

階層化による統合型列車制御システム
の開発に関する研究

令和4年 4月

齊 藤 嘉 久

階層化による統合型列車制御システム の開発に関する研究

目 次

第1章 序論.....	1
1. 1 本研究の背景	1
1. 2 本研究の概要	3
1. 3 第1章のまとめ	4
1. 4 第1章の参考文献	5
第2章 既存列車制御装置・システムの特徴と分析	7
2. 1 はじめに.....	7
2. 2 鉄道信号システムの構成と各装置の役割	7
2. 2. 1 閉そく方式（装置）	8
2. 2. 2 連動装置	12
2. 2. 3 列車保安制御 ATP（ATS・ATC）装置	14
2. 2. 4 踏切保安装置	15
2. 3 第2章のまとめ.....	16
2. 4 第2章の参考文献.....	16
第3章 階層化による既存列車制御システムの再構築	17
3. 1 はじめに.....	17
3. 2 CBTC システムにおける列車制御と階層化システム	19
3. 2. 1 無線式列車制御システム CARAT/ATACS.....	19
3. 2. 2 CBTC システム.....	23
3. 2. 3 列車保安制御の欧州統一バージョンを目指した ETCS. 26	
3. 3 閉そく論理の一元化とその効果	27

3. 4	連動装置の安全機能と本質	28
3. 5	踏切制御装置と階層化システム	30
3. 6	現場設備状態監視装置	32
3. 7	階層化による列車制御の可能性	33
3. 8	第3章のまとめ	34
3. 9	第3章の参考文献	35
第4章	統合型列車制御システムの提案	37
4. 1	はじめに	37
4. 2	統合型列車制御システムの提案	37
4. 3	統合型列車制御システムの詳細検討	40
4. 3. 1	機能層としてのセンター処理装置の機能	42
4. 3. 2	ネットワーク層の要件と IP ネットワーク	43
4. 3. 3	端末層とその機能	46
4. 4	統合型列車制御システムの安全性	47
4. 4. 1	地上信号方式+ATS の場合	47
4. 4. 2	デジタル ATC の場合	48
4. 4. 3	提案する UTCS の場合	50
4. 5	統合型列車制御システムの効果	52
4. 6	第4章のまとめ	55
4. 7	第4章の参考文献	56
第5章	統合型列車制御システムの検討とケーススタディ	59
5. 1	はじめに	59
5. 2	既存列車制御システムと統合型列車制御システム	59
5. 2. 1	CBTC システムと UTCS	59
5. 2. 2	デジタル ATC システムと UTCS	60
5. 2. 3	既存信号保安システムと UTCS	60
5. 2. 4	新連動の開発と UTCS	61
5. 3	地方交通線への UTCS の導入	69
5. 3. 1	地方交通線用統合型列車制御システムの要件	69
5. 3. 2	ATP 閉そくシステムの開発	70

5. 3. 3	GPS・GNSS を利用した信頼性の向上	75
5. 3. 4	汎用無線通信網利用により想定される脅威と対策	79
5. 3. 5	センター処理装置と車上装置間、現場処理端末間通信	80
5. 3. 6	ATP 閉そくシステムの導入・実現に向けて	80
5. 4	都市鉄道への UTCS の導入	85
5. 4. 1	相互直通運転と UTCS	85
5. 4. 2	自動運転への展望	86
5. 5	第 5 章のまとめ	86
5. 6	第 5 章の参考文献	88
第 6 章	システム論から見た統合型列車制御システム	89
6. 1	本質制御と Safety 2.0	89
6. 2	将来の交通システムに向けた検討	91
6. 3	第 6 章のまとめ	93
6. 4	第 6 章の参考文献	94
第 7 章	結論	95
7. 1	本研究の成果	95
7. 1. 1	第 1 章「序論」の結論	95
7. 1. 2	第 2 章「既存列車制御装置・システムの特徴と分析」 の結論	96
7. 1. 3	第 3 章「階層化による既存列車制御システムの再構築」 の結論	96
7. 1. 4	第 4 章「統合型列車制御システムの提案」の結論	97
7. 1. 5	第 5 章「統合型列車制御システムの検討とケーススタディ」 の結論	98
7. 1. 6	第 6 章「システム論から見た UTCS」の結論	99
7. 1. 7	第 7 章「結論」	100
7. 2	今後の課題	100
7. 3	補遺（コロナ禍後の鉄道事業と UTCS）	102
7. 4	第 7 章の参考文献	103

・謝辞.....	105
・参考文献（第1章～第7章&付録）一覧	107
・申請者発表業績論文等の一覧.....	111
・その他 【付録】	117
【付録1】 閉そく装置.....	119
【付録2】 連動装置.....	125
【付録3】 ATP（ATS・ATC）装置.....	133
【付録4】 踏切保安装置.....	143

齊藤 嘉久 博士論文テーマ

『階層化による統合型列車制御システムの開発に関する研究』

第1章 序論

1. 1 本研究の背景

列車制御システムの中で、列車の安全な運転制御にかかわる列車保安制御は、信号保安と呼ばれてきた。この信号保安に運行管理機能を備えた領域を広義の意味で“信号”と言うカテゴリで整理している。信号保安は、列車の進路構成における転てつ機と信号機間の連査から始まり、構内の連動装置を生み出した。一方、単線区間の列車の運転方向の制御は、駅中間での列車衝突を防止する重要な機能であり、両駅の駅長間の共同確認・操作による単線閉そくを生み出したが、列車検知センサーである軌道回路の登場により、単線自動閉そく装置や駅間での自動閉そく装置が出現し、一定区間（1閉そく）に1列車の存在しか許容しない閉そく装置を生み出した。このほか、道路交通との接点に位置する踏切も軌道回路による列車検知結果による制御のほか、障害物検知センサーなどを駆使した装置も開発され、信号保安装置も高度化しつつある。

さらに、高密度運転が余儀なくされる都市圏の鉄道は、乗降を伴う客扱い等による遅延伝播に起因した慢性的な遅延発生状況が生じており、その解消を意図した出発抑止や運転変更が恒常的に行われている。さらに、サンフランシスコ湾岸高速鉄道「BART」における“無線式列車制御システム（AATC：Advanced Automatic Train Control）”の開発時には、列車の減速と他列車の加速をセンターから制御することによるエネルギー消費の削減を意図したり、き電区間に一定数以上の列車が在線時には、加速時の力行ノッチを制限して瞬時総電力量を抑えたりする“列車群制御”が検討されている。

このように、列車に対する制御は、単なる保安制御にとどまらず、省エネルギー化や安定輸送、サービス向上を意図したものに拡張されて来ており、信号システムは列車制御の“安全性（Safety）”，確保を第一に、これに加えて列車トラフィック制御の“信頼性（Reliability）”と“安定性（Availability）”，および輸送の“効率（Efficiency）”，これらの向上に資するべく、その役割を果たしていると考え

えられる^[1]。本論文では、これら今日の列車に対する安定・安全・効率輸送を意図した制御を総称した“列車制御”と呼ぶこととし、“信号保安”とは区別する。鉄道信号システムは、連動装置から始まり、軌道回路を用いた自動閉そく装置を生み出したが、閉そくの確保や進路設定時には、信号機の現示によって運転士に伝達していた。そして、運転士の過誤による事故防止を図るために、車内警報装置や自動列車停止装置（ATS：Automatic Train Stop）、さらには自動列車制御装置（ATC：Automatic Train Control）が開発され、今日の高速高密度運転の安全を支えている。鉄道信号システムを発展経緯からみると、各種装置が他装置とインタフェースをとりながら、順次組み込まれ高度化して来たといえ、個々の装置が“並立した縦割り型”の個別機能構成となっており、複雑なシステム構成や共通機能の重複、さらには装置毎の考え方の違い等が、従来から大きな課題となっていた。

本論文が対象とする列車に対する安定・安全・効率輸送を意図した制御を考えると、情報の一元化が望まれるが、現状は制御系とは独立に列車運行状況情報を収集し、運転指令を行っている形態が多い。このような状況に鑑み、既存の鉄道信号システムにとらわれることなく、今日の技術に立脚した“本来あるべき列車制御システム”を構築することにした。そのために、そもそも列車の運転制御に必要な本来あるべき情報は何か、そして、その情報は、どのように生成すべきかを検討した。得られた結論は、現場に不可欠な転てつ機と踏切、そして列車をベースに、センター処理装置が現場機器を制御し、その結果をもとに列車に“走行可能な地点情報”を伝達するというIoTに沿った、システムアーキテクチャとする、新たな考え方の列車制御システムを目指すべきというものであった。この考えを具現化させた新システムを『階層化を考えたシステム』（以下、『階層化システム』という）と称することにした。

『階層化システム』は、これまでの連動装置や閉そく装置は持たない。ATS（Automatic Train Stop device）を、はじめとするATP（Automatic Train Protection device）機能も車上の保安処理の中で自動的に実現され、特別な装置・設備を必要としない。しかも、列車に走行可能な地点情報を伝達するセンター処理装置は、すべての列車の在線位置情報を認識しているため、現場の状況をリアルタイムで把握した上で、安定・安全・効率的運転を指向した指令が運行管理系と一体となって行えるものであり、鉄道事業者（オペレータ）の“ニーズに柔軟に対応”できる、“システムを柔軟に進化”させられるものである^[2]、^[3]。本論文

では、『階層化システム』について論じるものであるが、以下に本論文の 2 章以下の内容について概略を紹介する。

1. 2 本研究の概要

第 2 章は、「既存列車制御装置・システムの特徴と分析」と題して、『階層化システム』を理解する上で、必要な既存の列車制御システムとして、鉄道信号システムを主体に扱う。鉄道信号システムの主要サブシステムとしては、閉そく制御装置、連動装置、ATP (ATS・ATC) 装置、そして踏切保安装置であり、これらの主要サブシステムの役割と課題を紹介する。なお、本論文末尾の【付録 1~4】に、上述の主要サブシステムに代表される各システム・装置類の基本的な機能の概要と、その重要な役割を理解するべく別途、参考として紹介している。

第 3 章は、「階層化による既存列車制御システムの再構築」と題して、第 2 章で抽出された課題を解決する方法について検討する。この中で、今日最も進んだ列車制御システムといわれる、“無線式列車制御システム CBTC : (Communication Based Train Control system)” の列車制御システムも分析する。そして CBTC を含め、既存列車制御システムが抱える課題を分析し、その解決には、システムを総合的に再構築すべきとの立場から、『階層化』による列車制御システムを提案する。

すなわち、従来の多くの装置が、縦割りの独立した構成から成るものに対し、それぞれの装置を『機能層』、『ネットワーク層』、『端末層』の“横割りの階層構成”として“階層ごとに統合”する新たな考えのもと、現場に必須な転てつ機、踏切、そして列車をインタフェースする『端末層』と、センターの処理部である『機能層』、そして、その間をインタフェースする伝送部である『ネットワーク層』からなる新たな『階層化』の概念に関する可能性を示すと共に、『機能層』に現場の情報がリアルタイムで収集・フィードバックされるシステムが、より高度な列車制御システム実現に適していることを主張する。

第 4 章が、『階層化システム』を具現化し、階層構造をとる各層の仕様について詳細に紹介する。さらに、『階層化システム』の安全性や効果についての検討結果について論じる。

第 5 章では『階層化システム』の検討とケーススタディとして、『階層化システム』の応用に関する検討成果を論じる。優れたシステムであったとしても、鉄道

事業者が導入に踏み切るには、鉄道事業者のビジョンとの整合性の一致が必要である。このため、5.2 節では鉄道事業者がデジタル ATC や既存 CBTC を志向した場合を前提としたソリューションとして、『階層化システム』の効果を検討するとともに、IoT 時代における“新連動”の概念を論じている。さらに、『階層化システム』と、他の既存列車制御システムとの関係も明らかにする。そして、ケーススタディの一つとして“地方交通線”向けに適用した事例として、実用の域に達した『ATP 閉そくシステム』について紹介する。

第 6 章は、システム論から見た『階層化システム』として、提案する『階層化システム』を単なる列車制御としてのシステムから見るのではなく、広くシステム論としての視点から評価した。システム論としては、協調安全で知られる Safety2.0 を取り上げた。この結果、『階層化システム』は、Safety2.0 の概念に符合するばかりでなく、“本質制御”という最も進んだシステム論の実現事例でもあることを確認した。また、第 6 章では広く交通システムとして MaaS との関係も検討しており、今後の総合交通システム構築実も寄与できることを明らかとした。

第 7 章は「結論」であり、本論文の各章での成果について、まとめると共に、今後の課題について明らかにしている。さらに、補遺として今日の“コロナ禍”により経営的に大きな困難を抱える鉄道運営事業について、『階層化システム』が貢献できる可能性についてまとめている。

1. 3 第 1 章のまとめ

本章では、本研究にあたっての背景を明確にするとともに、列車制御システムの大系を整理した。列車制御システムの保安制御は鉄道信号システムとして論じられるが、今日の列車制御は“安全制御”のみにとどまらず、“安定・安全・効率的輸送”を担うリアルタイム制御が必須となっている。本論文では列車運行管理と一体化して行う、これらの処理を“列車制御”と位置づけている。このほか、本論文を構成する 2 章から 7 章に対し、各章における主要な記述すべき内容について紹介した。

1. 4 第1章の参考文献

- [1] 日本鉄道電気技術協会 秋田雄志, ほか, 「鉄道信号」, 2015-1
- [2] 電気学会論文誌 C 部門 vol136, No.7, 「階層化による列車制御システムの再構築」, 齊藤嘉久, ほか, 2016-7
- [3] 平成 27 年 電気学会電子・情報・システム部門大会 IEE 論文番号 TC9-6 (長崎) 「階層化による列車制御システムの再構築」, 齊藤嘉久, ほか, 2015-8

第2章 既存列車制御装置・システムの特徴と分析

2.1 はじめに

本論章では、本論文のテーマである統合型列車制御装置が対象とする、既存列車制御システムの中で、特に列車の安全運転を目的とした列車保安制御を担う鉄道信号システムを中心に、その特長を分析する。鉄道信号システムのサブシステムとしては、閉そく方式・装置、連動装置、ATP装置（ATS・ATC装置）、踏切保安装置を取り上げる。これら主要サブシステムは、列車の安全な運転を確保するために開発され、それぞれ他サブシステムとインタフェースを取りながら、それぞれ組み込まれて来ている。本章では、これらサブシステム間の相互の関係と機能目的、そして列車運転への関与について分析し、その役割と鉄道信号システムの基本概念を明確にする。なお、これら鉄道信号サブシステムは、列車を安全に運転させるための必須の“中枢神経系”であり、個々のサブシステムの重要な役割に関しては、省くことなく、先達の努力の結晶の証として、本論文の【付録1~4】に体系的に記することとした。

2.2 鉄道信号システムの構成と各装置の役割

鉄道信号システムは、列車の保安制御を主体に技術が発達し、幾多の変遷を経て今日の姿（様態）に到達した。その到達した様態は、2002年（H14年）3月に制定された「鉄道に関する技術上の基準を定める省令（技術基準省令）」に記されていると言える。「技術基準省令」は、鉄道の輸送の用に供する設備、車両及び運転の取り扱いについて必要な技術上の基準を定めることにより、安全な輸送および安定的な輸送の確保を図り、公共の福祉に資することを目的としたものである。この“技術基準省令101条”で、列車間の安全確保には、次の3つの方法があることを記している^[4]。

- ①. 「閉そくによる方法」
- ②. 「列車の間隔を確保する装置による方法」
- ③. 「運転士が前方の見通し、その他列車の安全な運転に必要な条件を考慮して運転する方法」

上述①. は、今日の“固定閉そく”を前提とした保安制御で、駅間の自動閉そく信号や単線区間の閉そく方式で、信号機の現示を介して運転士に進行の可否を

伝達し運転させるもので、運転士の過誤による危険性については ATS・ATC をベースとして安全を確保するという今日最も多く用いられている方法である。

一方、②. の列車の間隔を確保する装置による方法であるが、装置とは、列車と進路上の他の列車等との間隔および線路の条件に応じ、連続して制御を行うことにより、自動的に当該列車を減速させ、または停止させることが出来るものでなくてはならないとしており、従来の“固定的な閉そく”によらない JR 東日本仕様の ATACS : (Advanced Train Administration and Communications System) 等の“CBTC”システムで採用されている方式・システムが符合する。この方式の下では、“移動閉そく方式・システム”という効率のよい列車制御が実現する。

③. の条件は、路面電車の保安方式のほか、上記の①, ②の方式装置が故障した時に運転士が前方線路を注視しながら、あらかじめ定められた速度以下で運転する“無閉そく運転”を想定したものである。

本章では、「技術基準省令 101 条」の①, ②に対応した“鉄道信号保安技術”を対象に、その機能や安全を達成するための仕組みを分析する。この部分は、列車制御の中の“保安制御（信号保安）”に相当する最も核となる重要な部分である。

前述の 1.1 項で述べた通り、信号保安に運行管理の機能を備えた領域を広義の意味で“信号”と整理されているが、信号が正常に機能したとしても、人間の過誤による事故が過去に多発した。このため、より進んだ保安制御として人間の過誤から安全を守る ATS・ATC が登場する。なお、海外では ATS・ATC を区別せず、総称して、自動列車防護機能：ATP (Automatic Train Protection) と称している。ATC はブレーキ扱いを機械優先としたことにより、国内外で高い安全性の実績を残して来た。一方、ATS は方式により安全制御の機能水準が変わるが、進んだ ATS は、ATC と遜色ない安全制御機能を有する。また、実際の導入では、“安全性”のみならず、“運転能率”に与える影響という視点からの評価も重要な一視点といえる^[1]。鉄道信号は運転保安を設備面、特に“安全制御”の面から遂行する中核である。

2. 2. 1 閉そく方式（装置）

(1) 単線閉そく装置

運転方向が一義に定まらない単線線区においては、その閉そく区間の“運行許可権”を、どの列車に付与し、どの列車を排他制御するかということが問題とな

ってくる。このため、単線区間における列車の安全な運転のためには、駅長が発発許可を与える条件として、隣接対向駅からの列車進入を禁止する処置が施されていなければならない。この隣接駅間との“排他制御”を行う装置が単線閉そく装置である。この運転方向の制御という衝突防止を主眼とする各種の単線閉そく方式（装置）が生み出された。

その詳細は【付録 1】にて記述するが、軌道回路の出現によって、駅間の列車在線の有無を自動的に取得できるようになり、単線自動閉そく装置が誕生した(図 2.1 に示す) [5]。

方式	設備概要	機能など
特殊自動閉そく式 (軌道回路検知式) [特殊自動 A]		閉そくの確保：停車場内は連続軌道回路により、停車場間はその両側にそれぞれ 2 種類の検知軌道回路(OT/CT)を設け、これと隣接する分岐器を含む軌道回路とにより、列車の進入・進出を検知し、閉そくが自動的に確保される。 列車の運転方向の設定：隣接する停車場に設けた 1 対の方向てこを、共同して取り扱うことにより行う。
(電子符号照査式) [特殊自動 B または 電子閉そく]		閉そくの確保：停車場構内は連続軌道回路により、停車場間は、隣接停車場に列車の識別符号を送受信する検知装置を設け、これと停車場構内の部分に設けた軌道回路により、列車の進入、退出を検知し、閉そくが自動的に確保される。 列車の運転方向の設定：隣接する停車場に設けた駅装置相互間で列車の識別符号を送受信し、照合して自動的に行う。
自動閉そく式(特殊) [自動 B]		閉そくの確保：停車場内外を通して連続した軌道回路と 2 種類の軌道回路(OT/CT)を設け、これにより列車の進入・退出を検知し、閉そくが自動的に確保される。 列車の運転方向の設定：上記の特殊自動 A に同じ。
自動閉そく式 [自動 A]		閉そくの確保：上記の自動閉そく式(特殊)に同じ。 列車の運転方向の設定：上記の特殊自動 A および自動閉そく式(特殊)に同じ。

〔注〕 —太線は軌道回路を、—細線は軌道回路のないことを示す。なお、OT は開電路を、CT は閉電路を示す。

図 2.1 単線自動閉そくの比較

通票閉そく式や票券閉そく式といった機械式信号機の下では、駅間の閉そくの制御と出発信号機に関係した転てつ機の制御は分離されており、運転士は、運転許可を意味する“タブレットや通券”を携行した上で、進路の構成が完了していることを伝える出発信号機の進行現示を確認して運転する必要があった。しかし、軌道回路を利用して駅間に列車が在線してないことを確認して、駅間の閉そくを設定する、単線自動閉そく式や特殊自動閉そく式などの進んだ閉そく装置では異なる。これらの方式では、出発信号が進行現示であれば、駅間の閉そくが確保され、同時に出発進路に関係する転てつ機も転換され、安全が保障されていることを示していた。

このように、単線線区における運転方向の制御は、両駅の駅長相互の確認操作による閉そく取り扱いが必要であった。駅長が不在の電子閉そく装置においては、運転士の進路要求釦の押下のタイミングによって、運転方向が決定されているが、この場合でも、閉そくの設定は、両駅に配置されたフェールセーフ・コンピュータ間の通信によって行われている。すなわち、電子閉そくシステムを含め、駅間の運転方向設定作業が必要であったのは、両駅に権限を持つ“駅長”や“フェールセーフ・コンピュータ”が存在していたことによる。この電子閉そく（図 2.2 参照）^[6]は、駅間を 1 閉そくとし、閉そくの両端駅には位相差同期方式のフェールセーフ・コンピュータを配置し、通信回線を介して接続していた。

図 2.2 に示す一連の動作処理は、運転士が出発要求を行っただけで自動的に行われる。従って、厳密にはダイヤに従った順序判断機能はなく、運転士に任されているとよい。しかし、地方鉄道は、この程度の運行管理で十分機能できることも明らかで、CTC によらない自動化システムとして普及した。国鉄の民営分割を見越して地方鉄道に導入された電子閉そくシステムであるが、現在老朽化更新期を迎えており、より経済性と機能性に優れたシステムの開発実用化が待ち望まれ、この課題に応える技術開発が重要であると言える^[6]。

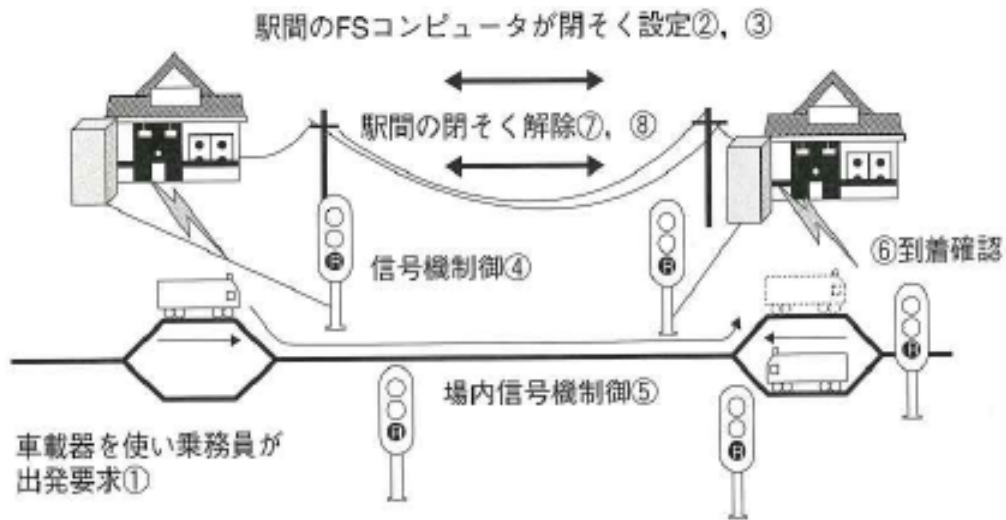


図 2.2 電子閉そくシステムとその動き

(2) 駅間自動閉そく装置

運転方向が定められた区間における“固定閉そく”の主たる目的は、先行列車と後続列車間の“間隔制御”になる。間隔制御の構成は、単位時間あたり何本の列車運行を許容するかという運転時隔と関係し、閉そく区間長の設定や信号現示方式が決定づけられる。いずれにしても、その線区を走行する車両のブレーキ性能を考慮し、各信号現示が定められるが、進行信号と停止信号以外の信号現示は、閉そく区間を細分化すると、その区間内では停止までのブレーキ距離を確保できないために、中間速度まで減速させることを意図して設定されたものである。従って、列車の安全な運転のためには、停止信号現示を冒進することのないような制御をすれば良いわけで、中間信号機の色段を守ることに意味があるわけではない。すなわち、駅間の安全な運転を守るための自動閉そくは、前方車両が在線する“軌道回路の ID”もしくは“軌道回路始端の位置情報”を与えれば良いことになる。

このことは、ATS-P 形が地上子（トランスポンダ）を用いて、停止信号機直下の停止位置を伝えており、さらにはデジタル ATC が前方列車在線軌道回路の“ID”を送っていることから裏付けられる。駅間自動閉そくと ATS-P 形による保安制御の概念について図 2.3 に示す。このような閉そく装置に対する分析と、あるべきシステムの姿については、第 3 章の 3.3 節、閉そく論理の一元化と、その効果で論じる。

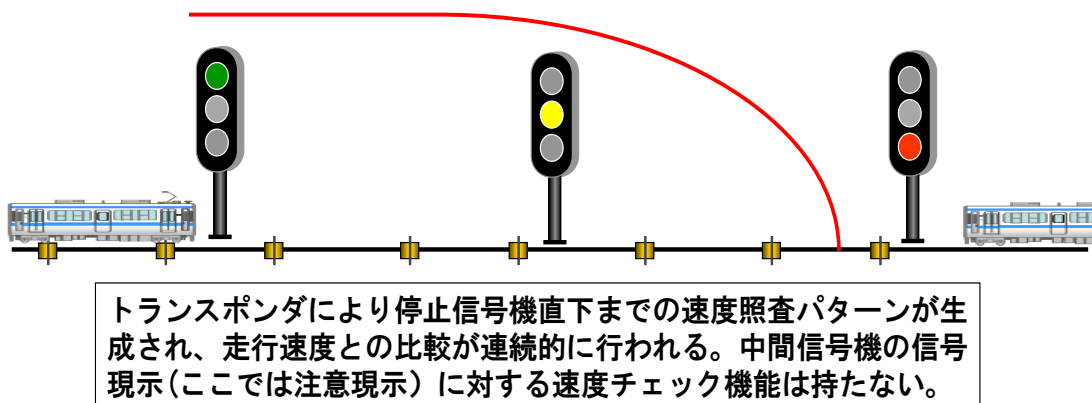


図 2.3 駅間自動閉そくと ATS-P 形による保安制御

2. 2. 2 連動装置

網状に展開される駅構内の線路配線上を安全に走行させるには、進路の開通を示す信号と転てつ機の転換方向の一致をとらなければならない。さらに、構成された進路に支障するような他列車の動き（走行）を阻止する必要がある。機械式連動装置は、進路の開通を示す信号機と転てつ機間の”連査”を確保することを主目的に開発された。

その後、技術開発が進み、リレー（継電器）の接点論理で安全の条件を織り込む継電連動装置が出現すると、単なる転てつ機と信号機間の連査だけに留まらず、扱ひ者のミスによる危険側の事象も防止する論理が組み込まれ、安全性が格段に向上した。例えば、駅への侵入を許可する場内信号機に進行現示を出力していた時に、指令から退避変更するために進入番線を変更せよと指示されたために、急遽進路の引き直しを行ったと仮定する。進行信号を確認して進行してきた運転士は、急遽場内信号が引き戻されたことによって生じた、停止信号への現示変化を知るとブレーキを扱うが、すぐには停車できないため、場内信号機を冒進通過し、場内信号機の内方区間に進入してしまうことが考えられる。この状況下で、転てつ機が別進路の進路構成のために転換を開始すると、当該列車は脱線する恐れがある^[5]。このような危険な“インシデント”状態を回避するために、一旦列車に進行信号を現示した後、進入番線変更などの事態に進路の引き直しを行った場合、場内信号機の現示は停止信号にするが、転てつ機は一定時間を経過するまでは転換させず（転換の抑止）、進路を保持したままにしておき、一定時間は転てつ機の

転換を抑止する処理機能（接近鎖錠の機能）が加えられている。“接近鎖錠”の概念に関して図 2.4 に示す。

このほか、継電連動装置には過去の事故から教訓を得た多くの安全性の対策が組み込まれている。なお、電子連動装置は、継電連動装置の論理・アルゴリズムを“ソフトウェア”で実現したものであり、コンピュータの故障に対する安全性の保障やソフトウェアのバグの懸念に対する課題を克服し、実績ある継電連動装置の後継機として開発された。基本的には継電連動装置と同一であるが、軌道回路情報の入力を単なる 1/0 で処理するのではなく、列車の移動としてとらえるなど、安全性向上の工夫が施されている。

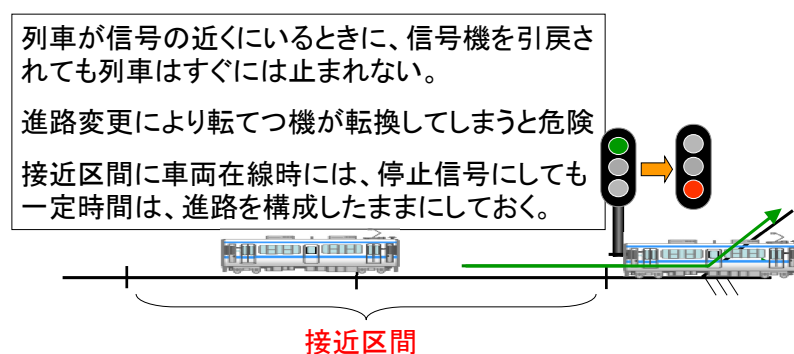


図 2.4 接近鎖錠の概念

このように、駅構内の運転に関する保安制御は高い水準に到達しているが、連動装置は、進路設定時に連動装置の根幹をなす“連動図表”に基づく、進路の要件が全て満足されるか否かの連動チェックをしており、“1 進路 1 列車の進入しか許容しない”という“固定閉そく”が必然となる。このため、移動閉そくで運転してきた列車も連動駅に到達すると、前方列車が進路を進出しきるまで、場内信号機外方で機外停車しなければならない。移動閉そくを可能とする CBTC の時代においては、駅構内においても同様に移動閉そくも可能とする論理の開発が不可欠であり、しかも、駅間の閉そく制御と同じような“対車上メッセージ”で制御できることが望まれる。

なお、連動装置の課題と、その解決方法については、第 3 章の 3.4 節 連動装置の安全機能と本質で分析して論述する。このように既存連動装置は長い年月をかけ、さまざまな方式の装置が開発されてきたが、その体系と今日用いられてい

る主要連動装置についての詳細をまとめたものは、【付録 2】として、本論文末尾にて紹介する。

2. 2. 3 列車保安制御 ATP (ATS・ATC)装置

閉そく装置や連動装置の処理結果は、信号機を介して運転士に伝えられる。運転士が信号機に従って運転すれば事故が発生しないように装置としては、“フェールセーフ”の構成により構築されている。しかし、人間の過誤による停止信号現示を冒進すると重大な“インシデント事故”につながる危険性がある。これまで、わが国の鉄道史において多くの事故を経験してきた。このために、人間にミスがあっても“安全”が確保、守られるように、自動列車停止装置：ATS、自動列車制御装置：ATCの各自動制御装置が開発されてきた。

今日の列車の安全な運転にはATS・ATCが不可欠であり、“既存信号保安装置”の車内警報装置に“ブレーキ機能”を付加する形でATSが装備された。社内警報装置は、AF軌道回路を利用するA形車内警報装置、商用周波数軌道回路に細工を施して実現するB形車内警報装置、そして“点制御”の新しい情報伝送手段で実現するC形車内警報装置の3種類が検討された。その後、車内警報装置は、そのまま“ブレーキ制御”と結びつき、ATSへと進化していった^[6]。

一方、ATCでは“車内信号化”され、“自動的なブレーキ制御”と一体化する形で保安制御が実現している^[7]。人間のミスによる事故を完全に防止するには、人間（運転士）の手を経ないで直接ブレーキ制御を行うことである。この設計思想が徹底されたシステムが、世界で初めて高速鉄道を実現しようとした東海道新幹線のATCであった。ATCの開発にはkHz帯域の信号を用いたAF軌道回路の技術を利用することで、伝達する情報量を増加できた。すなわち、ATC信号電流は、“kHz帯域の搬送波”を、低い周波数の信号波で“振幅変調（AM変調）”することにより生成されている^[6]。

これらATS・ATCの技術の流れを、図2.5に示す。なお、欧州では、一般的にATSとATCなど列車防護の機能を有する装置や概念を総称して、自動列車防護装置ATP：(Automatic Train Protection system)と呼んでいる。また、日本で言うところのATSは、自動列車停止装置ATS：(Automatic Train Stop)を示すものではなく、列車運行監視（管理）ATS：(Automatic Train Supervision)とし

て、保安よりも運行管理的な概念で、用いられている違いがあるため、注意を要する^[1]。その詳細は【付録3】として、本論文末尾にて紹介する。

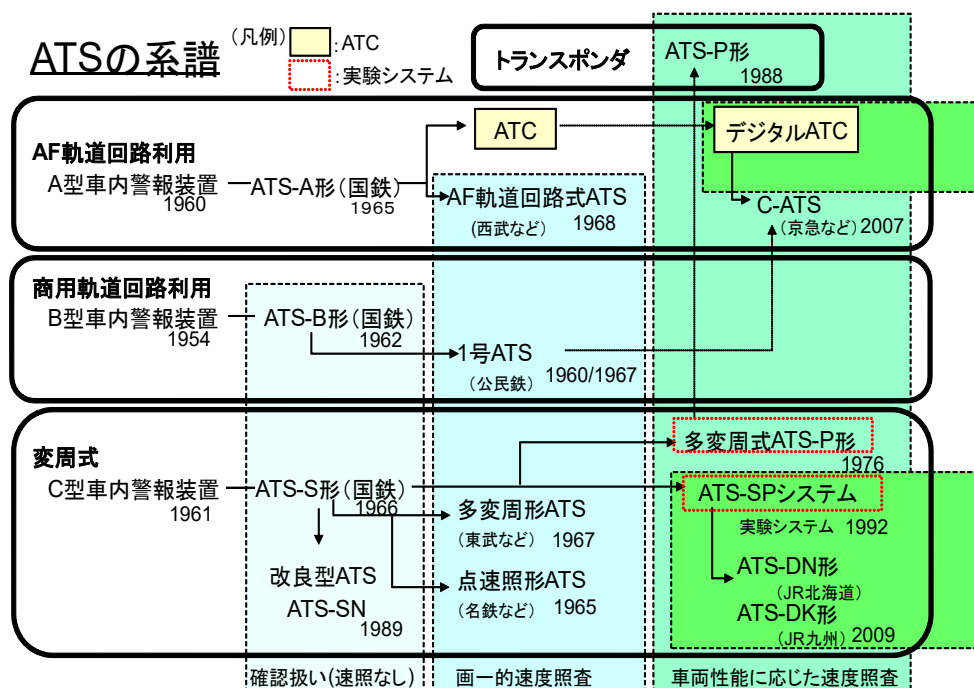


図 2.5 ATS・ATC 技術の推移

2. 2. 4 踏切保安装置

道路交通との接点である踏切は、“踏切道”を通行する人および自動車(以下「踏切道通行人等という」)の交通量および踏切幅員、そして踏切保安装置の具備する踏切設備により幾つかの種別がある。この中で、設備の進んだ踏切には、“踏切道通行人等に対する警報と表示”、“遮断棹の制御”、“障害物検知”、“異常検出時に乗務員に伝える機能”が備わっている。その詳細は【付録4】として、本論文末尾にて紹介する。踏切の制御には、列車接近を検知する踏切制御子(鳴動点の制御子)が配置され、列車進入を検知すると一定時間警報を発した後に遮断棹を降下させて、道路交通を遮断し、列車が踏切を通過すると遮断棹を上げ、道路交通を許可するというように、“地上側でクローズ”された制御を行っている。

このため、速度向上時には、鳴動点踏切制御子を追加したり、移動させたりするなどの対策が施される必要がある。ただ、鳴動点踏切制御子は、最高速度で列車が進入してきても一定の鳴動時分を確保するよう安全側に配置されるため、列

車が低速で進入時には、鳴動時分が長くなるといった問題があった。このほか、遮断後に自動車が取り残された場合には列車を停止させなければならないため、障害物検知装置と連動した停止制御や、特殊信号発光器により、運転士に危険を伝えブレーキ制御を行わせるなどの方法がとられているが、取り残された障害物と衝突するといった事故が残念ながら頻発している状況にある。このような課題の解決には、JR 東日本仕様の ATACS で採用されたような、踏切制御装置と車上制御装置間の“クローズド・ループによる制御”がある。

その詳細は第 3 章の 3.5 節「踏切制御装置と階層化システム」で論述する。

2. 3 第 2 章のまとめ

信号機と転てつ機の連査という機械式信号から始まった信号保安システムは、百数十年をかけてデジタル情報処理のコンピュータ制御まで進化していった。その進化は、運転士をバックアップする停止信号の冒進防護、速度照査と情報伝送の連続制御化、運転士に代わって安全性を確保する“車内信号化”，そして列車自体の位置検知による円滑な高密度運転化へと辿っていった。さらに、これら保安制御と別に、年間の鉄道事故の発生に起因する最も件数の多い踏切という道路交通との接点部分の安全性確保も重要な課題となっている。本章では、これら既存信号保安装置として、閉そく装置、連動装置、ATS・ATC、踏切保安装置を紹介し、その役割と現状、そして課題と共に、これからのあるべき姿を展望した。

2. 4 第 2 章の参考文献

- [1] 日本鉄道電気技術協会 秋田雄志,ほか,「鉄道信号」,2015-1
- [4] 国土交通省鉄道局監修 電気関係技術基準調査研究会編「鉄道に関する技術上の基準を定める省令（技術基準省令）」2002-3
- [5] オーム社「鉄道信号・保安システムがわかる本」中村英夫編著,2012-5
- [6] オーム社「列車制御-安全・高密度運転を支える技術-」中村英夫編著,2011-2
- [7] 信号保安協会「ATS-国鉄・民鉄方式の詳説」1.3 ATS の開発経緯,1973

第3章 階層化による既存列車制御システムの再構築

3.1 はじめに

信号保安装置は、運転取り扱いに深く関わる装置でもあり、鉄道経営合理化や経済性向上のために、多くのシステム開発が展開されてきた^[5]。国鉄民営分割の際に機械式閉そく装置を用いてきた地方交通線の多くは、電子閉そく装置により近代化された。

さらに、より合理的なシステムへと指向して、列車の位置検知を、従来の軌道回路から“RFID : (Radio Frequency IDentity chips)”により近接無線を用いたバリス検知器に変更し、列車検知に用いた単線区間の閉そく装置 COMBAT : (Computer and Microwave Balise Aided Train control system)^[8]が、鹿島臨海鉄道に試験的に導入された経緯がある。このほか、電子閉そく装置の老朽更新期を迎え、閑散線区向け拠点無線式列車制御システム^[9]、や ATP 閉そくシステム^[10]、地方交通線向け列車制御システム^[11]、などの開発も行われている。また、仙石線には JR 東日本が開発した、わが国初の無線式列車制御システム (ATACS : (Advanced Train Administration and Communications System)が 2011 (平成 23) 年 10 月に導入され、安定稼働している^[12]。

同様な無線式列車制御システムとして、日本信号(株)の開発した SPARCS : (Simple-structure and high-Performance Atc by Radio Communication System)が、中国の北京 15 号線に 2011 年 12 月に導入、さらに(株)京三製作所が開発した無線式列車制御システム IT-ATP : (Information Technology -Automatic Train Protection system) が、アメリカのオーランド国際空港(South Airport)にて 2017 (平成 29) 年 11 月に導入され、それぞれ安定稼働している状況にある^[13], ^[14]。

進歩する“ICT 技術”を効果的に導入した列車制御システムの開発は今後も継続して、なされるであろうが、本論文申請者は、列車制御システムの“理想形”を目指し、列車制御システムの各装置を『階層的』に俯瞰して、論理処理部 : (機能層) と現場機器インタフェース部 : (端末層)、そして、その間を結ぶ伝送部 : (ネットワーク層) に“階層分類統合”した、新たな『階層化システム』の概念を提案し、その開発を行ってきた。近年、鉄道を取りまく環境の変化も早く、そのような状況下において列車制御システムは、そのニーズに柔軟に対応して進化させていく必要があると考える。

『階層化システム』は、まさに鉄道輸送システムとして“不可欠な要素のみが相互に情報交換”を行うことで、必要な保安制御を行うため、従来制御のために生み出されてきた、閉そく装置や連動装置、ATSを持たない究極の省設備化が図られているため、“信頼性・保全性向上”のほか“インタフェースの最小化”による“安全性向上”のみならず、下記に示す鉄道システムに望まれる“属性”をも、実現することが出来る。

- (1). 発展性：鉄道事業者のニーズに合わせて進化が可能となる。
- (2). 柔軟性：必要な機能を取捨選択して柔軟にシステムを構築できる。
- (3). 保守性：現場機器の大幅な削減と予防保全が可能となる。

『階層化システム』の概念を“従来型の信号保安システム”と比較して図示すると図 3.1 のようになる。技術進歩に応じて、さまざまなサブシステムが付加されてきた従来型の信号保安システムが“縦割りの独立構成システム”とするなら、『階層化システム』は図 3.1 に示すように“横割り構成に統合、整理された階層構成”となる。このシステムは、まさにシステムに必須な要素が相互に情報情報交換を行うことで保安制御を実現する“本質制御：Inherent Control”を理想的なシステムの在り方として、具現化したものであると言える^{[2], [3], [15]}。

本質制御の下では、保安制御のために、これまで重要な役割を持っていた、連動装置、閉そく装置、ATS・ATC 装置は、センターにて統合集約されたセンター処理装置のソフトウェア論理や車上装置の保安論理に置換され、物理的な姿は消すと考えられる^[15]。

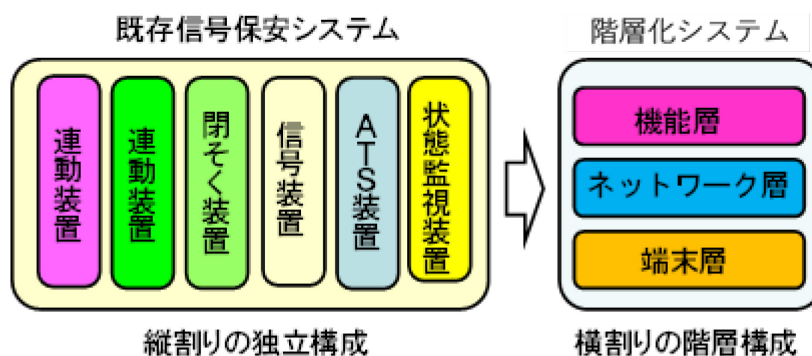


図 3.1 従来システムと階層化システムとの比較

図 3.1 に示す本研究が対象とする『階層化システム』における『機能層』は、列車に対する“走行許可地点”(Authorized Route : 以下“走行路”という)を生成するもので、この走行路生成の際に、関係する転てつ機や踏切も制御される。

すなわち、『機能層』に位置する論理処理部：統合型処理部は、転てつ機制御、踏切制御、前方列車位置探索を一元処理して、列車に対する支障点の探索により走行路を確定し、『ネットワーク層』を介して、『端末層』に位置する車上制御装置に送信する新しい概念のものであり、既存の集中連動装置や集中踏切装置のように“独立した装置の集中化”を意味するものではない。現在の信号保安装置の機能を統一的に扱え、かつ CBTC などにも、そのままシームレスに移行可能である、新たな『機能層』の発展的処理でなければならない^{[2], [3]}。

3. 2 CBTC システムにおける列車制御と階層化システム

3. 2. 1 無線式列車制御システム CARAT/ATACS

1987 年に(現：公益財団法人)鉄道総合技術研究所は、次世代列車制御システムの開発研究を開始し、無線式列車制御システム CARAT : (Computer And Radio Aided Train control system)を具現化させ、上越新幹線で実証実験を行ってきた。

“CARAT”は 1996 年に実験システムとしての開発に成功し、研究を終えているが、その成果を引継ぎ、JR 東日本は在来線の無線式列車制御システム：ATACS の開発に着手した。

CARAT が“漏洩同軸ケーブル(LCX)”を無線伝送媒体としていたのに対し、ATACS は在来線対応としたため、“空間波”を用いている。周波数帯域は鉄道用に与えられている“400MHz 帯”で同一である。ATACS は、仙石線において 1997 年から 2005 年にかけて 3 期にわたる走行試験を実施し、実用レベルのシステムとして完成させ、2011 年 10 月に仙石線において実稼働を開始している。実用化後の稼働は良好であり、日本における“車上主体の無線利用列車制御システム”の時代への先駆けとなった。

ATACS は車上装置が“位置検知機能”と“保安制御機能”を有し、“デジタル無線”を介して、地上の拠点装置の“列車追跡機能”との間で情報交換を行い、列車の安全を確保している。車上装置は、速度と走行位置情報を拠点装置に伝送し、拠点装置からは、走行可能な地点情報を取得する方式となっている。

そのほか、ATACSは“踏切制御機能”も組み込んでおり、地上設備に依らない列車制御のため、“設備コストやメンテナンスコスト削減”への道が切り拓けるのみならず、欧州で標準となっている“単線並列運転”（複線を上り下りに分けず単線が2本並列と考える）も実現出来る。機能的には欧州のETCS:(European Train Control System)の“レベル3”に相当するシステムである。“ETCSレベル3”では、ETCSは地上の在線検知装置も地上信号機も置き換えられ、列車の位置情報は、車上の走行距離計で測定され、GSM-R無線通信網を介して地上側の無線閉そくセンターに報告される。さらに、列車の安全性は車上装置によってチェックされる。列車間隔は、在線検知装置により規定される個々の軌道回路区間に制限されることはなく、列車からの軌道在線情報に基づくことになる。この構成により、地上側の機器が大幅に簡素化され、“コスト削減”となるとともに、厳密に構成された“固定閉そく区間”に依存しなくなることにより、実現可能な線区容量が増大する。

ATACSの保安制御は、CARATと同様に車上の“列車位置検知機能”・“保安速度制御機能”と地上の“列車追跡機能”，そして地上・車上間を結ぶデジタル無線によって実現される。列車の間隔制御は、地上から送信される“停止限界”（走行許可地点情報：『階層化システム』の“走行路”に対応）が基本となり、車上制御装置系が許可された地点までの安全な速度制御を行う。“走行許可地点情報”は、前方列車の後尾位置に一定の“安全余裕距離”を加味した値が基本となるが、踏切制御時には踏切の手前地点、駅構内では進路の終端位置となり、いずれも地上の拠点装置から与えられる。ATACSによる制御の質と安全性は、車上の“位置検知機能”と“伝送周期、無線利用技術”に依存する。ATACSの位置検知としては、速度発電機：(TG)からの出力パルスの積算と、地上子通過時に得られる絶対位置を拠り所としており、“滑走・空転”は誤差の要因となる。

しかしながら、速度発電機：(TG)を、モータの駆動軸には設置しないことにより“空転”を防ぎ、さらにブレーキ力を弱めた“ATC軸”に設置することで“滑走”の発生確率を低減する。その他、ソフト的に減速度の異常な低下を検知して補正する滑走補正論理を組み込むなどして200m以上の地上子間隔で“0.5%以内の誤差”という仕様条件を確保している。ATACSの実現は軌道回路や地上信号機といった沿線設備の大幅な削減を可能とするほか、移動閉そくや単線並列運転といった新たな機能を大幅なコスト増を伴うことなく実現可能とし、さらには、鉄道システムの“強靱化（レジリエンス）”にも繋がる利点がある。

また、在来鉄道で課題となっている“踏切制御”の性能向上に対しても、地上踏切制御部、車上制御部との“クローズド・ループ”の実現により、本質的な解決策が可能となるなどの効果が期待されている^[5]。一方、ATACSでは、駅構内の保安制御に既存の電子連動装置を用いている。仙石線のように列車密度の低い線区（地方ローカル線区）では問題ないが、第二次システムとして導入した埼京線のシステムでは、駅中間においては“移動閉そく”としてスムーズな高密度運転が維持されているが、池袋駅等では、駅構内において、先行列車が進路を抜けきるまでは、後続列車が場内信号機外方地点で“機外停車”させられ、“数珠繋ぎ状態”になるなど、現行連動装置を使用している限り制約が大きく、駅構内の“固定閉そく”であるが故の問題点がクローズアップされている。

このように、これらのCBTCも既存信号保安システムの枠内で開発されたものであり、駅構内は既存連動装置による、進路確保に安全を委ねているものが多い実状である。駅構内運転の安全を既存連動装置に委ねたことによる、列車の“団子運転”の様子を図3.2に示す。本件については、本章の3.4節「連動装置の安全機能と本質」の項でも別途、取り上げる。

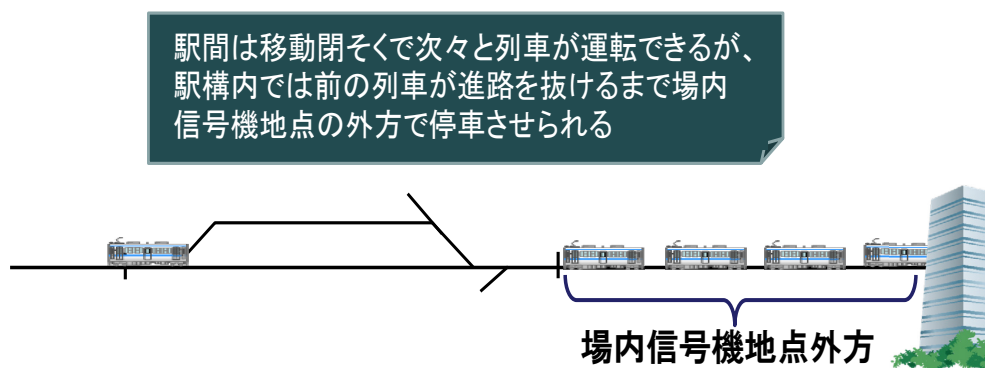


図3.2 駅構内運転の安全を既存連動装置に委ねたことによる団子運転の様子

このほか、車上装置と地上装置間の無線交信は“拠点装置”単位に行われており、列車が移動して拠点装置の守備エリアを越える場合には、隣接拠点装置との間で“列車ID”を引き継ぎ、交信を次の拠点装置に促す、いわゆる“ハンドオーバー処理”を行ってシームレスな制御を実現している。既存CBTCで行われるハンドオーバー処理について図3.3に示す。

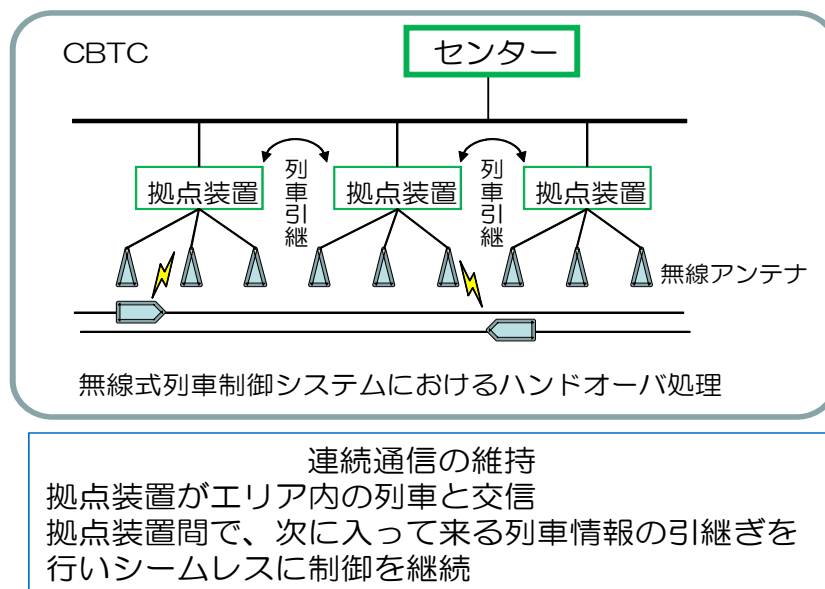


図 3.3 既存 CBTC で行われるハンドオーバー処理

もし、『階層化システム』のように、“列車の追跡”と“走行許可地点情報”の生成を一元化すれば、拠点装置は処理を持たない単なる無線基地局となる。このことは、センターにすべての列車情報が集中することを意味し、“列車遅延時の指令”や、省エネルギーを目指した列車の“群制御”などに道を切り開くことができる。(株)京三製作所製の「無線式列車制御システム (IT-ATP) 車上装置：(制御器, 送受信器, 車上無線機)」実機例を図 3.4 に示す。

下図、左側写真は“制御器”, センター写真は“送受信器”, 右側写真は“車上無線機”を示している。



図 3.4 IT-ATP の無線式列車制御システムの車上装置

3. 2. 2 CBTC システム

1970年代に、都市内や空港内などの中容量交通輸送システムとして、新交通システムの開発が活発化した。新交通システムは、バスと鉄道間の輸送需要を埋めるものとされ、“自動案内軌条式旅客交通システム (Automated Guideway Transit: AGT)”を基本としており、普通鉄道とは区別されていた。開発当初から、多くは交差誘導線等を媒体とする“無線”を利用した自動運転システムによる無人運転を意図していた。恒久的な交通システムとしては、1981年2月に開業した神戸ポートライナーが世界で最初のCBTCシステムであり、(株)京三製作所が“無線を利用した列車制御システム”を開発している。引き続き3月に大阪ニュートラムが実稼働を開始している。

米国ニューヨーク市営地下鉄のCBTC (Communications-Based Train Control system) は、カナシー線の列車制御システムの老朽更新を機に、1997年に開発が承認され、2006年実稼働を開始している。カナシー線のCBTCは、新交通システムとして1998年に開業したパリ地下鉄 (パリ交通公団: RATP) 14号メテオール線の“誘導無線式”の完全自動無人運転システムMETEOR (METro Est Ouest Rapide) を“空間波無線”に置き換えることと、制御論理を同一にして、ソフトウェアの新規開発を抑えることで実現されている。

このように、新交通システムの制御技術から発展した列車制御システムと、既存列車制御システムの否定からスタートして開発された普通鉄道の列車制御システム「CARAT」、「ATACS」、「ASTREE」などの制御技術が同一枠内で議論されるようになった。今日、欧州の鉄道関連メーカーは、CBTC導入実績として新交通システムも含めてカウントしており、その数は約100システムを越えていると言われているが、その多くは新交通システムのような小規模の例えば、空港内のターミナル to ターミナル間を結ぶ線区に導入されたものである。

主なCBTCの開発・実用化の経緯を図3.5に示す。

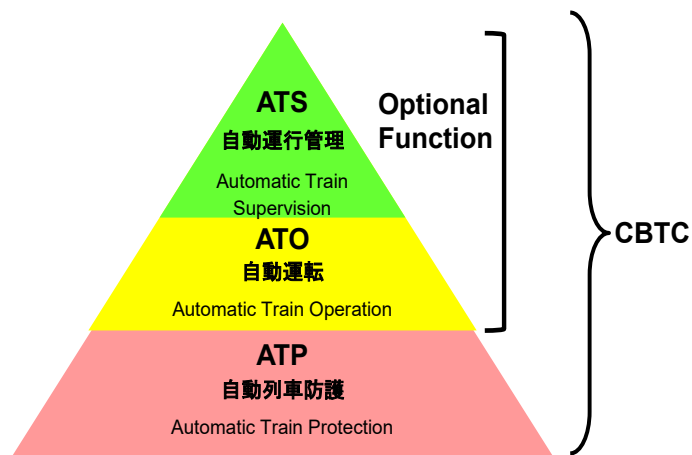


図 3.6 IEEE1474.1 が示す CBTC の構成概念

オプションとはいえ，“自動運転機能（ATO）”と“自動運行管理機能（ATS）”を配置している点で，CBTC システムは単独で“運行指令から保安に至る列車制御全体”を包含出来るが，もともと独立した新交通システムには，“自動運行管理機能”が必要であったし，コスト削減の意味からも“無人自動運転”（DTO・UTO）が必須の要件であったといえる．これに対して CARAT, ATACS は，運行管理システムは枠外として，何らかの上位システムの下に位置づけられていた．また，“自動運転機能”も持っていない．上述した CBTC の分類でいえば，システムの基本機能である「ATP」を実現させたシステムと言って良いが，既存の在来鉄道に導入するには，その線区のみ独立した“運行管理機能”の下で機能するよりも，“ネットワーク化”された周囲の線区との一元管理の下で指令業務が遂行される方が，より効率良い指令業務が期待できる．

このように技術発展の経緯は異なるものの，地上と車上の処理装置を“無線”で結んで列車を制御する CBTC としては大きな差異はない．ただ，3.2.1 項の無線式列車制御システム CARAT/ATACS で明らかにした，“駅構内での固定閉そく化”による問題，さらには，拠点装置を用いて処理が行われるため“ハンドオーバー”が必要になるという点は，CBTC 共通の問題として認識する必要がある．

この点において，本論文で主張している，論理を『機能層』であるセンターの処理装置に一元化する『階層化システム』の概念は，“ポスト CBTC”のあるべき姿を提示している．センターで一元管理されたリアルタイムな情報を下に，運行管理システムとの協働による本来の列車制御すなわち，単なる保安制御に留まら

ない，“列車群制御を利用して安定輸送と省エネルギー”等の効率化をも意図した，“新たな列車制御システムの実現”が開発・出現するものと期待している。

3. 2. 3 列車保安制御の欧州統一バージョンを目指した ETCS

既存列車保安制御装置は，ATS や ATC によって最終的な列車の安全を守ってきた。ATS や ATC と言っても，その方式は多様であり，長い年月をかけて機能の改善が図られ，今日の ATS-P 形やデジタル ATC に到達している。この中で JR 西日本が“無線式 ATC”の名称で開発を行っているように，CBTC は ATS・ATC の発展形として位置づけられている。

この状況は，欧州の ETCS (European Train Control System) が CBTC を，その“レベル 3 システム”として，既存列車保安制御システムの発展形と位置付けていることから理解できる。

欧州「ETCS」の制御概念を図 3.7 により説明する。

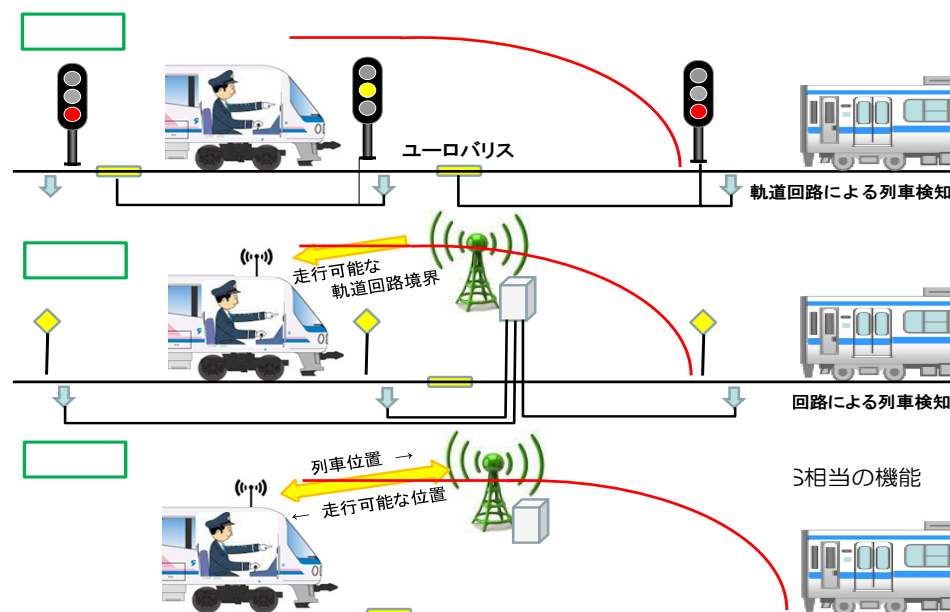


図 3.7 欧州 ETCS の制御概念

欧州の ETCS は，欧州統合による“インターオペラビリティ：(相互直通運転)”の実現を図ることを目的に 1990 年頃に EU 指令のもと，“TSI (Technical Specification for Interoperability) 仕様”が制定されたもので，図 3.7 に示すよ

うに，“レベル 1” から “レベル 3” まで 3 段階の制御形態が基本的に定義されている（現在の制御レベル分けでは一部細分化されている）。

“レベル 1” は，軌道回路により列車検知をしており，進入可能な進路や停止すべき軌道回路情報は，“ユーロバリス” と呼ばれるトランスポンダによって車上に伝達される．日本の ATIS-P 形と同様な機能と考えてよい．これが，“レベル 2” になると，2.5 世代の携帯無線通信網（GSM-R）による地上対車上の“相互情報伝送機能” が付加される．ただ，列車検知はレベル 1 同様に軌道回路を用いる．そして，沿線の地上信号機は無くなり，車内信号方式に移行する．この形態は日本の“デジタル ATC” に対応する．デジタル ATC がレールを用いてデジタル電文を送信しているのに対して，ETCS では“携帯無線通信網” を利用している差がある．上述の 3.2.1 項でも一部触れたが，“レベル 3” になると，軌道回路も無くなり，車上の位置検知情報を受信して列車追跡を行う．地上対車上の情報交換は，レベル 2 と同様に GSM-R を用いる．

この，GSM-R は ETCS 専用仕様として，1990 年代に制定されたが，その当時の欧州における携帯電話網は“GSM” と呼ばれる 2.5 世代が全盛期であった．この無線通信網方式に“鉄道専用”の周波数帯域（876～880MHz 帯）を専用を取得し，“GSM-R (for Railway)” として実用化したものである．

ATACS は鉄道専用の無線帯域を使用しているが，欧州の ETCS では，汎用の周波数帯を割り当てることで，“専用無線” として利用しているとも考えることもできる．実現しようとしている機能は，ATACS と同様である．このように，欧州の ETCS では，技術発展や線区の重要度に応じて，“レベル 1” から “レベル 3” まで発展できるように計画されている．このことは，“レベル 3” に位置する“CBTC” が既存の ATIS・ATC の延長上に位置付けられることを意味している^[16]．

3. 3 閉そく論理の一元化とその効果

(1) 単線閉そく

単線閉そくは，列車の運転に対する“許可権限”を持った駅長やフェールセーフな処理装置が複数存在することにより，複雑な“閉そく処理や解錠処理”が生まれたことを第 2 章で示した．複雑な手続きによる制御は，インタフェースの不具合や外乱による処理の乱れにつながり，結果としてリスクを増大させることになる．許可権限を持つ処理装置が 1 台であるなら，被制御対象の列車との“クロ

ーズド・ループ”を維持しつつ、単線閉そくの機能が、より効率的に実現できると考える。

(2) 駅中間自動信号区間の閉そく

一方、駅中間の自動信号区間の閉そくにおいては、軌道回路という列車センサーが基本となり、“1閉そく1列車”という排他制御を実現する上で安全性上大きな役割を果たし、軌道回路をベースに、“自動信号”という堅固な保安システムが構築された。この自動信号も、“信号冒進”というヒューマンエラーによる事故防止を目的に、車内警報装置→ATS→ATCと技術開発が行われて来た。なお、ATSやATCにおける制御情報を生成する論理処理部を、はじめとする機器は、沿線器具箱もしくは機器室に配置されている。

この中で、ATC信号(デジタルATCではデジタルATC信号)の生成に“列車追跡処理”が重要となっているが、駅構内では電子連動装置も同様に列車追跡を行っている。なお、現行閉そく方式では、軌道回路をベースに構築されているため、運転時隔短縮を図るには軌道回路の細分化と信号現示もしくは、ATC信号関係の再設計・改修が不可避であった。このほか、“レールバス”^[17]や、“DMV:(Dual Mode Vehicle)”^[18]、“フリーゲージトレイン”^[19]と言った、新たな方式車両の導入時に軌道回路の安定動作の確認が必須となって来ている。

これら技術進歩により多くのATC・ATS装置が登場したが、いずれも列車位置を検出し、その位置関係から定まる制御情報を生成して車上装置に伝達するという共通の形態でまとめられる。さらに、既存システムでは、隣接する装置や機器室との“相互情報交換”が必要である。従って、『階層化システム』で考えられるように、列車追跡処理と制御情報を生成する論理を“センターに一元化”する機能構成なら、隣接する機器室等の情報交換の必要性も無くなることとなる。

3.4 連動装置の安全機能と本質

本節では、第2章で説明した連動装置に対し、『階層化システム』の下で、どのように変貌するかを論述する。連動装置は、第2章で説明したように連査や鎖錠という概念で、駅構内の列車運転の保安を司ってきた。

この連動装置における様々な“鎖錠論理”は、駅構内で展開された労働集約的作業(複数の信号扱者が自由に取り扱う進路設定に関する作業)の中で、発生し

た不具合対策として組み込まれてきた経緯のものが多い。その結果、今日の連動装置は、信号機相互間の“連鎖や接近鎖錠”のように信号扱者が、どのような操作をしても安全を損なわないと言う高度な処理が組み込まれている。また、連動装置は列車の動きに応じて“鎖錠”を解錠しており、列車追跡が重要になるが、同様に、ATCにおいても列車追跡は不可欠であり、同一の処理をそれぞれ有している。さらには、構内踏切の処理論理には連動条件を必須とするものも多く、各踏切に応じたインタフェースが設計されるのが現状である。

複数の信号扱者が、どのような連動取扱操作を行っても、“安全性”を確保するために組み込まれた多くの鎖錠論理であるが、信号扱い（連動操作）を、人間からフェールセーフ性が保障された1台のコンピュータ(FS-CPU: Fail Safe-CPU)に置換するなら、“ヒューマンエラー”が排除できるため、鎖錠論理の、いくつかは不要になる。また、フェールセーフな処理装置により、進路設定時や復位時に対する合理性チェックが行えるので、安全を損なうような“競合進路”の設定や、安全が確認されない状態での“進路の引き戻し（復位）”もあり得なくなる。

さらに、処理装置と車上装置間で情報伝達の“クローズド・ループ”が機能すれば、接近鎖錠や保留鎖錠などの時間鎖錠を用いた安全性向上対策も不要となる。なお、鉄道総研が開発した前述の CARAT では、この考え方を積極的に採用した連動処理を“ポイント制御”と称して開発し、現車試験により有効性を確認している。ポイント制御では、転てつ機上は、1列車の存在しか許容しないが、その他の区間においては、駅中間と同様に、“前方列車の後部位置+ α の地点”まで接近を許容する^[20], ^[21]。なお、この“ポイント制御”の概念は、本論文の第5章で提案するIoT時代における“新連動”の開発の重要なポイントとなる。

この論理は、先行列車の後尾位置もしくは、転てつ機の状態により、列車の“走行許可（走行路）”が決定されるというもので、この論理を『階層化システム』も踏襲している。さらには、『階層化システム』の目標である、“連動処理”と“踏切制御処理”、“閉そく処理”が一元化されるなら、インタフェースの削減と、同一処理（共通処理）を複数箇所を持つようなことは不要となり、処理の簡略化が大幅に図れる^[2]。この点で『階層化システム』の構成は理想的であり、既存連動装置が抱える課題をスマートに、そしてシームレスに解決できる可能性を持っていると考える。

3. 5 踏切制御装置と階層化システム

第2章で説明したように、既存の踏切制御は、列車検知から警報・遮断・鳴動停止・開扉という踏切制御を地上側機器で行い、列車側は制御に能動的には関与していなかった。この装置の下で“踏切支障事故防止”が大きな課題となっている。また、構内踏切では連動装置とのインタフェースも必要となっている。さらには、単線踏切では、運転方向に応じて鳴動点踏切制御子のマスクが必要となる問題も残っている。

このほか、踏切は、その線区の最高速度を向上させようとするすると、踏切警報の始動点（鳴動点）の踏切制御子を移設しなければならなくなり、低速走行時との調整が必要となるなどの問題もあった。この課題の解決には“ATACS”が採用したように、踏切制御装置と車上装置間で情報伝達の“クローズド・ループ”による制御の採用が必要になってくる。

ATACSでは、次の手順で踏切制御を行っている。

- ①. 列車が、自らの走行速度と走行位置をもとに鳴動開始時刻を踏切保安装置に伝達すると共に、自らは踏切までの停止パターンを生成させて走行。
- ②. 踏切において遮断完了し、障害物がないことが確認されると、遮断完了・障害物なしのメッセージを車上装置に伝達。
- ③. 遮断完了・障害物なしのメッセージを受信した車上装置は、踏切手前までの停止パターンを解除して踏切を通過。

このような“クローズド・ループの制御方式”により、警報時分の適正化や障害物に対する安全性の確保が行われている。この制御方式は、通信障害や機器故障によりメッセージが途絶えた場合には、踏切道前までのパターンが消去されず、保持されるので“フェールセーフ”に動作する^[5]。この概念は、“安全性向上”と“警報の定時間制御”という課題解決にも効果があることが、ATACSのフェーズ2の試験実績からも実証されている。ATACSにおける踏切制御の概念を図3.8に示す。

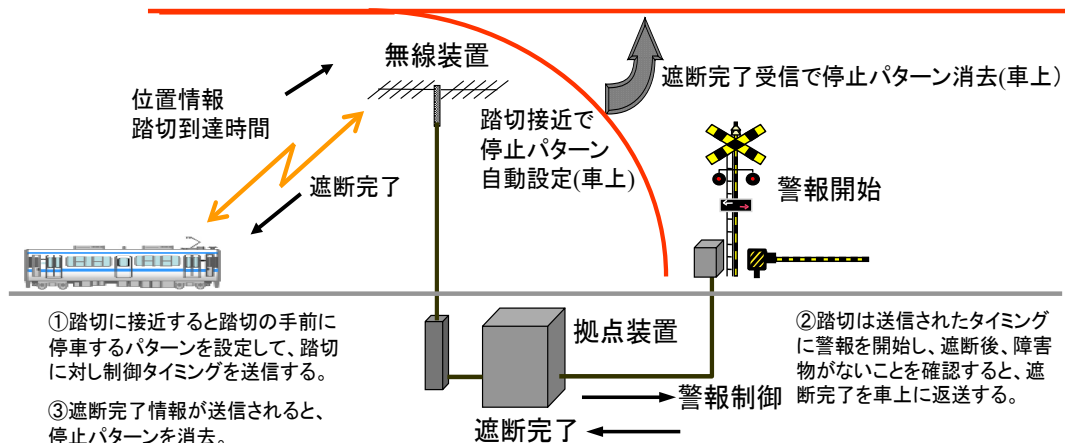


図 3.8 ATACS における踏切制御の概念

ATACS は現場の拠点装置を介して、この処理を行っていたが、連動処理と踏切制御処理、閉そく処理がセンターの統合型処理部に一元化されるなら、構内踏切のインタフェースの簡易化が実現できることとなる。また、“無線式制御”に依ることによって速度向上に伴う踏切制御子の設置位置の問題や、単線線区における運転方向の識別問題も解決出来ることとなる^{[2], [3]}。

このような解決策を実現する上で、『階層化システム』のアーキテクチャは理想的なものとする。なお、今日の踏切の課題解消策として、上記手法を導入するには、まず、“車上側”に地上間との無線通信手段及び、車上位置検知手段を具備する必要がある。併せて、“地上側”も無線通信手段を設備するほか、上記の論理を組み込んだ処理装置を設けなければならないというように、ハードルは高い。

しかしながら、現在 JR 東日本では、この「踏切制御の概念を実装したシステム」を試作し、2020 年 9 月より八高線（高崎-高麗川間）の線区において、“GNSS: Global Navigation Satellite System（全地球航法衛星システム）”と“携帯無線通信網”を活用した“無線列車制御システム”の走行試験：（踏切制御機能）を行っている。JR 東日本では、GNSS と携帯無線通信網を使用して、ローカル線向け（地方交通線区対応）の“新しい列車制御システムの開発”を推進している。これは最新の ICT（情報通信技術）と汎用技術を活用し、“踏切制御機能”と列車の“速度制御機能”の実現を目指すもので、“世界初のシステム”である。最近の GNSS の現況は、米国の GPS（Global Positioning System：全地球測位システム）、ロシアの GLONASS（GLObal Navigation Satellite System）、EU の Galileo、

そして日本の準天頂衛星（QZSS：Quasi-Zenith Satellite System）など、各国が開発を進めており、世界共通の社会インフラとして期待されている。2019年4機体制の“みちびき（QZSS）”は、準天頂軌道を周回する3機と赤道上の静止軌道に配置する1機の静止衛星から構成されており、“日本版GPS”として期待されている。各産業界では準天頂衛星を含めたGNSSによる“衛星測位技術”を利用した応用システムの研究開発が進んでいる状況である^[2 2]。

鉄道界における本システムは、GPSや準天頂衛星（みちびき）などの衛星の位置測位システムを用いて、“列車位置”を検知し、“汎用携帯無線通信網（4G）”を活用して、列車と踏切の制御情報を伝送する。通信回線は2社の汎用回線を使用する。このうち、踏切制御は、“GNSS”で列車位置を測位把握し、汎用携帯回線を使ってセンター装置と踏切制御端末装置間で情報を伝送する。踏切で“非常ボタン”が压下された場合は、運転席で警報音が鳴動するとともに、踏切手前で停止するブレーキパターンを出力する。

これにより、運転士が緊急ブレーキで列車を停止させるが、万一の場合でも踏切手前までに自動で停止する。また、汎用携帯回線で“通信断”などが発生した場合は、自動的にブレーキが作動することとなる。さらに、GNSSが受信できなくなった場合などは車両に標準的に搭載されている速度発電機：（TG）に切り替えて自列車の位置を割り出す。現行システムと比較して、異常時に自動でブレーキ制御できるようになり、“安全性”が大幅に向上する。踏切制御子や特殊信号発光機、連動ケーブルなどの現場設備も大幅に削減できるため、故障を減少させ輸送の“安定性”も向上する。コスト面でも、設備の削減に伴い、全体の20%程度のコスト削減が期待できると評価・分析されている^[2 3]。

3. 6 現場設備状態監視装置

既存信号保安システムをベースに『階層化システム』の導入による効果を検討してきたが、システムとしては“運用・保守”も重要な要素と言える。今日では、定常状態監視装置などの設備が多数導入され、保守の合理化に寄与しているが、この設備状態監視装置は、ATS・ATC装置や連動装置、踏切制御装置といった“システムの動作状態”を監視するものとして導入されてきた経緯が多い。従って、現場設備が変更されると、それに応じて設備状態監視装置の機能も変更・改修させなければならないことになる。“異常判定”は現場機器の動作と関連して判断さ

れることが合理的であることは言うまでもない。『階層化システム』は、既存の連動装置や閉そく装置、ATS・ATC、そして軌道回路という現場機器を不要とした。しかも、現場に残る転てつ機と踏切は、“センターからの制御”に移行する。

さらに、『階層化システム』の下では、すべての列車が車上で“位置検知機能”を備えている。従って、車両（車上）の振動などを計測する、加速度センサーや異音を検出するマイクロフォンを具備することにより、軌道検測車を持つことなく、軌道の異常も把握できるし、ピンポイントでの合理的な保全が期待できる。

“保全”は、それまでの機能を維持する保守にとどまらず、速度向上など鉄道システムとしての性能向上に寄与すべきであり、この点で、“常時監視データ依存型の予防保全 CBM: Condition Based Maintenance”に向かうべきと考える^{[2], [3]}。

3. 7 階層化による列車制御の可能性

既存信号保安システムを分析し、課題解消を検討する中で、現場装置をできる限り削減して、残る装置間の交信により保安制御を実現するシステムアーキテクチャに到達した。この構成は、保安制御論理をセンターに集中するものであるが、すでに無線式列車制御システムでは、駅間の“移動閉そく論理”も確立しており、“踏切制御”も実現している。従って、これらの技術的蓄積の下に移動閉そくを可能とする連動機能を実現すれば、“センターに処理を一元化した列車制御システム”が出来上がる。ただ、この検討においても個々の機能を開発し、それを付加していく従来の方法論では、理想的なシステムにはならないと考える。

申請者は、駅中間の列車に与えている制御コマンドを“踏切制御”にも、さらには“駅構内の走行”にも利用することを考えた。この方式によれば、車上処理装置からは、それが“踏切制御”によるものか“駅構内の走行路”によるものか、一切関係なく共通の論理処理で制御できることとなる。既存の信号保安システムの構成と、『階層化システム』における『階層化』による制御の概念の比較を図 3.9 に示す。

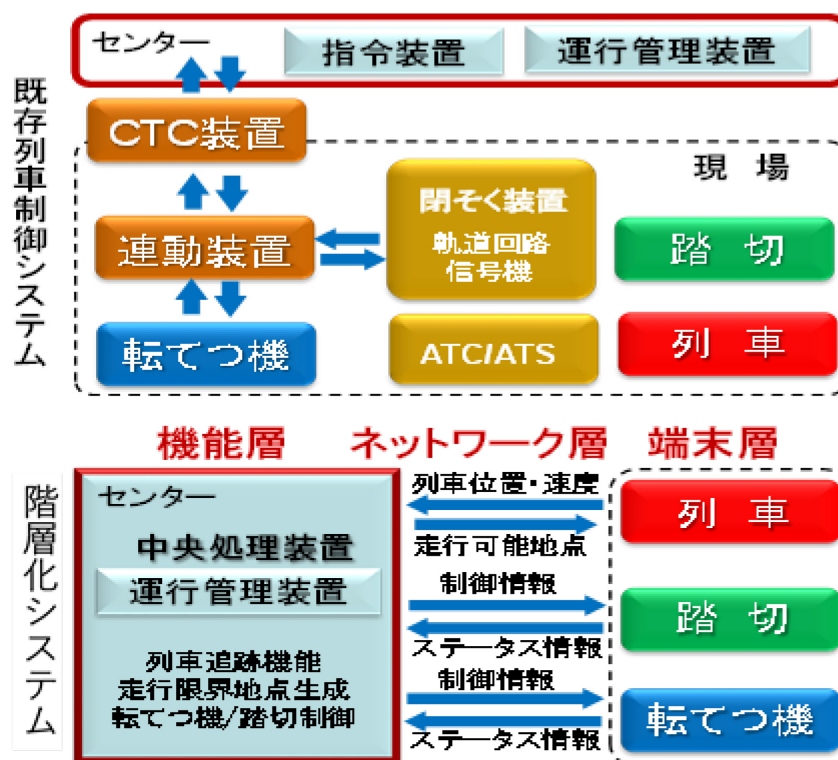


図 3.9 既存信号保安システムの構成と階層化システムによる制御概念の比較

3. 8 第3章のまとめ

本章では『階層化による既存列車制御システムの再構築』と題して、第2章で抽出された課題を解決する方法について検討した。この中で、今日最も進んだ列車制御システムといわれる、“無線式列車制御システム：CBTC (Communication Based Train Control system)”の列車制御システムも分析し、処理部を沿線に“分散配置”するのではなく“センターに一元化”することの有効性を明らかにした。

そして“CBTC”を含め、既存列車制御システムが、それぞれ抱える課題を分析し、連動装置や閉そく装置、ATS・ATCといった制御装置を、現場に設備・配置する従前の考えではなく、システムの安定稼働を保証する“アシュアランス技術”に則した多様なニーズに対応するために、異種システム間の共存を可能とする性質である“異種性”とシステムを取り巻く状況の変化に柔軟に対応する性質である“適応性”の2つの要素を持ち、システムに適用される“アシュアランス性”を考慮した、鉄道システムとして、必須な転てつ機、踏切、そして列車をインタフェースする『端末層』と、センターの中央処理部『機能層』、そして、その間をつなぐ伝送部『ネットワーク層』からなる『階層化』の新たな概念について示す

と共に、『機能層』へ現場の情報が、リアルタイムで一元的に収集・フィードバックされるシステムが、“より高度な列車制御システム”実現に適しているかを、明確に示した。

3. 9 第3章の参考文献

- [1] 日本鉄道電気技術協会 秋田雄志, ほか「鉄道信号」, 2015-1
- [2] 電気学会論文誌 C 部門 vol136 No.7 「階層化による列車制御システムの再構築」齊藤嘉久, ほか, 2016-7
- [3] 平成 27 年 電気学会電子・情報・システム部門大会 IEE 論文番号 TC9-6 (長崎)「階層化による列車制御システムの再構築」齊藤嘉久, ほか, 2015-8
- [5] オーム社「鉄道信号システムがわかる本」中村英夫編著, 2012-5
- [8] 鉄道総研報告 Vol.15 No.1 「バリス式列車検知装置(COMBAT)の開発」西堀典幸, ほか, pp17-22, 2001-1
- [9] J-RAIL2010 講演論文集 S7-1-4 「閑散線区向け拠点無線式列車制御システムの開発」平栗滋人, ほか, 2010
- [10] 電気学会全国大会 S22-5 「地方鉄道線区の経営改善スキーム」中村英夫, ほか, 2008
- [11] J-RAIL2010 講演論文集「地方交通線向け列車制御システムの開発」S7-1-5 安西理, ほか, 2010
- [12] JREA Vol.58 No.58 「ATACS の踏切制御機能使用開始」山崎勇, ほか, 2010
- [13] KYOSAN CIRCULAR 2018 Vol.69 No.1 「無線式列車制御システム(CBTC)の開発」水野健司, ほか, 2018-1
- [14] 鉄道車両と技術 Vol.17 No.9 「日本信号における無線式 CBTC システム(SPARCS)の海外展開」八木誠, ほか, 2011
- [15] オーム社 日本鉄道電気技術協会編「鉄道信号技術」中村英夫, ほか, 2020-11
- [16] 齊藤嘉久, 高田哲也, 中村英夫, 「統合型列車制御システムの構成とその効果」電気学会論文誌 TER/マイクロセンサーシステム合同研究会 TER-21-029/MSS-21-022, pp1-6, 2021

- [17] 芸文社「日本レールバス大全-国産軽量気動車のすべて」 齊籐幹雄, ほか, 2010
- [18] 国土交通省「デュアル・モード・ビークル(DMV)に関する技術評価検討会」, 2015-10
- [19] 国土交通省「軌間可変(フリーゲージトレイン)技術評価委員会」, 2018-3
- [20] 鉄道総研報告「CARATに関する研究成果を概観する」 Vol.7, No.5, 中村英夫, ほか, 1993
- [21] 日本鉄道サイバネティクス協議会 第 30 回鉄道サイバネシンポジウム 317 「CARAT 用電子連動装置の開発」 中村英夫, ほか, 1993
- [22] 浅野晃 日本大学理工学研究科博士学位申請論文「列車保安制御システムへの全球測位衛星システム (GNSS) 利用に関する研究」, 2018-9
- [23] JR 東日本「GNSS・携帯無線活用し列車制御 走行試験を報道公開」, 2021-2-1, 交通新聞プレス発表

第4章 統合型列車制御システムの提案

4.1 はじめに

前章まで呼称してきた『階層化システム』について、本4章以降では、『統合型列車制御システム (UTCS : Unified Train Control System)』と正式に命名し、論ずることとした。

信号の基本機能である“閉そく機能”と“連動機能”は、進路の構成という役割を除くと、列車相互の衝突や追突といった事故の回避を最大の使命としていた。そして、その信号の原理は、他の列車との接触を無くすという“排他制御”を基本に構築されてきた。信号の仕組みの中には、有史以来の事故を経て学んだ苦い教訓の中で培われた技術が数多く蓄積されて来ている。この技術進歩の過程が、信号システムの現状、すなわち、“ボトムアップ的”に改善が重ねられ、精緻で複雑な今日の閉そく装置や連動装置へと発展してきたことを意味している。

しかし、個々の機能が、それぞれ発達していく中で、多くの装置の中に共通的に内包される処理や、システムの進歩の中で、やがては姿を消すと思われる処理もある。さらには、現在の鉄道事故の最大要因となっている踏切事故防止等、課題解決のためには抜本的な変革を要するものもある。このことを、今日の閉そく装置、連動装置、そして多くの問題を抱える踏切制御装置等に関して、第2章、第3章までの分析をベースに『統合型列車制御システム (UTCS)』が目指す理想的なシステムの可能性について考察・提案する^{[2], [3]}。

これまでの分析により、既存列車制御システムに対し、“論理をセンターに集約”し、現場には、鉄道信号システムとして必須な転てつ機、踏切、列車という要素を配置して、“無線通信”により接続する『UTCS』が、課題解消に有効との見通しを得た。このため、本章では“階層構造”をとる、新たな考え『UTCS』における『機能層』、『ネットワーク層』、『端末層』の、それぞれの仕様について検討する。さらに、『UTCS』の“安全性や導入効果”についての、検討結果についても論じる。

4.2 統合型列車制御システムの提案

第3章で述べたように、申請者は、列車制御システムを“階層的”に俯瞰し、『論理処理部：(機能層)』、『対現場機器インタフェース部：(端末層)』と『伝送

部：(ネットワーク層)』から成る“新たな階層的列車制御システム”で再構築を図ることを提案した。これまでの列車制御システムは ATC 装置，連動装置，閉そく装置，設備監視装置などが個別に導入され，機能していた。センターでは，これらの装置の情報を収集するために，装置ごとの ATC 回線，連動回線（CTC），設備監視回線等の通信回線を，それぞれ用いていた。このため，機能の追加や削除等の改修を行う際に，影響分析，装置間インタフェースの検討，改修作業，試験確認などに多くの時間と費用を必要とすることが課題であった。図 4.1 に「既存の列車制御システム」の構成を例に示す^[24]。

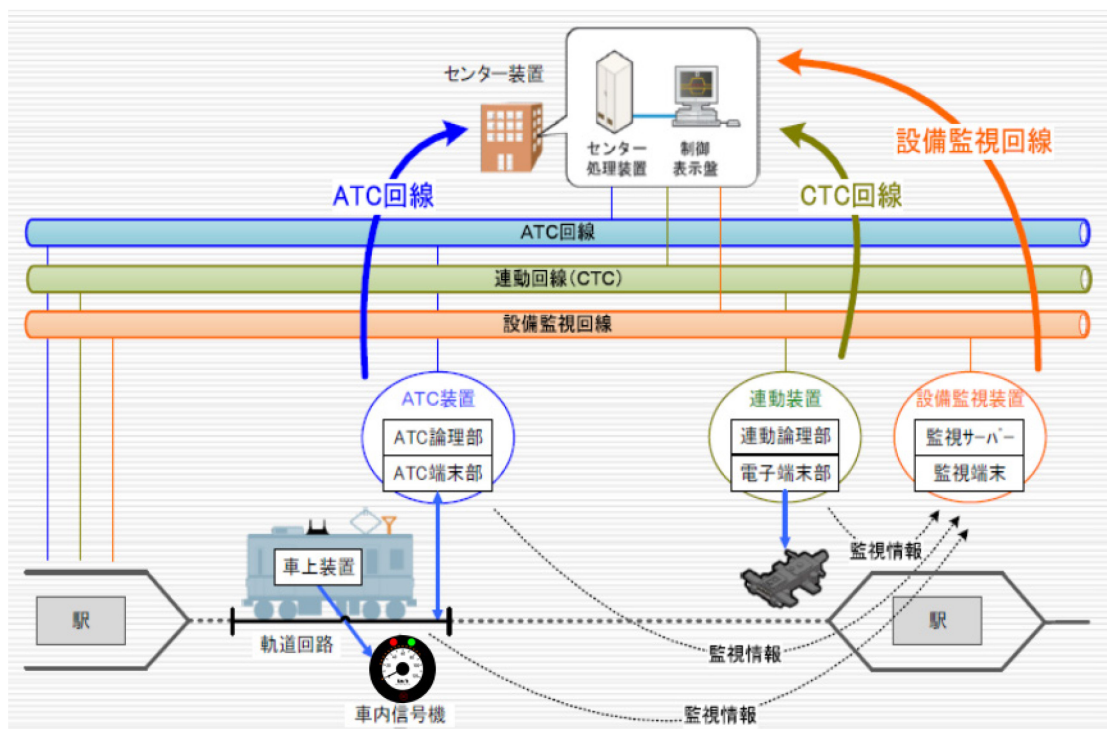


図 4.1 従来の列車制御システムの構成

図 4.2 は既存列車制御機能に関して階層的に再整理を試みた例である^[24]。但し，概念的には，連動装置や ATC 装置，閉そく装置，そして設備監視装置といった各装置の論理処理をセンターシステムに実装しているが，これらは最終的には淘汰され，『機能層』の新たに“一元化された論理処理部：統合型処理部”に統合され，進化生まれ変わることとなる。

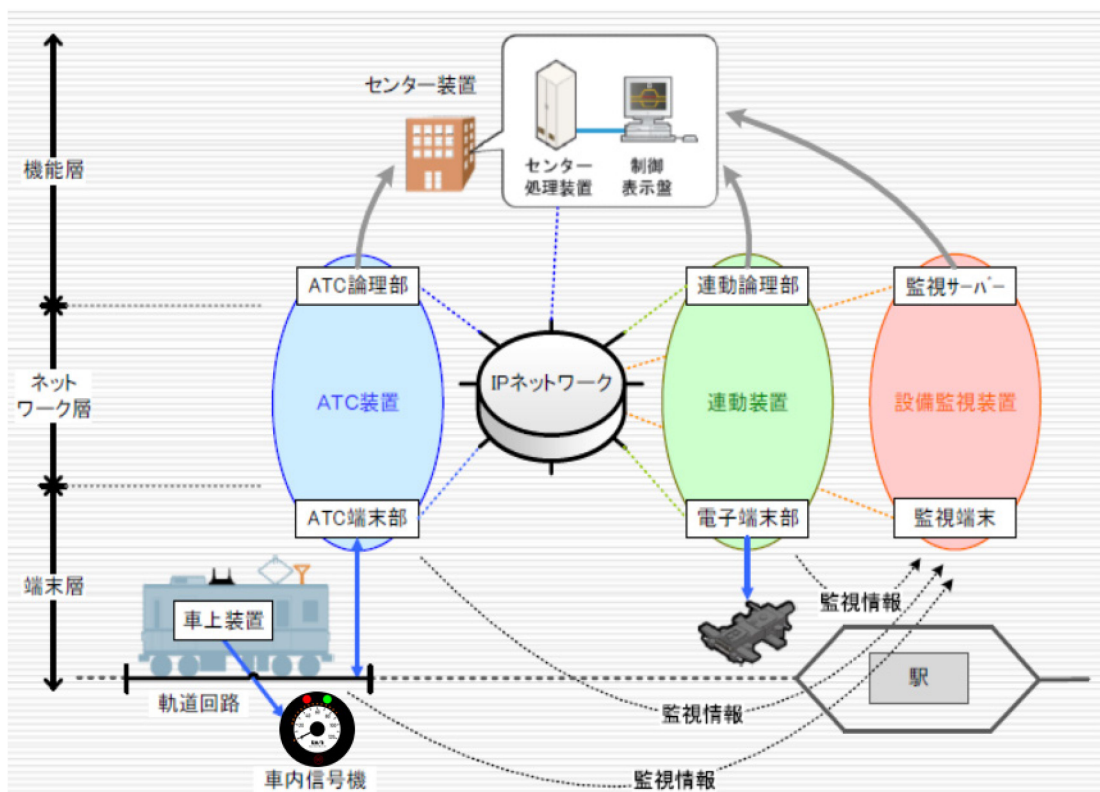


図 4.2 既存列車制御システム階層構造に分離

『階層ごとに統合』された構成図を図 4.3 に示す。

その結果，従来複数の装置で，共通に内包される論理機能を持っていた無駄が省かれ，従来システムの課題を解決し，論理もカスタマイズされ，“シンプル化”できる^{[2][4]}。これは単純な機能の“集中化”を図るものではなく，新たに「本質制御」に関わる必須機能の統合化と集約化を図った高安全なシステムの再構築となるものである。

さらに論理部を統合・集約することにより，機能変更や機能追加時の改修範囲もセンター中心に限定されるため，列車制御システムのニーズ変化に柔軟に対応可能な“進化可能なシステム”へ変貌することが容易になると考える^{[2], [3]}。

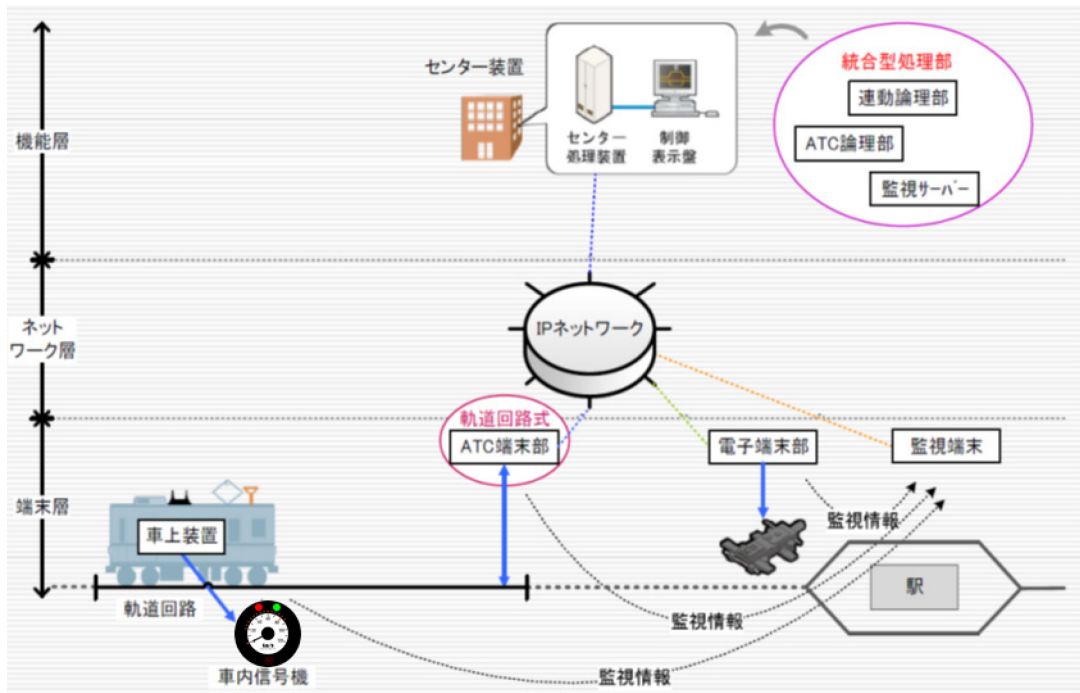


図 4.3 階層毎に統合された構成図

4. 3 統合型列車制御システムの詳細検討

本節において，“階層型の理想的システム”を目的とし、『統合型列車制御システム：(UTCS)』について詳細な検討を行なう。図 4.4 が『UTCS』の具体的な構成を示すもので、『機能層』は，従来の各制御装置が，それぞれ独立に行なっていた処理機能を“統一的”に扱う。ATS・ATC 機能や閉そく機能，連動機能を単にセンターに集約するのではなく，現在の信号保安装置の機能を統一的に扱え，かつ“CBTC システム”などにも，そのまま容易に移行対応できることとなる。

図 4.3 の“軌道回路式”から“CBTC 式”へのシステム変更を考えてみる。この CBTC 式への移行概念を図 4.5 に示す。地上側の設備において軌道回路式と CBTC 式では，信号情報と列車位置情報を通信する媒体がレールから“無線”に変わるだけで，システム的な違いはない。軌道回路式では，ATC 端末部が，信号情報の送信と列車位置検知を行っていたが，CBTC 式では，“IP ネットワーク”に接続した地上無線部が車上装置と無線通信を行い，信号情報と列車位置検知情報を送受信するようになるだけである。このように『UTCS』では，必要な個所

(機能) だけを改修・変更すれば、システムを容易に進化させることが出来るよう考慮されている。

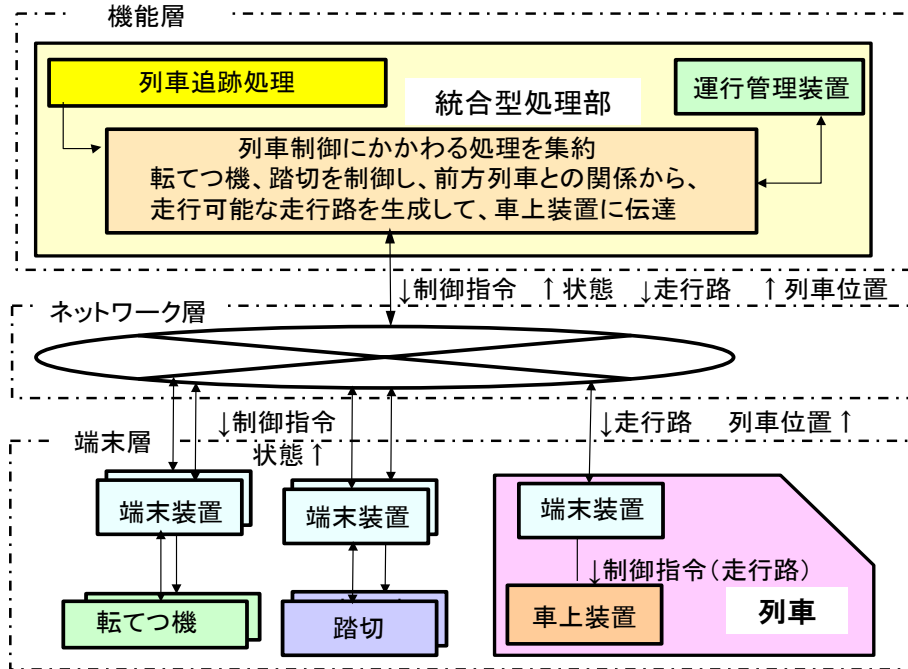


図 4.4 提案する UTCS の構成

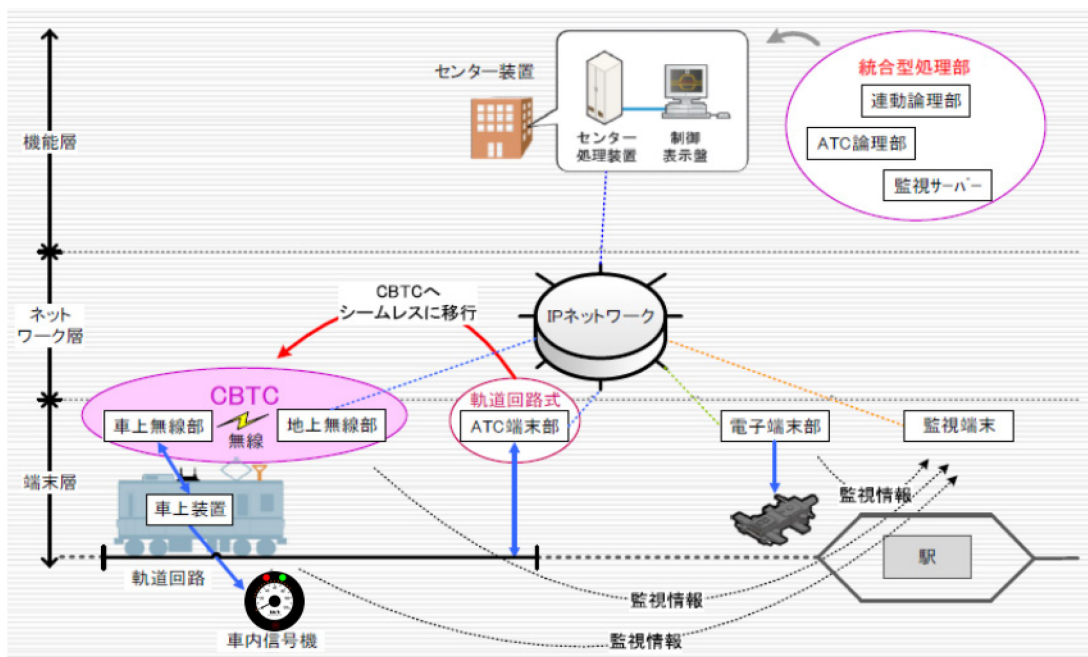


図 4.5 軌道回路式から CBTC 式へ

4. 3. 1 機能層としてのセンター処理装置の機能

申請者は、閉そく制御や連動制御、踏切制御といった個別に発達してきた処理の統一化のために、列車に対する“走行路”という概念を導入する。走行路は、それぞれの列車単位に、関係する先行列車、転てつ機、及び踏切の状態から導かれる“走行可能な限界までの地点”を意味する。このため、先行列車、転てつ機、及び踏切を“支障点”と呼ぶ。

図 4.5 に示すように、列車に対する統合型処理部の処理は、“列車追跡処理機能”と“走行路探索処理機能”，および“走行路探索処理”によって起動され、転てつ機や踏切を制御する制御処理機能が含まれる。列車に対する走行路が確定すると、さらに走行路内の速度制限情報が付加された“走行コマンド：(Authorized Command)”が生成され、対象の列車の端末装置に送られ“速度照査とブレーキ制御”が行われる。

いずれにしろ、車上の保安処理は車上装置が担うが、車上はパターン（速度プロファイル）による“連続した速度照査”が実現する。しかも CBTC の場合には、地上側に ATS・ATC の装置を設けずに“高水準の速度照査機能”を実現することが出来る^{[2], [3]}。

上記で説明した『UTCS』における“走行可能な限界点までの地点（走行路）”の概念を図 4.6 に示す。

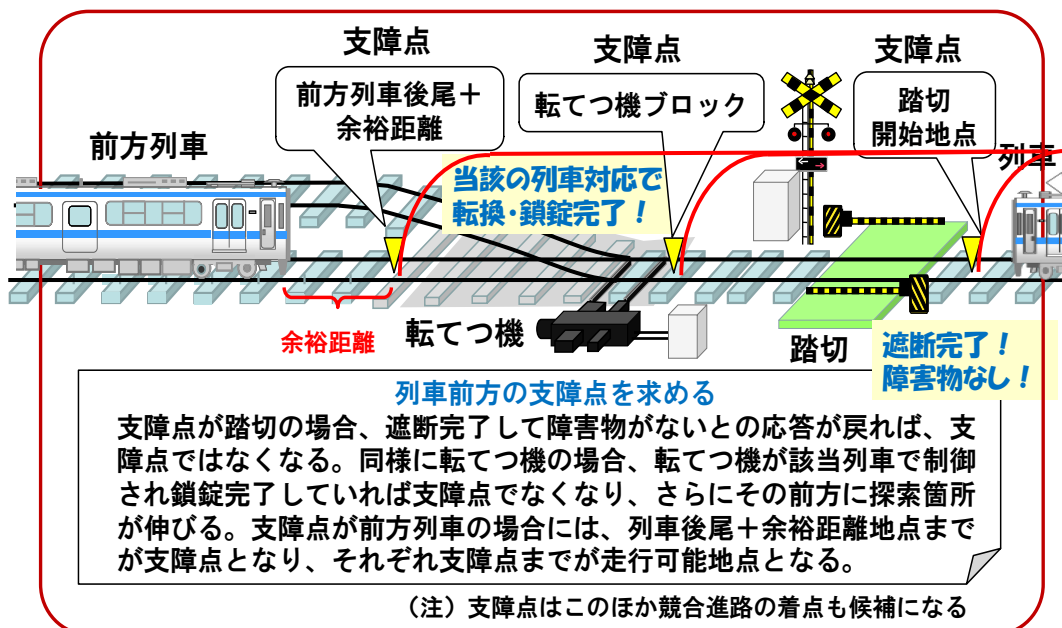


図 4.6 UTCS における走行可能な限界までの地点（走行路）の概念

4. 3. 2 ネットワーク層の要件と IP ネットワーク

『統合型列車制御システム：(UTCS)』の実現には、“IP ネットワーク”が重要な役割を果たす。IP ネットワークの必要条件是、使用する線区に応じて異なる。高密度線区では、高速・高信頼で情報の伝達時間を保証する必要があるため、性能重視の新幹線等で実績のある“列車制御専用ネットワーク”が必要となる。一方、地方交通線などの低密度線区では、導入コストと保守コストを抑えながら高信頼が要求されることから、コスト重視の“汎用ネットワーク”の利用・導入を考える必要がある。また、高密度線区と低密度線区が接続されるような線区の場合でも、IP ネットワーク同士の接続となるので、容易に接続することが可能となるメリットが得られる^{[2], [3]}。

高速鉄道における列車速度の変化を見てみると、1963年に日本の新幹線1000形電車が、当時の電車世界最高速度記録、“256Km/h”を達成した後、各国が最高速度を更新してきたが、2007年フランスのTGV(4402特別編成)が“574.8Km/h”を記録し、これを比較しても、45年経過で2.25倍程度である。これに対して通信速度は、1980年代に一般的な家庭の通信回線が“512kbps”であったのに対して、2021年の平均接続速度は“80Mbps~100Mbps”と列車速度の変化とは、比較にならない速度変化となっている。

このことは、列車制御における情報量の観点から中央に集中した『機能層』論理部にて、『ネットワーク層』を介して、現場に点在する『端末層』の各現場機器を十分制御可能であることを示している。本申請論文では、現在の仕組みとして、高密度線区向けと低密度線区向けのネットワーク構成を提示するが、将来的には高密度線区でも、インターネット回線を経由した列車制御が十分可能と考える。

(1) 高密度線区用 IP ネットワーク

高密度線区用 IP ネットワークは、列車制御専用開発した“伝送ノードを光回線にてループ接続”する。そして、各装置と伝送ノードは、イーサネット回線で接続する。この IP ネットワークは、伝送ノード間の通信時間をリレー動作時間の1/10以下の短時間で最長通信時間を保証することも可能である。これにより、各装置は、装置間の物理的距離を意識することなく、同じ機器室に隣接し、リレーインタフェースしているのと同様以上の応答性を（東海道新幹線従来技術：100Mbps → ATP 用に開発：2Gbps）以って扱うことが可能となり、従来と全く同

じ考えでシステムを捉えることが出来る。IP ネットワークは、シングル系構成をベースとするが、稼働率向上のために複数の IP ネットワークを冗長構成とすることができる。それぞれの IP ネットワークは、完全独立であるので、“並列 2 重系構成” となり、センター処理装置と端末装置は、自由に通信ルートを選択して通信することが可能になる。IP ネットワークの稼働率は、システムの稼働率に直結するため、信頼性にも十分な配慮が必要となる。

伝送ノードのハードウェアは、東海道新幹線をはじめとする、多くのシステムで伝送系故障が皆無の非常に稼働実績の高い、信号 LAN の技術を継承して今後も開発を継続する。なお、東海道新幹線では、信号 LAN を ATC 装置、電子連動装置、CTC 装置に採用し 15 年以上稼働しているが、ハードウェア故障を起因とするシステムダウンは発生していない実績を有している。この IP ネットワークの冗長構成図を図 4.7 に示す^{[2], [3], [24]}。

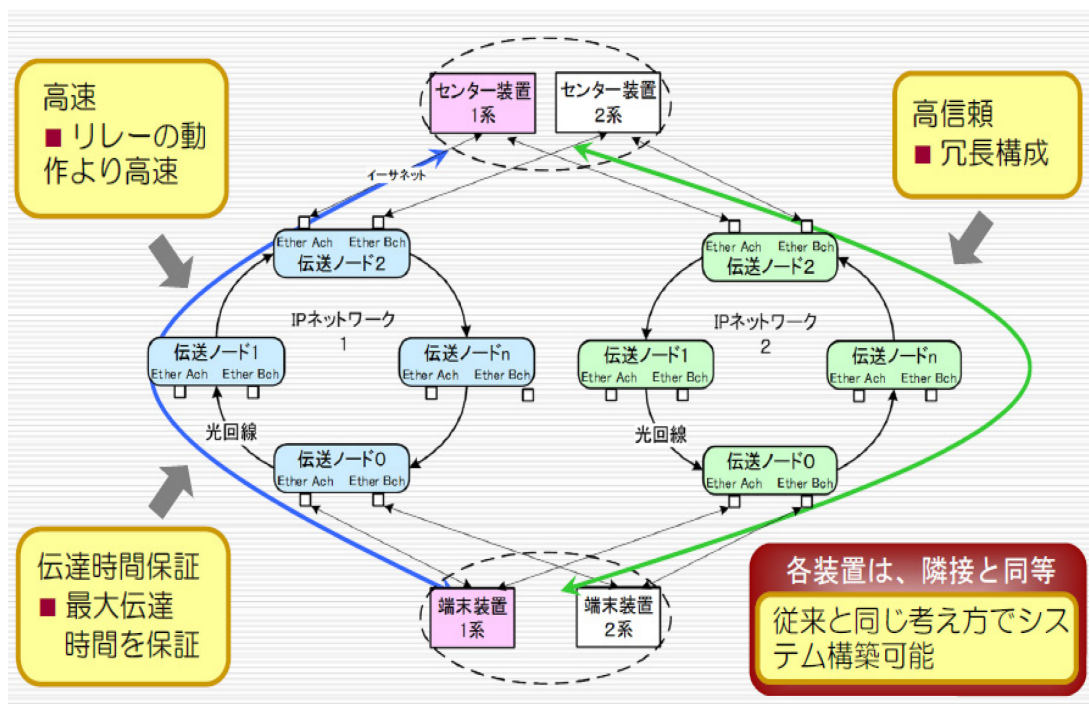


図 4.7 IP ネットワークの冗長構成

(2) 地方交通線用 IP ネットワーク

地方交通線では、導入コストと保守コストが事業運営上、重要であるため、IP ネットワークとして、たとえば汎用技術を利用した“汎用携帯無線通信網”の利

用が考えられる。この汎用携帯無線通信網は、高額なケーブル敷設費、設備費、保守費を削減することができるが、通信時間を保証できないという制約や、通信費を考慮する必要がある。地方交通線での汎用携帯無線通信網利用の場合、連続した通信は困難となる。しかし、単線線区において、センターとの情報交換を行う箇所を駅構内近傍に限定しても、現状以上の機能を有した、新たな列車制御システムが実現できる^{[2], [3]}。

このことは、『ATP 閉そくシステム：(Automatic Train Protection and Block system)』の研究・開発報告によって実証している。本『ATP 閉そくシステム』は、2009年度から2011年度までの3年間にわたり、国土交通省鉄道技術開発費補助金により、“地方交通鉄道の合理化”（電子閉そくの置き換え等）を目的に基礎開発を行った。この補助金による研究開発事業においては、専門技術委員会である『ATP 閉そくシステム調査検討会：中村英夫委員長』を設け、各委員である有識者方々のご指導を頂き、列車の通常走行時の仕様作成および、山形鉄道株式会社殿の協力を得て地方交通線の実フィールドを使用しての実車試験を実施・検証し、既に良好な試験結果を得ることが出来ている^[2-5]。

汎用携帯無線通信網も稼働率を考慮すると、2社の通信事業者を用いて“冗長化”することが考えられる。この場合、正常時は片回線が空くことになるが、この空き回線を使用して、列車の走行状態をセンター処理装置へ送信すれば“予防保全”等などに有効活用できる。図 4.8 に汎用携帯無線通信網の冗長化イメージを示す^[2-6]。

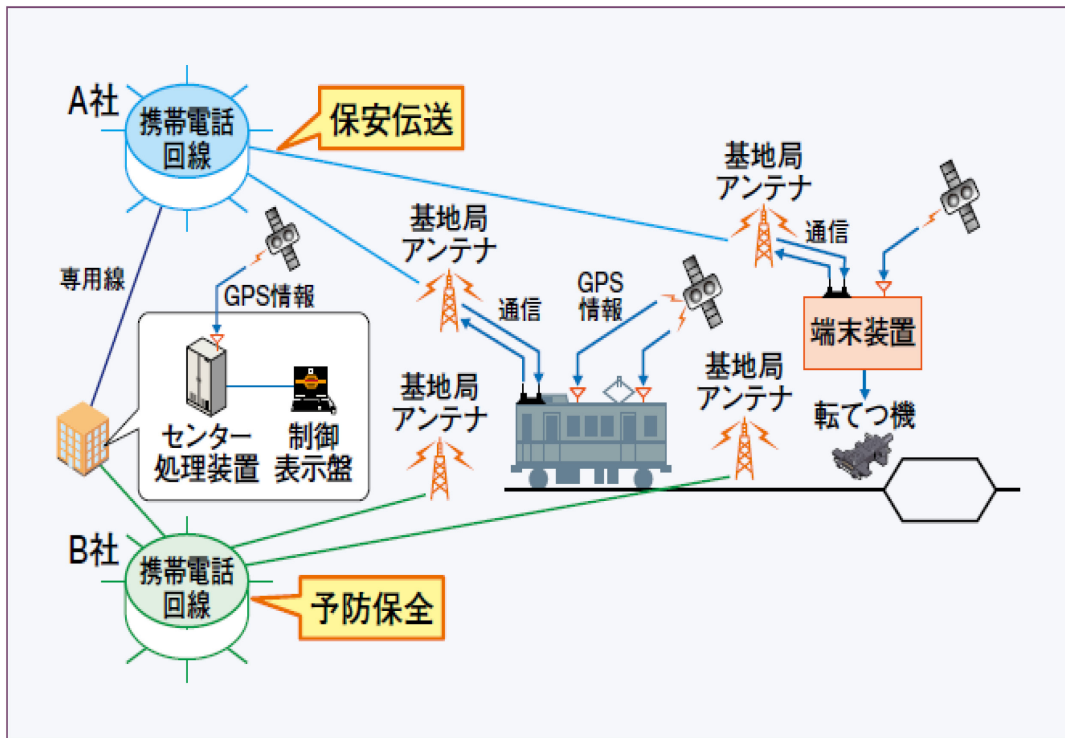


図 4.8 汎用携帯無線通信網の冗長化

4. 3. 3 端末層とその機能

端末装置はフェールセーフな、コンピュータに現場機器とのインタフェースソフトを組み込んだものである。基本的には現場機器とセンターの統合型処理部間の情報交換に徹するが、重要な現場機器を制御するため、下記の通信に関わる国際標準化に則り、“国際規格 IEC62280 : (International Standard for Safety Related Transmission System)の鉄道アプリケーション-安全関連伝送に関わる通信要件”，及び“国際規格 IEC/TS 62773 : (Procedure to determine the performance requirements for radio systems applied to radio-based train control systems)の鉄道アプリケーション-無線式列車制御システムにおける無線システムの性能要求決定手順”等に準ずることと、さらには、車上装置を除く現場機器に対しては、一回のメッセージでは処理を進めず、メッセージ内容の妥当性を相互に確認しながら、処理を進めるなどの万全な通信上の“セキュリティ対策”等が重要な要素となる。

4. 4 統合型列車制御システムの安全性

『統合型列車制御システム：(UTCS)』の安全性について FTA 解析を用い，“地上信号装置+ATS の場合”，“デジタル ATC の場合”そして“提案する UTCS の場合”について FTA 解析し，評価した。

4. 4. 1 地上信号方式+ATS の場合

地上信号方式における“自動閉そく”（信号制御回路）の例を図 4.9 に示す^[36]。図ではリレーによる信号灯器の制御が表現されているが，軌道回路電流の極性（位相）制御もリレー結線で行っている。地上信号方式の場合，乗務員の誤認による列車衝突事故の懸念があるため，ATS が付加されることになる。ATS は方式により，ヒューマンエラーに対するカバレッジが異なる。

この関係を“FTA 解析”で表現したものが，図 4.10 である。本 FTA 解析の各エレメントに対しては“危険側事象”のみを抽出している^[27]。

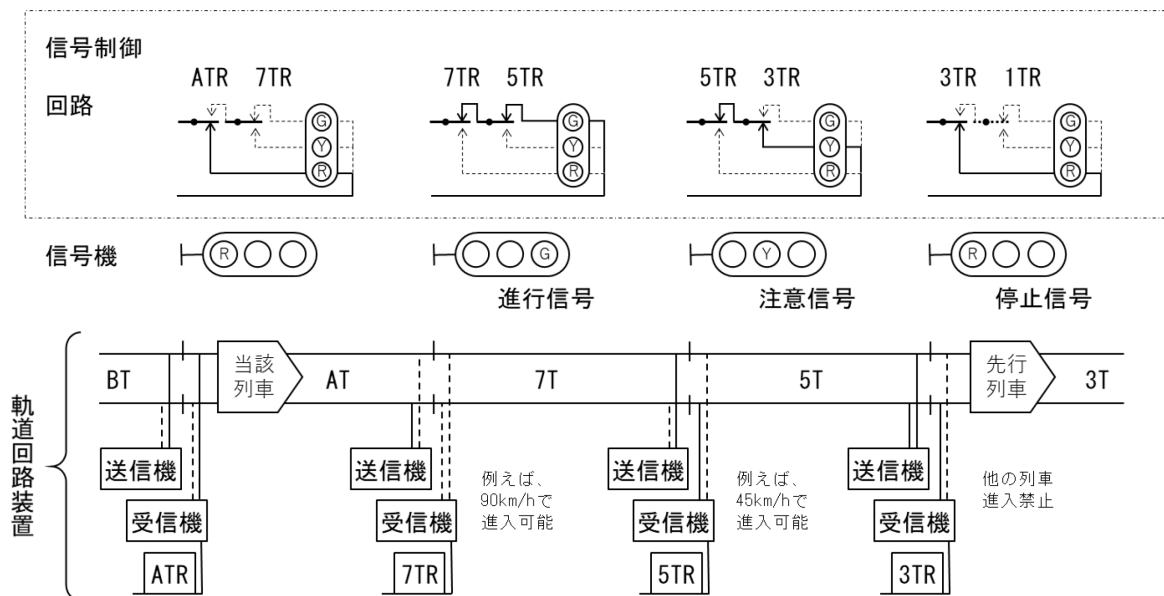


図 4.9 自動閉そく式信号制御回路の例

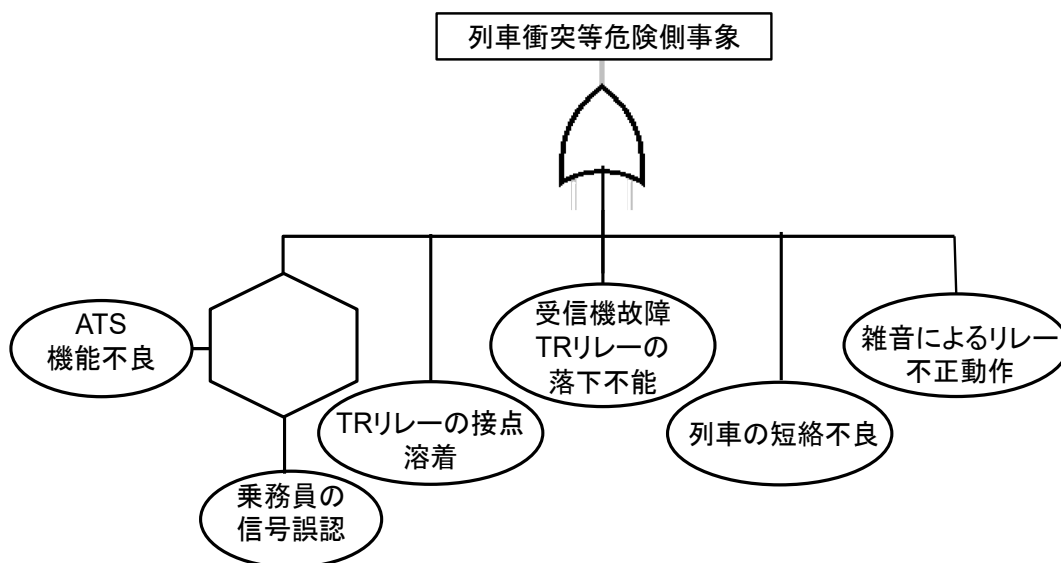


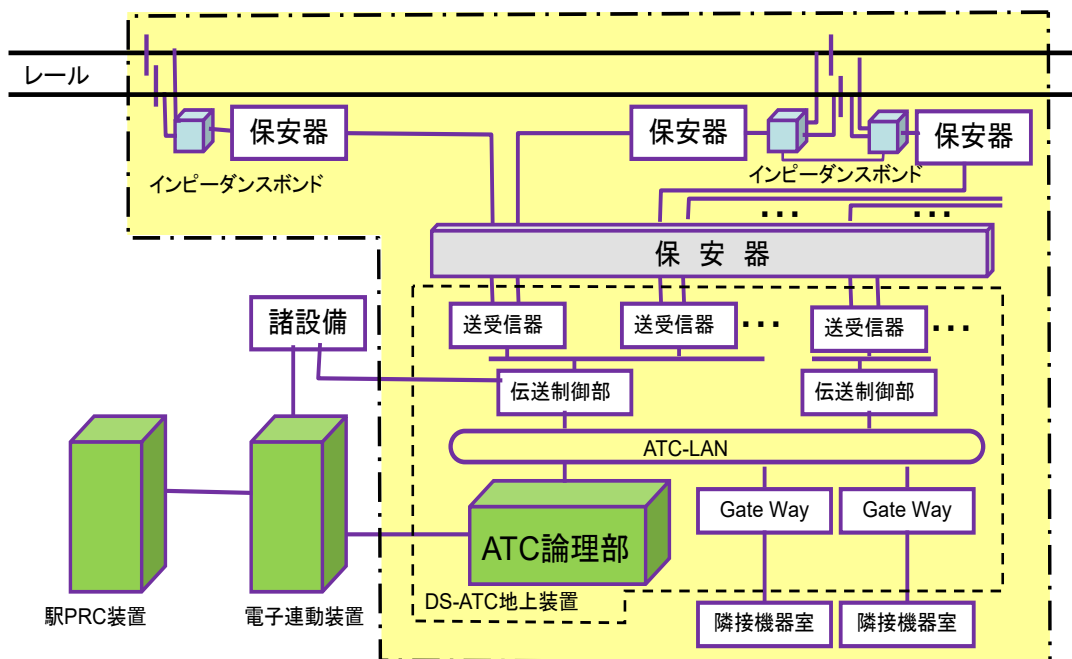
図 4.10 自動閉そく式信号制御回路に対する FTA 解析

図 4.10 において危険側事象は，“軌道短絡不良”のような列車に起因するものと，“軌道リレー（TR）の故障”に起因するもの，そして制約ゲートから“乗務員のミスに対するカバー不足”に分類できる．このうち，軌道回路の短絡不良は，線区依存性が大きい．また，軌道リレーの不良は保守に依存する．さらに ATS のカバー不足は ATS の形式によって多様であるが，近年の ATS は装置自体の不備に起因した事故が発生しないよう，保安機能高度化の各種要求にも柔軟に応えられる機能を有したシステム・装置が導入され，列車運転の安全性向上に，大きく寄与している^[27]．

4. 4. 2 デジタル ATC の場合

図 4.11 に，デジタル ATC 地上装置の構成例を示す．1 つの機器室に，1 台の ATC 論理部と，各軌道回路単位に伝送制御部と送受信部が配置される^[28]．ATC 論理部は，エリア内の在線列車情報と隣接機器室からの列車在線情報を取り込み，個々の軌道回路に送信する“ATC 電文”を生成する．

生成された ATC 電文は ATC-LAN を介して伝送制御部に送られ，送受信器によって，変調増幅され軌道回路に送信される．送受信器と現場の軌道回路間は距離が長く，外部ノイズの影響を受けやすいため，線間にサージ対策として“保安器”を挿入している^[27]．



デジタル伝送技術を応用した新幹線ATCシステム(DS-ATC)の開発 平成13年度 信号セミナー予稿 参考

図 4.11 デジタル ATC の地上装置の構成例

“デジタル ATC” を対象にして行った FTA 解析が、図 4.12 である。デジタル ATC の場合、隣接機器室間で列車位置情報を交換しており、その情報は ATC 電文生成に用いられる。このほか、データは Gate Way や ATC-LAN を介して ATC 論理部に伝送されるため、ここでの“情報誤り”も考慮する必要がある。同様に、伝送制御部では列車検知を行い、その結果をデータとして ATC 論理部に送信している。これらの情報誤りも、誤った“危険側の ATC 電文生成”を引き起こしかねない。

しかし、これらの情報は符号語として伝送されるため、受信側での“符号検定”によってリジェクトされ、実際に危険側に作用する確率は極めて小さい。この点は、地上信号方式のリレー回路と大きく異なり、符号語の“ハミング距離”を、要求される“見逃し誤り”の程度に合わせて調節することができる。

一方、軌道回路短絡不良や列車検知不良は、その誤った情報をもとにデータとして、ATC 論理部に伝達されるため、直接危険側に作用する。このことは、電文を生成する ATC 論理部の“危険側故障(危険側誤電文生成)”も同じであるが、ソフトウェア作成時のバグ以外にはあり得ず、信号保安装置に用いるソフトウェア

のバグは、国際規格に則ったプロセスに従って開発することにより、開発時に取り除かれていると考えられるため、この事象の発生確率は極めて小さい。なお、地上信号方式ではATS機能不良という事象を考慮している。

これは、ATSの種類（形式）により、防御できる水準が異なるためである。一方、デジタルATCにおいては、車上装置の故障による“危険側事象”は実績として皆無であるため、解析から除外している^[27]。

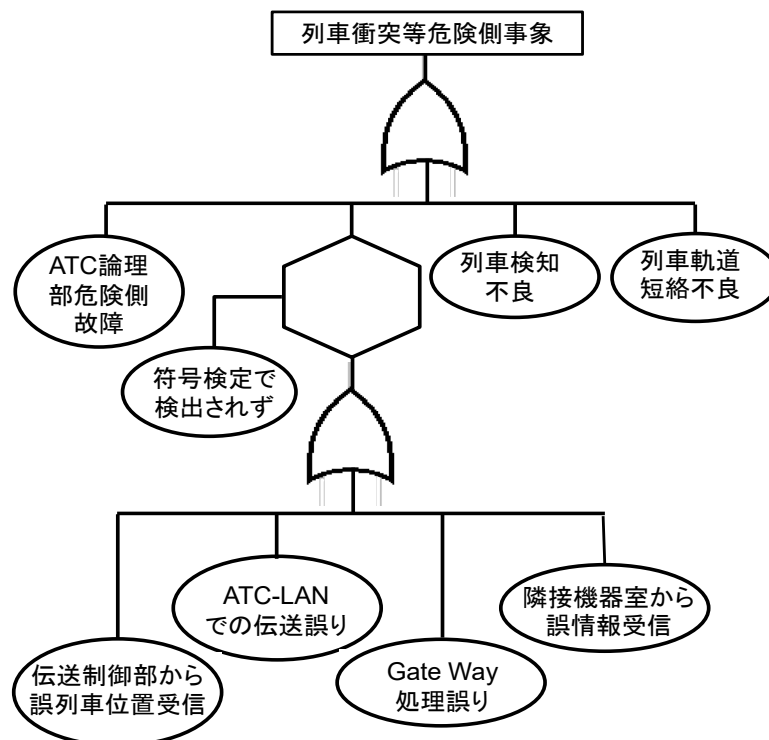


図 4.12 デジタルATC地上システムに対するFTA解析

4.4.3 提案するUTCSの場合

申請者が提案する『統合型列車制御システム：UTCS』について、同様のFTA解析を行ったものが、図 4.13 である。『UTCS』の場合、それぞれの構成要素間は、“メッセージ電文”でインターフェースされる。このため、インターフェース上で発生した“符号誤り”は、誤り検定で抽出することが期待できる。また、“電文はバイタルな処理装置で誤り検定コードが付加され、バイタルな処理装置で符号検定が行われる。通番を以て電文の正当性を確認する…”。といった安全関連伝送に

関わる国際規格 IEC62280 : (International Standard for Safety Related Transmission System)の国際標準化に準拠した対策が考慮されており，このチェック機構を通り抜けて，危険側の誤制御を行う確率は，無視し得るほど小さいと考えられる。

しかも，デジタル ATC の場合，危険側事象の発生確率は，機器室の数を乗じた値になる。同様に，地上信号機の場合，危険側事象発生確率は軌道回路の数を乗じた値になる。一方，『UTCS』の場合，処理装置が，センターに集約統合され，一台あるのみであり，しかも“踏切制御機能や連動処理機能”まで含めている点も見逃せない^[27]。

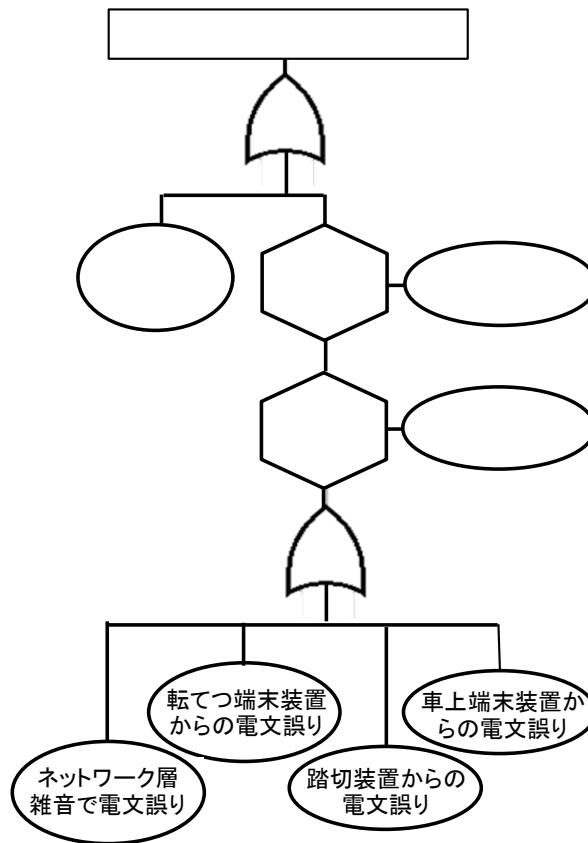


図 4.13 UTCS に対する FTA 解析

さらに無視し得ないのは，デジタル ATC や地上信号機方式の場合，“列車軌道短絡不良”という事象が存在し，その事象が直接危険側事象に結びついていることである。

これら解析から、定性的ではあるが、『UTCS』が“安全性上、優れたアーキテクチャ”であることが確認、理解できる^[2 7].

4. 5 統合型列車制御システムの効果

『統合型列車制御システム：(UTCS)』は、線路沿線に拠点装置を持たない“CBTC”導入の戦略でもあるが、CBTCの効用は、そのまま享受できる^[2].

(1) 多様な列車の走行を可能とする

例えば、現行信号システムの下で、レールと道路両方走行できる「デュアルモードビークル DMV：(Dual Mode Vehicle)」^[1 8]、や「レールバス」^[1 7]の構想実現には、“車輪・車軸による軌道短絡”を利用した軌道回路方式との調和が必要になる。新幹線・在来線を自由に走行できる「フリーゲージトレイン」の実現にも軌道回路による安定した列車検知が不可欠である。『UTCS』は、軌道回路に依らない保安システムへの置換であり、一挙にこれらの制約を取り払い、DMVやレールバスなど、多様な列車形態の走行を、現実的なものとする事が出来るものである^[2]、^[3].

(2) 運転密度向上・走行速度向上にも柔軟に対応可能

また、現行信号システムにおいて、運転密度や運転速度を向上させるには、閉そく区間の分割や、信号現示の追加と現示系統の変更、さらには、踏切制御子の位置の変更などが必要で、現行のままで対応させることは容易ではない。この点が自動車輸送等との競争力向上時の障害となっていた。しかし、『UTCS』では、軌道回路に依らない車上主体の位置検知と車内信号機化、さらには、“踏切の無線制御”を利用することで、これらの困難を一挙に払拭し、“自由自在に運転速度向上や運転密度向上”ができるようになり、交通インフラシステムとしての性能向上にも資するものである^[2].

(3) コストを掛けずに万全のATS・ATCが実現

『UTCS』は車内信号化され、走行路が受信されると、その地点までの速度制限を加味した速度照査プロファイルが自動的に生成される。このATSは今日実現しているATSの最高クラスであるATS-P形相当以上の機能であり、ATS-P形が沿

線にトランスポンダ：(地上子) を設備したり，トランスポンダ間の通信線を確保したりする必要があったのに対し，まったく現場設備に依らずに実現できるものである。

(4) 信頼性・保守性の向上

『UTCS』は，駅構内の連動装置が無くなるなど，既存の列車制御システムと比べて現場設備が大幅に削減される。また閉そく装置と ATS・ATC が一体化され，信号装置と ATS・ATC といった，構成要素間のインタフェース部も無くなるなどインタフェースの削減が，劇的に進む。

このような省設備化が実現するため，当然のごとく，“信頼性，保守性”が向上する。また，人間を含めたインタフェースの誤りに起因した障害の発生リスクが減少するので，“安全性”の面でも，効果が大いに期待できる。これらは『UTCS』が鉄道システムにおける“レジリエンスの強靱化”に貢献することを意味しているものである^{[2], [3]}。

機器の削減，“省設備化”実現イメージを図 4.14 に示す^[2 4]。

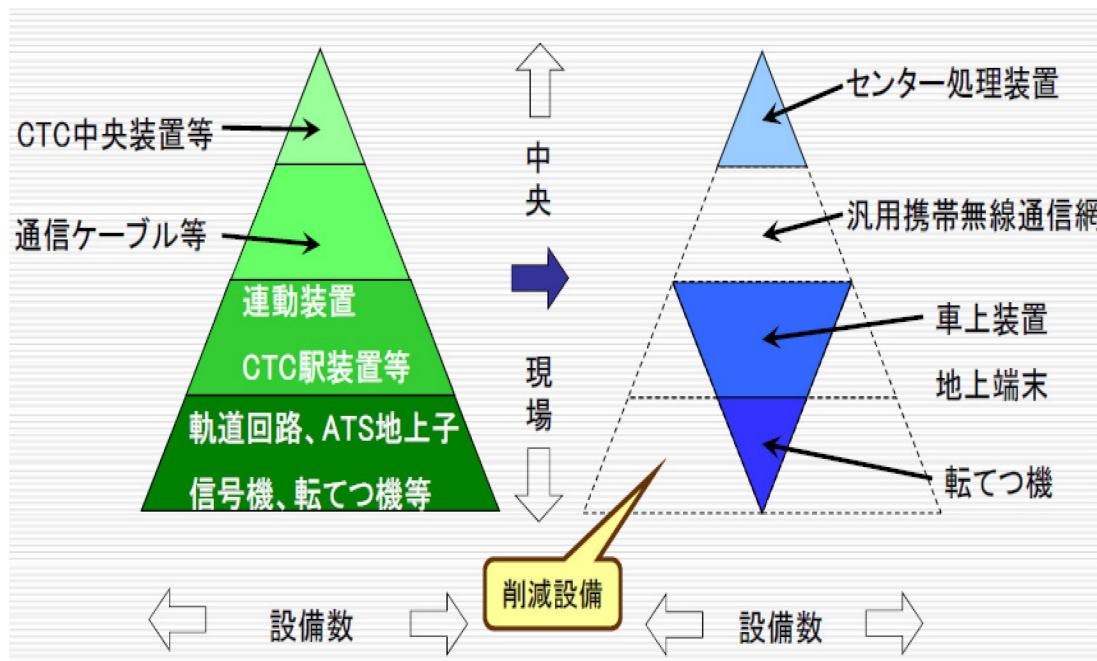


図 4.14 機器の削減（省設備化実現）

(5) 保守コストの低減とプローブ車両の実現

同様に保守に関する効果であるが、『UTCS』は“車上インテリジェント（車上自律型）”となるため、車上における連続的位置検知を必須要素として有することが出来る。この要素技術を利用することにより、プローブ車両（軌道検測等）による保守への道が切り開ける^[2]、^[29]、^[30]。

プローブ車両による保守への効果は、『UTCS』を構成する要素に対する保守ではなく、軌条・軌道の状態や電力設備などに対する能動的な常時監視によるデータ収集であり、従来の定期保守(TBM : Time Based Maintenance)から、予防保全(CBM : Condition Based Maintenance)への変革となる。この結果、線路沿線に出向いての計測が大幅に合理化・削減できるとともに、鉄道事業者にとって重要な“安全性向上”に大きく貢献できることにより、鉄道経営に大きな変革をもたらすと期待できるものである。

(6) 新形式車両と電磁雑音問題の解消

今日の鉄道において、“新型車両の開発”が報道されるが、工場内での電磁雑音試験に合格した車両でも、実際に投入線区を試験走行させると、ATSや踏切制御装置などで用いている信号の“周波数帯域”に影響し、現場の信号機器が誤動作する問題が散見される。しかしながら、『UTCS』は、現場機器の制御はセンターで行うため、電磁雑音の影響を受けにくい。この結果、新型車両の生産においても、通常の国際規格標準に則った“EMC基準”を満足させたなら、そのまま走行可能と考えられるものである。

(7) 踏切関連問題の軽減

今日の鉄道の事故防止で大きな課題は、踏切にある。踏切の鳴動時分は列車が最高速度越えの走行をしても、一定の鳴動時間を確保できるように設計しているため、逆に速度の低い列車では“過剰な鳴動時分”となる。特に都市圏の踏切では、その蓄積により開扉時間が短くなる“開かずの踏切”問題が顕在化している。このほか、踏切の無謀横断に伴う“支障物（人や自動車）”が列車と衝突するといった安全性上の問題もある。

これらに対し、『UTCS』では、走行状況に応じて“鳴動時分を適正化”出来るし、踏切の手前までの停止パターンを設定して走行するため、たとえ支障物が踏切道内に有っても安全性は維持・保証される。唯一踏切での事故は“遮断後の無

謀進入”位になる。従って、踏切の安全性向上は、速度向上や在来線での自動運転に有利な状況を生み出すものである。

(8) 自然災害対策への効果

『UTCS』は、車上装置とセンターの統合型処理部と無線で直結されるため、走行時に車両が受ける風圧情報などの生データがセンターに集約される。センターではこれら情報のほか、沿線のセンサー、気象庁の情報等を総合判断した個々の列車に対する、きめ細かい“沿線走行指示情報”をリアルタイムで走行列車に送信できる。これにより、個々の走行列車の安全な走行が確保され、この状況は、駅を出発した列車が、まったくの無情報下で運転を強いられる現状を大きく改善する列車運転の“安全性向上”に大きく寄与するものと期待できるものである。

4. 6 第4章のまとめ

第3章で得た、既存列車制御システムに対し、“論理をセンターに集約”し、現場には鉄道交通システムとして必須な転てつ機、踏切、列車という要素を配置して、“無線通信”により接続する『統合型列車制御システム：UTCS』が課題解消に有効との見通しのもとに、本章では、『UTCS』の具体的な検討を行った。まず、列車制御システムを“階層的”に再構築するための前提を明らかにし、『UTCS』の『機能層』・『ネットワーク層』・『端末層』の有るべき姿を論じた。

この中で、機能層に位置する統合型処理部では、列車の保安制御（転てつ制御、踏切制御、前方列車位置探索等）を一元処理するために、“支障点”という概念を導入し、踏切や転てつ機を含んだ経路の安全運転を駅中間と同様に実施する“走行路”として定めた。その結果、論理を現場からセンターに集約することに成功すると共に、論理を有した『機能層』と、現場機器とのインタフェースをつかさどる『端末層』、そして両者をつなぐ『ネットワーク層』から成る、“横割りの3階層構造”で統合整理することができた。

これにより『機能層』の統合処理部による列車に対する支障点の探索により、走行路を確定し、『ネットワーク層』を介して、『端末層』に位置する車上制御装置に送信制御する新しい概念で“支障点”を探索し、走行可能地点を車上に送信すればATC・ATSは不要となる。また駅構内においても支障点探索が連動の位置づけで、従来の“駅連動装置”は不要となり、駅構内も駅中間も同様の総じた保

安制御が実現可能となることを明らかにした。これは保安制御上、非常に大きな留意点と言える。

さらに、本章では、『UTCS』の“安全性”を既存の自動閉そくによる信号方式、及び、デジタル ATC と比較して評価した。評価は概念設計レベルの FTA 解析で行ったが、自動閉そくやデジタル ATC が、現場機器の故障を、そのまま危険側に遷移する可能性があるのに対し、『UTCS』は、すべてメッセージ交換で処理が進むため、通信上の適切な対策を施すことにより、高い安全性が確保、得られることを明らかにした。

また、本章では『UTCS』の導入効果を分析し、8 項目の効果が期待できることを明確に示した。これら効果は“現在の鉄道システムが抱える根本的な課題解消”に結びつくものであり、『UTCS』の早期実現が望まれるとの結論に達した。

4. 7 第4章の参考文献

- [2] 電気学会論文誌 C 部門 vol136, No.7, 「階層化による列車制御システムの再構築」齊藤嘉久, ほか, 2016-7
- [3] 平成 27 年 電気学会電子・情報・システム部門大会 IEE 論文番号 TC9-6 (長崎)「階層化による列車制御システムの再構築」齊藤嘉久, ほか, 2015-8
- [14] 鉄道車両と技術 Vol.17 No.9 「日本信号における無線式 CBTC システム (SPARCS)の海外展開」八木誠, ほか, 2011
- [17] 芸文社「日本レールバス大全-国産軽量気動車のすべて」齊藤幹雄, ほか, 2010
- [18] 国土交通省「デュアル・モード・ビークル(DMV)に関する技術評価検討会」, 2015-10
- [24] KYOSAN PRODUCTS INFORMATION 製品情報誌, Vol.11, 2020
- [25] 京三サーキュラーvol.66 No.1「ATP 閉そくシステム試験完了のお知らせ」中村英夫, ほか, 2015
- [26] 京三サーキュラー誌 Vol.66, No.1, 2015, 「統合型列車制御システム：列車制御システムの新たな方向」浅野晃, 高田哲也, 中村英夫, 2015
- [27] 電子情報通信学会 IEICE Technical Report SSS2016-5 信学技報 「統合型列車制御システムの構成と安全性」齊藤嘉久, ほか, 2016-5

- [28] 信号セミナー講演予稿「デジタル伝送技術を応用した新幹線 ATC システム(DS-ATC)の開発」中村英夫, ほか, 2001
- [29] JREA, Vol.50 No.9 「プローブ車両用信号設備計測技術の開発」中村英夫, ほか, 2007
- [30] 3rd Asia-Pacific Control Command and Signalling(CCS)Workshop, No.3 Advances in Signalling Systems and the Outlook for Next-Generation Train Control Systems in Japan」 H.NAKAMURA, 2014-10
- [36] 「鉄道信号における信頼性と安全性」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, 山本正宣, 高橋聖, 中村英夫, 106,402, pp.23-29, 2006.12

第5章 統合型列車制御システムの検討とケーススタディ

5.1 はじめに

本章では、『統合型列車制御システム：(UTCS)』の応用に関する検討成果を論じる。優れたシステムであったとしても、鉄道事業者が導入に踏み切るには、“鉄道事業者のビジョン”との整合性が必要である。このため、5.2節では鉄道事業者が、デジタルATCや既存CBTCを志向した場合を前提としたソリューションとして『UTCS』の効果を検討している。さらに、『UTCS』と他の既存列車制御システムとの関係も明らかにする。そして、ケーススタディの一つとして、地方交通線用に適用した事例として研究開発が進み、実用の域に達した『ATP閉そくシステム』について5.3節で紹介する。

5.2 既存列車制御システムと統合型列車制御システム

『UTCS』の応用システムとして開発した『ATP閉そくシステム』には、単なる“CBTCの発展系”としてのシステム以外に、既存CBTCやデジタルATC、その他、信号保安システムとのスムーズな連携を意図している。

5.2.1 CBTCシステムとUTCS

『UTCS』は、“ポストCBTC”との位置付けで開発されたものであり、CBTCとの親和性は高い。車上装置から見た対地上処理装置とのインターフェースはCBTCであれ、『UTCS』であり同一である。CBTCが、拠点装置で行なっている列車追跡処理や制御電文生成処理が、『UTCS』では、センターの『機能層』に位置する統合型処理部によって一元化され処理が行われる。

同様に、踏切に対する処理もセンターの統合型処理部に一元化されるが、ATACSにおいて、車上装置と拠点装置間で行っていた車上主体の踏切制御方式ではなく、センターからの“走行路生成の条件として踏切制御”が行われるため、列車の駅出発時に駅間も含めた次駅までの踏切に制御タイミングを送信し、列車の移動に伴い、鳴動開始時間を刻々と修正する方式に変更することとなる。列車に対しては、走行経路上に踏切があれば、そこを“支障点”として、そこまでの地点を“走行路”として車上に送信する。指定されたタイミングで踏切が、警報

開始・遮断完了・障害物無し，との条件が成立すれば，センターの統合型処理部は走行路を，踏切を越えた次の支障点まで延ばすこととなる。

5. 2. 2 デジタル ATC システムと UTCS

これまでデジタル ATC を実現するには，機器室にデジタル ATC 地上装置を設備し，機器室間をネットワークでつなぐことが必要であった。これに対し、『UTCS』の場合，処理が一元化されるため，機器室間の接続は不要であり，地上装置の大幅な簡易化が期待できる。ただ，車上側の処理装置においてデジタル ATC との相違は，対列車との通信する媒体が“レールか無線”というだけで，システム的な違いはないと考える。もちろん，デジタル ATC の列車検知は軌道回路を用いているため，沿線の軌道回路境界に配置した ATC 端末部が，センター処理装置から配信された“ATC 電文”を増幅して軌道回路に送信するとともに“列車位置検知”を行い，センター処理装置に伝送する。このため，『UTCS』のもとで，現行デジタル ATC を実現しようとするなら，センターの統合型処理部は走行路生成の論理の出力から ATC 電文の生成を行うことと，ATC 端末部からの情報をもとにした列車の追跡処理が加わる。

これとは逆に，デジタル ATC から『UTCS』に移行する際には，“IP ネットワーク”に接続した地上無線部が車上搭載の無線装置を経由して，車上の端末装置と情報交換を行い，『機能層』に位置するセンターの統合型処理部からは，走行コマンドとしての“走行路情報”が送信され，車上装置からは“列車位置情報”が送受信されることになる。このときに無駄となる装置は，ATC 端末部のほか，軌道回路毎の AMP：(増幅器)と TD：(列車検知)，に限定される^[2]，^[3]。

5. 2. 3 既存信号保安システムと UTCS

既存信号保安システムは，長い歴史の中で多くの技術開発がなされ，現場では線区事情に応じて，その中から適切と思われる信号保安システムを取捨選択して導入してきた。このため，基本は，閉そく制御，連動制御，信号機制御，ATS・ATC，踏切制御という機能を有しているものの，そのハードウェアやシステムアーキテクチャは多様である。ここに『UTCS』を導入する効果は，既存の信号保安システムが有する信号装置や ATS などに対する制御論理が，現場に配置された論理装置を用いるため，相互の情報交換（インタフェース）が必要であり，“多量の

現場ケーブル配線”が不可欠であったことが救済される対象となる。すなわち、『UTCS』は、既存の信号保安システムの論理部といえる連動装置や閉そく装置、ATS装置を設けずとも、センターの統合型処理部によって、必要な信号機の制御やATSの制御が行えることとなる。

これにより、従来の多量な現場ケーブル敷設が必要なく、高額な“ケーブル敷設費、設備費、保守費”を大幅に削減できる面で大きなメリットが図られる。この概念の説明図を図5.1に示す。(なお、図5.1内の“APOLLON”表記は、(株)京三製作所における商標登録名である)

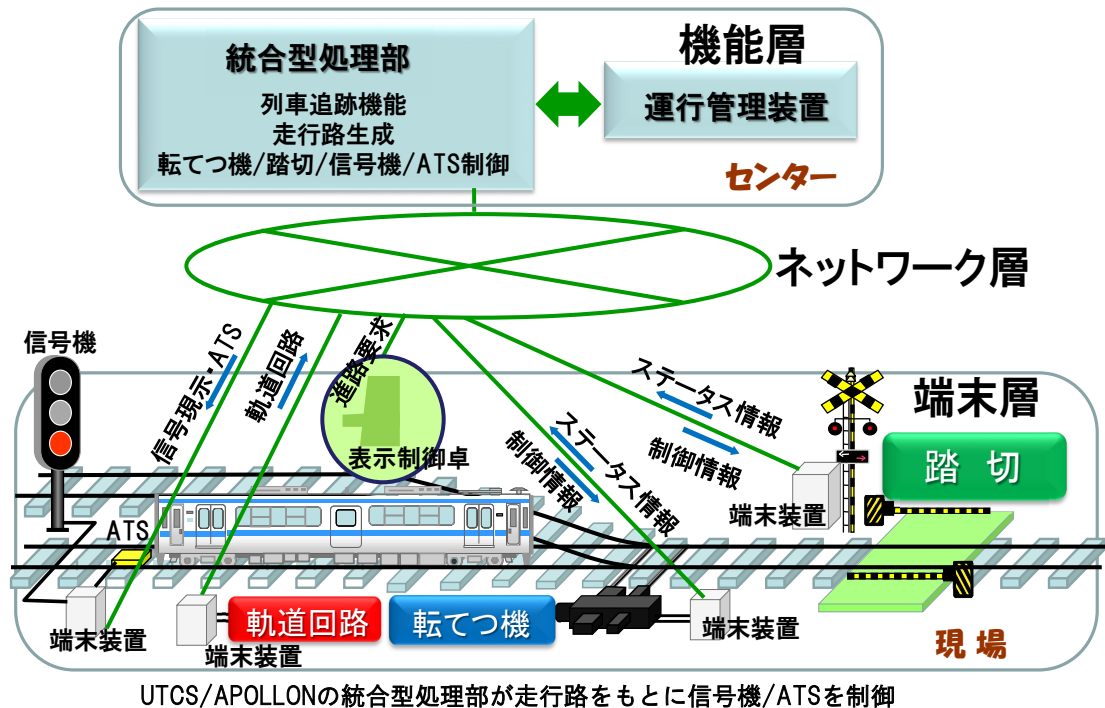


図 5.1 UTCS による既存信号保安システム制御の概念

5. 2. 4 新連動の開発と UTCS

今日、“Industry4.0”など産業界においてはIoTに依拠した新たなイノベーションの成果が注目されている。鉄道の列車制御システムにおいては、CBTCシステムが先端的システムとして注目され、既に多くの導入事例が見られるが、CBTCのアーキテクチャをIoTの視点で再構築することにより、理想的な列車制御システムが浮かび上がる。申請者は、本論文に示す通り、IoT時代の新しい列

車制御システムとして、システムの構成要素が相互に情報交換することにより安全を確保する『UTCS』を提案している。『UTCS』は、IoT時代の“CBTC”である。『UTCS』のもとでは、駅ごとの連動装置は不要となり、連動論理はセンターの統合型処理装置に集約される。このセンター統合型処理装置の制御論理においては、各列車に付与する“走行許可地点情報(ブロックID列とブロック内位置)”の生成時に列車間の進路競合等が排除されるため、既存の連動装置における各種鎖錠処理は軽減され、論理も単純化される。以下に『UTCS』における連動処理の内容について“CBTCの列車間隔制御”との関係を交え、以下に説明する。

(1) 既存継電連動装置の特長

継電連動装置の究極の目的は、駅構内を走行する列車の安全を守ることである。そのために、進路に関係する軌道回路の情報を利用しつつ、現場の転てつ機や信号機間の安全を確保するためのインターロックが実現されている。駅構内の列車の走行におけるリスクは、列車同士の正面衝突、走行中の列車に対する側面衝突、さらには走行中における関係転てつ機の転換による脱線等がある。そして、その要因には、人間の取り扱い誤りや、センサー類の故障、素子故障、ロジックの不具合など、さまざまな要因が考えられる。

継電連動装置の優れた点は、まず人間の誤操作に起因する危険側事象の発生を各種論理で抑止し、人間の誤りが事故につながらないような配慮がなされていることである。さらに、センサーや素子の故障による事故を防止するために、センサーや論理素子である信号用リレーなどの故障時には、いずれも0側の値を取る“非対称誤り特性”を持たせて、装置としての“フェールセーフ性”を確保していることが重要なポイントである^[31]。

(2) CBTCの列車間隔制御論理

CBTCでは、先行列車の後部位置をベースに一定間隔の余裕長を付加した地点を“走行許可地点情報”として、車上装置に伝達することにより、駅間における列車の間隔制御を行っている。その結果、前方列車の移動に従って、走行許可地点も移動する“移動閉そく”が実現されている。CBTCの多くは、線区をブロックの集合として捉え、列車の走行位置をブロックIDとブロック内の位置で管理している。従って、車上装置に与えられる“走行許可地点情報”も“ブロックID”

(ブロックが複数に及ぶ場合にはブロック ID 列で管理される) と、“ブロック内の位置情報”になる。

日本における CBTC としては、JR 東日本の ATACS が実稼働している他、JR 西日本と東京地下鉄株式会社が実用化に向けた開発を行っている。これらのシステムに共通なことは、駅々間では“移動閉そく”を採用しているものの、“駅構内の保安制御”は既存の連動装置を前提としている点である。現行の連動装置を採用する結果、一つの進路内には 1 列車の存在しか認められず、たとえ続行列車が同一の進路を走行する場合でも、前方列車が、その当該進路を抜け切るまでは、進路外方で待機（機外停車）しなければならないことである。但し、駅構内において車上装置に与えられる走行許可情報は、進路名称ではなく、駅中間と同じくブロック ID（もしくはブロック ID 列）とブロック内の位置情報であり、車上装置から見れば、駅中間と駅構内での処理に違いがあるわけではない^[31]。

(3) 駅構内に移動閉そくを実現する方法と走行路

駅構内における列車の間隔制御にも“移動閉そく”を導入する考えである。そのためには、既存連動装置が持つ“進路”という概念は、“固定閉そく”となるため問題となる。移動閉そくの下では、同一進路であるなら、前方列車の後部に“余裕距離”を付加した地点まで列車の進入が許可されることを基本とする。但し、分岐器区間には、てつ査鎖錠の考えを持ち込み、安全確保の観点から 1 列車の存在しか許容しない。これらの条件の下、駅構内にも移動閉そくを可能とするためには、進路条件ではなく、列車の走行許可地点を意味する“走行路”という概念を導入する。走行路は、列車に対して与える走行許可地点情報であり、先行列車や転てつ機の状態が走行路を決定する。その様子に関して、図 5.2 を用いて以下に説明する。

前提条件として、1 番線の Q 地点に向かって走行する先行列車 A に引き続き、続行列車 B が 2 番線の P 地点に向かって進行するものとする。

- ①. 列車 A には走行路として、ブロック k, ブロック m, ブロック n の L_q 地点情報が与えられる。
- ②. 列車 B に与えられる走行路は列車 A の後部に余裕距離を含めたブロック j の L_p 地点情報である。

- ③. 列車 A が、ブロック m に進入して、ブロック k を抜け切ってもブロック m は分岐器を含むため、列車 B にはブロック k の境界 L_o 地点までしか、走行許可地点が与えられない。
- ④. 列車 A が、ブロック n に入りきると、ブロック m が開放されるため、ブロック m と排他関係にある、ブロック r の使用权が列車 B に移行するが、列車 B のために、転てつ機 51 号を反位側に制御し、転てつ機 51 号の鎖錠完了後に列車 B に対しては、ブロック r を含めて、走行許可地点情報がブロック s の L_r 地点まで与えられる。

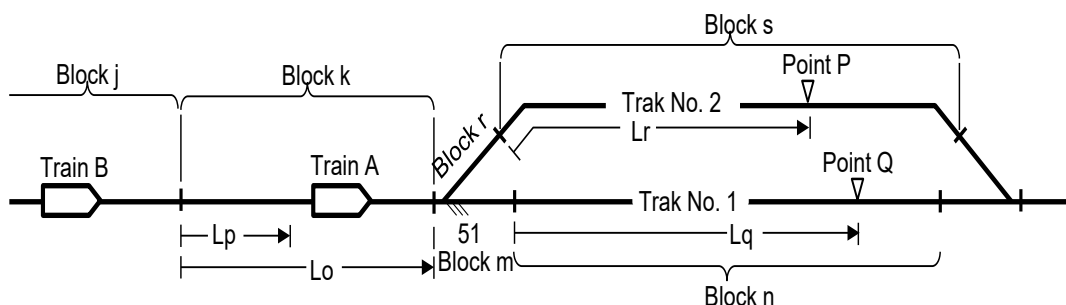


図 5.2 走行路探索の例

(4) 排他制御の変貌

このように、駅構内も駅中間と同一の車上装置の処理により、移動閉そくが実現できることとなる。『統合型列車制御システム：(UTCS)』は、無線を利用した列車制御システム CBTC (Communication Based Train Control system) のシステムとして整理できる。既存の CBTC は沿線に複数の拠点駅装置を配置して、それぞれゾーン内に存在する列車を制御する形態をとることが多い。これに対して『UTCS』においては、地上側の処理装置は、“中央統合型処理装置”に一元管理され、列車の追跡も、各列車に対する走行許可地点の付与も、同一の中央統合型処理装置で行う。駅構内の走行路の探索も、走行路の要求に対する合理性検定も一元化される。このため、既存連動装置において重要な役割を持っていた、複数の要求入力に対する排他制御の意味を持つ各種鎖錠などは、走行路探索時のアルゴリズムの中に集約され不要となる。残る鎖錠は、転てつ機ゾーンに列車が存在している時には、転てつ機の転換を容認しないという、“てつ査鎖錠”のみとなる。このように『UTCS』における、てつ査鎖錠は転てつ機ゾーン内では 1 列車の進

入しか容認しないという処理と、転てつ機ゾーン内に列車が在線時には、転てつ機に対する制御要求を抑止するという処理に整理されることとなる^[31]。

(5) 駅構内移動閉そく運転を実現する連動表の検討

既存の“連動図表”イメージ例を下図 5.3 に示す。

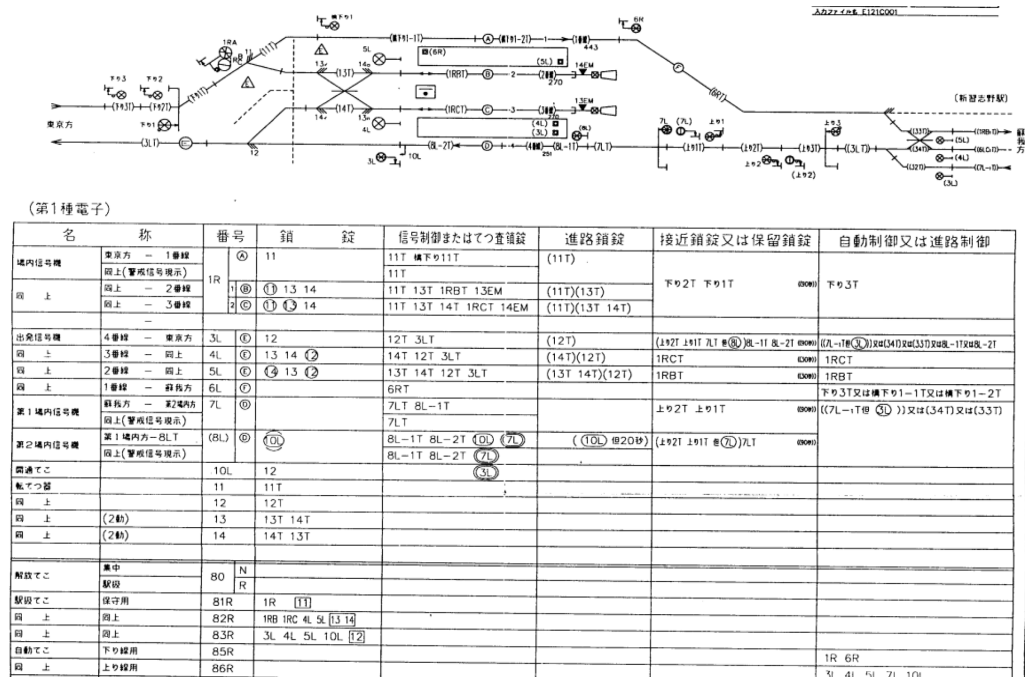


図 5.3 既存連動図表の例

連動表は、対象駅の連動装置に対する安全な列車走行の仕様をまとめたものとみなすことが出来る。連動表の各行は、進路に対する構成要件が記されている。従って、進路に対し構成要件が満たされないときには、進路が設定されないことになる。そして、各進路には、他の列車が在線していないこと、すなわち関係する軌道回路が全て復旧していることが、条件として記載されているため、“1進路に1列車しか存在できないという固定閉そく”の制約を与える根拠にもなっている。従って、駅構内において、移動閉そくを実現するためには、移動閉そく制御が可能となるような連動表を開発しなければならないこととなる。

申請者は、この課題に対して新たな概念に基づき、“ブロックデータと走行許可地点データ”から成る“新たな連動表”を開発した。これは、走行路がブロック

列の配列を生成することであり、ブロックはブロック内に複数列車の在線を容認するものと、1 列車しか在線させないブロック、すなわち、転てつ機を含むブロック（転てつ機ブロック）に分けられる。これらを考慮して、ブロック列の情報を“行”として定めるとともに、走行路としての“ブロック列”の順番を定めた「新連動表」を新たに開発した。この“走行許可地点データ”で示されたシーケンスで該当列車が走行できる許可情報を探索して、走行が支障なく可能となるブロックの配列が走行可能な経路として“走行許可コマンド”が作成され、当該列車の車上装置に伝送され、これにより駅構内における安全な進路の確保が約束されることとなる。

この新連動表におけるブロックの情報は、ブロック長、ブロック内への転てつ機の有無情報、そしてブロックの接続情報（転てつ機を含む場合には、転てつ機が定位の場合と反位の場合のそれぞれに対する接続ブロック情報）となる。また、転てつ機の定位側のブロックと反位側のブロックのように排他関係にある場合には、その記載も新連動表に示すこととしている^[3 1]。

この新たな概念に基づく、新連動表を図 5.4 に示す。

〇〇駅新連動表

ブロック情報						進路情報							
ブロック名称	対応転てつ機	競合ブロック	ブロック長(m)	始端接続ブロック		終端接続ブロック		進路名称					
				定位	反位	定位	反位	1LA	1LB	2RC	3RC		
1001			196			1002		6		1			
			77	1001		1003	1006	5		2			
	11DN	1006	45	1002		1004				3			
			46	1003		1005				4			
	12IN	1007	45	1004		1101				5			
1052			74	1051		1053	1056		6				2
1053	12DN								5				
1054													
1055	11IN												
1056	12DR	1053	30	1052		1007							
1057	11IR	1055	32	1006		1058		3					
1058			50	1057		1151		2		2			
1151			27	1058				1	1				

拡大

前後のブロック名を追記

縦表記。使用するブロック名称欄に使用番号を記入した

図 5.4 提案する新連動表の例

(6) 新連動表を用いた転てつ制御と Automatic Train Protection

新連動表を下に、各ブロックのステータステーブル、転てつ機ステータステーブルが生成される。この2つのテーブルは、中央処理装置内の作業用テーブルであり、消去されることはなく、保持され、転てつ機の制御や列車の移動に応じて状態が逐次更新される。これらのテーブルの他に、走行路に応じてブロックの配列を記録した“走行路テーブル”も生成され、“走行路”の探索に参照される。

図 5.5 に新連動表を用いた各種テーブルを示す。

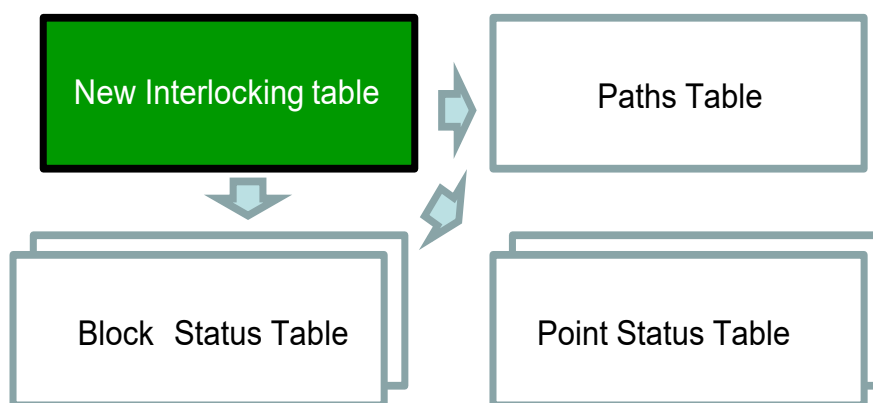


図 5.5 新連動表を用いた列車制御のための各種テーブル

さらに、CBTCにおけるATP：(Automatic Train Protection) 処理は、列車追跡処理と列車の間隔制御処理によって遂行される。列車追跡処理は、車上装置から得られる走行位置情報をもとに、“列車ステータステーブル”の現在位置を逐次更新するものである。また、間隔制御処理は、列車単位に現在位置から走行許可地点を探索し、更新するものである。走行許可地点の探索は、それまでに与えられている走行許可地点情報をもとに、さらに走行路の遠方にある支障点を求める作業になる。“支障点”には次の4種がある。

- ①. 前方列車の後部に余裕長を加味した地点.
- ②. 走行路内において走行が許可されていない転てつ機ブロックの始点に余裕長を加味した地点.
- ③. 走行路内において通過が許容されていない踏切の始点に余裕長を加味した地点.
- ④. 走行路内の停止位置.

走行許可地点の探索では、これらの支障点の中で最も近いものが選択され、走行許可地点として“列車ステータステーブル”に登録されるとともに、最終的には車上装置へのメッセージに反映されることとなる^[31]。このように“新連動表”と“各種ステータステーブル”の関係が重要であり、キーとなる。

(7) IoT 時代における新連動の性能評価

『統合型列車制御システム：(UTCS)』は、現場設備の大幅な削減を可能とし、直接、センター統合型処理装置と車上装置がインタフェースされ、駅構内においても“移動閉そく”を可能とする“IoT 時代の新連動機能”を実現するものである。この IoT 時代の新連動制御は、以下に示す 8 項目に及ぶ大きな効果が、期待できることとなる^[31]。

- ①. 駅構内の走行における ATP 機能を地上設備なしで実現する。
- ②. 駅構内移動閉そくの実現により、列車運行の効率化と柔軟化が可能となる。
- ③. 進入番線の変更などの要求に対しては、車上装置との連携で安全を確保しつつ、合理的に実現でき、運転効率の低下を抑止できる。
- ④. 時間によって担保してきた安全性を、本質的な方法による安全性確保に代替える。
- ⑤. 連動機能の変更が、センター統合処理装置のみの変更で容易に実現できる。
- ⑥. センサーや現場機器間のインタフェースの齟齬に伴う、非安全側インシデントの可能性が低減できる。
- ⑦. センター統合処理装置と車上装置の直接的な情報交換により、突発的な危険側事象にも的確に対応できる。
- ⑧. これまでの複雑な連動論理が簡易化される。

新連動の性能評価として、駅構内を走行する列車の安全を守る連動装置は、機械連動装置から電気機械連動装置、そして継電連動装置、電子連動装置へと発展してきた。連動装置の中で安全の確保に重要な意味を持つのが、各種鎖錠機能である。本論文では、さまざまな鎖錠機能が果たしている役割を分析評価した。その結果、進路設定・復位の要求および処理を一元化することで、多くの鎖錠機能が不要となることが判明した。さらに、これまでの一つの進路には、1 列車しか存在できないという限界も、CBTC の駅間における“間隔制御”と同様な処理を行うことで、駅構内にも移動閉そくが導入できるとの結論に至った。そして、そ

のための連動表について検討し，“ブロックの情報を行”とする新たな連動表を提案するとともに，そのもとでの列車制御の方法について示した．この新たな連動処理は，転てつ機，車上装置，踏切といった削除できない要素がセンターの統合処理装置とネットワークを介して接続することで列車制御を行う『UTCS』の処理に符合する“次世代の連動の姿”であると言える．

5. 3 地方交通線への UTCS の導入

地方交通線への『統合型列車制御システム：(UTCS)』の応用に関する具体的な検討結果を以下に示す．

5. 3. 1 地方交通線用統合型列車制御システムの要件

地方鉄道の発展には，単なるシステムチェンジではなく，鉄道の経営に“柔軟性”と“発展性”を保障する新たな技術の提供が必要である^[30]．経営的に厳しい地方交通線の信号保安設備は，電子閉そく装置が老朽更新期にあるなど，現状の設備維持等含め厳しい環境におかれている．しかも，既存信号保安装置は，軌道回路，連動装置，閉そく装置，ATS 装置など，保守を必要とする現場機器を多量に要している．さらに，ATS の機能が高くはないため，駅構内における上り下りの列車の同時進入が行えないなど，経営努力をしようにも設備面での制約が多く，経営改善を支障していた．このため，以下に示す 6 項目のような，システム要求が投げかけられていた．

- ①. 駅間における複数列車の運転を可能にするシステム
- ②. 上下線同時進入など経営陣の要求に柔軟に对应する信号保安システム
- ③. 保守費・運営コストの低減可能な設備
- ④. 人手がかからないシステム
- ⑤. 乗務員に過度な負担をかけないシステム
- ⑥. コストをかけない高機能 ATS 等の実現

これらの事業者におけるシステム要求に対して，新たな『UTCS』は，インタフェースの“合理化や省設備化”をもたらすため，安全性・信頼性のみならず，上記に示す事業者の必要とする要件に対して，下記の鉄道システムに望まれる“発展性”，“柔軟性”，“保守性”の属性により，容易に実現が期待できるものである^[2]，^[3]．

- (※) 発展性：鉄道事業者のニーズに合わせて進化できること。
- (※) 柔軟性：必要な機能を取捨選択し、柔軟に構築できること。
- (※) 保守性：現場機器の削減と合理的な予防保全を可能とすること。

5. 3. 2 ATP 閉そくシステムの開発

(1) ATP 閉そくシステムの目的

GPS：(Global Positioning System) 等の GNSS：(Global Navigation Satellite System) による、列車在線位置検知や汎用携帯電話回線（汎用携帯無線通信網）等の汎用技術が、鉄道信号に応用可能な状況となった。『ATP 閉そくシステム』は、これらの汎用技術、汎用インフラを利用することにより、鉄道沿線設備を削減するとともに、IoT 等の情報技術に依存することにより、低コストで柔軟で効率的な運転を可能とする、“機能性及び安全性に優れた列車制御システム”を経済的に提供することを目的としている。

(2) ATP 閉そくシステムの特徴と構成

『ATP 閉そくシステム』は、老朽更新期を迎えた電子閉そく装置を、はじめとする単線閉そく装置の後継システムを意図して開発した。『ATP 閉そくシステム』は、車上に搭載した車上装置とセンターのセンター処理装置間を“汎用の携帯無線通信網”で結び、センターから車上装置に出発許可などの指令を直接伝え、運転台の車内信号に反映させる。その結果、閉そく処理のための駅装置を用いる必要がなくなり、信号機などの地上設備も不要になる。

また、この車内信号化により、高度な ATS を地上設備無しで実現できるほか、CTC と等価な機能が CTC 装置の設備不要で実現できる。このように多くの機能を持ちながら、汎用携帯電話回線等（汎用携帯無線通信網）の汎用技術、さらに“GNSS”を利用した汎用インフラシステムが数多く開発されて来ているなか、準天頂衛星時代に向けた新たな応用研究検討に取り組むことが期待される GNSS 等の汎用インフラを利用することにより、導入コストが低く抑えられる。さらに、地上設備が削減されるため、保守や運用のためのランニングコストが削減される。

このほか、『ATP 閉そくシステム』が備える“車上の位置検知機能”を利用して、軌道状態の“モニタリング”や踏切制御子の“保全情報”取得も可能となり、大幅なコストをかけずに、高度な設備管理が可能になる。

『ATP 閉そくシステム』は，“情報技術に依拠した機能性及び安全性”に優れた列車制御システムを経済的に提供することを目的として，開発を行っている『統合型列車制御システム：(UTCS)』を具現化した，地方交通鉄道線区向け応用システムである^[25]。

この地方交通鉄道向け『ATP 閉そくシステム』の特徴は，次の通りである。

- ①. センターにセンター処理装置を設備して，全線の進路制御，閉そく制御を行う。進路取り扱いはセンター処理装置による自動扱いとし，運転士の取り扱いを前提としない。
- ②. 全線に亘って軌道回路を設備せず，駅構内には地上信号機，連動装置等を設備せず，地上設備を極力削減する。
- ③. 車内信号方式とし，車上位置検知系と情報依存型の車上装置により，連続的に列車制御を行う。
- ④. 基本的には単独の単線路線に適用し，他路線との直通運転を行う路線や複線路線は適用外とする。

ATP 閉そくシステムのシステム構成は，以下に示す 5 装置構成からなる。

システム構成例を図 5.6 に示す。

- ①. センター処理装置
- ②. センター制御盤
- ③. 端末装置
- ④. 車上装置
- ⑤. 通信回線（汎用携帯無線通信網）

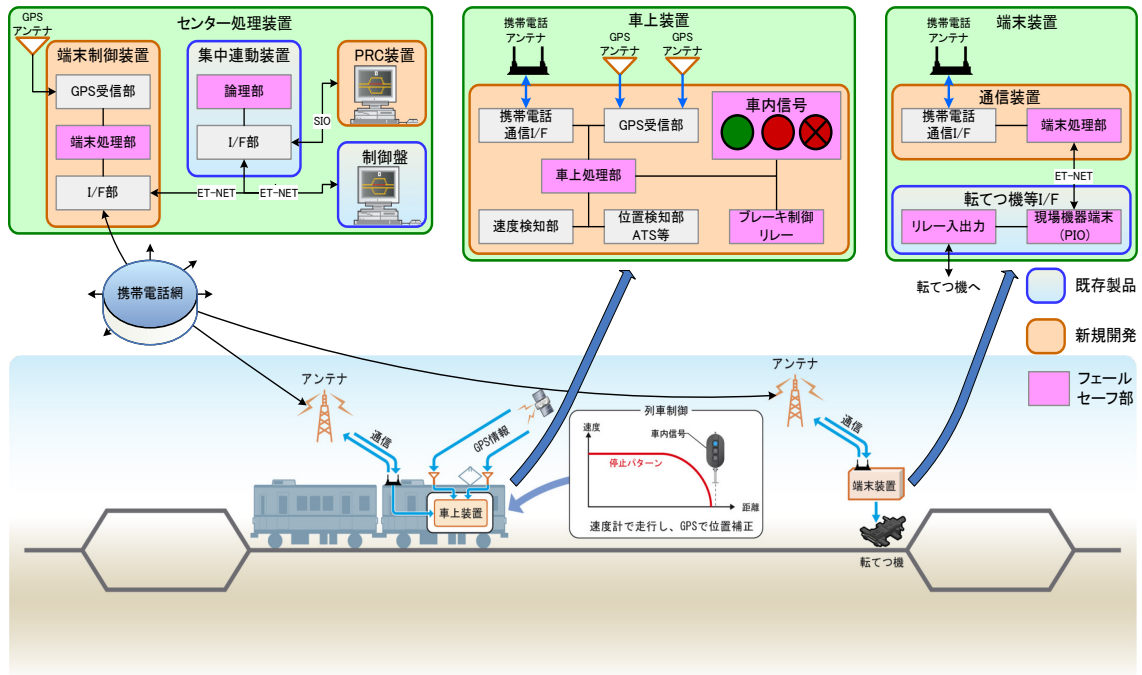


図 5.6 ATP 閉そくのシステム構成例

(3) ATP 閉そくの機能

『ATP 閉そく装置』の有する処理機能の詳細について、以下に説明する。これら機能を実現する車上装置を主体としたシステム構成は、図 5.7 のようになる。

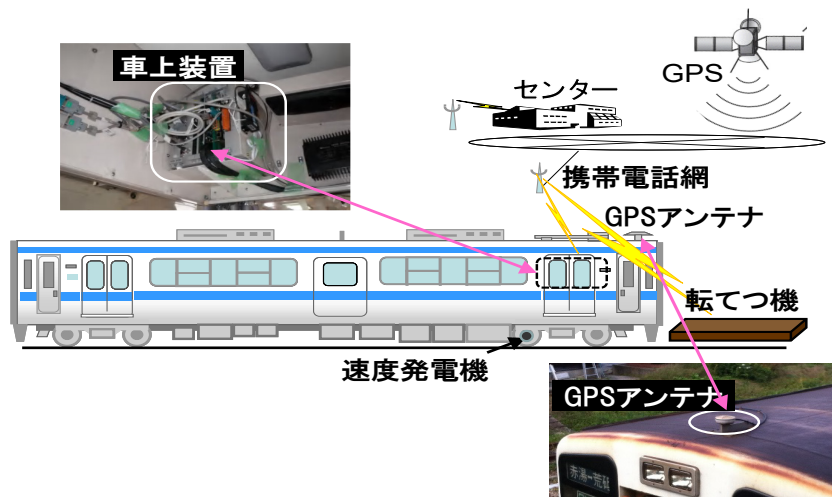


図 5.7 車上機器を主体とした ATP 閉そくシステムの構成

a) 「位置検知機能」

列車の“位置検知”は、車両に設けられた GNSS 受信機及び速度発電機：(TG) を使用する。車両に設けられた GNSS 受信機は、高精度な位置情報を、安定して検知出来る場合は、GNSS の位置情報を用いて、“自列車位置情報”の検知を行う。そうでない場合は、速度発電機の世界情報（車軸の回転数を検知して列車速度を算出できる装置、車両に標準的に搭載されている）から走行距離を算出し、“自列車位置情報の更新”を行う。なお、トンネル区間等の GNSS が使用できない箇所では、車両に設けられた速度発電機の世界情報から走行距離を算出して、自列車位置情報を保持する開発コンセプトとしている。但し、「鉄道分野における GNSS 利活用ガイドライン検討委員会：座長 日本大学 中村英夫名誉教授」により、2017 年 3 月に「鉄道分野における GNSS 利活用ガイドライン」が制定され、制御用途として具備する条件が定義された。これにより“GNSS 測位技術を列車保安制御”へ利用するには、まずは速度発電機の補助装置としての位置づけで実用化し、実績による証明を経る必要がある、この実績により、GNSS を主装置としての地位が今後、早期に確立されるよう努める必要がある^[2 2]。

b) 「通信機能」

センター処理装置と車上装置は、汎用な“携帯無線通信網”を経由して通信を行う。通信は、必要な箇所でのみ行う。

c) 「進路制御機能」

出発進路の制御は、駅ホームへの列車到着により、センター処理装置が自動的に行う。場内進路の制御も列車の駅接近により、センター処理装置が自動的に行う。転てつ機は、センター処理装置が汎用携帯無線通信網を経由して制御を行う。信号は車内信号方式とし、センター処理装置からの進路開通情報に基づき、車上装置が車内信号機に進行信号を現示する。

d) 「閉そく制御機能」

出発進路の制御により、センター処理装置が運行計画に従い、走行経路（進路）を決定することにより、自動的に駅間の閉そくが実現される。

e) 「列車保安制御機能」

車上に搭載した線路データ（車上 Data Base）と車上で検知した列車位置に基づき、車上装置が、センター処理装置からの“走行路情報”を取得したときに、その走行路の終端までの“速度照査パターン”を生成し、連続的に速度照査を行う。列車速度が照査速度を超えた時は、自動的にブレーキを作動させる。

(4) ATP 閉そくシステムの効果

『ATP 閉そくシステム』の導入効果を整理すると、次のように整理される。

- a). 運行管理系のスケジューリングに従った“列車運行”ができる。
- b). 駅間に閉そく境界をデータとして設定すると“続行列車の運転が可能”となる。
- c). 現行信号方式の出発から進路終端に至る速度照査パターンによる“ATS”が自動的に実現できる。
- d). 現場機器が削減されるため“信頼性・保全性”が向上する。
- e). 車上の位置検知機能を利用し、営業車による“設備保線データの収集”ができる。
- f). CTC 機能が CTC 設備を設けることなく実現する。
- g). このシステムを上り/下り線に設備することにより、“単線並列運転”が可能な、“亜幹線用システム”にランクアップできる。

(5) ATP 閉そくシステム開発の現状

『ATP 閉そくシステム』は、2009 年度から 2011 年度までの 3 年間、(株)京三製作所が“国土交通省鉄道技術開発費補助金”により、「ATP 閉そくシステム調査検討会：座長日本大学 中村英夫名誉教授」で仕様検討を行い、山形鉄道株式会社殿のフィールドにおいての基礎試験を経て機能確認を行った^[25]。さらに、補助事業完了後、2014 年 7 月末、西日本旅客鉄道株式会社殿の岩徳線にて、総合実車試験を成功させ、下記、実用性能等を確認した。総合実車試験では、システム導入区間への進入・進出、端末駅での折り返し、分割・併合（誘導信号機による運転）、入庫・出庫（入換信号機による運転）や、異常時の機能確認を含めて実施し、良好な結果が得られ、実用の域に十分あることを確認している。さらに試験システムの長期稼働試験も、江ノ島電鉄株式会社殿の江ノ島線にて実施し、同様に良好な試験結果を既に得ている。

5. 3. 3 GPS・GNSS を利用した信頼性の向上

「鉄道分野における GNSS 利活用ガイドライン検討委員会：座長 日本大学 中村英夫名誉教授」により，2017 年 3 月に「鉄道分野における GNSS 利活用ガイドライン」が策定されている．この中で列車制御における GNSS の利用は図 5.8 に示す“レベル 4（保安制御等）”に定義されている．GNSS は，日本の準天頂衛星が，最終的には 7 機体制で運用されることから列車位置検知に有望なシステムであると言える．ただし，ガイドラインにおけるレベル 4 の定義を GNSS の位置情報を安全の担保のために利用するものであり，かつ，目的の実現主体はシステムであるものとしている．

ただし，現時点では，GNSS による位置情報は，“速度発電機：(TG)等の他装置の支援手段として用いるものとする”と定義され，要求事項として，“レベル 4”に関しては，現時点では，GNSS の位置情報は他装置の支援手段として利用するものとし，将来，準天頂衛星の整備が進展し，かつ，他装置の支援手段として実績が十分得られたと判断されたとき，GNSS の位置情報を“主”とし，他装置を支援手段として利用することが出来るとしている^[3 2]．現時点で GNSS 受信機から得られる情報は，誤差を含んでおり，その値が分からないことが大きな課題の一つと言える．

㈱京三製作所では，GNSS 受信機から得られる情報を“GNSS 検定”により，測位精度を検定し，合格したときのみ，その“位置情報”を使用する考えとした．㈱京三製作所の GNSS 検定手法は“ガイドラインの参考注”として，掲載されており（図 5.8 参照），本検定手法は㈱京三製作所の“特許技術”となっている．

鉄道分野におけるGNSS利活用に関するガイドライン

- ・ GNSSを利用する際に留意すべき事項を広くとりまとめる
- ・ GNSSの利用について有用な情報を共有し、利用者を支援

利用レベル	想定される機能・装置の代表例		現時点での実現可否	将来の可能性*
レベル1	記録等	運転状況記録装置	○	○
レベル2	運行管理等	運行管理・旅客案内装置 車体傾斜・振り子制御装置 (安全の確保の目的で利用されないもの)	○	○
レベル3	保守・警報装置等	列車接近警報装置 (保守作業員の支援を目的としたもの) 運転士への支援装置 軌道・路盤変位観測装置	単独、又は他の装置の支援を得て利用	○
レベル4	保守制御等	列車制御装置 (ATC相当のもの) 路面電車位置検知装置 (トロリーコンタクトの代替を目的としたもの)	他の装置の支援手段として利用	他の装置の支援手段として利用

保安装置を定義

※「将来の可能性」とは、将来、準天頂衛星の整備が進展し、かつ、他の装置の支援手段としてのGNSSの利用実績が十分得られたと判断されたときの使用方法を指す。

図 5.8 鉄道分野における GNSS 利活用に関するガイドライン

地方鉄道などでは、車両数が少ないため、速度発電機：(TG)のみでの“空転・滑走対策”を取ることが容易ではない。『ATP 閉そくシステム』では、“位置検知の信頼性向上”のために、「GNSS」も併用する。GNSS は、“方向識別が可能な速度情報”，“誤差蓄積の無い位置情報”，および“時刻情報”を連続的かつ、高精度に、さらに低コストで取得可能である。

しかし、GNSS は GNSS 衛星からの電波遮断や GNSS 受信機の処理により、誤差を把握出来なくなる場合がある。『ATP 閉そくシステム』では“独自の検定”を行い、GNSS から得られる“位置”と“移動方向”を GNSS とは“独立したシステム固有の情報”と比較することで、高信頼の GNSS データのみを使用できるようにする。

すなわち、車両屋根上の前後には、あらかじめ 2 台の GNSS 受信機を、離隔を取り設置する。GNSS 検定は、各 GNSS 受信機の測位値（位置情報と速度ベクトル情報）、GNSS 受信機の設置離隔、および軌道 Data Base（軌道 DB：列車走行区間の緯度、経度、方位、キロ程等を、あらかじめ記録したもの）を用いて、下記に示す(1)～(3)の方法で行う。この検定に合格した情報のみを用いることで、

“GPS 情報の信頼性”を高くしている。“GNSS (Global Navigation Satellite System) 検定”について、図 5.9 に示す。GNSS 検定は、GNSS から得られる位置、移動方向を GNSS とは、独立したシステム固有の情報と比較することによって異常を検出する^[24]。

(1). 「トレース」

2 台の GNSS 受信機の測位値が、軌道 DB 上を連続的にトレースし、“絶対位置の誤差が少ない”ことを検定する。

(2). 「設置離隔：位置」

2 台の GNSS 受信機の測位値の離隔が GNSS アンテナの“設置離隔に等しく”、“測位値の相対誤差が少ない”ことを検定する。

(3). 「進行方向：方位」

2 台の GNSS 受信機の“速度ベクトルが軌道 DB の方位に等しく”、“速度ベクトルの誤差が少ない”ことを検定する^[33]。

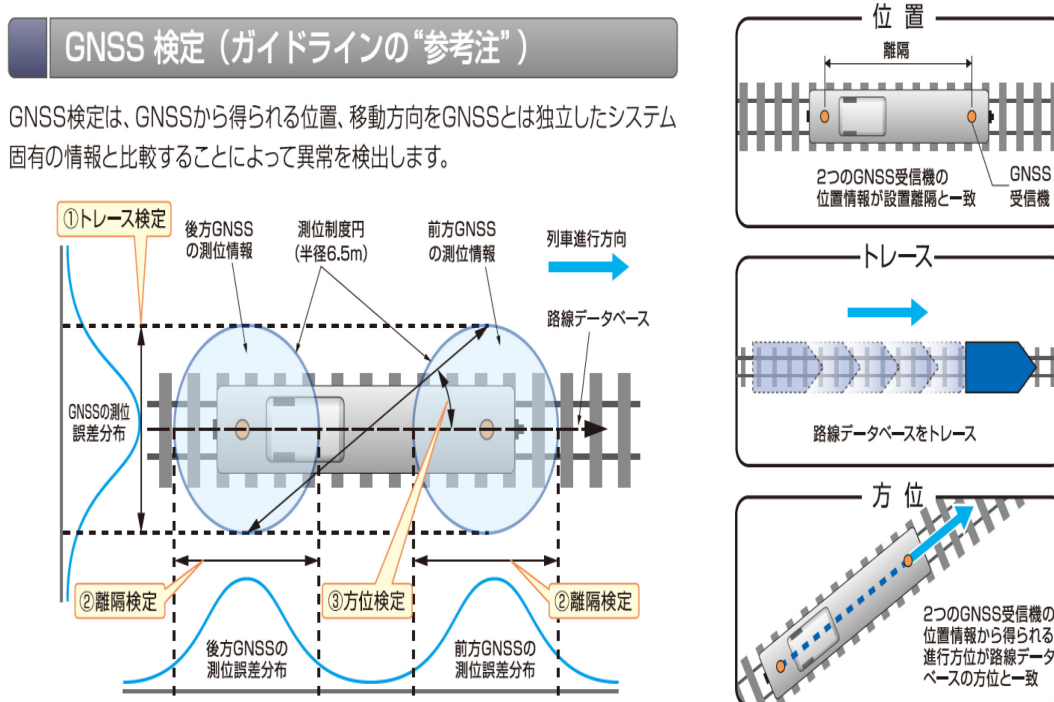


図 5.9 GPS の GNSS 検定

なお、GNSS 利用列車制御システムのケーススタディとして、“GNSS を利用した試作システム”を構築している。図 5.10 に試験システムの構成を示す。これ

により、山形鉄道フラワー長井線，西日本旅客鉄道岩徳線，江ノ島電鉄江ノ島線にて既設システムと同等の列車制御を行うために必要な機能を盛り込んだ，試験システムにより，GNSS から得られる 3 つの情報，“位置”，“速度”，“時刻”を最大限に活用した実線区における実車試験を実施し，既設システムとの比較で評価をしている．これにより，列車の出庫から入庫までのすべての機能を有しており，実用化レベルに達していると評価されている．これにより，既設のシステムと比較して，機能的にも経済的にも『ATP 閉そくシステム』が優れているかケーススタディにて立証されている^[22]．

現状の 2017 年に制定された「鉄道分野における GNSS 利活用ガイドライン」における定義では，GNSS の位置情報は車両に標準的に搭載されている速度発電機：(TG)の補助装置（他装置の支援手段）としての位置づけであるが，今後ケーススタディ等による実績を積み重ねて，この実績が立証・評価されれば，近い将来には，メインの機能として確立できると考える．これらの GNSS 利用におけるケーススタディの試験結果詳細報告等は，(故)浅野晃氏執筆による「列車保安制御システムへの全球測位衛星システム (GNSS) 利用に関する研究」の博士論文報告 (2018 年 9 月) に委ねる．

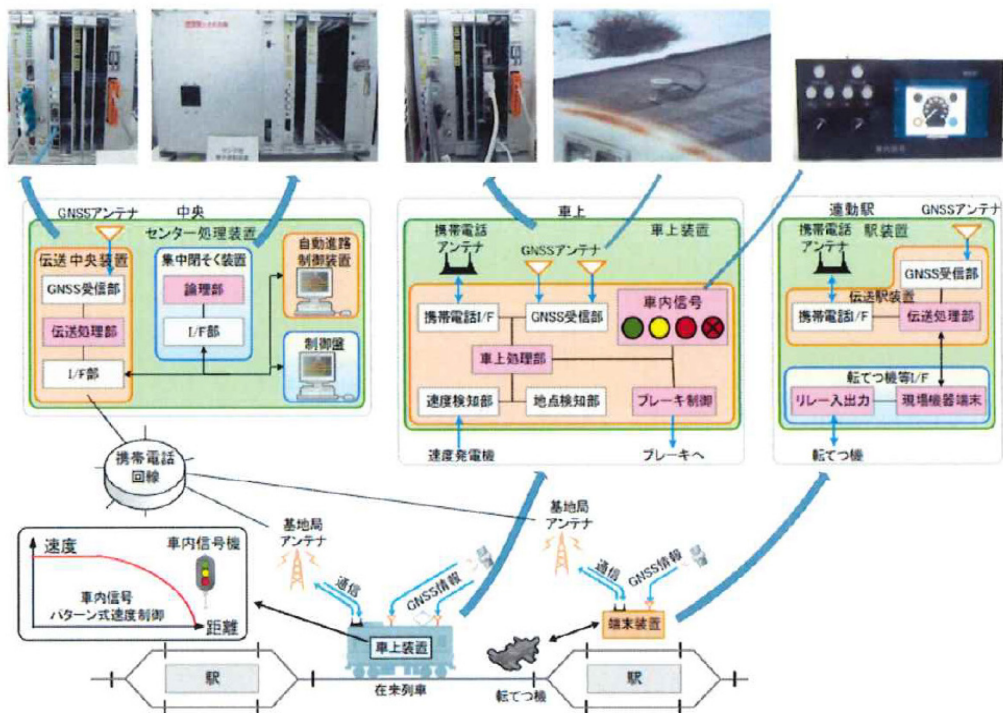


図 5.10 試験システム構成

5. 3. 4 汎用無線通信網利用により想定される脅威と対策

汎用携帯無線通信網（汎用携帯電話回線網）を利用した通信は“汎用の無線通信網”を用いるほか，“断続通信”であるため，以下のような不具合が発生することが想定される．

- ①. 電文の重複
- ②. 電文の欠落（妨害）
- ③. 誤電文の挿入
- ④. 電文の順序狂い
- ⑤. 不正電文（なりすまし）
- ⑥. 電文の遅延，偽り（なりすまし）
- ⑦. 通信断

これらの不具合要因に対しては，基本的に車上側が“マスター”となり，通信回線を確立することとし，回線確立が，なされない限り，その状態を維持する（それまでの通信によって許可された“領域・地点”を越えて走行することを許可しない）ことで安全を確保する．また，鉄道分野における国際標準化に則り，国際規格の安全関連伝送に関わる「IEC62280-2：(EN50159-2)」に準じた，次に示す万全な安全関連伝送上の“セキュリティ対策”を講ずることとしている．

- ①. シーケンス番号付加：電文の重複，欠落，誤電文挿入，順序狂い対策等
- ②. タイムスタンプ付加：電文の重複，順序狂い，遅延対策等
- ③. タイムアウト検出：遅延対策等
- ④. フィードバックメッセージ確認：通信の欠落，誤電文挿入，偽り(なりすまし)対策等
- ⑤. ID付加：誤電文挿入対策等
- ⑥. 暗号化：不正電文，偽り(なりすまし)対策等

これらは，一般的なセキュリティの確保策であるが，このほかに，アプリケーションレイア相互での“情報の妥当性確認”が有効と考える．ここで述べる妥当性とは，位置情報や制御情報内容の合理性などを考えている．

5. 3. 5 センター処理装置と車上装置間、現場処理端末間通信

(1) センター処理装置と車上装置間の通信

ケーススタディの『ATP 閉そくシステム』では、センター処理装置と車上装置間の通信は“定められた箇所”のみで行うことにしている。車上装置は、センター処理装置と通信するにあたって、それぞれ固有の“識別情報”を持ってセキュリティー確保して対応する。

(2) センター処理装置と現場端末装置間の通信

駅には、電気転てつ機を制御するための端末装置を設備し、センター処理装置は汎用無線通信網（汎用携帯電話回線網）を介して通信を行う。通信はセンター処理装置が“マスター”となつて行う。表示情報は一定の周期でセンターに伝送するが、転換制御は必要な時のみ行う。センター処理装置は、転てつ機に対して関連する閉そくの有無を送信するとともに、転てつ機の転換が必要な時には、一定の手順に従つて転換制御を行う。端末装置は、“転換制御手順”の開始に際しては、関連する閉そくが設定されていないことを確認する。転換制御手順に則つた“電文”の授受に際しては、常に“アンサー応答”を実施することとし、手順を踏んだ“電文交換”がなされない限り、転てつ機を転換させない。転てつ機から開通方向の“表示情報”（転換完了通知）を受信すると、センター処理装置に当該転てつ機の表示情報を送信する。

5. 3. 6 ATP 閉そくシステムの導入・実現に向けて

(1) ATP 閉そくシステム導入にあたって

前述の 5.3.2 項に示す通り、列車制御システムへの“汎用技術”の利用による『ATP 閉そくシステム』が、地方交通線の切り札として“実用の域”に達していることは開発の現場試験現況から確認できている。今後の導入・実現・実用化に向けて、鉄道事業者殿が最もポイントとするであろう、“運転取扱”、“信号設備”、“要素技術”そして、“経済性”、“保全性”等の観点から『ATP 閉そくシステム』を検証する。

(a). 運転取扱について

運転の観点から“駅構内での上り列車と下り列車の同時侵入”についての実現は、列車のホーム進入時には、停止位置までの停車用速度照査パターンが設定されるので、“オーバーラン”が防止される。これにより、ATS-P 形導入線区と同様に、同時進入が可能となる。また、“同一駅間における続行列車運転”に関する実現は、駅間に“無線交信領域”を設定することにより、閉そく区間が区分できるので、万全の安全を保ちつつ、“続行列車の運転も可能”となる。駅における“優等列車の追い越し運転”の実現は、駅における停車しての追い越しのほか、通過列車としての追い越し運転も可能となる。さらに、“分割・併合運転”の運転実現は、“分割後”は二つの列車編成として個別に識別管理される。また、“併合運転”は従来の制御と同様に構内の誘導信号機を制御して、実現し、“併合後”は一編成列車として組成完了する。

(b). 信号設備について

センターからの走行許可を得て、車内信号が進行現示になると、目標地点までの“速度照査パターン”が車内で自動的に生成され、ATS-P 形と同様な連続した“速度照査”が行われる。しかも、地上側に ATS のための処理装置を設備する必要がなく、『ATP 閉そくシステム』を導入するだけで、ATS 機能を廉価なイニシャルコストで実現できることとなる。

また、転てつ機のある駅構内の連動制御の実現は、センター装置の統合処理部機能である“集中ポイント制御論理”によって構内の端末装置を介して、直接制御する“線区集中ポイント制御処理機能”を持っているため、従来の駅構内における連動処理装置は必要ないこととなる。さらに踏切制御は、現在の設備を、そのまま使用して安全性と制御能率の向上が図られる。

(c). 要素技術について

要素技術の観点から、従来の軌道回路を使用せずに、“列車の在線検知”の実現に関しては、車上装置は地上子や GNSS などにより、“絶対位置”を取得後、速度発電機：(TG) のパルスを積算して（車軸に速度発電機を取り付け：回転回数×車軸円周径＝移動距離から算出）、走行位置を連続的に検知し、無線交信領域でセンターに伝達される。これにより、“車輪の空転・滑走”による誤差は、補助の GNSS の速度情報やセンサー類で確実に検知し、補正される精度の高い絶対位置

検知が可能となる。また、地上装置と列車間の通信の実現は、通信事業者が管理する汎用の“携帯無線（電話）通信網”を用いて、センターと全列車間で通信を行う。センターと直接交信するため、列車を制御する沿線の地上装置は一切必要としない。さらに、交信周期は、“駅への到着時、進路設定時”など必要なタイミングで行うことで連続交信ではなく“離散的”な交信となるが、これも一切問題はない。

(d). 経済性について

『ATP 閉そくシステム』の導入コストに関しては、“汎用技術”を活かしたシステムであり、ケーブル類、軌道回路、信号機そして、ATS 等の信号設備が不要となる。従って、従来以上の“安全性”の確保が出来るとともに、“機器の削減”という大きなメリットが確保出来ることにより、地方交通線における鉄道経営再生の切り札となる、“最も廉価なシステム”と言える。また“保守費用”や“ランニングコスト”に関しては、地上信号設備が大幅に削減されるため、鉄道事業のための運営費用は大幅に削減される。

『ATP 閉そくシステム』は車上自律型となるため、車上における“連続位置検知”機能を必須要素として有する。この“要素技術”を利用することにより、営業車両に“慣性センサー”等による軌道診断装置を設置すれば（図 5.11, 図 5.12 参照）、専用の軌道検測車を用いずとも、軌道廻りの診断が可能であり、保全に関して予防保全に関わる“CBM : (Condition Based Maintenance)”が実現し、保守コストの削減が図れる。この結果、新たな保全への道が切り開かれ、従来から懸念されていた“保全コスト”の大幅な削減が約束される効果が大である^[2],^[3]。

併せて、信号設備用電力などの、“維持コスト”も削減されるメリットがあり、まさに『ATP 閉そくシステム』は、“SDG's 実現に向けた、新たな地方線区向け列車制御システム”であるとも言える。

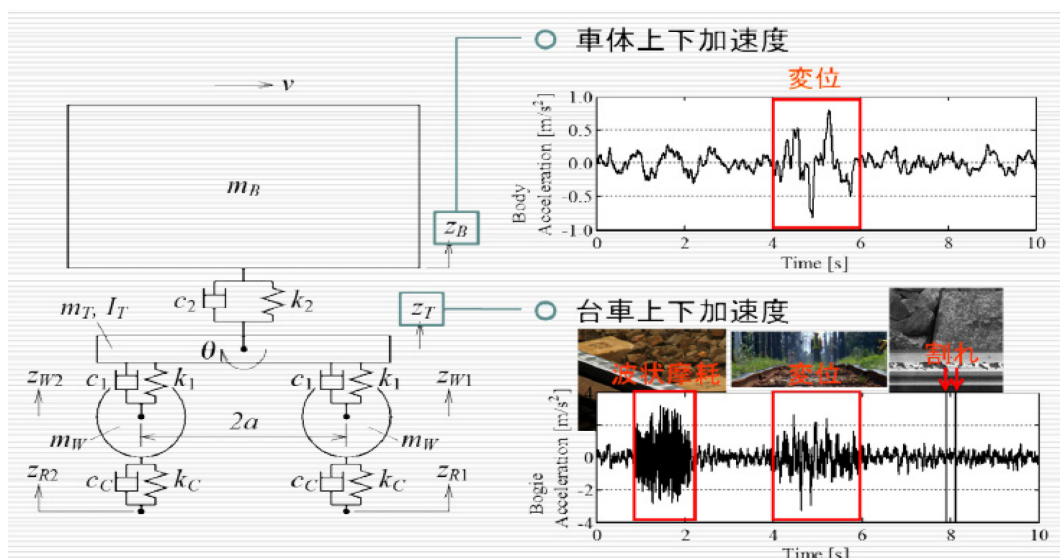


図 5.11 地方交通線への適用：慣性センサーによる軌道診断

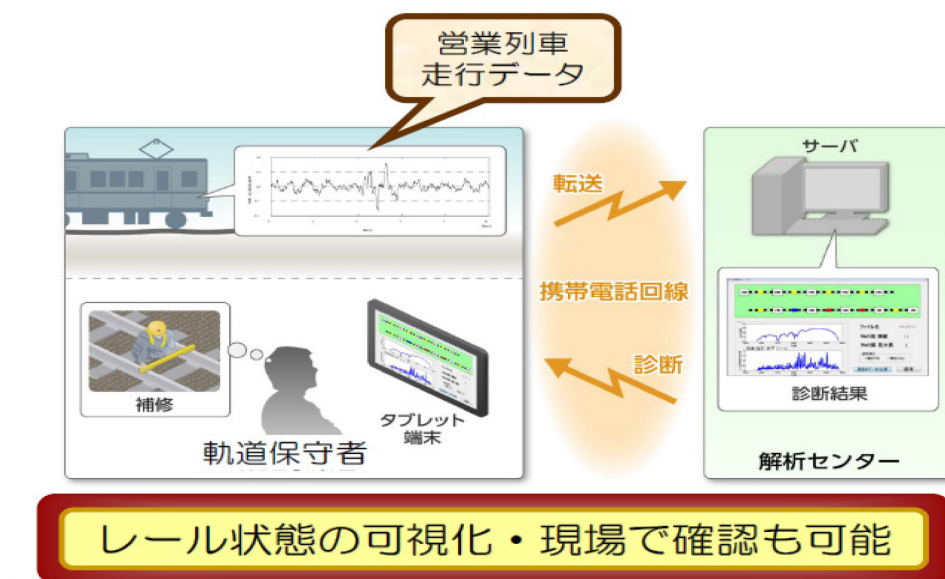


図 5.12 地方交通線への適用：CBM（予防保全）の実現

(e). 発展性について

『ATP 閉そくシステム』は、地方交通線をターゲットとした“無線式列車制御システム”導入の戦略でもあり、無線式列車制御システムの効用が、そのまま享受できるメリットが生まれる。2021年12月25日には、阿佐海岸鉄道（株）にて、世界初となる“レールと道路”両方を走行できる“デュアルモードビークル

(DMV)”の実運用が開始されたが、その制御方式には ATP 閉そくシステムで培われた技術が多く用いられている。

また、DMV 等の新形式車両に関していえば、過去には鉄道の再生を期した“レールバス”の構想もあった。新幹線・在来線を自由に走行できる“フリーゲージトレイン”も魅力的として開発が行われたが、実現には多くの課題があった。

これらのチャレンジの全てに車輪・車軸による軌道短絡が課題とされていた。軌道回路に依らない保安システムへの置換は、一挙にこの制約を取り払うものとなる。信号システムの限界は、他にもある。“運転密度”を向上させるには、閉そく区間を細分化すれば良い。しかしながら、そのためには、軌道回路の分割、信号機の新設、関連閉そく信号機の現示変更、さらにはケーブル敷設等、膨大なコストを要することとなる。

一方、“速度向上”も交通機関の競争力確保に有効であるが、信号見通し距離 600m、ブレーキ距離 600m を満足する範囲で行うには、信号現示の追加と現示系統の変更、さらには、踏切制御子の設置位置変更等などが必要で、現行のままでは対応できない。しかしながら、軌道回路に依らない車上主体の位置検知と車内信号化、さらには、踏切の“無線制御”は、これらの困難を一挙に払拭して、自由自在に“速度向上や運転密度向上”が図れる効用が生まれることとなる。これらの制約から解放されれば、鉄道事業者にとって経営手腕を発揮する余地が生じると考えることが出来る。従って制約開放の敷居は高くないと言える。

また、信号システムを“無線利用”の列車制御システムに移行させるにしても、現場に信号機を残しては、たとえ無線利用しても、速度向上や運転密度向上に対する制約からの解放は出来ない。従って“車内信号機化”は必須であり、それだけで“コストはほぼゼロ”で、完全な ATS が完備できる効用がある。

(2) ATP 閉そくシステムの実現に向けて

地方交通線区の鉄道事業者の“ニーズ”に合わせると、段階的なシステム構築についても検討が望まれる。ここでは、その一例を紹介する。まず、最初にセンター処理装置と車上装置を導入する。これにより、全線にわたる“速度照査”が可能となるため、重要課題である“安全性”が向上する。現行システムとの比較が可能であるため、この段階で“モニターラン”による機能確認を実施する。

これにより、モニターランによる安定稼働を確認したうえで、切り替えることが可能となる。次に、転てつ機制御で割出形転てつ機を使用するか、電気転てつ

機を使用するかにより、対応が変わる。割出形転てつ機の場合には、新たな対応は不要となる。安全を考慮して、転てつ機を対向で通過する際の速度制限は、“速度照査パターン”上に反映することとする。

一方、電気転てつ機の場合には、センター処理装置からの“転てつ機制御”に、いずれ移行し、駅の連動装置は不要となる。新設する端末装置は、既存の連動装置、信号機および、転てつ機などとのインタフェースを持っているので、“老朽更新期”を迎えた駅などから、順次切替て行く方法も可能である。センター処理装置は、全線分の転てつ機制御を行う能力があるため、その際には対象駅ごとに順次“論理結線”を追加していくこととなる^[33]。『ATP 閉そくシステム』の導入は、老朽更新期を迎えた電子閉そく装置の後継機種として最適であり、“汎用の情報・通信技術”を利用した廉価な『ATP 閉そくシステム』が、“安全性の高い運転制御”と“効率的な保全”を提供できる。そして、『ATP 閉そくシステム』が、支える“低コスト”で“柔軟”かつ“効率的”な運転が、地方鉄道の競争力を強め、地方鉄道を蘇えらせることが出来ると考える。

5. 4 都市鉄道への UTCS の導入

都市鉄道への要件としては、運営費用を含めた輸送コストの低減という経済性の視点のほか、輸送力の変動に対する柔軟性及び我が国の都市鉄道の特徴である“相互直通運転”などへの対応である。さらに、将来的には鉄道事業者の検討が進みつつある“自動運転”実現への展望である。

運営費用の削減は、既存列車保安制御システムが有している現場設備の削減という CBTC の効果が、そのまま『UTCS』でも成立する。同様に、輸送力の変動に対する柔軟性についても、移動閉そくが実現する CBTC と同様、困難な課題ではない。ここでは、相互直通運転と自動運転への展望を論じる。

5. 4. 1 相互直通運転と UTCS

地下鉄線区の多くの CBTC では 2.4GHz の周波数を用いているが、ATACS では 400MHz の空間波で制御を行っている。階層構成をとる『UTCS』の場合、機能層に位置するセンターの処理装置は共通となる一方、ネットワーク層に位置する通信系は、機能層とは独立となっているため、異なる通信手段に対応できる準備さえできれば、“相互直通運転が容易に実現”できる。

5. 4. 2 自動運転への展望

わが国の自動運転は、神戸ポートライナーやゆりかもめのように専用軌道での導入が主体であるが、九州旅客鉄道株式会社（JR 九州）は、2020年12月に、「自動列車運転装置」を用いた自動運転の営業運転を香椎線 西戸崎駅～香椎駅間で開始した。当面の間、運転士が乗務した状態の営業列車で実証運転を行うものの、将来的には、運転士以外の係員が前頭に乗務する自動運転（GOA2.5）の実現を目指している。

在来鉄道での自動運転は、国内初であるが踏切事故や万一の事態に対する対応ということで、運転士以外の係員の乗務を前提にしている。『UTCS』は踏切の制御も機能層で行っており、踏切遮断完了で障害物がないという安全運転が保障されたときに、踏切を通過するという万全の制御が期待できるため、自動運転に対する「踏切」という障害が軽減できる。

『UTCS』では、ネットワーク層に特定の通信手段を決めておらず、近年注目されている5G携帯電話の導入も期待されている。5G携帯電話網ではスライシングにより、万一の際にも一定の優先接続が可能であるほか、リアルタイム性や単位時間当たりの情報量も一桁以上向上すると言われている。

その応用事例として期待されているのは、遠隔制御や動画のリアルタイム送信である。近年発生した車内テロ時の乗客への対応が、自動運転の課題としてクローズアップされたものの、実際の事故時には車内乗務員に的確な情報が集まらないという実態が明らかとなった。一方で、リアルタイムの動画通信を有効に使い、指令からの切替により各車両の状況を把握し、むしろ指令から適切な指示を乗客に直接与える方向の有効性が期待されている。『UTCS』のネットワーク層に適切な通信手段を選択することにより、制御はもちろんのこと、万一の事態における情報交換手段が構築できる。

5. 5 第5章のまとめ

本章では、『統合型列車制御システム（UTCS）』の応用に関する検討成果を論じた。この中でユーザである鉄道事業者が、デジタルATCや既存CBTCを志向した場合でも、『UTCS』を用いることで、デジタルATCの“地上設備が大幅に削減”できるほか、いずれCBTCへの移行を考えた際も、スムーズに移行・実現で

きることを示した。さらに、『UTCS』と他の既存列車制御システムとの関係も明らかにした。

また、一つのケーススタディとして、走行路探索に用いる“新連動表”の開発と概念を明らかにした。駅構内を走行する列車の安全を守る連動装置の中で、安全の確保に重要な意味を持つのが各種の“鎖錠機能”であった。本論文では、様々な鎖錠機能が果たしている役割を分析し、その結果、進路設定・進路復位の要求および処理を一元化することで、多くの“鎖錠機能”が、等価的に実現されていることを明らかにした。さらに、これまでの一つの進路には、1列車しか存在できないという限界も、走行路探索を用いることで、CBTCの駅間における間隔制御と同様に、駅構内にも“移動閉そく”が導入できるとの結論に至った。そして、これを実現する“連動表”について検討・検証し、「走行路探索に用いるブロックの情報を“行”とする新たな連動表」を提案するとともに、そのもとでの列車制御の方法について明確に示した。この新たな駅構内の制御処理は、転てつ機、車上装置、踏切といった削除できない要素がセンターの統合型処理装置とネットワークを介して接続することで、列車制御を行う申請者が提言する『UTCS』の処理に明確に符合する、“次世代の連動の姿”であると言える^[31]。

さらに、そのケーススタディとして、実フィールドでの実車試験も完了し、実用の域に達した『ATP閉そくシステム』についても論じた。『ATP閉そくシステム』の導入は、老朽更新期を迎えた“電子閉そく装置の後継機種システム”として最適であり、現状維持や延命ではなく、“汎用の情報・通信技術”を利用した“廉価”な『ATP閉そくシステム』が、“安全性の高い運転制御と効率的な保全”を提供できることを示した。これにより、『ATP閉そくシステム』が、支える“低コスト”で“柔軟”かつ“効率的”な運転が“地方鉄道の競争力”を強め、鉄道交通を核とした新しい地域の再生により、地域の暮らしに組み込まれた“持続可能な存在”として、地方鉄道を蘇えらせることができると考えている。

また、第5章では都市鉄道の近代化に対する『UTCS』の効用について、『UTCS』が、持つCBTCとしての特徴以外に、“相互直通運転”との関係や将来の“自動運転”への展望について考察した。その結果、相互直通運転には、通信手段と処理系の分離が有効であるが、その意味でも階層構造を持つ『UTCS』の有利さが確認できた。自動運転においても、5Gなど適切な通信手段を『ネットワーク層』の要素として選択することにより、現在課題として論じられている在来線の自動運転に有利な局面を切り開けることが明らかとなった。

5. 6 第5章の参考文献

- [2] 電気学会論文誌 C 部門 vol136, No.7, 「階層化による列車制御システムの再構築」 齊藤嘉久, ほか, 2016-7
- [3] 平成 27 年 電気学会電子・情報・システム部門大会 IEE 論文番号 TC9-6 (長崎) 「階層化による列車制御システムの再構築」 齊藤嘉久, ほか, 2015-8
- [22] 浅野晃 日本大学理工学研究科博士学位申請論文「列車保安制御システムへの全球測位衛星システム (GNSS) 利用に関する研究」, 2018-9
- [24] KYOSAN PRODUCTS INFORMATION 製品情報誌, Vol.11, 2020
- [25] 京三サーキュラーVol.66 No.1 「ATP 閉そくシステム試験完了のお知らせ」 中村英夫, ほか, 2015
- [30] 3rd Asia-Pacific Control Command and Signalling(CCS) Workshop, No.3 「Advances in Signalling Systems and the Outlook for Next-Generation Train Control Systems in Japan」
H. NAKAMURA, 2014-10
- [31] YOSHIHISA SAITO, TETSUYA TAKATA, HIDEO NAKAMURA, 「INTRINSIC FUNCTION OF CONVENTIONAL RAILWAY INTERLOCK AND FUTURE ASPECT OF INTERLOCK EQUIPMENT AT IOT ERA」 “International Journal of Transport Development and Integration” WIT Press Journals, Volume 6, Issue2, pp143-154, 2022.
- [32] 鉄道分野における GNSS 利活用ガイドライン検討委員会編 (座長: 中村英夫) 「鉄道分野における GNSS 利活用ガイドライン」 (第 1 版) , 2017-3
- [33] 京三サーキュラーVol.65 No.1 「列車制御システムへの汎用技術の利用—ATP 閉そくシステムの要素技術」 浅野晃, ほか, 2014

第6章 システム論から見た統合型列車制御システム

6.1 本質制御と Safety 2.0

申請者は、本研究論文で、「列車制御システム」の新たな方向性として、“IoT 技術に依拠した Safety 2.0 (協調安全)” のシステムに則り、必須の構成要素が相互に情報交換し、高度な安全機能を実現する、まさに“本質制御”を理想的なシステムの在り方として具体化した、『統合型列車制御システム (UTCS: Unified Train Control System)』を提案した。列車制御システムを、構築するために必要最低限の要素は、下記の4項目である。

- ①. センターの地上処理装置は、転てつ機、踏切を制御し、その情報と“前方列車の走行位置情報”をもとに、列車に対して“安全に走行できる経路”を定め、その限界地点を車上に伝達すること。
- ②. 列車は、“走行位置と速度”を常時把握し、限界地点までの安全な運転を行うとともに、列車の走行情報 (位置、必要に応じて速度など) を提供すること。
- ③. 列車とセンター処理装置間は“無線”で情報更新すること。
- ④. 設備故障など異常事態を確実に把握し、列車の安全を確保すること。

(注) ①. および②. は、第2章において広義の“閉そく概念”として提示した排他制御 (ブロッキング: 列車同士の衝突を防止するために、列車の前方走行路に排他領域を設定して、走行列車相互の安全を確保すること) で実現される。

これらは、転てつ機、踏切、レール、車両、センター処理装置という“鉄道に必須のアイテム”で実現できる。このように、システムに必須のアイテムを相互に情報交換を行うことで、保安制御を実現する形態を“本質制御: (Inherent Control)”と称している。“本質制御”のもとでは、保安制御のために、これまで重要な役割を持ち担っていた連動装置や閉そく装置、ATS・ATC装置などの主要機能は、センター処理装置の“ソフトウェア論理”や車上装置の“保安制御論理”に置換され、物理的な装置は姿を消すと考える^[15]。

従来の列車制御システムでは、ATC装置や電子連動装置といった装置ごとに考えられた安全性の概念に基づいて、“システム全体の安全”を確保している。申請者は『統合型列車制御システム (UTCS: Unified Train Control System)』

で、さらに“ネットワーク化”等により“安全の見える化”を進め、それぞれの装置が他の動作を判定して、相互に理解し合い、処理することにより“危険因子”そのものを取り除く「本質制御」を、より明確に実現することを目指した。人とモノと環境を情報でつなぎ、それぞれが協調して高次元の安全を実現する取り組みの概念として“Safety 2.0”（協調安全）がある。これは人の注意力に頼る時代を“Safety 0.0”，安全を組み込んだモノを提供する時代を“Safety 1.0”とし、それぞれのモノが必要な情報を交換することにより“安全”を確保する時代を“Safety 2.0”とされている。

“Safety 0.0 から Safety 2.0”までの概念を図 6.1 に示す。

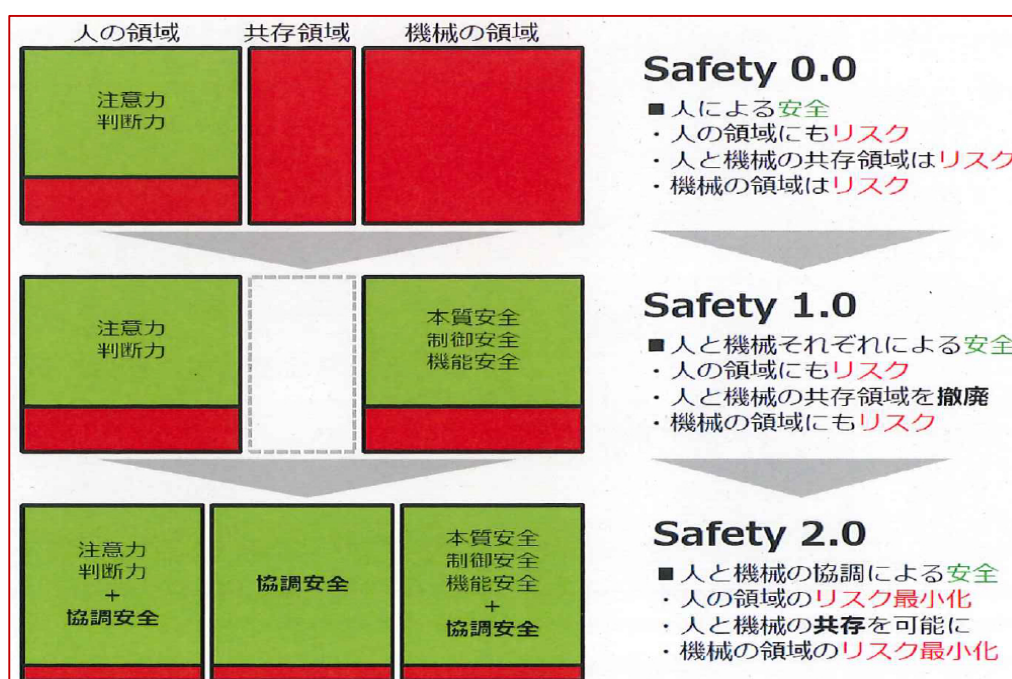


図 6.1 Safety0.0 から Safety2.0 までの概念

大事な視点は、鉄道の安全を確保するという“安全機能”の発揮こそ、ICT を積極的に活用することである。この ICT の技術のおかげで、“デジタル情報”を共有することで、“人間”と“技術”と“環境”が協調して、安全を実現することの可能性がでてきた。この新しい安全の思想を“協調安全”と呼び、この協調安全を実現する ICT 技術を「Safety 2.0」と呼ぶ^[34]。この概念を列車制御に当てはめると、図 6.2 に示す通りとなる。センター装置と現場の列車、転てつ機、踏

切が相互に情報交換し、システムに必須の各要素が相互に連結され、情報交換を行い、システムとしての機能を遂行する、IoT 時代のシステムアーキテクチャであり、まさに提案する『統合型列車制御システム (UTCS : Unified Train Control System)』は“Safety 2.0” 型の概念を満足した『本質制御』の具現化されたシステムと言える^[24]。



図 6.2 列車制御における本質制御の考え方

6. 2 将来の交通システムに向けた検討

鉄道システムに限定した視点から、もっと広義な“交通インフラシステム”の視点で、新たな交通インフラの方向性について提案したい。現在の交通インフラシステムは、自動車、鉄道、航空機が独立システムにより個々に競争している状況と言える。これは今までに本論文で論じた、従来の鉄道システムにおける既存信号保安システムが、縦割りの独立構成で構築されてきた状況と同じと考える。しかしながら、交通インフラを利用する利用者の立場で考慮した場合、その移動距離により、交通インフラとしての自動車、鉄道、航空機がシステム融合していく“新たな交通インフラシステム”の変革・構築が、我々が目指すところの『本質的系統制御』であり、将来の社会のニーズに応えるということではないかと考える。同時に、この概念は“MaaS (Mobility as a Service)”の方向性とも合致する。図 6.3 に交通インフラの新たな方向性 (変革) に関する概念を示す。

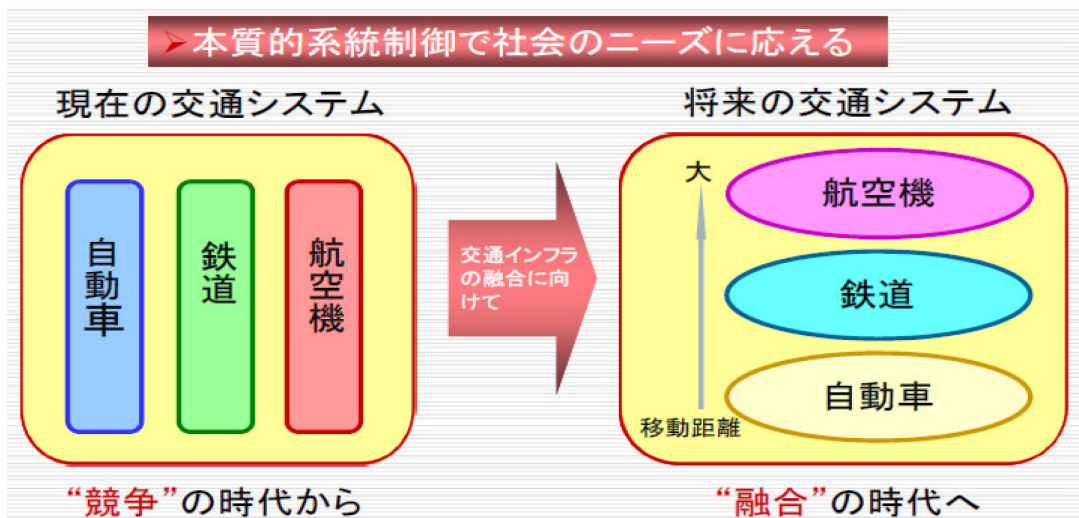


図 6.3 交通システムの新たな方向性（変革）

このような「新たな交通インフラシステム」の融合にも、申請者が提案する『統合型列車制御システム：(UTCS)』の考え方（コンセプト）は有効であると考えられる。将来的に大きな交通インフラ網の運行状況が統合、一元管理されれば、その運行状況等を利用者に積極的に配信することは容易である。さらに自動車は高速道路、一部の限定エリア等におけるバス、トラックの“自動運転による隊列走行”の研究開発が進んでおり、実用化も近いと考えられている。さらに、航空機について考慮すると、航空機の離発着に伴う地上側管理（滑走路とボーディングゲート間）管制センターからの“誘導路 (Taxiway) の地上側(Taxiway)走行自動制御”が課題となっており、これらは、まさしく『鉄道システム：UTCS』と同様の“本質制御”コンセプトにおける自動運転等の制御系研究開発が可能ではないかと考える。このように交通インフラシステムの課題は多々あるが、自動車、鉄道、航空機が一体となった新たな“交通インフラシステムの変革・統合”が実現可能になれば、広義の交通インフラにおける、最適運行管理と最新の交通インフラ運行状況が一元管理され、乗り継ぎ等の時差が無くなり、利用者の“利便性向上”に役立つこととなる。さらには物流の面でも、地球環境にやさしい効率的な輸送の実現が確保されることも明白である。

いずれにしろ、交通インフラシステムは将来にわたり、利用者最優先で、日々の生活に密着した利便性向上が必須要件であることに変わりない。これらの方向

性は、地球規模で重要な『2050年カーボンニュートラル宣言に基づく、低炭素交通社会づくり』にも貢献すると考える。

図 6.4 に将来の交通システムの統合概念を示す。

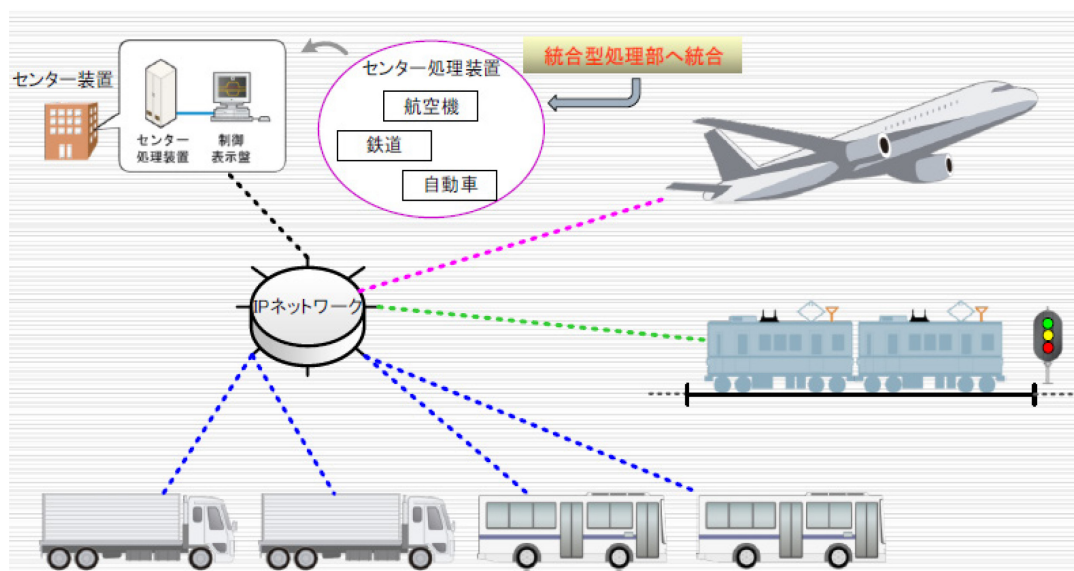


図 6.4 交通システムの統合概念

6.3 第6章のまとめ

第6章「システム論から見た UTCS」では、効率的かつ合理的に列車制御を実現するという鉄道システムではなく、一般的なシステム論から見た位置づけについて検討した。検討には、今日の ICT 利用システム技術の説明が合理的に可能な Safety 2.0 の視点から評価することにした。Safety 2.0 は産業機械や装置、システムの安全性への配慮が、従事者の注意力に委ねていた Safety 0.0 の時代から、安全を司るインターロックや保護装置などを駆使して従事者の注意力欠如が事故に至ることを防止する Safety 1.0 そして、ICT の時代に可能となった Safety 2.0 に遷移する過程を説明している。

そして、Safety 2.0 は協調安全とも呼ばれ、システムを構成する要素が情報交換を行う中で、より高度な安全を確保しようというものであり、まさに IoT 時代のシステムアーキテクチャでもある。この点で見ると『UTCS』は、Safety 2.0 の中でも最も進んだ本質制御の概念を利用していることが確認できた。

さらに、システム論としては交通システムで重要視されている MaaS を取り上げ、『UTCS』が MaaS に大きく寄与できるだけではなく、『UTCS』の概念を MaaS に持ち込むことにより、交通システムの発展にも貢献できることを明確に示した。

6. 4 第6章の参考文献

- [2] 電気学会論文誌 C 部門 vol136, No.7, 「階層化による列車制御システムの再構築」 齊藤嘉久, ほか, 2016-7
- [3] 平成 27 年 電気学会電子・情報・システム部門大会 IEE 論文番号 TC9-6 (長崎) 「階層化による列車制御システムの再構築」 齊藤嘉久, ほか, 2015-8
- [6] オーム社 「列車制御-安全・高密度運転を支える技術-」 中村英夫編著, 2011-2
- [15] オーム社 日本鉄道電気技術協会編 「鉄道信号技術」 中村英夫, ほか, 2020-11
- [16] 齊藤嘉久, 高田哲也, 中村英夫, 「統合型列車制御システムの構成とその効果」電気学会論文誌 TER/マイクロセンサーシステム合同研究会 TER-21-029/MSS-21-022, pp1-6, 2021
- [22] 浅野晃 日本大学理工学研究科博士学位申請論文 「列車保安制御システムへの全球測位衛星システム (GNSS) 利用に関する研究」, 2018-9
- [24] KYOSAN PRODUCTS INFORMATION 製品情報誌, Vol.11, 2020
- [34] JREA Vol.64, No.2, 「巻頭言：時代と共に進む安全の技術と思想」 向殿正男, 2021
- [35] 工学院大学オープンカレッジ講演会資料 「鉄道信号システムの近未来像」 中村英夫, 2018-2

第7章 結論

7.1 本研究の成果

申請者が本研究論文で提案する『統合型列車制御システム (UTCS : Unified Train Control System)』は、列車保安制御の根幹とされる、閉そく装置、連動装置を廃止して成立するという未踏の領域のものである。しかも、海外でも、その概念すら議論されていない中で、申請者の発表論文は、既に多くの評価を得ている。その一つの証として、申請者発表業績論文等一覧(査読付き論文の項:NO.8)に示す『INTECH OPEN (BOOK TITLE : Applied Modern Control)』への2019年投稿英文論文「Study on a New Train Control Systems in the IoT Era : From the Viewpoint of Safety 2.0」は出版元の“Intech Open”からダウンロード数が800回を超え、学術的に評価の高い、興味深い論文であるとの情報連絡を受けている。これに併せて、世界各国から、本論文に関わる多くの問い合わせも受けており、これらに真摯に対応している状況である。また、国内では、本研究申請論文のベースとなる論文が、平成30年(2018年)の電気学会(IEEJ)における『第74回電気学術振興賞』の『論文賞』“電気学会論文誌 C 部門 vol.136 No.7「階層化による列車制御システムの再構築」”を、受賞出来たことから裏づけられている(申請者発表業績論文一覧:査読付き論文の項 NO.1)。本システムは、鉄道事業者殿とともに“進化”していくシステムとのコンセプトのもとに、今後も事業者殿からの多くの、ご意見等を頂戴して、“システムの進化”と“システムの最適化”を図っていくことが重要と考える。本節では、申請者が提案する『統合型列車制御システム:(UTCS)』に関する、研究の成果を本研究論文の構成に従って結論として示す。

7.1.1 第1章「序論」の結論

第1章「序論」では、本研究実施に際しての背景を明確にするとともに、列車制御システムの大系を整理した。列車制御システムにおける保安制御は鉄道信号システムとして論じられるが、今日の列車制御は“安全制御”のみにとどまらず、“安定・安全・効率的輸送”を担うリアルタイム制御が重要となっている。本論文では列車運行管理と一体化して行い、これら一連の処理を“列車制御”と位置

づけている。このほか、本論文を構成する 2 章から 6 章について、各章における主要な内容について紹介した。

7. 1. 2 第 2 章「既存列車制御装置・システムの特徴と分析」の結論

第 2 章「既存列車制御装置・システムの特徴と分析」では、本論文のテーマである『統合型列車制御装置』が対象とする、既存列車制御システムの中で、特に列車の安全運転を目的とした列車保安制御を担う信号保安システムを中心に、その特長を分析した。

信号機と転てつ機の連査という機械式信号から始まった信号保安システムは、百数十年をかけて“デジタル情報処理のコンピュータ制御”まで進化していった。その進化は、運転士をバックアップする停止信号の冒進防護、速度照査と情報伝送の連続制御化、運転士に代わって安全性を確保する“車内信号化”，そして列車自体の位置検知による円滑な高密度運転化へと辿っていったことを紹介した。さらに、これら保安制御と併せて、年間の鉄道運転事故件数の多い踏切部分の安全性確保も重要な課題となっていることを示した。

第 2 章では、これら既存信号保安装置として、閉そく装置，連動装置，ATS・ATC，踏切保安装置の特徴と分析を実施し、その役割と現状，そして課題と共に、これからのあるべき姿を展望した。

7. 1. 3 第 3 章「階層化による既存列車制御システムの再構築」の結論

第 3 章では『階層化による既存列車制御システムの再構築』と題して、第 2 章で抽出された課題を解決する方法について検討した。この中で、今日最も進んだ列車制御システムといわれる、無線式列車制御システム：CBTC (Communication Based Train Control system)についても分析し、処理部を沿線に“分散配置”するのではなく“センターに一元化”することの有効性を明らかにした。

そして“CBTC”を含め、既存列車制御システムが、それぞれ抱える課題を分析し、連動装置や閉そく装置，ATS・ATC といった制御装置を、現場に設備・配置する従前の考えではなく、システムの安定稼働を保証する“アシュアランス技術”に則した鉄道システムとして、転てつ機，踏切，そして列車をインタフェースする『端末層』と，センターの中央処理部『機能層』，そして，その間をつなぐ伝送部『ネットワーク層』からなる『階層化』の新たな概念について示すと共に，現

場の情報が、リアルタイムで『機能層』へ、一元的に収集・フィードバックされるシステムが、“より高度な列車制御システム”実現に適していることを、明確に示した。

7. 1. 4 第4章「統合型列車制御システムの提案」の結論

第3章で得た、既存列車制御システムに対し、“無線通信”により接続する『統合型列車制御システム：UTCS』が、課題解消に有効との見通しのもとに、本章では、『UTCS』の具体的な検討を行った。まず、列車制御システムを“階層的”に再構築するための前提を明らかにし、『UTCS』の『機能層』・『ネットワーク層』・『端末層』の有るべき姿を論じた。

この中で、『機能層』に位置する統合型処理部では、列車の保安制御（転てつ制御、踏切制御、前方列車位置探索等）を一元処理するために、“支障点”という概念を導入し、踏切や転てつ機を含んだ経路の安全運転を駅中間と同様に実施する“走行路”として定めた。その結果、論理を現場からセンターに集約することに成功すると共に、論理を有した『機能層』と、現場機器とのインタフェースをつかさどる『端末層』、そして両者をつなぐ『ネットワーク層』から成る、“横割りの3階層構造”で統合整理することが実現できた。

これにより『機能層』の統合処理部による列車に対する支障点の探索処理により、走行路を確定し、『ネットワーク層』を介して、『端末層』に位置する車上制御装置に送信制御する新しい概念で“支障点”を探索し、走行可能地点を車上に送信すればATC・ATSは不要となる。また駅構内においても“支障点探索”が連動の位置づけとなることから、従来の“駅連動装置”は不要となり、駅構内も駅中間も同様の保安制御が実現可能となることを明らかにした。これは保安制御上、非常に大きな留意点と成果と言える。

さらに、本章では、『UTCS』の“安全性”を、既存の自動閉そくによる信号方式及びデジタルATCと比較して分析評価した。評価は概念設計レベルの“FTA”解析で行ったが、自動閉そくやデジタルATCが、現場機器の故障により、危険側に遷移する可能性があるのに対し、『UTCS』は、すべてメッセージ交換で処理が進むため、通信上の適切な対策を施すことにより、高い安全性が確保されることを明らかにした。

また、本章では『UTCS』の導入効果を分析し、8項目の効果が期待できることを明確に示した。これら効果は“現在の鉄道システムが抱える根本的な課題解消”に結びつくものであり、『UTCS』の早期実現が望まれるとの結論に達した。

7. 1. 5 第5章「統合型列車制御システムの検討とケーススタディ」の結論

本章では、『統合型列車制御システムの検討とケーススタディ』として、『統合型列車制御システム (UTCS)』の応用に関する検討成果を論じた。この中でユーザである鉄道事業者が、デジタルATCや既存CBTCを志向した場合でも、『UTCS』を用いることで、デジタルATCの“地上設備が大幅に削減”できるほか、将来的にCBTCへの移行を考えた場合も、スムーズに移行・実現できることを示した。さらに、『UTCS』と他の既存列車制御システムとの関係も明確にした。

また、『UTCS』の持つ柔軟な駅構内の走行を実現する方法として、走行路探索に用いる“新連動表”の開発と、その概念を明らかにした。駅構内を走行する列車の安全を守る連動装置の中で、安全の確保に重要な意味を持つのが各種の“鎖錠機能”であった。本論文では、様々な鎖錠機能が果たしている役割を分析し、その結果、進路設定・進路復位の要求および処理を一元化することで、多くの“鎖錠機能”が、等価的に実現されていることを明らかにした。さらに、これまでの一つの進路には、1列車しか存在できないという限界も、走行路探索を用いることで、CBTCの駅間における間隔制御と同様に、駅構内にも“移動閉そく”が導入できるとの結論に至った。そして、これを実現する“連動表”について検討・検証し、「走行路探索に用いるブロックの情報を“行”とする新たな連動表」を開発・提案するとともに、そのもとでの列車制御の方法について明確に示した。この新たな駅構内の制御処理は、転てつ機、車上装置、踏切といった削除できない要素がセンターの『統合型中央処理装置』とネットワークを介して接続することで、申請者が提言する『UTCS』の処理に明確に符合する、“次世代の連動の姿”であることを明確にしている^[31]。

さらに、そのケーススタディとして、実フィールドでの実車試験も完了し、実用の域に達した『ATP閉そくシステム』についても論じた。『ATP閉そくシステム』の導入は、老朽更新期を迎えた“電子閉そく装置の後継機種システム”として最適であり、現状維持や延命ではなく、“汎用の情報・通信技術”を利用した“廉

価”な『ATP 閉そくシステム』が，“安全性の高い運転制御と効率的な保全”を提供できることを示した。これにより、『ATP 閉そくシステム』が、支える“低コスト”で“柔軟”かつ“効率的”な運転が“地方鉄道の競争力”を強め、鉄道交通を核とした新しい地域の再生により、地域の暮らしに組み込まれた“持続可能な存在”として、地方鉄道を蘇らせることができることを明確に示している。

また、第5章では都市鉄道の近代化に対する『UTCS』の効用について、『UTCS』がもつCBTCとしての特徴以外に、相互直通運転との関係や、将来の自動運転への展望について考察した。その結果、相互直通運転には、通信手段と処理系の分離が有効であるが、その意味でも“階層構造”を持つ『UTCS』の有利さが確認できた。自動運転においても、5Gなど適切な通信手段をネットワーク層の要素として選択することにより、現在課題として論じられている在来線の自動運転に有利な局面を切り開けることを明らかにしている。

7. 1. 6 第6章「システム論から見た UTCS」の結論

第6章「システム論から見た UTCS」では、効率的かつ合理的に列車制御を実現するという鉄道システムではなく、一般的なシステム論から見た位置付けについて検討した。検討には、今日のICT利用システム技術の説明が合理的に可能なSafety 2.0の視点から評価することにした。Safety 2.0は産業機械や装置、システムの安全性への配慮が、従事者の注意力に委ねていたSafety 0.0の時代から、安全を司るインターロックや保護装置などを駆使して従事者の注意力欠如が事故に至ることを防止するSafety 1.0そして、ICTの時代に可能となったSafety 2.0に遷移する過程を説明している。

そして、Safety 2.0は協調安全とも呼ばれ、システムを構成する要素が情報交換を行う中で、より高度な安全を確保しようというもので、まさにIoT時代のシステムアーキテクチャでもある。この点で見ると『UTCS』は、Safety 2.0の中でも最も進んだ本質制御の概念を利用していることが明確に確認できている。

さらに、システム論としては交通システムで重要視されている“MaaS”を取り上げ、『UTCS』がMaaSに大きく寄与できるだけでなく、UTCSの概念をMaaSに持ち込むことにより、交通システムの発展にも貢献できることを明確に示した。

7. 1. 7 第7章「結論」

第7章は「結論」として、本論文の各章にわたり、その目的と結論について明確に示した。併せて今後の課題についても明確に示している。

7. 2 今後の課題

“明日の鉄道界”への展望を拓く選択肢の一つとして、申請者は、新たな明日の列車制御を目指す『統合型列車制御システム (UTCS : Unified Train Control System)』そして、その具体的なシステムとして、地方交通線向けの『ATP 閉そくシステム』の開発研究を行ってきた。これは従来の鉄道システムの鉄道インフラが、CTC を含め“柔軟な戦略を立てられない構造的な問題”を有すること。30年以上を経過する電子閉そく装置の老朽化更新に対して、単なる“装置の置換え更新”と捉えていては展望がないこと。さらには“既存の信号機もケーブルも使用できるから、それを利活用した安価なシステム更新”を、という発想は、問題の先送り、経営改善のチャンスを見逃すこととなる選択肢と言わざるを得ない。

現在、我々は戦略的に柔軟な施策を講じられるステージにおり、まさに「鉄道界の変革」を推進する先駆者として対応することが重要と考える。これらの未来を先導する、“ICT”に依存した理想の鉄道システム実現のキーワードは『本質制御』そのものである。

しかしながら、これまでの信号の形態が、大きく変わるものであるため、広くコンセンサスを得て実現・実用化を図るためには、今後なすべき課題もいくつか残されている。その一つとして、3.1 節で前述の通り、『UTCS』における『機能層』に位置する、論理処理部：統合型処理部は、“転てつ機制御”，“踏切制御”，“前方列車位置探索”を一元処理して列車に対する支障点の探索により走行路を確定し、『ネットワーク層』を介して、『端末層』に位置する車上制御装置に送信する新たな概念の構築である。これは既存の集中連動装置や集中踏切装置のような、単純な“独立した装置の集中化”ではなく、センターに“集中・統合化された高性能な高安全システム向け列車制御システム”の構築が要求されることから、この制御論理や駅・路線網に関する“データの一元化”はソフトウェアの比重が、さらに大きくなるとともに、“データベースの大規模化”につながる。従って、システムの“セキュリティ確保”，“拡張時のアシュアランス性”，“冗長化”と高度な“自律分散処理”などの技術施策等が重要性を増す課題と考える^[15]。

また、『ATP 閉そくシステム』の一つの特長として、“既存のインフラの有効活用”がキーとなるが、“汎用携帯無線通信網”を活用することで、新たな設備の導入が不要であり、通信コストも低価格化が進んでおり、これらは保安伝送を置き換える IP ネットワークとして大きなメリットがある。一方でオープンな回線のために、“接続保証が無い”、“セキュリティ上に問題がある”等、汎用携帯無線通信網を“保安伝送”に利用するためには、信頼性向上のための対策が必要となる。

これらの“信頼性”向上の対策として、接続保証がないことに対しては、電波状態の良好な通信地点を限定（離散的通信）して、トンネルなどの電波状態の悪い箇所では通信を行わないこととし、“回線断”が発生しないようにするとともに、仮に回線断が発生しても、システム側で安全を確保するよう考慮する必要がある。しかしながら、“無線”による情報の連続的交信は、アナログ式 ATC の構造規則に引きずられてきたものであり、“安全性上必須”なものではない。このことは、トランスポンダを用いた“離散的な情報授受”で安全性が十分担保されている ATIS-P 形の制御形態からも理解できる^[16]。さらに、情報伝送上の“セキュリティ対策”としては汎用携帯無線通信網をオープンな回線と位置づけ、“データの暗号化”と“IP アドレス”を用いて、相互認証することを考慮する必要がある。また、“通信時間の保障”は、各装置が“GNSS 時刻”に同期して、古いデータは廃棄して“常に最新のデータのみ”使用することで、“通信時間の保証”を確保する必要がある等の課題整理が必要である。

2017 年「鉄道分野における GNSS 利活用ガイドライン」が制定され、制御用途として具備する条件が定義された。これにより“GNSS 測位技術を列車保安制御”へ利用するには、まず TG の補助装置としての位置づけで実用化し、実績による証明を経る必要がある。しかしながら、この実績が評価されれば、近い将来 GNSS を主装置とすることが可能と考える^[22]。今回、開発研究を進めてきた提案の『UTCS』そして『ATP 閉そくシステム』ともシステム構成として、その心臓部と言える“統合型処理部：論理部機能”がセンター集約となることから、センターにおける論理機能断等の障害に際しては、この影響を極力最小にするべく、“高いレジリエンス性”と“高い安全性”を有した“自律分散処理”の機能を考慮する課題整理が重要である^[16]。

いずれにしろ、“IoT 時代”にふさわしい『UTCS』そして『ATP 閉そくシステム』の開発とも、“ICT 技術”を用いた抜本的な「新たな鉄道列車制御システム」

の構築において、今後、我々鉄道信号技術者が挑戦するに値する、的を得た課題・命題であると考えている^[34]。

7. 3 補遺（コロナ禍後の鉄道事業と UTCS）

最後に、新型コロナウイルス禍を経て、鉄道経営そのものが大きく揺れている。社会システムの中で極めて重要な地位を占める鉄道経営に『UTCS』がどのように貢献すべきなのか、今日の事態を踏まえ、『UTCS』の検討グループで行った議論を踏まえた考察結果を付記する。

今後の状況を踏まえ、目指すべき信号システムは輸送需要、運賃収入の減少に対して、“柔軟な列車運行サービス”，さらには“フリークエントサービス（高頻度運転）”を実現させ、鉄道運営コストの大幅な削減が可能なシステムを“低コスト”で提供し、鉄道の活性化を図ることが重要である。これまでの鉄道の安全は、閉そく装置、連動装置、ATS・ATC装置などの、保安度の高い技術で保たれてきた。しかし、CBTCの制御概念を発展させると、鉄道にとって不可欠な、転てつ機、踏切、車両と、“指令”を司るセンター装置を“インターネット”で接続し、相互に情報交換するだけで、“安全な列車制御”が実現できるとの結論に至った。

これが、まさに『統合型列車制御システム（UTCS：Unified Train Control System）』であり、まさに“Post CBTC”のシステムである。センター装置が、“列車の走行位置などの情報を把握”し、現場の踏切、転てつ機を制御し、どこまで安全に走行できるかを“走行路”として列車に伝達すれば、列車の安全な運転・走行が実現できる。この新たに提案する『UTCS』により、既存の連動装置の必要性は無くなるので、駅構内の“1進路1列車”という従来の固定閉そくの束縛から解放され、駅中間と同様に前方列車の20m後位まで走行できる移動閉そくが実現可能になると考えられる。その結果、“列車制御処理”と“伝送系”が分離され、無線技術の進歩を柔軟に享受できるシステムが構築されるほか、“相互直通運転”といった日本の車両共通運用形態にも、適したシステムが生まれることを明らかにした^[16]。また、“位置検知機能”を有した車上装置が常時、“車両の揺れ”，“異音検知”等を行い、その情報を“保守”に生かして、車体動揺のない走行を実現できるようになれば、乗客にやさしい“乗り心地の向上”につながるとともに、列車の“速度向上”にも有効なデータを提供できるメリットが新たに生まれることとなる。これまで、線区の“速度向上”には、踏切制御子の設置位置

を調整する必要があったが、『UTCS』の踏切制御は“踏切制御子無し”で行われるため、速度向上がなされても、適切なタイミングでの“踏切警報制御”が可能となり、安全性向上は、もとより課題となっていた“開かずの踏切”問題も軽減できることとなる。このように、『UTCS』は、まさに進んだ技術を“本質制御”の概念をベースに取捨選択し、質の高い鉄道を生み出し、低コストで鉄道のシステムそのものを変えることが出来る、“Post コロナ”を踏まえた『明日の列車制御システムを目指す Post・CBTC システム』であると言える。

7. 4 第7章の参考文献

- [15] オーム社 日本鉄道電気技術協会編「鉄道信号技術」中村英夫, ほか, 2020-11
- [16] **齊藤嘉久**, 高田哲也, 中村英夫, 「統合型列車制御システムの構成とその効果」電気学会論文誌 TER/マイクロセンサーシステム合同研究会 TER-21-029/MSS-21-022, pp1-6, 2021
- [22] 浅野晃 日本大学理工学研究科博士学位申請論文「列車保安制御システムへの全球測位衛星システム (GNSS) 利用に関する研究」, 2018-9
- [31] **YOSHIHISA SAITO, TETSUYA TAKATA, HIDEO NAKAMURA**, 「INTRINSIC FUNCTION OF CONVENTIONAL RAILWAY INTERLOCK AND FUTURE ASPECT OF INTERLOCK EQUIPMENT AT IOT ERA」 “International Journal of Transport Development and Integration” WIT Press Journals, Volume6, Issue2. pp143-154, 2022.
- [34] JREA Vol.64, No.2, 「巻頭言：時代と共に進む安全の技術と思想」向殿正男, 2021

・謝辞

本研究申請論文とりまとめの、きっかけとなったのは平成30年(2018年)電気学会(IEEJ)において『第74回電気学術振興賞』の『論文賞』, “電気学会論文誌C部門 vol.136. No.7「階層化による列車制御システムの再構築」”を対象として、名誉ある論文賞を受賞出来たことに端を発します。さらに、INTECH OPEN社「Applied Modern Control」への海外投稿論文が、海外の多くの方々から評価を受けたこと、これらが心強い支援となりました。論文執筆にチャレンジするも、本来業務とは、切り離れた論文執筆取りまとめは多々困難もありましたが、頂いた多くの支援に励まされ強い精神力を持って、取り組むことが出来たと思っております。

今般の、本申請論文のとりまとめ執筆にあたっては、本研究の中心的な指導者として、ご指導を賜った、日本大学の中村 英夫名誉教授様には、本論文執筆に際しても技術的観点から適切にご指導、有益なご助言等を賜り、さらには叱咤激励を頂戴し、何とか本研究申請論文として取りまとめることが出来たことに、あらためて深く、深く感謝申し上げます。日本大学 中村 英夫名誉教授様の適切な、ご指導、ご助言がなければ、この申請論文のとりまとめ自体、まったく進められず、このような成果として形を成さなかったことは明白であると思っております。長期間におけるご指導、誠にありがとうございました。

また、本申請論文の日本大学理工学部専攻内説明・公聴会等において、有益なご助言、ご指導を頂きました主査の日本大学理工学部応用情報工学科 高橋 聖教授様、副主査の日本大学理工学部応用情報工学科 吉川 浩教授様、ならびに日本大学 中村 英夫名誉教授様に心から深謝いたします。

さらに、本研究を進めるには、実車試験等が必要不可欠であり、長年にわたる実車試験を快く受け入れて頂いた山形鉄道株式会社殿、路面電車を用いた試験において、ご協力頂いた広島電鉄株式会社殿、試験システムの運転取り扱い確認試験において、ご協力頂いた西日本旅客鉄道株式会社殿、試験システムの長期稼働試験において、ご協力頂いた江ノ島電鉄株式会社殿、さらには補助事業、GNSS研究において、ご指導頂いた(独)交通安全環境研究所殿には、改めて深く感謝申し上げます。加えて本研究はいくつかの委員会の場を経ており、その際に適切かつ、貴重なご指導を賜った国土交通省鉄道局の関係各位殿にも厚く御礼申し上げます。

今般、弊社においては本研究、本申請論文執筆を進めるにあたり、適切な研究環境を整えて頂き、ご指導を頂いた(株)京三製作所の戸子台会長、國澤社長、そして、論文編集にあたり、多大なサポートを頂いた R&D センター竹内俊裕さん、ならびに信号事業部の関係者各位に深く感謝いたします。さらに、本研究に関して現在も高い志を持って継続して、鉄道事業者殿への導入、製品化を目指すべく、日々努力している(株)京三製作所の信号事業部 技術部関係技術者各位に、あらためてここに深く感謝するとともに、この研究の中心的な存在であった、(故)浅野晃君、そして、本研究開発の良き理解者で、ご支援を頂いた(元)鉄道総合技術研究所理事長(故)秋田雄志様のご冥福を心より、お祈り申し上げます。

最後に本申請論文執筆の、ほとんどの時間は帰宅後の夜間・早朝そして、週末の家庭における長期間のとりまとめとなりましたが、これに際しても、その環境づくりから対応等含め温かく見守り、時には熱くバックアップしてくれた妻(まさみ)と長男(優太)にも、ここに深く感謝致します。ありがとうございました。

『感謝』

参考文献（第1章～第7章&付録）一覧

- [1] 日本鉄道電気技術協会 秋田雄志, ほか, 「鉄道信号」, 2015-1
- [2] 電気学会論文誌 C 部門 vol136, No.7, 「階層化による列車制御システムの再構築」 齊藤嘉久, ほか, 2016-7
- [3] 平成 27 年 電気学会電子・情報・システム部門大会 IEE 論文番号 TC9-6 (長崎) 「階層化による列車制御システムの再構築」 齊藤嘉久, ほか, 2015-8
- [4] 国土交通省鉄道局監修 電気関係技術基準調査研究会編「鉄道に関する技術上の基準を定める省令（技術基準省令）」, 2002-3
- [5] オーム社「鉄道信号・保安システムがわかる本」中村英夫編著, 2012-5
- [6] オーム社「列車制御-安全・高密度運転を支える技術」中村英夫編著, 2011-2
- [7] 信号保安協会「ATS-国鉄・民鉄方式の詳説」1.3 ATS の開発経緯, 1973
- [8] 鉄道総研報告 Vol.15 No.1 「バリス式列車検知装置(COMBAT)の開発」西堀典幸, ほか, pp17-22, 2001-1
- [9] J-RAIL2010 講演論文集 S7-1-4 「閑散線区向け拠点無線式列車制御システムの開発」平栗滋人, ほか, 2010
- [10] 電気学会全国大会 S22-5 「地方鉄道線区の経営改善スキーム」中村英夫, ほか, 2008
- [11] J-RAIL2010 講演論文集「地方交通線向け列車制御システムの開発」S7-1-5 安西 理, ほか, 2010
- [12] JREA Vol.58 No.58 「ATACS の踏切制御機能使用開始」山崎勇, ほか, 2010
- [13] KYOSAN CIRCULAR 2018, Vol.69, No.1, 「無線式列車制御システム(CBTC)の開発」水野健司, ほか, 2018-1
- [14] 鉄道車両と技術 Vol.17 No.9 「日本信号における無線式 CBTC システム(SPARCS)の海外展開」八木誠, ほか, 2011
- [15] オーム社 日本鉄道電気技術協会編「鉄道信号技術」中村英夫, ほか, 2020-11

- [16] 齊藤嘉久, 高田哲也, 中村英夫, 「統合型列車制御システムの構成とその効果」電気学会論文誌 TER/マイクロセンサーシステム合同研究会 TER-21-029/MSS-21-022, pp1-6, 2021
- [17] 芸文社「日本レールバス大全-国産軽量気動車のすべて」齊籐幹雄, ほか, 2010
- [18] 国土交通省「デュアル・モード・ビークル(DMV)に関する技術評価検討会」, 2015-10
- [19] 国土交通省「軌間可変(フリーゲージトレイン)技術評価委員会」, 2018-3
- [20] 鉄道総研報告「CARAT に関する研究成果を概観する」 Vol.7 , No.5, 中村英夫, ほか,1993
- [21] 日本鉄道サイバネティクス協議会 第 30 回鉄道・サイバネシンポジウム 317 「CARAT 用電子連動装置の開発」 中村英夫, ほか, 1993
- [22] 浅野晃 日本大学理工学研究科博士学位申請論文「列車保安制御システムへの全球測位衛星システム (GNSS) 利用に関する研究」, 2018-9
- [23] JR 東日本「GNSS・携帯無線活用し列車制御 走行試験を報道公開」, 2021-2-1, 交通新聞プレス発表
- [24] KYOSAN PRODUCTS INFORMATION 製品情報誌, Vol.11, 2020
- [25] 京三サーキュラーVol.66 No.1「ATP 閉そくシステム試験完了のお知らせ」 中村英夫, ほか, 2015
- [26] 京三サーキュラー誌 Vol.66, No.1, 2015, 「統合型列車制御システム: 列車制御システムの新たな方向」 浅野晃, 高田哲也, 中村英夫, 2015
- [27] 電子情報通信学会 IEICE Technical Report SSS2016-5 信学技報 「統合型列車制御システムの構成と安全性」 齊藤嘉久, ほか, 2016-5
- [28] 信号セミナー講演予稿「デジタル伝送技術を応用した新幹線 ATC システム(DS-ATC)の開発」 中村英夫, ほか, 2001
- [29] JREA, Vol.50 No.9 「プローブ車両用信号設備計測技術の開発」 中村英夫, ほか, 2007
- [30] 3rd Asia-Pacific Control Command and Signalling(CCS) Workshop, No.3 「Advances in Signalling Systems and the Outlook for Next-Generation Train Control Systems in Japan」 H. NAKAMURA, 2014-10

- [31] **YOSHIHISA SAITO**, TETSUYA TAKATA, HIDEO NAKAMURA,
「INTRINSIC FUNCTION OF CONVENTIONAL RAILWAY
INTERLOCK AND FUTURE ASPECT OF INTERLOCK
EQUIPMENT AT IOT ERA」 “International Journal of Transport
Development and Integration” WIT Press Journals, Volume 6, Issue2,
pp143-154, 2022.
- [32] 鉄道分野における GNSS 利活用ガイドライン検討委員会編（座長：中村
英夫）「鉄道分野における GNSS 利活用ガイドライン」（第 1 版）,
2017-3
- [33] 京三サーキュラー誌 Vol.65, No.1, 「列車制御システムへの汎用技術の利
用—ATP 閉そくシステムの要素技術」 浅野晃, ほか, 2014
- [34] JREA Vol.64, No.2, 「巻頭言：時代と共に進む安全の技術と思想」
向殿正男, 2021
- [35] 工学院大学オープンカレッジ講演会資料「鉄道信号システムの近未来像」
中村英夫, 2018-2
- [36] 「鉄道信号における信頼性と安全性」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, 山本正宣, 高橋聖, 中村英
夫, 106,402, pp.23-29, 2006.12

申請者発表業績論文等の一覧

(A). 審査（査読）付き論文

- (1) 齊藤嘉久, 浅野晃, 中村英夫, 望月寛, 高橋聖, 「階層化による列車制御システムの再構築」電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌) Vol.136, No.7, pp923-928, 2016-7 → 「電気学会 第 74 回電気学術振興賞」・『論文賞』受賞
- (2) Yoshihisa SAITO, Akira ASANO, Hideo NAKAMURA, Sei TAKAHASHI, 「A Proposal for the Design of Integrated Train Control Systems Capable of Improving Reliability and Safety」The Third International Conference on Railway Technology : Research, Development and Maintenance, Civil-Comp Press, paper70, 2016-4
- (3) YOSHIHISA SAITO, TETSUYA TAKATA, HIDEO NAKAMURA, 「INTRINSIC FUNCTION OF CONVENTIONAL RAILWAY INTERLOCK AND FUTURE ASPECT OF INTERLOCK EQUIPMENT AT IOT ERA」 “International Journal of Transport Development and Integration” WIT Press Journals, Volume6, Issue2, pp143-154, 2022
- (4) 中村英夫, 齊藤嘉久, 浅野晃, 「列車制御システムの安全性・信頼性向上のためのアプローチ」信頼性学会論文(REAJ)誌, Vol.37, NO.5, 通巻 225 号, pp228-232, 2015-9
- (5) 織原幸一, 齊藤嘉久, 中村英夫, 押立貴志, 「鉄道信号における安全性・信頼性技術の変遷」日本信頼性学会論文誌, 信頼性 Vol.39(4), pp191-199, 2017-7
- (6) Hideo NAKAMURA, Yoshihsia SAITO, 「Study on a New Train Control Systems in the IoT Era : From the Viewpoint of Safety 2.0」INTECH OPEN, Applied Modern Control, published in London, UK, pp3-14, 2019-3
- (7) Hiroyuki HORI, Yasuhiro SATO, Hiroyuki OHNO, Hitoshi TSUNASHIMA, Yoshihisa SAITO, 「Development of Compact Size Onboard Device for Condition Monitoring of Railway Tracks」 Journal of

Mechanical Systems for Transportation and Logistics, 6(2), pp142-149,
2013-12

(B). その他論文

- (1) 齊藤嘉久, 高田哲也, 中村英夫, 「統合型列車制御システムの構成とその効果」電気学会論文誌 TER 技術研究会 TER-21-029/MSS-21-022, pp1-6, 2021
- (2) 齊藤嘉久, 電気学会, IEEJ Industry Applications Society News Letter, D 部門, 「Technical Development Report:技術開発レポート:階層化による列車制御システムの再構築」The Institute of Electrical Engineers of Japan, 2019-6
- (3) 中村英夫, 齊藤嘉久, 「巻頭言:明日の列車制御を目指して(対談)」日本鉄道技術協会 JREA 誌 Vol.63, No.8, pp2-7, 2020-8
- (4) 齊藤嘉久, 「主讲題目:総合型列車控制系统」2017年西南交通大学峨眉校区高层教师学术论坛学术报告会(2017年西南交通大学峨眉キャンパスハイレベル教師学術フォーラム学術特別講演会), pp1-28, 2017-3-22
- (5) 中村英夫(委員長), 齊藤嘉久(副委員長), 押立貴志, 山本正則, 佐野実, ほか「鉄道信号の礎」信号工業協会編 鉄道の安全性・信頼性研究委員会, pp1-323, 2017-1
- (6) Takeshi MIZUMA, Yoshihisa SAITO, Hideo NAKAMURA, Sei TAKAHASHI, & Hitoshi TUNASHIMA, 1st Nihon Univ.-Rangsit Univ. Symposium On Railway Systems Technology, 「Technical Forecasts of Future Railways and Signalling Systems」 Rangsit Univ., Thailand, 2016-3-14
- (7) 齊藤嘉久, 浅野晃, 中村英夫, 望月寛, 高橋聖, 「階層化による列車制御システムの再構築」平成27年電気学会C部門(電子・情報・システム部門)大会(長崎), 2015 IEE 論文番号 TC9-6, 2015-8
- (8) 齊藤嘉久, 浅野晃, 中村英夫, 高橋聖, 望月寛, 「統合型列車制御システムの構成と安全性」電子情報通信学会論文誌 信学技報 116(42), IEICE, SSS2016-5, pp19-22, 2016-5
- (9) 齊藤嘉久, 高田哲也, (2016). 「軌道維護管理運用車載感應器之大數據分析」, 2016 鐵路與公路工程創新發展研討會.

- (10) 高田哲也, 齊藤嘉久, (2015). 「致力於新世代列車控制系統開發及實踐」, 2015 國際鐵路工程創新發展研討會.
- (11) 齊藤嘉久, 高田哲也, 風間洋, (2014). 「未來交通管理系統的新展望」, 2014 軌道工程建設之挑戰與創新發展研討會.
- (12) 齊藤嘉久(プロジェクトリーダー), 「可搬型レール状態診断装置の高性能化」, 文部科学省, 研究成果最適展開支援プログラム・フイージビリティスタディス-ステージ (シーズ顕在化タイプ) 完了報告様式 2-1, AS2311267B, 2012-9-30
- (13) 小林尊仁, 綱島均, 森裕貴, 竹内俊裕, 佐藤安弘, 大野寛之, 齊藤嘉久, 「可搬型プローブ装置を用いた軌道の状態監視に関する研究」 第 19 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2012) 論文集, 2012(19), pp623-627, 2012-12
- (14) 森裕貴, 佐藤安弘, 大野寛之, 竹内俊裕, 小林尊仁, 綱島均, 齊藤嘉久, 「小型レール状態診断装置の開発」 第 19 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2012) 論文集, 2012(19), pp197-200, 2012-12
- (15) 森裕貴, 佐藤安弘, 大野寛之, 竹内俊裕, 小林尊仁, 綱島均, 齊藤嘉久, 「小型レール状態診断装置の開発」 アドバンティ・シンポジウム (ADVANTY2012), 2012
- (16) 水間毅, 桑原正秋, 齊藤嘉久, 「AUGT (自動運転システムの安全性要件) 規格の動向」 電気学会, 研究会論文, TER/交通・電気鉄道研究会, 2008(38), pp11-16, 2008-10
- (17) 水間毅, 齊藤嘉久, 桑原正秋, 「自動運転における安全性解析について」, 電子情報通信学会, 技術研究論文, DC ディペンダブルコンピューティング, 105(458), pp25-28, 2005-12
- (18) 水間毅, 桑原正秋, 齊藤嘉久, 「AUGT(自動運転)規格に関する動向と今後の展望」, 電気学会, 研究会論文, TER/交通・電気鉄道研究会, 2005(55), pp75-80, 2005-10
- (19) 山本正宣, 竹村喜市, 奥谷民雄, 浦壁俊光, 竹内寛人, 佐藤公一, 齊藤嘉久, 道場俊文, ほか, 「電気鉄道用語の整合性: 信号分野」 電気学会論文誌 D, (TER/交通・電気鉄道研究会編), 2005(55), 2005-10
- (20) 白土義男, 齊藤嘉久, 島添敏之, 「IEC 規格と鉄道信号 (IEC Standards Concerning with Railway Signalling System of Japan)」 KYOSAN CIRCULAR 誌, 一般論文, 2003, Vol.54, No.5, pp1-12, 2003

- (21) K.IWATA,I.WATANABE,Y.HIRAO,H.HIRAGURI,H.NAKAMURA,&
Y.SAITO, 「Study on Quantitative Evaluation Methodss for Safety of
Railway Signalling Systems」 International Symposium on Speed-up and
Service Technology for Railway and Maglev Systems 2003, (STECH'03),
2003.8.19-22, Tokyo, JAPAN
- (22) 岩田浩司, 渡辺郁夫, 平栗滋人, 平尾裕司, 中村英夫, 齊藤嘉久, 「鉄道信号
の安全性技術の定量的評価手法に関する考察：信号技術者へのアンケート
調査による定量化」電子情報通信学会 技術研究報告論文, DC, ディペンダ
ブルコンピューティング, 102(492), pp31-37, 2002-11
- (23) 渡辺郁夫, 平尾裕司, 中村英夫, 齊藤嘉久, 「安全性技術の定量的評価手法
に関する考察」信学技報, FTS2001-74, pp41-47, 2001-12
- (C). 電気気学会 「第 74 回電気学術振興賞」・『論文賞』表彰対象論文
- (1) 齊藤嘉久, 浅野晃, 中村英夫, 望月寛, 高橋聖, 「階層化による列車制御シ
ステムの再構築」電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌) Vol.136,
No.7, pp923-928, 2016-7

その他【付録】

【付録 1】 閉そく装置

【付録 2】 連動装置

【付録 3】 ATP (ATS・ATC) 装置

【付録 4】 踏切保安装置

【付録1：閉そく装置】

1. 単線閉そく方式（装置）

1. 1 スタッフ閉そく式

スタッフ閉そく式は、“スタッフ”を携行した列車の運転士のみが、その駅間を運転できる方式のことである。駅間毎にスタッフを設定すれば、確実な“単線閉そく制御”が実現出来る。この方式は駅間に何ら通信手段を用いること無く実現出来るが、一方駅間を交互に運転することが前提となっていた。スタッフは通行権を意味するシンボルで、棒状の金具（スタッフ：Staff）やタブレットが用いられる。現在でも、折り返し駅などの閉そく方法として用いられている。

1. 2 票券閉そく式

スタッフ閉そく式は、駅間の同一方向に続行列車を運転させることが出来ないという制約であった。この制約を解放し、駅長が発行した“通行票”を携行すれば、次々と運転できるようにした方式が“票券閉そく式”である。

票券閉そく式では、通行票の発行権利を有した駅長が通行票を発行すれば、何本でも続行列車を出発させることが出来る方式である。そして、同一方向に運転する最後の列車の運転士が、通行票ではなく“通票（タブレット）”を携行することとなっており、タブレットは票券を納めた箱（票券箱）を開ける鍵の役割をしており、タブレットを所有する一方の駅からしか、票券を発行できないようにして、反対側の駅からの出発抑止を実現している。

また、続行列車を出発させる際には、隣接駅駅長との間で電話による到着確認を行うことで列車の間隔制御を行っていた。しかしながら、列車の運行順序を変更する場合にタブレットを反対側の駅まで別手段の陸送をしなければならないなどの制約があり、「通票閉そく式」に順次置き換えられていった。

1. 3 通票閉そく式（タブレット閉そく式）

通票閉そく式（タブレット閉そく式）では、閉そく区間の両端の駅にタブレット閉そく装置（通票閉そく器）を設置し、両方の駅の駅長が確認を取り合いながら通票閉そく器を取り扱うことで一つの“通票（タブレット）”を取り出し、このタブレットの交換で運転方向の制御を行う方式である。タブレットを携行した運転士が次の駅に到着し、タブレットを駅長に渡す。列車到着後、直ちに対向列車

を進出させる場合にはタブレット（通票）の折り返し使用が認められていて、タブレットを通票閉そく器に戻すことなく、対向列車の運転士に渡せば良い方式となっている。

通票閉そく器の中には複数のタブレットが収納されている。同一方向に続行運転をする時には、通票閉そく器からタブレットを取り出して携行させれば良いが、駅間に1列車しか在線させないために、到着した列車からタブレットを受け取った駅長が、隣の駅の駅長と相互に取り扱いを行い、そのタブレットを通票閉そく器に入れ戻した後でないと、タブレットは取り出せない。この間の取り扱いとして、閉そくの相手となる駅長と打ち合わせ→タブレット取り出し→当該列車の運転士に授受→当該列車携行→当該列車運転士より授受→出発駅の駅長と連絡打ち合わせ→タブレット収納、という一連の取り扱い動作が定められている。列車が自駅に到着し、タブレットを通票閉そく器に戻さない限り、新たなタブレットを取り出せないため、票券式の電話による到着確認より確実であり、安全性が高い。両駅の通票閉そく器は一对（2本）の閉そく回線で結ばれていた。タブレット閉そく式は“機械式単線閉そく”として普及したが、反対側の列車が離れた番線に在線している場合や吹雪の時などには、タブレットの授受が容易でないという問題があった。

1. 4 連動閉そく式

タブレット閉そく式では、転てつ機が所定の方向に転換された進路が確保されている時に信号機に進行を示すよう連鎖が施されていた。しかしながら、駅間の閉そく確保は“通票閉そく器”を用いて独立に行われ、運転士はタブレットの携行と信号機の確認が必要とされていた。これに対して、駅間の列車在線を“軌道回路”で検知し、駅間の列車在線が無いことを条件に、駅長が隣の駅との間で閉そくを確保して出発信号機に反映させる連動閉そく式が登場した。連動閉そく式の下では、運転士は信号現示を確認するだけで、閉そくが確保されていることと、進路が開通していることを確認出来た。仕組みとしては、軌道回路で駅間の列車を検知し、これを閉そくに反映、両駅の駅長の作業で運転方向を決定、駅間閉そくと進路設定のOKで信号機が進行現示、運転士は信号現示を確認して出発すれば良い方式となっている。

1. 5 連査閉そく式

連査閉そく式は、連動閉そく式と同様に出発信号機に閉そく信号機の機能を与えている方式で、連動閉そく式とは異なり、軌道回路は両端の駅の場合信号機の近傍に、二つの“短小軌道回路（閉電路型の OT と開電路型の CT）”を設置するだけで、駅間の軌道回路は必要ない方式である。駅間の在線は、OT/CT の動作を下に、閉そく区間への進入、進出検知を判断している。駅相互の扱いは、両駅の“連査閉そく機”を用いて連動閉そく式と、ほとんど同じ操作を行う。原理的には、列車分離により駅中間に遺留車両がある場合、事故に至る懸念が、ある等の弱点を抱えていた。

1. 6 単線自動閉そく式

単線自動閉そくシステムの中で安全性・機能性に優れたシステムとして導入され、CTC 導入時の基本的なインフラと位置づけられたものが、「単線自動閉そく式」である。この方式は両駅の駅長が相互に打ち合わせを行い、最初に列車進入側（受け入れる側）の駅長が、“方向てこ”を受け側に取り扱い、次に出発側駅で駅長が“運転方向てこ”を出し側に扱うことによって、“運転方向リレー回路”が動作し、運転方向が設定される。運転方向が設定されれば、運転方向と逆になる駅間の信号機は全て停止現示となる。また、運転方向と同一方向の駅間の閉そく信号機は複線区間の閉そく信号機と同様に列車の移動に伴って自動的に制御される。従って、単線自動閉そくの下では、安全性を損なうことはなく続行列車の運転も問題なく可能となる。

単線自動閉そく式は、列車の運転方向を設定するための運転方向てこ、運転方向リレー回路、運転方向回線、駅間の軌道回路と信号機から構成されている。なお、単線自動閉そくを実現する方向回線は、3本の線のみで処理を行っている。列車密度の低い線区では、駅間を“1閉そくとする単線自動閉そく”が用いられた。その際の列車検知には、長大軌道回路を用いている。この方式は、単線自動閉そく（特殊）と呼ばれている。なお、単線自動閉そく式を“自動 A”と呼び、駅間 1 閉そくの単線自動閉そく（特殊）を“自動 B”と識別して呼ぶことがある。

1. 7 特殊自動閉そく式（軌道回路検知式）

低コストで CTC 化を進めるためには、駅間に軌道回路を設けず、連査閉そく式と同様に、駅の入り口に設けた“OT/CT”の軌道回路の変化で列車在線を検出す

る方式が考案された。閉そく取り扱いの機能のみならず，誤出発検知や退行運転の機能を有し，この時に使用する閉そくの解除用のボタンも備えている。論理部を上り方と下り方に二分し，それぞれハットとして工場内で製作し，現場に搬入するなど，徹底したコスト削減の努力が成されている。この方式は継電式でコスト削減を意図した究極の装置であったが，さらに低コストを図った“電子閉そく式”が開発するに及び，特殊自動閉そく（軌道回路検知式）として，整理された経緯がある。

1. 8 特殊自動閉そく式（電子符号照査式）-電子閉そく式

単線自動閉そくに代わる低コストなシステムとして開発され，JR 移行を，にらみ機械式の閉そく装置の代替システムとして 1986 年に 20 線区に導入された。システムは，運転士に出発要求押しボタン扱いという処理の一端を行わせることで，CTC 化せずとも，駅の信号扱いの無人化を実現した。また，“車載器と駅装置（FS コンピュータ）”間の情報交換に“無線”を用いた他，両駅間の閉そく処理には“車載器番号”をキーとして用いるなど，先進的な内容を含んだシステムであった。

電子閉そくの処理の流れは次のようになる。

- ①. 運転士は乗務時に特定番号を発信する車載器を満ち，運転台にセットする。
- ②. 出発時には，運転席の出発要求押しボタンを運転士が押す。その結果，車載器番号が駅装置（FS コンピュータ）に読み取られ，次駅の駅装置との間で車載器番号を用いた閉そくが制御される。
- ③. 閉そくが確保されると駅装置は，出発信号機を進行現示にする。
- ④. 出発信号に従い，列車が進行し，駅構内を進出して一定時間経過すると自駅の場内信号機に進行信号を現示する。
- ⑤. 列車が次駅構内に入ると，駅装置からのポーリングに応じて車載器番号が自動的に読み取られ，閉そくを設定した番号と照査される。一致時には到着完了として，両駅の駅装置間で情報を交換し，閉そくを解除する。

1. 9 次世代の単線自動閉そくシステム

1986 年に導入された“電子閉そく装置”が老朽更新時期を迎え，2010 年代に入り，その代替システムとして，より経済的なシステムを目指した技術開発が行われた。電子閉そく装置は両駅のコンピュータが相互に通信を行い，排他的に閉そくを確保していたが，閉そくの付与を“センター装置に一元化”出来れば，“排

他制御”は相互の通信が無くとも自動的に行える。また、センターからの閉そく許可をもって、閉そく境界地点までの“速度照査パターン”を車上で自動生成すれば、ATSも実現出来る。この考えに依拠したものが『ATP閉そくシステム』である。一方、現状からの極端な変更を回避して、現場に既にある信号機やケーブルを有効活用して高度な機能を実現しようとする考え方で、“拠点無線式列車制御システム”が、さらに、ATACSで培った技術を導入して、今後予想される“無線”による列車制御システムとの親和性を重視する考え方に従った、地方交通線向けシステムなど、それぞれの立場からの開発が現在行われて来ている^[1]。

【付録 2：連動装置】

(1). 連動装置の種類

連動装置は、信号機、入換標識及び転てつ機の連鎖を行う装置によって、次の2種類に大別される。

- ・第1種連動装置
- ・第2種連動装置

第1種連動装置とは信号機、入換標識と、てこを集中した転てつ機との連鎖を第1種連動装置によって制御する装置である。

第2種連動装置とは信号機、入換標識等と現場扱いの転てつ機との相互間の連鎖を電気鎖錠器又は電磁転てつ機等によって行う装置である信号機の信号現示を制御するために、軌道回路によって連続的に行われるもの「甲」、一部分のみしか行われぬもの「乙」、全く軌道回路によって制御されないもの「丙」等の種類に分類され、これらを保安度の高い上位のものより、“甲・乙・丙”の区別をつけている。このように、様々な連動装置の方式・保安度が分かるようにするため、連動装置の種別は図1のように分類整理できる^[1]。



図1 連動装置の種別

第1種連動装置“電子”，“継電”，“電気”においては、軌道回路によって連続制御されるのが通例であるので“甲・乙・丙”の区別は省略されている。この他、第1種連動装置あるいは第2種連動装置以外で、電気鎖錠等による簡易な連鎖を有するものを、第3種連動装置として区分しているが、法規上の公式的なもので

はない。機械連動装置とは信号機、転てつ機などの相互間の連鎖と制御を、機械てこを用いて機械的に行うものである。現在でも、一部のローカル線区にのみ残っており、機械連動装置には、“第1種と第2種”がある。

(a). 第1種連動装置の種類

①. 第1種電子連動装置

第1種電子連動装置は、信号及び転てつてこを集中した表示制御盤と処理装置により、“コンピュータ”を用いて、連鎖を行う装置である。

②. 第1種継電連動装置

第1種継電連動装置は、信号及び転てつてこを集中した制御盤とリレー群により、連鎖を電氣的に行う装置をいう。さらに第1種連動装置は構成される、リレー回路の方式から“進路てこ式、進路選別式”などに区分される。

③. 第1種電気連動装置

第1種電気連動装置は、電気てこ（信号・転てつ）を集中した第1種電気連動機により、連鎖を電気及び機械的に行う装置である。

④. 第1種機械連動装置

第1種機械連動装置は、上記の連動装置が普及する以前、多数の転てつ機があるような大きな駅構内に設けられた装置である。信号及び転てつてこは機械てこを用い、1箇所集中される機械てこ相互間の連鎖は、各種の”駒装置”を使って機械的に行われていた。現在では、歴史的な”遺産”と言える装置となっている。

(b). 第2種連動装置の種類

①. 第2種電子連動装置

第2種電子連動装置は、信号てこを集中した表示制御盤と処理装置により、電気鎖錠器または電磁転てつ鎖錠器付き転てつてこ間の連鎖に関して、コンピュータを、用いて行う装置である。

②. 第2種継電連動装置

第2種継電連動装置は、信号機、入換標識などのてこを集中し、現場扱いの転てつ機（レバー）には電気鎖錠器を、発条転てつ機には電磁転てつ鎖錠器を設けて、これらの相互の連鎖を、リレーと鎖錠器で行う装置をいう。

③. 第2種電気連動装置

第2種電気連動装置は、卓上電気てこ（信号・転てつ）と電気鎖錠器、または電磁転てつ鎖錠器付き転てつてこ間の連鎖を電氣的に行う装置をいう。

④. 第 2 種機械連動装置

第 2 種機械連動装置は、比較的閑散な構内に設備され、信号機と転てつ機相互間の連鎖は、主として第 2 種連動機によって行われるが、この他に信号てこ相互間の連鎖は、第 2 種連動機を介して行うものと、信号てこに取り付けられた”駒装置”で、“てこ連鎖”を行う装置をいう^[1].

(2). 継電連動装置

信号機、入換標識を電気によって制御し、転てつ機の転換は電気により、転換させるとともに軌道回路の状態を入力し、これら相互間の連鎖を制御盤とリレー群を組み合わせた継電連動機によって行う連動装置である。様々な、鎖錠論理が接点論理で実現出来、高度な保安機能が実現したばかりではなく機械的要素が無いために設置場所の制約も無くなった。

信号システムの近代化に不可欠の装置として導入され、今日でも多くの駅で主流の位置を占める連動装置である。

(3). 電子連動装置

電子連動装置は継電連動装置の論理を“ソフトウェア”で実現するもので、コンピュータの故障に対する安全性の保障やソフトウェアのバグの懸念に対する課題を克服し、実績ある継電連動装置の後継機として開発された。我が国で本格的な電子連動装置として 1985 年に実用化されたシステム『SMILE：(電子連動装置 1 形)』は、連動機能に留まらず、大規模駅構内の“進路制御自動化機能：(WARC)”の機能も取り込んだ画期的なシステムであった。それまでの PRC(Program Route Control)が、線区単位のシステムであったものに対して、電子連動導入駅のための PRC 機能であり、“駅分散 PRC”の嚆矢となった。この、“SMILE”は当時の国鉄 東神奈川駅に 1 号機として導入された以降、新宿駅をはじめとする、日本全国の進路数の多い大駅（ターミナル駅）である”拠点駅”に順次導入されていった経緯がある^[5].

(a). 各鉄道事業者の主な電子連動装置例

各鉄道事業者に導入されている、既の実績のある代表的な電子連動装置の概要を、以下に述べる。

①. 汎用型電子連動装置（JR 東日本の例）

JR 東日本では、各方式の電子連動装置が導入されているが、その中でも多くの駅に導入されている汎用型電子連動装置についての、一例を以下に示す。

(i). 東京圏（ATOS）線区用の電子連動装置

“ATOS”の制御面の要として開発された電子連動装置である。

CTC化が進んでいた地方線区や新幹線と比べ、屈指の高密度線区である東京圏において近代化が遅れていたのは、制御応答時間、大駅対応問題、保守作業の管理等などの課題が多数あったからである。この解決のためには、最新のコンピュータ技術の導入を要すると考えられた。また、当時、一部で挿入されていた電子連動装置では、フェールセーフ性を“専用ハードウェア”に依存しているため、プロセッサの性能向上に追従できず、結果として最新技術の導入が難しい状況であった。

このため、“専用ハードウェア”を極力排除し、“汎用ハードウェア”をベースにした電子連動装置の開発を行うこととなった経緯がある。汎用ハードウェアをベースとして“フェールセーフ性”を実現するため、ATOS形電子連動装置では、三重系構成とした汎用コンピュータを並列稼働させ、三重系間相互にデータ交換を行い、多数決論理により出力を決定する方式を採用している。さらに、外部に専用ハードで構成された照合回路を設け、故障診断、出力系選択を行い、汎用コンピュータの使用による処理性向上を図ると同時に、“フェールセーフ性”の確保を実現している。また、新しい“アルゴリズム（軌道回路予約方式）”により、直接連動機能を実現する方式を採用している。さらに、駅毎に駅PRC装置を持つ構成とし、中央装置から受信したダイヤデータにより、各駅で進路制御を行う方式を採用、駅・中央間での表示・制御情報伝送に関する遅延を排除して、制御応答時間の大幅な短縮を図っている。さらに、大駅対応問題や連動検査の自動化も図られている。

(ii). 一般線区（主に CTC 線区）用の電子連動装置

JR 東日本では一般線区用電子連動装置として、“小駅用”、“中・大規模駅用”、“極小駅用”の3タイプの電子連動装置がある。

“一般線区小駅用電子連動装置”は、ATOS区間にて開発の進められた汎用型電子連動装置を、一般線区（主に CTC 線区）の小駅に適用するため、小型化、コスト削減をコンセプトとして“202形”の開発がなされた。その主な特徴として、

- ※ 連動架には連動処理部に加えて CTC 伝送部を内蔵
- ※ 連動端末・保守端末には汎用形パソコンを採用
- ※ 現場機器とのインタフェース部には信号用リレーを適用

対応できる入出力点数は、128～192 点と形式により違いはあるが、“32 進路以下の駅”をターゲットとしている。機器構成にあたっては、汎用製品（汎用プログラマブルコントローラーによる連動系、イーサネットによる連動端末などとの接続を実現）の適用を考慮している。

また、“一般線区中・大規模駅用電子連動装置”は、汎用型電子連動装置を、一般線区用の中規模駅に適用するために、“201 形”、“501 形”の開発が行われている。

その主な特徴として、

- ※ 複数の CTC 伝送部とのインタフェースを実現
- ※ 連動端末を複数台適用可能
- ※ 現場機器とのインタフェース部には“信号機器コントローラ”を採用

大規模駅の運転取扱業務を軽減させるため、ATOS 区間用の進路制御系を踏襲し、自動進路制御機能を有する装置の開発がなされている。自動進路制御に必要な列車ダイヤについては、輸送総合システムからの基本ダイヤを電子連動装置に入力することにより、実施ダイヤの作成できる“221 形”電子連動装置の開発がなされた。

さらに汎用型電子連動装置を、一般線区の“極小駅”に適用するため、主に現地試験における試験の簡素化をコンセプトとして「702 形」の“一般線区極小駅用電子連動装置”が開発されている。コンセプトは下記の通りである。

- ※ 信号用ハットに電子連動装置およびリレー架などを内蔵
- ※ 連動端末をパネル化（補助制御盤）
- ※ 連動処理部の冗長化見直し（二重系構成）

入出力点数は、入出力ボードの組合せにより決定されるが、12 進路以下の極小駅をターゲットとしている。

②. LD 形電子連動装置（JR 東海の例）

JR 東海では、電子連動装置仕様として“結線図論理処理方式”を中心に導入が進められてきている。JR 東海仕様の電子連動装置“LD-1 形”は、以下をコンセプトとして、“電子連動装置 1 形、2 形の後継機種”が開発・導入されている。

- ※ 内部処理の明確化及び、社内技術力維持向上を目的に結線論理方式を採用
- ※ 従来の電子連動装置の弱点（処理速度、冗長構成等）の改善
- ※ 装置構成の共通化，シンプル化
- ※ 設計のシンプル化，保守のシンプル化，連動変更作業容易性向上
- ※ 駅規模に合わせた容易な拡張性
- ※ 在来線・新幹線への適用

これにより，電子連動装置“LD-2形”は，LD-1形をベースに在来線の中・小規模駅用としてコストダウンを図っている．新幹線の電子連動装置 LD-1 形について下記に説明する．“Ei-W(Wire)”と呼ばれる“FS 光 LAN”を介して，機能分担された各論理部が接続される．この論理部は，進路数，結線量などに応じて増設が可能であり，各駅連動規模に合わせて設備することが出来る．

前述の通り，連動結線の社内技術力維持向上を目的に，“結線論理処理方式”を採用しているが，これをサポートするために，LD 形電子連動装置では，“結線入力装置”を設けている．“結線図作成補助ツール，結線入力ツール”で構成され，連動図表から参考結線データの作成，および直接結線データの作成・修正を支援している．

従来の信号の根幹を成す“連動結線図をベースとする入力方式”は信号エンジニアにとって，基本中の基本であり，最重要な結線図をベースとする入力処理方式は信号技術者育成と技術の伝承にとって最適な方式といえる．従来の電子連動装置と同様に，連動機能，現場機器制御機能，列車追跡機能等を有している．特徴としては，変更時に各論理部にデータ配信することで連動変更を可能とし，連動変更の作業容易性向上を図ったことと，各種分析，試験作業軽減が可能なように監視機能，モニタ機能，試験機能を充実させている．

③. 1P 形電子連動装置（JR 西日本の例）

JR 西日本の電子連動装置は，在来線大駅対応として，“PRIME 形”をベースにした“1P 形”，中小駅用に“4 形”，新幹線用に“1P-S 形”の型式名称に統一しているが，その仕様については変わって来ている．JR 西日本において，山陽新幹線信号保安設備の CTC・連動システムの設備更新に合わせて，1994 年 4 月から 1996 年 3 月にかけて開発・導入したものである．その特徴は 1993 年 3 月に設備更新した ATC システム（のぞみ 270Km/h 営業運転対応）にリンクすることと，“並列二重系システム”を基本としたことにある．32 ビット CPU 搭載の処理部と，

フェールセーフ光 LAN (100M) で完全な並列二重系構成により、高い安全性および信頼性を実現している。

処理部は 7 つの機能 (連動・ATC/CTC・列番・現場機器・モニタ・連動制御盤・自動制御) を設けることで、処理のシンプル性と高速性を可能としている。

連動処理方式は“連動論理処理マトリックスファイル方式”を採用している。これは連動図表の内容を専用ツールに入力することで、自動的に解析・変換し、連動定数データを作成する方式であり、連動処理部に搭載した、連動プログラムが、この定数データをアクセスしながら、動作することで当該駅の連動機能を実現するものである。

また、各処理部は定周期処理と LAN データによるマクロ同期動作で、連動処理特有の保持条件の不一致処理を防止するなど、“並列二重系”を実現している。現場機器出力回路は、基板実装した小型保安リレーを駆動して、その接点を用途に応じた基板パターン配線で出力することにより、外部リレーを駆動する方式を採用している。

④. DI 形電子連動装置 (公民鉄の例)

公民鉄の電子連動装置事例として、主に地下鉄を中心に採用されてきた電子連動装置を以下に紹介する。地下鉄の信号システムは ATC 装置が主体であるため、電子連動装置は、主に“デジタル ATC 装置との接続に拡張性”を持たせた多くの機種が開発・導入されている。特徴としては、以下の通りである。

- ※ 32 ビット CPU を採用し、処理の高速化を図った。
- ※ 上位 PTC 装置およびデジタル ATC 装置との接続に、C-LAN (センター LAN) を採用し、拡張の容易化、伝送の高速化を図った。
- ※ 電子端末部のサテライト化を行い、駅連動規模に合わせた設備構築を可能とした。
- ※ 結線論理処理方式の採用により、連動論理内容の明確化を図った。

公民鉄向け電子連動装置の基本的な構成は、集中機器室に設備される連動論理部を中心に、上位制御系システム間は“C-LAN”，下位装置間 (電子端末・現場機器 ET-LAN, デジタル ATC) 間は“信号-LAN”で構成される。C-LAN と信号-LAN は、“イーサネットによる並列二重系構成”を採用し、ET-LAN は、大容量保安伝送 (LST) による光ケーブルを使用した二重ループ構成の LAN で構成されている。

処理方式は“結線論理処理方式”のデータ入力方式を採用した。これは結線図入力支援ツールにより、従来の電気結線図と同様のイメージで作成を行い、鉄道事業者も連動論理の確認が可能である。また、ATC 速度論理機能もっており、この処理についても結線データで対応可能としている^[1]。

【付録 3 : ATP (ATS・ATC) 装置】

1. 車内警報装置と ATS

閉そく概念が構築され、軌道回路と信号機により“運転士が信号機を守って運転している限り事故を防止できる”という仕組みが確立された。しかしながら、最終的に運転士に安全を委ねるシステムでは、信号確認後の失念等による事故を防げない。信号機だけで安全を確保していた当時は、誤出発や停止現示の見落とし等に起因した事故が多発していた。

このため、日本国有鉄道（国鉄）では停止現示であることを運転士に伝え、信号冒進しないように警報を与える装置“車内警報装置”の開発を戦前より行っていた。車内警報装置は、AF 軌道回路を利用する“A 形車内警報装置”，商用軌道回路を操作して停止信号を伝える“B 形車内警報装置”，そして、点制御の新しい情報伝送手段で実現しようとする“C 形車内警報装置”の 3 方式が検討の対象とされた。それぞれ、現場試験を経て実用の域まで到達した。やがて、それらの車内警報装置は、ATS や ATC へとつながり、列車運転の安全性向上に大きく寄与することとなる。

2. ATS の機能

車内警報装置にブレーキ機構を組み合わせたものが ATS である。従って技術的には車内警報装置の開発が先行する。しかし、警報を与えず直接機械的にブレーキを作動させる ATS があった。“打子式 ATS”と呼ばれる ATS であり、我が国には 1927 年 12 月開業の東京地下鉄(株)の浅草・上野間で初めて導入されている。

(1). 設備の基本条件

国鉄及び公民鉄の各社はそれぞれ発足の経緯があり、歴史と伝統を持っている。このため、運転に関する考え方は必ずしも同一ではなく、運転取扱い、信号現示と列車運転速度との関連及び車両のブレーキ性能などにも多様性がある。しかしながら、ATS 設備の基本条件は、次の通りであり、機械と人間（運転士）のシステムのあり方に共通点が見られる。

- ※ 列車を停止信号現示の信号機外方に停止させる。
- ※ 現行列車ダイヤを維持する。
- ※ 運転士のバックアップシステムとする。

なお、国鉄が最初に導入した ATS の場合は、停止現示に対する“覚醒”と確認扱いを強いることを目的としたシステムで、速度照査機能が無く、確認扱い後の保安は運転士に全面的に委ねられるなど、ATS 装置としての安全に関する機能は公民鉄の ATS に比べ緩やかなものであった。

これは、車内警報の開発に始まり ATS に至る技術開発の当事者で、国鉄は常に先行技術を導入する立場にあったことと、全国設備として早期導入が求められていた事情がある。これに対して公民鉄は後発で国鉄の開発した技術をベースに改良が可能であったほか、線区規模が小さかったため、比較的容易に新技術が採用できたという背景がある。

加えて、国鉄では列車の運転密度も高く、ブレーキ性能の異なる多様な車種の列車が混在走行しており、民鉄のような単純な速度照査式 ATS では、車両によっては不要なブレーキが頻発することが懸念され、現行のダイヤが維持出来ないという事情もあった。この状況を克服したのは、速度を基準とした制御手法ではなく、距離によって制御するという ATS-P 形の原点となる方式の開発があった。

(2). ATS の制御方式

公民鉄における ATS の処理は、各社の運転条件と線区の実状に応じた、何らかの“速度照査機能”を実現しているが、一様ではない。主要項目に関する相違は次の通りである。その制動方式は ATS が動作した時、制御するブレーキの種類は、多くは非常ブレーキを使用している。但し、一部事業者には高速域では“非常ブレーキ”であるが、低速域では“常用ブレーキ”を用いる方式や、全ての速度域で“常用ブレーキ”を使用する方式もある。

また、速度照査は ATS の情報伝達地点を列車が通過時の速度が速度照査より高速の時に限って ATS により、自動的にブレーキをかけるものが“速度照査式 ATS”である。速度照査式にも、ブレーキが動作した後、列車の速度が照査速度以下に減速すると自動的にブレーキが緩解する方式と、列車を一端停止させて運転士に復帰ボタンを取扱いさせて、ブレーキを緩解させる方式がある。

3. ATS の分類

前述したように ATS の制御方式は、情報の与え方により“点制御”と“連続制御”に分けられる他、速度照査の方式や機能に多様性がある。各種 ATS の変遷を図 2 に示す。機能的な分類では、車内警報装置として、開発されたものにブレーキ機能とリンクさせることで実現した ATS-S 形に代表されるものから、何らかの

“速度照査機能”を付与することにより，“確認扱い”を不要としたシステム，更には車両のブレーキ性能の差を柔軟に吸収できる ATS-P 形に代表されるシステムに分類出来る．

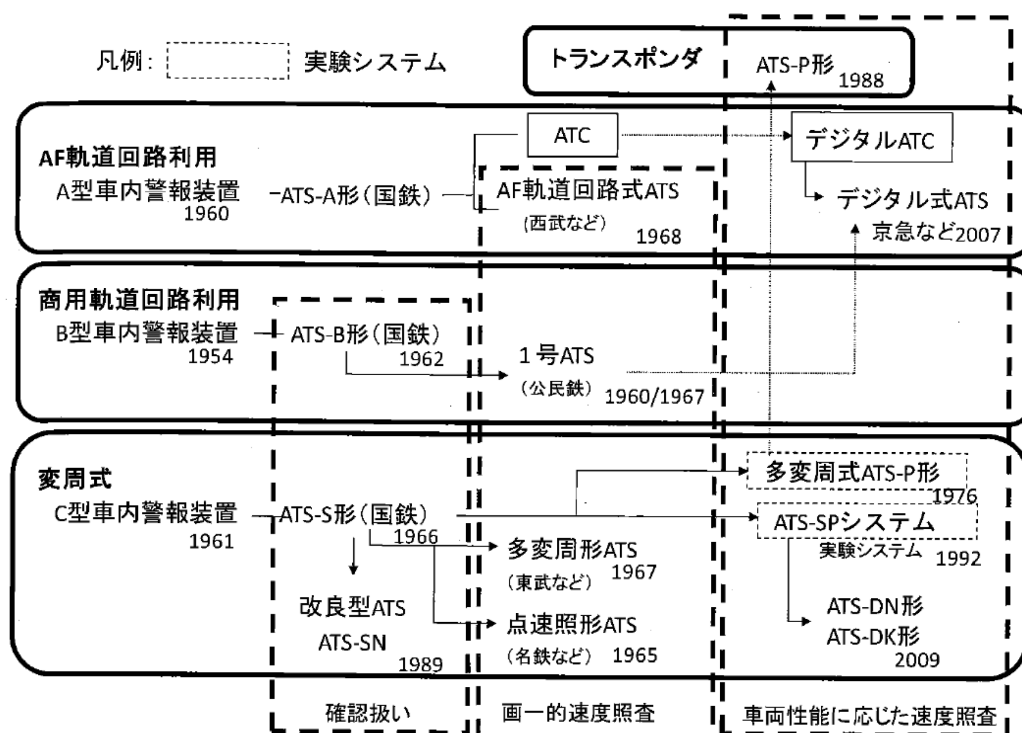


図2 各種ATSの変遷

3.1 点制御ATS

点制御ATSは，軌道回路もしくは地上子を用いて1点で情報を車上に伝達し，車上のATS機能を動作させるものである．

(1). 打子式ATSと永久磁石式ATS

初期に使用された打子式ATSは，“車両のタッチレバーと地上に設置されたトリップアーム”を接触させて，直接ブレーキ制御する構造である．地上に“打子(トリップ)”を設け，信号機が進行現示の時は，打子をレール面下に倒しておく．このときは車上のタッチレバーと接触しないので車両は，そのまま通過できる．信号機が停止現示の時は，打子をレールより上に立て，車上のタッチレバーと接触させることで，車上の制動管の空気を抜いて自動的に制動制御する．永久磁石式ATSは，地上装置として“コの字形”の“誘導子(Inductor)”を設けて，こ

の誘導子を地上信号機の条件 (HR) によって、短絡又は開放することによって車
上装置を制御する方法である。

(2). ATS-B 形

ATS-B 形は、軌道回路を用いるが、A 形車内警報とは異なり、商用周波軌道回
路を利用する。ATS-B 形は点制御もしくは半連続制御と呼ばれ、列車が警報点に
接近したことを軌道回路の送電端電圧の低下によって検知し、5 秒間送電を停止
することで車上に警報を与える方式である。その 5 秒間に運転士がブレーキ手配
をして確認扱いを行わないと、“非常ブレーキ” が作動し、列車は停止する。速度
照査の機能は無く、JR の通勤線区等に一部使用された。地上装置は、軌道回路の
送電端に接近リレーと時素リレーを設け、電車が停止信号現示している信号機の
外方一定距離 (警報点) に接近した際に、接近リレーが、これを検知し軌道回路
の送電を遮断する。その後、時素リレーが 5 秒経過を検知すれば送電を回復させ
る。車上装置は、レール電流を受電器で常時受電し、受信器を動作させている。
受信器入力が 5 秒間途絶えると警報を出し、運転士の確認扱いを促す。この結果、
運転士が行う取扱いは ATS-S 形と同じとなる。

(3). 1 号形 ATS

京浜急行電鉄、京成電鉄の 1 号形 ATS も軌道回路を利用している。1 号形 ATS
は信号機から外方の B 点まで、短い AF 軌道回路を低周波の閉そく用軌道回路に
重畳して設け、注意信号を現示する信号機の B 点に列車が進入した時点で閉そく
用軌道回路の送電を 0.8 秒間遮断して、列車に警報を与え“Y 現示”であること
を伝達する。また、信号機が停止信号を現示する場合は、車上に与える磁束を 3
秒以上相殺して警報を与える。低周波の受信信号の遮断時間を変えることによっ
て車上では“2~3 段の速度照査”が可能となっている。

(4). ATS-S 形

ATS-S 形は変周式の原理を利用しているが、変周周波数は 1 波の単変周式であ
る。変周現象を発生させる地上子は、ポリエステル樹脂で固めた長方形の扁平な
コイルで、コンデンサーにより停止現示には 130kHz の共振回路を構成する。こ
の、地上子を信号機の外方約 800m (600m のブレーキ長に 5 秒間の警報距離を
確保) の地点に設置する。

一方、車上子は先頭車の床下に取り付けてあるコイル部分で、105kHz の帰還
発振回路の一部になっている。車上受信器は常時 105kHz で発振し、その出力の
一部が 105kHz のバンドパスフィルタを通過し、増幅・整流を経て、常時リレー

を動作させている。車上子が停止現示に対応した地上子と結合したときは、発振周波数が地上子の共振周波数の 130kHz に変周するため、バンドパスフィルタを通らなくなり 105kHz の出力が絶たれ、リレーが復旧することで情報を得ることとなる。

3. 2 多変周式地上子を用いた連続速度照査式 ATS

東武の ATS は、1 個の地上子の共振周波数を外部回路で数通りに変えられる“多変周式”を採用している。信号現示に応じて異なる変周周波数を車上に伝達できるため、“パターンによる速度照査”など高度な保安機能を実現することが出来る。

3. 3 地上子対を通過する時間で速度を照査する ATS

地上に検知用と制御用の 2 個の地上子を設け、列車が検知用地上子を通過すると一定時間、制御用地上子を 0Km/h の情報とし、その時間内に制御用地上子に達すればブレーキがかかる機能である。これは地上子間隔を変化させることにより、任意の速度制限制御が実現出来る。この制御概念は曲線区間の速度制限制御などにも利用できるが、速度照査パターン式が連続した速度照査が出来るのに比べると速度照査は 2 個の地上子が設置された地点のみに限定される。従って、極端に速い速度で進入した場合などには、ブレーキが作動しても間に合わない場合が想定されるため、この“地上子対”を複数設置するなどの対応が行われる。

3. 4 連続制御式 ATS

列車の位置検知と列車に対する制御信号の伝送を“AF 軌道回路”によって行う方式である。京阪急行電鉄、阪神電鉄、山陽電鉄、西武鉄道などに使用され、“速度照査”、“連続制御”、“常用ブレーキ”、“自動緩解”など、ATC に近い機能を有している。速度照査は数段階設けられ、軌道回路の変調周波数に、それぞれ照査の速度段が対応している。連続制御式 ATS の特徴を以下に示す。

- ※ 地上信号機が指示する許容速度に常に追従出来るので、先行列車の在線状態の変化に応じて現示アップが可能であり、追従性に優れている。また、踏切道などにおける緊急停止指令に対応できる。
- ※ 情報伝送を連続的に行えるので、地上設備が故障した時、“フェールセーフ”が確保でき、安全性が高い。

※ 変調周波数の選定によって多段式の運転制御が可能である。

※ 地上信号機と ATS 情報による社内表示が可能で、運転士は両システムからの情報が得られる。

3. 5 ATS-P 形

ATS-P 形も点制御式 ATS であるが、今日最も進んだ ATS の一つとされる。また、2006 年の省令改正による“保安機能高度化”の各種要求にも柔軟に応えられる特長を持っている。

(1). ATS-P 形の特徴と機能

ATS-P 形は以下の特徴を有している。

- ①. 運転士が取り扱いを失念し、速度が停止パターンを超えた場合には、常用ブレーキまたは、非常ブレーキが動作し、停止信号を現示している信号機の手前に自動的に停止させる。
- ②. 出発対策として、停止信号を現示している信号機の手前の直下地上子の即時停止情報により、自動的に非常ブレーキまたは常用ブレーキを動作させる。
- ③. 制限速度超過防止対策として、分岐器、曲線、勾配の速度制限対応のパターンを生成出来、パターンの速度を超過した場合、自動的にブレーキを動作させる。
- ④. 車上から地上への情報送信機能を用いた付加機能として、高減速、中減速列車は前方信号機の現示を読み替える現示アップ機能を実現出来るほか、車上より得た列車番号情報を列車選別や旅客案内に利用できる。

このように、ATS-P 形は、車上装置、地上装置から構成され、車上装置は、地上からの情報を受ける車上子、受けた情報を変換する送受信器、情報より作成した速度照査パターンと列車速度を比較する速度照査及びブレーキ指令を行う制御器などで構成される。一方、地上装置は信号機の現示情報を符号化し、地上子に伝送する符号処理器、符号処理器の情報を中継する中継器及び地上子から構成される。

(2). 双方向伝送

ATS-P 形は、地上子と車上子間で最大 64bit/S の伝送速度で双方向のデジタル通信を行う。電文は“HDLC (High Level Data Link Control)”のフレーム構成で 1 フレーム 80bit を繰り返して送信する。ATS-P 形は、信号機約 600m の地点に第 1 地上子を設置する。第 1 地上子は、信号機の現示している信号機までの距

離，下り勾配補正，次の地上子までの距離，運転方向その他のデータを送信する．また，速度制限箇所の手前に地上子を設置し，制限箇所始点までの距離，制限速度などのデータを車上に送信する．80bit の電文は，フラグが電文の始めと終わり，それぞれ 8bit，電文内容が 58bit，HDLC 検定 16bit で構成される．

電文内容は，情報種別 6bit，運転方向 2bit，地上子番号 4bit，個別情報 36bit で，個別情報の内容例として，分岐パターン継続 1bit，信号パターンの勾配補正 3bit，予備 4bit，現示コード 3bit，信号機種別 5bit，停止信号機までの距離 10bit，次地上子までの距離 5bit，各社情報 5bit の構成となっている．距離情報は 4m 単位で 0～4092m まで実現出来る．

ATS-P 形は，受信情報に対するアンサーバック送信をしていない．その理由は，基本となるトランスポンダの伝送品質が高いこと，また，一地点で電文を 4 回以上必ず受信出来るので，電文の検定処理が可能なことを踏まえたものである．なお，地上子と車上装置が正常に動作していれば，伝送誤りによって情報の授受が出来ない確率は， 5.46×10^{-8} 以下と小さい^[1]．

4. ATC

運転士のミスによる事故防止のために設けられた防護装置を海外では，“列車防護装置（ATP：Automatic Train Protection）”と称されているが，日本では，機械が自動的にブレーキを操作させる“自動列車制御装置（ATC：Automatic Train Control）”と，ブレーキ操作は運転士が行い，危険時のみブレーキを動作させる“自動列車停止装置（ATS：Automatic Train Stop）”と区別している．ATC 装置は，地上送受信装置と車上受信装置，ブレーキ制御装置，及び速度発電機で構成され，先行列車との間隔及び進路条件に応じて，当該列車の速度を許容速度以下に自動的に減速させる．

但し，加速制御の機能は含まない．ATC には地上信号式と車内信号式がある．地上信号式は“WS-ATC（Wayside Signal ATC）”と呼ばれ，運転士が確認する地上信号機の現示が示す速度を超えていれば自動的に指示速度まで減速される方式である．車内信号式は“CS-ATC（Cab Signal ATC）”と呼ばれ，車内に表示された速度信号を超えれば自動的にブレーキを作動させ，指示速度まで減速させる装置である．WS-ATC は順次，CS-ATC に置き換えられている．

4. 1 多段ブレーキ制御式 ATC

ATC は 1961 年 3 月に開業した帝都高速度交通公団（現東京地下鉄(株)）日比谷線北千住～仲御徒町間 3.7Km に国内で初めて設備されたが、1964 年 10 月に開業した東海道新幹線の保安装置として設備され、新幹線の安全・安定輸送を支えてきた。その後 ATC は信号機の見通しが困難になる箇所が多い地下鉄や列車密度の高い一部在来線に導入された。これらの ATC は、速度信号を基本とする“多段ブレーキ制御 ATC”であった。

一方、車内信号方式の場合は、地上信号が通常 2 セクションクリアで運転できるのに対し、3 セクションクリアとなり、1 セクション増加する。そのため、運転効率（能率）、保安制御等を考慮した各種工夫がなされ、次の 5 種類の方式が生み出された。

(1). B 点制御式 (Brake point control system)

この方式は、停止信号が現示されている閉そく区間の外方一定距離にブレーキ開始点（B 点、新幹線では P 点）を設けて、その閉そく区間に入らないように階段状に列車速度を減じる。従って、絶対停止区間の外方区間が、注意信号相当の速度による制御区間と停止制御区間（0Km/h）の 2 区間に分割された形となる。

(2). 重複式 (Overlap system)

この方式は、CS-ATC の基本的な方式である。CS-ATC では、0 信号区間が重複する区間を設けて、許容停止の 0 信号を 01、絶対停止を 02 あるいは×と表示している。従って、停止信号が 2 区間連続することになり、手前の停止信号は、進入許容の停止信号、次の停止信号が従来の停止信号の絶対に進入してはならない絶対停止信号となる。

この手前の停止信号の内方、0 信号の区間を一般に“重複区間”と呼ぶ。この重複区間により、運転時隔が延びることとなる。この方式は、1961 年当時、営団地下鉄 2 号線（現日比谷線）の自動閉そく式区間の補助装置として設置された。

(3). 半重複式 (half overlap system)

重複式の閉そく区間を更に分割し、一部の信号現示を 2 区間続けて現示する、半重複区間として設定する方式である。速度制御区間では、信号機の見通し距離の制約が無く、制限速度を効率的に設定することが可能であり、先行列車の進行に伴って、細分化された制御区間毎に制限速度が移行するので運転時隔の短縮が可能である。この方式は、特に高密度の通勤電車線区間における停車場付近に適

用できる。従って、駅中間は“重複式”，運転時隔を左右する駅付近では“半重複式”として使用する例が多い。

(4). クロージングイン方式 (Closing-in system)

制御区間を後続列車の運転速度に応じて短縮させる方式で，移動閉そくに準じた方式である。先行列車と後続列車との運転時隔は，最終的には後続列車の速度に応じたブレーキ距離を確保することが必要であるが，後続列車は，その距離を隔てた地点まで接近して運転することが出来る。この方式によれば，一定のブレーキ制御区間は，後続列車の速度に応じて短縮されると同時に，先行列車の進行に伴って移行するので，信号方式としては，当然，車内信号式が有利であり，なおかつ中間の速度制御を必要としないため，進行 G，停止 R，絶対停止信号×が信号現示系の基本となる。この考えは，列車相互の間隔に無駄が少なく，運転時隔の短縮に有効な方式となる。この方式は，制御区間を一定の長さの区間に分割し設定したもので，ブレーキ制御は一段，あるいはパターン制御となる。

(5). 連続クロージングイン方式

クロージングイン方式の制御区間の長さを列車の編成長に比較して，無視出来る長さにまで細分化すれば，先行列車の進行に伴って連続的に短縮され，かつ移行することとなり，理論的に最小の運転時隔となる。速度制御は一段ブレーキ制御であり，加減速制御を地上で行う場合と，軌道回路を細分化する代わりに，車上装置でブレーキパターンを設定する方式がある。

4. 2 一段ブレーキ制御式の ATC

初期の ATC である多段ブレーキ制御式の ATC の速度信号は 5～6 種類で，自動信号機の信号現示に準じて設定された速度信号である。しかしこの制御は，速度信号毎に空走時分と余裕距離が必要なために無駄があった。これを改善したものととして，東急電鉄田園都市線，新玉川線に導入された“一段ブレーキ制御方式”である。

この制御は速度段を超多段（5Km/h ごとの車内 22 段）とし，格段から常用ブレーキのパターンに沿った停止までのパターンを用意し，停止信号区間の終端までに列車を停止させる制御をする。従って，信号は 2 現示の G，R である。これによって，1 回のみ空走時分と余裕距離となり，従来の多段ブレーキ制御に比べて先行列車までの距離を 2 割ほど近づけることが出来，時隔短縮に寄与した。この一段ブレーキ制御 ATC は，1991 年 4 月に実稼働を開始した。

4. 3 ブレーキパターン制御式 ATC (デジタル ATC)

一段ブレーキ制御式 ATC は、多段ブレーキ制御式で発生していたブレーキ制御・緩解の繰り返しによる乗り心地の悪さを防止できるほか、運転時隔短縮に寄与するなどの利点があった。しかし、一段ブレーキ制御式 ATC は、あくまでも走行する車種が均一な線区に有効な制御方式であった。異なるブレーキ性能の車両が混在走行する線区では、全ての車両に合理的なブレーキパターン制御の設定は困難という課題があった。

ATS-P 形は、ブレーキパターンを唯一に定めず、停止信号機までの距離という共通情報を与えることで、車上でブレーキ性能に応じたパターンを生成する方式を実現している。この考え方によらない ATC においても、先行列車や目標地点までの距離情報、あるいは開通区間数の情報を送信することで、合理的な保安制御を行う方式が検討された。なお、速度制限や勾配などの情報は、このブレーキパターンに反映されるが、情報を車上で持つ方式や、伝送される情報の中に組み込む方式などがある。

但し、この方式を実現するには、地上、車上間の伝送情報量が大幅に増えるため、デジタル信号を軌道回路に流して情報を伝送する技術が開発され、“デジタル ATC” として具体化された。デジタル ATC では、1 フレーム当たりの有効ビット長は 20～75 ビットとなっている。情報の内容は、現在走行している軌道回路固有の軌道回路番号、前方列車との間の軌道回路数を示す“開通区間数”、駅の出発又は到着番線、臨時の速度制限などであり、情報手段としては、時分割のデータ伝送で搬送周波数が 500～3000Hz、1 フレームの伝送速度が 60～300bps でデータを繰り返し送信している^[1]。

【付録 4：踏切保安装置】

1. 踏切道と踏切保安装置

1. 1 概要

鉄道の線路と道路とが平面で交差している場合が、踏切道：(Level Crossing)である。“踏切道”は、踏切道を通行する人および自動車等（以下、「踏切通行人等」という）の安全かつ円滑な通行に配慮したものであり、踏切保安装置：(Level Crossing Protection)を設けなければならないとされている。また踏切保安装置は踏切通行人等に対して、列車の接近を知らせることができ、かつ踏切道の通行を遮断することが出来るものでなければならない^[4]。信号装置、転てつ装置、連動装置などの信号設備が列車の運行のために運転関係従事者を対象にしているのに対して、踏切道においては、踏切通行人等の公衆を対象にした各種踏切設備が存在している。（各種踏切設備の総体を“踏切保安装置”という）踏切道は設備や遮断の仕方により、次の 4 種類に分類される。

1. 2 踏切道の種別

- (1). 第 1 種踏切道：“自動踏切遮断機”が設置されているか、または“踏切保安係”を配置して、遮断機を閉じて道路を遮断する踏切道。
- (2). 第 2 種踏切道：一日のうち一定時間だけ“踏切保安係”が遮断機を操作して、遮断機を閉じて道路を遮断する踏切道。
- (3). 第 3 種踏切道：“踏切警報機”が設置され、列車接近を知らせる踏切道。
- (4). 第 4 種踏切道：第 1 種から第 3 種以外の踏切で自動踏切遮断機、踏切警報機が設置されておらず、踏切保安係もない踏切道。

現在では、上記分類の第 1, 3, 4 種が存在しており、第 2 種に分類される踏切道は現存しない。「省令」の解釈基準では、“踏切警報機”と“踏切遮断機”の両方が設備された“第 1 種踏切”が原則であり、列車が 130km/h 以下の速度で通過する踏切道であって、鉄道および道路の交通量が著しく少ない場合などの例外条項を満たす場合には、“第 3 種踏切道”が認められている^[5]。

1. 3 踏切制御機器

踏切保安装置は、踏切道を通行する人、自動車などから見て勘違いや見誤りを生じさせないように設備することが求められる。具体的な踏切制御機器である踏

踏切遮断機，踏切警報機，列車進行方向指示器，踏切支障検知装置，踏切遮断・動作反応灯などの機能，構造，設備方などを以下に示す。

(1). 踏切遮断機

遮断桿と呼ばれる“竿（棒）”あるいは“ワイヤー”により道路交通を遮断する機器が踏切遮断機で，遮断桿を遮断機の支持点を中心に回転させることにより，道路を遮断する腕木式がほとんどで，腕木式は遮断棒 1 本で遮断する“直桿式”と，上昇時には中間部で折れ曲がる“屈折式”および特に大型車両の高い運転席ドライバーからの視認性を向上させた直桿 2 段式に分けられる。遮断時には，遮断桿が道路面上 0.8m の高さにおいて水平になることが必要であるが，この位置で遮断するためには，遮断機の内部にある回路制御器によって調整する。現在，“ウェイト”付加を取りやめることにより，“防雪カバー”を不要・レス化とし，また，ウェイトバランスの調整を簡略化した“ウェイトレス形電気踏切遮断機”が 2005 年頃より普及し，施工性，保全性が向上した。

(2). 踏切警報機

交互に点滅する 2 灯 1 組の赤色閃光灯（踏切警報等）および音響（踏切警報音，踏切電鈴），により踏切通行人等に列車接近を警報する装置であり，原則として踏切道に向かって左側に設置する。踏切の存在を示す踏切警標（クロスマーク），踏切警報等，踏切警報音を発するスピーカあるいは踏切電鈴，および跨線線が 2 線以上の踏切では，列車の進行方向を表示する列車進行方向指示器，必要により，踏切支障操作器（非常ボタン）および，これらを取り付けるため警報柱で構成される。

(3). 列車進行方向指示器

跨線線が 2 線以上の踏切では，1 方向からの列車が通過した直後に反対方向の列車が踏切に接近したときに，踏切通行人等が踏切に進入すると非常に危険であるため，列車進行方向を“矢印”で示す指示器を設置する。

(4). 踏切支障報知装置

自動車の踏切道上における脱輪やエンストなどにより，踏切道が支障した場合，踏切支障操作器（非常ボタン）などの手動扱い，あるいは踏切障害物検知装置が自動的に検知することにより，踏切道に接近する列車に対して，“信号煙管”の燃焼（発煙信号），“特殊信号発生器”の点灯（発光信号）などにより，停止信号を現示する装置の総称で各種の方式がある。

(a). 踏切支障操作器・支障押しボタン（非常ボタン）

標準的には線路の両側に、通行者が容易に取り扱える位置に設置され、一度扱われると、支障状態が解除されるまで保持される。解除は鉄道係員が“復帰スイッチ”を扱うことにより解除する方式と、列車乗務員が踏切道の安全を確認後、列車が通過することにより、自動的に解除する方式とがある。

(b). 踏切障害物検知装置

各種の方式が研究開発されているが、実用化されている主な装置を以下に示す。

①. 光電式（LED式、レーザ式）障害物検知装置

発光ダイオード（LED）やレーザダイオード（LD）が発する、近赤外線領域を投光受光器間で踏切道内に張り巡らし、自動車等により検知ビームが一定時間遮断されたことを検知する方式である。

②. ループコイル式障害物検知装置

踏切道の舗装内にループ状の電線（コイル）を埋め込み、この電線を発振回路の一部に用い、自動車等の金属物が接近することにより、このインダクタンスが変化することを捉え、障害物として検知する方式がある。

③. 3次元レーザレーダ式障害物検知装置

計測範囲全体にパルスレーザ光を2次元方向にスキャンさせることにより、各点の3次元座標値を計測して、点の集合として物体の位置と形状を求める。パルスレーザ光を照射・受信するレーザレーダヘッドは、踏切道脇の線路外約5mの高さに取り付けられるので、施工・保守時に線路内に立ち入らなくても良く、施工性・保全性に優れている。また障害物を3次元で捉えるために、2.9m未満の小型自動車等、従来の物体より小さいモノ（支障物）の検知が可能である。

④. ミリ波踏切障害物検知装置

赤外線代わりに“ミリ波”領域の電波を利用し、踏切道全面を電波ビームで覆い従来の装置では避けることができない光ビーム間の死角（検出不可の範囲）を無くすことができる。“ミリ波送受信機”から電波ビームを送信し、障害物がある場合には反射波を受信する。送受信波の時間差で送受信機は障害物との距離を判断し、踏切道内の障害物の有無を判断する。従来のものより対候性に優れ、従来の装置より小さいモノ（支障物）の検知が可能である。“踏切障害物検知装置”は従来、自動車（二輪車を除く）を検知対象としていたが、近年、人や車椅子をも検知できるものが要求されつつある。

(5). 踏切遮断反応灯（踏切動作反応灯）

踏切遮断機がすべて降下完了したことを乗務員に知らせるためのもので、第 3 種踏切で、踏切警報機が動作していることを知らせるものも含む。民鉄では設備されているが、JR 等では設備されていないのが現状である。事業者ごとに様々な形状や点灯方式がある^[5]。

2. 踏切制御の原理

踏切制御の一連の流れは次の通りである。

列車検知装置により列車が踏切道に接近したことが検知されると、“踏切警報機”の警報灯が点滅し、警報音が発せられる。その後、“踏切遮断機”が降下を始め、5～8 秒後に踏切道が遮断される。列車が踏切道を通り終わったことが検知されると、警報灯、警報音が停止し、踏切遮断機が上昇する。

2. 1 警報・遮断時間（警報開始から遮断解除までの各段階の時間）

踏切制御装置の警報開始から遮断解除までのタイムシーケンスを以下に示す。

(1). 警報開始から踏切遮断機が降下を開始するまでの時間（予告時間）

警報開始から踏切遮断機が降下を開始するまでの時間は、民鉄で“6～7 秒”，JR 各社では跨線数（踏切道にある線路の本数）や踏切遮断機の設置数（1 組 2 機または 2 組 4 機）などにより異なり，“4～10 秒程度”である。

(2). 踏切遮断機の降下時間，遮断完了までの時間

1 機の踏切遮断機が降下に要する時間は約“5～8 秒”である。4 機により遮断する場合は（2 組遮断という）には、踏切道に向かった左側（進入側）の踏切遮断機の遮断が完了してから、右側（進出側）の踏切遮断機が降下を開始するので、踏切道全体を完全に遮断するには、“10～16 秒程度”要する。

(3). 遮断完了から列車到達までの時間

警報開始と同時に踏切に進入した通行者が、通常で安全に踏切道を渡りきることと、列車の通過を待っている踏切通行人等に焦燥感や抵抗感を抱かせない時間として、20 秒を標準とし、15 秒以上としている。

(4). 列車到達から警報停止，遮断解除までの時間

列車到達から列車が踏切道を通りすぎるまでの時間は、列車速度と列車長による。通過完了してから警報が停止、踏切遮断機が上昇を始めるまでには、通過の完了を確実に検知するために 1～2 秒間の監視時間（リレーの緩動時素や数回の一致

チェック)を持たせている場合が多い。また、踏切遮断機が完全に上昇するには、“4～6秒程度”の時間が必要である^[5]。

2. 2 連続制御方式と列車検知装置

「国土交通省 省令の解釈基準」では、踏切の制御は“連続閉電路式”が基本となっており、具体的には踏切の警報制御区間の全体にわたり閉電路式の“軌道回路”を設けて列車を検知し、この区間内に列車が在線する間は警報する方式としている。列車が警報制御区間のどこに存在しても検知し、警報制御することから“連続制御方式”と呼ばれる。

(1). 連続制御方式の踏切制御に用いられる軌道回路

(a). 直流軌道回路

蓄電池を浮動充電して、軌道回路電源として用いるシンプルで安価な構成であるが、列車の検知性能が十分でない理由などから、非電化区間や非自動区間などの一部で使用されている。

(b). パルス軌道回路

レール間の印加電圧を数 V のパルス状に送電することにより、レール上面の酸化被膜を破壊して“列車検知機能”を高めたもので、海岸に近く“浮錆”が生じやすい箇所や軽車両を 1～2 両の短編成で運転する線区などで使用されている。

(c). 商用軌道回路

信号機を制御するための商用軌道回路を、そのまま踏切制御用に使用するものであるが、この軌道回路の境界と踏切の警報制御区間の“始端（警報開始点）”および“終端（警報終了点）”の位置が、一致しないことがほとんどであり、そのままでは使用できない場合が多い。警報開始点が、“信号機制御用軌道回路”の始端より内方（内側）にある場合には、この軌道回路が列車を検知してから“警報開始点”までに列車が到達する時間が経過してから警報を開始する例や、警報開始点や終端に踏切制御子を併用する例、終始点に AF 軌道回路を併設する場合もある。

(d). AF 軌道回路

2～10kHz の可聴周波数を使用した無絶縁軌道回路で、“信号機制御用軌道回路”と重畳して回路構成できるので、信号機制御用軌道回路の境界とは独立して警報制御区間の始端および終端を設定することが可能である。“AF (Audio Frequency)”, “AFO (Audio Frequency Overlay)”, “HF (High Frequency)”,

“MHF (Modulation High Frequency)”などと呼称されるタイプが製品化され、それぞれ“無変調型”，変調を施し，耐雑音特性を高めたタイプとがある．主に民鉄の直流電化区間で使用されている．警報制御区間の始端で直接レールに接続して AF 信号を送信し，踏切道を通じた地点（警報制御区間の終端）で受信するが，受信方式には以下の 3 方式がある．

※ 電圧受電方式：直接レールに接続して受電する方式．

※ 電流受電方式：レールには接続せずに，この位置に敷設したループコイルや受電器に誘起した AF 信号電流を検知する方式．

※ 電圧電流受電方式：この両方を兼ね備えた方式．

電圧受電方式は，列車がある程度走行し，離れなければ列車が通過したことを検知出来ず，それだけ警報停止時期が遅れるが，伝送特性や列車検知性能は高い．電流受電方式は，列車の通過を即検知出来，警報を停止させることが出来る．また 1 つの送信に対して，複数の地点で受信できるメリットもある．

(2). 連続制御方式の踏切制御論理

警報制御区間の途中に信号機が設置してある場合には，警報制御区間に複数の列車が存在する（続行運転という）ことがある．また，“閉そく信号機”が停止信号の場合には，所定の確認や手続きのもとに，その停止信号を越えて低速で運転することが許されている（無閉そく運転という）ので，この場合にも警報制御区間に複数の列車が存在する．

“連続制御方式”は，警報制御区間内の軌道回路に列車が存在する間は踏切の警報を継続し，列車が在線しなくなった時点で警報を停止する論理であるので，“続行運転や無閉そく運転”による複数列車に対して特別な処置を講ずる必要がなく，“踏切制御論理回路”が比較的簡単に構成できる．

2. 3 点制御方式と列車検知装置

警報制御区間の始端および終端の位置に短小区間の列車検知装置を設け，この間の列車の存在を“チェックイン・チックアウト”の論理により検知し，警報制御する方式がある．警報制御区間の始端および終端の点（短小区間）で列車を検知して，警報制御することから“点制御方式”と呼ばれる．信号機制御用軌道回路とも併設できる利点があるが，連続閉電路式と同等以上の性能とするためには，“続行運転や無閉そく運転”時に，警報制御区間に在線する複数の列車（特に続行列車）を確実に捉え，警報制御するための処置が必要である．論理は“順序論

理”となるため、に停電が発生すると、その論理が崩れ、復電しても警報を回復できないので、電源には蓄電池（バッテリー）を使用して“無停電電源”とする必要がある。“信号機制御用軌道回路”とは独立して構成できる特長があることなどから、JR 各社や第 3 セクター鉄道事業者などで広く採用されている。

(1). 点制御方式の踏切制御に用いられる列車検知装置

(a). 踏切制御子

8.5～40kHz の電流をレールに流し、列車を検知する短小の無絶縁軌道回路の一種で、制御区間長は 30m が標準である。信号機制御用の軌道回路の有無や種類、電化方式の種類に関係なく使用できる特長がある。最近では、列車検知性能を高めた“H 形”と呼ばれる踏切制御子が普及している。検知方式により、“閉電路式（CT 形）と開電路式（OT 形）”の 2 種類がある。

“閉電路式”は、警報制御区間に列車が進入したことを検知し、警報を開始する警報開始点用に使用する。開電路式は、常時、軌道回路を構成する“電気回路が開いた（構成されていない）”状態で、列車が在線し、車軸でレールが短絡されると、“電気回路が閉じる（構成される）”ことにより、列車の在線を検知する方式で、列車が踏切道を通じた、すなわち警報制御区間を進出したことを検知し、警報を止める“警報終了点用”に使用される。

軌道回路を構成する機器の故障や、レールが破断したときには、閉電路式では、列車が在線した状態になり、警報を開始し、一方、開電路式では、列車が在線しない状態となり、警報を継続することとなる。踏切の制御における“安全側は警報する方向”であり、警報開始点用に閉電路式を、警報終了点用に開電路式を採用することにより、全体で“フェイルセーフ性”を確保している。

(b). アクセルカウンター（車軸検出器）を用いた列車検知

車軸によるレール短絡によらない列車検知装置の一つで、近年の車両の“軽量化”やレール上面の錆などによる短絡性能低下の影響を受けない特長がある。レールを挟んで、送信コイルと受信コイル（両方を合わせて検知子という）を設置し、車輪がこのコイル間に在線すると、受信コイルで受信する磁界の強さが低下する（レベル差方式）、あるいは電圧位相が変化する（位相検知方式）ことを検出して列車を検知する。

いずれの方式も、“閉電路式（CT 形）および開電路式（OT 形）”として使用できる。また、検知子を 2 組設けることにより、列車の進行方向、この間の走行速度を検出することも可能である。

(c). ATS を活用した列車検知装置（踏切バックアップ装置）

ATSの車上装置から常時発信している一定周波数の信号を地上の地上子で受信することにより、列車の先頭が通過することを検知するもので、車上の発信周波数を受信すると検知リレーが動作する（受信動作形）と、常時検知リレーが動作していて、車上の発信周波数により検知リレーが落下する（受信落下形）がある。受信落下形は“フェイルセーフ”の思想にかなうが、両方とも何かの理由でATS車上装置が、使用停止時には列車が検知できないため、“列車検知のバックアップ”として利用されている。

(2). 点制御方式の踏切制御論理

警報制御区間内の列車の、存在をチェックイン・チェックアウトの論理により検知し、警報制御する方式であるが、警報制御区間内の複数の列車の在線を検知する方法が、論理を“リレー”で組むものと、“ソフトウェア”で組む場合とで違いがある。ソフトウェアで組む方式は、電子踏切（制御）装置（中間用）と呼ばれる装置に採用され、1986年に実用化されている。リレー論理との大きな違いは、警報制御区間内に在線する列車の本数をカウントする論理であることである。具体的には、警報開始点の踏切制御子が、警報制御区間内へ列車が進入したことを検知したときに、列車本数を加算（+1）し、警報終止点の踏切制御子が警報制御区間から列車が進出したことを検知したときに列車本数を減算（-1）して、列車本数がゼロになったときに警報を停止する論理である。

この論理では、続行運転用や無閉そく運転用の踏切制御子は不要となり、施工性、保守性が向上する。さらには列車ごとに走行の順序性（「警報開始点進入→警報開始点進出→警報制御区間在線→警報終止点進入→警報終止点進出」）をチェックし、この順序の合理性判断論理や、踏切制御子における“煽り”（レールの錆などにより、一時的に列車検知状態が不安定になる状態）による誤動作を回避する判断論理などにより、警報制御の“確実性・安全性”も向上した。

2. 4 単線区間の踏切制御論理

単線区間では、1本の線路に下り列車に対する警報制御区間（条件）と、上り列車に対する警報制御区間（条件）が混在する。下り列車が、その警報制御区間である軌道回路を進出した時点で警報を停止しなくてはならない。このためには、上り列車に対する警報制御条件となる軌道回路による列車の在線条件を、下り列車が上りの警報制御区間を進出するまでの間、“マスク”する処置が必要である。

このマスクの処置は“連続制御方式”，“点制御方式”に関わらず必要である。万が一何らかの原因で，“マスク”が継続すると，反対方向列車が，その警報制御区間である軌道回路に進入しても警報せず，非常に危険なインシデント状況となる。不要にマスクが継続している場合には，これをリセットするような処置，あるいは強制的に“警報”するようなバックアップ処置が講じられている。

2. 5 構内踏切の踏切制御論理

駅構内あるいは，その近傍にある踏切を一般的に“構内踏切”と呼んでいるが，その警報制御論理は，“駅中間”にある踏切とは大きく異なり，また複雑である。駅中間にある踏切では，一言でいえば，警報制御区間に列車が在線するか否かで警報の要否が決定される。

これに対して，構内踏切において警報が開始するためには，列車の在線のほかには当該踏切道に向かって進行するための進路が構成されていることが必要である。この進路構成の条件は，駅構内にある“転てつ機や出発信号機”などを制御する連動装置から制御される。

進路を構成し，該当の信号機に進行を指示する信号を現示するためには，連動装置に対して，運転取り扱いの担当者による手動操作，あるいは列車ダイヤに基づき自動的に進路構成する装置（PRC や運行管理装置という）からの入力が必要であり，構内踏切の制御は信号機に対する操作あるいは制御入力により，間接的に制御されるので“半自動制御の踏切”と分類されることがある。駅構内には，数多くの転てつ機や信号機，軌道回路があり，その線路配線や規模は駅ごとに異なる。従って，この進路構成を警報条件の一つとした構内踏切の制御論理も千差万別で，現行“リレー論理”では標準化は難しいのが現状であるが，“ソフトウェア論理”により標準化を目指す“ES 形電子踏切装置”などの事例がある。

2. 6 保守用車踏切制御装置

保守用車が短絡走行すると，“点制御方式”の警報制御区間の途中で折り返し運転した場合に警報持続になったり，また“短絡不良”により無警報になったりする。“連続制御方式”の制御においても，警報制御区間内で長時間停車すると，その間に警報が継続する。そこで，JR では保守用車は“絶縁走行”を原則としている。“保守用車踏切制御装置”は，保守作業の効率化と踏切道での安全確保を目的

としたもので、保守用車から下車することなく、“光通信方式”もしくは“無線通信方式”を用いたリモートで“警報開始”と“警報停止”を行う。

3. 踏切警報時間制御

警報を開始してから列車が踏切道に到着するまでの時間が、どの列車に対しても常に一定であり、しかも必要最短であることが理想であり、踏切に対する社会的要請が大きい重要な課題の一つである。その意味で、“踏切定時間警報制御”と呼ばれることがあるが、この定時間を実現することは難しいのが現状であり、現状を反映した表現としては、“警報時間の適正化”、“踏切警報時間制御”が妥当である。「国土交通省・省令」の“解釈基準”では、踏切警報時間制御装置について、列車または車両の種類あるいは速度を識別することにより、自動的に踏切遮断機あるいは踏切警報機の動作の開始時期を制御するものとされている。

“踏切警報時間制御”としては、次のものがある。

- ※ 停車列車，通過列車の列車種別を判断し，警報開始時期を制御するもの。
- ※ 列車の走行速度を識別し，警報開始時期を制御するもの。
- ※ 鉄道運行と連携することにより，警報開始時期を制御するもの。

3. 1 列車種別を識別した制御

駅近傍の出発側にある踏切では、停車列車による警報時間が長くなり問題となっている。通過列車を対象に警報開始位置を設定すると、停車列車に対しては、列車が駅に接近するに従って減速すること、停車後乗客の乗降にも時間が加わること、その後、再加速することにより、通過列車による警報時間と比べて、大きな差が生じることとなる。

(1). 列車種別選別装置を利用した制御

旧地方鉄道法が適用された大手，準大手民鉄では、早くから停車・通過の種別に関して“列車種別選別装置”を設備することにより識別している。

列車種別選別装置としては、次の2種類の方式が実用化されている。

(a). 車上設定方式

車上に種別設定器と、地上設備と共振する同調器や、特定の周波数を送信する送信器などを設備し、地上側には必要箇所地上子やループコイルなどの地上設備

を設ける。列車が、この地上設備の上に来た時に“電磁結合”等により、列車種別を検知するものである。

(b). 地上設定方式

列車が連動駅を出発時に、出発信号機などの操作と合わせて運転取扱の担当者が、あるいは PRC、運行管理装置からの入力により、“列車選別”を設定するものであり、その結果を文字や数字で表示し、列車乗務員が確認する。設定された列車種別と当該踏切または隣接の連動駅手前の踏切まで順送する。

(2). ATS-P を活用した列車選別による制御

ATS-P 装置を搭載した列車からは“高減速列車”、“中減速列車”、“低減速列車”などの情報が地上装置側に伝送されるが、高減速列車を“停車列車”とし、それ以外の中・低の減速列車、および ATS-P 未搭載車については“通過列車”とみなす。停車列車に対しては、通過列車の警報開始位置よりも、踏切道に近い位置から警報を開始することにより、警報時間の適正化を行う。

3. 2 走行速度を識別した制御

最初の警報開始点で、走行する列車の速度を検知し、低速度の場合は、この地点では警報開始しないことで警報時間の適正化を図るものである。運転速度を検知する方法としては、車軸検知器により、車軸の通過速度を検知する方法などがある。2 点以上の地点で、それぞれ速度を識別する必要があること、速度検知後、踏切まで加速されることを考慮する必要がある。

3. 3 鉄道運行との連携による制御

(1). 信号現示により警報開始点を切り替える方法

朝夕のラッシュ時間帯では、混雑緩和のために多くの列車を運転していることから、信号現示が“制限信号”になる場合が多い。制限信号に対する速度で等速運転したときに所定の警報時間が確保できる範囲で“警報開始時期”を遅らせている。

(2). 列車の出発時機を遅らせる方法

ある駅から列車を出発させても、当該列車が隣接の次駅に到着する番線に、他の列車が在線し、到着が支障する場合には、次駅に侵入できずに手前にある踏切道付近に停車し、この間警報が継続してしまう。このような場合には、次駅に在

線し、支障している列車が出発するなど支障が解除するまで、当該列車の出発を“抑止”することにより警報時間を短縮する。

このシステムは警報時間の短縮に大きな成果を上げており、さらに上下列車を踏切道に同時に接近し、通過させるシステムに進展させることも可能であるが、鉄道輸送の“定時性”が損なわれることにもなるので、踏切制御と鉄道運行との協調、設備費の分担などが課題である^[5]。

【付録 1～4：参考文献一覧】

- [1] 日本鉄道電気技術協会 秋田雄志, ほか「鉄道信号」 2015-1
- [5] オーム社「鉄道信号システムがわかる本」中村英夫編著 2012-5
- [15] オーム社 日本鉄道電気技術協会編「鉄道信号技術」中村英夫, ほか
2020-11