

エラストマーの超高速2軸引張試験法

高橋, 清
九州大学応用力学研究所 : 教授

小松, 治男
九州大学応用力学研究所

橋本, 隆次
ブリヂストンタイヤ (株) 研究開発本部

<https://doi.org/10.15017/4743691>

出版情報 : 応用力学研究所所報. 58, pp.79-94, 1983-02. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



エラストマーの超高速2軸引張試験法

高橋 清* 小松 治 男†
橋本 隆 次‡

概 要

エラストマーに超高速で2軸的な引張大変形を与えることを可能とする新しい試験法を提案した。空中放電によって起る空気の断熱的膨張を圧力源として利用した一種のダイナミックバルーンテストである。直径10mmの円形をしたゲージ部を最高で秒速100mにのぼる速度でふくらませることが可能である。インパクトアセンブリーの特性について詳しく述べ、試験例としてバルーンの振動、破壊挙動および破壊時の限界伸びなどを扱っている。

Key words: Elastomers, Dynamic balloon, Biaxial tension, Fracture, High speed photography

1. はじめに

ゴムなどのエラストマーは動的変形を伴う用途が多いので動的特性は最も重要な性質の1つである。しかし現象が非線形性などを含み、測定も簡単ではないために種々の負荷法、試験法が並存しているのが現状である。そのなかで強度試験に関係の深い高速引張型の試験についてみると、落錘型¹⁾、回転円盤型²⁾、飛行物体による衝撃型³⁾、圧さく空気または爆薬とピストンによる衝撃型⁴⁾等、用途に応じてさまざまな方法が考案されている。しかしながらこれらの試験においてはほとんどが単軸引張となっている。一方、この材料の実用面では2軸ないし3軸的負荷がかけられていることの方が多い。多軸負荷時の挙動が単軸負荷時の挙動と同一に論じられないことを考えるならば、多軸負荷時の挙動を調べることもまた重要である。ここで提案する試験法はエラストマーの小試片に簡便に2軸的な超高速大振幅引張変形を与えて、破断開始時の限界伸びおよびその温度依存性を調べ、さらに他の特性に関する研究にも使える可能性のある手法である。したがってこれは前述の各種試験法のどれかに代替し、改良しようとするものではなく、1種の極端条件下における材料の力学物性の評価技術の1つを提供しようとするものである。

2. 試験法

空中放電によって発生する爆発的な衝撃力を利用してシート状試験片をバルーン状に急激に膨らま

* 九州大学教授 応用力学研究所

† 九州大学応用力学研究所

‡ プリヂェストーンタイヤ(株)研究開発本部

せ、これに破断にいたらしめることができる程の大変形を起こさせる。原理的には一種のダイナミックバルーンテストといえる。放電を利用した加工法では線爆発あるいは箔爆発の水中ないしは空中での応用がよく知られているが、ここでは単なる空中での電極間放電のみによって衝撃力を得ている。図1に今回用いたインパクトアセンブリを示した。4ヶ所にボルト穴をもつ高分子材料製のバックアップブロック1の上に対向して置かれた薄い電極2の約1mmの間げきで放電を起こさせる。放電条件は試験片や目的とする試験によって異なるが、キャパシターの容量1~3 μ F、充電電圧4~10kVとなっている。(放電電流は後述のように数 μ s持続する振動性の波形をしているが、現在迄のところ特に波形整形その他特別の方策はとっていない。)図1で3は小さな黒い紙片で、放電時に発生する熱から試験片4の表面を保護し、また後述の計測のじゃまとなる光をさえぎるためのスクリーンの役も兼ねている。試験片4は30 \times 30mmの正方形をしており上方から押え板5によりブロック1にボルト締めされている。押え板の中央には直径10mmの穴があげられており、この穴の縁にはプレスリング6が試験片との間にはさまれ、押えの効果を高めている。試験片のうちこの穴で囲まれた部分がいわばゲージ部にあたり、放電により発生する爆圧により膨張する。すなわち2軸的な引張りがなされる。

写真1に厚さ1mmのブチルゴム試験片の変形例を示した。半球形のバルーンに成長した瞬間がと

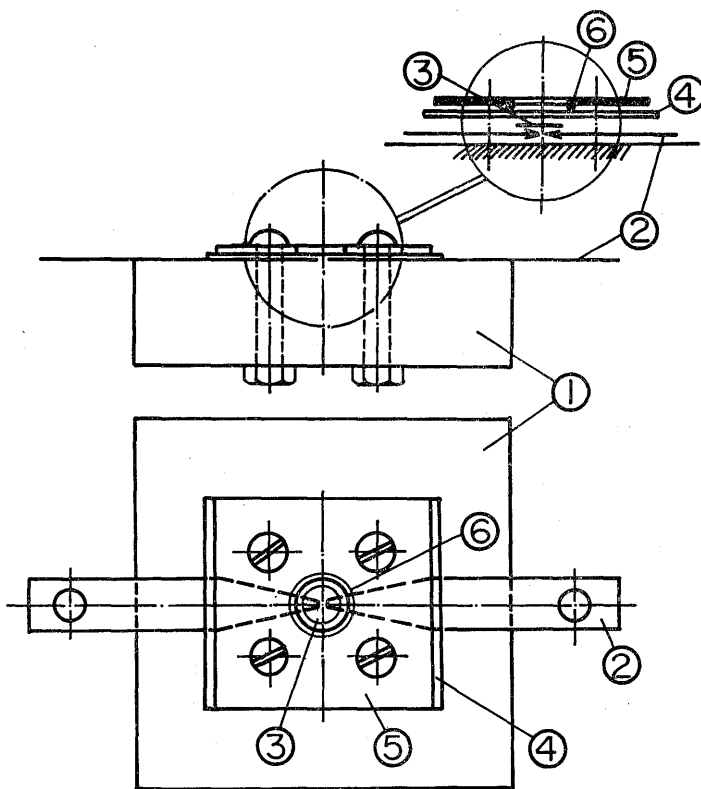


図1 インパクトアセンブリ

らえられている。試験片の厚さには 0.5～3 mm が選ばれるが、この実験ではほとんど全部が 1 mm のものである。バルーンの形状の時間的変化はまずは高速度カメラ RIAM-MC1⁵⁾ により観察、測定した。さらにバルーン高さの時間的変化を撮影によりなくとも求めることができるように簡易な光電式計測装置をつくった。これらの装置で図1のインパクトアセンブリの諸特性を測定した他、インパルスのな負荷に

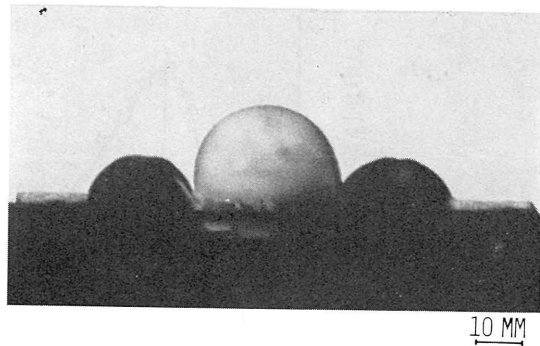


写真1 変形中のブチルゴム試験片

対する試験片の変形挙動、破裂発生時の限界的な伸び、およびこれらの特性の温度依存性などの予備的な試験を行った。空中放電を利用しているため、図1のインパクトブロックを恒温槽に入れることにより零度C以下の低温域から室温以上の高温域まで容易に試験できることが利点の1つとなっている。

3. 光電式バルーン高さ測定システム

変形の時間的変化を常に撮影により求めるのは確実な方法ではあるが繁雑である。したがってこの試験法の実用化のためには簡易な計測装置のあることが望ましい。図2にはそのような目的で組み立て、特にインパクトアセンブリの特性を調べるために用いた計測システムを示した。その原理は図の上方に示されている。すなわちビームエキスパンダーで平行にされたレーザー光が細いスリットを通った後一部はバルーンによってさえぎられ、残りは受光器（フォトダイオード）に集められる。静的なバルーンテストにより正確にバルーン高さ（ h ）と受光器出力との較正をあらかじめしておくことにより本

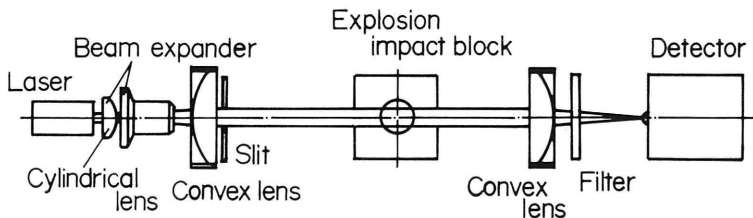
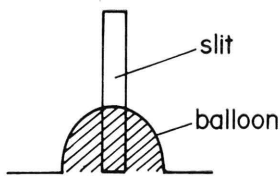


図2 光電式バルーン高さ計測システム

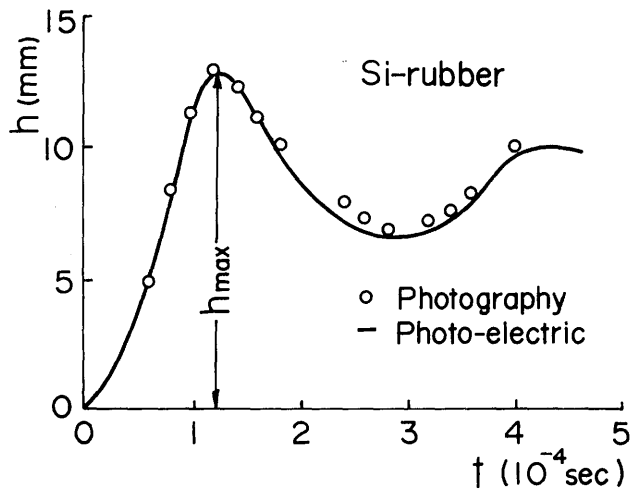


図3 h の光電式計測と高速度撮影による計測との比較

実験での h の測定ができるようにした。この方法と比較のために同時になされた高速度撮影による h の測定結果が図3に示されている。試験片には厚さ 1 mm のシリコンゴムが用いられた。両者の一致性はよく、この計測システムにより h の時間的変化が測定できることを示している。破断にいたらない場合には図のように h は時間に対して振動的となることがある。このときの最大変位量を図のように h_{\max} で与えることとする。以下のインパクトブロックの特性測定においてはこの h_{\max} が測定され、比較されている。

4. インパクト装置の各種の特性

前記2.の装置による試験を行うにあたってはインパクト装置に関する各種の特性をつかんでおく必要がある。電極の形状、材質、プレスリングの効果、遮へいの効果などである。この実験で用いられた放電回路は既報⁹⁾の通りである。

図4には電極シートにせず、銅、ステンレスを用いたときの h_{\max} の違いを示した。用いた電極の厚さ (d) は $50\ \mu\text{m}$ でその形状は図の通りである。(以降の実験においても形状は変わらない。) l は電極間げきである。このときの放電電流波形が図の右側に示されている。図4で横軸に融点 T_m をとった理由は、この厚さの電極ではその先端の一部 (Sn, Cu, SUS でそれぞれ先端から 4.5 mm, 1.0 mm, 1.7 mm) が融けて蒸発するためである。箔爆発が生じると爆発力が上昇する(後述)という利点がある反面その部分で衝撃力が局部的に大きくなるのでこの実験では好ましくないと判断された。蒸発が少く、しかも h_{\max} が高いという意味で銅電極が有利である。

図5では銅の電極の厚さの効果を調べている。ここで wet は電極間に蒸留水を付着した場合、dry は付着しなかった場合である。蒸留水を付着すると効率が約 15% 増加することがわかる。その理由としては加熱により蒸発した水蒸気が爆発力を強めていることが考えられる。また水をこのように使用す

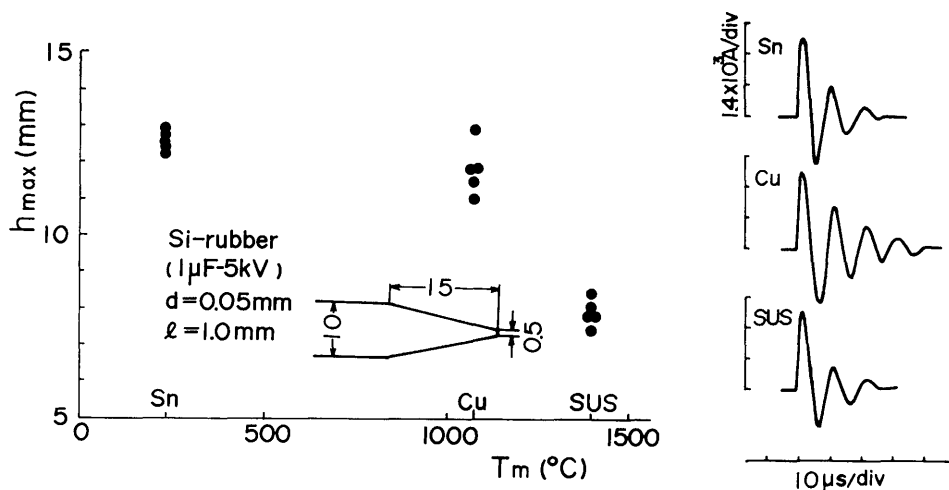


図4 h_{max} に与える電極材質の影響の1例

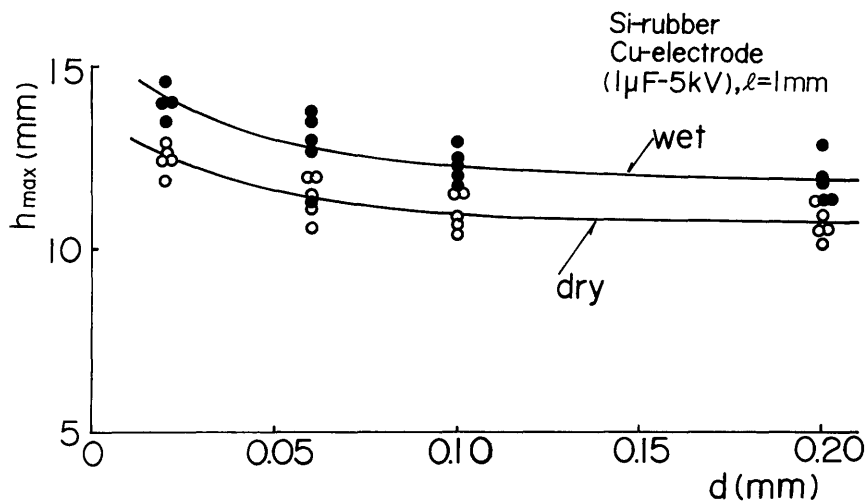


図5 銅電極の厚さおよび電極間に付着させた水分の影響

ると光学的計測がしやすくなる利点がある。測定のじゃまになる迷光を少なくする効果が生じるようである。この図で、wet, dry のいずれの場合にも d が小さくなると h_{max} が増加する傾向にある。すなわちエネルギー変換効率が高くなる。その理由は前述のように電極の部分的な箔爆発効果によるようだ。ちなみに $20 \mu\text{m}$ 厚で先端から約 2 mm 、 $60 \mu\text{m}$ 厚では前述のように約 1 mm が消失している。しかし $100 \mu\text{m}$ 厚の場合には先端部がわずかにとけただけとなっている。放電条件が変われば当然影響をうけるわけであるが、以降の実験ではなるべく箔爆発を起こさず、しかもうすい電極厚さとして $100 \mu\text{m}$ を用いている。図5にはこの実験で得られる h_{max} の実験毎のばらつきが示されている。およそ $10 \sim 15 \%$ がここでは認められる。

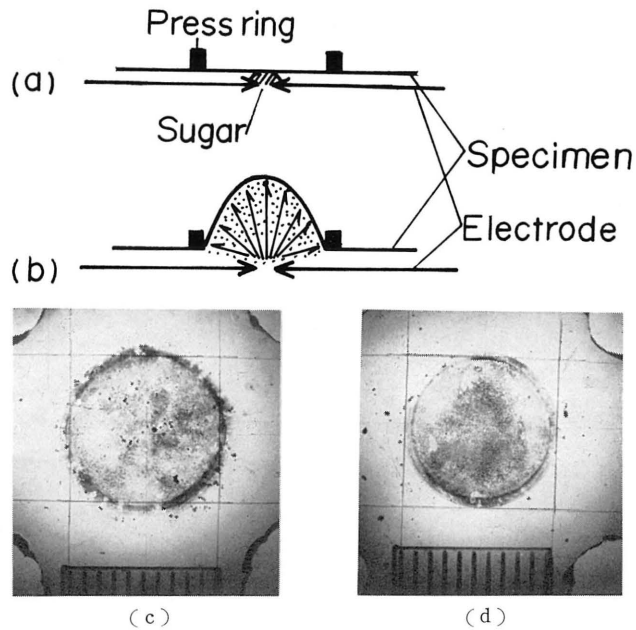


図6 (a), (b) ゲージ部のひろがりのカーボン付着による計測法; (c) プレスリングを使用しない場合, (d) 使用した場合のカーボン付着の様子, いずれの場合も試験前のゲージ部は写真で示された1辺10mmの正方形に内接した円形をしている。

次にプレスリング（図1の6）の効果についてであるが、これは試験片のゲージ域を一定に保つうえで重要である。なぜならばこの部分での押えが不足するとゲージ域周辺の試料が引張られて変形するため伸びの定量的扱いが困難になるからである。ここでは変形に関与している試料域（実質的なゲージ域）を次のようにして調べた。図6(a)のように電極間にわずかの量の砂糖をおき、放電により瞬時に炭化させ、できたカーボンを飛散させ試験片に付着させる(b)。このカーボン付着域を測定し、ゲージ域のひろがりを決定した。同図(c), (d)にそれぞれプレスリング無しの場合、有りの場合の回収後の試験片の写真を示した。4角のます目は1辺10mmの正方形なので正規のゲージ域の円はこれに内接している。(c)は明らかに直径10mm以上の領域までカーボンが付着しており、ゲージ域が拡大したことを示している。一方(d)ではほとんどゲージ域は変わらず、プレスリングの効果が見られる。このようにして測定されたゲージ域（もとの半径は $r = 10$ mm）の平均的な増分($d\bar{r}$)を図7に示した。ここでは放電電圧を変えて h_{\max} を幾分変化させてこれを横軸にとってある。 h_{\max} が増すと当然のことながら $d\bar{r}$ が増す傾向にあるが、プレスリングを用いた実験ではいずれも $d\bar{r}$ は0.5 mm(10%)以下で、用いない場合には10%を越えることが示されている。

ゲージ部の面積を一定に保持することとならんで重要なのは放電に伴い発生する熱から試料を保護することである。熱の影響を完全に避けることは難しいが、ほとんど無視できる程度にこれをおさえる

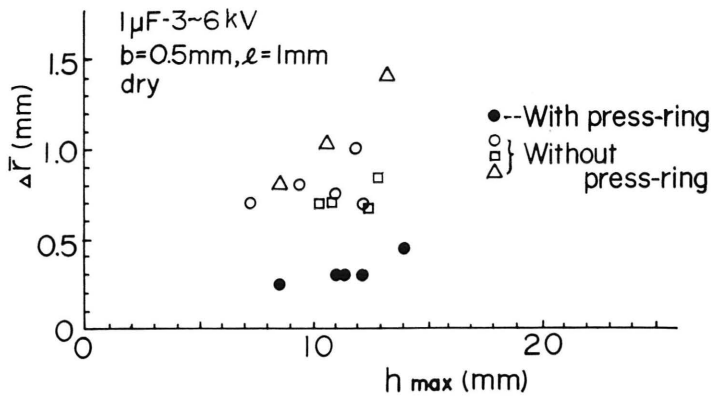


図7 ゲージ域のひろがり Δr に関する測定のまとめ

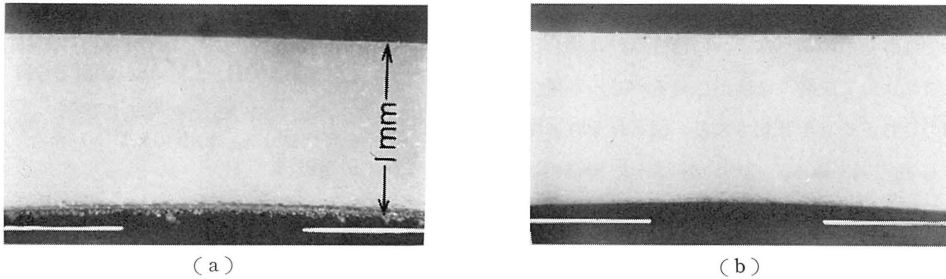


写真2 スクリーンを用いない場合(a)と用いた場合(b)のシリコンゴム試験片の断面写真。白線は電極の位置関係を表わす。

ことができればよい。熱遮へい用スクリーンとして現在主として用いているのは黒紙とポリエステルフィルムないし黒紙のみの小片である。これらを直径 7 mm 程度の丸形に切りそろえ、電極と試料の間に挿入している。熱遮へいの効果は試料面での温度計測ができれば定量的に知ることができる。しかし放電が強い雑音源であるために電気的な温度測定ができないのでここでは次のような方法で半定量的ないし定性的な評価を試みた。放電はいずれも $1 \mu\text{F}-5 \text{ kV}$ で行った：(i) ヒートラベル(ミクロン)樹(樹)抜、88, 93, 99°C) による測定、(ii) 融点既知の金属の溶解テスト；G. C. 社製の“メロット”(融点 98°C), すず(同 232°C), アルミニウム(同 659°C), (iii) 回収試料の断面観察、などである。(i) のヒートラベルは変色するにはある程度の加熱時間が必要なわけであるが、この実験のような短時間加熱では変色までにはいたらなかった。(ii) で用いた低融点合金については、その表面組織の形態変化を、加熱炉で 100°C の加熱をした場合とこのテストを行った場合とで比較した。この放電テストではたまたま 30 μm 厚の銅電極を用いていたが前述のように電極先端で部分的に蒸発する。この蒸発電極部に隣接する部分でメロットの組織は明らかに 100°C 以上に相当する変化を示していた。電極間に隣接する部分についてははるかに組織変化は少く、100°C を越えないと考えられる部分がかなり残されていた。この結果は薄い銅はくを電極に用いて蒸発を起こさせるのは熱しゃへいの点でも不利であることを示している。(iii) のテストの結果の 1 例を写真 2 に示した。ここには厚さ 1 mm のシリコンゴムの

断面のうち電極間げきに近い部分が示されている。電極は銅製で(厚さ $100\ \mu\text{m}$) その位置が白線で示されている。この間で放電させている。このテストで用いているシリコンゴムは耐熱性にすぐれたゴムなので、熱遮へいには約 $0.1\ \text{mm}$ 厚の黒紙1枚のみを用いている。(a)は遮へいしなかった場合で(b)は遮へいした場合である。(a)では約 $70\ \mu\text{m}$ の深さまで熱と高速衝撃によっておこされたあとが認められるが、それ以上の深さでは損傷が認められない。(b)ではほとんど損傷が認められず、薄い紙1枚ではあるが熱しゃへいの効果ははっきり示されている。なお、このような遮へい物を用いた場合、放電によって試験片を変形させるパワーが幾分減じられることが予想される。図8はそれに関する測定例である。遮へいを行った場合には h_{max} の値が約1割程小さくなることが示されている。

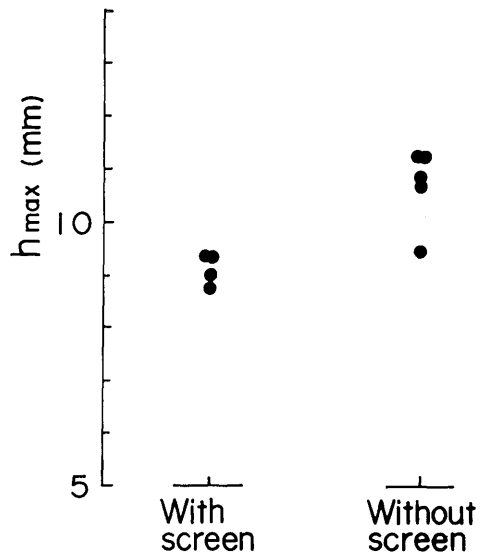


図8 スクリーンの h_{max} に与える影響。
(シリコンゴム, $1\ \mu\text{F}/5\ \text{kV}$, $30\ \mu\text{m}/\text{Cu}$ 電極.)

以上の結果をまとめると、この試験法での好ましいインパクトアセンブリーの条件として、電極には幅 $10\ \text{mm}$ 厚さ $0.1\ \text{mm}$ の銅はくを先端の幅が約 $0.5\ \text{mm}$ となるように切り抜き、間げき l を $1\ \text{mm}$ 程度にとって用いること、熱遮へいをし、またゲージ部を固定するためのプレスリングを用いること、などがあげられる。また状況に応じて電極間に蒸留水を付着させて試験するとエネルギー変換効率、迷光防止の点で有利となる。

5. 試験例と考察

図1のアセンブリーを用いていくつかの予備的な実験を試みた。これらは試験片が破壊にいたらない場合と破壊する場合とに分けることができる。

5.1. 破壊にいたらない場合の変形

破壊にいたらない程度のインパクトを与えて数種のゴム試料につきバルーンの大きさの時間的変化を求めた。その結果を図9~11に示した。ここで図9, 10は高速度撮影により、また図11は図2の光電計測システムにより得ている。ここで図9, 10の右側のたて軸の ε_s についてふれておきたい。 ε_s は次のように定義された“面積ひずみ”である。すなわち、

$$\varepsilon_s = S/S_0 - 1 \quad (1)$$

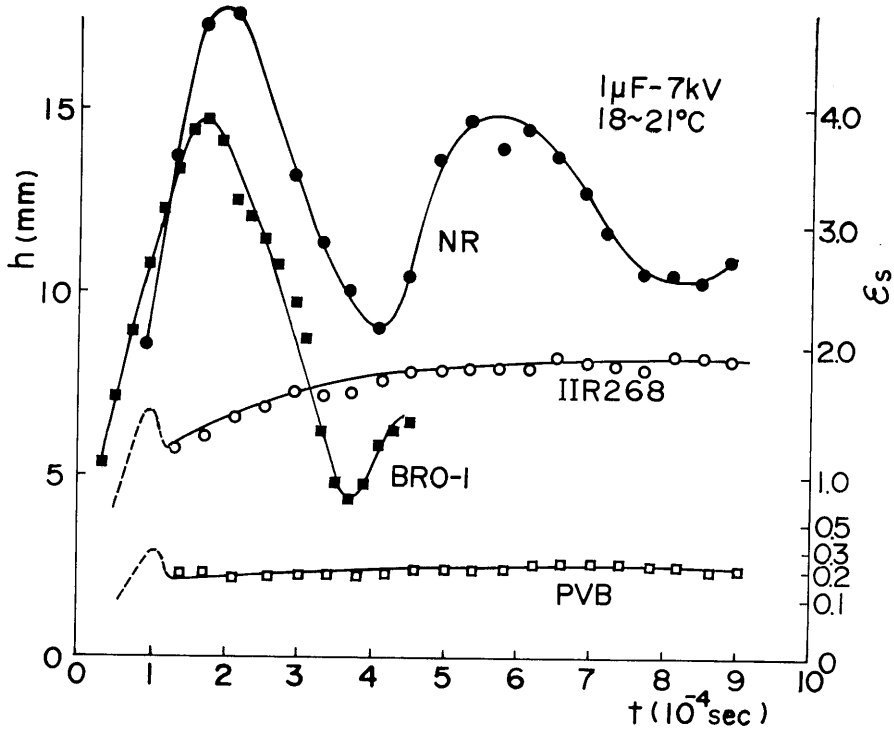


図9 高速度撮影によって得られた各種ゴムの h の時間的変化, 試験片が破裂しない場合.

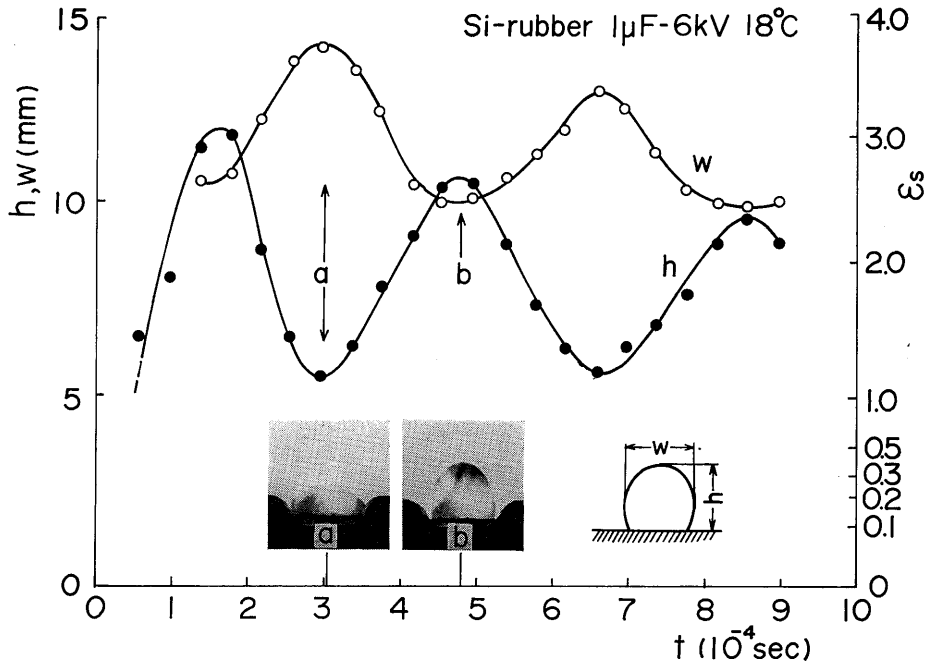


図10 高速度撮影によって得られたシリコンゴムの破裂しない場合の h と w の時間的変化.

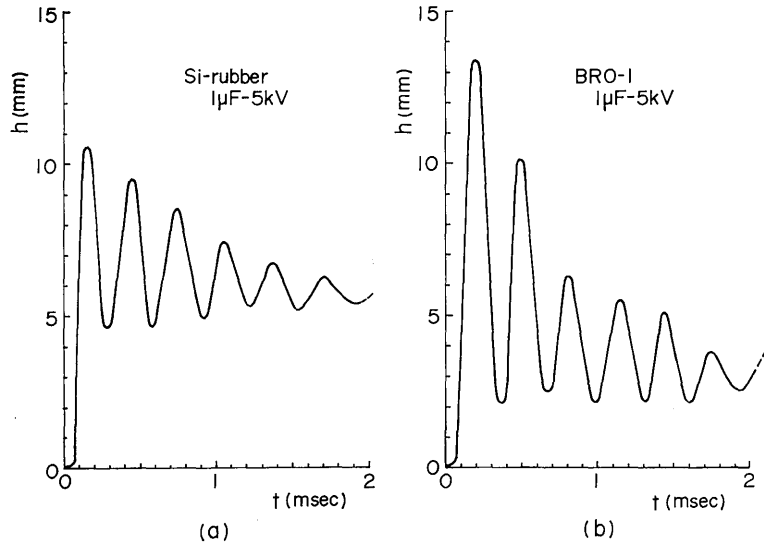


図11 光電式計測による破裂しない場合のポリブタジエンゴムおよびシリコンゴムの h の時間的变化。

ここで S_0 はもとのゲージ部の面積 (r をゲージ部の半径として πr^2)、 S は二軸的な伸長をした状態の面積で、次のように与えている：まず $h \leq r$ の場合には、バルーンの形状を球の一部と仮定して

$$S = \pi(r^2 + h^2) \quad (2),$$

また $h > r$ の場合には、バルーンを h 方向を長軸とする回転だ円体の半分と仮定して* その表面積の式

$$S = \pi r h \{ \sqrt{1 - \epsilon^2} + (\text{arc sin } \epsilon) / \epsilon \} \quad (3)$$

$$\epsilon = \sqrt{1 - (r/h)^2} \quad (\text{離心率})$$

である。ただし振動するタイプに対しては(2)、(3)式が適用されるのは後述のように h が最初のピークに達する迄である。図9には4種のゴムの挙動が示されている。ここで NR は天然ゴム、IIR 268 はブチルゴム、BRO-1 はポリブタジエンゴム、PVB はポリビニールブチラールである。(IIR 268 と PVB については衝撃直後は図の点線のようになることが別の光電計測によるオシログラムで示されている(図13参照)。迷光がじゃまをしてこの部分の像はこの撮影ではとらえられていない。) 図から $h(t)$ は大きく振動するタイプ(以降 A タイプと呼ぶ)とごくわずかに振動するタイプ(Bタイプ)に分けられる。Aタイプの変形は大きく、たとえば NR の ϵ_s は $t \approx 200 \mu\text{s}$ で400%を越えているのに対して B タイプの変形はより少なく、PVB の場合 ϵ_s はピーク時の $t \approx 100 \mu\text{s}$ で50%以下にと

* 回転だ円体で近似する場合、ここで仮定したようにだ円体の半分とすると実際にはやや少なめの面積を与えることになる。その理由は、写真3からもよみとれるように、バルーンの最も太い部分は押え板の位置よりもやや上方にあり、実際にはもっと膨れているからである。今後さらに多くの実験例を得てより適切な ϵ_s の評価法を得たい。

どまっている。前述の図3のシリコンゴムはAタイプに属する。高速度撮影で得られたシリコンゴムのバルーン高さ (h) および最大幅 (w) の時間的変化を図10に示した。振動する h , w は位相が互いに π だけずれていることがわかる。図9のAタイプの振動はいずれもこのようなモードの振動である。前述の(2), (3)式の利用においては h , w のこのような振動モードは考慮されていない。したがって最初のピーク以降は誤差が多くなるので用いない方がよいだろう。図11は光電計測によって得られたもので、図9, 10より長い時間領域でみたシリコンゴムとBRO-1の h の減衰振動を示している。

図9~11に示した挙動から2軸的な高速変形をするエラストマーのどのような力学特性が定量的に得られるかということはこの試験法の応用に関する今後の重要な課題であるが、ここでは単純な振動論をもとに試験片の反発弾性 R (レジリエンス) との関連にふれておきたい。この場合、まず試験片がどのようなプロセスによって2軸的な変形をするのかのメカニズム、つまりこの衝撃負荷におけるエネルギーの変換過程をはっきりさせておく必要がある。水中における線爆発による放電加工などの類推から試験片に運動を与える源として、まず考えられるのは放電によって生じる衝撃波である。しかしながら金属の線や箔の爆発を伴わない単なる空中放電による衝撃波が試験片変形における主たる駆動源となっていることは考えにくい。仮にそうだとすると図9でA, B両グループ共に試験片の h が h_{max} に達した後にすみやかに減少に向わないこと、あるいはAグループの振動の復元力が何によるかの説明がつかない。ここではバルーン内部には1気圧以上のガスが存在していると考えべきである。つまり放電によって電極周辺にわずかにあった空気が高温・高圧状態となり、これが膨張して試験片をふくらませ、その振動においては復元力の源となると考えるのが自然であり、衝撃波は試験片伸長の過程で副次的な役割を果していないと考えてよからう。この考え方が正しいとするとAグループの振動はバルーンとガス体の振動である。いま仮りにこの振動システムにおけるガス体の役割を単に復元力を与えるものとして、バルーンの振動は粘弾性体の振動の問題と類似の扱いが可能であると仮定するとこの減衰振動システムは x を変位として

$$\ddot{x} + 2\epsilon\dot{x} + n^2x = 0 \tag{4}$$

で記述される。よく知られているように、 $n/\epsilon > 1$, ≤ 1 にしたがってこのシステムはそれぞれ振動的、非振動的となる。また減衰角 ϕ を

$$\tan \phi = \epsilon / \sqrt{n^2 - \epsilon^2} = 1 / \sqrt{(n/\epsilon)^2 - 1} \tag{5}$$

で定義すると(1周期)対数減衰率は

$$-\ln A = 2\pi \tan \phi \tag{6}$$

となる。一方エラストマーの反発弾性(レジリエンス) R はテスト用試験片に衝突する鉄棒の最初の高さに対する反発後の高さの割合(%)で示される。これは衝突前後の棒の速度の2乗の比に等しい。いま、鉄棒(質量 m) と試験片が接触している間の運動が

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \tag{7}$$

で示されるような並進運動であるとすると、これは(4)式と類似の式であり ($k/m \rightarrow n^2$, $c/m \rightarrow 2\epsilon'$),

表1 試験に用いた各田エラストマーの力学的性質

		BRO-1	NR	IIR 268	PVB	Si-R 221-5 U
ガラス転移点 (°C)		-112	-72	-70	-2	
硬度 (25°C, JIS A)		48	40	36	56	53
引* 張 試 験	T_b (kg/cm ²)	53.2	80.0	19.8	230	76
	E_b (%)	630	637	363	340	260
	M_{100} (kg/cm ²)	12.7	7.3	5.9	30.0	20.5
	M_{300} (kg/cm ²)	25.2	15.8	15.5	185.0	53.7 (M_{200})
レジリエンス (27°C, %)		41.6	85.2	46.6	6.0	58

* 単軸, 100 mm/min, 26°C, ここで T_b は破断強度, E_b は破断時伸び, M_{100} , M_{300} はそれぞれ 100%, 300% 伸張応力値, レジリエンスは反撥弾性係数である.

さらにレジリエンス R は $\tan \phi'$ を用いて

$$R/100 \approx \exp(-2\pi \tan \phi') \quad (\phi' \ll \pi) \quad (8)$$

と表わすことができる⁷⁾. (4)式の ε , n^2 , (7)式から得られる ε' , n'^2 はいずれも試験片の粘弾性を反映するものであるから R は $\tan \phi$, つまり n/ε に密接に関連しているはずである. 図9の各試料につき, レジリエンスを含むいくつかの力学物性値が表1にまとめられている. 参考のためにここには図3~図11の実験で多用されたシリコンゴム Si-R 221-5 U の物性値も与えておいた. (4), (5), (8)式は n/ε が大きい程振動的となり R が大きくなることを示している. 表1の数値はこのことと少くとも定性的には一致している. シリコンゴムも含めAグループの R はすべてBグループの R よりも大きくなっている.

次に変形の途次試験片厚さ, 面積ひずみ速度が時間と共にどう変るかを図9の IIR 268 を例にとり

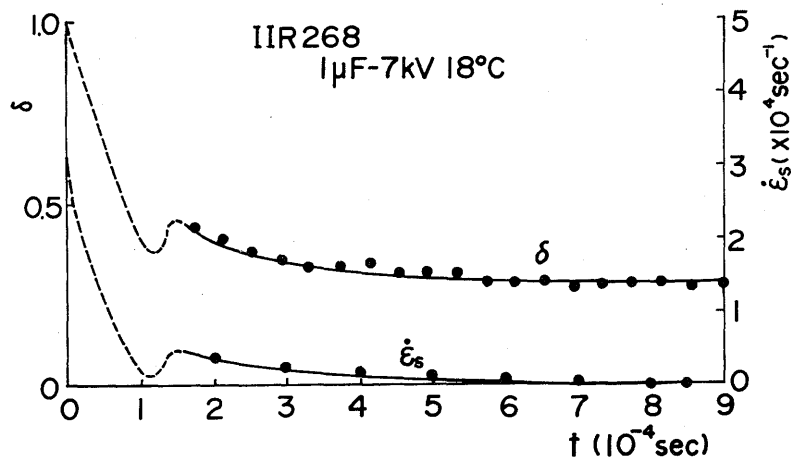


図12 試験片の面積ひずみ速度, 厚さの時間的变化の1例.

図12に示した。ここで δ は変形中の厚さ d をもとの厚さ ($d_0=1\text{ mm}$) で割ったもので、試料の体積が変らないものとして

$$\delta = d/d_0 = r^2/(r^2+h^2) \tag{9}$$

で与えている。(ただし、ここではバルーンの形状は球の一部であると仮定している。) δ の最低値は約0.3となっており(つまり0.3 mm)、また面積ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_s$ の最高値は約 $3 \times 10^4/\text{sec}$ に達している。

この試験法の1つの特徴は恒温槽を利用することにより試験温度を変えうることである。図13にはPVBの h の温度依存性に関する測定例を示した(1 μF -6 kV, 厚さ1 mm)。PVBは合わせガラス用補強フィルムなどとして利用されている材料であるが表1にもみるようにすぐれた力学的性質を有しており、図13の結果は熱的にもまた安定した材料であることを示している。

前述のようにバルーンが空気断熱膨張によりふくらむものとする、バルーン内部の圧力を急激に抜くことによりステップ状の除荷が実現されよう。これをためてみたのが次の実験である。図1の絶縁ブロック1の中央に穴をあけ、そこに栓をしておく。放電爆発により発生する圧力によりこの栓が急にはずされることを期待して前述の光電計測システムによってシリコン試験片のバルーン高さの時間的変化を計測した。その結果を図14に示した。図から明らかに負荷の場合とほとんど変らぬ速さで除荷がなされており、前述の仮定を裏付けている。図14の結果は、2軸的な大変形後に緩和挙動を示す試料がある場合、その挙動を観察し得る可能性を示している。しかしこのことの当否は高速度撮影によるバルーン形状変化に関する直接的な確めを必要とする。

5.2. 破壊挙動

この試験法により振幅の十分大きなインパルスを与えた場合には試験片は破壊にいたる。そのときの破壊様式は図15のように3つにまとめることができる。(a)は低い試験片温度でみられる様式で、試験片は押え板の穴の大きさとパンチされる。これは丁度ダンベル型試験片の「チャック切れ」に相当す

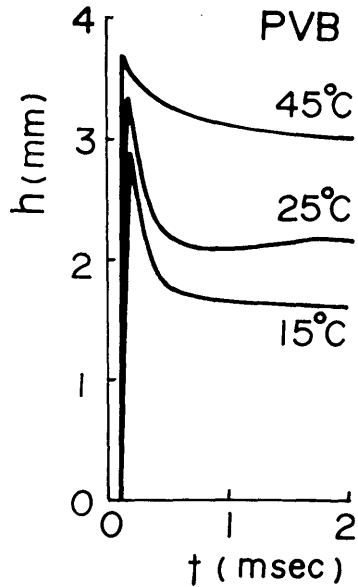


図13 h の温度依存性の測定例(光電式計測)。

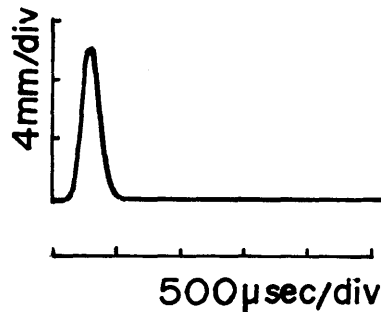


図14 急激に除荷した場合の h の測定例(光電式計測)。

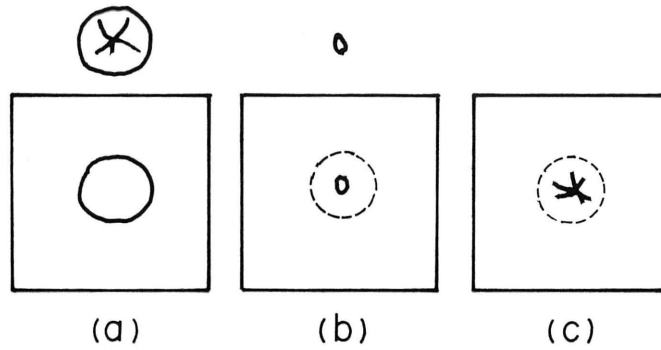


図 15 試験片の破壊様式のまとめ.

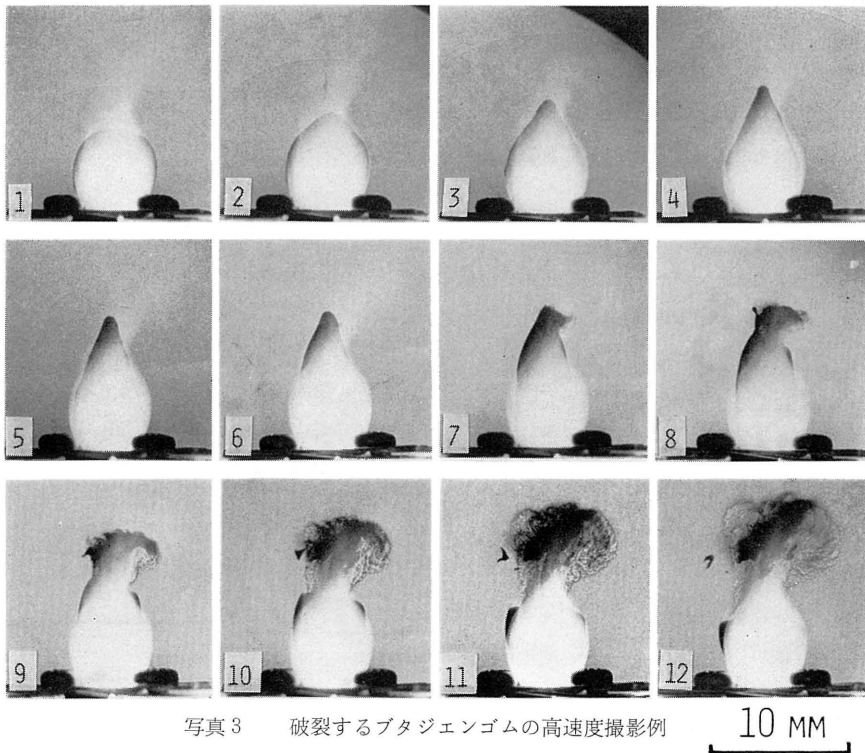


写真 3 破裂するブタジェンゴムの高速度撮影例

10 MM

る。(b)は強力なインパルスにより極めて短時間内に発生する小さな穴で、時間の短かさからして衝撃波による一撃によってつくられるものと考えられる。(c)はエラストマーに典型的な、裂け目の発生による破壊モードである。(c)の高速度撮影例(ブタジェンゴム)を写真3に示した。これは6.7万駒/秒の速度で撮影された。No. 6の駒で破裂のきざしが認められる。No. 7以降の駒では破裂による膨張空気の吹出しが認められる。この写真はエネルギー変換過程に関する前述の議論を実験で直接裏付けるものである。

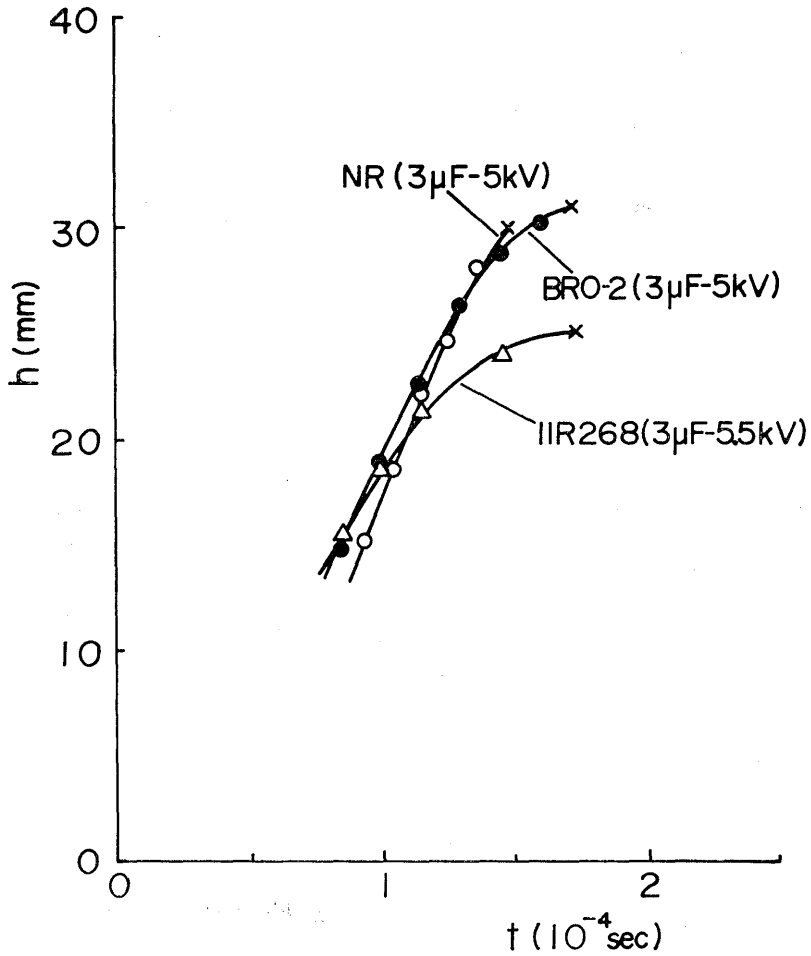


図 16 高速度撮影による破裂時限界伸びの測定例

このように撮影によってとらえられたパルーンの成長、破裂過程の $h(t)$ の観測例を図 16 に示した。破裂開始時の値 h_c は NR, BRO-2, IIR 268 でそれぞれ 31 mm, 30 mm, 25 mm となっている。これを(1), (3)式によって ϵ_s に換算すると、それぞれについて 8.8, 8.5, 7.0 が得られる。これらの値を表 1 の単軸引張試験における破断時伸びのデータと比較してみよう。単軸引張りでは IIR 268 は BRO-1 や NR の E_s の約 6 割にとどまっている。一方この高速度二軸試験によるとその比は約 8 割となっている。データが少いのではっきりと結論することは避けたいが、両試験でこのように特性に違いがでてくることは十分あり得ることである。そのような違いを系統的に調べて整理することがこの研究のこれからの課題の 1 つである。

6. おわりに

エラストマーに超高速で二軸的な引張大変形を与えることを可能とする新しい試験法を提案した。空中放電による空気の断熱的膨張を利用して試験片の円形ゲージ部を秒速 100 m に達する高速でふくらませ、破断発生時の限界の伸びなどを測定しようとするものである。この試験法の実用化のために今後さらに研究をすすめるべき課題としては、技術的には高速度撮影によらず破断発生時点を正確にとらえる手段の確立がまずあげられよう。また力学物性研究の立場からは破断時伸びに関するデータの集積、静的な単軸引張試験結果との比較、検討、バルーンの振動現象の解析とレジリエンスなど実用的な粘弾特性との関連性の研究、試料温度依存性に関する諸測定と単軸引張時の温度依存性との比較、などがあげられよう。

謝 辞

バルーンの振動に関して本発究所流体力学部門の中村泰治教授にご討論いただいた。熱的計測で用いられた低融点合金メロットを本研究所弾性学部門の福田重久氏に提供していただいた。ブリヂストン(株)研究開発本部の大橋 隆氏には試料作成その他の面でご協力いただいた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Dannis, M. L. J. Appl. Polymer Sci., **6** (1962) 283.
- 2) Patterson, G. D. Jr. and Miller, W. H. Jr., J. Appl. Polymer Sci., **4** (1960) 291.
- 3) Spangler, R. D. and Cooper, E. B., J. Appl. Phys., **28** (1957) 329.
- 4) Jones, J. W., J. Appl. Polymer Sci., **4** (1960) 284.
- 5) Takahashi, K. and Mada, T, Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ., **28** (89) (1980) 21.
- 6) 高橋清, 小松治男, 九州大学応用力学研究所 所報 No. 55 (1981) 27.
- 7) 戸原春彦, ゴム試験法 (新版, 永井仁他編, 日本ゴム協会, 1980) pp. 300-306.

(昭和 57 年 10 月 30 日 受理)