

アモデル®



SOLVAY

asking more from chemistry®

アモデル® PPA

デザインガイド

**SPECIALTY
POLYMERS**

はじめに	1	水分の影響	38
アモデル ポリフタルアミド (PPA) 樹脂	1	吸水の意味	38
化学	1	吸水とガラス転移温度 (T_g)	38
結晶性	2	吸水量	39
水分の影響	3	水分が強度と剛性に及ぼす影響	39
製品データ	4	水分による寸法変化	40
アモデル樹脂特性表	4	PA 6,6 との寸法変化比較	41
表記方法	5	熱特性	42
製品の選択	5	荷重たわみ温度 — HDT	42
特性データ	6	アモデル樹脂の荷重たわみ温度	43
主要特性	6	熱線膨張係数	43
水分コンディショニングの加速方法	6	熱伝導率	45
機械特性	19	比熱	46
短期的機械特性	19	熱安定性	47
引張特性	19	熱重量分析 (TGA)	47
試験方法	19	熱老化	47
引張特性の比較	21	相対温度指数 (UL)	48
GR PPA の引張特性と温度	21	燃焼特性	50
高温領域における A-1000 GR グレードの		グローワイヤー試験	50
引張特性	22	煙濃度試験 (NBS)	51
曲げ特性	23	UL 94 準拠垂直燃焼性	51
試験方法	23	水平燃焼試験	51
曲げ特性の比較	24	50W 試験炎による垂直燃焼試験	51
高温領域における曲げ特性	24	500W 試験炎による燃焼試験	52
せん断特性	26	電気特性	53
圧縮強さと圧縮弾性率	27	絶縁破壊電圧と絶縁耐力 — ASTM D149	53
衝撃強さ	27	体積抵抗率 — ASTM D257	53
アイゾット (片持ち梁) 衝撃	28	表面抵抗率 — ASTM D257	53
アイゾット衝撃特性の比較	28	誘電率 — ASTM D150	54
シャルピー (支持梁) 衝撃	29	誘電正接 — ASTM D150	54
落錘衝撃特性	30	UL 746A 短期特性	54
ポアソン比	30	高電圧低電流耐アーク性 — ASTM D495	55
長期的機械特性	31	耐トラッキング指数 (CTI) — ASTM D3638	55
クリープ	31	高電圧アークトラッキング速度 (HVTR)	55
引張クリープ	32	ホットワイヤーイグニッション (HWI) —	
等時性応力-ひずみ曲線	34	ASTM D3874	56
引張クリープ破断	34	高電流アーク着火性 (HAI)	56
曲げクリープ	35	高電圧アーク着火性	56
圧縮クリープ	36	アモデル樹脂の UL 746A 特性	57
耐疲労性	36	UL 相対温度指数	57
アモデル樹脂の疲労強さ	37	耐環境性	58
		耐薬品性	58
		化学適合性	62
		ガンマ線照射	62

設計情報63

機構設計64

古典的な応力-ひずみ方程式の使用67

設計における計算の限界点 67

たわみ計算 67

応力計算 67

強化繊維の配向に関する考察 67

同等の部品剛性を実現する設計 68

断面肉厚の変更 68

リブを追加して剛性を保つ 68

持続性荷重を考慮した設計 69

たわみ計算 69

許容応力の計算 — クリープ破断 70

応力集中71

熱応力71

クリープによるボルトのゆるみ 72

アッセンブリー設計73

嵌め代と圧入 73

許容嵌め代の計算 73

メカニカルファスナー 74

セルフタッピングねじ 74

トルク保持の改善 75

締め付けトルク 75

引抜き力の計算 75

ねじ込みインサート 75

一体成形ねじ 76

スナップフィットを使用する設計 76

テーパー付き片持ち梁方程式 77

射出成形に適合した設計78

肉厚 78

肉厚の変化 78

抜き勾配 78

リブ 79

肉盗み 79

ボス 79

アンダーカット 80

二次加工81

溶接81

ホットプレート溶接 81

振動溶接 81

スピン溶接 82

超音波溶着 82

接着剤による接合83

コーティングと表面仕上げ84

真空蒸着 84

レーザーマーキング 85

インクジェット印刷 85

塗装 85

オーバーモールド 85

索引87

表

表 1：アモデル PPA ベースポリマーの特性	1	表 32：高電圧低電流耐アーク性のパフォー マンスレベルカテゴリー (PLC)	55
表 2：アモデル樹脂の命名規則	4	表 33：耐トラッキング指数のパフォーマンス レベルカテゴリー	55
表 3：アモデル PPA 主要グレード特性値の 相対比較	5	表 34：高電圧アークトラッキング速度の パフォーマンスレベルカテゴリー	56
表 4：ガラス繊維強化グレード — 機械特性 (US 単位)	7	表 35：ホットワイヤーイグニッションの パフォーマンスレベルカテゴリー	56
表 5：ガラス繊維強化グレード — 機械特性 (SI 単位)	8	表 36：高電流アーク着火性のパフォーマンス レベルカテゴリー	56
表 6：ガラス繊維強化グレード — 熱、電気、 一般特性	9	表 37：高電圧アーク着火性のパフォーマンス レベルカテゴリー	56
表 7：耐衝撃グレード — 機械特性 (US 単位)	10	表 38：アモデル PPA グレードの UL 746A 特性 PLC	57
表 8：耐衝撃グレード — 機械特性 (SI 単位)	11	表 39：耐薬品性のランク分類	58
表 9：耐衝撃グレード — 熱、電気、一般特性	12	表 40：耐薬品性スクリーニング試験 — 有機薬品	59
表 10：耐衝撃ガラス繊維強化、難燃性 グレード — 機械特性 (US 単位)	13	表 41：耐薬品性スクリーニング試験 — 水溶性薬品の溶液	60
表 11：耐衝撃ガラス繊維強化、難燃性 グレード — 機械特性 (SI 単位)	14	表 42：耐薬品性スクリーニング試験 — 輸送機器流体	61
表 12：耐衝撃ガラス繊維強化、難燃性 グレード — 熱、電気、一般特性	15	表 43：アモデル PPA 樹脂の一般化学 適合性に関する指針	62
表 13：ミネラル、ミネラル／ガラス強化 グレード — 機械特性 (US 単位)	16	表 44：ガンマ線照射による影響： アモデル AS-1133 HS	62
表 14：ミネラル、ミネラル／ガラス強化 グレード — 機械特性 (SI 単位)	17	表 45：アモデル樹脂の金属に対する 設計上の優位性	63
表 15：ミネラル、ミネラル／ガラス強化 グレード — 熱、電気、一般特性	18	表 46：最大応力とたわみを表す式	65
表 16：アイゾット試験の試験片寸法	28	表 47：一般的な断面形状の面積と モーメント方程式	66
表 17：耐衝撃変性 PPA の貫通衝撃 (ASTM D3763)	30	表 48：カンチレバー式スナップフィットの 推奨ひずみ	77
表 18：アモデル製品のポアソン比	31	表 49：適合する自動車用プライマー	84
表 19：熱線膨張係数	44	表 50：レーザーマーキング装置メーカー	84
表 20：アモデル PPA 樹脂の熱伝導率	45	表 51：インクジェット印刷装置メーカー	85
表 21：アモデル PPA 各グレードの相対温度指数 ..	49		
表 22：GWIT と GWFT の UL による定義	50		
表 23：グローワイヤー試験の結果	50		
表 24：煙濃度	51		
表 25：UL 分類基準 (V-0、V-1、V-2)	52		
表 26：UL 分類基準：5VA または 5VB	52		
表 27：アモデル PPA グレードの UL 94 ランク	52		
表 28：アモデル各種グレードの絶縁耐力	53		
表 29：アモデル樹脂の体積／表面抵抗率	54		
表 30：アモデル樹脂の誘電率	54		
表 31：アモデル樹脂の誘電正接	55		



図 1：温度に対する弾性率の変化.....	2	図 33：アモデル ET-1000 のアイゾット 衝撃試験：PA、PC との比較.....	29
図 2：温度に対する弾性率の関係： アモデルベース樹脂	2	図 34：ET-1000 HS および PC のノッチ半径感度 ...	29
図 3：水分が T_g に及ぼす影響	3	図 35：アモデル PPA グレードの低温 アイゾット特性.....	29
図 4：寸法変化 vs. 水中浸漬時間.....	3	図 36：シャルピー衝撃試験で使用する試験片	29
図 5：代表的な応力-ひずみ曲線： アモデル ET-1000.....	19	図 37：30～33% GR 樹脂のノッチ付き シャルピー衝撃強さ	30
図 6：代表的な応力-ひずみ曲線： アモデル A-1933.....	20	図 38：見掛けの弾性率：23°C、13.8 MPa	33
図 7：弾性率の評価：割線法と接線法	20	図 39：見掛けの弾性率：23°C、34.5 MPa	33
図 8：30～33% GR 樹脂の引張強さ	20	図 40：見掛けの弾性率：125°C、13.8 MPa	33
図 9：30～33% GR 樹脂の引張弾性率.....	20	図 41：見掛けの弾性率：125°C、34.5 MPa	33
図 10：30～33% GR 樹脂の引張伸び.....	21	図 42：見掛けの弾性率：175°C、13.8 MPa	33
図 11：33% GR PPA の引張強さと温度.....	21	図 43：見掛けの弾性率：175°C、34.5 MPa	33
図 12：33% GR PPA の引張弾性率と温度	21	図 44：等時性応力-ひずみ曲線：A-1133 HS PPA ...	34
図 13：33% GR PPA の引張伸びと温度.....	21	図 45：等時性応力-ひずみ曲線：A-1145 HS PPA ...	34
図 14：GR A-1000 PPA グレードの 引張強さと温度.....	22	図 46：引張クリープ破断：AS-1133 HS.....	35
図 15：GR A-1000 PPA グレードの 引張弾性率と温度	22	図 47：見掛けの曲げ弾性率：69 MPa、23°C.....	35
図 16：GR A-1000 PPA グレードの 引張伸びと温度.....	22	図 48：見掛けの曲げ弾性率：14 MPa、83°C.....	35
図 17：ミネラル／ガラス強化 PPA グレードの 引張強さと温度.....	22	図 49：見掛けの圧縮弾性率：AS-1133 HS	36
図 18：ミネラル／ガラス強化 PPA グレードの 引張弾性率と温度	23	図 50：GR 樹脂の曲げ疲労：23°C、32 Hz.....	37
図 19：30～33% GR 樹脂の曲げ強さ.....	24	図 51：AS-1145 樹脂の曲げ疲労：高温領域.....	37
図 20：30～33% GR 樹脂の曲げ弾性率.....	24	図 52：GR 樹脂の吸水.....	39
図 21：GR PPA 樹脂の曲げ強さと温度	24	図 53：水分による影響：GR 樹脂の引張強さ.....	40
図 22：GR PPA 樹脂の曲げ弾性率と温度.....	24	図 54：水分による影響：GR 樹脂の曲げ弾性率	40
図 23：GR A-1000 PPA グレードの 曲げ強さと温度.....	25	図 55：33% GR PPA の寸法変化	40
図 24：GR A-1000 PPA グレードの 曲げ弾性率と温度	25	図 56：40% ミネラル強化 PPA の寸法変化.....	41
図 25：ミネラル／ガラス強化 PPA 樹脂の 曲げ強さと温度.....	25	図 57：GR PA 6,6 と GR PPA の寸法比較： 100% RH	41
図 26：ミネラル／ガラス強化 PPA 樹脂の 曲げ弾性率と温度	25	図 58：金型温度とアニーリングによる HDT への影響：アモデル AS-1133 HS	42
図 27：30～33% GR 樹脂のせん断強さ.....	26	図 59：30～33% GR 樹脂の HDT.....	43
図 28：30～33% GR 樹脂の圧縮強さ.....	27	図 60：ガラス繊維強化アモデル PPA の熱伝導率... 45	
図 29：A-1000 樹脂の圧縮強さと温度	27	図 61：アモデル A-1000 PPA — 比熱と温度.....	46
図 30：A-1000 樹脂の圧縮弾性率と温度	27	図 62：アモデル A-4000 — 比熱と温度.....	46
図 31：アイゾット衝撃試験の試験片	28	図 63：アモデル A-5000 — 比熱と温度.....	46
図 32：30～33% GR 樹脂のアイゾット 衝撃強さ、ASTM D256.....	28	図 64：アモデル A-6000 — 比熱と温度.....	46
		図 65：A-1000 の熱重量分析（空気雰囲気中）	47
		図 66：熱老化の比較 — 引張強さ	47
		図 67：熱老化の比較 — アイゾット衝撃.....	48
		図 68：リブを追加して剛性を高める	69
		図 69：曲げ荷重を付加した片持ち梁	69
		図 70：引張クリープ破断： アモデル A-1133 HS 樹脂	70
		図 71：内側コーナーの応力集中係数	71

図 72：熱応力の例	71
図 73：ボルトのトルク保持	72
図 74：メカニカルファスナーの設計	74
図 75：セルフタッピングねじ用のボス設計.....	74
図 76：ねじ込みに伴って発生するトルク	75
図 77：超音波インサート用のボス設計	75
図 78：カンチレバー（片持ち梁）タイプの スナップフィット	76
図 79：片持ち梁 — 自由端に集中荷重	76
図 80：テーパ付き梁を使用する スナップフィット設計	77
図 81：テーパ付き梁の比例定数（K）	77
図 82：肉厚の変化	78
図 83：抜き勾配 — 離型を容易にする設計.....	78
図 84：抜き勾配 — 推奨リブ設計	79
図 85：ボス設計 — 一般的ガイドライン.....	80
図 86：ビードを使用しているサーモスタット ハウジングの例.....	80
図 87：アンダーカットの図	80
図 88：ホットプレート溶接の接合部設計.....	81
図 89：接合部の重ねせん断構造.....	82
図 90：せん断接合構成.....	82
図 91：エネルギーを一方向へ集中する 代表的な接合部の構成	83
図 92：重ねせん断接着強度	84
図 93：側面衝撃接着強度	84

アモデル ポリフタルアミド (PPA) 樹脂

ポリフタルアミド (PPA) 樹脂であるアモデルは 1991 年に製品化されました。ポリフタルアミド樹脂の合成技術は、広範囲にわたる半結晶性樹脂および非晶性樹脂の両方を作り出すことのできる技術です。1991 年以降、産業界からの具体的なニーズに応え、基本となる重合組成が何種類か製品化されてきました。これまでに商品化されたアモデル製品はすべて半結晶性樹脂です。

アモデル PPA 樹脂の半結晶性グレードは、優れた機械特性と卓越した寸法安定性、さらに並外れた耐熱性能を発揮し、しかも加工特性も良好です。アモデル樹脂は、大量に使用される中程度の性能のエンジニアリングポリマー（熱可塑性ポリエステルや脂肪族ポリアミド）と、コスト高のために使用量が限られているポリエーテルエーテルケトン (PEEK) のような特殊熱可塑性樹脂の間のコストパフォーマンスのギャップを埋めることができる製品です。

アモデル製品群には 100 種類を超える様々なグレードがあります。それぞれのグレードは、具体的な用途と処理上の要件に即した特性が巧みにバランスするように設計されています。アモデル PPA の応用例は産業界の広い分野で展開されており、このような分野には自動車／輸送、工業機器、水処理、電気通信、電気／電子、コーティングとコンポジット、フードサービス、家電・日用品などが含まれます。

本冊子は、アモデル PPA を材料ニーズへのソリューションとして検討されている設計／製造担当者の方々に、使いやすい参考資料を提供する目的で編集されたマニュアルです。製品群の中から選択したグレードの特性データを掲載するとともに、部品設計および加工処理上の推奨事項についても説明しています。

化学

アモデル樹脂は、一般的な化学区分ではポリアミドとして分類される樹脂です。ポリアミドは一般的には二官能基を持つ有機酸と二官能基アミンの反応、または ω -アミノ酸またはラクタムの自己縮合反応によって生成されます。ポリアミドは多種類の酸とアミンから生成が可能であり、多くのポリアミドは商業的に重要な役割を担っています。

表 1：アモデル PPA ベースポリマーの特性

ベース ポリマー	T_g	T_m
	°C	°C
A-1000	123	313
A-4000	100	325
A-5000	89	294
A-6000	88	310

様々なポリアミドを区別するために命名法についての取り決めがあります。この規則では、ポリアミドに名前を付ける際、モノマー中に含まれる炭素数を基準としますが、そのときにジアミン側の炭素数を名前の先頭側に置きます。したがって、ヘキサメチレンジアミンとアジピン酸から作られるポリアミドはポリアミド 66 またはナイロン 66 と呼ばれ、ヘキサメチレンジアミンとドデカン二酸から作られるポリアミドはポリアミド 6,12 と呼ばれます。

脂肪族二官能基酸の代わりに芳香族の二官能基酸が使用される場合は、芳香族二官能基酸の異性体を区別する必要があることから命名規則も若干変更され、ポリフタルアミドという名前を用いることによって脂肪族のみを原料とするポリアミドと区別することもあります。

ヘキサメチレンジアミンとテレフタル酸の縮合反応によって作られるポリアミド 6,T は、優れた寸法安定性と低い吸水性、また高い強度と耐熱性を持つため、以前から高い評価を与えられてきた樹脂です。しかしこの樹脂には、結晶融点が熱分解温度よりも高い 370°C という値を持つという基本的な問題点があるため、商業化が阻害されてきました。このため、例えば射出成形や押出成形などの従来の熔融プロセス技術では加工することができません。これに加えて、様々な他の要素のなかでも特にその融点が重合プロセスを複雑化しています。

複数のコモノマーを追加することにより、基本的なポリアミド 6,T 技術が改変され、独自の物質組成を持つポリフタルアミド (PPA) 樹脂としてのアモデルファミリーを製造しました。コモノマーの量と種類を変更することにより、一連の樹脂ファミリーが得られます。これらの樹脂はすべてポリアミド 6,T よりも低い融点を持ち、急速に結晶化します。アモデル PPA ベースポリマーの熱特性を表 1 に示します。

これらのベースポリマーをミネラルやガラス繊維、さらに他の複合材料と組み合わせることにより、加工性と耐熱性／機械特性のバランスのとれた、射出成形可能なさまざまな樹脂を生成することができます。ベースポリマー A-1000 をベースとするグレードはオイル温調金型を必要としますが、それ以外のポリマーをベースとするグレードは、水温調金型でも処理が可能です。

結晶性

熱可塑性樹脂はしばしば非晶性と半結晶性というふたつのクラスに分類されます。非晶性と半結晶性樹脂の大きな相違点のひとつは、温度変化に応じて起こる特性の変化です。図 1 に示すのは、温度変化に対して非晶性と半結晶性樹脂の弾性率が示す代表的な変化です。

温度が上昇すると、非晶性ポリマーの弾性率は一般にゆっくりと減少し、この減少はガラス転移温度 (T_g) に達するまで続きます。 T_g よりも高い温度領域では、弾性率はより急激な低下を示します。このため、非晶性の熱可塑性樹脂がガラス転移温度よりも高い温度領域で使用されることはほとんどありません。

半結晶性樹脂の場合も、弾性率は温度の上昇に伴って緩やかに減少します。ガラス転移温度またはその近傍で弾性率は急激に低下しますが、それでも材料として使用可能なレベルを保ちます。そこからさらに温度を上昇させても、融点 (T_m) に達するまで弾性率はこのレベルを維持します（結晶性プラトー）。融点 (T_m) に達すると、弾性率は再び急激に低下します。半結晶性樹脂はガラス転移温度を超える温度で使用されることもよくありますが、使用できる範囲は融点以下に限られます（特にガラス繊維やミネラルで強化されたグレードの場合）。

半結晶性樹脂を加工処理する場合、結晶性の程度は処理条件によって影響を受けます。例えば、アモデル A-1000 PPA をベースとする製品は、射出成形の過程で最大限の結晶性を発現させるためには少なくとも 135°C 以上の金型表面温度を必要とします。アモデル A-4000 または A-6000 をベースとする製品は 80°C 程度の金型温度で高い結晶性を発現します。

半結晶性樹脂は T_m を超える温度で溶融し、固体状態から液体状態へと変化します。

半結晶性樹脂の耐熱特性は T_g と T_m によって大きく規定されます。すなわち、ポリマーが高い剛性を示す領域 (T_g よりも低温) と中程度の剛性を示す領域 (T_g と T_m の中間)、および使用に耐える剛性を示さない領域 (T_m よりも高温) が、このふたつの温度によって区分されます。図 2 に、アモデルベース樹脂の温度に対する弾性率の関係を示します。これは、動的熱機械測定 (DMA) により得られたデータです。

図 1：温度に対する弾性率の変化

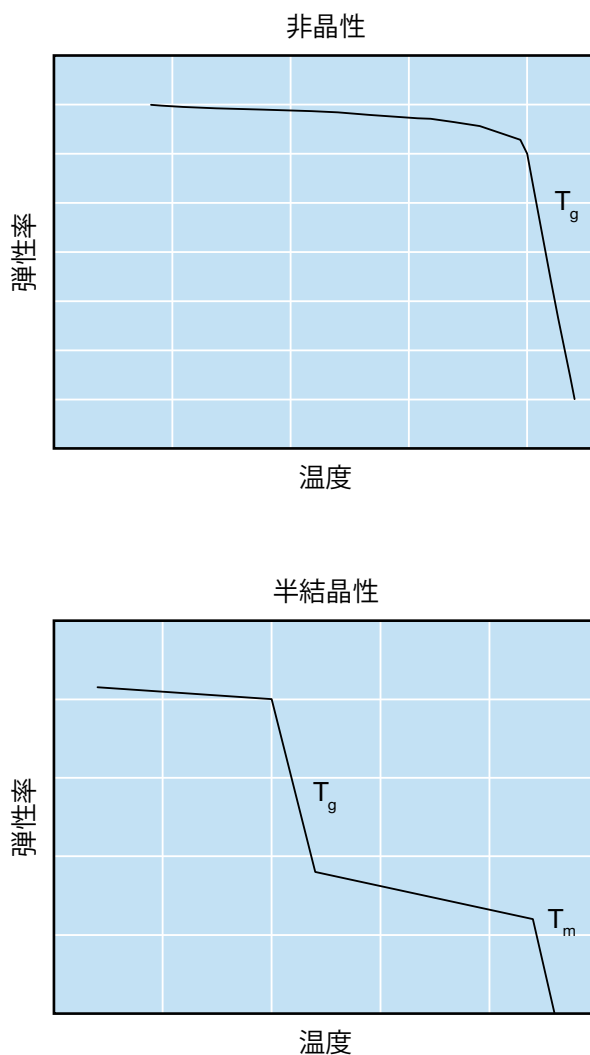
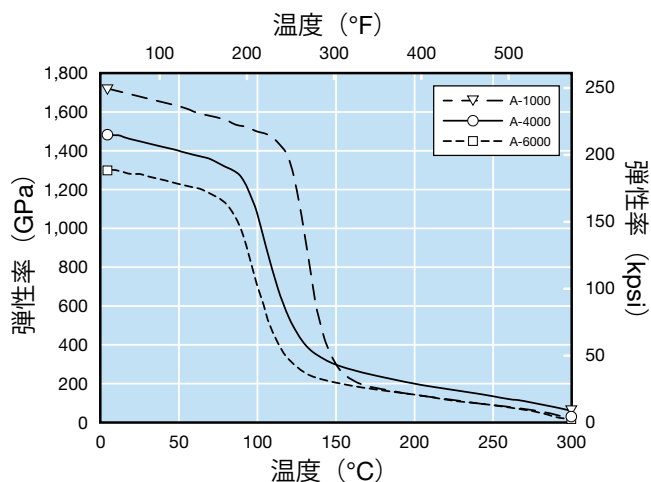


図 2：温度に対する弾性率の関係：アモデルベース樹脂



水分の影響

他のポリマーと同様、ポリフタルアミド樹脂も雰囲気中の水分を吸収します。一般的に、ポリフタルアミドは PA 6,6 のような脂肪族ポリアミドよりも吸水量が小さく、かつ水分を吸収する速度も低いのが特徴です。

アモデル A-1000 ベースの樹脂による成形品を相対湿度 (RH) 100% の環境で吸水平衡に達するのを待つと、吸水による重量増加は、ポリフタルアミド樹脂自体の重量のおよそ 5~6% 程度になります。

図 3 に示すのは、アモデル A-1000 樹脂と PA 6,6 のガラス転移温度を水分含量に関連して比較したものです。これらの材料は異なる速度で水分を吸収し、最大吸水量も異なります。これらの特性を比較する最も有用かつ実用的な方法は、 T_g を様々な相対湿度における平衡水分含量に対してプロットすることです。

乾燥した PA 6,6 を乾燥したアモデル A-1000 樹脂と比較すると、アモデルは T_g が約 60°C 高いという利点を持っています。相対湿度 50% 相当の水分含量でこの比較を行うと、アモデルの方が約 89°C 高い T_g を示します。アモデル ポリフタルアミドが示す卓越した寸法安定性と特性保持能力は、主として T_g が高いこと、および 100% RH 相当の水分含量においても T_g が室温よりもはるかに高いレベルを維持することに起因します。一方で、50~60% RH での平衡状態に対応する水分含量において、PA 6,6 の T_g は -15°C に低下します。

図 4 に示すのは、23°C の水中に浸漬後のアモデル A-1000 樹脂と PA 6,6 の寸法変化の比較です。図に示すのは、厚さ 3.2 mm の平板を用いた測定結果です。1 年間 (約 8,800 時間) 経過後のデータで比較すると、PA 樹脂は PPA 樹脂に比べ約 3 倍の寸法変化を起こしています。

ポリフタルアミドは標準的なポリアミドと比較して吸水量が少ないばかりでなく、吸収する速度もはるかに低いのが特徴です。23°C におけるアモデル A-1000 樹脂内の水の拡散係数は PA 6,6 の約 20% にすぎません。

図 3：水分が T_g に及ぼす影響

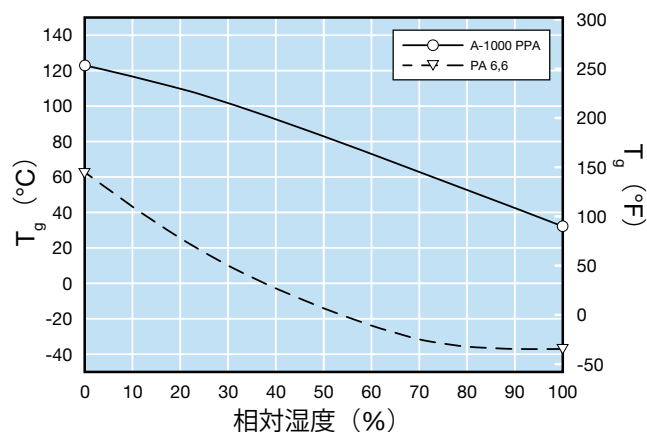
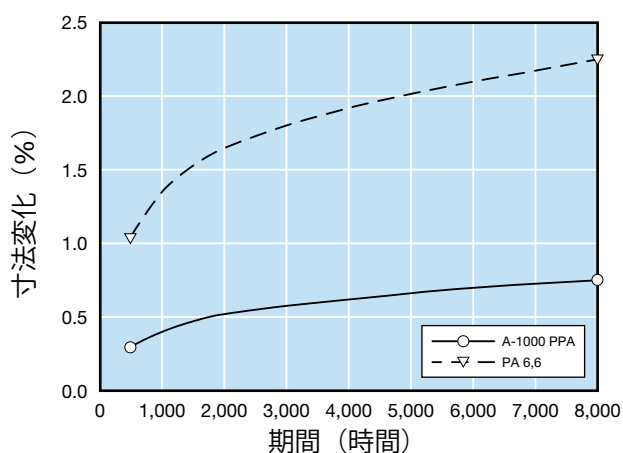


図 4：寸法変化 vs. 水中浸漬時間



製品データ

アモデル樹脂特性表

アモデル PPA 樹脂は、強化材や充填材、衝撃改質剤、難燃剤、着色剤、その他の添加物を配合することで、様々な特徴を持つ広い範囲の製品を実現することができます。現在、このファミリーは 100 種類を超える商用グレードを擁しています。この資料では、製品ファミリーを代表するものとして選択された 12 種類のグレードについてその特性を詳細に解説します。お客様ご自身の用途に最適な樹脂の選択については、ソルベイの担当者までご相談ください。

ベースポリマーは結晶性であるために半透明の白色をしています。個々の製品の自然色は使用する添加剤に応じてさまざまです。大部分のグレードは、自然色または黒色で提供されていますが、それ以外の色で提供することも可能です。特にご希望の色がある場合には、ソルベイの担当者にご相談ください。

表 2：アモデル樹脂の命名規則

位置	特性	意味／例
第 1 文字	製品ファミリー	A = アモデル E = エキストラ
次の文字（複数あり）	オプション	E = 電気／電子 F = 難燃 P = 塗装／めっき S = 厚肉部品 (>3 mm) T = 耐衝撃
-	ハイフン	
第 1 数字	ベースポリマー	1 = A-100x ベースポリマー 4 = A-400x ベースポリマー 5 = A-500x ベースポリマー 6 = A-600x ベースポリマー 9 = A-900x ベースポリマー
第 2 数字	充填材／強化材	0 = 無充填 1 = ガラス繊維 2 = ミネラル A 3 = ミネラル A + ガラス繊維 4 = ミネラル B 5 = ミネラル B + ガラス繊維 6 = 炭素／グラファイト繊維 9 = 耐グリコール性
第 3、第 4 数字	充填材／強化材の量	33 = 33%（重量比） 45 = 45%（重量比）など
スペース		
次の文字（複数あり）	接尾辞	HN = 熱安定剤添加、潤滑剤無添加 HS = 熱安定剤添加 HSL = 熱安定剤添加 + 潤滑剤添加 L = 潤滑剤添加、熱安定剤無添加 NL = 潤滑剤無添加、熱安定剤無添加 V0 Z = UL 94 V0（0.8 mm において）
スペース		
次の 2 文字	カラーコード	NT = ナチュラル（無着色） BK = 黒 WH = 白、その他

表記方法

表 2 に概略を示すように、アモデル® PPA のグレードは重要な組成情報が一見して分かるような表記方法を採用しています。ただし、超高靱性の ET グレードや高流動性の HFZ グレードのように、この表記方法にも例外がいくつかあります。

ひとつの例として、アモデル AFA-6133 V0 BK324 を考えてみます。この名称は A-600x ベース樹脂にガラス繊維を重量比で 33% 加えて (6133) 難燃性を付加した製品 (AFA) であることを示しています。この樹脂は 0.8 mm で UL94 の V0 規格を満たし、着色剤 324 によって黒色に着色されています。

製品の選択

ソルベイススペシャルティポリマーズは、業界で最も広範囲に亘る PPA 樹脂製品群を提供しています。お客様の個々の用途に最適な製品を選択するのに役立つように、アモデル製品群の中から選択した何種類かについて相対的な性能比較を表 3 に示します。表に示すのはいずれもアモデル全体を代表する製品ばかりです。しかし、表に記載されている以外にも多数のグレードを用意しておりますので、お客様に最適な製品がきっと見つかることでしょう。製品選択の最終的な判断を下される前に、ソルベイススペシャルティポリマーズの担当に相談されることをお奨めします。弊社 Web サイトには、この他にも製品選択に役立つ資料や技術データを多数掲載しております。

表 3：アモデル PPA 主要グレード特性値の相対比較⁽¹⁾

	強度 (室温)	剛性 (室温)	剛性 (100°C)	衝撃 — ノッチ付き	荷重たわみ 温度	比重
ガラス繊維強化グレード						
A-1133 HS	9	6	8	4	7	6
A-1145 HS	9	8	8	7	7	7
A-6135 HN	8	7	6	5	8	4
A-4133 HS	7	6	5	4	9	4
耐衝撃グレード						
AT-1002 HS	2	2	2	8	2	1
ET-1000 HS	1	1	1	9	1	1
耐衝撃ガラス繊維強化グレード						
AT-1116 HS	5	4	4	7	4	3
AT-6115 HS	4	3	3	6	4	3
難燃グレード						
AFA-6133 V0 Z	6	8	7	5	6	8
ミネラル、ミネラル／ガラス繊維強化グレード						
A-1240 L	3	4	4	2	3	6
A-1565 HS	4	9	9	1	5	10
AS-1566 HS	8	9	9	3	6	9

⁽¹⁾ 10 段階での特性ランク付け (10 が最高位)

特性データ

主要特性

以下に示す短期特性表に記載の主要特性データは、いずれも製品特性の通常の変動範囲を代表する値です。個々のロットの実際の特性値は、規格範囲内で変動します。

したがって、これらの値を仕様の限界値を規定する目的で使用しないでください。また、これらの値だけを使用した部品設計を行わないでください。

水分コンディショニングの加速方法

ポリアミドは一般に雰囲気中の水分を吸収する性質を持ち、吸収した水分が特性値のいくつかに影響を与えます。設計者により適切な特性情報を提供するため、ポリアミドのメーカーは一般に成形直後の「絶乾状態」と吸水後の両方の特性値一覧を提供しています。吸水後のデータとしては 50% RH の値を示すのが慣例であり、この値は相対湿度 50% の環境に置かれて平衡に達した材料の特性値を示すものです。ポリアミド 6,6 の場合は水分の吸収が速く、かつ水分によって多くの特性値が顕著な変化を示すため、この慣例は妥当なものと言えます。

一方ポリフタルアミドの場合は吸水の速度が遅く、かつほとんどの特性値は水分を吸収しても目立った変化を示さないため、この方法は適切とは言えません。しかし、業界の慣行に合わせるという意味で吸水後の値も作成してあります。吸水後のサンプルの正しい調製方法は、サンプルを 50% RH 環境に置いて重量が一定になる（吸水が平衡に達する）のを待つことです。しかし、アモデル PPA の吸水速度は非常に小さいため、平衡に達するには 2 年以上の期間が必要です。このため、吸水を加速する方法を開発しました。

ここで使用している水分コンディショニングの加速方法は、水 100g あたり 80g の酢酸カリウムを添加した水溶液中に試験片を浸漬して 96 時間煮沸する方法です。この方法は一定湿度のチャンバー内にサンプルを入れて平衡に達するのを待つ方法を近似する目的で経験的に開発しました。このコンディショニング方法は 100~130°C までの範囲の温度を使用するため、一部ではアニーリング効果も発生し、50% RH における弾性率の値が成形直後の「絶乾状態」と比較して数パーセント高い値を示すこともあります。

さらに、比較的高温で水を主成分とするコンディショニングメディアに 96 時間浸漬することから、ガラス／樹脂界面においていくらかの加水分解が起こります。このため、ガラス／樹脂界面の付着性に依存する引張強さやノッチ付きアイソッドなどの特性では、サンプルを 50% RH の空気雰囲気中室温でコンディショニングした場合と比較して測定値が 10% 程度低めにすることがあります。

表 4：ガラス繊維強化グレード — 機械特性 (US 単位)

物性	温度	方法		単位	A-1133	A-1145	A-6135	AS-4133
		ASTM	ISO		HS	HS	HN	HS
引張強さ	73°F	D638		kpsi	32.0	37.5	29.4	29.0
引張強さ 50% RH	73°F	D638		kpsi	28.0	33.0	25.5	25.0
引張強さ	73°F		527	kpsi	33.8	38.1	30.6	30.6
	212°F		527	kpsi	21.5	25.1	17.6	18.1
	302°F		527	kpsi	11.5	12.3	13.4	12.7
	347°F		527	kpsi	10.4	11.0	11.9	11.5
引張伸び	73°F	D638		%	2.5	2.6	1.9	2.5
引張伸び 50% RH	73°F	D638		%	2.1	2.1	2.1	2.2
引張伸び	73°F		527	%	2.5	2.7	2.0	2.6
	212°F		527	%	2.9	2.5	4.3	4.3
	302°F		527	%	8.7	7.2	4.9	6.6
	347°F		527	%	8.5	6.5	4.7	6.6
引張弾性率	73°F	D638		Mpsi	1.90	2.50	2.00	1.70
引張弾性率 50% RH	73°F	D638		Mpsi	1.90	2.50	1.77	1.70
引張弾性率	73°F		527	Mpsi	1.94	2.44	1.67	1.83
	212°F		527	Mpsi	1.57	1.62	1.06	0.99
	302°F		527	Mpsi	0.97	1.16	0.91	0.77
	347°F		527	Mpsi	0.62	0.78	0.77	0.70
曲げ強さ	73°F	D790		kpsi	46.0	52.6	45.0	42.0
曲げ強さ 50% RH	73°F	D790		kpsi	36.9	42.7	36.1	35.0
曲げ強さ	73°F		178	kpsi	46.3	54.7	43.5	42.9
	212°F		178	kpsi	33.0	38.7	24.7	25.6
	302°F		178	kpsi	13.5	16.1	17.8	16.1
	347°F		178	kpsi	11.5	13.7	16.2	14.4
曲げ弾性率	73°F	D790		Mpsi	1.65	2.00	1.65	1.60
曲げ弾性率 50% RH	73°F	D790		Mpsi	1.65	2.00	1.59	1.60
曲げ弾性率	73°F		178	Mpsi	1.68	2.31	1.65	1.51
	212°F		178	Mpsi	1.42	1.89	0.96	1.04
	302°F		178	Mpsi	0.58	0.78	0.71	0.67
	347°F		178	Mpsi	0.52	0.71	0.67	0.61
せん断強さ	73°F	D732		kpsi	14.7	15.6	12.7	13.0
せん断強さ 50% RH	73°F	D732		kpsi	12.9	13.3	10.7	11.0
圧縮強さ	73°F	D695		kpsi	26.9	28.1	21.4	26.0
ポアソン比	73°F				0.41	0.41	0.39	0.41
アイゾット衝撃、ノッチ付き	73°F	D256		ft-lb/in	1.5	2.1	1.6	1.5
アイゾット衝撃、ノッチ付き 50% RH	73°F	D256		ft-lb/in	1.1	1.9	1.3	1.5
アイゾット衝撃、ノッチなし	73°F	D4812		ft-lb/in	14	21	15	19
アイゾット衝撃、ノッチ付き	73°F		180/1A	ft-lb/in ²	4.2	4.9	4.3	4.6
アイゾット衝撃、ノッチなし	73°F		180/1U	ft-lb/in ²	23	29	30	28
シャルピー衝撃	73°F		179/1eA	ft-lb/in ²	4.5	4.9	4.4	5.1
シャルピー衝撃、ノッチなし	73°F		179/1eU	ft-lb/in ²	35	44	28	32
ロックウェル硬度	73°F	D785		R	125	125	125	124

表 5：ガラス繊維強化グレード — 機械特性 (SI 単位)

物性	温度	方法		単位	A-1133	A-1145	A-6135	AS-4133
		ASTM	ISO		HS	HS	HN	HS
引張強さ	23°C	D638		MPa	221	259	202	200
引張強さ 50% RH	23°C	D638		MPa	193	228	178	172
引張強さ	23°C		527	MPa	233	263	211	211
	100°C		527	MPa	148	173	121	125
	150°C		527	MPa	80	85	93	87
	175°C		527	MPa	72	76	82	79
引張伸び	23°C	D638		%	2.5	2.6	1.9	2.5
引張伸び 50% RH	23°C	D638		%	2.1	2.1	2.1	2.2
引張伸び	23°C		527	%	2.5	2.7	2.0	2.6
	100°C		527	%	2.9	2.5	4.3	4.3
	150°C		527	%	8.7	7.2	4.9	6.6
	175°C		527	%	8.5	6.5	4.7	6.6
引張弾性率	23°C	D638		GPa	13.1	17.2	13.8	11.7
引張弾性率 50% RH	23°C	D638		GPa	13.1	17.2	12.2	11.7
引張弾性率	23°C		527	GPa	13.4	16.8	11.5	12.6
	100°C		527	GPa	10.8	11.2	7.3	6.8
	150°C		527	GPa	6.7	8.0	6.3	5.3
	175°C		527	GPa	4.3	5.4	5.3	4.8
曲げ強さ	23°C	D790		MPa	317	363	310	290
曲げ強さ 50% RH	23°C	D790		MPa	254	294	249	241
曲げ強さ	23°C		178	MPa	319	377	300	296
	100°C		178	MPa	227	267	171	176
	150°C		178	MPa	93	111	123	111
	175°C		178	MPa	80	95	112	100
曲げ弾性率	23°C	D790		GPa	11.4	13.8	11.4	11.0
曲げ弾性率 50% RH	23°C	D790		GPa	11.4	13.8	10.9	11.0
曲げ弾性率	23°C		178	GPa	11.6	15.9	11.4	10.4
	100°C		178	GPa	9.8	13.0	6.6	7.2
	150°C		178	GPa	4.0	5.4	4.9	4.6
	175°C		178	GPa	3.6	4.9	4.6	4.2
せん断強さ	23°C	D732		MPa	101	108	88	90
せん断強さ 50% RH	23°C	D732		MPa	89	92	74	76
圧縮強さ	23°C	D695		MPa	185	194	148	179
ポアソン比	23°C				0.41	0.41	0.39	0.41
アイゾット衝撃、ノッチ付き	23°C	D256		J/m	80	110	85	80
アイゾット衝撃、ノッチ付き 50% RH	23°C	D256		J/m	60	100	70	70
アイゾット衝撃、ノッチなし	23°C	D4812		J/m	770	1105	780	1030
アイゾット衝撃、ノッチ付き	23°C		180/1A	kJ/m ²	8.8	10.3	9.1	9.7
アイゾット衝撃、ノッチなし	23°C		180/1U	kJ/m ²	49	61	62	59
シャルピー衝撃	23°C		179/1eA	kJ/m ²	9.5	10.3	9.2	10.7
シャルピー衝撃、ノッチなし	23°C		179/1eU	kJ/m ²	73	93	60	68
ロックウェル硬度	23°C	D785		R スケール	125	125	125	124

表 6：ガラス繊維強化グレード — 熱、電気、一般特性

物性	方法		単位	A-1133	A-1145	A-6135	AS-4133
	ASTM	ISO		HS	HS	HN	HS
熱特性							
荷重たわみ温度、264 psi	D648		°C	285	287	291	300
荷重たわみ温度、1.8 MPa		75AF	°C	280	281	288	294
ビカッ軟化温度	D1525	306	°C	303	304	301	314
融点	D3418	11357-3	°C	313	310	310	327
燃焼性、3.2 mm 棒材	UL-94			HB	HB	HB	HB
電気特性							
絶縁耐力、3.2 mm	D149		V/mil	533	584	—	510
			kV/mm	21	23	—	21
絶縁耐力、1.6 mm	D149		V/mil	813	—	—	813
			kV/mm	32	—	—	32
体積抵抗率	D257		Ω-cm	1x10 ¹⁶	1x10 ¹⁶	—	1x10 ¹⁶
表面抵抗率	D257		Ω	1x10 ¹⁵	—	—	1x10 ¹⁵
耐トラッキング指数	D3638		Volt	550	550	—	>600
誘電率 @ 60 Hz	D150			4.4	4.6	—	3.8
誘電率 @ 100 Hz	D150			5.1	—	—	4.6
誘電率 @ 10 ⁶ Hz	D150			4.2	4.4	—	3.6
誘電率 @ 10 ⁹ Hz	D150			3.7	—	—	3.6
誘電正接 @ 60 Hz	D150			0.005	0.005	—	0.004
誘電正接 @ 10 ⁶ Hz	D150			0.017	0.016	—	0.012
誘電正接 @ 10 ⁹ Hz	D150			0.016	—	—	0.013
一般特性							
比重	D792	1183A		1.48	1.59	1.45	1.45
吸水性、24 時間	D570	62	%	0.2	0.1	0.3	0.3
成形収縮率、流れ方向	D955	294-4	%	0.4	0.2	0.6	0.5
成形収縮率、直角方向	D955	294-4	%	0.8	0.6	0.9	1.0

表 7：耐衝撃グレード — 機械特性 (US 単位)

物性	温度	方法		単位	AT-1002	ET-1000
		ASTM	ISO		HS	HS
引張強さ	73°F	D638		kpsi	12.1	10.0
引張強さ 50% RH	73°F	D638		kpsi	11.1	9.1
降伏時引張応力	73°F		527	kpsi	10.9	10.2
破断時引張応力	73°F		527	kpsi	9.9	8.7
降伏時引張応力	212°F		527	kpsi	5.6	4.9
破断時引張応力	212°F		527	kpsi		
降伏時引張伸び	73°F	D638		%	5.0	6.0
破断時引張伸び	73°F	D638		%	10~12	20.0
破断時引張伸び 50% RH	73°F	D638		%	30.0	18
降伏時引張ひずみ	73°F		527	%	5.0	5.0
破断時引張ひずみ	73°F		527	%	10.0	7.0
降伏時引張ひずみ	212°F		527	%	3.7	4.3
破断時引張ひずみ	212°F		527	%	>95	>95
引張弾性率	73°F	D638		kpsi	400	350
引張弾性率 50% RH	73°F	D638		kpsi	400	350
引張弾性率	73°F		527	kpsi	400	350
引張弾性率	212°F		527	kpsi	305	290
曲げ強さ	73°F	D790		kpsi	14.9	15.8
曲げ強さ 50% RH	73°F	D790		kpsi	10.6	12.4
曲げ強さ	73°F		178	kpsi	11.5	10.2
曲げ強さ	212°F		178	kpsi	7.2	6.4
曲げ弾性率	73°F	D790		kpsi	320	330
曲げ弾性率 50% RH	73°F	D790		kpsi	330	310
曲げ弾性率	73°F		178	kpsi	330	260
曲げ弾性率	212°F		178	kpsi	250	190
せん断強さ	73°F	D732		kpsi	9.3	8.5
せん断強さ 50% RH	73°F	D732		kpsi	8.3	
ポアソン比	73°F				0.38	0.39
アイゾット衝撃、ノッチ付き	73°F	D256		ft-lb/in	2.4	17.0
アイゾット衝撃、ノッチ付き 50% RH	73°F	D256		ft-lb/in	2.6	20.0
アイゾット衝撃、ノッチなし	73°F	D4812		ft-lb/in	破断なし	破断なし
アイゾット衝撃、ノッチ付き	73°F		180/1A	ft-lb/in ²	6.0	34.9
アイゾット衝撃、ノッチなし	73°F		180/1U	ft-lb/in ²	84	破断なし
シャルピー衝撃	73°F		179/1eA	ft-lb/in ²	6.4	36.9
シャルピー衝撃、ノッチなし	73°F		179/1eU	ft-lb/in ²	破断なし	破断なし
ロックウェル硬度	73°F	D785		R	119	120

表 8：耐衝撃グレード — 機械特性 (SI 単位)

物性	温度	方法		単位	AT-1002	ET-1000
		ASTM	ISO		HS	HS
引張強さ	23°C	D638		MPa	83	69
引張強さ 50% RH	23°C	D638		MPa	76	63
降伏時引張応力	23°C		527	MPa	75	70
破断時引張応力	23°C		527	MPa	68	60
降伏時引張応力	100°C		527	MPa	39	34
破断時引張応力	100°C		527	MPa		
降伏時引張伸び	23°C	D638		%	5.0	6.0
破断時引張伸び	23°C	D638		%	10~12	20.0
破断時引張伸び 50% RH	23°C	D638		%	30.0	18.0
降伏時引張ひずみ	23°C		527	%	5.0	5.0
破断時引張ひずみ	23°C		527	%	10.0	7.0
降伏時引張ひずみ	100°C		527	%	3.7	4.3
破断時引張ひずみ	100°C		527	%	>95	>95
引張弾性率	23°C	D638		GPa	2.8	2.4
引張弾性率 50% RH	23°C	D638		GPa	2.8	2.4
引張弾性率	23°C		527	GPa	2.8	2.4
引張弾性率	100°C		527	GPa	2.1	2.0
曲げ強さ	23°C	D790		MPa	103	109
曲げ強さ 50% RH	23°C	D790		MPa	73	85
曲げ強さ	23°C		178	MPa	80	70
曲げ強さ	100°C		178	MPa	50	44
曲げ弾性率	23°C	D790		GPa	2.2	2.3
曲げ弾性率 50% RH	23°C	D790		GPa	2.3	2.2
曲げ弾性率	23°C		178	GPa	2.3	1.8
曲げ弾性率	100°C		178	GPa	1.8	1.3
せん断強さ	23°C	D732		MPa	64	59
せん断強さ 50% RH	23°C	D732		MPa	57	
ポアソン比	23°C				0.38	0.39
アイゾット衝撃、ノッチ付き	23°C	D256		J/m	130	905
アイゾット衝撃、ノッチ付き 50% RH	23°C	D256		J/m	140	1065
アイゾット衝撃、ノッチなし	23°C	D4812		J/m	破断なし	破断なし
アイゾット衝撃、ノッチ付き	23°C		180/1A	kJ/m ²	13	74
アイゾット衝撃、ノッチなし	23°C		180/1U	kJ/m ²	177	破断なし
シャルピー衝撃	23°C		179/1eA	kJ/m ²	14	78
シャルピー衝撃、ノッチなし	23°C		179/1eU	kJ/m ²	破断なし	破断なし
ロックウェル硬度	23°C	D785			119	120

表 9：耐衝撃グレード — 熱、電気、一般特性

物性	方法		単位	A-1002 HS	ET -1000 HS
	ASTM	ISO			
熱特性					
荷重たわみ温度、264 psi	D648		°C	121	120
荷重たわみ温度、1.8 MPa		75AF	°C	118	109
ビカット軟化温度	D1525	306	°C	286	283
融点	D3418	11357-3	°C	315	310
燃焼性、3.2 mm 棒材	UL-94			HB	HB
電気特性					
絶縁耐力、3.2 mm	D149		V/mil	431	—
			kV/mm	17	—
体積抵抗率	D257		Ω-cm	1x10 ¹⁶	—
表面抵抗率	D257		Ω	8x10 ¹³	—
耐トラッキング指数	D3638		Volt	>600	—
誘電率 @ 60 Hz	D150			3.3	—
誘電率 @ 10 ⁶ Hz	D150			3.3	—
誘電正接 @ 60 Hz	D150			0.004	—
誘電正接 @ 10 ⁶ Hz	D150			0.016	—
一般特性					
比重	D792	1183A		1.13	1.13
吸水率、24 時間	D570	62	%	0.5	0.7
成形収縮率、流れ方向	D955	294-4	%	2.0	1.5
成形収縮率、直角方向	D955	294-4	%	2.1	1.5

表 10：耐衝撃ガラス繊維強化、難燃性グレード — 機械特性 (US 単位)

物性	温度	方法		単位	AFA-6133		
		ASTM	ISO		AT-1116 HS	AT-6115 HS	V0 Z
引張強さ	73°F	D638		kpsi	23.3	17.7	28.8
引張強さ 50% RH	73°F	D638		kpsi	19.0	13.9	24.1
引張強さ	73°F		527	kpsi	23.2	16.5	27.0
	212°F		527	kpsi	9.5	9.9	16.5
	302°F		527	kpsi			10.9
	347°F		527	kpsi			9.2
引張伸び	73°F	D638		%	3.8	3.4	1.7
引張伸び 50% RH	73°F	D638		%	2.8	5.3	1.7
引張伸び	73°F		527	%	3.7	3.9	1.6
	212°F		527	%	4.2	7.7	2.4
	302°F		527	%			5.1
	347°F		527	%			4.9
引張弾性率	73°F	D638		Mpsi	0.94	0.78	2.33
引張弾性率 50% RH	73°F	D638		Mpsi	1.03	0.97	1.99
引張弾性率	73°F		527	Mpsi	1.00	0.78	2.10
	212°F		527	Mpsi	0.97	0.45	1.33
	302°F		527	Mpsi			0.86
	347°F		527	Mpsi			0.74
曲げ強さ	73°F	D790		kpsi	32.8	24.0	32.5
曲げ強さ 50% RH	73°F	D790		kpsi	29.1	16.7	33.2
曲げ強さ	73°F		178	kpsi	28.6	24.7	37.6
	212°F		178	kpsi	20.5	9.7	23.3
	302°F		178	kpsi			14.6
	347°F		178	kpsi			12.7
曲げ弾性率	73°F	D790		Mpsi	0.87	0.64	1.90
曲げ弾性率 50% RH	73°F	D790		Mpsi	0.90	0.50	1.93
曲げ弾性率	73°F		178	Mpsi	0.97	0.62	1.83
	212°F		178	Mpsi	0.72	0.34	1.17
	302°F		178	Mpsi			0.72
	347°F		178	Mpsi			0.67
せん断強さ	73°F	D732		kpsi	10.1	8.2	11.6
せん断強さ 50% RH	73°F	D732		kpsi	9.5	6.4	9.0
圧縮強さ	73°F	D695		kpsi	18.0	14.5	21.1
ポアソン比	73°F				0.40	0.39	0.37
アイゾット衝撃、ノッチ付き	73°F	D256		ft-lb/in	1.8	1.7	1.6
アイゾット衝撃、ノッチ付き 50% RH	73°F	D256		ft-lb/in	0.9	1.5	1.5
アイゾット衝撃、ノッチなし	73°F	D4812		ft-lb/in	18	16	13
アイゾット衝撃、ノッチ付き	73°F		180/1A	ft-lb/in ²	3.8	5.5	3.9
アイゾット衝撃、ノッチなし	73°F		180/1U	ft-lb/in ²	25	26	21
シャルピー衝撃	73°F		179/1eA	ft-lb/in ²	4.3	5.2	6.6
シャルピー衝撃、ノッチなし	73°F		179/1eU	ft-lb/in ²	41	36	22
ロックウェル硬度	73°F	D785		R スケール	124	116	125

表 11：耐衝撃ガラス繊維強化、難燃性グレード — 機械特性 (SI 単位)

物性	温度	方法		単位	AFA-6133		
		ASTM	ISO		AT-1116 HS	AT-6115 HS	V0 Z
引張強さ	23°C	D638		MPa	161	122	199
引張強さ 50% RH	23°C	D638		MPa	131	96	166
引張強さ	23°C		527	MPa	160	114	186
	100°C		527	MPa	66	68	114
	150°C		527	MPa			75
	175°C		527	MPa			63
引張伸び	23°C	D638		%	3.8	3.4	1.7
引張伸び 50% RH	23°C	D638		%	2.8	5.3	1.7
引張伸び	23°C		527	%	3.7	3.9	1.6
	100°C		527	%	4.2	7.7	2.4
	150°C		527	%			5.1
	175°C		527	%			4.9
引張弾性率	23°C	D638		GPa	6.5	5.4	16.1
引張弾性率 50% RH	23°C	D638		GPa	7.1	6.7	13.7
引張弾性率	23°C		527	GPa	6.9	5.4	14.5
	100°C		527	GPa	6.7	3.1	9.2
	150°C		527	GPa			5.9
	175°C		527	GPa			5.1
曲げ強さ	23°C	D790		MPa	226	165	224
曲げ強さ 50% RH	23°C	D790		MPa	201	115	229
曲げ強さ	23°C		178	MPa	197	170	259
	100°C		178	MPa	141	67	161
	150°C		178	MPa			101
	175°C		178	MPa			88
曲げ弾性率	23°C	D790		GPa	6.0	4.4	13.1
曲げ弾性率 50% RH	23°C	D790		GPa	6.2	3.4	13.3
曲げ弾性率	23°C		178	GPa	6.7	4.3	12.6
	100°C		178	GPa	5.0	2.4	8.1
	150°C		178	GPa			5.0
	175°C		178	GPa			4.6
せん断強さ	23°C	D732		MPa	70	56	80
せん断強さ 50% RH	23°C	D732		MPa	66	44	62
圧縮強さ	23°C	D695		MPa	124	100	145
ポアソン比	23°C				0.40	0.39	0.37
アイゾット衝撃、ノッチ付き	23°C	D256		J/m	95	90	85
アイゾット衝撃、ノッチ付き 50% RH	23°C	D256		J/m	45	80	80
アイゾット衝撃、ノッチなし	23°C	D4812		J/m	945	825	710
アイゾット衝撃、ノッチ付き	23°C		180/1A	kJ/m ²	8.1	11.6	8
アイゾット衝撃、ノッチなし	23°C		180/1U	kJ/m ²	53	54	44
シャルピー衝撃	23°C		179/1eA	kJ/m ²	9.1	11.0	14.0
シャルピー衝撃、ノッチなし	23°C		179/1eU	kJ/m ²	85	75	47
ロックウェル硬度	23°C	D785		R スケール	124	116	125

表 12：耐衝撃ガラス繊維強化、難燃性グレード — 熱、電気、一般特性

物性	方法		単位	AT-1116	AT-6115	AFA-6133
	ASTM	ISO		HS	HS	V0 Z
熱特性						
荷重たわみ温度、264 psi	D648		°C	254	271	277
荷重たわみ温度、1.8 MPa		75AF	°C	258	265	282
ビカット軟化温度	D1525	306	°C	295	296	291
融点	D3418	11357-3	°C	310	307	310
燃焼性、3.2 mm 棒材	UL 94			HB	HB	V-0
電気特性						
絶縁耐力、3.2 mm	D149		V/mil	—	533	609
			kV/mm	—	21	24
絶縁耐力、1.6 mm	D149		V/mil		711	686
			kV/mm		28	27
体積抵抗率	D257		Ω-cm	—	1x10 ¹⁶	1x10 ¹⁶
表面抵抗率	D257		Ω		1x10 ¹⁵	1x10 ¹⁵
耐トラッキング指数	D3638		Volt	—	—	—
誘電率 @ 60 Hz	D150			—	—	—
誘電率 @ 100 Hz	D150			—	4.0	4.8
誘電率 @ 10 ⁶ Hz	D150			—	3.3	4.1
誘電率 @ 10 ⁹ Hz	D150			—	3.1	3.7
誘電正接 @ 60 Hz	D150			—	—	—
誘電正接 @ 100 Hz	D150			—	—	—
誘電正接 @ 10 ⁶ Hz	D150			—	0.013	0.011
誘電正接 @ 10 ⁹ Hz	D150			—	0.011	—
一般特性						
比重	D792	1183A		1.28	1.22	1.68
吸水率、24 時間	D570	62	%	0.2	0.2	0.2
成形収縮率、流れ方向	D955	294-4	%	0.6	1.0	0.3
成形収縮率、直角方向	D955	294-4	%	0.6	1.1	0.6

表 13：ミネラル、ミネラル／ガラス強化グレード — 機械特性 (US 単位)

物性	温度	方法		単位	A-1240	A-1565	AS-1566
		ASTM	ISO		L	HS	HS
引張強さ	73°F	D638		kpsi	15.0	19.0	30.0
引張強さ 50% RH	73°F	D638		kpsi	13.5	17.9	25.4
引張強さ	73°F		527	kpsi	15.1	20.0	29.0
	212°F		527	kpsi	10.1	13.3	18.4
	302°F		527	kpsi	4.2	6.7	7.6
	347°F		527	kpsi	3.5	4.7	6.3
引張伸び	73°F	D638		%	1.6	1.2	1.7
引張伸び 50% RH	73°F	D638		%	1.2	1.2	1.8
引張伸び	73°F		527	%	1.6	1.0	1.4
	212°F		527	%	1.9	1.3	1.5
	302°F		527	%	9.1	2.4	3.4
	347°F		527	%	7.3	1.8	3.1
引張弾性率	73°F	D638		Mpsi	1.30	3.00	2.90
引張弾性率 50% RH	73°F	D638		Mpsi	1.20	3.02	3.03
引張弾性率	73°F		527	Mpsi	1.45	2.86	3.26
	212°F		527	Mpsi	0.81	2.23	2.49
	302°F		527	Mpsi	0.16	0.83	1.06
	347°F		527	Mpsi	0.13	0.74	0.90
曲げ強さ	73°F	D790		kpsi	30.0	30.5	42.0
曲げ強さ 50% RH	73°F	D790		kpsi	25.6	28.4	38.1
曲げ強さ	73°F		178	kpsi	24.9	30.6	41.2
	212°F		178	kpsi	17.6	23.6	29.7
	302°F		178	kpsi	4.0	10.1	13.9
	347°F		178	kpsi	3.2	8.1	11.0
曲げ弾性率	73°F	D790		Mpsi	1.10	2.60	2.70
曲げ弾性率 50% RH	73°F	D790		Mpsi	1.00	2.61	2.88
曲げ弾性率	73°F		178	Mpsi	1.00	1.32	2.98
	212°F		178	Mpsi	0.87	0.99	2.44
	302°F		178	Mpsi	0.16	0.36	1.06
	347°F		178	Mpsi	0.13	0.33	0.93
せん断強さ	73°F	D732		kpsi	13.9	10.3	11.6
せん断強さ 50% RH	73°F	D732		kpsi	13.5	7.2	9.1
圧縮強さ	73°F	D695		kpsi	26.8	27.4	25.3
ポアソン比	73°F				0.29	0.31	0.35
アイゾット衝撃、ノッチ付き	73°F	D256		ft-lb/in	0.9	0.7	1.2
アイゾット衝撃、ノッチ付き 50% RH	73°F	D256		ft-lb/in	0.6	0.6	1.0
アイゾット衝撃、ノッチなし	73°F	D4812		ft-lb/in	7	7	13
アイゾット衝撃、ノッチ付き	73°F		180/1A	ft-lb/in ²	2.2	1.9	3.1
アイゾット衝撃、ノッチなし	73°F		180/1U	ft-lb/in ²	11	15	21
シャルピー衝撃	73°F		179/1eA	ft-lb/in ²	1.9	1.6	2.9
シャルピー衝撃、ノッチなし	73°F		179/1eU	ft-lb/in ²	14	21	16
ロックウェル硬度	73°F	D785		R スケール	125	124	122

表 14：ミネラル、ミネラル／ガラス強化グレード — 機械特性 (SI 単位)

物性	温度	方法		単位	A-1240	A-1565	AS-1566
		ASTM	ISO		L	HS	HS
引張強さ	23°C	D638		MPa	103	131	207
引張強さ 50% RH	23°C	D638		MPa	93	123	175
引張強さ	23°C		527	MPa	104	138	200
	100°C		527	MPa	70	92	127
	150°C		527	MPa	29	46	53
	175°C		527	MPa	24	32	44
引張伸び	23°C	D638		%	1.6	1.2	1.7
引張伸び 50% RH	23°C	D638		%	1.2	1.2	1.8
引張伸び	23°C		527	%	1.6	1.0	1.4
	100°C		527	%	1.9	1.3	1.5
	150°C		527	%	9.1	2.4	3.4
	175°C		527	%	7.3	1.8	3.1
引張弾性率	23°C	D638		GPa	9.0	20.7	20.0
引張弾性率 50% RH	23°C	D638		GPa	8.3	20.8	20.9
引張弾性率	23°C		527	GPa	10.1	20.0	22.8
	100°C		527	GPa	5.6	15.4	17.2
	150°C		527	GPa	1.1	5.7	7.3
	175°C		527	GPa	0.9	5.1	6.2
曲げ強さ	23°C	D790		MPa	207	210	290
曲げ強さ 50% RH	23°C	D790		MPa	177	196	263
曲げ強さ	23°C		178	MPa	172	211	284
	100°C		178	MPa	121	162	205
	150°C		178	MPa	27	70	96
	175°C		178	MPa	22	56	76
曲げ弾性率	23°C	D790		GPa	7.6	17.9	18.6
曲げ弾性率 50% RH	23°C	D790		GPa	6.9	18.0	19.8
曲げ弾性率	23°C		178	GPa	7.0	9.1	20.8
	100°C		178	GPa	6.0	6.8	16.8
	150°C		178	GPa	1.1	2.5	7.3
	175°C		178	GPa	0.9	2.3	6.4
せん断強さ	23°C	D732		MPa	96	71	80
せん断強さ 50% RH	23°C	D732		MPa	93	50	63
圧縮強さ	23°C	D695		MPa	185	189	174
ポアソン比	23°C				0.29	0.31	0.35
アイゾット衝撃、ノッチ付き	23°C	D256		J/m	50	35	65
アイゾット衝撃、ノッチ付き 50% RH	23°C	D256		J/m	30	30	55
アイゾット衝撃、ノッチなし	23°C	D4812		J/m	345	395	700
アイゾット衝撃、ノッチ付き	23°C		180/1A	kJ/m ²	4.7	4.0	6.6
アイゾット衝撃、ノッチなし	23°C		180/1U	kJ/m ²	24	31	44
シャルピー衝撃	23°C		179/1eA	kJ/m ²	4.1	3.4	6.2
シャルピー衝撃、ノッチなし	23°C		179/1eU	kJ/m ²	29	44	34
ロックウェル硬度	23°C	D785		R	125	124	122

表 15：ミネラル、ミネラル／ガラス強化グレード — 熱、電気、一般特性

物性	方法		単位	A-1240	A-1565	AS-1566
	ASTM	ISO		L	HS	HS
熱特性						
荷重たわみ温度、264 psi	D648		°C	179	271	278
荷重たわみ温度、1.8 MPa		75AF	°C	174	271	280
ビカット軟化温度	D1525	306	°C	302	296	298
融点	D3418	11357-3	°C	310	311	311
燃焼性、3.2 mm 棒材	UL-94			HB	HB	HB
電気特性						
絶縁耐力、1.6 mm	D149		V/mil	—	—	737
			kV/mm	—	—	29
体積抵抗率	D257		Ω-cm	9x10 ¹⁵	4x10 ¹⁴	1x10 ¹⁶
表面抵抗率	D257		Ω	—	—	1x10 ¹⁵
耐トラッキング指数	D3638		Volt	550	>600	—
誘電率 @ 60 Hz	D150			—	—	—
誘電率 @ 100 Hz	D150			4.2	—	5.7
誘電率 @ 10 ⁶ Hz	D150			4.0	—	4.7
誘電正接 @ 60 Hz	D150			—	—	—
誘電正接 @ 100 Hz	D150			0.006	—	—
誘電正接 @ 10 ⁶ Hz	D150			0.017	—	0.011
一般特性						
比重	D792	1183A		1.54	1.90	1.84
吸水率、24 時間	D570	62	%	0.1	0.1	0.1
成形収縮率、流れ方向	D955	294-4	%	1.0	0.3	0.3
成形収縮率、直角方向	D955	294-4	%	1.0	0.5	0.5

機械特性

部品を設計するエンジニアにとって材料の機械特性は基本的に重要な事項です。設計者は、候補となるさまざまな材料の機械特性を、それぞれの用途での性能要件に照らし合わせて、特定の部品設計にもっとも適した材料を決定しなければなりません。逆に言えば、設計者は材料の特性値をうまく利用することによって最適な部品設計を実現することができます。

設計者の便宜を考慮して、このマニュアルでは材料の各特性を短期的または瞬時的な特性と、長期的または時間依存性のある特性とにグループ分けして提示してあります。短期的特性は一般的に破壊発生の際の強度の尺度となり、長期的特性はその材料の特性が温度や持続的な負荷、薬品への暴露に対してどのような影響を受けるかを時間の関数として示します。

短期的機械特性

短期的機械特性の項目として標準的に含まれるのは、引張強さと引張弾性率、曲げ強さと曲げ弾性率、数種の衝撃試験、圧縮強さ、せん断強さ、および表面硬さなどです。これらの特性値は通常は室温における値を示しますが、必要に応じて他の温度で示すこともあります。ポリマーの種類によっては雰囲気中の水分を吸収するものがあり、吸収された水分が特性に影響を与えることがあります。このため水分含量を明示する必要がある場合は、相対湿度（RH）を用いて表示するのが通例です。

材料メーカーが提供するデータシートに記載されているのは通常は短期的特性値であり、その主たる用途は類似した材料を相互に比較することです。データシートを利用して材料を比較する際非常に重要なのは、同じ試験法を用いたデータであることを確認すること、およびデータが同様の単位系で記載されていることです。

短期的機械特性を設計において有効に利用できる範囲は限られています。多くの場合これらの特性値は、再現性のある結果を得る目的で特別に設計・成形した試験材を用いて測定を行い、しかも慎重に管理した環境条件下で特定の負荷速度を用いて測定を行います。このようにして得た測定値は、通常その材料や特性について得られる最高値を示しています。

実際に部品が成形プロセスを経て製造される際には、応力集中やウェルド、コーナーその他多数の要素によって、一般に強度が低下します。実際の部品の強度は強化繊維の配向や相対的な結晶度、熱処理履歴（アニーリング）などによって減少することもあり、場合によっては逆に向上することもあります。これに加えて、短期的特性値には経時的効果や化学的環境が及ぼす影響については何も示唆されていないことに留意してください。

引張特性

試験方法

引張特性の試験方法として現在広く認められているのは ASTM D638 と ISO 527 のふたつです。これらの試験方法が測定する特性は同じですが、若干異なる試験片と試験手順を使用します。同一材料を両方の試験法で測定すると、得られる結果は類似していますが完全に同じではありません。したがって、材料比較を行うときは同じ試験法で得た値を使用すべきです。本資料では、引張特性値を提示するときには使用した試験法も明示するものとし、多くのケースでは両方の試験法による値を示しています。

どちらの試験法を使用する場合も、基本的には試験片の両端を試験装置のクランプで固定して一方向に一定速度で力を加え続けます。試験片を引き離すために要した力を試験片の最小断面積で割った値を引張応力と定義します。応力を付加した結果、試験片は一方向へ伸びます。この伸びの長さを試験片の元の長さで割った値がひずみです。

付加した応力を、それにより生じたひずみに対してプロットすると、図 5 のような曲線が得られます（対象はアモデル ET-1000 HS 樹脂）。この曲線は「応力-ひずみ」曲線と呼ばれ、材料に荷重を付加したときの短期的挙動を決定するために非常に有用です。延性のある金属もこれと良く似た曲線を示します。

図 6 に示すのは非延性材料（ここではアモデル A-1933 PPA）の代表的な応力-ひずみ曲線です。非強化グレードと比較して、破壊ひずみがはるかに低い位置で起こっていることが分かります。ガラス繊維を追加して強化することにより強度と剛性は向上しますが、延性や破壊ひずみは低減します。

図 5：代表的な応力-ひずみ曲線：アモデル ET-1000

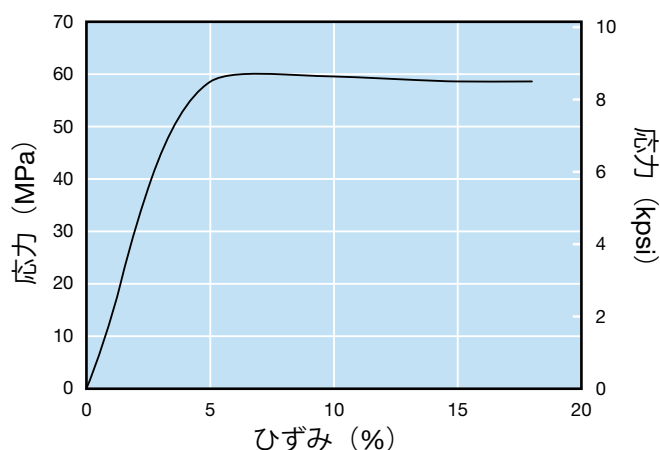


図 6：代表的な応力-ひずみ曲線：アモデル A-1933

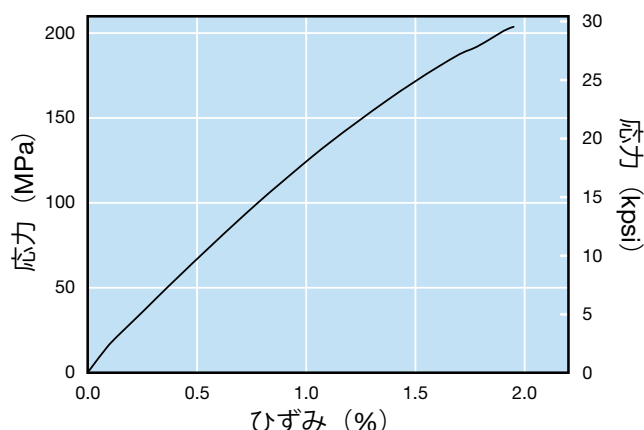
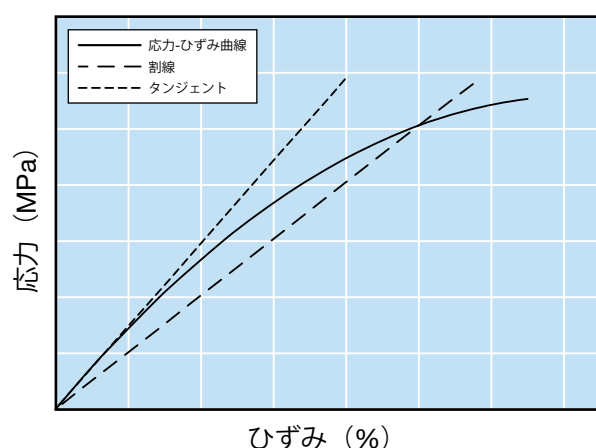


図 7：弾性率の評価：割線法と接線法



応力-ひずみ曲線の最初の部分にも注目すべき情報が含まれており、この部分の勾配は材料の剛性や弾性率と関係付けられます（図 7 参照）。

この図から分かるとおり、応力があるレベルに達するまではひずみと応力が比例関係にあります。この領域は「フック」領域、あるいは弾性領域として知られています。応力がそれに比例するひずみを発生する領域内の最大応力レベルを比例限界と呼びます。

試験片に引張負荷を与えて得られる応力-ひずみ曲線の勾配が引張弾性率（あるいは単に弾性率）です。比例限界を超えると応力-ひずみプロットが直線から外れていくため、測定値を標準化して試験結果の変動を押さえるための工夫が考案されています。ひとつの方法では、曲線に接線を引いてその勾配を使用します。もうひとつの方法では、原点と任意に指定したひずみレベルを通過する割線を引いてその勾配（通常は 1%）を使用します。接線法は ISO の試験法からは削除されており、これに代わって特定のひずみ値（0.0005 と 0.0025）から勾配を計算する方法が採用されています。別法として、コンピュータ制御された試験装置を使用する場合は、同じひずみ領域における勾配を最小自乗法で計算することも可能です。

図 8：30～33% GR 樹脂の引張強さ

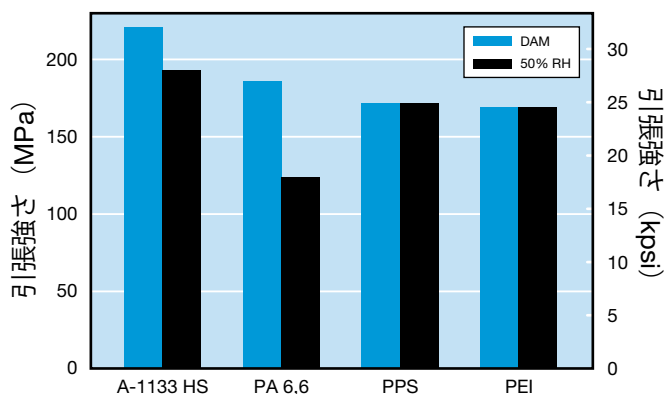
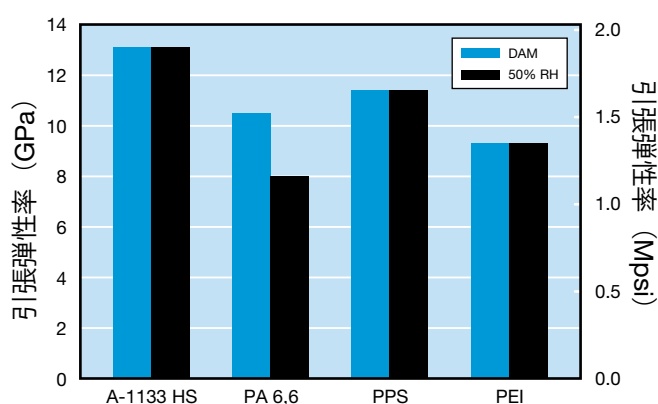


図 9：30～33% GR 樹脂の引張弾性率



本冊子に載せた ASTM D638 による引張データは、接線法を使用して得たものです。

延性のある材料は破断の前に降伏現象を起こします。この降伏点において、応力を増加させなくても材料は追加的な延伸を起こします。降伏現象が起こる応力レベルをしばしば降伏時引張強さ、または降伏時引張応力と呼びます。この点で発生する延伸のことを降伏時伸びまたは降伏ひずみ、あるいは降伏時引張ひずみと呼びます。試験片は試験の進行とともに伸び続け、最終的に破断します。このときの応力レベルを破断時引張強さ、または極限引張強さ、または破断時引張応力と呼びます。引張強さは、実測された降伏時引張応力または破断時引張応力のいずれか大きい方と定義されます。

図 10：30～33% GR 樹脂の引張伸び

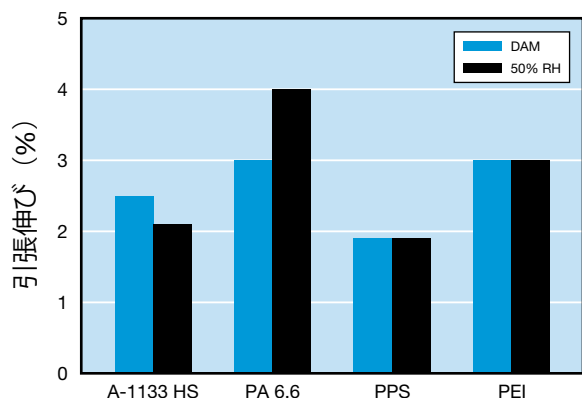
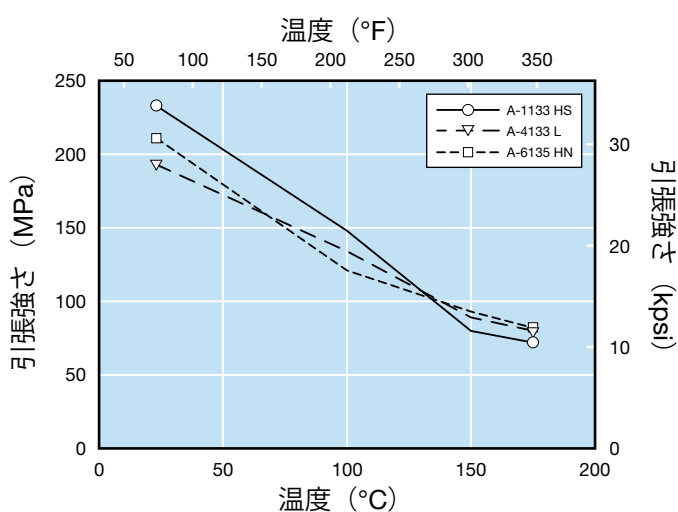


図 11：33% GR PPA の引張強さと温度



引張特性の比較

図 8 に示すように、アモデル A-1133 HS 樹脂は室温で 33% GR ポリアミド (PA) 6,6、30% GR ポリフェニレンスルフィド (PPS)、および 30% GR ポリエーテルイミド (PEI) よりも高い引張強さを持っています。水分コンディショニングを施した後もアモデル PPA は他の樹脂よりも優れた強度を示します。

図 9 では 33% GR アモデル PPA の引張弾性率を同じ樹脂と比較しています。アモデル樹脂は成形直後の弾性率がより高い値を示すばかりでなく、水分コンディショニングを行っても弾性率の低下を示しません。PA 6,6 は 20% を超える弾性率の低下を示しています。

引張伸びについて同じ比較を行ったのが図 10 です。ガラス繊維強化のため、引張伸びは低い値を示しています。PA 6,6 に水分コンディショニングを施すと、 T_g が低下することにより伸びが増大します。

図 12：33% GR PPA の引張弾性率と温度

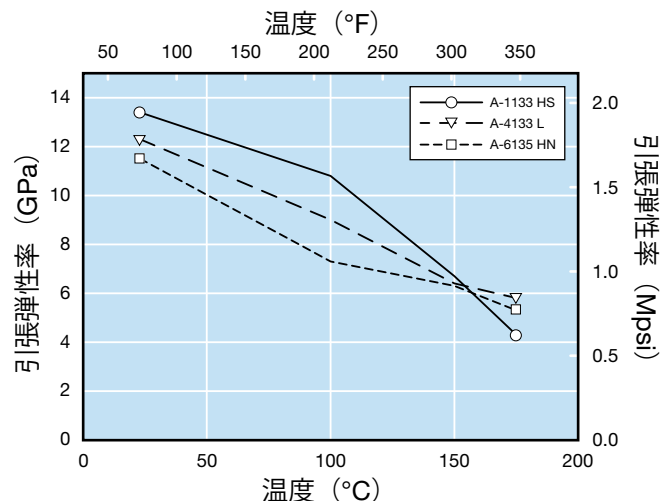
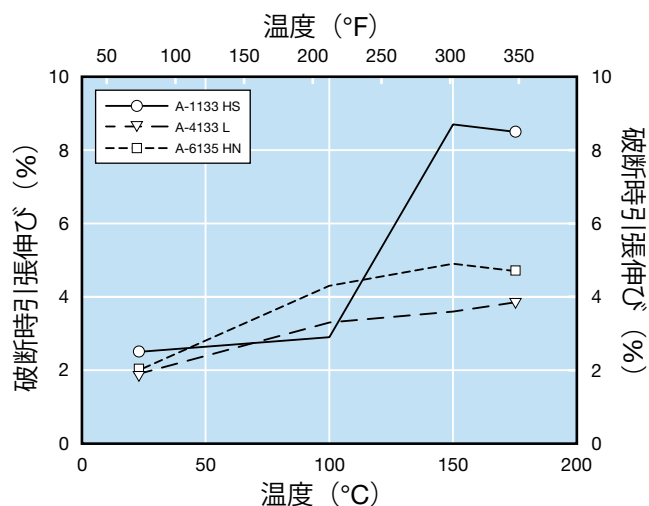


図 13：33% GR PPA の引張伸びと温度



GR PPA の引張特性と温度

A-1000、A-4000、および A-6000 をベース樹脂とするアモデル PPA GR グレードの、室温から 175°C に至る温度での引張特性を図 11～13 に示します。室温で最も高い強度と剛性を示すのはアモデル A-1133 HS ですが、150°C を超える温度領域では A-4133 L と A-6135 HN の方がより高い強度と剛性を示します。

図 14：GR A-1000 PPA グレードの引張強さと温度

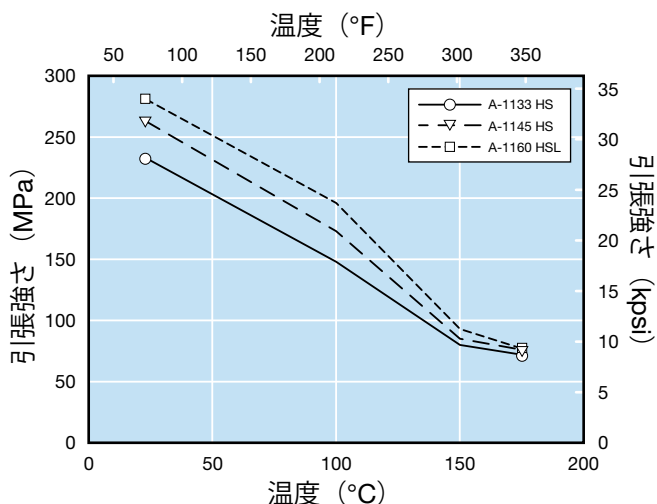


図 15：GR A-1000 PPA グレードの引張弾性率と温度

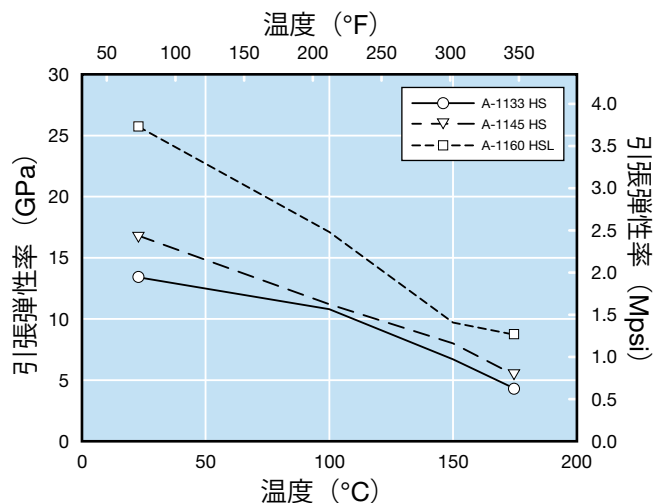


図 16：GR A-1000 PPA グレードの引張伸びと温度

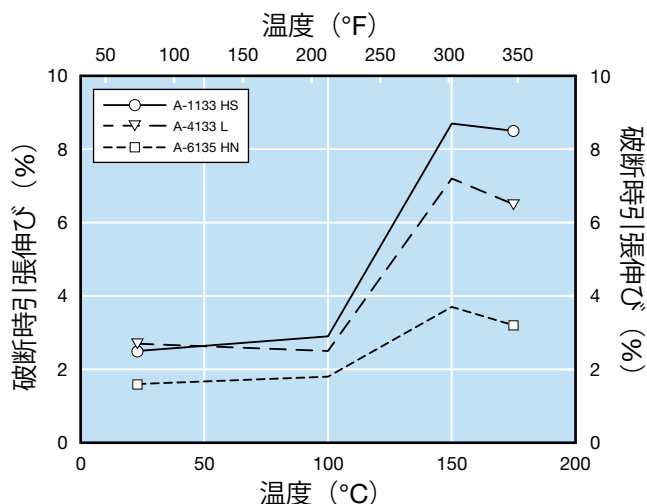
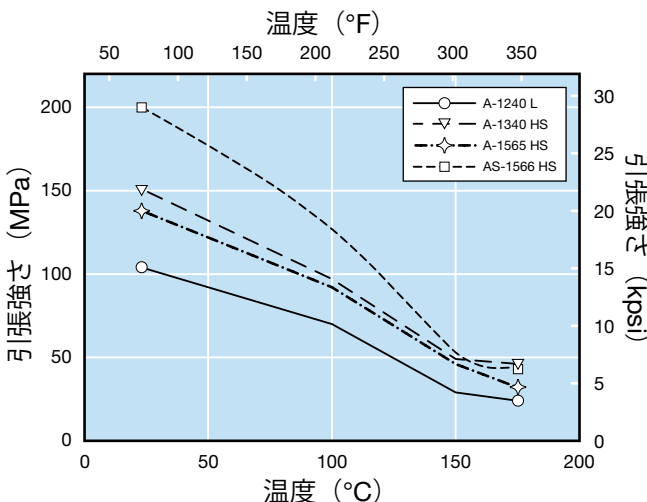


図 17：ミネラル／ガラス強化 PPA グレードの引張強さと温度

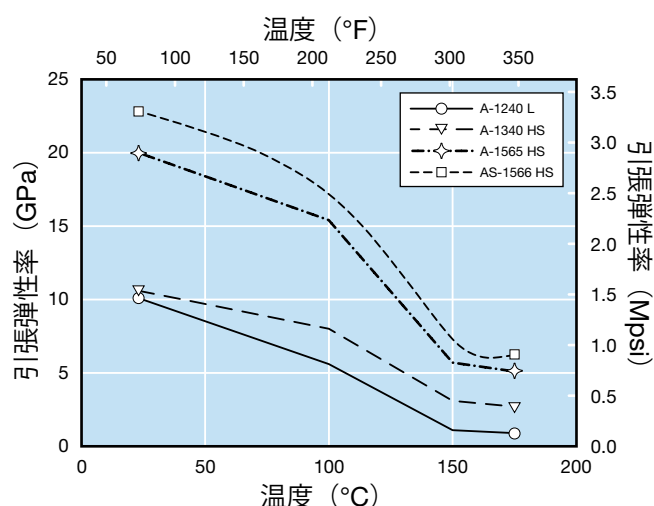


高温領域における A-1000 GR グレードの引張特性

図 14～16 までに示すのは、3 種類のガラス繊維強化アモデル PPA における室温から 175°C に至る温度での引張特性です。これらの樹脂はいずれも A-1000 をベースとしてそれぞれ 33%、45%、および 60% のガラス繊維で強化しています。引張強さと弾性率はガラス繊維含量が増えるに従って上昇しますが、これは半結晶性熱可塑性樹脂に共通に見られる特徴です。

また、強度と弾性率は温度の上昇とともに低下していきます。伸びは温度の上昇とともに増大します。半結晶性材料であるアモデル樹脂の機械特性は、温度が室温からガラス転移温度 (T_g) へ上昇するにつれてゆっくりと、しかし確実に低下していきます。温度が T_g に達すると、狭い温度範囲の中で急激な低下が起こりますが、その後はまたゆっくりとした低下に戻ります。これはすべての半結晶性熱可塑性樹脂に共通に見られる挙動です。

図 18：ミネラル／ガラス強化 PPA グレードの引張弾性率と温度



曲げ特性

引張強さと引張弾性率と同じように、プラスチック材料の曲げ強さと曲げ弾性率もガラス繊維を加えることによって増大します。ガラス繊維を適切に処理することでプラスチックとガラス間に強固な化学結合が生じ、これによって引張特性と曲げ特性の両方を広範囲にわたる環境条件において向上させることができます。プラスチックに含まれる強化用ガラス繊維の量が増えるにつれ、曲げ強さと曲げ弾性率も向上します。

試験方法

熱可塑性材料の曲げ特性は ASTM D790 または ISO 178 に準拠して決定します。ASTM D790 には 3 点荷重試験 (Method I) と 4 点荷重試験 (Method II) が含まれます。本資料で D790 という名前を参照している箇所では Method I を使用しています。ISO 178 の「Plastics – Determination of Flexural Properties」(プラスチック — 曲げ特性の測定) では 3 点荷重試験を使用するように指定しています。

ふたつの試験方法は、試験片の寸法、装置仕様、最大たわみ、および計算方法の詳細が異なります。3 点荷重法では、試験片を特定の距離だけ離れた 2 点で支え、両方の支点の midpoint 位置で試験片上面に垂直荷重を付加します。その荷重により、試験片に変形やたわみが生じます。こうして、破断が起こるまで、もしくは最大ひずみに達するまで試験片をたわませます。曲げ強さは、破断や最大ひずみが生ずる時点での最大応力と定義されます。ISO 178 が指定している最大ひずみが 3.5% であるのに対して ASTM D790 では 5% を指定しています。

したがって同じ材料の曲げ特性を両方の方法で測定すると、ASTM による結果は ISO による結果とは異なることになります。特性値の表には両方の試験法で得られた値を示しています。材料の比較を行うときは、比較の対象となるデータが同じ試験法と試験条件で得たものであることを確認してください。

曲げ弾性係数は、弾性限界の範囲内で試験片の一番外側に加えた応力とそれに対応するひずみとの比率です。引張試験の場合と同様に、この弾性率も直線領域 (フック領域) での荷重たわみ曲線の勾配を使用して計算します。

曲げ試験では、材料が曲げ負荷に対して持つ強度と剛性の情報が相対値として示されます。高い曲げ強さを持つ材料ほど破断を起こさずに高い曲げ荷重に耐える能力を持っています。部品に曲げ荷重を加えたとき、高い曲げ弾性率を持つ材料から作られた部品は、より低い弾性率の材料で作られた部品よりもたわみが小さくなります。

アモデル PPA の曲げ強さと曲げ弾性率は、ガラス繊維やミネラルを添加することによって非強化タイプよりも更に増大します。こうして得られる高い弾性率は、多くの用途において望ましい特性です。

図 19：30～33% GR 樹脂の曲げ強さ

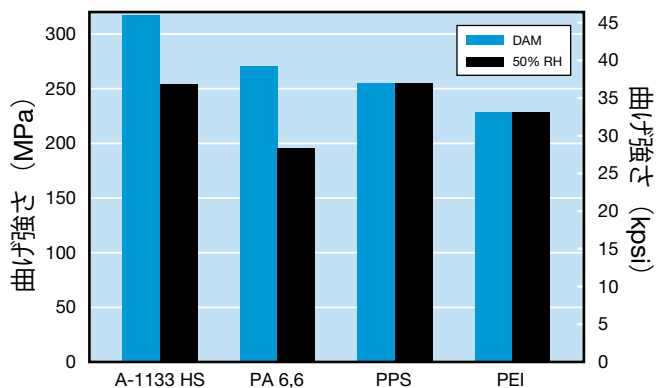
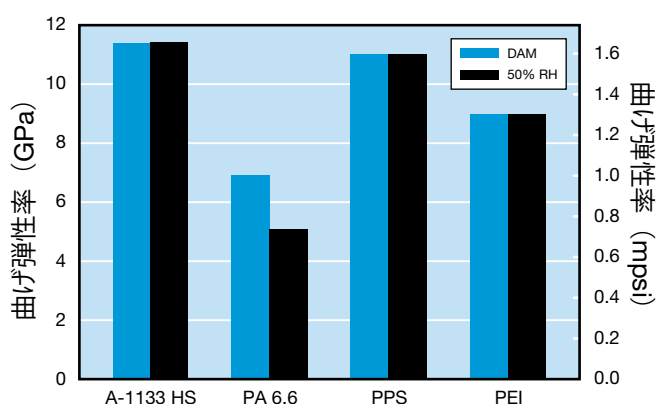


図 20：30～33% GR 樹脂の曲げ弾性率



曲げ特性の比較

図 19 に示すのは 33% GR アモデル PPA の曲げ強さを、PPS、PEI、および PA 6,6 樹脂と比較したデータです。アモデル PPA の強度は他の樹脂よりも優れており、水分コンディショニングによっていくらか強度が低下するとはいえ、それでも他のほとんどの樹脂の成形直後の状態よりも高い値を示します。

曲げ弾性率について同様の比較を図 20 に示します。アモデル樹脂の曲げ弾性率は際立って高く、しかも水分コンディショニングの影響を受けていません。これに対して PA 6,6 樹脂の弾性率は水分コンディショニングによって著しく低下しています。

図 21：GR PPA 樹脂の曲げ強さと温度

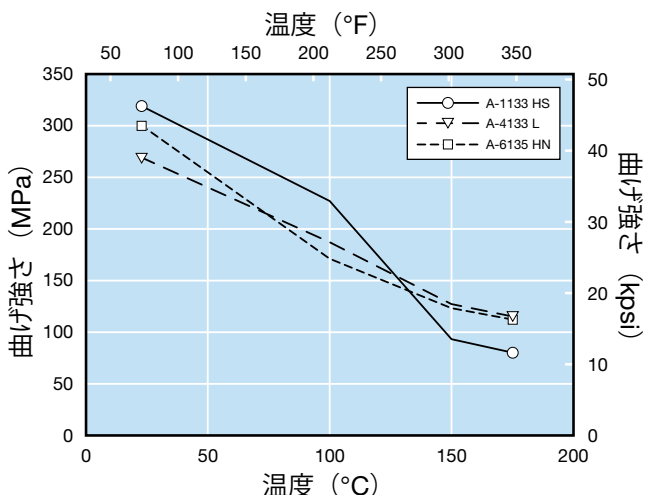
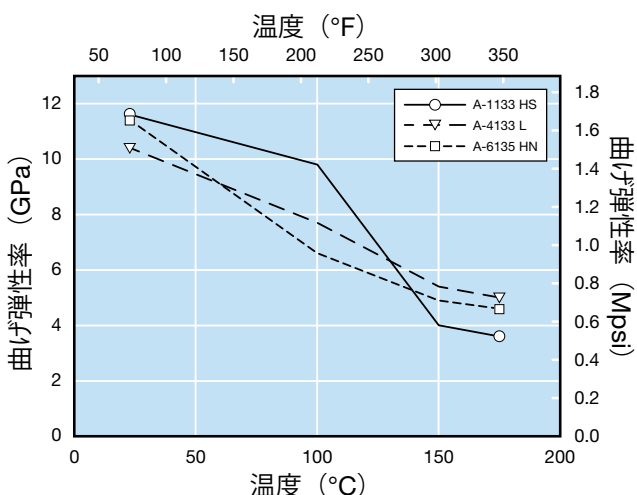


図 22：GR PPA 樹脂の曲げ弾性率と温度



高温領域における曲げ特性

図 21 および図 22 に示すのは、A-1000、A-4000、および A-6000 をベースとしてガラス繊維強化した 3 種類のアモデルグレードについて、室温から 175°C までの温度での曲げ特性です。室温では A-1000 をベースとするグレードが他よりも高い強度と剛性を持ちますが、125°C 以上の領域では A-4000 と A-6000 をベースとするグレードの方が優れていることが分かります。

図 23：GR A-1000 PPA グレードの曲げ強さと温度

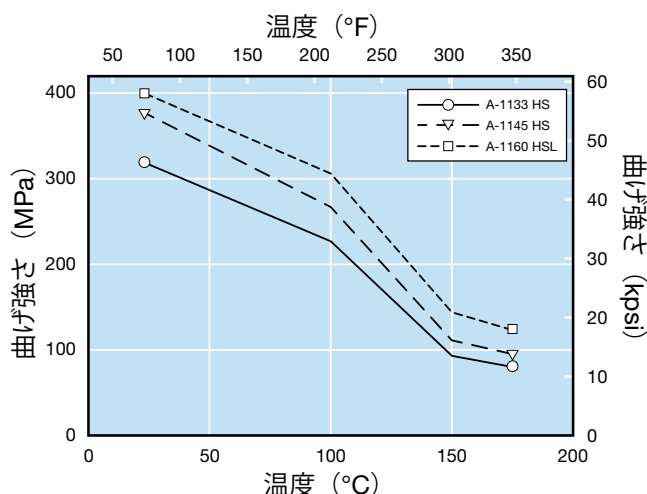


図 24：GR A-1000 PPA グレードの曲げ弾性率と温度

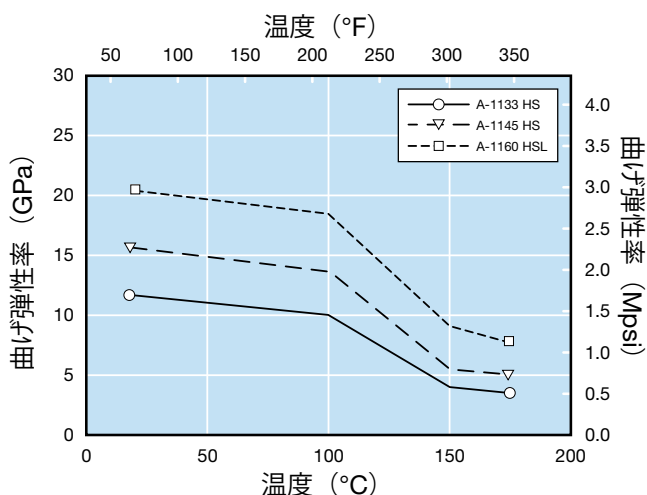


図 23 および図 24 に示すのは、A-1000 をベースとしたガラス繊維強化のレベルの異なるアモデル PPA 樹脂の曲げ特性です。予期されるとおり、ガラス繊維含量の多いグレードの方が全温度範囲にわたって高い強度と剛性を示しています。

図 25：ミネラル／ガラス強化 PPA 樹脂の曲げ強さと温度

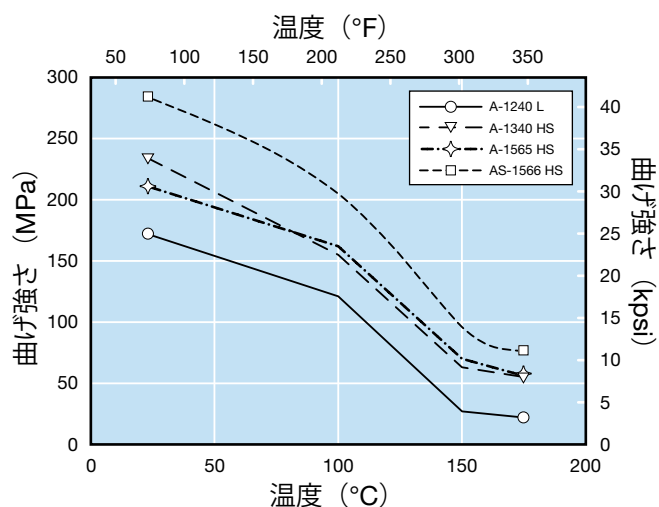
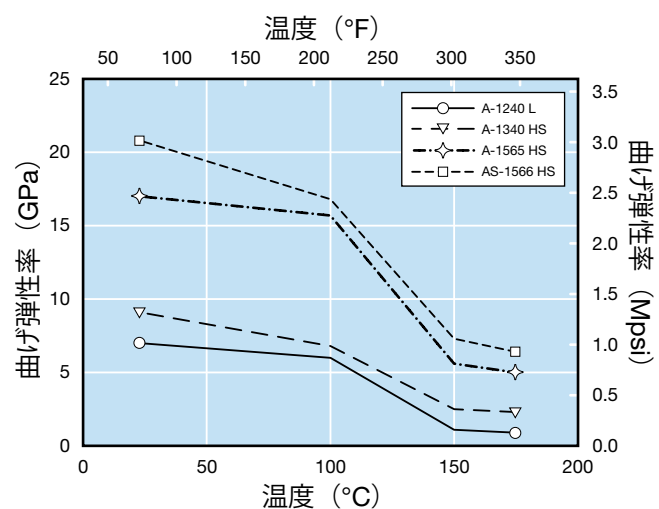


図 26：ミネラル／ガラス強化 PPA 樹脂の曲げ弾性率と温度



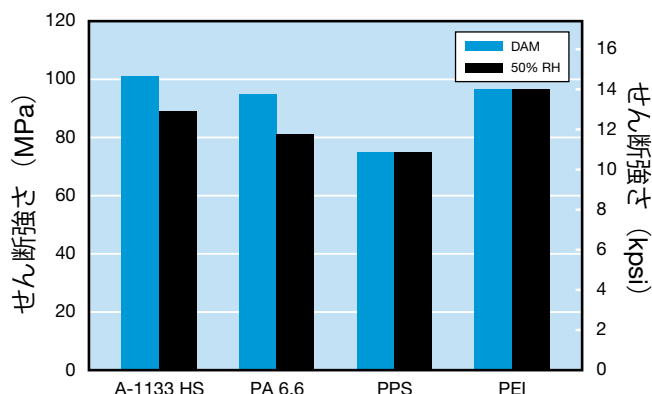
せん断特性

せん断強さとは、ふたつの平面が負荷方向へ相対移動するときの降伏または破断に対する耐性を示す指標です。また、せん断強さは、移動側平面が静止側平面から完全に剥がれた状態になるために、試験片に加える必要のある最大荷重であると定義することもできます。実際の応用では部品に加わる最大応力はせん断応力であることが多いため、せん断強さは特に構造部材の設計で重要な値です。

せん断強さは ASTM D732 に従って測定しました。この試験では、被試験材料から成形した薄い板を、中心に円形穴のあいたプレート上に置き、この穴よりも若干直径の小さな円形パンチで試験される薄板を押して円盤を打ち抜きます。この打ち抜きに必要となる最大応力がせん断強さとして測定されますが、この値は試験片打ち抜きに必要荷重をせん断面積で割って算出します。このせん断面積は、穴の円周長に試料薄板の厚みを掛けた値です。

アモデル PPA のせん断強さを PA 6,6、PPS、および PEI と比較したデータを図 27 に示します。アモデル PPA のせん断強さは PA 6,6 および PEI とほぼ同程度であり、PPS よりも優れています。

図 27：30～33% GR 樹脂のせん断強さ



圧縮強さと圧縮弾性率

圧縮強さと圧縮弾性率は ASTM D695 に従って測定します。試験対象の材料から試験片を成形し、それを平行プレート間に置きます。プレート間の試験片を圧縮する力を加えながら、付加した力と平行プレート間の距離をモニターします。プレート間の距離の変化により圧縮ひずみを測定します。試験片が壊れた時点での力を試験片断面積で割って得る破壊応力が圧縮強さであり、応力-ひずみ曲線の勾配が圧縮弾性率となります。

衝撃強さ

ポリマーは粘弾性を持つため、その特性は荷重を加える速度にも依存します。この負荷速度が急激である場合、その部材には衝撃荷重が加わっていると言えます。プラスチック部品が加えられた衝撃による損傷を受けずに耐えるためには、衝突によって伝達される運動エネルギーを吸収できなければなりません。

プラスチック部品がエネルギーを吸収する能力は、その形状や寸法、厚み、およびその部品作成に使用したプラスチックのタイプにより異なります。現在最も頻繁に使用されている耐衝撃試験法では、設計者が解析的に利用できる適切な情報を提供することができません。これらの試験の最も有効である点は、相対的な耐衝撃性が分かり、各材料のノッチ感度を比較できるという点にあります。実際の応用における実用的な強靭性を適切に予測するという点では不十分ですが、それでも材料相互の比較を行う上では大きな利点があります。

図 28：30～33% GR 樹脂の圧縮強さ

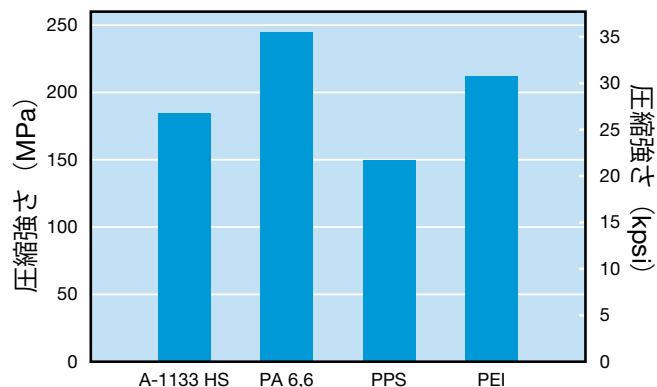


図 29：A-1000 樹脂の圧縮強さと温度

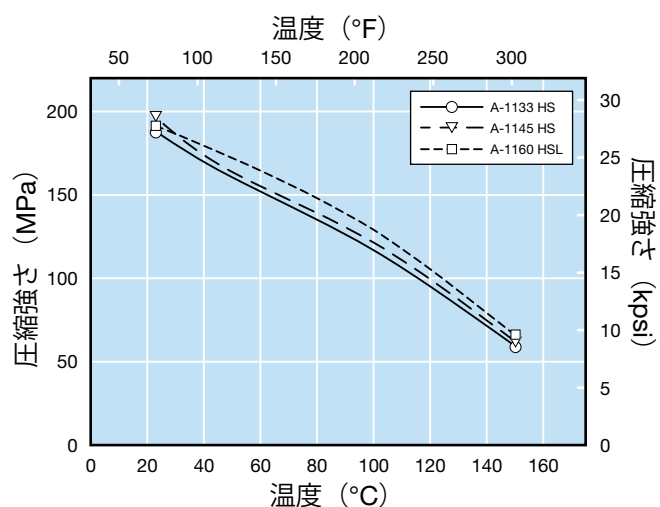


図 30：A-1000 樹脂の圧縮弾性率と温度

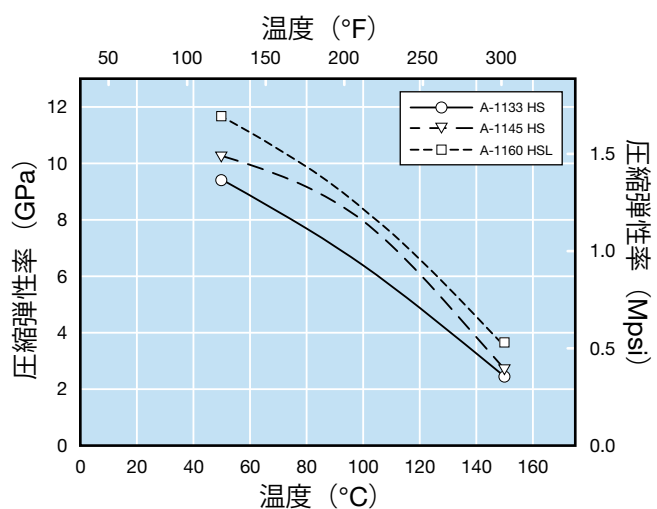


図 31：アイゾット衝撃試験の試験片

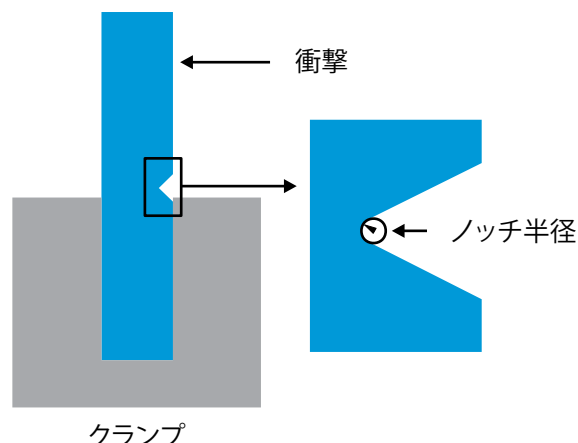


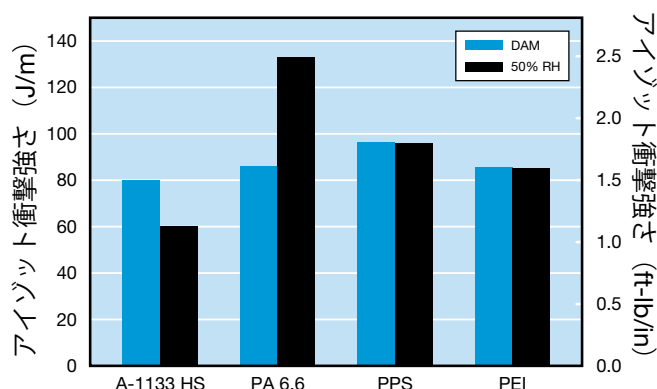
表 16：アイゾット試験の試験片寸法

寸法	ISO 180	ASTM D256
	mm	mm
長さ	80.00	63.50
幅	10.00	12.70
厚さ	4.00	3.20
ノッチ半径	0.25	0.25

アイゾット（片持ち梁）衝撃

アイゾット衝撃の値を決定する方法としては、ASTM D256（Impact Resistance of Plastics and Electrical Insulating Materials）または ISO 180（Plastics – Determination of Izod Impact Strength）を使用します。図 31 に示すように、この二種類の試験ではともに、指定された径のノッチを加工した試験片に振り子を当てて衝撃を与えます。衝撃後も振り子のスイングは続きますが、振り子のエネルギーの一部はこの衝突によって失われます。二種類の試験法の違いは、試験片の寸法と結果の計算方法にあります。ASTM D256 を使用する試験では、振り子が失ったエネルギーを試験片のノッチ部分を除いた幅で割り、値はメートルあたりのジュール値（J/m）という単位で計算します。ISO 180 を使用する場合は、失われたエネルギーを 1,000 倍してから試験片のノッチ部分を除いた幅と厚みの積で割ります。この計算の単位は平方メートルあたりのキロジュール値（kJ/m²）となります。

図 32：30～33% GR 樹脂のアイゾット衝撃強さ、ASTM D256



アイゾット衝撃試験はノッチのない試験片を用いて行うことも可能です。ASTM D4812 と ISO 180U がこれに該当する試験法を規定しています。これらのノッチなしの試験法とノッチ付き試験法の大きな相違点は、試験片の全幅を用いて計算を行うことです。

本資料には両方の試験法を用いたデータを掲載しています。試験に使用する試料片の外形寸法を表 16 に示します。

アイゾット衝撃特性の比較

図 32 に示すのは、33% のガラス繊維強化アモデル PPA と、PA 6,6、PPS、および PEI それぞれのガラス繊維強化グレードについて、ノッチ付きアイゾット衝撃強さを比較したデータです。これらの材料はガラス繊維により強度が増していますが、延性は低下しており、しかも全部の材料が共通に低いアイゾット値を示しています。PA 6,6 では水分コンディショニングにより衝撃強さが増しています。

図 33 に示すのは、アモデル PPA の強化グレード ET-1000 HS、および PA 6,6 と PA 6 の耐衝撃グレードのアイゾット衝撃強さ比較であり、同時にポリカーボネート（PC）とポリカーボネート／ポリエステル（PC/PBT）変性品のデータも示しています。アモデルグレードは他の材料とほぼ同等、もしくはそれを上回る衝撃強さを示しています。図 34 は、他の大部分の非晶性ポリマーがノッチ半径の強い影響を受けるのに対して、このグレードはノッチ半径にそれほど敏感でないことを示しています。

図 35 によれば、ET-1000 HS は室温よりも低い温度で良好なアイゾット衝撃特性を示しますが、特にアモデル AT-1001 L は -40℃ という低い温度においても優れた耐衝撃性を維持しています。

図 33：アモデル ET-1000 のアイゾット衝撃試験：PA、PC との比較

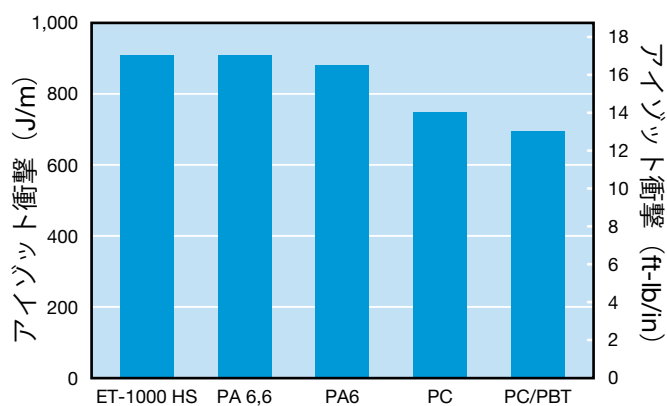
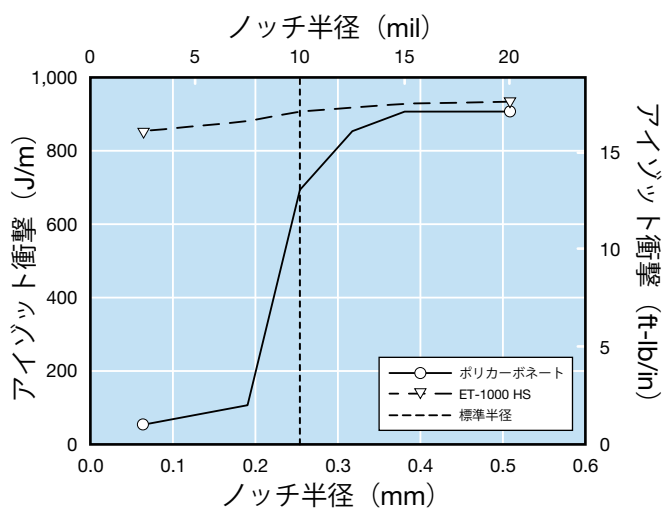


図 34：ET-1000 HS および PC のノッチ半径感度



シャルピー（支持梁）衝撃

シャルピー衝撃試験もアイゾット試験と同様に、落下する振り子で試験片に衝撃を与えて試験片を破断するエネルギーを測定します。両者の最も大きな相違点は、シャルピー試験では試験片を両端で支持して試験片の中間部に衝撃を与えることにあります（図 36 参照）。ここで使用した試験法は ISO 179/1eA および 179/1eU です。

図 35：アモデル PPA グレードの低温アイゾット特性

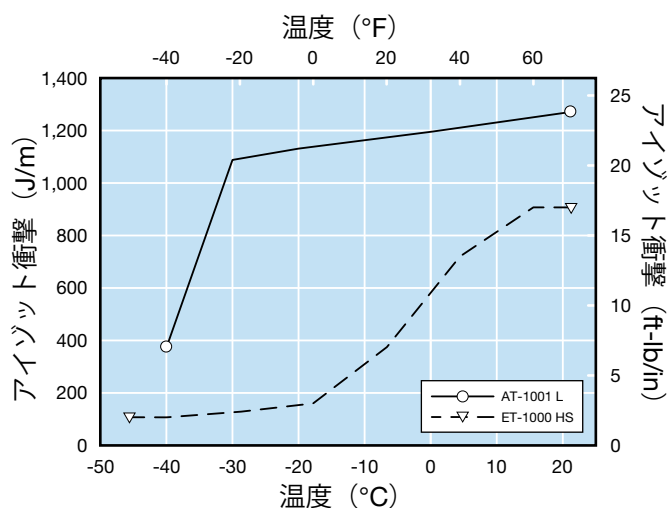


図 36：シャルピー衝撃試験で使用する試験片

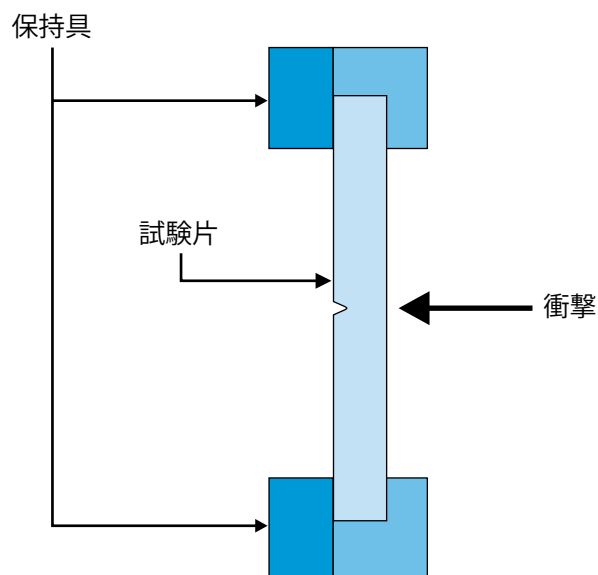
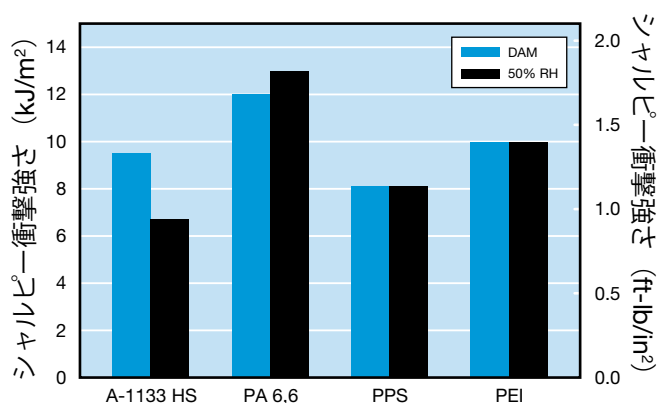


図 37：30～33% GR 樹脂のノッチ付きシャルピー
衝撃強さ



落錘衝撃特性

アモデル ポリフタルアミド樹脂の実用的な強靱性を測定する方法として ASTM D3763 (High-Speed Puncture Properties of Plastics Using Load and Displacement Sensors) を使用しました。

この試験では、射出成形した試験片を直径 76 mm の開口に被せて固定しておき、錘を付けたプランジャをあらかじめ決められた高さから落下させることによって既知の速度で衝撃を与えます。プランジャアッセンブリーは半円形の先端を持つ直径 12.7 mm の鋼製ロッドで構成されています。このプランジャアッセンブリーをロードセルに装着しておいてサンプルの破壊に必要なエネルギーを測定します。

試験片は脆性破壊する場合と延性破壊する場合とがあります。延性破壊する場合、試験片はプランジャの形状に合わせて恒久的な変形を起こしますが、プランジャ貫通後もバラバラにはならず一体性を保ちます。脆性破壊する場合は、試験片は破壊なしに変形できるような十分な延性を持たないため、プランジャによる衝撃によって複数の部分に破壊します。

この測定方法は、得られる衝撃値自体は本質的に「踏み台」から錘を落下させる方法と同様ですが、この方法が ASTM D3029 よりも好まれて使用される理由は、コンピュータを応用したデータ解析技術を利用して機械による試験結果が得られ、必要な標本数を少なくできるためです。

表 17：耐衝撃変性 PPA の貫通衝撃 (ASTM D3763)

グレード	条件	最大荷重	総エネルギー
		N	J
AT-1001 L	DAM	4,900	54
AT-1002 HS	DAM	4,400	54
AT-1002 HS	50% RH	4,000	47
AT-5001	DAM	4,400	54
AT-5001	50% RH	4,000	50
ET-1000 HS	DAM	4,670	54
ET-1001 L	DAM	5,600	64

ポアソン比

ポアソン比は、材料に荷重を加えたときに荷重の向きに垂直な方向で材料が示すひずみ特性を表す値です。ポアソン比とは、比例限界内での横ひずみと縦ひずみの比率です。例として引張応力に曝された円筒状の試験片を考え、応力負荷によって長さ (L) が増加すると同時に直径 (D) が減少するものとします。

この場合、ポアソン比 (ν) は次式によって計算されます：

$$\nu = \frac{-\Delta D / D}{\Delta L / L}$$

大部分のプラスチック材料のポアソン比は 0.3 から 0.5 の範囲にあります。

表 18 に示すのは、各種アモデルグレードの成形直後の「絶乾状態」 (23°C) でのポアソン比です。

表 18：アモデル製品のポアソン比

グレード	ポアソン比 (ν)
ET-1000 HS	0.40
A-1115 HS	0.41
AS-1133 HS	0.41
AS-1145 HS	0.41
A-1230 L	0.31
A-1240 L	0.29
A-1340 HS	0.38

長期的機械特性

ポリマー樹脂で製造した工学部品が、その意図された設計寿命の期間を通して仕様に見合う性能を発揮するためには、設計者は数多くの要素が及ぼす長期的効果を考察する必要があります。様々な態様の応力荷重に加え、環境的要素に起因する特性変化も考慮に入れなければなりません。ポリマー材料に加える応力が及ぼすその挙動への経時的効果を評価するためには、クリープや疲労特性の測定が必要となります。工学部品の性能に影響を及ぼす可能性のある環境的要素は非常に多様であり、これらの詳細については 58 ページ以降の「耐環境性」のセクションで説明します。しかし、特に大きな影響力を持ついくつかの環境的要素については、このセクションで考察するものとします。具体的には吸水と高温環境に長期間曝されたときの効果をこのセクションで説明します。

このセクションでは、設計者の助けとなることを目的に収集したデータを提示し、設計寿命に必要な要件の解析を行います。このセクションで取り扱うデータは次のとおりです。

- 引張、曲げ、圧縮モードにおけるクリープ弾性率
- 引張クリープ破断
- 疲労耐久度
- 吸水による特性変化
- 吸水による寸法変化
- 高温に長期間曝されたことによる特性変化

このマニュアルに掲載された長期特性データは、何通りの代表的条件下に置かれた各種のアモデル PPA グレードが示す特性損失とその傾向を明らかにする目的で取得されたものです。ただし、データ取得に必要な期間が長い場合、すべてのグレードとすべての条件セットが含まれているわけではありません。これらのデータは特性変化の傾向を充填材／強化材の関数として示すことを意図したものであり、設計者はこれらのデータをもとに合理的な判断を下すことができます。

いくつかの例では、長期的特性データをより短い期間で取得するために「加速」試験を用いています。このような方法で取得したデータはしばしば非線形性を示すため、データの評価には特に注意が必要です。この傾向は、特性損失を温度上昇または化学薬品暴露の関数として測定する場合に特に顕著に現れます。このような非線形挙動を引き起こす最大の要因は、熱的な「しきい値」、例えばガラス転移温度 (T_g)、さらには融点の存在です。

クリープ

材料に応力が加わると直ちにひずみが発生します。ひずみは、その程度が小さい範囲では応力に比例するため、該当する弾性率を使用して計算することができます。しかし、応力が長時間連続的に加わると、さらなるひずみが観測されることがあります。この挙動がクリープであり、これにより生ずるひずみの増分をクリープひずみと呼びます。

クリープは金属でも観測されますが、プラスチックではより顕著に現れます。プラスチックでは弾性率が低いので、同じ応力レベルでも大きなひずみが発生し、最終的なひずみの割合が大きくなります。一般的には、初期ひずみと最終的なひずみの値が近いほど顕著なクリープが発生します。

長期的に満足のいく性能を発揮するためには、現実にかかるクリープを考慮した設計を行わなければなりません。まず初めに行わなければならないのは、クリープが部品の寸法や機能に無視できない効果を生ずるか否かを判定することです。応力レベルが十分に低く、問題となるような寸法変化が生じないのであれば、クリープも無視することができます。しかし、許容範囲を超えるような変形を生ずるレベルの応力が加わるのであれば、別な設計を考えなければなりません。そのためには、より高いクリープ弾性率を持つ材料の調査や、部分的に高荷重に耐える金属インサートを組み込むなどの別なアプローチによる設計の検討が必要となります。さらに詳しい考察については、「設計」のセクションをご覧ください。

一般的に、ガラスまたはミネラル／ガラス強化グレードは、非強化グレードよりもクリープが小さくなります。測定可能なレベルのクリープが発生するまでに必要な時間も、非強化グレードの方が短くなります。高温領域では、見掛けの弾性率またはクリープ弾性率が小さくなり、それに対応してクリープが大きくなります。温度がガラス転移温度 (T_g) を超えると、非強化グレードの見掛けの弾性率は極端に小さくなるため、比較的小さな荷重であっても大きなクリープが発生します。したがって、非強化グレードをこのような温度領域で構造材として使用することは一般的にはお奨めできません。高温に曝される構造材として使用する場合には、ガラスまたはミネラル／ガラス強化グレードをご利用ください。

クリープは引張、圧縮、曲げのいずれのモードでも起こります。したがって、クリープ特性を把握するためには、特定の環境条件に置かれた試験片に一定の引張、圧縮、曲げ荷重を加えたときのひずみを時間の関数として測定します。このための試験手順は ASTM D2990 (Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics) に説明されています。ISO 899 (Plastics – Determination of Creep Behaviour) もこれに類似していますが、試験片の仕様が違うため、得られる結果は正確には同じではありません。どちらの方法を使用しても、一般的な傾向に関してはほぼ同等の結果が得られますが、材料の比較データとして使用する場合は必ず同じ方法で取得したデータを使用する必要があります。

通常、クリープは3段階で進行します。

- 急速な初期変形
- ゆっくりとした一定速度で連続的に進行する変形
- 延性材料の場合：降伏現象が起こり、それに続いて破断が発生。非延性材料の場合：破断。

クリープ試験から得られるデータが非常に重要なのは、そのデータをもとに時間に依存するクリープひずみや、応力計算に使用するクリープ弾性率、さらに特定の時間、温度条件における安全応力レベルを計算できるためです。様々な応力レベルで材料が破壊するまでのクリープ試験を実施することにより、クリープ破断曲線を作成することができます。

クリープには、解析を更に複雑にする次のような局面があります。ある与えられた応力を受けると、材料は見掛けの弾性率から予測される速度でクリープを発生します。しかし、応力の与え方によっては初期クリープによって応力緩和を起こすことがあります。例えば、プラスチック部品をボルトでクランプし、プラスチックに圧縮応力を加えるようなトルクでこのボルトを締め付けたとします。このようなケースでは、クリープひずみの発生に伴って圧縮応力の低下が起こり、その結果としてクリープが小さくなることがあります。圧縮応力のこのような低下は、より低い応力レベルで平衡状態が達成されるまで続きます。この現象に単変数解析法を適用すると、保持トルクが破壊レベルまで低下するという結果を導くことになりますが、実際には破壊レベルに達する前に妥当な平衡レベルで落ち着きます。

クリープが部品設計に及ぼす影響についての具体例を含めた更に詳しい考察については 70 ページをご覧ください。

引張クリープ

異なる3段階の温度 (23°C、125°C、175°C) と2段階の応力レベル (13.8 MPa、34.5 MPa) で引っ張りクリープを測定しました。使用した試験片は ASTM D638 (タイプ I) に準拠して射出成形した厚さ 3.2 mm の引っ張り試験片です。サンプルは成形直後と同じ「絶乾状態」で試験に供しました。2段階の高温状態で試験を行ったサンプルは、空気循環式オープン内に入れて温度を調節しました。測定するのはひずみですが、測定結果は一般的にひずみの値を加えた応力で割ることによって算出する見掛けの弾性率として報告されます。設計者は、持続的な荷重に耐え得る部品を設計する際、機構設計の計算にこの見掛けの弾性率を使用します。

試験を行った材料は A-1133 HS (ガラス繊維 33%) および A-1145 HS (ガラス繊維 45%) です。室温での試験結果を図 38 および図 39 に示します。

125°C で実施した引張クリープ試験の結果を図 40 と図 41、175°C での結果を図 42 と図 43 に示します。

図 38：見掛けの弾性率：23°C、13.8 MPa

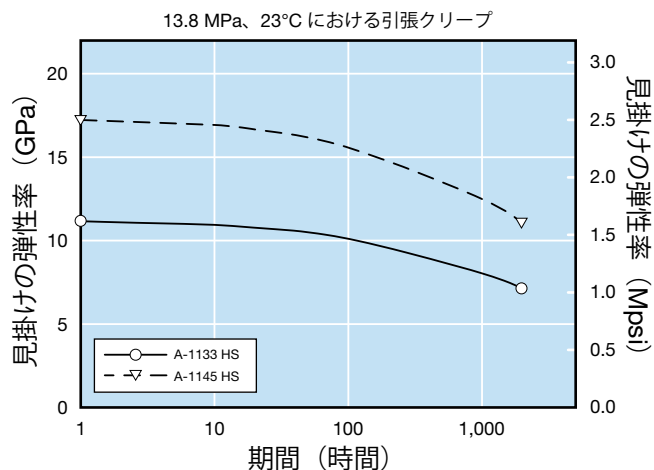


図 41：見掛けの弾性率：125°C、34.5 MPa

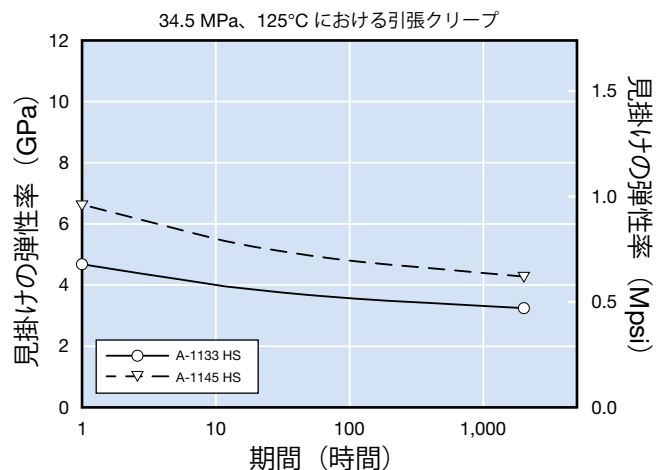


図 39：見掛けの弾性率：23°C、34.5 MPa

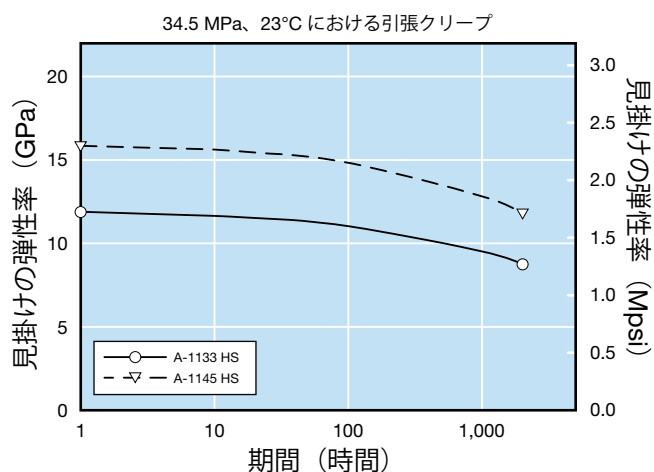


図 42：見掛けの弾性率：175°C、13.8 MPa

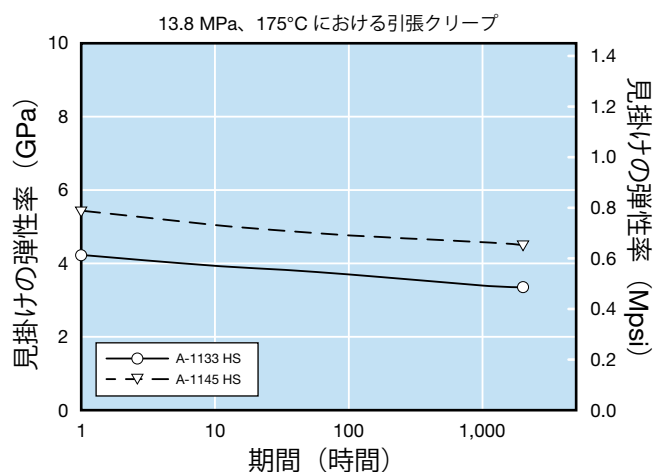


図 40：見掛けの弾性率：125°C、13.8 MPa

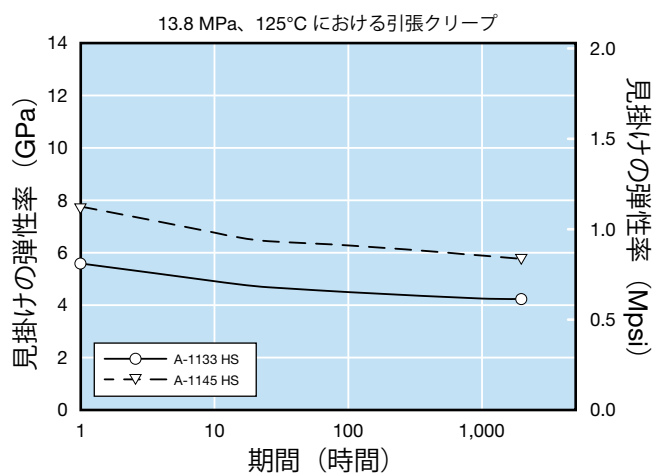
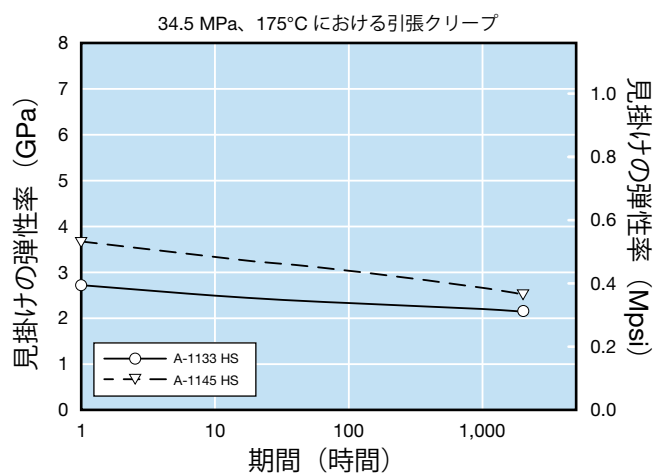


図 43：見掛けの弾性率：175°C、34.5 MPa



等時性応力-ひずみ曲線

クリープデータを表現するもう一つの有用な方法として、応力をひずみに対して同じ時間間隔（等時性）でプロットする方法があります。等時性曲線を作成するには、応力とそれにより生ずるひずみを同じ時間間隔でプロットし、これらのポイントを結ぶ滑らかな曲線を描きます。時間間隔を変えながらこの操作を繰り返します。

この方法を使用すると、大量データを簡潔に表現できるという利点があります。応力を図に示されるひずみ値で割ることにより、任意のポイントでの見掛けの弾性率を計算することができます。（図ではひずみがパーセント値で表現されていることに注意してください。プロットされた値を 100 で割った値が実際のひずみ値です。）

図 44 に示すのは、アモデル A-1133 HS 樹脂の各温度（23°C、125°C、175°C）における等時性応力-ひずみ曲線です。

図 45 に示すのは、同様の条件で測定したアモデル A-1145 HS のデータです。予期されるように、複合材料中のガラス繊維含量が多くなるほど優れたクリープ耐性を示しています。

引張クリープ破断

クリープ破断は、持続的な荷重を加えた結果として生ずる材料の破壊または破断と定義されます。荷重を継続的に付加して破断を生じさせる応力レベルは、短時間に破断を発生させる応力レベルよりも低いため、クリープ破断は設計上の制限因子として重要です。

引張クリープ破断試験の目的は、持続的荷重が破断を発生させるまでに必要とする時間を測定することです。破断に要した時間に対して応力をプロットした曲線は、一般に「クリープ破断曲線」として知られています。材料の強度は温度に依存して変化するため、「クリープ破断曲線」も必要な温度ごとに作成する必要があります。

クリープ破断曲線は ASTM D2990 に準拠して作成しました。引張試験に供した試験片は ASTM D638（タイプ I）に準拠して射出成形した厚さ 3.2 mm の引張り試験片です。試験環境は上に説明した引張クリープ試験と同様です。空気圧動作ベローズを使用してサンプルに荷重を与え、指定された応力レベルを保ちます。

アモデル AS-1133 HS 樹脂の各温度（65°C、100°C、150°C）における引張クリープ破断曲線を図 46 に示します。

図 44：等時性応力-ひずみ曲線：A-1133 HS PPA

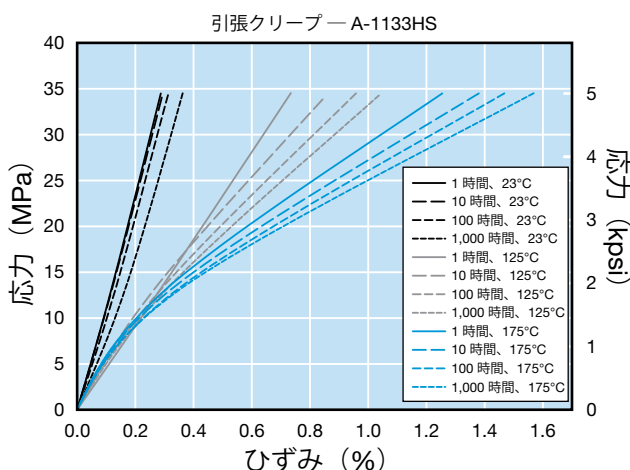


図 45：等時性応力-ひずみ曲線：A-1145 HS PPA

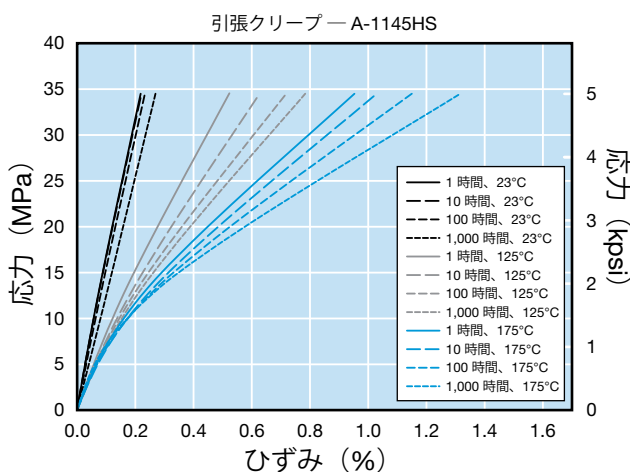


図 46：引張クリープ破断：AS-1133 HS

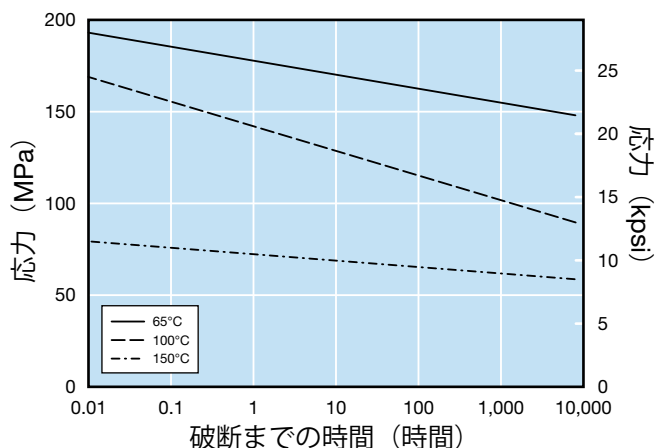


図 47：見掛けの曲げ弾性率：69 MPa、23°C

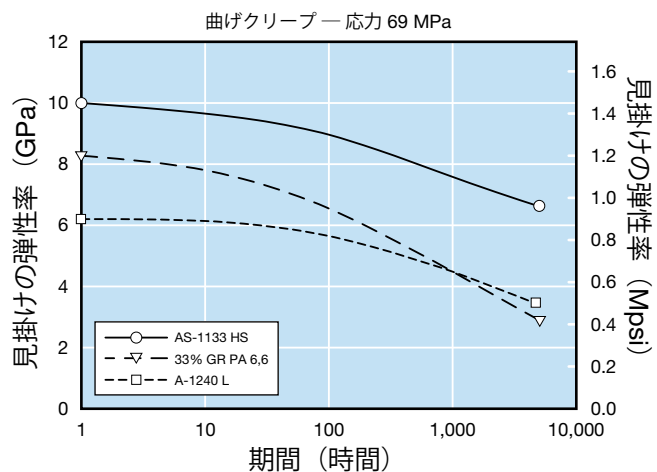
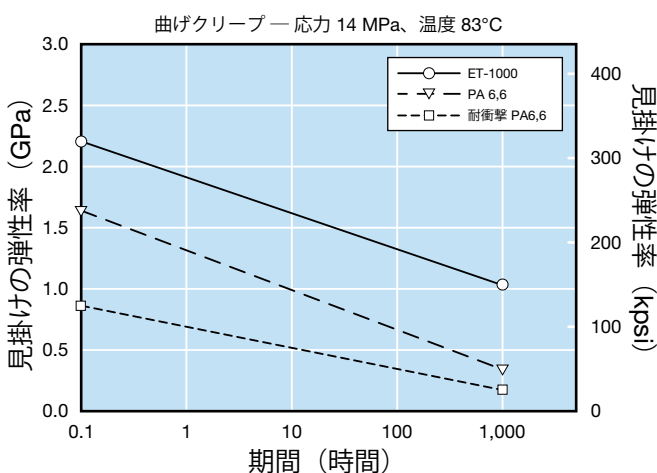


図 48：見掛けの曲げ弾性率：14 MPa、83°C



曲げクリープ

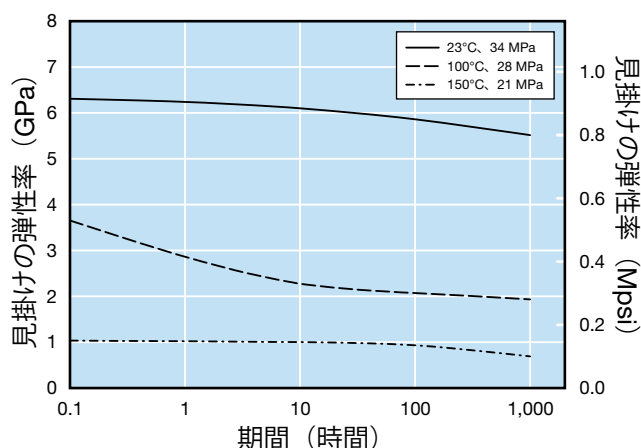
曲げクリープは ASTM D2990 が規定する 3 点曲げモード（支点間隔 50.8 mm）を用いて測定します。この試験では 127 x 12.7 x 3.2 mm の射出成形試験片を、成形直後と同じ「絶乾状態」で試験に供します。試験環境は相対湿度 50%、温度 23°C に保ちます。試験で使用する応力レベルは、曲げ強度-温度曲線をもとにして、試験温度でその材料が示す極限強さの 25~35% レベルとなるようにあらかじめ決定しておきます。

耐クリープ特性は、材料の使用温度とガラス転移温度との関係からおよその予測が可能です。標準的には、使用温度が T_g よりもはるかに低い場合に優れた耐クリープ特性を示し、使用温度が T_g に近づくに従って特性は低下していきます。このことから、アモデル樹脂が従来型の多くの半結晶性熱可塑性樹脂よりも優れた耐クリープ特性を持つことが分かります。例えば、示差走査熱量測定 (DSC) (ASTM D3418) によるアモデル A-1000 樹脂のガラス転移温度は 123°C であるのに対して、PA 6,6 の同じ測定法による T_g は 65°C です。 T_g に達するまでのすべての温度において、アモデルの方が優れた耐クリープ特性を示しています。

図 47 に示すのは、アモデル AS-1133 HS と A-1240 L 樹脂の見掛けの曲げ弾性率を、ガラス繊維強化 (33%) PA 6,6 と比較したデータです。AS-1133 HS 樹脂がガラス繊維強化 PA よりも優れているのは明らかですが、ミネラル強化グレード（アモデル A-1240 樹脂）は 1000 時間の荷重付加後でさえ、実質的にさらに高いクリープ弾性率を示しています。

図 48 に示すのは、アモデル ET-1000 樹脂の見掛けの曲げ弾性率を、PA 6,6 の非強化グレードおよび耐衝撃グレードと比較した例です（温度 83°C、応力 14 MPa）。

図 49：見掛けの圧縮弾性率：AS-1133 HS



圧縮クリープ

圧縮クリープは ASTM D2990 に従って測定しました。12.7 x 12.7 x 25.4 mm の射出成形試験片を使用しました。試験片の両端片を切削加工して、相互の平行度が 0.025 mm 以内に収まり、かつ軸と垂直となるようにしました。試験片にはひずみゲージを接着して変位をモニターしました。曲げクリープ試験と同様に、付加する応力レベルは試験温度における圧縮強さの 35% 未満となるようにしました。

図 49 に示すのは、アモデル AS-1133 HS 樹脂の各温度（23°C、100°C、150°C）における圧縮クリープ弾性率です。これらの弾性率は、図 47 に示した曲げクリープ弾性率よりも低い値を示していますが、その理由は発生するひずみ方向へ強化繊維が配向している程度が低いからです。

アモデル樹脂に圧縮荷重がかかるような用途では、ほとんどの場合流れ方向に対して直角方向に荷重が付加されるため、強化繊維の向きに対して横方向から力が加わることになります。したがって、ここに示す見掛けの弾性率が一般的な用途における材料の性能を代表するものであるといえます。

耐疲労性

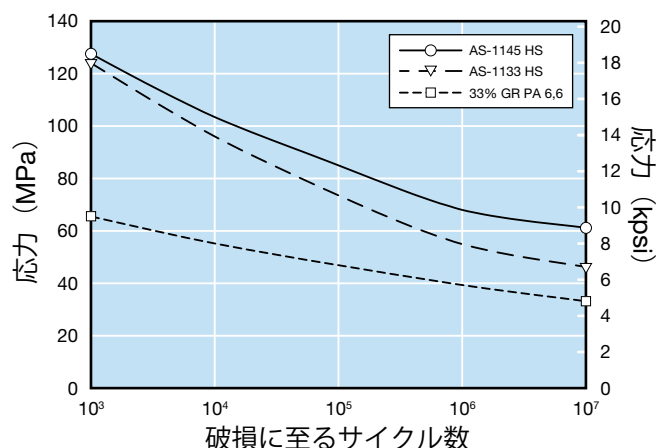
材料に応力を繰り返して付加すると、短期的な極限強度よりもはるかに低いレベルの応力で破壊や破断が起こります。反復的に応力が加わる応用の例としては、激しい振動に曝される部品、往復／回転運動を行う装置で繰り返し荷重が加わる部品、ギアのような機構の一部でその位置に応じて繰り返し荷重が加わる部品などがあります。

この現象は金属では良く知られており、冶金学者は材料が破壊を起こすことなしに耐えられる反復応力の最大値を「疲労耐久限界」という用語で表しています。通常、この応力レベルは 1000 万 (10^7) サイクルの応力付加でも破壊を起こさない最大応力に相当します。

「疲労耐久限界」という用語は、プラスチック材料が関わる設計を考える場合にも使用されることがありますが、繰り返し応力に対するプラスチックの応答は金属の場合よりも複雑であるため、厳密にはこの用語はあてはまりません。疲労データは、一般的には破断が発生した時点での応力と繰り返し回数との関係をプロットすることによって表現します。データに合致する滑らかな曲線を計算によって作成します。部品設計の観点からは、この S-N（応力-繰り返し回数）曲線は、要求される部品寿命に適合する強度の値を示すものとなります。

繰り返し荷重に曝される部品を設計する際には、疲労強さの必要条件を明確にしておくことが望まれます。しかし、疲労強さに影響を与える因子が多数に及ぶため、必要条件の解析は非常に複雑な作業になります。このような因子には次のようなものがあります：部品形状、応力集中係数、荷重負荷速度、荷重付加により生ずる温度変化、荷重により生ずる応力のタイプ（引張り、圧縮、せん断など）、環境的要素（化学薬品、放射、周囲温度など）、残留応力、負荷サイクル、望ましい部品寿命など。

図 50：GR 樹脂の曲げ疲労：23°C、32 Hz



アモデル樹脂の疲労強さ

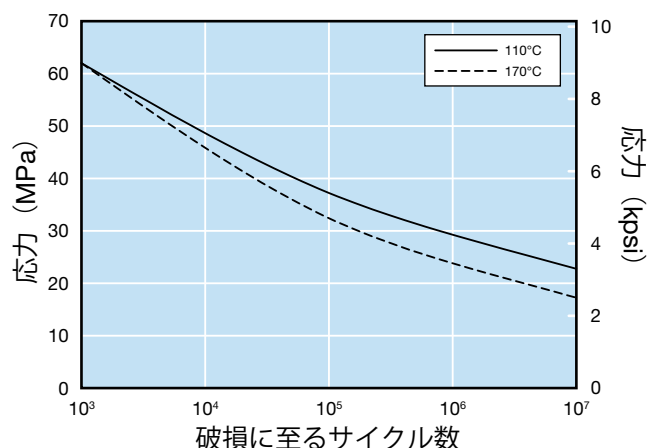
プラスチック材料の疲労強さの測定や比較を行うときは、そのモード（引張、圧縮、曲げ）や周波数、応力プロファイルを明確に指定することが非常に重要です。

アモデル樹脂の疲労強さは ASTM 試験法 D671 に従って測定しました。この試験法では、一定のたわみを与えた片持ち梁を使用します。図 50 に示すのは、周波数 32 Hz を用いて測定した結果です。応力レベルが初期値の 90% まで低下したことをもって部品の破壊発生と定義します。この図から分かるように、アモデル樹脂は PA 6,6 と比較して、より高い繰り返し荷重に対し長く耐えることができます。

図 51 に示すのは、アモデル AS-1145 HS 樹脂の各温度（110°C および 170°C）における疲労挙動です。予測されるとおり、温度が上昇するにつれ、材料が耐えられる繰り返し回数は低下します。

繰り返して応力がかかる部品の代表例はギアです。駆動ギアが被駆動側のギアを回転させるとそれぞれの歯に応力が加わり、それに続いて応力がゼロまたは小さい時間帯が発生します。ギアの歯を設計する際には、ギアの動作条件における材料の疲労耐久限界を強度基準として使用します。

図 51：AS-1145 樹脂の曲げ疲労：高温領域



すべての計算が完了した後に、選択した材料の特性を最大限に生かすために部品設計を修正することは可能です。逆に、特定用途での必要条件に合わせて使用材料のグレードを変更することも可能です。有限要素解析（FEA）は、設計の検証に役立つ強力なツールです。FEA は電子的にデータ化されたモデル部品にコンピュータプログラムを適用して、予測される荷重と応力のシミュレーションを行います。計算で得たひずみ分布の解析を行い、必要に応じて部品設計や使用材料を変更することができます。部品や金型を試作して改良するよりも FEA の段階で修正を行う方がはるかに容易です。

ただし、必要な計算や FEA 解析が行われたとしても、動的応力に曝される部品の材料を評価する最善の方法は、やはり部品を試作して試験を行うことであることに変わりはありません。標準的形狀の素材から切削加工を施して作成した試作部品に、各用途の必要条件に合わせた性能試験を行うのが良い方法です。標準的に利用できる素材は押出し厚板や棒材ですから、射出成形した部品と比較して一般的に機械特性がやや劣ります。さらに、射出成形部品では通常存在しない応力が切削加工によって発生することもあります。このような問題はあるにせよ、適切な試作品を作成して試験を実施することにより設計の信頼性レベルは著しく向上します。

水分の影響

ほとんどの熱可塑性樹脂と同じように、アモデル樹脂で作成した部品も雰囲気中の水分を吸収します。水分の吸収は物理的な変化であって化学的な変化ではないため可逆的にも進行し、適切な条件下に置くことで部品を「乾燥」させることができます。ポリフタルアミド樹脂であるアモデルは、ポリマーの「骨格」に多量の芳香族成分が存在し、そのため PA 6,6 や PA 6 のような脂肪族ポリアミドと比較してはるかに少ない水分しか吸収しません。その結果、アモデル部品の寸法や強度、剛性が吸水によって受ける影響は、従来型の脂肪族 PA 部品と比較してはるかに低くなっています。水分はあらゆる場所に存在しますから、エンドユーザー要件に対応しようとする設計者にとって、水分が材料特性に与える影響を知ることは非常に重要です。

吸水の意味

ポリマーが雰囲気中の水分を吸収したときに発生する変化にはさまざまなものがあります。重量が増加するのは明らかですから、この重量増加を使用して吸収された水分量を測定することができます。重量以外に寸法も変化することがあります。一般的に寸法は増加傾向を示し、すなわち部品が大きくなります。ガラス繊維などの強化材が含まれると、金型にポリマーを充填するときに繊維が樹脂の流れ方向へ配向することから、寸法変化に異方性が生ずることがあります。成形時の収縮と同じように、吸水に起因する寸法変化も多くの場合流れ方向と直角方向の両方の値が報告されます。

機械特性も吸水の影響を受ける可能性があります。一般的に、引張強さや曲げ強さなどの物理特性は若干低下する傾向が見られます。それぞれに対応する弾性率もわずかに低下します。一方、衝撃強さは若干増大する傾向を示しますが、これは水分の存在がポリマーの可塑化を促進する効果を持つためです。水は電気を導くため、吸水は成形部品の誘電特性に悪影響を与えます。

水分を吸収する性質を持つポリマーのメーカーは、通常二種類の条件によるデータを用意しています。ひとつは水分を吸収していない試験片の試験結果一覧であり、このデータを一般に「絶乾状態」(DAM: Dry – As Molded)と呼びます。もうひとつのデータは、試験片が相対湿度 50% の環境中で平衡重量に達したときの試験結果であり、こちらのデータは「50% RH」として知られています。PA 6 や PA 6,6 のようなポリマーは比較的急速に水分を吸収し、相対湿度 50% の環境でも短時間の内に平衡に達します。したがって、これらの材料の 50% RH データを準備することは簡単であり、しかも以下の考察から分かる通り設計に非常に役立つデータです。

しかし、アモデル PPA のようなポリマーの吸水は非常に緩慢であり、50% RH で平衡に達するまでに数年を要することがあります。50% RH データを得るために、試験片のコンディショニングを加速する方法が開発されています。この方法では、試験片の重量が一定になるまで試験片を酢酸カリウム水溶液中で煮沸します(通常は数日間)。当然予期されるように、この加速法は試験結果にいくつかの副次的な効果を及ぼします。加速法を使用することによって、試験片にアニーリング処理が施されたことになり応力が解放される結果、実際よりも良い特性試験結果が得られることがあります。逆に、沸騰水中に浸漬されたポリマーの加水分解が進んで特性値が劣化することもあります。その他、沸騰した塩水への暴露は、ポリマーと強化材(ガラス繊維など)との間の結合を劣化させることがあり、その結果として引張り、曲げ、衝撃などの機械特性が低下することが示されています。以上のような問題はありますが、吸水がアモデル樹脂に及ぼす影響は非常に僅かです。

吸水とガラス転移温度 (T_g)

吸水が材料に及ぼす影響としては、室温特性よりもガラス転移温度 (T_g) への影響の方がはるかに顕著です。ポリマーの T_g とは、その温度を超えるとポリマー母材中の結晶性領域が非晶質領域に対する優位を失う温度と定義されています。 T_g を超える温度では非晶質領域が材料の大部分を占めるため、機械特性と温度の関係の考察から分かる通り、機械特性が明瞭に劣化します。特に非強化グレードの変化は非常に顕著であり、機械設計の観点からはほとんど利用価値のないレベルまで特性値が低下します。強化材を含むグレードの場合は T_g を超えても設計上の観点からはまだ利用価値を失いませんが、それでも機構特性が著しく低下することを十分に考慮した設計を行う必要があります。

半結晶性樹脂に吸収された水分には、ガラス転移温度を下げる性質があります。 T_g がどの程度低下するかは、個々のポリマーの特性と吸収した水分量に依存します。

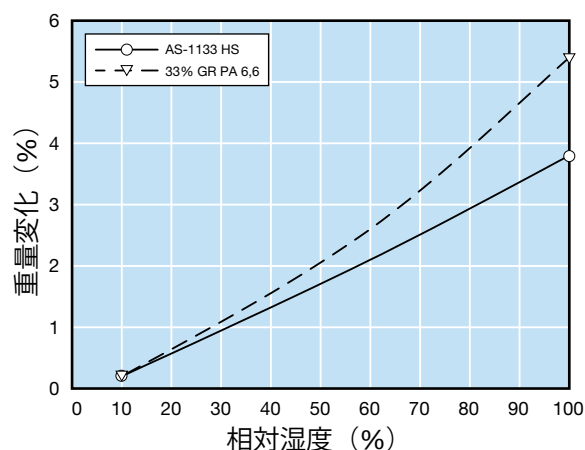
100°C またはそれ以下の T_g を持つポリマーを使用して設計を行う場合は、この現象に十分な注意を払う必要があります。例えば、 T_g が 80°C（絶乾状態）のポリマーでは、吸水によって T_g が 60°C まで低下することがあります。設計上の決定を下すにあたって、設計者は T_g の低下によって 60°C を超える温度で特性が著しく損なわれることを考慮に入れなければなりません。乾燥状態での T_g がさらに低いポリマーの場合は、吸水によって T_g が室温またはそれに近い値まで低下する可能性があります。このような場合は、設計時に極めて慎重な考慮が必要となります。

別な例として、乾燥状態での T_g が 123°C であるアモデル A-1000 シリーズのポリマーを考えてみましょう。室温での吸水によってこのポリマーの T_g は 84°C まで下がり、「室温」特性値も若干低下します。しかし吸水は可逆的な現象であるため（吸水は物理現象であって化学反応ではありません）、100°C を超える温度ではポリマーは水分を失って T_g も最初の値である 123°C へ戻ります。したがってアモデル樹脂の場合には、吸水によって T_g が一時的に低下したとしても本質的に問題はありません。以下に示すデータは、周囲温度において吸水が起こると予想され、それに伴って多少の特性劣化が発生すると考えられる用途において考慮すべき項目を示しています。ポリマーは 100°C を超える温度に曝されることで水分を「放出」して乾燥時の特性を取り戻すため、100°C 以上の湿った環境で取得した試験データはアモデル樹脂では意味を持ちません。しかし 100°C 近傍またはそれ以下の T_g を持つポリマーに対しては、このようなデータは非常に重要なものです。

吸水量

これまでも説明したとおり、吸水は可逆のプロセスです。相対湿度と温度を指定すると、樹脂はその条件に応じた水分を吸収して平衡に達しようとし、平衡に達すると、ポリマーは水分を放出する速度と同じ速度で水分を吸収し、正味の重さは一定に保たれます。水分を吸収するのはポリマー自体であって充填材や強化材ではないため、吸収する水分量は各グレードが含むポリマーの量に比例します。したがって、充填材含量の多いグレードほど非強化グレードと比較して吸収する水分量は少なくなります。図 52 に示すのは、アモデル AS-1133 HS と 33% ガラス繊維強化 PA 6,6 を対象として、室温での吸水による重量増加を相対湿度を変化させて比較したデータです。33% ガラス繊維強化 PA 6,6 はアモデル AS-1133 HS 樹脂に比べ、著しく多量の水分を吸収することが分かります。また、平衡に達するまでの時間を比較した場合も、アモデル樹脂は PA 6,6 よりもはるかに長い時間を必要とします。

図 52：GR 樹脂の吸水



水分が強度と剛性に及ぼす影響

アモデル AS-1133 HS と 33% ガラス繊維強化 PA 6,6 の引張強さを、温度（23°C）と水分含量を指定して比較した例を図 53 に示します。アモデル樹脂の引張強さは成形直後と同じ絶乾状態で PA よりも優れているばかりでなく、水分レベルが高くなるほど強度の差は大きくなります。

図 53：水分による影響：GR 樹脂の引張強さ

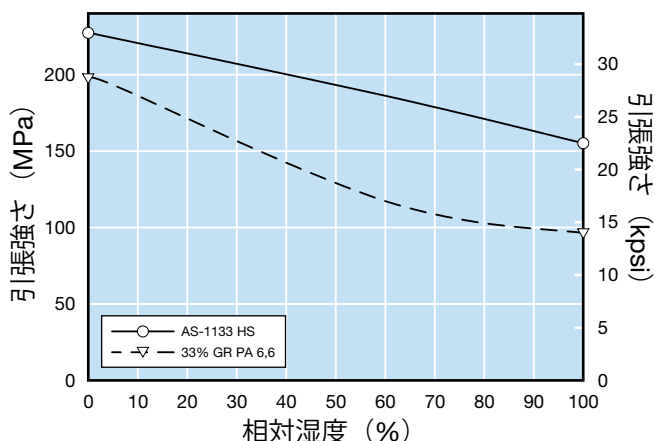
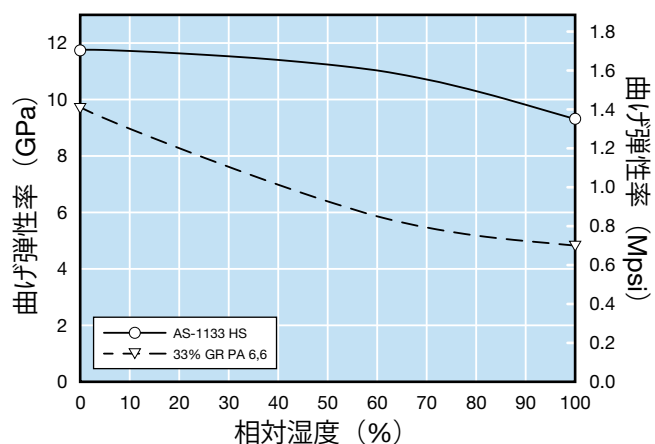
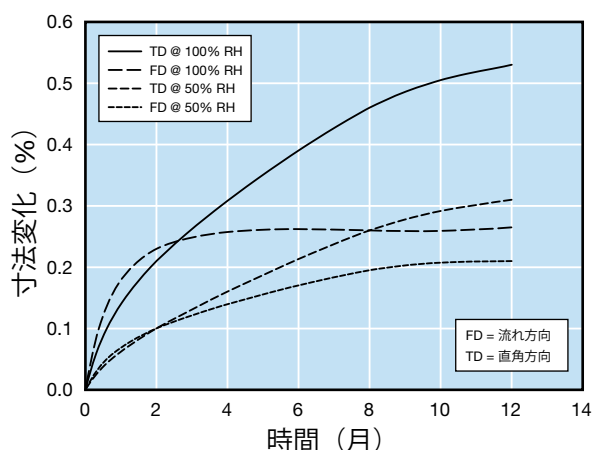


図 54：水分による影響：GR 樹脂の曲げ弾性率



アモデル AS-1133 HS と 33% ガラス繊維強化 PA 6.6 の曲げ弾性率を、一定の温度（23℃）で水分含量を変化させて比較した例を図 54 に示します。アモデル樹脂の曲げ弾性率は成形直後に高い値を示し、水分含量が変化しても比較的一定なレベルを保ちます。PA 樹脂の曲げ弾性率は水分レベルと温度の上昇に伴って急激に低下します。これは、PA 6,6 の T_g が 100℃ 以下であり、しかも吸水によって更に低下することによりま

図 55：33% GR PPA の寸法変化



水分による寸法変化

吸水が部品の寸法に及ぼす影響を解析するため、102 x 102 x 3.6 mm の薄板を成形し、その寸法を測定してから室温（23℃）、相対湿度 50% または 100% の環境に入れて放置しました。この薄板を定期的に取り出して寸法を測定しました。成形時の流れ方向を記録しておき、流れ方向と直角方向の二種類のデータを収集しました。寸法変化はパーセント値として算出されます。すなわち、変化後の長さから初期の長さを引き算し、それを初期の長さで割ってから 100 倍することにより、変化率パーセントを計算します。

アモデル AS-1133 樹脂の試験結果を図 55 に示します。相対湿度 100% の環境に置いた場合も、アモデル樹脂の寸法は相当長い期間変化し続けます。図の曲線から分かるように、1 年が経過すると変化速度は大幅に小さくなりますが、それでも寸法は変化し続けます。流れ方向の変化は直角方向の変化と比較して変化量が小さいことが分かりますが、その理由は強化繊維が流れ方向に沿って配向するためと考えられます。寸法変化の規模は比較的小さい（0.6% 未満）と言えますが、極度に厳しい寸法公差と寸法安定性が要求される用途ではこのような小さな変化も重要な問題となることがあります。

図 56：40% ミネラル強化 PPA の寸法変化

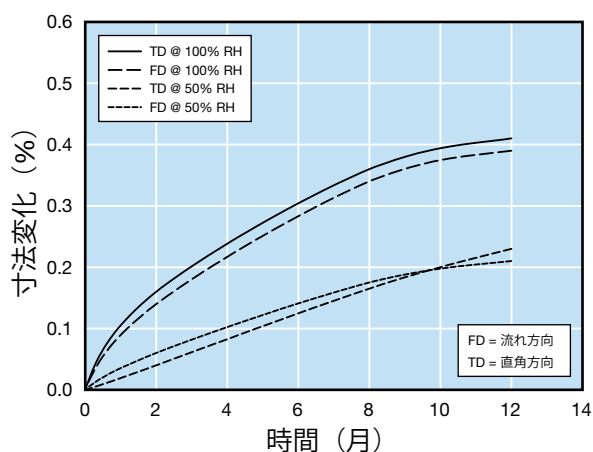
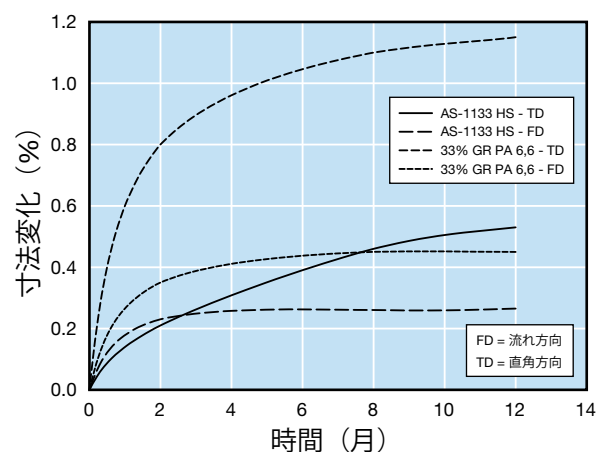


図 56 に、アモデル A-1340 PPA（40% ミネラル強化グレード）に対して同じ試験を行った結果を示します。このグレードでは寸法変化の規模が小さくなるばかりでなく、流れ方向と直角方向の差がほとんど無視できるほど小さくなっています。

PA 6,6 との寸法変化比較

図 57 に示すのは 100% RH の環境下での吸水による寸法変化について、アモデル AS-1133 HS 樹脂と 33% ガラス繊維強化 PA 6,6 とを比較したデータです。適正な比較を行うために、両方の樹脂は最高度の結晶性を実現する条件下で成形されています。アモデル樹脂では 135℃ の金型温度を用い、PA 6,6 では 93℃ の金型温度を使用しました。厚さ 3.2 mm の薄板を室温、100% RH の環境に置いて水分を吸収させました。

図 57：GR PA 6,6 と GR PPA の寸法比較：100% RH



アモデル樹脂は PA 6,6 よりもはるかに緩慢な速度で水分を吸収します。これは室温における水の拡散係数を比較すると PA 6,6 の値はアモデル樹脂の約 5 倍にも及ぶためです。このため、PA 6,6 の薄板が約 4 ヶ月で平衡状態に達するのに対して、アモデル AS-1133 HS 樹脂は 2 年以上の期間を要します。

熱特性

一般に熱特性は、短期的および長期的な温度変化に対して材料がどのように応答するかを規定する特性値です。熱特性値は、次のような項目に対して温度が及ぼす影響を示します。

- 強度と剛性
- 寸法
- 熱劣化または酸化劣化によるポリマー自体の化学的变化
- 軟化、溶融、変形
- 相変化

材料の溶融状態における特性については、アモデルの成形に関する資料をご参照ください。燃焼中の物質が示す挙動については、燃焼特性のセクションで説明します。

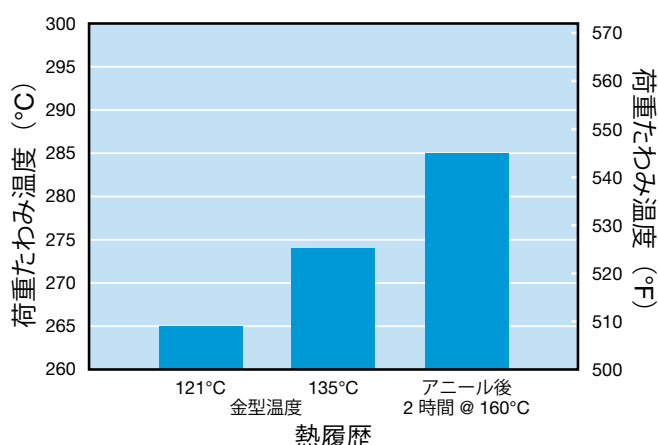
荷重たわみ温度 — HDT

短期的熱特性を測定するためにプラスチック産業界で最も一般的に使用されている試験法は、ASTM D648 (Standard Test Method for Deflection Temperature of Plastics Under Flexural Load) および ISO 75 (Plastics – Determination of Temperature of Deflection Under Load) の二種類です。これらの試験法は一般に熱変形温度 (HDT: Heat Distortion Temperature) または荷重たわみ温度 (DTUL: Deflection Temperature under Load) と呼ばれています。試験片を2点で支持して中央部に荷重を加えるという点で両者はよく似ています。ダイヤル付マイクロメータで変位を測定しながら、試験片のたわみが指定された大きさになるまで一定速度で温度を上昇させます。

これらの試験法では、使用する試験片の幾何形状や向き、たわみの終点、支点間の距離などの詳細はそれぞれ異なりますが、どちらの試験法でも標準的な応力レベルとして 1.8 MPa と 0.45 MPa の負荷を使用します。出典の異なる複数のデータを比較するときは、対象となるすべてのデータが同じ測定法によって取得されたことを確認することが重要です。6 ページ以降に掲載してある特性表では、両方の試験法で取得したデータが併記されています。これらのデータを詳細に検討してみると、いくつかのグレードでは試験法によって値に相当の差があることが分かります。

試験パラメータの中には、得られる結果に大きな影響を与えるものもあります。このため、設計技術者は複数の出典からのデータを使用するときはデータの取得方法に十分な注意を払う必要があります。一般に起こり易く、かつ重大な誤りは、応力 1.8 MPa で実施した試験結果と 0.45 MPa で実施した試験結果を混同してしまうことです。すべてのアモデル樹脂は、特に注記がない限りは 1.8 MPa で試験しています。また、試験パラメータで特に注意を必要とするものに、試験片の肉厚と熱処理履歴があります。

図 58：金型温度とアニーリングによる HDT への影響：アモデル AS-1133 HS

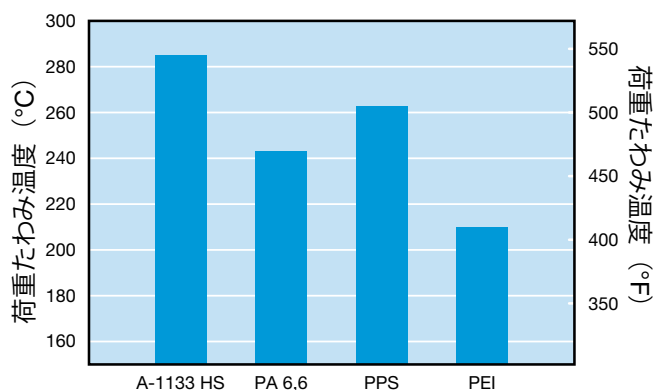


成形直後の試験片を試験に供することもあります。ガラス転移温度よりも若干高めの温度で数時間熱処理（アニーリング）を施してから試験を行うこともあります（アモデル PPA の場合は約 160°C で熱処理を行います）。

アニーリングを施すことによって一般に荷重たわみ温度測定値のばらつきが小さくなり、値も全体として若干高くなります。図 58 に示すのは、金型温度とアニーリングがアモデル AS-1133 HS の荷重たわみ温度（1.8 MPa 使用）に与える影響です。この図から分かるように、金型温度とアニーリングによって荷重たわみ温度が 17°C も変化することがあります。このマニュアルに記載の荷重たわみ温度は、試験片を 160°C で 2 時間アニーリングしてから測定した値です。

荷重たわみ温度とは温度測定における弾性率です。古典的な応力-ひずみ解析の解釈によれば、ASTM D648 が実際に測定するのは付加応力が 0.45 MPa であるときに曲げ弾性率が 240 MPa となる温度、もしくは付加応力が 1.8 MPa であるときに曲げ弾性率が 965 MPa となる温度です。この試験法は 5 分経過後に指示計をゼロにリセットするように指定しているため、最初の 5 分間に起こったクリープひずみを実質的には終点ひずみから差し引かれることになり、試験終点での実際の弾性率が低くなります。初期弾性率はクリープひずみに関連付けられる値です。

図 59 : 30~33% GR 樹脂の HDT



すなわち、荷重たわみ温度は材料の耐熱特性を測定するものではなく、単に弾性率-温度曲線のある一点を与えるものにすぎません。

一般に、HDT は短期的な耐熱特性を一般的に表す指標としてのみ使用できる値です。類似した材料を比較するために有用な値ではありますが、例えば非晶性材料を半結晶性材料と比較するためにこの値を使用すると誤った判断を下す恐れがあります。HDT は材料の長期的な熱安定性については何ら情報を与えるものではありません。実際の負荷と性能要求により、材料の適合性が決定されます。多くの半結晶性樹脂は、その樹脂の荷重たわみ温度を超える温度に随時曝されるような用途であっても使用が可能です。

アモデル樹脂の荷重たわみ温度

アモデル PPA を代表する 19 のグレードについて、ASTM D648 と ISO 75Af の両方で測定した荷重たわみ温度をまとめて 7 ページ以降の各表に示します。

図 59 に示すのは、負荷応力 1.8 MPa におけるアモデル AS-1133 HS 樹脂の荷重たわみ温度を、33% ガラス繊維強化 PA 6,6、30% ガラス繊維強化ポリフェニレンスルフィド、および 30% ガラス繊維強化ポリエーテルイミドの値と比較したデータです。アモデルの HDT は PEI と比較して 75°C 優れているほか、PA 6,6 と比較して 42°C、PPS と比較して 22°C 高い値を示します。

熱線膨張係数

大部分の材料は温度の上昇にともなって寸法が伸びます。熱線膨張係数 (α) はこの変化を表す尺度であり、温度の変化に対する長さの変化の割合です。

この係数 α が既知であるならば、温度 T_f の上昇によって一様な直線棒材に起こる長さ変化は、次の式を用いて計算することができます。

$$\Delta L = \alpha L (T_f - T_o)$$

ここで表しているのは以下のとおりです。

ΔL = 長さ変化

L = 初期長さ

α = 熱線膨張係数

T_f = 最終温度

T_o = 初期温度

ASTM E831 に従って測定した何種類かのアモデルグレードと一般的な金属の熱線膨張係数 (α) を表 19 に示します。この方法で得られるのは、膨張係数のある温度範囲にわたって平均化した値です。

金属は、測定した温度範囲にわたって一様な熱膨張挙動を示します。しかし、表 19 が示すようにポリマー材料の熱線膨張係数は測定する温度範囲によって変化します。一般にポリマー材料はガラス転移温度を超えるとそれ以下の温度よりもやや大きな膨張を示し、 T_g 近傍での挙動も若干の非線形性を示します。ただし、広い温度範囲を考えるとこれらの変動はそれほど顕著ではないため、表に示された値を利用して優れた精度の寸法特性を予測することができます。また、ガラス繊維その他の強化材を加えることによって、熱膨張に異方性が生じます。繊維は流れ方向に沿って配向する傾向を示し、ガラスはポリマーよりも熱線膨張係数が小さいことから、一般に直角方向よりも流れ方向の方が熱線膨張係数は小さくなります。

アモデル樹脂から成形した部品の温度が変化すると熱膨張によって熱応力が発生しますが、表 19 に示す値を使用して設計者はこの熱応力の大きさを予測することができます。

表 19：熱線膨張係数

表に示す値は温度 1°C あたりの 10^{-6} L/L (L は長さ)

温度	0～50 °C		50～100 °C		100～150 °C		150～200 °C	
方向	FD ⁽¹⁾	TD ⁽²⁾	FD	TD	FD	TD	FD*	TD
単位	/°C	/°C	/°C	/°C	/°C	/°C	/°C	/°C
ガラス繊維強化グレード								
A-1133 HS	24	50	24	60	27	99	27	130
A-1145 HS	22	49	21	58	27	88	15	122
A-6135 HN	23	59	21	63	16	96	15	109
AS-4133 HS	20	64	20	87	20	114	9	126
耐衝撃グレード								
AT-1002 HS	70	84	85	101	145	126	112	153
ET-1000 HS	68	80	85	81	147	97	142	113
ET-1001 L	71	69	94	80	167	88	170	118
AT-5001	93	106	136	144	184	184	153	142
耐衝撃ガラス繊維強化グレード								
AT-1116 HS	20	72	23	77	16	116	16	133
AT-6115 HS	23	83	21	97	34	116	26	121
難燃グレード								
AFA-1633 V0 Z	18	56	16	72	11	93	3	120
ミネラル、ミネラル／ガラス繊維強化グレード								
A-1240 L	26	68	19	91	18	117	15	121
A-1340 HS	34	50	42	60	51	103	19	103
A-1565 HS	20	34	20	39	20	72	14	89
AS-1566 HS	17	36	17	44	17	59	16	85
AP-9240 NL	54	48	87	61	110	81	87	110
一般的な金属								
亜鉛合金	27	27	27	27	27	27	27	27
アルミニウム合金 A-360	21	21	21	21	21	21	23	23
ステンレス鋼	17	17	17	17	17	17	18	18
炭素鋼	11	11	11	11	11	11	12	12

⁽¹⁾ FD = 流れ方向

⁽²⁾ TD = 直角方向または流れ方向に垂直

表 20：アモデル PPA 樹脂の熱伝導率

			平均温度		
			40°C	100°C	150°C
グレード	添加材	量 (%)	W mK	W mK	W mK
A-1115 HS	ガラス	15	0.289	0.307	0.324
AS-1133 HS	ガラス	33	0.341	0.360	0.376
AS-1145 HS	ガラス	45	0.372	0.393	0.409
A-1240 L	ミネラル	40	0.377	0.388	0.399
A-1340 HS	ミネラル／ガラス	25/15	0.422	0.430	0.436

熱伝導率

熱伝導率は、熱エネルギーが材料中を伝わる速度を表します。ポリマー材料を断熱材として利用する場合や、熱の散逸を考慮しなければならない用途では、この値が非常に重要な意味を持ちます。

熱伝導率の測定は ASTM F433 に準拠して行われます。この試験では、異なる温度にコントロールされたプレート間にサンプルを挟んで、サンプル中を流れる熱流をモニタリングします。熱伝導率は 3 段階の平均温度（40°C、100°C、150°C）で測定されますが、高温側プレートを平均温度よりも約 7°C 高く、低温側プレートを平均温度よりも約 7°C 低く設定しました。

アモデル樹脂各種グレードの熱伝導率を上記それぞれの温度で測定した結果をまとめたのが表 20 です。高い熱伝導率は熱を流し易い性質があることを示し、この値が低ければ絶縁材として優れていることを表します。

図 60 はガラス繊維含量が増えるほど、また温度が上昇するほど熱伝導率の値が大きくなることを示しています。

図 60：ガラス繊維強化アモデル PPA の熱伝導率

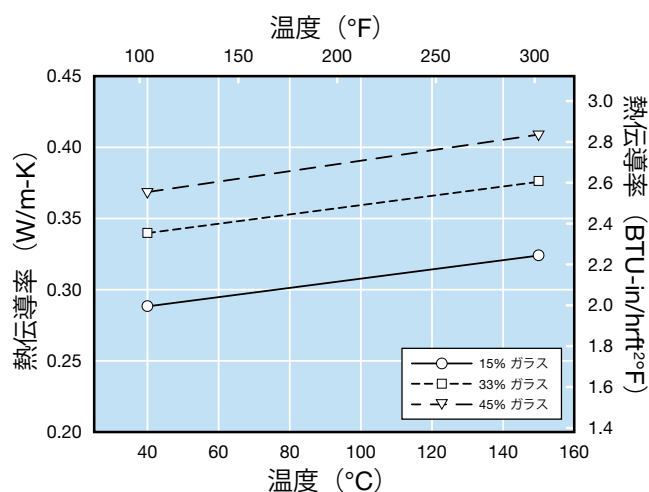


図 61：アモデル A-1000 PPA — 比熱と温度

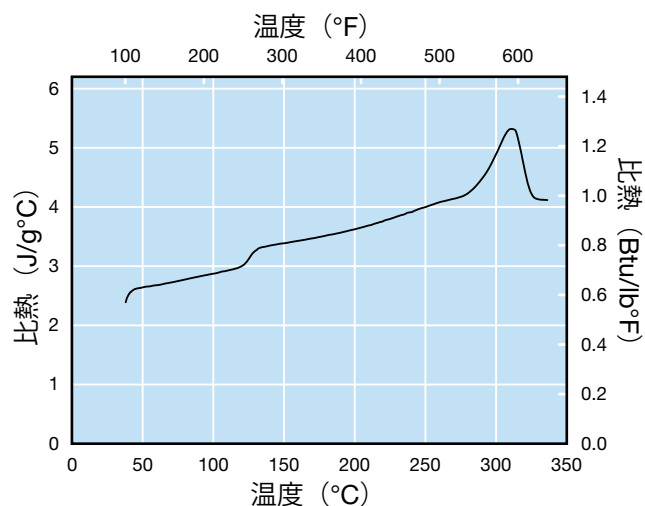


図 63：アモデル A-5000 — 比熱と温度

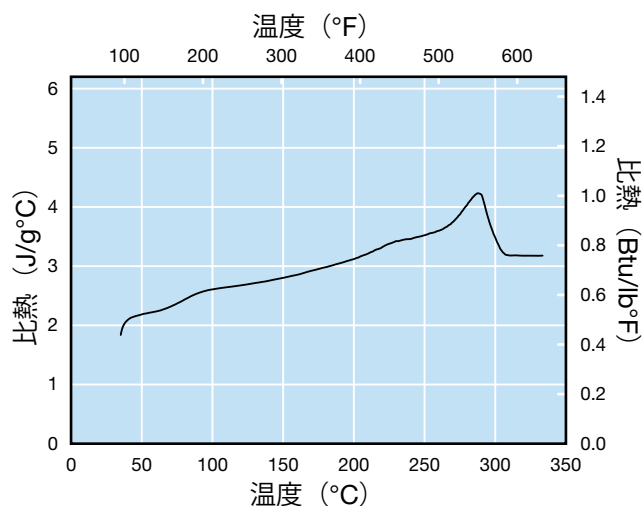


図 62：アモデル A-4000 — 比熱と温度

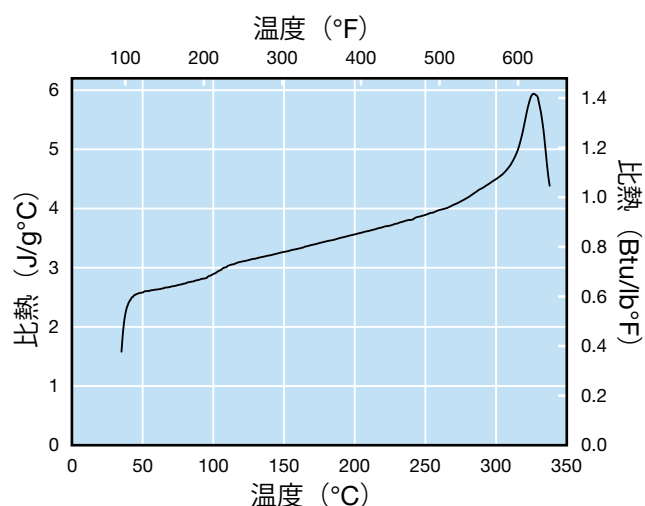
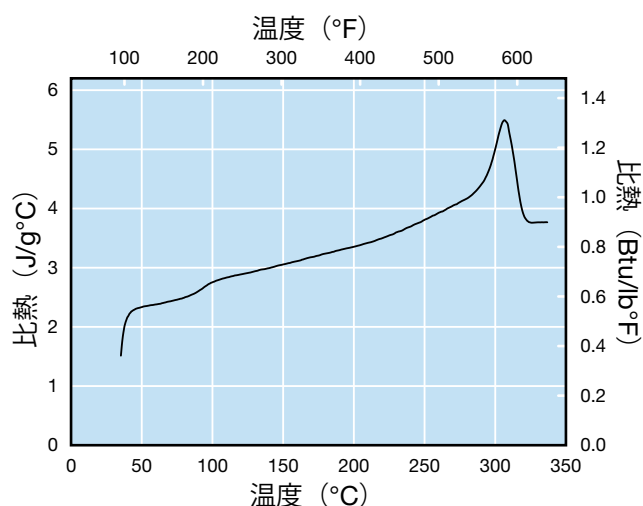


図 64：アモデル A-6000 — 比熱と温度



比熱

比熱とは、単位質量の物質の温度を 1°C 変化させるために必要な熱量と定義されます。アモデル基本樹脂の比熱を温度の関数として図 61～64 に示します。比熱の値が融点において大きく変化していることに注意してください。これは半結晶性熱可塑性樹脂に共通に見られる挙動です。

加工技術者はこの情報を利用して、アモデル樹脂を押出機や射出成形機で加工する際に必要となる熱投入量を計算することができます。

熱安定性

熱安定性は、材料が熱によって特性を失うことに対する耐性を表す一般用語です。この傾向を評価するための多種類の方法が使用されています。次のセクションでは、これらの方法の中から熱重量分析や長期的なヒートエージングなど、数種類の方法を選択して詳しく考察します。

熱重量分析 (TGA)

熱重量分析では、試験材料の小型サンプルの温度を一定速度で上昇させながら重量変化をモニターします。この試験は管理された雰囲気下で行われ、通常は空気または窒素のような不活性ガスが使用されます。図 65 に示すのは、空気雰囲気中、一定速度で加熱 (10°C/分) したときのアモデル A-1000 樹脂の重量損失を温度の関数として表したデータです。このグラフから分かるように、アモデル PPA は推奨処理温度上限値 (350°C) を超える領域でも熱的に安定しています。

熱老化

ほとんどすべてのポリマー材料は、長期間にわたって高温に曝されることにより機能特性の一部を失います。ポリマーの種類によって安定性の値は異なるものの、特性損失は基本的に暴露時間と温度両方の関数となります。特性損失は酸化劣化と熱劣化の両方に起因するものであるため、「熱酸化安定性」という用語も頻繁に使用されています。

樹脂が持つ熱酸化安定性によって、そのポリマーを長期間使用できる温度範囲が制限されます。アモデル ポリフタルアミドの特性値に与えるこれらの長期的効果を解析するため、アモデル樹脂の成形試験片を循環式オープンに入れて何段階かの高温レベルに曝すテストを行いました。試験片を一定期間ごとにオープンから取り出して、室温で引張強さと耐衝撃性を測定しました。

通常このようなエージング試験は、観察の対象となる特性値が初期値の半分に低下するまで続けられます。何段階かの異なる温度でエージング試験を行い、そのデータをもとにして「アレニウスプロット」を作成します。「アレニウスプロット」は、特性値が初期値の半分に低下するまでに要するヒートエージング時間 (半減期とも呼ばれる) を、エージング温度 (K) の逆数に対してプロットして得られるグラフです。この方法でデータを解析することの利点は、このプロットが理論的に直線になるはずであり、したがって変化を推定するのが容易であることです。

図 65 : A-1000 の熱重量分析 (空気雰囲気中)

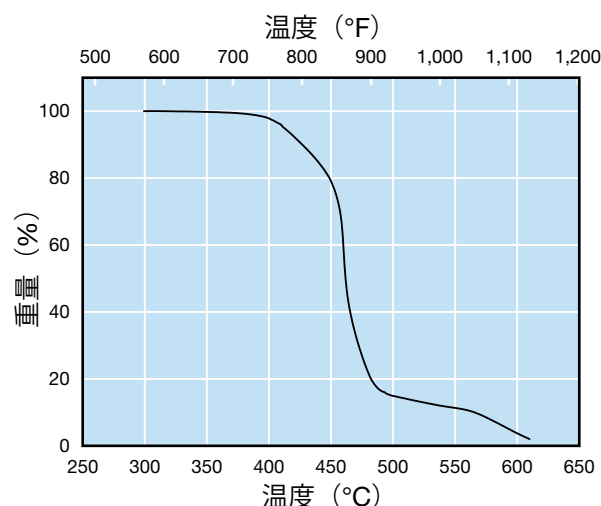


図 66 : 熱老化の比較 — 引張強さ

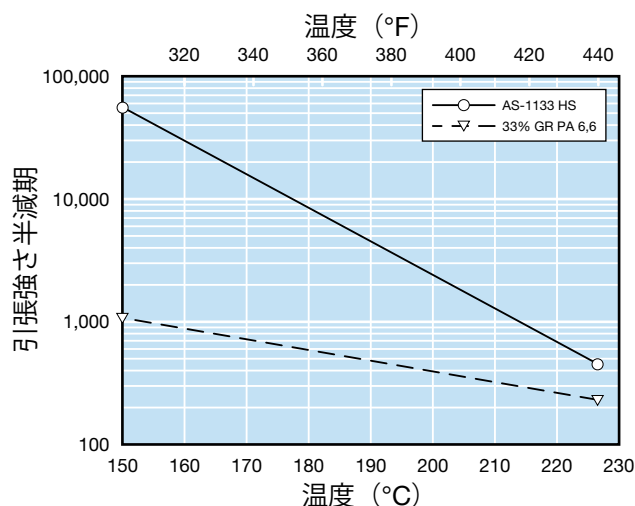


図 66 に示すのは、アモデル AS-1133 HS 樹脂と GR PA 6,6 の引張強さ半減期をエージング温度に対してプロットしたグラフです。アモデル PPA の方が PA 6,6 よりも長期間にわたり引張強さを維持することが分かります。

図 67：熱老化の比較 — アイゾット衝撃

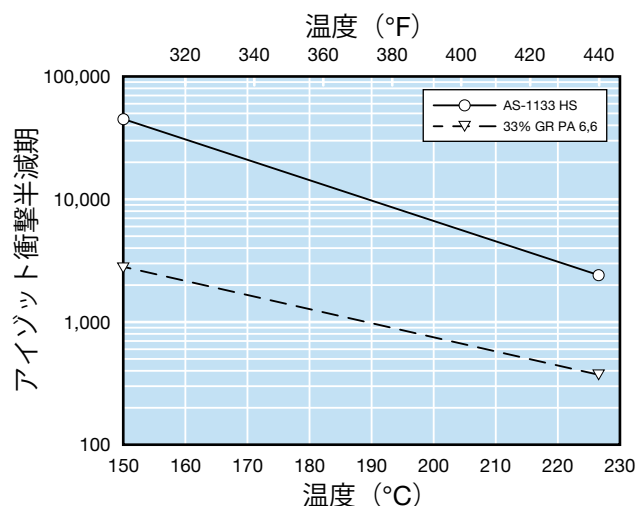


図 67 に示すのは、アモデル AS-1133 HS 樹脂と GR PA 6,6 のノッチ付きアイゾット半減期をエージング温度に対してプロットした熱老化曲線です。耐衝撃性においても、アモデル PPA が特性を失うまでのエージング時間が PA 6,6 樹脂の場合よりも長いことが分かります。

このような熱老化試験は、プラスチック材料を比較するため、また使用寿命を予測するために実施します。ある材料の特定の最終用途温度における使用寿命はその用途の要求条件に大きく依存するため、ヒートエージング試験データのほかに、最終用途の条件における実際の試験（またはシミュレーション）も判断材料とするべきです。

相対温度指数 (UL)

アンダーライターズラボラトリーズ (UL) の主要業務は、電気機器の使用に関連した火災の危険性を評価することです。絶縁材料も経時的に劣化することが考えられるため、この傾向を解析して電気機器の設計者や使用者に指針を与えるために何らかの方法が必要となります。アンダーライターズラボラトリーズはこの目的のために試験方法と評価システムを開発しました。この方法が UL 規格 746B (Polymeric Materials, Long-Term Property Evaluation) であり、ASTM D3045 (Standard Practice for Heat Aging of Plastics Without Load) もこれと類似した方法です。

前のセクションで説明したエージング試験の結果をもとに、UL は絶縁材料を対象とした評価基準「相対温度指数」を指定しています。すべての材料特性が同じ速度で劣化するわけではないので、ひとつの材料でも電気特性や機械特性（衝撃あり／衝撃なし）ごとに異なる相対温度指数を持つことがあります。

相対温度指数 (RTI) は、評価の対象である特性の熱老化データを統計的に解析することにより決定されます。RTI により予測されるエージング温度とは、その材料が 100,000 時間耐えることができ、かつその時点で初期特性または測定対象である特性の 50% 以上を維持できるエージング温度です。

一般に薄い試験片の方が劣化速度が速いことから、UL では試験片の肉厚に応じた RTI 評価を行っています。

UL 準拠の RTI 評価を行うためには、長期間にわたるヒートエージングプログラムを実施しなければなりません。このプログラムでは、対象である材料から成形した試験片のセットを予め温度設定したオープンに入れ、定期的に試験片を取り出して試験を行います。それぞれのエージング温度における結果をもとに、測定値が初期値の 50% 以下に低下するまでの特性値と時間の関係をプロットします。時間とエージング温度のこの組み合わせを、その特性、材料、厚みにおける「半減期」と呼ぶことがあります。

特定の特性値の半減期（50% 以下に低下する時間）を 4 段階のエージング温度について実験的に決定し、そのデータをエージング温度（絶対温度）の逆数に対してプロットします。プロットされたポイントは直線上に乗るはずなので、その特性の異なる温度における半減期を外挿により予測することが可能になります。これを「アレニウスプロット」と呼びます。

材料の RTI を推定するには、4 つの半減値データポイントから引張強さの最適直線を決定し、これを 100,000 時間まで外挿します。この直線が 100,000 時間のラインと交差する温度が、その材料の RTI 推定値です。使用できる半減値データが 3 つだけの場合（例えば 4 番目の温度データがまだ試験中の場合）であっても暫定的な RTI の計算が許されています。UL は試験の変動要素を補償するために統計的手法を用いており、そのために UL が指定する RTI はやや低めの値を示すことがあります。

UL 規定の相対温度指数 (RTI) を決定するためのアモデル樹脂の試験は、長期間を要するプロセスであり現在も継続中です。本マニュアル印刷時にすでに UL ランクが決定されているアモデル樹脂のデータを表 21 に示します。この試験は現在も継続中であるため、最新の RTI 情報については Underwriters' Laboratories の Web サイト (<http://data.ul.com>) をご覧ください。

表 21：アモデル PPA 各グレードの相対温度指数

グレード	色	厚さ (mm)	電気特性	相対温度指数 (RTI) (°C)	
				機械特性	
				衝撃あり	衝撃なし
AFA-4133 V0 Z	すべて	0.75	130	130	130
		1.5	130	130	130
		3.0	130	130	130
AFA-6133 V0 Z	すべて	0.75	130	130	130
		1.5	130	130	130
		3.0	130	130	130
AFA-6145 V0 Z	すべて	0.75	140	—	130
		1.5	140	—	130
		3.0	140	140	140

燃焼特性

このセクションでは、アモデル樹脂の燃焼と着火に対する耐性、および着火した際の煙濃度特性について説明します。以下に説明するのはグローワイヤー試験の結果、および UL 94 と ASTM に準拠した煙濃度試験の結果です。

グローワイヤー試験

プラスチック材料に点火したときにその後の燃焼を維持する性質を標準化された方法で評価するのがグローワイヤー試験です。この試験は、故障や過負荷操作によって通電中の裸導線が絶縁体に接触する状況を作り出します。この試験法は IEC 695-2-1/3 を基準として導かれたものです。

グローワイヤー試験装置は、太めのニッケル-クロム抵抗線ループと熱電対、およびサンプル取付けブラケットから構成されています。

試験中は、予め決められた温度になるようにニッケル-クロム抵抗線ループに電流を流します。続いて、サンプルを 30 秒間にわたり抵抗線に接触させます。抵抗線を離れた後でサンプルが炎を発生したり赤熱状態にならなければ、あるいは、もしなかったとしても 30 秒以内に消えればこの試験に合格です。

この試験は、推奨温度のいずれか（複数の温度も可）において、必要な任意の肉厚試験片を使用して実施することができます。試験のために推奨されている温度は 550°C、650°C、750°C、850°C、960°C です。サンプルの肉厚については通常デバイスの設計または要求によって定まります。肉厚の薄いセクションに高いグローワイヤー温度を適用した場合に、当然ながら着火への耐性が最も低くなります。

UL の定義に従い、パラメーターは通常表 22 に示す形式で報告されます。

表 23 に示すようにアモデル樹脂はグローワイヤー試験に合格しています。

表 22 : GWIT と GWFT の UL による定義

IEC グローワイヤー点火温度 (GWIT)

IEC 695-2-1/3 の規定に準拠して、GWIT は 3 回のグローワイヤー試験を逐次実施した際、試験中に材料の点火には至らないようなグローワイヤー先端の最高温度よりも更に 25°C 高い温度 (°C) と定義されています。

IEC グローワイヤー燃焼温度 (GWFT)

IEC 695-2-1/2 の規定に準拠して、GWFT は 3 回逐次実行される試験中に発生した炎または白熱状態が、グローワイヤーを取り除いた後に火の粉などの燃焼滴下物や粒子によって指標物が燃焼を開始することなく 30 秒以内に自発的に消化するような最高温度 (°C) と定義されています。

表 23 : グローワイヤー試験の結果

グレード ⁽¹⁾	GWIT	GWFT
	°C	°C
A(AS)-1133 HS	725	725
AT-6115 HS	750	800
AT-6130	725	750
AS-1566 HS	775	800
AS-4133 HS	750	750
AFA-6133 V0 Z	960	960

⁽¹⁾ すべてのサンプルは肉厚 0.8 mm で試験に供しました。

表 24：煙濃度

グレード	D _s (4分)	D _m	D _m 補正值
燃焼時			
AS-1133 HS	565	510	469
非燃焼時			
AS-1133 HS	3	162	162

煙濃度試験 (NBS)

材料が燃えると煙が発生します。発生する煙の量と濃度は多くの用途で重要です。相対的な煙濃度を評価する手法を規定するのが ASTM E662 (Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials) です。この試験はもともと米国国家標準局 (NBS) によって開発されたものであるため、しばしば NBS 煙濃度試験と呼ばれます。燃焼時と非燃焼時の両方で得られたデータをまとめて表 24 に示します。6 管式バーナーを使用して、試験片の下側の端に小さな火炎の列をあてます。煙が充満する状態を、光度計を使用して垂直方向の透過光によって測定します。この光透過性データから特有光学密度 (D_s) が計算されます。最大光学密度は D_m と呼ばれます。

UL 94 準拠垂直燃焼性

アンダーライターズラボラトリーズが策定した UL 94 燃焼性規格は、プラスチック材料をその耐燃焼性を基準として分類するシステムです。プラスチック材料に与えられる燃焼性の評価は、その材料が実験室内で正確にコントロールした条件下で熱と炎に対してどのような挙動を示すかによって決定され、特定用途におけるその材料の燃焼性を判断する予備的な指標として利用されます。熱と炎に対する熱可塑性樹脂の実際の挙動は、その製品の寸法や形状、その材料で製造した製品の最終的な使用方法などを含む他の因子の影響を受けます。これに加えて、製品を実際に使用する場面での着火の容易さ、燃焼速度、炎の広がり、燃料の存在の有無、燃焼の激しさ、燃焼生成物等の要素も、材料の燃焼性を左右します。

UL 94 規格は主要な 3 種類の試験方法から構成されています。すなわち、水平燃焼試験、50W 試験炎による垂直燃焼試験、および 500W 試験炎による燃焼試験の 3 種類です。

水平燃焼試験

94HB の分類では、射出成形試験片の大きさは長さ 125 mm、幅 13 mm、およびその格付けの対象となる最小の厚みにします。クランプによって水平に保持されたサンプルの、クランプしていない側の端に、45° の角度で 20 mm の青炎を 30 秒間あて、燃焼の先端が試験片の端から 25 mm の位置に予め付けられているマークに達したらすぐに炎を離します。炎を離してから、燃焼の先端が 25 mm ラインから 100 mm ラインまで延焼する速度を計算します。この方法で少なくとも 3 個の試験片をテストします。厚さが 3 mm 以上の試験片については延焼速度が 40 mm/分を超えなかった場合、また、厚みが 3 mm 未満の試験片については 75 mm/分を超えなかった場合に、そのプラスチックに HB の格付けが与えられます。延焼が 100 mm の基準マークに達しなかった製品についても同じ格付けが与えられます。

アモデル AS-1133 HS 樹脂は、黒色試験片を用いた厚さ 0.8 mm までの水平燃焼試験において 94HB ランクを取得しています。

50W 試験炎による垂直燃焼試験

サンプルを垂直にクランプして燃焼させ、その結果をもとに材料を V-0、V-1、または V-2 のいずれかに分類します。50W 試験炎による垂直燃焼試験は HB 試験よりもさらに苛酷な試験であり、対象となるサンプルは長さ 125 mm、幅 13 mm、およびその格付けの対象となる最小の厚み（標準的には 0.8 mm または 1.57 mm）です。サンプルを垂直にクランプし、試験片の下端に長さ 20 mm の青炎をあてます。10 秒間あてた後で炎を離します。引火せずに炎が消えてしまうようであれば、もう一度 10 秒間炎をあててから引き離します。同じ方法で、全部で 5 個のサンプルについて試験を行います。この試験で材料を分類する際の基準を表 25 に列挙します。

表 25 : UL 分類基準 (V-0、V-1、V-2)

基準	V-0	V-1	V-2
個々の試料の残炎時間、 $(t_1$ または $t_2)$	$\leq 10s$	$\leq 30s$	$\leq 30s$
あらゆる条件の組合せに対する全残炎時間 (5 個の試験片についての $t_1 + t_2$)	$\leq 50s$	$\leq 250s$	$\leq 250s$
2 回目接炎後の各試験片の残炎時間と残燼時間の合計 ($t_2 + t_3$)	$\leq 30s$	$\leq 60s$	$\leq 60s$
各試験片の保持クランプまでの残炎または残燼	なし	なし	なし
発炎物質または滴下物による標識用綿の着火	なし	なし	あり

500W 試験炎による燃焼試験

500W 試験炎による燃焼試験が要求する燃焼条件に合格した材料には 5VA または 5VB ランクが与えられます。この試験はこれまで説明した 3 種類の中で最も苛酷な試験です。この試験に供する成形試験片のサイズは、50W 試験炎による垂直燃焼試験で使用するものと同じです。これに加えて、実際の応用で必要となる最大および最少の厚みを持つ、面積 150 x 150 mm の薄い板も必要となります。垂直姿勢でクランプされた試験片（バー）に 125 mm の高さを持つ炎を 5 秒ずつ、1 回ごとに 5 秒の間隔をあげながら全部で 5 回あてます。板材は水平姿勢でクランプし、底面の平坦部位に 20° の角度を付けて高さ 125 mm の炎をあてます。炎をあてる回数と時間は上記の試験片と同様です。5VA または 5VB ランク取得に必要な基準をまとめて表 26 に示します。

何種類かのアモデル樹脂に現在与えられている UL 94 ランクを表 27 に示します。ランク付けは変更されることがあり、新たにランク付けされた製品も逐次追加されるため、最新の情報についてはアンダーライターズラボラトリーズの Web サイトをご覧ください。

表 26 : UL 分類基準 : 5VA または 5VB

基準	5VA	5VB
個々の試験片ごとの 5 回目に炎を当てた後の残炎時間と残燼時間の合計	$\leq 60s$	$\leq 60s$
試験片からの発炎物質または滴下物による標識用綿への着火の有無	なし	なし
いずれかの薄板試料に貫通焼け穴発生の有無	なし	あり

表 27 : アモデル PPA グレードの UL 94 ランク

グレード	色	厚み (mm)	UL 94 ランク
AFA-4133 V0 Z	すべて	0.75	V-0
		1.5	V-0
		3.0	V-0
AFA-6133 V0 Z	すべて	0.75	V-0
		1.5	V-0
		3.0	V-0
AFA-6145 V0 Z	すべて	0.75	V-0
		1.5	V-0
		3.0	V-0

電気特性

熱可塑性樹脂の多くの用途は、これらの樹脂が電気を絶縁する能力を持つことに依存しています。電気分野への応用に即した各種の材料性能を測定するために様々な試験法が開発されています。この分野でのより一般的な試験のいくつかを以下に簡単に説明します。

絶縁破壊電圧と絶縁耐力 — ASTM D149

絶縁耐力は、材料が絶縁破壊を起こさずにどの程度の高電圧まで耐えることができるかを示す指標です。この測定では、試験片をふたつの電極間に挟み、最終的に絶縁破壊が起こるまで印加電圧を上昇させていきます。絶縁耐力は破壊が起こる直前の最高電圧として報告されます。ASTM D149 に含まれる各種試験法のなかで、UL 746A は毎秒 500 V の割合で一様に電圧を上昇させる短期試験を規定しています。

試験結果は kV/mm (Volt/mil) 単位で報告されますが、絶縁耐力は試験片の厚みや水分含量、温度によっても影響を受けます。したがって、異種材料のデータを比較できるのは、サンプルの厚みと水分含量、および温度が同等とみなせる場合に限られます。

何種類かのアモデルグレードの絶縁耐力を表 28 に示します。相対湿度 50% でコンディショニングしたサンプルの絶縁耐力が、成形直後の絶乾状態のサンプルと同じであることに注意してください。

体積抵抗率 — ASTM D257

材料の体積抵抗率は、その材料の単位立方体が示す電気抵抗と定義されます。材料に DC 500 V の電圧を 1 分間印加したときに材料を通して流れる電流を測定します。高い体積抵抗率を示す材料は、電気絶縁体として効果がより高いと言えます。

UL 746A では二種類の試験片セットを用いて試験を行うように規定しています。一方のセットは温度 23°C、相対湿度 50% で 48 時間のコンディショニングを行い、他方のセットは温度 35°C、相対湿度 90% で 96 時間のコンディショニングを施します。

体積抵抗率は湿度変化ばかりでなく、温度変化に対して特に敏感に応答します。したがって、異なる材料のデータを比較するためには、水分含量と温度が同等である必要があります。一般に $10^8 \Omega\text{-cm}$ 以上の抵抗率を持つ材料が絶縁体と見なされ、 $10^3 \sim 10^8 \Omega\text{-cm}$ の抵抗率を持つ材料を部分的伝導体と見なします。

表 28：アモデル各種グレードの絶縁耐力

グレード	条件 ⁽¹⁾	厚み			
		3.2 mm		1.6 mm	
		kV/mm	V/mil	kV/mm	V/mil
A-1133 HS	乾燥	21	533	32	813
A-1133 HS	50% RH	21	533		
A-1145 HS	乾燥	23	584		
A-1145 HS	50% RH	23	584		
AS-4133 HS	乾燥	21	533	32	813
AS-4133 HS	50% RH	21	533		
AT-1002 HS	乾燥	17	432		
AT-1002 HS	50% RH	17	432		
AT-5001	乾燥	17	432		
AT-5001	50% RH	17	432		
AT-6115 HS	乾燥			28	711
AFA-6133 V0 Z	乾燥	24	610	27	686
A-1340 HS	乾燥			32	813
AS-1566 HS	乾燥			29	737

⁽¹⁾ 条件：乾燥とは絶乾状態、50% RH は 6 ページに説明されている水分コンディショニング。

表面抵抗率 — ASTM D257

ある材料の表面抵抗率とは、試験片の表面に配置したふたつの電極間の電気抵抗を意味します。材料に DC 500 V の電圧を 1 分間印加したときに材料の表面を通して流れる電流を測定します。材料の表面だけでなくある程度の深さ方向の部分も電流を流すのに寄与しますが、この厚みを測定することはできません。したがって、表面抵抗率はあくまでも近似的な指標です。表面抵抗率は表面の汚れなどによっても影響を受けるため、材料の基本特性とは見なされません。UL は体積抵抗率測定と同じ条件で試験片のコンディショニングを行うように規定しています。この試験から得られるデータが最も役立つのは、表面漏れ電流が問題となる用途に使用する材料を比較するときです。

表 29：アモデル樹脂の体積／表面抵抗率

グレード	条件 ⁽¹⁾	体積抵抗率 ($\Omega\cdot\text{cm}$)	表面抵抗率 (Ω)
A-1133 HS	乾燥	1×10^{16}	1×10^{15}
A-1133 HS	50% RH	2×10^{15}	
A-1145 HS	乾燥	1×10^{16}	
A-1145 HS	50% RH	2×10^{15}	
AS-4133 HS	乾燥	1×10^{16}	1×10^{15}
AS-4133 HS	50% RH	5×10^{14}	
AT-1002 HS	乾燥	1×10^{16}	8×10^{13}
AT-1002 HS	50% RH	7×10^{14}	2×10^{13}
AT-5001	乾燥	4×10^{15}	4×10^{15}
AT-5001	50% RH	2×10^{15}	2×10^{15}
AT-6115 HS	乾燥	1×10^{16}	1×10^{15}
AFA-6133 V0 Z	乾燥	1×10^{16}	1×10^{15}
A-1240 L	乾燥	9×10^{15}	
A-1240 L	50% RH	2×10^{15}	
A-1340 HS	乾燥	1×10^{16}	
A-1340 HS	50% RH	1×10^{16}	1×10^{15}
A-1565 HS	乾燥	4×10^{14}	
AS-1566 HS	乾燥	1×10^{16}	1×10^{15}

⁽¹⁾ 条件：乾燥とは絶乾状態、50% RH は 6 ページに説明されている水分コンディショニング。

誘電率 — ASTM D150

誘電率とは、コンデンサー内に誘電体として試験材料を満たした場合と、同じコンデンサー内を真空にした場合の電気容量の比と定義されます。絶縁材料は、明確に異なる 2 通りの方法で使用されます。その第一は部品を支持し、部品同士および接地面から絶縁することであり、第二の目的はコンデンサーに充填する誘電体として使用することです。第一のケースでは低い誘電率を持つ材料が望ましく、第二のケースでは高い誘電率を持つ材料を使用した方がコンデンサーの小型化を可能にします。誘電率は温度の上昇や水分含量の増加によって急激に変化することが知られているため、異なる材料の比較を行うためには水分含量と温度レベルが同等である必要があります。

表 30：アモデル樹脂の誘電率

グレード	条件 ⁽¹⁾	周波数			
		60 Hz	100 Hz	10^6 Hz	10^9 Hz
A-1133 HS	乾燥	4.4	5.1	4.2	3.7
A-1133 HS	50% RH	4.7		4.3	
A-1145 HS	乾燥	4.6		4.4	
A-1145 HS	50% RH	4.9		4.5	
AS-4133 HS	乾燥	3.8	4.6	3.6	3.6
AS-4133 HS	50% RH	4.3		3.4	
AT-1002 HS	乾燥	3.3		3.3	
AT-1002 HS	50% RH	3.8		3.8	
AT-5001	乾燥	3.2		3.2	
AT-5001	50% RH	3.6		3.6	
AT-6115 HS	乾燥		4.0	3.3	3.1
AFA-6133 V0 Z	乾燥		4.8	4.1	3.7
A-1240 L	乾燥		4.2	4.0	
A-1240 L	50% RH		4.4	4.0	
A-1340 HS	乾燥		4.5	4.3	
A-1340 HS	50% RH		4.5	4.3	3.8
AS-1566 HS	乾燥		5.7	4.7	4.5

⁽¹⁾ 条件：乾燥とは絶乾状態、50% RH は 6 ページに説明されている水分コンディショニング。

誘電正接 — ASTM D150

誘電正接（損失正接、タンデルタとも呼ばれます）は交流電流が絶縁体に接したときの誘電損失（エネルギー散逸）によってエネルギーを失う程度を表す尺度です。一般的には低い誘電正接が望ましく、この値が低いということはその材料が優れた誘電体であることを表します。誘電正接は試験片の汚れや試験周波数、温度、湿度などの影響を受けます。

UL 746A 短期特性

ある種の電気特性は、アンダーライターズラボラトリーズ（UL）規格 746A の「Standard for Polymeric Materials Short-Term Property Evaluations」という項目に含まれており、これらの特性値は「パフォーマンスレベルカテゴリー」（PLC）として報告されています。UL はそれぞれの特性値ごとに、試験結果の範囲とそれに対応するパフォーマンスレベルカテゴリーを明記しています。最も望ましい、または最高性能を発揮した場合に PLC が 0 となり、この数値が小さいほど材料の性能が優れていることを示します。

表 31：アモデル樹脂の誘電正接

グレード	条件 ⁽¹⁾	周波数			
		60 Hz	100 Hz	10 ⁶ Hz	10 ⁹ Hz
A-1133 HS	乾燥	0.005		0.017	0.016
A-1133 HS	50% RH	0.009		0.022	
A-1145 HS	乾燥	0.005		0.016	
A-1145 HS	50% RH	0.009		0.021	
AS-4133 HS	乾燥	0.004		0.012	0.013
AS-4133 HS	50% RH	0.020		0.019	
AT-1002 HS	乾燥	0.004		0.016	
AT-1002 HS	50% RH	0.018		0.035	
AT-5001	乾燥	0.004		0.016	
AT-5001	50% RH	0.012		0.027	
AT-6115 HS	乾燥			0.013	0.011
AFA-6133 V0 Z	乾燥			0.011	
A-1240L	乾燥		0.006	0.017	
A-1240L	50% RH		0.007	0.019	
A-1340 HS	乾燥		0.005	0.017	
A-1340 HS	50% RH		0.008	0.017	0.014
AS-1566 HS	乾燥			0.011	0.011

⁽¹⁾ 条件：乾燥とは絶乾状態、50% RH は 6 ページに説明されている水分コンディショニング。

表 32：高電圧低電流耐アーク性のパフォーマンスレベルカテゴリー (PLC)

範囲 (秒)		PLC
≥	<	
420		0
360	420	1
300	360	2
240	300	3
180	240	4
120	180	5
60	120	6
0	60	7

表 33：耐トラッキング指数のパフォーマンスレベルカテゴリー

範囲 (Volt)		PLC
≥	<	
600		0
400	600	1
250	400	2
175	250	3
100	175	4
0	100	5

高電圧低電流耐アーク性 — ASTM D495

この試験は、材料表面に 2 本のタングステン棒電極を取り付けておき、指定された試験シーケンスをその程度を順次増大させながら実施したときに 12,500 V アークが貫流して導通経路（トラック）が形成されるまでの時間（秒）を測定します。この試験は主として高電圧動作する交流回路（電流は通常 0.1A 以下）の使用条件を近似的に評価する目的で使用されます。表 32 に、耐アーク性と UL 規定のパフォーマンスレベルカテゴリー（PLC）との関係を示します。

耐トラッキング指数 (CTI) — ASTM D3638

耐トラッキング指数は、30 秒に 1 滴の割合で 50 滴の電解液を滴下したときに恒久的な炭化導電路が生ずる電圧と定義されます。この試験の目的は、絶縁材料のトラッキングに対する感度を測定することです。この試験で得られる電圧値と PLC との関係を表 33 に示します。

高電圧アークトラッキング速度 (HVTR)

この試験は、絶縁材料に高電圧、低電流アークを繰り返して印加したときに、材料表面に目視でわかる炭化導電路（トラック）が生ずる度合いを評価します。高電圧アークトラッキング速度は、規格化された試験条件下で絶縁材料表面に導電路が成長する速度（mm/分）を表します。この試験は高電圧電源の動作不良を模擬するものであり、値が低いほど性能が良いことを表します。HVTR 値と、それに対応する PLC を表 34 に示します。

ホットワイヤーイグニッション (HWI) — ASTM D3874

この試験は、電流を流して加熱したワイヤーをプラスチック材料に接触させたときの着火に至るまでの相対的な耐性を測定します。試験片の一部に特定の条件に従って加熱ワイヤーを巻き付け、単位長さあたりの出力密度が 2.6 W/mm となるように電流を流します。試験片が着火するまで一定電流を流し続けて着火に至る時間を記録します。

ある種の動作条件、あるいは故障発生時などには、部品が予想外な高温となる場合があります。このような過熱状態にある部品が絶縁材料と密に接触すると、絶縁材料が着火する恐れがあります。絶縁材料がこのような条件下で示す相対的な耐着火性を測定するのがこの試験の目的です。材料のホットワイヤーイグニッション時間とその材料に与えられた PLC を表 35 に示します。

高電流アーク着火性 (HAI)

この試験は、アーク放電による着火に対して絶縁材料が示す耐性を測定します。条件によっては絶縁材料のすぐ近傍でアーク放電が起こる可能性があり、アーク放電の強度と持続時間によっては絶縁材料着火の原因となり得ます。この試験は 240 V 32.5 A アークを材料表面に繰り返し印加したときに着火に至る、もしくは材料に穴があくまでのアーク数を測定します。電極間の距離を毎秒 254 mm の割合で離していき、印加アーク数の最大値を 200 とします。

この試験の目的は、近傍でアークが発生したときの絶縁材料の性能を評価することにあります。

表 36 は高電流アーク着火性と UL が規定するパフォーマンスレベルカテゴリーとの関係を示します。

高電圧アーク着火性

この試験は、絶縁材料に高電圧、低電流アークを印加したときの耐着火性、または材料表面に目視でわかる炭化導電路が生ずる度合いを評価します。高電圧アークの印加は、材料が着火するか、焼けによって試験片を貫通する穴が開くか、または 5 分が経過するまで続けられます。試験片が着火した場合はそれに至る経過時間が報告され、着火が起こらない場合は 300 を超える値が報告されます。

着火に至る平均時間とパフォーマンスレベルカテゴリーの関係を表 37 に示します。

表 34：高電圧アークトラッキング速度のパフォーマンスレベルカテゴリー

範囲 (mm/分)		PLC
>	≤	
0	10	0
10	25.4	1
25.4	80	2
80	150	3
150		4

表 35：ホットワイヤーイグニッションのパフォーマンスレベルカテゴリー

範囲 (秒)		PLC
<	≥	
	120	0
120	60	1
60	30	2
30	15	3
15	7	4
7	0	5

表 36：高電流アーク着火性のパフォーマンスレベルカテゴリー

範囲 (秒)		PLC
<	≥	
	120	0
120	60	1
60	30	2
30	15	3
15	7	4
7	0	5

表 37：高電圧アーク着火性のパフォーマンスレベルカテゴリー

HVAR — 着火までの平均時間 (秒)		PLC
<	≥	
	300	0
300	120	1
120	30	2
30	0	3

アモデル樹脂の UL 746A 特性

何種類かのアモデルグレードについて測定した UL 746A 特性一覧を表 38 に示します。ここで選択したグレードは、電気絶縁の用途で最も頻繁に使用されているグレードです。

UL 相対温度指数

UL 相対温度指数は熱老化試験から得られる結果であるため、「熱安定性」のセクションの 49 ページに掲載しています。

表 38：アモデル PPA グレードの UL 746A 特性 PLC

グレード	mm ⁽¹⁾	HWI	HAI	HVTR	CTI
A(AS)-1133 HS	0.80	0	0	4	0
AT-6115 HS	0.80	0 ⁽²⁾	0	1	0
AT-6130	0.80	4	0	1	0
AS-1566 HS	0.80	—	0	0	0
A-1340 HS	0.80	0 ⁽²⁾	0	1	1
AS-4133 HS	0.80	0 ⁽²⁾	0	1	0
AFA-4133 V0 Z	0.75	0	0	1	1
AFA-6133 V0 Z	0.75	0	0	1	1
AFA-6145 V0 Z	0.75	0	1	—	1

⁽¹⁾ 最小厚さ (mm)

⁽²⁾ 厚さ 1.5 mm で測定した値

耐環境性

これまでも触れたように、ポリマー材料の性能は環境的要素によって低下することがあります。このセクションでは、化学薬品への暴露や加水分解の促進、ガンマ線／紫外線照射などの環境的要素がアモデル樹脂の性能に及ぼす影響について説明します。比較のため、適当と思われる個所では競合する樹脂に対するこれらの因子の影響も併せて論じます。

耐薬品性

半結晶性ポリフタルアミドであるアモデル樹脂は、他の半結晶性ポリアミドと同じように、一般的な有機溶剤に対して優れた耐性を示します。しかも、アモデル樹脂の化学構造が高度の芳香族性を持つことにより、アモデルの耐薬品性は一段と優れており、耐性を示す薬品の範囲も更に広がっています。

化学薬品への暴露がポリマー部材にどのような影響を与えるかを的確に予測するのは簡単ではありません。試薬の種類と濃度、暴露時間、試薬の温度、ポリマー部品の温度、部品にかかっている応力などのすべての要素が性能変化とその程度に影響を及ぼします。化学薬品によってポリマー部材が受ける影響を評価する唯一の信頼できる方法は、実際に試作品で試してみることです。材料を比較して一般的な指針を得るために多く用いられているのがスクリーニング試験です。

耐薬品性評価のためのスクリーニング試験では、ASTM D638（タイプ I）の引張り試験片を、特定の温度の各種化学薬品に 30 日間浸漬します。この試験のために使用したのは 33% ガラス繊維強化アモデル樹脂（アモデル AS-1133 HS）です。比較のために、33% ガラス繊維強化 PA 6,6 と 30% ガラス繊維強化ポリエチレンテレフタレート（PET）のデータも示します。

表 39：耐薬品性のランク分類

略号	格付け	引張強さ低下率 %
E	優	≤ 10
A	可	≤50 かつ ≥10
U	不可	> 50

材料性能の評価を表 39 に示します。性能評価に加えて、この表には引張強さ、長さ、重量の変化もパーセント値で示されています。

スクリーニング試験に使用した化学薬品は次の 3 つのグループに分けられます。

- 有機溶剤（表 40）
- 水溶液（表 41）
- 自動車用流体（表 42）

高温水溶液を用いたスクリーニング評価によれば、試験を行った 3 種類の樹脂すべてに引張強さの劣化が見られました。これはガラス繊維強化した熱可塑性樹脂に共通に見られる現象です。アモデル AS-1133 HS を 93°C の脱イオン水に浸漬した試験では、初期段階で引張強さが急速に低下しますが、これはガラス繊維と樹脂母材間の界面の密着性が失われるためです。それに続く加水分解による影響を反映して、引張強さはその後も緩慢に低下し続けます。不凍液や塩化亜鉛の水溶液もこれと類似した影響を及ぼします。PA 6,6 は特に塩化亜鉛溶液から強い影響を受けます。PET は不凍液から強い影響を受けることに加えて、高温の蒸留水に浸漬すると著しい加水分解を起こします。

表 40：耐薬品性スクリーニング試験 — 有機薬品

23°C で 30 日間浸漬

試薬	樹脂	格付け	引張強さ 保持率 (%)	長さ変化 (%)	重量変化 (%)
アセトン	アモデル AS-1133 HS	E	97	0.1	0.2
	33% ガラス強化 PA 6,6	E	99	0.2	0.2
	30% ガラス強化 PET	A	72	0.3	3.2
イソプロパノール	アモデル AS-1133 HS	E	99	0.0	0.2
	33% ガラス強化 PA 6,6	E	112	0.0	0.3
	30% ガラス強化 PET	E	109	0.0	0.3
メタノール	アモデル AS-1133 HS	A	83	0.1	2.9
	33% ガラス強化 PA 6,6	A	68	0.5	5.6
	30% ガラス強化 PET	E	96	0.1	0.5
塩化メチレン	アモデル AS-1133 HS	E	94	0.0	1.1
	33% ガラス強化 PA 6,6	E	90	0.1	2.4
	30% ガラス強化 PET	A	71	2.0	9.5
メチルエチルケトン	アモデル AS-1133 HS	E	103	0.0	0.1
	33% ガラス強化 PA 6,6	A	113	0.0	0.1
	30% ガラス強化 PET	A	72	0.1	3.0
トルエン	アモデル AS-1133 HS	E	101	0.0	0.1
	33% ガラス強化 PA 6,6	E	109	0.1	0.2
	30% ガラス強化 PET	E	91	0.1	1.6
1,1,1 トリクロロエタン	アモデル AS-1133 HS	E	99	0.0	0.2
	33% ガラス強化 PA 6,6	E	110	0.0	0.2
	30% ガラス強化 PET	E	100	0.0	2.3
トリクロロエチレン	アモデル AS-1133 HS	E	102	0.0	0.3
	33% ガラス強化 PA 6,6	E	97	0.0	0.4
フレオン® 113	アモデル AS-1133 HS	E	96	0.0	0.1
	33% ガラス強化 PA 6,6	E	99	0.0	0.2
n-ヘプタン	アモデル AS-1133 HS	E	104	0.0	0.1
	33% ガラス強化 PA 6,6	E	96	0.0	0.2

フレオンは E. I. duPont de Nemours and Company の登録商標です。

表 41：耐薬品性スクリーニング試験 — 水溶性薬品の溶液

指定温度で 30 日間浸漬

試薬	濃度	温度 (°C)	樹脂	格付け	引張強さ 保持率 (%)	長さ変化 (%)	重量変化 (%)
水酸化アンモ ニウム	10%	23	アモデル AS-1133 HS	E	96	0.1	0.8
			33% ガラス強化 PA 6,6	A	61	0.2	4.5
			30% ガラス強化 PET	E	95	0.2	0.4
脱イオン水	100%	93	アモデル AS-1133 HS	A	69	0.2	3.4
			33% ガラス強化 PA 6,6	A	62	0.2	5.0
			30% ガラス強化 PET	U	19	0.0	2.4
塩化ナトリウム	10%	23	アモデル AS-1133 HS	E	97	0.1	2.1
			33% ガラス強化 PA 6,6	A	67	0.2	3.3
			30% ガラス強化 PET	E	98	0.0	0.3
塩化亜鉛	50%	93	アモデル AS-1133 HS	A	66	0.1	4.8
			33% ガラス強化 PA 6,6	U	0	*	*
			30% ガラス強化 PET	A	54	-0.1	0.6
硫酸	36%	23	アモデル AS-1133 HS	E	92	0.0	1.8
			33% ガラス強化 PA 6,6	U	0	*	*
			30% ガラス強化 PET	E	94	0.0	0.3
水酸化ナトリ ウム	10%	23	アモデル AS-1133 HS	E	93	0.0	1.6
			33% ガラス強化 PA 6,6	A	62	0.0	3.1
			30% ガラス強化 PET	A	70	0.0	-4.2
次亜塩素酸 ナトリウム	5%	23	アモデル A-1133 HS	E	94	0.0	1.4
			33% ガラス強化 PA 6,6	A	57	0.0	-1.5
			30% ガラス強化 PET	E	94	0.0	0.4

* = 影響あり

表 42：耐薬品性スクリーニング試験 — 輸送機器流体

指定温度で 30 日間浸漬

流体	温度 (°C)	樹脂	格付け	引張強さ 保持率 (%)	長さ変化 (%)	重量変化 (%)
50% 不凍液	104	アモデル AS-1133 HS	A	77	0.2	5.6
		33% ガラス強化 PA 6,6	A	54	0.3	8.3
		30% ガラス強化 PET	U	0	*	*
ブレーキ用流体	49	アモデル AS-1133 HS	E	99	0.0	0.4
		33% ガラス強化 PA 6,6	E	105	-0.1	0.2
		30% ガラス強化 PET	E	97	0.0	1.0
ディーゼル燃料	23	アモデル AS-1133 HS	E	98	0.0	0.1
		33% ガラス強化 PA 6,6	E	100	0.0	0.3
		30% ガラス強化 PET	E	100	-0.1	0.0
ガソール (10% エタノール)	23	アモデル AS-1133 HS	A	86	0.0	1.4
		33% ガラス強化 PA 6,6	A	65	0.1	3.5
		30% ガラス強化 PET	E	93	-0.1	0.7
油圧オイル	49	アモデル AS-1133 HS	E	92	0.0	0.3
		33% ガラス強化 PA 6,6	E	103	0.0	0.3
		30% ガラス強化 PET	E	105	-0.1	0.1
JP-4 ジェット燃料	23	アモデル AS-1133 HS	E	95	0.0	0.4
		33% ガラス強化 PA 6,6	E	100	0.0	0.3
		30% ガラス強化 PET	E	100	0.0	0.1
モーターオイル	121	アモデル AS-1133 HS	E	100	0.0	0.1
		33% ガラス強化 PA 6,6	E	106	0.0	-0.2
		30% ガラス強化 PET	E	91	-0.1	-0.6
パワーステアリングオイル	49	アモデル AS-1133 HS	E	97	0.0	0.1
		33% ガラス強化 PA 6,6	E	106	0.0	0.2
		30% ガラス強化 PET	E	108	0.0	0.0
トランスミッションオイル	121	アモデル AS-1133 HS	E	97	0.0	0.1
		33% ガラス強化 PA 6,6	E	105	-0.1	-0.2
		30% ガラス強化 PET	A	64	0.1	-0.5
無鉛ガソリン	23	アモデル AS-1133 HS	E	96	0.1	0.0
		33% ガラス強化 PA 6,6	E	99	0.1	0.1
		30% ガラス強化 PET	E	99	0.0	0.1

* = 影響あり

表 43：アモデル PPA 樹脂の一般化学適合性に関する指針

試薬	格付け
脂肪族炭化水素	E
芳香族炭化水素	E
オイル	E
グリース	E
塩素化炭化水素	E
塩化メチレン	A
クロロフルオロカーボン	E
ケトン	E
エステル	E
高級アルコール	E
メタノール	A
フェノール	U
強酸	A
アルカリ	E

表 44：ガンマ線照射による影響：アモデル AS-1133 HS

保持率 (%)	5 Mrad 照射
引張強さ (kPa)	620
引張伸び (%)	100

化学適合性

表 43 は、アモデル樹脂の耐薬品性を考慮するときの一般指針として使用できるデータです。しかし、これらのデータはあくまでもスクリーニングのために使用するべきものです。これまでに触れたように、実際に化学薬品に暴露したアモデル樹脂の性能は、機械応力や濃度、暴露時間／温度などの条件の違いによって変動します。信頼性の高い性能情報を得るためには、目的とする応用で実際に起こると予測されるのに近い条件でテストを実施することをお奨めします。

ガンマ線照射

アモデル AS-1133 HS 樹脂はガンマ線照射に対して非常に優れた耐性を示します。射出成形による引張り試験片に 5.0 メガラドのガンマ線を照射した後でも、アモデル AS-1133 HS 樹脂の機械特性は実質的に劣化を起こしません。この試験の結果を表 44 に示します。

このセクションでは、設計者がコスト／性能要求を満たすプラスチック部品を設計する際に役立つよう、基本的な設計原理や一般的な推奨事項について説明します。また、アッセンブリーの構造や温度変化、環境的要素、および時間に起因する応力の影響をクリープとの関連において考察するガイドラインを提供します。

設計者が利用できる数多くの材料の中でも、熱可塑性樹脂は最も種類が多く、用途も広い上、しかも設計の自由度が高い材料です。透明なものや不透明なもの、剛性の高いものや容易にたわむもの、硬いものや柔らかいものなど、プラスチックの性質は実に多様です。化学薬品への耐性についても、化学的に不活性なプラスチックもあれば、ある種の環境で選択的に溶解するプラスチックもあります。それ以外の特性、例えば強度や剛性、耐衝撃性、潤滑性、耐熱性などについても、各種のプラスチックが持つ特徴は実に多様です。ブレンドや変性によって、特定の応用に向けた材料の選択肢をさらに広げること可能です。

プラスチックを使用する設計は金属を使用する設計よりも複雑に見えるかも知れません。しかし、プラスチックを使用して得られる製品の多様性や装飾、適用可能な二次加工（溶接、インサート、印刷、塗装、金属蒸着）により、設計者にとって従来考えられなかった自由度を提供します（表 45 参照）。

設計者はついプラスチック材料の持つ柔軟性や設計の自由度を十分に考慮しないで、金属部品の形状をそっくりまねてプラスチック部品を設計しがちです。このようなアプローチは結果として非効率で製造の難しい部品になり易く、最適な性能は得られません。

以下のセクションでは、プラスチックを使用する設計に即して機構設計と応力解析の各種問題を考察し、金属とプラスチックを比較検討しながらプラスチックに固有な特性について説明します。

表 45：アモデル樹脂の金属に対する設計上の優位性

アモデル樹脂の特性	設計上の利点
アモデル樹脂は射出成形で製造できるため、設計の自由度が非常に広い。	リブ、ボス、コアなどを容易に設計に組み込むことができます。
	スナップフィットを組み込むことでアッセンブリーを単純化できます。
	ドリル穴あけ、ねじ切り、削孔、バリ取り、研磨などの多くの二次加工が不要になります。
	金属インサートなどを利用して簡単に強度の最適化を図ることができます。
アモデル樹脂は熱可塑性樹脂である。	複数の金属部品の機能をひとつの部品に組み込んで、アッセンブリーの単純化とコスト削減を図ることができます。
	ファスナーを使用せずに、超音波溶接や振動溶接などの手段で部品を接合できます。
アモデル樹脂は耐薬品性を持つ。	加工後の塗装ではなく、成形時に材料自体を着色することができます。
	錆びることがなく、腐食にも耐えます。

機構設計

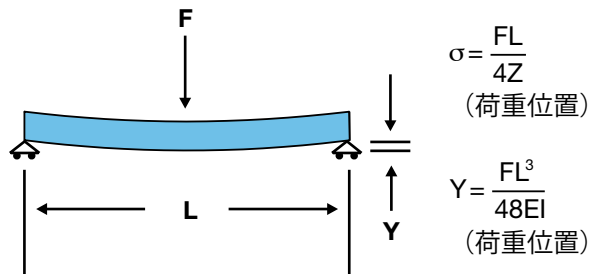
古典的な応力とたわみの式が部品設計の基礎になります。アモデル樹脂の機構設計で必要となる計算は、他の工業材料を使用する場合とほぼ同様です。ただしプラスチックに共通な問題として、材料が粘弾性を持つことを考慮に入れなければなりません。さらに、ひずみ速度や温度、化学的環境、ガラス繊維強化プラスチックの場合は繊維の配向などの条件によって材料の特性が変化します。したがって、すべての予想される使用条件を適切に考慮して解析を行う必要があります。例えば、長期間の連続的な負荷に耐えなければならない使用条件の場合は、短期的な弾性率ではなく見掛けの弾性率、またはクリープ弾性率を使用しなければなりません。また、長期間にわたり周期的な負荷が加えられる場合には、設計時に想定する疲労強さが制限要因になります。

部品設計解析の最初のステップは、その部品が曝される荷重を決定し、それによって生ずる応力と変形、すなわちひずみを計算することです。荷重は外部から付加されることもあります。温度変化や組み立てによる応力が原因で発生することもあります。

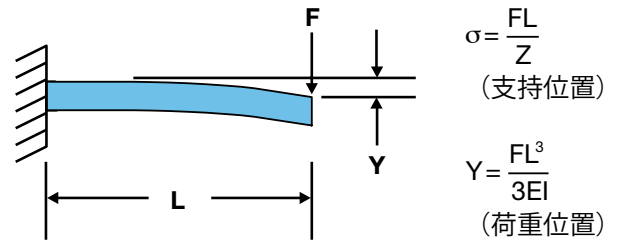
例えば、滅菌トレイの上にかかる医療装置の重量などが外部から付加される例です。組み立てによる荷重の例として、ハウジングフランジをエンジンへボルトで固定したときに発生する荷重や、プーリーハブにベアリングを押し付けたときに発生する荷重などを挙げることができます。アッセンブリーの温度が上昇し、プラスチック部品の寸法が付属している金属部品の寸法よりも大きく、あるいは小さくなった場合に、熱に起因する応力が発生します。

表 46：最大応力とたわみを表す式

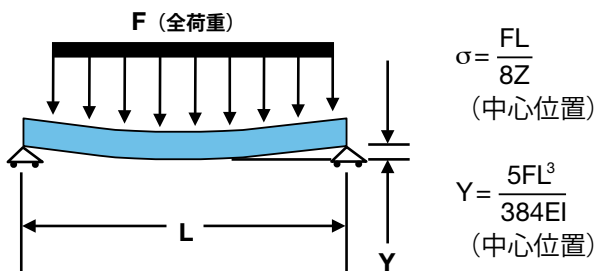
単純支持梁
中央集中荷重



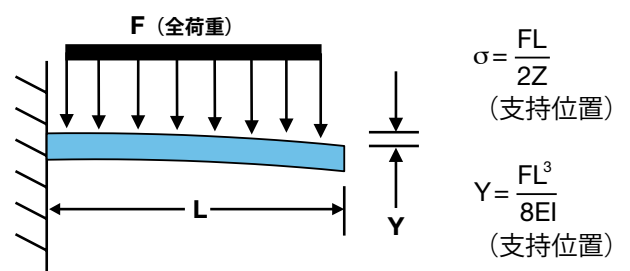
片持ち梁（一端を固定）
自由端に集中荷重



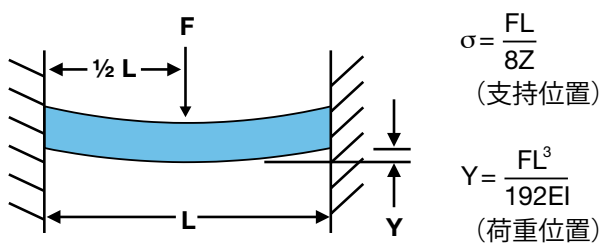
単純支持梁
均等分布荷重



片持ち梁（一端を固定）
均等分布荷重



両端固定
中央集中荷重



両端固定
均等分布荷重

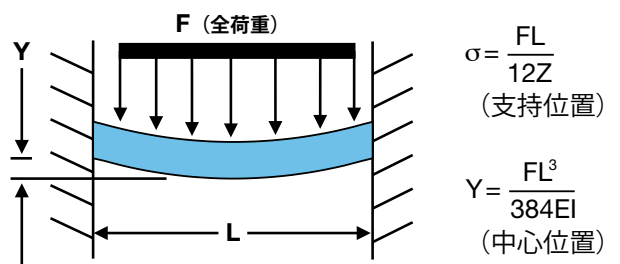
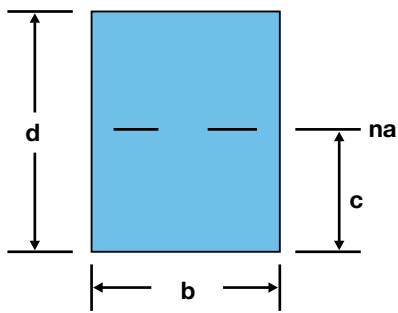


表 47：一般的な断面形状の面積とモーメント方程式

矩形



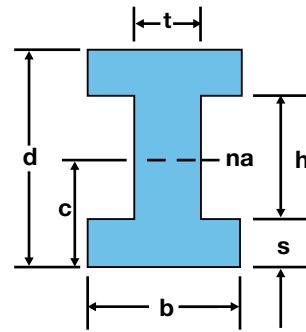
$$A = bd$$

$$c = \frac{d}{2}$$

$$I = \frac{bd^3}{12}$$

$$Z = \frac{bd^2}{6}$$

I字ビーム



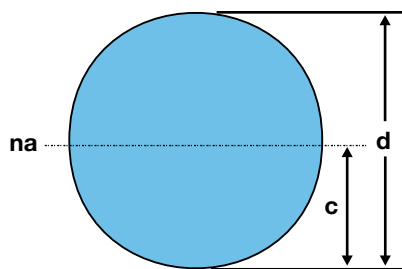
$$A = bd - h(b-t)$$

$$c = \frac{d}{2}$$

$$I = \frac{bd^3 - h^3(b-t)}{12}$$

$$Z = \frac{bd^3 - h^3(b-t)}{6d}$$

円形



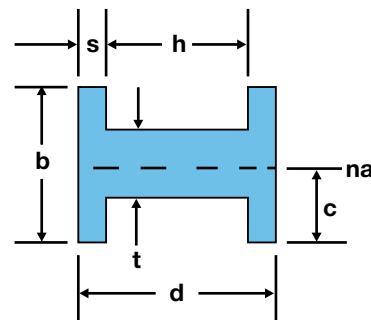
$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$c = \frac{d}{2}$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64}$$

$$Z = \frac{\pi d^3}{32}$$

H字ビーム



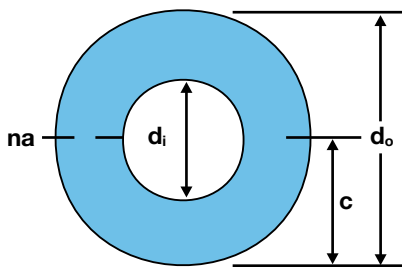
$$A = bd - h(b-t)$$

$$c = \frac{b}{2}$$

$$I = \frac{2sb^3 + ht^3}{12}$$

$$Z = \frac{2sb^3 + ht^3}{6b}$$

チューブ



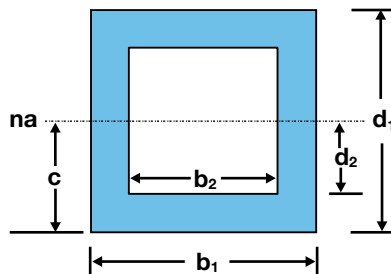
$$A = \frac{\pi(d_o^2 - d_i^2)}{4}$$

$$c = \frac{d_o}{2}$$

$$I = \frac{\pi(d_o^4 - d_i^4)}{64}$$

$$Z = \frac{\pi(d_o^4 - d_i^4)}{32d_o}$$

中抜き矩形



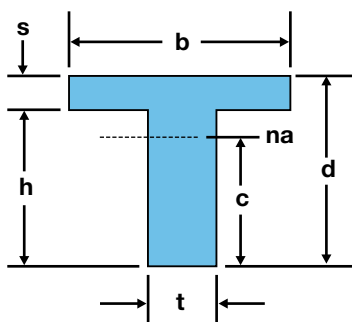
$$A = b_1d_1 - b_2d_2$$

$$c = \frac{d_1}{2}$$

$$I = \frac{b_1d_1^3 - b_2d_2^3}{12}$$

$$Z = \frac{b_1d_1^3 - b_2d_2^3}{6d_1}$$

T字ビーム／リブ



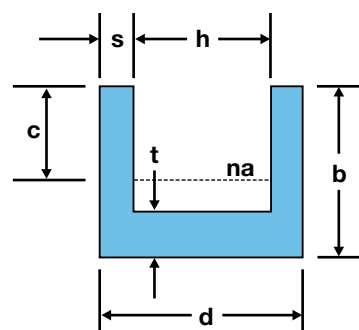
$$A = bs + ht$$

$$c = d - \frac{d^2t + s^2(b-t)}{2(bs + ht)}$$

$$Z = \frac{I}{c}$$

$$I = \frac{tc^3 + b(d-c)^3 - (b-t)(d-c-s)^3}{3}$$

U字ビーム



$$A = bd - h(b-t)$$

$$c = b - \frac{2b^2s + ht^2}{2A}$$

$$I = \frac{2b^3s + ht^3}{3} - A(b-c)^2$$

$$Z = \frac{I}{c}$$

古典的な応力-ひずみ方程式の使用

古典的な計算式を使用するためには、次の仮定を入れて考え方を単純化する必要があります。

- 部品は 1 個以上の単純な構造として解析できるものとする
- 材料は線形弾性体、かつ等方性である
- 負荷は 1 点に集中しているか、または分布した静負荷が短時間だけ徐々に加えられる
- 部品は残留応力／成形による応力をほとんど持たない

個々の状況を考えると上記の仮定は必ずしも厳密には成立しませんが、それでも古典方程式は解析の良い出発点となります。設計者は、単純化のために導入した仮定の効果を考慮しながら解析方法を修正していくことができます。

ビーム曲げモデルを使用して様々な部品を解析することができます。何種類かの梁について最大応力とたわみを計算する式を表 46 に示します。

最大応力 (σ) は梁の中立面から最も離れた表面で起こり、次の式で表現されます。

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{M}{Z}$$

ここで表しているのは以下のとおりです。

M = 曲げモーメント (N・m)

c = 中立軸からの距離 (m)

I = 慣性モーメント (m⁴)

Z = $\frac{I}{c}$ = 断面係数 (m³)

表 47 は一般的な何種類かの断面についての断面積 (A)、慣性モーメント (I)、中立軸からの距離 (c)、および断面係数 (Z) を示します。

それ以外の断面もしくは幾何形状を取り扱うときは、応力解析ハンドブックを参照してください。また、有限要素解析を行うのも良い方法です。

設計における計算の限界点

古典的機構設計方程式を適用して得られる設計は出発点としては有用ですが、これだけの解析では重要な要素が考察から抜け落ちてしまいます。ポリマー材料は粘弾性挙動を示すのが特徴ですから、例えば小さなたわみを取り扱うケースなどでは設計方程式をそのまま適用することができません。

最大応力の計算では、単純化のために何項目もの仮定を導入するのが普通であるため計算結果が信頼性に欠け、また予期される故障モードが座屈またはせん断であるため適切な特性データが存在しません。

また、ある設計における耐衝撃性は、その設計が破壊することなく衝撃エネルギーを吸収できる能力に直接関係していますが、設計がエネルギーを吸収できる能力を予測することは一般に困難です。さらに、エネルギー吸収の要求を満たせる手段があったとしても、エンジニアリングポリマーの強靱性を表す実用的な定数は存在しません。実験室における試験の結果は、たとえ幾何学的条件が同じであったとしても衝撃試験のタイプや速度によって変化します。このため、試作部品の耐衝撃試験を行い、その設計がどの程度の衝撃に耐える能力を持つのかをチェックする必要があります。

疲労試験の結果もまた同様で、選択したサイクル速度や、試験の運動学的条件、使用する試験片などによって変化します。このような試験結果は基本的には、疲労を伴うアプリケーションで材料がもつ能力の大まかな指標として用いるべきです。

たわみ計算

古典的な式を使用して設計した部品のたわみを決定するためには、弾性係数の値を知る必要があります。このとき、弾性係数の正しい値を使用することが重要であり、実際の使用温度と湿度あるいはその近傍における材料の値でなければなりません。室温および高温における値を 7 ページから 18 ページまでの特性表に示しています。荷重が継続的に付加されるのであれば、見掛けの弾性率またはクリープ弾性率を使用する必要があります。これらの値を等時性応力-ひずみ曲線として示します (34 ページの図 44、図 45)。

応力計算

最大応力の計算が終了したら、次に設計者が行うのは計算した値と材料の特性値 (引張り、圧縮、せん断強さなど) とを比較することです。この比較は目的とする応用で要求される温度や湿度条件に即したものでなければなりません。

強化繊維の配向に関する考察

プラスチックを用いた設計を行う際、特に充填材で強化されたプラスチックを用いた設計の場合には、設計者は充填材や強化繊維がプラスチックの機械特性に与える効果を認識しておかなければなりません。充填材を含むプラスチックの処理の過程で、繊維や大きなアスペクト比の充填材は、流れ方向に配向する傾向を示します。このマニュアルの説明を通して、重要な箇所では流れ方向とその直角方向の両方について特性値を表示しています。

部品の設計と処理は相互に関連しているため、設計者は部品のどの部位が異方性を持つかを知り、それによって特性値が受ける影響を考慮しなければなりません。収縮、強度、剛性、熱線膨張係数などの特性は、繊維のアスペクト比（長さとの比率）と繊維の配向の程度によって値が変わります。繊維の配向方向に直角な向きを考えると、繊維は強化材としてよりも単に充填材として機能します。

ポリマーの成形では、溶融部先端同士が出会う部分（一般にウェルドとして知られています）が起こります（例えば、溶けたプラスチックの流れがコアピンを回り込むときなど）。しかし、プラスチック内の強化材（存在する場合）がウェルドを横切ることはありません。このことは、ウェルドが強化ポリマーと同じ強度を持たないことを意味し、場合によってはポリマー母材の強度すら満たさないことがあります。強化プラスチックを用いて設計を行うときは、このような要素を考慮に入れる必要があります。

同等の部品剛性を実現する設計

金属部品をプラスチック部品で置き換えたいが金属部品の剛性はそのまま維持したいという設計者の要求がしばしばあります。ある材料を異種材料（一般に弾性率が異なります）で置き換える際、部品の剛性を維持する方策として二種類の非常に簡単な方法が考えられます。

その第一の方法は断面の肉厚を大きくして剛性を維持する方法であり、もうひとつの方法はリブを追加して剛性を高める方法です。それぞれの方法の例を次に示します。

断面肉厚の変更

表 46 に示されたたわみ方程式を見ると、たわみは常に荷重と長さに比例し、弾性係数と慣性モーメントに逆比例することが分かります。

ひとつの例を考えると、両端を固定して均等分布荷重を加えたときのたわみは次式によって決定されます。

$$Y = \frac{FL^3}{384EI}$$

したがって、二種類の異なる材料から等しい剛性を得るためには、次のようにたわみの値を等置すればよいことになります。

$$\left\{ \frac{FL^3}{384EI} \right\}_{\text{金属}} = Y = \left\{ \frac{FL^3}{384EI} \right\}_{\text{プラスチック}}$$

荷重と長さに変化がないとすれば、 FL^3 は式の両辺で同じ値となりますから、残るのは次の項だけです。

式 1

$$\{EI\}_{\text{金属}} = \{EI\}_{\text{プラスチック}}$$

したがって、この式が部品の剛性を等しくする条件を規定します。

金属部品がマグネシウム製（弾性係数 $E = 44.8 \text{ GPa}$ ）であり、これをアモデル AS-1145 HS 樹脂（弾性係数 13.8 GPa ）で置き換えるとすれば、部品の肉厚を増やすかまたはリブを追加することによって、プラスチック部品の慣性モーメント（ I ）を大きくする必要があります。

E の値を式 1 に代入することにより：

$$(44.8 \times 10^9)I_{\text{金属}} = (13.8 \times 10^9)I_{\text{アモデル}}$$

$$3.25 I_{\text{金属}} = I_{\text{アモデル}}$$

表 47 から、矩形断面の慣性モーメントは次式で表現されます。

$$I = \frac{bd^3}{12}$$

ここで、 b は断面の幅、 d は厚みを表します。値を式に代入して必要な肉厚を計算すると：

$$3.25 d^3_{\text{金属}} = d^3_{\text{アモデル}}$$

金属部品の d が 2.54 mm であったとすれば、アモデル樹脂の肉厚は次のようになります。

$$d_{\text{アモデル}} = \sqrt[3]{3.25(2.54)^3} = 3.76 \text{ mm}$$

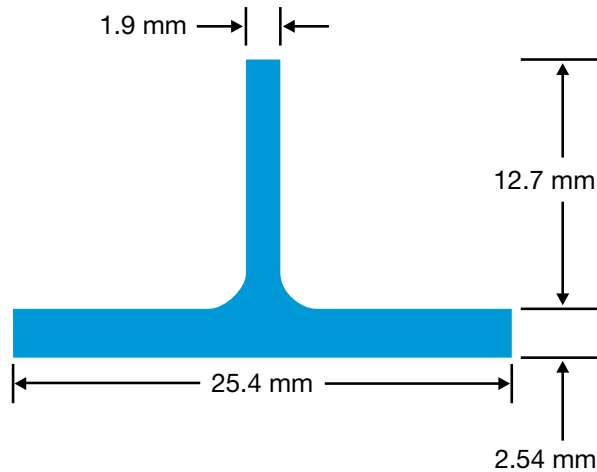
結論としてマグネシウム部品よりも 48% 厚みを増やすことになります。ただし、次のセクションで説明するように、リブを使用することで効果的に慣性モーメントを大きくすることが可能です。

リブを追加して剛性を保つ

前のセクションでの説明により、金属部品をアモデル AS-1145 HS 樹脂成形部品で置き換えようとする、肉厚 2.5 mm のマグネシウム部品と同じ剛性を維持するためには、部品の肉厚を 3.7 mm へ増やす必要があることが分かりました。

アモデル部品の設計にリブを組み込むことによって、肉厚と重量を効率的に低減することができ、しかもマグネシウム部品と同等の剛性を保持することができます。

図 68：リブを追加して剛性を高める



これを具体的に示すために、リブを用いた新設計の慣性モーメント (I) を肉厚 3.7 mm のプレート設計に適用してみます。使用する材料として同じアモデル AS-1145 HS を選択すると弾性係数はどちらも 13.8 GPa ですから、リブを使用した設計の慣性モーメントがプレート設計の場合と同じであれば、どちらの部品も同じたわみ、または剛性を持つことになります。

表 47 からリブ付き断面の I を選択し、断面の幅 b は両者に共通であると仮定すれば、 $I_{\text{リブ}}$ は $I_{\text{プレート}}$ と同等もしくはより大きくなければなりません。断面幅として $b = 25.4 \text{ mm}$ を仮定することにより、この条件を満たすリブ付き構造の慣性モーメントが計算可能になります。

プレート設計の慣性モーメント：

$$I_{\text{プレート}} = \frac{bh^3}{12} = \frac{2.54 \times (3.76)^3}{12} = 112.5 \text{ mm}^4$$

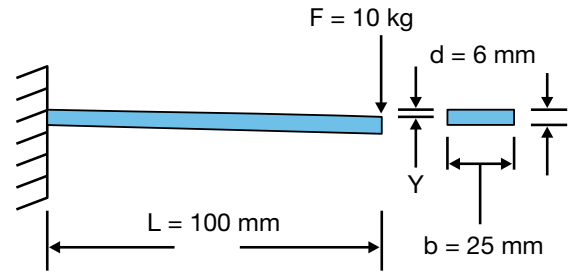
図 68 に示す任意のリブ設計を選択して計算を実行すると、次の慣性モーメントが得られます。

$$I_{\text{リブ}} = 1379 \text{ mm}^4$$

この例では、リブ付き設計の方がアモデルのプレート設計および元の肉厚 2.5 mm のマグネシウム部品よりも、9.5 倍も高い剛性が得られることになります。

同じリブを使って高さを半分にした場合でも、マグネシウム部品の 2 倍の剛性を持つ部品を作ることができます。ここに示したリブ設計では、断面幅にわたって 25 mm ごとにリブを設ける必要があります。

図 69：曲げ荷重を付加した片持ち梁



持続性荷重を考慮した設計

ここまでの説明で取り扱ってきた応力-ひずみ計算は、専ら応力に対する即時のひずみ応答、すなわち短期特性のみでした。対象となる部品が長時間あるいは高温下で荷重に耐える場合は、起こりうる追加のひずみや部品のたわみを明らかにするために、見掛けの（クリープ）弾性率を使用する必要があります。このような持続的な荷重がかかる場合に、計算をどのように修正するかを次の例で説明します。

たわみ計算

矩形断面を持つ片持ち梁（図 69）の自由端に 10 kg の荷重をかけて 1,000 時間経過したときのたわみの大きさはどれだけになるでしょう。

65 ページの表 46 から、片持ち梁のたわみは次式によって与えられます。

$$Y = \frac{FL^3}{3EI}$$

ここで I は慣性モーメントであり、表 47 に示すように次式で表現されます。

$$I = \frac{bd^3}{12}$$

E はその材料の曲げ弾性率です。

以上から、この例の慣性モーメントは次のように計算されます。

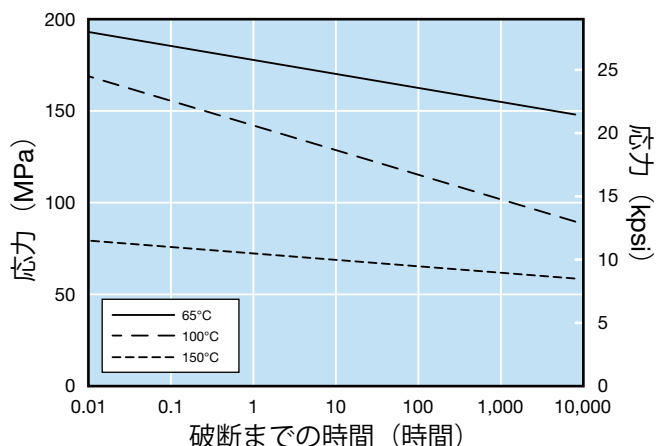
$$I = \frac{(25)(6)^3}{12} = 450 \text{ mm}^4$$

データシートによればアモデル A-1133 HS 樹脂の曲げ弾性率は 11.6 GPa です。この値と前に説明した式を用いて、室温における短期的なたわみを計算すると次の結果が得られます。

$$Y = \frac{(10 \text{ kg} \times 9.8066)(0.1 \text{ m})^3}{3(11.6 \times 10^9 \text{ Pa})(4.5 \times 10^{-10} \text{ m}^4)}$$

$$Y = 6.3 \text{ mm}$$

図 70：引張クリープ破断：アモデル A-1133 HS 樹脂



長期間持続する荷重のかかるアプリケーションの場合は、クリープが発生することによってこれよりも大きなたわみが生ずると考えられます。クリープも考慮してたわみを計算するために、短期的な曲げ弾性率ではなく見掛けの弾性率を使用することにします。1000 時間におけるアモデル A-1133 HS 樹脂の見掛けの弾性率を図 70 から評価すると 7.58 GPa という値が得られます。これを用いてたわみを計算すると：

$$Y = \frac{(10 \text{ kg} \times 9.8066)(0.1\text{m})^3}{3(7.58 \times 10^9 \text{ Pa})(4.5 \times 10^{-10} \text{ m}^4)}$$

$$Y = 9.6 \text{ mm}$$

すなわち、持続的な荷重を考慮した場合のたわみは約 50% 大きな値を示します。

許容応力の計算 — クリープ破断

荷重が長期間持続し、その荷重が十分に大きい場合または温度が十分に高い場合は、クリープの蓄積によって部品はやがて破断します。

このような破壊を引き起こす時間と温度、および荷重の組み合わせを解析するため、図 70 に示すクリープ破断試験が何段階もの温度で実施されます。この図は様々な応力レベルを付加したときに破壊に至るまでの実際の時間を示すものであり、このデータからクリープ破断曲線を得ることができます。この曲線をもとにして、それぞれの温度における時間または応力の安全係数を決定することができます。

例えば、アモデル A-1133 HS 樹脂成形品を使用したアプリケーションの寿命が 65°C において 1,000 時間であるとすれば、この図から部品が約 158 MPa の応力が加わると所定時間内に破断が起こる可能性があることが分かります。

部品を再設計して応力を 124 MPa まで下げることができれば、破断が起こるまでの予測時間は 10,000 時間をはるかに超えることになります。このようにして設計に自動的に安全係数を盛り込むことができます。結果を検証するためには実際の部品を用いた試験が望ましいことは勿論です。

実際の使用温度が試験に使用した温度と異なる場合は、問題となる温度における曲線を近似するための情報は通常、既知のクリープ破断曲線から外挿することによって得られます。

応力集中

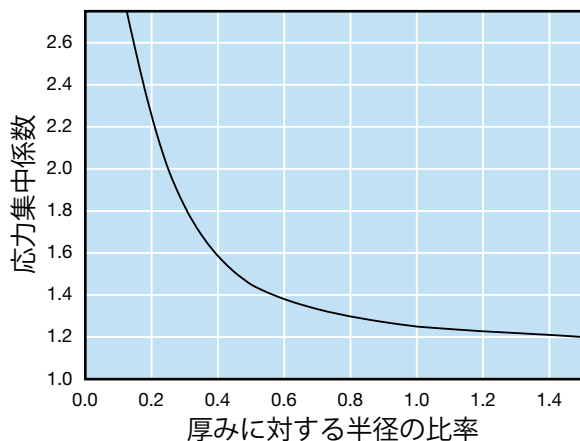
古典的な機構設計を適用した部品では、予想よりもはるかに短い時間、あるいははるかに低い応力で部品が壊れることがあります。その原因となるのが応力集中です。応力集中はシャープコーナー、穴周り、その他の特異部分に発生します。応力集中は衝撃や疲労が起こり易い状況で特に問題になります。

シャープコーナーを減らして応力集中を分散することにより、構造強度のより優れた部品を作ることができます。応力集中の問題が起こらないようにするには、コーナーの内側半径を少なくとも部材の標準肉厚の半分またはそれ以上にするべきです。溝底の半径は少なくとも 0.4 mm 以上としてください。

図 71 はコーナーの内側半径が応力集中係数に与える影響を示しています。例えば、標準肉厚が 2 mm であり、コーナーの内側半径が 0.5 mm であるとすれば、厚みに対する半径の比率は 0.25 となって応力集中係数の値は 2 を超えます。したがって、応力が x であれば $2x$ を超える影響を部品に及ぼします。

コーナーの外側半径は、その内側半径に部材肉厚を加えた値として均一な肉厚を保つようにします。

図 71：内側コーナーの応力集中係数



熱応力

金属とプラスチックを併用した部品が温度変化に曝されると応力が発生します。設計者はこの現象を考慮した部品設計を行う必要があります。

図 72 に示すのは、鋼製ボルトで鋼製枠に固定されたプラスチックフランジの代表例です。プラスチックの熱膨張は鋼よりもかなり大きいため、温度の上昇によってプラスチックの圧縮応力が増大するとともに鋼製ボルトには張力が働きます。ボルトのクリープとトルク損失が問題となる場合には、ワッシャーの下側での圧縮応力の増加を考慮する必要があります。

例えば、温度変化に曝された材料の長さ変化は、下式で与えられます。

$$\Delta L = L (T_F - T_0) \alpha$$

ここで表しているのは以下のとおりです。

ΔL = 長さ変化

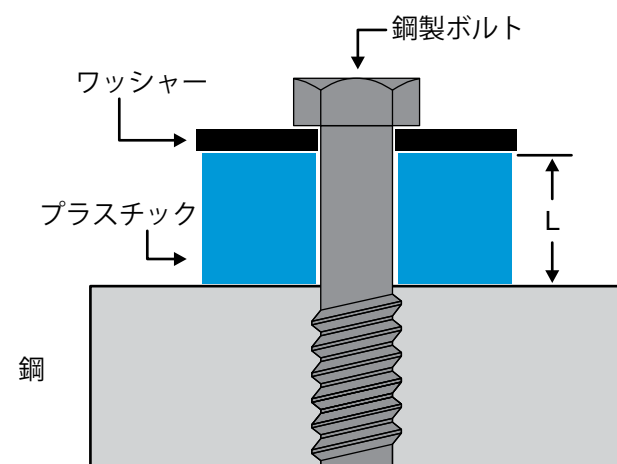
L = 初期長さ

α = 熱線膨張係数

T_F = 最終温度

T_0 = 初期温度

図 72：熱応力の例



プラスチックは動きが制約されているため、鋼製ボルトとプラスチック両方の単位伸び（熱膨張とひずみの組み合わせ）は次のように表現されます。

$$\alpha_s(T_F - T_0) + \frac{F}{A_s E_s} = \alpha_p(T_F - T_0) - \frac{F}{A_p E_p}$$

ここで表しているのは以下のとおりです。

A_s = ボルト断面積

A_p = ワッシャー断面積

E_s = 鋼材の弾性率

E_p = プラスチックの弾性率

α_s = 鋼材の熱線膨張係数

α_p = プラスチックの熱線膨張係数

F = ボルトにかかる引張り力の増加

F について解くと

$$F = \frac{(\alpha_p - \alpha_s)(T_F - T_0) A_s E_s}{1 + \frac{A_s E_s}{A_p E_p}}$$

プラスチックの圧縮応力の増加は次のようになります。

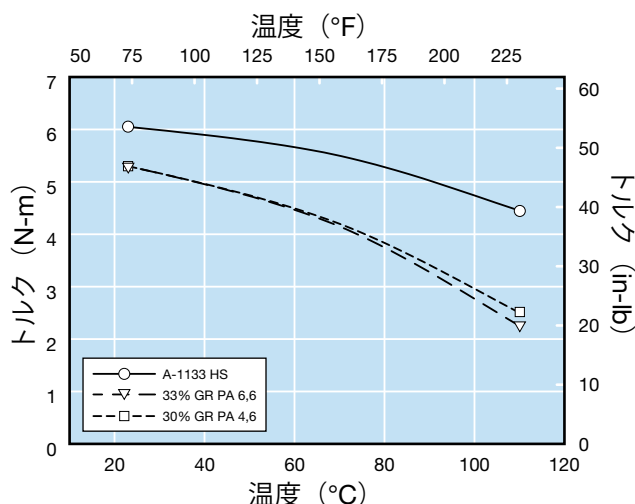
$$\sigma = \frac{F}{A_p}$$

クリープによるボルトのゆるみ

プラスチック部品を本体に組みつけ、固定するためにねじなどの金属ファスナーを使用する設計では、本体が温度変化に曝された場合、プラスチックと金属の熱膨張係数が違うことに起因する問題が起こります。ねじ部品を締め付けると、ねじが僅かに伸びて基材に対する圧縮応力が発生し、この圧縮応力がボルトの緊張を保つ働きをします。

本体が加熱されると、プラスチック部品と金属ファスナーの両方が膨張しようとし、しかし、プラスチック部品は金属ファスナーによって押さえ付けられているため伸びることができません。その結果としてプラスチック部品の圧縮応力が増加し、それに対応して圧縮クリープあるいは応力緩和の傾向が強くなります。圧縮応力の緩和の結果として、ボルトがトルクを保持できなくなります。

図 73：ボルトのトルク保持



この傾向の解析を行うため、三種類の材料（アモデル A-1133 HS 樹脂、33% ガラス強化 PA 6,6、30% ガラス強化 PA 4,6）から作成した厚さ 6.4 mm の薄板を金属板表面に鋼製ボルトで固定し、トルクレンチを使用して 6.8 N·m のトルクで締め付けてプラスチック板をボルト面の下側で押し付けました。このボルト締めアセンブリーの温度を、図 73 に示す温度まで上昇させて 1 時間保持した後に室温まで温度を下げました。このときにボルトを緩めるために必要であったトルクを記録しました。

保持されていたトルクの大きさと温度との関係を図 73 に示します。アモデル樹脂の熱線膨張係数は他の試験材料よりも小さく、したがって鋼の係数により近い値を示します。

押さえ付けられた部品は熱変化を受けることで圧縮ひずみが発生し、これにより応力を受けますが、熱膨張の差が小さいことから発生応力が他よりも小さくなります。したがってクリープも小さくなり、このようなボルト締めアセンブリーでもトルクが良好に保持されます。

アッセンブリー設計

嵌め代と圧入

二個の部品を組み立てる際に使用できる最も経済的な方法は圧入です。この方法では、シャフトの直径よりもやや小さく作られた穴にシャフトを強制的に圧入することによって接合します。このときの穴の直径とシャフトの直径の差を嵌め代と呼びます。接合を保持する主たる力は、シャフトを穴に挿入することによってハブ側に発生したフープ応力がシャフトに加わる圧縮応力です。シャフトとハブ材料の相対的な弾性率の差によっては、シャフト側の圧縮応力も接合の維持に寄与します。ポリマー材料の見掛けの弾性率が時間とともに減少することから、締まり嵌めを保持する応力も時間の経過とともに緩くなる傾向を示し、丁度クリープに似た挙動を示します。

許容嵌め代の計算

シャフトとハブ間の許容嵌め代は次の一般方程式から計算することができます。

$$l = \frac{S_d D_s}{F} \left\{ \frac{F + v_h}{E_h} + \frac{1 - v_s}{E_s} \right\}$$

幾何形状因子は次式で与えられます。

$$F = \frac{1 + \left(\frac{D_s}{D_h} \right)^2}{1 - \left(\frac{D_s}{D_h} \right)^2}$$

ここで表しているのは以下のとおりです。

l = 嵌め代

S_d = 作業応力

D_h = ハブ外径

D_s = シャフト直径

E_h = ハブ材料の弾性率

E_s = シャフト材料の弾性率

v_h = ハブ材料のポアソン比

v_s = シャフト材料のポアソン比

F = 幾何形状因子

シャフトとハブを同一グレードのアモデル樹脂で製作したとすれば、式は次のようになります。

$$E_h = E_s = E$$

同じように、嵌め代は次のようになります。

$$l = \frac{S_d}{E} D_s \left(\frac{F+1}{F} \right)$$

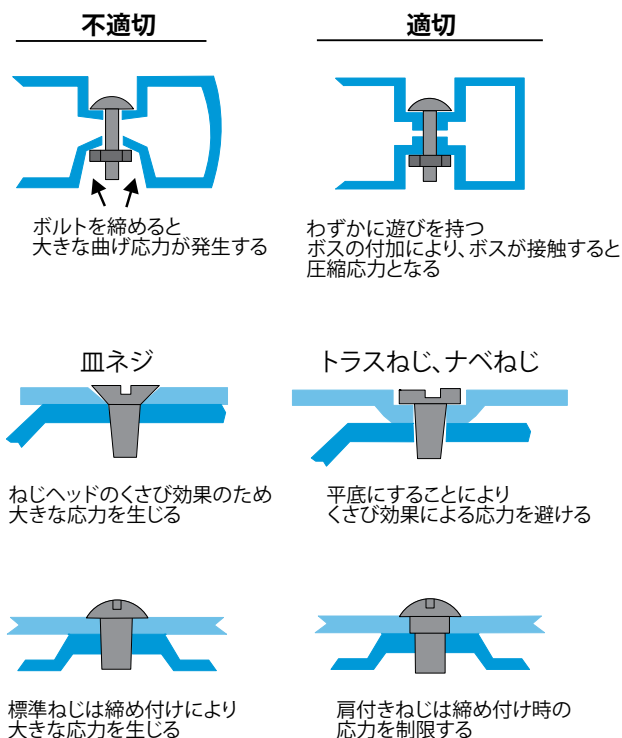
ハブをアモデル樹脂で作成し、シャフトを金属製とすれば嵌め代は次のようになります。

$$l = \frac{S_d D_s}{F} \frac{F + v_h}{E_h}$$

異種材料間で圧入を使用する場合は、両者の熱膨張率の違いにより、嵌合部品間の嵌め代が増減します。これに伴って接合強度に影響を与える応力も変化します。

圧入は時間とともにクリープや応力緩和を起こします。これによりアッセンブリーを保持する力が低下することがあります。したがって、実際に適用する使用条件でアッセンブリーの状態を試験するように強くお勧めします。

図 74：メカニカルファスナーの設計



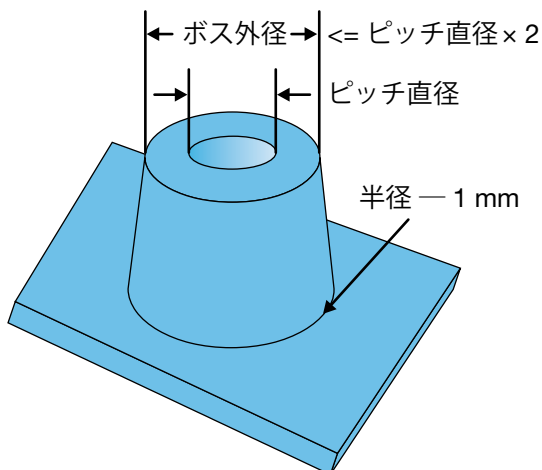
メカニカルファスナー

メカニカルファスナーは、異種材料を接合させる経済的な手段です。射出成形したプラスチック部品とともに頻繁に使用されるファスナーには、ねじ、ボルト、ナット、ロックワッシャー、ロックナットなどがあります。金属製のメカニカルファスナーを使用する場合は、組み付けられるプラスチック部品に過度の応力がかからないよう、設計の段階で慎重に検討する必要があります。

組み付け時に大きな応力が発生するのを防ぐ最も有効な手順は、トルクドライバを利用してメカニカルファスナーの締め付けをコントロールすることです。現場での組み付け作業などでトルクをコントロールするのが困難な場合は、段付ねじを使用すればプラスチック部品にかかる圧力を制限することができます。それ以外の方法としては、例えばフランジヘッドねじや、大型ワッシャー、段付ワッシャーなどが考えられます。メカニカルファスナーを使用するための好ましい設計例を図 74 に示します。

セルフタッピングねじを使用するときは、組み立てと分解を何度も繰り返さないでください。何度も組み立てを行う必要がある場合は、盛り上げねじの使用をお奨めします。

図 75：セルフタッピングねじ用のボス設計



セルフタッピングねじ

プラスチックに一般的に使用されるメカニカルファスナーの例がセルフタッピングねじです。セルフタッピングねじは、プラスチック内に挿入されるときに自分でねじ山を切る（形成する）タイプのねじであり、これによって内側のねじを成形したり二次的な切削加工でねじ切りをする操作を省くことができます。このねじの主要なタイプとして、盛り上げねじタイプとねじ切りタイプがあります。

どのタイプのセルフタッピングねじがアプリケーションに適しているかを決定するにあたっては、プラスチック材料の弾性係数が重要な役割を果たします。ほとんどの非強化樹脂がそうであるように、弾性率が 3.0 GPa 未満であるプラスチック材料には盛り上げねじが適しています。これは、プラスチックには十分な延性があるためクラックやせん断を起こすことなく変形が可能であるからです。ガラス・ミネラル強化プラスチックにはねじ切りタイプが適しています。

ストリッピングトルクを最適化するために、ボスの穴径がねじのピッチ直径と一致するようにしてください。ボスの外径はこの穴径の 2 倍または 3 倍程度とし、ボスの高さはボスの厚みの 2 倍以上を確保してください。

セルフタッピングねじを使用する場合のボスの基本的な設計法を示すのが図 75 です。

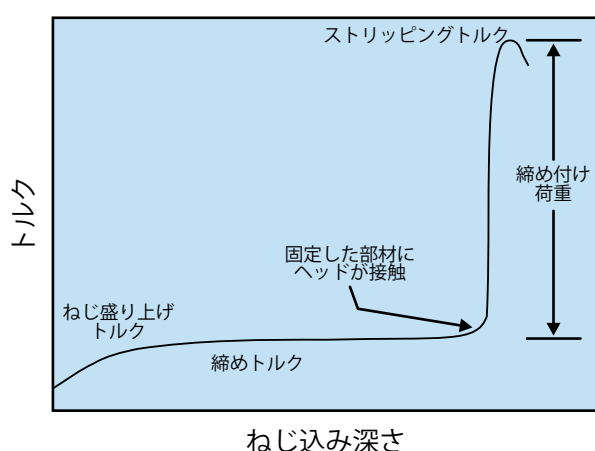
組み付け時にストリッピングや高応力が発生するのを防止するため、組み立て工程ではトルクドライバを使用してください。

トルク保持の改善

クリープによるトルクの低下を最小限に押さえるためには、以下の方法を用いてねじヘッドの下に発生する圧縮応力を低減させます。

- ねじヘッドの直径を大きくする
- 径の大きな平ワッシャーを使用する
- 締め付けトルクを減らす
- スプリングワッシャーやスパイラルワッシャーを使用する
- 肩付きねじを使用してプラスチック部品にかかる応力を減らす
- 金属製ブッシングを使用する

図 76：ねじ込みに伴って発生するトルク



締め付けトルク

図 76 はねじ込み深さとトルクの関係を示しています。締め付けトルクは個々のアプリケーションごとに決まる推奨組み付けトルクです。このトルクは、ねじ山が完全に嵌合して締め付け荷重が発生するまで大きくしなければなりません、同時にねじ山が壊れてしまうトルク（ストリッピングトルク）よりは小さくしなければなりません。

締め付けトルクの最適値は、平均締めトルクと平均ストリッピングトルクから、次式に従って計算することができます。

$$T_T = \frac{1}{2} \left(\frac{3}{2} T_D + \frac{1}{2} T_S \right)$$

ここで表しているのは以下のとおりです。

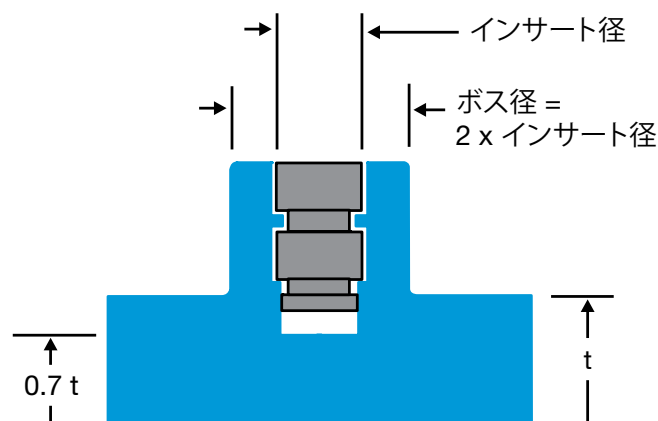
T_T = 締め付けトルク

T_D = 平均締めトルク

T_S = 平均ストリッピングトルク

プラスチック材料に使用することを目的として設計された専用のセルフタッピングねじが用意されており、このようなねじの利点は、金属用のねじと比較して締めトルクとストリッピングトルクの差がより大きくなるように設定されていることです。このような専用ファスナーを使用することで、自動組み立ての安全係数をさらに大きくすることができます。

図 77：超音波インサート用のボス設計



引抜き力の計算

接合部の強度を表す数値として、ねじの引抜き力を使用します。引抜き力は次式によって評価します。

$$F = \pi S D L$$

ここで表しているのは以下のとおりです。

F = 引き抜き力

S = せん断強さ

D = ピッチ直径

L = ネジの噛み合わせ長さ

組み立てと分解を繰り返す必要がある、あるいは予測されるアッセンブリーには、セルフタッピングねじの使用を避け、代わりに金属製ねじ込みインサートを使用してください。

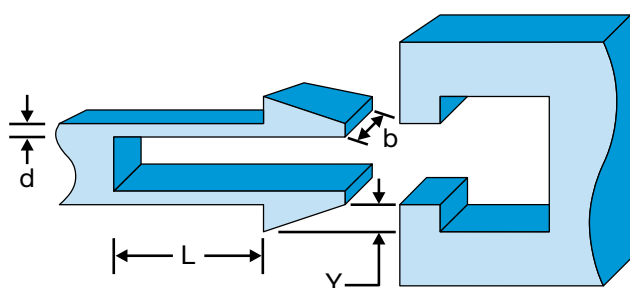
ねじ込みインサート

金属製ねじ込みインサートを使用すればプラスチック部品に金属ねじを恒久的に埋め込むことが可能であり、様々なサイズとタイプのインサートがあります。通常、インサートはそれに適合する内径で設計し、成形したボスに取り付けます。最も一般的に使用される金属製インサートには、一体成形タイプと、超音波による二次加工によって部品内に埋め込むタイプがあります。一体成形インサートの場合は、インサートを金型に取り付けておいてからその周りにプラスチックを射出成形します。プラスチックがインサート周りで冷えると応力が発生しますが、インサートを金型温度まで加熱しておくことによって発生する応力を小さくします。

超音波インサートを使用する場合は、超音波溶着機が発生する高周波振動を与えてプラスチックを溶かすことにより、インサートをプラスチックに圧入します。超音波溶着機の効果により、挿入する金属インサート周りの材料が溶けてインサートとプラスチック間の結合が形成されますが、この結合は通常非常に強く、かつ問題となるような応力は発生しません。

アモデル PPA 樹脂で使用するインサートとボスの推奨設計例を図 77 に示します。

図 78：カンチレバー（片持ち梁）タイプのスナップフィット



一体成形ねじ

金属ではなくプラスチック材料を使用する利点のひとつは、ねじを直接部品内に成形することができる点にあります。これにより、金属部品にねじを切る際に必要となる二次的な切削加工の必要がなくなります。一体成形ねじは、部品の外側と内側のどちらにでも作成が可能です。内側ねじの場合は離型を可能にするため、何らかの回転抜きや折り畳み式コアが必要となります。雄ねじの場合、金型のパーティング面がねじ山に直交していれば、より簡単にねじを成形することができます。

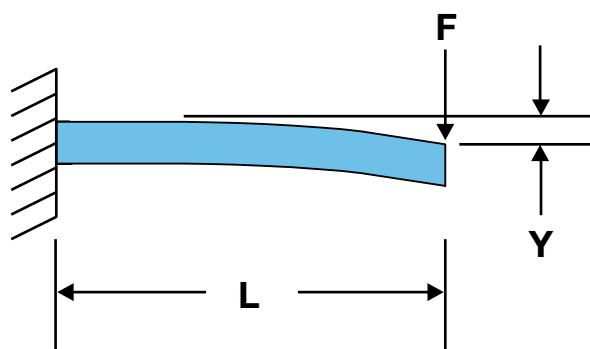
スナップフィットを使用する設計

スナップフィットはプラスチックで非常に広く用いられている方法です。スナップフィットを使用する設計のすべてにおいて、嵌合する相手側の縁を通過したときにプラスチックがカンチレバー（片持ち梁）スプリングのようにたわむ必要があります。フレキシブルアームが一旦相手側の縁を通り抜けたら、アームはたわみのない、応力のかかっていない通常的位置へ戻ります。通常は、相手側に嵌合してロックするようカンチレバーにステップまたは突出部が作り込まれるため、追加部品を必要としない簡単な組み立て法を実現することができます。図 78 にこれを示します。

挿入するためには、それぞれのカンチレバーアームが Y の距離だけたわむ必要があります。スナップ設計で重要なのは、使用する材料のひずみ-応力リミットを超えないようにすることです。延性が大きく弾性率の小さなプラスチックに用いたスナップフィット設計を、充填材で強化した剛性の高いプラスチックに適用するのは不適当です。

剛性の高い材料を使用する場合は、カンチレバーアームを長くするか、あるいは嵌合のためのたわみ距離 Y を小さくします。適当な「ストッパー」を設けることで、組み立て時のカンチレバーのたわみ過ぎを防止することができます。

図 79：片持ち梁 — 自由端に集中荷重



垂直片持ち梁方程式

垂直片持ち梁の最大たわみとひずみの相関関係は次式で計算されます。表 46 から選択した片持ち梁を図 79 に再掲します。最大応力は次式で与えられます。

$$\sigma = \frac{FL}{Z}$$

この梁は矩形断面を持つことから、

$$Z = \frac{bd^2}{6} \quad \text{および、}$$

$$I = \frac{bd^3}{12}$$

したがって：

$$\sigma = \frac{FLd}{2I}$$

梁のたわみ Y は次式で与えられます。

$$Y = \frac{FL^3}{3EI}$$

表 48：カンチレバー式スナップフィットの推奨ひずみ

グレード	最大ひずみ (%)
ET-1000 HS	1.0
A-1230 L	0.5
AS-1133 HS	1.0

このたわみの式を F について解くことにより、梁をたわませるために必要な力が次式によって計算されます。

式 1

$$F = \frac{3YEI}{L^3}$$

弾性係数 E の定義は次のとおりです。

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{したがって、} \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

これを片持ち梁の応力方程式に代入することにより：

式 2

$$\varepsilon = \frac{FLd}{2EI}$$

式 1 の関係を用い、式 2 の F に代入することによって、ひずみとたわみの関係が次のように導かれます。

式 3

$$\varepsilon = \frac{3Yd}{2L^2}$$

設計者はこの式を用いて、設計上の最大たわみによって生ずるひずみの大きさを計算することができます。何種類かのアモデル樹脂に適用される推奨最大ひずみをまとめて表 48 に示します。

設計に適したアモデル樹脂のグレードが選択されたら、基本方程式を使用して、カンチレバーを必要な大きさだけたわませるのに必要な荷重 F を計算することができます。

カンチレバー式スナップフィットの場合、カンチレバーの根元部分で応力とひずみが最大となり、荷重が負荷される先端部に近づくほど応力とひずみが小さくなります。実際、荷重位置から固定端への距離である L を変えて計算すれば、任意の位置における応力とひずみを計算することができます。したがって、カンチレバーの肉厚を固定端から先端へ向けて徐々に減らしていけば、固定肉厚の場合よりも容易にたわむカンチレバーの設計が可能であり、しかも最大応力の増大を招くことはありません。この方法により、材料が持つ性能を最大限に引き出すことができます。

図 80：テーパ付き梁を使用するスナップフィット設計

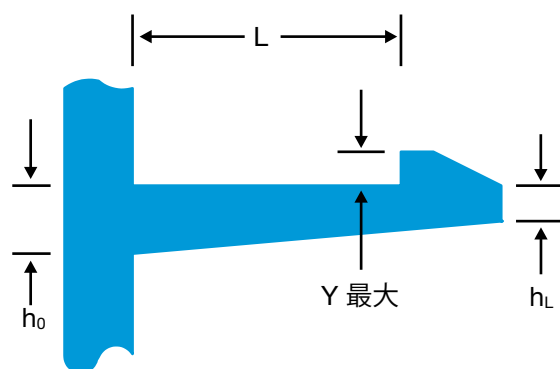
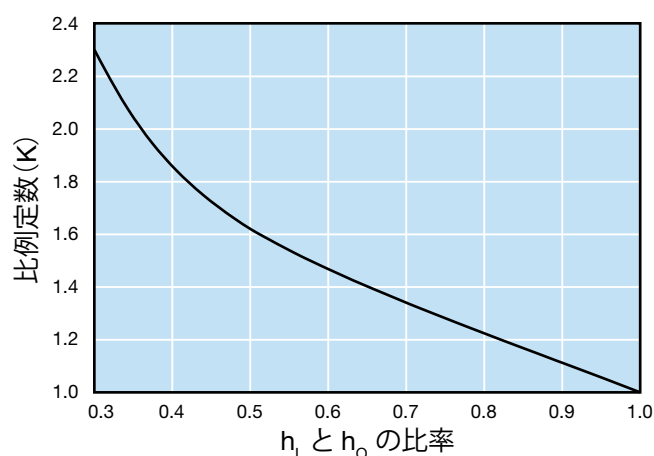


図 81：テーパ付き梁の比例定数 (K)



テーパ付き片持ち梁方程式

図 80 に示すテーパ付き設計では、自由端の肉厚は hL になります。テーパ付き梁設計の比例定数 K を図 81 から見つけ出し、式 (4) を使用して最大ひずみを計算することができます。

式 4

$$\varepsilon = \frac{3Yh_0}{2L^2K}$$

例えば、梁の肉厚が固定端の半分になるように漸次減らしていったとすれば、hL の h0 に対する比率は 0.5 であり、K (図 81 より) は 1.6 となります。したがって、最大ひずみと対応する応力には K の逆数である 0.625 という値が乗算され、同じたわみ値を持つ固定肉厚梁設計の場合と比較して、ひずみが約 40% 減少することが分かります。

射出成形に適合した設計

アモデル PPA 樹脂を使用する用途の多くでは、射出成形によって部品を製造します。部品を設計する技術者は、アプリケーションが要求する性能を満たすように設計を行うことはもちろんですが、その設計の中には成形性に影響を及ぼす要素が多数含まれていることも認識していなければなりません。考慮すべき要素としては、肉厚と肉厚変化、抜き勾配、リブ、ボス、および肉盗みなどが含まれます。設計者は部品を成形する金型を作成する前の段階で、これらの要素が成形性に及ぼす影響を考慮する必要があります。

肉厚

一般的には、予期される負荷を支えられる十分な構造的強度を保てるだけの最小肉厚を用いて部品を設計しますが、同時にたわみを設計基準内に収め、適切な流動性を確保し、燃焼性と耐衝撃性への要求を満たすことが必要になります。この方法で設計された部品が最も軽量で、したがって最小の材料コスト、かつ最短の成形サイクルで成形できます。

肉厚の変化

射出成形プロセスの観点から理想的なのは一様な肉厚を持つ部品設計です。このような設計では成形時の応力が最も小さくなり、部品表面にひけが生ずる可能性を低減するほか、成形部品内部にボイドができる可能性を無くすることができます。しかし、構造的、外観的、および抜き勾配に関する条件によっては、必然的に肉厚変化を伴う設計が必要となることがあります。面部分の厚みを変化させる必要がある場合、設計者は例えば図 82 に示すテーパ付きや緩やかな肉厚変化に見られるように、肉厚を滑らかに変化させるよう考慮してください。

階段状のシャープな肉厚変化は不均一な冷却や乱流を生じるため、外観および寸法安定性上の問題を引き起こす可能性があります。シャープな肉厚変化はまた応力集中の原因にもなり、荷重や衝撃に対する部品性能に悪影響を与えます。

抜き勾配

離型を容易にするため、通常は部品にテーパを付けて設計します。金型が動きだすとすぐにこのテーパによって隙間ができ、部品を簡単に金型のキャビティから解放して取り出すことが可能になります。このテーパは一般に「ドラフト（抜き）」と呼ばれ、テーパの大きさを「抜き勾配」と呼びます（図 83 参照）。

図 82：肉厚の変化

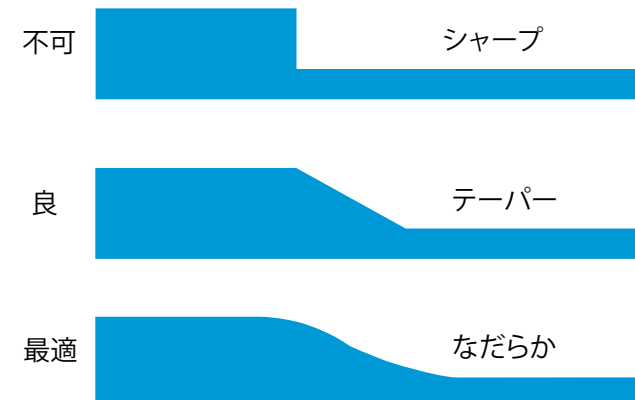
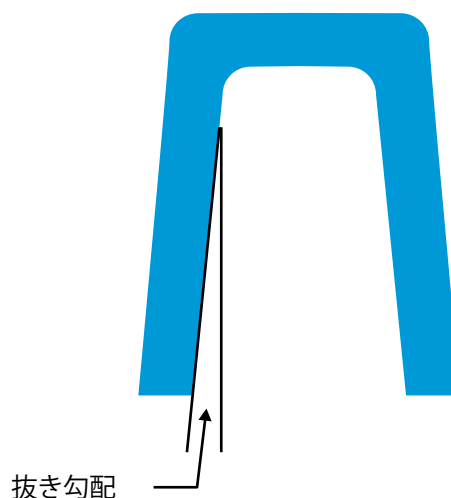


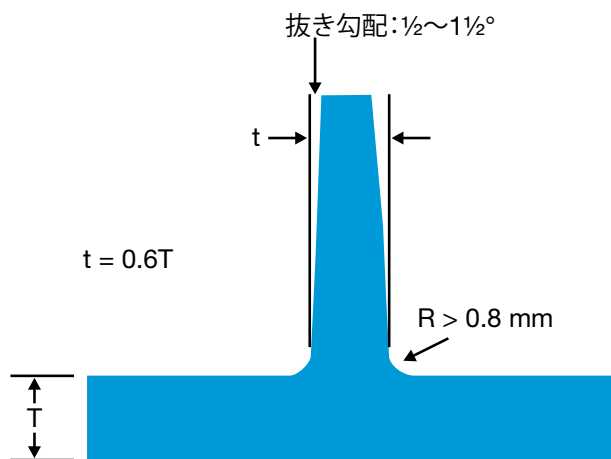
図 83：抜き勾配 — 離型を容易にする設計



金型から簡単に部品を取り出せるようにするには適切な抜き勾配を付ける必要があります。アモデル樹脂を使用する場合は、一般的に樹脂壁面の内側と外側両方について片側あたり $0.5 \sim 1^\circ$ の抜き勾配を付けます。ただし、金型表面が引き磨き処理されているような特殊ケースでは $1/8 \sim 1/4^\circ$ 程度のより小さな抜き勾配が使用されます。

また、深絞りやコアを使用する場合には抜き勾配を大きめにします。シボ加工では抜き勾配を大きめにし、片側のシボ深さ 0.025 mm あたり 1° 以上にする必要があります。

図 84：抜き勾配 — 推奨リブ設計



リブ

設計セクションの「リブを追加して剛性を保つ」（68 ページ）でも例を示したように、リブを適正に設計して要所に配置することによって、肉厚を大きくせずとも部品の剛性を向上させることができます。適正なリブ設計を使用すれば肉厚を減らすことも可能です。肉厚の減少は材料使用量と部品重量の低下に寄与し、成形サイクルも短縮されます。肉厚の大きな壁は部品表面のひけや部品内部のボイドの原因となるため、リブを利用して肉厚部位をなくすることは非常に有効です。適正に配置されたリブは金型内部のランナーとしても機能し、成形工程で溶融プラスチックを滑らかに流すのに役立ちます。

一般的に、リブを利用する設計は次のガイドラインに従ってください。リブの根元部分の厚みは、隣接する壁面の肉厚の 60% を超えないようにしてください。リブが化粧面の裏である場合は幅を出来るだけ小さくしてください。成形部品の中に外観よりも構造的強度を重視しなければならない部位がある場合は、リブの大きさはしばしば外側壁面肉厚の 75%、また場合によっては 100% にもなります。リブは側壁やボス、取り付けパッドなど、他の構造的な部分と出来る限り滑らかに接続する必要があります。ひとつの部品が複数のリブを含む場合は、リブの高さや幅を常に一定にする必要はなく、部品にかかる応力分布に対応して適宜変化させてかまいません。すべてのリブには片側面あたり少なくとも $1/2^\circ$ の抜き勾配を与え、根元部分には少なくとも 0.8 mm の半径を与えて、応力集中とひけの発生を防ぐ必要があります。

リブの寸法に関する推奨事項を図 84 に示します。

肉盗み

部品全体を通して壁面部分の厚みを一様にするのが最も望ましい設計です。部品内に厚肉部分が存在するとサイクルタイムが長くなり、部品表面のひけや部品内部のボイド発生の原因となることに加えて、成形時の応力も大きくなります。

厚肉部分には肉盗みを施して肉厚を一様にします。単純かつ経済的に射出成形を行うためには、型開きに沿って平行に肉盗みを配置します。それ以外の方向に肉盗みを配置すると、何らかのスライド機構が必要となること、または入れ子の手作業による脱着が必要となります。

キャビティにまで及ぶ肉盗みは大きな圧力にさらされます。直径が 1.5 mm を超える片止めコア（支持されていないコア）のコア長はその直径の 3 倍を超えないよう、また直径 1.5 mm 未満の片止めコアの長さはその直径の 2 倍を超えないようにします。貫通コア（金型の反対側まではめ込まれている、または金型の反対側で封止されている）の場合は上記の 2 倍の数値を適用してください。すべてのコアおよび引き磨き処理した型パーツには、突き出しを容易にするために抜き勾配を付けてください。

ボス

ボスとは、最終的には部品の取り付けや固定に使用するための、部品基準面から突出するように作られた部分のことです。ボスの設計は主としてそのボスが部品の中でどのような役目を果たすかによって決まります。圧入やセルフタッピングねじ、および超音波インサートには穴付きボスを使用しますが、これらはいずれもボスの付いた壁面に応力を及ぼします。

一般的なガイドラインとして、外観的な要求を超える構造的な懸念がある場合を除いて、ボスの外径を穴内径の 2 倍とし、ボスの根元の壁面肉厚が部品壁面肉厚の 60% を超えないようにします。これらのガイドラインを図 85 に示します。

ボスに余分な力が加わることにより、その力がボスから基準面に伝わる場合があります。このため、ボスの根元には肉厚の少なくとも 25% 以上の曲率半径を与えて十分な強度を確保するとともに応力集中を防ぐ必要があります。ボスにさらに強度を与えるには、ボス周りをガセットプレートで支持するか、または正しく設計されたリブで最寄の壁面へ接続します。ボスはリブの場合と同様に設計してください。部品表面のひけ、部品内部のボイド発生を防止するために厚肉部分は避けてください。

図 85：ボス設計 — 一般的ガイドライン

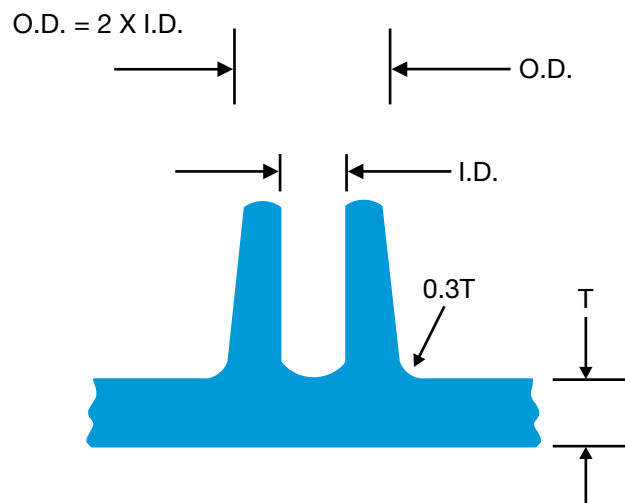


図 86：ビードを使用しているサーモスタットハウジングの例



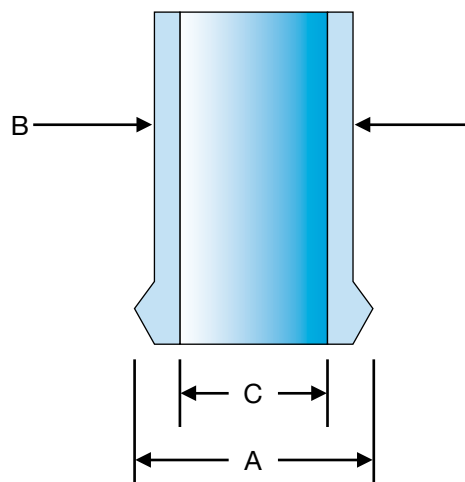
アンダーカット

ある種の設計（向きに依存します）では、金型の一部が部品を突き出す方向に設置されることがあります。このような構造物はアンダーカットと呼ばれ、特殊な金型構成を必要とします（スライドやカムを必要とすることがあり、あるいは射出の前に移動するなど）。場合によっては成形する材料自体が非常に柔軟であるために、アンダーカットによって損傷を受けることなしに部品を突き出せることもあります。

例えば、図 86 に示す代表的な自動車用サーモスタットハウジングは、水漏れしないホース接続を可能にするためにビードを備えています。ホース接続部の表面を滑らかにするために、設計者は金型のパーティング面がこの領域と重ならないよう設計します。その結果として各ビード部がアンダーカットになります。

コアを先に引き抜くことができアンダーカット比が 8 以下である場合には、アンダーカットがあってもある種の条件下では部品を突き出すことが可能です。

図 87：アンダーカットの図



$$\text{アンダーカット比 (R)} = \frac{100 (\text{ビード直径 (A)} - \text{チューブ外径 (B)})}{\text{チューブ内径 (C)}}$$

スライドコアなしで部品を成形する必要がある場合、および計算されたアンダーカット比が 8 を超える場合には、設計を修正する必要があります。可能な修正法のひとつは、チューブの内径側にテーパを付けてビードの下の方の壁面肉厚を実質的に減らすことです。チューブ内径が 25 mm 未満である場合は、ビードの幾何形状を修正してアンダーカット比を 8 またはそれ以下にする必要があります。

この方法を成功させるためには、部品がまだ熱く柔軟性が低下する前に金型から取り出さなければなりません。

溶接

アモデル樹脂を使用して製造した部品は、ホットプレート、振動、スピン、超音波などの溶接手段を用いて簡単に接合することができます。

このセクションではそれぞれの溶接法を説明するとともに、アモデル AS-1133 HS 樹脂を用いて良好な溶接部を得るための機器や条件についても説明します。これらの条件は、実際の応用での溶接条件を決定する上で有用なスターティングポイントとなるものです。AS-1133 HS 以外のアモデルグレードを使用する場合は、ここで説明する加工条件をもとにして更に微調整が必要となります。場合によっては、溶接条件への感度やサンプルの幾何形状、水分含量などの追加情報を提供します。

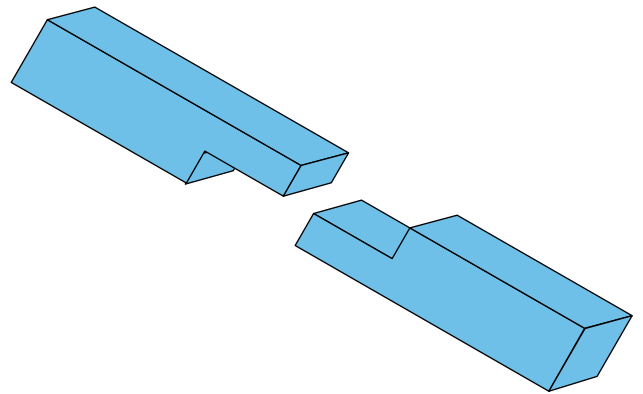
アモデル樹脂は水分を吸収する性質があるため、3段階の異なる水分レベル（0%、1.8%、3.8%）の試験片を使ってテストを行いました。これらの水分含量は、アモデル AS-1133 HS 樹脂で成形した部品が、相対湿度レベル 0%、50%、100% の空気雰囲気中で平衡に達したときの水分含量として選択したものです。結果の検討を簡単にするため、絶乾状態の試験片を単に乾燥、水分含量 1.8% の試験片を標準、水分含量 3.8% の試験片を飽和と呼ぶことにします。

結果を先に要約すると、このセクションで説明するすべての溶接方法を用いて、実用性のある溶接が可能であることが分かりました。超音波溶着では、強固な接合には近接場エネルギーの応用が必要です。水分の吸収は一般的には溶接に影響を与えませんが、最良の結果を得るためには水分含量が標準（1.8%）またはそれ以下のサンプルを使用するのが望ましいといえます。

ホットプレート溶接

ホットプレート溶接では、まず熱可塑性樹脂のサンプルを加熱したエレメントへ押し付けて溶接部表面を融かし、エレメントから取り外したサンプル同士を圧力をかけて相互に押し付けます。この溶接法は他の方法と比較してサイクルタイムが長くなりますが、非常に大きな面積を持つ部品の溶接に適用できるのが特徴です。十分な注意を払ってアモデル樹脂にこの方法を適用すれば、強固で気密性に優れた接合体を得ることができます。

図 88：ホットプレート溶接の接合部設計



ここで使用したホットプレート溶接機は Bielomatic HV 4806 型（Leuze GMBH 1986 年製造）です。試験片は長さ 102 mm、幅 25 mm、厚み 6 mm の棒材です。溶接機は、公称値 13 x 25 mm の重ねせん断溶接ができるようにセットアップしました。溶接部位形状を図 88 に示します。

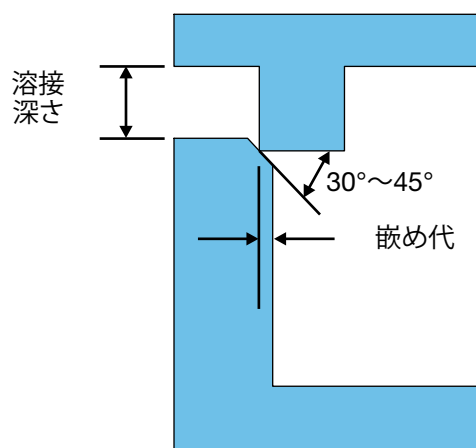
ホットプレート温度を 330°C、型締め力を 207 KPa としたときに最高の結果が得られました。試験サンプルの最適加熱時間は 40 秒、ホールド時間は 20 秒でした。生成した接合部の強度は、材料自体の強度とほぼ同等でした（実際、機械的試験に供した試験片の大部分は、溶接部位以外の部分で破壊が起こりました）。

シリコン離型剤を塗布してホットプレートが熱平衡に達するのを待ってからでなければ、試験用薄板がホットプレートに固着してしまうという現象が時々起こりました。しかし試験結果では、離型剤を使用しても溶接強度の劣化は見られませんでした。乾燥（0%）および標準（1.8%）レベルの吸水では、溶接強度に顕著な影響は与えませんでした。飽和（3.8%）条件では溶接強度の低下が観測されました。

振動溶接

振動溶接では、摩擦を利用して接合部に熱を発生させます。組み立てる部品の一方を静止させておき、他方の部品を約 0.8~1.5 mm 程度の振幅で直線的に 100~400 Hz の周波数で振動させます。振動溶接が可能なのは平坦な部品に限られますが、比較的サイクルタイムが短く設備コストが低いという利点があります。

図 89：接合部の重ねせん断構造



ここで説明する実験には Vinton Hydroweld 振動溶接機を使用しますが、この機械は公称周波数 240 Hz で動作します。使用した試験片は長さ 102 mm、幅 25 mm、厚さ 6 mm のサイズで、図 89 に示す 25 x 13 mm の重ねせん断構成で溶接を行いました。

この方法は非常に効率が良く、母材と同じ強度を簡単に得ることができます。この方法は溶接の条件にはそれほど敏感ではなく、わずか 0.60 秒の溶接時間、2.20 MPa の低い圧力で良好な結果が得られます。また、標準（1.8%）量の水分を含む試験片を用いたときに最も良い溶接結果が得られました。

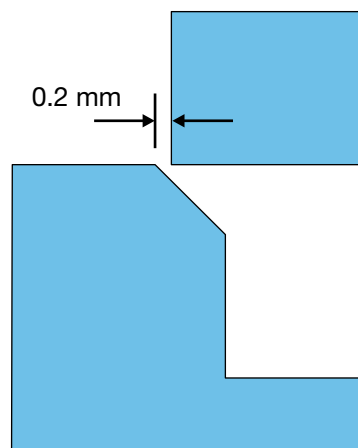
スピン溶接

スピン溶接は、摩擦熱を利用してふたつの円筒状または球状部品を接合させる方法です。一方の部品を巣箱状の治具で固定しておき、接合する他方の部品を固定側に接触させながら急速に回転させます。界面が摩擦して温度が上昇し、材料の熔融が起こります。回転が停止した後、部品を圧力で相互に押し付けながら温度が下がるのを待ちます。当然ながら、この溶接方法を適用できるのは接合部が円形形状を持つ部品に限られます。スピン溶接で得られる利点のひとつは、他の技術と比較して接合部の材料がより良く分散することです。これにより気密封止が得られ、接合部の幾何形状が要求する許容差を小さくすることが可能になります。

アモデル PPA をスピン溶接で接合させる場合は、せん断接合（図 90 参照）として知られている設計を取り入れる必要があります。また接合の要件によっては、フラッシュトラップと呼ばれる細かな細工を取り入れて、局部的に発生する溶けた材料の流れを部品の一方の面に流す流路を確保する必要があります。

ここで説明するスピン溶接に使用した装置は Mechasonic KLN Omega モデル SPN-063 です。この溶接技術で重要な役割を持つパラメータは通常、角速度（毎分の回転数）、法線方向の力、および溶接時間です。

図 90：せん断接合構成



実験に使用した機械が慣性力を利用するタイプであったため、サンプルを回転させるために利用できるエネルギーはフライホイールに蓄積されているエネルギーだけでした。したがって、速度自体を調節するのではなく、フライホイールに蓄積されるエネルギーをコントロールする必要がありました。より新しいタイプのスピン溶接機械では多くの場合、速度、力、時間、さらに装置によっては角度位置の調節も可能です。

スピン溶接試験には、射出成形で作成した締めリジョイント設計のカップ型試験片を用いました。この方法で得られた溶接は非常に優れた強度を示しました。

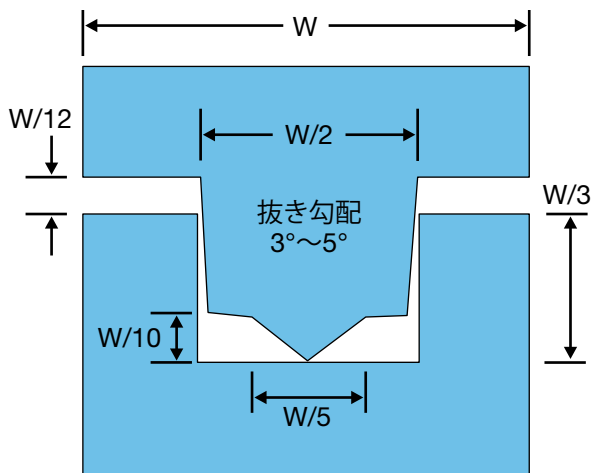
設定できる溶接条件は使用する機械に固有であるため、これらの条件を説明しても一般的な条件設定のスターティングポイントとしてはあまり役立ちません。観測された重要な事実として、アプセット圧と角速度を上げていくとある値で溶接強度が最大値を示し、それよりも更に圧力または速度のいずれかを増大させると溶接強度が低下しました。これらのパラメータの値は部品の幾何形状に強く依存するものであるため、ここでは説明しません。観測された現象は次のように説明できます。アプセット圧が過大な状態で溶接を行うと、回転運動があまりに急激に停止されるために十分な量のポリマーが熔融して流動することが阻害され、その結果として良好な接合部が得られなくなります。その反対の極端な例として、非常に大きな角速度と低いアプセット圧を使用した場合には、実質的に上部の部品が下の部品の上に座ってしまい、圧力がかからずに単に自由回転を行うことになるため、締め嵌めに押し付けられなくなります。良好な接合を得るためには、熔融と押し付けの両方が適正に起こる溶接条件を見つけ出さなければなりません。

水分含量は溶接強度に顕著な影響を与えませんでした。

超音波溶着

熱可塑性樹脂の超音波溶着では、高い周波数（10～40 KHz）の機械振動を一方の部品を通して接合部界面に伝達し、接合する他方の部品を静止状態に保ちます。

図 91：エネルギーを一方向へ集中する代表的な接合部の構成



力を加えることと摩擦を組み合わせ、接合部界面の温度が材料の融点に達するまで上昇させます。超音波エネルギー入力を遮断した後も接合面に法線方向の力を維持して機械的接合（溶接）を完成させます。

超音波溶着の利点は、非常に高速な処理が可能であるため大量生産に適していることです。ばらつきの無い高品質溶接が得られ、厳密に許容差管理された部品を使用すれば気密封止を実現することも可能です。

この方法では超音波溶着装置に加えて、目的とするアッセンブリー用にカスタマイズしたホーンを使用してその部品構成に超音波エネルギーを集中させる必要があります。

アモデル材料に適用する場合は、エネルギーを集中できるように接合部を設計して、接合部で局所的な溶融が起こるように考慮してください。接合部の代表的な設計例を図 91 に示します。せん断接合設計を使用する場合の嵌め代としては少なくとも 0.2 mm を推奨します。

ここでの試験では、マイクロプロセッサで制御された Branson Model 910 M 超音波溶着装置を使用しています。このユニットはサンプルに与える超音波エネルギーの量を調節できる機能を持っています。試験では、ブースターからの出力を近接場と遠距離場ホーンに供給しました。使用したサンプルは、スピン溶接の評価に使用したものに類似した、射出成形したカップ型試験片です。アルミニウム製治具で部品を所定の位置に保持し、構成としては突合せ溶接方式を用いました。

近接場ホーン（ホーンから溶接部までの距離が 6 mm 以下と定義）を使用した溶接では優れた結果が得られました。遠距離場ホーンで得られた溶接は脆弱であり（近接場ホーンで得られた強度の 1/3）、実用性はありませんでした。実用的な溶接強度が得られたのは、溶接エネルギー 750J、圧力 4.3 MPa の条件下でした。

接着剤による接合

アモデル A-1133 HS 樹脂から射出成形したサンプルを、エポキシ接着剤とウレタン接着剤を使用して接合させました。どちらの接着剤も Lord Corporation の製品です。エポキシ接着剤は商品名 Lord® 305-1/305-2 として市販されている 2 液混合タイプの接着剤であり、ウレタン接着剤は Lord® 7500 A/C として市販されている 2 液混合タイプです。

Lord® 305-1/305-2 用としてサンプルを調製するため、120°C – 30 分間のキュアサイクルを実施し、それに続いて 72 時間の室温コンディショニングを行いました。Lord® 7500 A/C 接着剤では 90°C – 10 分のキュアサイクルと、それに続く 72 時間の室温コンディショニングステップを実施しました。

両方の接着剤で得られた接着強度を、低温、室温、高温の 3 段階でテストしました。また、湿度存在下でのエージング効果を評価するため、試験片を温度 38°C、相対湿度 100% の環境に 14 日間置いてコンディショニングしました。試験片のいくつかはコンディショニング直後に試験を実施し、それ以外の試験片はコンディショニング後さらに 24 時間経過してから試験を行いました。

衝撃性能の評価には側面衝突試験機（GM 仕様 #9751P 準拠）を用い、重ねせん断値の測定には Instron 試験機を用いて引張り速度を 13 mm/分（ASTM D1002 準拠）としました。

試験結果を図 92 および図 93 に示します。一般に、エポキシ接着剤の方がウレタンよりもやや優れた性能を示しています。アモデル樹脂へのアクリル系接着剤の使用はお奨めできません。

図 92：重ねせん断接着強度

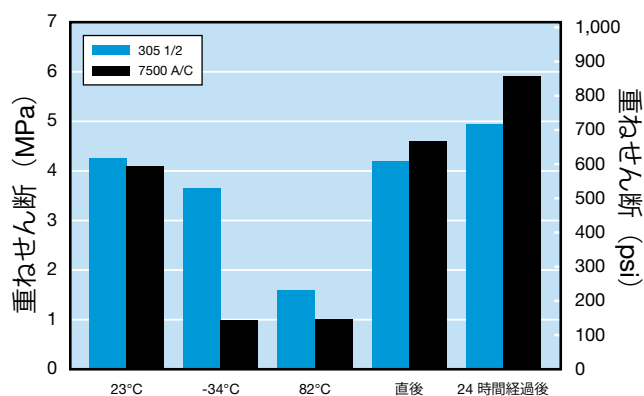


図 93：側面衝撃接着強度

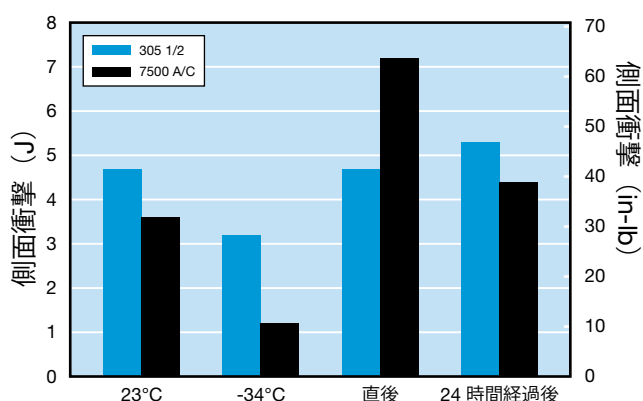


表 49：適合する自動車用プライマー

メーカー	プライマー	説明
BASF	U04KD004	溶剤系、軟質
	U04AD041	溶剤系、硬質
	U36AD001	水系
PPG	RPP9870	溶剤系、高固形分
	AHAP9470R	溶剤系、一度塗り
Red Spot	AE146	溶剤系、ラッカー
Siebert-Oxidermo	UBP9604	溶剤系、高固形分
	BP2024	溶剤系
Sherwin-Williams	E75BC2301	溶剤系
	E75AC6	溶剤系

コーティングと表面仕上げ

真空蒸着

真空蒸着は、真空チャンバー内で金属を蒸発させてその蒸気をチャンバー内に置かれた基材表面上に凝縮させる操作です。この目的でほとんどの工業的用途において使用される金属はアルミニウムです。通常、エンドユーザー要件が単に装飾を目的とするものである場合は、基材に有機二層コーティング（下塗りと上塗り）を施し、金属層はこの二層の中間に蒸着させます。下塗りの主たる機能は、成形プラスチック部品の表面を滑らかに整えて、金属層が最良の光沢を出せるようにすることです。下塗りは、金属層の基材への密着性を良くするという副次的な機能も果たします。基材が真空中で脱ガスする性質を持つ場合には、この下塗りがバリア層として働きます。上塗りの機能は、金属層を物理的な損傷や、酸化または化学的劣化から保護することにあります。

アモデル樹脂に適合性のあるベースコートとしては、例えば Pearl Paints の #VB-4315、#VB-4774、#VB-4836-1 を挙げることができます (<http://www.pearlpaints.com>)。アモデル樹脂に適合するトップコートとしては、同じく Pearl Paints の #VT 4316-2 などがあります。

真空蒸着プロセスでは金属材料を蒸発させる必要があるため、真空チャンバー内が高温になると考えなければなりません。したがって、部品にコーティングを施す速度は、基材の熱的特性に左右されます。この観点から、高い荷重たわみ温度を特徴とするアモデル樹脂は、金属蒸着が必須である用途において優れた選択肢となる素材であり、アモデルを使用することでより迅速なサイクルタイムを実現できる可能性があります。

表 50：レーザーマーキング装置メーカー

会社名	Web サイト
Videojet Systems International, Inc.	www.videojet.com
Panasonic Electric Works Corporation	www.panasonic-electric-works.co.uk
ID Technology	www.idtechnology.com

表 51：インクジェット印刷装置メーカー

会社名	Web サイト
Videojet Systems International, Inc.	www.videojet.com
ID Technology	www.idtechnology.com

レーザーマーキング

一般市販されているレーザーマーキングシステムを用いて、アモデル樹脂表面に良好なコントラストと耐久性を持つマーキングを施すことができます。使用するレーザーシステムの波長と強度に応じて、表面の退色によるマーキングから刻印に至る、様々なタイプのマーキングが可能です。

すべてのアモデル PPA 樹脂のレーザーマーキングに適用できる単一のパラメータセットというものはないので、それぞれの応用と部品に応じて動作パラメータを調節する必要があります。

アモデル PPA のマーキングに適用可能な装置を製造しているメーカー一覧を表 50 に示します。

インクジェット印刷

インクジェット印刷を使用すれば、アモデル PPA 樹脂基材の表面に任意の色で見やすいマーキングを施すことができます。インクジェットシステムで作成したマーキングの耐久性は、その部品が曝される環境要求、およびマーキングに使用したインクのタイプに依存します。多くの場合、十分に満足な耐久性を持つマーキングを施すことが可能です。

使用するインクのタイプやマーキング速度、マーキングの大きさによって、必要になる装置もさまざまです。様々なタイプの装置とインクが市販されていますが、その中の代表として 2 社を表 51 に示します。

塗装

アモデル PPA 樹脂の数種類のグレードについては、各種自動車塗装システムとの適合性が評価されています。ガラス繊維やミネラル、またその両方で強化した複合材料についても評価が行われています。

すべてのプラスチック基材と同様に、結果を左右するのはプライマーの組み合わせです。試験片をまずイソプロピルアルコールでクリーニングしてからプライマーをコーティングし、メーカーの指定に従ってキュアリングを行います。こうして調製された薄板試料は、コーティング処理直後、および 96 時間の水／霧／湿度曝露コンディショニング（GM4465P 仕様）を実施した後の両方について、テープ密着性（GM9071P、方法 A）、クロスハッチ密着性（GM9071P、方法 B）、およびグラベロメータチップ耐性（GM9508P、SAEJ400）試験を実施しました。すべての試験要件を満たすことが確認され、かつ自動車塗装のコーティングに要求される適切な性能を持つプライマーの一覧を表 49 に示します。

オーバーモールド

Bryant Rubber Corporation によって開発されたプロセスにより、アモデル材料とソフトタッチシリコンゴムを使用したオーバーモールドが可能となりました。シリコンゴムは、密閉性のある表面やクリック感のあるグリップ、音響／振動減衰効果のある細工を作り込むための理想的な材料です。シリコンゴムを利用したオーバーモールド自体は新しいアイデアではありませんが、プライマーや下塗りプロセスを工夫しても剛性基材への密着性に問題があるため、具体的な設計には困難が伴いました。しかし、Bryant 社が開発した SPAPS™ 技術（Select Primerless Adhesion Polymer System）を使用することで、従来よりもはるかに優れた密着性と剥離強度が実現できるようになりました。実際、シリコンゴムの凝集破壊は SPAPS™ 技術を使用したプロセスに特有なものです。

高温における優れた特性を特徴とするアモデル樹脂は、SPAPS™ シリコンゴムとの併用に特に適した材料です。この特性によりシリコンキュアプロセスのサイクルタイム短縮が可能となり、全体としての経済性が向上します。シリコン系の材料はアモデル樹脂の長期的熱安定性と非常に良く適合し、他のエラストマー材料よりもむしろ優れた適合性を示すため、過酷な環境下に置かれても長期間性能を維持します。

SPAPS™ シリコンゴムは、他の一般的なシリコンゴムの持つ特性もすべて備えています。本来は透明ですが成形プロセスで液体着色剤を使用することにより着色が可能であり、長時間紫外線に曝されても優れた耐変色性を示します。SPAPS™ シリコンゴムは、デュロメータを用いるショア A 硬度スケールでは 10 から 85 にランクされています。耐薬品性は他のシリコンゴム材料とほぼ同等であり、本質的に化学反応性に乏しいため、最終製品は NSF、FDA、および U.S.P. などの認証を取得することも可能です。

オーバーモールドプロセスについて更に詳しくは、Bryant Rubber Corporation の Web ページ（<http://www.bryantrubber.com/>）をご覧ください。

G

GR PPA の引張特性と温度 21

P

PA 6.6 との寸法変化比較 41

U

UL 94 準坲垂直燃焼性 51

UL 746A 短期特性 54

UL 相対温度指数 57

あ

アイゾット（片持ち梁）衝撃 28

アイゾット衝撃特性の比較 28

圧縮強さと圧縮弾性率 27

アッセンブリー設計 73

アモデル樹脂特性表 4

アモデル樹脂の UL 746A 特性 57

アモデル樹脂の荷重たわみ温度 43

アモデル樹脂の疲労強さ 37

アモデル ポリフタルアミド（PPA）樹脂 1

アンダーカット 80

い

一体成形ねじ 76

インクジェット印刷 85

引張クリープ 32

引張クリープ破断 34

引張特性 19

引張特性の比較 20

お

オーバーモールド 85

応力計算 67

応力集中 71

か

化学 1

化学適合性 62

荷重たわみ温度 — HDT 42

ガンマ線照射 62

き

機械特性 19

機構設計 64

吸水とガラス転移温度（ T_g ） 38

吸水の意味 38

吸水量 39

強化繊維の配向に関する考察 67

許容応力の計算 — クリープ破断 70

許容嵌め代の計算 73

く

クリープ 31

クリープによるボルトのゆるみ 72

グローワイヤー試験 50

け

結晶性 2

煙濃度試験（NBS） 51

こ

コーティングと表面仕上げ 84

高温領域における A-1000 GR グレードの

引張特性 22

高温領域における曲げ特性 24

高電圧アーク着火性 56

高電圧アークトラッキング速度（HVTR） 55

高電圧低電流耐アーク性 — ASTM D495 55

高電流アーク着火性（HAI） 56

古典的な応力-ひずみ方程式の使用 67

し

試験方法 19, 23

持続的な荷重を考慮した設計 69

射出成形に適合した設計 78

主要特性 6

衝撃強さ 27

真空蒸着 84

振動溶接 81

す

垂直片持ち梁方程式 76

垂直燃焼試験 51, 52

水分が強度と剛性に及ぼす影響 39

水分コンディショニングの加速方法 6

水分による寸法変化 40

水分の影響 3, 38

水平燃焼試験 51

スナップフィットを使用する設計 76

スピン溶接 82

せ

製品データ 4

製品の選択 5

絶縁破壊電圧と絶縁耐力 — ASTM D149 53

設計情報 63

設計における計算の限界点 67

接着剤による接合 83

セルフタッピングねじ 74

せん断特性 26

そ

相対温度指数 (UL) 48

た

耐環境性 58
体積抵抗率 — ASTM D257 53
耐トラッキング指数 (CTI) — ASTM D3638 55
耐疲労性 36
耐薬品性 58
たわみ計算 67, 69
短期的機械特性 19
断面肉厚の変更 68

ち

超音波溶着 82
長期的機械特性 31

て

テーパー付き片持ち梁方程式 77
電気特性 53

と

等時性応力-ひずみ曲線 34
同等の部品剛性を実現する設計 68
特性データ 6
塗装 85

に

肉厚 78
肉厚の変化 78
肉盗み 79
二次加工 81

ぬ

抜き勾配 78

ね

ねじ込みインサート 75
熱安定性 47
熱応力 71
熱重量分析 (TGA) 47
熱線膨張係数 43
熱伝導率 45
熱特性 42
熱老化 47
燃焼特性 50

は

嵌め代と圧入 73

ひ

引抜き力の計算 75
比熱 46
表記方法 5
表面抵抗率 — ASTM D257 53

ほ

ポアソン比 30
ボス 79
ホットプレート溶接 81
ホットワイヤーイグニッション (HWI) —
ASTM D3874 56

ま

曲げクリープ 35
曲げ特性 23
曲げ特性の比較 24

め

メカニカルファスナー 74

ゆ

誘電正接 — ASTM D150 54
誘電率 — ASTM D150 54

よ

溶接 81

ら

落錘衝撃特性 30

り

リブ 79
リブを追加して剛性を保つ 68

れ

レーザーマーキング 85



特殊ポリマー

本社

SpecialtyPolymers.EMEA@solvay.com

Viale Lombardia, 20
20021 Bollate (MI), Italy

米州本部

SpecialtyPolymers.Americas@solvay.com

4500 McGinnis Ferry Road
Alpharetta, GA 30005, USA

アジア本部

SpecialtyPolymers.Asia@solvay.com

No.3966 Jindu Road
Shanghai, China 201108

日本事務所

ソルベイスペシャルティポリマーズジャパン株式会社

Solvay Specialty Polymers Japan K.K.

〒105-6207 東京都港区愛宕二丁目5番1号

愛宕グリーンヒルズMORIタワー7階

Tel: +81-3-5425-4320 (大代表)

+81-3-5425-4300 / +81-3-5425-4330 (営業代表)

Fax: +81-3-5425-4321

www.solvay.com

SDS (製品安全データシート) をご希望のお客様は電子メールでご請求いただくか、または弊社の営業担当者へご連絡ください。弊社製品をご使用になられる場合は必ず事前に該当の SDS をお取り寄せの上、ご確認ください。

弊社または関係会社は本製品および関連情報につき、明示または黙示を問わず、いかなる権利を許諾するものでもなく、またそれらの市場適応性および使用適合性を含め、いかなる責任も負いかねます。ソルベイグループの製品が、食用、水処理、医療用、薬用および介護等の用途に用いられる場合、かかる使用が関係法令もしくは国内外の基準またはソルベイグループの推奨に基づいて制限または禁止される可能性があることにご注意ください。埋め込み型医療機器としてお使いいただけるのは、Solviva® の生体材料群として指定された製品だけです。本情報および製品の使用につきましては、あくまでもお客様ご自身の判断と責任において、かかる情報および製品が特定の用途に適しており、関係法令に適合していることをご確認頂き、使用方法や知的財産権の侵害のリスクなどをご検討のうえ、ご使用くださるようお願い申し上げます。本情報および製品は専門家の慎重な判断および責任において利用すべきものであり、他の製品や工程と組み合わせて利用することを想定しておりません。本文書は特許権その他の財産権に基づく実施権をお客様に付与するものではありません。本情報はあくまでも標準的な特性を説明したものであり、仕様を述べるものではありません。

すべての商標および登録商標は、ソルベイグループまたは他の該当する所有者に帰属します。

© 2014, Solvay Specialty Polymers. All rights reserved. D 2002 | R 01/2014 | Version 4.7