

レーザスペckル法に画像処理を援用した塑性ひずみの非接触測定システムの開発

中部大学 工学部 機械工学科

教授 加藤 章

(平成4年度研究開発助成 AF-92002)

1. まえがき

粗面にレーザを照射した場合に反射光の干渉によってスペckルが発生するが、これを用いて表面あか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の荷重を加えて塑性変形を与えた場合についてレーザスペckルパターンの強度分布の変化を観測した。その結果、レーザスペck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ckルの強度分布は試験片表面の断面曲線の周波数の統計的な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ck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ckルの強度分布との間に一意的な関係があることを利用して、スペck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。

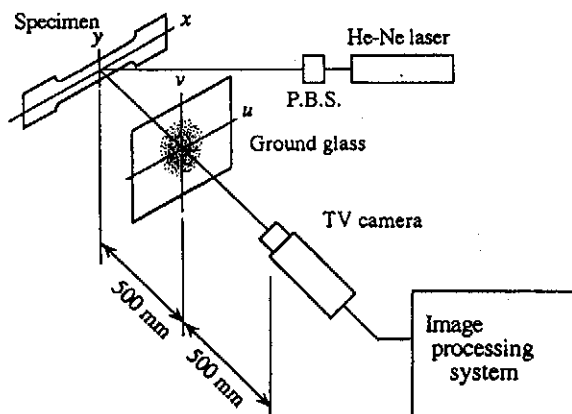
2. 実験方法

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表1に示す。試験片は厚さ3.2mm、幅15mmの平板試験片である。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かさになるようにした。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、レーザスペckルの観測を行なった。レーザ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スペckルを観測するようにした。

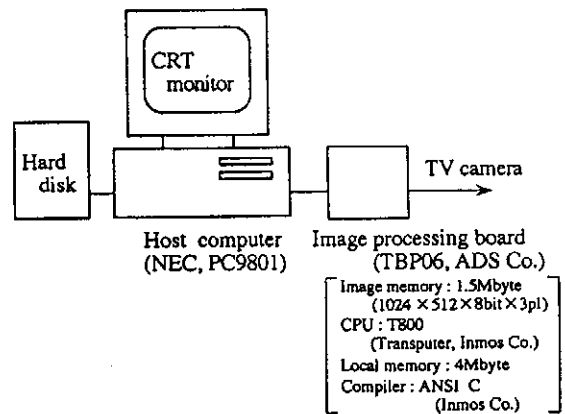
レーザスペckル観測用の光学系は図1(a)に示すとおりである。試験片表面にHe-Neレーザ(出力5mW、ビー

表1 化学成分 (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	-



(a) 光学系



(b) 画像処理システム

図1 実験装置

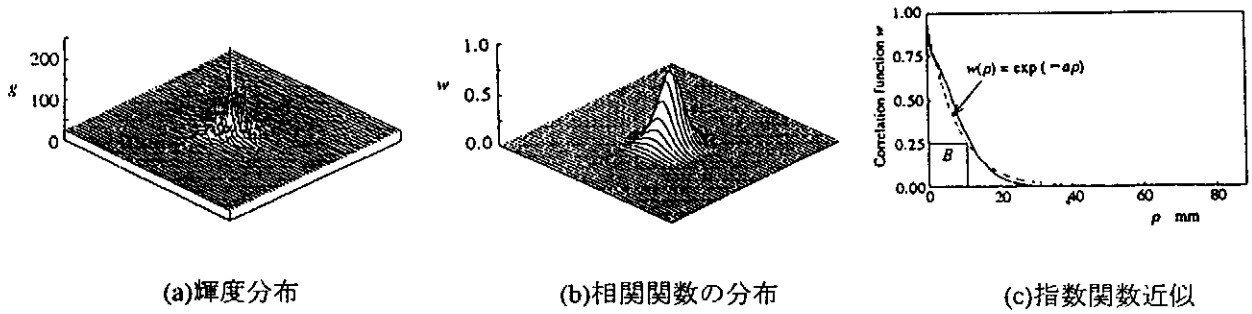


図2 レーザスペckルの強度分布の評価法

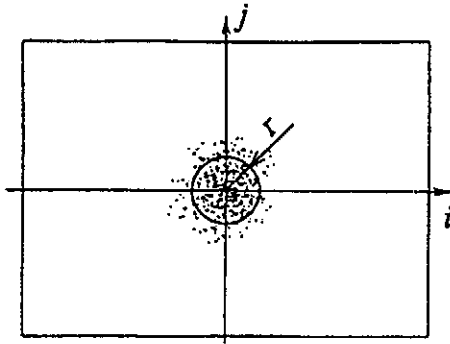


図3 スペckル画像

ム径約1mm)を照射し、試験片表面の反射光によるレーザスペck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ck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。使用した画像処理システムは図1 (b) に示したものである。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 (トランスピュータ) およびメインメモリーが搭載されており、画像処理のプログラムはすべてこのボード上で実行される。用いた解像度は 512×512 ピクセルで、濃度階調は256レベルである。

3. スペckル強度分布の二次元的評価法

スペckルの強度分布の一例を図2 (a) に示す。この図は縦軸に画像の明るさをとってスペck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る。図3に示すように、スペck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

表2 平均結晶粒径

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

数 $w(h, k)$ を計算する。

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

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、本研究ではフーリエ変換を用いて高速に計算する方法を用いた⁽⁴⁾。

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、図2 (b) に示すようになる。図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⁽³⁾、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わす近似式として、半径方向 P に関する指数関数を用いる。

$$w(\rho) = \exp(-a\rho) \quad (2)$$

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図2 (b) のデータとの比較を図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わすパラメー

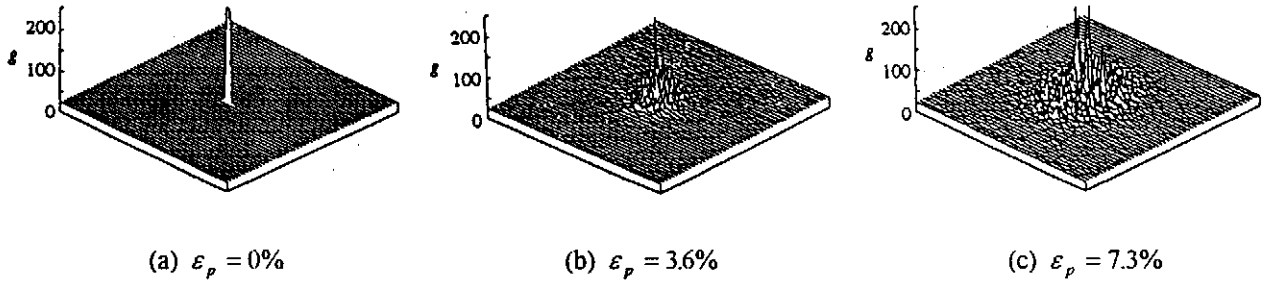


図4 レーザスペckルの強度分布

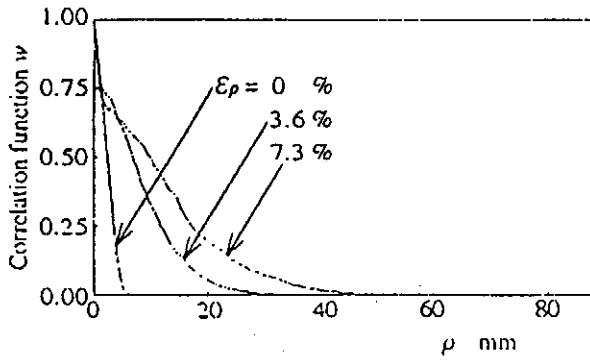


図5 二次元の相関関数の分布

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。

$$B_s = \frac{-\ln(0.25)}{a} = \frac{1.3863}{a} \quad (3)$$

このパラメータ B_s を用いてレーザスペckルの強度分布の広がりを表わすことにする。

4. 塑性ひずみの大きさとスペckル強度分布の関係

試験片素材としてSS330を用い、焼き鈍し温度を変えて結晶粒径の異なる試験片を作成した。焼き鈍し温度と平均結晶粒径を表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一軸引張りによって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。一例として、焼き鈍しを行っていない試験片についてレーザスペckルの強度分布を図4に示す。塑性ひずみが大きくなるにつれて、スペckルの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、図5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。

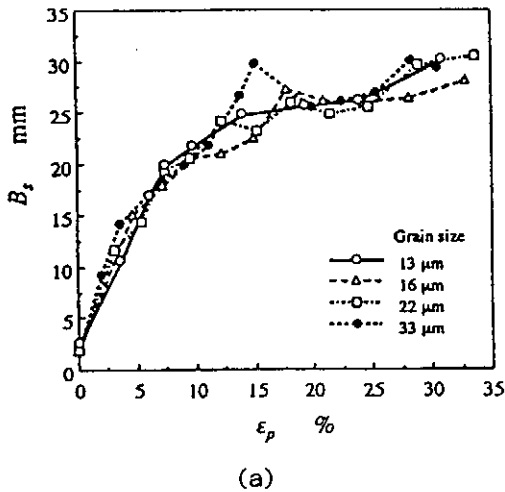
スペckルの強度の広がりを表わすパラメータ B_s と塑性ひずみの大きさ ϵ_p との関係を図6 (a) に示す。結晶粒径の異なる場合について B_s と ϵ_p との関係を示してあるが、結晶粒径の違いによるこれらの間の関係の違いは認められない。実験結果のばらつきの範囲内でほぼ合っているといえる。また、図6 (b) は横軸を対数で表したものであるが、両者の間にはほぼ直線関係にあることがわかる。すなわち、次式

$$B_s = D' \log(\epsilon_p) + E' \quad (4)$$

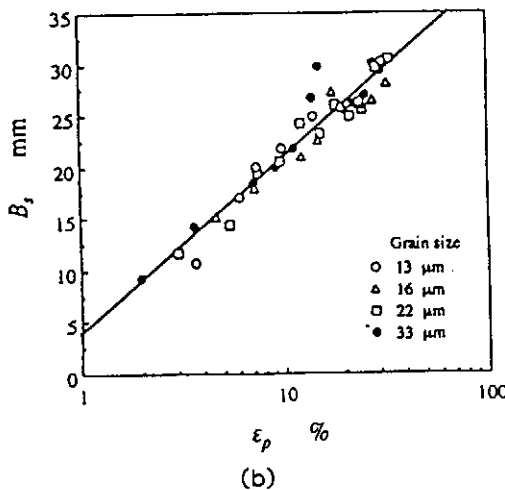
が成り立つ。これを書き換えれば、次式

$$\epsilon_p = E \exp(DB_s) \quad (5)$$

のようになる。ただし、 $D = \ln(10) / D'$ 、 $E = 10^{-(E' D')}$



(a)



(b)

図6 B_s と ϵ_p との関係

である。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図6 (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 (5) で表されるといえる。

また、図7は結晶粒径が異なる二本の試験片について試験片表面の中心線平均粗さ Ra 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 Ra 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 Ra 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、レーザスペック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いえる。図8は結晶粒径が異なる場合についてほぼ同じ大きさの塑性ひずみを与えた場合の断面曲線を示したものである。断面曲線の変動のピッチは粒径の小さい場合に小さく、粒径の大きい場合に大きくなり、これはほぼ結晶粒径に対応していることがわかる。粒径が小さい場合には変動のピッチが小さく、表面あらさが小さくなり、粒

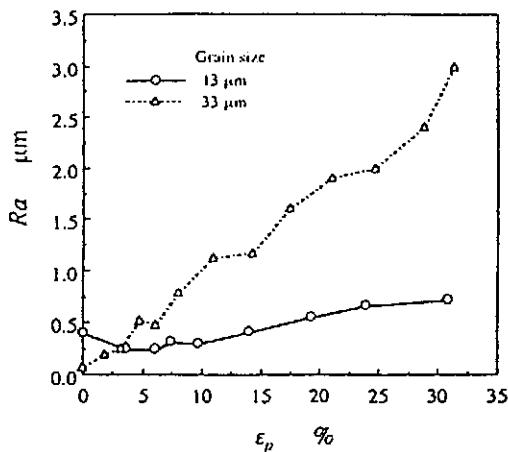
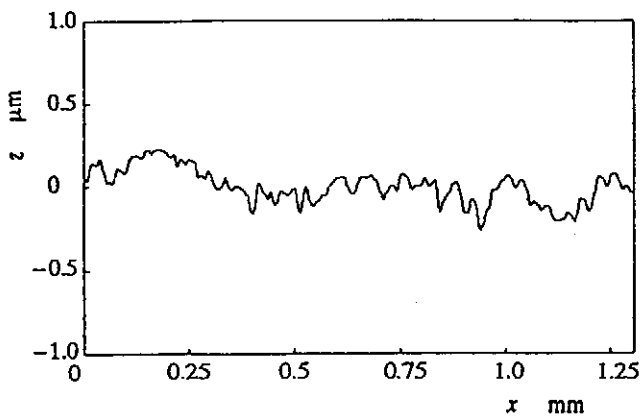
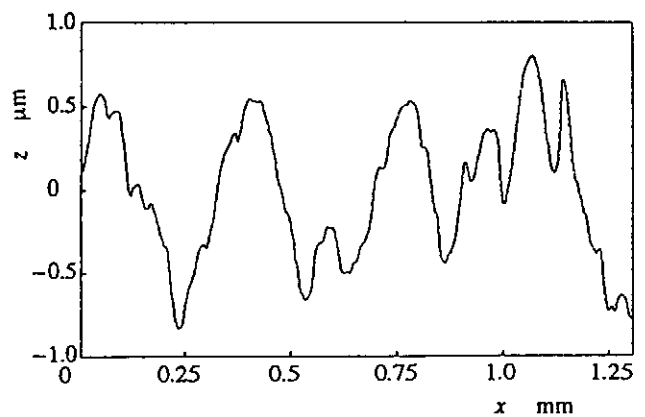


図7 Ra と ϵ_p との関係



(a) 結晶粒径 = $13 \mu m$ ($\epsilon_p = 10.9\%$)



(b) 結晶粒径 = $33 \mu m$ ($\epsilon_p = 11.1\%$)

図8 結晶粒径の異なる場合の断面曲線

径が大きい場合には変動のピッチが大きく表面あらさも大きくなることからわかる。表面あらさ計によって求めた断面曲線では結晶粒単位の表面の凹凸は検出できているが、細かいすべり線による表面の凹凸を検出できていないものと考えられる。表面あらさは結晶粒単位の大きなうねりによって決まるが、スペックルの広がりはずべり線の間隔のようなさらに小さい領域の変動によって影響を受けており、それが結晶粒径によってスペックルの広がりや塑性ひずみとの関係に違いが現われなかった理由と考えられる。

図9は三種類の異なる鋼材 JIS・SS330, SK-5, SUS304 に対して得られた実験結果から B_s と ϵ_p との関係を示したものである。鋼材の種類によるこれらの間の関係の違いは認められない。この場合についても実験結果のばらつきの範囲内ではほぼ合っていると考えられる。式 (5) の係数 D および E を求めれば、それぞれ $D = 0.120, E = 6.96 \times 10^{-3}$ となる。

ここで、前報において報告した (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の結果の三つの場合について得られた式 (5) の係数 D および E の値を用いて求めた 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、この範囲では実験結果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、レーザスペックルの強度分布を表すパラメータ B_s を求めれば、これらの係数を用いて式 (5) により測定箇所の変形ひずみを推定できるものと考えられる。

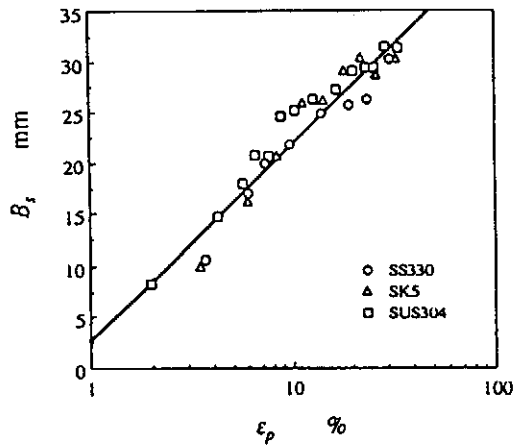


図9 B_s と $\log(\epsilon_p)$ との関係

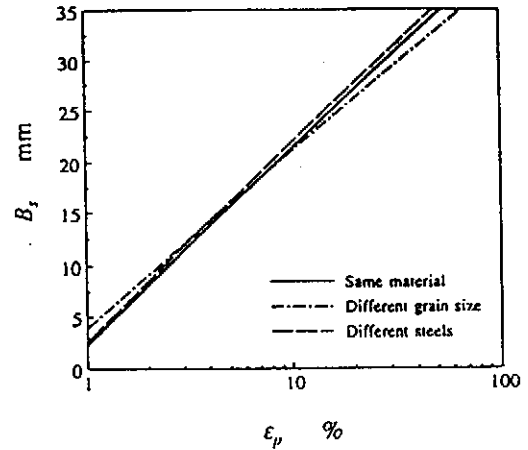


図10 B_s と ϵ_p との関係の比較

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ルの広がりを経験する方法を用いたが、この方法により分布の広がりを経験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の関係は結晶粒径の違いによらず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との間にはほぼ同じ関係が成り立つことがわかった。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ルの広がりを経験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、以上のような利点をもつ簡単な測定法として便利であると考えられる。

謝 辞

本研究に協力された当時の中部大学大学院生、川村満夫、伊藤孝治の両君に感謝する。また、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。さらに、試験片素材を提供頂いた中野ハガネ（株）（愛知県名古屋市）に感謝する。

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) 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.
- (4) 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.