

# 鉄道における高速・高密度運転システム

## High Speed and High Density Train Operation in Railway Systems

大都市圏鉄道では、国内外ともに鉄道の高速化・高密度化の要請が強い。一般には高速化と高密度化は相反する関係にあるが、新技術の導入によって可能な限りの同時達成が現在要請されている。

ここでは、世界の高速・高密度運転の現状について述べ、国内の事情にあった高密度運転方式であるATD方式(Automatic Train Deceleration System)を提案し、次いで現在の鉄道から次世代システムまでの輸送能力を4段階に区分・定量化し、日立製作所が指向する次世代システム概念を明確化した。

また、次世代鉄道システムの実現のために必要な技術課題を整理し、システムインテグレーションのツールとしての鉄道システム用総合シミュレータにより、運転支援システムの省エネルギー効果が大きいことを示した。

高岡 征\* *Tadashi Takaoka*  
 能見 誠\*\* *Makoto Noumi*  
 川島治仁\*\* *Haruhito Kawashima*  
 田代維史\*\*\* *Korefumi Tashiro*

### 1 緒 言

大都市圏を中心に鉄道の輸送力は限界に達しており、輸送力増強の具体策が早急に必要とされている。従来は列車編成両数の増加などによって対応できたが、10両程度の長大編成が多くなった現在では、プラットホームの延伸もほぼ限界に達し、これ以上の編成両数の増加は困難であり、列車本数の増加によって輸送力の増大を図ることが要請されている。

しかし、列車本数を増加させるには信号系だけでなく車両性能や列車の運転制御、駅停車時間の短縮など総合的な検討が必要となる。当面の課題としては、最小限の設備の付加により、輸送力増強に対応しながら、将来の高機能システムにも移行しやすい高密度輸送システムを確立し実現することが求められる。

21世紀にはより豊かな生活への志向が強まる一方、東京などの大都市圏への人口の集中がさらに強まるものと推定される。このため、輸送人員×輸送距離(単位：人・km)で表される旅客輸送量は増加するが、自動車や航空機との競争が激しく、鉄道の輸送分担量はこのままでは相対的に減少することが懸念される。

安全、正確、環境保全という鉄道の特質を生かしながら、さらにその機能性や経済性を高めて鉄道が与えられた役割を果たし続けるためには、最新の技術を駆使しゆとりあるライフスタイルを求めている人々のニーズにこたえられる鉄道に変革させていく必要がある。

統計によれば、自動車と鉄道について地方の主要都市間ごとの数十の区間について自動車、鉄道の所要時間と輸送の分担率は、所要時間が同一の区間の場合には約65%の人が自動車を選ぶという結果が得られている。鉄道が自動車と対等(50%)の分担率になるのは、鉄道の所要時分が自動車に対して20~30分短い場合である。

このことから、鉄道にとって到達時間の短縮が大きな課題であり、同時にドア ツー ドアの輸送が可能な自動車に対抗できる快適性の実現、運行の多頻度化および輸送力の増大が求められる。

### 2 都市鉄道の高速・高密度運転

都市鉄道の高速・高密度運転の検討にあたり、本章は世界の代表的な都市鉄道での高速・高密度運転の現状と今後の動向および日本の鉄道と比較し、どのような特徴があるかについて述べる。

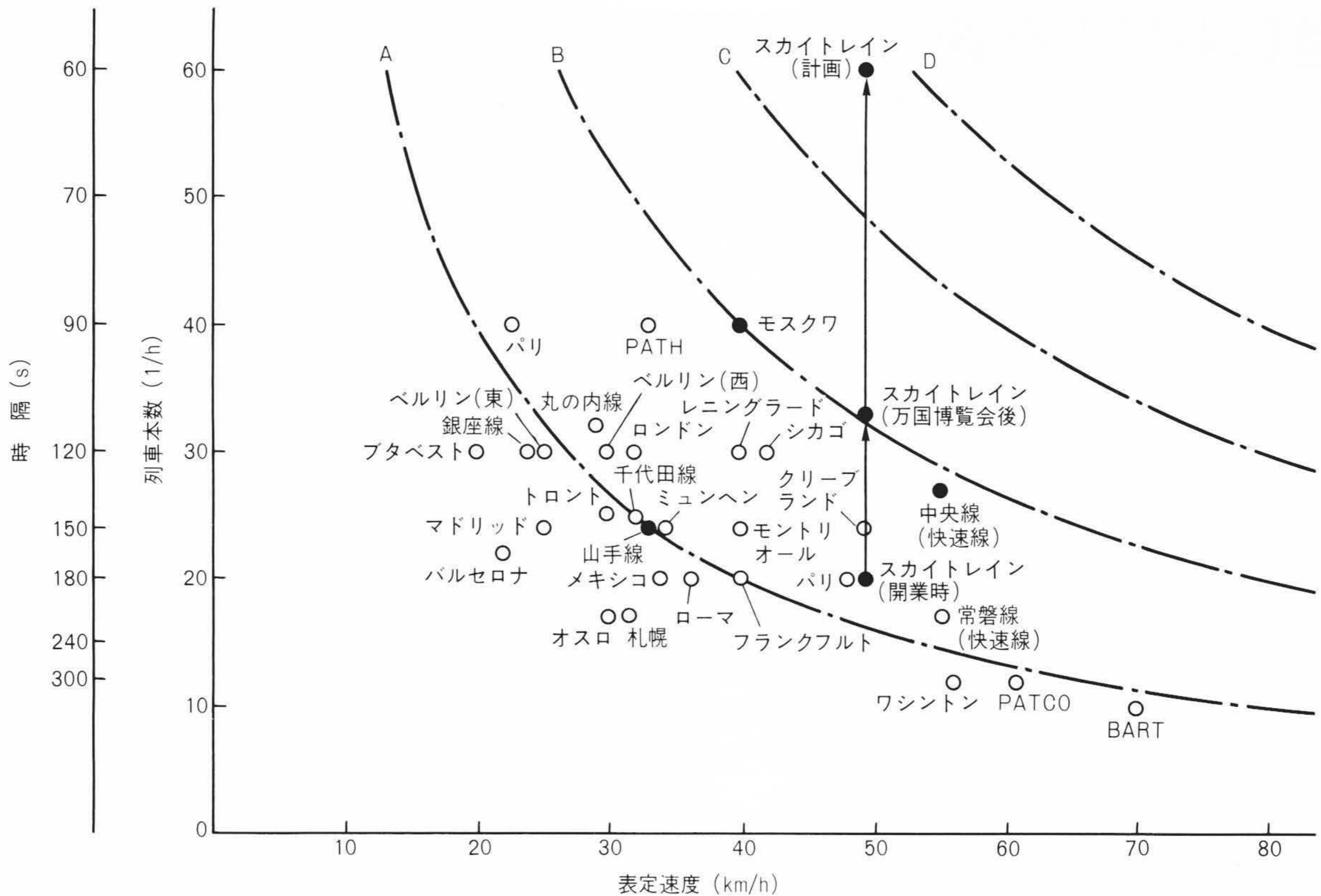
地下鉄など大都市圏鉄道の表定速度と運転時隔の代表例について図1に示す。横軸を表定速度とし、縦軸を最も混雑する時間帯の運転時隔(列車本数)とした。ここで、輸送能力 $T_c$ を(1)式のように定義し、 $T_c$ をおのおの一定の値とした場合の曲線を示す。

$$T_c = V_{ap} \times N \text{ (km/h} \cdot \text{h)} \dots\dots\dots(1)$$

ここに  $V_{ap}$  : 表定速度(km/h)

\* 日立製作所 水戸工場    \*\* 日立製作所 システム開発研究所    \*\*\* 日立製作所 日立研究所





注：略語説明 BART (サンフランシスコ湾岸鉄道), PATCO (フィラデルフィア港湾局運輸公社)  
PATH (ニューヨーク港湾局トランスハドソン公社)

図1 表定速度と運転時隔 表定速度と列車本数の積は輸送能力を表すが、Aを輸送能力1とするとBは2倍、Cは3倍、Dは4倍の輸送能力比となる。

$N$  : 1時間当たりの列車本数(1/h)

ここで、図1のA, B, C, Dは、それぞれ $T_c$ が $750 \times 10^3$ ,  $1,500 \times 10^3$ ,  $2,250 \times 10^3$ ,  $3,000 \times 10^3$ の輸送能力一定曲線を示している。

レベルA(輸送機能比1倍)を国内外の「現在の主要都市高速鉄道システム」レベル、レベルB(輸送機能比2倍)を日立製作所が当面の目標とする「高速・高密度鉄道システム」レベル、レベルC(輸送機能比3倍)を「次世代鉄道システム」レベルとして以下に述べる。

### 2.1 現在の主要都市高速鉄道システム[(レベルA)輸送機能比1倍]

このレベルは、現状の世界の主要都市での大量輸送線区の代表的なレベルである。図1に示すように、現状の鉄道システムは、表定速度が向上すれば列車本数が減少(運転時隔が増大)する傾向を示している。これは、表定速度を高くすると、先行列車に追突しないための制動距離を長くとる必要があり、このため列車間隔が長くなり、単位時間当たりの列車本数(列車密度)が減少することによる。

### 2.2 高速・高密度鉄道システム[(レベルB)輸送機能比2倍]

このシステムレベルは、現行の固定閉そく信号システムを基本とした鉄道の限界レベルである。このシステムレベルに

列車密度を上げるには、次の方策があげられる。

- (1) 閉そくの細分化
- (2) 一段ブレーキ制御の導入
- (3) 車両加減速性能の向上
- (4) 駅進入速度の最適化
- (5) 駅定位置停止減速度の向上
- (6) 駅停車時間の短縮

この中で駅停車時間の短縮は有効であるが、駅構造や車両扉構造とも密接に関係しており、上記の(1)~(5)とは異なる対策を要する。現在ではレベルBの線区は国内外ともにほとんどなく、ただ中央線の快速線がこれに近いレベルにある。中央線快速線のレベルが高いのは、複々線であることが大きく効いており、駅間距離が長く、表定速度が約55 km/hと大きいことがその要因である。

### 2.3 次世代鉄道システム[(レベルC)輸送機能比3倍]

このレベルは現在の粘着駆動により、軌道上を走行する鉄道の限界レベルに位置するものとする。このレベルの機能の実現のためには、移動閉そくまたはそれに相当した方式の導入が必要である。

すなわち、先行列車の速度をなんらかの形で配慮し、それに応じた後続列車の続行許容速度を定めることが必要である。



すでに述べたレベルA, Bの方式では先行列車の速度は考慮していないので、先行列車が走行していても停止しているとして固定した閉そく距離を決定している。ところが、このレベルCでは、そのときの先行列車の走行速度に応じて後続列車の接近可能距離を変化させることになる。

このことは、万一先行列車の速度の測定を誤ると追突の可能性もあることになり、信頼性の高い列車速度・位置の検知やその処理方式、後続列車への情報伝送方式、さらには万一の場合のバックアップの確立などを要する。

自動車の運転がこの移動閉そく方式(人間の制御)に相当しており高密度な運転がなされているが、鉄道でも高度な制御技術により、安全を確保した移動閉そく式高機能鉄道システムの実現が期待されている。現在このCレベルに相当する鉄道はないと考えられるが、カナダで稼動中のスカイトレインがこのレベルを指向しているとの情報がある。

なお、図1には輸送機能比4倍のレベルDのランクを記入しているが、このレベルは現状では従来の軌道上を車輪で走行する鉄道では実現が困難と考えられる。

### 3 高密度運転システム

現状の運転速度を低下させずに、列車本数の増加による輸送力の増強を図るためには、信号制御システムの改善、車両性能の向上、列車の運転制御の高度化、曲線や分岐器位置などの路線条件や駅設備の改善、変電所の強化など幅広い検討

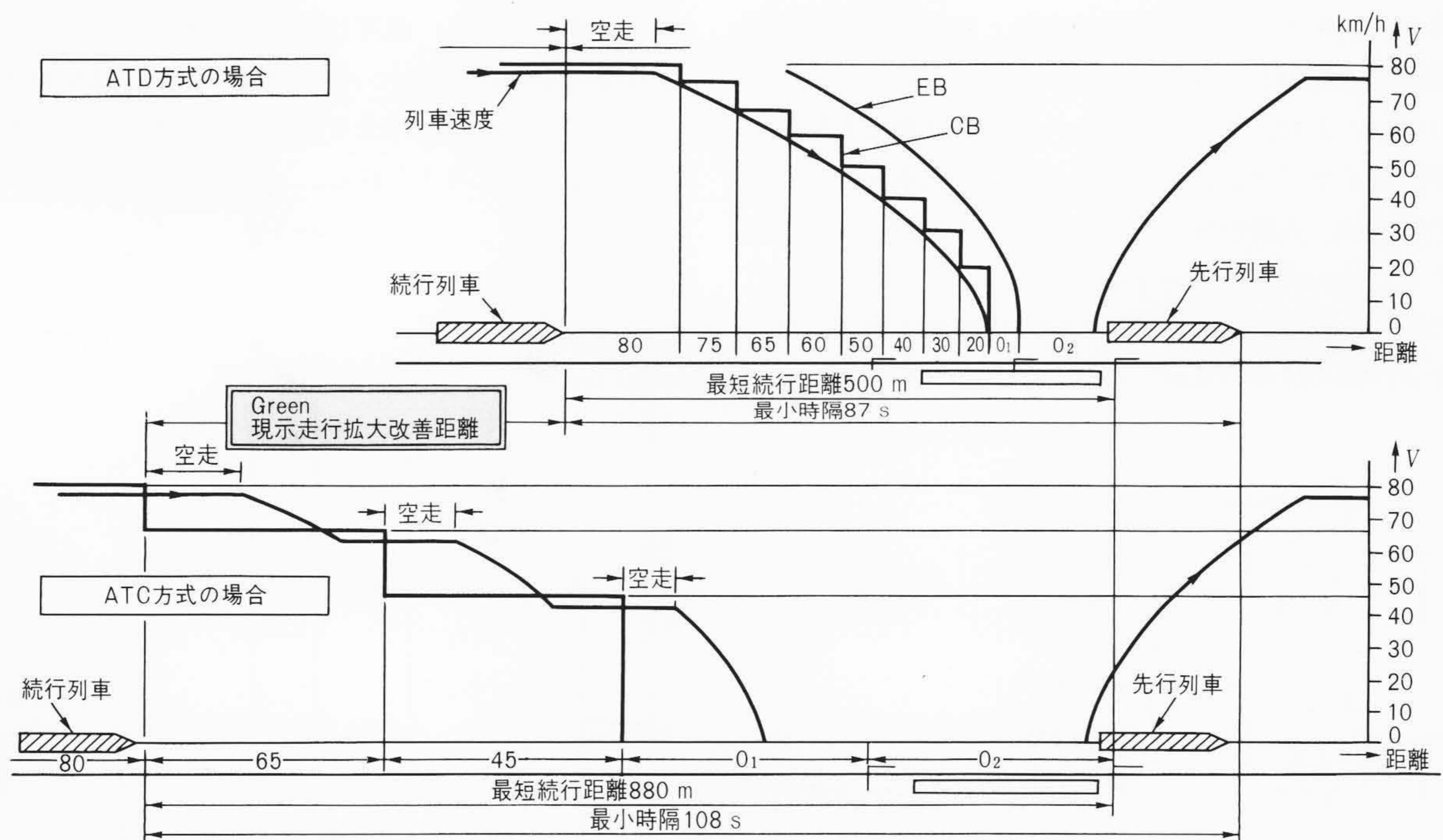
を必要とする。このうち路線や駅設備は都市構造との関連もあり、線区や駅によって対応が異なり、一律な方法では難しい。ここでは信号制御システムの改善、車両性能の向上、列車の運転制御の高度化などを中心とした高密度運転システムについて提案する。

#### 3.1 高密度運転システム

高密度運転を実現するためには、信号制御方式を中心とした改善を必要とする。この場合、特に配慮が必要なのは、稼動中のシステムの改善であり、地上設備、車上設備ともに新旧システムの併用を可能としないければならないことである。混雑が特に厳しく停車時間の長い駅や、高性能新製車両の投入などによって逐次新システムに切り替え、適用範囲を拡大していくこと、あるいは車両性能の劣る旧形車両にまず装備し、車両性能の低いことをシステムでカバーすることが望ましい。

このような観点から、ATD(Automatic Train Deceleration)システムと称する高密度線区に適用する列車制御方式を従来提案してきた。方式の説明を図2に示す。このATD方式は、現用の多段ATC(Automatic Train Control)の欠点とも言えるATC速度制限段ごとのブレーキ空走時間の加算を省くため、超多段の速度制限信号によって速度制限パターンを発生させている。このパターンを列車速度が超えたとき1回のブレーキ制御で所定速度までの減速制御を行う。

これにより、ATCと同等の保安度を維持しながら、後続列



注：略語説明 EB (Emergency Brake Pattern), CB (Control Brake Pattern), ATD (Automatic Train Deceleration) ATC (Automatic Train Control)

図2 ATD方式と従来ATC方式の比較 本例ではATD方式によって時隔が21秒短縮される。また、ATD方式では粗い階段パターンに滑らかに追従させるため、ファジィ制御を応用している。



車を先行列車にできるだけ接近させる運転を可能としている。このとき、先行列車の駅進出検知も細分化して列車運転時隔のいっそうの短縮を図っている。

本方式では、地上から車上へ従来のATC信号に相当する第一の速度制限信号と、これと並行して、第一の速度制限信号よりも低い速度に設定され、滑らかに列車を減速制御するための第二の速度指示信号を伝送する。通常はこの第二の速度指示信号を目標に、自動運転に類似した車両の減速制御を行うものである。この第二の速度制限信号は、数十メートルごとに速度指示が変化する階段パターンであり、このような粗い階段パターンに列車を滑らかに追従させるためにファジィ制御を使用している。

また、地上から車上への信号伝送は細分化された地上ループで実現することも可能であるが、最近進歩の著しいトランスポンダをこれに代えて使用することも可能である。本システムでは、通常の保安制御で強い保安ブレーキを避け、乗り心地の良いファジィ制御ブレーキによって制御される。

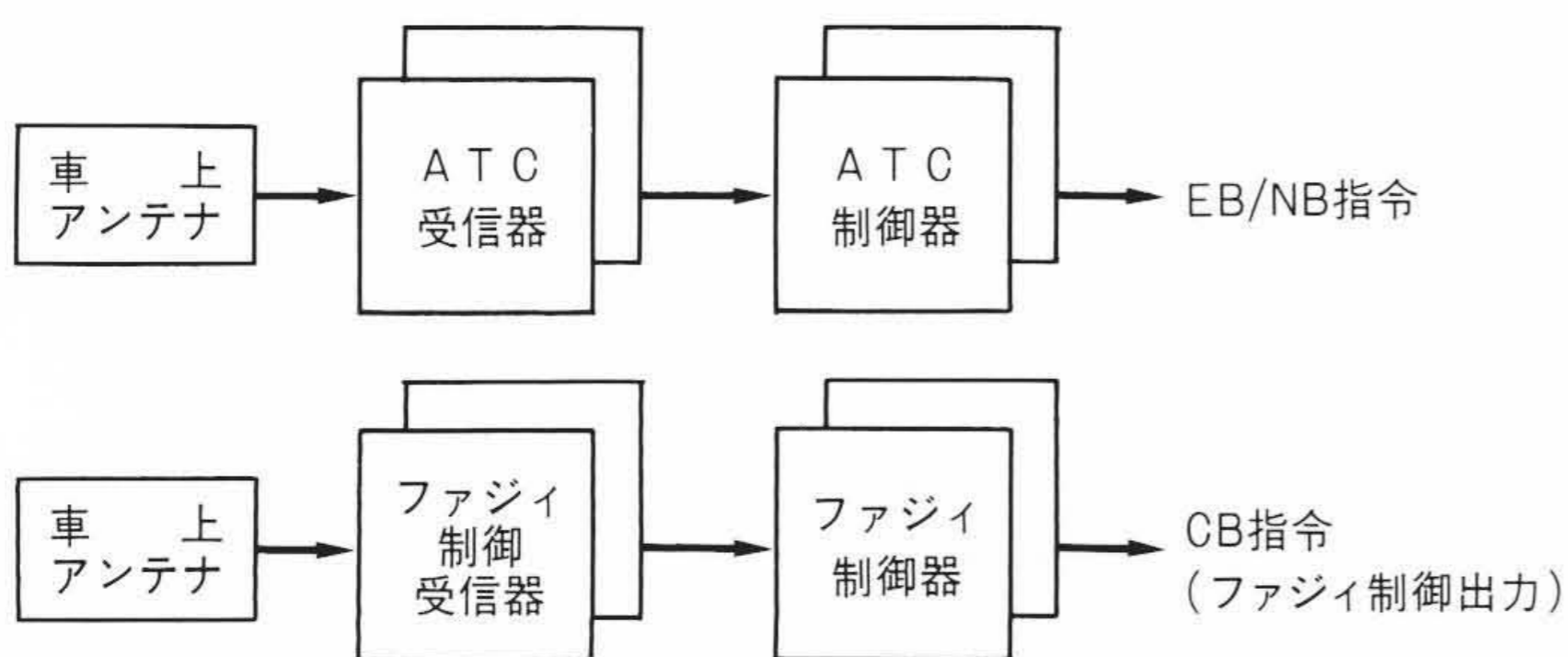
ATDシステム車上装置構成図を図3に示す。なお、車上装置は従来のATC装置に加え、ファジィ制御用のファジィ制御器の追加が必要であるが、これはATO(Automatic Train Operation)機能にも流用可能である。

### 3.2 運転支援システム

大都市圏鉄道で高速・高密度運転実現のためには、設備の改善、改良が必要である。これについての最大の課題の一つは、従来の乗務員の記憶と判断による運転では効率と安全性の面で限界が生じることである。

特に高速・高密度運転では、単位時間・単位距離内に処理すべき情報量の増加と、操作に許容される余裕時分の減少が避けられない。また、サービス向上のために従来にも増して複雑な走行ダイヤグラムによる運行が求められる。

現在の鉄道は、人間の分担する作業の割合が他の最新の巨大システムに比べて高いという指摘がある。したがって、これからの新しい鉄道システムでは人間の分担する作業と機械の分担する作業の区分の見直しが必要である。その方策の一



注：略語説明 NB (Normal Brake)

図3 ATDシステム車上装置構成図 従来のATC装置に加えて、ファジィ制御用のファジィ制御器の追加によって高密度輸送を実現するシステムである。

つとして、ICカードを応用し運転ダイヤグラムや運転条件、路線条件などの記憶内容を適宜表示させ、また地上・車両条件と逐次入力される前方列車状況とにより、定時運転や省エネルギー運転の支援が可能なシステムが将来考えられる<sup>1),2)</sup>。

### 3.3 運転支援による省エネルギー運転

高密度運転で、定時性を確保しながら省エネルギーとなる運転を実現するためには、先行列車の状況を常時取り込み列車の運転を随時修正することが必要になる。定時性を制約条件とした最小エネルギーとなる最適な列車運転方式を求める試みは種々なされてきた。

日立製作所では、列車運転がほぼ一定のパターンになっていることに着目して運転方式を少数のパラメータで記述し、それらのパラメータを最適な値に定める方法を提案している<sup>3)</sup>。駅間の制限速度は図4に示すように、線路条件によって複数の制限速度で構成されている。駅間を制限速度が異なる $X_0 \sim X_n$ の区間に区分し、各区分ごとに制限速度よりも低い目標速度を設定し、これらの目標速度を組み合わせることによって駅間の運転方式を決めるものである。

すなわち、各区分 $X_0 \sim X_n$ の目標速度を変化させ、これらを組み合わせ、所要の駅間走行時間が確保できて、しかも消費エネルギーが最も小さい目標速度の最適組み合わせを車上でオンラインシミュレーションで求める。この方法によると修正は、区間に対応した目標速度という少数のパラメータの変更に帰着し、比較的簡単な演算装置で短時間に可能である。

モデル線区での走行シミュレーション結果を図5に示す。同図(a)はその線区を最高速度で走行し、最短時分運転した場合である。しかし、通常は運転ダイヤグラムに余裕時分が含まれている場合が多く、最高速度での走行は早着となる。したがって、その余裕時分を活用し省エネルギー運転を行うことが望ましいと考えられる。

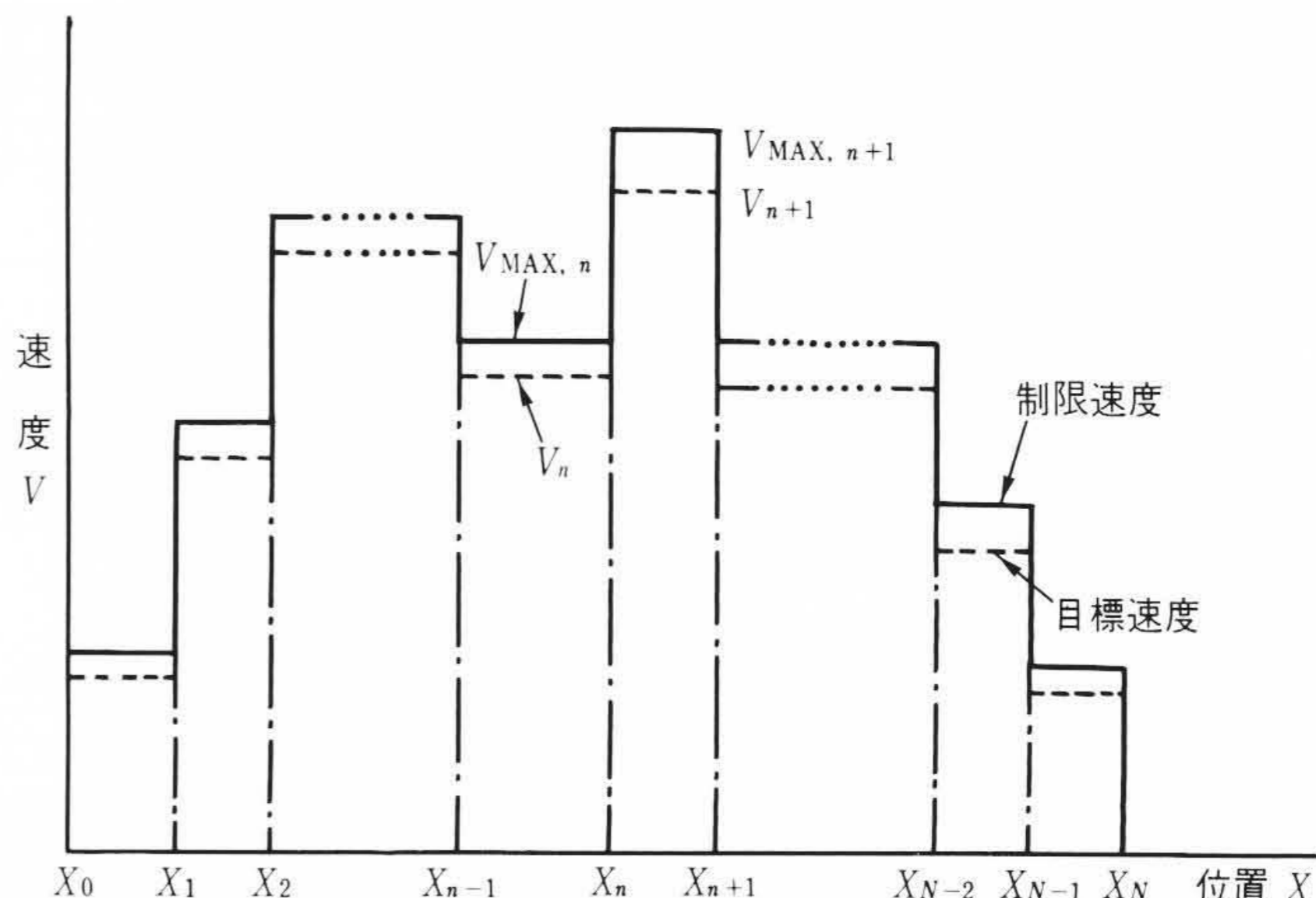
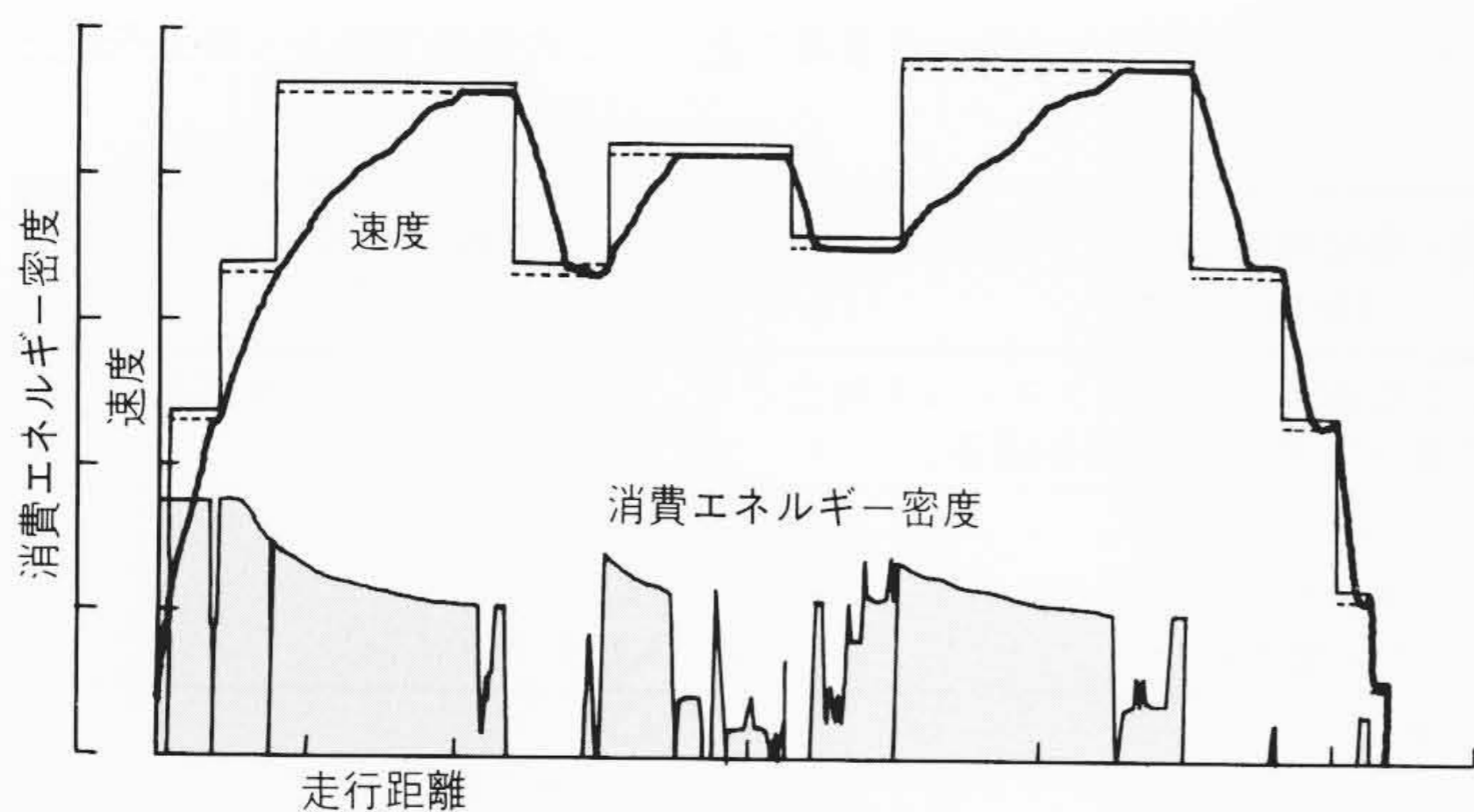
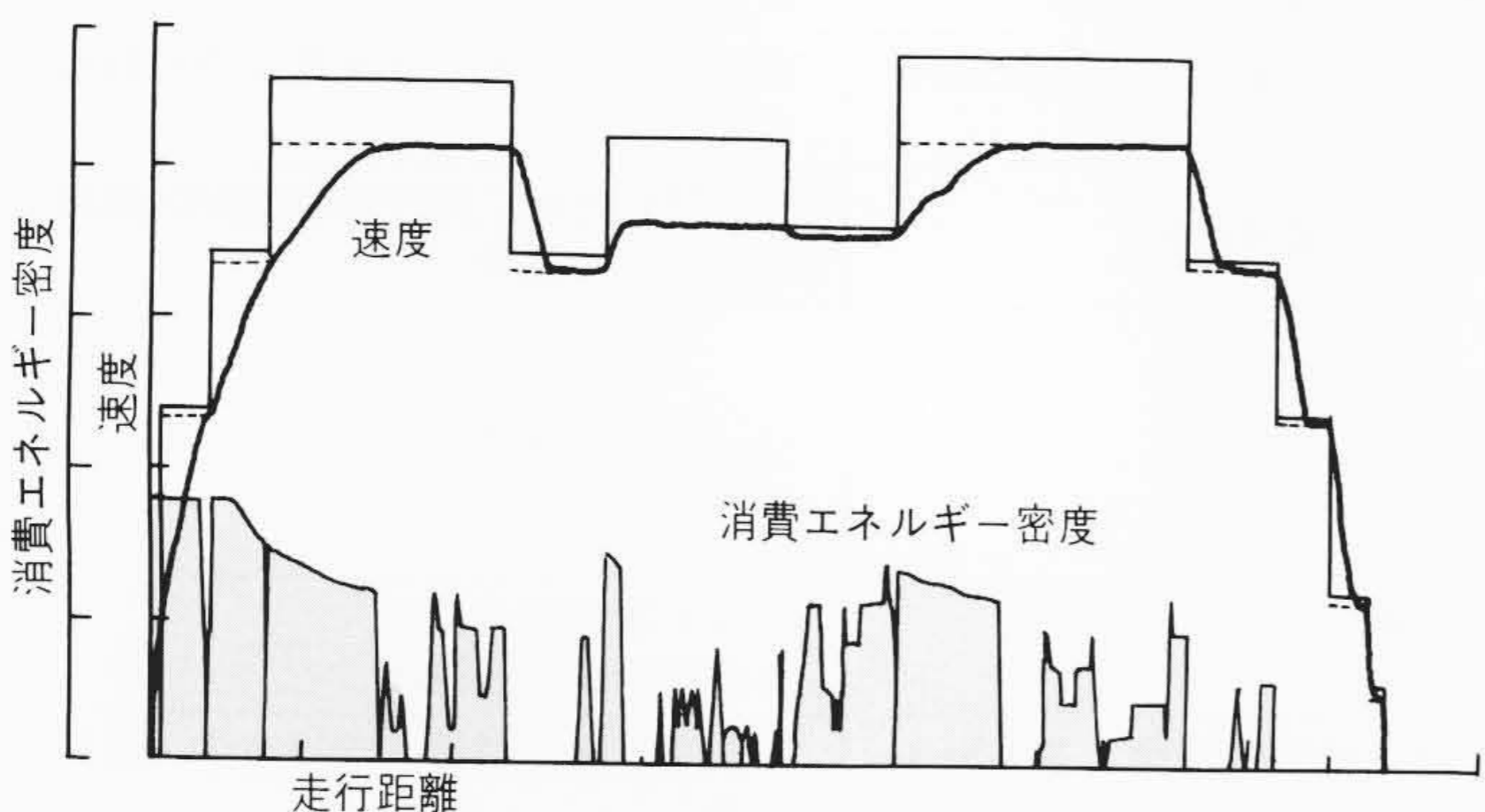


図4 駅間制限速度の形状 駅間の制限速度は、図示のように複数の制限速度によって構成され、各制限区分ごとの目標速度の設定により、駅間の運転方式が決定できる。





(a) 最高速度での走行結果



(b) 最適運転方式による走行結果  
(3.85%運転時分を増加させた。)

図5 走行シミュレーション結果 モデル区間の走行シミュレーション結果では、最高速度で走行した場合の3.85%の運転時分増加により、19.6%の省エネルギーとなった。

図5(b)は運転時分に3.85%の余裕がある場合に、余裕時分を省エネルギー運転に振り向ける(走行速度を幾分下げ無用な加速やブレーキを省きながら、運転ダイヤグラムにあった所定時分で駅間を走行させる。)ことにより、19.6%の消費エネルギーの低減結果が得られたことを示す。

#### 4 次世代鉄道システム

これからは、より豊かな生活への志向が強まり、これに伴い人々の移動の目的と内容の多様化がますます進むものと考えられる。その中で鉄道は、自動車と航空機に挟まれて、旅客の輸送分担率が相対的に減少することが懸念されている。

このような状況の中で、鉄道が役割を果たし続け自動車と航空機以上にサービスを向上するためには、すでに述べた高速・高密度輸送に加え、次のようなシステム技術を導入したい。

- (1) 大量輸送技術を実現する技術
- (2) 高速化の技術
- (3) 運転・運行・保守の合理化技術

##### 4.1 次世代鉄道システムのイメージ

次世代鉄道システムのイメージは、当然のことながら社会

のニーズや動向を敏感に反映したものにならざるを得ない。換言すれば、社会のライフスタイルの変化に伴って鉄道のありかたも変化する。土地高騰の首都圏で住宅を入手することは事実上困難である。通勤用のセカンドハウスを都心に持ち、週末は首都近郊都市に家族と生活するとか、業務のソフト化による勤務形態の多様化・24時間化・サテライトオフィス化、長距離出張の増加、情報のリアルタイム化による移動中の情報交換ニーズの発生、情報化に刺激を受けた人や物の往來の増加、移動時間自体を楽しむ多様なニーズの発生、等々の変化が生じつつある。

また、世界的に環境重視の動きにあり、省エネルギーも経済効果と切り離しても評価される時代となった。さらに、都市圏の道路の交通渋滞やそれに伴う環境問題も鉄道が注目される状況を作りだしている。

このような状況に対応するため鉄道の第一の課題は、制御と情報の統合による新鉄道システムの構築であると考えられる。すなわち、制御と診断・保守、さらには情報サービスの一体化により、新しい効率的な高度鉄道システムを構築することが求められる。

##### 4.2 次世代鉄道システムの技術課題

すでに2章で述べたおのおののシステムレベルの技術課題を表1に示す。これらの技術課題の中で今後の進め方を決定する重要なものは、地上・車上情報伝送である。現在使用されている誘導無線、列車無線、LCX(Leakage Coaxial Cable)などのほか、衛星通信、ミリ波、光空間伝送などがある。設備費用や情報伝送能力、都市での障害物に対する影響などを考慮すると伝送システムは一義的には決定できない。

また、列車の操縦制御の点では、高密度運転への対応能力と人手不足の影響が鉄道にも及ぶと考えると、目標は自動化の方向となろう。特に前後の列車と連携した走行制御が要求されてくると、自動運転を活用し、運転を支援し、運転士には人間の高度な判断を要する業務を主体に行わせるように移行することが望ましい。

#### 5 結 言

鉄道での高速・高密度運転システムについて、その概要を述べた。高速・高密度運転は言うまでもなく鉄道の最大の課題であったし、また今後も最大の課題であり続けるであろう。この課題は、鉄道の大部分のサブシステムと密接に関連するために、鉄道トータルとしての検討がますます必要となっている。

車両の性能について言えば、単に加減速の性能だけでなく、車上の情報化やインテリジェント化の程度が鉄道のシステム性能にますます大きく関与してくるようになった。

また信号システム、電力システム、曲線や分岐器などの通過速度の向上、高密度化の改善策、駅停車時分の短縮のため



表1 次世代鉄道システムの技術課題 次世代鉄道システムにとって、地上・車上の密接な連携が最重要であり、この意味で地上・車上伝送方式がシステムの性格を決める。

システム種別		現在の主要都市高速鉄道システム (レベルA)	高速・高密度鉄道システム (レベルB)	次世代鉄道システム (レベルC)
項目				
目的		安全で快適な高効率鉄道システムを目指し、異なる技術世代のサブシステムを融合させ、在来鉄道システムを逐次レベルアップし成長させることを可能とした次世代鉄道システムの実現を図る。		
目標性能 (線区例)		時隔120~150 s 表定速度30 km/h (例：山手線)	時隔90~120 s 表定速度40 km/h (例：モスクワ地下鉄)	時隔60 s 表定速度50 km/h (例：スカイトレイン)
列車位置 検知	位置検知	軌道回路 ATS地上子 トランスポンダ	交差誘導線 LCX GPS, ジャイロ	(レベルA, Bに準ずる。)
	位置補正	車軸回転数計測		
列車間隔 制御	列車検知	軌道回路方式：軌道回路細分化	軌道回路併用方式：既設軌道回路と 車上検出の自列車位置を併用	車上列車位置連続検知方式：列車の 位置情報に全面的に依存
	閉そく	固定閉そく基本 問題駅では閉そく細分化	固定閉そく基本 駅付近で部分的移 動閉そく追加	移動閉そく、または同等な信号制御 方式
	制御方式	AATC方式：多段制御ATC	ATD方式：一段減速制御	移動閉そく方式：先行列車の速度を考慮 双方向走行制御
地上車上 情報	伝送方式	列車無線, 誘導無線 トランスポンダ 交差誘導線	LCX 衛星通信 光空間伝送 ミリ波(UHF)	(レベルBに準ずる。)
	地 → 車 情報	多段ATC制限速度予告情報	速度制御情報・地点 運転計画	速度制限情報・地点 先行列車位置・速度
	車 → 地 情報	列車番号 電話	自列車速度・位置・踏切・進路制御 指令	自列車速度・位置・走行方向・車両 性能
操縦制御	操縦	高減速制御用TASC	高速・高密度運転対応 ATC/ATO	列車群対応定時運転・省エネルギー 運転支援
	運転支援	ICカード運転支援	AI応用運転支援	最適運転ガイダンス
	乗務員	二人乗務	一人乗務	無人(添乗員)
進路制御	継電連動	電子連動	双方向走行制御	
運行制御	全線の列車位置をセンタと駅に表示	運行管理・電力管理などの連携によ る高度制御	営業システムと直結した運転計画の 作成と制御	
踏切制御 駅プラットフォーム監視	光空間伝送応用障害物視認システム	非常発報情報車上伝達踏切制御指令 の車上発信	踏切障害物など画像認識システム	
列車制御システム	車両引き通し線 車両モニタリング VVVFインバータ	自律分散車上LAN 知的駆動制御システム	マルチメディア車上LAN 鉄道FAシステム	
保守・検収	モニタリングによる応急処置・保守 支援 故障時の応急処置支援 始業検査自動化	モニタリングによる保守回帰延長 故障解析エキスパートシステム	状態監視保全・予知保全	
旅客情報サービス	固定情報を基本とした情報サービス	適切な随時運転情報の提供	地上と同等な情報サービス	

注：略語説明 ATS(Automatic Train Stop), AATC(Advanced Automatic Train Control), TASC(Train Automatic Stop Control), VVVF(Variable Voltage and Variable Frequency), LCX(Leakage Coaxial Cable), GPS(Global Positioning System), ATO(Automatic Train Operation)

の諸施策など、いずれの項目についても各サブシステム単独の検討では結論を出せない状況となっている。

幸い、JUMPS(Justified Models for Practical Specification<sup>4)</sup>)という鉄道システム用総合シミュレータがあるので、これの活用によって新しいシステムインテグレーションへ対応するつもりである。

参考文献

- 1) 高岡, 外：車両搭載情報制御システム, 日立評論, 70, 7, 717~724(昭63-7)
- 2) 高岡, 外：列車運転・運行システム, 電気学会誌, 101巻, 4号(平成2年)
- 3) 川島, 外：最適な列車運転方式の作成及び修正方法の提案, 電気学会交通・電気鉄道研究会資料, TER-90-34(平成2年)
- 4) 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)