

高性能，高信頼の Suica システムの実現

初瀬 雄一 (株式会社ジェイアール東日本情報システム)
 真野 明子 (株式会社ジェイアール東日本情報システム)
 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 鉄道輸送は毎日休むことなく継続したサービスを提供する必要がある。日本の鉄道の特徴は朝夕の猛烈なラッシュであり、自動出改札システムの重要な課題の一つとして、高密度輸送におけるピーク時の乗降客に対応して旅客流動を確保するための「自動改札機の処理速度向上」がある。本稿では、「センタサーバ」「駅サーバ」「端末」の3階層からなる自律分散システムとして構築された IC 乗車券システムにおいて、高性能、高信頼を実現するための技術を紹介する。これらの技術は東日本旅客鉄道の Suica システムに導入され、その有効性が実証されている。

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)には高性能と高信頼性が求められる。高密度輸送におけるピーク時の乗降客に対応するには「自動改札機の処理速度向上」が必要である一方、乗車券は金券に相当するためデータの信頼性、即ちカードと各機器で保持しているデータの一致が不可欠である。

無線通信方式の IC カード乗車券システムでは IC カードと端末間の処理を無線通信により行う。端末のリーダ/ライタ(R/W)が同時に取り扱える IC カードは原則として1枚で、複数のカードを扱うことはできない。そのため多くの乗客が高速で通過する自動改札機では、通路の前後で複数のカードを検知しないよう通信エリアを小さくする必要がある。すると、今度は IC カードが通信エリアに滞在できる時間が短くなり、IC カードと R/W 間の処理に十分な時間を取ることが難しくなる。処理が途中で終わった状態を「処理未了」と呼ぶが、この「処理未了」が起きるとカード内のデータと機器のデータとの整合が取れず、データの信頼性(データ一致度)が低下する。このため、「IC カード」「(自動改札機などの) 端末」「駅サーバ」「センタサーバ」をサブシステムとして自律させた自律分散 IC カード乗車券システムを構築した。

本稿では、第2章で Suica システムの概要を示した上で、第3章で Suica システムの持つ課題を端末とシステムの観点から述べる。そして、第4章でそれらの課題を解決するために考案した自律分散技術を紹介する。これ

らの技術は東日本旅客鉄道(JR 東日本)の Suica システムに導入され、その有効性が確認されている。また、第5章では自律分散型アーキテクチャによって実現した他社との相互利用を紹介する。

2. Suica システムの概要

2.1 自律分散型アーキテクチャ

IC カード乗車券システム“Suica”はサブシステムである「IC カード」「端末」「駅サーバ」「センタサーバ」がサブシステム間のデータフィールド(DF)を介して自律的に処理を行う自律分散システム[1][2][3][4]である。各サブシステムが自律的に処理を行うため、一部の機器が故障した時でも最低限のシステム稼働を保障する高信頼性を実現している。

また、「IC カード」と「端末」間の DF は乗降客の流動を阻害しないよう高性能が求められるが、「端末」と「駅サーバ」間、「駅サーバ」と

「センタサーバ」間の DF は乗降客に直接影響せず、むしろデータの信頼性が求められる。このため、前者の DF では 1/10 秒単位の無線通信でデータを授受する一方で、後者の DF では「時間」「日」単位の有線通信によりデータを授受する。このように異なる DF をシステムニーズにより使い分けている点が IC カード乗車券システムの特徴である[5]。

「センタサーバ」「駅サーバ」は IC カードの状態を一元的に管理する Suica ID (Identification number)管理システムに分類され、自動改札機などの「端末」は駅務機器システムに分類される。本章では、各システムの概要を紹介する。

センタサーバ， 駅サーバ，
 端末の3階層構造

2.2 Suica ID 管理システム

Suica ID 管理システムは、図 1 に示すように全てのデータを処理する「センタサーバ」と端末が作成したデータを中継する「駅サーバ」から構成される。「センタサーバ」は「駅サーバ」と WAN (Wide Area Network) で接続され、各駅で発生したデータを一定時間おきに授受している。各端末で IC カードを処理すると ID を付与した処理単位のデータ（これを「一件明細データ」と呼ぶ）を生成する。これらの一件明細データは、各端末と駅内 LAN (Local Area Network) で接続された「駅サーバ」によって中継され、中央の「センタサーバ」に集約される。

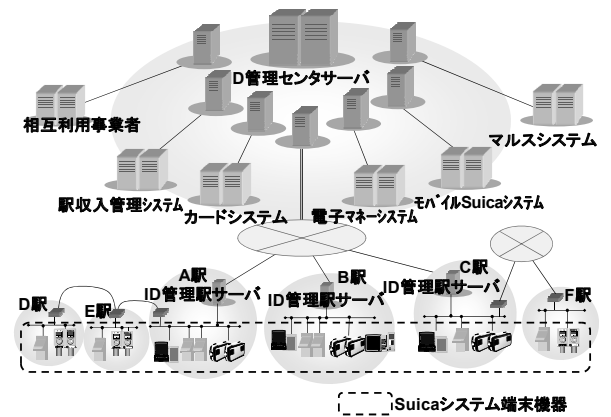


図 1. Suica ID 管理システムおよび関連システムの接続構成

また、「センタサーバ」では、発行された Suica カード全ての利用状態を管理しており、万一の紛失時に、Suica カードの定期情報や残額を保証した再発行サービスを提供したり、不正利用があった場合にはブラックリスト情報を「端末」に配信するなどの役割を担っている。さらに、モバイル Suica システムや電子マネーシステム等の主要システムとも接続し、駅以外で発生した一件明細データも授受することで、Suica システムのサービス拡大に寄与している。

**課題を克服して高性能
高信頼を勝ち取る**

2.3 駅務機器システム

駅務機器システムは、図 2 に示すような端末機器で構成されている。駅には出札業務（乗車券、料金券、入場券などの発行）を行う出札機器と改札業務（乗車券などの検査、取り集め）を行う改札機器がある。出札機器としては POS 端末、マルス端末、自動券売機、多機能券売機、定期券発売機、カード発売機等があり、改札機器としては自動改札機、自動精算機、窓口精算機等がある。これらはさらに乗客が操作する顧客操作型と、駅の係員が操作する係員操作型の 2 種類に分類される。

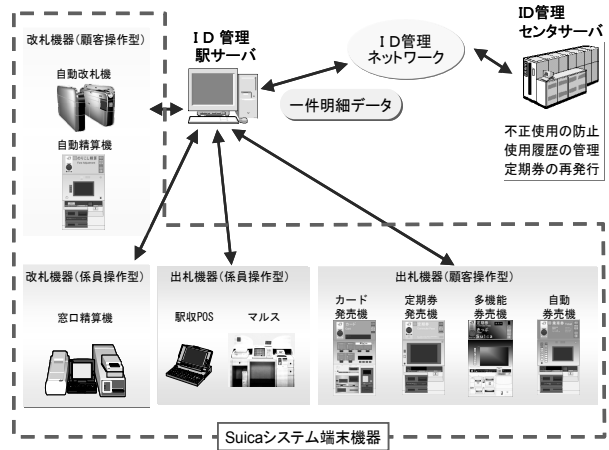


図 2. Suica システムの端末機器

3. Suica システムの課題

3.1 端末の課題

3.1.1 改札機と IC カードの処理内容

Suica システム端末機器の中で特に自動改札機は、日本の鉄道事情の特徴である朝夕のラッシュ時間帯に、絶え間なく通過する乗客の IC カードを連続して処理するスピードが求められる。

乗客が改札機に IC カードをかざして通過する際、IC カードが通信領域に滞在する時間は測定の結果、約 0.2 秒であることが判っている。図 3 に示すように、この滞

在時間の間に改札機では、①存在確認、③相互認証、⑤データ読取、⑦運賃計算、⑧不正乗車チェック、⑨データ書換指示の各処理を行っている。一方、IC カードは、②存在応答、④相互認証、⑥データ出力、⑩データ書換の各処理を行っている。

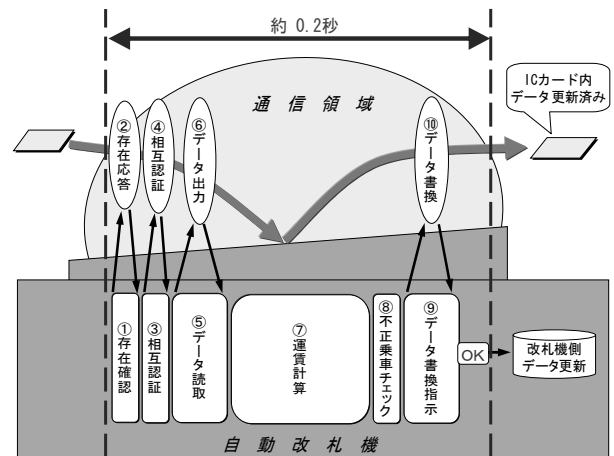


図 3. 改札機通過時の IC カードと改札機の処理

3.1.2 改札機における運賃計算

IC カードは乗車券と定期券の両方の機能を1枚のカードで実現しているため、乗客の利用パターンには、
 ①乗車券のみ利用、②定期券のみ利用、③乗車券+定期券利用、④乗車券+定期券+乗車券利用のパターンがある(図4)。

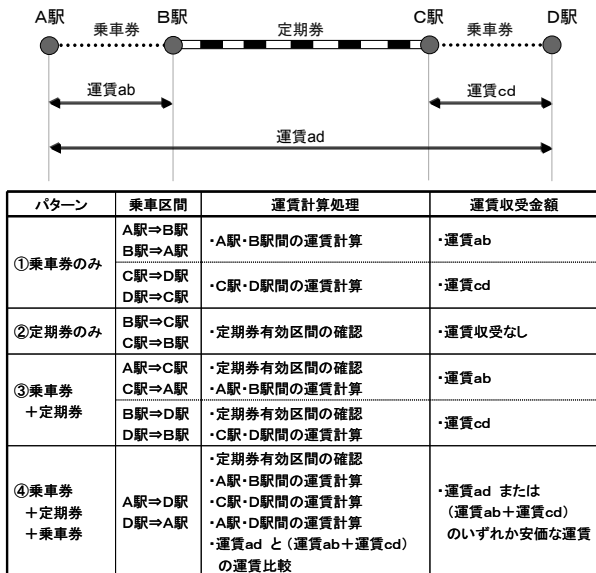


図4. 自動改札機における運賃計算処理

そのなかでも④乗車券+定期券+乗車券利用は、改札機で行う運賃計算処理の内容が多いため、乗客が改札機にICカードをかざしている約0.2秒の間で、改札機とICカードが行う必要のある全ての処理を終えることが出来ない可能性がある。このことから、改札機での運賃計算を高速処理とすることが課題である。

3.2 一件明細データ処理における課題

3.2.1 どうしても発生する処理未了

乗客が自動改札機を通過する際、ICカードのかざし方によってはICカードとR/W間での十分な処理時間が取れず、処理が途中で終わることによる「処理未了」が発生することがある。「処理未了」には2種類あり、ICカード側のデータは更新されているが処理完了の通知が自動改札機側に届いていない「通信未了」(図5の上側)と、ICカード側のデータも更新されていない「書き込み未了」(図5の下側)に分類される。これらは「データ抜け」と呼ばれ非接触方式がゆえの問題であるが、システムの信頼性とサービス低下に関わる重要な問題である。

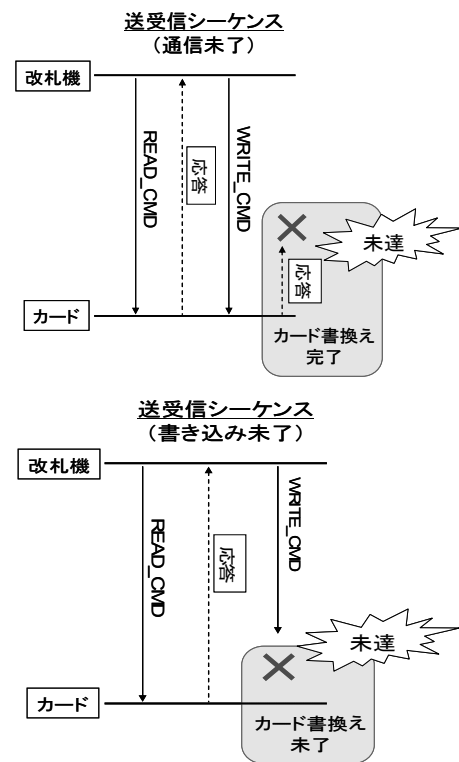


図5. 処理未了の発生例

3.2.2 異常データへの考慮

Suica ID管理システムでは、約15,000台の機器から1日あたり2,000万件以上の一件明細データを受信している。これらのデータの中には、3.2.1で述べた「処理未了」の他に、ごく稀ではあるが、通常の利用形態では発生することがあり得ない信頼性の低いデータが含まれることがある。本稿では、これらのデータを「異常データ」と呼び、「異常データ」を「化けデータ」「欠落データ」「改竄データ」の3種類に分類する(図6)。「化けデータ」とは、端末機器の問題等により日付情報が不正な値に設定されてしまうなど、妥当性を欠いたデータのことを指す。「欠落データ」とは、何らかの要因でデータそのものがセンタサーバに到達せず、抜け落ちてしまっ

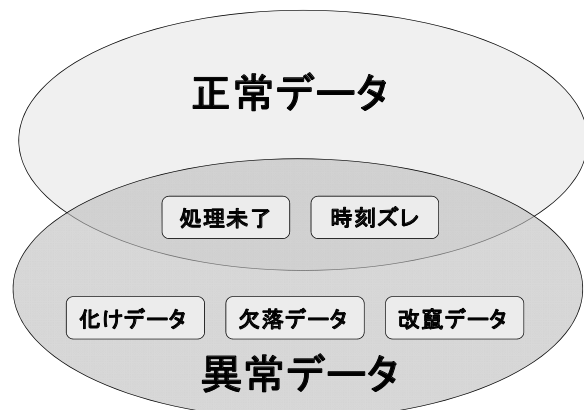


図6. データ分類

たデータを指す。「改竄データ」とは、人為的に偽造されたデータや変造されたデータのことを指す。これらのデータの取り扱いについてもシステムの信頼性を確保する上では無視することが出来ない課題である。

3.2.3 トランザクションの飛躍的增加

駅での業務終了時には、夜間に端末機器の電源を落とす時間があり、センタサーバにとっては、システムのバージョンアップやサーバ点検等でシステムを一時停止することが可能となる重要なメンテナンスの時間帯である。センタサーバでは、この時間帯を利用して端末機器から受信した前日分データから IC カード毎の状態管理の更新や不正チェック処理等を実施し、端末が起動する時刻までに処理結果となる最新のブラックリスト情報などを、駅サーバまで配信し終えなければならない。

2001 年 11 月のサービス開始以来、Suica システムはサービス及び使用可能エリアの拡大に伴い、その利用が急速に拡大していった (図 7)。特に、2007 年 3 月の首都圏 IC カード相互利用サービス開始 (Suica と PASMO の相互利用) では、その件数が飛躍的に増えている。

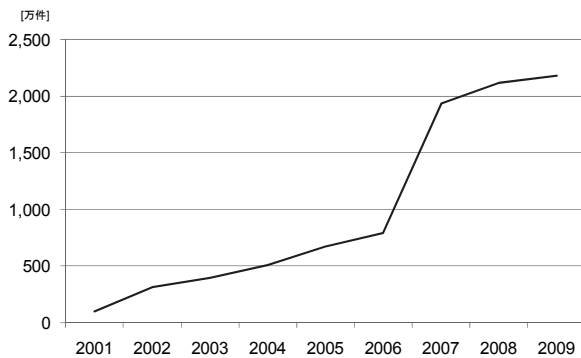


図 7. Suica ID 管理システム取扱データ量

これらの背景から、夜間処理の高速化技術は最重要課題であった。2006 年 1 月に使用開始された 2 代目 Suica ID 管理システムの構築においては、サービスの拡大に加えて、取扱可能なデータ量を 3,000 万件/日に増強させる必要があり、これらの課題に取り組むこととなった。

4. Suica システムのソリューション

4.1 運賃計算の自律分散アルゴリズム

4.1.1 自律連携処理技術

2 点間の最短経路と最短距離を求めるアルゴリズムは、全ての 2 点間の最短路・最短距離を求める方法であるウ

ォーシャル・フロイド法 (Warshall-Floyd 法) と、特定の 2 点間の最短路・最短距離を求めるダイクストラ法 (Dijkstra 法) がある [6][7]。

しかし、図 4 に示したように鉄道 IC 乗車券システムでは、単に 2 点間の最短路・最短距離を求める運賃計算ではなく、乗車した駅から降車した駅までの距離、経路、大人または子供、所持している定期区間の組み合わせによる降車駅での処理をいかに高速処理できるかが重要なポイントである。このため、図 8 に示すように、端末でデータ D1 をシステム Sc で D2 に変換する場合の処理時間を tc とする処理を改札機の運賃計算に適用した場合、必要な処理時間にすべての処理が終わらない場合がある。

**自律分散技術で
高性能を実現する**

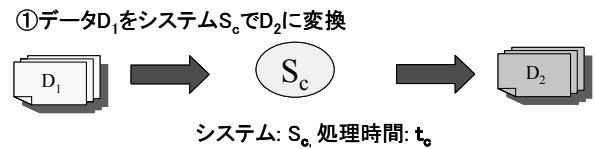


図 8. 通常の処理

このため、改札機における運賃計算の高速処理のための方法として、図 9 に示すように処理を前処理と後処理に分割し、各々の処理結果を自律連携処理し、図 8 の通常の 1 回処理と同様の結果を得る技術を提案した。これを「自律連携処理技術」と呼び、処理のアルゴリズムを「自律分散アルゴリズム」と呼ぶ。トータルの処理時間は tc より少なくなるとは限らないが、個々の端末レベルでの処理間の短縮は可能となる。

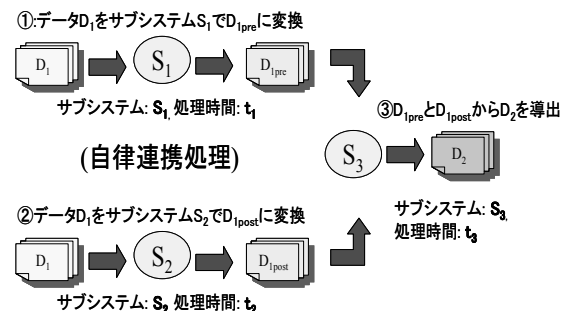


図 9. 自律連携処理技術 (自律分散アルゴリズム)

4.1.2 改札機への適用

改札機での運賃計算を高速に処理するために自律連携処理技術を用いた例を図 10 に示す。

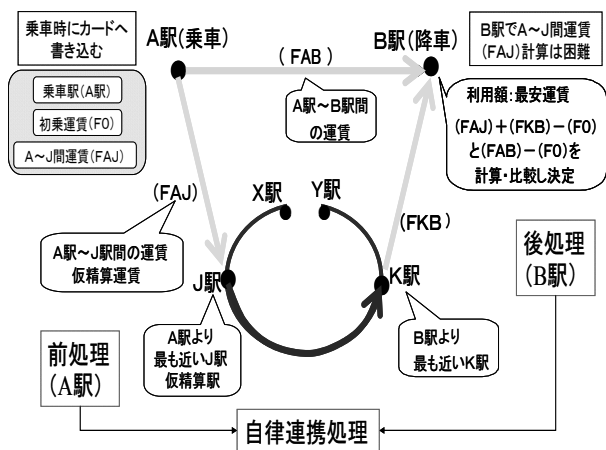


図 10. 運賃計算の自律分散アルゴリズム

図 10 では、A 駅乗車時に A 駅からの運賃が最も安くなる定期区間内の駅 (J 駅) を選択し、A-J 間運賃(FAJ)をカード内に書き込む。そして、B 駅降車時には B 駅からの運賃が最も安くなる定期区間内の駅 (K 駅) を選択する。次に「A-B 間運賃(FAB)」および「A-J 間運賃(FAJ) + B-K 間運賃(FKB)」を比較し、より安価なルートを選択すると共にカード内処理を行う。

このように運賃計算を前処理と後処理に分けて計算し最後に自律連携処理をするため、乗車・降車という個々の処理時間を短縮することができた[8]。

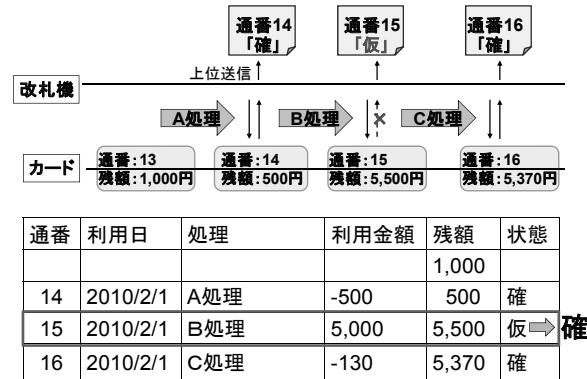
4.2 自律分散整合化技術

3.2.1 で述べた「処理未了」が発生した場合、IC カード内のデータとセンタサーバ側で蓄積しているデータに差異が発生してしまう。この状態が発生すると、IC カードが正当に利用されているにも関わらず、カードを使用不可とってしまう場合がある。この状態を回避し、信頼性の高いシステムを構築する必要がある。ここでは、「処理未了」と総称される「通信未了」と「書き込み未了」について、センタサーバ側での整合化技術を紹介する。

「通信未了」の処理例を図 11 に示す。通番 14 の処理以前に、IC カードには 1,000 円の残額が存在する。通番 15 の B 処理時に、IC カードのかざし方が不十分で端末側の処理が完結することが出来なかった場合には「仮」という目印を付けたデータが作成される。その後、通番 16 の C 処理にて利用額-130 円、残額 5,370 円で正しく送信されたと仮定する。この場合、「仮データ」である通番 15 から「確定データ」である通番 16 への推移が正当と判断することができる。通番 15 の「仮データ」が存在

**異常データの活用が
高信頼に結びつくか
はチューニング次第**

しないと、後続である通番 16 への推移が証明できないという論理のもと、通番 15 の「仮データ」を「確定データ」に更新して正当なデータとして取り扱うことになる。



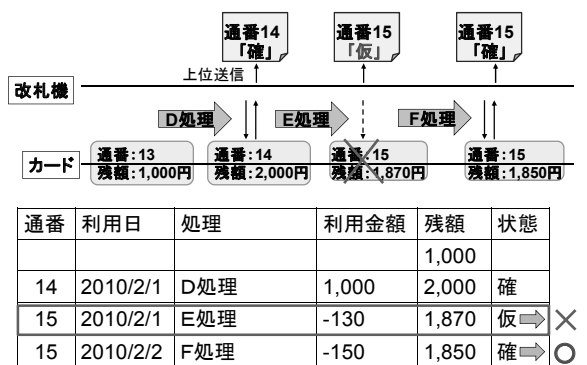
**前後のデータと残額推移が一致
⇒「仮データ」を「確定」に更新する。**

図 11. 通信未了データの判定

次に、「書き込み未了」の処理例を図 12 に示す。通番 15 における E 処理時の「仮データ」が前述の事象により発生したと仮定する。「通信未了」と異なる点は、次の処理である F 処理時に E 処理と同じ通番 15 としてデータが計上されている点である。これは、E 処理の情報が IC カード側に記録できていないと考えられる。例えば、

E 処理が自動改札機の入場処理であった場合、この乗客は、入場記録が無いことで出場時に改札機のゲートが閉まり、係員の窓口対応で出場することとなる。この場合、システムでは F 処理時に作成された通番 15 の「確定

データ」に着目し、通番 14 の D 処理による残額から通番 15 の F 処理「確定データ」の内容にて差し引いた金額と残額の推移が正当であると判断する。従って通番 15 の E 処理は、D 処理・F 処理との整合性が合わないため、



**E処理は前後のデータと残額推移が一致しない
⇒通番「15:F処理」データを採用する。**

図 12. 書き込み未了データの判定

E 処理は処理対象のデータでは無いと判断する。

この2方式によって、「仮データ」の正当性を見極め、IC カード内のデータとセンタサーバ側のデータの整合性を高めている。

4.3 異常データ活用技術

次に3.2.2で述べた「異常データ」について触れる。信頼性を損なうものだから廃棄する、という考えもあるが、あえて「異常データ」を検出し、その発生を運用者に自動通知することで、異常部位の排除に活用し、信頼性を確保する。その一方、端末の時刻ズレなど、一定の条件下であれば、センタサーバ側での補正処理を行うことで、そのデータを「正常データ」として活かし、可能な限りカード状態との一致化を図っているという面もある。「異常データ」の中でも改竄された可能性のあるデータについては、システムの信頼性を揺るがす重大な問題であるため、確実に不正を検知出来る技術を導入している。また、「処理未了」や「時刻ズレ」の他に「欠落データ」を考慮する必要がある。

「欠落データ」の補完処理の例を図13に示す。通番15の処理が欠落した例であるが、このケースでは、通番16のI処理により残額1,870円が「確定データ」として作成されているため、通番15の処理は130円の利用データであることが推測できる。この論理に基づき通番15のデータをシステムで補完（復元）し、収入清算処理などの後方系処理に繋げることで、データの整合性を確保している。

また、ネットワーク障害により一部伝送経路が遮断されたケースなどでは、障害復旧後に利用データが遅着するケースもある。この場合、一定期間内に遅着したデータであれば、正常データとして処理する。但し、遅着データを長期間待ち続けることは、その後の利用データの

通番	利用日	処理	利用金額	残額	状態
				1,000	
14	2010/2/1	G処理	0	1,000	確
		利用	-130	870	
16	2010/2/2	I処理	1,000	1,870	確
15			-130	870	補完

**前後のデータより残額推移が正当
⇒「補完」データを作成する。**

図13. 欠落データの補完処理

正当性チェックを処理保留させてしまうことになり、ICカードの実利用状況とセンタシステムで管理しているカードの最新状態に乖離が発生してしまうため、「遅着を待つ」とことと「諦めて補完データを作成する」とことのチューニングは、システムの信頼性を確保する上で重要な要素となる。Suicaシステムでは今まで、「異常データ」に起因する問題は発生しておらず、4.2, 4.3で述べた技術が信頼性に関する要求を満足していることを裏付けている。

4.4 夜間処理の負荷軽減技術

3.2.3では、夜間処理の時間短縮に関する課題を挙げた。夜間処理の中でもメインとなる不正チェック処理は、取扱データ量の増加がそのまま所要時間増加に影響することとなる。しかし、不正チェック処理を簡略化する高速化は信頼性の維持に重大な影響を及ぼすため選択肢から除外しなければならない。そこで、これまで夜間に一度実行していた不正チェック処理を、日中時間帯にも実施し、夜間に実施する不正チェック処理の負荷軽減を図る方式を採用した。日中時間帯に複数回、その時点までに集められたデータを対象に、不正チェック処理の事前処理を作動させるものである。

しかし、ICカード乗車券システムは自律分散型であるが故に、各階層で蓄積されたデータがセンタサーバに集められる時刻にはばらつきがあり、日中時間帯に実行する不正チェック処理では、一時的に「欠落データ」状態となってしまうことがある。事前処理では、これらを考慮した処理の短縮化を検討し、一日あたりの取扱データ量の98%以上を日中時間帯に処理することを実現させた。その結果、夜間処理の負荷を大幅に軽減させることが可能となり、3.2.3図7に示された飛躍的なデータ増加に対応し、高性能という要求を満足できたのである。

4.5 データ送信契機の差別化技術

センタサーバにおけるデータ集中負荷軽減とICカードとのデータ一致度を確保させるため、駅サーバではデータの緊急性に応じて送信契機を分類している。端末から収集したデータのうち、ICカードの発売情報や再発行情報などは、各駅窓口からの検索に応じる必要があるため、即時にセンタサーバでのカード管理状態を反映する必要がある。逆に、入場・出場などの情報は、不正チェック処理や履歴の印字用には重要ではあるが、一定時間単位で処理を行えば提供サービスや信頼性を損なうもの

**さまざまな技術の結集
が成功への道筋となる**

では無い。この2種の性質を持つデータは、駅サーバで処理内容を判別し「リアル収集」と「バッチ収集」に振り分けを行っている。この技術の導入により、センタサーバでは、乗客への適切なサービス提供を実現している(図14)。

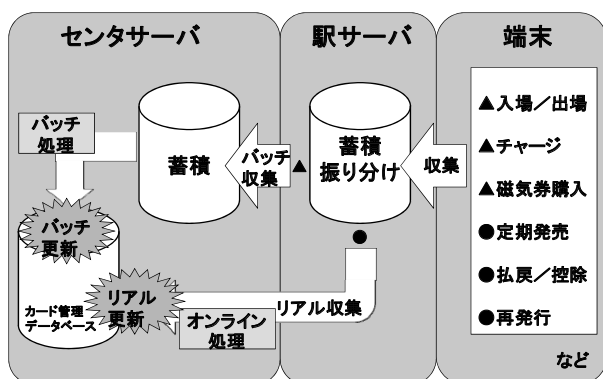


図14. 振り分け概念図

5. 他事業者との相互利用

JR 東日本では相互利用の拡大を重要な事業戦略に位置付けている。JR 東日本の「Suica」は、西日本旅客鉄道が発行するICカード「ICOCA」との相互利用を2004年に開始し、以降、関東公民鉄各社の「PASMO」、東海旅客鉄道の「TOICA」、北海道旅客鉄道の「Kitaca」、九州旅客鉄道の「SUGOCA」、西日本鉄道の「nimoca」、福岡市交通局の「はやかけん」との相互利用を実現した。他事業者でSuicaカードが利用された情報、またSuicaエリアで他事業者のカードが利用された情報は、事業者間で清算処理を実施する必要があり、確実なデータの授受が求められる。これらは、相互利用を行う各事業者が、同一のインタフェースを実装する「接続サーバ」を配置することで実現され、相互利用の拡大を推し進めている。

「接続サーバ」は、他事業者との中継機能を分割する「自律分散型」の思考が採用されている。例えば自社のセンタシステムに障害が発生していたとしても、「接続サーバ」が他事業者から受信したデータを蓄積しておくことができる。また、「異常データ」の検出や送受信データの正当性チェックを行うことで、ICカード相互利用全体としての信頼性を確保している。

さらに「自律分散型」により、システム設計側のメリットもある。JR 東日本では年々相互利用先を拡大するとともに、Suicaサービスも拡充しており、同時並行的にシステム改修を実施している。これらを実現出来ているのも、「接続サーバ」が、各事業者で異なるデータ規格を自社規格に変換する役割を担うことで、センタサーバへの影響を最小限としているためである。

6. おわりに

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には、高密度輸送におけるピーク時の乗降客に対応する高性能と、金券に相当する乗車券を取り扱うための高信頼性が求められる。

本稿では、Suicaシステムの概要を示した上で、その課題を端末とシステムの観点から述べた。そして、それらの課題を解決するために考案した自律分散技術と、自律分散型アーキテクチャによって実現した他社との相互利用を紹介した。自律分散技術はJR 東日本のSuicaシステムに導入され、その有効性が確認されている。また、自律分散型アーキテクチャはSuicaと他社カードとの相互利用拡大に貢献している。高性能・高信頼性を目的に設計した思考が、結果としてサービス拡充による更なる顧客サービスを実現することに繋がっている。

参考文献

- 1) K. Mori, "Autonomous Decentralized System Concept, Data Field Architecture and Future Trends," Intl. Symposium on Autonomous Decentralized Systems, pp.23-34, Kawasaki, Japan, April 1993.
- 2) K. Mori, H. Ihara, Y. Suzuki, K. Kawano, M. Koizumi, M. Orimo, K. Nakai, and H. Nakanishi, "Autonomous Decentralized System Software Structure and Its Application," IEEE Fall Joint Computer Conf., pp.1056-1063, Dallas, US, Nov. 1986.
- 3) 森欣司, "自律分散システム [I-VI]," 電子情報通信学会誌, 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, Jun.-Oct. 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)," 電気学会誌, vol.121, no.2, pp.100-118, no.3, pp.177-189, Feb., Mar. 2001.
- 5) 椎橋章夫, "有線・無線統合型自律分散ICカード乗車券システムにおける高速処理・高信頼性技術の研究," 電子情報通信学会論文誌, vol.J89-D, no.8, Aug. 2006.
- 6) 佐藤史隆他, 最短経路問題におけるアルゴリズム【ウォーシャル・フロイド法】の調査, ISDL report No.20040416001.
- 7) 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.
- 8) S. Miki, T. Takai, and K. Nakamura, "Contactless smart card AFC trials in East Japan Railway Co.," World Congress on Railway Research, Tokyo, Japan, Oct. 1999.

初瀬 雄一 (非会員)

E-mail: hatsuse@inet.jeis.co.jp

1994年(株)ジェイアール東日本情報システム入社.
新幹線運行管理システム(COSMOS)の開発に従事.

2003年より Suica ID 管理システムの開発・運営に従事. 現在に至る.

真野 明子 (非会員)

E-mail: akiko@inet.jeis.co.jp

1999年(株)ジェイアール東日本情報システム入社.

Suica 初期導入時から Suica ID 管理システムの開発・運営に従事. 現在に至る.

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: 串間 和彦(NTT ドコモ)