

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

コンピュータ式保安制御への道を拓いた電子連動装置

列車運行の安全の要である連動装置にコンピュータ制御を導入する研究は、1960年代から旧日本国有鉄道（旧国鉄）鉄道技術研究所を中心に行われてきました。約20年におよぶ研究開発を経て、1985年にコンピュータによるフェールセーフ制御を実現した電子連動装置Ⅰ形として実用化されました。それに続いて、ATC、ATS、閉そく装置などさまざまな信号装置にコンピュータ制御が幅広く使用されるようになりました。このほか、研究の過程で鉄道信号の安全性・信頼性技術の理論化・体系化なども行われ、現在の信号装置の設計思想に多大な影響を与えました。ここでは、その経緯と意義について紹介します。



平栗 滋人
Shigeto Hiraguri
研究開発推進部
次長
【専門分野】 鉄道信号、
安全性技術



中村 英夫
Hideo Nakamura
日本大学
名誉教授
【専門分野】 鉄道工学、
システム安全性工学

連動装置の役割

駅などで列車が進むルートを安全に制御するためには、信号機や転てつ機などの信号設備の間に関連をもたせ、それを保ちつつ各設備を動作させる必要があります。その要となるのが連動装置（図1）です。

初期の連動は機械的な手段で実現

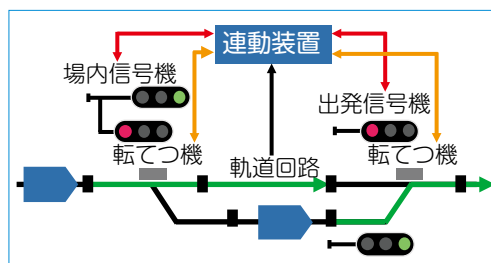


図1 連動装置の役割

していましたが、1930年ごろにはリレー（継電器）を組み合わせた電気回路を使用して連動の制御論理を機器室内に集中させた継電連動装置（図2）が導入されました。リレーは、入力となる条件の状態を制御対象に伝達する一種のスイッチです。たとえば、ある軌道回路に列車が在線すると入力条件

がOFFとなり、このときの出力条件によって信号機を停止に制御します（図3）。実際の連動装置では、いくつもの条件のON、OFFの組み合わせや、変化の順序にしたがって信号機の現示や、転てつ機の転換を安全に制御する論理が構成されています。

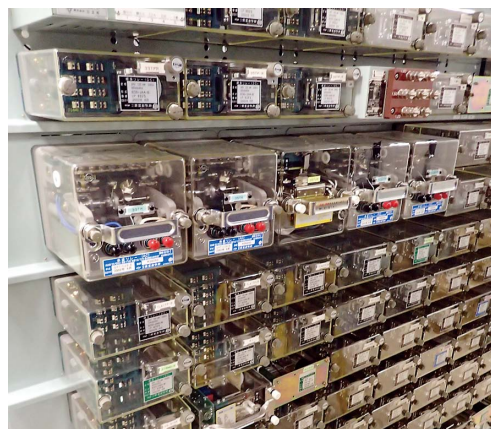


図2 継電連動装置

連動装置とフェールセーフ

信号装置を設計するうえで、フェールセーフとよばれる重要な概念があり、「保安制御システムに障害が生じた場合に、対象システムを安全な状態に維持もしくは、安全な状態に遷移させる保安制御システムの特性」（列車保安制御システムの安全性技術指針、1996年）と定義されてい

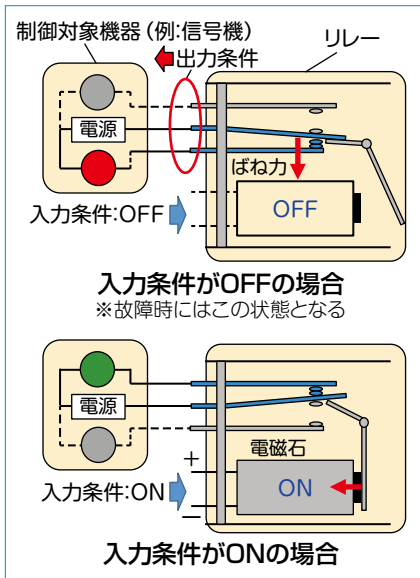


図3 リレーの状態と出力

ます。鉄道における「安全な状態」とは、たとえば停止信号を現示させることとなります。また、この特性とは別に障害自体の発生率が小さいこと、つまり信頼度が高いことも重要な要件です。

継電連動装置におけるフェールセーフの実現には、リレーがもつ特性が大きな役割を果たしています。連動装置に使用されるリレーは故障が発生すると、ばねの力によって入力条件がOFFの場合と同じ状態になります(図3)。このようにリレーは故障時の状態を特定することができ、この性質は非対称誤り性とよばれます。そこで、OFF側の出力に停止信号などの安全側の条件を割り当てておけばフェールセーフが実現できます。なお、鉄道信号に使用されるリレーは、溶着の起きにくい接点材料の使用、十分な余裕をもたせたばね力など、一般用途のものとは異なる設計上の配慮がなされています。

ところが、コンピューターを構成する電子素子はリレーのような非対称誤り性をもっていません。連動装置の電子化の研究では、いかにしてフェールセーフを実現するかが大きな課題となりました。

連動装置の電子化の研究

1957年に、当時の旧国鉄鉄道技術

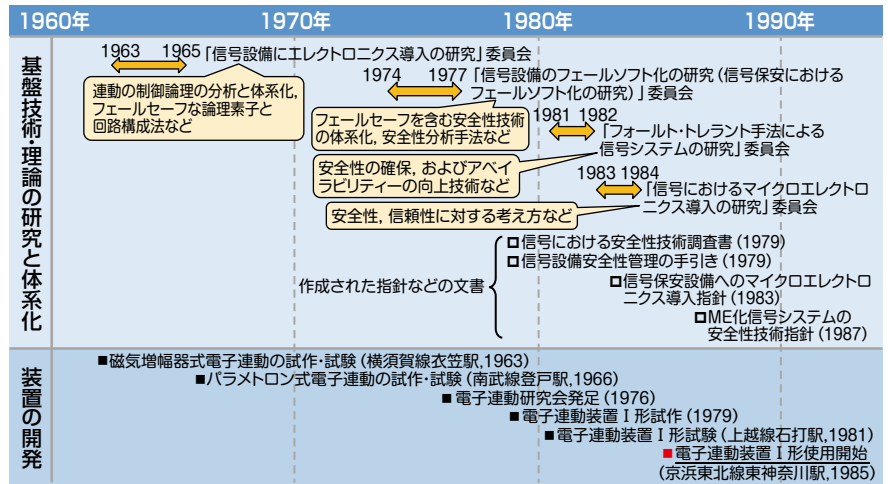


図4 電子連動装置の研究開発の経緯

研究所に米国製のBendix G-15という電子計算機が導入され、情報処理や制御システムの研究に大きな影響を与えました。連動装置の電子化の研究も1960年ごろから始まっています。

図4に最初の実用機である電子連動装置I形の導入までの経緯を示します。このプロセスにおいて、とくに基盤技術・理論の研究と体系化において、鉄道技術研究所が中心的な役割を果たしました。大学や部外の研究機関の研究者、信号メーカーの技術者の参加を得た研究委員会では、それまで経験的に積み重ねてきたフェールセーフの考え方の論理化、フェールソフト(☞参照)やフォールトトレランス(☞参照)などの考え方を参考にした安全性と信頼性技術の体系化、マイクロエレクトロニクス(☞参照)技術を保安装置に導

入するための指針の作成など、非常に熱心な取り組みや議論が行われました。この中での提案には研究の前進に大きな影響を与えたものもあったほか、学術的にも大きな成果を残しています。

初期の研究と信号技術の理論化

研究の初期には、磁気増幅器(☞参照)やパラメトロン(☞参照)などを使用した連動装置が開発されました。これらは、それぞれ横須賀線衣笠駅、南武線登戸駅で試作機の試験が行われ、フェールセーフを実現することに成功しましたが、経済性の点で継電連動装置をしのぐことができず、実用には至りませんでした。

しかし、同時期に旧国鉄から信号保安協会への委託による「信号設備にエレクトロニクス導入の研究」という研

☞ フェールソフト

システムを構成する一部が故障しても全体を停止させず、機能は限定されるもののサービスを継続するという考え方を指します。

☞ フォールトトレランス

コンピューターシステムの耐故障性に関する概念で、故障が発生した場合、機能を維持すること(狭義)、あるいは性能は低下するが正しい動作を継続すること(広義)という考え方があります。

☞ マイクロエレクトロニクス

マイクロコンピューターなど超小型、微細な電子部品の製造や活用に関する技術を指します。

☞ 磁気増幅器

変圧器に似た構成の電気回路を利用して、リレーのような機械的な可動部や接点をなくした機器として活用が検討されました。

☞ パラメトロン

フェライトコアに巻いたコイルにコンデンサー、抵抗を接続した簡単な構成の電気回路を利用した論理素子で、1954年に東京大学大学院生(当時)の後藤英一氏によって発明されました。

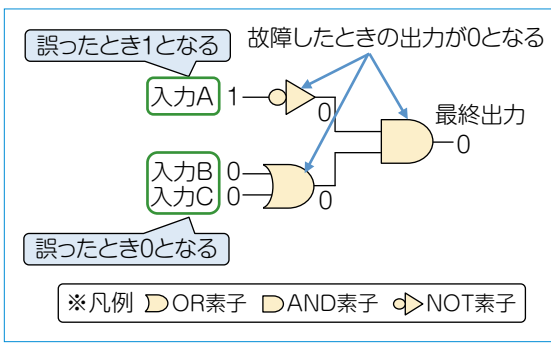


図5 フェールセーフにできる回路の例

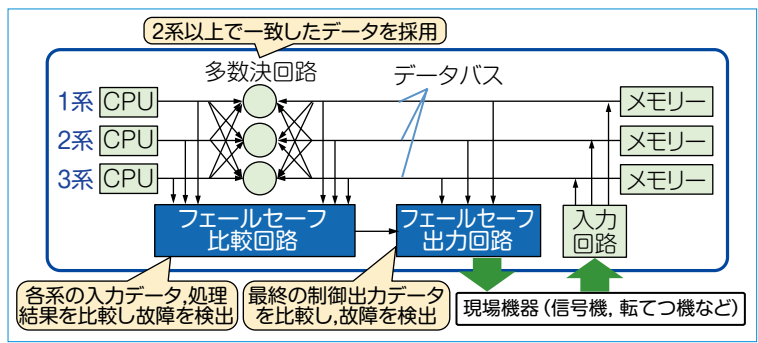


図6 電子連動装置 I 形の基本構成

究委員会において、それまで経験的に積み上げられてきた連動の仕組みの分析・体系化、フェールセーフ理論による回路構成法の研究などが行われ、その研究成果が後の実用機開発に多大な影響を与えています。

フェールセーフ理論の一例を紹介します。図5に示す論理回路において、最終出力が0、1のうち0になった場合を安全側とします。ここで、論理回路を構成するORやANDなどの論理素子は、故障が発生した場合、各素子の出力はかならず0になるフェールセーフな性質をもつものとします。ここで、入力に誤りが発生した場合にそれぞれAが1、Bが0、Cが0となる性質をもたせれば、入力と論理素子のどこに誤りや故障が発生しても最終出力が0となり回路としてフェールセーフが実現できます。なお、論理回路の組み方によっては最終出力が0となるように、入力が誤り時にとるべき値を決められず、フェールセーフにできない場合もあります。

マイクロコンピュータの登場と研究の進展

1970年代になるとマイクロコン

アベイラビリティ

システムが要求される機能を定められた期間、実行できる性能のことで、以前は可用性とよばれていましたが、国際規格で想定しているニュアンスと整合をとるため、信頼性用語の規格 JIS Z 8115 ではアベイラビリティを使用するよう規定されています。

ピューターやミニコンピューターが市販されるようになり、ふたたび信号装置の電子化への期待が高まりました。1976年には鉄道技術研究所を中心とする旧国鉄、信号メーカーによる電子連動研究会が発足し、電子連動装置の基本概念やシステム構成などの検討が行われました。

また、同じ時期にはフォールトトレランスに関する学会などが盛んに開かれるようになり、研究成果の発信や、国内外の研究者との情報交換も活発に行われ、フェールセーフを実現する基本構成となったバス同期三重系多数決方式(図6)のヒントもこのような交流の中で得ています。この方式ではバスとよばれる三つの系のライン上でやりとりされるデータをビットごとに一致、不一致をチェックし、不一致を検出した場合には、故障と判断された系を制御から切り離すことで安全性を確保します。多数決回路では三つの系のデータのうち二つ以上が一致していれば、そのデータを制御に採用し、一つの系が故障しても動作を継続することでアベイラビリティ(☞参照)を確保します。しかし、多数決回路が故障したときには不一致が検出できず多重故障に遷移するおそれがあります。これに備えて系間のデータをチェックする比較回路を設けて、データが一致している限り、比較回路を構成する論理素子の値が0と1を周期的に繰り返すダイナミックな動作を行う仕組みが開発されフェールセーフを実現しています。

また、転てつ機などの機器に対する最終出力を行う回路が故障すると安全が確保できないおそれがあるため、工業技術院電気試験所(現在の産業技術総合研究所)で考案された仕組みにもとづいて、故障と判断された系のデータが外部に出力されないフェールセーフな出力回路が開発されました。

このほか、ハードウェア、ソフトウェアに関するさまざまな安全性・信頼性技術が開発されましたが、設計の基本的な考え方は、データの入力、処理、出力を多重化し、それらの比較・照合を行い、異常を検出した場合には安全側の状態に固定させる点にあります。とくに比較・照合について、コンピューターが得意である高速処理を活かして高頻度かつ多箇所で行うことで、単一故障のうちに検出することを基本としています。

このように、1960年代から積み重ねてきた研究成果にもとづいた工夫によって、電子素子が非対称誤り性をもたないという課題を克服し、フェールセーフなコンピューター制御が実現されました。

安全性技術の体系化

電子連動装置の実用に向けた研究と並行して、本格的なコンピューター制御の利用に対応して、安全性・信頼性技術の体系化に関する調査・研究が行われました。

ここでは、さまざまな技術をフェールセーフ技術のほか、多重化や診断な

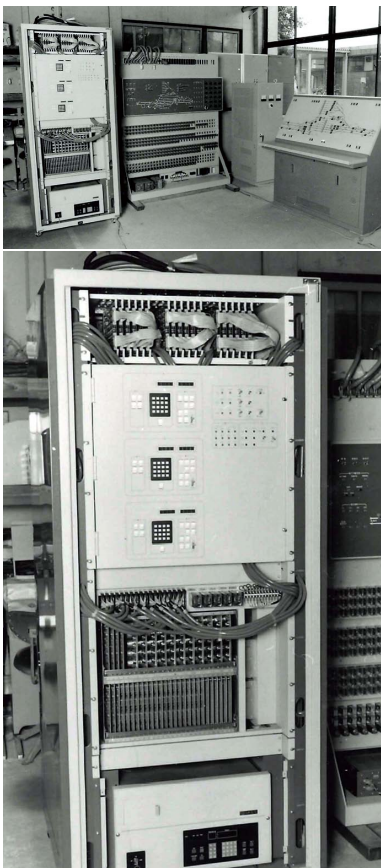


図7 電子連動装置 I 形の試作装置

どアベイラビリティを向上させる技術、フェールソフトやバックアップなど故障時に性能は低下するものの安全を損なうことなく動作を継続させる技術などに分類、体系化しました。

これらの成果は図4に示す文書として形になっており、現在においても鉄道信号の基本となる考え方や技術を理解するうえで貴重な資料となっています。1996年には鉄道総研が事務局となって、これらの成果と機能安全の国際規格IEC 61508の考え方を融合させた「列車保安制御システムの安全性技術指針」を作成しました。また、2002年に発行されたRAMS規格IEC 62278に対して鉄道信号が他の技術分野に比べて早い対応ができたのも、このときの成果があればこそ、といえます。

電子連動装置 I 形の実用化

電子連動装置の開発は1979年に旧国鉄本社の技術課題に選定され、試作装置が製作されました(図7)。試作装

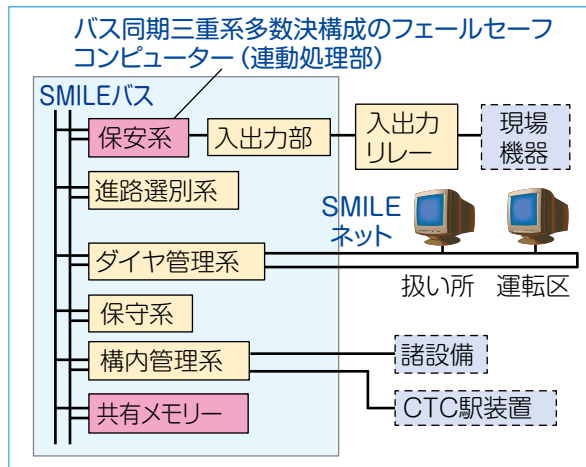


図8 電子連動装置 I 形の全体システム

置を使用した試験は、1981年から上越線石打駅で行われました。

これらの研究開発を経て、いよいよ電子連動装置の実用化が決定されました。試作装置で検証した連動の基本機能に加えて、進路制御、ダイヤ管理、保守作業の管理などの機能を組み込みました。しかし、当時は1台のコンピューターですべての機能を実現することは難しかったので、複数の装置に機能を分散させて、核となる保安系は先に述べたバス同期三重系多数決方式として他の健全性を診断する構成としました(図8)。

1985年3月15日、SMILE(スマイル: Safety Multiprocessor System for Interlocking Equipment)と名付けられた電子連動装置 I 形は、京浜東北線東神奈川駅で第1号機が使用開始となりました。

電子化信号システムの発展

電子連動装置 I 形の実用化を皮切りに、その後、さまざまなタイプの電子連動装置が開発、導入されました。また、連動装置に留まらず、ATCやATS、閉そく装置などにもコンピューターが使用されることが一般的になりました。さらには、2011年には国内でもコンピューター制御と無線を組み合わせた、無線式列車制御システムATACSが実用化されるなど、保安制御においてコ

ンピューターは不可欠な技術になっています。

2019年3月には、電子連動装置 I 形が鉄道信号へのコンピューター制御の普及のさきがけとなった意義・価値が認められ、電気学会から「でんきの礎」として顕彰されました。

新たな時代に向けて

コンピューターの性能向上や、ネットワーク技術の急速な進歩を背景に、AIやIoTなど新たな技術的環境が生まれつつあります。信号システムもその流れを活かしたさらなる変革に取り組み、鉄道の再生に資する技術的貢献を果たさなければなりません。

そのためにも、電子連動開発当時の安全性技術体系化に学び、AI、ICT時代にふさわしい安全性技術・信頼性技術の創成に取り組みたいと考えています。[RRR]

文献

- 1) 信号保安協会：鉄道信号発達史，信号保安協会，1980
- 2) 奥村幾正，渡辺俊勝，中村英夫，川久保和雄：電子連動装置の開発，鉄道技術研究資料，Vol.38，No.5，pp.11-17，1981
- 3) 奥村幾正，渡辺俊勝，中村英夫：システム安全性工学の鉄道信号への導入，鉄道技術研究資料，Vol.38，No.9，pp.14-17，1981
- 4) 秋田雄志/中村英夫/渡辺俊勝/熊谷敏雄/熊谷敏雄・渡辺郁夫/秋田雄志：電子連動装置(その1～その6)，信号保安，Vol.39，No.4～No.9，1984
- 5) 中村英夫：講座 これだけは知っておきたい電子連動装置(4) 安全性技術と信頼性のしくみ，信号保安，Vol.44，No.12，pp.521-527，1989
- 6) 日本鉄道電気技術協会：鉄道信号の技術はこうして生まれた，日本鉄道電気技術協会，pp.131-147，2009
- 7) 秋田雄志：電子連動装置はこうして生まれた，鉄道と電気技術，Vol.25，No.5，pp.3-7，2014