ぜい性材料の繰返し荷重によるひずみの精密測定*

徐 章** 池 田 郁 雄***

A Precise Measurement of Deflection Occurred by Repeat Loading for Brittle Materials

Akira Joe and Ikuo Ikeda

Generally it is said that fatigue by repeat loading does not occur in amorphous glass except static fatigue. In this paper, offering suggestion for measurement of limiting infinitesimal displacement applying Newton's rings as marking point, it is tried to accomodate measuring displacement (fatigue) value at center of specimen by testing method of three points bending repetitional fatigue. As a result, deflection of about 200 μ m value occurred by fatigue was obtained for the specimen of 400mm in length. Further, in consequence of preliminary experiment, the measurement accuracy by this whole device was about $\pm 0.016\mu$ m.

Key words: measurement accuracy, Newton's rings, cyclic fatigue, bending, ceramics material testing, glass, reliability, marking point, repeated load

1. 緒 言

現在、様々なセラミックスに代表されるぜい性材料の熱的、機械的特性に関するニーズは高く、今後構造用部材として使用範囲が飛躍的に拡大していくものと考えられるが、現在開発されているセラミックスなどはぜい性材料であるため、完全に使用するためには、その強度特性、特に疲労強度特性を十分に把握しておくことが必要不可欠である。しかし、実用上の繰返し荷重下でのセラミックスの疲労強度評価が重要であるにもかかわらず、硬ぜい性材であることに起因する様々な実験試行上の困難さから研究例は少なく¹⁾、各種ぜい性材料の疲労強度の相対的高低を議論し得る段階に至っていないのが現状である。特に、動的疲労についての研究があまり行われない原因としては、疲労による変形が延性材料と比べて、ぜい性材料の場合、極めて微小であったためと考える。

また、近年の超精密加工技術や微細加工技術の進歩に伴い、計測の面からもサブミクロンオーダ以上の精度が要求されるようになってきており、位置決め(変

位測定)などにおけるフィードバック制御には、高分解能・高精度なレーザ干渉測長器²⁾³⁾が使用されはじめている。

著者らは、変位(位置)測定の精度向上を図るための諸問題を解決するひとつの方法として、ニュートンリングを応用した微小変位測定器(N.R.M.)⁴⁾を考案し、平面曲げ繰返し疲労試験⁵⁾によるぜい性材料の、疲労に起因すると考えられるたわみ(中点降下)量の精密測定に適用させた。

2. 測定原理

ニュートンリング⁶⁾は、波動の重ね合わせによって平凸レンズと平板ガラスの間に生じる等厚干渉現象である。上方から単色光を照射させると、中心が暗い同心円状の明暗な干渉じまが形成され、研磨された面の平面度やレンズの曲率の測定・検査⁷⁾などに利用されていることは周知の通りである。

本研究では、ニュートンリングを発生させるために、高性能な小半球レンズとオブジェクトマイクローメータを用いた。これらは、工作技術上極めて高精度に得られるものであり、この二つの面によってできるニュートンリングも、極めて精密なものとなる。

図1に、本研究におけるニュートンリングの発生原

* 原稿受付 平成4年8月17日

** 学生会員 関東学院大学大学院(横浜市区六浦町4834)

*** 関東学院大学工学部

Fig. 1 Occurring theory of Newton's rings

Fig. 2 Measuring method of displacement

理,そして図2に変位測定方法を示す。

このニュートンリングを用いる最大の利点は、ニュートンリングが物体ではなく現象であり、必ず接触面上に現れ、オブジェクティブマイクロメータの目盛り線と同一面に存在することにある。したがって、光のてこによるたわみ法など他の光学的手法に比べ、視差による誤差が生じないのが特徴である。

3. 測定装置および方法

図3に測定装置のシステム構成図を示す。また図4に装置全体図、図5に概略図を示す。

3.1 微小変位測定装置

試料側面に貼り付けた半球レンズとオブジェクティブマイクロメータに垂直落射照明装置で光を当て、発生したニュートンリングを実体顕微鏡によって観察し、顕微鏡に取り付けた小型顕微鏡写真装置で撮影した。

ニュートンリングの変位量を精密に測定するため、透過照明用対物マイクロメータ（オブジェクティブマイクロメータ）（OB-M, 1/100mm, オリンパス）を使用した。さらにニュートンリング（標点）が、1mm以上変位した場合に対応するため、XYステージとマイクロメー

タヘッド（ミットヨ）を用い、オブジェクティブマイクロメータの直交三軸方向移動ステージを製作し、支点間距離を可変できるように改良した Ewing によるヤング率測定装置⁸⁾に取り付けた。

半球レンズは、HBX2.5R-3.0T(BK-7)(夏目光学)を使用し、曲面を外側にして試料側面の中心に固定した。

本研究では、ニュートンリングを発生させ、それを計測するために、三眼ズーム実体顕微鏡（SZ6045TRPT オリンパス）を用いた。

この実体顕微鏡は、対物レンズの倍率1～6.3倍、接眼レンズの倍率15倍で、最大95倍まで観察可能である。また、ニュートンリング発生位置の変化を記録するために、撮影倍率28倍の小型顕微鏡写真装置(PM-6)

Fig. 3 Schematic diagram for fatigue test system using Newton's rings method

Fig. 4 Overall view of fatigue test apparatus

① Fatigue tester, ② Specimen, ③ Spherical lens, ④ Objective micrometer, ⑤ Natrium lamp, ⑥ Stereo microscope, ⑦ Photo micrographic apparatus, ⑧ Transformer, ⑨ Focusing mechanism, ⑩ Attachment objective, ⑪ Vertical irradiation drop system, ⑫ X-Y stage, ⑬ Micrometer head, ⑭ Load, ⑮ Two-point supported apparatus, ⑯ DC geared motor

Fig. 5 Schematic drawing of measuring apparatus

を用いた。ニュートンリングを発生させるための光源には、一様な明るさの広がりがあり、オブジェクティブマイクロメータ刻線も明視できるなどの理由からナトリウムランプを使用し、垂直直射照明装置 (SV-VIA) を介して照射した。以上の実体顕微鏡及び補助装置が水平状態に設置できるように基準アーム (SZ-ST5) を用いて図5のように架台を製作した。

なお、計測は、図5のオブジェクティブマイクロメータ④を半球レンズ③に近接または、軽く接触させた状態で行う。

本研究では、まずこの測定装置を用いて、三点支持曲げ極微小負荷時における試料の midpoint 降下量を、半球レンズによりオブジェクティブマイクロメータ上に発生させたニュートンリングの移動量から測定した。

本測定法を用いることにより、例えば光学系の拡大方法などによる影響をまったく受けずに直接的に変化量を読み取ることができる。またオブジェクティブマイクロメータの目盛りが $1/100\text{mm}$ 間隔であり、さらに標線個々の間隔は後述のように実測により $0.1\mu\text{m}$ 以下の誤差であったため、極微小変位の測定に十分対応できた。

本研究では、撮影したニュートンリングの多重同心円、数十個より中心位置を平均的に求める方法を用い、オブジェクティブマイクロメータ上での標点とした。

3.2 疲労試験装置

金属材料用疲労試験機⁹⁾をぜい性材料にそのまま利

Table 1 Chemical analysis of specimen %

SiO ₂	Na ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃
70.3	21.2	6.9	1.2

用した場合、試験機の負荷軸精度の偏心が金属材料では問題とならない程度であっても、硬ぜい性材料のセラミックスなどでは試験片つかみ部での拘束による局部的応力によって破壊に至る可能性がある¹⁰⁾。本研究では、ぜい性材料に対応できるように工夫した平面曲げ疲労試験機⁵⁾を新たに製作した。試験片つかみ部が拘束されていないため、局部的応力が掛らず、信頼性の高いデータが得られるという点が特徴である。

3.3 繰返し疲労試験によるたわみ量の測定

実験は、恒温室において、負荷 $4 \sim 10\text{N}$ 、負荷速度 240c.p.m. で、支点間距離 200mm , 400mm 、ベッセル点¹¹⁾ およびエアリー点¹²⁾ の場合について、 1×10^5 回繰返し負荷し、 5×10^3 回ごとに midpoint 降下量を測定した。

3.4 試料

試料には、代表的なぜい性材料であるソーダ石灰ガラスを、 $500^{\text{W}} \times 30^{\text{D}} \times 2^{\text{t}}$, 3^{t} mm^3 に切断しアセトン・トリクレンで超音波洗浄し、乾燥させたものを使用した。表1に試料の化学成分定量分析結果を示す。

4. 測定結果および考察

4.1 オブジェクティブマイクロメータの精度

本測定法の精度を決定する重要な要素の一つとして、まずオブジェクティブマイクロメータの目盛線 (スケール) の精度を検証した。精度については、JIS¹³⁾ において全体で $1\text{mm} \pm 2\mu\text{m}$ 、また目盛線1本1本の間隔については $10\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$ と規格化されているものの、校正はなされていない。

そこでオブジェクティブマイクロメータを、走査型電子顕微鏡により撮影した写真を実体顕微鏡で読み取ることにより、刻線間隔の一応の精度を調べた。

その結果、規格の $1\mu\text{m}$ より分散は少なく、確率誤差¹⁴⁾は約 $\pm 0.35\mu\text{m}$ であった。

なお、実際にはニュートンリングの原理に基づいて波長の明らかな既知光源中から、いくつかの波長 (輝線スペクトル) を選定して使用することによりオブジェクティブマイクロメータの絶対検定が可能であると考える。

4.2 微小負荷による midpoint 変位量の測定結果

本測定法の精度を検証するために、微小負荷時にお

ける試料の中間変位量測定とヤング率の算出を行った。

試料にはすべて、図6に示す三点支持曲げ¹⁵⁾により試料中央に0.005Nごとに、0.000~1.000Nまでおもりを負荷した。図7に、 $30^D \times 3^t \text{ mm}^2$ の試料を支点間距離400mmにおいて、1.000Nまで負荷した場合の、ニュートンリングの変位例を示す。また、このニュートンリングを標点に用いて、三点曲げによる試料(幅 $30^D \times$ 板厚 $2^t \cdot 3^t \text{ mm}^2$)の中間降下量を、0.005Nごとに測定した結果を図8に示す。この結果から、理論たわみ直線と高い精度で一致していることがわかる。

Fig. 6 Loading way by adding weight

4.3 ヤング率算出結果

$D = 10, 15, 20, 30 \text{ mm}$, $t = 2, 3, 5 \text{ mm}$ の試料に対してそれぞれ測定を行い、ヤング率を算出した結果、平均 $E = 69.35 \pm 0.78 \text{ GPa}$ と、高い精度で求めることができた。また、同一試料を10回測定した結果では、確率誤差 $\pm 0.17 \text{ GPa}$ と従来より極めて、ばらつきの少ない精度で、ヤング率を得ることができた。なお以前、著者が行った光のてこを用いたたわみ法¹⁶⁾によるヤング率の算出値は、 $68.9 \pm 1.6 \text{ GPa}$ ⁹⁾であった。

以上の結果からも、ニュートンリング法を用いることによって信頼性の高い微小変位測定が可能であることがわかった。

Fig. 8 Measurement value of deflection caused by infinitesimal load

Fig. 7 Examples of displacement of Newton's rings caused by infinitesimal load (Newton's rings and objective micrometer)
Size of specimen: $30^D \times 3^t \text{ mm}^2$, Load: 0.000 - 1.000N
Distance between supporting points: 400mm

Fig. 9 Examples of Newton's rings (deflection) caused by fatigue test for soda-lime glass; Newton's rings appear on the surface of objective micrometer which is in contact with the spherical lens
Specimen size: $30^0 \times 2^1 \text{ mm}^2$, Distance between supporting points: 400mm, Repetition load: 6N, Light source: natrium lamp

4.4 繰返し疲労によるたわみの測定結果

それぞれの試料に6Nを繰返し負荷した場合のニュートンリングの変位例を図9に示す。また疲労たわみ測定結果例を図10に示す。

一般に非晶質のガラスは静疲労は生ずるが、繰返し疲労は起こらない¹⁷⁾。したがって繰返し荷重下における疲労特性は、静疲労の結果から推測できると考えられている^{18) 19)}。

このことは、セラミックスなどぜい性材料の場合、 K_{IC} が低く、試験領域の K_{max} に近い。また、媒体・温度・環境など雰囲気によってかなり異なるため、現在必ずしも明らかになっている訳ではないが、 K_{max} や時間の依存性、いわゆる静疲労により支配される部分が、 ΔK や繰返し数依存性の繰返し疲労に支配される部分を上回るためと推定される。

疲労試験は、一般にS-N曲線で示すが、本研究では、もしガラスに動的疲労が存在するとすれば、必ず内部的な潜在き裂²⁰⁾の成長などにより疲労たわみが検出されたと考え、D(Distance)-N曲線により結果を示した。

本研究において、繰返し負荷試験を様々な荷重下について行い、ニュートンリングを標点に用いて、たわみ(中点降下量)を測定した結果、図10に示すように微量ではあるが、 1×10^5 回の疲労試験に対して約 $200 \mu\text{m}$ のたわみ量を計測した。

また、両支点位置において同様に設定した半球レンズとオブジェクティブマイクロメータを用いて繰返し負荷試験を行った結果、支点における試料標点のずれ

Fig. 10 Measurement result of fatigue deflection

は、X・Y軸方向に対して共に $\pm 10 \mu\text{m}$ 以下であった。

この結果を、測定環境の変化に起因すると考えても、上記の変位 $200 \mu\text{m}$ に比べて非常に小さく、この測定によりガラスの疲労によるたわみ量を得ることができたと考えられる。

繰返し速度および測定ごとの試験機停止の影響については、疲労強度が、上記したようにS-N曲線で表されており、このことは疲労が応力の総繰返し数のみによって決定され、繰返し速度には無関係であることを意味する。よって、いかなる速度で試験されたかは、極端に高速または低速な試験の場合以外、さほど問題にならないと考える。また、たわみ測定ごとに疲労試験機を停止したことによる影響についても、1回の測定(記録撮影)に要する停止時間は、30~45s以内であり、さらに 1×10^5 回連続運転した後、測定した場

合のたわみ量と比較した結果からも影響は認められず、問題ないと判断した。

先にも述べたように、このニュートンリングを用いる最大の利点はニュートンリングが物体ではなくて現象であり、必ずスケールを印した接触平面上に現れることにある。本研究では、オブジェクティブマイクロメータを用いているため、ニュートンリングは、1 mm (10 μ m/div) の目盛線と重なって存在することになる。

そのため、視差による誤差は皆無であり、従来の機械的、光学的欠点を同時に取り除くことができ、さらに多くの多重同心円の平均中心位置を標点に用いていることから、本微小変位測定器は確率誤差 $\pm 0.02 \mu$ m 以下の高い測定精度を得ることができた。

以上の実験結果から本測定器の精度は、測定対象が 1 mm 以内の狭範囲では上記の精度を有する。また 1 mm 以上の広範囲では、図 6 に示すようなオブジェクティブマイクロメータ移動装置（直交三軸ステージ）の精度など外的要因に影響されると考えられる。

今後、このオブジェクティブマイクロメータの移動方法を改良することにより、さらに高精度な変位測定が行えると思われる。

5. 結 言

本研究により得られた主な結論は以下の通りである。

- (1) 新たに提案したニュートンリング法は、微小変位量を測定するのに極めて有用であることがわかった。なお、測定範囲が 1 mm を超える場合の、本測定装置の精度は、オブジェクティブマイクロメータを移動させるための、直交三軸ステージの精度に依存することがわかった。
- (2) ニュートンリングを標点に用いることによって、微小負荷時におけるヤング率を、従来より高い精度(確率誤差 $\pm 0.02 \mu$ m 以下)で安定して得ることができる。
- (3) ニュートンリング法を用いることにより、ガラスの繰返し疲労によると考えられるたわみを、支点間距離 400 mm の場合で 約 200 μ m と極微量ではあるが測定することができた。
- (4) 力学的・光学的手法における誤差の重大な原因となる指標位置を、常に極めて精密に測定することができる。さらに標点と測定尺目盛とが同一平面上にあり、直接測定が可能のため視差を除去でき、またその他の光学的拡大方法の固定誤差も小さく無視することができる。
- (5) 光源にナトリウムランプを使用することによ

て十分なコントラストと、従来^{4) 5)}と比してより多くのニュートンリング(約 100 個)を得られることがわかった。

本測定法は、サブクリティカルな状態における現象を、細分化して捕らえることが可能であるなど、今後多くの機械的・物理的諸現象の変位測定への応用が期待できるものと考ええる。

おわりに、実験に際して研究室の岡崎順(現、宮田工業(株))、保坂広樹(現、東京エレクトロン山梨(株))両氏の協力があったことを付記し感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 山田敏郎, 星出敏彦, 古屋博章: 常圧焼結窒化ケイ素の静的および繰返し疲労強度, 材料, 33 (1984) 28.
- 2) 中村 収, 後藤充夫, 豊田幸司, 谷村吉久, 黒澤俊郎: 追尾式レーザ干渉計による座標計測システム, 精密工学会誌, 57, 5 (1991) 831.
- 3) 小田切延之: 光ファイバー結合レーザ干渉測長器の新しい用途, 東京精密技報, 8, 23 (1991) 1.
- 4) 徐 章, 池田郁雄: ニュートンリングを標点に用いた微小変位測定の精度に関する研究, 日本機械学会講演論文集, No. 920-17, C (1992) 158.
- 5) 徐 章, 池田郁雄: ニュートンリングを標点に用いた脆性材料の繰返し曲げによる疲労たわみ測定, 1992 年度精密工学会関西地方定期学術講演会講演論文集, (1992) 103.
- 6) 伊藤芳郎, 笹田芳秋, 飛田伸一: 教養物理学実験, 新評論, (1971) 160.
- 7) 工業技術院計量研究所編集委員会編: 新版計量技術ハンドブック, コロナ社, (1987) 638.
- 8) 徐 章, 池田郁雄: Ewing 装置による脆性材料の縦弾性係数測定法について, 日本機械学会講演論文集, No. 910-62, C (1991) 381.
- 9) JIS Z2275 金属平板の平面曲げ疲れ試験方法 (1974).
- 10) 田中道七, 山元 茂, 岡部永年, 中山英明: セラミックス用曲げ疲労試験機の開発と常圧焼結窒化ケイ素による実験結果, 材料, 39, 438 (1990) 84.
- 11) 吉田重一: エアリー点について, 北海学園大学工学部研究報告, 8 (1981) 1.
- 12) C. Chree: Applications of Elastic Solids to Metrology, Phil. Mag. S., 6, 2, 11 (1901) 594.
- 13) JIS B7137 生物顕微鏡用対物マイクロメータ (1990).
- 14) 本間 仁, 春日屋伸昌: 次元解析・最小 2 乗法と実験式, 応用数学講座, 5, コロナ社, (1976) 144.
- 15) JIS R1601 ファインセラミックスの曲げ強さ試験方法 (1981).
- 16) JIS R1602 ファインセラミックスの弾性率試験方法 (1981).
- 17) 堀部 進: セラミックスの繰返し疲労, 鉄と鋼, 75, 4 (1989) 8.
- 18) A. G. Evans and E. R. Fuller: Crack Propagation in Ceramic Materials Under Cyclic Loading Conditions, Metall. Trans., 5 (1974) 27.
- 19) A. G. Evans and M. Linzer: High Frequency Cyclic Crack Propagation in Ceramic Materials, Int. J. Fracture, 12 (1976) 217.
- 20) A. A. Griffith: The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A, 221 (1920) 163.