

ICカード出改札システム “Suica” 開発記

ジェイアール東日本メカトロニクス株式会社（元 JR東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所） 高井 利之



2001年11月18日、東京圏のJR東日本の424駅で一斉に、非接触式のICカード出改札システムSuica - Super Urban Intelligent CArd - が使用開始となりました。この日、新宿駅南口では、社長の太塚はじめ、生みの親の三木氏（元総合技術開発推進部情報技術担当部長、現JR貨物総合企画本部主幹）、育ての親のSuicaシステム推進プロジェクト担当部長の椎橋、PRキャラクターで女優の国仲涼子さんなどが参列して華やかにオープニングセレモニーが催されました。このSuica誕生の影には、10年を超えて人知れず脈々と研究開発に携わってきた関係者の営みがありました。

1 プロローグ

1987年、旧電電公社はすでに2年前に民営化されてNTTとなり、旧国鉄もJRグループとして再出発しようとしていました。その頃、巷では、そのNTTと、JRグループが発行する2種のカード、テレフォンカードとオレンジカードが話題を集めていました。それまで、公衆電話をかけるにも、券売機で切符を買うにも、小銭を必要としていたものを、その手間を省いたこれらのカード、すなわち、カード内に一定のバリューを備えたプリペイドカードは、その手軽さと便利さ、さらにはカラフルで多様なデザインから、人気を集め、コレクターも少なからず存在していたようです。カードといいますと、銀行のキャッシュカードやクレジットカード等、プラスチックカードの一部分に、磁気ストライプを貼り付けたものがおなじみですが、これらのプリペイドカードは、PETカードの裏面全体に、磁気塗料を塗布したものとなっています。

当時、この磁気塗料を塗布した切符や定期券を使った自動出改札システムは、関西の私鉄を中心に導入が進んでいましたが、JRグループや関東の私鉄の駅では、昔ながらに駅員が切符にはさみを入れる音が響いていました。

そんなころに、磁気カードを使った出改札システムの次の世代の出改札システムとして、ICカードを活用することの可能性について議論をはじめていた三木をはじめとする研究者達がいまいました。

2 鉄道における乗車券の変遷

鉄道による本格的な旅客輸送は、1830年、英国のリバプール&マンチェスター鉄道で始まりました。

この時に利用された乗車券は、当時の乗り合い馬車の運送状に準じて88×73mmの大きさの用紙に発着駅を印刷し、発車時刻、発売年月日を手書きで記入したものでした。

また、1832年には、同じく英国のレスター&スワニングトン鉄道において、真鍮製の金属乗車券に会社名や着駅、通し番号等を打刻し、回収して繰り返し使用するトークン方式が使用され始めました。

そして、1837年、英国ニューカッスル&カーライル鉄道ミルトン駅長のエドモンソン氏が30.0×57.5mmのボール紙に、木製の手打ちスタンプで発着駅、運賃等を印刷し、通し番号を手書き記入した乗車券を考案しました。このタイプの乗車券は現在に至るまでエドモンソン券として引継がれています。

1960年代になると、出改札業務の効率化、確実化を図るために、それまでの“紙に印刷されたり、書かれていたりした情報を人間が目視で確認して処理していたシステム”から、“磁気カード等に蓄積された情報を、それぞれ的手段で認証し、読み取り、書き込んで処理するシステム”が登場してきました。このシステムは、1963年のロンドンでの試行に始まり、日本でも、1966年、東急が鑽孔式の切符で試験を行い、その後、1967年に近鉄が阿倍野橋で試用、阪急が北千里駅で使用開始をしました。この辺の経緯は、過日NHKのプロジェクトXでも紹介されましたので、ご存知の方も多いかと思いますが、一回券は硬券の裏側に磁気インクによりバーコードを印刷したもので、定期券はプラスチックカードに光学パンチを施すとともに、表面には従来と同様の印刷を行ったものを使用し、自動改札機もそれぞれ専用機を設置していました（図1参照）。その後、切符の裏面全体に磁気塗料を塗布する方式が採用され、一回券も定期券も同一の自動改札機で対応できるようになり、幾多の改良を経て現在



図1：初期の自動改札用乗車券

に至っています。この方式は、1971年に日本鉄道サイバネ規格に採用され、国内の各鉄道会社間での仕様の統一が図られています。

3 ICカード出改札システム開発の黎明期

1987年の初めころから、ICカードを次世代の出改札システムとして活用することに関して、その機能評価と応用の可能性の検討が三木を主査としたグループで開始されました。

ICカードは、接触式と非接触式の2種類に大きく分けられます。接触式ICカードは、カード内のICとの接点がカードの外部に露出していて、その接点を通じてデータの交信を行います。これに対し、非接触式ICカードは、接点を持たず、無線でデータの交信を行います。都市圏鉄道の乗車券として使用するには、自動改札機通過時に必要とされる処理速度やその使用頻度から、非接触式でなければ対応が困難です。

その当時、非接触式ICカードと称するものを製造していたのは、中波を使用したA社、研究開発を行っていたのは、同じく中波を使用したB社と、マイクロ波を使用したC社で、ともにリードオンリー（読取専用）のカードだけでした。しかしながら、出改札システムとして使用するには、ラッシュ時の膨大なトランザクション（データの処理）を考えると、その都度、中央で処理を行うのは困難であり、カード自体に書込み機能を持たせたリードライトカードとする必要があると三木達は結論づけました。

これらの検討結果から、非接触式ICカードを出改札システムとして活用するためには、表1に示すような仕様を有することが必要である、との開発目標を提示しました。

表1：ICカード乗車券の開発目標

項目	目標	備考
大きさ	ISO/サイバネサイズ	量産時
メモリ容量	数百バイト	暫定的
読書き	可能	必要部分書込み可
通信保証距離	30cm以内	ケース内で可能
通信禁止距離	1 m以上	隣接装置影響なし
通信時間	200ms以下	流動を阻害しない
読書きの方向性	なし	上下左右可能
改札エラー率	10 ⁻⁵	駅環境において
環境/物理条件	ISO準拠	暫定的

この開発目標に対し、各メーカーは、通信インフラは高速化が進む、そうするとIDさえわかれば高速ネットワークを経由して中央での処理が可能であるから、リード

オンリーでも対応できる、と主張しました。しかし、JR東日本の東京圏では、一日に1500万人規模のお客さまにご利用をいただいています。このうち、すべてがICカードに変わるわけではないとしても、お客さまが自動改札機を通過するたびに、膨大なトランザクションが発生します。しかも、自動改札機を通過するわずかな時間でオンライン処理するのは、いくらネットワークが高速化されたとしても、これに耐えうるネットワークを構築することで対処することは得策ではなく、カードにもそれなりの処理機能を持たせるべき、したがってリードライトとする必要がある、と三木は説得しました。

当初否定的であった各メーカーも、度重なる説得の結果、ようやくこの説を認め、リードライトのICカードを開発するとの意思表示を得ることができました。

その後1988年から89年にかけて、これらのメーカーからICカードの試作品が提供されるようになり、これらのカードを使用して三木達は基礎的な研究を行いました。カードとリーダーライター（読み書き装置：以下R/W）との間でのデータの読み取りや書込みが目標時間内に正確性をもって伝送可能かどうかの試験が繰り返され、カードやシステムに改良が加えられていきました。

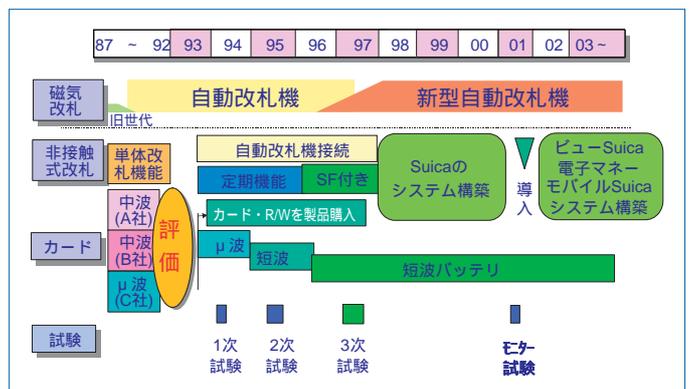


図2：ICカード乗車券システムの開発経緯

そんなときにある“事件”が発生しました。

JR東日本では、業務の改善を進めるため、東京圏の改札業務を自動化することを計画し、1990年から東京駅と、駒込駅を皮切りに、各駅への磁気カードを用いた自動出改札システムの導入を開始しました。

この時、あるメーカーが、“これで当面、少なくとも10年くらいは、JR東日本においてICカードを使用した自動出改札システムは採用されるめどがなくなった。他の

私鉄も、JR東日本と接続しているからには、磁気式出改札システムを導入していくであろうことは理の当然である。したがって、当社は、鉄道自動改札用のICカードの研究開発は中止したい。時期を見て必要であれば再開することとしたい。”との通告をしてきました。

また、JR東日本社内からも、“ICカード出改札システムに多くの優位な点があることは承知しているが、現段階で採用するだけの信頼性はない。したがって、東京圏には、現在最も信頼のおける磁気式出改札システムの導入を推進していく。磁気式出改札システムの導入を推進しつつ、その不十分な点を改善するために、もっと優れたICカード出改札システムを開発しているということは自己矛盾となりかねない。したがって、ICカード出改札システムの開発を進めていることは積極的にPRするな、かといって止めるな、将来はICカード出改札システムとなる可能性が大であるから、そのときに外堀を埋められてしまうことなく、イニシアチブは取れるように、最先端の動きに半歩遅れてついていけ、タイミングを図れ、de factoを他に取られるな”、という難しい要請がありました。

メーカーからは、“開発を中止したい”と通告され、社内からは、“つかず離れず、でいけ”との要請を受けるなかで、メーカーを“なだめすかしながら”研究開発を続けるという日々がしばらく続きました。

4 単体システムの評価

上述のような状況下で、細々と、しかし着実に研究開発は続けられてきました。そして、1992年、それまでに改善を重ねられてきた3社のカードが期待される仕様のレベルに近づいたと考えられたため、3社のカードの評価を行うこととしました。その結果、必要とされる機能の面からは3社それぞれ優劣はつけがたいものの、データを伝送するために、ある周波数の電波を発生させる発振回路を、A社、B社の方式ではカード自体に設けなければならないのに対し、C社の方式ではR/Wの方に設置すればよく、システム全体のコストダウンが見込めることから、C社の方式に優位性が認められる、との結論にいたり、その後はこのシステムをベースにして開発を続けていくこととしました。

5 自動改札機と接続しての試験

5.1 自動改札機との接続

単体システムで良好な結果を得ることが出来たため、次のステップとして、自動改札機と接続するシステムの開発を進める段階、すなわち、これまでの実験室レベルから一歩進んで実フィールドでのレベルでの検証が必要な段階となりました。それまでは、研究開発部門である総合技術開発推進部を中心に進めてきましたが、このころから、実フィールドの磁気式出改札システムを担当している設備部旅客設備課との連携を深めていくようになりました。

開発を進めるにあたって、すでに、磁気式出改札システムが導入されているため、ICカードシステムを活用する場合の条件として、以下の点を考慮することとしました。

- ・磁気式システムとの共存を図ること。
- ・処理能力は、磁気式システムと同等以上であること。
- ・信頼性は、磁気式システムと同等以上であること。
- ・新たなサービスを付加すること。

その後、このICカードと、R/W、既存の自動改札機とのインターフェイス等の開発を行い、実験室内での試験を繰り返しました。

そして、1993年、機能的には、実際の駅に設置しても対応が可能であろうと考えられるレベルに達することができました。そこで、実使用に近い状態での試験を行い、システムの信頼性や、自動改札機の処理能力の確認、モニターによる使い勝手の検証を行うことを目的として、フィールド試験を実施することとしました。

5.2 第一次フィールド試験

(1) 概要

第一次フィールド試験は、1994年の2月から3月まで約1ヶ月にわたって実施しました。その規模等は、表2に示すとおりです。

また、お客さまの使い勝手を知るために、R/Wについては、水平タイプと垂直タイプの2種類を試みました。

(2) 結果と課題

試験の結果、ICカードとR/W間の通信の処理が、適正に行われず改札機を通過できない割合（通過障害率）が磁気式の20倍以上となってしまいました。この要因としましては、

- ・通信エリアがラグビーボールのようなかたちであったため、ICカードをR/Wに近づけると、かえって処理が

十分に行われなかったこと、

・マイクロ波が人体の水分に吸収されてしまい、通信エリアが小さくなってしまったこと、
が考えられました。

モニターの方の感想では、90%の方が定期券を定期入れから出さなくてよいことに対する利便性をあげましたが、半数弱の方々から処理速度が遅い、との指摘もありました。

また、ほとんどのモニターの方が、R/Wは、水平タイプの方が使いやすいとの回答を寄せていました。

表2：各試験における規模と仕様

	第一次試験	第二次試験	第三次試験
試験期間	1994/2～3	1995/4～10	1997/4～11
駅数（通路数）	8（13）	13（30）	12（32）
モニター数	400	700	800
アプリケーション	定期券		定期券+SF
カードサイズ	54×85.6×0.76mm（ISOサイズ）		
ユーザーメモリー	512bytes	1024bytes	1200bytes
周波数	2.4GHz	32MHz	13.56MHz
通信速度	70kbps	250kbps	250kbps
電源供給	内蔵バッテリー		バッテリーレス

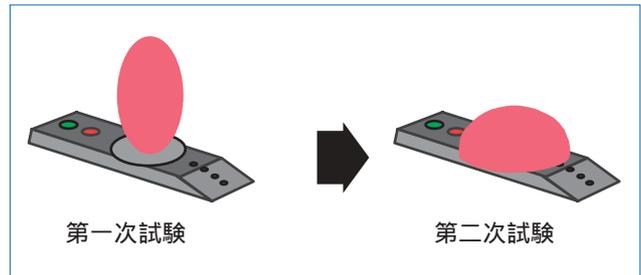


図4：R/Wの通信エリア



図5：第二次試験でのR/W

(2) 結果と課題

前回に比較すれば、通過障害率に改善は見られましたが、まだ、磁気式システムの約4倍もありました。これは、ICカードシステム自体に不安定な要素があったことでもあります。ICカードとR/Wとの通信エリアが目に見えないため、モニターのかざし方によっては、通信エリアでの滞在時間が不足し、データ処理に必要な時間を確保できない場合があって、正常な処理率の向上を妨げているものと考えられました（図6参照）。

また、試験開始3ヶ月を過ぎた頃から、内蔵バッテリーが劣化して、ICカードが使用不可能となるものが見られ始めました。したがって、バッテリー内蔵型は、長期間の使用には不適であるとともに、当然ではありますが、バッテリーの寿命がカードの寿命となってしまうため、抜本的な改良策が必要であることを認識しました。

処理速度については、通信速度を早めたために、改札機の通過数は、磁気式を上回ることができました。

第二次試験の結果は、全く満足のできるものではありませんでした。

第一次試験での不具合点を改修し、万全に近い自信を持って望んだ開発チームのメンバーにとっては、予想外



垂直タイプ 水平タイプ

図3：第一次試験でのR/W

5.3 第二次フィールド試験

(1) 概要

第一次フィールド試験の問題点を改善し、1995年4月から10月まで6ヶ月間にわたり、第二次フィールド試験を行いました。

主な改善点は、

- ・周波数の短波化
- ・通信エリアの半球型化
- ・通信速度の高速化

の3点です。

また、R/Wは、前回のモニターの方のご意見から、水平タイプのみとし、カバーには、アンテナ部分へ誘導するために、緑色に点滅するLEDを直線状に設置しました。

の結果でもありました。

周囲の目も厳しくなり、“全然使い物にならないではないか”、“カードがまともに反応しないことが多すぎる”等々の批判が寄せられました。

モニターをお願いしたある経営幹部も“おれのカードは5打数1安打だ”、すなわち、5回に1回ぐらいしか反応しない、との酷評を述べられました。

メンバーの一人は、“カードの使い方に慣れていただければ、信頼性は高まる”というように主張しましたが、“不特定多数が利用する改札口で、電車に乗るのに特別な訓練が必要なカードではどうしようもないではないか”という発言の前には、それ以上の反論は意味をなしませんでした。

開発責任者であった三木は、この試験で実用化の可否を決められると考えていたため、研究開発の中止も覚悟して、上司である研究開発担当役員にこの結果を報告するとともに、今後の進め方について意見を求めました。その答は、極めて明快でした。

“今回の試験がうまくいかなかったからといって、悩む必要はない。これからの出改札システムは非接触のICカードになるにきまっている。今回の問題点や反省事項を徹底的に改良して、もう一度挑戦しろ”

開発チームは、三度目の試験に向けて行動を再開しました・・・。

(1) “かざす” から “触れる” へ

第二次試験の反省から、必要な通信時間を確保し、通信の信頼度を向上するために、お客さまには、かざすというあいまいな動作ではなく、R/Wに触れていただく、ということをお願いすることとしました。そこで、触れていただきやすい、というより、その場に行くと、自然に手がそこへ伸びていってしまうような誘引効果、誘導効果のあるインターフェイスは出来ないであろうか、ということで、インターフェイスの研究者にいくつかのパターンを構成していただいて、田町駅のラッシュ時以外は使用していない自動改札機に組み込んで、試験を行いました。当時は、マンマシンのインターフェイスについてモニターの意見を伺うということに対する経験もなく、メンバー達が、それぞれの知人に頼み込んでモニター役を要請して行いました。

その結果、現在のR/Wの原型、すなわち、手前に15度

程度傾斜させる、触れていただきたい部分をわかりやすく図示するとともに、その周囲をLEDで明示する等々・・・を見出しました。

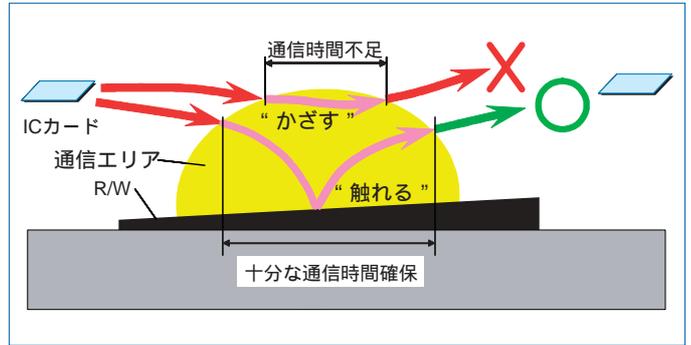


図6：“かざす”から“触れる”へ

(2) バッテリーレスカードとリライトシステムの開発

電源供給の信頼性を向上するために、カード自体にバッテリーを内蔵するのではなく、R/Wからの電波をカード側で電源として使用するバッテリーレスカード方式を採用することとしました。

このカードを使用することで、定期券として、カードを更新再利用することができるようになりますが、そのために、カード表面の記載事項を書き換え可能とする新しいリライト方式の開発にも取り組みました。カード表面にリライト層を設け、電圧を加えた状態で磁気的に書き換えを行う方式と、磁力を加えた状態で電氣的に書き換えを行う方式の開発を行ないましたが、機能面はともかく、コスト面での壁を崩すことが出来ず、導入時には、既存のロイコリライト方式を採用することとなりました。

(3) 新たなサービスの開発

より現実的な使われ方を想定して、これまでの定期券のみの機能に加えて、SFカード（イオカード）の機能を付加することとしました。すなわち、ICカードを、定期券単独でも、SFカード単独でも、さらに、定期券にSFカードの機能を組み合わせ、複合券として、定期券の区間外を乗車した場合にも、自動改札機で精算が行えるシステムの開発を行いました。

その精算の考え方は以下のとおりとなっています。

A、B両駅間有効の定期券に、SF機能を付加した複合券で、定期区間外で乗降する場合の精算方式

(i) 定期区間内で乗車し、定期区間外のC駅で下車する場合

A	B	C
	

1997年4月21日の試験初日、試験駅のひとつである田端駅には、あるTV局が取材に来ており、レポーター自らがICカードを使ってみせる等、周囲の意識も高まりつつありました。

このようなシステムの導入というのは、いくらそのシステムが優れたものであっても、社内はもちろんのこと、世の中の動向や、ご利用される方々の意識等“タイミング”というものが極めて意味を持つということを身をもって感じました。

この試験の結果を集約し、1998年3月、三木は上司とともに、技術部門の経営幹部に、導入に向けた検討をはじめめるべきである、と熱く語りました。

この経営幹部は、その説明を聞いた後、短く言いました。

“わかった。2000年をめざしてやれ。
設備部にプロジェクト体制を作って進めろ。”

この後、1998年5月から、プロジェクトチームは6人に増強されました。この6人は、さまざまな分野から、精鋭が集められました。営業制度とICカードシステムとの適合性やサービス内容・宣伝活動の検討と駅社員への効果的な教育計画の策定を営業担当者、ICカード内に記録された情報をどのように会計処理に反映させるかというルールを作成を会計担当者、膨大な情報を処理するシステムとネットワークのあり方をシステム担当者、お客さまにも駅社員にも使いやすいSuica対応機器の開発を設備担当者というように、進めていきました。

プロジェクトチームの増強と時を同じくして、1998年5月、JR東日本は2001年からのICカード出改札システムの導入を発表しました。

社長によるプレス発表には、24社が集まりました。発表が終わるのを待ちかねたように、記者の皆さまから質問が飛んできました。

どこから導入するんですか。

一部でやっても意味はありません。東京圏一斉にと考えています。

以下、

- ・私鉄との連携はどうなるのか、
- ・セキュリティの問題はどうか、
- ・導入経費の想定は、

と続き、予定された社長会見時間内に質疑が終わらず、別室に場所を移して、開発担当者が記者の皆さまの質問に答えました。新聞社、TV局等、次から次と現実的な質問が寄せられて、関心の高さをうかがわせました。

たとえば、

- ・定期入れの中に磁気カードがあっても使えるのか、
- ・入金できる金額は、
- ・一般の切符はどうするのか、等々・・・。

さらに、このための推進体制として、社内に「ICカード出改札システム導入推進委員会（委員長：副社長）」を設置して取り組むこととしました。関係会社についても同様の推進体制を整備し、導入までの様々な課題の対応を総勢で200名を超える体制で推進しました。

6 導入にむけて

ICカード出改札システムを導入することにより、お客さまサービスや、セキュリティの向上、新規事業の展開等の効果が期待できる、とはいいまでも、企業として具体性のあるメリットが無ければ導入は困難です。今回のICカード出改札システムについては、既に東京近郊区間（東京100km圏）に磁気式出改札システムが導入されており、単に乗車券の媒体が磁気からICカードに変わっただけでは投資額に見合う効果は期待できません。しかしながら、この磁気式出改札システムは導入から10年以上を経過し、その設備更新の時期を迎えていました。このため、設備更新にあわせて、新しいICカード出改札システムを導入することとしました。今回のICカード出改札システムの投資額の試算結果は、総額約460億円、（内：設備更新経費約330億円、ICカードシステム関係経費130億円）となりました。このうち設備更新経費の約330億円はICカードを導入しなくても必要な経費となります。さらに詳細に試算し、ICカード導入による効果として、出改札機器の磨耗部分の減等によるメンテナンスコストの低減効果が期待でき、その低減額が、自動改札機の寿命である10年間で約130億円となるため、投資額とバランスすることを明示しました。

プロジェクトチームのメンバーを中心に上記のような投資計画案を策定、何回もの議論を通じて、1999年3月末役員会に提出、4月早々にGo指令が出されました。

また、1999年10月、ネーミングを検討し、Suica（Super Urban Intelligent CArd）と決定しました。

7 Suica導入後の状況

Suicaは、本導入に先立って、2001年4月8日から7月8日まで、モニター1万人（Suica定期券8,500人、Suicaイオ1,500人）を募集し、総合的な機能確認のためのモニター試験を埼京線（恵比寿 川越間、27駅）で実施した後、2001年11月18日、東京圏で一斉導入しました。導入から約1年半が過ぎましたが、これまでに大きなトラブルも無く順調に稼働しています。当初424駅でスタートしたSuicaも、2002年4月21日の東京モノレール、2002年12月1日の東京臨海高速鉄道りんかい線との共通化の実現により、東京圏の481駅（JR東日本465駅、東京モノレール9駅、東京臨海高速鉄道りんかい線7駅）でのご利用が可能となっています。2003年6月末日現在でSuicaは約661万人（Suica定期券：約335万人、Suicaイオカード：約326万人）のお客さまにご利用をいただいています。お客さまからはSuicaの利便性等に対して、

- ・パスケースから出さずに自動改札を通過できる、
- ・定期券+SF機能により自動改札機で精算できる、
- ・紛失しても再発行できる、

等の好意的なご意見をいただいています、

- ・他私鉄やバスとも共通利用できるようにしてほしい、
- ・新幹線でも利用できるようにしてほしい

等、「Suicaの利用範囲の拡大」を求める声も多く寄せられています。

8 今後の展開

Suicaは、今後、お客さまの利便性のさらなる向上をめざすとともに、当社の経営にも資するように、新幹線や東京圏外への拡大、他の鉄道・バス会社との共通化を進めていきます。

さらに、ビューカードとの一体化や電子マネー機能の付加等を実施して、移動サービスと生活サービスとを連携させたチケットレス・キャッシュレス化を推進していきます。

また、携帯電話との一体化によるサービス向上や新規事業の展開も検討しています。

9 エピローグ

いろいろな紆余曲折を経ながら、ICカード出改札システムSuicaは日の目を見ることができました。

Suicaを成功に導いたのは、“ICカードを絶対将来の出改札システムの主役にするんだ”という、研究者の夢と信念、それを支えた経営幹部の示唆と激励、目標達成に向けた開発チームやプロジェクトチームのメンバーの情熱と奮闘、こういうものが一体となった組織の力ということができるのではないのでしょうか。

2001年12月1日に開設されたJR東日本研究開発センターでは、研究に携わる者のCuriosity（好奇心）、Desire（情熱）、Scenario（展開予測）を未来に活かすために、それらの頭文字を連ね、研究者の主体性、自主性を尊重したCDS研究開発というしくみを設定しました。

この制度では、研究者に、自ら見出した萌芽的な研究テーマに対して、一人あたり年間100万円以内の研究費を使用することを認めています。

このような制度も活用して、何年か後に主役となりうるような技術シーズを見出し、育てていくことができる機会を求め続けていきたいと思います。

（敬称略）

参考文献

- 1) 三木彬生他：キャッシュレス社会に対応した鉄道のカードシステム、鉄道総研調査資料、1988.3、P25～35.
- 2) 三木彬生他：交通・運輸におけるICカードの利用、鉄道総研セミナー資料、1989.10、P21～33.
- 3) 三木彬生他：非接触ICカードを用いた出改札システム、三菱電機技報、1991.7、P53～57.
- 4) 三木彬生：乗車券のICカード化、計測と制御、1991, 11、P999～1001.
- 5) 田中幹夫：交通機関におけるユーザーIDベースの料金徴収方式に関する研究、2000.5、P14～16.
- 6) 椎橋章夫：「Suica（スイカ）」出改札システムの導入と今後の展開について、JR TR、2002.9、P23～27.