

石本, 携帯式加速度計

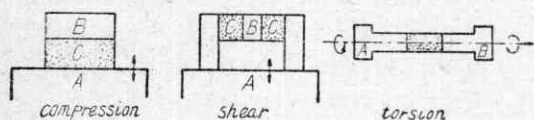
乗物に振動がなかつたら……それは旅する人々にとって一つの夢である。しかしゴムの老化が防止され、構造材料と密着させる技術が向上して将来強度のすばらしいものになれば私達の夢もやがては実現されるかも知れない。

本文は機械振動に対する防振効果を主眼としたゴムの性質の一端である。

### 1. は し が き

工学上はもちろん、身近な日常生活にまでいろいろな形で取り入れられ各方面に利用されている振動現象も、ときには随分わずらわしいものとして私達を悩ませることが多い。例えば電子顕微鏡に使用する真空蒸発装置を小型の箱に手際よく収めてみたいと思つても、ロータリーポンプの振動が餘りはげしいと、いきおい箱を少し大きく設計しなければならないし、また外出した時などクッションの利いていない乗物のガタツキには非常に不愉快な思いをさせられるものである。とりわけ高精度の計器が要求されている今日では、各種機械の高速運転に伴つて擾亂として傳播してくる波動や衝撃は誠にいやな存在である。したがつてこれ等の衝撃を緩和し振動を吸収する防振材料の性質が近時非常に重要視されるにいたつたのは當然なことから、今回は特に弾性ゴムについて基礎的な性質を極く簡単に御報告することにした。

一般に振動原因不可避の空腔  $A$  によつて起される振動衝撃を、被振動體  $B$  に伝えないためには第1圖のように  $AB$  兩者の間に緩衝體  $C$  を介在させ、それによつて振動のエネルギーを吸収するのが普通である。しかし防振材料も弾性體であるから、どんな方法で挿入しても或周期の振動に對しては發振體の振動に共振して被振動體をいちじるしく不安定で危険な状態におく結果となる。したがつて共振する厚さを避けるために、材料の弾性係数の値をぜひ知つておかなければならない。



第 1 圖

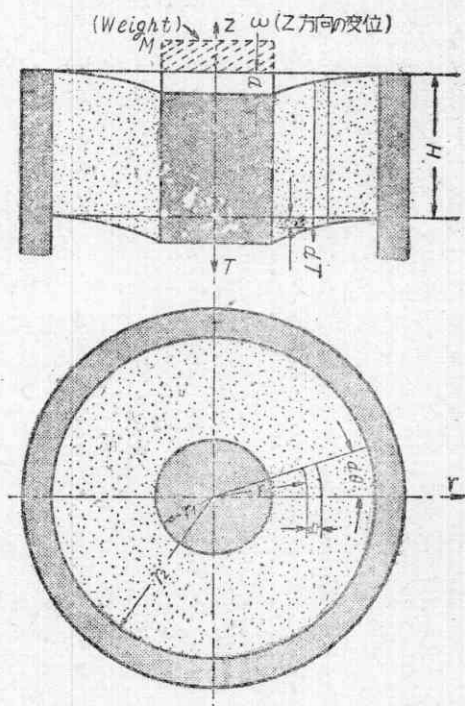
## 防 振 ゴ ム の 性 質

西村 源 太 郎 ・ 古 川 浩

波及するエネルギーの吸収には縦振動を利用した壓縮型 (compression) と剪斷振動を利用した剪斷型 (shear) および捩り振動による捩り型 (torsion) とがあつて、防振効果もそれぞれ異つた結果が豫想されるが、このたびは壓縮型と剪斷型についてその周波數に應ずる振動傳達率を調べて見た。

### 2. 防振系の基礎理論

緩衝體による一般吸振理論は別の機會にゆずり、ここにはわれわれの系の簡単な近似を述べるだけにとどめる。



第 2 圖

普通に用いられる剪斷型の場合は第2圖のように中空圓筒形の防振材を用いて、例えば外側からくる振動を内側に傳わらないようにするのである。これを論ずるには圓筒座標を用いて弾性振動の方程式を立てるべきであるが、計算の簡易化と壓縮型の場合にも同じ數表が使用できるため、これを一次元の問題に單純化して次のようにおくことにした。

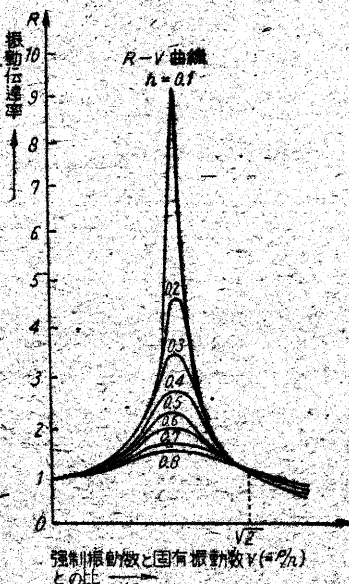
$$\rho \partial^2 \omega / \partial t^2 = G \partial^2 \theta / \partial r^2 + \xi \partial^3 \omega / \partial t \partial r^2 \dots \dots \dots (1)$$

ただし  $\omega$  は  $r$  における  $x$  方向の変位,  $\rho, G, \xi$  はそれぞれ防振材であるゴムの密度, 剛性率, 横粘性係数である。いま定常振動について考えることにし,  $\omega = \omega(r) e^{i \omega t}$  とおいて両端  $r=r_1, r=r_2$  における  $\omega$  の値をそれぞれ  $B, A$  と定め, 境界条件を導入して (1) 式を解けば振動傳達率 ( $R=B/A$ ) を求めることができる。(1) もちろんそれはかなり複雑な式であるため,  $SG, M$  をそれぞれ防振材の平均断面積と被振動系の質量をあらわすものとし, 各係数を無次元にするような  $l=r_2-r_1, n^2=GS/Gl/M, v=p/n, r=\rho SGl/M, h=\xi n/G$  におき換えをすると,  $R$  の絶対値は

$$|R| = \left[ \frac{1+h^2 v^2}{1-v^2 - \frac{v^2 r}{1+h^2 v^2} \left( \frac{1}{2} - \frac{v^2}{6} + \frac{1}{2} h^2 v^2 \right)} + h v \left( 1 - \frac{1}{6} \frac{v^2 r}{1+h^2 v^2} \right) \right]^{1/2} \dots \dots \dots (2)$$

と書きあらわせる。(2)

これによれば原振動と防振材を通した後の振動との振幅比  $R$  は防振材の寸法および密度, 弾性率, 粘性係数, 防振材と被振動系との質量比, 外力の振動数のみによつて決定される函数であつて, 他の因子には全く無関係である。したがつて実験によつて振動傳達率と振動数との関係さえ出しておけば, それから  $G, \xi$  の値を算出することができる。すなわち (2) 式の  $r$  と  $h$  に実験と適合する範囲の値を與え, あらかじめ第3圖のように  $R-v$  曲線を算出しておけばこれと実験から得られた共振曲線より  $R_{max}$  を與える振動数  $f_0$  並びにその時の  $h, v$  の値が決定できて



第3圖

$$G = (2\pi f_0)^2 M l / v_0^2 S G \dots (3) \quad \xi = h \sqrt{G l M / S G} \dots (4)$$

の関係から動的剛性率と横粘性係数が求められる。

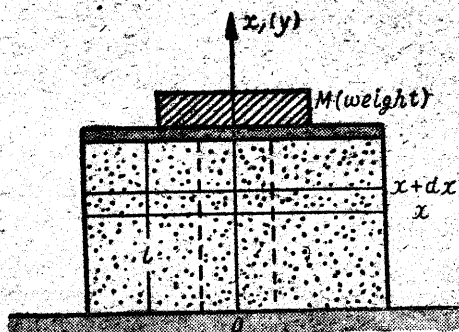
また静的剛性率は第2圖に示すように内圓端の軸方向の引張力を  $T$ , 変位を  $d$  とすれば,  $G = T \log(r_2/r_1) / 2\pi H \cdot d$  で表わされる。(3)

壓縮型の場合にも  $E, \mu$  をそれぞれヤング率, 縦粘性係数とし  $SE$  は防振材の断面積 (底面),  $y$  は  $x$  における

註 (1), (2), (3) 計算の詳細は「防振設計」に發表の稿びとなつてゐる。

変位とすれば第4圖において

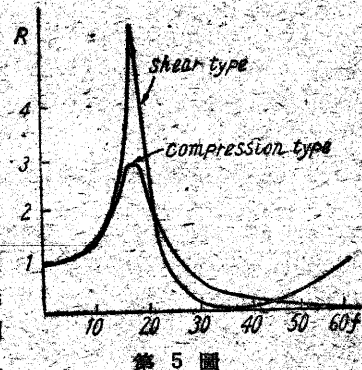
$$\rho \partial^2 y / \partial t^2 = E \partial^2 y / \partial x^2 + \mu \partial^3 y / \partial t \partial x^2 \dots \dots \dots (1)'$$



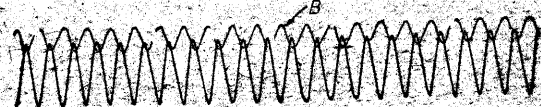
第4圖

という關係が成立し, 剪斷型と同じように  $E, \mu$  を決めることができる。もちろん

ゴムは完全弾性體から相當かけ離れた性質のものであり, 内部摩擦を粘弾性體として取扱つたのもまた一つの假定に過ぎない。しかし從來この方面の理論的研究は非常に少く, ごのような弾性ゴム自體の動力學的性質に関する實驗も乏しいので上記の理論式のもとに比較的低振動数の領域で二, 三の實驗を試みてみた。第5圖は實驗によつて得られた壓縮型と剪斷型の共振曲線, 第6圖は防振材を介したAとBの振動狀態を光學的鏡子で撮影した一例で, 兩方とも美し



第5圖



第6圖

い正弦曲線となつてゐる。このことは理論式からも明らかになように防振系が線型であることを示すものである。

### 3. ゴム弾性

#### (a) 履歴効果と緩和現象

外力が變動する時, 粘弾性物質では一般に歪は歪力と一義的に對應せず, 時間にも關係して歪の回復が緩慢となるような弾性餘効的變形をとまう。そのため昔からよく「ゴムは記憶を持つ」等といわれ, その荷重—変み曲線が獨特のヒステリシスをえがく原因となつてゐる。

## その静的な履歴

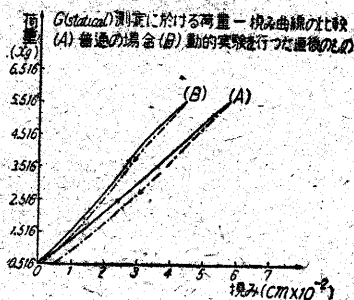
曲線は壓縮型の時には三日月形(第7圖), 剪断形の場合には鳥帽子形(第8圖)のループを書き, さらに連続して荷重を増減させれば曲線はいづれも少しずつ立つてくる傾向を示す。このことは動的な力を加えた直後において特にちじるしく, いささか妥當を缺く言葉ではあるが硬くなつたものといえよう。そして伸張に要した仕事はゴム自身の内部摩擦として熱に変化する。このヒステリシス損失の大きいことは弾性ゴムの大きな特徴である。

また時間因子が影響をおよぼす特異性の一つとしては第9圖のように荷重に變化を與えた場合にも變位がすぐに一定しない緩和現象がある。

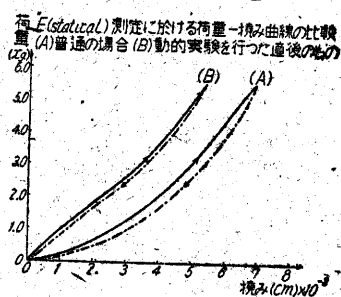
一定値に落着くまでの緩和時間  $\tau$  は荷重を受けるゴム自身の前の履歴温度等の條件によつて變り, 同一條件ならば荷重の變動が大きい程當然長い  $\tau$  が期待される。一般に荷重を加えた時の變位の落着きよりも, 除去した時に復元する時間の方が長く, 繰り返しによつて材料が疲れてくるとさらにちじるしい。これ等の現象は皆, 高分子構造の性質によるもので, ゴム弾性の本質は統計力学の立場から確率論的にエントロピーのゆらぎ(Schwankung)によつて理解されなければならない。

## (b) 粘性係数と弾性率

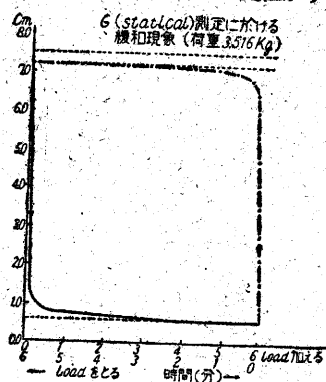
このような理由からゴムの弾性率を與える式はさまざまの形で表わすことができ, 恒数としての本質的な意義を定義することは材料によつてその値が廣範圍にバラツ



第7圖



第8圖



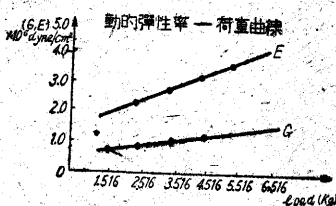
第9圖

第1表

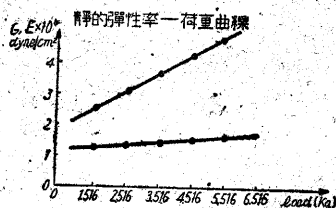
dynamical				
load (kg)	$E (\times 10^6)$	$G (\times 10^6)$	$G/E$	
5,516	3,604			
4,516	3,235	1.16	0.36	
3,516	2,787	1.10	0.40	
2,516	2,359	0.89	0.38	
1,516		0.74		
statical				
load (kg)	$E (\times 10^6)$	$G (\times 10^6)$	$G/E$	
5,516	4,652	1,428	0.31	
4,516	4,293	1,430	0.33	
3,516	3,732	1,387	0.37	
2,516	3,241	1,340	0.40	
1,516	2,573	1,210	0.47	
load	$\eta (\times 10^6)$	$\xi (\times 10^6)$	$\xi/\eta$	
5,516	3.02			
4,516	2.82	2.06	0.73	
3,516	2.75	1.84	0.67	
2,516	2.46	1.55	0.63	
1,516		1.13		

ぐために困難であるが, ここでは前節の理論により, 定常振動の實驗から求めた振動傳達率と周波数との關係を處理して  $E$ ,  $G$ ,  $\eta$ ,  $\xi$  に關し第一表に示すような結果を得た。

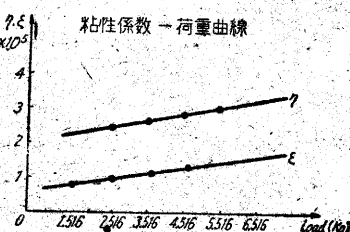
これによれば靜的であると動的であるとにかかわらず, 粘性係数と弾性率の値は加えられる荷重に比例して直線的に増加している。剛性率はヤング率のほぼ四割の値を示し, その増加する割合はヤング率にくらべ



第10圖



第11圖



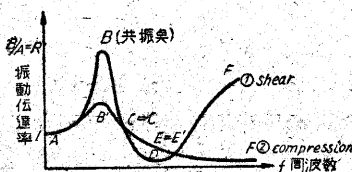
第12圖

て僅少でほとんど一定に近い。

#### 4. 防振効果

また第3圖から明かなように防振は  $v > \sqrt{2}$  の範圍に對して有効で、剪斷型も壓縮型もともにこの關係を満足している。ただ實驗した結果によると前者の共鳴曲線による  $R_{max}$  の値は後者のそれよりもはるかに大きく、曲線は  $v = \sqrt{2}$  において交差するから、一次の共鳴點のすぐ上の振動數では明らかに壓縮型より剪斷型を利用した方がよいことになる。しかし振動數が少し高くなつてくると、もともと構造物とゴムの接着が不十分なために純然たる剪斷振動が行われていない結果、第13圖のように一たん低い値をとつた傳達率が再び1より大きくなつて現れてくる。

いまかりにこれを擬二次共鳴とよぶことにしよう。ゴムは他の材料にくらべて剪斷型の



第13圖

有効範圍が割合に廣い方であるが、それでも周縁との結合状態によつては擬二次共鳴點が早く現れてくる。それにくらべると壓縮型ではこの傾向が全くなく、同一質量のゴムに對する粘性係數の値も縱振動を利用した時の方が大きいから、與えられた衝撃は剪斷型の時よりも速く減衰する。しかも周波數が高くなつてもほとんど一定して傳達率が零に近い優秀な性質をもっているから、よほどの事情がないかぎり現在では壓縮型を採用することが望ましい。しかし荷重が變化しても剛性率がほとんど一定であつたり、共鳴曲線が第13圖のD點のような場所を持つ利點もあり、現場の機械振動には定常振動がかなり多いから裝置のために純粋な剪斷振動が利用できなくても防振材料の厚さを適當に加減することによつて剪斷型も或程度使えるのではあるまいか。近着のアメリカ雜誌によると、高分子化合物と金屬の結合機構が高度に發達して、剪斷振動を利用した防振材が、50kg/cm<sup>2</sup> の力に耐え得ることが報ぜられている。わが國でもゴムと金

屬との丈夫な接着が簡單に行われるようになれば、剪斷型の利用もともに増加することであろう。

#### 5. むすび

緩衝體としてゴムがすぐれている理由の一つは、履歴現象を伴うために、弾性懸架としての動力學的性質の他に内部におけるエネルギーの吸収能力が効いて制振が働く結果である。今不幸にして共振點( $p/n=1$ )で機械が回轉する場合が起つてもそのために振幅は有限におさえられ、いちぢるしく危険性が減少する。また弾性が小さく粘性が大きいということは固有振動周期を長くすることにも役立つて、それが強制振動周期にくらべて長い程被振動體を原位置にとどめることになる。同一の弾性機構で鋼のスプリングと加硫ゴムに共振を起させるとゴムの方が遙かに早く減衰して振動が中止してしまうし、また大きい振動數を小さなものとして傳達する利點もある。したがつてゴムを使用して弾性機構をたくみに設計すれば外部からの擾亂を全く遮斷することも不可能ではない。軟質ゴム片を適當に金屬ボルトと組合せたゴム絶縁ボルトによつて、機體に取付けた發動機が、運轉中にボルトの締め加減をスクリーカップで調節することによりほとんど振動をなくしているのはそのよい實例である。

飛行機や自動車のようにゴムタイヤの使えない鐵道車輛が枕ばねや蔓巻ばねを使用しているのを見て、將來弾性ゴムがさらに改良され、強度や耐久力が向上して大荷重がはげしく作用するところにも長く使用できるようになることを心から期待し、またその實現を切望して止まない。終りにあたり本研究にいろいろ御助言を賜つた河村教授、池田教授、科研佐田登志夫氏に厚く御禮申し上げる。

#### 文 献

- (1) J.P. Den Hartog; Mechanical Vibration (1940).
- (2) 磯藤貞一; 日本航空學會誌 P 12 4 (1939).
- (3) 津村利光; 機械學會誌第十四卷 P 95 (1938).
- (4) 久保光五; ゴム弾性 (1949).
- (5) 神原 周; ゴム岩波講座機械工学.

#### “生産技術研究所報告”既刊のお知らせ

第1巻、第2號および第3號が發行されました。特に頒布を希望される方は、當所臨時業務部へ御照會ねがいます。

第1巻第2號——勝田高司著“自然換氣に関する實驗的研究”本篇は建物の溫度差および風力による自然換氣の一般性質と、換氣量計算に必要な基礎的なデータとを實驗的に求めたもので、一般の室・工場・アパートメントなどの模型による換氣および通風實驗の結果を報告し、炭酸ガスによる流量測定法・遠隔操作用カタ巻環計・窓および隙間の流出係數などに関する實驗法および結果を記述してある。

第1巻第3號——鈴木弘著“逆張力引拔加工(管造

の引拔加工を含む)に関する研究”で、1. 引拔變形過程の塑性學的研究、2. 引拔材料の機械的性質、3. 引拔機械の機械的特性、の3方面の総合的研究である。1では摩擦係數の實測、變形過程の詳細な解析を含む點、2では硬度・殘留應力等の引拔材の横斷面上の分布に及ぼす引拔條件の影響を求めた點、等が従来の諸研究と異なり、3では逆張力引拔機械の特性の基礎理論を新たに求めて、設計上の要點と主な對策を示した。