

223 制振のからくり : 第 2 報制振材料の機能 : 材料と力学の掛橋

長松, 昭男 / NAGAMATSU, Akio

(出版者 / Publisher)

日本機械学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

「運動と振動の制御」シンポジウム講演論文集

(巻 / Volume)

2003

(号 / Number)

8

(開始ページ / Start Page)

254

(終了ページ / End Page)

256

(発行年 / Year)

2003-10-30

223 制振のからくり

(第2報 制振材料の機能：材料と力学の掛橋)

Mechanism of Damping

(2nd Report Function of Damping Material : A Bridge between Material and Dynamics)

正 長松昭男 (法政大)

Akio NAGAMATSU, Hosei University, Kajino-cho 3-7-2, Koganei-shi, Tokyo

Damping mechanism of polymer material is introduced in this paper easily to understand for mechanical engineers. First, dynamical characteristics common to polymer materials are related. Second, mechanism of joint combination is presented which causes these characteristics. Third, physical properties of polymer in glass region and in rubber region are introduced. Forth, the reason why polymer reveals exceedingly high damping effectiveness is explained. Fifth, notice points for successive application of damping material to machines for decrease of their vibration are given.

Key Words : Damping Material, Polymer, Viscosity, Vibration, Storage Stiffness, Loss factor, Entropy

1. まえがき

制振材料を開発する材料メーカは、制振の力学的メカニズムを知らないままで、与えられる材料特性を満足する材料を試行錯誤で作っている。一方それを利用するユーザは、制振の材料学的メカニズムを知らないままで、与えられる材料を利用している。開発と利用間のこのような相互不理解が原因で、制振材料に対する過大な期待や間違った使い方をしている例がしばしば見受けられる。これを防ぎ、目的に最適な制振材料を開発すると共に、材料の性能を最大限に引き出す使い方をするためには、制振のメカニズムに関する最小限の知識を両者が共有することが、重要である。

本解説では、制振材料として最もよく利用される高分子材料が特定の条件下で高い制振性能を発揮するからくりを、制振材料のユーザである機械技術者を対象に、概念的・定性的にはあるが分かり易く説明する。

2. 高分子材料の力学的性質⁽¹⁾

高分子は、複数の原子が共有結合という方法で繋がれた低分子を基本要素とし、多数の低分子がさらに共有結合された分子量の非常に大きい(通常1万個以上)長い鎖や塊の形をした分子の総称である。

高分子材料の力学的性質は、分子量が大きいことと低分子が多数結合されていることの2つの原因により、その種類に関係なく温度によって特有の変化をする。例として、三角定規やOHP透明紙に使うポリエチレンテレフタレート(PET)について述べる。

PETは、室温では無色透明で硬い。これをガラス状態という。温度を上げ約70℃以上になると、無色透明のままでは軟らかくなる。これをゴム状態という。ガラス状態とゴム状態の間の中途半端な状態をガラス転移状態という。約100℃以上になると、軟らかいままでも白く濁ってくる。これは、非結晶状態で不規則分布する分子の鎖が熱による攪乱を受けて再配列する結果、内部全体に結晶微粒子が生まれ、光が散乱されるためである。PETのようにゴム状態で温度を上げて行くと不透明になる物を、結晶性高分子という。これに対し、どのようにしても結晶を生じさせることができないものを、無定形高分子という。約260℃以上になると、結晶構造が崩壊して再び透明になり、解けて流れる。さらに高温になると、分解して焦げだす。解け

た透明な状態から室温にまで急冷すると、透明なままで硬くなる(ガラス状態)が、除冷すると白濁して硬くなる。

制振材料のほとんどは高分子材料である。一般に制振材料の剛性は $E = E' + jE''$ のように複素弾性率で表現される。実部 E' は、通常のばね剛性のように、作用力に対して時間遅れのない応答変位を生じ、これにより材料の内部に力学的エネルギーが貯蔵されるので、これを貯蔵弾性率と呼ぶ。一方、単位虚数 j は複素平面上で90度(振動の1/4周期)の時間進みを意味する⁽²⁾から、 $F = jE''x$ は力 F が変位 x より90度進むこと、つまり変位が力より90度遅れて生ずることを表す。このように、加振力に対して振動の1/4周期だけ遅れる応答変位を生ずるこわさが E'' であり、これは力学的エネルギーの消散(損失)を伴う(本解説第1報参照)から、これを損失弾性率と呼ぶ。また、実部と虚部の比 $\eta = E''/E'$ を損失係数と呼ぶ。

上記のように高分子材料は、温度の低いほうからガラス領域、ガラス転移領域、ゴム領域、流動領域に状態が変化する(化学的架橋があると流動領域はない)。これらの領域における E' 、 E'' 、 η の大きさを図1に示す。 E'' と η は共にガラス転移領域で最も大きく、通常この領域が制振に利用される。

3. 共有結合

高分子材料の基本的性質を決める性質の一つである共有結合について、説明する。

共有結合は、原子が最外周の電子を他の原子と共有することによる原子同士の結合である。その結合の腕すなわち官能基の数は、共有する電子の数に等しく、原子の種類により決まる。例えば、炭素原子は4個の官能基を持っている。原子が複数の官能基を有する場合には、複数の相手と結合できる。相手も複数の官能基を有する場合には、それもまた別の相手と結合できる。このように多数の原子が結合して形成される高分子は、一般に共有結合による長い鎖(主鎖)を幹とし、残りの官能基による共有結合が枝(副鎖)を形成する構造になっている。

共有結合は、1個の結合に用いられる官能基の数により、単結合、二重結合、三重結合などに分けられる。共有結合の結合力は極めて強力であり、原子間距離は不変(例えば炭素原子同志の単結合では0.154nm)であるが、単結合のみで

は結合軸まわりの回転が許される。しかし一般に、単結合している原子の残りの官能基に他の原子や分子が結合している場合には、その回転が制限される。例えば図2に示すエタン分子 $\text{H}_3\text{C}-\text{CH}_3$ の場合、一方の炭素原子に結合した3個の水素原子が他方の炭素原子に結合した別の3個の水素原子と空間的に最も接近した重なり型のとき、水素原子間の反発力が最大となるため、エタン分子は自発的に水素原子同士が互いに最も離れたねじれ型の配置を取ろうとする。そして、安定したねじれ型を底とし不安定な重なり型を頂とするポテンシャルエネルギー場が形成される。制振材料のように炭素原子を主骨格とする高分子でも、原理的にはエタン分子と同様な現象が起こるが、様々な種類の側鎖が互いに異なる力で反発し合うために、主鎖回転のポテンシャルエネルギー場はもっと複雑であり、一般に頂と底の他に中間底を有する。

高分子の制振材料としての基本的性質を決めるもう一つの性質である van der Waals 引力については、本解説の第1報で説明した。

4. ガラス状態

ガラス状態は、高分子が冷凍庫内の肉のように固く凍結された状態である。ガラス状態にある結晶性高分子では、高分子の鎖が秩序正しく折り畳まれた結晶領域と無秩序に組み重なった非晶領域が混在しているが、すべてが結晶領域になることは決してない（上記PETの結晶度は透明で5%以下、白濁で20~30%）。各結晶領域の大きさは数十nm以下であり、一般に一本の高分子の長い鎖は、いくつもの結晶領域と非晶領域を貫いている。他方、無定形高分子には非晶領域しかない。ガラス状態とガラス転移状態は、非晶領域が有する本質的性質であり結晶領域は関係ないので、以下無定形高分子を対象に説明する。

固体と液体では分子間距離があまり変わらないが、固体は原子や分子が秩序正しく並ぶ結晶からなるのに対して、液体では分子が無秩序に混在する。ガラスは、見かけは固体であるが本質は液体であり、金属の規則正しい原子配列に沿った滑り面のような応力緩和機構を持たないために、塑性変形ができず、わずかなひずみで破壊する。

一般に、原子や分子は絶対零度以外では熱により励起されている。高分子材料の場合には、温度が低いときには主骨格を形成する炭素原子の熱励起は小さく、共有結合軸まわりの回転ポテンシャルエネルギー場の頂を越えることができない。そのために、共有結合軸まわりの回転は凍結され、原子は図2のようなエネルギーポテンシャルの底を中心に微細回転振動をする。

主鎖を形成する炭素原子は、両端が別の共有結合で拘束されているために、1個の原子の回転はそれに連結された原子群の移動と再構成を伴う。そのために、少なくとも数個~数十個の集団（これをセグメントと呼ぶ）内の炭素原子が互いに協調し合っって同時に動かなければ回転できず、凍結が解除されない。

このように共有結合軸まわりの回転が凍結された高分子主鎖の原子と、同様に回転が凍結された隣接高分子主鎖の原子とは、 vW 引力によるポテンシャルエネルギー場の変極点を越えて離れることができず、こちらも凍結される。

このような2種類のポテンシャルエネルギー場における、1本の主鎖内の原子間と隣接する2本の高分子主鎖間の同時凍結が、ガラス状態を作り出す。

5. ゴム状態

上記2種類の凍結が共に完全に開放された状態である。主鎖を構成する全原子は 10^{10} 回/秒程度の高速で回転し、それに伴って高分子全体が激しくのたうちまわる（この運

動をマイクロブラウン運動という）。隣接する高分子との間に、 vW 引力ポテンシャルから開放され自由に運動できる空間（自由体積）が存在する。

制振材料は、通常あまり加硫されないので化学的架橋はないとしてよく、変形に対する抵抗の主役は同一高分子あるいは他の高分子と絡み合う点（主鎖のもつれ目であり物理的架橋という）が演ずる。すなわち物理的架橋ではそれを形成する高分子間に vW 引力や水素結合によるポテンシャルエネルギー場が形成され、それによるエネルギー弾性と高分子鎖が本来有するエントロピー弾性（鎖で繋がれた全分子が互いに無関係に不規則な運動をしようとする結果、鎖が縮まり丸い団子のようなろうとするため、鎖両端の物理的架橋間の距離を縮める力）が合わさって E' を生じる。一方、このポテンシャルエネルギー場から原子を開放し絡み合いをずらすために必要な力学的エネルギー（熱エネルギーに変化し消散される）が、粘性（本解説第1報参照）すなわち E'' を生ずる。物理的架橋は、自動車のシートベルトのように、早い時間変化に対しては硬い結び目となり強く抵抗するが、ゆっくりした時間変化に対しては容易にずれ、材料の流動やクリープを起す。

6. ガラス転移

ガラス状態で温度を上げて行くと、主鎖を形成する炭素原子の励起エネルギーが次第に増加し、たまたま比較的動き易い形態を取っていたセグメント内で凍結が解除され、主鎖がポテンシャル場の頂を越えて回転できるようになる結果、そのセグメントはマイクロブラウン運動を始める。セグメント内での激しい運動の開始に伴い、その運動エネルギーに必要な熱量の吸収が始まり、材料の比熱が少し増加する。同時に、凍結が解除された主鎖が隣接する主鎖と衝突し反発する結果、 vW 引力ポテンシャル場による主鎖間の凍結からも解除され、高分子間に自由空間が生まれ、温度上昇に伴う材料の体積増加率が少し大きくなる。このように主鎖の2種類の凍結が同時に解除される現象をガラス転移といい、その開始温度をガラス転移温度 T_g という。 T_g は通常、比熱または体積増加率を測定して決められる。

T_g より温度を上げて行くと、材料内の多くの点で凍結の解除が始まると共に、それらの領域は広がる。そしてあたかも、粘く自らのたうちまわる丈夫な無数の糸（凍結が解除されたセグメントの主鎖）で連結された多くの岩（凍結されたセグメントの固まり）が、互いに押し合い圧し合い擦れ合いながら外部からの力に従って動き出し変形して行くような状態になる。このような強引な移動と変形は大量のエネルギー消費を伴うので、損失弾性率 E'' は急増する。

この移動と変形は高分子の配列構造全体の再編成を伴うので、それに要する時間だけ応答が外力より遅れる。外力が調和加振力の場合、その周期の $1/4$ がちょうどこの遅れ時間に等しいときに、エネルギー消費が最大になる。それよりも周期が短い加振力に対しては、再編成が追い付かず変形抵抗が急増してガラス領域として振る舞う。逆にそれよりも周期が長い振動に対しては、連結糸と同じ高分子からなる岩の内部も含めた再編成がスムーズに進む結果、変形抵抗が減少してゴム領域として振る舞う。

さらに温度を上げていくと、岩は糸に分解されて小さくなり、やがて消えてゴム領域に移行する。

7. 制振材料使用上の留意点

制振材料の効果を最大限に引き出すためには、次の事項に留意して使用すべきである。

1) 強制振動では、加振振動数が系の固有振動数より小さ

い場合にはこわさが、大きい場合には質量が主役を演じ、粘さが主役を演ずるのは固有振動数近傍の狭い振動数帯域に限られる。したがって、粘さを付加するタイプの制振材料は、共振振動数近傍以外ではほとんど効果がない。

- 2) 損失係数 η が金科玉条のように扱われているが、実際の振動減衰の大小は損失弾性率 E'' で決まる。損失係数 η は E'' と貯蔵弾性率 E' の比であるから、 η が大きいからといって制振効果が大きいとは限らない。
- 3) η が最大になる温度と E'' が最大になる温度は少し異なる。一般には前者で用いるのが最適とされているが、制振効果をもっとも大きいのは後者である。
- 4) 上記3)の温度は、いずれも振動数によって変わる。したがって、振動数が異なると最適な使用温度も異なる。
- 5) 制振材料の付加は、粘性の付加だけでなく質量と剛性の付加を伴い、共に制振効果に影響を与える。そして、どの特性の効果が大きいかは振動の種類や材料の使用条件によって異なる。
例えば自由振動では、こわさを抑制し、粘性の付加は発生した振動の減衰を速める。一方強制振動では、粘性の増加・付加は共振近傍の狭い周波数範囲内ではしか制振に対する効果がなく、それよりも低周波数範囲ではこわさの付加が、高周波数範囲では質量の付加が、制振の主役を演ずる。
- 6) 制振材料では、ガラス領域温度でこわさの付加が、ガラス転移温度で粘性の付加が、ゴム領域温度で質量の付加と大振幅振動に対する粘性の付加が、制振に大きく影響する。
- 7) 制振効果の大きさと有効振動数範囲の広さは互いに相反関係にあり、制振効果の大きい材料は一般に有効振動数範囲が小さい。
- 8) 制振効果の大きさと有効温度範囲の広さは互いに相反関係にあり、制振効果の大きい材料は一般に有効温度範囲が小さい。
- 9) 制振材料はエネルギー消散により機能するから、制振効果が大きいほど自己発熱も大きい。したがって、連続使用では温度が上昇し、制振性能が変化する。
- 10) 制振効果は振幅により異なる。したがって、大振幅で使用するときの制振性能は、微小振動を用いる通常の計測方法では評価できない。

8. まとめ

本解説では、主に機械技術者を対象にして、制振材料の機能について分かりやすく説明した。まず、高分子材料に共通する力学的性質を紹介した。次に、それを決定する原因の一つである共有結合について説明した。続いて、ガラス領域とゴム領域における物理的性質を述べた。そして、その中間に位置するガラス転移領域において制振性能が急増する理由を説明した。さらに、制振材料を使用する際の留意点を紹介した。

文献

- (1) 荒井健一郎他, わかりやすい高分子化学, 三共出版, 1994
- (2) 長松昭男, モード解析入門, コロナ社, 1993

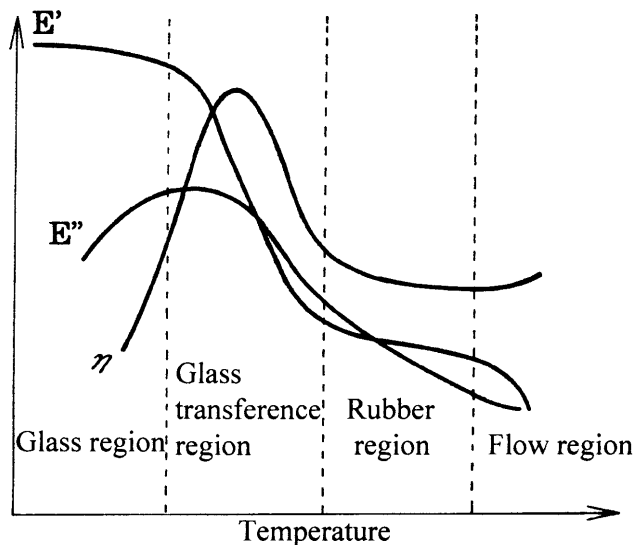


Fig1 Relation between characteristics of polymer and temperature

E' : Storage Stiffness
 E'' : Loss Stiffness
 η : Loss Factor = E'' / E'

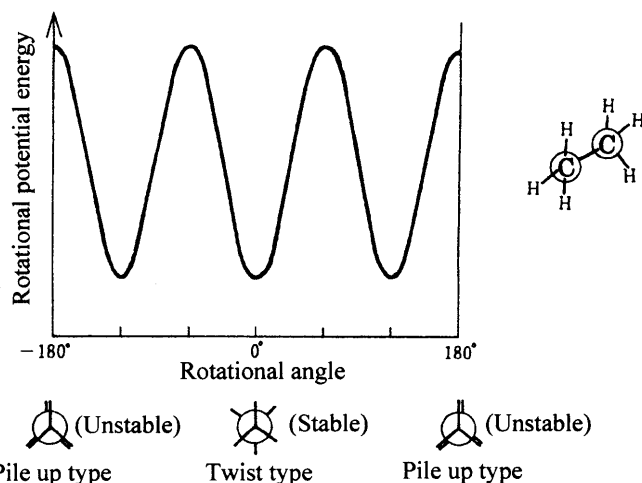


Fig2 Relation between rotational potential energy and rotational angle of ethane molecule