

デジタル画像とモアレを利用した 変形分布計測技術とその応用

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
計量標準総合センター 分析計測標準研究部門

総括研究主幹 津田 浩 (つだ ひろし)



網戸を重ねたときに網目以外の模様が現れるのを見たことはありませんか？このとき片方の網戸を少し動かすと、その模様は大きく変化します。この模様は網目のような周期格子を重ねたときに生じる干渉現象で、モアレと呼ばれます。モアレは一種の拡大現象で、格子がわずかに動くともアレ模様は大きく変わります。著者の研究グループはモアレが持つ拡大現象を利用して、電子デバイスから社会インフラに渡る幅広いスケールに及ぶ材料・構造の変位・ひずみ分布を高精度に計測する技術を開発しました。この技術は壊れにくい材料の設計や構造物の信頼性評価に貢献します。またモアレを利用した計測原理を応用することで結晶欠陥である転位の分布を評価する技術を開発しました。この技術を利用して欠陥の少ないデバイス製造が期待されます。

1. はじめに

熱や力を受けたとき材料・構造がどのように変形するかを理解することは、損傷や破壊を抑制する観点から非常に重要である。このため耐荷重能が求められる構造物だけでなく、熱変形を受ける電子デバイスにおいても変位・ひずみの測定ニーズがある。従来、変位は伸び計、ひずみはひずみゲージを用いて測定されてきたが、これらのセンサは取り付けられた箇所の一点しか測定できない。このためひずみゲージの大きさの制約から電子デバイスのような小さな部材のひずみ分布は計測できなかった。また巨大構造物の変位分布計測には多数の伸び計が必要となり、コストと手間を要することが課題になっていた。

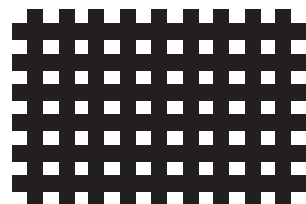
近年、デジタルカメラ、および画像処理技術の進展に伴い、デジタル画像を利用した全視野計測が大きな注目を集めている。全視野計測は計測対象に描写された模様の動きを解析することで変位・ひずみ分布を計測する技術で、**図1**に示す不規則なスペckル模様を描写するデジタル画像相関法と周期模様を描写するモアレ法に大別される^{1, 2)}。スペckル模様を大面積に描写することは技術的に困難なので、デジタル画像相関法は比較的小さな領域を対象にした計測に利用される。

一方、周期模様はナノインプリントリソグラフィなど半導体製造技術を利用して比較的容易にナノ、またはマイクロメートルスケールの微小な模様を計測対象へ描写できる。またビルや橋梁などの巨大構造物では窓枠や橋桁といった構造物に備わる周期構造を利用して変位分布を計測できる。このような理由からモアレ法は材料のひずみ分布計測から巨大構造物の変位分布計測に至る広範なスケールに及ぶ計測に利用されている。

本稿はモアレ法を利用した変位・ひずみ分布計測技術を紹介する。はじめにモアレ法の原理を説明し、続いて350メートルを超える長大橋のたわみ計測、レーザー走査型顕微鏡観察下で繊維強化プラスチックの3点曲げ試験を行った際のひずみ分布計測、およびモアレ技術の応用として電子顕微鏡写真から結晶欠陥の一種である転位の分布を評価した例を紹介する。



スペckル模様



周期模様

図1 全視野計測に用いられる二種類の模様イメージ

2. モアレを利用した全視野計測の原理

モアレは図2に示す間隔がほぼ等しい二つの格子を重ねたときに形成される干渉縞である。片方の格子をわずかに移動、または回転させるとモアレ模様は大きく変化する。モアレ模様の変化は数学的には位相変化として取り扱われ、モアレを利用することでわずかな移動、または回転といった変位は大きな位相変化として検出される。モアレの位相分布変化は変位分布に対応することから、モアレの位相解析から変位分布を評価できる。

モアレを変位計測に利用するには二つの格子が必要である。そこで一つは測定対象表面に格子模様を描写する。もう一つは測定対象を撮影するデジタルカメラの撮像素子を利用する。CCDやCMOSといったデジタルカメラの撮像素子を構成する画素は二次元周期配列している。測定対象上の格子をデジタルカメラで撮影すると、周期配列した画素に格子模様が記録されことから、二つの格子を重ねたときと同じ効果を得ることができる。

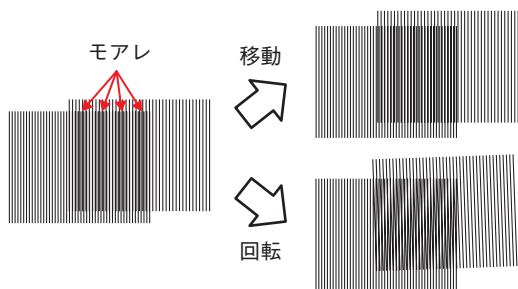


図2 モアレの特徴

図3 (a) に示す一次元白黒格子を一次元撮像素子で撮影することを考える。同図 (b) に示した赤色囲みが撮像素子の画素を表すとき、各画素は画素中の白黒面積比に応じた同図 (c) を出力する。しかしながらこのとき得られた出力分布にはモアレに相当する干渉模様が観察されない。ここで本節冒頭の「モアレは間隔がほぼ等しい二つの格子を重ねたときに形成される」という記述を思い出して欲しい。同図 (b) を見ると、白黒格子一周期に3.5個の画素が配置しており、

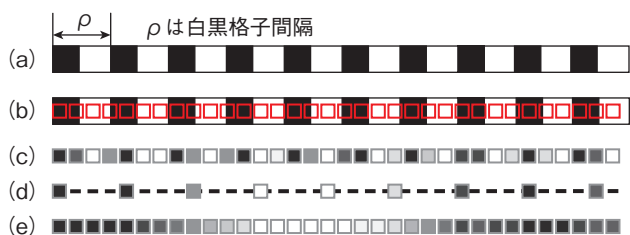


図3 サンプリングモアレ法による変形分布計測の原理

INTRO

分析計測標準研究部門は産業技術総合研究所計量標準総合センターの4研究部門の一つで、音響・超音波、放射線、中性子線に関する計量標準の維持・供給を行う一方で、モアレを利用した画像計測技術のほか、各種量子線、極短パルスレーザー光、イオンビーム、超音波などを用いた先端計測技術を研究開発し、新材料や製品開発に役立つ計測データを提供することによる産業界への橋渡しを目指しています。

変位・ひずみ分布計測技術は現在、様々な分野でニーズがあります。たとえば我が国では高度成長期に建設された数多くの橋梁が老朽化し、これらの健全性を評価する必要があります。従来、目視検査といった検査員の技量に大きく依存する検査が行われてきましたが、車両が通行したときのたわみ分布を計測することで損傷具合を定量評価することが期待されています。また近年、さらなる高温での動作が要求されるパワー半導体では熱ひずみによるパッケージングの破壊を防ぐ設計が求められています。そこでパッケージングに用いる材料の組成と熱ひずみ分布の関係を評価することで、熱変化によるひずみ集中を緩和するようなパッケージングの開発に貢献できます。

本稿に記したデジタル画像計測技術はデジタルカメラの性能とパーソナルコンピュータの処理能力向上に伴い成長してきた新しい技術で、従来技術では実現できなかった計測を可能にします。今後も産業界のニーズに応じた研究開発を進め、変位・ひずみ分布計測による問題解決に取り組みます。

(分析計測標準研究部門HP :

<https://unit.aist.go.jp/rima/index.html>)

■ナビゲーター

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
計量標準総合センター
分析計測標準研究部門長

野中 秀彦 (のなか ひでひこ)

白黒格子と比較して画素の間隔は狭い。そこで白黒格子にほぼ等しい間隔に画素を配置するような操作、つまり画素データを間引き処理をする。この例では白黒格子一周期に3.5個の画素があることから、3.5に近い整数である4個ごとに画素データを間引くと同図 (d) が得られる。欠落した画素データを線形補間すると同図 (e) に示すモアレが得られる。同図 (e) に見られる濃淡の周期性を正弦波と捉えたと位置*i*における画素が位相値 $\varphi(i)$ を持つことが理解できるであろう。

変形後に撮影された画像データに対しても同様の画像処理を行うことで、位置*i*における画素の位相値 $\varphi'(i)$ を得ることができる。位置*i*における変位 $\delta(i)$ は白黒格子間隔を ρ とすると、次式から求めることができる。

$$\delta(i) = -\frac{\rho}{2\pi} \{\varphi'(i) - \varphi(i)\}$$

上記した格子画像を間引きした画素データからモアレの位相値を算出し、変位分布を評価する解析法をサンプリングモアレ法と呼ぶ。サンプリングモアレ法では測定対象に貼り付けた格子間隔 ρ の0.1%の精度で変形を計測できる³⁾。最近のデジタルカメラの撮像素子は数千万画素を有する製品が多く、数千点の画素が横、縦方向に配置することから、非常に高解像度の分布計測が可能である。

3. 巨大構造物の変位分布計測への適用

図4の写真は福岡県北九州市戸畑区と若松区を結ぶ支間長367メートルの若戸大橋である。この長大橋のたわみ計測を考えたとき橋の下が海なので、地面と測定箇所を接続して用いる伸び計による測定はできない。また全視野計測を適用するにしても、数百メートルに及ぶ巨大構造物に格子、または不規則模様を描写することはコストと景観を考慮すると難しい。モアレを利用した全視野計測の利点として構造物が有する周期構造を利用できることを前述した。若戸大橋の主桁は周期的なトラス構造を有することから、主桁のトラス構造を周期模様と見なしてたわみ分布を計測した。

大型トラックが橋梁を通過する時間6、14、22秒における画像と、そのときに評価されたたわみ分布を示す。トラックが右主塔を通過した時間6秒では、トラック位置で約30mm下向きなたわみが計測される。一方、橋梁中央部から左主塔間は最大10mmを超える上向き

たわみが発生した。トラックが橋梁中央に位置する時間14秒のとき、橋梁中央が20mmほど下向きにたわみ、両主塔近傍は数mmほど持ち上がる。トラックが左主塔に接近する時間22秒では、トラック位置で下向きに約30mmたわみ、橋梁中央から右主塔間は上向きに最大約20mmたわむと評価された。このような結果から吊り橋である若戸大橋は車両が通行したときに可撓性のある変形挙動を示すことが分かった。同じ重量の車両が通過したときのたわみ量の経時変化を記録することで、橋梁の剛性低下を評価することが期待される。

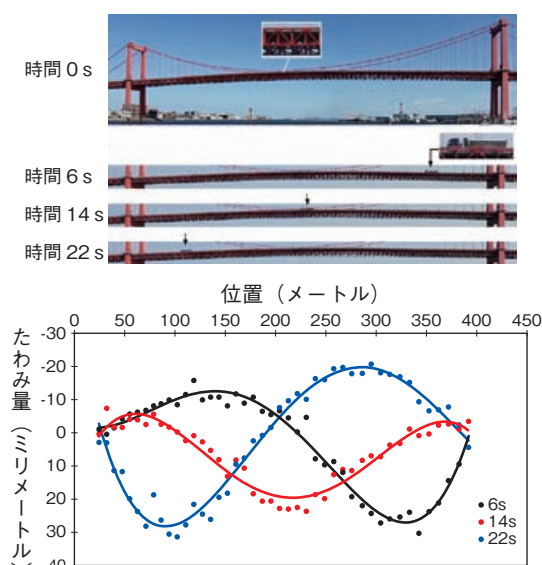


図4 若戸大橋のたわみ計測結果

4. 炭素繊維強化プラスチックの曲げ時のひずみ分布測定

炭素繊維は軽量で剛性・強度が高い特長を有し、層状に配置した炭素繊維を樹脂で固め、その層を重ね合わせた炭素繊維強化プラスチック (carbon fiber-reinforced plastics、以下CFRP) として、主に航空宇宙構造物に適用される。CFRPは壊れにくく変形しにくい材料であるが、層を積み重ねた構造から、曲げ荷重を受けると層間がはく離する、また繊維軸方向以外の力に対しては比較的低い荷重レベルで樹脂が割れるといった欠点がある。この破壊過程を詳細に検討するため、曲げ荷重における層間や樹脂割れが生じる際のひずみ分布の定量評価が求められていた。

ここでは図5に示すCFRPへ曲げ荷重を与えた箇所の真下近傍をレーザー走査顕微鏡で観察してひずみ分布を計測した例を紹介する。ナノインプリントリソグラフィと呼ばれる半導体の微細な回路を描写する技術を

利用して試験片側面に3 μm 間隔の二次元格子を塗布した。同図下に曲げ荷重を掛けたときの3方向のひずみ分布を示す。x方向ひずみに関しては下層から荷重方向に伸びる大きなひずみを有する領域が点在している様子が観察される。一方、y方向はほぼ一様な圧縮ひずみが発生している。また層が下になるにつれて、層間にはく離を引き起こす大きなせん断ひずみが発生していることが分かる。これらの観察からこの材料は曲げ荷重を受けたとき、最下層において樹脂割れ、または層間にはく離が最初に発生することがわかる。上記のようなCFRPの破壊過程を定量評価することで、壊れにくいCFRPの材料設計指針を与えることができる。

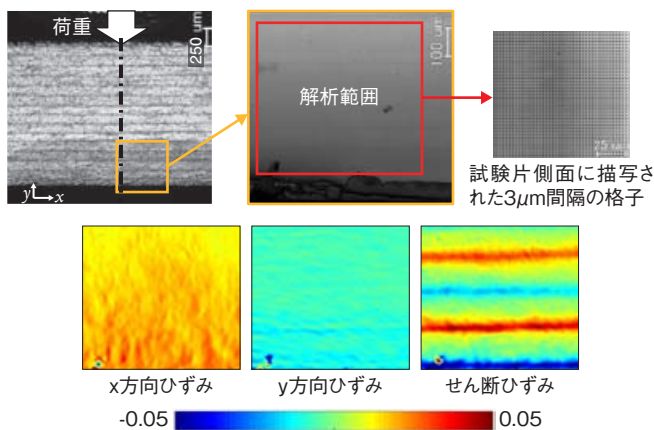


図5 炭素繊維複合材料の曲げ荷重におけるひずみ分布測定

5. モアレを利用した電子顕微鏡写真像から転位を検出する技術

半導体デバイスは構成原子が均一配列していることが望ましいが、製造時に転位と呼ばれる結晶欠陥が導入される。転位は原子レベルの欠陥であるため、高解像度な透過電子顕微鏡写真の目視観察から転位分布を評価していた。しかし図6左下に示す透過電子顕微鏡写真から分かるように、目視から転位を検出することは極めて難しい。ここで透過電子顕微鏡写真に画像処理を施すことで転位分布を評価した研究を紹介する。

図6の左上に周期的な原子配列の中に転位に相当する余分な原子層が入った原子配列イメージを示す。この原子配列を格子と見なして前述したモアレ解析技術を応用すると、同図右上に示すモアレ模様が得られる。このモアレ模様では赤丸で囲んだ転位箇所ではモアレが途切れる、また分岐している。つまり透過電子顕微鏡写真にモアレ解析を適用することで転位箇所をモアレ

の途切れ、または分岐点として容易に検出できると考えられる。同図下に示した3枚の写真はそれぞれ半導体デバイスの透過電子顕微鏡写真、モアレ解析から得られたy軸格子像（水平方向の原子配列像）とx軸格子像（垂直方向の原子配列像）である。y、およびx軸格子像の途切れ、分岐点が転位に対応している。これまでデバイスの転位分布評価は極めて困難であったが、この技術を利用することで転位の少ない高性能デバイスのプロセス技術が確立されることが期待できる。

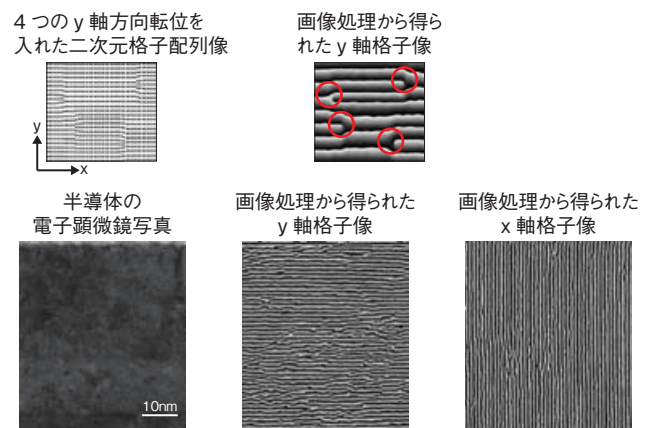


図6 透過電子顕微鏡画像における転位分布検出⁷⁾

6. まとめ

モアレは古くから知られた現象で、デジタルカメラが出現する以前からモアレを利用した計測技術は存在したが、精度が低いことや利用条件に制限が多く、適用に制約のある計測手法であった^{4, 5)}。しかし画像をデジタルデータとして取り扱えるようになってから、モアレを利用した画像計測技術は急速に進展し、様々な解析手法や評価結果が報告されるようになってきた^{6, 7)}。

今後はここで紹介した計測データを材料・構造設計や信頼性向上に活用し、壊れにくい材料の開発、欠陥の少ないデバイスプロセス技術の確立、構造物の健全性評価に役立つような研究を進める所存である。

参考文献

- 1) Yoneyama S. *et al.* Experimental Techniques, 34-40 (2007)
- 2) Ri S. *et al.* Experimental Mechanics, Vol. 50, No. 4, 501-508 (2010)
- 3) 李志遠 他, 非破壊検査, Vol.63, No.10, 515-521 (2014)
- 4) Post D, Applied Optics, Vol. 6, No. 11, 1938-1942 (1967)
- 5) McDonach A. *et al.* Experimental Techniques, 20-24 (1983)
- 6) Wang Q. *et al.* Applied Optics, Vol. 55, No. 25, 6858-6865 (2016)
- 7) Kodera M. *et al.* Japanese Journal of Applied Physics, 57, 04FC04 (2018)

ご照会先

hiroshi-tsuda@aist.go.jp