

# 1. NOVADURAN™について

## 1.1 NOVADURAN™の特徴

NOVADURAN™ は、三菱ケミカルが製造・販売するポリブチレンテレフタレート(PBT)樹脂の商品名である。PBT樹脂は、テレフタル酸(TPA)またはジメチルテレフタレート(DMT)と1,4-ブタンジオール(1,4-BG)を重縮合させて得られるポリエステル樹脂で、以下のような特徴を有している。

- (1) 機械的特性が優れている。
- (2) 耐熱性が優れている。
- (3) 結晶化速度が速く、流動性も良好で、成形性に優れている。
- (4) 吸水率が非常に小さく、寸法安定性が良好である。
- (5) 表面光沢に優れ、着色性も良好である。
- (6) 耐油性、耐溶剤性に優れ、ほとんどの薬品に侵されない。
- (7) 電気的特性に優れている。
- (8) 摩擦・摩耗特性に優れている。
- (9) 優れた難燃グレード供給が可能である。

NOVADURAN™には、非強化、GF 強化、難燃等の各標準グレードの他に、低ガスタイプ、耐加水分解タイプ、低反りタイプ等、種々のグレードがあり、用途に応じた最適なグレードの選択が可能である。

## 2. 物理的性質

### 2.1 分子量と溶液粘度

高分子の分子量は一般に、ある幅の分布を持っているため、通常はその平均値を表す平均分子量で代表される。平均分子量は測定方法によっていくつかの種類が存在する。

- |                 |                 |
|-----------------|-----------------|
| (1) 数平均分子量(Mn)  | : 浸透圧測定法、末端基定量法 |
| (2) 重量平均分子量(Mw) | : 光散乱法、超遠心法     |
| (3) 粘度平均分子量(Mv) | : 粘度法           |

各平均分子量の間には一般に、 $M_n < M_v < M_w$  の関係がある。

PBTの平均分子量測定は粘度法によることが多い。溶液粘度については、固有粘度 $[\eta]$ と分子量 $M$ との間に、 $[\eta] = K \cdot M^\alpha$  なる関係が知られており、溶液粘度を測定することによりPBTの平均分子量を求めることができる。例えば、30℃におけるフェノール/テトラクロロエタン(1/1)溶媒中の溶液粘度の場合、 $K = 4.3 \times 10^{-4}$ 、 $\alpha = 0.76$  という値が報告されている。

### 2.2 比重および結晶性

PBTの比重は結晶相と非晶相で異なり、いくつかの値が報告されている。代表的な値は以下の通りである。

結晶相の比重	1.40 g/cm <sup>3</sup>
非晶相の比重	1.28 g/cm <sup>3</sup>
一般成形品の比重	1.31 g/cm <sup>3</sup>

成形品の比重は結晶化度によって異なるが、PBTの結晶化度は概ね15～30%程度である。一般的な射出成形品の比重は、1.31g/cm<sup>3</sup>程度とされており、この場合の結晶化度は28%となる。結晶化度は成形条件等の影響を受け、低い金型温度でハイサイクル成形した場合には急冷されるため結晶化度は低くなり、逆にゆっくり冷却された場合には結晶化度は高くなる。また、成形後に高温でアニールを行うと再結晶化が進み、結晶化度が增大する。

### 2.3 熔融粘度

PBTは比較的成形時の流動性が良い樹脂である。PBTの熔融状態における粘度または流動性は、流速(せん断速度)や圧力(せん断応力)に依存して変化する。熔融粘度はキャピラリーレオメータを用いて測定することができる。この測定法では、特定の流出速度(せん断速度)における応力を測定し、せん断速度や温度を変えることで、種々の条件における粘度曲線(フローカーブ)を得ることができる。NOVADURAN™の代表的なフローカーブは以下のようなになる(図2-1、図2-2)。

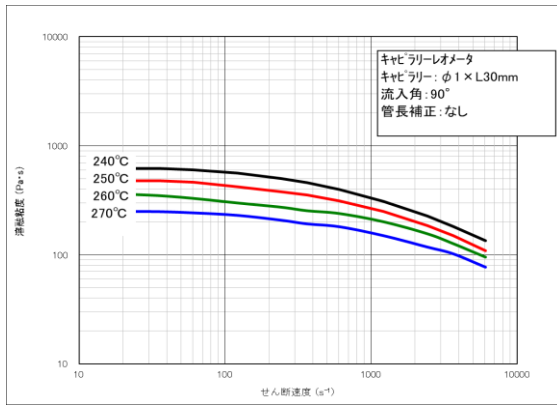


図 2-1 5010R5 のフローカーブ

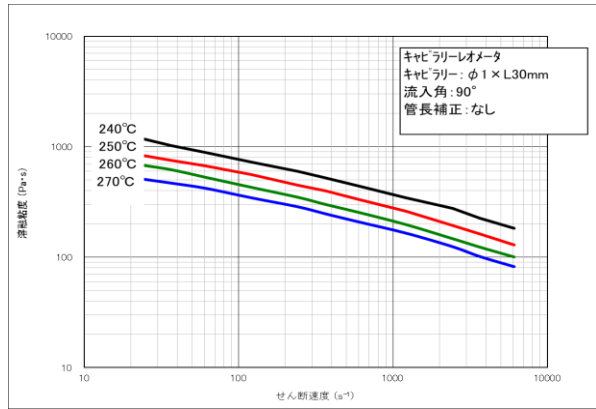


図 2-2 5010G30 のフローカーブ

## 2.4 吸水・吸湿率

PBT は非常に吸水率の低い樹脂で、大気中の平衡吸水率は 0.2%程度である。ただし吸水状態で高温に曝されると、水分が微量であっても加水分解により分子量が低下し物性が低下するため、成形前には水分量が 0.02%以下になるまで乾燥を行う必要がある。機能部品等の場合は、水分量 0.01%以下まで乾燥することが望ましい。

図 2-3 に NOVADURAN™の吸水曲線、図 2-4 に両対数プロットしたものを示す。吸水率と浸漬時間を両対数プロットすると、概ね直線に近い関係が得られる。図 2-5、図 2-6 に各種条件下での吸水曲線、および吸水率と寸法変化の関係を示す。NOVADURAN™の吸水率は非常に低く、吸水による寸法変化も極めて小さいことがわかる。以下に他樹脂との吸水率比較を示す。ただし、この吸水率の測定方法は必ずしも吸水率ゼロを基準としていないため、これら吸水させたものについてカール・フィッシャー法等で水分率を測定すると、以下の数値よりもやや大きくなる場合がある。

樹脂	吸水率 (%)
PP	< 0.01
PE	0.04~0.08
PS	0.03~0.04
ABS	0.2
PMMA	0.2~0.4
<b>PBT</b>	<b>0.1</b>
PA	1.5~2.3
POM	0.4
PC	0.2
m-PPE	< 0.1

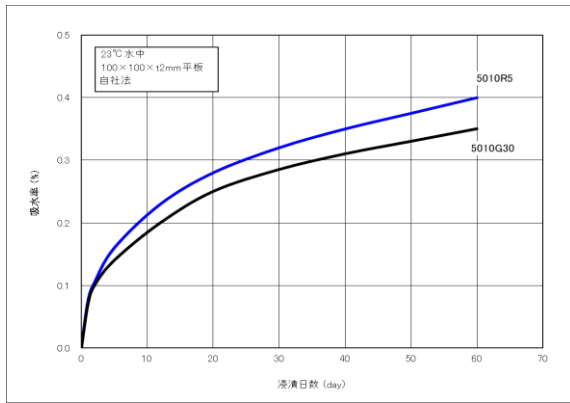


図 2-3 各グレードの吸水曲線

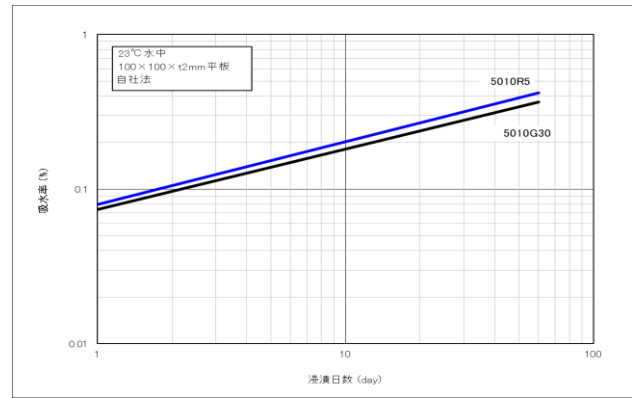


図 2-4 各グレードの吸水曲線(両対数プロット)

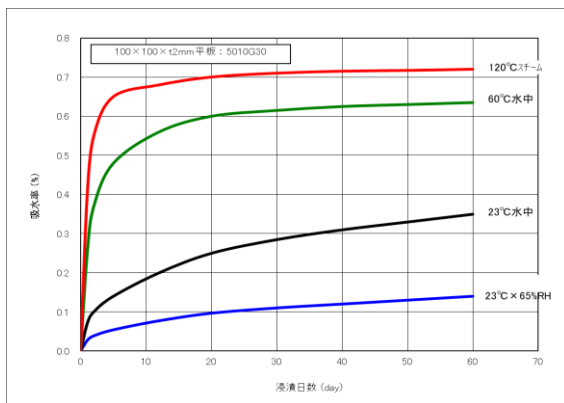


図 2-5 各種条件下での吸水曲線

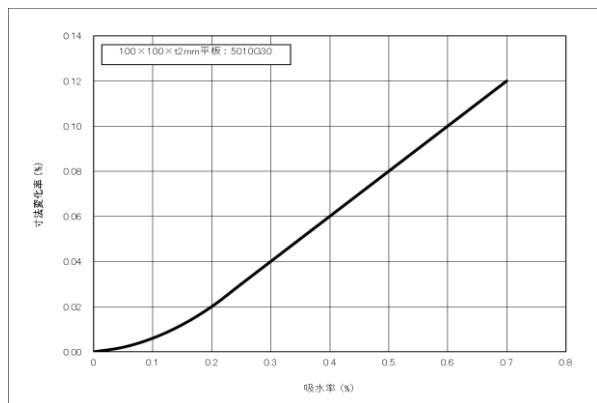


図 2-6 吸水率と寸法変化

### 3. 機械的性質

#### 3.1 引張強度

引張強度は機械的特性の中で、最も基本となる重要な特性である。引張試験で得られる応力-ひずみ曲線においては、材料によって変形パターンが異なると違った曲線を呈する。

図 3-1 は強化 PBT に見られる代表的な引張応力-ひずみ曲線の形状である。破壊までのひずみが比較的小さく、直線的に立ち上がってそのまま破断する脆性破壊の形態を示す。一方、図 3-2 は非強化 PBT に見られる代表的な引張応力-ひずみ曲線の形状である。破壊までのひずみが比較的大きく、延性破壊の形態を示す。降伏点を過ぎた後にネッキング現象により断面収縮を起こすが、くびれの伝播終了後に再び応力が立ち上がり、ついには脆性破壊に至る。引張り強さは以下の式で算出される。

$$\text{引張応力 } \sigma = P/A \quad P : \text{破壊または降伏荷重}, A : \text{試験片の断面積}$$

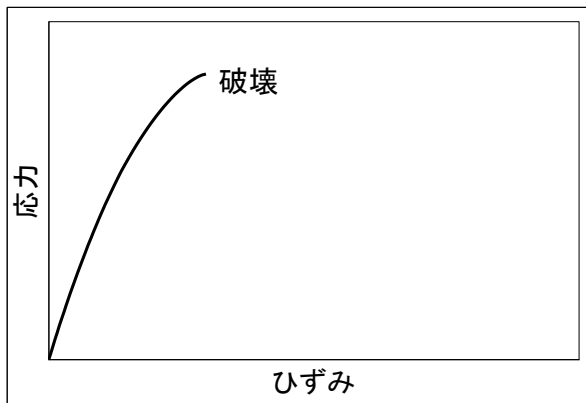


図 3-1 強化 PBT の引張応力-ひずみ曲線例

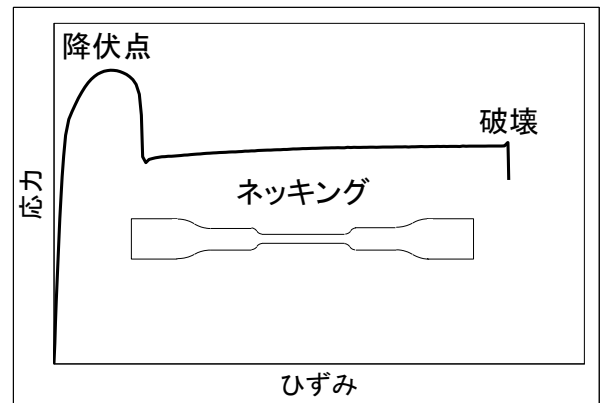


図 3-2 非強化 PBT の引張応力-ひずみ曲線例

引張強度には温度依存性がある。高温では強度が低下してひずみが増加する(柔らかくなる)傾向を示し、反対に低温では強度が向上してひずみが小さくなる(硬くなる)傾向を示す。NOVADURAN™の代表的なグレードについて、引張応力-ひずみ曲線を図 3-3～図 3-5 に、引張特性の温度依存性を図 3-6 に示す。

一般の成形品にはウェルド部を生じることが多く、ウェルド部においては強度が低下することがある。図 3-7 に PBT のウェルド強さの温度依存性を示す。一般に GF 強化 PBT では、ウェルド部で GF 配向の乱れ等が生じるため強度が低下する。非強化 PBT では強度低下は小さいが、成形条件や成形品形状によってウェルド部に十分な圧力がかからない場合等には、ウェルド強度が低下する場合もある。

また、樹脂の流動方向の異方性によっても強度に違いが生じる。PBT の引張強さの場合、流動方向に直角な方向(TD 方向)と平行な方向(MD 方向)の異方比(TD/MD 比)は 100%を下回り、TD 方向の強度が低くなる傾向がある。非強化 PBT では比較的異方比は 100%に近い値となるが、GF 強化 PBT では GF の補強効果に違いがあるため、異方比は 50～60%程度となる(図 3-8)。

実製品では前述のようなウェルド部や流動配向の影響による強度低下に注意して設計する必要がある。

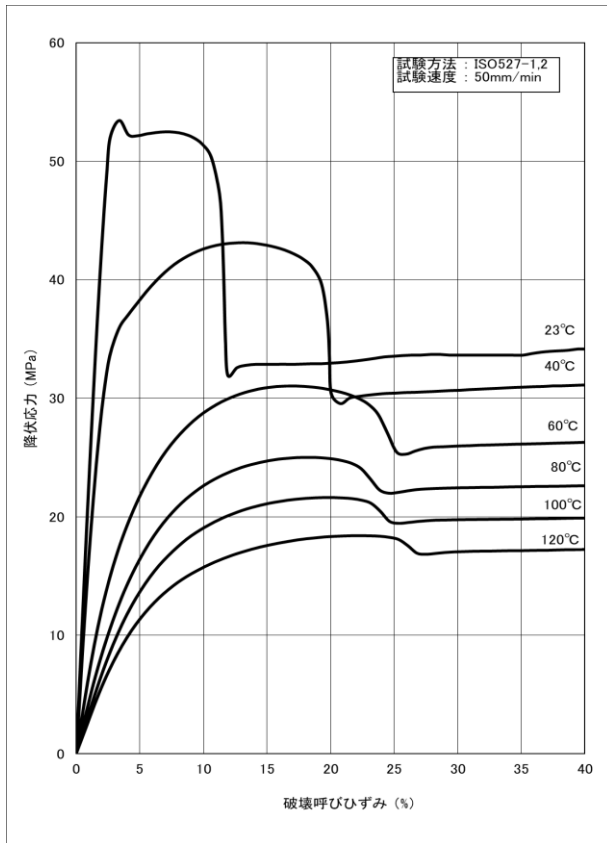


図 3-3 5010R5 の降伏応力-ひずみ曲線

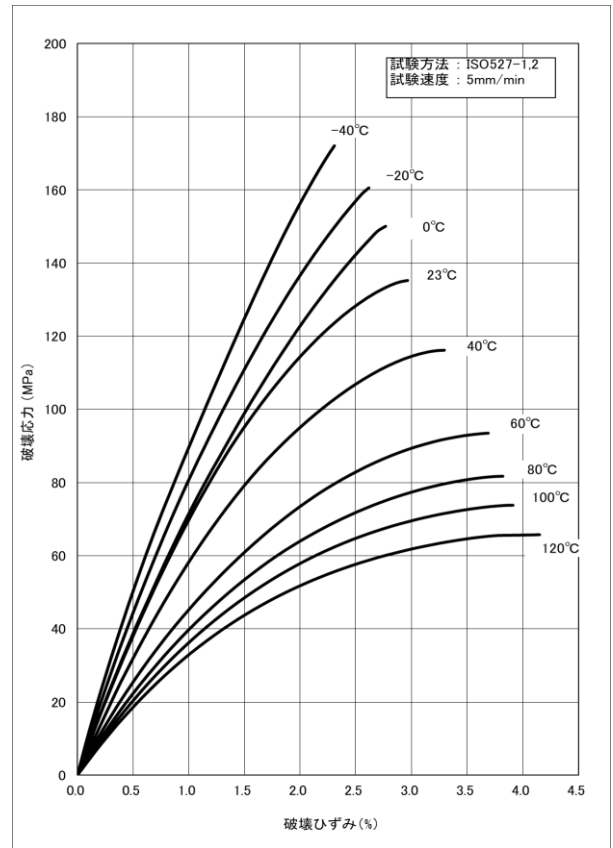


図 3-4 5010G30 の破壊応力-ひずみ曲線

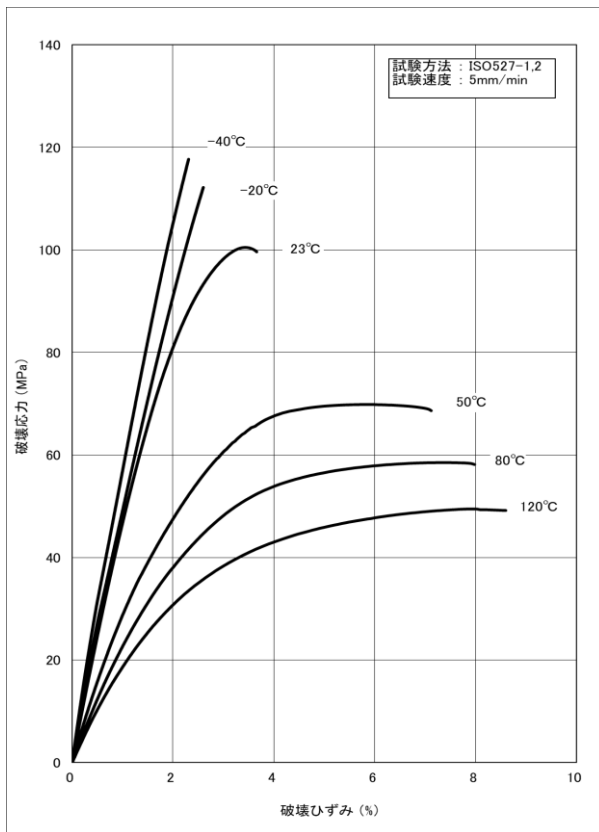


図 3-5 5010G15 の破壊応力-ひずみ曲線

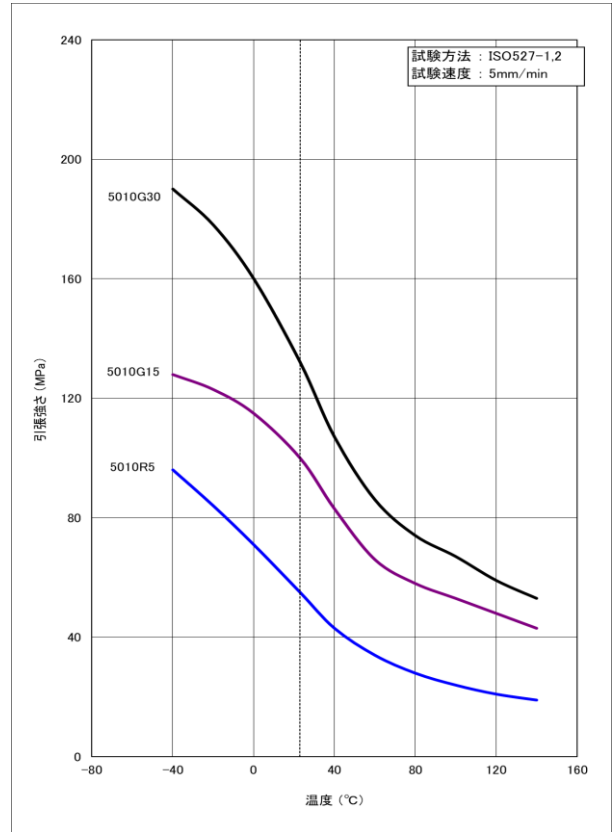


図 3-6 引張強さの温度依存性

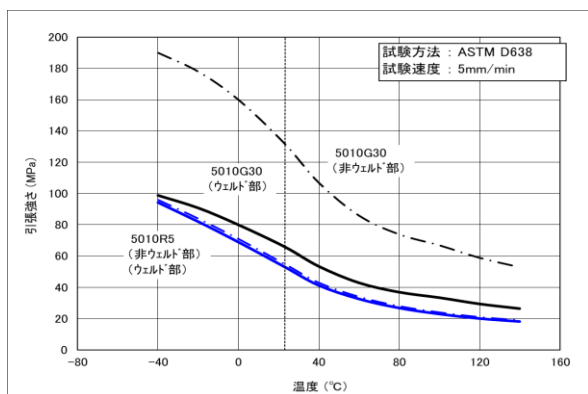


図 3-7 ウェルド強さの温度依存性

銘柄	種類	グレード	引張強さ (MPa)		異方性 (%)
			MD方向	TD方向	TD/MD比
NOVADURAN™	非強化PBT	5010R5	61	56	92
	強化PBT	5010G30	106	59	56

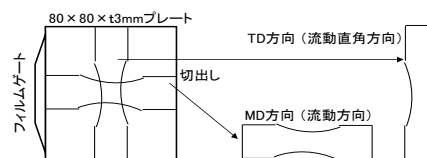


図 3-8 引張強さの異方性

## 3.2 曲げ強度

曲げ強度の試験方法には3点曲げ法と4点曲げ法があるが、通常は3点曲げ法で測定される。たわみの小さい場合の曲げ強さは以下の式で算出される。

$$\text{曲げ応力 } \sigma = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

P : 最大荷重, L : 支点間距離  
b : 試験片の幅, h : 試験片の厚み

PBT の曲げ応力-ひずみ曲線は、引張試験の場合と類似の傾向を示すが、引張試験で見られたネッキング現象は曲げの場合には見られない。曲げ特性も引張特性と同様に温度依存性がある。また曲げ弾性率は、曲げ応力-ひずみ曲線の初期直線部の勾配から求められ、材料の剛性を示す指標として使用される。NOVADURAN™の代表的なグレードについて、曲げ応力-ひずみ曲線を図 3-9～図 3-11 に、曲げ特性の温度依存性を図 3-12、図 3-13 に示す。

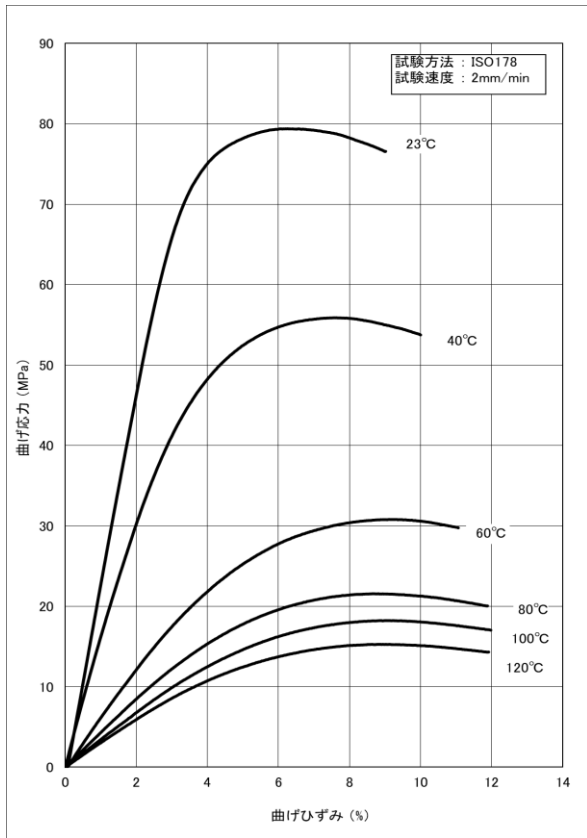


図 3-9 5010R5 の曲げ応力-ひずみ曲線

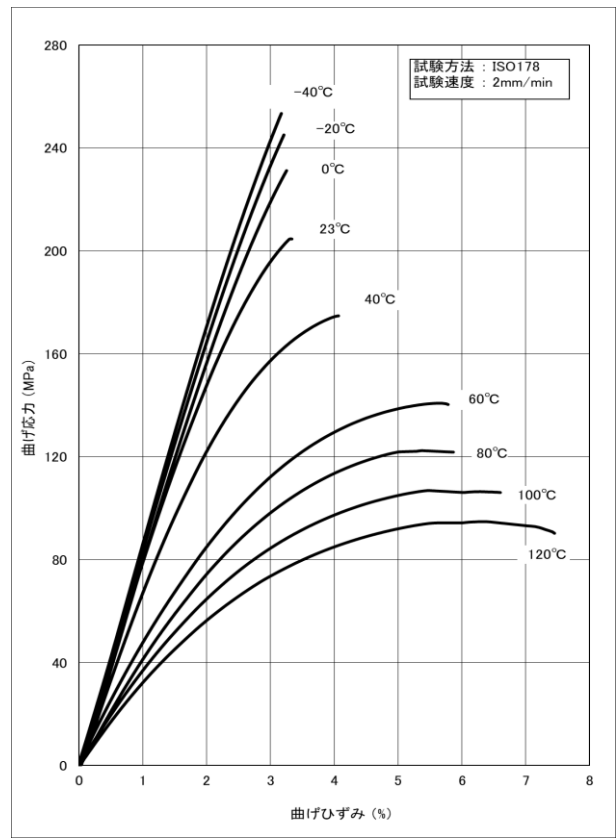


図 3-10 5010G30 の曲げ応力-ひずみ曲線

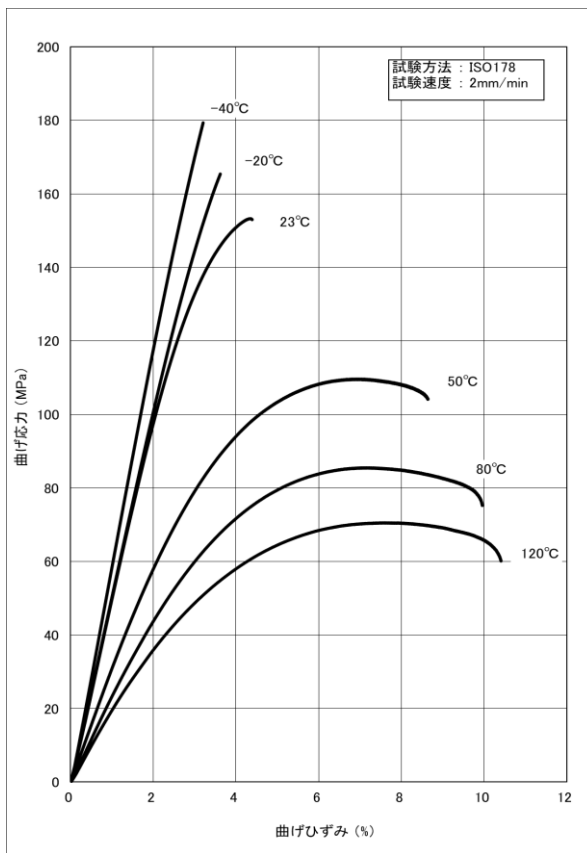


図 3-11 5010G15 の曲げ応力-ひずみ曲線

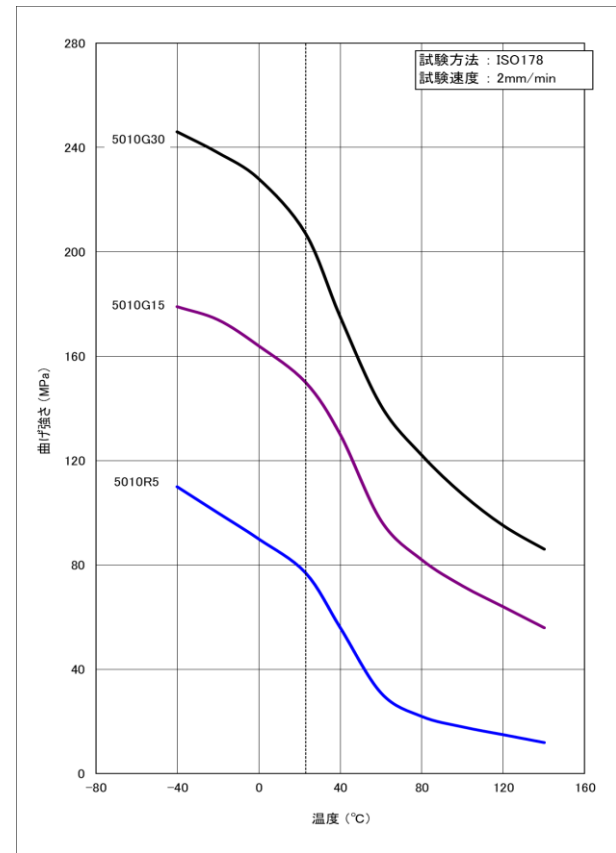


図 3-12 曲げ強さの温度依存性



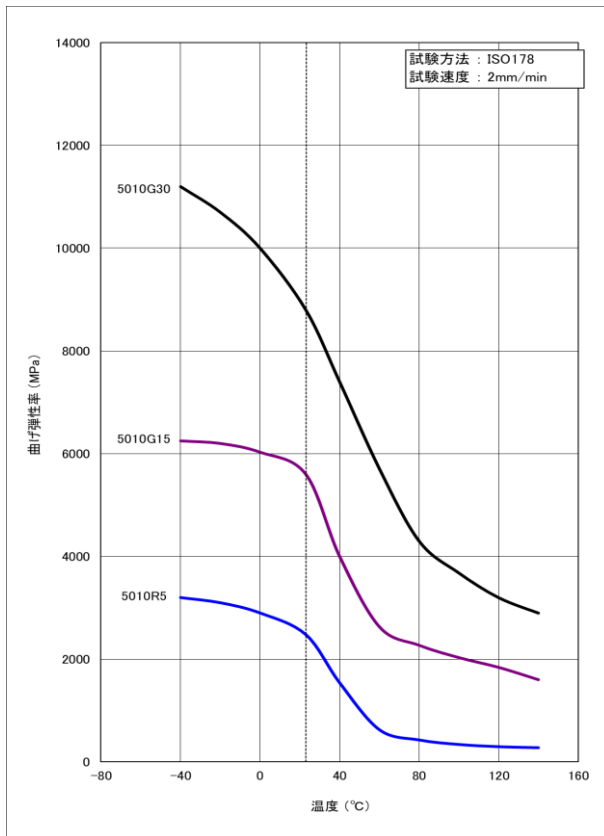


図 3-13 曲げ弾性率の温度依存性

### 3.3 圧縮強度

圧縮は引張と荷重方向が逆になるため、圧縮強さは引張の場合と同様に以下の式で求められる。圧縮試験における応力-ひずみ曲線を図 3-14、圧縮強さの温度依存性を図 3-15 に示す。

$$\text{圧縮応力 } \sigma = P/A$$

P : 破壊または降伏荷重

A : 試験片の断面積

### 3.4 せん断強度

成形品等をパンチで打ち抜いたり、切断したりする際に要する力をせん断力という。せん断強度の測定は、平板状試験片の中央部から円板を打ち抜く方法等で測定する。せん断強さは以下の式で求められる。せん断強さの温度依存性を図 3-16 に示す。

$$\text{せん断応力 } \sigma = \frac{P}{\pi \cdot D \cdot h}$$

P : 最大荷重

D : 打ち抜き円板の直径

h : 試験片の厚み

なお、せん断弾性率(横弾性係数)G と引張弾性率(縦弾性係数)E との関係は、ポアソン比  $\nu$  (PBT の場合 0.35~0.40 程度)を用いて以下のように表される。

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

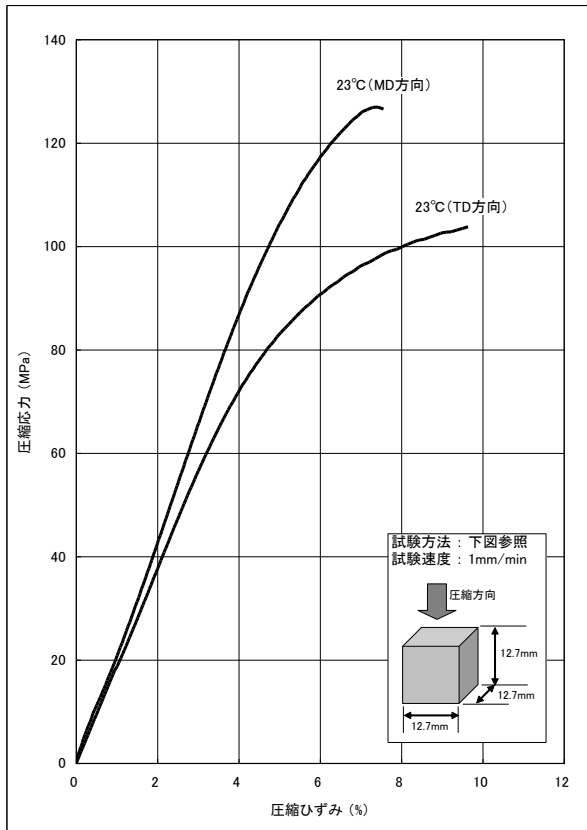


図 3-14 5010G30 の圧縮応力-ひずみ曲線

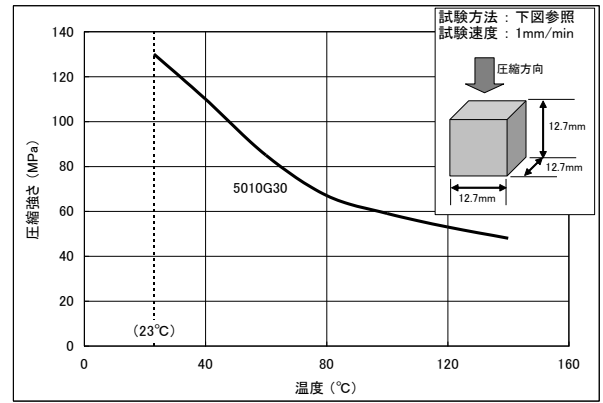


図 3-15 圧縮強さの温度依存性

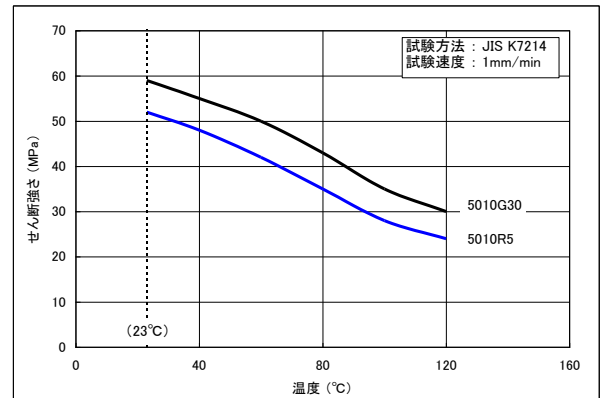


図 3-16 せん断強さの温度依存性

### 3.5 衝撃強度

衝撃強度は高速変形における材料の強度を表す。金属の場合に比べると、プラスチックでは耐衝撃性が問題となることが多い。代表的な衝撃試験方法としては以下のような方法があるが、通常はアイゾット衝撃試験またはシャルピー衝撃試験の測定値を参考とすることが多い。

- (1) 振り子の運動エネルギーによる衝撃試験 : アイゾット衝撃試験、シャルピー衝撃試験
- (2) 落体の運動エネルギーによる衝撃試験 : 落錘衝撃試験、落球衝撃試験
- (3) 高速変形による衝撃試験 : 引張衝撃試験

成形品にノッチ等のシャープコーナーがあると、衝撃を受けた際に応力が集中して破壊起点となり、破壊が起こりやすくなる。一般に衝撃強度は、ノッチの角度やコーナー部の R に対する依存性(ノッチ感度)が見られるため、成形品の耐衝撃性を高めるためにはコーナー部に R を取ることが重要となる。PBT の衝撃強さの温度依存性とノッチ R 依存性を図 3-17、図 3-18 に示す。

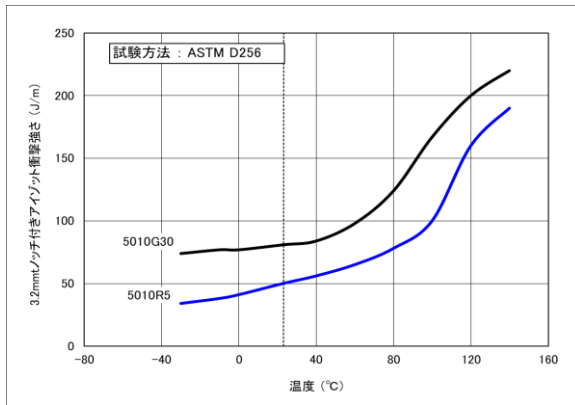


図 3-17 衝撃強さの温度依存性

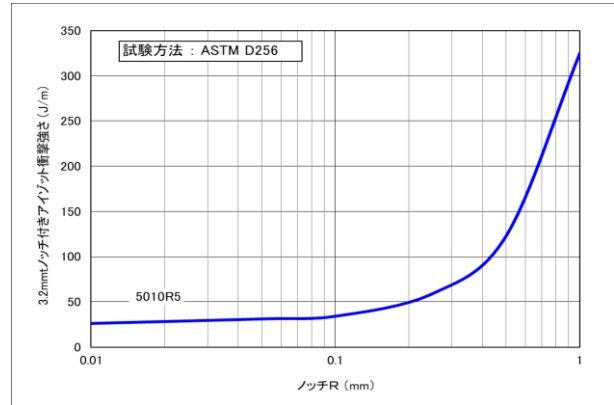


図 3-18 衝撃強さのノッチ R 依存性

### 3.6 強度に対する GF 含有量の影響

PBTはGF強化によって強度や耐熱性が大幅に向上する。強度はGF含有量に応じて向上するが、含有量が多くなるとその向上度合いは鈍くなる。一方、弾性率はほぼGF量に応じて向上する。耐熱性の指標となる荷重たわみ温度は、GF量に応じて急激に向上し、GF15%以上では高いレベルを保持する。図 3-19～図 3-22 に静的強さおよび衝撃強さ、弾性率、荷重たわみ温度のGF含有量依存性を示す。

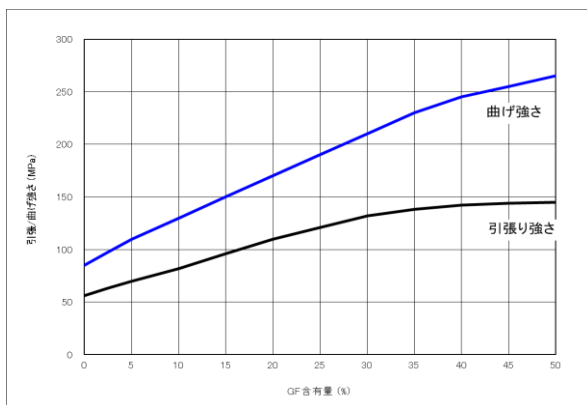


図 3-19 静的強さの GF 含有量依存性

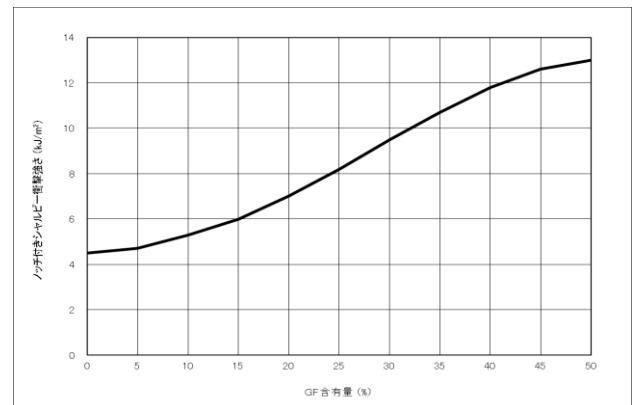


図 3-20 衝撃強さの GF 含有量依存性

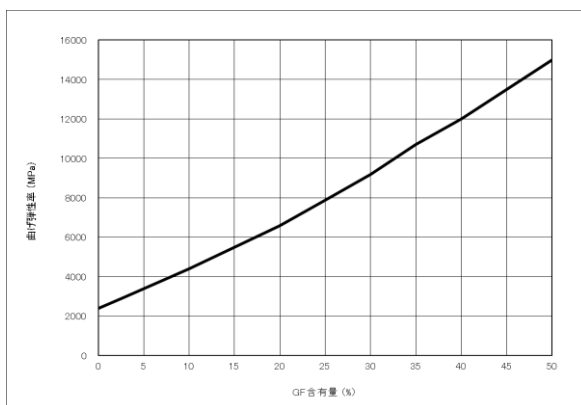


図 3-21 弾性率の GF 含有量依存性

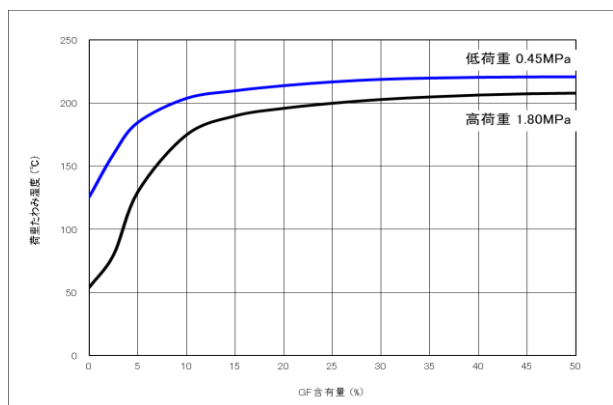


図 3-22 荷重たわみ温度の GF 含有量依存性

### 3.7 耐疲労特性

繰り返し荷重が加わる部品は、樹脂の疲労劣化が進むため、樹脂の破壊応力以下の応力で破壊する場合があります。繰り返し荷重が加わる部品設計では、疲労強度を考慮することが必要となる。図 3-23、図 3-24 に NOVADURAN™の曲げ疲労特性とその温度依存性を示す。繰り返し応力負荷のサイクル数が多くなると、静的な曲げ強さに対して半分以下の応力で破壊することがわかる。

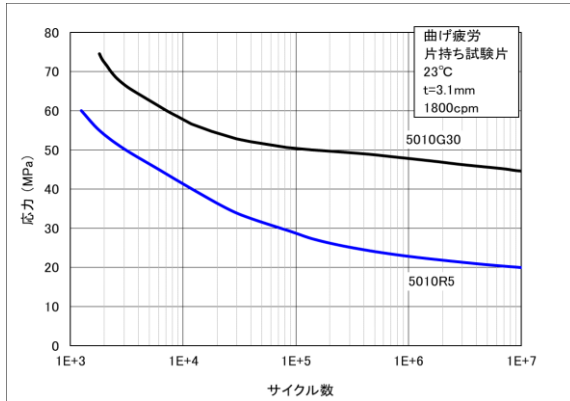


図 3-23 曲げ疲労特性

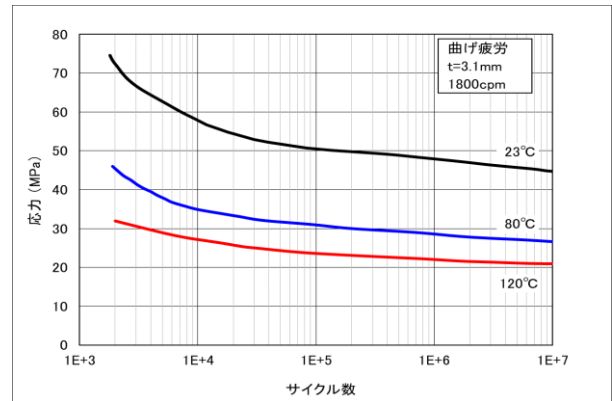


図 3-24 5010G30 曲げ疲労特性の温度依存性

### 3.8 クリープ特性

応力が加わった状態で製品を長時間放置すると、しだいにクリープ変形を生じる。応力の負荷時間が長くなると、樹脂の破壊応力以下でも破壊する場合があります。定常荷重が加わる部品設計では、クリープによる変形や破壊に注意する必要があります。

図 3-25、図 3-26 に非強化 PBT (5010R5) と GF 強化 PBT (5010G30) の曲げクリープひずみ特性を示す。クリープひずみ量は応力や温度によって異なるが、温度や応力が比較的低い場合は、ひずみ量が応力にはほぼ比例するためクリープ弾性率を用いて表すことができ(図 3-27、図 3-28)、任意の応力についてひずみ量の推測が可能である。

$$\text{クリープ弾性率} = \frac{\text{応力}}{\text{クリープひずみ}}$$

温度や応力が非常に高い場合は、ひずみが急激に立ち上がり破壊に至る(加速クリープ)現象が起こるため、注意する必要があります。図 3-29、30 に非強化 PBT (5010R5) と GF 強化 PBT (5010G30) について、引張クリープの場合のクリープ破壊曲線を示した。上記のクリープ弾性率による推測が可能となるのは、負荷応力が概ねクリープ破壊応力の半分以下の場合である。

クリープ特性は材料の弾性率に大きく依存するため、GF 量が多くなるとクリープひずみも小さくなる。図 3-31 にクリープひずみの GF 量依存性を示す。

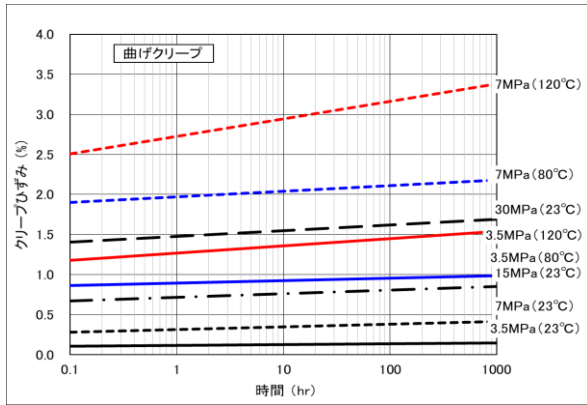


図 3-25 5010R5 の曲げクリープひずみ特性

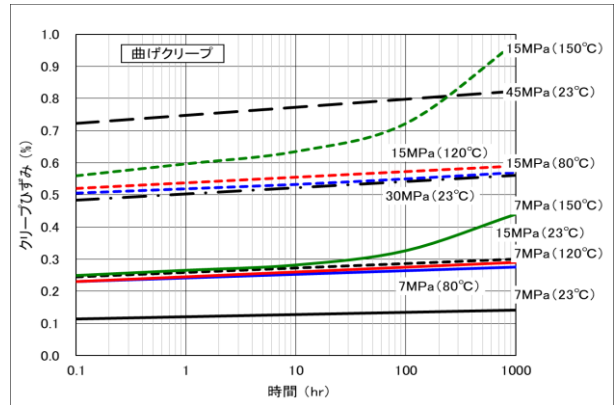


図 3-26 5010G30 の曲げクリープひずみ特性

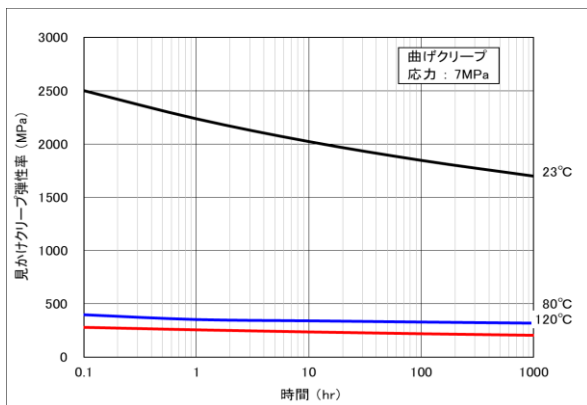


図 3-27 5010R5 の曲げクリープ弾性率

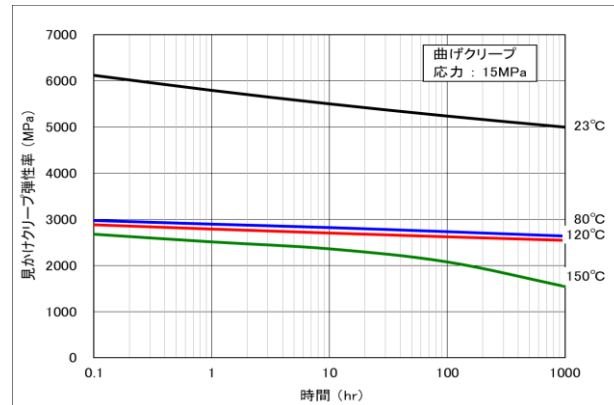


図 3-28 5010G30 の曲げクリープ弾性率

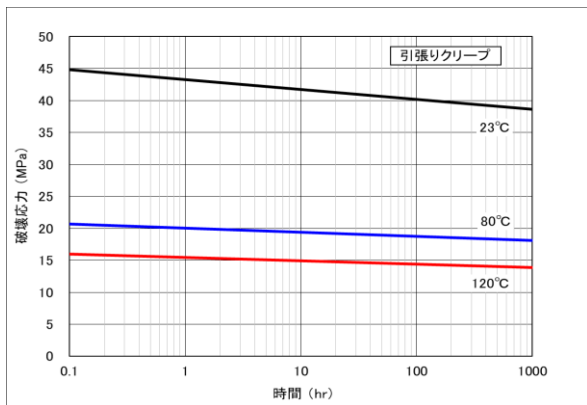


図 3-29 5010R5 の引張クリープ破壊特性

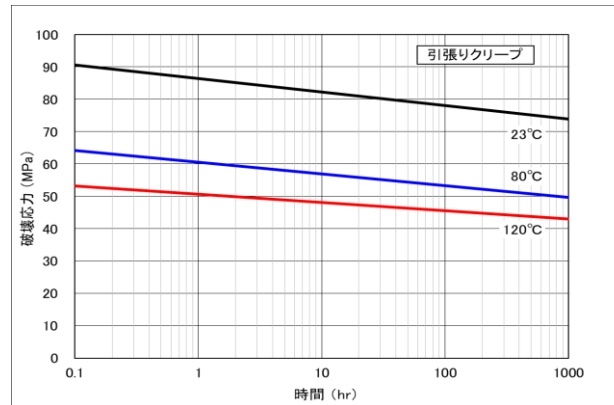


図 3-30 5010G30 の引張クリープ破壊特性

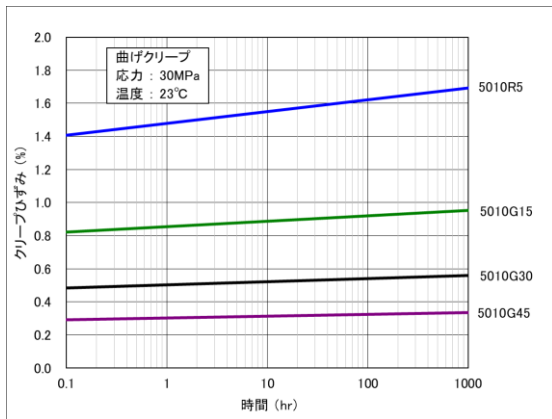


図 3-31 曲げクリープ特性の GF 量依存性

### 3.9 応力緩和

製品に一定応力が加わるとひずみが生じるが、そのひずみ量を一定のまま長時間保持した場合、材料のクリープ特性のため次第に内部応力が緩和される。この特性を応力緩和特性という。図 3-32、図 3-33 に非強化 PBT (5010R5) と GF 強化 PBT (5010G30) の引張応力緩和特性を示す。

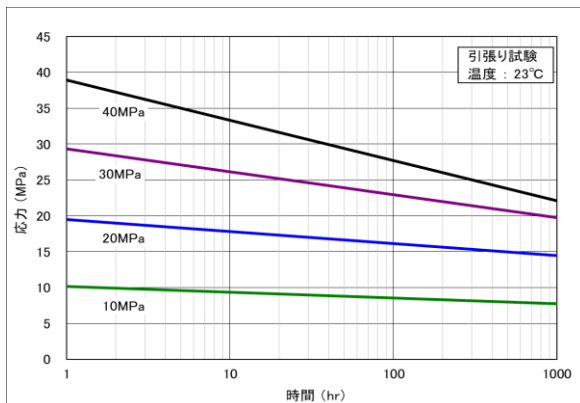


図 3-32 5010R5 の応力緩和曲線

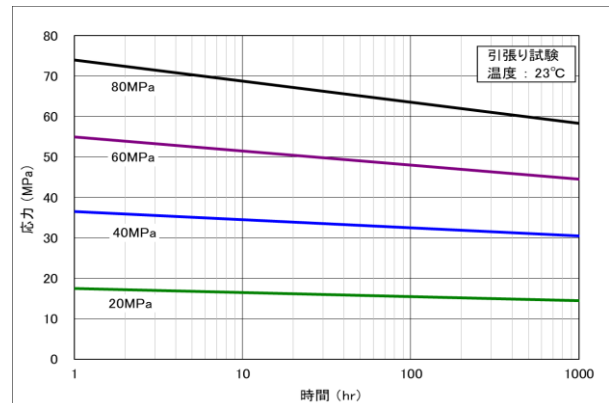


図 3-33 5010G30 の応力緩和曲線

### 3.10 耐摩擦・摩耗特性

摺動特性の評価法には、テーバー摩耗、スラスト摺動、ピン-板摺動等、摺動形態に合わせた各種の方法があるが、ここでは代表的なスラスト摺動試験による PBT の摺動特性の結果を示す(表 3-1～表 3-3)。スラスト摺動試験では、図 3-34 に示すようなリング状の樹脂成形品または金属部品を用い、面圧をかけた状態で一方を固定し他方を回転させて摺動特性を評価する。摺動特性を表す代表的な項目としては以下のようなものがある。

- (1) 動摩擦係数 : 摺動時に発生する摩擦抵抗の大きさを表す。
- (2) 比摩耗量 : 一定条件下での摺動摩耗量を表す。面圧、摺動距離等の条件で規格化した値が用いられ、摩耗係数とも呼ばれる。
- (3) 限界 PV 値 : 摺動時の面圧 P と線速度 V の条件において、成形品が摺動摩擦熱で熔融して試験不可能となる摺動限界を表す。

PBT の動摩擦係数は概ね 0.3~0.5 程度の値となる。摩耗量は対同樹脂 (PBT 同士) の場合よりも対異樹脂 (POM 等) の方が小さくなる傾向があるため、条件の厳しい摺動部品では異樹脂の組合せを選定することが望ましい。対金属摺動では、非強化 PBT に比べて GF 強化 PBT の摩耗量が大きくなりやすい。一方で摺動限界 (限界 PV 値) は対樹脂よりも、放熱性に優れた対金属の方が高くなる。

相手材	面圧	線速度	5010R5	5010G30
自己	0.1 MPa	0.1 m/s	0.38	0.34
汎用POM	0.5 MPa	0.1 m/s	0.50	0.35
鋼 (S45C)	0.5 MPa	0.15 m/s	0.33	0.32

表 3-1 動摩擦係数

相手材	面圧	線速度	5010R5	5010G30
自己	0.3 MPa	0.1 m/s	1.71 (自己・相手平均)	0.32 (自己・相手平均)
汎用POM	0.3 MPa	0.1 m/s	—	0.01 (POMの摩耗量)
鋼 (S45C)	0.5 MPa	0.3 m/s	0.26 (自己の摩耗量)	1.42 (自己の摩耗量)

表 3-2 比摩耗量 (mm<sup>3</sup>/kg・km) : 20hr 実施

相手材	面圧	線速度	5010R5	5010G30
自己	—	0.1 m/s	0.05	0.06
汎用POM	—	0.1 m/s	—	0.09
鋼 (S45C)	—	0.15 m/s	0.69	0.69

表 3-3 限界 PV 値 (MPa・m/s)

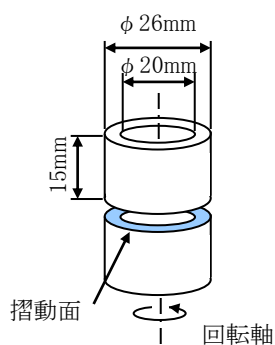


図 3-34 スラスト摺動試験方法

## 4. 熱的性質

### 4.1 融点、結晶化温度、ガラス転移点

一般に PBT の融点 ( $T_m$ ) は、示差走査熱量計 (DSC) で測定される融解吸熱ピーク位置で求められることが多く、融点は  $224^{\circ}\text{C}$  程度となる。

PBT の結晶化温度 ( $T_c$ ) も同様に、DSC 測定による結晶化発熱ピーク位置で求められることが多い。  $T_c$  はグレードによっても異なり、概ねベースレジンの場合で  $170\sim 175^{\circ}\text{C}$ 、コンパウンド品で  $185\sim 195^{\circ}\text{C}$  程度になる。  $T_c$  の値は結晶化速度の目安と考えられ、一般に  $T_c$  の高いものはより高い温度から結晶化が始まるため、結晶化速度が大きいと考えられる。 PBT は比較的結晶化速度の速い樹脂で、ハイサイクル成形に適している。結晶化速度の測定にも DSC 等が使用され、DSC を用いた半結晶化時間測定結果では、ポリアセタール (POM) について結晶化が速いという結果が報告されている。

PBT のガラス転移点 ( $T_g$ ) は測定法により異なり、 $37\sim 53^{\circ}\text{C}$  程度の値が報告されている。

### 4.2 融解熱、比熱、熱伝導率

DSC 測定で求められる PBT の融解熱および結晶化熱は約  $50\text{ J/g}$  程度となる。コンパウンド品の場合は、GF やその他成分添加の影響で値が小さくなる傾向を示し、GF30%強化 PBT の場合は  $35\text{ J/g}$  程度となる。

比熱も DSC 測定等で求められる。比熱は温度によって変化する (図 4-1) が、実用温度域における PBT の比熱は  $1.2\text{ J}/(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$  程度となる。この値は一般合成樹脂と大差はなく、代表的な金属 (鉄、銅、アルミニウム等) に比べて約 3 倍に相当する。また比熱の値は結晶化度の影響を受け、結晶化度が高くなると比熱はわずかながら小さくなる。

PBT の実用温度域における熱伝導率は  $0.22\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  程度であり、GF 強化 PBT では  $0.29\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  程度になる。この値も一般合成樹脂と大差ないレベルであるが、代表的な金属の数百～数千分の一程度であり、金属に比べると非常に小さい値となる。

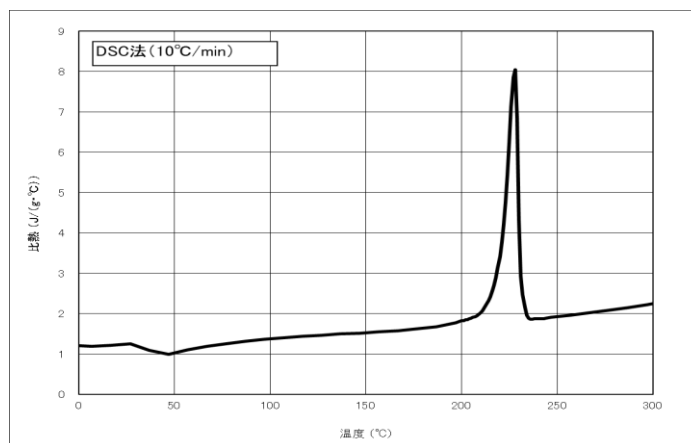


図 4-1 比熱の温度依存性 (5010R5)



### 4.3 熱膨張係数、PVT 曲線

PBT の線膨張率はやや温度依存性を持つが、23°Cにおいて  $1.1 \times 10^{-4} (1/^\circ\text{C})$  程度となる。この値は代表的な金属の 5~10 倍程度であり、金属に比べるとやや大きい値となる。GF 強化 PBT では線膨張率は小さくなり、流動配向による異方性が生じるため、流動方向 (MD 方向) の線膨張率は金属の値に近づく。図 4-2、図 4-3 に線膨張係数の温度依存性と GF 含有量依存性を示す。また圧力 (P)、体積 (V)、温度 (T) の関係を表した PVT 曲線を図 4-4、図 4-5 に示す。

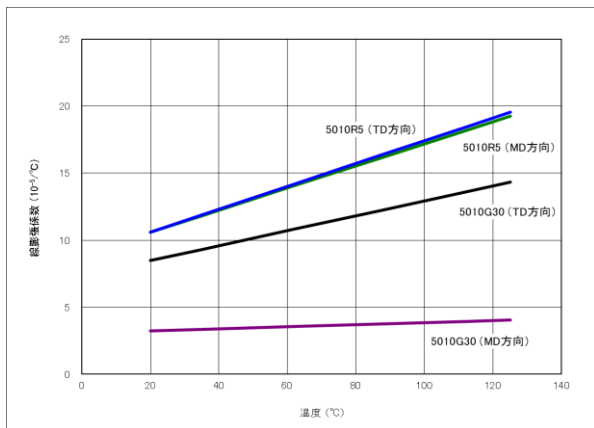


図 4-2 線膨張係数の温度依存性

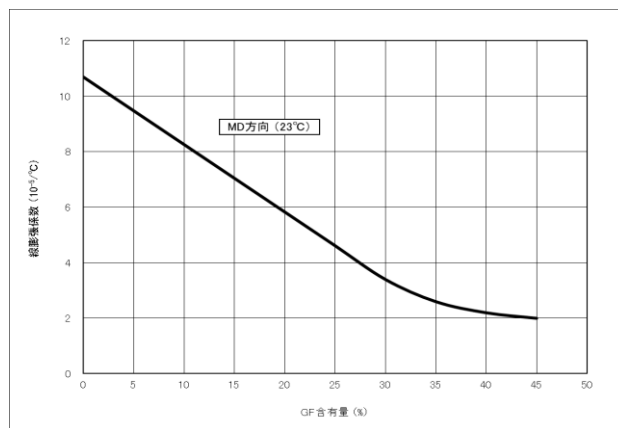


図 4-3 線膨張係数の GF 含有量依存性

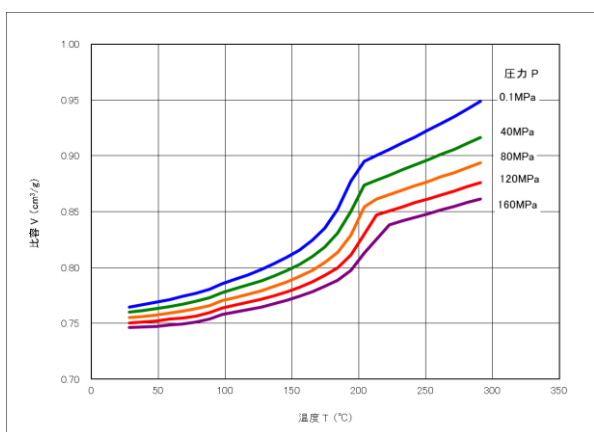


図 4-4 5010R5 の PVT 曲線

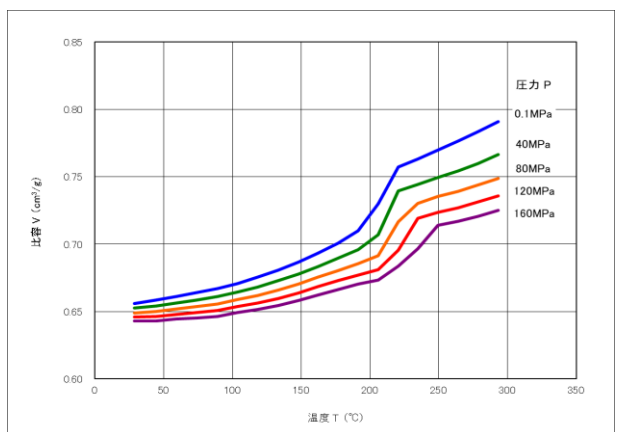


図 4-5 5010G30 の PVT 曲線

### 4.4 熱変形温度

耐熱性の一つの指標である熱変形温度は、荷重たわみ温度の値がしばしば使用される。PBT は GF 強化によって耐熱性が大幅に向上する(図 4-6)。PBT の荷重たわみ温度は概ね以下の値となる。

	非強化 PBT (5010R5)	強化 PBT (5010G30)
応力		
1.80MPa	54°C	202°C
0.45MPa	136°C	220°C

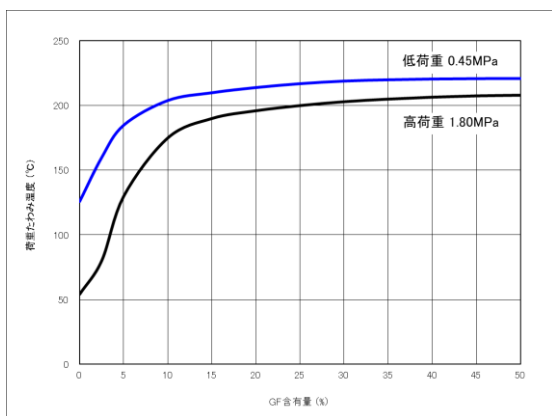


図 4-6 荷重たわみ温度の GF 含有量依存性

## 4.5 熱分解、燃焼性

PBT を融点以上の高温に放置すると、徐々に熱分解が起こる。PBT を成形機シリンダ内で滞留させた場合の熱分解による分子量低下を、溶液粘度で測定した結果を図 4-7 に示す。温度が高くなるほど熱分解が進みやすくなるのがわかる。また熱重量(TG)分析にて、窒素雰囲気下 20°C/min で測定した熱分解開始温度は 390°C 程度になる(図 4-8)。

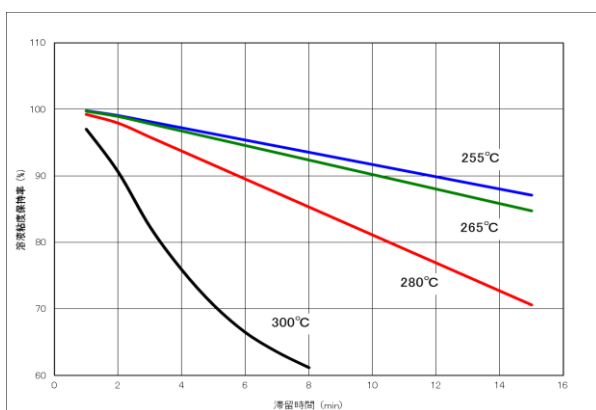


図 4-7 5010G30 の滞留による溶液粘度低下

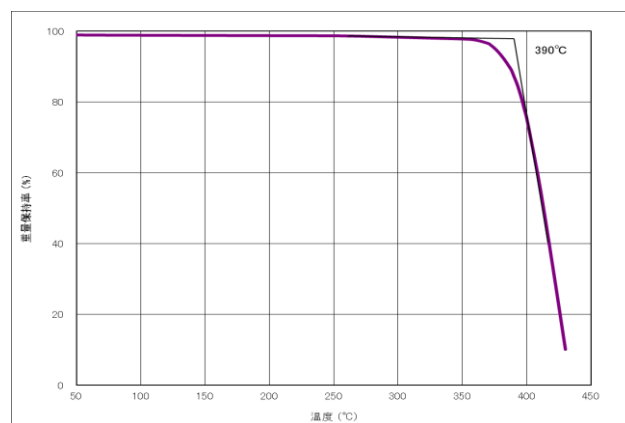


図 4-8 PBT の熱重量(TG)減少曲線

樹脂の難燃性の尺度としては UL94 規格が代表的である。PBT は UL94 で HB レベルの難燃性を有するが、難燃グレードでは V-2 や V-0 レベルを達成する。もう1つの難燃性の尺度として、限界酸素指数 (LOI) が用いられる場合もあるが、各 UL 規格レベルに相当する PBT の LOI は概ね以下ようになる。

UL 規格 HB レベル相当 (非強化)	LOI = 23 程度
UL 規格 HB レベル相当 (強化)	LOI = 18~19 程度
UL 規格 V-2 レベル相当	LOI = 24 以上
UL 規格 V-0 レベル相当	LOI = 30 以上

PBT の熱分解により発生するガスは、可燃性のテトラヒドロフラン (THF) が主成分である。PBT の引火温度は概ね 300°C 以上であり、発火温度は 400°C 以上である。

## 5. 電氣的性質

### 5.1 絶縁耐力

絶縁耐力の評価法には、絶縁破壊強さや耐電圧の測定があり、前者は后者よりもやや高い値となる。PBT の絶縁破壊強さは 20MV/m 前後となり、他の汎用エンブレと同レベルである。GF 等を含有すると絶縁耐力が向上し、GF 強化系は非強化系に比べて高い値となる。絶縁破壊強さは温度や成形品厚みに対する依存性がある(図 5-1、図 5-2)。また加水分解等により PBT の分解が起こると、絶縁破壊強さは低下する。高温放置後、および湿熱処理後の値を図 5-3、図 5-4 に示す。

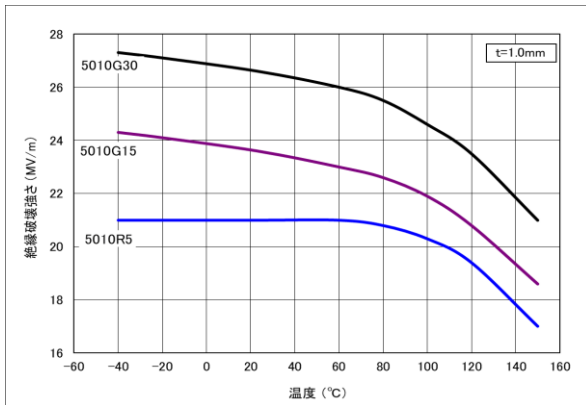


図 5-1 絶縁破壊強さの温度依存性

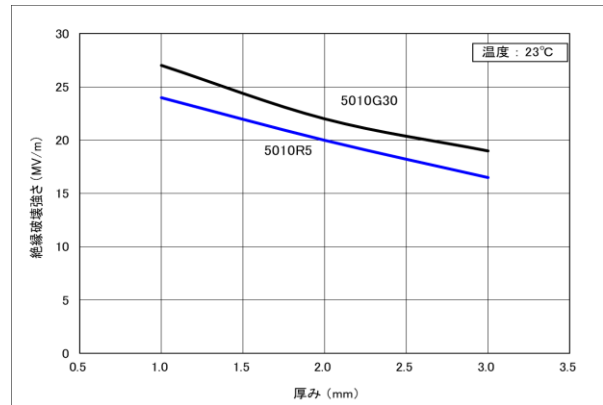


図 5-2 絶縁破壊強さの厚み依存性

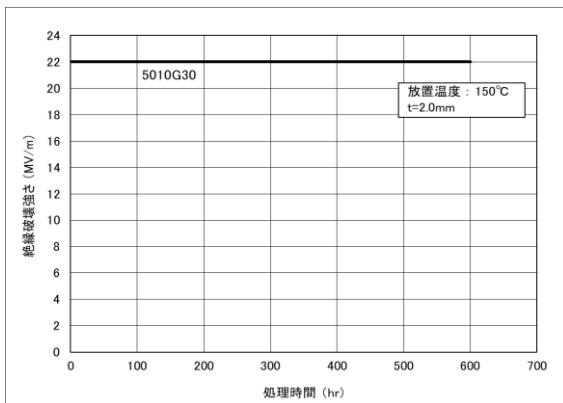


図 5-3 高温放置後の絶縁破壊強さ

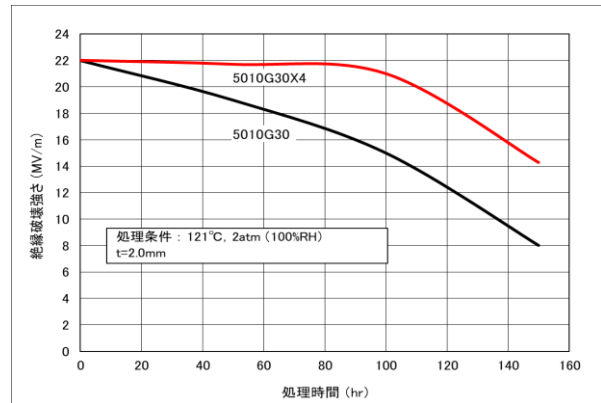


図 5-4 湿熱処理後の絶縁破壊強さ

### 5.2 絶縁抵抗

絶縁体に 2 個の電極を設けて電圧を印加した際に、絶縁体を流れる電流は内部電流と表面電流の合計となる。内部電流に対する抵抗値を体積抵抗、表面電流に対する抵抗率を表面抵抗と呼ぶ。絶縁体である PBT の抵抗率は高く、室温付近における体積抵抗率は  $10^{-14} \Omega \cdot m$  程度、表面抵抗率は  $10^{-15} \Omega$  程度である。これらの抵抗率も温度依存性が見られる。(図 5-5、図 5-6)

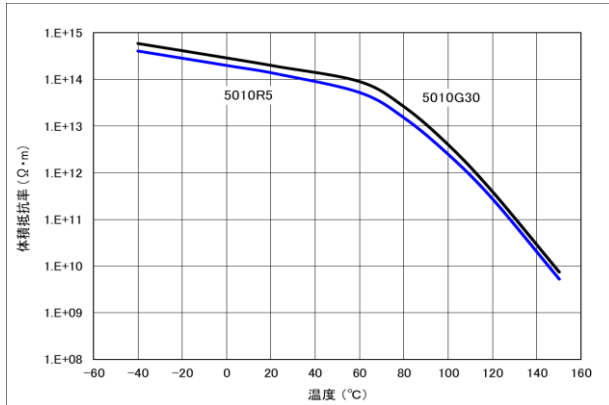


図 5-5 体積抵抗率の温度依存性

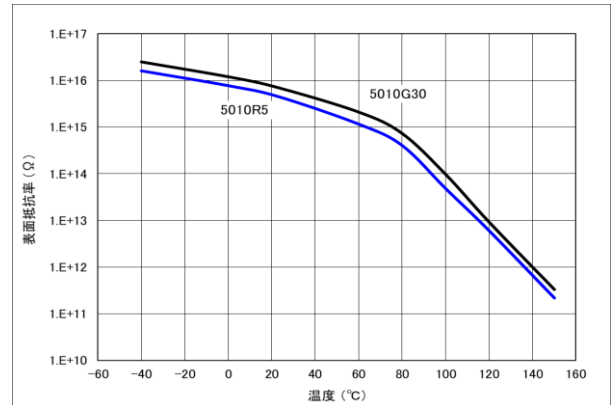


図 5-6 表面抵抗率の温度依存性

### 5.3 誘電特性

絶縁体に電圧をかけたとき、絶縁体表面に正と負の電荷が発生する現象を誘電分極という。誘電率 ( $\epsilon$ ) はこの誘電分極の大きさを表し、比誘電率は真空の誘電率 ( $\epsilon_0 = 8.854\text{pF/m}$ ) に対する比で表される。電圧として交流電圧をかけた場合に、印加電圧に対して実電流が遅れる分の位相差 ( $\delta$ ) の正接を誘電正接 ( $\tan \delta$ ) という。誘電体に高周波交流電圧がかかる場合、 $\epsilon \times \tan \delta$  に比例した電気エネルギー損失 (誘電体損) 分の発熱が起こるため、高電圧や高周波機器の絶縁材料は  $\epsilon$  や  $\tan \delta$  の小さいものが好ましい。

PBT の室温付近 1MHz における比誘電率は 3.2、誘電正接は 0.02 程度である。誘電特性にも温度や周波数に対する依存性がある。(図 5-7～図 5-10)

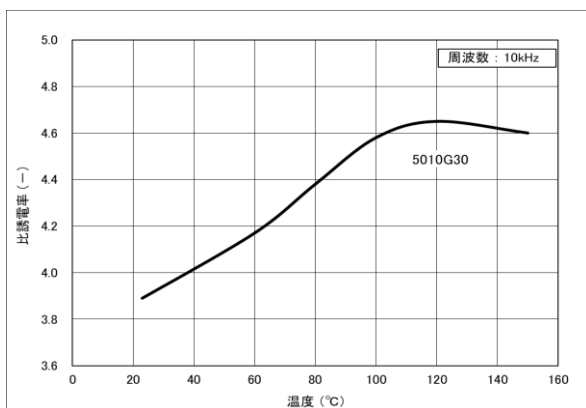


図 5-7 誘電率の温度依存性

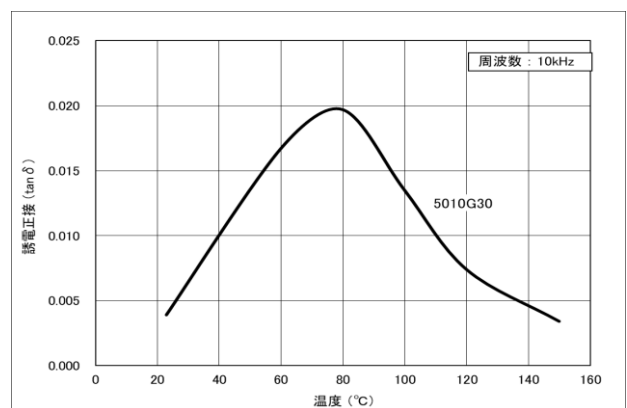


図 5-8 誘電正接の温度依存性

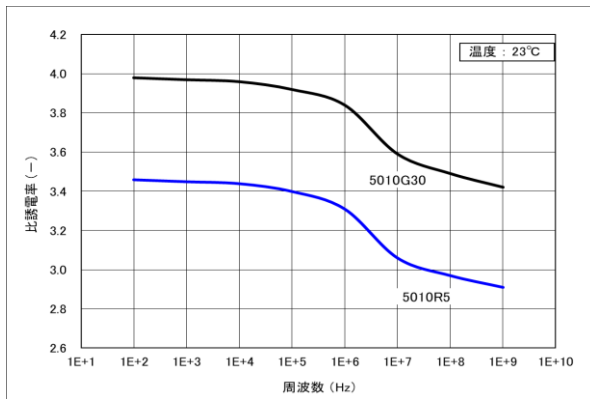


図 5-9 誘電率の周波数依存性

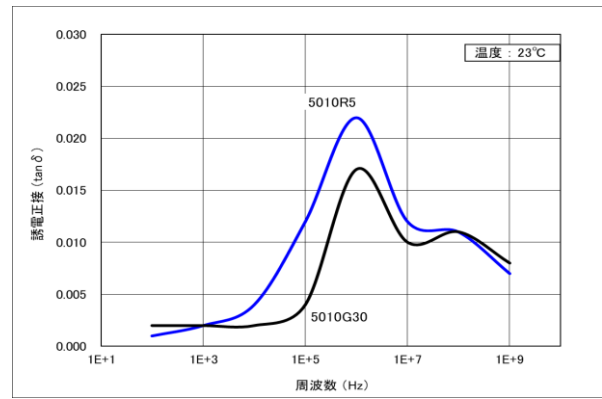


図 5-10 誘電正接の周波数依存性

## 5.4 耐トラッキング性

絶縁体表面に汚染物質(水, 塩分, 塵等)が付着した場合、比較的低電圧であってもリーク電流により劣化する特性をトラッキング特性という。リレーケースやスイッチング基盤等の絶縁体では、耐トラッキング特性が重視される。トラッキング特性の測定法には IEC 法等があり、CTI(Comparative Tracking Index)等の指数で表される。UL 規格では以下のように、CTI 値によるランク分けがされている。

CTI : 600V 以上	PLC ランク : 0
600~400V	1
400~250V	2
250~175V	3
⋮	⋮

PBT の非難燃グレードは概ね PLC1 相当以上の実力を有するが、難燃グレードでは PLC3 相当以下となるものもある。

## 5.5 耐アーク性

プラスチックの表面でアーク放電を行うと、アーク熱でプラスチックが劣化し、やがては炭化して導通路を形成しアークが消滅する。このアーク消滅時間がプラスチックの耐アーク性の指標とされる。PBT 非難燃グレードの耐アーク性は概ね 120sec 以上のレベルだが、難燃グレードでは 120sec 未満となるものもある。表 5-1 に他樹脂との耐アーク性比較を示す。

樹脂	耐アーク性 (sec)
PP	> 140
PE	> 130
PS	> 130
ABS	93
PMMA	> 130
PBT	125
PA6	140
PA66	> 140
POM	> 240
PC	110
変性PPE	67

表 5-1 各樹脂の耐アーク性比較

## 5.6 耐コロナ性

導体の一部に電荷が集中すると、その部分に接触する気体が絶縁破壊を起こし、局所的な放電が発生する。これをコロナ放電という。コロナ放電が起こると酸素原子、オゾン、酸化窒素、イオン類等が生じるため、プラスチックの劣化が促進され絶縁破壊に至る。

耐コロナ性は誘電損失の影響を受けやすいため、誘電体損の増大するガラス転移点(Tg)が室温に近いPBTは耐コロナ性があまり良くない。高電圧交流波や連続パルスがかかる電機部品でPBTを使用する際は、コロナ放電対策に注意する必要がある。

## 6. 化学的性質

### 6.1 耐湿熱性

PBT は高温高湿環境下において、加水分解が起こり物性が低下する場合があるため、使用環境を考慮して注意する必要がある。特に使用環境が厳しい場合は、5010G30X4 等の耐加水分解グレードの使用が望ましい。図 6-1～図 6-4 に NOVADURAN™の湿熱処理 (85°C, 95%RH) とプレッシャークッカー試験 (PCT) 加速処理 (121°C, 2atm, 100%RH) における強度変化を示す。PCT 処理では上記湿熱処理に比べて、15～20 倍程度の加速試験になっていることがわかる。

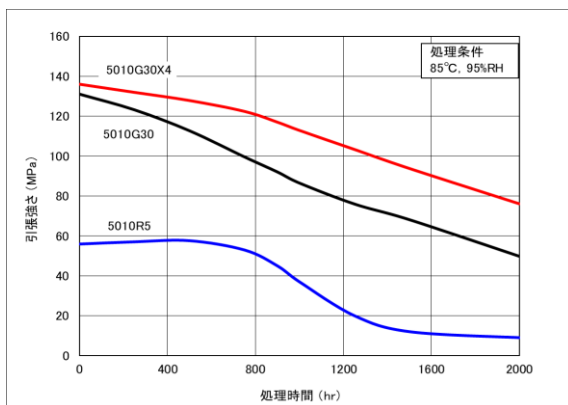


図 6-1 湿熱処理後の強度変化

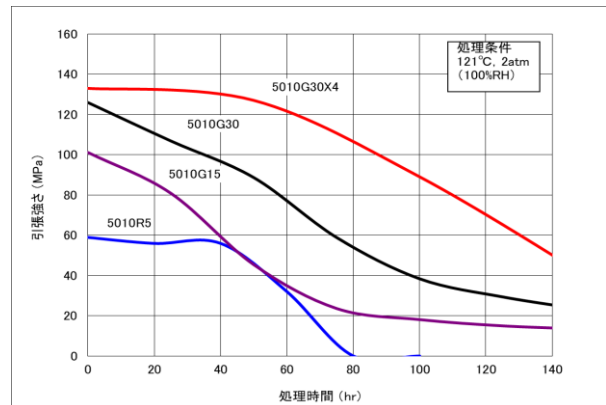


図 6-2 プレッシャークッカー処理後の強度変化

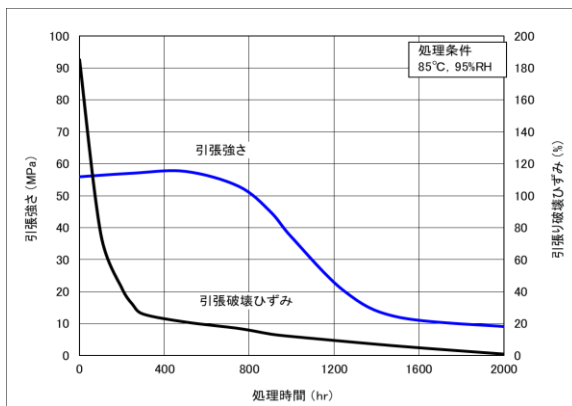


図 6-3 5010R5 湿熱処理後の物性変化

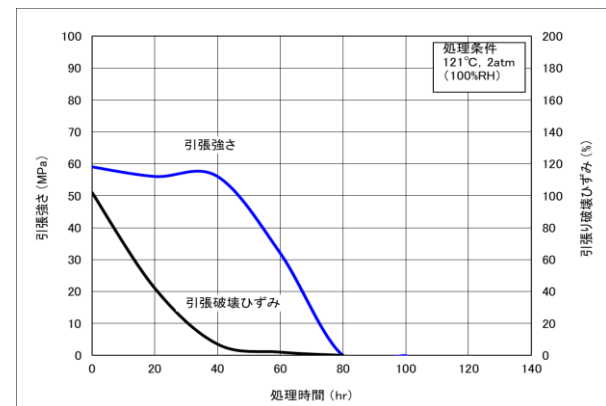


図 6-4 5010R5 プレッシャークッカー処理後の物性変化

### 6.2 耐薬品性

PBT は結晶性樹脂であるため耐薬品性に優れており、ほとんどの有機溶剤や油類に対して耐性を持っている。ただしエステル結合を有することから、強酸やアルカリには侵される場合がある。表 6-1～表 6-2 に NOVADURAN™の代表的な耐薬品性を示す。

薬品名	グレード		5010R5		5010G30	
	浸漬温度 (°C)	浸漬日数 (day)	強度保持 率 (%)	重量増加 率 (%)	強度保持 率 (%)	重量増加 率 (%)
＜ 無機薬品 ＞						
10%塩酸	23	7	96	0.2	95	0.1
		30	96	0.3	89	0.1
10%酢酸	23	7	92	0.2	94	0.1
		30	91	0.4	89	0.1
10%硫酸	23	30	94	0.3	97	0.1
36%硫酸	23	30	99	0.2	97	0.1
	70	30	92	0.3	84	1.1
5%アンモニア	23	7	97	0.1	97	0.1
		30	95	0.2	95	0.2
10%NaOH	23	7	94	0.2	34	1.6
		30	93	0.2	2	0.9
＜ 有機薬品 ＞						
酢酸エチル	23	7	90	0.7	99	0.3
		30	77	1.3	96	0.7
1,2ジクロロエタン	23	7	61	6.1	80	2.9
		30	39	11.3	62	5.2
テトラクロロエチレン	23	7	97	0.2	100	0.2
		30	98	0.6	98	0.3
トルエン	23	7	93	0.5	96	0.2
		30	87	1.0	95	0.5
ヘプタン	23	7	100	0.0	100	0.0
		30	100	0.1	98	0.1
アセトン	23	7	78	1.0	89	0.6
		30	70	1.9	86	1.1
クロロベンゼン	23	7	82	1.5	91	0.7
		30	73	2.6	91	1.3
メタノール	23	7	85	0.3	92	0.3
		30	76	0.6	91	0.5
メチルエチルケトン	23	7	83	0.8	93	0.4
		30	73	1.5	90	0.8
塩化メチレン	23	7	32	27.4	55	13.4
		30	33	25.8	54	13.0
1,4ブタンジオール	23	7	98	0.0	98	0.0
		30	100	0.0	100	0.0
エチレングリコール (不凍液100%)	23	7	100	0.0	100	0.0
		30	100	0.0	100	0.0
エチレングリコール:水=1:1	23	7	96	0.1	100	0.1
		30	100	0.2	99	0.2
イソプロピルアルコール	23	7	100	0.0	100	0.0
		30	100	0.0	100	0.0

表 6-1 NOVADURAN™の耐薬品性(その1)



薬品名	グレード		5010R5		5010G30	
	浸漬温度 (°C)	浸漬日数 (day)	強度保持 率 (%)	重量増加 率 (%)	強度保持 率 (%)	重量増加 率 (%)
＜ ガソリン・オイル類 ＞						
ガソリン(有鉛)	23	7	100	0.0	100	0.0
		30	100	0.0	100	0.0
ガソリン(無鉛)	23	7	100	0.0	100	0.0
		30	100	0.1	100	0.1
レギュラーガソリン(無鉛)	60	7	—	—	89	0.6
		30	—	—	81	1.1
ハイオクガソリン(無鉛)	60	7	—	—	89	0.4
		30	—	—	81	1.0
レギュラーガソリン:メタノール =85:15	60	7	—	—	72	1.9
		30	—	—	57	3.3
レギュラーガソリン:エタノール =80:20	60	7	—	—	80	1.1
		30	—	—	66	2.5
トランスミッションフルイド <sup>※</sup>	23	7	100	0.0	100	0.0
		30	100	0.0	100	0.1
	120	7	100	0.4	100	0.3
		30	100	0.7	100	0.6
	150	7	100	0.9	100	0.6
		30	99	1.2	75	0.8
パワーステアリングフルイド <sup>※</sup>	23	7	99	0.0	100	0.0
		30	100	0.0	100	0.0
	70	7	96	0.0	96	0.0
		30	99	0.0	99	0.4
	150	7	100	0.6	100	0.4
		30	52	0.8	64	0.7
ブレーキフルイド <sup>※</sup>	23	7	100	0.0	100	0.0
		30	100	0.0	100	0.0
	70	7	92	0.3	100	0.2
		30	87	0.6	100	0.4
モーターオイル(シェル)	23	30	100	0.0	100	0.1
シリコンオイル (東レシリコンSH200)	23	7	100	0.1	100	0.1
		30	100	0.1	100	0.0
	70	7	100	0.0	100	0.0
		30	100	0.0	100	0.0
水溶性切削油 (共石ソウルカットW-11)	23	7	100	0.0	100	0.0
		30	100	0.0	100	0.0
	70	7	100	0.2	100	0.1
		30	100	0.2	100	0.2

表 6-2 NOVADURAN™の耐薬品性(その2)

# 7. 光学的性質

## 7.1 光線透過率

PBT は結晶性樹脂であるため一般の射出成形品は不透明であるが、フィルム等の非常に薄いものでは透明になる場合がある。可視光線の透過率は肉厚に依存するが、非強化 PBT で厚さ 1mm の場合は 20～30%程度であり、GF 強化系では透過率はやや小さくなる(図 7-1、図 7-2)。透過率は結晶化度の影響を受けるため、成形条件等によっても変化することがある。また通常の着色品では透過率は非常に小さくなり、通常のブラック色ではほぼゼロとなる。

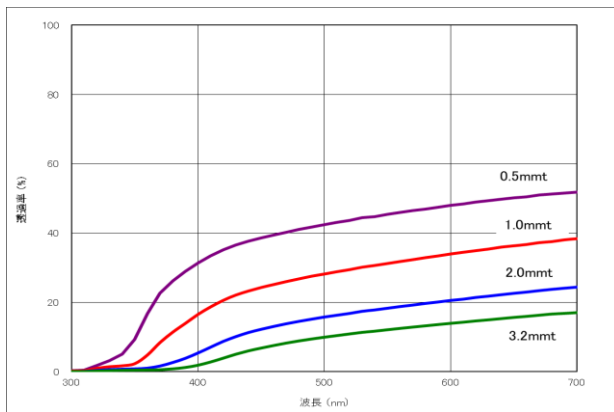


図 7-1 光線透過率 (5010R5/NA)

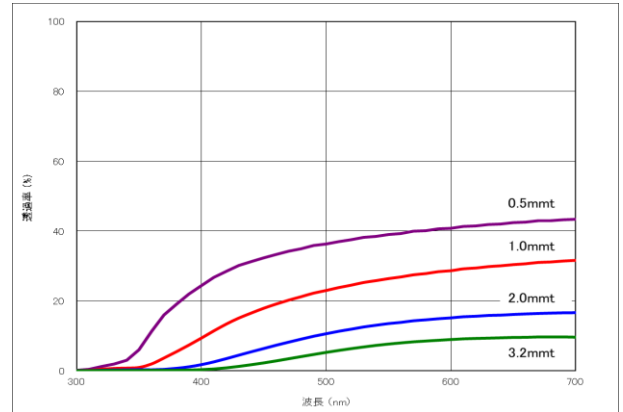


図 7-2 光線透過率 (5010G30/NA)

## 7.2 耐候性、耐光性

PBT は比較的耐紫外線性に優れているが、太陽光線等の紫外線照射を長時間受けると徐々に分解して劣化する。太陽光線による劣化特性の評価方法としては、実際に太陽光のもとに暴露させる方法のほか、人工の紫外線光源を用いた促進試験が行われる。紫外線光源としては、カーボンアークやキセノンアーク等が代表的である。試験法としては、屋外での使用を想定した雨有り試験(耐候性試験)と、屋内や直接雨を受けない環境を想定した雨無し試験(耐光性試験)がある。

図 7-3、図 7-4 に促進耐候性試験(カーボンアーク)と屋外暴露試験による結果を示す。非強化 PBT (5010R5)の引張ひずみ特性の低下を見ると、促進試験では実暴露に比べて 10 倍程度の促進試験になっていることがわかる。PBT は耐候処理による強度低下は比較的小さいが、引張ひずみは低下が見られる。GF 強化 PBT では強度的な問題を生じることが少ないが、非強化 PBT の場合は許容変位量の低下等に注意する必要がある。

PBT の耐候性は着色カラーや分子量によって異なる(図 7-5、図 7-6)。一般に無着色(ナチュラル)グレードに比べて、着色(カラー)グレードの方が耐候性に優れる傾向にあり、特に黒色(ブラック)グレードが良好である。またナチュラルグレードでは着色グレードに比べて、物性低下だけでなく変色等による外観変化も大きくなりやすいため、注意する必要がある。PBT の分子量は大きい方が耐候性が優れる傾向にあるが、流動性は低下するため、製品設計を考慮してグレード選定する必要がある。

図 7-7、図 7-8 には耐光性試験結果を示す。耐候性の場合と同様に、引張ひずみにおける低下が顕著に見られ、ナチュラル色よりもブラック色の方が優れる傾向にある。

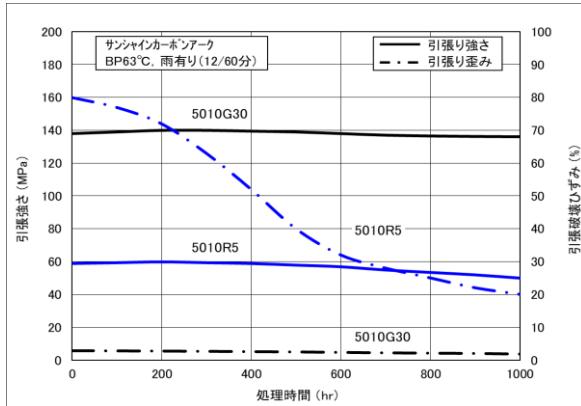


図 7-3 耐候性(耐候促進試験)

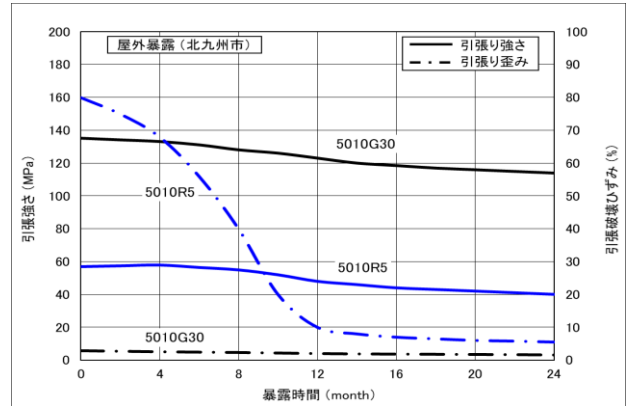


図 7-4 耐候性(屋外暴露試験)

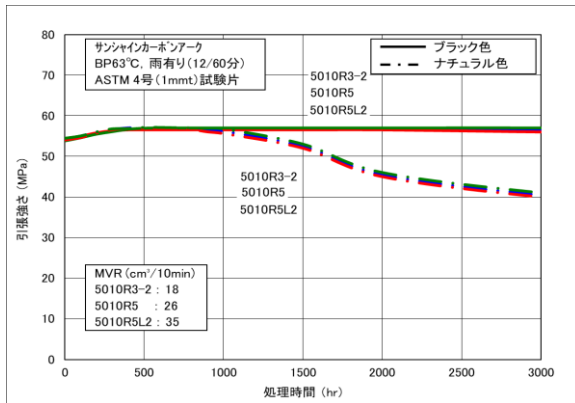


図 7-5 耐候性へのカラーと粘度の影響

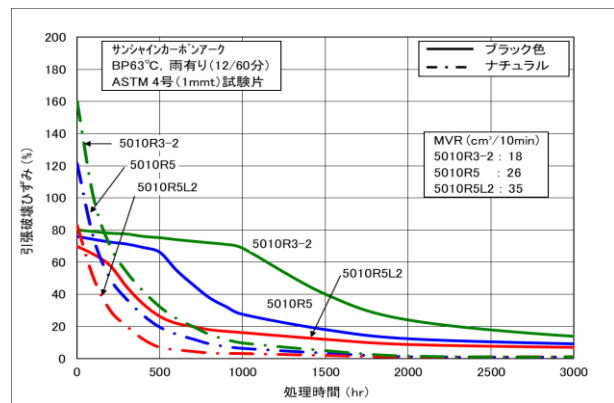


図 7-6 耐候性へのカラーと粘度の影響

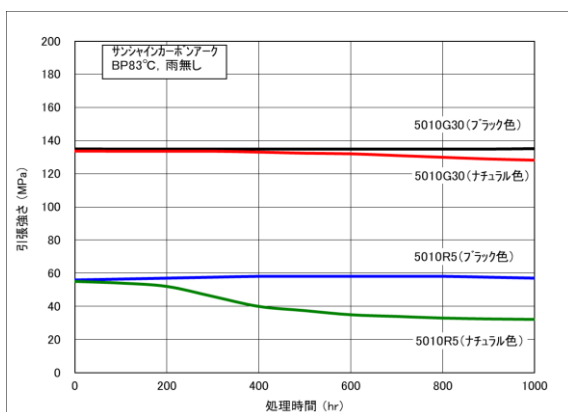


図 7-7 耐光性(引張り強さ)

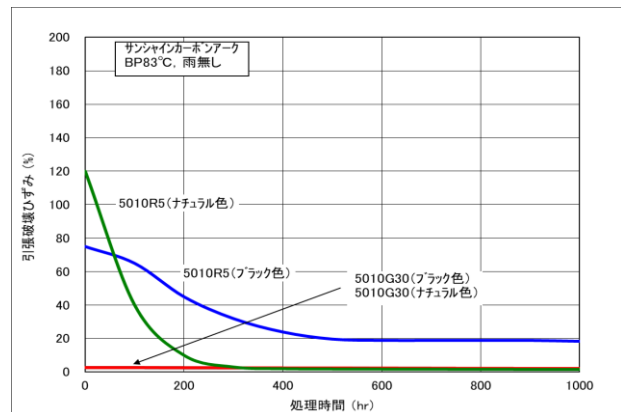


図 7-8 耐光性(引張ひずみ)