

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：15201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04165

研究課題名(和文)多層塗膜の応力解析を可能にするFMCWデジタルホログラフィ統合塗膜解析法

研究課題名(英文)FMCW digital holographic method to achieve stress analysis for multilayer coating films

研究代表者

横田 正幸 (Yokota, Masayuki)

島根大学・学術研究院理工学系・教授

研究者番号：80323335

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：レーザー光源の周波数を変調する周波数変調連続波(FMCW)技術をデジタルホログラフィに導入することで、多数物体の弁別解析を可能にした。物体を弁別する条件を実験、数値計算により調べた。また、参照光の光路長を多重化して、直交した直線偏光とすることで物体光の偏光状態を解析する手法を提案した。UV硬化型接着剤の瞬間的な変化及び長時間の硬化特性の両方を解析する実験を行い、接着剤の硬化特性の新しい評価法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

デジタルホログラフィによる干渉計測法では、その逐次解析により塗膜の乾燥や硬化過程の評価が可能になる。提案法では、デジタルホログラフィにFMCW技術を導入することにより所望の位置にある物体だけを選択的に解析することが可能になる。また、選択的な像再生から多層塗膜などへの応用や光路長の多重化による参照光の多重化を図り、これによる物体光の偏光状態の解析などを可能にする。これらにより、従来の塗膜乾燥評価において、多層塗膜への適用や塗膜内の応力の変化などを解析することが可能になる。

研究成果の概要(英文)：By introducing the frequency modulation continuous wave (FMCW) technology that modulates the frequency of the laser light source into digital holography, it has become possible to discriminate and analyze a large number of objects. The conditions for discriminating objects were investigated by experiments and numerical calculations. We also proposed a method for analyzing the polarization state of object light by multiplexing the optical path length of the reference light to obtain an orthogonal linearly polarized light. We conducted an experiment to analyze both the instantaneous change of the UV curable adhesive and the long-term curing characteristics, and proposed a new evaluation method for the curing characteristics of the adhesive.

研究分野：光応用計測

キーワード：デジタルホログラフィ FMCW 多重化 塗膜の硬化過程 偏光の記録と解析

1. 研究開始当初の背景

レーダに用いられてきた周波数変調連続波 (FMCW) 技術は、物体の変位や形状、距離測定を目的として干渉計にも応用されている。FMCW 技術を干渉計に応用する場合、半導体レーザは小型、取り扱いが簡便で注入電流変調による発振周波数が変調できることから便利である。不等光路を持つマイケルソン干渉計に半導体レーザを光源として用いるヘテロダイン干渉計では、光検出器において検出されるビート信号周波数が物体距離に依存する。これより、ビート信号の周波数と位相を測定することで、物体距離や変位、形状が測定できる。

近年、この FMCW 技術がデジタルホログラフィ (DH) にも応用されている。DH ではレーザ反射光と参照光を干渉させて記録したホログラムから像再生計算により、物体光の情報 (強度、位相) が得られる。FMCW 技術を導入した DH では、光源の周波数変調中に一定時間間隔で高速記録したホログラムの時系列データから、時間フーリエ解析を経て所望の物体位置に対応するビート信号成分を抽出した選択的像再生が可能になる。この技術を用いて拡散反射面を持つ硬貨の選択的画像再生や広帯域波長走査光源を使って DH 顕微鏡による豚の精子細胞観察が行われている。塗料や接着剤などの乾燥や硬化評価には、有効な方法としてデジタルホログラフィ法が提案されているが、FMCW 技術を導入することにより多層膜、多面的な解析、偏光情報の記録と解析などの機能を容易に導入することが可能になる。

2. 研究の目的

塗料、インク、接着剤等の乾燥・硬化を伴う工業材料に対し、非破壊・非接触かつ総合的な塗膜解析・評価をデジタルホログラフィ (以下 DH と略す) に基づく干渉計測法とレーザ技術を融合した統合解析法により実現する。具体的にはレーザ光を周波数変調する FMCW (Frequency Modulation Continuous Wave) 技術を応用し、直交した偏光方位を持つ 2 つの参照光によるホログラム多重記録を行い、塗膜反射光 (物体光) の偏光状態を記録し塗膜の応力解析を行う。これより近年普及の顕著な UV 硬化剤 (塗料、インク、接着剤) に対する硬化過程解析、UV 光照射時の塗膜内応力解析を試みる。実験として、二つの物体の分離度を数値計算及び実験により確認後に、光路長の異なる 2 つの直交直線偏光を参照光として FMCW 技術によりホログラム多重記録し、これにより応力印加前後におけるアクリル樹脂透過光の偏光状態の変化や UV 硬化接着剤の時系列解析した結果について報告する。

3. 研究の方法

(1) 光源の周波数変調と物体の分離度の関係

半導体レーザ (LD) の注入電流を鋸歯状波で変調することにより出射光を光周波数変調した場合、光周波数の変調帯域幅と物体検出の際に生じるビート信号の周波数との関係を調べた。図 1 のようにそれぞれに A、B の文字を書いた 2 枚の平板 (銅板) を並べて配置した後、1 つの平板 (A) のみを移動した場合について、平板 B に対応するビート信号周波数のみを抽出して得られた再生像に対する再生分離度 (平板 A の再生像が表示される割合) を実験と数値計算によって調べた。これより、光源の周波数変調帯域幅と物体分解能の関係を調べた。

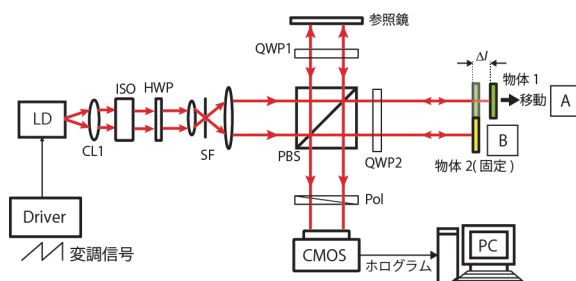


図 1.2 物体分離実験系

(2) 直交偏光した参照光の多重化による物体の応力解析

物体光の偏光状態を記録、解析するために方位が直交した直線偏光を持つ 2 つの光路の異なる参照光を使って図 2 の実験系によりホログラムを多重記録した。これにより、物体光の各偏光成分を記録したホログラムをビート周波数面で分離して別々に再生することができる。実験として、アクリル製リングに対する応力印加前後における透過光の偏光状態の変化を解析した。次に、逐次記録を実施することにより UV 硬化接着剤の硬化過程の解析を透過光の偏光状態の変化や位相変化から解析した。

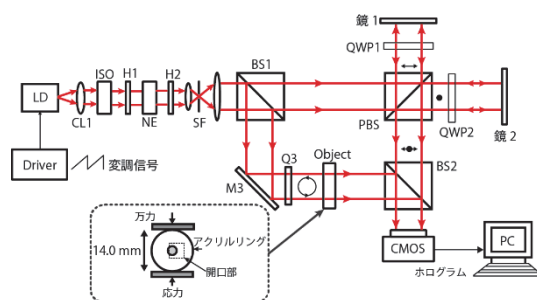


図 2. 偏光解析実験系

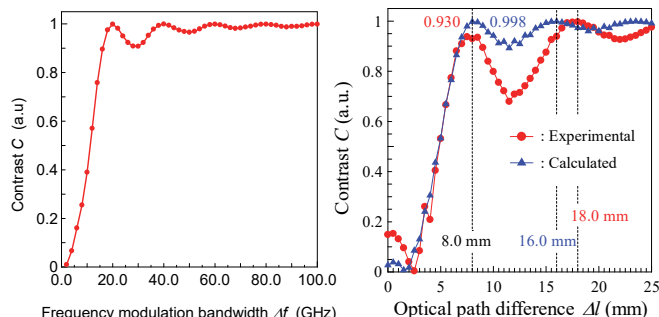
4. 研究成果

(1) 光源の周波数変調と物体の分離度の関係

光源（市販の半導体レーザー：HL7859MG）の光周波数変調の帯域幅と得られる再生像のコントラストとの関係を調べた。結果は図3のように、2つの再生像（強度画像）間のコントラスト C ($C=1$ の場合、一方の像が完全に消える) が変化した。図3(a)は数値計算の結果で、物体間の距離は光路長差で 15mm と固定している。この距離は半導体レーザーのモードホップを避けた時の変調帯域幅 19.6GHz における最小距離分解能に相当する距離である。

周波数帯域 Δf を増やすと 20GHz 以上であれば十分像が消え、 60GHz 以上であれば変動しても僅かではほぼ完全に像が分離できることが分かった。ただし、半導体レーザーの場合、変調帯域幅を広げすぎるとモードホップが生じるため 100GHz 以上の帯域幅を得るのは難しい。次に、図1を想定し、片方の物体を離して行った場合の再生像のコントラスト変化を実験、数値計算両方により調べた。条件は $\Delta f=20\text{GHz}$ としている。

結果を図3(b)に示す。3(a)と似たような変化を示すが、特に物体間距離が Δf により決定される最小検出距離（実験の場合は 7.65mm ）の整数倍の位置においてコントラストが極大値を取ることが分かった。通常の半導体レーザーで得られる Δf が 100GHz 以下であることから、2物体の弁別解析には物体を数mm以上離して配置する必要があることが分かった。



(a) 周波数帯域依存性 (b) 距離依存性

図 3.2 物体の分離再生

(2) 直交偏光した参照光の多重化による物体の応力解析

図2に示す実験系により、透明なアクリル製の円環（直径 14mm ）に対する透過光を物体光とし、方位が直交した2つの参照光に対して記録されたホログラムから得られるビート信号周波数を 19Hz と 28Hz として分離した。万力により円環に応力を加える前後で得られた再生像を図4に示す。

x , y は Jones 行列による偏光成分を表している。 $I_{ox,y}$ は強度画像、 $\phi_{ox,y}$ は位相の x , y 偏光成分である。再生範囲は $6.01 \times 6.01\text{mm}^2$ である。位相分布は $0 \sim 2\pi$ (rad) に対して黒～白のグレースケールで表記している。強度画像では応力印加前後で大きな違いは見られないが、 x , y 偏光においてそれぞれ異なる縞模様が見られる。これは光学素子などからの裏面反射で生じる干渉縞と考えられるが、時系列信号処理におけるバンドパスフィルタの狭帯域化や像再生の際の空間周波数面におけるフィルタ処理により除去可能であると思われる。

対照的に位相分布では、応力印加前後で大きな違いが見られる。 x , y 偏光成分間においても位相分布の差異が生じている。偏光成分による差異はアクリル試料の持つ複屈折や試料に穴をあける際の残留応力が要因として考えられ、万力による応力の印可前後における違いは試料に誘起された光弾性効果による複屈折であると考えられる。

次にそれぞれの偏光成分における再生像の振幅、位相情報から物体光の偏光状態を記述した結果を図5に示す。左中央が穴部分、それ以外がアクリル試料を透過した部分である。試料部分では応力印加前後で偏光状態が大きく変化している。これは光弾性効果により誘起された複屈折による変化と考えられ、この変化から光弾性解析により試料に働いた応力が推定できる。

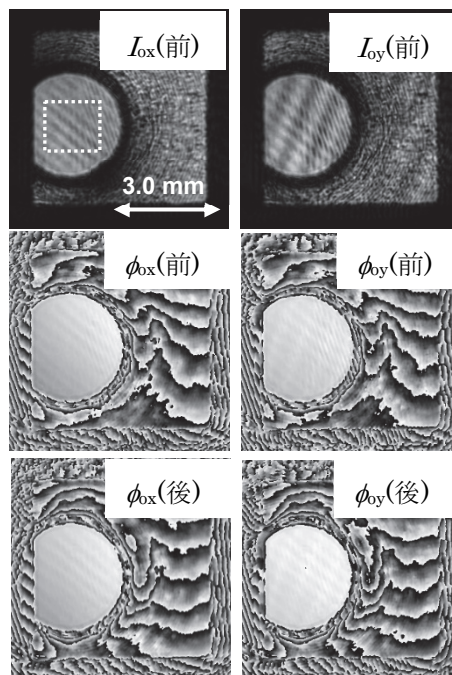


図 4. 応力印加前後の再生像

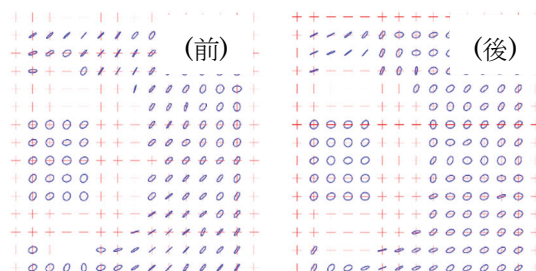


図 5. 応力印加前後の偏光分布

次に、図6の様にUV硬化型接着剤を分光高度計用ガラスセル(透過長2.0mm)に注入した試料のレーザ透過光に対する偏光解析を行った。この場合、UV接着剤の硬化用にUV-LED(出力50mW/cm², 中心波長365nm)を用いて試料上方10cmの位置より照明して接着剤を硬化させた。

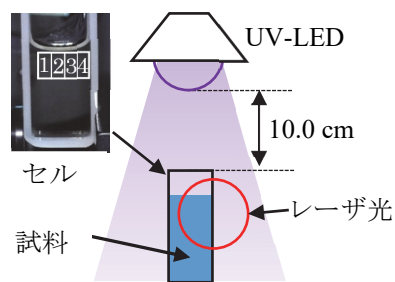


図6. UV接着剤の硬化解析

また、透過光の解析範囲をセル写真の白い枠内として、さらに範囲内を4分割して解析した。この実験では、高速カメラを変更(100fpsで繰り返し測定可能なカメラ)し、測定を5秒毎に繰り返して、1800秒間測定している。また、UV-LED光は測定開始30秒後に照明を開始し、測定終了時(1800秒後)まで照明を続けた。

30秒と30.1秒で得られた再生像(x偏光成分)の位相差の絶対値を各エリア内で平均した値を時系列毎に示した結果を図7に示す。この結果ではUV光照明直後の30秒時点、100秒時点、400秒時点での結果を示している。これらと比較すると照明直後では位相変化量が1ラジアン以下となっており、

あまり位相変化が見られないが、100秒時点ではそれが30倍以上と大きくなっている。このとき接着剤の光重合反応等による激しい化学変化が塗膜内で生じていることが予想される。

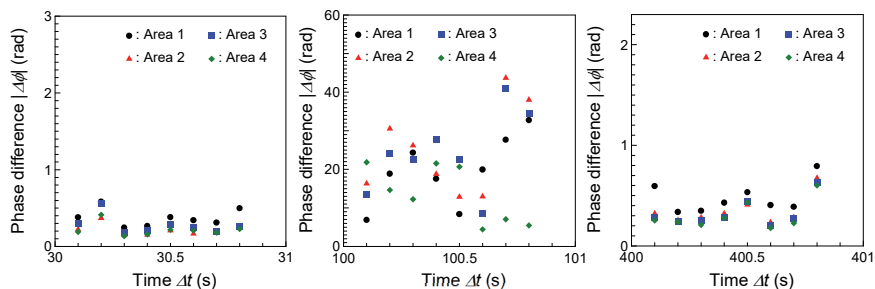


図7. 位相差絶対値の時系列変化

しかし、この変化も400秒時点では収まっており、このことから繰り返し測定によりUV照明により生じる化学変化によって引き起こされる塗膜変化の様子を高速且つ長時間観察することができることが示された。

次に30秒時点と100秒時点でのエリア1内における偏光分布の様子を求めた結果を図8に示す。これを見ると、対応する各点における偏光状態が大きく変わっていることが分かる。このことから化学変化による複屈折や硬化時の塗膜応力等により偏光が変わっている様子が示唆される。

以上の結果より、FMCW-DH法を用いた偏光解析及び応力可視化が可能であることが分かった。

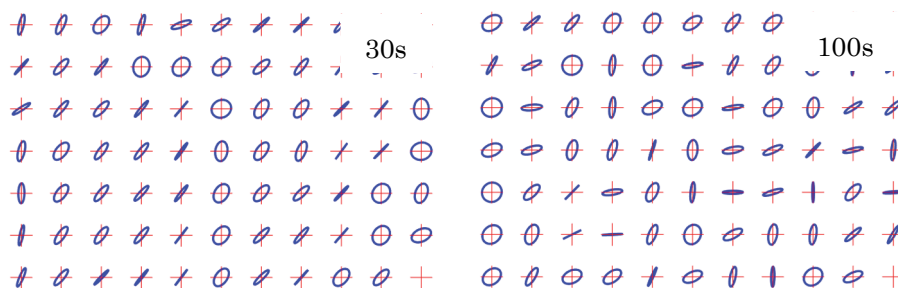


図8. 30sと100s時の偏光分布 (Area 1)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 横田正幸, 石川達也, 青木善伸	4. 巻 9
2. 論文標題 FMCW-デジタルホログラフィによる直交直線偏光の参照光を用いた偏光分布の解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 産業応用光学会誌	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Y. Aoki, T. Ishikawa and M. Yokota
2. 発表標題 Effects of both light intensity variation and frequency modulation bandwidth of a light source on reconstructed images in FMCW-digital holography
3. 学会等名 Information Photonics 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Yokota, T. Ishikawa, and Y. Aoki
2. 発表標題 Polarization analysis of the object wave using FMCW-digital holography
3. 学会等名 2019 Optical Metrology（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Yokota, T. Ishikawa and Y. Aoki
2. 発表標題 Polarization state of the object wave analyzed by using FMCW-digital holography
3. 学会等名 13th Japan-Finland Joint Symposium on Optics in Engineering（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木善伸, 横田正幸
2. 発表標題 FMCWデジタルホログラフィを用いた偏光解析の研究
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木善信, 石川達也, 内田研, 横田正幸
2. 発表標題 FMCW法を用いたデジタルホログラフィにおける2物体分離度の数値計算による検討
3. 学会等名 第20回IEEE広島支部学生シンポジウム (HISS20)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石川達也, 横田正幸
2. 発表標題 FMCWデジタルホログラフィにおける選択的像再生条件の検討
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会2018 (OPJ2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Ishikawa, T. Uchida and M. Yokota
2. 発表標題 Investigation of the distance resolution in FMCW-digital holography
3. 学会等名 International symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2018 (ISOM2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Ishikawa, Yoshinobu Aoki and M. Yokota
2. 発表標題 Selective object image reconstruction using FMCW-digital holography
3. 学会等名 3rd International Symposium of Gunma University Medical Innovation and 8th International Conference on Advanced Micro-Device Engineering (GUMI&AMDE2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Aoki, T. Ishikawa, M. Yokota
2. 発表標題 Effects of both light intensity variation and frequency modulation bandwidth of a light source on reconstructed iamges in FMCW-digital holography
3. 学会等名 Information photonics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関