高速引張試験用荷重計の試作

帝 人 (株) 千 布 正 雄 (会員)

Load Cell for High-Speed Tensile Testing of Yarns

Masao Chifu

Fiber and Textile Research Institute, Teijin Limited, Ibaragi, Osaka-fu

Abstract

A high-frequency, responsive force gauge is needed to observe the actual stress-strain curve of a filament yarn in an extreme short loading time ranging in ms during high-speed testing.

A standstill indication must be formed with the D. C out-put from the force-gauge, because dead loads are charged to calibrate the gauge with weights.

The gauge of a yarn-measuring instrument must have temperature stability and zero-level stability.

We have designed and built a high frequency responsive force gauge with which to investigate the behavior of a filament yarn. The gauge is based on the principle that the frequency of a zero temperature coefficient (A.T cut) quartz crystal resonator of radio frequency shifts under external pressure.

The characteristics of the quartz crystal resonator force gauge show that the frequency response is from D.C to about 6~7 KHz and stable.

Further work is in progress to improve the mechanism of the force gauge so as to obtain a higher response.

(Received May 29, 1969)

摘 要

目 的 繊維測定用、高速引張り試験における荷重計の開発を試みた。

数ms という短い時間における荷重の変化を測定するためには、数 KHz~10KHz に及ぶ高い周波数特性が要求される。一方、標準分銅で目盛りの校正を行なうときには指示を静止させるために直流出力が必要となる。

このほかに繊維計測の面からも温度安定性の良いことなどの要件があり、従来の荷重検出方法では一長一短であった。そこで零温度係数水晶共振子(A.T.カット)の共振周波数が外力で変化することを利用して、これらの要件を満たす荷重計の開発を試みた。

結 果 周波数応答は直流成分から約 6~7KHz に及び、初期ドリフト、温度ドリフト、共に安定な特性を得た。

10KHz をこえる応答周波数特性を得るためには、荷重部の機構に今後の検討が必要である。

(昭和44年5月29日 受理)

1. 緒 言

繊維の性質を知る主要な試験方法の一つに、引張り強さの測定がある。その試験は繊維が切れるまで静かに引張ったときの引張り強さと、そのゆがみの関係を表わす荷重-伸張曲線である。この場合の引張り速度は早くても 1m/min にすぎないため、一般に静的試験と言われている。

自動車用タイヤの高速下で起きる破壊現象はタイヤコードの静的試験から予測することは困難で、たとえば高速衝撃試験が実車走行試験と良い相関を示すと報告

されている。^{1,2)}

合成繊維のような高分子材料は力学的緩和時間の分布が広く、かつ大変形での挙動は複雑である。そうした場合高速変形での挙動は静的変形と違ったものが考えられ、静的な変形から高速度下の変形を予測することは困難である。

したがって、高速度で繊維を引張り、その場合の繊維の受ける引張り力を測定するのがより実用に即した試験方法と考えられる。これが高速引張り試験であり、静的試験に対して動的試験と呼ばれている。

引張り速度が早くなると測定にいろいろな困難が伴っ

てくる。まず繊維に加えられる力を測定する荷重計の応答速度の早いこと、高速度で運動しながら繊維をつかんで引張るチャックの構造、あるいは引張り機構、引張り速度や変位の記録装置などいずれも低速の引張り試験機には現われなかった問題が起ってくる。本研究ではまずその内の一つである荷重計の開発を試みた。

いま試料の長さを 30 cm としたときに、これに力を加えてゆがみを与え、切断するときの伸びが 20 % とすると、6 cm の変形で切断することになる。この場合 10 m/sec の引張り速度では荷重計が力を受けている時間は 6 ms である。

荷重の変化する速さと、荷重計及びそれに接続している増巾器の応答周波数の関係についてはすでに多くの研究が行なわれており^{3,4)} 6 ms の間に終わってしまう現象を測定するためには測定系の応答周波数は 10 KHz あれば良いと言われている。

一方、次の理由によって直流出力が取り出せる必要がある。測定装置の検量線を求めるには荷重計に標準分銅を掛けたときのブラウン管上の目盛りの移動によって行なわれる。このとき、静荷重を与えている間、目盛りが静止していなければならない。つまりこのときの荷重計の応答周波数は 0 Hz (直流出力) であることが要求される。

もちろん、この荷重計に接続される増巾器にも広い周波数帯域を持った直流増巾器が使われる。また、検出感度も、強度の小さい未延伸糸の測定の場合を考えれば、オシロ スコープのブラウン管上でフルスケール 200~300 gr 前後の感度が要求される。

繊維用の引張り試験は、目的によっては、しばしば 100~200°C の高温で行なわれる場合がある。繊維を荷重計に取り付けて加熱炉に釣下げたとき、加熱炉からの上昇気流の一部が荷重計にふれるため、温度安定性が悪いと、オシロ スコープの 0 点が動揺する。しかも繊維を加熱炉の中に入れたまま 0 点が安定するまで放置することはゆるされないため、温度安定性が悪いと操作がきわめて困難になる。

以上のことから検出部に必要な特性をまとめれば、

- (1) 0 Hz~10 KHz の応答性を持つこと。
- (2) フルスケール 200~300 gr の測定がなされること。
- (3) 温度安定性の良いこと。

の要求されることが了解されよう。

上記の要求特性から市販の荷重計について考えてみる。

(1) ワイヤーストレインゲージはきわめて高精度、かつ高感度のものが得られているが、応答周波数の限度が 1~2 KHz 前後で、高速変形の測定には適しない。

(2) 半導体ストレンゲージはワイヤーストレンゲ

ジよりも感度が高いため、応答周波数の高いものの製作もできるが、温度による影響を受けやすい。温度補償の方法もかなり研究されているが^{5,7)} 実際に市場で所要の特性を持つ半導体を手することは困難である。

(3) 応答の早い荷重計に水晶あるいは特殊なセラミックスのピエゾ効果を応用したものがある。チャージ増巾器を接続すれば 0.1 Hz~100 KHz というきわめて広い範囲の周波数にわたって測定することができて、しかも 1 V/10 gr と感度の高いものもある。しかし 0 Hz に近い応答を要求する場合に 0.1 Hz よりもさらに低い周波数まで拡張できるが、0 点安定性が著しく悪化する欠点がある。また、この形式の荷重計は引張り方向のみならず、他の方向、たとえば引張り軸に垂直な方向の出力が意外に大きいので、引張り機構などから不測の振動が混入して悩まされる場合が多い。

このように高速引張り試験用荷重計として容易に入手し得るものはそれぞれ一長一短あるのが現状である。

2. 実験装置

通信用水晶発振子に力を与えると、発振周波数がわずかに変化することは 1951 年来知られている。⁸⁾ E. A. Gerber はこの現象を利用してバイメタルで周囲温度の変化に応じて水晶発振子に加わる力を変化させて、発振周波数の温度ドリフトを補償する装置を考案した。⁹⁾ 本研究は水晶発振子の温度安定性の良いおよび周波数変調方式には、0 Hz までの応答性があることを利用したものである。

第 1 図は、水晶発振子に力を与えて発振周波数の偏移

第 1 図 静荷重特性測定実験装置

を測定する装置を示したもので、この研究の予備的実験である。

水晶発振子に直接引張り荷重を加えることは構造上困難であるから、てこを用いて圧縮荷重として加える。てこの長さは約 12 cm でその中央をピンで支えてある。一端に釣下げられた標準分銅によって加えられた荷重は他端に挟まれて固定された水晶発振子に与えられる。実験に使用した水晶発振子は発振周波数 5 MHz の A.T. カットである。

第 2 図に外観の例を示す。

左上が水晶発振素子で右下はこれに保護金具を装着したものである。金具は2号～4号注射針を半円形に削り(長さ4 mm)水晶振動子に接着する。

第2図 荷重検出用水晶発振素子

直径約 14 mm, 厚さ約 0.33 mm の薄い円板状で, その両面には電極が金鍍金されており, 縁に近い部分に一對の細いリード線を取り付けて発振回路に接続される。発振回路は第3図に示されるようにトランジスタ3個からなる簡単な無調整発振回路である。

Tr1, Tr2, Tr3 : 2 SC 289
C1 : 200 pf
C2 : 100 pf
C3 : 1000 pf

第3図 発振回路

水晶発振子はすでに述べたように薄い円板であるから, これに直接引張り荷重を与えるのはむずかしいので圧縮荷重の形で力を与える。力を与える方向は円板の直径方向である。(注) 水晶発振子の表面(平面)に垂直方向に力を与えると発振状態にきわめて敏感に影響が現われる。たとえばわずかな塵の付着, あるいは油類による汚染も発振周波数が変動し, もし汚染が著しい場合には発振が停止する。取り扱いに際しては平面にさわらないように注意することが必要である)

円板の縁から直径方向に力を与える位置は円周上180°に涉って考えられる。いま力を与える方向の基準として水晶発振子のX軸を取り, このX軸と力を与える方向とのなす角度を α とする。(水晶の結晶軸(X, Y, Z)は原石から発振子を裁り出す際にX線解析によって決定されるものであって, 本実験に使用した水晶発振子にはそ

→ X軸方向とのなす角 α

基本周波数 : 5 MHz

第4図 周波数偏位と荷重方向

の面上にX軸の方向が表示されている)。第4図は力を加える方向とX軸とのなす角度を変化させた場合に, 一定荷重(300 gr および 600 gr)における周波数の変化する状況を示したものである。X軸に沿って力を与えた場合, 力の変化(300 g-600 g)に応ずる周波数変化が最大となる。したがってこの角度が最大感度の位置である。

第5図は最大感度の位置における水晶発振子に加える

第5図 最高感度の位置における周波数偏位と荷重

力の大きさと周波数変化の関係を示したものであって, 約 5 kg まで荷重に対して周波数変化は直線的に約 3 KHz 増加している。5 kg 以上の荷重では発振周波数が不安定となるが荷重を軽減すれば再び安定な発振状態に回復した。

- A: 水晶発振子荷重用てでA点に糸を引掛ける。
B: 支点
C: 水晶発振子および保護金具
D: ゴムタンパーは糸が切断し、荷重がなくなったときにこの振動を抑制するものである。
E: 荷重計ケース内に発振回路プリント板が取り付けられる。

第6図 高速引張り試験用荷重計詳細図

第6図は実際に高速引張り試験に用いた荷重検出部の構造を示したものである。糸に加えられた引張り荷重は静荷重測定と同じ要領でて約2倍の大きさに拡大されて、水晶発振子に加えられる。

てこはこの部分の機械的共振周波数の低下を防ぐため、ヤング率の比較的高い金属、(工具鋼、(KS-5))に熱処理をほどこしたもので、形状も許す限り小型に設計した。糸張力の加わる部分Aと、支点Bおよび水晶発振子に接している部分Cは、同一線上に来るようにし、簡単な構造とするために糸は単にてこの一端Aに引掛け、あるいは巻き付け得るようにしてある。

3. 周波数弁別回路

前述のように発生信号は荷重によって変化する周波数変調波であり、その無荷重時の発振周波数は約5MHzである。

第7図は、周波数弁別回路のブロック図である。入力信号は2段の周波数変換回路で200KHzに変換される。

第2段目の周波数変換用局部発振器は、100KHz~150KHzの可変発振回路になっている。水晶発振子の製造時バラツキ巾 ± 40 KHzを微調整するためのものである。この周波数変換回路で中心周波数が正確に200KHzになった信号は周波数弁別回路に導かれる。周波数弁別回路は直線性の良い2同調回路方式である。

第8図は周波数弁別回路の出力特性を示したもので、周波数弁別出力は第9図に示されるような特性の20KHzの低域低波器により、200KHzの成分の除去を行な

1. 第2局部発振器は約50KHz可変できる安定な発振回路が必要。もし不安定であると出力が変動する。
2. 周波数弁別回路と低域低波器の間には直流増幅器(エミッタホローまたはソースホロー回路)を一段入れ、両者のインピーダンスを調整する。
3. 各段間の高周波部分のしゃへいを注意して行わないと、出力波形が乱れる。

第7図 荷重検出部ブロック図

第8図 周波数弁別回路の出力特性

周波数弁別回路の不平衡のため200KHzの信号がわずかに現われる(carrier leak)。これを十分に除かないと、出力波形に重畳して画像が太くなる。

第9図 周波数弁別回路に持続された低域部波特性

いオシロスコープの垂直軸に接続される。

第10図は、この周波数弁別回路を用いた荷重一出力の関係を示すものである。水晶発振子に約5kgrの荷重を与えたときの直流出力は約200mVであった。

第11図は電源投入時における初期変動を示したもので

第10図 荷重計の総合静特性

荷重計は無荷重、電源を入れてから約30~60 min に約25 mV 移動し、その後は比較的安点に推移する。主として最終段の直流増幅回路、および第2局部発振器の変動であろう。

第11図 電源投入時の初期変動

ある。水晶発振子に加える荷重が0のとき約30min~1 hr に約25 mV の変動が認められる。これは最大荷重5kg負荷時の出力200 mV の約12.5%に相当するが、それ以降はきわめて安定に推移することを示している。

第12図はこの装置に625 gr の荷重を1 min 約5回の

繰り返し荷重を与えたときの荷重計の出力の再現性および0点のドリフトを示す。625 g の荷重により約28 mV の出力を示し、1hr で約4 mV の0点移動が認められる。

第12図 荷重計の再現性および動作点の安定性

割合で静かに繰り返し加えたときの出力の変動を示したものであって、再現性および基線の変動など使用目的の時間内では十分なほど安定していると言える。

4. 引張り機構

本研究における引張り機構は荷重計の性能試験を目的としたものであるから、ストローク約50 cm, 引張り速度約10 m/sec 前後の性能を得られるだけにとどめ、できるだけ簡単な構造を採用した。したがって繊維引張り試験機としての必要な性能をすべて期待したものではない。

引張り機構は、圧空でピストンを押し下げる形式であって、シリンダー直径30 mm, ストローク70 cm, 空気圧0~5 kg/cm² である。ただし窒素ポンプを使用すれば0~20 kg/cm² となる(13図), 引張り速度の調節は空気圧を調節して行なった。

この引張り試験機に繊維を取りつけて荷重計の性能を調べるに先立って、あらかじめ引張り速度の検定を行なった。その方法はチャックに全長2 m位の録音テープの

圧空シリンダーは約5 kg/cm² の圧空配管に接続され、減圧バルブで調節する。振動を除くため、重量約1t (工作機械のフレームを改造) の鋳鉄製架台に取付けてある。

第13図 圧空式高速引張り機構

一端を直接取付けておき録音テープは別に固定した再生ヘッド (Sony TC-357用再生ヘッド) 上に接触させて置く。引張り試験機のチャックが移動すれば、それにつれて録音テープが再生ヘッド上を動くので、再生ヘッドに録音出力が得られる。

録音テープには録音器で 19 cm/sec の速さで 190 Hz の周波数を録音して置く。録音テープ上の磁気記録は 1 mm/1 Hz の波形である。再生ヘッドの出力を測定用オシログラフに接続すれば録音テープが 1 mm 移動する毎に 1 Hz の波形が観測される。

第14図は、空気圧 5 kg/cm² のとき、ピストン起動位置から 12.5 cm 下った点における録音波形を示したものである。1 ms の間に約 7.5 mm テープが移動している。したがって、この点におけるピストン速度は約 7.5 m/sec である。(第14図、横軸 100 μs/cm, 縦軸 0.1 V/cm) このようにして 2.5 cm ごとにピストン速度を求め、プ

横軸: 100 μs/cm 縦軸: 0.2 V/cm,

19 cm/sec の速さの録音テープに 190 Hz の録音すれば一周期は 1 mm に相当する。1000 μs の間に約 7.5 波移動している。したがってピストン速度は約 7.5 m/sec である。

第14図 ピストン速度測定用録音テープ出力波形

ピストン降下位置～ピストン速度の関係を示す。手動による圧空バルブの開閉であるため、ピストン速度にばらつきが認められる。電磁弁を採用すべきであろう。空気圧 20 kg/cm² の場合には最高 15 m/sec に達した。

第15図 ピストン走行速度

ロットしたのが第15図である。ピストン部分の慣性による起動位置からの立上りは比較的良好であるが、ピストンの移動と共に、漸時速度は上昇している。

試料長 30 cm, 伸度20%ならば試料が切断するまでの伸びは 6 cm である。この伸びがピストンのストローク 20 cm ぐらいの所で起こるようにして、第15図でそのときのピストン速度を求めると、ピストンが 20 cm 下った位置では約 8.5 m/sec, 26 cm の点では 9 m/sec である。したがって試料に力が加えられて切断するまでの間における変形速度は等速変形と見なして荷重計の性能を判定することは可能であるとする。伸度のきわめて大きい未延伸糸の場合には等速変形とならないことはいうまでもないが、ヤング率の範囲、あるいはその前後の測定のようにきわめて短い波形を測定せる場合には等速変形と見なせよう。

5. 動 特 性

高速引張り試験の動特性を調べるにはいろいろな考え方、求め方があるがまだ確定した方法はない模様である。

上野ら³⁾、H. Grimminger⁴⁾らがアナログ コンピューターを用いてこの種の解析を試みた結果、5～6 ms で終わる現象を観察するためには、検出部およびこれに接続される増巾器の周波数特性は、最高 10 KHz まであれば理想に近いと述べている。

荷重計の周波数特性を知る簡単な方法は荷重検出部の固有振動から推定する方法である。荷重検出部を単純化して等価的に二次系で表わされるものとする、その振動方程式は次式で与えられる。

$$m\ddot{x} + \eta\dot{x} + Gx = F(t)$$

ここで

m : 振動系の有効質量

η : 粘性系数

G : バネ定数

$F(t)$: 外力

外力 $F(t) = 0$ と置いた上式の解の自由振動の周期は荷重検出部の固有振動を示す。実験的にこれを求めてみた。

まず繊維では単糸の切れかたが不ぞろいになると切断時の波形が不明瞭になる恐れがあるので長さ約 20 cm, 直径約 0.12 mm の銅線を用意して引張り試験を行なう。このときの引張り速度は約 7 m/s 前後である。第16図に示すように、銅線が切断されて荷重計に与えられていた力が 0 となると荷重検出部に固有振動が認められる。この図から固有振動数は約 7～8 KHz であると考えられる。

第17図 A. B は、ポリエステル未延伸糸について行なった記録である。A は、比較のため、市販の固有振動数

切断波形を測定するため銅線（長さ約 20 cm，直径約 0.12 mm）を使用した。銅線が切れた後，荷重検出部の固有振動が認められる。

第16図 荷重計の固有振動数の測定波形

2.3 KHz（メーカー仕様）のワイヤー ストレイン ゲージで測定したもので，Bは，本研究の水晶発振子の場合を示している。引張り速度は約 15 m/s，縦軸は 80 gr/Div，横軸は 5 ms/Div，試料長 7 cm である。試料が未延伸のため伸びが大きく切断に至るまでの記録ではない。したがって，初期応力前後の観測が示されている。後半における荷重の急激な低下はチャックの停止によるものである。

第18図A，Bは横軸の走査速度を第17図の10倍すなわち 0.5 ms/Div に拡大して，初期の立上り部分の詳細を示したものである。前述の如くこの図Bからも高域特性は約 7 KHz 前後におよぶと考えられる。図Aでわかるように固有振動数の低い，ワイヤー ストレイン ゲージでは，このように急激な変化を示す場合の観測はきわめて困難である。

A ワイヤー ストレイン ゲージ式荷重計

B 水晶発振子式荷重計

第17図 未延伸糸の高伸速変形時の荷伸曲線

A ワイヤー ストレイン ゲージ式荷重計

B 水晶発振子式荷重計

第18図 未延伸糸の高速変形時の初期応力

第19図 ポリエステル糸高速変形特性

第20図 伸張絹ミシン糸の高速変形特性

第19図は、水晶発振子を用いた場合のポリエステルミシン糸（市販品）、第20図は、絹ミシン糸（市販品）の切断までの高速引張り特性である。これらの場合いずれも試料長 22 cm、引張り速度約 10 m/sec、縦軸 130 g/Div、横軸 1 ms/Div のものを示す。

以上に示すように、水晶発振子の周波数変化から、これに与えられた荷重を求める方法では、静荷重はもちろん約 10 m/s の速さの引張り速度での荷重—伸長曲線も測定することができた。しかし、高い周波数領域においては、目標の 10 KHz にはまだ到達し得ない。これは水

晶発振子の素子に荷重を賦荷する機構になお検討不十分の点が残されているためではないかと考えられる。

本研究は荷重計として水晶発振子を使用し、その発振周波数の偏移が荷重に比例する原理を利用したものである。すなわち、発振子にある方向の力を与えると、それに⁸⁾応じた周波数偏移を生じ、それは容易に出力として取出すことができ、しかもこの取出し得る出力は、D. C 数 KHz にもおよぶ広帯域にわたること、温度ドリフトが 0 であること、などの本質的な特徴を利用して、引張り試験用荷重計の試作を試みた。

最後に、本研究に対し、水晶発振子の製作と回路設計を担当していただいた東洋通信機株式会社、情報制御技術部の諸氏、また、本研究を発表するにあたり種々便宜を与えられた当研究所、椿茂雄所長に感謝いたします。

この報告は昭和43年度、日本繊維機械学会第21回年次大会で発表したものである。

文 献

- 1) K. B. O'neil ; M.F. Dague and J. E. Kimmel ; "High Speed Tensile Testing of Tire Textiles" (1967)
- 2) E. W. Lothrop JR ; "Impact Resistance of Automobile Tires" Ibid P.53~70
- 3) 上野弥, 石川稔 ; "薄い高分子フィルムのための高速引張り試験機の試作" 材料, 14, No.139 P.23~27 (1965)
- 4) H. Grimminger ; "Basic Problems involved in the testing materials under destructive ultimate load at high strain rate" Applied polymer Symposia, High Speed Testing. V (1965)
- 5) 五十嵐伊勢美 ; "半導体ひず計, およびその応用" 機械学会誌, 65, No.527 (1962)
- 6) 五十嵐伊勢美 ; "半導体ひずみ計について" 計量管理, 14, No.5, P.2~8
- 7) 五十嵐伊勢美 ; "ひずみ測定用半導体トランス ジューサー・計測と制御, 5, No.2, P17~26, (1966)
- 8) E.A. Gerber ; "Precision frequency. Control for guided missile" I.R.E. National Convention Record, Pt. 1, P. 90~98 (1957)
- 9) E. A. Gerber ; "Reduction of frequency temperature shift of piezoelectric crystals by application of temperature dependent pressure" Proc. I.R.E. 48, P.244~245 (1960)