

無線式列車制御の プロトタイプCARAT

近年、無線式列車制御システムであるATACS (Advanced Train Administration and Communications System) が仙石線、埼京線に導入されたのを皮切りに、JR他社や民鉄でも無線式列車制御システムの導入を検討する動きがみられます。鉄道総研ではATACSのベースとなった無線による列車制御システムCARAT (Computer And Radio Aided Train control system) の開発を、電子連動、電子閉そくなど信号保安システムのマイクロエレクトロニクス化が進められた直後の1987年に開始しています。ここでは、CARAT開発時の技術的検討の経緯と旧日本国有鉄道(旧国鉄)鉄道技術研究所・鉄道総研の関わりを紹介します。



山本 春生
Haruo Yamamoto
信号・情報技術研究部
列車制御研究室
室長
【専門分野】 列車制御、
衛星測位応用



長谷川 豊
Yutaka Hasegawa
元 鉄道総合技術研究所
技術支援部長
【専門分野】 列車制御、
移動体通信

はじめに

CARATは、地上車上間で列車運行の安全にかかわる制御情報を無線でやり取りすることと、車上にコンピューターを搭載し列車自身が在線位置を検出すること、そして列車に停止目標を指示し走行可能な上限速度は列車自身のブレーキ性能に基づいて車上で計算することにより、地上で列車検知を行う軌道回路や上限速度を指示する地上信号機をはじめとする保守に手間のかかっていた従来の信号設備を削減し、多様な列車を効率的に、しかも低コストで運行できる列車制御システムです(図1)。旧国鉄末期に鉄道が生き残るための運転システムとして提案され、分割民営化と同時に研究開発を開始しました。開発3年目から5年間、旧運輸省(現在の国土交通省)の補助金を受けて大規模な現地実験システムを構築し、基本機能を実証しました。その後の実用化

開発はJR東日本に引き継がれ、2011年にATACSとして実用化されました。

システムの概要

CARATのシステム構成を図2に示します。車上は、在線位置を検出する位置検知系、走行速度を安全に保つ操縦制御系、地上は、各列車の在線位置に基づき各列車へ走行許可区間を指示する追跡制御系、駅構内での進路の安全を確保するポイント制御系、そして地上車上間を無線で結ぶ伝送系により構成されます。

列車位置検知

列車検知は車上の位置検知系で行います。位置検知系は、列車が地点検知用の地上子を通過するときに絶対的な在線位置を検出し、そこから次の地上子までは地上の追跡制御系から受け取った走行経路情報と車輪の回転数を積算した走行距離により在線位置を推定します。車輪径の設定値が実際と異

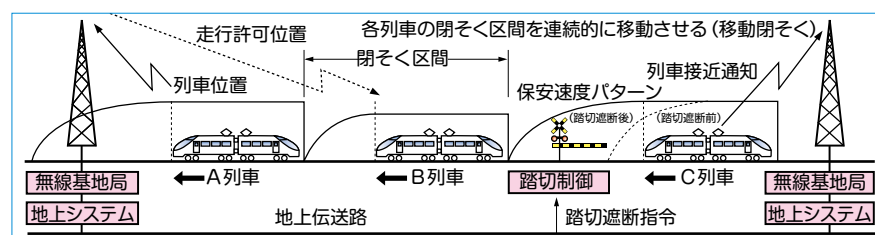


図1 CARATの概念

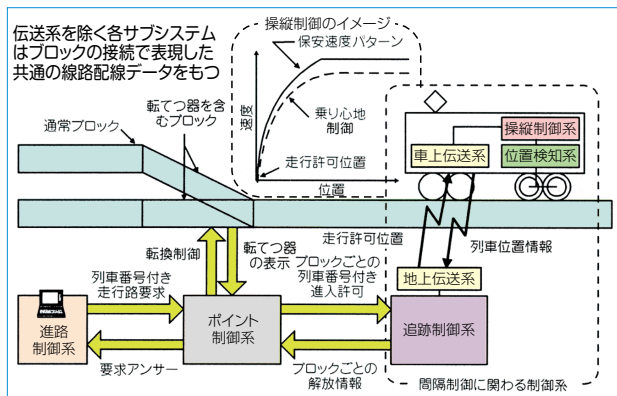


図2 CARATのシステム構成 (踏切なし)

なることによる走行距離誤差の累積と車輪の空転・滑走による走行距離誤差に対しては、処理上の列車長を前後に拡大することで安全を確保し、地上子を検出するたびに、処理上の列車長は実際の列車長にリセットされます。

列車間隔制御

間隔制御は地上の追跡制御系と車上の操縦制御系で行います。追跡制御系は、無線を介して列車から位置情報を受信し管轄内の全列車位置を把握するとともに、ポイント制御系の進路状態に応じて、各列車に対する走行許可区間を定め、これを送信します。従来は固定的な区間ごとに走行の可否を指示していたのに対し、CARATでは走行できる範囲が先行列車の走行に追従して連続的に変化するため、いわゆる移動閉そくを実現できます。車上の操縦制御系は、指定された走行許可区間を安全に走行するため、各在線位置における上限速度を連続的に示した保安速度パターンを自身のブレーキ性能に基づいて設定します。通常は保安速度パターンの傘の下で、乗り心地を考慮した常用ブレーキにより、保安速度パターンを超過しないように制御し、万一これを超過した場合は非常ブレーキをかけることで安全を確保します。移動閉そくが実現することによって、従来よりも先行列車に接近して走行することができるようになるため、列車の運転間隔を短縮できます。

駅構内制御

駅構内での進路の安全確保は、ポイント制御系が行います。この制御では、

することでブロック内への複数列車の進入を許容しています。これにより駅構内における移動閉そくを実現し運転間隔を短縮できます。また、ポイント制御では、いったん設定した進路の取り消し時に、無線を介して列車に停止可否を確認し、可能な場合のみ取り消すことで安全性が向上するとともに直ちに解錠するため制御を効率化できます。

地上車上間の伝送

地上車上間の伝送を行う無線は、各列車の位置や走行許可などを伝えるシステム構成上もっとも重要な役割を果たします。無線を列車の保安制御に用いるには高品質であるだけでなく高い信頼性とセキュリティが求められます。そのための対応策として、伝送情報は誤りを検出するための情報である誤り検出符号を付加したうえで、さらに誤りを訂正するための情報である誤り訂正符号を追加したのちに暗号化して送信され、受信側では暗号を解読して、誤り訂正と誤り検出を行います。また、ダイバーシティ受信（複数のアンテナから受けた電波のなかからつねにより状態の電波を選択したり合成する手法を用いたりして電波の感度の強弱をできるだけ少なくする受信方式）を行うなど線区の状態に見合った回線設計が必要となります。しかし、伝送系をフェールセーフ（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）にすることは難しいので、伝送情報の誤り検出符号の処理を

従来の軌道回路に代えて線路配線をブロックとよぶ区間に分割して列車の在線を管理します。進路は複数のブロックから構成され、進路内の列車追突防止は列車間隔制御が担保

フェールセーフな処理装置に行わせることで、見逃し誤りを安全上の問題がない程度にする方式となっています。

開発経緯

システムのニーズは、旧国鉄時代の鉄道技術研究所で、鉄道が対抗輸送機関である道路や航空との競争の中で生き残るにはどうあるべきかを検討する1984年度のグループ研究「新しい運転システム」から生まれました。この段階で、地上設備を簡素化し制御を車上主体で行うことが、輸送のコスト削減、多様な需要への弾力化と即応性向上に必須であると結論づけています。これを受けて、信号と通信の2研究室の統合を契機に行われた1986年度のグループ研究「新しい信号と通信システム」の中で、列車との通信によって列車の間隔や速度を制御する新しいシステムの提案が生まれました。移動体通信手段としては漏洩同軸ケーブル（LCX：同軸ケーブルの一種で、スロットと呼ばれる切込みが一定間隔で設けてあることで、信号を伝送すると同時にその一部を電波として外へ漏洩させて通信を行うもの）の利用の実現性が高いが、移動体通信を介した保安に直接関係する情報の送受信について、伝送系の障害や誤りに対する安全性確保の方法が課題とされました。なお、この時期は海外においても同様の動きが起きており、1984年には北米でATCS（Advanced Train Control System）プロジェクトが、1986年にはフランス国鉄でASTREE（Automatisation du Suive Temps Reel）プロジェクトが開始されています。いずれも列車に搭載したマイクロコンピュータと地上のセンターコンピュータの間を無線伝送路で結ぶことを特徴としていて、線路沿線に配置された従来の制御機器や伝送ケーブルを廃止

することによる経済性の大幅向上だけでなく、鉄道輸送の弾力性と効率を抜本的に改善することを目的としています。

鉄道総合技術研究所として活動を開始した1987年度は、「無線による列車制御システム」として基礎的な研究開発に取り組みました。制御方式の検討を行い、地上のサブシステムと車上のサブシステムの機能分担については、大容量の無線伝送路の確保が難しいと見込まれたことから地上が制御機能の一部を分担し、無線伝送路に大きな伝送容量を必要としない方式が適すると結論づけました。また、並行してLCXの伝送品質の測定を東北新幹線白石蔵王・一ノ関間でを行い、当時の新幹線のLCX程度の伝送品質を確保できれば無線を列車制御に使用できる見通しを得ました。ただし、地上設備の簡素化の目的から、無線伝送路としての本命は空間波（送信アンテナから発射され大気層上空の電離層と地表面との間を反射しつつ伝搬する電波）であり、列車無線で使われている400MHz帯か、あるいは移動通信の電波割り当ての長期展望にたてば準マイクロ波帯（1.5GHz帯）が妥当として、次年度以降に伝送試験を行うこととしました。

1988年度は、「次世代運転制御システム」として本格的な研究開発に着手しました。まず、無線システム、位置検知、列車間隔制御、ポイント制御、踏切制御といったサブシステムの機能と構成を検討し、列車制御システムの基本的な仕組みと安全確保の方法を明確にしました。また、制御方法やシステム性能などを実験的に検証するため、室内実験システムの構築を開始しました。無線については、準マイクロ波を用いる場合の伝搬特性を解析し、実用性の見通しを得るとともに、準マイクロ波の実験局免許を受けて試作無線機での伝送試験に着手しました。さらに、在来

線区や新線に次世代運転制御システムを適用した場合のケーススタディーを行い、経済効果を明らかにしました。

1989年度からは旧運輸省の補助金を受けて（1993年度まで）研究開発を加速させました。位置検知に関しては、前年度に行ったレーダーを用いた方式の試験に続き、車軸の回転を積算する方式において従来の装置では検出できなかった5km/h以下の速度も検出できる装置を開発して性能確認試験を実施しました。無線については、中央線で準マイクロ波の伝送試験を継続するとともに、第一次現地実験として山陽新幹線新岩国・徳山間の約6kmにLCXを線間に一条敷設し、3箇所を基地局を、列車1編成に車上局を仮設して伝送特性を確認しました。各種の保安機能を実行する処理装置については、基本方式を検討するとともに、その心臓部である2つの32ビットCPUの入出力データを照合することにより処理の妥当性を保証し不一致時は停止するフェールセーフ比較回路のLSIを試作しました。室内実験システムでは、列車間隔制御と踏切制御を実装し、機能を確認しました。

1990年度には、第一次現地実験として地上の各基地局に追跡制御系を、列車には位置検知系および操縦制御系を追加仮設し、実列車により駅中間の列車間隔制御の機能確認を行いました。位置検知系については、車軸の回転を積算する方式のほか慣性航法装置を併用して空転・滑走が発生した場合の速度を補完する性能についても確認しています。

1991年度からは、それまで開発してきたソフトウェアとハードウェア

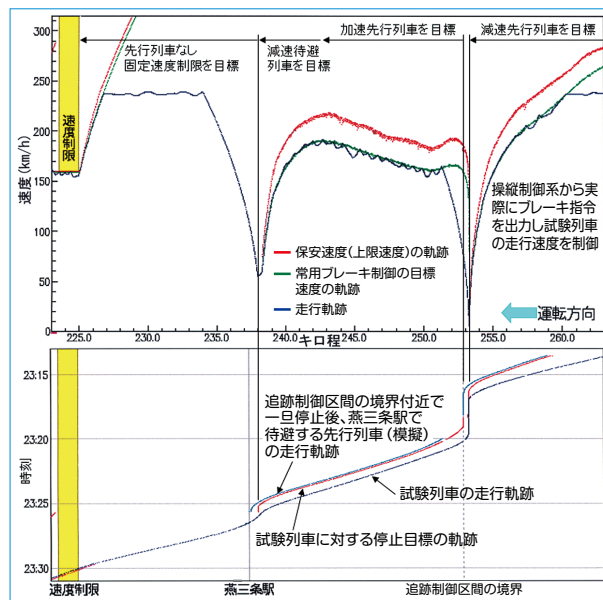


図3 実ブレーキ試験走行結果

を組み合わせた総合試験として、上越新幹線で、最終的に長岡・新潟間約77kmの既設LCX、3箇所の基地局と3編成の列車を用いた大規模かつ長期間の第二次現地実験を開始しました。なおこの試験は、一部の無線局をJR東日本が製作するなど、JR東日本と共同で実施しています。この実験システムでは、機能的には新たにポイント制御系を追加しました。また、無線システムとしては誤り訂正（FEC：Forward Error Correction）機能を持つ符号化／復号器を追加しています。各系の処理装置としては、二つの32ビットCPUとフェールセーフ比較回路のLSIを実装したフェールセーフCPUボードを使用して処理能力向上と安全性確保を図り、さらにこれを2重化する構成法を開発して信頼性を高め、異常時の回復機能を加えるなど、実用化を意識した開発を進めました。JR東日本の低騒音高速試験電車（STAR21）による300km/h以上の高速走行試験におけるLCXの伝送品質測定も行いました。一方、1991年度は、中央線でも準マイクロ波の第二次伝送試験を実施し、トンネル区間や市街地での伝送品質測定により適用できる見通しを得ました。しかし、準マイクロ波は、携帯電話用電波の需要急増のた

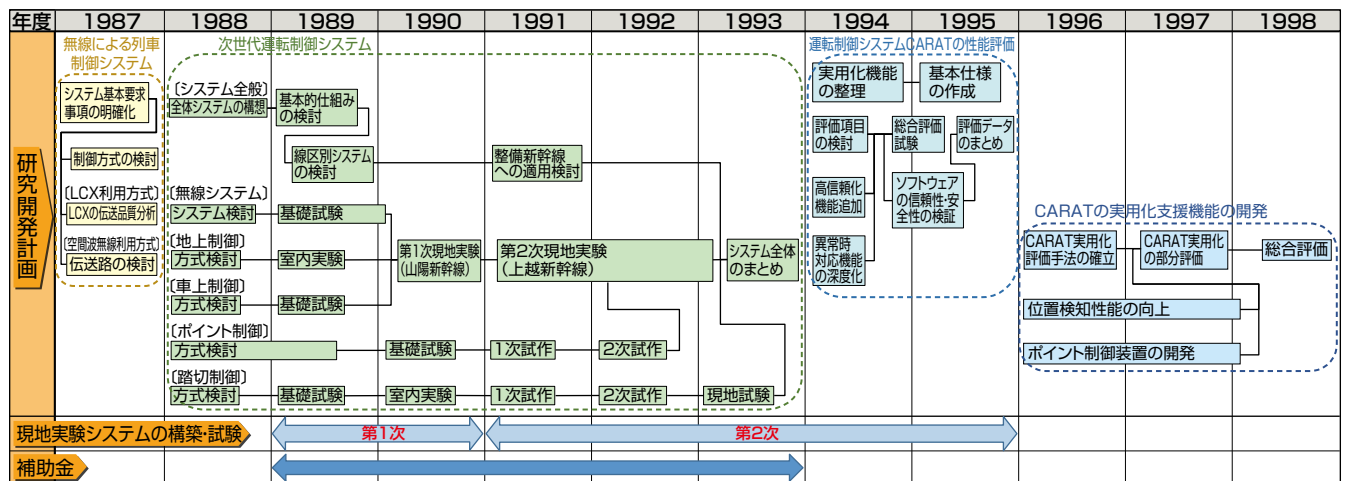


図4 12年間の研究開発計画(抜粋)

め、鉄道での使用が見込めない情勢となったことから、研究を中止せざるを得なくなりました。なお、踏切制御については、第二次現地実験とは別に函館本線で現車試験を行っています。

旧運輸省の補助金が終了した後の1994年度からの2年間は、「運転制御システムCARATの性能評価」として、無線の誤り率や列車位置検知の信頼性の確認、さらに地上装置と車上装置の処理能力、装置の安全性と信頼性の検証を実施しました。また、第二次現地実験の最終段階では、STAR21による速度制御や異常時のブレーキ確認試験などを行いました。時々刻々と変化する先行列車(模擬)の後尾位置に追従して試験列車の停止目標が変化するなかで、保安速度パターンに接近した場合は常用最大ブレーキがかかり停止目標の手前に停止すること、さらに図3のように、保安速度パターンの傘の下で乗り心地を考慮した常用ブレーキ制御により走行速度を制御できることを確認しました。

1995年度までにCARATの基本機能の開発を終了し、1996年度からJR東日本によるATACSの開発が本格化すると、鉄道総研から研究メンバーの一部がJR東日本に出向し開発チームに加わりました。研究面では「CARATの実用化支援機能の開発」として、導入コスト低減を目的とした軌道回路ベースの既存の連動装置との結合や、位置検知の精度向上を目指したGPSと慣

性航法装置による補助系の導入の可能性についても試験を実施し、いずれも良好な結果を得ました。また、現地試験によって安全性の評価・確認を終えているCARATの基本機能について、機能安全の国際規格IEC 61508で定められている安全に関わるシステムの概念設計から廃棄までの過程を対象とする安全性ライフサイクルにおける事前安全性解析を適用して再検証を実施し、安全性に問題がないことを確認しました。

研究開発を振り返って

CARATは列車制御システムのイノベーションともいえる研究開発成果です。しかし、開発経緯を振り返ってみると、研究開発が比較的スムーズに進展したといえます。たとえば、現地実験システムを構築するタイミングで補助金を受けることができ、基本機能を実証できたところで導入に向けた検討を進めていたJR東日本に実用化開発(ATACSの開発)が移り、また鉄道総研がその支援もできたことです。

1987～98年度の12年間の研究開発計画を示します(図4)。補助金は、研究開発が佳境に入るところで5年間受け、その額は、研究開発費全体の7割以上に及びました。補助金対象が狭軌新幹線であったことから、現地実験の無線はLCXを使うことになりました。ATACSの無線は空間波ですが、地下区間などではLCXを使っており、JR

東日本の次期新幹線ATCがLCXを使う無線式になるようであれば、上越新幹線での高速走行試験を含めた伝送品質測定の結果は活かされてきます。

JR東日本では、1990年度から「次世代信号通信システム検討会」を設置し、1992年度まで基礎検討を行い、1993年度にはプロジェクト化の検討を開始しています。上越新幹線における第二次現地実験がこの年からJR東日本と共同で行うこととなり、その後1995年度にJR東日本は具体的なシステム名をつけたATACS検討会を組織して実用化検討を具体化していきました。これらの検討会には、鉄道総研のメンバーが委員をはじめ幹事などで参画していました。鉄道総研が基本方式の開発とその技術的可能性の実証を行い、JR東日本がその成果を発展させて実用化したといえます。

おわりに

ATACSの実用化が2011年度ですから、ATACSの開発には鉄道総研におけるCARATの研究開発期間を上回る時間が割かれています。それほど実用化に慎重さが求められる革新的な列車保安制御システムに一研究所が単独で実用化まで関わることはとてもできません。CARATからATACSへのバトンタッチの流れは、今後の革新的な研究開発成果の実用化方法のひとつの手本になると思われます。[RRR]