



## 新幹線の技術的發展と展望

### Technical Development and Prospect of the Shinkansen

渡 邊 偕 年\*

Kainen WATANABE

**Key Words:** Railway, Engineering, Environmental Engineering, Mechanical Engineering, Electrical Engineering, Civil Engineering, Information Engineering

#### 1. はじめに

昭和 39 年 10 月デビュー以来 20 年余, 新幹線は 20 億人をこえる乗客を死亡事故なく, 定時確保率 99% で輸送し, 在来特急利用による所要時間とくらべ約 30 億時間の余剰時間を生み出して日本社会の活性化に寄与してきた。そしてその収入は 58 年度ついに全国鉄幹線収入の 50% をこえた。60 年 3 月, 東北・上越新幹線が上野始発となり, 東海道・山陽を含む四つの新幹線は, 我が国旅客交通体系の主軸として重要な役割りを担っている。

本稿では, 新幹線が今日に至る発展の経緯について, これを支える各技術領域ごとに概観し, さらに将来の交通機関としての展望に言及する。

#### 2. 新幹線技術の発展

**2.1 車両** 新幹線車両は, 戦後における航空機技術の鉄道への導入と, ビジネス特急こだま号などによる経験と理論から生まれた。そのジェット旅客機に似た前頭形状, 軽量高強度の「準張殻」車体構造, 空気抵抗の少ない車体表面, 振動・蛇行動に対す高性能走り装置, 動力分散の全動力車方式による電気ブレーキ等, 当初の車両設計上の基本思想は一貫して受け継がれている。

国鉄技術の総力を挙げて誕生した新幹線ではあ

ったが, 開業後多くの新しい事態に遭遇した。雪害・地震等の自然災害, 騒音・振動・テレビ障害等の環境問題, 集電設備事故・レール折損・ATC 誤動作等の設備の故障劣化, 輸送力急増と労働力不足, そして紆余曲折はあったが高速化の要請(最高速度 240 km/h が今年実現した)である。

これらは新幹線のそれぞれの技術領域に多かれ少なかれ影響を与えた。車両においても耐久性をはじめとした信頼性の向上, 快適性と走行安定性の向上を目指した改善策が採用された。東北・上越新幹線は急こう配が連続し, トンネルが多いので電車の出力増加が, 一方多雪寒冷地帯走行および厳しい環境保全への対応策が必要であった。これらはいずれも車両重量の増加要素となるため, 平行して車両軽量化の技術が発展した。

(1) 車体 東北・上越新幹線の 200 系電車は軽量化のため, 構体にアルミニウム合金を採用し, 大形型材を用いた全溶接構造である。快適な乗り心地のためには車体の曲げ固有振動を高めておく必要があるため, 側スカート部を一体にしたボディマウント構造として剛性を高めたが, これにより約 20% の軽量化が可能となった。

トンネル走行時の車体気密は開業後の開発課題であるが, 現在の水準は世界をリードしており, 今後の高速化挑戦に際して鍵となる技術である。

(2) 走り装置 これまでの計画最高速度は 210 km/h であったため, 台車には東海道新幹線で安定した実績がある軸箱支持装置, 駆動装置, まくらばり装置が用いられてきた。しかし 200 系電車では, 台車軽量化のためまくらばりと空気ばね

\* 日本国有鉄道技術研究所 (〒185 東京都国分寺市光町 2-8-38)。

の内外筒をアルミニウム合金で製作し、空気ばねの性能を高めて小形化をはかっている。

一方、車両の走行安全上最も重要な台車蛇行動を安定化させるために、筒形緩衝ゴム方式のボルスタアンカによって、台車旋回運動へ適度の弾性を与えている。

今後の高速化のためにはばね下質量と台車および、走り装置ではないが車両重量の1/3を占める電気品の軽量化が課題であり、前者に対しては中空車軸、ボルスタレス台車、新しいブレーキ材の開発が、後者に対してはVVVF (Variable Voltage Variable Frequency) 化を含めた半導体やパワーエレクトロニクス応用技術、電力回生技術による電気品小形化が進められている。

(3) 力行制御 東海道・山陽新幹線の0系電車の力行制御方式では、主変圧器二次側のタップ切換器で電圧を制御し、主整流器で直流に変換している。一方200系電車では、タップ切換器を無くして保守を容易にし、雪による粘着力低下の中で滑らかな加速力を得るため、サイリスタ・ダイオード混合ブリッジを使用したパーニヤ位相制御方式で、直流電圧を円滑に連続的に制御している。

しかしこの方式は反面、原理的に交流側の高調波電流がタップ制御方式より多くなる欠点があるので、200系電車では主変圧器二次巻線比、制御方式、各巻き線のリアクタンス特性、直流電流の脈流率等の適正化をはかって、東海道・山陽新幹線と同等の等価妨害電流の目標値をクリアした。

(4) ブレーキ制御 200系電車のブレーキ制御は、0系電車と同様発電ブレーキが主体で、空気ブレーキは同ブレーキ失効時のバックアップと、低速時の補足ブレーキである。ブレーキ電流制御については、降積雪時の滑走防止のため種々の改良が行われた。すなわち200系電車では、滑走のトリガとなる要因抑制のため、サイリスタチョッパ制御装置でブレーキ抵抗を見かけ上、連続制御し、ブレーキ電流制御を滑らかにしている。

滑走発生時、0系電車では発電ブレーキを切り、非滑走軸に空気ブレーキを働かせるが、200系では、微少滑走(過大減速度検知)に対してはチョッパ制御装置でブレーキ電流を低減し、中滑走(速度差検知)に対しては主電動機の界磁を短絡してブレーキ力を弱め、再粘着特性を向上して発電ブ

レーキの有効利用を図っている。

さらに200系では電気指令による空気ブレーキを使用しており(0系では電磁直通ブレーキ)、低速域での電気ブレーキ力の減少を空気ブレーキで連続的に補うため、電空のブレーキ切換えが円滑で乗り心地を害しない。

(5) モニタリングシステム 応急処置の簡易化、迅速化を主な目的として200系電車に導入されたシステムであり、これにより列車運転に関して1人乗務が実現した。

両運転台に中央装置と表示装置を、各車両に端末装置を配し、これらの間を9.6 kbit/sのデータ伝送回線で結んでいる。中央・各端末装置の制御にはマイクロコンピュータを用いている。

このシステムの機能は、まず故障内容の表示で、運転士はこれを見て処置を判断、普通は故障機器を開放して運転続行する。次は機器動作状態の表示で、搭載機器の情報収集が容易となる。また故障解析、一部の車両検査業務の代行ができる。

(6) 走行安定性と乗り心地管理 新幹線電車の乗り心地と走行安定性は、定期検査修繕と車体振動測定による車両走行管理で確保されている。東海道・山陽新幹線では後者のために機械式加速度計を用いていたので、解析に多くの人手を要した。

200系電車には1列車各車両の振動を電車既設配線を通して1箇所測定できる、FM多重テレメータ方式の編成車両振動測定装置を導入した。収録された振動データを車両振動解析装置にかけ、自動的に処理された乗り心地評価と振動診断データに基づいて、車両の修繕管理を行っている。

## 2.2 集電・電力供給

(1) パンタグラフ 東海道・山陽新幹線の現行パンタグラフPS 200 A形は、開業以来大きな変更はなく、安定した性能を示している。

東北・上越新幹線のPS 201形は、微小な離線アークに由来する騒音、電波雑音、すり板摩耗等の問題を改善するために開発された。すり板を舟体に板ばねで支持して、トロリ線へ直接接する等価質量を極力小さくした。PS 201形では微小な離線がPS 200 A形の1/2以下に減っている。

(2) 架線 新幹線の架線は多数パンタグラフを前提にして、架線振動が後続パンタグラフに影

響しにくい合成コンパウンドにはじまるが、山陽新幹線以降は架線の張力と線材の太さを大きくしたヘビーコンパウンド架線に切替えられた(表1)。

列車走行時の架線押上げ量は速度と共に増加し、速度 210 km/h では静止時の 3 倍となるが、ヘビーコンパウンド架線は押上げ量が小さく(支持点で 30 mm, 中央付近で 50 mm)ばらつきが少ないので、パンタグラフが円滑に走行できる。

架線の応力について現在問題は解消され、トロリ線オーバーラップ部衝撃摩耗対策として、2 径間オーバーラップを採用している。

離線は 160 km/h をこえると発生しはじめ、速度とともに増加する。先頭パンタグラフの離線率は後続のものより少なく、210 km/h で数%である。パンタグラフ間の引き通し線は、離線アークを減少させ、すり板摩耗やアーク音対策に有効であり、東北新幹線の一部列車に適用されている。

(3) き電方式 高速長大編成の新幹線の負荷容量は在来線の 3~4 倍(最大 20 MW)であるため、き電電圧は交流最大 30 kV, 標準 25 kV である。

通信線の誘導対策を考えき電方式については、レールに流れる帰線電流をブースタ変圧器で吸い上げる BT 方式(セクション消弧対策つき)が採用されたが、BT セクションの弱点を改良したオ

ート変圧器を用いる AT 方式が山陽新幹線以降採用されている。AT 方式は消弧対策が不要であり、変電所からの送り出し電圧をトロリ線電圧の 2 倍としたため変電所間隔を 3 倍程長くできるので、送電線を含めた変電所建設費がやすくなった。

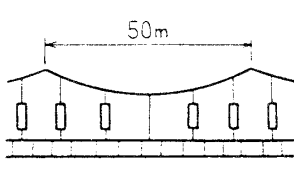
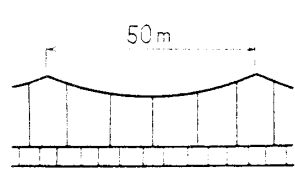
(4) 電圧変動・不平衡対策 新幹線では大負荷容量に見合った短絡容量の大きい超高压変電所から直接変電しているが、超高压系の直接接地系と十分協調できる、一次側に中性点をもった変形ウッドブリッジ形変圧器が開発された。その一次側(三相)における負荷電流平衡化の原理は、従来の交流き電用スコット変圧器と同じである。

(5) 保護方式 AT き電方式では、変電所の外に約 10 km おきに縦長特性の距離継電器を置き、故障時には、連絡回路により各継電器の動作信号を変電所に送ってしゃ断器をトリップさせている。最近、微小時間当たりの電流変化の異常を検出する ΔI 形保護継電器が開発され、設置中である。

2.3 制御と情報(図1)

(1) ATC 新幹線は高速なので、地上信号方式でなく車上に許容速度が示され、列車速度がこれをこえると自動的にブレーキがかかる自動列車制御方式(ATC)を採用している。当初それは電源同期 SSB(Single Side Band) 1 周波方式であったが、東北・上越新幹線ではチョッパ車導入に

表 1 新幹線の架線の構成

架線方式		合成コンパウンド	ヘビーコンパウンド
構造			
つり架線	線種	Cd Cu 80 mm <sup>2</sup>	St 180 mm <sup>2</sup>
	張力 N	10 000	25 000
補助つり架線	線種	Cd Cu 60 mm <sup>2</sup>	Cu 150 mm <sup>2</sup>
	張力 N	10 000	15 000
トロリ線	線種	Cu 110 mm <sup>2</sup>	Cu 170 mm <sup>2</sup>
	張力 N	10 000	15 000
ばね定数(静的)	径間 N/m	2 500	3 000
	支持点 N/m	2 700	4 500

よるノイズレベル増大などを考慮して、2周波方式とした。

(2) CTC 新幹線では集中列車制御方式(CTC)を採用している。CTCの役割りは、センタで全列車の状態が分かること、センタから必要な駅の進路設定ができることである。当初はトランジスタを用い、当時としてはひじょうに伝送速度が高い2000 bit/sのシステムを開発実用化した。東北・上越新幹線では中央装置にミニコンを用い、小形化、高性能化、低廉化を実現した。

(3) COMTRAC (COMputer aided TRAffic Control) 列車種別、列車本数、制御距離の増加に対処するため、指令員の業務を支援するCOMTRACシステムが、山陽新幹線に開発導入された。このシステムは当初、情報の収集・分類整理・伝達および進路制御の自動化の機能をもっていたが、東北・上越新幹線では

- ・輸送需要の変動に即応した車両・乗務員運用を含めた、合理的な運転計画の作成・伝達。

- ・ダイヤが乱れた時の運転整理ダイヤ(車両、乗務員を含む)の作成・伝達。

- ・駅旅客情報システムに必要な情報の伝達、などの機能が付加されている。

コンピュータは、常時二重系運転、1台待機予備の三重系方式としている。

(4) 列車無線 列車・地上間の情報連絡手段として、当初UFH帯(400 MHz)の空間波無線方式を採用したが、東北・上越新幹線ではそれまでトンネル内で使用していたLCX(Leaky Coaxial cable)を全線に適用した。LCXは同軸ケーブルの外部導体にジグザグにスロットを設けたもので、LCXに沿って帯状の安定した電磁界が保たれ、回線増(10→24)が可能となり、回線品質が改善された。この結果運転指令活動のほか、公衆電話が全国にかけられ、またデータ通信が可能となった。

### 2・4 軌道

2・4・1 軌道構造 東海道新幹線の軌道構造については、無道床軌道を含む飛躍的な案も検討されたが、動力的な理論的考察にもとづき、予想される2000万t/年程度の輸送量に対して、ロングレール、コンクリートまくらぎ、砕石道床か

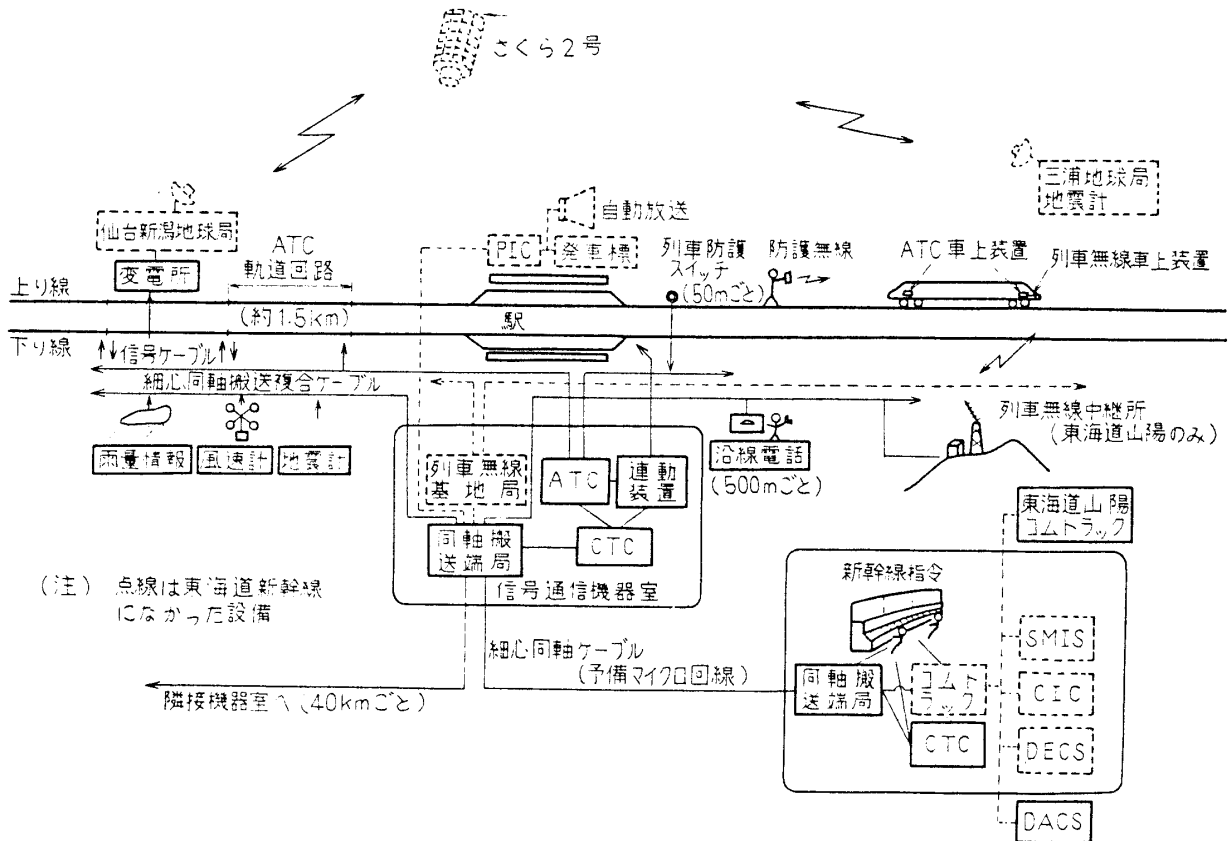


図 1 新幹線制御・情報システム略図

ら成る従来方式の軌道構造として決定された。

開業後の予想外の輸送量増加に対しては、レール重量化 (53.3 kg/m→60 kg/m) と厳密な軌道狂い管理を行い、現在 4 000 万 t/年の荷重に耐えている。その後観測された輪重変動等に対処して、軌道パッドを軟らかく、まくらぎを大きくするとともに、高架橋・トンネルなどの剛性路盤では、道床の下にゴム製のバラストマットを敷きこんでいる。

一方、保守要員需給のひっ迫に対処して、セメントとアスファルトの混合層上にコンクリートスラブ板を水平移動を拘束して載せ、これにレールを直結するスラブ軌道が開発され、山陽新幹線(岡山～博多)以降の新幹線の剛性路盤上に大々的に採用された。この軌道は有道床軌道に比べ、性能がほぼ同等、建設費約 1.5 倍、保守費約 1/5 で、乗り心地が大幅に向上した(表 2)。

**2・4・2 軌道の保守管理** 軌道の保守管理としては、まず軌道狂いの整備目標値を定め、高速軌道検測車による 10 日に 1 回の軌道狂い測定と、週 3 回程度の車体振動加速度測定を行っている。

検測輪がレールに直接接触していた当初の検測車は、最高速度が 160 km/h に制限され夜間運行していたが、その後光学式非接触測定機構が開発されて、210 km/h で昼間営業時間帯に運行するようになった。東北・上越新幹線では、舞い上がる雪の中でも測定できる渦電流方式が使用されている。

これらの記録は SMIS (Shinkansen Management Information System) とよばれる情報管理システムで処理され、保守作業の指示と検修が自

動的に行われる。

東北新幹線で最高速度 240 km/h 運転が始まったが、高速化に応じて、主として乗り心地にかかわる長波長の軌道狂いと、輪重変動、騒音にかかわる短波長のレール頭頂面凹凸の管理が必要になる。前者に対しては、実車試験と理論解析から求めた乗り心地を一定に保つ軌道狂い検測フィルタを用いた、新しい検測装置 HISTIM (High Speed Track Inspection Machine) II が検測車に付加された。後者に対しては、輪重変動と騒音の特性を考慮した、レール頭頂面検測フィルタによる測定結果により、レール削正が行われている。

**2・5 雪害および環境対策**

**2・5・1 雪対策** 新幹線関ヶ原地区で、車両着雪落下による飛び石被害(車両部品、窓ガラス破損等)や電気機器の絶縁破壊などが起こり、雪の舞い上がりを防ぐスプリンクラなどによるぬれ雪化、人力による雪落とし、および列車速度規制でこれに対応してきた。

東北新幹線では、列車前頭部の走行抵抗の小さいスノーブラフによる高速自力排雪・側溝貯雪を、豪雪の上越新幹線では、スノーシェルタと循環式温水散布による完全消雪を行っている。

また 200 系車両では、車内換気などのため吸気側にサイクロン方式の雪切り装置を、着雪防止のためボディマウント方式を採用した。

**2・5・2 騒音対策** 昭和 40 年代後半から沿線住民の環境意識が高まって、新幹線の列車走行騒音が問題になり、環境庁は 50 年にピーク値で、住宅地域 70 ホン、商工業地域 75 ホンという厳しい環境基準を定めた。開業以来の騒音対策の努力は

表 2 構造物別スラブ・有道床軌道の延長比

構造種別	東海道新幹線 (東京～新大阪間)		山陽新幹線 (新大阪～岡山間)				山陽新幹線 (岡山～博多間)				東北新幹線 (大宮～盛岡間)				上越新幹線 (大宮～新潟間)			
	延長 km	比率 %	軌道別 km		延長 km	比率 %	軌道別 km		延長 km	比率 %	軌道別 km		延長 km	比率 %	軌道別 km		延長 km	比率 %
			バラスト	スラブ			バラスト	スラブ			バラスト	スラブ			バラスト	スラブ		
土工	274	54	12	0	12	7	54	4	58	15	3	23	26	5	1	2	3	1
橋りょう	57	11	20	0	20	12	16	15	31	7	4	70	74	16	4	27	31	11
高架橋	116	22	71	3	74	45	45	41	86	22	39	219	258	55	14	121	135	49
トンネル	69	13	53	5	58	35	10	213	223	56	1	111	112	24	0	106	106	39
計	516	100	156 (95%)	8 (5%)	164	100	125 (31%)	273 (69%)	398	100	47 (10%)	423 (90%)	470	100	19 (7%)	256 (93%)	275	100

現在この基準を達成すべく集中されており、幾多の対策が開発、実用化されている(表3)。新たに開発された指向性マイクロホンの利用と、大々的な種々の試験により、新幹線鉄道騒音の音源別寄与と伝ば特性を明らかにすることが可能となり、東北・上越新幹線開業時の基準 80 ホンはクリアされた。

音源対策で基準が達成されない場合は、沿線民家に防音工事か立ち退き補償を行っている。

**2・5・3 振動対策** 騒音に平行して振動についても、振動対策、伝ば路対策の研究開発が行われてきた。東北・上越新幹線では、主として地震対策により線路構造物がマシブなためか、振動について問題はほとんど生じていない。

**2・5・4 トンネル微気圧対策** 列車が高速でトンネルに突入すると、圧縮波が音速で前進し、出口からパルス状の圧力波となって放出される。これによって生ずる微気圧波が沿線の民家の窓などを振動させ奇音が発生する。現在、トンネル入口に圧縮波の形成を遅延させる緩衝フードを設けるか、トンネル内で圧縮波をバイパス等へ放出させるかの方法が有効であり、実用化されている。

**2・5・5 電波障害対策** パンタグラフ集電時のアークによるパルス音が沿線テレビ障害の主要原因であり、テレビ共同アンテナ設置で一応の回避をはかる一方、パンタグラフの改良やすり板材質

表 3 鉄道騒音の音源別分類とその対策

騒音の種別		主な対策手法
転動音		レール表面削正 車輪踏面削正 防音壁 吸音処理
構造物音	コンクリート橋	軌道構造対策けた
	鋼橋	けたの制振 有道床化 下部遮音工
集電系音	しゅう動音	潤滑 すり板・トロリ線材質
	スパーク音	架線・パンタグラフ構造 母線引き通し
	パンタグラフ風切り音	整形など
車体空力音		整形など

の銅系から鉄系への変更が進められている。

### 3. 新幹線の将来展望

新幹線の今後の展開は、既設新幹線の、高速化および 21 世紀社会へ適合する改革、ならびに整備新幹線の、新線建設などシステム拡大の二つの方向へ向かうことになる。

財政上の問題があるにせよ、新幹線システムの持つ高速、安全、快適、大量などの特性は他交通機関で補えないものがあり、十分な環境アセスメントの後、極力低廉なものとして計画的に進められるべきものといえよう。

(1) 高速化 東海道・山陽新幹線は、今後の空港や高速自動車道の整備に対して競争力をつけるため、昭和 60 年代初頭より車両・地上設備の更新が始まるので、68 年度を目途に 4 段階の高速化が計画されている。これによれば、東京～新大阪は 2 時間台、東京～広島は 4 時間台、東京～博多は 5 時間台、新大阪～博多は 2 時間台で到達できる予定である。この計画に導入される 0 系電車のモデルチェンジ 100 系電車は、近い将来最高 260 km/h で走行することになる。

一方東北新幹線では、60 年春の上野開業時に ATC 最高速度を 240 km/h に向上した。山陽新幹線とともに東北・上越新幹線も近い将来、260 km/h 化されることになる。

これらの計画に続く高速化のための研究が既に始まっている。鉄道技術研究所では 56 年以来、車両、軌道、集電、制御など分野ごとの研究により、軽量、小断面、高出力化によって 300～320 km/h の安全走行、350 km/h の試験走行が可能な高速新幹線車両 SUS (Speed Up on the Shinkansen) の構想を提案している。

いずれにしても、高速化には列車走行騒音、トンネル通過時の車両の気密、出入口空力音、許容カント不足量、集電システム、車両軽量化などの技術開発を必要とするが、既設の信号、き電システムの改良も含め最終的には経済性から最適解が求められることになる。

(2) 21 世紀社会への適合 新幹線の延伸につれ、遠距離客に対しては航空機に対抗できる魅力を加し、本来競争に勝てる距離帯でも速度以

外のサービスを加える必要が生じてきた。

21世紀について種々の予測が行われているが、近い未来に情報社会が到来することはまず確かであろう。これに対応して将来の新幹線は、その車室内が外部の情報社会と緊密に一体化するとともに、新幹線の運行それ自体が情報の流動と相補っているのだからなければならない。

このような考えから、100系電車では旅行の多様性に対応した個室、家族個室、寝台、パノラマラウンジ、階上食堂など多彩な企画が行われている。また東北新幹線で車内と外部とのファクシミリ交信や、コンピュータを利用した座席指定券販売用車内端末機の実験が成功裏に進められた。

既にATC、CTC、COMTRAC、SMISなどが開発され、新幹線システムの中核を構成している。将来は自動列車運転(ATO)への挑戦があり、列車自体にモニタリングや判断機能を付加し、智能化することが必要となろう。

(3) 低廉化 新幹線の保守運営システムは開業後見直された部分ももちろんあるが、当初のものも残っている。既設新幹線の運営費を今一度見直し、体質を改善して競争力を強める必要がある。

今後の新幹線は、人口密集地を通らず、輸送量も少ないが、反面、地価や市街地建設上の諸制約、

環境問題、列車回数など建設費を安くする要素も大きい。従って、線区ごとに最適条件となるようシステムの信頼性、境界領域での割り切りなどを行い、現行新幹線と異なった概念の導入が求められよう。また既存交通手段との関連についても、物流、旅客流動を含めた交通体系の基本に立った考慮を払い、国家的次元での経済原則に従った最適解が求められる必要がある。

(4) いわゆる“新幹線”からの脱却 新幹線は今や世界中で“Shinkansen”という固有名詞として使われている。そこには、世界の鉄道再生の引き金となった東海道新幹線のイメージが固定化している。新幹線は在来線と同じ鉄車輪、レールシステムの鉄道であるが、発想を転換してそのシステムからの脱却があつてよい。超電導磁気浮上案内、リニアシンクロナスマータ駆動による鉄道システムは、宮崎実験線で既に517 km/hの浮上走行を達成、3両連結、有人走行にも成功している。この現在の技術水準は実行段階へ移行可能な状況にあると考えられ、今後の太平洋ベルト地帯に対する有力な交通手段の候補といえよう。

このような交通システムを第二世代の“Shinkansen”と位置づけることにも意義があろう。

(原稿受付 昭和60年6月3日)