

博士論文

情報通信技術を活用して  
安全かつ費用対効果の高い  
鉄道輸送サービスを実現する  
列車制御高度化の研究

勝田 敬一



## 概要

鉄道は、一度に大量の旅客や貨物を効率良く輸送できる交通機関で、高速性・定時性・安全性・環境性に優れている。このため、近年では世界的に鉄道への関心が高まり、世界各国で鉄道の建設が推進されている。このような期待の中で、鉄道が、今後も社会の要請に合った交通機関として持続的に発展していくためには、より一層安全かつ効率的に輸送サービスを提供していくことが重要である。

そのためには、列車運行の安全を担う信号システムと、列車運行の効率化を担う運行管理システムという、現在の鉄道システムの中で相対的に大きな経費が投じられている列車制御に関係する 2 つのシステムに着目し、高速鉄道から、大都市圏鉄道、幹線鉄道、地方交通線に至るまで、それぞれの路線が抱えている問題を分析して解決策を探究する必要がある。特に、輸送量の少ない路線では収支の均衡を確保することが難しいという課題が顕在化しており、また、輸送量の大きい路線では、混雑緩和のためのインフラ投資や複数路線間の相互直通化に多大な費用が投じられている。

そこで、本研究は、信号システムと運行管理システムを対象として、将来に渡って鉄道ネットワークが持続的に発展していくために、安全かつ費用対効果の高い鉄道輸送サービスを実現するための列車制御に関する統一的な解決策を探究し、その技術と効果を検証することを目的とする。具体的には、信号システムの低コスト化と相互運用化に資する技術と、それらを前提とした列車運行の高度化と省インフラ化を実現する技術を考案し、これらの技術が鉄道輸送に使われるアセットを柔軟かつ効率的に運用するための基盤となり、少子高齢化社会における公共交通機関の持続的な発展という社会課題の解決に貢献できることを示す。

本論文は、輸送量の少ない路線に適した車上装置が制御主体となる低コストな信号システム、複数路線間の相互直通化において信号システムの相互運用コストを低く抑える車上信号装置、輸送量の大きい路線において列車運行密度を限界まで高めるダイヤグラム、さらに輸送力と速達性の向上が求められるような場合に少ない線路資源を効率的に使うための列車運行方式、以上 4 つの要素から構成されており、最後に、信号システムが車上装置主体の制御に進化し、これが相互直通ネットワークに沿って普及していくシナリオと、その動きに合わせて列車の運行管理の形態が変化すること、そして、それによって設備の限界まで密度を高める列車運行や、少ない線路資源を効率的に使う列車運行、さらには現場の判断による列車の自律運行等が可能となり、現在よりも高度なサービスが期待できる鉄道輸送の将来像について述べる。

本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章では、序論として、鉄道を取り巻く環境と社会的役割、列車運行の安全を担う信号システムと列車運行の効率化を担う運行管理システムの概要を説明し、本論文で研究対象とする、この 2 つの列車制御に関係するシステムに相対的に大きな経費が投じられている背景を明らかにした。

第 2 章では、第 1 章で挙げた 2 つのシステムに関する先行研究を踏まえて、列車制御における課題を経済性に焦点を当てて掘り下げた。まずは、喫緊の課題として、輸送量の少ない路線における経済性の課題を整理し、次に、路線と路線を繋ぐ相互直通化における課題、続いて輸送量の大きい路線における課題を整理し、最後に、それらの課題を踏まえた上での本研究の取り組み、具体的には安全かつ費用対効果の高い鉄道輸送サービスの実現を目的とした列車制御に関する研究の方針を示した。

第 3 章では、第 2 章で説明した課題の 1 つである、輸送量の少ない路線における経済性の課題に対し、古くから使われているタブレット閉塞式の考え方を発展させて、車上信号装置と転てつ器装置だけで信号システムに求められる機能を実現する「リングトポロジー CBTC システム」の仕組みとその優れた経済性を示した。

第 4 章では、複数路線間の相互直通化における経済性の課題に対し、列車に 1 台の車上信号装置を搭載し、その演算部が路線ごとにその地上側列車制御装置に対応したアプリケーションを実行して列車を制御するという「インターオペラブル車上信号装置」の基本概念と、それによる相互運用コストの低減効果を示した。

第 5 章では、輸送量の大きい路線における経済性の課題に対し、限られた線路資源上で列車運行密度を限界まで高めることのできる「稠密ダイヤグラム」を導出する方法とその活用事例を示した。

第 6 章では、さらなる輸送力と速達性の向上が求められる場合に、駅間の線路と各駅の待避設備を時間的に効率良く使うことで複々線化と同等の速達性と輸送力を実現とする「駅間 3 線の緩急交互型運行方式」の基本原則とその高い投資対効果性を示した。

第 7 章では、第 3 章と第 4 章で提案した信号システムに関する技術によって、将来的に信号システムは車上装置主体の制御に変化し、これが相互直通ネットワークに沿って普及していくシナリオと、それによって列車の運行管理の形態も変化し、第 5 章と第 6 章で提案したダイヤグラムや運行方式に関する技術の実用化が容易になることを示した。これは、これらの技術が、ただ単に保安機能やその相互運用化を低コストに実現するだけでなく、列車を柔軟かつ効率的に運用できる基盤となることを意味しており、具体的には、現場の判断による列車の自律運行が可能となること、それにより現在よりも高度な列車制御が実現できるという、鉄道輸送の将来像について述べた。

第 8 章では、第 3 章から第 6 章までに提案した列車制御に関する技術と、第 7 章で示した鉄道輸送サービスの将来像とその進化のシナリオを総括し、本論文のまとめとした。

情報通信技術を活用して安全かつ費用対効果の高い  
鉄道輸送サービスを実現する列車制御高度化の研究

目次

概要.....	i
目次.....	iii
1. 序論 .....	1
1.1. 本研究の背景.....	1
1.1.1. 鉄道を取り巻く環境 .....	1
1.1.2. 鉄道の社会的役割.....	1
1.1.3. 鉄道における列車制御の現状.....	3
1.2 本研究の目的と本論文の構成 .....	6
1.2.1 本研究の目的 .....	6
1.2.1 本論文の構成 .....	7
2. 鉄道輸送サービスの抱える経済性の課題.....	9
2.1. 輸送量の少ない路線における経済性の課題 .....	9
2.2. 鉄道ネットワークの相互直通化における経済性の課題 .....	10
2.3. 輸送量の大きい路線における経済性の課題 .....	12
2.4. 鉄道輸送サービスの抱える経済性の課題に対する研究方針.....	14
3. リングトポロジーCBTC システム .....	16
3.1. はじめに .....	16
3.2. 信号システムの基本構成 .....	16
3.2.1. 軌道回路ベース信号システム.....	17
3.2.2. 無線ベース信号システム.....	18
3.3. リングトポロジーCBTC システムの提案.....	20
3.3.1. 基本概念 .....	20
3.3.2. 基本原理 .....	21
3.3.3. 保安電文 .....	22
3.3.3. システム挙動 .....	25
3.4. リングトポロジーCBTC システムの特長.....	33
3.4.1. 簡素なシステム構成 .....	33
3.4.2. 十分な機能性 .....	33
3.4.3. コスト低減.....	34
3.5. システム固有の課題.....	35
3.5.1. 保安電文消失による制御停止リスク .....	35

3.5.2.	保安電文回覧の仕組みによる運転密度低下のリスク .....	36
3.6.	システム固有の課題を解決する仕組み.....	38
3.6.1.	選定された1台の装置による消失保安電文の復元 .....	38
3.6.2.	適切な管轄区間設定による回覧装置数の最小化 .....	40
3.6.3.	保安電文回覧順序の動的変更による運転時隔の短縮 .....	40
3.7.	ケーススタディによる効果検証.....	43
3.7.1.	権限装置によるシステム復旧時間短縮効果.....	43
3.7.2.	電文回覧順序の動的変更による運転時隔短縮効果.....	44
3.8.	まとめ.....	48
4.	インターオペラブル車上信号装置.....	50
4.1.	はじめに .....	50
4.2.	欧州統一信号システム (ETCS).....	51
4.2.1.	ETCS の概要 .....	51
4.2.2.	ETCS の困難な現状 .....	53
4.3.	統一システムによる相互運用化が抱える課題.....	53
4.3.1.	システム仕様の複雑化によるコスト増 .....	53
4.3.2.	システム導入時のコスト増 .....	54
4.3.3.	システム更新時のコスト増 .....	55
4.4.	インターオペラブル車上信号装置の提案 .....	55
4.4.1.	基本概念 .....	55
4.4.2.	機器構成 .....	58
4.4.3.	既存方式との比較.....	60
4.5.	インターオペラブル車上信号装置の基本原理.....	62
4.5.1.	異なる信号システムの路線を相互直通運転可能にする仕組み .....	62
4.5.2.	車両に見合った性能の車上信号装置で相互直通運転を可能にする仕組み .....	64
4.6.	インターオペラブル車上信号装置の特長.....	65
4.6.1.	システム仕様の複雑化を防ぐ効果 .....	65
4.6.2.	システム導入時のコスト増を防ぐ効果.....	66
4.6.3.	システム更新時のコスト増を防ぐ効果.....	66
4.7.	インターオペラブル車上信号装置による相互運用化の経済性評価の具体例 .....	67
4.7.1.	相互運用化コスト概算式.....	67
4.7.2.	相互運用化コスト概算結果 .....	68
4.8.	まとめ.....	70
5.	端末駅における稠密ダイヤグラム.....	72
5.1.	はじめに .....	72
5.2.	運転時隔 .....	73

5.3. 稠密ダイヤグラムの定義と導出方法 .....	77
5.3.1. 基本概念 .....	77
5.3.2. 求めるダイヤグラムの定義 .....	78
5.4. 稠密ダイヤグラムの導出 .....	80
5.4.1. 前提データの作成 .....	80
5.4.2. 走行挙動の模擬 .....	81
5.4.3. 走行挙動間の運転時隔の計算 .....	82
5.4.4. 運行順序パターンの作成 .....	82
5.4.5. 1 周期時間の計算 .....	83
5.4.6. 稠密ダイヤグラムの抽出 .....	83
5.5. 稠密ダイヤグラムの導出ツール .....	83
5.5.1. 稠密ダイヤグラム導出ツールの構成 .....	83
5.5.2. 稠密ダイヤグラムの出力表示 .....	85
5.5.3. 稠密ダイヤグラムの規模と導出時間の関係 .....	86
5.6. 事例に見る稠密ダイヤグラム活用効果の検証 .....	88
5.6.1. 運行計画への活用 .....	88
5.6.2. 運転整理への活用 .....	90
5.6.3. 設備設計への活用 .....	91
5.7. まとめ .....	95
6. 駅間 3 線の緩急交互型運行方式 .....	97
6.1. はじめに .....	97
6.2. 既存の運行方式 .....	98
6.2.1. 複線における緩急結句型運行 .....	98
6.2.2. 複線における全各駅停車型運行 .....	100
6.2.3. 複々線における緩急分離型運行 .....	101
6.3. 駅間 3 線の緩急交互型運行の提案 .....	101
6.3.1. 基本概念 .....	101
6.3.2. 基本原理 .....	102
6.4. 駅間 3 線の緩急交互型運行の特長 .....	104
6.4.1. 速達列車優先型運行 .....	104
6.4.2. 各駅停車列車優先型運行 .....	105
6.4.3. 片方向優先型運行 .....	105
6.4.4. ケーススタディを用いた各方式の比較 .....	106
6.5. 駅間 3 線の緩急交互型運行特有の懸念事項の分析 .....	109
6.5.1. 列車遅延に対するロバスト性 .....	109
6.5.2. 列車折返 .....	112

6.5.3. 運行密度の調整 .....	113
6.5.4. 速達列車の停車・通過変更に伴う制約 .....	114
6.6. 駅間3線の緩急交互型運行の投資対効果評価 .....	115
6.6.1. 朝通勤通学ラッシュ時 .....	115
6.6.2. 日中 .....	116
6.6.3. 夕方 .....	116
6.6.4. 小イベント終了時 .....	117
6.6.5. 大イベント終了時 .....	117
6.6.6. 終日 .....	118
6.7. まとめ .....	119
7. 提案する技術がもたらす鉄道輸送サービスの将来像 .....	121
7.1. はじめに .....	121
7.2. 車上装置主体型の信号システムの普及 .....	121
7.3. 信号システムの車上装置主体化がもたらす列車の運行管理形態の変化 .....	122
7.4. 列車の自律走行を取り入れて高度化する将来の鉄道輸送サービス .....	124
8. 結言 .....	127
8.1. 研究成果の要約 .....	127
8.2. 今後の課題 .....	129
謝辞 .....	131
参考文献 .....	132
研究業績 .....	140
学術誌原著論文 .....	140
国際会議論文・発表 .....	140
表彰論文 .....	140
国内学会・研究会・シンポジウム・その他 .....	141
資格 .....	141
国際特許 .....	141
国内特許 .....	143
国際業務への貢献 .....	143



## 1. 序論

### 1.1. 本研究の背景

#### 1.1.1. 鉄道を取り巻く環境

鉄道は、一度に大量の旅客や貨物を効率良く輸送できる交通機関で、高速性・定時性・安全性・環境性に優れている。このため、20 世紀初めに大衆車が誕生して以降、輸送機関としての鉄道の地位は、モータリゼーションの進展によって低下したものの、近年では世界的に鉄道への関心が高まり、世界各国で鉄道の建設が推進されている。

欧州では、EU と各国政府の支援の下、1990 年時点で 1,000km ほどの高速鉄道網が、2014 年時点で 7,351km まで拡大し、2015 年以降もこれを上回る路線の建設が計画されている[1.1]。インドでは、デリー—ムンバイを結ぶ西回廊とデリー—コルカタを結ぶ東回廊の総延長 3,300km の貨物専用鉄道が計画されており、2013 年には円借款契約が締結され西回廊の建設が開始された[1.2]。米国では、2015 年 1 月にカルフォルニア州のロサンゼルス—サンフランシスコを結ぶ 840km の高速鉄道が起工された[1.3]。また、アジアでは、2007 年に台湾新幹線が開業[1.1]、さらに中国の高速鉄道網は 2014 年時点で 11,132km にまで急速に拡大した[1.1]。

日本国内でも、2015 年 3 月には北陸新幹線の長野—金沢間や、宇都宮線・高崎線・常磐線と東海道線を結ぶ上野東京ラインが開通する等、高速鉄道である新幹線や大都市圏の鉄道を中心に活発に設備投資が進められている[1.4][1.5][1.6]。

#### 1.1.2. 鉄道の社会的役割

鉄道は、旅客や貨物を輸送する交通機関として様々な社会的役割を担っている。そこで、日本の鉄道を例に、鉄道が担っている社会的役割を説明する。

##### 高速鉄道

日本で最も速い速度で運転されている鉄道は、新幹線である。1964 年に東京—新大阪間に開業した東海道新幹線に始まり、1972 年に山陽新幹線、1982 年に東北新幹線と上越新幹線、1997 年に北陸新幹線(長野新幹線)、2004 年に九州新幹線が開業した。近年では、2010 年 12 月に東北新幹線が新青森まで延伸され、2011 年 3 月には九州新幹線の鹿児島ルートが全線開通し、2015 年 3 月には北陸新幹線が金沢まで開通した。2015 年現在、標準軌の新幹線の総延長は 2848.3km である。また、2013 年度の 1 日あたりの利用者数は 916 千人、旅客人キロは、89,168 千人キロ/年にも及ぶ[1.7]。これは国内全鉄道の 21.5%であり、新幹線は今日の日本における基幹的な都市間交通機関として

の役割を担っている。今後も、さらに旅客を早く輸送するためには、車両の高速化に加え、複数路線間の相互直通運転等が望まれる。

### 大都市圏鉄道

日本で最も多くの人に利用されている鉄道は、大都市圏の鉄道である。日本では、1955年から1973年までの高度経済成長に伴って大都市圏へ人口が集中したことにより、朝の通勤通学ラッシュ時の混雑が問題となっていた。そこで、1955年には運輸省によって都市交通審議会が設置され、1956年には東京及びその周辺における旅客輸送力に関する第1次答申が作成された。その内容は、主として都市内を走る路面電車の地下鉄への転換と、地下鉄と民鉄路線との相互乗入れを具申するものであり、これに基づいて、1962年には地下高速鉄道建設費補助制度が施行され、大規模な地下鉄網の建設が開始された。また、大手民鉄に対しては、1957年に輸送力増強計画を策定し、高性能車両の新造、既存車両の不燃化、線路の増設、プラットホームの新設や延伸、変電所の増設等に大きな投資を実施した[1.8]。さらに、1980年代には国鉄による東海道線・中央線・東北線・常磐線・総武線の5方面に対する線路増設を中心とした通勤輸送改善、1986年からは特定都市鉄道整備促進特別措置法を活用した民鉄による複々線化が進められた[1.9]。このような混雑緩和を目的とした整備が進められてきたことにより、東京圏31区間、大阪圏20区間、名古屋圏8区間の平均混雑率はそれぞれ2013年時点で165%(1975年時点221%)、124%(同199%)、131%(同205%)にまで改善された[1.10]。さらに、2005年には既存の都市鉄道ネットワークを有効活用しつつ、速達性の向上や交通結節機能の高度化を図ることを目的に、都市鉄道等利便増進法が制定され、神奈川東部方面線等の整備が進められている[1.11]。このように、日本三大都市圏である東京圏・大阪圏・名古屋圏の鉄道が、日本の経済発展とともに整備されてきた理由は、大都市圏の鉄道が基幹的な都市内大量交通機関としての役割を果たしているからである。2008年の統計で1日あたり54.0百万人もの旅客に利用されており、これは国内全鉄道の利用者数の85.7%を占めている[1.12]。しかしながら、今後は少子高齢化社会の到来を前に、混雑緩和のための大規模なインフラ投資は難しい。この問題については、2.3節で詳述する。また、旅客の利便性向上のために、路線間のさらなる相互直通化も望まれているが、その実現には高いコストを要する。この問題については、2.2節に詳述する。

### 幹線鉄道

鉄道は、自動車輸送よりも環境負荷を低く、また船舶輸送よりも早く、旅客と貨物を大量に長距離輸送できるという特長を持つ。2015年現在、国内貨物輸送の分担率は、キロトンベースで、自動車輸送が54.9%、船舶輸送が40.3%に対し、鉄道は4.6%ではあるが、特に自動車輸送では、トラックドライバー不足が問題となっており、早さを

求められる長距離貨物輸送については鉄道へのシフトが進んでいる[1.13]。例えば東京と福岡を結ぶ東海道線・山陽線は、JR 貨物が貨物輸送を担当している。東京―福岡間の貨物輸送は、2015 年 3 月に 2 本/日から 3 本/日の運行に増え、1 編成にコンテナ車を最大 26 両連結させて 12 フィートコンテナ 130 個(650t)の貨物を一度に輸送している。また、トンキロあたりの二酸化炭素排出量はトラック輸送に対して約 1/8、船舶輸送に対して約 3/5 であり、高い環境性を持つ。このように、幹線鉄道は、旅客輸送だけでなく貨物輸送においても長距離・大量・低環境負荷という輸送特性を生かして、日本における物流を支えている[1.14]。そして、このように複数の路線を跨って旅客や貨物を輸送する場合、大都市圏鉄道と同様に複数路線間を直通運転できることが望ましい。その実現における経済性の問題については、前述の通り 2.2 節に詳述する。

#### 地方交通線

鉄道は、旅客や貨物を大量に運んではじめて効率的な交通機関となる。従って、旅客や貨物の輸送量が少ない路線では、収支の均衡を確保することが難しい。この問題については、2.1 節で詳述する。現実には、1980 年代には、旧運輸省によって全区間の旅客輸送密度が 4000 人未満の路線は収支の均衡が難しいと判断され、実際に 45 路線がバス輸送に転換された[1.15]。しかし一方で、38 路線が沿線の自治体や企業が共同で出資する第三セクター方式等の形で存続した。これは、鉄道が自家用車等の私的交通手段を利用できない人にとっての貴重な移動手段であると同時に、鉄道のもたらす人の流動が地域経済圏の維持に欠かせない等、地域住民の社会生活基盤としての役割を担っていることを示している。

このように、鉄道には様々な種類があり、それぞれが重要な社会的役割を担っている一方で、様々な問題も抱えている。日本の鉄道は、1950 年代から 1980 年代にかけて、前述の輸送改善、特定地方交通線や寝台列車の削減、国鉄の分割民営化等、大きな変革を経てきた。そして 1990 年代以降も、大小様々な変革を経て、現代社会にマッチした交通機関として変化してきた。今後も継続して社会の要請に合った交通機関として便利に利用され続けていくためには、旅客や貨物の輸送をより一層、安全かつ効率的に実現していくことが重要となる。

##### 1.1.3. 鉄道における列車制御の現状

鉄道は、旅客列車や貨物列車を安全かつ効率的に運行して旅客や貨物を輸送する交通機関であるが、その運行は主として信号システムと運行管理システムによって制御されている。具体的には、信号システムが列車を安全に運行させる役割を担い、運行管理システムが列車を効率的に運行させる役割を担っている。

そこで、まずは列車を安全に運行する技術について述べる。列車は自動車のように進路を変更して他の列車との衝突や追突を避けることができない。このため、対向列車同士あるいは先行列車と続行列車との間で何らかの形で物理的な間隔制御が必要となる。駅間においては、現在、線路を一定区間に区切って 1 区間を 1 列車のみに占有させ、完全に通過し終わるまでは続行列車または対向列車をその区間に進入させないという方式が一般的に用いられている。このような区間を閉塞区間といい、閉塞区間によって列車間隔を確保する方式を固定閉塞方式という。この固定閉塞方式では、閉塞装置と呼ばれる装置が、沿線に建植された信号機を軌道回路や制御子等の列車検知装置と関連付けて制御し、閉塞区間に複数の列車が進入してしまうことを防いでいる[1.16] [1.17]。

なお、近年では固定化された閉塞区間によるのではなく、地上側と車上側の装置間で無線通信を行って列車位置や停止点等の情報を交換し、先行列車と続行列車との間隔を制動距離等の必要最小限の間隔に抑える移動閉塞方式と呼ばれる列車間隔制御も実用化されている。この移動閉塞方式には、主として **moving block** 式と **virtual block** 式の 2 種類の実現手段があり、**moving block** 式は制御周期を単位とした時間ベースの移動閉塞方式の列車間隔制御を実現し、**virtual block** 式はブロック長を単位とした距離ベースの移動閉塞方式の列車間隔制御を実現する[1.18]。

また、駅構内では、列車を衝突させたり、脱線させたりしないために、連動装置と呼ばれる装置が、駅構内の信号機や転てつ器を列車検知装置と関連付けて制御し、列車が走行する進路を安全に構成している。このような信号機と転てつ器、列車検知装置間の相互関係を連鎖と呼び、その論理は連動図表によって表現され、各駅の連動装置に実装されるのが一般的である。

さらに、現在は、列車に必要な応じて列車のブレーキを自動的に動作させる装置が搭載されている。これは、列車運転速度の高速化と高密度化に伴い、1962 年の常磐線三河島事故のような運転士のブレーキ操作ミスに起因する停止信号の冒進事故が多発したことから開発されたもので、自動列車停止装置と呼ばれる。この自動列車停止装置は、地上子やループコイル等を介して地上側から伝送される信号機の現示情報に基づき、列車が停止信号を冒進しないように自動的にブレーキを動作させる機能を持つ。最初に日本で開発された装置は **ATS** と呼ばれる方式で、信号機が停止現示の場合に地上子から停止信号接近の情報が車上装置に伝送され、その情報を受けた車上装置が運転士に警報を発し、さらに 5s 以内に運転士が確認しなければ、非常ブレーキを動作させるという仕組みであった。その後も、1988 年の中央線東中野事故を含む様々な事故の経験を踏まえ、**ATS-S**、**ATS-P**、**ATC** と呼ばれる方式に改良が進んでいる。

このように、鉄道の信号システムは、閉塞装置、連動装置、車上装置、信号機、転てつ

器、列車検知装置等、多くの種類の装置から構成されているが、当然、どの装置であっても、故障した場合にその故障が列車事故の原因となるようなことがあってはならない。つまり、信号システムを構成する装置は、故障した場合でも、その結果としての制御が常に安全側、つまり列車を停止させるように設計されることが求められる。このような性質をフェイルセーフと呼ぶ[1.19]。

例えば、代表的な列車検知装置である軌道回路装置は、電氣的に区分した線路の一端の左右のレールに電源を接続、他端の左右のレールに電磁リレーを接続し、この電磁リレーの扛上接点によって当該区間の信号機に進行現示を点灯する回路で構成されている。このため、当該区間内に列車が存在しない場合には、リレーに電流が流れてリレーが扛上し、信号機に進行現示が点灯する。逆に、当該区間内に列車が存在する場合には、列車の車軸によって左右のレールが短絡され、リレーには電流が流れずリレーは重力やバネの力で落下し、信号機は点灯しない。当然、この論理を実現するリレーについては、故障の非対称性を利用し、故障確率の高い方落下側を安全側制御(消灯)、故障確率の低い扛上側を危険側制御(点灯)に割り当てる。このような仕組みを持つため、もし電源の停電や回路の断線等の故障が発生しても、リレーには電流が流れず信号機は点灯しない。これは、1872年に米国のウィリアム・ロビンソンによって発明された閉電路方式の軌道回路の仕組みであり、電気回路を用いたフェイルセーフ設計の代表例である[1.20]。

1980年代には、信号装置の電子化が進展し、コンピュータを用いた電子連動装置が開発され、その後、閉塞装置や自動列車停止装置等、多くの信号装置が電子化された。このような装置は複数の演算機を持ち、それぞれの演算機が同じ論理処理を行って結果を比較し、過半数以上の系が一致しなければエラーと判断する。この時、複数の演算機に全く同じ故障が発生して演算誤りを見逃すことのないよう、演算機の故障確率を踏まえて十分長い情報を十分短い時間間隔で比較することによってフェイルセーフ機構に準じた高い安全性を確保している。当然、比較する回路自体の故障に対しても必ず安全側に動作するよう回路が構成されている。このように、鉄道の信号システムは、高い安全性を確保するために、フェイルセーフ機構、もしくはそれに準じた多数決論理を持つよう設計され、一般に用いられている産業用の汎用装置よりも複雑な機構を備えている[1.21]。

1990年前後からは、無線を利用して列車を高密度に運行させる列車制御システムの研究が進展した。地上側に列車制御装置、車上側に車上信号装置を設け、それらの装置間で無線通信を行って列車位置や停止点等の情報を交換し、先行列車と続行列車との間隔を必要最小限に抑える移動閉塞方式の無線列車制御システム(CBTCシステム)である[1.22]。このような無線列車制御システムの代表的な例には、Trainguard MT[1.23]、Trainguard Sirius[1.24]、URBALIS[1.25]、CITYFLO[1.26]、SelTrac[1.27]、Ansaldo STS CBTC[1.28]、

Tempo[1.29]、Hitachi CBTC[1.30]、ATACS[1.31]等があり、主として大都市圏鉄道を対象に列車運行密度の向上に貢献した。

そして、近年は、無線を利用して信号システムのコストを低減させる研究が活発に行われている。特に列車運行密度の低い地方交通線を対象に、COMBAT[1.32]や ATP 閉塞[1.33]という従来型の CBTC システムよりもコストを低減させる列車制御システムが提案されている。

次に、列車を効率的に運行する技術について述べる。列車は、予め決められたダイヤグラムに従って運行するのが基本であるが、そのためには、信号システムと連携して、列車の進路を適切に構成しなければならない。つまり、列車を運行するためには、各駅の駅員が、列車の運行状況を見ながら、ダイヤグラムに従って閉塞装置や連動装置を操作する必要がある。

そこで、路線全体の列車をより効率的に制御するため、また列車の運行が乱れた際には適切な対応を迅速かつ効率的に行えるように、東北・上越・北陸新幹線の COSMOS、東海道・山陽新幹線の COMTRAC、東京圏の ATOS をはじめとする運行管理システムが開発された。具体的には、路線全体の列車の運行状況を表示する機能、列車の運行計画を表すダイヤグラムを管理する機能、そして、そのダイヤグラムに従って各駅の連動装置や閉塞装置を遠隔操作し、自動的に進路を設定する機能が開発された。現在までに、一部の地方交通線を除いて、ほとんどの路線にこのような機能を持つ運行管理システムが導入され、列車を効率的に運行できるようになっている。

さらに、近年は、上記の機能に加え、ダイヤグラムの作成支援機能、列車運行が乱れた際にダイヤグラムの変更を立案する運転整理機能、駅の旅客案内表示器や自動放送装置を適切に制御する旅客案内機能、車両や乗務員の運用を管理する運用管理機能等も開発され、列車運行の高度化が進展している。

## 1.2 本研究の目的と本論文の構成

### 1.2.1 本研究の目的

本研究は、1.1 節で述べた鉄道を取り巻く環境、社会的役割、そして、それぞれの路線における問題を踏まえ、将来に渡って鉄道ネットワークが持続的に発展していくために、信号システムと運行管理システムを対象として、安全かつ費用対効果の高い鉄道輸送サービスの実現を目的とした列車制御に関する統一的な解決策を探究し、その技術と効果を検証

することを目的とする。具体的には、信号システムの低コスト化と相互運用化に資する技術と、それらを前提とした列車運行の高度化と省インフラ化を実現する技術を考案し、これらの技術が鉄道輸送に使われるアセットを柔軟かつ効率的に運用するための基盤となり、少子高齢化社会における公共交通機関の持続的な発展という社会課題の解決に貢献できることを示す。

### 1.2.1 本論文の構成

本論文は全 8 章で構成される。

第 1 章は、序論として、鉄道を取り巻く環境と社会的役割、列車運行の安全を担う信号システムと列車運行の効率化を担う運行管理システムの概要を説明し、本論文で研究対象とする、この 2 つの列車制御に関係するシステムに相対的に大きな経費が投じられている背景を述べた。

第 2 章では、第 1 章で挙げた 2 つのシステムに関する先行研究を踏まえて、列車制御における課題を経済性に焦点を当てて掘り下げる。まずは、喫緊の課題として、輸送量の少ない路線における経済性の課題を整理し、次に、路線と路線を繋ぐ相互直通化における課題、続いて輸送量の大きい路線における課題を整理し、最後にそれらの課題を踏まえた上での本研究の取り組み、具体的には安全かつ費用対効果の高い鉄道輸送サービスの実現を目的とした列車制御に関する研究の方針を示す。

第 3 章では、第 2 章で説明した課題の 1 つである、輸送量の少ない路線における経済性の課題に対し、古くから使われているタブレット閉塞式の考え方を発展させて、車上信号装置と転てつ器装置だけで信号システムに求められる機能を実現する「リングトポロジー CBTC システム」の仕組みとその優れた経済性、ケーススタディを用いた実用化検討について述べる。

第 4 章では、複数路線間の相互直通化における経済性の課題に対し、列車に 1 台の車上信号装置を搭載し、その演算部が路線ごとにその地上側列車制御装置に対応したアプリケーションを実行して列車を制御するという「インターオペラブル車上信号装置」の基本概念と、それによる相互運用コストの低減効果について述べる。

第 5 章では、輸送量の大きい路線における経済性の課題に対し、限られた線路資源上で列車運行密度を限界まで高めることのできる「稠密ダイヤグラム」を導出する方法とその活用について述べる。

第 6 章では、さらなる輸送力と速達性の向上が求められる場合に、駅間の線路と各駅の待避設備を時間的に効率良く使うことで複数線化と同等の速達性と輸送力を実現とする「駅間 3 線の緩急交互型運行方式」の基本原則とその高い投資対効果について述べる。

第 7 章では、第 3 章と第 4 章で提案した信号システムに関する技術によって、将来的に信号システムは車上装置主体の制御に変化し、これが相互直通ネットワークに沿って普及していくシナリオと、それによって列車の運行管理の形態も変化し、第 5 章と第 6 章で提

案したダイヤグラムや運行方式に関する技術の実用化が容易になることを示す。これは、これらの技術が、ただ単に保安機能やその相互運用化を低コストに実現するだけでなく、列車を柔軟かつ効率的に運用できる基盤となることを意味しており、具体的には、現場の判断による列車の自律運行が可能となること、それにより現在よりも高度な列車制御が実現できるという、鉄道輸送の将来像について述べる。

第 8 章では、第 3 章から第 6 章までに提案した列車制御に関する技術と、第 7 章で示した鉄道輸送サービスの将来像とその進化のシナリオを総括し、今後の課題について述べる。



## 2. 鉄道輸送サービスの抱える経済性の課題

### 2.1. 輸送量の少ない路線における経済性の課題

鉄道は、他の交通機関と比較して大きなインフラ設備を必要とするため、旅客や貨物を大量に運んではじめて効率的な交通機関となる。従って、輸送量の少ない路線では、収支の均衡を確保することが難しい。実際に日本では、1980年に日本国有鉄道経営再建促進特別措置法(国鉄再建法)[2.1]によって、以下のいずれの条件にもあてはまらない路線が、収支の均衡を確保することが難しい路線と判断され、地方交通線に分類された。

- (1) 1980年3月末現在で人口10万人以上の都市を相互に連絡し、旅客営業キロが30kmを超え、すべての隣接駅間の旅客輸送密度(1977-79年度3年間平均の1日1kmあたりの輸送人員)が4,000人以上である区間を有する線
- (2) (1)の条件にあてはまる営業線と主要都市とを相互に連絡し、旅客営業キロが30kmを超えるか、すべての隣接駅間の旅客輸送密度が4,000人以上である区間を有する線
- (3) 旅客輸送密度が8,000人以上である線
- (4) 貨物輸送密度(1977-79年度3年間平均の1日1kmあたりの輸送貨物トン数)が4,000t以上である線

さらに、その中でも旅客輸送密度4,000人未満の83路線を特定地方交通線と分類して、法律で強制的に廃止できるようにし、実際に45路線が廃止された。残りの38路線は、地域の交通事情によって、廃止してしまうと住民の社会生活に大きな支障を及ぼすとして、沿線の自治体や企業が共同で出資する第三セクター方式で存続させているが、大部分の事業者の経営状況は厳しい状況にある。

上記の経緯で第三セクターに継承された鉄道や、地方の中小民鉄によって運営される鉄道は、そのほとんどが旅客輸送密度8,000人未満である。このような地域鉄道に対しては、毎年、鉄道軌道整備法に基づいて国から赤字の補てんが行われてきたが、1998年度にこれが打ち切られたため、2000年代に多くの地域鉄道が廃線となった。実際に2000年から2014年までに廃線となった路線は35路線673.7kmにのぼる[2.2]。

この結果、2014年時点で存続している地域鉄道は91社となり、営業キロは3413.4kmに減少した。さらに、これらの地域鉄道のうち、営業利益を計上しているのは12社に過ぎず、残りの69社は赤字経営に陥っており、地元自治体が赤字を補填している状況にある[2.3]。このような厳しい経営の要因であるが、国交省によると、地域鉄道においてはインフラ施設の維持補修に要する経費が全体のコストの約45%を締めており、その割合は現在進められているワンマン化や無人化等の輸送に関する経費の合理化によって、さらに増える傾

向にあると分析されている。その上で、仮にインフラ施設に要する経費を除くと、営業赤字の事業者は約 10%にまで減じるとの試算があり、地域鉄道の経営圧迫要因はインフラ施設に関わる経費にあると分析されている[2.4]。なお、大手民鉄においては、このインフラ施設に関する経費の半分以上が、鉄道運行の安全確保に関する設備に投じられており、残りが輸送力増強やサービス改善に関する設備に投じられている[2.5]。経営が厳しい地域鉄道においては、それ以上の割合で鉄道運行の安全確保に関する設備に経費が投じられていると想定される。このように、地域鉄道にとって負担の重い額を鉄道運行の安全確保に関する設備に費やさざるを得ない理由は、前章で述べたように、信号システムを構成する装置にはフェイルセーフ機構、もしくはそれに準じた多数決論理が求められ、具体的には、閉塞装置、連動装置、車上装置、信号機、転てつ器、列車検知装置等は、それぞれ複雑な機構を備え、高コストとなるからである。

当然ながら、鉄道にとって、安全性は経済性より優先されるものである。つまり、いくら輸送量が少ない路線であったとしても、安全確保に関する設備への投資を疎かにすることはできない。従って、列車運行の安全を担保する仕組みをいかに低コストに実現していくかが、輸送量の少ない路線が収支の均衡を維持しながら鉄道経営を継続していく上で最大の課題となっている。近年、COMBAT[1.32]や ATP 閉塞[1.33]というコストの低い列車制御システムが提案されているが、これらのシステムも中央から同時に複数の装置を制御する集中型連動装置や閉塞管理装置を必要とするため、コスト低減効果は限定的であり、広く導入されるまでには至っていない。そこで、本論文の第 3 章では、この課題に対して、車上信号装置と転てつ機装置間で情報を共有してそれぞれが自律的に列車や転てつ器を制御する論理を提案し、その基本論理に基づく新しい信号システムの実用性を検証する。

## 2.2. 鉄道ネットワークの相互直通化における経済性の課題

次に挙げられる課題は、複数路線間の相互直通化における経済性の課題である。2000 年 10 月に発表された運輸政策審議会答申第 20 号[2.6]には、現在までの混雑緩和を目的とした新線建設や複々線化等のインフラ整備に一定の評価を与えている一方で、今後のインフラ投資に関しては、交通機関の利便性向上と利用効率向上の重要性を指摘した上で「シームレス化の推進により交通機関相互間の乗継利便性を高めていく必要がある」という方向性が示されている。

実際に 2005 年には都市鉄道等利便増進法[2.7]が制定され、国と地方自治体が、既存の都市鉄道路線間を連絡する新線の建設や複数路線間を連絡するための施設整備等の相互直通化事業を補助する仕組みができ、実際に相鉄本線西谷—JR 東日本東海道貨物線横浜羽沢間の相鉄・JR 直通線 2.7km や横浜羽沢—東急東横線日吉間の相鉄・東急直通線 10.0km の建

設が進められている[2.8]。

一般的に複数路線間の相互直通化においては、連絡線の建設や接続駅の線路配線やホームの改修だけではなく、相互直通化する路線の車両、軌間、電気方式、信号システム等を合わせる必要がある。例えば、車両については、車両長・幅・高さ・重量などを規定範囲内に合わせる必要があるし、軌間が異なる場合には、どちらかが改軌するか、もしくは三線軌化や軌間可変車両の導入を検討しなければならない。また、電気方式が異なる場合には、列車にそれぞれの電気方式に適合した主回路機器を備える必要があるし、信号システムが異なる場合には、列車にそれぞれの信号システムに適合した信号装置を備える必要がある。

このような交通ネットワークのシームレス化に関しては、欧州でその必要性が早くから叫ばれており、実際に EU は、域内の社会的・経済的結束と国際競争力の強化を図るため、「欧州横断交通ネットワーク(TEN-T)の構築」を盛り込んだマーストリヒト条約を 1993 年に発効させ、1996 年にはこの条約に基づいて「TEN-T 整備のためのガイドライン」を制定し[2.9]、大規模な交通インフラ整備を進めてきた。この TEN-T 構想は、欧州に点在する複数の交通ネットワークを統合して、統一された効率的な交通インフラの構築を目的としたプロジェクトであり、多額の EU 予算や欧州投資銀行の融資等を受けて進められている。2004 年に改訂されたガイドライン[2.10]には 30 の優先プロジェクトが規定され、そのうち、デンマークのコペンハーゲン―スウェーデンのマルメ間 16km のオレスン海峡線を含む 3 つのプロジェクトが既に完成している。

特に鉄道ネットワークの相互直通化においては、前述の通り、相互直通化する路線の諸元を合わせる必要があるが、これについても欧州はいち早く取り組みを開始しており、2004 年には、欧州委員会が EU 域内鉄道の相互直通化を目的とした「相互運用のための技術仕様(TSI)」を制定した[2.11][2.12]。制定後も継続的に更新が重ねられ、2015 年現在、この TSI には、基本設備・電力・車両・信号・運転・保守・情報通信の 7 つのサブシステムについての相互運用のための技術仕様が規定されている[2.13]。

本論文が対象とする信号システムについては、国際鉄道事業者連合(UIC)、欧州鉄道庁(ERA)、欧州鉄道メーカ連合(UNISIG)が中心となってさらに詳細なシステム仕様が策定されている[2.14]。これは、ERTMS/ETCS と呼ばれる欧州統一系列制御システムの仕様であり、現在は TSI の下に位置付けられ、EU 域内の幹線路線を中心に、この仕様に基づいて開発された ERTMS/ETCS システムが段階的に導入されている。

この ERTMS/ETCS の事例は、日本の鉄道ネットワークの相互直通化にとって示唆に富

ものであるが、従来の信号システムと比較してコストが高く、その導入は当初の計画通りには進んでいない[2.15]。そこで、本論文の第4章では、ERTMS/ETCSの開発過程と技術仕様を分析し、その中に存在する経済性の問題点とその解決策について明らかにする。具体的には、統一的なシステム仕様を策定する上での問題点とそれに起因するシステムコストの肥大化について言及した上で、それよりもコストのかからないアプローチとして、列車に1台の車上信号装置を搭載し、その装置が路線ごとに地上側列車制御装置に対応したアプリケーションを実行して列車を制御するという仕組みを提案し、その相互運用性の経済性を検証する。

### 2.3. 輸送量の大きい路線における経済性の課題

最後に挙げる課題は、輸送量の大きい路線における経済性の課題である。具体的には、少子高齢化社会の到来を前にして大都市圏鉄道の混雑をどのように緩和していくかという課題である。

混雑緩和の課題に対しては、現在までに、新線建設や複々線化等の大規模なインフラ整備によって三大都市圏の平均混雑率は1975年時点と比較して大きく改善されたことは第1章に述べた通りである。また、前節で引用した運輸政策審議会答申第20号[2.6]においても、「鉄道については、三大都市圏等における通勤・通学時間帯の混雑の解消が長年の懸案であり、精力的な路線整備等の努力により、混雑率の着実な低下が図られてきた」と一定の評価を与えている。

しかし、続いて「一部の路線については今なお激しい混雑状況が見られるため、今後とも所要の整備を継続し、混雑率の改善とネットワークの完成を図るとともに、シームレス化の推進により交通機関相互間の乗継利便性を高めていく必要がある」と、完全に混雑の問題が解消されたわけではないことについても言及している。これは、朝の通勤通学ラッシュ時に総武緩行線等の一部区間では未だに200%に迫る激しい車内混雑が発生していること、どの路線においても過密な列車運行により慢性的な運行遅延が生じていることなどを指している[2.16]。

一方で、大都市圏の旅客需要は1991年をピークに減少傾向にあり、かつ少子高齢化社会の到来で将来的に利用者が減少すると予測されていることから、事業者は鉄道事業以外の生活サービス事業や不動産投資信託事業等への投資を増加させつつある[2.17][2.18]。これは、今までのような鉄道事業に直結する大規模なインフラ投資が、必ずしも事業者にとって費用に見合う効果を期待できない状況になりつつあることを表わしている。

このような状況の下、路線全体の輸送力を制約する場所、特に列車の折返運用が行われる駅において、大規模なインフラ投資によらずに輸送力を増強する様々な手段が講じられてきた。列車の折返運用が路線全体の輸送力に影響を与えることになる理由は、列車が折り返す際には、続行列車だけでなく、対向列車との平面交差支障や転てつ器の転換時間等も考慮しなければならないからである。

具体的な手段としては、例えば、乗務員運用の工夫による停車時間の短縮、各番線を効率的に使うための線路配線の改善、さらには信号システムの高機能化が進められた。特に信号システムについては、地上側の列車制御装置から車上側の信号装置への制御伝送を地上子を使用した点制御方式から無線を使用する連続制御方式にする、車上信号装置のブレーキパターンを多段制御方式から一段制御方式にする、列車間隔制御論理を固定閉塞方式から移動閉塞方式にする、等の高機能化が進展し、その結果、列車の運転間隔は大幅に短縮された[2.19] [2.20]。

このように、大都市圏鉄道のような大きな輸送力を必要とする路線では、大規模なインフラ投資によらずに輸送力を増強する手段として、乗務員運用の工夫による停車時間の短縮、各番線を効率的に使うための線路配線の改善、信号システムの高機能化等が有効であるが、その効果を正確に評価したり、その輸送力増強手段を前提として列車を可能な限り高密度に運行するためには、端末駅での列車折返運用を精密に分析しなければならないことが分かる。本論文の第 5 章では、この課題に対して、駅構内における走行挙動を精度高く模擬した上で端末駅での運行密度を限界まで高めるダイヤグラムを導出する方法を提案し、その効果を検証する。

但し、第 5 章の考察では、輸送力の増強に対する信号システムの限界も明らかになる。この限界以上の輸送力を得ようとするためには、大規模なインフラ投資を行うしか方法は無い。最も一般的な方策は、線路の増設であり、既に複線が敷設されている大都市圏鉄道の場合には、複々線化やバイパス新線の建設となる。

大都市圏鉄道の中でも、特に、旅客を速やかに輸送するために一部の駅を通過する速達列車を運行している路線では、複々線化による輸送力増強効果は非常に大きい。これは、複々線化した場合に、各駅停車列車と速達列車の運行を分離し、それぞれを高密度に運行することができるためであり、同一線上で各駅停車列車と速達列車の両方を運行しなければならない複線の場合と比較すると輸送量は 2 倍以上になる。現在は大規模なインフラ投資が難しい状況にあると先に述べたが、そのような状況でも、西武池袋線の練馬―石神井公園間 4.6km(2012 年使用開始)や、小田急小田原線代々木上原―登戸間 11.1km(2017 年度使用開始予定)の複々線化が進められていることがその証左である[1.9]。

このように、速達列車を運行する路線では、複々線化した方が線路という資源を効率的に使えるようになるのである。但し、第 5 章で提案する方法によって複々線上で運行される列車の運転間隔を制約する要因を分析すると、必ずしも全区間において線路を限界まで使っているわけではないことも分かる。具体的に言うと、同一線上で同一種別の列車を運行する場合の運転間隔は、列車の駅停車時間とその前後の加減速挙動に制約されるということであり、逆に言うと、複々線路線における列車運行は、停車駅前後においては 4 線ある線路を効率的に使っているものの、それ以外の区間では十分に使い切っていないということである。そこで、本論文の第 6 章では、複々線化という大規模なインフラ投資によらず、これと同等の輸送力増強効果をそれよりも少ないインフラ投資によって得られる方策として、費用対効果の高い駅間 3 線の線路配線構造と列車運行方法を提案し、その効果を検証する。

#### 2.4. 鉄道輸送サービスの抱える経済性の課題に対する研究方針

さて、本章の最後に、今後も鉄道による安全かつ費用対効果の高い輸送サービスを持続的に発展させていく上での課題とこれに対する研究方針を示す。これまで述べてきたように、最初に取り組むべき課題は、収支の均衡を確保することが難しい輸送量の少ない路線の経営環境をいかに改善させるか、ということである。そのためには、高い安全性を求められる信号保安機能を低コストに実現できる新しいアーキテクチャのシステムが求められる。本研究では、2.1 節で述べたように、信号システムの構成要素を最小化することを考え、本論文の第 3 章で、従来のように地上側の制御装置が各列車の車上装置を中央制御する形ではなく、各列車の車上装置が制御主体となる信号システムの形を示す。

次に取り組むべき課題は、旅客の利便性向上である。そのためには、鉄道ネットワークの相互直通化をいかに経済性高く実現するか、ということが重要となる。ここでも高い安全性が求められる信号システムに対して低コストで相互運用するための工夫が求められる。本研究では、2.2 節で述べたように、先行している欧州での事例とその問題点を分析、各信号システムにおける車上装置の本質的な機能に着目し、本論文の第 4 章で、1 台の車上装置で複数の信号方式にソフトウェア的に対応する信号システムの相互運用の形を示す。

車上装置が制御主体となる信号システムが地方の輸送量の少ない路線に導入され、その路線とそれに繋がる路線との間で、1 台の車上装置を使った異なる信号システム間の相互運用が実現すると、徐々に車上装置主体型の信号システムに適合した列車が増え始める。この車上装置主体型の信号システムは、地上側の高コストな既存の信号装置を必要としないため、相互直通の進展に伴ってこの信号システムに適合した列車が増えれば、徐々に周囲の路線にも普及していくことが期待できる。さらには、この車上装置主体型の信号システ

ムが高い運転密度を実現するための要求仕様も満足できれば、大都市圏の輸送量の大きい路線を含む鉄道ネットワーク全体に普及していくことが期待できる。

このように車上装置主体型の信号システムが普及し始めると、列車の運行管理の形態も変化していく。現在の運行管理システムは、地上側の複数の信号装置とインタフェースを取り、適切なタイミングで各列車の進路を設定することで、列車の運行を間接的に制御していたが、信号システムが車上装置主体型となる場合、運行管理システムは車上装置とインタフェースを取るだけで、進路の設定を含む列車の運行全般を直接指示できるようになる。このため、従来よりもきめ細かな運行管理が実現できるようになると考えられる。

例えば、運行管理システムが各列車の車上装置に直接運行を指示できるようになれば、システムで動的に計算した最適なダイヤグラムの通りに列車を走行させることが難しくなくなる。特に、大都市圏の輸送力の大きい路線においては、大規模なインフラ投資によらずに現状よりも輸送力を上げることが求められており、その際、列車の走行挙動を精密に予測し、適切な余裕時間を加味した上で、設備の限界まで運行密度を高めたダイヤグラムを導出して、列車をその通りに走行させることは有効な方策になりうる。本研究では、2.3節で述べたように、路線全体の輸送力を制約する端末駅での列車の折返運用に着目し、本論文の第5章で、端末駅での運行密度を限界まで高めるダイヤグラムを導出する方法とその活用方法を示す。

その一方で、設備限界以上の輸送力を求められる路線もある。そのとき、現在最も一般的に考えられる施策が複々線化である。但し、複々線化には大きな投資が必要であり、また、必ずしも駅間の4本の線路を時間的に効率良く使っているとは言えない。本研究では、信号システムが車上装置主体型になれば、連動装置のような地上側の高コストな信号装置を必要とせず、各駅に待避設備を増やせるようになることを踏まえ、本論文の第6章で、各駅の待避線と各駅間の3線を使って、複々線と同等の輸送力増強効果を得られる列車の運行方法を提案する。

そして最後に、信号システムが車上装置主体型に変化することで、各列車の運転士が、運転台に搭載されている車上装置上で列車の進路を安全に設定することができるようになり、自律的な判断によって列車を運行できるようになることに言及する。鉄道ネットワークは、公共交通機関として、列車は予め決められたダイヤグラムに従って運行されることが望ましいと考えられるが、事故や故障等の輸送障害時には、現場の判断で列車を柔軟に運行させることでサービスを改善できる可能性がある。本論文の第7章では、システムによる大局的な運行管理と、現場の判断による自律運行とを組み合わせることで実現できる、現在よりも柔軟な鉄道輸送サービスの将来像について述べる。

### 3. リングトポロジーCBTC システム

#### 3.1. はじめに

2.1 節の「輸送量の少ない路線における経済性の課題」で述べたように、国内の輸送量の少ない路線では、コストの低い信号システムが求められている。また、海外においても、鉄道システムのインフラ施設における信号システムの高コスト性は問題視されており[3.1]、低コスト化の重要性が説かれている[3.2][3.3]。

従来の信号システムのコスト構造を、鉄道部門におけるコストデータ[3.4]に基づいて分析すると、駅中間における列車の間隔制御を行う地上側の装置や、進路が錯綜する駅構内において列車の排他制御と進路の構成制御を行う地上側の装置といった地上側の信号装置が、信号システムの装置コストの約 4～6 割を占めている。その理由としては、これらの装置が、列車の在線を検知する軌道回路装置、転てつ器の転換・鎖錠を行う転てつ器装置、信号灯を点灯させて列車の運転士に進行許可を伝達する信号機装置等、多くの沿線機器を制御下に置いて、中央から同時に複数の列車を安全に制御するものであり、このため、多くの沿線機器からの情報を短時間かつフェイルセーフ機構に準じた多数決論理で処理するための高い演算処理能力や照合検定能力、その情報をやり取りするための多数のケーブルやリレー等を必要とするためと考えられる。

従来から、信号システムのコスト低減を目的とした無線通信装置[3.5]や列車検知装置[3.6]の研究、ERTMS regional[3.7]、COMBAT[1.32]、ATP 閉塞[1.33]のようなコストを抑える信号システムの研究がなされてきた。しかしながら、前述の分析を踏まえると、信号システムのコストを本質的に低減するためには、フェイルセーフ機構に準じた多数決論理を持つ高性能な演算処理部を備えた地上側の信号装置が、多くの沿線機器を制御下に置いて、中央から同時に複数の列車を安全に制御する、という仕組み自体を抜本的に見直す必要があると考えられる。

そこで、本章では、従来の信号システムの仕組みに捉われずに、車上装置と転てつ器装置間で保安情報を含む電文を回覧させることで、中央に保安装置を必要とせずに、信号システムに求められる機能を実現する新しい信号システムの仕組みを提案する。

#### 3.2. 信号システムの基本構成

既存の地方交通線の信号システムは、信号機、列車検知装置、閉塞装置、主として ATS 方式の車上装置や地上子等の多くの種類の装置と、それらを接続する多数のケーブルから構成されており、それらのほとんどが 1970 年代から 80 年代にかけて導入されたものであ



る。すなわち、沿線機器が旧式のため、その保守にかかるコストを低減できる見通しは立たず、今後も一層困難になっていくことが予想され、鉄道事業者では、このような旧式の信号システムに代わるものとして、近年普及している ETCS や CBTC と呼ばれる無線を用いた信号システムに注目している[3.8][3.9]。そこで、本節では、まず、現在も継続的に技術が更新されている代表的な軌道回路をベースとした信号システムと、近年急速に普及している無線ベースの信号システムを例に挙げて、信号システムの基本的な構成について説明する。

### 3.2.1. 軌道回路ベース信号システム

軌道回路をベースした信号システムは、日本を始め世界各国で様々なシステムが開発されてきた。代表的なものは、日本の D-ATC[3.10]、ドイツの LZB[3.11]、フランスの TVM[3.11]等が挙げられる。それらシステムの基本的な考え方は同じであり、地上側の列車制御装置が軌道回路装置からの列車在線情報に基づいて列車の間隔制御を行うというものである[3.12]。

なお、駅構内における列車の排他制御と進路の構成制御は、地上側の連動装置が軌道回路装置からの列車在線情報に基づいて行い[3.13][3.14]、列車のブレーキ制御は車上側の信号装置が行う。代表的なシステム構成図を図 3-1、装置関連図を図 3-2、各装置の機能を下記に示す。

#### (1) 列車制御装置

駅間における列車の在線情報や駅構内の進路開通情報を、それぞれ軌道回路装置や連動装置から取込み、それらの情報に基づいてそれぞれの列車間に必要十分な安全間隔が確保されるように各列車の停止限界点を計算し、計算した停止限界点を、軌道回路や地上子を介して各列車の信号装置に伝達する。

#### (2) 連動装置

駅構内における列車の在線情報、転てつ器の状態情報、進路要求情報を、それぞれ軌道回路装置、転てつ器装置、運行管理システムから取り込み、連動論理に従って転てつ器や信号機を制御し、開通した進路の情報を列車制御装置や運行管理システムに伝達する。

#### (3) 車上信号装置

地上子からの地点情報と、速度センサからの速度情報の積算値に基づいて自列車位置を把握し、地上側の列車制御装置から軌道回路や地上子を介して伝達される停止限界点を踏まえて、必要に応じて列車のブレーキを制御する。

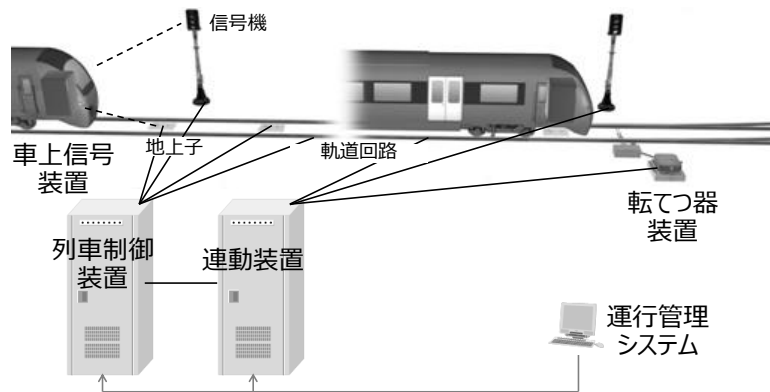


図 3-1. 代表的な軌道回路ベース信号システム

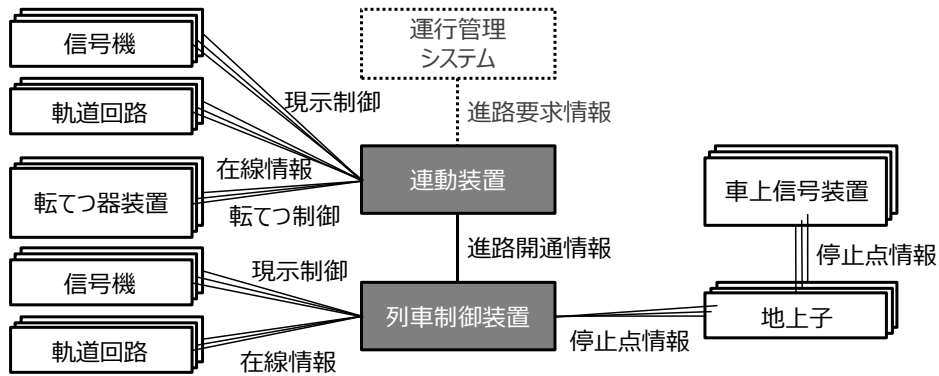


図 3-2. 軌道回路ベース信号システムの装置関連図

### 3.2.2. 無線ベース信号システム

前項に示した軌道回路ベースの信号システムは、列車の位置を検知するために、多くの軌道回路、多くのケーブルやリレーを必要とする。そのため、以前から、軌道回路装置を沿線に敷設する代わりに、列車に無線機器を搭載し、車上側の信号装置が自列車位置を地上側の列車制御装置や連動装置に伝送することができれば、コストを低減できると考えられてきた[3.15]。

このような考え方に基づいて開発された信号システムが、無線ベース信号システム(CBTC システム)であり、1999 年に IEEE で規格化[3.16]された。以後、現在まで世界各国の都市交通システムに導入されている。代表的なシステム構成図を図 3-3、装置関連図を図 3-4、各装置の機能を下記に示す。

#### (1) 列車制御装置

各列車の信号装置から無線を介して伝達される列車位置情報と、連動装置から取込んだ駅構内の進路開通情報に基づいて、それぞれの列車間に必要十分な安全間

隔が確保されるように各列車の停止限界点を計算し、計算した停止限界点を無線を介して各列車の信号装置に伝達する。

(2) 連動装置

各列車の信号装置からの列車位置情報、転てつ器の状態情報、進路要求情報を、それぞれ列車制御装置、転てつ器装置、運行管理システムから取り込み、連動論理に従って転てつ器を制御し、開通した進路の情報を列車制御装置や運行管理システムに伝達する。

(3) 車上信号装置

地上子からの地点情報と、速度センサからの速度情報の積算値に基づいて自列車位置を把握し、無線を介して地上側の列車制御装置に伝達する。一方で、列車制御装置から無線を介して伝達される停止限界点を踏まえて、必要に応じて列車のブレーキを制御する。

(4) 無線システム

車上側の信号装置と地上側の列車制御装置とを繋ぐ無線システムで、列車位置情報や停止限界点の伝送を担う。

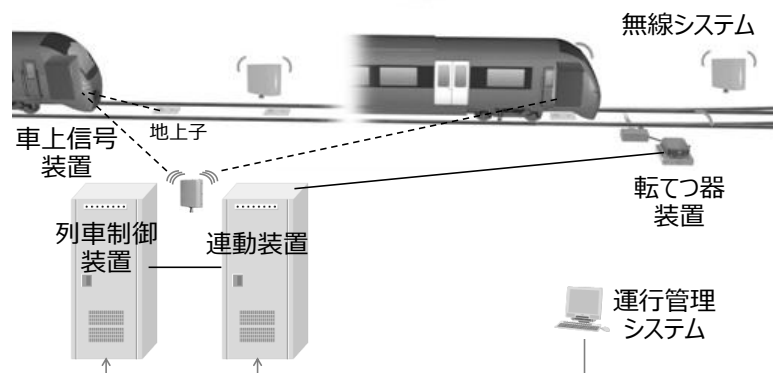


図 3-3. 代表的な無線ベース信号システム

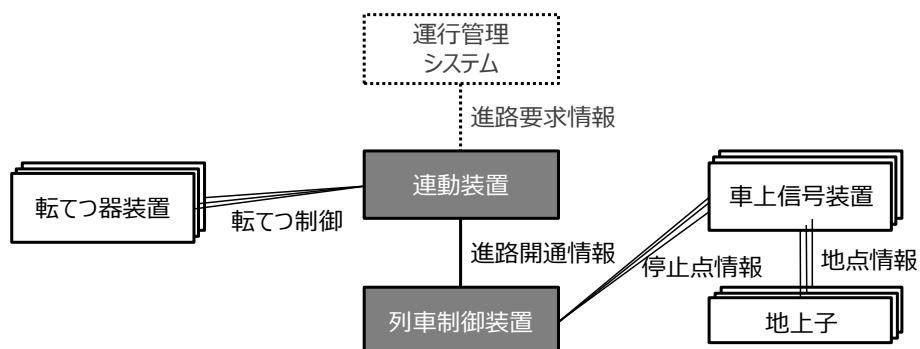


図 3-4. 無線ベース信号システムの装置関連図

### 3.3. リングトポロジーCBTC システムの提案

本節では、本論文で提案する新しい信号システムの基本概念、ならびに基本原理とその挙動について述べる。

#### 3.3.1. 基本概念

3.2.1 項の図 3-2 に示した軌道回路ベース信号システムの装置関連図を見ると、このシステムが軌道回路を含む多くの沿線機器を必要とし、高いコストを要することが分かるが、一方で、中央の信号装置である列車制御装置と連動装置が、それら沿線機器を効率よく中央制御していることも分かる。次に、3.2.2 項の図 3-4 に示した無線ベース信号システムの装置関連図を見ると、列車位置情報と停止限界点の無線伝送によって必要となる沿線機器が減ったにも関わらず、中央の信号装置である列車制御装置と連動装置が車上信号装置や転てつ器装置を中央制御する、という形は変化していない。

このように、現在の無線ベース信号システムは、多くの沿線機器を必要とした軌道回路ベース信号システムの中央制御論理を踏襲しているが、この論理は、無線を活用したことにより信号システムを構成する沿線装置を削減できた新たな状況では必ずしも効率的ではない。そこで、本研究では、地上側の列車制御装置や連動装置が沿線機器を中央制御するという論理に代わって、車上信号装置と転てつ器装置間で情報を共有してそれぞれが自律的に制御するという論理を提案する。図 3-5 に提案するシステムの装置関連図を示す。

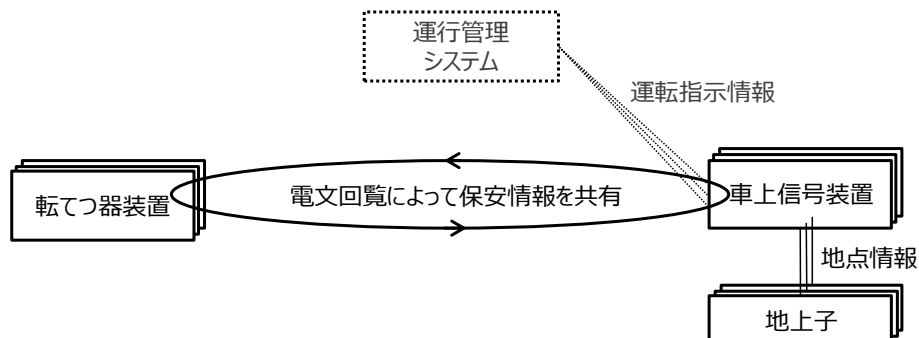


図 3-5. 提案システムの装置関連図

上記の基本概念に基づいて提案するシステムの構成は、図 3-6 に示すような形となる。基本的には、車上信号装置と転てつ器装置だけで、既存の信号システムにおいて地上側の列車制御装置や連動装置が担ってきた列車の間隔制御・排他制御、進路の構成制御を行う。このために必要となる保安情報は 1 つの電文に纏めて、車上信号装置と転てつ器装置との間で回覧させる。以後、このシステムを「リングトポロジーCBTC システム」、回覧させる電文を「保安電文」と呼ぶこととする。なお、運行管理システムは、軌道回路ベースの信号システム、無線ベースの信号システムのどちらの場合も、列車を運行するために適切な

タイミングで連動装置に進路の設定を指示していたが、提案システムの場合には、無線を使って直接車上信号装置に進路を指示する形態となる。このような形態の変化は、様々な利点をもたらすと考えられる。例えば、デッドロック防止機能については、従来、進路の設定を実行する連動装置でも、列車の在線状態に基づいて、これを防止する論理を組んでいたことから、必ずしもデッドロックに陥らないケースでも指令員に警報を出す場合があった。しかし、運行管理システムが車上装置に進路を直接指示する前提であれば、運行計画に基づいた厳密なデッドロックチェックを運行管理システム側で行うことができるようになる。このような利点については、第7章で改めて述べることとする。

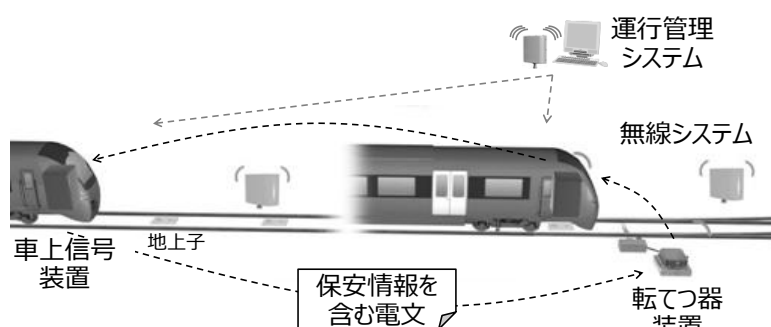


図 3-6. リングトポロジーCBTC システム

また、保安情報を 1 つの電文に纏めて回覧する仕組みについては、システム信頼性や列車運行密度に関して、従来にはなかった課題が懸念される。これについては 3.5 節で詳しく検討する。

### 3.3.2. 基本原理

このリングトポロジーCBTC システムの基本論理は、古くから単線路線で使われているタブレット閉塞式[3.17]の考え方を応用したものである。タブレット閉塞式とは、図 3-7 に示すように、駅間を 1 つの閉塞区間とし、タブレットと呼ばれる金属円盤を携行する列車にその区間を占有させる閉塞方式である。タブレットは、回線で繋がった両側の駅の閉塞機から常に 1 個だけが取り出せる仕組みとなっており、これが閉塞を保証し、閉塞区間内に複数の列車が進入することを防いでいる。

本論文では、このタブレット閉塞式の考え方を次のように応用する。

- (1) 線路を仮想的なブロックに分割し、各ブロックに占有権を設定する。
- (2) ブロック内に転てつ器がある場合、その制御権はその転てつ器の属するブロックの占有権に付随する。

- (3) ブロック占有権の設定情報、転てつ器の転換指示情報、状態情報は、当該区間を走行する列車の車上信号装置と当該区間に属する転てつ器装置との間で無線を介して共有される。
- (4) 列車に対して進路の走行が許可される条件は、その列車の車上信号装置が進路上の全ブロックの占有権を確保し、進路上の全ての転てつ器が進路を開通される方向に鎖錠されていることが確認できた場合である。
- (5) (4)の条件が成立していない場合、車上信号装置は、列車を当該進路に進入しないように制御する。

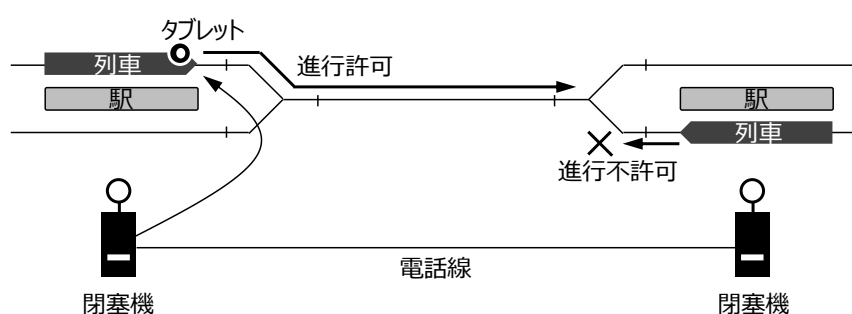


図 3-7. タブレット閉塞式

### 3.3.3. 保安電文

リングトポロジーCBTC システムでは、前項の基本原理に基づいて列車の間隔制御・排他制御、進路の構成制御を実現するために、車上信号装置と転てつ器装置との間で下記 4 情報を含む保安電文を回覧させる。例えば、図 3-8 に示す区間における保安電文の例を表 3-1 に示す。

#### (1) ブロック占有権の設定情報

各ブロックの占有権の所在を示す情報。ブロック内に転てつ器がある場合にはその転てつ器の制御権も付随する。車上信号装置は、解放されている占有権に限り確保することができ、その際は列車 ID を記入する。また解放する時にはこれを消去する。

#### (2) 転てつ器に対する転換指示情報

各転てつ器に対して転換を指示する情報。制御権を持つ車上信号装置が、進路を開通させる方向を記入し、転てつ器装置はこれを受けて転てつ器を転換する。

#### (3) 転てつ器の状態情報

各転てつ器の鎖錠状態を示す情報。転てつ器装置が状態を記入し、車上信号装置はこれを受けて転てつ器の状態を確認する。

#### (4) 回覧装置リスト

保安電文の回覧順を示すリスト。保安電文を受信した装置は、保安電文を更新した後、このリストの順序に従って次の装置に保安電文を送信する。

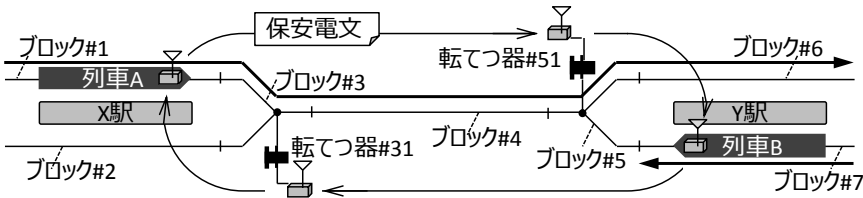


図 3-8. 保安電文の管轄区間の例

表 3-1. 保安電文の例

No.	保安情報	対象	内容
(1)	ブロック占有権の設定情報	ブロック#1	列車 A
		ブロック#2	—
		ブロック#3	列車 A
		ブロック#4	列車 A
		ブロック#5	列車 A
		ブロック#6	列車 A
		ブロック#7	列車 B
(2)	転てつ器に対する転換指示情報	転てつ器#51	定位
		転てつ器#31	反位
(3)	転てつ器の状態情報	転てつ器#51	定位鎖錠
		転てつ器#31	反位鎖錠
(4)	回覧装置リスト	No.1	列車 A
		No.2	転てつ器#51
		No.3	列車 B
		No.4	転てつ器#31

なお、列車がある保安電文の管轄区間内に進入する場合、その列車の車上信号装置は、事前に当該保安電文が回覧されている装置(例えば、当該区間の転てつ器装置)へ当該保安電文の回覧を要求する。要求された装置は、次の保安電文の回覧時に当該列車 ID を回覧装置リストに追加する。このような仕組みによって、管轄区間に進入する列車の車上信号装置に保安電文が回覧されてくるようになる。進入する列車の車上信号装置は、これを待つてブロックの占有権を確保する。

なお、回覧装置リストに新たな装置を追加する際は、自装置の前に追加する。回覧装置リスト先頭の場合には、回覧装置リストの最後に新たな装置を追加する。これは後述するように、システム信頼性向上の目的で、保安電文の消失を素早く検知するために、各装置

が回覧装置数に基づいて保安電文の受信タイムアウトを設定するためであり、もし、このような制約無く、新たな装置を回覧リストに追加してしまうと、他の装置は、その装置に保安電文が回覧されることを事前に認識することができず、不必要なタイムアウトを検知したり、それを防ぐためにタイムアウトに不必要な余裕時間を考慮しなくてはならなくなるからである。

逆に、列車が保安電文の管轄区間外へ進出した時には、その列車の車上信号装置は、次の保安電文の回覧時に回覧装置リストから自列車 ID を消去する。これにより、進出した列車の車上信号装置には保安電文が回覧されなくなる。

また、前項の基本原理に基づく列車の間隔制御・排他制御、進路の構成制御の安全性を確保する上では、保安電文の唯一性が鍵となる。従って、リングトポロジーCBTC システムでは、保安電文の初期設定と再発行を下記のように制限する。

#### 初期設定

システム開始時、指令員は、保安電文の初期設定を行う転てつ器装置を指定する(以後、権限装置と呼ぶ)。権限装置は、全ての車上信号装置に列車位置の報告を要求し、要求された車上信号装置は列車位置を報告する。その後、権限装置は、車上信号装置から報告を受けた列車位置に基づいて、ブロック占有権をそのブロックに在線している列車に与える形で、保安電文を初期設定し、指令員に確認を要求する。指令員は、保安電文の管轄区間内に存在している列車の位置を運転士との電話連絡等で確認し、保安電文上でそれぞれの列車に対してブロック占有権が正確に設定されているかを確認した後、保安電文の回覧を指示する。権限装置は、この指示を受けて保安電文を回覧させる。なお、その際、装置間の保安電文送受信に要する想定伝送時間、装置内での保安電文更新に要する想定処理時間、電文を回覧する装置数を踏まえ、ある程度の余裕時間を見込んだ有効期限を設定する。以後、この有効期限は保安電文回覧の度に権限装置によって更新される。

#### 再発行

一度保安電文の回覧が開始されれば、通常、システム稼働中は保安電文を再び発行することは無い。しかしながら、保安電文が消失してしまった場合には、例外的に、その保安電文の管轄区間の制御が停止しないよう、保安電文を安全かつ速やかに再発行する。そのために、保安電文を回覧している車上信号装置や転てつ器装置には、前回の保安電文送信から、回覧装置数に基づいて規定するタイムアウト時間以内に次の保安電文を受信できなかった場合に、保安電文受信タイムアウトを運行管理システムに報告させるようにし、運行管理システムには、この保安電文受信タイムアウトを通知



された場合に、保安電文を回覧している装置の中から保安電文の再発行を行う装置を指定させる(以後、権限装置と呼ぶ。初期設定時の権限装置から変更してもよい)。そして、指定された権限装置は、保安電文を回覧している全ての装置に対して保安電文の送受信ログを報告するよう要求し、その後、それぞれの装置から報告された送受信ログに基づいて、保安電文を復元し、元の保安電文の有効期限が経過した後、復元した保安電文を回覧させる。なお、詳細な手順、ならびに復元に要する時間の分析についてはそれぞれ 3.6.1 項、3.7.1 項で詳しく述べる。

### 3.3.3. システム挙動

次に、リングトポロジーCBTC システムにおいて、保安電文の情報がどのように更新され、列車や転てつ器がどのように制御されるか、図 3-9 の網掛けで示す区間を管轄する保安電文を例に説明する。この区間は 5 つのブロック(#2, #3, #4, #5, #6)に分割され、2 つの転てつ器(#31, #51)がそれぞれブロック#3, #5 に存在するものとする。

- i. 保安電文は回覧装置リストに従って転てつ器装置#31, #51 との間で回覧されている。
- ii. 列車 A が X 駅に到着すると、列車 A の車上信号装置は、保安電文の管轄区間へ進入するために、転てつ器装置#31 に保安電文の回覧を要求する。これを受けた転てつ器装置#31 が回覧装置リストに列車 A を追加する。
- iii. これにより、保安電文は、回覧装置リストに従って列車 A の車上信号装置に回覧されるようになる。
- iv. 保安電文を受信した列車 A の車上信号装置は、Y 駅までの進路上の全てのブロックの占有権設定状態を確認する。4 つのブロック(#3, #4, #5, #6)の占有権が解放されていることを確認した後、これを確保するために自列車 ID を記入する。さらに進路上の転てつ器に対して、転換方向(転てつ器#31 は反位, 転てつ器#51 は定位)を記入する。
- v. この保安電文を受信した転てつ器装置(#31, #51)は、それぞれ保安電文に記入された指示方向に転てつ器の転換を開始する。
- vi. 転てつ器装置(#31, #51)は、転てつ器を指示方向に転換し、鎖錠が完了した後、次の保安電文の回覧時にその鎖錠状態を記入する。
- vii. この保安電文を受信した列車 A の車上信号装置は、Y 駅までの進路上の全ての転てつ器が所定の方に鎖錠されていることを確認できるので、Y 駅までの進路が開通したと判断し、停止限界点を当該進路の終端(ブロック#6 終端)まで延長し、運転士に進行許可を与える。
- viii. この時点で、反対方向から列車 B が Y 駅に到着したとする。列車 B の車上信号装置は、保安電文の管轄区間へ進入するために、転てつ器装置#51 に保安電文の回覧

- を要求する。これを受けた転てつ器装置#51が回覧装置リストに列車Bを追加する。
- ix. これにより、保安電文は、回覧装置リストに従って列車Bの車上信号装置にも回覧されるようになる。但し、X駅までの進路上のブロック(#2, #3, #4, #5)のうち、#3, #4, #5の占有権が列車Aによって確保されているため、これらの占有権が解放されるまでは、列車Bの車上信号装置はこれらを確保することはできない。
  - x. 列車Aの後端がブロック#3を抜けた後、列車Aの車上信号装置は、次の保安電文の回覧時にブロック#3の占有権を解放する。
  - xi. 続いて、列車Aの後端がブロック#4を抜けた後、列車Aの車上信号装置は、次の保安電文の回覧時にブロック#4の占有権を解放する。
  - xii. 同様に、列車Aの後端がブロック#5を抜けた後、列車Aの車上信号装置は、次の保安電文の回覧時にブロック#5の占有権を解放する。
  - xiii. ブロック#5の占有権が解放された後、列車Bの車上信号装置は、X駅までの進路上の全てのブロック(#2, #3, #4, #5)の占有権を確保できるようになる。そこで、次の保安電文の回覧時にこれらの占有権を確保し、進路上の転てつ器に対して、転換方向(転てつ器#51は反位、転てつ器#31は定位)を記入する。
  - xiv. この保安電文を受信した転てつ器装置(#31, #51)は、それぞれ保安電文に記入された指示方向に転てつ器の転換を開始する。その時、保安電文上の転てつ器状態は非鎖錠に更新する。
  - xv. 次に、列車Aがこの保安電文の管轄区間から進出したとする。つまり、列車Aの後端がブロック#6を抜けたとする。この時、列車Aの車上信号装置は、次の保安電文の回覧時にブロック#6の占有権を解放すると同時に回覧装置リストから自列車IDを消去する。
  - xvi. これにより、以後、保安電文は、列車Aの車上信号装置には回覧されず、転てつ器装置#31, #51, 列車Bの車上信号装置の間で回覧されるようになる。
  - xvii. その後、転てつ器装置(#31, #51)が、転てつ器を指示方向に鎖錠が完了すれば、保安電文を介して、列車Bの車上信号装置は、X駅までの進路が開通したと判断できるので、停止限界点を当該進路の終端(ブロック#2終端)まで延長し、運転士に進行許可を与える。

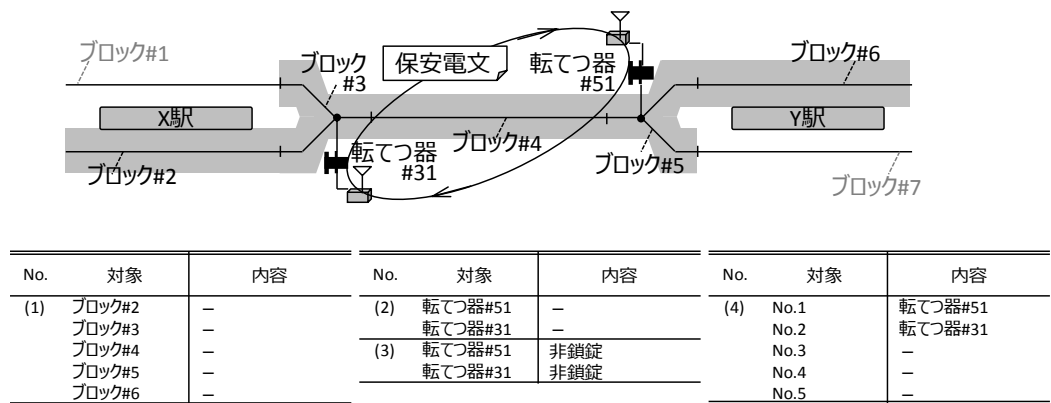


図 3-9-1. Step i

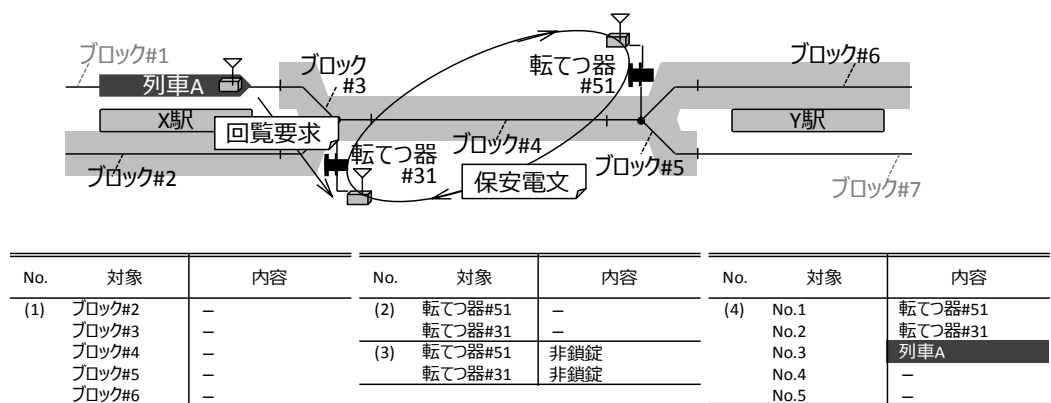


図 3-9-2. Step ii

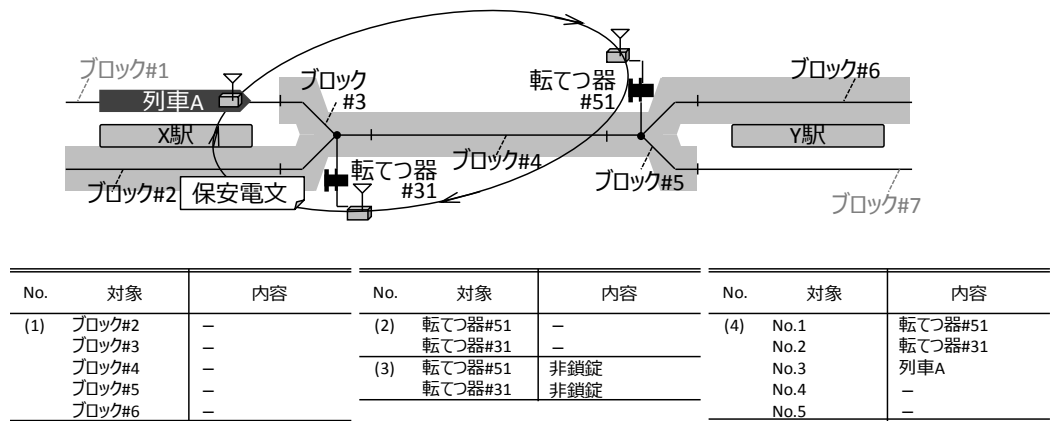


図 3-9-3. Step iii

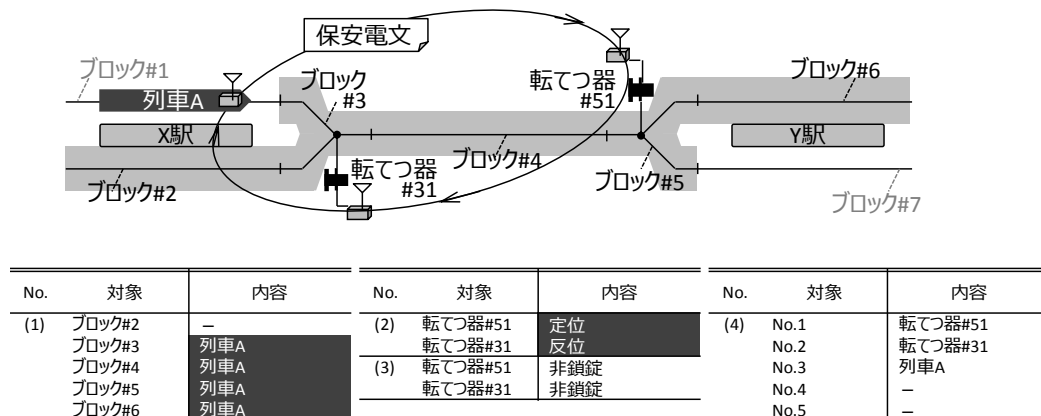


図 3-9-4. Step iv

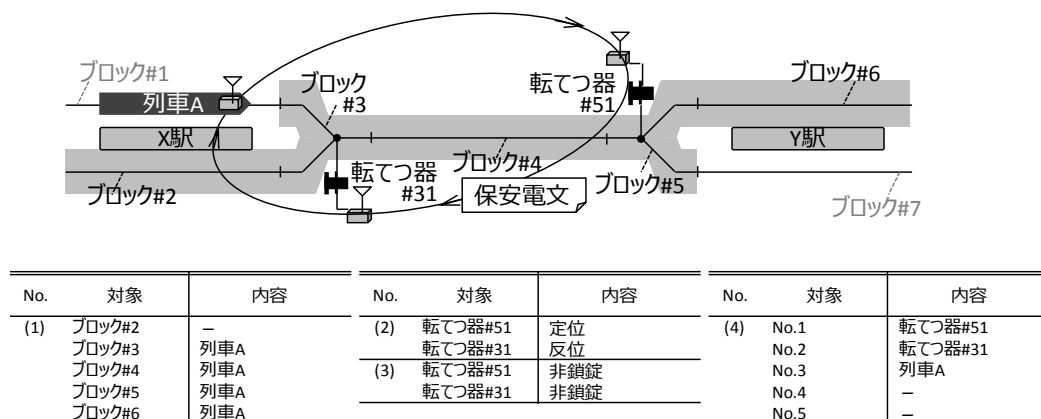


図 3-9-5. Step v

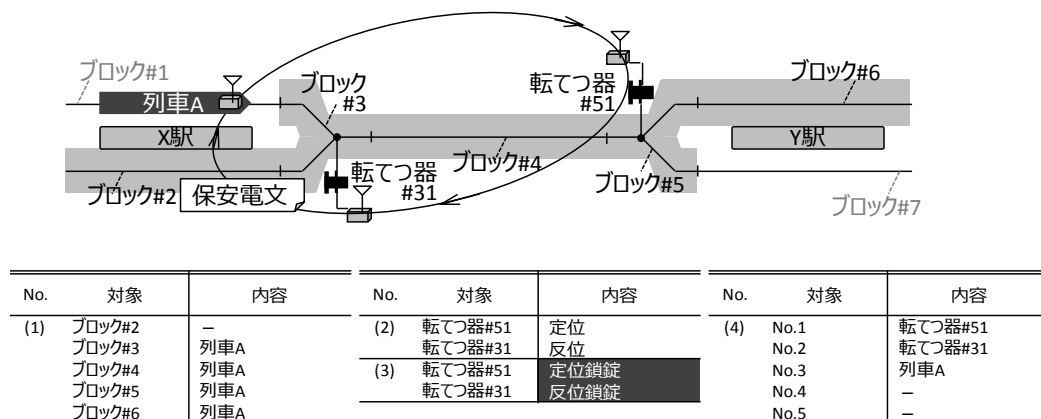


図 3-9-6. Step vi

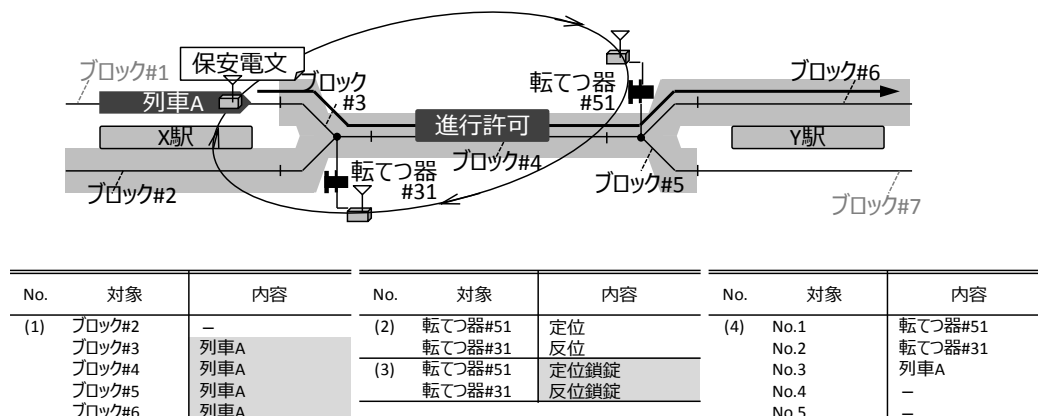


図 3-9-7. Step vii

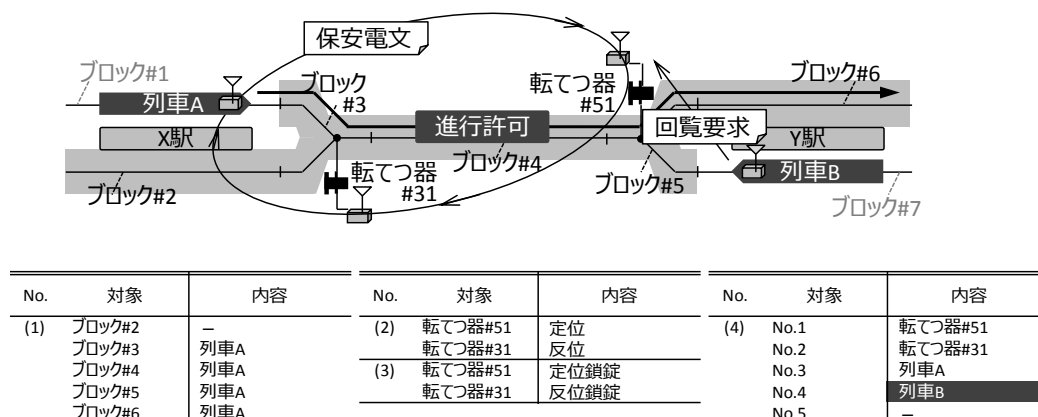


図 3-9-8. Step viii

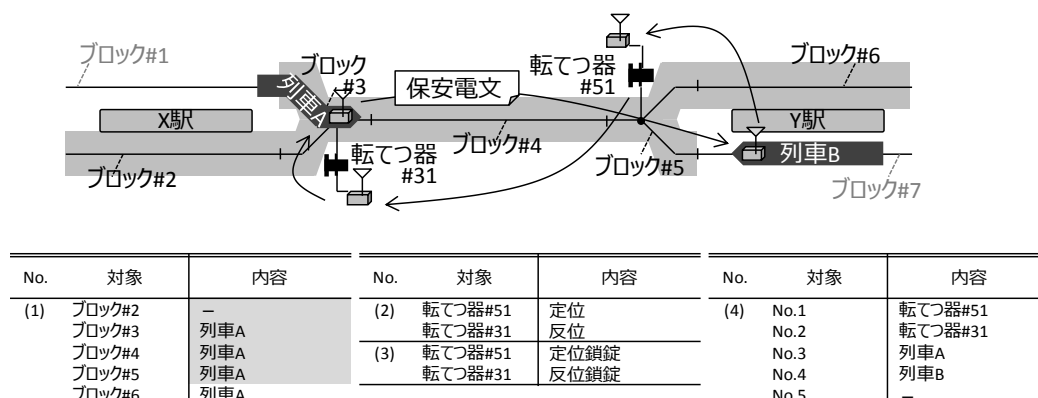


図 3-9-9. Step ix

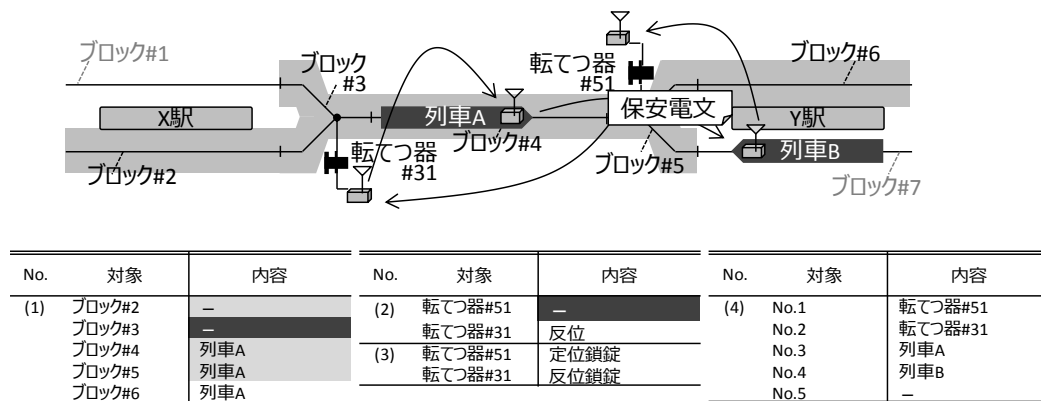


図 3-9-10. Step x

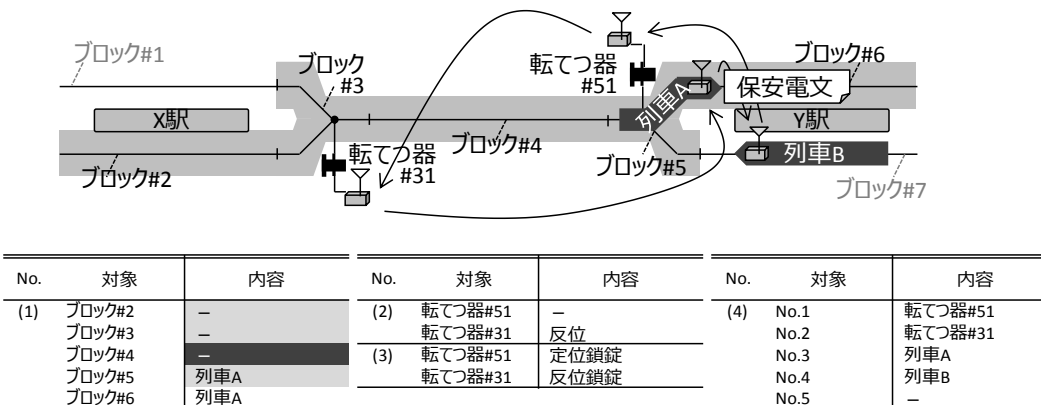


図 3-9-11. Step xi

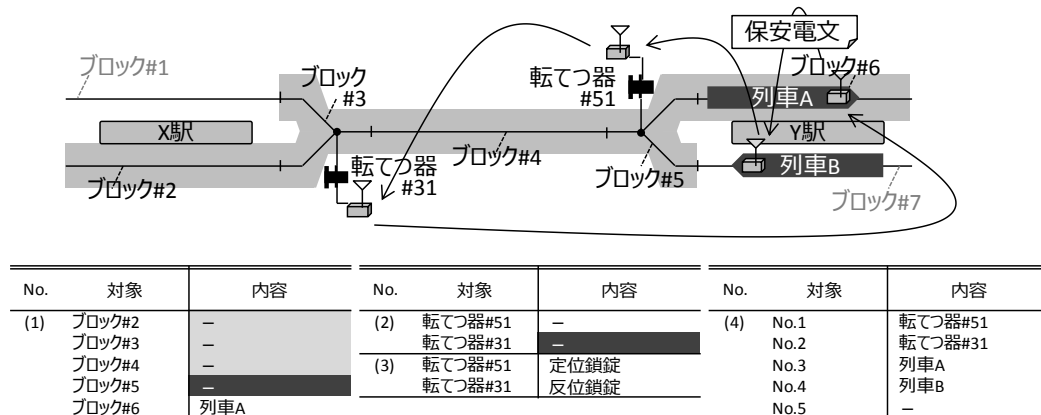


図 3-9-12. Step xii

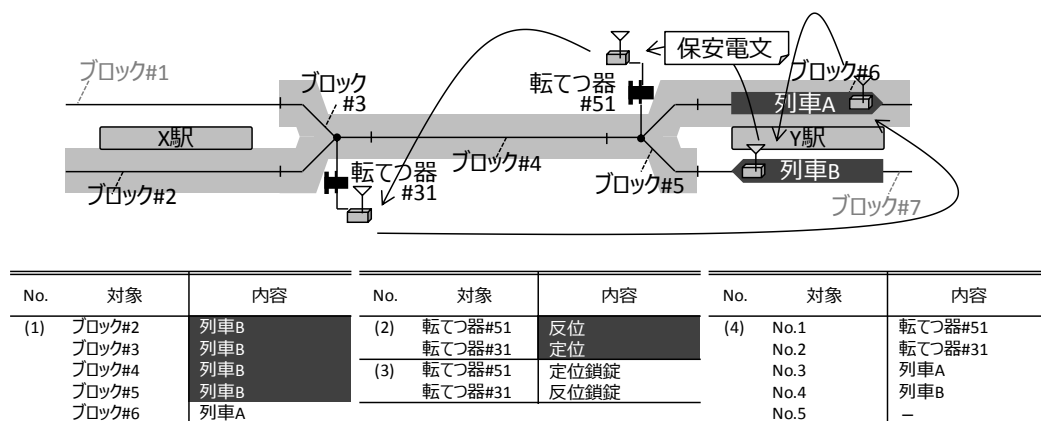


図 3-9-13. Step xiii

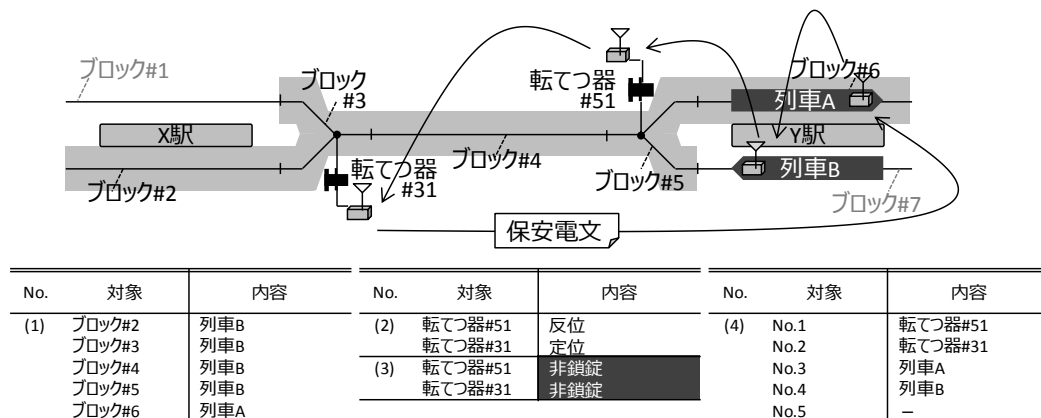


図 3-9-14. Step xiv

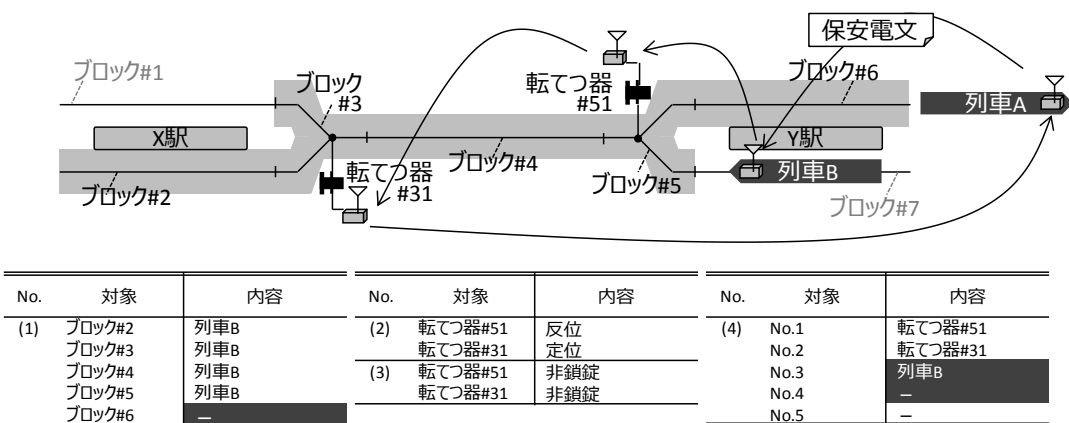


図 3-9-15. Step xv

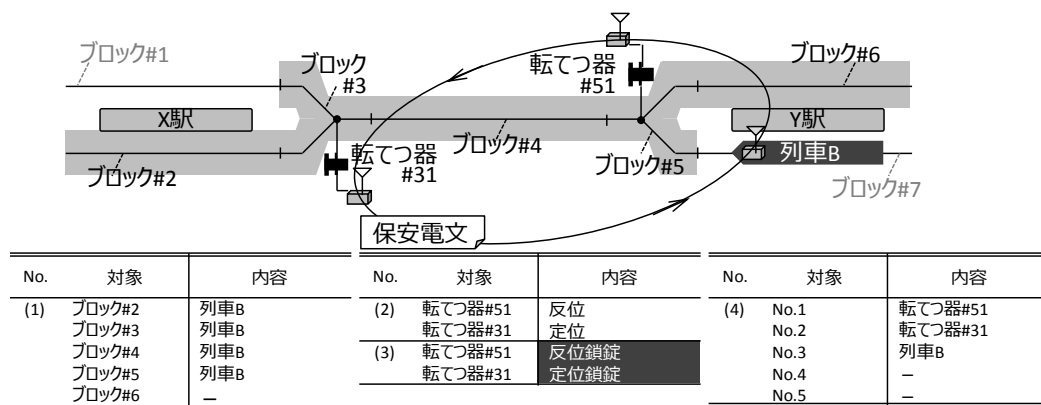


図 3-9-16. Step xvi

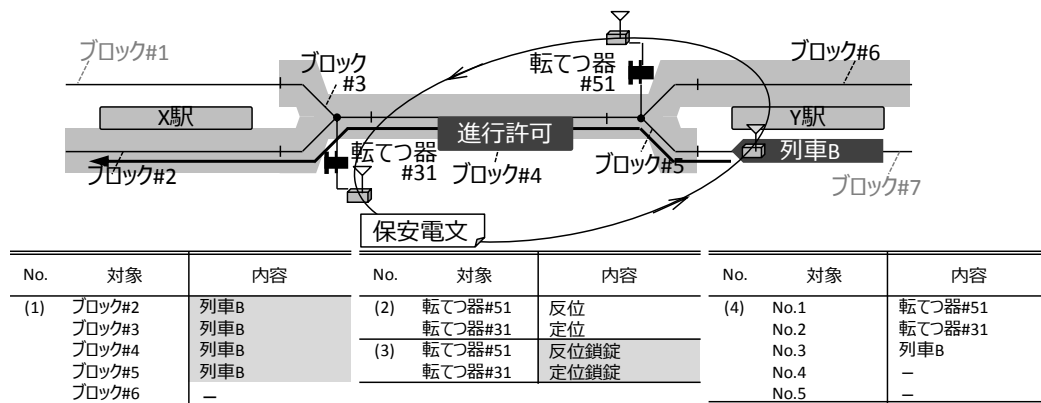


図 3-9-17. Step xvii

リングトポロジーCBTC システムは、このように 1 つの電文でその管轄区間内の保安情報を一元管理し、この電文の管轄区間内に存在する全ての保安装置間で回覧する仕組みで、列車の間隔制御・排他制御、進路の構成制御を実現する。なお、本項では、単純な線路配線の区間でシステム挙動を説明したが、この仕組みは、線路配線が複雑な区間においても同様に適用でき、同様の制御が可能である。

また、列車の分割・併合や救援など、特殊な運用に対しても十分な機能性を備えうるか、ということについては、実用化設計において詳細に検証していくが、回覧される電文を用いて全ての保安装置間で 1 つの情報を共有するという仕組みは、どのような特殊な保安機能にも応用することが可能である。例えば、列車を併合する場合には、ブロックの分割を適切に変更したり、他列車の占有ブロックへの進入を条件付きで許可するなどの方法で、既存の信号システムと同等の機能を実現することができる。



### 3.4. リングトポロジーCBTC システムの特長

本節では、リングトポロジーCBTC システムの 3 つの特長について述べる。

#### 3.4.1. 簡素なシステム構成

リングトポロジーCBTC システムの 1 つ目の特長は、無線を活用した保安情報の共有によって、車上信号装置と転てつ器装置だけで列車の間隔制御・排他制御、進路の構成制御を実現できる点である。これを実現させるための車上信号装置、転てつ器装置、無線システムの機能を下記に示す。

##### (1) 車上信号装置

保安電文の回覧によって共有される情報に基づいて列車を安全に制御する。具体的には、保安電文の回覧時に、ブロック占有権の設定情報、転てつ器に対する転換指示情報を記入することで走行する進路を設定、保安電文内の転てつ器の状態情報を確認することで進路の開通・非開通を判断し、自律的に停止限界点を計算する。そして、地上子からの地点情報と、速度センサからの速度情報の積算値に基づいて自列車位置を把握し、必要に応じて列車のブレーキを制御する。

##### (2) 転てつ器装置

保安電文の回覧によって共有される情報に基づいて転てつ器を安全に制御する。具体的には、制御権を持つ車上信号装置によって保安電文内に記入された転換方向に転てつ器を転換し、鎖錠後には保安電文にその鎖錠状態を記入する。

##### (3) 無線システム

車上信号装置と転てつ器装置とを繋ぐ無線システムで、ブロック占有権の設定情報、転てつ器に対する転換指示情報、状態情報、回覧装置リストを含む保安電文の回覧を担う。

#### 3.4.2. 十分な機能性

2 つ目の特長は、3.5 節に後述するシステム固有のリスクがあるものの、前項に示したような簡素なシステム構成で、既存の信号システムと同等の機能を実現できる点である。リングトポロジーCBTC システムが実現する駅中間における列車の間隔制御、ならびに駅構内における列車の排他制御と進路の構成制御の内容を下記に示す。

##### (1) 駅中間における列車の間隔制御

既存の信号システムでは、地上側の列車制御装置が、軌道回路装置からの列車在線情報もしくは車上信号装置からの列車位置情報に基づいて、制御区間内に存在する列車の位置を把握し、それぞれの列車間に必要十分な安全間隔を確保できるように各列車の停止限界点を計算し、これを軌道回路や地上子もしくは無線を用いて車上側に伝達していた。

これに対し、リングトポロジーCBTC では、各々の車上信号装置が、保安電文内

のブロック占有権の設定情報を確認することによって他列車の占有範囲を認識することができる。そして、解放されているブロック占有権を確保して、駅中間での停止限界点を延長させることができる。なお、これは仮想ブロックによる固定閉塞方式の列車間隔制御とも言えるが、ブロックを細かく分割すれば、移動閉塞方式と同等の列車間隔制御となり、**virtual block** 式の移動閉塞方式に分類されるのが一般的である。

## (2) 駅構内における列車の排他制御と進路の構成制御

既存の信号システムでは、地上側の連動装置が、軌道回路装置からの列車在線情報もしくは車上信号装置からの列車位置情報に基づいて、制御区間内に存在する列車の位置を把握し、連動論理の上で運行管理システムから要求された進路を開通できる場合には転てつ器を制御し、開通した進路の情報を列車制御装置に伝達していた。

これに対し、リングトポロジーCBTC では、転てつ器の属するブロックの占有権を確保した車上信号装置が、保安電文内に転換指示情報を記入することで転てつ器を制御することができ、転てつ器装置が、保安電文内に鎖錠状態を記入することによって、車上装置は転てつ器の状態を確認することができる。これにより、車上信号装置は、走行する進路の設定および開通判断を行うことができる。

### 3.4.3. コスト低減

3つ目の特長は、コストの高い地上側の列車制御装置や連動装置を必要としないので、装置コストが低く抑えられる点である。表 3-2 に、6 連動駅を含む 30km 複線路線を前提とした既存の信号システムとの導入コスト比較結果を示す。各装置の価格比率は鉄道部門におけるコストデータ[3.4]、導入コスト全体における装置コストの割合は市場調査報告[3.18]から試算した。市場調査報告[3.18]によると、30km の複線路線に既存の無線ベース信号システムを導入した場合の総コストは約 71.1 million EUR であり、その約 28.1%を装置コストが占めると報告されている。

この試算の結果、軌道回路をベースとした信号システムの導入コストは 78.5M EUR(うち装置コストは 33.0M EUR)、無線をベースとした信号システムの導入コストは 71.1M EUR(うち装置コストは 20.0M EUR)となった。その一方で、リングトポロジーCBTC システムの導入コストは 59.7M EUR で、そのうち装置コストは高々 8.6M EUR である。これは単なる 1 つのケースの結果に過ぎないが、リングトポロジーCBTC システムが、その特長として、既存の信号システムでは必要不可欠なコストの高い地上側の列車制御装置や連動装置を必要とせず、装置コストの低減に大きな効果を持つことは明らかである。

表 3-2. 既存の信号システムとリングトポロジーCBTC システムの装置コスト比較

No.	装置	装置価格 比率 (10 <sup>3</sup> EUR)	必要 装置数	装置コスト比率 (10 <sup>3</sup> EUR)		
				軌道回路ベース 信号システム	無線ベース 信号システム	リングトポロジー CBTC
1	列車制御装置	1000	6	6000	6000	—
2	軌道回路	80	120	9600	—	—
3	信号機	10	120	1200	—	—
4	ケーブル (per km)	50	30	1500	—	—
5	連動装置	1000	6	6000	6000	—
6	転てつ器装置	25	24	600	600	600
7	転てつ器装置用	25	24	—	—	600
8	車上信号装置(パター ン制御機能なし/あり)	17/170	30	510	5100	5100
9	無線システム (per km)	10	30	—	300	300
10	運行管理システム	2000	1	2000	2000	2000
装置コスト合計				27410	20000	8600
11	その他のコスト (据付、試験、試運 転、調整、保守等)			51100	51100	51100
導入コスト合計				78530	71100	59720

### 3.5. システム固有の課題

リングトポロジーCBTC システムは、前節で述べたように、既存の信号システムに対して優れた特長がある一方、装置間で 1 つの保安電文を回覧させる仕組みのため、システム信頼性や列車運行密度に関して、従来には無かったシステム固有の課題が懸念される。本節では、このようなシステム固有の課題を抽出する。

#### 3.5.1. 保安電文消失による制御停止リスク

既存の無線ベース信号システムは、3.2.2 項の図 3-4 に示したように、中央の信号装置である列車制御装置から車上信号装置への制御情報が 1 対多通信で高頻度に伝送されるため、一時的な通信エラーによって伝送情報が消失した場合でも、次の機会に伝達される情報でこれを補って制御を継続することができる。また、車上信号装置や転てつ器装置が故障した場合も、その影響は当該列車や当該転てつ器の制御に限定され、地上側の列車制御装置が故障しない限り、その他の制御は継続することができる。

これに対し、リングトポロジーCBTC システムは、3.3.1 項の図 3-6 に示すようにブロッ

ク占有権の設定情報、転てつ器に対する転換指示情報や状態情報を含む1つの保安電文を、車上信号装置と転てつ器装置との間で回覧させる仕組みのため、通信エラーや装置故障等で保安電文が消失してしまった場合、保安電文の管轄区間全域で制御が停止することになる。

通信エラーに対しては、既に一般的に用いられている高信頼通信プロトコルを用いることでその発生確率を低くすることができる。具体的には、電文に誤り検知符号を付加したり、図3-10のように通信を高信頼化する再送手順を実装すればよい。また、装置故障についても、既存の信号システムで行われているように装置を冗長化することで故障確率を低く抑えることが可能である。

但し、上記の対策では、保安電文消失の発生確率を低く抑えることが可能とはなるが、ゼロにすることはできない。つまり、実用化に向けては、保安電文消失の発生確率を低く抑える対策に加え、保安電文が消失した際のシステム復旧の仕組みが必要となる。この課題に対する解決策については次節で述べる。

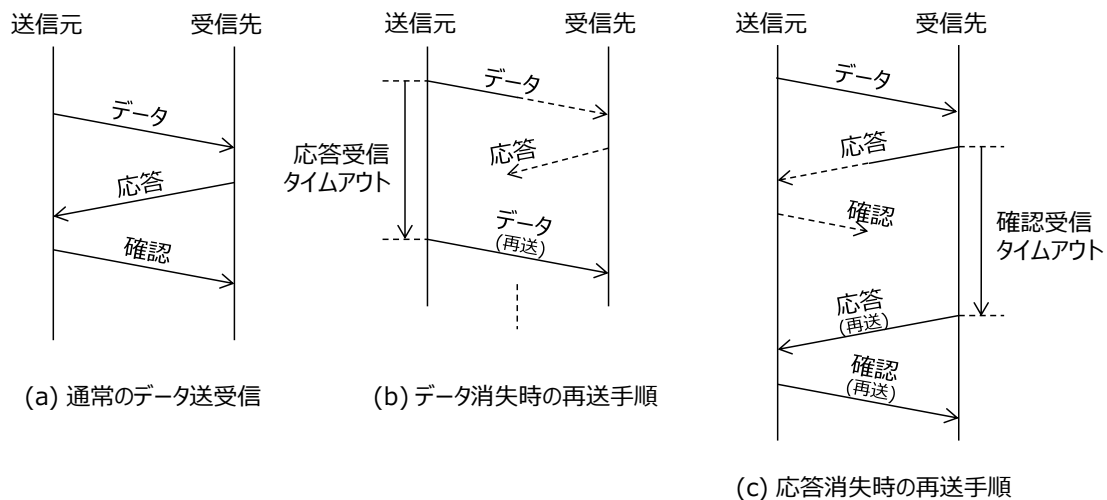


図3-10. 高信頼再送手順

### 3.5.2. 保安電文回覧の仕組みによる運転密度低下のリスク

もう1つのシステム固有の課題は、列車の運転時隔に与える影響である。前項でも説明したように、既存の無線ベース信号システムは、中央の信号装置である列車制御装置と車上信号装置との間で情報を高頻度に1対多通信して、高密度な列車運行を可能としている[3.19][3.20][3.21]。例えば、図3-11に示す転てつ器区間において列車Aと列車Bが順番に走行する時に、列車Aがブロック#2を通過してから転てつ器が列車Bの走行方向への転

換指示を認識するまでに要する時間は、図 3-12 のタイムチャートに示す通りになる。

これに対し、リングトポロジーCBTC システムは、車上信号装置や転てつ器装置への情報伝達が電文回覧の度になることから、列車 A が通過してから転てつ器が列車 B の走行方向への転換指示を認識するまでに要する時間は、図 3-13 のタイムチャートに示すようになり、既存の無線ベースシステムより時間がかかってしまうことが分かる。その上、保安電文の管轄範囲が広い場合や、列車密度が高い場合には、保安電文を回覧する車上信号装置や転てつ器装置の数が増えるため、さらに時間がかかることになる。この課題に対する解決策についても次節で述べる。

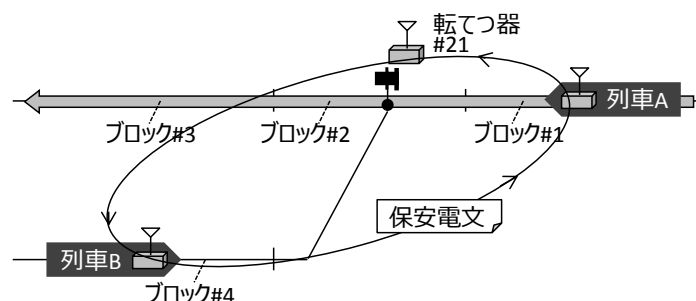


図 3-11. 転てつ器区間の例

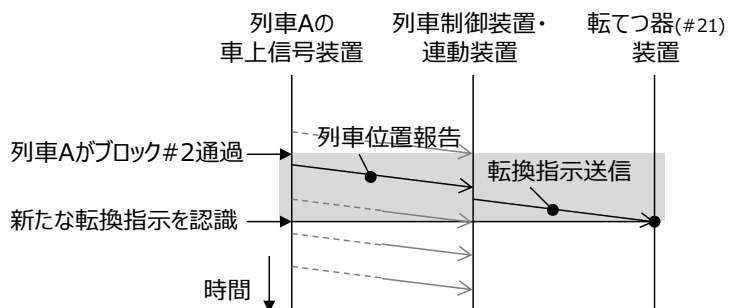


図 3-12. 既存の無線ベース信号システムの転てつ器に対する転換指示フロー

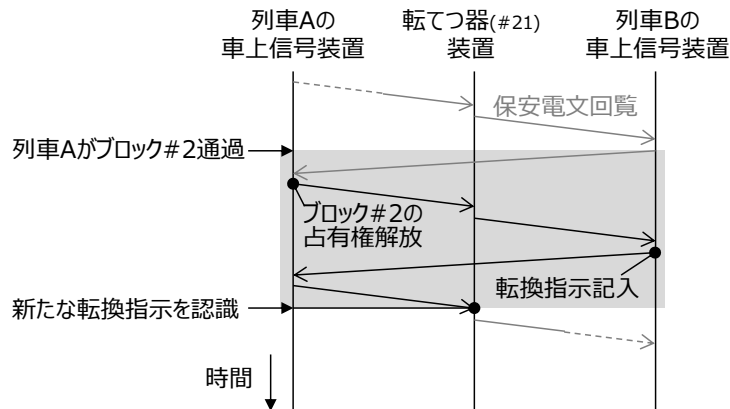


図 3-13. リングトポロジーCBTC システムの転てつ器に対する転換指示フロー

### 3.6. システム固有の課題を解決する仕組み

本節では、リングトポロジーCBTC の実用化に向け、前節で挙げたシステム固有の課題を解決する仕組みを述べる。

#### 3.6.1. 選定された1台の装置による消失保安電文の復元

本項では、3.5.1 項に挙げた保安電文消失による制御停止リスクに対する解決策を述べる。この課題に対し、本研究では、図 3-14 に示すように、列車の運行を管理する運行管理システムと連携して、1 台の車上信号装置もしくは転てつ器装置が他の装置から電文送受信ログを収集し、収集した情報に基づいて消失した保安電文を復元する仕組みを考案した。運行管理システムと連携する仕組みとした理由は、電文の復元に必要となる機能のうち、保安に影響しないものについては、信号システムから切り離すことで、コストのかかる保安装置の機能を最小限を抑えるためである。具体的な仕組みを下記に示す。

- (1) 車上信号装置と転てつ器装置は、前回の保安電文送信から、回覧装置数に基づいて規定する受信タイムアウト時間以内に次の保安電文を受信できなかった場合、保安電文受信タイムアウトを運行管理システムに報告する。なお、受信タイムアウト時間は、装置間の保安電文送受信に要する想定伝送時間に装置内での保安電文更新に要する想定処理時間を加算したものに、電文を回覧している装置数(回覧1周に要する送受信回数)を乗算、これに余裕時間を加えて決定する。なお、車上信号装置に関しては、保安電文の遅延や消失が即座に危険事象には至らないものの、周囲の車上信号装置や転てつ器装置に故障が発生している可能性が考えられるため、常用ブレーキを作動させ列車を停止させることとする。
- (2) この保安電文受信タイムアウトを通知された運行管理システムは、保安電文を回覧している装置の中から1台の装置(以後、権限装置と呼ぶ)を選定し、その装置に対して、保安電文を回覧している全装置から保安電文の送受信ログを収集するよう指

示する。なお、運行管理システムが直接この情報を収集せず、車上信号装置もしくは転てつ器装置に収集させる理由は、運行管理システムは保安装置として設計されていないからである。もし運行管理システムが保安電文の送受信ログを収集し、消失した保安電文を復元した場合、その処理過程でエラーが発生してもこれがフェイルセーフに処理されるとは限らず、保安電文の安全性が低下してしまうからである。以後の手順においても、保安電文の復元に直接影響を与える処理については、保安装置として設計されている車上信号装置もしくは転てつ器装置によって実行される。

- (3) 権限装置は、保安電文を回覧している装置に対して、保安電文の送受信ログを報告するよう要求する。
- (4) 権限装置から上記要求を受けた装置は、保安電文の送受信ログを報告し、その際、もし保安電文を更新中もしくは送受信中であればその旨も報告する。
- (5) 権限装置は、各装置からの報告内容によって下記 3 つの対応を行う。
  - ① 保安電文を更新中もしくは送受信中の装置を確認できた場合、電文受信タイムアウトの原因は通信環境の悪化等による一時的な伝送遅延と考えられるため、権限装置は運行管理システムに電文の所在を報告し、以後、特段の処理は行わない。通信環境が回復すれば、列車や転てつ器の制御が再開される。
  - ② 保安電文の更新中もしくは送受信中の装置を確認できないが、全装置から保安電文の送受信ログの報告があった場合、保安電文は送受信中に消失したと考えられるので、全装置の保安電文の送受信ログの中から最も新しい情報を使って保安電文を復元し、この保安電文を回覧させる。これによって、列車や転てつ器の制御が再開される。
  - ③ 保安電文の更新中もしくは送受信中の装置を確認できず、一部の装置から保安電文の送受信ログの報告が無い場合、応答の無い装置の故障によって保安電文が消失したと考えられる。この場合、権限装置は運行管理システムに無応答装置を報告、指令員が当該装置の状況を確認し、保安電文消失以外の異常が発生していないことを確認できた場合には、保安電文の送受信ログの中から最も新しい情報を使って保安電文を復元し、故障装置を外して保安電文を回覧させる。これによって、故障装置の影響の無い列車や転てつ器の制御が再開される。なお、保安電文消失以外の異常が発生している場合には、その異常が解消されるまで保安電文を回覧させない。

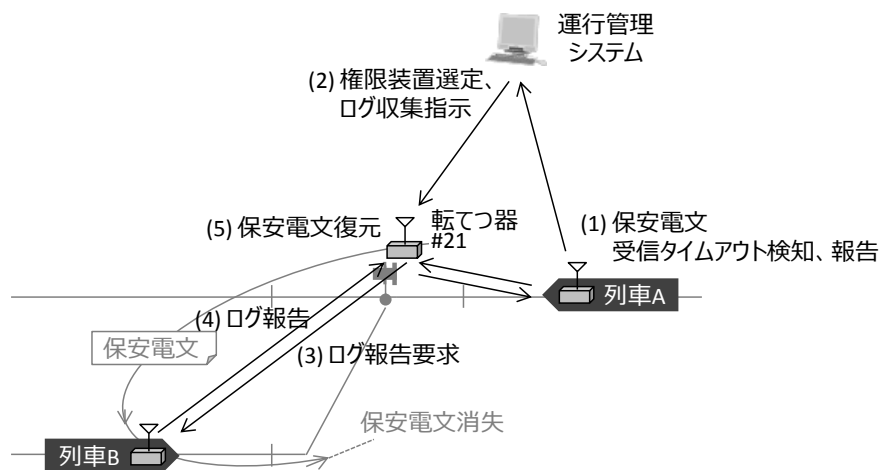


図 3-14. 選定された 1 台の装置による消失保安電文の復元手順

### 3.6.2. 適切な管轄区間設定による回覧装置数の最小化

次に、3.5.2 項に挙げた保安電文回覧の仕組みによる運転密度低下のリスクに対する解決策を述べる。この課題に対し、本研究では、まず、保安電文を回覧する装置数を少なくすることを対策として挙げる。

具体的には、1 つの保安電文の管轄区間を狭く設定すればよい。一般的に最も列車が錯綜して運行される地点は端末駅であると想定されるが、例えば複線路線の 2 線端末駅であれば同時に運行される列車は多くても 3 列車程度である。駅構内には双動転てつ器が 2 つ設置されているとして、このような端末駅構内を 1 つの保安電文で管轄すると、回覧装置数は最大でも 5 つに抑えられる。

### 3.6.3. 保安電文回覧順序の動的変更による運転時隔の短縮

さらに、保安電文回覧の仕組みによる運転密度低下を抑えるための解決策として、保安電文の回覧順序を動的に変更し、必要なタイミングで車上信号装置や転てつ器装置に保安電文を送受信させる仕組みを考案した。

具体的には、保安電文に、ブロック占有権を解放する想定時刻と次に確保する列車 ID、転てつ器に対する次の転換指示、転てつ器の鎖錠される想定時刻の情報を追加し、これらの情報を車上信号装置と転てつ器装置との間で共有し、保安電文の回覧順序を動的に変更する仕組みである。この時の保安電文の例を表 3-3 に、具体的な仕組みを下記に示す。

まず、転てつ器を含まないブロックの確保・解放についての仕組みを下記に示す。

- (1) 先行列車の車上信号装置は、列車の運行計画に基づいて走行する進路上のブロック



の占有権を確保して走行していくが、進路開通を認識した時点から列車の運行計画と現在位置・速度に基づいて列車後端がそれぞれのブロックを抜ける時刻を予測し、保安電文に想定解放時刻に記入する。これ以降、ブロック占有権を解放するまで、保安電文回覧の度に想定解放時刻を更新する。

- (2) 一方、後続列車の車上信号装置も、列車の運行計画に基づいて走行する進路上のブロックの占有権を確保していくが、確保しようとするブロックの占有権が解放されていない場合には、保安電文上でこのブロックの占有権を予約する。
- (3) 保安電文を回覧しているその他の装置は、保安電文回覧の度に全てのブロック占有権の予約状況と想定解放時刻を確認し、予約がありかつ想定解放時刻の過ぎたブロックがある場合には、保安電文の回覧装置リストに記された自装置の電文送信先を、このブロック占有権を確保している列車の車上信号装置に変更して保安電文を送信する。
- (4) 保安電文を送信された先行列車の車上信号装置は、列車後端が抜けたブロックの占有権を解放し、後続列車の車上信号装置による予約を有効化する。そして、保安電文の回覧装置リストに記された自装置の電文送信先を、この列車の車上信号装置に変更して保安電文を送信する。
- (5) 後続列車の車上信号装置は、保安電文を受信した時点で、予約していたブロック占有権を確保できたことを確認することができる。

次に、転てつ器を含むブロックの確保・解放についての仕組みを下記に示す。

- (1) 先行列車の車上信号装置は、列車の運行計画に基づいて走行する進路上のブロックの占有権を確保して走行していくが、進路開通を認識した時点から列車の運行計画と現在位置・速度に基づいて列車後端がそれぞれのブロックを抜ける時刻を予測し、保安電文に想定解放時刻に記入する。これ以降、ブロック占有権を解放するまで、保安電文回覧の度に想定解放時刻を更新する。
- (2) 一方、後続列車の車上信号装置も、列車の運行計画に基づいて走行する進路上のブロックの占有権を確保していくが、確保しようとするブロックの占有権が解放されていない場合には、保安電文上でこのブロックの占有権と当該ブロックに含まれる転てつ器に対する転換方向を予約する。
- (3) 保安電文を回覧しているその他の装置は、保安電文回覧の度に全てのブロック占有権の予約状況と想定解放時刻を確認し、予約がありかつ想定解放時刻の過ぎたブロックがある場合には、保安電文の回覧装置リストに記された自装置の電文送信先を、このブロック占有権を確保している列車の車上信号装置に変更して保安電文を送信する。
- (4) 保安電文を送信された先行列車の車上信号装置は、列車後端が抜けたブロックの占有権を解放し、後続列車の車上信号装置によるブロック占有権と転換方向の予約を

有効化する。そして、保安電文の回覧装置リストに記された自装置の電文送信先を、この転てつ器装置に変更して保安電文を送信する。

- (5) 転てつ器装置は、保安電文を受信した時点で、後続列車の車上信号装置からの転換方向を確認することができ、転換を開始する。同時に、鎖錠時刻を予測し、保安電文に想定鎖錠時刻に記入する。これ以降、転てつ器の鎖錠が完了するまで、保安電文回覧の度に想定鎖錠時刻を更新する。
- (6) 電文を回覧しているその他の装置は、保安電文回覧の度に全ての転てつ器の想定鎖錠時刻を確認し、想定鎖錠時刻の過ぎた転てつ器がある場合には、保安電文の回覧装置リストに記された自装置の電文送信先を、この転てつ器装置に変更して保安電文を送信する。
- (7) 保安電文を送信された転てつ器装置は、保安電文に転てつ器の鎖錠状態を記入し、保安電文の回覧装置リストに記された自装置の電文送信先を、この転てつ器に転換方向を指示した後続列車の車上信号装置に変更して電文を送信する。
- (8) 後続列車の車上信号装置は、保安電文を受信した時点で、予約していたブロック占有権の確保、ならびに転てつ器の指示方向への鎖錠を確認することができる。

なお、上記は 1 つのブロックに着目して説明したが、全てのブロックに対して同様の制御を行う。つまり、車上信号装置は、前方のブロックに関しては後続列車の装置として振る舞い、後方のブロックに関しては先行列車の装置として振る舞うこととなる。

表 3-3. 保安電文の回覧順序を動的に変更するための情報を加えた保安電文の例

No.	保安情報	対象	内容	想定解放時刻 想定鎖錠時刻	予約
(1)	ブロック占有権の設定情報	ブロック#1 ブロック#2 ブロック#3 ブロック#4 ブロック#5 ブロック#6 ブロック#7	列車 A — 列車 A 列車 A 列車 A 列車 A 列車 B	--:--:-- 09:01:15 09:01:45 09:05:05 09:05:15 --:--:-- --:--:--	— — 列車 B 列車 B 列車 B — —
(2)	転てつ器に対する転換指示情報	転てつ器#51 転てつ器#31	定位 反位		反位 定位
(3)	転てつ器の状態情報	転てつ器#51 転てつ器#31	定位鎖錠 反位鎖錠	--:--:-- --:--:--	
(4)	回覧装置リスト	No.1 No.2 No.3 No.4 No.5	列車 A 転てつ器#51 列車 B 転てつ器#31 —		

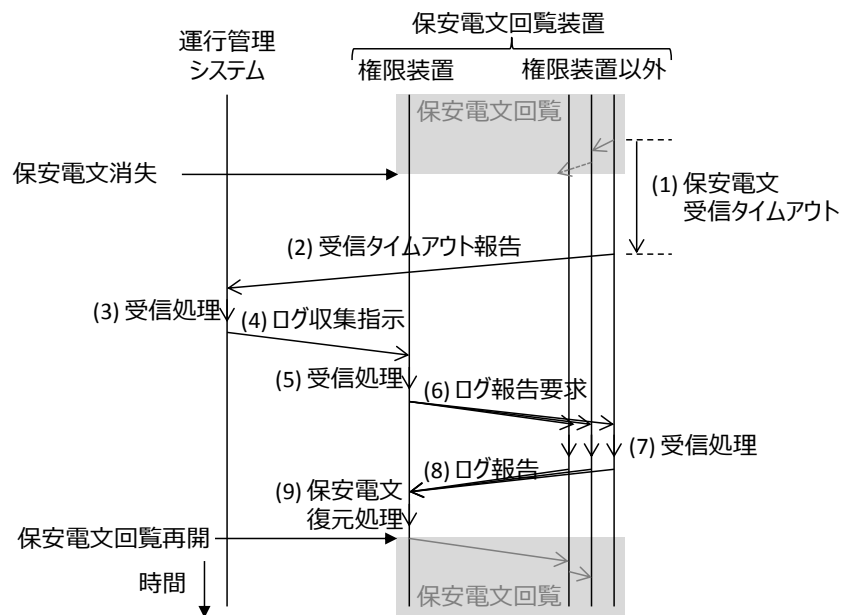
### 3.7. ケーススタディによる効果検証

本節では、前節で述べたシステム固有の課題を解決する仕組みを導入することによる効果を検証する。

#### 3.7.1. 権限装置によるシステム復旧時間短縮効果

保安電文が消失した時に、3.6.1 項で説明した保安電文復元の仕組みによってシステムが復旧するまでの時間は、図 3-15 のタイムチャートに示す(1)-(9)となる。

保安電文受信タイムアウト時間(1)を 3.0 s、装置間の情報伝送時間(2)(4)(6)(8)、装置内での情報処理時間(3)(5)(7)(9)をとともに 0.5 s と想定すると、合計で 7.0 s となる。一般的に、運転時隔は 10s 程度の余裕時間を持って運用されることから[3.22]、万一、保安電文が消失したとしても、このシステム復旧の仕組みを導入することによって、その余裕時間内でシステムを復旧させることが可能となることが分かる。



- (1) 保安電文消失→検知： 保安電文受信タイムアウト
- (2) 検知装置→運行管理システム： 保安電文受信タイムアウト報告の情報伝送
- (3) 運行管理システム： 保安電文受信タイムアウト報告の受信処理
- (4) 運行管理システム→権限装置： 保安電文の送受信ログ収集指示の情報伝送
- (5) 権限装置： 保安電文の送受信ログ収集指示の受信処理
- (6) 権限装置→各装置： 保安電文の送受信ログ報告要求の情報伝送
- (7) 各装置： 保安電文の送受信ログ報告要求の受信処理
- (8) 各装置→権限装置： 保安電文の送受信ログ報告の情報伝送
- (9) 権限装置： 保安電文の送受信ログによる電文復元処理

図 3-15. 保安電文消失から復元までのタイムチャート

### 3.7.2. 電文回覧順序の動的変更による運転時隔短縮効果

続いて、3.6.2 項、3.6.3 項で説明した仕組みによって、どの程度の運転時隔短縮効果が期待できるか計算する。なお、このケーススタディでは、運転密度低下のリスクを正当に評価するため、運転密度の要求の厳しい高密度輸送を目的とする都市交通システムを前提とする。使用するパラメータは表 3-4 に示す値とする。

表 3-4. ケーススタディに用いるパラメータ

No.	パラメータ	値
1	列車長	54 m
2	加速度	3.6 km/h/s
3	常用ブレーキ減速度	2.4 km/h/s
4	非常ブレーキ減速度	3.6 km/h/s
5	最高速度	60 km/h
6	駅構内制限速度	30 km/h
7	列車間隔余裕距離	20 m
8	仮想ブロック長	5 m
9	転てつ器転換時間	5 s
10	乗降時間 (中間駅/端末駅)	30 s / 60 s
11	装置内の情報処理時間	0.25 s
12	データ伝送時間 (有線/無線)	0.25 s / 0.5 s
13	運転時隔余裕時間	10 s

#### (1) 中間駅における運転時隔

まず、図 3-16 に示す中間駅における続行時隔について、既存の無線ベース信号システム、リングトポロジーCBTC システム(電文回覧順序：固定)、リングトポロジーCBTC システム(電文回覧順序：動的変更)とを比較する。それぞれのシステムにおいて図 3-17 に示す続行時隔を計算し、その結果を物理的制約、運用的制約、情報伝達時間に分けて表 3-5 に示す。リングトポロジーCBTC システムの場合には、保安電文が 3 装置間で回覧されている前提とし、回覧順序固定の場合には先行列車の車上信号装置から後続列車の車上信号装置への情報伝達に 5 回の情報伝送が必要となる最悪ケース(先行列車の回覧順が 1 番目、後続列車が 3 番目の場合)を考慮した。

表 3-5 に示す結果を見ると、中間駅における続行時隔に関しては、ブロック長の影響による物理的制約の増加と保安電文回覧による情報伝送時間の増加が見られるものの、これらの影響は極めて小さく、リングトポロジーCBTC システムの最小続行時隔は既存の無線ベース信号システムと比べて 1.5～3.0s、高々2～4%

程度しか増加しないことが分かる。



図 3-16. 中間駅の例

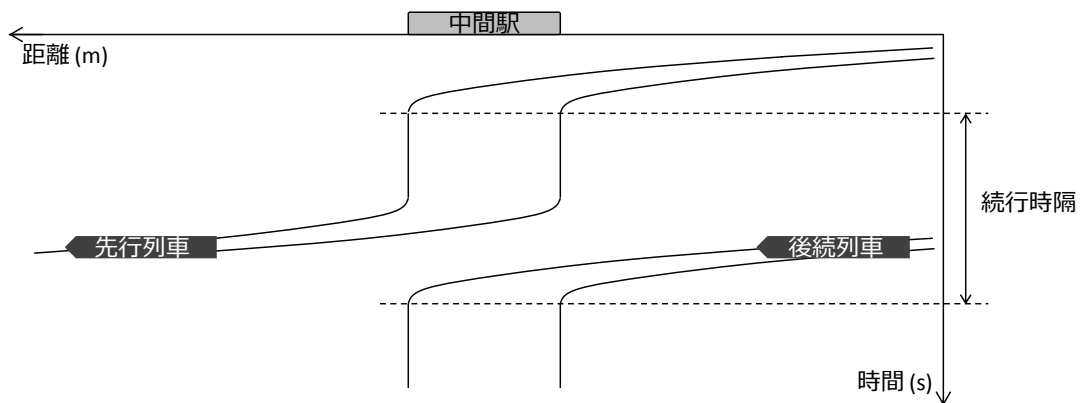


図 3-17. 中間駅における続行時隔

表 3-5. 既存の無線ベース信号システムとリングトポロジーCBTC システムの続行時隔比較

No.	システム	物理的制約 (s)	運用的制約 (s)	情報伝達時間 (s)	運転時隔余裕時間 (s)	最小続行時 隔 (s)
1	既存の無線ベース信号システム	28.5	30.0	1.8	10.0	70.3
2	リングトポロジーCBTC システム (電文回覧順序：固定)	29.5	30.0	3.8	10.0	73.3
3	リングトポロジーCBTC システム (電文回覧順序：動的変更)	29.5	30.0	2.3	10.0	71.8

## (2) 端末駅における運転時隔

次に、図 3-18 に示す端末駅における折返時隔について、既存の無線ベース信号システム、リングトポロジーCBTC システム(電文回覧順序：固定)、リングトポロジーCBTC システム(電文回覧順序：動的変更)とを比較する。一般的に、端末駅での列車運行は複雑であり、ここでの運転時隔が路線全体の運行密度を決定する。1 番線で折り返す列車を C、2 番線で折り返す列車を D とし、図 3-19 に示す各列車間の運転時隔を計算し、その結果を物理的制約、運用的制約、情報伝達時間に分けて表 3-6 に示す。リングトポロジーCBTC システムの場合には、電文が 5 装置間で回覧されている前提とし、回覧順序固定の場合には装置から装置への

情報伝達に 13 回の情報伝送が必要となる最悪ケース(先行列車の回覧順が 1 番目、後続列車の回覧順が 5 番目の場合)を考慮した。

表 3-6 に示す結果を見ると、端末駅における運転時隔に関して、最も大きな制約となるのがケース iii の時隔であることが分かる。このケースでは、リングトポロジーCBTC システムは回覧順序を変更しないと、最悪ケースで既存の無線ベース信号システムと比べ 23.0s、25%も増加してしまうことが分かる。しかし、3.6.3 項で説明した保安電文回覧順序を動的に変更仕組みを導入することで、情報伝達時間を 19.5s も削減することができ、既存の無線ベース信号システムと比べて 3.0s、高々3%程度しか増加させないで済むようになることが分かる。

つまり、運転時隔に一般的に 10s 程度の余裕時間を持って運用される状況で、リングトポロジーCBTC システムの保安電文回覧の仕組みが与える運転時隔への影響は、3.6.3 項で説明した保安電文回覧順序を動的に変更仕組みを導入することで高々3.0s 程度に抑えられることが分かる。以上から、運転時隔 90s 程度の高密度路線へ適用する場合を想定しても、リングトポロジーCBTC システムは、運転密度低下のリスクに対して実用上問題無いレベルに解消されると結論付けられる。

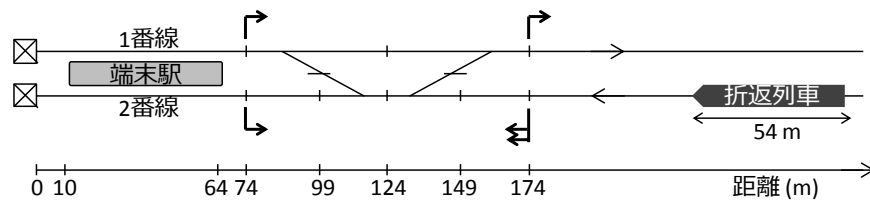


図 3-18. 端末駅の例

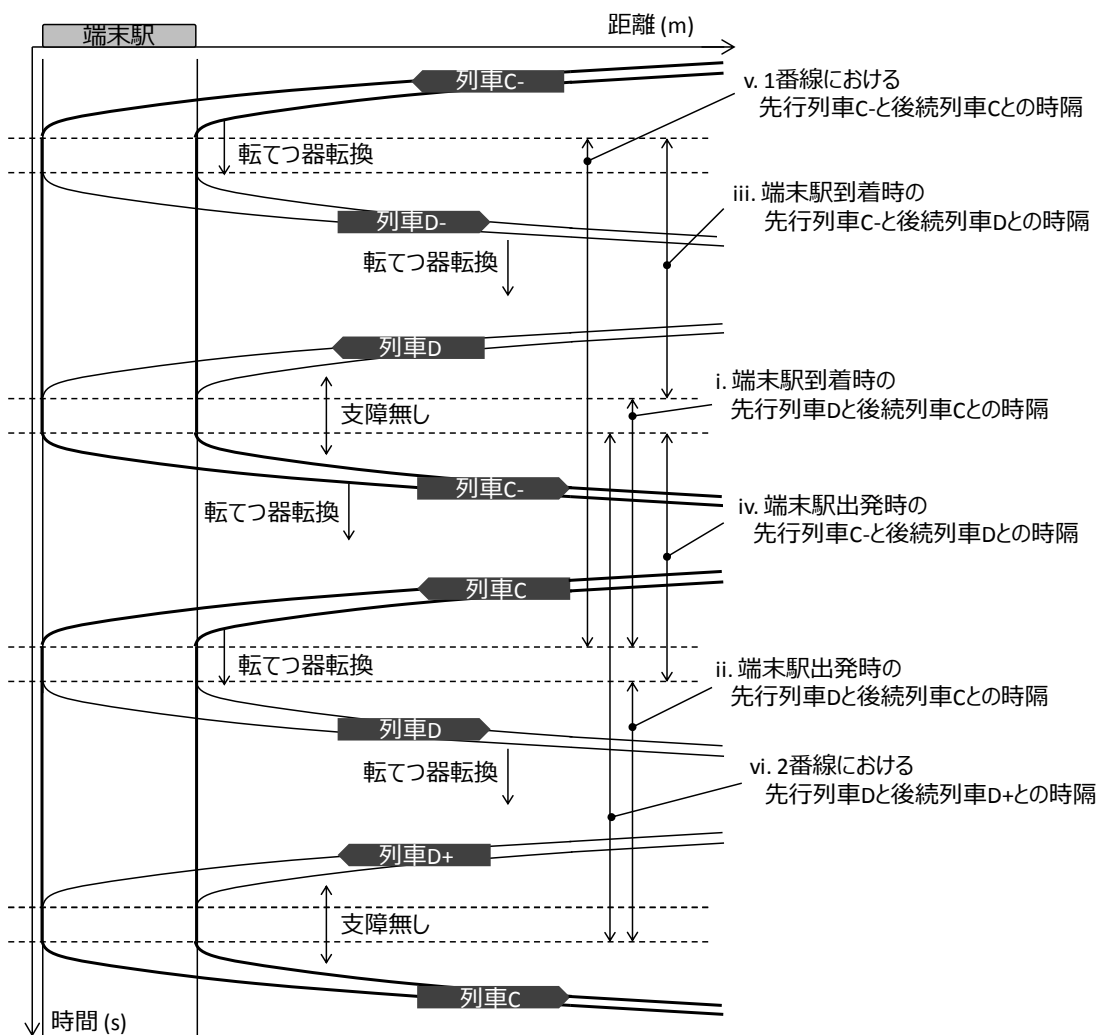


図 3-19. 端末駅における各列車間の時隔

表 3-6. 既存の無線ベース信号システムとリングトポロジーCBTC システムの折返時隔比較

Case	システム	物理的制約 (s)	運用的制約 (s)	情報伝達時 間 (s)	運転時隔余 裕時間 (s)	最小続行時 隔 (s)
i	既存の無線ベース信号システム	43.8	0.0	3.0	10.0	56.8
	リングトポロジーCBTC システム (電文回覧順序：固定)	43.8	0.0	14.3	10.0	68.1
	リングトポロジーCBTC システム (電文回覧順序：動的変更)	43.8	0.0	4.5	10.0	58.3
ii	既存の無線ベース信号システム	28.8	0.0	3.0	10.0	41.8
	リングトポロジーCBTC システム (電文回覧順序：固定)	28.8	0.0	14.3	10.0	53.1
	リングトポロジーCBTC システム (電文回覧順序：動的変更)	28.8	0.0	4.5	10.0	43.3

iii	既存の無線ベース信号システム	77.3	0.0	6.0	10.0	93.3
	リングトポロジーCBTC システム (電文回覧順序：固定)	77.3	0.0	29.0	10.0	116.3
	リングトポロジーCBTC システム (電文回覧順序：動的変更)	77.3	0.0	9.0	10.0	96.3
iv	既存の無線ベース信号システム	71.3	0.0	6.0	10.0	87.3
	リングトポロジーCBTC システム (電文回覧順序：固定)	71.3	0.0	29.0	10.0	110.3
	リングトポロジーCBTC システム (電文回覧順序：動的変更)	71.3	0.0	9.0	10.0	90.3
v	既存の無線ベース信号システム	71.8	60.0	3.0	10.0	144.8*
	リングトポロジーCBTC システム (電文回覧順序：固定)	71.8	60.0	14.3	10.0	156.1*
	リングトポロジーCBTC システム (電文回覧順序：動的変更)	71.8	60.0	4.5	10.0	146.3*
vi	既存の無線ベース信号システム	77.8	60.0	3.0	10.0	150.8*
	リングトポロジーCBTC システム (電文回覧順序：固定)	77.8	60.0	14.3	10.0	162.1*
	リングトポロジーCBTC システム (電文回覧順序：動的変更)	77.8	60.0	4.5	10.0	152.3*

\*: ケース v と vi は、それぞれ 1 番線、2 番線における先行列車と後続列車の時隔であり、その間に他方の番線で 1 本の列車が折返している点に注意。

### 3.8. まとめ

輸送量の少ない路線では、列車運行の安全を担う信号システムのコスト低減が喫緊の課題である。しかしながら、信号システムは、これを構成する装置にフェイルセーフ機構、もしくはそれに準じた多数決論理での演算処理が求められるため、鉄道システムのインフラ施設の中でも相対的に重層的かつ高コストな設備となりがちであった。

長年使われてきた信号システムは、フェイルセーフに列車を検知する軌道回路装置を多く用いるものであった。そこで、近年、このような軌道回路ベース信号システムのコスト削減を目的として、無線を活用した信号システムが開発された。この無線ベース信号システムは、車上―地上間の無線通信を活用して車上側の信号装置が地上側の列車制御装置や連動装置に自列車位置を伝達する仕組みによって、軌道回路装置を不要とすることができた。但し、列車の間隔制御、排他制御、進路の構成制御を行う上では従来からの中央制御論理を踏襲しており、車上信号装置や転てつ器装置からの情報を短時間かつフェイルセー



フ機構に準じた多数決論理で処理するための高い演算処理能力や照合検定能力を必要とする地上側の列車制御装置や連動装置を依然として必要とするシステムであった。

このような状況に対し、本研究では、古くから使われているタブレット閉塞式の考え方を発展させて、車上信号装置と転てつ器装置だけで信号システムとしての機能を実現する「リングトポロジーCBTC システム」を提案した。具体的には、線路を仮想的なブロックに分割して各ブロックに占有権を設定し、この占有権の所在を示す情報と転てつ器の方向指示情報、状態情報を「保安電文」に纏め、これを車上信号装置と転てつ器装置間で回覧させる新しい車上装置主体型の信号システムである。

本章では、まず、このリングトポロジーCBTC システムの基本概念と基本原理を説明し、車上信号装置、転てつ器装置、無線システムというシンプルなシステム構成によって、列車の間隔制御、排他制御、進路の構成制御という信号システムに求められる機能を実現できることを説明した。列車の分割・併合や救援など、特殊な運用に対しての機能性については、今後の実用化設計において詳細に検証していくが、回覧される電文を用いて全ての保安装置間で 1 つの情報を共有するという仕組みは、どのような特殊な保安機能にも応用することが可能である。

次に、列車制御装置や連動装置という中央の信号装置を不要とするシンプルなシステム構成によって、既存の無線ベース信号システムと比較して、導入コストを約 16%、装置コストをおよそ 1/3 程度にまで低減させることを示した。

その上で、実用化に向けて、保安電文消失による制御停止リスク、保安電文回覧の仕組みに起因する運転密度低下のリスクというシステム固有の課題を抽出し、これを解決する仕組みを示した。具体的には、保安電文消失の発生確率を低く抑える高信頼通信プロトコル、権限装置による消失保安電文を復元手順、保安電文回覧装置数を最小化する適切な管轄区間設定、運転時隔を短縮する保安電文回覧順序の動的変更という対策である。

最後に、その対策の効果を都市交通システムを想定したケーススタディで評価し、運転密度の要求の緩やかな輸送量の少ない路線はもちろん、運転密度の要求の厳しい輸送量の大きい路線においても、実用上問題無く適用できる信号システムであることを明らかにした。

## 4. インターオペラブル車上信号装置

### 4.1. はじめに

2.2 節の「鉄道ネットワークのシームレス化における経済性の課題」で述べたように、2000 年 10 月の運輸政策審議会では、鉄道事業者の取り組むべき今後の施策に関して、現在までの混雑緩和を目的とした大規模なインフラ投資から、旅客の利便性向上を目的とした交通機関相互間のシームレス化へ重点を移すべきである、との方向性が示されている[2.6]。

鉄道ネットワークの相互直通化については、欧州においていち早く取り組みが開始され、2004 年には EU 域内鉄道の相互直通化を目的とした技術仕様(TSI)が制定された。この TSI には、基本設備・電力・車両・信号・運転・保守・情報通信のサブシステムごとに相互運用のための技術仕様が規定されている[2.18]。

特に信号システムに関しては、欧州 21 カ国に 23 種類ものシステムが存在しており、相互直通運転を行う列車に、予め走行する全ての路線に適合する信号システムを搭載しておく、というようなことは不経済であると考えられた。そこで、国際鉄道事業者連合(UIC)と欧州鉄道メーカ連合(UNISIG)は、TSI 制定以前から ERTMS/ETCS と呼ばれる欧州統一列車制御システムの検討を開始しており、2000 年には、その中の信号システム部分である ETCS のシステム要求仕様規格(version 2.0.0)を策定した。その後、この仕様に基づいて試作された車上信号装置がスペインの研究所で機能検証され、さらに、地上側の列車制御装置と合わせて、オーストリア・ハンガリー国境、ドイツ、フランス、イタリア、スペイン、オランダ、英国において、信号システムとしての機能、ならびにそれぞれの国の環境への適合性などが試験された。そして、2002 年にブルガリアのソフィア―ブルゴス間で、ETCS は初めて実用化された[4.1]。

日本の鉄道には、軌間や電気方式に関していくつかの種類が存在しており、これらも鉄道ネットワークの相互直通化における課題となっているが、信号システムについてはそれよりも多くの種類が混在している。ATSに限っても、ATS-S、ATS-P、ATS-PT、ATS-PS、ATS-Dx、ATS-DWに加え、さらに多くの種類の民鉄ATSが存在している[4.2]。このように信号システムの異なる路線を多く抱える日本にとって、この ETCS の事例は、示唆に富むものである。

しかしながら、ETCS の導入は順調に進んでいるとはいえない。当初 2008 年までに約 16,000km[4.3]の導入が計画されていたものの、2008 年末時点で 2,644km[4.1]、2014 年時点で約 4,400km[4.4]の導入に留まっている。これは、独自の信号システムを使用してきた鉄道事業者の要求を考慮しながら統一のシステム仕様を策定する作業が難航した結果、策

定されたシステム要求仕様が非常に複雑になり、車上信号装置が既存の信号システムと比べて高コスト化したことが最大の原因と考えられる。

そこで、本章では、まず、鉄道事業者間における異なる信号システムの相互運用を目的とした時に、統一仕様の信号システムを相互直通運転の対象となる全路線・全列車に導入する戦略について、先行している ETCS の開発過程と技術仕様を経済性の視点から分析し、その問題点を明らかにする。次に、その問題点を踏まえ、システム統一化とは異なる構想として、1 台の車上信号装置が、走行する路線ごとに、実行するアプリケーションを地上側の列車制御装置に合わせて切り替えることで、既存の信号システムに対応する戦略を提案する。そして、この戦略の基礎となる車上信号装置の仕組みと特長を整理し、本装置による信号システムの相互運用化の経済性について具体例を挙げて検証する。

## 4.2. 欧州統一信号システム (ETCS)

まず本節では、統一信号システムの代表例として欧州の統一信号システム(ETCS)の概要を説明する。

### 4.2.1. ETCS の概要

ETCS は、欧州統一列車制御システム(ERTMS)の中の信号システムの部分であり、欧州統一信号システムの規格である。この規格は、独自の信号システムを使用してきた欧州各国の鉄道事業者間における信号システムの相互運用化を目的として、UIC (国際鉄道事業者連合)が中心となって 1991 年から検討されてきたものである。

基本的には、地上側の列車制御装置が、バリスと呼ばれる地上子や GSM-R 無線を介して、車上信号装置に制御指令を与える構成である。なお、国ごと路線ごとの様々な運行条件や、地方路線、幹線鉄道、高密度路線、高速鉄道等の様々な環境条件に対応できるように、下記に説明する 3 種類の列車制御レベルが規定されている。

#### (1) レベル 1

図 4-1 に示すように、列車位置検知に地上側の軌道回路を使用し、地上側の列車制御装置から車上信号装置への制御指令伝送にバリスを用いる点伝送型で固定閉塞式の列車制御方式。運転士は地上信号機に従って列車を運転する。

#### (2) レベル 2

図 4-2 に示すように、レベル 1 を車内信号化し、地上側の列車制御装置から車上信号装置への制御指令伝送に GSM-R 無線を用いる連続伝送型で固定閉塞式の列車制御方式。運転士は運転台画面(DMI)に表示される信号現示に従って列車を運転する。

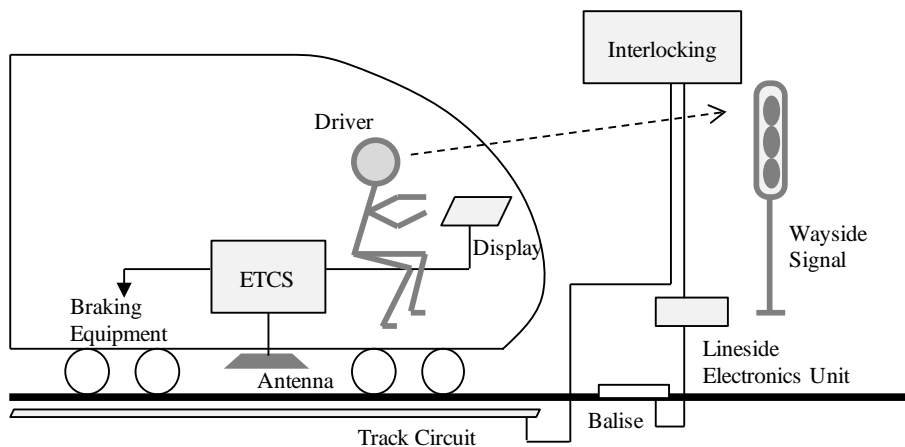


図 4-1. ETCS レベル 1

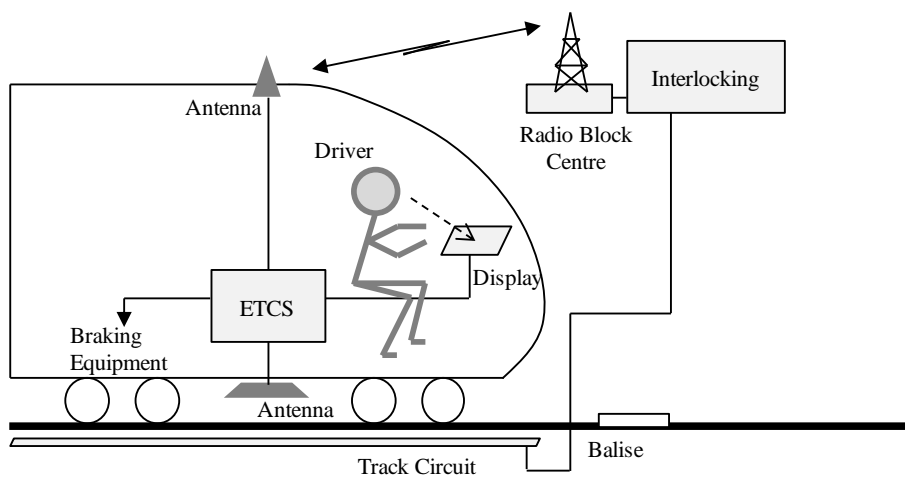


図 4-2. ETCS レベル 2

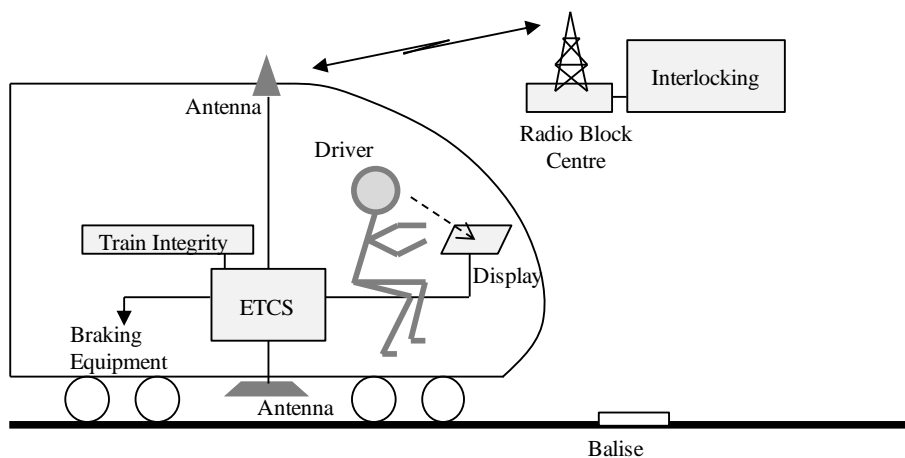


図 4-3. ETCS レベル 3

### (3) レベル 3

図 4-3 に示すように、レベル 2 から軌道回路を廃し、その代わりに車上信号装置の位置報告情報を用いる移動閉塞式の列車制御方式。運転士はレベル 2 と同様、運転台画面(DMI)に表示される信号現示に従って列車を運転する。

これら 3 種類のレベルは、制御情報の伝送手段や閉塞方式が異なり、日本の信号システムでいうと、それぞれ ATS-P[4.2]、D-ATC[3.8]、ATACS[1.31]に類似したシステムである。つまり、従来の観点からいうと、ETCS の仕様には 3 種類の全く異なるシステムの仕様が含まれていると言える。地方路線から高速鉄道まで様々な路線に適用する統一信号システム仕様としては、このように策定せざるをえなかったと考えられる。

#### 4.2.2. ETCS の困難な現状

当初、ETCS は、欧州各国で使用されている異なる信号システムを統一し、安全かつ低コストに相互直通運転を実現するための信号システムと期待されたが、4.1 節で述べたようにその導入は当初の計画通りには進んでいない。その一方で、現在、欧州の鉄道事業者が、個々の路線において ETCS の機能を限定することによってコスト低減を模索する ETCS Limited Supervision[4.5]、ERTMS Regional[3.7]、openETCS[4.6]等のプロジェクトが活発化している。このような状況は、ETCS が経済性の課題を抱えていること、具体的には、ETCS 装置の開発や導入に多大なコストを要していることを示している。

### 4.3. 統一システムによる相互運用化が抱える課題

本節では、なぜ ETCS 装置の開発や導入に多大なコストを要することになったのか、ETCS の開発過程と技術仕様を分析することによって、統一システムによる相互運用化が抱える経済性の課題を明らかにする。

#### 4.3.1. システム仕様の複雑化によるコスト増

ETCS のシステム仕様の規格化は、前述のように UIC が中心となって開始されたが、各鉄道事業者の既存の信号設備や運転規則に対応できるよう豊富なオプション機能を用意しようとしたために、システム仕様の大部分が最小公倍数的な内容で決定されることとなった。具体的に 2006 年 2 月に公式に更新されたシステム要求仕様規格(version 2.3.0)[4.7]を例に挙げると、車上信号装置に対して、16 種類もの制御モードが規定され、7 段階の優先順位を持つ 67 個の条件によって、118 ケースのモード間遷移が規定されている。また、地上一車上間通信において、174 種類の変数で規定された 49 種類のパケットと 37 種類の電文が規定されており、その多くが可変長の構造を持っている。さらに、初期立上時の動作については、13 個の中間状態、8 個の条件判断、11 個の処理、23 個の外部条件入力を経て、

8 個の最終状態へ遷移するフローチャートで規定されている。つまり、ETCS の開発には、EU 内の多くの国と組織が関係し[4.8]、その結果、システム仕様が非常に複雑な内容で策定された[4.9]ことが分かる。

さらに、このシステム仕様は、2000 年に初めて version 2.0.0 として規定された後、2002 年 2 月に version 2.2.2、2006 年 6 月に version 2.3.0、2008 年 1 月に version 2.3.0d と、仕様の改良に伴って頻繁に更新された。その後もブレーキパターン規定の大幅な変更を含む新たな Baseline 3 システム仕様(version 3.0.0)が 2008 年 12 月に発行、そして、この仕様も 2010 年 2 月に version 3.1.0、2010 年 12 月に version 3.2.0、2012 年 3 月に version 3.3.0、2014 年 5 月に version 3.4.0 と、依然として更新され続けている。さらに、合意形成まで至らなかった仕様については、各国の規格基準でカバーすべきオープンポイントとして多く残されており、このようなオープンポイントに対しては、プロジェクト毎に各国の規格基準を踏まえて対応することになっている。このように仕様が変化し続ける状況は、ソフトウェア開発においては非常に大きなリスクであり、往々にしてコストが想定以上に増加する[4.10]。

#### 4.3.2. システム導入時のコスト増

鉄道信号システムは、基本的に、列車に搭載される車上信号装置と地上側の列車制御装置が協調して列車を制御するシステムであり、これが、統一システムを導入する際に、さらにコストを増加させる要因となる。

まず、車上信号装置については、全ての列車に統一システムに適合した装置を搭載する必要がある。特に、ETCS は、高速鉄道を含めた欧州鉄道ネットワークにおける統一信号システムとして規格化されたものであるため、ETCS のシステム仕様は高速運転に対応できるものである。従って、高速運転をしない在来線の旅客列車や貨物列車に対しては、不必要な高速運転用の機能が含まれることになり、既存の在来線用の車上信号装置よりハイスペックな車上信号装置を搭載しなければならなくなる。例えば、高速度域からの長いブレーキパターンを作成するための論理やデータ、この機能を適切な時間内で終えるための演算性能等は、最高速度の低い列車には過剰なスペックとなる。

また、地上側の列車制御装置については、相互直通化する全ての路線で ETCS に更新しなければならない。対象範囲が大きい場合、地上側の列車制御装置の規模も大きく、通常は段階的に更新することになり、その間は既存の列車制御装置とインタフェースを取って協調制御を行わなければならない。また、走行する全ての列車が ETCS に対応するまでは、既存の列車制御装置との二重制御を実施する必要もある。このように、地上側の列車制御装置は、システムの移行を考慮して、既存の信号システムの種類ごとに、これに合わせた

インタフェース設計を必要し、導入時のコストを増加させる要因となる。

4.3.3. システム更新時のコスト増

さらに、技術の進歩に伴うシステム更新にも、今後、高いコストを要することが想定される。なぜなら、システム仕様の更新の度に、前述の通り、多種多様な関係者間の調整と複雑なソフトウェアの再開発・再試験・再認証が必要になるからである。このコストの問題は、鉄道信号システムの今後の発展を阻害する大きな課題だと考えられる。

4.4. インターオペラブル車上信号装置の提案

本節では、4.3 節で説明した統一システムによる相互運用化の課題を踏まえ、システム統一化とは異なるアプローチによる信号システムの相互運用化の車上信号装置の基本概念と、その構成について説明する。

4.4.1. 基本概念

本研究では、既存の信号システムを活用する前提で、信号システムの相互運用化を検討する。そこでまず、鉄道信号システムのアーキテクチャを分析する。基本的に、信号システムは、図 4-4 に示すように、どのような種類においても、地上側の列車制御装置が車上信号装置へ停止限界や制限速度等の制御情報を与え、車上信号装置は列車が停止限界や制限速度を超えないように必要に応じて車両側機器へブレーキ指令等を出力する、という点で同じアーキテクチャのシステムと言える。特に、車上信号装置については、通信機器が地上側の列車制御装置からの制御情報を受信し、演算部が制御情報に基づいてブレーキパターンを計算し、ディスプレイを使って運転士に必要な情報を表示、必要に応じて車両インタフェースを通じてブレーキを制御する、という点で共通しており、このような構成機器とその役割は、本質的にどのような信号システムにおいても同じである。

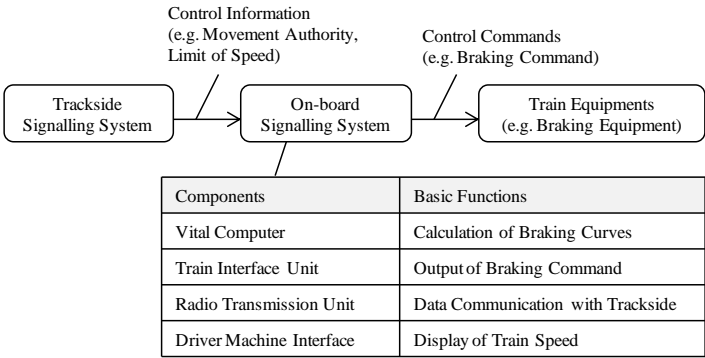


図 4-4. 信号システムの基本構成

上記のような鉄道信号システムとその車上信号装置の特長を踏まえると、各列車に搭載された車上信号装置の演算部が、路線毎にその地上側列車制御装置に対応したアプリケーションを実行して、地上側列車制御装置からの制御情報を処理し、その制御情報に基づいてブレーキパターンを計算し、必要に応じてブレーキを制御することができれば、必ずしも複数の車上信号装置を列車に搭載しておかなくても、あるいは信号システムを統一化しておかなくても、信号システムの異なる路線へ乗り入れられるのではないかと考えられる。つまり、1台の車上信号装置で複数の信号システムに対応する、という考え方である。

図 4-5 は、この考え方を、走行する路線の信号システムごとに専用の車上信号装置を列車に搭載する方式(装置切替方式)、ETCS に代表される走行する路線の信号システムを統一化する方式(システム統一化方式)と比較して模式的に説明するものである。図 4-5 左上に示すハードウェアからアプリケーションまで全て個々の装置で対応するのが ETCS 以前の装置切替方式であり、この不経済性を解決するため、地上側の信号システムから車上側のハードウェア、オペレーティングシステム、アプリケーションまで全てを統一しようとしたのが図 4-5 右上に示すシステム統一化方式である。これに対して、本研究で提案する方式は、図 4-5 下に示すように、車上側のアプリケーションは、走行する路線の信号システムに合わせて複数用意するが、車上信号装置として地上側の信号システムに依らないオペレーティングシステムからハードウェアまでの部分は、プラットフォームとして共通化する、という考え方である。

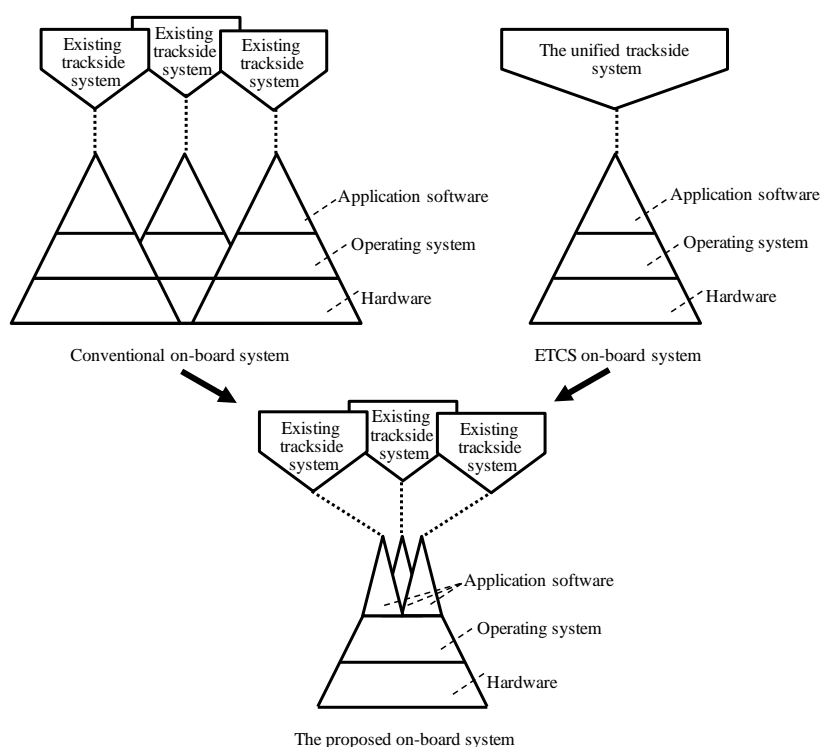


図 4-5. 提案する車上信号装置の概念図



具体的に、信号システム A が敷設されている路線(路線 A)と信号システム B が敷設されている路線(路線 B)との間で相互直通運転を行う場合を例に説明すると、車上信号装置には、信号システム A 用のアプリケーションと B 用のアプリケーションをインストールされ、列車が路線 A を走行する場合には A 用のアプリケーションを起動して信号システム A の列車制御装置からの制御情報に基づいて列車を制御し、路線 B では B 用のアプリケーションを起動して信号システム B の列車信号装置からの制御情報に基づいて列車を制御する仕組みである。言いかえると、路線 A では信号システム A の車上信号装置になり、路線 B では信号システム B の車上信号装置になるという仕組みである。以後、このように走行する路線の信号システムごとに、これに適合するアプリケーションを起動して列車を制御する車上信号装置を「インターオペラブル車上信号装置」と呼ぶこととする。

今までは、信号システムに多様なアナログ技術が使われてきたことから、演算部上で異なるアプリケーションを実行させることを前提とした車上信号装置本体の共通化に向けた研究はあまり行われてこなかったが、近年は地上側の列車制御装置から車上信号装置への制御情報のデジタル化が進み、かつ車上信号装置に求められる機能の高度化も進んだことから、車上信号装置本体はソフトウェアの比重が大きくなり、ハードウェアに依存する部分は小さくなっている[4.11]。このような車上信号装置本体におけるソフトウェア比重の増加傾向と、近年のソフトウェアをベースとした情報処理技術の急速な発展やその応用域の拡大を踏まえると、1 台の車上信号装置で複数の信号システムに対応する「インターオペラブル車上信号装置」という構想は十分に検討に値するものと考えられる。既に、非常に近いシステム同士では、停止点の情報から統一的なブレーキパターンを計算して制御するという考えが示されており[4.12]、複数の異なる地上側信号システムに対応できる車上信号装置が開発されている。具体的には、ATS 車上装置の変周式受信器とトランスポンダ式受信器を統合した装置[4.11]、ATS-P と ATS-Ps の検波機能や速度照査機能を統合した装置[4.13]、ATC と ATS と ATS-P の車上装置を統合した装置[4.14]等である。

もちろん、地上側の信号システムとの適合性確認や、アプリケーションの構成管理が適切に行われることがシステムの安全性の前提となる。従来から、地上側列車制御装置と車上信号装置間では、データベースやプログラムのバージョン情報の交換等により、異なるバージョンの論理で列車を制御してしまうことを防いでいるが、本章で提案するインターオペラブル車上信号装置においても、ある信号システムの路線で、それとは異なる類似のシステムに適合したアプリケーションを実行して列車を制御してしまうようなことを防ぐため、このような仕組みは必要となる。

#### 4.4.2. 機器構成

4.4.1 項で述べた基本概念に基づいて検討したインターオペラブル車上信号装置を中心とした信号システムの構成を、3 種類の列車制御アプリケーションがインストールされ、無線通信に関しては 3 種類のアンテナを、無線以外の特殊な信号については 3 種類の周辺機器を備える場合を例として図 4-6 に示す。また、各機器の機能の概要を表 4-1 に示す。

特に、車上信号装置本体の演算部には、基本的なオペレーティングシステムとしての機能に加えて、複数のアプリケーションの挙動(開始・中断・再開・終了等)を管理する機能や、必要に応じてアプリケーション間でデータを共有する機能、さらにはアプリケーション自体の追加や削除を実行する機能などが必要となる。その上で、前項に述べた、地上側の信号システムとの適合性確認や、アプリケーションの構成管理等を実行する仕組みを実装し、適切なアプリケーションを実行して列車を制御する。

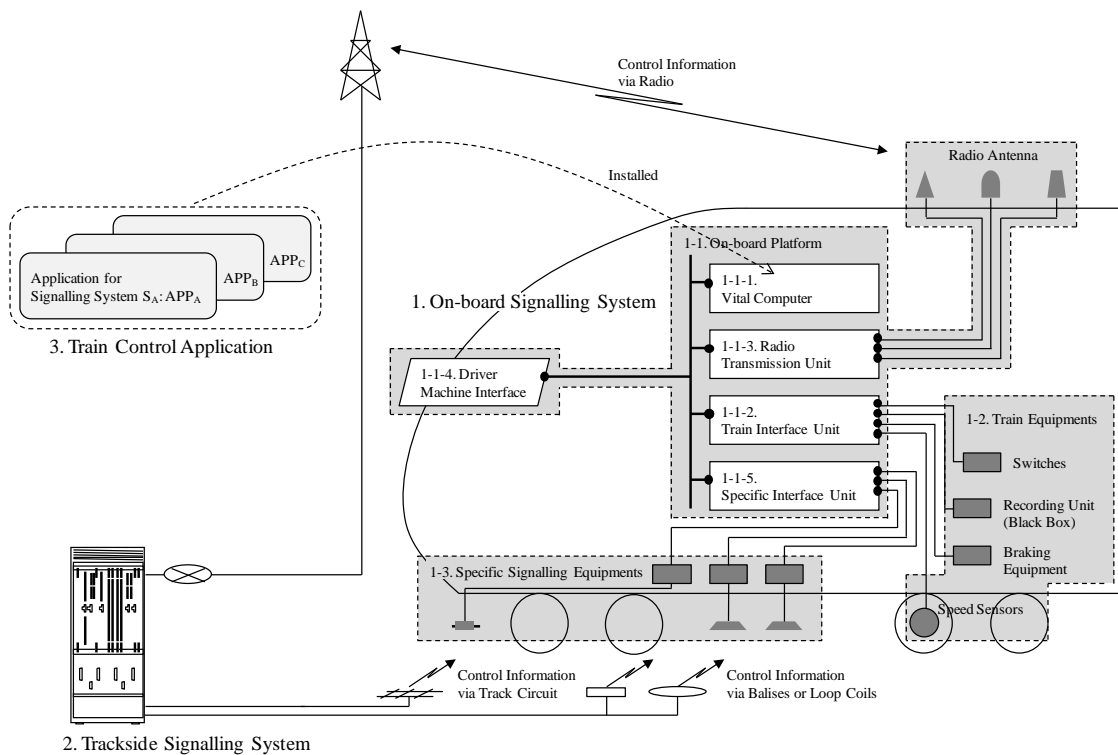


図 4-6. インターオペラブル車上信号装置の機器構成

表 4-1. インナーオペラブル車上信号装置を構成する機器の機能概要

No.	構成機器			機能概要
1	車上信号装置	1-1 車上信号装置本体	1-1-1 演算部	<p>路線の信号システムに対応した列車制御アプリケーションを実行して、速度演算・速度照査・ブレーキ出力等の列車制御機能を実行するためのフェイルセーフ機構に準じた多数決論理を備えた演算器。</p> <p>基本的なオペレーティングシステムとしての機能に加えて、複数のアプリケーションの挙動(開始・中断・再開・終了等)を管理する機能や、必要に応じてアプリケーション間でデータを共有する機能、さらにはアプリケーション自体の追加や削除を実行する機能等を備え、4.4.1 項に述べた、地上側の信号システムとの適合性確認や、アプリケーションの構成管理等を実行する仕組みが実装される。</p> <p>その上でアプリケーションを実行し、具体的には、速度センサからの情報に基づいて走行速度を演算したり、地上側の列車制御装置から伝送される制御指令に基づいてブレーキパターンを計算し、必要に応じてブレーキを出力する。</p>
			1-1-2 車両インタフェース	演算部と車両側機器との入出力を制御するインタフェース。
			1-1-3 無線通信機器	地上側機器と通信を行うための無線通信機器。
			1-1-4 ディスプレイ	速度や信号情報等、運転に必要な情報を表示するためのディスプレイ。
			1-1-5 特殊インタフェース	演算部と信号システム特有の周辺機器との情報入出力を制御するインタフェース。
		1-2 車両側機器		車上信号装置と接続する必要がある車両側機器。速度センサ・ブレーキ装置・記録装置(ブラックボックス)・スイッチ等。
		1-3 信号システム特有の周辺機器		車上信号装置と接続する必要がある信号システム特有の周辺機器。各信号システムで用いられる特殊な地上子、ループコイル、軌道回路等との通信機器等。
2	地上側信号装置			当該路線の信号システムに従って各列車を制御するための制御指令を作成し、送信する地上装置。基本的な構成や制御論理は、既存の地上信号装置から変更しない。
3	列車制御アプリケーション			路線の信号システムに従って列車を制御するためのソフトウェア。車上信号装置の演算部にインストールされて実行される。

#### 4.4.3. 既存方式との比較

本項では、前項までに説明したインターオペラブル車上信号装置による信号システムの相互運用化について、走行する路線の信号システムごとに専用の車上信号装置を列車に搭載する装置切替方式、ETCS に代表される走行する路線の信号システムを統一化するシステム統一化方式と比較することで、その特徴を明らかにする。

##### (1) 車上信号装置本体

装置切替方式は、信号システムごとに専用の装置を必要とする。これに対し、システム統一化方式では、演算部・車両インタフェース・無線通信機器・ディスプレイ各 1 台と ETCS 特有の周辺機器で構成できる。

インターオペラブル車上信号装置による提案方式は、演算部上で複数のアプリケーションを切り替えて実行して各々の信号システムに対応するため、各信号システム特有の周辺機器とのインタフェースを備える必要があるものの、車上信号装置を構成する機器の共通化が図れる。つまり、システム統一化方式と同様に、演算部・車両インタフェース・無線通信機器・ディスプレイを 1 台に集約することができる。

##### (2) 車両側機器

装置切替方式は、信号システムごとに専用の装置を持つため、ブレーキ装置や速度センサのように共通のインタフェースを持つものを除き、車両側機器も信号システムごとに必要とする。一方でシステム統一化方式は各車両側機器とも 1 台で済む。

本提案方式は、信号システムごとに異なる入出力処理が実行されるものの、それらは全て 1 台の演算部上で実行されるため、車上側機器も各 1 台に共通化できる。つまり、システム統一化方式と同様に記録装置・スイッチ等を各 1 台に共通化することができる。

##### (3) 信号システム特有の周辺機器

システム統一化方式は、統一システム用の機器だけで済む一方、装置切替方式と本提案方式は各々の信号システム特有の機器を必要とする。但し、異なる信号システムで同じ機器を使うようなケースで、その機器が複数のインタフェースを持っている場合には、(2)と同様の理由で提案方式では共通化を図ることができる。

##### (4) 地上側の列車制御装置

システム統一化方式では、全線の地上側の列車制御装置を統一システムに更新する必要があるのに対し、装置切替方式と本提案方式では、既存の地上側列車制御装置の基本的な構成や制御論理を変更する必要はない。

##### (5) 列車制御アプリケーション

装置切替方式、システム統一化方式とも、地上側の信号システムに対応した専

用の車上信号装置を用いるため、共通の車上信号装置上で動作する列車制御アプリケーションは必要としない。これに対し、本提案方式では、対応すべき信号システムごとに、車上信号装置の演算部上で動作するアプリケーションを必要とする。

(1)から(3)の構成要素の比較から分かることは、本論文で提案するインターオペラブル車上信号装置は、複数の信号システムへの対応が要求される場合に、各々の信号システム特有の周辺機器やそれらとのインタフェースを備える必要があるものの、装置切替方式では個別に必要としていた車上信号装置本体をほぼシステム統一化方式と同等レベルにまで集約、ならびに車両側機器を共通化できるということである。つまり、装置切替方式に比べて必要となる機器数は減り、サイズはシステム統一化方式並みに低減できると考えられる。一例として信号システムの異なる 3 種類の路線間で相互直通運転する場合を想定すると、必要とする機器数は表 4-2 の通りとなる。

一方で、(4)と(5)の比較は、インターオペラブル車上信号装置による信号システムの相互運用化が、システム統一化方式とは異なる性質を持っていることを示している。具体的には、提案方式による相互運用化では、対応すべき信号システムごとに列車制御アプリケーションを開発する必要があるものの、地上側の列車制御装置を変更する必要が無いということである。この違いについては、コストの観点から改めて 4.7 節で考察することにする。

表 4-2. 相互運用化のために必要となる構成要素の比較

No.	構成機器	装置切替方式	システム統一化方式	提案方式
1-1	車上信号装置本体	演算部	3	1
		車両インタフェース	3	1
		無線通信機器	3	1
		ディスプレイ	3	1
		特殊インタフェース	—	1
1-2	車両側機器	速度センサ	1 セット	1 セット
		ブレーキ装置	1	1
		記録装置(ブラックボックス)	3	1
		スイッチ類	3 セット	1 セット
1-3	信号システム特有の周辺機器	3 セット	1 セット	1～3 セット

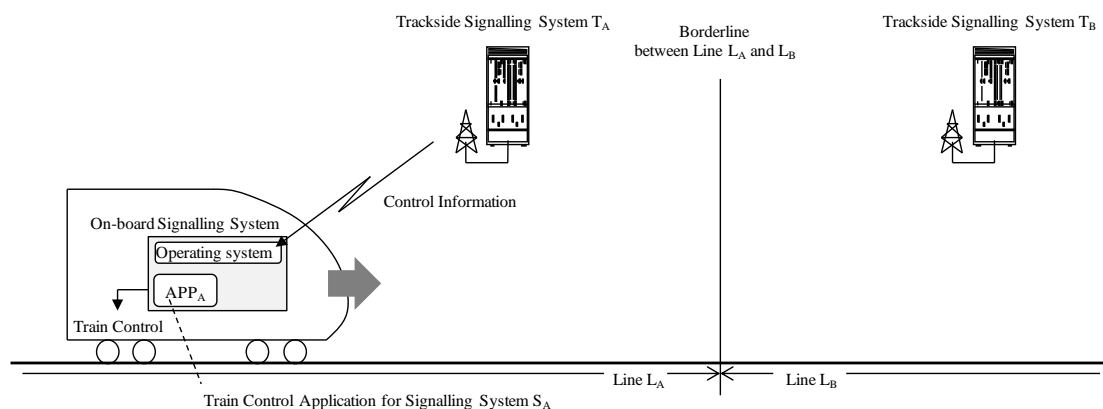
#### 4.5. インターオペラブル車上信号装置の基本原理

次に、本論文で提案するインターオペラブル車上信号装置を用いて、異なる信号システムを相互運用化する仕組みを説明する。

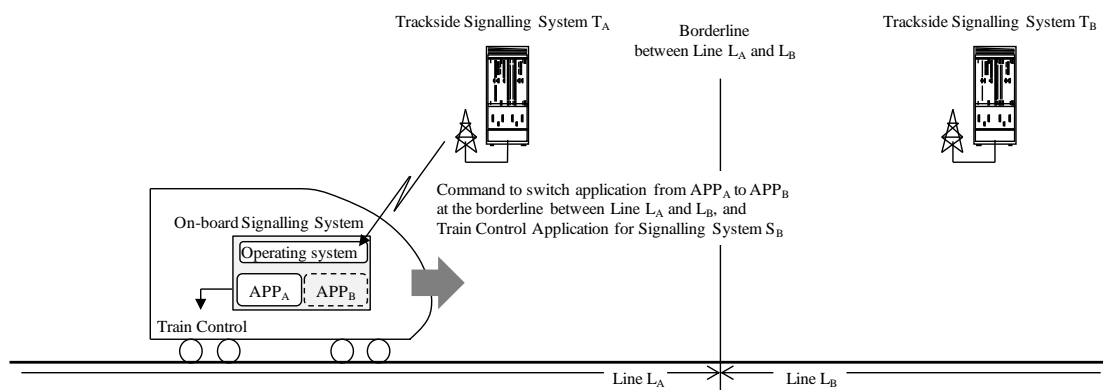
##### 4.5.1. 異なる信号システムの路線を相互直通運転可能にする仕組み

インターオペラブル車上信号装置を搭載した列車は、図 4-7 に示すように、実行する列車制御アプリケーションを切り替えて、信号システムの異なる路線、例えば、信号システム  $S_A$  の路線  $L_A$  から、信号システム  $S_B$  の路線  $L_B$  へ乗り入れる。

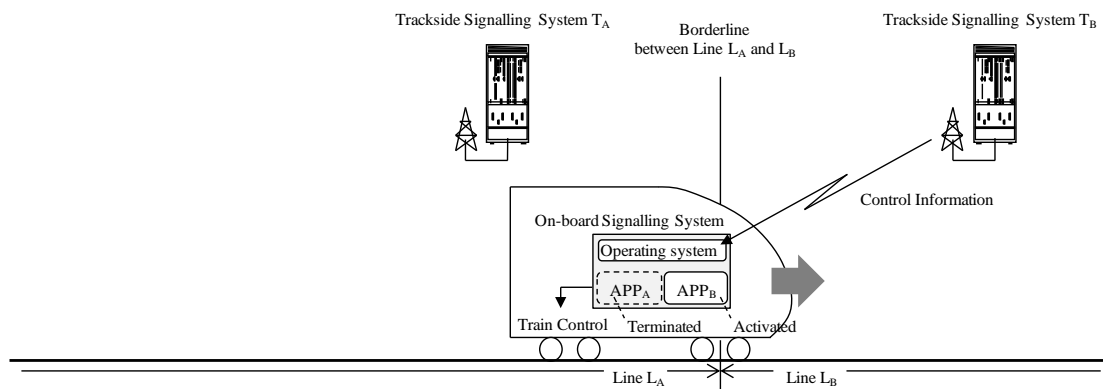
- (1) まず、列車が路線  $L_A$  を走行している間、インターオペラブル車上信号装置は、図 4-7.(a)に示すように、列車制御アプリケーション  $APP_A$  を実行し、地上側信号装置  $T_A$  からの制御指令に基づいて列車を制御する。
- (2) 次に、列車が路線  $L_A$  と路線  $L_B$  の境界に近づいた時、図 4-7.(b)に示すように、車上信号装置は、地上側信号装置  $T_A$  から、路線  $L_A$  と路線  $L_B$  の境界位置で列車制御アプリケーションを  $APP_A$  から  $APP_B$  へ切り替えるよう、地上子や無線を介して指示される。なお、新しく実行される列車制御アプリケーション  $APP_B$  は、車上信号装置の演算部に予めインストールされておいてもよいし、上記指令と同時にもしくは前後に地上に設置されたデータベース等から無線を介してダウンロードしてもよい。
- (3) その後、車上信号装置は、図 4-7.(c)のように、列車が路線  $L_A$  と路線  $L_B$  の境界位置に到達した時点で、列車制御アプリケーション  $APP_A$  を終了するとともに、列車制御アプリケーション  $APP_B$  を実行する。なお、路線の境界位置が駅構内であれば、列車制御アプリケーションの切り替えは、列車が停止している間に行えばよい。一方、路線の境界位置が駅間である場合には、車上信号装置の演算部の性能にもよるが、列車制御アプリケーションの起動や終了に要する時間を考慮して、列車制御アプリケーション  $APP_B$  を予め路線境界に到達する前に起動しておき、路線境界に到達した時点で制御を有効化する等の方法を使って、列車を停車させずに列車制御アプリケーションを切り替えればよい。
- (4) 以後、車上信号装置は、図 4-7.(d)に示すように、列車が路線  $L_B$  を走行している間、地上側信号装置  $T_B$  からの制御指令に従って列車を制御する。



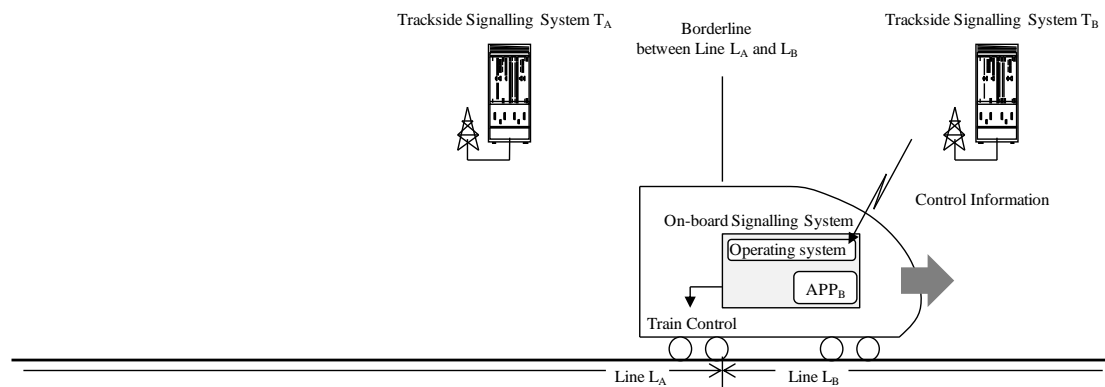
(a) ステップ(1)



(b) ステップ(2)



(c) ステップ(3)



(d) ステップ(4)

図 4-7. 異なる信号システムの路線を相互直通運転可能にする仕組み

#### 4.5.2. 車両に見合った性能の車上信号装置で相互直通運転を可能にする仕組み

インターオペラブル車上信号装置を搭載した列車は、4.4.1 項で説明した通り、信号システム  $S_A$  の路線  $L_A$  から信号システム  $S_B$  の路線  $L_B$  へ乗り入れる場合に、車上信号装置の演算部上で信号システム  $S_B$  用の標準的な列車制御アプリケーション  $APP_B$  を実行すればよい。ただ、その仕組みだけでは、信号システム  $S_B$  の路線  $L_B$  へ乗り入れる全列車、特に低速度で運転される旅客列車や貨物列車の車上信号装置にも、路線  $L_B$  の最高速度で走行することを想定した標準的な列車制御アプリケーション  $APP_B$  を実行できる性能のハードウェアを必要とすることとなる。

本論文では、このような不必要な高コスト要因を取り除くため、車上信号装置の演算部の性能や周辺機器の構成の違いに応じてダウングレード版の列車制御アプリケーションを用意することを提案する。下記に、各列車が車両に見合った性能のハードウェアの車上信号装置で相互直通運転を可能にする仕組みを示す。

- (1) まず、信号システム  $S_B$  用の列車制御アプリケーションとして、標準的な列車制御アプリケーション  $APP_B$  に加えて、何種類かのダウングレード版の列車制御アプリケーションを用意しておく。なお、当然のことながら、ダウングレード版の列車制御アプリケーションも、標準的な列車制御アプリケーションと同等の安全性を確保する必要がある。従って、ダウングレード版の開発においては、例えば、列車の最高速度を低く設定したり、制動距離や停止距離の余裕を長めに設定する等、別途、十分な安全性を確保する対策を検討しておく必要がある。
- (2) そして、車上信号装置の演算部の性能や周辺機器の構成が、信号システム  $S_B$  用の標準的な列車制御アプリケーション  $APP_B$  の動作条件を満たさないような場合、図 4-8



のようにダウングレード版の列車制御アプリケーションの中から、動作条件を満たす  $APP_B$  を選択してインストールしておく。なお、動作条件とは、例えば、演算部の処理速度、無線通信機器の通信速度、ディスプレイの大きさ、車両側機器の精度や応答速度等である。これらの動作条件を緩和するためには、制御周期を長くしたり、運転支援等の機能を縮退させればよい。また、乗り入れる距離が極端に短い場合には、運転士責任で低速運転するためのモードだけを実装したような極めて簡易的なものとしても、十分な相互運用性を確保できると考えられる。このように、使用される状況に応じて、コストパフォーマンスの高い列車制御アプリケーションを設計すればよい。

- (3) その後、車上信号装置は、列車が路線  $LB$  の境界位置に到達した時点で、列車制御アプリケーション  $APP_B$  を実行し、地上側信号装置  $T_B$  からの制御指令に従って列車を制御する。

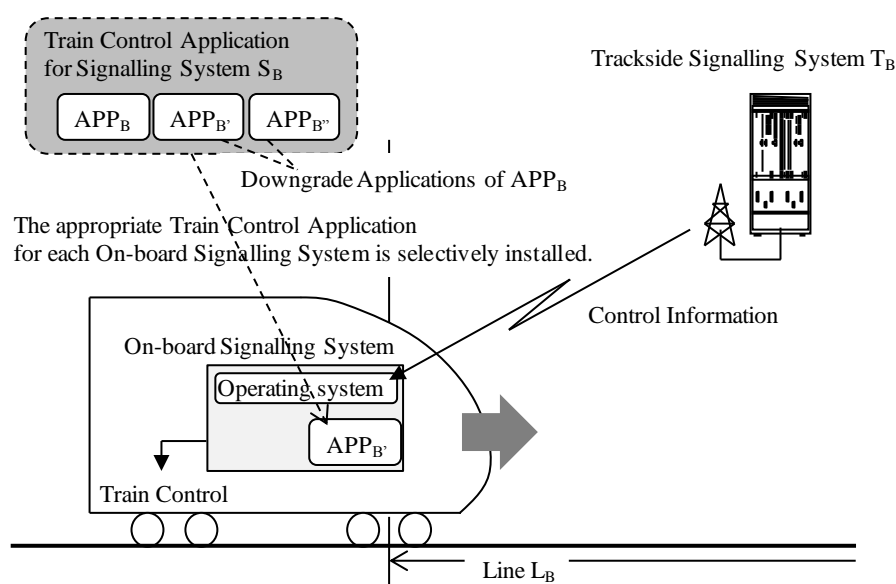


図 4-8. 車両に見合った性能の車上信号装置で相互直通運転を可能にする仕組み

#### 4.6. インターオペラブル車上信号装置の特長

本節では、インターオペラブル車上装置の長所を、4.3 節で挙げた統一システムによる相互運用化の課題と比較しながら明らかにする。

##### 4.6.1. システム仕様の複雑化を防ぐ効果

信号システムの相互運用化を目的として、統一システム仕様を策定する際、現在まで独自の信号システムを使用してきたそれぞれの鉄道事業者の要求を考慮することを求められ

る可能性が高い。その場合、多種多様な関係者間の調整作業が必要となり、その調整が円滑に進まないリスクや、策定されたシステム仕様が複雑化するリスクが高まる。

これに対し、インターオペラブル車上信号装置による相互運用化では、そもそも新しい信号システムを確立する必要が無く、基本的には長年使用されている完成された既存の信号システムの仕様をそのまま使用できる点は大きな長所である。様々な信号システムを扱うことにはなるが、各々の仕様は、列車制御アプリケーションのレベルで閉じるので、仕様確定の困難さは従来の信号システムと同等レベルであり、ETCS のように仕様が極端に複雑化してしまうリスクは低い。また、将来的に多少の仕様変更が必要になったとしても、それはその信号システムを使用している鉄道事業者と管轄機関とだけ調整すればよいことから、仕様変更も ETCS のように多くの時間やコストを必要とすることはない。さらに、既に使用されているソフトウェアの設計資産を活用することもコスト的に大きな利点と考えられる。

#### 4.6.2. システム導入時のコスト増を防ぐ効果

統一システムによって地方路線から高速鉄道まで様々な路線環境の路線を含んだ鉄道ネットワーク全体の相互運用化を図ろうとすると、高速運転をしない旅客列車や貨物列車も、高速運転する列車と同じ車上信号装置を搭載しなければならない。さらに、地上側の列車制御装置も、全線を統一システムに更新するだけでなく、走行する全列車がその統一システムに対応するまでは、既存信号システムとの二重制御を実施しなければならない。

これに対し、インターオペラブル車上信号装置による相互運用化では、それぞれの既存信号システムにおいてダウングレード版の列車制御アプリケーションを用意することによって、車両に見合った性能の車上信号装置 1 台で様々な信号システムの路線へ列車を乗り入れる手段を提供することができる。この機能レベルに応じた柔軟性は、導入コストを低減させるだけでなく、どのような性能の車上信号装置を搭載した列車であっても、他の信号システムの路線へ乗り入れることを可能とさせる。例えば、高速鉄道と地下鉄、在来線と LRT というような、今までは費用対効果を考えると難しいと思われていた組み合わせの相互直通運転の実現可能性を高めることができ、乗り継ぎ等の旅客サービス向上も期待できる。つまり、高性能な車上信号装置を搭載していない列車であっても、安全性を低下させることなく局所的に高規格な路線に乗り入れることを可能とし、最小限の費用で効率的に旅客サービスを向上させることを期待できる。

#### 4.6.3. システム更新時のコスト増を防ぐ効果

統一システムでは、前述したように、システム仕様の更新の度に、多種多様な関係者間の調整と、複雑なソフトウェアの再開発・再試験・再認証を必要とするため、技術の進歩

に伴うシステム仕様の陳腐化対策に高いコストを要するリスクがあった。

これに対し、インターオペラブル車上信号装置による相互運用化においては、ある信号システムに更新が必要となった場合も、対応するアプリケーションの仕様とソフトウェアを更新するだけで対応することができる。さらに、その際、その信号システムを使用している鉄道事業者と管轄機関とだけ調整すればよい。この特長は、本システムの陳腐化を防ぐだけでなく、鉄道信号システムの今後の発展を阻害しないという大きな利点となる。

#### 4.7. インターオペラブル車上信号装置による相互運用化の経済性評価の具体例

本節では、インターオペラブル車上信号装置によって既存の鉄道ネットワークの信号システムを相互運用可能にするためのコストを概算し、信号システムごとに専用の車上信号装置を搭載する装置切替方式、ETCS のように路線の信号システムを全て統一するシステム統一化方式と比較して、その優位性を明らかにする。

##### 4.7.1. 相互運用化コスト概算式

既存の鉄道ネットワークの信号システムを相互運用可能にするためのコストは、装置切替方式、システム統一化方式、インターオペラブル車上信号装置による提案方式で、それぞれ  $C_{CONV}$ 、 $C_{ETCS}$ 、 $C_{PRO}$  として、下記の式で計算することができる。

(1) 装置切替方式による相互運用化コスト：

相互直通運転区間の全信号システムに対応した車上信号装置を全列車に搭載するコスト

$$C_{CONV} = C_{OBU\_CONV} \times N_{SIGNAL'} \times k \times N_{TRAIN} \quad \text{式(4-1)}$$

$C_{OBU\_CONV}$	既存システムの車上信号装置コスト (/台)
$N_{SIGNAL'}$	1 列車が相互直通運転する区間の信号システム数 (種類)
$N_{TRAIN}$	鉄道ネットワーク上の列車数 (編成)
$k$	運転台係数 (主として列車のように前後運転台にそれぞれ車上信号装置が必要となる場合は 2、主として機関車のように前後運転台で 1 台の車上信号装置を共用できる場合は 1)

(2) システム統一化方式による相互運用化コスト：

全列車に 1 台の統一システムの車上信号装置を搭載し、相互直通運転区間全線の地上側の信号装置を統一システムに更新するコスト

$$C_{ETCS} = C_{OBU\_ETCS} \times k \times N_{TRAIN} + C_{TRACK} \times L_{NETWORK} \quad \text{式(4-2)}$$

$C_{OBU\_ETCS}$	統一システムの車上信号装置コスト (/台)
$C_{TRACK}$	地上側の信号装置コスト (/km)
$L_{NETWORK}$	鉄道ネットワークの路線長 (km)

(3) 提案方式による相互運用化コスト：

相互直通運転区間の全信号システムに対応した列車制御アプリケーションを開発するコストと、その列車制御アプリケーションを実行できる 1 台の車上信号装置を全列車に搭載するコスト

$$C_{PRO} = C_{APP} \times N_{SIGNAL} + C_{OBU\_PRO} \times k \times N_{TRAIN} \quad \text{式(4-3)}$$

$C_{APP}$	列車制御アプリケーションのコスト (/種類)
$N_{SIGNAL}$	鉄道ネットワーク上の信号システム数 (種類)
$C_{OBU\_PRO}$	本システムの車上信号装置コスト (/台)

#### 4.7.2. 相互運用化コスト概算結果

UIC の 2003 年の ETCS 導入計画資料[4.3]によると、欧州主要 20 ヶ国の鉄道総延長は約 300,000km、列車は約 54,000 編成が運用されており、そのうち 19 の信号システムが使用されている約 16,000km を 2008 年までに ETCS 化する計画であった。その中の欧州幹線網 8 路線における 1 列車が相互直通運転する区間の信号システム数は 2 から 8 種類で平均は 5.9 種類であった。また、UIC の ETCS に関するコストベンチマーク資料[4.15]によると、車上信号装置は約 270kEUR/台、地上側の信号装置については ETCS レベル 1 で約 90kEUR/複線 km、ETCS レベル 2 が約 355kEUR/複線 km と分析されている。一方、既存の信号システムについては、LZB が約 120kEUR、ZUB が約 170kEUR と報告[4.16]されている。

そこで、UIC の ETCS 導入計画と同等レベルの鉄道ネットワークをモデルとして、装置切替方式とシステム統一化方式による相互運用化コストを計算した結果を下記に示す。この結果からは、ETCS に代表されるシステム統一化方式が、従来からの装置切替方式に対して約 2 割のコスト削減効果があることが分かる。なお、概算に用いた各パラメータの値は、表 4-3 の通りである。

(1) 装置切替方式

$$C_{\text{CONV}} = 3.70 \text{ billion EUR}$$

(2) システム統一化方式

$$C_{\text{ETCS}} = 2.94 \text{ billion EUR}$$

表 4-3. 相互運用化コスト概算に用いたパラメータ

No.	パラメータ	値
1	$C_{\text{OBU\_CONV}}$	$(120 + 170) / 2 = 145 \text{ k EUR/台}$
2	$C_{\text{OBU\_ETCS}}$	270 k EUR/台
3	$C_{\text{TRACK}}$	$(90 + 355) / 2 / 2 = 111 \text{ k EUR/km}$
4	$L_{\text{NETWORK}}$	16000 km
5	$N_{\text{TRAIN}}$	$54000 \times 16000 / 300000 = 2880$ 編成
6	$N_{\text{SIGNAL}}$	19 種類
7	$N_{\text{SIGNAL}'}$	5.9 種類
8	k	1.5

(3) 提案方式

提案方式のインターオペラブル車上信号装置による相互運用化コストを計算することは難しいが、4.5 節で述べた長所を踏まえれば、車上信号装置のコスト  $C_{\text{OBU\_PRO}}$  はシステム統一化方式の ETCS よりも低く、列車制御アプリケーションのコスト  $C_{\text{APP}}$  も ETCS よりも低いと考えられる。これは、車両に見合った性能の演算部を準備し、その演算部上で実行する列車制御アプリケーションの開発については、基本的に新規の仕様設計が不要であるからである。

前出の UIC 資料[4.14]によると ETCS の車上信号装置の開発コストは 18.7 million EUR と推定されていることから、 $C_{\text{OBU\_PRO}} < 270 \text{ k EUR/台}$ 、 $C_{\text{APP}} < 18.7 \text{ million EUR/種類}$ として計算すると、提案方式による相互運用化コストは、

$$C_{\text{PRO}} < 1.52 \text{ billion EUR}$$

となる。

この値はあくまで概算ではあるが、既存の鉄道ネットワークの信号システムを相互運用化する場合、ETCS のように統一システムを開発・導入するよりも、既存の信号システムをそのまま活用する形でインターオペラブル車上信号装置と列車制御アプリケーションを開発・導入する方が、明らかにコストを抑えられることが分かる。

#### 4.8. まとめ

複数路線間の相互直通化のためには、車両、軌間、電気方式に加えて、信号システムを合わせる必要があり、特に種類の異なる信号システムが多く存在する日本にとっては、信号システムの相互運用化を低コストに実現することが、鉄道ネットワークの利便性向上と利用効率向上のために重要となる。

そこで、まず、いち早く取り組みが開始された欧州の統一信号システムである ETCS の開発過程と技術仕様を経済性の視点から分析した。その分析結果として明らかになったことは、信号システムの相互運用化のために、独自の信号システムを使用してきた鉄道事業者の要求を考慮しながら統一した信号システムを開発する戦略を取ると、システムの複雑化とコストの肥大化が不可避となるということであった。

このような分析に基づいて、本研究では、鉄道信号システムのアーキテクチャを分析し、システム統一化とは異なるアプローチで信号システムの相互運用化を実現する構想と、その中心となる車上信号装置を提案した。具体的には、地上側の信号装置の既存の構成や基本制御論理を変更せずに、列車に 1 台の車上信号装置を搭載し、その演算部が路線ごとにその地上側列車制御装置に対応したアプリケーションを切り替えて実行し、列車を制御する仕組みである。

このような仕組みは、車上信号装置を構成する機器とその機能が本質的に同じであること、近年は地上側の列車制御装置から車上信号装置への制御情報のデジタル化が進み、かつ車上信号装置本体のソフトウェア比重が増加傾向にあることを踏まえたものであり、既存の信号システムの仕様をそのまま使用できる点や、車両に見合った性能の車上信号装置 1 台で相互運用できる点など、システム仕様の複雑化やシステム導入コストの増加を避けられる特長を持つ。

本章では、この構想の中心となるインターオペラブル車上信号装置の機器構成と基本原理を説明し、システム統一化による信号システムの相互運用化における問題点と比較しながら、システム仕様の複雑化やシステムコストの肥大化を避けられる特長を明らかにした。さらに、ETCS 導入計画と同等レベルの鉄道ネットワークを想定して、インターオペラブル車上信号装置による信号システムの相互運用化コストを概算し、これが ETCS に代表されるシステム統一化方式の約半分程度に抑えられることを明らかにした。

なお、個々の信号システムの列車制御アプリケーションについては、長年使用されている完成された既存の信号システムの仕様をそのまま使用し、既に使用されているソフトウェアの設計資産を活用して開発すればよい。同様に、安全性についても、基本的には、既

存の信号システムの安全性仕様をそのまま踏襲すればよい。しかしながら、システム境界における安全性仕様は、個々のケースにおいて改めて精査する必要がある。特に、仕様が酷似した信号システムを渡る場合には、正しくアプリケーションが切り替わらなかった場合をどのように検知するか、仕様を追加する必要があるかもしれない。このような点については実用化の際の課題とする。

また、実用化に向けては、1 台の車上信号装置上で複数の列車制御アプリケーションを切り替えて実行する際の過渡的な処理負荷の低減も考える必要がある。特に、列車走行中に、実行するアプリケーションを切り替える場合には、一時的に 2 つのアプリケーションを並列実行しなければならない、その時、車上信号装置の演算部ではどちらのアプリケーションの処理も適切な時間内で終わるように設計しなければならないからである。また、ディスプレイでは運転士がどちらのアプリケーションともインタフェースを取れるように設計しなければならない。このようなアプリケーション切り替え時の並列処理機能を、通常機能に対して必要十分な性能のハードウェアで実現することも、実用化に向けた課題となる。

## 5. 端末駅における稠密ダイヤグラム

### 5.1. はじめに

2.3 節の「輸送量の大きい路線における経済性の課題」で述べたように、輸送量の大きい路線では、乗務員運用の工夫による停車時間の短縮、各番線を効率的に使うための線路配線の改善、信号システムの高機能化等、輸送力を増強する手段が既に多く講じられており、また今後も求められている。特に端末駅での列車折返運用については、続行列車だけでなく、対向列車との平面交差支障や転てつ器の転換時間等も考慮しなければならないことから、路線全体の輸送力を制約している場合が多く、例えば、小田急線新宿駅では上下 2 層構造の駅で列車を折返したり、京王線新宿駅では手前の駅から 2 つのルートに分けるような列車運用で輸送力を向上させている。このような例からも、端末駅における列車折返運用を精密に分析することは、既存のインフラを効率的に使用する上で、また投資効果の高い輸送力増強手段を選択する上で、重要であると考えられる。

このような端末駅において実際に列車を高密度に運行させるためには、各列車の走行挙動を精度高く模擬し、それぞれの列車間に安全を確保するための必要最小限の間隔を考慮する必要がある。これらの値は、列車の走行性能、追抜・折返等の列車間の関係、線路の配線などによって異なる。このため、端末駅において高密度な列車運行を計画することは、複雑かつ労力を要する作業となる。

従来から、列車の運転曲線やダイヤグラムの作成、列車運行が計画から乱れた際の運転整理などの業務を支援する目的で、列車の走行性能や線路の配線から列車の走行挙動を計算する研究[5.1][5.2]、走行時分などの基礎データからダイヤグラムを作成する研究[5.3][5.4][5.5][5.6]、出発順序変更・番線変更・運休などの戦術を用いた運転整理の研究[5.7][5.8][5.9][5.10][5.11]が行われてきた。

しかしながら、複雑な線路配線を持つ端末駅において、多種別・多性能の列車を複雑かつ高密度に運行させるためには、依然として列車の走行性能や線路の配線に精通した専門家の経験と労力を多く必要としている。

そこで、本章では、複雑な線路配線を持つ端末駅において、想定される全ての種類の列車が駅構内の全進路を走行する場合の走行挙動を精度高く模擬し、それらの走行挙動間に存在する安全を確保するための信号システムによる必要最小限の間隔を計算して、端末駅における運転時隔のデータベースを構築する方法と、このデータベースを用いて、端末駅での運行密度を限界まで高めるダイヤグラムを導出する方法を提案し、その効果を検証する。



## 5.2. 運転時隔

運転時隔とは、列車運行の安全のために必ず確保しなければならない列車間の時間間隔のことであり[5.12]、列車は、信号システムによってこの間隔を保つように制御されている。従って、この間隔が必要最小限の値以下に縮まった場合には、車上信号装置がブレーキをかけて列車を減速させることになる。このような減速が発生すると、所要時間が増加し、乗り心地やエネルギー効率などが悪化するため、列車運行を計画する際には、このような減速が発生しないように、必要最小限の運転時隔を考慮してダイヤグラムを作成する。

必要最小限の運転時隔は、列車の走行速度が変化する区間で大きくなるので、ダイヤグラムを作成する際には、列車の加速や減速が行われる駅近傍での運転時隔が最も大きな制約として考慮される[5.13]。この駅近傍の運転時隔については、駅が複数の番線や待避線等を備え、追抜や折返等、列車を複雑に運行することを想定した場合、下記 4 種類の時隔を考慮しなければならない。

### (1) 続行時隔

同一番線上を同一方向に走行する場合の先行列車と後続列車との間の時間間隔

### (2) 追込時隔

待避設備のある駅で後続列車が先行列車を追い抜く際の、先行列車の駅進入と後続列車の駅進入との間の時間間隔

### (3) 開通時隔

待避設備のある駅で後続列車が先行列車を追い抜く際の、後続列車の駅進出と先行列車の駅進出との間の時間間隔

### (4) 平面交差時隔

列車が折り返す場合の上下線交差部分を通過する対向列車間の時間間隔

この 4 種類の時隔をそれぞれ図 5-1, 図 5-2, 図 5-3, 図 5-4 に示す。図中の曲線は、列車の先端と後端の位置と時間を表す時間曲線を示しており、図中の記号や用語の定義は表 5-1 に示す通りである。また、各時隔の計算式は下記となる。

### (1) 続行時隔

図 5-1 における列車先端が着点に到達する時刻の差

$$T_1 = t_7 + t_6 + t_5 + t_2 + t_3 + t_4 \quad \text{式(5-1)}$$

### (2) 追込時隔

図 5-2 における列車後端が進路制御終了地点を抜ける時刻の差

$$T_2 = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad \text{式(5-2)}$$

(3) 開通時隔

図 5-3 における列車後端が進路制御終了地点を抜ける時刻の差

$$T_3 = t_1 + t_2 + t_6 + t_4 \quad \text{式(5-3)}$$

(4) 交差支障時隔

図 5-4 における列車が発発する時刻の差

$$T_4 = t_5 + t_1 + t_2 + t_3 + t_4'' + t_7 + t_6 \quad \text{式(5-4)}$$

このように、それぞれの時隔は上記の計算式で求めることができるが、高々2列車間の運転時隔を計算しようとする場合でも、少なくとも列車が走行する進路、距離  $d$ 、時間  $t_1 \sim t_7$  など、多くの要素を考慮しなければならない。さらに、時隔の種類によって計算基準となる時刻が異なるため、各々の時隔の計算と大小を比較する作業は、複雑な補正を要する。

その上、複数の番線や待避線等を備え、追抜や折返など同時に複数の列車が複雑に運行される駅では、3 以上の列車間に存在する時隔をそれぞれ計算して比較しなければならず、その計算量は組合せの数に比例して増加することになる。

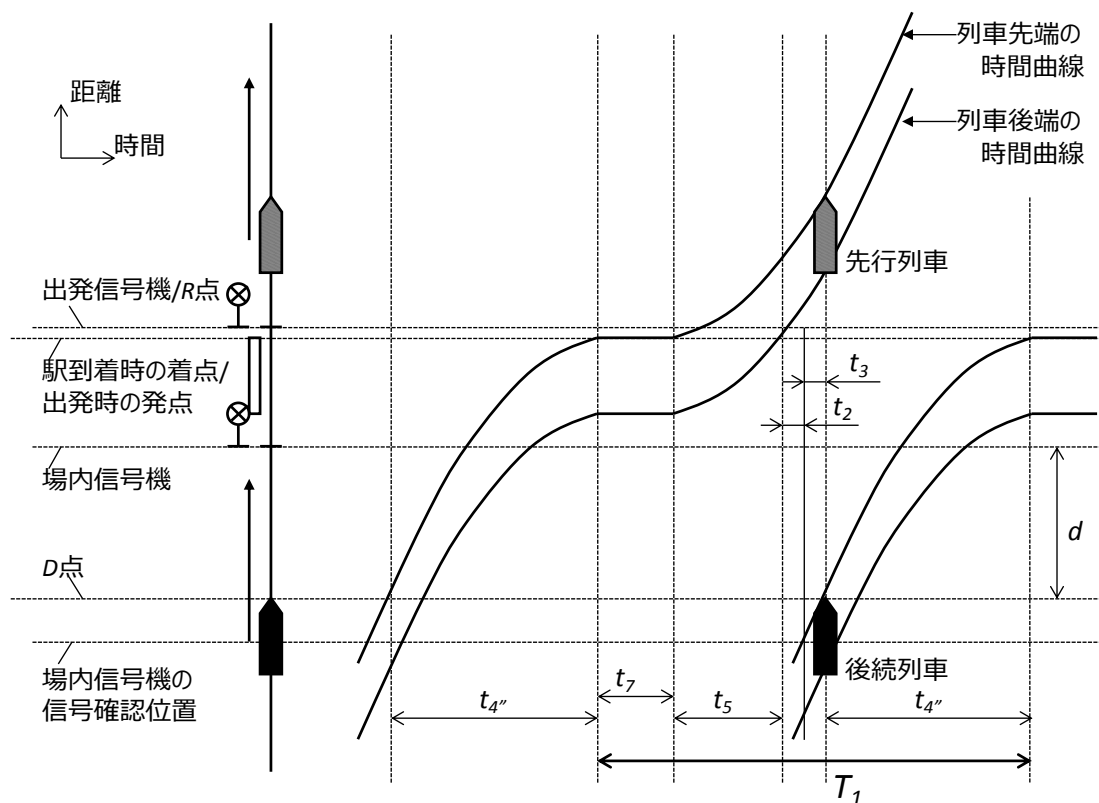


図 5-1. 続行時隔

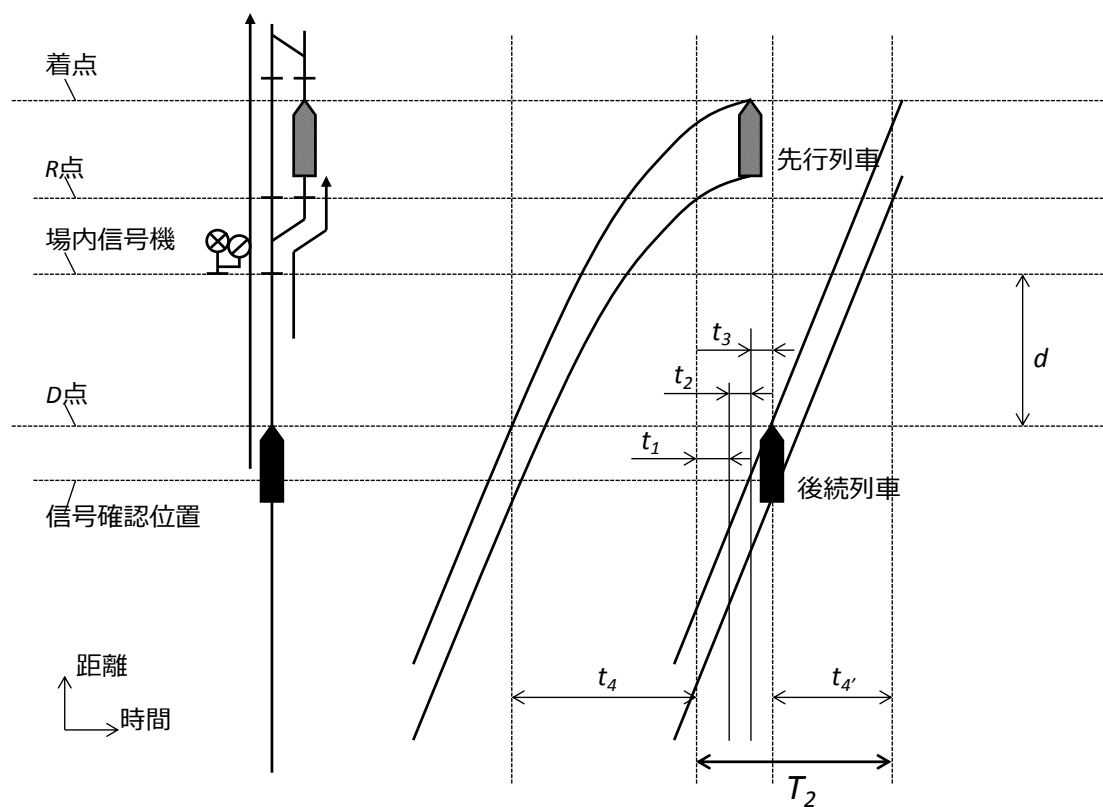


図 5-2. 追込時隔

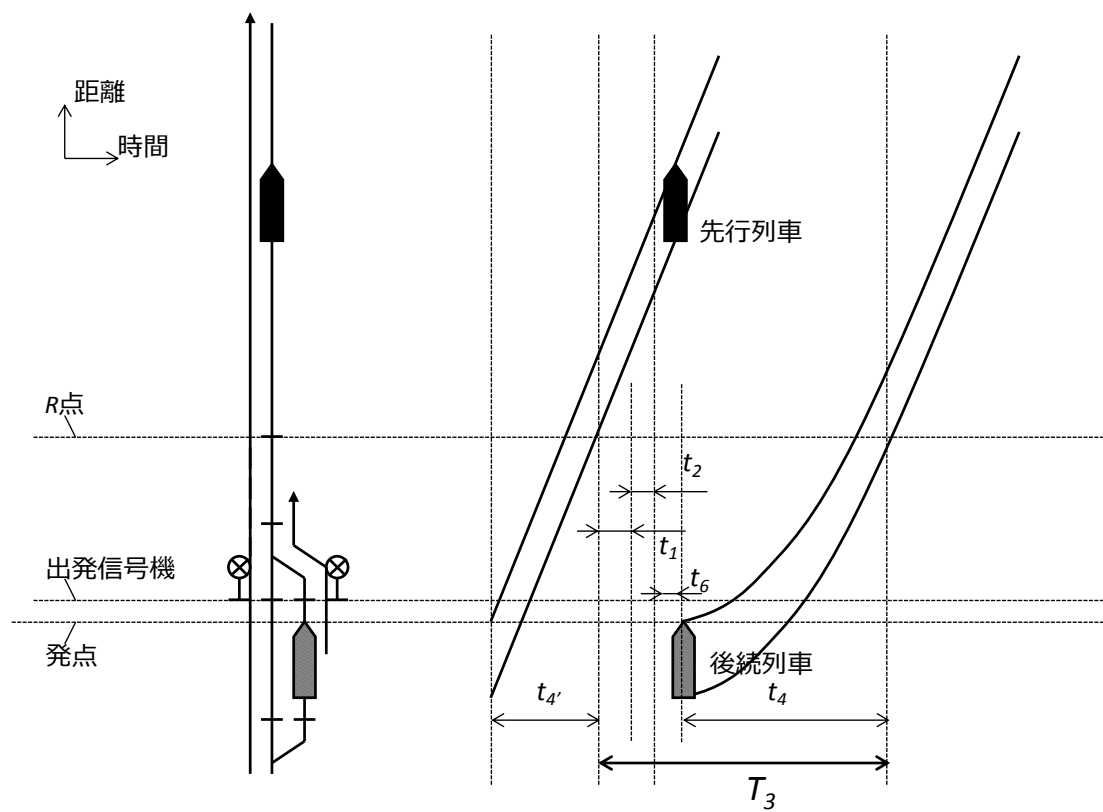


図 5-3. 開通時隔

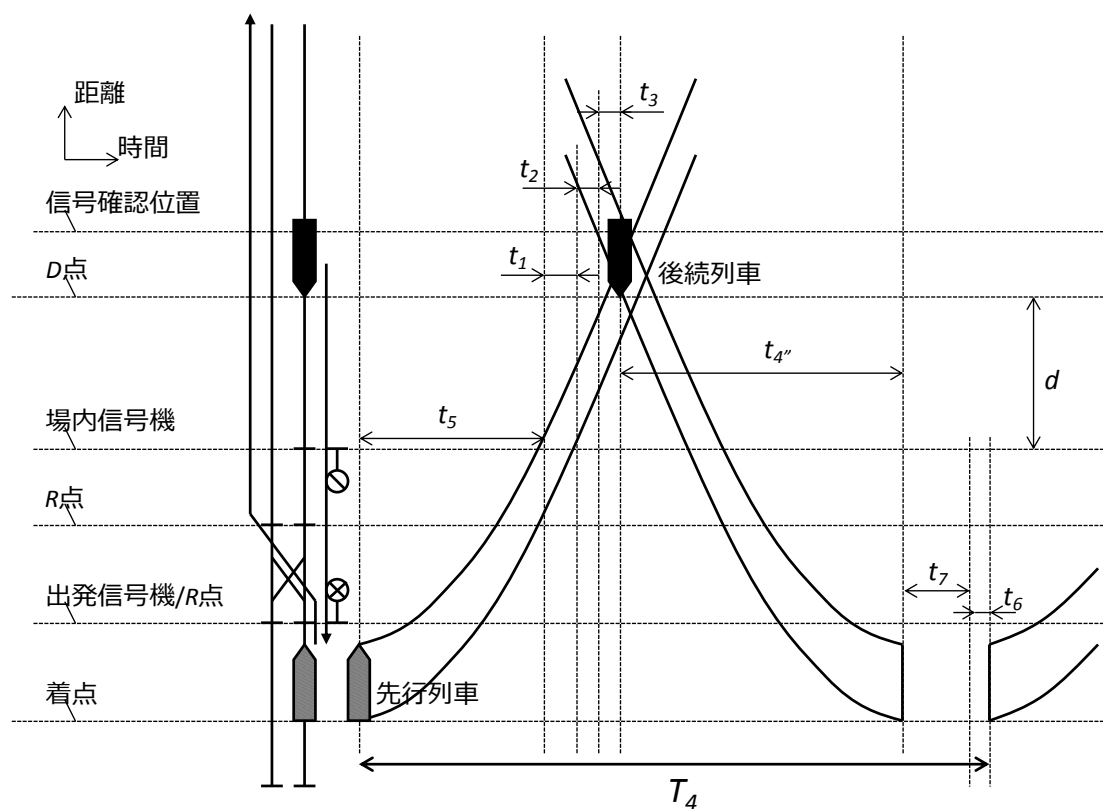


図 5-4. 交差支障時隔

表 5-1 記号や用語の定義

No.	記号・用語	定義
1	$d$	列車が計画速度から場内信号機手前で停止できる最小距離
2	$D$ 点	場内信号機から $d$ 手前の地点
3	着点	列車の停止地点
4	発点	列車の出発地点
5	$R$ 点	列車後端が抜けることで、後続列車の進路構成が可能な地点
6	$t_1$	進路構成に要する時間
7	$t_2$	信号機の応答時間 (信号現示変化時間)
8	$t_3$	乗務員による信号確認からブレーキ手配までの時間
9	$t_4$	列車先端の $D$ 点通過から列車後端の $R$ 点通過までの時間
10	$t_4'$	通過列車先端の $D$ 点もしくは発点通過から列車後端の $R$ 点通過までの時間
11	$t_4''$	列車先端の $D$ 点通過から列車先端の着点到達までの時間
12	$t_5$	列車出発から列車後端の $R$ 点通過までの時間
13	$t_6$	乗務員による安全確認から出発までに要する時間
14	$t_7$	駅における停車時間

### 5.3. 稠密ダイヤグラムの定義と導出方法

本節では、運行密度の高い運行方法を効率的に導出するために、本論文で提案するダイヤグラムの基本概念と、その定義と導出方法について述べる。

#### 5.3.1. 基本概念

前節で説明したように、複数の種類の運転時隔の計算と大小を比較する作業は、複雑な補正を要し、さらに、同時に 3 以上の列車が運行される場合には、組合せの数に比例して増加することになる。また、これらの結果を用いて運行密度の高いダイヤグラム案を作成しても、初期状態が異なったり、列車間隔がばらついた場合、それらの案の運行密度を正當に比較することは難しい。

そこで、本研究では、運行密度の高い運行方法を効率的に導出するため、求めるダイヤグラムに周期性を持たせることに着目する。具体的には、周期的に同じ形の列車運行形態(種別・行先・追抜関係など)を繰り返すダイヤグラムであり、その運行密度は、1 周期の間に運行される列車本数を 1 周期に要する時間で除算した値で、正當に比較することができる。

このような考え方は、パターンダイヤグラムと呼ばれ、現在、多くの大都市圏鉄道で通勤・通学時間帯のダイヤグラム設計に用いられている[5.14]。このパターンダイヤグラムの例を図 5-5 に示す。この例では、折返駅の A 駅において 15 分周期で(1)特急出発→(2)特急到着→(3)普通出発→(4)急行到着→(5)急行出発→(6)普通到着という列車運行形態が繰り返されていることが分かる。

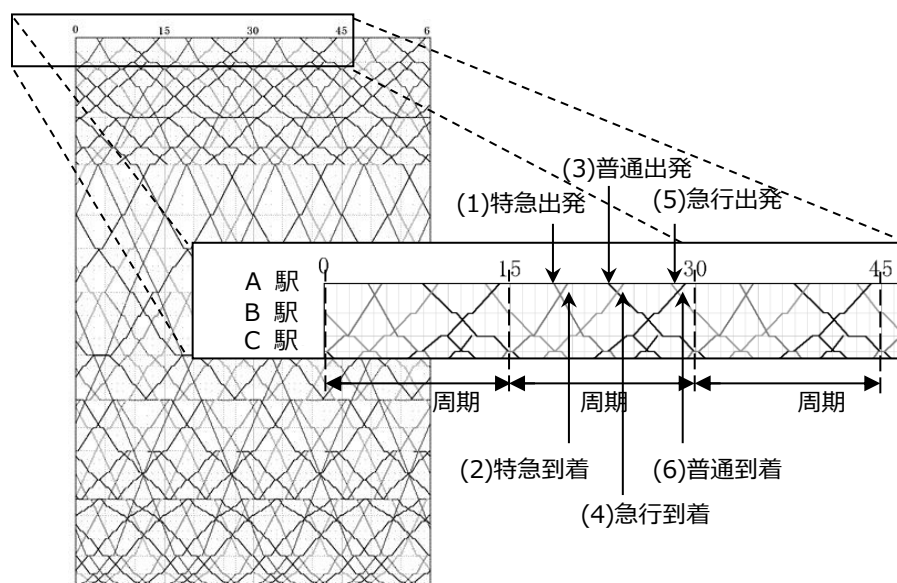


図 5-5. パターンダイヤグラムの例

2つ目の着目点は、列車の走行挙動を精密に模擬することである。現在、人手によってダイヤグラムを作成する場合、これを短時間で行うため、図 5-6(左)に示すように列車の走行挙動を直線に近似していることが多い。但し、当然ながら、このような走行挙動を基に計算した運転時隔は精度が低下するため、場合によっては過剰な余裕時分を考慮している場合がある。

そこで、本研究では、各列車の走行挙動を正確に模擬し、図 5-6(右)に示すように列車長や加減速度を考慮した時間曲線を用いて運転時隔を計算する。

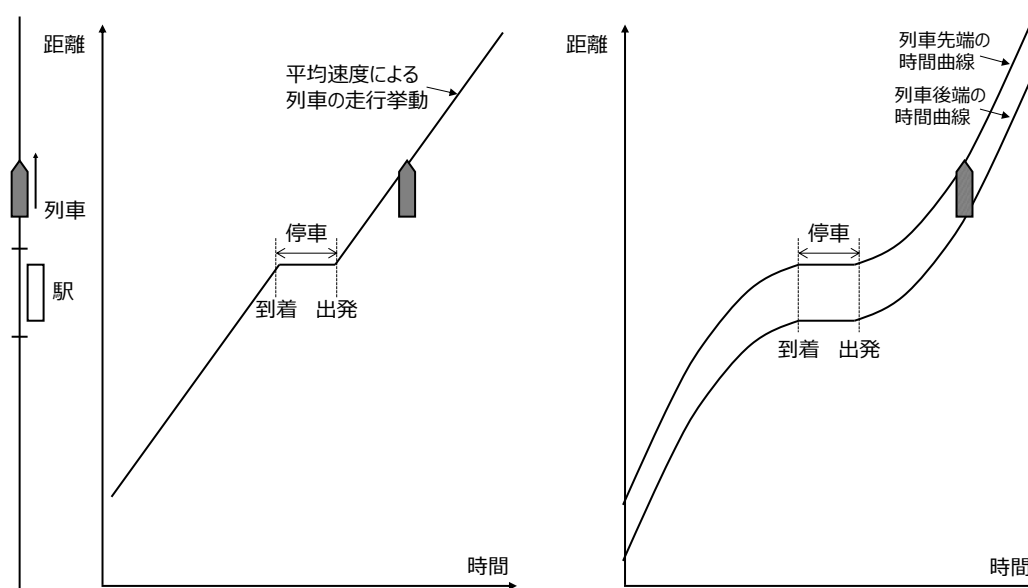


図 5-6. 列車の走行挙動の推定

3つ目の着目点は、求めるダイヤグラムの範囲を、駅近傍の列車の走行速度が変化する区間に限定することである。これは、5.2 節で述べたように、運転時隔は列車の走行速度が変化する区間で大きくなるからであり、路線全体の輸送力を制約するのは、駅中間の運転時隔ではなく、駅近傍の運転時隔だからである。つまり、運行密度の高い運行方法を導出するためには、駅近傍の運転時隔を考慮すれば十分だからである。これにより、列車の走行挙動は駅近傍に区間を限定して模擬すればよく、計算量の削減が期待できる。

### 5.3.2. 求めるダイヤグラムの定義

本研究では、前項で述べたように、駅近傍の列車の走行速度が変化する区間に限定して列車の走行挙動を精密に模擬し、これを基にしてそれぞれの走行挙動間の運転時隔をデータベース化し、このデータベースを用いて運行密度を限界まで高める周期性を持つダイヤ

グラムを導出する。そこで、このようなダイヤグラムを「周期的な列車運行形態を決定した時に1周期に要する時間が最も短くなるダイヤグラム」、すなわち「稠密ダイヤグラム」と定義する。

例えば、図 5-7(左)に示すような線路配線の駅で、1 周期の間に 1 本の列車が 1 番線で折返し、もう 1 本の列車が 2 番線で折返すような運行形態を考えると、いくつかの運行順序のパターンが考えられる。その内、下記のパターン A の 1 周期時間は図 5-7(右)に示す時間であり、パターン B の 1 周期時間は図 5-8 に示す時間となる。このような 1 周期時間を全ての運行順序パターンで計算し、その中でこの 1 周期時間が最も短くなるものが、この運行形態における稠密ダイヤグラムである。

- (1) パターン A : 1 番線到着→2 番線出発→1 番線出発→2 番線到着→
- (2) パターン B : 1 番線到着→1 番線出発→2 番線到着→2 番線出発→
- (3) パターン C : ...
- (4) ...

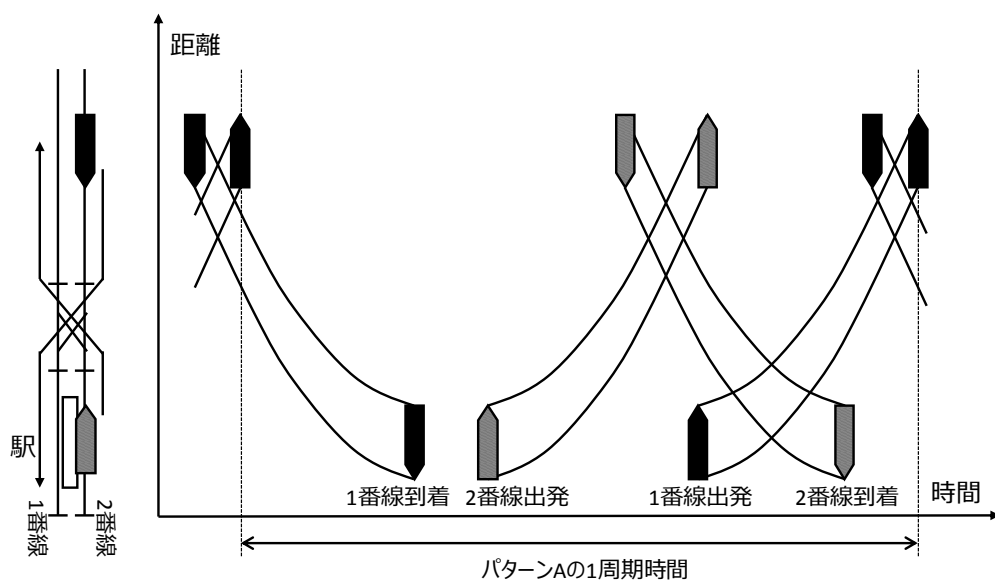


図 5-7. 端末駅の例とパターン A

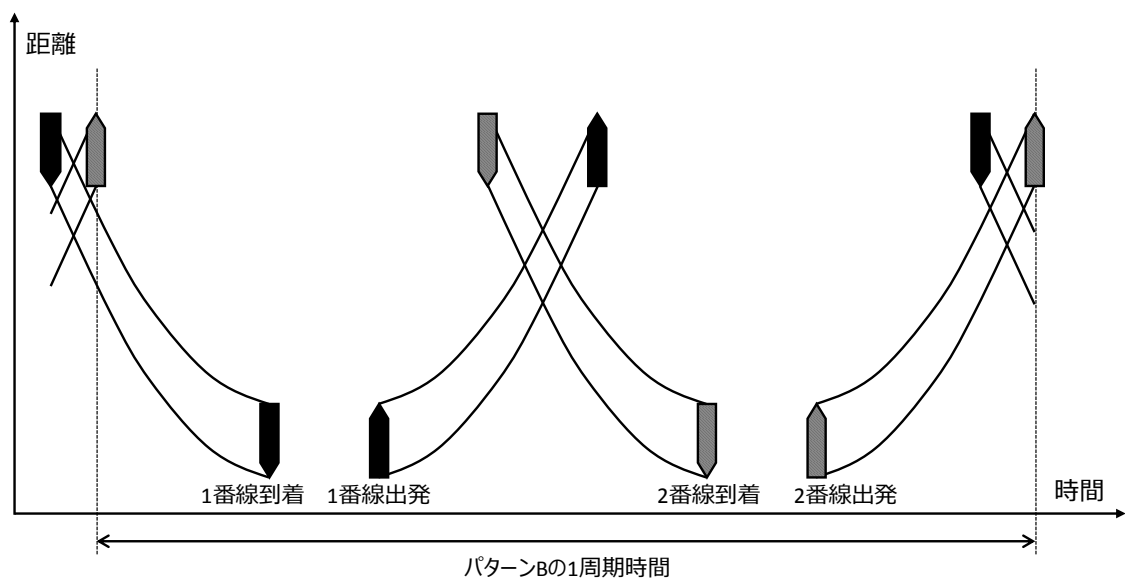


図 5-8. パターン B

#### 5.4. 稠密ダイヤグラムの導出

本節では、前節で定義した稠密ダイヤグラムの導出方法について説明する。導出工程は全部で 6 段階である。

##### 5.4.1. 前提データの作成

第 1 段階では、走行挙動の模擬および走行挙動間の運転時隔の計算に必要な前提データを揃える。具体的には、軌道回路割や転てつ器の座標や諸元、制限速度などを規定する線形データ、進路の発点や着点の座標、その経路などを規定する進路データ、信号機の現示変化や軌道回路の列車検知、転てつ器の転換や鎖錠に関する時素を規定する時素データ、列車長、最高速度、加速度、非常ブレーキ減速度、常用ブレーキ減速度などを規定する列車データ、乗降時間や信号システムの種類などを規定する運用データである。表 5-2 に主な前提データを示す。

表 5-2. 主な前提データ

No.	前提データ		
1	線路	線形	線路構造 軌道回路割 転てつ器座標 転てつ器諸元 勾配 (%) 曲率半径 (m)



		制限速度 (km/h)
	進路	信号機建植位置
		発点
		着点
		経路軌道回路
		鎖錠転てつ器
		過走区間
		進路区分鎖錠
	時素	現示変化時素 (s)
		軌道回路時素 (s)
		転てつ器転換時素 (s)
		転てつ器鎖錠時素 (s)
2	列車	列車長 (m)
		最高速度 (km/h)
		重量 (t)
		定員 (人)
		乗車率 (%)
		加速度 (km/h/s)
		非常ブレーキ減速度 (km/h/s)
		常用ブレーキ減速度 (km/h/s)
3	運用	乗降時間 (s)
		信号システム

#### 5.4.2. 走行挙動の模擬

第 2 段階では、第 1 段階で作成した線形データ、進路データ、時素データ、列車データに基づいて、想定される全列車が想定される全進路を走行する際の走行挙動を計算し、走行挙動データを作成する。具体的には、図 5-9 に示すように、列車が進路の発点に発点速度で存在している状況から、途中の速度制限を守って列車の加減速性能の範囲内で進路の着点に着点速度で到達する場合の進路全地点における列車の通過時刻と通過速度を計算する。

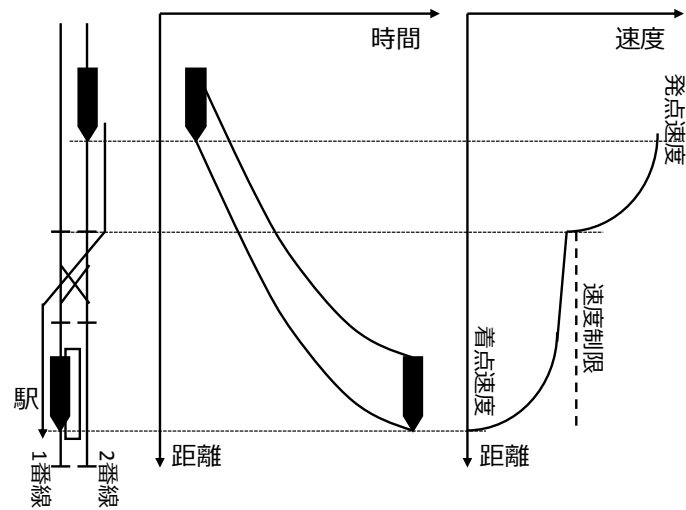


図 5-9. 走行挙動の模擬

#### 5.4.3. 走行挙動間の運転時隔の計算

第 3 段階では、第 1 段階で作成した線形データ、進路データ、時素データ、運用データ、第 2 段階で作成した全列車全進路の走行挙動データに基づいて、全ての走行挙動間の運転時隔を計算する。具体的には、2 つの走行挙動に関し、共通して通過するブロック(以後、競合ブロックと呼ぶ)と転てつ器(以後、競合転てつ器と呼ぶ)を抽出し、一方の列車を先行、他方の列車を後続として、先行列車の走行挙動データから競合ブロックや競合転てつ器通過時刻に機器反応時間や転てつ器転換時間等を加算し、後続列車の進路開通時刻を計算する。次に、この開通時刻に後続列車が不必要な減速をせずに接近できる地点を求め、そこから後続列車の進路発点通過時刻を算出する。

このような計算により、先行列車の走行挙動と後続列車の走行挙動間の運転時隔を求めることができる。これを全ての走行挙動の組合せについて計算し、運転時隔データを作成する。

#### 5.4.4. 運行順序パターンの作成

第 4 段階では、列車の周期的な運行形態を決定し、その運行形態における全通りの運行順序パターンを作成する。具体的には、選択された複数の列車と進路の組(以後、運転セットと呼ぶ)の順列組合せ(周期性を持つため円順列)分の運行順序パターンを作成する。1 周期の間に 1 本の列車が 1 番線で折返し、もう 1 本の列車が 2 番線で折返すような運行形態では、それぞれの走行挙動を 1 番線到着(A)、1 番線出発(B)、2 番線到着(C)、2 番線出発(D)

とすると、ABCD の円順列、つまり ABCD・ABDC・ACBD・ACDB・ADBC・ADCB の 6 (3!) 通りの運行順序パターンを作成する。

#### 5.4.5. 1 周期時間の計算

第 5 段階では、第 4 段階で作成した運行順序パターンごとに、第 1 段階で作成した運用制約データと第 3 段階で作成した運転時隔データに基づいて、その 1 周期時間を計算する。具体的には、順序 1 番の走行挙動の進路発点経過時刻を 0 秒とし、以後、運行順序に従って、それぞれの走行挙動の進路発点経過時刻を計算する。この時、全ての先行走行挙動との運転時隔と運用制約とを踏まえた上で、最も詰められる時刻を求める。そして、同じ走行挙動に関して次周期での進路発点経過時刻を求めれば、その差分が 1 周期時間となる。但し、1 周期目は前周期の影響を受けていないため、1 周期分を計算しただけでは正確な 1 周期時間は求められない。そこで、1 周期時間が一定となるまで上記計算を繰り返す。これを全ての運行順序パターンについて行う。

#### 5.4.6. 稠密ダイヤグラムの抽出

第 6 段階では、第 5 段階で計算した全ての運行順序パターンの 1 周期時間の中から、最も短い運行順序パターンを抽出する。これが、第 4 段階で決定した周期的な運行形態における稠密ダイヤグラムである。

### 5.5. 稠密ダイヤグラムの導出ツール

本研究では、前節で示した導出方法を実際に計算機に実装し、稠密ダイヤグラムを自動的に導出するツールを作成した。本節ではそのツールの概要について述べる。

#### 5.5.1. 稠密ダイヤグラム導出ツールの構成

本研究で作成したツールのモジュール構成を図 5-10 に示す。基本的には前節で説明した稠密ダイヤグラム導出 6 段階に対応する 6 つのモジュールで構成される。

##### (1) 前提データの作成モジュール(第 1 段階のモジュール)

線形データ、進路データ、時素データ、列車データ、運用データを記入するための表形式の入力インタフェースを用意し、ツール使用者によって入力されたデータをツール内の記憶部に格納する機能を持つ。

##### (2) 走行挙動の模擬モジュール(第 2 段階のモジュール)

第 1 段階のモジュールで入力された線形データ、進路データ、時素データ、列車

データに基づき、入力された全ての列車と進路の組合せについて、進路全地点における列車の通過時刻と通過速度を計算し、これを走行挙動データとして記憶部に格納する機能を持つ。

(3) 走行挙動間の運転時隔の計算モジュール(第3段階のモジュール)

第1段階のモジュールで入力された線形データ、進路データ、時素データ、列車データ、運用データ、第2段階のモジュールで作成した走行挙動データに基づき、全ての走行挙動間の運転時隔を計算し、これを運転時隔データとして記憶部に格納する機能を持つ。

(4) 運行順序パターンの作成モジュール(第4段階のモジュール)

列車の周期的な運行形態を指定するための運転セットの選択形式の入力インタフェースを用意し、ツール仕様者によって入力された列車と進路の組合せから全通りのパターンを作成し、これを運行順序パターンとして記憶部に格納する機能を持つ。

(5) 1周期時間の計算モジュール(第5段階のモジュール)

第4段階のモジュールで作成した運行順序パターンごとに、第1段階のモジュールで入力された運用制約データと第3段階で作成した運転時隔データに基づいて、その1周期時間を計算し、これを記憶部に格納する機能を持つ。

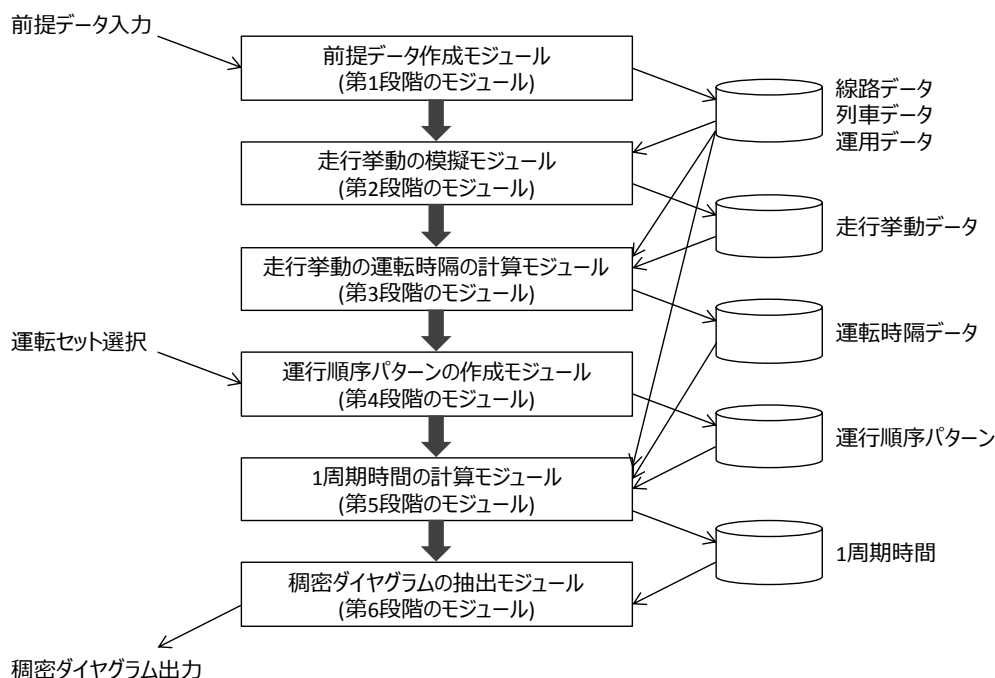


図 5-10. 稠密ダイヤグラム導出ツールのモジュール構成

(6) 稠密ダイヤグラムの抽出モジュール(第 6 段階のモジュール)

第 5 段階のモジュールで記憶した全ての運行順序パターンの中の 1 周期時間の中から、最も短い運行順序パターンを抽出し、これを稠密ダイヤグラムとして時間曲線図もしくは動画によってツール使用者に提供する機能を持つ。

### 5.5.2. 稠密ダイヤグラムの出力表示

前項で説明した稠密ダイヤグラムの抽出モジュール(第 6 段階のモジュール)において、実際にツール使用者に対して提供した稠密ダイヤグラムの時間曲線図による表示と、動画による表示を図 5-11、図 5-12 に示す。

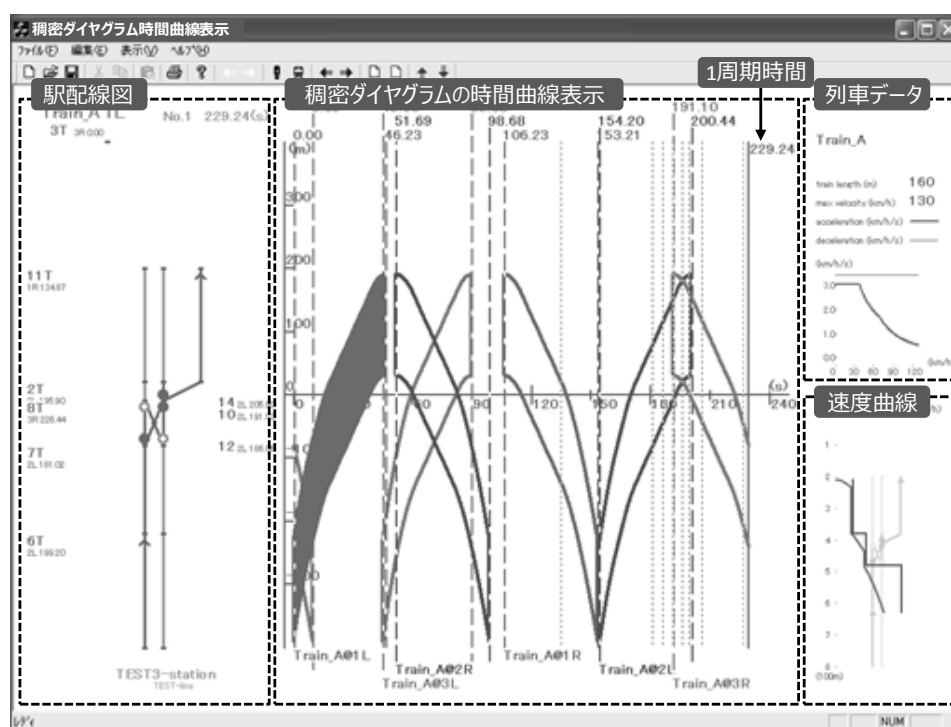


図 5-11. 時間曲線による稠密ダイヤグラム表示

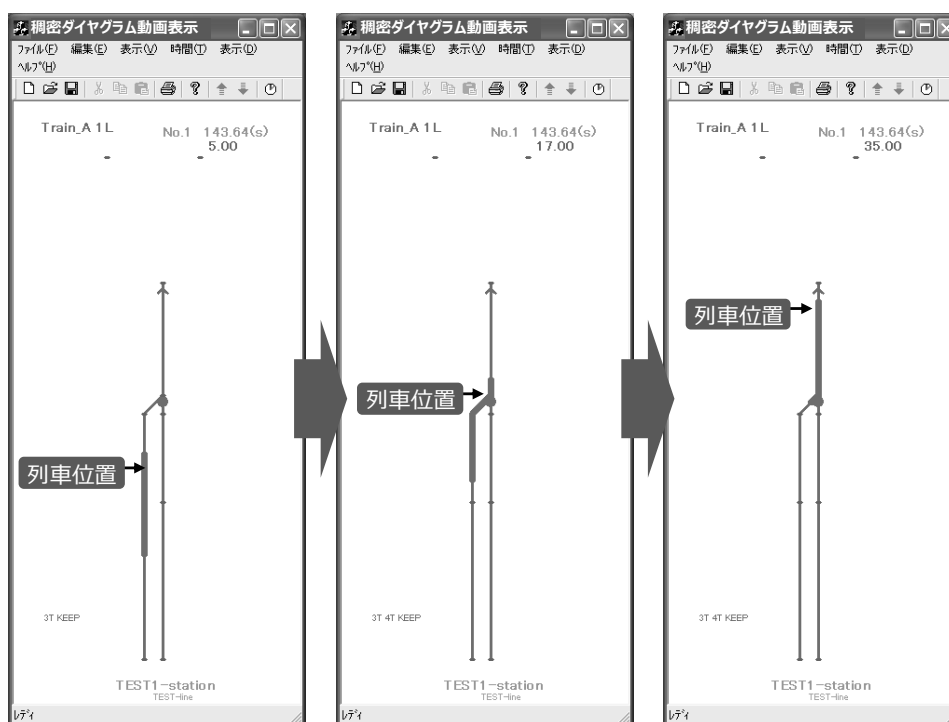


図 5-12. 動画による稠密ダイヤグラム表示

### 5.5.3. 稠密ダイヤグラムの規模と導出時間の関係

本研究で作成したツールにおいて、最も計算量を要するモジュールは、設定した運転セットの順列組合せ分の運行順序パターンごとに、1 周期時間を計算する第 5 段階のモジュールである。例えば、図 5-13 に示すような 4 線端末駅において、列車が各番線で均等に折返す運行形態では、運行順序パターンの数は 5040 (7!) 通りとなり、Pentium IV 2.0GHz の CPU を持つ Windows XP 機を用いて 0.5s で導出することができた。また、6 線端末駅において列車が各番線で均等に折返す運行形態では、運行順序パターンの数は  $39.9 \times 10^6$  (11!) 通りとなり、導出に約 1 時間を要した。このように、当然のことながら稠密ダイヤグラムの導出時間は運行順序パターン数に比例した。なお、運行順序パターン数と前述の計算機における稠密ダイヤグラム導出時間との関係は表 5-3 に示す通りである。

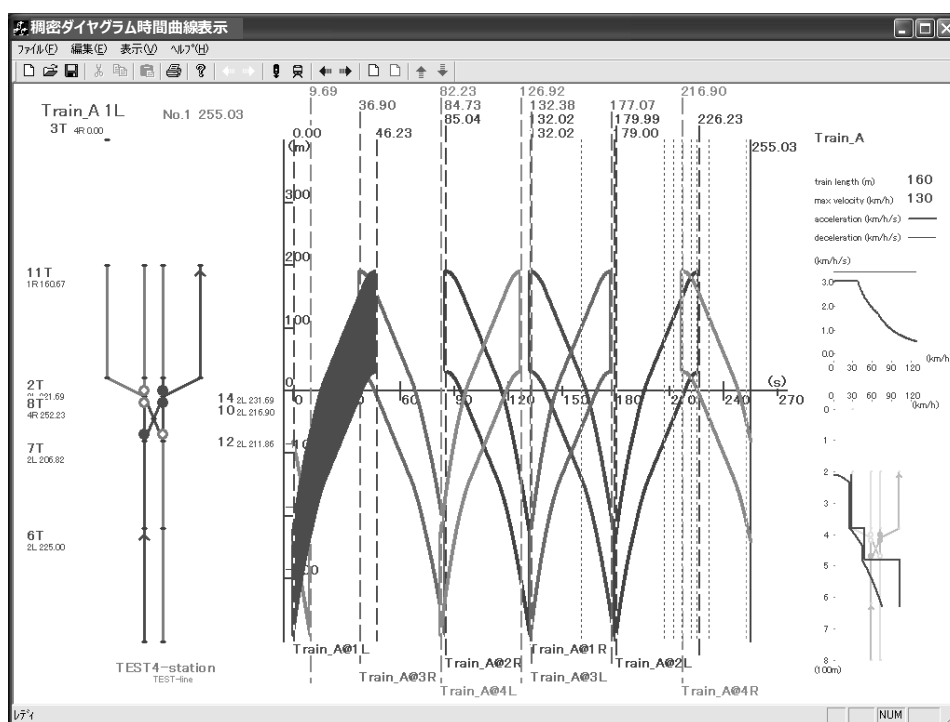


図 5-13. 4 線端末駅における稠密ダイヤグラム導出の例

表 5-3. 運行順序パターン数と導出時間の関係

No.	端末駅番線数	運行順序パターン数	導出時間
1	3	120 (5!)	0.01 s
2	4	5040 (7!)	0.5 s
3	5	362880 (9!)	34 s
4	6	39916800 (11!)	1 h

## 5.6. 事例に見る稠密ダイヤグラム活用効果の検証

前節で説明したツールを用いて稠密ダイヤグラムを導出することによって、端末駅での列車折返運用を精密に分析することができる。そこで、本節では、いくつかのケーススタディを用いて、稠密ダイヤグラムの導出によって得られる有効な情報について説明する。

なお、このケーススタディでは、限られたインフラの下で列車折返運用を評価することによって得られる有効な考察結果を示すため、大規模な線路の増設が難しい大都市圏鉄道を前提とし、表 5-4 に示すパラメータを用いて稠密ダイヤグラムを導出する。

表 5-4. ケーススタディに用いるパラメータ

No.	パラメータ	値
1	ホームトラック制限速度	25 km/h
2	転てつ器制限速度 (定位)	60 km/h
3	転てつ器制限速度 (反位)	45 km/h
4	転てつ器転換時間	10 s
5	乗降時間	60 s 以上
6	列車長	160 m
7	最高速度	130 km/h
8	加速度	3.0 km/h/s
9	減速度	3.0 km/h/s

### 5.6.1. 運行計画への活用

まず、本項では、図 5-14 左側に示すような 3 線端末駅をモデルとして稠密ダイヤグラムを導出し、稠密ダイヤグラムの運行計画への活用を説明する。

この 3 線端末駅の各番線において列車が均等に折返す運行形態での稠密ダイヤグラムは図 5-14 中央に示す通りになり、その 1 周期時間は 229s となった。つまり、この 3 線端末駅では、図 5-14 中央に示すような順序で列車を運行することが最も高密度な列車折返運用であること、その運行密度は 229s に 3 本であることが分かる。これは、路線の運行計画を立案する際に非常に有益な情報となる。

また、稠密ダイヤグラムの 1 周期時間は、線路形状や列車性能というインフラ条件の他に、様々なパラメータの影響を受けている。そこで、影響を与えていると想定される時間のパラメータを変化させ、その時の 1 周期時間の変化から各パラメータの列車折返運用に与える影響を分析することもできる。



例えば、転てつ器の転換時間と旅客の乗降時間を変化させ、この 3 線端末駅における稠密ダイヤグラムの 1 周期時間の変化を調べることで、そのパラメータが列車折返運用に与える影響を調べることができる。転てつ器の転換時間については、1 回の転換時間の前提は 10s としたが、特に 2 番線での折返列車が、駅到着時と駅出発時の両方で転てつ器の転換の影響を受けており、全体で 27s も 1 周期時間を増加させていた。また、旅客の乗降時間については、列車の折返時に 60s を要する前提としたが、1 番線での折返列車の乗降時間が 12s も 1 周期時間を増加させていることが分かった。

従って、このケースでは、転てつ器については、特に 2 番線での折返列車が通過する転てつ器の転換時間を短縮できれば、列車の折返密度を高められること、乗降時間については、1 番線での折返列車の乗降時間を短縮できれば、それだけ列車の折返密度の向上に寄与することが分かる。従来から、多くの民鉄において、列車の両側にプラットホームを設けて乗車と降車を分離することで乗降時間を短縮するような工夫がなされているが、乗降時間のパラメータを変化させて稠密ダイヤグラムを分析することで、どの番線でどの程度の効果が期待できるのか、容易に評価することができる。

さらに、稠密ダイヤグラムが運行計画に活用できる別の事例として、余裕時間の適正化が挙げられる。現在、運行計画を設計する際、停車時間のような状況に応じて変動する可能性の大きなパラメータについては、そのばらつきを考慮して大きな余裕時間を設定することが一般的である。これに対し、予めパラメータを変化させ、複数のケースで稠密ダイヤグラムを導出し、その 1 周期時間の増加量を計算することで、パラメータ変動確率と折返列車密度に与える影響の大きさとの関係を整理することができ、確率論的に適切な余裕時間を導出することが可能となる。

つまり、稠密ダイヤグラムは、端末駅において最適な運行順序を提示するというだけでなく、パラメータを変化させて 1 周期時間を分析することによって、各パラメータの列車折返運用に与える影響や、その変動を踏まえた適切な余裕時間等、様々な列車運用に関する有益な情報を得られることが分かる。

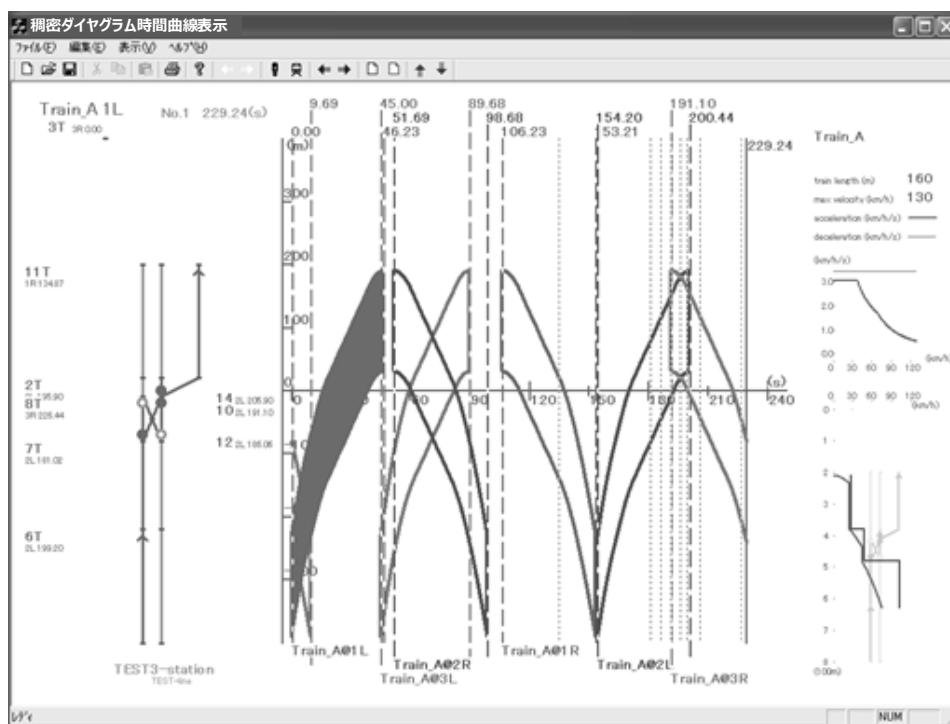


図 5-14. 3 線端末駅の例と稠密ダイヤグラム

### 5.6.2. 運転整理への活用

次に、本項では、稠密ダイヤグラムの運転整理への活用について述べる。運転整理とは、事故や災害等によって列車の運行計画が乱れた時に、列車運行の継続性や旅客輸送サービスの観点から適切に列車の運行計画を変更することを指す。

例えば、図 5-15 左側に示すような 4 線端末駅をモデルとして、列車が各番線で均等に折返す運行形態での稠密ダイヤグラムを導出すると、各列車の走行挙動は図 5-15 中央に示す通りとなり、その 1 周期時間は 255s となる。これに対し、事故や災害等によって、この駅の 4 番線が使用できなくなった場合を想定すると、この駅は 5.6.1 項の図 5-14 左側の 3 線端末駅と同じ構造となる。つまり、この場合、255s の間に 4 本の列車を折返すことができたのが、229s に 3 本の列車しか折返すことができなくなることが、稠密ダイヤグラムを導出することによって即座に分かる。従って、このような場合に運転整理案を作成する際には、図 5-14 中央の 3 線端末駅における稠密ダイヤグラムが、4 線端末駅において残った 3 つの番線を使った列車折返運用を考える上で有益な参考情報となり、1 周期時間についても、この端末駅の手前で列車に不要な減速や停止を発生させないで済むような案を作成する上で貴重な情報となる。なぜなら、この 1 周期時間を考慮し、端末駅の前駅までの待避設備を活用して、列車密度を調整できれば、端末駅で不要な減速や停止の無い稠密ダイヤグラムの通りの列車折返運用ができるからである。また、まだ列車を高密度運行する前の時間

帯であれば、その時間帯で列車に不要な減速や停止を発生させないで済むような臨時の間引きダイヤを作成するために、このような稠密ダイヤグラムを活用することもできる。

つまり、列車の運行計画に何らかの支障が発生し、運転整理が必要になった場合、その状況に合わせて前提条件を修正して稠密ダイヤグラムを導出することによって、路線全体の運転整理案の作成に対し、特に運転間隔を詰めることの難しい端末駅近傍の運転整理案の作成に対して、即座に有益な情報を提供することができるのである。

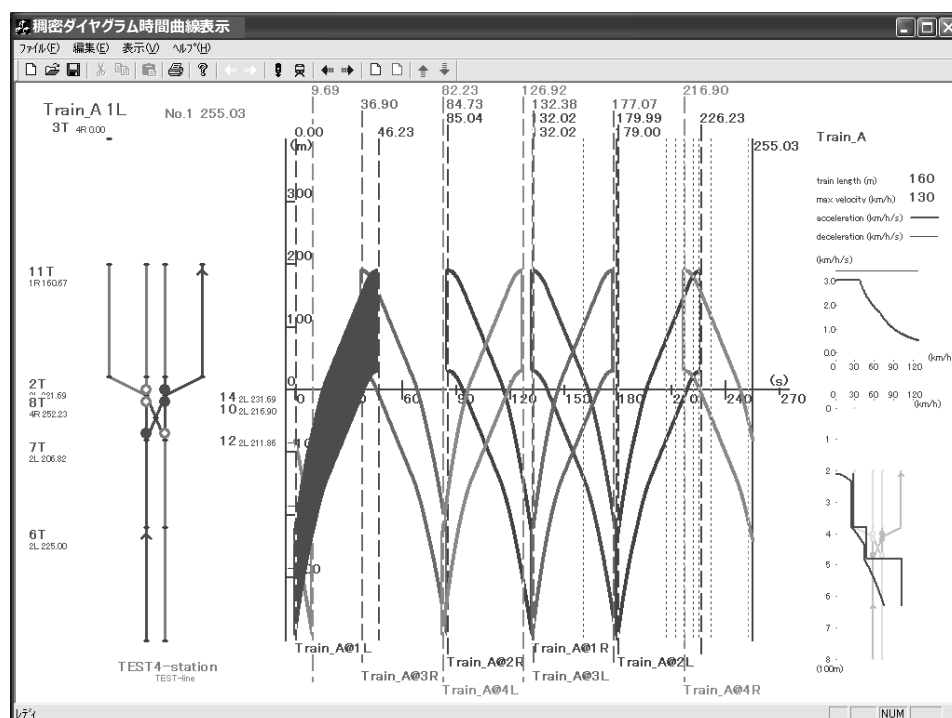


図 5-15. 4 線端末駅の例と稠密ダイヤグラム

### 5.6.3. 設備設計への活用

最後に、本項では、稠密ダイヤグラムの設備設計への活用について述べる。例えば、図 5-16 に示す 4 つの端末駅を対象として、列車が各駅の各番線で均等に折返す運行形態での稠密ダイヤグラムを導出し、それぞれの 1 周期時間とその 1 周期時間に影響を与えるパラメータとその度合いを抽出する。結果を表 5.5 に示す。

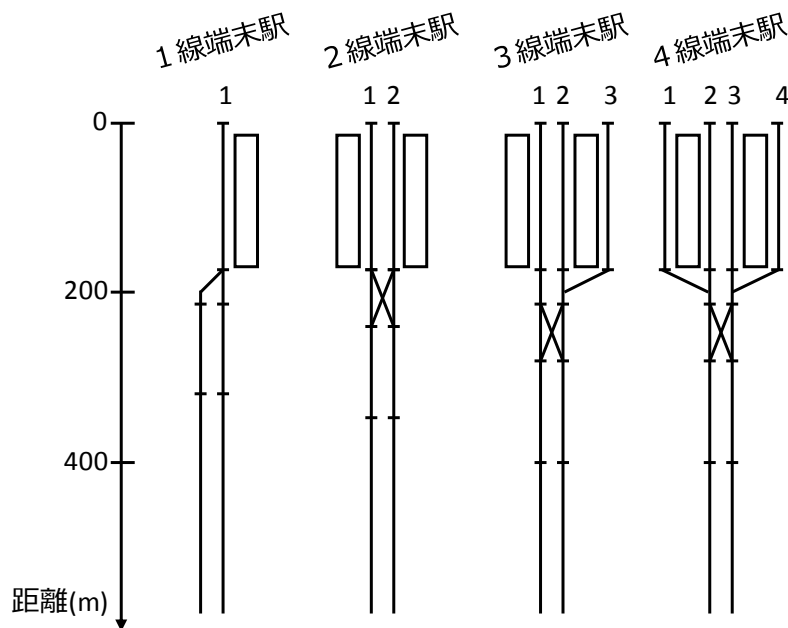


図 5-16. 1 線～4 線端末駅の例

表 5-5. 1 線～4 線端末駅の稠密ダイヤグラムの 1 周期時間

No.	端末駅構成	1 周期時間(s)	折返運行密度 (1 線端末駅の場合 を 1 とした時)	転てつ器の転換 時間の影響(s)と 割合(%)	旅客の乗降時間 の影響(s)と割合 (%)
1	1 線端末駅	144	1	10 (7%)	60 (42%)
2	2 線端末駅	150	1.92	10 (7%)	10 (6%)
3	3 線端末駅	229	1.88	27 (12%)	12 (5%)
4	4 線端末駅	255	2.25	10 (4%)	0 (0%)

この結果から様々なことが分かるが、その 1 つは、端末駅を 1 線から 2 線へ線路増設すると折返運行密度を 1.9 倍も向上させることができる一方で、2 線から 3 線へは線路増設しても折返運行密度を向上できないだけでなく、若干低下してしまうということである。これは、図 5-17 に示すように、3 線へ線路増設すると、両渡交差分岐の転てつ器を手前に移設する必要があり、その分速度制限区間が長くなり、2 線の場合よりも列車の到着・出発に時間を要するようになるからである。このような一見分かりづらい現象についても、導出された稠密ダイヤグラムにおいて各列車の走行挙動を比較することで、その理由を容易に認識することができる。

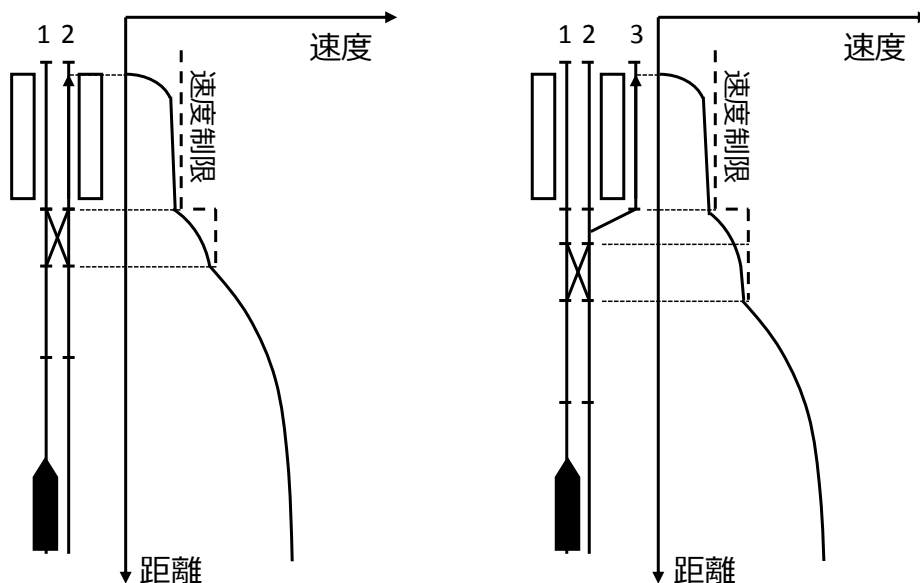


図 5-17. 2 線端末駅と 3 線端末駅での走行挙動の違い

さらに、このように、線路設計において問題点が顕在化された後も、稠密ダイヤグラムを活用することで、顕在化した問題点を解決するための新たな線路設計を検討することができる。例えば、図 5-16 の 3 線端末駅では 3 番線を効率良く使えていなかったことから、図 5-18 に示すように 3 番線からの駅進出用に新たな線路を追加して稠密ダイヤグラムを導出してみると、折返運行密度が表 5-6 に示すように大きく改善することが分かる。

もちろん、このような 3 線端末駅の線路設計における問題点や、これを解決する線路設計の工夫は、従来より知られているものであるが、今後、より複雑な状況において線路設計を行う際、本節に示したように線路設計案ごとに稠密ダイヤグラムを導出することで、設計者に、一見分かりづらい問題点を認識させ、さらには、そのような問題点を解決する工夫の発見を促すことが期待できる。

また、図 5-16 と表 5-5 から、もう 1 つ分かることは、4 線端末駅では、転てつ器の転換時間や旅客の乗降時間が稠密ダイヤグラムの 1 周期時間にほとんど影響していないことである。つまり、4 線端末駅でこれ以上折返運行密度を向上させるためには、他のパラメータを変化させなければならないことが分かる。具体的には、線路形状や列車性能、駅構内の制限速度などである。これらのパラメータがどの程度折返運行密度の向上に寄与するかについては、5.6.1 項で転てつ器の転換時間や旅客の乗降時間を変化させて稠密ダイヤグラムの 1 周期時間の変化を調べたようにすればよい。例えば、駅構内の制限速度を 35km/h に上げた場合、1 周期時間は 255s から 219s にまで短縮される。

つまり、駅の線路配線の設計や改修を行う際、複数の設計案や改修前後の条件で、稠密ダイヤグラムを導出して比較することで、どのようなパラメータがどの程度折返運行密度に影響を与えるかという情報を提供することができる。このような情報は、大規模なインフラ投資が難しく、目標に対して過不足ない設計や投資効果の高い改修が求められる状況においては、非常に有益な情報と言える。

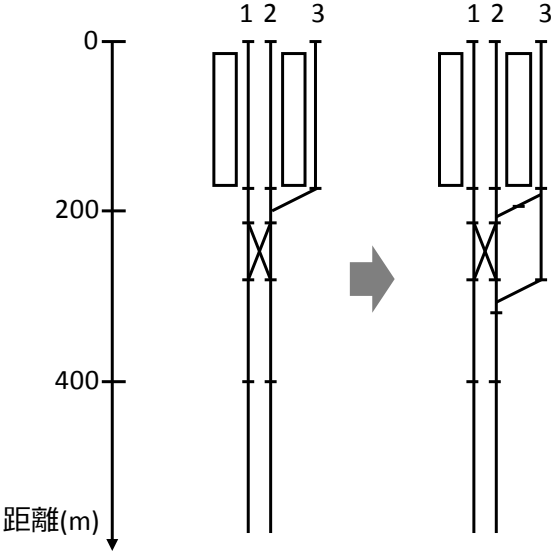


図 5-18. 3 線端末駅の線路設計の工夫例

表 5-6. 3 線端末駅の 3 番線進出用に線路を追加した場合の 1 周期時間

No.	端末駅構成	1 周期時間(s)	折返運行密度 (1 線端末駅の場合 を 1 とした時)	転てつ器の転換 時間の影響(s)と 割合(%)	旅客の乗降時間 の影響(s)と割合 (%)
3	3 線端末駅	229	1.88	27 (12%)	12 (5%)
3a	3 線端末駅(3 番線 進出用に線路追加)	186	2.32	10 (5%)	0 (0%)

## 5.7. まとめ

輸送量の大きい路線で、大規模なインフラ投資によらずに列車を高密度に運行させるためには、複雑な線路配線を持つ端末駅において、各列車の走行挙動を精度高く模擬し、それぞれの列車間に安全を確保するための最小限の間隔を計算して、折返運行を限界まで高めるダイヤグラムを導出することが有効である。

そこで、本研究では、駅近傍の列車の走行速度が変化する区間に限定して、周期的な列車運行形態を決定した時に 1 周期に要する時間が最も短くなるダイヤグラム「稠密ダイヤグラム」を定義し、これを導出する方法を系統的に示した。具体的には、駅近傍における列車の走行挙動を精密に模擬し、これを基にしてそれぞれの列車の走行挙動間の運転時隔をデータベース化し、このデータベースを用いて最も 1 周期に要する時間が短くなる運行順序パターンを抽出する、という方法である。

本章では、まず、この稠密ダイヤグラムを導出する方法を 6 段階の工程に分けて説明し、次に、この導出方法を実際の計算機に実装し、稠密ダイヤグラムの規模とその導出時間との関係を示した。稠密ダイヤグラム導出において、最も計算量を要する工程は、選択された列車と進路の組の順列組合せ分の運行順序パターンごとに 1 周期時間を計算する工程であり、その計算時間は選択された列車と進路の組数の階乗(番線数 $\times 2 - 1$  の階乗)に比例するものの、6 線端末駅の稠密ダイヤグラムまで一般的な汎用計算機を使って実用的な時間内に導出できることを確認した。大規模なインフラ投資の難しい一般的な路線において、折返運行に用いることのできる番線数は、多くても 6 線以下であることから、十分に実用的であると言える。

但し、西武池袋線池袋駅や小田急線新宿駅など、周期的に運転されている特急の一部を有料特急とし、その列車に特定の番線を専用的に使用させるなど、各番線を均等に使用するとは限らない駅もある。例えば、特急/急行/普通/特急/急行/普通/有料特急/急行/普通というように運用する場合には、1 周期に考慮する列車数は 3 本ではなく、9 本として計算する必要がある。今後、このような運用上の制約に柔軟に対応するためには、1 周期の列車数を多く設定しても、実用的な時間内で稠密ダイヤグラムを導出できるように、最適解以外のパターンについては計算の途中で適切に枝刈りして無用な計算を減らすようなアルゴリズムを研究していくことが課題となる。

最後に、導出した稠密ダイヤグラムから、列車を高密度に運行させる上で重要な運行計画、運転整理、設備設計という業務に対して、下記に示すような有益な情報を得られることを、大規模な線路の増設が難しい大都市圏鉄道を想定したケーススタディを用いて明らかにした。

- ・ 転てつ器の転換時間や旅客の乗降時間が列車の折返運用に与える影響
- ・ 端末駅の 1 つの番線が使用できなくなった場合にこの端末駅手前で列車に不要な減速や停止を発生させないために前駅までに調整すべき列車密度の目標値
- ・ 設備改修による制限速度区間変更が列車の折返運行密度へ与える影響
- ・ 線路設計案の列車折返運用上の問題点やそれを解決する線路追加の効果 など



## 6. 駅間 3 線の緩急交互型運行方式

### 6.1. はじめに

2.3 節の「輸送量の大きい路線における経済性の課題」で述べたように、複線の大都市圏鉄道の輸送力を向上させる最も一般的な方策は、複々線化である。しかしながら、現在、旅客需要は減少傾向にあり、かつ少子高齢化社会の到来で将来的に利用者が減少すると予想されていることから、事業者にとって線路の増設などの大規模なインフラ投資を行うには厳しい経済状況になりつつある。

第 5 章では、高機能化した信号システム上で列車を高密度に運行することを目的に、列車の走行速度が変化するために列車間の安全を確保するための時間間隔が必然的に大きくなってしまふ駅近傍に焦点をあてて列車の運行密度を限界まで高めるダイヤグラムを導出する方法について述べた。裏を返せば、従来の列車運行方式では、それ以外の区間、具体的には、駅間の線路を時間的に限界まで使っているわけではないことを示唆している。

以前から、複線の運行方式については、特に大都市圏鉄道の速達性向上と輸送力増強を目的として多くの研究がなされており、地域分離型運行[6.1]、選択停車型運行[6.2]、はみ出し停車[6.3]などの運行方式が考えられてきた。実際にこれらの運行方式はいくつかの複線の大都市圏鉄道において適用され、大きな効果を挙げた。しかしながら、輸送力については複々線の運行方式には及ばないものであった。

このような複線の運行方式に対し、複線と複々線の間である 3 線を使う運行形態については、小田急小田原線登戸―向ヶ丘遊園間 0.6km や、京急本線子安―神奈川新町間 0.7km など、上りに 2 線、下りに 1 線を使う 3 線運行の事例は存在するものの、非常に短い区間であり、先行研究事例は少ない。幹線鉄道において速達列車に追い抜かれる各駅停車列車の待避時間をなくす研究[6.4]や、複々線区間の 1 線が不通になった場合に輸送力が大幅に低下しないように 3 線を活用する研究[6.5][6.6][6.7]は知られているが、大都市圏鉄道を対象として複線区間の輸送力増強を目的とした研究は行われてこなかった。

そこで、本章では、複線区間と複々線区間において現在実施されている列車の運行方式とその線路の使い方を分析し、駅間 3 線の線路を時間的に効率的に使う方法を探究する。具体的には、駅間 3 線の線路を時間的に効率的に使うことによって、複々線化のような大規模なインフラ投資によらず、これと同等の輸送力増強効果をもたらす費用対効果の高い列車運行方式を提案する。

## 6.2. 既存の運行方式

### 6.2.1. 複線における緩急結合型運行

5.2 節で述べたように、列車間の安全を確保するための最小限の運転時隔は、列車が停車する駅近傍で長くなる。図 6-1 のような待避設備を持たない駅で、列車を高密度に運行しようとする場合、先行列車と後続列車との間には下記 2 つの時間を合算した時間間隔が必要であり、これが運行密度の限界を制約する。

#### (1) 駅停車損失時間

駅を通過する場合と比較して、駅に停車するために減速・停車・加速することによって余分に費やされる時間

#### (2) 信号システムによる最小運転時隔

列車間の安全を確保するために信号システムによって制御される必要最小限の運転時隔

現在、一般的な大都市圏鉄道では、予め定時運行するための余裕時間を含めて、(1)と(2)の両方の時間とも 60s 程度で運行されている[6.8]。

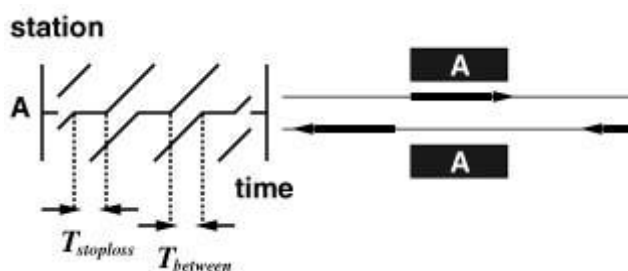


図 6-1. 待避設備を持たない駅における列車運行

また、図 6-2 のような待避設備を持つ駅で列車の追抜運行を行う場合も、同様に、追い抜かれる列車と追い抜く列車との間に、駅停車損失時間、信号システムによる最小運転時隔、余裕時間を考慮しなければならない。

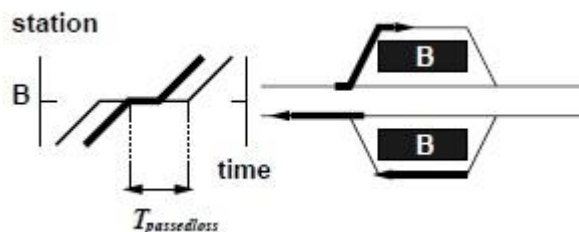


図 6-2. 待避設備を持つ駅における列車追抜運行

上記を踏まえて、図 6-3 に示すようないくつかの駅に待避設備を持つ複線の路線で、各駅停車列車と待避設備を持つ駅にだけ停車する速達列車を運行する場合(緩急結合型運行)を考えると、待避設備を持つ駅では、追抜運行のために、速達列車と各駅停車列車との間に、駅停車損失時間、信号システムによる最小運転時隔、余裕時間を踏まえた間隔をあける必要がある一方で、待避設備を持たない駅では、各駅停車列車は停車して速達列車は通過するため、駅ごとに駅停車損失時間分、列車間隔が詰まることになる。従って、図 6-4 に示すように、速達列車を不必要な減速や低速運転をさせないように運行するためには、予め各駅停車列車と間に適切な間隔をあけなければならないし、逆に輸送力を確保するために列車を高密度に運行させたい場合には、速達列車を低速運転させなければならない。

このように、複線の路線では、輸送力と速達性の両立が困難であり、実際に、多くの大都市鉄道において、朝の通勤通学ラッシュ時には、輸送力を確保するため、速達列車を低速運転し、速達性を犠牲にしている。

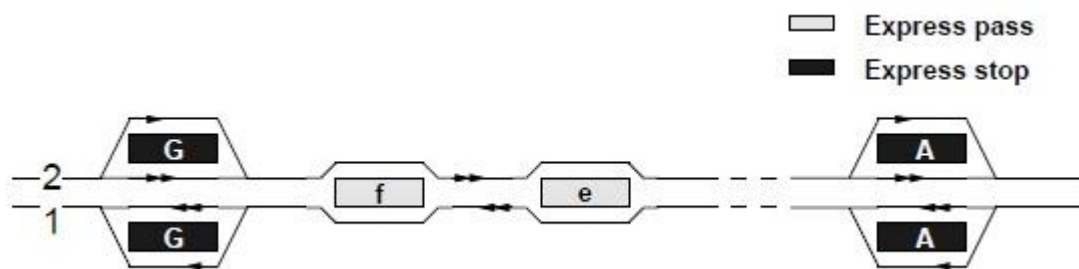


図 6-3. 一般的な複線路線

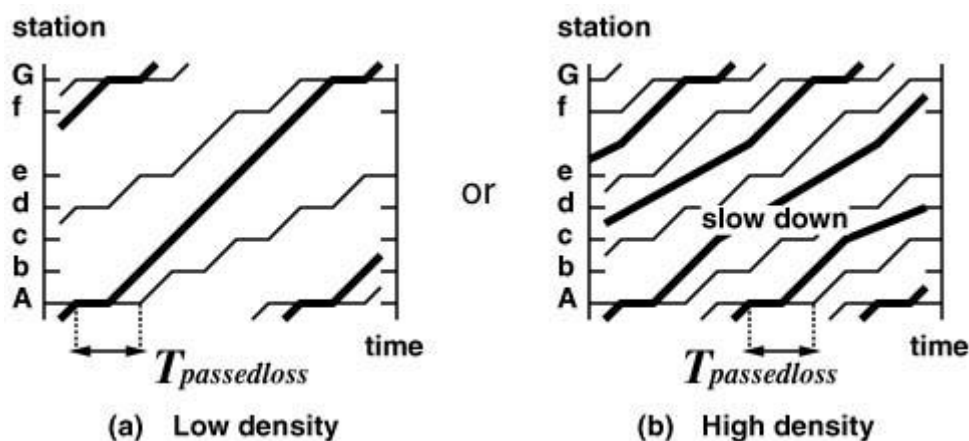


図 6-4. 複線の緩急結合型運行

### 6.2.2. 複線における全各駅停車型運行

前項で述べたように、複線の路線では輸送力と速達性を両立させることは難しい。一方で、速達性を犠牲にすれば輸送力を向上させることができる。実際に、大都市圏鉄道でも近距離旅客が多い路線においては、輸送力を上げるために、図 6-5 に示すように全ての列車を各駅停車とする運行(全各駅停車型運行)が行われている。

この運行方式には列車追抜運行がないため、全ての列車を、各駅での駅停車損失時間と信号システムによる最小運転時隔を合算した間隔まで詰めて運行することができる。

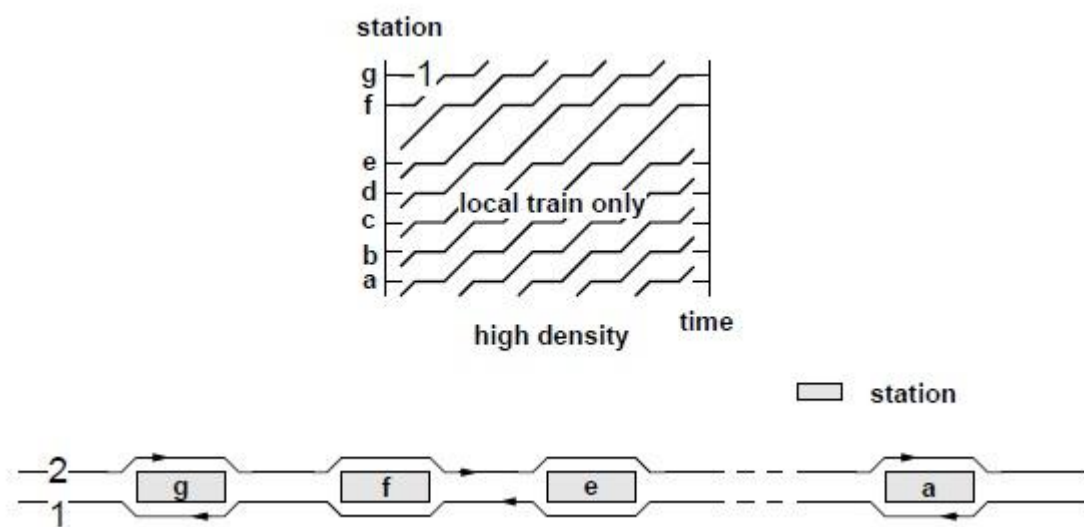


図 6-5. 複線の全各駅停車型運行

その上、全ての駅に待避設備を設けると、図 6-6 に示すような 2 つの番線を使用した交互着発を行うことができる。この交互着発では、先行列車との運転間隔において先行列車の駅停車損失時間を考慮する必要がなくなるため、さらに運行密度を上げることができる [6.9]。

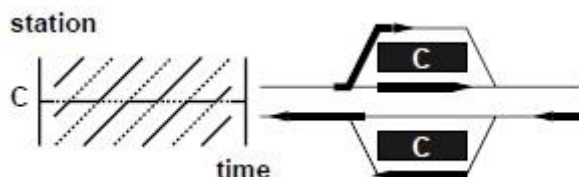


図 6-6. 交互着発

### 6.2.3. 複々線における緩急分離型運行

6.2.1 項で説明した緩急結合型運行は、速達性を確保するために輸送力を犠牲にしており、6.2.2 項で説明した全各駅停車型運行は、輸送力を確保するために速達性を犠牲にするものであった。つまり、繰り返しになるが、複線の路線では、輸送力と速達性の両立に限界が存在する。

このような輸送力と速達性の両立における課題は、大規模なインフラ投資が可能であれば線路を複々線化することで解決することができる。複々線の路線では、図 6-7 に示すように、上下線の 2 線をそれぞれ速達列車の運行と各駅停車列車の運行に使い分けることで、両方の列車とも 6.2.2 項の図 6-5 に示した全各駅停車型運行のように高密度に運行させることができるからである。これにより、速達性を維持しつつ高密度運行を実現することができる。

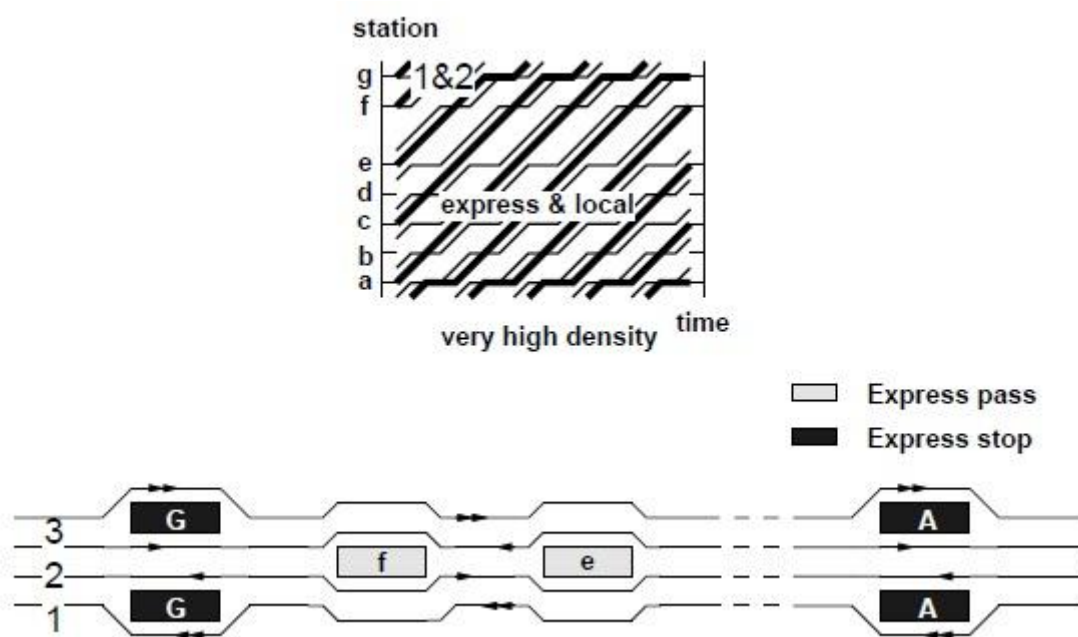


図 6-7. 複々線の緩急分離型運行

## 6.3. 駅間 3 線の緩急交互型運行の提案

本節では、本論文で提案する駅間 3 線の緩急交互型運行方式の基本概念と、速達列車と各駅停車列車それぞれの運行方法について述べる。

### 6.3.1. 基本概念

6.2.3 項では、複々線における緩急分離型運行が、速達列車と各駅停車列車の両方の列車

とも 6.2.2 項の全各駅停車型運行のように高密度に運行させることができ、輸送力と速達性を両立させることを説明した。そして、6.2.2 項では、この全各駅停車型運行において、さらに、全ての駅に待避設備を設ければ、先行列車と後続列車との間で交互着発が可能となり、列車をより高密度に運行できることも説明した。

これらを踏まえると、複々線における緩急分離型運行には、線路を時間的に使う余地がまだ残っていたと考えられる。つまり、各駅に待避設備を設ければ、複々線よりも少ない設備でも、先行列車と後続列車との間で交互着発させることで列車間隔を詰めることができ、輸送力と速達性を両立させることが可能ではないかと考えられる。そこで、本研究では、駅間 3 線と各駅の待避設備を用いて輸送力と速達性を両立させる運行方法を探究する。

### 6.3.2. 基本原理

従来、3 線を使って列車を運行させるとすると、外側 2 線は上り下りに運行方向を固定し、中線の運行方向を需要に応じて変更させる、もしくは上り勾配で速度が低下する方向に 2 線を使う、というような道路交通に近い運行方法しか考えられてこなかった。しかし、鉄道の場合、列車の運行密度が上下線で異なれば、両端に列車を滞留させる貨物輸送のヤードのような設備と多数の列車が必要となり、本論文で対象としている大都市圏鉄道への適用に関しては、実現性がなかった。

そこで、本研究では、図 6-8 のように、駅間は 3 線、速達列車停車駅は 2 面 4 線、通過駅は 1 面 4 線の構造とし、中線の運行方向を速達列車通過駅ごとに逆転させる方式を検討する。なお、中線の運行方向を全て逆としても構成は可能である。

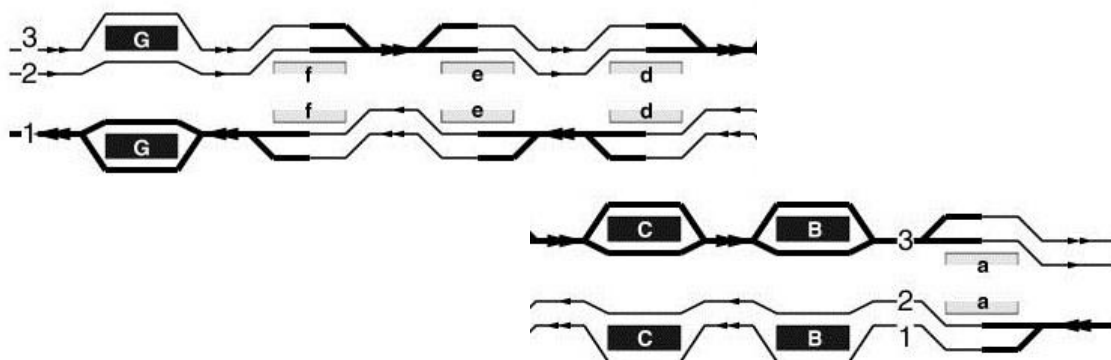


図 6-8. 駅間 3 線の緩急交互型運行方式の線路構造

運行方法は、6.2.2 項で説明した複線での交互着発と、6.2.3 項で説明した複々線での緩急分離を組み合わせたものである。上り下りの方向それぞれに、次の 2 つの区間を設定する。

- (1) 単走区間 1 線を使って速達列車と各駅停車列車が交互に走行する区間。
- (2) 並走区間 2 線を使って速達列車と各駅停車列車が並んで走行する区間。

これら 2 つの区間は、速達列車通過駅ごとに切り替える。具体的に説明すると、速達列車通過駅では、各駅停車列車は停車して速達列車は通過するため、単走区間を交互に走行してきた速達列車と各駅停車列車については、駅停車損失時間の分だけ間隔が詰まるので、次の区間では 2 線を使って並んで走行させるようにする。一方、並走区間で並んで走行してきた速達列車と各駅停車列車については、駅停車損失時間の分だけ間隔が広がるので、次の区間では 1 線を使って交互に走行させるようにする。

つまり、駅停車損失時間と信号システムによる最小運転時隔をともに 60s とした時、単走区間では速達列車と各駅停車列車を 60s 間隔で交互に走行させ、並走区間では速達列車と各駅停車列車をそれぞれ 120s 間隔で並んで走行させれば、不必要な減速や低速走行を生じさせることなく、図 6-9 に示すように、速達列車と各駅停車列車をそれぞれ 120s 間隔、つまり、複々線における緩急分離運行と同じ間隔で運行させることができる。そして、この 2 つの区間を上り下り方向で互い違いに配置すれば、駅間の線路は全ての区間において 3 線ですむ。以後、この方式を「緩急交互型運行方式」と呼ぶこととする。

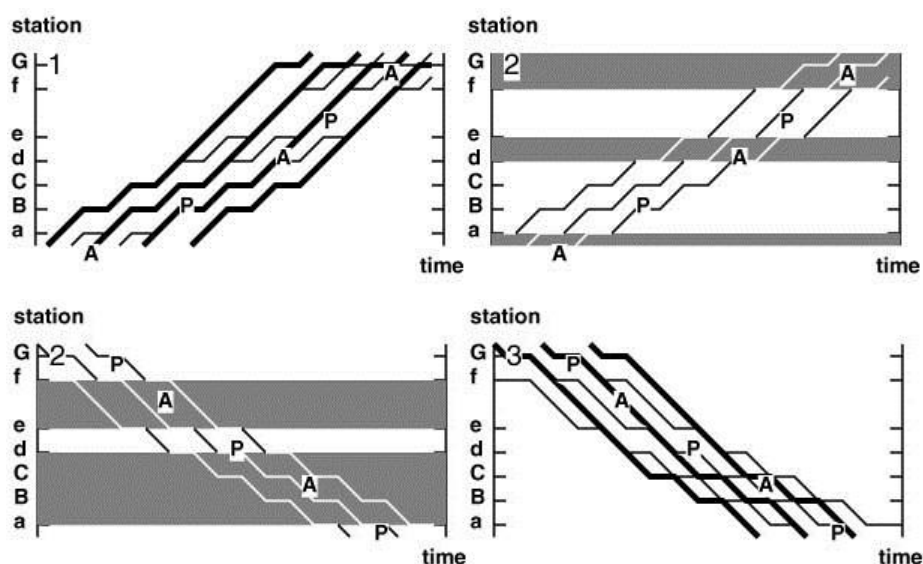


図 6-9. 提案する駅間 3 線の緩急交互型運行方式

なお、全駅間を 3 線とする方式以外に、単走区間・並走区間を上下線で同区間に配置する方式も考えられる。この場合、優等列車通過駅ごとに 2 線(複線)区間と 4 線(複々線)区間が繰り返されることになるが、例えば、優等列車通過駅間が長い区間を 2 線にし、短い区



間を 4 線にするなど、用地確保や優等列車の停車パターンなどを考えた場合、条件によってはこのような運行方法の方が有利な場合がある。もちろん、その際の単走区間・並走区間における速達列車と各駅停車列車の走り方は、全駅間を 3 線とした場合と同様である。

#### 6.4. 駅間 3 線の緩急交互型運行の特長

本節では、前節で提案した駅間 3 線の緩急交互型運行方式の特長を、他に考えられる 3 線運行方式と比較することで明らかにする。

##### 6.4.1. 速達列車優先型運行

まず、3 線を複線+単線と考えると、図 6-10 に示すように中線を上り下り両方向の各駅停車列車の単線運行に使い、外側 2 線を速達列車の高密度運行に使う方式が考えられる。

この方式では、各駅停車列車は各駅において反対方向からの列車との交換が必要になるため、駅間所要時間の 2 倍以上の運転間隔を空けなければならない。そのため、優等列車を高密度に運行できるものの、各駅停車の運行密度を著しく低下させることになる。また、中線の運行方向は固定されないので、両方向の運行に対応する信号システムが必要となる。

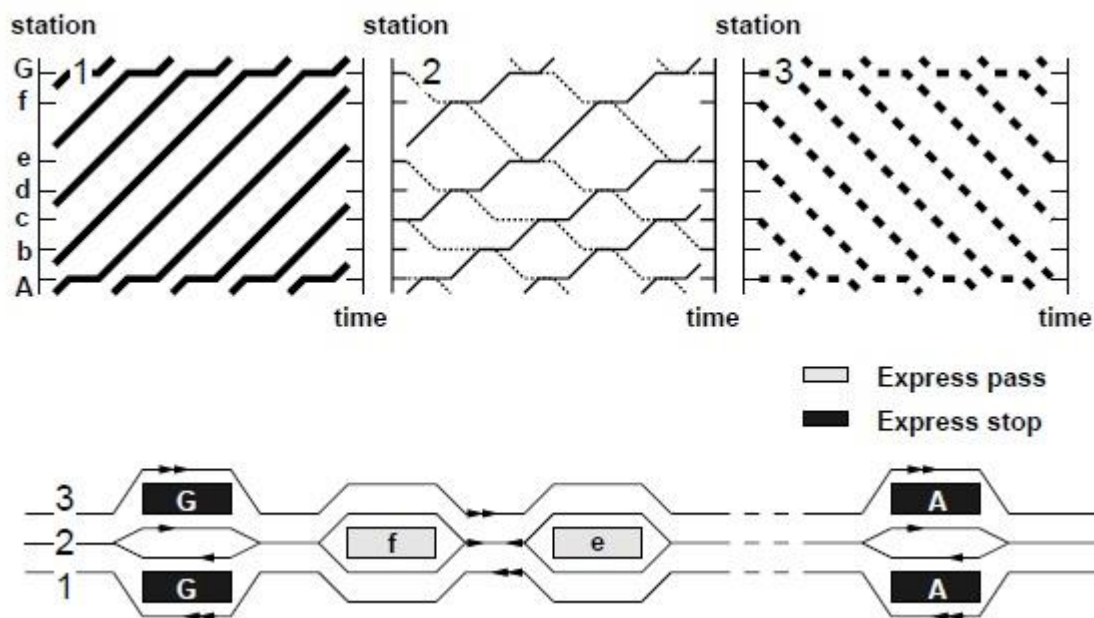


図 6-10. 3 線の速達列車優先型運行



#### 6.4.2. 各駅停車列車優先型運行

次に、図 6-11 に示すように中線を上下両方向の速達列車による各駅停車の追抜運行に使う方式が考えられる。

この方式では、速達列車が中線を使って一度に複数の各駅停車列車を追い抜くことが可能となるため、速達列車の運行と各駅停車列車の高密度化を両立させることができる。しかしながら、速達列車は反対方向からの列車と中線を共用することから運行密度は上げられず、各駅停車列車の運行密度は偏ってしまうことは避けられない。また、この方式も中線の運行方向は固定されないため、両方向の運行に対応する信号システムが必要となる。

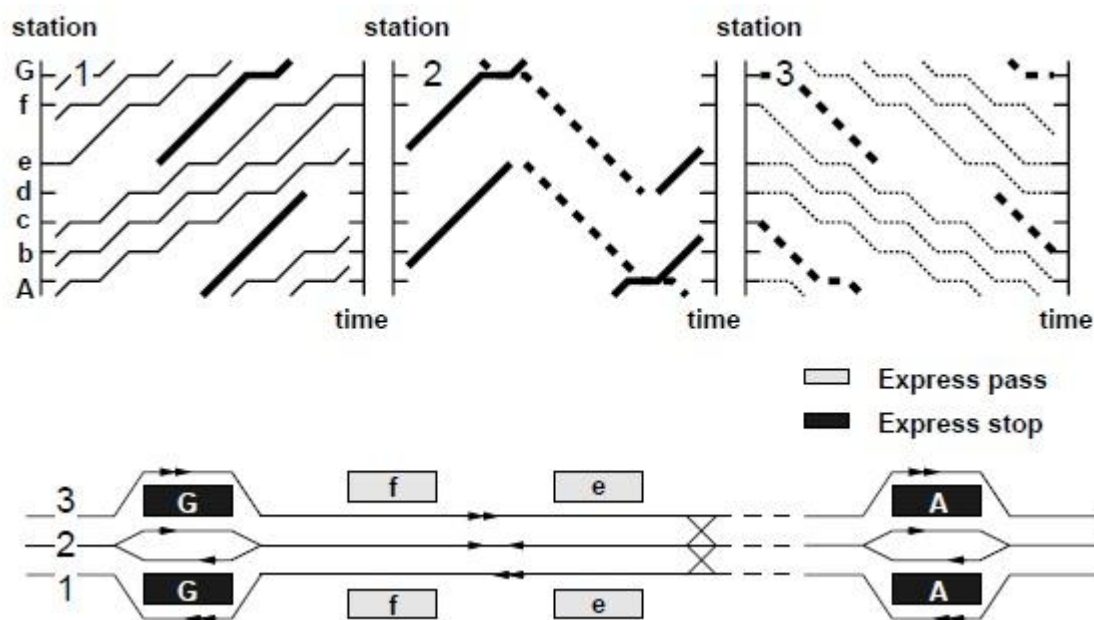


図 6-11. 3 線の各駅停車列車優先型運行

#### 6.4.3. 片方向優先型運行

また、図 6-12 に示すように 2 線を需要の大きい方向の速達列車と各駅停車列車の高密度運行に使い、1 線を反対方向の各駅停車列車と回送列車の運行に使う方式も考えられる。

この方式では、需要の大きい方向に 2 線を使って速達列車と各駅停車列車を高密度に運行させることができる。その時、反対方向の運行密度と同じ本数に抑えないと、端末駅に列車を滞留させる設備と多数の列車が必要になってしまう。従って、需要の大きい方向の列車密度は、反対方向の各駅停車列車と回送列車の運行密度に制約されることになる。また、反対方向は、速達列車を運行することができず、一部は回送列車となるため、速達性

と輸送力の両方が損なわれることは避けられない。この方式は中線の運転方式は固定されるが、需要の逆転する時間帯に、反対方向を優先するために中線を使うためには、両方向の運行に対応する信号システムが必要となる。

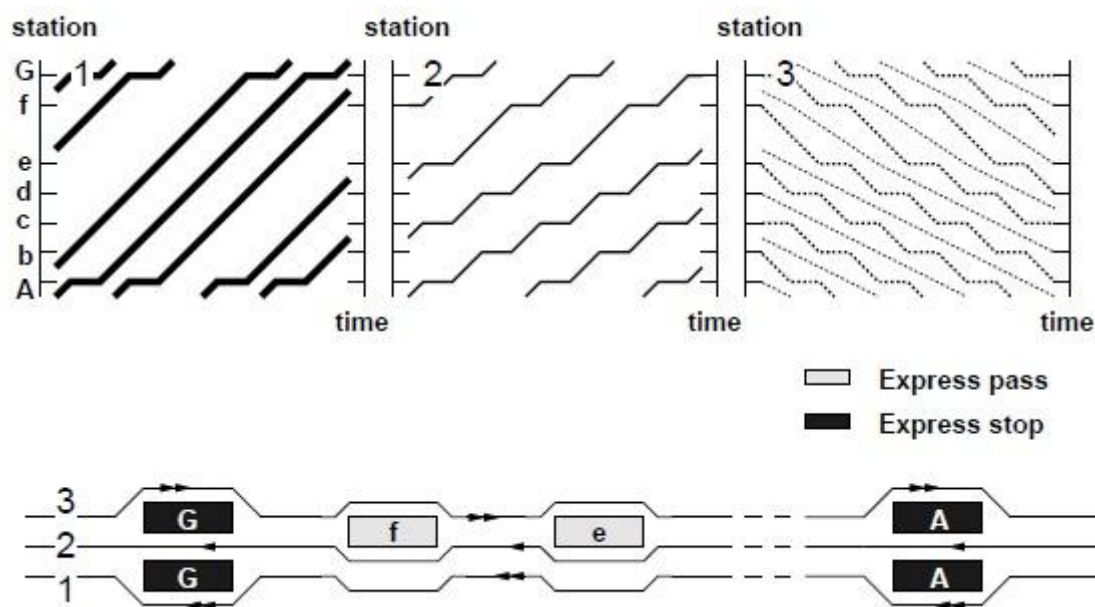


図 6-12. 3 線の片方向優先型運行

#### 6.4.4. ケーススタディを用いた各方式の比較

本項では、6.3 節で提案した駅間 3 線の緩急交互型運行方式について、速達性と輸送力、必要となるインフラの観点から、6.2 節や 6.4 節で説明した既存の運行方式と比較する。比較する運行方式は下記 8 方式とする。

- (1) 複線 緩急結合型運行 (6.2.1 項)
- (2) 複線 全各駅停車型運行 (6.2.2 項)
- (3) 複線 全各駅停車型交互着発運行 (6.2.2 項)
- (4) 3 線 速達列車優先型運行 (6.4.1 項)
- (5) 3 線 各駅停車列車優先型運行 (6.4.2 項)
- (6) 3 線 片方向優先型運行 (6.4.3 項)
- (7) 3 線 緩急交互型運行方式 (6.3.2 項)
- (8) 複々線 緩急分離型運行 (6.2.3 項)

このケーススタディでは、大都市圏鉄道を想定した図 6-13 に示すようなモデル路線の一部を用いて、近距離旅客の所要時間、長距離旅客の所要時間、単位時間当たりの輸送力を

比較した。具体的には、駅間距離が 2～3km、駅間所要時間が 1～2 分、6 駅に 1 駅の割合で速達列車停車駅が設定されている路線において、駅 e—駅 h 間を利用する旅客を近距離旅客の代表、駅 A—駅 M 間を利用する旅客を長距離旅客の代表としてその所要時間を評価した。輸送力については、それぞれの方式で列車を限界まで詰めて運行した時の単位時間あたりの列車運行可能本数を評価した。また、インフラについては、駅設備長を 200m とし、各方式における線路長、駅番線数、転てつ器数、必要となる列車編成数を評価した。なお、端末駅の構造や端末駅での列車折返運行については、第 5 章で個別に考察したように特殊な問題であり、上記の運行方式とは切り離して分析すべき事柄であると判断し、別途 6.5.2 項で論じることとする。

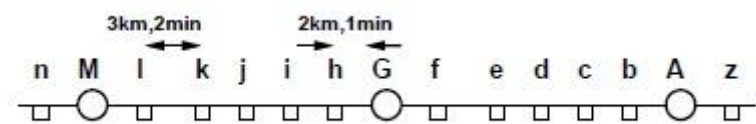


図 6-13. ケーススタディに用いるモデル路線

速達性と輸送力についての評価結果を表 6-1 に示す。近距離旅客の所要時間については、各駅停車列車の運行密度の高い方式が短く、長距離旅客の所要時間については、速達列車の運行密度の高い方式が短くなった。複線の各方式(1)～(3)、提案方式を除く 3 線の各方式(4)～(6)では、いずれもどちらかがよい、もしくはどちらも中程度という評価であり、複線や 3 線では、速達列車の運行と各駅停車列車の運行の両立が難しいことが分かる。

その中で、提案方式である駅間 3 線の緩急交互型運行(7)は、速達列車も各駅停車列車も複々線の緩急分離型運行(8)と同じように運行することができており、近距離旅客と長距離旅客の所要時間ともよい評価を得られていることは特出すべき特長であると言える。

列車運行可能本数については、各駅停車列車だけを運行して運行密度を上げる方式(2)(3)を除いて比較すると、当然ではあるが、複線より 3 線、3 線より複々線の方が多くなる傾向にある。従って、輸送力についても、提案する駅間 3 線の緩急交互型運行が、複々線の緩急分離型運行と全く同じように運行できていることは特出すべき特長であると言える。

表 6-1. 各方式の速達性と輸送力の比較

No.	線路数	運行方式	近距離旅客の所要時間(min)	長距離旅客の所要時間(min)	列車運行可能本数(/min)
(1)	複線	緩急結合型運行	11.5	18.5	0.29
(2)	複線	全各駅停車型運行	7.0	26.0	0.50
(3)	複線	全各駅停車型交互着発運行	6.5	25.5	1.00

(4)	3 線	速達列車優先型運行	9.5	16.0	0.70
(5)	3 線	各駅停車列車優先型運行	8.0	18.0	0.42
(6)	3 線	片方向優先型運行	8.0 / 7.5	16.2 / 26.5	0.67
(7)	3 線	緩急交互型運行	7.0	16.0	1.00
(8)	複々線	緩急分離型運行	7.0	16.0	1.00

次に、必要となるインフラについて評価した結果を表 6-2 に示す。路線長については、当然ではあるが、複線、3 線、複々線の順に比例して長くなる。駅番線数は、各駅で 2 つの番線を使用する交互着発方式(3)が突出して多くなる。それ以外はどの方式も、基本的に速達列車停車駅で 4 つの番線、通過駅で 2 つの番線を必要とするため、ほとんど差異は見られない。転てつ器数は、これも交互着発方式(3)で多く必要とし、次に、速達列車による追抜運行がある方式や、提案する駅間 3 線の緩急交互型運行(7)もある程度の数を必要とする。一方、追抜運行の無い複線の全各駅停車型運行(2)や複々線の緩急分離型運行(8)では 1 つも必要としない。最後に必要となる列車編成数であるが、これも各駅停車列車を高密度に運行する交互着発方式(3)が最も多くを必要とする。それ以外は基本的に列車可能運行本数に比例する。

ここで提案する駅間 3 線の緩急交互型運行(7)と複々線の緩急分離型運行(8)に着目すると、差分は線路長と転てつ器数だけである。先の速達性と輸送力の比較で、駅間 3 線の緩急交互運行が複々線の緩急分離型運行と全く同じ運行を実現していることを述べたが、その仕組みが、駅の転てつ器を駆使することで駅間 3 線の線路を時間的に効率的に使っていることにあることが分かる。つまり、提案する駅間 3 線の緩急交互型運行は、駅の転てつ器を使って駅間 1 線分の資源を節減する特長を持つ運行方式なのである。

表 6-2. 各方式で必要となるインフラの比較

No.	線路数	運行方式	線路長(m)	駅番線数	転てつ器数	列車編成数
(1)	複線	緩急結合型運行	532	32	12	13
(2)	複線	全各駅停車型運行	520	26	0	26
(3)	複線	全各駅停車型交互着発運行	546	52	52	52
(4)	3 線	速達列車優先型運行	806	32	26	27
(5)	3 線	各駅停車列車優先型運行	786	32	38	21
(6)	3 線	片方向優先型運行	774	29	0	30
(7)	3 線	緩急交互型運行	806	32	26	42
(8)	複々線	緩急分離型運行	1040	32	0	42

## 6.5. 駅間3線の緩急交互型運行特有の懸念事項の分析

本章で提案する駅間3線の緩急交互型運行方式は、前節で述べたように、駅の転てつ器を使って、複々線の駅間1線分の資源を節減する優れた特長を持つ一方で、速達列車と各駅停車列車が一部区間では交互に走行し、一部区間では並走することになるため、方式特有の複雑な性質が懸念される。本節では、このような方式特有の性質について分析する。

### 6.5.1. 列車遅延に対するロバスト性

最も懸念される性質が列車遅延に対するロバスト性である。駅間3線の緩急交互型運行方式には、速達列車通過駅において、高密度に運行されている速達列車と各駅停車列車が1本の線路に合流、もしくは2本の線路に分岐するような運行現象がある。この現象について、列車遅延に対するロバスト性に悪影響を与えないか検証する必要がある。

そこで、大都市圏鉄道を想定した表6-3に示すパラメータを用いて、駅間3線の緩急交互型運行方式における、駅構内と駅間それぞれの許容遅延時間を計算し、複々線の緩急分離型運行、複線の全各駅停車型交互着発運行と比較する。許容遅延時間とは、後続列車の走行に影響を与えずにすむ遅延の限界値であり、これが大きいほど、列車遅延に対するロバスト性が高いと言える。

表 6-3. ケーススタディに用いるパラメータ

No.	パラメータ	値
1	巡航速度	$V_{cr}$ 22.2 m/s
2	転てつ器制限速度	$V_{lp}$ 16.7 m/s
3	転てつ器長	$l_{sw}$ 58.3 m
4	転てつ器端—プラットホーム端	$l_{sp}$ 19.1 m
5	プラットホーム長	$L_{pf}$ 210 m
6	列車長	$L_{tr}$ 200 m
7	転てつ器転換時間	$T_{sw}$ 10 s
8	運転時隔	$T_{bt}$ 60 s
9	加速度	$a$ 1.0 m/s <sup>2</sup>
10	減速度	$\beta$ 1.0 m/s <sup>2</sup>
11	転てつ器区間進入速度	$V_{pt}$ 式(6-1)
12	最小運転時隔	$T_{minbt}$ 式(6-4), (6-8)
13	駅到着時の最小運転時隔	$T_{minbta}$ 式(6-2)
14	駅出発時の最小運転時隔	$T_{minbtd}$ 式(6-3)
15	駅停車損失時間	$T_{sloss}$ 式(6-6), (6-9)
16	駅間での許容遅延時間	$T_{delaybtsta}$ 式(6-5)
17	駅構内での許容遅延時間	$T_{delayatsta}$ 式(6-7)

駅間 3 線の緩急交互型運行方式では、列車は駅進入時に転てつ器区間の制限速度まで手前から減速する必要がある、その際の進入速度は式(6-1)に示す通りとなる。そのため、各駅停車列車の駅到着時の後続速達列車との最小運転時隔は式(6-2)、各駅停車列車の駅出発時の後続速達列車との最小運転時隔は式(6-3)に示す通りとなる。駅間での最小運転時隔は、式(6-4)に示す通り、この駅到着時もしくは駅出発時の最小運転時隔の大きい方の値であり、許容遅延時間は式(6-5)に示す通りとなる。また、駅停車損失時間は式(6-6)に示す通りとなり、駅構内での許容遅延時間は式(6-7)に示す通りとなる。

なお、複線の全各駅停車型交互着発運行では、同様に転てつ器区間の制限速度の影響を受け、先行列車と後続列車との最小運転時隔は式(6-4)、駅停車損失時間は式(6-6)となる。複々線の緩急分離型運行では、転てつ器が無く、その制限速度の影響は無いため、先行列車と後続列車との最小運転時隔は式(6-8)となり、駅停車損失時間は式(6-9)となる

$$V_{pt} = \begin{cases} V_{lp} & \text{if } \frac{V_{lp}^2}{\beta} < l_{pf} + l_{tr} + 2(l_{sp} + l_{sw}) \\ v & \text{if } \frac{V_{lp}^2}{\beta} \geq l_{pf} + l_{tr} + 2(l_{sp} + l_{sw}) \end{cases} \quad \text{式(6-1)}$$

$$T_{\min bta} = \frac{V_{cr}}{\beta} \left( 1 - \frac{V_{pt}}{2V_{cr}} + \frac{V_{pt}^2}{2V_{cr}^2} \right) + \frac{(l_{pf} + l_{tr})/2 + l_{sp}}{V_{pt}} - \sqrt{\frac{l_{pf} - l_{tr} + 2(l_{sp})}{\beta}} + t_{sw} \quad \text{式(6-2)}$$

$$T_{\min btd} = \frac{l_{tr} + l_{sw}}{V_{cr}} + \frac{V_{cr}}{2\beta} + t_{sw} \quad \text{式(6-3)}$$

$$T_{\min bt} = \max \begin{cases} T_{\min bta} \\ T_{\min btd} \end{cases} \quad \text{式(6-4)}$$

$$T_{delaybtsta} = T_{bt} - T_{\min bt} \quad \text{式(6-5)}$$

$$T_{sloss} = \frac{V_{cr}}{2} \left( \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} \right) \left( 1 - \frac{V_{pt}}{V_{cr}} + \frac{V_{pt}^2}{V_{cr}^2} \right) + \left( \frac{1}{V_{pt}} - \frac{1}{V_{cr}} \right) (l_{pf} + l_{tr} + 2(l_{sp} + l_{sw})) \quad \text{式(6-6)}$$

$$T_{delayatsta} = T_{bt} - T_s - T_{sloss} \quad \text{式(6-7)}$$

$$T_{\min bt} = \frac{V_{cr}}{2} \left( \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} \right) + \sqrt{\frac{2l_{tr}}{\alpha}} \quad \text{式(6-8)}$$

$$T_{loss} = \frac{V_{cr}}{2} \left( \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} \right) \quad \text{式(6-9)}$$

表 6-3 のパラメータに基づく計算結果を表 6-4 に示す。駅間 3 線の緩急交互型運行の許容遅延時間は、駅構内と駅間の両方で、複々線の緩急分離型運行の約半分にまで低下する。前節では、駅間 3 線の緩急交互型運行は複々線の緩急分離型運行と比較して線路を時間的に効率的に使っていると述べたが、裏を返せば、その分、許容遅延時間が短くなることを意味している。

しかしながら、駅間 3 線の緩急交互型運行の許容遅延時間は、駅構内と駅間の両方とも複線の全各駅停車型交互着発運行と全く同じレベルでもある。現実に大都市圏鉄道において交互着発運行が大きな問題無く効果的に実施されている現状や、ATO や運転士支援システムの性能を踏まえると、現在の技術レベルにおいて十分なロバスト性は保持しており、実用上の問題を生じさせる危険性は低いと考えられる。また、この運行方式は、他の 3 線運行方式のように中線を上り下り双方向の運行に使うわけではないので、上り方向の遅れが下り方向に波及することも無いことを付け加えておく。

表 6-4. 各方式における許容遅延時間の比較

線路数	運行方式	駅構内での許容遅延時間 (s)	駅間での許容遅延時間(s)
(3) 複線	全各駅停車型交互着発運行	3.5	19.8
(7) 3 線	緩急交互型運行	3.5	19.8
(8) 複々線	緩急分離型運行	7.8	40.0

なお、表 6-3 に示したパラメータの値を変化させれば、当然、許容遅延時間も変化する。例えば、巡航速度や列車長は許容遅延時間と負の相関があり、転てつ器転換時間や転てつ器端からプラットフォーム端までの距離などは正の相関があると考えられる。従って、実路線に適用する際には、第 5 章で説明した稠密ダイヤグラム導出ツールなどを用いて、パラメータの感度分析を行い、適切な運転曲線を設計することが望ましい。

### 6.5.2. 列車折返

次に懸念されることは、列車の折返しである。駅間 3 線の緩急交互型運行では、複々線の緩急分離型運行や複線の全各駅停車型交互着発運行と同じレベルで高密度に運行される列車を折り返す必要がある。しかしながら、2.3 節でも述べたように、列車の折返し運用においては、続行列車だけでなく、対向列車との平面交差支障を考慮しなければならず、このような列車折返しを 1 つの端末駅で行うとすると、図 6-14 に示すような大きな設備が必要となり、現実的では無い。

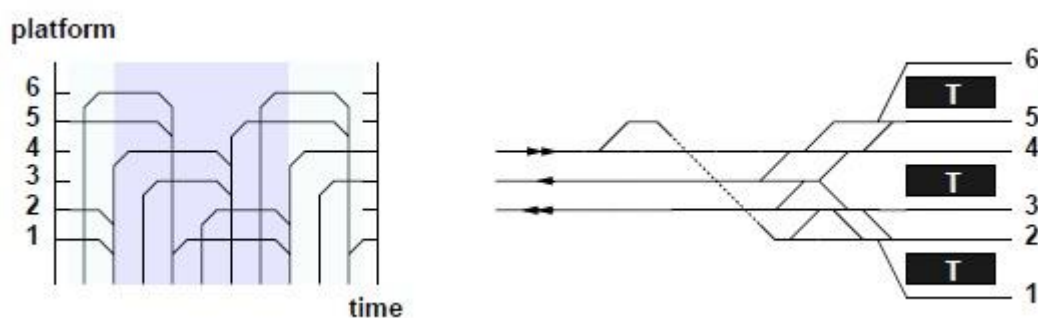


図 6-14. 高密度な列車折返のための端末駅構造

5.1 節で述べたように、現実の複々線の路線では、需要が特に大きな区間の両端の駅に折返設備を設け、一部の列車を折り返すことで、端末駅での列車折返密度を下げる方法や、もしくは路線を 2 つの複線路線に分岐し、それぞれの端末駅で列車を折り返す方法が用いられている。これらの方法は、図 6-15 に示すように、駅間 3 線の緩急交互型運行でも同じように用いることのできるものである。つまり、列車折返しに関しては、列車を複々線と同じように運行することで問題を解決できる。

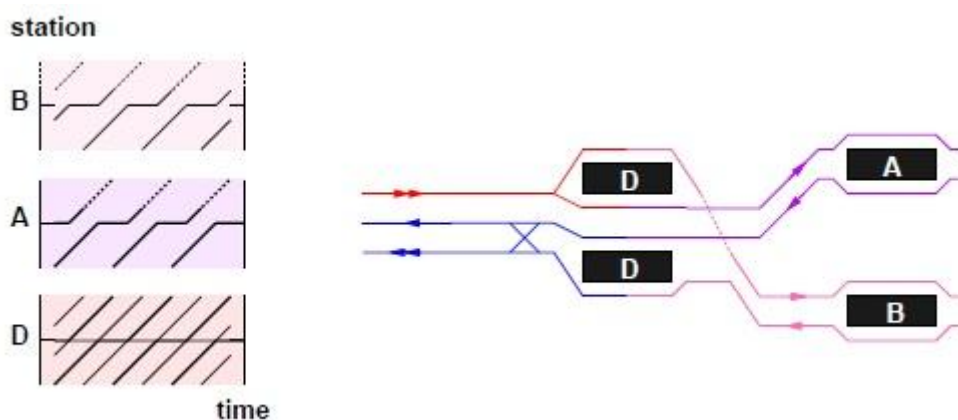


図 6-15. 2 つの複線路線への分岐



### 6.5.3. 運行密度の調整

3 点目の懸念事項は、列車を高密度に運行する必要の無い時間帯における運行密度の調整の方法である。例えば、複線の緩急結合型運行では、最も運行密度を詰めた時の運行形態から単に列車を間引くと、運行密度にむらができ、旅客の所要時間が極端に悪化する場合がある。

これに対し、駅間 3 線の緩急交互型運行では、最も運行密度を詰めた時、各駅停車列車と速達列車の両方とも、高密度かつ均一に運行されることになる。従って、このような運行形態から列車を偏りなく間引けば、旅客の所要時間が極端に悪化するような運行になることは無い。言い換えると、運行密度に偏りのある運行形態から、運行が偏らないように列車を間引くことは難しいが、高密度かつ均一な運行形態から、運行が偏らないように列車を間引くことは難しくない。

さらに、あるパターンで列車を間引くことで、ある区間の中線、もしくは並走区間側の外側の線を全く使わずにすむような運行も可能であり、このような運行形態を計画的に実施すれば、路線の保守作業の効率向上やコスト減も可能となる。つまり、駅間 3 線の緩急交互型運行は、輸送力と速達性の両立だけでなく、保守コストの低減という複線の路線では解決の難しい課題を解決できる性質を持つことが分かる。図 6-16 に、速達列車と各駅停車列車の両方の運行密度を半分に間引き、区間 M, N の並走区間側の外線を使わずにすむ運行形態を示す。

また、6.6.1 節に後述するように、緩急結合型運行が行われている複線の大都市圏鉄道では、一般的に、速達列車への需要の方が各駅停車列車に比べて高い。場合によっては、各駅停車列車を間引いたり、短編成化しても輸送サービスがそれほど落ちない路線もある。実路線に適用する際には、その路線の最大混雑区間における速達列車と各駅停車列車の乗車率を分析し、大きな差がある場合には、朝の通勤通学ラッシュ時においても、各駅停車列車を間引いたり、短編成化してもよく、その効果として、6.5.1 項で述べた列車遅延に対するロバスト性を改善することもできる。

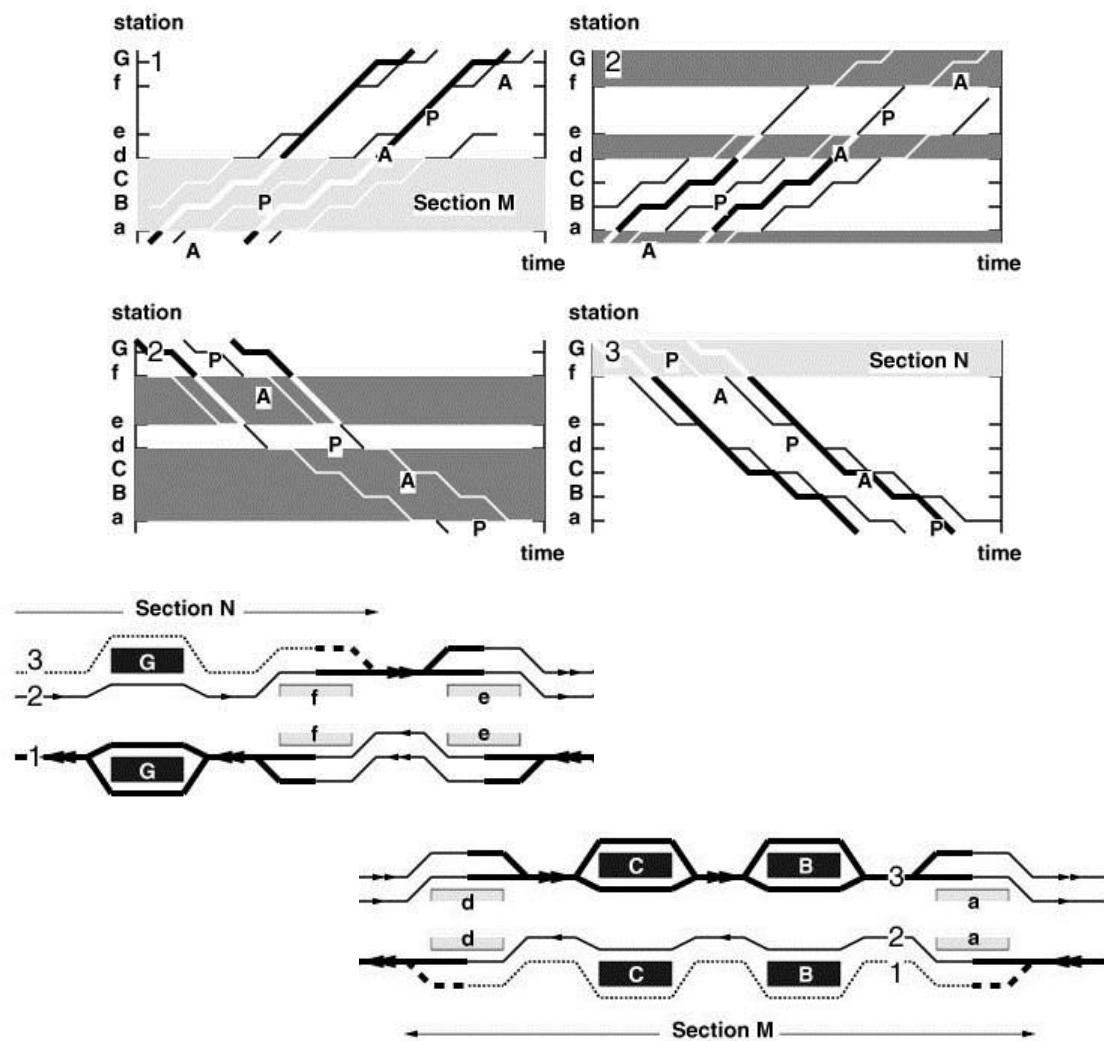


図 6-16. 区間 M, N の並走区間側の外線を使わない間引き運行

#### 6.5.4. 速達列車の停車・通過変更に伴う制約

最後の懸念事項は、速達列車の停車・通過変更に伴う制約である。駅間 3 線の緩急交互型運行は、6.3.2 項で説明したように、単走区間と並走区間を速達列車通過駅ごとに切り替える。このため、1 つの駅を速達列車通過駅から停車駅に、もしくは逆に停車駅から通過駅に変更すると、変更した駅からどちらかの端末駅まで中線の運行方向を全区間で逆転させなければならない。また、新駅建設に関しても、新駅を速達列車通過駅にする場合には同様の問題が発生する。

通常、このような速達列車の停車・通過の変更は頻繁に行われることではないので、致命的な問題点にはならないと考えられるが、この点については、路線の設計時に考慮しなければならない方式特有の制約となる。

## 6.6. 駅間3線の緩急交互型運行の投資対効果評価

6.4 節では、提案する駅間3線の緩急交互型運行が、複々線の緩急分離型運行と同じ列車運行を実現できること、6.5 節では、その時、速達列車と各駅停車列車の走行形態が複雑になるものの実用上の問題点の無いことを説明した。最後に、本章では、提案する駅間3線の緩急交互型運行によって、実際にどの程度の速達性と輸送力が向上するのか、その投資対効果はどの程度であるか、混雑が問題となっている大都市圏鉄道の路線を取り上げて定量的に検証する。

本章のケーススタディでは、東京と蘇我を結ぶJR 東日本京葉線を対象に、朝の通勤通学ラッシュ時、日中、夕方、大・小のイベント終了時[6.10]の5 ケースについて、1 時間あたりの旅客の損失時間の総和と最大混雑率(イベント終了時はイベント旅客輸送時間)を計算し、その上で投資対効果を評価する。なお、各ケースにおける各駅間の単位時間あたりの旅客数(OD データ)は、1999 年の都市交通年報[6.11]の乗降客数・混雑率のデータから推定した。当時の JR 東日本京葉線の路線図と速達列車停車駅の設定は図 6-17 に示す通りである。また、旅客の損失時間とは、旅客が出発駅に来てから列車の待ち時間も含めて目的駅に着くまでに要する時間から、仮に待ち時間無く無停車で目的駅まで直行する列車を使った場合に出発駅から目的駅に着くまでに要する時間を減算した時間である[6.12]。イベント旅客輸送時間とは、最初のイベント旅客が駅に到着してから、最後のイベント旅客が駅を出発するまでの時間である。

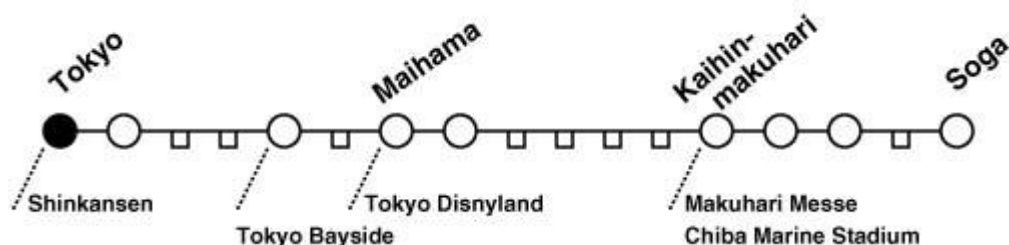


図 6-17. JR 東日本京葉線

### 6.6.1. 朝通勤通学ラッシュ時

路線の全線において激しい混雑の発生する朝通勤通学ラッシュ時において、複線の緩急結合型運行、駅間3線の緩急交互型運行、複々線の緩急分離型運行の3方式について、列車密度を限界まで高めた場合で比較した結果を表 6-5 に示す。

駅間3線の緩急交互型運行は、6.4 節で説明したように複々線の緩急分離型運行と同じ列車運行ができることから、速達性と輸送力の両方で複々線と同等の効果を得られることが分かる。その効果は、複線の緩急結合型と比較して、旅客の損失時間とを約 6 割、最大混

雑率を約 1/3 に低減させるものである。

なお、複線の緩急結合型の最大混雑率が計算上 300%を超えているが、これは一部の区間で速達列車に乗りきれない旅客が発生していることを示している。現実には、これらの旅客は後発の各駅停車列車を利用することになるため、複線の緩急結合型の旅客の損失時間は計算結果よりも大きいことが想定される。

表 6-5. 朝通勤通学ラッシュ時における各方式の旅客の損失時間と最大混雑率の比較

No.	線路数	運行方式	旅客の損失時間 (min/h)	旅客の損失時間 ((1)を1とした時)	最大混雑率(%)
(1)	複線	緩急結合型運行	515378	1	312.2
(7)	3 線	緩急交互型運行	311384	0.60	96.1
(8)	複々線	緩急分離型運行	311384	0.60	96.1

#### 6.6.2. 日中

混雑の無い日中の時間帯において、複線の緩急結合型運行、駅間 3 線の緩急交互型運行、複々線の緩急分離型運行の 3 方式について、列車密度を当時と同じとして比較した結果を表 6-6 に示す。

輸送力に問題の無い時間帯であり、列車密度を合わせて評価したため、3 方式でほとんど変わらない結果となった。なお、損失時間とに微小な差が生じた理由は、複線の緩急結合型運行では、各駅停車列車が速達列車に追い抜かれる際に、駅間 3 線の緩急交互型運行や複々線の緩急分離型運行では必要の無い余計な待ち時間が発生するためである。

表 6-6. 日中の時間帯における各方式の旅客の損失時間と最大混雑率の比較

No.	線路数	運行方式	旅客の損失時間 (min/h)	旅客の損失時間 ((1)を1とした時)	最大混雑率(%)
(1)	複線	緩急結合型運行	207184	1	63.5
(7)	3 線	緩急交互型運行	206975	0.99	63.5
(8)	複々線	緩急分離型運行	206975	0.99	63.5

#### 6.6.3. 夕方

路線の一部に小規模な混雑の発生する夕方の時間帯において、複線の緩急結合型運行、駅間 3 線の緩急交互型運行、複々線の緩急分離型運行の 3 方式について、列車密度を限界まで高めた場合で比較した結果を表 6-7 に示す。

駅間 3 線の緩急交互型運行には、複線の緩急結句型と比較して旅客の損失時間とを約 6 割、最大混雑率を約 1/3 に低減させる効果があり、これは複々線の緩急分離型運行と同等であるという、6.6.1 項の朝通勤通学ラッシュ時と同じ傾向の結果を得た。

表 6-7. 夕方の時間帯における各方式の旅客の損失時間と最大混雑率の比較

No.	線路数	運行方式	旅客の損失時間 (min/h)	旅客の損失時間 ((1)を 1 とした時)	最大混雑率(%)
(1)	複線	緩急結句型運行	422922	1	182.7
(7)	3 線	緩急交互型運行	248913	0.59	61.8
(8)	複々線	緩急分離型運行	248913	0.59	61.8

#### 6.6.4. 小イベント終了時

路線の一部の駅近傍で 20000 人規模のイベントが終了した時間帯を想定して、複線の緩急結句型運行、駅間 3 線の緩急交互型運行、複々線の緩急分離型運行の 3 方式について、列車密度を限界まで高めた場合で比較した結果を表 6-8 に示す。

駅間 3 線の緩急交互型運行には、複線の緩急結句型と比較して旅客の損失時間、イベント旅客輸送時間とも約半減させる効果があることが分かる。

表 6-7. 小イベント終了時における各方式の旅客の損失時間とイベント旅客輸送時間の比較

No.	線路数	運行方式	旅客の損失時間 (min/h)	旅客の損失時間 ((1)を 1 とした時)	イベント旅客輸送 時間(min)
(1)	複線	緩急結句型運行	206352	1	19
(7)	3 線	緩急交互型運行	99998	0.49	9
(8)	複々線	緩急分離型運行	99998	0.49	9

#### 6.6.5. 大イベント終了時

路線の一部の駅近傍で 100000 人規模のイベントが終了した時間帯を想定して、複線の緩急結句型運行、駅間 3 線の緩急交互型運行、複々線の緩急分離型運行の 3 方式について、列車密度を限界まで高めた場合で比較した結果を表 6-8 に示す。

駅間 3 線の緩急交互型運行には、複線の緩急結句型と比較して旅客の損失時間、イベント旅客輸送時間とも約半減させる効果があり、6.6.4 項の小イベント終了時と同じ傾向の結果を得た。

なお、駅間 3 線の緩急交互型運行と複々線の緩急分離型運行との間に微小な差が生じた理由は、イベント旅客の集中する駅で旅客の整理誘導のために列車の停車時間を長く設定したために、当該駅前後での速達列車と各駅停車列車の合流・分岐の際に、余計な待ち時間が発生したためである。このように、駅間 3 線の緩急交互型運行は、6.3.2 項で述べたように、駅停車損失時間と、信号システムによる最小運転時隔に余裕時間を加算した時間の両者が通常はほぼ同じであることを前提として、速達列車と各駅停車列車を交互に運行させる方式のため、特別な事情によって一部の駅で停車時間を長くすると、その前後の駅で通常は必要のない待ち時間が発生してしまう。この待ち時間の影響は微小なものではあるが、6.5.4 項の速達列車の停車・通過変更に伴う制約と合わせて、方式特有の制約として認識しておかなければならない。

表 6-8. 大イベント終了時における各方式の旅客の損失時間とイベント旅客輸送時間の比較

No.	線路数	運行方式	旅客の損失時間 (min/h)	旅客の損失時間 ((1)を1とした時)	イベント旅客輸送 時間(min)
(1)	複線	緩急結合型運行	8193358	1	215
(7)	3 線	緩急交互型運行	4165324	0.51	107
(8)	複々線	緩急分離型運行	4066326	0.50	107

#### 6.6.6. 終日

最後に、1 日を通して、複線の緩急結合型運行、駅間 3 線の緩急交互型運行、複々線の緩急分離型運行の 3 方式における旅客の損失時間の総和を比較した結果を表 6-9 に示す。それぞれの方式において、6.6.1 項の朝通学通勤ラッシュ時の結果を 2 時間分、6.6.2 項の日中の結果を 13.5 時間分、6.6.3 項の夕方の結果を 4 時間分、合計して算出した。

表 6-9. 終日における各方式の旅客の損失時間と時間の比較

No.	線路数	運行方式	旅客の損失時間 (min/h)	旅客の損失時間 ((1)を1とした時)	(1)との差分(min)
(1)	複線	緩急結合型運行	5519428	1	—
(7)	3 線	緩急交互型運行	4412583	0.80	▲1106845
(8)	複々線	緩急分離型運行	4412583	0.80	▲1106845

さらに、この計算結果と 2010 年の労働賃金と労働時間のデータを基に所得接近法により求められる時間評価値(東京都で 47.0 円/分)[6.13]とを用いて、複線の緩急結合型運行から駅間 3 線の緩急交互型運行、もしくは複々線の緩急分離型運行とした際に得られる経済効果を概算すると 5202 万円/日となる。

JR 東日本京葉線の路線長は 43.0km であり、高架通勤線の建設費用を単純に 1 線・1km あたり約 30 億円[6.14]とすると、複々線化の投資費用は 2580 億円、3 線化の投資費用は半分の 1290 億円であり、償却期間はそれぞれ 19.8 年、9.9 年となる。なお、この数字は、簡単のために割引率などを考慮せず単純に除算した値であり、実際には、3 線化と複々線化との投資対効果にはさらに大きな差があると考えられる

## 6.7. まとめ

第 5 章の「端末駅における稠密ダイヤグラム」では、駅近傍に焦点をあてて列車の運行密度を限界まで高めるダイヤグラムを導出する方法について述べたが、裏を返せば、従来の列車運行方式では、それ以外の区間、具体的には、駅間の線路を時間的に限界まで使っているわけではないことを意味している。

そこで、本研究では、列車を高密度に運行することのできる複々線の緩急分離型運行と、複線の全各駅停車型の交互着発運行を組合せて、駅間の線路と各駅の待避設備を時間的に効率的に使うことで、3 線でも複々線化と同等の輸送力増強効果をもたらす列車運行方式「緩急交互型運行方式」を提案した。具体的には、1 線を使って速達列車と各駅停車列車を交互に走行させる区間と、2 線を使って速達列車と各駅停車列車を並走させる区間を、速達各駅停車列車用の待避設備のある列車通過駅ごとに切り替えて設定し、上り下り方向でこれらの区間を互い違いに配置する方式である。

本章では、この緩急交互型運行方式の基本原理を説明し、大都市圏鉄道を想定したケーススタディを用いて、速達列車と各駅停車列車の両方とも高密度に運行できること、複々線の緩急分離型運行方式と全く同じレベルの速達性と輸送力を実現できることを明らかにした。

次に、このようなことが可能となる理由として、駅の転てつ器と待避設備を駆使することで、速達列車と各駅停車列車を混在させながら駅間の線路を効率的に使うことができる、という緩急交互型運行方式の特長を示した。これは、速達性と輸送力を両立させるためには速達列車と各駅停車列車の運行を分離しなければならない、という従来の考え方とは異なる新しい考え方である。

最後に、この新しい緩急交互型運行方式について、方式特有の複雑な運行形態を分析したところ、許容遅延時間が複々線の緩急分離型運行よりも短くなり、列車遅延に対するロバスト性が低下することが分かったが、現実到大都市圏鉄道において交互着発運行が大きな問題無く効果的に実施されている現状や、ATO や運転士支援システムの性能を踏まえれ

ば、実用上大きな問題にはならないことを示した。また、列車の折返、運行密度の調整、速達列車の停車駅変更に対しても制約が生じる場合のあることが分かったが、それらの制約についても実用上解消可能であることを示した。最後に、現実の大都市圏鉄道の路線を取り上げて、緩急交互型運行方式を用いる 3 線化の投資対効果を定量的に評価し、複々線化の 2 倍以上の効果があることを明らかにした。

なお、6.3.2 項で言及したように、本章で提案した駅間 3 線の緩急交互型運行方式には、例えば、単走区間・並走区間を上下線で同区間に配置する応用形態も考えられる。この場合、優等列車通過駅ごとに 2 線(複線)区間と 4 線(複々線)区間が繰り返されることになるが、例えば、優等列車通過駅間が長い区間を 2 線にし、短い区間を 4 線にするなど、用地確保や優等列車の停車パターンなどを考えた場合、条件によってはこのような運行方法の方が有利な場合がある。このような応用形態の検討、ならびにその特長の定量的な評価は、今後の課題として引き続き研究を進めていく。



## 7. 提案する技術がもたらす鉄道輸送サービスの将来像

### 7.1. はじめに

本論文では、安全かつ費用対効果の高い鉄道輸送サービスを実現することを目的として、リングトポロジーCBTC システム(第 3 章)、インターオペラブル車上信号装置(第 4 章)、端末駅における稠密ダイヤグラム(第 5 章)、駅間 3 線の緩急交互型運行方式(第 6 章)という新しい列車制御に関する技術を提案してきた。これらの技術は、ただ単に列車運行の安全性を担保する信号保安機能や、旅客の利便性を向上させる相互直通化を低コストに実現させるだけでなく、列車を柔軟かつ効率的に運用できる基盤となり、鉄道輸送サービス全体の高度化をもたらす。本章では、本論文で提案した技術がもたらす鉄道輸送サービスの将来像について述べる。

### 7.2. 車上装置主体型の信号システムの普及

本節では、本論文で提案した技術がどのような形で現在の鉄道システムに採り入れられ、どのような方法で鉄道ネットワーク全体の発展と維持に寄与してることができるか、1 つの現実的なシナリオを示す。

第 3 章で提案したリングトポロジーCBTC システムは、地上側の既存の高コストな信号装置が不要となることから経済性に優れており、まずは、経営環境の改善が喫緊の課題となっている地方の輸送量の少ない路線に導入されると考えられる。

次に、リングトポロジーCBTC システムの導入路線が増えると、その中には、既に他路線と相互直通運転を実施している路線や、新たに相互直通運転を実施することによって高度な旅客サービスを望める路線が存在することになる。第 4 章で説明したインターオペラブル車上信号装置は、信号システムの相互運用化を経済的に実現できることから、このような路線間で相互直通運転を行う列車に搭載されるようになると考えられる。

この動きが進むと、最初にリングトポロジーCBTC システムが導入された路線に続いて、その路線と相互直通運転を実施する路線においても、徐々にリングトポロジーCBTC システムに対応するアプリケーションがインストールされたインターオペラブル車上信号装置を搭載した列車が増え始める。そして、そのような列車が全てとなった時点で、その路線においてもリングトポロジーCBTC システムによる列車制御が可能となり、地上側の既存の列車制御装置や連動装置が無用となる。このような経済的な利点から、以後、鉄道ネットワークの相互直通化の流れに乗って、リングトポロジーCBTC システムは、インターオペラブル車上信号装置の浸透によって、広く普及していくと考えられる。

そして、リングトポロジーCBTC システムは、第 3 章に示したように、運転密度の高い路線に対しても実用上問題の無く導入できることから、この流れは、大都市圏の輸送量の大きい路線を含む鉄道ネットワーク全体に波及していくと考えられる。

### 7.3. 信号システムの車上装置主体化がもたらす列車の運行管理形態の変化

ところで、このリングトポロジーCBTC システムは、従来の地上側の連動装置や列車制御装置が制御主体となるシステムとは異なり、車上装置が制御の主体となって進路を構成して列車を安全に制御する信号システムである。従って、このような車上装置主体型の信号システムが普及し始めると、列車の運行を管理する形態も変化せざるをえない。

現在の信号システムと運行管理システム間の主な情報の流れを図 7-1 に示す。この図からは、運行管理システムが、地上側の列車制御装置や連動装置を介して各列車の位置情報を入手していること、そして、列車制御装置や連動装置に対して列車の運転や進路の構成を指示していることが分かる。つまり、現在の運行管理システムは、地上側の複数の信号装置と複雑に情報を交換し、適切なタイミングで各列車の進路を設定することで、列車の運行を間接的に制御している。

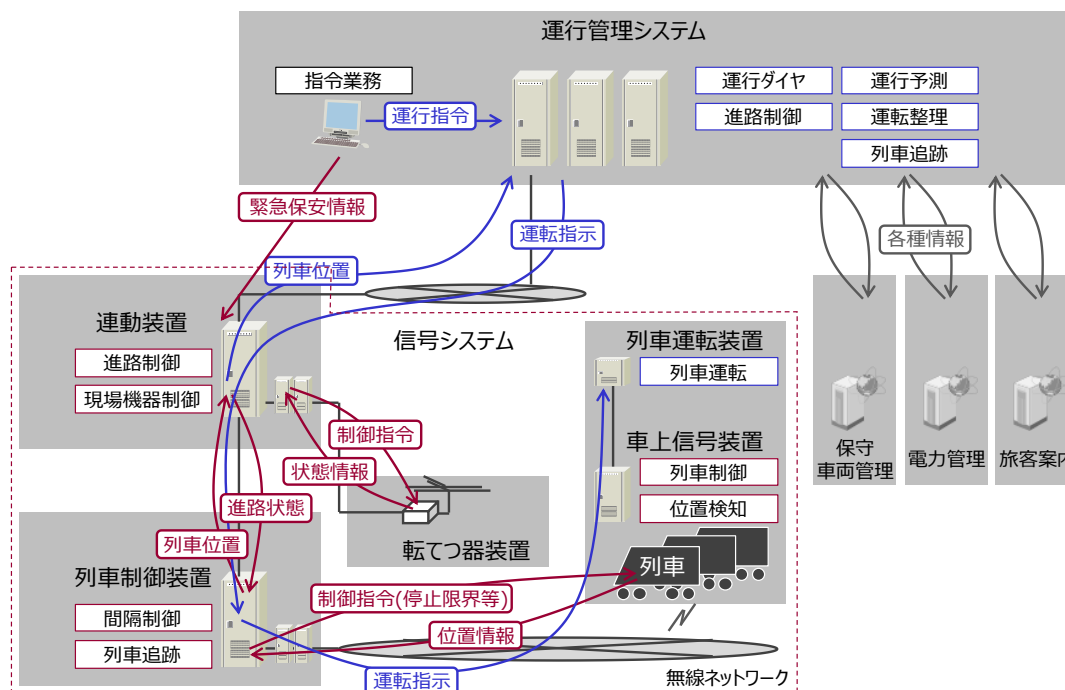


図 7-1. 現状の運行管理システムと信号システムとの関係

これに対し、信号システムが車上装置主体型となる場合の信号システムと運行管理システム間の主な情報の流れを図 7-2 に示す。この図からは、信号システムが車上装置主体型となることで、運行管理システムは、各列車の列車運転装置から列車の位置情報を直接入手でき、かつ進路の設定を含む列車の運行全般を直接指示できるようになることが分かる。このように、運行管理システムと信号システムとのインタフェースが簡素化されると、今まで複雑な経路を介して情報交換せざるをえなかったために費やしていた情報処理資源や情報伝送時間をよりきめ細かな運行管理の実現のために使えるようになる。

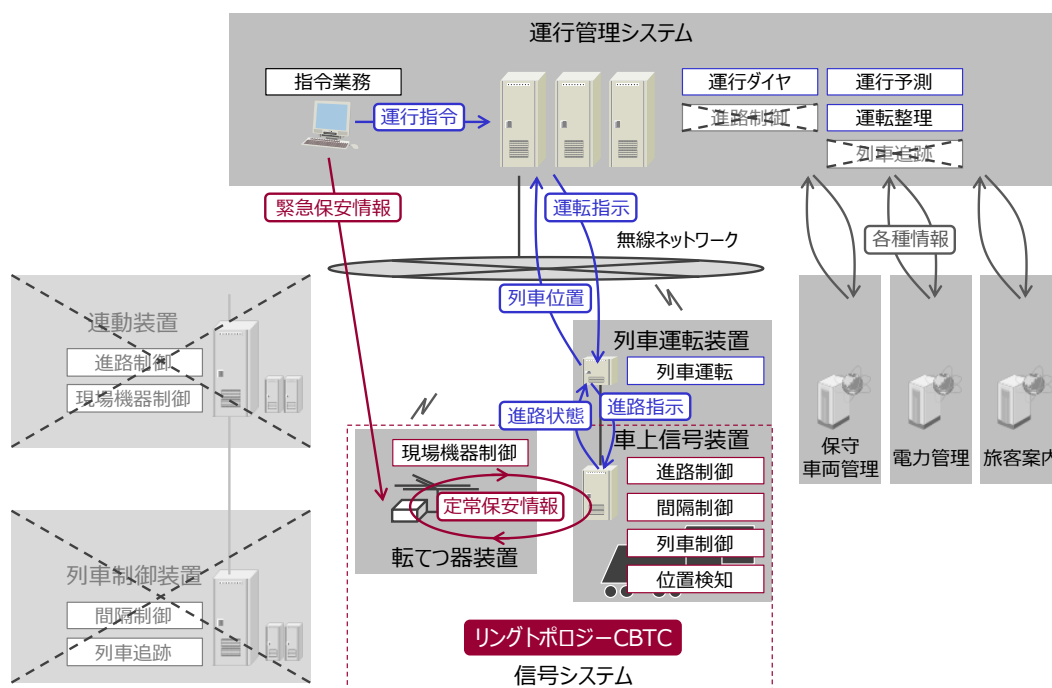


図 7-2. 運行管理システムと車上装置主体型の信号システムとの関係

例えば、デッドロック検知機能については、3.3.1 項で説明したように、従来は、信号システム側でも、列車の在線状態に基づいて、これを防止する論理を組んでいたことから、必ずしもデッドロックに陥らないケースでも指令員に警報を出す場合があったが、運行管理システムが列車の運行全般を直接指示できる前提であれば、運行計画に基づいた厳密なデッドロックチェックを運行管理システム側で行うことができるようになる。

さらには、第 5 章で提案した稠密ダイヤグラムのように、必要に応じて随時、列車の走行挙動を精密に予測し、適切な余裕時間を加味した上で、設備の限界まで運行密度を高めたダイヤグラムを導出して、列車をその通りに走行させることも可能となる。これは、第 5 章でも説明した通り、大規模なインフラ投資によらずに現状よりも輸送力を上げるための

有効な方策となる。

その上で、さらに輸送力と速達性の向上が求められる路線に対しては、第 6 章で提案した投資対効果の高い緩急交互型運行方式を前提とした駅間 3 線化によって、その目的を達成することができる。この緩急交互型運行方式は、各駅の待避設備と転てつ器を駆使して速達列車と各駅停車列車を複々線同等の高密度に運行する方式であり、既存の信号システムを前提とすると全駅に連動装置が必要となるが、車上装置主体型の信号システムを前提とすれば、このような地上側の高コストな信号装置は必要とせずに実現できる。

#### 7.4. 列車の自律走行を取り入れて高度化する将来の鉄道輸送サービス

前節では、車上装置主体型の信号システムが普及すると、運行管理システムと信号システム間の情報のやり取りが簡素化され、運行管理システムが車上装置に直接列車の運行全般を指示できるようになることから、従来よりもきめ細かい列車の運行が可能になると述べた。しかしながら、車上装置主体型の信号システムによる効果はこれに留まらない。

現在の鉄道システムでは、運行管理システムによって予め決められたダイヤグラムに従って列車を運行しているが、このような前提を外せば、信号システムが車上装置主体型になることによって、各列車は運転士の自律的な判断で走行することができるようになる。

もちろん、鉄道システムは、出発地も目的地も異なる不特定多数の旅客が利用する公共交通機関であるため、列車は予め決められたダイヤグラムに従って運行されることが望ましいと考えられる。しかし、事故や故障等によって予め決められたダイヤグラムから外れた時には、指令員による大局的な判断の範囲内で、局所的に各列車の運転士が自身の判断によって列車を走行させることで、輸送サービスを改善できる可能性がある。

例えば、現在の鉄道システムでは、事故や故障等によって列車が駅間に停止した場合、後続列車も駅間で停止することになり、基本的には先行列車の運行再開を待たなければならない。運行再開の見通しが立たない時など、どうしても前駅まで退行しなければならない場合には、指令員が信号システムを操作して、まずは退行区間に他列車が進入してこないように線路閉鎖手続きを行い、次に列車が退行できるよう転てつ器の転換を行う。その上で退行区間の安全を再度確認し、運転士に退行を許可する手続きを行わなければならない。このように、異常時に予め決められていない列車運行を行おうとすると、人間系のミスによる二次災害を防ぐために厳しい制約を設けていることもあり、指令員の負荷が大きく、時間も要する。特に、異常時に複数の列車を同時に制御することは、経験豊富な指令員でも難しい業務となる。

これに対し、車上装置主体型の信号システムでは、予め決められていない列車運行を行う場合でも、各列車の運転士がそれぞれの車上装置上で自列車の進路を安全に設定することができる。具体的に述べると、第3章で提案したリングトポロジーCBTCシステムでは、保安電文上で退行区間のブロック占有権を確保できれば、それだけで他列車の進入を防ぐことができ、保安電文上にそのブロック内にある転てつ器への方向指示を記入すれば、それだけで転てつ器を転換させることができる。つまり、車上装置主体型の信号システムでは、列車をどのように走行させようとする場合でも、その安全は、指令員の手を煩わせることなく、各列車の運転士と車上装置という現場レベルで確保することができる。このため、指令員は、「どの列車をどの駅まで走行させる」というような大局的な運行管理業務により集中することができる。

上記の例は、あくまで異常時における列車退行の例であるが、通常時においても、各列車の運転士が局所的に進路を判断し、その進路の安全を指令員を介さずとも車上装置上で確保することができることから、現場レベルの進路設定と、大局的な運行管理の業務を分離することができる。このような業務分離が進めば、業務が混乱するリスクが低減し、かつ指令員や運行管理システムは大局的な運行管理業務にリソースを集中させることができる。

つまり、従来、運行管理システムと信号システムは密に結合して、鉄道輸送サービスに使われるアセットを運行管理と保安の両面から運用していたが、信号システムが車上主体型に変化すれば、運行管理システムと信号システムは車上装置内で疎に結合すれば十分で、アセットは主として車上装置が主体となって運用できるようになるため、アセットの柔軟かつ効率的な運用が容易となる。

このような可能性を踏まえると、将来的には、図7-3に示すように、車上装置主体型の信号システムを基盤として、鉄道輸送サービスに使われるアセットを柔軟かつ効率的に運用できるようになり、少子高齢化社会における公共交通機関の維持という社会課題の解決に向けた高度な列車制御が実現できるようになる。

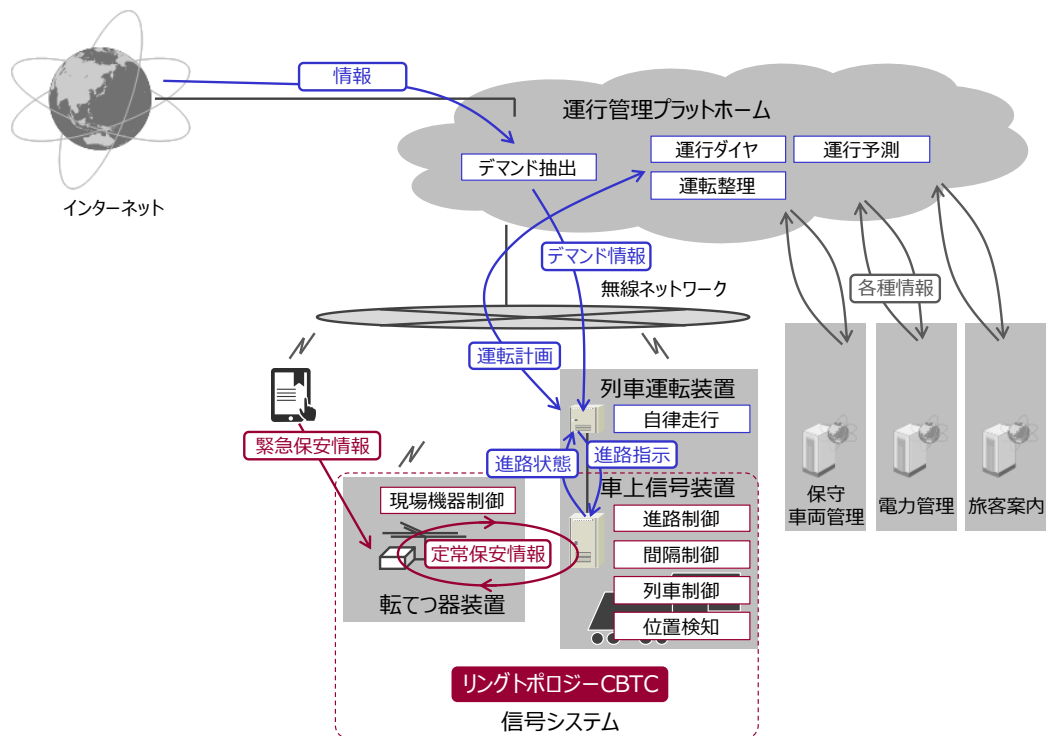


図 7-3. 信号システムと運行管理システムの将来像

## 8. 結言

### 8.1. 研究成果の要約

本研究では、鉄道ネットワークの持続的な発展と維持に資する列車制御に関する工夫を提案することを目的として、「リングトポロジーCBTC システム」「インターオペラブル車上信号装置」「稠密ダイヤグラム」「駅間3線の緩急交互型運行方式」を考案した。

リングトポロジーCBTC システムは、線路を仮想的なブロックに分割して各ブロックに占有権を設定し、この占有権の所在を示す情報と転てつ器の方向指示情報、状態情報を1つの電文に纏め、これを車上信号装置と転てつ器装置間で回覧させる車上装置主体型の信号システムである。このシステムは、地上側の列車制御装置や連動装置を不要とするため、既存の無線ベース信号システムと比較して、導入コストを約16%、装置コストをおよそ1/3程度にまで低減させることができる。実用化に向けては、保安電文回覧の仕組みに起因するシステム信頼性と列車運行密度に関するシステム固有の課題について分析し、消失した保安電文を安全に復元する手順や保安電文の回覧順序を動的に変更する方法等、これを解決する対策を考案した。その効果を運転密度の要求の厳しい都市交通システムを想定したケーススタディで評価し、このシステムがどのような路線にも実用上問題無く適用できる信号システムであることを明らかにした。

インターオペラブル車上信号装置は、路線ごとにその地上側列車制御装置に対応したアプリケーションを実行して列車を制御する車上信号装置であり、列車はこの装置を1台搭載するだけで信号システムの異なる路線への乗り入れが可能となる。この提案による信号システムの相互運用化は、既存の地上側列車制御装置に対応したアプリケーションの開発と、それらを切り替えて実行できる演算部を必要とするものの、独自の信号システムを使用してきた鉄道事業者の要求を考慮しながら統一信号システムを開発するというアプローチとは異なり、多種多様な関係者間の合意形成に難航してシステム仕様の複雑化とシステムコストの肥大化を招く、というようなことは避けられる。そのため、この提案による信号システムの相互運用化コストは、ETCSに代表されるシステム統一化方式と比較して約半分に抑えられることを明らかにした。

稠密ダイヤグラムは、駅近傍の列車の走行速度が変化する区間に限定して、周期的な列車運行形態を決定した時に1周期に要する時間が最も短くなるダイヤグラムである。このダイヤグラムは、駅近傍における列車の走行挙動を精密に模擬し、これを基にしてそれぞれの走行挙動間の運転時隔をデータベース化し、このデータベースを用いて最も1周期に要する時間が短くなる運行順序パターンを抽出する、という方法で導出することができる。この導出方法を一般的な汎用計算機に実装し、実用的な時間内に稠密ダイヤグラムを導出

できること、ならびに列車を高密度に運行させる上で重要な運行計画、運転整理、設備設計という業務に対して有益な情報を得られることを、大規模な線路の増設が難しい大都市圏鉄道を想定したケーススタディを用いて明らかにした。

駅間 3 線の緩急交互型運行方式は、1 線を使って速達列車と各駅停車列車を交互に走行させる区間と、2 線を使って速達列車と各駅停車列車を並走させる区間を、各駅停車列車用の待避設備のある速達列車通過駅ごとに切り替えて設定し、上り下り方向でこれらの区間を互い違いに配置する列車運行方式である。この運行方式は、駅の転てつ器と待避設備を駆使して速達列車と各駅停車列車を混在させながら駅間の線路を効率的に使うことによって、複々線の緩急分離型運行方式と全く同じレベルの速達性と輸送力を実現する。なお、列車運行が複々線よりも複雑になるため、これに起因して、列車遅延に対するロバスト性や、列車折返、運行密度の調整、速達列車の停車・通過変更に複雑な性質が懸念されるものの、これらの方式特有の懸念事項を分析して実用上大きな問題にはならないことを示した。さらに、この運行方式を前提とした駅間 3 線化の投資対効果については、現実の大都市圏鉄道の路線を取り上げて定量的に評価し、複々線化の 2 倍以上の効果があることを明らかにした。

最後に、リングトポロジーCBTC システムとインターオペラブル車上信号装置が、信号システムの抱える経済性の課題の解決に寄与し、これらの技術が鉄道ネットワーク全体に普及していく現実的なシナリオを示した。そして、将来的に信号システムは車上装置主体の制御に変化し、これが相互直通ネットワークに沿って普及していくこと、それによって列車の運行管理の形態も変化し、端末駅における稠密ダイヤグラムや駅間 3 線の緩急交互型運行方式といった、費用対効果高く輸送力を増強する技術の実用化が容易になることを示した。これは、これらの技術が、列車を柔軟かつ効率的に運用できる基盤となることを意味しており、具体的には、現場の判断による列車の自律運行が可能となること、それにより現在よりも高度な列車制御が実現できるという、鉄道輸送の将来像を示した。

以上に述べた成果により、本研究では、鉄道ネットワークの発展と維持に有益な技術を提案できたと考える。



## 8.2. 今後の課題

本研究では、「リングトポロジーCBTC システム」「インターオペラブル車上信号装置」「稠密ダイヤグラム」「駅間 3 線の緩急交互型運行方式」について述べたが、これらに関する今後の課題について以下に纏める。

リングトポロジーCBTC システムについての課題としては、列車の分割・併合や救援など、特殊な運用に対しての機能性が挙げられる。基本的には、回覧される電文を用いて全ての保安装置間で 1 つの情報を共有するという仕組みを用いることで実現できると考えられるが、今後の実用化設計において、詳細に検討していく必要がある。また、早期の実用化に向けては、試作機の開発と現車を用いた実証試験を実施していく必要がある。さらに、実際のシステム導入に際しては、その路線環境に適した既存システムからの移行手順を設計する必要がある。

インターオペラブル車上信号装置については、1 台の車上信号装置上で複数のアプリケーションを動作させ、それを路線境界で切り替える、という点で、既存の車上信号装置と大きく異なる。個々の信号システムの列車制御アプリケーションについては、安全性仕様も含めて、長年使用されている完成された既存の信号システムの仕様をそのまま使用し、既に使用されているソフトウェアの設計資産を活用して開発すればよいが、システム境界における安全性仕様は、個々のケースにおいて改めて精査する必要がある。また、実用化に向けては、この仕組みに伴う過渡的な処理負荷の低減が挙げられる。特に、列車走行中に、実行するアプリケーションを切り替える場合には、一時的に 2 つのアプリケーションを並列実行しなければならない。このようなアプリケーション切り替え時の並列処理機能を、通常機能に対して必要十分な性能のハードウェアで実現するためには、その処理負荷を低減させる制約や対策を検討していく必要がある。

稠密ダイヤグラムについては、運用上の制約に柔軟に対応できるアルゴリズムが求められる。特に、有料特急の運行などにより、各番線を均等に使用するとは限らない駅では、1 周期の間に考慮しなければならない列車数が増えるため、稠密ダイヤグラムを導出するために考慮すべき運転順序パターンが増加する。また、運転整理業務に活用する際には、可能な限り短時間で導出することが望ましい。運転整理業務では、刻々と変化する状況に合わせて、その都度適切な運転整理案を即座に作成する必要があるからである。本研究では、稠密ダイヤグラムを導出するために、機械的に作成した全ての運転順序パターンについて 1 周期時間を計算しているが、上記のような課題に対応していくためには、最適解以外のパターンについては計算の途中で適切に枝刈りして無用な計算を減らし、導出時間を短縮するようなアルゴリズムを研究していく必要がある。

駅間 3 線の緩急交互型運行方式については、全駅間を 3 線とする方式以外に、単走区間・並走区間を上下線で同区間に配置する方式も考えられる。この場合、優等列車通過駅ごとに 2 線区間と 4 線区間が繰り返されることになるが、例えば、優等列車通過駅間が長い区間を 2 線にし、短い区間を 4 線にするなど、用地確保や優等列車の停車パターンなどを考えた場合、条件によってはこのような運行方法の方が有利な場合がある。このような応用形態の検討、ならびにその特長の定量的な評価が、今後の課題として挙げられる。

## 謝辞

本論文を纏めるにあたり、終始並々ならぬご指導とご高見を賜りました 東京大学大学院工学系研究科 教授 古関隆章先生に心から感謝申し上げます。

本論文の審査を頂きました 日本大学 理工学部 教授 中村英夫先生、東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授 堀洋一先生、東京大学大学院 工学系研究科 教授 相田仁先生、東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授 大崎博之先生、宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 宇宙応用工学研究系 教授 橋本樹明先生に深く感謝申し上げます。皆様より頂きましたご指摘とご指導により、論文全体を貫く問題意識を明確にすることができ、各章間の繋がりや各章の質を大きく高めることができました。中村英夫先生には、本論文で提案した鉄道信号システムの実用性を高めるための有益なご示唆を多数賜りました。

学士課程から修士課程におきまして、電気鉄道分野の研究者、技術者としての基礎をご教授賜り、さらには、本論文を推敲するにあたり、数々の有益なご指導、ならびに厳しくも温かいご鞭撻を賜りました 工学院大学 特任教授 曾根悟先生に深く感謝申し上げます。

本研究の大部分は、(株)日立製作所 研究開発グループにおける業務の一環として行ったもので、研究の機会を与えて頂いた、日立研究所 所長 青木雅博博士、技術戦略室 室長 西野由高博士、機械イノベーションセンタ センタ長 大曾根靖夫博士、輸送システム研究部 部長 鈴木敦博士、Hitachi Europe Ltd., Head of Railway Research Centre 佐藤裕氏に深く感謝申し上げます。また、本研究は、(株)日立製作所 鉄道ビジネスユニット、ならびに水戸交通システム本部の製品開発に関連して行ったもので、研究の機会を与えて頂くとともに、ご指導やご討論を頂いた、鉄道ビジネスユニット 技監 藤原道雄氏、輸送システム本部 本部長 三和直樹氏、水戸交通システム本部 信号システム設計部 部長 中澤慶光氏、担当部長 飛田安正氏、担当部長 山疊一広氏、主任技師 渡部悌氏、主任技師 辻雅樹氏、主任技師 小池潤氏、主任技師 細井戸隆博氏、技師 谷浩行氏、企画員 佐藤究氏、プロセス設計部 部長 糟谷直大氏、輸送システム本部 輸送システム部 部長 長井聡氏、主任技師 佐々木英二氏、プロジェクトエンジニアリング本部 主任技師 酒井憲一氏、主任技師 小岩博明氏、中部支社 交通システム部 部長代理 織田肇氏、交通営業本部 JR 部 部長代理 池田克彦氏、主任 片瀬義明氏、他多数の方に厚く御礼申し上げます。本研究の推進にあたって、有益なご指導を賜りました、日立オートモティブシステムズ株式会社 CTO 川端敦氏に厚く御礼申し上げます。

最後に、いつも私を応援してくれた両親と妹、明るく支えてくれた妻と娘に深い感謝の意を表して謝辞といたします。

## 参考文献

- [1.1] UIC High Speed Department: “High Speed Lines in the World”, 2014/9, <[http://www.uic.org/IMG/pdf/20140901\\_high\\_speed\\_lines\\_in\\_the\\_world.pdf](http://www.uic.org/IMG/pdf/20140901_high_speed_lines_in_the_world.pdf)>
- [1.2] 外務省: “インドに対する円借款に関する書簡の交換”, 2013/3, <[http://www.mofa.go.jp/mofaj/press/release/25/3/press6\\_000063.html](http://www.mofa.go.jp/mofaj/press/release/25/3/press6_000063.html)>
- [1.3] California High-Speed Rail Authority: “High-Speed Rail Authority Hosts Official Groundbreaking Ceremony”, 2015/1, <[http://www.hsr.ca.gov/docs/newsroom/jan\\_2015\\_Groundbreaking\\_Press\\_Rel010615.pdf](http://www.hsr.ca.gov/docs/newsroom/jan_2015_Groundbreaking_Press_Rel010615.pdf)>
- [1.4] 国土交通省: “平成 26 年度 国土交通白書”, pp179-181, 2015, <<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h26/hakusho/h27/pdf/np206100.pdf>>
- [1.5] 国土交通省: “新幹線鉄道の整備”, <[http://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo\\_fr1\\_000041.html](http://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_fr1_000041.html)>
- [1.6] 国土交通省: “都市鉄道の整備”, <[http://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo\\_tk4\\_000002.html](http://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_tk4_000002.html)>
- [1.7] 国土交通省: “鉄道輸送統計年報”, 2014/10, <<http://www.mlit.go.jp/k-toukei/search/pdf/10/10201300a00000.pdf>>
- [1.8] 国土交通省: “日本鉄道史”, 2012/7, <<http://www.mlit.go.jp/common/000218983.pdf>>
- [1.9] 国土交通省: “特定都市鉄道整備事業計画の概要”, 2005/2, <[http://www.mlit.go.jp/tetudo/toshitetu/pdf/03\\_06.pdf](http://www.mlit.go.jp/tetudo/toshitetu/pdf/03_06.pdf)>
- [1.10] 国土交通省: “三大都市圏における主要区間の平均混雑率・輸送力・輸送人員の推移”, 2014/10, <<http://www.mlit.go.jp/common/001050443.pdf>>
- [1.11] 国土交通省: “都市鉄道等利便増進法案について”, 2005/1, <[http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/08/080131\\_.html](http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/08/080131_.html)>
- [1.12] 国土交通省: “交通関連統計資料集”, 2015/5, <<http://www.mlit.go.jp/statistics/pdf/23000000x012.pdf>>
- [1.13] 国土交通省: “貨物の輸送機関別輸送量・分担率の推移”, 2012/2, <<http://www.mlit.go.jp/common/000231638.pdf>>
- [1.14] 国土交通省: “我が国の貨物鉄道輸送”, <[http://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo\\_tk2\\_000003.html](http://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_tk2_000003.html)>
- [1.15] 運輸省: “平成 2 年度 運輸白書”, 第 2 部第 3 章第 2 節 5, 1990, <<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/transport/heisei02/2/22-3-2.HTM#e>>
- [1.16] 鉄道総合技術研究所: “わかりやすい鉄道技術[鉄道概論・電気編]”, pp.5, 2005/7
- [1.17] 日本鉄道電気技術協会: “鉄道技術者のための電気概論 信号シリーズ 2 閉そく装置”, pp.1-3, 1993/3

- [1.18] Frost & Sullivan: “Strategic Analysis of Communications-Based Train Control Systems in the Western European Urban Rail Market”, pp.36-37, 2013/7
- [1.19] 日本鉄道電気技術協会: “鉄道技術者のための電気概論 信号シリーズ 1 鉄道信号一般”, pp.10-14, 1993/6
- [1.20] 日本鉄道電気技術協会: “民鉄信号保安装置概説”, pp.103-105, 1995/3
- [1.21] 日本鉄道電気技術協会: “鉄道技術者のための電気概論 信号シリーズ 5 連動装置 改訂版”, pp.115-170, 2002/5
- [1.22] 日本鉄道電気技術協会: “信号システムの進歩と発展”, pp.299-300, 2009/6
- [1.23] Siemens AG: “Trainguard MT”, <<http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/sitecollectiondocuments/en/rail-solutions/rail-automation/train-control-systems/trainguard-mt-en.pdf>>
- [1.24] Siemens AG: “Trainguard Sirius CBTC”, <<https://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/en/rail-solutions/rail-automation/train-control-systems/trainguard-sirius-cbtc-en.pdf>>
- [1.25] Alstom: “URBALIS CBTC SOLUTION”, <<http://www.alstom.com/Global/Transport/Resources/Documents/Brochure%20-%20Signalling%20-%20Urbalis%20-%20English%20.pdf>>
- [1.26] Bombardier: “CITYFLO 650”, <<http://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/rail-control-solutions/cbtc/cityflo-650.html>>
- [1.27] Thales: “SelTrac CBTC”, <[https://www.thalesgroup.com/sites/default/files/asset/document/SelTracBrochure\\_CBTCsolutions\\_eng.pdf](https://www.thalesgroup.com/sites/default/files/asset/document/SelTracBrochure_CBTCsolutions_eng.pdf)>
- [1.28] Ansaldo STS: “CBTC Communication Based Train Control”, <<http://www.ansaldo-sts.com/sites/ansaldosts.message.asp.com/files/imce/cbtc.pdf>>
- [1.29] GE Transportation: “Tempo CBTC Solution”, <<http://www.getransportation.com/sites/default/files/Tempo%20CBTC%20Brochure%20FINAL.pdf>>
- [1.30] Hitachi Rail: “Communication Based Train Control (CBTC)”, <<http://www.hitachi-rail.com/products/signalling/cbtc/>>
- [1.31] 日本鉄道電気技術協会: “信号システムの進歩と発展”, pp.265-268, 2009/6
- [1.32] 日本鉄道電気技術協会: “信号システムの進歩と発展”, pp.287-288, 2009/6
- [1.33] 中村英夫: “鉄道信号システムの革新”, 情報処理学会誌, pp268-276, Vol.55, No.3, 2014/3
  
- [2.1] 日本国有鉄道経営再建促進特別措置法, 1980/12 施行, 1986/12 廃止
- [2.2] 国土交通省: “近年廃止された鉄軌道路線”, 2014/5, <<http://www.mlit.go.jp/common/001037038.pdf>>
- [2.3] 国土交通省: “地域鉄道の現状”, 2013/11, <<http://www.mlit.go.jp/common/001018569>>

pdf>

[2.4] 国土交通省: “地域公共交通確保・維持・改善に向けた取組マニュアル”, pp.392-399, 2012/3, <<http://www.tb.mlit.go.jp/kinki/kansai/program/column02.pdf>>

[2.5] 日本民営鉄道協会: “大手民鉄の素顔”, pp.23, 2014/10, <[https://www.mintetsu.or.jp/activity/databook/pdf/14databook\\_full.pdf](https://www.mintetsu.or.jp/activity/databook/pdf/14databook_full.pdf)>

[2.6] 運輸政策審議会: “21 世紀初頭における総合的な交通政策の基本的方向について”, 答申第 20 号, pp.12-20, 2000/10, <[http://www.mlit.go.jp/kisha/oldmot/kisha00/21koutu/mokuji\\_.htm](http://www.mlit.go.jp/kisha/oldmot/kisha00/21koutu/mokuji_.htm)>

[2.7] 都市鉄道等利便増進法, 2005/5 施行

[2.8] 国土交通省: “都市鉄道利便増進事業”, 2012/10, <<http://www.mlit.go.jp/common/000227012.pdf>>

[2.9] Decision No 1692/96/EC of the European Parliament and of the Council of 23 July 1996 on Community guidelines for the development of the trans-European transport network, <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:31996D1692&qid=1436944584431&from=EN>>

[2.10] Decision No 884/2004/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 amending Decision No 1692/96/EC on Community guidelines for the development of the trans-European transport network, <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004D0884&qid=1436944273626&from=EN>>

[2.11] Council Directive 96/48/EC of 23 July 1996 on the interoperability of the trans-European high-speed rail system, <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:31996L0048&qid=1436945043694&from=EN>>

[2.12] Directive 2001/16/EC of the European Parliament and of the Council of 19 March 2001 on the interoperability of the trans-European conventional rail system, <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32001L0016&qid=1436945447681&from=EN>>

[2.13] Directive 2008/57/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 on the interoperability of the rail system within the Community, <<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0057&qid=1436946130038&from=EN>>

[2.14] ERA: “ERTMS/ETCS Functional Requirement Specification”, Version 5.00, 2007/6, <[http://www.era.europa.eu/Document-Register/Documents/Set-1-Index001-ERA\\_ERTMS\\_003204%20v500.pdf](http://www.era.europa.eu/Document-Register/Documents/Set-1-Index001-ERA_ERTMS_003204%20v500.pdf)>

[2.15] R. Wright: “Showcase train project ‘too complex’”, Financial times, 2008/1/4

[2.16] 国土交通省: “混雑率データ”, 2014/8, <<http://www.mlit.go.jp/common/001025446.pdf>>

- [2.17] 中村久人” JR 東日本の駅ナカ・ビジネスの展開と Suica の導入”, 経営力創成研究, pp.135-147, Vol.3, issue1, 2007/3, <<http://www.toyo.ac.jp/uploaded/attachment/977.pdf>>
  - [2.18] 京阪電気鉄道株式会社: “京阪アセットマネジメント株式会社の設立について”, 2014/4, <[http://www.keihan.co.jp/info/upload/2014-04-28\\_asset\\_management.pdf](http://www.keihan.co.jp/info/upload/2014-04-28_asset_management.pdf)>
  - [2.19] 日本鉄道電気技術協会: “信号システムの進歩と発展”, pp.32-45, 2009/6
  - [2.20] L. Lindqvist and R. Jadhav, “Application of communication based Moving Block systems on existing metro lines,” in Advanced Train Control Systems, B. Ning, Ed. WIT Press, 2010, pp. 55-64
- 
- [3.1] C. Sevestre, “Reduction in cost of signalling,” in IRSE International Technical Committee Report, 2006/9
  - [3.2] A. Harrison, “The business of signalling and train control systems,” in IET Professional Development Course on Railway Signalling and Control Systems (RSCS 2008), Birmingham, 2008/6, pp. 1-9
  - [3.3] S. J. Dapr , “Main line scheme design,” in IET Professional Development Course on Railway Signalling and Control Systems (RSCS 2012), London, 2012/5, pp. 175-190
  - [3.4] J. P. Baumgartner, “Price and Costs in the Railway Sector,” 2001/1
  - [3.5] H. S. Bhatia, “Telecommunications supporting signalling and railway operations,” in IET Professional Development Course on Railway Signalling and Control Systems (RSCS 2012), London, 2012/5, pp. 144-161
  - [3.6] J. W. Palmer, “The need for train detection,” in IET Professional Development Course on Railway Signalling and Control Systems (RSCS 2012), London, 2012/5, pp. 60-74
  - [3.7] ERTMS REGIONAL Functional Requirements Specification, issue 3.08, UIC, 2009/12
  - [3.8] 安西理, 八木遵, 石川哲也, 石瀬裕之, 黒崎倫之, 村山健, 佐々木敦: “地方交通線向け列車制御システムの開発”, JR EAST Technical Review, No.35, pp30-35, 2011
  - [3.9] 八木遵, 石川哲也, 安西理, 石瀬裕之, 村山健, 佐々木敦: “無線を利用した新しい地方交通線向け列車制御システムの開発”, JR EAST Technical Review, No.43, pp25-32, 2013
  - [3.10] 松本雅行, 河田智太郎, 永次由英: “車上自律型列車制御システムの提案と現車試験”, 電気学会誌 D, Vol.122-D, No.12, pp1103-1112, 2002/12
  - [3.11] J. Pore: “High Speed Line Signalling System”, in European Railway Signalling, C. Bailey, Ed. IRSE, 1995, pp.282-310
  - [3.12] P. D. Booth, “Intermittent and continuous automatic train protection,” in IET Professional Development Course on Railway Signalling and Control Systems (RSCS 2012), London, 2012/5, pp. 89-117

- [3.13] C. White, “Interlocking principles,” in IET Professional Development Course on Railway Signalling and Control Systems (RSCS 2012), London, 2012/5, pp. 75-88
  - [3.14] 日本鉄道電気技術協会: “鉄道技術者のための電気概論 信号シリーズ 5 連動装置 改訂版”, pp.2-7, 2002/5
  - [3.15] S. Morar, “Evolution of communication based train control worldwide,” in IET Professional Development Course on Railway Signalling and Control Systems (RSCS 2012), London, 2012/5, pp. 218-226
  - [3.16] IEEE Standard for CBTC Performance and Functional Requirements, IEEE Standard 1474.1, 2004
  - [3.17] 日本鉄道電気技術協会: “鉄道技術者のための電気概論 信号シリーズ 2 閉そく装置”, pp.88-89, 1993/3
  - [3.18] Frost & Sullivan: “Strategic Analysis of Communications-Based Train Control Systems in the Western European Urban Rail Market”, 2013/7.
  - [3.19] R. M. P. Goverde, F. Corman, and A. D’Ariano, “Railway line capacity consumption of different railway signalling systems under scheduled and disturbed conditions,” in Proc. 5th International Seminar on Railway Operation Modelling and Analysis, Copenhagen, Denmark, 2013/5
  - [3.20] D. Emery, “Enhanced ETCS\_L2/L3 train control system,” in Advanced Train Control Systems, B. Ning, Ed. WIT Press, 2010, pp. 113-122
  - [3.21] D. N. Jansen, S. G. Klabes, and E. Wendler, “The impact of GSM-R on railway capacity,” in Advanced Train Control Systems, B. Ning, Ed. WIT Press, 2010, pp. 143-151
  - [3.22] 高岡征, 田代維史, 箭本芳人: “信号・車両・運転を総合化した高密度運転方式”, 電気学会誌 C, Vol.115-C, No.5, pp681-688, 1995/5
- 
- [4.1] P. Winter: “Train control-command: the ETCS developments”, Compendium on ERTMS, P. Winter, Ed. Railway Gazette, 2009/3, pp. 70-145
  - [4.2] 日本鉄道電気技術協会: “信号システムの進歩と発展”, pp.10-52, 2009/6
  - [4.3] UIC: “Implementing the European Train Control System ETCS Opportunities for European Rail Corridors”, pp19-33, 2003
  - [4.4] David Briginshaw: “An ETCS strategy starts to emerge in Europe”, IRJ (International Railway Journal), Vol.52, Issue4 pp.35-39, 2012
  - [4.5] G. Raymond: “Siemens’ Rollout of ETCS L1 Limited Supervision on SBB”, IRSE NEWS, Issue 199, pp13-14, 2014/4
  - [4.6] K. R. Hase: “An openETCS@ITEA2 project update”, European Railway Review Signalling & Telecommunications supplement, Vol. 20, Issue 3, pp.5-9, 2014/6



- [4.7] UNISIG: “ERTMS/ETCS subset-026 System Requirements Specification”, Version 2.3.0, 2006/2
- [4.8] 平尾裕司: “ヨーロッパの列車制御システムの動向—ERTMS/ETCS—”, 鉄道と電気技術, Vol.12, No.9, pp47-52, 2001/9
- [4.9] Finalcial times: “Showcase train project ‘too complex’”, 2008/1/4
- [4.10] NIST (National Institute of Standards & Technology): “The Economic Impacts of Inadequate Infrastructure for Software Testing”, 2002
- [4.11] 服部鉄範, 林成男, 田原一浩, 村上貴久, 猪又憲治, 大西智宏: “ソフトウェア無線技術を適用した ATS 送受信器の開発”, 第 42 回鉄道サイバネシンポジウム論文集, No.512, 2005
- [4.12] 中村英夫, 池田昌俊, 武子淳, 星野武彦: “車上インテリジェント型統合列車保安システムの開発”, 電気学会誌 C, Vol.115-C, No.5, pp689-695, 1995/5
- [4.13] 横山啓之, 池永真英: “ATS-P・Ps 統合型車上装置の開発”, R&m, 日本鉄道車両機械技術協会, 19 巻 7 号, pp.9-14, 2011
- [4.14] 金子隆, 渡辺裕介: “2 重系統合型車上装置(ATC, ATO, ATS)の開発”, 第 42 回鉄道サイバネシンポジウム論文集, No.522, 2005
- [4.15] UIC: “Workshop Economic Evaluation of ERTMS, Results of the study ERTMS Benchmark on Costs”, 2010
- [4.16] David Briginshaw: “IS ETCS missing an open goal?”, IRJ (International Railway Journal), Vol.52, Issue4 pp.40-42, 2012
- 
- [5.1] 竹尾友智, 木村吉宏, 赤岡尚人, 佐藤圭志, 小原 毅, 杉山英昭: “運転曲線作成システム”, 第 31 回鉄道サイバネシンポジウム, No.402, pp.157-159, 1994/11
- [5.2] 庄司光輝, 足立武士, 栗原俊明, 李麒, 阿久澤充, 奥村幾正: “高密度運転の動的シミュレーションによる評価”, 第 32 回鉄道サイバネシンポジウム, No.414, pp.153-156, 1995/11
- [5.3] 浅井俊雄, 柳谷秀美, 山口文敏, 北川英裕美, 棟田恭弘: “京阪列車ダイヤ作成支援システム「ASK」”, 第 32 回鉄道サイバネシンポジウム, No.401, pp.101-104, 1995/11
- [5.4] 山下修, 大川水澄, 岡田和宏: “列車ダイヤ計画システム(DIAPS)”, 第 32 回鉄道サイバネシンポジウム, No.405, pp.117-120, 1995/11
- [5.5] 箭本芳人, 早川忍, 八木遵: “時短支援ツール“最小運転時隔計算”の開発”, 第 32 回鉄道サイバネシンポジウム, No.415, pp.157-159, 1995/11
- [5.6] 金山道王, 三吉京, 関義朗, 藤原裕二, 蘇武和男: “鉄道列車制御シミュレータの開発”, 第 34 回鉄道サイバネシンポジウム, No.403, pp.84-87, 1997/11
- [5.7] 駒谷喜代俊, 匹田志朗, 安部恵介: “知識工学的アプローチによる列車運転整理支援システムの開発”, 電学論 C, Vol.107, No.2, pp.173-180, 1987/2
- [5.8] 片岡健司, 駒谷喜代俊: “対話形ダイヤ作成支援システム DIAPLAN”, 電学 D, Vol.112,

No.2, pp.153-159, 1992/2

[5.9] 明日香昌, 駒谷喜代俊: “端末駅における列車運転整理手法”, 平成 7 年電気学会全国大会, Vol.4, pp.373-374, 1995/2

[5.10] 高野たい子, 川端敦, 堀田正人, 日野知明: “対話型鉄道運転整理システム STREAM の構想”, 平成 7 年電気学会全国大会, Vol.4, pp.377, 1995/2

[5.11] 荒木大, 櫻井茂明, 小川真一郎, 篠原正憲: “マンマシン協調モデルに基づく運転整理エキスパートシステム”, 電学論 C, Vol.115, No.5, pp.672-680, 1995/5

[5.12] 運転理論研究会, “運転理論(改訂版)”, 日本鉄道運転協会, pp.310-315, 2002/3

[5.13] 列車ダイヤ研究会: “列車ダイヤと運行管理”, 成山堂, pp.39-43, 2008/11

[5.14] 富井規雄: “鉄道ダイヤのつくりかた”, オーム社, pp.8, 2012/3

[6.1] 小川浩, 曾根悟: “列車ダイヤの合理的作成法に関する検討(2)”, 平成 5 年電気学会産業応用大会, No.113, pp.485-486, 1993/8

[6.2] 山崎公之, 曾根悟: “選択停車による通勤ダイヤの改善”, 平成 2 年電気学会全国大会, No.658, pp.6-152-153, 1990/3

[6.3] 半田伊吹, 曾根悟: “はみ出し停車を活用した列車運行の提案”, 平成 10 年電気学会全国大会, No.939, pp.4-379-380, 1998/3

[6.4] 豊田直幸, 曾根悟: “三線化によるダイヤの改善”, 平成 3 年電気学会全国大会, No.680, pp.6-173-174, 1991/3

[6.5] 水野健司, 曾根悟, 高野奏: “方向別複々線区間において線路変更を活用した運転整理～3 線運行の可能性～”, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-05-34, pp.27-30, 2005/7

[6.6] 水野健司, 曾根悟, 高野奏: “方向別複々線区間において線路変更を活用した運転整理～3 線運行の有効性について～”, 平成 17 年電気学会産業応用部門全国大会, No.3-2, pp.III-95-96, 2005/8

[6.7] 水野健司, 曾根悟, 高野奏: “方向別複々線区間において線路変更を活用した運転整理～3 線運行のために設置する渡り線の間隔について～”, 第 12 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL 2005), S-1-5-4, pp.495-498, 2006/1

[6.8] S. Sone: “High-speed, high-density train allocation”, COMPRAIL '94, pp.2-11-18, 1994/9

[6.9] 列車ダイヤ研究会: “列車ダイヤと運行管理”, 成山堂, pp.43-45, 2008/11

[6.10] 大長順一: “京葉線の歩みと 20 万人ビッグコンサートに伴う多客輸送”, 運転協会誌 483 号, pp.27-30, 1999/9.

[6.11] 運輸経済研究センター: “平成 10 年度版都市交通年報”, 1999/3.

[6.12] S. Sone: “Novel Train Stopping Patterns for High-Frequency, High-Speed Train Scheduling”, COMPRAIL '92, pp.107-118, 1992/8

[6.13] 国土交通省: “鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル 2012”, pp.161, 2012/2

[6.14] 亀山弘行, 柏谷増男, 星野鐘雄, 朴性辰: “新鉄道システム工学”, 山海堂, 1984.

## 研究業績

### 学術誌原著論文

- [1] 勝田敬一, 古関隆章, 曾根悟: “複々線同等の高速・高密度運行を可能にする駅間3線運行方式”, 電気学会論文誌 D, Vol.121-D, No.6, pp.705-712, 2001/6
- [2] 勝田敬一, 高野たい子, 小熊賢司, 渡部悌, 植村良: “駅構内における高密度列車ダイヤの導出”, 電気学会論文誌 D, Vol.124-D, No.8, pp.792-798, 2004/8
- [3] K. Katsuta, “Cost effective railway signalling by wireless communication among onboard controllers and switch controllers,” IET Intelligent Transportation Systems, Vol. 9, Issue 1, pp. 67-74, 2015/2
- [4] K. Katsuta, K. Imamoto, and H. Tani: “Ring Topology Railway Signalling with Information Sharing among Onboard and Switch Controllers”, 電気学会英文論文誌 D, [under review]
- [5] 勝田敬一, 谷浩行: “鉄道信号システムの相互運用を経済的に実現するインターオペラブル車上信号装置の提案と経済性の検証”, 電子情報通信学会論文誌 D, [under review]

### 国際会議論文・発表

- [1] K. Katsuta, T. Koseki, and S. Sone: “Rail Service on Triple-track Lines: Proposal and Benefits”, COMPRAIL 2000, Bologna, Italy, pp.415-424, 2000/9
- [2] K. Katsuta, T. Koseki, and S. Sone: “Train operation on a triple-track line as rapid and frequent as on a quadruple-track line”, IV SIMPOI/POMS, Sao Paulo, Brazil, No.318, 2001/8
- [3] K. Katsuta, T. Takano, K. Oguma, D. Watanabe & T. Uemura: “Cristal Diagram: A Technique for Making High-Density Diagrams”, COMPRAIL 2004, Dresden, Germany, pp.647-656, 2004/5
- [4] K. Katsuta, H. Tani, and K. Imamoto: “Feasibility study of ring topology CBTC system with information sharing among onboard controllers and field controllers”, RailTokyo 2015, Chiba, Japan, No.80, 2015/3

### 表彰論文

- [1] 勝田敬一, 杉田洋一, 渡部悌: “低コスト・高サービスを実現する運行管理と信号保安システム”, JREA, 日本鉄道技術協会, Vol. 50, Issue 12, pp.32977-32980, 2007/12, JREA 創立 60 周年記念 懸賞論文 優秀論文賞

## 国内学会・研究会・シンポジウム・その他

- [1] 勝田敬一, 曾根悟: “不連続運行に適した列車運行法の提案”, 平成 11 年電気学会全国大会, No.979, pp.403-404, 1999/3
- [2] 曾根悟, 下堀友数, 勝田敬一: “個別案内の実現法とそれによる輸送改善の可能性”, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-99-25, pp.23-28, 1999/5
- [3] 勝田敬一, 古関隆章, 曾根悟: “3 線運行方式の提案と適した運行計画”, 平成 11 年電気学会産業応用部門全国大会, No.307, pp.III-313-314, 1999/8
- [4] 勝田敬一, 古関隆章, 曾根悟: “不連続運行に適した列車運行法の提案”, 電気学会交通・電気鉄道委員会, TER-99-71, pp.31-35, 1999/11
- [5] 勝田敬一, 古関隆章, 曾根悟: “3 線運行方式の基本運行計画と効用”, 平成 11 年鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL'99), S5b-2, pp.287-290, 1999/12
- [6] 勝田敬一, 古関隆章, 曾根悟: “3 線運行方式の提案と実路線への適用”, 平成 12 年電気学会産業応用部門全国大会, R15-96, pp.II-853-856, 2000/8
- [7] 勝田敬一, 古関隆章, 曾根悟: “複々線同等の高い列車密度を可能にする 3 線運行方式”, 平成 12 年鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL'00), OS25-3406, pp.371-374, 2000/12
- [8] 勝田敬一, 高野たい子, 小熊賢司, 渡部悌, 渡部博孝: “最密折返ダイヤの自動生成手法”, 第 39 回鉄道サイバネシンポジウム, No.403, 2002.11
- [9] 勝田敬一: “インターオペラビリティを低コストに実現する新しい鉄道信号システムの提案”, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-13-30, pp.77-82, 2013/5
- [10] Alexandra Girardi, 小岩博明, 辻雅樹, 細井戸隆博, 勝田敬一: “欧州規格対応信号システムの開発”, 日立評論 2014 年 9 月号, pp.41-44, 2014/9

## 資格

- [1] Certification on Engineering Safety Management, Lloyd's Register Rail Ltd, Birmingham UK, 2010/4

## 国際特許

- [1] K. Katsuta, Y. Sugita, D. Watanabe, and T. Yamaguchi: “Signaling system”, US P7756613 号, 2010/7
- [2] K. Katsuta, Y. Sugita, D. Watanabe, and T. Yamaguchi: “Signaling system”, GB P1695890, 2008/11
- [3] K. Katsuta, Y. Sugita, D. Watanabe, and T. Yamaguchi: “Signaling system”, DE P1695890, 2008/11
- [4] K. Katsuta, Y. Sugita, D. Watanabe, and T. Yamaguchi: “Signaling system”, FR

P1695890, 2008/11

[5] K. Katsuta, Y. Sugita, D. Watanabe, and T. Yamaguchi: "Signaling system", China PZL200610005814, 2009/10

[6] K. Katsuta, D. Watanabe, and Y. Sugita: "Signaling system", US P8548654, 2013/10

[7] K. Katsuta, D. Watanabe, and Y. Sugita: "Signaling system", China PZL200610170054, 2012/7

[8] K. Katsuta, Y. Sugita, K. Maekawa, N. Shibata, K. Imamoto, and M. Suzuki: "Railway signalling system and on-board signalling system", US P8924050, 2014/12

[9] K. Katsuta, Y. Sugita, K. Maekawa, N. Shibata, K. Imamoto, and M. Suzuki: "Railway signalling system and on-board signalling system", Russia P2524758, 2014/6

[10] K. Katsuta, Y. Sugita, K. Maekawa, N. Shibata, K. Imamoto, and M. Suzuki: "Railway signalling system and on-board signalling system", China PZL201210247030, 2015/5

[11] K. Katsuta, K. Maekawa, N. Shibata, K. Imamoto, N. Kanekawa, and D. Watanabe: "Data comparison apparatus, data comparison method and safety system using the same", GB P2626787, 2014/9

[12] K. Katsuta, K. Maekawa, N. Shibata, K. Imamoto, N. Kanekawa, and D. Watanabe: "Data comparison apparatus, data comparison method and safety system using the same", DE P2626787, 2014/9

[13] K. Katsuta, K. Maekawa, N. Shibata, K. Imamoto, N. Kanekawa, and D. Watanabe: "Data comparison apparatus, data comparison method and safety system using the same", FR P2626787, 2014/9

[14] K. Katsuta, K. Maekawa, N. Shibata, K. Imamoto, N. Kanekawa, and D. Watanabe: "Data comparison apparatus, data comparison method and safety system using the same", China PZL201310043788, 2015/9

[15] K. Imamoto, K. Maekawa, K. Katsuta, N. Shibata, K. Sakai, H. Sakuyama, and D. Watanabe: "Information processing system, output control device, and data generating device", GB P2680148, 2015/1

[16] K. Imamoto, K. Maekawa, K. Katsuta, N. Shibata, K. Sakai, H. Sakuyama, and D. Watanabe: "Information processing system, output control device, and data generating device", DE P2680148, 2015/1

[17] K. Imamoto, K. Maekawa, K. Katsuta, N. Shibata, K. Sakai, H. Sakuyama, and D. Watanabe: "Information processing system, output control device, and data generating device", FR P2680148, 2015/1

[18] Y. Nakanishi, K. Katsuta, T. Nishino, K. Imamoto, and K. Sanjo: "Signaling system", EPO P14186149, 2016/7

## 国内特許

- [1] 勝田敬一, 高野たい子, 小熊賢司, 渡部悌, 糟谷直大: “連動論理作成支援方法”, 特許第 3818161 号, 2006/6
- [2] 勝田敬一, 高野たい子, 小熊賢司, 渡部悌, 早乙女弘: “運転時隔算出装置”, 特許第 3941618 号, 2007/4
- [3] 勝田敬一, 杉田洋一, 渡部悌, 山口高史: “信号保安システム”, 特許第 4375253 号, 2009/9
- [4] 小熊賢司, 渡部悌, 勝田敬一, 江淵智浩, 宮内努, 永次由英: “自動列車制御装置”, 特許第 4612551 号, 2010/10
- [5] 小熊賢司, 渡部悌, 勝田敬一, 江淵智浩, 宮内努: “列車ダイヤ評価装置及び列車ダイヤ評価方法”, 特許第 4716712 号, 2011/4
- [6] 勝田敬一, 松尾雅一: “運転整理装置”, 特許第 4940542 号, 2012/3
- [7] 西野尊善, 勝田敬一, 杉田洋一, 永次由英, 前川景示, 堀田正人, 小熊賢司, 宮内努: “信号保安システム”, 特許第 5023052 号, 2012/6
- [8] 勝田敬一, 渡部悌, 杉田洋一: “信号保安システム”, 特許第 5023685 号, 2012/6
- [9] 勝田敬一, 杉田洋一, 前川景示, 柴田直樹, 今本健二, 鈴木基也: “信号保安システム及び車上信号装置”, 特許第 5373862 号, 2013/9
- [10] 前川景示, 今本健二, 柴田直樹, 渡部悌, 勝田敬一: “列車制御方法及び列車制御システム”, 特許第 5596621 号, 2014/8
- [9] 勝田敬一, 前川景示, 柴田直樹, 今本健二, 金川信康, 渡部悌: “データ照合装置、照合方法及びそれを用いた安全保安システム”, 特許第 5925507 号, 2016/4

## 国際業務への貢献

(株)日立製作所は、2013 年 12 月に、欧州統一列車制御システム(ERTMS)の一部である信号システム(ETCS)の車上信号装置を製品化した。製品化にあたっては、英国ネットワーク社の協力を得て、英国カンブリアン線にて機関車を用いた実証走行試験を実施し、欧州公的認証機関から日本企業として初めて ETCS 規格への適合を示す TSI(Technical Specification for Interoperability)認証、ならびに国際安全性規格における最高安全性レベルである SIL4(Safety Integrity Level)認証を取得した。この ETCS 車上信号装置は、2015 年 10 月に英国ネットワーク社所有の Class37 機関車 2 両に搭載され、さらには、日立製作所が納入する英国都市間高速鉄道(IEP: Intercity Express Programme)向けの車両 122 編成にも搭載される予定である[9.1][9.2][9.3]。なお、Class37 機関車に搭載された ETCS 車上信号装置は、2015 年度の英国 The Most Interesting new product Award を受賞した[9.4]。

本論文著者は、2008 年 4 月から Hitachi Rail Europe Ltd.にて、2010 年 12 月からは(株)

日立製作所 研究開発グループにて、ETCS 規格・国際安全性規格に準拠した ETCS 車上信号装置の開発、ならびに TSI 認証・SIL4 認証取得に向けた業務に従事し、日本企業として初めての ETCS 車上信号装置の製品化に貢献した。特に、(株)日立製作所の日本人従業員として初めて、欧州公的認証機関から Engineering Safety Management 資格を取得し、国際安全性規格への準拠と SIL4 認証取得に向けた業務を牽引する役割を果たした。

さらに、並行して、2013 年 6 月に受注したベトナムホーチミン都市交通 1 号線への導入が予定されている無線列車制御システム(CBTC)の開発、ならびに国際安全性規格への準拠に向けた業務に従事し、2014 年 2 月に SIL4 認証取得に貢献した[9.5]。

また、(株)日立製作所は、InnoTrans 2014 (2014/9/23-26 ドイツ・ベルリンで開催) や、MetroRail 2015 (2015/3/9-11 英国・ロンドンで開催) 等の国際鉄道技術見本市において、第 3 章で提案した「リングトポロジーCBTC システム」の基本概念を説明する動画と、提案システムによる列車制御をデモンストレーションするシミュレータを展示した。これらの業務も本論文著者が主導的な役割を果たした。なお、展示内容に対しては、世界各国の鉄道事業者や競合サプライヤ等から肯定的な反響を受けており、今後も提案活動を継続していく予定である。

[9.1] Alexandra Girardi, 小岩博明, 辻雅樹, 細井戸隆博, 勝田敬一: “欧州規格対応信号システムの開発”, 日立評論 2014 年 9 月号, pp.41-44, 2014/9

[9.2] 日立製作所ニュースリリース: “日本企業として初めて欧州列車制御システムの認証を取得”, 2013/12/26, <<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2013/12/1226.html>>

[9.3] 日立製作所ニュースリリース: “日立が英国ネットワークレール社から欧州統一規格に準拠した車上信号装置を受注”, 2014/8/6, <<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2014/08/0806b.html>>

[9.4] Nominations for The Most Interesting new product: ERTMS by Hitachi Rail, 2015/10, <[http://www.railexecgala.com/awards/the\\_most\\_interesting\\_new\\_product/205.html](http://www.railexecgala.com/awards/the_most_interesting_new_product/205.html)>

[9.5] 日立製作所ニュースリリース: “都市交通向け無線信号システムの国際規格認証を取得”, 2014/2/20, <<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2014/02/0220.html>>