

相互に連携する交通インフラの構築

～局所的サービスから大域的サービスへ～

永瀬 秀彦（ジェイアール東日本メカトロニクス株式会社）

概要 東日本旅客鉄道株式会社（JR 東日本）が 2001 年 11 月に首都圏で導入した IC カード乗車券システム“Suica”は、自社内の仙台、新潟地区へ導入するとともに、北海道旅客鉄道（JR 北海道）、関東公民鉄各社、東海旅客鉄道（JR 東海）、西日本旅客鉄道（JR 西日本）、九州旅客鉄道（JR 九州）、西日本鉄道、福岡市交通局と相互利用のエリアを拡大してきた。Suica 導入後、2004 年 8 月に JR 西日本と開始した相互利用はお互いの IC カードをそれぞれのエリア内に限り利用できるという“局所的サービス”であった。しかし、2007 年 3 月に開始した首都圏での相互利用によって現在首都圏では、鉄道（31 社）だけでなくバス（77 社）、一部の大手タクシー会社と、ほぼすべての種類の陸上交通機関にて Suica カード 1 枚で利用できるようになっただけでなく、事業者間、路線間において双方向での利用が可能な“大域的サービス”となり、Suica は交通インフラとなった。この首都圏相互利用では、複雑な網の目状の鉄道路線や相互直通による鉄道事業者間を乗り継ぐ際の運賃計算の正当性をいかに保証するか、各鉄道事業者の既設改札機における改修をいかに短期間、低コストで実現するかが課題であった。この課題に対し、改札機 IC 判定モジュールとロジックシミュレータを提案し、システムへの高品質サービスの提供を実現した。本論文では交通インフラの基礎となった改札機 IC 判定モジュールとロジックシミュレータの背景・経緯、導入した技術について述べる。

1. はじめに

JR 東日本は 2001 年 11 月 18 日に IC カード乗車券システム“Suica”を導入し、12 月 6 日までの 19 日間でホルダが 100 万枚となり、2009 年 10 月には 3000 万枚を超えた[1]。Suica 導入後の 2004 年 8 月には JR 西日本と相互利用を開始したが、この相互利用はお互いの IC カードをそれぞれのエリア内に限り利用できる“局所的サービス”であった。一方で、2002 年からは旅客が 1 枚の IC カードで JR 東日本、私鉄、地下鉄を利用できるよう首都圏での相互利用の検討が始まった。首都圏では鉄道での乗降の際の運賃計算に関していくつかの大きな課題があった。首都圏の路線は複雑で、駅で別の社線への乗り換えを繰り返して乗車する（図 1）。このため、鉄道路線を乗り換えた際の運賃計算の正当性をいかに保証するか、各鉄道事業者の所有する改札機をどのように短期間、低コストで改修するかなどが課題となった[1]。この課題に対し、改札機 IC 判定モジュールとロジックシミュレータを提案し、信頼性を高めることで、首都圏の相互利用を実現した。現在、首都圏では 1 枚の IC カードで鉄道、バス、タクシーを利用することができる。特に鉄道利用では鉄道事業者間を乗り継ぐことが可能な“大域的サービス”としたため、Suica は交通インフラとして広く認知され、高い利便性の実現と新ビジネスとしての展開をと

もに生み出すこととなった。

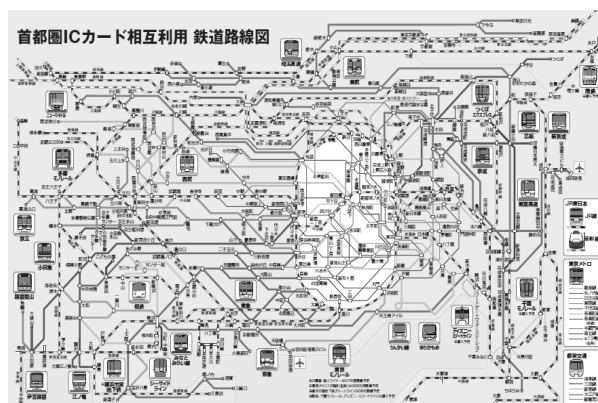


図 1. 首都圏 IC カード乗車券相互利用の範囲

2. 鉄道運賃計算の特徴

鉄道運賃計算の基本は乗車駅から降車駅までの距離である。電車は異なる事業者間で相互直通運転を行っているが、距離に対する運賃単価は鉄道事業者ごとに異なり、乗車区間限定の割引（乗継割引）や同じ運賃で経路を選んで乗車できるなど特殊な制度や規則が存在する。これらの制度、規則により、首都圏 1,782 駅間発着の運賃は、単純に乗車駅と降車駅の距離からだけでは求められない。さらに定期券の利用を考慮すると、パターンは 2×10^{16}

以上となり、従来の手法で作成・検証を行うことは現実的でないため、改札機 IC 判定モジュールとロジックシミュレータを開発することにした。

3. 改札機 IC 判定モジュールの開発

3.1 開発コンセプト

首都圏における改札機の導入は、1990 年から始まり、2007 年 3 月には、JR 東日本、私鉄、地下鉄で 1,782 駅、10,800 通路であった（図 2）。

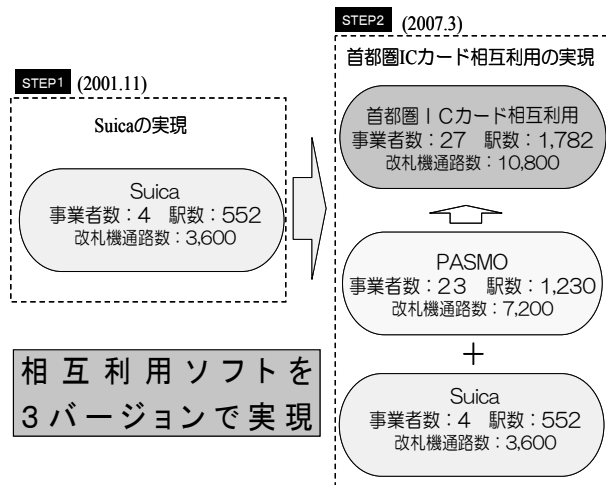


図 2. 改札機における首都圏 IC カード相互利用の規模

しかし、それまでは 27 社局の各鉄道事業者が改札機の仕様を決め、独自に運賃判定ソフトを作成していたため、1,782 駅での運賃判定ソフトは合計 102 バージョン存在していた（図 3）。

IC カードの相互利用を実現するにあたり、102 バージョンの運賃判定ソフトを、担当するメーカ 3 社に依頼したのでは、開発工程の長期化、高コスト、低品質になりかねない。ニーズに対して、求められていた時間内での対応ができないと判断し、次のような開発コンセプトに

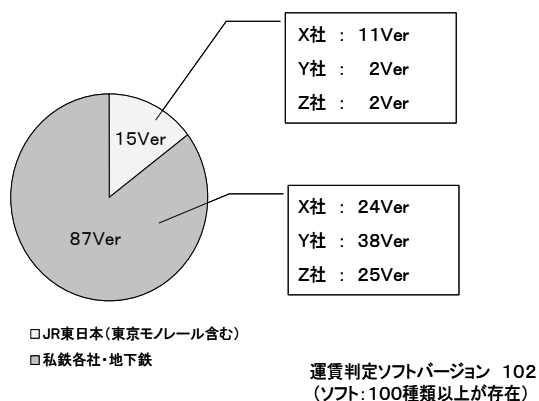


図 3. 運賃判定ソフトのバージョン数（首都圏）

より、共通仕様の運賃判定ソフトを搭載した改札機 IC 判定モジュールを開発することとした。

- (1) 運賃判定ソフトは 1 バージョン/1 メーカとする。
- (2) すべての既設改札機に搭載する。
- (3) 運賃データを 3 メーカ同一とする。
- (4) 運賃判定ソフトは 3 メーカで共通仕様とする。
- (5) プログラムのアップロード、ダウンロードを実現する。
- (6) 高速処理により、IC カードの処理未了を低減する。
- (7) データの消滅、化けに対する信頼向上を実現する。

この開発コンセプトを実現するために、各鉄道事業者ごとに異なる特殊な制度や規則を相互に公開し、開発メーカにおける共通仕様として定義した。鉄道事業者とメーカとの間で約 300 回の仕様検討会を実施し、共通仕様策定までには 3 年の期間を要した。

改札機の相互利用ソフトを 3 バージョンで実現

3.2 改札機 IC 判定モジュール

改札機 IC 判定モジュールは、旅客が IC カードを翳すユニット内に、アンテナ（R/W）、案内表示、判定ボードを実装し、改札機本体内の主制御部と独立した構成とした。IC カードの判定処理はすべてこの改札機 IC 判定モジュールで行う。改札機 IC 判定モジュールのインタフェースを共通にすることで、改札機のメーカや形式が異なっても搭載可能とした（図 4）。

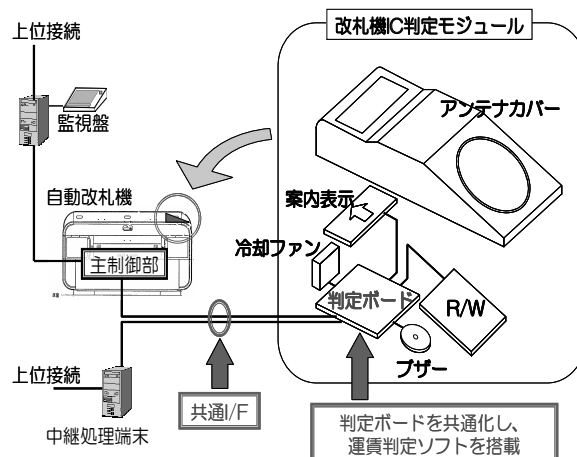


図 4. 改札機 IC 判定モジュール

3.3 改札機 IC 判定モジュールの機能・性能

改札機 IC 判定モジュールは、カードの存在確認、相互認証、データ読取、運賃計算、データ更新を IC カードが翳されている約 0.2sec の間に実行しなければならない[1]. とりわけ首都圏相互利用では最大 4 線連絡となる複雑な経路判定や運賃判定が必要である. このため、改札機 IC 判定モジュールの CPU には高いパフォーマンスが必要となる. 例えば Intel にて 5 年間供給保証している「Embedded List」には、「Scalable (高性能版)」と「Low Power (低消費電力)」の 2 つのリストがあり、高性能版リストでは、動作クロック周波数は最高 2.6GHz (現在は 3.0GHz までアップ) である. 複雑な経路判定を短時間でを行うためには、高性能な CPU を選定すべきである. 一方で 2.6GHz クラスの CPU は、熱設計電力値が 50W 以上であり、ファンによる常時冷却が必要で、ファン自体のメンテナンスも考慮する必要があるがでてくる.

改札機の内部は主制御部、搬送部モータの熱が発生する. 加えて改札機 IC 判定モジュールの小さな内部空間に、改札機 IC 判定モジュール CPU 自身の熱発生が加わる. 高性能 CPU を採用しても、CPU メーカーの CPU コアの動作保証値 100℃を超えてしまう環境では、運賃計算は不可能である.

現行自動改札機 (3 メーカー) で採用している CPU の動作クロック周波数は 100MHz, 131MHz, 200MHz であった. 改札機 IC 判定モジュールでは、旅客が IC カードを翳したときの読取ミスなどの処理未了を低減するため、最低でも現行の 2 倍以上とし、400MHz を採用した.

次に発熱量に関して、X86 系における動作クロック周波数と熱設計電力の関係を表 1 に示す. “プロセッサ A” は動作クロック周波数 933MHz で熱設計電力 12.2W, “プロセッサ F” は動作クロック周波数 400MHz で熱設計電力 0.6W, と主に動作クロック周波数と熱設計電力の相反する関係のなかで CPU を選定した.

ここでは最終的に採用した CPU を明らかにすることは出来ないが、選定にあたっては前述の処理能力の高さと熱設計電力の検討に加え、メーカー内においてこれまでのソフト資産を活かせること、ソフト開発ツールやデバッグツールが運用しやすいことなどについても重要な選定要素であった.

表 1. 動作クロック周波数と熱設計電力の関係

プロセッサ	動作クロック周波数	熱設計電力 (最大)
A	933MHz	12.2W
B	800MHz	11.2W
C	400MHz	10.1W
D	650MHz	8.3W
E	400MHz	4.2W
F	400MHz	0.6W

4. 基本運賃データの作成

改札機 IC 判定モジュールによって複雑な乗り継ぎの運賃計算が高速かつ安定に実行できたとしても、正しい運賃判定という品質を保証する必要がある. 駅と駅との

運賃は単純な距離×単価ではなく、特殊な制度と規則によって決まる. IC カードの相互利用を実現するにあたり、駅間の運賃計算をメーカーごとに

データを作成した場合、制度と規則の解釈のしかたによりメーカー間で運賃の不一致が発生してしまうという課題があった. この課題を解決するために、改札機の運賃計算を高速化するためのデータ構造を考案した. その主な情報項目は、

- (1) Suica エリア内および PASMO エリア内の路線・駅に関する情報
- (2) 定期券の有効性に関する情報
- (3) 社局内の 2 駅間運賃に関する情報
- (4) 社局またがりの 2 駅間の運賃算出経路に関する情報
- (5) 特殊な乗車経路に対する判定方法を決めるための情報

である.

運賃のデータ構造は、これを基本仕様として定めておき、各メーカーは基本仕様に基づき運賃データを作成した. この運賃データを、

- (1) 論理的な構成単位 (レコード) での突合
- (2) バイナリレベルでの突合

を行うことにより、メーカー間のデータ上での差をなくした.

5. ロジックシミュレータの開発

5.1 ロジックシミュレータ

首都圏の相互利用では 1,782 駅間全駅、全経路、全定期パターンの組み合わせで 2×10^{16} 以上となる。これは、0.2sec/1 件で 365 日 24 時間連続稼動して検証しても 4.3 億年要する計算になる。従来は手作業でテストパターンを作成していたが、首都圏の JR 東日本、私鉄、地下鉄間のテストパターンを手作業で作成することは現実的ではなく、網羅性にも限界があった。このため、ロジックシミュレータにてテストパターンの自動作成と大量テストパターンの高速処理を行えるようにした。(図 5)

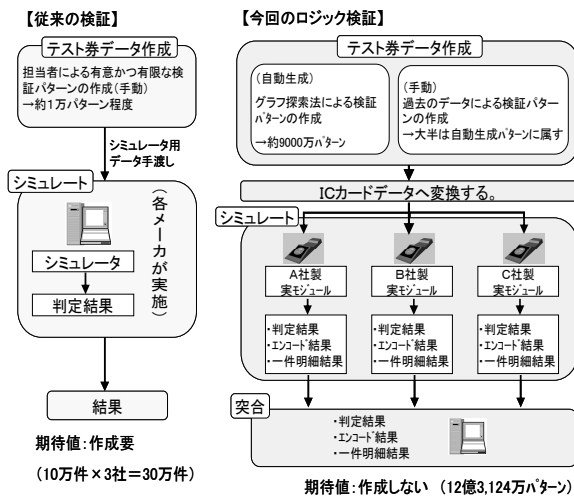


図 5. ロジックシミュレータによる検証

5.2 テストパターンの自動作成・突合

テストパターンは旅客が乗り継ぐルートを図探索法(一筆書き)により自動作成することとした。また、定期券の経路作成についても、「ダイクストラ法」と「グラフ探索法」により自動作成した[2]。その結果、テスト件数は3億2000万件(大人・小人)となり、24時間連続稼動で行い、3ヶ月間で実施した。

検証では、作成したテストパターンをメーカ3社の改札機 IC 判定モジュール(フィールドと同一のデータ、プログラム)に設定し、運賃計算、ICカードへの書き込みデータおよび上位への出力データを突合する(図5)。突合が不一致のパターンがあれば、不一致を発生させたプログラムを修正し、再度、突合を行い、不一致がなくなるまで突合を繰り返した。突合は10次、12億3000万パターンに及び、結果の完全一致により、2007年3月18日、首都圏にお

ける相互利用を安定的なスタートで迎えることができた(図6)。

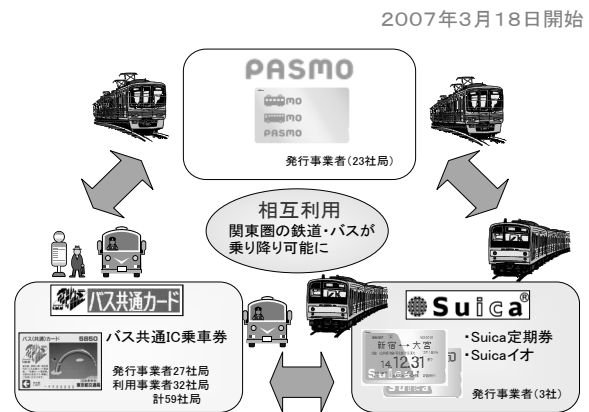


図 6. 首都圏 IC カード相互利用

このテストパターン突合の完全一致の原則により、首都圏における改札機 IC 判定モジュールは以後、各年のサービス追加に対するソフト改修に対しても高品質を維持し、参入者局も増えている(図7)。

首都圏ICカード相互利用 鉄道路線図

	Suica		PASMO	
	鉄道	バス	鉄道	バス
事業者数	4事業者 ↓ 5事業者	1事業者	23事業者 (相互利用開始時) ↓ 26事業者	67事業者 (相互利用開始時) ↓ 76事業者
相互利用対象駅数 バス両数等	552駅 (相互利用開始時) ↓ 645駅	1営業所 約10両	1,230駅 (相互利用開始時) ↓ 1,279駅	約12,700両 (相互利用開始時) ↓ 約14,000両

(2010年4月1日現在)
 ※PASMOのバスの車両数のみ2008年11月末現在

図 7. 首都圏 IC 相互利用社局

6. 交通インフラの構築

Suicaを導入した当初は、乗車券を非接触IC化することによる利便性向上やコストダウン、情報量の増大、セキュリティ向上を見込み、JR東日本の自社インフラとしてシステムを開始した。その後、改札機 IC 判定モジュールやロジックシミュレータの基礎技術の適用により首都

圏 IC 相互利用を実現し、Suica システムは自社インフラから各事業者の鉄道、バス、タクシーのシステムが連携した交通イン

フラとなった。さらに鉄道の在来線において、JR北海道、JR東海、JR西日本、JR九州、西日本鉄道、福岡市交通局との相互利用を可能とした(図8)。

**検証パターン数をまともにやる
と 4.3 億年を大幅短縮！**

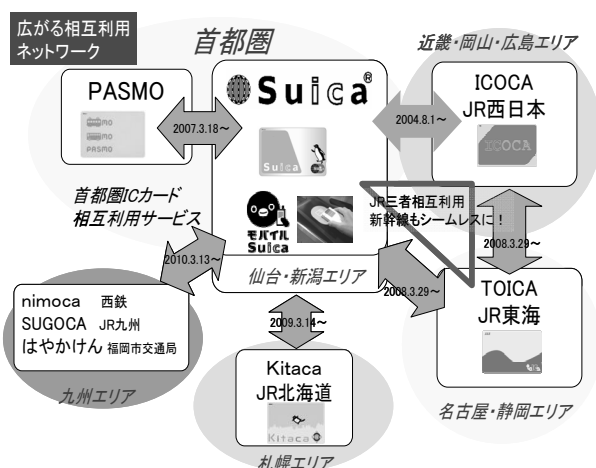


図 8. Suica の相互利用範囲

新幹線においては、2008 年 3 月から、JR 東海、JR 西日本、JR 東日本の国内主要都市をまたがる共通の旅客の移動の利便性を高めるために、IC カード乗車券による新幹線・在来線相互間のシームレスな移動を実現した。

IC 媒体も従来の IC カードに加え、携帯電話機の IC 機能を利用した「モバイル Suica」のサービスを開始した[3] (図 9)。

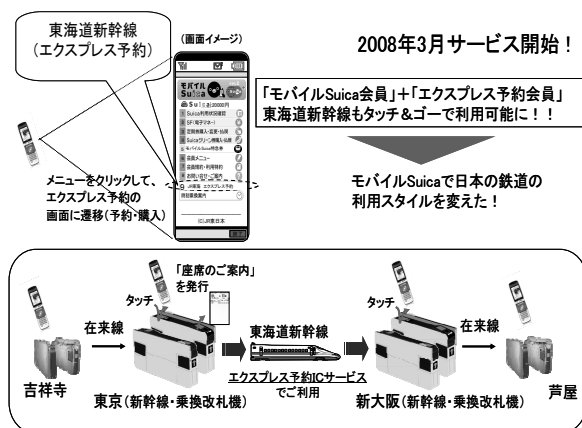


図9 モバイル Suica による東海道新幹線利用

JR 東日本では、新幹線改札機において新幹線乗車駅までの在来線部分の運賃判定を実施しているが、この運賃判定のソフトは、改札機 IC 判定モジュールの運賃判定ソフトをそのまま搭載することで、設計期間、設計費、検証期間、検証費を縮小し、信頼性を高めた[4]（図 10）。

Suica は乗車券としてだけではなく、電子的なバリュー（価値）を付加した電子バリュー機能により電子マネーとしての決済ビジネスや他の媒体（クレジットカードなど）と一体化した多機能も可能とし、鉄道、バス、タクシーの交通インフラから新しいビジネスの展開へと進んでいる。

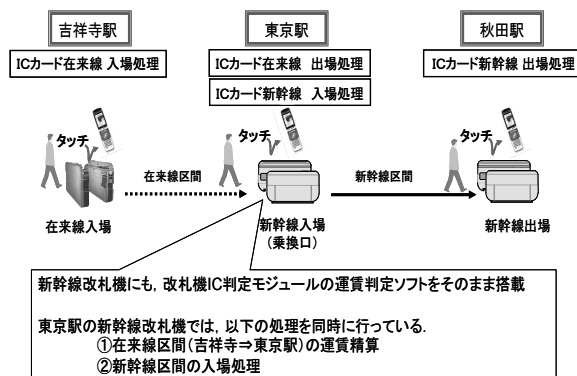


図 10 新幹線改札機における改札機 IC 判定
モジュールの運賃判定ソフト利用

7. おわりに

2001 年 11 月に運用開始した Suica は JR 東日本 1 社のシステムでしかも鉄道だけの局所的サービスであった。首都圏における相互利用実現に向けて、各鉄道事業者ごとに異なる特殊な制度や規則を相互に公開し、開発メーカにおける共通仕様を定義したが、この共通仕様を作成するために鉄道事業者とメーカとの間で約 300 回の仕様検討会を実施し、共通仕様策定までには 3 年の期間を要した。長期間に及ぶ仕様検討を経て、首都圏 IC 相互利用は 2007 年 3 月に運用開始となり、現在首都圏では、鉄道（31 社）だけでなくバス（77 社）、一部の大手タクシー会社と、ほぼすべての種類の陸上交通機関において双方向での利用が可能な大域的サービスとなった。

本論文では、Suica を大域的サービスとするための技術として、高速処理と熱設計電力のバランスが取れた改札機 IC 判定モジュールを提案し、運賃判定ソフトの共通化、ロジック検証の効率化を図ることで、品質向上を実現したことについて述べた。

その成果として、Suica カードの発行が 3,000 万枚を超え、旅客の信頼を得ることができた。その後、利用エリアも JR 北海道、JR 東海、JR 西日本、JR 九州、西日本鉄道、福岡市交通局での相互利用を可能とし、Suica と関連する IC カードの利便性を飛躍的に向上させ、新しいビジネス展開を実現した。

現在、JR 東日本エリア内の全駅 1,705 駅における 1 日あたりの利用者数は約 1,680 万人であり、このうち Suica エリア内での乗車人員が 98%を占めている。しかしながら、それに見合う旅客の IC カード利用率には達していない。今後も IC カードのさらなる利用率向上、利用範囲の拡大を目指す。このためには、旅客へのサービスアップと IC 機器拡大のための投資が必要となり、その投資対効果を満足させるための機器とソフトの共通化による量産

コストダウン，運用変更に対する柔軟かつ迅速な対応，新規ビジネス開拓による IC カード乗車券システムの価値向上などが必要と考えている。

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) 佐藤史隆 他: 最短経路問題におけるアルゴリズム【ダイクストラ法】の調査, ISDL report, No.20040416002.
- 3) 永瀬秀彦: モバイル Suica 特急券対応新幹線改札機の開発, (社) 日本鉄道車両機械技術協会, Vo16, No.4 (2008).
- 4) 永瀬秀彦 他: モバイル Suica 特急券対応新幹線改札機の開発, 日本鉄道サイバネティクス協議会, 第 45 回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, No.220 (2008).

永瀬 秀彦 (非会員)

E-mail: nagase54@jrem.co.jp

1978 年群馬大学工学部機械工学科卒業。同年日本国有鉄道入社。1987 年 JR 東日本。1992 年よりジェイアール東日本メカトロニクス (株) へ出向。IC カード乗車券システムの研究・開発に従事。現在に至る。機械学会会員。

投稿受付: 2010 年 3 月 15 日

採録決定: 2010 年 4 月 16 日

メンタ: 坂井 修一(東京大学)

- ・「Suica」は東日本旅客鉄道株式会社の登録商標です。
- ・「TOICA」は東海旅客鉄道株式会社の登録商標です。
- ・「ICOCA」は西日本旅客鉄道株式会社の登録商標です。
- ・「SUGOCA」は九州旅客鉄道株式会社の登録商標です。
- ・「Kitaca」は北海道旅客鉄道株式会社の登録商標です。
- ・「PASMO」は株式会社パスモの登録商標です。
- ・「nimoca」は西日本鉄道株式会社の登録商標です。
- ・「はやかけん」は福岡市交通局の登録商標です。