

早稲田大学大学院 理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

安全性・信頼性向上のための鉄道信号
システムの設計手法に関する研究

Study on Design Techniques of Railway Signalling
System for Enhancing Safety and Reliability

申 請 者

奥谷	民雄
Tamio	Okutani

電気・情報生命専攻 コンピュータ援用電磁工学研究

2007 年 11 月

1. 研究の背景

近年、鉄道に対する期待は世界的に高まっている。特に高速鉄道に対しての期待は大きく、国内では整備新幹線の建設が進められ、欧州各国でも高速鉄道の建設が進められている。一方、アジアでも台湾新幹線が開業し、中国においては 200 [km/h] の列車運行が広範囲な区間で開始された。さらに、経済成長が著しいアジア各国を中心に多数の都市内鉄道計画が進められている。日本国内での新幹線は 1,000[km]以下の主要な輸送機関であり、大都市圏の在来線・地下鉄線区は、高密度大量輸送を行っている。一方、地球温暖化防止の観点から二酸化炭素の排出量削減に関する京都議定書（1997 年 12 月）では、日本の削減数値目標を 94% とした。しかし、現状の二酸化炭素の排出量は削減どころか増加しており、特に運輸・民生部門での増加が目立っている。鉄道は、自動車や航空機に比較してエネルギー効率が良く、輸送部門での利用向上により二酸化炭素排出の削減が期待される。より一層の利用向上には、高速化と運転頻度の向上により利便性の向上が必要であり、安全で安定した運行を実現することが何よりも重要である。

信号システムは列車運行の安全確保と線路利用効率の向上を目的としている。信号システムの安全性を担っていた素子は長らく信号用リレーであったが、近年マイクロコンピュータ（MPU）を用いて安全性を確保する様々な手法が提案され、連動装置や自動列車制御装置（ATC）等の安全性確保の中心的装置に導入されている。しかし、信号システムは、その歴史的経緯から、複数の装置を組合せて実現しており、必ずしも最適なシステム構成が実現しているとは言えない。したがって、安全性、信頼性および保守性のより向上した経済的な信号システムを実現する設計手法が求められている。

また、具体的システムとして新幹線と高密度線区に設備される ATC 装置は、レールに制御情報（ATC 信号）を流し、地上装置から車上装置への情報伝達を行う。一方、近年の車両の電動機制御方式は、GTO・IGBT を用いた PWM コンバータ/インバータ（C/I）による誘導電動機制御方式が主流である。帰線電流には PWM C/I による高調波電流が含まれ、この高調波電流は ATC に対する妨害電流となる。しかも、従来用いられていたダイオード整流とトランスタップ制御やサイリスタ位相制御方式の高調波は、周波数の増加とともに漸減する傾向であったものが、PWM C/I では特定の周波数帯に大きな高調波電流が発生する。こうした信号システムに対する高調波電流による妨害問題は、信号設備と車両の電磁両立性（EMC）として従来から課題となっている。EMC においては、妨害発生源・妨害伝達経路・妨害量と妨害を受ける側の信号設備の妨害許容値を把握することが重要である。またこれらの妨害発生量と許容限度値を予測して信号システムを設計することは有効な手法である。

2. 論文の概要

第1章においては、本研究の背景と概要について述べ、その位置付けと意義を示す。

第2章においては、単線線区の複数の行違い駅を有する線区全体を1組の電子連動論理部で制御する信号方式の開発手法について記述する。従来の標準的な信号方式では、各連動駅に連動装置と遠隔制御（CTC）駅装置を、連動駅間には閉そく装置を設け、指令所にはCTC中央装置を設備し、線区内の各駅の制御を行っていた。これを、指令所に電子連動論理部を1組設置し、各駅には信号機、電気転てつ機および軌道回路と接続する電子端末を設置する方式とした。この方式の実現のために、各駅の電子端末と指令所の電子連動論理部の接続に長距離伝送が可能なSM光ケーブル用フェールセーフ（FS）光伝送部を開発した。この信号方式の開発により、各駅に設けていた連動装置とCTC駅装置を不要とし、各駅間に設けていた通信ケーブルとリレーを用いた閉そく装置も不要とした。本システムでは、閉そくを確保する方式に新たな方式を採用したことから、本システムの安全性について故障モード影響解析（FMEA）を行い、さらに故障木解析（FTA）を実施し、列車の衝突、脱線等の危険事象となる事象分析を行った。その結果、新たな対策を付加したことにより危険事象に至る可能性が低下していることが確認された。さらに、FTAの結果から各部の多重部分故障時の動作について、実際に多重故障状態を人為的に起こした状態で試験列車を走行して確認する動的試験を実施し、いずれの故障状態の組合せでも安全性が確保されていることを確認した。このことから信号装置の新たな方式を開発する場合にFMEAおよびFTAによる安全性検証を実施する有効性を確認した。開発したシステムは、1991年1月に井原鉄道井原線（井原・神辺間41.7[km]）に適用され、その後、土佐くろしお鉄道阿佐線（御免・奈半利間42.7[km]、2002年7月開業）、仙台空港線（名取・仙台空港間7.2[km]、2007年3月開業）等の線区に適用されている。

第3章においては、通勤線区の運転本数24[本/h]、運転最高速度[130km/h]を満たし、直流1,500[V]および交流50[Hz]20[kV]の複き電方式に適用するATCの開発手法について記述する。要求された高密度・高速性は、従来の到達水準を越える上に、通勤線区として初めての交流・直流複き電方式である。要求された高密度・高速化に対応するには多数のATC情報数が必要であり、従来のAM変調系のアナログ伝送方式では信号周波数選択が困難である。そこで、MSK変調による符号伝送方式を採用し情報量の増加を図った。一方、ATC信号に対する主な妨害波は、交流き電区間での車両のPWMコンバータ/インバータ（C/I）の発生する高調波である。この高調波は、PWMの搬送波の偶数次高調波に付随する電源周波数の奇数次高調波であり、3～6[kHz]帯では1[A]以上と想定される。そこで、ATCとPWM C/Iの搬送周波数をそれぞれ変え、妨害許容値と妨害発生量を予測し、両者が両立可能な周波数を選定し、所定のATCを実現した。本ATCシステムは、つくばエクスプレス線（秋葉原・つくば間58.3[km]、2005年8月開業）に適用した。

第4章においては、北陸新幹線（高崎・長野間）における異周波き電におけるATCに対する異周波妨害対策法の開発手法について記述する。新幹線ATCは電源同期SSB方式を通信方式としているため、異周波電源の突合せ箇所では、相互にその帰線電流に含まれる高調波が相手方区間に流れATCに対する異周波妨害を生じる。電源同期SSB方式のATCに対する同種の妨害として津軽海峡線（新中小国・木古内間、1988年開業）において、電源周波数制御が独立した50[Hz]き電境界におけるATCに対する非同期妨害対策法を開発して実施した。この「津軽方式」を基にした北陸新幹線における対策では、き電回路構成等の相違から妨害許容値を超え、より妨害電流を低下させる対策方法の開発が必要となった。対策方法の策定に当たっては、帰線電流は低抵抗で分布接地されるレールに流れるため大地帰路多線条回路網解析による誘導予測計算を実施し、き電回路構成、軌道回路構成および軌道回路周波数等を変更して妨害電流が許容値以下となる新たな「軽井沢方式」と呼称する対策方法を開発した。設備完成後、擬似列車試験および実車走行試験により妨害量の実測を行い、異周波妨害対策が有効に機能し妨害電流が許容値以下となっていることを確認した。北陸新幹線（高崎・長野間117.4[km]、1997年10月開業）に開発した対策法を適用した。

第5章においては、これまで実施してきたATCに対する異周波／非同期妨害対策における予測計算結果と実測結果には0.2～3倍程度の乖離が見られ、対策が過大または過小になっているおそれがあり、予測計算の高精度化する手法について記述する。予測計算値が実測と乖離する原因として計算対象に含めていない導体の存在に着目した。鉄道線路を構築する高架橋およびトンネルには、多数の鉄骨・鉄筋が使用され、これらの導体は低抵抗で接地されているので、誘導電流に対する遮蔽導体となる。したがって、これらの遮蔽導体の存在が誘導電流に影響を与え、計算精度が低下していると考えられる。そこで、これらの遮蔽導体を計算対象導体に含めることを目的に、新幹線のトンネルおよび高架橋に試験設備を仮設して、遮蔽導体の影響を解明し遮蔽導体をモデル化するための実測を行った。さらに、遮蔽効果に大きな影響を与えるパラメータとして、トンネルにおいてはトンネル支保抗の接地抵抗および支保抗とタイロットの接続抵抗の実測と解析を行い、これらパラメータの範囲と影響を明らかにした。また、高架橋については、パラメータとして高架橋間の接続抵抗と高架橋基礎の接地抵抗とし、それぞれの実測と解析を行い、パラメータの変動範囲とその影響を明らかにした。得られたパラメータを用いて遮蔽導体をモデル化し、大地岐路多線条回路網に取り入れて計算し、誘導電圧測定試験での試験結果と比較した結果、両者は良く一致し、遮蔽導体のモデル化手法は妥当であることを明らかにした。したがって、トンネルおよび高架橋の鉄筋等をこのモデル化手法を用いて、誘導予測計算に組み込めば、高精度の誘導電圧を予測可能となる。

第6章においては、本研究の結論および今後の課題を明らかにした。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 奥谷 民雄 印

(2007年10月 現在)

種 類 別	題名	発表・発行掲載誌名	発表・発 行年月	連名者（申 請者含む）
○論文	高速・高密度・通勤線区用 ATC 装置の開発	電気学会論文誌 Vol.127D No.10 p.p.1033-1042	2007, 10	奥谷民雄 中村信幸 入江章二 長 宏樹 佐野 実 池田圭吾 小澤寛之
○論文	山岳トンネルの電磁遮蔽効果に対する解析手法の高度化	電気学会論文誌 Vol.127D No.4 p.p.391-399	2007, 4	奥谷民雄 中村信幸 寺田夏樹 福田光芳 館 裕 稲田 聡 伊藤秀憲 若尾真治
論文	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の構築手法の検討	電気学会論文誌 Vol.125D No.7 p.p.681-690	2005, 7	福田光芳 渡辺郁夫 寺田夏樹 島添敏之 奥谷民雄
論文	連動図表における配線略図の電子的表現法の研究	電気学会論文誌 Vol.125D No.7 p.p.729-737	2005, 7	関根 俊 奥谷民雄
○論文	北陸新幹線における ATC 装置に対する異周波妨害対策法の開発	電気学会論文誌 Vol.121D No.1 p.p.31-42	2001, 1	奥谷民雄 犀川 潤 館 裕
○論文	鉄道信号用線区集中電子連動システムの開発と評価	電気学会論文誌 Vol.119D No.11 p.p.1307-1314	1999, 11	奥谷民雄 島添敏之
講演	A Theoretical Calculation Method of the Return Current Harmonics caused by the PWM Converters of AC EMU	RTS 2007（掲載決定済）	2007, 11	T. Ogawa Y. Son S. Wakao T. Okutani S. Hatsukade T. Watanabe S. Kojima
講演	新幹線用無絶縁 ATC 軌道回路の開発（試験報告）	電気学会研究会資料 交通・電気鉄道研究会 TER-07-37	2007, 9	奥谷民雄 他 8 名
講演	新幹線高架橋での電磁誘導測定試験と解析	電気学会研究会資料 交通・電気鉄道、リニアドライブ合同研究会 TER-07-26/LD-07-22	2007, 7	孫 佳男 小川知行 若尾真治 奥谷民雄 他 4 名

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題 名	発 表 ・ 発 行 掲 載 誌 名	発 表 ・ 発 行 年 月	連 名 者（申 請 者 含 む）
講演	交流鉄道車両用コンバータによる 帰線電流高調波の理論計算手法の 検討	電気学会研究会資料 交通・電気鉄 道研究会 TER-07-20	2007, 5	小川知行 若尾真治 奥谷民雄 他 2 名
講演	新幹線信号設備の EMC	電気学会研究会資料 交通・電気鉄 道 ITS 合同研究会 TER-06-88/ITS-06-45	2006, 11	奥谷民雄 他 9 名
講演	高架橋の電磁遮蔽効果を考慮した 誘導予測計算法の提案(2)	電気学会研究会資料 交通・電気鉄 道 ITS 合 同 研 究 会 TER-06-87/ITS-06-44	2006, 11	三枝雄一郎 小川知行 孫佳男 若尾真治 奥谷民雄 他 4 名
講演	新幹線用無絶縁 ATC 軌道回路の開 発	電気学会研究会資料 交通・電気鉄 道 ITS 合 同 研 究 会 TER-06-89/ITS-06-46	2006, 11	奥谷民雄 他 7 名
講演	高架橋の電磁遮蔽効果を考慮した 誘導予測計算法の提案	電気学会研究会資料 交通・電気鉄 道研究会 TER-06-72	2006, 9	小川知行 三枝雄一郎 若尾真治 奥谷民雄 他 4 名
講演	鉄道の EMC に関わる海外規格の 動向	電気学会研究会資料 交通・電気鉄 道 半 導 体 変 換 合 同 研 究 会 TER-06-39/SPC-06-86	2006, 3	渡邊朝紀 真部健一 古谷勇真 奥谷民雄
講演	電気鉄道用語の整合性 ―信号分 野―	電気学会研究会資料 交通・電気鉄 道研究会 TER-05-65	2005, 10	山本正宣 奥谷民雄 他 11 名
講演	整備新幹線向け信号設備の機能仕 様の分析	電気学会研究会資料 交通・電気鉄 道研究会 TER-05-41	2005, 9	寺田夏樹 福田光芳 渡辺郁夫 奥谷民雄
講演	高速・高密度・通勤線区用 ATC 装 置の開発	電気学会研究会資料 交通・電気鉄 道研究会 TER-05-42	2005, 9	奥谷民雄 他 6 名
講演	つくばエクスプレス線での EMC 対策事例紹介	電気学会産業応用部門大会講演論 文集 3-S2-5	2005, 8	奥谷民雄
講演	多線条回路網解析における大地帰 路相互インピーダンスの計算方式 に関する一考察	電気学会全国大会講演論文集 5-201	2005, 3	伊藤秀憲 若尾真治 奥谷民雄
講演	要求分析に基づく信号システムの 構築と評価	鉄道におけるサイバネティクス利 用国内シンポジウム論文集 論文 番号 101	2004, 11	福田光芳 他 3 名 奥谷民雄
講演	デジタル符号伝送方式 ATC 地上 装置の開発―つくばエクスプレス ATC 地上装置―	鉄道におけるサイバネティクス利 用国内シンポジウム論文集 論文 番号 622	2004, 11	奥谷民雄 他 7 名

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名	発表・発行掲載誌名	発表・発行年月	連名者（申請者含む）
講演	鉄道における状態監視・危険予知の技術に関する協同研究委員会活動および成果について	電気学会研究会資料 交通・電気鉄道研究会 TER-04-60	2004, 10	奥谷民雄 他 4 名
講演	鉄道信号システムの自然災害に対する耐性	電気学会全国大会講演論文集 R3-1-3-2	2004, 8	真部健一 他 3 名 奥谷民雄
講演	要求分析とアベラビリティ評価に基づく鉄道信号システム構築の検討	信 学 技 報 , Vol.103, No.535, DC2003-86	2003, 11	寺田夏樹 他 3 名 奥谷民雄
講演	New Strategy for Configuration of Signalling System	Paper of the International Conference IRSE ASPECT 03 p.p.115-119	2003, 9	N. Terada M. Fukuda I. Watanabe T. Shimazoe T. Okutani
講演	トップダウン的な要求分析による信号システム構築の検討	電気学会産業応用部門大会講演論文集 III-117-3-16	2003, 8	福田光芳 他 3 名 奥谷民雄
講演	信頼性分析に基づいた信号設備構成安の評価	電気学会産業応用部門大会講演論文集 III-105-3-13	2003, 8	寺田夏樹 他 4 名 奥谷民雄
講演	鉄道信号システムの自然災害時における影響評価の考察	電子情報通信学会ディペンダブルコンピューティング研究会 3	2002, 12	真部健一 他 4 名 奥谷民雄
講演	無人運転システムの標準化について	鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 J-RAIL	2002, 11	水間 毅 他 2 名 奥谷民雄
講演	集中電子踏切システムにおける踏切制御の安全性	電子情報通信学会 FTS 研究会	2001, 12	奥谷民雄 他 3 名
講演	集中電子踏切システムの開発ー踏切制御における安全性強化策の検討ー	鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集	2001, 12	奥谷民雄 他 3 名
講演	A Centralised Interlocking System for Low-density Line Signalling with a Predictive Monitoring System	Proceedings of the Posters of the 5th World Congress on Railway Research "WCRR 2001", 267, Cologne (Germany)	2001, 11	T. Shimazoe T. Okutani
講演	Safety of Level Crossings on the Integrated Crossing Control System Using Electronic Controller	Proceedings of 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics "ISIE 2001", FrA4-04, Pusan (Korea)	2001, 6	T. Shimazoe T. Okutani
講演	線区集中形設備監視装置の開発-井原線に適用した信号踏切設備の集中監視装置-	鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集	1999, 11	奥谷民雄 他 3 名
講演	信号方式による在来線高速運転の安全検証-高速進行信号を導入した160km/h 運転の実施試験-	鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集	1997, 11	宇賀神博 白戸宏明 奥谷民雄 内田東作