

# 運行管理と保安制御を融合した列車運行制御システムの基礎検討

杉山 陽一\* 岩田 浩司\* 山本 春生\*\*

## Basic Study on Train Control System Integrating Operational Control and Security Control

Yoichi SUGIYAMA Koji IWATA Haruo YAMAMOTO

We propose a train operation control system that draws up operation curves composed of pairs of precise train position and precise operation time, and controls train operation and ground facilities according to the plan. This system realizes more flexible control than that of the conventional system by controlling the on-board device and the ground device according to the operation curve from the central equipment, where the operation management function and the safety control function are integrated. In this report, we describe the control method based on “band” with margin for safety added to the operation curve, and the requirements for securing safety. In addition, we have confirmed by the simulator that there is no bottleneck in the transmission path, even though the information concentrates on the central equipment.

キーワード：運行管理，保安制御，無線式列車制御，運転曲線，アベイラビリティ

### 1. はじめに

情報ネットワークを活用して、列車群の運行状況を密に把握し、その状態に応じてリアルタイムに着発時刻や運転曲線の再計算を行うことにより、自由度が高く、かつ安全な列車運行を行うシステムが実現できる。その実現にあたり、システムの具体的な制御方法だけでなく、安全性、アベイラビリティ、および、リアルタイム性についても要件を整理する必要がある。

そこで、リアルタイムに再計算した運転曲線に従って列車運行を行うシステムについて、列車制御方法、および、転てつ器等の現場設備の制御方法を検討し、列車制御システムの基本仕様を作成した。さらに、基本仕様に基づき、制御論理を中央の運行制御装置に集中するシステム構成とした場合のネットワーク負荷をシミュレータで確認した。これらをもとに、安全性確保のための要件を定めるとともに、システムのアベイラビリティを評価した。

本稿では、本システムの概要、安全性要件を述べたのち、アベイラビリティの評価結果について報告する。

### 2. 保安制御と運行管理との機能的な融合

#### 2.1 概要

近年導入が進められている無線を用いた列車制御システム<sup>1)</sup>は、地上・車上間の無線伝送により、詳細な列車位置や速度を地上の装置が把握できることが特長である。また、地上の制御装置から列車を特定した上で、詳細な

制御指示を個々の列車に与えることができる。

一方、現在の列車運行システムは、図1(a)に示すように、運行管理と保安制御(列車制御)が明確に分かれており、運行管理は軌道回路単位での列車位置情報に基づいているため、詳細な列車位置・速度の情報を活用しきれていない。

本報告では、無線式列車制御システムで得られる高精度な情報を積極的に活用し、図1(b)に示すように運行管理と列車制御を機能的に融合させた新しい列車運行方式を提案する<sup>2) 3)</sup>。

提案する列車運行方式(以下、「本方式」)の概要は以下①～③の通りである。

- ①中央の運行制御装置が、情報ネットワークを介して、列車位置や設備状態の詳細な情報を収集する。
- ②前記①で得た詳細情報をもとに安全な列車運行・設備制御の計画を作成する。
- ③前記②の計画を各列車、各設備に伝送する。各列車、各設備が安全な計画に沿って制御されることで、列車間隔制御・進路制御が実現する。

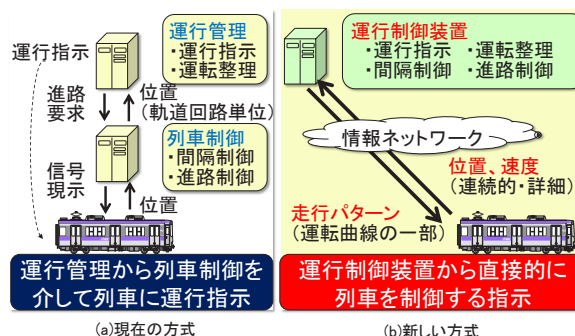


図1 列車制御のための情報の流れ

\* 信号・情報技術研究部 列車制御研究室

\*\* 信号・情報技術研究部

特集：信号通信技術

現行の無線式列車制御システムでは、停止限界位置を列車に伝送し、当該位置を超過しないブレーキパターンを車上で発生させて列車を防護している。これに対し、本方式では運行制御装置が安全な運行計画を運転曲線レベルで作成する。この運行計画に従って列車や地上側設備（転てつ器・踏切など）を制御することによって安全を確保する。本方式での運行計画により、旅客利便性向上、保守作業上の要求だけでなく、将来的には省エネルギーを実現する運行計画なども期待できる。

運行制御装置から精緻な運転指示が随時出力されるが、列車の性能誤差、乗降時間が長引くことによる遅延、設備故障などの要因で運行計画通りに運行できない場合があるため、安全な運行計画はその時の運行状況や設備状態、作業状況などに応じて短い周期で作成する必要がある。

2.2 制御方式

従来方式では、運行管理システムによって、各列車のスジ（各駅の着発時刻の集合）で構成されるダイヤに基づいて列車運行を計画し、信号システムで列車間隔制御（在線位置に応じて列車同士の衝突を防止）および進路制御（在線位置に応じて進路を構成）を実現している。

これに対し、本方式では、スジに代えて、駅間も含めた運転曲線で構成されるダイヤで列車運行を計画する。ここで、他列車の位置や転てつ器などの制御状態に応じて運転曲線を逐次作成することで、運行管理と保安制御の機能的融合を図る。これにより、例えば、先行列車が駅で遅延したときに、後続列車の速度を適切に制御し、運転時隔を短縮することで、ダイヤ乱れの影響の低減が図れる。さらに、安全な走行軌跡を指示でき、転てつ器の鎖錠など連動論理をシンプルにできる可能性がある。

2.2.1 制御マップ

本方式では、ダイヤに代わって、運行制御装置が列車運行の安全を保障する「制御マップ」を作成して、直接列車の運行を制御する（図2）。制御マップは従来方式のダイヤとは異なり、駅間も含めた位置（縦軸）と時間（横軸）との対応を把握する。なお、複数の番線に分岐する駅においては、制御マップは多層的に表される。

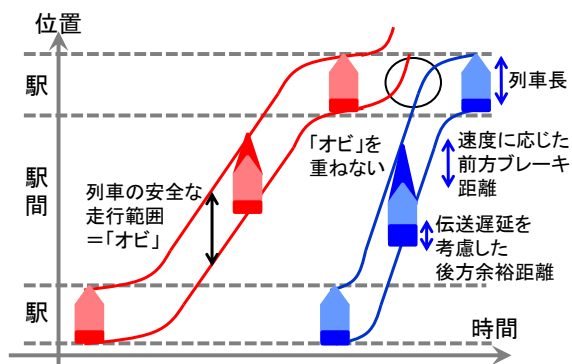


図2 制御マップ上のオビ

2.2.2 列車間隔制御

列車間の安全な運行は、以下の二つの要件を満たすことで実現できる。

- ①列車による線路の時空間の占有が競合しないこと
- ②安全な列車間隔を確保すること

そこで、図2に示すように、制御マップ上の列車の在線範囲を中心として、前方に当該列車のブレーキ距離を、後方に車上から地上に対するブレーキ動作情報の最大伝送遅れ時間（例えば3秒）後における列車後尾位置をとった帯状の範囲（以下、「オビ」）を設定する。なお、走行中に何らかの異常が発生した場合には、非常ブレーキが動作するため、列車がオビから逸脱することはない。

前記の要件①は、オビを重ねないことで実現でき、要件②は、オビの先端と後端の設定によって確保できる。

したがって、運行制御装置は、制御マップ上でオビどうしが重ならないように排他管理を行う。

2.2.3 進路制御

列車の安全な運行を行うために、列車の安全な進路を確保する必要がある。制御マップ上には転てつ器、踏切のほか、保守作業や設備故障に伴う支障も表現される。このうち、転てつ器を制御する場合の例を図3に示す。

転てつ器が当該列車の予定する進路に合った開通方向でない場合、当該転てつ器上に矩形の支障が設定される。当該列車の通過タイミングが計画されると、転てつ器の転換が計画され、転換中も支障が継続される。所定の転換が完了した段階で支障が消滅するが、仮に転換不良が発生した場合には、支障が消滅しないため、当該列車は転てつ器地点までに停止する。

この制御方法を応用することで、踏切制御、保守作業員の退避を含めた安全な列車制御を行うことができる。

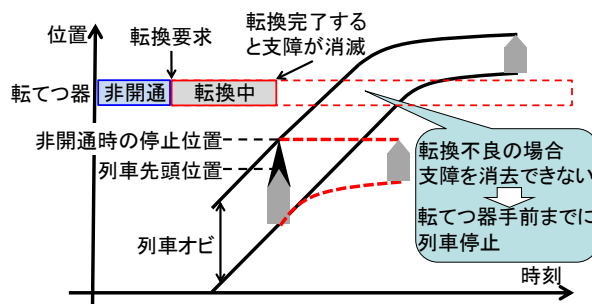


図3 制御マップ上のオビと転てつ器動作の関係

2.2.4 指示・情報の伝送

運行制御装置で計画した制御マップをもとに、列車・装置ごと制御情報を抽出し、これに従った制御を各列車・各装置に指示する。各列車および現場機器は指示に従って走行、制御することを基本とするが、伝送遅延や外乱などにより、指示通りに制御されない場合がある。そのため、各列車の最新の位置・速度、各装置の状態を収集

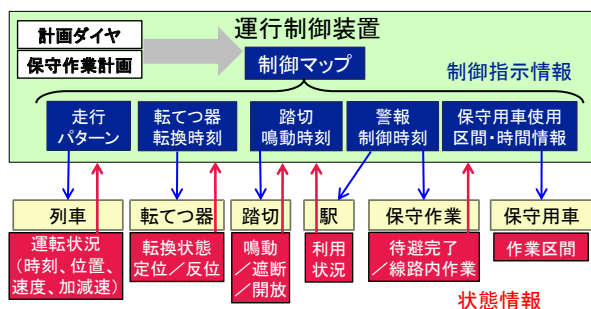


図4 列車制御におけるデータフロー

し、制御マップを逐次修正する(図4)。

制御マップを用いる本方式は、従来の運行管理と転てつ器を含む保安制御を機能的に一体化しているため、現場機器の制御までの時間を短縮できる。また、ダイヤ乱れなどの異常に対しても即応性の高い運行計画を再作成するので、列車運行の状況変化に対するロバスト性の向上が期待できる。さらに、地上設備の削減も可能となる。

### 3. システム構成の検討

#### 3.1 ネットワーク負荷

本システムでは、単一の運行制御装置が線区全体の運行を制御することから、制御指示情報や装置状態情報が運行制御装置に集中することによるボトルネックが懸念される。そこで、鉄道総研で開発した無線式列車制御用ネットワークシミュレータ TCNET を用い、無線通信システムの性能を考慮してネットワーク負荷を算出した。

##### 3.1.1 システム内の装置数

現在の一般的な無線式列車制御システム(以下、「従来システム」)に倣い、無線装置1台で管轄するエリアの車上装置を最大16台と仮定する。これに対し、本システムでは、1エリアあたり車上装置数16台とは別に、現場装置(転てつ器制御・踏切制御・保守作業)20台を加えた36台を配置できるものとする。

##### 3.1.2 ネットワーク構成

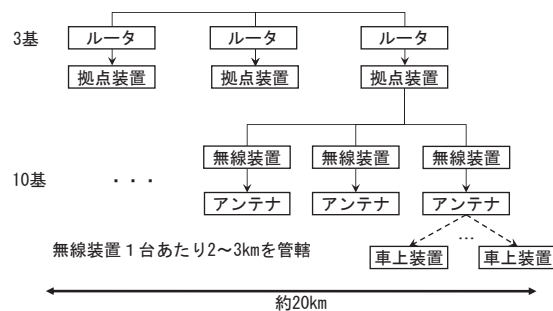
従来システムを参考に、本システムの中央集中型ネットワーク構成例を設定した(図5)。

従来システムでは、エリアごとの拠点装置が車上装置との間で無線通信を行い、在線位置把握や停止限界点通知を行っている。エリア境界付近に在線する列車については、拠点装置間で情報の伝送が発生する。

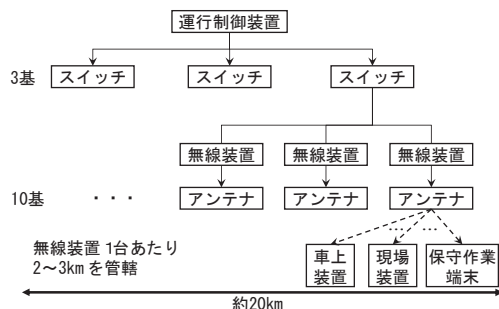
一方、本システムでは、運行制御装置が各エリアの無線装置を介して末端の各装置との間で無線通信を行い、装置状態の把握および制御指示を行う。

##### 3.1.3 電文フォーマット

運行制御装置と車上装置との間で伝送する電文のフォーマットの例を表1に示す。



(a) 従来システム



(b) 本システム

図5 無線列車制御のネットワーク構成例

表1 車上装置への電文のフォーマット例

内容	型	情報量	備考	
指示時刻	int	2byte	タイムスタンプ	
ダイヤ通番	int	2byte	根拠となる制御マップ	
送信元ID	int	2byte	線区識別用	
送信先ID	int	2byte	装置種別も識別	
送信先位置	int	2byte	無線装置特定用	
指示内容	14byte × 10		0.5秒刻みで5秒間の位置	
	車上装置ID	int (2byte)		一斉配信を想定
	走行時刻	float (4byte)		
	走行位置	float (4byte)		停止限界点は中央の
	走行速度	float (4byte)	運行制御装置で管理	
合計		150byte		

1列車に必要な情報は、伝送周期1秒、オビ更新周期0.5秒として設定した。また、運行制御装置からの伝送断許容回数は連続3回、運行制御装置での制御情報作成時から車上装置到達までの最大伝送遅延を2秒とし、運行制御装置から車上装置に対して、現在時刻から5秒分のオビを「制御情報」として送信する前提とした。

車上装置への制御指示のイメージを図6に示す。制御情報が5秒分より短いと、許容回数の伝送断により車上装置での制御情報が不足し、非常ブレーキが動作する可能性がある。また、制御情報が5秒より長いと、冗長な情報が車上装置に伝送され、伝送路の負荷が増大する。

##### 3.1.4 シミュレーション結果

本方式のネットワーク負荷を検証するため、前述の条件の下で、ある路線のダイヤを想定して伝送シミュレーションを行った。このシミュレーションでは、表1のデータ長150byteにチェック符号などを付加することを想定

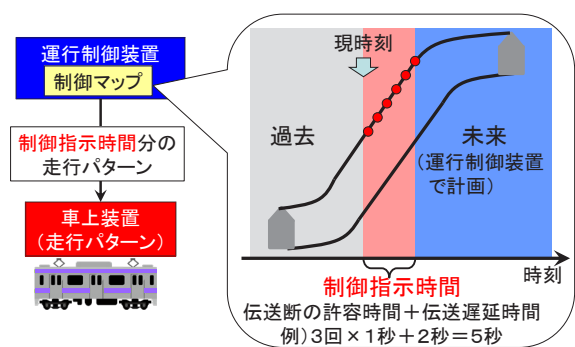


図6 制御指示情報

し全体の電文長を180byteとした。また、従来システムと比較して電文長が約2.5倍、スロット数が約2.3倍となるので、無線伝送性能は従来システムの9.6kbpsではなく、64kbpsを想定した。なお、条件を単純化するため、電文長は車上装置以外の装置についても、車上装置と同じとした。さらに、無線回線、有線回線ともに伝送誤りなしの前提としている。

シミュレーション画面を図7に、結果を表2に示す。

運行制御装置回線での回線利用率は約14%以内にとまっており、集中ネットワーク化したことによるボトルネック箇所の発生は見られなかった。

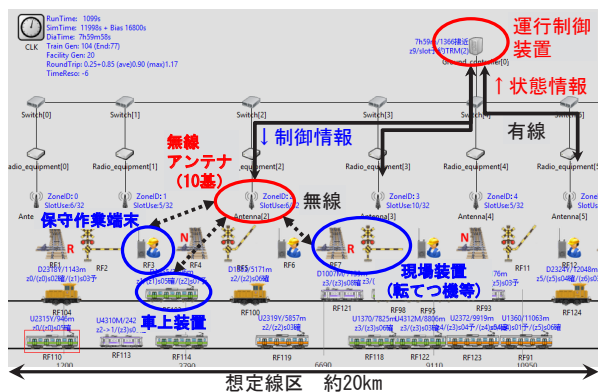


図7 TCNETでのシミュレーション画面

表2 シミュレーション結果

		8列車在線	30列車在線		
条件	無線装置数		10台		
	通信可能装置数	無線装置1台あたり36装置			
	無線伝送周期		1秒		
	伝送速度	有線10Mbps, 無線64kbps			
	パケット長	有線7740byte, 無線180byte			
結果	回線利用率	有線	運行制御→スイッチ	12.9%	12.9%
			スイッチ→運行制御	13.3%	12.7%
		無線	スイッチ→無線装置	1.3%	1.3%
			無線装置→スイッチ	1.3%	1.2%
	ラウンドトリップタイム	アンテナ→列車	21.6%	32.9%	
		列車→アンテナ	11.3%	23.0%	
ラウンドトリップタイム		平均0.9秒, 最大1.17秒			

### 3.2 安全性確保の要件

#### 3.2.1 従来手法との機能の相違

##### (1) 基本的な安全性確保の考え方

従来方式では、運行管理装置と保安制御を担う連動装置が独立しており、運行管理装置がダイヤに基づく進路設定要求を連動装置に出力し、要求を受けた連動装置が現場機器に制御出力を行う。一方、本方式では、運行管理と保安制御を機能的に統合した運行制御装置が全装置に制御指示を出し、各装置は指定された情報に従って制御される。

各列車は、運行制御装置が定めるオビの範囲内に存在するよう制御され、オビの長さは「列車長+ブレーキ距離+余裕距離」で定義される(図8)。なお、運行制御装置と車上装置は列車がオビを逸脱しないことを常時診断し、逸脱のおそれがある場合には非常ブレーキを出力する。

運行制御装置は、列車の位置と装置の状態を把握し、制御マップを再設定する。ここで、全装置に同じ制御マップに基づく制御情報を共有させるため、運行制御装置は一定時間ごとに制御マップを更新して配信する。

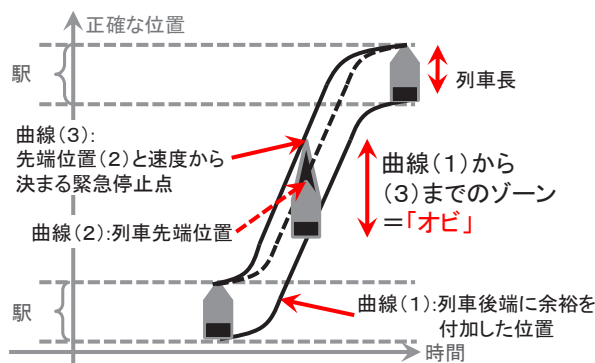


図8 オビによる安全確保の考え方

##### (2) 余裕時間の設定

従来方式では、運行管理装置が、折返し、着発迫込み、交差支障、列車運転時隔、番線競合などに関連した余裕時分をダイヤ上のスジ間に設定することにより、連動装置や閉そく装置などにおける安全制御に関わる時間をダイヤに反映している。一方、本方式では、従来方式のスジに相当するオビの設定時にこれら要因を考慮する。ここで、余裕時分の設定値は安全性に直接関わる。

##### (3) オビ間の排他論理

本方式では、前述の通り、オビ内に列車が在線するように制御し、オビを逸脱するおそれがある場合には非常ブレーキで停止させるが、オビ間の支障を回避するため、列車運転時隔と交差支障に関して排他論理を定義する。

##### ① 列車間隔制御に関わる排他論理

制御マップ内に既に設定されているオビに他のオビが

重ならないよう設定する。

②進路制御に関わる排他論理

転てつ器のてっ査区間（脱線防止のために防護する区間）内は1列車のみ占有する。この要件を満たすため、運行制御装置では、てっ査区間全体を転てつ器の支障として制御マップ上に設定する。また、支障の設定後、オビが重ならないことを診断する。この考え方は踏切の防護範囲や保守作業の防護範囲にも適用することができる。

3.2.2 安全性解析

本方式での制御方法に対する安全性解析を行った。従来方式とは異なり、運行制御情報の時刻に基づく制御指示が末端の各装置に伝送される点に違いがあるため、この解析では、制御指示の根拠となる制御マップの誤りによるシステムへの影響をFMEA, FTAにより特定した。

(1) FMEA

制御マップの設定に関連する事象についての解析結果を表3に示す。

末端の装置での認識誤りは制御マップの誤りにつながるが、FS (Fail Safe) 性を持つ装置において滑走・空転検知、補正位置情報との照合によって誤りを検知する。また、オビを最大限に拡大したり、強制的に支障を設定したりすることにより、安全性を確保する。この場合、列車遅延の増大が懸念されるため、伝送間隔を縮めるなどの対策が必要である。

運行制御装置での制御マップ設定誤りについては、FS装置で検知する。また、時刻誤りが発生した場合には、GPS時刻を用いた補正や末端装置でのタイムスタンプの合理性チェックを行うことで影響を抑える。

各装置から情報の出力がない場合は、伝送断の場合と同じく、伝送断許容回数・最大遅延時間の閾値を設定することにより、列車を停止させる安全側制御を行う。

(2) FTA

衝突・脱線を頂上事象として解析した(図9)。

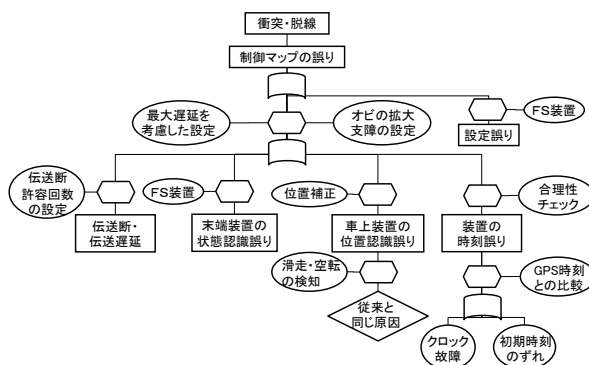


図9 制御マップの設定に関する FTA

解析の結果、頂上事象につながる制御マップの誤りについて、発生原因を特定し、頂上事象に影響が及ばないように対策が取られていることを確認した。

3.2.3 システム構成に関わる要件

(1) 時刻同期

装置間の時刻ずれ対策として、装置間での時刻ずれを診断し、許容値内に収まるよう、定期的に時刻同期をとる。許容誤差を超過する可能性がある場合には、停止現示相当の処理を行う。

(2) 制御情報配信時のプロトコル

全装置を安全に制御するため、運行制御装置の伝送に関して以下の条件を設ける。

- ①装置の制御結果を把握するため、制御指示の配信を制御開始一定時間（伝送断許容時間以上）前とする。
- ②各装置の制御情報を一致させるため、制御マップの更新は、全装置から制御情報配信確認を受けてからとする。よって、伝送断許容時間が更新間隔となる。

3.3 アベイラビリティ確保の要件

3.3.1 従来手法との機能相違の比較

アベイラビリティの低下には、安全側制御に伴うものと装置故障に伴うものがあるが、ここでは後者について、従来方式と本方式を比較、検討した(図10)。

本方式は集中型構成によって実現される。集中型構成

表3 制御マップ誤りの影響解析

装置	故障モード	影響	検知	安全側制御
末端装置	位置認識誤り	制御マップの設定誤り	滑走・空転検知, 補正位置との照合	オビの拡大
	状態認識誤り		フェイルセーフ (FS) 装置	支障の設定
	時刻誤り	古い情報の制御マップ	タイムスタンプの合理性チェック	オビの拡大支障の設定
	情報出力なし	オビ・支障の設定不能	伝送断許容回数・最大遅延時間の設定	オビの拡大支障の設定
運行制御装置	制御マップの設定誤り	衝突, 脱線	フェイルセーフ (FS) 装置	制御情報を出力しない
	時刻誤り	システム全体の時差	GPS時刻と比較, タイムスタンプの合理性チェック	列車緊急停止 異常情報出力
	情報出力なし	列車・装置の制御停止	伝送断許容回数・最大遅延時間の設定	

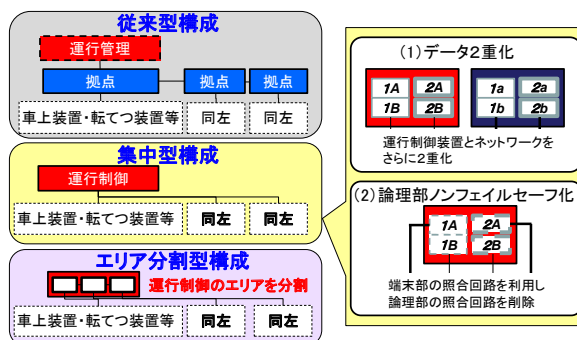


図10 システムの構成

特集：信号通信技術

では従来型の構成に対して、拠点装置をエリアごとに設置する必要がなく、故障発生頻度を低減できる。さらに、運行制御装置が故障した場合の影響を低減するために、装置内部の管轄エリアを分割した構成を提案する。また、運行制御装置の故障発生頻度を低減するため、運行制御装置を2重化する構成と、論理部の照会回路を省略したノンフェールセーフ(NFS)構成も提案する。

3エリアを仮定した線区のシステム構成を表4に示す。

表4 システム構成装置数

装置名	従来型	集中型			エリア分割型
		データ2重化	論理部NFS化		
運行制御装置	1	1	2	0.7	3
ネットワーク装置	1	1	2	2	1
拠点装置	3				
転てつ器制御装置	6	6	6	6	6
車上制御装置	3	3	3	3	3
保守作業端末	3	3	3	3	3
合計	17	14	16	14.7	16

3.3.2 各方式のアベイラビリティの算出

アベイラビリティ算出にあたり、以下の前提をおいた。

- ①各装置の故障発生頻度は $10^{-5}$ [h]とする。
- ②各機器の復旧に要する時間は以下とする。
  - ・運行制御装置、ネットワーク、拠点装置：2時間
  - ・転てつ器、車上制御装置、保守作業端末：1時間
- ③装置の障害発生による影響エリアの大きさに応じた係数を設定した(表5)。線区内全エリアに影響が及ぶ場合を最大値1とする。

以上の前提をもとにアベイラビリティを算出した結果を表6、図11に示す。

集中型では拠点装置が不要になるため、どの構成でも従来型よりアベイラビリティが改善した。その中でも、

表5 影響度係数

	従来型	集中型			エリア分割型
		データ2重化	論理部NFS化		
運行制御装置					
ネットワーク装置	1.0	1.0	0.5	1.0	0.3
拠点装置	0.3				

表6 各方式のアベイラビリティ

	従来型	集中型			エリア分割型
		データ2重化	論理部NFS化		
障害発生頻度(回/年)	1.49	1.23	1.40	1.28	1.40
総停止時間(h)	1.58	1.40	1.40	1.52	1.28
平均修復時間(h)	1.06	1.14	1.00	1.18	0.92
アベイラビリティ	99.982%	99.984%	99.984%	99.983%	99.985%

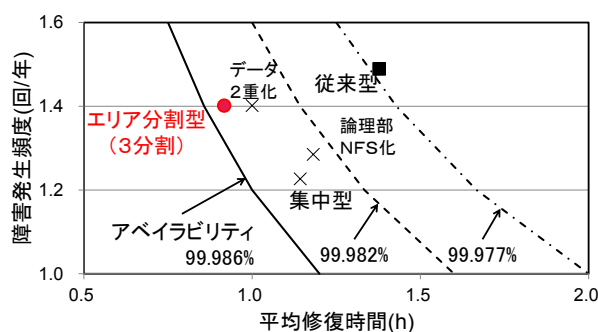


図11 各構成に対するアベイラビリティ

運行制御装置内部のエリアを3分割にした構成が最もアベイラビリティが良いことが分かった。

4. おわりに

情報ネットワークを活用し、列車運行状況や装置状態に応じて運行計画の再計算を行う、自由度の高い列車運行システムの基本設計を行い、安全性、アベイラビリティ、および、伝送上の要件を整理した。

逐次計画した運転曲線に従って列車運行を行うシステムを実現するための列車制御方法、転てつ器等の現場設備の制御方法を検討し、列車制御システムの基本仕様を作成した。これをもとに安全性確保のための要件を検討し、システムのアベイラビリティを評価した。

運転曲線の更新間隔は、全装置を同一のスケジュールで制御する必要があるため、装置間の最大遅延時間以上とする必要がある。また、制御論理を中央に集約した構成としても、伝送路上のボトルネックが発生する可能性が小さいこと、従来のシステム構成よりアベイラビリティが悪化しない構成が実現可能であることを確認した。

本方式の実現により、地上設備の削減や旅客ニーズに沿った柔軟な運行が期待できる。今後は、列車制御論理や、ダイヤ乱れ時など状況に適応した列車制御について機能の実現を図る。

文献

- 1) 無線式列車制御システム 第1部：一般要求事項および機能要求事項 JIS E 3801-1：2009
- 2) 福田光芳, 杉山陽一, 國松武俊, 辰井大祐：“Improvement of train traffic control functions”, WCR2016, No.842, 2016
- 3) 福田光芳, 杉山陽一, 國松武俊, 辰井大祐：運行管理と列車制御を融合した新しい列車運行方式, RRR, Vol.74, No.1, pp.8-11, 2017