

レーザースペックルセンサーを用いた塑性ひずみの測定

加藤 章*

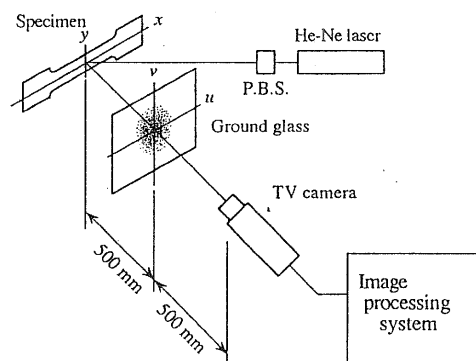
1. まえがき

粗面にレーザーを照射した場合に反射光の干渉によってスペックルが発生するが、これを用いて表面あらさあるいはひずみを測定する各種の方法がこれまでに報告されている。著者らは金属材料に静的な一軸引張り荷重を加えて塑性変形を与えた場合についてレーザースペックルパターンの変化を観測した。その結果、レーザースペックルの強度分布は塑性ひずみが大きくなるにつれて広がり、その間には一意的な関係があることを報告した⁽¹⁾⁽²⁾。また、スペックルの強度分布は試験片表面の断面曲線の統計的な周波数分布に明確に対応していることを明らかにした。塑性変形が大きくなるほどすべり線の密度が高くなることによって断面曲線の高周波成分の割合が多くなり、スペックルの強度分布が広がって来るものと考えられる。塑性変形による表面状態の変化とスペックルの強度分布との間に一意的な関係があることを利用すれば、スペックルの強度分布を観測することによって非接触の塑性ひずみの測定が可能になるものと考えられる。本研究ではこの方法にコンピュータによる画像処理を用いて測定の定量化および自動化を行なうための基礎的な研究を行なった。

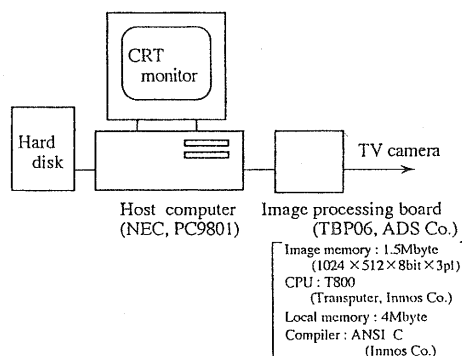
2. 実験方法

使用した試験片素材は JIS-SS330, SK-5 および SUS304 の三種類の鋼材である。それぞれの素材の化学成分を Table 1 に示す。試験片は厚さ 3.2 mm の平板試験片で、平行部の幅は 15 mm である。試験片表面は紙やすりで研磨した後、酸化アルミニウム粉末を用いてランダムな方向に磨くようにして、マクロ的な異方性をなくするとともに、どの試験片もほぼ同じ程度の表面あらさになるようにした。試験片の初期の表面あらさは 0.1 μ mRa である。この試験片について軸方向の引張りにより塑性変形を与えた後、レーザースペックルの観測を行なった。レーザーを照射する箇所は試験片の平行部のほぼ中央である。ここでは 1 本の試験片に対して小さい塑性ひずみから順に塑性ひずみを大きくしてレーザースペックルを観測するようにした。

レーザースペックル観測用の光学系は Fig. 1 (a) に示すとおりである。試験片表面に He-Ne レーザ (出力 5 mW, ビーム径約 1 mm) を照射し、試験片表面の反射光によるレーザースペックルパターンをスクリーンとして置かれたすりガラス上に形成する。ここで、スクリーン上の座標系を $u-v$ とする。スペックルパターンは CCD カメラを用いて撮像し、画像データとして画像処理システムに入力する。使用した



(a) Optical system



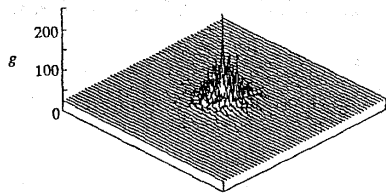
(b) Image processing system

Fig. 1 Configuration of experimental system

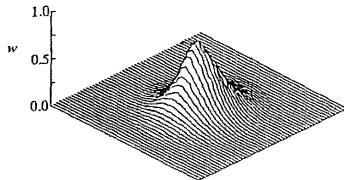
Table 1 Chemical composition of materials (wt. %)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
SS330	0.05	0.01	0.29	0.012	0.007	—	—	—
SK5	0.85	0.20	0.44	0.013	0.005	0.02	0.16	0.06
SUS304	0.05	0.51	1.21	0.021	0.004	8.25	18.12	—

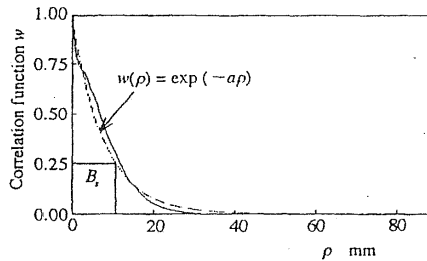
画像処理システムは Fig. 1 (b) に示したとおりで、パーソナルコンピュータに画像処理ボードを装着したものである。このボード上には画像メモリーと専用の 32 ビット CPU (トランスペュータ, Inmos Co.) およびメインメモリーが搭載さ



(a) Gray level distribution



(b) Correlation function



(c) Approximation with an exponential function

Fig. 2 Intensity distribution of the laser speckle

れており、画像処理のプログラムはすべてこのボード上で実行することができる。用いた画像の解像度は 512×512 ピクセルで、濃度階調は 256 レベルである。

3. スペックル強度分布の二次元的評価法

スペックルパターンの画像の明るさの強度分布の一例を Fig. 2 (a) に示す。この図は縦軸に画像の明るさをとってスペックルの強度分布を三次元的に表したものである。この図から各点の輝度の変動が非常に大きいことがわかる。そこで、本研究では、輝度分布を平滑化して、かつ分布の傾向の違いを明確にするために、次のような二次元的な相関関数を考えた。Fig. 3 に示すように、スペックル画像の輝度分布の重心位置を原点にとり、座標系を $i-j$ とおく。原点を中心とし、半径 r の円形のウィンドウを考える。このウィンドウを順に画面の左上から動かして、ウィンドウ内の輝度データと対応する点の輝度データとの間で積和を求め、次式のような正規化された相関関数 $w(h, k)$ を計算する。

$$w(h, k) = \frac{\sum_{j=-r}^r \sum_{i=-C}^C g(i, j)g(i+h, j+k)}{\sum_{j=-r}^r \sum_{i=-C}^C g(i, j)^2} \quad (1)$$

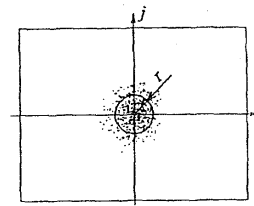
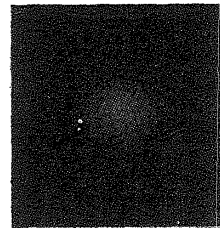
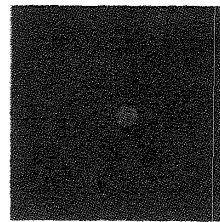


Fig. 3 Image of the laser speckle



(a) Whole image $g(i, j)$



(b) Window image $p(i, j)$

Fig. 4 Image plane

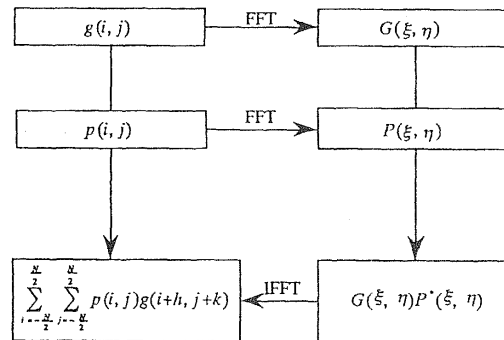


Fig. 5 Flow chart for calculation of the correlation function

ただし、 $C = \sqrt{r^2 - j^2}$ 、であり、また $g(i, j)$ は点 (i, j) における輝度を表す。ここで、式 (1) の分子の部分の計算をそのまま行くと非常に計算時間がかかるので、本研究では以下のようにフーリエ変換を用いて高速に計算する方法を用いた。

いま、スペックルの全画面の輝度分布 (Fig. 4 (a)) を表す関数を $g(i, j)$ 、半径 r の円形ウィンドウの内部だけ輝度を持ち、その外部ではすべて値が 0 になるような分布 (Fig. 4 (b)) を表す関数を $p(i, j)$ とすれば、式 (1) の分子の部分は次式で表される。

4. 塑性ひずみの大きさとスペckル強度分布の関係

$$q(h, k) = \sum_{i=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} \sum_{j=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} p(i, j) g(i+h, j+k) \quad (2)$$

ここに、 N は 1 画面の縦横の画素数で、ここでは 512 である。式(2)は $p(i, j)$ と $g(i, j)$ の離散化された相関関数を表すので、 $p(i, j)$ と $g(i, j)$ のフーリエ変換をそれぞれ $P(\xi, \eta)$ と $G(\xi, \eta)$ とすれば、相関定理より $q(h, k)$ のフーリエ変換は $G(\xi, \eta) P^*(\xi, \eta)$ で与えられる⁽³⁾。ただし、 $P^*(\xi, \eta)$ は $P(\xi, \eta)$ の共役関数である。すなわち、式(2)の相関関数は Fig. 5 に示す流れ図に従って求めることができる。 $g(i, j)$ と $p(i, j)$ のフーリエ変換 $G(\xi, \eta)$ および $P(\xi, \eta)$ を求め、それらのフーリエ変換を用いて対応する要素の積 $G(\xi, \eta) P^*(\xi, \eta)$ を計算した後、フーリエ逆変換を行えば求める相関関数、 $q(h, k)$ が得られることになる。遠回りな計算を行っているように見えるが、フーリエ変換については高速フーリエ変換 (FFT) の手法が確立されており、コンピュータを用いて非常に高速に計算することができるので、この方法により短時間に計算できるわけである。Fig. 4 (a) の輝度分布の場合、式(1)を用いて直接計算する場合には約 20 分かかるのに対して、フーリエ変換を用いれば、約 5 分で計算することができる。

いま、 $r = 20$ (ピクセル) として相関関数 $w(h, k)$ の分布を求めれば、Fig. 2 (b) に示すようになる。Fig. 2 (a) に比べて細かい変動がかなり平滑化されていることがわかる。ここで、この相関関数の分布は必ずしも重心に関して対称ではなく、少し方向性を持つが⁽⁴⁾、方向性はそれ程大きくないので、重心から半径方向の分布のみを考える。相関関数の分布を表す近似式として、半径方向 ρ に関する指数関数を用いる。

$$w(\rho) = \exp(-a\rho) \quad (3)$$

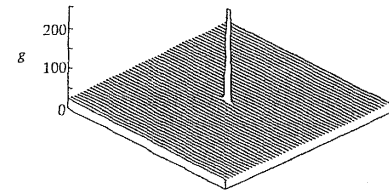
ここで、 ρ はスクリーン座標系の寸法で表すものとすれば、 $\rho^2 = A^2(h^2 + k^2)$ となる。ただし、 $A = 0.397$ (mm/pixel) である。近似式による計算値と Fig. 2 (b) のデータとの比較を Fig. 2 (c) に示したが、相関関数の分布と良く合っていることがわかる。この分布の広がりを表すパラメータとして $w(\rho)$ の値が 1/4 になるときの ρ を用いれば、次式で表わされる。

$$B_s = \frac{-\ln(0.25)}{a} = \frac{1.3863}{a} \quad (4)$$

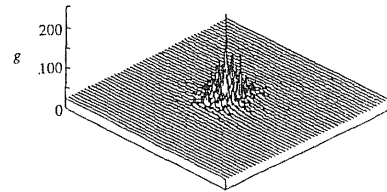
本研究では、この 1/4 価幅 B_s を用いてスペckルの強度分布の広がりを表すことにする。

試験片素材として SS330 を用いた場合の各塑性ひずみに対するレーザスペckルの強度分布の一例を Fig. 6 に示す。塑性ひずみが大きくなるにつれて、スペckルの強度分布が広がるのがわかる。相関関数の分布と塑性ひずみとの関係について示せば、Fig. 7 のようになる。塑性ひずみによるスペckルの強度分布の違いが明らかである。スペckルの強度分布の広がりを表すパラメータ B_s と塑性ひずみの大きさ ε_p との関係を図 8 (a) に示す。

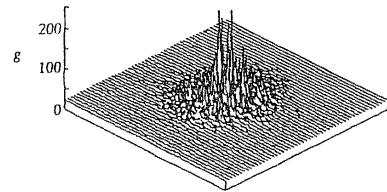
ここで、結晶粒径の違いによる影響を調べるため、焼なまし温度を変えて結晶粒径の異なる試験片を作成して実験



(a) $\varepsilon_p = 0\%$



(b) $\varepsilon_p = 3.6\%$



(c) $\varepsilon_p = 7.3\%$

Fig. 6 Light intensity distribution of the laser speckle for different plastic strains

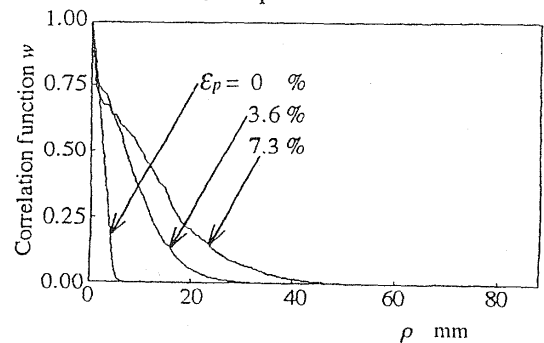
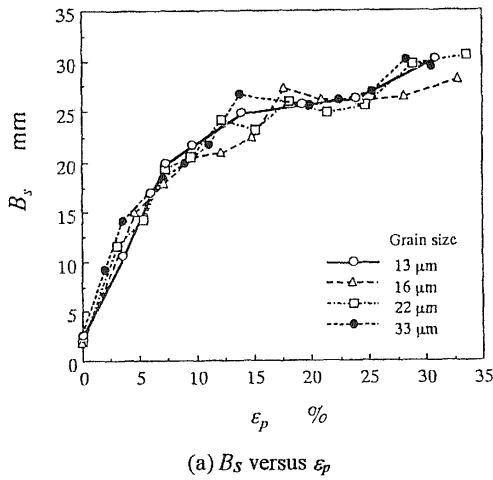


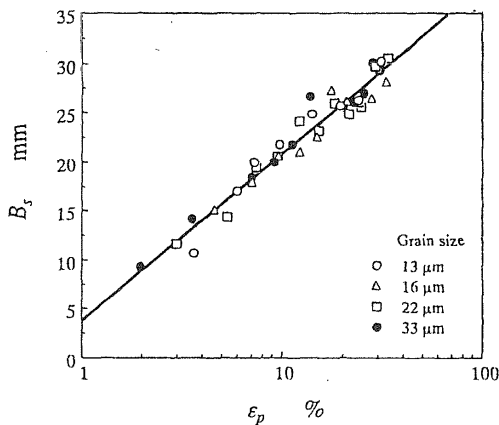
Fig. 7 Comparison of the correlation function

Table 2 Grain size

Annealing temperature (°C)	Grain size (μm)
Non-annealing	13
800	16
870	22
950	33



(a) B_s versus ϵ_p



(b) B_s versus ϵ_p (log scale)

Fig. 8 Relationship between width of laser speckle pattern and plastic strain (SS330)

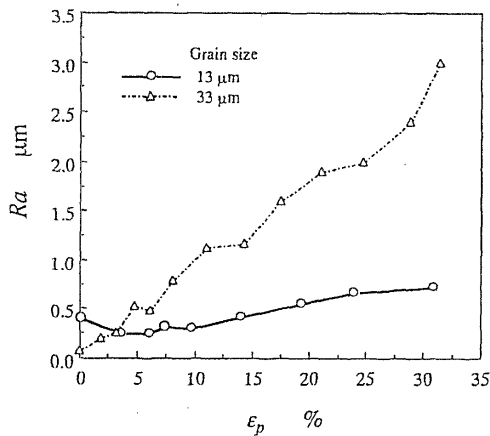


Fig. 9 R_a versus ϵ_p (SS330)

を行った。焼なまし温度と平均結晶粒径を Table 2 に示す。それぞれの温度の保持時間は 30 分で、その後炉冷を行った。これらの試験片に対して同様に塑性変形を与えてレーザスペckルの強度分布を観測した。Fig. 8 (a) に結晶粒径の異なる場合について B_s と ϵ_p との関係を示してあるが、結晶粒径の違いによるこれらの間の関係の違いは認められない。実験結果のばらつきの範囲内でほぼ合っていると見える。また、Fig. 8 (b) は横軸を対数で表したものであるが、両者の間にはほぼ直線関係にあることがわかる。すなわち、次式

$$B_s = D' \log(\epsilon_p) + E' \quad (5)$$

が成り立つ。これを書き換えれば、次式

$$\epsilon_p = E \exp(DB_s) \quad (6)$$

のようになる。ただし、 $D = \ln(10)/D'$ 、 $E = 10^{-(E'/D')}$ である。実験結果から最小二乗法により係数 D 、 E の値を求めれば、それぞれ $D = 0.135$ 、 $E = 5.88 \times 10^{-3}$ となる。この係数値による直線を Fig. 8 (b) に示したが、実験結果に良く合っていることがわかる。結晶粒径の違いによらず B_s と ϵ_p との関係は式 (6) で表されると見える。

また、Fig. 9 は結晶粒径が最も小さい場合と最も大きい場合に対する試験片表面の中心線平均粗さ R_a と塑性ひずみとの関係を示したものである。結晶粒径が小さい場合には R_a の変化があまり大きくないのに対して、結晶粒径が大きい場合には塑性ひずみに対する R_a の増加が非常に大きいことがわかる。塑性ひずみの大きさと表面粗さとの関係は結晶粒径の大きさによって大きく異なるのに対して、レーザスペckルの強度分布との関係は結晶粒径の大きさの影響をほとんど受けないと見える。

同様に SK-5 および SUS304 の種類の異なる鋼材に対しても実験を行ってみたが、 B_s と ϵ_p との関係については鋼材の種類による違いはほとんど認められず、Fig. 8 (b) とほぼ同じ関係を示した。ここで、すでに報告した (1) 同じ材質 (SS330) の三本の試験片による結果⁽²⁾、そして今回の (2) 結晶粒径の異なる場合、および (3) 異なる材質の試験片を用いた場合に対して得られた結果から式 (6) の係数 D および E の値を求め、それらから求めた B_s と ϵ_p との関係を図 10 に示したが、これらの三本の直線はかなり良く合っていることがわかる。塑性ひずみがかなり大きい範囲とかなり

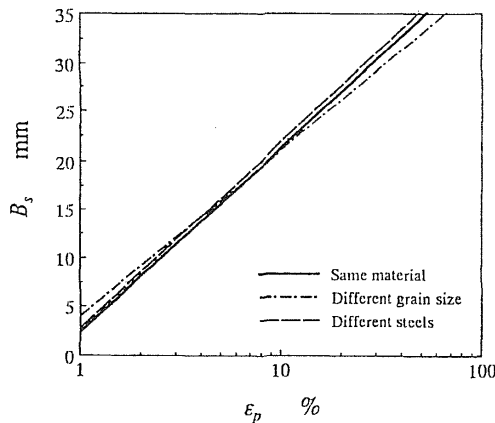


Fig. 10 Comparison of $B_s - \epsilon_p$ relation for different steels

小さい範囲ではわずかに違いがあるようであるが、この範囲では実験データが少なかったことを考えれば、これらの三つの場合において得られた実験結果では B_s と ϵ_p との間にはほぼ同じ関係が成り立つものといえる。すべての実験結果から係数 D および E の値を求めれば、 $D = 0.128$ 、 $E = 6.42 \times 10^{-3}$ となる。すなわち、結晶粒径が異なる場合についても、鋼材の種類が異なる場合についても、これらの係数を用いてレーザスペckルの強度分布を表すパラメータ B_s を求めれば、式 (6) により測定箇所の塑性ひずみを推定できるものと考えられる。

5. むすび

本研究では、鋼材試験片に一軸方向の静的引張りによって塑性ひずみを与えた場合のレーザスペckル強度分布の変化について調べてみた。スペckルの強度分布の二次元の相関関数を求め、これの半径方向の分布を指数関数近似して 1/4 価幅をとることによってスペckルの広がり进行评估する方法を用いたが、この方法により分布の広がりを精度良く評価できることがわかった。

熱処理によって結晶粒径を変えた場合、および三種類の異なる鋼材を用いて、塑性ひずみの大きさとレーザスペckルの強度分布との関係に対する組織の影響を調べた。結

晶粒径が異なる場合、塑性ひずみと表面あらさの関係は結晶粒径に大きく影響されるのに対してレーザスペckルの強度分布と塑性ひずみの間にはほぼ同じ関係が成り立つことがわかった。また鋼材の種類が異なる場合についても、レーザスペckルの強度分布と塑性ひずみの大きさの間にはほぼ同じ関係が成り立つことが明らかになった。そして、これらの関係は簡単な関係式で表されることがわかった。この関係式を較正式として用いることにより異なる鋼材に対しても同じ式を用いてレーザスペckルの広がりを表すパラメータから塑性ひずみの推定を行なうことができるものと考えられる。このことは実際にこの方法を使用する上で非常に有効であるといえる。

以上の結果からレーザスペckルを用いた塑性ひずみ測定を行なえる可能性があるといえる。この方法の利点は、まず非接触測定が可能であり、その場測定が可能であることである。また、塑性ひずみの大きさがスペckルパターンの変化により可視化出来ること、そしてその画像はコンピュータによる画像処理によって定量化、測定の自動化が可能なことである。測定精度については、非常に高精度ということは期待できないが、以上のような方法により非接触で簡単に塑性ひずみが測定できれば、実用上非常に便利であると考えられる。

本研究は平成 4 年度の天田金属加工機械技術振興財団の研究助成および平成 5 年度の文部省科学研究費 (一般研究 (C)) によるものであることを記して謝意を表す。

文 献

- (1) 加藤章, 川村満夫, 中谷一郎, 塑性ひずみを与えた炭素鋼材のレーザスペckル強度と表面性状の関係, 日本機械学会講演論文集, No. 920-72, (1992), 19.
- (2) 加藤章, 川村満夫, 中谷一郎, レーザスペckル法に画像処理を援用した金属材料の損傷の検出 (第 2 報, 表面性状とレーザスペckル輝度分布の関係), 日本機械学会論文集, A 編 59-561, (1993), 1401.
- (3) Brigham E. O., The Fast Fourier Transform, (1974), Prentice-Hall; 宮川洋, 今井秀樹 訳, 高速フーリエ変換 (1979), 科学技術出版.
- (4) 加藤章, 川村満夫, レーザスペckルの強度分布を用いた鋼材の塑性ひずみの測定, 材料, 43-489, (1994), 696.