

# レーザ散乱光の画像処理による加工表面の インラインプロセス計測装置の開発

(課題番号：07555516)

平成7・8年度科学研究費補助金（基盤研究(A)(2)）

## 研究報告書

平成9年3月

横浜国立大学附属図書館



10304007



研究代表者      小   豆   島      明  
(横浜国立大学   工学部)



## はしがき

表面粗さは工業製品や機械部品の表面機能に関する重要な量であり、工業界においても重要な管理対象とされている。近年、加工表面の表面性状のオンライン管理の要求にともない、光学的手法による非接触センサ、とりわけレーザ光線を用いたものがいくつか考案されてきた。しかし、いずれも2次元的に散乱した反射光を1次的に光学センサを用いて処理するもので、その測定精度や汎用性から、研究室の領域を出られないものが多いのが現状である。このような状況から新しい非接触インラインプロセス計測装置の開発が望まれている。

申請者が既に開発した画像処理装置を用いた散乱光計測システム（特許公開中）は、反射散乱光を半透明性のスクリーンに投影し、散乱光分布の全体かもしくはほぼ全体の1枚の画像としてとらえることにより、非常に容易に散乱光分布の2次的処理が可能である。本研究は、この散乱光の2次元的处理方法を利用して、画像処理散乱光インラインプロセス計測装置の開発を行ったものである。

## 研究組織

研究代表者： 小 豆 島 明（横浜国立大学工学部教授）  
研究分担者： 青 木 孝史朗（横浜国立大学工学部助手）

## 研究経費

|       |            |
|-------|------------|
| 平成7年度 | 6 1 0 0 千円 |
| 平成8年度 | 7 0 0 千円   |

横浜国立大学附属図書館



10304007

## 研究発表

### (1) 口頭発表

- 1) 小豆島明、中野宏和、阿部正：レーザ散乱光による圧延加工材料表面のインプロセス計測、平成6年度塑性加工春季講演会、1994年5月・
- 2) 鈴木孝、小豆島明：画面処理を用いたレーザ散乱光による加工表面の計測、平成3年度塑性加工春季講演会、1991年5月・

## 1. はじめに

表面粗度は、工業製品や機械部品の表面機能に関する重要な量である。従来、このような表面粗度の測定には触針式の表面粗度測定装置が広く使用されてきた。しかし、近年のオンライン粗度管理に使用するには測定速度・測定範囲の点で不向きであり、また接触式であるため表面に傷が付くという問題もあった。

これらの理由から、非破壊・非接触的手法であり、しかも高速測定ができる工学的測定手法とりわけ空間的にコヒーレントであるレーザー光線を用いたものが研究開発されてきた。

そこで、本研究においては、散乱光分布の画像処理による測定システムを提案し、この測定システムを実際の圧延におけるオンライン計測に利用できるまで高速化した。さらに、高速化した本測定システムを用いて、オフラインで表面粗さと2値化面積の関係における油膜の影響を調べた。

## 2. 計測システム

### 2.1 測定装置

測定装置の概略を図1に示す。装置の基本動作は次の通りである。光源は出力5mWのHe-Neレーザーで入射角 $20^\circ$ で試験片表面に照射される。試験片表面におけるレーザースポット径は約1.2mmである。反射した散乱光は試料台から325mm離れた半透過性のスクリーン状に投影され、スクリーンの裏側からCCDカメラにより1枚の映像として捉える。その映像は、日本アビオニクス製のイメージプロセッサImage Mateへ送られ、イメージプロセッサは画像をA/D変換してパソコンHP216へ転送する。この動作はHP216によって制御される。パソコンに転送された散乱光の画像は、レベル0～255までの2次元整数配列としてコンピュータ内に存在する。コンピュータへの画像転送領域はデータ処理速度を決定する重要な項目であるが、本研究の場合画面の中央に縦300ピクセル、横300ピクセルの合計9万ピクセルをとることにした。この結果データ転送時間は90秒となった。またこれはスクリーン上において縦横それぞれ90mmにあたり約 $0.05^\circ$ の高分解能を得た。

### 2.2 試験片

#### 2.2.1 表面粗度パラメータ

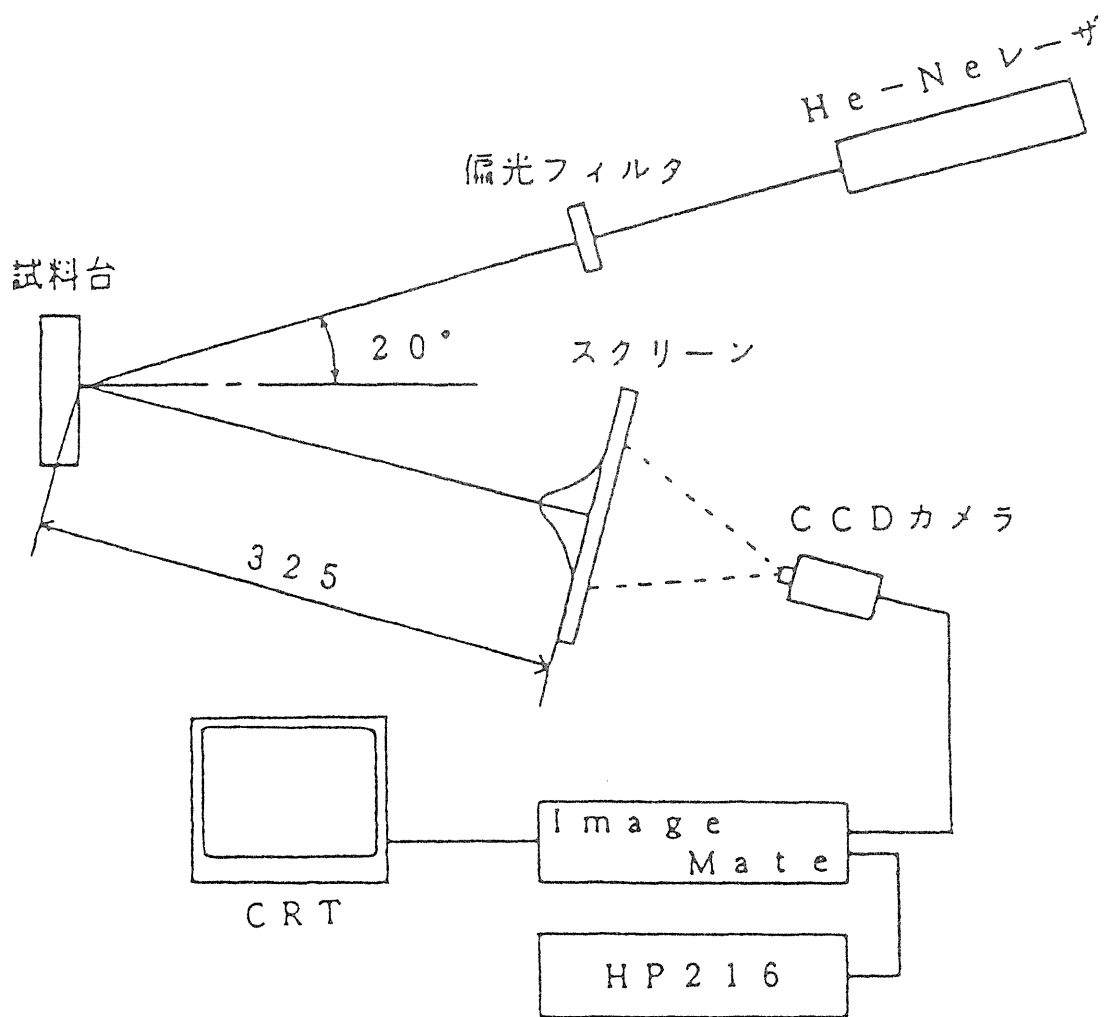


図 1 測定系概略図

本研究では表面粗度を表すパラメータとして振幅、周波数、傾斜角の3種類の情報について、触針式粗さ計で以下の3つのパラメータを測定した。

(1) 2乗平均粗さ  $R_{rms}$

(2) 自己相関距離  $T$

$$C(\tau) = \Psi(\tau) / \Psi(0)$$

$$\Psi(\tau) = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} z(x) \cdot z(x+\tau) dx$$

$z(x)$ : 表面プロフィール関数

$T$ :  $C(\tau)$  が  $1/e$  になる時の  $\tau$  の値

$$C(T) = C(0) / e \doteq 0.37$$

(3) 平均傾斜角  $\delta a$

$$\delta a = \frac{1}{L} \int_0^L |\delta - \delta m| dx$$

$\delta$ :  $dz/dx$

$\delta m$ : 中心線 (表面プロフィールの単純平均角度)

## 2.2.2 試験片

本研究では測定対象表面を2次元ランダム表面に絞り、試験片は、単純引張、および流体潤滑圧延によって周波数の異なる以下の3種類の自由変形表面を作成した。

(1) Aシリーズ 引張アルミキルド鋼

コイル状の体炭素アルミニウムキルド鋼焼きなまし調質材を300mm程度の短冊に切断し、引張試験機で単純引張したもので、表面粗度は

$$R_{rms} = 0.050 \sim 0.238 \mu m$$

$$T \doteq 13 \mu m$$

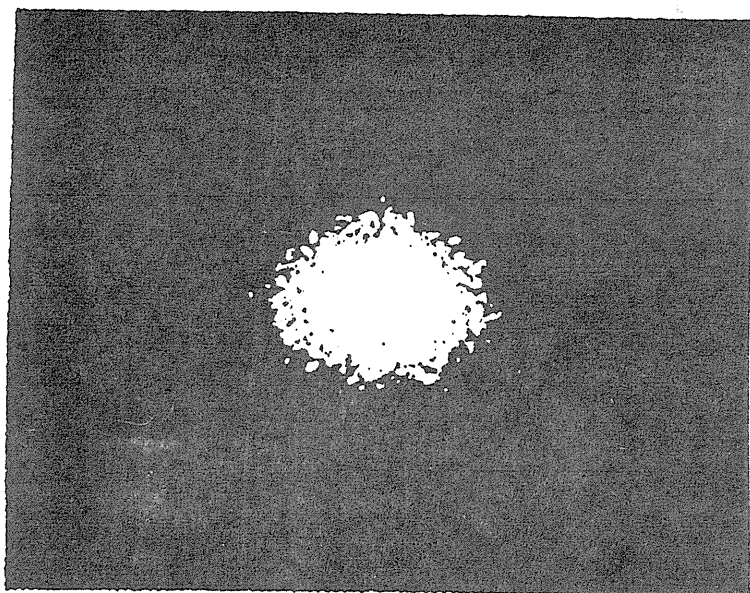
$$\delta a = 0.429 \sim 1.432 \text{ deg}$$

(2) Bシリーズ 引張ステンレス鋼

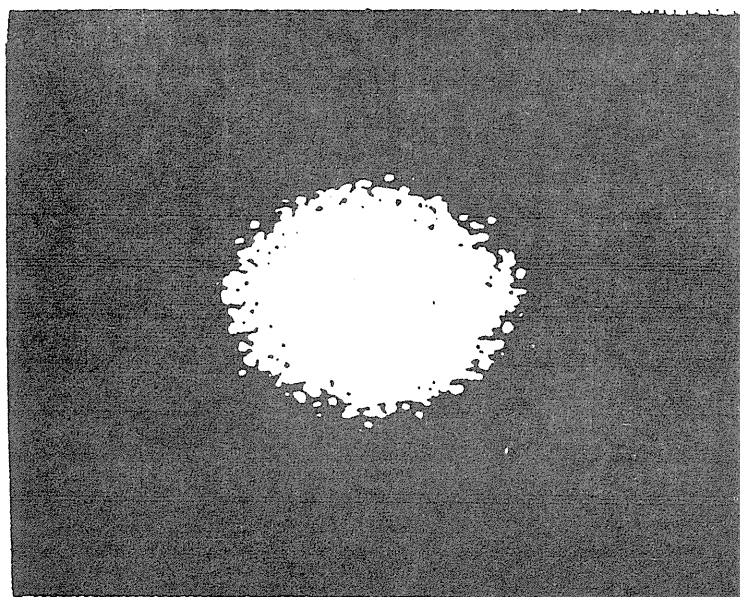
フェライト系ステンレスSUS430をAシリーズと同様に単純引張したもので、表面粗度は

$$R_{rms} = 0.020 \sim 0.227 \mu m$$

$$T \doteq 19 \mu m$$



原画像



2 値画像

写真 1 原画像と 2 値画像

$$\delta a = 0.218 \sim 0.997 \text{ deg}$$

### (3) C シリーズ 圧延ステンレス鋼

短冊状に切断したSUS430を比較的粘度の高い潤滑油（パラフィン系鉱油、340cSt at 20℃）を用いて一定速度（12m/min）、一定圧下率（7.5%）で圧延することにより、流体潤滑に近い状態で自由変形させたもので、直径76mmの圧延ロールの粗さを変化させることにより試験片の表面粗さを変化させた。

$$R_{rms} = 0.059 \sim 0.091 \mu m$$

$$T \doteq 6 \mu m$$

$$\delta a = 0.850 \sim 1.128 \text{ deg}$$

これともう一つ、600cSt at 20℃の潤滑油を用いて同じ条件で圧延し、さらに自由変形させた試験片を作成した。

$$R_{rms} = 0.012 \mu m$$

$$T \doteq 10 \mu m$$

$$\delta a = 1.486 \text{ deg}$$

これらの試験片はランダムとはいうものの測定方向によって粗さが異なるので、測定は各試験片について引張、圧延方向およびそれに垂直な方向それぞれ5回ずつ測定し、その平均値を表面全体の粗さの代表値とした。また、レーザ光の回析に直接的に関わりの薄い表面の低周波成分を除去するためCut Offは0.25mmとした。

## 2.3 実験

### 2.3.1 データ処理方法

従来、散乱光のデータ処理方法としてはピーク強度や半値幅、拡がりの標準偏差や分散などが測定され、表面粗度との関係が調べられてきたが、ここでは新しく散乱光の拡がり进行评估する方法として、取り込んだ散乱光の画像を一定のしきい値（=10）で2値化して、その拡がり面積（画素数）を測定し表面粗度との関係を調べた。（写真1）

### 2.3.2 測定結果

測定は各試験片について近傍の3点を測定し、その平均値を代表値とした。2値化面積と $R_{rms}$ および $\delta a$ との関係を図2、図3に示す。

図2から周波数の異なる各表面に対して、それぞれ2値化面積は $R_{rms}$ と比例関係にあることが分かる。またその傾きは3種類ともほぼ同じである。そして、図3から2値化面積は表面の傾斜角に応じて広が



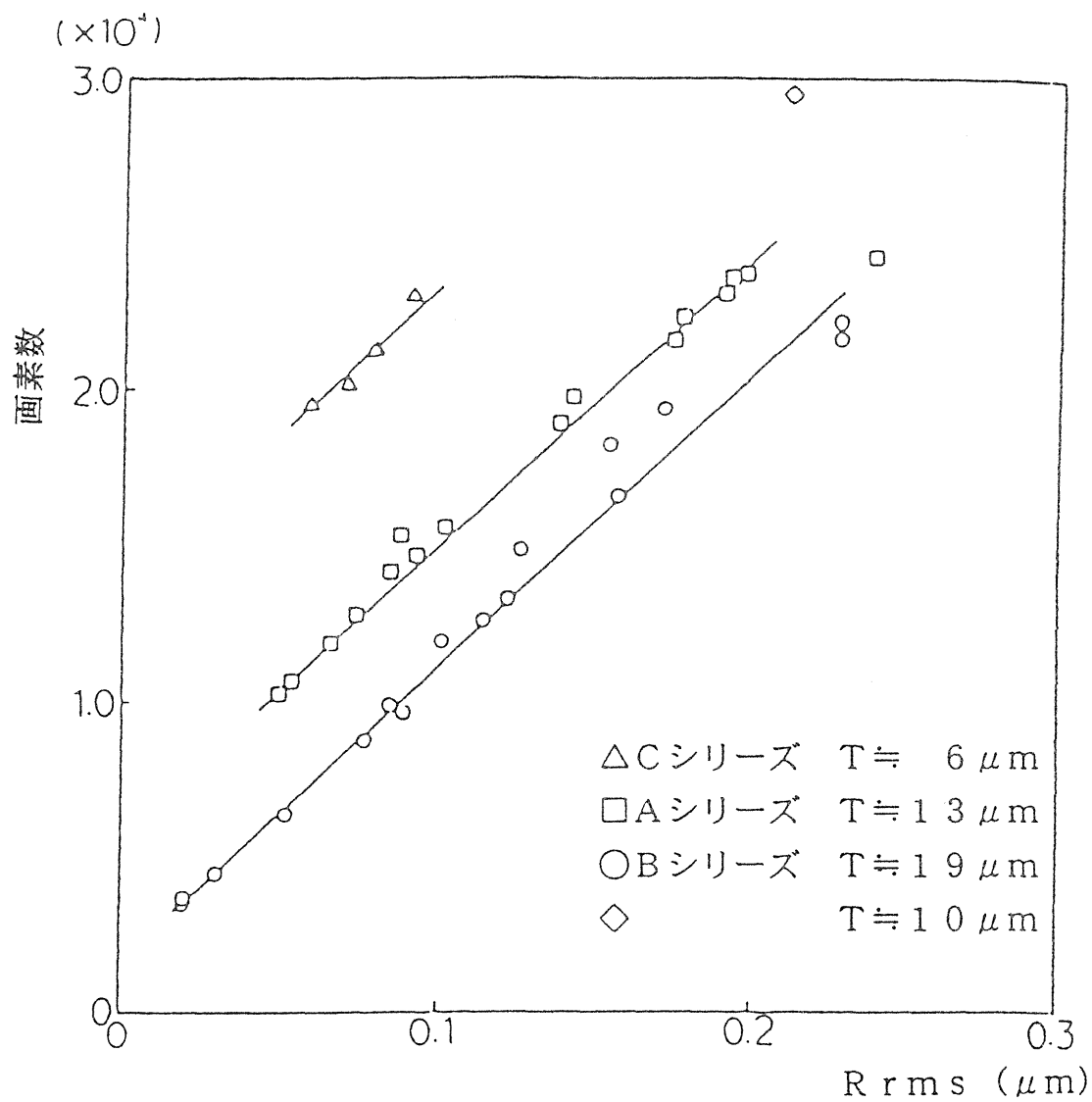


図 2 2 値化面積と  $R_{rms}$  の関係

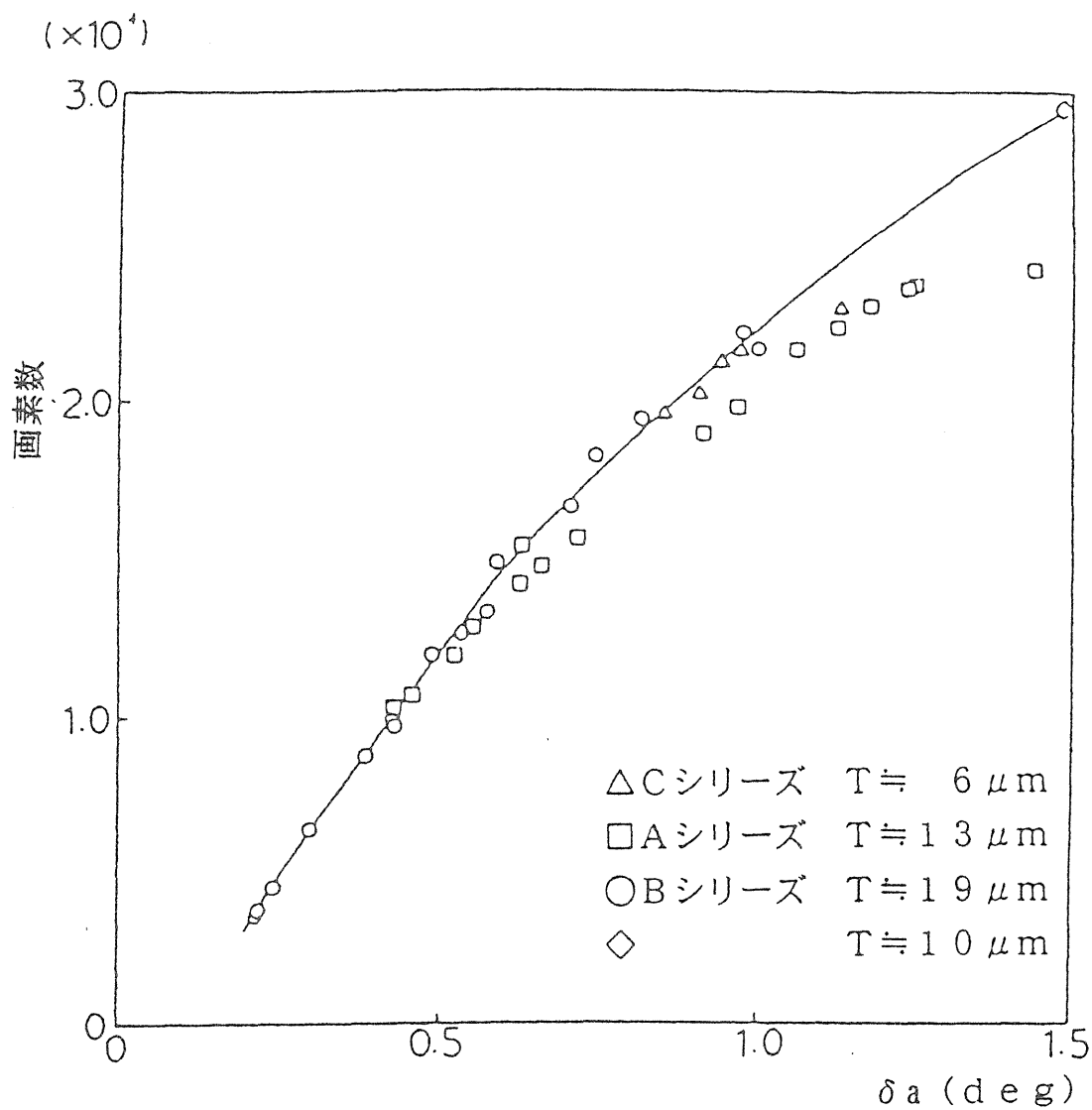


図 3 2 値化面積と  $\delta a$  の関係

っているのが分かる。また傾斜角が小さいすなわち鏡面に近い領域において相関性が高くなっている。Aシリーズのみ多少他シリーズと異なるが、これは鋼とステンレスの反射率の違いから生じたものではないかと思われる。

### 3. 計測システムの高速化

図1の測定系は、イメージプロセッサIMAGE-MATEを使用しており、HP-IBでのデータ転送時間に必要以上に時間を要していた。そこで、本研究では、新しい画像入出力ボードMT-9801-FMMをPC9801VXに組み込みI/Oバンク切り替え方式にすることによりデータ転送時間のロスを無くした。さらに、HP-BASICでプログラムを組んでいたので計算速度が低かった事により、画像処理時間が数分間かかってしまった。そこで、本研究では、HP-BASICでのプログラムを参考にしてC言語での画像処理プログラムを開発し画像処理時間を短縮する事にした。変更後の画像処理装置部の概略図を図4に示す。

本測定システムについて説明する。He-Neガスレーザー出力装置から出力したレーザーは、光量調節の変更フィルタを通過し入射角 $20^{\circ}$ で試験片表面に照射される。試験片表面での反射散乱光は、半透過性のスクリーン上に投影され、裏側からCCDカメラでとらえられ、その画像は画像入出力ボードへ送られる。画像入出力ボードは画像をA/D変換してパソコンPC-9801VXへ転送する。この画像状態はCRTでリアルタイムにモニターすることができる。パソコンに転送された散乱光の画像は、レベル0~255までの2次元正数配列としてコンピュータ内に存在し、2値化や数値解析グラフィックス処理等の操作が行われる。従来との画像処理時間の比較を表1に示す。

### 4. オフライン計測での油膜の影響を調べる実験

オンライン計測で油膜の影響を調べる前に、あらかじめ様々な粗さの材料を作成してオフラインで調べた。

#### 4.1 試験片および実験方法

フェライト系ステンレスSUS430、板厚0.4mm、板幅25mm、長さ200mm、表面粗さ $Ra0.018\mu m$ に、引張ひずみを与えることにより作成した。試験片は、0~0.1の引張ひずみの範囲で10本作成した。上記の様な試験片に油膜を付着させるためには以下の方法を取った。まず、所定の

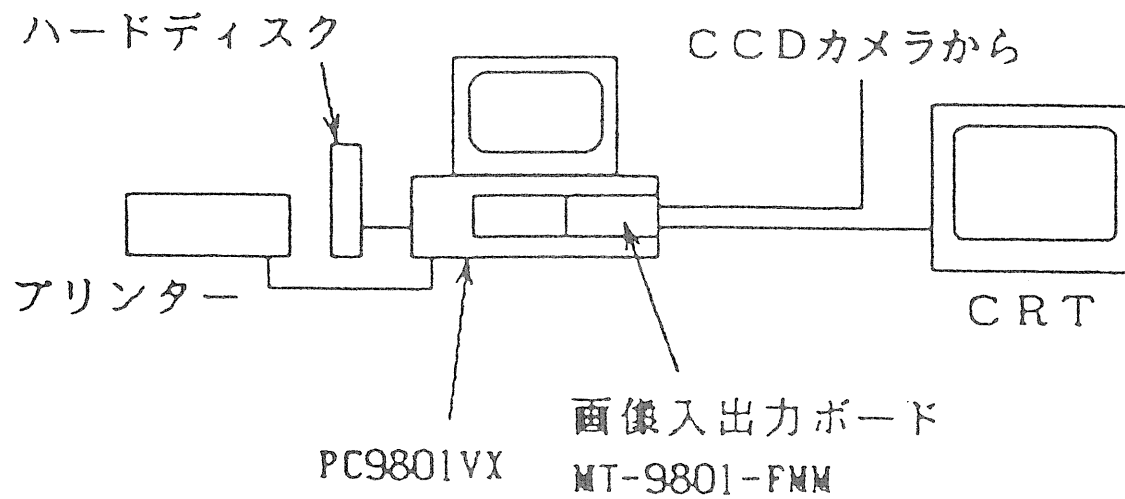


図 4 高速化した測定計

表 1 画像処理時間の比較

|           | 従来法       | 本研究       |
|-----------|-----------|-----------|
| データ転送時間   | 1 分 3 0 秒 | 1 / 3 0 秒 |
| 中心を求める計算  | 4 分       | 4 秒       |
| 2 値化面積の計算 | 1 分 3 0 秒 | 1 . 5 秒   |
| 散乱光の分散の計算 | 4 分       | 0 . 1 秒   |

濃度までヘキサンで薄めた潤滑油中に試験片を十分に浸す。潤滑油はP30（80cSt、20℃）を用いた。つぎに、これらを一日以上吊るして置いて潤滑油が均一に付着されているようにした後、油膜厚さを測定する。実験では、油膜厚さ $2.8\mu\text{m}$ のものと $5.1\mu\text{m}$ のものを作成し、これら試験片を、本測定システムで計測した。尚、油膜を付着させない状態のものを、油膜厚さ無しのものとして計測した。

## 4.2 結果および考察

計測結果を図5に示す。結果より、ひずみの大きさつまり表面粗さRaの大きさと2値化面積との間には比例関係があることが分かる。これは、ひずみ及び表面粗さRaの大きい表面の荒れたものほど散乱光が広がっている事を表している。また、油膜厚さを持った試験片では、油膜を持たないものに比べて全体として2値化面積は大きくなっている。このことより、油膜は2値化面積を大きくする影響を持つことが分かる。また、油膜の有無による2値化面積差は、ひずみ及び表面粗さRaによらず、ほぼ一定であることが分かる。また、 $2.8\mu\text{m}$ と $5.1\mu\text{m}$ 程度の範囲では、2値化面積の増加は油膜厚さに関係ないものと思われる。

## 5. オンライン計測による実験

### 5.1 オンライン計測システム

本測定システムを圧延機へ取り付ける際には、空間的な制限により、システムを直線的に配置することが困難であったため、レーザーをミラーで反射させ、圧延材に照射することとした。図6にそのシステムを示す。

### 5.2 実験室用圧延機

広範囲速度可変実験室用圧延機の仕様を表2に示す。

### 5.3 実験材料

フェライト系ステンレスSUS430、板厚0.8mm、板幅25mm、表面粗さRa $0.018\mu\text{m}$ のコイル状のものを用いた。

### 5.4 潤滑油

実験には、5種類のパラフィン系鉱油を潤滑油として用いた。表3

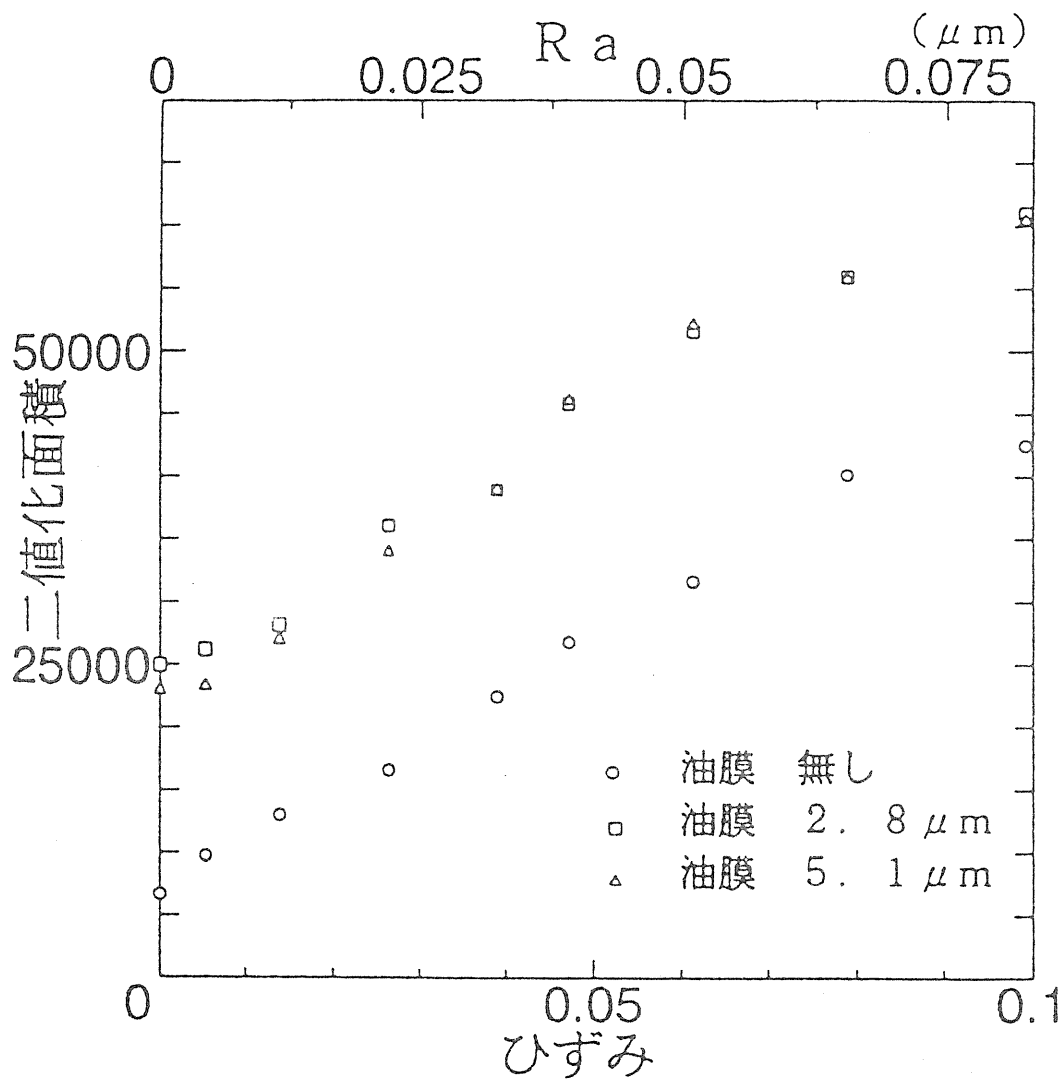


図 5 油膜の影響

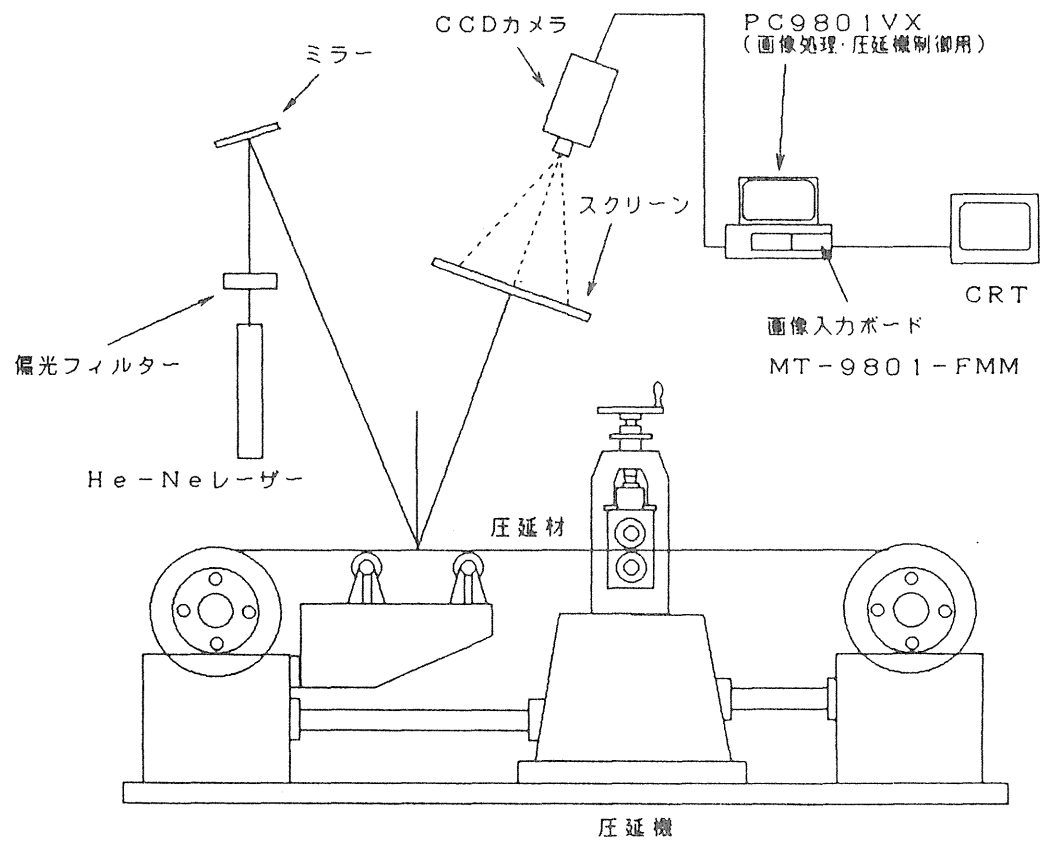


図 6 オンライン計測システム



表 2 圧延機仕様

|         |                       |
|---------|-----------------------|
| ロール寸法   | $\phi 76 \times 60^L$ |
| ロール材質   | S K H                 |
| ロール表面粗さ | R a 約 0. 0 1 $\mu m$  |
| ロール回転数  | 0 ~ 1 8 0 0 r p m     |
| ロール速度   | 0 ~ 4 3 0 m / m i n   |

表 3 潤滑油の粘度

| 潤滑油名    | 粘度 ( c S t : 2 0 ° C ) |
|---------|------------------------|
| P 1 5   | 3 3                    |
| P 5 0   | 1 4 2                  |
| P 1 0 0 | 2 7 1                  |
| P 2 0 0 | 6 4 6                  |
| P 4 0 0 | 1 4 5 9                |

に、20℃での粘度(cSt)を示す。

## 5.5 実験方法

圧延速度10m/min、圧下率5%で圧延を行い、レーザー散乱光によるオンライン計測は3秒間隔で行った。

油膜の影響を調べる実験については、圧延し二値化面積をオンライン計測し、その後、圧延材を戻して脱脂した後もう一度オンライン計測した。これを、5種類の粘度の潤滑油それぞれについて行った。

計測中の振動の影響を調べる実験については、油膜の影響を調べる実験中の振動について調べた。

追従性を調べる実験では、二値化面積のオンライン計測中に潤滑油粘度を33cStから1459cSt(20℃)へ変化させたときの表面変化に対し調べた。

## 5.6 結果及び考察

油膜の影響を調べる実験の結果を図7～図11に示す。

全ての潤滑油につき、脱脂後より脱脂前の方が二値化面積が大きく、油膜があることにより散乱光が広がることは、オフラインでの油膜の実験で得た結果と一致する。しかし、脱脂前後での二値化面積差については、粘度の低い潤滑油を用いて圧延したのもほど小さくなっている。このことは、オフラインでの油膜の実験で得た結果に矛盾する。そこで、計算によりこの場合の油膜厚さを算出した<sup>2)</sup>。その計算結果を表4に示す。

この様に、実験の圧延によって導入された油膜厚さは付着させた油膜の厚さに比べずっと薄いものであった。そこで、オフラインでの油膜の実験で得た結果と併せて、油膜厚さと二値化面積差の表すと、図12のようになる。このように、油膜厚さが1μm以下の時は、油膜厚さと二値化面積差の間に直線関係を持つことが分かる。

次に、振動の影響については次のことが言える。圧延中には絶えず振動が起こっているにもかかわらずオンライン計測によって得られたグラフは高い安定性を示している。このことにより、通常の圧延で発生している振動の影響は問題ないと思われる。これは、本計測システムが散乱光を一旦スクリーン上に投影し、散乱光の中心を求めた後、その中心より画像転送領域を取り込む形式を採っているためである。

追従性を調べた実験の結果を図13に示す。この実験では、オンラ

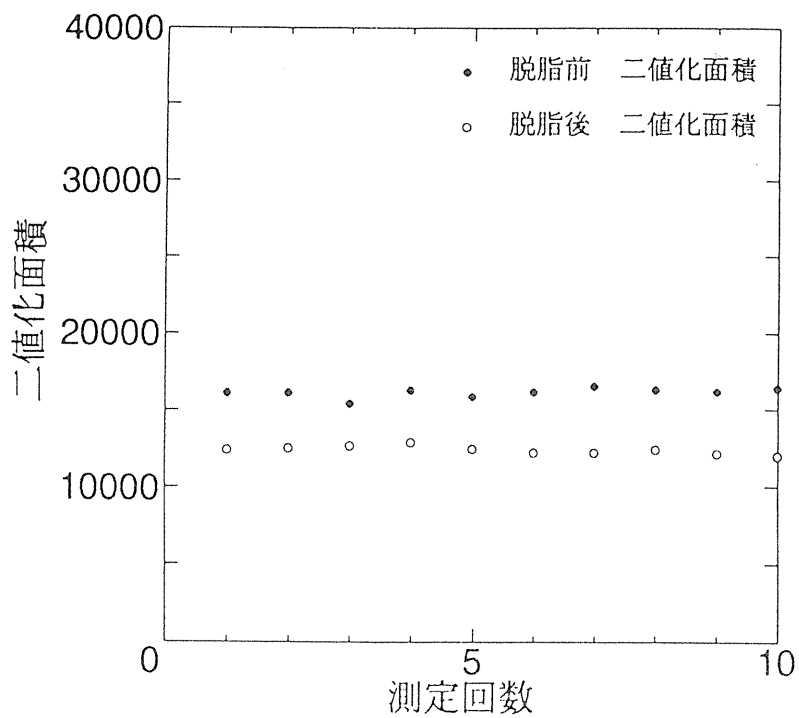


図 7 P 1 5 の計測結果

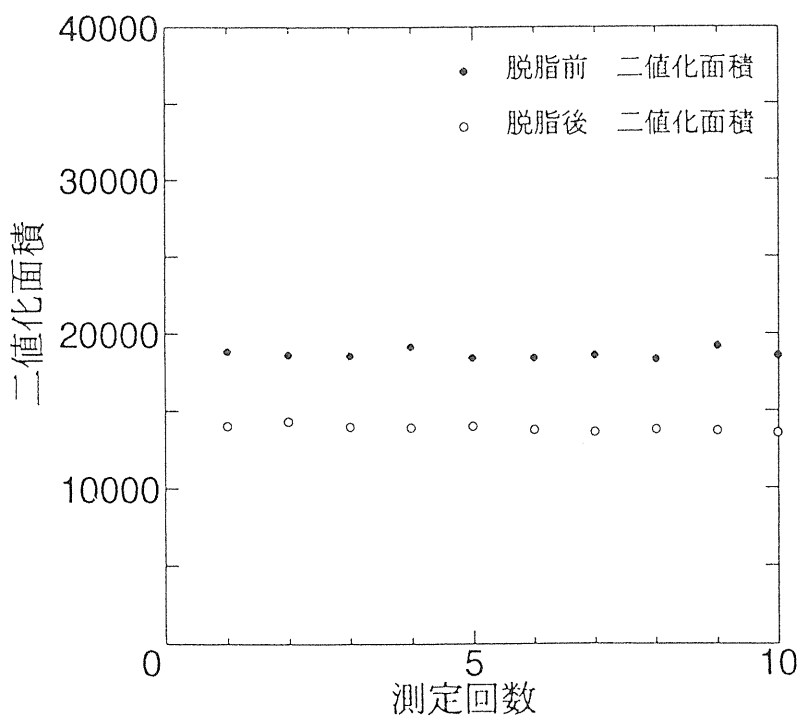


図 8 P 5 0 の計測結果

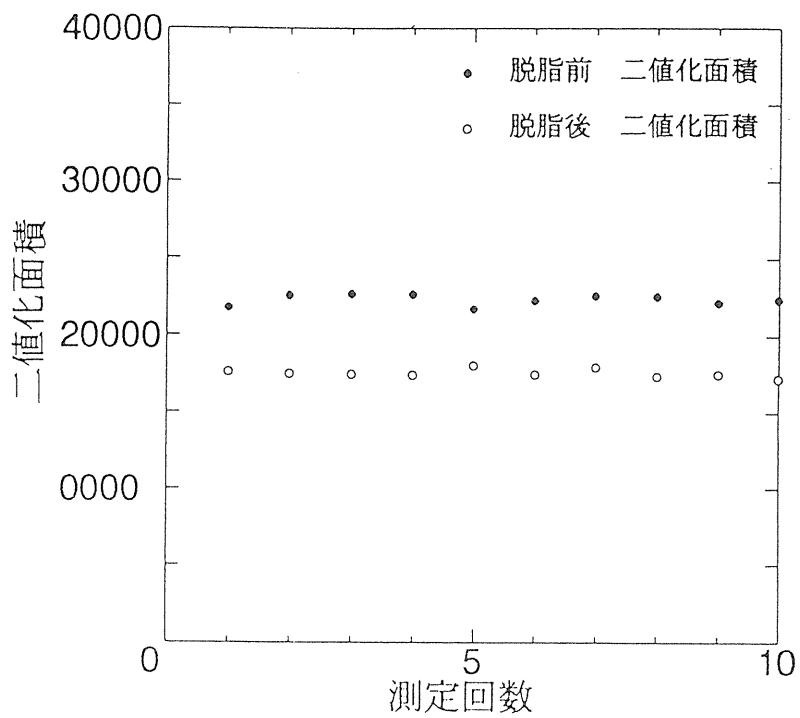


図 9 P 1 0 0 の計測結果

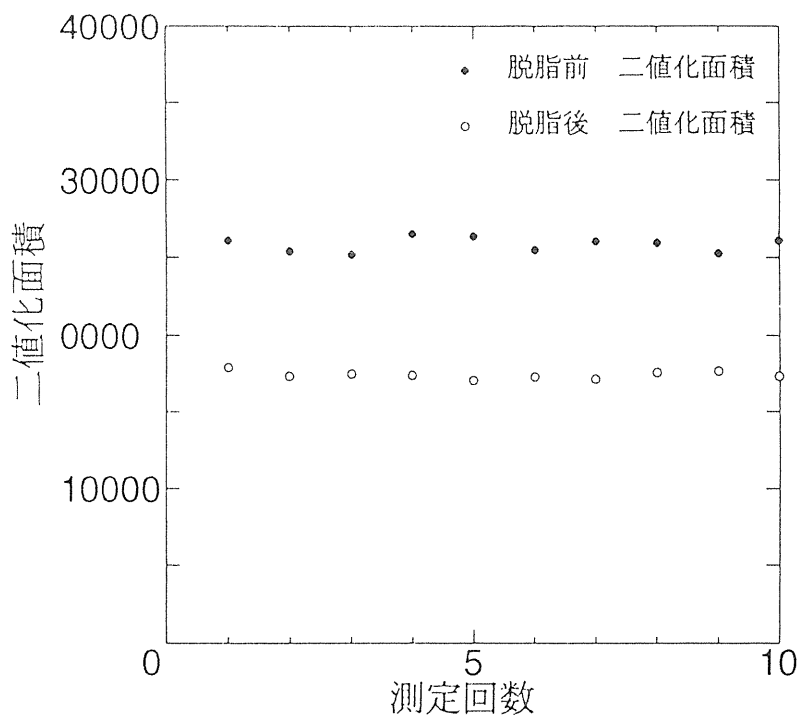


図 1 0 P 2 0 0 の計測結果

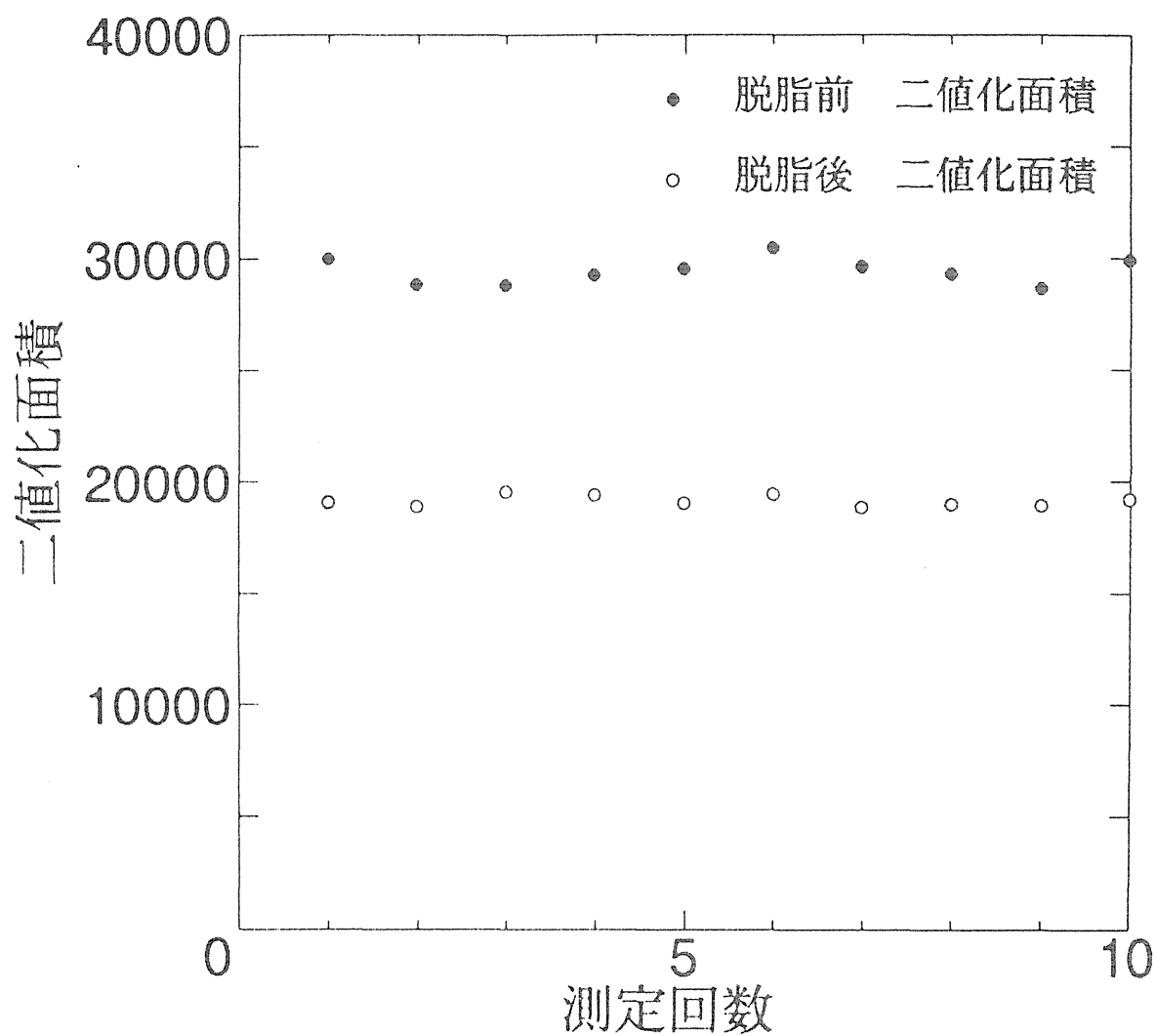


図 1 1 P 4 0 0 の計測結果

表 4 油膜厚さの計算結果

| 潤滑油名    | 油膜厚さ ( $\mu\text{m}$ ) |
|---------|------------------------|
| P 1 5   | 0 . 0 1 4              |
| P 5 0   | 0 . 0 6 2              |
| P 1 0 0 | 0 . 1 1 7              |
| P 2 0 0 | 0 . 2 8 0              |
| P 4 0 0 | 0 . 6 3 8              |

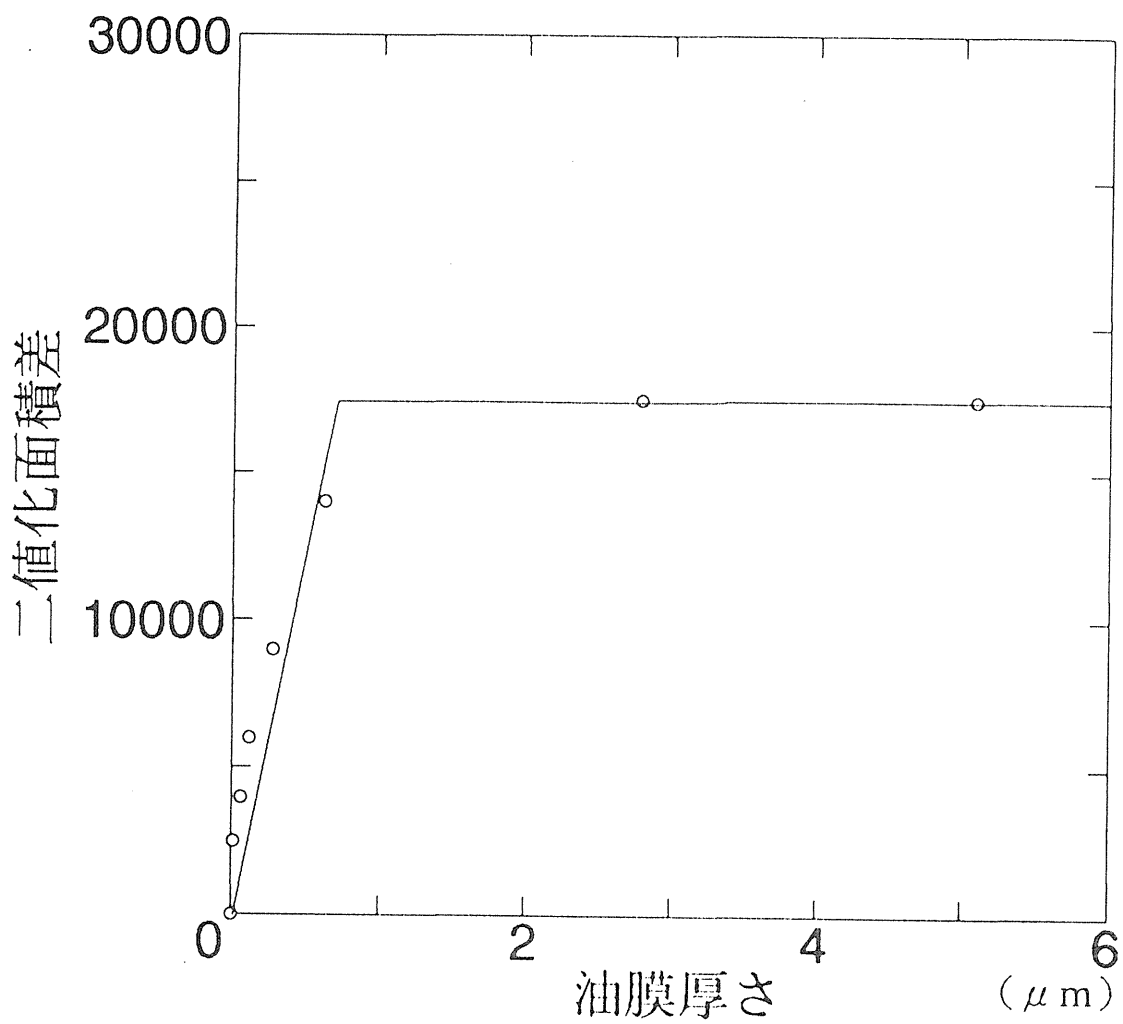


図 1 2 油膜厚さと二値化面積差

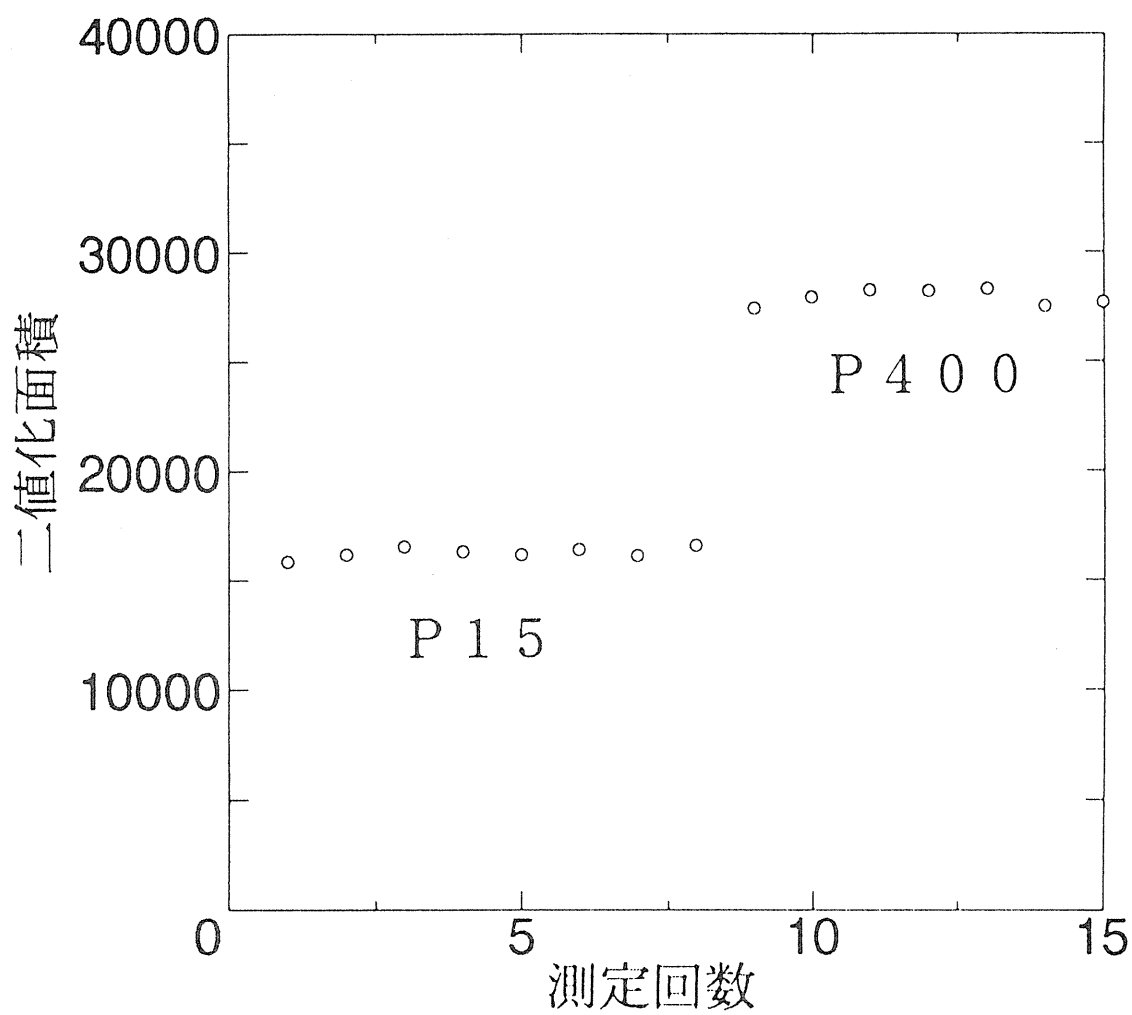


図 1 3 表面変化に対する追従性



イン測定中に潤滑油を変えることによる圧延材表面の変化に対する追従性を調べたのだが高い追従性を持つことを示された。

## 6. まとめ

本研究では、画像処理装置を用いた新しいレーザ散乱光による表面計測システムおよび評価方法を考慮し、その有効性を検討した。更に、本計測システムを用いてオンライン計測を行う際、問題となっていたシステムの高速化に対し、画像入出力ボードを高速処理可能なものにすること、また画像処理プログラムを高速なものに変更することにより、実験室レベルでのオンライン計測が可能なまでに成功した。

このことは、さらに、計測システムの各部分について、より高速処理可能なものに変更していくことによって、一層の高速化が望めることを示した。さらに、オンライン計測において問題となる、油膜の影響、振動の影響、表面変化への追従性に対し、これまでの実験より次のことが分かった。

- 1) 油膜がある場合は2値化面積を大きくする。
- 2) 圧延における通常の振動に対し、本計測システムは影響を受けない。
- 3) 材料表面の変化に対し、高い追従性を持つ。

## 文献

- 1) 鈴木、小豆島：平3年塑加講論、(1991)、385.
- 2) 小豆島他2名：塑性と加工、19(1978)、958.