輸送におけるシミュレーション技術

Simulation Technology in Transportation System

輸送システムの目的は、速く確実に人あるいは物を移動させることにある。輸送システムでは運搬される対象や手段には多くのバリエーションがあり、また関与者が多くその評価も多様なことから、最適なシステムの実現には、定量的で総合的な評価が行なえるシミュレーションをはじめとしたシステム技術が必要である。特に移動する運搬手段の特性を問題とする際には、シミュレーション技術は不可欠なものとなる。

本稿では, 軌道輸送システムを中心とした, 輸送システムの特徴とシミュレーションに要求される機能について述べる。

今後とも,輸送システムの高機能化・高効率化・省資源化は強く要望されており, より良い,新しいシステムの実現にシミュレーション技術の果たす役割は大きい。 宮本 捷二* 井原 廣一* 大島 弘安** 刈谷志津郎*** 武井 謙二****

Shôji Miyamoto
Hirokazu Ihara
Hiroyasu Ôshima
Shizuo Kariya
Kenji Takei

Ⅱ 緒 言

交通などの輸送システムは, 社会システムとして公共性が 重視されることと, 地域的に広く分散した対象を制御しなけ ればならないことから、コストパーフォーマンスを最適とす るシステムを実現するには、計画設計時に定量的で総合的な 評価を行なうことが不可欠である。すなわち、最近は特に輸 送システムはその規模が大きくなり、省資源で環境保全を行 ないながら、高機能・高性能化が追求されると同時に、これ まで運営経験をもっていなかった公共体などが、新しい交通 システムを開発したり多数の関与の評価を満足させなければ, システムの建設が認められなくなってきているなど, 従来の ような経験に基づくノウハウの積み重ねだけでは、最適な輸 送システムの実現ができなくなってきている。そこで、これ を解決する手段として、シミュレーションをはじめとするシ ステム技術が利用されており1)、特に、インタラクチブに各 種条件を変更設定しながら実行できるシミュレータが有効な 手段として活用されている。

本稿では、軌道輸送システムを中心として、輸送システムでのシミュレーション技術の利用について概括する。なお、ここでは、物理的な実物モデルでのシミュレーションではなく、コンピュータシミュレーションについて述べる。

2 輸送システムの評価とシミュレーション

輸送システムをその目的と形態で分類してみると、図1に示すように人間を運ぶ手段と物を運ぶ手段に分けることができる。両方のシステムともコストを低くして、なおパーフォーマンスを高くしようとする要求は共通しているが、目的により、例えば交通システムでは人を運ぶということから安全性がいちばん重要なのに対して、物流システムでは効率が重視されるというように評価が異なるし、関与する評価者によっても評価基準が変わってくる。図2に交通、流通を中心とした輸送システムでの各関与者ごとの主要な評価項目を示したが、このように複雑な対象に対して、多くの評価を行なって最適なシステムとするには、過去の経験と勘だけに頼っていたのではだめで、どうしても、定量的な検討を解析モデルやシミュレーションを用いて行なうことが必要である。

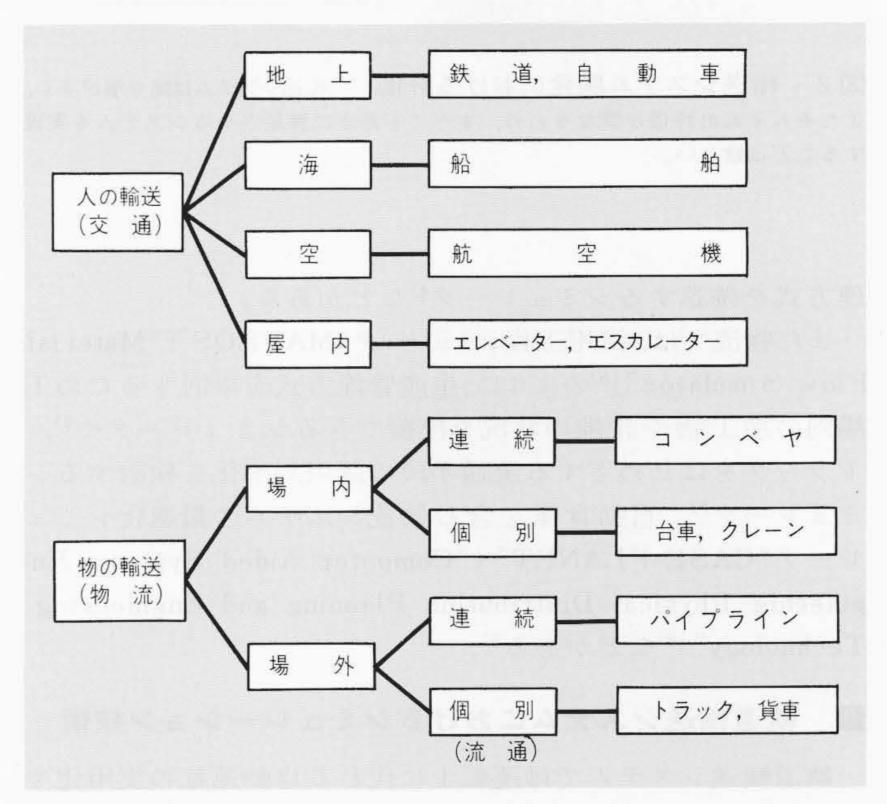


図 I 輸送システム 輸送システムは、大きく人の輸送と物の輸送の二つに分けて考えることができる。

さて、シミュレーションによってシステムの検討を行なおうとする場合には、対象をきちんと把握し、その特徴をとらえたモデル化が必要である。

そこで輸送システムの特徴と必要なシミュレーション機能をあげてみると図3のようにまとめられる。すなわち、運搬される物と運搬する手段をもった輸送システムのシミュレーションでは、運搬手段の運動を正確に模擬すると同時に、運搬される対象の状態の変化や、多くの運搬手段や対象の相互関係を明らかにすることが重要である。

輸送で活用されているシミュレーションシステムとして, 交通では,軌道輸送システムの最適設計を可能とするシミュ レータ²⁾,道路交通で最短時間の経路を求めるシミュレータ³⁾, 乗客の待ちをできるだけ少なくするエレベーター群の運行管

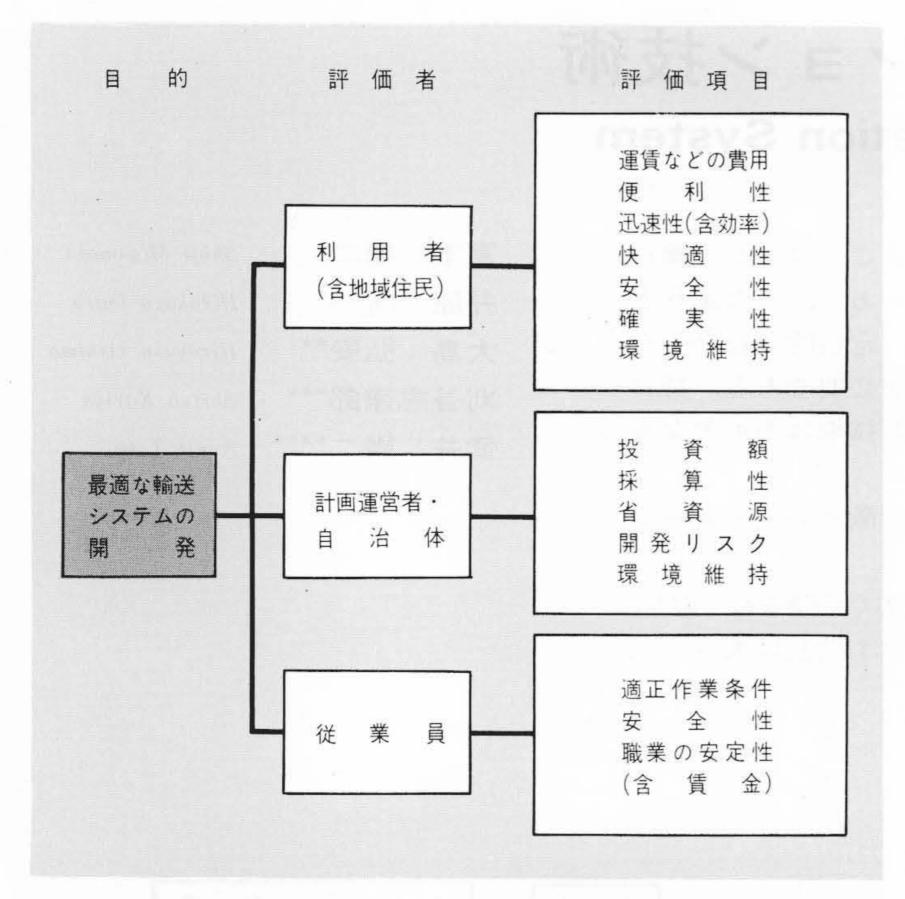


図 2 輸送システム開発における評価 輸送システムは関与者が多く, またそれぞれの評価が異なるため、すべてを完全に満足させるシステムを実現 することは難しい。

理方式を確認するシミュレータ4)などがある。

また物流では、汎用工程シミュレータ"MAFLOS"("Material Flow Simulator") $^{5)}$ のように、生産管理方式を検討するため工場内の加工物や設備の状況を模擬できるシミュレータや $^{6)}$ 、トラックをはじめとする流通手段の運用効率化を検討するシミュレータ $^{7)}$ 、自動倉庫を含む物流システムの最適化シミュレータ"CASE-PLANET" ("Computer Aided Systems Engineenig-Physical Distribution Planning and Engineering Technology") $^{8)}$ などがある $^{9)}$ 。

圏 軌道輸送システムにおけるシミュレーション技術

軌道輸送システムでは運転士に代わる自動運転の実用化や新交通システムの実現など、新しい技術を取り入れたシステム開発が着実に進められている^{10),11)}。ここでは、計画設計段階と試験運用段階に分け、シミュレーション技術の適用について述べる。

3.1 計画設計段階でのシミュレーション

軌道輸送システムの計画設計は**図4**に示すように地域特性の制約のもとで、利用者、住民、計画運営者など多くの評価者が満足するシステムを決定するもので、都市計画に近いところから具体的な機器仕様決定まで非常に幅広いが、その手順をマクロに見ると、

- (1) 都市計画に基づき、予測される交通需要から、多くの関与者の利害を均衡させる新システムを選択する都市交通計画のレベル。
- (2) 選択された新システムについて、コストパーフォーマンスを最適とするような車両運行条件、各種設備規模など、システムの基本仕様を決定する軌道システム計画のレベル。
- (3) 基本仕様に沿って要求性能を満足するような電動機容量,制御パラメータなど、機器の詳細仕様を決定する運転制御システム設計のレベル。

の3段階に分けられる。

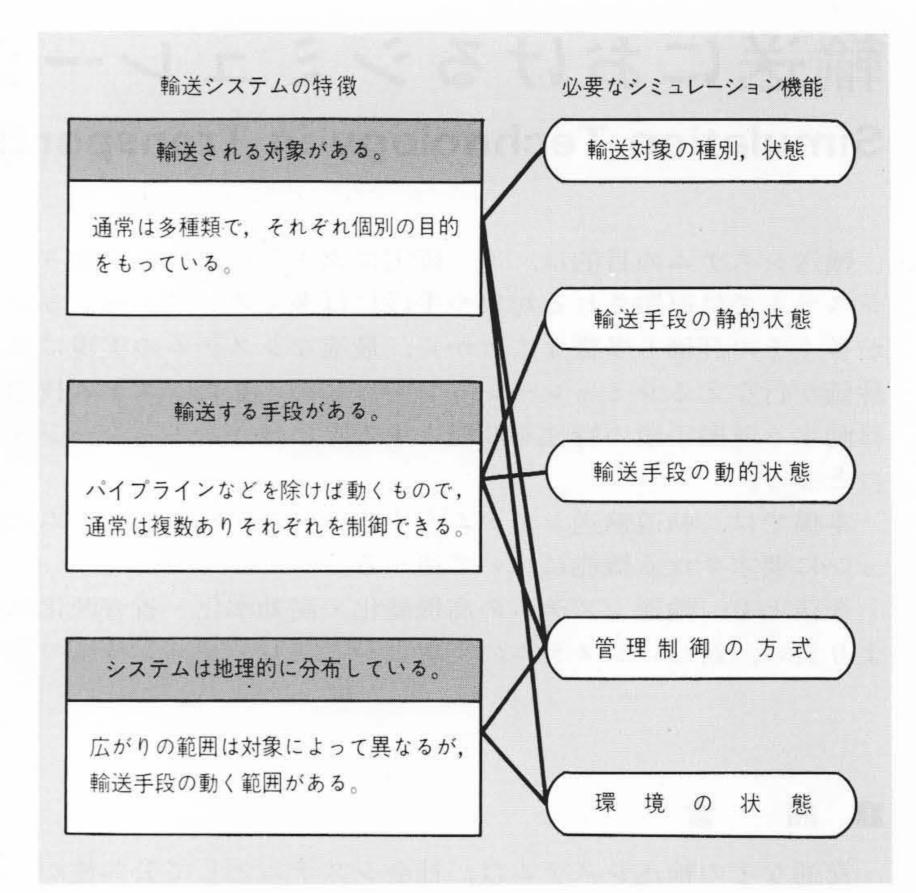


図3 輸送システムの特徴とシミュレーション機能 輸送システムのシミュレーションでは、輸送させる対象と輸送する手段のダイナミックな状態の変化を、正確に模擬することが必要である。

この計画設計に当たっては、それぞれの段階でシミュレーション技術をはじめとするシステム技法を利用しなければ最適システムの決定ができないが、特にシミュレーション技術が有効であるのは上記(3)の具体仕様決定の段階である。

海外でのシミュレーション技術を利用した研究として,最適な交通手段の選択¹²⁾,コストを最小化する車両諸元の決定¹³⁾,省エネルギー化を目指した列車走行方式の検討¹⁴⁾など,幾つかのものはあるが,いずれもまだ研究レベルの段階で,実際のシステム開発に活用されているところまでには至っていないようであり,軌道輸送システムの開発に関しては,日本が一歩進んでいると見てよいと考える。

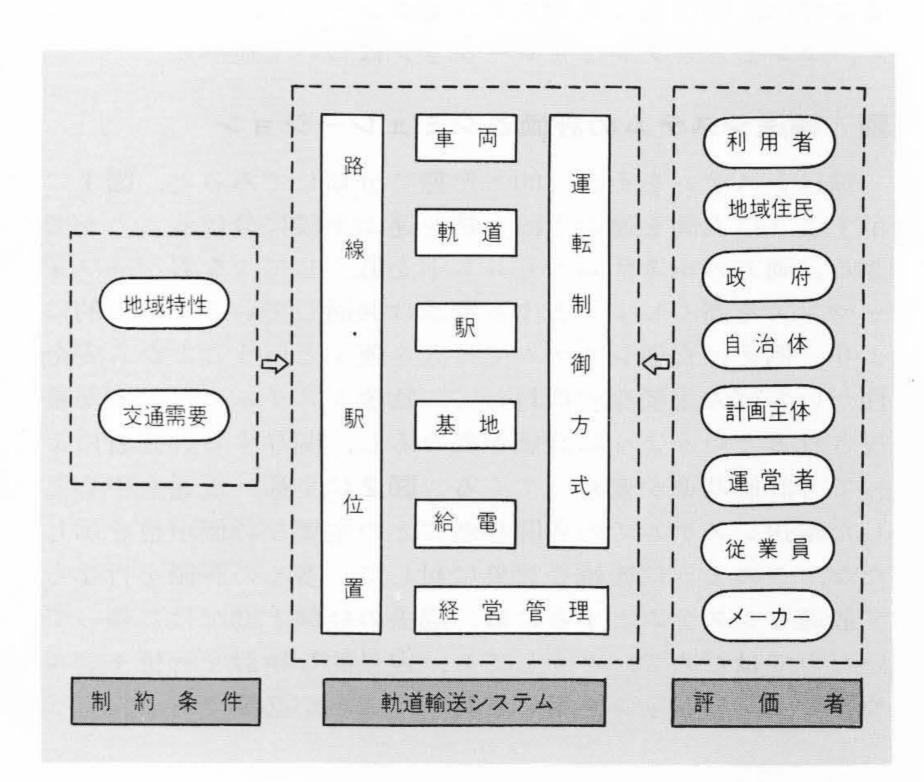


図 4 軌道輸送システムの計画と設計 地域特性,交通需要などの制 約条件のもとで,多くの評価者が満足するシステムの設計を行なう。

日立製作所では、制御器、電動機、車体、電力系といった個別の設計をサポートするシステムに加え^{15),16)}、軌道システムの計画設計を総合的・定量的にサポートするツールとして、TRANSPLAN(Transit Planning System)を開発している¹⁷⁾。TRANSPLANは、先の計画設計の3段階に対応させた"HOPPS"("Hierarchy Organization System for Urban Transportation Planning and Predict Strategies")、"STEPS"("Synthetic Transit Systems Evaluation and Planning System")、"JUMPS"("Justified Models for Practical Specification")の3サブシステムから成る。ここでは、軌道システム全体のシミュレーションによって、運転制御システム設計レベルをサポートするJUMPSについて述べる。

3.2 運転制御システム設計サポートシステム"JUMPS"

軌道輸送システムを制御の観点から見ると、その機能と主要な評価指標は図5に示すようにまとめられるが、各機能ともその高度化は急速に進められている¹⁸⁾。詳細設計のレベルでは設計変数が数百と多く、また、評価項目の関係が複雑であることから、図6に示すように車両、制御器、信号通信、変電所など軌道輸送システム全体を総合的に模擬できるダイナミックスシミュレータとしてJUMPSを開発したわけである。JUMPSの開発に当たり、具体的な設計への活用ということで要求されたことは、

- (1) 設計の段階によって、マクロなものからミクロなものまでと評価のために得たい情報のレベルとが異なるため、必要に応じたシミュレーションが行なえること。
- (2) 特定の対象だけでなく、すべての対象のシミュレーションができること。
- (3) シミュレーション結果が評価しやすいこと。
- (4) 設計作業の特徴である試行錯誤が容易にできること。 であった。

JUMPSは、この4項目に対応させた次に述べる特徴をもたせることによって、要求を満足するシステムとした。

- (1) シミュレーションモデルを、関数形に定式化した階層的モデルとして構成し、目的に応じたモデル化を可能とした。
- (2) 対象によって異なる部分をデータ化し、プロシジャ部をモジュール化することによって、プログラムを汎用化した。

サブシステム	設 計 項 目	標価指標
列 制 御	自動運転方式 (CSC:定速運転制御, TASC:駅停止制御)	運転制御特性
車車両	電動機性能ブレーキ性能	
信 号	信号方式 閉塞割り	表定速度
運 行	運転整理方式配車計画方式	運転時隔
軌 道	端 末 駅 形 態 基 地 形 態	
電力	変電所容量・配置	消費電力量

図 5 軌道輸送システムの機能と評価指標 軌道輸送システムは, 安全かつ乗り心地よく,速く大量に輸送でき,しかも省エネルギーであること が必要である。

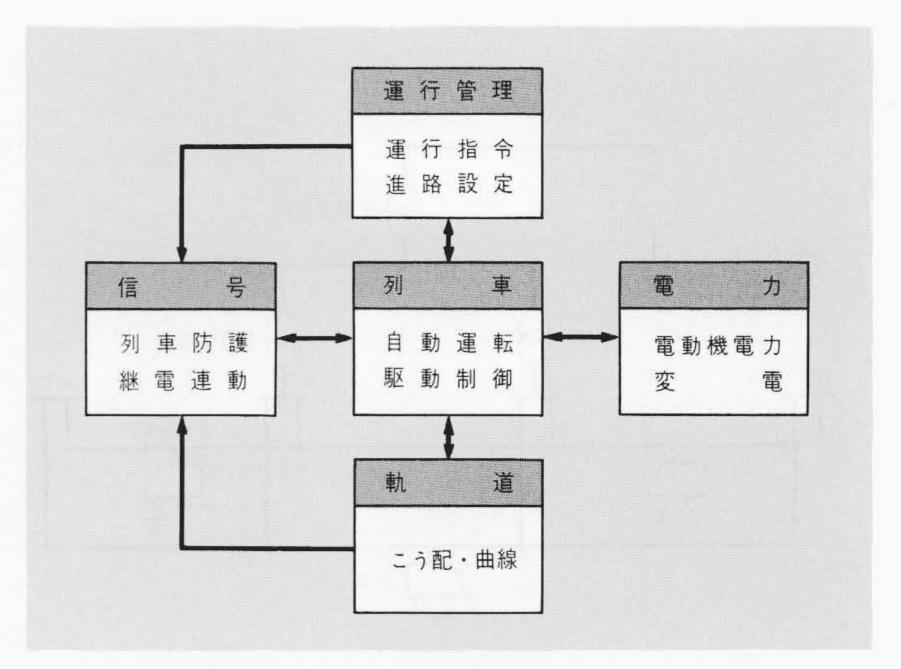


図 6 JUMPSのモデル 軌道システム全体を、シミュレーションできるようにモデル化してある。

例えば、図7(a)に示す電力系システムでは¹⁹⁾、路線形状、列車の移動、入出庫によって回路の構造が変化する。JUMPSでは変電所、タイポスト、列車をノード、配電系統枝、架線枝をアークとした同図(b)のような回路網に基づいて次式の節点方程式を解くことにより、各節点の電圧・電流、力率などを求める。

$AGA^T V_n = J_n$

ここで A:接続行列、G:アドミッタンス行列

Vn:電圧ベクトル, Jn:電流ベクトル

すなわち、定義された変電所などの固定データに、時々刻々 変化する列車データを加え、A、Gを自動的に求めて方程式 とし解析できるようにした。

また,すべての定義データは図8に示すようなFIF(Fill in the Form)形式で設計者が記入すればよいようにし,入力の簡易化を図っている。

- (3) シミュレーション結果を、製図機及びディスプレイにグラフィカルに出力することによって、結果の評価を容易にした。
- (4) キーボードによって、シミュレーション条件を変更設定すれば、シミュレーション結果がすぐにカラーディスプレイで確認できる会話形式のシステムとした。また、音響カップラによるポータブル端末を用いれば、公衆回線によって遠隔地でのシミュレーション確認もできる。

以上述べたように、JUMPSは図9に示すように路線条件、 車体条件など軌道輸送システム基本仕様をデータベースとし て、要求性能を実現するために求めようとする電動機特性、 信号条件、制御パラメータなど変数の値を入力し、システム 評価のための運転曲線、路線ー時間曲線、電力負荷曲線、エ ネルギーフローなどを求めるシステムである。

このJUMPSによって、従来多くの人手と時間をかけていた設計作業の効率と質を大きく向上させることができたとともに、実際の車両による機能・性能の試験を事前に済ませてしまうことができるため、システムの開発期間を大幅に短縮することができるようになった。JUMPSはこれまでに札幌市、福岡市、京都市などの地下鉄や北九州市モノレール、大阪市南港新交通といった具体システムの設計に活用されている。また、従来にない新しい管理・制御方式の検討が自由にできることも大きな効果であり、例えば、Fuzzy制御による自動運転方式や200、列車遅延ポテンシャル最少化を図るバラ

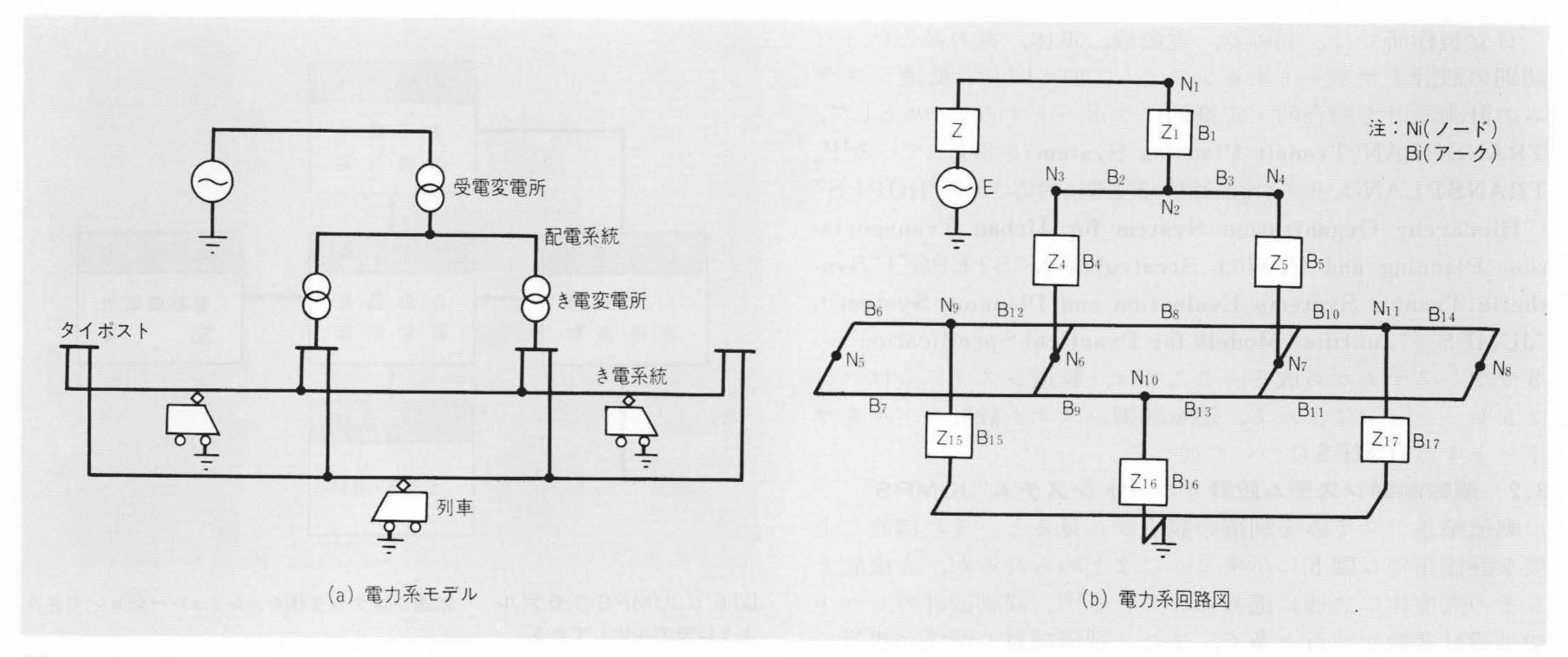


図 7 電力系のモデル化 JUMPSでは、電力系を時々刻々(b)図のようにノードとアークでモデル化し、回路網の解析を行なっている。

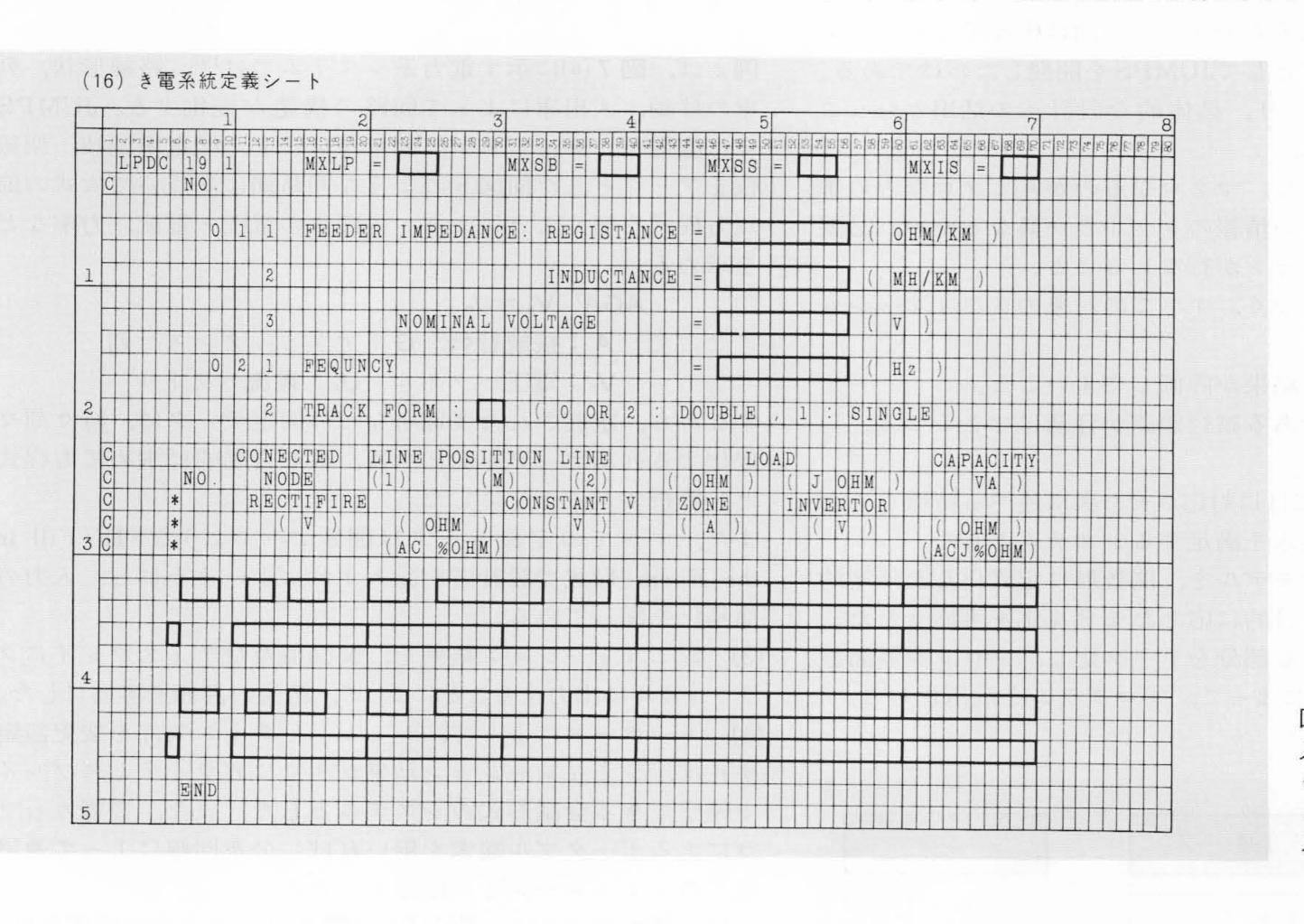


図 8 データのFIF形式 入力例 設計者はデータ シートあるいは端末で、指定 されたブランクにデータを記 入してゆけばよい。

ンシングダイヤ運行管理方式²¹⁾も本シミュレータによってその有効性を確認した後、実用化へのステップを進んでいる。

3.3 試験運用段階でのシミュレーション

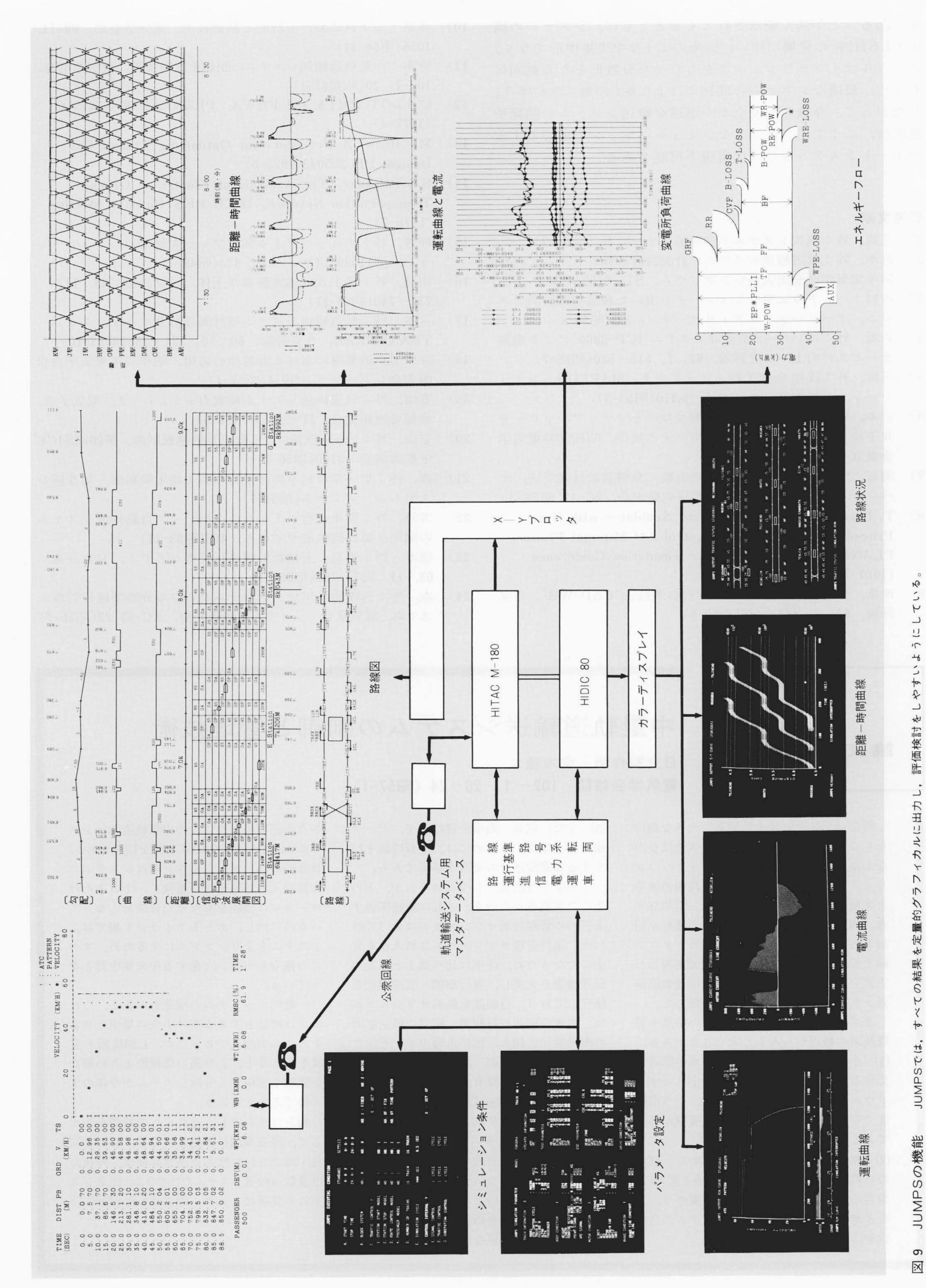
決定された仕様に基づいて製作したハードウェア・ソフトウェアは、実際の運用に入るまでにあらゆる条件での試験を行ない、所定の機能と性能を達成しているか、どうかを確認することが必要である。

特に運行管理システムは、信号機、軌道回路、転てつ器、 進路鎖錠など全路線に分散した設備の制御を、各設備からの 入力情報に基づいて行なっていることから、製作したハード ウェア・ソフトウェアの確認には、実際の設備の状態変化を 模擬的に作り出すものが必要である。この役割を果たすもの として、TTS(Train Traffic Simulator)がある²²⁾。TTSは 工場内での試験はもちろん、プログラムチェックのために実 際の列車を運行させることができないことから、現地試験で も非常に有効である。例えば、新幹線の運行管理システム "COMTRAC" (Computer Aided Traffic Control System) では、3台のコンピュータから成る進路制御系の1台に、TTS プログラムを組み込んでおり、列車運行の各種状況が設定できるようになっている。したがって、システムのデバッグや 異常時のシミュレーションテストを能率良く実施できることはもちろん、路線構成や機能の変更・改良にも信頼度高く対処できる²³⁾。

4 結 言

軌道輸送システムを中心として,輸送でのシミュレーション技術の特徴を述べたが,ここで述べたシステムは,いずれも具体的な対象の計画・設計及び運用に有効な手段として役立っている。

輸送システムはますます高性能・高効率で、しかも省資源



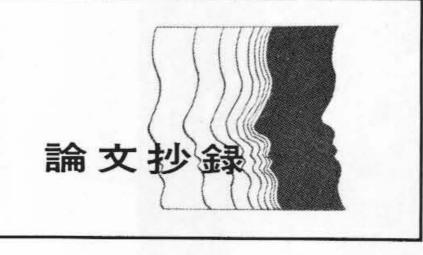
JUMPSの機能

化を図ることが強く要求されてくるとともに、システムの構成もLSI技術の発展に伴い、従来のような中央集中形でなく、ローカルにインテリジェンスをもたせた分散形となる動向にあり²⁴⁾、最適なシステムの開発にはより多くの難しさが伴う。したがって、今後とも安全かつ迅速な輸送システムの開発や運用は、ここで述べたようなシミュレーションを中心とするサポートシステムなしには実現不可能である。

参考文献

- 1) 三浦,外:現代システム工学概論,オーム社(昭52-2)
- 2) 宮本,外:軌道輸送システムの計画設計評価システム,昭和 54年電気学会全国大会シンポジウム,S14-6(昭54-4)
- 3) 古村:ハードウェアシミュレータを用いた最適経路計画システム,オペレーションズ・リサーチ,p.235(昭55-4)
- 4) 岩坂,外:エレベータ群管理システム"ICP-3800"による乗客 サービスの向上,日立評論,62,7,515~520(昭55-7)
- 5) 三留,外:汎用生産工程シミュレータ MAFLOS,シミュレーション技術II,コロナ社,p.110(昭53-3)
- 6) 岩本,外:物流システムの制御フローとマテリアルフローを 非手続言語で記述するシミュレータの試作,昭和56年電気学 会東京支部大会(昭56-10)
- 7) 明石:区域トラック輸送の車両台数,乗務員数計画手法,オペレーションズリサーチ学会春季研究発表会,2C-12(昭56-3)
- 8) T. Iwamoto, et al.: A Discrete Simulator with Non-Procedural Language for Control and Material Flows; PLANET, Summer Computer Simulation Conference (1981-7)
- 9) 西条,外:自動倉庫システム設計計画技法"CAD-WH",日立 評論,62,6,443~446(昭55-6)

- 10) 井原:地下鉄における計画と制御技術,電気学会誌,99-11,1056(昭54-11)
- 11) 宮本:中量軌道輸送システムの制御と管理技術,電気学会誌, 102-1,20(昭和57-1)
- 12) U.S.DOT/UMTA and FHWA, PLANPAC/BACKPAC (1977-4)
- 13) M.F.Huss: A Procedure for Optimizing Transit Car Design, PB-255048(1975-5)
- 14) S.N.Talukdar: The Analysis of Electrified Ground Transportation Network, IEEE PES Summer Meeting (1976-7)
- 15) 坪井,外:チョッパによる回生ブレーキ制御のシミュレーション,第11回鉄道サイバネ,424(昭49-11)
- 16) 中島,外:浮上式鉄道実験線浮上体,日立評論,**63**,11,737~740(昭56-11)
- 17) 宮本,外:軌道輸送システム用計画設計サポートシステム TRANSPLAN,日立評論,60,10,751~756(昭53-10)
- 18) 井原:鉄道業務における計算機の応用,昭和57年電気学会全 国大会シンポジウムS9-4(昭57-4)
- 19) 安信,外:軌道輸送システム用電力シミュレータ,電気学会, 情報処理研究会,IP-79-55(昭54-9)
- 20) 安信,外:Fuzzy理論による列車自動運転制御,第20回SICE 学術講演会,3105(昭56-7)
- 21) 森,外:単一車種列車群の走行制御と端末駅制御,第5回システムシンポジウム(昭54-7)
- 22) 雪浦,外:列車走行シミュレータ用データ自動作成システム の開発,第15回鉄道サイバネ,403(昭53-11)
- 23) 榎本,外:東北・上越新幹線運行管理システム,日立評論, 63,11,757~762(昭56-11)
- 24) 森,外:自律的な駅サブシステムからなる分散型運行管理システム,電気学会 システム制御研究会,SC-81-22(昭56-7)



中量軌道輸送システムの制御と管理技術

日立製作所 宮本捷二 電気学会雑誌 102-1,20~24 (昭57-1)

新交通システムは十数年前に大きな期待をもって議論されたが、その具体化はなかなか進まなかった。しかし、マイクロコンピュータの出現をはじめとする技術の進歩と実用化への着実な努力が実り、昭和56年春、神戸市と大阪市で相次ぎ営業運転が開始された。本稿では大阪市のポートタウン線と神戸市ポートアイランド線で実現した方式を比較することによって、中量軌道輸送システムの管理制御技術を概括した。

まず、中量軌道輸送システムの特徴を管理制御の観点からみると次の3点がある。

- (1) 小形ゴムタイヤ車両が、従来の鉄道に比べると急こう配で曲率半径の小さいガイドウエイ上を走行することから、より高精度で安定な自動運転制御方式の実現が必要である。
- (2) 無人運行を前提とすることから、従来の自動運転機能を更に高度化すると同時に、 乗客の安全・サービス機能を充実させ、また基地管理・検査など支援システムの自動化が必要である。

(3) 少ない定員の列車を運行して、ピーク 輸送力を確保するためには、運転時隔を短 くする高密度運行の実現が必要である。

このような特徴をもつシステムが、どのように実現されたかを、運転に直接関係する三つの管理制御サブシステムに分けて述べた。運行管理サブシステムは無人化を安全に行なうため、従来に比べ地上と車上の伝送機能を充実し、運行制御・監視機能を強化しており、自動運転制御サブシステムは、従来の駅間走行制御、駅定点停止制御の高精度化に加え、駅停止時のインチング制御、ドア開閉制御、出発制御、前後切換制御機能をもつ。なお、駅での停止精度は両システムとも±30cm以内を達成している。保安制御サブシステムは従来と同じ固定閉そくATC方式である。

以上の管理制御方式の解説に加え、結論 として設計思想について述べた。すなわち、 軌道輸送システムのように大規模複雑な社 会システムでは、その設計思想はシステム の使命を制する重要なポイントである。そ の点今回実現した二つの中量軌道輸送システムは設計の考え方に基本的な相違がある。 具体的には、ポートタウン線はシステムの信頼性・応答性をより重視し、できるだけローカルに機能をもたせた分散形となっているのに対し、ポートアイランド線では、システムをよりシンプルにするため、すべての指令を中央から発する中央集中形となっている。

一般的にシステムの構造をみると、これまでは機能をできるだけ中央に集中させるシステムが主流であったが、LSI技術の発展を考えると、より高い信頼性ときめ細かい制御を実現する分散システムが今後のすう勢であると考える。

両システムとも、それぞれの特徴を生かして、現在順調に稼動しており、ここで開発・確立された技術と運営経験は、今後、中量軌道輸送システムだけでなく、従来システムの発展にも大きく役立つものと信ずる。