

論文審査の結果の要旨

氏名：高 田 哲 也

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：無線式列車制御システム（CBTC）用連動装置の開発と安全性評価に関する研究

審査委員：（主査） 教授 高 橋 聖
（副査） 教授 吉 川 浩 特任教授 泉 隆
名誉教授 中 村 英 夫

本研究の研究領域は、鉄道信号保安に関するものである。列車運転の安全を確保するには、走行する車両が健全であることが第一に必要であり、次に軌道が完全であり、レールに破断や落石などの障害物があってはならない。その上で、列車衝突が起こらないように、先行列車と次列車との間隔を維持し、また、単線区間にあつては、駅間で対向する列車間の調停を万全に行わなければならない。これを閉そく装置が司る。また、駅構内において分岐箇所がある場合、所定の進路を確保して列車や車両を運転する際に、脱線したり別の走行路に進入してしまったりしてはならない。この処理を行う装置を連動装置という。これらを総称して信号保安装置という。現在の信号保安装置は、列車の位置検知を、軌道回路をベース（固定閉そく）とした列車制御方式が主流であるが、列車の位置検知を、列車での位置検測をベースとした無線式列車制御システム（CBTC：Communication Based Train Control）が移動閉そくを実現するものとして実用化が進んできている。CBTCによる移動閉そくの考えを取り入れた効率の良い列車制御は、既に駅間において実現されている。しかしながら、駅構内では軌道回路などによる列車検知に基づく既存の連動装置に頼っているため、移動閉そくの効果を発揮できていない。軌道回路による固定閉そく式に対して移動閉そくを実現することは、駅構内の能率的運転に効果があることから、駅構内の移動閉そくを可能とするCBTC用連動装置を開発することが求められていた。

以上のような課題に対し、申請者は、駅構内の移動閉そくを可能とするCBTC用連動機能として、従来の進路ではなく安全が確保できる地点までを許容する走行路確保による制御方式を確立した。そして、この方式を実現するために、「支障点」という概念を導入し、要求走行路上に支障点が発生した場合は、要求走行路に対して該当列車の先頭位置から支障点までをその列車への占有権として与えることで列車制御を行うという考え方を提案している。そして、提案した方式によるCBTC用連動装置を開発し、既存の鉄道路線や路面電車向けシステムをケーススタディとしてシミュレーションによる動作確認を行っている。さらに、開発したCBTC用連動装置の安全性評価について、既存の解析方法を整理したうえで、新たな安全性解析手法を提案し、その有効性を明らかにするとともに、CBTC用連動装置の安全性が問題ないことを示した。

以上のように、申請論文は、社会に与える影響も大きく、また技術領域での水準も高いものである。以下、論文の章立てに沿って審査の内容を報告する。

論文は、第1章の序論から第6章の結論に至る全6章から構成されている。

「第1章 序論」では、本研究の背景や位置づけ、目的および概要がわかりやすく説明されている。近年の情報通信技術の発達により、鉄道分野にもCBTCが導入され始めていること、そしてCBTCを連動装置に適用することの有用性および課題について述べることで、本研究の課題を明確に浮き上がらせており、申請論文の重要性が明確にされている点で評価できる。

「第2章 鉄道信号用連動装置の機能と課題」では、CBTCの効果を確認するとともに、鉄道信号用連動装置の機能と課題や、効率的な連動機能の実現のためには、CBTCを連動装置に適用することが有効であることを説明している。まず、既存の軌道回路をベースとした固定閉そくによる列車制御に対して、列車の位置情報を基にした列車位置検知をベースとした移動閉そくによるCBTC化の効果をシミュレーションで比較し、CBTC化の有効性を明らかにしている。この結果から、移動閉そくによるCBTC化が、駅構内における連動装置にも必要であることを述べている。また、既存の電子連動装置は、継電連動のシーケンスロジックを基にしているため、制御論理は駅別仕様に基づく駅別のデータによることから、

連動機能自体の安全性は、駅ごとに確認する検査方法がとられていることも課題であることを述べている。本章は、CBTCの効果を確認するとともに、CBTCを連動装置に適用することの重要性を指摘することで、CBTC用連動装置開発の意義を明確にしている点で評価できる。

「第3章 CBTC用連動装置の提案」では、第2章で述べられた課題等を基に、その課題を克服するための手法として、走行路確保の考え方による移動閉そくが可能な連動機能の実現方法を提案し、その仕組みを説明している。まず、CBTC用連動装置における走行路確保の考え方を示し、列車を安全に運転するための条件を整理している。そして、この条件を実現するために、列車の進める範囲を制限する点として「支障点」の概念を導入し、要求走行路上に支障点が発生した場合は、要求走行路に対して列車先頭位置から支障点までをその列車への占有権として与えることで駅構内で移動閉そくを実現する考え方を提案している。そして、この考え方に基づいたCBTC用連動装置を提案し、その連動機能を詳細かつ丁寧に説明している。本章は、駅構内の連動機能にCBTCによる移動閉そくの考えを取り入れるための条件を整理し、要求走行路上に「支障点」を設置するという発想から、この条件を満足する新たな連動装置を開発しており、その独創性ととも高く評価できる。

「第4章 既存安全性評価手法の検討」では、既存の安全性評価の現状と問題点を整理している。グローバル化に伴い、鉄道におけるシステム全体の安全性・信頼性の評価には、鉄道の国際規格RAMS (IEC62278)への対応が要求される。この規格では、安全性に対する評価には定量的解析が求められている。まず、既存の安全性評価手法であるFMEA (Failure Mode and Effects Analysis) およびFTA (Fault Tree Analysis)と、新たな安全性評価手法として着目されるSTAMP (Systems-Theoretic Accident Model and Processes)の特徴とそれぞれの課題について簡潔に説明している。FTAではシステムの不具合モードから解析を深度化させていくが、解析の終端はソフトウェアのバグではなく、機能モジュールの機能不具合にとどまらざるを得ない。一方FMEAではソフトウェアの故障の定義やその影響を評価する方法論がない。これに対してSTAMPは、FTAやFMEAなどの事故評価モデルでは見つけることが難しかった、システム全体の設計に起因する事故原因を特定しやすい手法である。しかしながら、STAMP解析そのものの結果では、定性的な解析結果としては有効であるが、その結果を定量的解析に結び付けることは難しいという課題を抱えている。本章は、既存の安全性解析手法の特徴と課題を整理することで、続く第5章で提案される新しい安全性解析手法の必要性を際立たせるための的確な内容を含んでいる点で評価できる。

「第5章 新しい安全性解析手法の提案とCBTC用連動装置の安全性評価」では、STAMPを利用した新しい安全性評価手法を提案し、この手法に基づき、第3章で提案したCBTC用連動装置の安全性評価を行っている。開発した連動装置の安全性評価については、これまでの経験則による結果にて評価をすることはできないため、新たな解析手法が必要である。このため申請者は、STAMP/STPAの概念に基づく解析とFTAの長所に着目した新たな安全性解析手法を提案した。提案された手法は、FTAでは見逃されていた「構成要素間のインタフェースの齟齬に起因する障害」を含めた網羅性、STAMPでは難しかった定量解析について双方を満たすことができる画期的な手法であると言える。また、本章では、管理プロセスを構築・展開し、リスク検知手段、リスクの見える化、管理プロセスの手段を確立し、安全性解析の活動の一つとして示している。なお、この方式により抽出した事故に至るシナリオは、制御する上での本質的な考えに基づき抽出できることから、今後新しいシステムを構築するに当たっても評価基準となり得る点で評価できる。

「第6章 結論」では、申請者の行った研究の成果や今後の課題を述べている。本研究で取り上げたこれまでのCBTCシステムでは、駅構内において既存の連動装置を用いているため、移動閉そくが実現できないという課題があったが、CBTC用連動装置の実現を目的とした本研究によって、この課題に対して十分な成果が得られたことを明確に結論づけている。

申請者の研究は、情報通信技術を利用した無線式の列車制御システムであるCBTCの移動閉そく制御を、駅構内部分にも拡張し、より効率的な運転方式を実現するCBTC用連動装置への道を切り開いたものである。また、新たな安全性解析手法を提案し、その有効性を明らかにするとともに、CBTC用連動

装置の安全性の評価に適用し問題ないことを示している。本研究の成果は、広く世界の鉄道産業の発展にも貢献する可能性を持っているものとして非常に高く評価できる。

以上のことは、本論文の申請者が自立して研究活動を行い、又はその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令和2年2月20日