

●CCDカメラによる非接触計測技術の物性測定への応用

東ソー分析センター 四日市事業部 解析グループ

志村 尚俊
松本 良憲
山本 武志

1. はじめに

材料物性を評価するには、外場を与え、その応答を観測する方法が一般的である。例えば、外場として変形を与えたときの応答として力の計測、外場として温度変化を与えたときの応答としての変形の計測などである。引張試験で代表される力学物性評価では、これまで、応答は試験片に“接触”して計測することが一般的であった。しかしながら、試料によっては接触することによって試験結果に影響を与えることがある。例えば、JIS規格に準じて引張弾性率評価を行う場合、Fig. 1 に示したように引張りずみは接触法によるひずみ計で計測する。ゴムのような柔らかい材料にひずみ計を装着すると、ひずみ計自身の重みで試料が変形することがある。そのような場合、引張による変形量とひずみ計を装着することによる変形量を分離することは実際上不可能であるため、得られた弾性率は見かけ上の値となる。

同様にフィルム状試料の弾性率も接触式では評価が困難である。このような背景から一部の装置メーカーはビデオやCCDカメラを用いたひずみ計をオプションとして提供している。

近年では、各種電子技術が容易に利用できるようになった。CCDカメラもその一つで、比較的安価な市販品を入手することができる。本報告では、市販CCDカメラを利用してひずみを計測した事例を紹介する。

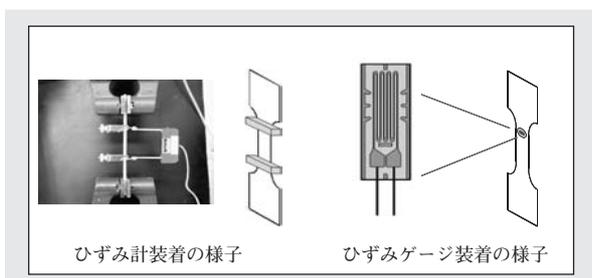


Fig. 1 従来法による引張試験

CCDカメラを用いたひずみの評価には画像照合法¹⁾など高度な処理を必要とする方法もあるが、ここでは単純に試料表面にマーカを描いて撮影する方法を用いた。

本技術紹介では、測定原理について触れた後、引張試験におけるひずみ測定やポアソン比測定、線膨張係数測定を行った結果を中心に紹介する。

2. 測定原理

測定原理をFig. 2 に示す。基準となる形状を試料上にマーカとして記し、それをCCDカメラで撮影する。撮影されたマーカの変形量からひずみを評価する。ここでのポイントは、CCDカメラでひずみだけを評価しても、必ずしも物性を評価できないという点である。例えば、弾性率を求めるには応力とひずみを同時に測定することが必要である。今回、構築したシステムでは、ひずみと力、温度、湿度、電気抵抗などを時間の関数として同期させて取り込み、コンピューター処理することによって、弾性率や線膨張などの物性を評価できるようにした。

3. 引張試験への適用

引張試験ではひずみと力を計測する。ひずみの計測には、Fig. 1 に示すひずみ計やひずみゲージが用いら

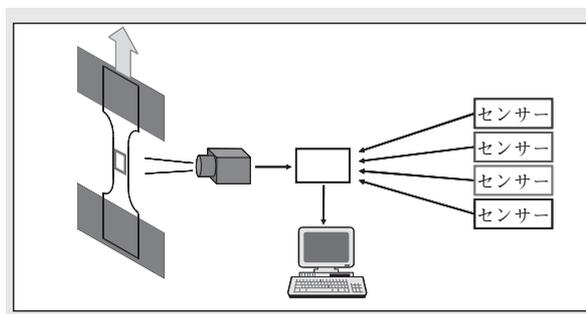


Fig. 2 構築した計測システム

れている。まず最初に、接触法と非接触法の整合性について検討した事例を紹介する。接触法としては、ひずみゲージによる評価を行った。Fig. 1の右に示すひずみゲージはポリイミド基板上に抵抗回路がプリントされたもので、試料に接着剤で貼り付けて使用する。試料の変形に伴って基板が変形すると、回路の抵抗値が変化し、変形量を検出する。金属等の変形検出に利用されるように精度が高い半面、基板がポリイミドであるため、柔らかい材料に使用すると、補強効果（試料が見かけ上、硬くなる効果）のため、正確な値が得られない。また、ポリエチレンなど難接着性の材料では、試料の変形とひずみゲージの変形が一致しないため、適用が困難だと考えられる。

ここでは、ポリカーボネート（PC）、高密度ポリエチレン（HDPE）に対する測定例を示す。PCは接触法でも十分に評価が可能だと予想される試料、HDPEは柔らかく、かつ適切な接着剤がないため、ひずみゲージの適用が困難な試料だと予想される。

Fig. 3に引張測定中に試料に加わった引張方向の縦ひずみ（ ϵ_L ）、および垂直方向の横ひずみ（ ϵ_T ）を試験時間に対してプロットした結果を示した。

PCの結果から、ひずみゲージ（接触法）と非接触法から評価したひずみが一致しており、非接触法で従来法と同等の評価が可能であることがわかる。さらに、通常ひずみゲージではひずみ量2%程度までしか評価できないのに対し、非接触法では一般的な硬質系プラスチックが降伏する10%以上まで評価が可能であった。

一方、HDPEではひずみゲージと非接触法の評価結果が異なった。PCの検討で非接触法が従来法と同等であったことから、ひずみゲージでの評価結果に問題があると考えられる。HDPEはPCに比べて柔らかいため、硬いひずみゲージを貼り付けることによる補強

効果が生じたこと、あるいは、ひずみゲージの接着が十分でなく、試料の変形にひずみゲージの変形が追従していなかったことが原因と考えられる。

このようにひずみゲージでは測定に問題があるような材料でも非接触法では測定が可能であった。

次に、試料厚みが約100 μ mのフィルム状試料の引張試験の結果をFig. 4に示した。試料が薄いため、ひずみ計装着による影響が大きく従来法による測定は困難であるが、非接触法を用いると、容易に評価が可能である。力と縦ひずみの関係から弾性率、縦ひずみと横ひずみの比（ $-\epsilon_T / \epsilon_L$ ）からポアソン比を評価することができた。ここで、ポアソン比とは引張方向の縦ひずみ（ ϵ_L ）と引張方向と垂直方向の横ひずみ（ ϵ_T ）の比で、ゴム状試料で約0.5、硬質プラスチックで約0.3程度の値となる。ポアソン比（ $-\epsilon_T / \epsilon_L$ ）は、有限要素法によるコンピュータシミュレーションにおいて構造体のひずみと応力の関係を計算する際に必須となる値である。通常はJIS試験片等を用い、ひずみゲージで評価する。Fig. 5に示したように縦ひずみ（ ϵ_L ）と横ひずみ（ ϵ_T ）は測定範囲で比例関係にあって、一定のポアソン比を得ることが出来た。

弾性率とポアソン比を繰返し回数N=5で試験し

Table. 1 フィルムの引張り試験

項目	ポアソン比	弾性率
単位	—	GPa
1	0.38	2.27
2	0.39	2.27
3	0.40	2.23
4	0.38	2.31
5	0.39	2.21
平均	0.39	2.26
標準偏差	0.01	0.04

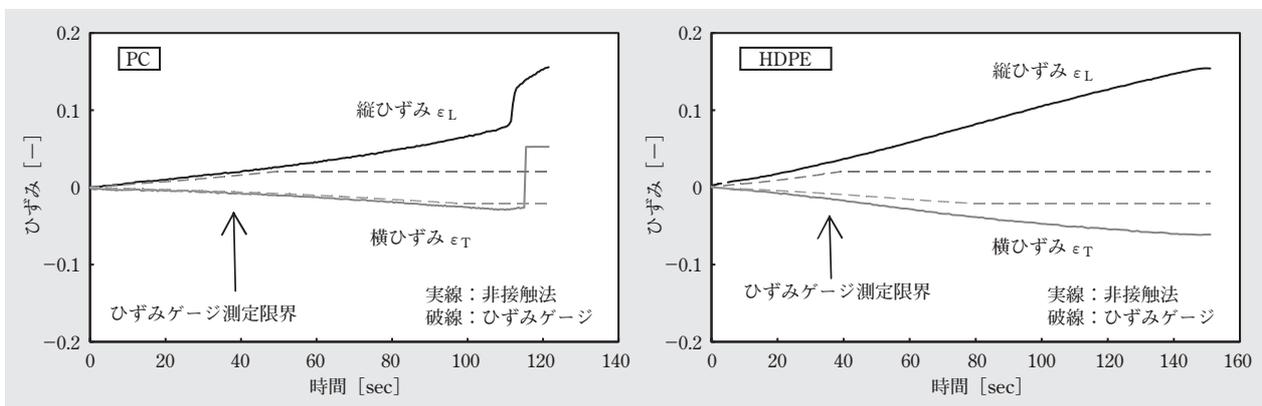


Fig. 3 接触法と非接触法の比較

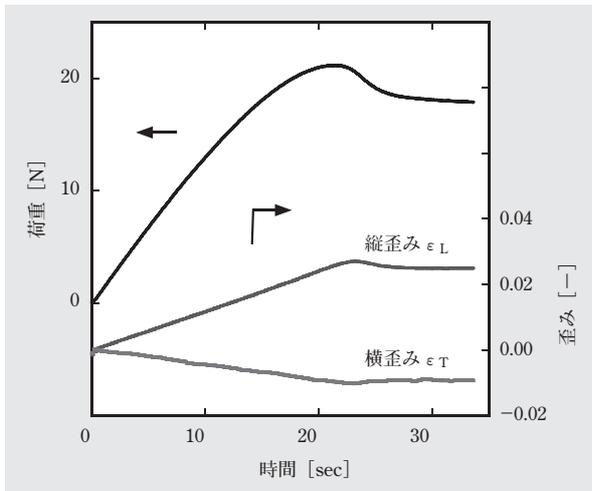


Fig. 4 フィルムの引張試験

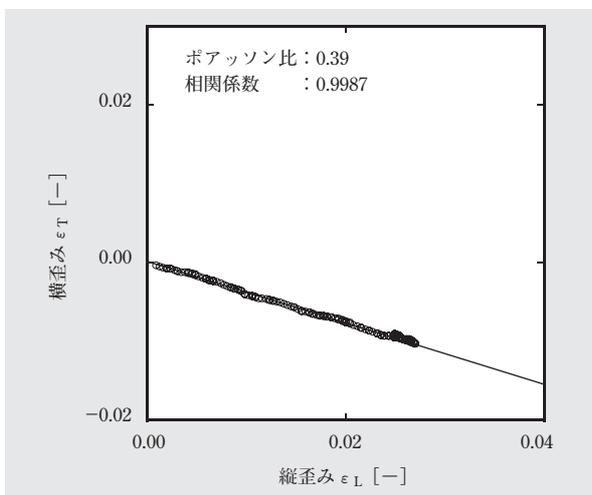


Fig. 5 ポアソン比の解析

た結果を表1に示した。良い再現性が得られた。

引張試験における非接触法の利点は、適用試料の範囲が広いということに加え、高温または低温測定でも適用可能である点である。ひずみゲージなどの接触法ではセンサーを試料に装着するため、測定環境と同じ温度で作動するひずみ計を用意する必要があるが、非接触法は観察窓の外から評価するため測定環境の影響を受けない利点がある。検討の結果、恒温槽（ $-60\sim 200^{\circ}\text{C}$ ）を用いた評価が可能であった。

非接触測定には、もう一つの利点としてカメラを複数台組み合わせることで観察できる点がある。接触法ではセンサーを装着できる場所がある程度限定される。例えば、JIS規格の引張試験片の面方向（幅10mm）に装着することはできても、厚み方向（厚み4mm）にひずみゲージを装着することは困難である。非接触法であれば、カメラの倍率を調整することによって厚み方向

のひずみも同時に評価できる。ここには示さないが、等方性材料、異方性材料について検討したところ、異方性材料では幅方向と厚み方向でポアソン比が異なるという結果を得た。

4. 線膨張率測定への適用事例

液晶モニターに代表される電子機器は多数のプラスチック材料と金属系材料を複雑に組み合わせて精密に構成される。精密であるがゆえ、使用環境の変化に伴う熱ひずみが問題となる場合がある。すなわち、金属の線膨張率（ $1\sim 10\text{ppm/K}$ ）とプラスチックの線膨張率（ $10\sim 100\text{ppm/K}$ ）の違いにより、熱環境の変化に伴って構成材料間の寸法のバランスが狂い、各々の材料にひずみが生じ、製品にゆがみを生じるおそれがある。

熱による変形量の材料間の違いを最小限に抑えるためには、構成材料の線膨張率を合わせこむ必要がある。しかし、プラスチックの線膨張率は材料そのものが持つ特性に加え、加工履歴が大きく影響する²⁾。そのため実際に用いられる部品形状で線膨張率を評価することが望ましいが、電子機器等に用いられるプラスチック部材は薄膜かつ微小であるため従来から用いられているTMA法では評価することが困難であった。

Fig. 6 に従来法であるTMA法の模式図を示す。TMA法は試料にプローブを密着させ、プローブの位置変化から試料長さの変化を評価する。測定方法には、引張または圧縮の2つのモードがあるが、いずれの方法も試料とプローブの密着性を確保するために試料に微小な力を加える必要がある。

硬質材料の場合はTMA法でも問題ないが、ゴムな

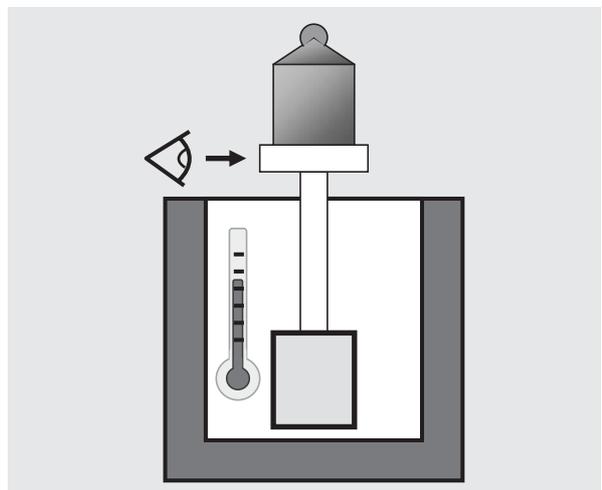


Fig. 6 TMA法の模式図

どの柔らかい材料や薄膜などは微小な力が評価結果に影響を与える恐れがある。この例としてFig. 7にポリエーテルサルフォン (PES) の0.1mm厚フィルムを、TMA法と非接触法で評価した結果を合わせて示した。TMA法によると室温領域では温度に応じて長さが線形に増加するが、PESのガラス転移温度近辺になると試料が軟化し始めるために大きく変形し、室温に冷却しても元の大きさには戻らない。これは試料に加えた微小な力によって永久変形 (クリープ変形) してしまったためである。一方、非接触法では昇降温させてもほぼ元の大きさに戻っており、クリープ変形は認められない。

非接触法の利点として、任意の面内二方向の線膨張率を同時に評価できるという点もある。同時評価の例としてポリエチレンテレフタレート (PET) の0.1mmフィルムに適用した事例をFig. 8に示した。PETフィルムは透明性と耐熱性を両立させるため、加工段階において特定の温度で2軸延伸しながら結晶化を進行させる。昇温時の挙動をMD、TD両方向で比較すると、温度領域ごとに異なる挙動を示す。これはMD方向の

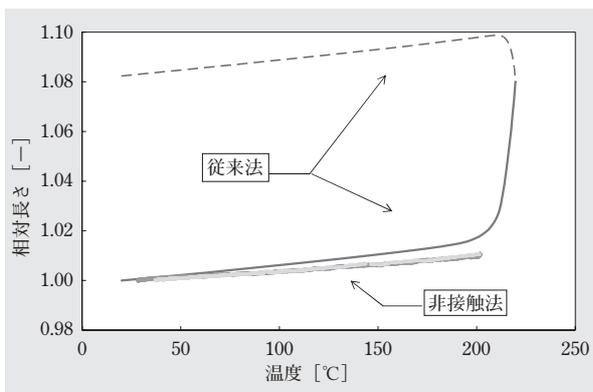


Fig. 7 PESフィルムの線膨張

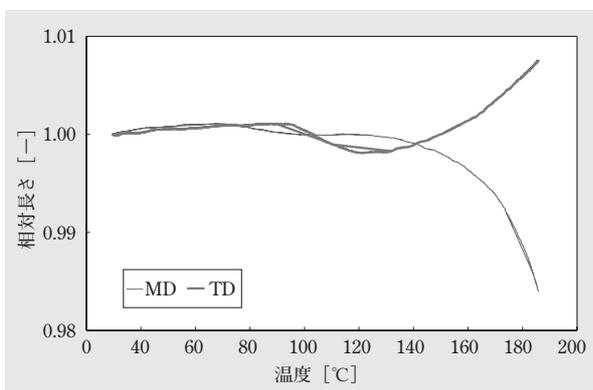


Fig. 8 PETフィルムの線膨張

延伸とTD方向の延伸を異なる温度条件で実施していることと対応していると考えられる。

このように熱を与えたときの試料形状の変化をクリープなどの影響を受けずに計測できることから、他にも試料中の残留ひずみの評価などに適用することが可能である。

5. その他の適用例

ここまでは、力や温度変化に伴う形状変化について紹介した。非接触法の適用できる範囲は、これらの例以外にも見出すことが出来る。例えば、外場を湿度変化にすれば、湿度環境の変化にともなう変形を評価することができる。日常生活環境では湿度の変化も大きく、湿度による影響を調べることは重要である。

吸湿性のある厚み0.1mmの透明フィルムを用いた測定例をFig. 9に示した。湿度変化に対応して、試料の大きさが変化している。試料周辺の湿度は1分程度で設定値に追随していた。一方、湿度変化に対して試料形状は少し遅れを伴い変化した。湿度を上げる過程では、湿度変化に対する形状変化は良い追随性をみせたが、湿度を下げる過程での形状変化は湿度に対する追随性が悪く、複雑な挙動を示した。

また、顕微鏡と組み合わせると観察対象を小さくすることも可能である。Fig. 10、11にホッチキスの針の太さ (約1mm) の温度変化と毛髪の太さ (約0.1mm) の温度変化を示した。試料が小さいため、与える外場は限定されるが、応答としてひずみを評価することは容易である。ホッチキスの針が温度に伴って太くなり、一方、毛髪は温度を上げると乾燥し細くなる事がわかる。

外場として電場、磁場などを活用すれば非接触法の適用範囲はまだ広がると思われる。

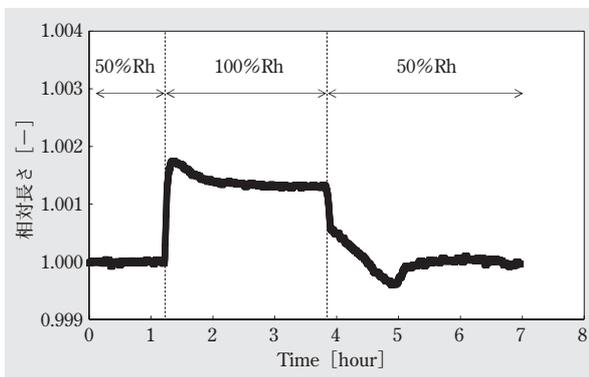


Fig. 9 透明フィルムの耐湿試験

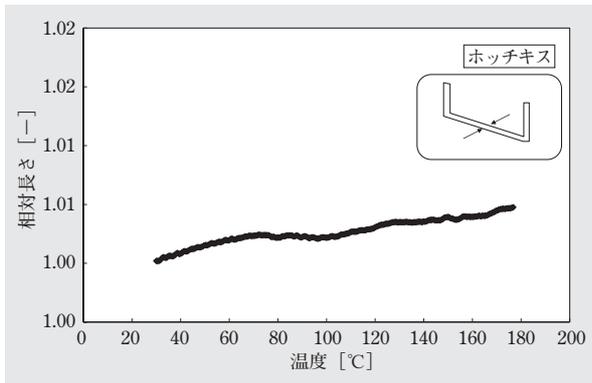


Fig.10 昇温に伴うホッチキス針の変化

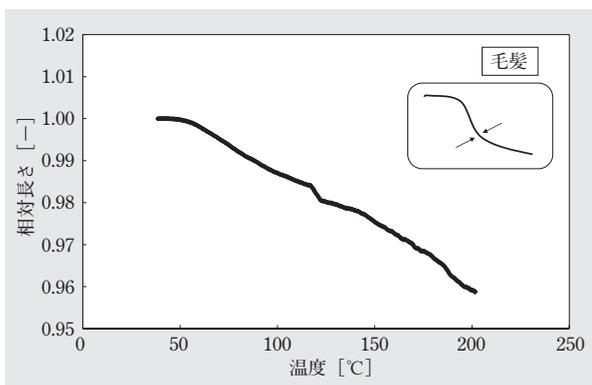


Fig.11 昇温に伴う毛髪径の変化

6. おわりに

非接触法を用いてひずみを評価した事例を紹介した。接触法に比べ非接触法の適用範囲は広く、これまで評価が困難だった柔軟材料や薄膜の評価が可能になる。ここで紹介した評価方法以外にも、様々な評価法が可能であると考えられる。今後も検討を継続し、適用範囲を広げていきたい。

References

- 1) 例えば、K.Murata, et.al., *Mokuzai Gakkaishi*, 5(45), 375 (1999)
- 2) 例えば、瀬戸雅宏他: 成形加工、**13** (12)、812 (2001)