振動法によるプラスチックへの放射線照射効果の研究*

栗谷 丈夫**, 峯 垣 松 生***

Study on Effects of γ -Ray Irradiation on Polyethylene
by a Vibration Method

by Jōbu AWATANI and Matsuo MINEGAKI

Young's modulus of polyethylene, γ -ray irradiated, was measured by a vibration method and effects of radiation dose, the atmosphere in which radiation is done, the thickness of samples irradiated and so forth acting on crosslinking were studied. Main results are as follows: (1) the degree of crosslinking of samples irradiated in vacuum is remarkably larger compared with that irradiated in air, (2) the thinner the samples, the lower the degree of crosslinking and (3) for thin samples irradiated in air, the proportional relationship between the degree of crosslinking and radiation dose is not held, and irradiation has complicated, rather harmful, effects on the mechanical properties such as yield stress and wear resistance. In appendix, theoretical approach is shown for a composite oscillator which consists of the sample and the reed.

1. 緒 言

プラスチックの機械的性質を改善するため、放射線の照射を利用する研究が最近さかに行なわれているが、その効果はいずれも放射線による高分子間の架橋によるものとされている。この種の研究は原子炉中の放射線を利用した Charlesby ら⁽¹⁾につづき、すでにかなり多くの人々によって、それぞれの目的に応じた研究がなされている⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。しかし放射線のプラスチックへおよぼす影響は複雑で、たとえば同じ材料に対しても照射条件などにより相当の差があるようである。

本文では基本的な高分子材料としてポリエチレンを選び、これに Co^{60} からの γ 線を照射した場合の架橋度を振動リード法によって測定し、これが照射線量や照射雰囲気および試料の厚さなどにいかに影響されるかを研究した。また部分的ではあるが、架橋度と降伏応力や摩耗量などの機械的性質との比較も行なった。ここに採用した振動リード法はプラスチックの動的試験法として賞用されているが、なお検討を要するところがあるので、この点について若干振動論的な考察を行なった。

2. 測定装置ならびにその原理

まず試料の(動的)縦弾性係数を測定する。測定装

置は、その後改良した加熱円筒と振動舌片を除いては、すでに筆者の1人が高分子の内部摩擦の実験⁽⁶⁾に用いたものと同一のものであるが、説明のために再録する(第1図参照)。図中で試験片 S は鋼製の舌片 R の下端に取りつけられ、片持り振動を行なう。このような複合振動子においては、その共振振動数 f_0 と試験片の縦弾性係数 E_2 との間にはよく知られているように、

$$E_2 = 48\pi^2 \rho_2 l_2^4 f_0^2 / \beta^4 t_2^3 \dots\dots\dots (1),$$

第1図 測定装置

* 昭和 37 年 10 月 30 日 第 40 期全国大会講演会において論文講演として講演, 原稿受付 昭和 37 年 7 月 23 日。

** 正員, 大阪大学産業科学研究所(堺市北花田町555)。

*** 大阪大学産業科学研究所。

の関係があるが, β は単純片持はり振動における $(1 + \cos \beta \cosh \beta) = 0$ の代りに

$$(1 + \cos \beta \cosh \beta) + \frac{\rho_2 A_2 l_2}{\rho_1 A_1 l_1} \frac{\alpha (\cos \alpha \sinh \alpha - \sin \alpha \cosh \alpha)}{1 + \cos \alpha \cosh \alpha} \frac{(\cos \beta \sinh \beta + \sin \beta \cosh \beta)}{\beta} = 0 \quad (2)$$

の根となることが示される (付録参照). この式に用いた諸記号はそれぞれ

$$\begin{aligned} \rho: & \text{密度 (舌片または試料)}, \quad l: \text{長さ (舌片または試料)}, \\ t: & \text{厚さ ("),} \quad A: \text{断面積 ("),} \\ k: & \text{回転半径 ("),} \quad f_0: \text{共振振動数 } (\omega_0 = 2\pi f_0), \\ \alpha = l_1 \sqrt{\frac{\rho_1 \omega_0^2}{E_1 k_1^2}}, \quad \beta = l_2 \sqrt{\frac{\rho_2 \omega_0^2}{E_2 k_2^2}} \end{aligned}$$

であり, 添字 1 および 2 は, 鋼製の舌片および試料に関するものである.

さて, このような装置で被照射ポリエチレンの縦弾性係数を測定すると, その値は温度の上昇とともに急に低下するけれども, 130°C 近辺からは反対に温度とともにわずかに上昇するようになる. このいわゆるゴム弾性状態では, 縦弾性係数と架橋間の平均分子量 M_c との間に次の関係式がある⁽¹⁾.

$$E_2 = 3\rho_2 RT/M_c \quad (3)$$

ただし, ここで R はガス定数を, T は絶対温度を示している.

したがって, 架橋度百分率 (100 個の炭素原子間に存在する架橋の数) は

$$\text{架橋度百分率} = 1400/M_c \quad (4)$$

によって求められるので⁽⁶⁾, 縦弾性係数から架橋度が計算される.

3. 測定とその結果

供試材としては基本的な高分子材料という意味でポリエチレン [Hi-Zex, 三井化学工業会社製, 比重 0.96 (常温)] を選んだ. 試験片は厚さを 0.48, 1.0 および 2.0 mm の 3 種類を採用したが, 長さは舌片の共振周波数 (1050 c/s) を考慮して, それぞれ 13.5, 20.0, 24.5 mm 程度に, 幅はいずれも 5 mm のたんざく形にした. まずこれらを 2 組に分け, 一方は空气中で, 他方はアンブールに封入して 10^{-3}mm Hg 程度の真空に保ち, 約 200×10^6 レントゲンまで種々の線量の γ 線照射 (線量率 $0.1 \times 10^6 \text{ r/h}$) を行ない, 照射後は遊離ラジカルの安定化のため 100°C , 1 時間の熱処理をほどこした.

縦弾性係数の温度依存性の測定はだいたい 20°C 間隔で行なったけれども, ゴム弾性状態に近い 120°C 以上では 10°C おきに行なった. 各測定から次の測定までで温度上昇には約 15 分間をかけ, 所定の温度になってからは, 試料の熱平衡を考慮して約 20 分間その温度に放置してから測定した. 第 2 ~ 5 図はそれぞれ

194×10^6 , 100×10^6 , 50×10^6 および 10×10^6 レントゲンの γ 線照射を受けた上記試料の測定結果である.

厚さによって分類した 3 組の試料は, 常温においていずれもだいたい同じ共振周波数をもつように製作したのであるが, 温度の低いとき, 最も厚い 2.0 mm 試料の縦弾性係数は他のものよりかなり低く算出される. これは試験片の重量が大きいほど, またその共振

第2図 被照射ポリエチレンの縦弾性係数の温度依存性 (194×10^6 レントゲン)

第3図 被照射ポリエチレンの縦弾性係数の温度依存性 (100×10^6 レントゲン)

周波数が舌片のそれに近づくほど、(2)式の近似が悪くなり、不正確な値を与えることが知られるので(付録参照)、これらの図では80°C以下の2.0 mm 試料についての値を省略した。

また、縦弾性係数が急に低下する100~120°Cの温度範囲では、共振周波数の測定値は平衡時間を長く保つほどしだいに低下した。これは、この範囲が結晶部の融解温度に相当しているので、熱平衡が保ち難いためであろう。この温度範囲では3種類の測定値の間にも多少のばらつきが見られたので、これらの図では破線で示した。なお、試料のうすいものほど、すみやかに熱平衡に達し得ると考えられるので、この破線部は最もうすい試料の測定値(○印)をやや重く評価して引いた。しかし、130°C以上のゴム弾性領域にはいると、このような不安定なことも起らず、測定値は平衡時間の長短にはほとんど左右されなかった。

第4図 被照射ポリエチレンの縦弾性係数の温度依存性 (50×10^6 レントゲン)

第5図 被照射ポリエチレンの縦弾性係数の温度依存性 (10×10^6 レントゲン)

4. 架橋度

架橋度は(3), (4)両式を用いて、150°Cの縦弾性係数から計算した。これは、以上の縦弾性係数温度依存性の測定結果から判断して、被照射ポリエチレンは150°C近辺で最もよくゴム弾性性質を現わしているように思われたからである。さらに試料がうすく照射線量の低い場合、ゴム弾性に特有な性質を示さないものもあるが、他の場合と同じように(3)式を適用した。第6図はこの結果である。これからわかることは、

- (1) 照射効果は真空中で行なうほうが空気中で行なったものよりはるかに大きい。
- (2) うすい試料よりも厚い試料のほうが照射効果は大きい。
- (3) 真空中で照射した場合は、架橋度はだいたい照射線量に比例する傾向があるが、空気中で照射したときはこの比例関係は成立しない。

これらのことから、ポリエチレンのような架橋形プラスチックでも、空気(酸素)の存在下では、架橋よりも切断すなわち分解(degradation)のほうが強く起るものと思われる。したがって、酸素と直接触れる表面近くでは分解が強く、内部にはいるに従って架橋のほうがすぐれるようになるので、ここで測定された架橋度は、これらの平均値的なものであろうことが想像される(Charlesby⁽¹⁾らの実験結果では架橋度は照射線量にだいたい比例して増加しているが、かなり大きな試料を用いているために、表面での効果があり大きくきいてこなかったものと思われる)。また、 10^{-8} mm Hg 程度の真空では、なお架橋反応を妨害するかなりの酸素量が存在していると考えれば、真空中照射を行なった場合でも、厚い試料ほど架橋度の大きいこ

第6図 架橋度

第7図 被照射ポリエチレンの摩耗特性 (超音波微動摩耗による)

第8図 降伏応力と架橋度との関係 (うすい試料の場合)

第9図 測定前後における試験片の形状 (A列: 未照射, B列: 100×10^6 レントゲン照射, 右: 測定前, 左: 測定後)

とが納得される。

著者らは、さきに被照射ポリエチレンの摩耗性質について報告し⁽⁷⁾、真空中で照射したものは、きわめてよい耐摩耗性を現わしたけれども、空气中で照射したものは反対に劣化の傾向を示した (第7図参照)。これは、空气中での照射は、試料表面が架橋よりも分解のほうが強く起って劣化するという上記の考察から容易に説明できる。

降伏応力もまた架橋度とともに増加することが当然予想される。第8図は厚さ 0.48 mm の試料について、この両者の間の関係を示したものである。真空中で照射した場合は予想どおりの結果になっているが、空气中で照射された試料は、むしろ降伏応力の変則的な低下を示している。これはおそらく表面近くで起った分解が、表面効果として複雑に作用すると同時に、試料の有効断面積を縮小さしめた結果であろうと考えられる。

ちなみに第9図は照射試料 (真空中, 100×10^6 レントゲン) と未照射試料の測定前後の形状を示したものであるが、後者は 130°C 以上の温度で変形が著しく、測定が不可能であった。

5. 結 言

以上 Co^{60} からの γ 線照射をうけたポリエチレンの縦弾性係数 E を振動リード法では測定し、ゴム弾性状態での E の値から架橋度を求め、照射雰囲気や試料の厚さの影響を調べた。これから判明したことは

(1) 真空中で照射をうけた試料は大きい架橋度を示し、その値はだいたい受けた線量に対応して増加する。

(2) 空气中で照射されたうすい試料の架橋度は著しく低く、その値は線量とともに増加しない。

(3) 10^{-3} mm Hg 程度の真空度までは、厚い試料ほど照射効果は大きい。

(4) ポリエチレンのような架橋形プラスチックでも直接空気に触れる部分は架橋よりも分解のほうが強く起るものと思われる。

なお、付録では、振動リード法によって縦弾性係数を測定する場合、試料と舌片の周波数の相対的關係以外に、試料と舌片の重さの比によってもかなり大きな誤差を伴うことを示し、かかる場合に適用し得る近似式を理論的に導いた。

付録 振動リード法に関する検討

一般に振動リード法における振動部を単純化して示すと第10図のようになる。ここで $x=0 \sim -l_1$ の部分は鋼製の舌片を、 $x=0 \sim l_2$ の部分が試験片を表わしている。従来は内部摩擦を考慮し、試験片の上端 ($x=0$) において一定の振幅を与え、他端 ($x=l_2$) が自由な状態の単純な片持り振動の理論解が用いられている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。そして舌片の共振周波数と試験片のそれとがかなり離れておれば、ばく然とこの理論が適用し得るものと考えられている。

しかしながら、照射を行なわない処女材を常温付近で測定し、この理論式から縦弾性係数を計算すると、その値が試料の厚さによつてかなり異なるというよう

第 10 図

第11図 試料厚さによる縦弾性係数の相違 (従来の理論式より求めた場合)

な不都合を生ずる。第11図は0.48, 1.0 および 2.0 mmの3種類の試料について、このことを示したものである。また、従来の式では共振周波数と t_2/l_2^3 (t_2 : 試験片の厚さ, l_2 : 長さ) との間には直線関係が存在するはずであるが、試験片の厚さが大きくなるほど、この直線関係からずれてくる (第12図参照)。これらの事実から、試料は舌片と組合わさって複合振動子を形成しているように思われる。

さて、一般に断面積が一樣でない片持り振動の基礎式は

$$\rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) = 0 \quad \dots\dots (5)$$

ただし、 y : 振幅

ρ : 密度

A : 断面積

I : 断面の慣性モーメント ($=k^2 A$)

である。したがって、第10図のような振動系では、上式の解は

$$\left. \begin{aligned} x = -l_1 \sim 0; \\ y = A_1 \cos m_1 x + B_1 \sin m_1 x \\ \quad + C_1 \cosh m_1 x + D_1 \sinh m_1 x \\ x = 0 \sim l_2; \\ y = A_2 \cos m_2 x + B_2 \sin m_2 x \\ \quad + C_2 \cosh m_2 x + D_2 \sinh m_2 x \end{aligned} \right\} \dots\dots (6)$$

ここで、 A, B, C および D はともに未定定数であり、 m_1 および m_2 はそれぞれ次式で与えられる。

$$m_1 = \sqrt[4]{\frac{\rho_1 \omega^2}{E_1 k_1^2}}, \quad m_2 = \sqrt[4]{\frac{\rho_2 \omega^2}{E_2 k_2^2}} \quad \dots\dots (7)$$

また、添字1および2はすでに本文中で記したように舌片および試料に関するものである。

境界条件として、

- (1) 舌片の上端 ($x = -l_1$) で振幅ならびにそのこう配がなく、

第12図 共振周波数と t_2/l_2^3 の関係

- (2) 試験片の下端 ($x=l_2$) は自由振動端とし、さらに
 (3) 接合点 ($x=0$) では振幅、振幅こう配、モーメントおよびすべり応力が連続している。
 として、八つの未定定数 ($A_1 \cdots D_2$) を消去すれば、
 (8) 式のようにになる (ただし $\alpha = m_1 l_1$, $\beta = m_2 l_2$)。 煩雑なことを度外視すればこの式によって共振周波数から縦弾性係数を求めることができる。しかし、一般にプラスチックは鋼と比較して、その縦弾性係数はほぼ 1/100 であるから、舌片と試料の断面積を同じ程度であると仮定すると、(9) 式のような関係が成立するので、計算がかなり簡単になる。

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 - (\cos \alpha \cosh \alpha + \sin \alpha \sinh \alpha), \quad \{-\cos \alpha \sinh \alpha + \sin \alpha \cosh \alpha\}, \\ 1 + (\cos \beta \cosh \beta + \sin \beta \sinh \beta), \quad \{-\cos \beta \sinh \beta + \sin \beta \cosh \beta\} \\ \frac{m_1}{m_2} \{-\cos \alpha \sinh \alpha + \sin \alpha \cosh \alpha\}, \quad \frac{m_1}{m_2} \{1 - (\cos \alpha \cosh \alpha - \sin \alpha \sinh \alpha)\}, \\ \{-\cos \beta \sinh \beta - \sin \beta \cosh \beta\}, \quad \{1 + (\cos \beta \cosh \beta - \sin \beta \sinh \beta)\} \\ \{-1 - (\cos \alpha \cosh \alpha + \sin \alpha \sinh \alpha)\}, \quad \{-\cos \alpha \sinh \alpha + \sin \alpha \cosh \alpha\}, \\ \left(\frac{m_2}{m_1}\right) \frac{E_2 I_2}{E_1 I_1} \{-1 + (\cos \beta \cosh \beta + \sin \beta \sinh \beta)\}, \quad \left(\frac{m_2}{m_1}\right) \frac{E_2 I_2}{E_1 I_1} \{-\cos \beta \sinh \beta + \sin \beta \cosh \beta\} \\ \{-\cos \alpha \sinh \alpha + \sin \alpha \cosh \alpha\}, \quad \{-1 - (\cos \alpha \cosh \alpha - \sin \alpha \sinh \alpha)\}, \\ \left(\frac{m_2}{m_1}\right) \frac{E_2 I_2}{E_1 I_1} \{-\cos \beta \sinh \beta - \sin \beta \cosh \beta\}, \quad \left(\frac{m_2}{m_1}\right) \frac{E_2 I_2}{E_1 I_1} \{-1 + (\cos \beta \cosh \beta - \sin \beta \sinh \beta)\} \end{array} \right\} = 0 \quad (8)$$

$$\left(\frac{m_2}{m_1}\right) \frac{E_2 I_2}{E_1 I_1} < \left(\frac{m_2}{m_1}\right) \frac{E_2 I_2}{E_1 I_1} < \frac{m_1}{m_2} < 1 \quad (9)$$

そこで、 $\left(\frac{m_2}{m_1}\right) \frac{E_2 I_2}{E_1 I_1}$ の項を無視し、かつ

$$\frac{m_1}{m_2} \{-\cos \alpha \sinh \alpha + \sin \alpha \cosh \alpha\} = \varepsilon_1, \quad \frac{m_1}{m_2} \{1 - (\cos \alpha \cosh \alpha - \sin \alpha \sinh \alpha)\} = \varepsilon_2,$$

$$\left(\frac{m_2}{m_1}\right) \frac{E_2 I_2}{E_1 I_1} \{-\cos \beta \sinh \beta - \sin \beta \cosh \beta\} = \delta_1, \quad \left(\frac{m_2}{m_1}\right) \frac{E_2 I_2}{E_1 I_1} \{1 - (\cos \beta \cosh \beta - \sin \beta \sinh \beta)\} = \delta_2$$

とおくと、(8) 式は次式のように近似される。

$$\left\{ \begin{array}{l} 1 - (\cos \alpha \cosh \alpha + \sin \alpha \sinh \alpha), \quad \{-\cos \alpha \sinh \alpha + \sin \alpha \cosh \alpha\}, \\ 1 + (\cos \beta \cosh \beta + \sin \beta \sinh \beta), \quad \{-\cos \beta \sinh \beta + \sin \beta \cosh \beta\} \\ \varepsilon_1, \quad \varepsilon_2, \\ \{-\cos \beta \sinh \beta - \sin \beta \cosh \beta\}, \quad \{1 + (\cos \beta \cosh \beta - \sin \beta \sinh \beta)\} \\ \{-1 - (\cos \alpha \cosh \alpha + \sin \alpha \sinh \alpha)\}, \quad \{-\cos \alpha \sinh \alpha + \sin \alpha \cosh \alpha\}, \\ 0, \quad 0 \\ \{-\cos \alpha \sinh \alpha + \sin \alpha \cosh \alpha\}, \quad \{-1 - (\cos \alpha \cosh \alpha - \sin \alpha \sinh \alpha)\}, \\ \delta_1, \quad \delta_2 \end{array} \right\} = 0 \quad (8)'$$

さらに、前と同じように、 $\varepsilon \delta \cong 0$ として、これを無視すれば、結局次式が得られる。

$$(1 + \cos \beta \cosh \beta) + \frac{\rho_2 A_2 l_2}{\rho_1 A_1 l_1} \frac{\alpha (\cos \alpha \sinh \alpha - \sin \alpha \cosh \alpha)}{(1 + \cos \alpha \cosh \alpha)} \frac{(\cos \beta \sinh \beta + \sin \beta \cosh \beta)}{\beta} = 0 \quad (10)$$

この式の左辺の第2項を省略した $(1 + \cos \beta \cosh \beta) = 0$ が従来の単純な片持はりの共振周波数を規定する式であり、第2項が複合振動子と考えた場合の補正項に相当している。この補正項のうち第1項 $(\rho_2 A_2 l_2 / \rho_1 A_1 l_1)$ は試料の重さと舌片のそれとの比を表わし、第2項の $\alpha(\cos \alpha \sinh \alpha - \sin \alpha \cosh \alpha) / (1 + \cos \alpha \times \cosh \alpha)$ は舌片の弾性のみにより、最後の $(\cos \beta \times \sinh \beta + \sin \beta \cosh \beta) / \beta$ は試料の弾性のみによって定まる項である。通常の測定では、 β の値は $(1 + \cos \beta \times \cosh \beta) = 0$ の根とあまり大きな差異はないから、補正項中の β の値は近似的にこの根を採用しても大差は起らない。

試料の共振周波数が舌片のそれに近づくと、 $(1 + \cos \alpha \times \cosh \alpha) \approx 0$ となり、第2項の α 項が大きくなる。従来の測定では試料の共振周波数と舌片のそれとをかなり離れた条件で用いるのはこの意味からも明らかである。そのほか、試料の重さと舌片のその比(第1項)が大きくなると、これまた補正項が大きくなるので、この場合にも、従来の理論式では大きな誤差の原因となることがわかる。

第12図で、直線 I は従来の単純片持はりの理論から導かれるものであるが、他の三つの曲線はそれぞれ

0.48, 1.0 および 2.0 mm 厚さの試料について (10) 式から求めたものである(舌片の長さ 2.7 cm, 厚さ 0.09 cm, 共振周波数 1050 c/s)。また図中 O, Δ および $\square$ 印は、それらに相当する厚さをもつ試料の実測値であって、理論と測定の両者の間にはかなりよい一致がみられる。

また、厚い試料で周波数が高くなるほど、(10)式から求めた理論値と実験値の間の一致が悪くなっているが、これは、(10)式は $\epsilon \delta \approx 0$ という仮定のもとで導かれていることと、さらに、この計算では補正項中の β を一定値 (1.875) として行なっているためであろう。

文 献

- (1) A. Charlesby & N.H. Hancock, *Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A*, **218** (1953), 245.
- (2) D.S. Ballantine, G.J. Dienes, B. Manowitz, P. Ander, & R. B. Mesrobian, *J. Polymer Sci.*, **13** (1954), 410.
- (3) A. Chapiro, *J. Chem. Phys.*, **52** (1955), 246.
- (4) H. Matsuo & M. Dole, *J. Phys. Chem.*, **63** (1959), 837.
- (5) C.W. Deeley, J.A. Sauer, & A. E. Woodward, *J. Appl. Phys.*, **29** (1958), 1416.
- (6) 栗谷・赤井・阪上, 機械学会論文集, **26-161** (昭 35-1), 148.
- (7) 栗谷・恒川, 機械学会論文集, **27-179** (昭 39-7), 1113.
- (8) M. Horio & S. Onogi, *J. Appl. Phys.*, **22** (1951), 977.
- (9) D.W. Robison, *J. Sci. Inst.*, **32** (1955), 2.

討

〔質問〕 (1) 測定周波数はどの程度であるか。

(2) (3)式を適用した温度域においては結晶は存在しないのか。

(3) 第3～5図において、温度が上昇するとき縦弾性係数が低下する場合はゴム弾性と認められないにもかかわらず、この場合にも (3) 式を適用していることは妥当か。(田中久一郎)

〔回答〕 (1) 測定周波数の範囲はだいたい 550～20 c/s である。試料によってはこの範囲を多少越えたものもあった。周波数の精度はだいたい3けたまでのように思う(横河電機製, 測音1号 CR 発振器を用いた)。

(2) (3)式の適用し得る範囲では結晶は存在しないと考えている。結晶が存在すれば長鎖分子の Brownian motion が抑制されるので、ゴム弾性理論は適用できないことになる。

(3) ゴム弾性の特性は縦弾性係数が温度とともに上昇することである。第3～5図の中、空気中照射を行なった 0.48 mm 厚の試料はお説のとおりこの特性を示していない。したがって厳密に言えばこのような場合に (3) 式を適用するのは妥当でない。このこと

論

は本文 1191 ページ右欄 7 行めにも指摘しているように、他の場合と比較するために行なった仮定的なものである。したがってこれから導かれたもの(第6図の下端の曲線—●—)はむしろ破線で示すべきであった。

〔質問〕 振動リード法に関し、舌片への試験片の取付方法はいかになっているか、またその取付部が温度変化を受けた場合、振動特性に影響はないか、取付部の mass やすべりなどが l_1 および l_2 の相当長さに与える影響とともにご教示下さい(計算では l_1 および l_2 にどの数値を使ったかはっきりしない)。

(砂川 恵)

〔回答〕 付録で示した振動論的な部分は簡単に過ぎ、必要な箇所までもむしろ省略したようなことになった。舌片への試料の取付けは小さなボルトとナット(質量 0.206 g)で行なった。温度の場所的な変化は、試料や舌片を含めた振動子全体の範囲で、温度差が 1°C 以内になるように加熱コイルの巻き方を加減した。温度が常温から 160°C まで上昇しても取付部のために振動特性が変るようなことは見当らない。なお、この取付部の条件については、佐賀氏への回答とも関連があるので、それを参照されたい。

舌片の製作寸法は厚さ 0.9 mm, 幅 5.0 mm, 長さ 21.0 mm です。しかし試料取付金具 (ボルトとナット) を取付けた状態で, リードの共振周波数を測定してみると, 1050 c/s となるので, この周波数から逆に舌片の長さを算出し, 27.0 mm を得た。第10図の l_1 はこの 27.0 mm を示す。また, 試料の縦弾性係数の算定にもこの値を用いた。 l_2 は試料を舌片に取付けた場合, 舌片の下端から測った試料の長さである。これは共振周波数をだいたいそろえるために, 試料の厚さによって次のような値を取るようにした。

$$l_2 = \begin{cases} 2.45 \pm 0.02 \text{ cm} & (2.0 \text{ mm 資料}) \\ 2.00 & \text{ // } (1.0 \text{ mm //}) \\ 1.35 & \text{ // } (0.48 \text{ mm //}) \end{cases}$$

〔質問〕 放射線効果と直接関係のない問題であるが, 第10図の試料長さ l_2 は舌片の下端よりとられている。また舌片の上端 $x = -l_1$ が固定端としてとられ, $x = 0$ で一定の振幅をもつとされている。そして従来の方法, 欠点を是正するために付録の (8) 式以下を用いているわけだが, 振動法による縦弾性係数の測定値が, 鋼の場合 $2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ からかなりはずれる事実は, 一端固定の条件が容易に満足されないことによることは, 樋口教授らの研究によっても明らかである。すなわち固定の条件は実際の固定端より常に内側, 換言すれば, 長さが l_1 あるいは l_2 より実際には少し大きいということである。栗谷氏は複合振動の影響を考慮して補正項を求められたわけだが, その以前に固定端の影響 (a) l_1 の長さは実際はそれより少し大きい。 (b) 1193 ページ右欄下 1 行め以後の境界条件 (1), (3) が必ずしも成立しないこと (3) のうち特に振幅こう配が連続であるというのは疑問であると考ええる。縦弾性係数の温度依存性の結果そのもの (第5図) はそうであろうが, その測定の根本において, l_1, l_2 の長さの決定方法, 二つの継目の連続の条件についての疑問について著者の解答をお願いしたい。

(佐賀二郎)

〔回答〕 (1) l_1 の決定: 舌片の上端は黄銅のベースに, 舌片がはいる深さ 5 mm 程度のきり込みをつくり, それに舌片を入れて銀ろう付をした。しかしこのようにしても, 固定の条件を正確に満たしているとは限らない。またこのほかに試料取付金具 (0.206 g) が付加質量のように作用する。 l_1 の決定はこれらの両者のことを考慮しなければならないと思うが, このことについては砂川氏への回答と重複するので, それを参照ください。

(2) l_2 の決定: 舌片と試料は取付けの都合上約 5 mm overlap している。しかしプラスチックの E は

鋼に比べてきわめて小さいため, この overlap した部分は, 鋼製の舌片だけで構成されているものと考えて大差はないと思う。したがって, l_2 の決定は舌片の最下端から測った試料の長さをとった。また試料と舌片との継目の条件については次のように考えている。

(3) 継目の条件: 継目では試料は舌片と 5 mm 角ナットとの間にはさまれてボルト付けされている。であるから試料はいちおう舌片に対して固定された状態, したがってそのこう配も近似的に舌片のそれに等しいと考えてよいと思う。鋼製舌片を振動論的な意味で, その一端を固定することはなかなか困難なようであるが, プラスチックの場合ではそれほど困難ではないような気がする (その柔軟性のゆえに)。しかしお説のようにこの継目で振幅こう配がはたして連続しているか否かについては, 適当な決定方法がない。結局このような composite oscillator では第12図で示したような関係を測定して, 計算値と測定値が合えば, 計算に用いた仮定 (継目でこのこう配の連続性も含めて) が成立していると考えて大過はないと思う。

〔質問〕 (1) l_1 について以下の条件付でいちおう了承いたします。

(3) 継目の条件: 舌片とプラスチックとが 1 本のボルトとナットとで固定されているので, 振幅こう配が連続しているかどうかはだいぶ疑問に思う。仮定と測定値とが合えばその仮定はだいたい正しかったといえるが, 修正された式の影響と l_1, l_2 およびこう配連続の条件の影響とどちらが大きき結果にきくかこのままではわからないのではないと思う。それで l_1, l_2 の大きさあるいは, その比をいろいろに変えて実験されて, お調べになれば, その点が少しははっきりするのではないか, またストロボを使って振動を観察すれば, 継目の状態が少しははっきりしてこないか。 (佐賀二郎)

〔回答〕 (1) プラスチック試験片取付ナットの形状は薄い四角形で, その幅は舌片や試験片の幅と同じである。試験片はサンドイッチのようになり強くはさまれている。

(2) l_1 を変えることは事実上困難であるので, 第12図では l_2 のほうを種々変化して (各試験片についてそれぞれ六とおり変化して) 修正された式と実測値との対比を行なったものである。

(3) ストロボを使う方法は直接観測としては, 確かに良い方法だと思う。駆動電圧がせいぜい 10 V 程度であることと, 継目の振幅がきわめて, 小さいのでストロボを使用するためには, 100 V 程度への増幅器や顕微鏡観測装置が必要である。今のところ可急的な観察はできないが, いずれぜひ行ないたいと思う。