

防振ゴムの剪断疲労について (第1報)

桑江和夫* 齊田信幸**

Fatigue of Rubber Springs on Shear (Report 1)

By Kazuo Kuwae and Nobuyuki Saida
Kasado Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

Rubber springs are being used increasingly at various parts of the cars for the purpose of eliminating their noise and vibration. The resilient wheel is regarded as a typical application of rubber spring, and in this application the rubber spring is subjected to repeated shearing force.

The writers' model test using 75 mm dia. model wheel, was to investigate the rubber fatigue phenomenon and revealed the following:

- (1) Elasticity of rubber undergoes a degree of variation in the process of fatigue.
- (2) The weak points of rubber spring are located at the surface of rubber bonded to metal and at the center portion of the rubber, and whether the fatigue is caused at the former part or at the latter is determined by the magnitude of the load.

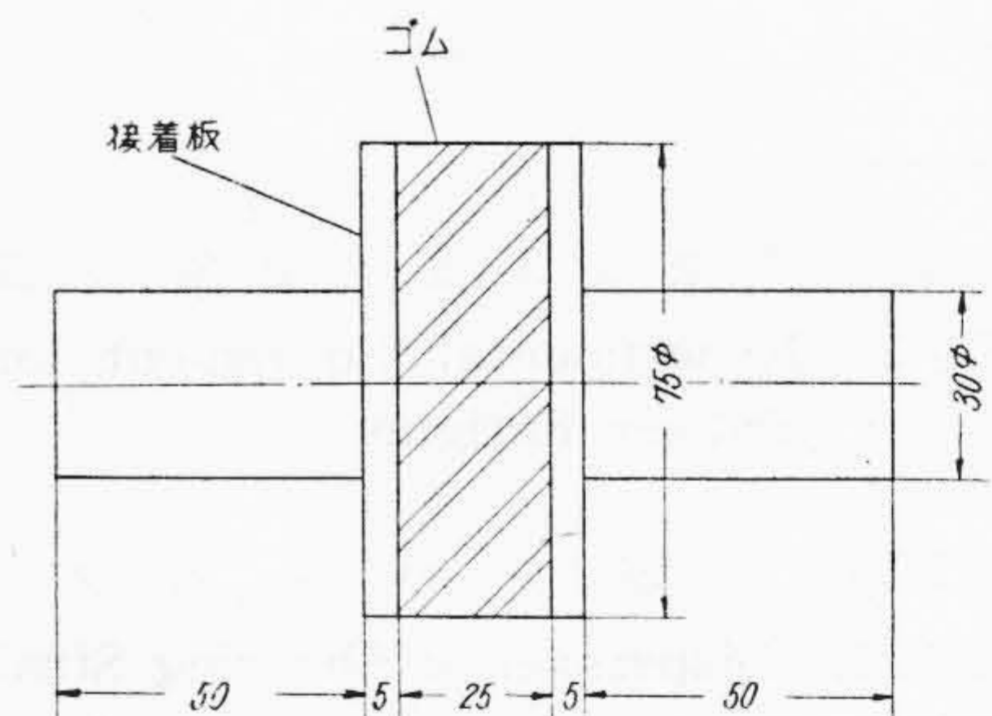
〔I〕 緒 言

車輛に関する防音防振は最近特に重要視され、その具体策として防振ゴムが車輛に大幅に導入されるに至り大きな成果を挙げつつある。一方振動源と見なされるレールからの衝撃緩和のためにできるだけ直接衝撃を受ける部分の重量を減少しようとするいわゆるバネ下重量軽減の面からすれば、バネ系における在来の車輪車軸の重量が問題になってくる。かかる観点から、ついに車輪輪心部に防振ゴムを導入したいわゆる弾性車輪が出現するに至った。これは円板型防振ゴムで車輛の全荷重を回転剪断の型で受ける構造のものであり、欧米においてはすでに相当の普及をみているようであるが、本邦においては未だ試用の域を脱せず、技術的問題点も少なくない現状である。

防振ゴムはその発達の歴史も新しく判然とした理論も確立されていないが、さらに残念ながら国産品は外国製品に比してすぐれているとはいえず、特にその寿命に問題がある。

ここにおいて防振ゴムの一般的基礎実験もさることながら、車輛の防音防振問題の根本的解決策としての弾性車輪の完成のため、円板型防振ゴムの定荷重回転剪断に対する疲労強度の研究が当面の必要問題となり、研究を

* ** 日立製作所笠戸工場



第1図 試験片寸法
Fig. 1. Size of Test Piece

始めたが、実験の一部を第1報として報告する。

〔II〕 実験方法

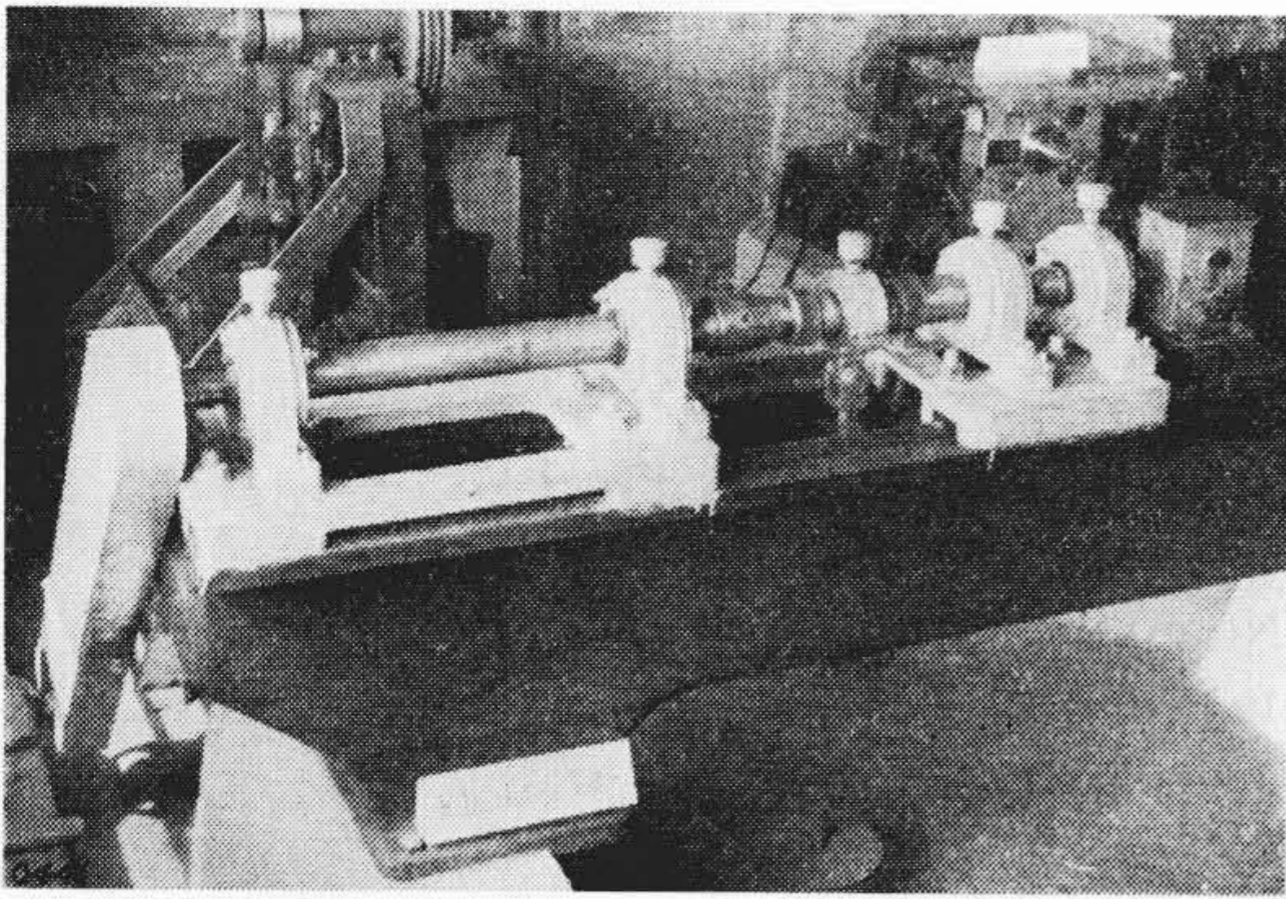
(1) 試験片

弾性車輪に使用される防振ゴムでは、その直径は車輪径によつて異なり、500~700 mm 見当であるが、ゴム厚の方は現在車輪径に関係せず 25 mm が使用されているので、試験片寸法は第1図に示すごときものとし、ゴム厚は現物と同一にした。

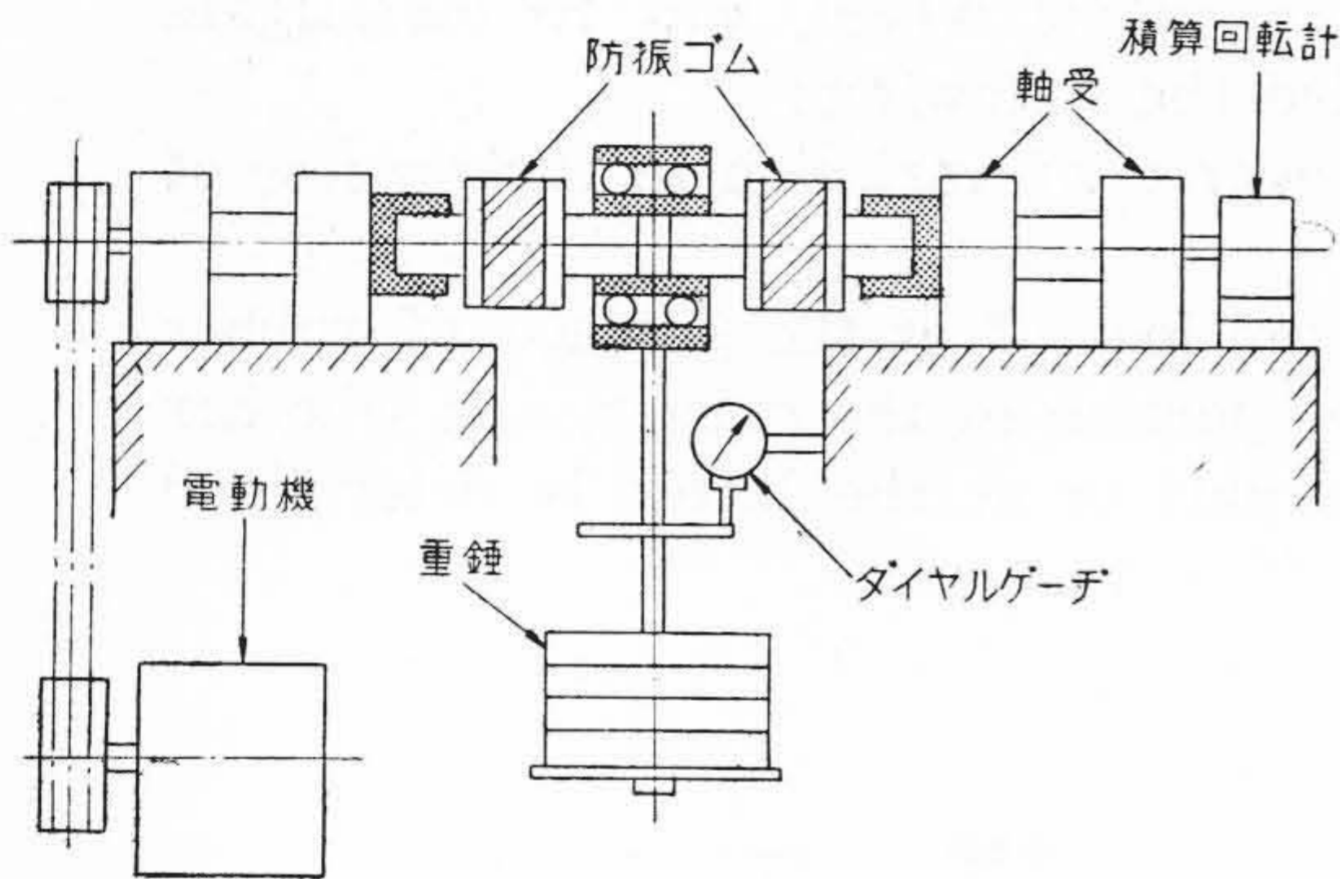
防振ゴムの表面硬度はデュロメータ 60~62 であり、ゴムと金具との接着剤はタイ・プライである。

(2) 試験装置

試験装置は第2図および第3図(次頁参照)に示すごと



第2図 防振ゴム疲労実験装置
Fig.2. Experimental Equipment for Rubber Fatigue



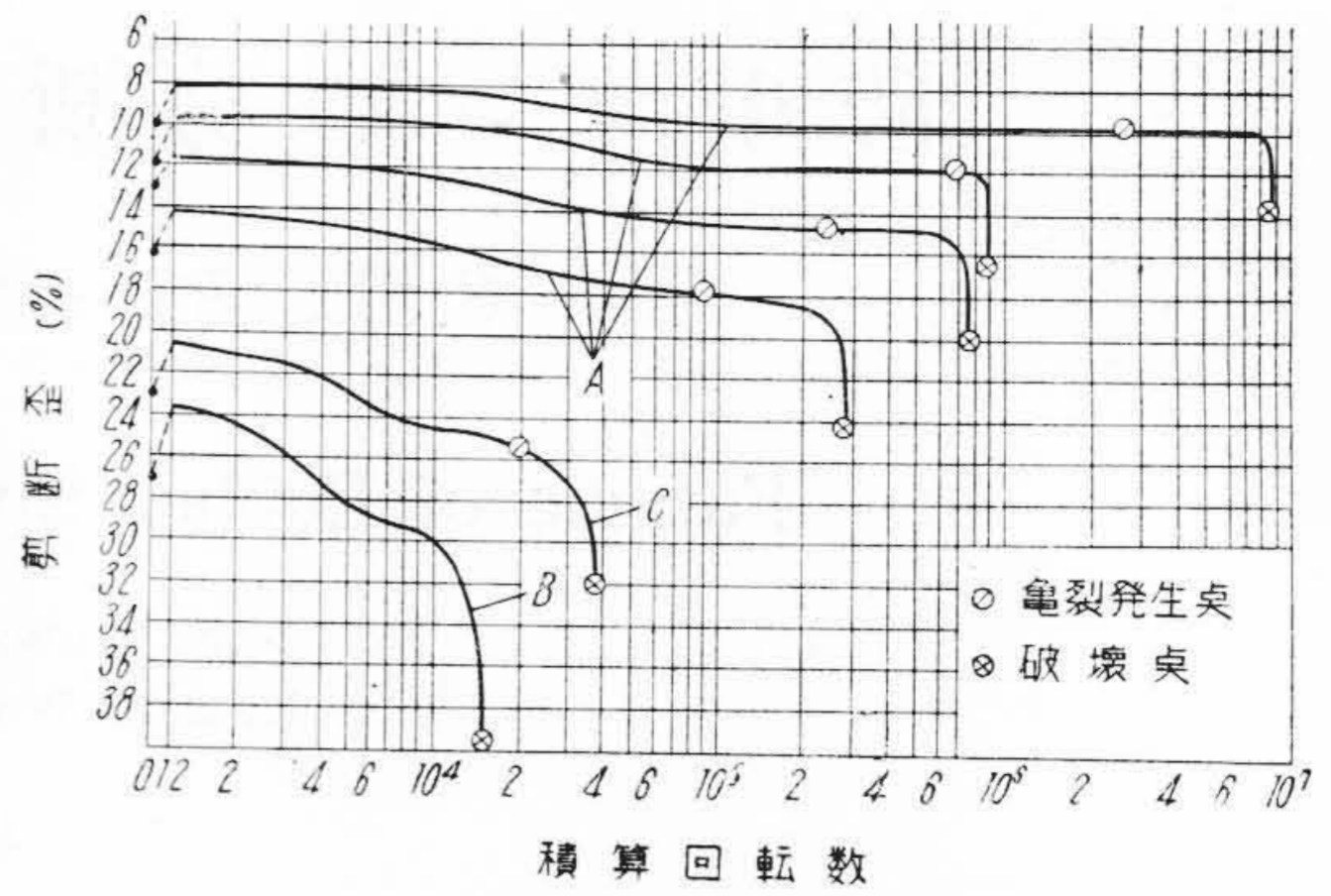
第3図 防振ゴム疲労実験装置
Fig.3. Experimental Equipment for Rubber Fatigue

第1表 剪断歪のバラツキ
Table 1. Dispersion of Shearing Strain

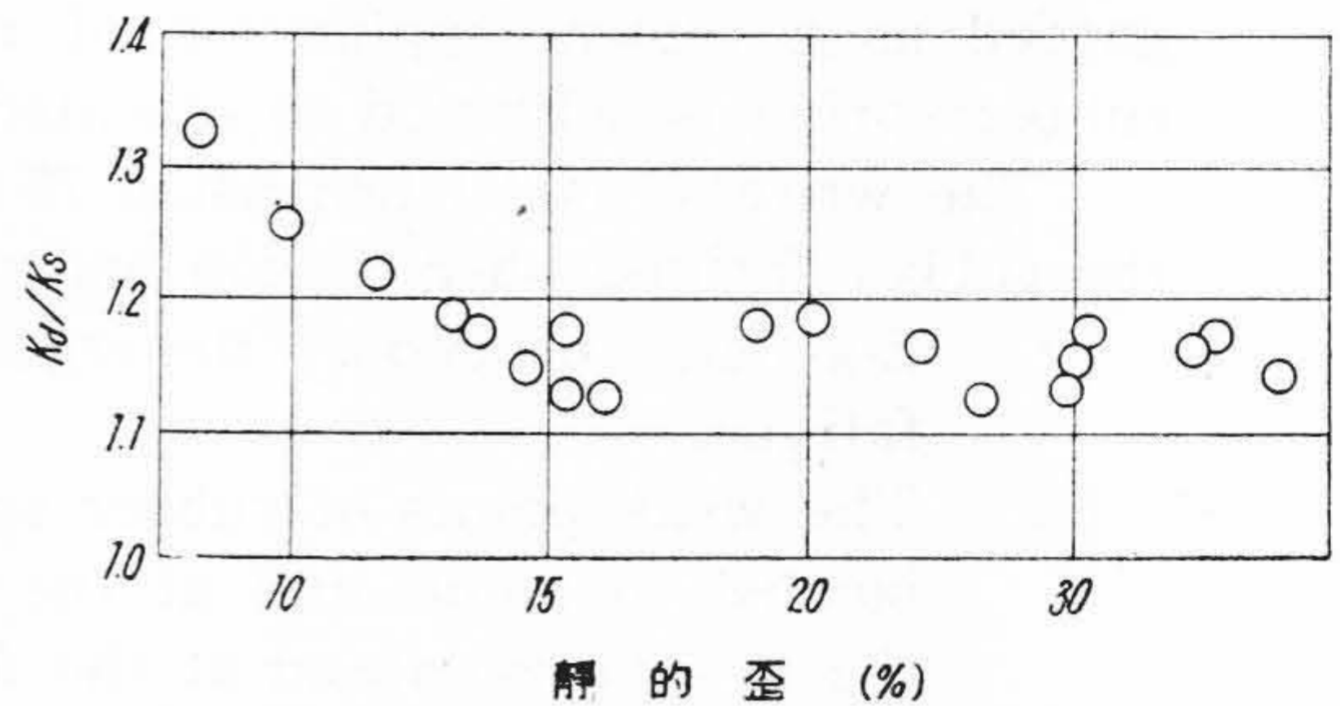
荷重 (kg)	150	200	250
測定数	11	11	8
剪断歪平均値 (%)	15.65	20.6	26.46
95%信頼限界 (%)	±1.30	±0.894	±1.16
平均値に対する割合 (%)	±8.3	±4.3	±4.4

くであり、2箇の試験片の中間に球軸受を介して荷重をかけておき、防振ゴムを回転するようになっている。これは現車と全く同じ荷重条件で、防振ゴムの弾性がいかに変化しても荷重は一定のいわゆる定荷重方式である。

本試験装置において荷重、回転速度などの条件を変えた場合について、積算回転計の読みとそのときのダイヤルゲージの読みを記録し、疲労破壊を起すまでの防振ゴムの挙動を追跡した。ただし運転は加荷後クリープの影響が無いうちに開始するよう留意した。



第4図 ゴム弾性変化曲線 (1)
Fig.4. Change of Rubber Elasticity (1)



第5図 動的バネ常数と静的バネ常数との比
Fig.5. Ratio of Dynamic and Static Rubber Spring Constant

〔III〕 実験結果

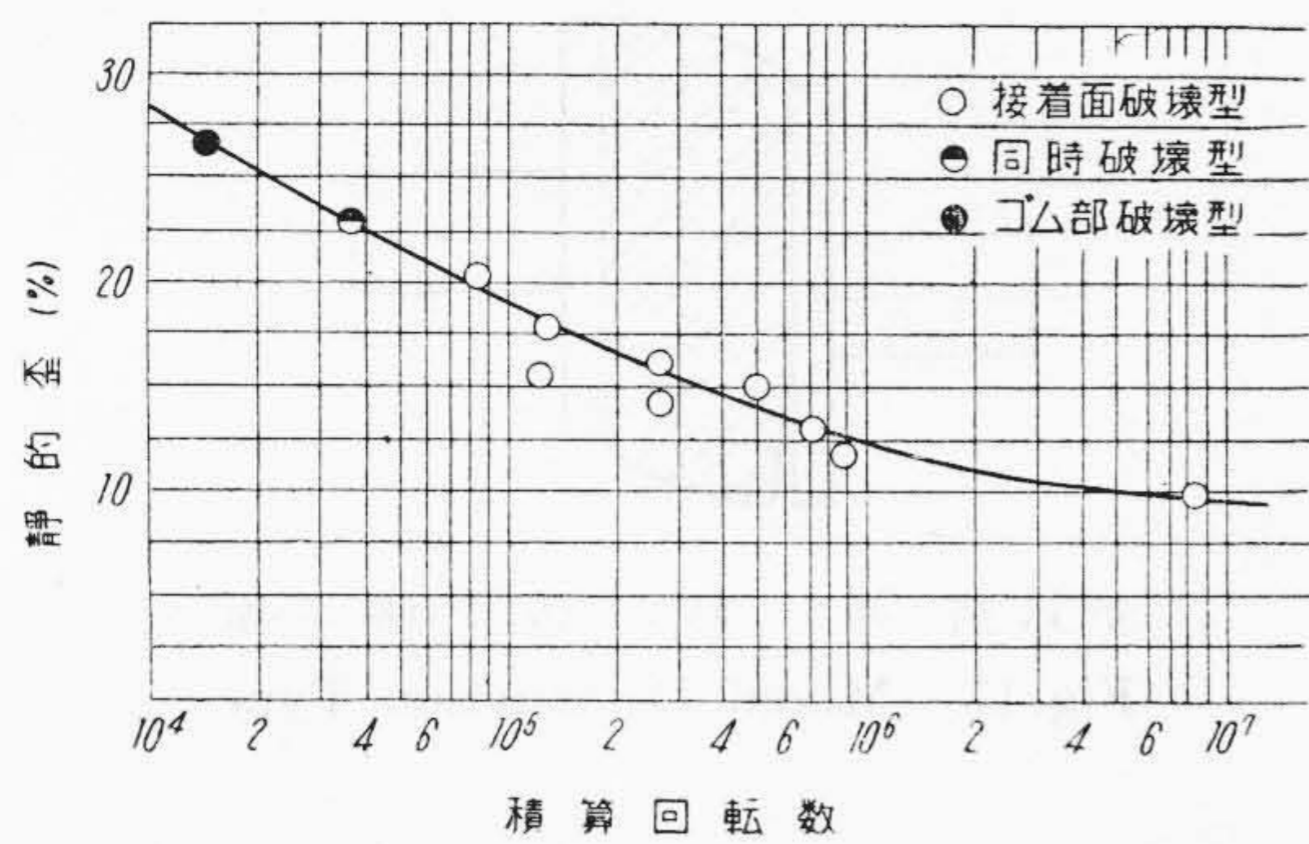
(1) 荷重と静的歪

上述の試験装置において加荷し、その直後における防振ゴムの静的剪断歪を読み取り荷重との関係を求めた。表面硬度実測の結果はデュロメータ 60~62 で大体一様であったが、同一荷重に対する静的剪断歪にはある程度バラツキが見られた。第1表にその例を示すが、勿論これは2箇の試験片の合成値である。

(2) 動的バネ常数とその変化

疲労試験装置を一定回転速度 1,450 rpm で連続運転し、積算回転数と2箇の試験片の合成歪の変化の関係を種々の荷重について測定した結果は第4図のごとくである。ただし縦軸には剪断歪の百分率を逆に目盛り、横軸には積算回転数を対数目盛で示した。

防振ゴムは回転を始めるとバネ常数は瞬間的に上昇しその歪量は減少する。この場合状態の急変により防振ゴムは振動するが、間もなく歪量が増加しつつ安定してくる。この間の変化は過渡的なものであり、測定も困難なので第4図には一応安定した 1.2×10^3 回転からの変化を取り、静止歪との間を点線で結んでその間の関係を示したが、過渡的範囲内における歪量はさらにこの図に示すものよりも小さなものである。



第6図 寿命曲線 (1)
Fig. 6. Life Curve for Rubber Spring (1)

第4図におけるゴム弾性の変化を荷重に対して眺めてみると、荷重の小さな場合はその変化の程度も小であるが、荷重が増大するにつれて著しい変化を示すことがわかる。

上述のごとく動的バネ常数は静的バネ常数より大きくなるが、参考までに一応 1.2×10^3 回転時における歪量により、動的バネ常数 k_d と静的バネ常数 k_s の比を静的剪断歪との関係として表わしてみると第5図のごとくで、大体倍率は(1.1~1.3)の範囲にあるようである。勿論ゴムの動的弾性の変化割合は荷重により著しく異なるので、これを一率に 1.2×10^3 回転時で表現することには問題がある。

(3) 寿命曲線

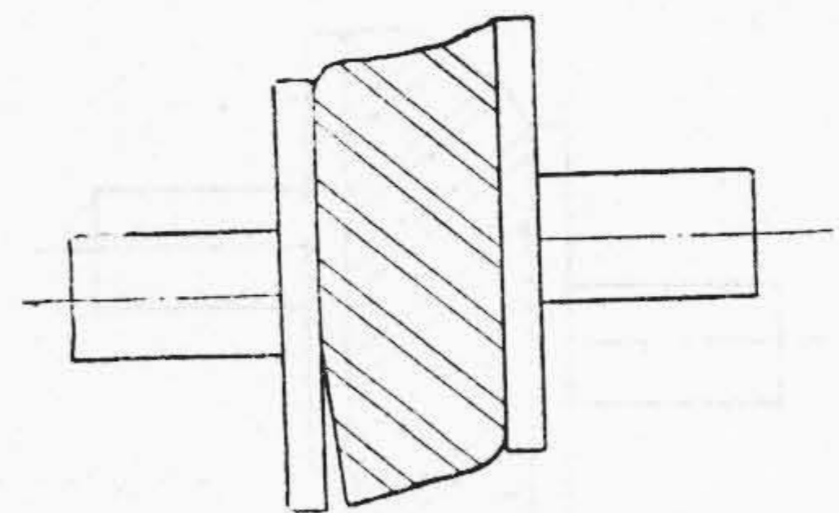
上述により試験片は寸法同一で、表面硬度もほぼ同一であるが、静的バネ常数はばらつくことがわかったので、寿命曲線を求める場合、応力の代りに、試験片の性質を直接的に表現していると考えられる歪量で整理してみた。第6図にその結果を示す。この場合寿命としては合成ゴム弾性が急激に変化する点をとつたが、1組2箇の試験片の疲労損傷の程度はかならずしも一様ではない。この点を考慮して試験片の対としては表面硬度のなるべく等しいものを選択して組合せた。

(4) 破壊過程と破壊の型式

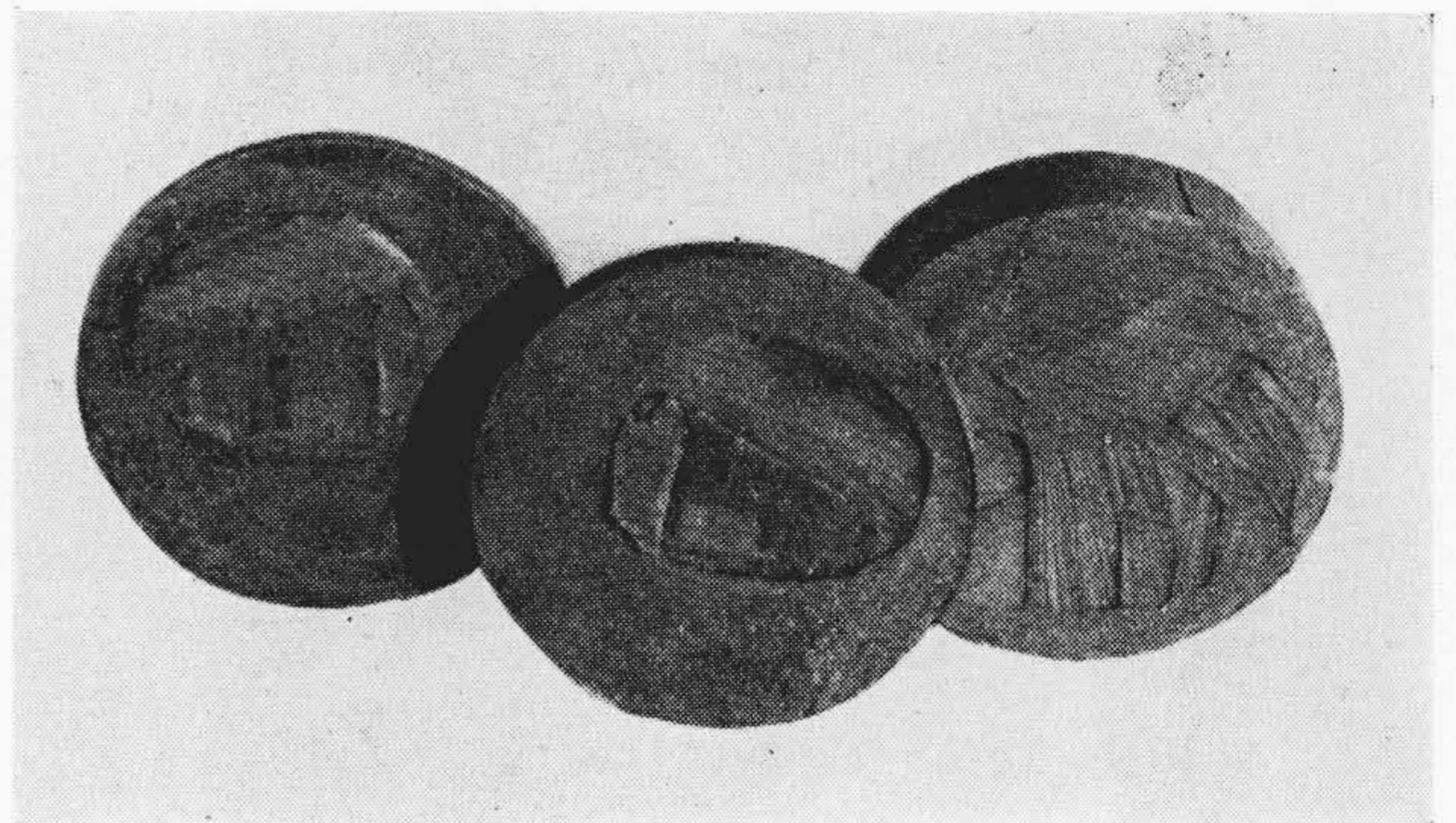
疲労試験における防振ゴムの破壊状況を観察すると、これをつぎの4種類の型式に大別できるように思われる。

(A) 接着面破壊型

これは荷重が軽い場合に見られ、ゴム弾性は著しい変化を示さないが、やがて積算回転数が増大すると接着面に剝離箇所を生じ、これが徐々に進行拡大し、ついにはゴム弾性は急変して振動が増え、切断破壊するに至る。この場合の特長として剝離はかならずしも同心円的に進行せず、また剝離が発生してもゴム弾性は急変すること



第7図 接着面破壊型
Fig. 7. Bonded Surface Destruction Type



第8図 破断面 (1)
Fig. 8. Section of Fatigued Rubber Spring (1)

なく、剝離発生から完全切断までには相当の期間が認められる。

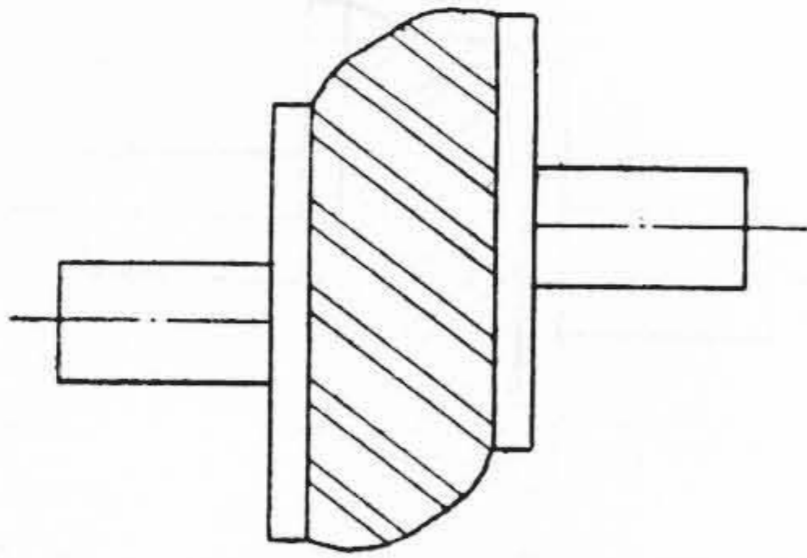
第4図のゴム弾性変化曲線中に記号でこの関係を示したが、同図中A曲線はこの型のものを示す。

第7図のごとく剝離が進行し、ゴム弾性が急変するにいたつた試験片の残りの接着面を、小刀で切断して接着の程度をしらべ、一方ゴム部の異常の有無を検ずべくその中央部を同様小刀で切断したもののが第8図である。

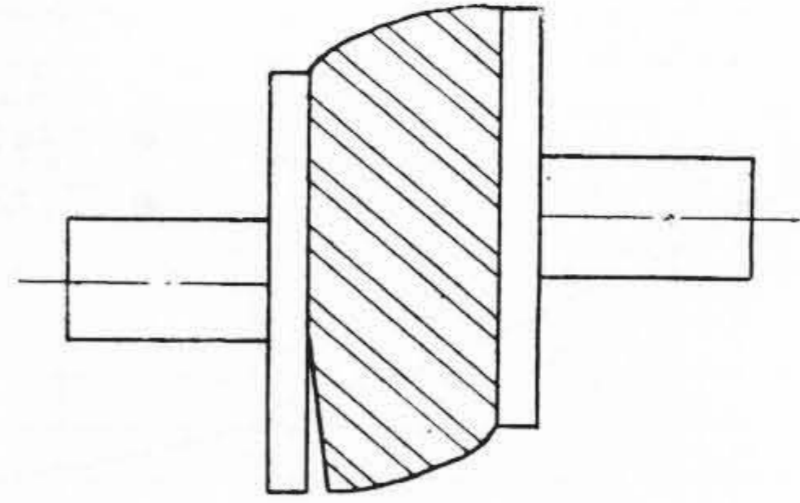
なお破壊時におけるゴム表面温度も測定したが、外気温度 $20 \sim 28^\circ\text{C}$ の範囲で $45 \sim 80^\circ\text{C}$ 程度であつたが、これは剝離面において接着板とゴムとの間の相対運動により摩擦熱が発生し、そこに一部ゴムが溶着していることもあるので、ゴム内部温度と直接結びつけるには問題があろう。なおゴム表面硬度には顕著な変化は認められなかつた。

(B) ゴム部破壊型

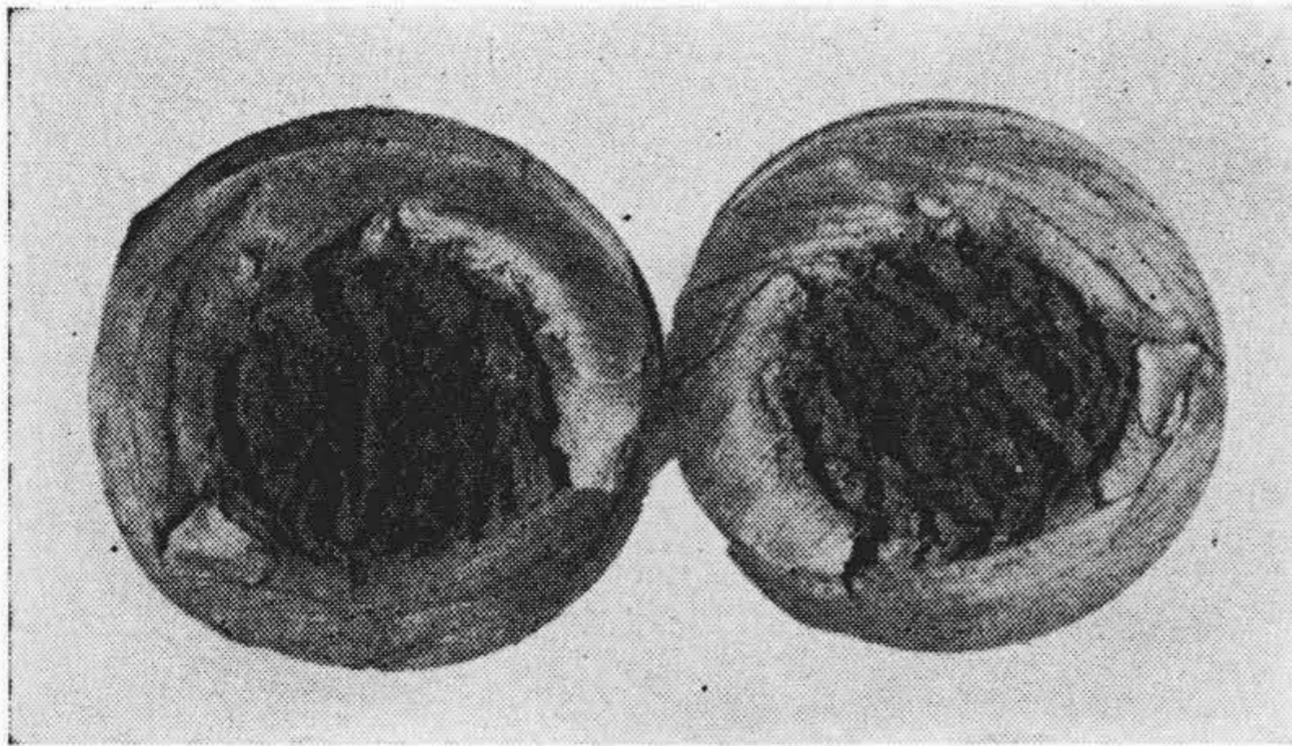
これは荷重が大きい場合に見られる型で、ゴム弾性は著しい変化を示す。積算回転数が増大すると、やがてゴム表面がわずかに膨大し、これが次第に大きくなり第9図(次頁参照)のごとく極端に膨大し、ゴム弾性も急激に減少して振動増大し、爆発的に破壊しゴムが飛散するに至る。この場合ゴム内部は組織的に変化し、粘着性を増



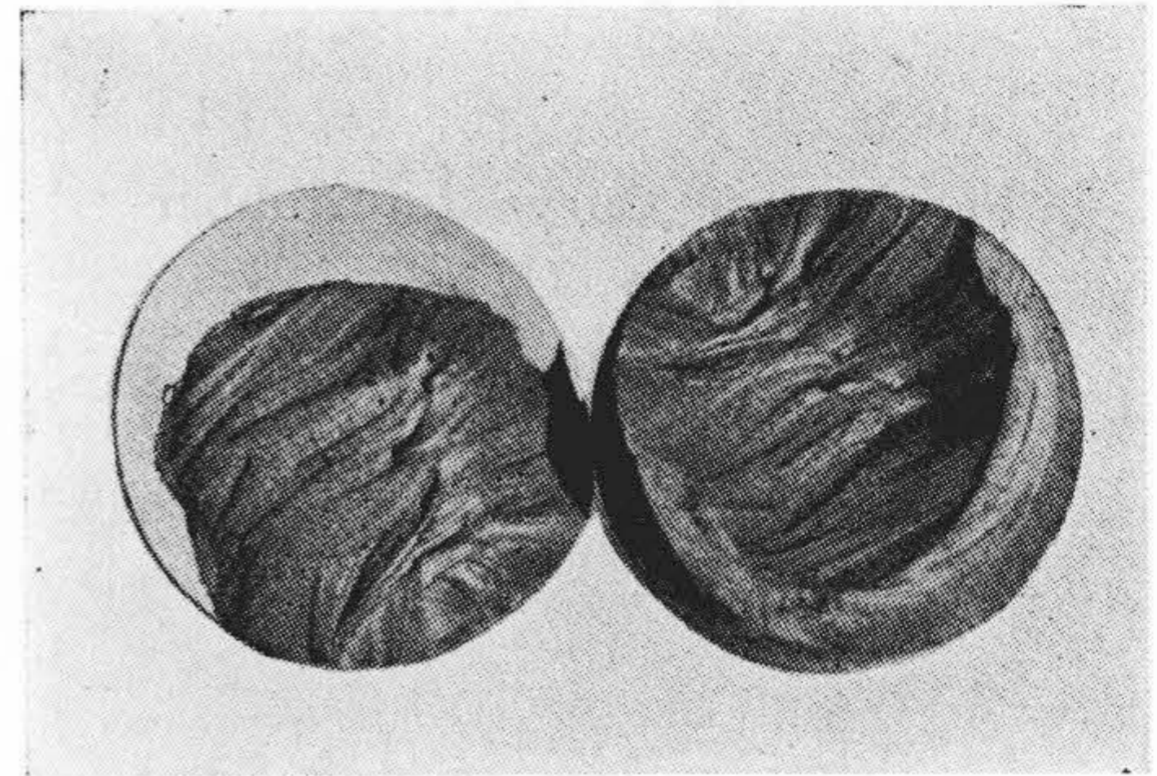
第9図 ゴム部破壊型
Fig. 9. Rubber Destruction Type



第11図 同時破壊型
Fig. 11. Mixed Destruction Type



第10図 破断面(2)
Fig. 10. Section of Fatigued Rubber Spring (2)



第12図 破断面(3)
Fig. 12. Section of Fatigued Rubber Spring (3)

し中心部は海綿状となるが、第10図にその一例を示す。これは破壊寸前の試験片のゴム厚中央部を小刀で切断したものである。

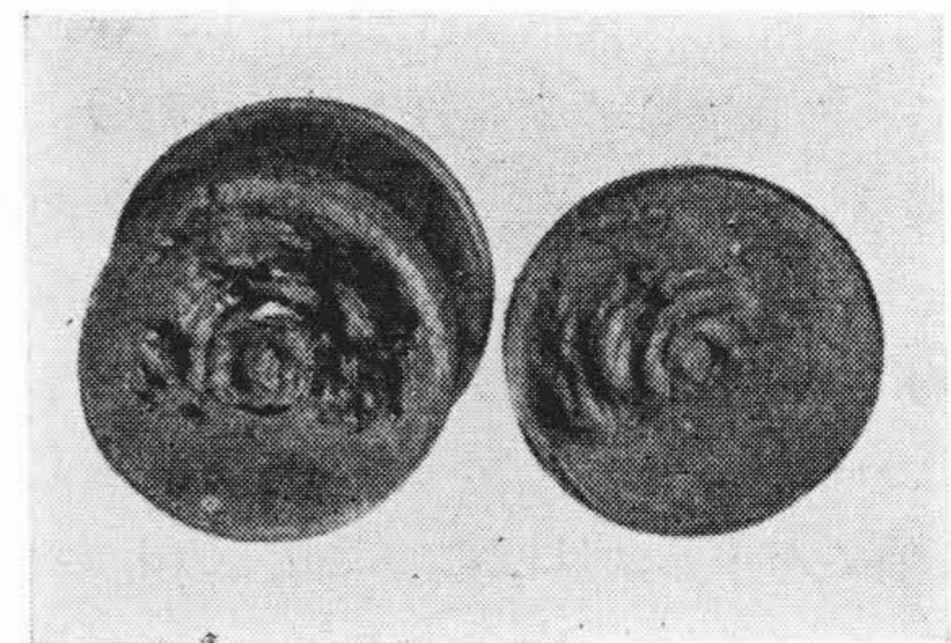
かくのごとくゴムが極度に膨脹するので、ゴムはその接着板端部において相当無理な変形を余儀なくされる。したがってこのために接着面に二次的に剝離現象を見ることがあるが、あくまで破壊を規定するものはゴムそのものであることを特長としている。

第4図のB曲線はこの種の破壊を起したゴムの弾性変化を示す。この場合の破壊直後における温度測定結果は、外気温度 $20\sim 28^{\circ}\text{C}$ の範囲で表面 $80\sim 90^{\circ}\text{C}$ 内部 $120\sim 150^{\circ}\text{C}$ 見当であるが、破壊瞬間におけるゴム温度はさらにこれ以上と考えられる。また表面硬度もデュロメータ 54 程度まで低下する。

(C) 接着面ゴム部同時破壊型

荷重からいうと前二者の中間的な場合に見られる。この型のゴム弾性変化もしたがって前二者の中間的なもので、第4図におけるC曲線はこの例である。この型は接着面の剝離とゴム部の破壊が、並行に進行してゆくものと考えられるが、ゴム部破壊型が二次的に接着面剝離を発生するのに対し、外見的にはむしろ剝離発生の方が先に現われるものである。しかる後ゴム部も膨大の傾向を示し、第11図のごとく剝離現象と併存し、やがてゴム弾性は急激に減少するに至る。

第12図はゴム弾性急変時に回転を中止し剝離接着面か



第13図 破断面(4)
Fig. 13. Section of Fatigued Rubber Spring (4)

らゴム中央部にかけて試験片を切開したものの一例である。これを見るとゴム内部においては、ゴム破壊型のごとく完全に海綿状組織にはなっていないが、中央部にその発生の過渡的なものが見られる。

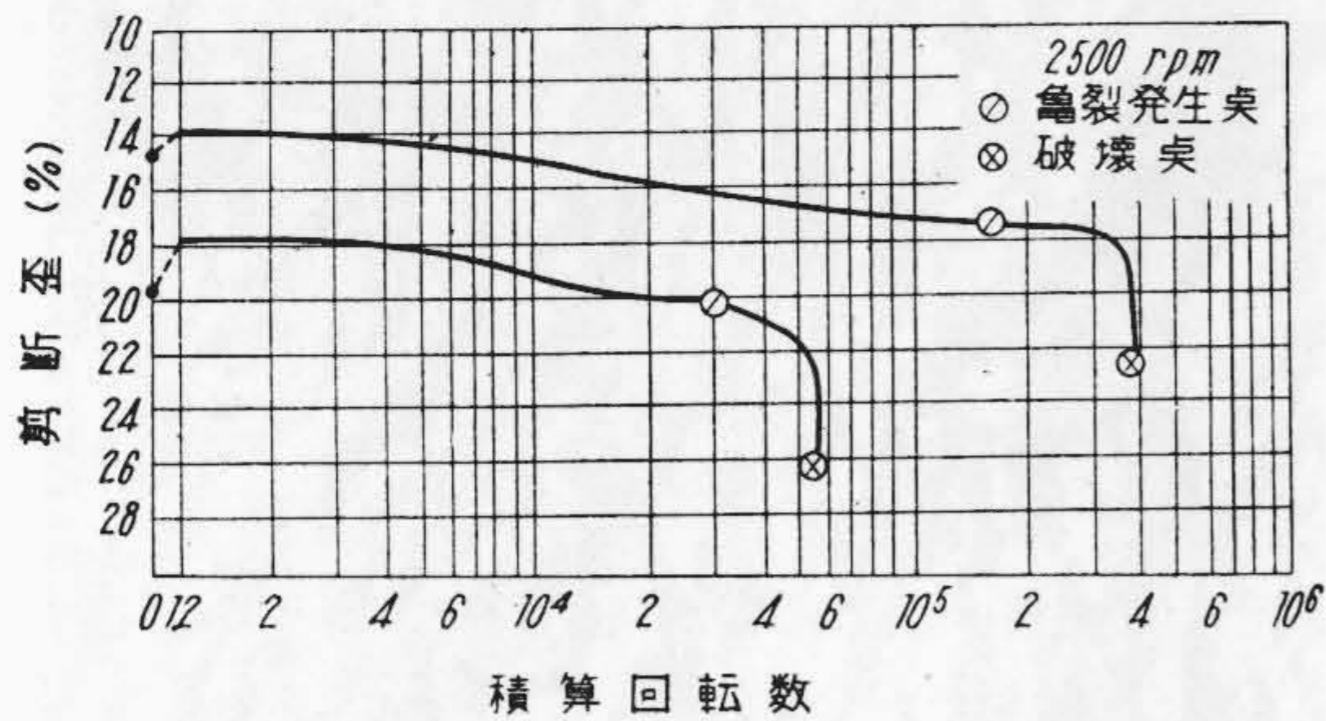
破壊直後における表面温度も前二者の中間的なものとなっている。

(D) 異常破壊型

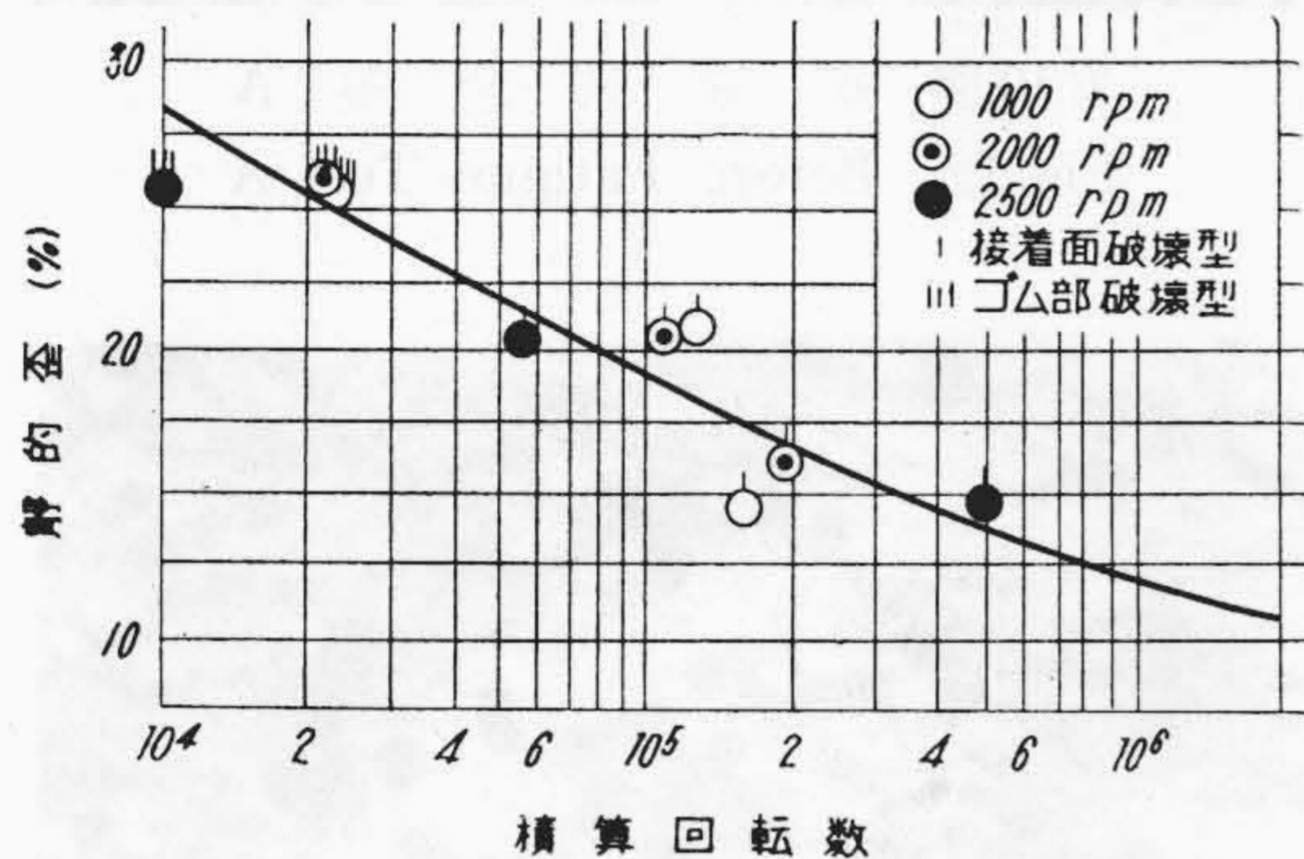
これはゴム試験片に欠陥がある場合に起るものであり、欠陥の原因は主して加硫作業の不完全に基くものと考えられる。

したがってこの種のもものはゴム弾性、破壊過程においても一定した傾向はなく、寿命においても第6図の寿命曲線からは外れて短く出る。

第13図はこの種のももの破断面の一例を示すが、加硫



第14図 ゴム弾性変化曲線(2)
Fig. 14. Change of Rubber Elasticity (2)



第15図 寿命曲線(2)
Fig. 15. Life Curve for Rubber Spring (2)

不完全のためゴム板の層が歴然と残っているのがわかる。

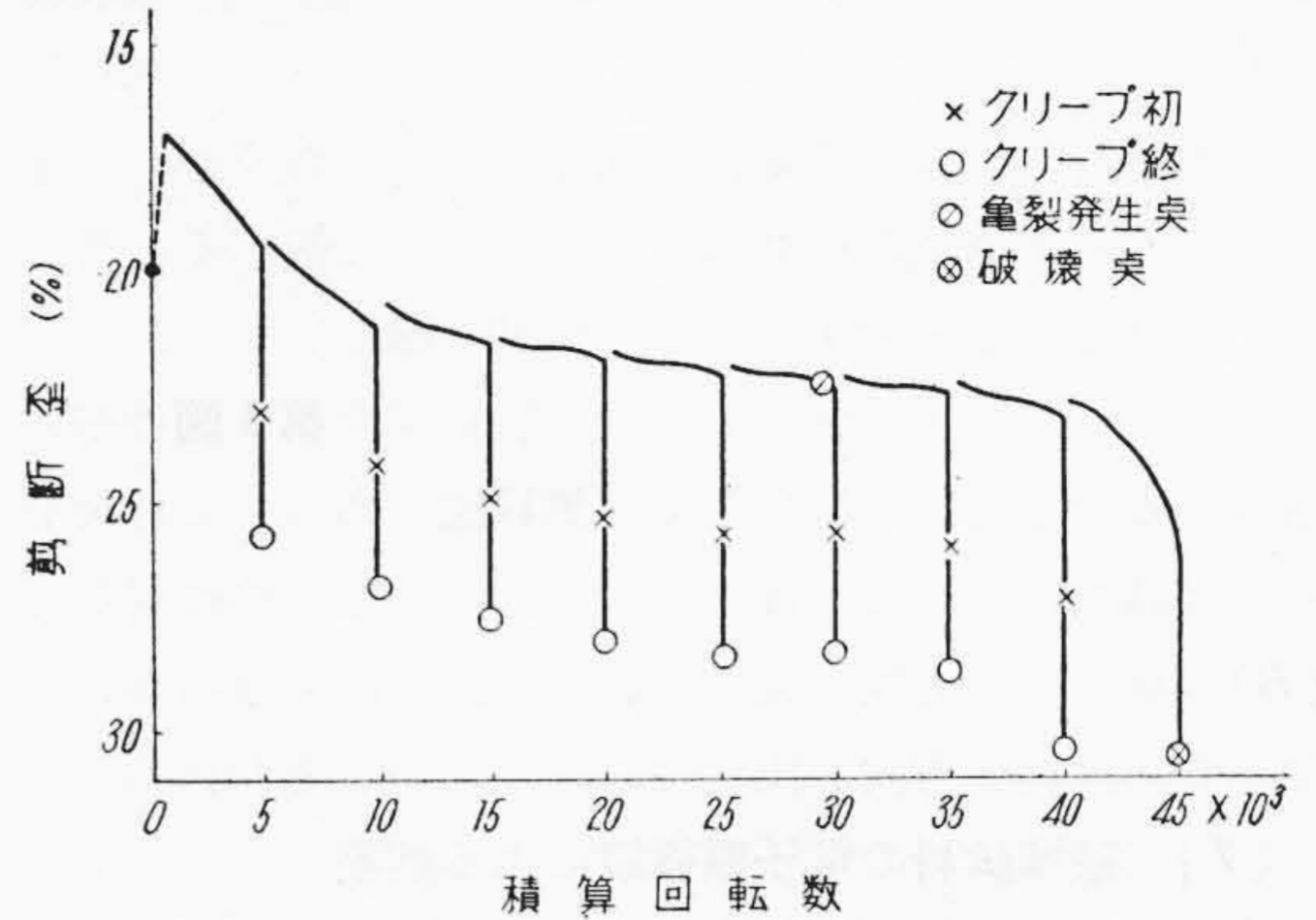
以上のうち異常破壊型を除いた他の三者を第6図の寿命曲線に記号で表わしてみると、荷重との関係がはつきり現われている。

(5) 回転数の影響

上述の疲労試験は 1,450 rpm の一定荷重速度で行ったが、防振ゴムは粘弾性体として考えるとき荷重速度の影響はある筈である。しかし弾性車輪として応用される場合を考えれば荷重速度には大体の限度があり、また疲労試験を広範囲の荷重速度において行うことは実験上の困難性もあるので、一応試験機回転数で 1,000, 2,000, 2,500 rpm と 3 種類の場合を、1,450 rpm と同一要領で試験した。

各場合についてゴム弾性の変化を求めたが、いずれも第4図と同様の傾向を示した。第14図に 2,500 rpm の場合を一例として示す。

これらの場合の寿命を第6図から求めた寿命曲線をベースにして比較してみると第15図のごとくになり、これを見ると回転数の相異による差異としてはむしろ不統一であるが、ベースの曲線の附近にいずれも散在してい



第16図 ゴム弾性変化曲線(3)
Fig. 16. Change of Rubber Elasticity (3)

る。第6図における測定点の散布状態からすれば、この 1,000~2,500 rpm の荷重速度範囲では寿命にその影響は特別に現われていないと考えるべきであろう。

破壊過程その他についても定性的には前述と全く同一の関係が成立するようで特別な差異は認められなかった。

(6) 運転停止の影響

現車運転を考えた場合、運転停止の影響は弾性車輪用防振ゴムには任意の形で入って来る問題である。これを検すべく 1,450 rpm 運転において下記実験を行った。

すなわち普遍的な関係を求めるためには、荷重と停止位置および停止時間を幾通りも組合せて実験すべきであろうが、概略の傾向のみを把握するためにつきの二通りの場合について行った。

(A) 5,000 回転毎荷重をかけた儘 5 分間停止

測定の都合上割合高荷重、短寿命のものについてしか行いえなかったが、この場合のゴム弾性変化の一例を第16図に示す。これは積算回転数を普通目盛にしたが、停止点において不連続点を形成していることがわかる。また一般に停止後は停止前のバネ常数よりも固くなる方に変化しているようであるが、その変化量は任意の形に現われてくる。これは停止時のクリープの方向に関係があるのではないかと思ひ、その方向を一定にしてみたが特別の変化は見られなかった。第16図には停止時におけるクリープの状態にも留意したのでこれを併記した。

また停止後再び始動する場合はクリープのために瞬間的に非常に振動するが、これは間もなく減少して安定するようである。

(B) 20,000 回転毎荷重をかけたまま 1 時間停止

上述の 5 分間停止では、回転停止までに上昇したゴムの温度が外気温度と完全に平衡できないでつぎの運転に入ることになるが、これを平衡させるために停止時間を

1時間とした。ただし停止時間は実験の都合上 20,000回転とした。

この場合のゴム弾性変化も同様のものとなるが、停止点における不連続の程度は(A)の場合に較べると著しく、また停止後起動する場合の振動も激しい。

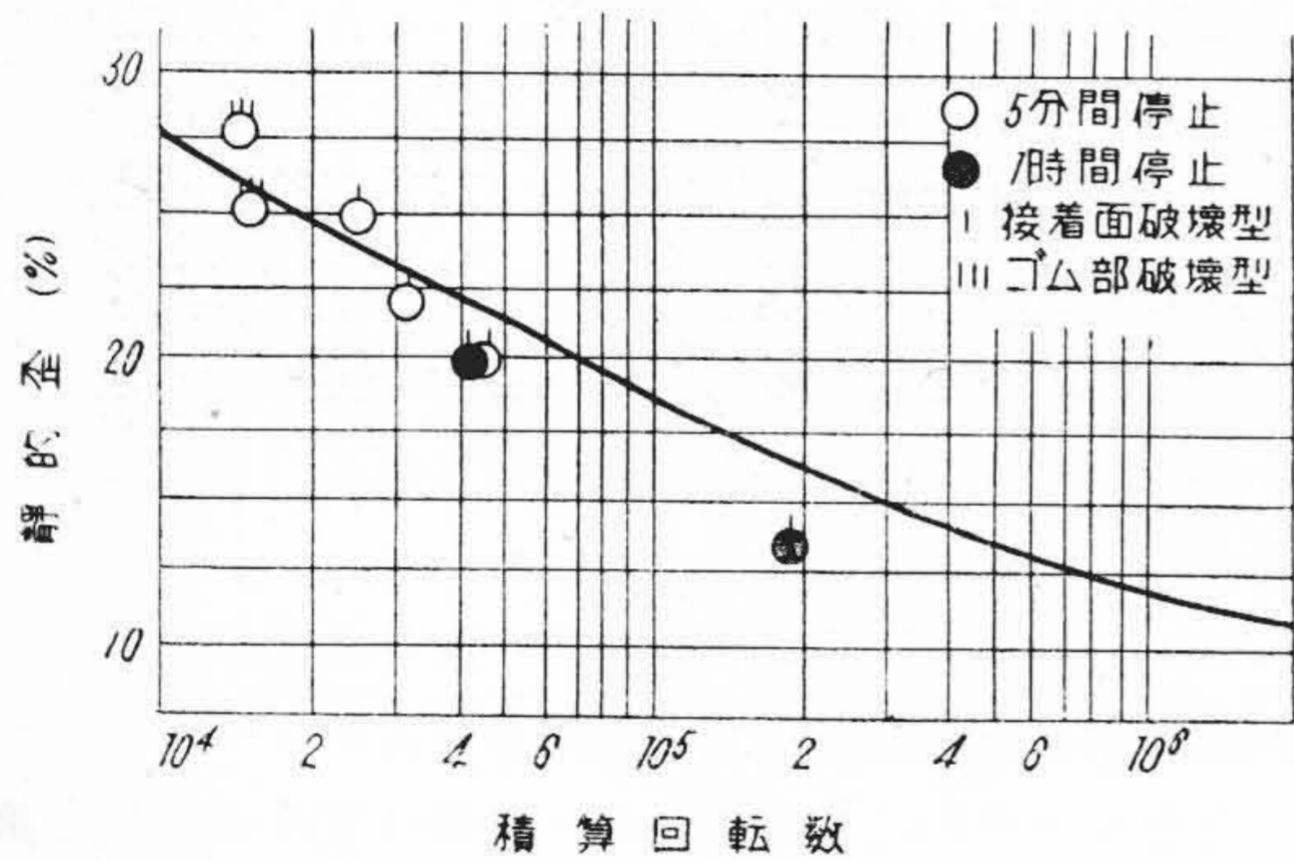
以上二つの停止条件に対する実験結果を第6図の寿命曲線に対して比較してみたのが第17図である。これを見ると(A)の場合にはほとんどずれていないのに対し、(B)の場合は、実験の数が少ないので断定はできぬが、寿命としては短い方向に出るのではないかと思われる。

(7) 破壊試料の電子顕微鏡による観察

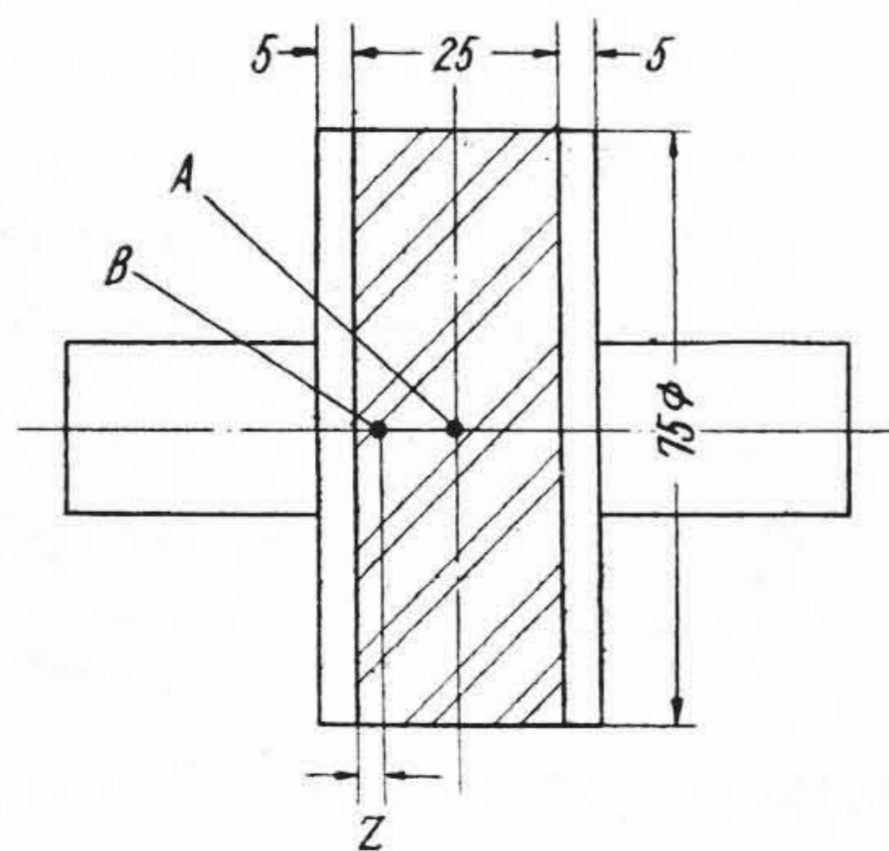
上述のごとく剪断疲労破壊の型式は異常破壊型を別とすれば、接着面破壊型、同時破壊型およびゴム部破壊型となるが、さらにその表面状態を詳細に観察すべく、それぞれに対して電子顕微鏡写真を撮影した。

試料採取箇所は第18図に示すごとく、ゴム中央部A点および接着面近傍B点の2箇所とした。

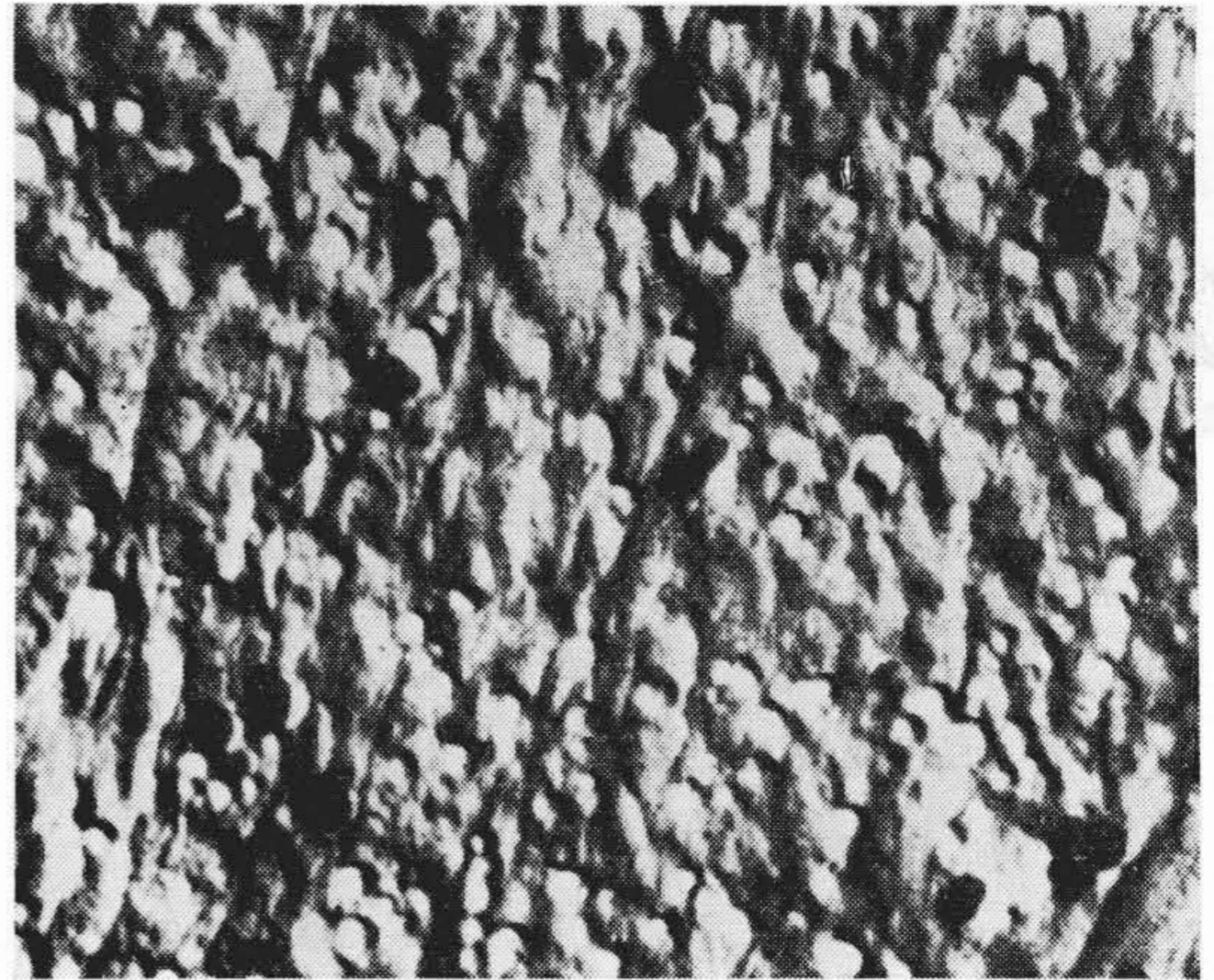
電子顕微鏡試料はいずれもプレスレプリカ法にて作成シヤドウイングはゲルマニウムで $\tan \theta = 1/2$ で行い、倍率 10,000 で撮影したが、第19図~第26図にその結果を示す。



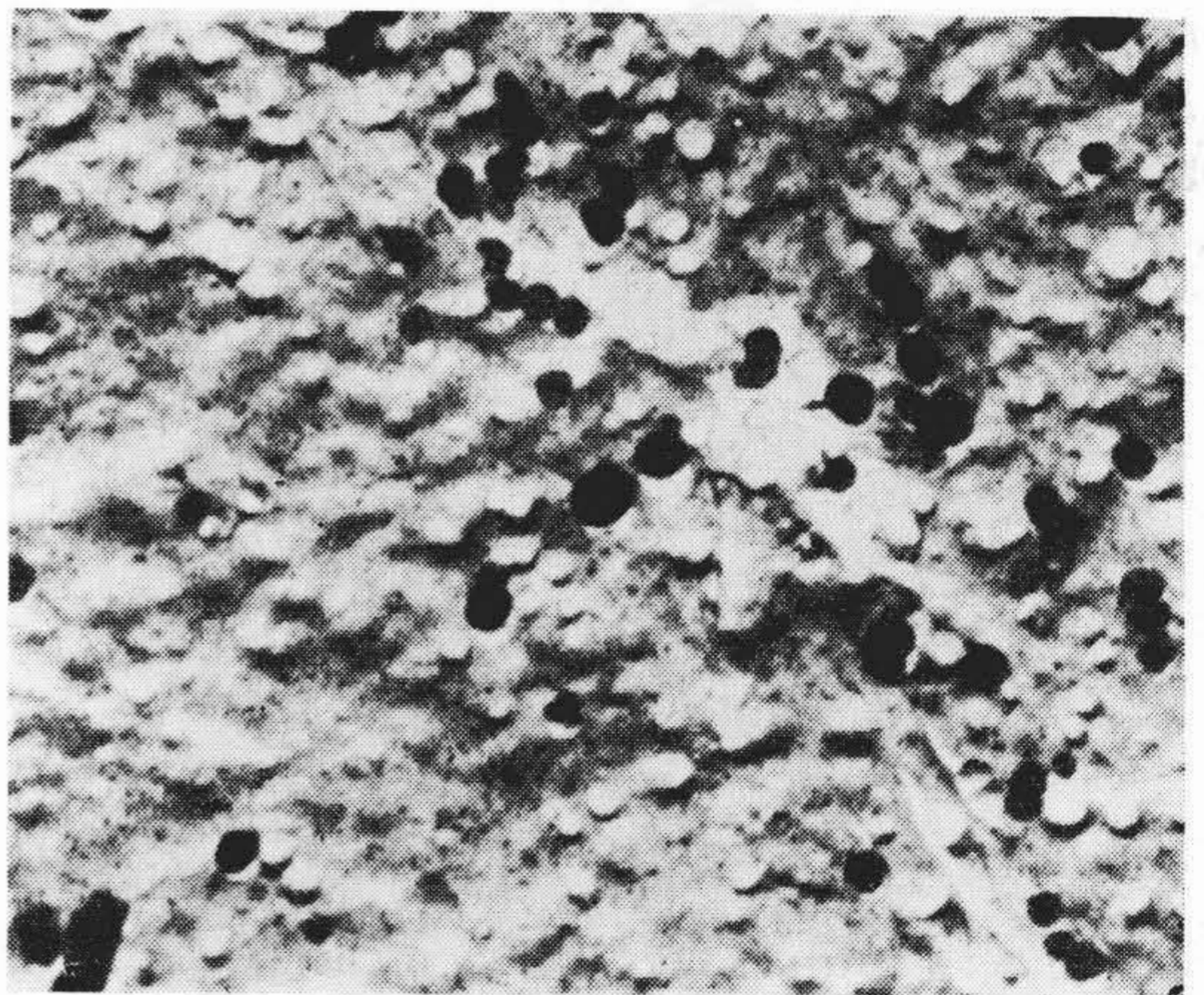
第17図 寿命曲線 (3)
Fig. 17. Life Curve for Rubber Spring (3)



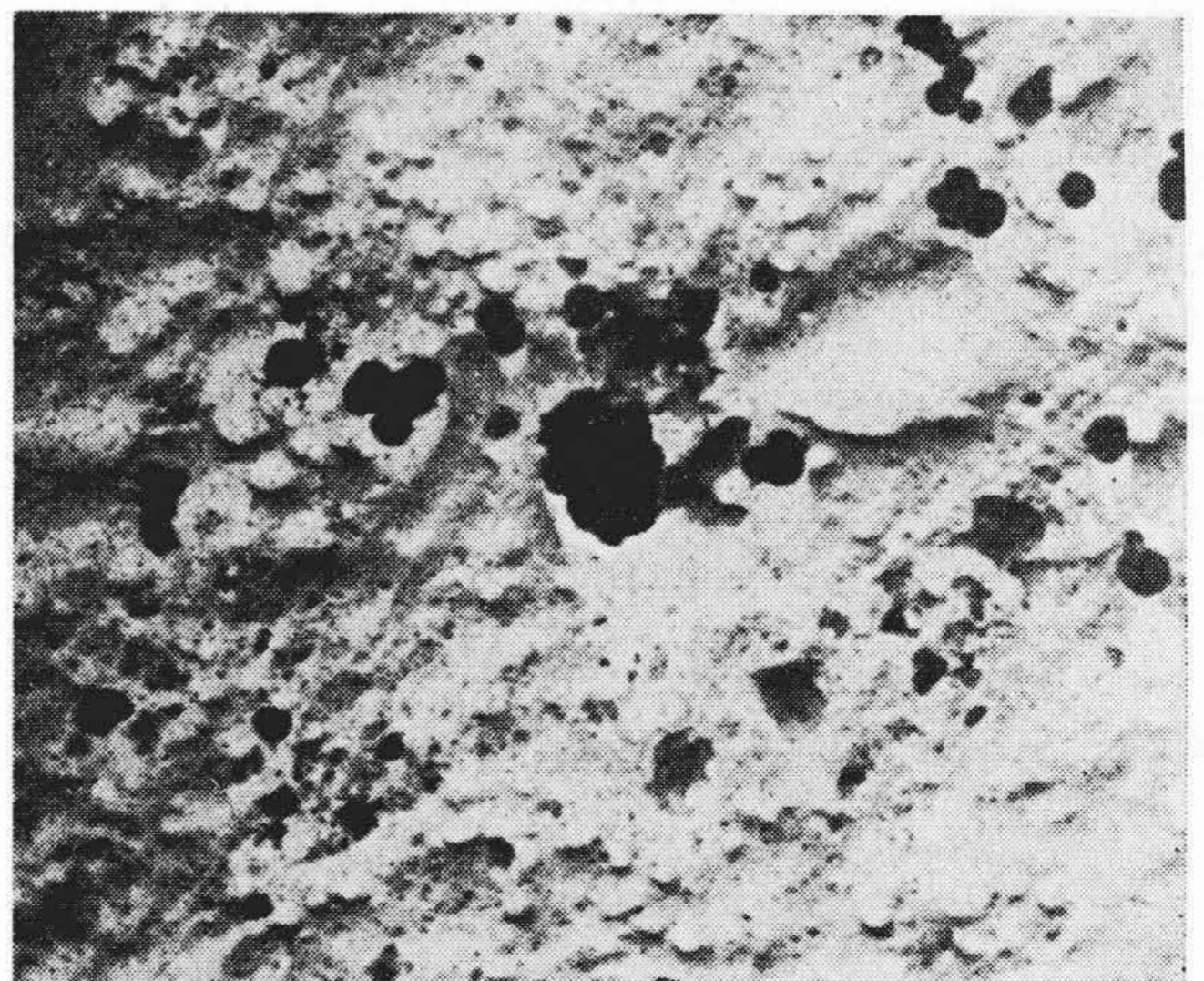
第18図 試料採取箇所
Fig. 18. Position of Rubber Picked Up as a Sample



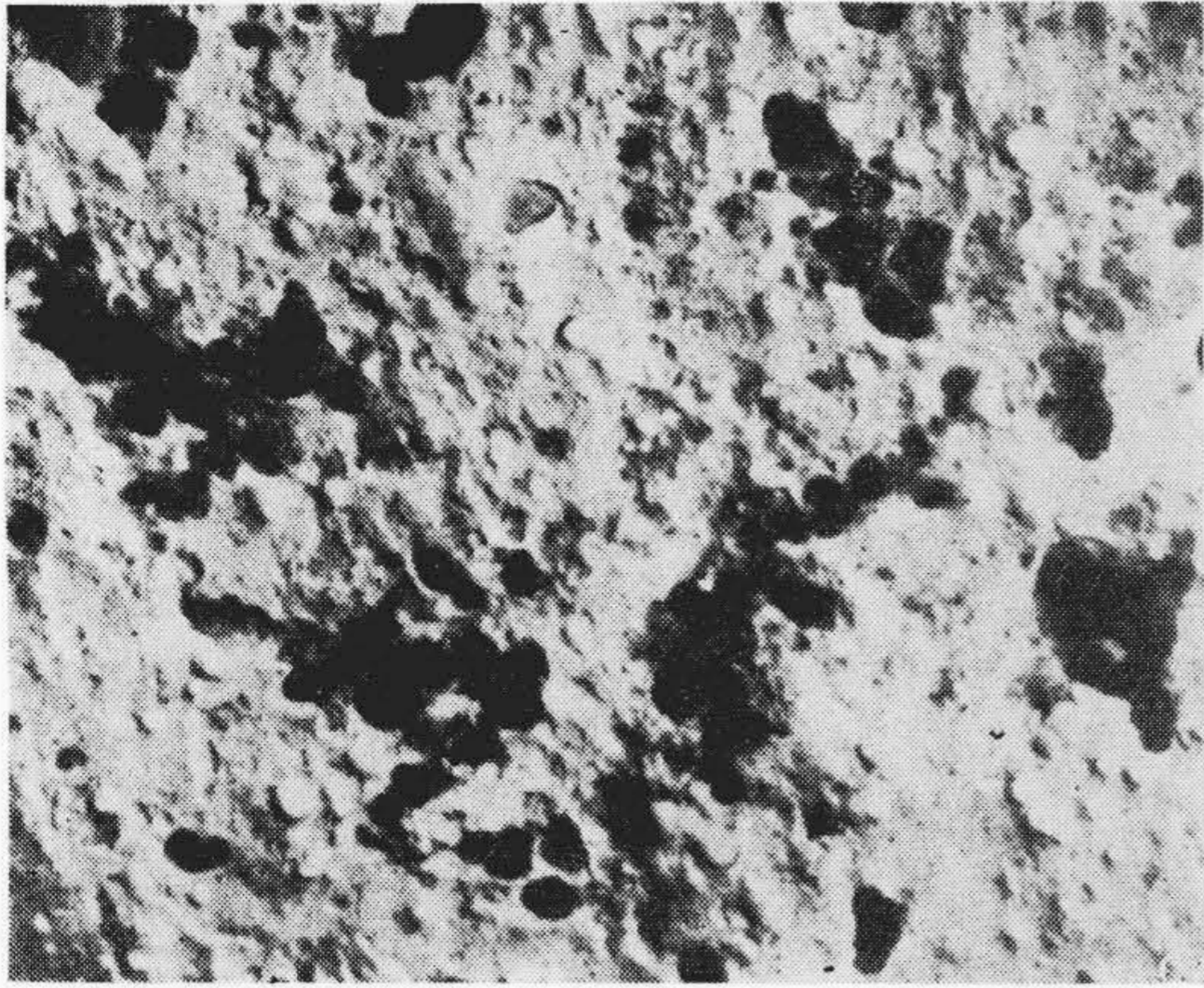
第19図 疲労試験前 A
Fig. 19. Before Fatigue Test A



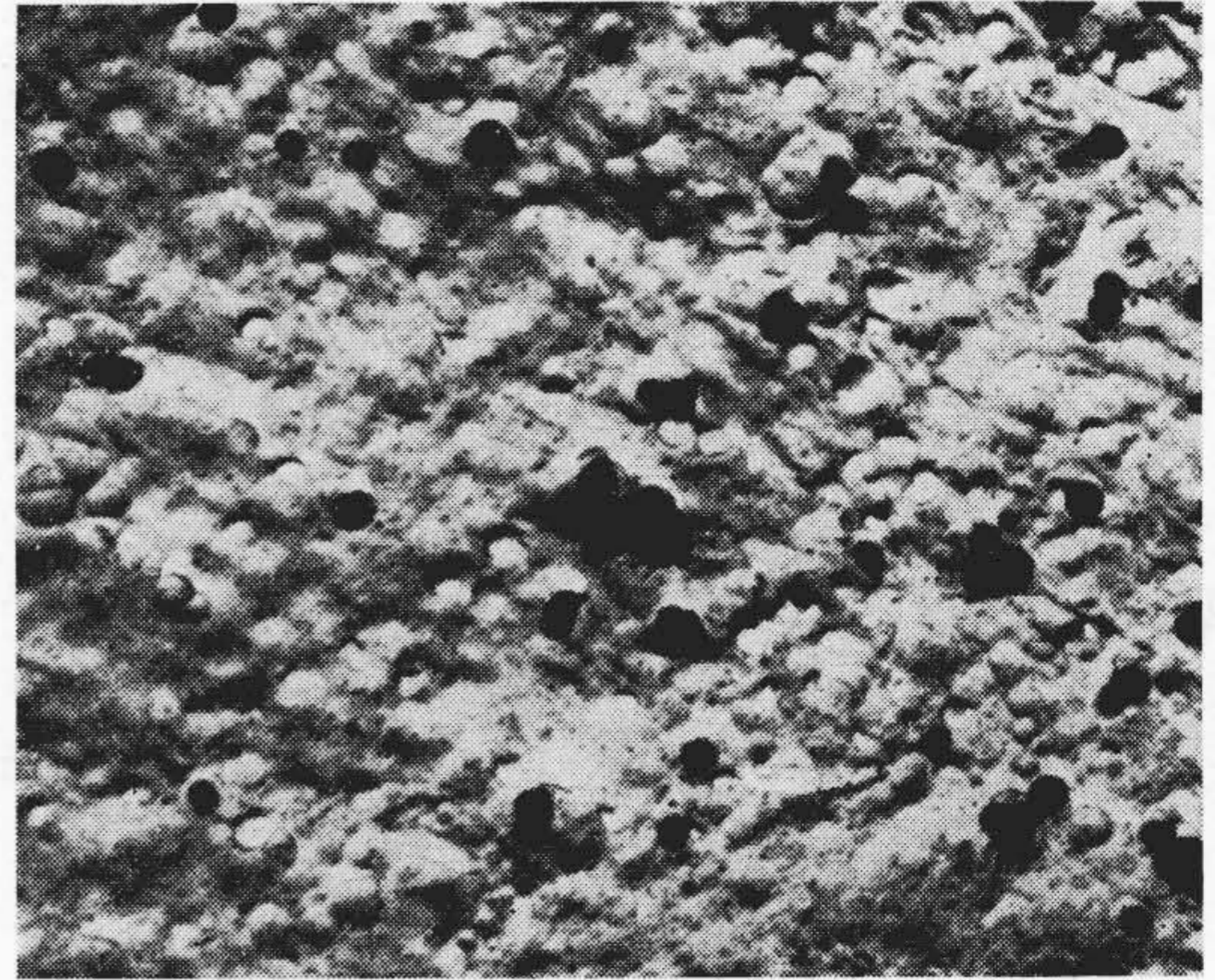
第20図 接着面破壊型 A
Fig. 20. Bonded Surface Destruction Type A



第21図 同時破壊型 A
Fig. 21. Mixed Destruction Type A



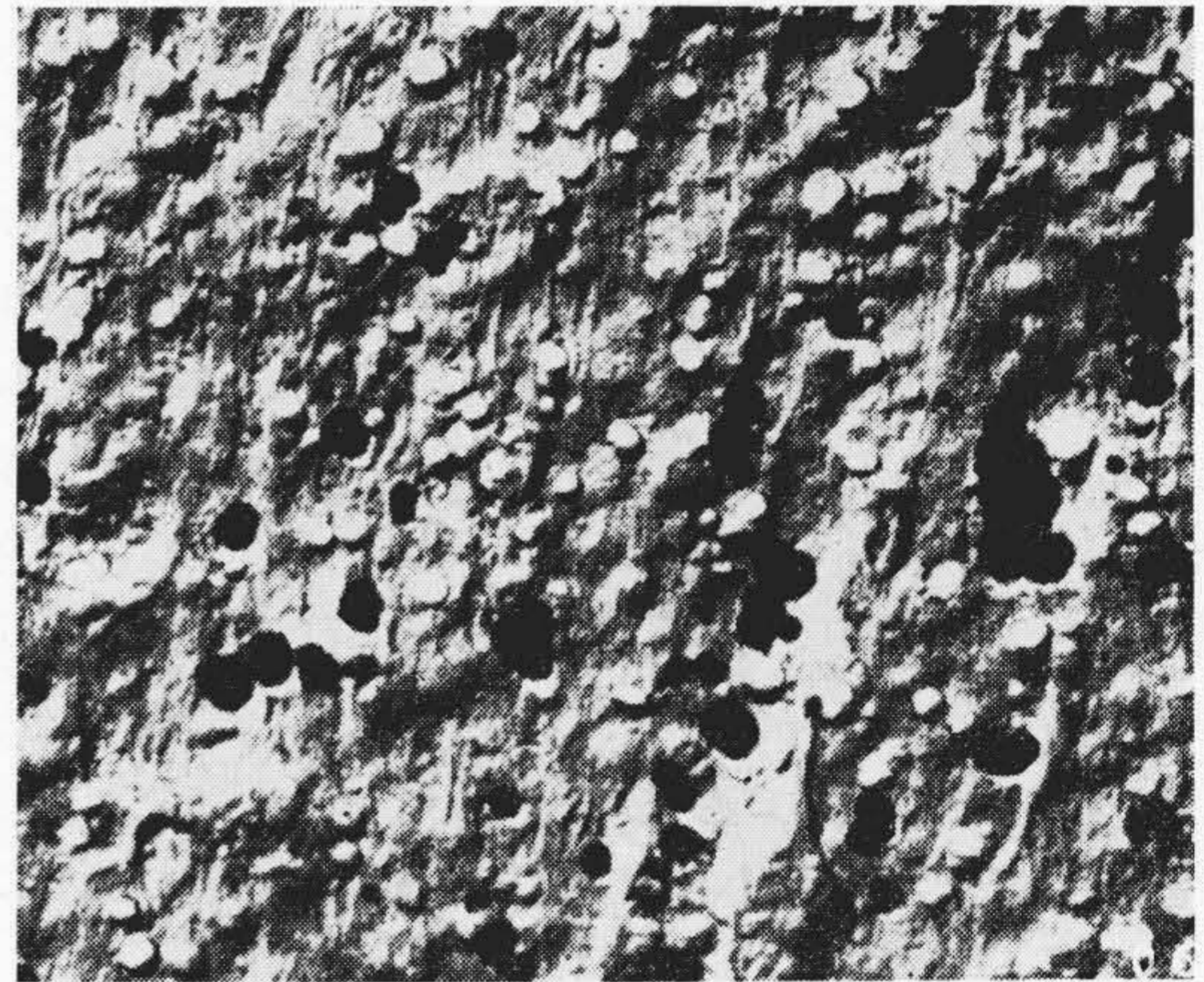
第22図 ゴム部破壊型 A
Fig. 22. Rubber Destruction Type A



第25図 同時破壊型 B
Fig. 25. Mixed Destruction Type B



第23図 疲労試験前
Fig. 23. Before Fatigue Test B



第26図 ゴム部破壊型 B
Fig. 26. Rubber Destruction Type B



第24図 接着面破壊型 A
Fig. 24. Bonded Surface Destruction Type B

第19図は疲労試験前のA点で、第20図～第22図はそれぞれ接着面破壊型、同時破壊型およびゴム部破壊型のそれぞれを示すが、これを荷重条件について眺めてみると、表面状態はこれに伴い著しく変化していることがわかる。使用カーボンブラックが球状であること、およびカーボンブラックの配合量が他の配合剤に比して著しく大であることから考えると、写真中の球状の黒白はカーボンブラックではないかと思われる。同様に第23図～第26図にはB点を示すが、この場合はA点のごとく顕著な差異は認められない。

[IV] 考 察

(1) 疲労過程におけるゴム弾性の変化

各種条件において疲労試験を行った結果、その過程において程度の差こそあれ、ゴム弾性は変化することがわかった。

ゴム弾性は加硫によるゴム分子と硫黄分子との架橋お

よび充填剤（増強剤）のゴム分子との二次結合によつて与えられ、またこれらの結合状態は熱に対して不安定になりうることから考えると、上記ゴム弾性変化の原因としては運転中におけるゴムの内部摩擦による温度上昇が考えられる。

荷重小の場合はゴム弾性変化が小であり平衡状態が続いているが、これは内部摩擦による発熱量が小でゴムの温度上昇も少く、かつゴム表面および接着板からの放熱条件と平衡することによると思われる。これに対し荷重大の場合は発熱量が大で熱的平衡に達しえない中に破断するものと考えられる。

(2) 破壊型式

上述のごとく破壊型式は4種類に大別できたが、この中異常破壊型を除けば、防振ゴムにおいては疲労過程の弱点として接着面とゴム中央部との2箇所が考えられることがわかった。荷重大でゴム部破壊型が起り、荷重小で接着面破壊型が起ることは、前者においてはヒステリシス大で内部摩擦による発熱が大であるため、ゴム結合に著しい変化を起し破壊するのに対し、後者においてはヒステリシスが小なるため、むしろ接着面におけるゴムの応力集中の方が敏感に響いて剝離の発生となると考えるべきであろう。荷重条件が両者の中間にあるものは、破壊も中間的なものとして現われるべきことになるが実験結果もこのことを示している。

(3) 回転数の影響

防振ゴムは粘弾性体である以上、荷重速度が広範囲に変ればヒステリシスにも影響があり、単位時間当りのその回数は変化して発熱量はこれらによつて規定されるが、一方これに伴う表面からの冷却効果も異つてくるので、その合成結果がゴム弾性および寿命に影響すると考えられる。実験結は顕著な差異を示していないが、これは実験荷重速度変化の範囲ではこれらの影響は相殺され、ゴム質のバラツキの範囲内に収つたものと思われる。

(4) 停止の影響

試験機をある時間の後停止すると、防振ゴムはそれま

での運転のため温度上昇を起しているのが、停止の瞬間から放熱現象のみを起すことになる。一方荷重をかけたままなのでその荷重方向に対してはクリープ現象を余儀なくされる。したがつてこの停止時間中においてもやはりゴム分子の結合状態、特に充填剤との二次結合状態が変化し、停止点におけるゴム弾性変化曲線の不連続はこのことに基くと考えるのが妥当であろう。またこの不連続の程度は荷重、運転時間、停止時間などで支配され、ゴムの寿命にも関係しそうに思われる。

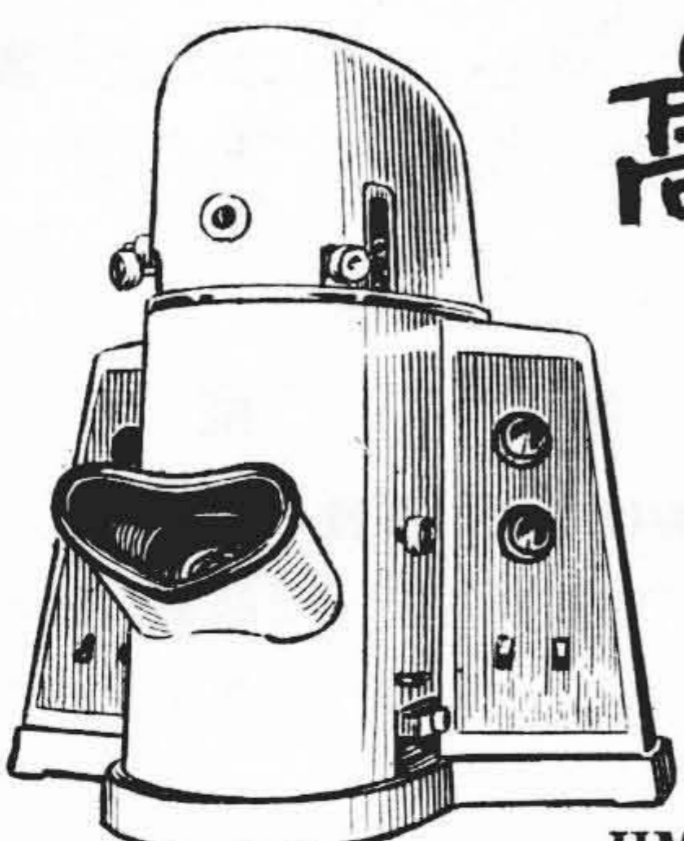
[V] 結 言

以上のことを要約してみるとつぎのごとくになる。

- (1) 防振ゴムは定荷重剪断疲労試験の疲労過程においてゴム弾性が変化し、その変化量は荷重が大なる程大きい。
- (2) 防振ゴムには接着面とゴム中央部に疲労に対する弱点があり、破壊がそのいずれによつて支配されるかはそのときの荷重条件による。
- (3) 防振ゴムの寿命は静的剪断歪との関係で整理すると割合きれいに求められる。
- (4) 試験片の回転速度を 1,000~2,500 rpm の範囲に変えて疲労試験を行つた結果は、ゴム弾性の変化および寿命ともに顕著な差異を示さなかつた。
- (5) 運転停止はゴム弾性変化曲線に対し不連続点として現われてくるが、この不連続の程度の程度は荷重、運転時間、停止時間などに関係する。

以上円板型防振ゴムの定荷重剪断疲労につきその定性関係を実験的に説明して簡単な推察を加えるに止めたが、これらに関する詳細はさらに目下検討中であり、後報する予定である。


最後に本研究に際し御指導を賜つた九大石橋教授、電子顕微鏡写真の撮影を御願ひした日立製作所中央研究所長崎氏、種々御助言を戴いた研究課佐川氏および実験に御協力願つた設計二課福田温氏に深甚の謝意を表す次第である。



高度の研究を推進する

日立電子顕微鏡

分光光電光度計



HM-2 型日立卓上型電子顕微鏡

日立製作所