

広い表面形状を高分解で高速に計測する非接触センシング技術の研究

埼玉大学大学院理工学研究科 塩田達俊

1. はじめに

高速かつ高精度に物体の表面や内部構造の計測を行う技術は、工業などの分野で広く求められている。光学干渉計による計測は非接触かつ非破壊に計測できる手法であり、様々に応用研究がなされている。古くから広く現象が知られている低コヒーレンス干渉計測は白色光が干渉できる範囲がマイクロメートル程度であることを利用して、マイクロメートル分解能の計測を可能にしているが、機械的な掃引を必要とするうえ計測の高速化には限界がある。また波長可変レーザを光源として波長ごとに干渉強度を測定するフーリエドメイン干渉計では機械的な掃引を必要としないが、フーリエ変換などの演算処理の手間とその分の時間を要す。

これらに対して、白色光源の広帯域性とレーザのコヒーレンスと高出力性能を併せ持つ光周波数コムを光源として高精度な測定と広い計測範囲を可能にする光周波数コム干渉を用いた測定法が提案されている。最初に報告された光周波数コム干渉計は、光源の光周波数コムの繰り返しピーク間隔を掃引することで機械的な走査を必要とせずに高精度かつ高速に形状計測を行えることを示した[1-5]。その後、我々のグループは光周波数コムが周波数軸上で繰り返しピークを持つことに起因して干渉波形も高次干渉として繰り返し現れることを利用して、計測範囲を拡大する方式も提案した[2]。

一方、我々はさらに高速化するために、空間位相変調器 (SPM) と 2 次元イメージセンサ (CCD) を用いてカメラのフレートの速さで 2 次元断層画像を連続取得することに成功した[3-4]。ここでは白色光源を用いたが、さらにその出射光路中に光共振器を設置して低コヒーレンス光周波数コムを発生した。これにより簡便に光周波数コム干渉を得ることを示したうえに、高速かつ高精度、広範囲な測定が可能であることを示した。これが時間領域干渉のシングルショットイメージングシステムである。

本論文ではこれに合わせて Virtually Imaged Phased Array (VIPA) と CCD を光学干渉計に入れた[6-8]、新しい周波数領域のシングルショットイメージングシステムも紹介する。VIPA は出射角に応じて異なるコム間隔の光周波数コムを空間的に出射することができる。つまり、光周波数コムの FSR が空間変調されていることを示す。このピーク間隔が空間変調された光周波数コムを光源とした干渉出力をイメージングセンサーにより同時に計測することで、高精度かつ広範囲で機械的な走査が必要のない高速な計測を行うことができる。また VIPA は入射する全ての光を利用可能とする VIPA の特徴を最大限に生かすことで、高いエネルギー効率の干渉計測を実現することができる。

2. 原理

2.1 Comb interferometry by scanning teeth interval

Fig.1 に干渉波形とパワースペクトルの関係図を示す。光周波数コムとは周波数軸上で周期的にピークを持つ光であり、これを逆フーリエ変換することで干渉波形を求めることができる。ここで ν_i をコム間隔、 ν_0 を中心周波数、 ν_B を光周波数コムスペクトルの半値幅、 $F(\nu)$ を包絡線、 $G(\nu)$ をコムスペクトルの縦モードの形状とする。光周波数コムによって得られる干渉信号 $\Gamma(\tau)$ は、ウイナーキンチンの定理より、逆フーリエ変換することで表せる。

$$\Gamma(\tau) \propto \mathbf{F}^{-1} \left[F(\nu - \nu_0) \left\{ G(\nu) * \sum_{p=-\infty}^{\infty} \delta(\nu - p\nu_i) \right\} \right] \cong g(\tau) \exp[j2\pi\nu_0\tau] \left[f(\tau) * \sum_{p=-\infty}^{\infty} \delta(\tau - p\tau_0) \right] \quad (1)$$

$f(\tau)$, $g(\tau)$ は $F(\nu)$, $G(\nu)$ を逆フーリエ変換したものである。その干渉信号は時間軸上で光周波数コムと同様に周期的に干渉ピークが現れる。干渉ピークの間隔 τ_0 は $\tau_0 = 1/\nu_i$ と表すことができるため、光路差 ΔL は $\Delta L = c/2m\nu_i$ と表せる。これによりコム間隔を掃引することで距離計測が可能となることが分かる。つまり ν_i の走査を空間展開してイメージセンサを利用することで2次元距離計測が可能になるのである。

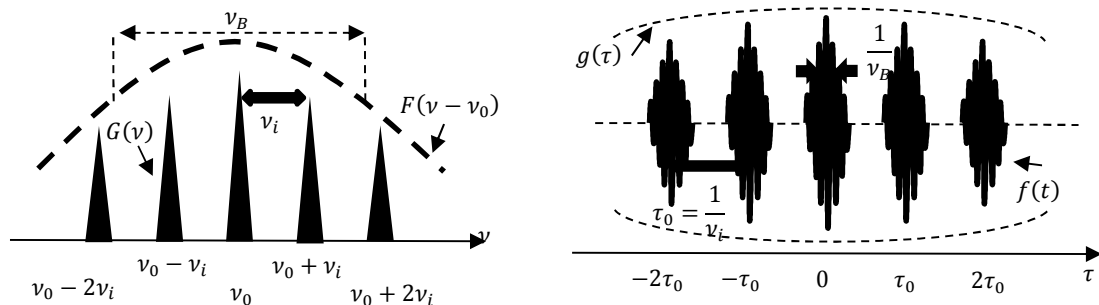


Fig. 1 パワースペクトルと干渉信号の関係

2.2 VIPA による光周波数コム

VIPA は光通信用の分光デバイスとして提案され、既に分光用のデバイスとしての応用研究がなされている[7-8]。これを利用した干渉計測はすでに報告されているが、その効果はファブリペロエタロンとしての動作を利用しているに過ぎない[9]。前述の通り、白色光をVIPAに入射するとその出射光は出射角に依存してFSRが異なる光周波数コムとなる。この性質を利用した干渉計はまだ報告がない。そこで本

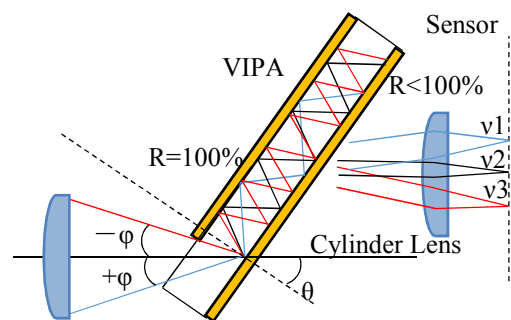


Fig. 2 VIPA の出射イメージ

研究では VIPA を用いた周波数領域での干渉をシングルショットイメージングに適用した。

Fig.2 に VIPA による出射光のイメージを示す。VIPA はガラスプレートの両面に反射膜を有する構造を持ち、入射側の反射率を 100%，出射側を 100%未満の光反射率にする。入射側に開けられた窓より光を入射するとそれぞれ出射角によって異なる光路を進み光が空間展開される。このとき光周波数コムの FSR は Eq.(2)で表すことができる。

$$FSR = \frac{c}{2d\sqrt{n^2 - \sin^2(\theta \pm \phi)}} \quad (2)$$

c は光速、 d はガラスプレートの厚さ、 n は屈折率、 θ は出射中心角、 ϕ は入射光の角度幅を示す。Eq.(2)からも分かるように VIPA により出射させる光周波数コムは出射角に依存して変化する。つまり VIPA は FSR の異なる光周波数コムを空間展開することができるのである。ここでピーク間隔が空間走査された光コムを光源とした干渉出力をイメージセンサにより同時に計測することで、機械的な走査することなく周波数ドメインの高速な計測が可能となる。しかしながら VIPA の出力の v_i はイメージセンサの垂直方向に線形でないため、そのふるまいをシミュレーションにより明らかにする必要がある。

3. シミュレーション

3.1 VIPA による干渉信号

Eq.(2)をフーリエ変換して干渉信号のピーク位置を求めると、

$$\Delta L = 2md\sqrt{n^2 - \sin^2(\theta \pm \phi)} \quad (3)$$

これより横軸に信号光と参照光の光路差、縦軸に 0~90° の出射角として、各角度から出射された干渉信号の位置を次数毎に結び Fig.3 に示す。シミュレーションの値として $n=1.5$ 、 $d=500\mu\text{m}$ としている。Fig.3 より各次数の線は変曲点を持つような曲線になっており、次数が大きくなるにつれて直線性がなくなっているのが分かる。ただし実際には全ての入射角の光を使うわけではなく Fig.3 内の黒い枠のように $\theta \pm \phi$ の範囲のみを用いる。正確な測定には、各次数の線は直線性があることが望ましい。このため最適な角度を求める必要がある。

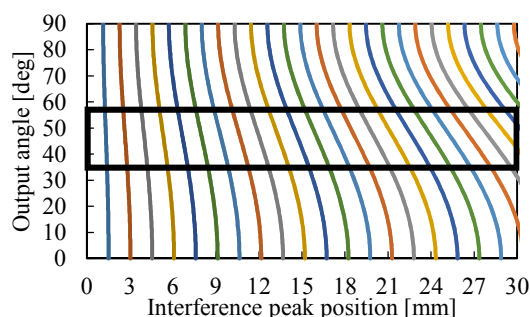


Fig. 3 光路差

3.2 直線性

また Fig.3 より、1 次の曲線に対して θ を 0 から 90° まで変えながら $\theta \pm 3^\circ$ の範囲で近似直線を求め、それぞれの角度での最大誤差を算出する。これを角度成分 $\theta \pm 3^\circ$ の出射光が CCD に全て入射するとし、誤差を CCD のピクセル数に変換した。CCD は縦方向に 250pixel とした。この結果を Fig.4 (a) に示す。Fig.4 (a) より最も誤差が小さくなったのは 49.2° となった。またいくつかの角度では最大誤差が 1pixel 未満となることも分かった。これより VIPA への入射光は 49.2° 傾けて用いるのがよいと分かった。また同様な方法で、 $\theta = 49.2^\circ$ として $\theta \pm \phi$ の角度幅 ϕ を変えていった時の最大誤差を算出した結果を Fig.4 (b) に示す。Fig.4 (b) より、 $\phi \leq 9$ では誤差が 1pixel 未満となることが分かった。これらの結果より、VIPA の入射光は自由度があり、適切な角度を用いれば誤差は 1pixel 未満となり、無視できるほどであるということが分かった。

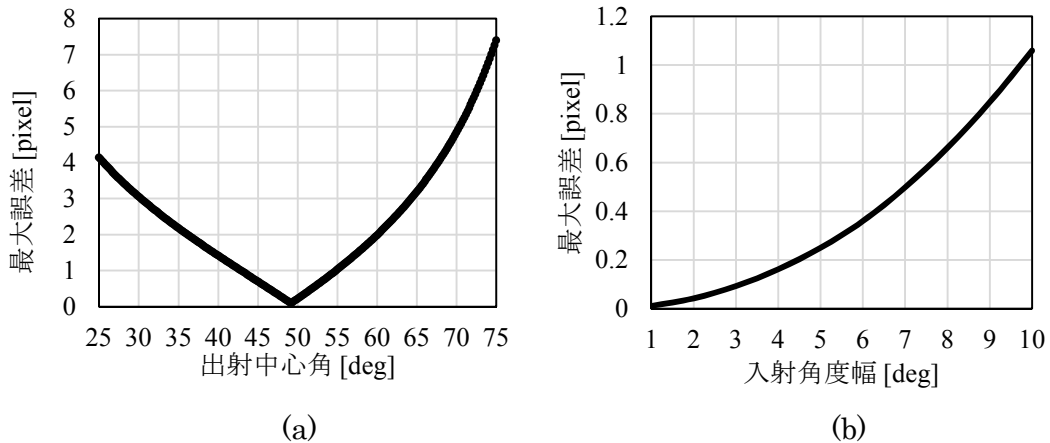


Fig. 4 (a) 出射中心角に依存した最大誤差

(b) 角度幅に依存した最大誤差

3.3 測定範囲

Fig.3 より VIPA による干渉信号は、距離に対して非線形であり次数毎にそのふるまいも異なる。これは見方を変えれば、VIPA は次数によって異なる測定範囲を扱うことができることを意味する。そのシミュレーション結果を Fig.5 に示す。次数に対して測定範囲が変わっているのが分かる。また角度幅を変えることにより測定範囲の変化量を変えることができる。つまり VIPA は次数と角度幅を選択することで測定範囲を変えることを示している。

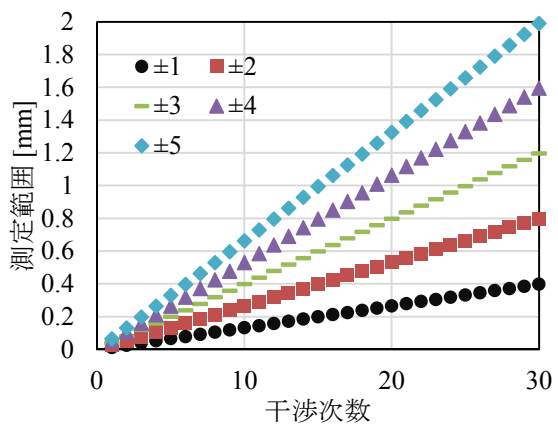


Fig. 5 測定範囲

4. 実験方法

Fig.6(a)に特性計測の実験系を示す。シミュレーションの結果より VIPA を 49.2° 傾けて設置し、シリンダーレンズにより線状に集光した光を入射して、出射光を CCD で観測した。入射光は波長可変レーザーにより周波数を 193~194 THz まで掃引して測定した。その結果を Fig.6(b)に示す。縦軸に CCD のピクセル数、横軸に周波数とし、各ピクセルで観測された光周波数コムのピーク位置をプロットした。また Fig.6(b)の結果から、CCD の 0 pixel と 250 pixel で観測された光周波数コムを Fig.6(c)に示す。周波数軸上に周期的な光周波数コムが得られていることが分かる。またこれらをフィッティングすると FSR がそれぞれ 225 GHz, 232 GHz となった。つまり CCD の最上段、最下段である 0 pixel と 250 pixel で異なる FSR の光周波数コムを観測できたことになる。これより VIPA が空間的に異なる FSR の光周波数コムを出射できていることを確かめることができた。

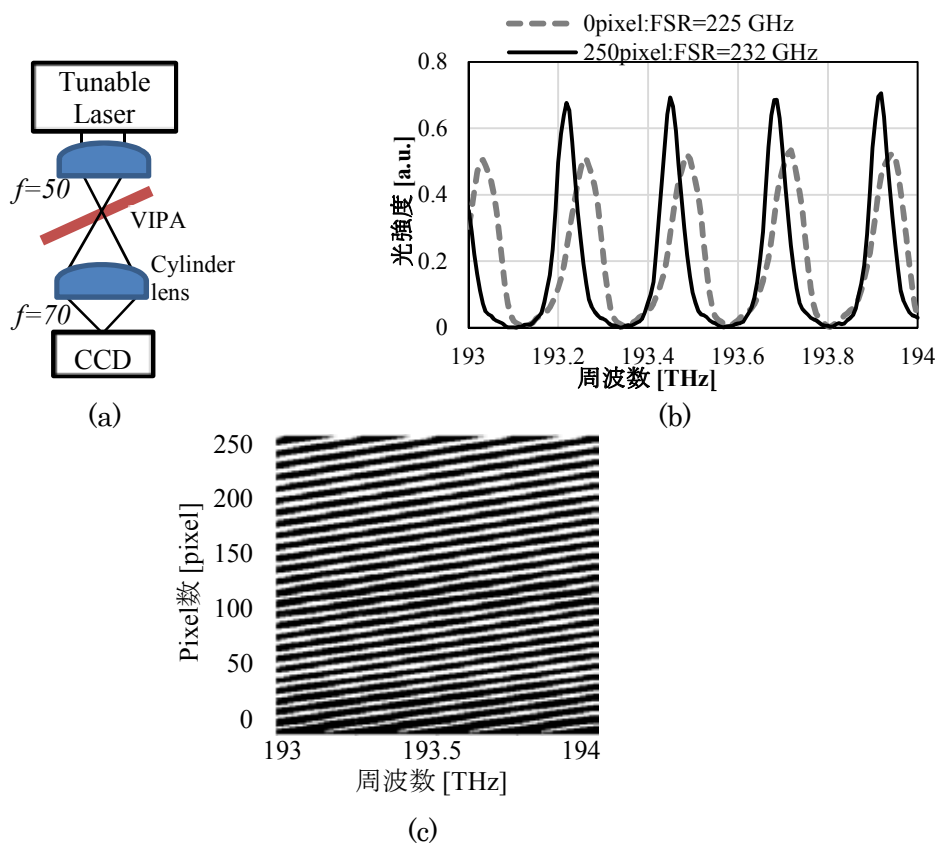


Fig. 6 (a) 測定系、(b) 周波数軸上の光周波数コムのピーク位置、
(c) CCD 上 0pixel と 250pixel で受光された光周波数コム

4.1 干渉信号の計測

実際に VIPA と CCD をマッハツェンダー干渉計に導入し、干渉信号の計測を行った。Fig.7(a)に VIPA と CCD を導入した干渉計を示す。SC 光源を LPF(1150 nm)に通した光を光源とした。また VIPA は参照側に設置し、信号光は試料であるミラーに直接向かうようにした。その反射光と参照光を合波し CCD により観測する。試料を光軸方向に動かしていったときの CCD で観測した干渉信号を Fig.7(b)に示す。試料の走査に追従して干渉信号が CCD 上を動いているのが分かる。これによって試料の奥行き方向の距離情報が CCD に投影されていることが分かり、VIPA と CCD を導入した干渉計による、周波数領域のシングルショット計測を実証できた。また試料を $1\ \mu\text{m}$ ずつ動かした時の干渉信号のピーク位置をプロットした結果を Fig.7(c)に示す。試料の走査に対して干渉信号が CCD 上を直線状に動いていることが分かる。またこの結果から実際の距離と CCD 上に投影された距離情報の換算値を導出することができ $3.64\ \text{pixel}/\mu\text{m}$ となった。この値を用いて干渉信号の半値幅から分解能を算出すると $1.76\ \mu\text{m}$ となった。また VIPA は光周波数コムを出射することができるため繰り返し干渉信号を得ることができる。Fig.7(d)に示すように、計測の結果 12 次まで観測することができた。またシミュレーションの結果とも一致し、高次になるほど測定範囲が大きくなっていることも確認できた。

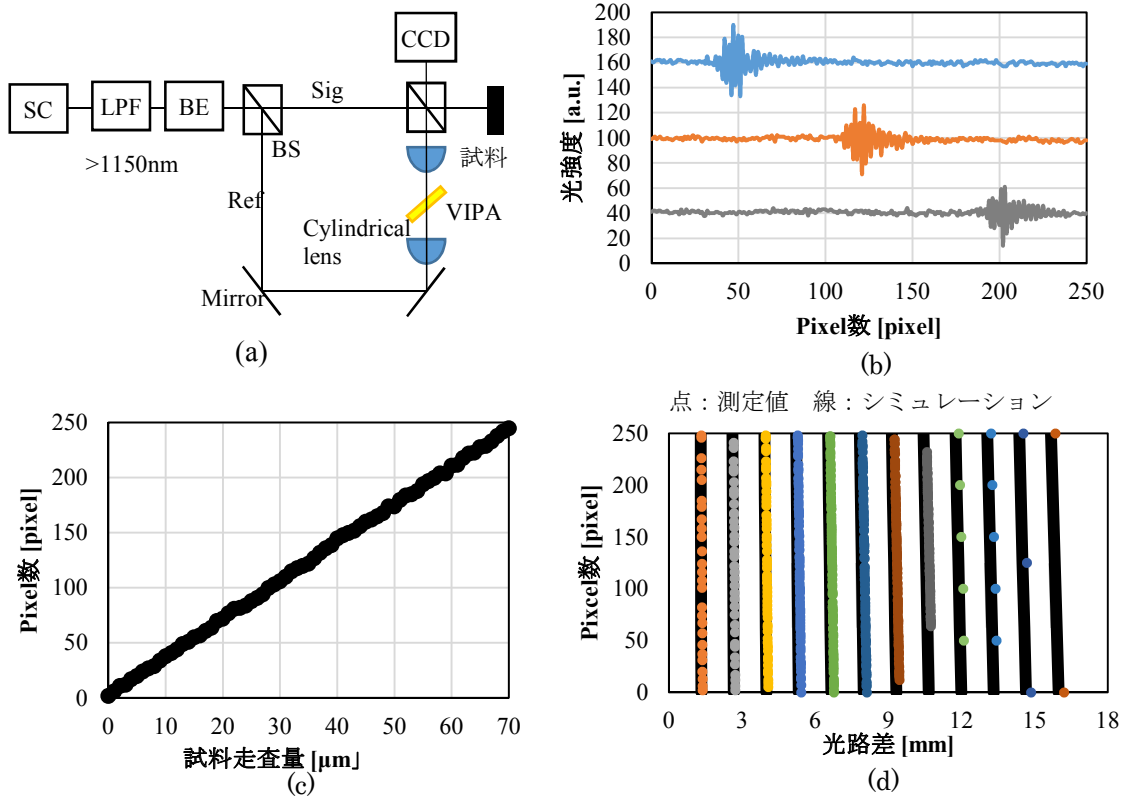


Fig. 7 (a) VIPA を導入した干渉計

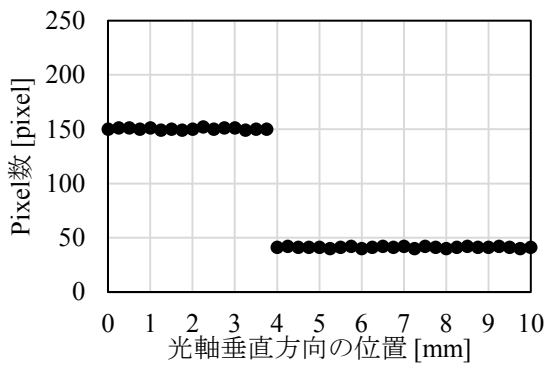
(c) 試料位置に対する干渉信号位置

(b) 観測された干渉信号

(d) 12 次までの試料位置に対する干渉信号位置

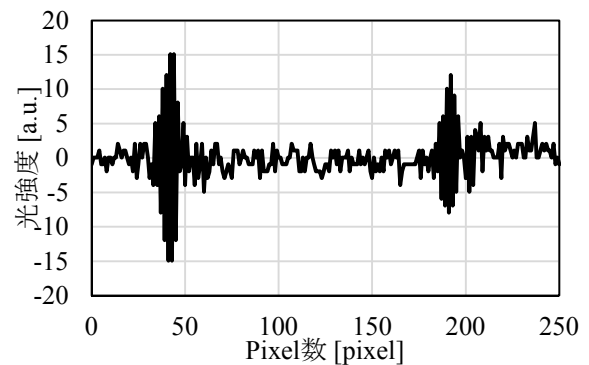
4.2 他試料の計測

試料をミラーから変更し、ゲージブロックを重ねて段差 $20\ \mu\text{m}$ とした。ゲージブロックは信号光に対して垂直方向に走査し、各位置での干渉信号のピーク位置を計測した。その結果を Fig.8(a)に示す。段差の1段目と2段目の表面形状が計測できているのが分かる。また Fig.7(c)と同様に実際の距離と CCD に投影された距離情報の換算値を算出すると $5.3\ \text{pixel}/\mu\text{m}$ となり、Fig.8(a)で求めた段差を計算すると $20.4\ \mu\text{m}$ となった。次に試料を厚さ $d=0.03\text{mm}$ のガラスプレートに変更し、内部構造の計測を行った。その結果を Fig.8(b)に示す。ガラスプレートの表面と裏面からの干渉信号を計測することができた。また同様にして換算値を算出すると $2.86\text{pixel}/\mu\text{m}$ となり、干渉信号のピーク間隔から厚さを求めると $nd=52.8\ \mu\text{m}$ となった。これらの計測により他試料においても表面形状計測や内部構造の計測を行うことができた。また前述の通り VIPA による計測では、干渉次数が高次になるほど測定範囲が大きくなる。これはつまり試料に対してズームアウトしながら計測しているといえる。Fig.8(b)で用いたガラス試料の計測結果のうち、1次から3次までの計測結果を Fig.9に示す。1次では2つの干渉信号が画面いっぱい広がっているのに対して、2次、3次と見ると干渉信号の間隔が小さくなっていくのが分かる。この結果より次数によって測定範囲が大きくなっていることを確かめることができた。



(a)

Fig. 8 (a)ゲージブロックの表面形状計測



(b)

(b)ガラスプレートの内部構造計測

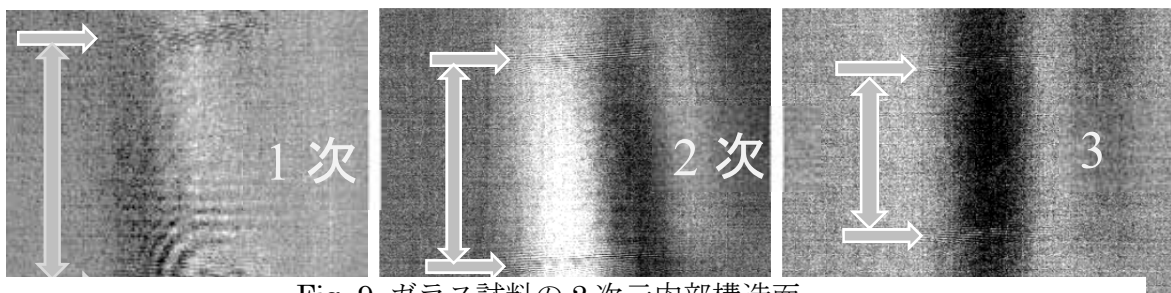


Fig. 9 ガラス試料の2次元内部構造面

5. まとめ

本研究では新たに VIPA と CCD を用いた周波数領域の 2 次元シングルショット計測システムを提案した。はじめにシミュレーションを行い VIPA の最適な出射角が 49.2° であることを求めた。また干渉信号の次数や入射する際の角度の幅によって測定範囲を変えることができるということも分かった。特性計測では VIPA からの出射光を計測し、空間的に異なる間隔の光周波数コムを出射できていることを確かめることができた。また実際にマッハツェンダー干渉計に VIPA と CCD を導入し、計測を行った結果、分解能 $1.76\mu\text{m}$ の干渉信号を 12 次まで計測することができ、周波数領域の 2 次元シングルショット計測に成功した。

6. 謝辞

研究は「公益財団法人 JFE21 世紀財団」の研究助成による。

7. 参考文献

- [1] K.-N. Joo and S.-W. Kim, *Opt. Express* 14, (13), pp. 5954-5960 (2006).
- [2] M. Cui, et al, *Opt. Express* 19, (7), pp. 6549-6562 (2011).
- [3] S. Choi, et al, *Opt. Lett.* 31, (13), pp. 1976-1978, (2006).
- [4] S. Choi, et al, *Jpn. J. Appl. Phys.* 48 pp.09LF01-05 (2009).
- [5] S. Choi, et al, *Opt. Express*, 20, (25), pp. 27820-27829 (2012).
- [6] T. Shioda, et al, *Opt. Commun.* 284, (1), pp. 144-147 (2011).
- [7] M. Shirasaki, *Opt. Lett.* 21, pp. 366-368, (1966).
- [8] M. Shirasaki, *Opt. Lett.* 9, pp. 1598-1600, (1967).
- [9] T. Shioda, et al, *Appl. Opt.*, 51, (21), pp. 5224-5230 (2012).