

博士論文

慣性センサと速度発電機を併用した
車上位位置検知システムの開発とアベイラビリティ
向上対策決定法を適用した評価

2017年3月24日

岩田 浩司

目次

第1章 序論.....	4
1.1 本研究の背景.....	4
1.2 本研究の内容概要と成果の位置づけ.....	5
第2章 列車制御システムとアベイラビリティ.....	9
2.1 はじめに.....	9
2.2 列車制御システムにおける車上位置検知.....	9
2.3 列車制御システム国際規格におけるアベイラビリティ.....	12
2.4 要約.....	17
第3章 慣性センサを併用した車上位置検知システム.....	21
3.1 はじめに.....	21
3.2 慣性センサを併用した距離算出法.....	22
3.2.1 滑走・空転検知方式.....	23
3.2.2 滑走・空転検知後の距離算出方式.....	24
3.2.3 再粘着判定.....	27
3.2.4 想定誤差.....	27
3.3 シミュレーション解析結果.....	28
3.3.1 データ記録方法.....	28
3.3.2 しきい値の設定.....	30
3.3.3 想定距離誤差.....	31
3.3.4 距離誤差.....	33
3.4 提案手法の評価.....	35
3.4.1 評価項目.....	35

3.4.2 評価結果.....	36
3.4.3 従来手法との相違.....	43
3.5 要約.....	47
第4章 アベイラビリティ向上対策決定法.....	50
4.1 はじめに.....	50
4.2 目標アベイラビリティ達成のための対策決定法.....	51
4.2.1 目標アベイラビリティ達成の対策決定法とその特徴.....	51
4.2.2 目標アベイラビリティの設定と提案手法の適用手順.....	53
4.3 提案手法の適用.....	55
4.3.1 解析対象線区の概要.....	55
4.3.2 現状把握.....	55
4.3.3 目標アベイラビリティの設定.....	58
4.3.4 目標アベイラビリティを達成するための適用対策の決定.....	60
4.4 要約.....	64
第5章 アベイラビリティ向上対策決定法による車上位置検知システムのアベイラビリティ改 善策の決定.....	67
5.1 はじめに.....	67
5.2 適用対策の改善効果の算出.....	67
5.2.1 検討対象とする適用対策.....	68
5.2.2 適用対策の効果の算出.....	69
5.3 適用対策の決定.....	73
5.4 要約.....	79
第6章 結論.....	82

略語および記号の説明	85
謝 辞	87
筆者が発表した論文.....	89

第1章 序論

1.1 本研究の背景

列車制御システムにおいては、高密度の列車運転を可能とするために車上制御装置での速度照査パターンによるブレーキ制御が行われるようになり、車上制御装置での位置検知機能が重要になっている。さらに、2011年に ATACS (Advanced Train Administration and Communications System) ^①が JR 東日本 仙石線にて実用化され、首都圏への展開も予定されているほか、無線を用いた列車制御システム (CBTC: Communication Based Train Control) ^②が海外で展開が進みつつある。このような速度照査パターンあるいは無線による列車制御システムでは、車上制御装置での列車位置検知 (以下、車上位置検知) 結果は、地上制御装置での列車追跡情報として使われるため、より重要になっている。しかしながら、車上位置検知のための方法としては、依然として速度発電機単体による方式が採用され、速度発電機を取り付けた軸での車輪の滑走・空転の影響を受けるため、改善が必要とされている。

また、近年の列車制御システムは多数の装置がネットワーク接続され、また、ソフトウェアで実現される部分が大きくなっている。これらに対しては、列車制御システムに関する RAMS 国際規格 (IEC 62278^③) に基づいてシステムを開発すれば、システムティック誤りの低減に対して一定の効果が期待できる。この規格に定める主要な指標としては安全性 (Safety) とアベイラビリティ (Availability) の二つがあり、安全性確保に直結する列車制御システムにおける安全性レベルの選択には実質、余地はないが、輸送の安定性に関するアベイラビリティについては、列車制御システムを適用する線区の状況を考慮して対策を適用する自由度が残っている。しかしながら、アベイラビリティについては、本来、障害の発生頻度と障害に伴う影響度の二次元的な検討が可能であるが、これまで個々の装置の高信頼化などを中心とするアベイラビリティ向上のための対策検討に留まっているのが実情である。

以上のことに鑑み、本博士論文では、列車制御システム用途での、慣性センサと速度発電機を併用した車上制御装置での列車位置検知手法を提案する。また、現状の鉄道信号装置を対象

に障害の発生頻度と障害に伴う影響度の二成分に分けて分析するアベイラビリティ向上対策の決定法を提案する。最後に、提案するアベイラビリティ向上対策決定法を慣性センサと速度発電機を併用した車上制御装置での列車位置検知手法に適用し、その改善策の適用効果を明確化する。

これらの検討を行うことで、列車制御システムにおいて重要な役割を担う車上位置検知システムを新たに開発するとともに、提案するアベイラビリティ向上対策決定法の有用性を示す。

1.2 本研究の内容概要と成果の位置づけ

本研究の内容概要は以下のとおりである。

第1章「序論」では、アベイラビリティ向上対策決定法の適用による車上位置検知システムの開発研究の概要を示した。

第2章「列車制御システムとアベイラビリティ」では、無線を用いた列車制御システム(CBTC)は海外において実用化が進んでおり、車上制御装置での位置検知結果は重要になってきていることを述べた。しかしながら、車上位置検知のための方法としては、依然として速度発電機単体による方式が採用され、速度発電機を取り付けた軸での車輪の滑走・空転の影響を受けるため、改善が必要とされていることを明確にした。また、アベイラビリティについては、本来、障害の発生頻度と障害に伴う影響度の二次元的な検討が可能であるが、これまで個々の装置の高信頼化などを中心とするアベイラビリティ向上のための対策検討に留まっているのが実情であることを明確にした。

第3章「慣性センサを併用した車上位置検知システム」では、車軸に設置した速度発電機を用いた走行距離の算出方式は、車輪の滑走・空転の影響を受けることから、その対策の一手法として、滑走・空転の検知時に、慣性センサを用いた距離算出方式を提案した。提案手法は、速度発電機と慣性センサを併用した列車速度・距離算出手法であり、非駆動軸を持たない車両や短編成車両でも適用可能である。路線勾配と曲線が組み合わさった区間での補正処理における誤差低減のために、慣性センサの加速度(3軸)と角速度(3軸)を用いた補正処理を適用

し、現車試験で時刻管理して記録したデータにもとづくシミュレーション解析を行い、提案手法の有効性を明らかにした。

第4章「アベイラビリティ向上対策決定法」では、鉄道信号装置の目標アベイラビリティ達成のための対策の決定法を提案した。提案手法では、目標アベイラビリティを達成するための対策について、単位時間あたりの障害件数の低減成分と、1障害あたりの平均停止時間の短縮成分の両面から総合的に考慮して戦略的に決定する。これにより、線区ごとに異なる障害内容に応じた効果の高い対策の適用を可能にする。目標アベイラビリティについては、構成機器の故障による遅延を受けた乗客数で定義した輸送損失を反映して設定し、提案手法を適用している。この結果、障害発生頻度と障害発生後の影響を総合的に考慮して、戦略的に効果的な適用対策を決定できることを明らかにした。

第5章「アベイラビリティ向上対策決定法による車上位置検知システムのアベイラビリティ改善策の決定」では、アベイラビリティ向上対策決定法を車上位置検知システムに適用し、補正開始点を複数選定し補正論理の並列処理による対策が特に再粘着判定不能後の復旧時間が長い線区において有効であることを示した。これら結果は線区の条件によって異なるが、アベイラビリティ向上対策決定法の有用性を明らかにした。

第6章「結論」は、提案する速度発電機と慣性センサを併用した車上位置検知システムは、非駆動軸を持たない車両や短編成列車だけでなく、近年導入が進みつつある無線を用いた列車制御システム（CBTC）にも適用可能なものであり、列車制御システムの基盤となる成果である。また、提案する障害の発生頻度と障害に伴う影響度の二成分に分けて分析するアベイラビリティ向上対策決定法は、システムの障害データに基づく新たな手法であり、装置間がネットワーク接続され大規模化した列車制御システムの評価において基盤となる成果であることを示した。

本博士論文における研究項目と成果、および論文構成を図1に示す。

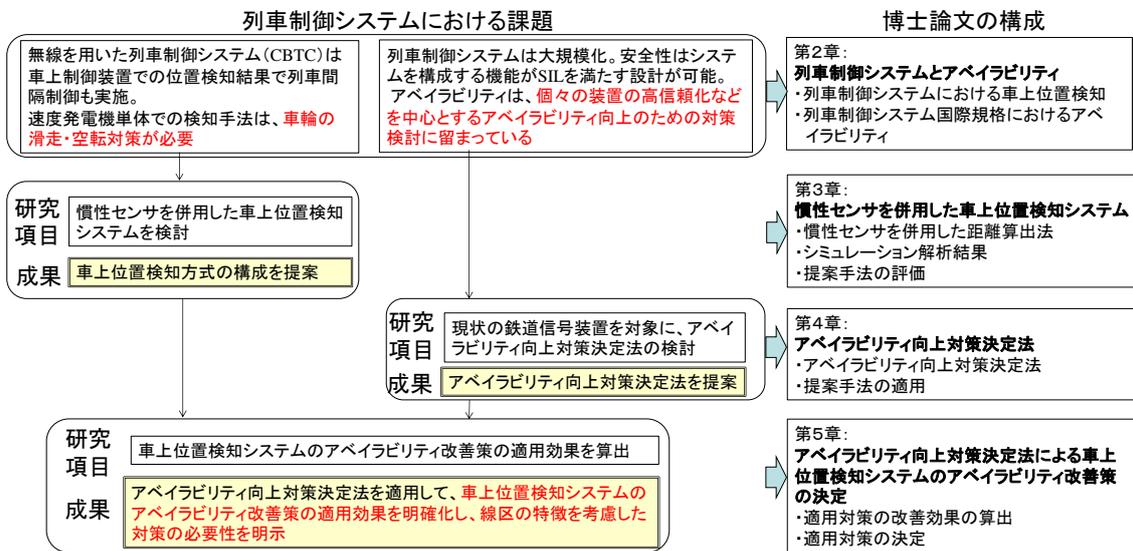


図1 研究項目と成果, 博士論文の構成

参考文献

- (1) 無線による列車制御システム「ATACS」の使用開始について, 東日本旅客鉄道株式会社, プレスリリース, 2011.10
- (2) IEEE Standard for Communications Based Train Control(CBTC) Performance and Functional Requirements, IEEE Std 1474-1, 1999.12.
- (3) IEC 62278 : Railway applications – Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS), 2002.

第2章 列車制御システムとアベイラビリティ

2.1 はじめに

列車制御システムにおいては、高密度の列車運転を可能とするために車上制御装置での速度照査パターンによるブレーキ制御が行われるようになり、車上制御装置での位置検知機能が重要になっている。また、無線を用いた列車制御システム（CBTC：Communication Based Train Control）^①が海外で展開が進みつつある。このような速度照査パターンあるいは無線による列車制御システムでは、車上制御装置での列車位置検知（以下、車上位置検知）結果は、地上制御装置での列車追跡情報として使われるため、より重要になっている。

また、近年の列車制御システムは多数の装置がネットワーク接続され、また、ソフトウェアで実現される部分が大きくなっている。これらについては、列車制御システムに関わる国際規格で定める安全性を立証するプロセスを経れば、システムティック故障の低減に対して一定の効果が期待できる。

本章では列車制御システムにおける車上位置検知と、列車制御システムに関わる国際規格におけるアベイラビリティについて述べる。

2.2 列車制御システムにおける車上位置検知

列車制御システムにおいては、列車間の衝突防止のための間隔制御と、また、分岐箇所での衝突・脱線防止のための進路制御が安全性確保において重要である。分岐箇所は、先行列車を追い越すため、また、折り返し等のため、駅等に設置され、その転換制御のため転てつ機が設置され、連動装置が転換ならびに鎖錠の制御を行っている。

これらの制御は、基本的には地上制御装置単体で行うことを基本とし、列車に対して進行可能な地点の伝達は、当該地点に信号機を設置して運転士に対して進行の可否を伝達することを基本としている。そのため、地上に設置する信号機の設置位置の制約から基本的には予め定め

たブロック単位での固定閉そくである。また、車上制御装置は、当該地点までに停止する制御を行うこととし、独立した構成となっている。

間隔制御を行うためには先行列車の位置の検知が必要であり、また、分岐箇所列車が在線していないこと、また、接近していないことの確認のためにも列車の位置検知が必要である。このようなことから、列車の在線位置の検知は、列車制御システムにおいて不可欠な機能である。

以下、列車制御システムにおける位置検知機能の推移について述べる。

(1) 地上装置において区間単位で列車を検知するシステム

従来までは、一定区間ごとに区切ったレールに対して、片側から地上に設置した装置が電気信号を送信し、反対側に設置した地上装置が当該電気信号を受信できるかどうかを判定する電気回路（軌道回路）を構築して列車の在線の有無を判断していた。電気信号の受信ができる場合には、列車が非在線であり、電気信号を受信できない場合には、列車在線である。これにより、装置が故障した場合には列車在線となり、安全側となり、フェールセーフな構成を実現している。

また、列車の検知区間の境界に設置された地上信号機が停止現示である場合に、当該信号機を列車が冒進することを防止するため、地上信号機の区間においてはATS（Automatic Train Stop：自動列車停止装置）が設備される。このATSは停止信号の冒進時に列車を停止することを主目的とする。このATSのため、地上においては、特定点に地上子が設置され、信号の現示情報が送信される。また、車内信号の区間においては、地上装置が一定区間ごとに速度照査信号を作成して、車上制御装置に対して送信し、車上制御装置が現在速度と比較を行い、超過している場合にはブレーキ制御を行うアナログATC（Automatic Train Control：自動列車制御装置）が導入されている。^{(2),(3)}

このように、基本的には、連続的な位置検知を行わない、区間単位での制御が可能な仕組みで制御可能な構成となっている。

(2) 車上制御装置において連続的な位置検知を行うシステム

更なる安全性確保のため、1987年からATS-Pのように、車上制御装置が地上に設置した地上子を検知して、当該地点から速度発電機を用いて走行距離を算出することにより、車上制御装置が列車位置を連続的に把握して停止点までの速度照査パターンに対して速度照査するシステムが大都市圏や主要幹線等に導入されている。⁽⁴⁾

また、新幹線や大都市圏においては、車内信号の区間においてもレールに送信する停止点を表す情報を車上制御装置が受信して、走行可能な地点までの速度照査パターンを作成するデジタルATCが2002年から導入されている。このシステムにおいては位置の把握に地上子を用いており、当該地点からの走行距離算出に速度発電機を用いている。^{(3),(4)}

このように、車上制御装置が速度照査パターンを作成して速度照査するシステムにおいては、基本的には速度発電機と地上子を組み合わせて位置を把握している。

(3) 連続的な位置検知を基本とするシステム

近年、世界的に導入されつつある無線を用いた列車制御システムCBTC (Communication Based Train Control)⁽¹⁾は、これまで地上装置が列車の位置を検知するために用いてきた軌道回路を使用せず、車上制御装置が速度照査パターンの作成のために用いている位置情報を、地上制御装置と車上制御装置間の無線伝送を用いて、地上制御装置に対して送信する点の特徴である。

2011年に、JR東日本仙石線において導入されたATACS (Advanced Train Administration and Communications System)⁽⁵⁾のような無線を用いた列車制御システムは、地上制御装置が制御対象エリア内の各列車の位置を把握して、各列車の停止限界を作成し、この停止限界を各列車に送信して、間隔制御が行われている。このシステムにおいては、各列車の位置は、車上制御装置が地上子からの走行距離で位置を把握することを基本としている。

このように、制御に使用する列車の位置情報は、車上制御装置での速度照査パターンでの制御に用いる位置検知結果であるので、位置情報は軌道回路での検知区間を基本とする離散的な情報ではなく、連続的な情報となる。よって、列車のより細かな列車制御が可能になり、例え

ば、列車の間隔をより狭めることが可能になる。また、固定閉そくではなく、移動閉そくが実現できる。

以上のように、車上制御装置での位置検知結果は、車上制御装置での速度照査だけでなく地上装置での間隔制御にも使用され、列車制御の安全性確保において重要な情報になってきている。しかしながら、車上位置検知のための方法としては、依然として速度発電機単体による方式が採用され、速度発電機を取り付けた軸での車輪の滑走・空転の影響を受けるため、改善が必要とされている。

2.3 列車制御システム国際規格におけるアベイラビリティ

(1) 列車制御システムの国際規格の概要

列車制御システムの安全性に関する国際規格は主に表1に示す4つがある。これらの列車制御システムに関する国際規格は、一般産業分野における機器を対象とした国際規格である IEC 61508⁽⁶⁾がベースである。これら規格の関係を図1に示す。IEC 62278 は鉄道システム全体における安全性・信頼性等を対象とする。他の3つの規格は列車制御システムを対象としておりこの規格に包含されている。

表1 列車制御システムの国際安全規格一覧

IEC 規格	内容
IEC 62278 ⁽⁷⁾	RAMS (信頼性, アベイラビリティ, 保守性, 安全性)
IEC 62279 ⁽⁸⁾	ソフトウェア
IEC 62280 ⁽⁹⁾	伝送
IEC 62425 ⁽¹⁰⁾	セーフティケース (システムの安全)

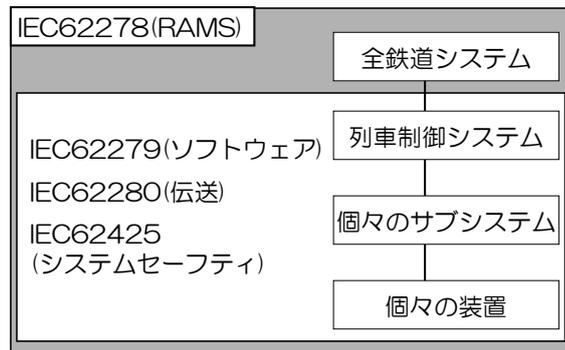


図1 列車制御システムの国際安全規格

①RAMS (IEC 62278)

RAMS は、Reliability (信頼性) Availability (可用性) Maintainability (保全性) Safety (安全性) を示す。IEC 62278 では、列車制御システムだけでなく車両や電力設備など鉄道システム全般を対象とし、RAMS を確保するためのシステムライフサイクルにおける一連のプロセスと各フェーズにおける実施内容を規定する。この規格は、全体の規格を包含する性格のもので、列車制御システム特有の要件については他の3つの規格で規定される。具体的には、RAMS の要求事項とそれらが満たされていることを明らかにすることを求め、そのために必要な実施事項、作成すべきドキュメントを14のフェーズごとに規定する(図2)。特に、安全性に関しては、対象とする装置・システムに危害あるいは影響を与える事象をハザードとして特定し、それらが内在する装置・システムの安全性を定量的に評価するリスク解析を行うことを求めている。

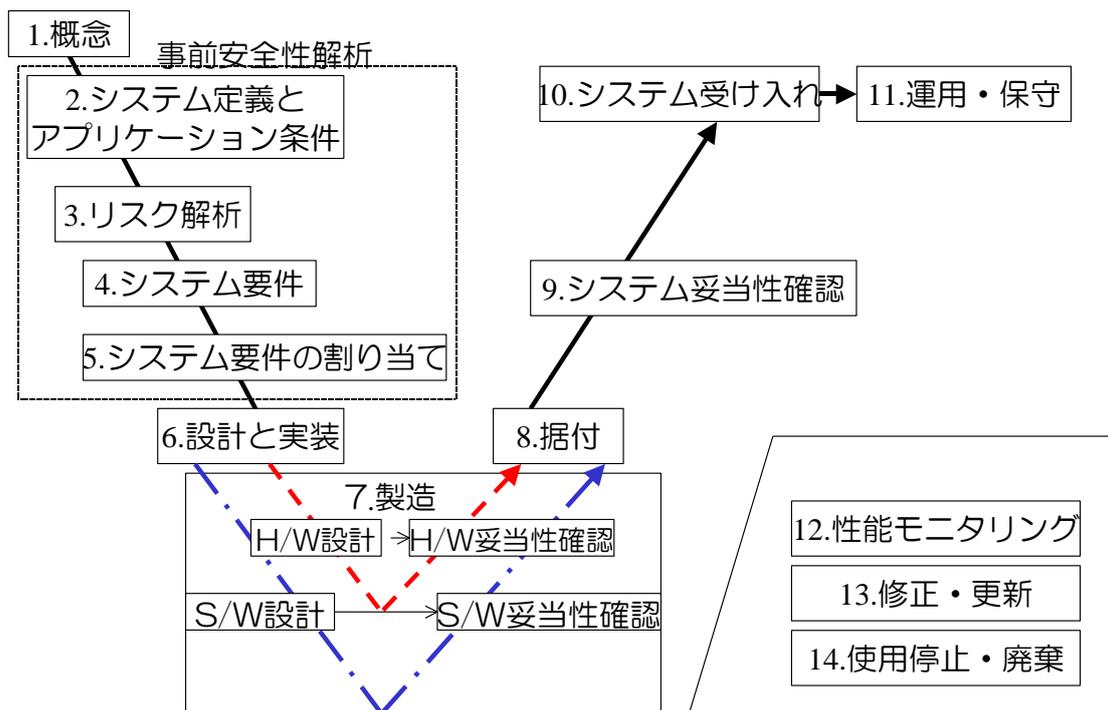


図2 RAMS ライフサイクルに示す14段階

このような考え方は、IEC 61508 によるもので、いわゆるリスクベースによる定量的なアプローチを求めている。その基礎となるリスクに対する考え方の基本的な原理として、個人レベルでの年間あたりの死亡確率をもととしたイギリスのALARPやドイツのMEMなどが例示されている。ハザード解析、リスク解析を行うことを要求しているが、数値そのものの規定はない。実際に、リスクの評価の手法として、ハザードの発生頻度と結果の厳しさについて定性的に評価する方法が例示されている。

安全性等の具体的な要件は、他の3つの規格で規定される。また、RAMSの4つの項目を対象とするが、実質的にはA（可用性）とS（安全性）が扱われる指標である。

② ソフトウェア（IEC 62279）

IEC 62279 は、列車制御システムにおけるソフトウェアの国際安全規格であり、IEC 61508 のPart3で扱っているソフトウェアに関する規格をベースとし、列車制御システムにおける条件を反映させている。本規格では、ソフトウェアのライフサイクルにおける安全性確保のため

の要求事項とその要求事項が満たされていることを明らかにするプロセスを規定する。そのために必要な方法と管理，作成すべきドキュメントのほか，安全性管理のための一連のプロセスにおける関係組織と，関係者の役割および資格などについても規定している。

③ 伝送 (IEC 62280)

IEC 62280 は，列車制御システムにおける安全関連伝送の規格である。従来からの物理的に独立した専用の有線回線 (closed transmission systems)，ならびに，無線，インターネットなどを中心とする物理的に独立になっていない伝送回線 (open transmission systems) も対象としている。列車制御システムトータルとしての安全性は，IEC 62425 で規定される。

④ セーフティケース (IEC 62425)

IEC 62425 は，列車制御システムの認可および受け入れのために必要な安全要件とそのドキュメント管理について規定したものである。本規格は，安全性に特に重点を置く列車制御システムを対象としたものであるため，安全性インテグリティレベルと許容リスクの値 (Tolerable Hazard Rate) についても表 3 のように規定している。

なお，現実的な対応として，安全性インテグリティレベルの決定方法については，特に定めていない。

表 3 SIL (安全性インテグリティレベル) と THR (危険側障害の発生確率)

SIL	THR (h ⁻¹ /機能)
4	$10^{-9} \leq \text{THR} < 10^{-8}$
3	$10^{-8} \leq \text{THR} < 10^{-7}$
2	$10^{-7} \leq \text{THR} < 10^{-6}$
1	$10^{-6} \leq \text{THR} < 10^{-5}$

(2) ハードウェア／ソフトウェアに対する安全性の数量的基準

システムに要求される安全性のレベルとしては、SIL (Safety Integrity Level : 安全度水準, 安全性インテグリティレベル) があり, 最高レベル4から最低レベル1までの4段階に分けて, システム内の各機能に設定される。安全に関わらない機能については, レベル0が用いられることもある。複数の機能が同一装置内で構築されている場合には, 最も安全性が要求される機能のSILが基準となる。SILを導入することにより, ハードウェアに関わるランダム故障と, 定量化しにくいソフトウェア等の決定論的な原因故障を関連づけて取り扱うことが可能になる。

SIL決定法として, IEC 61508 (JIS C 0508 電気・電子・プログラマブル電子安全関連系の機能安全) 第5部にリスクグラフ等が参考として示されている。リスクグラフは, リスクに関する基本的な要件である頻度, 厳しさとこれを安全系等で防護できる程度を定性的に判断してグラフを構成し, 得られたリスクの大きさに対して, インテグリティレベルを設定していくというものである。ただし, その前段階においてはシステムに内在するハザードを特定しきることが重要であり, すべての危険事象の特定を保証する手法はないが, トップダウン的なFTAとボトムアップ的なFMEAの組み合わせた手法が適用されてきている。

なお, 列車制御システムの場合には定量的な実績データが必ずしも十分ではなく, 現時点ではむずかしく, IRSE の主要列車制御システムとSILの関係を示した表⁽¹¹⁾を参考に決定する手法も現実的な手法として考えられる。運転取り扱いが国によって異なるため, SILの割り当てが異なる場合もあるが, 連動装置, 信号機, 転てつ機, 列車検知装置はレベル4との共通認識である。

(3) アベイラビリティ

近年の列車制御システムは, 地上制御装置だけでなく車上制御装置も含めて, ネットワーク接続され, また, ソフトウェアで実現される部分が大きくなっている。これらに対しては, 上述の列車制御システムに関わる国際規格で定める安全性を立証するプロセスを経るのは, システムティック故障の低減の面から一定の効果が期待できる。その意味では, 列車制御システム

に関わる国際規格が整備されているのは大きなメリットである。しかしながら、列車制御システムに要求される安全性レベルの検討においては、一見自由度があるように見えるものの、列車制御システムの危険側故障の影響度が大きく、基本的には極めて低い領域での発生頻度のみでの議論となる。また、類似機能として判断した場合、選択の余地は少ない。

その一方、アベイラビリティに関しては、線区の状態などを考慮して、システム全体の目標値を設定して、それぞれの線区ごとに応じたアベイラビリティの設定を行うことができる余地が残っている。また、アベイラビリティの算出式も定まっている。過去にはコスト面・技術面から現状で適用可能な対策を対象としてボトムアップ的に解析された例^{(12),(13)}もある。しかしながら、アベイラビリティは、本来、障害の発生頻度と障害に伴う影響度の二次元的な検討が可能であるが、これら要因を停止時間に置き換えた場合、一次元に集約されるので、対策の決定において線区の障害発生状況を考慮した対策の適用を行うことに限界がある。よって、列車制御システムを適用する線区の障害の発生頻度と障害発生後の影響を総合的に考慮して、戦略的に適用対策を決定することは難しい。

2.4 要約

本章では、本研究の背景と目的について述べた。成果の要約は以下のとおりである。

- (1) 列車制御システムにおいては、高密度の列車運転を可能とするために車上制御装置での速度照査パターンによるブレーキ制御が行われるようになり、車上制御装置での位置検知機能が重要になっている。さらに、2011年にATACS (Advanced Train Administration and Communications System) がJR 東日本 仙石線にて実用化され、首都圏への展開も予定されているほか、無線を用いた列車制御システム (CBTC : Communication Based Train Control) が海外で展開が進みつつある。このような速度照査パターンあるいは無線による列車制御システムでは、車上制御装置での列車位置検知 (以下、車上位置検知) 結果は、地上制御装置での列車追跡情報として使われるため、より重要になっている。しかしなが

ら、車上位位置検知のための方法としては、依然として速度発電機単体による方式が採用され、速度発電機を取り付けた軸での車輪の滑走・空転の影響を受けるため、改善が必要とされていることを明確にした。

- (2) 近年の列車制御システムは多数の装置がネットワーク接続され、また、ソフトウェアで実現される部分が大きくなっている。これらについては、列車制御システムに関する RAMS 国際規格 (IEC 62278) に基づいてシステムを開発すれば、システムティック誤りの低減に対して一定の効果が期待できる。この規格に定める主要な指標としては安全性 (Safety) とアベイラビリティ (Availability) の二つがあり、安全性確保に直結する列車制御システムにおける安全性レベルの選択には実質、余地はないが、輸送の安定性に関するアベイラビリティについては、列車制御システムを適用する線区の状況を考慮して対策を適用する自由度が残っている。しかしながら、アベイラビリティについては、本来、障害の発生頻度と障害に伴う影響度の二次元的な検討が可能であるが、これまで個々の装置の高信頼化などを中心とするアベイラビリティ向上のための対策検討に留まっているのが実情であることを明確にした。

以上のことに鑑み、本博士論文では、列車制御システム用途での、慣性センサと速度発電機を併用した車上位制御装置での列車位置検知手法を提案する。また、現状の鉄道信号装置を対象に障害の発生頻度と障害に伴う影響度の二成分に分けて分析するアベイラビリティ向上対策の決定法を提案する。最後に、提案するアベイラビリティ向上対策決定法を慣性センサと速度発電機を併用した車上位制御装置での列車位置検知手法に適用し、その改善策の適用効果を明確化する。

これらの検討を行うことで、列車制御システムにおいて重要な役割を担う車上位位置検知システムを新たに開発するとともに、提案するアベイラビリティ向上対策決定法の有用性を示す。

以下、

- ・慣性センサを併用した車上位位置検知システム (3章)
- ・アベイラビリティ向上対策決定法 (4章)

- ・アベイラビリティ向上対策決定法による車上位検知システムのアベイラビリティ改善策の決定（5章）
 - ・結論（6章）
- の順に述べる。

参考文献

- (1) IEEE Standard for Communications Based Train Control(CBTC) Performance and Functional Requirements, IEEE Std 1474-1, 1999.12.
- (2) 吉村寛, 吉越三郎:「信号」, 交友社, 昭和 33 年 5 月
- (3) 内外の高速鉄道技術の相違と特徴に関する調査専門委員会:「国内外における高速鉄道技術」, 電気学会, 技術報告, 2014.3
- (4) 「信号システムの進歩と発展=近年 20 年の展開と将来展望=」, 日本鉄道電気技術協会, 平成 21 年 6 月, ISBN 4-931273-98-6
- (5) 無線による列車制御システム「ATACS」の使用開始について, 東日本旅客鉄道株式会社, プレスリリース, 2011.10
- (6) IEC 61508 : Functional Safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related Systems, 2010.
- (7) IEC 62278 : Railway applications – Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS), 2002.
- (8) IEC 62279 : Railway applications – Communications, signalling and processing systems – Software for railway control and protection systems, 2015.
- (9) IEC 62280 : Railway applications – Communication, signalling and processing systems –Safety-related communication in transmission systems, 2014.
- (10) IEC 62425 : Railway applications – Safety related electronic systems for signaling, 2007.
- (11) IRSE-TC REPORT No.1.
- (12) 福田光芳, 渡辺郁夫, 寺田夏樹, 島添敏之, 奥谷民雄:「要求分析と統合的ライフサイクルコスト評価に基づいた鉄道信号システム構築手法の検討」, 電学論D, 125巻7号, pp681-690, 2005
- (13) Engineering Safety Management (The Yellow Book) Volumes 1 and 2 Fundamentals and Guidance Issue 4, Rail Safety and Standards Board, 2007.

第3章 慣性センサを併用した車上位置検知システム

3.1 はじめに

近年導入された ATACS (Advanced Train Administration and Communications System) ①のような無線を用いた列車制御システムにおける列車の間隔制御は、地上装置が各列車の車上制御装置の位置検知結果を無線伝送で受信して、各列車が走行できる範囲を決定する。このようなことから車上制御装置での位置検知結果は、車上制御装置での速度照査だけでなく地上装置での間隔制御にも使用され、列車制御の安全性確保において重要な情報である。ATACS では、システムが認識する各列車の在線範囲は先頭位置と後部位置の両方で管理している。後部位置は先頭位置から列車長分後方に算出している。また、システムが認識する列車の在線範囲が実際の列車の在線範囲を含むようにするため、想定される誤差を先頭位置は前方に、また、後部位置は後方とすることで在線範囲を拡大している②。

車上制御装置での列車位置の認識は、地上子を用いた絶対位置の特定と、当該地点からの走行距離の算出による。一般に走行距離は車軸に取り付けた速度発電機を用いて算出する③④が、速度発電機を用いた距離算出は、車輪の滑走・空転に伴う誤差が発生する。以前の研究では、速度発電機単体での距離誤差は 0.03%が得られるものの滑走・空転の頻度は 1000km 当たり 10~20 回発生し、誤差が 50m を超えるものが約 1%あり、100m を超えるものもあるとされている⑤。そのため、滑走・空転時には、車両の最大・最小の加減速度をもとに列車長を延伸する補正がなされる②。この際には車両の最大・最小加速度による推定速度で列車長の延伸を行うので誤差は大きくなりやすい。この対策としては、速度発電機を非駆動かつブレーキ力を弱めた軸に取り付けることで滑走・空転の発生頻度の低減をはかる手法が適用されている②。その結果、基本的には距離誤差は 0.5%以下の精度が得られている。しかしながら、速度発電機を非駆動かつブレーキ力を弱めた軸に取り付ける手法は、編成両数が短い場合には条件に合う軸が少ない、あるいは存在しないため適用が困難となる。

なお、研究段階のセンサとしては、最大誤差を特定できないものの絶対位置を取得できる

GPS や、滑走・空転の影響を受けないドップラーレーダを用いることで距離誤差を 0.2%程度とできる方式がある。しかし、前者は鉄道で使用する環境においてはトンネル内で衛星からの電波を受信できないことへの対策が必要であり、後者は車両への取り付け環境の制約が大きく、依然課題がある⁶⁾。

このような課題を解決する手法として、走行距離の算出に慣性センサの使用を検討している。しかし、慣性センサは、加速度と角速度を積分して距離や速度を算出するので、時間経過とともに誤差が蓄積する。航空機などで使用される高精度なセンサ⁶⁾を用いた場合には、蓄積した誤差のリセット間隔を長時間とすることができ、慣性センサ単体での使用も検討対象となる。しかし、列車制御システムへの適用は速度発電機を使用する方式から大きなコスト増を避けることへの要望が強いため、現実的ではない。そこで、より汎用的で安価な慣性センサを用いるため、常時慣性センサで距離を算出するのではなく、通常時は既設の速度発電機を使用し、滑走・空転を検知した時のみ慣性センサの加速度と角速度を併用し、地球中心での姿勢角をもとに重力加速度成分を除去して補正する距離算出方式を提案する。

以下、提案する慣性センサと速度発電機を併用した滑走・空転検知時の補正方式を述べ、現車試験で時刻管理して記録したデータによるシミュレーション解析結果をもとに提案手法の有効性を述べる。

3.2 慣性センサを併用した距離算出法

提案手法の距離算出における速度発電機での処理と慣性センサでの補正処理との切替は、相互の加速度を常時比較し、差がしきい値を超過した場合を車輪の滑走・空転状態と判断することによって行う。補正処理は、前後方向加速度の積分によるが、路線の勾配による重力加速度成分を除去するため、車両の姿勢角を算出する。距離算出方式に用いる変数は Table 1 にあげたように定義する。以下、詳細を述べる。

Table 1. Definition of variables

Variable	Description
t	Compensation duration
Ta	Threshold to detect skids or slips
Ap	Acceleration with tachometer generator
Ap_0	Acceleration with tachometer generator at $t=0$
a_x	Longitudinal acceleration with inertial sensor
a_{y0}, a_{z0}	Lateral, vertical acceleration with inertial sensor at $t=0$
A_x	Longitudinal acceleration for attitude sensing
A_{x0}, A_{y0}, A_{z0}	Longitudinal, lateral, vertical acceleration for attitude sensing at $t=0$
$\omega_x, \omega_y, \omega_z$	Roll, pitch, yaw angular velocity with inertial sensor
ω_y'	Compensated pitch angular velocity considering yaw angular velocity
ω_y''	Compensated pitch angular velocity considering yaw and roll angular velocity
ω_{z0}	Yaw angular velocity with inertial sensor at $t=0$
Ω_{z0}	Yaw angular velocity on a horizontal plane at $t=0$
θ, Ψ	Pitch, roll angle
θ_0, Ψ_0	Pitch, roll angle at $t=0$
Jp	Jerk calculated with tachometer generator
Ji	Jerk calculated with longitudinal acceleration of inertial sensor
v_0	Velocity with tachometer generator at $t=0$

3.2.1 滑走・空転検知方式

車輪の滑走・空転時の慣性センサでの距離算出と、粘着状態での速度発電機による距離算出の切替を行うため、常時相互の加速度の差を比較する。具体的には、慣性センサが検出する前後方向の加速度(a_x)と速度発電機での加速度(Ap)を比較し、その差（加速度判定値）

が一定値(Ta)を超過した場合に滑走・空転と判定する (1式)。 Ta は、誤って滑走・空転と判定することを防止するため、路線の勾配による重力加速度の変化を考慮した値とする。

$$|a_x(t) - Ap(t)| > Ta \quad \dots\dots\dots (1)$$

滑走・空転検知は、従来の速度発電機単体による速度変化でなく、慣性センサの加速度との差分での比較判定であり、早期の段階での滑走・空転検知が期待できる。

3.2.2 滑走・空転検知後の距離算出方式

(1) 補正処理

滑走・空転を検知した場合には、Fig.1 に示すように車体床面の中央に設置した慣性センサで検出した前後方向成分の加速度(a_x)をもとに速度・距離の算出 (以下、補正処理) を行う。前後方向加速度は、路線の勾配による重力加速度($G \times \sin \theta$)の影響を受ける(2式)。これを補正するために、地球中心の座標系を基準とする車両の姿勢角(θ)を算出する。この姿勢角は、まず、滑走・空転検知直前の粘着状態と推定できる地点を補正開始点と定め、そ

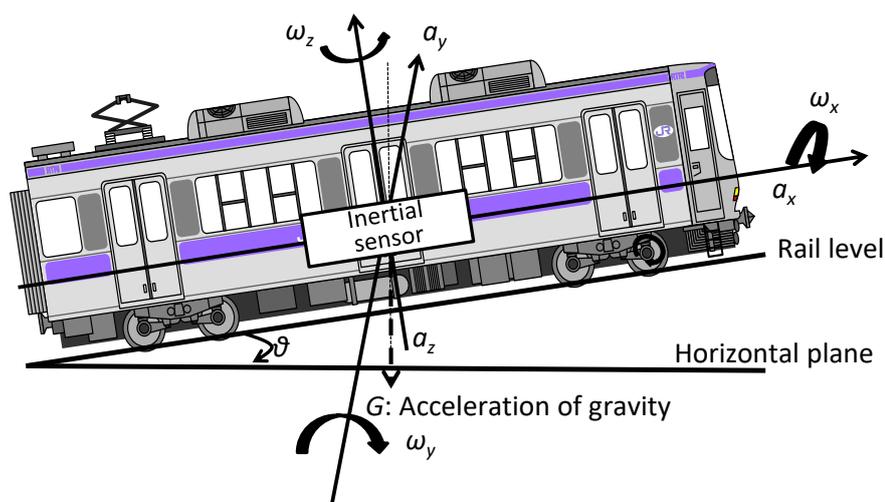


Fig.1. Inertial sensors and a tachometer generator for compensation in case of occurrence of wheel skids and slips

の地点（時刻 $t=0$ ）での初期姿勢角(θ_0)を慣性センサでの検出加速度(a_{x0})と速度発電機の加速度成分(Ap_0)との差をもとに算出する ((3)式)。なお、初期姿勢角の算出において速度発電機の加速度を用いるが、補正開始点は粘着状態であるので滑走・空転の影響はない。その状態からの姿勢角($\theta(t)$)は、慣性センサが検出したピッチ角速度(ω_y)の時間積分値をもとに、車輪が再粘着したと判定するまで算出する ((4)式)。

$$A_x(t) = a_x(t) - G \times \sin \theta(t) \dots\dots\dots (2)$$

$$\theta_0 = \arcsin\left(\frac{a_{x0}-Ap_0}{G}\right) \dots\dots\dots (3)$$

$$\theta(t) = \theta_0 + \int_0^t \omega_y(t) dt \dots\dots\dots (4)$$

(4)式に示すピッチ角速度(ω_y)は、曲線区間ではカントなどによりヨー角速度成分の影響を受ける。そこで、ピッチ角速度に対して(5)~(7)式を用いて補正する。

$$\omega'_y(t) = \omega_y(t) - (-\omega_z(t) \times \sin \Psi(t)) \dots\dots\dots (5)$$

$$\Psi(t) = \Psi_0 + \int_0^t \omega_x(t) dt \dots\dots\dots (6)$$

$$\Psi_0 = \arctan\left(\frac{-A_{y0}}{\sqrt{A_{x0}^2 + A_{z0}^2}}\right) \dots\dots\dots (7)$$

(7)式に示す A_{x0} の最大値は鉄道における最大 35%勾配にて 0.34m/s^2 (1.23km/h/s) であり、重力加速度 (9.8 m/s^2) の 3.5%程度である。よって、 A_{z0} が重力加速度に近い値が期待できる鉄道においては A_{x0} が A_{z0} に対して十分小さいと仮定すると、(7)式は(8)式で表される。

$$\Psi_0 = \arctan\left(\frac{-A_{y0}}{A_{z0}}\right) \dots\dots\dots (8)$$

また、補正開始点での姿勢角算出用の左右方向加速度 A_{y0} は、遠心力の成分の影響を受ける。よって、センサ検出値の左右方向成分の加速度(a_{y0})に対して遠心力成分を補正する ((9)式)。

$$A_{y0} = -(a_{y0} - v_0 \times \Omega_{z0} \times \cos\Psi_0) \dots \dots \dots (9)$$

ここで、ロール角度 (Ψ) は小さいと仮定すると、ヨー角速度はセンサ検出値とほぼ等しく、 $\Omega_{z0} \times \cos\Psi_0 = \omega_{z0}$ となるので、(9)式は(10)式となる。

$$A_{y0} = -(a_{y0} - v_0 \omega_{z0}) \dots \dots \dots (10)$$

よって、(8)式に(10)式を代入すると(11)式となる。

$$\Psi_0 = \arctan\left(\frac{a_{y0} - v_0 \omega_{z0}}{A_{z0}}\right) \dots \dots \dots (11)$$

(11)式に示す速度 v_0 は滑走・空転補正の適用前の速度であり、滑走・空転状態前の速度発電機のパルスで算出した速度である。 A_{z0} は鉄道における 35‰の勾配の範囲であれば慣性センサでの上下方向の加速度検出値(a_{z0})と等しいとみなすことができる。

また、ピッチ角速度(ω_y)は、姿勢角($\theta(t)$)によりロール角速度(ω_x)の影響も受ける。そこで、ピッチ角速度に対してさらに補正し、(5)式に示すピッチ角速度の補正式は最終的には(12)式とする。

$$\omega_y''(t) = \omega_y(t) + \omega_z(t) \times \sin\Psi(t) - |\omega_x(t)| \times \sin\theta(t) \dots \dots \dots (12)$$

(2) 補正開始点の選定

滑走・空転を検知した時点は、慣性センサの前後方向加速度と速度発電機で算出した速度にもとづく加速度との差がしきい値(Ta)を超過した場合であり、厳密には粘着状態ではない。この点を補正初期値とした場合には姿勢角を正しく算出できず、距離誤差が発生する。そこで、滑走・空転検知点より、さかのぼって補正開始点を設ける。この補正開始点は、

滑走・空転の影響を小さくするため、加加速度が一定値未満を条件に選定する。

具体的には、補正開始点は滑走・空転検知点からさかのぼって探索する。補正開始点の選定条件は、慣性センサの前後方向成分の加速度から算出した加加速度(Ji)の大きさが一定値未満、かつ、速度発電機から算出した加加速度(Jp)の大きさが一定値未満の状態、さらに、 Ji と Jp の変化タイミングのずれによる影響防止のため、これらの差の大きさ($|Ji-Jp|$: 加加速度判定値)が一定値未満である点とする。

なお、補正開始点は、一時的な変動で誤って確定することを防ぐため、処理周期が3回連続で条件を満たしている点とする。また、微小滑走・空転時に加加速度のしきい値未満となり、誤判定となることを軽減するため、補正開始点の探索は一定の戻り時間をさかのぼった時点から開始する。この加加速度による補正開始点の選定論理を設けることで、下り勾配での滑走時や上り勾配での空転時には慣性センサと速度発電機の加速度差による滑走・空転検知が、勾配がない区間と比較して遅れる事象を軽減でき、距離算出への影響を低減できる。

3.2.3 再粘着判定

補正処理開始後、滑走・空転検知に用いる加速度判定値 ($|a_x - Ap|$) が検知しきい値以下、かつ、速度発電機と補正速度との速度差が一定値 ($\beta m/s^2 \times t$: 補正時間) 以下の場合に再粘着と判定する。

3.2.4 想定誤差

提案手法において滑走・空転時に発生しうる距離誤差 (Δd) は、(13)式で算出できる。

$$\Delta d = \frac{1}{2} \times \Delta a \times t^2$$
$$\Delta a = \Delta a_t + \Delta a_a + G \times \sin(\Delta a_\omega \times t) + \Delta a_g$$

} (13)

t : 補正時間

Δa_t : 速度発電機誤差

Δa_a : 加速度誤差

Δa_ω : 角速度誤差

Δa_g : 勾配誤差

ヨー角速度、ロール角速度はピッチ角速度の補正に関係するが、誤差への影響は小さいので、慣性センサの出力のうち、ピッチ角速度と前後方向加速度を対象とする。

これらの誤差については、列車制御の安全余裕距離を、最大補正時間をもとに設定し、最大補正時間内に再粘着判定を正しく判定できない場合には、列車を停止することで安全を確保する。なお、これら最大誤差の見積もりは線区の勾配、使用するセンサの性能に応じて設定する。

なお、蓄積した誤差のリセットは、一定間隔で設置した地上子を検出した時に行うことを想定している。また、センサのリセットは一般的な運行における駅停車時を想定し、30分程度の間隔で補正することを想定している。

3.3 シミュレーション解析結果

提案手法の有効性を確認するため、現車試験で時刻管理して記録したデータをもとにシミュレーション解析で、想定距離誤差ならびに距離誤差を算出する。

3.3.1 データ記録方法

シミュレーション解析用のデータを記録するため、試験に用いた機器の概要を以下に述べる。

(1) 記録部

シミュレーション解析での評価のため、当該装置内で記録する 10ms 単位での慣性センサ検知結果と速度発電機出力の 100ms サンプリングの結果を記録する。Fig.2 に示すハードウ

エアは、電子連動などでも使用されているフェールセーフ処理装置（CPU：SH-4，内部クロック：150MHz，RAM：4MB，ROM：2MB）である。

（2）速度発電機

速度発電機は、既設の機器（AG20B）を使用する。取り付け軸は駆動・制動の両方が発生する第1軸である。原理は歯数（1周90歯）のカウントによる距離積算のセンサである。距離を微分して速度を算出し、さらに微分して加速度を算出するので、必然的に加速度の分解能は悪くなる。滑走・空転補正処理に用いる慣性センサの加速度と比較する際には分解能を向上させる必要があり、3秒の移動平均を適用する。3秒の移動平均は速度発電機の歯数をカウントする方式であることから分解能の向上のため適用しているが、この移動平均の適用により平均1.5秒の遅延を伴う。これについては、速度発電機の色度算出処理を歯数のカウントによる方式ではなく、歯を検知した際のパルス幅で算出する処理に変更することで分解能の向上が可能であり、移動平均時間の短縮ができ、リアルタイム性の向上が期待できる。なお、100パルスカウントを達成するまでの時間をもとに速度を算出し、1秒以内に100パルスに達しない場合は一定時間内のパルス数をもとに速度を算出し、精度を向上させている。



Fig.2. Fail-safe processing unit

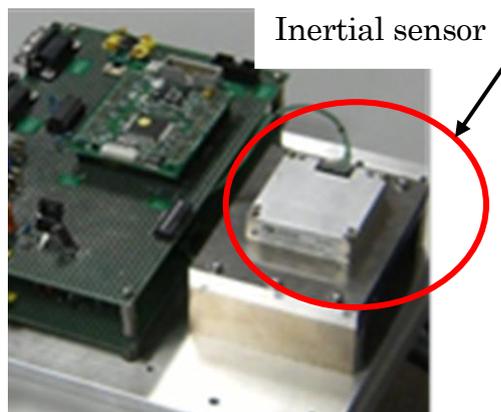


Fig.3. Inertial sensor

(3) 慣性センサ

慣性センサ (ANALOG DEVICES 製 ADIS16480, Fig.3) は加速度 (前後, 上下, 左右), 角速度 (ピッチ, ヨー, ロール) の合計 6 軸を有する。滑走・空転補正に使用するものは, 前後加速度, ピッチ角速度である。慣性センサは先頭車両に設置し, 車両内での設置位置は解析の容易化のため, 前後方向では前台車と後台車の中間, また, 左右方向では中央の車両床面とした。

慣性センサの演算結果と, 速度発電機の演算結果との同期のため, とともに 3 秒の移動平均を適用する。この移動平均を適用することで, 車両の細かい振動はキャンセルされ, 車両に起因した振動などの影響がないことを周波数解析により確認している。なお, リアルタイム性の向上のため速度発電機の加速度の分解能向上により移動平均時間を短縮する場合には, 車両に起因する振動の影響がないことを同様に確認することになる。

3.3.2 しきい値の設定

提案手法に関するしきい値を以下に示す。

①滑走・空転検知

滑走・空転検知のしきい値は, 最大勾配が $\pm 35\%$ に相当する $\pm 0.34\text{m/s}^2$ ($\pm 1.23\text{km/h/s}$) と

し、3 処理周期（100ms×3 回）連続して超過時に検知とする。このしきい値は線区の最大勾配に合わせて設定することも可能であるが、ここでの検知しきい値は線区に依存しない一律の値とした。

②加加速度のしきい値

補正開始点の選定に関わる加加速度のしきい値は各センサの実測値から以下とした。

$$|j_p| \text{ (速度発電機での加加速度)} < 0.42\text{m/s}^3(0.15\text{km/h/s/0.1s})$$

$$|j_i| \text{ (慣性センサでの加加速度)} < 0.28\text{m/s}^3(0.1\text{km/h/s/0.1s})$$

$$|j_i - j_p| < 0.14\text{m/s}^3(0.05\text{km/h/s/0.1s})$$

いずれの条件も 3 処理周期（100ms×3 回）連続することで確定とした。

微小滑走・空転時に加加速度のしきい値未満となり、誤判定となることを軽減するため、補正開始点の探索は一定の戻り時間をさかのぼった時点から開始するが、この値は 2.1 秒とした。この値を設けても加加速度を用いた判定の有効性確認に大きく影響することはないことは確認している。

③再粘着判定

再粘着の判定は、滑走・空転判定値が検知しきい値 $\pm 0.34\text{m/s}^2$ （ $\pm 1.23\text{km/h/s}$ ）以内を連続して 3 処理周期満たし、かつ、速度発電機のパルス（速度パルス）と補正速度との速度差が一定値以内（ 0.056m/s^2 （ 0.2km/h/s ）×補正時間）を満たした時点とする。

3.3.3 想定距離誤差

3.2.4 項に示す距離誤差の最大値については、本試験構成においては以下となる。

①速度発電機誤差（ Δa_t ）

本評価に用いた速度発電機の加速度の分解能は、走行試験の結果から等速走行時において 3 秒移動平均適用後 0.042m/s^2 （ 0.15km/h/s ）程度である。よって、誤差は 0.021m/s^2

(0.075km/h/s) となる。

②加速度誤差 (Δa_a)

センサ単体での定置試験を 3 時間実施した結果、処理周期に相当する 100ms 単位での平均値に対して 3 秒の移動平均を適用した場合、3 時間の最大と最小の差は 0.015m/s^2 (0.053km/h/s) である。

③角速度誤差 (Δa_ω)

センサ単体での定置試験を 3 時間実施した結果、処理周期に相当する 100ms 単位での平均値に対して 3 秒の移動平均を適用した場合、3 時間の最大と最小の差は 0.025deg/s である。なお、 0.025deg は重力加速度の進行方向加速度成分 0.0042m/s^2 (0.015km/h/s) に相当する。

④勾配誤差 (Δa_g)

補正開始点の選定においては、加加速度を用いた判定を実施するものの、微小滑走・空転による影響を考慮し、勾配変化の値が誤差となる。勾配の最大値 35%では 0.34m/s^2 (1.23km/h/s) となり、例えば、勾配 16%の場合は 0.16m/s^2 (0.56km/h/s) となる。

上述の誤差を考慮した発生しうる距離誤差を Fig.4 に示す。Fig.4 には、すべての誤差を含む場合 (太破線)、勾配誤差がない場合 (太一点鎖線)、勾配と速度発電機誤差がない場合 (太実線) の 3 種類を示した。また、滑走・空転補正時間は短時間を想定しており、この補正時間内に上述の角速度誤差の値まで達するとは考えにくいので、参考として角速度誤差を 1/10 した値 (0.0025deg/s) も、それぞれ細線で示した。これは、地球の自転が 15deg/h (0.0042deg/s) と同じオーダである。なお、誤差は正負両側に発生する可能性があるため、0 を中心に線対称となっている。また、通常運用時の走行において約 90%が 10 秒以下の滑りであるとの報告⁷⁾を参考に、補正開始点から再粘着点までの補正時間を 10 秒と仮定している。

勾配 16%での誤差 $\pm (\Delta a_g + \Delta a_t + \Delta a_a + \Delta a_\omega)$ は Fig.4 中の太破線で示すように $\pm 11.8\text{m}$ であ

り、勾配誤差 (Δa_g) が無い場合 $\pm (\Delta a_t + \Delta a_a + \Delta a_\omega)$ は Fig.4 中の太一点鎖線で示すように $\pm 3.9\text{m}$ である。

角速度の誤差を 1/10 とした場合、勾配 16‰ での誤差 $\pm (\Delta a_g + \Delta a_t + \Delta a_a + 0.1 \times \Delta a_\omega)$ は Fig.4 中の細破線で示すように $\pm 9.8\text{m}$ となり、勾配誤差 (Δa_g) が無い場合 $\pm (\Delta a_t + \Delta a_a + 0.1 \times \Delta a_\omega)$ は Fig.4 中の細一点鎖線で示すように $\pm 2.0\text{m}$ となる。

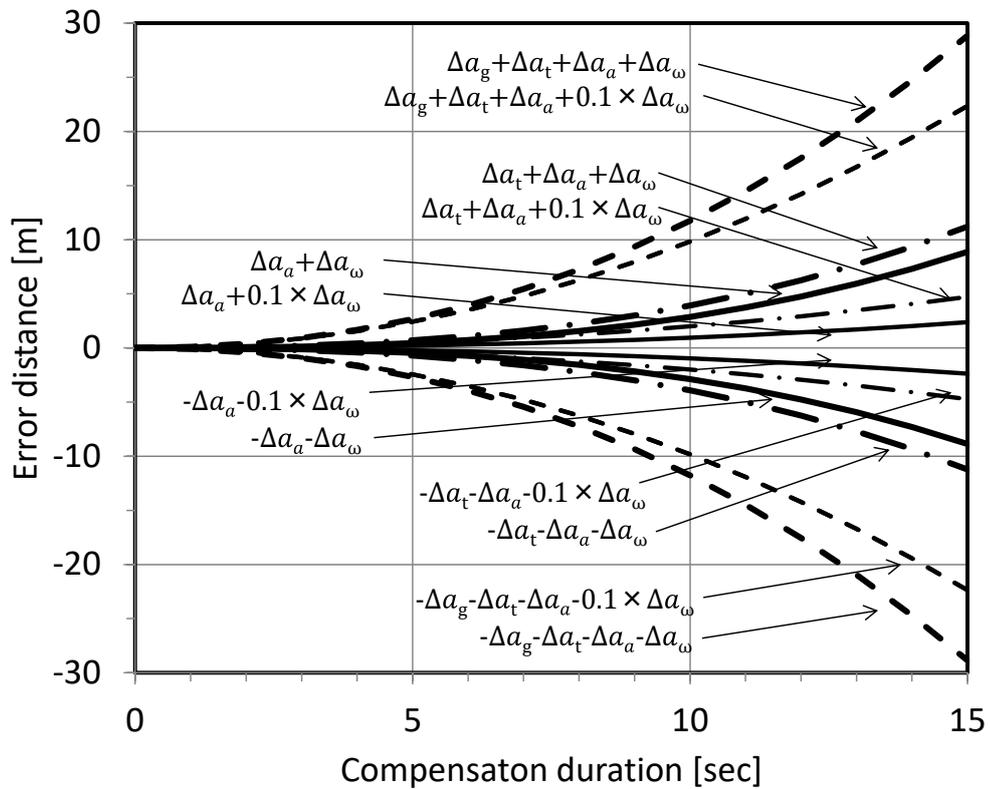


Fig.4. Estimated error distance based on compensation duration in case of $\pm 16\text{‰}$

3.3.4 距離誤差

3両編成の在来線用車両を用いて、Table 2 に示す線区を 9 往復走行した。通常走行では滑走・空転が発生しにくいことから試験では散水を行い滑走・空転を発生させた。この現車試験で記録したデータをもとにシミュレーション解析により距離誤差を算出した。

Table 2. Outline of a test line

Line length	About 14.5km (Double track)
Gradients	+15.9‰~-14.2‰ (Outbound train) 14.2‰~-15.9‰ (Inbound train)
Maximum speed	27.8m/s (100km/h)

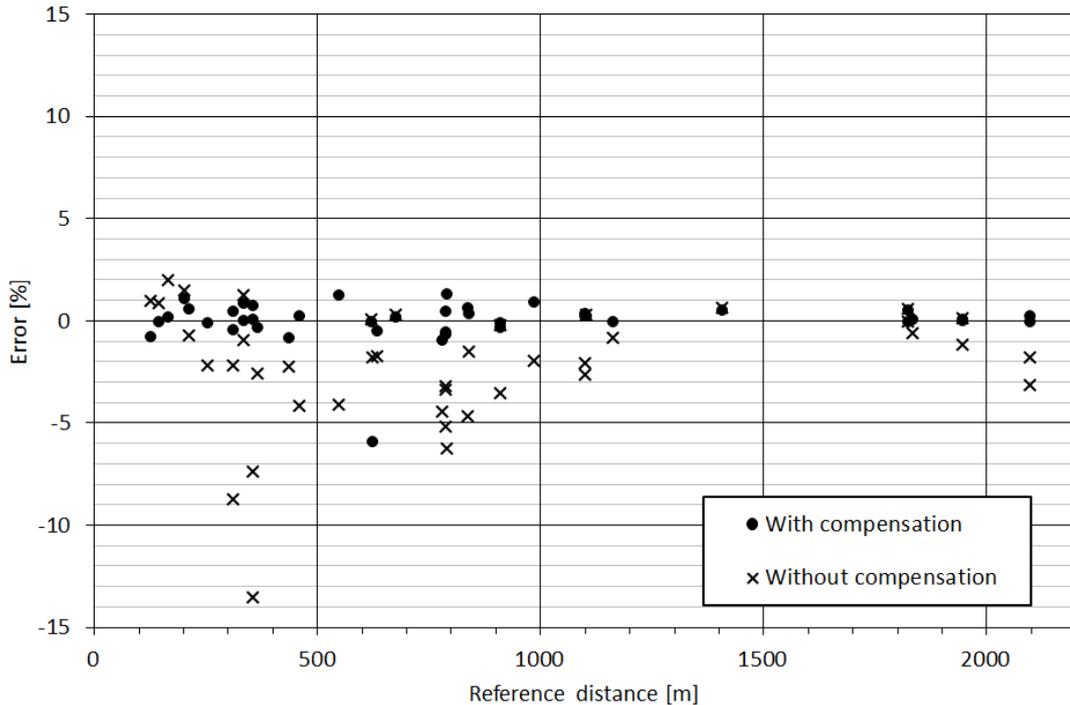


Fig.5. Error based on reference distance in case of occurrence of wheel skids and slips

地点間距離を基準とした滑走・空転時の距離誤差を Fig.5 に示す。地点間距離は、滑走・空転のない状態で走行した時の地上子間距離にもとづく。地上子検知時の信号の立ち上がりから次の地上子検知時の信号の立ち上がりまでに走行した距離である。誤差率は（計測距離－地上子間距離）／地上子間距離×100 で算出した。計測距離は、補正開始から再粘着判定までの補正速度の 100ms 単位での台形積分距離と当該区間内のパルス数による速度の時間積分との差を補正距離とし、滑走・空転時の地上子間のパルス数に加算して算出した。

滑走・空転補正処理は全部で 51 件あるが、このうち 2 件は、3.2.2 項に示す手法で選定した補正開始点では再粘着判定をできないことから、補正開始点をさらにさかのぼって同様に選定することとし、3 つ目もしくは 6 つ目での再粘着判定可能な補正開始点を選定した。

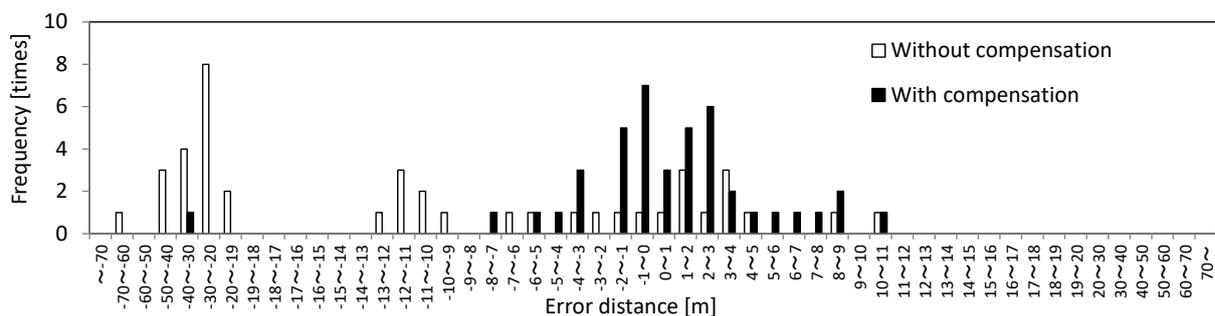


Fig.6. A histogram of error distance based on the reference one in case of occurrence of wheel skids and slips

この選定は、複数箇所の補正開始点に対して同時に補正処理を行い、先に再粘着判定した方を採用する処理を適用すればリアルタイム処理が可能である。なお、補正開始点として選定した箇所からの補正である限りは、再粘着判定時に一時的な変動はあるものの、補正に用いる距離のばらつきは想定誤差の範囲内にとどまる。

地上子間距離を基準とした誤差は、勾配と曲線が組み合わさった箇所を含んだ場合においても、その最大値は Fig.5 に示すように基本的には±2%程度、絶対量では Fig.6 に示すように約±10m 程度である。補正後の誤差が上記を超過するのは-6%（絶対量で約 37m）の 1 箇所のみである。この箇所についても、補正開始点を 1 つさかのぼった 2 つ目とすることで誤差が 0%となり、上述の複数箇所の補正開始点に対して同時に補正処理を行うことで改善可能である。

なお、滑走・空転の事例において、速度発電機の検知速度の精度が悪くなると言われている 1.4m/s（5km/h）以下⁽⁵⁾となる箇所はなく、本提案方式に影響を与えていないことは確認している。この低速処理については、従来と同等の性能である。

3.4 提案手法の評価

3.4.1 評価項目

提案手法の評価は、3.2 節に示す処理順序を考慮し滑走・空転検知、滑走・空転時の距離

補正，再粘着判定に関して行う。各評価項目を以下に示す。

(1) 滑走・空転検知

滑走・空転検知のしきい値である慣性センサでの前後加速度 (a_x) と速度発電機での加速度 (Ap) との差 ($a_x - Ap$) がしきい値を超過したことで滑走・空転検知できることを確認する。勾配がない区間と比較して，滑走・空転を検知しにくくなる勾配区間においても，滑走・空転検知が可能であることを確認する。

(2) 滑走・空転時の距離補正

勾配や曲線がある区間において，滑走・空転発生時に補正開始点が適切に選定されていること，また，補正処理ならびに距離誤差を確認する。

(3) 再粘着判定

再粘着判定の評価は，補正後に再粘着判定条件を満たし，速度発電機の処理に移行することを確認する。これらについては，前項(2)の滑走・空転時の距離補正結果を算出するためには，再粘着判定している必要があり，当該項にて再粘着判定の可否も含めて評価する。よって，再粘着判定できない可能性について評価する。

3.4.2 評価結果

前項 3.4.1 で述べた評価項目について以下に述べる。

(1) 滑走・空転検知の評価

勾配が無い箇所で車輪が滑走した場合の例を Fig.7 に示す。滑走・空転判定値となる慣性センサでの加速度と速度発電機での加速度の差 ($a_x - Ap$) が滑走・空転検知のしきい値（最大勾配が±35%に相当する±0.34m/s²（±1.23km/h/s））を超過した場合に滑走検知する。また，Fig.8 に下り勾配区間 (-7.6%) における滑走例を示す。勾配の大きさは，列車進行方向

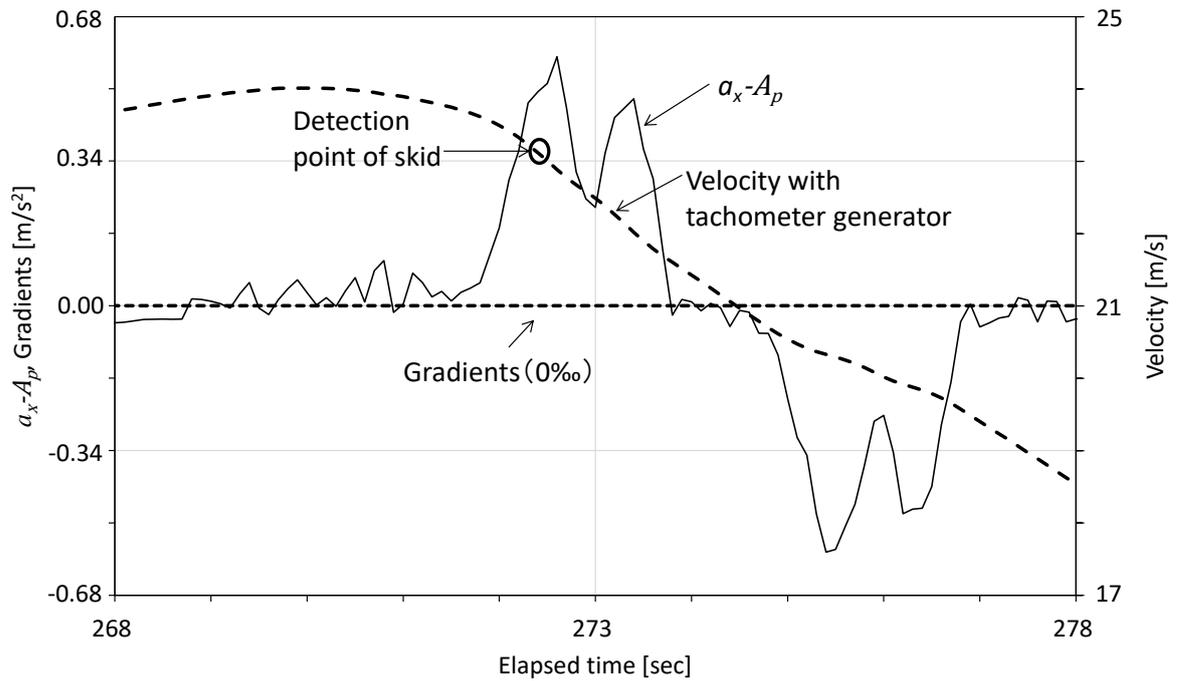


Fig.7. A detection point in case of occurrence of wheel skids in a section without gradients

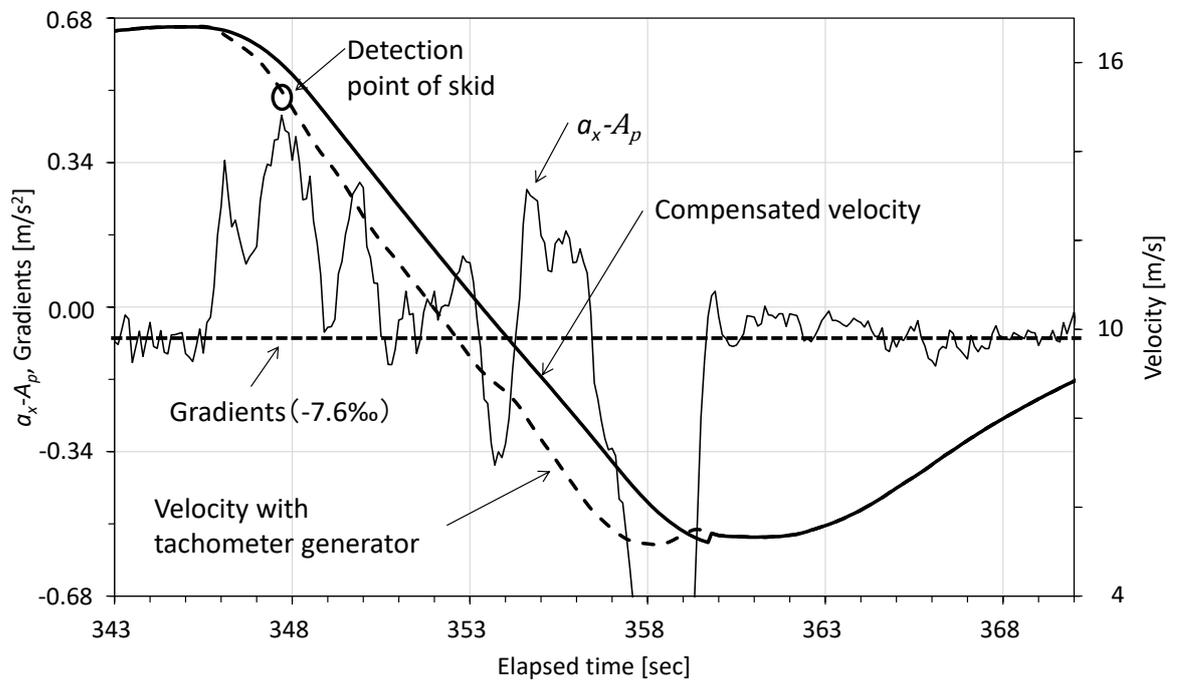


Fig.8. A detection point in case of occurrence of wheel skids in a section with gradients

の重力加速度成分に換算して記載している。滑走・空転検知の判定は慣性センサの進行方向加速度が下り勾配に相当する重力加速度成分 (-0.075m/s^2 (-0.27km/h/s)) の影響を受ける

が、勾配の無い箇所と同様に滑走・空転検知のしきい値にもとづき滑走検知が可能である。

(2) 滑走・空転時の距離補正の評価

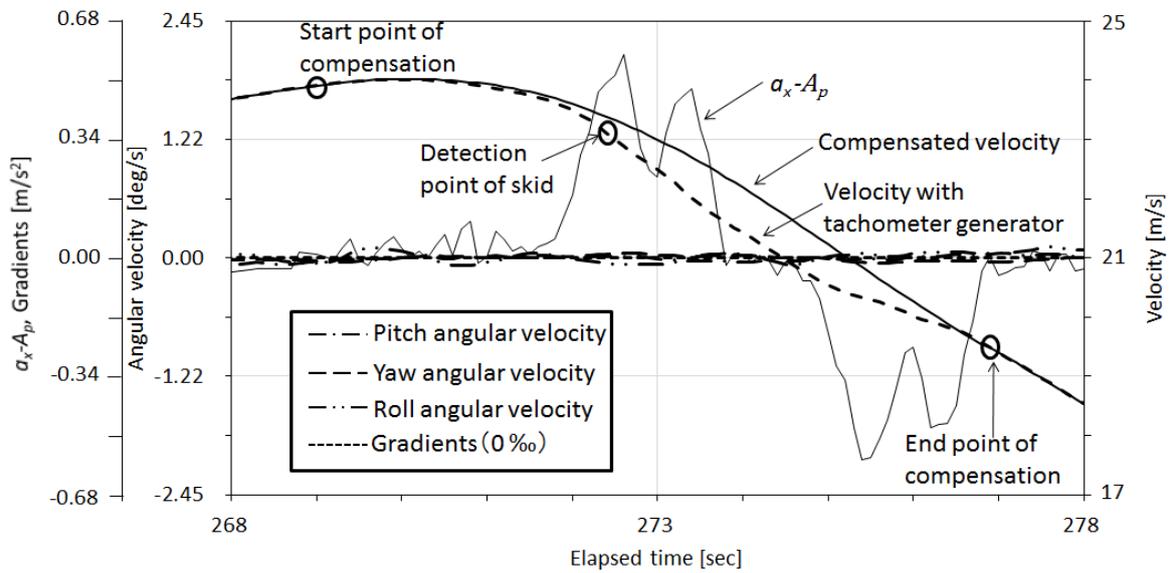
①補正開始点の選定

勾配がない区間での滑走補正例を Fig.9(a),(b)に示す。Fig.9(b)に示すように、滑走検知後にさかのぼって加加速度判定 ($|j_p| < 0.42\text{m/s}^3$ (0.15km/h/s/0.1s), $|j_l| < 0.28\text{m/s}^3$ (0.1km/h/s/0.1s), $|j_i-j_p| < 0.14\text{m/s}^3$ (0.05km/h/s/0.1s)) を行うことで、慣性センサでの加速度と速度発電機での加速度の差 ($a_x - Ap$) が勾配 (0%) に伴う加速度に近い箇所を補正開始点として選定されていることが確認できる。なお、微小滑走時に加加速度のしきい値未満となり、誤判定となることを軽減するため、あらかじめ滑走・空転検知後 2.5 秒さかのぼってから補正開始点を選定している。

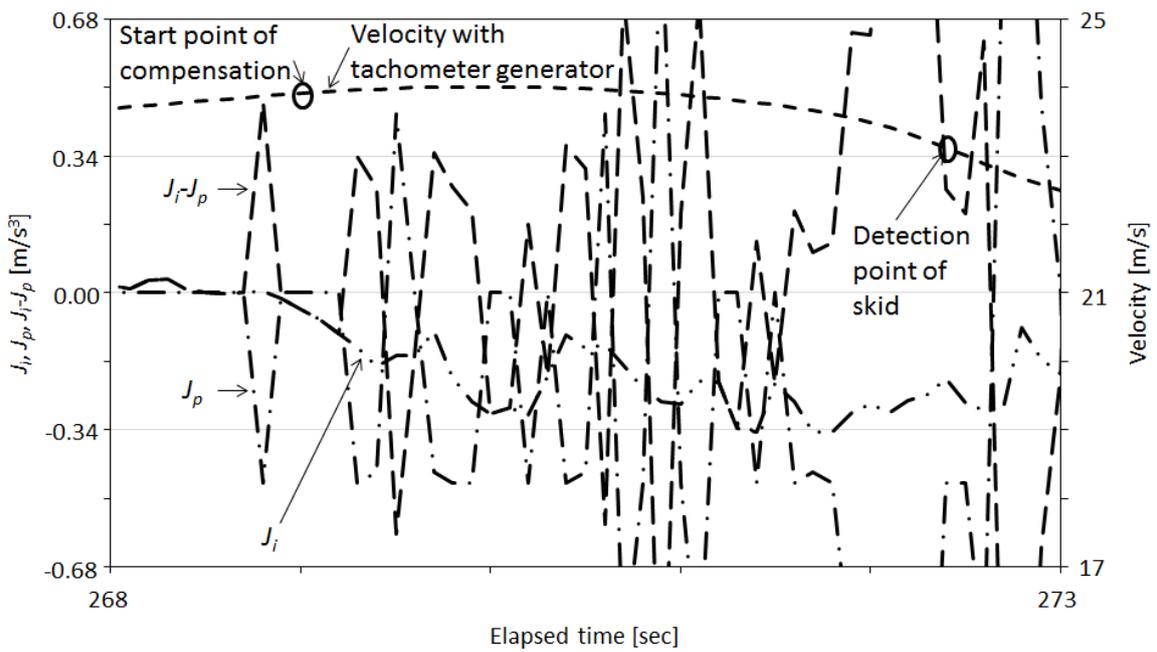
勾配 (-7.6%) 区間での滑走時の補正例を Fig.10 に示す。勾配の大きさは、列車進行方向の重力加速度成分に換算して記載している。慣性センサでの加速度と速度発電機での加速度の差 ($a_x - Ap$) が勾配 (-7.6%) に伴う加速度に近い箇所を補正開始点として選定していることから、勾配の有無にかかわらず補正開始点は適切に選定されていることが確認できる。

②補正処理

補正処理中に勾配が 0%から-10%に変化し、また、曲線半径 400m の箇所を通過する場合における補正結果を Fig.11 に示す。勾配の大きさは、列車進行方向の重力加速度成分に換算して記載している。ヨー角速度やロール角速度が大きく変化する場合には、ピッチ角速度に対する補正を行わない計測値と進行方向加速度での補正では正しく再粘着判定できない。一方、6 軸を用いたピッチ角速度を補正した場合は再粘着判定可能である。このように、提案手法を採用することで、勾配の有無、曲線の有無にかかわらず、補正開始点を選定し、再粘着判定可能であることを、滑走・空転の 51 件に対して確認している。



(a) A compensation result



(b) J_i , J_p and J_i-J_p

Fig.9. A compensation result and J_i , J_p , J_i-J_p in case of occurrence of wheel skids in a section without gradients

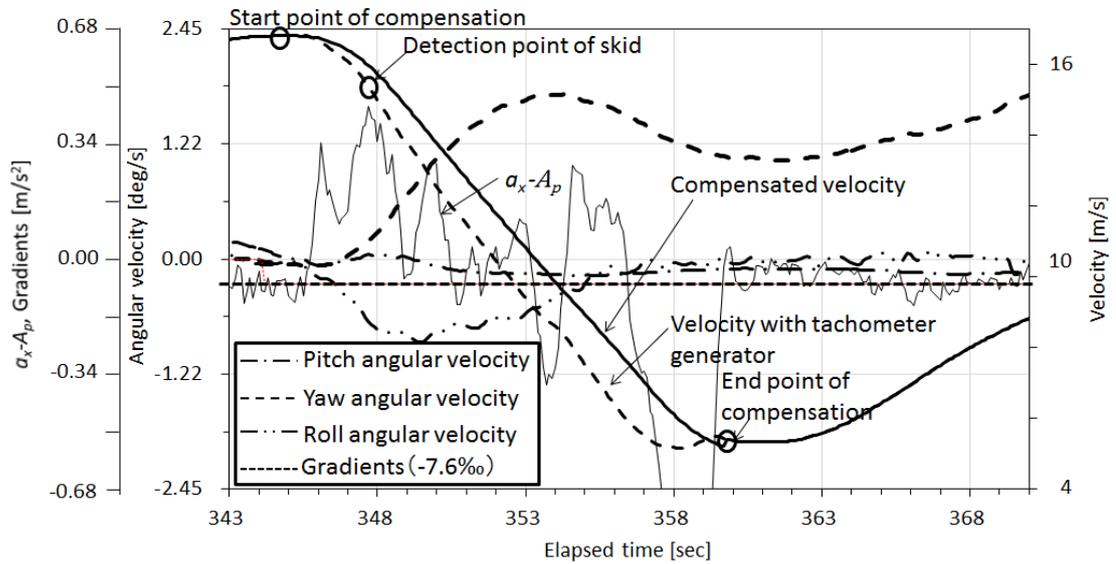


Fig.10. A compensation result in case of occurrence of wheel skids in a section with gradients

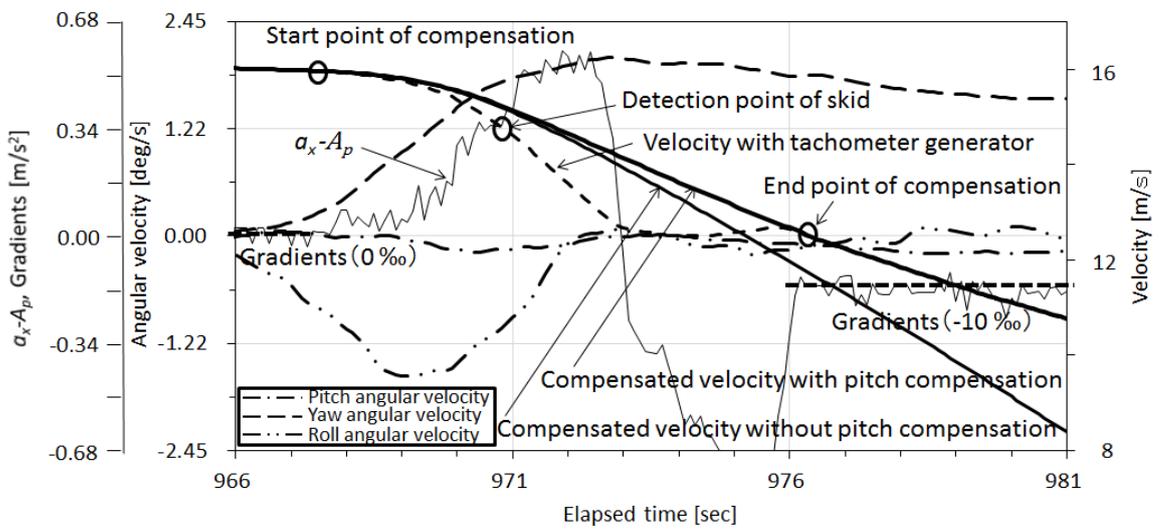


Fig.11. A compensation results in case of occurrence of wheel skids in a section with gradients and curves

③距離誤差

地上子間距離にもとづく誤差は、Fig.12 に示すように基本的には 3.3.3 項に示した、線区勾配を考慮した想定する距離誤差内である。

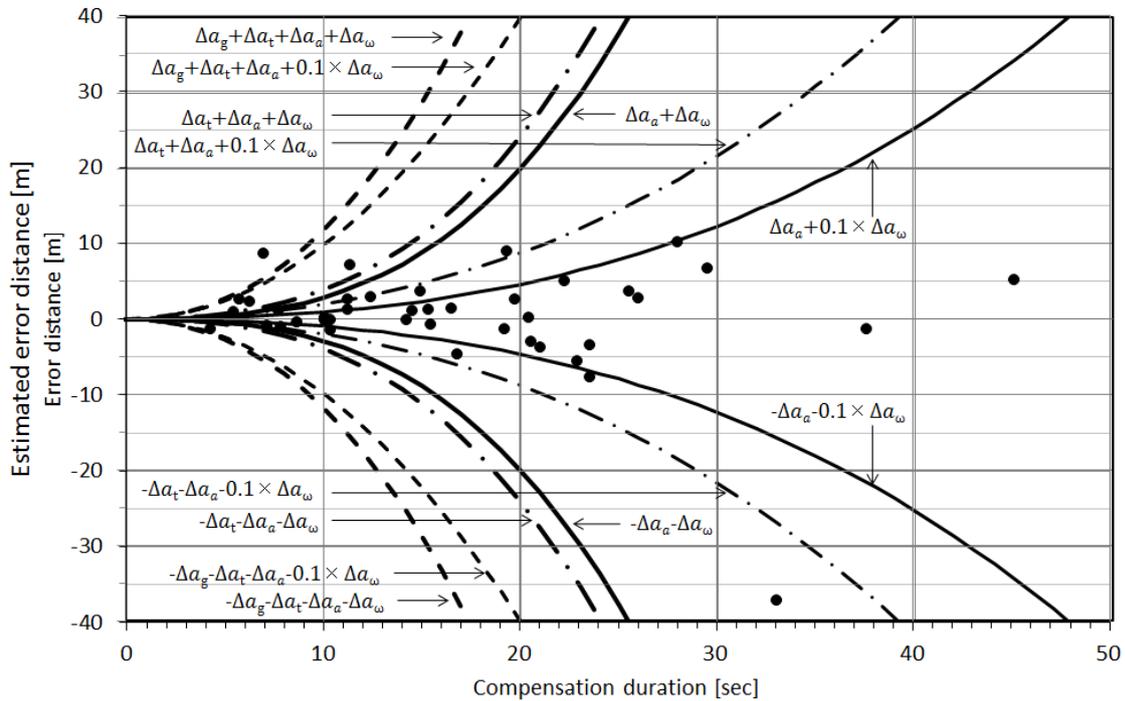


Fig.12. Error distance and compensation duration in case of occurrence of wheel skids and slips, where estimated error distance is based on Fig.4

補正時間が7秒の箇所において約9mの誤差となり想定誤差を超過するが、これは空転検知しきい値以下の微小な空転が要因として考えられる。これについては、提案手法での滑走・空転検知しきい値の大きさは従来の最大最小加減速度方式と比べて小さくできるものの、検知しきい値以下での微小な滑走・空転に起因する誤差であることから、数m程度の余裕を加算して対応する。このような微小な滑走・空転に対する具体的な余裕値は走行実績にもとづき設定することになる。

なお、3.3.4項に示した、誤差が約37mとなる箇所についても想定誤差以内である。

(3) 再粘着判定の評価

再粘着については補正時間が長くなる場合、センサ誤差の蓄積により、速度に関する再粘着判定条件を満たさなくなる可能性がある。この速度に関する再粘着判定条件を満たす範囲につ

いては、3.3.2 項③の再粘着判定のしきい値 (0.056m/s^2 (0.2km/h/s) \times 補正時間) である。この場合におけるセンサに対する誤差の許容値は 0.056m/s^2 (0.2km/h/s) と考えることができる。この誤差の要因としては、速度発電機の加速度分解能に伴う誤差、慣性センサの加速度誤差、ならびに、慣性センサの角速度誤差があげられる。これらの内、速度発電機の加速度と慣性センサの加速度の値は瞬時の値を使用するが、慣性センサの角速度の値については時間積分して角度に換算して使用する。その結果、補正時間が長い場合には角速度誤差が蓄積して、上述の誤差の許容値 0.056m/s^2 (0.2km/h/s) を超過する可能性があり、補正可能な時間には最大値がある。この角速度に対する誤差許容値は、再粘着判定時のセンサ誤差の許容値 (0.056m/s^2 (0.2km/h/s)) から、速度発電機の加速度と慣性センサの加速度を差し引いた値に相当する。以下、この補正時間の最大値を、角速度誤差は補正時間に比例すると仮定して算出する。

3.3.3 項で述べたように、速度発電機の分解能が 0.042m/s^2 (0.15km/h/s) であり 0.021m/s^2 (0.075km/h/s) 程度の誤差、また慣性センサの加速度誤差が 0.015m/s^2 (0.053km/h/s) である。これらの値から、角速度誤差の最大許容値は 0.02m/s^2 (0.072km/h/s) となることから、ここでは慣性センサの角速度誤差の許容値は 0.014m/s^2 (0.05km/h/s) 程度とする。一方、慣性センサの角速度誤差 (Δa_ω) は 0.025deg/s (進行方向加速度成分 0.0042m/s^2 (0.015km/h/s) 相当) であることから、角速度誤差の許容値を超過するのに要する時間は Δa_ω が補正時間に比例すると仮定した場合には 3 秒となり、また 3.3.3 項と同様に $0.1 \times \Delta a_\omega$ を想定した場合は 32 秒となるので、補正可能な時間の最大値は 3 秒から 32 秒の範囲となる。現車試験での距離誤差の実績値 (Fig.12) においては、発生した誤差が基本的には速度発電機誤差と加速度誤差と角速度誤差の 1/10 ($\Delta a_t + \Delta a_a + 0.1 \times \Delta a_\omega$) の曲線内であることから、角速度誤差は $0.1 \times \Delta a_\omega$ の程度であり、補正時間は 32 秒まで対応可能である。

この補正時間 32 秒を超過する 3 箇所のうち 2 箇所 (37.7 秒, 45.2 秒) は、距離誤差の算出のため地上子間での複数の滑走・空転を合計したことに起因したものである。残り 1 箇所の 33.1 秒の箇所は 3.3.4 項で述べた誤差 37m となる箇所であり、補正開始点を 1 つさかのぼった 2 つ目とすることで補正時間は 16.5 秒となり、前述の複数箇所の補正開始点に対して同時に補正処理を行うことで改善可能である。このようなことから、対応する必要が

ある補正時間は Fig.12 に示す 29.6 秒以下の箇所であり，最大 30 秒程度と見なすことができる。

よって，角速度誤差を考慮した最大補正時間（32 秒程度）に対して，補正時間は最大 30 秒程度であることから，角速度誤差に伴い再粘着判定ができない事象が発生する可能性は小さいと考える。

3.4.3 従来手法との相違

慣性センサと速度発電機を併用する提案手法と，速度発電機のみを用いる従来手法との相違について，以下に述べる。

(1) 滑走・空転検知の評価

速度発電機のみを用いて滑走・空転検知する場合には，列車の加減速と滑走・空転の区別を確実にを行うため，勾配のない水平箇所における列車の加減速度（加速度 $0.58\sim 0.92\text{m/s}^2$ ($2.1\sim 3.3\text{km/h/s}$)，減速度 $0.97\sim 1.4\text{m/s}^2$ ($3.5\sim 5.2\text{km/h/s}$))⁽⁸⁾ならびに勾配箇所の走行での重力加速度成分（35%では 0.34m/s^2 (1.23km/h/s))を考慮した滑走・空転の検知しきい値とする必要がある。

一方の提案手法は，慣性センサの加速度と速度発電機の加速度を比較するので，列車の加減速度をしきい値に含む必要がなく，勾配とセンサ誤差のみを考慮したしきい値設定でよい。センサ誤差は列車の加減速度と比較して約 1 桁程度小さく，提案手法は早期の滑走・空転検知が可能である。

(2) 滑走・空転時の距離補正の評価

滑走・空転検知時の距離補正には，最大最小加減速度を用いた補正の方式がある⁽⁵⁾。これは補正後の列車位置が真の列車位置となるようにするもので，列車位置を前部と後部に分けて管理し，滑走時には前部位置は線路勾配を加味した最小の減速度（惰行を含む）とし後部位置は最大の減速度で算出する。また，空転時には前部位置は最大加速度，後部位置

は最小の加速度（惰行を含む）で走行したものとして補正する。この方式は近年導入された ATACS にも適用されている⁽²⁾。

提案手法も、センサ誤差・勾配誤差をもとに発生しうる誤差を見積もる点は同じである。ただし、提案手法では、最大最小加減速度ではなく、センサ誤差と線区の最大勾配で見積もることで距離補正の誤差を小さくできる点で優れている。以下、その詳細を述べる。

①補正開始点の選定

最大最小加減速度方式は、滑走・空転検知点からの補正であり、補正開始点の選定はしていないので、列車の加減速度（加速度 $0.58\sim 0.92\text{m/s}^2$ ($2.1\sim 3.3\text{km/h/s}$), 減速度 $0.97\sim 1.4\text{m/s}^2$ ($3.5\sim 5.2\text{km/h/s}$))⁽⁸⁾を考慮した滑走・空転検知しきい値に伴う補正距離誤差が生じる。一方の提案手法の滑走・空転検知しきい値は、勾配を考慮した 0.34m/s^2 (1.23km/h/s) と小さい。また、補正処理は滑走・空転の検知点からではなく補正開始点を選定して実施していることから、本提案手法は加減速度情報に基づき算出した補正のための距離のばらつきを滑走・空転検知しきい値による距離のばらつき以下まで低減でき、距離誤差を低減できる。

②補正処理

最大最小加減速度方式の場合、列車の最大最小加減速度分と勾配に伴う加速度が誤差となる。一方の提案手法ではセンサ誤差と勾配に伴う加速度が誤差となる。よって主な相違は列車の加減速度となる。例えば滑走時の誤差は列車の最大減速度が 1.4m/s^2 (5.2km/h/s) の場合は、補正時間を 10 秒と仮定すると 72m となり、空転時の誤差は列車の最大加速度が 0.92m/s^2 (3.3km/h/s) の場合は、補正時間を 10 秒と仮定すると 46m となる。提案手法はこれらの誤差を考慮する必要がなく、距離誤差を低減できる。

③距離誤差

①、②で述べた理由から、最大最小加減速度方式と比較して提案手法は距離誤差を低減することができる。しかしながら、列車制御システムに適用するためには安全性確保のため最

悪値での検討も必要となる。そこで安全余裕距離について比較する。

最大最小加減速度方式の場合、滑走・空転発生後の補正時にとりうる加減速度を考慮した余裕を含めて補正するので、補正時間に応じた余裕距離を設定する。一方の提案手法では滑走・空転の有無にかかわらず常に想定距離誤差を予め設定している。これは、滑走・空転補正処理のため慣性センサを使用するので、この誤差を考慮した安全余裕距離を予め確保しておかなければ再粘着判定に失敗した時に、必要となるブレーキ距離を確保できないことによる。以下、安全余裕距離の面からの距離誤差の相違を述べる。

まず、最大最小加減速度方式における、想定する距離誤差の値の大きさは、仮に提案手法と同じく 3.4.2 項（3）で想定した補正時間が 32 秒継続する場合、車両性能に伴う加減速度分に起因した距離誤差は、最大減速度が 1.4m/s^2 (5.2km/h/s) では 740m となり、最大加速度が 0.92m/s^2 (3.3km/h/s) では 469m となり、これらの距離誤差を考慮した在線範囲とする必要がある。実際にはさらに勾配分の重力加速度成分による距離誤差を在線範囲として考慮する必要がある。

一方、提案手法における想定距離誤差は、3.4.2 項（3）で想定した 32 秒を最大補正時間とした場合、 $\pm 105\text{m}$ （勾配 16‰、角速度センサ誤差が $0.1 \times \Delta a_\omega$ の時）となる。また、安全余裕であるので角速度誤差を厳しく見積もった場合（勾配 16‰、角速度センサ誤差が Δa_ω の時）は $\pm 169\text{m}$ である。

このように、提案手法は最大最小加減速度方式と比較して、補正時間が大きい滑走・空転時において在線範囲を狭めることができる点において優れている。

なお、想定する距離誤差の設定方法の相違については、最大最小加減速度方式が発生時に補正時間に応じて余裕距離を増やすのに対して、提案手法では再粘着判定できない可能性を想定した最大補正時間に応じた距離誤差をあらかじめ安全余裕距離として常時設定する点が異なる。

この安全余裕距離を常時設けるに伴う影響の一つとしては、制御対象の列車長が線路有効長を超過する点があげられる。すなわち、例えば単線区間の駅部における列車の行き違いができなくなる。これについては、基本的には線区ごとの線路有効長から列車長を差し引いて最大設定可能な安全余裕距離を算出し、これを満たすことができる以下に示す勾配値と最大補正

時間を設定する手順で対応する。以下、提案手法の適用可能性の検討のため、短編成車両（1両）を例に、安全余裕距離の設定に伴う影響を述べる。

例えば、勾配 16‰の箇所においては、±169m の安全余裕距離（1 車両が 20m の場合には 17 両相当）となるので、実際の編成長（1 両）を加算した列車長（以下、制御対象列車長）は 18 両となる。そこで、全線にわたってこの勾配 16‰を考慮した 18 両の線路有効長を確保することが難しい場合には、勾配の大きさに応じて区間ごとに安全余裕距離を設定する。このようにすることで、線路有効長の制約から安全余裕距離を大きく伸ばすことができない駅付近においても、駅の勾配は基本的には小さいことから安全余裕距離を削減できる。駅の勾配が 0‰の場合には、安全余裕距離は±88m（1 車両が 20m の場合には 9 両相当）で、実際の編成長（1 両）を加算した制御対象列車長は 10 両となり、勾配 16‰を考慮した場合と比較して約 45%低減できる。

また、さらに線路有効長が短い線区において、安全余裕距離を短くする必要がある場合には、最大補正時間を削減して対応する。例えば、最大補正時間を 32 秒としているが、12 秒削減した 20 秒に設定することで、安全余裕距離を±24.2m（1 両が 20m の場合には 3 両相当）まで削減可能となり、実際の編成長（1 両）を加算した制御対象列車長を 4 両まで短縮できる。補正時間を削減した場合には、滑走・空転時に最大補正時間を超過する可能性はあるものの、通常運用時の走行において約 90%が 10 秒以下の滑り⁽⁷⁾であり、実運用において問題ないと考える。ただし、稼働率に影響するので線区全体での確認は必要である。

一方、安全余裕距離を常時設定することに伴って制御対象列車長が長くなり時隔への影響も想定される。仮に 16‰の勾配を想定した±169m の安全余裕距離を設定した場合、実際の列車長 20m より 338m 伸ばすことになる。この場合における時隔への影響は、駅出発時を想定して、列車が停止状態から比較的加速性能が低い加速度 0.58m/s^2 (2.1km/h/s) にてホームトラック（列車長分と仮定）を進出するのに要する時間を比較して算出する。列車長を延伸した場合の 358m の走行に必要な時間が約 35 秒であり、一方、実際の列車長 20m のみ場合は 8 秒であることから、約 27 秒が安全余裕距離を常時設定した時の影響となる。この値については、提案手法を適用する様な、弱め軸を設定できない短編成が走行するよう

な線区においては、勾配が 16%程度であるならば常時安全余裕距離を設定することによる時隔への影響は小さいと考える。また、上述のように区間ごとに勾配を考慮した安全余裕距離を設定するならば制御対象列車長は 10 両程度に設定でき、既に首都圏において高密度運転の実例があることから、提案手法の適用に問題はないと考える。

(3) まとめ

提案手法は、速度発電機のみを用いた従来手法と比較して、早期の滑走・空転検知が可能である。また、滑走・空転検知後の補正処理は最大最小加減速度による補正処理と比較して距離誤差を低減できる。特に 1 両編成という短編成車両にも適用可能な利点がある。一方、留意点としては、滑走・空転の有無にかかわらず想定距離誤差を常時設けるので、常時列車長が伸びることになるので安全余裕距離を適切に設定しなければ線路有効長や時隔に影響する可能性がある。しかし、線路有効長の制約については上述の勾配値と最大補正時間を適切に設定して安全余裕距離を短くすることで対応可能である。また、時隔への影響については提案手法が想定している弱め軸を設定できない短編成が走行するような線区においては影響が小さく、また上述の勾配値と最大補正時間を適切に設定して安全余裕距離を短くすれば基本的には問題ない。

3.5 要約

本章では、車上位置検知システムについて検討した。成果の要約は以下のとおりである。

- (1) 車軸に設置した速度発電機を用いた距離の算出方式は、車輪の滑走・空転の影響を受けることから、その対策の一手法として、滑走・空転の検知時に、慣性センサを用いた距離算出方式を提案した。提案手法は、慣性センサと速度発電機を併用した列車速度・距離算出手法であり、非駆動軸を持たない車両や短編成車両でも適用可能である。路線勾配と曲線が組み合わさった区間での補正処理における誤差低減のために、慣性センサの加速度（3 軸）と角速度（3 軸）を用いた補正処理としている。

- (2) 現車試験で時刻管理して記録したデータにもとづくシミュレーション解析を行い、提案手法の有効性を明らかにした。

なお、補正速度・絶対位置については、速度発電機の分解能の確保のため、また車両振動の影響除去のため、移動平均を適用して算出しており、実際の速度・絶対位置と比較して遅延が発生する。この移動平均時間の短縮ならびに列車制御アプリケーションへの反映法については今後の課題としたい。

参考文献

- (1) Masayuki Matsumoto : "ATACS delivers moving block", Railway Gazette International, pp.43-45 (2011-3)
- (2) 今野信三:「JR 東日本 ATACS システムにおける列車位置検知」, 鉄道車両と技術, No.137, 第 13 巻第 10 号(2007-10)
- (3) 電気鉄道ハンドブック編集委員会:「電気鉄道ハンドブック」, コロナ社, pp.686-687 (2007-2)
- (4) Peter Stanley : "ETCS for Engineers", Eurail press, p.126 (2011)
- (5) 池田昌俊 : 「列車位置検知手法の動向」, 鉄道総研報告, Vol.13, No.8, pp.1-6 (1999-8)
- (6) 多摩川精機 (株) : 「ジャイロセンサ技術」, 東京電機大学出版局, p.137 (2011)
- (7) 池田昌俊, 長谷川豊: 「車軸回転による列車位置の検知特性と補正法」, 鉄道総研報告, Vol.5, No.4, pp.43-51 (1991-4)
- (8) 電気鉄道ハンドブック編集委員会 : 「電気鉄道ハンドブック」, コロナ社, p.139 (2007-2)

第4章 アベイラビリティ向上対策決定法

4.1 はじめに

鉄道信号装置は、装置の障害が重大事故に直結する可能性が大きく、高い安全性が要求される。このような鉄道信号装置では、装置内に故障が発生しても安全側に制御できるように、フェールセーフを基本とした対策が施され⁽¹⁾、そのための安全性解析・評価には、マルコフモデル、FTA (Fault Tree Analysis)、FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) などが用いられる。これら手法を組み合わせることにより、不安全な事象の抽出とこれら不安全事象への対策の確認がなされている⁽²⁾。

一方、RAMS 国際規格が発行され⁽³⁾、R (Reliability : 信頼性)、A (Availability : アベイラビリティ)、M (Maintainability : 保全性)、S (Safety : 安全性) を観点とした総合的な解析・評価が必要とされ、鉄道輸送の安全性だけでなく安定性としてのアベイラビリティ向上も求められている。

過去の研究においては、システム構築の評価方法について LCC (Life Cycle Cost : ライフサイクルコスト) 評価法の研究⁽⁴⁾がある。また、英国の Yellow Book には費用対効果に基づく対策の決定例が示されている⁽⁵⁾。これらの研究では、鉄道信号装置のアベイラビリティ向上のために適用する対策の決定法が、費用を最小化することを判断基準として論じられている。しかし、コスト面・技術面から現状で適用可能な対策を対象としてボトムアップ的に解析しており、障害発生頻度と障害発生後の影響を総合的に考慮して戦略的に適用対策を決定する方式ではない。そのため、線区の条件に応じた効果的な対策の組み合わせた解を得るのは難しい。

このようなことから、目標アベイラビリティを達成するため、障害発生頻度と障害発生後の影響を総合的に考慮して戦略的に適用対策を決定する方法を提案する。

以下、4.2 節では提案手法である目標アベイラビリティ達成のための対策決定法を述べ 4.3 節では提案手法の適用例を示し、障害発生頻度と障害発生に伴う停止時間の二成分に分けて解析する手法の有効性を示す。

なお、本論文では安全性については現状で要求されるレベルは確保されていることを前提とする。

4.2 目標アベイラビリティ達成のための対策決定法

4.2.1 目標アベイラビリティ達成の対策決定法とその特徴

本論文で対象とするアベイラビリティ A は、 $MTBF$ (Mean time between failures : 平均故障間隔) と $MTTR$ (Mean time to repair : 平均修復時間) を用いて式(1)で定義されるとする。

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad \dots\dots\dots (1)$$

提案する目標アベイラビリティ達成のための適用対策の検討においては、平均故障間隔 ($MTBF$) の定義から、偶発故障期においては、単位時間あたりの障害件数 (λ) は $1/MTBF$ であることを用いて、アベイラビリティ (A) の定義式(1)を式(2)に変形し、単位時間あたりの障害件数と1障害あたりの平均修復時間 (平均停止時間) は、アベイラビリティ一定のもとでは反比例の関係にあることに着目する。

$$\lambda = \frac{1-A}{A} \times \frac{1}{MTTR} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、鉄道信号装置の場合には、 $MTTR$ は障害が発生してから復旧するまで運行ができなくなるために生じる列車の停止時間に対応する。具体的に、 $MTTR$ は鉄道信号装置の構成機器 i 内の障害による平均停止時間 T_i に対応し、式(2)の λ および $MTTR$ は偶発故障期においては式(3)のように定義する。これらパラメータに対しては鉄道信号装置を構成する、個々の機器の使用実績の値を適用する。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_i &= \sum_j \lambda_{ij} \\ MTTR = T_i &= (\sum_j \lambda_{ij} \times t_{ij}) / \sum_j \lambda_{ij} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

T_i : 平均停止時間, λ_{ij} : 機器 i 内の障害 j についての単位時間あたりの障害件数, t_{ij} : 機器 i 内の障害 j による停止時間, i : 鉄道信号装置の構成機器, j : 機器内の障害

これにより、アベイラビリティをパラメータとして、縦軸を鉄道信号装置の単位時間あたり

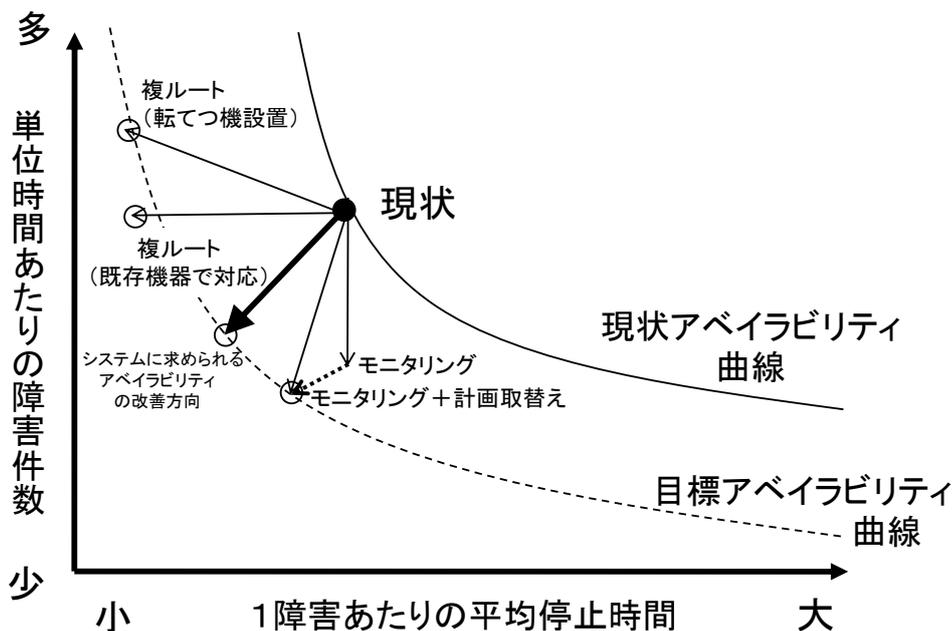


図1 鉄道信号装置のアベイラビリティ向上対策とその効果

の障害件数、横軸を1障害あたりの平均停止時間として関係づけることができる(図1)。このようにアベイラビリティを図1に示す2軸で表現することで、輸送の安定性としてのアベイラビリティ向上のための適用対策が障害件数の低減の成分と、停止時間の短縮成分の二次元で判断可能になる。すなわち、障害発生頻度と障害発生後の影響を総合的に考慮した戦略的な適用対策の決定が可能になる。

例えば、故障の予兆をとらえるためのモニタリングを行う対策は障害件数を低減する対策であり、障害発生後の停止時間の短縮にはつながらないことや、障害箇所を迂回するための複ルートは、障害発生後の停止時間の短縮になるが、障害件数の低減にはならないことなど、適用対策の特徴を明確にできる。これにより、システムに求められるアベイラビリティの改善方向に応じた効果的な対策の適用の決定や、障害発生頻度は減少したものの、平均停止時間が逆に大きくなるなどの事象の発生を防ぐことが可能になる。また、モニタリング対策に対して、例えば、機器の計画的な取り替えを追加するといった適用する対策の組み合わせの検討も可能になる(図1)。

提案手法を適用することにより、単位時間あたりの障害件数が少ないものの障害発生後の停

止時間が長い装置に対して、多重化などによる障害件数の低減策を一律に適用することを防止できる。また障害発生頻度に加えて、停止時間の短縮も同時に検討することが可能になり、対策の選択肢の増加が期待できる。

なお、以上では鉄道信号装置のある構成機器単体を対象として議論したが、複数の構成機器から成る線区全体のアベイラビリティの検討にもその考え方は同様に適用できる。すなわち、複数の構成機器から成る線区全体を対象とする場合には、式(2)において線区全体での鉄道信号装置の単位時間あたりの障害件数を λ 、線区全体で障害が発生した時の平均停止時間を $MTTR$ として、式(4)のように定義する。ここで λ_i と T_i は式(3)によることとし、偶発故障期を前提としたものである。なお、これらパラメータに適用する値は、式(3)で述べたように鉄道信号装置の使用実績の記録にもとづき適用する。

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \sum_i \lambda_i \\ MTTR &= (\sum_i \lambda_i \times T_i) / \sum_i \lambda_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

また、構成機器種別ごとに検討する場合には、式(4)において構成機器種別ごとに同一の単位時間あたりの障害件数、平均停止時間の値をとればよい。

4.2.2 目標アベイラビリティの設定と提案手法の適用手順

前項に示す提案手法を適用するにあたっては、線区規模で鉄道信号装置の構成機器種別ごとに目標アベイラビリティを設定し、それを達成するための適用対策を決定する。その理由は、同一種別の構成機器に対して共通で有効な適用対策を把握することが優先されるべきとの考えによる。これら式(3)、式(4)の値については、実績データから求めることが可能である。なお、特定の箇所を設置された個々の構成機器に対して有効な適用対策を検討する場合には、個別の単位時間あたりの障害件数、停止時間を用いて対応する。また、アベイラビリティの設定にあたっては、構成機器の故障によって遅延を受けた乗客数で定義する輸送損失を導入する。

以下に、提案手法の適用手順を示す。

(1) STEP 1 : 現状のアベイラビリティの算出

線区全体に設置されている鉄道信号装置の構成機器種別ごとの現状のアベイラビリティを算出する。このアベイラビリティは、線区における当該種別の全構成機器を対象としてその故障によって生じる列車停止時間の総和と、列車運転時間の総和をもとに式(1)から求める。ここで、列車停止時間は、各故障によって影響を受けた最初の列車の遅延が最大であると考え、その停止時間を採用する。

線区における鉄道信号装置全体のアベイラビリティは、構成機器種別ごとの列車停止時間の総和を加算し、同様に式(1)を適用して求める。

また、現状の輸送損失 A は、その線区における単位時間当たりの輸送人数と列車停止時間との積から求める。

(2) STEP 2 : 目標アベイラビリティの設定

輸送の安定性の向上のための目標アベイラビリティを、輸送損失を介して設定する。STEP 1 で求めた輸送損失 A に対し、鉄道信号装置への対策によって実現する目標輸送損失 B を設定する。この差分 $C (=A-B)$ が鉄道信号装置のアベイラビリティ向上によって減少させる輸送損失であり、効果である。

差分 C の構成機器種別への割り付けについては、STEP 1 で求めた各構成機器の種別単位のアベイラビリティをリストアップし、その値が小さい構成機器種別を選定する。選定した構成機器種別に対して差分 C を配分し、輸送損失の改善に対応する停止時間を減じて式(1)によってそれら構成機器種別の目標アベイラビリティとして設定する。

なお、差分 C の配分については、単一の構成機器種別を対象とすることも複数の構成機器種別を対象とすることも可能である。

(3) STEP 3 : 目標アベイラビリティを達成するための適用対策の決定

STEP 2 で選定、設定した鉄道信号装置の構成機器種別単位の目標アベイラビリティを実現する対策について、4.2.1 項で述べた提案手法によって検討、決定する。

なお、適用対策の検討は、構成機器の種別単位だけでなく、複数の構成機器種別を対象として線区全体の鉄道信号装置に対する適用対策の決定を行うことも可能である。

4.3 提案手法の適用

提案手法の有効性を確認するため、本手法をある線区に適用し、目標アベイラビリティを達成するための対策を戦略的に決定する過程を示す。ここでの提案手法の適用にあたっては、4.2.2 項での手法の適用手順で示したアベイラビリティ、列車停止時間、輸送損失の算出に線区の障害管理記録データを用いる。

4.3.1 解析対象線区の概要

解析対象とする線区（以下、A 線）は、複々線箇所を一部に含む区間長が約 50km、連動駅数が 15 箇所、代表的な駅の日あたりの列車発着本数は 2,250 本である。当該線区の障害管理記録（以下、障害データ）は、鉄道総研 鉄道技術推進センターの鉄道安全データベース（2号様式）に基づく。2号様式は運休が 1 本以上もしくは遅延時間が旅客列車の場合は 30 分、貨物列車は 1 時間以上のものに対して記載が求められる。解析対象とする期間は、2001 年 10 月から 2006 年 11 月まで約 45,300 時間（以下、5 年間）である。なお、本論文は鉄道信号装置を対象とするので、踏切装置については対象としていない。

4.3.2 現状把握

4.3.2.1 現状のアベイラビリティの算出

現状のアベイラビリティは、線区内に設置された鉄道信号装置の構成機器の障害に伴う最初の列車の停止時間により算出する。駅中間、駅構内における地上信号方式での鉄道信号装置の構成機器のモデルを、それぞれ図 2、図 3 に示す。

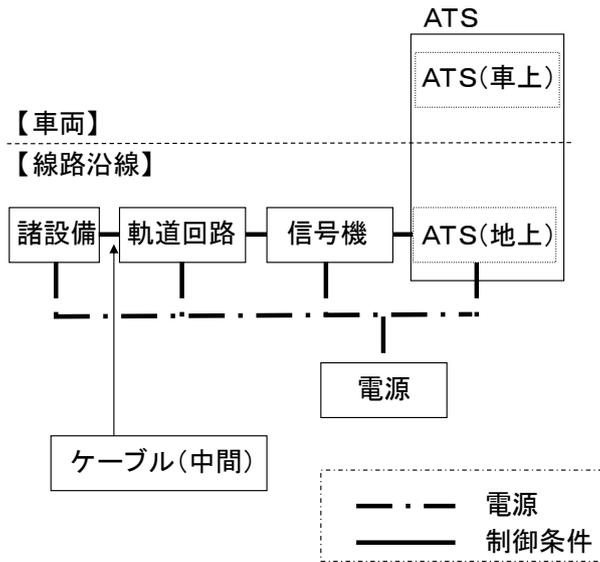


図2 駅中間モデル（地上信号式）

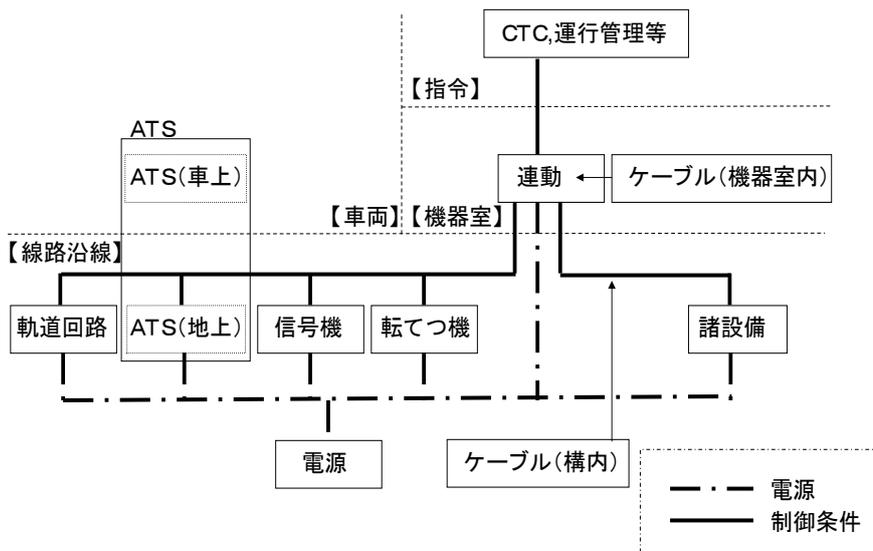


図3 駅構内モデル（地上信号式）

図4に対象とするA線における構成機器の種別ごとに集計した列車停止時間（5年間）の実績を示す。各棒グラフ内の区分は、構成機器の種別ごとの故障原因を示す。

A線における線区全体の鉄道信号装置の5年間における総停止時間とアベイラビリティは、図4の構成機器種別ごとの総停止時間（5年間）の実績、それぞれ31.4[h]、99.93[%]（24時間連続使用として算出）である。

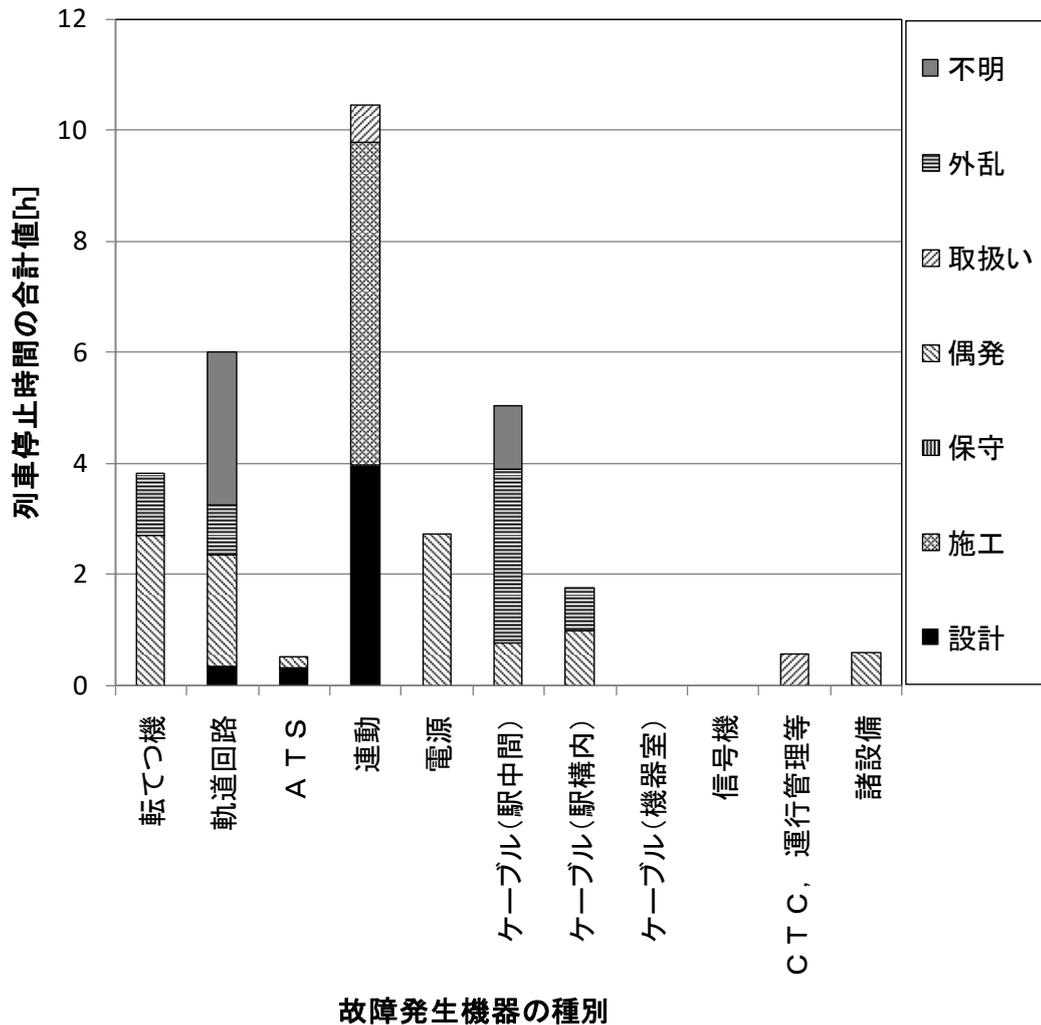


図4 構成機器の種別ごとの列車停止時間の合計値とその内訳 (A線, 5年間)

なお、構成機器種別ごとのアベイラビリティは、図4の構成機器種別ごとの列車停止時間から求められる。

4.3.2.2 輸送損失の算出

現状の輸送損失は、4.2.2項のSTEP 1で述べたように、列車停止時間とその線区における単位時間当たりの輸送人数の積から求める。

A線では、列車本数が最大となるピーク時間帯の列車本数は、複々線箇所での1時間あたりの上下方向の列車本数の総和の最大値が101本であることから、ある地点を基準とした通過車

両数の最大値は、 $10[\text{両}] \times 101[\text{本/h}] = 1,010[\text{両/h}]$ である。ここで、混雑率を200[%]、定員は約150[人/両]と仮定すると、ピーク時の1時間あたりの輸送人数 = $1,010[\text{両/h}] \times 150[\text{人/両}] \times 2$ [混雑率] = 30.3 [万人/h]となる。

一方、A線における現状の列車停止時間の合計値は31.4[h]（5年間）である。よって、輸送損失はピーク時の1時間あたりの最大輸送人数が30.3[万人/h]とすると、952[万人]（5年間）となる。この結果、A線の1年あたりの鉄道信号装置に関する輸送損失は、184[万人]と算出される。

4.3.2.3 解析対象線区の特徴

解析対象線区は高密度線区であるとともに、解析対象期間内で高架化工事に伴う鉄道信号装置の更新が継続して行われている。このような線区では通常の保守とは異なる更新に伴う障害の発生があるため、一般的な対策が必ずしも有効ではない。これに対し、本提案手法は、解析対象線区の障害実績データに基づいて障害発生頻度と平均停止時間の両面からアベイラビリティ向上策を検討するものであり、線区の特徴や特情を反映した目標アベイラビリティ達成の対策の決定ができる点に大きな特徴がある。

4.3.3 目標アベイラビリティの設定

(1) 線区全体における鉄道信号装置の目標アベイラビリティ

A線における鉄道信号装置の構成機器の種別ごとの障害に起因した列車停止時間の実績値の合計、すなわち、線区全体における鉄道信号装置の障害に基づく輸送損失を表1に示す。列車

表1 輸送損失、許容列車停止時間、鉄道信号装置のアベイラビリティの目標値

目標低減割合	輸送損失の目標値	許容列車停止時間の目標値	鉄道信号装置のアベイラビリティ目標値
現状	184[万人/年]※1	6.08[h/年]※2	99.93[%]
現状の25%減	138[万人/年]	4.56[h/年]	99.95[%]
現状の50%減	92[万人/年]	3.04[h/年]	99.97[%]
現状の90%減	18[万人/年]	0.61[h/年]	99.993[%]

※1 A線の列車停止時間の実績値(5年間の平均)をもとに算出

※2 A線の列車停止時間の5年間の平均値

停止時間の実績値は、最初の列車の停止時間の合計値で算出すると 6.08[h/年]（5年間平均）である。輸送損失の目標値は、0にすることが望ましいが完全に0にするのは現実的には難しいので、ここでは列車停止時間の実績値に基づく 184[万人]から 138[万人]への約 46[万人]の低減とし、現状の 25%の削減と設定する。このとき、許容列車停止時間は 6.08[h/年]から 25%減の 4.56[h/年]となる。

なお、アベイラビリティについては、鉄道信号装置を構成する各機器は 24 時間連続使用であるが、列車運転時間は 22 時間であり、厳密には稼働時間に 2 時間の相違がある。しかしながら列車運転終了後の鉄道信号装置の停止も、初列車に影響する可能性があるとの考えから 24 時間連続使用で算出する。つまり、鉄道信号装置のアベイラビリティは、列車停止時間を鉄道信号装置の停止時間とし、24 時間連続使用で算出する。この考えにもとづき、ここでの機器に適用する対策の検討においては、99.93[%]から 99.95[%]への改善を目標とする。

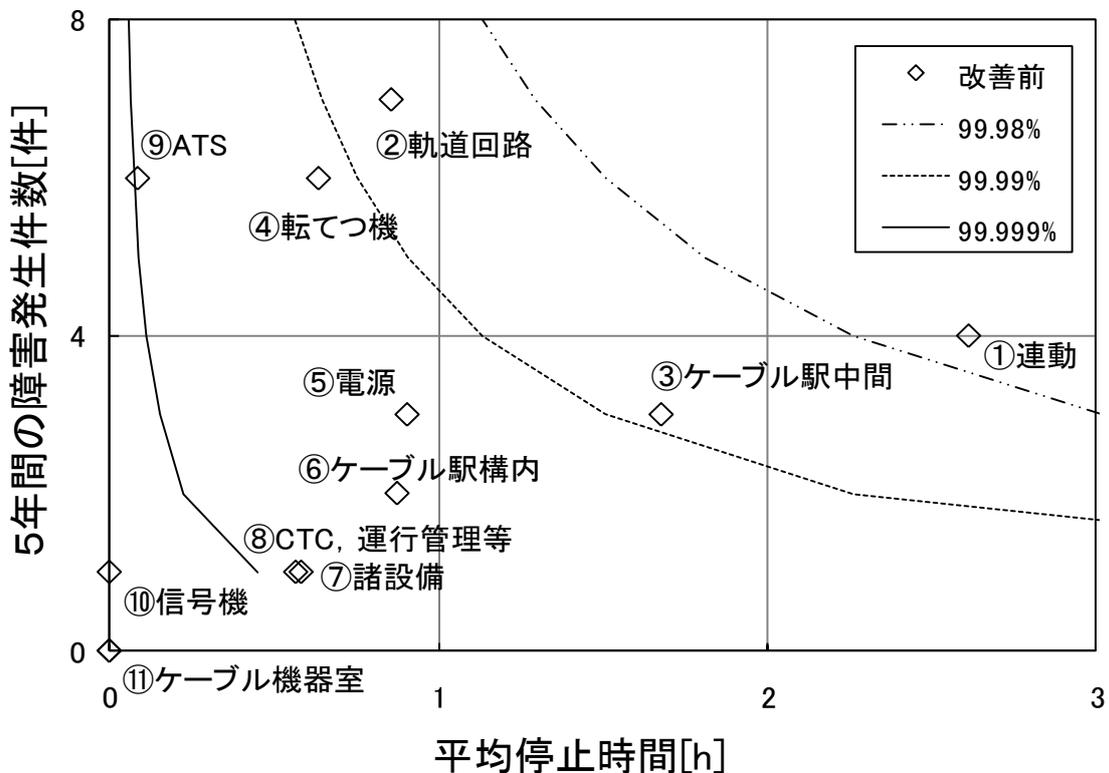
仮に、1 路線あたりの鉄道信号装置に関する輸送損失の目標値を、現状の 50%減に相当する 1 年 (8,760[h]) あたり 92[万人]までの減少とする場合、ピーク時間帯で輸送損失を算出した A 線の許容列車停止時間は $92 [万人]/30.3 [万人/h]=3.04 [h]$ となり、24 時間使用での目標アベイラビリティは、 $(8,760-3.04)/8,760=99.97[%]$ となる。

目標値を現状の 90%減とした 1 年間に 18[万人]とするには、列車停止時間を 0.61[h]に抑える必要がある（表 1）。この場合における削減量（5.5[h]）は、例えば軌道回路に関する 5 年間分の障害（6[h]）対策に相当する大きさである（図 4）。

（2）対策を適用する構成機器種別の選定

A 線における構成機器種別ごとのアベイラビリティを図 5 に示す。図 5 の縦軸は 5 年間の障害件数、横軸は停止時間の平均値である。各プロットは A 線内における構成機器の種別を示し、図内の曲線はアベイラビリティの値である。図 5 の右上の領域にプロットされる機器ほどアベイラビリティは悪く、アベイラビリティが最も悪いのは連動装置であり、続いて、軌道回路、ケーブル駅中間、転てつ機の順である。

4.2.2 項の STEP 2 および STEP 3 で述べたように、目標アベイラビリティ実現のための輸送損失差分の配分は、単一の構成機器種別を対象とすることも複数の機器種別を対象とすることも



注) ○数字は改善順序を示す

図5 構成機器種別ごとのアベイラビリティ (A線)

可能である。ここでは、連動装置と転てつ機を選定し、単一と複数の構成機器種別を対象とする2つのケースを扱う。軌道回路やケーブルではなく転てつ機を選定する理由は、不明あるいは各機器内の構成要素以外が関係する外乱による故障原因が少なく、適用すべき対策がより検討し易いためである。外乱等による故障に対する対策はアベイラビリティ向上のために重要であるが、別の研究成果を待ちたい。

4.3.4 目標アベイラビリティを達成するための適用対策の決定

A線全体における鉄道信号装置の目標アベイラビリティ値は、輸送損失の25%減とした場合、先に述べたように現状の99.93[%]から99.95[%]への改善が必要となる。

ここで、線区全体における鉄道信号装置の目標アベイラビリティを達成するための改善対象

の構成機器種別を上述の手順で選定した連動装置と転てつ機とする。適用する対策は、これら構成機器種別の障害データに示す障害原因をもとに、最初に、選定した構成機器の種別単位で最も効果の高い対策を決定する。続いて、複数の構成機器種別を対象として線区全体の鉄道信号装置に対する適用対策の決定を行う。

なお、対策を適用した場合には、関連する障害は発生しないと仮定する。

(1) 構成機器の種別単位での適用対策の決定

連動装置と転てつ機それぞれの装置における対策のうち、最も効果的な対策を決定する。

連動装置に関する対策の候補としては、障害データに示す障害原因をもとに、①異常時試験の十分性、②取扱い規定の遵守、③現場機器と連動装置間の電気配線の確認徹底（以下、電気配線の確認徹底）、④システム仕様の明確化を仮定した。これら対策による障害件数の低減効果は、図6に示すように、いずれも1件であり差はない。しかし、平均停止時間の短縮効果は「③電気配線の確認徹底」が最も大きく、アベイラビリティの改善効果が最も高い対策となり、次いで「④システム仕様の明確化」の順となる。連動装置において、これら二つの対策を適用することにより、障害件数は2件減少して32件となり、停止時間は31.4[h]から22.4[h]に減少する。これにより、平均停止時間は0.92[h]から0.70[h]となる。その結果、アベイラビリティは現状の99.93[%]から所期の目標値である99.95[%]までの改善が期待できる。

転てつ機に関する対策の候補としては、障害データに示す障害原因をもとに、(A)部品の劣化診断、(B)異物介入に対する分岐器の強化、(C)状態監視の強化を仮定した。これらの対策による、平均停止時間の低減効果は、図7に示すように大きな差はない。一方の、障害件数の低減効果は、「(C)状態監視の強化」が最も大きく、アベイラビリティの改善効果が最も大きな対策となる。転てつ機においては、図7に示す対策を全て適用しても、停止時間は31.4[h]から27.6[h]への減少であり、アベイラビリティは99.94[%]であることから、所期の目標値である99.95[%]のアベイラビリティは達成できない。

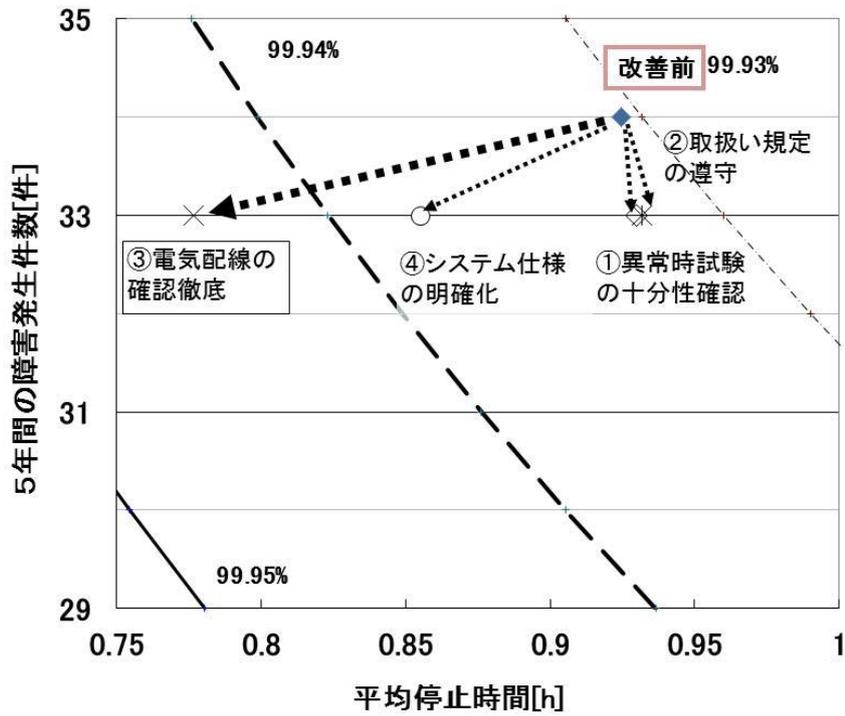


図6 連動装置を対象とした適用対策の決定

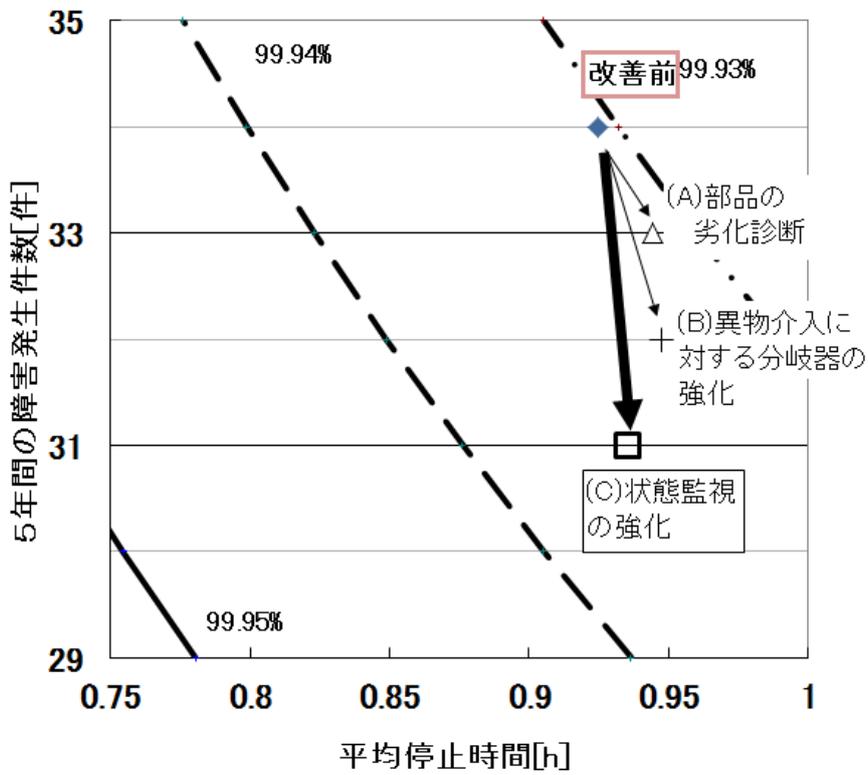


図7 転てつ機を対象とした適用対策の決定

(2) 複数の構成機器種別を考慮した線区全体の鉄道信号装置を対象とした適用対策の決定

連動装置と転てつ機で選定した全対策を比較して最も効果的な対策を決定する。ここでは、アベイラビリティの改善効果が大きい各機器種別で決定した対策を優先する。その結果、図8に示すように、連動装置に関する「③電気配線の確認徹底」と、転てつ機に関する「(C)状態監視の強化」の二つの対策となる。これら二つの対策を適用することにより、障害件数は4件減少して30件となり、停止時間は31.4[h]から23.2[h]に減少する。これにより、平均停止時間は0.92[h]から0.77[h]となる。その結果、図8内の太矢印に示すようにアベイラビリティは現状の99.93[%]から所期の目標値である99.95[%]までの改善が期待できる。

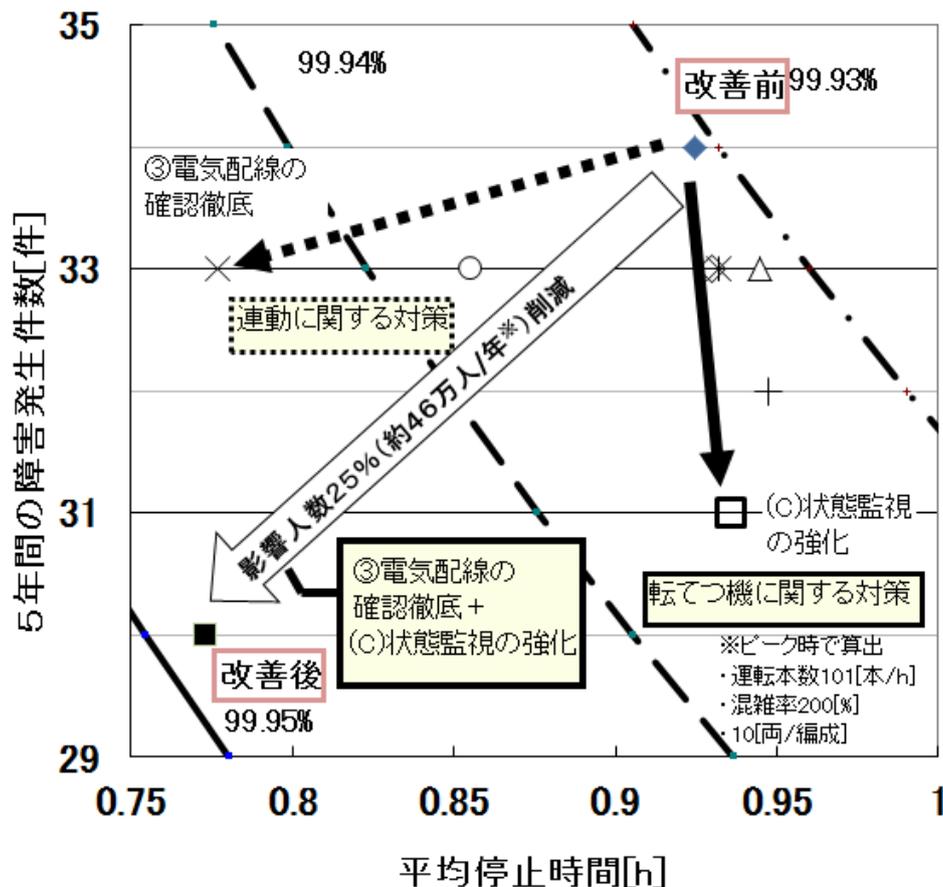


図8 複数の構成機器種別（連動装置と転てつ機）を対象とした適用対策の決定

なお、厳密には4.2.2項のSTEP2およびSTEP3で述べたように目標アベイラビリティ実現のための輸送損失差分を配分し、適用対策を決定する必要があるが、ここでは障害実績データから適用可能な対策を先に選択し、そのアベイラビリティ改善効果を確認する簡略的な方法を採用した。

(1)もしくは(2)に示した対策のいずれかを選択することで、目標アベイラビリティ99.95[%]をほぼ達成でき、表1に示した現状の輸送損失184[万人/年]が138[万人/年]、また現状の列車停止時間が6.08[h/年]が4.56[h/年]となることから、輸送損失25%減(約46[万人/年])、列車停止時間の25%減が期待できる。

このように提案手法を鉄道信号装置の更新が継続して行われている高密度線区に適用した結果、解析対象線区における構成機器種別ごとのアベイラビリティでは連動装置が最も悪く、他の構成機器種別と比較して平均停止時間が大きい特徴があることを明確にできた。提案手法を用いて選定した対策は、連動装置については平均停止時間の低減、転てつ機については障害発生頻度の低減といった相違があることを確認できた。また、目標アベイラビリティを達成するための効果的な対策の決定が、障害発生頻度の低減だけでなく、装置停止時間の低減の面からも可能であることを確認できた。

4.4 要約

本章では、アベイラビリティ向上対策決定法について検討した。成果の要約は以下のとおりである。

- (1) 鉄道信号装置の目標アベイラビリティ達成のための対策の決定法を提案した。提案手法は、目標アベイラビリティを達成するため、システムに効果的な対策を決定することを目的とする。システムへ適用する対策は、単位時間あたりの障害件数の低減成分と、1障害あたりの平均停止時間の短縮成分の両面から、総合的に考慮して戦略的に適用対策を決定する。これにより、線区ごとに異なる障害内容に応じた効果の高い対策の適用を可能にする。

- (2) 目標アベイラビリティを、構成機器の故障による遅延を受けた乗客数で定義した輸送損失の低減度で設定し、提案手法を適用した。この結果、障害発生頻度と障害発生後の影響を総合的に考慮して、戦略的に効果的な適用対策を決定できることを明らかにした。

提案手法は、鉄道信号装置を対象に検討したが、他システムにおける目標アベイラビリティ達成のための対策の決定においても有効と考える。

参考文献

- (1) 公益財団法人 鉄道総合技術研究所：「列車保安制御システムの安全性技術指針」, 1996.3
- (2) 岩田浩司, 西堀典幸, 平尾裕司:「無線による列車制御システムCARATの事前安全性解析」, 鉄道総研報告, Vol.13, No.8, pp39-44, 1999.8
- (3) IEC 62278. Railway applications –Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS), 2002.
- (4) 福田光芳, 渡辺郁夫, 寺田夏樹, 島添敏之, 奥谷民雄：「要求分析と統合的ライフサイクルコスト評価に基づいた鉄道信号システム構築手法の検討」, 電学論D, 125巻7号, pp681-690, 2005
- (5) Engineering Safety Management (The Yellow Book) Volumes 1 and 2 Fundamentals and Guidance Issue 4, Rail Safety and Standards Board, 2007.

第5章 アベイラビリティ向上対策決定法による車上位位置検知システムのアベイラビリティ改善策の決定

5.1 はじめに

無線を用いた列車制御システム（CBTC：Communication Based Train Control）⁽¹⁾は、車上位装置での位置検知，ならびに，地上装置と車上位装置間での無線伝送を特徴とする。一方，地上装置と車上位装置との間に無線伝送を用いない従来システムにおいては，地上装置が列車の位置を検知して停止限界に相当する情報を作成し，地上の現場機器に対して送信している。よって相違点は，車上位装置の位置検知結果をもとに停止限界を作成し，この停止限界をレール伝送等ではなく，無線を用いて車上位装置まで直接送信する点である。

このようなことから，CBTCにおいては，車上位装置での位置検知結果を地上装置に伝送してこの情報をもとに間隔制御を行う点が最も重要であり，第3章で述べた車上位位置検知システムにおける再粘着判定に関わるアベイラビリティ改善が必須である。

第3章においては，複数の補正開始点を選定する前提で解析を行ったものの，補正論理が複雑になることへの対応が必要になる。よって，その必要性を明確にするため，第4章で述べたアベイラビリティ向上対策決定法を適用する。

なお，本対策の検討において，安全性には影響しない前提とする。

5.2 適用対策の改善効果の算出

第4章で述べたアベイラビリティ向上対策決定法を，第3章で述べる車上位位置検知システムに適用し，対策を適用することによる改善効果を検討する。この対策の適用効果の検討は，滑走・空転を検知して補正した後に再粘着判定失敗となる発生頻度とその影響度について，補正時間をもとに比較評価して実施する。

5.2.1 検討対象とする適用対策

第3章で述べた再粘着判定ができない理由は、最大補正時間を超過して再粘着判定できない場合（1件）と、もともとの補正開始点の選定において閾値設定範囲内における誤差に起因する場合（2件）である。

慣性センサの精度向上により再粘着判定となる事象に対してある程度まで改善をはかれるものの、航空機に搭載するような高価なセンサを鉄道車両に搭載することは費用対効果を示す必要がある。そこで、「慣性センサ精度向上による補正可能時間の延伸策」と、「補正開始点を複数選定し補正論理の並列処理による対策」の2つの手法を比較検討する。

なお、車上位置検知システムの影響度低減策は、システム故障時の異常時取扱いとなり、この異常時取扱いは車上位置検知システム自体の改善対策ではない。システムの改善策として選定した上述の2つの手法は、再粘着判定不能となる事象に対する発生頻度低減策に位置付けられるものである。

それぞれの対策の概要を以下に示す。

(1) 対策1：慣性センサ精度向上による補正可能時間の延伸策

対策1は、現状の補正処理を変更せず、最大補正時間を長くすることにより、大きな滑走・空転に対して対応させるための手法である。よって、対策1における補正処理は同一であり、パラメータのみの変更で対応可能である。しかしながら対策1は、安全余裕距離が補正時間の2乗で増大する（例えば、補正時間が1.5倍の場合、安全余裕距離は2.25倍の延伸となる）ので、列車ダイヤへの影響が懸念される。

以上のように、対策1は、最大補正時間を延伸することで再粘着判定不能の発生頻度の低減が期待できる。その一方、最大補正時間にもとづいて設定する安全余裕距離は増大する欠点がある。

(2) 対策2：補正開始点を複数選定し補正論理の並列処理による対策

対策2は、複数選定した補正開始点に対して常時滑走・空転補正処理を適用し、滑走・空転

を検知した場合には先に再粘着判定可能となった補正開始点を採用する対策である。

具体的には、滑走・空転に関わらず、補正開始点を一定時間の間隔をあけて複数点（例えば、2点）選定して常時補正処理を行い、滑走・空転が発生した場合には、先に再粘着判定した補正開始点を採用する。一定時間は、現車試験の結果、微小の滑走・空転の影響を回避するために滑走・空転検知点から補正開始点の選定までに最低設ける時間と同値とし、2.5秒とする。

これにより、微小の滑走・空転などが発生して補正開始点が再粘着判定を得られない箇所となった時に、当該補正開始点より前の時刻の補正開始点とした補正処理により、微小の滑走・空転による影響を受けず、再粘着判定が得られる可能性が高まる。

なお、選定した位置補正開始点すべてが再粘着判定をできない場合においても、最大補正可能時間の経過後に安全側制御するのは対策前と同じである。そのための安全余裕距離を確保する前提も対策前と同じである。

この対策を適用することで、補正時間は少なくとも2.5秒増大することになる。安全余裕距離は、最大補正時間で決定するので、変わらない。

以上のように、対策2を適用した場合は、再粘着判定の頻度が増加する効果が期待できる。その一方、補正時間が2.5秒増大する点と、補正処理の複雑さが欠点となる。

5.2.2 適用対策の効果の算出

5.2.1項で述べた対策1と対策2を例に、第4章で述べたアベイラビリティ向上対策決定法を適用する。これは、位置検知装置を対象とした単一装置での評価に相当するものである。

(1) 前提

① 検討対象

評価対象とする滑走・空転の例は、第4章で述べた試験結果（51件）とし、最大補正時間は同じく第3章で述べた32秒とする。

なお、51件は地点間を基準とした件数であり、厳密には滑走・空転の検知回数と若干異なるが解析において大きな影響はない前提で実施する。

②停止時間

MTTR に関わる停止時間は、以下の2つの要因が考えられる。

- ・「要因(a)」：再粘着判定不能後に再び位置確定して復旧するまでに要する停止時間
- ・「要因(b)」：補正時間拡大による安全余裕距離の増大に伴う停止時間
- ・「要因(c)」：想定距離誤差を考慮した安全余裕距離の影響

以下、それぞれの詳細について述べる。

「要因(a)」：再粘着判定不能後に再び位置確定して復旧するまでに要する停止時間

この停止時間は、滑走・空転の検知後に再粘着判定不能となった列車に対して発生する。この停止時間は、30分と仮定する。

平均停止時間は、滑走・空転の発生頻度（全件数）と再粘着判定不能に伴う異常処理に要する停止時間で決定する。ここで、51件で平均をとるのは、滑走・空転時の平均停止時間を算出する観点からである。

なお、対策適用前の平均停止時間は、再粘着判定不能となった場合の停止時間が前提条件に示した30分と仮定すると、平均停止時間は $30 \text{分} \times 3 \text{件} / 51 \text{件} = 105.9 \text{秒}$ である。

「要因(b)」：補正時間拡大による安全余裕距離の増大に伴う停止時間

補正時間の拡大に伴う停止時間は、安全余裕距離の拡大となる。この結果、後続列車に対して影響を与える。この安全余裕距離の増大の影響は、例えばホームトラックでの停止から最大加速での進出に要する時間となる。ここでは、補正時間の増大は、簡単化のため安全余裕距離は勾配（16%）のみを考慮することとし、当該距離の進出に要する時間については最大加速で算出するので、停止時間は補正時間の $1 / \sqrt{3.8}$ 程度として算出する。この $\sqrt{3.8}$ は第4章で述べた低加速度列車での加速度 2.1km/h/s / 勾配 16% の場合の重力加速度成分である 0.56km/h/s の平方根で算出した値である。

この停止時間の増大量は、滑走・空転の検知回数に依存しない一律の値であるので、平均停

止時間に加算する際には、滑走・空転の検知回数で除算した値とする。

「要因(c)：想定距離誤差を考慮した安全余裕距離の影響

第3章で述べたように、慣性センサを用いた補正を行うことに起因した安全余裕距離を設定するので、この安全余裕距離の設定に伴う平均停止時間の増大（35秒：列車長20m、16‰を想定した想定距離誤差±169m、加速度2.1km/h）も発生する。この影響については、再粘着判定不能となる要因による影響とは独立であり、対策前、対策1、対策2の適用による増加分に加算する。この停止時間の増大量は、滑走・空転の検知回数に依存しない一律の値であるので、平均停止時間に加算する際には、滑走・空転の検知回数で除算した値とする。

(2) 対策1の適用効果の算出

対策1の適用により、再粘着判定不能頻度は低下するものの安全余裕距離が増大する。安全余裕距離に伴う停止時間はホームトラックでの停止から最大加速での進出に要する時間として算出すると、上述のとおり、停止時間は補正時間の $1/\sqrt{3.8}$ 程度となる。

試験結果において、補正時間が規定の最大補正時間(32秒)を超えるのは、先に述べた1件であり、補正時間は33.1秒である。この最大補正時間はセンサ精度を考慮した値であるので、最大補正時間の延伸にはセンサの変更が必要である。

なお、再粘着判定不能となった場合の停止時間は、前提条件に示した30分と仮定する。

仮に、補正時間の延伸は10秒単位を基本とすることとし、補正時間33.1秒に対して最大補正可能時間は40秒と設定する。対策1を適用した結果、再粘着判定不能は2件となる。

この場合、要因(a)による平均停止時間は、再粘着判定不能となった場合の停止時間は前提条件に示した30分と仮定すると、平均停止時間は $30分 \times 2件 / 51件 = 70.6$ 秒である。

要因(b)による平均停止時間は、最大補正時間32秒に対して、補正時間を40秒とするので全列車が8秒の拡大となる。その結果、停止時間は $1/\sqrt{3.8}$ 倍した4.1秒の増大となる。この停止時間の増大は、滑走・空転の検知回数に依存しない一律の値であるので、平均停止時間に

加算する際には、滑走・空転の検知回数（51件）で除算する。また、要因(c)による平均停止時間についても、滑走・空転の検知回数に依存しない一律の値であるので、平均停止時間に加算する際には、滑走・空転の検知回数（51件）で除算する。

よって、平均停止時間は 71.4 秒（70.6 秒（要因(a)）+4.1 秒（要因(b)）／51 件+35 秒（要因(c)）／51 件）の増大となる。

以上のことから、対策適用前の平均停止時間が 106.6 秒（105.9 秒(要因(a))+35 秒（要因(c)）／51 件）であるのに対して、対策 1 の適用により平均停止時間は 71.4 秒の延伸に抑えることができるので、対策 1 の適用効果が期待できる。ただし、対策 1 は補正時間の増大のためには慣性センサの精度向上が必要となる欠点がある。

（3）対策 2 の適用効果の算出

対策 2 の適用により、再粘着判定不能となる事象の発生頻度は低下する。対策 2 を適用する前の再粘着判定不能となる例は 3 件であり、対策 2 の適用後はゼロ件となる。

一方、補正開始点の間隔は最低 2.5 秒離すので、この時間分の補正時間が伸びると考えると、安全余裕距離が増大する。

よって、対策 2 については再粘着判定不能の発生頻度の低減効果は 3 件であり、対策適用後は再粘着判定不能がゼロ件となる。しかしながら、微小の滑走・空転時間は 2.5 秒と仮定した場合には全列車に対して滑走・空転の補正時間が 2.5 秒伸びることから、平均停止時間は 1.3 秒（2.5 秒／ $\sqrt{3.8}$ ）延伸する。この停止時間の増大は、滑走・空転の検知回数に依存しない一律の値であるので、平均停止時間に加算する際には、滑走・空転の検知回数（51 件）で除算する。また、要因(c)による平均停止時間についても、滑走・空転の検知回数に依存しない一律の値であるので、平均停止時間に加算する際には、滑走・空転の検知回数（51 件）で除算する。

以上のことから、対策適用前の平均停止時間が 106.6 秒（(要因(a)105.9 秒+35 秒（要因(c)

／51件)の延伸であるのに対して、対策2の適用により平均停止時間は0.71秒(1.3秒(要因(b))／51件+35秒(要因(c))／51件)に抑制できるので、対策2の適用効果は期待できる。

5.3 適用対策の決定

車上位検知システムに対する検討は、第4章で述べた単一の位置検知装置に相当するものであり、線区レベルまでを考慮した検討を行わなくても比較評価できる。そこで、第4章で示した考え方をもとにするものの、実際の目標アベイラビリティまでは算出せず、対策を適用した場合における発生頻度と平均停止時間について相対的に比較評価する、簡略化した対策決定法を適用する。

(1) 頻度

再粘着判定不能の発生頻度の低減効果については、対策1が1件、対策2は3件であり、対策2が優れている。なお、対策1ならびに対策2は滑走・空転自体の低減ではないので、総件数51件は変わらない。よって、滑走・空転に関わるアベイラビリティ改善の観点からは、対策1・対策2は影響度低減対策に位置付けられることが、第4章に示した提案手法を適用することでわかる。

(2) 平均停止時間

対策適用前の平均停止時間が106.6秒(105.9秒(要因(a))+35秒(要因(c))／51件)であるのに対して、対策1の適用により平均停止時間は71.4秒(70.6秒(要因(a))+4.1秒(要因(b))／51件+35秒(要因(c))／51件)となる。また、対策2の適用により平均停止時間は0.71秒(1.3秒(要因(b))／51件+35秒(要因(c))／51件)に抑制できる。

(3) 適用結果

上述の様に、再粘着判定不能の発生頻度低減効果、平均停止時間低減効果ともに、対策1と

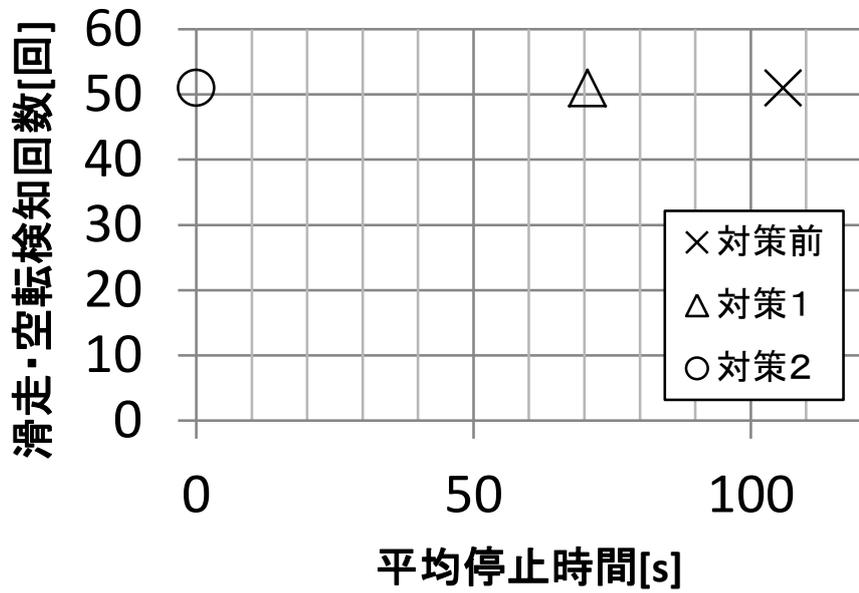
比較して対策2は優れている。また、現状と比較しても平均停止時間は優れている。

これらの結果から、対策1ではなく、対策2を採用する。

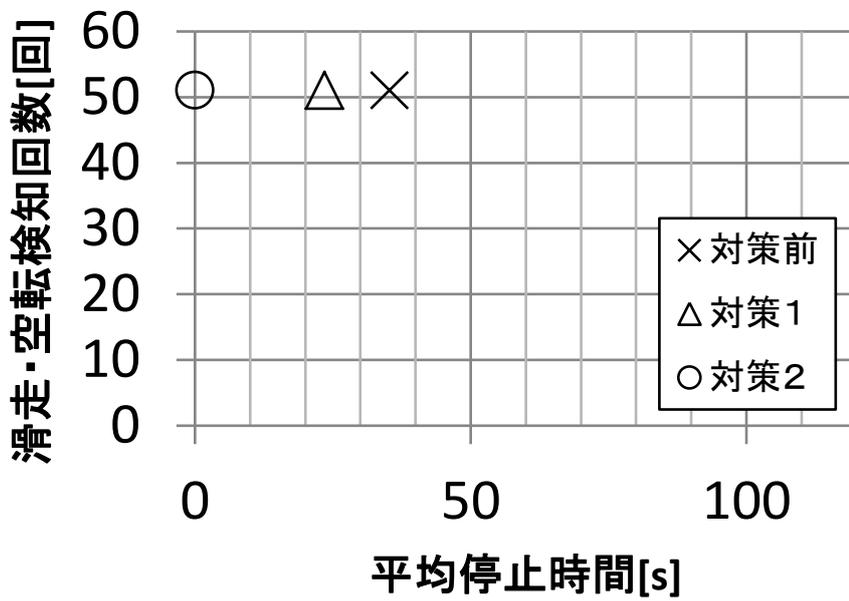
なお、これは再粘着判定不能時の復旧時間を30分と仮定したものである。車上位検知システム以外での異常時対策の適用により、この復旧時間が仮に3分の1の10分となった場合には、106.6秒の平均停止時間が同様の計算により36.0秒（要因(a)35.3秒、要因(c)0.7秒）程度となる。対策1の適用時の延伸時間は24.3秒（要因(a)23.5秒、要因(b)0.1秒、要因(c)0.7秒）であるのに対して、対策2の延伸時間は0.71秒（要因(b)0.0秒、要因(c)0.7秒）となり、現状のダイヤが15秒で作成されていることに鑑みるに、対策2の適用効果は復旧時間が30分の場合と同様に、復旧時間が10分となった場合でも期待できる。（図1）

また、対策1については、仮に最大補正時間を40秒ではなく、過去の滑走・空転事例と同値である33.1秒とした場合には、要因(b)による延伸時間は現状の最大補正時間32秒を差し引いた1.1秒となり、これに起因する停止時間は $1/\sqrt{3.8}$ 倍した0.57秒程度の増大となる。しかしながら、対策1は再粘着判定できない場合が2件残るので、要因(a)による平均停止時間が70.6秒（再粘着判定不能時の停止時間を30分とした場合）を考慮する必要があるため、対策1は対策2と比較して適用効果は期待できない。

対策2については、2個の補正開始点に対しての並列処理を実機に実装し、粘着状態のもとではあるが、リアルタイムで勾配箇所等にて滑走検知させて再粘着判定可能であることを確認している。実際に、1点目の補正開始点での再粘着判定を失敗して、2点目を採用して再粘着判定可能な処理を実現できることも確認済みである。



(a) 再粘着判定不能時の復旧時間を 30 分とした場合



(b) 再粘着判定不能時の復旧時間を 10 分とした場合

図 1 対策の適用効果

(4) アベイラビリティの算出

対策適用効果の確認のため、各対策適用後のアベイラビリティを算出する。アベイラビリティは、滑走・空転の発生件数（51件）が発生する期間と停止時間によって変わる。ここでのアベイラビリティは、発生期間を1年とした場合と、1日とした場合の2ケースを仮定し、再粘着判定不能時の停止時間を30分とした場合と10分とした場合について算出する。

なお、このアベイラビリティは、各対策を適用したことによる平均停止時間の増加分として算出する。

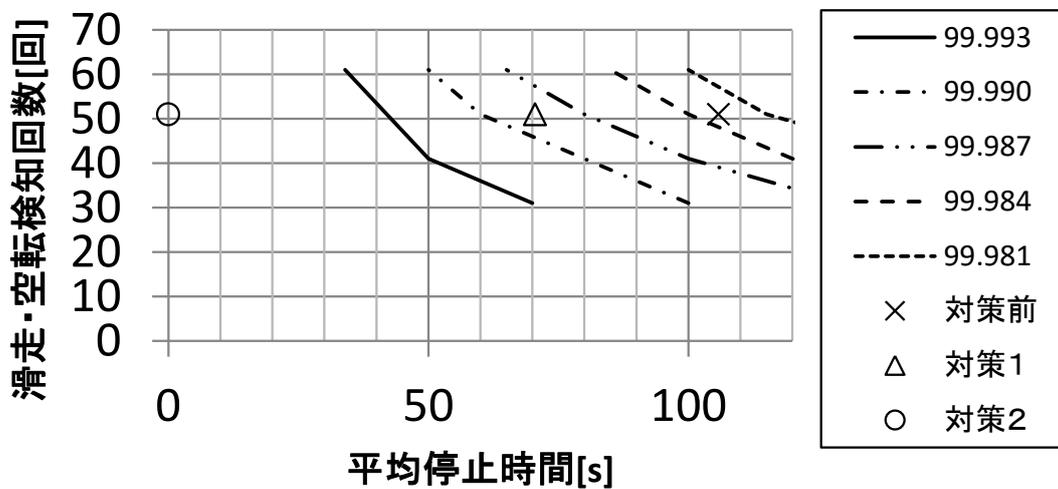
算出した結果を表1、表2ならびに図2に示す。

表1 再粘着判定不能時の停止時間を30分とした場合

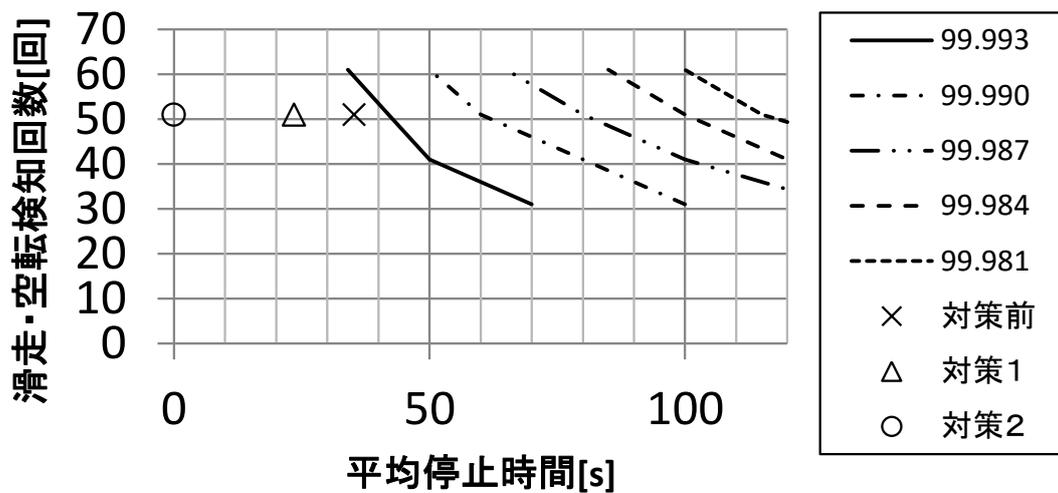
	滑走・空転検 知回数[回]	平均停止時間 [s]	総停止時間 [s]	発生期間を1 年と仮定した アベイラビ リティ[%]	発生期間を1 日と仮定した アベイラビ リティ[%]
対策前	51	106.6	5435.0	99.983	93.71
対策1	51	71.4	3639.1	99.988	95.79
対策2	51	0.7	36.3	100.000	99.96

表2 再粘着判定不能時の停止時間を10分とした場合

	滑走・空転検 知回数[回]	平均停止時間 [s]	総停止時間 [s]	発生期間を1 年と仮定した アベイラビ リティ[%]	発生期間を1 日と仮定した アベイラビ リティ[%]
対策前	51	36.0	1835.0	99.994	97.88
対策1	51	24.3	1239.1	99.996	98.57
対策2	51	0.7	36.3	100.000	99.96



(a) 再粘着判定不能時の停止時間を 30 分とした場合



(b) 再粘着判定不能時の停止時間を 10 分とした場合

図 2 対策の適用効果と発生期間を 1 年とした場合のアベイラビリティ

(5) アベイラビリティの算出結果に基づく適用対策の検討

第4章での検討対象線区に対して提案する車上位検知システムを導入すると仮定した場合について検討する。ただし、この検討においては、機器種別のアベイラビリティ目標値の設定が目的であり、実際に組み込むことまでは実施しない。

アベイラビリティの目標値については第4章での検討対象線区では99.93%から99.95%への改善であり、また、第4章図5に示した構成機器種別ごとのアベイラビリティは大半の機器種別が約99.99%以上である。よって、検討対象線区に提案する車上位検知システムを適用する際に影響を与えないようにするためには、99.99%の目標値達成が必要となる。

例えば、再粘着判定不能時の復旧時間を30分と仮定した場合、表1に示すように、滑走・空転検知回数の期間が1年において99.99%を達成するためには対策2が必須となる。一方、再粘着判定不能時の復旧時間を10分と仮定した場合には、表2に示すように、再粘着判定不能後の復旧までの時間が短いので対策前の状態でも支障はなく対策2の適用は不要である。

また、滑走・空転検知回数の期間が1日とした場合には、アベイラビリティ改善効果が高い対策2の適用による改善は必須となり、この対策以外にも、安全余裕距離の削減や滑走・空転自体の発生頻度低減が不可欠である。

このように適用対象線区の特徴（障害発生頻度と影響度）によって、対策の必要性が異なることがわかる。

なお、上述の値は1編成を対象とした平均停止時間の低減策の適用効果であり、システム内の台数が増加して当該アベイラビリティ値でシステム全体での要求を満たさない場合には、安全余裕距離の削減や滑走・空転の発生自体を減少させる頻度低減対策の検討もあわせて検討する必要がある。

以上の結果は、アベイラビリティ向上策を頻度と影響度に区分して解析することで得られる結果であり、提案するアベイラビリティ向上対策決定法は有効なものとする。

5.4 要約

無線を用いた列車制御システム（CBTC）においては、車上装置での位置検知結果を地上装置に伝送してこの情報をもとに間隔制御を行う点が最も重要であり、第3章で述べた車上位置検知システムにおける再粘着判定に関わるアベイラビリティ改善が必須である。そこで、本章では、第4章で述べたアベイラビリティ向上対策決定法を、第3章で述べる車上位置検知システムに適用し、改善効果を検討した。その際には、簡易評価として、再粘着判定不能の「発生頻度」とその際の影響として「平均停止時間」の両面から比較検討した。

成果の要約は以下のとおりである。

- (1) アベイラビリティ向上対策決定法を車上位置検知システムに適用し、補正開始点を複数選定し補正論理の並列処理による対策が、特に再粘着判定不能後の復旧時間が長い線区において有効であることを示した。これら結果は線区の条件によって異なるが、アベイラビリティ向上対策決定法の有用性を明らかにした。

なお、実際に対策を適用した場合の輸送損失に換算した効果については、適用する線区によって変化する。この点の考慮が必要となる場合は、第4章で述べた詳細な比較検討で実施することになる。

今後の課題と展開としては、対策2における複数の位置補正開始点をいくつ持たせるかについての検討があげられる。実装においては2点まで可能であることを確認しているものの、処理負荷が重くなるデメリットがある。この詳細検討が課題としてあげられる。

なお、この複数の位置補正開始点に対しての補正処理は、つきつめると、常時、位置補正開始点に対して補正処理を行っていることになる。これは、常時慣性センサで位置を検知することを意味する。今後、速度発電機からの出力信号の更なる分解能向上、ならびに慣性センサの精度向上ができれば、補正時間を長くでき、より慣性センサを主体とした処理へと移行できる

と考えている。また、速度発電機でない別の安全性を確保できるパルスセンサの構成が可能になれば、速度発電機を用いない構成も実現可能になると考えている。

参考文献

- (1) IEEE Standard for Communications Based Train Control(CBTC) Performance and Functional Requirements, IEEE Std 1474-1, 1999.12.

第6章 結論

列車制御システムにおいては、高密度の列車運転を可能とするために車上制御装置での速度照査パターンによるブレーキ制御が行われるようになり、車上制御装置での位置検知機能が重要になっている。さらに、無線を用いた列車制御システム（CBTC）の展開が進みつつある。このような速度照査パターンあるいは無線による列車制御システムでは、車上制御装置での列車位置検知結果は、地上制御装置での列車追跡情報として使われるため、より重要になっている。しかしながら、車上位置検知のための方法としては、依然として速度発電機単体による方式が採用され、速度発電機を取り付けた軸での車輪の滑走・空転の影響を受けるため、改善が必要とされている。また、列車制御システムには輸送における高い安全性と安定性の確保が求められている。安全性確保に直結する列車制御システムにおける安全性レベルの選択には実質、余地はないが、輸送の安定性に関係するアベイラビリティについては、列車制御システムを適用する線区の状況を考慮して対策を適用する自由度が残っている。しかしながら、アベイラビリティについては、本来、障害の発生頻度と障害に伴う影響度の二次元的な検討が可能であるが、これまで個々の装置の高信頼化などを中心とするアベイラビリティ向上のための対策検討に留まっているのが実情である。

以上のことに鑑み、本博士論文では、列車制御システム用途での、慣性センサと速度発電機を併用した車上制御装置での列車位置検知手法を提案した。また、現状の鉄道信号装置を対象に障害の発生頻度と障害に伴う影響度の二成分に分けて分析するアベイラビリティ向上対策の決定法を提案した。最後に、提案するアベイラビリティ向上対策決定法を慣性センサと速度発電機を併用した車上制御装置での列車位置検知手法に適用し、その改善策の適用効果を明確化した。

これらの検討を行うことで、列車制御システムにおいて重要な役割を担う車上位置検知システムを新たに開発するとともに、提案するアベイラビリティ向上対策決定法の有用性を示した。

本研究成果は以下のとおりである。

1. 車軸に設置した速度発電機を用いた走行距離の算出方式は、車輪の滑走・空転の影響を受けることから、その対策の一手法として、滑走・空転の検知時に、慣性センサを用いた距離算出方式を提案した。提案手法は、速度発電機と慣性センサを併用した列車速度・距離算出手法であり、非駆動軸を持たない車両や短編成車両でも適用可能である。路線勾配と曲線が組み合わさった区間での補正処理における誤差低減のために、慣性センサの加速度（3軸）と角速度（3軸）を用いた補正処理を適用し、現車試験で時刻管理して記録したデータにもとづくシミュレーション解析を行い、提案手法の有効性を明らかにした。
2. 鉄道信号装置の目標アベイラビリティ達成のための対策の決定法を提案した。提案手法では、目標アベイラビリティを達成するための対策について、単位時間あたりの障害件数の低減成分と、1障害あたりの平均停止時間の短縮成分の両面から総合的に考慮して戦略的に決定する。これにより、線区ごとに異なる障害内容に応じた効果の高い対策の適用を可能にする。目標アベイラビリティについては、構成機器の故障による遅延を受けた乗客数で定義した輸送損失を反映して設定し、提案手法を適用している。この結果、障害発生頻度と障害発生後の影響を総合的に考慮して、戦略的に効果的な適用対策を決定できることを明らかにした。
3. アベイラビリティ向上対策決定法を車上位置検知システムに適用し、補正開始点を複数選定し補正論理の並列処理による対策が特に再粘着判定不能後の復旧時間が長い線区において有効であることを示した。これら結果は線区の条件によって異なるが、アベイラビリティ向上対策決定法の有用性を明らかにした。

提案する速度発電機と慣性センサを併用した車上位置検知システムは、非駆動軸を持たない車両や短編成列車だけでなく、近年導入が進みつつある無線を用いた列車制御システム（CBTC）にも適用可能なものであり、列車制御システムの基盤となる成果である。また、提案する障害の発生頻度と障害に伴う影響度の二成分に分けて分析するアベイラビリティ向上対

策決定法は、システムの障害データに基づく新たな手法であり、装置間がネットワーク接続され大規模化した列車制御システムの評価において基盤となる成果と考える。

略語および記号の説明

略語・記号	説明
ATACS	Advanced Train Administration and Communications System
CBTC	Communication Based Train Control
RAMS	Reliability, Availability, Maintainability, Safety
SIL	Safety Integrity Level
ATS	Automatic Train Stop
ATC	Automatic Train Control
T	Compensation duration
Ta	Threshold to detect skids or slips
Ap	Acceleration with tachometer generator
Ap_0	Acceleration with tachometer generator at $t=0$
a_x	Longitudinal acceleration with inertial sensor
a_{y0}, a_{z0}	Lateral, vertical acceleration with inertial sensor at $t=0$
A_x	Longitudinal acceleration for attitude sensing
A_{x0}, A_{y0}, A_{z0}	Longitudinal, lateral, vertical acceleration for attitude sensing at $t=0$
$\omega_x, \omega_y, \omega_z$	Roll, pitch, yaw angular velocity with inertial sensor
ω_y'	Compensated pitch angular velocity considering yaw angular velocity
ω_y''	Compensated pitch angular velocity considering yaw and roll angular velocity
ω_{z0}	Yaw angular velocity with inertial sensor at $t=0$
Ω_{z0}	Yaw angular velocity on a horizontal plane at $t=0$
θ, ψ	Pitch, roll angle
θ_0, ψ_0	Pitch, roll angle at $t=0$
jp	Jerk calculated with tachometer generator

j_i	Jerk calculated with longitudinal acceleration of inertial sensor
v_0	Velocity with tachometer generator at $t=0$

謝 辞

本論文をまとめるにあたり，日常的な研究ご指導の上に，指導教員として御指導ご鞭撻を頂きました長岡技術科学大学 平尾裕司 教授には，心より感謝しお礼申し上げます。

また，本博士論文を審査いただきました長岡技術科学大学 門脇敏 教授，福田隆文 教授，阿部雅二郎 教授，木村哲也 准教授にお礼申し上げます。

第2章に述べた，列車制御システムとアベイラビリティに関する課題については，平尾裕司 教授の直接のご指導のもとに実施した研究の成果である。

第3章に述べた，慣性センサを併用した車上位置検知システムの評価については，平尾裕司 教授の直接のご指導のもとに実施した研究の成果である。

本試験を実施するにあたり，多大なるご協力をいただいた西日本旅客鉄道株式会社 関係者各位に厚く感謝いたします。

(株)京三製作所 浅野晃 氏，記虎正幸 氏には試験装置を試作していただき，また，貴重なご助言をいただいたことに厚く感謝いたします。

測定実施においては(公財)鉄道総合技術研究所 信号・情報技術研究部 列車制御研究室 副主任研究員 杉山陽一 氏，副主任研究員 北野隆康 氏にご協力いただいたことに感謝いたします。

測定・解析においては，(株)京三製作所 山道孝 氏にご協力をいただいたことに厚く感謝いたします。

また，(公財)鉄道総合技術研究所 信号・情報技術研究部 (前)列車制御研究室 室長 福田光芳 氏に貴重なご助言をいただいたことに感謝いたします。

第4章に述べた，目標アベイラビリティ達成のための対策決定法における手法の体系化については，平尾裕司 教授の直接のご指導のもとに実施した研究の成果である。また，(公

財) 鉄道総合技術研究所 理事 渡辺郁夫 氏, 信号・情報技術研究部 部長 平栗滋人 氏, (前) 列車制御研究室 室長 福田光芳 氏に貴重なご助言をいただいたことに感謝いたします。

第5章に述べた, 車上位検知システムのアベイラビリティ改善策の適用効果の算出については, 平尾裕司 教授の直接のご指導のもとに実施した研究の成果である。

補正開始点を複数選定し補正論理の並列処理による対策については, 論理確認のためにおいては, (公財) 鉄道総合技術研究所 列車制御研究室 齋木翔太 氏, 太田佑貴 氏に貴重なご助言をいただいたことに感謝いたします。

本研究を進めるにあたり, 適切な研究環境を整えていただいた(公財)鉄道総合技術研究所 理事 渡辺郁夫 氏, 信号・情報技術研究部 部長 平栗滋人 氏, 信号・情報技術研究部 上席研究員 山本春生 氏に深く感謝申し上げます。

筆者が発表した論文

[第2章]

- (1) 内外の高速鉄道技術の相違と特徴に関する調査専門委員会：「国内外における高速鉄道技術」，電気学会，技術報告，2014.3

※内外の高速鉄道技術の相違と特徴に関する調査専門委員会 幹事として執筆

(第19回優秀技術活動賞 技術報告賞 代表：奥谷 民雄)，2016.4

[第3章]

- (1) 岩田浩司，山道孝，杉山陽一，北野隆康，浅野晃：「車輪の滑走・空転補正に慣性センサを用いた距離算出方式の適用検討」，電子情報通信学会技術研究報告，DC，ディペンダブルコンピューティング，114(384)，pp45-50，2014.12
- (2) 岩田浩司，山道孝，杉山陽一，北野隆康：「慣性センサを併用した複合型位置検知システムの開発」，鉄道総研報告，第30巻，第1号，2016.1
- (3) Koji Iwata, Takashi Yamamichi, Yoichi Sugiyama, Takayasu Kitano, Train Position Detection System by Means of Inertial Sensors Together with a Tachometer Generator, Quarterly Report of RTRI, Vol.57, No.4, pp293-299, 2016.
- (4) 岩田浩司，山道孝，杉山陽一，北野隆康，浅野晃，平尾裕司：「無線を用いた列車制御システムにおける速度発電機と慣性センサを併用した距離算出法」，電気学会論文誌D，Vol.136，No.12，pp.915-924，2016

[第4章]

- (1) 岩田浩司，平栗滋人，渡辺郁夫：「鉄道信号装置のアベイラビリティ向上のための評価法の検討」，電子情報通信学会技術研究報告，DC，ディペンダブルコンピューティング，107(367)，pp19-24，2007.11
- (2) 岩田浩司，平栗滋人，渡辺郁夫：「鉄道信号装置のアベイラビリティを観点とした評価法の検討」，第38回信頼性・保全性シンポジウム，2008.7，日本科学技術連盟

(第 38 回信頼性・保全性シンポジウム 奨励報文賞受賞)

- (3) 岩田浩司, 平栗滋人, 渡辺郁夫:「アベイラビリティを観点とした信号設備の評価法」, 鉄道総研報告, 第 23 巻, 第 1 号, 2009.1
- (4) Koji Iwata, Shigeto Hiraguri, Ikuo Watanabe, Evaluation Methods for Railway Signalling Systems from the Viewpoint of Availability, Quarterly Report of RTRI, Vol.50, No.3, pp152-157, 2009.
- (5) Koji Iwata, Shigeto Hiraguri, Ikuo Watanabe, Study on Evaluation Methods Based on Availability for Improvement of Railway Signalling Systems, Proceedings of Symposium FORMS/FORMAT 2008, pp217-224, 2008.10, ISBN 978-963-236-138-3.
- (6) 岩田浩司, 平栗滋人, 渡辺郁夫, 平尾裕司:「鉄道信号装置の目標アベイラビリティ達成のための対策決定法」, 信頼性シンポジウム発表報文集 2015_秋季(28), pp97-100, 2015.12, 日本信頼性学会
(第 28 回秋季信頼性シンポジウム 優秀賞受賞 2016.5)
- (7) 岩田浩司, 平栗滋人, 渡辺郁夫, 平尾裕司:「鉄道信号装置の目標アベイラビリティ達成のための対策決定法」, 日本信頼性学会誌, 信頼性 38(1), pp67-74, 2016.1
- (8) 岩田浩司:「鉄道信号装置の安全性確保の考え方と目標アベイラビリティ達成のための対策決定法」, IEEE Reliability Society Japan Joint Chapter Seminar, 2016.6 【講演のみ】

[その他の主な発表]

- (1) 岩田浩司, 西堀典幸, 平尾裕司:「無線による列車制御システム CARAT の事前安全性解析」, 鉄道総研報告, 第 13 巻, 第 8 号, pp39-44, 1999.8
- (2) 岩田浩司, 西堀典幸, 平尾裕司:「列車保安制御用ソフトウェアの検証法の検討: COMBAT を対象とした解析」, 電子情報通信学会技術報告, DC, ディペンダブルコンピューティング, 103(535), pp15-22, 2003.10
- (3) IWATA Koji , WATANABE Ikuo , HIRAO Yuji , HIRAGURI Shigeto , NAKAMURA Hideo , SAITO Yoshihisa, Study on Quantitative Evaluation Methods for Safety of Railway Signalling Systems, Proceedings of International Symposium on Seed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems, STECH 2003, pp276-281, 2003.
- (4) 岩田浩司, 渡辺郁夫, 平尾裕司:「国際規格にもとづくディペンダブルソフトウェアの開発手法について」, 電子情報通信学会技術報告, DC, ディペンダブルコンピューティング, 104(533), pp19-24, 2004.12
- (5) 岩田浩司, 渡辺郁夫:「リスクに基づく鉄道信号システムの改善効果の評価法」, 鉄道総研報告, 第 24 巻, 第 3 号, 2010.3
- (6) 岩田浩司, 渡辺郁夫:「列車制御システムソフトウェア要求仕様の安全確認項目の設定による誤り低減の検討」, 電子情報通信学会技術報告, DC, ディペンダブルコンピューティング, 110(333), pp37-42, 2010.12
- (7) 岩田浩司:「列車制御システムの概念設計段階における安全性確認手法」, 鉄道総研報告, 第 26 巻, 第 7 号, pp5-10, 2012.7
- (8) K.Iwata, Y.Hirao, A Method to Verify System Requirements Specifications Based on Safety Requirements for Train Control Systems, FORMS/FORMAT 2012, 9th Symposium on Formal Methods, 2012.12.
- (9) 岩田浩司:「列車制御システムにおける安全要件の定量的検討」, 電子情報通信学会技術研究報告, SSS, 安全性, 114(4), pp5-8, 2014.4
- (10) 岩田浩司:「列車制御システム仕様書の安全性確認項目の提案」, 鉄道総研報告, 第 28 巻,

第 11 号, pp25-30, 2014.11

- (11) 岩田浩司, 齋木翔太, 杉山陽一, 他: 「慣性センサと速度発電機を用いた線路特徴点検出による列車長算出手法」, 電子情報通信学会技術報告, DC, ディペンダブルコンピューティング, 115(382), pp65-70, 2015.12
- (12) 岩田浩司, 齋木翔太, 太田佑貴, 記虎正幸, 浅野晃: 「慣性センサと速度発電機を併用した線路特徴点検出による列車長算出手法」, 電子情報通信学会技術報告, DC, ディペンダブルコンピューティング, 116(373), pp31-36, 2016.12