

小型船舶用熱可塑性樹脂の強度特性

大阪支所 材料研究グループ *小野 正夫、櫻井 昭男、津島 聡(元)
海上安全研究領域 危険物輸送・防災研究グループ 前田 利雄

1. まえがき

近年、環境問題等について関心が高まっていることから、特に小型の船舶を主にリサイクル性の高い熱可塑性樹脂を使用した輸入艇や国内艇等が多く見られるようになってきた。今後さらにこれらの問題が重要視され、環境に配慮した船舶の需要が高まると予想される。しかし、新材料を使用した場合の小型船舶の強度評価は、落下試験によって行われており、評価基準等は未だ十分確立されていないのが現状である。本研究では、日本小型船舶検査機構と共同で熱可塑性樹脂を小型船舶の船殻材料として使用した場合の検査上の留意事項を策定する目的で、静的及び動的な各種材料試験を行い、試験結果を元に各材料の力学的特性を把握し、留意事項等について検討した。

2. 試験材及び試験方法

熱可塑性樹脂の試験材は、表 - 1 に示す 6 種類を用意した。すでに小型船艇に使用されている高密度ポリエチレン(PEB)とポリプロピレン(PPF)については、直接船艇から採取したが、輸入艇等にも使用されている中密度ポリエチレン(PEM)及び低密度ポリエチレン(PEL)については、船艇が用意出来なかったため、当支所でペレットから成形したものをを用いた。成形には東洋精機製作所製の加熱プレス機(MP-WCL)を使用し、ポリプロピレン(PPS)は約 210℃、PEM と PEL については約 160℃ に加熱し、加圧して成形した。成形の際にはペレット以外の添加剤等は加えなかった。但し、船艇から切り出した試験材は、着色してあり、片側表面にエンボス加工等が施してある。試験項目を表 - 2 に示す。静的試験は、引張、圧縮、曲げの各試験を行った。動的試験は、引張疲労、曲げ疲労、衝撃曲げ等の各試験を行った。また、耐環境性に配慮した耐寒試験及び促進暴露試験等も行い、劣化特性を調べた。各試験方

表 - 1 試験材

記号	種 類	材料形態	製造メーカー
PEB	高密度ポリエチレン	製品切出し	M社 提供
PEM	中密度ポリエチレン	支所成形材	三井化学(株) エポリユール SP-4030
PEL	低密度ポリエチレン	支所成形材	日本ポリケム(株) NOVATEC LD
PPF	ポリプロピレン	製品切出し	F社 提供
PPS	ポリプロピレン	支所成形材	出光石油化学(株) PP E-250G

表 - 2 試験方法

項 目	適用基準	試験片形状	試験装置
組成調査	デュロメータ硬さ試験	JIS K7215 平板・厚さ 4-5 mm	デュロメータ
静的試験	引張試験	JIS K7113 ダンベル型・厚さ 約 4 mm 平行部長さ 33 mm 平行部幅 10 mm	テンシロン万能試験機 (東洋ボールドウィン製) UTM-10T
	圧縮試験	BEF法 短冊型・厚さ 4-5 mm スリット 40 mm・幅 15 mm	
	曲げ試験	JIS K7203 短冊型・厚さ 4-5 mm スリット 60 mm・幅 15 mm	
	引張疲労試験	JIS K7118 静的引張試験と同様	
動的試験	曲げ疲労試験	JIS K7119 短冊型・厚さ 約 6 mm スリット 80 mm・幅 35 mm	サーボハイドラリック(島津製) EFH-EG5-10L
	繰返し折り曲げ試験	- 平板・厚さ 4-5 mm	
	落錐3点曲げ試験	JIS K7211 短冊型・厚さ 約 4 mm スリット 60 mm・幅 20 mm	
	耐衝撃試験	アイソット衝撃試験片 幅 3-4 mm・厚さ 12.7 mm 長さ 64 mm・V字切欠き 2.54 mm	
耐寒試験	アイソット衝撃試験	JIS K7110 2号A切欠き試験片 幅 3-4 mm・厚さ 12.7 mm 長さ 64 mm・V字切欠き 2.54 mm	アイソット試験装置
熱老化試験	静的曲げ試験	JIS K7212 静的曲げ試験と同様	ギヤーオープン
定応力環境応力き裂試験	←	JIS K6760 ダンベル型・厚さ 約 3-4 mm 両端幅 15.9 mm 中央部幅 3.18 mm	腐食疲労試験装置
滑り摩擦試験	←	JIS K7218 正方形 10×10 mm	回轉式摩擦試験機
促進暴露試験	アイソット衝撃試験 静的曲げ試験	JIS K7350 短冊型 120×70 mm より 各試験用に切出し	ウェザーメータ

法は JIS に準拠して行った。

3. 試験結果及び考察

3.1 デュロメータ硬さ試験

デュロメータ D 硬さ試験の結果を表 - 3 に示す。HDD 硬度は、PPS が約 73 と最も硬く、PE 系は密度に比例している。ちなみに、水上バイク等の SMC 材の HDD の値は 85~88 程度である¹⁾ことからやや柔軟な材料であることが分かる。

表 - 3 デュロメータ D 硬さ試験結果

試験材	板厚(mm)	密度(g/cm ³)	硬度 HDD
PEB	2.57	0.95	63.5
PEM	3.01	0.94	60.9
PEL	2.94	0.93	55.2
PPF	3.75	0.90	71.0
PPS	2.95	0.89	72.8

3.2 静的引張試験

静的引張試験における応力とひずみの関係の例を図 - 1 に示し、試験後の試験片の様相（ひずみ量約 100 % の時）を図 - 2 に示す。引張強度は図 - 1 に示すような荷重の最大値で求めた。引張弾性率は初期の傾斜より求めた。試験片は最初、荷重の最大値付近で白化部分が現れ、その部分から伸びるような状態になり、見かけのひずみ量が 500 % 程度になってようやく破断した。このように熱可塑性樹脂は粘弾性的な挙動を示すことから、靱性が高く非常に柔軟性を有していることが分かる。各試験片の引張試験の結果を図 - 3 に示す。強度は試験材の硬さと相関関係にあり、PPS が高い値を示した。また、一般的に FRP 船舶に使用される熱硬化性樹脂(不飽和ポリエステル等)と比較すると²⁾、強度は少し低い値となるが、比強度では優れている。

3.3 静的圧縮試験

圧縮試験は BEF 法³⁾を用いて行った。静的圧縮試験の結果を図 - 3 に示す。圧縮試験においても引張試験同様に粘弾性的な挙動を示したが、試験片が柔軟なため、荷重の最大付近で試験片が座屈変形を起こした。圧縮強度は、荷重の最大値より求めた見かけの強度である。圧縮強度が引張強度より低い値を示すのはこのためと考えられる。

3.4 静的曲げ試験

静的曲げ試験の結果を図 - 3 に示す。曲げ強度は荷重の最大値を見かけの強度として求めた。曲げ試験においても他の試験と同様に粘弾性的な挙動を示し、荷重曲線に最大値が見られるが、非常に柔軟で破壊しない。曲げ試験は、たわみ量が 20mm 程度になるまで行った。その際、PPS 材は最大荷重を示した時点で引張側に白化現象が生じたが、他の試験材には変化が見られなかった。また、試験後の試験片は、数秒で元に近い状態に回復した。

3.5 引張疲労試験

引張疲労試験結果を図 - 4 に示す。プラスチック系材料においては一般的に明確な疲労限を示さないことが多いが、今回 10^7 回付近で試験片のほとんどが破断した。破断部は、白化した領域で発生していることから、初期に応力集中の大きい箇所に白化現象が現れ、その箇所を中心に試験片が伸びるようになり、伸びることで断面積の小くなった部分に繰返し荷重が集中し、疲労破断に至ったと考えられる。

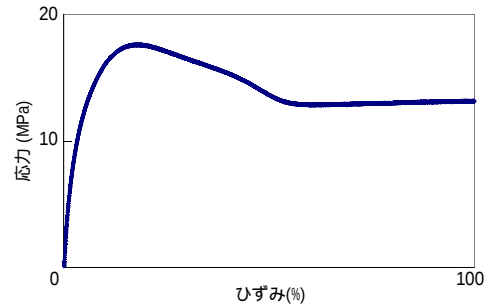


図 - 1 引張試験時の応力とひずみの関係例



図 - 2 引張試験後の試験片の様相

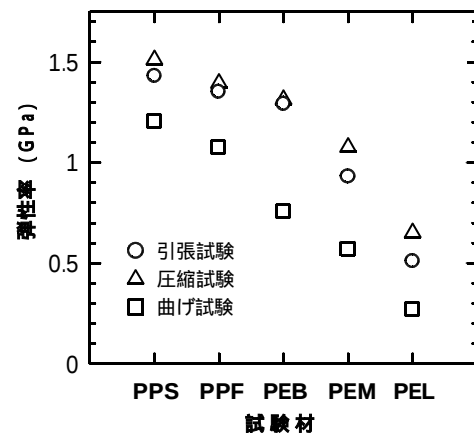
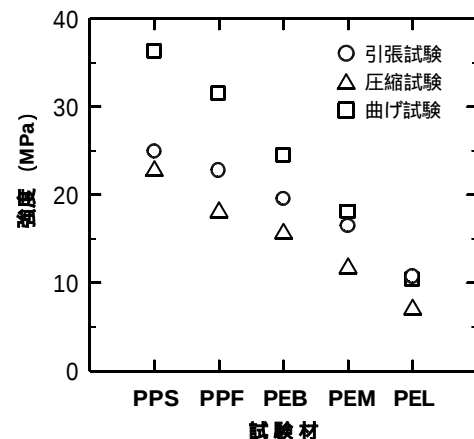


図 - 3 静的試験結果

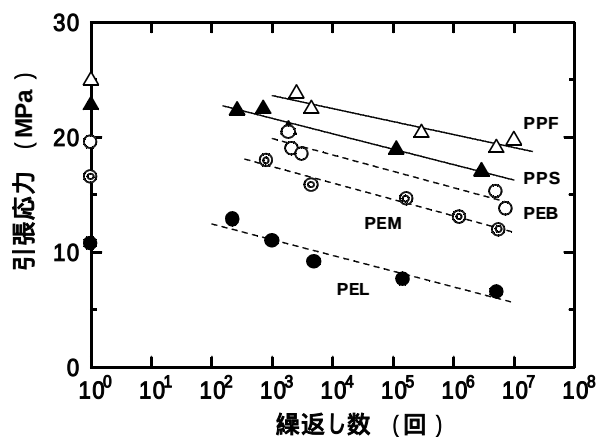


図 - 4 引張疲労試験結果

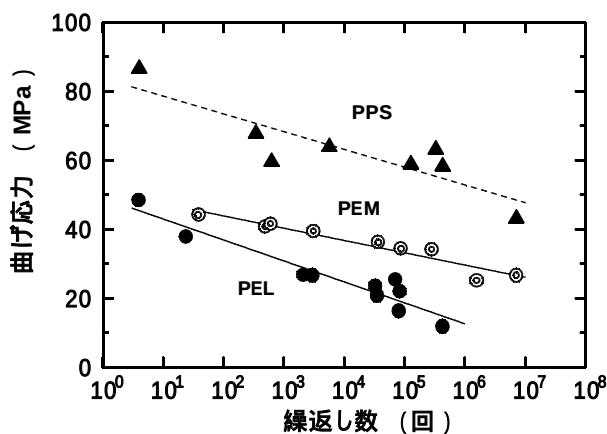


図 - 5 曲げ疲労試験結果

各試験片とも繰返し数 10^3 回程度以降に疲労の影響が現れる。また、繰返し数に対する疲労曲線の傾斜は緩やかで、各試験材とも同様な傾向を示す。

3.6 曲げ疲労試験

曲げ疲労試験については、熱可塑性樹脂が非常に柔軟な材料であるため、疲労試験機のコントロール精度を考えた場合に弾性率、試験片の幅及び厚さを考慮する必要がでてきた。このため、曲げ疲労試験は当支所で板厚の変更が可能な材料のみを対象にし、弾性率を上げる方法として、1 の水中で行った。また、曲げ疲労破壊の判定は、1 ストロークの最大荷重が所定荷重に達しないとき、もしくはたわみ量が 50 mm を超えたときとした。曲げ疲労試験の結果を図 - 5 に示す。すべての試験片は破壊しなかったが、引張側に白化部分は見られた。応力は引張疲労試験の結果より高くなっているが、これは温度条件による影響である。疲労曲線から曲げ疲労の傾向をみた場合、PEM は引張疲労と同様な疲労傾向を示すが、PEL 及び PPS についてはやや低下率が大きく、温度の影響が現れたものと考えている。

3.7 繰返し折り曲げ試験

折り畳み式プレジャーボートの仕組みを参考にし、型削り盤の往復運動を利用した片振り ($45^\circ \sim 90^\circ$) 及び両振り ($90^\circ \sim 135^\circ$) 繰返し折り曲げ試験を行った。繰返し速度は 20 回/min で繰返し数を 2 万回とした。試験結果を表 - 4 に示す。特に PEL は試験途中で破断したが、PP 系等は白化する程度で破断には至らなかった。PEL 以外の折り曲げ耐久性については、十分であると考えられる。

3.8 衝撃 3 点曲げ試験

衝撃 3 点曲げ試験の結果を図 - 6 に示す。衝撃試

表 - 4 繰返し折り曲げ試験結果

試験材	片振り			両振り	
	45°	67.5°	90°	90°	135°
PEB	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
PEM	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
PEL	異常なし	破断/4000回	ひび/10000回	破断/2400回	破断/1800回
PPF	異常なし	異常なし	両端部白化	異常なし	異常なし
PPF溝付	-	-	溝部分白化	溝部分白化	溝部分白化
PPS	異常なし	異常なし	両端部白化	固定側白化	固定側白化

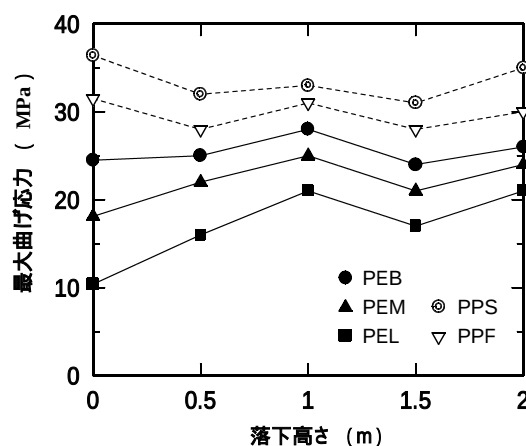


図 - 6 衝撃 3 点曲げ試験結果

験においても静的試験と同様に試験材は非常に柔軟で破壊せず、粘弾的な挙動を示す。衝撃曲げ強度は荷重の最大値で求めた見かけの強度である。静的曲げ試験結果と比較すると、衝撃曲げ強度は PEM 及び PEL が 1.2 倍以上の高い値を示したが、それ以外の試験材では著しい違いはみられない。衝撃曲げ試験では、たわみ量が約 30mm で停止するように緩衝材を配置してあり、試験後の試験片は折れたような状態になるが、数秒後にはたわみ量が 5mm 程度にまで回復した。耐衝撃性については、衝撃吸収力が高く優れていると考えられる。

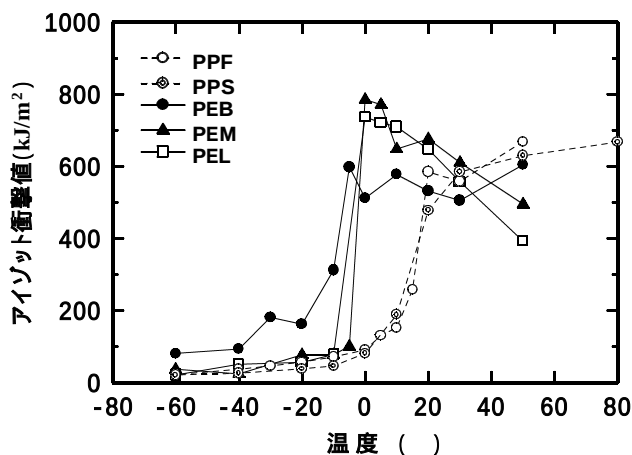


図 - 7 耐寒試験時のアイゾット衝撃試験結果

3.9 耐寒性試験

耐寒性試験は、-60~50 の温度環境においてアイゾット衝撃試験を行った。試験結果を図 - 7 に示す。PE 系の材料は、試験温度が低くなるに従い衝撃値は増加するが、PP 系の材料は衝撃値の変化が小さい。試験片に切欠きを設けた場合には、各試験片ともその切欠きの先端部分よりき裂が発生し進展する。温度領域が 20~50 の場合、各試験片ともき裂が発生するが、延性的破壊となり分断には至らなかった。常温付近で使用する場合、耐衝撃性が優れていることが分かる。しかし、10 以下の温度の低い領域では脆性的破壊となり、分断破壊となる。脆性的破壊領域でのアイゾット衝撃値は、延性的破壊領域での値と比較し 1/10 以下と低い値を示す。延性的破壊領域から脆性的破壊領域に移行する遷移温度領域は、PP 系で 10 付近、PE 系が -10~-5 付近であることが分かった。破壊様相の一例 (PPF) を図 - 8 に示す。破壊様相及び破面の観察からも延性的破壊と脆性的破壊の違いが分かる。

3.10 熱老化試験

PE 系は、50 で 0~100 日間加熱した。その結果、重量の変化はほとんどみられなかった。PP 系の場合は、120 で 0~500 h 加熱した。その結果、PPF の重量が、500 h で約 0.5 % 低下した。熱老化を加えた後の静的曲げ試験の結果を図 - 9 (a) (b) に示す。各試験材とも加熱時間に対する曲げ強度の変化が小さいことから、今回の加熱条件における熱老化の影響はほとんどないものと考えられる。

3.11 定応力環境応力き裂試験

各試験片に対する初期応力は、6.86~12.74MPa

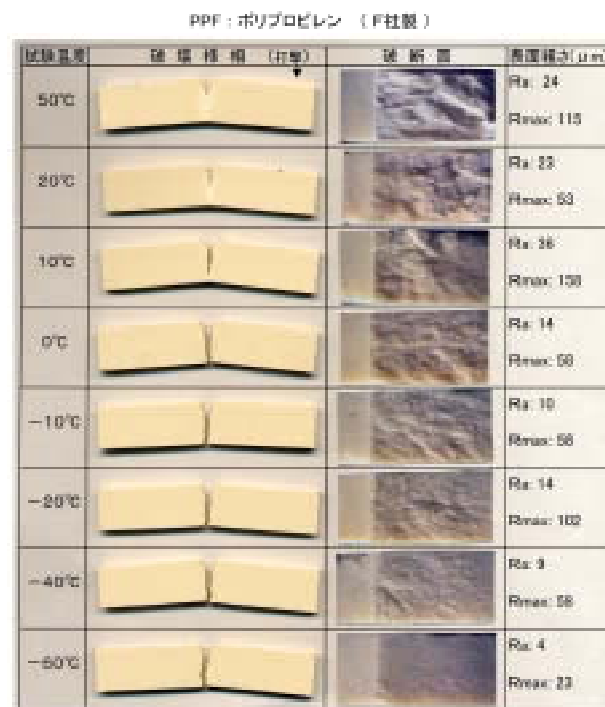
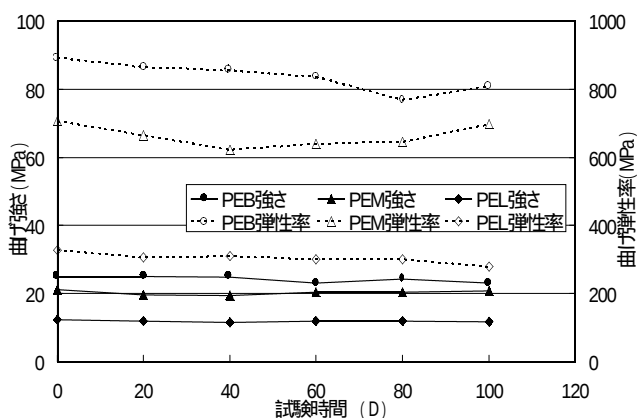
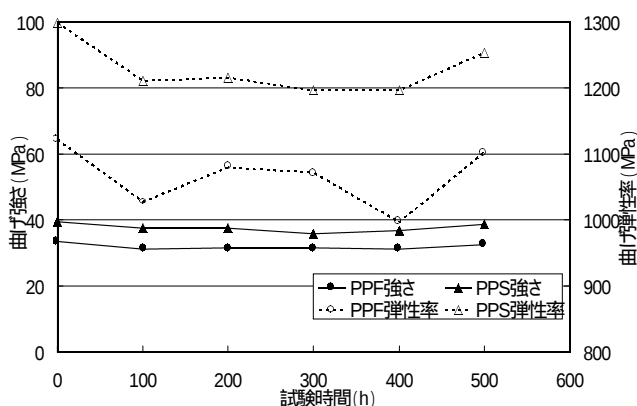


図 - 8 アイゾット衝撃試験後の破壊様相例



(a) ポリエチレン系



(b) ポリプロピレン系

図 - 9 曲げ強度経時変化

とし、50℃の恒温水槽中で行った。初期応力に対し伸び率がほぼ一定に近い状態になる時点で負荷荷重を追加して行った。定応力環境応力き裂試験後の試験片の様相を図 - 10 に示す。最終的に試験片に荷重を追加すると伸びが急激に増加するが、PEL 以外の試験材は破断には至らなかった。PEL は、初期応力 6.68MPa、経過時間 10 h 程度で破断した。このときの伸び量は 2 mm と比較的小さかった。PEL 以外の試験材については、この条件下での定応力環境応力き裂は発生しないと考えられるが、PPS のように伸び量が大きく、注意が必要である。

3.12 促進暴露試験

促進暴露試験については、屋外暴露の1年に相当するようにサンシャインカーボンアークの照射時間を500 hとした。促進暴露した試験片については、目視観察、硬度試験、静的曲げ試験及びアイゾット衝撃試験を行った。促進暴露を受けた試験片の表面を目視観察した結果、PPS 材は図 - 11 に示すように照射時間が200hで試験片の照射面に葉脈状のき裂が現れ始め、300hではその間隔が1 mm以下となった。500 h後のき裂の深さを超音波探傷器で測定すると、その深さは0.2~0.4 mmであった。しかし、その他の試験片については、500 hでも照射表面がガラつく程度でほとんど変化がみられなかった。促進暴露後の試験片の硬度は、やや低下する傾向を示した。特に PPS 材は他の試験片より低い値を示す。その理由として促進暴露を受けることによって表面が劣化し微少なき裂が発生したためと考えられる。促進暴露後の静的曲げ試験の結果を図 - 12 に示す。各材料の曲げ強度は、暴露試験時間に対しやや低下する傾向を示すが、その低下率は10 %程度と小さい。しかし、PPS 材については強度の低下率が25 %と他の試験材より低い値を示した。その理由として、葉脈状亀裂の影響が大きいと考えられる。このことは、着色した PPF 材にその影響がほとんど現れないことから分かる。促進暴露後の試験片に対し、-10~10℃の温度環境下でアイゾット衝撃試験を実施した結果、図 - 13 のようになった。促進暴露することによって着色等を施した試験材とそうでない試験材は、0℃以上の条件でのアイゾット衝撃値の低下率に差が現れた。特に PEM、PEL 材は、暴露時間100~200 hで著しく低下した。このことから屋外で使用する場合にはその対策等を考慮

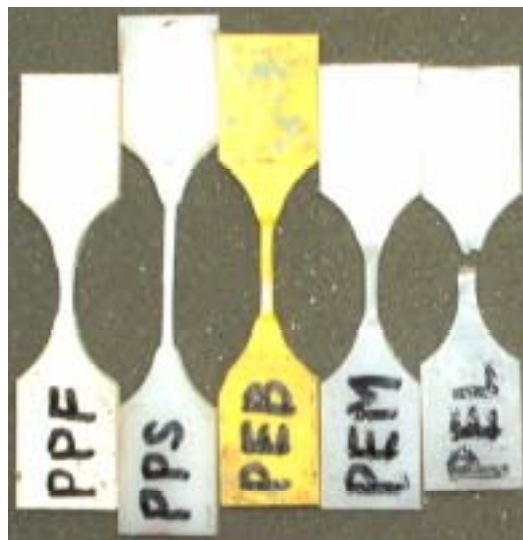


図 - 10 定応力環境応力き裂試験後の試験片様相



図 - 11 促進暴露後の試験片様相例

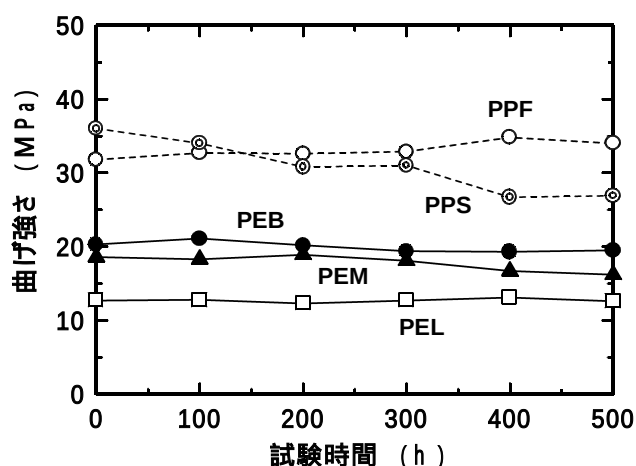


図 - 12 促進暴露後の曲げ試験結果

する必要があると考えられる。しかし、-10℃の低

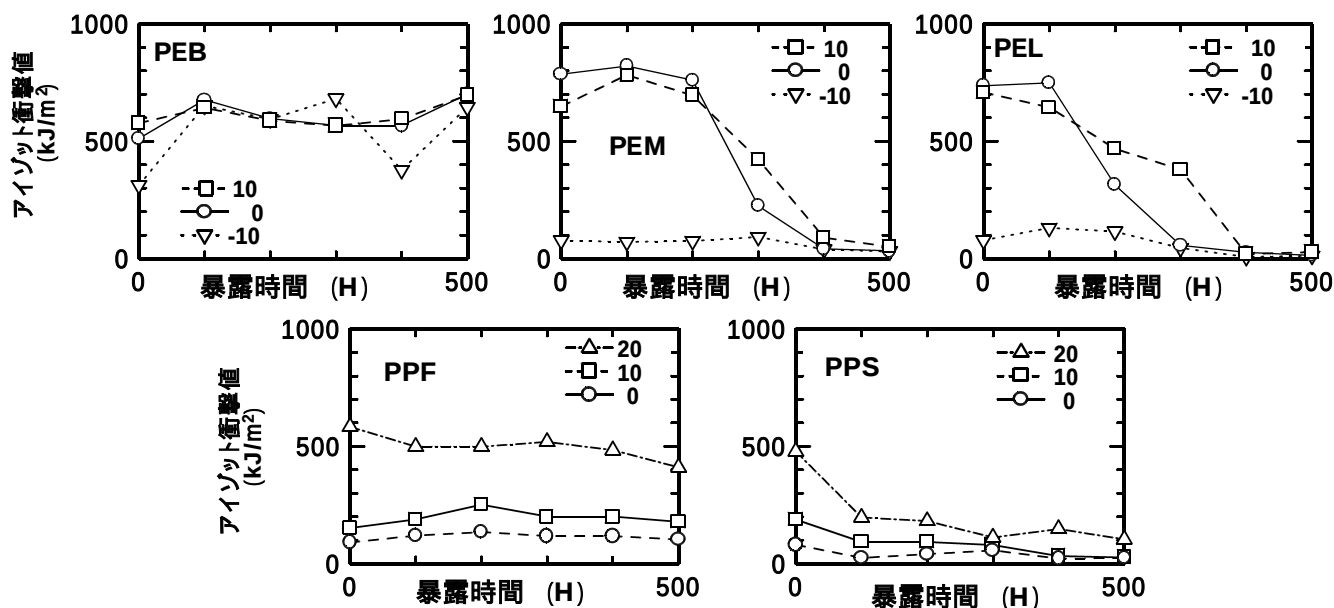


図 - 13 暴露試験後のアイゾット衝撃値

温時では暴露試験の影響はほとんどみられず、アイゾット衝撃値は低い値を示した。

４．まとめ

密度の違うポリエチレン及びポリプロピレンの力学的特性等を調べ、以下のことを明らかにした。

- １．熱可塑性樹脂の成形は容易で、美観にも優れている。
- ２．ポリプロピレンは、ポリエチレンと比較して硬度が高い。また硬度は材料の密度に比例する。
- ３．静的強度は、ポリプロピレンがポリエチレンと比較して高い値を示し、比強度も優れている。ポリエチレンの密度の違いによる強度の差は 50% 程度になった。
- ４．引張疲労試験において、明確な疲労限は認められなかった。また、繰返し数に対する疲労曲線の低下は比較的緩やかで疲労特性に優れていることが分かった。疲労破断については、静的試験の場合と異なり破断箇所の近傍に限り白化領域が現れた。一方、低温での曲げ疲労試験においては、温度の影響を受けて PPS、PEL 材の強度の低下率は大きくなる傾向を示す。
- ５．PEB 及びポリプロピレンは、繰返し折り曲げに対する耐久性が認められた。

６．熱可塑性樹脂材料は、非常に柔軟で衝撃吸収力が優れており、衝撃曲げ試験では破壊しなかった。衝撃曲げ強度と静的曲げ強度に著しい違いはみられなかった。

７．耐寒試験の結果より、延性破壊から脆性破壊に移行する遷移温度域は、PEB が -5~-20、PEM 及び PEL が 0~-10、ポリプロピレンが -10~20 付近であった。

８．ペレットから製作した PEM、PEL、PPS の各材料は、PPF 及び PEB と比較して促進暴露の影響を受け劣化し易く、曲げ強度及びアイゾット衝撃値は低下する。

９．材料に白化現象が現れた場合は、破壊の前兆現象として考えられるので注意が必要である。

参考文献

- １) 海上技術安全研究所大阪支所内部資料
- ２) 林毅 編，複合材料工学，日科技連，(1975)，PP.116-117
- ３) 吹上紀夫、津島聰、小野正夫，41th FRP CON-EX '96 講演要旨集，(1996)，PP.59-60