

世界の最先端技術を結集

国立天文台の  
大型望遠鏡

# すばる

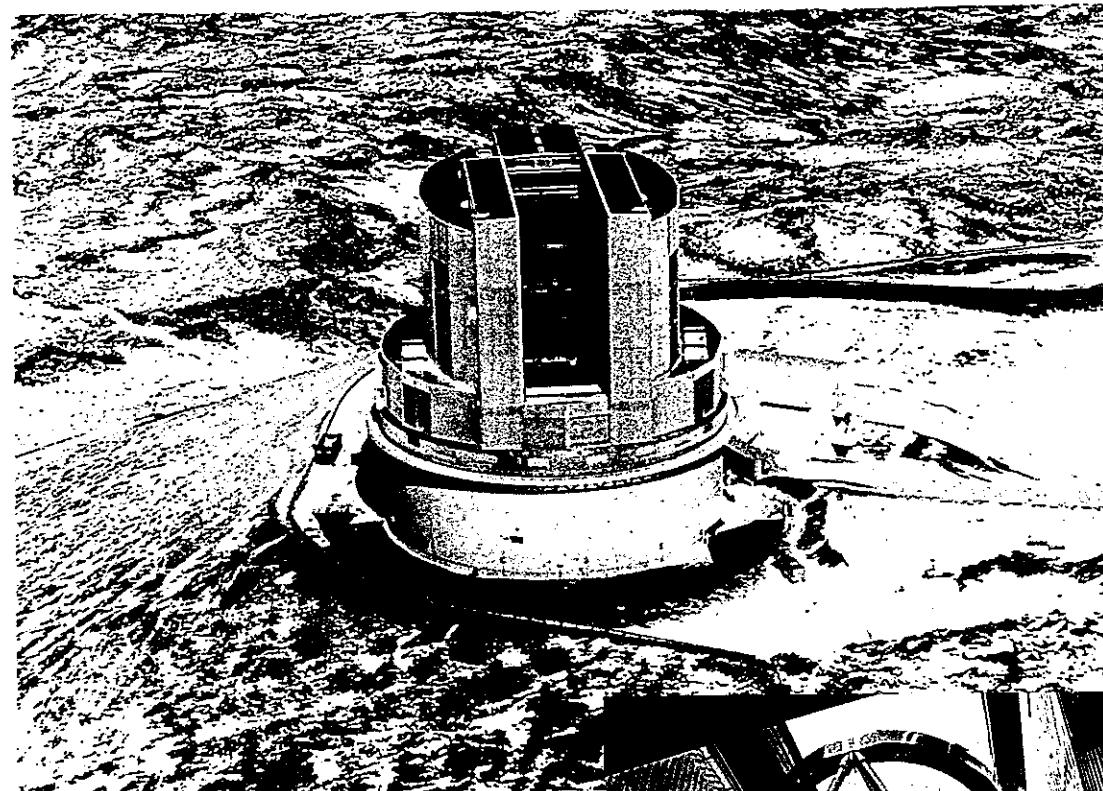


写真1 うっすらと雪化粧したマウナケア山頂のすばる望遠鏡ドーム

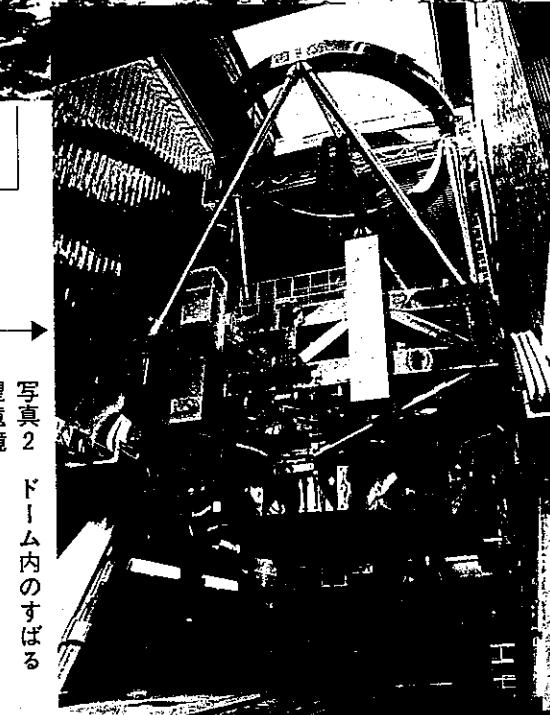
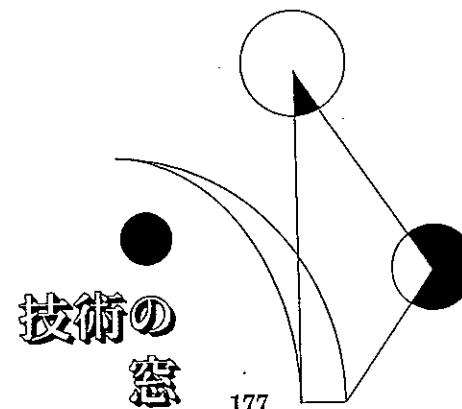


写真2 ドーム内のすばる  
望遠鏡



技術の窓

有効口径8.2M!! 巨大な精密装置が  
観測開始するまで

ハワイマウナケア山頂

写真3 研磨中の主鏡

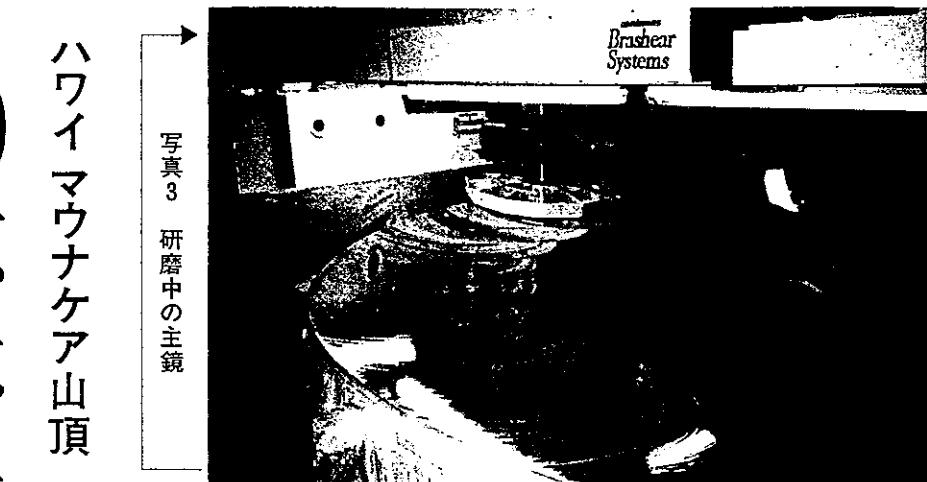


写真4 主鏡の完成検査（右端筆者）

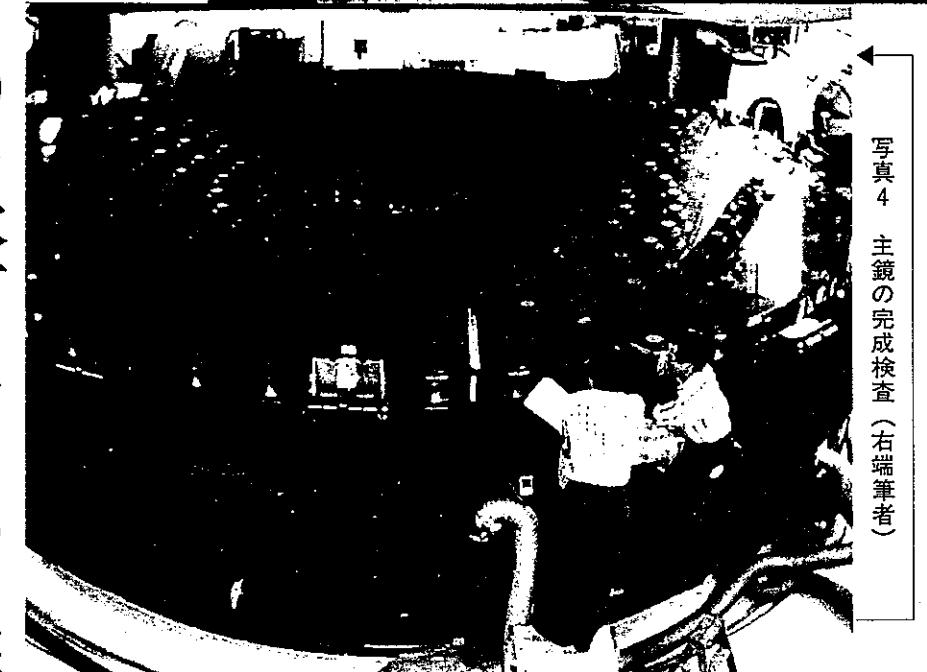


写真5 マウナケア山頂へ  
向かう主鏡



# 大型望遠鏡すばる

国立天文台 光学赤外線天文学  
・観測システム研究系 家 正 則

国立天文台が1991年度から海拔4100mのハワイ島マウナケア山頂（写真1=技術の窓参照）に9年計画、総予算約400億円で建設を進めてきた有効口径8.2mの大型光学赤外線望遠鏡すばる（写真2=同）が、1998年12月にファーストライトを迎えた。この望遠鏡計画は1984年ごろから検討を重ね練られてきたものであり、国立天文台野辺山宇宙電波観測所の45m電波望遠鏡や宇宙科学研究所の一連のX線天文衛星とともに、日本の天文科学の大きな柱となるものである。ハワイ島の町ヒロに設置された国立天文台ハワイ観測所は我が国が外国に設置した初めての国立研究施設となった。世界の最先端技術を結集して建設したすばる望遠鏡について紹介する。

## 1. 主鏡の製作

天体望遠鏡の主鏡として使えるのは熱膨脹係数の極めて小さい光学ガラスである。1948年に完成了パロマー山天文台の5m主鏡は、1度あたりの膨脹率100万分の1程度のバイレックス・ガラスを蜂の巣構造の鋳型に流し込み、中空構造とすることで軽量化を実現した。だが、膨脹率100万分の1の鏡の場合、良い結像性能を保つには、実現が困難なレベルの温度制御が必要となる。すばる望遠鏡の主鏡には膨脹係数がさらに2桁小さいガラス材であるコーニング・ガラス社の超低膨脹ガラス(ULE)を採用することとした。コーニング社では直径1.5m程度のULEの六角形部分鏡材を44個作り、これを55個のブロックに整形して直径8.3mの円盤となるように並べ、最後に大型炉でこれらを融着して一枚もののガラス材にする工法を採った。

こうしてできあがった鏡材は、光学研磨を請け負ったピツバーグのコントラベス社に運ばれた。実際に鏡を測定しながら研磨を進めるには、鏡の近軸曲率半径に相当する30mの高さの空間が必要である。コントラベス社は、石灰岩の採掘抗跡を拡幅して、地下に30mの縦穴を用意した。

地上に高さ30mの塔を建設するのに比べると、風による振動や日照による温度変化が無い分、計測には有利である。主鏡の研削・研磨は回転台に乗せた主鏡をゆっくりと回転させ、門型レールを走行する研磨機の先にとりつけられた研磨ヘッドが回転し、主鏡面上をリサージュ图形を描きながら研磨してゆく。もちろん、この工程は計算機制御である（写真3=同）。

鏡面の計測は、はじめのうちは接触センサーをヘッドに搭載して、三次元測定を行ったが、研磨の進行とともに波長10ミクロメートルの赤外レーザー干渉計による計測、さらに最終的には波長0.63ミクロメートルの可視レーザー干渉計による計測を行った。主鏡の面形状は回転放物面に近い特定の回転双曲面に仕上げねばならない。8.2mの鏡で集めた光の80%以上を焦点面上で0.1秒角に相当するスポットに結像させるには、鏡面の平均形状誤差を光の波長の14分の1以下に抑える必要がある。計測には曲率中心からレーザー光を広げて鏡面に照射し、反射光を曲率中心で受ける。主鏡は球面とはわずかに異なるので、その分を補正するヌルレンズを曲率中心の手前に置き、干渉縞を計測して鏡面形状を求める。このヌルレンズが原器となるので、ヌルレンズ自体に誤差がないことを慎重に吟味した。こうして、1998年7月に主鏡の研磨が完了し、世界最大かつ平方根自乗平均形状誤差12nm（50分の1波長）という世界最高精度の8.2m鏡

が完成した（写真4=同）。

## 2. 主鏡能動支持機構

研磨後の主鏡は厚さ20cmで23トンの重さとなった。天体を追尾するとき望遠鏡の姿勢が変化するため、鏡の支持機構にかかる鏡の自重分布は時々刻々と変化する。直径の41分の1しかない薄い鏡の自重変形を無くすため、鏡の形状を常に計測し、鏡を能動的に浮いている状態に制御する能

動光学システムを採用することにした（図1）。計算機シミュレーションの結果、鏡の支持は8つの同心円上にほぼ均等に配置した264点で行うこととした。1点あたりの鏡の荷重は望遠鏡の姿勢により0kgから90kgまで変化する。これに約60kgまでの付加補正力を発生できるようにしておき、鏡の形状をフックの弾性変形の法則に則って、力で制御しようというシステムである。力制御の精度としては90kgに対して1万分の1の10g以下の制御が必要である。望遠鏡の製作を請け負った三菱電機はこのため超高精度の力センサーを開発した。支持力分布がわかれれば、有限要素法による計算機シミュレーションで、その姿勢での期待される支持力分布と比べることにより、支持力誤差分布を求めることができ、対応して鏡面がどう変形しているかが計算できる。

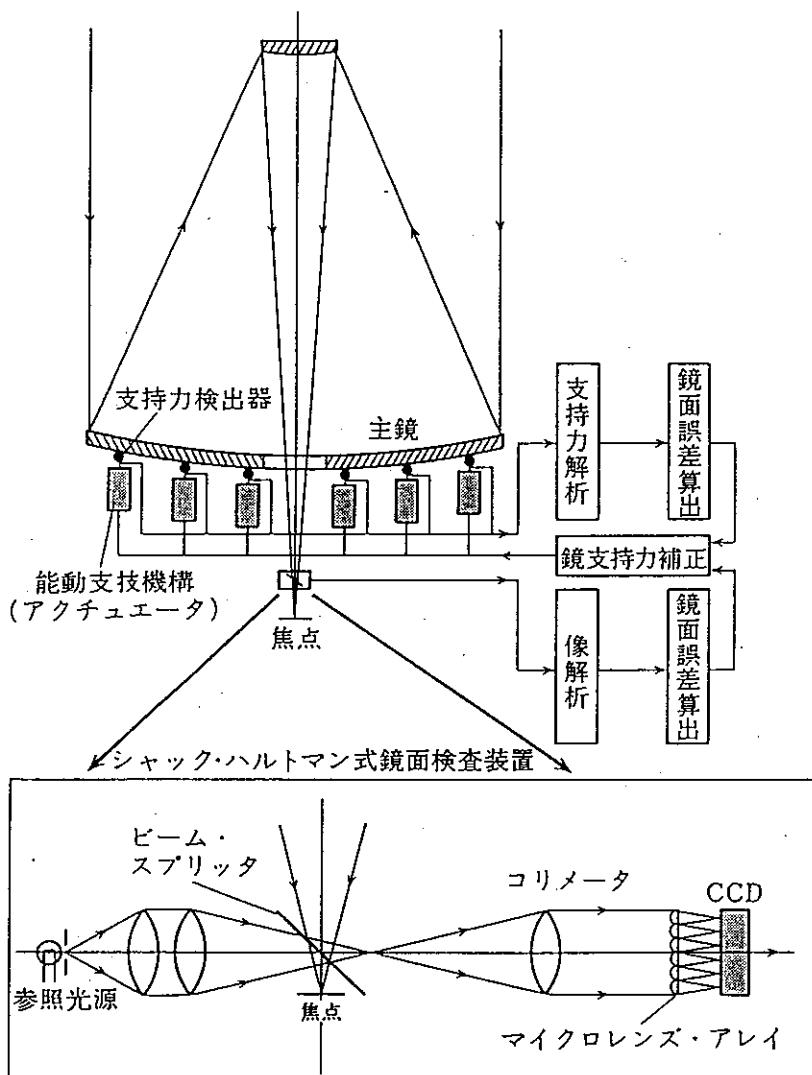


図1 能動光学システムの構成原理

実際の鏡面の測定には、焦点前にシャック・ハルトマン型鏡面測定装置という天文台が開発した装置を用いる。光学的に鏡面をときどき計測し、力支持の制御ループを校正する。シャック・ハルトマン型鏡面測定装置は、望遠鏡の瞳面に置いたマイクロレンズアレーで主鏡を約200個の小部分に分割し、明るい星を撮影すると焦点面上で各小部分から

の独立な星像がその数だけできる装置である。大気のゆらぎを平均化するため、約30秒間の露出をかけると、鏡が理想的な光学面を達成していれば、200個の星像が基盤の目のようにきちんと整列する。星像の並びに乱れがあれば、その向きと変位量から鏡の対応する部分の局所傾斜の誤差ベクトルを求めることができる。この測定から鏡のどこがどれだけ変形しているかが計算できるので、それを直すように支持力を修正する。これが能動光学方式の原理である。

### 3. 望遠鏡架台

望遠鏡は地球の自転に伴う天体の日周運動を追尾する機能が必要である。水平軸と垂直軸のまわりに駆動構造が対称で簡単な経緯台方式を採用し、従来の赤道儀方式より架台が軽量化されているといえ、可動部の重量は500トンにも達する。長いときは1時間以上にも及ぶ露出時間の間、正確に追尾を行わないと、光学系で実現したシャープな画像が流れてしまう。すばる望遠鏡の追尾仕様は10分間ガイドなしでも、追尾誤差が0.2秒角以下という厳しいものとした。このような高い追尾精度を実現するには、摩擦やガタのない方式の採用が不可欠であり、静圧軸受けを採用し、ダイレクトドライブモータで駆動することとした。位置計測には光学読みとり方式のテープエンコーダを使用した。500トンの可動部は厚さ50ミクロンの油膜の上に浮いて、なめらかに走行する。

追尾誤差は天体を望遠鏡で追尾している間にその方向がどの程度ふらつくかを示す量である。出来上がった望遠鏡の追尾誤差は0.07秒角rmsしかない。

指向誤差は望遠鏡を任意の天体に向けたときにどれだけ正しくその方向に向くかを示す量である。これについては、位置の精密に知られている多数の星の位置を実際に山頂に据え付けた望遠鏡で測り、望遠鏡のくせを補正することで誤差わずか1秒角という目標を達成した。

### 4. ドーム

マウナケア山頂の厳しい気候条件から望遠鏡を守り、夜間の観測条件を保持するためにドームがある。水流実験や計算機シミュレーションを繰り返して、ドーム形状はドーム開口部からの空気の流れが適切になるように円筒形とした。すばる望遠鏡は主鏡周辺の温度差による星像劣化を抑えるために、望遠鏡鏡筒への風の流れを規制する黒塗りの巨大な壁（通称グレートウォール）がドーム内に設置されている。ドーム位置はドーム外周に沿ってバーコードを用いたエンコーダシステムを設置している。駆動精度は0.1度である。ドーム可動部の総重量は2000トンにも達する。

大気の安定したマウナケア山頂は天体観測にとって世界で最良の場所の一つである。だが、ドームや望遠鏡周辺での空気のゆらぎによる劣化を最小限に抑えるため、すばる望遠鏡のドームには、いろいろな工夫を施した。通風を確保することによりドーム内部の気温をできるだけ外気温に近づけるのがねらいである。ドーム内気温が周辺気温になじむのには時間が必要なので、日中のドーム内温度は夜間の気温を予測して空調制御することにした。

### 5. 観測装置

望遠鏡で集めて結像した電磁波を検出し記録するのは検出器の役目である。検出器の飛躍的な性能向上が1980年代以降の観測天文学を支えてきたと言っても過言ではない。可視光域では写真乾板が、シリコン半導体をベースとした固体撮像素子CCDにはほぼ完全に置き換わった。天体観測の場合、CCDは感度は良いが面積的に小さいのが欠点であったが、最近は800万画素で60mm×30mmの大きさを持ち、しかも読み出し回路を一方向にまとめて、モザイク化が可能な高感度大型CCD素子が実用化された。すばる望遠鏡の主焦点カメラはこの大型素子を10個並べて30分角の視野を覆

うものである。赤外線検出器も半導体撮像素子の時代となり、感光波長域に応じてInSb、HgCdTe、GaAsなどの半導体素子が実用化され、CCDと同じような画質の撮像が可能になっている。

すばる望遠鏡には30分角の広い視野を誇る主焦点、高解像観測ができるカセグレン焦点、大型装置を設置できる2つのナスミス焦点の合計4つの焦点がある。これらの焦点に装備する合計7台の共同利用観測装置の製作が進められている。このうち3台は可視光用、3台は近赤外線用、1台は中間赤外線用の観測装置であり、どの波長域でも、これらの観測装置により撮像機能と分光観測機能が満たされる。

能動光学の発展として、大気の揺らぎを実時間で計測し、焦点面近傍に置いた小型の可変形鏡を高速駆動して補償してしまう、補償光学装置も製作がほぼ終り、近赤外線でのすばる望遠鏡の解像力を回折限界にまで高めることができた。

### 6. おわりに

すばる望遠鏡は構想から完成まで15年、総予算約400億円。天文学観測のために必要な、新機能・高性能の実現を目標に据えて、世界中の利用可能な先端技術をサーベイして作った望遠鏡である。この間、科学的に明確な目標があったので、こんなものが作れないだろうか、こんな機能が欲しいのだと、工学技術者に相談し、お願いしてきた。宇宙観測のためにはどうしてもこれが必要だという説明に多くの技術者は難題解決への挑戦に果敢にチャレンジしてくださった。もちろん、うまく行ったものと、あきらめざるを得なかつたものがあるが、前例のあるものだけで作ろうという姿勢では、とてもこのような新しい望遠鏡は完成しなかったはずである。理学出身の筆者にも、ものづくりの楽しさと醍醐味が良く分かるようになったのは、大きな収穫であった。研磨完了した

主鏡は1998年11月にマウナケア山頂に届いた（写真5=技術の窓参照）。8m主鏡のアルミ蒸着も大変な作業であったが、1998年12月24日のクリスマスの夜、望遠鏡に初めて天体の光が入った。ファーストライトである。巨大な精密装置である望遠鏡の調整には本来1—2年はかかるものである。だが、すばる望遠鏡は滑り出しから期待どおりの性能を見せ始めている。写真6=同=はすばる望遠鏡で捕らえた約50億光年かなたの銀河団の姿である。今後、このような写真を続々と発表する予定である。

家 正則（イエ マサノリ）

1949年8月13日生。国立天文台教授。光学赤外線天文学・観測システム研究系主幹。72年東京大学理学部天文学科卒。77年同大学院博士課程（天文学専攻）修了、東京大学理学博士。同年東京大学理学部助手。80年東京大学東京天文台に移り、86年同助教授。88年国立天文台助教授、93年同教授。すばる望遠鏡計画の構想時から従事。CCDカメラ、能動光学、補償光学などの開発と銀河物理学の研究に従事。



CI 0939+47 (Abell 851)

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

CISCO (J &amp; K) &amp; Suprime-Cam (R)

January 28, 1999

写真6 すばる望遠鏡で撮影した距離約50億光年の  
銀河団アーベル851

卷 頭 言

## 工業高校の復権を目指して

(社)全国工業高等学校長協会理事長 稲見辰夫  
(東京都立墨田工業高等学校長)

このたび、全国工業高等学校長協会員諸賢のご推挙をいただき、本協会の理事長の重責を担うことになりました。宜しくお願ひ申し上げます。さて、世紀末の今日、我が国は大きな社会変動の真っ直中に居ると言っても過言ではありません。「大きな社会変動」の原因は、戦後日本が嘗々と築き上げてきた「日本型社会システム」の崩壊でもあります。皆さんもご承知の通り、ソニーやトヨタ、ホンダ等のように早くから海外での競争の試練を経てシステム化への改善に成功した企業を別にして、国内に基盤をおく歴史ある大企業が今その建て直しに必死なのは、旧来の経営システム化が有効性を失っているからにはほか有りません。

工業高校においては、高度成長時代に企業の求めに応じて、大量生産方式に対応できる人材を育成する教育システム等を取り入れました。それは、生徒の個性や創造性を育成するよりも規格に適合する製品を作る技術者を育成してきた教育システムでありました。この教育システムは、我が国を世界第二の経済大国に押し上げ、豊かな社会を作り上げる上で最も、優れた教育システムでした。しかしながら、今や後発の国々の工業化への進展は著しく我が国より、安い価格で、大量で良質の製品を作り出す時代となっております。

そして、21世紀のはじめには、日本は半導体で韓国に、エレトロニクスで台湾に、電子機器組立て中国に、研究開発の機能でシンガポールに抜かれる可能性が高いと、一昨年の科学技術庁の調査結果でも指摘されております。「日本には、技術がある」とアジアが異口同音に唱えた日は、すでに過去のものに成りつつあります。現在の我が国は少子化などの社会的大変動の中で高学歴志向を目指し、豊かな物質文明を享受するものの3Kと呼ばれる仕事を厭う傾向に有ります。

このような状況の中で、工業高校の価値を高め、社会的に復権することは並大抵の努力ではできません。今こそ全国工業高等学校の全教職員が英知と情熱を出し合って、工業教育復権のため団結するときであります。

先日放送された、NHKのクローズアップ現代では、機械で仕上げるより、精度の高い技能を持ったスーパー技能者は21世紀には居なくなると報道しておりました。このようなスーパー技能者が若者に技能を伝授しようと「マニュアルづくりに取りかかるが、どうしても言語で表せないものがある」と述べ「体験して得られた高度の技能は、言葉や文章で表すことはできない」と言っておりました。それは、体験によってしか得られない「感性」や「技術のセンス」であり、15歳から集中的に体験させる中で培われる五感であります。このような能力を備えた技能者は、教科書やテキストだけで指導できるものではなく、師弟同道の「ものづくり体験」の中で育成できるものです。スーパー技能を身につけた教師や創造的態度を身につけた教師によって、初めて我が国の科学技術創造立国を支える技能者を育成できると考えております。工業高校の一つの有り方としてエリート技能者を育成する教育システムの導入を提案したいと思います。

科学技術基本法が議員立法で制定され、我が国が科学技術創造立国としてスタートした今日、スーパー技能者には、豊かな暮らしや地位を保証するなど、社会的に高い評価を国策として与えられるよう期待します。

全工協の会員が一丸となって21世紀の日本の工業を担う有能な技術者の育成について考え、提案し、実現することが工業高校の復権につながると確信しております。