



非球面に対する干渉図形の解析法*

津村徳道** 山本高志*** 大西邦一† 横関俊介††

Fringe Interpreting for Aspheric Surface Testing

Norimichi Tsumura, Takashi Yamamoto, Kunikazu Ohnishi and Shunsuke Yokozeki

In the usual method of fringe analysis for aspheric surface, the difference between the test surface and the reference surface is measured by the order of fringes. But, in this method, the error can't be avoided from the approximate interpretation. By simulating the error using a certain aspheric surface, it is shown that the error can't be ignored. Then, a new method is proposed which doesn't contain the error from the approximate interpretation. In this new method, fringe density which can be obtained from interference fringe's figure is introduced as a data. This new method doesn't measure the difference between test surface and reference surface, but measures the test surface directly.

Key words: aspheric surface, interferometric testing, approximate interpretation, fringe density, Twimann-Green interferometry

1. 緒 言

精密加工技術の進歩に伴って、非球面を採用した光学部品が量産される時代になってきた。そこで、光学的非球面の形状計測が非常に大切な技術となっている¹⁾。その中でも、データが干渉図形で得られる非球面干渉計測法がたいへん有力な手段である。

参照球面と被測定非球面との形状差を、干渉図形より得られるしま次数から直接求める計測法が一般に使われている。しかし、しま次数を用いて直接形状差を求める方法には、近似解釈による誤差を含む²⁾。したがって、しま次数のみを用いた干渉図形解析法には精度の限界がある。

そこで、トワイマン・グリーン干渉計上での干渉図形の得られ方を光線追跡を行って調べ、近似解釈による誤差の現れ方の考察を行う。またその誤差の大きさを具体例によって示し、非球面形状計測において無視できないことを示す。さらに、近似解釈を行わない解析法として、干渉図形から得られるしま密度をデータに加えて、光線方向とは逆方向に光線追跡することで非球面の形状を直接求める解析法を提案する。

2. 近似解釈による誤差

2.1 干渉図形の近似解釈

図1は被測定面が非球面であるトワイマン・グリーン干渉計である。ここで、被測定非球面は光軸を軸とする回転体であると仮定し、光軸を含む面上のみでの計測を考える。また、レンズL₂とレンズL₃の焦点距離は同じにし、被測定面の形状に応じてレンズL₂とレンズL₃の間隔を変える。このことによって座標の対応のつきやすい等倍の像が得られる。

観測面で得られた干渉図形から被測定非球面の形状を求めるには、しま次数 m から求まる形状差 $m \cdot \lambda / 2$ が物面上のどの位置における形状差に対応するかを知る必要がある。そこで、干渉しあう参照球面と被測定

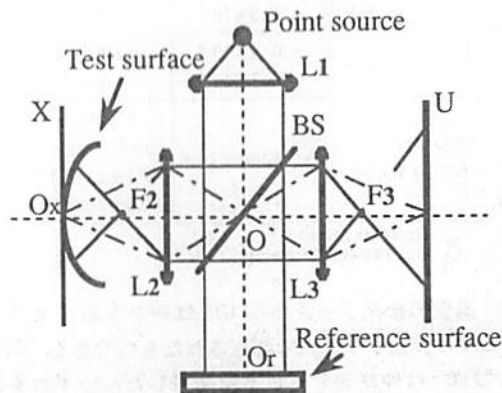


Fig. 1 Twimann-Green interferometry

* 原稿受付 平成2年8月1日。第37回応用物理学関係連合講演会(平成2年3月28日)にて発表

** 学生会員 大阪大学工学部(吹田市山田丘2-1)

*** (株)リクルート(東京都中野区中央5-23-13)

† (株)日立製作所家電研究所(横浜市戸塚区吉田町292)

†† 正会員 九州工業大学情報工学部(飯塚市川津680-4)

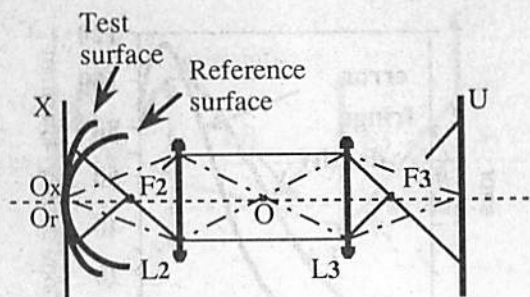


Fig. 2 Equivalent figure of Twimann-Green interferometry

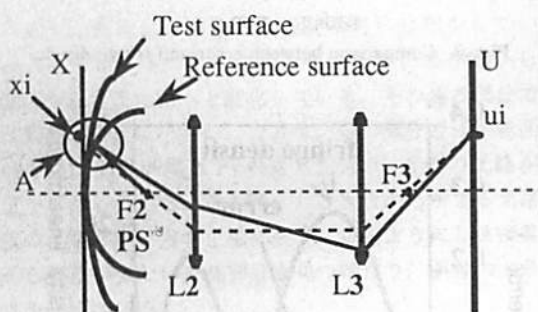


Fig. 3 Ray tracing of two reflection rays

非球面からの2つの反射光線の光路の位置関係を示す。図1のままでは位置関係を示すのに不適當であるため、次に述べる等価的な光学系で考察をすすめる。

図1において、 OO_x と OO_r との光路長が等しいときには、観測面Uから見た場合、参照面は、図2に示すように物面上に重ねて書くことができる。参照平面は、物面側にもってくる際、レンズ L_2 のため F_2O_x を半径とした参照球面となる。この時、BSを取り払って、点光源はレンズ L_2 の焦点 F_2 にあると見なすことができる。図3に示すように、焦点 F_2 にある点光源から射出した光は被測定非球面と参照球面とによってそれぞれ反射されて観測点 u_i に至ると見なすことができる。実線は被測定非球面による反射光線で、破線は参照球面による反射光線である。

観測点 u_i でのしま次数は焦点 F_2 から観測点 u_i に至るそれぞれの光路長の差より決まる。逆に言えば、しま次数より2つの光線の光路差が分かる。この時、2つの光線の光路が図4(a)のように重なってあれば、光路差の1/2が参照球面からの形状差にあたる。しかし、実際は図4(b)のように被測定非球面と参照球面の傾きが異なり、光路が重ならないことから光路差の1/2と形状差は対応しない。そのためしま次数より形状差を求める際には図4(a)で示すように光線の光路が重なっていると近似的に解釈して、光路差の

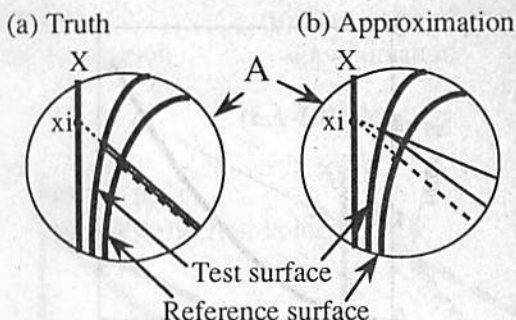
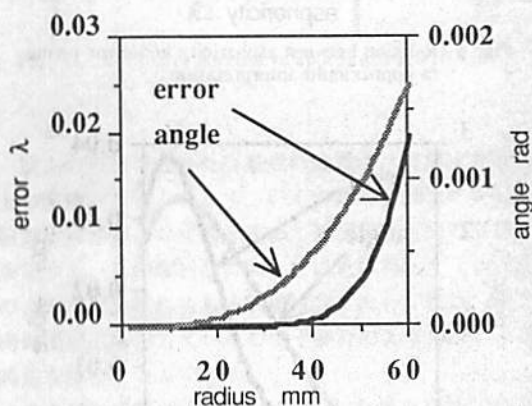


Fig. 4 Interpreting of the phase information

Fig. 5 Error owing to approximate interpretation and angle of reflection (Parabola of $f=194$ mm)

1/2は座標 x_i と焦点 F_2 を結ぶ方向の形状差に相当すると近似して解析を行っている。

2.2 具体例における近似解釈による誤差

実際の計測の際には干渉計による収差等が測定誤差として含まれてくる。しかし今回、近似解釈による誤差のみを検討するために、理想結像系を仮定した。理想結像系を計算機内で実現するために光線追跡に関して以下の工夫を行った。

- (1) レンズとビームスプリッタの厚さはゼロと仮定した。
- (2) レンズによる屈折は、近軸近似で作られた結像式³⁾によるものとした。
- (3) 光路差の計算では、物点から出たすべての光線が像点として点状に結像されるとき、その光線の物点と像点間の光路長はすべて等しいことを利用した。

非球面としては焦点距離194 mm、口径100 mmの放物面を、またレンズ L_1, L_2 については焦点距離200 mmを仮定した。こうして近似解釈による誤差と非球面上での反射角の計算を行った。図5にその結果を示す。

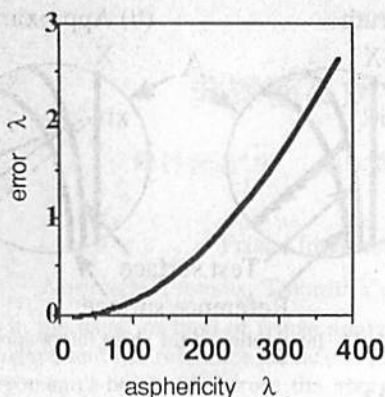


Fig. 6 Relation between asphericity and error owing to approximate interpretation

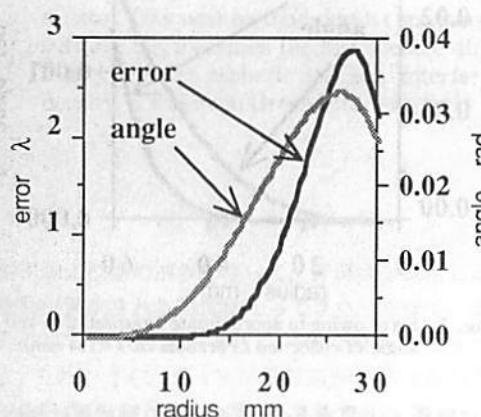


Fig. 7 Error owing to approximate interpretation and angle of reflection (An aspheric surface of video-eyepiece)

計算に使用した焦点距離 194 mm の放物面では誤差は計測上無視できる大きさである。しかし、最近利用される非球面はかなり非球面度の大きいものが使われている。そこで、放物面の半径を変えることで非球面度と近似解釈による誤差の関係を計算し図 6 に示す。非球面度の大きくなるに連れて無視不可能な誤差を含んでいる。非球面度の大きい面の例として最大非球面度が 720 波長であるビデオ接眼レンズを構成する一非球面を使い、その近似解釈による誤差と反射角を図 7 に示す。

2.3 近似解釈による誤差としま密度

実際計測する際、近似解釈による誤差がどれほど入っているか知っておきたい。図 5 と図 7 において、反射角と誤差の関係を示した。反射角がわかれば大体の含まれる誤差の見当がつく。しかし、得られるデータは非球面に対する干渉図形のみであるから、直接反射角を求めることが出来ない。そこで、干渉図形から

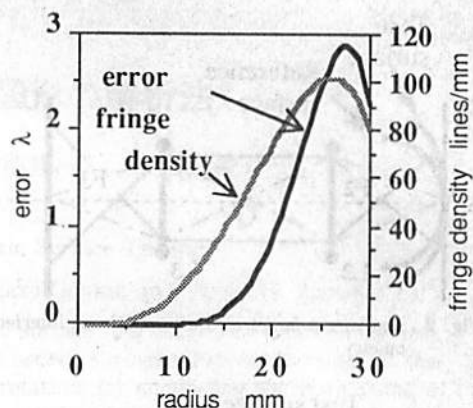
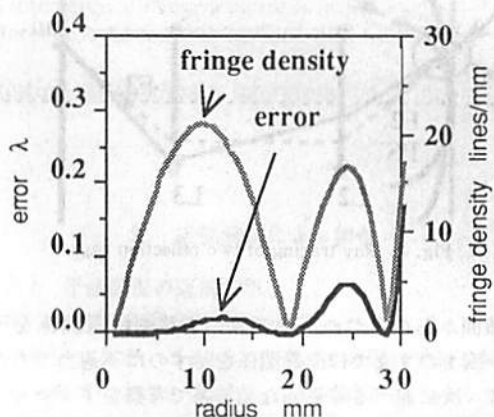
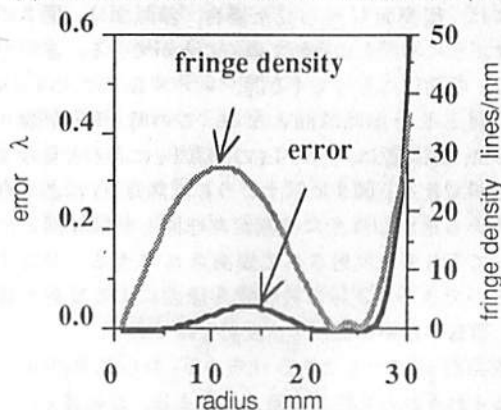


Fig. 8 Comparison between error and fringe density



(a) 40mm is added in radius of reference sphere



(b) 50mm is added in radius of reference sphere

Fig. 9 Comparison between error and fringe density when radius of reference sphere is changed

求めるしま密度と誤差との関係を計算した。

ビデオ接眼レンズに用いられている一非球面に対してしま密度と誤差の関係は図 8 に示す。しま密度にほぼ比例して誤差が大きくなっている。図 9 は参照球面の半径を変えたときの誤差と干渉しまの密度のグラフ

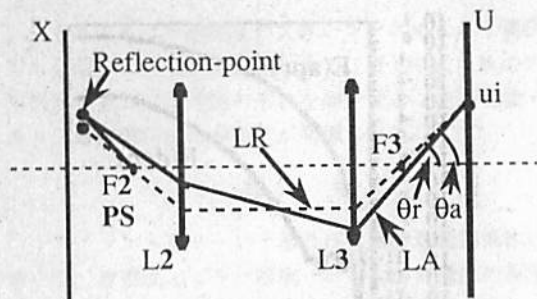


Fig. 10 Method to find reflection-point by LA (optical length) and θ_a

である。誤差と干渉じまの密度は同じ分布をしている。光軸から外に行くにつれて、干渉じまが密から疎、そしてまた密へと変化している。その疎の部分では誤差は非常に小さい。これは、疎の部分では非球面からの反射光が焦点 F_2 の近くを通り、2つの光路が重なるためである。その時、しま次数から求まる光路差の $1/2$ は形状差を正確に表す。このようにしま密度から誤差の少ない計測部分を見つけたり、誤差の大きさを推定できる。

3. しま密度を利用した厳密解析法

3.1 厳密解析法

2.2項で干渉図形から形状差を求める際には、精度の上で限界のあることを示した。ここでは被測定非球面の形状を、近似解釈による誤差を含まず、参照球面との形状差を介さず直接に求める厳密解析法を提案する。図10において、焦点 F_2 から被測定非球面によって反射され観測点 u_i に至るまでの光路長 LA と観測点 u_i への入射光線と光軸とがなす角 θ_a が干渉図形より得られたとする。この LA と θ_a を使って被測定非球面の形状を求める。

- (1) θ_a を使って光線方向と逆方向に観測点 u_i より焦点 F_2 まで光線追跡を行う。非球面の形状が求まっていないので非球面上での反射点を直接求めることはできない。
- (2) 図11(a)に示すように、第一近似として逆方向に光線追跡した光線と物面との交点 r_1 を反射点とする。そのときの光路長を LA_1 とする。
- (3) 図10の破線で示した光線追跡によって求めた参照面による反射光の光路長 LR と、しま次数から LA の値を求める。
- (4) LA と LA_1 の差を求め、図11(b)に示すように、その差の $1/2$ だけ光線方向に沿って反射点をずらす (r_2)。
- (5) (3), (4) を繰り返して収束した反射点を求め

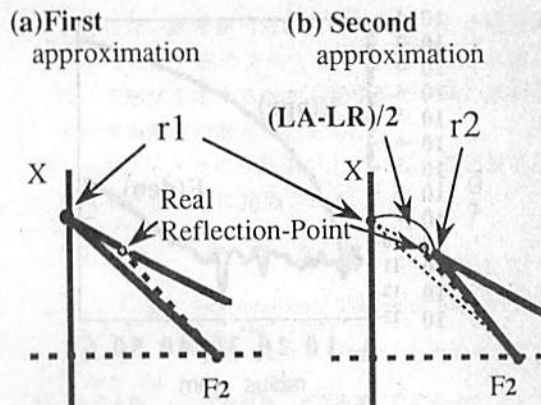


Fig. 11 Method of successive approximation to find a real-reflection point

る。

以上の方法で求めた反射点の位置が、被測定非球面上の座標となる。そして、いくつかの観測点に対して被測定非球面上の座標を求めて被測定非球面の形状を決定する。この解析法においては近似解釈による誤差のような理論的に生じる誤差は含まない。また、逆方向に光線追跡をしているので干渉計の光学部品による誤差を除くことができる。

ここで、干渉図形より LA と θ_a を得る方法について説明する。焦点 F_2 から参照球面に反射されて観測点 u_i に至る光線の光路長を LR とし、参照球面からの反射光線がレンズ L_2 を通過した後の光線と光軸とのなす角を θ_r とする。 LR と θ_r は、参照球面による反射光は必ず焦点 F_3 を通ることから観測点 u_i の位置から一意的に決まる。2.1項で述べたようにしま次数 m は LA と LR の差から求まることから LA はしま次数 m を使って、次のように表せる。

$$LA = LR - m\lambda \quad (1)$$

参照球面からの反射光(破線)と被測定非球面からの反射光(実線)とによって生じる干渉じまの観測点 u_i でのしま密度を考える。その際、観測点 u_i でのしま密度は光線の光軸とのなす角度が θ_a , θ_r の平面波によって、観測点 u_i の近傍に生じる干渉じまから求めたしま密度と一致する。光線の光軸となす角が θ_a , θ_r である2つの平面波の観測面上での位相分布 PA , PR は次の式(2), (3)で表せる。

$$PA(x) = \exp\left(2\pi i \frac{\sin \theta_a}{\lambda} x\right) \quad (2)$$

$$PR(x) = \exp\left(2\pi i \frac{\sin \theta_r}{\lambda} x\right) \quad (3)$$

2つの平面波が干渉しあてできる干渉じま $IC(x)$ を次の式(4)で示す。

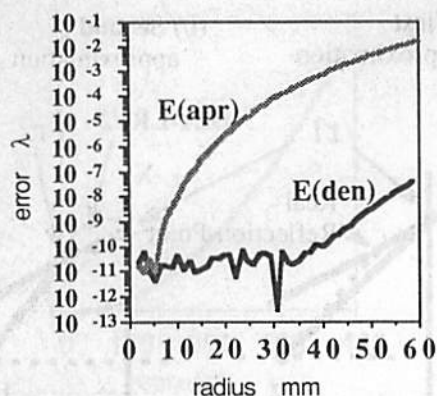


Fig. 12 Improvement of precision by adopting the new method (Parabola of $f=194$ mm)

$$IC(x) = 2 \left\{ 1 + \cos \left(2\pi \frac{\sin \theta_a - \sin \theta_r}{\lambda} x \right) \right\} \quad (4)$$

式(4)で示せる干渉じまのしま密度 d は式(5)で表される。

$$d(u) = \frac{\sin \theta_a - \sin \theta_r}{\lambda} \quad (5)$$

この式を θ_a について解くと式(6)になる。

$$\theta_a = \sin^{-1}(d\lambda + \sin \theta_r) \quad (6)$$

式(6)によって、 θ_a はしま密度 d より求めることができる。以上のように、干渉図形のしま次数としま密度より LA , θ_a が求まる。

3.2 精度について

2.2項で使った放物面による干渉図形をCCDカメラで計測した後、厳密解析法を採用する場合を考えた。得られるであろう干渉じまを計算で求め、それから前述した方法によって形状を求めた。参照球面の半径を388 mmとしたときの干渉図形の中で最もしまの密度が大きいところは1 mmあたり約5フリンジである。また1フリンジを認識するのにサンプリング定理より最低2個のサンプル点が必要であり、半径が60 mmであるのですべての等間隔のサンプル点の数は $60 \times 5 \times 2 = 600$ 個必要であると考えた。そこでCCDカメラの画素数を 600×600 と仮定して計算した。しま密度を求める際、対象とするサンプル点の前後の点の座標の差としま次数の差から傾きを求めてしま密度とした。計算結果を図12に示す。2.2項の近似解釈による誤差を $E(\text{apr})$ 、しま密度を利用した厳密解析法における誤差を $E(\text{den})$ として示した。非常に良く形状が求まる。ビデオ接眼レンズの一非球面に対しても同様の計算を行った。この時、最低限必要なサンプル数は6000個であった。最近よく出まわっているCCDカメラにおける画素数は 500×500 程度であるが、技術の進歩を考えて 6000×6000 の画素数の

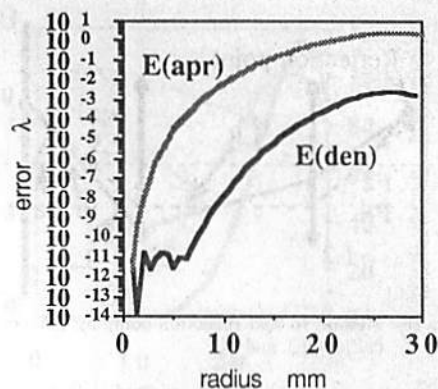


Fig. 13 Improvement of precision by adopting the new method (An aspheric surface of video-eyepiece)

Table 1 Several values of two aspheric surfaces

Test surface	Paraboloid (bore 120 mm)	An aspheric surface in a video-eyepiece (bore 60 mm)
Max. asphericity	40 wave length	720 wave length
Max. error from approximate interpreting	0.02 wave length	3 wave length
Max. fringe density	5 fringes/mm	100 fringes/mm
CCD camera's pixel-number to need	600×600	6000×6000

CCDカメラを仮定して計算した結果を図13に示す。干渉じまを近似解釈する方法では1波長を越える誤差を生じるため実用的でなかったが、本手法では十分対応できる。

4. 考 察

表1において、焦点距離194 mmの放物面のように非球面度が小さく、しま密度の低い場合には、近似解釈による誤差は無視可能である。この時、ヘテロダイン法等の各種の内挿法⁴⁾を用いることで、より精密な計測ができる。またこの場合、CCDカメラ製造技術の現状から、誤差を含まないしま密度を利用した厳密解析法は利用できる。

一方、ビデオ接眼レンズの一非球面のように非球面度の大きいものは、しま密度が高いため内挿の必要はないが、近似解釈による誤差は無視できない。この場合、2.3項で行ったように参照球面の大きさを変化させてしま密度の低い部分を移動した干渉図形を複数枚利用することで計測⁵⁾⁶⁾できる。

しかし、最近の技術の進歩はめざましいものがあり、1万×1万画素のCCDカメラの登場も夢ではな

い、そうすれば非球面度の大きいレンズによる干渉図形も全面にわたり解析可能になる。その時、1枚の干渉図形で被測定非球面の形状を測定することが可能であり、厳密解析法の有効性が発揮される。

5. 結 論

トワイマン・グリーン干渉計による非球面計測法において、放物面とビデオ接眼レンズの一非球面の測定を仮定して光線追跡を行い、次のような結果を得た。

- (1) しま次数から形状差を求める従来の手法では、近似解釈による誤差を含む。また、その誤差は非球面度の高いものに対して計測上無視できない大きさである。
- (2) 近似解釈による誤差としま密度の間には高い相関があり、しما密度の高いところでは、誤差も大きい。
- (3) しま密度をデータに加えることで、近似解釈

を行わない厳密解析法が実現できる。この厳密解析法では、光線方向とは逆方向に光線追跡を行って形状を求めるので、光学系の収差の影響を受けず高精度の測定が行える。

- (4) CCDカメラの分解能が上げれば、厳密解析法の有効性がさらに発揮される。

参 考 文 献

- 1) J. C. Wyant: Interferometric Testing of Aspheric Surfaces, Proc. SPIE, 816, (1987) 19.
- 2) 横関俊介: 非球面の光学的計測法, 応用物理, 57, 3 (1988) 331.
- 3) 松居吉哉: レンズ設計法, 共立出版, (1972) 16.
- 4) K. Creath: Phase-Measurement Interferometry Techniques, Proc. Optics, 26, (1988) 349.
- 5) 大西邦一, 横関俊介, 鈴木達朗: 被測定面の移動による非球面の干渉測定法, 光学, 11, 5 (1982) 296.
- 6) 大西邦一, 横関俊介, 鈴木達朗: 複数の干渉図形を用いた非球面の形状測定法, 光学, 12, 4 (1983) 296.



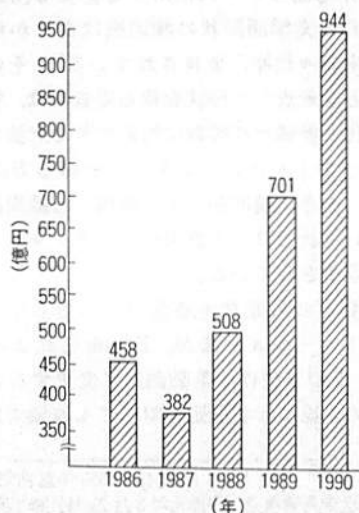
90年の工作機械輸入 944 億円

90年の工作機械の輸入総額(鍛圧機械を含む)は過去最高の944億4400万円に達した。

これは機械産業などの活発な設備投資を背景に、国策ともなっている輸入促進、とりわけ工作機械日米協力の始動など官民一体による輸入促進の展開によるところが大きい。また、機種のには研削盤や歯車機械など非量産型で国内市場ではあまりみられない機種に傾斜しているのが特徴である。

放電加工機(NCタイプ、ワイヤカットタイプなどを含む)と「その他の加工機」が前年に比べ減少となったが、そのほかは、すべて前年を上回り、とりわけユニットコンストラクションマシン、マルチステーショントランスファマシンは4.5倍、歯車機械も70.5%と大きく伸張した。

輸入額でみると、研削盤が191億円(前年比51%増)、歯車機械97億円、旋盤55億円であるが、MCは前年比28.3%増の18億円である。(服部 敏夫)



工作機械の輸入実績推移(大蔵省貿易統計)