No.5

列車の運行から改札までの鉄道システムの事例

松本雅行　東日本旅客鉄道（株）信号システム管理センター

鉄道システムの概要

鉄道システムは乗客と貨物を安定して，効率よく運ぶことが使命である．かつての国鉄時代は経営赤字の問題や運転事故など安全上の課題なども多くあり，その対応に追われ鉄道業務のさまざまな分野でシステム化が遅れていたといわざるを得ない．

JR となってから，経営が安定したこともあり，各社はそれぞれ，安定輸送，サービス向上，業務能率の向上などのため，「情報システムの近代化」を掲げ，各種のシステム化に取り組んできた．

経営の面では，「総合経営情報システム」として「経費の把握システム」，「駅収入管理システム」，「輸送総合システム」の 3 つのシステムを開発し，未来を切り拓くための経営戦略情報をスピーディに収集・分析できるシステムとしてフル活用してきている．

列車運行では，システム化が遅れていた首都圏に新しいコンセプトの輸送管理システムを導入するとともに，新幹線のシステムも同様なシステムにチェンジしてきた．さらに，列車制御の面でも従来の ATC システムを抜本的に見直し，IT 技術をフルに活用したデジタル ATC を開発し，新幹線と山手・京浜東北線に導入した．また，駅の改札も非接触 IC カードを用いた Suica システムを開発し導入するだけでなく，電子マネー，携帯電話と結合したモバイル Suica を開発し，生活スタイルの変革も果たしている（**図 -1**）．

以下に，これらのシステムのうち代表的なシステムについて，鉄道におけるシステムの活用例といかにディペンダブルなシステムとなっているかを紹介する．

輸送管理システムの革新

大都市内あるいは都市間鉄道において，高密度の輸送が求められており，JR 東日本の中でも，新幹線と首都圏の線区は高密度輸送や安全・安定輸送に対するニーズが非常に強い線区である．

ところが，JR 東日本が発足したころ，首都圏の輸送管理業務（運転ダイヤに従って列車運転の管理を行う仕事），進路制御業務（個々の列車を所定の進路で運転させる仕事）の大半が紙と鉛筆，電話と黒板という人手に頼ってきていた．国鉄時代から他の線区では自動化が進んでいたが，首都圏におけるこのような状況は高密度運転を担っている線区として問題があるとの認識から，これらの業務のシステム化に取り組んだ．

開発にあたっては，従来システムの課題を克服するため，輸送管理業務を抜本的に改善し，次世代にふさわしい鉄道輸送管理システムを構築するものとし，以下の開発コンセプトを掲げた．

1) 駅での運転扱いから指令中心の輸送管理に移行する
2) 旅客案内を自動化しお客様サービスを向上する
3) 指令と駅・区所との運行情報を共有する
4) 保守作業管理のシステム化により安全性を向上する

この東京圏輸送管理システムを ATOS（Autonomous Decentralized Transport Operation Control System）とよび，1996 年 12 月に中央線に導入し，以来逐次線区の拡大を行ってきていて，現在は首都圏の 1,050km・19 線区に導入している（**図 -2**）．

図 -1　列車運行から改札までのしくみ

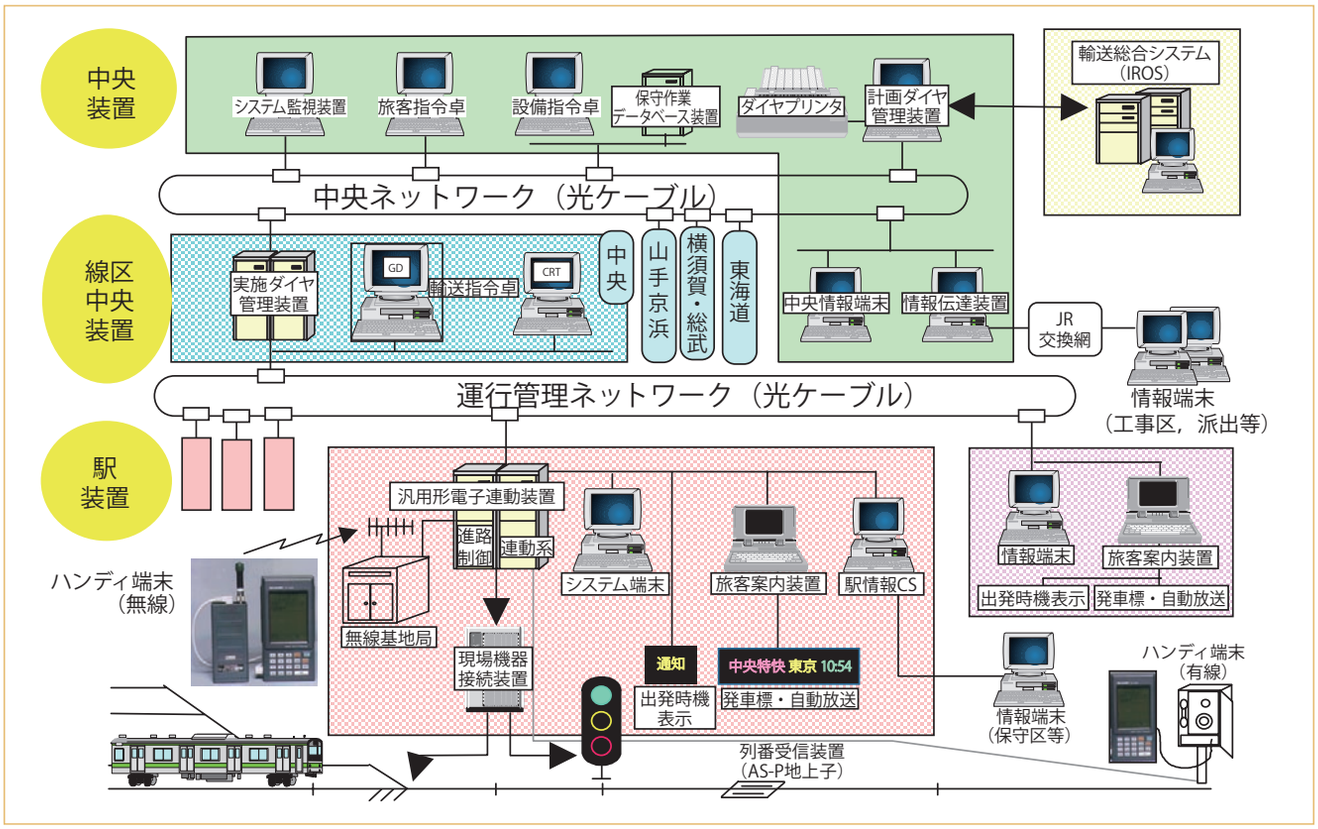

図 -2　ATOS のシステム構成図

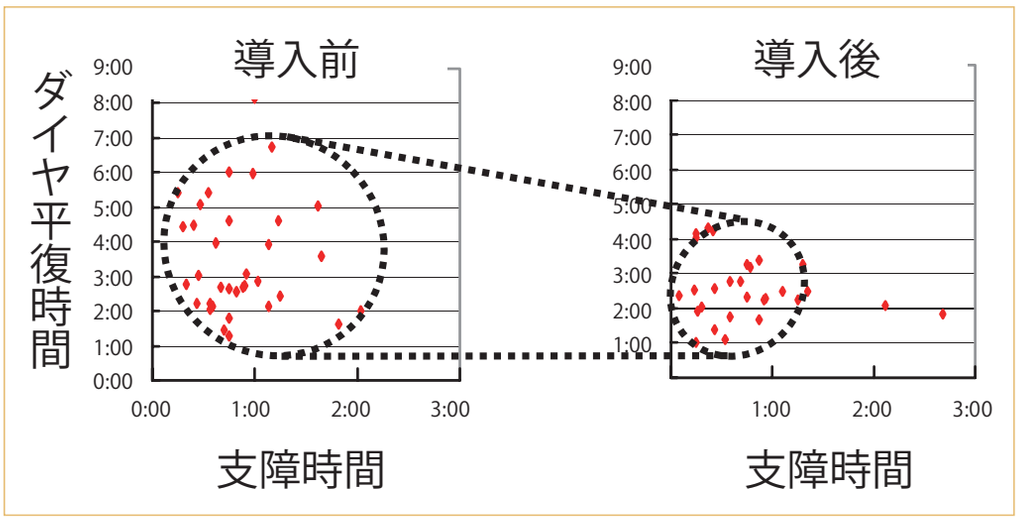

図 -3
ATOS 導入によるダイヤ平復時間の変化

システムは，大きく分けて中央システムと駅システムに分けられ，相互を結合する光ネットワークと多数の汎用コンピュータ群で構成されている．従来のシステムは中央集中型であったが，各駅に駅装置用のコンピュータ（新型電子連動装置）を分散配置した自律分散システムを採用し，駅単独のシステム構成だけでも進路制御機能や保守作業管理機能を有するとともに，万一，中央装置や光ネットワークが故障して駅システムが中央から切り離されても，列車の進路制御が継続できる構成となっている．この自律分散システムの採用によって，システム全体を一度に使用開始するのではなく，駅ごとに使用開始し，線区の全部の駅に新システムが導入された段階で，線区システムを使用開始するという，段階的構築手法を採用でき，システム展開をスムーズに行うことができた．

また，ATOS の導入後は，列車が何らかの原因で乱れても，平常時の運転に復帰する時間が以前に比べて短くなり（**図 -3**），またお客様への案内情報を逐次提供できるなど安定輸送に大きな貢献を果たしているとともにサービス向上にも役立っている．さらに，保守作業の際に作業者が現地でハンディ端末を扱うことで，列車

図 -4　ATC システムを使用した東海道新幹線開業

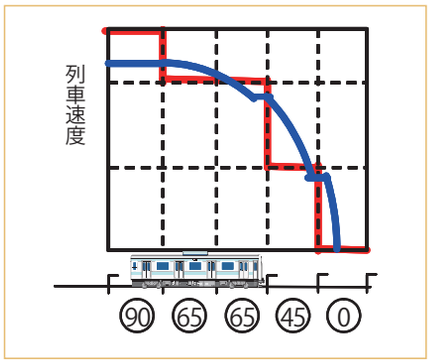

図 -5　ATC システムの動作原理

の進入を防ぐ機能があり，保守作業の安全性も格段に高まった．

列車制御システムの革新

【ATSの導入】

鉄道の初期では，駅員が身振りによって進行か停止の信号を示していた．運転士がこの信号を見て列車を運転しても，信号の見落としや信号無視による追突や衝突の可能性は皆無ではなく列車事故が頻繁に発生した．これを防止するのが列車制御システムである．

1956 年 10 月に，参宮線六軒駅において死者 42 名を出すという列車衝突事故が発生し，停止信号を音で運転士に知らせる車内警報装置の採用を決定するとともに信号機の自動化や色灯化を促進した．その後，1962 年 5 月に三河島駅において死者 160 名を出すという，国鉄史上まれに見る大事故が発生した．この事故によって車内警報システムに停止機能を付加した自動列車停止装置（ATS：Automatic Train Stop）を，1966 年 4 月までに日本国有鉄道（JNR）の全線に導入した．ATS は，列車が停止信号に接近すると，信号確認を促すベル，チャイムと赤色表示の警報を発し，もし運転士が一定時分（5 秒）以内に確認扱いをとらなければ，自動的にブレーキをかけ列車を停止させる．確認扱いをした場合には，運転士の注意のもと運転が継続できるが，これが取り扱い誤りによる事故の原因ともなり ATS の弱点となっていた．

この ATS の欠点をついた事故が発生したため，新型 ATS を開発することとなった．ATS-P と呼ぶ新しい装置の動作原理は，信号機の手前一定距離の地点に地上子を設け，信号機が停止現示のときは信号機からの距離―速度相関の速度照査パターン（以下パターン速度という）を車上で発生させ，列車速度がこのパターン速度を超えたときのみ自動的に常用ブレーキが動作し，列車を信号機の手前に安全に停車させることを基本としている．

【ATCの登場】

1964 年 10 月，東京オリンピックと同時に東京・大阪間に超高速の東海道新幹線が営業開始された．運転席に速度信号を表示し，この信号に従って自動的にスピード制御する車内信号の自動列車制御装置（ATC：Automatic Train Control）を採用し，超高速輸送の安全，安定輸送を保障する重要な位置を占めた（**図 -4**）．国鉄の在来線では 1971 年に常磐線と営団地下鉄千代田線の相互乗り入れのときに国鉄で初めて在来線用に ATC が導入された．1982 年山手線・京浜東北線に導入，民鉄にも 1964 年から広く採用されてきている（**図 -5**）．

ところが，ATC は安全の向上と輸送効率の向上に貢献しているものの，地上から伝送されている許容される列車速度以下に速度を下げることにより段階的に速度を下げて停止するという原理によっているため，各速度ごとにブレーキがかかったり，緩んだりするロスが生じてしまい，列車間隔を縮めることができないため輸送密度の向上につながらない．また，ブレーキは急に強いブレーキがかかるため，乗客にとって乗り心地が悪くなるうえ，地上機器が多いため重厚で高コストな設備となっているなどの問題点があり，その結果輸送改善に支障をきたしていた．

【デジタルATC】

これらの問題点を解決すべく開発されたのがデジタル ATC システムである．列車制御システムとして本来あるべき姿を考えると，先行している列車に追突することなく，列車を停止させるために必要なことは「停止すべき位置までの距離」だけが分かればよいわけで，そのために必要な情報は，「自列車の正確な位置」と「停止すべき位置」である．すなわち，地上からは停止すべき点の位置情報のみを送り，車上は自位置を認識して，地上からの停止点との距離を計算する．かつ，線路の曲線，勾配等の条件を加味して必要な時機に適切なブレーキをかけるのが，新しい列車制御システムの基本原理である．

まず，先行する列車の位置を検知し，その位置をもと

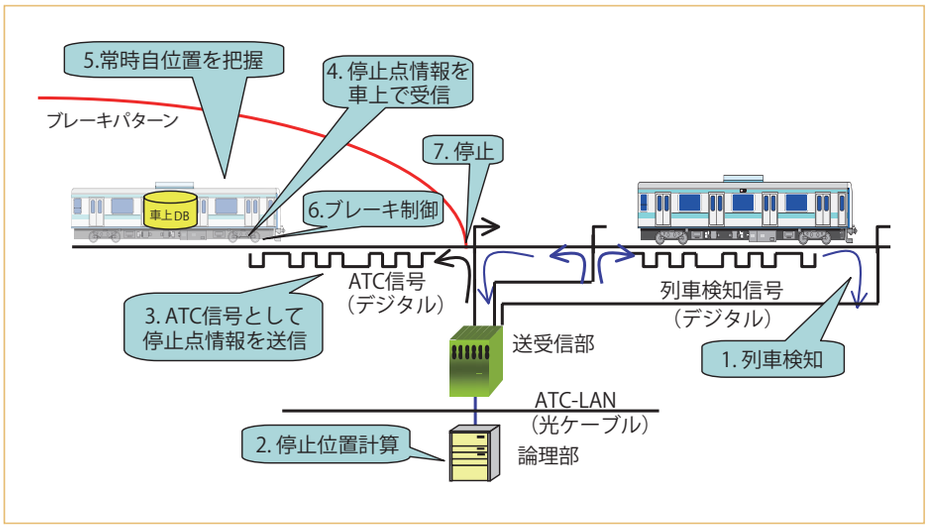

図 -6　D-ATC の動作原理

にどこに止まるかの情報をデジタル信号として後続の列車に伝える．一方，後続の列車は自分の位置を速度発電機により常に計算しており，この停止点と，列車の位置とからブレーキパターンを作り出す．このブレーキパターンと列車速度から列車のブレーキ制御を行って停止点までに列車を停止させる（**図 -6**）．

本システムの特長は，第 1 に，パターン制御により停止点まで連続してブレーキを動作させるため，高密度運転が可能であることがあげられる．2 番目に，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，3 番目に，車両性能の向上に追随して，地上設備の変更なしで運転間隔を短縮することが可能であるというフレキシビリティを備えている．そして，最後に，進路の開通状況を乗務員に示すことにより，運転操縦性の改善も図ることができるという点がある．

この結果，新しい列車制御システムは現行 ATC よりも低コストで，しかも現行 ATC 区間の 2 分 30 秒時隔を 2 分時隔に短縮可能なものとなり，工事費も従来による方法に比べて 20％ほど低減できる見込みである．また，信頼性・安全性も向上し，信頼度は 10^{-5} であったものが 10^{-6} に改善し，危険側の故障率は 10^{-12} を確保することができた．

【ATACS】

JR 東日本では，無線通信を利用した列車制御システムを開発した．今日の情報技術分野の著しい発展は，列車自身が位置を把握し，無線によって他の列車と情報を交換する列車制御システムを作り上げることを可能とした．それゆえ，これまでの列車制御は軌道回路を用いて列車位置を検知する方式から，車上で自ら位置を把握しこれを無線によって地上装置経由で後続列車に伝送する方式とし，ATACS（Advanced Train Administration and Communications System）と呼んでいる．

この ATACS のプロトタイプ試験を 2003 年 10 月から 2005 年 2 月まで，昼間の模擬走行試験を累積で約 100 万 km 以上実施，夜間実際に列車を制御する実走行試験は全部で 28 回行った．この結果，プロトタイプシステムは，機能，安全性共に問題がないことが検証できたので，現在実用化に向けて工事を進めている．

Suica の開発導入と展開戦略

【Suicaのサービス開始】

当社では，駅の改札業務の近代化･効率化の観点から，1973 年に武蔵野線，1986 年に京葉線へと自動改札システムを導入し，さらにより一層のサービス向上を目指し 1990 年度に新たな磁気式ストアードフェアシステム「イオカード」を導入してきた．

この自動改札システムが老朽取替の時期を迎え，お客さまのニーズに適合した次世代の出改札システムとして，乗車券の購入や精算に対するキャッシュレス化，チケットレス化など新たなサービスの提供を考え，1987 年から非接触 IC カード出改札システムの開発を進めてきた．実用化の目途がついたので，老朽取替に合わせて「Suica（スイカ）」を使った新しい出改札システムのサービスを東京近郊区間の 424 駅において，2001 年 11 月より開始した（**図 -7**）．従来の自動改札機には Suica を処理する機能を付加し，自動改札機を設置していない個所には，Suica を処理する機能を持つ簡易 Suica 改札機を新たに設置した．IC カード出改札システムの導入にあたってのコンセプトは次のとおりである．

1) サービスアップ
2) システムチェンジ

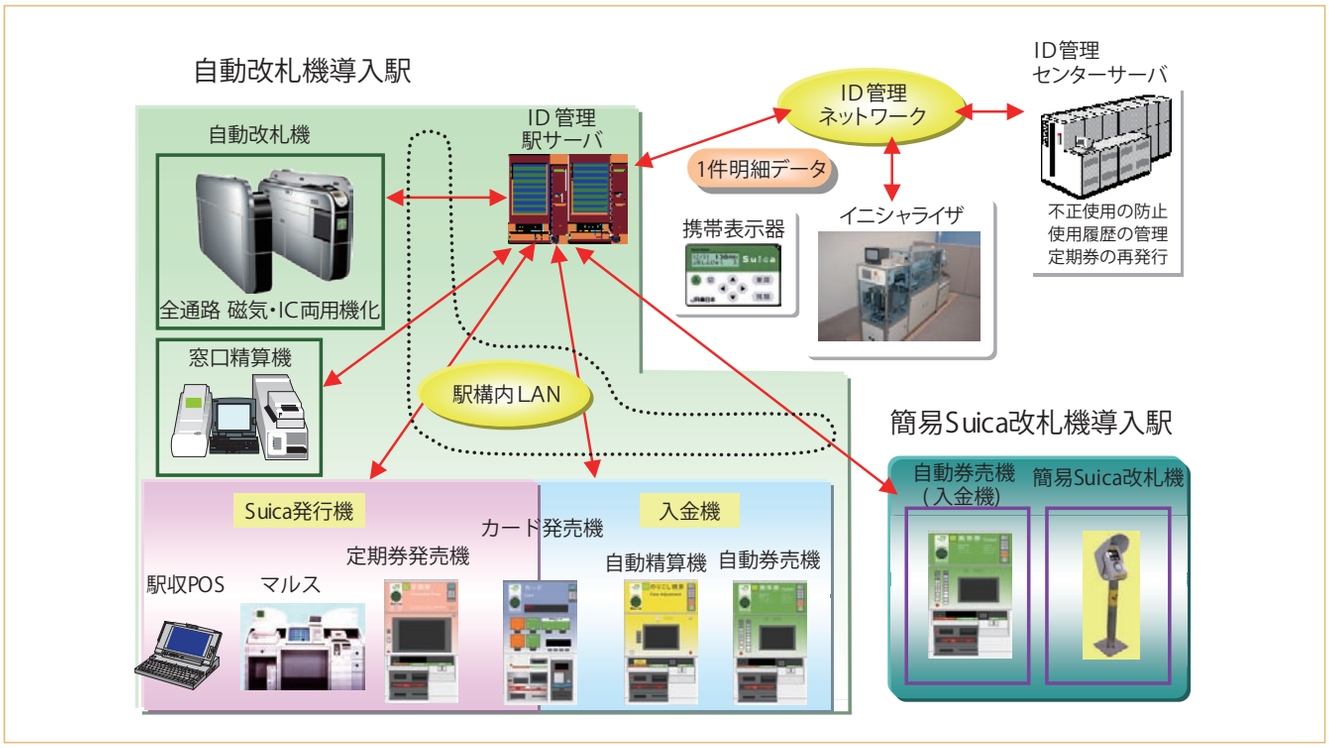

図 -7　Suica ネットワーク構成図

3) コストダウン
4) セキュリティアップ
5) ニュービジネス

この Suica が好評であり，他交通事業者とのカード乗車券相互利用の要請が強く，東京モノレール，JR 西日本と相互利用を 2002 年に実現した．その後，協議・検討・開発・試験のプロセスを経て，2007 年 3 月 18 日，首都圏で PASMO との相互利用サービスを開始した．参加交通事業者は，サービス開始時点で PASMO グループ鉄道 23 事業者，バス 31 事業者と，Suica グループ 5 事業者の計 59 事業者となり，約 1,800 の駅と 1 万 4,000 台のバスがネットワークで結ばれ，世界最大規模の交通 IC カードネットワークが完成した（**図 -8**）．

また，Suica を利用したグリーン車 Suica システムを 2004 年に，湘南新宿ラインで実現し，利便性をさらに向上し，2008 年初めでカード所有者数は 2,300 万にも上っている．

【Suica 電子マネーの誕生】

Suica 電子マネー（ショッピングサービス）は，お客さまの利便性やサービス向上を目的に，2004 年 3 月，首都圏と仙台エリアの一部からサービスを開始した．

2007 年 3 月末時点で Suica 電子マネー利用可能店舗数は約 1 万 2,700 店舗，1 日あたりの取扱件数は約 53 万件となっている．今後，Suica 電子マネーのさらなる普及・促進を図るためには，電子マネーが利用できる個所を増やすことが必要となると考えている．

【モバイル Suica】

この 10 数年間で携帯電話は著しい普及を遂げ，2007 年 3 月現在，国内における携帯電話の契約数は 9,500 万台を超えている．近年では，機能の多様化が進み，メール・通話機能に加えて，ネットへのアクセス，ワンセグ対応，音楽配信など，2006 年秋にスタートしたナンバーポータビリティを踏まえて，高付加価値化による顧客の囲い込みを図ろうと，携帯電話各社がしのぎを削っている．こうした状況の中で，高付加価値化のツールの 1 つとして非接触 IC チップとアンテナを内蔵した携帯電話（以下，IC 搭載携帯電話）が開発された．NTT ドコモは，2004 年 7 月から IC 搭載携帯電話を発売しており，2007 年 3 月末までに 1,100 万台以上が普及している．また，2005 年には KDDI とソフトバンクモバイルも IC 搭載携帯電話を発売した．そこで，NTT ドコモ，KDDI とそれぞれ提携し，Suica 機能を IC 搭載携帯電話にて実現するモバイル Suica サービスを 2006 年 1 月 28 日から開始した．今後多くの企業が IC 搭載携帯電話を活用したサービスを提供していくことが想定される．

【今後の新しいサービス】

モバイル Suica は，お客さまのニーズに応えるべく，決済クレジットカードの拡大（2006 年 10 月サービス

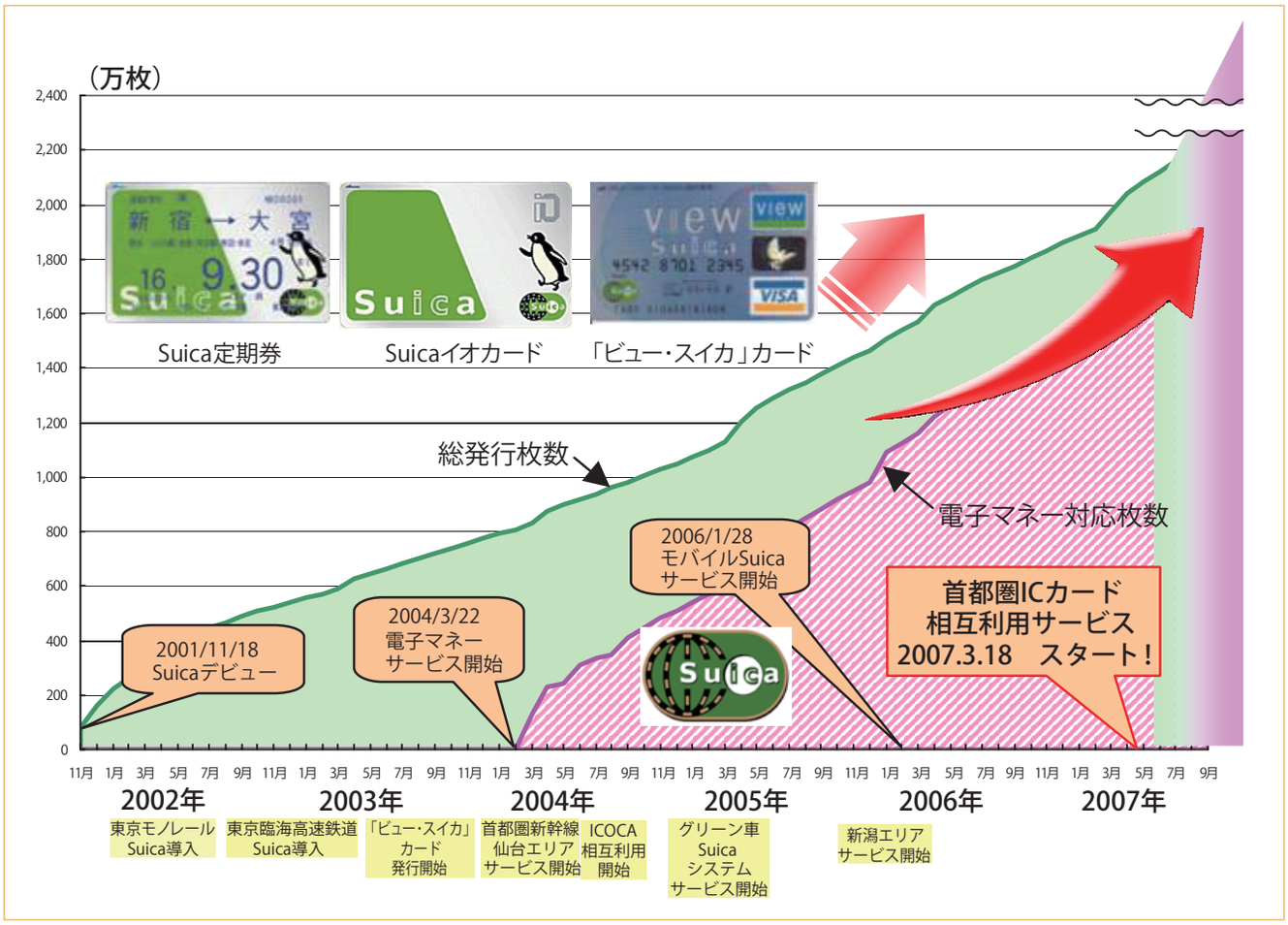

図 -8　Suica の現状

開始）やモバイル Suica サービスを鉄道，電子マネーなどの交通関連サービスにとどめずに，より魅力のある総合的なサービスとして活用していただくためにも，新規ビジネス分野の機能を早期に構築することが求められる．

鉄道が望むディペンダビリティ

鉄道に求められる特質には，安全で安定に運転するという社会インフラとしての位置づけ，利便的で快適な高品質のサービスを継続して提供するというサービスの位置づけとお客様の多様なニーズにすばやく適応するというものがある．これらの実現のためには，日々システムを改良し機能アップを図っていく必要がある．また，ときにはシステムのリプレースを行って抜本的にチェンジすることも必要となる．

これまで，システムはハードウェアの不具合やソフトウェアのバグによる停止に対して，安定して稼働するという点の議論は進められてきたが，機能の改修・追加・取替，それに伴うテストなどによる安定したシステムの運転については，現場では切実な問題であったにもかかわらず学問レベルでの研究はほとんど行われていない．近年アシュアランス技術の提唱があるもののまだ広くいきわたっているとはいえない．

当社のシステムをいくつか紹介し，鉄道におけるシステムの役割，効果などについて述べた．ぜひ，システムの機能改修・追加・取替などにおけるディペンダビリティの検討を専門の方に期待する次第である．

参考文献
1）松本雅行：電気鉄道，森北出版（Apr. 1999）．
2）北原文夫他：超高密度鉄道の列車群を自律分散制御する東京圏輸送管理システムの開発，電気学会，Vol.118-D, No.4 (Apr. 1998).
3）松本雅行：世界にはばたく技術―自律分散システム―自律分散型列車制御システム，電気学会，Vol.121, No.2 (Feb. 2001).
4）松本雅行，森　欣司：自律分散型列車制御システムにおけるアシュアランス技術と評価法，電子情報通信学会 , Vol.J86-DI, No.1 (Jan. 2003).
5）椎橋章夫：IC カード出改札システム “Suica” の開発と導入，日本信頼性学会 ,Vol.25, No.8 (Nov. 2003).

（平成 20 年 2 月 5 日受付）

松本雅行
m-matsumoto@jreast.co.jp

1972 年東工大大学院修士了，同年日本国有鉄道入社，1987 年 JR 東日本入社，運輸車両部，設備部担当部長などを経験し，2007 年から理事，電気ネットワーク部信号システム管理センター所長．技術士，工学博士．