制御システムに求められるものと比べて緩いため，分散処理を行う必然性はないと考えるが，システムのフルリプレイスを行う前に装置のみを追加，交換したりそれに伴い機能が追加拡張できることが求められると想定され，提案した方式によるワークフロー管理による実行管理というフレームワークを活用することは可能である．

## 第4章 電力配電監視制御のための監視箇所選 定方式の提案

### 4.1 はじめに

電力系統は発電所，発電所から各地域の変電所に電力を供給する送電系統，変電所から需要家に電力を供給する配電系統から構成される．配電システムは配電網と電力配電監視制御システムから構成される System of Systems である．近年，太陽光発電等の再生可能エネルギーや電気自動車（EV）の蓄電池等の蓄放電が可能な機器の導入が進行しており，それらが直接配電系統に接続されることで配電系統の安定化が課題となっている [39]．実際，日本政府は，PV 電力供給の目標収容力を年 2030 年までに 5300 万 kW に設定している．また，自然災害の大規模化，多発化の実態があり，被害の拡大阻止，早期復旧を実現するディザスタリカバリの必要性が高まっている [40,41]．更に，近年導入が始まっているデマンドレスポンスのような電力需要家の需給を調整するサービスの効率的運用が求められている [42]．これらの課題に対処するためには，正確な配電系統の状況把握が必要となる．本研究は，近い将来に大量の太陽光発電 (PV) が電力系統に接続されたと想定したときに対応するものである．

一方，配電系統の監視制御を行う電力配電監視制御システムは，国内・海外において IT 基盤への投資が遅れており，上記の課題に対応するために電力配電監視制御システムの高度化，具体的には，電力配電監視制御システムにおけるフィールドネットワークの高速化が求

められている．フィールドネットワークとは，電柱の上に設置されたセンサ端末と変電所とを接続するネットワークである．そこでまず本研究では，高度化に必要な通信容量の試算を行い，その結果を示す．次に将来の電力配電監視制御システムの設計と運用についての問題に焦点を置く．

PV 出力は気象状況次第で大いに変動する．したがって，電力系統に PV が大規模接続されたときにも適切な電圧を維持するために，次世代電力配電監視制御システムは，既存の電力配電監視制御システムよりもより詳細に電力供給の状態を観測して制御する能力が必要である [43,44]．現在日本で展開されている従来のフィールドネットワークの速度がわずか数百 bps 程度であるので，多くの主要な電力会社は将来の要求に対応するために通信容量の増強を行う計画を立てようとしている．

大規模な通信ネットワークへの投資を計画するとき，通信容量の評価は必須となる [45]．本研究の試算結果により，将来の電力系統で電力品質を維持するためには，フィールドネットワークには現在より大幅な高速化が必要であることが分かった．

SCADA システムが全く新しい高速フィールドネットワーク上で構築することができるのであれば，それは理想的であるが，実際には実現は困難である．これは，フィールドネットワークが非常に広く（電飾会社 1 社あたり約 1 万平方キロメートルにわたる），これら全体が短期間で高性能のネットワークに置き換えられることは現実的ではないからである．その結果，増強される間，既存の遅いネットワークを使い続けなければならない地域が多く生じることが予想され，また，設備投資額の制約の都合上，増強が終わった後でさえ，そのような地域が残ることが考えられる．

通信容量が制限されるとき，PV の大量導入時に求められる短い収集時間以内にすべてのセンサから情報を集めることは不可能である．そのような状況に対処するために，本研究では，適切な監視箇所を選択する方式を提案する．この方式では，異常な電圧が起こる危険性

が最も高い監視箇所の監視状態や計測値を，制約時間内でできるだけ多く収集することを目標とする．提案方式はオプションとルールの2つから構成され，配電設備の配置状況やPVの普及率等を基に適応的に監視箇所を選択する．これらのオプションとルールは，これまでの経験に由来するヒューリスティックな知識に基づくものである．

次に，この方式を実装したプロトタイプツールを用いてシミュレーションを行う．シミュレーションは，配電線の構成・フィールドネットワークの構成と制約条件（収集時間等）を入力することで，監視箇所のリストを出力する．最後に，シミュレーション結果を基に提案方式が一般的に用いられる手法よりも，重要な監視箇所の数を多くカバーできることを示す．

本章の構成は以下の通りである．4.2節では現状の電力配電監視制御システムについて説明する．4.3節では将来必要となる電力配電監視制御システムの通信容量を試算する．4.4節では高速なフィールドネットワークを導入するときの問題点について説明する．4.5節では監視箇所を選定する方式について説明する．4.6節では開発したプロトタイプツールから得られた実行結果を基に，提案手法の有効性について評価を行う．4.7節では投資コストとの関係についての考察を説明する．最後に4.8節で本章のまとめについて記す．

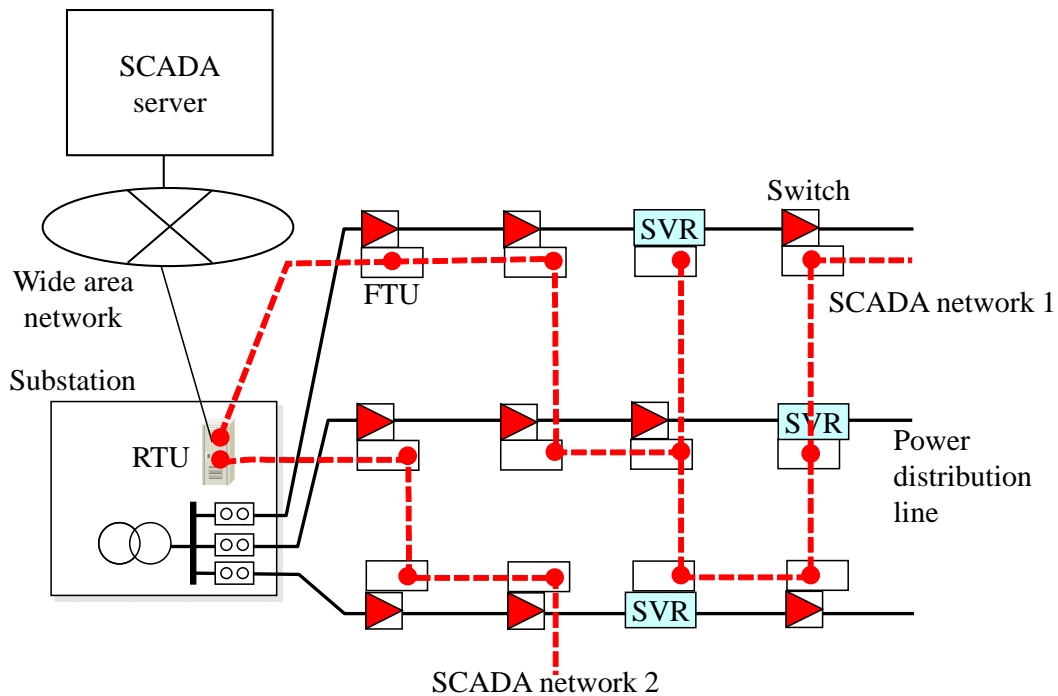


図 4.1: 電力配電監視制御システムの構成

## 4.2 現状の電力配電監視制御システム

一般的に配電の運用システムは、設備管理やメンテナンス業務管理等を行うオフラインシステムと、オンラインシステムとから構成されている。オンラインシステムは日本では配電自動化システムと呼ばれており、系統の異常検知・回復、系統状態の画面表示・監視・開閉器制御、負荷予測等各種シミュレーション、業務手順作成等の機能群で構成される。

これらの機能の中で監視や開閉器制御を担うのが電力配電監視制御システムである。電力配電監視制御システムの構成を図 4.1 に示す。電力配電監視制御システムは SCADA サーバと、変電所にある中継装置である配電 RTU (Remote Terminal Unit)、電柱上の配電設備に接続された FTU (Feeder Terminal Unit) とそれらを接続するフィールドネットワークから構成される。フィールドネットワークは複数の独立したネットワークからなり、RTU はそれ

それぞれのネットワーク上でポーリング方式により FTU と通信する [46]。以降、個々の独立したネットワークを SCADA ネットワークとよぶ。RTU1 台に接続される SCADA ネットワークの数は最大 10 程度であり、SCADA ネットワークあたりの FTU は最大 30 個程度である。SCADA ネットワークのトポロジは、ほぼ例外なく、直線状、もしくは、根に RTU が対応するような木である。配電線ネットワークと SCADA ネットワークのトポロジは直接対応していないことが多い。

配電システムの監視では、電柱上に設置されたセンサが計測する電流や電圧、また、開閉器のオン/オフ状態を、これらの機器に接続された FTU と通信することで収集する。現状の電力配電監視制御システムでは、開閉器の状態情報については 10 分に数回程度、センサの計測値については 1 時間に数回程度の周期で情報収集を行っている。

RTU はポーリング方式により、順番に各 FTU からセンサの状態や計測値を収集し、サーバに転送する。開閉器の状態についても、同様に順番に開閉器にアクセスして状態を収集してサーバに転送する。一方、開閉器をオン/オフする制御指令はサーバから RTU に送信され、RTU はポーリングを中止した後に該当 FTU に転送する。このような設計となっているのは、制御指令が出されるのは障害等の非常時のみであり、必要な通信量も小さいことによる。

サーバと変電所にある RTU の間の通信ネットワークは順次大容量化の投資が行われており、光ファイバによる広域 IP 網が構築されつつある。一方で RTU と FTU 間を結ぶ SCADA ネットワークの通信容量は非常に小さい。文献 [47] および [48] から、国内における SCADA ネットワークの通信媒体（通信メディア）とその通信容量および接続される FTU の割合を整理した結果を表 4.1 に示す。ここで、A, B, C, D, E は電力会社を表している。

光ファイバのような大容量の通信を全エリアで導入している電力会社は現状ないことが分かる。また、メタル線による通信容量は現状大きくて 1200bps 程度である。配電線による通信 (PLC) の容量は現状大きくて 200bps 程度である。

表 4.1: 現状の通信容量

	A	B	C	D	E
Optical	–	–	–	–	10Mbps
fiber	–	–	–	–	(2%)
Metal	600bps	–	1200bps	600bps	200bps
	(75%)	–	(95%)	(35%)	(80%)
PLC	50bps	200bps	50bps	60bps	60bps
	(25%)	(100%)	(5%)	(65%)	(18%)

## 4.3 将来の SCADA ネットワークの通信容量の試算

### 4.3.1 想定するシステムの諸元

#### 監視制御対象となる機器

現在の電力配電監視制御システムで遠隔制御の対象となるものは、開閉器のオン/オフのみであり、電圧を制御している既存機器、具体的には、自動電圧調整器 (SVR: Step Voltage Regulator) は機器内のセンサによる計測情報を用いて機器単独で制御を行っている。将来的には、SVR 以外に、静止形無効電力補償装置 (SVC: Static Var Compensator) と蓄電池や太陽光発電システムのパワーコンディショニングシステム (PCS: Power Conditioning System) が、電圧制御機器として導入されるとともに、これらの機器についても遠隔制御、および、状態の監視が求められる [43,45,49]。

#### 情報収集周期と通信データサイズ

将来の配電システムの監視において、最も考慮すべき点は太陽光発電等の再生可能エネルギーの出力変動が早いことである。天候の変化による太陽光発電の出力は分単位で大幅に変動することから、電圧・電流変化の動向を把握するためには最大でも数分周期での情報収集が要求される [50]。以降、要求される情報収集周期（監視周期）を  $T$ （秒）とする。

FTU が接続される機器としては開閉器と SVR, SVC, 蓄電池の PCS, 太陽光発電の PCS が挙げられる。それぞれの機器に対して、監視に必要なデータ項目、および、データ量を検討した。表 4.2 にこの結果を示す。上りは各機器やセンサが送信するデータ、下りは受信するデータを表す。電圧、電流それぞれの情報については 2 バイトで表現するものとした。現状では、計測時刻の情報が含まれていなかったり、収集する電圧計測値が 3 相交流電線 3 線のうちの 1 線のみの場合もあるが、将来の電力配電監視制御システムでは、より詳細な状



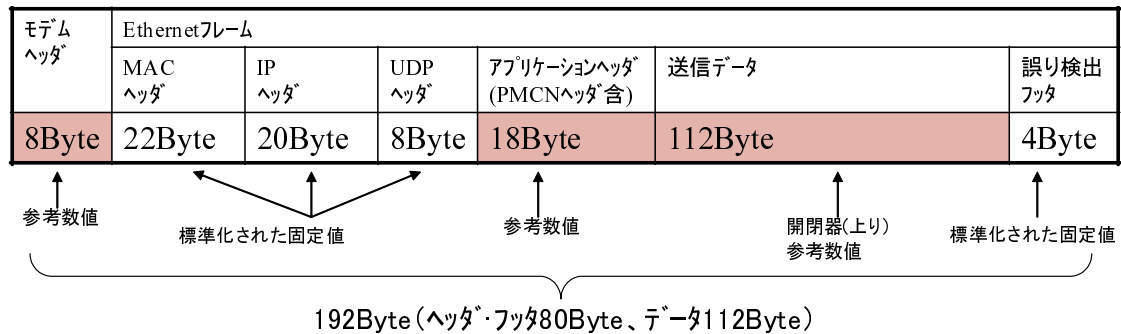


図 4.2: 通信プロトコルフォーマットの仮定

況把握のため、3 相交流 3 線の電圧・電流値を、時刻情報とともに計測、収集することを想定した。検討の結果、開閉器の監視に係るデータサイズが最も大きいことが分かった。これは、開閉器が OFF の場合、その両側 (1 次側、2 次側) で異なる経路から電力が供給するため、両側の監視が必要となるためである。安全側に見積もりを行うため、以降、各 FTU は開閉器に接続されているものと想定する。

一方、機器の制御のための通信については、現状のシステム同様、監視のための情報収集を中断して必要な場合に即時に行うこと、また、制御が必要となるのは稀であることから、通信容量の試算においては無視することが可能である。

### 通信方式

RTU と FTU の間の通信方式は現状と同様ポーリング方式を仮定する。また、SCADA ネットワークの最長の通信距離は数十 km に及ぶ場合があることから、中継器を介してマルチホップ通信を行うものとする。通信プロトコルは UDP/IP プロトコル、PMCN (Protocol for Mission Critical industrial Network use) プロトコルを採用することとする。通信プロトコルのフォーマットは図 4.2 の通りであり、このとき、物理層の通信ヘッダを含めてメッセージ

表 4.2: 機器毎のデータサイズ

機器 種別	データ サイズ	データ 項目
開閉器(上り)	112Byte	電流(3相)(1次/2次側), 力率(3相), 電圧(3相)(1次/2次側), 有効電力(3相), 無効電力(3相), 零相電圧, 開閉器状態, 事故検出情報, モード情報, 時刻, 端末識別子, 予備
開閉器(下り)	10Byte	指令情報, 端末識別子, 予備
SVR(上り)	98Byte	電流(3相), 力率(3相), 電圧(3相), 有効電力(3相), 無効電力(3相), 零相電圧, タップ状態, モード情報, 時刻, 端末識別子, 予備
SVR(下り)	10Byte	指令情報, 整定情報, 端末識別子, 予備
SVC(上り)	96Byte	電流(3相), 力率(3相), 電圧(3相), 有効電力(3相), 無効電力(3相), 零相電圧, モード情報, 時刻, 端末識別子, 予備
SVC(下り)	10Byte	指令情報, 整定情報, 端末識別子, 予備
PCS(上り)	24Byte	電流, 電圧, 電力量, モード情報, 時刻, 端末識別子, 予備
PCS(下り)	10Byte	指令情報, 整定情報, 端末識別子, 予備

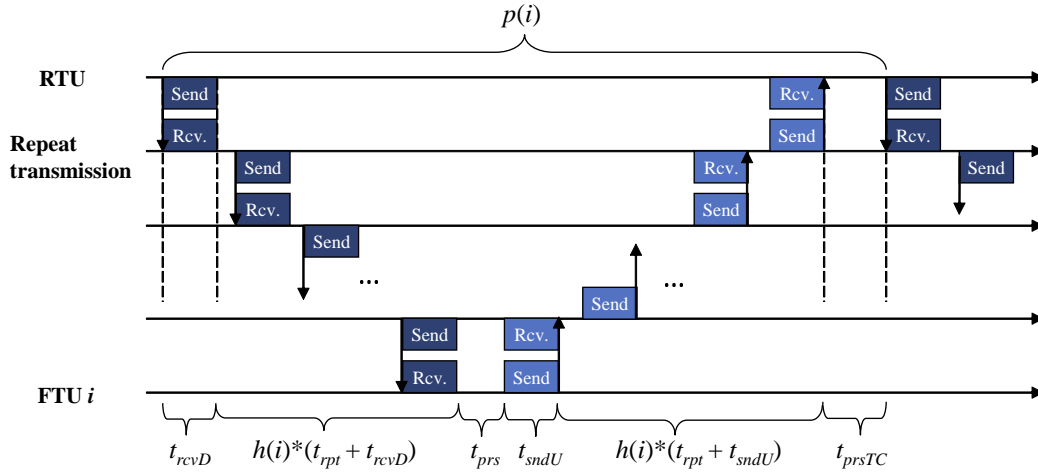


図 4.3: 通信遅延の内訳

データのヘッダ及びフッタサイズの合計は 80 バイトとした。

#### 4.3.2 通信時間の分析

上記試算条件をもとに通信容量を試算した。ポーリングの対象となる FTU の総数を  $n$  , それらの ID を  $1, 2, \dots, n$  とする。通信容量を  $x(\text{kbps})$  , 収集周期  $T(\text{秒})$  をすると, RTU が SCADA ネットワークに接続された  $n$  台の FTU にポーリングする時間が  $T$  秒以内に収まることは, 以下の不等式によって表せる。

$$\sum_{i=1}^n p(i) \leq T \quad (4.1)$$

ここで,  $p(i)$  は FTU  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) とポーリングするのに必要な時間 (秒) である。

$p(i)$  の内訳は図 4.3 の通りであり, 以下の式で求められる。

$$\begin{aligned} p(i) = & t_{rcvD} + h(i) * (t_{rpt} + t_{rcvD}) + t_{prs} \\ & + t_{sndU} + h(i) * (t_{rpt} + t_{sndU}) + t_{prsTC} \end{aligned} \quad (4.2)$$

ここで

- $t_{rcvD} = \frac{(80+10)*8}{x*1000}$ : RTU からのデータの受信時間 (秒) .
- $t_{rpt}$ : FTU のデータ受信完了から中継送信開始までの時間 (秒)
- $t_{prs}$ : FTU のデータ受信完了からデータ送信開始までの時間 (秒)
- $t_{sndU} = \frac{(80+112)*8}{x*1000}$ : FTU からのデータ送信時間 (秒) .
- $t_{prsTC}$ : RTU のデータ受信完了からデータ送信開始までの時間 (秒)
- $h(i)$ : RTU と FTU  $i$  との間でマルチホップ通信するときの中継段数 .

以降, 実際の機器の性能から, 見積もりでは  $t_{rpt} = t_{prsTC} = \frac{6}{1000}$ ,  $t_{prs} = \frac{50}{1000}$  と仮定する .

このとき,  $p(i)$  を整理すると以下の通りとなる .

$$p(i) = \frac{1}{1000x}(12h(i)(x+188) + 56x + 2256) \quad (4.3)$$

#### 4.3.3 試算結果と考察

現実的な配電システムを想定し, 試算を行った . まず, 想定されるシステム規模を検討した . 変電所から出ている高圧電線 (フィーダ) の長さが最長で 40km 程度と想定し, 変電所にある RTU とフィーダ上にある FTU の間の SCADA ネットワーク上の通信距離も同じく 40km とした . SCADA ネットワークあたりの FTU 数は現状では最大 30 個程度であるが, 将来の電力配電監視制御システムではこの 3 倍程度と仮定し,  $n = 100$  とした . 情報収集周期  $T$  については, 太陽光発電の変動が分単位であることから  $T = 60, 180, 300$ (秒) の 3 通りについて検討した .

マルチホップ通信で中継が必要な通信距離を  $y$ (km) で表す . つまり, 通信距離が  $y$ (km) を超えると, 中継機器による中継が必要となる . 中継機器は, 変電所から  $y$ (km) 毎に設置され

るものとする．このとき，FTU  $i$  の中継段数  $h(i)$  は，0 以上， $\lceil \frac{40}{y} \rceil$  未満となる．式 (4.1) の左辺である  $n$  台の FTU 全部へのポーリング時間は， $h(i)$  が FTU 全体でどう分布しているかに大きく依存する．FTU は電力需要家が多いほど多く設置され，また，実際の配電系統では変電所周辺に需要家が集中しているため，中継段数  $h(i)$  が小さい FTU ほど数が多くなる．我々の知見では，ほとんどの配電系統で，半数近くの FTU が変電所から数 km 以内に設置されていることが分かっている．ただし，郊外の開発に伴い変電所から離れた地域で需要家が増える可能性も存在する．そこで保守的な見積もりとして， $h(i) = k$  であるような FTU の数を  $N_k$  と表記して， $N_k$  を以下のように仮定した．

$$N_k = \begin{cases} \lfloor \frac{100}{40} * y \rfloor & (k = 0) \\ \lfloor \frac{100}{40} * (k + 1) * y \rfloor - \sum_{i=0}^{k-1} N_i & (1 \leq k \leq \lceil \frac{40}{y} \rceil - 2) \\ 100 - \sum_{i=0}^{k-1} N_i & (k = \lceil \frac{40}{y} \rceil - 1) \end{cases} \quad (4.4)$$

たとえば， $y = 10$  であれば， $N_0 = 25, N_1 = 25, N_2 = 25, N_3 = 25$  となる． $y = 3$  であれば， $N_0 = 7, N_1 = 8, N_2 = 7, N_3 = 8, \dots, N_{12} = 7, N_{13} = 3$  となる．これは，FTU から変電所の RTU までの距離が 0km から 40km の範囲でほぼ均一に分布している状況に対応しており，十分に安全側に立った仮定である．

以上にしたがって変数値を定めて，式 4.1 を解いた結果を表 4.3 に示す．中継が必要となる通信距離は採用する通信メディアや設置条件によって異なるため，複数の通信メディアを想定し， $y = 10, 5, 3(\text{km})$  の 3 種類の場合について計算結果を示している．試算結果より，現状のメタル通信線，PLC の通信線よりも高速なフィールドネットワークが必要であることが明らかとなった．また，スマートグリッドの研究では光ファイバが導入されることが前提で検討が行われていることがよくあるが，本研究で想定した要求の達成にはそれほどの高速性は必要ではなく，敷設作業を含む設置コストが安い他の通信メディアを採用することができ

表 4.3: 試算結果

(a) 収集時間  $T = 60$ (秒)

中継距離 $y$	10km	5km	3km
必要通信容量 $x$	$\geq 10.7\text{kbps}$	$\geq 20.3\text{kbps}$	$\geq 34.6\text{kbps}$

(b) 収集時間  $T = 180$ (秒)

中継距離 $y$	10km	5km	3km
必要通信容量 $x$	$\geq 3.3\text{kbps}$	$\geq 6.0\text{kbps}$	$\geq 9.7\text{kbps}$

(c) 収集時間  $T = 300$ (秒)

中継距離 $y$	10km	5km	3km
必要通信容量 $x$	$\geq 1.9\text{kbps}$	$\geq 3.5\text{kbps}$	$\geq 5.7\text{kbps}$

ることが明らかになった．このような通信メディアとしては，たとえば，920MHz 帯無線などが挙げられる．

## 4.4 フィールドネットワーク導入における問題点

4.3 節で述べた試算結果より，次世代電力配電監視制御システムの導入のためには通信速度の向上が必要とされることが分かる．しかし，新しい高速ネットワークを迅速に，かつ全域に導入することは困難である．以下，新しい高速ネットワークを導入するうえでの問題点について2つ述べる．

1つ目の問題点は，ネットワークは非常に広範囲にわたっているため，ネットワークの増強が一度に行われにくいということである．たとえば，ネットワークが約1万平方キロメートルにわたっているならば，全てのネットワークを更新するには10～20年程度必要である．その結果，多くの地域では既存の，遅いネットワークが使われ続けなければならない．

2つ目の問題点は，常に投資への制約があることである．これは，すべての増強が終わった後でさえ，既存の遅いネットワークのみが提供されている地域が残っていることを意味する．たとえば，光ファイバー線の敷設には，工事のための人件費を含めて1キロメートルにつきおよそ100万円かかる．従って光ファイバーの新しい設置は，人口密度の高い地域には起こりえるが，農村地帯では現実的ではない [51–53]．

これらの問題点より，将来のSCADAネットワークの全体像としては以下のようなことが考えられる．特に市街化地域で早いネットワークが導入されるが，その他の地域では既存の遅いネットワークを使い続ける．そのようなフィールドネットワークを使用しつつ電力の品質と信頼性を維持するために，限られた速度のネットワークをできるだけ有意義に使用することが必要である．4.5 節では，電圧監視に焦点を絞ってこの問題へのアプローチを提案する．

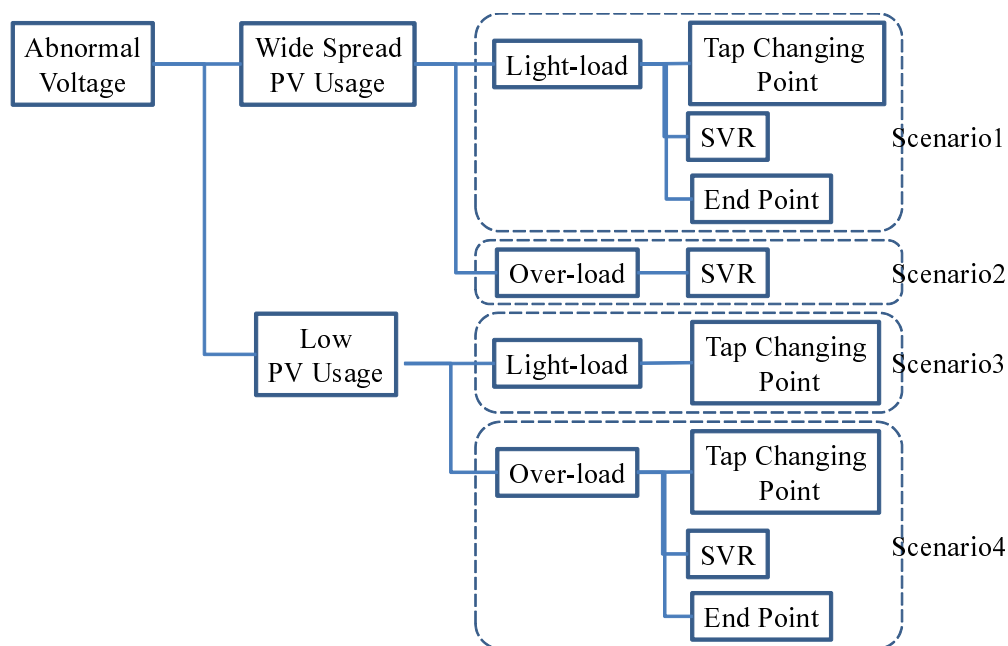


図 4.4: 電圧逸脱のシナリオ分析結果

## 4.5 提案アプローチ

この節では、通信容量の制約があるフィールドネットワークにおける電圧監視についてのアプローチを提案する．具体的には、電圧推定の正確さを増大させるために重要な監視箇所を選ぶ方法を考案する．

### 4.5.1 監視箇所の選定

図 4.4 で示すように、まず、電圧が許容範囲から逸脱する原因となる主要なシナリオを明らかにした．電圧逸脱の発生可能性が出てくる条件とその地点に関して MECE(Mutually Exclusive and Collectively Exhaustive) で分析を行っている．図に示すとおり、電圧逸脱の発生可能性が出てくる条件は 4 つのシナリオがあり、電圧逸脱の発生可能性があり計測してお



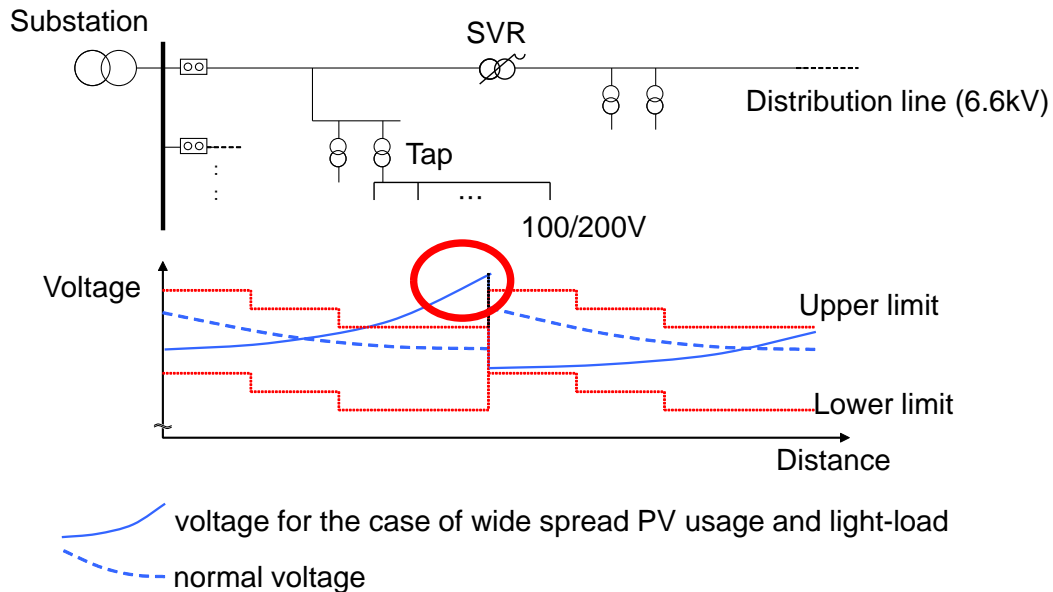


図 4.5: シナリオ 1 の SVR で電圧上限逸脱が起きる例

くべき地点は各々のシナリオで 1～3 種類（柱上変圧器タップ切換点と SVR と配電線末端）あることが分かる。

たとえば、シナリオ 1 は、PV の普及が広まっており、電気の需要が低い状況を表している。電圧の許容範囲は低圧換算で 101 プラスマイナス 6V であり、このシナリオでは、電圧の許容範囲の上限逸脱が起こることがありえる。図 4.5 にシナリオ 1 において電圧逸脱が起きる例を示す。縦軸は電圧値であり、横軸は変電所からの距離を示している。系統を安定して運用するための電圧許容範囲が図中の Upper limit と Lower limit の間であり、電圧がこの範囲内に常時収まっていることを確認する必要がある。点線で示した電圧は理想的に制御できている電圧の例である。実線で示した電圧がシナリオ 1 における電圧である。図 4.5 に示す通り、PV が大量に普及しており需要が少ないときには電力が余り、そのため配電線の電圧は末端に近づくほど上昇する。SVR で電圧を調整しているがこのときに上限を逸脱してい

る．シナリオ 2 とシナリオ 3 も電圧の上限逸脱が起こり得る．シナリオ 4 は下限の逸脱が起こり得る．各々のシナリオでは 1～3 種類の箇所において電圧逸脱の発生可能性があり，優先して監視する必要がある．それらは柱上変圧器タップ切換点と SVR と配電線末端である．柱上変圧器タップ切換点とは，柱上変圧器のタップ値が異なる地点に最も近い開閉器もしくはセンサのことを指す．

提案する選択方式は，以下の点を考慮して設計した．

- (1) 電圧監視よりも重要な役割を持つ，遠隔監視制御できる開閉器を監視箇所として選択する必要がある．
- (2) 簡単に入手できる情報のみを使った単純な基準に基づく優先度設定により，監視箇所の候補を決定する必要がある．

特に (2) により提案方式を自動化することができるようになる．

提案する選択方式はオプションとルールの 2 つから構成される．各々のオプションは，選択すべき監視箇所の集合を定義している．定義した 5 つのオプションは以下のようになる．

オプション 1: 区間開閉器を選択

オプション 2: 事前に設定された末端を選択

オプション 3: 柱上変圧器のタップ切換点近傍の末端を選択

オプション 4: 配電線各分岐の末端を選択

オプション 5: その他の末端を選択

ルールは，オプションの優先度付けとオプションによって選択される複数の監視箇所候補の優先度付けに使われる．以下，3 つのルールと 1 つの補助ルールを定義する．ルールは，番号の若い順に順番に適用される．

ルール 1: 優先度をオプションの番号順に割り当てる．最も高い優先度はオプション 1 に割り当てられる．最も低い優先度はオプション 5 に割り当てられる．

ルール 2: フィーダ分岐が多い (20 個以上の) 場合はオプション 4 に 2 番目に高い優先度を割り当てる．

ルール 3: P V 普及率が高い (導入率 30% 以上の) 場合はオプション 3 に 2 番目に高い優先度を割り当てる．

優先度に応じオプションは順番に選ばれ，監視箇所が決定される．予め設定された収集時間内に情報収集が行える場合は，次の優先度のオプションを選択する．1 つのオプションで特定されたすべての監視箇所が選択できないときは，以下の補助ルールを適用する．

ルール 4: フィーダ長が長い (20km 以上の) 場合は，変電所から 1 番遠いセンサから順番に選択していき，そうでない場合は，変電所から近いものから選択していく．

たとえば，オプション 1 によって示されるすべての点選ばれたが，オプション 2 で特定された点の一部しか選ぶことができなかった場合，オプション 2 にルール 4 が適用される．

なお，ルールで使われている特定の数値 (30% や 20km) は，これまでの経験において蓄えられたノウハウに基づくヒューリスティックである．

#### 4.5.2 シミュレータの開発

提案方式をシミュレーションできるプロトタイプを開発した．開発言語は C++，コード量は GUI 含めて 12kstep 程度である．シミュレータの入力は電力線の構成 (開閉器や SVR を含む) と通信線の構成 (センサ端末も含む)，通信メディア別環境制約テーブル (通信メディアの仕様)，共通環境制約テーブル (収集時間制約などの通信メディアによらない仕様) で

ある．出力は選択された機器のリスト (監視箇所) である．開発したシミュレータの画面例を図 4.6 に示す．描画領域で電力線の構成と通信線の構成を記述する．プルダウンメニューから通信メディア別環境制約テーブル，共通環境制約テーブルの値を入力する．通信メディア別環境制約テーブルの入力画面例を図 4.7 に，共通環境制約テーブルの入力画面例を図 4.8 に示す．図 4.6 の左上の実行ボタンを押下することで，選択された機器 (監視箇所) が描画領域に強調表示される．

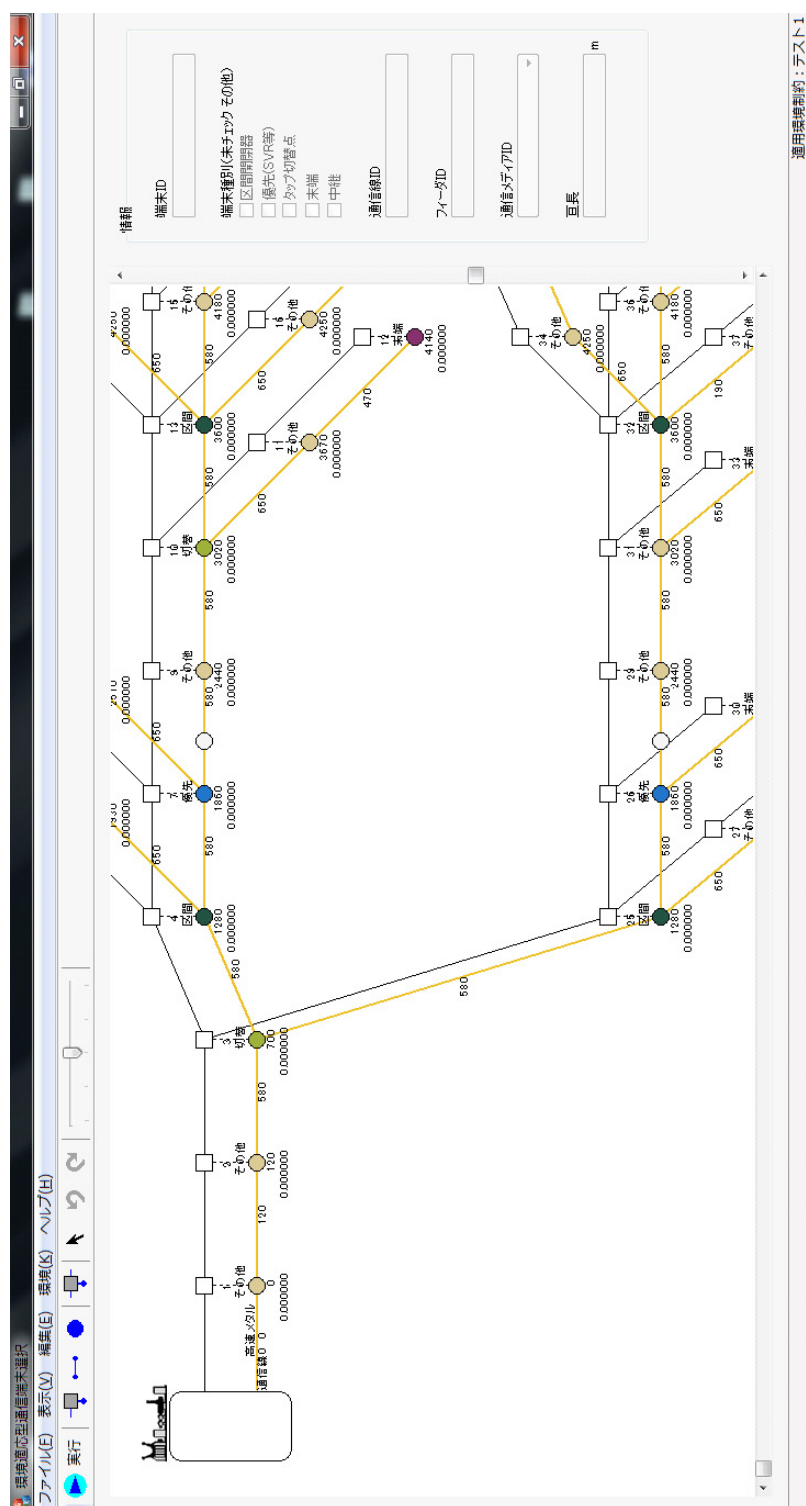


図 4.6: シミュレータ画面例

通信メディア別環境制約

通信線識別名	高速メタル
通信容量(bps)	10000
ヘッダ・フッタサイズ(Byte)	80
中継遅延(μs)	6000
送信前遅延(μs)	0
通信線表示色	<span style="display: inline-block; width: 20px; height: 15px; background-color: yellow; border: 1px solid black;"></span> 色選択

登録 削除 キャンセル

図 4.7: 通信メディア別環境制約テーブル入力画面例

共通環境制約

条件識別名	テスト1
監視子局処理遅延(ms)	200
監視制御親局処理遅延(ms)	100
通信メディア切替処理遅延(μs)	500
通信データ容量(上り)(Byte)	128
通信データ容量(下り)(Byte)	10
通信タイムアウト時間(s)	1
リトライ回数	0
収集時間制約(s)	60
フィード長閾値(km)	20
分岐数閾値	20
PV普及率(%)	30

登録 削除 キャンセル

図 4.8: 共通環境制約テーブル入力画面例

### 4.5.3 信頼性の保証

提案方式を実装した機能は、設備計画策定時および需要家や系統の環境が変化（新しい住宅地が造成される、系統構成を変更する等）して設備見直しを行う時に、オフラインで利用される機能であるが、事前にシミュレーションを行うことで制約時間内に必要な監視情報が収集できるための投資範囲が明確になり、その結果投資を行った後にオンラインで運用される SCADA システムの信頼性を担保するものである。

なお、故障の発生等の異常時において配電系統の安全を確保するため、以下の対策を行っている。まず、サーバ・子局や通信機器の故障により開閉器の遠隔制御ができなくなった時のために、開閉器は過電流の検出時には断線やショートがあると判断し、ハードウェア回路で開閉器を開いて電気が流れない仕組みになっている。また、停電の復旧時には SCADA を活用した開閉器の遠隔制御により順番に開閉器を閉じていく運用を行っている。このようにすることで、異常によって遠隔制御ができないことにより不要な場所に電気が流れ続けることはなく、安全性を担保できる。なお、開閉器は遠隔で制御できない場合にも現地で手動で操作できるようになっている。

更に電圧調整機器 (SVR 等) を遠隔制御する場合は、指令情報を伝送するだけでなく、機器単独で制御判断を行うための動作アルゴリズムに必要なパラメータ値（整定値）を予め機器に設定しておくことで、サーバ・子局や通信機器の故障により遠隔制御できなくなった場合にも、機器単独で判断して監視制御を継続できるようになっている。

SCADA システムの導入範囲が広範囲であるため、このように SCADA システムそのものの高信頼化を行うのではなく、配電系統設備全体で安全・高信頼を保つような設計・運用を行っている。

## 4.6 評価

開発したプロトタイプを用いて提案方式の評価を行った．評価は通信容量が足りない場合に，電圧逸脱の発生可能性があり計測しておくべき監視箇所をどの程度選択できているかという割合で性能を定量化する．

評価に使用した配電系統について以下説明する．使用した配電系統は国内で定義されている標準系統の 1 つを用いた [54]．農山村地区大容量を対象としており，定義された標準系統の中で総こう長が最も長く複雑である．距離は分岐含めて 49km である．[54] で定義された標準系統は柱上変圧器タップ情報や SVR 設置位置の情報が含まれていないため，文献 [39] で使用されている同様のモデルに記入されている情報を適用した．タップ切替点は 4 地点，SVR は 2 地点である．以上の系統情報を図 4.9 に示す．図 4.9 中の機器# 007,026 は SVR とした．区間開閉器は# 004,013,025,032 とした．収集すべき優先端末は SVR とした（# 007,026）．タップ切替点付近の機器は# 003,010,025,032 とした．





表 4.4: 仮定条件

項目	値
フィールドネットワークのトポロジ	配電網と同様
PV 普及率	普及率高い場合：40% ， 普及率低い場合：30%
収集周期	30 秒
既存ネットワーク容量	200bps
新規ネットワーク容量	100kbps

次に仮定した条件について説明する (表 4.4) . まず , フィールドネットワークのトポロジーが配電網のそれと同一であると仮定した . PV の普及率は 40% と 30% の 2 種類とした . 普及率とはそのフィードの全契約容量に占める PV 接続容量の割合を指す . 監視のための収集周期は 30 秒とした . この仮定は , 4.3 節で述べられている最も厳しい「60 秒以内に 100 台の機器から情報を収集する」という必要条件を反映している . これは今回採用した標準系統がおよそ 50 台の機器しか含まないため , 収集時間を 60 秒の半分に設定した結果である .

電力監視制御システムのフィールドネットワークに関しては , 既存メタル線 (200bps) を増強することを想定し , 投資コストの都合上 920MHz 帯無線 (250mW 出力 , 100kbps) のものを全エリアの 0% 導入した場合 , 20% 導入した場合 , 50% 導入した場合 , 100% 導入した場合の 4 ケースについて検討した . 導入箇所は変電所に近いところから導入することとした .

評価は , 電圧逸脱が起こりやすい観測地点をどれだけカバーできているかという値で行った . 発電と消費の確率モデルを使う代わりに , 経験と 4.5 節で行ったシナリオ分析結果を基にそのような重要な監視箇所を静的に定めた . シナリオ 1 では 14 地点 , シナリオ 2 では 2 地点 , シナリオ 3 では 4 地点 , シナリオ 4 では 14 地点をこのような箇所とした . それぞれ

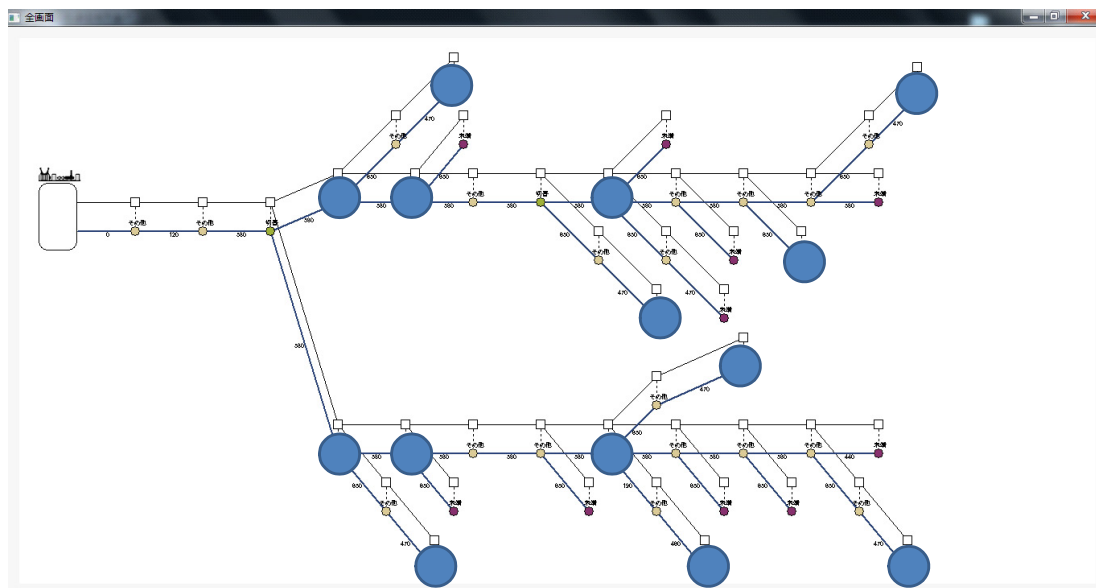


図 4.10: シナリオ 1, 4 の電圧逸脱箇所 (14 箇所)

図 4.10, 4.11, 4.12 に示す．図の中の 印がこれらの計測しておくべき地点となる．これらの点は，SVR，タップ切換点や配電線の末端（少なくとも 1km 以上の分岐の場合）を含む．

各々の条件で提案方式を使った場合と使わない場合とでカバー率にどの程度差が出るかも比較した．提案方式を使わない場合は変電所に近い端末からできるだけ選択することとした．この方式は実際に現状採用されている一般的な方式を反映したものである．

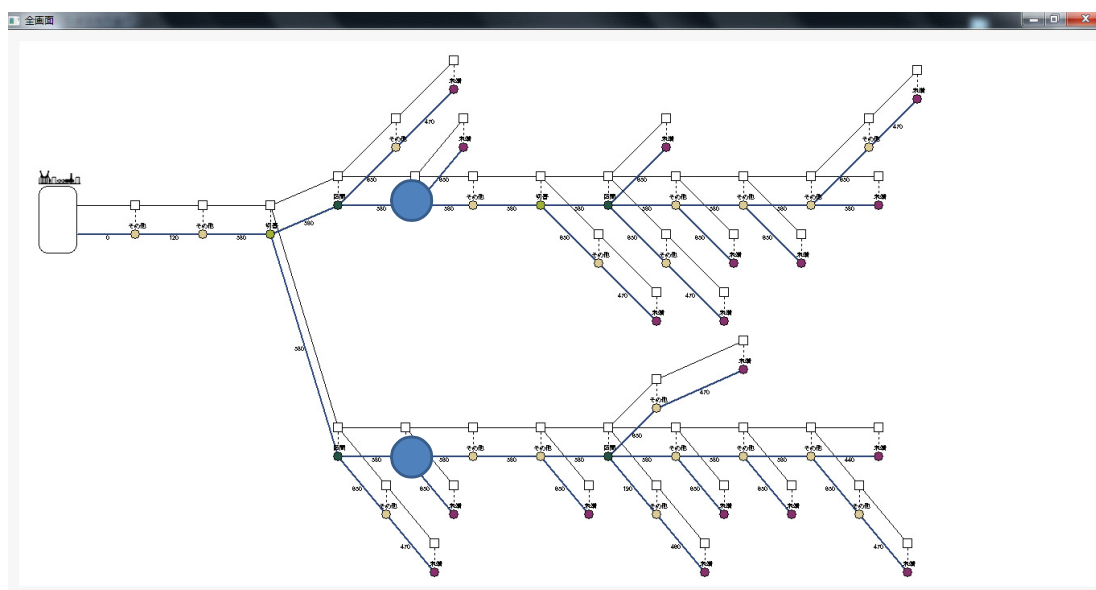


図 4.11: シナリオ 2 の電圧逸脱箇所（2 箇所）

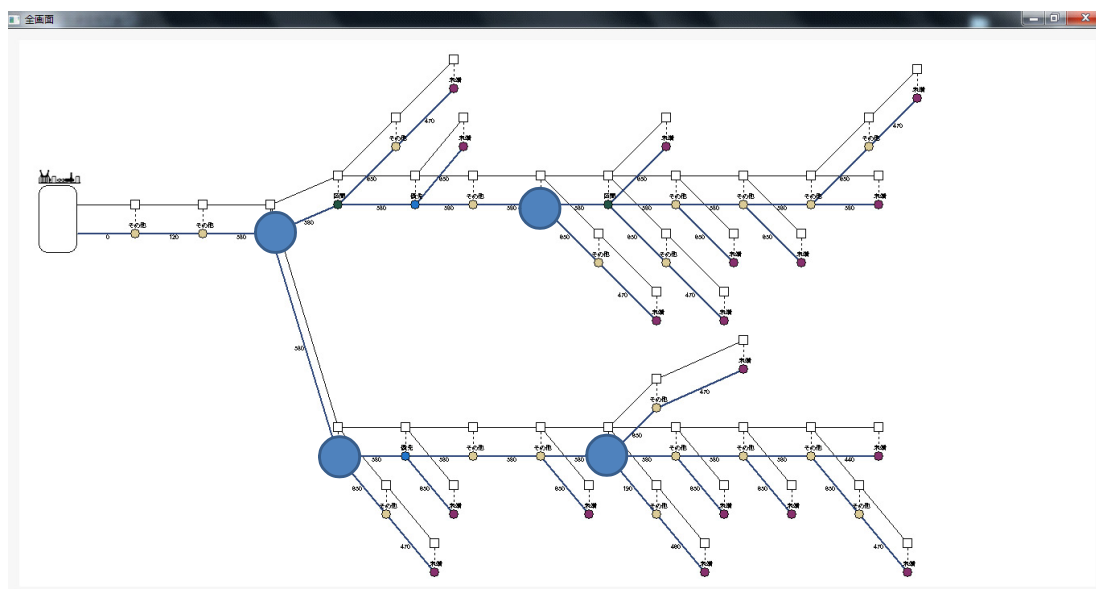


図 4.12: シナリオ 3 の電圧逸脱箇所（4 箇所）

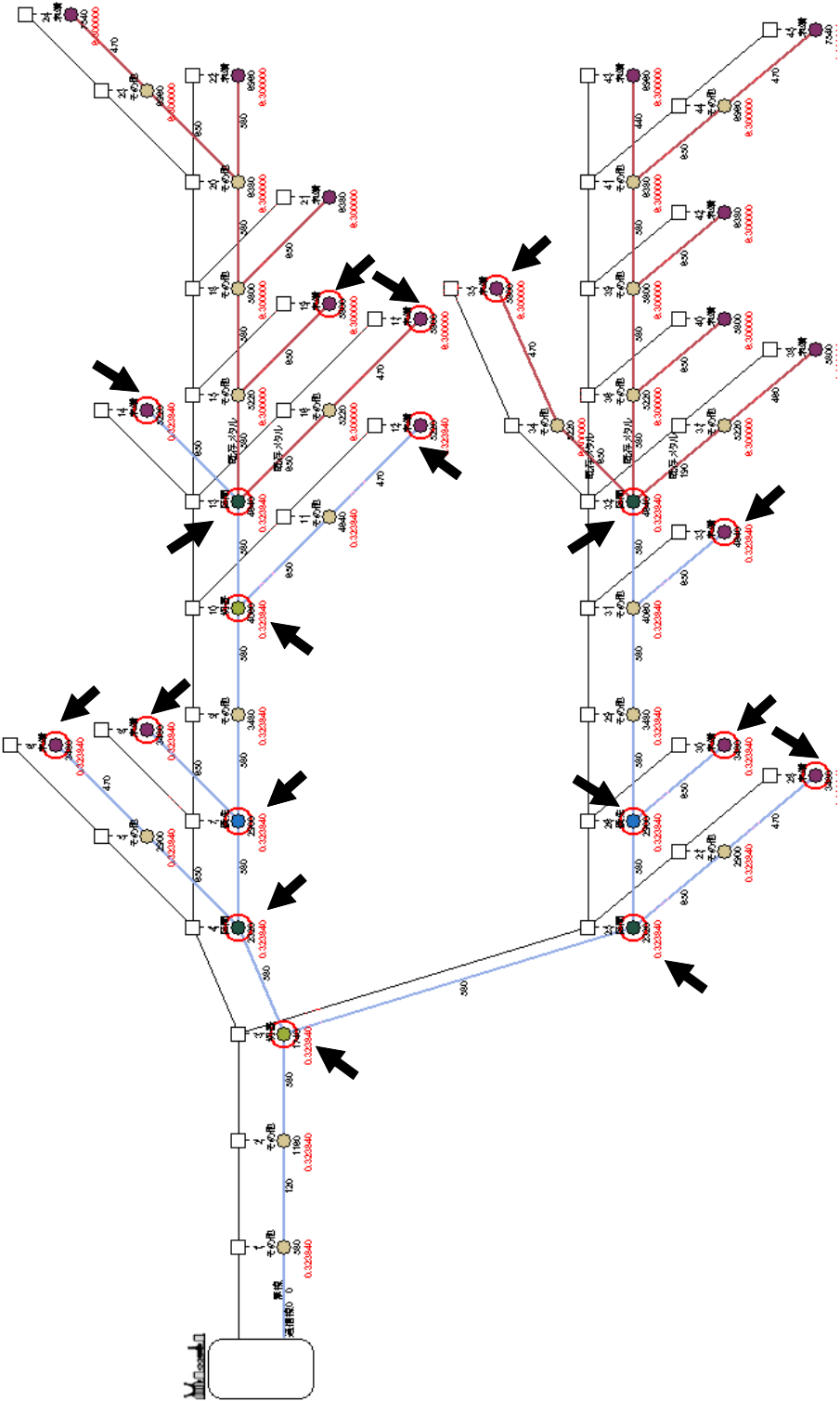


図 4.13: 提案方式による端末選択結果例 (矢印で示した部分)

図 4.13 に提案方式による端末選択結果例を示す。これはシミュレータの出力画面であり、シナリオ 1 で無線通信路が 50% 導入された場合の監視する機器の選択結果を示している。矢印で示した部分が選択された機器である。端末選択数は 18 個であり、18 個のうちの 11 個は事前に評価のために決めていた計測しておくべき地点である。このケースでは、ルール 1 とルール 3 が適用され、その結果オプションについては 1, 3, 2, 4, 5 の順番に優先度が高い設定となる。その結果、計測しておくべき地点のうち、すべてのタップ切替点付近と SVR、および、末端の一部が選択されている。

シミュレーションによる評価結果を表 4.5 に示す。投資コストの都合で全てのエリアに新規フィールドネットワークが増強されない場合でも、提案方式を活用することで、より多くの計測しておくべき地点を自動で選択することができ、電圧変動解析の精度向上に寄与することが可能であることを示している。

また、一般的にはフィールドネットワークの高速化には光ファイバ (1Mbps 以上) を導入することが想定されているが、本シミュレータを用いた評価結果から無線 (100kbps) でも全ての計測しておくべき箇所をカバーでき、要件を満たせることを示している。

表 4.5: シミュレーション結果 (電圧逸脱が発生する可能性がある監視地点のカバー率)

	Selection Method	Usage of 920MHz Band Radio			
		0%	25%	50%	100%
Scenario 1	Proposed	14% (2/14)	57% (8/14)	79% (11/14)	100% (14/14)
	Conventional	7% (1/14)	43% (6/14)	57% (8/14)	100% (14/14)
Scenario 2	Proposed	0% (0/2)	100% (2/2)	100% (2/2)	100% (2/2)
	Conventional	0% (0/2)	100% (2/2)	100% (2/2)	100% (2/2)
Scenario 3	Proposed	50% (2/4)	100% (4/4)	100% (4/4)	100% (4/4)
	Conventional	25% (1/4)	50% (2/4)	100% (4/4)	100% (4/4)
Scenario 4	Proposed	14% (2/14)	57% (8/14)	79% (11/14)	100% (14/14)
	Conventional	7% (1/14)	43% (6/14)	57% (8/14)	100% (14/14)

## 4.7 投資コストとの関係

ここでは光ファイバを新規導入した場合と、無線を新規導入した場合とを、導入コスト CAPEX (Capital Expenditure) で比較する。配電線 60,000km のこう長をカバーする大規模エリアへの導入を想定する。この試算規模は日本の電力会社 1 つ分のエリアに相当する。光ファイバの導入は 1 kmあたりの投資コストを設置工事含めて 100 万円と仮定する。この場合 CAPEX は 600 億円となる。一方、無線を活用する場合、約 50 億円となる。これは地形に応じた通信距離をもとに必要設置端末数、中継機数を割り出し、端末 1 台あたりの価格を開発費込みで計算した結果である。4.6 節の評価結果から、無線の導入で監視の要件は満たせること、加えて、フィールドネットワークの一部分のみに無線が導入された場合にも、適切に監視地点を選択することで監視の要件はある程度満たせることが分かっている。概算して 92% の初期投資コストを削減できることとなる。

次にこの数値は、AMI(Advanced Metering Infrastructure) の通信ネットワークとの共用によりさらに改善される場合がある。AMI は各需要家の電力使用量を測定している電力メータを高度化し、ネットワーク化することで自動検針を実現する。また、使用電力量の収集周期を短くすることでより詳しく使用状況の実績を把握できる能力を利用した、新たなサービスの創出を期待されている。AMI は北米や欧州では既に導入が進んでいる [55]。しかしながら配電監視制御システムについては北米や欧州では設備投資が最も手薄な範囲であり、導入が進んでいない。AMI の通信ネットワークは需要家の電力メータと収集サーバを接続しているため、電力を提供している全エリアに通信ネットワークが敷設されることになる。その通信ネットワークを共用して配電系統の監視を行う場合は、配電監視制御のためのフィールドネットワーク新規敷設は必要なく、監視端末の設置のみでよい。その結果概算では 99% 以上の投資コストを削減できることとなる。以上のコスト評価結果を図 4.14 に示す。但し、



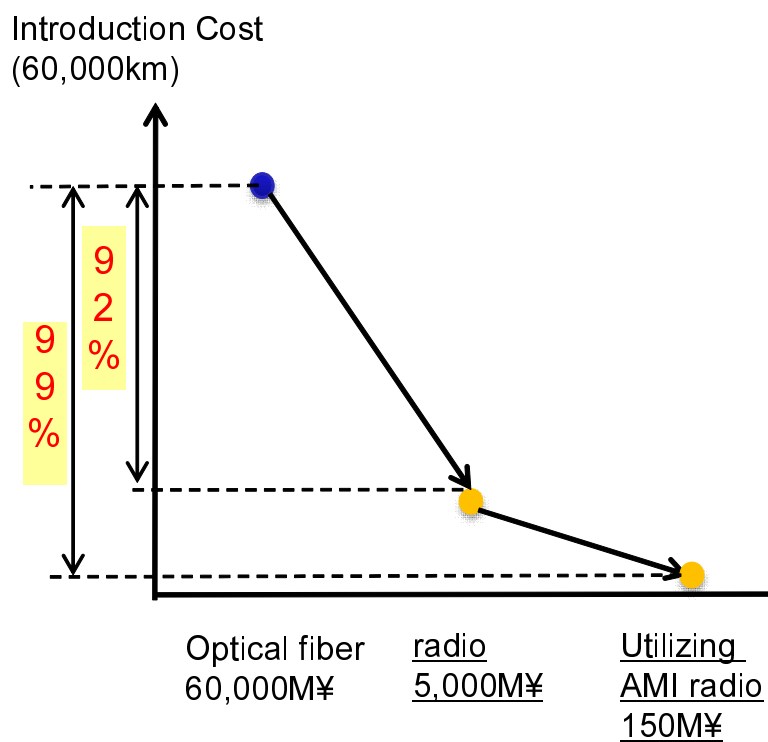


図 4.14: 導入コストの比較結果

AMI の通信ネットワークを共用して配電監視制御を行う場合は、監視データや制御データの送信時における AMI データとのパケット衝突回避策や、制御データの優先送信などによる通信品質の保証を行う必要がある。この問題は将来の検討課題である。

## 4.8 まとめ

太陽光発電等の再生可能エネルギーの普及や，電気自動車（EV）の蓄電池等蓄放電が可能な機器が直接配電系統につながることによる系統安定化の課題，自然災害の大規模化，多発化に対するディザスタリカバリの課題，更に，近年導入が始まっているデマンドレスポンスのような電力需要家の需給を調整するサービスの効率的運用の課題に対して，電力配電監視制御システムの高度化，具体的には，電力配電監視制御システムにおけるフィールドネットワークの高速化が求められており，必要な通信容量の試算を行った．その結果，将来には現状よりも大容量のネットワークが必要であることを明確にした．更に，大きくても 40kbps 程度の通信容量で分単位の監視が可能であることを導き，光ファイバ以外のコストの低い通信メディアの利用が可能なことを明らかにした．

しかしながら，高速ネットワークの導入は即時には実現しない現状があり，通信速度が十分でない状況に対処するために，監視箇所を選択する方式を提案した．提案した方式は，ヒューリスティックと配電系統の形状に基づき監視箇所の候補を優先度付けすることによって SCADA に有用な監視箇所を選ぶことを特徴とする．この方式を実装したプロトタイプツールを用いてシミュレーションを行い，シミュレーション結果を基に提案方式が一般的に用いられる手法よりも，重要な監視箇所の数を多くカバーできることを示した．この結果から，提案手法が有効であることが結論できる．

#### 4.8.1 他の分野への応用可能性に関する考察

提案した手法は，広範囲もしくは多量な機器やセンサがネットワーク接続され，情報を周期的に送受信しながら協調して動作すること求められる SCADA システムに同様に適用が可能であると考える．

同じ電力分野の他のシステムへの適用として，BEMS(Building Energy Management System)，FEMS(Factory Energy Management System) や CEMS(Community Energy Management System) における電圧や電力量の監視，開閉器や電圧調整機器の制御のための SCADA システムが挙げられる．BEMS，FEMS や CEMS は電力会社の保有する配電系統（グリッド）に対して，ビル間（ビル内），工場間（工場内），地域間（地域内）を接続するマイクログリッドととらえることができ，提案した手法がそのまま活用できる．

他分野に適用が期待できる SCADA システムとしては，水道やガスなどの都市全体に敷設される SCADA システムが挙げられる．提案した方式におけるオプションやルールの中身は電力配電分野におけるノウハウが含まれているため，そのまま同じものを活用することはできないが，広範囲もしくは多量な機器が接続される状況は同じであるため通信容量の制約が同様に起きることが想定され，提案した方式による優先度に基づき監視地点を選択するという考えは活用可能である．

## 第5章 むすび

### 5.1 まとめ

社会基盤システムを運用するためには様々なセンサ情報を収集してそれに基づき判断を行い、制御や実行をするための機構が必須である。その役割を担うのが監視制御 (SCADA) システムであり、本論文では ICT(情報通信技術) を活用した高機能・高性能の SCADA システムの実現について議論した。

社会基盤システムを構成する SCADA システムには以下の 2 つの要件がある。

- (1) 使用期間が長いため、拡張性を保持しなければならない。
- (2) 監視対象が広範囲・大量なため、最先端技術を必ずしも適用できるとは限らないという制約下で新機能を実現しなければならない。

特に本論文では、著者が実際に開発に携わってきた鉄道車上監視制御システムと電力配電監視制御システムについて、これらの要件にどう対処したかに焦点を当てて研究成果を説明した。

鉄道車上監視制御システムの研究では、要件 (1) の実現を目的として行った。具体的には、機器や機能の追加や協調制御の導入といった拡張を可能にするための、拡張性を高める分散処理を実現した。

提案した手法では、まず、既存の鉄道車上アプリケーションの機能構造を明らかにして、アプリケーションソフトウェアをモジュール分離し、次に、分離したモジュール毎に起動タ

イミングや起動端末局(号車)を指定できるワークフロー管理方式を用い、車上制御ネットワークの全ての端末局でのモジュールの分散実行を実現した。

更に、製品プロトタイプにおける各種処理時間実測値をもとに、典型的な機器接続例において処理時間を評価した。その結果、従来の集中処理方式では処理周期時間内に処理時間が収まらない場合にも、提案方式によりリアルタイム性を満たした処理が可能になること、更に、追加する処理に割り当てられる時間が、車両によっては処理周期の4分の1程度確保できることが分かった。また、機器が非常に多い場合でも、負荷分散により必要な処理を周期時間内に収められることを示した。これらの結果から、提案方式によりソフトウェアの機能拡張性を向上できることが結論できる。

電力配電監視制御システムの研究では、要件(2)の実現を目的として行った。具体的には、既存技術活用という制約がある中での新機能実現について取り組んだ。

まず、太陽光発電等の再生可能エネルギーの普及や、電気自動車(EV)の蓄電池等蓄放電が可能な機器が直接配電系統につながることによる系統安定化の課題、自然災害の大規模化、多発化に対するディザスタリカバリの課題、更に、近年導入が始まっているデマンドレスポンスのような電力需要家の需給を調整するサービスの効率的運用の課題に対して、SCADAシステムの高度化、具体的には、SCADAシステムにおけるフィールドネットワークの高速化が求められており、必要な通信容量の試算を行った。その結果、将来には現状よりも大容量のものが必要であることを明確にし、更に、大きくても40kbps程度の通信容量で分単位の監視が可能であることを導き、無線など光ファイバ以外の通信メディアを活用することで、敷設作業までを考慮したときに導入コストを削減できる通信メディアの利用が可能なることを明らかにした。

しかしながら、高速ネットワークの導入は、すぐに起こらない現状があり、通信速度が十分でない状況に対処するために、監視箇所を選択する方式を提案した。提案した方式は、

ヒューリスティックと配電系統の形状に基づき監視箇所の候補を優先度付けすることによって SCADA に有用な監視箇所を選ぶことを特徴とする。

次に、この方式を実装したプロトタイプツールを用いてシミュレーションを行い、シミュレーション結果を基に提案方式が一般的に用いられる手法よりも、重要な監視箇所の数を多くカバーできることを示した。この結果から、提案方式により、最先端技術を必ずしも適用できるとは限らないという制約下で新機能を実現するという観点で提案手法が有効であることが結論できる。

## 5.2 社会基盤システム向け SCADA システムにおける今後の課題

社会基盤システム向け SCADA システムの分野において、今後、技術開発が求められる課題として、まず、大量のセンサデータの活用が挙げられる。近年飛躍的に性能が向上している機械学習技術を適用することで、より有効な監視制御が実現可能となる。例えば、機器の故障診断や状態監視保全 (Condition Based Maintenance) への応用が期待されており、実際に利用が始まりつつある。

また、有事への対応も重要な課題として挙げることができる。SCADA システムは社会基盤システムにおける異常発生検知に不可欠であるが、テロや自然災害等により甚大な被害が発生した場合には、SCADA システム自体が機能不全となり、監視制御を継続することが不可能になることが考えられる。このような問題に対して、多重化等の伝統的な方法によるシステムの高信頼化だけでなく、他の方法の利用可能性について検討する必要がある。このような方法として、たとえば、有事においても収集可能であるが、通常は収集や分析の対象となっていない情報を一時的に用いることで、監視に資する情報を生成するといった手法が挙げられる。このような多種の情報を活用する技術は、機械学習技術の発展を背景に、今後より重要性を増すと考えられる。

## 参考文献

- [1] M. Naphade, G. Banavar, C. Harrison, J. Paraszczak, and R. Morris. “Smarter Cities and Their Innovation Challenges”. *IEEE Computer*, Vol. 44, No. 6, pp. 32–39, 2011.
- [2] Y. Yoshikawa, A. Sato, S. Hirasawa, M. Takahashi, and M. Yamamoto. “Hitachi’s Vision of the Smart City”. *Hitachi Review*, Vol. 61, No. 3, pp. 111–118, 2012.
- [3] 井野本正樹, 坂上聡子, 伊藤満夫, 田熊良行. “けいはんな学研都市実証事業への取組”. *スマートグリッド*, Vol. 55, No. 6, pp. 19–24, 2014.
- [4] 斎藤俊哉. “北九州スマートコミュニティ創造事業における実証実験報告”. *スマートグリッド*, Vol. 55, No. 6, pp. 25–31, 2014.
- [5] Masahiro Kuwahara. “Simulation For Operating Additional Buses Based On Demand In Toyota City Low-Carbon Society Verification Project”. In *Proc. of 20th ITS World Congress (CD-ROM), Paper Number: 3103*, October 2013.
- [6] 島岡厚一. “横浜スマートシティプロジェクト”. *スマートグリッド*, Vol. 55, No. 6, pp. 13–18, 2014.
- [7] M. V. Maier. “Architecting principles for systems-of-systems”. *International Council on Systems Engineering*, Vol. 1, No. 4, pp. 267–284, 1998.



- [8] A. Gorod, B. Sauser, and J. Boardman. “System-of-Systems Engineering Management: A Review of Modern History and a Path Forward”. *IEEE Systems Journal*, Vol. 2, No. 4, pp. 484–499, 2008.
- [9] R. Poovendran, K. Sampigethaya, S. K. S. Gupta, I. Lee, K. V. Prasad, D. Corman, and J. L. Paunicka. “Special Issue on Cyber-Physical Systems”. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 100, No. 1, pp. 6–12, 2012.
- [10] J. Eidson, E. A. Lee, S. Matic, S. A. Seshia, and J. Zou. “Distributed Real-Time Software for Cyber-Physical Systems”. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 100, No. 1, pp. 45–59, 2012.
- [11] P. Derler, E. A. Lee, and A. Sangiovanni-Vincentelli. “Modeling Cyber-Physical Systems”. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 100, No. 1, pp. 13–28, 2012.
- [12] 中村泰之. “次世代の首都圏鉄道システムの概要”. *JR EAST Technical Review*, No. 36, pp. 3–6, 2011.
- [13] 今井一富, 大石潔, 佐野孝, 牧島信吾, 保川忍. “電気車の空転・滑走再粘着制御時における編成内計画トルク配分制御の一構成法”. *電学論 D*, Vol. 130, No. 7, pp. 890–901, 2010.
- [14] 生方伸幸, 深澤真吾, 山下良範, 金子健太. “省エネ最適車両システムへの取り組み”. *サイバネティクス*, Vol. 17, No. 2, pp. 63–67, 2012.
- [15] 松本貴之. “車両内での個人向け情報サービス 山手線とレインネット”. *サイバネティクス*, Vol. 18, No. 2, pp. 47–51, 2013.
- [16] 菅谷誠, 佐藤真哉, 廣瀬哲也, 松橋正美, 佐藤春雄, 祖父江明彦, 星野健太郎. “次世代車両制御システム (INTEROS) の開発 (第二報)”. *JR EAST Technical Review*, No. 43, pp. 51–58, 2013.

- 
- [17] 堀井博夫, 谷津昌洋, 相原孝志. “電力供給安定化と広域連系を可能にする電力系統技術への取り組み”. 日立評論, Vol. 94, No. 11, pp. 788–793, November 2012.
- [18] 解良和郎, 川口幸一, 横須賀靖. “鉄道システムの新しいトータルソリューション”. 日立評論, Vol. 85, No. 8, pp. 539–544, August 2003.
- [19] D. Karlsson, M. Hemmingsson, and S. Lindahl. “Wide area system monitoring and control - terminology, phenomena, and solution implementation strategies”. *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 2, No. 5, pp. 68–76, Sept 2004.
- [20] Qiang Yang, J.A. Barria, and T.C. Green. “Communication Infrastructures for Distributed Control of Power Distribution Networks”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 7, No. 2, pp. 316–327, May 2011.
- [21] 佐藤裕, 長洲正治, 石田啓二, 北林英朗. “高速車上ネットワーク B-LAN の開発”. 第 41 回鉄道サイバネシンポジウム論文集 (CD-ROM), 論文番号 813, 2004.
- [22] C. L. Liu and J. W. Layland. “Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard real-time environment”. *Journal of ACM*, Vol. 20, No. 1, pp. 46–61, 1973.
- [23] H. Goma. “A software design method for distributed real-time applications”. *Journal of Systems and Software*, Vol. 19, No. 2, pp. 81–94, 1989.
- [24] H. Kopetz. “*Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications*”. Springer, 1997.
- [25] H. Goma. “*Designing Concurrent Distributed, and Real-Time Application with UML*”. Addison-Wesley, 2000.

- [26] Y. Kakumoto, H. Terada, K. Ishida, S. Sekino, and N. Komoda. “Component oriented software framework for train car systems”. In *Proc. of IEEE International Conf. on Computational Intelligence for Modelling Control and Automation (CIMCA2005)*, pp. 587–592, 2005.
- [27] I. Crnković, S. Sentilles, A. Vulgarakis, and M.R.V. Chaudron. “A classification framework for software component models”. *IEEE Trans. on Software Engineering*, Vol. 37, No. 5, pp. 593–615, 2011.
- [28] X. Ke, K. Sierszecki, and C. Angelov. “COMDES-II: A component-based framework for generative development of distributed real-time control systems”. In *Proc. of 13th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA '07)*, pp. 199–208, 2007.
- [29] K. Hanninen, J. Maki-Turja, M. Nolin, M. Lindberg, J. Lundback, and K.-L. Lundback. “The Rubus component model for resource constrained real-time systems”. In *Proc. of International Symposium on Industrial Embedded Systems (SIES 2008)*, pp. 177–183, 2008.
- [30] AUTOSAR Development Partnership. “AUTOSAR technical overview v2.0.1”. [www.autosar.org](http://www.autosar.org), June 2006.
- [31] 新井静男, 松崎弘二, 本間英寿, 間瀬浩之, 宮内隆史. “列車情報管理装置 (TIMS) の開発 : 209-950 代への適用”. 平成 10 年電気学会産業応用部門全国大会講演論文集, pp. 267–270, 1998.
- [32] 門脇悟志, 大石潔, 佐野孝, 保川忍. “電空協調制御を考慮した滑走再粘着制御への外乱オブザーバによる再粘着制御系への応用”. 電学論 D, Vol. 125, No. 10, pp. 919–926, 2005.

- 
- [33] 古田良介, 白石仁史, 中村信彦, 中田剛, 板野康晴, 梶川重広. “E954 形式新幹線高速試験電車における編成ブレンディング制御”. 第 43 回鉄道サイバネシンポジウム論文集 (CD-ROM), 論文番号 529, 2006.
- [34] 根岸徹, 高木誠, 綾部和則, 祖父江昭彦, 伊東知. “東武鉄道 50050 系車両 ATI 装置”. 第 43 回鉄道サイバネシンポジウム論文集 (CD-ROM), 論文番号 530, 2006.
- [35] 原克浩, 西村知洋, 伊東知, 君島寛久. “神戸市交通局海岸線 5000 形車両用 ATI の開発”. 電気学会研究会資料 TER-02-7, pp. 33–36, 2002.
- [36] 藤沢利之, 窪谷紀生, 小川克弘, 山畳一広, 石田啓二. “20000 系通勤電車車両モニタ装置”. 第 37 回鉄道サイバネシンポジウム論文集 (CD-ROM), 論文番号 510, 2000.
- [37] X. Li, Y. Liang, T. Mitra, and A. Roychoudhury. “Chronos: A timing analyzer for embedded software”. *Science of Computer Programming*, Vol. 69, No. 1–3, pp. 56–67, December 2007.
- [38] D.S. Johnson, A.J. Demers, J.D. Ullman, M.R. Garey, and R.L. Graham. “Worst-case performance bounds for simple one-dimensional packing algorithms”. *SIAM Journal on Computing*, Vol. 3, No. 4, pp. 299–325, 1974.
- [39] 財団法人エネルギー総合工学研究所. “新電力ネットワークシステム実証研究新電力ネットワーク技術に係る総合調査 経過報告 【第一部】電力ネットワーク技術実証研究に係わる経過報告”. <http://www.iae.or.jp/research/activity/sdr.html>, March 2006.
- [40] A. G. Bruce. Reliability analysis of electric utility SCADA systems. In “20th International Conference on Power Industry Computer Applications”, pp. 200–205, May 1997.

- [41] 山下育男. “電力会社における通信網の信頼性確保に向けた研究について（＜特集＞通信システムの信頼性）”. 日本信頼性学会誌：信頼性, Vol. 33, No. 1, pp. 29–34, January 2011.
- [42] 飯野穰. “スマートコミュニティにおける次世代エネルギーマネジメント技術（特集 産業界における制御技術の現状と将来展望）”. 計測と制御, Vol. 52, No. 5, pp. 419–424, May 2013.
- [43] M. Watanabe, T. Onishi, T. Omori, H. Terada, M. Adachi, and K. Inagaki. “Next-generation SCADA and control technologies for large-scale use of photovoltaic generation on electric power grid”. *Hitachi Review*, Vol. 60, No. 3, pp. 143–149, June 2011.
- [44] T. Otani and H. Kobayashi. “A SCADA system using mobile agents for a next-generation distribution system”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 28, No. 1, pp. 47–57, 2013.
- [45] G. Ericsson. “Communication requirements - basis for investment in a utility wide-area network”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 1, pp. 92–95, 2004.
- [46] J. Luque, I. Gómez, and J. Escudero. “Determining the channel capacity in SCADA systems using polling protocols”. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 11, No. 2, pp. 917–922, 1996.
- [47] 電力用通信網管理システムの設計技術専門委員会. “電力用通信網管理システムの設計技術”. 電気協同研究, Vol. 63, No. 2, 2007.
- [48] 社団法人電気協同研究会. “低炭素社会の実現に向けた配電系統の高度化”. 電気協同研究, Vol. 66, No. 2, 2010.

- 
- [49] 林泰弘. “分散型電源の導入拡大に対応した配電系統電圧制御の動向と展望”. 電気学会論文誌 B, Vol. 129, No. 4, pp. 491–494, 2009.
- [50] 宇田川剛, 林泰弘, 高橋尚之, 松浦康雄, 森田智比古, 南雅弘. “センサ開閉器情報の取得周期が配電系統電圧制御に与える影響の評価”. 電気学会論文誌 B, Vol. 133, No. 4, pp. 324–332, 2013.
- [51] 相原靖彦, 林泰弘, 寺島尚志, 竹本育子, 岩本伸一. “地方系統設備計画における交渉エキスパートシステムの開発”. 電気学会論文誌 B, Vol. 115, No. 7, pp. 778–786, 1995.
- [52] 奈良宏一, 林泰弘, 武藤昭一, 土田鋼太郎. “都市部における配電線増設位置決定アルゴリズム”. 電気学会論文誌 B, Vol. 117, No. 10, pp. 1375–1381, 1997.
- [53] 朝倉孝宣, 由良俊樹, 林巨己, 福山良和. “実配電系統を対象とした配電系統長期設備増強手法の開発”. 電気学会論文誌 B, Vol. 120, No. 12, pp. 1574–1581, 2000.
- [54] 配電高調波対策専門委員会. “配電系統の高調波障害防止対策”. 電気協同研究, Vol. 37, No. 3, 1981.
- [55] 鈴木浩. “スマートメータを用いた電力流通インフラの海外動向”. 電気学会論文誌 B, Vol. 127, No. 9, pp. 977–980, 2007.

