

第1章

衝撃応力と衝撃荷重の基礎理論

見本

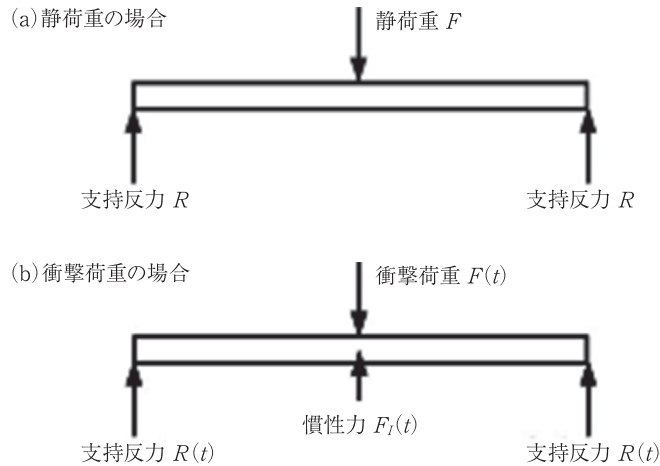


図2 はりに作用する力のつり合い

以上のように衝撃問題において、静的な変形、応力の考え方が必ずしも妥当ではないことがわかる。そこで本章は、衝撃に関する力学の基礎について説明を行う。一般的には衝撃を受ける構造物内の応力を単純な解析で求めることはかなり難しい。以下において説明のために数式が示されるが、複雑な数式の導出、**見本**専門的すぎる説明に立ち入らないようにし、衝撃応力、衝撃荷重などの衝撃現象の概念を理解することを念頭に置いて、若干正確さを欠くこともあるが平易に説明を行うものとする。このため衝撃応力、衝撃荷重については構造物が弾性変形範囲にある現象について説明を行う。塑性変形が生じるような衝撃問題は文献^{3,4,5,6}を参照いただきたい。

1. 応力波

まず、構造物が動的に変形したときの内部の応力を理解するために、最も単純な棒の引張問題を考える。図3のように、動的に変形している密度 ρ 、単位断面積の棒の微小要素の力のつり合い(あるいはニュートンの運動方程式)は次式のようになる。微小要素の両端に作用する応力 σ とともに微小要素が運動していることから慣性力を考慮しなければならない。

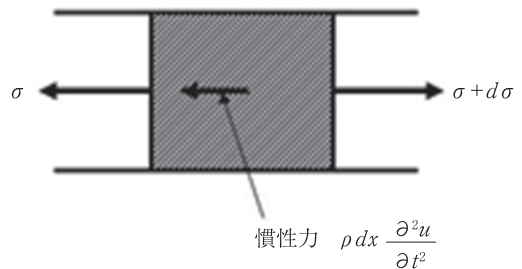


図3 棒中の力のつり合い

第2章

樹脂材料のぜい性破壊（衝撃破壊）の機構と
タフニング化

見本

第1節 固体樹脂の弾性と変形

固体材料に負荷を加えると変形する。負荷を担うことがその製品の最も重要な機能である金属等に代表される構造材料では、結晶を構成する原子は負荷がない場合、金属結合により支配される安定位置にある。負荷が加わり安定位置から変位することで、ポテンシャルエネルギーが大きくなるために反力が発生する。もちろん負荷が除かれれば安定位置に戻る。このようなポテンシャルエネルギーに支配される可逆的な変形はエネルギー弾性といわれる。長い分子鎖から構成されている高分子材料においても、結晶性高分子の結晶部分あるいは分子鎖の巨視的な熱運動が抑制されているガラス状非晶性高分子の弾性の発現は、基本的には分子鎖間のファンデルワールス力あるいは分子内の共有結合力等の相互作用に起因するエネルギー弾性により支配されている。長い分子鎖と多様な構造を持つ高分子材料のエネルギー弾性の発現様式には種々の形式がある。図1-1には非晶性ガラス状高分子のねじれ、結合角、分子間、分子内の変形等、いくつかのエネルギー弾性の発現モデルを示した。

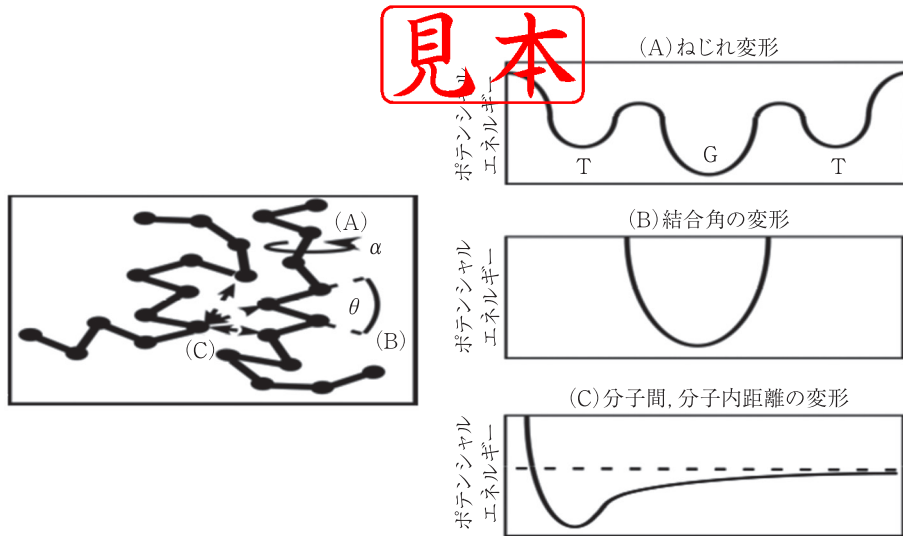


図1-1 非晶性ガラス状高分子のエネルギー弾性の発現モデル

高分子材料にはこのエネルギー弾性の他に、高分子鎖の熱運動に起因するエントロピー弾性と呼ばれる高分子特有の弾性の発現機構がある。ゴムあるいはガラス転移温度(T_g)より高い温度での結晶性高分子のラメラ結晶間にある非晶分子鎖がそのような弾性を発現する。 T_g 以上では、分子鎖が近接する分子鎖との相互作用に打ち勝って激しい熱運動を起こす。このとき

トニングが起き、真の降伏応力が低下し、塑性ひずみの集中が促進される。そのような集中した塑性ひずみの伝播が、最大主応力に対して45°の方向であれば体積変形は起こらない。その結果としてシアバンドの形成が観察される。配向硬化により降伏応力が増加し、図2-15の切り欠き先端から0.29～1.12 mmの位置の切片の写真で示すように、それが負荷応力と釣り合うと塑性ひずみの増加は停止する。ナノボイドの形成をともなうと推察されるPCの塑性領域では、伸張によるボイドの拡張はほとんど進行しないと推察され、白化は観察されない。

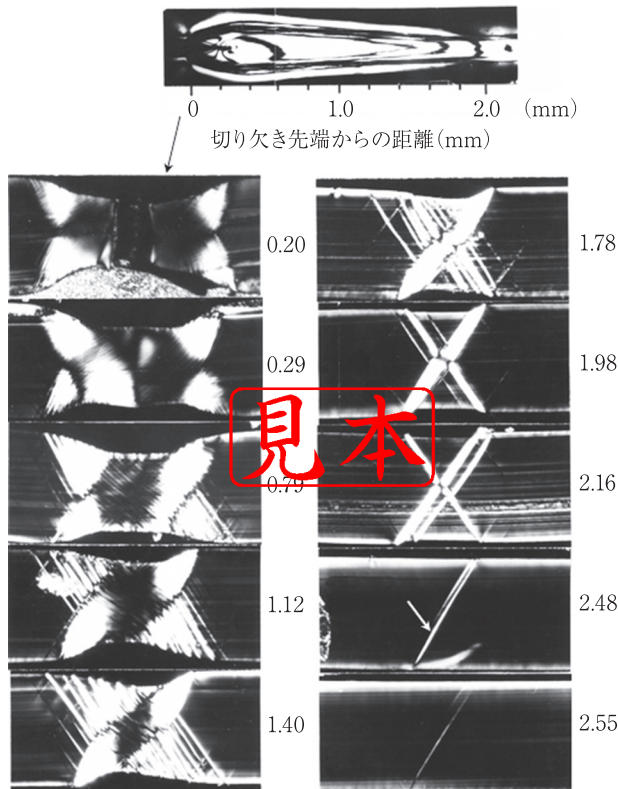


図2-15 切り欠きを導入したPCフィルムにおいて、一軸引張試験によって切り欠き先端にソフトニングにより形成されたシアバンドから構成される塑性領域

分子構造とソフトニングの強さの関係の検討は数少ない。図2-16にPC, PMMA, PLAの平面ひずみ圧縮試験による真応力-ひずみ曲線を示す。PLAは非常に強いソフトニングを示し、その後のひずみの増加により顕著な配向硬化を示す。一方、PMMAはソフトニングをほとんど起こさない。顕著なソフトニングを示すPLAは一軸引張試験では塑性変形の開始直後に不安定な局所変形であるネッキングを形成し、そのときの塑性ひずみの速度は降伏の開始までに

第5節 プラスチックのタフニング

樹脂製品のぜい性破壊はひずみの拘束に由来する応力集中により、製品に働く応力がボイドを含む局所的な配向組織であるクレイズのフィブリル強度を超えることによって始まる。このようなぜい性破壊が始まるまでの変形を大きくする、言い換えるとタフネスを大きくするためには、クレイズの強度を改善するか、製品に生じる最大応力を可能な限り大きな変形までフィブリル強度以下に調整することである。フィブリル強度の改善には、分子構造を分子鎖間の相互作用を高める方向に改善する必要がある。また、応力集中を小さくするにはその原因であるひずみの拘束を緩和する構造設計が必要となる。

1. 樹脂の分子構造の制御によるタフニング

1.1 高い分子量

樹脂の強度と分子量の関係はNielsen⁵³⁾によって整理されているが、その破壊機構のクレイズ強度からの解説は数少ない。クレイズは構成する、配向した分子鎖からなるフィブリルの破断は、分子鎖間の絡み合いが解け相互作用を失うことによって生じる。分子鎖の長さを大きくして分子鎖間の相互作用を改善すれば、その強度は大きくなるはずである。分子量は高分子材料の粘度と密接に関係する重量平均分子量によって表示されるのが一般的である。一方、分子鎖の長さに対応するのは数平均分子量である。クレイズの強度には数平均分子量が本質的に関与することを解説する。

1.1.1 非晶性ガラス状高分子

非晶性ガラス状高分子の欠陥による破壊に対する抵抗であるタフネスは平均分子量、正確には数平均分子量の増加によって改善することができる。図5-1に分子量の異なるPCのタフネスをU字型切り欠き試験片の三点曲げ試験における変位-曲げモーメント曲線によって評価した結果を示す³⁾。試験温度は23℃、曲げ速度は2 mm/minである。図5-2は破壊の直前あるいは全面降伏を起こしたときの変位で変形を固定した試料の切片の偏光顕微鏡写真である。分子量が低いときには塑性領域の先端からクレイズが形成され、そこからぜい性的に破壊する。分子量が増加すると明らかにクレイズが形成されるまでに塑性領域は拡大する。分子量がさらにある限界の大きさを超えて増加すると、塑性領域の先端からのクレイズ形成は抑制され、全面降伏が導かれることがわかる。非晶性ガラス状高分子材料の切り欠き先端の応力集中の大き

第3章

高分子材料開発による
耐衝撃性向上への取り組み

見本

さらに興味深い結果を、図4に示す。自動車部品に広く用いられているエラストマーのEPRをブレンドしたブロックPPにCaCO₃(一次粒子径0.15 μm)を充填したコンポジットの衝撃強度の温度依存性を示している¹⁾。CaCO₃充填量増加とともにコンポジットの衝撃強度は向上し、延性-脆性の遷移温度が低温側にシフトしている。すなわち、コンポジットの低温衝撃強度の改善にもCaCO₃充填が有効であることを示している。

PPの衝撃強度改善に有効なフィラーは、球状あるいは不定形で粒径がサブμm以下のものである。フィラーの分散状

態と界面構造はどのようなものが衝撃強度を改善するのであろうか。図5に平均粒子径0.9 μmのCaCO₃を20 mass%充填したPPの液体窒素下での破断面SEM観察写真を示す^{2,4,5)}。オレイン酸などの脂肪酸でCaCO₃を表面処理しない場合には、数十μm以上の凝集塊が存在している。一方、脂肪酸で処理したCaCO₃ではPPマトリックス中にCaCO₃粒子が均一に分散しており、破断面SEM観察においてCaCO₃の結晶が明瞭に観察されることから、フィラー/PPの界面で破断されていることがわかる。マレイン酸変性PP(MAh-PP)で表面処理したCaCO₃をPPに充填した場合は、破断面はポリマー相(CaCO₃がPP内部に埋まった状態)である。PPとCaCO₃粒子の界面は接着していると考えられる。未処理CaCO₃のように数十μm以上のフィラー凝集塊が存在している場合、そのコンポジットの衝撃強度はPPよりも低い値となる。図6にオレイン酸、MAh-PPで表面処理したCaCO₃をPPに充填したコンポジットの衝撃強度と

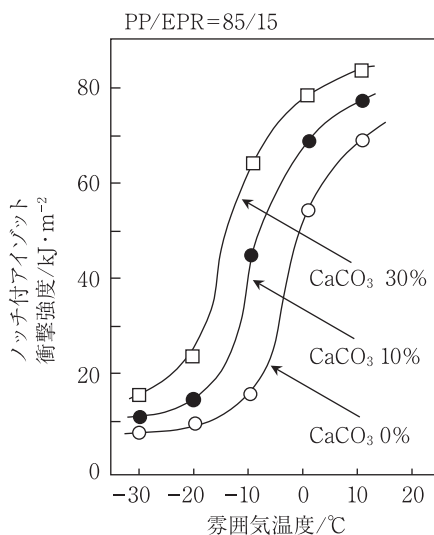


図4 EPRブレンドPPの衝撃強度に及ぼすCaCO₃(平均粒子径0.15 μm)添加効果

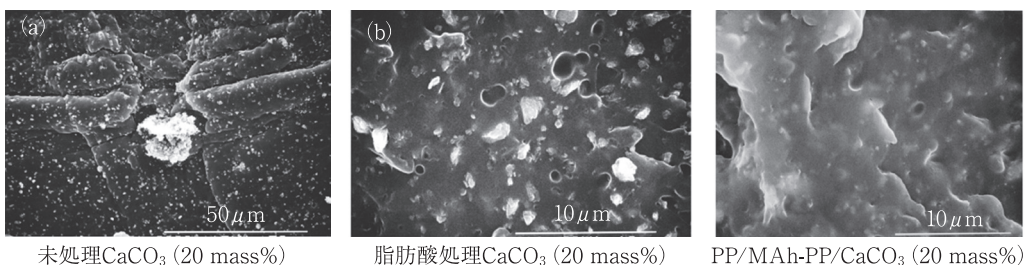


図5 平均粒子径0.9 μm炭酸カルシウム/PPの破断面SEM写真

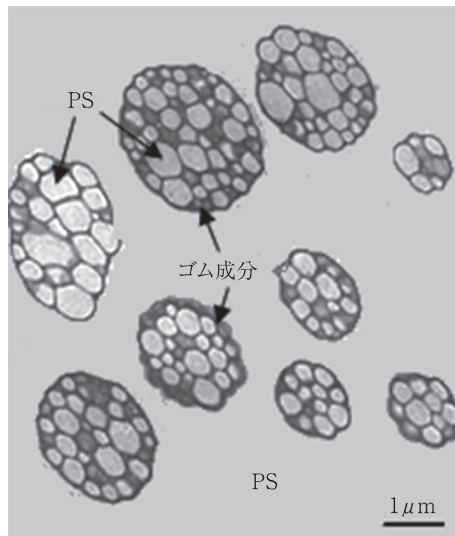


図1 HIPSのサラミ構造
白っぽい部分がPSで黒っぽい部分がゴム成分

HIPSのサラミ構造は、ポリブタジエン(PB)等のゴム成分をスチレンモノマー(St)中に溶解し、スチレン成分をラジカル重合することで得られる。その際にPSがグラフト化されたPB鎖や、PB鎖同士がPSにより架橋された構造体が形成される。スチレンの重合初期にはPB/St溶液中にPSリッチ相が相分離して図2(b)に示すような海島構造が形成される。その後、重合が進みPS成分の量が増えてくると相反転が起こり、図2(c)に示すようにPSリッチ相が島相から海相へと変わる。そして、島相であるPB/St溶液の中でさらにPSが生成し、島相の中にさらにPSの島相ができ、図2(d)のサラミ構造となる。ただし、(c)と(d)の過程は独立ではなく、同時進行あるいは前後して起こっている可能性が高い。図3に1つのサラミ状粒子の詳細な構造を模式的に示す。このサラミ粒子は架橋構造やグラフト構造を含んでおり、ガラス転

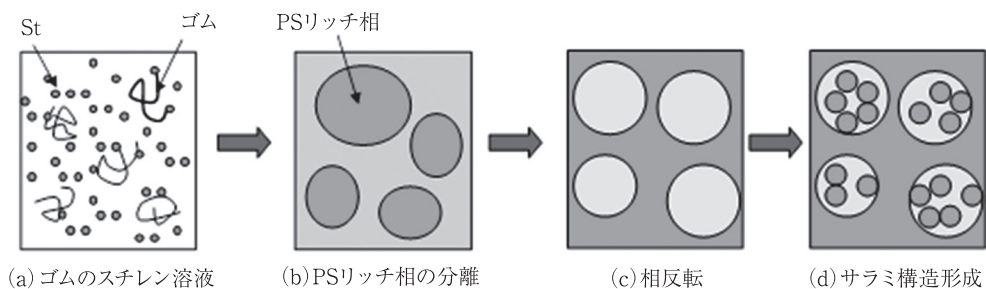


図2 HIPSの構造形成過程(カラーの図は巻頭ページに掲載)

表1 ガラスと樹脂の物性比較

	単位	ガラス	PC	PMMA
密度		2.5	1.20	1.19
ガラス転移温度	℃	—	145	107
光線透過率	%	90~91	87~89	92~93
屈折率		1.52	1.59	1.49
屈折率温度依存性	℃ ⁻¹	2.0×10 ⁻⁶	1.2×10 ⁻⁴	1.1×10 ⁻⁴
アッペ数		21~83	31	57~58
アイゾット衝撃強さ	kgf cm/cm	—	80~100	2.2~2.8
ビッカース硬度	N/mm ²	5,374	127	196
ロックウェル硬度	(M)	—	70	80~100
鉛筆硬度		9H	2B	2H
熱変形温度 ¹⁾	℃	500~720	138~142	100
使用温度帯	℃	最高700	-40~125	-60~80
弾性率	GPa	72	2.1~2.5	3.1
飽和吸水率	%	—	0.4	2.0
線膨張係数	×10 ⁻⁶ /℃	8.5	90	60~70
熱伝導率	W/(mK)	1	0.2	0.16~0.24
標準価格(平板)	ガラス=1	1	2.5~3.5	2~3

1) 18.5 kgf/cm²

脂を凌駕する一方、軽量性、熱伝導性では樹脂が優れていることが理解できよう。

PMMAとPCを比較した場合、PMMAの最大の特長は透明性と耐候性である。PMMAの優れた透明性は、サイズが異なるメチル基とカルボキシメチル基を有する立体的に不規則な構造に由来し、耐候性は酸化反応を阻害するα位のメチル基に由来している。PMMAが“プラスチックの女王”や“有機ガラス”といわれるのも、多くの用途がこの二つの特長を活かしたものであるためである。また、PMMAはPCよりも硬度が高いために耐スクラッチ性が優れていることも重要な特長である。さらに、研磨による表面の修復が可能であることもユニークな特長といえる。その一方、PMMAは耐衝撃性、難燃性、耐熱性の点でPCより劣っている。PCに導入されている芳香族環(ビスフェノールA骨格)は結晶性の阻害、難燃性向上、耐熱性付与という点では寄与しているが、耐候性という点では不利に作用する。PMMAとPCは共に透明樹脂であるが、これらの特徴を活かした用途への住み分けが行われているといえる。