

## 信号制御システムの現状と研究開発



JR東日本研究開発センター 先端鉄道システム開発センター 昆 吉徳

鉄道の長い歴史と共に発達してきた信号制御システムにも、幾つかの問題が顕在化してきています。そこで、最新の技術によって信号制御システムを再構築することが必要になってきました。

ここでは多岐にわたる信号制御システムを、今日のシステムに至るまでの変遷から説き起こし、信号制御システム全体のイメージを掴んで頂きます。その上で、現在の信号制御システムが抱える問題点を述べ、私達が研究開発を行っている新たなシステムの開発コンセプトを紹介したと思います。そして最後に、私達が描いている「将来の信号制御システム」の一端を披露いたします。

### 1 はじめに

鉄道は電車や機関車といった車両設備と線路や電力システム及び信号制御システム等の地上設備から成り、そのどれが欠けても機能しない巨大なトータル・システムです。その中でも信号制御システムは列車を正確安全に運転するために、鉄道にとっては必要不可欠なシステムと言えます。

しかし、鉄道の長い歴史と共に発達してきた信号制御システムにも幾つかの問題が顕在化してきており、最新の技術によって再構築することが必要になってきました。

ここでは信号制御システム全体を俯瞰した上で、現在のJR東日本の信号制御システムの研究開発に対する方向性について述べたいと思います。

### 2 信号制御システムの変遷と概要

さて、「信号制御システム」と一括りでお話してきましたが、実際には信号制御システムは多岐にわたる設備から成りたっています。そこで信号制御システムの個々の装置の研究開発に触れる前に、今日の信号制御システムに至るまでの変遷から説き起こし、信号制御システム全体のイメージを掴んで頂きたいと思います。

#### 2.1 信号機、軌道回路、転つ機

鉄道列車の運転は、1825年イギリスの「ストックトン&ダーリントン鉄道」での営業用貨物輸送に始まり、1830年「リバプール・マンチェスター鉄道」が旅客輸送を開始しました。

列車速度が遅い時代には、馬に乗った旗振りが汽車に先行して走ったこともありましたが、しかし、列車速度が向上し線路の分岐も増えてくると、要所々々に「レールウエイ・ポリスマン」という見張り人を置いて進路の安

全を確認し、手合図で片手を水平に上げて「無難(進行)」、片手を真上に上げて「注意」、両手を真上に上げて「危険(停止)」を指示したとされています。これが鉄道信号の始まりです。その後、「ボール信号機」(図1)などを経て、ワイヤーや鉄管で腕木の角度で「進行」「停止」場合によっては「注意」を示す「腕木式(うでぎしき)信号機」がイギリスで発明されました。(図2)



図2：日本の腕木式信号機

図1：ボール信号機

因みに、ボール信号機はボールを紐でつるし、ボールが高い位置にあると「進行(ハイボール)」、低い位置にあると「停止(ローボール)」を表しました。

ところでウイスキーのソーダ割の「ハイボール」の語源は、機関士達がパブで「ハイボール(出発進行)！」と言って乾杯したからとも、機関車に石炭や水を補給する間に乗客が一杯やって、ボール信号機が「ハイボール」になった時にソーダ水を入れて一気飲みをして列車に急いで乗り込んだから、



図3：色灯式信号機

とも言われています。

現在JR東日本では主として電球やLEDの点灯で「進行」「注意」「停止」を指示する「色灯式(しきとうしき)信号機」(図3)が用いられており、腕木式信号機は八戸線に残るのみとなっています。

信号制御システムにおいて、列車が衝突や脱線といった事故を起こす事なく安全に運行し、かつ後述するように自動的に管理されるシステムとするためには、列車が線路上のどの位置に列車がいるかを常に正確に把握することが絶対不可欠です。その検知の方法には幾つかありますが、日本では一般的に「軌道回路」方式を用いています。その仕組みは、線路を数十メートルから数百メートル毎に区切って電流を流して電気回路を構成し、ここに列車が進入すると車輪によって回路を短絡することにより、列車を検知するものです。(図4)

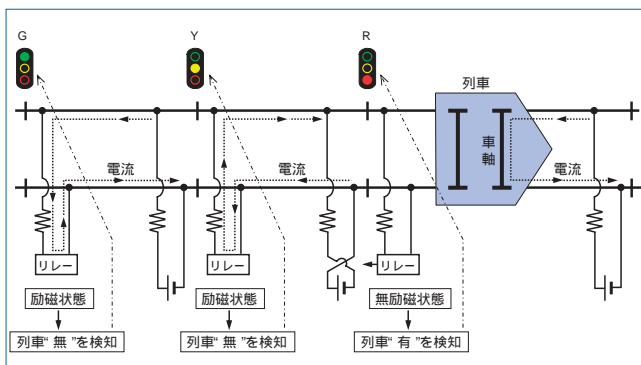


図4：軌道回路の仕組み

ところで、この軌道回路は1872年にアメリカのウィリアム・ロビンソンによって特許が取得されました。もちろん現在使用している装置は、当時の物と比較すると大きく進歩しています。しかし、130年以上前に発明された原理が今もって利用されていることは、いかにシンプルな構成でかつ信頼できるシステムであったかがお分かり頂けると思います。

又、列車には自動車と違ってハンドルは有りません。列車は線路が開通している方向にのみ進みます。従って、線路を列車が進めたい方向に切換える必要があります。列車の進行方向を変えるために、線路の進行方向を切換える装置が「分岐器(ポイント)」です。その昔、分岐器は人力で転換していましたが、現在ではモーターで転換させています。この転換装置を「転てつ機」(図5)といいます。

こうした信号機や軌道回路及び転てつ機等を総称して「現場機器」といいます。



図5：転てつ機(左)と分岐器(右)

## 2.2 連動装置

列車の進路を変える場合は、初めの頃は扱ひ者がその分岐器まで行き、所定の扱ひをしました。しかし、列車の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りません。そうなれば一人では出来ませんし、二人以上で受け持つと相互に連絡や確認が必要になります。小さい駅や列車本数が少ない場合は人間の注意力でも可能でしたが、大きい駅や列車の密度が多くなると、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を持たせ、列車の安全を確保する仕組みが必要になって来ました。この機能を司るのが「連動装置」です。

この連動装置は最初ワイヤーや鉄管で信号機と分岐器を相互に動かす間に「機械鎖錠」(図6)を設け、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し、これで安全を確保しました。これはあくまでも機械的な機構で成り立っていたため「機械連動装置」と呼ばれ、1856年イギリスのジョン・サクスピーによって発明されました。

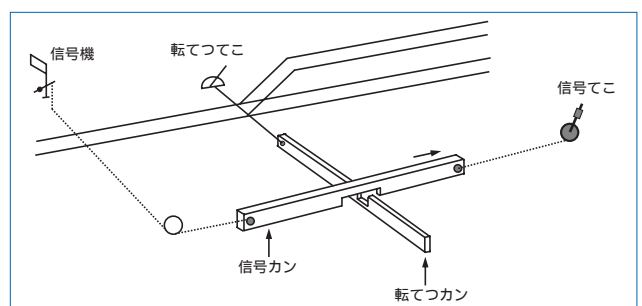


図6：機械鎖錠の仕組み

その後、この安全確保の機能をリレー(日本語で「継電器」)回路のアルゴリズムで実現した「継電連動装置」(図7)を経て、日本では1985年に京浜東北線東神奈川駅で導入されたコンピュータを用いた「電子連動装置」(図8)へと発展して来ました。



図7：継電連動装置



図8：電子連動装置

ところでこの連動装置の変遷は、時間的な差異はあるものの、イギリスのチャールズ・バベッジによって1839年に「階差機関 (difference engine)」と称される最初の機械式デジタルコンピュータが設計・開発され、その後リレー式コンピュータを経て、現在の電子式コンピュータへと続く、コンピュータの発達史と酷似している事にお気付きのことと思います。つまり、連動装置の機能はデジタルコンピュータの機能そのものであると言えるのです。

なお、これまで述べた連動装置やJR東日本が現在開発を進めている「新しい進路制御装置」を総称して「進路制御システム」と言うことにします。

### 2.3 CTC、PRC

連動装置は駅単位で設備されているため、連動装置の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遠隔制御する装置としてCTC (Centralized Traffic Control) が1927年アメリカで実用化されました。日本では大阪電気鉄道 (現近鉄) 天理線で1936年に初めて導入されました。

さて、列車の運転ダイヤは平日と土休日の区分や臨時列車の運行以外は殆んど決まったパターンで運転されています。そこで1964年になるとコンピュータの進歩と相まって、指令員によるCTCの進路設定などの扱いをコンピュータで制御するPRC (Programmed Route Control) が東海道新幹線で最初に開発導入され、以後在来線にも導入されてきました。

こうしてCTCやPRCによって指令センターでは線区全体の列車の運行を一元的に管理把握できる体制が整いました。しかし、近年ではお客さまや駅員に列車の運行の情報を随時お知らせする等のニーズや、ダイヤが乱れた場合の早期復旧等を目指し、1996年からATOS (Autonomous Decentralized Transport Operation Control System) の首都圏への導入が開始されました。

これらCTCやPRCを総称して「運行管理システム」と呼んでいます。(図9)



図9：指令センターと運行管理システム

### 2.4 輸送システム

首都圏ではATOSが導入されたことにより、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されました。しかし、異常時の車両運用の管理や乗務員の手配は依然として人手によっているのが実情です。そのため、輸送混乱時は車両や乗務員を管理する運転区所及び指令では多大な労力を必要としています。しかもこの分野は関係する個所、人、列車、情報等が複雑に絡み

合うためコンピュータ処理が非常に難しく、システム化が遅れていた分野でもあります。

しかし、輸送混乱時の速やかな回復を考えると、早急にシステム化する必要があります。幸い最近になって、コンピュータの処理速度が飛躍的に向上し、推論に適したアルゴリズムが数多く開発されたことにより、ようやく実現が可能な状況になってきました。

これら乗務員運用支援、車両運用支援、事故時の回復予測ダイヤ作成等のシステムを「輸送システム」と呼んでいます。

### 2.5 列車制御システム

これまで運転士は信号機を見てブレーキをかけたり、ノッチ（自動車のアクセルに相当）を上げたりして列車を運転していました。しかし、これはあくまでも運転士の注意力にのみ依存する運転方式であり、完全とはいえません。そこで、停止信号では自動的に列車を停止させるATS（Automatic Train Stop）が戦後になって暫時導入されました。

更に、運転士の注意力に依存することなく、自動的に列車の速度を制御するATC（Automatic Train Control）が1964年に東海道新幹線で実用化され、今日では他の新幹線はもとより、山手線等の在来線にも導入されています。因みに、新幹線が開業以来無事故を継続しているのも、このATCに拠るところが大きいと言えます。

なお、これらATS、ATCや更にデジタル技術を導入した在来線用D-ATC（Digital ATC）、新幹線用DS-ATC（Digital Communication & Control for Shinkansen ATC）及び現在私達が開発を進めているATACS（Advanced Train Administration and Communications System）も含め、「列車制御システム」に属すると考えています。

## 3 信号制御システムの全体構成

以上、これまで説明した信号制御システム全体の構成は（図10）の様になります。

線区によって装置の構成は多少異なりますが、基本的には「現場機器」、「進路制御システム」、「運行管理システム」の3階層に分類できます。

なお、ここで制御の安全は現場機器レベルと進路制御システムレベルで保証され、上位の運行管理システムレ

ベルは安全には直接関連していません。つまり、仮にCTCやPRCが誤った命令を与えても進路制御システムと現場機器で確実に安全を確保する仕組みになっています。

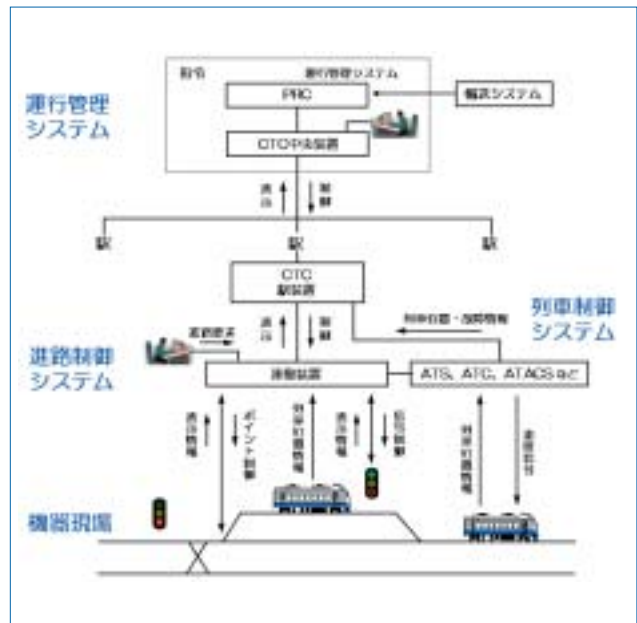


図10 信号制御システムの全体構成

## 4 現状の信号制御システムの問題点

こうして見てくると、信号制御システムの変遷は鉄道の歴史そのものであり、長い年月の経験とその時々最新の技術が取り入れられていることが分かります。しかし、その当時は最新の技術であっても、現在の技術レベルに照らしてみると改良すべき点は数多く有ります。しかも、鉄道事業の経営施策上、早急に改善する必要性が出て来ました。

### 4.1 積み木細工のような信号制御システム

現場機器から始まった信号制御システムの構築は、最初から理想的な鉄道トータルのシステム・デザインを基にして造られた物ではありません。あくまでも、その時々ニーズと技術によって、積み木細工のように積み上げられたシステムです。従って、鉄道システム全体として見た場合、現在の信号制御システムは必ずしも最適解であるとは言えません。

### 4.2 ケーブルを初めとする膨大な地上設備

各々の現場装置は、機器室に設置している連動装置と全てケーブルで結ばれています。そしてケーブルに電流

を流し、直接電圧と電流で制御されています。しかも、信号機であれば電球やLED毎にケーブルの芯線を使って制御しており、ケーブル長も東海道本線大船駅規模の駅では総延長が120キロメートルにもなります。また、例えば信号機の電球は30V、1.5Aで点灯させているため、電圧降下を考慮するとケーブルは極めて太いものとならざるを得ません。

その結果、信号制御システム工事全体の中で、ケーブルの敷設や接続工事の占める工期や工事費は膨大なものとなります。(図11)



図11：現在の機器室内のケーブル状況

### 4.3 設備の新設・改良に要する膨大な要員と工期

駅の新設や改良を行おうとすると、列車運行の安全を司る連動装置のロジックの工事や試験には、専門の知識を有した社員や作業員の多大の労力と日数を必要とします。

仮に駅に新しい進路を増設するとしたら、駅や工事の規模にもよりますが、1年から2年の工期が必要です。しかし、これではお客様のニーズやスピーディーな鉄道経営施策の遂行には対応できません。

### 4.4 建設コスト、メンテナンスコスト削減の必要性

日本は少子高齢化社会に突入し、鉄道輸送においても通学定期収入の伸び悩み等のように、徐々に影響が現れ始めました。このような状況下で、今後とも鉄道事業を安定的に経営を持続させるためには、鉄道システムの建設コストやメンテナンスコストなどの大幅な削減を行わなければなりません。

そのためには、鉄道制御システムにおいても設備のス

リム化を進める必要があります。更に、機器をいちいち検査するような保全方法ではなく、設備の故障予兆の集中監視やメンテナンス・フリー化等を行うことにより、保守要員を必要としないシステムへの転換が早急に求められています。

### 4.5 低い現場機器の信頼性

日々正確な時間で運転されている列車も時として遅延し、お客さまにご迷惑をおかけしてしまいます。その原因は幾つかありますが、その主なものの1つに、よく「信号機故障」と言われる信号機、軌道回路、転てつ機等の現場機器の故障があります。

その対策として、これまでメンテナンス・フリー化や機器の強化を実施してきました。しかし、現場機器やこれらの機器を制御するケーブルは、基本的にはバックアップ設備の無い1重系設備であり、そのため信頼性が低くなることは否めませんでした。

## 5 信号制御システムの開発の方向性

こうした現在の信号制御システムが抱えている諸問題を解決するためには、最新の技術を導入し、大胆かつ革新的な変革を行う必要があります。

鉄道システム、とりわけ信号制御システムは鉄道輸送の安全の根幹に関わるシステムであるが故に、これまで新しい技術の導入やシステム・チェンジには、石橋を叩いて渡る以上の慎重さで臨んできました。しかし鉄道以外の分野でも、原子力発電や航空機のように安全に直接関わる巨大システムが出現するに及び、これまでの経験工学的なアプローチだけではなく、「システムの安全性」の理論も世の中では確立されて来ました。

また、現在の情報通信技術、コンピュータ技術、デジタル符号処理技術、ソフトウェア工学の発展には目覚しいものがあり、これまで実現が不可能と思われていた事柄でも大抵の事は実現可能な状況になってきました。

こうした世の中の最新の技術にいち早くキャッチアップし、一日も早く信号制御システムを変革・再構築することが、私達が目指すべき開発の方向だと考えています。

## 6 「新しい信号制御システム」の開発コンセプト

新しい信号制御システムを構築するにあたり、私達は

開発コンセプトとして3つの柱を考えています。それは「軌道回路からの脱却」、「システムのシンプル化」、そして「信号制御システムの更なる安全性・信頼性の向上」です。

### 6.1 軌道回路からの脱却

列車の位置検知に用いられている軌道回路方式は、機能的にはシンプルで長い歴史持つ装置ですが、この装置にも限界が見えてきました。

例えば、軌道回路に電圧を加えるためと、列車の有無を検知するために、合計4芯のケーブルが1つの軌道回路毎に必要です。これが、駅の構内をケーブルだらけにしている一因でもあります。

また、レールや車輪の錆、火山灰や台風などの強風によって積もった落ち葉等で列車の検知が出来ないなどの不具合も時として発生しています。

こうした問題を解決するために、

- ・GPS等の測地技術を利用する方法
- ・車輪の回転数をカウントして列車の位置を把握する方法
- ・地上・車上間に検知子を設ける方法

などが考えられます。この内、GPSについては

- ・位置把握に高い精度を求めるには、現時点では高価であること
- ・トンネルやビルが立ち並ぶような場所では、必要な衛星の補足数が得られないこと

等から、当面実用化は困難と考えています。

そこで、JR東日本においてD - ATC、DS - ATC、ATACSでは、車輪の回転数をカウントして列車の位置を把握する方法を採用しています。特にATACSでは、把握した列車位置の情報伝送にもレールを一切用いないため、D - ATCやDS - ATCとも異なり、これまでの信号制御システムとは一線を画する画期的なシステムと言えます。

また、D - ATC、DS - ATC、ATACS導入以外の線区では地上・車上間に検知子を設ける方法等も研究開発しています。

### 6.2 システムのシンプル化

「現場機器」、「進路制御システム」、「運行管理システム」の3階層から成る「信号制御システム」において、今早急に改善する必要があるのは「進路制御システム」と「現場機器」及びそれを繋ぐケーブル類だと考えています。

そのため、私達は「新しい進路制御システム」と「ネ

ットワーク型信号制御システム」の研究開発を進めています。

#### 6.2.1 新しい進路制御システム

機械連動装置では、複数人間がばらばらに分岐器や信号機を扱い、なお且つ人間が取り扱いミスを犯しても衝突や脱線などの重大事故を防止するようなアルゴリズムを、基本思想として組み立てられています。そしてその基本思想は、綿々と今日の電子連動装置まで引き継がれています。

しかし、一つのコンピュータ内での処理であれば、複数の人間が扱うことによって行わなければならないイベント相互のチェックや、人間が犯すような取り扱いミスを防ぐためのアルゴリズムは不要であり、新たな進路制御システムを開発する場合は、処理は極めてシンプルにすることが出来ると考えています。

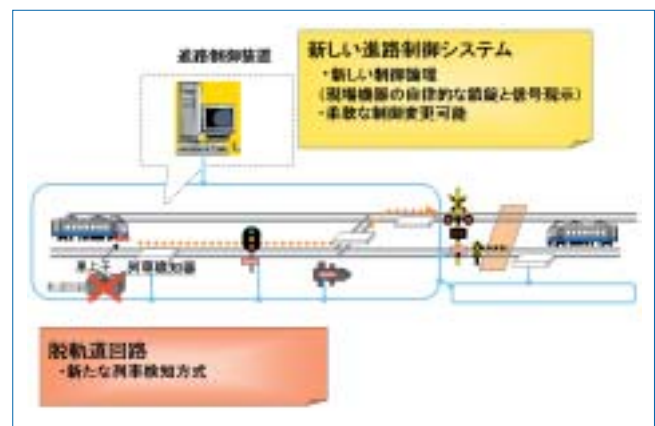


図12：新しい進路制御システム

また、現在の電子連動は各駅の構内の状況に合わせたシステムにせざるを得ず、一品料理的なシステムの構築を行っています。しかしこれも、最新のソフトウェア工学の知識を導入することより、一つの基本システムから各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って来ました。これは、信号設備工事の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できることから、ソフトウェアの初期故障の防止にも貢献できると考えています。

#### 6.2.2 ネットワーク型信号制御システム

現在の駅構内の信号ケーブルは制御情報の伝送と現場機器の駆動パワーの供給を兼ねていますが、それをパワー供給と制御情報伝送とに分離し、制御情報は多重して

光ケーブルに置き換えます。(図13)

このネットワーク型信号制御システムは、進路制御システムから現場機器までの膨大なケーブルを削減することを主目的とするとともに、大容量伝送と耐ノイズ性の向上を目指し、各設備を光ネットワークで末端設備まで接続するものです。更にこのシステムによる利点としては、ネットワーク装置類と進路制御システムが機能的に分離されているため、進路制御システムの開発・試験と、現場ネットワークの工事・試験が並行して実施でき、工期の短縮が期待できることが挙げられます。また各端末はその電子機器や各現場機器の自己診断機能を有し、これらを集中監視・制御することで保守性を向上させることを目指しています。

なお、現場端末などは沿線の過酷な環境下において安定稼動を要求されることから、2重系設備とすることを主眼とします。さらに現場機器がインテリジェンスを持ち、自己診断のみならず故障予兆の把握を行い、故障による停止に陥る前に警報を発する機能を検討しています。

更に光ケーブルはループ状になっているため、ケーブル切断などにも強く信頼性の向上も期待できます。

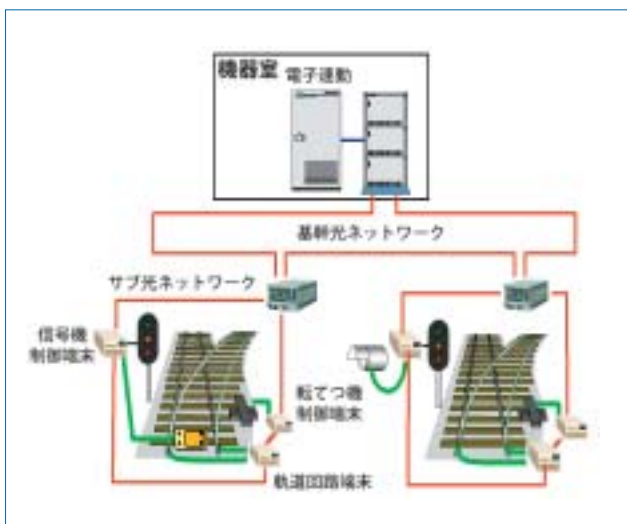


図13：ネットワーク型信号制御システム

### 6.3 信号制御システムの更なる安全性・信頼性の向上

これまで信号制御システムは、長い経験と幾多の尊い犠牲によって得られた教訓によって、今日の高い安全性が築き上げられて来ました。そのため、信号制御システム技術の細部については、技術者個々に知識や経験が「暗黙知」として蓄積されています。しかし現在では、その知識や経験の継承や若い技術者の養成が困難になって

いるばかりか、システムが多岐に渡るため、一方のシステムのトラブルで得られたノウハウが他システムへ反映され難い仕組みになっています。そこで、現在ヨーロッパで確立されつつあるRAMS (Reliability Availability Maintainability Safety) のドキュメント体系をこれからの信号制御システム構築時に導入し、「暗黙知」を「形式知」化して行くことが必要だと考えています。

更には、これまでのシステム構築では仕様書などは細部の意思伝達知識の共有ができにくく、問題領域の本質が見えにくいという傾向があります。そのため、システム構築にあたっては、時としてメーカーと私達ユーザーとのチーム全体として技術の「共有知」が構築できませんでした。その結果、システム使用開始時に初期故障が起きることがありました。そこで、仕様書等の記述にはUML( Unified Modeling Language : 統一モデリング言語)の活用を考えています。

こうした手法の導入により、バグの混入が軽減でき、システムの安全性及び信頼性の一層の向上が期待できます。

## 7 将来の信号制御システム

これまでの信号制御システムは、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、積み木細工のようなシステムだと申し上げました。あくまでも、最初からトータル・システムをイメージして造られたシステムではありません。つまり手を加えるならば、単に部分的なシステムの改良ではなく、全く新しいシステムを構築すべき時期に来ている、と言うことが出来ます。

では、「最新の技術を駆使して信号制御システムを再構築したら、どのようなシステムを描くことが出来るか?」。このグランド・デザインを描くことが、今の私達研究開発者に課せられた課題であり、使命だと思っています。

この検討は未だ緒についたばかりですが、その一部を紹介させていただきます。

### 7.1 地上設備偏重から車上インテリジェント化

これまでの信号制御システムは、地上設備ですべてを構成し、その上を列車が走行する仕組みでした。しかし、車上にインテリジェンスを持たせ、車上で自らの列車位置が随時把握できれば、前後の列車が相互の列車位置を情報交換することにより、列車は自律走行が可能となり

ます。

つまり、これまで列車は指令の指示と、予め決められたダイヤによって運行してきました。そして、これは平常時では大変効果的なシステムでした。しかし、輸送が混乱する異常時は、極めて対応が難しいシステムです。そこで列車自らが列車の相互の位置関係を把握し、自律的に走行が可能であれば、列車の運転もフレキシブルになり、輸送混乱時の早期運転回復が可能になると考えられます。

また、車上に運転計画と線区の勾配、曲線半径や制限速度等のデータベースを持たせることにより、列車の性能を最大限に発揮させることが出来る外、列車の加減速も最適でエネルギー消費や到達時間も最少となる運転が実現できることでしょうか。更に、お客さまの利用状況によって列車を増発して列車運行を柔軟に行う、オン・デマンド運転やソフト連結運転も夢ではなくなります。(図14)



図14：柔軟な列車運行

又、これによって結果的に線区全体を指令員が統制するという概念も変わりますので、運行管理システムの機能や役割は変わったものになると思います。

## 7.2 シンプルな進路制御システム

車上にインテリジェンスを持たせ、列車自体が自律的な運行が可能となると、地上設備は列車からの進路要求によって進路を構成します。また、現場機器に各々インテリジェンスを持たせ分散制御をすることにより、全体的には極めてシンプルな「進路制御システム」が構築できると考えています。

## 8 おわりに

これまで、信号制御システムの変遷を振り返りつつ、私達が目指しているこれからのシステムの開発の方向性について述べてまいりました。

信号制御システムの技術は、これまで大きな事故などの尊い犠牲や、先人の弛まぬ安全への追及によって今日の完成を見たものです。しかし、最初から信号制御システムはトータルデザインを思考して作られてきた物では無いこと、結果として重厚長大な設備であることや全体的に最新の技術を享受していない事など、システム・チェンジすべき課題が多くあることもお分かり頂けたかと思えます。個々の論文では、これらに対する私達のチャレンジの一端をご紹介します。

なお、これからの信号制御システムを革新して行くためには、私達JR東日本のみで成し得る物ではありません。より安全で、世界に冠たる鉄道システムにするためにも、皆様の多大なご支援とご助力をお願いいたします。

### 参考文献

- 1) 社団法人信号保安協会発行：鉄道信号発達史，社団法人信号保安協会，1980.
- 2) 社団法人信号保安協会発行：最新の国鉄信号技術，社団法人信号保安協会，1987.
- 3) 吉村 寛，吉越 三郎：信号，交友社，1991.
- 4) 江崎 昭：輸送の安全からみた鉄道史，グランプリ出版，1998.