特集

解説

鉄道における最近のシステム制御技術

正員 佐々木 敏 明 (財)鉄道総合技術研究所

1. ま え が き

鉄道のシステムはモデルチェンジが簡単でないことや、安全・正確を重んじるあまり保守的になりがちなこともあって、これまで新しい技術に十分即応してきたとはいえない。しかしマイクロエレクトロニクスや情報・通信技術の発展と、他輸送機関の発達、ヨーロッパにおける高速鉄道化への活発な取り組みなどが新しい技術革新を迫っている。加えて国鉄の分割・民営化はそうした動きに拍車をかけ、各種システムを見直し、再構築しようという動きが目立ってきた。

具体的には高速化が必要なところには高速化のための技術を、また高密度運転が必要なところにはそのための技術をというように、線区のニーズに適した個別化に見合う技術開発が志向されつつある。きめの細かい知恵をしばろうというわけである。

鉄道輸送は、もともとフレキシビリティに乏しいだけに、様々な工夫をこらして足らざるを補なうようにする必要がある。その意味からも、例えばマイクロコンピュータ（以下マイコンと称する）のインテリジェンスを積極的に活用するようなシステム制御技術は、これからの鉄道に不可欠といえよう。

本文では、そのような動向の中から幾つかのトピックを紹介する。

2. 保安制御へのマイコンの導入⁽¹⁾

安全性技術の分野、例えば、列車のブレーキ制御や駅のポイント駆動などには、これまで主として電磁リレーが用いられ、信頼性とともなフェイルセーフ性を重視してきた。すなわち、故障時には必ず安全例（列車を止める側）にシステムを制限するようなシステム

構成手法である。その後、エレクトロニクスの発展に伴い、その高機能、小電力、高速、小形などの特徴を安全性技術の分野にも生かすべく努力が続けられてきたが、限られた範囲にとどまっていたといえる。それは、電子回路でフェイルセーフな回路を構成しようとすると素子数が増え、複雑となる場合が多かったからである。しかし、マイクロエレクトロニクス、とりわけマイコンの経済性・機能性・高信頼性は保安装置にとっても極めて魅力があり、導入のための研究が行われてきた。

マイコン単体で、フェイルセーフ性を確保する考え方もないわけではないが、故障時の振舞いが定かでない。また特殊なマイコンを設計するよりも汎用品を用いた方が経済的で、しかも進歩に追従できる。そこで汎用マイコンの冗長構成によりフェイルセーフにする、すなわち複数処理結果を照合し、不一致なら出力を安全側に処理する方法が受入れられてきた。この場合、当然ながらシステムの稼働率は冗長化によって下るので、実用上は三重系の多数決方式や、もう一組の冗長化システムを待機予備とするなどの方法が採られることが多い。

図1は、実用化している各種冗長システムの概念図で、ハードウェア冗長とソフトウェア冗長、もしくははその組み合わせに分類される。

完全同期式は二つのマイコンの内部バス同士をデータが出入りする都度、直接比較するもので、高頻度照合に特徴がある。安全性をハードウェアに依存するのでソフトウェアの負担が少ない⁽²⁾⁽³⁾。

時間差同期式は入力回路などにおけるCOMMONモードノイズによる同時誤動作を避けるため、処理時間をずらして動作させる。ずらし方の工夫をすることで、比較回路（汎用コンパレータ）の出力が正常時にはダイナミック動作をするようにしてフェイルセーフ性を実現する⁽⁴⁾。

Recent Development of Systems Control Technology in Railways. By Toshiaki Sasaki, Member (Railway Technical Research Institute)

図 1 マイコンによる保安システムの構成手法

一方、ダイバシティプログラム式は、ある機能を実現する処理を同一 CPU 中で別々に行い、結果を比較する方式である。同一のシステム機能を別々のチームに作らせる方式⁽⁶⁾と、機能プログラムに診断プログラムを付加する方式がある。両者の独立性が高ければプログラムミスによる危険性を除去することができる。そこで一方を 1 論理、他方を 0 論理で構成する相補論理の採用などにより独立性を高め、ソフトウェアのバグやハードウェア故障の検出性能を向上させている。

これらマイクロエレクトロニクスを利用した高安全システムは、新幹線電車の速度制御システム⁽⁶⁾、駅構内の信号機とポイントの間の運動を保つ連動装置⁽⁷⁾、踏切における警報遮断システム、列車運転間隔を保つ閉そくシステムなどに応用されている。いずれも、従来よりもインテリジェンスを増し、マンマシンインタフェースや保全性などが格段に向上している。

3. 列車の運転制御

3.1 高密度運転制御

大都市通勤線区の列車密度は、現在の信号方式ではほぼ限界に近い。しかし更に列車本数を増やして混雑緩和を望む声は強い。抜本的システムチェンジには多大の費用がかかるので、現行設備の部分変更や駅近傍の設備付加により、列車運転間隔（時隔）を 100 秒前後にしようという研究が行われている⁽⁸⁾。ここでは超多段運転制御方式（日本船舶振興協会補助事業）について紹介する⁽⁹⁾。

この方式は、図 2 に示すような非常に細かな速度段（超多段）を地上から指示することによって、後続列

図 2 超多段運転制御方式

車を先行列車にできるだけ接近させる運転を可能にして、時隔短縮を図ろうとするものである。すなわち、地上から停止距離に応じた階段状の EB (Emergency Brake) パターンを与えると同時に、それより低速側に滑らかな CB (Control Brake) パターンを車上装置内に発生させ、これに沿った自動運転を行う。EB パターンは先行列車とともに移動するように制御される。万一故障などで EB パターンを越すと非常ブレーキが作動する。EB パターンはフェイルセーフ性が要求されるため、レール間に多数のループコイルを設け、それぞれに速度段に応じた周波数の電流を流し、これを車上で受信する単純な方式が採用される。

EB パターンが最適ブレーキ曲線にかなり近づけられることから、従来より 20 秒程度時隔を短縮できる。

3.2 ファジィ制御の自動列車運転への適用⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

列車の自動運転は新交通システムや一部の地下鉄などで実現されているが PID 制御が主である。すなわち、システムを正確に記述した上で目標値と状態量の

偏差を評価し、最小になるよう制御量を求める。しかし、列車運転のように、特性が絶えず非線形に変化したり、制御目的が多く、その優先度が状況に応じて変るようなシステムには、必ずしも最適な方法とはいえない。事実そのような精密な制御も運転士の操作に及ばないことが多い。そこで、運転士が経験的知識に基づいて操作している点に着目し、運転士の経験則をファジィ集合で定量化した上で制御指令の「確からしさ」を評価する制御方式が関心を呼んでいる。従来の制御では主に速度の目標値からのずれだけが問題にされるのに対し、ファジィ制御では乗心地、電力消費量、走行時間、停止精度など多くの評価指標を状況に応じて判断して速度を選択する。従って、外乱に対する適応性が高く、また制御則が人間にわかりやすいので経験者の意見などによる変更が容易であるという特徴があるといわれる。

実験では 100 ms ごとに制御則を評価することにより、ノッチやブレーキを制御した結果、PID 制御に比べて、停止精度のばらつきが 1/3、制御指令変化が 1/3、消費電力が -10% などの成果が得られたという。

3.3 交差誘導線による自動運転システム

レール間に一定距離ごとに交差する 2 本の導線を敷設し、これを伝送媒体と位置検知に利用して高精度の列車制御を行おうとする試みが幾つかみられる。ここでは、バンクーバのリニアモータ電車の制御システム (Sky Train と呼ばれる) を紹介する⁽¹²⁾。このシステムは 1986 年のカナダ交通博の足として披露され、話題になったが、ローレンツ社の開発した SELTRAC というシステムを採用しており、これは既にベルリン地下鉄、その他でも採用済のものである。次のような特徴がある。

(1) ハイアラキー構成とし、安全性と信頼性に配慮している

(2) 25 m ごとに交差した誘導線により、位置検出と制御信号・音声の伝送を行っている

(3) 移動閉そく方式により 60 秒ヘッド (停車時間 20 秒) の完全無人運転ができる

図 3 にシステム構成を示す。最上層は管理レベルですべての列車位置や、ポイントなどをモニタするとともに、ダイヤ変更など、いわゆる運行管理をする。案内放送もここから発することができる。待機予備系をもつミニコンピュータが用いられているが、安全に対する責務はない。次が運転レベルで、地域的に分散された保安制御装置は三重系のミニコンピュータから成り、互いにデータを照合しながら運転保安を司る。誘導線を介し、単線で最大 48 km の範囲の列車と交信

図 3 SELTRAC の構成

する。誘導線は 1.6 km ごとに分割され、1,200 bit/s、最大 0.84 s 周期でサイクリックに車両状況をモニタし、必要な加減速指令を各列車に出す。またポイント制御装置に対しポイント転換指令を出す。第三が現場制御レベルで、ポイントの連動制御や列車の制御を司る。車載マイクロコンピュータは二つが一组となっていて、互いの出力をモニタしており、不一致を検出した方が直ちにブレーキを制御するほか、故障と判定された場合には、ほかの車両のユニットに自動的に切り換えられる。

3.4 車上・地上間情報伝送システム

運転条件を列車に正しく与えるには信号機が一般的であるが、列車の高速化、多様化や高密度化は、情報量の拡大、すなわち車上地上間のデジタル符号による大量情報伝送を必要とするようになった。誘導線による伝送のほか、無線やループコイルによる伝送が用いられているが、ここではトランスポンダによる情報伝送とその応用システムについて述べる。

トランスポンダは、一般には応答信号の自動返送装置のことであるが、ここでは車上地上間のデジタル情報伝送に限られた地点でのみ行う装置をいう。図 4 に国鉄が開発したトランスポンダの構成を示す⁽¹³⁾。車上子は、390×360 mm のループコイルで地上からの情報受信のほか、車上からの情報送信地上装置 (地上子) に電源を供給するための電力伝送の機能をもつ。

図 4 トランスポンダの構成

表 1 トランスポンダの伝送諸元

種 別	項 目		変調方式	伝送速度
	周 波 数			
情報伝送	地上→車上	1.7 MHz	FSK	64 kbit/s
	車上→地上	3.0 MHz	FSK	64 kbit/s
電力伝送	車上→地上	245 kHz	—	—

一方、地上子は、枕木上に置かれた 390×230 mm (在来線) のループコイルで車上子に対応した情報送受信機能と、電源の得にくい箇所のための電力受信機能を有する。つまり、車上からの電磁波によりエネルギーをもらって電源とするわけである。表 1 に伝送諸元を示す。伝送は車上子と地上子がすれ違う際に瞬時に行われるので、72 bit (誤り訂正符号を含む) 長の電文を最低 4 回は受信できるように伝送速度やアンテナの大きさを定め、同じ電文が 2 回以上受信できた場合だけ情報として使用する。また、常時擬似信号を送って自らの受信コイルで受けとる故障診断を繰返したり、次の地上子までの距離をも地上子から与えることにより、受信不能の故障に備えている。

信号機が赤のときに列車が所定の速度以下でないとブレーキをかけるシステム (ATS) への応用が実現している。

そのほか、新幹線における速度向上時のシステムや列車番号、指令情報、曲線・こう配情報などの伝送への応用が考えられている。

なお、ビット誤り率は 64 kbit/s 時で 3×10^{-5} 以下にできる見通しが得られている。

4. 列車運行管理システム

4.1 トータルシステム化

新幹線の運行管理システム (COMTRAC) の成功以後、多くの線区に類似のシステムが導入されてきた。当初は列車の進路制御 (ダイヤに応じたポイントの制御) が中心であったが、コンピュータの高性能化・高信頼化・低価格化に伴い、制御範囲が拡がり、後方業務まで含めたトータルシステム化が行われつつある。札幌や福岡地下鉄がその代表で、運行管理のほか、自動運転、旅客案内、自動出改札、車両自動回送などのサブシステムが有機的に結合して、データの一元化による制御の迅速化や省力化に役立てている。光ファイバによる情報の大容量化や統合化のほか、誘導線や漏えい同軸ケーブルによる無線伝送、光による空間伝送 (地上～車上間)、列車内光ファイバなど、伝送システムの多様化・高度化が目立っている。

4.2 時隔制御

列車密度の大きい都市鉄道においては、わずかの外

乱でいわゆるダンゴ運転が起りやすい。そこで列車間隔が極端に不均一にならないように列車の時間間隔を適切に制御する必要がある。いろいろなアルゴリズムが提案されているが、列車ダイヤ、信号方式、乗降客の流れなど、多くの要因がからみ合うので、制御方式の評価は難しい。利用者側からは混雑度や所要時間が重要なので時隔の均一化が、また運用者側からは正常ダイヤへの早期復旧が図れるアルゴリズムが要望される。停車時間の調整や駅間走行時間の調整によってなされるが、遅延列車とその前後列車との時間間隔だけを制御することでかなりの効果が得られることが確かめられている。

遅延量だけから混み具合を推定する従来の方法から一歩踏み込んで、旅客量を直接計測し、より定量的な評価に基づいて制御量を合理的に決定しようとする提案がある⁽¹⁴⁾。ホームの待客数は ITV と画像処理装置あるいは自動出改札装置などから推定でき、車内乗客数は車両の応荷重装置の状態を測定することにより知ることができる。これらの実測によって乗降客数と、それをさばくのに要する乗降時間 (必要停車時間) の関係を求めておけば、制御量 (列車に故意に与える遅延量) を旅客量に応じて最適化するアルゴリズムが得られると考えられる。

4.3 分散制御

マイコンの低価格化・高機能化に伴い運行管理システムの分散化が進みつつある。ダイヤに乱れが発生すると、次第に全線に波及するので、乗務員や車両管理も含めた総合的生産調整 (集中管理) が余儀なくされる反面、最終的には駅での信号機制御や旅客案内変更など、分散された機器制御の問題に帰結するからである。しかし各駅はレールで直列に結ばれており、駅システムが故障したからといってそこを迂回して列車運転をするわけにはいかないので、監視の集中化と分散システムの高信頼化はどうしても必要になる。分散化のメリットは、制御の高速化や高信頼化よりむしろ拡張性や改修の容易性で評価されているようである。

図 5 は、神戸市交通局や営団地下鉄、近鉄などの運行管理システムで実用化されている自律分散伝送システムの構成である⁽¹⁵⁾。光二重ループ内の伝送制御装

図 5 自律分散伝送システムの構成

置 (NCP) は駅装置中の伝送サブシステム内で相互に結合されている。各 NCP は、すべて対等で親装置をもたず、独立して障害の検知や回復、迂回路の構成などを行う。情報は発生時点で直ちに各 NCP に中継伝送され、それを必要とする箇所が取り込む。優先制御や割り込み制御を不要として単純化し、自律性を高めている。

5. 新しい列車運転管理システム

5.1 電子閉そく

地方線区の合理化のため、従来の信号方式を抜本的に見直し、低コストの運営を可能にしようとする試みが各国に芽生えている。無線やマイコンを積極的に利用するとともに、駅員と乗務員による運営から、指令員と乗務員による運営、あるいは乗務員だけによる運営へとシステムの転換がみられる。

(1) イギリスの電子トークン 単線区間における古典的な閉そく装置 (列車の正面衝突を防止する装置) は、ある区間の走行を許可する証し (Token) をもった列車でないと走れないようにするものである。トークンの授受には駅員が必要である。そこでトークンを情報化し、管理センタとの間で授受させるようにしたのがイギリスで開発された電子トークンシステムである⁽¹⁶⁾。

管理センタにはトークンを管理するマイコンと無線機が設置される。列車にはトークンを表示する簡易なディスプレイと無線機が搭載される。地上には駅接近を示す標識などだけで、アクティブな機器はない。ポイントもパッシブな割り出し可能形である。

列車が駅を出発するとき、運転士は無線でセンタを呼び出す。指令員は打合せ後、押ボタン操作によりトークンを運転士に渡す。すなわち、マイコンで管理された許可区間コードを無線送信し、運転士のディスプレイ上に駅名で表示させる。列車が次駅に着くと再び打合せの上、運転士の押ボタン操作でこのトークンを返却する。トークンの管理をするマイコンは三重系のフェイルセーフシステムになっており、駅名文字を直接送信・表示するので、伝送誤りがあっても運転士が容易に見発できる。400 km の線区で 1985 年から使用されているが、列車密度は非常に小さい。

(2) 西ドイツの無線閉そく イギリスのシステムに似ているが、センタにはマイコンでなくリレー論理装置と音声出力装置があり、音声で運転士に進行を指示する点に特色がある。運転士からの申告により、指令員はパネル上の列車位置ランプをシフトさせていく。その操作ミスの防止や対向列車とのインタロック

図 6 電子閉そくシステムの構成

をリレー論理装置が行う。指令員の音声でなく、音声出力装置にしたのも安全上の配慮である。Dreiseen 線 (約 19 km) で実用化している。

(3) 日本の電子閉そく⁽¹⁷⁾ 国鉄において 1986 年 11 月に 17 線区 1,830 km で一斉に使用開始された。外国と違う点は、信号機があり、従来線区と同等の保安度であることと、運転士だけで運行できることである。列車密度も前述のイギリスや西ドイツの線区より数倍高い。

図 6 にシステム構成を示す。出発時に運転士が車載装置の出発ボタンを押すと車載装置固有の ID 番号が無線により送信される。駅装置は約 50 m の漏えいベアケーブル (RPC)⁽¹⁸⁾ によりこれを受信し、隣接駅装置に対し出発要請をする。このやりとりは一对の通信回線によってなされる。許可が出ると駅装置は信号機を進行に制御する。次駅に到着すると (軌道回路により検知する)、次駅装置は先刻の ID 番号により車載装置を呼び出し、同じ ID 番号を返送してもらうことにより列車到着と認識する。これによって駅間は列車なしと判定され、次列車を出すことができるようになる。

駅装置は時間差同期方式のマイコンによって構成され、故障時に信号を赤に制御する。通過列車の ID 番号はあらかじめ駅装置に記憶されており、隣接駅から ID 番号が送られてきた時点で通過とわかるから、駅接近時に出発信号機を進行に自動制御する。従って運転士が走行中に押ボタンを押す必要はない。

この方式は、運転士が自らの出発時刻を管理すること、システムが分散化されていること、従来どおり信号機の現示をみて走行する方式であることなどに特徴がある。RPC を用いたのは無線信号を限られたエリアでのみ受信するためである。

センタ (管理駅) にはパーソナルコンピュータが設けられ、駅間連絡回線を用いた中継伝送機能により各駅のモニタができる。またダイヤ変更のためのデータをあらかじめ駅装置に与えることができる。しかし本

質的には運転士が自ら出発のタイミングを与える方式であり、パーソナルコンピュータが故障しても通常は支障のない分散制御形である。

5.2 ASTREE プロジェクト

フランス国鉄では、相次ぐ列車事故に鑑み、意欲的な総合的列車制御プロジェクト ASTREE (Automatisation du Suivi en Temps Réel) を発表した⁽¹⁹⁾。

このシステムの考え方は次のようなものである。すべての列車の位置、速度、加速度、長さなどを管理するリアルタイムのデータベースを構築する。このデータベースは地域分散形であり、相互にネットワークを構成する。これらの情報を基に、地域の処理装置は各列車に対し速度指令を送る。従って、列車と地域の処理装置間のデータ伝送が運転の基本であり、全列車の保安やサービスが均一化し、沿線施設(信号設備)がなくなることによる運営コストの低減が可能になる。列車位置検知が基本なので、パッシブなトランスポンダとドップラレーダの組み合わせが検討されている。

フランス国鉄では、これによって、TGV から信号もない線区の列車に至るまで均質な保安が保たれ、従業員の教育や資材保管などの面でも図り知れない利益があるとしている。1995年には実現する計画で、既に実験を始めている。

5.3 ATCS プロジェクト

ATCS (Advanced Train Control System) と呼ばれるプロジェクトがアメリカとカナダの 100 余のメーカを結集して進められている⁽²⁰⁾。列車の挙動をマイクロエレクトロニクスや通信技術、コンピュータ技術により正確に把握するとともに、列車自体にも自らの状況をわかるようにし、これにより安全、能率、省エネルギーなどの課題を解決するものである。

互換性、発展性を考え、表 2 に示す五つのレベルを想定している。これが実現すれば、駅近傍を除いて地上信号設備は不要になり、更に運転用動力費が北米全体で年間 1 億ドル以上削減できるとしている。

表 2 ATCS の発展レベル

レベル	技術手段	目的
10	無線による運転指示とコンピュータによる監視	閉鎖線区の保安度向上とコスト削減
20	車載コンピュータによる指令の認識と表示	より一層の保安度向上と誤扱いの防止
30	全列車位置の追跡ソフトウェアと速度監視システム	速度制限、所を含む速度監視と動力費節減
40	運行管理システムの付加	速度調整やポイント制御を含むトラフィック制御
50	運転計画を含む高度化	輸送システム全体の高度化

6. む す び

以上のほか、車両あるいは列車を一つのシステムとしてみようとする考え方、座席予約の状況と列車設定計画を結びつけるシステム、更に列車計画や乗務員管理のシステム化など紹介すべきテーマは多いが別の機会に譲る。

1989 年に 300 km/h を実現するというフランスの計画や無線を用いて列車を制御しようとする ASTREE・ATCS プロジェクトは、日本国鉄の分割・民営化による再出発とともに、確かに鉄道の新しい時代を告げるものといえる。この機を逸することなく、漸新な発想をシステム制御技術と結びつけることが緊要で、そうしてこそ、鉄道がほかの交通機関に十分伍していけるものと確信している。(昭和 62 年 3 月 25 日受付)

文 献

- (1) 佐々木:「信号保安装置とマイクロエレクトロニクス」鉄道技術研究資料 41, 4, 131 (昭 59-4)
- (2) H. Strelow: "Das Sichere Mikrocomputersystem SIMIS" *Signal und Draht* 70, 4, 82 (1978-4)
- (3) 中村・川久保・奥村:「内部三重系構造をもつフェイルセーフ計算機システムの開発」電学論 C, 102, 85 (昭 57-4)
- (4) 大野・角山:「マイコンによるフェイルセーフ構成の一手法」電気学会電気鉄道研究会資料 RAT-83, p. 16 (昭 58-6)
- (5) B.J. Sterner: "Computerized Interlocking System" *Railway Engineer International* 3, 6, 29 (1978-11)
- (6) 高重:「デジタルフィルタを利用した ATC 車上受信器の小形化に関する一考察」電気学会システム制御研究会資料 SC-83, p. 47 (昭 58-11)
- (7) K. Akita, et al.: "Computerized Interlocking System for Railway Signalling Control" *IEEE Trans. Industry Applic. IA-21*, 3, 826 (1985-5/6)
- (8) 渡辺, 他:「軌道回路の短絡インピーダンス変化による連続列車位置検知」電気学会電気鉄道研究会資料 RAT-86, p. 17 (昭 61-15)
- (9) 日本鉄道技術協会: 高密度運転線区に適用する列車制御システムの研究報告書 (昭 61-3)
- (10) 安信・宮本:「Fuzzy 制御の自動列車運転システムへの応用」電学誌 104, 17 (昭 59-10)
- (11) 藤原, 他:「Fuzzy 制御方式による自動列車運転装置の開発」第 20 回鉄道サイバネティクス論文集 p. 272 (昭 58-11)
- (12) 日本鉄道技術協会: JREA '86 カナダ視察団報告書 p. 23 (昭 61-8)
- (13) 宮地:「トランスポンダを用いた双方向伝送システムの構成」電気学会電気鉄道研究会資料 RAT-86, p. 10 (昭 61-5)
- (14) 駒谷, 他:「旅客量情報を用いた列車群制御方式」第 23 回鉄道サイバネティクス論文集 (昭 61-11)
- (15) 井原・大島:「自律分散システムとその応用」電学誌 104, 169 (昭 59-3)
- (16) M. S. Birkin: "Low Cost Signalling by Radio" *IRSE Symposium* (1984-11)
- (17) T. Sasaki: "Development of Electronic Blocking System" *Japanese Railway Engineering* No. 99 (1986-9)
- (18) 天野, 他:「燃り対型漏えいケーブル (RPC) の開発」住友電気 123 号, p. 106 (昭 58-9)
- (19) J. Dupuy: "Safety Control for All SNCF Lines" *International Railway Journal* 26, 4, 31 (1986-4)
- (20) P. Detmold: "ATCS will close the control loop" *Railway Gazette International* 142, 1, 29 (1986-1)