

ICカード乗車券システムにおける自律分散高速処理技術と そのアプリケーション

椎橋 章夫*

Autonomous decentralized high-speed processing technology in IC card ticket system ,and the application.

Akio Shiibashi

Abstract: IC card ticket system is a system from which fixed-line and wire-less such as contact-less IC card and the examination of tickets machines are integrated. It introduces the autonomous decentralized architecture technology to achieve high-speed processing and high reliability that is the characteristic of the rail traffic and the case with the application.

Keywords: Contact-less IC card , high-speed processing , autonomous , decentralized adjustment making technology , and high reliability

1. はじめに

2001年11月に東日本旅客鉄道株式会社（JR 東日本）が導入した IC カード乗車券システム「Suica」は非接触 IC カードと自動改札機などの出改札機器（端末機器）と無線通信による処理を行い、この端末機器とセンターサーバとは有線ネットワークにより処理をする、有線と無線システムが統合されたシステムである。また、端末とセンターサーバは自律分散アーキテクチャにより構成され、トラブルが発生してもシステム全体へ拡大しない仕組みとしている。さらに、端末である出改札機器は鉄道輸送の特性から高速処理と高信頼性の確保が必須であるため、それらを実現する技術とアプリケーションが導入されている。

以下に有線と無線を統合した IC カード（Suica）乗車券システムにおける自律分散高速処理技術とそれを実現するアプリケーションについて述べる。

2. 鉄道における乗車券システムの特徴

鉄道における乗車券システムとして必要不可

(Received January 24, 2005)

*東日本旅客鉄道株式会社 Suica 部
渋谷区代々木 2-2-2
巻末に用語解説あり

欠な基本機能は第 1 に高速処理である。日本の鉄道の特徴は朝夕の猛烈なラッシュである。こうした状況において、旅客が駅構内を歩行する時の平均的な速度 1.2 m/秒に自動改札機の処理スピードが対応する必要がある。第 2 は高信頼性である。乗車券は金券であり、正確な処理を実現可能な、信頼性の高いシステムが必要である¹⁾。

2.1 従来の磁気式自動改札システム

従来の磁気式乗車券システムの基本はオフラインシステムである。各機器間は簡易な駅内通信ネットワークにより、データを収集している。

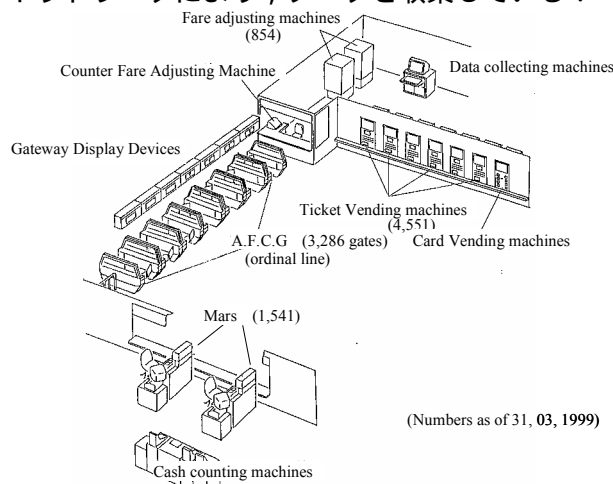


Fig.1: Traditional magnetic AFC system

その特徴は多くの機種と多くの台数(15種類, 約1万台)があること, その機種ごとに多くのOS(11種類)や通信インターフェース(7種類)があること等である. さらに磨耗部分が多いため, 保守コストが高く, 拡張性にも乏しいシステムである (Fig.1).

2.2 ICカード乗車券システム導入の背景

JR東日本では1990年より東京圏を中心に, 出改札業務の省力化と新たなサービスの提供を目指して導入した磁気式の出改札システムは10年を経過してメンテナンスコストが上昇傾向にあり老朽取替えに迫られていた. 一方, 技術面では電子デバイスやネットワーク技術の進展が進み, 当社が1987年から実施していた「ICカード技術の鉄道への応用研究と開発」も1997年にはICカード乗車券システムとして実用化レベルに到達していた. また, 経営面では当社の中期経営計画「ニューフロンティア21」により, 鉄道事業の競争力強化と生活サービス事業によるニュービジネスの展開を進めようとしていた. これらの技術面, 経営面の状況を総合的に経営判断する「技術経営戦略 (MOT: Management Of Technology)」により, 磁気システムの老朽取替えに合わせてICカードによる新しい乗車券システムの導入を決定した.

新しいICカード乗車券システム導入の基本コンセプトは システムチェンジ, サービスアップ, コストダウン, ビジネスチャンス, セキュリティアップ, である.

2.2.1 ICカード乗車券システムによる処理

磁気式と非接触ICカード式の改札機によるカード処理の違いは以下ようになる. 磁気式では, 改札機に乗車券が入ってくると, データの「読み出し」を行い,それが正規の乗車券であるかを「判定」し,必要な事項を「書き込み」それを「確認」するという4段階をおよそ0.7秒で処理している. これに対して, 非接触ICカードでは, まず, カードがその電波の中に存在しているかどうかの「存在確認」をし,それが処理するに値するかどうかの「認証」をする. その後はデータの「読み出し」「判定」「書き込み」「再確認」を行うが, 後述の Fig.10 に示すようにフィールドでの試験結果により, 最も早い人でも約0.2秒しかカード

がリーダ/ライター(以下R/Wと記す)の通信可能領域に存在しないことが分かった. 改札機内の処理時間(実測値から約0.1秒)を考慮すると, この一連の処理を旅客が立ち止まることなく行うためにはカードとリーダ/ライター間は約0.1秒以内しか許されない. このため, 非接触ICカードとR/Wには現在の技術レベルでも最難度の技術が求められている. このため, ICカードと改札機R/W間的高速処理を重点に開発した²⁾³⁾ (Fig.2).

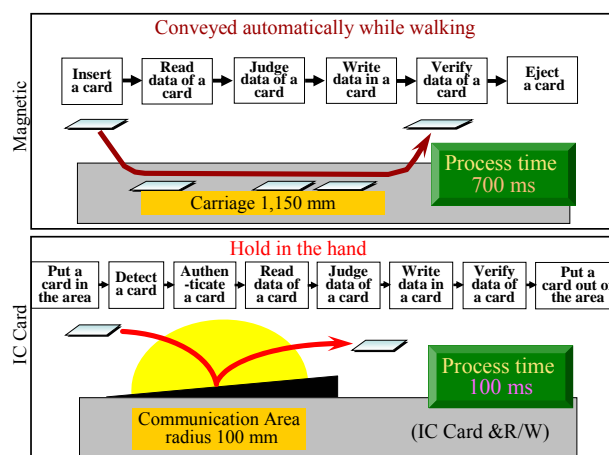


Fig.2: CIC system, transaction time analysis

2.2.2 ICカード乗車券システム開発の経緯

JR東日本が次世代出改札システムの手段として非接触ICカードの可能性に着目したのは, JR発足直後の1987年である. ICカードには接触式と非接触式があるが, 乗車券として使用する場合は, 旅客が移動しながら改札機で処理を行う必要があることから, 非接触式の方が望ましいと考えた.

当時非接触式ICカードを製造または開発していたのは中波を使用したA社, B社, 準マイクロ波を使用したC社であり, 全てバッテリーを内蔵したものであった. それぞれのカードに改善を重ね, 単体としての機能を試験した結果, 性能としては3社それぞれに優劣はつけられないものであった. しかし, データを伝送するために必要な電波を発生させる発信回路を, 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て, C社の方式ではR/Wのほうに設置すればよかった. そこで, 1992年, 処理速度, 価格等の面で実用化に近いと思われたC社の「バッテ

リーを内蔵し準マイクロ波を使用した非接触 IC カード」に絞り込んでいった。そして 1993 年には、機能的には実際の駅に設置しても使用可能なレベルに達し、それ以降、1994 年、1995 年、1997 年の 3 度にわたってシステムの信頼性、自動改札機の処理能力、人間（ユーザー）による使い勝手の良し悪し等の検証を行うためにフィールド試験を実施した（Fig.3）。3 度にわたるフィールド試験は、実際の駅で社員モニターにより実施された。通信速度、カード運用を変え、約 3 万回から約 17 万回の通信を行い、3 度目の試験においては磁気システムと同等の通過障害率を達成した（Table.1）⁴⁾⁵⁾。

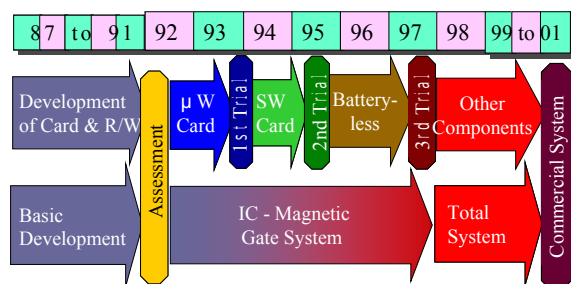


Fig.3: Details of Research and Development of IC card ticket system

Table.1: Results of Suica field tests

	1 st Trial	2 nd Trial	3 rd Trial
Test Period	1994.02.14 ~ 1994.03.15 (1 month)	1995.04.03 ~ 1995.10.02 (6 months)	1997.04.21 ~ 1997.11.25 (7 months)
Test Scale	8 stations 18 gates 400 persons	13 stations 30 gates 700 persons	12 stations 32 gates 800 persons
Communication Speed	70kbps	250kbps	250kbps
Card Movement	Waving	Waving	Touch & Go
Number of Total Transactions	29,900	176,000	174,000
Error Rate Compared with Magnetic one	More than 20 times	About 4 times	Nearly equal

3. 自律分散型 IC カード乗車券システムの特性

今回導入した IC カード乗車券システムの特性は 3 点ある。IC カード乗車券システムは IC カードを旅客が手に持って移動するため、IC カードと端末（自動改札機）間の処理は常に人に依存しており、不安定である。また、機器の故障時も最低限のシステムの稼動が補償されないと駅が大混乱システムとしては利用不可である。このため、1 点目は、システムを構築は固定したものではな

く、常に故障した部分を含むと仮定した上で、環境に対応することができるシステムであり、自律可制御性と自律可協調性の特徴を持つ「自律分散型アーキテクチャー」が必須である。端末では各出改札機器は IC カードとの間で自律的に高速処理が可能とした。また、端末処理データは一定期間分が蓄積可能であり、センター処理とは自律分散構成となっている。また、センターシステムでは高信頼性を確保するため、端末からのデータを一定期間分蓄積し処理を行う、自律処理構成としている。さらに端末の稼動情報をセンターで取得し、必要な対応をセンターから行い信頼性を向上させている。⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾

2 点目は「システム全体の信頼性の確保」である。ネットワーク化したシステム全体の信頼性を向上する技術として端末処理データは各レベルで一定量蓄積し、一部機器が停止しても全体へ影響しない仕組みとしている。3 点目は「システムの拡張性の確保」である。端末の種類増時の対応、他システムとの接続などは自律して実施可能としている。

3.1 自動改札機の処理能力と旅客流動

これまでに「高速で信頼性の高い処理」という要件の達成についてその重要性を述べてきた。このことを具体的に証明するため、実際の駅の旅客流動データから高速処理可能な改札機とそうでない場合の旅客流動シミュレーションを実施した。Fig.4 に示すように旅客流動シミュレーションとは、「旅客の行動（改札機と駅ホーム間相互の流動）」を数値的にモデル化することで、旅客の流動状態をシミュレートするものである。その解析手法は、駅構内をメッシュ状に区画し、様々な OD（Origin and Destination; 駅構内における出発地点と目的地）を定義された旅客グループがより早く目的地に着くように各メッシュ上を最適に（方向、速度）移動していくというものである。図中の矢印は、各旅客の OD により各メッシュに定義された移動方向であり、混雑度合いにより、この矢印の方向が変化する。ここでは、首都圏の一般的な駅として一日の旅客乗降数が約 30 万人である「田町駅」の例について以下に述べる。

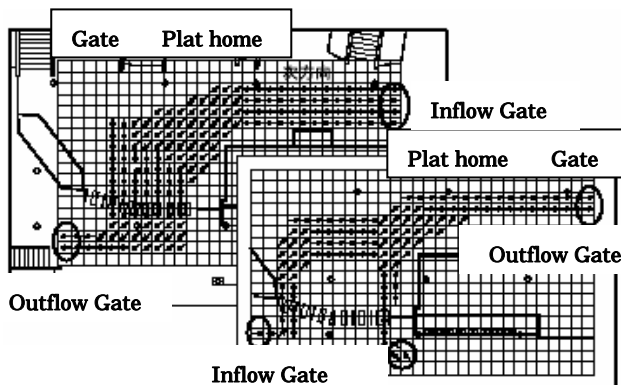


Fig.4; Passenger Flow Route Simulation at Station

3.1.1 高速処理可能な場合

自動改札機の設置基準は45人/分・台である。この能力を基本に、駅の改札機通過時に旅客流動が阻害されないよう必要な台数を計算し、設置している。実際の朝のラッシュ時には50人/分・台以上利用されており、今回は47人/分・台でシュミレーションした。

Fig.5 をスタートとして、Fig.6 に示すように、乗客の通過数より改札機の能力が上回っているため、流動は一定時間後には減少し、安定する。(図中、旅客は○の記号で表示しており、1つの記号が1人の人間を表している。記号の意味は「○は改札機を出場する(した)人」「×は改札機に入場する(した)人」である。また、Tは経過時間で単位は秒である)

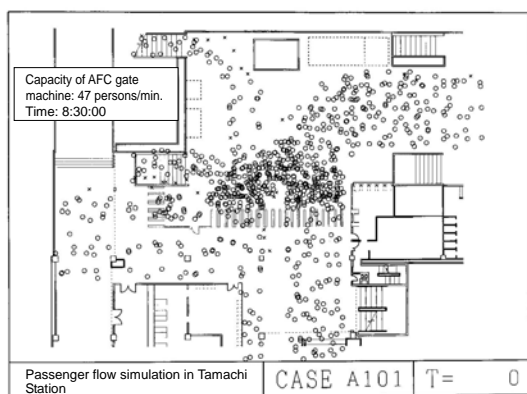
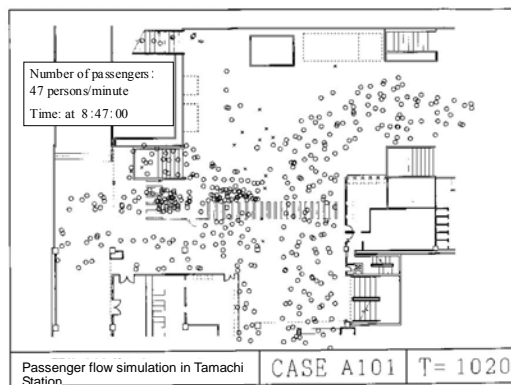


Fig.5: In case of simulation by 47 persons/min.



* At 8 o'clock 47m, the crowd disappeared in the case of simulation with 47 persons/minute.

Fig.6: capacity of AFC gate machine: 47 persons/min.

3.1.2 処理能力が低い場合

処理能力が低い場合の例として、欧州では一般的に見られる「ターンバー方式(体でバーを押しながら改札機を通過)」の改札機とした。このタイプの改札機は実測値で約30人/分・台のため、上記と同様にラッシュ時の利用を考慮して、32人/分・台でシュミレーションした。

Fig.7 に示すように、改札機処理が通過数より低いため、通過できない旅客がコンコースやホームにあふれ、非常に危険な状態となっていることがわかる。

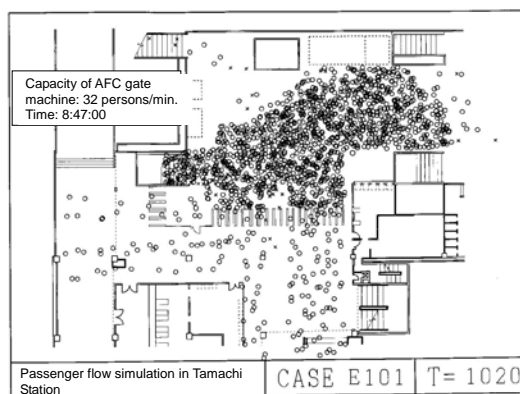


Fig.7: Capacity of turnstile AFC gate machine: 32 persons/min.

3.2 ICカードと端末間に必要なデータ処理時間

ICカードの通信可能領域は目に見えないため、「かざしてください」という案内では、各人が勝

手気ままにカードをかざしていた。しかし、タッチ&ゴー方式を採用したことにより、十分な処理時間を確保することができるようになった。実際に、タッチ&ゴー方式を採用した後の IC カードの通信可能領域への平均滞在時間は約 0.52 秒であり、最低の滞在時間は 0.2 秒である (Fig8・9)。

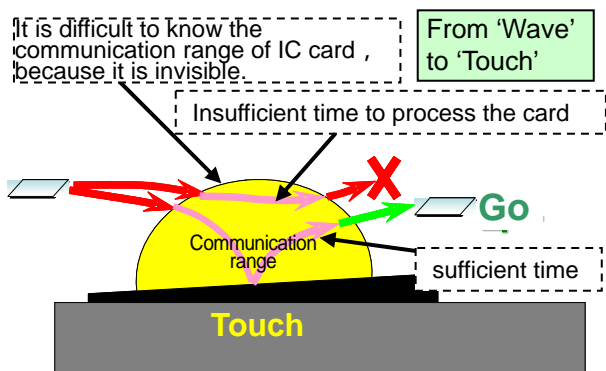


Fig.8: "Touch and Go" system

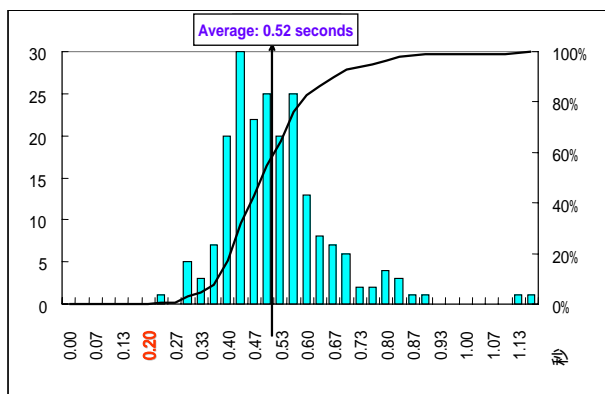


Fig.9: Staying time inside the communication area of IC card

3.3 IC カード乗車券の高速処理技術仕様

これまでの開発やフィールド試験を通じて、鉄道用の非接触 IC カードに具備すべき必要不可欠な高速処理技術仕様が明確になった。以下に、その点について述べる。

非接触 IC カードシステムを鉄道の出改札システムとして利用するために必要不可欠な要件は、通信及び処理の高速性と情報処理の信頼性の確立である。これは、非接触 IC カードの欠点を補うためでもある。なぜなら、非接触という利便性がある反面、非接触であるがために、旅客にカ

ードのかざし方 (処理方法) を委ねている。このため、タッチ&ゴー方式を推奨しているとはいえ、旅客のかざし方によっては、処理未了等が発生するという欠点を有しているし、タッチ&ゴーでも約 0.2 秒しか滞在しない場合もある。この処理未了の発生を低減させるためには、高速で信頼性の高い処理が要求される。

「高速で信頼性の高い処理」という要件の達成は、自動改札口での流動阻害の発生率を、現在の磁気システムレベル以下に押さえるためにも必要不可欠である。この要件を達成できないと現在も非常に混雑している駅構内での人の流動が行き詰まり、思わぬ事故の発生を招きかねない上に、列車の定時運行にも支障が発生する可能性が大である。

このため、これまでの長期わたる開発・フィールド試験等に基づき、鉄道輸送で使用する非接触 IC カードの技術仕様を決定した。自動改札機での流動阻害の発生率を抑えるためには、特に、実際の処理時間、通信速度 (理由は次項に記述)、及び通信範囲 (処理未了を防止するため) の 3 点が最も重要であり、具体的には、「処理時間 (100msec 以下)」、「通信速度 (212Kbps 以上)」、「通信範囲 (半径 100mm 以上)」である。

3.4 IC カードと端末間の高速通信とデータ信頼性

通信速度の重要性についてももう少し詳しく、解説したい。Fig.10 に示すように、Suica システムではカード側のデータ処理が完了したことを R/W 側が受け取って、処理は完了する仕組みである。この最後の通信が、通信可能エリアの境界付近で行われることによりエリアの外にカードが出てしまい処理未了になる場合が、旅客のかざし方によっては、(非接触式であるが故の欠点として) どうしても発生する。この場合、カード側のデータは更新されているが、R/W 側 (センターホスト側) が更新されていないため「データの不一致」という重要な問題が発生する。Fig.10 からわかるように、高速な通信では処理未了が発生しない確率が大幅に向上する。この発生を極力低減し、データの信頼性を向上するためには高速な通信速度が重要な要件である。

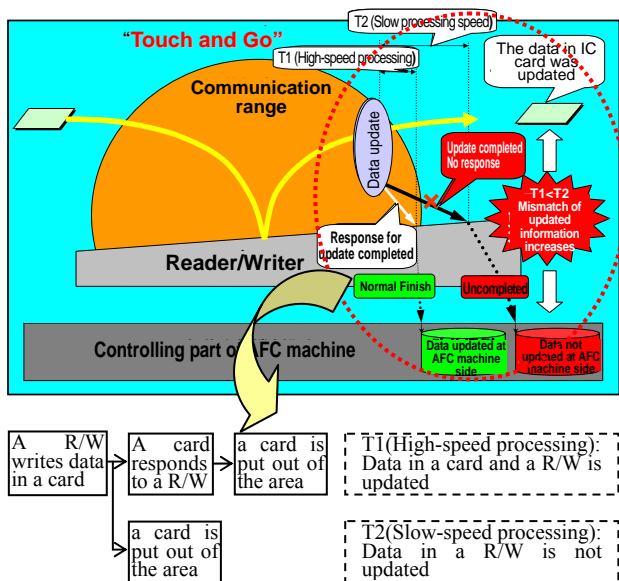


Fig.10: High-speed communication and data reliability between IC card and terminal

4. 自律分散高速処理技術の導入

これまで述べてきたように、鉄道の IC カード乗車券システムには自律的に高速処理が可能でかつ、信頼性の高いシステムが必要である。

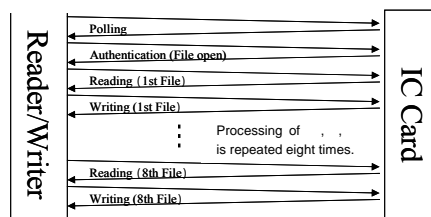
以下に端末システム、センターシステムなどで導入した高速、高信頼性技術について述べる。

4.1 端末システムの自律分散高速処理

4.1.1 データの高速処理技術

鉄道会社各社は、それぞれ独自の経営戦略を有しており、経営データを秘密にしたいと考えている。IC カードの利用に際して、各社の独自データのセキュリティーを確保し、かつ高速に処理する必要がある。このため、Suica カードには各ファイルに個々の鍵を付与し、R/Wには複数のファイルを同時にアクセスすることのできる鍵を付与することで、任意の複数（8個）のファイルを同時に開けられる機能（高速処理用のコマンド）を実現した（Fig.11）。

When one file is opened one by one



When 8 files are opened at the same time

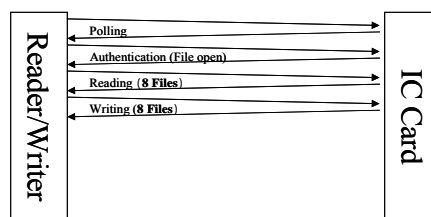


Fig.11: Command system for high-speed data processing

通常の手続きでは、8つのファイルを開くためには、認証・読み取り・書き込みの手続きを8回繰り返す必要があるが、高速処理コマンドの場合は、他会社に必要データを公開することなく、全体で100以上のファイルから、任意の8ファイルを1回の手続きで処理することが可能である。この方法での処理により8ファイルに区分された128バイトのデータをICカードとR/W間の処理に要する時間を0.1秒以下にすることが可能になった。

4.1.2 端末(改札機)での運賃計算の高速処理

Fig.12は、改札機での運賃計算を高速処理する技術の概要を示している。X駅とY駅間有効の定期券を所持する利用者は、定期区間外のA駅で切符を購入して入場し、同じく定期券区間外のB駅で出場する時は不足運賃を精算する必要がある。

従来の磁気券のシステムでは、定期券も含めて3枚の乗車券が必要であり、切符の購入や精算で列に並んで待たなければならなかった。

Suica導入後は、Suicaを改札機のR/Wにかざすだけで、必要な運賃を自動精算する。この複雑な計算が改札出口で行われる場合、その処理時間は非常に長くなる。したがって、処理時間を短縮するために、乗車時に予め定期区間内の乗継駅（仮精算駅）および乗車駅-乗継駅間の運賃をICカード内に記録する技術を考案した。これは、個々の改札機に自駅から各駅への運賃データを

記憶させることで可能となった技術である。

Fig.12 では、A 駅改札機入場時に A 駅から最短の定期区間内駅 (J 駅) を選択し、A-J 間運賃 (FAJ) と共にカード内に書き込みを行う。そして、B 駅改札機出場時には B 駅から最短の定期区間内駅 (K 駅) を選択する。次に「A-B 間運賃」および「A-J 間運賃 + B-K 間運賃」を比較し安価なルートを選択すると共にカード内処理を行う。

定期券の区間外からの入場の際には、入場駅で初乗り運賃を減算するほか、定期券区間に最も近い駅までの運賃を計算して IC カードに記憶する。出場時には入場時のデータを読み出して計算をするため、運賃処理の高速化をすることができた¹⁰⁾。

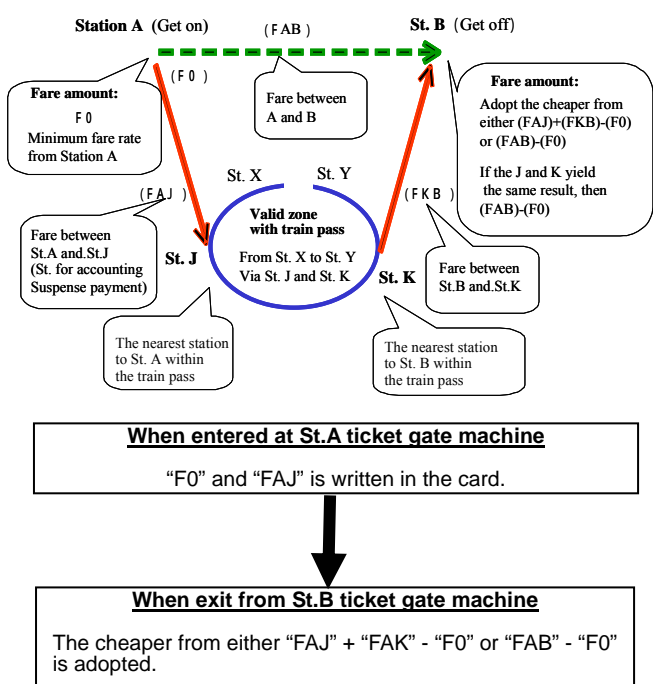


Fig.12: Temporary memory method for fast fare adjustment

4.2 センターシステムの自律分散整合化技術

Suica システムの機器構成は Fig.13 のとおりである。Suica 自動券売機で Suica カードを買うことができる。チャージ機により、SF (Stored Fare: 乗車時に利用するため事前に入金された運賃) をチャージできる。これらの AFC (Automatic Fare Collection: 自動改札) ゲートが設置されている駅では、Suica と磁気乗車券の両方を使うこ

とができる。AFC ゲートが設置されていない駅では、Suica のみ使える簡易型 AFC ゲートを導入した。

また、各 Suica カードには固有の ID 番号 (Identification number) が付けられており、Suica を利用するとネットワーク化された各機器により、全ての履歴を中央の Suica センターサーバに集約し管理する技術を導入した。これにより、全 IC カード乗車券の情報を一元管理し、IC カード毎の利用データを適確で安定した集約やネットワークから不正 IC カードの監視を行うなどが可能となり、高信頼性システムを実現した。

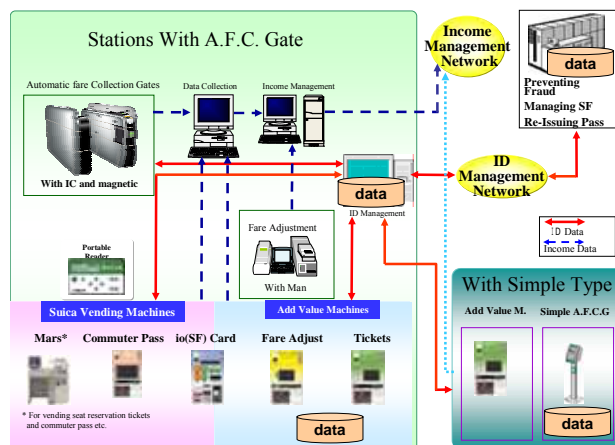


Fig.13: The make-up of the autonomous and decentralized data processing Suica system

その方法は以下のとおりである。

IC 乗車券センターサーバを構築するとともに、各出改札機器をネットワーク化し、IC カードから IC 乗車券センターサーバまでの情報を一元管理するシステムを構築した。

システムの信頼性を確保するために、次のようなデータ処理の分散による処理データのダム化 (一定量データの蓄積) 方式を考案し導入した。

- ・ IC カードの処理は各出改札機器にて独立して行い、処理の高速性を確保する。IC カードの処理データはカード内に一定量 (20 件分)、端末には一定期間 (3 日間分) 蓄積可能とした。
- ・ 上位への回線が確保されている場合は、各出改札機器端末で蓄積しているデータは

一定時間毎に駅サーバに送信する。駅サーバはそのデータを蓄積する。

・さらに上位への回線が確保されている場合は、駅サーバからセンターサーバにデータを一定時間毎に送信する。最終的にセンターサーバに蓄積(26週間分)される。

これにより、障害等によりICカードの処理データがセンターサーバまで送信されない場合であっても、駅の出改札機器は一定期間(3日間)は稼働可能となり、旅客サービスは継続される。復旧後は直ちに各段階で蓄積されたデータは再送信され、データの欠落を防ぐことが出来る。

仮に端末で「3.4」項で述べた処理未了が発生した場合は端末側にあるデータを「仮一件明細データ」としてセンターサーバに登録し、次の処理で送られてくるデータと前のデータとの整合性を確認し、仮データから確定データへ補正する (Table.2) 11)。

この方法は端末による部分処理とセンターによる処理を統合処理することによって、結果としてデータの信頼性を確保する技術である。

Table.2: Example of the autonomous, decentralized, and integrated processing

Detail ID		Date and time	Used	Balance
14	definite	2004/8/1	-160	840
15	temporary	2004/8/1	-130	710
16	definite	2004/8/1	-250	460

The temporary data 15 omitted between the previous and succeeding sets of data (detail ID 14 and 16) is checked for consistency and corrected as a set of definite data.

収集データから判明した不正カードに関する情報はリアルタイムで端末へ配信され、当該カードの利用を停止する。ネットワークからの監視により、セキュリティが大幅に向上した。

5. Suica 出改札システムの稼働状況

"Suica(スイカ)"出改札システムを2001年11月に導入し、約3年が経過したが、Suicaシステムはこれまでに大きなトラブルも無く順調に稼働している (Fig.14 & 15)。

Suica の導入は急激なホルダー数の増加からも分かるように、お客様サービスを飛躍的に向上させその支持を得た。また、本文では触れていないが近距離運賃収入の増加、メンテナンスコストの低減、電子マネー等の新たなビジネスの展開、当社のイメージアップなどの成果が出ている。現時点では技術経営上の判断は正しかったと言える。

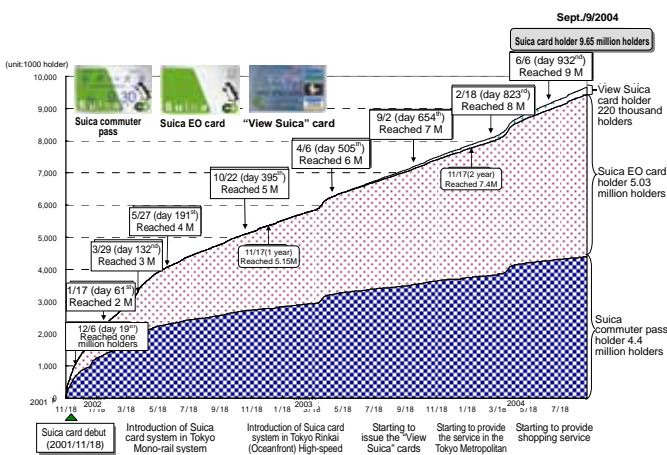


Fig.14: The number of Suica cardholders and usage situation

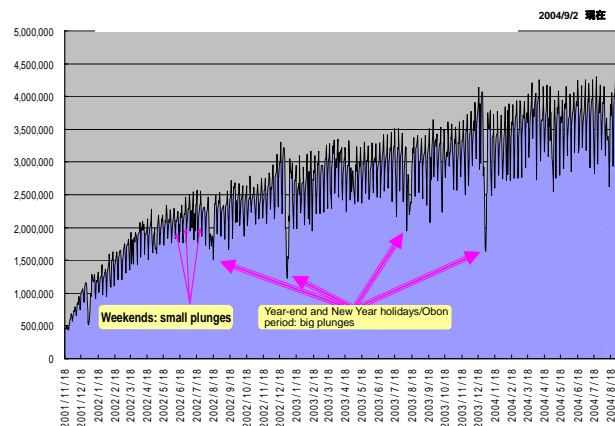


Fig.15: The number of Suica card transactions

6. おわりに

鉄道用 IC カード乗車券システムは高速処理と高信頼性が必要である。その技術仕様は長年の研究開発とフィールドテストの結果により決定した。具体的には、処理時間(0.1秒以下)、通信範囲(100mm以上)、通信速度212kbps)である。

IC カード乗車券システムの高速処理と高信

信頼性を実現するため、自立分散アーキテクチャを採用し、数々の自立分散高速処理技術を考案し導入した。

特に端末では「データの高速度処理」「運賃計算の高速度処理」、センターシステムでは「自立分散整合化技術」などを考案し導入した。

Suica は3年を経過し、1000万枚超のSuicaホルダーと約10000台の端末が稼働しているが、特に大きなトラブルは発生していない。

参考文献

- 1) 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, (2003)
- 2) S. Miki et al.:Development of contact-free IC card for railway ticket system, Proc.IFAC CCCT '89, (1989)
- 3) S. Miki et al.:Contact-free IC card for new railway ticket system, ASCE 2nd Conf. App.Adv. Tech. in Transportation Engineering, (1991)
- 4) A. Shiibashi et al.:JR East Contact-less IC Card Automatic Fare Collection System 'Suica', IEICE (Institute of Electronics Information Communication Engineers), Vol. E86D No.10, (2003)
- 5) S. Miki: Total marketing strategy with non-contact IC card, World Congress on Railway Research (WCRR'94), vol.1, 53/58, (1994)
- 6) K. Mori et al.: Autonomous decentralized software structure and its application, IEEE Fall Joint Computer Conference, (1986)
- 7) K. Mori: Autonomous decentralized systems: concept, data field architecture and future trends, ISADS93, (1993)
- 8) 森 欣司他:世界にはばたく技術—自律分散システム() (), 電気学会, Vol.121-No.2-3,(2001)
- 9) 森 欣司:自律分散システム []-[], 電子情報通信学会, Vol.84-No.6-10,(2001)
- 10) S. Miki et al.: Contact-less smart card AFC trials in East Japan Railway Co., WCRR99, (1999)
- 11) 松本 正行, 森 欣司:自立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-D-I-No.1, 14/22(2003)

用語解説

- ・Fare adjusting machine : 自動精算機

- ・Counter fare adjusting machine : 窓口精算機
- ・Data collecting machine : データ集計機
- ・Ticket Vending machine : 自動券売機
- ・Card vending machine : カード発売機
- ・A.F.C.G : Automatic Fare Collection Gate
自動改札機
- ・Mars : Multi Access Reservation System
旅客販売総合システム
- ・Gateway display device : 通路表示機
- ・Cash counting machine : 現金入出金機
- ・CIC : Contact-less IC 非接触ICカード

[著者紹介]

椎橋 章夫

1976年埼玉大学工学部(機械工学科)了。同年日本国有鉄道入社。1987年JR東日本。1994年よりICカード乗車券システムの研究・開発に従事。1998年より「Suicaシステム推進プロジェクト」を担当。現在に至る。機械学会, 電子情報通信学会各会員。

