

表面微細構造による光回折現象と
その応用計測技術の研究

1 9 7 9 年 6 月

稲 荷 隆 彦

表面微細構造による光回折現象と
その応用計測技術の研究

目 次

第 1 章	まえがき	1
1-1.	表面粗さの計測	2
1-2.	レーザ光による表面検査	3
1-3.	表面からの回折像を用いた速度計測	3
第 2 章	表面粗さ構造とコヒーレント光の回折	8
2-1.	表面粗さによる回折	8
2-2.	周期性のある金属加工表面の回折	11
2-3.	回折像の実際例	15
第 3 章	表面微細構造変化の計測	20
3-1.	表面粗さの観測	20
3-2.	回折像による表面微細構造変化の計測	20
3-3.	表面微細構造変化の計測・むすび	41
第 4 章	レーザ光による表面検査	43
4-1.	表面微細構造，形状の検出	43
4-2.	走間金属板表面検査装置	45
4-3.	細線表面検査装置	55
4-4.	レーザ表面検査装置のむすび	67
第 5 章	レーザ回折光による速度計測	69
5-1.	周期運動の周波数計測	69
5-2.	パルス計数方式による速度計測	72

5 - 3. 空間フィルターによる速度計測	78
5 - 4. レーザによる速度計測 　むすび	96
第 6 章 結 語	98
(内 容 要 約)	
謝 辞	102
附 録	103

表面微細構造による光回折現象と計測への応用に関する。

自著論文，ならびに各種学，協会研究発表リスト

第 1 章 ま え が き

光の波長に近い大きさの粗さ構造をもつ、金属などの表面にコヒーレント光を照射した場合、コヒーレント光は表面粗さ構造により回折される。この回折光を特定の光学系を用いずに、直接的に観測すると、表面粗さの統計的性質に対応した回折像が形成されていることがわかる。すなわちこの回折像の形状、光強度分布、ならびにその運動は、表面粗さ構造の統計的性質、ならびにその運動に関する情報を含んでいるということができる。

回折像の形状、光強度分布は、実際には比較的簡単な光学系により検出できる。本論文では表面粗さの統計的性質、ならびにその運動速度との対応をしらべ、表面粗さ計測、表面欠陥計測、ならびに表面の運動速度計測等へ応用した結果について報告する。これらの計測は、従来の工業計測手法では困難とされていたもので、コヒーレント光の回折を応用することにより、はじめて可能となったものである。

スリガラスのような拡散性をもつ表面にコヒーレント光（レーザ光）を照射した場合、その反射光、透過光、いずれの場合にも円形に拡大された光の分布の中に粒状性をもった斑点模様が現われるのが観測される。これはスペックルパターン（Speckle Pattern）と呼ばれ、レーザ光のもつ特有の性質である。

この現象はレーザの出現後、すぐに注目され、いくつかの実験的観測結果が報告され^{1)~5)}、若干の理論的な解析がなされた。⁶⁾ 次に、この現象が表面粗さ構造からの回折現象であり、回折理論により、回折された光の振幅分布と表面からの反射波の振幅分布が Fourier 変換の関係にあることを基礎とした理論が展開された^{7)~10)}。

また最近になって、表面粗さ計測の立場からこの回折像が注目され、いくつかの理論的実験的研究がおこなわれた^{11)~14)}。また運動の現象等も含めて、回折像形成の理論、表面粗さ、表面の運動に関する統一的な理論の形成がおこなわれた¹⁵⁾。

以上はいずれも数学的に取扱い容易な仮定を入れて展開した一般的理論であり、実験もきわめて簡単なものにとどまっている。筆者は具体的な目的をもつ工業計測に適合させるという立場から、一般的理論の再検討、ならびにその応用による計測の実用化をおこなった。

1-1 表面微細構造変化の計測

表面粗さは代表的な工業量であり、目的に応じていろいろな定義があり、測定法があり、今後の計測技術の展開にまつところの大きい分野である。特に加工中の対象物のオンラインでの計測は、加工物の品質制御上のみでなく、加工機械自身の損耗等を監視する上でも重要な課題である。

加工物の表面はその光沢等により、目視である程度判別できる。このことから、表面粗さによる電磁波の散乱の理論が研究され¹⁶⁾、また表面からの光の散乱の理論から、表面粗さの高さ方向分布の統計的性質と散乱光の分布との関連が研究され、計測の実験がなされた^{17),18),19)}。また一方、基本的には干渉計の原理を用いた表面粗さ計測法も研究されている²⁰⁾。

コヒーレント光の回折という立場から表面粗さとの関係に興味をもたれたのは上記のスペックルパターンの発見とその解明の過程においてである。

コヒーレント光によるホログラフィーや映像を作る立場からは、スペックルパターンは雑音として除去する研究がおこなわれ^{21)~23)}、一方計測側からはこれを積極的に利用するという考え方にたち、表面粗さ程度の表面構造の形状認識や表面微細構造計測に応用しようという構想が発表され始め²⁴⁾、特に表面粗さと回折像との関連に関する研究が多くおこなわれている^{11)~14)}。

表面構造を計測する場合、後述するように、観測される回折像は表面からの反射光の複素振幅分布のパワースペクトルに対応するが、表面粗さのプロフィールはこの反射光波の振幅分布の位相項を与えることになり、回折像はそのまま表面粗さのパワースペクトルにはならない。このため多くの報告ではこの位相項の確率分布関数を、たとえばガウス分布に従うと仮定し、正規不規則過程の取扱いにより、表面粗さの統計的諸量と回折像の分布を関連づけている^{8),15)}。また実際の回折像を観測する方式としては、スペックルパターンのコントラストを計測する方式等¹³⁾が報告されている。

しかし、実際の加工金属表面は上記のようにある確率分布関数で定義づけてしまうのは疑問がある。また表面粗さの振幅が光の波長のオーダーを越える場合の考え方を明確にしておく必要がある。スペックルパターンのコントラストを計測する方式等、従来報告されている回折像の観測方式も実用上問題がある。

筆者はきわめて大ざかみに表面上の微細構造の変化を検出する方式として、回折像全体の強度分布と形状を、必要に応じて大ざかみに検出し、加工条件等との対応を実験的に求め、

記憶した後、実際の計測では入力信号と比較、判定する方式を提唱してきた。^{11),25)} 本論文では表面微細構造の統計的性質と回折像との関連を、最初からある確率分布関数を仮定するのではなく、表面上の微細構造が加工によりしだいに高周波成分が増大するというモデルをたてた。このモデルの計算と実験による確認、ならびに実際の加工面での実測例について述べる。

1-2 レーザ光による表面検査

前節で述べた通り、回折像が表面構造の統計的な性質と直接関連しているところから、表面粗さのみならず、表面構造の形状の認識、表面の欠陥の検査に応用できることは直ちに類推される。

表面構造の認識は特に微細な構造が対象である場合有効である。筆者はこの点に着目し、半導体素子の表面の形状認識に用いた²⁴⁾。また、この原理は高集積度の半導体素子の表面欠陥検査を実現する一つの方法であるといえる。

一般の金属表面の検査への応用は、前節の表面粗さ計測と深い関連をもっている。つまり、表面粗さの異常の検知がすなわち欠陥の検知に相当している。この回折像を用いる方式は筆者らにより研究、実用化されたもので²⁶⁾、主としてなめらかな表面上の微細な欠陥の検出に適している。

表面検査装置はレーザではなく、通常光源を用いる方式も実用化されているが、微細な欠陥の検査には適していない。またレーザを用いた方式もいくつか報告されているが、回折像を積極的に利用した方式ではなく、光学系等が複雑になる欠点をもっている。

筆者らは上記の検査方式をさらに発展させ、回折像の性質を利用して、金属細線の表面を検査する方式を開発した²⁷⁾。細線の光学的な検査は、従来まったく不可能であったが、本方式で可能になったといつてよい。

本論文では、これらの表面検査方式を総合的に述べる。

1-3 表面からの回折像を用いた速度計測

いままで述べてきたレーザ光による回折像は、回折像全体の光強度分布、形状に着目したものであったが、実際にはこの回折像の内部は、スペックルパターン (Speckle Pattern) と呼ばれる粒状性の斑模様が観測される。

このスペックルパターンは対象物表面の移動に伴い、一定時間内、その形状を保ったまま

移動することは古くから注目され、これにより対象物表面の速度計測が可能であることが指摘されてきた^{3),4)}。

この点に着目し、また従来より図形の走行速度計測法として知られていた格子状スリットからなる空間フィルタを用いて、上記のスペックルパターンの移動速度の計測をおこなう方式の速度計がG. Stavis²⁸⁾により提唱、実験がおこなわれた。

筆者らはまず回転や振動する物体からのスペックルパターンが周期運動をおこなう点に着目した回転、振動計の研究をおこない²⁹⁾、さらに空間フィルタを用いない簡易形の速度計を開発した³⁰⁾。また空間フィルタを用いる方式の実用装置の研究、開発をおこない³¹⁾、特に対象物体の曲率をパラメータとして方式を確立し、実験的に確認した。さらに実用装置としての性能に及ぼす要因を広い範囲にわたって分析し、実験と照合して確認し、実用装置として確立した。本論文ではこの内容につき、系統だてて述べる。

1. まえがき

参考文献

- 1) J. D. Rigden and E.I. Gordon, The Granularity of Scattered Optical Maser Light, Proc. IRE, vol.50, 2367-2368, (1962).
- 2) B. M. Oliver, Sparkling Spots and Random Diffraction, Proc. IEEE, vol.51, January, 220-221, (1963).
- 3) W. H. Huntley, Jr., New Coherent Light Diffraction Techniques, IEEE. Spectrum, January, 114-122, (1964).
- 4) R. V. Langmuir, Scattering of Laser Light, Appl. Phys. Letters, vol.2, No.2, 29-30, (1963).
- 5) N. R. Isenor, Object-Image Relationships in Scattered Laser Light, Appl. Opt. vol.6, No.1, 163, (1967).
- 6) L. I. Goldfischer, Autocorrelation Function and Power Spectral Density of Laser-Produced Speckle Patterns, J. Opt. Soc. Am. vol.55, No.3, 247-253, (1965).
- 7) T. Suzuki and R. Hioki, Coherence of Light from Random Medium, Japan. J. Appl. Phys., vol.5, No.9, 807-813, (1966).
- 8) H. Fujiwara and T. Asakura, Effects of Time-Varying Diffuse Illumination on Holography, Japan. J. Appl. Phys. vol.7, No.5, 520-528, (1968).
- 9) R. B. Crane, Use of a Laser-Produced Speckle Pattern to Determine Surface Roughness, J. Opt. Soc. Am. vol.60, No.12, 1658-1663, (1970).
- 10) S. M. Kozel and G. R. Lokshin, Wave Scattering by a Statistically Rough Surface, Opt. Spectry, vol.31, 253-254, (1971).
- 11) T. Inari, Automatic Detection and Control of Surface Roughness by Coherent Diffraction Pattern, Proc. 16th SPIE Annual Meeting, 47-53, (1972).

- 12) N. Takai, Relation Between Statistical Properties of Surface Roughness and the Averaged Speckle Intensity in the Diffracted Field, *Opt. Commun.* vol. 14, No. 1, 24-29, (1975).
- 13) J. Ohtsubo, H. Fujii, and T. Asakura, Surface Roughness Measurement by Using Speckle Pattern, *Japan. J. Appl. Phys.* vol. 14, Suppl. 14-1, 293-298, (1975).
- 14) D. Léger, E. Mathieu, and J. C. Perrin, Surface Roughness Measurement by Use of Laser Speckle Techniques, *Japan. J. Appl. Phys.* vol. 14, Suppl. 14-1, 299-300, (1975).
- 15) 山口, スペックリングの統計的性質, *光学*, vol. 3, No. 2, 76-92, (1974).
- 16) H. Davis, The Reflection of Electromagnetic Waves from a Rough Surface, *Proc. Instn. Elect. Engrs.* vol. 101, 209-214, (1954).
- 17) H. E. Bennett and J. O. Porteus, Relation between Surface Roughness and Specular Reflectance at Normal Incidence, *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 51, No. 2, 123-129, (1961).
- 18) J. O. Porteus, Relation between the Height Distribution of a Rough Surface and the Reflectance at Normal Incidence, *J. Opt. Soc. Am.* vol. 53, 1394-1402, (1963).
- 19) R. P. Edwin, Light Scattering as a Technique for Measuring the roughness of Optical Surfaces, *J. Phys. E: Scientific Instruments*, vol. 6, 55-58, (1973).
- 20) W. B. Ribbens, Interferometric Surface Roughness Measurement, *Appl. Opt.* vol. 8, No. 11, 2173-2176, (1969).
- 21) L. H. Enloe, Noise-Like Structure in the Image of Diffusely Reflecting Objects in Coherent Illumination, *Bell Syst. Tech. J.* vol. 46, 1479-1489, (1967).
- 22) D. Gabor, Laser Speckle and Its Elimination, *IBM J. Res. Develop.* September, 509-514, (1970).

- 23) G. J. Grebowsky, R. L. Hermann, H. B. Paul, and R. S. Shulman, Elimination of Coherent Noise in a Coherent Light Imaging System, *Appl. Opt.* vol. 10, No. 2, 438-439, (1971).
- 24) 稲荷, レーザスペckルパターンによる形状認識, 学振 130 委, 光と電波の境界領域研究会資料, (1972. 1).
- 25) M. Kamei and T. Inari, Recognition and Inspection of Surface Roughness by Coherent Diffraction Pattern., *Proc. 3rd Intern. Conf. Production Eng.* 113-118, (1977).
- 26) 稲荷, 亀井, レーザによる金属板表面自動検査装置, 三菱電機技報, vol. 51, No. 5, 334-337, (1977).
- 27) 稲荷, 亀井, レーザ回折パターンによる細線表面欠陥の検出, 計測自動制御学会論文集, vol. 13, No. 1, 64-68, (1977).
- 28) G. Stavis, Optical Diffraction Velocimeter, *Instrument and Control System*, vol. 39, No. 9, 99-102, (1966).
- 29) T. Inari, Detection of the Number of Rotation of a Rotator Using the Speckled Patterns Produced by a Coherent Light, *Japan. J. Appl. Phys.* vol. 8, 970-971, (1969).
- 30) 稲荷, レーザ回折速度計, 応用物理学会講演会(春季)予稿集, 263, (1971).
- 31) 稲荷, 高嶋, 北原, 大道, レーザスペckルパターンによる非接触速度計の試作, 計測自動制御学会論文集, vol. 13, No. 1, 82-86, (1977).

第 2 章 表面粗さ構造とコヒーレント光の回折

2-1 表面粗さによる回折

コヒーレント光（レーザ光）を金属表面に照射し、特定の光学系を通さず、直接、その反射光を観測した場合にみられる回折像は一般に表面粗さ構造による Fraunhofer 回折によるものとされている。

図 2-1 のようにレーザ光源、物体面（金属表面）、および観測面を配置した場合、物体面上の座標 (x, y) 、観測面上の座標 (u, v) とし、それぞれの面上の光波の複素振幅分布を $U(x, y)$ 、 $A(u, v)$ とすると、両者はたがいに Fourier 変換で結ばれ、

$$A(u, v) = \frac{k}{2\pi h} \iint_{-\infty}^{\infty} U(x, y) \exp[i(k/h)(ux + vy)] dx dy \quad (2-1)$$

が成り立つ。¹⁾ ただしこの関係は Fraunhofer 近似、

$$u^2 + v^2 \ll h/k$$

を仮定した上で成立する。ここで $k = 2\pi/\lambda$ 、 λ は光の波長、 h は図 2-1 で物体面と観測面との距離である。

実際に観測される回折像は光強度分布 $I(u, v)$ であり、これは (2-1) 式から求めた結果、次のようになる。

$$\begin{aligned} I(u, v) &= |A(u, v)|^2 \\ &= (1/2\pi)^2 \iint_{-\infty}^{\infty} \rho(s, t) \exp[i(us + vt)] ds dt \end{aligned} \quad (2-2)$$

ここで、

$$\rho(s, t) = \iint_{-\infty}^{\infty} U(x, y) \bar{U}\left(x - \frac{h}{k}s, y - \frac{h}{k}t\right) dx dy \quad (2-3)$$

$$s = (k/h)(x - x')$$

$$t = (k/h)(y - y')$$

(x, y) 、 (x', y') は物体面上の 2 つの散乱点の座標
 $\bar{U}(x, y)$ は $U(x, y)$ の複素共役関数である。

(2-3)式から明らかな通り、 $\rho(s, t)$ は物体面からの反射光波振幅分布 $U(x, y)$ の自己相関々数となっており、Wiener-Khintchinの定理により、(2-2)式は観測される回折像 $I(u, v)$ が、反射光波振幅分布 $U(x, y)$ のパワースペクトルに対応することを示している。

反射光波振幅分布 $U(x, y)$ は実際には、物体面(金属表面)の表面反射率、および粗さ構造によって決められる。いま物体面へ照射されるレーザー光の分布はほぼ一定でその値を p とする。物体面の反射率分布 $f'(x, y)$ 、表面粗さの振幅分布(プロフィール)を $Z(x, y)$ とする(図2-3参照)と、 $U(x, y)$ は、

$$\begin{aligned} U(x, y) &= pf'(x, y) \exp[2ikZ(x, y)] \\ &= f(x, y) \exp[2ikZ(x, y)] \end{aligned} \quad (2-4)$$

与えられる。ここで $pf'(x, y) \equiv f(x, y)$ とおきかえている。(2-4)式は、表面粗さのプロフィールは $U(x, y)$ の位相分布を与えることを意味している。

回折像と表面粗さのプロフィール $Z(x, y)$ との関連性を求めるため、(2-4)式を(2-3)、(2-2)式に代入することになるが、上に述べた通り $Z(x, y)$ は $U(x, y)$ の位相分布を与えるので、 $Z(x, y)$ の統計的な代表数値(相関々数、平均値など)との直接的な関係式はただちに導くことはできない。このため $Z(x, y)$ にたとえばGauss分布などの統計的性質を仮定して、回折像との関係を求める試みがおこなわれている²⁾。しかし実際の金属表面等に対し、Gauss分布等を仮定して数学的に簡略化することは必ずしも妥当とはいえない。以下に実際の計測対象に対応した理論的解釈を展開する^{3),4)}。

いま $U(x, y)$ の積の期待値を求めるとすると、

$$\begin{aligned} &\langle U(x, y) \bar{U}(x - \frac{h}{k}s, y - \frac{h}{k}t) \rangle \\ &= \langle f(x, y) f(x - \frac{h}{k}s, y - \frac{h}{k}t) \exp[2ik(Z - Z')] \rangle \end{aligned}$$

ここで $Z = Z(x, y)$ 、 $Z' = Z(x - \frac{h}{k}s, y - \frac{h}{k}t)$

いま、通常の金属表面などを論ずる場合、 $f(x, y)$ はほぼ一定と仮定してよいから、上式は $\{f(x, y) f(x - h/k s, y - h/k t)\} = C$ とすれば、

$$\langle U(x, y) \bar{U}(x - \frac{h}{k}s, y - \frac{h}{k}t) \rangle = C \langle \exp[2ik(Z - Z')] \rangle \quad (2-5)$$

上式の左辺は通常 $U(x, y)$ の相関々数に相当し、右辺は $\exp[2ik(Z - Z')]$ の平均値を与える。 $\exp[2ikZ]$ は反射光波の位相であり、 Z を与えれば一意的に決る関数であるから、

$$\begin{aligned} \langle U(x, y) \bar{U}(x - \frac{h}{k}s, y - \frac{h}{k}t) \rangle &= C \langle \exp[2ik(Z - Z')] \rangle \\ &= C \exp[2ik(Z - Z')_{\mu}] \end{aligned} \quad (2-6)$$

ただし $(Z - Z')_{\mu}$ は $(Z - Z')$ の平均値である。

すなわち (2-6) 式は、反射光波振幅分布 $U(x, y)$ の相関々数が、表面上の任意の2点における表面粗さプロファイルの高さの差の平均値によって決る位相により与えられることを示している。

したがって回折光強度分布 $I(u, v)$ は、上記の平均の高低差により与えられる位相の関数のフーリエ変換で与えられる。

$Z > \frac{1}{2}\lambda$ 、 λ は光の波長、の場合、 $\frac{1}{2}\lambda$ 以上のプロファイルの情報はあらわれてこない。いま、

$$Z = Z_r + \frac{1}{2}n\lambda, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad \text{とすると, (2-4) 式から,}$$

$$\begin{aligned} U(x, y) &= f(x, y) \exp\left[i\left(\frac{4\pi}{\lambda} Z_r + 2\pi n\right)\right] \\ &= f(x, y) \exp[2ikZ_r] \end{aligned} \quad (2-7)$$

すなわち、表面粗さプロファイル $Z(x, y)$ が $\frac{1}{2}\lambda$ をこえる場合、 $\frac{1}{2}\lambda$ の整数倍分の高さは回折像には何ら寄与せず、上記の Z_r による回折として与えられる。

もし $Z(x, y)$ が十分小さく、 $Z < 1/2k = \lambda/4\pi$ の程度の場合、(2-6) 式より

$$\begin{aligned} \langle U(x, y) \bar{U}(x - \frac{h}{k}s, y - \frac{h}{k}t) \rangle &\cong C \langle (1 + 2kZ)(1 - 2kZ') \rangle \\ &= C \{ 1 - (2k)^2 \langle Z \cdot Z' \rangle \} \end{aligned} \quad (2-8)$$

すなわち $U(x, y)$ の相関々数は、定数項と、 $Z(x, y)$ 自身の相関々数で与えられる。回折像の強度分布は (2-8) 式のフーリエ変換で与えられるが、(2-2) 式の形で表現すると、

$$\begin{aligned}
 I(u, v) & \\
 & \doteq \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \iiint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) f\left(x - \frac{h}{k}s, y - \frac{h}{k}t\right) \exp[i(us + vt)] dx dy ds dt \\
 & + \left(\frac{k}{\pi}\right)^2 \iiint_{-\infty}^{\infty} f(x, y) f\left(x - \frac{h}{k}s, y - \frac{h}{k}t\right) Z \cdot Z' \exp[i(us + vt)] dx dy ds dt
 \end{aligned}
 \tag{2-9}$$

で与えられる。 $f(x, y) f\left(x - \frac{h}{k}s, y - \frac{h}{k}t\right)$ は前にも述べた通り、定数 C としてよいから、(2-9) 式第 1 項は δ 関数となり、観測面上の中心に形成されるスポット状の像を与える。第 2 項は表面粗さのプロフィール $Z(x, y)$ 自身のパワースペクトルを与える。

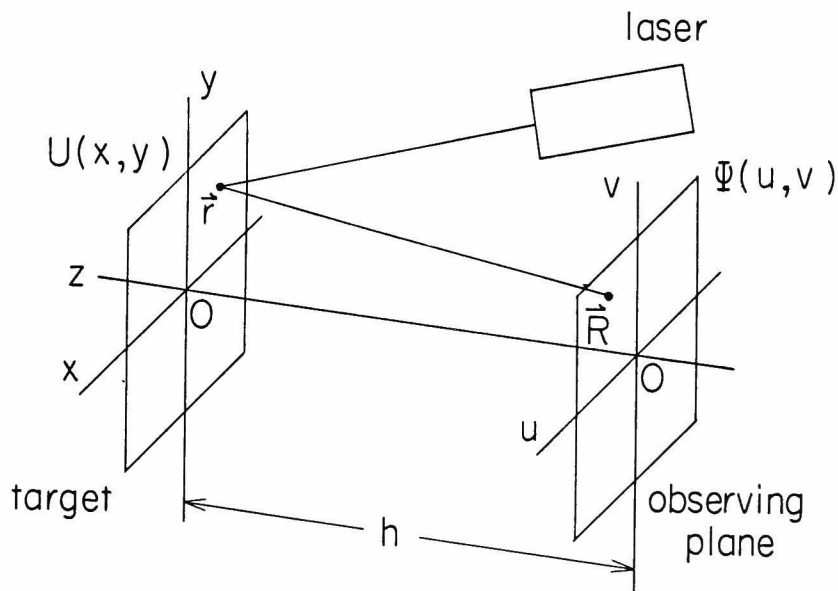


図 2-1 物体面，観測面の関係

2-2 周期性のある金属加工表面の回折

2-1 節で表面粗さプロフィールと回折との一般的な関連性についてのべた。その結果、一般的に表面粗さプロフィール $Z(x, y)$ の統計的な特徴が、回折像を決めていることが明らかになった。実際の金属加工表面は圧延の場合でも機械加工の場合でも、ある程度の周期

性があり，周期性に対するじょう乱という形で，不規則なプロフィールが形成されているとした方が妥当である。したがって完全な不規則過程として回折像を考えるより，回折格子の理論を応用し，不規則性はそれに対する統計的なばらつきの結果と考えた方が，実際の金属表面との対応が容易である。

金属表面は，一般に加工の方向に加工傷が形成されており，図 2-2 に示すように加工方向（たとえば圧延方向）を y 軸，それと直角の方向を x 軸とすると，表面粗さは y 軸方向にはほぼ一様であるのに対し， x 軸方向は上にのべた不規則性を含む，ある程度の周期構造となっている。以後の取扱いは x ， y 軸方向に独立して取扱う。

いま x 軸方向の表面粗さが図 2-3 のように，単位の表面粗さプロフィール $F(x)$ として，これが周期 T で繰返しあらわれると仮定する。すなわち， N を回折をおこす単位プロフィールの数とすると，

$$Z(x) = \sum_{n=0}^{N-1} F(x - nT) \quad (2-10)$$

で表わされるとする。この場合，表面からの反射光波振幅分布 $U(x)$ もやはり周期関数となるから， $F(x)$ に対応する単位の振幅分布 $R(x)$ の周期関数となり，

$$U(x) = \sum_{n=0}^{N-1} R(x - nT) \quad (2-11)$$

で与えられる。

したがって，(2-1) 式から，観測面上の光波振幅は，

$$\begin{aligned} A(u) &= \frac{k}{2\pi h} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{N-1} R(x - nT) \exp[i(k/h)ux] dx \\ &= \frac{k}{2\pi h} \sum_{n=0}^{N-1} \exp[-inT(k/h)u] \int_{-\infty}^{\infty} R(x) \exp[i(k/h)ux] dx \\ &= G(u) \cdot \frac{\sin(N/2)T(k/h)u}{\sin(T/2)(k/h)u} \cdot \exp[-i(N-1)(T/2)(k/h)u] \end{aligned} \quad (2-12)$$

となる。ここで $G(u)$ は次式で与えられる。

$$G(u) = \frac{k}{2\pi h} \int_{-\infty}^{\infty} R(x) \exp[i(k/h)ux] dx \quad (2-13)$$

ただし、 $R(x) = f_R(x) \exp[2ikF(x)]$ で与えられる。これは(2-4)式に対応するものである。

上の結果から回折像の光強度分布は次式で与えられる。³⁾

$$I(u) = |A(u)|^2$$

$$= |G(u)|^2 \left\{ \frac{\sin[(N/2)T(k/h)u]}{\sin[(T/2)(k/h)u]} \right\}^2 \quad (2-14)$$

(2-14)式は回折格子の式とまったく同じものである。したがって図2-4に示すように、ブラケット内は次式で示す一定の間隔 u_0 をもった干渉縞を与える。

$$u_0 = (h/k)(2\pi/T) \quad (2-15)$$

これに対し図2-4に示すように $|G(u)|^2$ が重畳され、干渉縞の高さ分布の包絡線を与える。

$G(u)$ は単位表面粗さプロフィール $F(x)$ からの回折であり、 $|G(u)|^2$ はその回折像である。したがって図2-4の包絡線は、2-1節で論じたように、単位表面粗さプロフィール $F(x)$ の統計的性質と対応している。

実際の金属表面は、その周期構造の周期 T にばらつきがあり、したがって干渉縞の間隔 u_0 にばらつきが生ずる。周期のばらつきの平均値を \bar{T} とすると、干渉縞間隔の平均値 \bar{u}_0 は $(h/k)(2\pi/\bar{T})$ で与えられる。

干渉縞によるこまかい縞模様のほかに、 $|G(u)|^2$ の中に、 $F(x)$ の構造からくる縞模様も、一種の雑音として重畳される。また(2-10)式は完全な周期関数とした場合であるが、実際には $F(x)$ 自身にもばらつきがあり、実際に観測される回折像の包絡線は表面粗さプロフィールを単位のプロフィールに分割した場合の各々の単位プロフィールからの回折像の平均をあらわしている。

一方 y 方向の表面粗さによる回折は、表面粗さをほぼ一定とみなすと、(2-1)節、(2-9)式の第1項と同様に、回折像は δ 関数で与えられ、観測面の中心に集るスポットとなる。 y 方向にも表面粗さプロフィールがある場合には、今まで論じた回折像が y 方向に対応して観測されることになる。

なお上に述べた干渉縞、または $|G(u)|^2$ による包絡線にあらわれる雑音成分により、実際に観測される回折像には、こまかい粒状性、または針状性の斑模様が現われる。これを通

常スペックルパターン (Speckle Pattern) と呼んでいる。

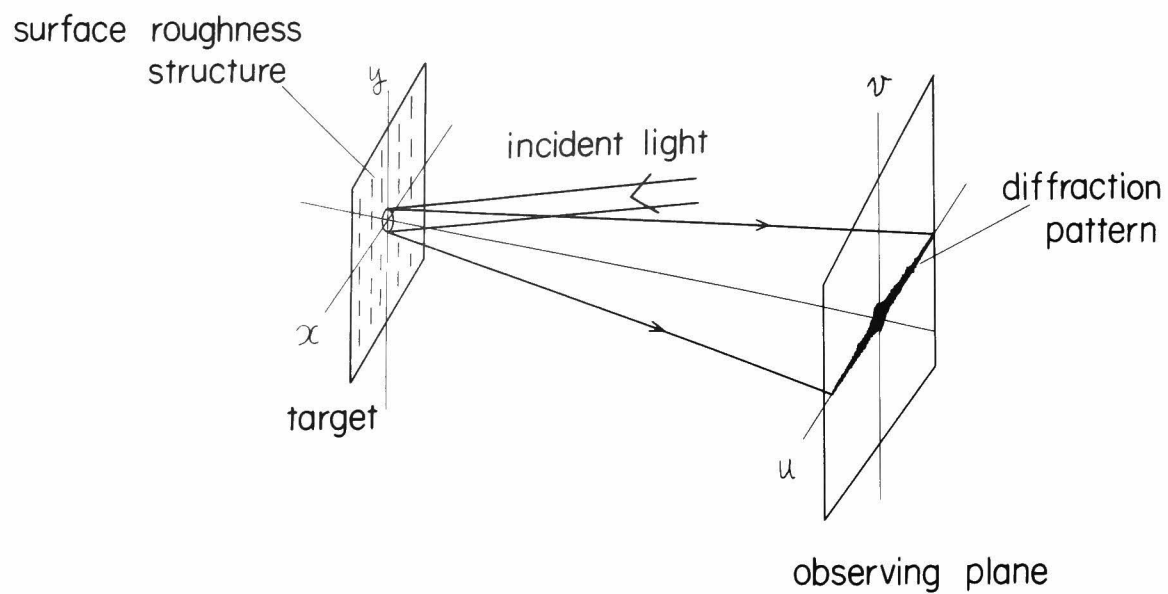


図 2 - 2 帯状回折像の観測

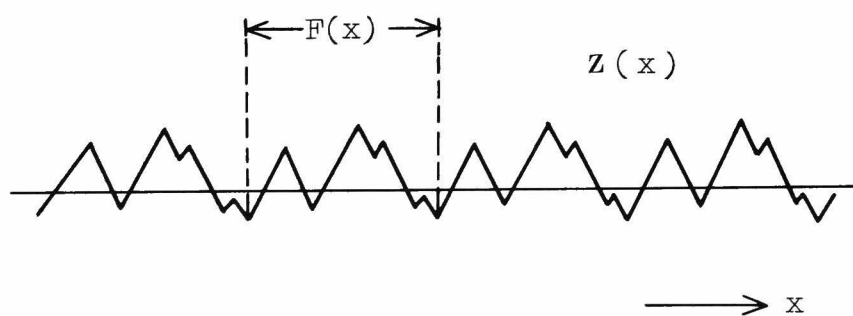


図 2 - 3 表面粗さのモデル

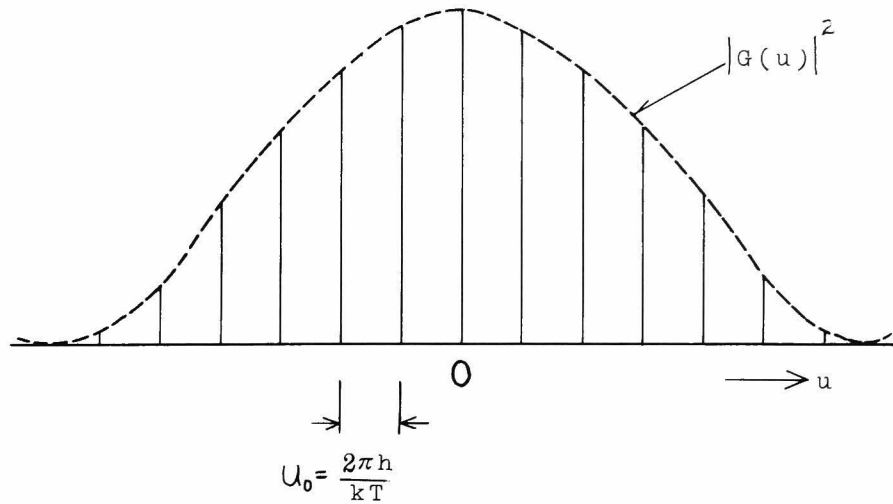


図 2 - 4 周期構造をもつ表面粗さによる回折像強度分布

2-3 回折像の実際例

実際に観測される回折像の例を以下に示す。前節までに述べてきた回折の一般理論には織りこまれていないが、実際の回折像はコヒーレント光の照射条件、ことに照射面積（スポット径）と照射光を集光するレンズ系により決まる照射光の角度分布等により、やや異ってくる。ことに一定距離においた観測面上での回折像の大きさ、スペックルパターンの平均の大きさ等に変化があらわれる。

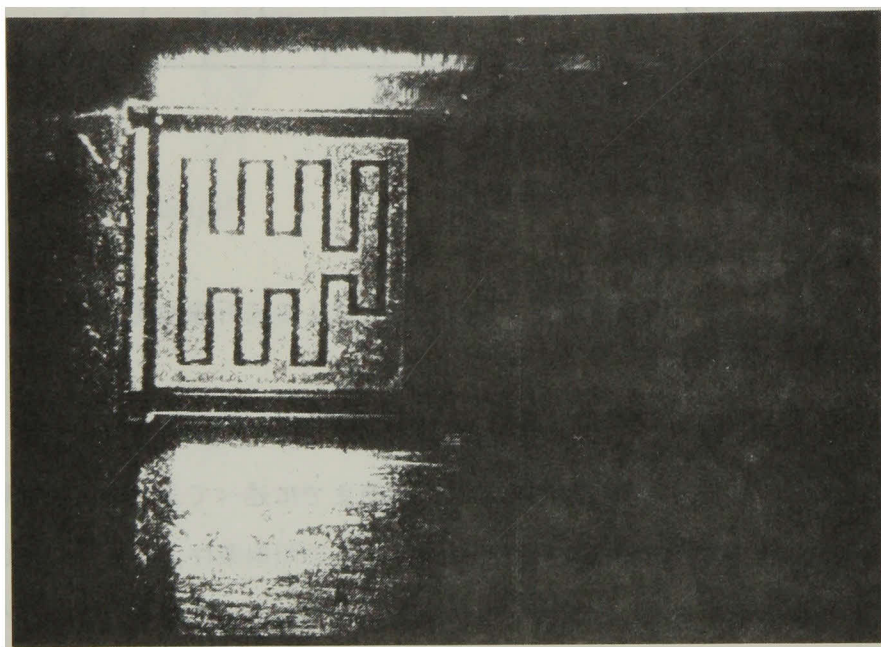
図 2 - 5 は、半導体素子の表面からの回折像の例である。この場合は比較的整然とした表面の例といえる。図 2 - 5 (a) は素子の全面全体にレーザ光（He-Ne ガスレーザ）を照射した場合で、(b) はその回折像である。表面像のパワースペクトラムに相当する回折像が現われていることがわかる。

圧延された金属表面からの回折像は（2-2）節の結論から u 軸方向（ x 軸方向と同一、図 2 - 2 参照）に干渉縞模様を含み、 $|G(u)|^2$ により決まる拡がった像になり、 v 軸方向は δ 関数に近くなるため、回折像全体としては u 軸方向に拡がる帯状の像となることが予想される。

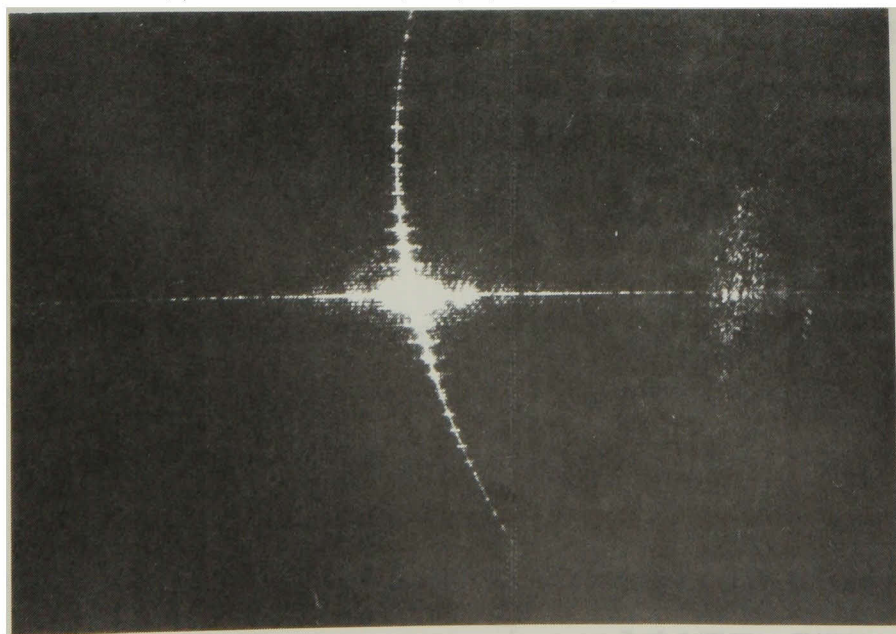
比較的一様な圧延傷のある金属板からの回折像の例を図 2 - 6 に示す。上記の通り、帯状に拡がった回折像が観測される。

図 2 - 7 に、金属表面との対応を調べるため、回折像を拡大して示している。(a) は比較的

整然として一定方向に圧延傷のある場合で、(b)の回折像は比較的明瞭な干渉縞を含んでいることがわかる。(c)は圧延傷が不規則で、y軸方向にも小さい傷を含んだ金属面であり、(d)に示す回折像は比較的中心強度の高い、かつ粒状性のスペckルパターンを多く含んでいる。これらの例は(2-2)節の一般的な理論を定性的にはあるが裏付けており、回折像は金属面の統計的性質の定性的な傾向に、よく対応していることを示している。



(a) レーザ光照射中の半導体素子表面



(b) 半導体素子表面(a)による回折像

図 2 - 5 半導体素子表面と回折像

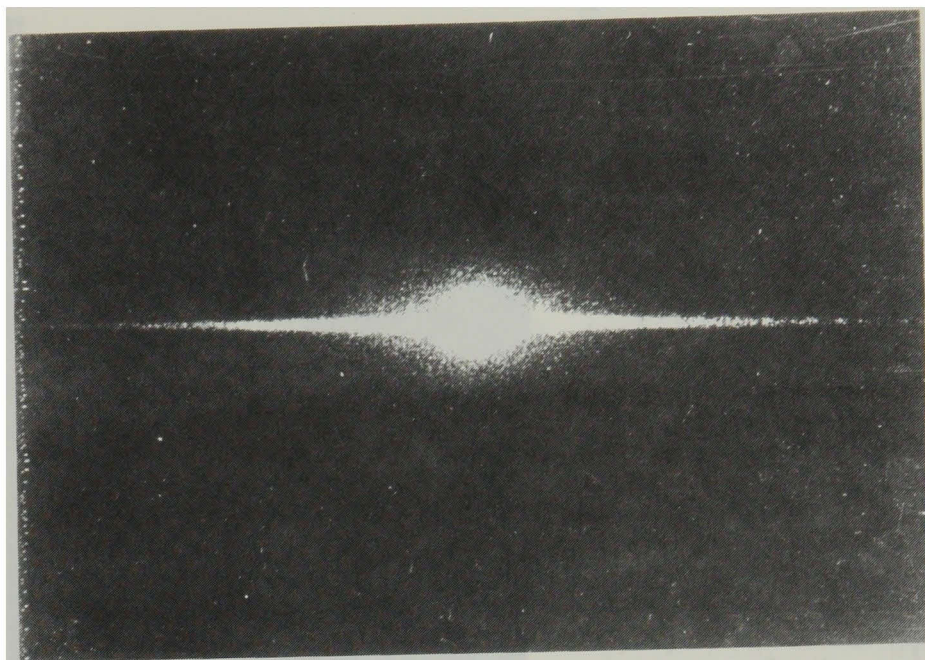


図 2 - 6 圧延金属板による帯状回折像

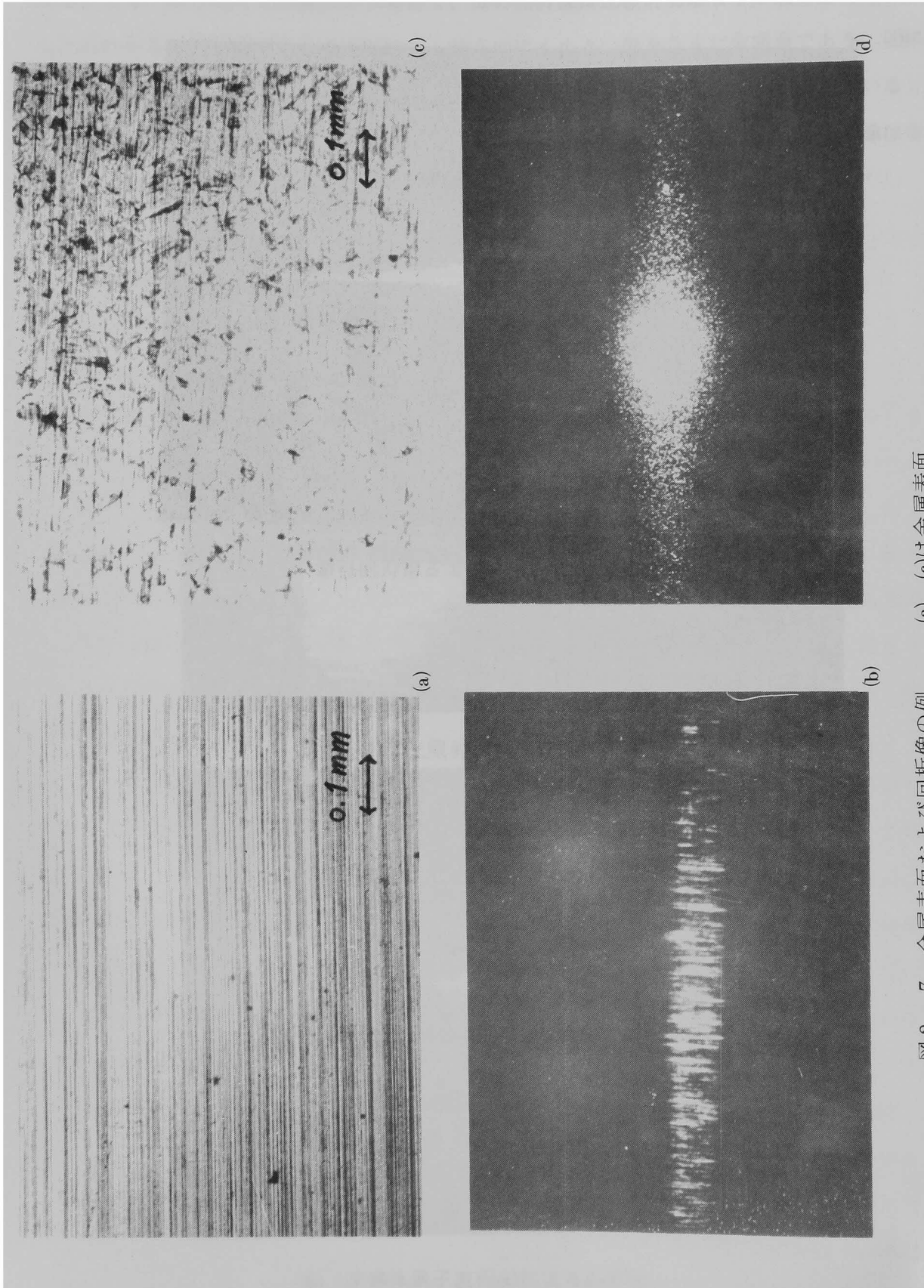


図2-7 金属表面および回折像の例
 (a), (c)は金属表面
 (b), (d)はそれぞれの回折像

2. 表面粗さ構造とコヒーレント光の回折

参考文献

- 1) R. B. Crane, Use of a Laser-Produced Speckle Pattern to Determine Surface Roughness, J. Opt. Soc. Am. vol.60, No.12, 1658-1663, (1970).
- 2) H. Fujiwara and T. Asakura, Effects of Time-Varying Diffuse Illumination on Holography, Japan. J. Appl. Phys. vol.7, 520-528 (1968).
- 3) T. Inari, Automatic Detection and Control of Surface Roughness by Coherent Diffraction Pattern, Proc. 16th SPIE Annual Meeting, 47-53 (1972).
- 4) M. Kamei and T. Inari, Recognition and Inspection of Surface Roughness by Coherent Diffraction Pattern., Proc. 3rd Intern. Conf. Production Eng. 113-118, (1977).

第 3 章 表面微細構造変化の計測

第 2 章の説明で、表面からの反射光を直接観測した際あらわれる回折像は、表面上の微細構造と直接関連していることが明らかである。本章では回折像の包絡線の強度分布から、表面微細構造の変化を検知することが可能であることを一つの応用例としてのべる。

3-1 表面粗さの観測

表面粗さは、通常、触針を表面に接触させ、表面の凹凸による触針の変位をマイクロメータで読みとるといふ、機械的な方法が用いられ、これにより表面粗さの構造の、一次元的なプロフィールが計測される。

表面粗さのプロフィールは、通常、非常に複雑、かつ不規則な形状をもっている。このため古くから表面粗さの代表的な特性を示す数値がいろいろ定義され、プロフィールの振幅の最大、最小値の表示、中心線平均粗さ、2乗平均値、一定区間内のピークの数、そして最近では周波数スペクトルや相関関数等が用いられている¹⁾。表面粗さは代表的な工学量であり、計測の目的に応じて必要な定義を定めて使用されている。

研削や切削等の機械加工品の表面、圧延された金属表面等は表面粗さの計測が必要な場合が多い。ことに加工中の計測の場合、また本来表面粗さは二次元平面上での高さの分布であり、二次元的な計測の場合には、上記の触針式では計測が不可能である。こうした加工中の表面状態の判別に現在用いられている方法は、人間の目視による表面観測よりほかになく、光沢等の二次元的な光学的特性から判別していると考えられる。

このことから光学的方法により表面粗さを計測する試みがいくつかおこなわれている。たとえば表面粗さより長い波長の光による光沢の計測²⁾、表面粗さ凹凸により、入射光線の正反射光の中心位置が観測面上で変化することを検出する一種の光切断法による方式³⁾なども提案、実施されている。

3-2 回折像による表面微細構造変化の計測

1) 表面微細構造と回折像の関係

表面からの反射光として直接観測される回折像は、第 2 章にのべた通り、表面からの反射光波のパワースペクトルに相当しており、表面粗さを直接的に計測することにはならない。

すなわち、(2-1)節で述べた通り、表面粗さのプロフィール $Z(x, y)$ は、反射光波振幅分布 $U(x, y)$ の位相項を与え、かつ $Z > \lambda/2$ の大きい振幅のプロフィールに関しては情報は失われてしまうため、回折像 $I(u, v)$ は厳密な意味ではプロフィール $Z(x, y)$ の空間周波スペクトル密度を与えることにはならない。しかし同一位相を与える部分の分布を1つの表面図形と考えれば、回折像 $I(u, v)$ はその表面図形のパワースペクトルを与えることになる。このことは図2-5をみればほぼ推定できる。このようにして表面粗さのおおよその空間周波スペクトルを計測できる。

非常に滑らかな表面で、(2-1)節の $Z < \lambda/4\pi$ が成立つ範囲では回折像 $I(u, v)$ は中心に集るスポット状の像を除けば、そのままプロフィール $Z(x, y)$ のパワースペクトルを与えらるゝとしてよい。

回折像 $I(u, v)$ の逆変換を光学的におこなうことができれば、上記の $Z < \lambda/4\pi$ の場合は逆変換された像は直流成分を除けばプロフィール $Z(x, y)$ の相関関数を与える。これは(2-8)式から明らかである。またこの像は(2-6)式からプロフィールの高低差の平均値 $(Z - Z') \mu$ の程度を与えることになる。

これらのことから、回折像を用いる計測法では、表面のプロフィールの高さが光の波長に近い、微細な構造に近づくほど、回折像が表面粗さの統計的性質とよく対応することがわかる。

2) 表面微細構造変化の一モデル

今まで述べてきた通り、光学的な諸条件により回折像 $I(u, v)$ がそのままプロフィール $Z(x, y)$ の統計的特性を数学的に明確な形で与えることにはならないが、たとえば表面構造の中に含まれる周期性が、加工等によりどのように変化するかを監視する目的等への応用は有効であると考えられる。いま一つのモデルとして研削された加工物の表面を想定する。

研削加工における砥石表面はドレッシングにより円周方向にほぼ一様で、円筒の軸方向にある程度の周期性をもって配列した構造をもっていると想定される。すなわち(2-2)節で述べたように、ある平均値をもってばらついた単位プロフィールが、ある平均値 \bar{T} をもつばらついた周期 T でもって軸方向に並んだ周期構造であると考えられる。研削によりその周期構造が転写されると考えれば、被加工面からの回折像は軸方向にのびた帯状の回折像となり、その軸方向強度分布の包絡線 $|G(u)|^2$ は各単位プロフィールの回折によって与えられる。

いま簡単のためにプロフィール $F(x)$ が図3-1(a)に示すような三角形で、この三角形

が軸方向につながって軸方向の表面粗さプロフィールを作っているとする。加工が進むに従い、この三角形が図 3-2(a), 図 3-3(a)に示すように、順次損傷が入り、高い周波数成分が重畳されてくるものとする。 $|G(u)|^2$ は簡単のために、これらの単位プロフィールそのもののパワースペクトルで与えられるとする。図 3-1(a), 図 3-2(a), 図 3-3(a)の各プロフィールのサンプリング点を計算機に入力し、計算機により直接パワースペクトルを計算した結果を、各々図 3-1(b), 図 3-2(b), 図 3-3(b)に示す。⁴⁾ これらの計算結果から砥石表面に損傷等が増えてゆけば、各パワースペクトルの高周波成分が増大してゆくことが明らかに認められる。したがってきれいに三角形の単位プロフィールが並んだ状況に近くなるようドレッシングされた直後から、加工が進むに従い、回折像の包絡線 $|G(u)|^2$ が拡がり、帯状回折像の強度分布は軸方向に拡がることと予測される。同様なモデルが他の機械加工や圧延等の場合にも成立し得ると考えられる。

帯状回折像の軸方向の拡がりを検出するのは、テレビカメラのような二次元撮像装置を用いてもよいが、軸方向の 2~3 個所に配置した通常の光検出器を用い、それぞれの出力の相対的比較により、容易に検出でき、比較的簡単な装置として実現できる。

3) 微細構造変化の観測例

実際に研削をおこなった加工表面を試料に用いて、上に述べたモデルの実験的確認をおこなった。⁵⁾ 試料は砥石のドレッシング直後から、研削をすゝめた各段階でとり出された被加工物を用いた。

試料は図 3-4 に示す。これらの試料は、たとえば $\#1$ はドレッシング直後の砥石で、 0.02 mm まで研削したもの、 $\#2$ は $\#1$ を研削した砥石でそのままさらに 0.2 mm まで研削したもので、他の試料は同様にして製作したものである。

上記の各々の試料からの回折像を図 3-5 に示す。簡単のために各回折像は像の中心から半分のみを示してある。図 3-6 は各々の試料表面の顕微鏡写真である。図 3-5, 3-6 共各写真の番号は図 3-4 の試料の番号に対応している。

図 3-5 の写真(1)と(5)を比較した場合、加工が進んだ状態(砥石表面上切刃の摩耗が進行した状態)では回折像が拡がっていることが明瞭にわかる。図 3-6 の顕微鏡写真からは目視的にその影響を見出すことができる。回折像の拡がりとは図 3-7(a), (b)により明瞭となる。これは回折像の強度分布を実測した結果である。参考のためにいくつかの試料の表面粗さを触針式粗さ計で計測したデータを図 3-8 に示す。図より $\#1$ の表面は、かなり明瞭な周期

構造があらわれており，加工が進むにしたがって損傷が増え，複雑な高周波成分の増加がみられる。このことから，定性的にはあるが，2)項にのべた微細構造の変化のモデルとよく一致していることがわかる。

図3-9は，上の実験結果の回折像の中央と端部の2点での光強度のデータの相対値が，加工の進展に対してどのように変化するかを示したものである。この場合の試料は図3-4と同様に製作したもので，試料No.1が0.02mmまで研削したもので，他は試料番号ごとに研削量が0.1mmずつ異っている。図3-9(a)は2点の強度比，(b)は分布の半値幅の変化の曲線である。研削の初期段階で得られる加工面では，微細な高周波成分が急激に増大することがわかる。

3-3 研削加工表面の監視への応用

前節において，表面構造としてある程度の周期的構造があり，これが損傷等の原因によりしだいにくずれ，周期的構造に微細な高周波成分が重畳し，これにより回折像の分布が変化するというモデルを確認した。この現象は，たとえば研削加工中に砥石の摩耗，損傷，目づまり等による被加工物表面の変化を間接的に監視することへ応用できる。この場合の実際の装置の構成としては，前節で用いたように，回折像の2点の強度比を，2個の光検知器を用いて計測すればよく，比較的簡単な方式が可能である。

実験は中心線平均粗さ(Ra)が1 μ m程度の研削加工面を対象とした。前に述べた通り，回折像による計測は表面構造のプロファイルの高さが光の波長の程度に近づくほど，表面構造の統計的性質との対応が一致しやすくなる。その意味で，この実験の程度の粗さは，回折像による計測がやゝ困難になる領域であるといえる。

なお，実際の加工において，加工条件，被加工物の材質等が一定している場合，表面粗さの管理は，その表面粗さと表面残留応力との関連性を，測定により確認した上で決められる場合がある。次にのべる実験例(1)では残留応力の変化もあわせて実測したので一例として述べる。

1) 実験例 (1)

研削条件ならびに試料は図3-10に示す。試料番号はNo.1がドレッシング直後の砥石で20 μ m研削されたもので，あと番号順に各0.1mmずつ研削を進めた場合の試料である。これらの試料によりビーム径1.5mm ϕ (1/e²)のレーザ光の回折像の強度分布を実測し，前回の実験と同様に，帯状の回折像の2点間の強度比を求めた。次に同じ試料により残留応力の実

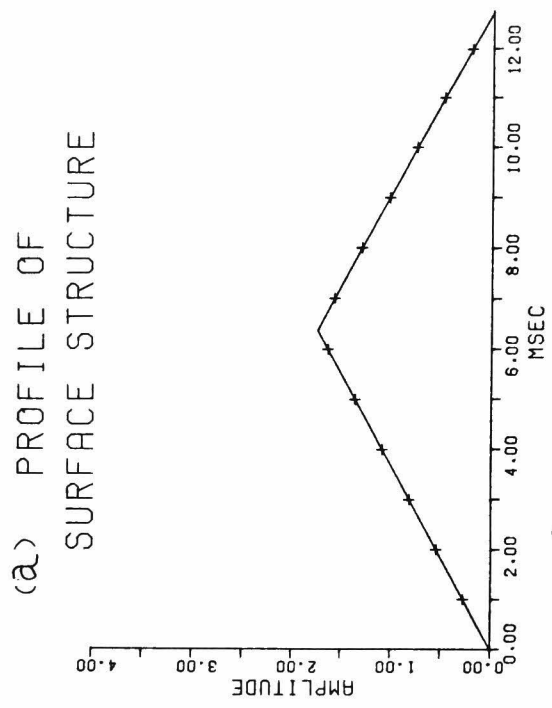
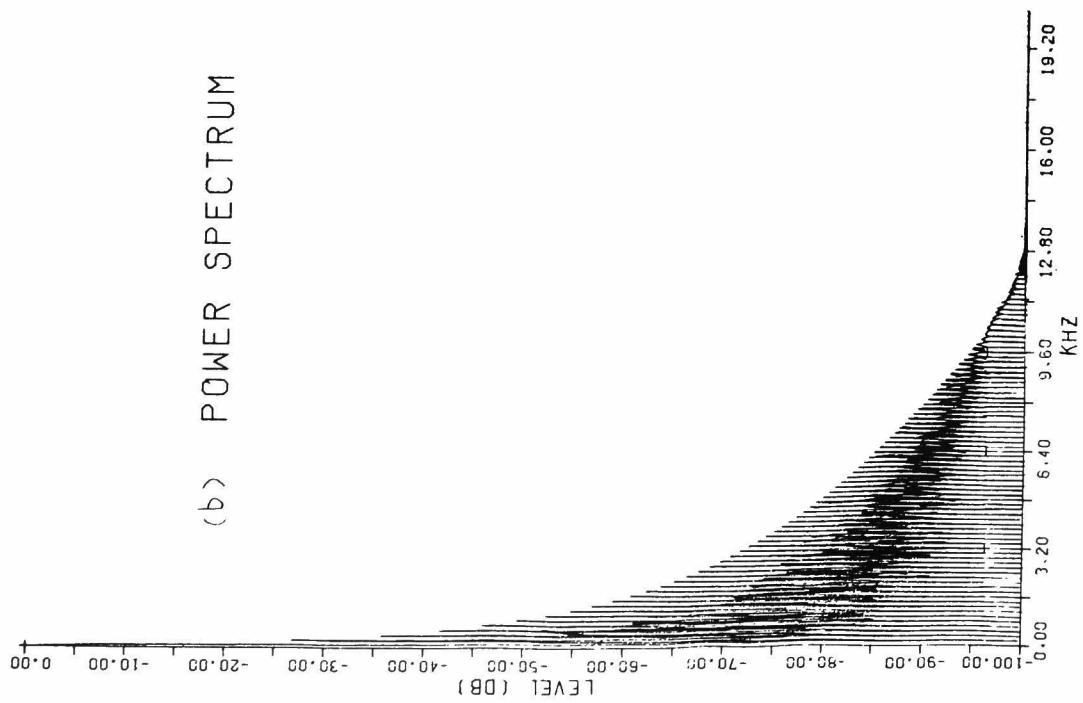


図 3-1 表面粗さ損傷モデル(1)とパワースペクトル

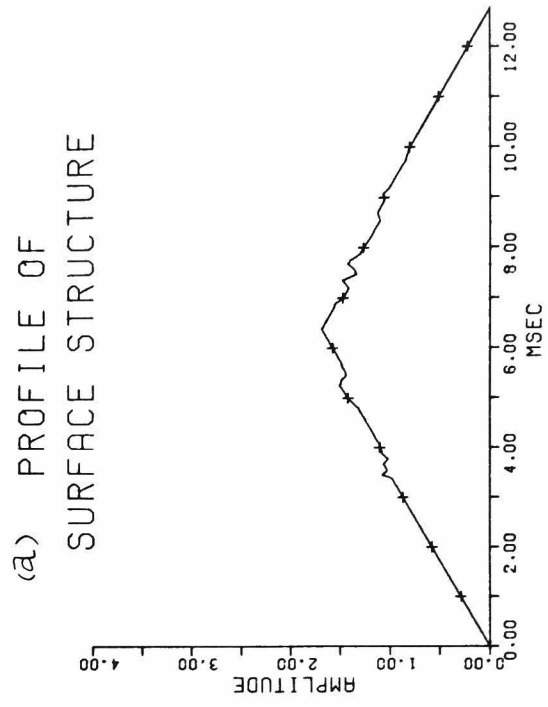
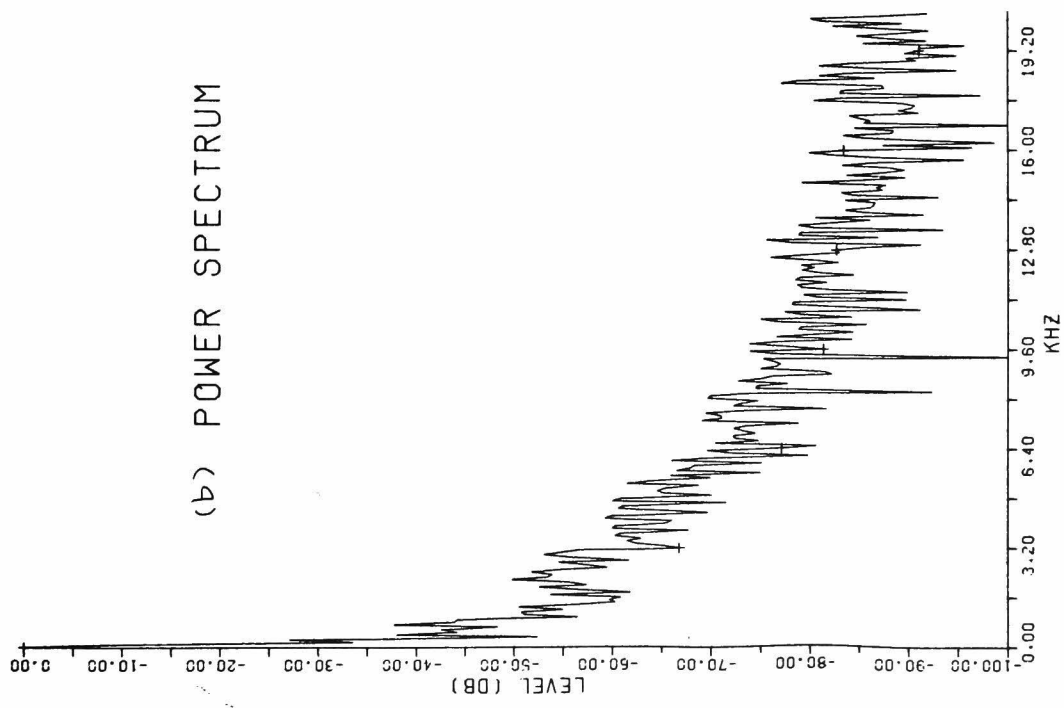


図 3-2 表面粗さ損傷モデル(2)とパワースペクトル

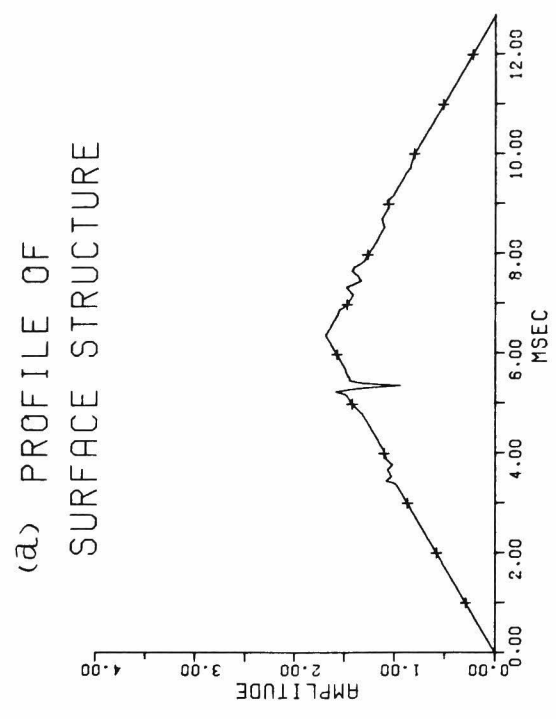
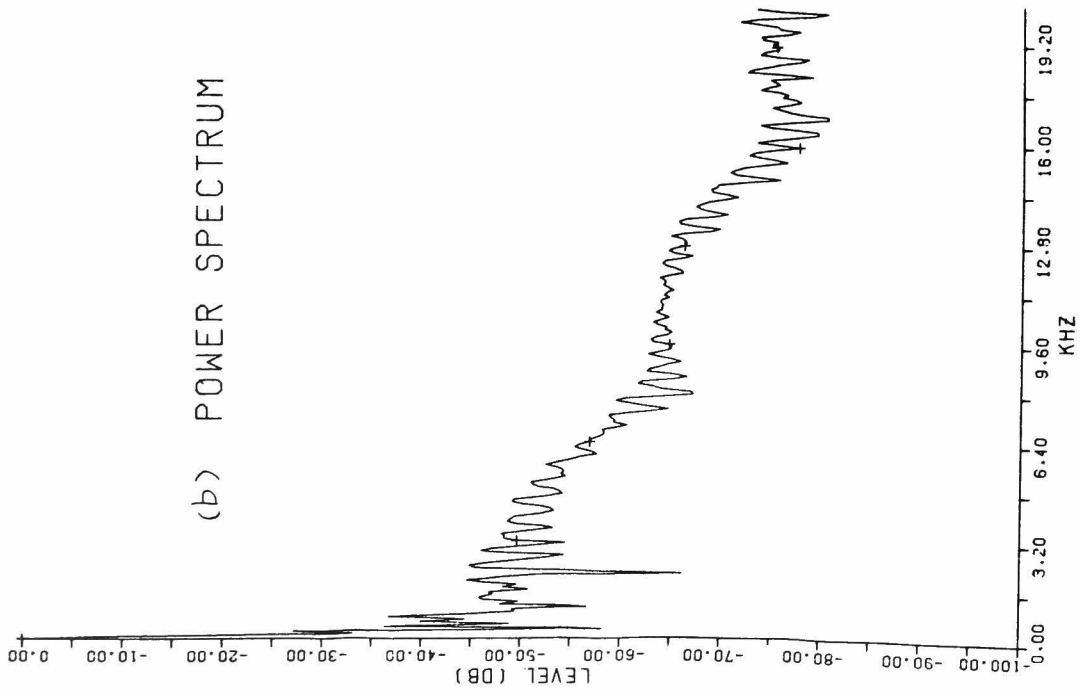
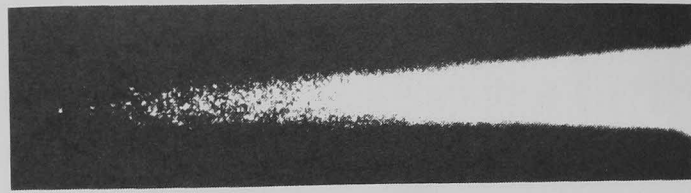


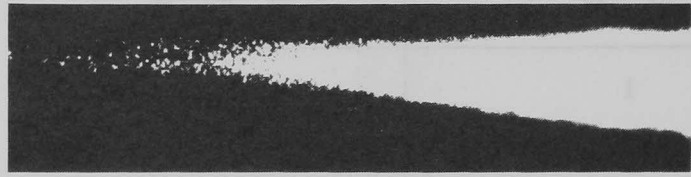
図 3-3 表面粗さ損傷モデル(3)とパワースペクトル

試料番号	研削量
1	0.02 mm.
2	0.2
3	0.4
4	0.8
5	1.0

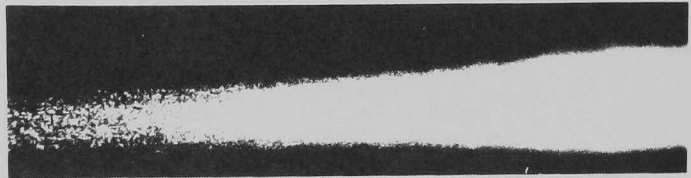
図 3 - 4 試料番号と研削量との関係



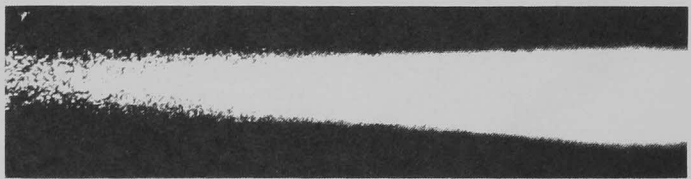
(1)



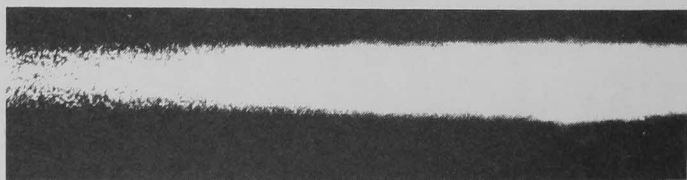
(2)



(3)

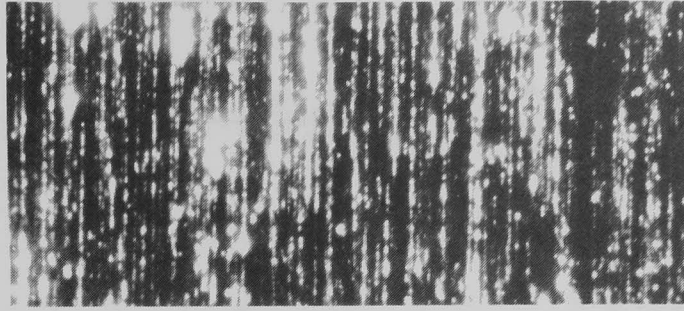


(4)

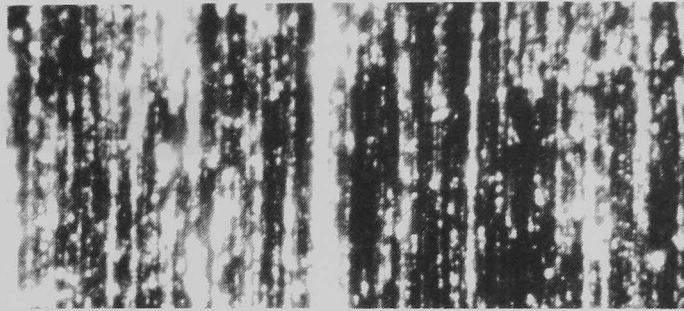


(5)

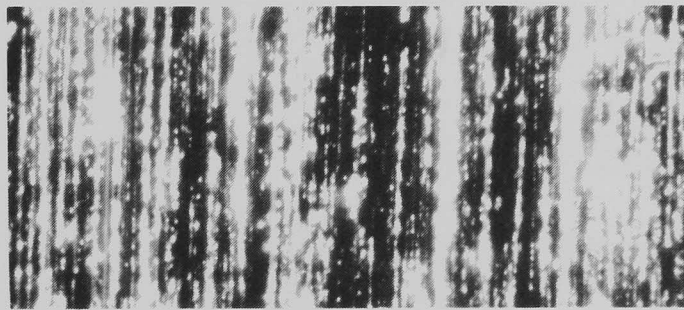
図 3 - 5 研削過程での帯状回折像の変化



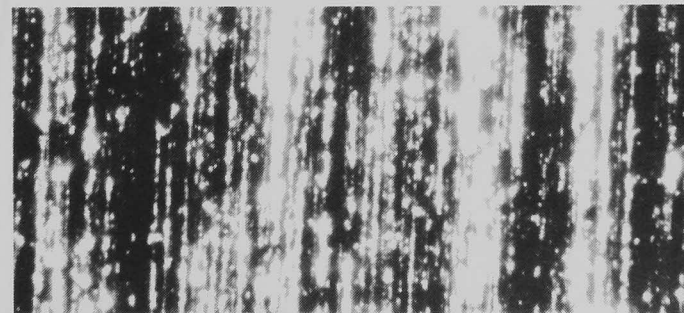
(1)



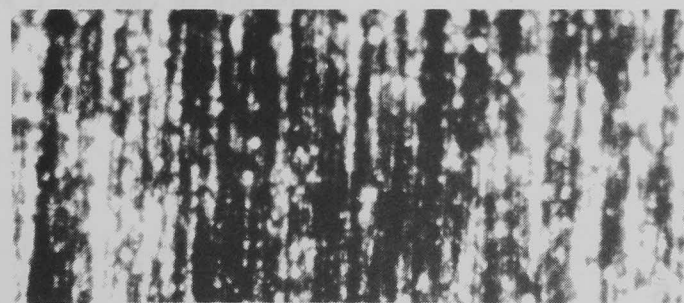
(2)



(3)

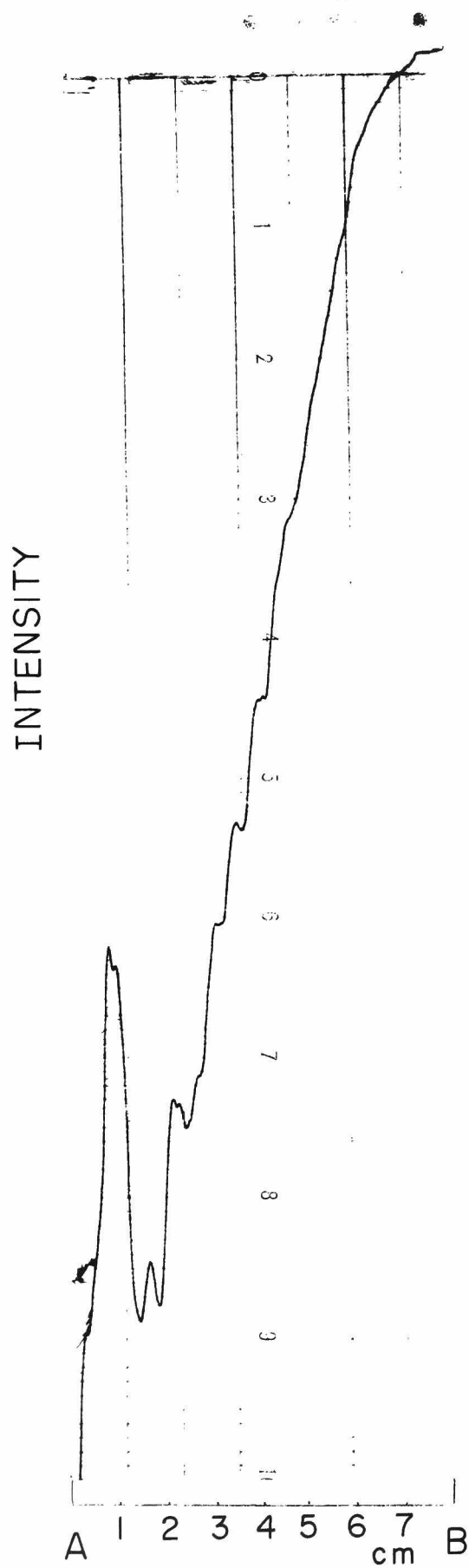


(4)



(5)

図 3 - 6 研削過程での金属表面の変化



SAMPLE NO. 1

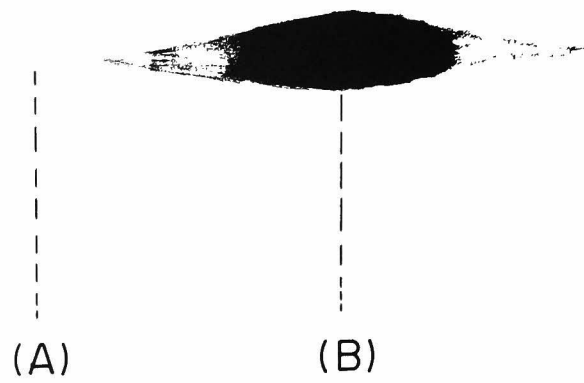
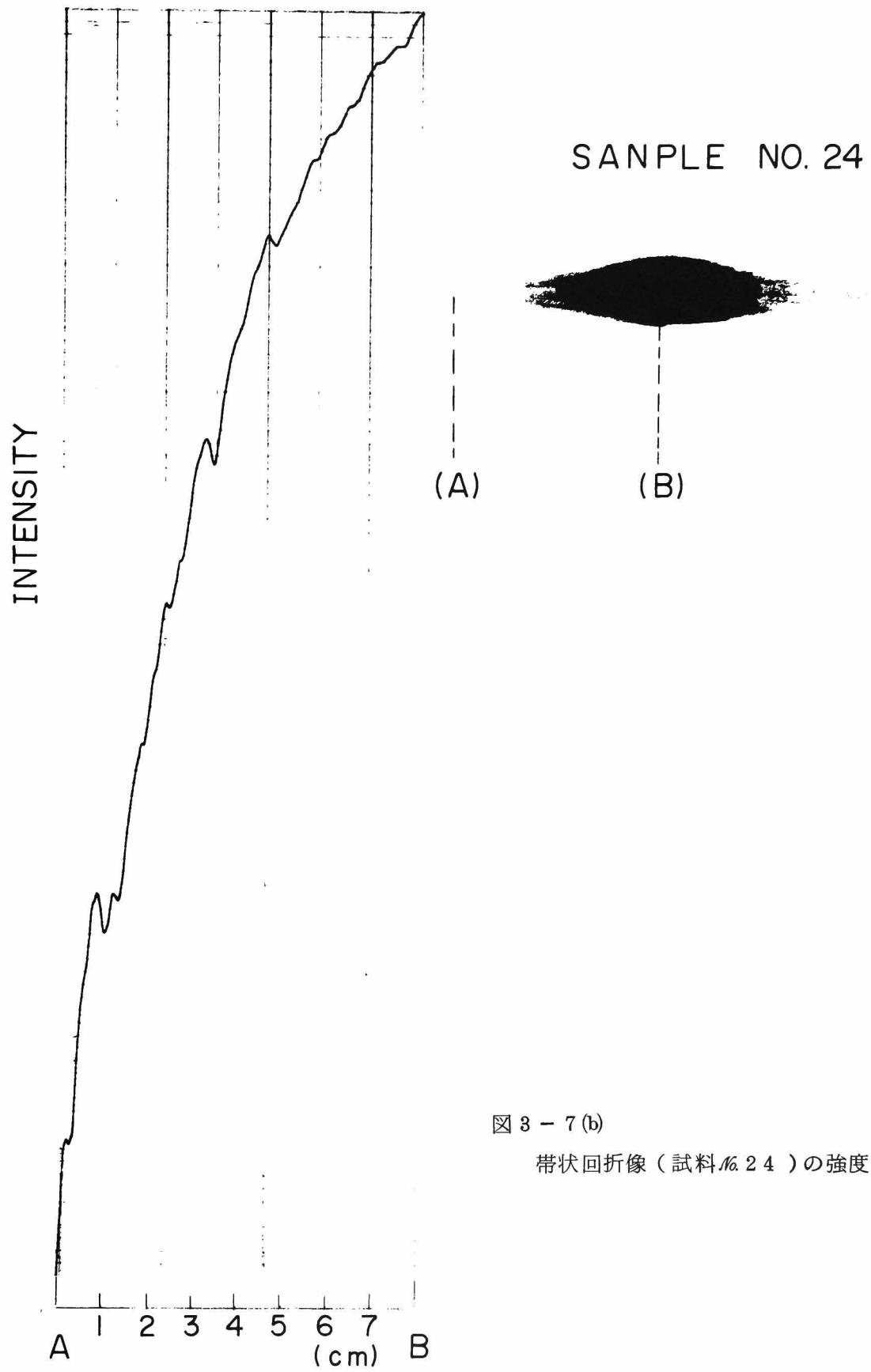


図 3 - 7 (a)

带状回折像 (試料 No. 1) の強度分布

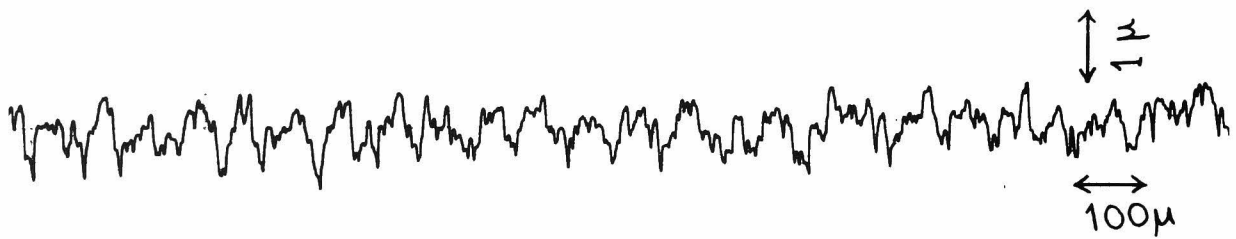


☒ 3 - 7 (b)
 带状回折像 (試料 №. 24) の強度分布

Profile of ground surface

material ; S 4 5 C

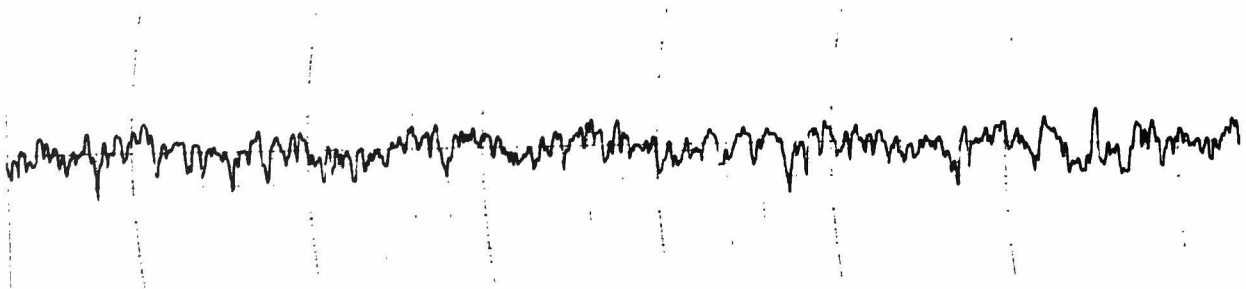
grindstone ; WA - 6 0 - L - m - V



1) 試 料 No. 1 (0.0 2 mm)



2) 試 料 No. 3 (0.4 mm)



3) 試 料 No. 5 (1.0 mm)

図 3 - 8 表 面 粗 さ の 変 化

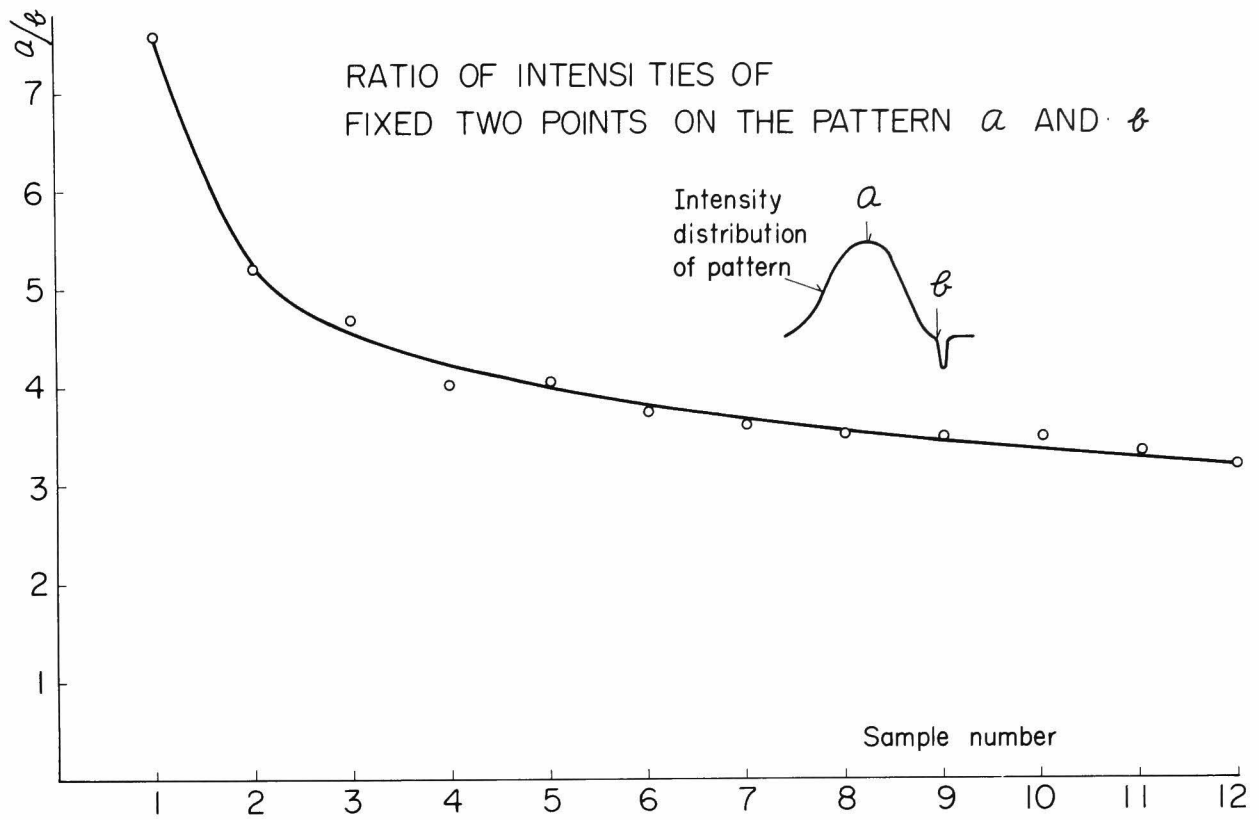


図 3 - 9 (a) 研削過程での帯状回折像の強度比の変化

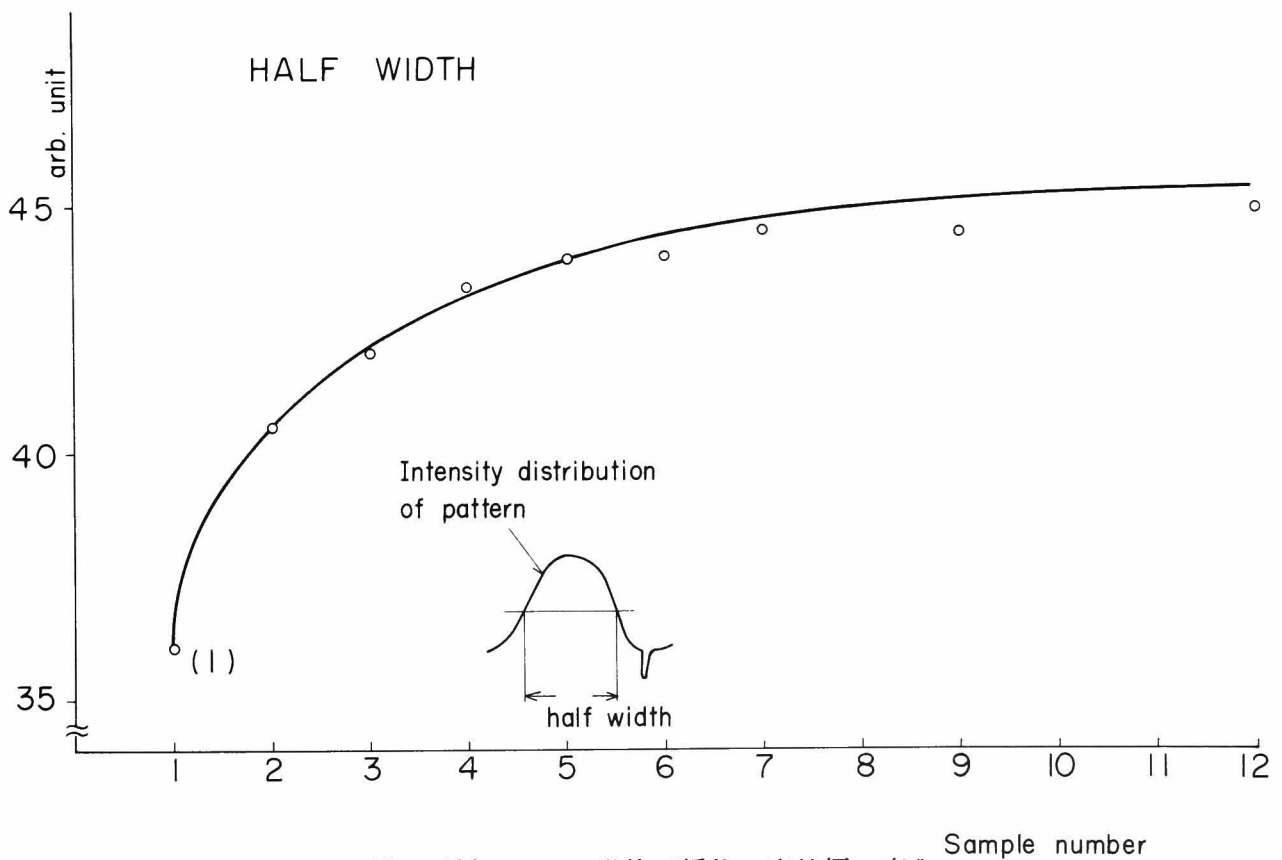


図 3 - 9 (b) 研削過程での帯状回折像の半値幅の変化

測をおこなった。測定方法はX線回折装置によるもので、 $90^\circ-45^\circ$ 法、ピーク決定は半値幅法によっている。試料表面は化学的にエッチングをおこない、エッチング深さを $10\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$ の3種類とした。

各試料番号ごとに、回折像強度比、ならびに残留応力のデータを図3-11(a)、(b)にそれぞれ示す。試料番号は図の(a)、(b)共通である。表面粗さは試料中の場所により、多少の差があるため、図の(a)では試料の端部と中央部でのデータをそれぞれ示している。また図の(b)では、エッチング深さの異なるデータもそれぞれ示している。

図から明らかな通り、この例では残留応力はドレッシング直後から急速に増大するが、ある段階に達すると安定領域に入り、ほぼ一定の残留応力が保持される。さらに加工が進むと残留応力は再び増大し始める。これに対し回折像の強度比は、前節の実験報告と同様に2点間強度比が急速に下り始め(強度分布がなだらかになる)、残留応力の安定領域に対応して強度比の変化曲線の“底”を形成し、残留応力の増大にほぼ対応して再び上昇し始める。

このことは次のように解釈される。まず研削量の少ない試料表面の表面粗さは大きく、明瞭な周期構造があり、これが鋭い回折像の強度分布を与える。加工が進なにしたがい、この周期構造はこわれ始め、微細で鋭い、高周波成分の構造があらわれ、その状態が持続して、これが回折像の強度分布を“なだらか”にし、残留応力の安定領域を形成する。さらに加工が進むと微細な構造も摩耗等により滑らかになり、一方で大きな深いキズがところどころにみられるようになる。この段階で強度分布が再び鋭くなってくる。

実験に用いた試料の表面粗さプロフィールのデータを図3-12に示す。研削の過程に対応して試料を下記の4段階に分けている。図はその中から一例ずつとり上げて示している。

初期	試料№	1～3	図3-12(a)
中期	〃 №	7～9	〃 (b)
後期	〃 №	13～15	〃 (c)
末期	〃 №	19, 20	〃 (d)

上記の分類は、データを見易くするために便宜上おこなったものである。表面粗さのプロフィールの変化は、上記の加工表面の状態の変化のモデルを裏付けている。

実際の研削工程で、どのレベルを加工仕上面の変化の限度として管理するかは、それぞれの場合に応じて決められる。表面粗さの振幅、周期性よりも、残留応力を小さくおさえる必要がある場合は、初期の、砥石の研削力の大きいところを用いるべきであり、また表面粗さ、

残留応力共にある程度小さくおさえない場合には、中間の安定領域で用いるのがよいと推定される。

回折像の強度比のデータは試料表面の場所によって、ばらつきをもっている。いま一つの例として試料の表面の計測点を多数個選び、それらの点でのデータを平均化してその試料のデータとした場合、各試料に対する、もしくは研削量に対する強度比の変化は図 3-13 に示すようになる。ただしこの場合は実験条件は図 3-10 と同じであるが、試料直径が異なり、50 mm φ とした場合である。図 3-11(a) に比べ、より明瞭に変化の傾向があらわれている。実際の装置としては、このような平均化をおこなう方が望ましい。

2) 実験例 (2)

次に実際に生産ラインでおこなわれている研削工程での被加工物表面の実験データ例について述べる。回折像、表面粗さの実測方法は実験例(1)とほぼ同じである。試料数は 12 個で、 $\#1$ は研削前の素材の状態のままの試料である。

図 3-14 は回折像の強度比の変化を示したものである。研削前 (試料 $\#1$) では表面粗さが大きすぎ、回折像による検出は不可能で、強度比のデータは記されていない。照射レーザー光線のビーム径は 2 種類用いた。

図 3-14 から、この加工工程においても表面微細構造の安定領域があることがわかる。なお、触針式粗さ計を用いた市販の計器による中心線平均粗さ (Ra) の表示値を図 3-14 の中に示している。この程度の加工では、Ra 値にほとんど変化はみられない。

以上の実験例より下記の事項が結論づけられる。すなわちこの程度の研削を施された表面に関しては、

- a) ドレッシング後の比較的周期性をもつ砥石表面微細構造がしだいに変化してゆく過程は、研削仕上面の回折像強度比により、触針法よりは高い感度で観測することができる。
- b) 上記実験に選んだ加工工程に関しては、回折像強度比により、下記の事項が推定できる。すなわち、ドレッシング直後の高い周期的構造が加工を始めると急速に変化し、微細な、鋭い構造をもつ高周波成分が増大し、一つの安定期を形成する。加工がさらに進むと摩耗が始り、先端の滑めらかな、大きな構造が増えてくることがわかる。

材 料	S S 4 1, 寸法 $90\text{ mm } \phi \times 25\text{ mm}$
研 削 盤	円筒式研削盤
砥 石	S A - 5 4 - K - m - V 3 0 5 × 1 2 5 × 5 0
ドレッシング条件	速度 0.8 m/min 切込 0.01 mm/回 ゼロ・ドレッシング無し ドレッサーは新品単石
切削方式	プランジカット (ドライ) 0.01 mm/回
砥石回転数	2 0 0 0 r p m
試料回転数	1 1 2 r p m
試料番号	No. 1 : ドレッシング直後の砥石で $20\text{ }\mu\text{m}$ 研削 No. 2 { } 番号順に研削量を 0.1 mm ずつ追 No. 2 0 加する

図 3 - 1 0 ドレッシングならびに研削の条件と試料仕様

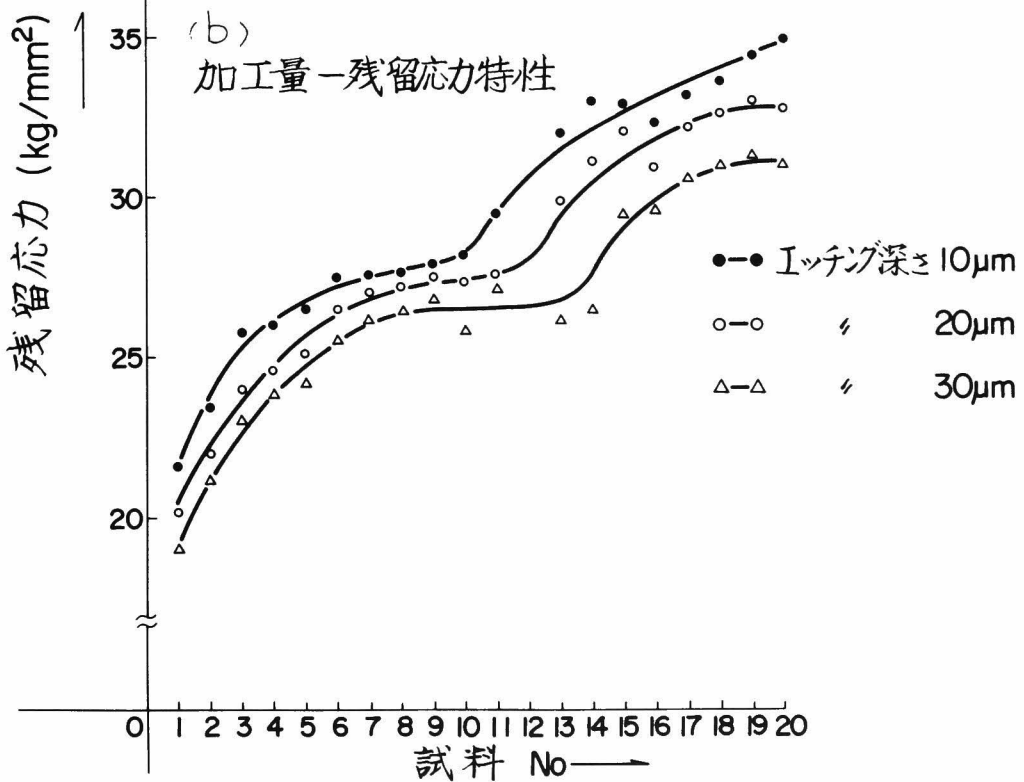
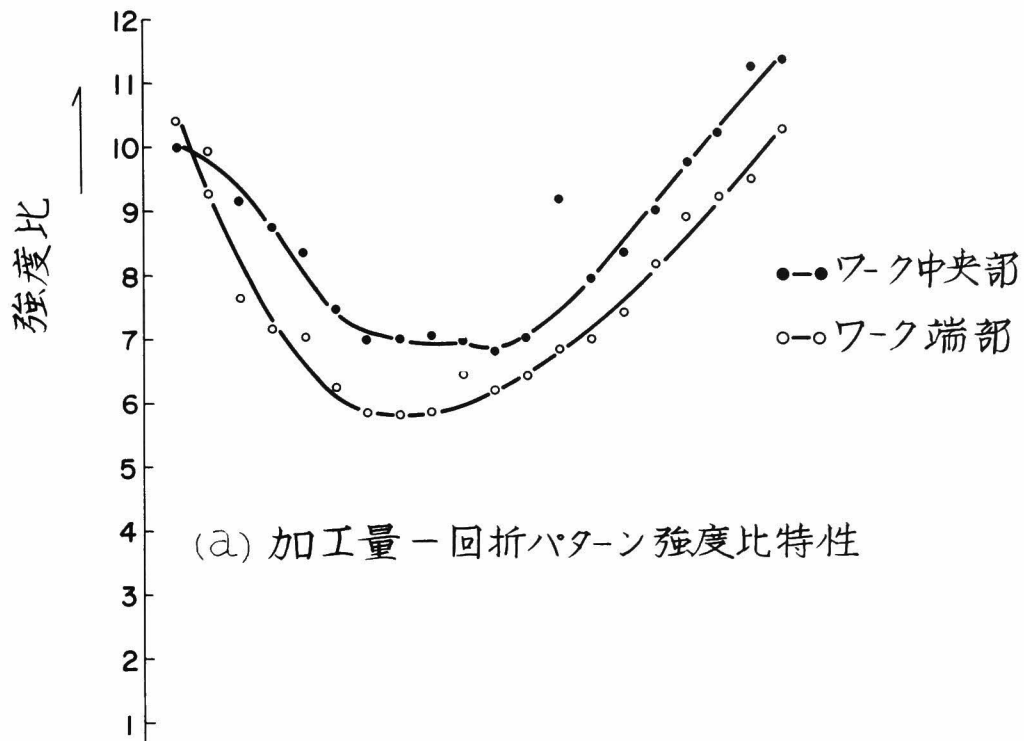
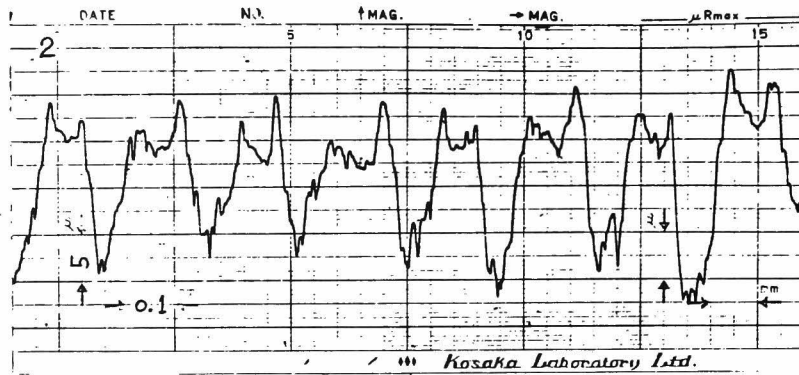
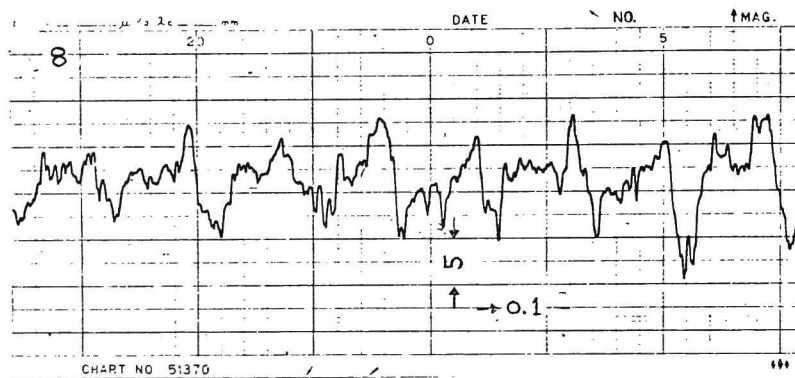


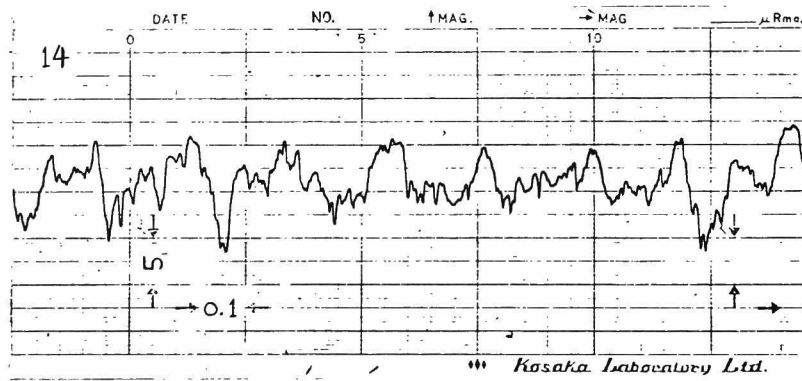
図 3 - 1 1 研削過程での帯状回折像強度比ならびに表面残留応力の変化



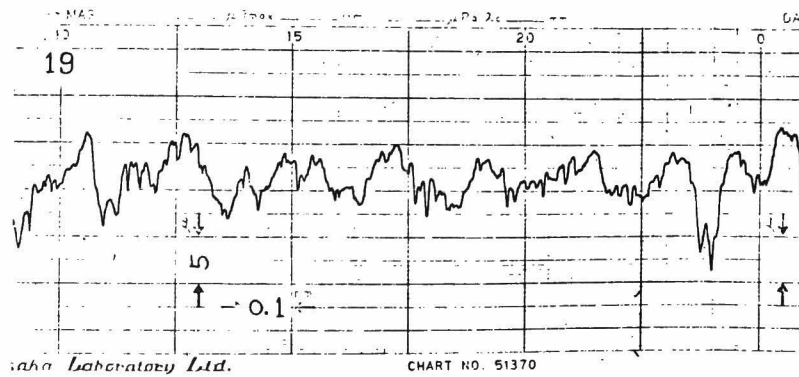
(a) 初期 (試料No. 2)



(b) 中期 (試料No. 8)



(c) 終期 (試料No. 14)



(d) 末期 (試料No. 19)

図3-12 研削の各段階での表面粗さ例

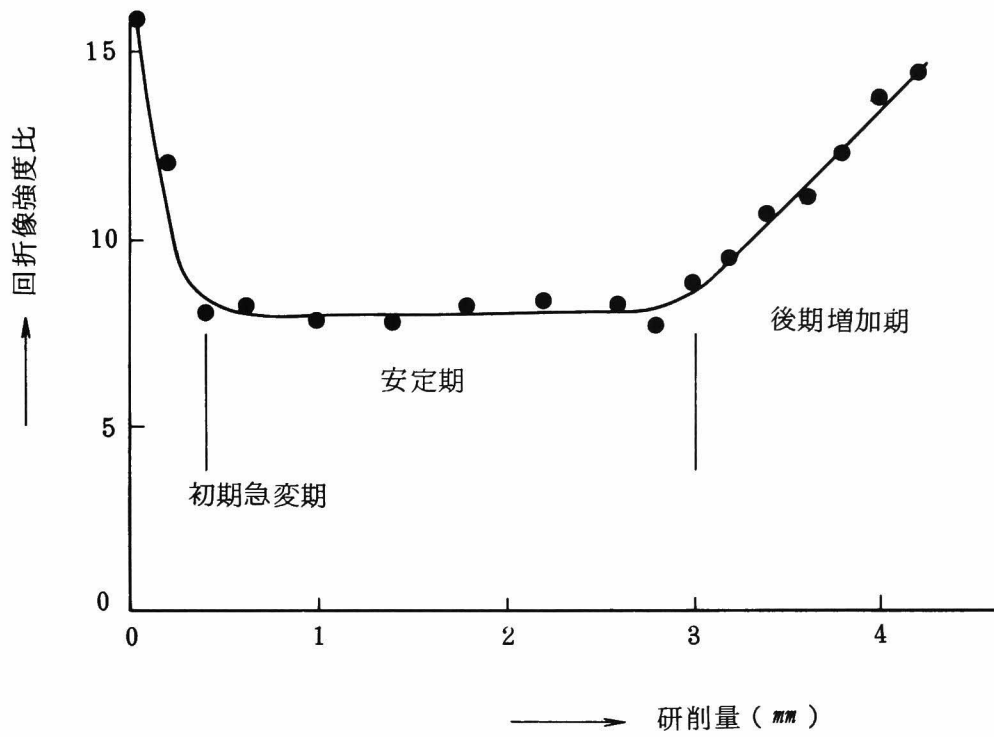


図 3 - 1 3 研削量に対する回折像強度比の変化
(レーザービーム径 1.5 mm φ)

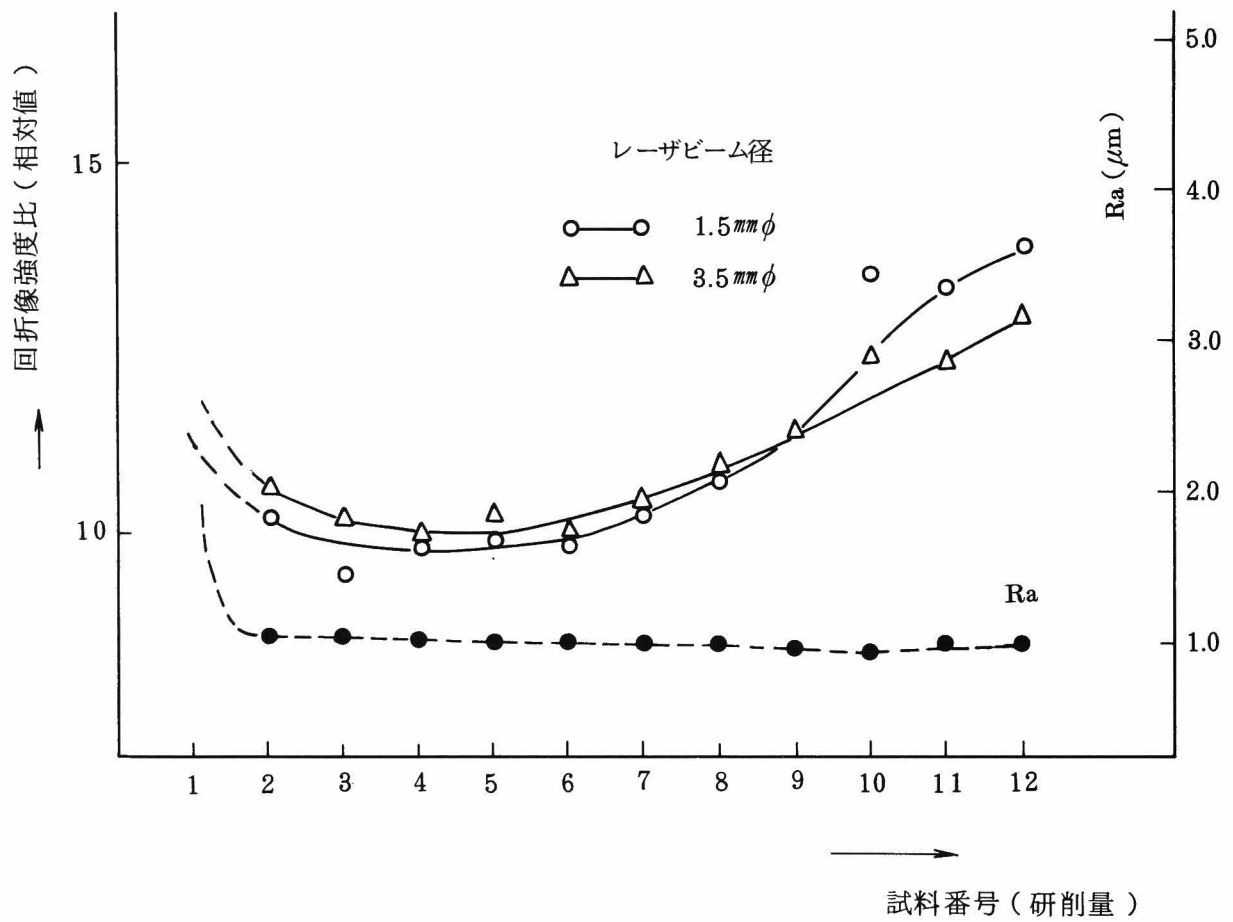


図 3 - 1 4 実験例 (2) の回折像強度比変化と中心線平均粗さ (Ra)

3-7 表面微細構造変化の計測，むすび

第2章にのべたように，表面より反射されたレーザ光による回折像は，表面からの反射光波のパワースペクトルに相当しており，したがって表面の微細構造の統計的な特徴と，直接的に対応している。回折像の包絡線的な分布の特徴は簡単な二次元的光学検出系と画像処理系により検出できるので，非接触でかつポストプロセス的に，表面微細構造の変化を監視する装置を比較的簡単に作ることができる。通常の加工の場合には，回折像の所定の2点の光強度の比を検出する簡単な方式により，実用的なオンライン用の監視装置を実現することができる。従来表面粗さ計測法として実用されているのは触針式の粗さ計であり，これは接触式で，かつ一次元方向の線上の粗さのみを計測している。この方式はポストプロセス的なライン計測には不向きであるが，回折像方式は，二次元の，ある一定面積内の微細構造の変化を検出できるという特徴がある。

この回折像方式は，その理論的制約から波長の $1/2$ を越える表面構造の高さ情報が失われ，表面構造の周期性，空間周波数特性が検知されることになる。表面構造の高さが光の波長程度，またはそれ以下の加工面の場合には，回折像は表面構造そのものの周波数スペクトルに近くなり，表面の統計的特徴とよく対応する。回折像方式は微細な構造の検出には，大きな特徴が発揮できる。

実際によく用いられる機械加工や圧延により形成された表面を計測する場合を想定し，一つのモデルとして表面構造はある単位構造が周期的に配列されており，加工による損傷，摩耗により，この単位構造に高周波成分が重畳，増大していくと仮定し，これにより回折像の強度分布の包絡線が変化し，回折像の所定の2点間の強度比が変化してゆくことを，計算と実験により確認した。

実際におこなわれている中心線平均粗さ(Ra)が $1\mu\text{m}$ 程度の研削加工面について実験をおこなった。実験の結果，ドレッシング直後の砥石で研削を開始した後，上記のモデルと同様に，急速に加工表面に微細な高周波成分が増大し，その状態で安定領域を形成する。さらに研削がすすむと，表面微細構造の先端の摩耗により，回折像の強度比の変化傾向が反転することを確認した。このことから，本章で提案する方式により，間接的に砥石作用面微細構造の観測をおこなうことができることを明らかにした。

回折像の強度分布による計測法では，表面粗さのプロファイルの何らかの数値表現との定量的な対応関係を求めるのは今後の課題である。回折像を用いる方式では，適用される加工

工程の、監視すべき表面構造の概略をあらかじめ決め、これに対応して選択されたビーム径による回折像の強度比の管理基準値をあらかじめ求め、これをもとにポストプロセス的オンライン計測をおこなうことができる。これにより従来不可能であった、機械加工や圧延、その他の加工による加工物表面のオンライン監視が可能となる。

3. 表面粗さの計測

参考文献

- 1) 奈良, 表面の微細形状の計測に関する最近の進歩, 日本機械学会誌, vol. 75, No. 641, 855-864, (1972).
- 2) H. E. Bennett and J. O. Porteus, Relation between Surface Roughness and Specular Reflectance at Normal Incidence., J. Opt. Soc. Am. vol. 51, No. 2, 123-129, (1961).
- 3) 佐藤, 三井, レーザ光を用いた断面形状の高速測定法とその応用について, 潤滑, vol. 21, No. 11, 733-739, (1976).
- 4) M. Kamei and T. Inari, Recognition and Inspection of Surface Roughness by Coherent Diffraction Pattern., Proc. 3rd Intern. Conf. Production Eng. 113-118, (1977).
- 5) T. Inari, Automatic Detection and Control of Surface Roughness by Coherent Diffraction Pattern, Proc. 16th SPIE. Annual Meeting, 47-53, (1972).

第 4 章 レーザ光による表面検査

第 2 章、第 3 章に述べてきた通り、レーザ光の表面からの回折像が、表面の状況に対応した形状、強度分布を示すことを利用すれば、表面上の微細な構造、形状の検知、正常な表面状況からの異常変化という意味での表面欠陥の検査が可能となる。

4-1 表面微細構造、形状の検出

第 2 章、第 3 章でも述べた通り、表面構造、形状が十分小さい場合には、回折像はそのパワースペクトラムとなることから、この回折像の形状、強度分布により、表面構造、形状を検出することができる。このことから、表面検査の場合にも、単に表面の異常の検知からさらに進んで、異常の場合の構造形状、すなわち欠陥形状、種類の識別の可能性もあることがわかる。

どのような表面構造、形状が検知されるかを示すために、いくつかの事例を図 4-1 に示す。この場合は、各種の微細表面構造が容易に得られるということから、半導体素子上の各種の表面を利用している。

線状のパターン、または線状に階段状の構造がある場合は、(c)、(c')に示すように、パワースペクトラムに相当する回折像が得られる。(a)、(a')と(b)、(b')は、いずれも平坦な表面に対応しているが、(a')はほぼ鏡面である結晶表面からの回折像であり、(b')はアルミニウムの蒸着面で、表面粗さのやや大きい場合である。(b')では、強度分布が外周に拡がった回折像となっている。

この現象は表面検査以外にも、いろいろな、簡単な検出装置として利用できる。図 4-2 は半導体素子の表裏、方向性を選別する装置の例¹⁾である。フィーダの上を一行に並んで搬送された素子は、ストップで停止させられ、図のように十字状に配列した 4 個の検出器からなる検出装置により、半導体素子からの回折像の強度分布が計測される。

回折像の強度分布から、レーザ光照射位置での素子の表面状態をしらべ、その表裏、方向を選別する。同様に各種の金属、セラミック等の部品の表裏等の判別をおこない、正しい部品が所定の姿勢で機械装置に送りこまれるよう制御する目的等にもこの現象が利用できる。このような計測は、本来パターン認識技術を必要とする分野のものであり、実用的な方法が従来なかったものである。回折像を用いることにより、簡単な装置として実現できるように

なったといえる。

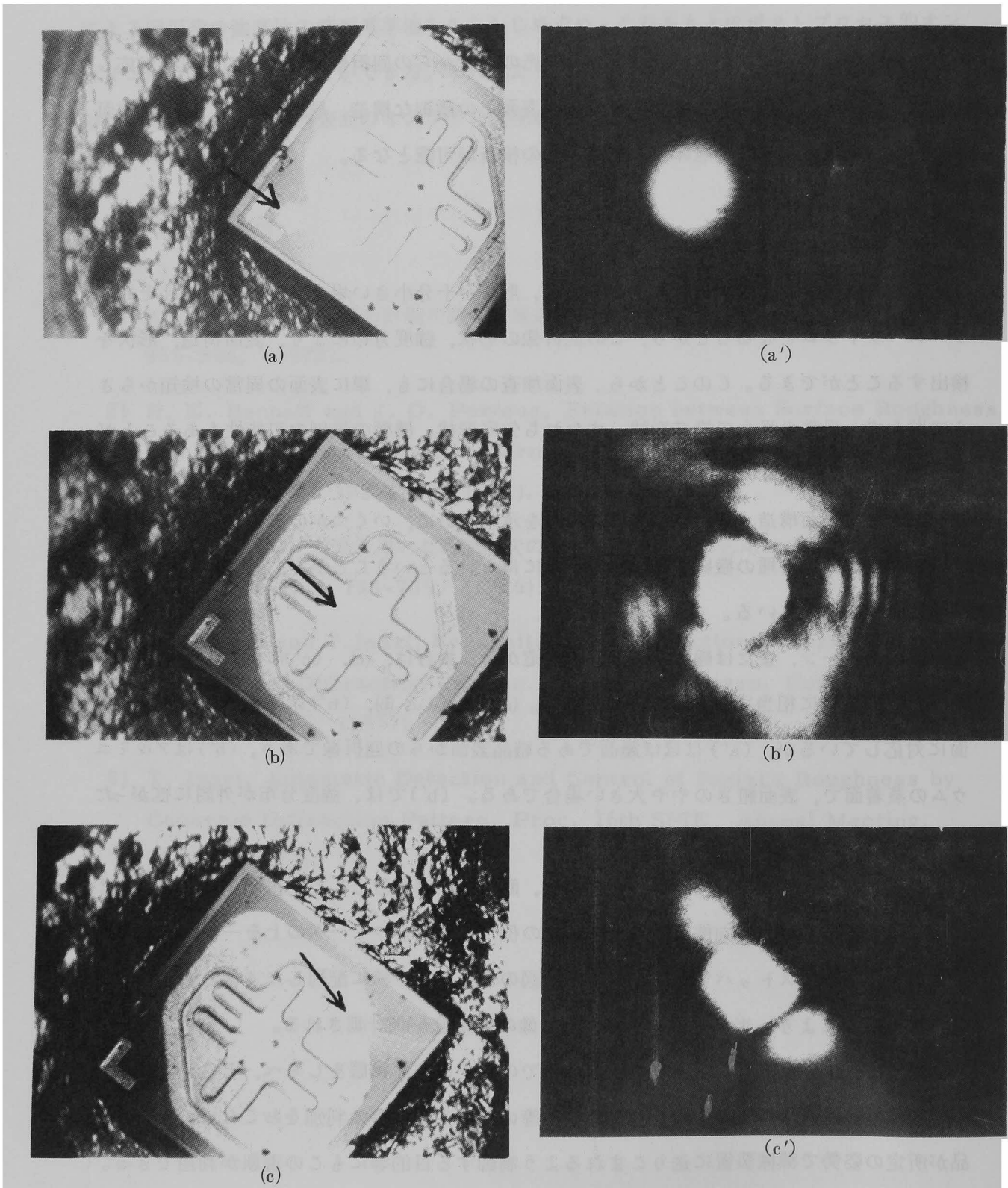


図4-1 半導体素子上の構造による回折像の変化

(a), (b), (c)は素子上での光の照射状況(矢印)
(a'), (b'), (c')はそれぞれの回折像

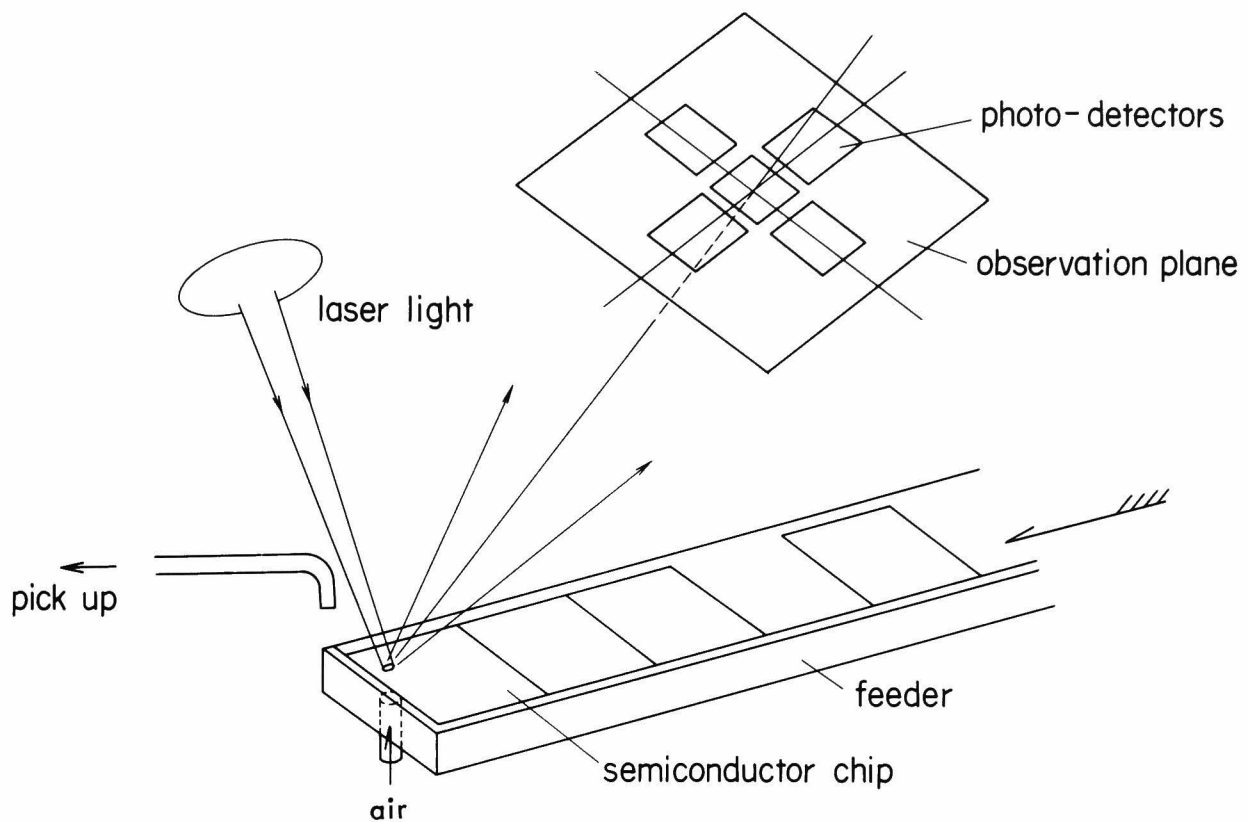


図4-2 半導体素子自動選別装置の構成

4-2 走間金属板表面検査装置

ここでは代表的な表面検査である走行中の圧延金属板の表面検査装置²⁾についてのべる。

第2章でのべた通り、圧延金属板からの回折像は図2-6に示すような、圧延方向と直角の方向（板幅方向）に拡がった帯状の像となる。正常な表面からの回折像は、おおむね同様の帯状の像となる。表面に欠陥のある場合、この回折像に変化が生ずる。

（4-1）節にのべたように、変化した回折像の形状、強度分布から、欠陥の微細構造、形状を検出することは可能であり、そのような検査装置を構成することもできる。しかしながら、実際の検査装置は欠陥の形状、種類まで識別する必要は少く、また上にのべた回折像からわかる欠陥の形状、種類は、実際の生産ラインにおいて必要とされる形状、種類とは必ずしも対応しない。このため筆者は、次にのべる簡単な光学系方式をもった検査装置を開発している。

1) 表面検査装置の原理と構成

上にのべた通り、圧延金属板からの回折像は、板幅方向に拡がる帯状の像となるため、この回折像の幅とほぼ等しい幅をもった、細長い受光面（開口）をもつ検出器を用いれば、欠陥による回折像の変化は検出信号の減衰として観測されることになる。

図4-3に検査装置の基本的な光学系を示す。小形He-Neレーザからの光線は、金属板上に集光するよう、まず集光レンズ系を通り、電磁振動鏡と、長方形の固定反射鏡により図のように曲げられ、走行中の金属板に照射される。反射光は上にのべた帯状の回折像となって正反射方向に進み、上にのべた細長い幅をもつ短冊状の開口をもつ、オプティカルファイバにより作られた集光系により受光される。次に入射レーザ光線が電磁振動鏡により板幅方向に走査されると、帯状回折像も板幅方向に振動する。集光系の短冊状の開口の長さはこの回折像の振動範囲を含むよう、十分長くとる必要がある。このようにすれば走査中に検出系に入る光の強さは常に一定であり、金属表面が正常であれば出力信号は一定に保たれている。走査中に欠陥があれば、その瞬間回折像は変化し、検出器の出力が変化する。図4-4に欠陥による検出器出力の変化の一例を示す。

光源は通常の冷間圧延板が対象の場合には標準的な小形He-Neガスレーザ（1～3mw）で十分である。特殊用途に対しては、それぞれ工夫が必要である。検出器は光電子増倍管を用いた。これは主として高速で走行する金属板に対する応答速度を考慮したためで、応答速度に問題がなければ、短冊状のシリコンの検出器を用いてもよい。図4-5にオプティカルファイバを用いた集光系の例を示す。短冊状開口の幅（d）は照射された光線の大きさ（スポット径）と共に、実質的な検査分解能を決める。理想的にはdは帯状回折像の幅の程度に設定すればよいが、実際には板のパスライン変動を考慮して、幾分大きく設定する必要がある。パスライン変動は、通常、ローラや押え板により規制することになるが、おのこのラインにおいて工夫する必要がある。

次に光電子増倍管からの信号を処理する方式についてのべる。

図4-6に処理方式の基本構成を示す。信号処理は大別して、通常はほぼ一定値（場合によっては正常表面自身のばらつき、表面粗さの大きさ等により、ある程度の幅をもつ“雑音”を含む）を示す出力から異常に小さい信号（欠陥信号）を抽出する検出回路と、その欠陥信号の走査周期の中での位置を判別して、板幅方向のどの位置に欠陥があるかを検出し、何らかの出力をおこなう判定回路、ならびに板の端部等処理する付属回路より構成されている。

検出回路は前置増幅器，主増幅器からなる広帯域増幅器群と，適当なスライスレベルをもつ波形整形器で構成され，図4-4に示したディップとして現われる欠陥信号を2値化信号として検出する。また場合によっては異ったスライスレベルをもつ複数の波形整形器を用いて原信号のディップ深さを計測し，欠陥の大小を判定することも可能である。

判定回路はチャンネル分割器とノイズ弁別器，および出力回路より構成されている。チャンネル分割器は検査領域を試料板幅方向に細分化し，独立した検査領域（チャンネルと称する）を試料板上に設定するもので，板幅方向での欠陥位置の検出や，次にのべるノイズ弁別のために利用される。これらの板幅方向の処理は電磁振動鏡の駆動電圧と鏡の振れ角が比例対応し，したがって照射レーザー光の位置が駆動電圧に対応していることを利用している。ノイズ弁別器は上記各チャンネルごとに，各走査ごとの欠陥の有無を調べるもので，少なくとも同一チャンネル内で2走査以上にわたって欠陥信号が出ない限り，欠陥であるとの認定をおこなわず，単発性のノイズの除去をおこなう。また出力回路は，ノイズ弁別器からの欠陥発生信号を受けた瞬間から，所定時間を経過した後にリレー接点の開閉をおこなう。所定時間とは，リレー接点により駆動される各種出力機器（たとえばマーキング装置，警報など）のライン上の設定場所とラインスピードとの関係で決定されるもので，必要に応じて適当に設定される。

付属回路は試料の材質，板幅等の変更や，実際の板の走行における蛇行等の問題に対処するための回路で，反射率補正，板幅記憶，端部検出の3機能を標準としてもっている。反射率補正は外部からの補正指令信号に同期して，板材の反射率変化を読みとり，前記の波形整形器のスライスレベルにフィードバックさせるもの，また板幅記憶は外部からの読込指令信号に同期して，図4-4に示す信号の幅から板幅をデジタル値で記憶するもので，共に新しい試料が送りこまれた場合にのみ操作される。端部検出は検査中各走査ごとの端部の位置を検出するもので，この信号に同期して各走査での検査が実施され，あらかじめ記憶されている板幅と走査位置が一致した時に検査が終了する。このため試料の蛇行に無関係に，しかも端部近辺の欠陥まで検査することができる。また正常試料においても連続的な反射率変化がある場合，前記の反射率補正を自動的に各走査ごとにおこなうか，増幅器をフローティングにして，ディップ状の変化だけを検出することにより対処できる。

図4-6の信号処理装置の構成には示されていないが，各走査ごとの欠陥信号波形の幅と，欠陥信号を出した走査線の数とから，欠陥の大よその形状と面積を検出することもできる。

また欠陥信号の出力形態としては、板幅方向と、走行方向での欠陥の座標を検出し、データ集録装置に記録し、デジタルプリンタ等に出力する場合もある。この場合は板の走行方向の情報、すなわち速度、または長さの情報が必要である。

図 4 - 7 に代表的な表面検査装置の仕様をまとめて示す。

図 4 - 8 は実装された検査装置の外観である。

2) 表面検査装置の性能

表面検査装置の性能を表示するのは大別して(1)検査分解能、(2)検査できる欠陥の種類、(3)制約条件、の 3 つに集約される。

検査分解能は主としてオプティカルファイバー集光形の短冊状開口の幅 d と、表面上での照射レーザー光のスポットの大きさにより決まる。照射レーザー光のスポットは数ミクロンの大きさにしぼれるが、通常はあまり小さくしぼると正常表面に対しても出力信号に含まれるノイズが大きくなり、分解能をかえって低下させる。

短冊状開口の幅 d は、前にのべた表面からの帯状回折像の幅の程度に設定した場合、最も検査分解能が高くなる。しかし現実には、パスライン変動等により回折像の位置が変化するため、 d にある程度の大きさをもたせる必要がある。帯状回折像の幅は第 2 章でのべた通り、板の走行方向の表面粗さの統計的性質により決っており、もし開口の幅 d を回折像の幅の程度に設定することが可能であれば、理論的には表面粗さの程度の欠陥まで検出できることになる。

帯状回折像が板の走行方向の圧延傷からの回折によるものであることから、圧延傷と同程度の、走行方向と平行にはしる欠陥に対しては検出できないことは容易に推定できる。ただし、現実にはそのような理想的な欠陥の入り方はまず考えられない。また正常表面と表面粗さ、および反射率がほぼ同じで色が変わっているとか、表面勾配がわずかに変化している（ふくらんでいる）等の欠陥に対しても原理的に検出は不可能である。

欠陥が検出された位置をデータとして読みとり、これをつないでゆくと、欠陥の大よその形状、大きさを知ることができる。一方、前にのべた通り回折像の形状が、表面からの反射光分布のパワースペクトルとなるたことから、回折像の形状から、欠陥の形状の識別をおこなう方式も考えられる。

制約条件の中で最も大きいものは、表面の検査装置に対する距離および勾配の変化（パスラインの変動）である。この変化により回折像の位置が変動し、欠陥と誤って判断すること

になる。この制約条件が検査装置を使用する生産ラインを制約することになる。

図4-9に表面欠陥とそれに対応する回折パターンの例を示す。(a)は正常表面の例で、(b)は欠陥のある場合の例である。

実際に実現されている検査装置の代表的な性能の例は図4-7の仕様表の中に示されている。

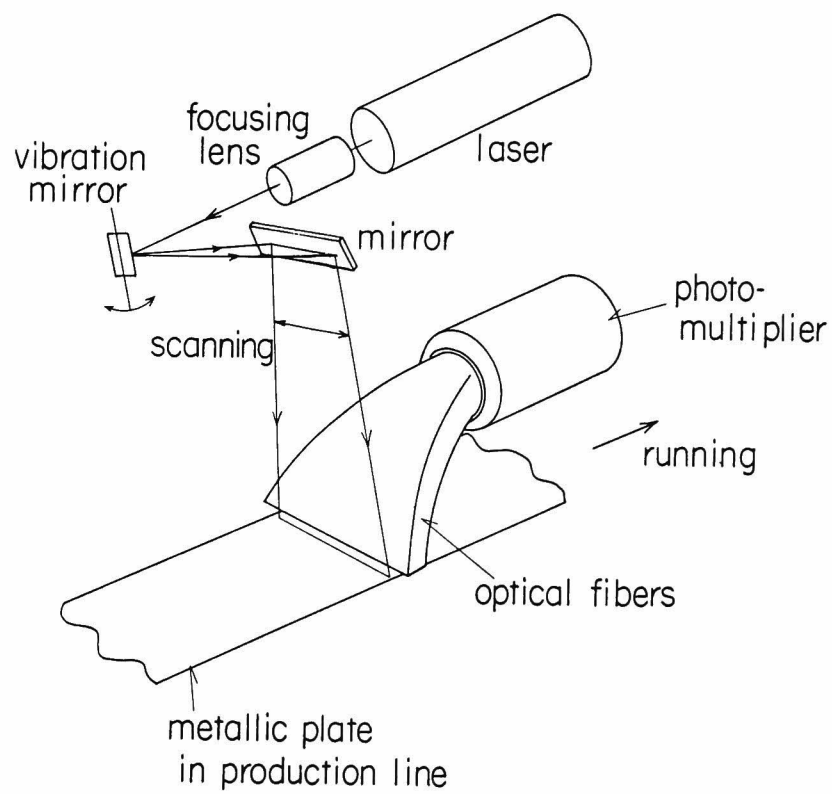


図4-3 レーザによる表面検査装置の構成

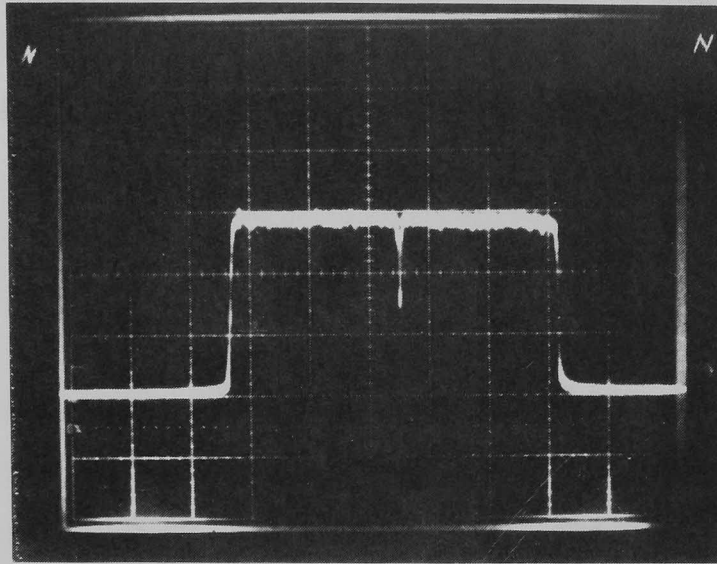


図 4 - 4 レーザ表面検査装置の欠陥信号波形例

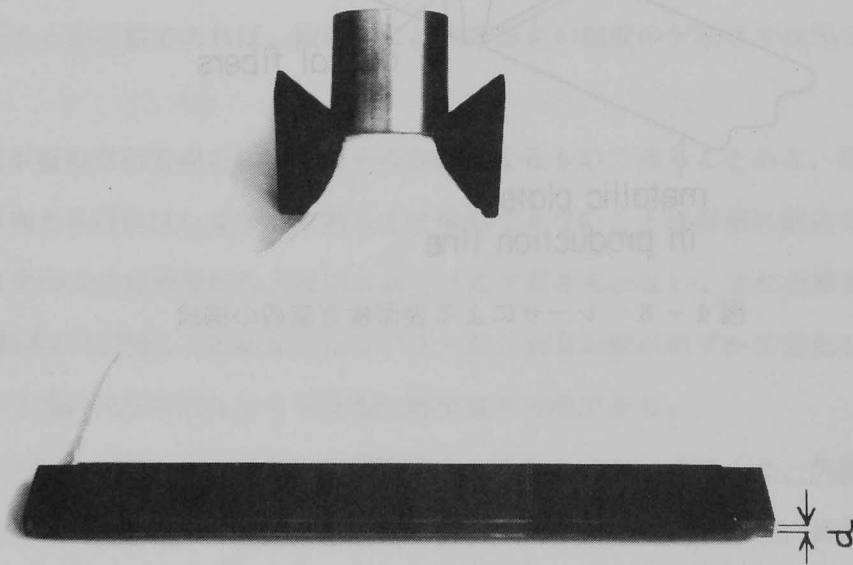


図 4 - 5 オプティカルファイバーによる集光系

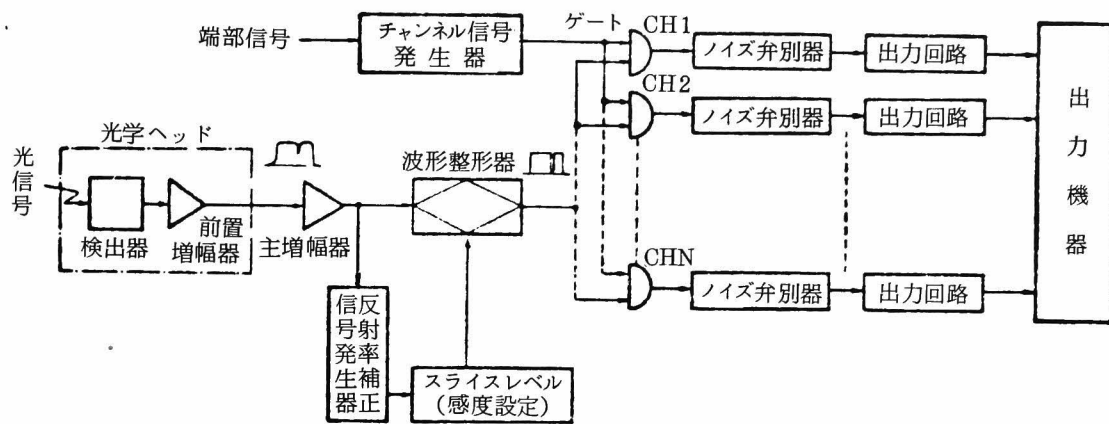


図 4 - 6 信号処理装置の基本構成

検 査 対 象	各種シート材（金属を主とする）
走 査 幅	250 mm / ユニット
走 査 方 式	電磁振動鏡
走 査 周 波 数	1 KHz
集 光 方 式	短冊形開口付オプティカルファイバー
受 光 器	光電子増倍管
光 源	He - Ne ガスレーザ
検 査 分 解 能	鏡面上の金属板上 $30 \mu m$ の黒点 $30 \mu m$ 幅の傷 } の検出が可能
電 源	AC 100V, 5A, 50 / 60Hz

図 4 - 7 レーザ表面検査装置の標準仕様

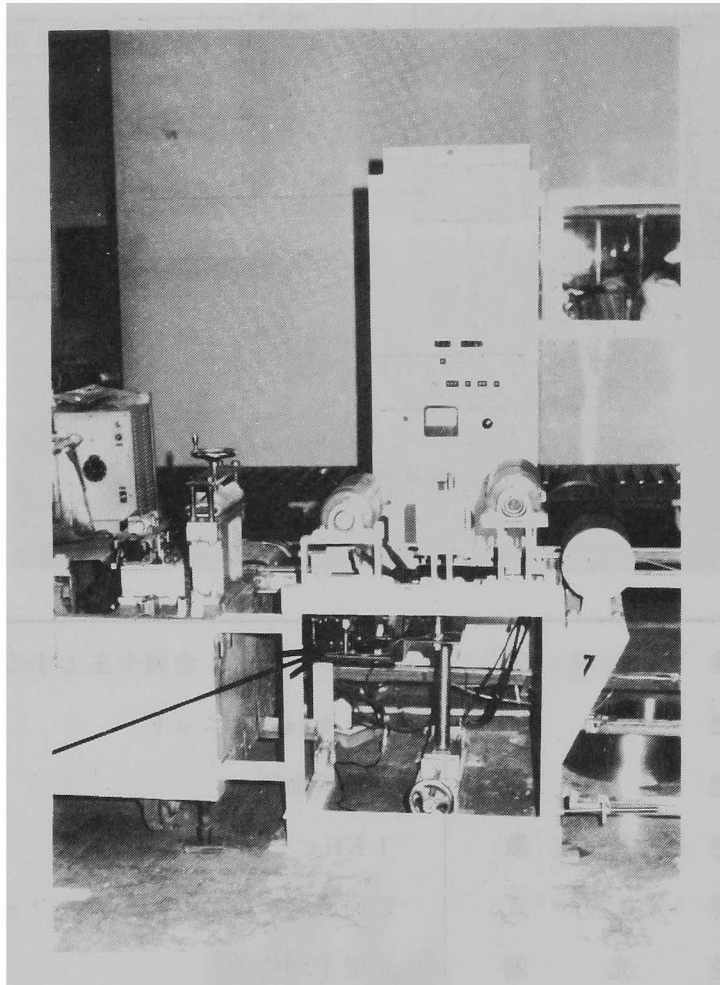


図 4 - 8 (a) レーザ表面検査装置の実装状況
(生産ライン中)

4-8. 鏡面検査装置

4-8図で

行光の特長は

1) レンズ

いふ類の型

レーザー光を照

リング上を

照けてシヤ

照の山は上記

装置にたいし

上記の鏡面は次の

ように入射光線が

光は(下へ)式で

できるとする

するが、表の

みた場合を照

の照射面が

照射面が

照射面が

照射面が

照射面が

照射面が

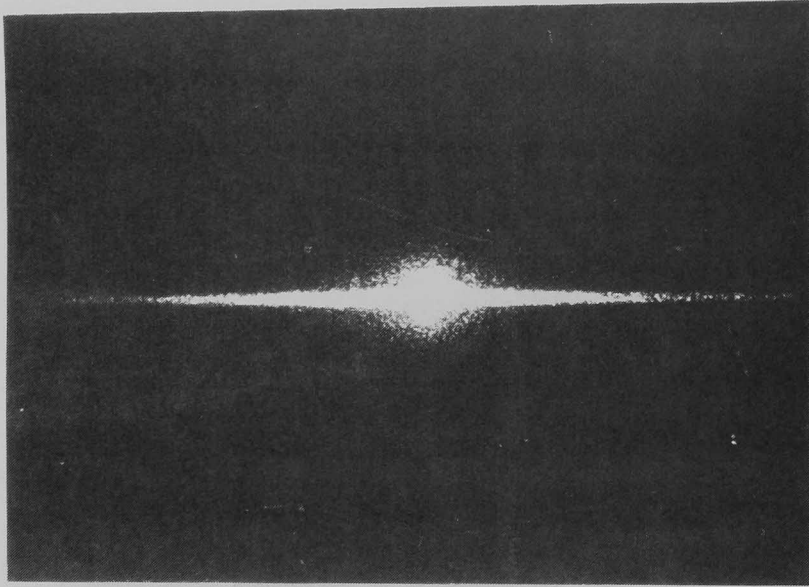
照射面が

照射面が

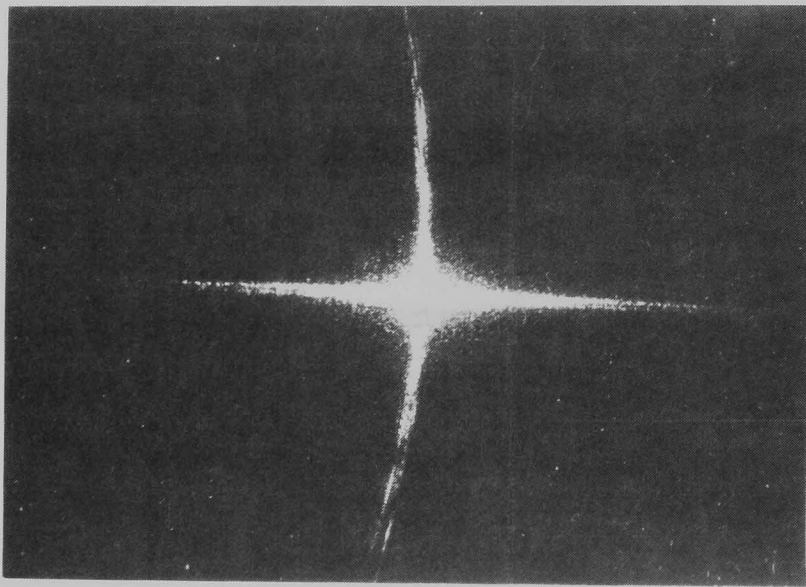
オプティカルファイバー
集光系

光学系

図4-8(b) 実装されたレーザー表面検査装置



(a) 正常表面からの回折像



(b) 欠陥部からの回折像

図 4 - 9 表面欠陥による帯状回折像の変化の例

4-3 細線表面検査装置

4-2節でのべた走間金属板表面検査装置と原理的にはほぼ同様で、細線に対して示す回折光の特異な現象を利用した細線表面検査装置が実現できる。³⁾

1) リング状回折像の形成

いま細い金属細線に対し、図4-10に示すように線の方向に対し θ_0 の角度をもたせてレーザー光を照射し、線の方向と垂直をなす面上にて回折像を観測すると、細線を中心としたリング上に分布した像が得られる。リング状の回折像の例を図4-11に示す。この現象は細線のみならず、圧延金属板等でも観測できる。金属板表面上の圧延傷方向に対し θ_0 だけ傾けてレーザー光を照射すると、同様なリング状の像が得られる。図4-12にその例を示す。図の(a)は上記の通り θ_0 傾斜した場合、(b)は圧延傷方向に対し、直角をなす方向から、板の表面に対し θ_0 傾斜させて照射した場合で、この場合にはリング状の像は観測されない。

上記の現象は次のように考えると理解できる。いま図4-13に示す光学系を考え、図のように入射光線は $y-z$ 平面内で y 軸に対し、角度 $\theta_0 (< 90^\circ)$ をもっているとする。回折光は(2-1)式で与えられるが、この中の積分は x 、 y 成分に関し、おのおの独立に計算できるとする。入射光線は平行光線とし、照射面積も観測面からの距離に対し十分小さいとすると、表面の x 、 y 方向共零次回折光は1点 R_0 にほぼ集る。いま光学系を x 軸の方向からみた場合を図4-14(a)に示す。表面の y 方向の表面粗さ(y 方向成分と呼ぶ)による回折の零次回折光は $Y_1 P_2 = Y_2 P_1$ の条件を満たす点で観測できる。

y 軸の方向から見た場合の光学系を図4-14(b)に示す。表面の y 方向成分はなめらかで、零次回折像のみであるとし、 x 方向成分からの高次回折光があらわれるとすると、上記の $Y_1 P_2 = Y_2 P_1$ を満たし、図の角度 φ をもつ軌跡、すなわち y 軸を中心とした円周上に分布することになる。立体的に考えれば、 y 軸を中心とし、角度 θ_0 をもつ円錐の母線上を、各回折光は進むことになる。

金属細線や圧延金属板は4-2節にのべたように、 y 方向には比較的なめらかで、 y 方向成分による回折像はほぼ零次回折光の周辺に集ることから、上にのべた場合に合致し、回折像は上記の円錐母線上を進むことになる。これを y 軸に関し垂直な観測面上にて観測すれば、 y 軸を中心としたリング状の像として観測されることになる。

表面の y 方向成分の高次回折光がある場合、各回折光は $\theta \neq \theta_0$ の角度をもつ多数の同軸円錐群の母線上を進むことになる。この様子を図4-15に示す。

2) 細線検査装置の原理と構成

細線の長手方向に対し傾斜した方向からレーザー光を照射した場合に得られるリング状回折像は、照射している表面に欠陥のある場合、正常な場合に比べ変化する。この変化を検出して欠陥を検出することは、走間金属板の場合と同様である。

いま、入射レーザー光線を細線の径の方向に走査したとする。走査スポットの中心は細線表面に沿って回転するため、図4-16の回折像の中心点 R_0 はそれに応じて回転し、回折光学系全体の座標系が回転することになる。細線の直径が十分小さい場合、上記の回転は前節でのべたリング状回折像にほぼ沿っておこなわれることになる。図4-17は直径約 0.5 mm の細線に対し、走査をおこなった場合に観測されるリング状回折像の例である。(図の(b)) 回折像は自身の描くリング上を回転しているため、均一なリング図形となっている。

図4-18に上記のリング状回折像の変化を検出するための光学系の基本構成を示す。走行中の細線に対し、レーザー光を集束、照射、かつ走査する光学系と、細線を中心軸とした円錐の母線上を進む回折光を一度ほぼ平行光とし、全体の光路を細線の方向から外へ取り出すための、中央に孔をもうけた集光レンズ、および反射鏡が設けられている。上記のリング状回折像は図の空間フィルター上で観測される。この空間フィルターには回折像とほぼ同じ程度の幅と直径をもつリング状のスリットが設けられ、正常表面に対応するリング状回折像のみが透過し、光電子増倍管にて受光される。

表面が正常である場合は回折像はリング上を回転しており、光電子増倍管はほぼ一定の出力となっている。表面欠陥がある場合、回折像の変化分は上記の空間フィルターにさえぎられ、出力には落ちこんだ信号があらわれる。この原理は走間金属板の場合と同じである。

3) 細線表面検査装置の性能

表面欠陥による回折像の変化を検出するという基本的な原理は、走間金属板の場合と同じであり、検査装置の性能評価、分析もまったく同じと考えてよい。

図4-19に細線表面欠陥のいくつかの例と、対応するリング状回折像を示す。図の(a)は欠陥表面、(b)はその回折像を示す。正常表面とその回折像の例は図4-17の通りである。なおいずれの場合もレーザー光は走査中である。

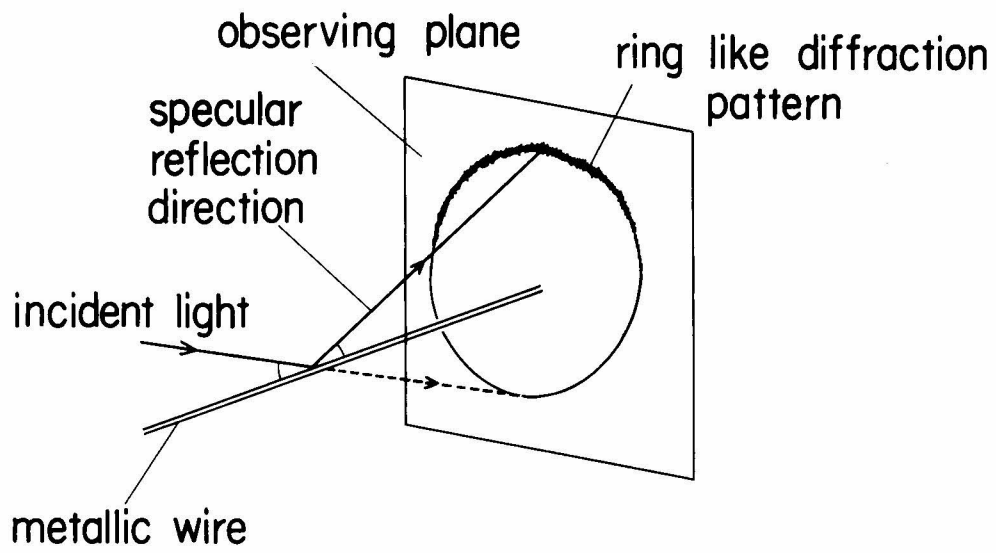


図 4 - 1 0 リング状回折像の形成

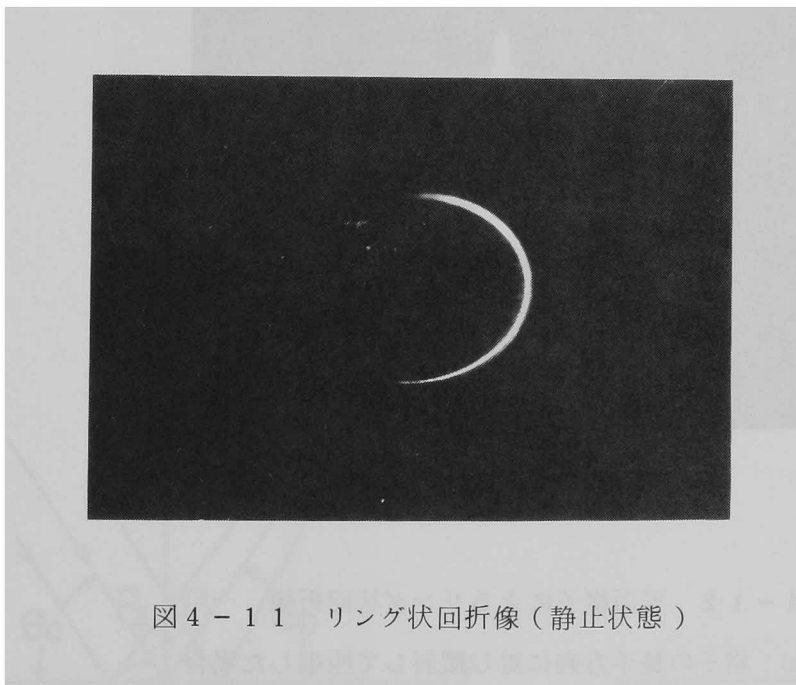
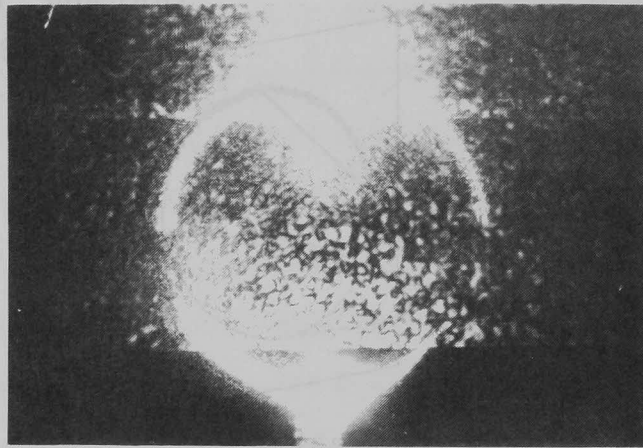
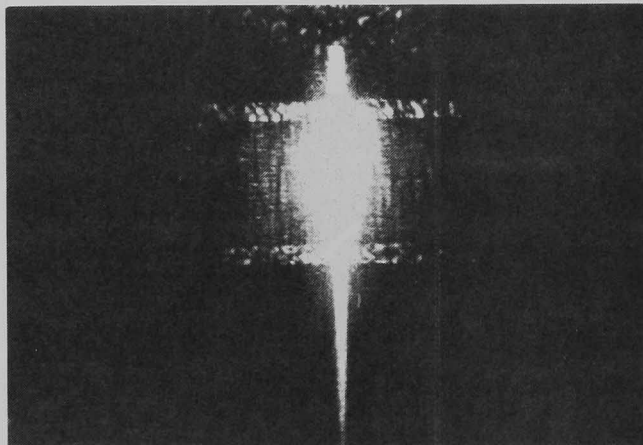


図 4 - 1 1 リング状回折像（静止状態）



(a)



(b)

図 4 - 1 2 平面格子によるリング状回折像

(a) 格子の長手方向に対し傾斜して照射した場合

(b) 格子の長手方向に直角方向に対し、傾斜して照射した場合

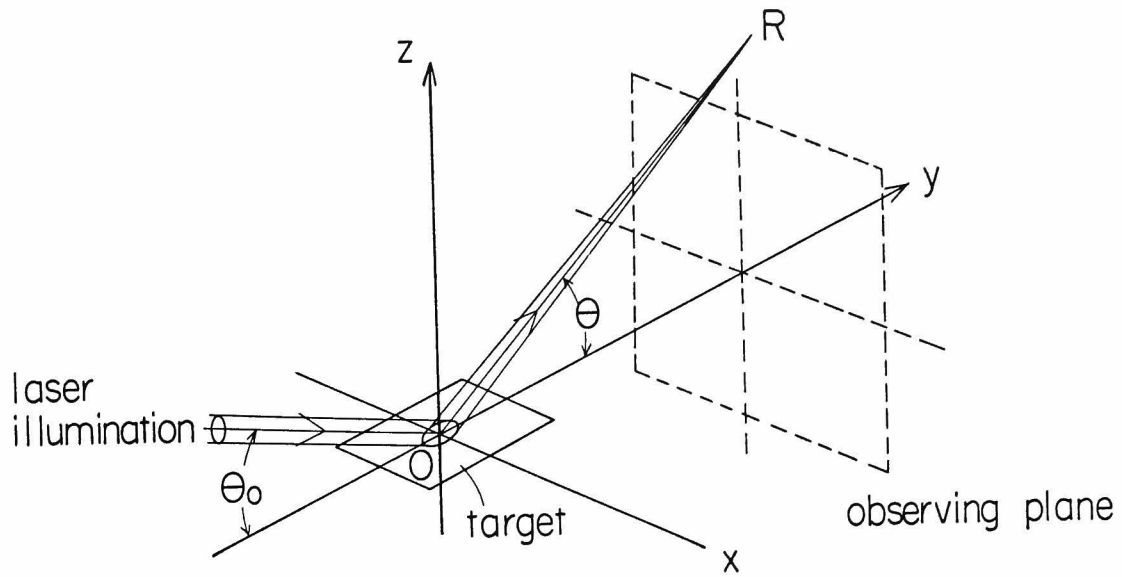


図 4 - 1 3 リング状回折像の観測系

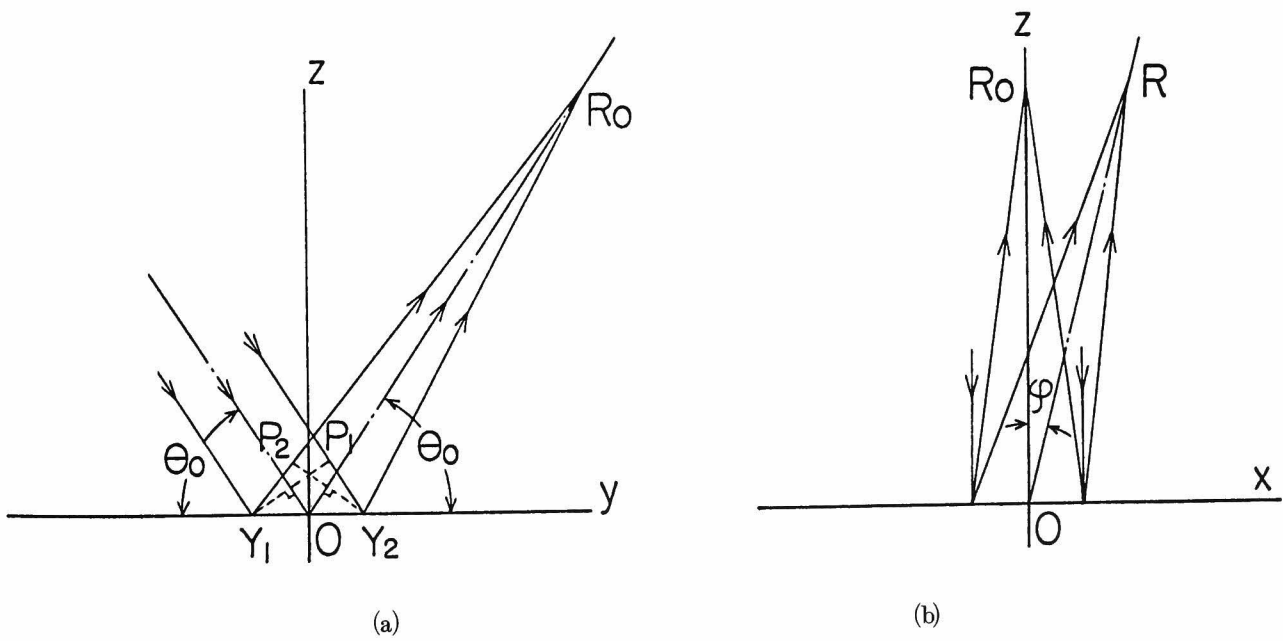


図 4 - 1 4 零次回折光の形成の条件

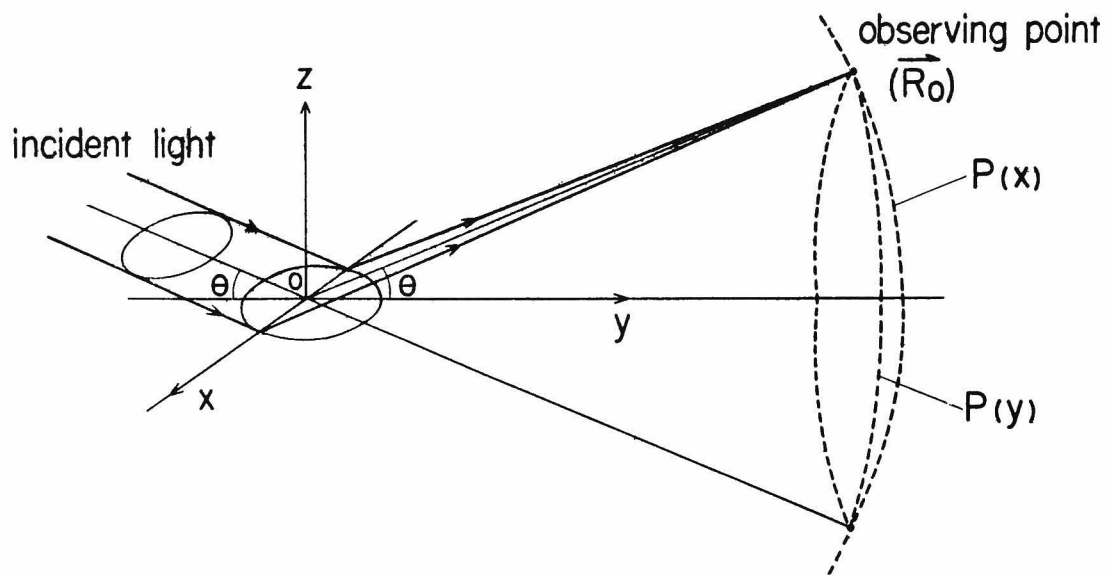


図 4 - 1 5 y 方向表面粗さによる零次回折光の描く軌跡

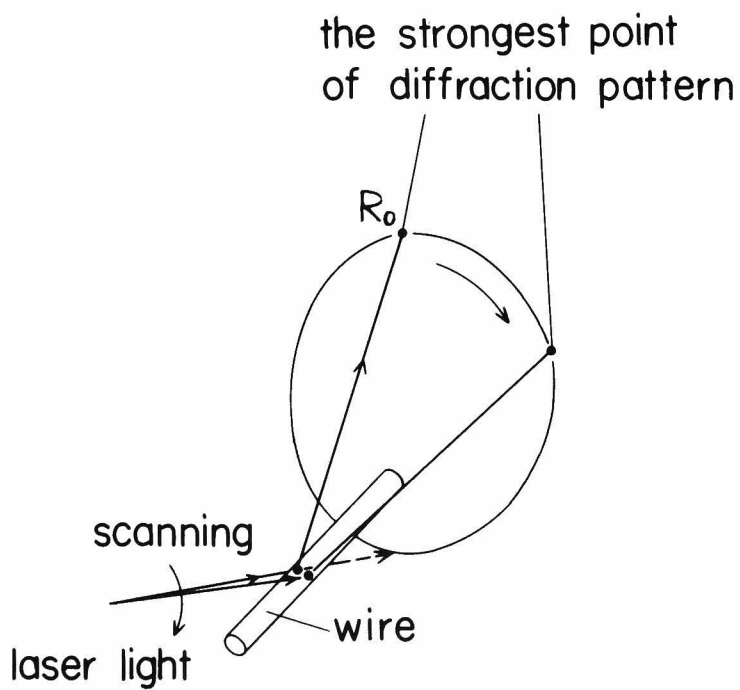


図 4 - 1 6 レーザ光走査によるリング状回折像の回転

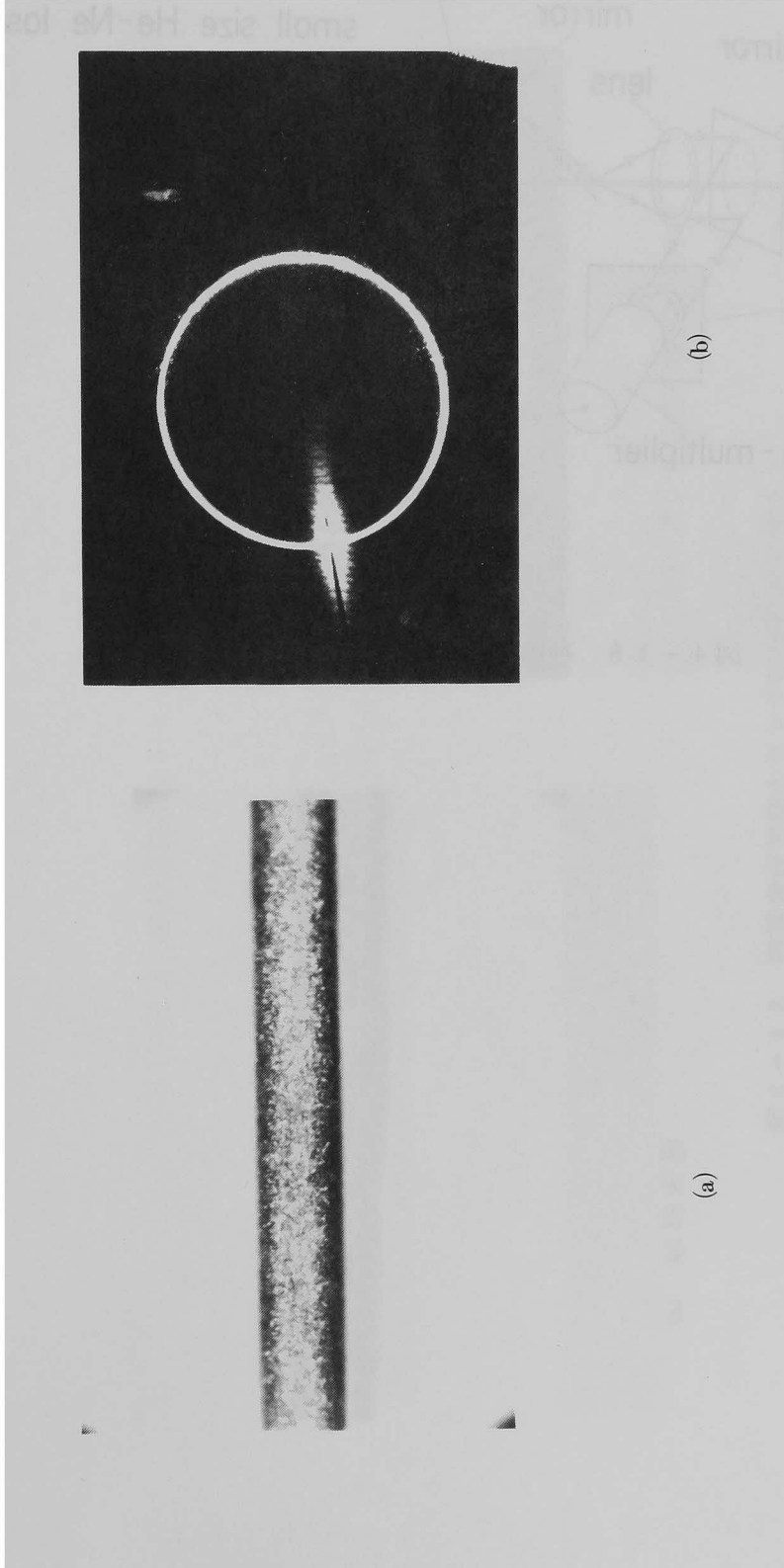


図 4 - 1 7 正常な細線表面からのリング状回折像
(a) 正常表面, (b) リング状回折像 (走査中)

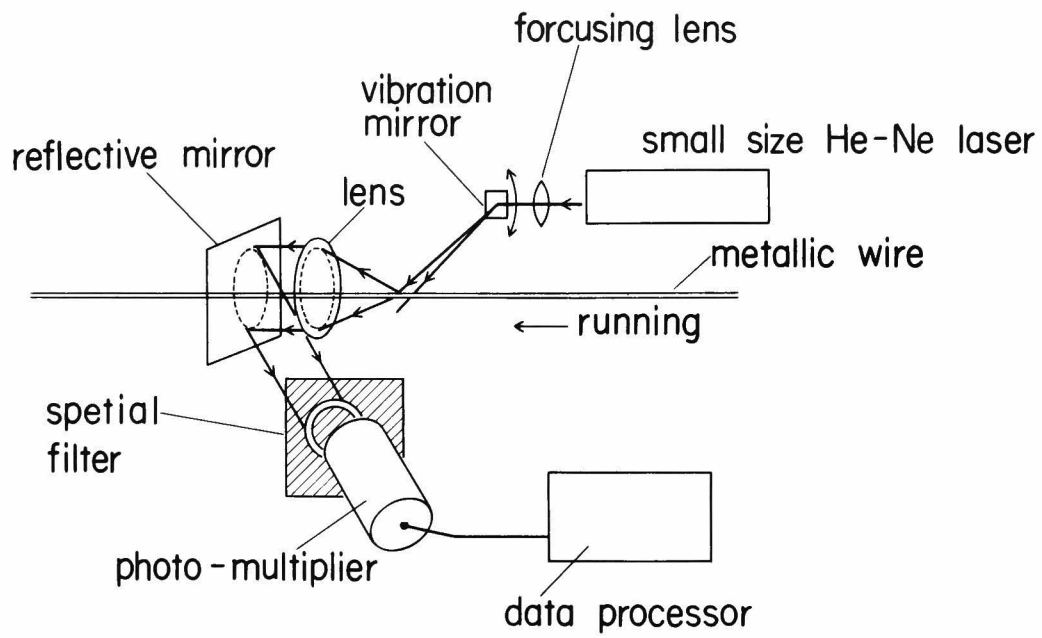
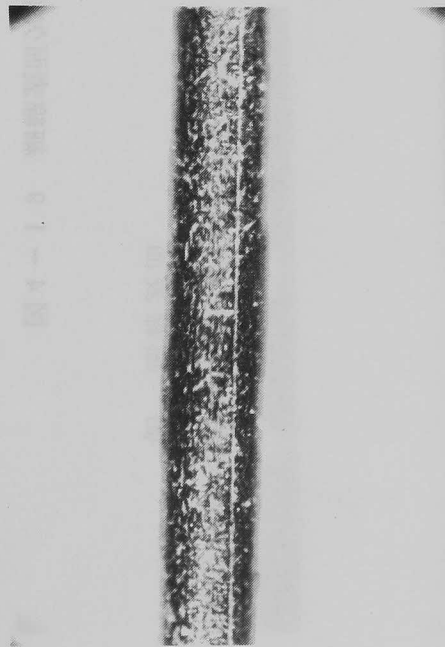
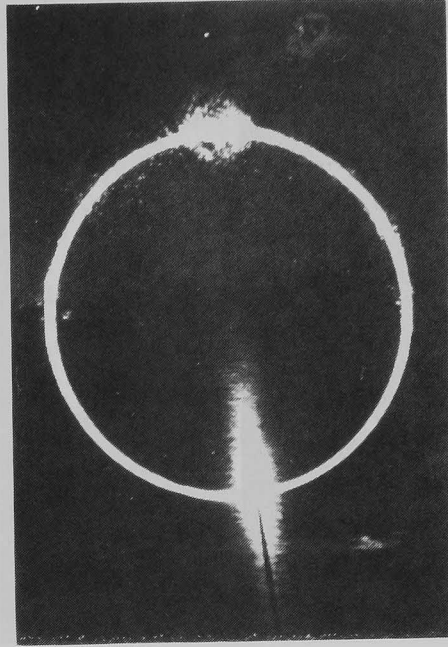


図 4 - 1 8 細線表面検査装置の構成



(a) 細線表面



(b) リング状回折像 (走査中)

図 4-19 細線表面欠陥とリング状回折像 (例 1)

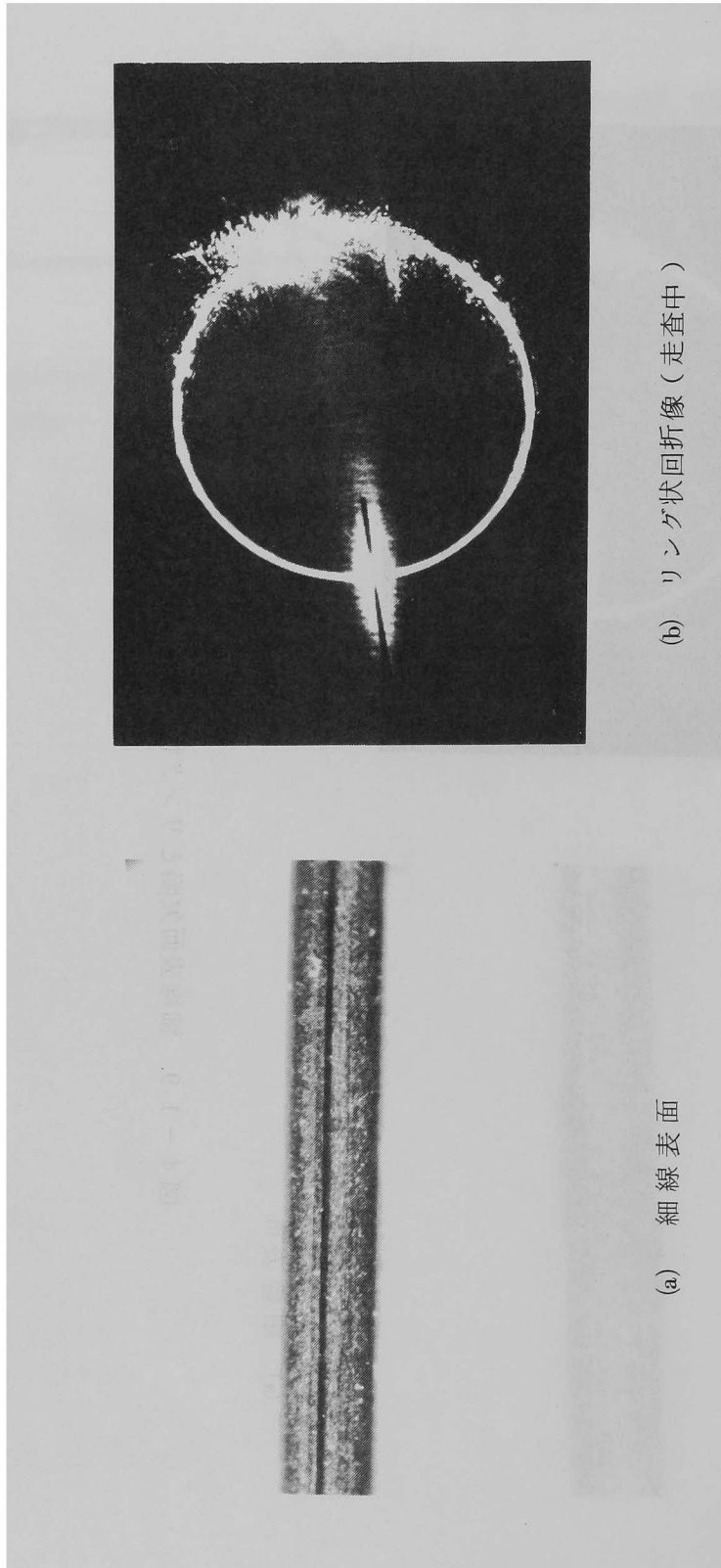
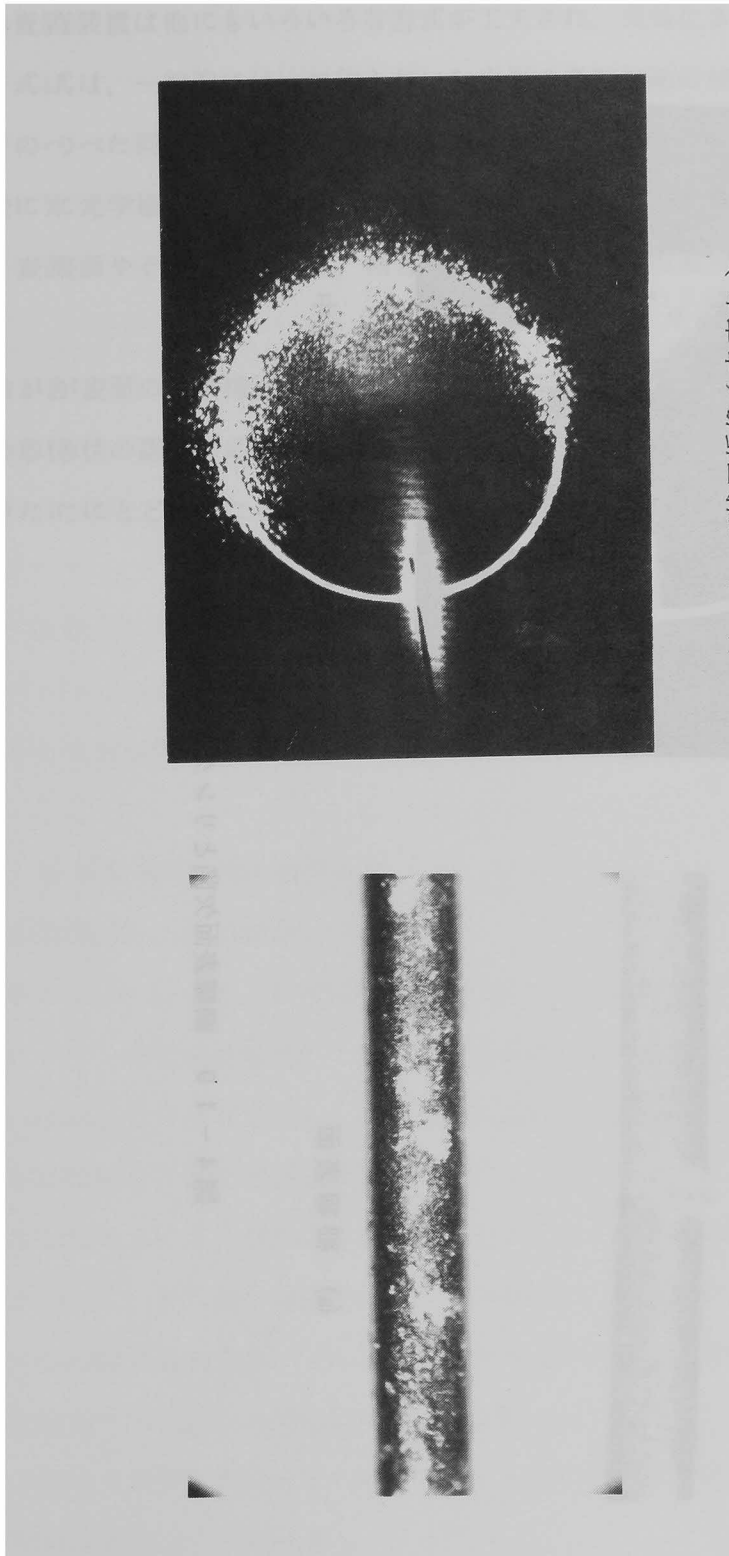


図 4 - 1 - 9 細線表面欠陥とリング状回折像 (例 2)



(a) 細線表面

(b) リング状回折像 (走査中)

図 4 - 1 - 9 細線表面欠陥とリング状回折像 (例 3)

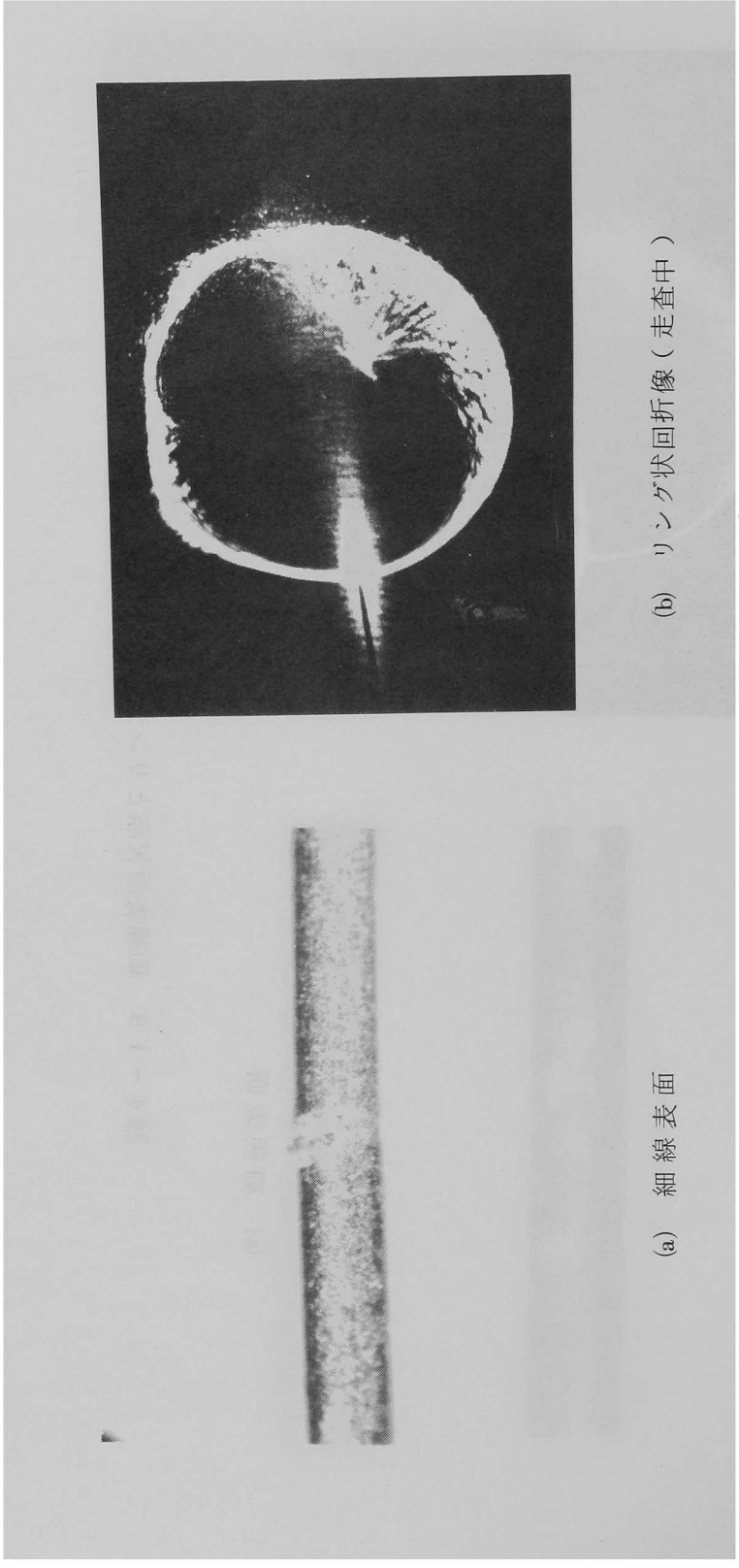


図 4 - 1 9 細線表面欠陥とリング状回折像（例 4）

4-4 レーザ表面検査装置のむすび

表面検査装置は他にもいろいろな方式が工夫され、実用化されている。ここでのべたレーザー光の方式は、一般的には比較的きれいな表面の微細欠陥の検出に適している。

ここでのべた回折像を直接検出する方式は、正反射光を用いる方式として特異なものである。一般に光学検査機は正反射を外した拡散反射光を用いる方式が多い、レーザーを用いる場合でも、表面やその欠陥の性質、検査の目的によっては拡散反射光を用いる方がよい場合もある。

回折像が表面の微細構造からの反射光分布のパワースペクトルであることを利用して、微細構造の形状の認識に応用することは、きわめて興味のあることであり、ここでは2～3の例をあげたにとどまったが、より応用範囲の拡がるのを期待したい。

4. レーザ光による表面検査

参考文献

- 1) 稻荷, レーザスペックルパターンによる形状認識,
学振130委. 光と電波の境界領域研究会資料(1972年1月)
- 2) 稻荷, 亀井, レーザによる金属板表面自動検査装置
三菱電機技報, vol.51, №5, 334~337(1977).
- 3) 稻荷, 亀井, レーザー回折パターンによる細線表面欠陥の検出, 計測自動制御学会論
文集, vol.13, №1, 64~68, (1977).

第 5 章 レーザ回折光による速度計測

今までの各章にて論じてきた表面の粗さ構造による回折現象は、その表面の運動、特に速度の計測に有効に利用することができる。

筆者はこの速度計の詳細な研究をおこない、実用機としての開発をおこなった。

この研究内容は大きく区分して以下の 3 つに分れる。

- 1) 周期運動をする物体からの回折像の変化に周期性が含まれることを利用して、周期運動の周波数を計測する。
 - 2) 回折像に含まれる粒状性図形（スペックルパターン）の個々の斑点が、表面の運動に伴って変化するが、単位時間内のその変動数を計測することにより、表面速度を計測する。
 - 3) 上記 2) 項で回折像のスペックルパターン全体が表面の運動に伴って運動するのを、空間フィルターによる相関を用いて、その運動速度を計測し、表面の速度を計測する。
- 以上の内容の詳細を以下に順次のべる。

5-1 周期運動の周波数計測

1) 周期運動計測の原理

第 2 章でのべたように、金属などの表面にレーザ光を照射した場合に観測される回折像は、照射されている表面の領域内の表面粗さ構造に一对一に対応している。すなわち表面状態が変化すれば、回折像も変化し、元の表面状態に戻れば、回折像も元に戻る。

物体が回転や振動などの周期運動をおこなっている場合は、表面状態が周期的に変化しているわけであるから、回折像の変化も周期的となることは当然である。

したがって、回折像の観測面に何らかの検出器、たとえば小さい孔を有するスリットをかぶせた光検出器をおくと、その出力信号は周期性をもった複雑な波形となる。この信号を周波数分析すれば、物体の周期運動の周波数を基本周波数とした周波数スペクトルが現われる。この基本周波数を検出すれば、物体の周期運動の周波数が検出できる。¹⁾

2) 装置の構成と実験結果

装置の構成を図 5-1 に示す。レーザ光をレンズを通して回転円板に照射し、回折してきた光をピンホールをもつスリットを通して光電子増倍管で受光する。出力信号を増幅した後、

周波数分析をおこなう。

回転円板の回転数を 20Hz , 30Hz , 40Hz とした場合の周波数スペクトルの例を図 5-2 に示す。図から明らかな通り、回転周波数を基本周波数とする周波数スペクトルが現われている。

周期運動の周波数を基本周波数とするスペクトルが現われることは、たとえば物体の形状、表面状態の変化等にはまったく依存しない。これは回折像の周期的変化が、表面の粗き構造の周期運動に依っているのである以上、当然のことである。通常、回転周波数を計測する場合には、回転体に何らかのマークを付す必要がある。また簡単な回転計の場合には物体の形状を考慮する必要があるのに対し、この計測方式は、そういった配慮を一切必要としないところに特長がある。

ただし物体の形状は周波数スペクトルの各周波数成分のスペクトル強度に影響を与える。たとえば正三角形の物体の場合には、基本周波数の 3 倍の周波数を基本とする各高調波成分が強調されて現われる。

正三角形の場合の実験例を図 5-3 に示す。このことから、周波数スペクトルを 1 種のパターンとしてみることにより、ある程度の、物体の運動状態の解析をおこなうことができる。

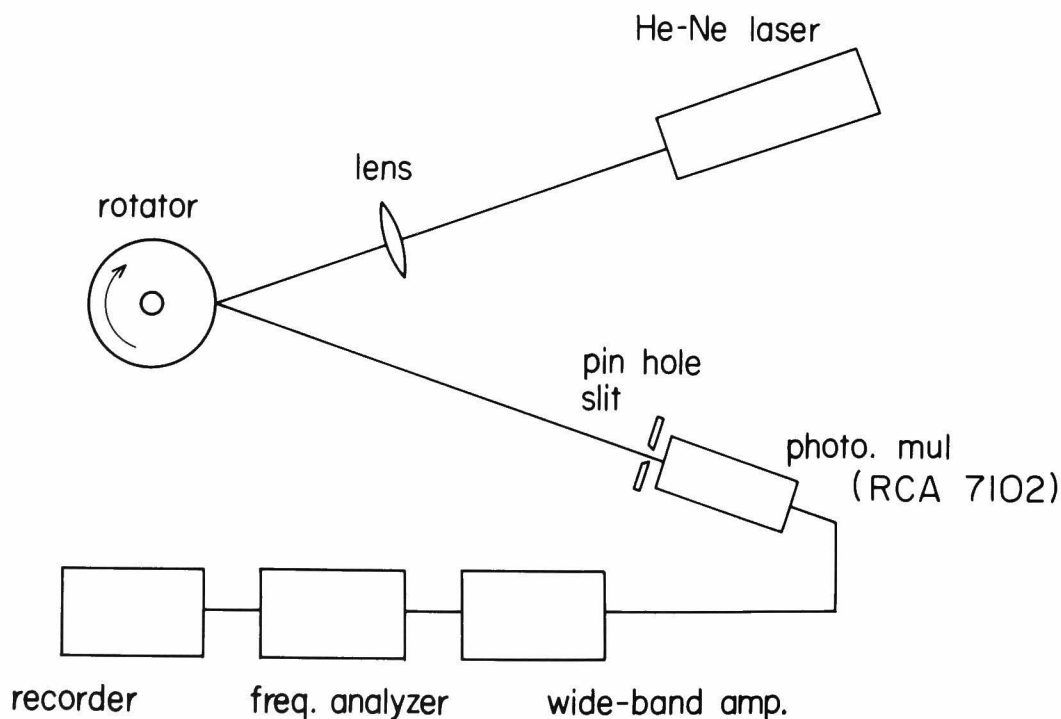


図 5-1 運動周期計測系の構成

Frequency spectrum of speckled patterns

for rotating steel disk a : 20 Hz

d : 30 Hz

c : 40 Hz

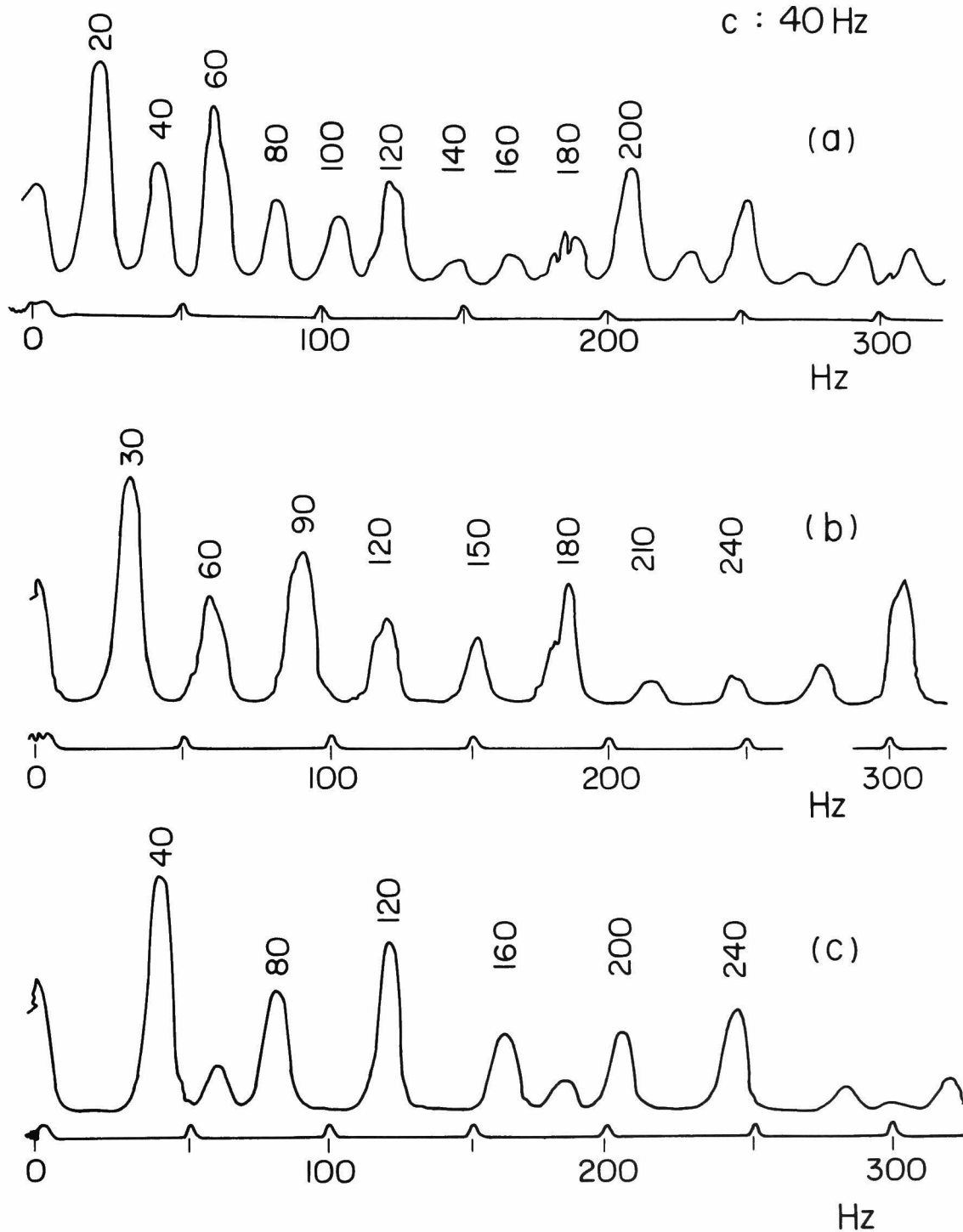


図 5 - 2 回転物体からのスペックルパターン信号の周波数スペクトル

Frequency spectrum of speckled patterns
for triangle aluminum disk
the number of rotation 25 Hz

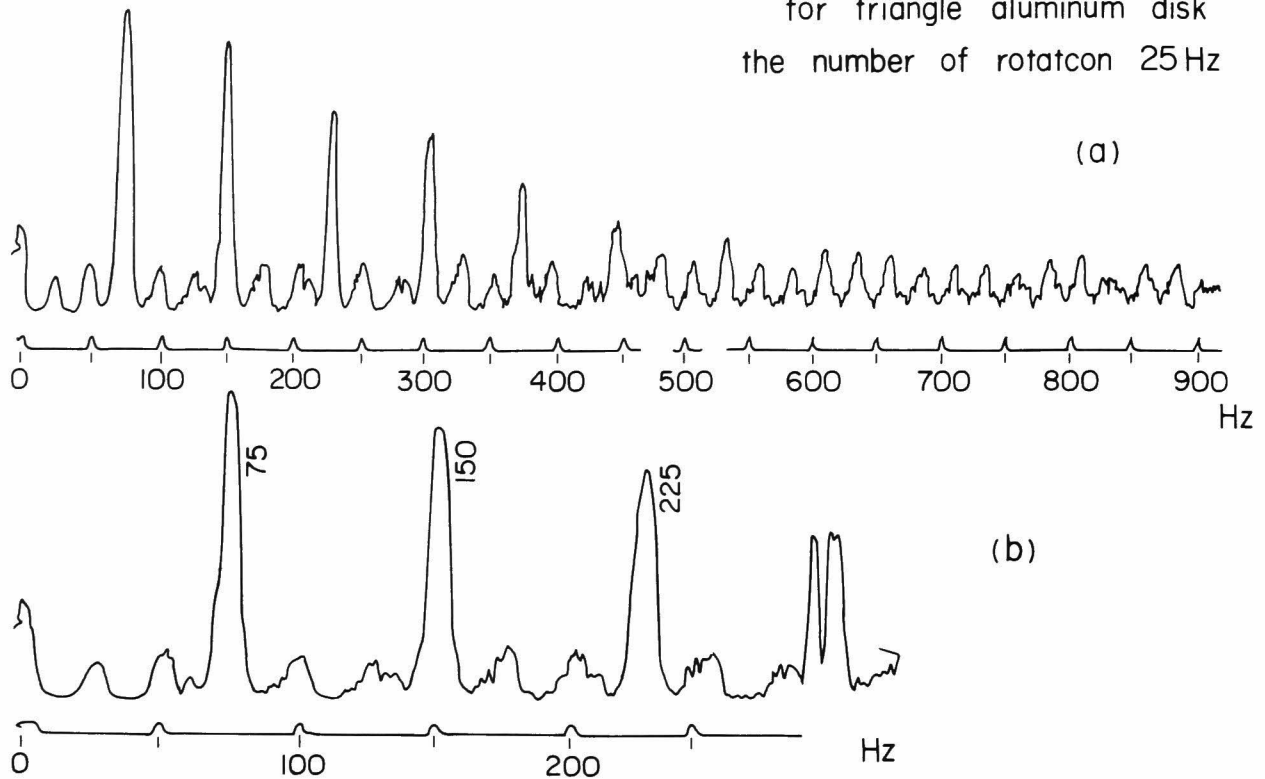


図 5 - 3 三角形の回転物体からのスペックルパターン信号の周波数スペクトル

5-2 パルス計数方式による速度計測

1) パルス計数法の基本方式

表面の運動により、上にのべた回折像に含まれる粒状性の斑点が変化する。表面運動の速さと運動速度との関連は次の 5-3 節にてのべる。この粒状性の模様（スペックルパターン）を小孔を設けたスリットを通して光検出器で受光し、スリットをスペックルが通過するたびに発生するパルス状信号の、単位時間あたりの数を計数することにより、表面の大よその速度を計測することができる。

図 5-4 に基本的な装置の構成を示す。パルス状の信号は、適当な値を設定した比較器により一定以上のレベルをもつ信号ごとにパルスを発生させ、カウンターにて一定時間内のパルス数を計数する。

図 5-5 に信号波形の一例を示す。図 5-6 は速度測定データの一例で、出力のパルス数と速度とは、ほぼ完全な比例関係を示している。実験的には、ばらつきの範囲は $\pm 1\%$ 以内

に入る。

3) 統計的平均値を用いた精度改善²⁾

上記のパルス計数法は、出力波形は図 5 - 6 に示すように一種の雑音波形であり、計数出力のばらつきは統計的分布を与える。この分布を正規分布と仮定すると、複数点にて同時に計数をおこない、その計数値の算術平均をとった場合、ばらつきが小さくなることが知られている。すなわち、1つの計測点での計数値の分布の平均値を μ 、標準偏差を σ とし、計測点が 1 ~ n までであるとすると、各々の計測点での計数値の分布は

$$[\mu_1, \sigma_1^2], \sim [\mu_n, \sigma_n^2]$$

で与えられる。この 1 ~ n までの計数値の算術平均をとった場合、平均値のしたがう分布は $\mu_1 = \dots = \mu_n = \mu_0$ 、 $\sigma_1 = \dots = \sigma_n = \sigma_0$ とした場合

$$[\mu_0, \sigma_0^2 / n]$$

で与えられる。したがって n 個の計測点の出力の平均値をとる方式をとった場合、そのばらつきは $1 / \sqrt{n}$ に減少することが予想される。

図 5 - 7 に実験系の構成を示す。実験では計測点を 2 個としている。図 5 - 8 に出力計数値の例を示す。図の (a)、(b) は各々の検出器の計数値であり、(c) はその算術平均値である。この結果のばらつきは下記の通りであり、明らかに算術平均値の精度が向上していることがわかる。なおこの実験の場合、回転体自体の表面速度が約 ± 0.1 % 程度のばらつきをもっている。

(a) :	± 3 σ で	± 0.59 %
(b) :	〃	± 0.48 %
(c) :	〃	± 0.41 %

図 5 - 9 はパルス計数方式の速度計の外観である。この装置では計測点数は 8 個で、その数だけの半導体光検出器が図の検出器部内に収められている。

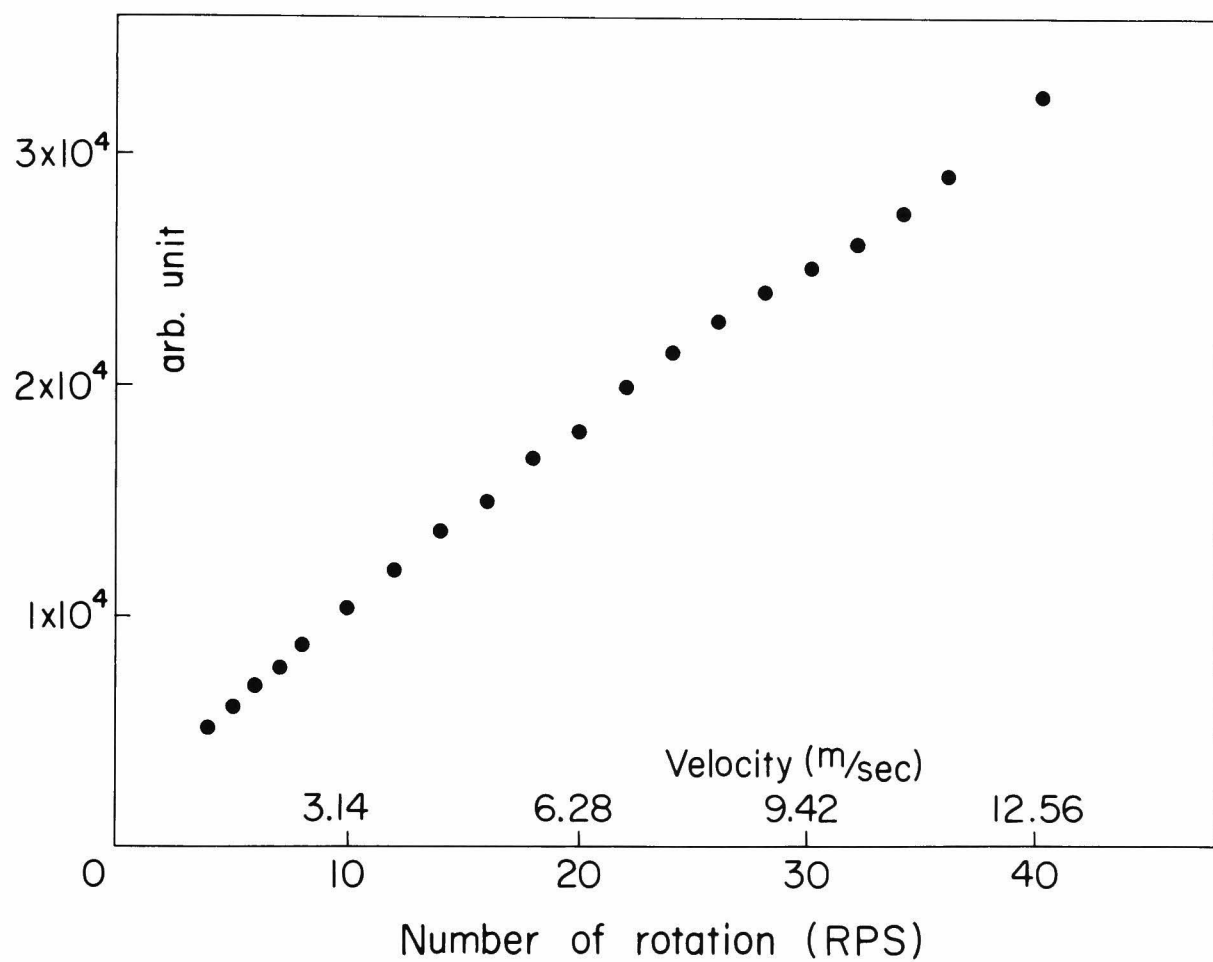


図 5 - 6 パルス計数方式速度計の特性

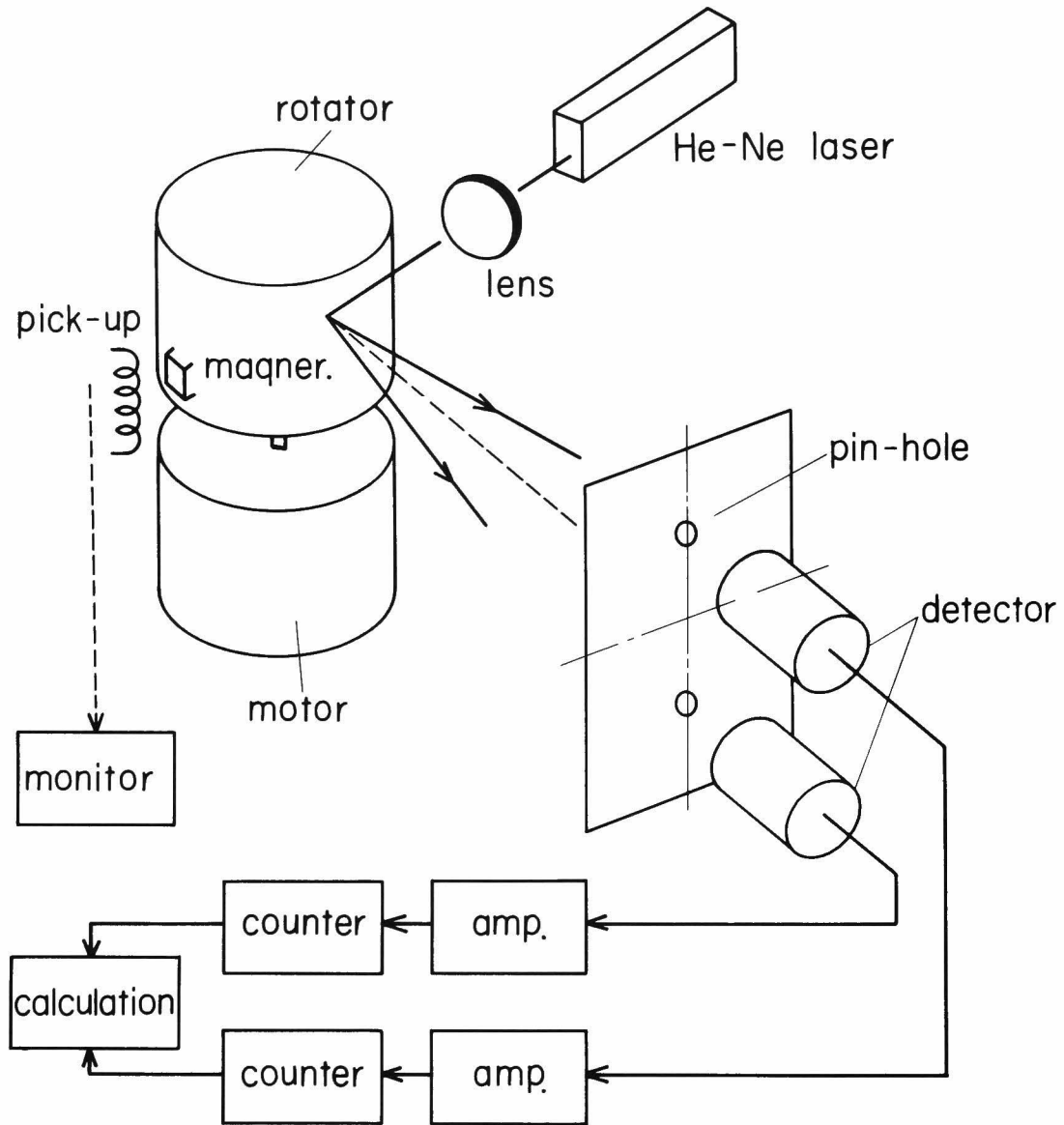


図 5 - 7 パルス計数方式速度計の統計的平均値方式の装置構成

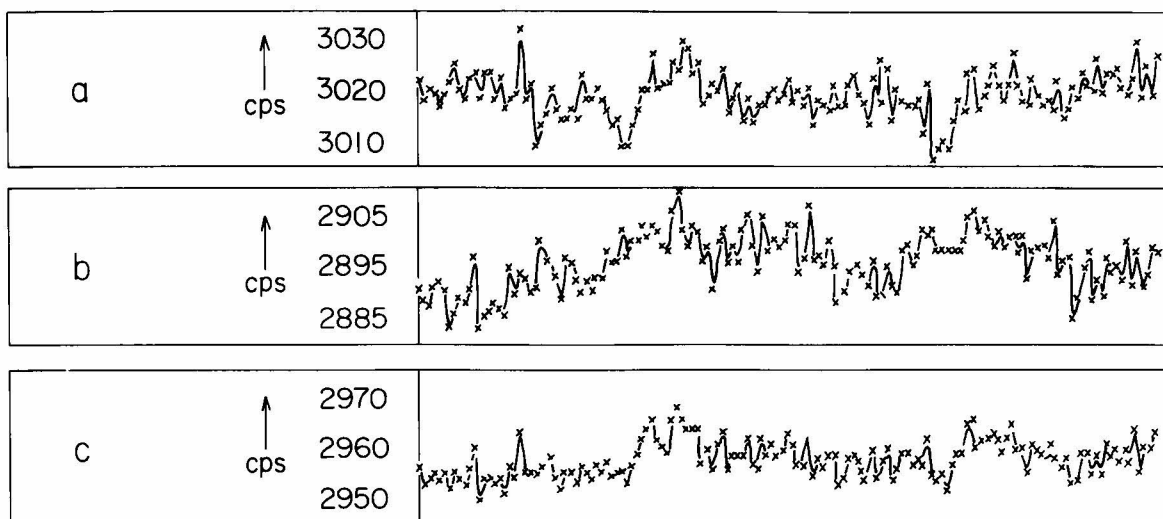


図 5 - 8 パルス計数方式速度計の統計的平均による精度改善

a, b : それぞれ独立した検出器からの出力

c : a, b 2 つの出力の加算平均出力

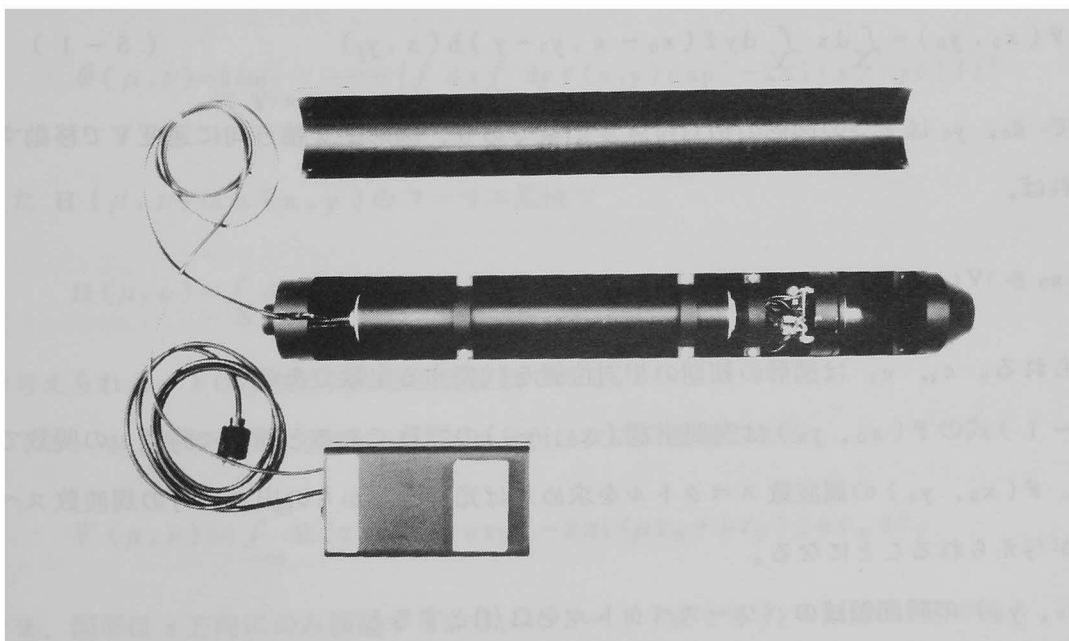


図 5 - 9 パルス計数方式速度計（統計的平均法）の外観

5-3 空間フィルターによる速度計測

図形の走行する速度を空間フィルターを用いて計測することは、古くから知られている。^{3),4)}

5-2節でのべたパルス計数方式は、スペックルパターンの個々の斑点の変化の速度を検出したのに対し、ここでのべる方式はスペックルパターン全体の図形が移動する速度を、上記の空間フィルターを用いて計測しようとするものである。この方式に関しても上述の空間フィルターによる計測法からの推定から可能であることは、以前から報告されているが、^{5),6)}速度計としての諸特性を解析し、実用装置とすることは、まだおこなわれていなかった。

1) 空間フィルターによる図形相関

一般に図形が移動している場合、その図形もしくはその結像された映像に対し、細長い矩形形状のスリットを一定間隔で格子状に配列した空間フィルターを重畳し、その透過全光量を検知すれば、検出出力には、図形とフィルターとの相対速度に比例した周波数をもつ交流信号が現われる。この周波数を読みとれば、速度が検知できる。(図5-10参照) この方式は上述の通り古くから知られ、空間フィルター特性の数学的解析もおこなわれている。⁴⁾

図5-10に示すように、被測定体の図形(光強度分布)を入力と考え $f(x, y)$ とし、フィルターの透過率分布を $h(x, y)$ とすると、重ね合せ部分を通して光検知器に入る全光量は次式の $\mathcal{F}(x_0, y_0)$ で与えられる。

$$\mathcal{F}(x_0, y_0) = \int_X dx \int_Y dy f(x_0 - x, y_0 - y) h(x, y) \quad (5-1)$$

ここで x_0, y_0 は2つの図形の相対位置変化量であり、図形が x 軸方向に速度 V で移動するとすれば、

$$x_0 = Vt + c_1, \quad y_0 = c_2$$

で与えられる。 c_1, c_2 は図形の初期の相対位置を代表する定数である。

(5-1)式の $\mathcal{F}(x_0, y_0)$ は空間座標 (x_0, y_0) の関数であると同時に時間 t の関数でもある。 $\mathcal{F}(x_0, y_0)$ の周波数スペクトルを求めれば光検出器からの出力信号の周波数スペクトルが与えられることになる。

$\mathcal{F}(x_0, y_0)$ の時間領域のパワースペクトルを $\Omega(f)$ とすると、

$$\Omega(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau_t) \exp[-2\pi i f \cdot \tau_t] d\tau_t \quad (5-2)$$

ここで $R(\tau_t)$ は $\mathcal{F}(x_0, y_0)$ の時間領域における自己相関々数、 f は時間的周波数、 τ_t は自己相関々数を求める場合の2つの関数のそれぞれの時間座標の差である。次に μ を空間周波数、 τ_x を自己相関々数を求める2つの関数のそれぞれの x 座標の差とし、 $R(\tau_x)$ を $\mathcal{F}(x_0, y_0)$ の空間領域における自己相関々数とすると、
 $f = \mu V$, $\tau_t = \tau_x / V$, $R(\tau_t) = R(\tau_x)$ の関係を考慮すると、(5-2)式より

$$\begin{aligned} \Omega(f) &= \frac{1}{V} \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau_x) \exp[-2\pi i \mu \tau_x] d\tau_x \\ &= \frac{1}{V} \Psi(\mu) \end{aligned} \quad (5-3)$$

となる。ここで $\Psi(\mu)$ は $\mathcal{F}(x_0, y_0)$ の空間領域におけるパワースペクトルである。

次に $\Psi(\mu)$ を求める。(5-1)式から $h(x, y)$ は空間フィルターを impulse 回路とした時のインパルス応答関数に相当していることがわかる。入力信号 $f(x_0 - x, y_0 - y)$ を定常不規則過程とすれば、定常不規則過程の impulse 回路の周波数スペクトルの理論から、次式が直ちに導かれる。

$$\Psi(\mu, \nu) = \Phi(\mu, \nu) |H(\mu, \nu)|^2 \quad (5-4)$$

ここで $\Phi(\mu, \nu)$ は入力信号 $f(x, y)$ のパワースペクトルであって、

$$\Phi(\mu, \nu) = \lim_{X, Y \rightarrow \infty} \frac{1}{X \cdot Y} \left| \int_X dx \int_Y dy f(x, y) \exp[-2\pi i (x\mu + y\nu)] \right|^2 \quad (5-5)$$

また $H(\mu, \nu)$ は $h(x, y)$ のフーリエ変換で

$$H(\mu, \nu) = \int_X dx \int_Y dy h(x, y) \exp[-2\pi i (x\mu + y\nu)] \quad (5-6)$$

で与えられる。 ν は y 軸方向の空間周波数である。

(5-4)式の二次元空間スペクトル分布は次式で表現できる。

$$\Psi(\mu, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau_x, \tau_y) \exp[-2\pi i (\mu\tau_x + \nu\tau_y)] d\tau_x d\tau_y$$

いま、図形は x 方向にのみ移動するから、(5-1)式でも $y_0 = c_2$ で一定であり、したがって二次元相関々数 $R(\tau_x, \tau_y)$ は $\tau_y = 0$ で、

$$R(\tau_x, \tau_y) = C \cdot R(\tau_x) \quad C: \text{定数}$$

と考えられる。これより x 軸方向のみの、一次元空間周波数スペクトル、 $\Psi(\mu)$ は、

$$\begin{aligned}\Psi(\mu) &= C' \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(\mu, \nu) d\nu \\ &= C' \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\mu, \nu) |H(\mu, \nu)|^2 d\nu \quad C': \text{定数} \quad (5-7)\end{aligned}$$

で与えられる。(5-7)式を(5-3)式に代入すれば、最終的な時間領域での周波数スペクトル $\Omega(f)$ は

$$\Omega(f) = \frac{C'}{V} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\mu, \nu) |H(\mu, \nu)|^2 d\nu \quad (5-8)$$

で与えられる。

(5-8)式から $|H(\mu, \nu)|^2$ が空間フィルターによるフィルタリング効果を示している。いま $H(\mu, \nu)$ が空間周波数 $\mu = \mu_0$ で急峻なスペクトルをもつように設定されているとすると、 $\Phi(\mu_0, \nu)$ が零でない限り、 $\Psi(\mu_0)$ は急峻なスペクトルをもち、 $f_0 = \mu_0 V$ で与えられる f_0 の正弦波信号が観測されることになる。

空間フィルターとして、短冊状スリットを一定間隔で格子状に配列した場合、高い空間周波数の選択性が得られることは、回折格子の理論からも容易に考えられる。空間フィルターの最適条件もすでに検討されている。⁴⁾ それによると、図5-11に示すように、スリットの幅 W 、スリット間隔 P とした場合、空間フィルターは

$$\mu_n = \frac{1}{P} \cdot n \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (5-9)$$

で与えられる μ_n で最大のピークをもつ周波数特性をもち、

$$\frac{W}{P} = \frac{1}{2} \quad (5-10)$$

の時、 $\mu_1 = 1/P$ で $|H(\mu, \nu)|^2$ が最大になる。

μ_n における選択の鋭さ(スペクトル幅)は、光が透過する領域内に入るスリットの数 N により決り、 N が大きい程スペクトル幅が小さくなることは、回折格子の場合とまったく同様である。

上の結果から、改めて格子のピッチ間隔を ϑ と書きなおし、 $\vartheta = P$ とすると、空間フィルターによりあらわれる信号周波数 f は

$$f = \frac{V}{g} \quad (5-11)$$

で与えられる。実際の速度計ではこの f 値を観測して、 V を検知している。

2) スペックルパターン⁷⁾の速度

いままで述べてきた速度 V は、空間フィルターと重畳される図形⁷⁾の速度であり、この場合はスペックルパターン全体像の速度である。このスペックルパターンの速度を v_s とした場合、 v_s と対象物表面の速度 v との関係は対象物表面のもつ曲線と、速度計の光学系により決定される。この関係については一般的な回折理論からも求められるが、むしろ光学系の幾何学的な関係から導く方が、簡単であり、実用的でもある。

スペックルパターンによる速度計の基本的な構成を図 5-12 に示す。 v と v_s との関係を求めるための光線の経路の幾何学的関係を図 5-13 に示す。図 5-13 において、入射光線の出発点を O とし、照射面積を D 、その中心を P とする。またスペックルパターンの観測面の中心を Q とする。いま表面が図で上の方に相対的に移動したとすると、面積 D で限定された図形の中心は P から P' 点へ移動する。この図形⁷⁾のみに着目すれば、光学系の中心が \overline{OP} から $\overline{OP'}$ に移ったことになり、したがって対応する回折像の中心は Q 点から Q' 点へ移動することになる。すなわち、移動前と同じ回折像を観測しようとするれば、観測の中心を Q から Q' へ移さねばならないことになる。したがって、 PP' を v とすれば、 $\widehat{QQ'}$ は v_s を与えることになる。被測定対象物表面の曲率を r とすれば、図の幾何学的関係より

$$v_s = v \left(1 + \frac{a}{b} + \frac{2a}{r} \right) \quad (5-12)$$

が導かれる。ただし a は OP の長さ、 b は PQ の長さである。

対象表面が平板の場合には、上式で $r = \infty$ とすれば

$$v_s = v \left(1 + \frac{a}{b} \right) \quad (5-13)$$

となる。

(5-12)式に(5-11)式を代入すれば

$$f = \frac{v}{g} \left(1 + \frac{a}{b} + \frac{2a}{r} \right) \quad (5-14)$$

となり、速度計出力と表面速度との関係が与えられる。

3) 速度計の構成⁷⁾

i) 検出ヘッド部

実際の速度計の検出ヘッド部の構成を図5-14に示す。基本的には図5-13と同じであるが、レーザ光を投射、および受光の光学系を同軸形に配置し、また(5-13)式で $a = b$ とすると、対象が平板の場合、検出ヘッドと対象表面の距離の変動による誤差が、理論的にはなくなるので、そのように構成している。

またHe-Neガスレーザの発振光は数100kHz~数MHzにかけ不安定な高調波の雑音光を含む場合があり、これが雑音となって広範囲の速度計測を妨げることになる。この場合にはもう一個の光電子増倍管を用いて、雑音光を除去する方式を用いる必要がある。

ii) 周波数追尾装置

光電子増倍管から現われる出力信号は多くの雑音を含んでおり、速度計としてはこの信号の周波数スペクトルの中心周波数を、できれば零から数MHzの周波数領域にわたって追尾し、数値として表示するものでなければならない。このような周波数追尾装置により、初めて0.1%クラスの高い精度に関連した諸特性の実験が可能となる。

図5-15に筆者らの開発した追尾装置の基本構成を示す。この場合には二つの近接した中心周波数をもつフィルターを用い、その中心周波数を連動して走査し、それぞれのフィルターの出力の相対値を検知してゆく。この相対値がバランスしている時、入力信号の周波数スペクトルの中心値をとらえていることになる。これにより信号のスペクトルの中心周波数、すなわち対象物の速度信号を検知することができる。

4) 速度計の実験結果⁷⁾

上にのべた速度計の試作をおこない、各種の実験をおこなった結果を以下に示す。実験室での実験では対象走行物体として標準回転体を試作して用いた。回転体はアルミニウム円板で、円筒部側面を研磨仕上げしたものを対象表面として用いた(半径50, 75, 100mmの3種類)。モータの回転速度のばらつきが相当あるため、そのモニター用として別にエンコーダを用いた。精度実験をおこなう場合には、追尾装置出力、エンコーダ出力をそれぞれD/A変換し、記録した。同一瞬間における両出力値も記録できるよう回路系を製作した。

i) 信号周波数スペクトル

1つの回転体の回転速度を変えた場合の、光電子増倍管からの出力信号の周波数スペクトルと波形を図5-16に示す。回転速度を変えるに従って、信号のスペクトルが変化してい

ることがわかる。この信号のスペクトルの中心周波数 ν をその半値幅 $\Delta\nu$ で除した値 ($\nu/\Delta\nu$) を信号スペクトルの鋭さを表わす値として、ここでは Q 値と呼ぶ。

ii) 指示値のばらつき

一定速度で回転している(と思われる)対象からの速度計指示値のばらつきの実測結果を図 5-17 に示す。図の A 欄は回転体の速度のばらつきを含めた値であり、B 欄は上にのべた測定系の同一瞬間における 2 つのエンコーダの出力から、回転体の速度変化を補正して求めた値である。対象表面の速度が大きい場合、 $\pm 0.1\%$ 以下の精度が実現できることを示している。

iii) 速度計の線形性

回転体の速度を広範囲に変化させた場合、信号周波数 f と速度 v との関係式 (5-14) と、実際の指示値がどのように変化するかが問題である。速度計指示値の線形性が完全に保たれるならば、一定の補正値を除いて、実測値と (5-14) 式からの計算結果とが合致する筈である。

図 5-18 は上記の実測値と計算値との偏差をいくつかの速度の場合について求めた結果である。同様な実験を 4 回繰返し、その結果も同時に記入している。実測値と計算値との偏差が完全に零であれば、各データはすべて図の縦軸上に並ぶ筈である。この結果から繰返し実験のばらつきは非常に小さい範囲に入っているが、計算値からのかたよりは 10% 以上あり、実験誤差以外の何らかの原因があるものと推定される。

iv) 対象表面の曲率の影響

(5-14) 式に示した通り、速度計の出力は対象表面の曲率 r により変化する。この変化分は速度計を使用する際、補正しなければならない重要な特性の一つである。

上にのべた 3 個の標準回転体と精度速定系を用いて、曲率による変化を実測した結果を図 5-19 に示す。測定系と表面との距離は一定に保つようになっている。おおよその傾向としては (5-14) 式に従っていることがわかる。この場合にも約 10% 前後の、一定のかたよりが観測される。このかたよりは実験系の設定誤差、信号スペクトルの Q 値とその観測法等に依存していると考えられる。

5) 信号スペクトルの Q 値と速度計精度⁷⁾

速度計の精度を決める要因のうち、基本的な値として最も大きいものは信号スペクトルの鋭さ (Q 値) で、次式で定義される。

$$Q = \nu / \Delta \nu$$

(5 - 1 5)

ここで ν は信号スペクトルの中心周波数、 $\Delta \nu$ はその半値幅である。Q値が大きければ、周波数追尾装置に用いられる2つのバンドパスフィルタの幅を小さく、かつ互いに接近した値に設定でき、高い追尾精度が得られる。

上記のQ値は光学系設定の諸条件で決まる。実際の回折像ではすべてのスペックルパターンが同一速度で運動するように設定することは困難であり、観測面内で速度分布をもつのが普通である。図5-20は速度分布をもつことを示す実験例である。図のaは通常に観測される信号スペクトルで、(b)は空間フィルタの中央部にマスクをかけた場合の信号スペクトルである。マスクをした部分の速度成分が消えて、信号スペクトルが2つに分割されていることがよくわかる。このことから光学的条件の設定により、Q値のみならず、上にのべた特性実験結果に現われたかたより等の誤差が与えられることが予想される。

信号スペクトルのQ値を与える基本的な要因として、スペックルパターンの寿命 (lifetime) というものがあげられる。今までの議論は、スペックルパターンがそのままの形を保ったまま平行移動し、その速度を計測するという仮定の上ですすめてきたが、実際のスペックルパターンは対象表面の移動に伴い、一瞬間、形状をそのまま保って移動するが、たちまち形状が変化して別の形状分布になってしまう。このほぼ一定の形状を保っている時間を、きわめてあいまいな定義であるが、スペックルパターンの寿命と呼んでいる。これは対象表面上の照射スポット径Dが限定された大きさを持ち、かつスペックルパターンは表面粗さ構造の回折により形成されているため、対象表面の移動により、各スペックルパターンの回折条件はただちにくずれて、別のスペックルパターンを形成する条件に変化するために起る現象である。ちなみに照射スポット径Dを小さくし、照射用レンズの焦点を対象表面に合わせると、もはやスペックルパターンの移動はみられなくなり、対象表面の移動によりただ変化するのみとなる。これをboilingと呼んでいる。

スペックルパターンの寿命が小さい場合、Q値が小さくなることは、1)節の空間フィルタによる図形相関による理論から当然予想される。すなわち(5-8)式において信号スペクトル $\Omega(f)$ は測定対象図形のパワースペクトル $\Phi(\mu, \nu)$ と、空間フィルタのフーリエ変換 $H(\mu, \nu)$ の2乗との積で与えられている。図5-21に示すように $H(\mu, \nu)$ が十分鋭いスペクトルを与えるように作られたとしても、 $\Phi(\mu, \nu)$ のQ値が小さい場合には $\Omega(f)$

の鋭さは劣化する。スペックルパターンの寿命は対象図形 $f(x, y)$ の相関々数 $\varphi_f(\tau_x)$ で表現されると考えられるから、相関関数とパワースペクトルとの関係式

$$\Phi(\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_f(\tau_x) \exp[-2\pi i \mu \tau_x] d\tau_x \quad (5-16)$$

から、 $\varphi_f(\tau_x)$ が小さくなれば $\Phi(\mu)$ 、したがって $\Phi(\mu, \nu)$ の Q 値が小さくなることは明らかである。つまりパターンの寿命、すなわち、相関々数 $\varphi_f(\tau_x)$ が信号スペクトル $\Omega(f)$ の Q 値を決めることになる。このようにスペックルパターンの相関々数を大きくとり、かつそのパワースペクトルと空間フィルターの周波数応答 $|H(\mu, \nu)|^2$ ができるだけ一致するよう系を設定することが、速度計の精度を上げる重要な要素であるといえる。

6) 速度計現地試験結果⁷⁾

この速度計は連続して走行する物体の速度を計測する目的のものであるが、実験室での実験はいずれも回転体でおこなうより外に方法がない。したがって最終的には実用性を確認するためには、実際の対象物での試験が必要である。

現地試験は実際の薄板冷間圧延ラインの中で、比較的鋼板の表面がきれいで、パスライン変動の少ない場所を選んでおこなった。実際はラインの中で鋼板がしっかりまかれたローラに取付けたエンコーダ (PLG と略す) により鋼板の速度を求め、その対比を検討した。

図 5-22 に試験結果を示す。図中で回転部とあるのはラインの中のローラの表面上での結果であり、平板部はローラからはずれた、曲率のない部分での実測結果である。平板部でのしわ、振動というのは鋼板にしわや振動のある部分での実測結果である。このような鋼板では反射光がゆれ動くため、1%に近い大きなばらつきが現われてくる。図 5-23 は現地試験での測定データの一部である。鋼板速度の変化によく追従していることがわかる。図 5-24 は実用機としての速度計の外観である。

現在までに得られている速度計の概略性能は、鋼板が一応通常の表面で、かつパスライン変動のない場合、高速において $\pm 0.15\%$ (応答時間 1 秒) の精度を得ている。計測できる速度の上限は、現在の装置では約 2000 m/min である。

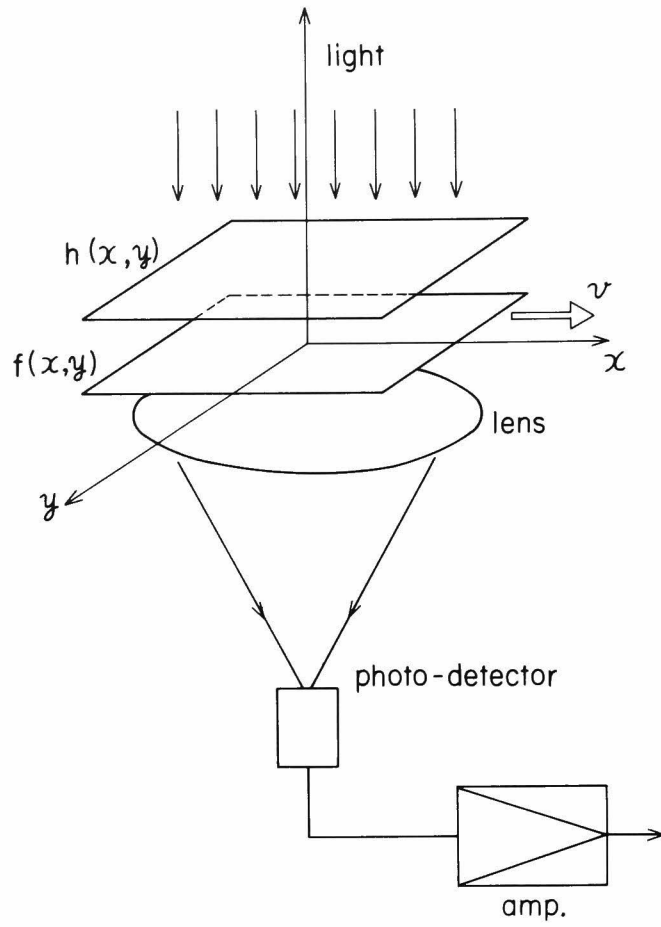


図 5 - 1 0 空間フィルターによる図形相関の原理

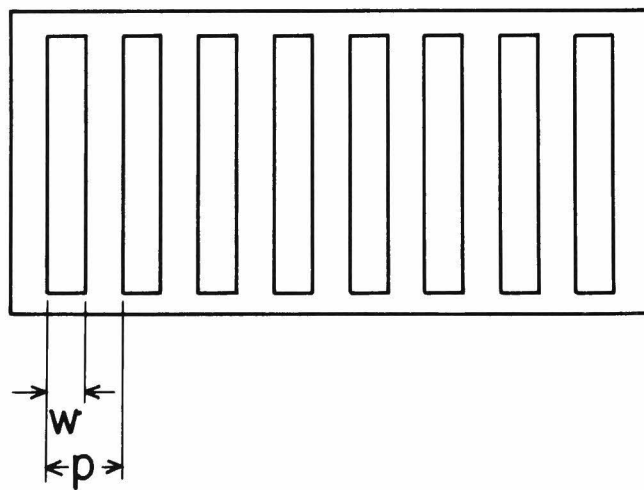


図 5 - 1 1 空間フィルター

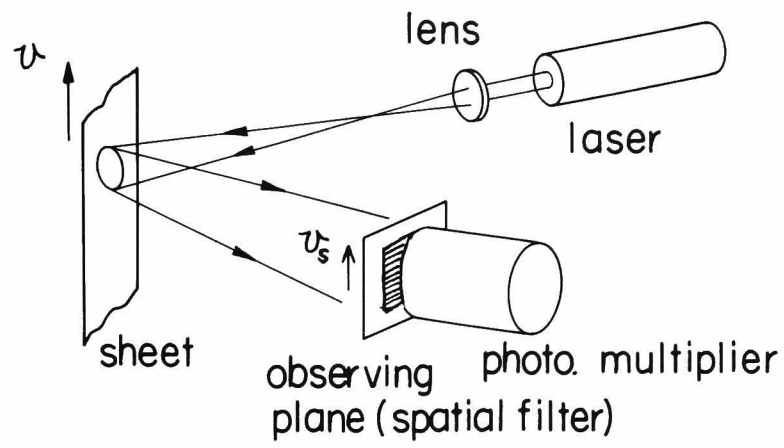


図 5 - 1 2 空間フィルターによるスペックルパターン速度計の基本構成

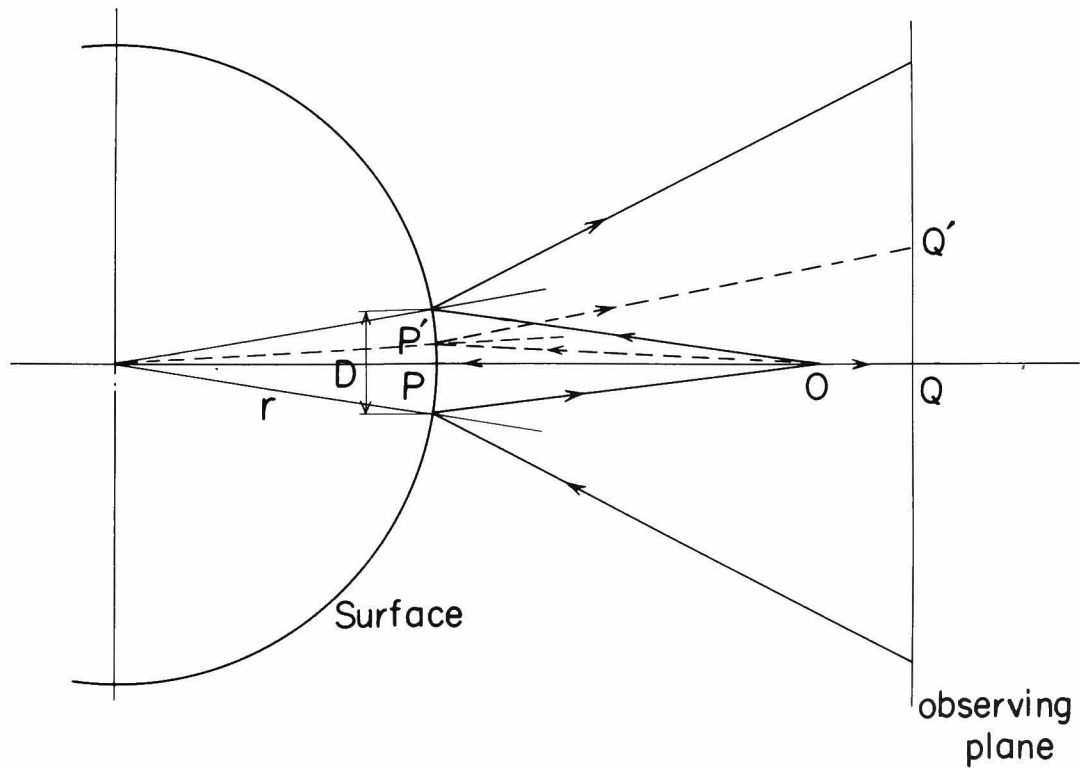


図 5 - 1 3 表面速度とスペックルパターン速度との関係

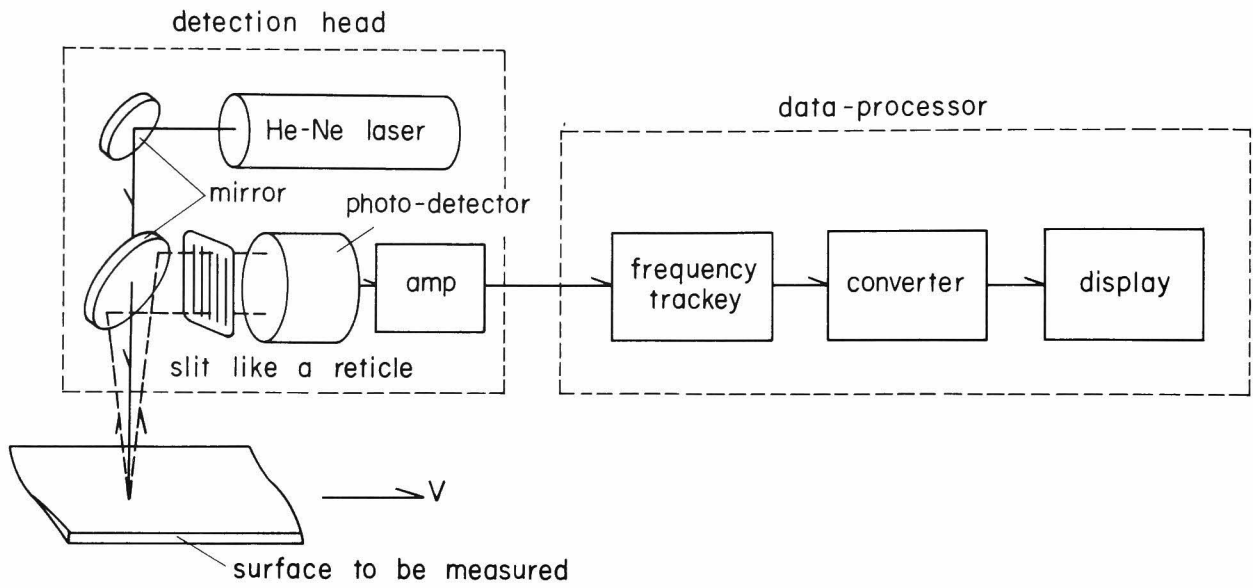


図 5 - 1 4 実際のスペックルパターン速度計の構成

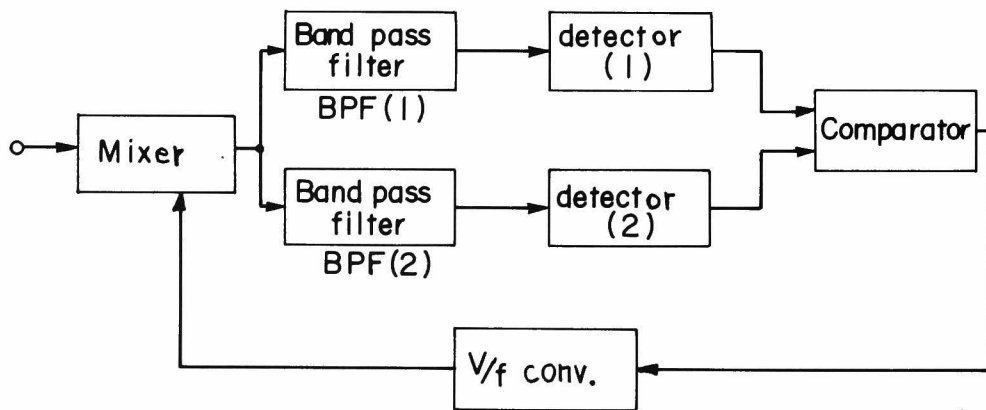
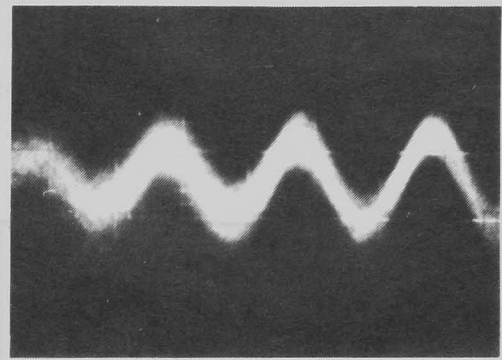
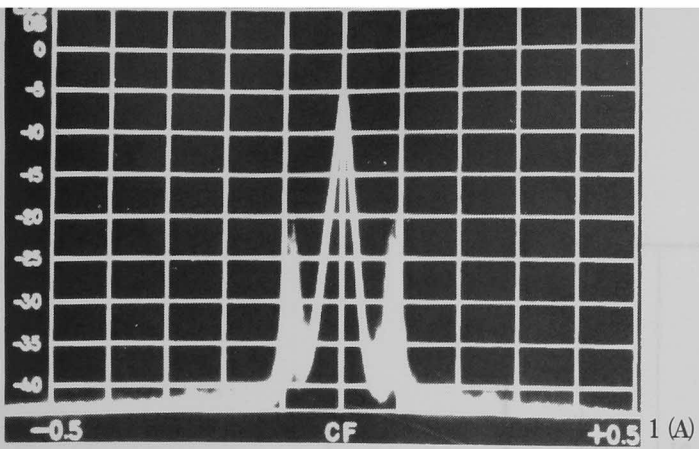
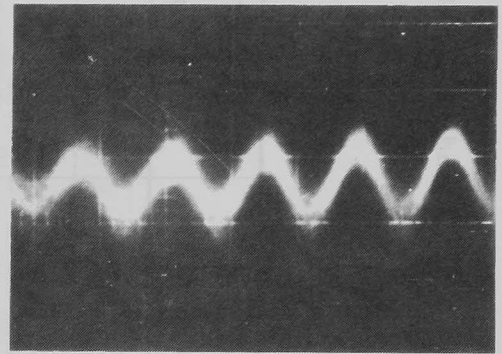
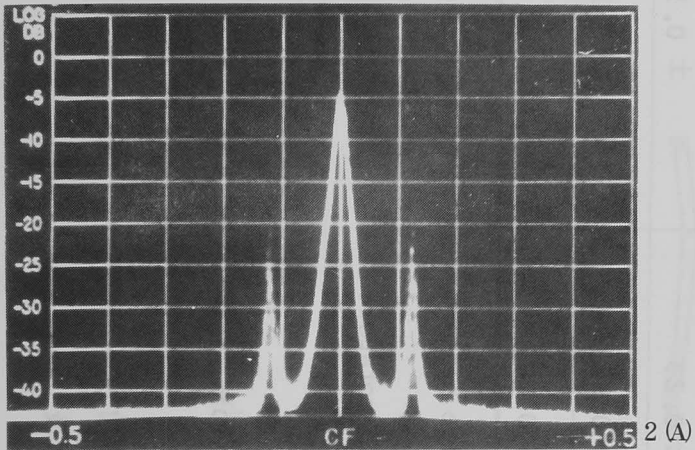


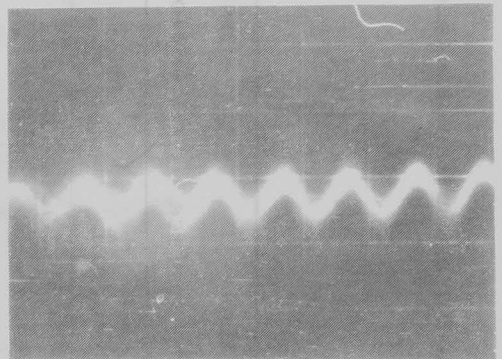
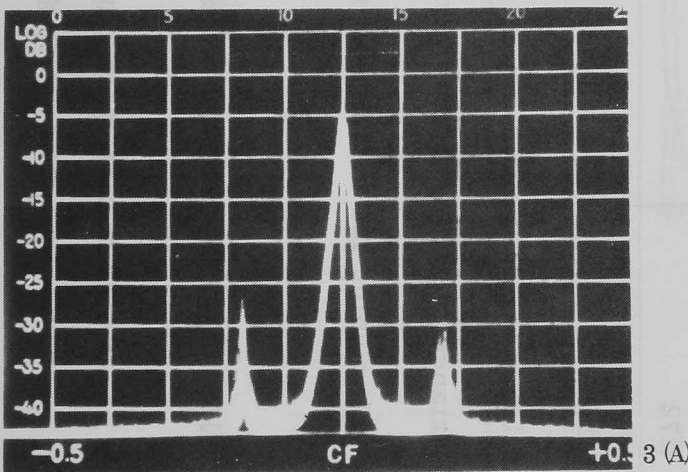
図 5 - 1 5 周波数追尾装置の基本構成



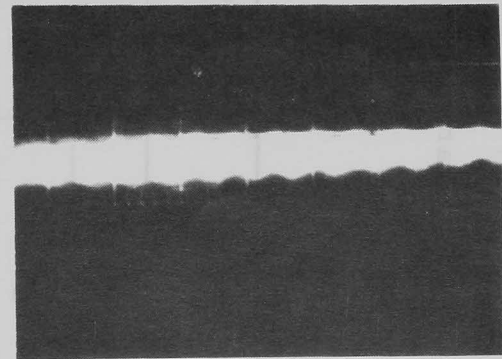
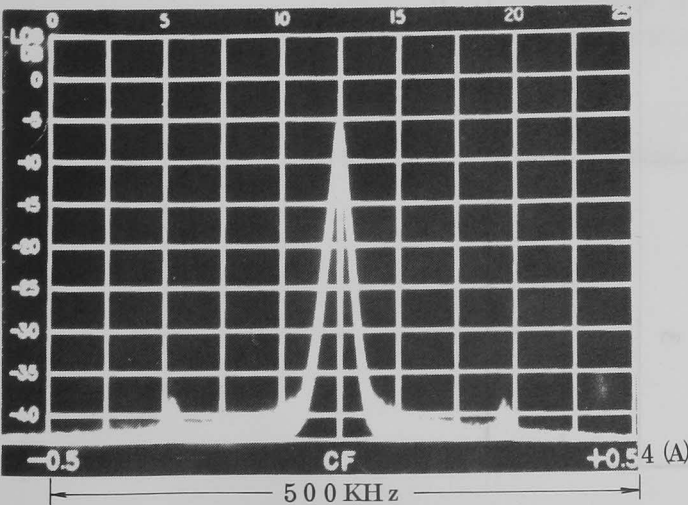
$g(\text{Pitch of Slit}) = 2.0 \text{ mm}$



$g = 1.4 \text{ mm}$



$g = 1.0 \text{ mm}$



$g = 0.6 \text{ mm}$

$10 \mu\text{sec}/\text{div}$

図5-16 格子ピッチの変化による信号波形，ならびに周波数スペクトルの変化

Variance of the data for a constant surface velocity of the standard rotator.

Data No.	Velocity of the rotating surface	Dispersion (A) (Before correlation)	Dispersion (B) (After correlation)
1	228 m/min	$\pm 0.17 \%$	$\pm 0.045 \%$
2	114	± 0.17	± 0.086
3	72	± 0.23	± 0.12
4	36	± 0.26	± 0.18
5	18	± 0.29	

A : Variance including that of surface velocity of the rotator.

B : Not including the variance of the rotator.

図5 - 1 7 標準回転体による速度計の精度特性

(A) : 回転体の回転速度誤差補正前

(B) : " " 補正後

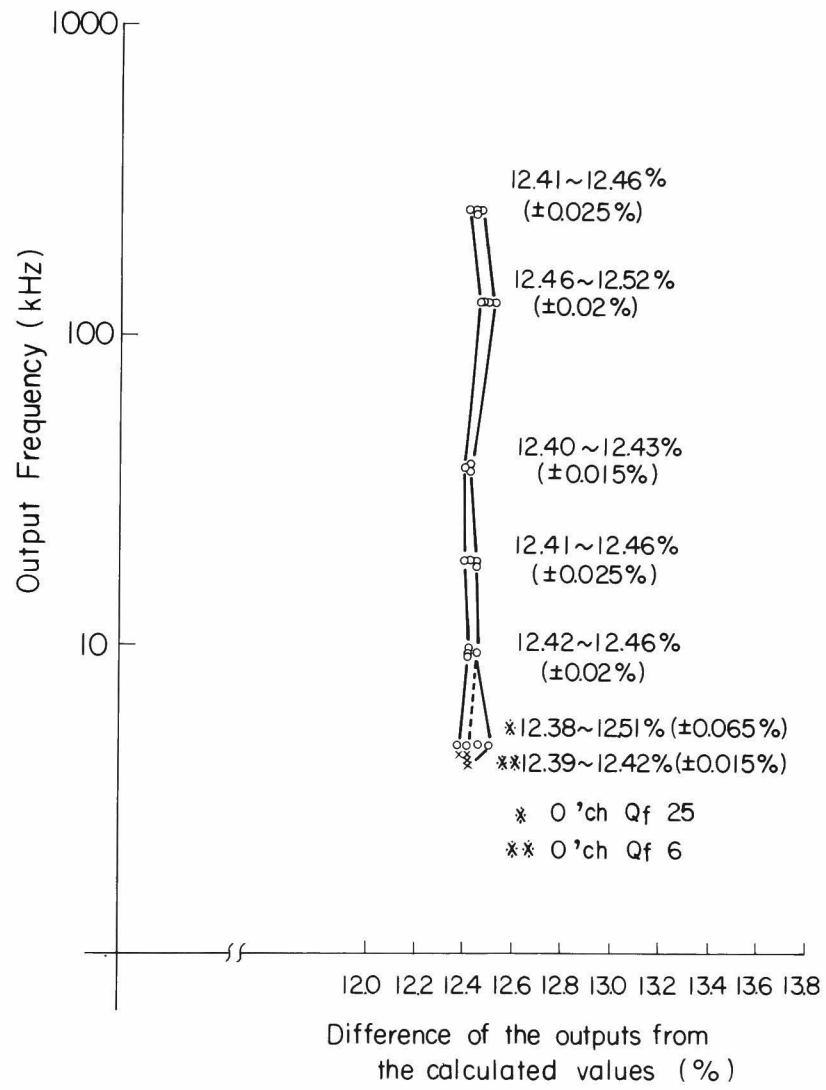


図 5 - 1 8 速度計の実測値の計算値からの偏差

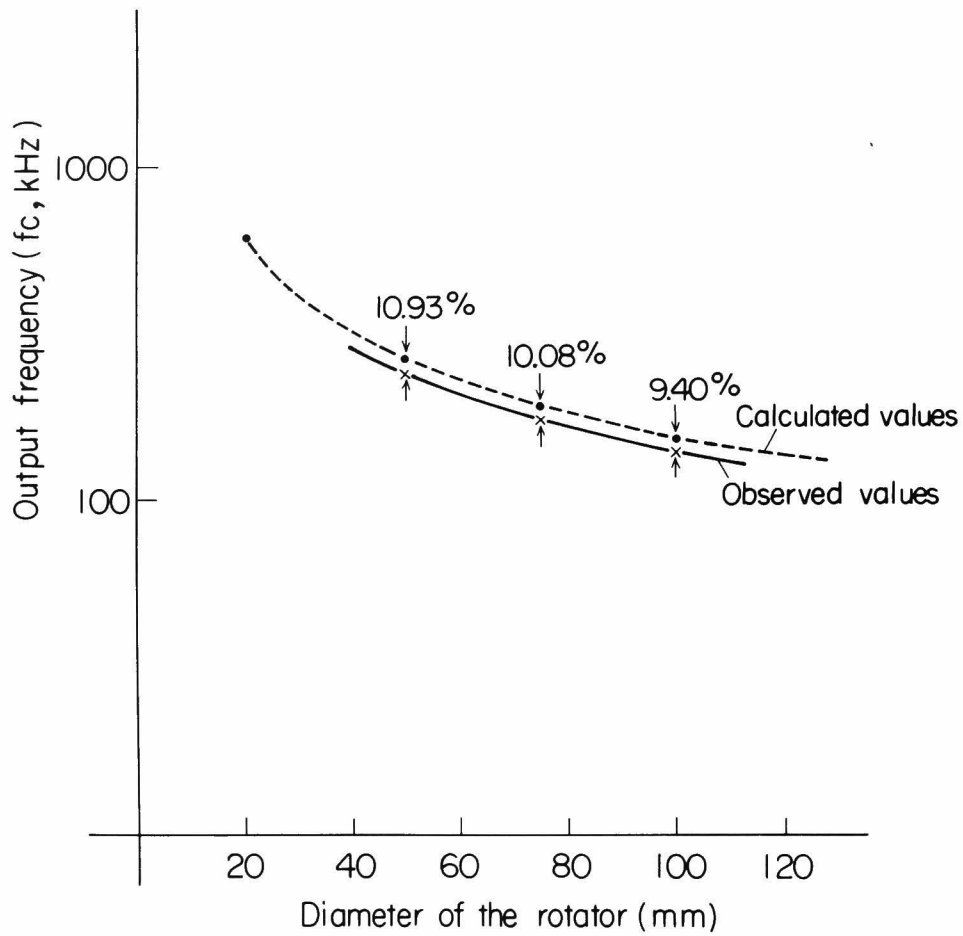


図 5 - 1 9 対象表面曲率による速度計出力の影響

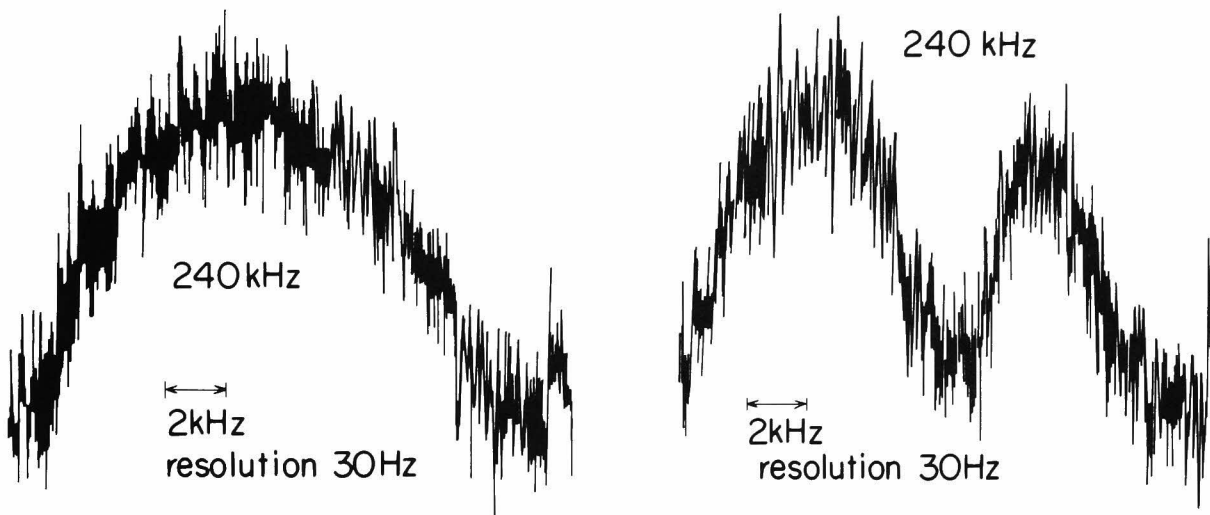
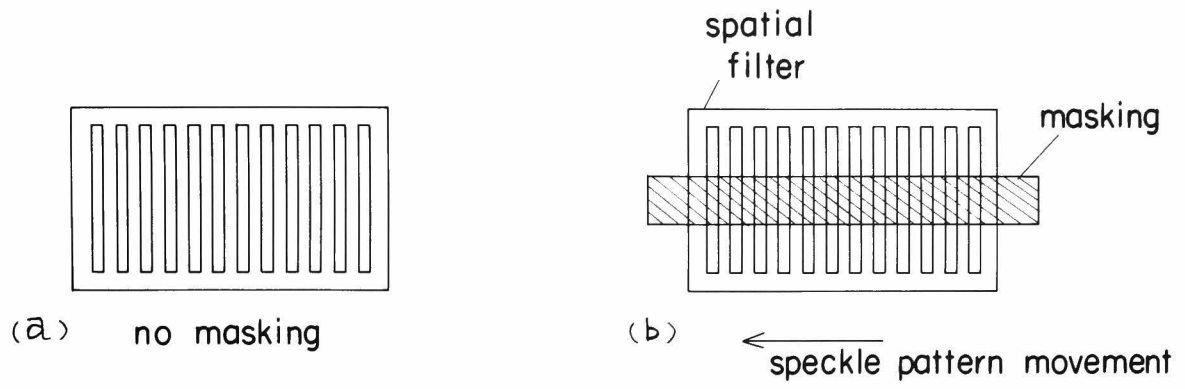


図 5 - 2 0 空間フィルター上における速度分布の実験

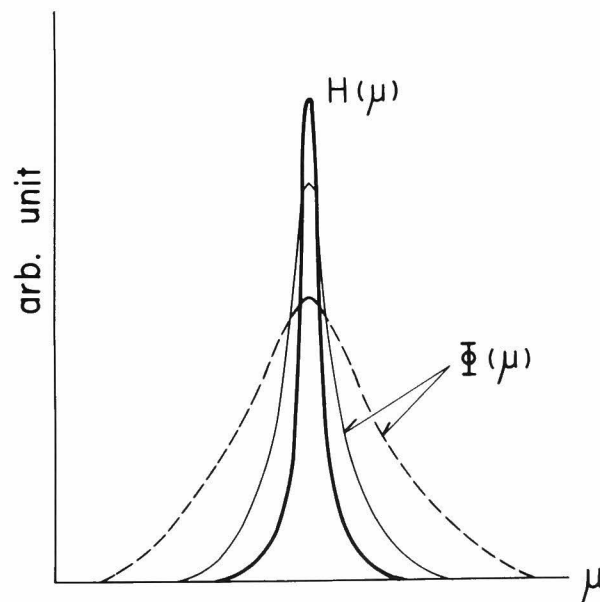


図 5 - 2 1 速度計出力信号の周波数スペクトルにおけるQ値と、
入力図形のパワースペクトル ($\Phi(\mu)$)との関係

Variance of the data for sheet metal in the field test.

Location of measurement	Velocity of steel plate / Dispersion of indication value	Note
Rotating part (on a roller)	400 ~ 800 ^m /min / ±0.12 ~ 0.16 %	Pitch of the grating g=0.4
On a plane part	Non-waving and non-vibrating point	0.4
	Waving point	0.2
	Vibrating point	0.2

図 5 - 2 2 冷間圧延鋼板に対する速度計現地試験での精度データ

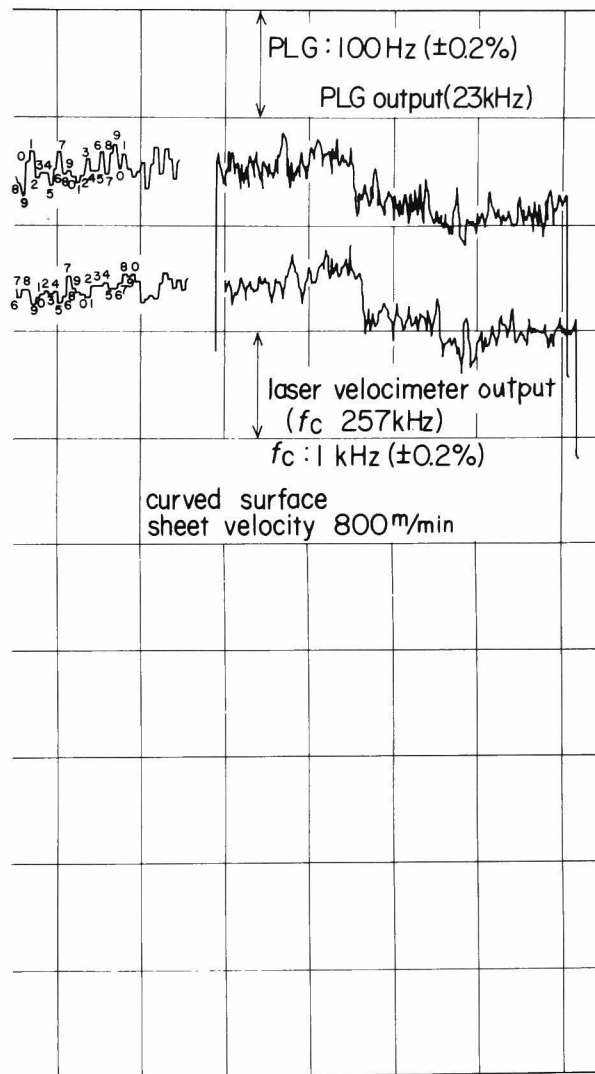


図 5 - 2 3 冷間圧延鋼板現地試験でのデータ例

上部トレース： ロール回転数からの速度データ

下部トレース： レーザ速度計の速度データ

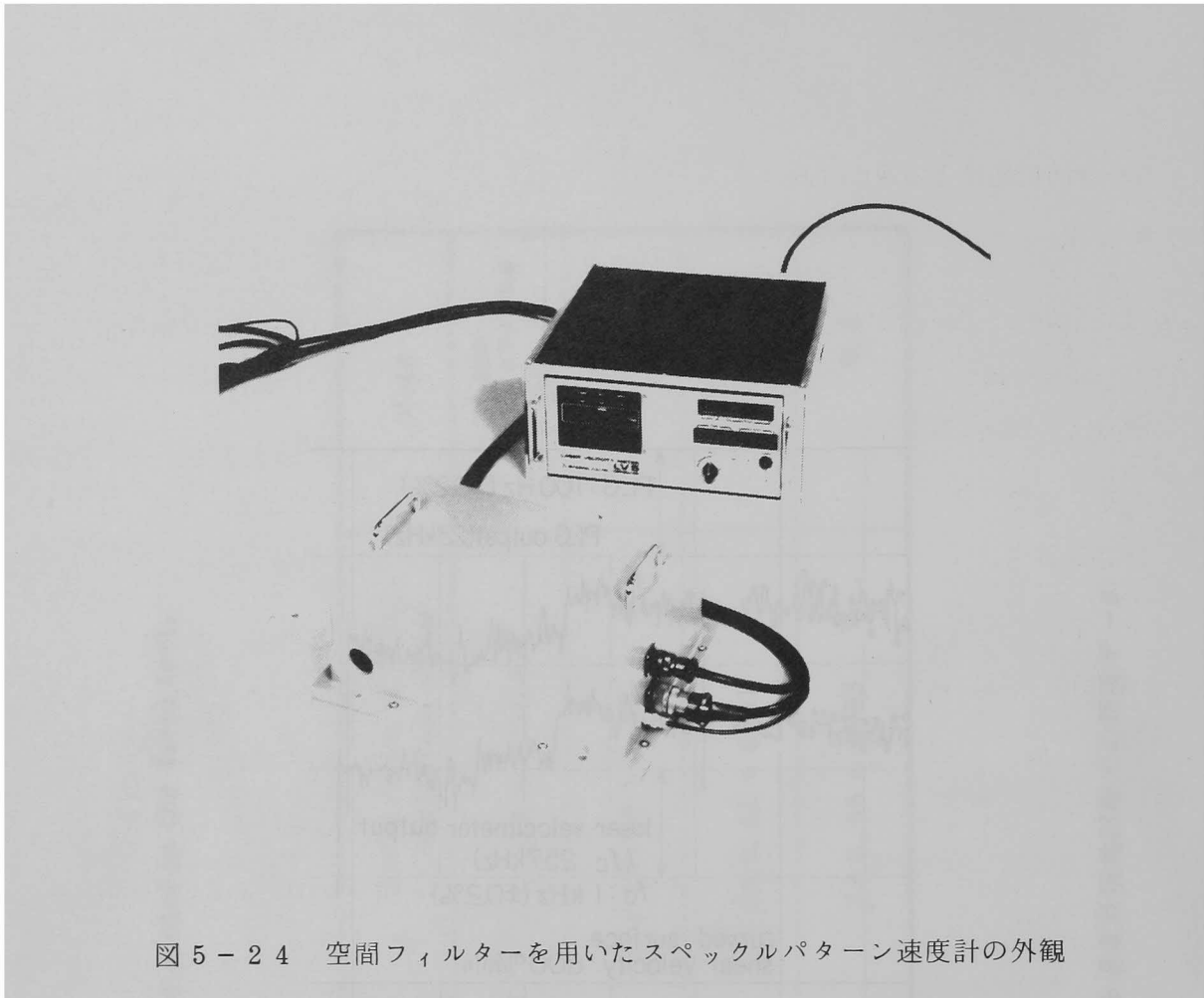


図 5-24 空間フィルターを用いたスペックルパターン速度計の外観

5-4 レーザによる速度計測のむすび

レーザの回折光を利用した速度計としては、5-3節にのべた空間フィルターの相関による方式が最も広い実用性をもっている。この方式の場合、精度に与える要因が複雑であり、十分に解析ができていないので、今後の問題である。

レーザによる速度計の最も広く知られたものとして、ドップラー効果を用いる方式がある。ドップラー効果も干渉を用いている点で同様のはんちゅうに入ると考えられるが、一応ここでまとめたのは、回折像の空間分布を用いるという範囲に限定している。

5. レーザ回折光による速度計測

参考文献

- 1) T. Inari, Detection of the Number of Rotation of a Rotator Using the Speckled Patterns Produced by a Coherent Light, Japan. J. Appl. Phys. vol.8, 970-971, (1969).
- 2) 高嶋, 稻荷, レーザスペックルパターンを用いた速度計の精度改善, 第13回SICE 学術講演会講演予稿集, p.211 (1974).
- 3) J. T. Ator, Image Velocity Sensing by Optical Correlation, Appl. Opt. vol.5, 1325-1331 (1966).
- 4) 内藤, 狼, 小林, 空間フィルタによる速度計測, 計測と制御, vol. 7, No. 11, 761-772, (1968)
- 5) W. H. Huntley, New Coherent Light Diffraction Techniques, IEEE. Spectrum, 114-122, January, (1964).
- 6) G. Stavis, Optical Diffraction Velocimeter, Instrument and Control System, vol.39, No.9, 99-102 (1966).
- 7) 稻荷, 高嶋, 北原, 大道, レーザースペックルパターンによる非接触速度計の試作, 計測自動制御学会論文集, vol.13, No.1 82-86 (1977).

第 6 章 結 語

レーザー光などのコヒーレント光を粗面に照射した場合にみられるスペックルパターンを含む回折効果は、レーザーの発明直後から注目され、実験的事実として注目された。その後この効果はそれより以前に知られていた電磁波の回折との対比において、回折効果として理論的な裏付けがなされ、いくつかの応用の可能性が示唆されてきた。しかしながら実際の装置等への応用はまだ進展しなかった。

筆者はレーザー光の反射を直接的に観測した場合におこる、この回折像の強度分布が、本論文で述べたように、表面からの反射光波の複素振幅分布のパワースペクトルに相当し、表面粗さ構造のもつ統計的な性質に対応していることに、応用上の観点から着目し、興味をもってきた。特にパターン認識がまだ光学装置上の問題、センサの問題、そして特に計算機による情報処理上の技術的な制約が大きい段階では、表面微細構造を対象とする、パターン計測の領域の課題には、この回折効果は有用な手段を提供すると考えた。

以上の観点から筆者は、表面粗さ構造と回折像の諸性質の理論的な関係を、応用上必要な観点と範囲で再整理し、表面粗さ計測、表面微細構造の認識、表面検査、そしてスペックルパターンの運動の性質を用いる速度計測等への、きわめて実際的な応用を展開してきた。その内容については本論文中に詳細に述べた通りである。

この分野の応用は、まだまだ多岐の範囲にわたって拡がると考えられる。現状の応用のさらに高度化が進む一方で、半導体レーザー、オプティカルファイバー等の光伝送用の光回路等の新しい開発、情報処理側からのマイクロコンピュータ等の電子技術の進展等を組合せて新しい可能性も開けると考えられる。またよく知られたレンズ系等の光学系による光情報処理や、ホログラフィーの応用技術等を組合せて、興味深い計測技術が開発されると考えられる。

本論文にて論述した内容を以下に要約する。

第 2 章 表面粗さ構造とコヒーレント光の回折

表面粗さにより回折されるコヒーレント光の複素振幅分布は、表面での反射光の複素振幅分布の Fourier 変換で与えられることを出発点として、表面粗さと、観測される回折像の強度分布との関連を論じた。

回折像の強度分布は反射光波分布のパワースペクトルで与えられ、表面粗さの高さ分布の統計量（相関々数、標準偏差等）を直接与えることはできない。反射波の相関々数は表面

粗さの任意の2点の高低差の平均値を与え、回折像はその Fourier 変換で与えられる。

表面粗さが光の波長の $1/2$ より大きい場合、波長の $1/2$ を越える部分の高さ情報は消える。反射光波の位相成分から構成される図形を考えた場合、回折像はこの図形のパワースペクトルとなり、人間の視覚に比較的よく一致し、実験的事実とよく対応する。

表面粗さが $\lambda/4\pi$ より小さい場合には、回折像の中心に集る零次回折光を除けば、回折像強度分布は表面粗さプロフィールそのもののパワースペクトルとなる。

実際の機械加工、あるいは圧延された金属表面は、かなりの周期的構造がみられる場合が多く、また方向性をもつ場合も多い。このような場合は、表面粗さとして、ある単位となる構造が周期的にあらわれるというモデルを仮定し、回折格子の理論を応用する方がわかり易い。この周期構造を基本とし、単位構造、ならびにその周期が、ある平均の構造、ならびに周期を中心に、統計的に分布していると考ええる。このように考えると、実際に圧延金属板等でみられる帯状回折像がよく理解できる。

第3章 表面微細構造変化の計測

第2章で得られた結果から、表面構造による回折像は表面微細構造の計測に有効に応用できる。回折像を用いる方式は、従来の表面粗さ計が表面粗さそのもののプロフィールを得るのに対し、表面構造の概略の特徴の変化をモニターすることになる。実際に使用する場合には、検知すべき表面構造の変化に対応した回折像強度分布（たとえば回折像の2点間の強度比等）を記憶しておき、これを基準として、現在の表面の変化をモニターする。

研削された被加工物の表面を、回折像の強度分布により観測すると、加工が進み、砥石表面が損傷するのに従って、回折像も変化してゆくことが明瞭に観測される。

加工が進むにしたがって、表面の周期的な構造に損傷等による微細な高周波成分が重畳し、比較的安定した領域を形成し、さらに研削が進むにしたがい、摩耗により上記高周波成分が滑らかになる。このような変化が回折像により観測でき、上記のモデルが妥当であることがわかる。

第4章 レーザ光による表面検査

表面からの回折像が表面粗さに対応することから、表面粗さの異常として欠陥が検知できる。レーザ光を圧延金属板等に対し走査し、板幅方向に細長い、短冊状の開口をもつオプテ

ィカルファイバーの集光系を通して光電子増倍管で受光する。表面に欠陥がある場合、帯状回折像が散乱されることにより、受光される光強度が落ちこみ、欠陥であることが検知される。

このようなレーザの回折像による方式は、かなりきれいな表面の微細な欠陥を検知するのに最も適しており、実用化されている。標準的な装置としては、検査分解能として約 $30\ \mu\text{m}$ の黒点、または $30\ \mu\text{m}$ 幅の線状の欠陥が検知でき、板幅は1ユニットあたり $250\ \text{mm}$ 程度のものが実現されている。

同様な原理により 細い線の表面検査も実現できる。これは線の長手方向に傾斜した方向からレーザ光を照射し、細線に対し垂直の面で観測されるリング状の回折像を利用する。欠陥による回折像の乱れをリング状のスリットを通して検出できるよう、光学系を工夫している。この検出方式は従来できなかった光学的な細線の表面のオンライン検査を可能にするユニークな方式である。

第5章 レーザ回折光による速度計測

表面粗さによる回折像の中に含まれる、粒状の雑音性のパターン（スペックルパターン）は、対象表面の運動速度に比例した速度で運動する。この運動速度を計測することにより、非接触の速度計を実現することができる。

運動するスペックルパターンをピンホールを通して受光すると、スペックルパターンの通過とともに、パルス状の信号波形があらわれる。この信号の周波数スペクトルは、対象物体が周期運動をおこなっている場合には、その周期運動の周波数を基本周波数とするスペクトルとなる。この周波数を検知することにより、運動周期や回転体の回転数が検出できる。この方法は対象物の形状、表面状態、対象物からの距離等の諸条件に影響されないのが特長である。

上記のパルス状の信号から、単位時間あたりのパルス数を計数する方式の速度計ができる。この場合、複数個のピンホール付きの光検出器を設け、各々の出力の算術平均をとることにより、精度を高くすることができる。

このような方式によっても、 $\pm 1\%$ 程度の速度計が実現できる。

走行する任意の図形を、その図形と一定の狭帯域の空間周波数スペクトルをもつフィルターとの図形相関により、図形速度を計測することは知られている。これをスペックルパターンの運動を計測するのに置きかえて使用した、スペックルパターン速度計を研究した。

この速度計を実用化した場合の計測精度に与える要因を解析した。この速度計は特に走行する連続的な物体の速度を非接触で計測できるという大きな特長がある。精度は対象物体の速度により変化し、低速になる程精度は低下する。おおよその精度は、対象が高速で最適条件下にある場合、 $\pm 0.1\%$ 程度が得られる。

謝 辞

本論文の作成にあたり、全面的な御指導、御援助頂いた京都大学教授、理学博士 福田国称先生に対し、深く感謝の意を表します。本論文は先生の御指導なくしては完成し得なかったものであります。

三菱電機株式会社常務、開発本部長、喜連川隆博士、同社応用機器研究所長、原仁吾博士、同社同研究所研究主監、大野栄一博士には、本研究の遂行、ならびに論文の完成に、深い御指導、御援助を頂きました。厚く感謝の意を表します。また、本研究の遂行にあたり、種々御支援を頂いた、三菱電機株式会社郡山製作所長、菘原智博士、同社開発本部担当部長、安東滋博士に謝意を表します。なお、研究実験の遂行、データの解析にあたり御協力頂いた、三菱電機株式会社応用機器研究所、亀井光仁氏、高嶋和夫氏に対しても深く感謝します。

(1 9 7 9 年 6 月)

附 録

表面粗さによる光回折現象と計測への応用に関する自著論文，ならびに各種学，協会研究
発表リスト

自著論文リスト

- 1) 稲荷，亀井， レーザ回折パターンによる細線表面欠陥の検出，計測自動制御学会論
文集， vol. 13, № 1, 64 ~ 68, (1977)。
- 2) 稲荷，高嶋，北原，大道， レーザスペックルパターンによる非接触速度計の試作，
計測自動制御学会論文集， vol. 13, № 1, 82 ~ 86, (1977)。
- 3) T. Inari, Detection of the Number of Rotation of a Rotator
Using the Speckled Patterns Produced by a Coherent Light.,
Japan. J. Appl. Phys. vol. 8, 970~971, (1969).
- 4) 稲荷，亀井， レーザによる金属板表面自動検査装置
三菱電機技報， vol. 51, № 5, 334~337, (1977)。
- 5) 稲荷，吉田， レーザの計測および加工への応用，
テレビジョン， vol. 31, № 2, 124~132, (1977)。

Conference 資料

- 1) T. Inari, Automatic Detection and Control of Surface Roughness by Coherent
Diffraction Pattern.,
Proc. 16th. SPIE. (Society of Photo-Optical Instrumentation
Engineers) U. S. A.
Annual Meeting, 47~53, (1972).
- 2) M. Kamei and T. Inari, Recognition and Inspection of Surface
Roughness by Coherent Diffraction Pattern.,
Proc. 3rd. Intern. Conf. Production Eng. 113~118, (1977).

シンポジウム，研究会資料

- 1) 稲荷，レーザ光による回転物体からの粒状性パターン，
輻射科学研究会資料，（1969. 11）.
- 2) 稲荷，レーザスペックルパターンによる形状認識，
学振130委. 光と電波の境界領域研究会資料，（1972. 1）.
- 3) 稲荷，亀井，レーザ回折パターンによる金属細線表面欠陥の検出。
輻射科学研究会資料，（1974. 12）.
- 4) 三菱電機（生研，鎌電），レーザ式非接触速度計，
第61回鉄鋼協会計測部会資料，（1975. 11）.
- 5) 亀井，稲荷，表面微細構造からの回折によるフーリエ変換像の利用，
シュミレーション技術研究会資料，27～32，（1976）.
- 6) 稲荷，亀井，レーザによる表面検査技術，
日本非破壊検査協会，NDI-004研究会資料，（1977. 2）
- 7) 稲荷，レーザを用いた計測の生産工場への応用，
第4回レーザ応用技術研究会資料，4，（1978）.

学会講演会発表資料

- 1) 稲荷，レーザ光による拡散面の回転周波数検出，
応用物理学会講演会（秋季）予稿集（1969）
- 2) 稲荷，レーザによる回転体速度計測，
第9回SICE学術講演会予稿集，317～318，（1970. 8）.
- 3) 稲荷，レーザ回折速度計，
応用物理学会講演会（春季）予稿集 263，（1971）
- 4) 稲荷，野田，渡辺，長谷川，レーザスペックルパターンによる半導体素子の表面パターン自動検出。
第10回SICE学術講演会予稿集，611～612，（1971. 8）.
- 5) 稲荷，レーザスペックルパターンによる表面の形状認識，
応用物理学会講演会（秋季）予稿集，262，（1971）.

- 6) 稲荷, 周波数分析形無接触光学回転計測,
第11回SICE学術講演会予稿集, 607~608, (1972. 8).
- 7) 稲荷, 高嶋, 空間フィルターを用いたレーザスペックルパターン速度計,
応用物理学会講演会(春季), 134, (1973).
- 8) 高嶋, 稲荷, レーザスペックルパターンを用いた速度計の精度改善,
第13回SICE学術講演会予稿集, 211~212, (1974. 8).
- 9) 亀井, 稲荷, レーザ光による細線表面欠陥検査装置,
第13回SICE学術講演会予稿集, 439~440, (1974. 8).
- 10) 亀井, 稲荷, レーザによる小型歯車自動欠陥検査装置.
第14回SICE学術講演会予稿集, 445~446, (1975. 8).
- 11) 稲荷, レーザによる回折像を用いた表面欠陥自動検査,
電気関係学会関西支部連合大会予稿集, S5. (1975. 10).
- 12) 井上, 岩佐, 稲荷, 数字車自動欠陥検査装置,
第18回自動制御連合講演会予稿集, 559~560, (1975. 11).
- 13) 北原, 加藤, 大道, 野呂, 稲荷, 高嶋, レーザ回折現象を利用した速度計,
電子通信学会総合全国大会講演予稿集, 4-53, (1977).

