

# 列車自動運転の最近の傾向

## Recent Tendency in Automatic Train Operating Equipment

高岡 征\* *Tadashi Takaoka*

Equipment designed for automation of railroad operation is classified largely by function into the automatic traffic control (ATC) equipment and automatic train operation (ATO) equipment. The former, aimed chiefly at safety, has been in practical use for some time now. The latter has as its purpose the efficient operation of trains and labor saving in addition to enhanced safety. Although it has been developed and tested in parallel with the ATC system, the ATO system so far has been applied practically in very few instances. But recent technical advances are enabling the ATO system to be introduced more extensively to meet the growing demand for more efficient train operation, greater safety, and labor saving. The latest tendency in the ATC and ATO systems is described together with the future progress of automatic railroad operation in which these systems are combined with ground-based control systems.

### 1 緒言

最近の目ざましい電子技術の進歩はATC(列車運行の自動制御)装置やATO(列車自動運転)装置に少なからぬ変化を与えた。

その一つは半導体技術の進歩によるIC(集積回路)、MSI(中規模集積回路)、LSI(大規模集積回路)などの出現であり、部品数の減少による高信頼化や安価、小形化に画期的な変化を与えた。特に比較的複雑であるATO装置においてはデジタル演算によらないと精度的に不十分なこともあり、デジタルICの一般化により一挙に実用化が促進される状態となった。

一方、演算方式の開発および進歩も急であり、従来のアナログ演算よりデジタル演算へ、さらにはデジタルでありながらフェールセーフが可能で簡易なリング演算方式に至っている。このリング演算方式の開発により、従来デジタル演算の短所とされていたフェールセーフ化困難な点が改善され、いまやATC装置やATO装置においてはデジタル演算が有利である場合が大部分となるに至った。

他方、応用の面よりこれを見ると、主流は個々の列車の自動制御であり、安全度の向上が主体となっており、他に入換運転や製

鉄所構内での省力化を主体とした場合がある。しかし、このような個々の列車の制御だけでは当然その効果に限界が生じ、複数の列車を群としてとらえ、これらを最も有効かつ効率的に運用して初めて運行の効率化や自動運転の有効性が最大限に発揮される。

今後はこのような地上に設置され列車群への制御指令を発する運行管制システムと、これを伝送系を経て車上へ伝達し、個々の列車を自動制御する車上制御装置との有機的な結合が不可欠となろう。

また、このような地上と車上を結合した自動化システムにおける自動運転装置には、当然従来の個々の列車制御の場合にはなかった機能が要求されてくる。それは効率化された運行に対応するための乗務員の補助をするものであり、また乗客へのサービスに関するものでもある。

### 2 最近の自動運転装置の概要

#### 2.1 横浜市交通局納め自動運転装置

横浜市営地下鉄1号線用にATC装置およびATO装置を納入し、今秋に予定される開業に備え練習運転中であるが、ATO装置にお

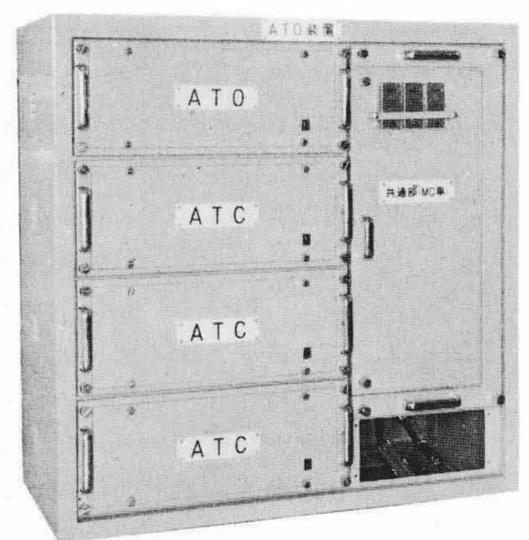
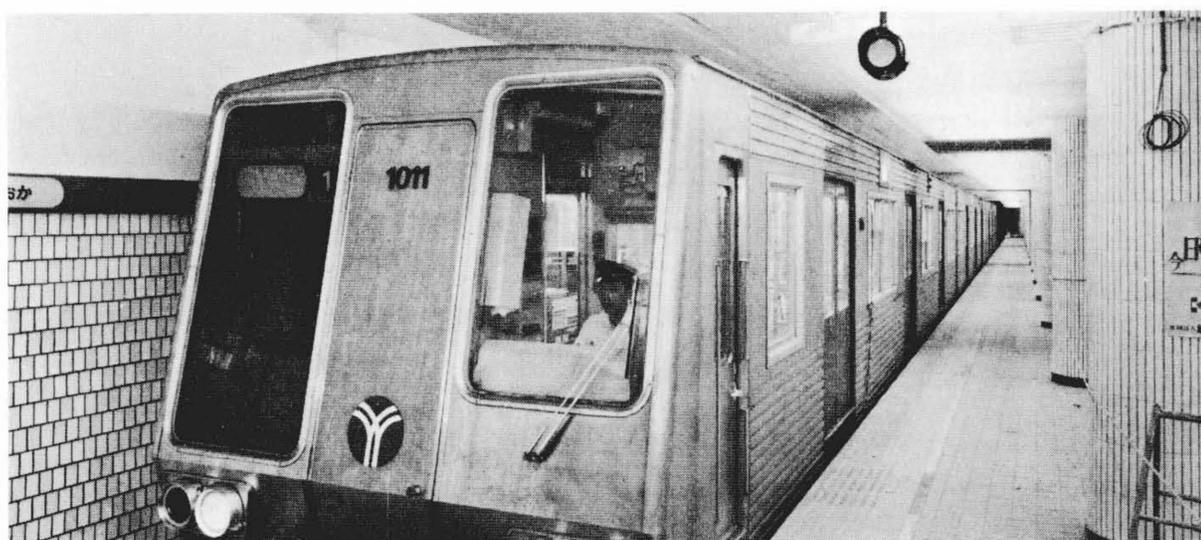


図1 横浜市営地下鉄電車(左)と運転台に装備されるATO装置(右) 三重系のATC装置と一重系のATO装置を設備し、乗務員が発車押しボタン操作するだけで発車から駅停車までの全自動運転が可能である。

Fig.1 ATO Equipment for Yokohama Municipal Subway Cars

\* 日立製作所水戸工場

いて最も困難な制御とされている定位置停止制御において停車位置のばらつき幅は±20cm以内という前例のないような高精度を示している。本装置の構成にあたり最も留意した点は、機器間の機能バランス、信頼度の向上、機器の簡素化、保守の簡易化などであり、演算はすべてモノリシックICによるデジタル演算としている。

(1) ATC装置

ATC装置は安全確保の観点から最も重要な機器であるので、三重系構成とし多数決論理をとることとした。演算方式は全デジタルリング演算方式であり、これによりアナログ演算より小形で部品点数の少ない、しかも高精度でフェールセーフな速度照査系を構成することに成功した。また多重化された各照査系のトレイおよびプリント板は完全な互換性を有し、さらにトレイ内の電源部についてもパック化し安全性の向上を図っている。

(2) ATO装置

ATO装置はATCで指示された許容速度以下で自動運転可能とすることを基本としており、一重系構成となっている。

演算はATC部と同様リング演算を採用、高精度化、簡易化を図っている。有する機能としては駅間の定速走行と停止駅での定点停止であり、乗務員が発車押しボタンを押すことにより全自動運転が可能な構成となっている。すなわち、発車押しボタンを操作し、車両の走行条件が整っていれば、列車は加速を始めATCにより指示された速度の下で速度バンド走行を行なう。もちろん途中でATC信号が下位に変化すれば、低下した新しいATC指示速度に従って走行を継続する。次駅に接近すると、プラットフォームの所定停止点より一定距離手前に設置された地上子により地点を検知し、これにより停止用放物線パターンを車上ATO装置内で発生し、これに列車速度を追従させる。放物線パターンへの追従制御方式としては、比例制御方式を採用し、放物線パターンと列車の実速度との速度差に比例したブレーキ力を与えることとした。このようにリング演算方式と比例制御方式の採用により停止位置のばらつきは±20cm以内という高精度が得られており、その小形、高信頼度な点とあわせ大きな特長となっている。

2.2 東京駅地下乗入れ車用ATC装置

昭和47年7月に東京駅に国鉄総武線が乗り入れられ、将来横須賀線との直通運転が計画されているが、今回総武線地下区間用にATC装置37セットが納入され、稼動を開始している。本ATC装置は新幹線ATCと同じく、三重系構成であるが、演算方式は新幹線ATCがアナログであるのに対し、本ATCはリング演算

方式による全デジタルであり、最新の技術を盛り込んだものである。最も特長とする点は故障検知方式であり、リング時分割演算の利点を生かし、確実な故障検知を少ない部品で実現することである。一般に故障検知回路に要求される条件としては、信頼度が高いことが不可欠であり、いくら完全な故障検知といっても故障検知回路の故障が目だつようでは本末転倒と言わざるを得ない。リング演算によると故障判定回路はIC4個だけで判定できるので、十分な高信頼度を得ることができる。

本ATCの演算部で処理するおもな機能は次の6種である。

- (a)クロック発生 (b)基準パルス発生 (c)車輪径補正 (d)周波数比較 (e)故障検知 (f)後退検知

図3はATC構成説明図であるが、同様に三重系構成のATC受信器よりATC制限速度信号を受け、この制限速度信号以下に列車速度を制御する。このため基準パルス発生部ではATC信号に対応した基準周波数を発生し、これと速度発電機出力周波数と周波数比較を行ない、基準周波数のほうが高ければ安全であるが、速度発電機出力周波数のほうが高ければ、ブレーキ指令を発し列車速度を低下させなければならない。また速度発電機は車軸に取り付けられており、車輪直径の変化により出力周波数が変動するため、これを補正し、常に一定の速度対出力周波数の関係が保たれるように、車輪径に応じた一定の比率を掛算する車輪径補正回路

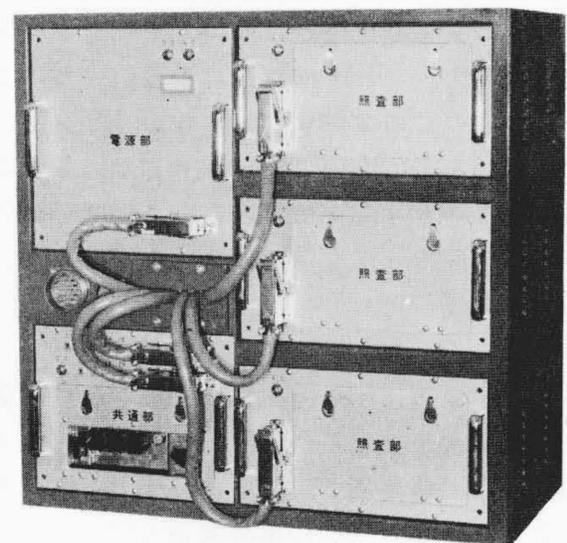


図2 東京駅地下乗入れ車用ATC装置 リング演算方式の採用により、画期的ハードウェアの簡易化と確実な故障検知が可能である。

Fig.2 Automatic Traffic Control Equipment(ATC)for Sobu Line (JNR)

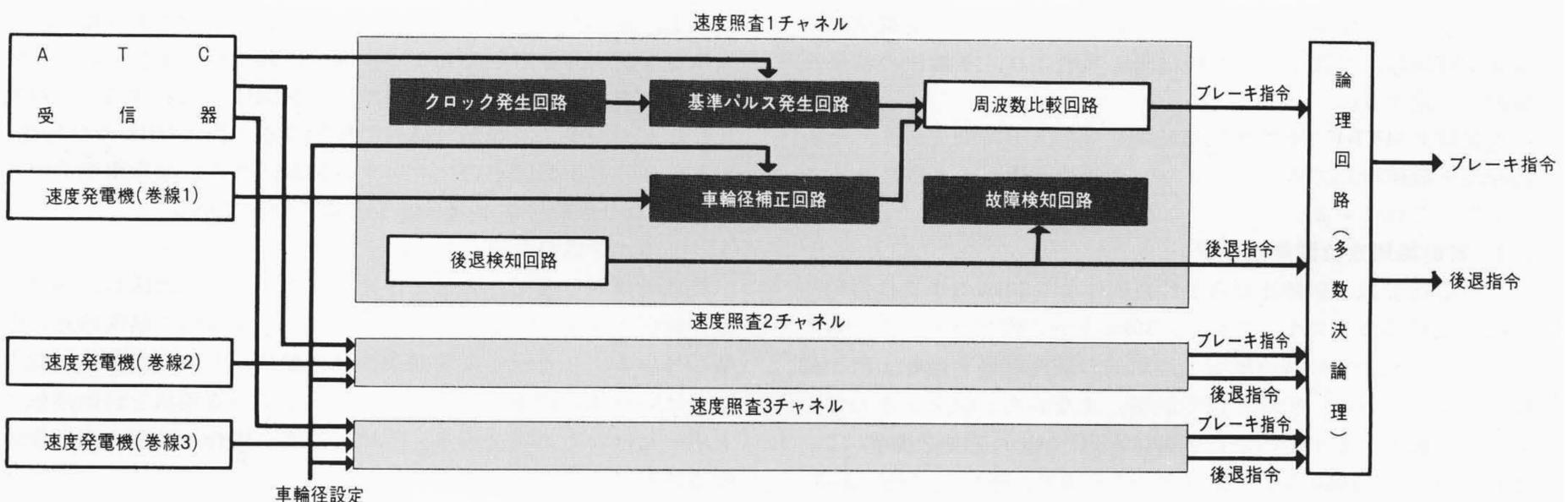


図3 ATC構成説明図 演算の主要部分はリング演算化されており、簡易化と高精度化が図られている。

Fig.3 Block Diagram of Automatic Traffic Control Equipment (ATC)



図4 リモコン式ATO (ATOR) 従来、乗務員、誘導連結手、ポイント切換手の3名で運用していたが、ATORの採用によりワンマン化されている。

Fig.4 Remote Control Type Automatic Train Control Equipment (ATOR)

路が必要である。図3の速度照査回路においては、これらの基準パルス発生と車輪径補正の2機能が最も重要で部品点数を要するものである。クロック発生はリング演算を行なわせるための統括制御を行なうもので、これも演算には不可欠のものである。今回のATCでは中心のこの3ブロックについてリング演算を適用している。後退検知をIC2個で実現させるため、また比較回路は2~3回路以上ないとリング演算の有効さが素子減少の面で発揮されないため、今回はリング演算に入れなかったが、その後の研究により1回路の場合でもリング演算が有利となしうることが判明している。

具体的にリング演算にて故障を検知する手法は、図3の基準パルス発生、車輪径補正とさらに故障検知用演算要素の三つを平等に同一の演算経路、演算素子により演算することにある。すなわち時分割によりこれらの三つの演算要素を同一のハードウェアで順次演算するわけであり、基準パルス発生と、車輪径補正は本来の目的とする演算を行なうわけであるが、故障検知用演算要素は共通の演算経路、演算素子に故障がないかどうかを的確に検知できるような演算を行なわせている。これによって演算経路や素子の微妙な誤りや従来検知不能であった数値のドリフト的变化までも確実に補捉することができる。

以上によって正確に演算されたブレーキ指令および後退検知指令は論理回路にて他チャンネルの結果と照合され、多数決の結果を車両に伝達する。

本装置のMTBF(平均無故障時間)は約3万時間であり、その高精度と故障検知方式とあいまって今後のATCの基本となることが期待されている。

### 2.3 新幹線用定位置停止装置

東海道新幹線の駅停止はATC装置により30km/hまでは自動的に減速されるようになっており、30km/hから駅プラットフォームの所定の停止点までの減速制御と、駅間の速度制御を運転士の手動操作によって行っている。駅間の速度制御、すなわち、駅を発車してから次駅に接近するまでの走行制御はATCの指示速度を規準にし、これより約5~10km/h下を走行させると通常の運行が可能である。この速度制御の自動化はすでに数回の試作を経ており、技術的には開発が完了している。一方、定位置停止制御のほうも新幹線以外の在来線や私鉄などで幾多の試作試験を重ねており、技術的には

完成の域にあるが、今回の試作は運転時分の短縮を大きな目的として行なわれた。すなわち、新幹線の場合30km/h以下の手動操作の範囲だけを自動化すればよいのであるが、実際の運転ではATCの信号セクションには余裕があり、また車両のブレーキ性能がよいため速く減速し、160km/h、70km/hおよび30km/h付近の走行区間が相当あって停止時分を長びかせている。よって定位置に自動停止させると同時に、これらの時間短縮をも考慮し、ATC信号を越えた放物線パターンを発生しこれに追従制御させたものである。この定位置停止装置の特長は、ATC信号を越えた追従パターンにあり、よってATC装置なみのフェールセーフ化と信頼性を要求されることにある。このため三重系構成とし、2 out of 3によりブレーキ指令を発生し車両を制御している。

東海道新幹線電車のブレーキ系の応答は最近の地下鉄車両などに比較して遅れが大きい、停止精度は実用に供しうる良好な成績を示した。また、駅停車時ののろのろ運転がなくなるため、ATC信号の160km/hから制御すると一駅平均約40秒の時間短縮が可能となり、東京・新大阪間全体では約8分の時間短縮ができる。これは「こだま」運転の場合、現状の210km/h運転を230km/h運転にスピードアップしたことに相当すると言われている。

### 2.4 その他の自動運転装置

以上、述べたものは旅客電車を対象としたものであったが、貨物輸送など旅客を対象としない車両の自動化も増加している。具体的には液体式ディーゼル機関車(以下DHLと略称する)を対象としたものが多く、製鉄所構内で稼働する入換用DHLの自動化、あるいは除雪用機関車のプログラム制御、さらには操車場での入換えDHLの自動化など分野は多岐にわたっている。

#### (1) リモコン式自動運転装置

製鉄所構内で運搬、入換え作業に従事しているDHLは、通常の旅客輸送とは異なり溶けた鉄や製品などの重量物の構内輸送に従事している。したがって周囲条件は過酷で、しかも機関車の能力いっぱいの重い荷重を名人芸で引き出している現状を自動運転で実現せねばならぬ場合も多く、旅客電車の場合とは別の高性能が要求されてくる。

本ATOは70MHz帯の電波を使用した携帯式微弱電界無線機の指令によるリモコン式自動運転装置で、携帯送信機を従来の誘導連結手(旗振り)に操作させ、運転手とポイント切換手の役めまで

を兼ねさせようとするものである。これによって従来一両のDHLに3名の要員が必要だったのが、1名で十分となり、四直三交代勤務のため1両で8名の省力化が可能となる。このようなワンマン化のためには人間工学的考察が最も重要であり、何を自動化し何を手動として残すか、またDHL以外の設備も改善しワンマン化された操作手を補助することなど検討する項目は多い。幸い本ATOは使用側各位のご指導により、このような人間工学的面においても成果をあげており、現在まで約170セットのワンマン化DHL用ATOが全国の10製鉄所において稼動中であり、今後も着実に増加するものと予想されている。今後の傾向としてはワンマン化をさらに進め、二人で3両のDHLを制御する、あるいは一人で2両のDHLを制御するなど高度化が図られると同時に、部分的には無人化DHLが運行されるようになる。この場合には微弱電界無線方式だけでは不十分であり、これと有線とを結合したような情報伝送系が要求されよう。

### (2) 除雪車用プログラム自動運転装置

除雪用DHLのプログラム自動運転装置(以下PTCと略称する)は、吹雪(ふぶき)中または夜間の除雪作業に出動する場合、前方の見通しが不十分なことにより危険な事態が予想されるため、また高速除雪が不可能なため開発したものである。本PTC装置は昭和44年から設計製作を開始し、46年3月および47年3月の2回にわたり信越線直江津～妙高高原間で本線試験が実施され、良好な成果を得たので、その実用化が確認されたものである。

装置の基本的な考え方は、自動運転を行なう線区の運転曲線、踏切や鉄橋、トンネルなどの線路状況を、DHLの走行距離に応じて読み出し、この読み出されたプログラムにより走行速度と除雪翼を自動制御するものである。したがって、乗務員は通常の運転および除雪作業から開放され、もっぱら前方監視に専念できる。もちろん異常を認めればただちに手動側に切換え可能である。また除雪作業も操作スイッチにより、かき寄せ翼は閉または開位置に手動操作ができ、フランジヤの上げ下げも同様手動優先に組み込まれている。

本PTCは今までに試作された自動運転装置の中では最も多くの機能を有するものであり、定速走行制御、除雪翼プログラム制御、障害物に接近時、翼が閉じないと脱線するため、これを防止するパターン式自動停止制御などが可能である。直江津駅で発車押しボタンを押せば妙高高原駅までの約30km間を除雪しながら自動運転が可能である。演算方式はリング演算方式であり、簡易で高信頼度の特長が生かされている。本PTC装置はDD15形除雪車に取り付けられたものであるが、これはすでに三度にわたる試作を完了している操車場内での入換え運転自動化用DE10形DHL用ATOの成果をその基としている。

## 3 自動運転と今後の動向

### 3.1 今後要求される機能

昨今、鉄道に対する要求も多様化しつつあり、それに伴って自動運転にも大きな変化が生じつつある。また電子技術の進歩、とりわけ情報処理手法における急速の進歩により、従来不可能とされたものが可能となりつつある面も多い。列車を操縦するという面から見ると発車し駅間をATC信号によって走行し、次駅に停車するという運転パターンは変わらず、ATO装置のダイナミックスの制御の面では機能的には大きく変わらない。一方、従来のATO装置は運転士による発車指令により動作を起こし、以後は自動的に自分で処理するように、ダイナミックスの制御を中心とし、論理状況判断は人間(運転士など)にたよる面が多かった。現在最も変化が激しいのはこの人間の論理・状況判断をどのようにATO装置に採り入れるかの接点であり、運転士にはより人間に適した

業務を集中し、機械化できる業務、運転士を補助する業務を極力自動化しようとするものである。

このため今後要求される機能としては次のようなものがある。

#### (1) 中央の運行センターとの運行データの受渡し

列車群の管制より得られる個々の列車へのデータを受け、これをATOにセットするとともに、自列車の状況を中央へ返送する業務

#### (2) 乗務員を補助するための表示や案内放送業務

中央からの個々制車へのデータはATOに直接インプットされるものも多い。たとえば、回復運転指令や、駅出発時刻の変更などである。これらの情報を乗務員に知らせるための表示や、従来車掌が行なってきた車内案内放送の自動化などを担当する業務

#### (3) ホームや車内状況の監視

将来、ワンマン化を行なう場合、ホームや車内状況の把握(はあく)を容易にする必要がある。このため運転台にこれらのビデオ表示が要求されよう。

#### (4) 主要車両機器の故障表示と診断

駅間にて車両が故障したとき、次駅まで走行できるのか否か、またどの車両や機器を開放したらよいか、たとえば、主回路の過電圧や過電流の検知などについて表示を行ない、運転士を助ける業務

#### (5) 入出庫の際の自動制御

出庫の際、車庫の停留位置より自動的に車庫出口まで回送し、出口でATOなどの機能を試験することおよび車庫入口まで手動運転してきた電車を停留位置にまで回送する制御。

#### (6) 故障記録の収集と自動試験機との結合

故障状況を常時記録し、入庫の際の試験を容易にする。

#### (7) 運行記録

### 3.2 運行管制との関係と情報伝送

地上の運行管制と車上ATOとの伝送内容は、円滑に運用可能な範囲で極力減らし、地上装置、伝送系、車上装置をあわせたシステム全体の信頼性と、故障時も大きな混乱がないように全体構成を考える必要がある。よって情報伝送内容を検討することはシステム全体に大きな影響を与えることがわかるが、ここでは伝送内容について考える。

#### (1) 地上から車上へのおもな情報伝送項目

(a)列車番号 (b)運行ダイヤ種別指定 (c)発車許可指令 (d)発車までの残時間表示 (e)列車種別および行先 (f)電話(音声)

#### (2) 車上から地上へのおもな情報伝送項目

基本的に車上から地上へ与える情報は電話による音声通話だけであるが、データでは誤り検知のための返送照合データが主となる。

(a)列車番号 (b)運行ダイヤ種別指定(返送照合用) (c)発車許可指令(返送照合用) (d)発車までの残時間表示(返送照合用) (e)列車種別および行先(返送照合用) (f)電話(音声)

以上のような情報の受渡しを境に地上、車上で制御処理を分担するのが良いと考える。

### 3.3 自動運転の今後の動向

列車運転の自動化が、個々の列車の制御技術を基として、列車群の制御を含むものに発展しつつあることを以上に述べた。しかしながら列車自動制御装置も、ほかの製品と同様に、需要者側の経済的理由または採算性からの制約から、具体的にどの機能までを自動化していくか、今後検討を要する問題も多い。そのためには、必要な機能の分析と割付け、効果の算定、価格など種々の面からの検討を積み上げるとともに、具体的にいかにそれを実現するか、ハードウェアの面からの検討も不可欠である。

ことに、従来ダイナミックスの制御を中心に進めてきたATOのハードウェアと、新たに要求されている機能を包含するための追加すべきハードウェアとを有機的に結合した新しいハードウェア

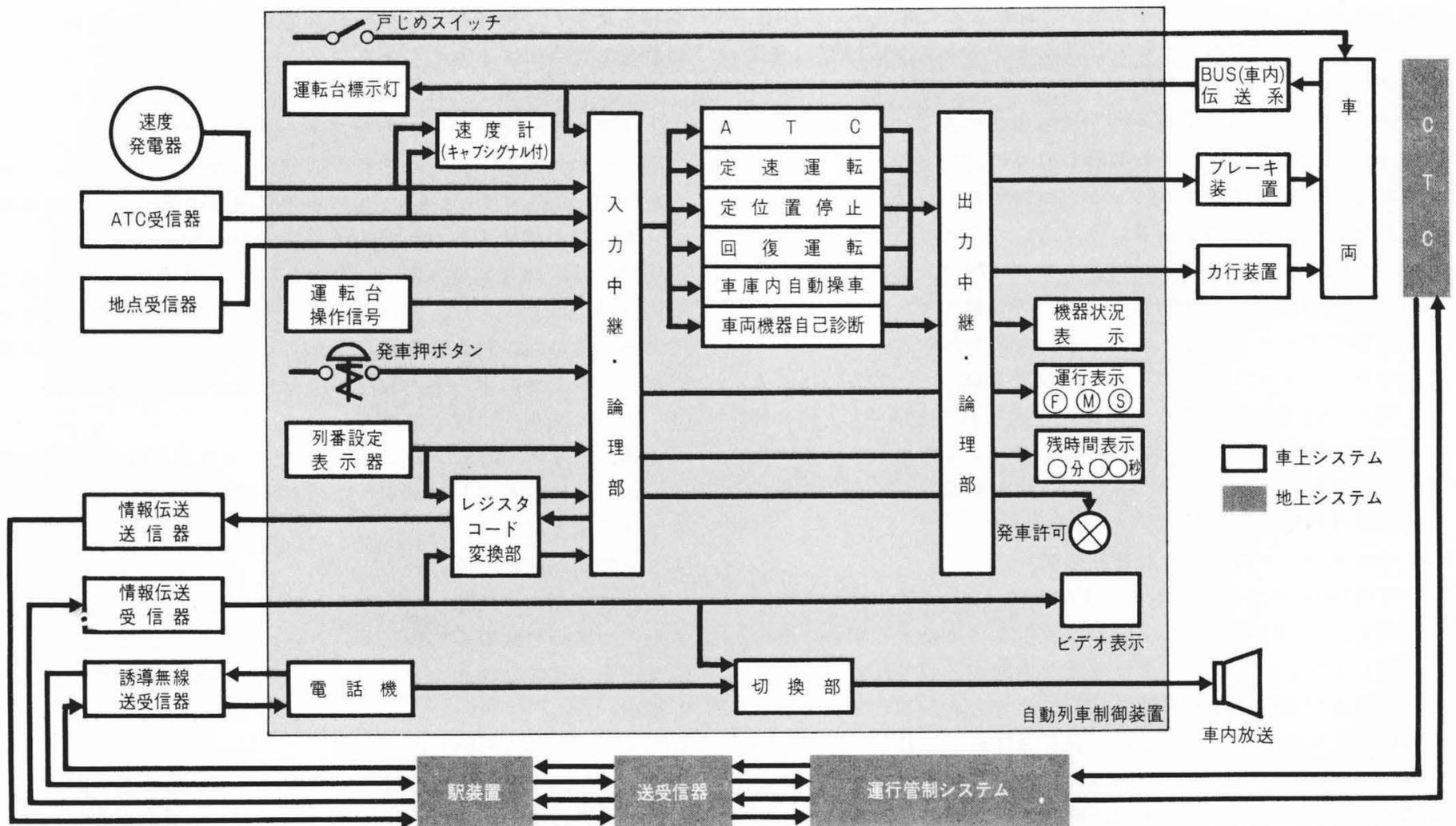


図5 列車制御システムブロック図 高効率な輸送システムにおける自動運転装置は、運行管制システムとの連携をとり、列車を最適に制御するような機能を有したものになる。

Fig.5 System Block Diagram of Automatic Train Control

が必要である。この新しいハードウェアに要求されるおもな項目は次のようなものである。

- (1) フェールセーフ。(2) 耐環境性能にすぐれていること。
- (3) 高信頼度でメモリはROM(固定メモリ)であること。
- (4) 多重系構成が容易であること。(5) 小形、安価であること。
- (6) ハードウェアの標準化が可能であること。
- (7) 演算能力は車上の制御をすべて処理できるものであること。
- (8) 今後の技術の発展を取り入れやすい方式であること。

図5は以上に示すハードウェアによる列車制御システム構成例を示したものである。運転士の操作を中心にその動作を説明するが、運転士が扱うおもなものは下記のとおりである。

- (a)マスコン、ブレーキ弁、確認スイッチ類 (b)速度計(キャブシグナル付) (c)運転台表示灯 (d)電話機 (e)戸じめスイッチ (f)ビデオ表示 (g)発車押しボタン (h)列車番号設定表示器 (i)残存停止時分デジタル表示 (j)発車許可表示 (k)運行ダイヤ表示 (l)機器状況表示

以上のうち(a)~(e)は従来の車両でも有していたものであるが、今までは操作を運転士と車掌が分担していたものである。(f)は従来車掌が行なった業務を運転台に設置されたホーム状況画像により運転士に行なわせようとするものである。(g)~(l)まではATOと運転士のインターフェース部であり、発車までの残り時間を表示し、運行管制から発車OKの指令がくると、発車押しボタンを操作し列車は走行を開始する。運行ダイヤ表示は運行されるダイヤ種別を乗務員に知らせるものである。なお運転士は始発駅にて列車番号設定を行なっておき、列車の運行に際し、機器状況の表示により車両主要機器の可否を監視する必要がある。

運転士の操作と運行について一例を示すと下記ようになる。

駅停車中運転士は残存停止時分のデジタル表示(i)とホーム監視(f)を主として行なう。残存時分デジタル表示がゼロに近づくと地上より伝送回線を経て車内放送が行なわれる。運転士はホーム状況を見ながら戸じめ操作(e)を行ない、次いで残存時分と発車

許可表示(j)を確認し発車押しボタン(g)を操作する。

列車が加速し始めると運転士は前方を注意し、キャブシグナル付速度計(b)で監視しATC、ATOが正常であることを、運転台表示灯(c)により車両の主要機器が正常であることを確認する。運転台表示灯に異常が表示されると、それによってどのような処置をとらねばならないか、運転士の判断を助けるための簡単な指示が機器状況表示(l)により与えられる。緊急の処理については、必要に応じて電話(d)により指令室と連絡をとり適切な処置を行なうことになる。緊急の事態や他列車のダイヤの乱れなどから走行パターンを変更する必要が生ずると運行管理システムの指示がATOに直接インプットされ、運行ダイヤ表示灯(k)にもこれが表示され、運転士にこれを知らせる。

#### 4 結 言

鉄道における自動化システムは運行管制を中心とした地上システムと、自動運転を中心とした車上システムおよびこれらを結合する情報伝送システムの緊密な連携の下に構成される。

このような車上システムに適合したハードウェアは、従来の個々の列車制御に必要であった機能に、他のシステムおよび乗務員と有機的に結合するための機能が追加された新しいハードウェアが必要である。

これらの機能の配分とウエイトおよび問題点は対象によってかなり変化するが、本質は同一である。われわれはこれに対処するため、リング演算を中心とした、フェールセーフ化可能な車両用デジタル制御器をこれに適用する考えである。これによって従来のハードウェアでは困難であった論理判断処理が可能になると同時に、汎用制御用計算機の適用では困難なフェールセーフ化や小形化を実現したい。

終わりにあたり、終始懇切なご指導を賜った日本国有鉄道車両設計事務所の関係各位、ならびに横浜市交通局の関係各位に深く感謝の意を表す。