

弾 性 車 輪 の 疲 勞 強 度 に つ い て

On the Fatigue of Resilient Wheels

桑 江 和 夫* 村 田 師 男* 齋 田 信 幸* 平 塚 幸 哉*
Kazuo Kuwae Norio Murata Nobuyuki Saida Kosai Hiratsuka

内 容 梗 概

最近鉄道車輛の乗心地の向上，騒音の防止に対する強い要求は，タイヤと輪心の間にゴムを挿入した弾性車輪の採用を促がしている。

戦後の金属とゴムとの接着技術の著しい進歩が，大型の接着型防振ゴムの製作を可能として以来，防振ゴムを使用した弾性車輪が，主として路面電車に用いられるようになったが，金属とゴムとの接着面の疲労強さに，若干の問題を残し，弾性車輪の使用を始めた初期には，二，三の事故を起している。

この問題を解決するために，日立製作所笠戸工場では弾性車輪の模型および実物について疲労試験を行ってきたが，これらの研究結果，ならびに今日までの使用実績を中心に，弾性車輪を疲労強さの面で捕え，二，三の問題点について述べた。

〔I〕 緒 言

弾性車輪は車輪，車軸などバネ下重量を軽減することによつて，走行中の騒音および衝撃を小さくすることを目的として誕生したもので，今日のようなタイヤと輪心の間を，防振ゴムで絶縁したものは，すでに1931年，Zürich で使用されている。

わが国でも戦前，試験的に弾性車輪が路面電車に用いられた実績もあるが，本格的に実用に供されるようになったのは，戦後であるといつてよい。

日立製作所では昭和23年の横浜市交通局への納入を始めとして，今日までに多数の弾性車輪を使用した路面電車を製作してきたが，最近では六大都市へ納入する路面電車の大部分は，弾性車輪を使用する方向に進んでいる。

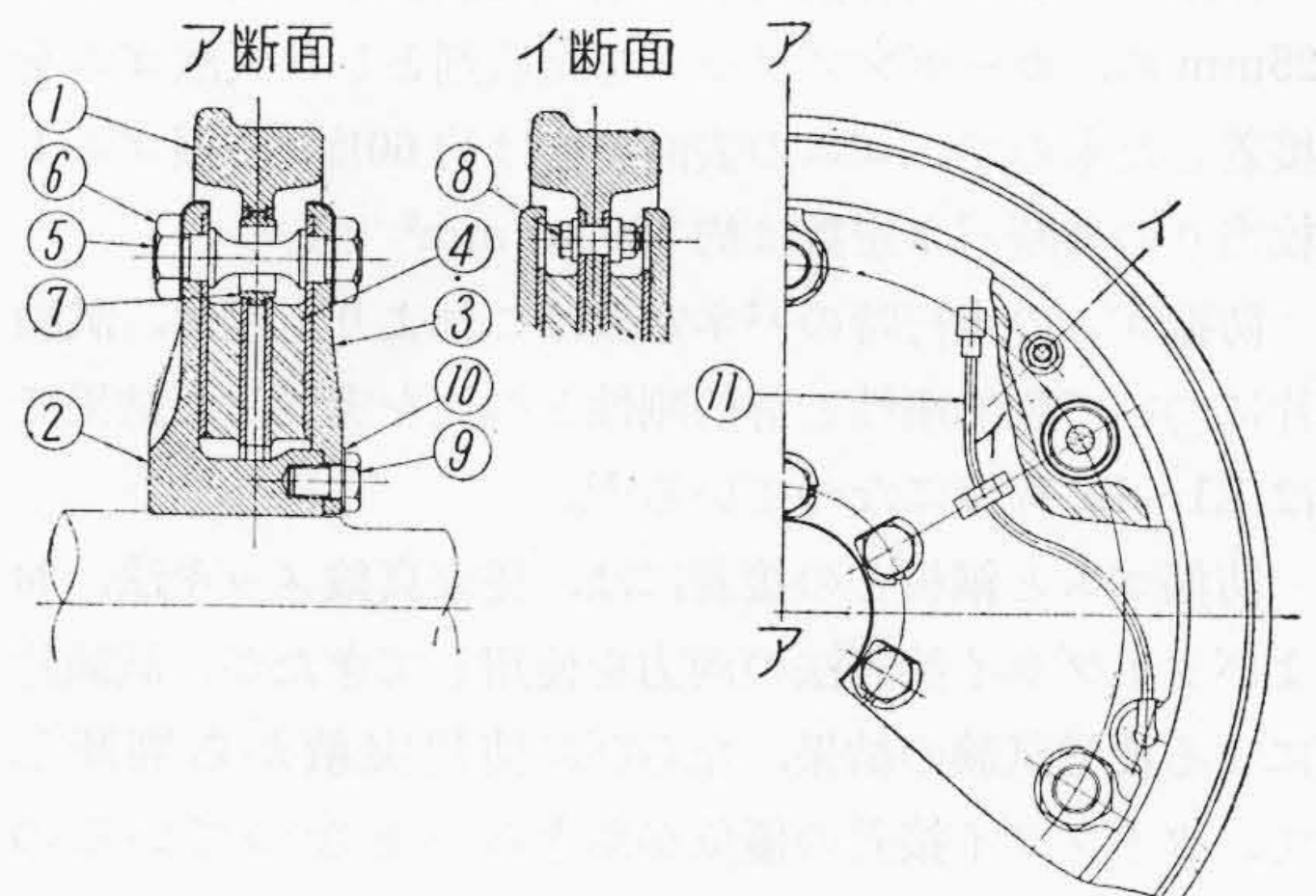
新製品の出現した当初は，いろいろの克服すべき問題に直面しなければならないことは，すべての場合についていいうることであるが，初期の弾性車輪においてもその疲労強さ，とくに防振ゴムと金属との接着面の疲労強さが十分でなかつたために，二，三の事故を経験している。

この欠陥を補い，長時間の使用にたえる弾性車輪を完成するために，昭和29年より弾性車輪防振ゴムの剪断疲労に関する研究を開始して今日に至っているが，これらの研究結果，ならびに弾性車輪使用実績から得られた知識をもとに，防振ゴムの疲労強さの面を中心として，弾性車輪について述べてみよう。

〔II〕 弾性車輪について

弾性車輪を一体車輪と比べた場合の長所としては，
(1) 騒音および衝撃の減少，(2) バネ下重量の軽減，

* 日立製作所笠戸工場



品番	部 品 名	品番	部 品 名	品番	部 品 名
1	タ イ ヤ	5	特殊ボルト	9	締付ボルト
2	輪 心	6	ナ ッ ト	10	座 金
3	防振ゴム抑え	7	止 輪	11	ボンド組立
4	防 振 ゴ ム	8	特殊ノック		

第1図 名古屋市交通局納 KL-8型台車用弾性車輪

(3) 平坦でないレール上での良好な走行，(4) 車輪のフランジ面の磨耗の減少，(5) レールの斑磨耗発生の防止などがかぞえられており⁽¹⁾，将来の台車構造発展の趨勢から見て，その重要性はさらに増すものと思われる。

弾性車輪の構造に関しては，今日までに多数の形式が提唱され，製作されてきたが^(2~4)，防振ゴムの使用方法によつてこれを分類すると，剪断型と圧縮型とに大別することができる。圧縮型弾性車輪はバネ剛性が大きくなる欠点があるため，ゴムと金属との接着技術の向上が，接着型防振ゴムの製作を可能として以来，剛性の小さい剪断型弾性車輪が広く用いられるようになった。

日立製作所笠戸工場では昭和23年に，剪断—圧縮併用の最初の弾性車輪附台車を横浜市に納入したが，昭和28年，長崎電軌，土佐電鉄に剪断型弾性車輪を納入して以

来、接着型防振ゴムを使用した剪断型弾性車輪を標準方式として現在に至っている。

第1図は名古屋市交通局納KL-8型路面電車用台車に使用した、660φ弾性車輪を示したものである。

タイヤと輪心が2枚の防振ゴムにより、完全に隔離されることが弾性車輪の特長であつて、防振ゴムの内側の接着板はタイヤに4本のボルトで、外側の接着板は6本のスペーサーボルトで輪心あるいはゴム押えに縫いつけられ、タイヤに加えられた荷重は、防振ゴムの内側の接着板からゴムを通つて外側の接着板に、ここからゴム押えを介し、または直接に輪心に伝えられる。

タイヤのスペーサーボルトの通る位置には、余裕を持つて孔があげられ、タイヤと輪心との相対運動を許す構造になつている。

防振ゴムは2枚の鋼板で形成した接着板の間に、厚さ25mmの、カーボンブラックを充填剤とした天然ゴムを接着したもので、ゴムの表面硬度は約60度、防振ゴム1枚当りの剪断バネ定数は約580 kg/mm²である。

防振ゴムの走行時のバネ定数はこれよりも剛く、試験片について動的剛性と静的剛性との比を実測した結果では1.1~1.2程度になつている⁽⁵⁾。

防振ゴムと鋼板との接着には、従来真鍮メッキ法、およびタイプライ接着法の両方を使用してきたが、試験片による疲労試験の結果、ならびに使用実績から判断して、タイプライ接着の優位があきらかとなつているので、現在ではすべてタイプライ接着の防振ゴムを使用している。

路面電車の場合、弾性車輪一輪あたりの最大荷重は約2.5t、平均剪断応力は0.9kg/cm²程度であつて、この場合の静的撓みは約2.5mmである。名古屋市交通局の御協力を得て、営業運転時のタイヤと輪心との相対変形を測定した結果では、満員時で3.1mmが測定されている。

弾性車輪用防振ゴムの寿命は長いことが望ましいのはいうまでもないが、ゴムと金属との接着面の疲労限というものは存在しないか、あるいは存在したとしてもかな

り低い値を取るものと思われ、これ以外にもゴムの老化などの問題があるため、耐久時間を考えて使用しなければならないものと思われる。

耐久時間が短いものであれば、保守が非常に面倒になる上に、経費もかさむから、実用されるための条件としては、少なくとも3年程度の連続使用にたえるものでなければならない。路面電車の年間走行距離は約 6×10^4 kmであつて、これを繰返し数に換算すると約 3×10^7 回程度になるから、少なくとも 2×10^5 km、 10^8 回の使用が可能であることが絶対に必要である。

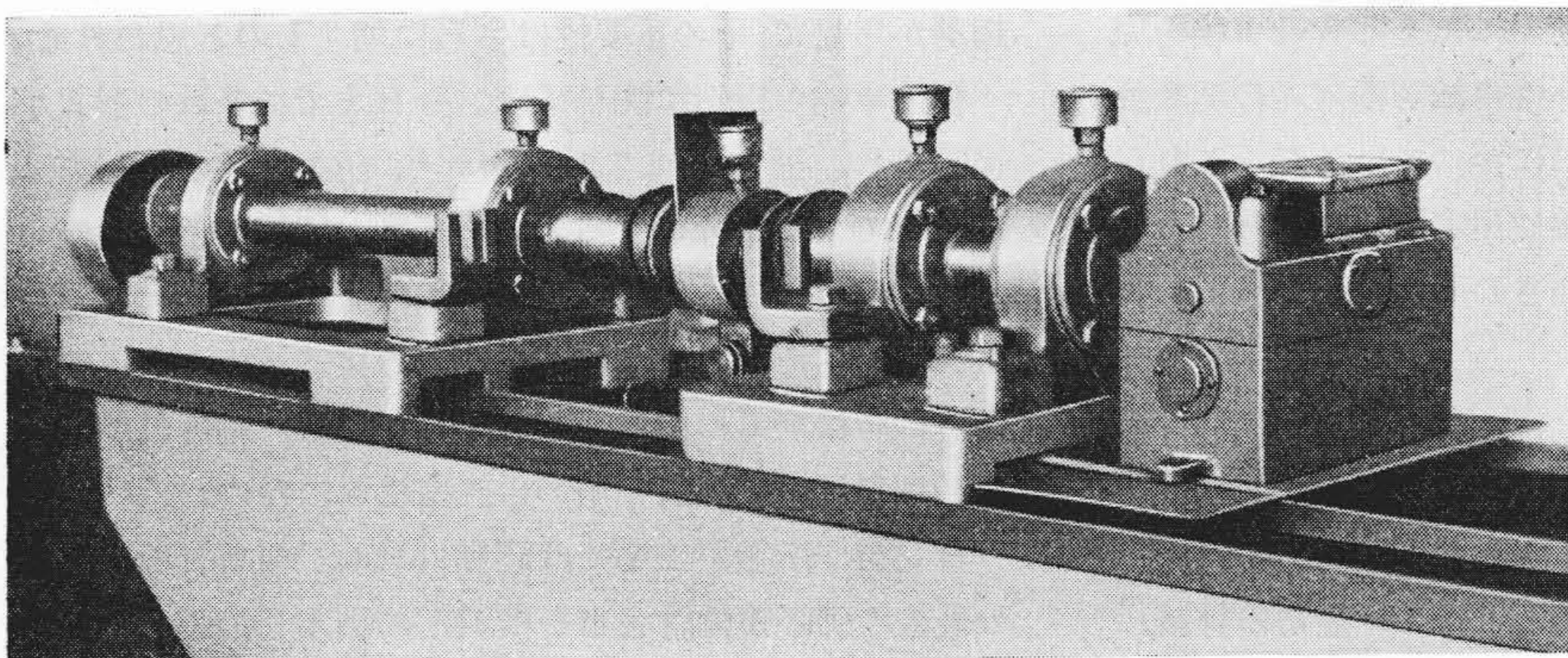
〔III〕 防振ゴムの疲労強さ

弾性車輪で最も問題とされていることは、その寿命、とくに防振ゴムと接着板との接着面の疲労強さであるが、ゴムと金属との接着面の疲労強さに関する研究はほとんど行われておらず⁽⁶⁾、不明な点が多いため、日立製作所笠戸工場では防振ゴムの剪断疲労に関する研究のために、第2図に示す防振ゴム剪断疲労試験機3台、第3図に示す弾性車輪試験機(660~910φ弾性車輪用)1台を製作し、試験片および実物について疲労試験を行つてきた。

日立製作所笠戸工場で製作した弾性車輪も、初期のものでは二、三の疲労破壊の経験を持つているが、その後ゴムメーカーの努力によつて接着力が向上したことで、疲労についての研究の結果、今日では十分実用にたえうる弾性車輪の製作が可能になつている。

(1) 疲労破壊形式

防振ゴムの破壊形式には、最初接着面に亀裂が入り、回転数の増加とともにゴムと接着板との間の剥離が進行し、ついに分離にいたる接着面破壊型と、ゴムの疲労あるいはヒステリシスによる発熱のためにゴムの中央面で切断するゴム部破壊型とがあるが、後者は比較的高荷重(ほぼ2.0kg/cm²以上)の場合にのみ起るものであるから、満員時の剪断応力を1.0kg/cm²以下に取つている弾性車輪で実際に問題となるのは、接着面の疲労破壊であ



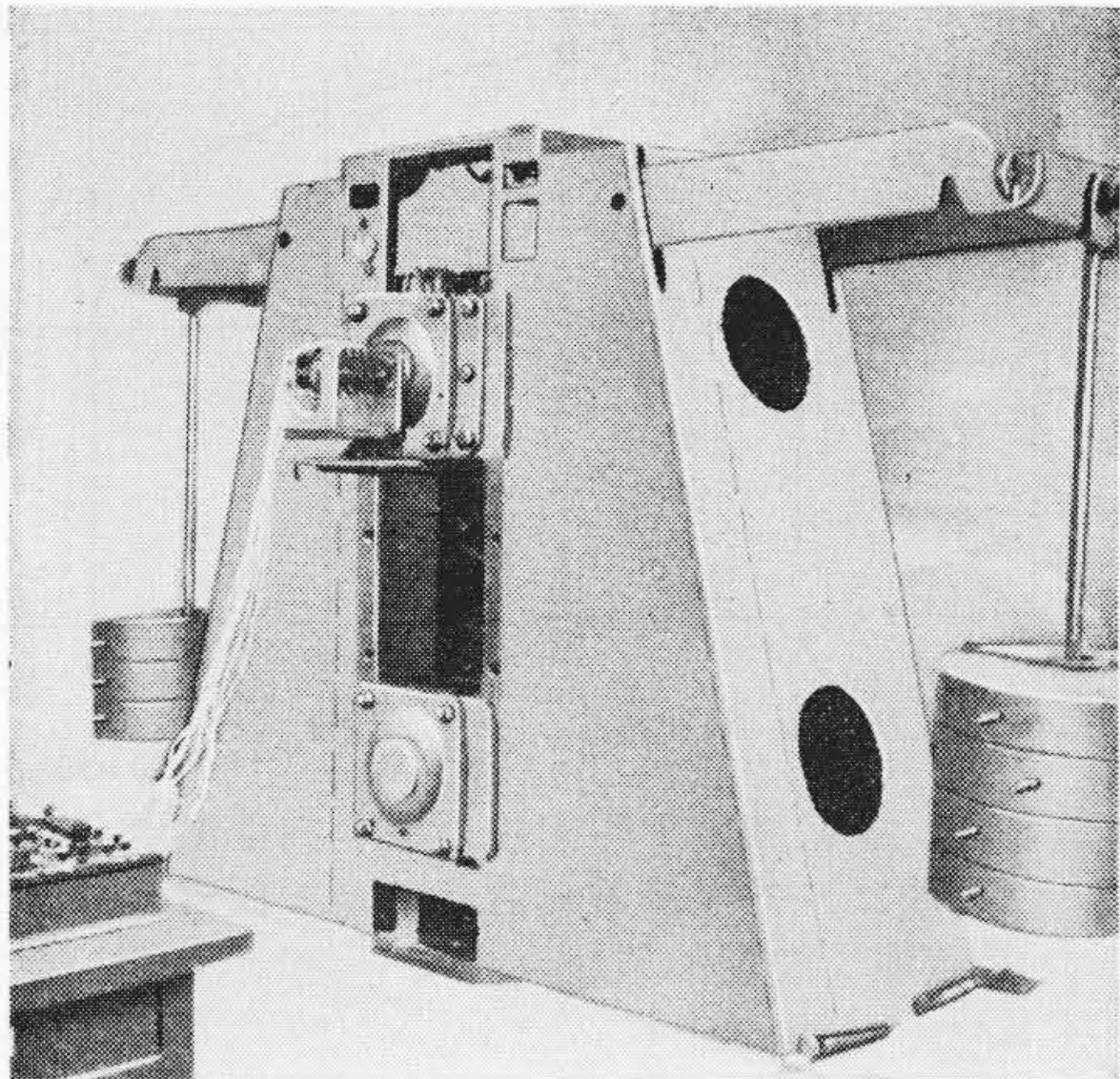
第2図 防振ゴム回転剪断疲労試験機

るといつてよい。

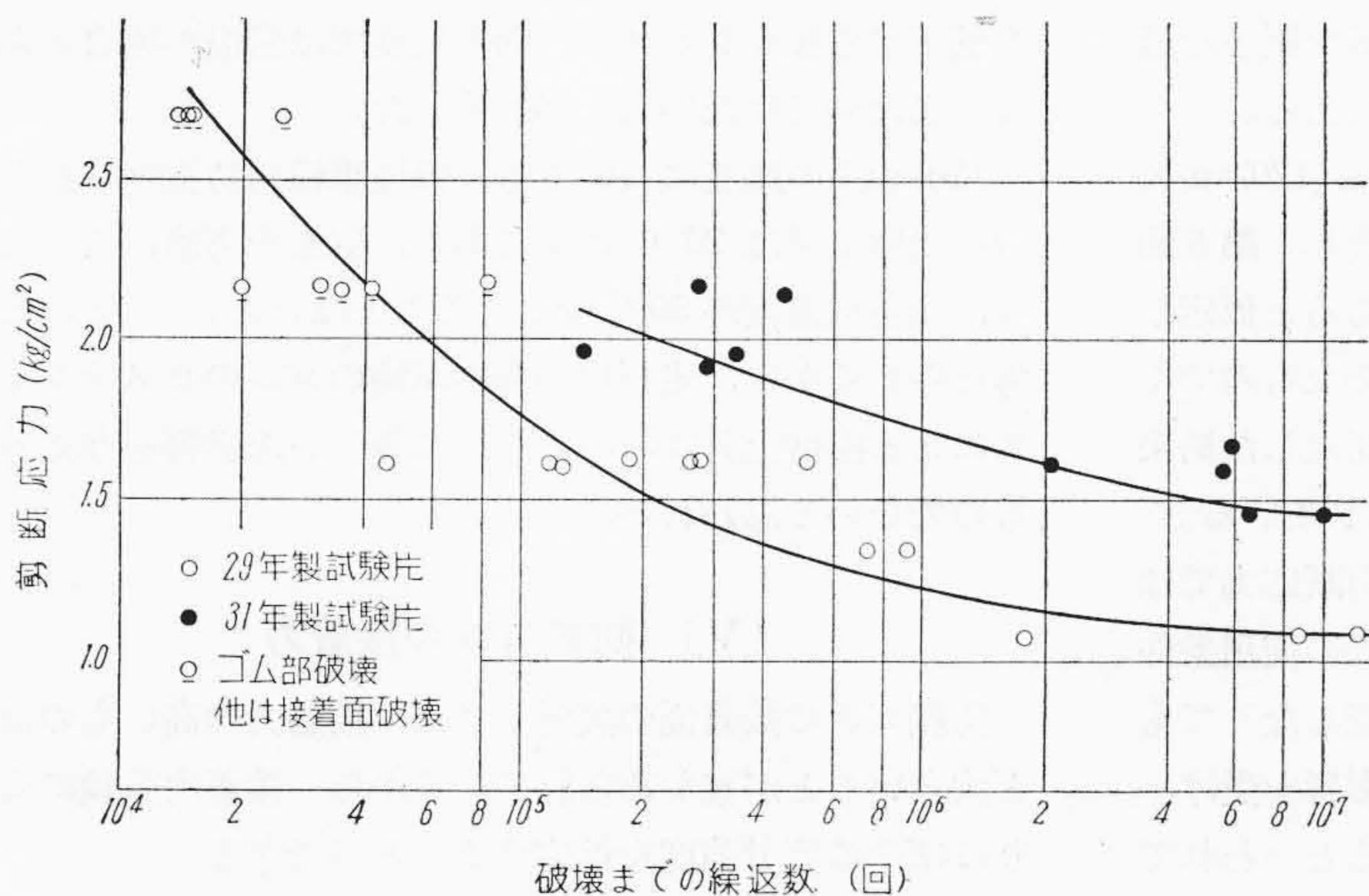
接着面破壊の疲労強さを増すためには、接着力を増し、ゴム—金属接着面の疲労強さを高めれば良いことはいうまでもないが、機械的方法としてゴムの端面に丸味をつけ、あるいは弾性車輪防振ゴムに初圧縮応力を与え、端面の剥離を阻止することも、きわめて有効な方法である。これらの補助手段を適切に行えば、接着面破壊が防止され、破壊はゴム部に移行するから、疲労強度は大幅に高まるものである。

(2) 接着面の疲労強さ

防振ゴム接着面の疲労強さを求め、弾性車輪設計の際の資料を得る目的で、弾性車輪用防振ゴムと同一条件で製作した、タイプライ接着による75φ試験片について回転剪断疲労試験を行つたが、その結果を第4図に示す。これらは昭和29年および31年の製作になるもので、この試験片の接着力を求めるためにアムスラー試験機で引張り試験を行つた結果では、前者の平均接着力が35kg/cm²、



第3図 弾性車輪疲労試験機



第4図 昭和29年および31年製作になるタイプライ接着防振ゴムの疲労曲線

後者が58kg/cm²を示しているが、これらの事実から接着力が年々向上していることが認められる。

(3) 端面Rおよび初圧縮の効果

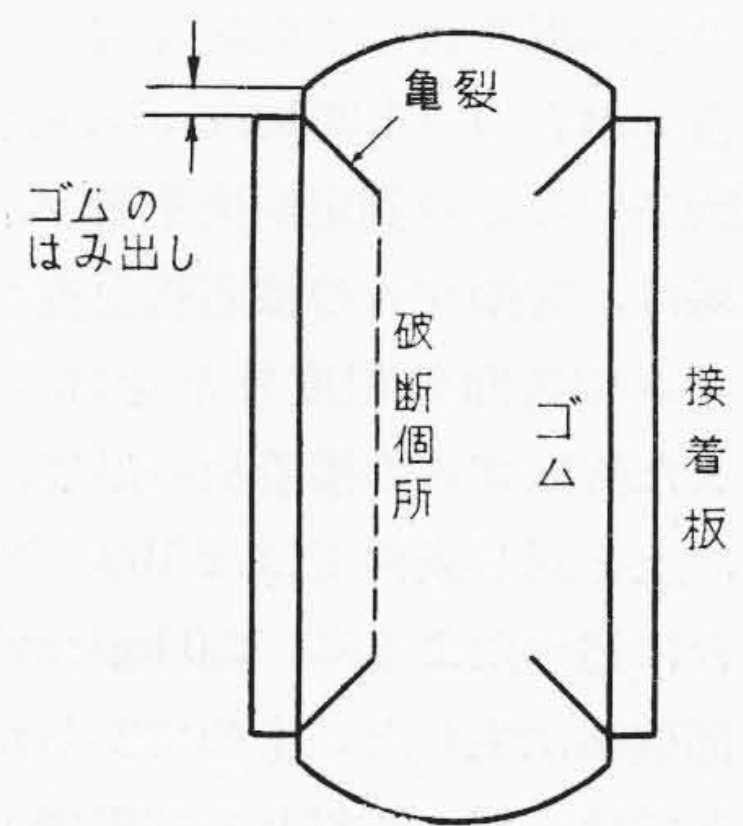
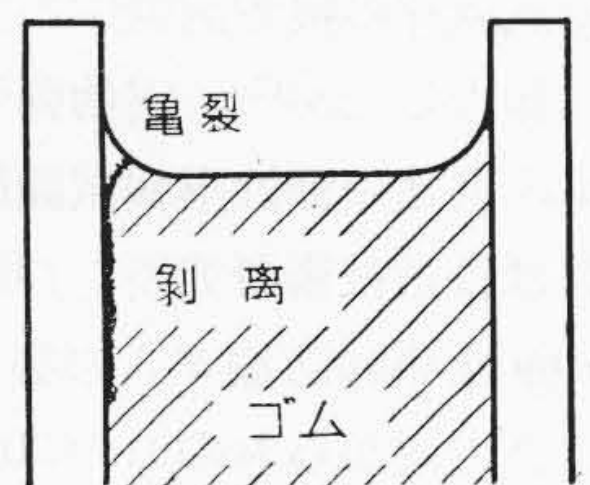
接着型防振ゴムの弱点は接着面にあり、接着面の剥離を阻止するために、端面にRを付けること、初圧縮を与えることなどが、実際に行われている有効な手段であるが、これらの効果を75φ試験片を用いて実験した。

端面のRが5mm以上あれば、接着面の剥離が絶無になつて、ゴムの中央面で切断するため、疲労強度の向上は顕著であつて、2.1kg/cm²の応力のもとに10⁷回の繰返し数に耐えうる。Rが2mmの場合には、第5図に示すようにゴムの肩に亀裂が入るために接着面破壊の現われることも有りうるが、この亀裂の発生まで長時間を要し、疲労強度としてはRが5mm以上の場合とほとんど異ならない。

試験片に6%の初圧縮を与えて疲労試験を行つた場合にも、接着面の剥離は完全に阻止されて、ゴム部で破壊し、10⁷回の時間疲労限は1.7kg/cm²程度まで向上する。

同じゴム破壊であるにもかかわらず、後者の疲労強度が小さいのは、初圧縮を与えると、第6図に示すようにゴムの端部に亀裂が入り、ゴムの有効面積が減少するためと思われるが、75φ試験片では接着面積が小さいためにこの影響が顕著であり、実物弾性車輪の場合には面積の減少の割合がわずかであるから、この意味では有利であるといえる。

第5図 R = 2 mm の場合の接着面疲労破壊機構



第6図 初圧縮変形を与えた場合のゴム疲労破壊機構

初圧縮を与える場合にもRを付けることは、肩の亀裂を生じにくくする上に、きわめて有効である。

(4) 接着力と疲労強さの関係

防振ゴムの受け入れ検査にあたっては、その接着力を試験することが、実際に可能な方法であるが、このためには接着力の高い防振ゴムは、疲労強度も大きいということが保証されていなければならない。

この点を確かめるために、タイプライ接着による試験片の接着力を11, 24, および35kg/cm²の三通りに変えて疲労試験を行つたところ、接着面の疲労強度は11~24kg/cm²の間で急激に低下することが明かになった。

試験片と実物弾性車輪とでは、寸法、形状が大きく異なつているので、試験片の結果を実物に換算することを可能とするためには、両者の比較試験を行う必要がある。実験の結果、金属の場合とは逆に、寸法が大きくなるにしたがつて、接着面破壊を生ずるまでの繰返し数の増すことが明かになった。このことは、実物弾性車輪に対しては、試験片より大きな荷重を許すことができることを意味するものである。

〔IV〕 走行時のゴム内部温度上昇

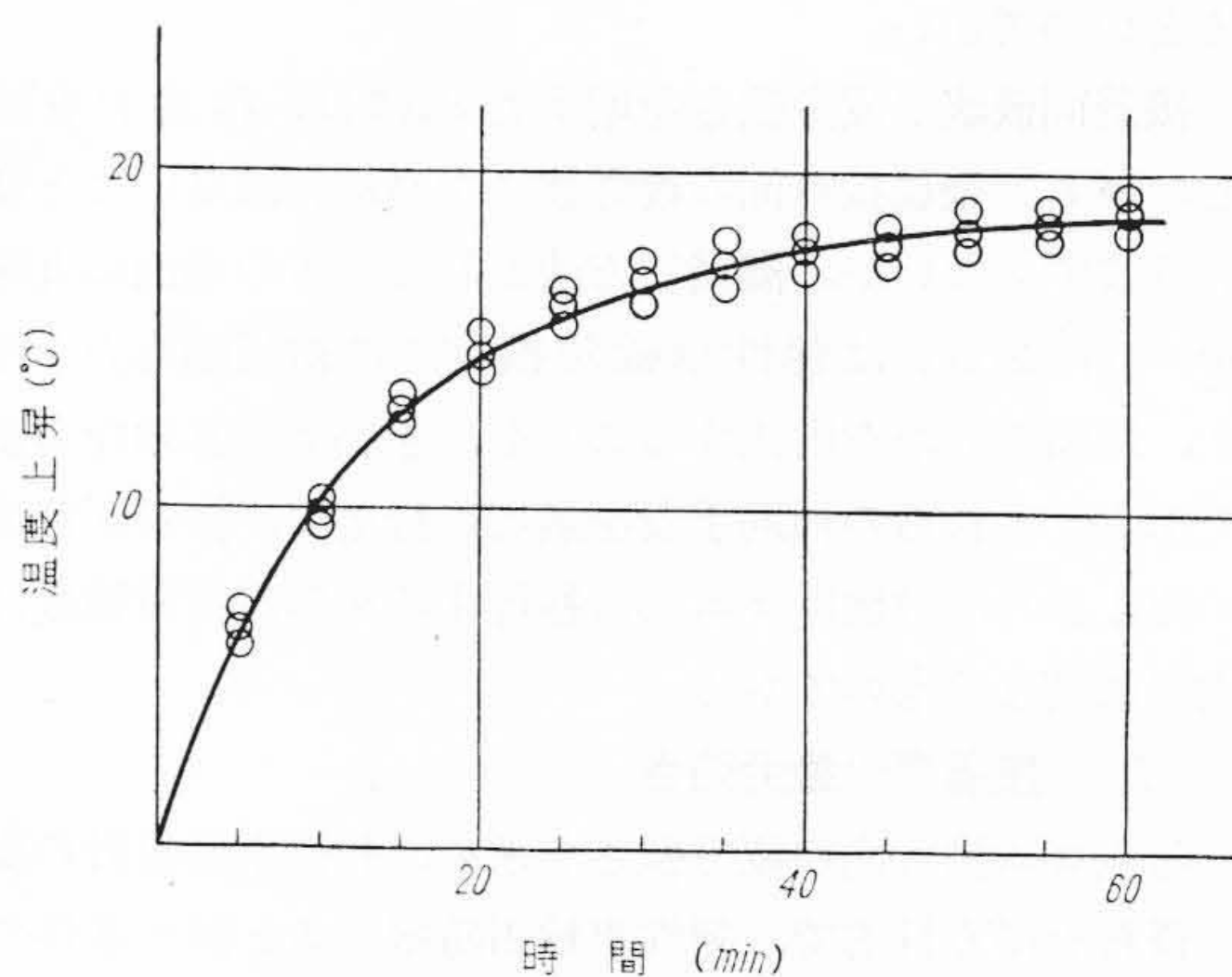
ゴムのヒステリシスのために、走行中の弾性車輪防振ゴムの温度上昇をきたすが、これがゴム、あるいは接着面の疲労強度に悪影響を持つのではないかということが問題になる。

75φ試験片の疲労試験中の内部温度上昇については、すでに報告したが⁽⁷⁾、実物弾性車輪の走行中の温度についても、前述の弾性車輪試験機を用いて測定を行つた。

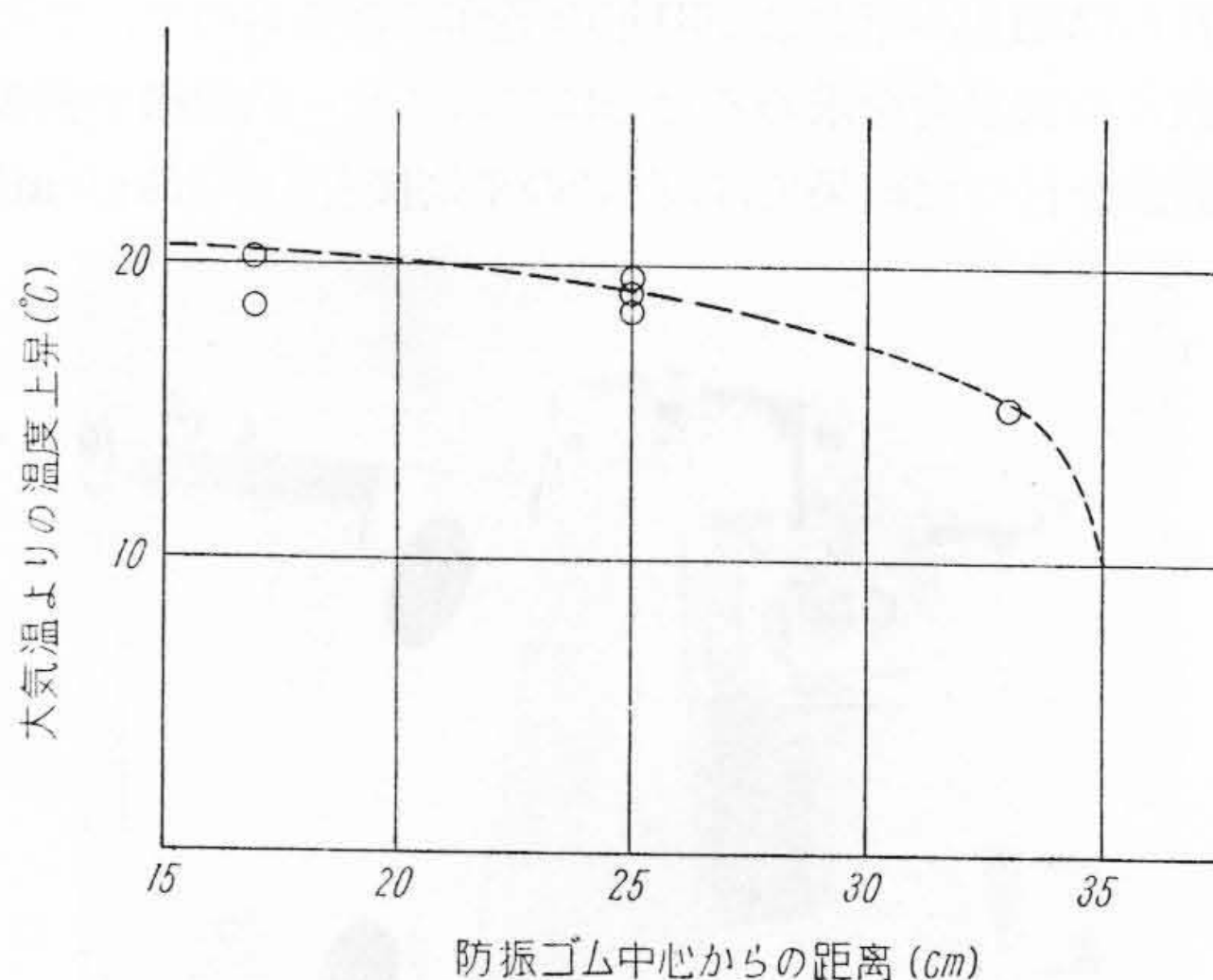
実験は鉄道技術研究所、戸原春彦氏指導のもとに、860φ弾性車輪防振ゴムの製作時に、ゴムの中央面の外周および内周からおのおの20mm内側に入つた位置、ならびに中央の3箇所に合計7点の熱電対をあらかじめ埋め込み、真鍮製スリップリングから銀カーボン刷子を通じて外部に取り出して温度を測定したものである。

荷重5.9t、($\sigma = 1.26 \text{ kg/cm}^2$)、毎分725回転(120km/h)の試験条件の際の測定結果を第7, 8図に示す。第8図の点線は、防振ゴムの接着板温度が一定であると仮定して、ゴム中央面の温度分布を理論的に求めたものである。また防振ゴムの接着板の温度は、別に測定した結果では、上と同じ条件でほぼ10°Cの上昇を示している。

さきに述べたように、2.0 kg/cm²以下の剪断応力ではゴム部破壊は生じないものであるから、実際の使用条件のもとでは、ゴムに対しては温度上昇は心配しなくてもよいとしても、接着剤タイプライは温度の影響を受け、70~100°Cになると急激に接着力が低下するといわれているので⁽⁸⁾⁽⁹⁾、この点について検討を加える必要がある。



第7図 運転時間と防振ゴム中心部温度との関係



第8図 運転開始1時間後のゴム内部温度分布
(点線は内外の接着板温度一定と仮定した定常状態での理論値)

75φ試験片を加熱炉中で接着板温度を一定に保ちながら行つた疲労試験結果では、温度上昇とともに疲労強度が低下する傾向を示すが、60°C程度では常温の場合とあまり異なつていないことが判明した。

120km/hの速度においても、弾性車輪用防振ゴム接着板の温度上昇は20°C以下であり、気温を考慮に入れても、接着板温度が50°Cをこえることはほとんどないと考えられるから、走行中の弾性車輪のゴムのヒステリシスによる温度上昇は、疲労強度に著しい悪影響を与えるものでないと思われる。

〔V〕 防振ゴムの接着力

防振ゴムの接着面の疲労強さは、接着力の高いものほど大きいことが確かめられているから、接着力試験によりほぼその疲労強度を推定することができる。

防振ゴムと金属との接着力は最近の接着技術の進歩により、75φ試験片においては55kg/cm²以上にも達して

第1表 75φ試験片，引張り破壊試験

実験番号	破 壊 荷 重 (kg)	引張応力 (kg/cm ²)
1	2,770	62.7
2	3,200	72.5
3	3,010	68.2
4	2,600	58.9
5	2,120	48.1
6	1,690	37.9

平 均：58.1kg/cm² 標準偏差：13.0kg/cm²

いるが，弾性車輪用防振ゴムの場合には，接着面積が大きいこと，形状が複雑であることなどのために，必ずしも試験片で得られた接着力を持つとは限らない。

弾性車輪用防振ゴムの受入れ検査にあたっては，なんらかの方法で接着力の試験を行うことが必要であり，当初防振ゴムの全数について，平均剪断応力が20 kg/cm²となるような剪断荷重を加え，この状態で3分間放置し，剥離などの異状のないものを合格とする方法がとられた。

弾性車輪製作の初期には，ゴムメーカーの経験も浅く，この試験に半数近く不合格となつた例もあるが，最近の接着技術向上の結果，不合格となるものは皆無であるという段階に達している。

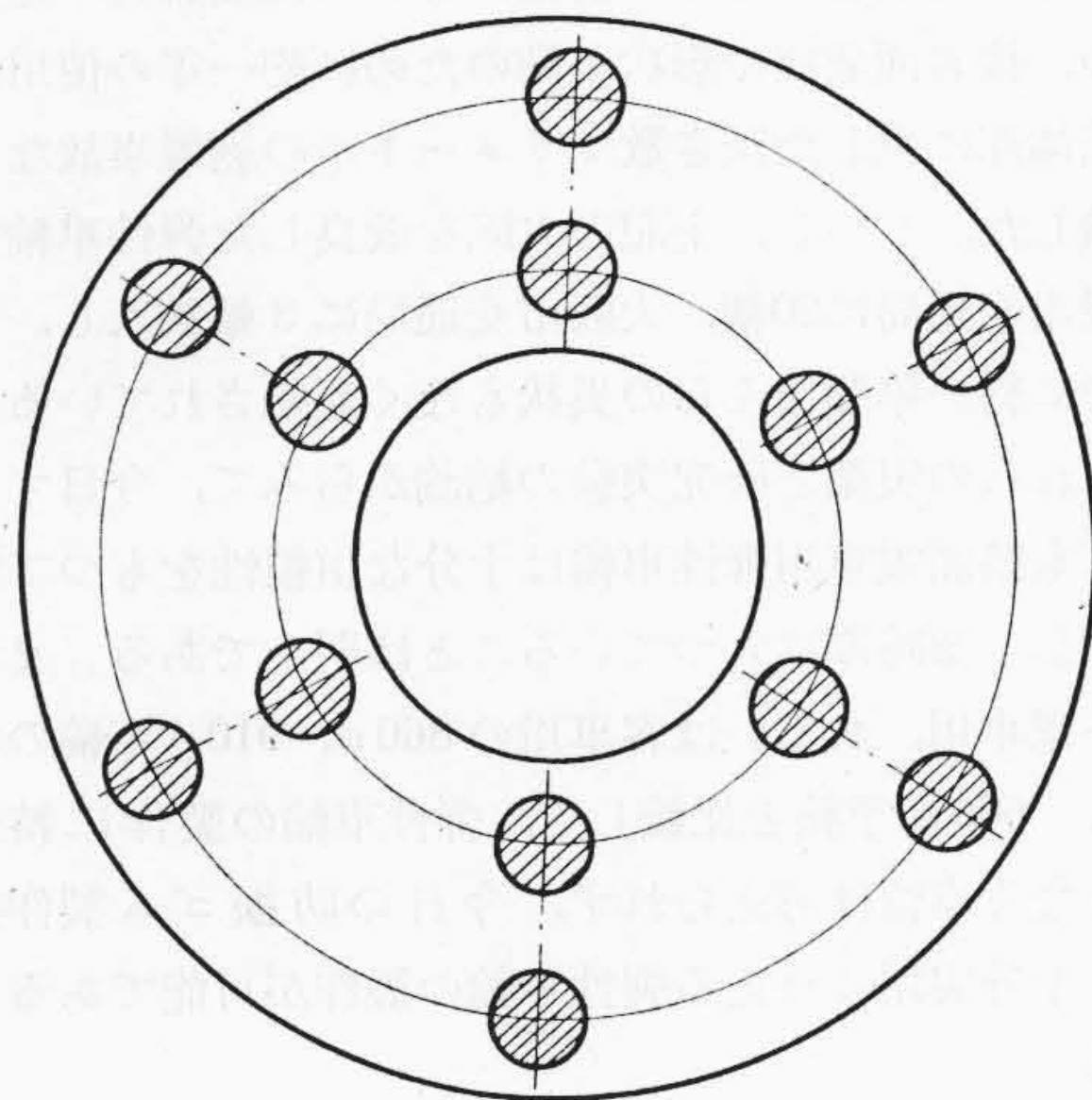
現在の防振ゴムの接着状況を把握するために，昨年名古屋交通局に納入したKL-8型台車に使用する防振ゴム20輻分，320枚のうちより任意に5枚を選び，このおのこの，第9図に示す位置から12枚ずつの直径40mmの接着力試験片を切り出し，接着力を試験した。試験片の形状寸法は第10図に示すとおりで，接着板の中央にあけた3/8インチのタップ孔にボルトを植え込み，荷重速度26 mm/minのもとで引張り試験を行い，その結果をヒストグラムで示したものが第11図である。

第1表は上記弾性車輪防振ゴムと同一条件で製作した75φ試験片の接着力を示したものであるが，平均値および標準偏差とも，ほとんど差が認められない。これらの結果からタイプライ接着によれば寸法の大きい弾性車輪防振ゴムにおいても，試験片と同じ接着が期待できることは明かであつて，接着面の疲労強度も，寸法，形状の影響を別にすれば，試験片のそれと等しいと考えてさしつかえないものと思われる。

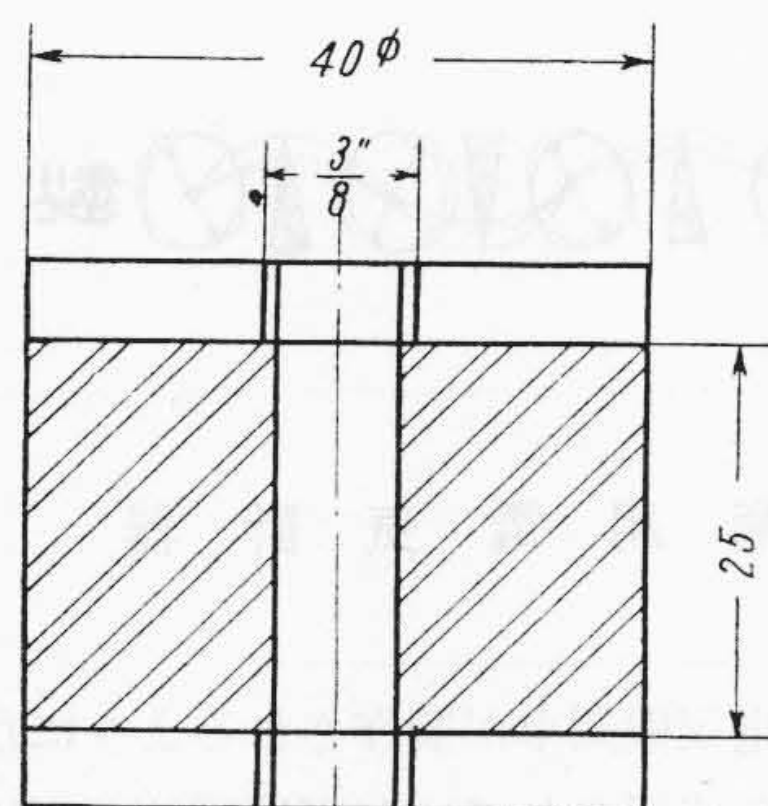
ただ接着力のバラツキが大きい点に問題があり，均一な接着力を持つ防振ゴムの製作が，今日の目標であつて，この点についてゴムメーカーのいつそうの努力を希望したい。

〔VI〕 結 言

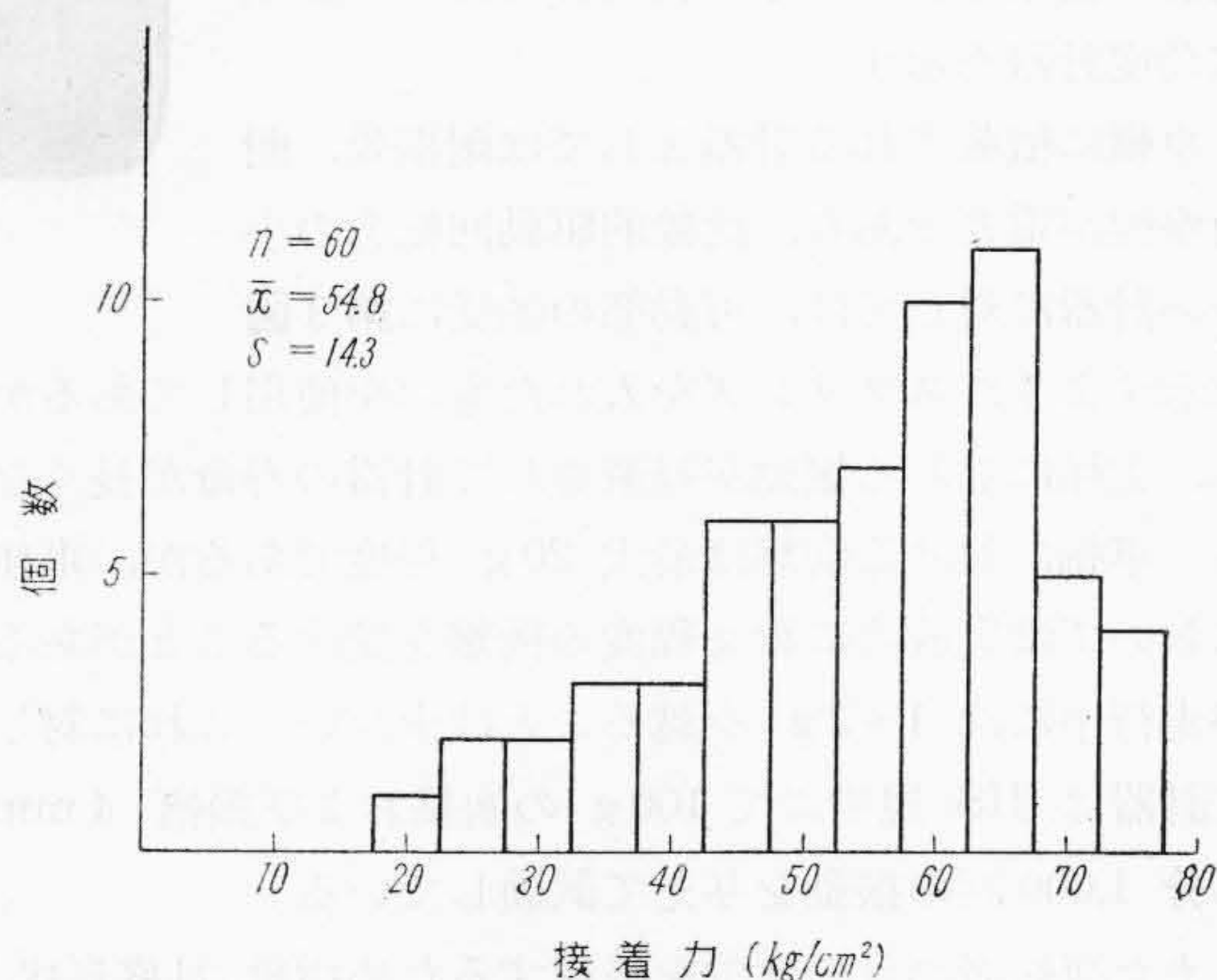
以上弾性車輪について，主として疲労強さの面から述



第9図 接着力試験片採取位置



第10図 接着力試験片の形状および寸法



第11図 防振ゴム接着力のヒストグラム

べたのであるが，わが国の弾性車輪は，その歴史もまだ浅く，その使用方面についていえば，路面電車に限られているといつてよい。日立製作所笠戸工場では今日までに約70輻の弾性車輪付路面電車を各都市に納入してきた

が、その実績をみると、初期においては接着力不足のための、接着面破壊や形状不備のために約一年の使用後接着面端部に生じた深さ数ミリメートルの剥離事故などを経験した。しかし、上記の欠陥を改良した弾性車輪を名古屋市交通局に20輛、大阪市交通局に3輛納入し、今日までに約一年間なんらの異状もなく運転されている。

これらの実績と研究実験の結論からみて、今日すくなくとも路面電車用弾性車輪は十分な信頼性をもつて実用に供しうる時期に入っていることは明かである。また、郊外電車用、あるいは客車用の860φ、910φ車輪の場合にも、660φ車輪と比較して、弾性車輪の製作に特別困難となる事情は考えられず、今日の防振ゴム製作技術で、十分実用にたえる弾性車輪の製作が可能であると信ずる。

終りにあたつて、営業運転時の弾性車輪撓みの測定に御便宜をいただいた名古屋市交通局の関係者の方々、弾

性車輪の温度測定に御指導いただいた鉄道技術研究所、戸原春彦氏に深い謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- (1) Göbel: Berechnung und Gestaltung Von Gummifedern S. 66 (1955)
- (2) Hug: Glassers Ann. 79, 219 (Juli, 1955)
- (3) Sachs: Elektrische Triebfahrzeuge, Bd. I (1953)
- (4) Cain: Vibration of Rail and Road Vehicles. (1940)
- (5) 桑江, 斎田, 日立評論 37. 1315 (昭 30-9)
- (6) ゴムの疲労に関してはつぎの論文がある。
榎木, 福田, 町田: 材料試験 5, 651 (昭 31-6)
Candwell: Ind. Eng. Chem. 12, (Jan. 1940)
Roelig; Fromandi: Zeit. VDI. 95, 159 (1953)
- (7) 桑江, 斎田: 日立評論 38. 323 (昭31-2)
- (8) 金丸: 接着および接着剤 57 (昭28)
- (9) Bruyne: Adhesion and Adhesives (1951)

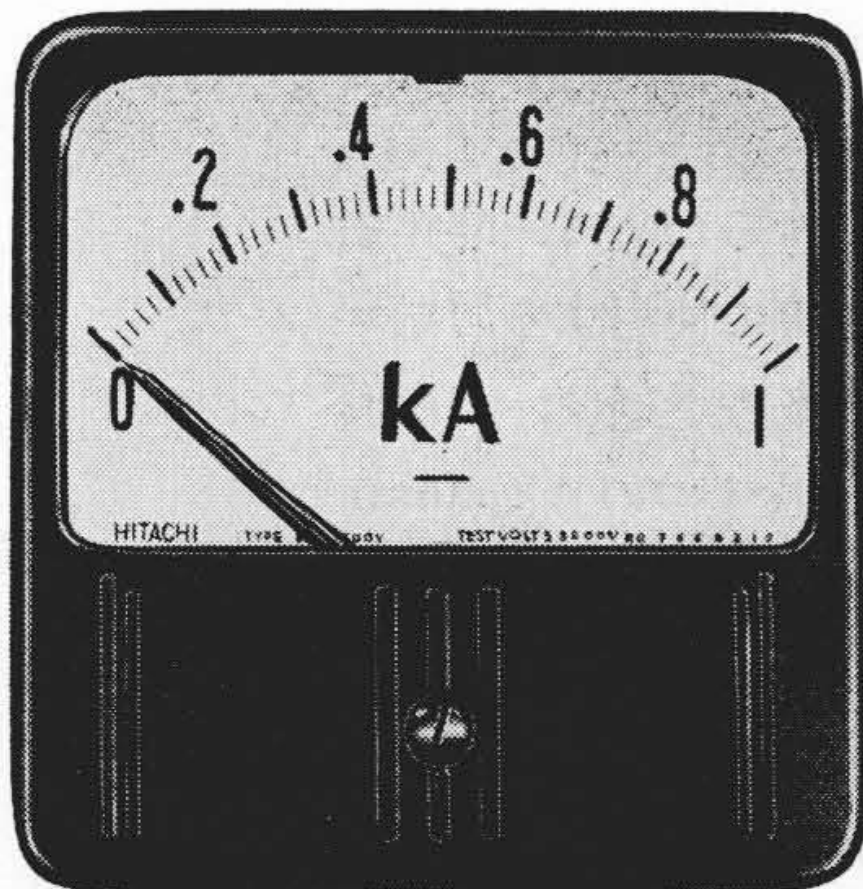
製 品 紹 介

車 輛 用 電 気 計 器

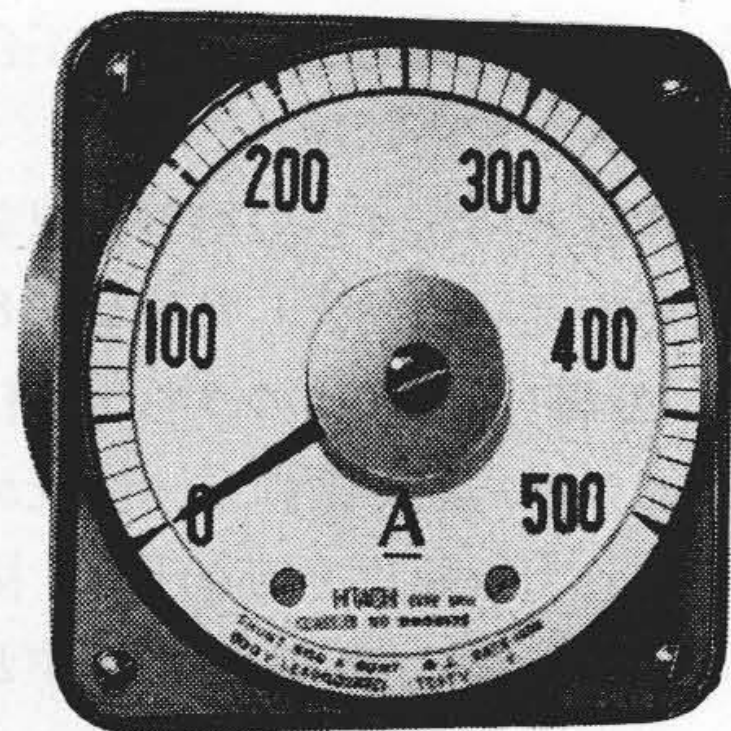
最近交流電気機関車が製作されるようになり、従来から使用されていた直流電流、電圧計、速度計などに加えて交流電流、電圧計が使用されるようになった。第1,2図に最も一般的に使用されているS₂₄型およびSR₃₅型広角度計器を示す。

車輻に積載される計器としては耐振動、耐衝撃性が重要であり、比較的駆動回転力の小さい計器に対しては、可動部の軸受に第3図に示すようにスプリングを入れたものを使用してあるから、尖軸に加わる振動が軽減されて計器の寿命が長くなる。車輻における衝撃は最大20g程度であるが、車体においては突放時に数g程度の衝撃を受けることがあるが走行中には1~2gを越えることは少ない。これに対して計器はJIS規格にて100gの衝撃および振幅4mm毎分1,000回の振動を与えて試験している。

また運転者の目の疲労を軽減するため指針、目盛形状、数字などを見やすくしてあり、SR₃₅型広角度計器はアクリル樹脂製のカバーを使用し各方向からの光線を取り入れるので目盛面が非常に見やすく、夜間における照明も容易である。

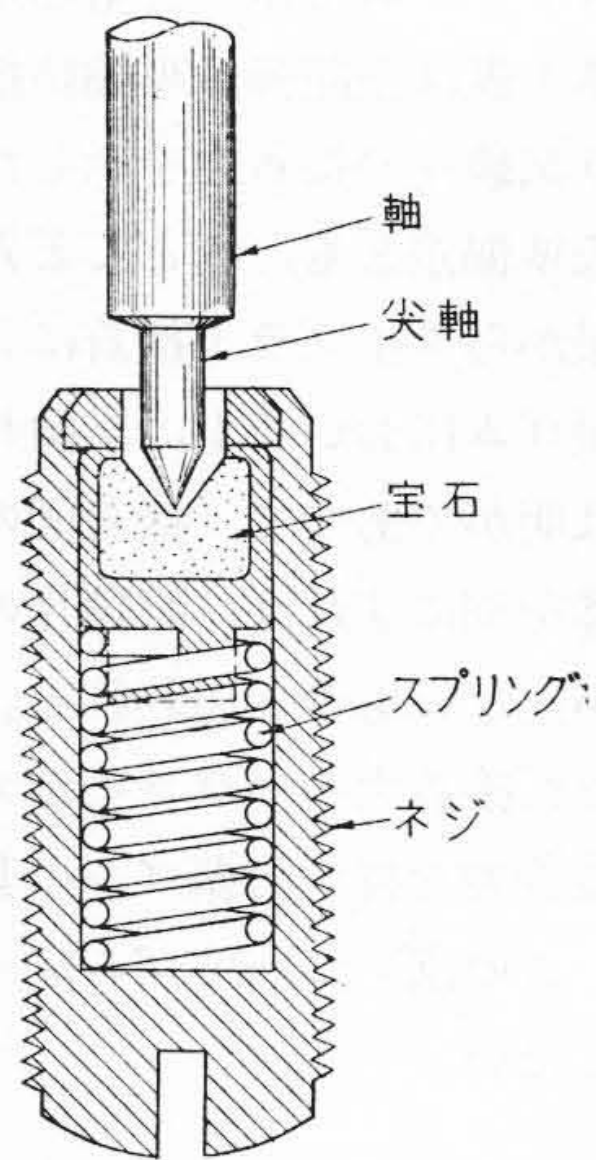


第1図 S₂₄ 型計器



第2図 SR₃₅ 型広角度計器

このほか広角度計器は目盛角度が従来のものの2.5倍の250度であり、目盛長は同一寸法計器の約2倍であるため読取りが容易であること、指針と目盛板とが同一平面上に配置されているので測定者の位置によつて生ずる視差がないことなどの特長を有している。



第3図 スプリング入軸受構造図