

半導体レーザーフィードバックを利用した画像計測

劉 紀 元

半導体レーザーから出た光が外部反射物により反射して半導体レーザーに戻ると、レーザー発振に不安定性をもたらす。光記録、光通信の障害になるので、普通は光アイソレーターを使って、その影響を避ける。その一方、外部反射光を積極的に利用する例も数多くある。外部反射物が光軸に沿って移動する場合、半導体レーザーの出力が半波長を周期として変化する。この特性を利用すると、外部反射物の初期位置からの移動量がレーザー出力の変化周期を数えることによって測定できる^{1,2)}。さらにレーザー出力の時間微分をとれば、散乱体の運動速度も測定できる³⁾。この原理を使ったレーザードップラー速度計が血流速度の測定に応用されている⁴⁾。外部反射物の変位によって、半導体レーザーの発振波長も周期的に変わることを利用して、外部反射物の振動が測定できる。このような振動計で振幅1 nm以下の振動も測定できる⁵⁾。

筆者らは半導体レーザーの戻り光効果を利用した干渉計の研究を行ってきた⁶⁻¹¹⁾。まず、実験的に半導体レーザーを用いたマイケルソン干渉計において、光のフィードバックによる干渉縞ロック現象を見いだした⁶⁾。そして、この現象を理論解析し、それは光路差の変化によるレーザー波長の変化がちょうど干渉縞の位相が 2π の整数倍の近傍に変化するようモードホップするためであるとわかった^{7,8)}。またこの現象は電流変調の場合にも観察できることがわかった^{9,10)}。さらに、この現象を利用して、光学定盤外での鏡面干渉計測に成功した¹¹⁾。

レーザーフィードバックのもう一つの応用で、最近注目されている研究としてはレーザーフィードバック顕微鏡が挙げられる。Juskaitisらは世界で初めてヘリウム・ネオ

ンレーザーを使った共焦点系で、電子回路表面のフィードバック反射像の取得に成功した¹²⁾。電子回路表面からレーザーに反射した光はレーザーに強度変化を誘起し、その変化が回路表面の反射率に依存するので、それを検出すれば、回路表面の反射像が得られる。この原理に基づき、半導体レーザーの発振閾値電流が戻り光によって低下されることを利用して、レーザーフィードバック顕微鏡の光軸方向の分解能が向上されることも報告された¹³⁾。最近ではマイクロチップレーザーを使った同じ共焦点系でトモグラフィーができることも報告され、話題を呼んでいる¹⁴⁾。

本稿では、筆者らの半導体レーザーフィードバック干渉計による定盤外での鏡面測定の研究を解説し、またレーザーフィードバックを利用したトモグラフィーなど画像計測の最新事情を紹介する。

1. 半導体レーザー干渉計による定盤外での干渉計測

干渉計測は高感度かつ非接触の計測法として、精密計測や精密加工分野に幅広く応用されている。しかし、高感度である反面、振動や空気のゆらぎにも弱いという欠点がある。この問題点を解決するために、色々な手法が提案されている。振動による干渉縞の強度変化を検出し、その信号を半導体レーザーの注入電流にフィードバックすることによって、波長を変え、位相をずらして干渉縞をロックすることができる¹⁵⁾。また、干渉強度の正弦波変調を利用する方法も提案されている¹⁶⁾。最近では、半導体レーザーの注入電流を変調して得られる干渉縞をロックインして、その位相を検出しながら、注入電流をフィードバック制御する方式も提案されている¹⁷⁾。以上の電気的フィードバック法はそれぞれ利点があるが、装置が複雑であり、また抑制できる外乱の周波数も電気回路装置の応答で制限されるので、大きな振動には対応できない。以上の方法の他に干渉

理化学研究所脳科学総合研究センター先端技術開発センター細胞機能探索技術開発チーム (〒351-0198 和光市広沢 2-1)
E-mail: liu@optsun.riken.go.jp

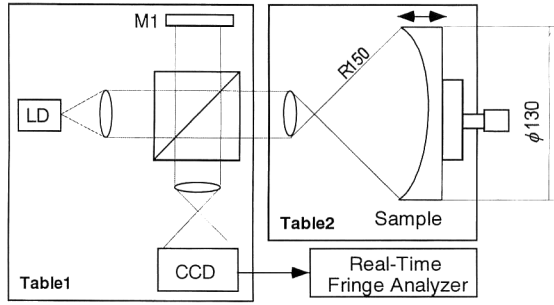


図1 半導体レーザーフィードバック干渉計による定盤外での凹面鏡形状測定の実験装置。

縞の高速撮影法により低周波の振動を除く方法も提案されている¹⁸⁾。しかし、それは干渉縞のコントラストを保つために、大出力のレーザーが必要となる。そこでわれわれは干渉縞ロック現象を利用した半導体レーザーフィードバック干渉計を提案する。

半導体レーザーを光源としたマイケルソン干渉計を考えてみよう。半導体レーザーと干渉計を含む系は多層モデルで表せる。この系の定常状態の解を求めるためには、各ミラーにおける境界条件を考えればよい。これにより半導体レーザー干渉計は ρ_e と Z を端面ミラーの反射係数とし、 g を増幅係数とする等価的ファブリー・ペロー共振器になる。このような等価的共振器の共振条件は下記の式で表せる。

$$\rho_e Z(k, L_1, L_2) g \exp(i2knL) = 1 \quad (1)$$

ここで、 k はレーザー発振波数、 L はレーザー共振器長、 L_1 と L_2 はそれぞれ干渉計の両光路長である。

一方、この等価的共振器の損失は下のようになる。

$$\alpha = 1 - |\rho_e Z|^2 = 1 - \rho_e^2 |Z|^2 \quad (2)$$

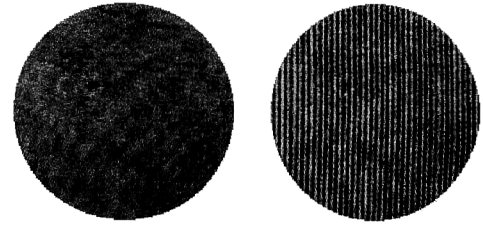
レーザー発振は等価的ファブリー・ペロー共振器の損失が最小になるときの共振波長で決まる。このときは $|Z(k, L_1, L_2)|$ は最大になる。 $|Z|^2$ は反射、透過係数の高次項を省略すると、下記のように書ける。

$$|Z|^2 = \rho_e^2 + \frac{a^2 + b^2 + 2abc \cos[2k(L_2 - L_1)]}{1 - 2c^2 - 2d^2 - 2cd \cos[2k(L_2 - L_1)]} \quad (3)$$

ここで、 a, b, c, d はそれぞれ各反射面の透過係数と反射係数にかかわる定数である。したがって、 $|Z|^2$ が最大値になるためには、 $\cos[2k(L_2 - L_1)]$ が最大になる必要がある。すなわち、

$$2k(L_2 - L_1) = 2m\pi \quad (4)$$

に相当する。ここで、 m は任意の整数である。一方、 $2k(L_2 - L_1)$ は干渉縞の位相を表すので、式(4)は位相が 2π の整数倍であることを意味する。しかし、式(4)は必ずしも式(1)を満足しない。式(1)が満足されて、かつ式(3)を最大とするためには式(4)の代わりに、



(a) With isolator (b) Without isolator

図2 アイソレーターを入れた場合(a)と入れない場合(b)に観察された干渉縞パターン。

$$2k(L_2 - L_1) = 2m\pi + \Delta\phi \quad (5)$$

となる。 $\Delta\phi$ は数値計算の結果 2π よりずっと小さいことが示される。これは干渉縞の位相が 2π の整数倍の近傍にロックされたことを意味する。

この干渉縞ロック現象を利用したレーザーフィードバック干渉計を使った定盤外での鏡面測定の配置を図1に示す。光源はシングルモード半導体レーザー(TOLD 9150)で、中心波長は691 nm、閾値電流は25°Cのとき50 mAで、最大出力30 mWである。干渉計はマイケルソン干渉計を採用している。被検面は曲率半径150 mm、直径130 mmの凹面鏡である。被検ミラーと対物レンズをまとめて一つの机に置く。干渉計ヘッドをもう一つの机に置く。干渉計の両ミラーをマイクロメーター付きの移動台上に固定し、光軸方向に μm の精度で位置を変えられるようにしておく。干渉縞の様子をCCDカメラで観察・記録する。記録した干渉縞のパターンを実時間縞解析装置¹⁹⁾に転送し、そこで鏡面形状をビデオレートで計算・表示する。

図2(a)に示すのは光アイソレーターがレーザーの前に挿入されて、干渉計からの戻り光が遮られる場合の干渉縞パターンである。干渉縞は机の振動によってぼけている。一方、図2(b)に示すのは光アイソレーターを取り去ってロックされた干渉縞パターンである。明らかに干渉縞は光のフィードバックでロックされていることがわかる。

干渉縞の位相変化を空間フィルター検出器で検出した結果を図3に示す。(a)に光アイソレーターがレーザーの前に挿入されて、干渉計からの戻り光が遮られる場合の干渉縞の位相変化を示す。干渉縞の位相変動が最大 6π もある。一方、アイソレーターを撤去した(b)では、光のフィードバックによってロックされた干渉縞の位相変化はわずか 0.2π で、フィードバックのないときの30分の1まで抑制された。

定盤外での凹面鏡を測定する際、平面鏡を測定するときに較べると二つのことに注意を払わなければならない。一つは光軸方向以外の振動の影響が大きい。それを解決する

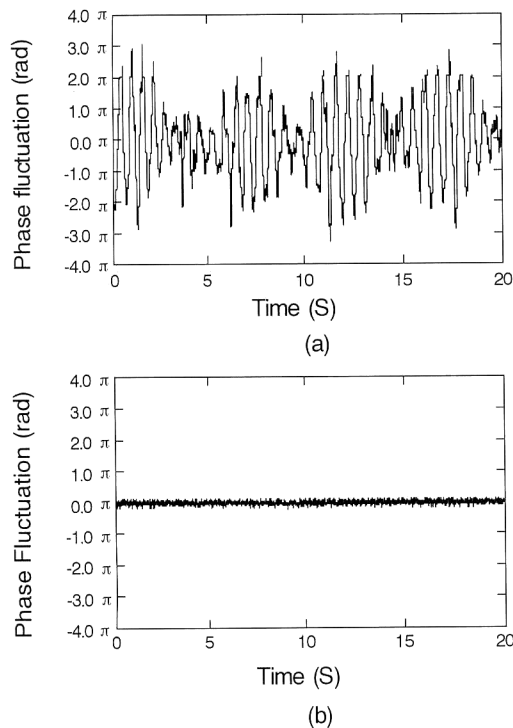


図3 アイソレーターを入れた場合 (a) と入れない場合 (b) の干渉縞の位相変化。

ために、できるだけ対物レンズの光軸と被検ミラーの光軸との一致を保たなければならない。われわれは実際に、対物レンズと被検ミラーを一つの机に置くことで、両者の間の相対運動を避けている。これにより、机の振動によるチルトの変化の影響をほとんど除去した。もう一つ注意すべきことはデフォーカスの影響である。実際凹面鏡を測定するとき、いくら注意を払っても、デフォーカスは必ず残る。これを除去するために、放物面で測定結果をフィッティングする。干渉縞ロックを保つために、どれくらいのデフォーカス量が許せるかを実験的に調べた。その結果を図4に示す。(a)には被検ミラーを干渉縞がロックされ始めたある場所からロックが外れるまで $1\mu\text{m}$ 置きにレーザーから離れる方向に沿って移動するとき、フィッティングする放物面の曲率半径の変化を示す。これにより、曲線が不連続になった最初の位置から $10\mu\text{m}$ 離れた場所がデフォーカスのないところであることがわかる。(b)には、それぞれの場所における測定結果のP-V (peak to valley) 値を示す。P-V値がそれほどデフォーカスに影響されないことがわかる。

この結果から、この干渉計はデフォーカスに対して $20\mu\text{m}$ の許容量をもつといえる。

この干渉計による定盤外での凹面鏡測定結果の3次元表示を図5(a)に示す。一方、定盤上でアイソレーターを入

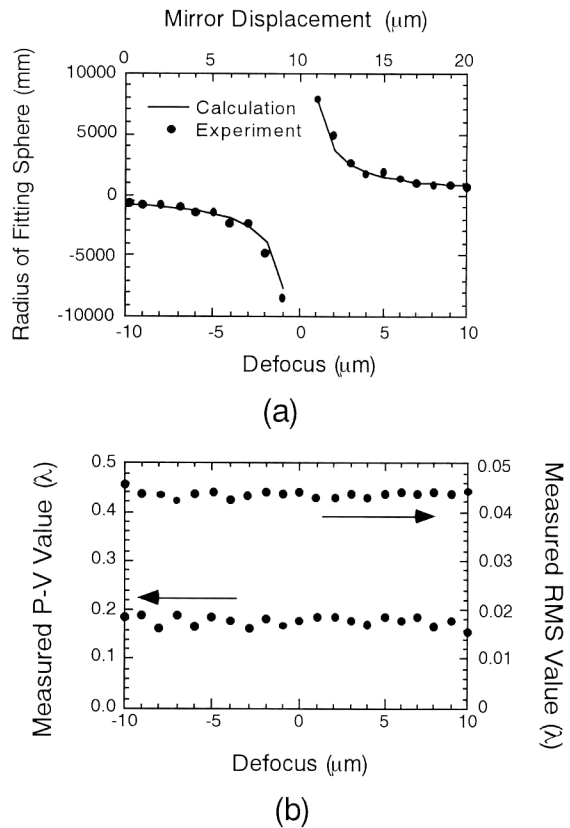


図4 (a) fittingする放物線の曲率半径のミラー移動量依存性, (b) 測定結果のdefocus依存性。

れている状態での測定結果を図5(b)に示す。両者がよく一致していることがわかる。

この研究によりわかることは

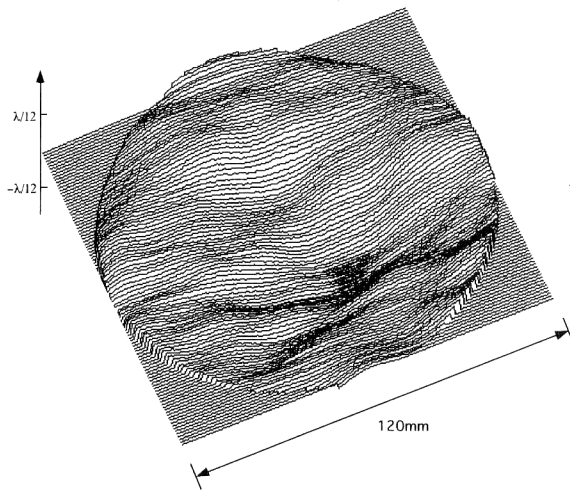
- (1) 干渉縞ロック現象を利用して、定盤外で干渉計測ができる。
- (2) 干渉計に使う装置が少なく、高価なものもない。
- (3) 凹面鏡を測定するときのデフォーカス許容量は $20\mu\text{m}$ あるので、調整のときそれほど正確でなくてもよい。
- (4) 測定結果は定盤上での結果とよく一致している。

2. レーザーフィードバックトモグラフィー

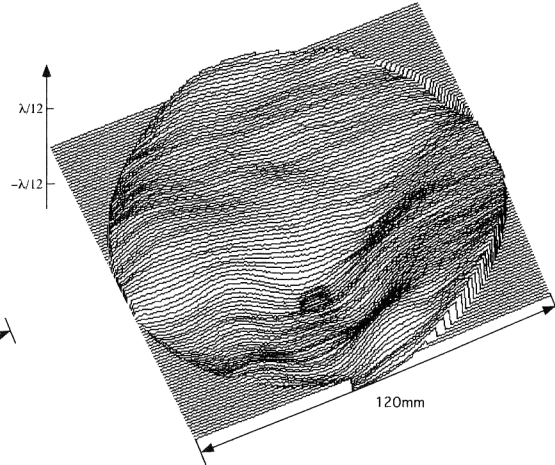
半導体レーザーあるいはマイクロチップレーザーの光フィードバックを利用したトモグラフィーは最近新しい話題として注目を集めている¹⁴⁾。マイクロチップレーザーあるいは半導体レーザーを光源とした共焦点光学系において、混濁媒質の深部に置くサンプルからレーザーに戻った光に誘起されたレーザーの発振強度変化を測定すれば、サンプルの共焦点反射像が得られる。この場合、レーザー自身が単なる光源として使われるのではなく、一種の信号増幅器と増幅された信号の検出器にもなる。これにより、生体や混濁液内部の微弱光を検出することもできるので、トモグラ

P - V : 0.172 λ (Repeatability : 0.011 λ)
 RMS : 0.046 λ (Repeatability : 0.0026 λ)

P - V : 0.168 λ (Repeatability : 0.010 λ)
 RMS : 0.045 λ (Repeatability : 0.0025 λ)



(a) On an optical bench



(b) On a wooden table

図5 定盤上 (a) と机上 (b) での測定結果の3次元表示.

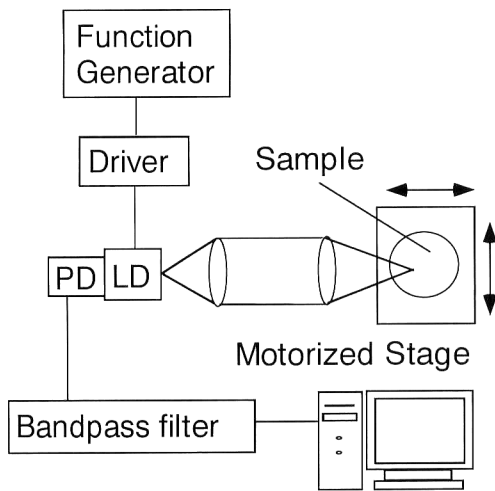


図6 半導体レーザーフィードバックトモグラフィーの実験配置.

フィーの応用が期待される.

図6に最近筆者らが試作した半導体レーザーフィードバックトモグラフィーの実験装置を示す. 光源はシングルモード半導体レーザー (TOLD 9150) で, 中心波長は 691 nm. 光源を 100 kHz の正弦波で電流変調する. 光源からの光をコリメートレンズと対物レンズを通して, サンプルに焦点を当てる. サンプルを xyz ステージに置き, 3次元の画像を生成するために走査する. 半導体レーザーの出力をレーザーチップの裏側に付いているフォトダイオードで測定する. その信号をバンドパスフィルターを通して, ヘテロダイン検波する. 検波された信号を AD 変換して, コンピューター上で画像化する. サンプルを xyz ステージ

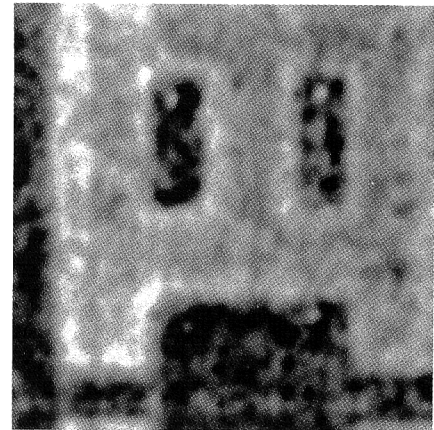


図7 牛乳に沈んでいる1円コインのトモグラフィー像.

に置き, サンプルを走査することによって3次元の画像が生成する.

実際に1円コインを牛乳の2 mm 下に置き, 容器全体をステージに載せ, それを xy 方向に走査して, 得た画像を図7に示す. 実際画像化した領域は $5 \times 5 \text{ mm}^2$ で, ちょうど“円”文字の場所である. 円の文字がはっきり画像化されていることがわかった.

以上の結果から, われわれはレーザーフィードバックトモグラフィーが簡単な装置でトモグラフィーができるといえる. また OCT (optical coherence tomography) のように生体の断層像が得られる段階になっていないが, もっと長波長の近赤外レーザーを使えばそれは実現できるだろう.

本稿ではレーザーフィードバックを利用した干渉計測やトモグラフィーを紹介した。干渉縞ロック現象を利用した定盤外での表面形状測定の問題点は位相シフト干渉法に適用しないことや、干渉縞のロックとキャリアーの調整には手間と技術が要ることなどが挙げられる。実用するまでにまだ工夫する余地が残る。

レーザーフィードバックトモグラフィーの原理はそれほど新しいことでもないが、トモグラフィーへの応用はつい最近のことで、理論解析や実験データがまだまだ足りないのが現状である。これから、理論と実験の両面から細かく検討する必要がある。

レーザーフィードバックを利用した光通信の話題もつい最近に出た²⁰⁾。こうした新しい応用がどんどん現れることがこの分野に活気をもたらし、ますます注目されるだろう。

文 献

- 1) P. J. de Groot: "Range-dependent optical feedback effects on the multimode spectrum of laser diodes," *J. Mod. Opt.*, **37** (1990) 1199-1214.
- 2) J. Kato, N. Kikuchi, I. Yamaguchi and S. Ozono: "Optical feedback displacement sensor using a laser diode and its performance improvement," *Meas. Sci. Technol.*, **6** (1995) 45-54.
- 3) P. J. de Groot and G. M. Gallatin: "Backscatter-modulation velocimetry with an external-cavity laser diode," *Opt. Lett.*, **14** (1989) 165-167.
- 4) M. H. Koelink, M. Slot, F. F. M. de Mul, J. Greve, R. Graaff, A. C. M. Dassel and J. G. Aarnoudse: "Laser Doppler velocimeter based on the self-mixing effect in a fiber-coupled semiconductor laser: Theory," *Appl. Opt.*, **31** (1992) 3401-3409.
- 5) P. A. Roos, M. Stephens and C. E. Wieman: "Laser vibrometer based on optical feedback-induced frequency modulation of a single-mode laser diode," *Appl. Opt.*, **35** (1996) 6754-6761.
- 6) J. Liu and I. Yamaguchi: "Observation of a fringe locking phenomenon in a self-feedback laser diode interferometer," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37** (1998) 2910-2919.
- 7) J. Liu and I. Yamaguchi: "Theory for fringe locking in a laser diode interferometer," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37** (1998) L933-L935.
- 8) J. Liu and I. Yamaguchi: "Fringe-locking in a laser diode interferometer by optical feedback," *Proc. SPIE*, **2479** (1998) 84-93.
- 9) J. Liu and I. Yamaguchi: "Surface profilometry using laser diode optical feedback interferometer outside optical benches," *Appl. Opt.*, **39** (2000) 104-107.
- 10) J. Liu and I. Yamaguchi: "Fringe locking in a laser diode interferometer by optical feedback during modulation of injection current," *Opt. Rev.*, **6** (1999) 100-103.
- 11) J. Liu and I. Yamaguchi: "Analysis of fringe locking in a laser diode interferometer under injection current modulation," *Opt. Lett.*, **24** (1999) 336-338.
- 12) R. Juskaitis, N. Rea and T. Wilson: "Fibre-optic based confocal microscopy using laser detection," *Opt. Commun.*, **99** (1993) 105-113.
- 13) 藤田克昌, 河田 聡: "戻り光によるしきい値制御を利用したレーザーフィードバック顕微鏡", *レーザー研究*, **24** (1996) 48-54.
- 14) E. Lacot, R. Day and F. Stoeckel: "Laser optical feedback tomography," *Opt. Lett.*, **24** (1999) 744-746.
- 15) T. Yoshino, M. Nara, S. Mnatzakanian, B. S. Lee and T. Strand: "Laser diode feedback interferometer for stabilization and displacement measurements," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 892-899.
- 16) O. Sasaki, K. Takahashi and T. Suzuki: "Sinusoidal phase modulating laser diode interferometer with a feedback control system to eliminate external disturbance," *Opt. Eng.*, **29** (1990) 1511-1519.
- 17) T. Yoshino and H. Yamaguchi: "Closed-loop phase-shifting interferometry with a laser diode," *Opt. Lett.*, **23** (1998) 1576-1578.
- 18) M. Melozzi, L. Pezzati and A. Mazzoni: "Vibration-insensitive interferometer for on-line measurement," *Appl. Opt.*, **34** (1995) 5595-5601.
- 19) J. Kato, I. Yamaguchi, T. Nakamura and S. Kuwashima: "Video-rate fringe analyzer based on phase-shifting electronic moire patterns," *Appl. Opt.*, **36** (1997) 8403-8412.
- 20) S. Sivaprakasam and K. A. Shore: "Signal masking for chaotic optical communication using external-cavity diode laser," *Opt. Lett.*, **24** (1999) 1200-1222.

(2000年6月27日受理)