

信号革新を目指して

東日本旅客鉄道株式会社 設備部兼 JR 東日本研究開発センター 担当部長 松本 雅行



鉄道信号の歴史を見ると、信号装置は、機械から、リレー、電気、電子、さらにコンピュータへとエレクトロニクス技術の進展に伴い発展してきました。特に、JR 東日本になってからは、コンピュータ技術、ネットワーク技術を駆使して、ATOS、COSMOS、デジタルATCなど、技術のブレークスルーを行って画期的なシステムを構築しています。

ところが、現場の信号機器の制御は相変わらず配線技術に頼っていたため、2003 年9月中央線の輸送障害を発生させてしまいました。この対策のためネットワーク信号制御システムを開発していますが、さらに今後どのような研究開発が求められるかについて述べています。

1 はじめに

鉄道の信号装置の発達の経緯を見ますと、大きな事故の対策として新しい信号装置を導入後、その盲点をつくり形で新たな事故が発生し、また別の対策を施すという、いわばイタチゴッコのような形で発達してきたのが実情です。初めの頃、信号装置は運転事故をいかに防ぐか、事故を契機に導入が進められてきたのですが、今日では、安全性をベースにしつつ運転能率やお客様へのサービスをいかに向上するかというニーズから新しいシステムの開発も行われています。ところが、現場に置かれている信号機、転てつ機などの制御には昔からの配線技術を使っているため問題があったのです。

本文では、鉄道信号の歴史を振り返り、特に JR 東日本になってからの運転業務だけでなく、輸送業務も含めて革新的なシステムを作ってきたことにもふれ、現在の信号の抱えている問題を明らかにした上で、今後の信号システムのあり方について述べてみたいと思います。

2 鉄道信号の歴史

2.1 黎明期

当初は馬に乗った旗振り（旗振り）が汽車に先行して走って安全を確保していましたが、列車速度が向上し線路の分岐点もふえると、要所にポリスメンという見張人を置いて、危害（両手頭上）、注意（片腕頭上）、無難（片腕横に）の手合図を出して安全な列車運行を行っていたのです。その後、一定の場所に常置の合図を掲げる設備がおかれ、これが「セマフォア・シグナル」と呼ばれ、腕

木式信号機（図1）へと発展していったのです。

さらに、ある区間に1列車以上が同時進入しないようにするために閉そく装置、列車の存在を検知するため発明された軌道回路、分岐器の開通方向と信号機に関連を持たせる連動装置などが考案され、19世紀後半のこれらの信号装置によって、今日の鉄道信号の基礎が築かれたのです。これらの装置はその後いくつもの改良が加えられ、安全の改善に大きく貢献してきてきました。こうして、信号装置は安全の確保と輸送量増に対処するために導入されてきていました。

2.2 信号扱いの機械化

鉄道ができた初めの頃、列車の進路を変えるには、駅の係員が分岐器まで行って転換していました。しかし、列車の本数が増え行き違いをする場合は、同時に複数の分岐器を操作し、列車に合図を送らなければならないのです。こうなると一人で扱うことができなくなりました。複数の人で受け持つと相互に連絡や確認が必要になりますが、人間の注意力のみで安全を確保するには限界があります。そこで、分岐器の開通方向と信号機の動作に連携（これを連鎖といいますが）を持たせ、列車の安全を確保する仕組みが必要になったのです。この機能を司るのが「連動装置」です。

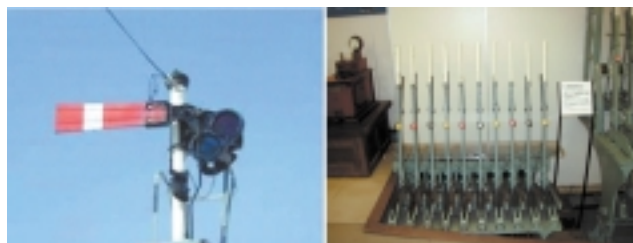


図1 腕木式信号機と機械連動装置

まず、「機械連動装置」という装置が1856年に発明されました（図1）。この装置は、信号機、分岐器相互間の連鎖を機械的に行うものです。ワイヤーや鉄管で信号機と分岐器を動かしていますが、分岐器が開通して進行できる条件が整った時のみ信号機が「進行」を指示できるようになっていて、これで安全を確保していました。

機械連動装置は手で動かしていて、保守に手間がかかることなどのため効率的ではなかったので、1929年に、電気によってリレーを動作させる「継電連動装置」が考案されました。これはリレー回路の組み合わせにより鎖錠を施し、リレーの接点で信号機や転てつ機を制御しているもので、一つの進路上にいくつかの信号機や転てつ機があっても一つの「てこ」とよぶスイッチを操作することによって、必要な転てつ機を自動的に転換し、信号を現示するという優れた機能を持っています。

2.3 運転ミスの防止

運転士が信号を確認しながら運転するだけでは事故が減らないので、運転士に停止信号に近づいていることを知らせる車内警報装置が考案され装備されましたが、これも見落としてしまうことによる事故が起こったのです。そこで、自動的に停止させる機能を付加した、自動列車停止装置（ATS）が登場しました。この装置は、停止信号を現示している信号機の手前で自動的に列車を停止させてこれらの事故を防ぐことができるのです。もし運転士が警報を見落としたり無視したりすると、自動的にブレーキがかかるというシステムになっているのです。このATSは三河島事故を契機に、1966年には国鉄の全線に整備されました。

ところが、この装置にも弱点があったのです。それは、運転士が確認扱いをすると、警報がキャンセルされてしまい、その後、運転士がミスをすれば運転事故は起きてしまうのです。これを解決するために開発されたのが、あとで説明します新型ATS（ATS-P）なのです。

3 信号装置のさらなる進歩

戦後まもなく発明されたトランジスターは私たちの生活を大きく変えてきたのは皆さんもご存知のとおりです。

リレーからトランジスターへ、ICへと進化し、さらにはコンピュータへとエレクトロニクス技術が20世紀半ばから急速に進歩してきました。これらの新しい技術を使って数々の新しい信号装置・信号システムが開発実用化されたのです。

3.1 てこ扱いの自動化

先に紹介しました連動装置は駅単位に設備されているので、それを取り扱う「扱い者」も駅毎に配置しなければなりません。一方、その線区全体の列車の運行状況を把握し、交通整理する「指令員」も必要です。そこで、この指令員が指令センターから複数駅の連動装置を介して転てつ機や信号機を遠隔制御する装置として列車集中制御装置（CTC）が1927年に実用化されました。

このCTCにより線区の運転取り扱い、中央の指令に一元化され、その能率は以前に比べて格段と向上したわけですが、ところが、列車本数が増大してくると人間の処理では追いつけなくなり、また取り扱い誤りを皆無にすることができないなどの限界もあったのです。そこで、この人間による業務を、列車の動きにもとづきあらかじめ決められた手順（プログラム）にしたがって進路を自動的に制御するようにし、業務のさらなる効率化と信頼性の向上を図ろうとして開発されたのが、プログラム進路制御装置（PRC）です。

3.2 列車制御の進歩

ATSの弱点を克服するために、常に停止信号までに停止する「速度パターン」を持って、走行速度と比較しながら運転するという機能を有した新型自動列車停止装置（ATS-P）という列車制御システムが開発されました。1973年に発生した関西本線平野駅での列車脱線事故を契機に開発され、当初はATSと同じ「変周式」でしたが、非常ブレーキの使用と情報量の不足という問題があったため、トランスポンダを使用した現在のATS-Pとなったのです。このATS-Pは1988年に京葉線に導入しましたが、その5日後に東中野駅において列車追突事故が発生したので、その後の導入計画が加速されています。

一方、高速運転、高密度運転線区では、信号の見落としは重大な事故に結びつくため、許容速度を車内に現示しその指示に従って自動的にブレーキをかける必要があ

ります。これを実現する装置は自動列車制御装置 (ATC) として知られています。東海道新幹線での時速200キロの高速運転では、地上信号機を安全に確認するのは難しいと考えられたので、1964年に東海道新幹線に初めて導入されました。また、国鉄の在来線では、営団線との直通運転の必要性から、1971年、常磐線で初めてATCが導入されています。

連続制御方式であるATCは運転士の信号見誤りのときも安全な運転ができるなど、点制御方式のATSに比べて格段に安全性が向上しました。

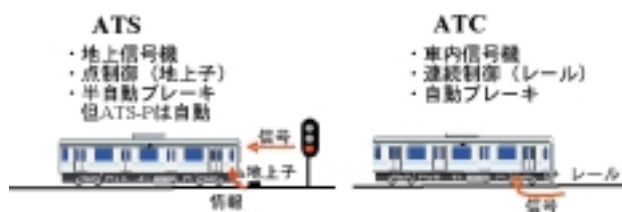


図2 ATSとATCシステムの違い

3.3 電子連動の登場

従来の継電連動装置は継電器のオン、オフの動作を組み合わせて使用していましたが、電子連動装置はマイクロコンピュータを使用して、従来の継電器のような可動部分をもたないスイッチング素子に置き換えるとともに、ハード、ソフトの特長を生かして機能の拡充と多様化を図ったのです。連動変更がソフトウェアの変更で対応できるので改修工事が容易になり、列車集中制御装置や自動進路制御装置などの電子化された装置とのインタフェースが容易となります。また、発車案内表示装置や案内放送などとの結合も可能となり、機能が拡大多様化されるなど特長を持っています。このように、電子連動装置は従来の継電連動装置に比べてすぐれており、1985年に東神奈川駅に導入されて以降、老朽化した旧来の継電連動装置の取り替えなどを契機に積極的に導入されています。

4 鉄道輸送システムの革新

JR 東日本になってから経営の基本方針として、お客様・地域・社会に貢献する「生活創造企業」、最新の技術を開発・活用する「未来志向企業」、社員・家族の幸福を実現する「人間尊重企業」を掲げ、国鉄時代の悪弊を

ぬぐいさろうという意識が高まりました。このような背景のもと、経営情報システムをはじめさまざまな分野でのシステム化を推進しました。そのうちの一つが輸送業務のシステム化です。東京圏のシステム化、新幹線システムの見直しを行って、高速化・快適化を図り、サービスレベルの向上に資するシステムの開発に着手したのです。

4.1 輸送総合システムの登場

輸送計画の業務は、列車の運転計画の作成からその情報の伝達、運転実績の把握、さらには車両の管理などの一連の仕事のことですが、その大半が人手により行われてきました。ひとつのミスが列車の遅れや事故に結びつくため、二重三重の入念なチェックが必要で、膨大な作業量であったのです。そこで、手作業によって行われていた輸送計画を、計算機の支援によって作成し、列車ダイヤ、車両・乗務員運用計画等を、駅、乗務員区、保守区等への抜粋・整理してオンライン伝達など、自動化しシステム化したものが輸送総合システム (IROS) です。これは、計画部門での業務の迅速化、ミスの減少を図ることができました。

4.2 首都圏の輸送管理の革新

技術革新時代にふさわしいサービスを提供するため、列車ダイヤ乱れ時のきめ細かな旅客サービスの提供、早期平常ダイヤに復帰機能、安全性の確保、指令業務の軽減と業務の効率化、駅業務の省力化、保守作業管理など社員の働きやすい環境を作ることなどが求められていました。

そこで、首都圏は列車運行形態が超高密度でかつ複雑なため輸送管理の自動化がきわめて困難であったのですが、指令員の業務軽減と業務効率化、駅の業務の省力化と安全性の確保、きめ細かな旅客案内サービスの提供を目的として、首都圏の輸送管理システムを開発しました。この東京圏輸送管理システム(ATOS)を、1996年に中央線、1998年に山手・京浜東北線で使用開始し、現在では首都圏の18線区、約910キロに広がっています (図3)。

各駅にコンピュータを配置し、駅単独で制御できる自律分散システムを採用し、中央システムと駅システム間を100Mbpsの高速光伝送網で結び、中央から送られるダイヤデータにもとづいて、駅で自律的に列車制御を行っ

ています。これにより、高密度線区に必要な高い応答性をもたせることができたわけです。首都圏ではATOSを導入したことにより、情報の伝達や作業性は以前のCTCやPRCと比較すると大幅に改善できました。

4.3 新幹線のトータルシステム化

新幹線では、新幹線運行管理システム(COMTRAC)が東北・上越新幹線開業時から設備されていましたが、北陸新幹線への対応をはじめ新しい施策に対応ができないものでありました。しかも、COMTRACでは、大きな総合表示盤を設けて列車の運行状況を表示していましたが、広大なスペースを必要とし、指令間の連携がスムーズでなく、新駅設置への拡張性がないなどの問題もあったので、CRT主体の指令システムに改めることにしたのです。そこで老朽取替に際して、新幹線の業務全体をネットワークで結び、情報の共有化・一元化を行うようにし、また運行管理は危険分散とレスポンスの向上のため自律分散方式とすることを検討したのです。このニュー新幹線総合システム(COSMOS)は1995年に使用開始しました(図3)。

COSMOSは、輸送計画システム、運行管理システム、構内作業管理システム、保守作業管理システム、車両管理システム、設備管理システム、集中情報管理システム、電力系統性システムの8つのシステムから構成された、トータルシステムです。各情報は、中央から、駅、乗務員区所、車両基地、保守区に高速デジタル回線を経由して配信しています。さらに、各駅のPRCが、この回線経由のダイヤデータにもとづき、列車の進路制御、電気掲示板に列車の出発時刻を表示するほか、ホーム、コンコースに案内放送を流しているのです。



図3 COSMOS(左)とATOS(右)の指令室

4.4 新しい列車制御

JR東日本となつてからまもない1990年に、次世代に

使う信号通信システムについて検討する「次世代信号通信システム検討委員会」が、社外の有識者も入ってスタートしました。次世代を担うにふさわしい信号通信システムとして、安全性・信頼性、保全性、運行面の角度から検討が行われ、軌道回路を無くし、無線を使用した列車制御システム、つまり車上情報発信・車上自律制御のイメージを打ちだしたのです。ところが、山手・京浜東北線のATC更新において、いきなりこのシステムを導入するかどうかの議論の結果、山手・京浜東北線には軌道回路を残した形の新しいATCとすることとしたのです。

4.4.1 新ATCの開発

従来のATCは、東海道新幹線当時のリレー回路主体の古い技術が使用されているため、列車本数を増やすことができず、急に強いブレーキがかかるため乗り心地が悪い上、地上装置が重厚長大で多大な投資が必要であるなどの問題を抱えていました。

列車制御装置として本来あるべき姿を考えると、停止位置の外方に列車を停止させるために必要な情報は、「停止すべき位置」と「停止すべき位置までの距離」の二つだけなのです。そこで、列車が止まるべき位置の情報を列車に伝送し、列車は自分自身の位置を常に認識して、停止点までの距離を計算し、曲線、勾配などを考慮し適切なブレーキをかければよいわけです。これが新しく開発したデジタルATC(D-ATC)の原理です(図4)。D-ATCシステムの特長としては、1段ブレーキ制御と車上自列車位置認識により運転時隔を短縮できるため、高密度運転が可能であり、かつ汎用情報機器の活用や分散構成のシステムによりスリムで低コストの地上設備とすることができました。さらに、車両加減速性能の向上に追従して、地上設備の変更なしで時隔短縮可能なフレキシビリティを備えています。この結果、新ATCでは現行ATCよりも低コストで、しかも現行ATCでの運転時隔2分30秒を、2分10秒に短縮可能なものとなりました。

2003年12月には京浜東北線の一部で実用化し、引き続き山手線、京浜東北線全線に拡大工事を進めています。また、東北新幹線の八戸延伸にも新しいATCを導入しようということとなり、新幹線の「S」をつけた、DS-ATCを開発し、2002年12月の八戸新幹線の開業から、盛岡・

八戸間に使っています。現在、東北・上越新幹線のATC取替工事で、電子連動装置と一体としたシステムへの取替工を行っています。

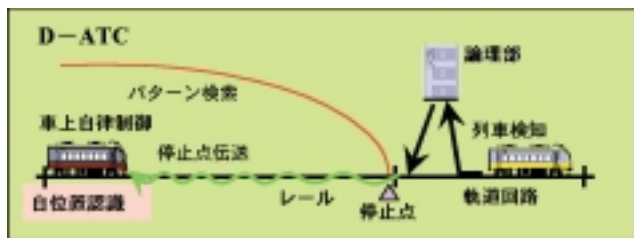


図4 D-ATCの動作概要

4.4.2 ATACSの開発

「次世代信号通信システム検討委員会」の方向付けにしたがって、無線を使った軌道回路のない新しい列車制御システム（ATACS）の検討開発が1995年から始まりました（図5）。軌道回路や信号機などの線路まわりの信号設備をなくそうということ、運転時隔短縮や列車の速度向上に際して閉そく割が不要であることなどから、ATACSは輸送改善ニーズに柔軟に対応できるという大きな利点を持っています。3期にわたった現地試験を実施してきて、特に3期目の試験は、プロトタイプ試験として実用機に近い形で、2003年10月から2005年2月まで、安全性・信頼性が確保されていることの検証を行ったのです。また、軌道回路を使用しない方式であり、無線を使っている新しい列車制御方式であるので、安全性、運転取扱面の評価を受けるため、「ATACSシステム評価委員会」も開催し、実用レベルに達しているとの評価も受けています。

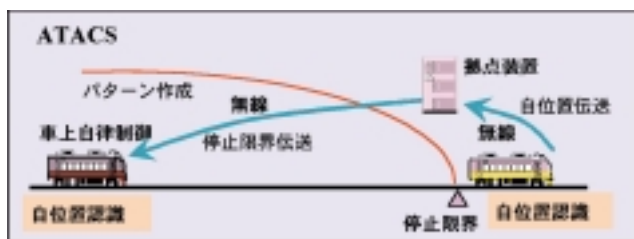


図5 ATACSの動作概要

5 信号の問題

JR東日本となってから、輸送業務、運転業務全般にわたってシステム化を進めてきたのですが、信号機、転てつ機を直接制御する「信号制御」の分野は、これまで

電子連動化に取り組んできて、首都圏ではATOSに見られるように汎用電子連動装置へと進化してきてのですが、機器室から現場機器へは、旧態依然とした配線に頼っていたというところに大きな落とし穴があったのです。2003年秋に発生した中央線の工事遅延はこの顕著な事例といえます。

では、何が問題かと言いますと、これまで現場の信号機器（転てつ機、信号機など）を制御するのに、ケーブルの電線1本1本に電気を送って直接制御していたからなのです。この方式ですと、ひとつの機器の制御に何本も電線を必要とするため、配線の作業量も膨大となり、その試験にも多大の時間と労力が必要となってしまうからです。しかも、これを人手でやっているのですから、間違えないのが不思議なくらいで、ダブルチェック、試験によってカバーしてきていたのですが、大規模な工事切替では追いつかなかったのが実情ではないかと思います（図6）。



図6 現信号機器室の配線とケーブル

この問題点を整理すると以下ようになります。

- (1) ケーブルを始めとする膨大な地上設備を有している
- (2) 膨大な配線作業に伴うため作業量が増える
- (3) この配線の確認のための試験に手間がかかる
- (4) 現場設備は1重系のため信頼度が低い

6 信号制御の革新をめざして

前章に述べた問題を解決するため、光ケーブルを使用して制御データをまとめて送り、これを解読するコンピュータである「現場端末」を各信号機器に置いて制御するようにするのです。これを「ネットワーク信号制御」と呼びます（図7）。情報通信で一般的に使用されているパケット通信の技術を用います。こうすることによって、データが届けば現場端末は動作しますので、現場では光

ケーブルがつながっていることを確認するだけでよいというメリットも生まれるのです。さらに、これまで現場で行わなければならなかった膨大な試験も工場内で行え、試験能率の向上を図ることができるとともに、現場端末自体および各信号機器の自己診断機能を持たせているので、これらを集中監視・制御することで保守性の向上にもつながります。

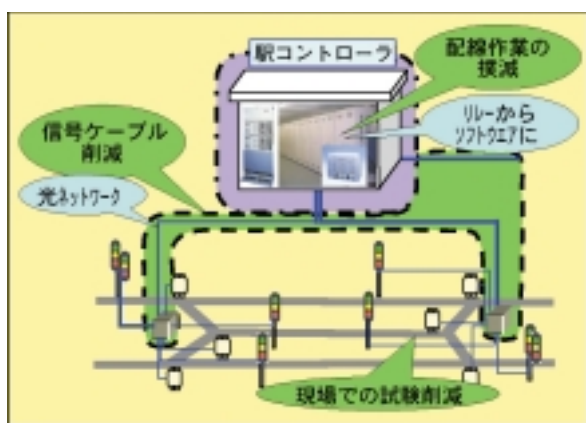


図7 ネットワーク信号制御システム

また、光ケーブルによるネットワークの構成はループ方式もありますが、こうすると光ケーブルを分岐するところに「ノード」という接続装置が必要となって、ここに電源を供給しなければならないなどコストも高くなります。今回は分岐個所に電源を必要としないイーボン（EPON）とよばれるファイバー・トゥー・ザ・ホーム（FTTH）などで使用されている汎用のネットワーク技術を使うこととしました。なお、コンピュータを線路沿線の過酷な環境下においても安定稼動が要求されますので、新たな課題として、温度、振動、電磁ノイズ、雷などの耐環境性を確認する必要があります。このため、2重設備とすることになっていますが、この悪環境条件に耐えるかどうかの型式（カタシキ）試験を工場内で行うとともに、本年4月から土浦駅においてモニターラン試験を行って、長期耐久性、ソフトバグの除去、光ケーブルの敷設・接続の施工方法など多角的な面からの検証を行っています。

土浦では駅構内の転てつ機や信号機の制御を主眼に試験を行っていますが、近い将来のATS-Pの老朽取替えに合わせて駅中間の信号機、ATS-P地上子なども制御できるように、今年度から研究開発に取り組む予定です。さら

に、軌道回路、踏切なども制御できるようにすれば、定時間制御、保守用車の短絡走行なども可能となります。

これらを実現するためには、信号装置の種別ごとに複数のコンピュータをひとつにして、スリム化を図る必要があります。機器室にはひとつのコンピュータが在って、現場の信号機器と光ケーブルで接続されているというのが理想の形でしょう（表1参照）。将来、ATACSのような無線を使った列車制御方式となっても、転てつ機と踏切は現場に残るでしょうから、ネットワーク信号制御技術は基本的なベースの技術といえます。

表1 小型端末の適用範囲

信号機器システム	転てつ機	信号機	ATS地上子	軌道回路	踏切
ATS	○	○	○	○	○
ATC	○	無	無	○	○
ATACS	○	無	無	無	○

7 駅における新たな展開

7.1 トータルシステムへ

これまでのシステムは、進路制御、列車制御、信号制御、車両制御などをそれぞれ別々に開発していますので、一つ一つをみるとうまくシステム化されているように見えても、全体をひとつの「運転制御システム」としてみた場合に最適なシステムと言えるのでしょうか。

同じデータをそれぞれ別々に持っていますし、同じような処理もそれぞれのシステムで行っています。これまでのシステムは、その時代の最新の技術とニーズによって積み上げられた個別のシステムなので、最初からトータルシステムをイメージして作られたシステムではありません。今後のシステム化においては、単に部分的なシステムの改良ではなく、技術のブレークスルーを果たすまったく新しいシステムを構築すべきです。この考え方を図8に示します。

また、地上の装置と車上の装置の取替え時期が異なっているため、どうしても既存のシステムの仕様に合わせざるを得ないという問題もあります。この問題の解決と

しては、時期を合わせるということだけではなく、たとえば車上の保安装置をATS、ATC（将来はATACSも）のいずれにも対応できるように新車導入時から併用可能な装置を搭載しておくという方法もあると思います。これは、単に二つの装置を載せるのではなく、ひとつのコンピュータでソフトの切り替えによってどちらの方式にも対応できるようにしておくことです。これにより、インターオペラビリティが向上しどの線区にも制約なく乗り入れが可能となりますので、この方向の技術開発にも力を入れていく必要があるでしょう。

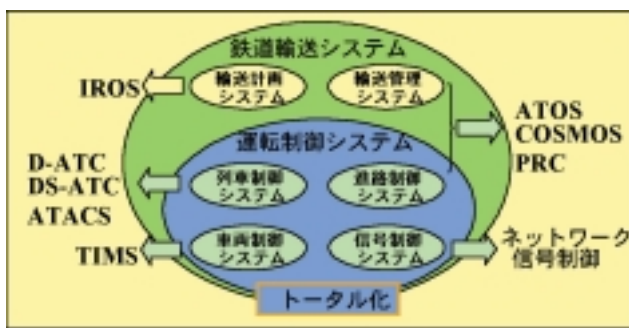


図8 トータル運転制御システム

7.2 シンプルなシステムの構築

これまでの車両制御装置や電子連動装置などは、最終出力を電気にしていたのですが、これからはデータを流せばよいわけですから、これを制御するコンピュータも、よりシンプルに構成することができるようになります。コンピュータの世界では、オブジェクト指向、汎用データベース、階層化プログラミング、共通プラットフォームなどいろいろな技術が進歩してきています。日ごろ使っているパソコンのソフトの進化を見ればおわかりになると思います。

そこで、信号システムの分野にも、これらの技術の取り込みを広げていき、「開発しやすく」、「改修しやすく」、「保守しやすく」、「取替えやすい」システムとしていくべきだと思います。これまでのように、一品料理的なシステムの構築ではなく、最新のソフトウェア技術の知識を導入することより、一つの基本システムから駅毎に容易にカスタマイズするシステム構築が可能となります。これは、工期短縮やコストダウンに大きく寄与するばかりでなく、システム構築におけるバグの混入を少なくすることから、システムの安定稼動にも貢献できると考え

ています。今後の研究開発にはこれらの視点が非常に大切なこととなります。

7.3 国際規格への対応

品質保証においてはISO9000が以前から国際標準として日本においても採用されてきています。国際標準の考えは鉄道界においても同様で、信号に関するものでも、ここ数年で国際規格となったもの、あるいは近々国際規格化される予定のものは次のとおりです。

- ・信頼性・可用性・保守性・安全性の規格（RAMS）
- ・ソフトウェアの安全性規格
- ・鉄道信号のフェールセーフ伝送の規格
- ・信号システムの安全性要件と文書管理の規格

これ以外にも、列車制御システム（UGTMS）、ドライバレス運転（AUGT）などが審議されていて、これからの鉄道信号システムを実用化するときには、これらの国際規格を無視しては通れないという状況になっています。当然、このことは研究開発の段階から意識して進める必要があるわけです。

8 おわりに

信号革新がなぜ必要か、信号システムの発展の経緯から述べ、問題点、解決策についても解説してみました。しかし、光ケーブルを利用したこのネットワーク信号制御システムは決して我々の最終目標ではなく、一部の解決策でしかないことがおわかりいただけたと思います。最終的には、これまで構築してきたシステムを、トータルシステムとして再構築し、不要な部分は切り捨て、重なっている部分は統合し、全体として最適なシステムを構築することがわれわれシステムに携わる技術者の目標であると考えます。

参考文献

- 1) 鉄道信号発達史：社団法人信号保安協会 1980年
- 2) 最新の国鉄信号技術：社団法人信号保安協会 1987年
- 3) 電気鉄道：松本雅行著 森北出版 1999年
- 4) 輸送の安全からみた鉄道史：江崎 昭 グランプリ出版 1998年