

## 異種統合型自律分散 IC カード乗車券システムの信頼性評価技術の研究

椎橋章夫<sup>†</sup> 大橋克弘<sup>††</sup>  
山名基晴<sup>†</sup> 森欣司<sup>††</sup>

鉄道の自動出改札システム (AFC: Automatic Fare Collection system) は、高密度輸送におけるピーク時の乗降客に対応するための高速性と金券である乗車券を処理するため高信頼性が不可欠である。しかし、無線通信方式の IC カード乗車券は旅客の使用 방법에依存するため、データの読み取りの不確実、不完全が発生する (これを「データ抜け」と呼ぶ)。東日本旅客鉄道株式会社の Suica システムでは「データ抜け」が発生してもシステムを止めることなく、データの信頼性を確保できるように「自律分散整合化技術」を導入していたが、その有効性を評価する手法を持たなかった。そこで、東京工業大学森研究室との連携のもと、自律分散整合化技術の有効性を評価する手法として、機能信頼性評価法を研究し、その評価技術を確立した。この結果、得られた最適パラメータを Suica システムに導入し、その有効性を実証した。

### Study on How to Evaluate the Reliability of the Autonomous Decentralized IC Card Ticket System

AKIO SHIBASHI,<sup>†</sup> KATSUHIRO OHASHI,<sup>††</sup> MOTOHARU YAMANA<sup>†</sup>  
and KINJI MORI<sup>††</sup>

The Automatic Fare Collection system (AFC) requires both high performance and high reliability; high performance is necessary to handle the congested passengers during the peak time and high reliability cannot be neglected because the tickets are as valuable as cash. However, the IC card ticket system with wireless communications depends on the way of passengers' behavior, which causes serious problems called "data lacks." In order to assure the reliability of the data in case of "data lacks" without stopping the system, the Autonomous Decentralized Data Consistency Technology has been installed to the Suica system in East Japan Railway Company. However, the evaluation method had not been prepared. This paper, in cooperation with Mori Laboratory, Tokyo Institute of Technology, evaluates the effectiveness of the Autonomous Decentralized Data Consistency Technology by Functional Reliability and optimizes it. This optimization has been installed to the Suica system and performs very well.

#### 1. はじめに

鉄道輸送を支える重要なシステムの 1 つである自動出改札システム (AFC: Automatic Fare Collection system) は、高密度輸送におけるピーク時の乗降客に対応するための重要な課題の 1 つとして「自動改札機の処理速度向上」がある。一方、金券である乗車券を処理するため高信頼性が不可欠である。このため、高速処理と高信頼性の両方を備えた乗車券システムが必

要不可欠である。

東日本旅客鉄道株式会社 (JR 東日本) の Suica IC カード乗車券システムは「自律分散アーキテクチャ」を使って高速処理性と高信頼性を実現した自律分散システムである。Suica システムは「IC カード」「端末 (自動改札機など)」「駅サーバ」「センターサーバ」から構成されている。この「自律分散型アーキテクチャ」によって一部の端末が故障しても、他の端末にはその影響を及ぼさず、最低限のシステムの稼働が保証されている。

また、金券である乗車券の運賃データには高度な信頼性の確保が不可欠であるが、無線通信方式の IC カードゆえの欠点として「データ抜け」という重大な問題

<sup>†</sup> 東日本旅客鉄道株式会社  
East Japan Railway Company  
<sup>††</sup> 東京工業大学  
Tokyo Institute of Technology

が発生してしまう。Suica システムでは「データ抜け」が発生してもシステムを止めることなく、データの信頼性を確保できるように「自律分散整合化技術」が導入されている。しかし、この技術の有効性を客観的に評価する手法を持たなかった。このため、JR 東日本 Suica 部と東京工業大学森研究室と共同で、自律分散整合化技術の有効性についての評価手法の研究を行い、機能信頼性評価法を用いた評価技術を確立した。

本論文では、まず、Suica システムのアーキテクチャと、発生する障害について詳細に分析した。それに基づいてシステムのモデル化、一般化を行い、実際に機能信頼性評価技術を適用しシミュレーションを行った。具体的には、整合化処理を行う Suica システムと、従来の整合化処理を行わない集中システムとの比較・検証を行い、それにより自律分散整合化技術による効果を検証した。また、この検証によって得られた最適パラメータを Suica システム更新時に実システムに導入し、その有効性を検証した。

### 1.1 共同研究の進め方

今回の研究では、JR 東日本が Suica システムに導入した自律分散システムと自律分散整合化技術を共同で調査・分析した(2章, 3章)。大学側とはその技術の評価方法として「機能信頼性」の概念を利用して評価する手法(4章, 5章)を連携して研究した。企業の持つ実システムの知識・技術と大学の持つ先端技術の研究成果、データ解析、理論化などそれぞれの長所を生かし、連携して研究を進め、共同でシミュレーション(6章)を行い、その有効性を検証した。

## 2. 異種統合型自律分散 Suica 乗車券システム

### 2.1 システム構成

図 1 にシステムの全体構成を示す。端末である各出改札機器は IC カードとの間で無線通信を行う。IC カードは識別コード(CC: コンテンツコード)が付いたデータを DF(Data Field)にブロードキャストし、端末(改札機)はセレクトしてデータの収集・処理を行っている。

各端末と駅サーバ間は駅内 LAN で結ばれており、DF を介して自律分散処理をしている。駅レベルでは、駅サーバから DF にデータをブロードキャストしており、各端末(自動改札機, 自動券売機など)はセレクトしてデータを受け不正カードチェックや運賃計算などの処理をしている<sup>1)~4)</sup>。

IC カード乗車券システムは端末での高速処理が必須要件であるため、IC カードと端末間の DF1 は 1/10 秒単位でデータの授受がなされている。また、端末は

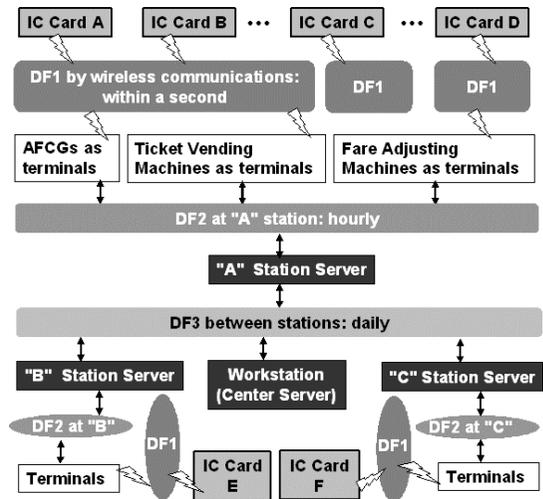


図 1 自律分散型 IC カード乗車券システム構成

Fig. 1 System configuration of autonomous decentralized IC card ticket system.

一定量のデータ保存が可能であるため駅サーバ間との DF2 ではデータが 1 時間単位で授受されている。さらに駅サーバについても一定量のデータ保存が可能であるためセンターサーバ間との DF3 は 1 日に 1 回データの授受がなされている。このように「秒」「時間」「日」の 3 種類の時間軸の異なる DF 群は「異種 DF」と呼び、このシステムを「異種統合型自律分散システム」と呼ぶ<sup>5)</sup>。

自律分散型 IC 乗車券システムはこの異種 DF により構成されているという特徴がある。これによりシステムの高速度と信頼性の確保を可能としている。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)方式が導入されている。

IC カードの処理は各出改札機器において自律して行い、処理の高速度を確保する。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)蓄積可能となっている。各出改札機器端末で蓄積しているデータは一定時間ごとに DF2 にブロードキャストされ駅サーバは CC により「選択受信」し、そのデータを蓄積する。さらに、駅サーバは DF3 へデータを一定時間ごとに送信する。センターサーバは同様に CC により必要なデータだけ「選択受信」し、蓄積(26 週間分)される。これにより、センターサーバや駅サーバが故障した場合であっても、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。復旧後はただ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

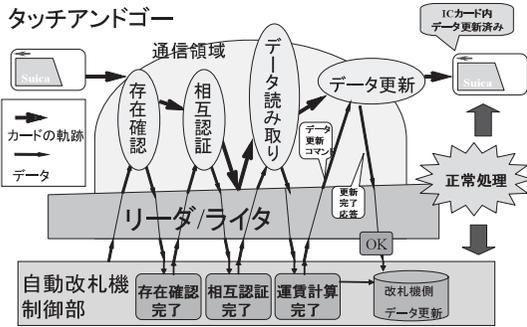


図 2 カードと自動改札機間の処理 (正常時)

Fig. 2 Process between Card-AFC gate (Normal).

ることができる<sup>6)</sup>。

具体的に改札機によるカード処理がどのように行われているか述べる。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相互認証をする。その後は判定に必要なデータをカードから読み取り、不正カードチェック、運賃計算、SF (Stored Fare: あらかじめ IC カードなどにチャージしてある金銭的価値のこと) 残金が十分かなどの判定を行い、結果のデータをカードに書き込み、最後に再確認を行う (図 2)。改札側は判定後のデータを仮データとしてデータベースに登録を行い、最後の再確認でカードから Ack 信号 (更新完了応答) が返ってくると、その仮データを確定データとして確定する。

### 3. 自律分散整合化技術

#### 3.1 無線通信に起因する処理未了エラー

図 3 に IC カードと端末間の処理を示す。特に、処理終了をどのように検知しているかを示したものである。IC カードリーダ・ライタ (R/W) は IC カードから「データ更新完了」の信号を受信してから自らのデータを更新する。この最後の信号通信は通信領域の境界付近で行われるため、乗客が IC カードを R/W にかざす方法によっては処理が正常に終了しない場合がある。これは非接触方式ゆえの問題である。この場合、IC カード内のデータは更新されているにもかかわらず、R/W (さらにはセンターサーバ) 側のデータは更新されない状態となる。この現象を「データ抜け」と呼び、データの信頼性およびサービス低下を発生させる深刻な問題である。

#### 3.2 自律分散整合化技術

この「データ抜け」を防ぐために提案し、導入した技術が「自律分散整合化技術」である。この技術は 2 章で述べた異種 DF を用いて「データ抜け」からデータ

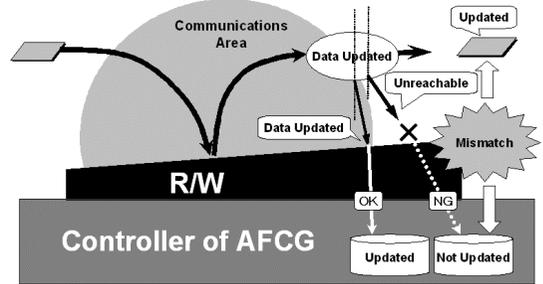


図 3 IC カード～端末間的高速処理とデータ信頼性

Fig. 3 High-speed communication and data reliability between IC card and terminal.

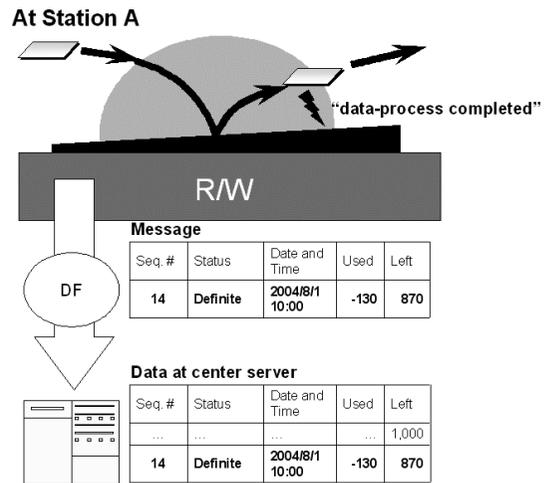


図 4 データ整合化技術 (1): R/W で正常に処理が完了した例

Fig. 4 Data consistency technology (1): Normal process at R/W.

を復活させるものである。

R/W が IC カードから「データ更新完了」の信号を受信できなかった場合、R/W 側のデータは「一時データ」としてセンターサーバに蓄積される。次回の処理が正常に完了すれば、正当なデータがセンターサーバに送られ、それ以前に蓄積されていた「一時データ」と照合されることで「確定データ」に更新される<sup>7)</sup>。

図 4 から 6 は 1 つの例である。ある乗客が 1,000 円のチャージをした IC カード乗車券を持って A 駅から B 駅へ移動するとする。A 駅で入場する際、自動改札機で最低運賃の 130 円が差し引かれる。処理が正常に完了し、R/W が「データ更新完了」の信号を受信したならば、A 駅の自動改札機は通し番号 (例では 14 番) を付与して「確定 (Definite)」データを DF (まず DF1, 次に駅サーバなどを介して DF2, DF3) へブロードキャストする (図 4)。

次に B 駅出場時、IC カード内のデータ更新が完了

したにもかかわらず、B 駅の R/W が「データ更新完了」の信号受信に失敗した、「データ抜け」が発生したとする。IC カード内のデータは実際には更新されているにもかかわらず、R/W やサーバはそれを検知することができない。一方で、R/W は IC カードに対してデータ更新のコマンドを投げている。このような場合、B 駅の自動改札機は未確定のデータを「一時

(Temporary)」（例では 15 番）として DF ヘブロードキャストする（図 5）。

もし、この乗客が同じ IC カードを持って C 駅に入場し、処理が正常に完了したとすると、16 番のデータは「確定」になる。センターサーバはシーケンスをチェックし、「確定」で挟まれた「一時」データを「確定」に更新する。こうして不整合はシーケンスを通して解消される（図 6）。

この方式によって万一「データ抜け」が起きたとしても、不正カードとして、ブラックリストに載る前にデータを復旧することができ、IC カードの無効化を防ぐことができる。つまり、この技術は端末とセンターサーバの自律的な処理を拡張することでデータの信頼性を高めているといえる。

4. 機能信頼性評価技術

機能が達成されるか否かを評価する一般的な信頼性とは異なり、サブシステムの連携・統合結果をシステム全体の機能として評価する機能信頼度の概念<sup>(8)~(11)</sup>があるのでこれを使うこととする。

4.1 システムモデル

図 7 に示したようなシステムモデルが提案されている。システムはいくつかのサブシステム（サブシステム群）から構成され、各サブシステムはいくつかの機能から構成される。いずれも機能の単位は機能量として表現する。

4.2 機能信頼度の定義

状態  $X$  の下でシステム  $S$  が達成する機能  $F$  は各サブシステムが持つ機能の和である。

$$F(S, X) = \sum_{S_i \in S} f(S_i, X) \tag{1}$$

ここで、 $f(S_i, X)$  は状態  $X$  の下でサブシステム  $S_i$  が達成する機能量である。機能達成の割合を機能達成度と呼び、状態  $X$  の下でのサブシステム  $S_i$  およ

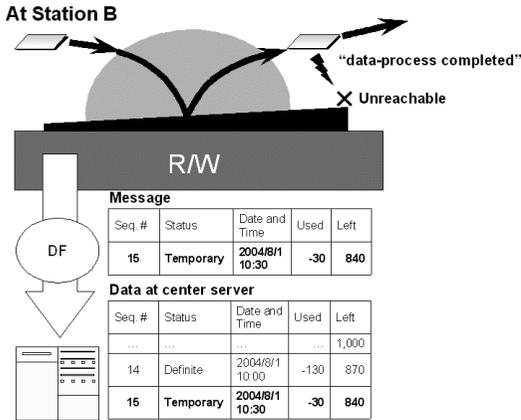


図 5 データ整合化技術 (2): R/W で処理の完了が確定できなかった例

Fig. 5 Data consistency technology (2): Unconfirmed process at R/W.

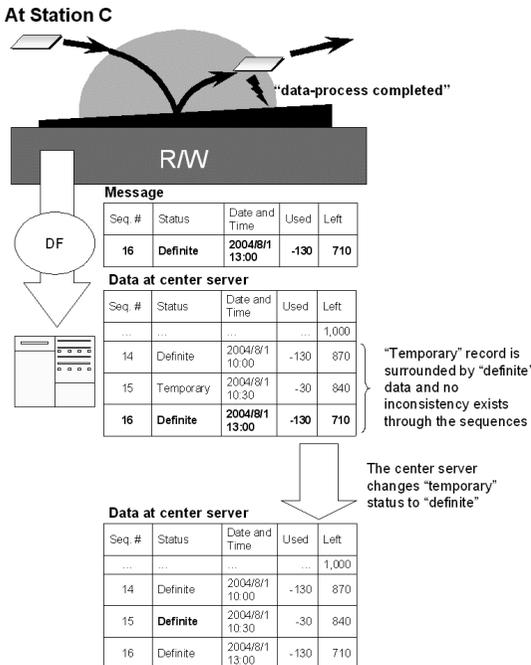


図 6 データ整合化技術 (3): R/W で再度正常に処理が完了し、データが復旧した例

Fig. 6 Data consistency technology (3): Another normal process at R/W and data recovery.

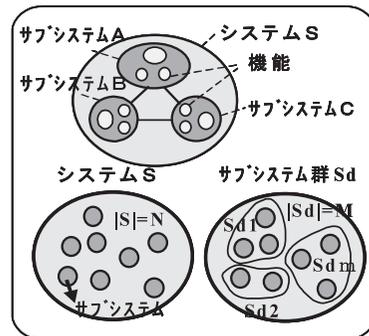


図 7 機能信頼性システムモデル  
Fig. 7 Functional reliability model.

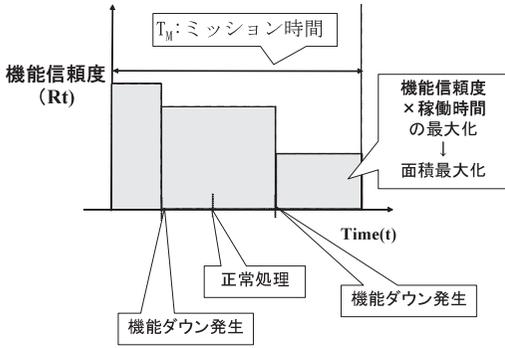


図 8 ミッション時間全体にわたる機能信頼度  
Fig. 8 Functional reliability through mission time.

びシステム  $S$  の機能達成度  $\psi(S_i, X)$ ,  $\Psi(S, X)$  は次式により定義できる.

$$\psi(S_i, X) = \frac{f(S_i, X)}{F(S, X_0)} \quad (2)$$

$$\Psi(S, X) = \sum_{S_i \in S} \psi(S_i, X) \quad (3)$$

時刻  $t$  での機能達成度の期待値を, 時刻  $t$  での機能信頼度  $Rt$  と呼ぶ.  $Rt$  は機能達成度と信頼度期待値の積により求められ, 次式 (4) により定義される.

$$Rt = \sum_X \Psi(S, X) \cdot P(X | t) \quad (4)$$

4.3 システム構築のアシュアランス性の定義

図 8 に示すように機能信頼度の所定期間 (ミッション時間) 全体にわたる平均機能信頼度を次式 (5) で定義する.

$$R = (1/T_M) \cdot \int_0^{T_M} Rt(t) dt \quad (5)$$

$T_M$ : ミッション時間,  
 $Rt(t)$ : 時刻  $t$  での機能信頼度

5. 信頼性評価技術の IC 乗車券システムへの適用

5.1 システムのモデル化

本章では 4 章で述べた機能信頼性評価技術を IC カード乗車券システムへ適用する. IC 乗車券システムの基本機能は不正カードのチェックと運賃計算処理である. このチェックと運賃計算処理はカード内データをもとに達成されるので, 各サブシステムは機能量として「一致データ」を持つと定義した. また, IC 乗車券システムに求められる機能達成度 (式 (2)) を「データの一貫性」(図 9) と定義する. ここで「データの一貫性」とは, 「サーバ側」と「カード」でそれぞれ保有しているデータが一致している度合いを表すものである.

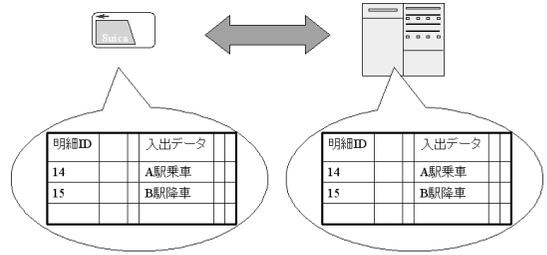


図 9 データ一貫性  
Fig. 9 Data consistency.

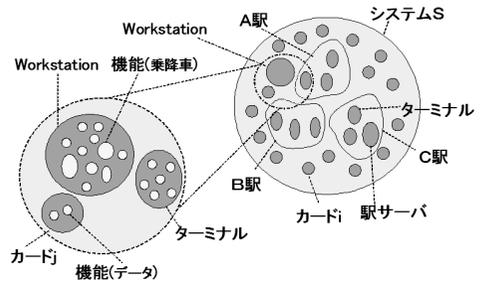


図 10 機能信頼性評価システムモデル  
Fig. 10 Model to evaluate functional reliability.

この考えに基づきシステムをモデル化したものが図 10 である. サブシステム中の粒 1 つが「一致データ」1 つを表している. Suica システムでのセンターサーバや駅サーバはバックアップ的にデータを集めておき, より信頼性を高めるために用いられるだけである. 不正カードチェックや運賃計算を直接行うのは各ターミナルであるので, 今回はカードとターミナルに焦点を当ててモデリングを行った.

5.2 IC 乗車券システムにおける定義式

これらのモデルにおいて機能信頼性の定義を適用した場合, 各数式がどうなるかを示す. 自律分散型乗車券システムではカードと各ターミナルが持つデータを比較する. 状態  $X$  におけるカード  $i$  が持つ機能量と機能達成度を

$$f(S_{Card(i)}, X), \quad \psi(S_{Card(i)}, X)$$

ターミナル  $j$  が持つ機能量と機能達成度を

$$f(S_{Terminal(j)}, X), \quad \psi(S_{Terminal(j)}, X)$$

として定義する.

(1) データベース一致データ

$$f(S_{Card(i)}, X) = \alpha \sum_{j \in Terminal} D_{C(i)T(j)} \quad (6)$$

$$f(S_{Terminal(j)}, X) = \alpha \sum_{i \in Card} D_{C(i)T(j)} \quad (7)$$

$\alpha$ : ステータスデータが論理的に正しいかどうか  
 $D_{C(i)T(j)}$ : カードとターミナル間一致データ数

表 1 カード利用方法の例 (1)  
Table 1 Sample of card usage (1).

前日ラスト	OK
1 回目 (乗)	OK
2 回目 (乗)	OK
3 回目 (乗)	Error
4 回目 (乗)	OK
5 回目 (乗)	Error
6 回目 (乗)	OK

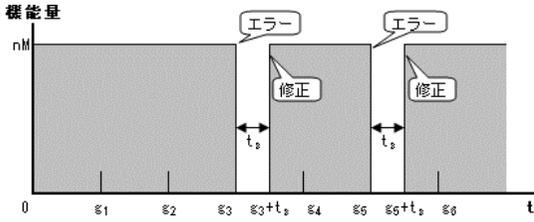


図 11 カードの機能量 (整合化技術なし)

Fig. 11 Functional value of card (without data consistency technology).

(2) データ一致度

$$\psi(S_{Card(i)}, X) = \frac{\alpha \sum_{j \in Terminal} D_{C(i)T(j)}}{D_{ALL}} \quad (8)$$

$$\psi(S_{Terminal(j)}, X) = \frac{\alpha \sum_{i \in Card} D_{C(i)T(j)}}{D_{ALL}} \quad (9)$$

$\alpha$ : ステータスデータが論理的に正しいかどうか  
 $D_{ALL}$ : システム内データ数

続いて、システム全体の機能信頼性がどうなるかを考察する。今回は、各サブシステムの物理的なダウンなど「データ抜け」以外の障害は発生しないものとする。さらにモデルをシンプルなものにするため、平均的なユーザを想定しその平均的なカードに基づき各サブシステムの機能量・機能達成度、システム全体の機能信頼性を求めていく。

まず、整合化技術なしの集中システムにおけるシステム全体の機能信頼度を求める。整合化技術を使用しない場合、データの不一致を許容できないため、エラーが発生した場合、旅客は自動改札機を通過することができず、係員窓口でデータを修正しなければならない。表 1 の例では、3 回目 (時刻  $g_3$ ) と 5 回目 (時刻  $g_5$ ) でデータ不一致が起きたため、それぞれ時刻  $g_3 + t_s$ 、 $g_5 + t_s$  にデータ修正が完了するまで機能量は 0 となっている (図 11)。

カードに保存できるデータ件数を  $n$ 、カードとター

ミナル間の一致データ数を  $n^*$ 、システム内カード枚数を  $M$ 、エラー発生率を  $e$  として各サブシステムの機能量と機能達成度を求めていく。カード  $i$  の機能量は式 (10) で表される。

$$f(S_{Card(i)}, X) = \alpha \sum_{j \in Terminal} D_{C(i)T(j)} = \alpha \cdot n^* \quad (10)$$

$$= \begin{cases} n : n^* = n, \alpha = 1 \\ \quad \text{(全データ的一致時)} \\ 0 : n^* < n, \alpha = 0 \\ \quad \text{(データの不一致時)} \end{cases}$$

各ターミナルの機能量 (式 (7)) より、ターミナル群としての機能量は

$$f(S_{Terminal}, X) = \sum_{j \in Terminal} f(S_{Terminal(j)}, X) = n^* \cdot M \quad (11)$$

$$= \begin{cases} n \cdot M : n^* = n, \alpha = 1 \\ \quad \text{(全データ的一致時)} \\ (n-1) \cdot M : n^* < n, \alpha = 0 \\ \quad \text{(データの不一致時)} \end{cases}$$

となる。これよりカードの機能達成度は

$$\psi(S_{Card(i)}, X) = \frac{\alpha \sum_{j \in Terminal} D_{C(i)T(j)}}{D_{ALL}} = \begin{cases} \frac{n}{D_{ALL}} \\ 0 \\ \frac{D_{ALL}}{D_{ALL}} \end{cases} \quad (12)$$

ターミナル群の機能達成度は

$$\psi(S_{Terminal}, X) = \sum_{j \in Terminal} \psi(S_{Terminal(j)}, X) = \begin{cases} \frac{n \cdot M}{D_{ALL}} \\ \frac{(n-1) \cdot M}{D_{ALL}} \end{cases} \quad (13)$$

となる。

システム全体の機能達成度は式 (3) より

$$\Psi(S, X) = \sum_{S_i \in S} \psi(S_i, X) = \begin{cases} \frac{n \cdot M + n \cdot M}{D_{ALL}} \\ \frac{(n-1) \cdot M}{D_{ALL}} \end{cases} \quad (14)$$

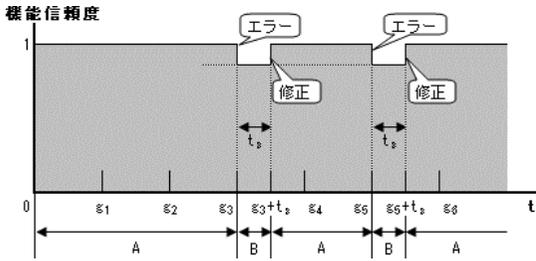


図 12 システム全体の機能信頼度の推移 (整合化なし)  
 Fig. 12 Transition of functional reliability of whole system without data consistency technology.

表 2 システム全体の機能信頼度 (整合化なし)

Table 2 Functional reliability of whole system without data consistency technology.

	$\Psi(S, X)$	$P(X t)$	$Rt$
A	1	1	$1 \times 1 + \frac{n-1}{2n} \times 0 = 1$
	$\frac{n-1}{2n}$	0	
B	1	$1-e$	$1 \times (1-e) + \frac{n-1}{2n} \times e$
	$\frac{n-1}{2n}$	$e$	

$$= \begin{cases} 1 & : \alpha = 1 \\ \frac{(n-1)}{2n} & : \alpha = 0 \end{cases}$$

式 (4), (14) より求めた  $Rt$  を図示したものが図 12 であり, 図 12 下部に示した A, B それぞれの期間における  $\Psi(S, X)$ ,  $P$ ,  $Rt$  を表 2 に表す.

信頼度 (平均機能信頼度) は式 (5) より,

$$R = \frac{\{1 \times (T_M - t_s \times q)\} + \left\{ \left(1 - \frac{n+1}{2n} \cdot e\right) \times t_s \times q \right\}}{T_M}$$

$$= \frac{T_M - \frac{n+1}{2n} \times e \times t_s \times q}{T_M} \quad (15)$$

となる.

同様に, 整合化技術を導入した自律分散システムの機能信頼度を求めていく. 整合化技術を用いる場合はデータの不一致をカードに保存できるデータ件数 ( $n$  個) まで許容でき, システムの稼動を継続できる. データ不一致が発生するたびにカードの機能量  $f(S_{Card(i)}, X)$  は 1 件分段階的に低下していく. 表 3 の例では, 1 回目 (時刻  $g_1$ ) と 2 回目 (時刻  $g_2$ ), 4 回目 (時刻  $g_4$ ) でデータ不一致が起きたため, それぞ

表 3 カード利用方法の例 (2)  
 Table 3 Sample of card usage (2).

前日ラスト	OK
1 回目 (乗)	Error
2 回目 (乗)	Error
3 回目 (乗)	OK
4 回目 (乗)	Error
5 回目 (乗)	OK
6 回目 (乗)	OK

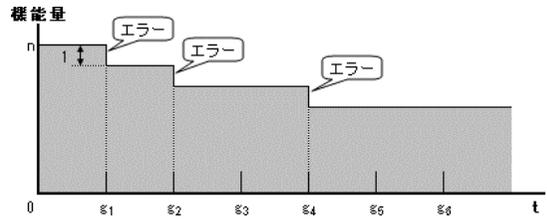


図 13 カードの機能量 (整合化技術あり)

Fig. 13 Functional value of card (with data consistency technology).

れ時刻  $g_1, g_2, g_4$  に機能量が低減している (図 13).

カードの機能量は式 (6) より

$$f(S_{Card(i)}, X) = \alpha \sum_{j \in Terminal} D_{C(i)T(j)}$$

$$= n^* \quad : n^* \leq n, \alpha = 1 \quad (16)$$

( $n$  個以下のデータ一致時)

ターミナル群としての機能量は

$$f(S_{Terminal}, X) = \sum_{j \in Terminal} f(S_{Terminal(j)}, X)$$

$$= n^* \cdot M \quad : n^* \leq n, \alpha = 1 \quad (17)$$

( $n$  個以下のデータ一致時)

となる. これらよりカードの機能達成度は

$$\psi(S_{Card(i)}, X) = \frac{\alpha \sum_{j \in Terminal} D_{C(i)T(j)}}{D_{ALL}} \quad (18)$$

$$= \frac{n^*}{D_{ALL}}$$

ターミナル群の機能達成度は

$$\psi(S_{Terminal}, X) = \sum_{j \in Terminal} \psi(S_{Terminal(j)}, X) \quad (19)$$

$$= \frac{n^* M}{D_{ALL}}$$

となる. システム全体の機能達成度は式 (3) より

$$\Psi(S, X) = \sum_{S_i \in S} \psi(S_i, X)$$

$$= \frac{n^* \cdot M + n^* \cdot M}{D_{ALL}} \quad (20)$$

$$= \frac{n^*}{n} \quad : n \leq n^*, \alpha = 1$$

( $n$  個以下のデータ一致時)

となる。

式 (4), (20) より求めた  $Rt$  を図示したものが 図 14

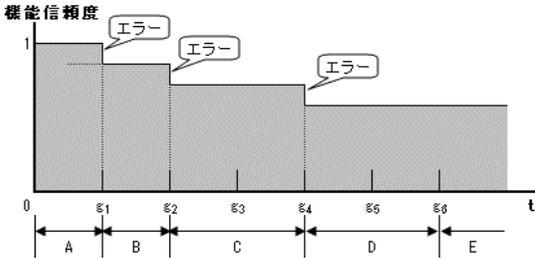


図 14 システム全体の機能信頼度の推移 (整合化あり)

Fig. 14 Transition of functional reliability of whole system with data consistency technology.

表 4 システム全体の機能信頼度 (整合化あり)

Table 4 Functional reliability of whole system with data consistency technology.

	$\Psi(S, X)$	P	Rt
A	1	1	1
	$\frac{n-1}{n}$	0	
	$\frac{n-2}{n}$	0	
	...	...	
	0	0	
B	1	$1-e$	$1 \times (1-e) + \frac{n-1}{n} \times e$
	$\frac{n-1}{n}$	$e$	
	$\frac{n-2}{n}$	0	
	...	...	
	0	0	
C	1	$(1-e)^2$	$(1-e)^2 + \frac{n-1}{n} \times 2e(1-e) + \frac{n-2}{n} \times e^2$
	$\frac{n-1}{n}$	$2e(1-e)$	
	$\frac{n-2}{n}$	$e^2$	
	...	...	
	0	0	
...	...	...	...
E	$\frac{n-k}{n}$	$\sum_{k=0}^j C_k e^k (1-e)^{j-k}$	$\sum_{k=0}^j \frac{n-k}{n} C_k e^k (1-e)^{j-k}$

であり, 図 14 下部に示した A, B, ...それぞれの期間における  $\Psi(S, X), P, Rt$  を表 4 に表す.

先ほどと同様に時刻  $t$  における機能信頼度を求めて 図 14, 式 (2) よりミッション時間全体にわたる機能信頼度 (平均機能信頼度) を求めると

$$R = \frac{\sum_{j=0}^q (g_{j+1} - g_j) \sum_{k=0}^j \frac{n-k}{n} C_k e^k (1-e)^{j-k}}{T_M} \quad (21)$$

となる。

## 6. シミュレーション

### 6.1 パラメータ

シミュレーションを行うにあたって, 平均的なユーザを考える. 図 15 は時間帯によって改札利用人数がどのように分布しているかを表す, ある駅での実測値である.

このデータから支配的な駅利用を行うユーザを想定した (図 16). この場合のミッションタイムは 3:00 から 24:00 の 21 時間である. エラー発生確率は Suica システムのフィールドにおける実測値を用いた.

また, 機能信頼度は全体のデータに対する不一致データの割合で示されるため, 図 17 に示すように, 処理がまったく行われない (通過しない) 場合や正常

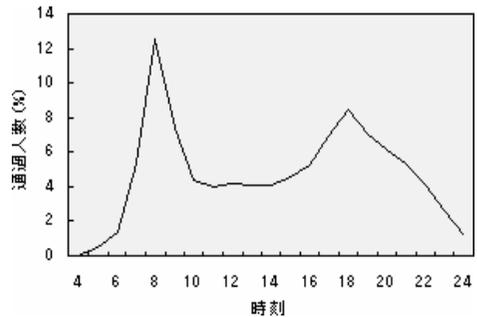


図 15 各時間帯における改札利用人数

Fig. 15 Number of passengers through AFC gate.

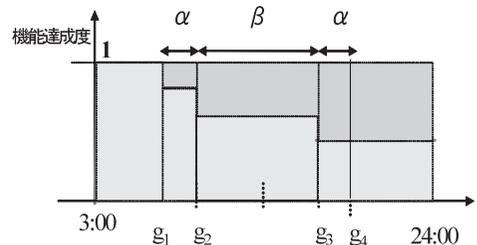


図 16 平均的ユーザの利用方法

Fig. 16 Average usage.

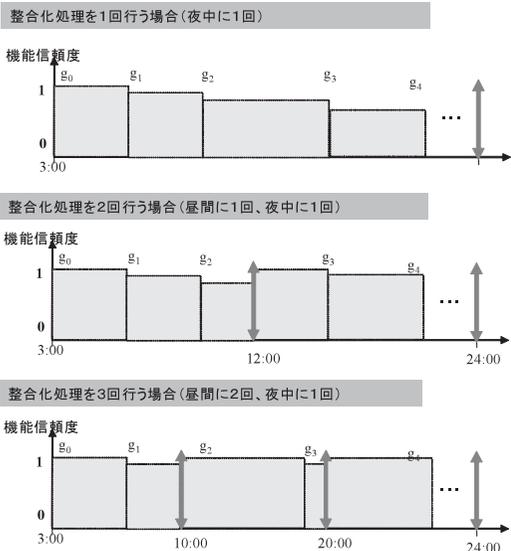


図 17 整合化処理を行う回数と時間

Fig. 17 Number and time of application of data consistency technology.

に処理された場合は持続し、不一致が起きれば 不一致データ数の増加数/全体のデータ数 だけ減少する。逆に、整合化処理によって不一致がなくなれば、その分 不一致データ数の減少分/全体のデータ数 だけ増加する。

一方、整合化処理はバックグラウンドでセンターサーバによって実行される。この「整合化処理を実施する時間」は重要である。5 章より、データ抜けの個数とその状態が継続する時間が機能信頼度に大きな影響を及ぼすことが分かっている。一方で、データ抜けはおおむねトランザクション数に比例する。したがって、トランザクションのピーク後に整合化処理を行うことが理想的だと考えられる。そこで、今回は図 17 に示す 3 つのケースの時間で整合化処理を行う場合をシミュレートした。具体的には、整合化を 1 回行う場合は従来どおり駅業務終了後の 24:00 に行うこととし、2 回整合化を行う場合は 2 つの改札利用ピークの間である 12:00 を追加し、3 回の場合は 2 つのピーク直後の 10:00 と 22:00 を追加し、それぞれ整合化する。この 3 つのケースと整合化技術なしの集中システムのケースを比較することとした。

6.2 シミュレーション結果

前節までの評価条件に従ってシミュレーションを行った結果を以下に示す(表 5, 図 18)。

横軸がカードに保持されるデータ件数, 縦軸がシステム全体の平均機能信頼度である。IC 乗車券システムにおける機能信頼性はデータ一緻度を用いて評価し

表 5 シミュレーションに利用したパラメータ  
Table 5 Parameter used for simulation.

パラメータ	値
ミッションタイム ( $T_M$ )	21 [hour]
ダウンタイム ( $t_D$ )	10 [min.]
タッチ回数 ( $q$ )	4
エラー発生確率 ( $e$ )	0.4 [%]
乗車時間	30 [min.]
1 回目タッチ時刻 ( $g_1$ )	08:00
2 回目タッチ時刻 ( $g_2$ )	08:30
3 回目タッチ時刻 ( $g_3$ )	18:00
4 回目タッチ時刻 ( $g_4$ )	18:30
設計パラメータ	
整合化処理の回数	1~3
カード内データ保持件数 ( $n$ )	1~40

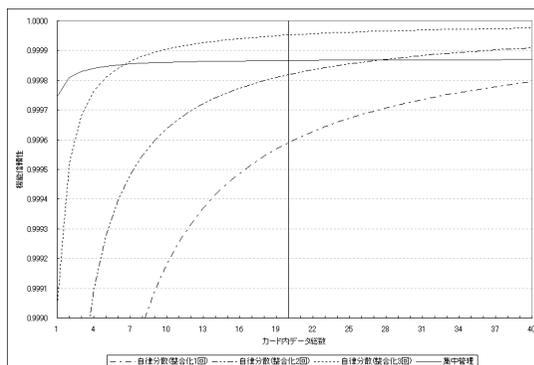


図 18 平均機能信頼度

Fig. 18 Average functional reliability.

ており、これはデータの信頼性を確保しつつ安定的にシステムが稼働できることの性質を意味している。

自律分散整合化技術はカードに保存されているデータ件数を許容範囲として、それ以下のデータ不整合を補完することができる。カードが多くのデータを持つほど、「データ抜け」をたくさん許容できるというわけである。シミュレーション結果からも、十分なデータ数を持たせれば整合化技術導入後の自律分散型システムが高信頼となることが分かった。ただし、データ保存件数が 20 件を超えたあたりから、その効果は小さくなる。これはエラー発生確率の小ささに対して、必要以上のデータを持たせても効果がないということであり、コストの問題からも、適切なデータ保持件数を決めることが重要であるといえる。

実システムの Suica カードは 20 件のデータを保持し、1 回/日の整合化を行っている。今回のシミュレーション結果より、その場合の平均機能信頼度は 0.9996 で

ある．また，同様にカードのデータ保持件数が 20 件，3 回の整合化処理の場合は 0.99995 と，データ保持 20 件の場合では最も高い平均機能信頼度である．

このように，データ保持 20 件で整合化 1 回の場合と同 3 回の場合では平均機能信頼度は 0.00055 改善されている．具体的には，2006 年 5 月現在の全改札機の Suica 通過総件数は約 1,250 万件/日であるため， $D_{ALL}$  は 2,500 万件となり，システム全体でトラブルを回避できると期待される件数は約 13,750 件/日である．

## 7. 研究のまとめ

本研究ではまず IC カード乗車券システムの構成，障害について調査を行った．それに基づきシステムをモデル化し，「自律分散整合化技術」の有効性を評価する手法として，機能信頼性評価法を研究し，その評価技術を確立した．この評価技術を Suica システムでシミュレーションした結果，得られた最適パラメータを実システムに導入し，従来は 1 日 1 回であった整合化処理の回数を Suica システムの更新に合わせて適正値 3 回（昼間 2 回，夜間 1 回）に変更した．2006 年 1 月より使用開始しているが，現在（2006 年 8 月）までに不具合もなく，この最適設計パラメータの有効性は検証された．

## 8. おわりに

今回，Suica システムの信頼性評価技術について産学連携で研究を行い，その結果をシステム更新に合わせて，実システムに導入し，成果を得た．

図 19 に示すように，鉄道会社は安全安定輸送確保の観点から，伝統的に自律分散システムを構築する傾向にある．しかし，そのシステムは必ずしも理論的に裏づけされたものではなく，経験工学によるものであ

る．企業には，実システム（フィールドデータ）とその対策技術は多くあるが，その解析や理論化，一般化は不得手である．一方，大学は先端技術の研究をパイロット的に行い，企業に比べて実用化への挑戦的研究では優れている．しかし，実システムを十分に知らないため，実システムの詳細な状況を理解するには時間がかかり，今回も，システムの現状とそのモデル化にあたって情報の共有化や研究の方向合わせに苦労した．

今回の経験から，今後の産学連携は大学から企業への知識移転という「Transfer 型」から企業との「Collaboration 型」が望まれる．具体的には，もっと初期（大学は基礎研究，企業はシステム構想段階）から「人と情報の連携」を密にすることが重要である．

## 参 考 文 献

- 1) Mori, K.: Autonomous Decentralized System Concept, Data Field Architecture and Future Trends, *International Symposium on Autonomous Decentralized Systems*, Kawasaki, Japan, pp.23–34 (1993).
- 2) Mori, K., Ihara, H., Suzuki, Y., Kawano, K., Koizumi, M., Orimo, M., Nakai, K. and Nakanishi, H.: Autonomous Decentralized System Software Structure and Its Application, *IEEE Fall Joint Computer Conference*, Dallas, US, pp.1056–1063 (1986).
- 3) 森 欣司：自律分散システム [I–VI]，電子情報通信学会学会誌，Vol.84, No.6, pp.403–408, No.7, pp.484–490, No.8, pp.611–617, No.9, pp.663–669, No.10, pp.734–740 (2001).
- 4) 森 欣司，足達芳昭，伊藤俊彦，松本雅行，大村賢，柴尾 聡，藤沢真二，星合隆成，久保田稔：世界にはばたく技術 自律分散システム (1)(2)，電子情報通信学会学会誌，Vol.121, No.2, pp.100–118, No.3, pp.177–189 (2001).
- 5) 椎橋章夫：IC カード乗車券システムにおける自律分散高速処理・高信頼性技術とそのアプリケーション，電子情報通信学会第 15 回アシュアランスシステム研究会，pp.1–9 (2005).
- 6) 椎橋章夫：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，計測自動制御学会産業論文集，Vol.4, No.7, pp.41–49 (2005).
- 7) Shiibashi, A.: Autonomous decentralized high-speed processing technology and the application in an integrated IC card fixed-line and wireless system, *International Symposium on Autonomous Decentralized Systems*, Chengdu, China, pp.215–223 (2005).
- 8) Matsumoto, M. and Mori, K.: Assurance evaluation technology for an autonomous decen-

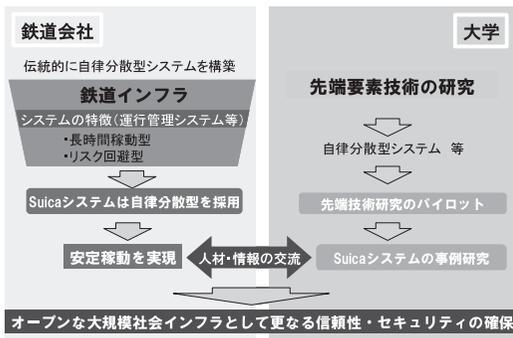


図 19 Suica における産学連携

Fig. 19 Industry-university cooperation on Suica.

tralized ATC system, *Electronics and Communications in Japan*, Vol.J86-D-I, No.1, pp.14-22 (2003).

- 9) 森 欣司, 宮本捷二, 井原廣一: 分散システムにおける機能と信頼性の評価法, 計測自動制御学会論文集, Vol.20, No.4, pp.314-321 (1984).
- 10) 織茂昌之, 森 欣司, 井原廣一: 機能信頼度に基づくシステム分割の評価, 計測自動制御学会論文集, Vol.28, No.2, pp.273-280 (1992).
- 11) 解良和夫: アシュアランス性評価技術に基づく段階的システム構築技術の研究 “Step-by-step system construction technology based on assurance evaluation technology,” 博士課程修了論文 (2003).

(平成 18 年 5 月 22 日受付)

(平成 18 年 11 月 2 日採録)



椎橋 章夫

1953 年埼玉県生まれ。1976 年埼玉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。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, IEEE, 電子情報通信学会各会員。



大橋 克弘

1983 年岡山県生まれ。2006 年 3 月東京工業大学工学部情報工学科卒業。現在, 同大学院情報理工学研究科計算工学専攻修士課程在学中。電子情報通信学会学生会員。



山名 基晴

1973 年岡山県生まれ。1996 年 3 月慶應義塾大学理工学部物理学科卒業。2005 年 7 月より東日本旅客鉄道株式会社 Suica 部。



森 欣司 (正会員)

1947 年東京都生まれ。1974 年早稲田大学大学院理工学研究科博士課程電気工学専攻修了。工学博士。株式会社日立製作所を経て, 1997 年より東京工業大学大学院情報理工学研究科計算工学専攻教授, 平成 17 年 4 月より同大学イノベーションマネジメント研究科技術経営専攻教授。科学技術長官賞 (研究功績者表彰) (1994), 市村産業賞本賞 (1994) 等, 受賞多数。