



## モアレ干渉法の自動縞解析

新井 泰彦\*・倉田 忠雄\*・横関 俊介\*\*

\* 関西大学工学部機械工学科 〒564 吹田市山手町 3-3-35

\*\* 九州工業大学情報工学部機械システム工学科 〒820 飯塚市大字川津 680-4

(1990年7月3日受付, 1990年11月21日受理)

### Automatic Fringe Analysis of Moiré Interferometry

Yasuhiko ARAI, Tadao KURATA and Shunsuke YOKOZEKI

\* Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kansai University,  
3-3-35, Yamate-cho, Suita 564

\*\* Department of Mechanical System Engineering, Faculty of Computer Science  
and System Engineering, Kyushu Institute of Technology,  
680-4, Kawazu, Iizuka 820

(Received July 3, 1990; Accepted November 21, 1990)

The phase analysis of fringes by applying the moiré techniques to the interferometer is well-known. Since this method is based on 2-D subtraction method in the incoherent optics, the distortion of the optical system is removed easily. Then the large aperture interferometer is able to be constructed. In this paper, a novel automatic method to detect phase of fringes was proposed by combining the conception of moiré-interferometer with the microcomputer system. The validity of the method is shown by experimental results in the phase analysis of fringes of slide-glasses. Furthermore, this system was applied to the measurement of pressure distributions in the Laval nozzle, then the measured results approximately coincided with the theoretical values. These results suggest that the system is well applicable to the fields of fluid mechanics.

### 1. はじめに

近年、非球面レンズ等の光学素子の発達とともに透明物体や透明な流体の内部の状態(たとえば、形状、屈折率分布、熱力学的性質等)を高感度にかつ高い信頼性で知るための測定法の必要性が増大している<sup>1-3)</sup>。ところが、このような測定において、干渉縞を等高縞としてたんに処理するだけでは、あまり高い精度を期待することはできない<sup>4)</sup>。この問題に対して、縞走査等のさまざまな縞解析技術が報告され<sup>5,6)</sup>、光波干渉計による表面あらかの自動解析システムなどが報告されるに至っている<sup>7)</sup>。

一方、モアレ干渉法は横関によって示されたように<sup>8)</sup>、干渉縞計測法に用いる干渉計にモアレ技術を採用したものである。この手法によれば、光学系の精度に対する要

求が緩和できるので大口径の干渉計が容易に製作できるとともに、位相物体の変化を計測できるなど優れた特徴をもっている<sup>8)</sup>。

本研究では、上記のモアレ技術を利用した干渉縞解析法<sup>8)</sup>とTVの走査線を用いた縞解析技術<sup>9)</sup>を組み合わせることによる高感度な新しい干渉縞の自動解析法を提案している。この提案は、たんに、高感度な新しい縞の自動解析技術を示すのみならず、前報<sup>9)</sup>に示したTVの走査線を用いた手法のより広い分野での応用性を示すものでもある。

本手法は、モアレ技術を用いた干渉計<sup>8)</sup>の考え方に従いモアレ技術の特徴である二次元の減算を主体として処理を行っているので、像の歪みを前もって調べておけば、歪等に対する補正も可能であるなど干渉計がもつ波面収差による誤差はもとより、TVカメラ等の観察系に

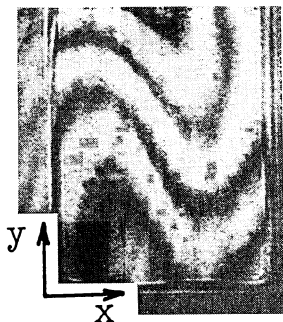


Fig. 1 Fringe of slide-glass A by Twyman-Green interferometer.

おける誤差も除去可能である特長をもっている。さらに、本手法は変形をうけた1枚の干渉縞画像によって処理を行うことのできる解析法であるから、従来の縞走査技術のように数枚の画像を必要としない。したがって、瞬時に変化する動的現象の解析も干渉縞を記録さえしておけば可能である。このように、本手法は、大口徑の干渉計やオプティカルパラレルを必要とする流体計測ならびに、動的な流体計測等に対しても有効な手法であると考えられる。

本報では、トワイマン・グリーン干渉計において Fig. 1 に示すような干渉縞が得られるスライドガラス A を被測定対象とすることにより、原理の正当性を示し、さらに、本手法を高感度な測定技術が必要とするラバールノズル内部の垂音速状態の流体計測へ適用した場合の結果ならびにその有効性を検討している。

## 2. 原 理

### 2.1 モアレ干渉法

モアレ干渉法では<sup>9)</sup>、測定領域内に被測定物体が存在する場合の干渉縞  $I_b$  としない場合の干渉縞  $I_a$  とのインコヒーレントな重ね合わせが利用されている。

一般に、モアレには、二重露光等による和のモアレと、二つの干渉縞を別々に記録した2枚のフィルムを重ね合わせることで得られる積のモアレとがある<sup>10)</sup>。ここでは、以下コントラストのよい積のモアレの原理にしたがって説明を行う。

測定領域内に被測定物体が存在する場合の光路長を  $l_2$ 、存在しない場合の光路長を  $l_1$  とすると、両者の光路長の変化  $\Delta l$  は  $l_2 - l_1$  となる。したがって、二つの干渉縞  $I_a, I_b$  をインコヒーレントに重ね合わせた場合に発生するモアレ縞は、空間的に低周波な成分  $M(x, y, z)$  として(1)式のように表現できる<sup>9)</sup>。ただし、 $a$  は光源の強度であり、 $\lambda_L$  は波長である。

$$M(x, y, z) = 2a^2 \left[ 1 + \frac{1}{2} \cos \frac{2\pi}{\lambda_L} \{ \Delta l(x, y, z) \} \right] \quad (1)$$

発生したモアレ縞は、位相物体による光路長の変化量  $\Delta l(x, y, z)$  のみに依存した縞となる。これが、モアレ技術を用いた干渉計の原理<sup>9)</sup>である。

### 2.2 本手法の原理

Fig. 2 に示すトワイマン・グリーン干渉計を例に挙げて本手法の原理の説明を行う。ここで、 $x-y-z$  座標系の  $y$  座標は紙面に垂直な方向の座標を示す。参照光側の mirror-2 を微小角  $\delta$  回転させると、回転角  $\delta$  に応じた波面収差が発生し、スクリーン上に Fig. 3 に示すよ

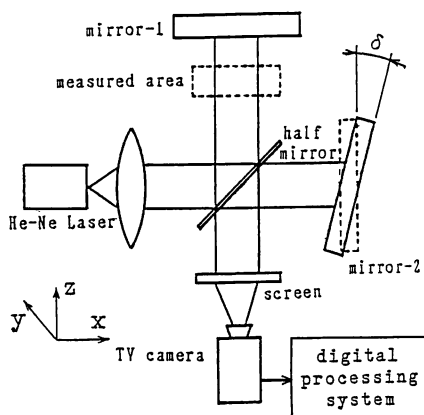


Fig. 2 Optical system.

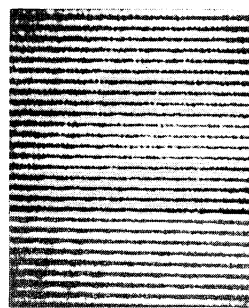


Fig. 3 Fringe (Carrier).

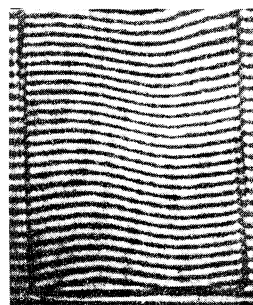


Fig. 4 Deformed fringe by slide-glass A.

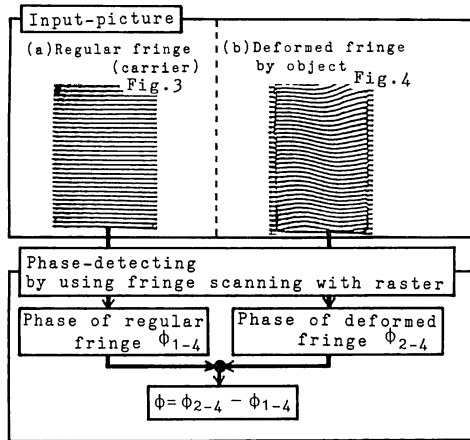


Fig. 5 Outline of principle.

ような直線格子状の干渉縞（以下、基準縞と呼ぶ）が現れる。本手法では、物体によって変形をうけた基準縞（たとえば Fig. 4 に示す干渉縞）に対して、Fig. 5 に示す処理を行っている。

まずはじめに、Fig. 5 に示すように 2 枚の干渉縞画像を計算機に入力し、それぞれの画像に対して位相分布を計算すると (2), (3) 式に示す被測定物体が存在しない場合の位相分布  $\phi_{1-4}(x, y, z)$  と被測定物体が存在する場合の位相分布  $\phi_{2-4}(x, y, z)$  とを求めることができる。

$$\phi_{1-4}(x, y, z) = \frac{2\pi}{\lambda_L} \{l_1(x, y, z) - l_4(x, y, z)\} \quad (2)$$

$$\phi_{2-4}(x, y, z) = \frac{2\pi}{\lambda_L} \{l_2(x, y, z) - l_4(x, y, z)\} \quad (3)$$

ここで、(2) 式に示す  $\phi_{1-4}$  は、被測定物体が存在しない場合に TV カメラから撮り込んだ画像の位相計算結果  $\phi_1$  から、光学系の歪による位相  $\phi_4$  (光路長としては  $l_4$  である。) を減じた純粋に被測定物体が存在しない場合の位相  $\phi_1 - \phi_4$  を示している。 $\phi_{2-4}$  も同様に光学系の歪による位相  $\phi_4$  を除去した純粋に被測定物体のみによる位相を示したものである。

(2), (3) 式から、被測定物体による位相変化量  $\phi(x, y, z)$  は Fig. 5 に示すように、被測定物体が存在する場合の位相分布から、存在しない場合の位相分布を減じた (4) 式として求めることができる。

$$\phi(x, y, z) = \phi_{2-4}(x, y, z) - \phi_{1-4}(x, y, z) \quad (4)$$

ただし、実際の演算では、(4) 式に示す  $\phi_{2-4} - \phi_{1-4}$  ではなく (4) 式と同様の結果が得られる  $\phi_2 - \phi_1$  によって変化量  $\phi$  を求めている。

これらの一連の演算における位相検出法としては、次に示す処理法を利用している。

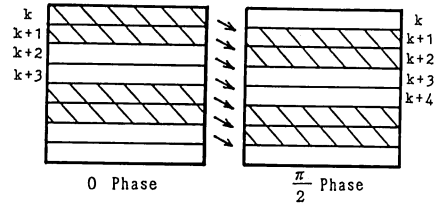


Fig. 6 Phase of the virtual gratings.

処理にあたってまず、Fig. 6 に示すような TV カメラの走査線を仮想格子  $I_R(x, y, z)$  として (5) 式に示すように定義している。

$$I_R(x, y, z) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \frac{2\pi}{\lambda_R} R(x, y, z) \right\} \quad (5)$$

ここで、Fig. 6 に示すように走査線 4 本を 1 組として仮想格子を設定すれば、モアレトポグラフィにおいて用いた手法<sup>9)</sup>によって、仮想格子を  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$  rad と仮想的に移動することができる。その際、Fig. 2 の mirror-2 の回転角  $\delta$  を調整することによって、TV の走査線を用いた仮想格子のピッチとスクリーン上の基準縞のピッチとをほぼ同じ値に合わせると、ミスマッチのないコントラストの高いモアレ縞を得ることができる。このような光学系の設定を行うことにより、縞走査の技術に従った縞の位相検出の感度を高めることができる<sup>11)</sup>。

以上のように、モアレ干渉法において光学的に行われていた処理は、本手法では、デジタル演算に置き換えられている。したがって、本手法においてもモアレ干渉法と同様に、ミラーやレンズの不完全さにより発生する測定誤差の除去は可能である。さらに、本手法では、デジタル演算によって高感度な処理が可能になっている。

### 3. 実験結果と検討

#### 3.1 減算を主体とした本手法の有効性

被測定物体として取扱いの容易なスライドガラスを測定した場合の結果を示す。

Fig. 1 に示す被測定物体に対して、Fig. 5 に示す処理にもとづき、Fig. 2, Fig. 7 に示す光学系と情報処理部とによって、位相分布を測定したものが Fig. 8 である。ここで、Fig. 8(a) に示した位相  $\phi_A$  に対して、 $\cos \phi_A$  を計算し、しきい値を 0 として、位相  $\phi_A$  に対応する縞模様を 2 値画像として示したものが Fig. 8(b) である。Fig. 8(b) に示す縞は、トワイマン・グリーン干渉計によって直接得た Fig. 1 の干渉縞によく一致していることがわかる。

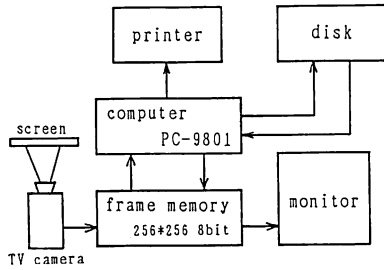


Fig. 7 Digital-processing system.

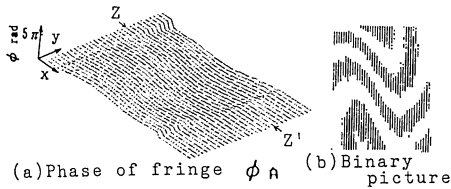


Fig. 8 Results of the slide-glass A.

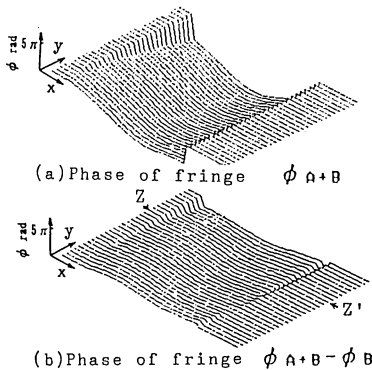


Fig. 9 Results of the superimposed slide-glass A and B.

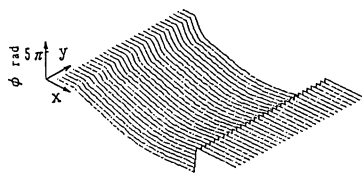


Fig. 10 Phase of the slide-glass B.

次に、本手法の最大の特徴である減算を主体とした処理の有意性を調べた結果が Fig. 9 である。Fig. 10 に示す位相分布をもつスライドガラス B を光学的な外乱であると考えるとスライドガラス A, B 2 枚を重ねることにより得た Fig. 9(a) に示す位相  $\phi_{A+B}$  の結果からスライドガラス B のみの位相  $\phi_B$  をデジタル量として計算機内部で減算すると、外乱としてのスライドガラス B

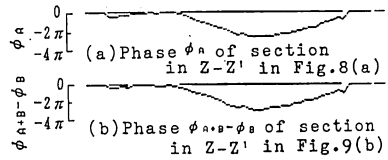


Fig. 11 Phase of section Z-Z'.

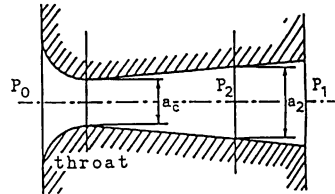


Fig. 12 Laval nozzle.

の影響は除去できるはずである。この処理を行った結果が Fig. 9(b) である。この結果は、Fig. 8(a) に示すスライドガラス A のみを測定した結果によく一致している。

ここで、Fig. 9(b) ならびに Fig. 8(a) の Z-Z' 断面の位相をそれぞれ示したものが Fig. 11 である。両者はよく一致していることが認められ、統計的処理を行うと、両者の差の標準偏差は  $2\pi/20$  rad であることがわかった。この結果は、たとえば数フリンジのミラーの歪であるとか、レンズの収差等の光学素子をもつ誤差要因に対しても、本手法が、精度よく利用可能であることを示している。

### 3.2 流体計測への応用

次に、亜音速状態のラバルノズル内部の圧力分布測定へ本手法を適用した場合を検討する。

ラバルノズルとは、Fig. 12 に示す形状をもつノズルである。ここで、入口圧力  $P_0$ 、出口圧力  $P_1$  さらにチョーク状態における断面積  $a_c$  に対する各部分の面積が既知の場合、任意の断面における圧力  $P_b$  は(6)式に示すように、断面積  $a_c$  と圧力を求めようとする位置の断面積  $a_b$  との比によって求められる<sup>12)</sup>。ただし、 $\kappa$  は比熱比である。

$$\frac{a_c}{a_b} = \frac{\left[1 - \left(\frac{P_b}{P_0}\right)^{(\kappa-1)/\kappa}\right]^{1/2} \left(\frac{P_b}{P_0}\right)^{1/\kappa}}{\left(\frac{\kappa-1}{2}\right)^{1/2} \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{(\kappa+1)(\kappa-1)}} \quad (6)$$

実験では、まずはじめに、ノズル内部に流体が流れている場合と流れていない場合との位相分布の差を Fig. 5 に示した手法により求めた。さらに、本手法は Fig. 2 に示すようにトワイマン・グリーン干渉計を基本としてい

るので、被測定物体を光は2度通過する。そのため、測定した位相差は  $2\pi$  rad に対して、1/2 波長を対応させることができる。この関係を用いて、ラバルノズル内部の光路差分布を位相差分布より求め、(7)式に従い屈折率  $n$  を求めた。

$$n = \frac{l}{l - \Delta l} \quad (7)$$

ここで、 $l$  はノズルの厚み、 $\Delta l$  は光路差の変化量である。

さらに、(8)式により密度分布を求めた。

$$\rho = \frac{n-1}{K} \quad (8)$$

ただし、 $K$  はグラッドストーンディール定数である<sup>12)</sup>。また、ノズル内部の変化を断熱変化であると仮定すると(9)式よりノズル内部の圧力分布を求めることができる。ただし、 $\kappa$  は比熱比である。

$$\left[ \frac{\rho}{\rho_0} \right]^\kappa = \left[ \frac{P}{P_0} \right] \quad (9)$$

Fig. 13(a) に測定時の基準縞を示す。本手法では、流体が流れることによる基準縞の変化を検出することによって圧力分布を求めている。ただし、対象とする圧力分布は、入口圧力を 120 kPa、出口圧力を大気圧とした場合に、流量 0.93 l/s で窒素ガスをノズル内部に流したときに生ずるものである。したがってノズル内部で超音速状態になる数フリンジも干渉縞が変化するような大きな圧力変化ではなく、1 フリンジ以下の変化に過ぎないきわめて小さな圧力変化を伴う現象である。Fig. 13(b) にトワイマン・グリーン干渉計によって観測された流体が流されたときにノズル内部に発生する干渉縞を示す。

測定結果を Fig. 14 に示す。Fig. 14(a) に示すノズル中心線上の位相分布から縞の位相分布が1 フリンジ内の変化であることがわかる。この位相分布より(7)、(8)、(9)式を用いて、圧力分布を求めた結果が Fig. 14(b) であり、その場合のマッハ数を計算した結果が

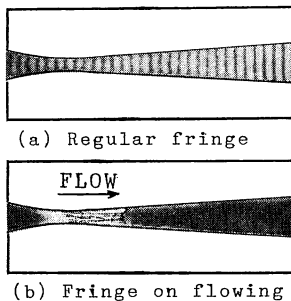
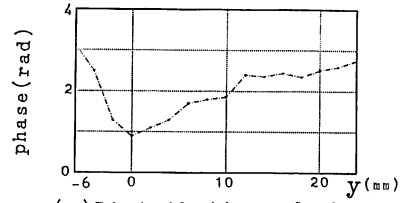
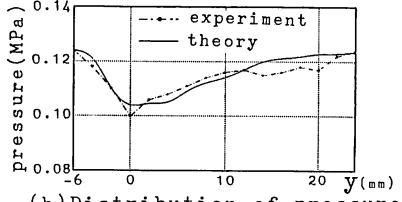


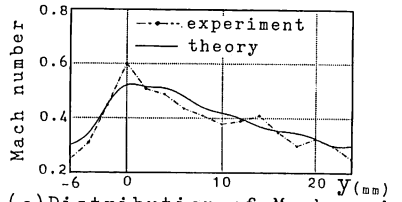
Fig. 13 Fringes in the nozzle.



(a) Distribution of phase



(b) Distribution of pressure



(c) Distribution of Mach number

Fig. 14 Experimental results.

Fig. 14(c) である。ここで、スロート部で音速になる状態に比べて、本実験で取り扱う圧力変化の小さい場合には、ノズル壁面に生じる境界層の影響が大きく、実際に、最も流れの幅が小さくなる部分とノズル形状におけるスロート部とは対応しなくなる。そのため、(6)式より求めた理論値と測定値との間には若干の隔たりが認められる。とくに流速が大きくなるスロート部では境界層の影響を大きく受けている。しかし、全体として、理論値と測定結果とは、よく一致していると考えられる。

以上の結果は、高感度な測定技術が必要とする流体がスロート部でチョーク状態にならない亜音速状態のラバルノズル内部の測定も本手法では可能であることを示している。さらに、広い分野においての流体計測も可能であることを示していると考えられる。

#### 4. 結 言

本研究で得た成果は次のものである。

(1) モアレ干渉法の自動化を走査モアレ法を用いた縞走査干渉計の手法によって行い、新しい干渉縞自動位相解析法を提案した。その正当性をスライドガラスを用いた実験において示した。

(2) 本手法の特長は、次のものである。

(a) 変形格子型干渉縞の解析を行っているので、1枚の入力画像によって処理が行える。そのため、瞬時に

変化する動的現象も干渉縞の変化を記録さえしておけば解析可能である。

(b) 光学的外乱が存在する場合にも利用できるもので、大口径の干渉計も安価に構成することができる。

(3) 亜音速状態のラバールノズル内部の流体計測への応用例を示し、高感度な定量的解析も流体計測において可能であることを示している。

研究を進めるにあたり熱心にご指導ならびにご助言を賜った大阪大学工学部精密工学科山田朝治教授に心より感謝するとともに、流体モデル作製ならびに解析にあたってご指導いただいた関西大学工学部機械工学第二学科大場謙吉先生に心より感謝いたします。

#### 文 献

- 1) 浅沼 強：新版流れの可視化ハンドブック (朝倉書店, 東京, 1986) pp. 291-367.
- 2) 藤井 哲：“点光源からの浮力流れの実験”, 日本機械学会論文集 (第2部), **38** (1972) 2119-2125.
- 3) 一色尚次：“斜め影写真法による境界層温度分布測定法”, 機械学会誌, **75** (1972) 689-699.
- 4) 豊岡 了：“マイクロコンピュータによる縞解析”, 機械の研究, **38** (1986) 1241-1247.
- 5) 谷田貝豊彦：“光干渉計測法の最近の進歩”, 精密機械, **51** (1985) 695-702.
- 6) 横関俊介：“縞走査”, 光学, **10** (1981) 202.
- 7) 岩田耕一：“二波長を用いた干渉縞走査型三次元表面粗さ計”, 昭和62年度秋季大会学術講演会論文集 (1987) pp. 225-226.
- 8) 横関俊介：“モアレ干渉法”, 光学, **12** (1983) 501-509.
- 9) 新井泰彦：“縞走査干渉計の手法による高速かつ高分解能なモアレトポグラフィ法”, 光学, **15** (1986) 402-406.
- 10) 高崎 宏：“モアレトポグラフィ”, 計測と制御, **12**(1973) 390-399.
- 11) J. H. Bruning: “Digital wavefront measuring interferometry for testing optical surface and lenses,” *Appl. Opt.*, **13** (1974) 2693-2703.
- 12) H. W. Liepmann and A. Roshko: *Elements of Gas-dynamics* (John Wiley & Sons, New York, 1957) (玉田 玼訳: 気体力学 (吉岡書店, 京都, 1960) pp. 138-159).