レーザースペckルによるひずみ測定法の溶接への適用*

—基本的な評価とひずみ速度の影響の検討—

村松 由樹**, 黒田 聖治**

Application of the Laser Speckle Method to Strain Measurement
in the Welding Process*

—Basic Evaluation, and Examination of Effects of Strain Rate—

by Yoshiki Muramatsu** and Seiji Kuroda**

Laser speckles can be used to measure surface strains without contact because they deform with a specific relation to the deformation of the surface illuminated by a laser beam. If it can be applied to the measurement of dynamic strains at high temperature as encountered in welding processes, it is hoped to help clarify various problems such as high-temperature cracking. However, several problems such as disturbances due to the intense emission from the welding arc, oxidation of measuring surface, and fluctuation of the surrounding atmosphere due to convection must be overcome.

In this study, several preliminary experiments were carried out in order to examine the applicability of the laser speckle method to welding:

- 1) Effects of several measurement parameters on the accuracy of the strain measurement.
- 2) Measurement of dynamic strains on the rear surface in TIG welding of stainless and mild steel.

It was found that a larger laser spot on the measuring surface gives better accuracy and stability in the measurement for the cost of spatial resolution. In the dynamic measurement, it was difficult to obtain reliable strain values when the strain rate was higher than $1 \times 10^{-3}/\text{sec}$. With strain rates below this value, reasonable agreements were obtained between the strain values measured by the laser speckle method and those by strain gauges. In the welding process, such a high strain rate occurs during the period right after the ignition of arc or when the arc is passing over the measuring point. It is concluded that it is necessary to speed up the sampling rate of the current speckle recording apparatus in order to widen the applicability of the method. Since some other noise factors such as out-of-plane displacement are also most vigorous during such periods, it will become necessary to take those factors into account too.

Key Words: Laser, Speckle, Measurement, Strain, Strain rate, Sensor, GTA welding, Tensile tests

1. 緒 言

レーザースペckルを用いたひずみ測定法は山口¹⁾によって開発されたもので、物体表面のひずみを非接触で高精度に測定することができる。これは物体表面で散乱されたレーザ光の相互干渉によって観察面上に生じるランダムな斑紋(スペckル)が物体表面の移動、変形に従って一定の関係で変化すること²⁾に基づいている。

本方法を溶接部のひずみ測定に応用できれば、従来数値計算によって推測するしかなかった高温部のひずみが実測され、溶接部の高温割れなど材料の高温域における欠陥発生に関する情報を適確に得ることが期待される。

しかし溶接部は広い温度範囲に渡り急熱・急冷によって急激な動的ひずみを受けるため、ひずみ測定にはこれに追従するだけの応答性が要求される。また、金属表面が高温で大気中に露出されるので、酸化や熱対流による雰囲気揺らぎなどの問題が予想され、シールドガスの流れや高輝度のアーク光による干渉も考えられる。

しかし、最近のオプトエレクトロニクスの進歩によっ

てスペckルパターンの測定と解析の高速化³⁾が可能となっている。また、高温での準静的なひずみ測定については、大気中で573 K程度まで⁴⁾、真空中では約873 Kまでの測定例⁵⁾があり、先に述べた問題を解決すれば溶接部への適用の可能性があると考えられる。

本研究では、溶接部にレーザースペckル法を適用するための基礎として、

(1) 測定条件がレーザースペckル法の精度に与える影響を静的な引張試験によって検討し、

(2) 鋼板にTIGアーク加熱した場合の裏面での動的ひずみの測定を行い、今後解決すべき問題について考察した。

2. レーザースペckル法の概略¹⁾²⁾

Fig. 1にレーザースペckルによるひずみ測定の原理を示す。図の配置はx方向のひずみ測定である。y方向の測定ではセンサーの素子の並び(図のセンサーの長手方向)がYZ面内になるようにセンサーと試験片の位置関係を90°変える。スペckルを一次元のイメージセンサーで測定すると、ランダムな明暗に対応した光量分布の波形が得られる。このスペckルパターンは物体の表面が収縮すれば膨張、逆に表面が膨張すれば収縮するという逆数関係にあるが、物体の剛体変位によっても移動す

*原稿受付 平成3年5月16日 平成3年度春季全国大会で発表

**正 員 金属材料技術研究所 Member, National Research Institute for Metals

Fig. 1 Schematic illustration of the laser speckle strain gauge.

るのでひずみによるパターンの変化だけを取り出す必要がある。そこで測定箇所に対して対称に2個のイメージセンサーを配し、それぞれのセンサー上での変形前後のスペックルパターンの移動量 $A_x(\theta_0)$, $A_x(-\theta_0)$ を測定し、両者の差 ΔA_x を求める。今、センサーと物体の距離を L_0 、ねらい角を θ_0 、縦ひずみを ε_x とすると

$$\Delta A_x = A_x(\theta_0) - A_x(-\theta_0) \\ = -2L_0\varepsilon_x \tan \theta_0 - 2a_z \sin \theta_0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

のような関係がある。 a_z は物体面に垂直方向の変位である。したがって

$$\varepsilon_x = -\Delta A_x / 2L_0 \tan \theta_0 - (\cos \theta_0 / L_0) a_z \quad \dots\dots\dots(2)$$

そこで ΔA_x から縦ひずみを求めるには a_z が無視できる程小さいか、そうでなければ何らかの方法で a_z を測定して補正してやればよい。 A_x は変形前後の波形の相互相関関数が最大値（ピーク値）を示す位置（ずれ）と定義できるから、センサーの出力を一次元の行列として次のように求めることができる。

$$C_{12}(j) = 1/N \cdot \sum_{i=1}^N S_1(i) S_2(i+j) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$A_x = j_0 \cdot p \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで $C_{12}(j)$ は相互相関関数、 $S_1(i)$ および $S_2(i+j)$ は変形前後のセンサーの出力信号、 N は素子数、 j_0 はピーク値、そして p はセンサーのピッチである。

3. 実験方法

Fig. 2 (a)-(c) に測定の概要と試験片の寸法・形状を示す。イメージセンサーによって測定された強度分布はデジタルオシロを介してパソコンに読込んだ。読込んだ後のデータ処理は大型コンピュータで行なった。

静的引張り試験には1mm厚のAl板、動的ひずみの測定には4mm厚のSUS304および軟鋼板(SM41)を用いた。本研究はレーザースペckル法の適用性の検討が目的のため、鋼材の残留応力除去のための熱処理は行っていない。

静的ひずみ測定は引張り用治具に取り付けた試験片の中央にレーザー光を照射し、同じ箇所（裏側）に貼付したひずみゲージの読みを見ながら 5×10^{-5} ずつひずみを与え、そのつど強度分布を読取ってひずみに換算し、ゲージによる値と比較した。

動的ひずみ測定は図のように試験片の裏面にレーザー光を照射し、その箇所のひずみ変化を測定した。熱源にはTIGアークを用い、測定点の直上を通過させる移動熱

Fig. 2 (a) Dimensions of the test specimen used in the tensile test. (b) Experimental arrangement for the dynamic strain measurement. (c) Dimensions of the test specimen for the dynamic strain measurement.

Table 1 Experimental conditions for dynamic strain measurement.

Welding current	: 100 A
Arc Voltage	: 9.2 V
Welding speed	: 2 mm/sec
Shielding gas	: 15 l/min (Ar)
Sampling interval	: 0.35 sec
Direction in sensing (θ)	: 45 deg.
Distance between measuring point and sensor	: 560 mm

Table 2 Specifications of lasers.

	He-Ne	Ar
Beam diameter (Exit) (mm ϕ)	: 0.8	1.4
Divergent angle (mrad)	: 1.0	0.5
Distance from source to specimen (mm)	: 920	1530
Spot diameter (mm ϕ)	: 1.7	2.2
Laser power (W)	: 0.005	0.03 ~ 0.05
Wavelength (nm)	: 632.8	514.5

源ならびに測定点から所定距離(10 mm~60 mm)離れた位置に静止熱源を設定した。図中に示す方向をxおよびy方向とした。アーク電流・電圧はそれぞれ100 A, 9.2 V一定とした。熱源移動速度は2 mm/secとし、測定点をはさんで100 mm長に熱を与えた。静止熱源のアーク持続時間は10 secとした。なお、試験片の裏面にレーザー光を照射したのはアーク光とシールドガスの影響を避けるとともに熱による対流の影響も最小限に抑えるためである。

Table 1に実験条件を示す。イメージセンサーは2048素子(ピッチ14 μm)のものの中央1000素子分を波形の読込みに用いた。 $L_0=560\text{ mm}$, $\theta_0=45^\circ$ とし、式(2)および(4)で $a_z=0$, $j_0=1$ とすればひずみ測定分解能は 1.25×10^{-5} となる。波形のパコンへの読込み間隔は0.35 sec/回としたが、これは著者が使用した装置で可能な最高の速度である。また読込み回数はパコン本体のメモリー容量と読込み間隔の関係で左右のセンサーによる二本の波形を一画面として、一回の実験で31画面が限度であった。

Table 2に用いたレーザーの仕様を示す。表中のスポット径は動的ひずみ測定の場合である。光源には移動熱源の場合のみArレーザーを用い、他はすべて取り扱いに便利な出力0.005 WのHe-Neレーザーを用いた。これは移動熱源ではアークが測定箇所近づいたときの試験片の赤熱部分波長域とHe-Neレーザーの波長が重なっているため、その影響をHe-Neレーザー用の干渉フィルターではカットできないためと、測定箇所の酸化皮膜形成による反射能の低下を補うのにレーザーのパワーが必要ためである。

なお動的ひずみ測定の場合、相互相関関数の計算は一回毎に基準をずらして、ある瞬間に取込んだ波形とその一回前に取り込んだ波形を用いて行なった。

4. 実験結果および考察

4.1 測定条件のひずみ測定結果におよぼす影響

測定面上でのレーザービームの径が測定精度に与える影響について検討するため、ビーム径を凸レンズを用いて変化させた。Fig. 3(a), (b)は 1×10^{-3} までの範囲の、スペックル法によるひずみと接着型ゲージによる値との比較で、(a)および(b)は試験片表面でのビームのスポット径がそれぞれ約1 mmおよび5 mmの場合である。ここではひずみが 1×10^{-3} まで約 5×10^{-5} 毎に測定した後、除荷し測定箇所をエメリーでこすって表面状態を変化させて5回測定を繰り返した。径1 mmの場合、表面性状が測定精度に若干影響しているが、両者はほぼ対応がとれている。ビームのスポット径を大きくするとスペックルは広い範囲の情報を含むので精度は向上するが、ひずみ測定の空間分解能は低下する。

次に変形前後の二画面でどの程度大きなひずみまで追従できるかを上述の実験データを用いて調べた。実験では一回の引張り試験について20画面のデータを得たが、その内の任意の二画面のスペックルについて、相関ピーク値よりひずみを算出してゲージの読みと比較することができる。スペックル法とゲージによる測定値の差を誤差と定義して、測定したデータの度数分布、および誤差の二乗平均の平方根と相関ピーク値およびスペックル法で得たひずみ量(測定値)の関係をスポット径1 mmの

Fig. 3 Comparison between the strains measured by the laser speckle method and those by a strain gauge.

Table 3 (a) Frequency distribution of experimental points as a function of the max. cross correlation and measured strain, and (b) the corresponding distribution of RMS errors.

Analysis based on speckle strain Spot dia.=1mm										
(a) Number of data n										
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
100	0	0	0	0	0	0	2	2	6	108
200	0	0	1	0	1	3	8	8	33	88
300	0	0	0	1	9	4	6	19	60	9
400	0	0	0	3	3	4	8	40	11	1
500	0	0	0	2	1	2	16	5	1	0
600	0	0	0	0	1	2	4	0	0	0
700	0	0	0	0	0	1	4	0	0	0
800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
900	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1000	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
OVER	0	0	6	56	36	6	2	0	0	0
(b) RMS error (e _{rms})										
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
100	*	*	*	*	*	*	23	20	22	15
200	*	*	*	*	*	36	20	35	28	20
300	*	*	*	*	42	55	36	52	33	42
400	*	*	35	88	67	52	60	65	*	*
500	*	*	90	*	31	48	44	*	*	*
600	*	*	*	*	96	50	*	*	*	*
700	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
800	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
900	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
1000	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
OVER	*	274.4	243.3	292.0	273.5	323.7	*	*	*	*

場合について Table 3(a)および(b)に示す。これはスペックル法を単独で使用する時の誤差の予測にもなる。

(a), (b)より1回の測定で読込んだひずみ量が 4×10^{-4} 以下のデータは相関値が0.7以上に集中し、測定誤差は 6×10^{-5} 以内に納まることがわかる。相関値が0.7未満のデータはひずみ量のばらつきはあるが 1×10^{-3} 以上に特が多い。また、これとは別にスポット径3.5 mmではひずみ 4×10^{-4} 以下、相関0.6以上で誤差は 3×10^{-5} 以内に納まった。

本実験ではセンサーを二個用いて試験片の面内の剛体変位を打ち消している。しかし面内の変位がある限度を超えるとスペックルパターンの変化が大きくなり、相関が低下し、したがって剛体変位を打ち消することができなくなることが予想される。そこで、ビームに正対して置かれた試料をビームに垂直方向に平行移動させてその影響を調べた。試料表面でのビームのスポット径は1 mmと5 mmとした。Fig. 4にその結果を示す。図(a)は試料の剛体移動量と相関のピーク値の関係、(b)は移動量と相関のピーク値のずれ(センサーの素子のビット数で表現)の関係で本来0であるべきものである。この実験はセンサーと試料の距離： $L_0 = 660$ mm、ねらい角： $\theta_0 = 30^\circ$ であり、ずれ1ビット当たり 1.8×10^{-5} のひずみに相当する。(a)から、スポット径1 mmの場合は移動量が0.5 mm以上で相関が失われてしまうが、5 mmの場合は0.9 mmまでである程度相関が保たれていることがわかる。そして(b)より移動量が0.2 mmあるとスポット径1 mmの場合は最大5ビット(9×10^{-5} のひずみ)の誤差が生じるが、5 mmの場合は1ビットとほとんど問題がないことがわかる。そして径1 mmの場合、誤差を 9×10^{-5} 以内に抑えようとすれば相関のピーク値を0.8以上に保つ必要があることもわかる。

4.2 動的ひずみ測定

4.2.1 静止熱源の場合のひずみ測定

Fig. 5にSUS304、熱源と測定点の距離30 mmのときの静止熱源による相関のピーク値とひずみ ϵ_x の時間的変化の例を示す。図に見られるようにアーク起動時に相関の落ち込みがあり、それとともなってひずみの不連続が生じている。この落ち込みはx方向の方がy方向より大きく、また熱源と測定点の距離が近い程大きい。これ

Fig. 5 Change in the maximum value of the correlation function and the measured strain after TIG arc start.

Fig. 4 Effects of the in-plane motion of the measuring surface on the maximum value of the correlation function and the apparent deformation of the speckle pattern.

Fig. 6 Measured strain history caused by a spot heat source placed 30 mm away from the measuring point.

Fig. 7 Relation between the incremental strain change measured by speckle and strain gauge between 3 sec and 10 sec after arc start at various distances from the heat source.

らのことから落ち込みの原因は試験片の局部的なねじれまたはたわみであると思われる。熱源が測定点に近い 10~15 mm の距離では測定が困難であり、ひずみが連続して安定的に測定できる境界の相関ピーク値は約 0.6 であった。SUS304 と軟鋼の間に特に傾向の差はなかった。

Fig. 6 に前図に y 方向の結果も加えて、ひずみの時間的変化を示す。図はスぺックルによる結果とひずみゲージ (1 mm 長, 2 軸) による測定結果も示した。先に述べたようにスぺックルによる測定ではアーク起動時にひずみの不連続を生じているので、図ではスぺックルで測定したひずみ曲線はゲージによる曲線の近くに平行移動してある。こうしてみるとスぺックルとゲージによるひずみ曲線はよく合っている。つまり安定的に測定できる範囲ではスぺックルによる測定の精度はよいことがわかる。

Fig. 7 にアーク起動後 3 sec から 10 sec までの間 (7

Fig. 8 Incremental strain change obtained by FEM between 3 sec and 10 sec.

sec 間) のひずみ変化量と熱源と測定点の距離の関係を示す。ゲージによる測定は温度上昇のため距離は 20 mm までとした。先にも述べたように鋼材の熱処理を行っていないので、その影響も生じているものと思われるがスぺックルによる結果はやばらつきはあるもののほぼゲージに近い値が得られている。実測の入熱条件と SUS304 の標準的な物理定数と機械的性質を用いて、有限要素法 (FEM) で熱弾塑性解析を行った結果を Fig. 8 に示す。スぺックルの結果はほぼ傾向が合っている。

4.2.2 移動熱源の場合のひずみ測定

Fig. 9 に SUS304 鋼板上に移動熱源を置いたときの相関のピーク値とひずみ ϵ_x の時間的変化を示した。曲線が不連続になっているのは、パソコンの容量の関係で測定を 3 回に分けたためである。静止熱源と同じく熱源が測定点に近い範囲で相関が大きく低下し、そこでは得られたひずみの信頼性がない。静止熱源の場合も含めて、この理由として

[1] この付近でひずみ速度が大きくなり、現在可能な最高の読込み速度 (0.35 sec/回) でもスぺックルのパターンの変化を追い切れなくなること。

[2] 相関関数の最大値をコンピュータで自動的に計算しているため、相関が低下して目立ったピークがなくなりスぺックルのパターン移動量に対応するピークが最大値でなくなると他の離れた位置のピークを最大値とみなしてしまう可能性。

[3] 板厚方向変位の影響。

が考えられる。[2] については現在、相関の計算を ± 300 ビットまでずらして行っているがこれを ± 30 ビット程度まで減らして計算し、ひずみ測定不可能範囲が狭くなればその影響があるといえる。しかし、実際に行なっていると範囲にほとんど変化はなかった。[3] の可能性は残っているが、今のところ [1] が最も可能性が高い。これを確かめるには入熱を変えてひずみ速度を遅くして実験を行ない、ひずみ測定不可能範囲が狭くなるかどうかを検討すればよいと考えられる。Fig. 9 の傾向は x, y 方向、SUS304、軟鋼を問わずすべて同じであった。

本実験の条件では測定可能な領域の境界での相関の比

Fig. 9 Change in the maximum value of the correlation function and the measured strain as a moving heat source passed over the measuring point.

ーク値はおおむね約0.6であった。またそのときの測定点の温度は熱源が接近するときは323 K~373 K (約50~100°C)、遠ざかるときは973 K~1073 K (約700~800°C)であった。このように前後で温度に差があるのは、その時点での測定点における熱サイクルの温度勾配の違いによるものと考えられる。Fig. 10(a)にSUS304と軟鋼の測定点で実測した熱サイクルを示す。

またy方向のひずみ測定不可能範囲はx方向のそれに比べてやや狭かった。これはy方向のひずみ量がx方向のそれより小さいためと考えられる。

4.2.3 板厚方向変位が精度におよぼす影響

先に述べたように、板厚方向の変位(a_z)があるとスペックルで得られたひずみを補正する必要がある。式(2)から補正ひずみ量は $(\cos \theta_0/L_0) \cdot a_z$ で与えられ、 $L_0=560$ mm, $\theta_0=45^\circ$, 一回の読込み間隔中の変位量 $a_z=0.1$ mmとすると補正量は約 1.3×10^{-4} となる。そこでカンチレバー方式の変位計を作製し、それを用いてスペックルによるひずみ測定箇所の板厚方向の変位を測定した。移動熱源の場合の板厚方向変位の時間的変化をFig. 10(b)に示す。板厚方向変位は熱サイクルにほぼ沿って変化している。しかしこれを用いて補正したひずみ曲線は補正前の曲線がやや平行移動した程度で殆ど変化はなかった。これは現在ひずみ測定が可能な領域では板厚方向の変位増分が極めて小さいため、今後、急激な立ち上がり部まで測定領域を広げた場合は板厚方向変位の影響が現れる。また、静止熱源でもひずみが測定できる(熱源と測定位置との)距離では板厚方向の変位の影響はほとんど見られなかった。

4.2.4 ひずみ速度と相関ピーク値の関係

読込み速度が一定であれば、ひずみ速度が小さい場合は当然相関は良く、速度が大きくなれば相関は低下する。そこで4.1と同様に間隔0.35 secのときの1画面毎のひずみの全データ(約3500個)について、ひずみ速度(ひずみ増分/0.35)の絶対値と左右の相関ピーク値の平均値

の関係を調べた。Fig. 11はひずみ速度の区分毎に見たデータの度数分布を百分比で表わしたものである。ひずみ速度が約 1×10^{-3} を境として相関の高低が分かれていること、また相関値が約0.6を境としてひずみ速度の大小が分かれていることがわかる。なお一番下の○印の行はひ

Fig. 10 (a) Thermal cycles at the measuring point. (b) Out-of-plane displacement at the measuring point.

Fig. 11 Frequency distribution of measured data points as a function of strain rate and the maximum value of the correlation function. The radius of each circle expresses the relative frequency among the data for a given strain rate.

ずみ速度 0 である。データの偏りを数値で表わすとひずみ速度が 1×10^{-3} 以上のデータは相関が 0.6 以下に 89% が集中している。これに対して 1×10^{-3} 以下のデータは相関が 0.6 以上に 95.7% のデータが集中していることがわかった。これらのことは先に述べた静止熱源および移動熱源でひずみが安定的に測定できる限界の相関値が約 0.6 であったことに符合しており、Table 3 の静的ひずみ測定の結果とも傾向の上で符合している。そこで本実験の条件では動的ひずみの測定では相関値が 0.6 以上かつひずみ速度 1×10^{-3} 以下が信頼のおけるデータであることが推察される。

5. 結 言

レーザースペckル法を溶接部のひずみ測定に適用する基礎として、測定条件がひずみ測定結果におよぼす影響を静的引張り試験で検討し、次に鋼板に TIG 加熱を行なった場合の動的ひずみの測定を行なったが得られた結果を要約すると以下の通りである。

(1) 静的引張り試験でスペckル法によるひずみとゲージによる値を比較すると、表面性状が測定精度に若干影響しているが、両者はほぼ対応がとれている。

(2) 静的引張り試験でスペckル法を単独で使用する際の誤差を予測した。その結果スポット径 1 mm では 1 回の測定で読込んだひずみ量が 4×10^{-4} 以下で相関値が 0.7 以上であれば測定誤差は 6×10^{-5} 以内、径 3.5 mm では 4×10^{-4} 以下で 0.6 以上であればほぼ 3×10^{-5} 以内に納まることがわかった。

(3) 試験片の剛体移動量と相関のピーク値とずれの関係を調べると、スポット径 1 mm の場合は移動量が 0.5 mm 以上で相関が失われてしまうが、5 mm の場合は 0.9 mm まである程度相関が保たれる。そして径 1 mm の場合誤差を 9×10^{-5} 以内に押さえようとするれば相関のピーク値を 0.8 以上に保つ必要がある。

(4) 動的ひずみ測定ではパターン読込み間隔は 0.35 sec/回が限度であったが、この間隔で得られたデータを整理すると、移動および静止熱源ともにひずみ速度がある限度を超えて速くなると現在のデジタルオシロを用いる方法ではスペckル・パターンの変化に追従できなくなることがわかり、この限界のひずみ速度は約 1×10^{-3} /sec であった。

(5) 移動および静止熱源を通じてひずみが安定的に測定できるのは、相関値が約 0.6 以上のときである。したがって本実験では、相関値約 0.6 以上、ひずみ速度約 1×10^{-3} /sec 以下のデータが信頼がおけることがわかった。

(6) 移動熱源の結果から、本実験のように雰囲気の影響を除去すれば安定した測定は試験片の温度に関係なく、ひずみ速度に依存していることがわかった。

(7) 今後、スペckル・パターンの読込み間隔をより速くし、本方法の溶接への本格的な適用を試みる。

謝 辞

本研究実施に当たり御助言を賜った、理化学研究所・山口一郎博士、大阪大学・豊田政男教授、姫路工業大学・瀬尾健二教授、格内敏博士ならびに金材技研・中村治方博士に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 山口, 町田: レーザースペckルひずみ計の開発, 非破壊検査, Vol. 30, No. 8, pp. 564-570 (1981).
- 2) I. Yamaguchi: Speckle displacement and decorrelation in the diffraction and image fields for small object deformation, Optical Acta, Vol. 28, No. 10, pp. 1359-1376 (1981).
- 3) I. Yamaguchi, T. Takemori and K. Kobayashi: Stabilized and accelerated speckle strain gauge, SPIE Vol. 1162, pp. 187-200 (1989).
- 4) 山口: レーザースペckルひずみ計による高温下のひずみ測定, 非破壊検査, Vol. 32, No. 9, pp. 676-682 (1983).
- 5) 小林, 山口, 竹森: レーザースペckル歪計による熱歪の測定, レーザ科学, No. 12, pp. 160-162 (1990).