

新幹線の実現と発展に役立った相似模型

横瀬 景司*, 山本 彬也**
Keiji YOKOSE Akiya YAMAMOTO

佐藤 吉彦**, 松浦 章夫**
Yoshihiko SATO Akio MATSUURA

1. まえがき

日本の鉄道の営業速度がまだ最高 110 km/h であり、世界の鉄道でも 160 km/h であった時代に、東京一大阪間 500 km を 3 時間 10 分、最高速度 210 km/h で走行する新幹線を実現することは、当時の鉄道を取り囲む一般的な状況の中では革命的な行動であったと考えられる。そしてその開業以来すでに 15 年の歳月が流れた。

この間、このシステムの実現そして発展に役立った相似模型はいくつかあるが、ここではこれらのうち、① 東海道新幹線開業以前における、自励振動として有名なだ行動に対して安定な台車を開発するための模型実験、② 車両前頭形状の決定とトンネル内のすれ違いを含めた圧力波の問題、③ 山陽新幹線開業後における長大トンネルの出口から生ずる微気圧波の問題に関係した空気力学の分野における模型実験、④ 現在建設が始められている本州四国連絡用長大つり橋のけた端に生ずる角折れの問題に関する模型実験について紹介する。 [佐藤 吉彦]

2. だ行動の模型実験と相似則

2.1 研究経過 鉄道車両は一般に複雑な構造からなっており、その運動は 15~17 自由度をもつ力学モデルとして表現することができる。このモデルには、各部の遊間、摩擦、車輪・レール間のクリープ力などの非線形要素が存在し、その理論解析には多くの困難を伴う。この高速走行時における鉄道のだ行動現象を解明し、その防止法を確立して現在の新幹線のような快適な乗りごころ

と安全性の高い車両が設計されるまでには、基礎理論の確立、電子計算機による数値解析、模型による組織的実験研究、さらに実物車両による実験など、長年月にわたる研究と多額の経費を要したことは言うまでもない。

模型実験については当初は 1/10 模型によって実験を実施した。しかし精度の高い実験を実施するには模型が小さすぎるという理由もあり、昭和 35 年には図 1 に示すような 1/5 模型に発展し、現在では実物車両とう載の車両試験台が鉄道技術研究所内に設置されている。

2.2 実物実験の問題点とだ行動現象 鉄道車両の動力学的現象解明には、実物車両により実験を実施することが最良であることは言うまでもない。しかし、実験に際してはいろいろな問題点がある。たとえば、装置がおおがかりになる、条件変更、設計変更が簡単でない、実験の時間的制約と多大な人力、経費とを要する、などである。

そこで、実物に類似した力学モデルを想定し、機動性のある縮尺模型で実験ができれば、実物製作前の設計変更、力学系の諸要素とだ行動の関係の解明に効果的である。

しかし、模型実験についても二、三の問題点は

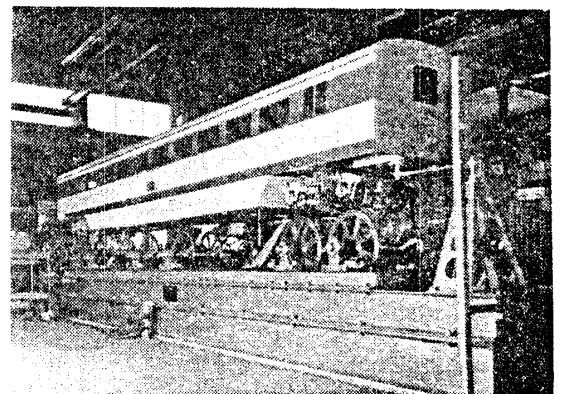


図 1 1/5 車両転走試験装置

* 正員、新潟大学工学部 (〒 940 長岡市学校町 1-2-1)。

** 鉄道技術研究所 (〒 185 国分寺市光町 2-8-33)。

ある。たとえば、実物相形の模型を製作できるかどうか、実物の現象を十分に再現できるかどうか、などである。それには鉄道車両の構造を十分に理解し、車両に起こる現象をはあくすることが必要である。鉄道車両の運動、とくにだ行動は、車輪の形状と車両の固有振動数とに強く支配されることを考慮すれば、模型製作のポイントはおのずからきまる。

ここで車両のだ行動について簡単に説明する。だ行動には二つの形がある⁽¹⁾。一つは車体だ行動であり、この限界速度は車体の固有振動数と幾何学的だ行動の波長の積によって、近似的に表される。他の一つは台車だ行動で、この限界速度は車体の力学的特性にはあまり支配されないで、台車の固有振動数と幾何学的だ行動の波長との積によって、近似的に表される。また、軌道の弾性によってもだ行動の安定性に変わるが、これはむしろだ行動の安定性を増加する方向に作用するので、だ行動現象の基本的解明には考えないでよい。

2.3 模型製作の留意点 上記の理論的知識をもとにすれば、模型製作に際し、留意すべきことがら明らかになる。

まず、車輪の製作、とくに車輪踏面形状と車両転送試験装置の軌条輪の断面形状はかなり正確に作ることである。車輪踏面は十分に研摩し、高周波焼入れなどによって摩耗による車輪踏面形状の変化を防止することが必要である。つぎに、車両の固有振動数を実物に相似にすることである。それには、車体重量、台車重量、各部の寸法、慣性モーメント、車体支持装置のばね定数などを力学的に相似に作ることである。そのほか、車両各部の遊間、摩擦係数などがあるが、これらについては模型と実物とを相似にすることは難しい。

2.4 相似則 模型の実物に対する縮尺比を $1/n$ 、材料の密度を ρ 、重量を W 、長さの代表値を l で表し、模型については m 、実物については a の添字をつけると、重量比は、

$$W_m/W_a = \rho_m l_m^3 / \rho_a l_a^3 = \rho_m / \rho_a \cdot 1/n^3 \quad \dots (1)$$

となる。模型と実物に同じ材料を使うものとする、 $\rho_m = \rho_a$ であるから式(1)は、

$$W_m/W_a = 1/n^3 \quad \dots (2)$$

となる。また、運動中の車両については、つぎの関係式が成立する。

車体の慣性力 F は、

$$F = ma \quad \dots (3)$$

車体の固有振動数 ν は、

$$\nu = \sqrt{k/m} \quad \dots (4)$$

ばね力 F_k は、

$$F_k = kl \quad \dots (5)$$

ここで m は車体質量、 α は振動加速度、 k はばね定数(軸ばね定数、まくらばね定数、ばねの支持間隔、車体重心高さなどに関係する等価ばね定数)、 l は長さの代表値である。

式(3)~(5)を代表値で表すと、

$$m = \rho l^3, \alpha = l/t^2, k = \rho l^3/l, \nu = 1/t \quad \dots (6)$$

となる。ここで t は時間を表す。

そこで、模型と実物のパイナンプバ⁽²⁾を等しくおくと、 $(F/F_k)_m = (F/F_k)_a$ であるから、これに式(3)および式(5)を入れると、模型と実物の振動数比として、次式が得られる。

$$\nu_m/\nu_a = \sqrt{n} \quad \dots (7)$$

また、車両の転走速度を v とすると、運動エネルギーは mv^2 、ポテンシャルエネルギーは kl^2 であるから、模型と実物のパイナンプバを等置し、 $(mv^2/kl^2)_m = (mv^2/kl^2)_a$ とする。これに式(2)および

$$k_m/k_a = W_m/W_a \cdot l_a/l_m = 1/n^2 \quad \dots (8)$$

の関係を用いると、転走速度比は

$$v_m/v_a = 1/\sqrt{n} \quad \dots (9)$$

となる。

さらに車両には、車体の共振防止のためダンパが取り付けられているが、 $1/10$ あるいは $1/5$ 模型のように縮尺比の小さい模型では、模型ダンパの減衰係数まで相似に作ることは難しい。そのほか車両各部に存在する遊間、摩擦までも相似に作ることは困難である。また、台車の前後輪軸の平行度もだ行動の波長に影響を与えるので、製作許容誤差の範囲内で極力正確に製作することである。

だ行動模型実験に際し、さらに重要な要因の一つは、車輪・レール間のクリープ力⁽³⁾である。クリープ力 F_c は次式によって定義される量である。

$$F_c = -fv'/v \quad \dots (10)$$

ここで f はクリープ係数、 v は転走速度、 v' はすべり速度で、 f (力のジメンションをもつ) は Chartet の理論式⁽⁴⁾によれば、

$$f = Eab \quad \dots (11)$$

である。ここで E は材料の縦弾性係数、 a および b はヘルツの理論によってきまる車輪・レールの接触面におけるだ円の長径および短径の半分

を表す量である。

式 (11) において a および b は車輪・レールの接触点における荷重, 車輪・レールの形状および縦弾性係数に関係するので, それぞれの代表値を W, l, E で表すと,

$$a \text{ あるいは } b \propto (Wl/E)^{1/3} \dots\dots\dots(12)$$

となるから, 式 (11) より

$$f_m/f_a = (E_m/E_a)^{1/3} n^{-8/3} \dots\dots\dots(13)$$

となるが, 模型と実物のパイナンプを等しくおくと, $(F/F_c)_m = (F/F_c)_a$ であるから,

$$F_m/F_a = f_m/f_a \cdot \varepsilon_m/\varepsilon_a = \rho_m/\rho_a \cdot 1/n^3 \dots\dots\dots(14)$$

となる。ここで ε はすべり率 (v'/v) で, 式 (14) は $\varepsilon_m = \varepsilon_a$ とおいたものである。

模型と実物のクリープ係数を相似にするためには, 式 (13) と式 (14) を等置して,

$$E_m/E_a = (\rho_m/\rho_a)^3 \cdot 1/n \dots\dots\dots(15)$$

となるから, 模型の縦弾性係数は縮尺比 $1/n$ に比例したものを使う必要がある。ところが事実上このような材料を使用するには問題がある。クリープ係数のスケールファクタを実物に近似させるため, 車輪・レールの材料としてアルミニウムを使用した例もある。しかし, 常用荷重の範囲内では, クリープ係数の多少の変動はだ行動の限界速度におよぼす影響は少ない⁽⁵⁾ので, 普通, 鉄を使用して差し支えないと考えられる。

2.5 今後の問題 新幹線車両の開業にいたるまでの研究経過の概要と, 模型製作上の問題点および模型と実物との相似則についてその概要を記述した。微小振幅の線形範囲の運動では, 相似則がほぼ適用され, だ行動現象の説明に十分であると考えられるが, 非線形要素を伴う大振幅の運動について相似則を拡張するには, たとえばクリープ力の非線形特性の問題があるので, 今後の課題として残っている。 [横瀬 景司]

3. 空気力学の分野における模型実験

3.1 車両前頭部形状 空気力学の分野における模型実験の代表的な例は, 車体特に前頭部模型の風洞試験によって空気抵抗を求めたり, 車体形状を流線形にデザインすることである。新幹線の営業開始の9年前から東京大学工学研究所の3m風洞で試験が繰返され⁽⁶⁾, その成果は小田急SE車を始めとして新幹線車両に反映された⁽⁷⁾。

この試験については, 最近さらに外国において

車両と地面との相対運動を正確に取り入れるるために, 風洞の中にゴムベルトの移動地面板をもちこんだり (フランス, TGV), 列車の1/5模型を自動車で動かして横風の影響を測定する (イギリス, APT) ことが試みられている。

3.2 トンネル内におけるすれ違い問題 日本のように山地の多い地形では, トンネルは避けることができない問題であり, 新幹線や高速自動車道が延びるに従って, より長いトンネルが計画されるようになってきた。青函トンネルのように特に長い複線トンネルの場合を除けば, 鉄道トンネルでは蒸気機関車の排煙の問題がなくなったために, また列車の断面がほぼ一様で十分長いこともあって, 自動車道トンネルとくらべて流れの解析がより容易であり, また換気が特に問題にならないことも確かである。しかし, 新幹線が計画されていたころには, トンネルという狭い拘束された空間に, 従来の鉄道の2倍もの速度で列車が突入し, 場合によってはすれ違いがあり得るということで, 空気力学的な問題の予測と対策が望まれていた。

これに関する最初の模型実験は, 断面の縮尺1/40で長さ10.6mのアクリル製トンネルの中を, 2mの長さの列車をロープえい行ですれ違いできるようにして, 全体を内法幅1.0m, 深さ0.8mの水そうに沈めたもの⁽⁷⁾ (1959) であって, 模型えい行速度は乱流境界面のレイノルズ数相当の3m/sまで可能であり, 車体表面およびトンネル内の圧力を測定するものであった(注1)。

これとともに, 空中で縮尺1/20でトンネルおよび列車断面を忠実に模擬した模型 (長さはそれぞれ20m, 2.28m) を用い, 上下を支持された車体が金属ばね発射機により4~10m/sの速度で打ち出される装置⁽⁸⁾による試験 (図2, 1960) も行われた。これでは, 車体の先頭形状を変えたり, トンネル壁面に穴をあけるなどをしたときの地上側および車上側の圧力が (後者ではFM送信により) 測定された。

これらの実験はいずれもトンネル・列車断面は幾何学的に相似につくられ, 圧力を走行速度に相当する動圧で除して無次元化したものを模型実験から得ようとするものであった。

このようにトンネルの空力現象全般をとらえる

(注1) 比較的低い速度でも大きい圧力を得られるので, 水中での試験が計画されたと思われる。

代わりに、列車がトンネルに突入する過渡現象はいちばん重要であり、またその後の流れを支配すると考えられるので、これに目標をしばった模型実験もなされた。ここでは壁面摩擦や空気粘性がほとんど関係しないので、幾何学的に相似のまま列車前頭やトンネル入口の形を変えたときの、トンネル内の圧縮波の波形を調べる目的の小形模型一内径 28 mm, 長さ 5.86 m の黄銅円管内にピアノ線を張り、ゴムパチンコ方式で外径 15.9 mm, 長さ 0.6 m の列車を最高速度 15 m/s で走らせて実験が行われた⁽⁹⁾ (1960)。

3.3 トンネル出口から発生する微気圧波対策

その後昭和 50 年代にいたり、従来のバラスト軌道に代えて主としてスラブ軌道で建設された山陽新幹線で、列車が比較的長いトンネルに突入した際に生じた圧縮波が、トンネル内を伝わっていくうちに波面がしだいにきり立ち、出口から強い微気圧波として放射され、これが周辺の家屋の窓ガラスなどに不意に強い衝撃を与える問題が生じ、何らかの対策が求められた。トンネルの入口に短いトンネル（緩衝工）を設ける、入口を広げる、開口部を設けるなどにより、列車突入による圧縮波の立ちあがりを緩和させる目的で、トンネ

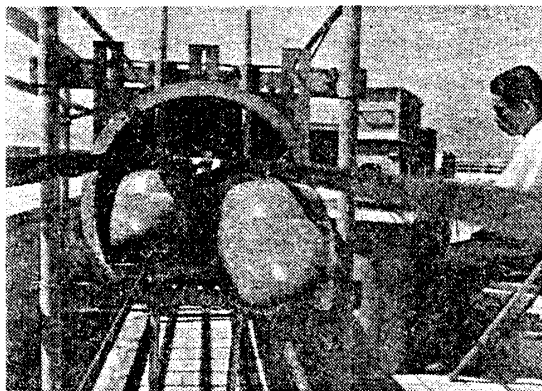


図 2 トンネル中形模型試験

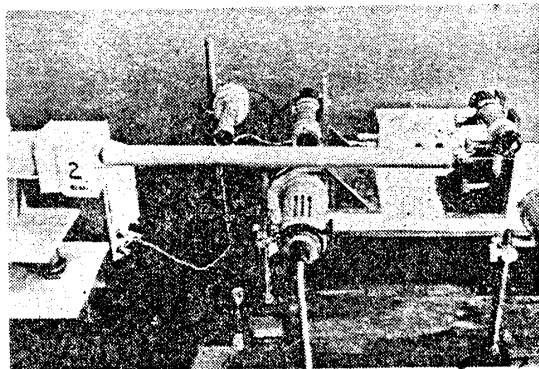


図 3 トンネル小形模型試験
(左端：トンネル入口)

ル入口にいろいろな対策工を設けたときの効果を見ることになったとき、上記の経験を生かし、寸法縮尺 1/140 で幾何学的に相似にして、内径 63 mm (長さ 3.5 m) のパイプの中をゴムを用いて最高 35 m/s までの速度で走行させる模型実験(図 3, 1975-8)が行われた。トンネル出口で幾何学的相似の位置での微気圧波の圧力は列車突入速度の 3 乗に比例し、周波数については突入速度と長さとの比で換算できることが理論解析から得られた結果、模型実験では圧力計として騒音計が利用できた⁽¹⁰⁾。この成果は備後トンネルに適用され、突入速度 200 km/h, トンネル坑口から 20 m 地点で微気圧最大値が 15~25 mmAq であったものが 2 mmAq 程度に低減できた。その後このような緩衝工による対策は山陽の多くのトンネルのみでなく、東北新幹線などにおいても施工(図 4)されているが、これらはすべて模型実験の成果といえよう。 [山本 彬也]

4. 長大つり橋の角折れ問題に関する模型実験

4.1 要旨 本州と四国との間を結ぶ交通路として、鉄道・道路併用の長大つり橋の建設が計画され、すでにその一部の建設が始められている。このような大規模な橋りょうを建設するには、多くの技術的な問題を解決する必要がある、関係分野でそれぞれの検討が進められている。

長径間のつり橋に高速鉄道をのせるという計画は、世界でもあまり例がない。そのため、つり橋の動揺や変形が、鉄道車両の走行を阻害しないかということが、技術的問題点の一つとなっていた。つり橋の動揺に関しては橋りょうの中央付近を、つり橋の変形に関しては橋りょうの端部付近を走行する列車が対象となる。前者に関しては主

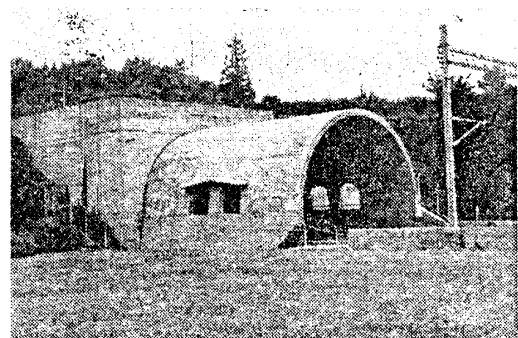


図 4 一関トンネル北口の微気圧波緩衝工

として東京大学の模型装置、後者に関しては鉄道技術研究所の模型線路により、それぞれ実験的・理論的研究が行われた。

ここでは、これらのうち鉄道技術研究所で行われた模型実験について紹介する。

4.2 つり橋の変形に対する問題点 長大つり橋においては、載荷や温度変化により、中央径間の補剛けたの傾斜と側径間の傾斜が主塔付近で極端に大きくなり、この位置に角折れと呼ばれる軌道の折れ曲がりが生じる(図5)。この値は、中央径間1500mの3径間2ヒンジ補剛トラスつり橋の主塔部の鉛直方向の角折れにおいて、最悪の条件のもとで40%と計算されている。これに対して、この角度をほぼ4等分して10%ずつ約10m間隔に分散する緩衝けた装置が提案されている。

一方、強風の際には、補剛けたが横方向にも大きくはらみ出し、上記の鉛直方向の角折れとともに、水平方向の角折れも同時に発生する。その大きさは20%程度に達するものと計算されている。

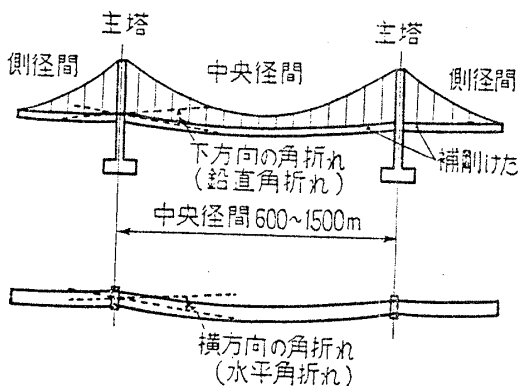


図5 長大つり橋に生じる角折れ

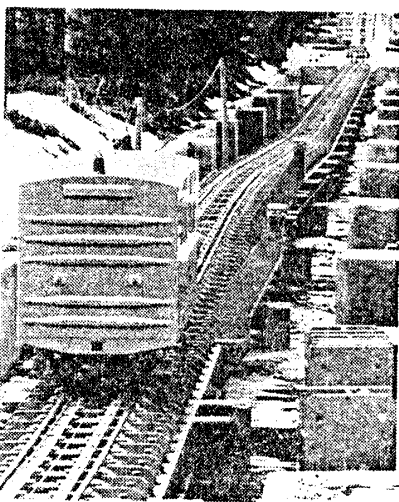


図6 角折れを設定した軌道と走行する車両(1/5相似模型)

このような大きな角折れが存在する軌道における列車の走行は、まったく未経験であるので、併用つり橋の実現にはこの点に関する十分な検討が必須なものとされた。そこで、この現象を確認するために鉄道技術研究所の構内において、相似模型による実験が実施された。

4.3 角折れ模型実験⁽¹¹⁾ 模型実験の対象とした車両は、ワラ1形式の2段リンク式二軸車で、模型の設計、製作にあたっては、できる限り実際の貨車の諸特性に合わせるよう考慮した。

この模型車両は、実物車両と同様に、主な部材を鋼製とし、寸法の縮尺を1/5とした。したがって相似則から、重量の縮尺は1/125、速度の縮尺は $1/\sqrt{5}$ 、加速度の縮尺は1/1となった。また、車輪およびレールの接触部の形状は、実物に相似させたが、材料に鋼を用いたことから、その接触力についての相似性は多少あいまいとなった。

模型車両を図6に示すように、鉛直および水平角折れを設定した軌道上を走行させ、車輪の輪重、横圧および車体の振動加速度などを、小形無線機を介して地上の記録器に送信した。

模型車両の走行安定性は、上述の測定量を用いて、脱線係数あるいは振動加速度をもって判定された。この判定方法は実車に対しても通常採用されているものである。

模型線路は、線路の形状を上下左右方向に自由に變形できるように設計されていて、角折れを任意に設定することができる。また、まくらぎには微調整装置を取付け、実際の線路の精度に相似させた模型を得ることができるものである。

以上のような相似模型を用いた角折れ走行実験により、つぎの点が明らかにされた。まず、線路の直線部を走行する車両には、高速において実車に見られるだ行動に類似した現象が現れた。つぎに、鉛直方向の角折れと水平方向の角折れが同時に存在する場合と、前者のみが存在する場合で、車両の上下方向の運動においては相違が認められない。最後に、連続した数個の角折れを通過する場合の車両の運動は、一つの角折れを通過するごとに増加する場合があるが、その増加程度はそれほど大きくなく、角折れの分散の効果が確かめられた。

4.4 その後の経過⁽¹²⁾ この相似模型による実験によって、大きな角折れが存在する場合でも、適当にそれを分散すれば、列車の走行上とくに問

題がないことが確かめられた。これに引き続き、狩勝実験線ならびに山陽新幹線において軌道に角折れを設定し、実車走行試験が行われた。

一方、これらに平行して実施された車両の運動性状のシミュレーション、それと模型、実車試験との対比を経て、角折れの許容限度、分散の適正間隔などの検討を行い、つり橋の変形における角折れの問題に関して、設計条件を定めるのに必要な基礎資料を提供した。 [松浦 章夫]

(原稿受付 昭和54年10月30日)

文 献

(1) 松平, 機論, 19-87 (昭 28), 139, 146, 154.

- (2) 江守・Schuring, D.J., 模型実験の理論と応用, (昭 48), 技報堂.
- (3) 横瀬, 機論, 37-304 (昭 46-12), 2407.
- (4) Müller, C.Th., *Öst. Ing. Z.*, 4-5 (1961-5), 179. [Levi, R., *Acad. Sci.*, 199 (1934), 119 から引用されている].
- (5) 横瀬, 機論, 35-279 (昭 44-11), 2190.
- (6) 伊東・田中, 鉄道技研監修, 高速鉄道の研究, (昭 42), 345/349, 研友社.
- (7) 牧野・小西, 鉄研速報, 63-83 (昭 38-4).
- (8) 小野・西村, 東海道新幹線に関する研究 (第2冊), (昭 36), 188/194, 鉄道技術研究所.
- (9) 原・大櫛, 鉄研報告, 288 (昭 37-4).
- (10) 小沢・ほか2名, 鉄研報告, 990 (昭 51-2).
- (11) 伊藤・ほか3名, 鉄研報告, 785 (昭 46-11).
- (12) 松浦・涌井, 鉄研資料, 36-1 (昭 54-1).



通産省・創造性高揚へ6項目提言 (その2)

(175 ページより)

▽技術開発貢献企業制度の創設=技術開発を推進するにはたとえばノーベル賞にも劣らないような国際的権威と報賞を伴う「技術賞」という報賞制度を設立することが一案である。この技術賞の対象は外国人をも含める必要がある。また、3年間なり5年なり一定の伸び率以上へ技術開発投資を行い、優れた技術開発に努めた企業および経営者を表彰しようとするものである。経営者を表彰するのは技術開発には優れた技術陣の存在ばかりでなく、技術開発に優れた理解とどう察力を有する経営者の存在が重要なためである。

▽技術戦略の一環としての特許制度の活用=わが国では特許制度について従来「権利の保護」という消極的観点から考えられ「権益を確保するための戦略手段」として積極的に位置づけられることが少なかった。しかし、諸外国では先進国のみならず今後の市場拡大が予想される発展途上国においても特許を積極的に確保している。わが国としても今後、企業における技術戦略の一環としての特許制度の活用を中心とした技術管理意識の高揚が必要であり、海外出願の促進をはかり、特許制度の活用を考えていくことが必要である。

▽最新試験施設の設置=世界最高水準の設備を備え

た試験場、研究所を設置することがたいせつである。わが国では現在ジェットエンジン性能テスト施設がないため、イギリスのガスタービン研究所で高空性能試験を行っているが、これに要する費用だけで数億円かかり、なおかつ相手国へエンジン性能に関する最新の情報が流出する。こうした施設を設置できれば、外国からの研究者の到来も期待でき、わが国への技術的刺激などその効果は大きい。

▽科学技術博物館、産業博物館の設立=科学技術教育を高めるばかりでなく、ある時代の知恵とか技術を次代へ伝承する意味でも博物館の設立が必要である。

▽外国人教授に対するポストの新設=わが国でも新たな時代の要請にこたえるためにも優秀な外国人を常任教授として登用することを検討する時期にきている。これが現行の講座制を中心とした大学制度下で難しければ別わくで検討するのも一案である。アメリカでは他国人を大学教授として登用、その効果は内外の優秀な人材が集まることから、大きな知的刺激と業績向上が期待される一方、アメリカ社会にとっては知的水準の向上、社会的還元などが期待され、これがアメリカ社会の活力の大きな源泉となっている。

[服部 敏夫]