

小型船舶の船体構造用特殊材料の
特性に関する調査研究報告書
(その 2 : ポリエチレン、ポリプロピレン材料編)

平成 14 年 4 月

日本小型船舶検査機構

本調査研究における調査の一部は、独立行政法人 海上技術安全研究所との共同研究として実施した。

目 次

1 調査研究の目的及び実施方法	1
1・1 調査研究の目的	1
1・2 調査研究の実施方法	1
1・3 委員会	2
1・3・1 委員会の構成	2
1・3・2 委員会の経過	3
1・4 ポリエチレン及びポリプロピレンの特性に関する検討部会	4
1・4・1 検討部会の構成	4
1・4・2 検討部会の経過	4
2 ポリエチレン及びポリプロピレンの特性に関する調査研究の内容	5
2・1 調査研究の概要	5
2・2 ポリエチレン及びポリプロピレンの概要	5
2・2・1 ポリエチレン	5
2・2・2 ポリプロピレン	7
2・3 ポリエチレン及びポリプロピレンの特性試験	8
2・3・1 実施概要	8
2・3・2 供試材	9
2・3・3 試験結果	11
2・4 まとめ	44
3 船体構造用材料として使用する場合の検査上の留意事項	51
3・1 材料の特性	51
3・1・1 高密度ポリエチレン	51
3・1・2 中密度ポリエチレン	51
3・1・3 低密度ポリエチレン	51
3・1・4 ポリプロピレン	52
3・2 検査上の留意事項	52
3・2・1 ポリエチレン	52
3・2・2 ポリプロピレン	53

1. 調査研究の目的及び実施方法

1 調査研究の目的及び実施方法

1-1 調査研究の目的

船殻材料として量産船舶に用いられるようになってきている次の材料について、材料としての基本的な特性を把握し、船殻材料として使用する場合の検査上の留意事項等について検討を行うことを目的とする。

- ① アルミニウム合金鋳物
- ② SMC (水上ホトパイ 船殻仕様材料)
- ③ ポリエチレン
- ④ ポリプロピレン

1-2 調査研究の実施方法

本委員会は、平成 10 年度～平成 12 年度は①アルミニウム合金鋳物及び②SMC を、平成 12 年度から平成 13 年度は③ポリエチレン及び④ポリプロピレンを検討対象とし、それぞれ「アルミニウム合金鋳物の特性に関する検討部会」、「SMC の特性に関する検討部会」及び「ポリエチレン及びポリプロピレンの特性に関する検討部会」を設置し調査研究を行った。

各検討部会では、様々な新規材料と経年使用材料を対象とした材料試験を行い機械的特性を確認することにより、検討対象の材料を船殻材料として使用する場合の検査上の留意事項についてとりまとめた。

本委員会では各検討部会の方向付け、調整等の検討を行い、また、各部会でとりまとめた検査上の留意事項について最終審議を行った。

本報告書は、③ポリエチレン及び④ポリプロピレンの 2 種類の材料について、それぞれ試験結果及び検査上の留意事項を取りまとめたものである。

なお、①アルミニウム合金鋳物及び②SMC については平成 12 年度に報告書（その 1）としてとりまとめた。

1-3 委員会

委員会の構成及び経過は、以下のとおりである。

1-3-1 委員会の構成

委員会の構成は次のとおりである。(敬称略)

委員長	金原 熱	金沢工業大学 物質システム工業科・先端材料工学科 教授
委員	松岡 一祥	独立行政法人 海上技術安全研究所 材料加工部 高エネルギー利用研究室長（アルミニウム合金鋳物の特性に関する検討部会長）
橋爪 豊	独立行政法人 海上技術安全研究所 構造強度部 強度研究室長 (SMCの特性に関する検討部会長)	
櫻井 昭男	独立行政法人 海上技術安全研究所 大阪支所 船舶用材料研究室長（ポリエチレン及びポリプロピレンの特性に関する検討部会長）	
村井 七生	社団法人 日本舟艇工業会 技術委員会 委員長	
旧委員	菅政之	元 社団法人 日本舟艇工業会 技術委員会 委員長
関係官庁	松尾 龍介	国土交通省 海事局 安全基準課長 (矢萩 強志 同上前任者)
伊藤 茂	国土交通省 海事局 検査測度課長 (北村 正一 同上前任者)	
青木 健作	国土交通省 海事局 次席船舶検査官 (松村 純一 同上前任者)	
事務局	中園壽俊	日本小型船舶検査機構 (松本 公道 同上前任者)
後藤 芳博	"	
	(島村 正明 同上前任者)	
坂元 謙介	"	
津端 英樹	" (小竹 壽朗 同上前任者) (渡邊 勝世 同上前々任者)	
竹内 順一	" (大賀 信夫 同上前任者)	
伊藤 淳	" (鈴木 輝昭 同上前任者)	
福島 正朗	"	

1-3-2 委員会の経過

第1回委員会

- ①開催年月日 平成10年8月6日
②開催場所 日本小型船舶検査機構 7階第1会議室
③主な審議事項 ・事業計画について

第2回委員会

- ①開催年月日 平成10年12月11日
②開催場所 国土交通省 船舶技術研究所 材料加工部会議室
③主な審議事項 ・アルミニウム合金鋳物の特性に関する検討部会経過報告
・SMCの特性に関する検討部会経過報告
・アルミニウム合金鋳物の材料試験について

第3回委員会

- ①開催年月日 平成11年3月18日
②開催場所 日本小型船舶検査機構 7階第1会議室
③主な審議事項 ・アルミニウム合金鋳物の特性に関する検討部会平成10年度報告
・SMCの特性に関する検討部会平成10年度報告

第4回委員会

- ①開催年月日 平成11年7月29日
②開催場所 日本小型船舶検査機構 7階第1会議室
③主な審議事項 ・アルミニウム合金鋳物の特性に関する検討部会
平成11年度試験計画及び経過報告
・SMCの特性に関する検討部会
平成11年度試験計画及び経過報告

第5回委員会

- ①開催年月日 平成12年6月6日
②開催場所 日本小型船舶検査機構 7階第1会議室
③主な審議事項 ・アルミニウム合金鋳物の特性に関する検討部会平成11年度報告
・SMCの特性に関する検討部会平成11年度報告
・平成12年度事業計画(ポリエチレン及びポリプロピレン)について

第6回委員会(検討部会と合同開催)

- ①開催年月日 平成12年9月20日
②開催場所 日本小型船舶検査機構 7階第1会議室
③主な審議事項 ・委員会報告書(その1)について
・検査上の留意事項について
・ポリエチレン及びポリプロピレンの材料特性試験案について

第7回委員会（検討部会と合同開催）

- ①開催年月日 平成13年4月23日
- ②開催場所 独立行政法人 海上技術安全研究所 管理部3F会議室
- ③主な審議事項
 - ・ポリエチレン及びポリプロピレンの特性に関する検討部会中間報告
 - ・ポリエチレン及びポリプロピレンの材料試験について

第8回委員会（検討部会と合同開催）

- ①開催年月日 平成14年3月22日
- ②開催場所 日本小型船舶検査機構 7階第1会議室
- ③主な審議事項
 - ・委員会報告書（その2）について
 - ・検査上の留意事項について

1-4 ポリエチレン及びポリプロピレンの特性に関する検討部会

1-4-1 検討部会の構成

ポリエチレン及びポリプロピレンの特性に関する検討部会の構成は次のとおりである。

（五十音順、敬称略）

部会長 櫻井昭男 独立行政法人 海上技術安全研究所 大阪支所 船舶用材料研究室長
委員 伊藤保彦 フジマックス㈱ 取締役 工場長
 福原直成 みのる化成㈱ 開発部 取締役部長
 前田利雄 独立行政法人 海上技術安全研究所 水海技術部 主任研究官
関係官庁 松尾龍介 国土交通省 海事局 安全基準課長
 (矢萩強志 同上前任者)
 伊藤茂 国土交通省 海事局 検査測度課長
 (北村正一 同上前任者)
 青木健作 国土交通省 海事局 次席船舶検査官
 (松村純一 同上前任者)
事務局 委員会の事務局に同じ。（1-3-1参照）

1-4-2 検討部会の経過

第1回部会（委員会と合同開催）（第6回委員会参照。）

第2回部会（委員会と合同開催）（第7回委員会参照。）

第3回部会

- ①開催年月日 平成13年8月2日
- ②開催場所 独立行政法人 海上技術安全研究所 管理部2F会議室
- ③主な審議事項
 - ・材料特性試験経過報告

第4回部会（委員会と合同開催）（第8回委員会参照。）

2. ポリエチレン及びポリプロピレンの特性に関する 調査研究の内容

2 ポリエチレン及びポリプロピレンの特性に関する調査研究の内容

2-1 調査研究の概要

中密度ポリエチレン、ポリプロピレン等を材料とした船舶については、実績が少なく、経年劣化等の材料特性も明確でないものが多い。このため、船体材料としての強度、耐久性等の特性の評価基準がなく、船体強度を計算で求めることができず、またその後の検査で劣化をどのように評価したらよいか基準が整備されていない。このため、中密度及び高密度ポリエチレン、ポリプロピレン等の材料の静的強度、疲労、衝撃試験などの動的強度、並びに紫外線、温度などの環境による劣化などの基本的な特性を、これまでに実績のある高密度ポリエチレンとの比較を通じて把握するとともに、船殻材料として使用する場合の検査・設計上の留意事項を策定するために、調査研究を行った。

2-2 ポリエチレン及びポリプロピレンの概要¹⁾

2-2-1 ポリエチレン

2-2-1-1 分類

JIS K6784によると、ポリエチレン(PE)とは、エチレンの単独重合体、エチレンと5mol%以下の α -オレフィン单量体との共重合体及びエチレンと官能基に炭素、酸素及び水素原子だけを持つ1mol%以下の非オレフィン单量体との共重合体と定義されている。また、ISO DIS 1872/1.2では、共重合成分の量を50mol%以下まで認めている。すなわち、一口にPEといっても、その範囲は広いが、ここでは、主としてエチレンの単独重合体、及びエチレンと数mol%以下の α -オレフィン单量体との共重合体について扱う。

ポリエチレンの分類の方法には二通りあり、一つは密度による分類である。共重合成分の量によって密度が異なるが、この密度の違いによって、後に表-2.3.6で示すように、低密度(LDPE)、中密度(MDPE)、高密度(HDPE)に分類される。今一つの方法は製造法による分類であり、重合反応時の圧力によって、高压法、中圧法、低压法に分けられる。

ところが、製造法によって、生成するPEの分子構造が異なり、これによって密度が変わるために、製造法・分子構造・密度を絡めた分類がよく使われる(表-2.2.1)。高压法、すなわち1000気圧以上の高压下ラジカル重合法で製造されるPEはエチル基などの短鎖分岐のほか長鎖分岐を含み、密度の低いLDPEとなる。これは、高压法低密度ポリエチレン(HPLD)と呼ばれている。一方、数十気圧以下の中・低压下、遷移金属触媒を用いて配位アニオン重合で製造されるPEは直鎖状であり、エチレンの単独重合体は密度が高い。高压法では密度の高いものができないので、単にHDPEと呼ばれる。ところが、中・低压法でも α -オレフィンを共重合すれば短鎖分岐が導入され、中・低密度のポリエチレンとなる。とくにHPLDと密度範囲が重なる領域のLDPEはHPLDと区別するため、直鎖状低密度ポリエチレン(LLDPE)と呼ばれている。LLDPEの中でさらに低密度にしたものは超低密度ポリエチレン(VLDPE)と呼ばれる。

表-2.2.1 製造法・分子構造・密度をからめたポリエチレンの分類

製造法		名称
重合圧力	コモノマー	
中・低圧法	なし、または微量の α -オレフィン	高密度ポリエチレン(HDPE)
	α -オレフィン	中密度ポリエチレン(MDPE) 直鎖状低密度ポリエチレン(LLDPE) 超低密度ポリエチレン(VLDPE)
高圧法	なし	高圧法低密度ポリエチレン(HPLD)

2-2-1-2 製造法

工業的なポリエチレンの製造法は、表-2.2.2 に示すように重合時の圧力によって、高圧法、中圧法、低圧法に分類される。

高圧法は 1000~4000atm 下、ラジカル開始剤を用いるラジカル重合であり、長鎖分岐のある LDPE が得られる。中・低圧法は遷移金属触媒を用いた配位重合であり、直鎖状の HDPE が生成する。しかし、 α -オレフィンをコモノマーとして共重合することにより、生成ポリエチレンの密度をコントロールすることができる。高圧法においては、エチレンが液化し、塊状重合となるが、中・低圧法においては、溶液重合やスラリー重合の他、溶媒を使用しない気相重合法も行われている。

表-2.2.2 ポリエチレン製造法の分類

重合時の圧力による分類	重合時の圧力	重合機構	開始剤、触媒	重合相	重合器の型	生成ポリエチレン
高圧法	1000~4000atm	ラジカル重合	酸素、過酸化物	塊状重合	オートクレーブ型 チューブラー型	LDPE
中圧法	30~70atm	配位重合	フィリップス触媒	溶液重合	オートクレーブ型	HDPE ～ LLDPE
				スラリー重合	ループ型 オートクレーブ型	
			スタンダード触媒	気相重合	流動床型 攪拌床型	
低圧法	数気圧 ～ 数十 atm	配位重合	チーグラー触媒	溶液重合	オートクレーブ型	HDPE ～ VLDPE
				スラリー重合	オートクレーブ型 ループ型	
				気相重合	流動床型 攪拌床型	

2-2-1-3 特徴と用途

ポリエチレンは、生産量、需要量において長らくプラスチックの王座の地位を保ち続けており、1990 年の全世界での生産量は 2800 万トン、うち日本では 290 万トンに達していた。ポリエチレンは、軽い、さびない、腐らないというプラスチックの共通の特徴に加え、化学安定性、耐候性、耐水性、耐低温衝撃性、絶縁性、成形性など広範囲にわたる優れた特性を備えている。さらに、プラスチックの中でも最軽量に属し、安価である。このため、LDPE はフィルム、加工紙、射出成形、電線被覆、中空成形、パイプ等、HDPE はフィルム、中空成形、射出成形、パイプ、フラットヤーン、繊維等、工業材料から日用雑貨に至る広範囲な用途に使用され、生活の隅々まで浸透している。

2-2-2 ポリプロピレン

2-2-2-1 分類

1955年、イタリアの Natta 博士が見いだした高密度ポリエチレン重合触媒を改良した触媒を用い、アイソタクティックポリプロピレン(PP)が製造できることを発表した。1957年には早くもイタリアで工業化が始まり、日本では1962年に始めた。PP の開発当初は、結晶性を有していることにより「夢の纖維」として期待されたが、染色性等の問題から纖維としての用途はあまり伸びず代わりに樹脂として特性が見いだされ、今日に至っている。

PP は $-(CH_2-CH\cdot Me)_n-$ の分子構造を持つ立体規則性高分子である。PP は α -位のメチル基の配置により3種類の立体化学構造を持つ型に分類される。図-2.2.1 は PP の主鎖を延ばした場合のこれらの概念図を示したものである。アイソタクティック PP はメチル基の立体配置がみな同じになっており規則性を有し、結晶性が高まる。現在工業化されている PP はすべてアイソタクティック構造を有する。シンジオタクティック PP は、メチル基の立体配置が交互になっており規則性を持ち、結晶性である。非常に透明性に優れる特徴を有するが、剛性はかなり低い。アタクティック PP はメチル基の立体配置が不規則になっており、結晶性は低く、実用的価値は低い。アイソスタティック PP 製造の副生物として少量発生するのみである。

また、共重合体の概念を中心にして PP 材料を考えると、プロピレン単位からなるホモポリマー、エチレンと共に重合したブロックコポリマー、ランダムコポリマー等に分けられる。

2-2-2-2 製造法

PP を重合するには、いわゆる Ziegler-Natta 触媒を使用するのが一般的である。主たる成分は三塩化チタン($TiCl_3$)である。もちろん、プロピレンは $TiCl_3$ のみで重合するわけではなく、助触媒である有機アルミニウム化合物、例えばジエチルアルミニウムクロライド $AlEt_2Cl$ の添加が必要である。さらに通常は第三成分である電子供与体を立体規則性向上剤として使用されている。現在、プロピレン重合触媒としては、 $TiCl_3$ 触媒系と $MgCl_2$ 担持触媒系の二つの系統がある。触媒開発の目的は、主に重合活性の増大と立体規則性の向上である。

製造プロセスは技術の進歩によって三つの世代に分類され、現在は最も簡略化された脱触、脱 APP 工程の不要なプロセス（気相法）が主に用いられている代表的なプロセスには BASF 法、Amoco 法、UCC 法、三井石化法等がある。

2-2-2-3 特徴と用途

PP は PE に比べて耐熱性があり、熱湯消毒ができる。融点は $165^{\circ}C$ である。電気絶縁性・高周波の誘電特性もよい。また、耐水性・耐薬品性もある。ただし、耐候性は悪く、接着・印刷は困

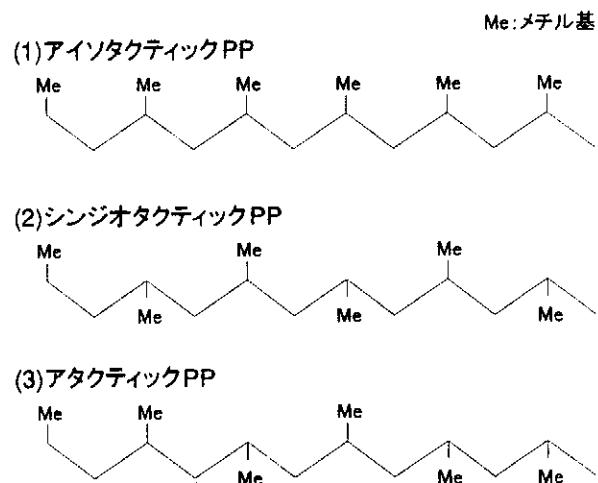


図-2.2.1 PP の立体規則性

難である。成形加工性がよいので、薄手のもの、複雑形状のものが可能で、成形収縮は小さい。用途としては射出成形、フィルム、押し出し成形、フラットヤーン、繊維等である。

2-3 ポリエチレン及びポリプロピレンの特性試験

2-3-1 実施概要

艇体に使用されている高密度ポリエチレン及びポリプロピレンについては製品用に成形したものから試験材を採取し、また輸入艇に使用されているが艇を入手できなかった中密度ポリエチレン並びに汎用型の低密度ポリエチレン及びポリプロピレンについてはペレットから試験板を成形して試験材とした。試験は、外観、組成調査、引張・曲げ等の静的強度試験、衝撃・疲労等の動的試験を実施した。また、耐環境性として、耐寒性、熱老化、定応力環境応力き裂、すべり摩耗、促進暴露等の試験を行い、劣化特性を調べた。試験項目を表-2.3.1に示す。

表-2.3.1 試験項目

	項目	適用基準	試験片	実施場所	試験設備
組成調査	外観・寸法			大阪	
	比重・密度				
	デュロメータ D硬さ試験	JIS K7215			
静的試験	引張試験	JIS K7113	2号試験片	大阪	大型テンション UTM-10T (東洋ボールドワイン)
	圧縮試験	(BEF法)	短冊形試験片		
	曲げ試験	JIS K7203	短冊形試験片		
疲労試験	引張疲労試験	JIS K7118	静的引張2号試験片	大阪	サーボパルサ EFH-EG5-10L(島津)
	曲げ疲労試験	JIS K7119	I号試験片		
耐環境性	繰り返し折り 曲げ試験		平板	三鷹	型削盤
	衝撃試験	落錐3点曲げ (JIS K7211)	短冊形試験片	大阪	(海技研)
	耐寒性試験	JIS K7110	2号試験片	三鷹	アイゾット試験装置
	熱老化性試験	JIS K7212	静的曲げ試験片	三鷹	ギヤーオーブン
	定応力環境応 力き裂試験	JIS K6760	ダンベル形試験片	三鷹	腐食疲労試験装置
	滑り摩耗試験	JIS K7218	A法角板試験片	三鷹	滑り摩耗試験機
	促進暴露試験	JIS K7350	標準試験片	大阪・大 阪府総研	ウェザーメーター

注：実施場所 大阪：独立行政法人海上技術安全研究所大阪支所（大阪府交野市）

三鷹：独立行政法人海上技術安全研究所三鷹本所氷海技術部（東京都三鷹市）

大阪府総研：大阪府立産業技術総合研究所（大阪府和泉市）

2-3-2 供試材

強度試験等に使用するポリエチレン、ポリプロピレン材料の一部は本部会委員2社よりご提供いただいた。また、それ以外のものはペレットを入手し、海上技術安全研究所大阪支所内の加熱プレス機（表-2.3.2、図-2.3.1）を用いて矩形平板に成形し、試験に供した。表-2.3.3に供試材の一覧を示すとともに、以下それぞれの供試材の特徴について外観、寸法等を含めて記す。

表-2.3.2 加熱プレス機の主要目

メーカー	(株)東洋精機製作所
型式	MP-WCL
熱板寸法	250mm角
ストローク	100mm
最大出力	100kN
最高調節温度	300°C



図-2.3.1 加熱プレス機

表-2.3.3 供試材

記号	種類	形態	品名・提供社
PEB	高密度ポリエチレン	成形板	みのる化成㈱ご提供
PEM	中密度ポリエチレン	ペレット	三井化学㈱ エボリュー SP-4030 (エクソンLL-8460相当品)
PEL	低密度ポリエチレン	ペレット	日本ポリケム㈱ ノバテック LD
PPF	ポリプロピレン	成形板	フリージア・マクロス㈱ご提供
PPS	ポリプロピレン	ペレット	出光石油化学㈱ PP E-250G

2-3-2-1 高密度ポリエチレン（記号：PEB）

みのる化成㈱が製造するプレジャーボート（図-2.3.2）から切り出して供試材とする予定であったが、製造計画の関係から、あいにくプレジャーボートそのものを入手することができなかつた。このため、同プレジャーボートを製造する世界最大級のブロー成形機（図-2.3.3）により、プレジャーボートと同じ原材料を使用して成形した製品から切り出した成形板を供試材とした。色は黄色であり、表面は両面ともほぼ平滑である。これらは板厚の比較的薄いもの（1.5mm～2.5mm）が多かったため、試験項目によっては、以前のプレジャーボート製造時に生じた端材（板厚4mm以上）も、傷等の有無を十分吟味した上で供試材として使用した。両者の供試材は、原材料も成形機も同じものであるため、成形時の流動条件が大きく異なるような隅角部近傍を除いて成形条件は変わらず、したがって、機械的性質にも大差はないと考えられる。

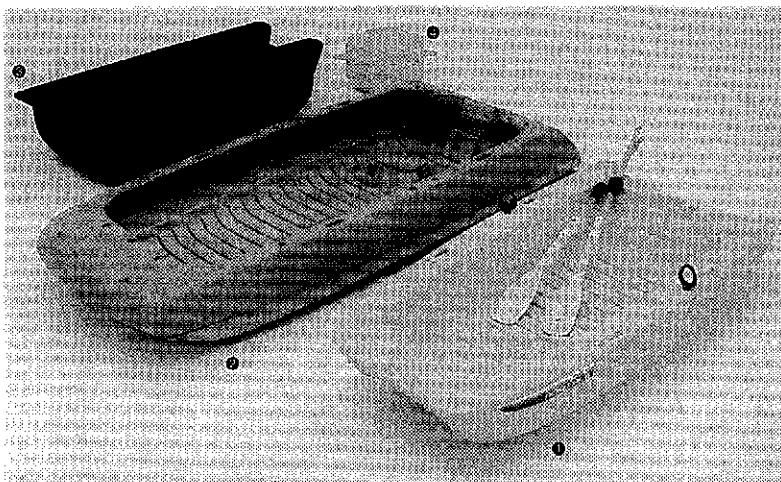


図-2.3.2 高密度ポリエチレン製プレジャーボート²⁾

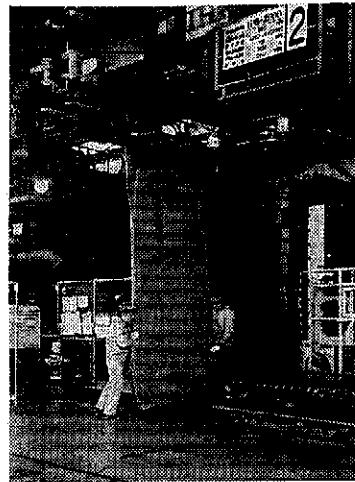


図-2.3.3 プロー成形機²⁾

2-3-2-2 中密度ポリエチレン（記号：PEM）

輸入艇に使用されている材料であるが、艇そのものの入手が困難だったので、原料ペレット（プレス成形前の粒状物質）を入手して、上述した加熱プレスにより成形して供試板とした。しかしながら同輸入艇に使用されている原料ペレット（エクソンケミカル社（現エクソンモービルケミカル社）製LL-8460）は北米地域でのみ販売されており、日本国内では入手困難であった。そこで相当品の原料ペレット（三井化学㈱製エボリュ-SP-4030）を代替品として入手し、これをプレス成形して供試板とした。表-2.3.4に両メーカーから提示されているカタログ値を示す。ただし、単位を統一するため、数値は換算して表示している。

表-2.3.4 中密度ポリエチレンのカタログ値^{3,4)}

項目	単位	LL-8460	SP-4030
メルトフローレート	g/10min	3.3	3.6
密度	kg/m ³	938	940
融点	°C	126.5	130
降伏点応力	MPa	17.9	19
破断点伸び	%	765	890
ヤング率	MPa	613	760
環境応力き裂試験、F 50	hr	>500	>1000

プレス成形は、内寸190mm×190mm、板厚3mmもしくは4mmのステンレス型枠を用いて、150°C、3MPaで30分保持した後、徐冷する条件で行った。

2-3-2-3 低密度ポリエチレン（記号：PEL）

低密度ポリエチレンとして、広く使われている日本ポリケム㈱製ノバテック LDをペレットで入手し、加熱プレスにより成形して供試板とした。成形条件は上述した中密度ポリエチレンと同じである。

2・3・2・4 ポリプロピレン（記号：PPF）

フリージアマクロス㈱が製造する折り畳み式プレジャーボート（図-2.3.4）の組み立て前の資材から切り出した成形板を供試材とした。色はベージュで、片面（船体内側）にエンボス加工が施しており、反対面は平滑である。また、繰り返し折り曲げ試験の一部には実艇と同様に溝をつけた2枚のポリプロピレン板を接着したヒンジ構造部分（図-2.3.5）を使用している。

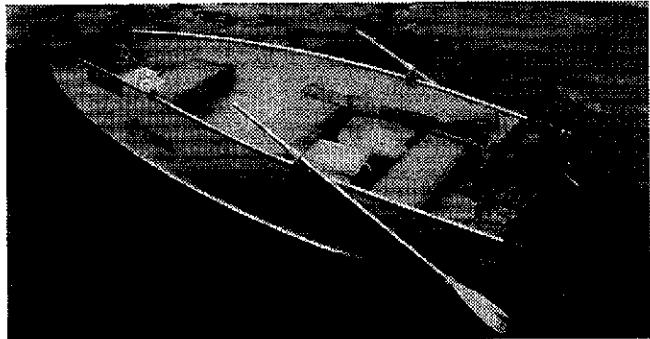


図-2.3.4 ポリプロピレン製プレジャーボート⁵⁾

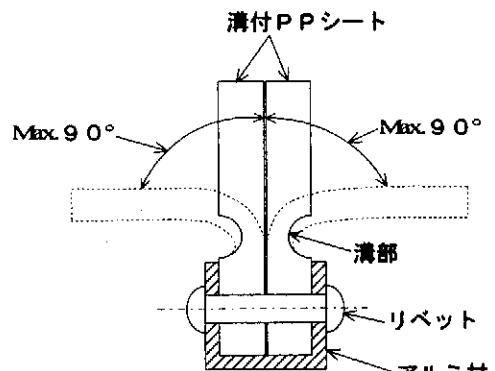


図-2.3.5 PPF 溝付きヒンジ構成部

2・3・2・5 ポリプロピレン（記号：PPS）

汎用のポリプロピレンとして、広く使われている出光石油化学㈱ PP E-250Gをペレットで入手し、加熱プレスにより成形して供試板とした。

成形は、ポリエチレン成形と同じ型枠を用いて、220°C、3MPaで30分保持した後、徐冷して行った。成形品の一例を図-2.3.6に示す。

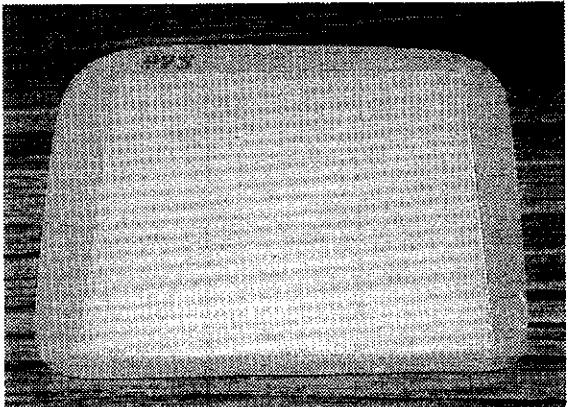


図-2.3.6 PPS 成形品の一例

2・3・3 試験結果

2・3・3・1 密度

(1) 試験方法

各供試板から強度試験用に切削加工した試験材の寸法より計算した体積と、㈱島津製作所製精密天秤BW-320H（最小単位0.001g）により測定した重量から、計算により簡易に求めた。

(2) 試験片

静的曲げ試験用に成形した短冊状試験片を使用した。

(3) 測定結果

各供試材について10本ずつ測定し、平均値と標準偏差を表-2.3.5に示す。また、表-2.3.6にポリエチレンの密度による分類表を示したが、供試したPEB、PEM、PEL材はそれぞれ高密度、中密度、低密度に対応していることがわかる。

表-2.3.5 密度

供試材	密度(g/cm ³)	
	平均	標準偏差
PEB	0.949	0.012
PEM	0.935	0.004
PEL	0.926	0.005
PPF	0.901	0.003
PPS	0.892	0.005

表-2.3.6 密度によるポリエチレンの分類⁶⁾

名称	密度範囲(g/cm ³)	
	JIS K6748	ASTM* D1248
高密度ポリエチレン	0.942～	0.941～
中密度ポリエチレン	0.930～0.941	0.926～0.940
低密度ポリエチレン	0.910～0.929	0.910～0.925

*ASTM--Standards of American Society for Testing and Materials

2-3-3-2 デュロメータ硬さ

(1) 試験方法

デュロメータ硬さ試験はJIS K7215プラスチックのデュロメータ硬さ試験方法に準じて行った。この試験は、圧子を用いて、くぼみ深さに対応して変化する試験荷重を試料に負荷する方法で、生じたくぼみ深さから求めた値がデュロメータ硬さである。試験は図-2.3.7に示す高分子計器㈱製ゴム硬度計D型（デュロメータ硬さ試験器）を用いて、タイプD圧子により行った。なお、試験点数は各供試板につき10点である。

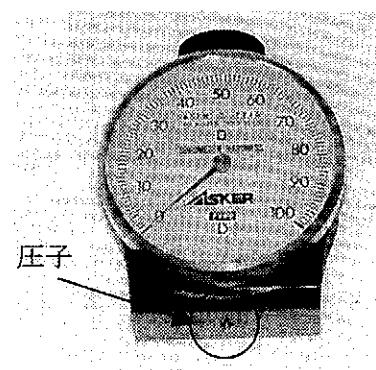


図-2.3.7 デュロメータ

(2) 試験片

試験片は全長120mm、幅70mmの促進暴露試験用短冊形板を使用した。試験片の板厚は元厚のままとした。PPF材については平滑面側を測定している。

(3) 試験結果

各供試板のデュロメータ硬さ(HDD)を表-2.3.7に示す。ポリエチレンよりポリプロピレンが硬く、またポリエチレンでは密度が高いほど硬いことを示している。ちなみに水上オートバイの船殻等に使用されるSMCはHDD85～88程度の値を示す⁷⁾。

表-2.3.7 デュロメータ硬さ

供試材	板厚 (mm)	HDD	
		平均	標準偏差
PEB	2.57	63.5	0.8
PEM	3.01	60.9	0.9
PEL	2.94	55.2	0.4
PPF	3.75	71.0	1.2
PPS	2.95	72.8	0.8

2-3-3-3 静的引張試験

(1) 試験方法

静的引張強度はJIS K7113プラスチックの引張試験方法に準じて行い、求めた。試験は(株)東洋ボールドウイン社製大型テンション試験機UTM-10T(図-2.3.8)を用いて、引張速度1mm/minで行った。引張ひずみはプラスチック用ひずみゲージ(株)東京測器研究所製GFLA-3-70)をポリプライマーで処理した試験片表面裏面に瞬間接着剤で貼り付け、測定した。なお、試験本数は各供試板につき10本、試験温度は20°Cである。

(2) 試験片

試験片はJIS K7113の2号試験片に準じた寸法・形状(全長115mm、両端の幅25mm、平行部長さ33mm、平行部幅10mm)のダンベル型とした。試験片の板厚は元厚のままとした。

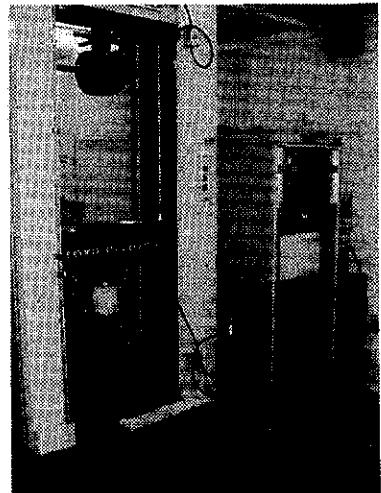


図-2.3.8 静的強度試験

(3) 試験結果

各試験片を引っ張ると、図-2.3.9に表されるような応力-ひずみ(伸び)関係を示す。ただし、このときのひずみ(伸び)はひずみゲージの測定範囲をはるかに越えているため、試験機クロスヘッドの移動量から求めた概算値である。図からわかるように、ひずみが数%のところで応力の極大値が生じ、その後やや応力が低下するがほぼ一定値を維持している。この図では約100%ひずみまでを示しているが、その後もこの状態が続き、500%ひずみ程度で破断した。これらの傾向はいずれの供試材もほぼ同様であった。図-2.3.10に約100%ひずみまで引っ張った時の試験片の状況を示す。すでに標点間全体が白化し、一部がくびれていることがわかる。したがって、今回の試験では最初に現れる応力の極大値を引張強さとし、最初の直線部分の勾配を引張弾性率とした。各供試板の測定結果を表-2.3.8及び図-2.3.11に示す。引張強さは先に示したデュロメータ硬さと良い相関を示しており、ポリエチレンでは密度が高いほど大きく、またポリプロピレンは高密度ポリエチレンよりも良い値を示している。さらに、ポリプロピレンはポリエチレンに比べ密度が小さいことから、比強度(単位重量当たりの強さ)の観点からはさらに優れた特性を示すことがうかがえる。

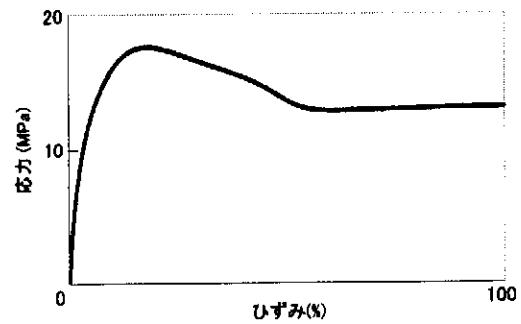


図-2.3.9 引張応力-ひずみ線図の一例

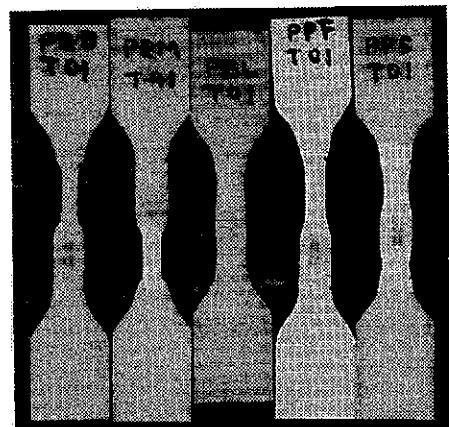


図-2.3.10 引張試験片

表-2.3.8 引張試験結果

供試材	平均板厚 (mm)	引張強さ(MPa)		引張弾性率(MPa)	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差
PEB	3.98	19.56	0.98	1291	160
PEM	3.63	16.52	0.39	930	22
PEL	3.64	10.72	0.53	509	19
PPF	3.64	22.77	1.39	1353	40
PPS	3.78	24.93	0.44	1431	31

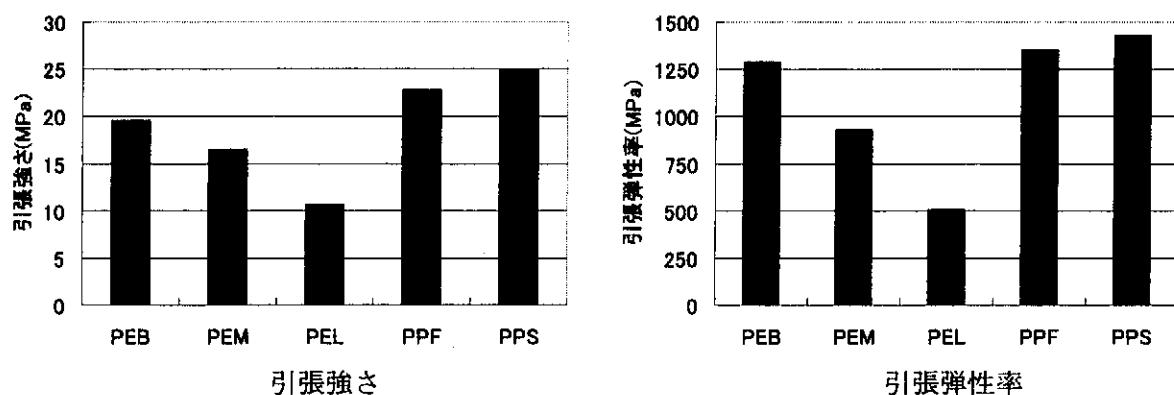
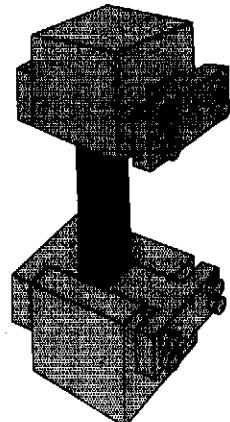


図-2.3.11 引張試験結果

2.3.3.4 静的圧縮試験

(1) 試験方法

静的圧縮強度は通常JIS K7208の試験片保持具を用いる試験方法を行うが、今回の供試材のような変形量の大きいものでは試験片保持具が邪魔をして十分な測定ができない。このため、図-2.3.12に示すような、BEF(Both End Fixed)法⁸⁾を用いて測定した。これは試験片の両端をそれぞれ別々の治具で固定して圧縮する方法である。このため、試験片へのタブやダンベル加工が不要で、ひずみゲージの貼付も可能である。また、圧縮強さ測定値や破壊様式にはJIS K7208の試験方法で得られる結果との違いはない。ただし、極端に薄い試験材では試験開始時から座屈変形を生じる可能性があり、試験片端部の加工精度が要求される。試験は大型テンション試験機UTM-10Tを用いて、試験速度1mm/minで行った。圧縮ひずみは試験片表裏面に貼った2方向ひずみゲージ（㈱東京測器研究所製GFCA-3-70）により測定した。なお、試験本数は各供試板につき10本、試験温度は20°Cである。

図-2.3.12 BEF 法⁸⁾

(2) 試験片

試験片は全長80mm、幅15mmの短冊型とした。試験片の板厚は元厚のままとしたが、できるだけ厚いものを使用した。

(3) 試験結果

各試験片を圧縮すると、図-2.3.13に表されるような応力-ひずみ関係を示す。引張試験の場合と同様に、ひずみが数%のところで応力の極大値が生じ、その後応力が低下する。この時点で試験片には白化等の目立った変化はみられないが、最初に現れる応力の極大値を圧縮強さとし、最初の直線部分の勾配を圧縮弾性率として計算した。各供試板の測定値を表-2.3.9及び図-2.3.14に示す。強度順等全体の傾向は引張試験結果とよく一致していたが、座屈変形の影響により、圧縮強度は引張強度に比べてやや小さめになっている。

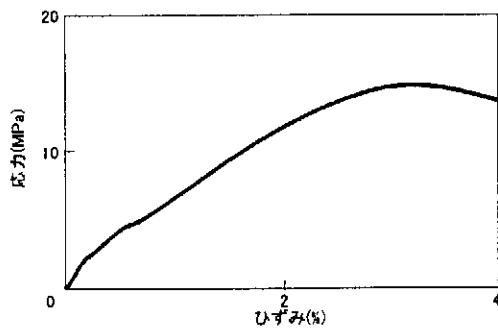


図-2.3.13 圧縮応力-ひずみ線図の一例

表-2.3.9 圧縮試験結果

供試材	平均板厚 (mm)	圧縮強さ(MPa)		圧縮弾性率(MPa)	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差
PEB	4.55	15.60	1.79	1313	68
PEM	3.66	11.67	1.21	1076	68
PEL	3.68	6.98	0.97	651	48
PPF	3.64	18.04	1.56	1394	60
PPS	3.81	22.71	2.54	1511	44

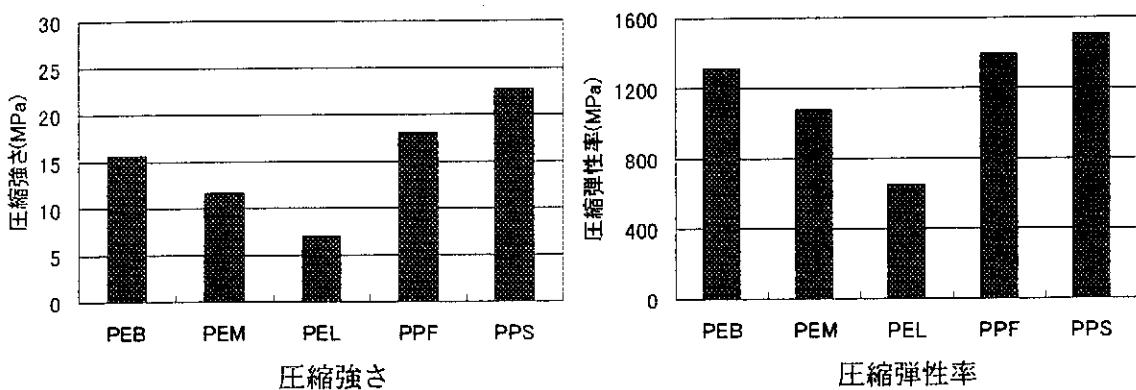


図-2.3.14 圧縮試験結果

2-3-3-5 静的曲げ試験

(1) 試験方法

静的曲げ試験はJIS K7203硬質プラスチックの曲げ試験方法に準じて3点曲げで行った。大型テンション試験機UTM-10Tを用いて、支点間距離60mm、試験速度2mm/minで行った。たわみ量はクロスヘッドの移動量から換算している。ひずみ速度は

$$V = \frac{S_r L^3}{6h}$$

V : 試験速度(mm/min)

S_r : ひずみ速度(min⁻¹)

L : 支点間距離(mm)

h : 試験片の厚さ(mm)

から計算すると、板厚により異なるが、0.012~0.016min⁻¹程度である。なお、試験本数は各供試板につき10本、試験温度は20°Cである。

曲げ強度及び弾性率は次式を用いて計算した。

$$\text{曲げ強さ} \quad \sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

P : 最大荷重(N)

L : 支点間距離(mm)

b : 試験片の幅(mm)

h : 試験片の厚さ(mm)

W/δ : 荷重ーたわみ線図の初期傾斜

$$\text{曲げ弾性率} \quad E_b = \frac{L^3}{4bh^3} \times \frac{W}{\delta}$$

(2) 試験片

試験片は全長80mm、幅15mmの短冊型とした。試験片の板厚は元厚のままとした。片面にエンボス加工のあるPPF材については平滑面側に引張応力が生じるように載荷した。

(3) 試験結果

各試験片を曲げると、図-2.3.15に表されるような曲げ荷重ーたわみ関係を示す。各供試板の曲げ強さと曲げ弾性率の平均値および標準偏差を表-2.3.10及び図-2.3.16に示す。強度の順序等全体の傾向は引張試験結果と相違ないが、弾性率が低めになっている。これはたわみ量の測定精度によるものと考えられる。また、最大荷重が生じた時点での試験片の状況を観察すると、PPF材が引張側に白化現象がみられたが、その他はいずれも変化が認められなかった。また、除荷後はほぼもとの状態に自然復帰し、永久変形はほとんどみられなかった。

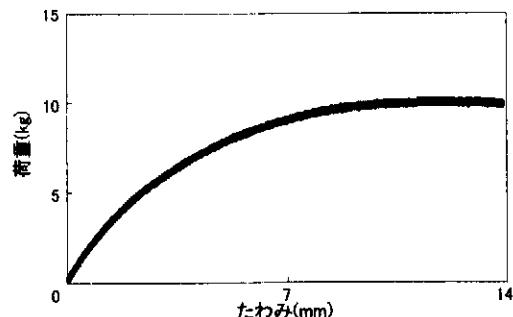


図-2.3.15 曲げ荷重ーたわみ線図の一例

表-2.3.10 曲げ試験結果

供試材	平均板厚 (mm)	曲げ強さ(MPa)		曲げ弾性率(MPa)	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差
PEB	4.77	24.48	0.73	754	38
PEM	3.64	18.10	1.00	572	40
PEL	3.67	10.39	0.54	268	24
PPF	3.68	31.48	0.51	1076	28
PPS	8.82	36.36	0.75	1205	47

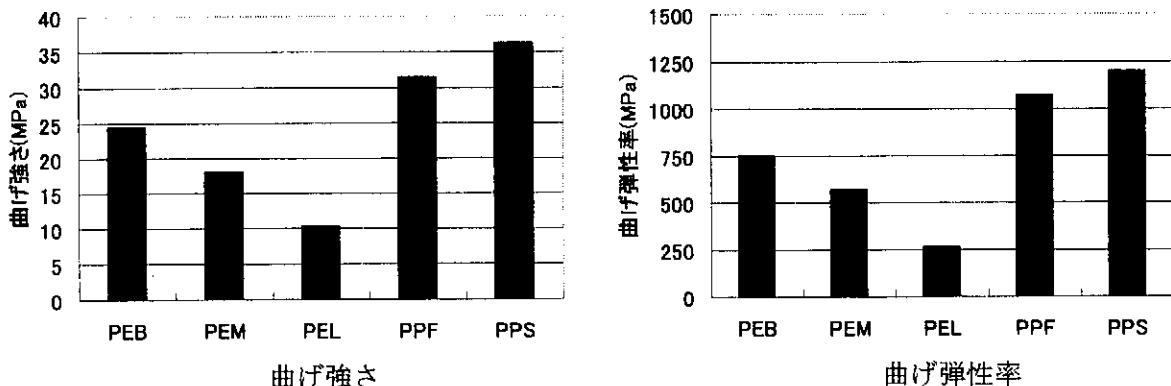


図-2.3.16 曲げ試験結果

2.3.3.6 引張疲労試験

(1) 試験方法

引張疲労試験はJIS K7118硬質プラスチック材料の疲れ試験方法通則を準用して行った。試験は㈱島津製作所製サーボパルサEFH-EG10-20L(図-2.3.17)及びEFH-EG5-10Lを使用して、5Hz sin波の片振り引張応力を与え、荷重制御、試験温度20°Cで行った。

(2) 試験片

試験片は静的引張試験と同じJIS K7113の2号試験片に準じた寸法・形状(全長115mm、両端の幅25mm、平行部長さ33mm、平行部幅10mm)のダンベル型とした。試験片の板厚は元厚のままとした。

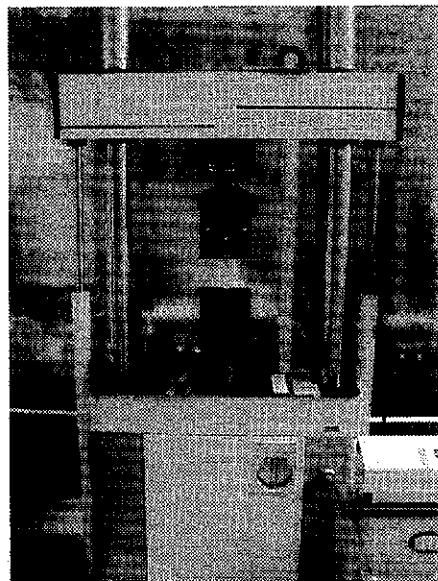


図-2.3.17 疲労試験機

(3) 試験結果

疲労試験では試験時間の制約から十分な数の試験を行うことができなかつたが、表-2.3.11に示す結果を得、これをもとに図-2.3.18に示す応力-繰り返し線図を作成した。プラスチック系の材料においては明確な疲労限を示さないことが多いため、10⁷回を越えて、試験片にき裂の発生がみられない場合はその応力を疲労限として試験を停止する予定であったが、今のところ、そこ

までのデータは得られていない。同図には破断繰り返し数1回のデータとして静的引張試験の結果をプロットしてあるが、これより、いずれの試験材も 10^3 回程度までは疲労の影響はなく、その後破壊応力が低下していくことがわかる。

各供試材の引張疲労破壊様相の代表例を図-2.3.19に示す。静的引張試験の場合と異なり、いずれも白化領域が疲労破断部の近傍に限られており、破断部から10mm以上離れると顕著な変化が認められない。すなわち、白化が顕著になるとその部分に繰り返し応力が集中し、疲労破断に至ると考えられる。

表-2.3.11 引張疲労試験結果

PEB 平均板厚 4.00mm		PEM 平均板厚 3.60mm		PEL 平均板厚 3.66mm		PPF 平均板厚 3.66mm		PPS 平均板厚 3.71mm	
最大 応力差 (MPa)	繰返し数	最大 応力差 (MPa)	繰返し数	最大 応力差 (MPa)	繰返し数	最大 応力差 (MPa)	繰返し数	最大 応力差 (MPa)	繰返し 数
20.46	1866	17.95	796	12.85	219	22.31	261	23.78	2499
18.99	2109	15.84	4446	10.99	1000	22.44	705	22.44	4406
18.52	3081	14.61	165122	9.18	4934	20.66	1843	20.35	291248
15.24	5005079	13.03	1242548	7.67	143743	18.90	112022	19.04	5044179
13.78	7344303	11.96	5591588	6.57	5223153	17.02	2870073	19.73	9823743

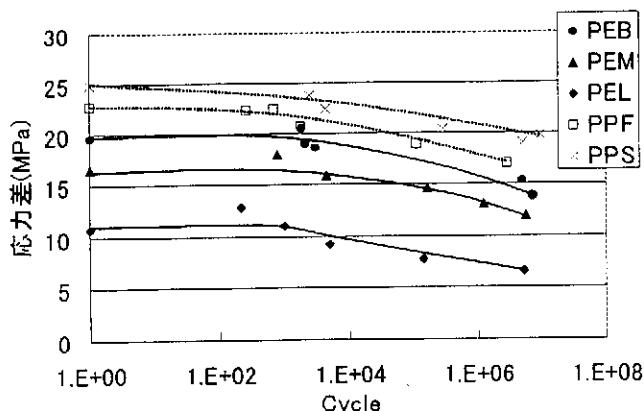


図-2.3.18 引張応力-繰り返し数線図

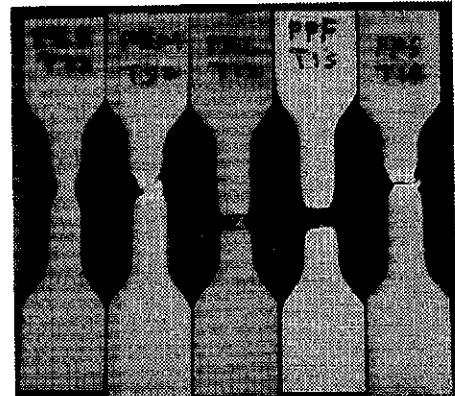


図-2.3.19 引張疲労試験片

そこで、疲労過程における試験材の剛性変化を検討した。剛性は所定繰り返し数での最大応力、最小応力の差と、最大変位、最小変位の差とから求め、疲労試験開始時の剛性値との比（剛性低下率）を求めた。具体的に剛性低下率は次式により計算した。

$$E_n = \frac{\Delta\sigma_n}{\Delta\varepsilon_n} = \frac{\Delta F_n/A}{\Delta L_n/s} = \frac{F_{n\text{-max}} - F_{n\text{-min}}}{L_{n\text{-max}} - L_{n\text{-min}}} \times \frac{s}{A}$$

$$E_n A = \frac{F_{n\text{-max}} - F_{n\text{-min}}}{L_{n\text{-max}} - L_{n\text{-min}}} \times s$$

$$\text{剛性低下率} = \frac{E_n A - E_0 A}{E_0 A} \times 100$$

ここで、

E_n : n回目の弾性率

$E_n A$: n回目の剛性

$E_0 A$: 初期の剛性

σ : 応力 ε : ひずみ

F : 荷重 L : 変位

A : 断面積 s : チャック間距離

図-2.3.20に剛性変化を調べた結果を示す。いずれも破断時の剛性低下は短寿命のものは大きく、破断までの寿命が長かったものは少ない。また、長寿命の試験材に注目してみると、ポリプロピレン系の試験材については、疲労開始当初に剛性率が10~20%程度に低下して、その後しばらくその値を維持し、再度低下が始まって破断に至っている。この再低下と前後して試験材に白化が認められている。ポリエチレン系のものについては疲労回数の進行と共にほぼ一様に剛性が低下しており、白化との関連は認められなかった。

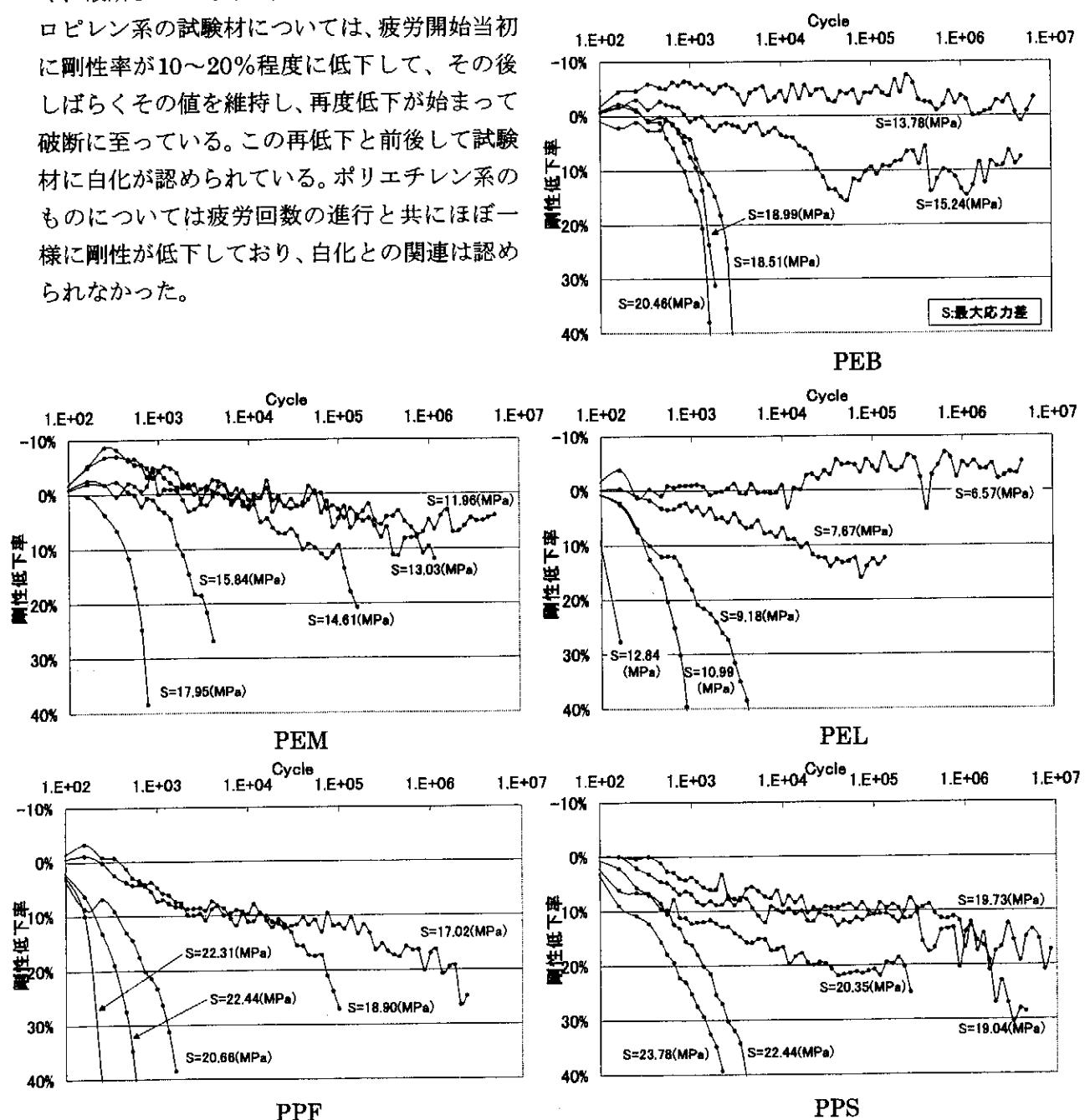


図-2.3.20 引張疲労過程における剛性低下率

2-3-3-7 曲げ疲労試験

(1) 試験方法

曲げ疲労試験はJIS K7119硬質プラスチック平板の平面曲げ疲れ試験方法を準用して行った。試験はサーボパルサEFH-EG5-10Lを使用し、三点曲げにより実施した。なお、プラスチック系材料では弾性率が小さいために曲げ応力によるたわみ量、すなわち試験機のストロークが長くなるので、繰り返し速度は引張疲労試験の場合より遅くして、 2Hz sin波の片振り曲げ応力を与え、スパンは80mm、荷重制御、試験温度は 20°C とした。以上のような条件で試験を開始したが、既定の供試材では試験荷重が小さく精度を維持できないこと、たわみ量が大きく繰り返し速度をさらに遅くする必要があること等が判明したため、試験方法を次のように変更した。

まず、試験荷重を大きくするために厚い試験材を新たに加熱プレス成形した。詳細は次項で示す。

たわみ量については、試験材の弾性率を大きくすることで対処し、このため、 $+1^\circ\text{C}$ の水中で疲労試験を実施することとした。試験は上述の疲労試験機の載荷部を囲むように水槽を取り付け、水槽内に通したパイプに低温ブラインを循環させて水槽水を冷却し、所定環境を実現した。図-2.3.21に浸漬疲労試験システムの写真を示す。

(2) 試験片

上述したように、当初計画したI号試験片では、必要とする曲げ荷重が試験機の容量に比べて小さく、精度良い試験機コントロールができないため、試験片は全長110mm、幅35mm、厚さ6mmの短冊型とした。試験材は新たにペレットよりプレス成形した。従って試験はペレットが入手できた3種(PEM、PEL、PPS)についてのみ行った。

(3) 試験結果

表-2.3.12に曲げ疲労試験結果を、またこれを元に作成した応力-繰り返し数線図を図-2.3.22に示す。なお、試験材の疲労破壊の判定は、1ストロークの最大荷重が(所定荷重-100N)に達しないとき、もしくはたわみ量が50mmを超えたときとした*解説参照。従って、必ずしも疲労破壊=破断を意味するものではない。

図からわかるように引張疲労試験の結果と比べて応力値が大きくなっているが、これは試験温度を $+1^\circ\text{C}$ としたためである。全体の傾向としては引張疲労と同じであるが、PEL材については繰り返し数の影響が大きい。すなわち他のものに比べて疲労による強度の低下率が大きい。

<解説：疲労破壊の判定について>

疲労試験において、自動運転している試験機が、試験材が破壊したと判定するための条件として、荷重条件とたわみ条件の2つを設定し、どちらか一方でも基準値になると、試験機は試験材が破壊したとして停止する。

荷重条件は、試験機のクロスヘッドを進めて、試験材から受ける荷重が所定値に達しないため、試験材が破壊したと判断するためのもので、(所定荷重-100N)を閾値とした。

たわみ条件は、試験材のたわみが大きくなつて破壊したと判断するための条件で、熱可塑性樹脂ではもっと大きくする必要があるかもしれないが、試験機の性能上の限界値である50mmを閾値とした。

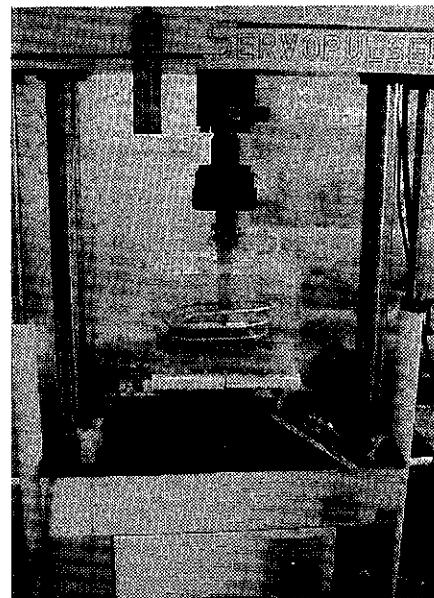


図-2.3.21 浸漬疲労試験

表-2.3.12 曲げ疲労試験結果

PEM		PEL		PPS	
最大応力差(MPa)	繰返し数	最大応力差(MPa)	繰返し数	最大応力差(MPa)	繰返し数
44.0	39	48.3	4	86.5	4
40.6	498	37.7	24	67.7	344
41.4	610	26.7	2116	59.5	624
39.3	3100	26.5	2992	63.8	5659
36.1	37219	23.5	32762	58.8	126861
34.2	88743	20.7	35776	63.1	328095
34.0	285626	25.3	71219	58.2	425908
25.1	1588053	16.2	80878	43.1	7110493
26.5	7154889	21.8	83729		
		11.7	426221		

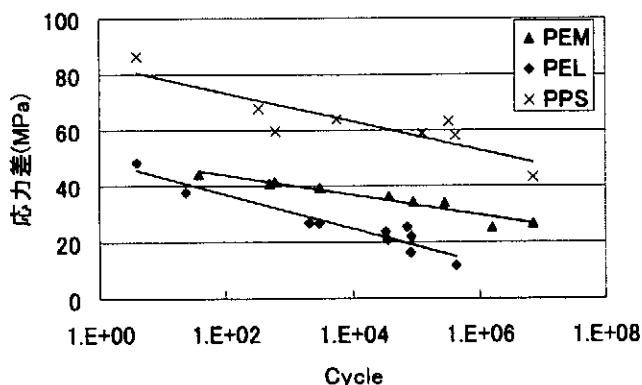


図-2.3.22 曲げ応力一繰り返し数線図

破壊様相は、静的曲げ試験の場合と同様PPS材に引張側の白化現象がみられたが、き裂等は発生していない。ポリエチレン系については白化現象も見られなかった。ただし、PEL材の一部にき裂の発生が見られた。このき裂にも白化現象は見られず、脆的にき裂が進んだように見受けられる。成形安定性の影響、低温の影響、荷重速度の影響等が考えられる。

図-2.3.23に剛性変化を調べた結果を示す。破断までの寿命が短いものは剛性率が20~40%程度に低下したときに破壊している。これに対して長寿命のものは剛性率が低下しないまま、あるいは逆に上昇して破壊している。熱硬化性樹脂の場合は、後硬化の影響により、時間がたつにつれて弾性率が大きくなることはよくあるが、今回の試験はそれとは違って、載荷部が繰り返し曲げられることによって徐々に白化が進み、これに伴う加工硬化が、疲労による微視的な破壊による強度低下よりも勝っていたために、強さが上昇したのではないかと考えられる。もちろんこの破壊は先に述べたように今回の判定条件のもとでの結果であり、そのまま疲労試験を続けると剛性が低下していくことは考えられる。今後の課題であるが、余寿命の判定に使用するのは難しそ

うである。

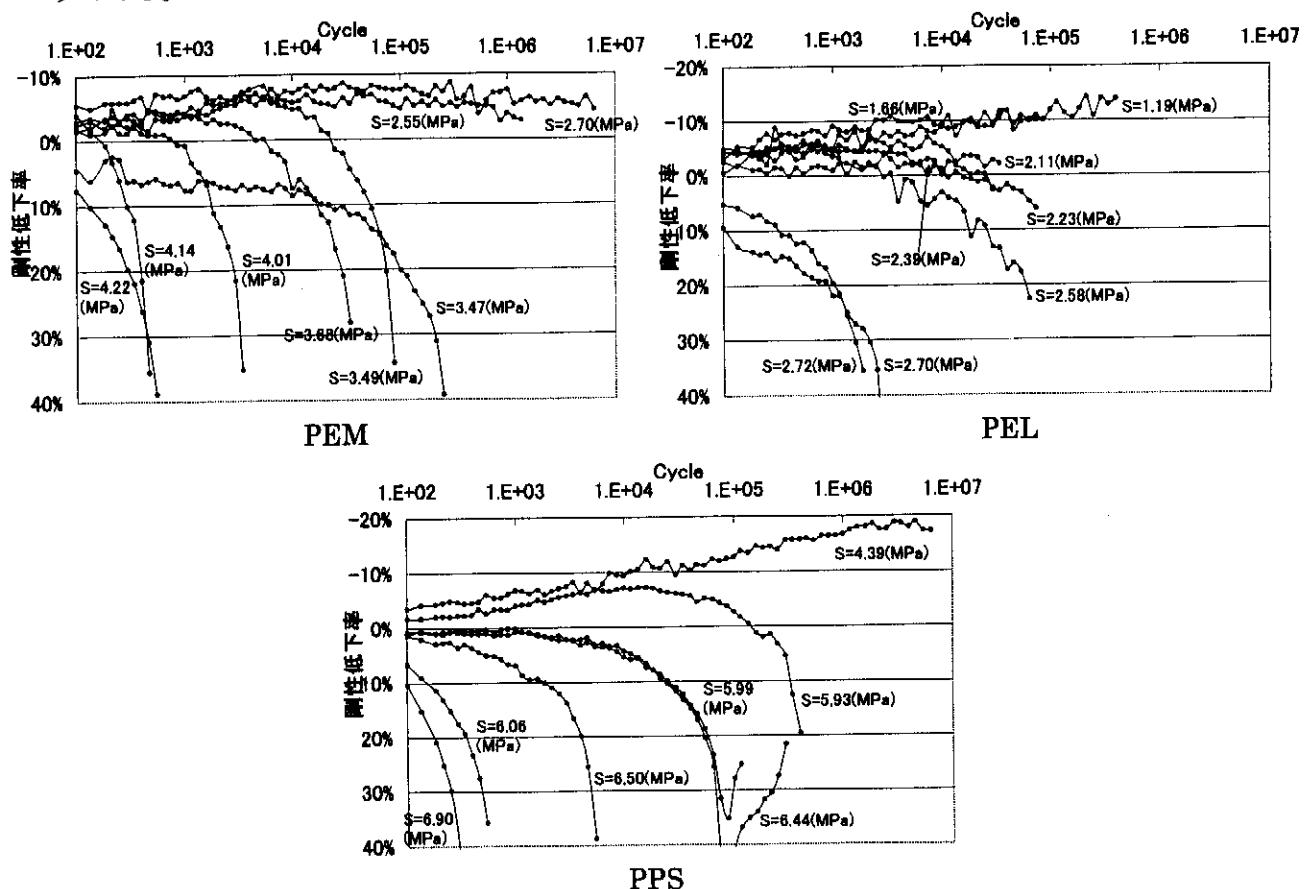


図-2.3.23 曲げ疲労過程における剛性低下率

2-3-3-8 繰り返し折り曲げ試験

(1) 試験方法

型削り盤の往復運動を利用して、図-2.3.24に示す方法により、 $176 \times 160 \times 3 \sim 4$ (元厚) mm の試験片について、片側繰り返し曲げ試験を行った。折り曲げ角度は 45° 、 67.5° 及び 90° の 3 通りとした。この方法では曲げた後の戻りが最初の位置まで戻らず、繰り返し数が多くなるほど、また折り曲げ角度が大きくなるほど戻る量は少なくなった。そこで、折り曲げ角度 90° の場合は試験片の先端に鍤を取り付けて元の位置まで戻るようにして行った。

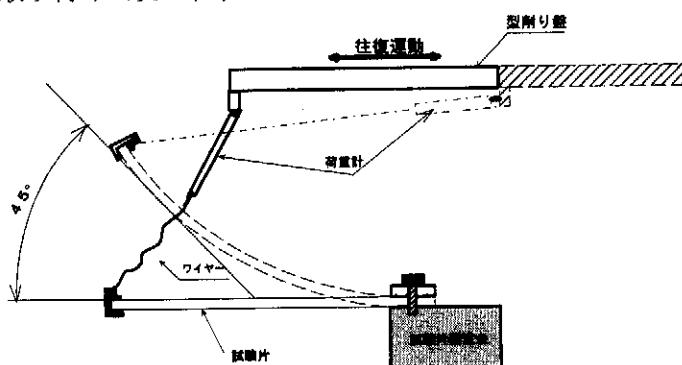


図-2.3.24 繰り返し折り曲げ試験装置(片曲げ)

また図-2.3.25に示す方法により、両側繰り返し曲げ試験も行った。試験片は $176 \times 50 \times 3 \sim 4$ (元厚) mmとし、曲げ角度は片側 45° 及び 67.5° の2通りとした。両方法とも、繰り返し速度は1分間に20回、繰り返し回数は2万回とし、試験温度は室温 ($23 \sim 28^\circ\text{C}$) で行った。

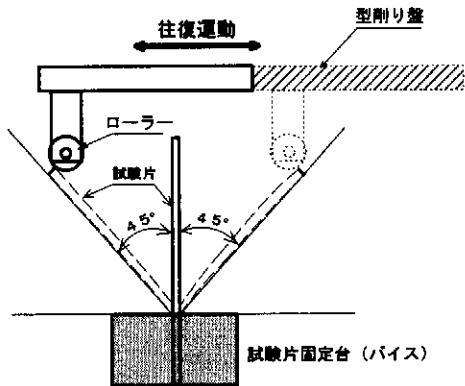


図-2.3.25 繰り返し折り曲げ試験装置（両曲げ）

(2) 試験片

各供試材の寸法を表-2.3.13に示す。

表-2.3.13 繰り返し折り曲げ試験片

供試材	片曲げ試験片寸法 (mm)			両曲げ試験片寸法 (mm)		
	幅	長さ	厚さ(元厚)	幅	長さ	厚さ(元厚)
PEB	162.3	175.7	3.22	50.7	176.0	3.45
PEM	159.9	176.4	4.02	50.5	176.5	3.65
PEL	159.8	176.6	3.73	50.5	175.9	3.70
PPF	160.0	176.0	3.67	50.5	176.1	3.65
PPS	159.9	176.2	3.77	50.6	176.0	3.60

(3) 試験結果

折り曲げ試験の結果を表-2.3.14に示す。

片曲げ試験ではPELの曲げ角度 67.5° 及び 90° のものにひび割れ、破断等の損傷が見られたが、その他は曲げ角度 90° で白色化が見られた程度であった。また両曲げの場合は、PELの曲げ角度 45° が2400回で破断し、PEMは曲げ角度 67.5° 、10140回でほぼ破断した。その他のものは白色化が見られた程度であった。

表-2.3.14 繰り返し折り曲げ試験結果

供試材	片曲げ			両曲げ	
	45°	67.5°	90°	45°	67.5°
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	10140回で破断
PEL	異常なし	4000回で 破断	約10000回でひび が入る	2400回で破断	1800回でほぼ破断
PPF	異常なし	異常なし	両端部の引張り側 が白色化する	異常なし	異常なし
PPF溝付	---	---	溝部が白色化し、 軟らかくなる	溝部が白色化し、 軟らかくなる	溝部が白色化し、軟 らかくなる
PPS	異常なし		両端部の引張り側 が白色化	試片固定台近傍 約5mm幅が少し 白色化	試片固定台近傍 約11.5mm幅の片側 が少し白色化

* 試験中の供試材の温度は片曲げが室温より約1.5°C高くなり、両曲げの場合は約5°C高くなつた。

2.3.3.9 落錘3点曲げ衝撃試験

(1) 試験方法

衝撃試験には、落錘3点曲げ試験装置を使用した。図-2.3.26に衝撃試験装置を示す。落錘重量は0.77kgである。落錘落下高さは、0.5~2mの範囲で行った。衝撃荷重は、支持点に設置したロードセル（㈱東京測器研究所製TCLZ-500KA）により計測した。データのサンプリング速度は、10μsecで行った。比較検討のため、同じ寸法の試験片で静的3点曲げ試験も行った。試験機は大型テンショロン試験機UTM-10Tを使用し、ヘッド速度は2mm/minで行った。また、衝撃試験時の試験片の振動特性等を調べるために、超音波探傷機を用いて各試験材の弾性率を求めた。探触子は、5MHzのものを使用した。なお、試験本数は各供試板につき5本、試験温度は室温（約25°C）で行った。

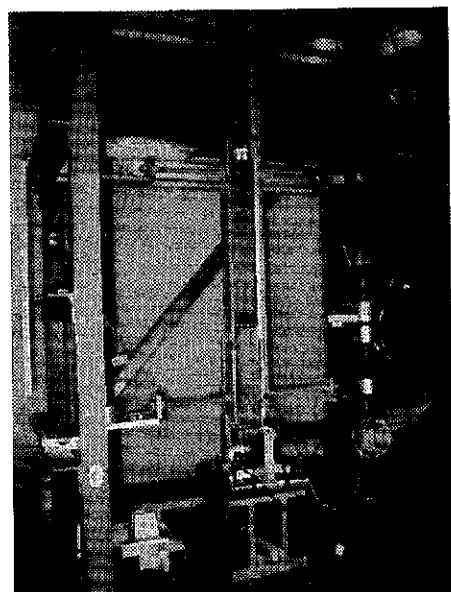


図-2.3.26 落錘衝撃試験装置

(2) 試験片

試験片の形状は短冊形とし、試験片寸法は、長さ100mm、幅20mm、板厚約3.5mm（各試験片板厚平均）である。スパンについては、これらの材料が非常に粘弹性的な特性を示し、曲げ試験時の荷重の出力値が小さいため、スパンを60mmにして3点曲げ試験を行つた。

(3) 試験結果

今回用いた各材料は、変形時に粘弹性的な性質を示し、落錘の落下高さが1m以上になると、試

試験片は二つ折りに近い状態にまで曲がってしまう。参考までに衝撃試験後の各試験片の目視検査を行った結果、ポリプロピレン系については、引張側に白化現象が生じていた。白化現象はPPSの方が顕著に現れ、その範囲も大きい。PEMについては、落錐落下高さが1m以上になると引張側に白化現象が少し生じた。しかし、他のポリエチレン材については全く損傷が観察されなかった。また、試験直後に折れ曲がった状態の試験片の荷重を除去すると、各試験片とも数分で変位が5mm程度にまで回復する。なお、衝撃試験装置の最大曲げ変形量は約30mmで、これは落下した落錐が緩衝材に衝突し停止させている距離である。

弾性率 E は、材料の密度 ρ 及び超音波試験装置を使用して材料の縦波の音速 C_p と横波の音速 C_s を測定し、ポアソン比 ν を算出してから、次式により求めた。

$$E = \frac{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} C_p^2$$

$$E = \rho 2(1+\nu) C_s^2$$

$$\frac{C_s^2}{C_p^2} = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}$$

測定結果を表-2.3.15に示す。この結果から、衝撃試験時の試験片に生じる振動周波数をはり理論から求め、衝撃荷重データの処理方法を検討した。これより衝撃荷重は、1kHzのフィルター処理を行った波形データから求ることとした。

衝撃3点曲げ試験を行った結果、試験片の破壊に至らなかったことは前述した。したがって、衝撃曲げ強度は測定データの最大値とした。衝撃曲げ強度の計算には、静的曲げ試験の項で述べた式をそのまま使用している。表-2.3.16及び図-2.3.27に衝撃曲げ強度および比較のための静的曲げ強度を示す。曲げ強さについては、静的曲げ強さと衝撃曲げ強さに著しい違いは見られなかった。

表-2.3.15 弾性率測定結果

試験材	密度	音速		ポアソン比	弾性率
	ρ (kg/m ³)	C_p (m/s)	C_s (m/s)	ν	E (GPa)
PPS	910	2320	1060	0.37	2.77
PPF	897	2300	1020	0.38	2.53
PEM	946	2110	800	0.42	1.65
PEB	930	2250	900	0.40	2.20
PEL	935	2060	660	0.44	1.22

表-2.3.16 衝撃及び静的曲げ強さ

試験材	静的曲げ 強さ (MPa)	衝撃曲げ強さ(MPa)			
		h=0.5 m	h=1.0 m	h=1.5 m	h=2.0 m
PEB	19	25	28	24	26
PEM	19	22	25	21	24
PEL	11	16	21	17	21
PPF	31	28	31	28	30
PPS	34	32	33	31	35

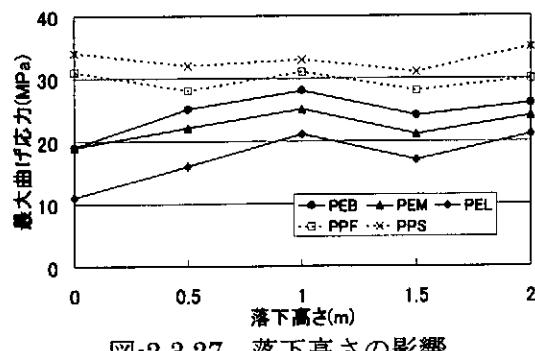


図-2.3.27 落下高さの影響

2-3-3-10 耐寒性試験（アイソット衝撃試験）

(1) 試験方法

試験はJIS K7110の硬質プラスチックのアイソット衝撃試験に準拠して、-60、-40、-30、-20、-10、0、10、20、50°Cの各温度において行い、アイソット衝撃値と温度との関係を求めた。試験後の試験片の破壊状況を目視で観察するとともに、マイクロスコープによる破面の観察及び表面粗さ形状測定機を用いて破面の表面粗さ（最大粗さ（Rmax）と中心線平均粗さ（Ra））を調べた。なお、試験本数は各供試板につき5本としたが、バラツキが多く傾向のはつきりしない場合は追加試験を行った。

(2) 試験片

試験片は幅（供試材の元厚）3~4mm、厚さ12.7mm、長さ64mm、V型切欠き深さ2.54mmの2号A切欠き付試験片を用いて行った。各試験片の幅（供試材の元厚）を表-2.3.17に示す。

表-2.3.17 試験片寸法

供試材	幅（厚さmm）	
	平均	標準偏差
PEB	2.87	0.064
PEM	3.71	0.897
PEL	3.65	0.08
PPF	3.64	0.004
PPS	3.78	0.076

(3) 試験結果

各供試材のアイソット衝撃試験結果のアイソット衝撃値を表-2.3.18に示す。また、アイソット衝撃値と温度との関係を図-2.3.28~2.2.32に示す。

表-2.3.18 アイソット衝撃値

温度 ℃	PEB		PEM		PEL		PPF		PPS	
	平均 kJ/m ²	標準偏差	平均 kJ/m ²	標準偏差	平均 kJ/m ²	標準偏差	平均 kJ/m ²	標準偏差	平均 kJ/m ²	標準偏差
80	----	----	----	----	----	----	----	----	667.48	19.24
50	603.56	101.70	495.10	50.53	391.90	13.44	667.88	39.21	629.39	41.70
30	504.64	43.46	609.61	35.61	556.56	6.74	557.62	45.75	584.36	27.14
20	531.00	67.19	675.86	17.54	646.69	15.89	583.59	16.81	478.14	24.20
15	----	----	----	----	----	----	258.19	45.75	----	----
10	576.81	96.93	647.57	70.00	708.96	30.17	152.17	14.11	188.21	38.33
5	----	----	771.39	114.92	720.62	22.48	131.12	6.30	----	----
0	511.07	115.11	784.58	28.61	735.97	62.77	90.58	5.98	81.35	1.81
-5	598.10	50.67	100.81	20.10	----	----	----	----	----	----
-10	311.83	48.78	77.40	4.56	78.27	34.44	71.45	11.32	45.62	5.64
-20	162.31	29.04	76.57	11.97	56.12	13.79	57.14	6.06	38.17	3.60
-30	180.95	25.74	----	----	----	----	46.11	2.61	----	----
-40	93.39	46.78	24.31	5.62	50.67	7.38	36.56	3.50	26.13	3.56
-60	80.69	1.57	36.61	5.65	21.46	1.85	21.55	1.78	21.06	1.60

ポリエチレン系のPEB(図-2.3.28)は-5°C付近まではあまり変化は見られないが、-5°Cより低い温度になると急激に減少する。また、PEM及びPELは0°C付近までは温度の低下に伴い増加する傾向を示し、0°Cより低くなると急激に減少する。

したがって、PEBの延性的破壊(延性的性質)領域から脆性的破壊(脆性的性質)領域に移る遷移温度域が-5～-20°C付近にあり、PEM及びPELの遷移温度域は0～-10°C付近であると思われる。これに対して、ポリプロピレン系の供試材のアイソット衝撃値は温度の低下に伴い徐々に減少し、20°Cより低くなると急激に減少する傾向が見られる(図-2.3.31、2.3.32)。このことはPPF及びPPSの遷移温度域が20～-10°C付近であることを示している。

アイソット衝撃試験後の破壊様相と破面の表面粗さを調べた結果を図-2.3.33～2.3.37に示す。破壊様相も温度の低下に伴い変化し、ポリエチレン系ではPEBが-10°C以下の温度で表面粗さが減少している(図-2.3.33)。また、PEMは-10°C破面の表面粗さが減少している(図-2.3.34)。しかしながら、PELでは-10°Cで完全に破断するようになるが、破面の粗さは比較的大きくなっている。このことは破壊様相を見るとわかるように、直線的に破断せず、結晶粒の粒界に沿って破断しているためと思われる(図-2.3.35)。

ポリプロピレン系のものはポリエチレン系より温度の影響が顕著であり、10°Cになるとほぼ完全に破断するようになる。また、破断面は10°Cより高い温度では引きちぎられたような比較的大きな凹凸が見られ、10°Cより低い温度では滑らかな破面となっている。このことは表面粗さを調べた結果にも現れており、PPFでは0°Cで、PPSでは10°Cでの表面粗さが急激に小さくなっている(図-2.3.36、2.3.37)。

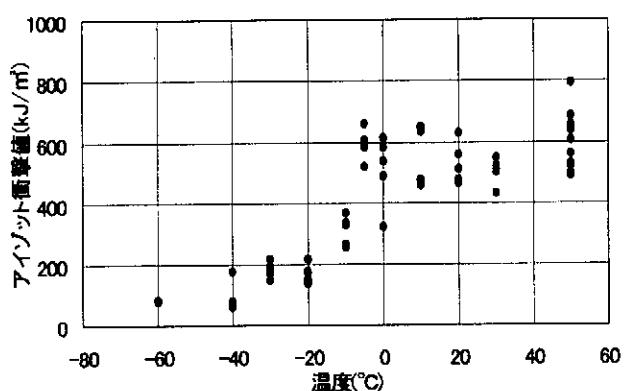


図-2.3.28 アイゾット衝撃値と温度との関係(PEB)

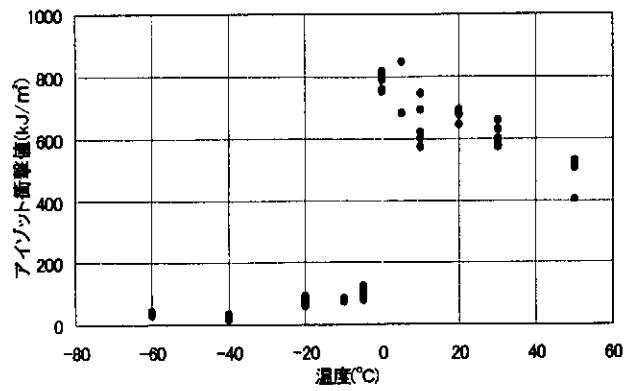


図-2.3.29 アイゾット衝撃値と温度との関係(PEM)

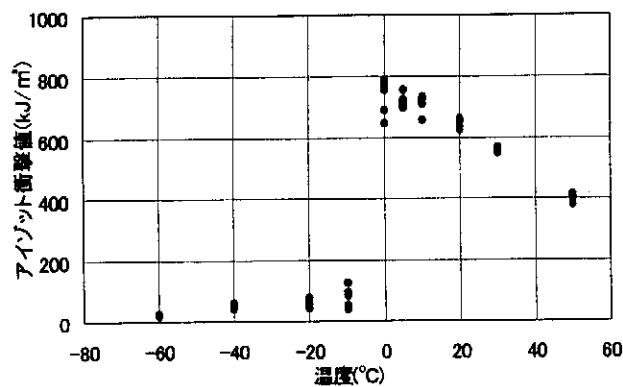


図-2.3.30 アイゾット衝撃値と温度との関係(PEL)

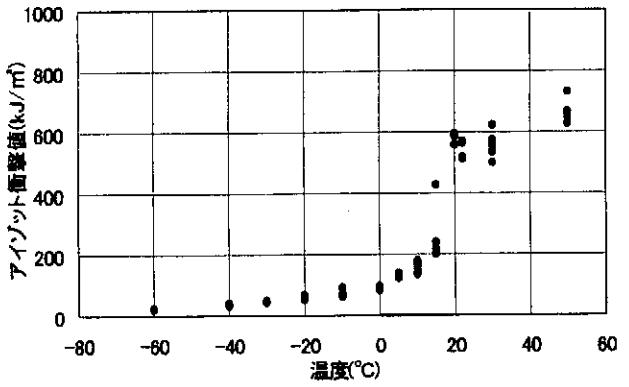


図-2.3.31 アイゾット衝撃値と温度との関係(PPF)

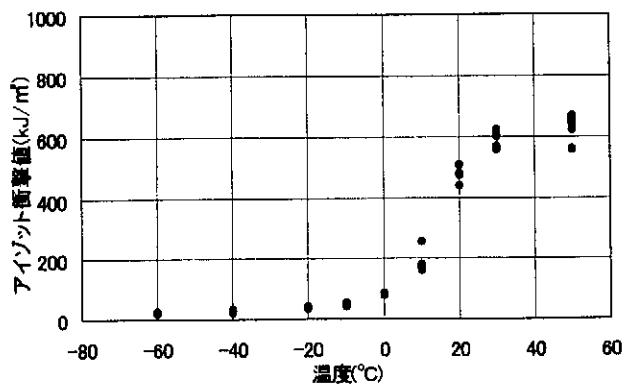


図-2.3.32 アイゾット衝撃値と温度との関係(PPS)

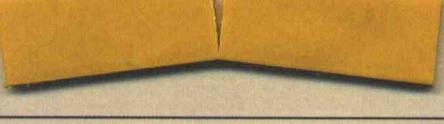
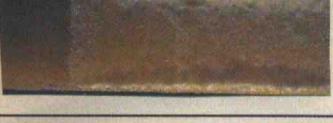
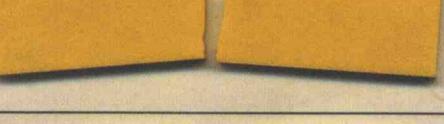
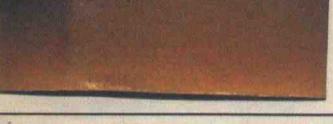
試験温度	破壊様相(打撃) ↓	破断面	表面粗さ(μm)
50°C			Ra: 5 Rmax: 29
20°C			Ra: 11 Rmax: 26
10°C			Ra: 9 Rmax: 24
0°C			Ra: 11 Rmax: 26
-5°C			Ra: 7 Rmax: 44
-10°C			Ra: 4 Rmax: 23
-20°C			Ra: 9 Rmax: 26
-40°C			Ra: 2.7 Rmax: 12.3
-60°C			Ra: 3.4 Rmax: 18.4

図-2.3.33 アイゾット衝撃試験片の破壊様相 (PEB)

試験温度	破壊様相(打撃) ↓	破断面	表面粗さ(μm)
50°C			Ra: 9 Rmax: 46
20°C			Ra: 7 Rmax: 37
10°C			Ra: 7 Rmax: 57
0°C			Ra: 7.6 Rmax: 14.6
-5°C			Ra: 8.6 Rmax: 22.1
-10°C			Ra: 6.6 Rmax: 5.9
-20°C			Ra: 3.3 Rmax: 16.2
-40°C			Ra: 6.1 Rmax: 10.2
-60°C			Ra: 5.9 Rmax: 23.5

図-2.3.34 アイゾット衝撃試験片の破壊様相 (PEM)

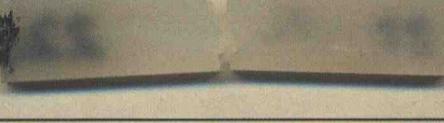
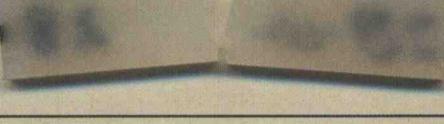
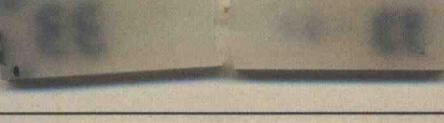
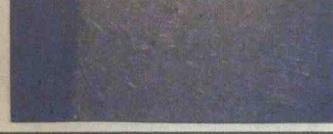
試験温度	破壊様相(打撃)	破断面	表面粗さ(μm)
50°C			Ra: 31.2 Rmax: 24.4
20°C			Ra: 17.8 Rmax: 54.6
10°C			Ra: 18.4 Rmax: 45.9
0°C			Ra: 31.5 Rmax: 71.6
-10°C			Ra: 36 Rmax: 161
-20°C			Ra: 36 Rmax: 63
-40°C			Ra: 7 Rmax: 49
-60°C			Ra: 4 Rmax: 28

図-2.3.35 アイゾット衝撃試験片の破壊様相 (PEL)

試験温度	破壊様相(打撃) ↓	破断面	表面粗さ(μm)
50°C			Ra: 24 Rmax: 115
20°C			Ra: 23 Rmax: 53
10°C			Ra: 36 Rmax: 158
0°C			Ra: 14 Rmax: 58
-10°C			Ra: 10 Rmax: 58
-20°C			Ra: 14 Rmax: 102
-40°C			Ra: 9 Rmax: 58
-60°C			Ra: 4 Rmax: 23

図-2.3.36 アイゾット衝撃試験片の破壊様相 (PPF)

試験温度	破壊様相(打撃)▼	破断面	表面粗さ(μm)
80°C			Ra: 21 Rmax: 101
50°C			Ra: 13 Rmax: 62
20°C			Ra: 45 Rmax: 178
10°C			Ra: 14 Rmax: 61
0°C			Ra: 15 Rmax: 79
-10°C			Ra: 13 Rmax: 67
-20°C			Ra: 15 Rmax: 70
-40°C			Ra: 8 Rmax: 41
-60°C			Ra: 14 Rmax: 41

図-2.3.37 アイゾット衝撃試験片の破壊様相 (PPS)

2・3・3・11 熱老化性試験（静的曲げ試験）

(1) 試験方法

JIS K7212の熱可塑性プラスチックの熱老化性試験方法（オープン法）に準拠して行った。試験はポリエチレン系が温度50°Cで試験時間を0、20、40、60、80、100日とした。また、ポリプロピレン系は温度120°Cで試験時間は0、100、200、300、400、500時間とした。老化の判定は①肉眼観察により、試験片に局部的な粉化、割れ、ひび、変形、変色などの発生状況、②重量の変化、③曲げ試験による性能変化を調べた。なお、試験本数は各試験時間とも5本である。

(2) 試験片

試験片は静的曲げ試験と同様の全長80mm、幅15mmの短冊型のものを使用した。試験片の板厚は元厚のままとした。各供試材の厚さを表-2.3.19に示す。

表-2.3.19 熱老化試験片

供試材	厚さ (mm)	
	平均	標準偏差
PEB	4.63	0.17
PEM	3.59	0.05
PEL	3.69	0.04
PPF	3.62	0.03
PPS	3.76	0.11

(3) 試験結果

- ① 肉眼観察では試験片に局部的な粉化、割れ、ひび、変形、変色などの発生は認められなかった。
- ② 重量の変化率と試験の経過時間との関係を図-2.3.38、2.3.39に示す。試験片の重量は老化試験初期には試験片の乾燥によりやや減少するが、その後はほとんど変化が見られない。供試片の中ではPPFが他のものより大きくなり、これは他の供試片と異なり片側表面にエンボス加工があること（エンボス加工により表面積が増加するため、老化作用を（表面積が増加した分だけ）多く受けること）が考えられるが、変化率は高々0.5%程度であり、問題はないと思われる。

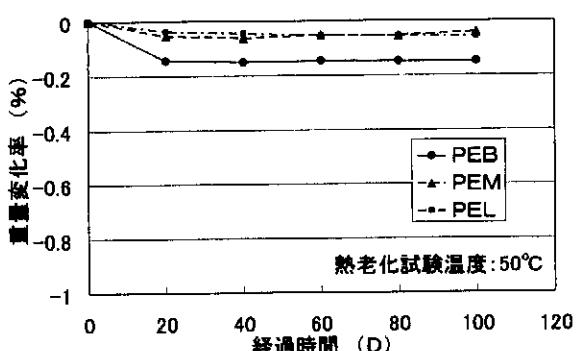


図-2.3.38 重量変化率の経時変化(PE 系)

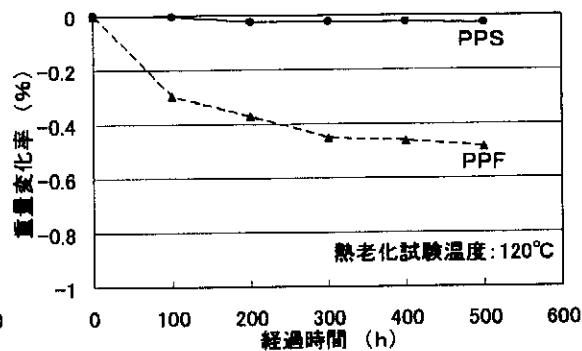


図-2.3.39 重量変化率の経時変化(PP 系)

- ③ 热老化試験後の曲げ強度及び曲げ弾性率を調べた結果を表-2.3.20、2.3.21に示す。また、各供試材の曲げ強さ及び弾性率と試験時間との関係を図-2.3.40、2.3.41に示す。総じて、曲げ強さ及び曲げ弾性率は試験時間の増加に伴いやや小さくなる傾向が見られる。

热老化試験による耐久性を調べるために、热老化試験後の曲げ強さ及び曲げ弾性率と試験前の曲げ強さ及び曲げ弾性率との比率をとった曲げ強さ及び弾性率の保持率と試験時間との関係を求めたものが図-2.3.42、2.3.43である。ポリプロピレン系の強さ及び弾性率の保持率は試験時間500時間後でも90%以上あり、ポリエチレン系のものは弾性率保持率がやや小さくなるが、100日後でも強度保持は90%以上で、弾性率保持率は85%以上ある。

表-2.3.20 热老化材の曲げ強度特性 (PE 系)

供試材	試験時間 (D)	曲げ強さ (MPa)		曲げ弾性率 (MPa)	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差
PEB	0	24.99	1.01	892.68	68.70
	20	24.99	0.56	864.46	85.75
	40	24.79	1.07	855.05	71.25
	60	23.13	1.57	836.92	108.00
	80	24.30	0.44	769.50	67.03
	100	23.13	1.27	809.68	60.96
PEM	0	21.07	1.63	708.15	39.89
	20	19.60	1.38	665.91	101.04
	40	19.40	1.75	622.50	53.90
	60	20.38	1.59	641.02	77.42
	80	20.38	1.65	646.41	82.22
	100	20.68	1.05	699.03	27.24
PEL	0	12.25	0.41	326.73	22.44
	20	11.96	0.38	306.64	7.84
	40	11.56	0.48	309.48	34.50
	60	11.86	0.32	299.49	8.92
	80	11.96	0.64	300.27	62.13
	100	11.66	0.29	278.12	11.86

表-2.3.21 热老化材の曲げ強度特性 (PP 系)

供試材	試験時間 (h)	曲げ強さ (MPa)		曲げ弾性率 (MPa)	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差
PPF	0	34.10	0.65	1121.71	28.60
	100	31.07	1.16	1028.22	37.99
	200	31.56	0.05	1079.47	20.04
	300	31.46	0.45	1071.73	35.86
	400	31.16	0.95	1054.79	35.41
	500	32.44	0.90	1102.70	30.08
PPS	0	39.59	0.54	1297.81	12.94
	100	37.42	0.74	1210.79	24.40
	200	37.49	0.94	1215.59	24.99
	300	35.85	0.77	1196.29	11.27
	400	36.79	0.68	1196.19	33.91
	500	38.56	0.62	1252.54	54.00

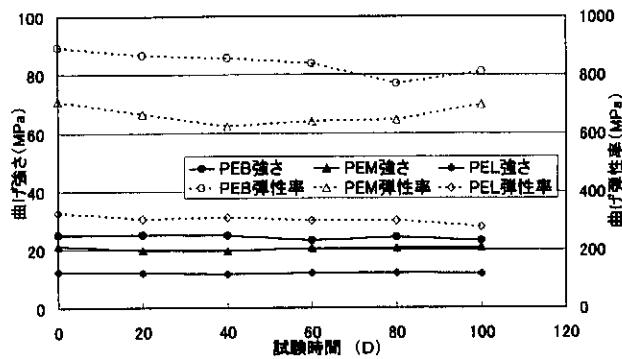


図-2.3.40 曲げ強度の経時変化(PE系)

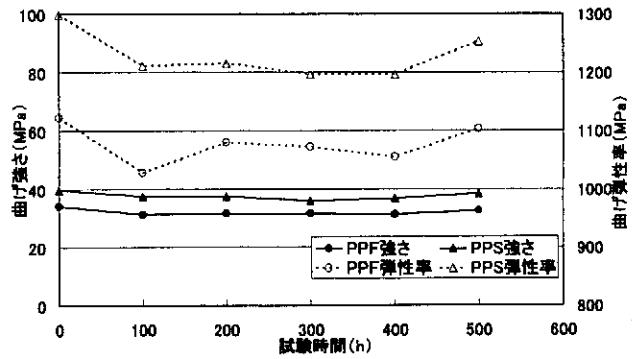


図-2.3.41 曲げ強度の経時変化(PP系)

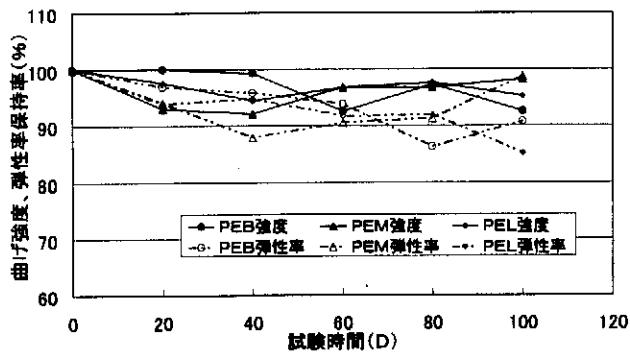


図-2.3.42 曲げ強度保持率の経時変化(PE系)

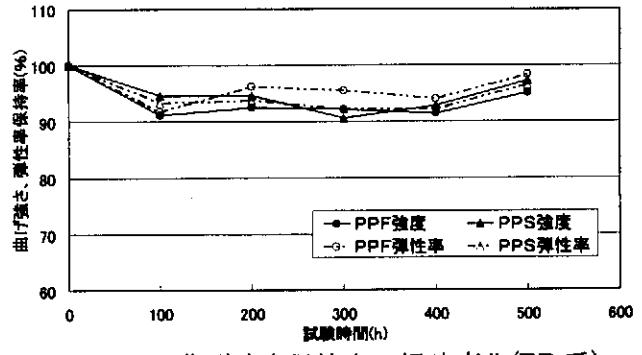


図-2.3.43 曲げ強度保持率の経時変化(PP系)

2-3-3-12 定応力環境応力き裂試験

(1) 試験方法

JIS K6760のポリエチレン試験方法に準拠して行った。個々の試験片に負荷する荷重は初期応力が原則として、7.48MPa、8.82MPa、9.80MPaのいずれかとし、50°Cの恒温水槽中で行った。

(2) 試験片

試験片の形状及び寸法は図-2.3.44に示すように成形したものを用いた。なお、試験片の厚さは元厚のままである。各供試材の厚さを表-2.3.22に示す。

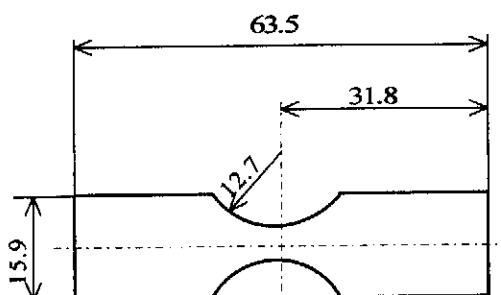


図-2.3.44 定応力環境応力き裂試験片

表-2.3.22 定応力環境応力き裂試験片

供試材	厚さ (mm)	
	平均	標準偏差
PEB	4.21	0.47
PEM	2.95	0.07
PEL	3.67	0.09
PPF	3.58	0.02
PPS	3.75	0.09

(3) 試験結果

各供試材の試験時伸びと経過時間との関係を図-2.3.45～2.3.49に示す。ポリエチレン系のPELを除く各供試材は90～100時間では破断せず、伸びはほぼ一定になった。そこで、荷重を追加すると伸びが急激に増加するが破断には至らず、図-2.3.50に示すように試験片中央部がくびれて試験片全体が長くなっている様相がわかる。したがって、これらの供試材は温度50°C、100時間程度の試験範囲では定応力環境応力き裂は起こらないものと思われる。これらに対して、PELは10時間程度で定応力環境応力き裂が発生し、破断した。この時の伸びは2mm程度と比較的小さかった。

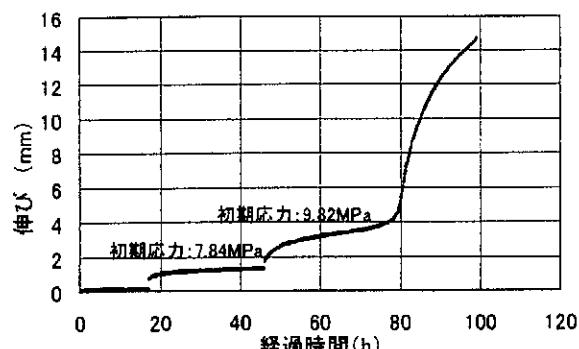


図-2.3.45 伸びの経時変化(PEB)

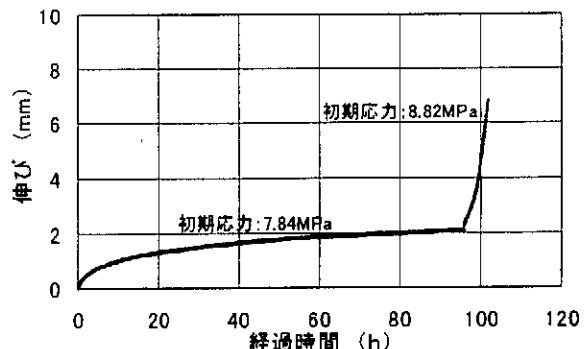


図-2.3.46 伸びの経時変化(PEM)

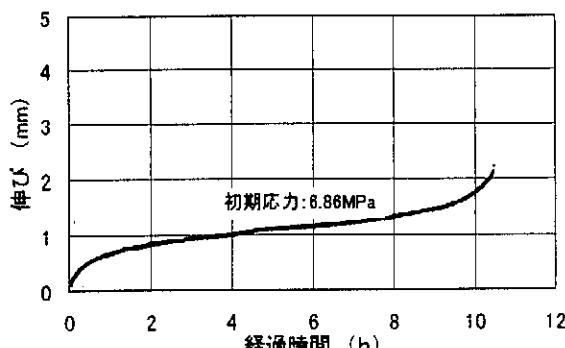


図-2.3.47 伸びの経時変化(PEL)

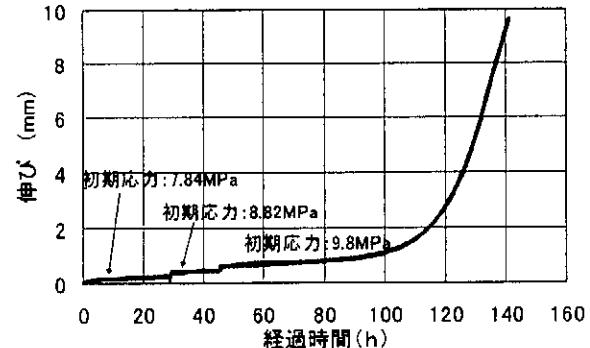


図-2.3.48 伸びの経時変化(PPF)

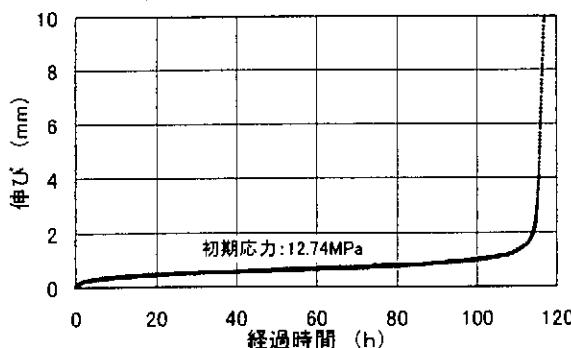


図-2.3.49 伸びの経時変化(PPS)

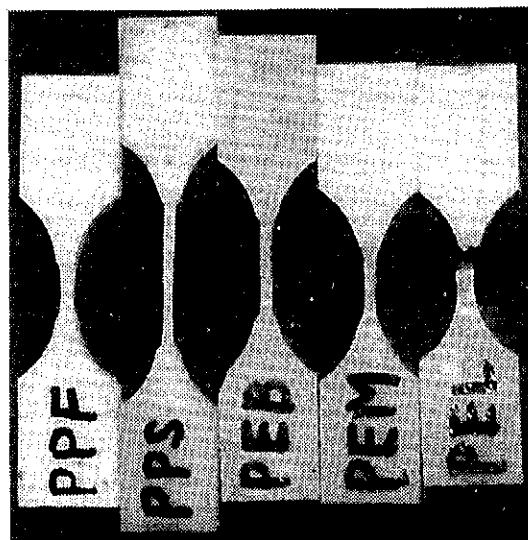


図-2.3.50 破壊様相

2-3-3-13 滑り摩耗試験

(1) 試験方法

摩耗試験はJIS K7218のプラスチックの滑り摩耗試験方法に準拠した回転式摩擦摩耗試験装置を用いて行った。これは図-2.3.51に示すディスク状の試験治具を用いて、上部ディスクに $10 \times 10 \times 2 \sim 3$ （元厚）mmの試験片を取り付け、下部ディスクには相手材のセメントモルタルを取り付けて圧着加圧し、下部ディスクを回転することにより摩擦する。この時の試験荷重及び摩擦力（すべりトルク）をロードセルにより検出記録して動摩擦係数を算出した。また、摩耗試験は平均滑り距離3km摩擦したときの試験前後の供試材重量を計測して摩耗量を算出し、次式により比摩耗量を算出した。試験中は圧縮空気を摩擦部に吹き付けることにより試験時の摩耗粉を除去するとともに、供試材及び相手材を冷却し、試験片の発熱を防ぐようにした。

$$V_s = V/PL$$

ここに V_s : 比摩耗量 mm³/ (N · km)

V : 摩耗量 mm³

P : 試験荷重 N

L : 平均滑り距離 km

摩耗量は次式により算出した。

$$V = (W_a - W_b)/\rho \times 10^3$$

V : 摩耗量 mm³

W_a : 試験前の試験片の重量 mg

W_b : 試験後の試験片の重量 mg

ρ : 試験片の密度 kg/m³

なお、試験前の供試材及び相手材の表面状態は表面粗さ形状測定機を用いて調べた。

(2) 試験片

試験片の大きさは縦10mm、横10mmの正方形とし、厚さは元厚のままとした。各供試材の厚さを表-2.3.23に示す。

表-2.3.23 滑り摩耗試験片

供試材	厚さ (mm)	
	平均	標準偏差
PEB	3.69	0.055
PEM	3.52	0.124
PEL	3.76	0.062
PPF	2.80	0.023
PPS	3.24	0.340

(3) 試験結果

はじめに、摩擦試験に用いた供試材及び相手材の試験前の表面状態を調べた結果を表-2.3.24に示す。各供試材の表面状態は比較的滑らかであるが、PEBは表面粗さ及び最大高さともやや大きくなっている。また、PPFは平滑面を用いた。

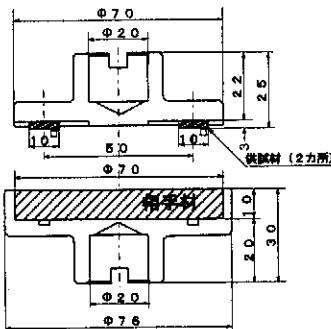


図-2.3.51 摩耗試験治具

表-2.3.24 摩耗試験材の表面状態 (単位: μm)

	相手材	PEB	PEM	PEL	PPF	PPS
中心線平均粗さ Ra	26.5	9.3	0.54	0.28	1.5	1.5
最大高さ Rmax	305	58.3	1.98	1.96	2.9	3.1

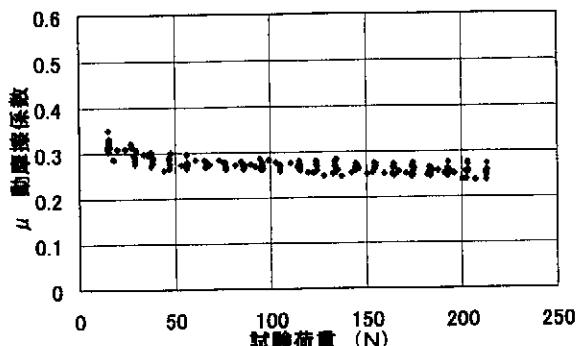


図-2.3.52 動摩擦計数と試験荷重(PEB)

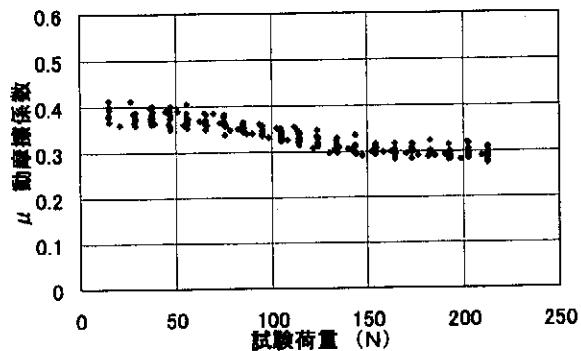


図-2.3.53 動摩擦計数と試験荷重(PEM)

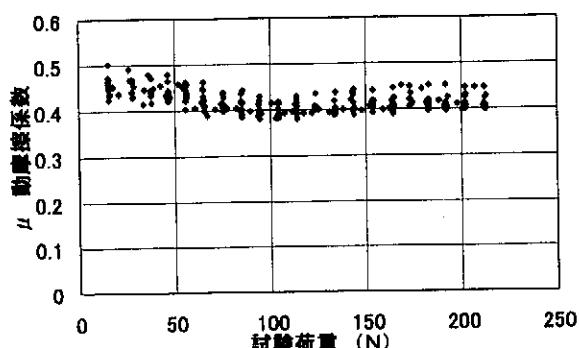


図-2.3.54 動摩擦計数と試験荷重(PEL)

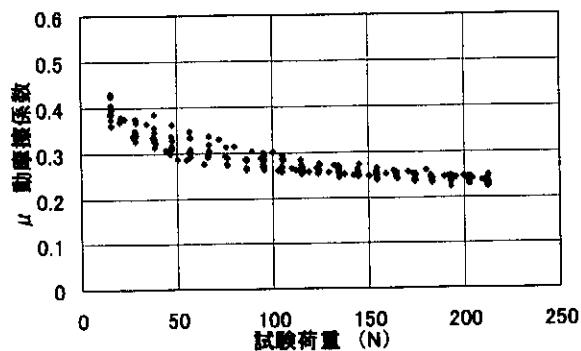


図-2.3.55 動摩擦計数と試験荷重(PPF)

図-2.3.52～2.3.56は各供試材の動摩擦係数を求めた結果である。これらは滑り速度を20m/min一定にして、試験荷重を変化させて調べたものである。各供試材とセメントモルタルとの動摩擦係数は0.2～0.5であった。また一体に、動摩擦係数は試験荷重の増加に伴い減少する傾向を示し、試験荷重が100N以上になるとそれほど変化が見られなくなる。

そこで、滑り速度は20m/min一定として、摩耗試験では試験荷重を49、98、196、294Nに変化させて行った。試験温度24～26°Cで摩耗試験を行った試験結果を表-2.3.25に示す。また、各供試材の比摩耗量と試験荷重との関係を図-2.3.57に示す。これによると、試験荷重196Nの場合のPEM及びPELの比摩耗量が急激に大きくなっている。これは、前述のデュロメータ硬さ(HDD)の結果からもわかるようにPEM及びPELは他の供試材に比べてHDDが小さく、比較的軟らかいため摩擦面が削られるような状態なったためと思われる。さらに試験荷重を294Nに大きくして試験を行ったが、削られる状況が見られ、試験時間1分(滑り距離:20m)程度で計測不能となった。その他の場合では比摩耗量の試験荷重に

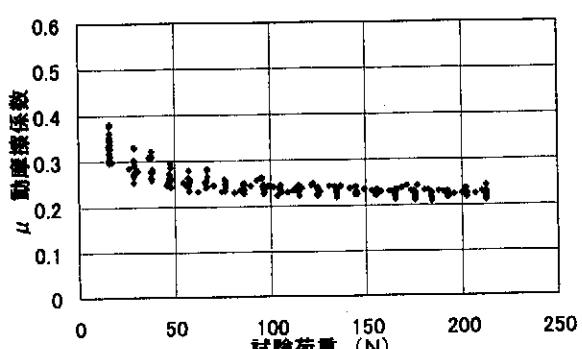


図-2.3.56 動摩擦計数と試験荷重(PPS)

よる差異は殆ど見られない。

表-2.3.25 各供試材の比摩耗量 単位 ; $\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{km})$

供試材	試験荷重 (N)			
	49	98	196	294
PEB	2.17E-08	3.75E-08	2.87E-08	3.19E-08
PEM	2.13E-07	2.17E-07	5.91E-07	-----
PEL	3.81E-06	3.81E-06	9.24E-06	-----
PPF	2.60E-09	7.17E-09	6.80E-09	4.91E-09
PPS	1.89E-08	1.30E-08	1.09E-08	8.52E-09

供試材による違いではポリプロピレン系のものが比較的良好な結果を示した。ポリエチレン系ではPEBがポリプロピレン系と遜色ない結果を示している。これらに比べてPEMが1桁、PELが2桁大きくなつた。

つぎに、常態での試験で比較的良好な結果を示したPEB、PPF及びPPSについて、水道水に10日間浸漬した後注水しながら摩擦試験を行い、動摩擦係数と試験荷重との関係を求めた結果を図-2.3.58～2.3.60に示す。

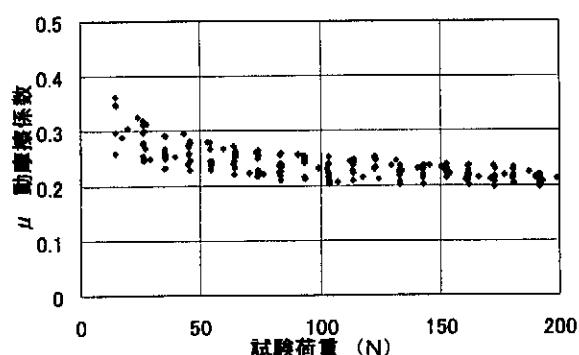


図-2.3.58 吸水状態における動摩擦係数と試験荷重(PEB)

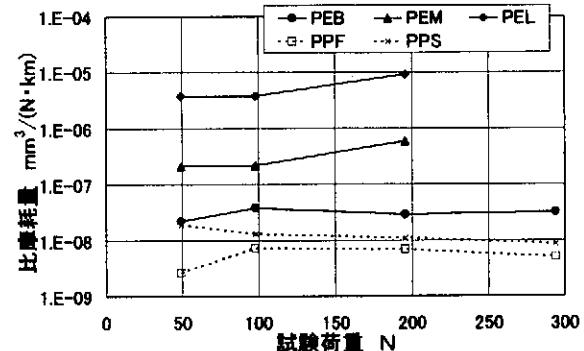


図-2.3.57 比摩耗量と試験荷重との関係

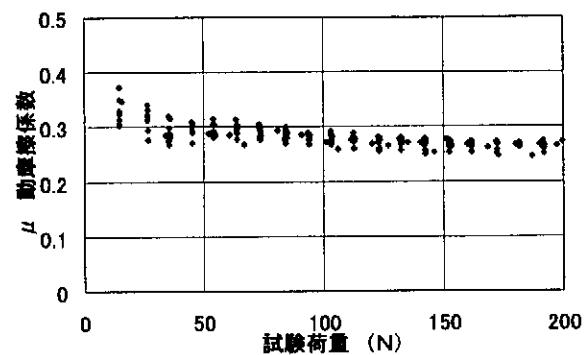


図-2.3.59 吸水状態における動摩擦係数と試験荷重(PPF)

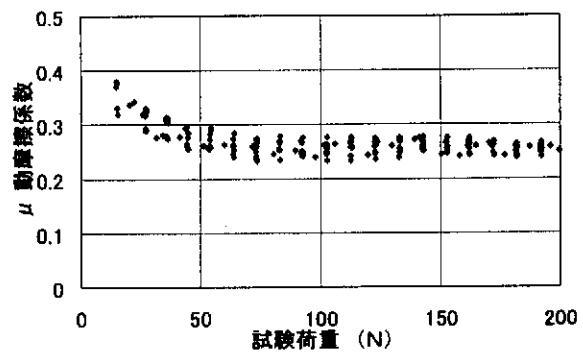


図-2.2.60 吸水状態における動摩擦係数と試験荷重(PPS)

また、FRPについて同様の試験方法で動摩擦係数を求めた結果⁹⁾の一例を図-2.3.61～2.3.63に吸水状態、図-2.3.64～2.3.66に乾燥状態における動摩擦係数と試験荷重との関係を示す。図中、GC、CC、及びACはガラスロービングクロス、カーボンクロス、アラミドクロスをそれぞれビニルエステル樹脂(VE)によりハンドレイアップしたFRPである。また、これらの結果より試験荷重50Nの動摩擦係数を乾燥状態と吸水状態とを比較して図-2.3.67に示す。図中、PPGはガラス繊維強化ポリプロピレンである。一般に、吸水状態の場合の動摩擦係数は水膜が潤滑剤となるため常態の場合に比べて小さくなる傾向を示すが、動摩擦係数が比較的小さい熱可塑性樹脂単体の場合はそれほど差異は見られない。

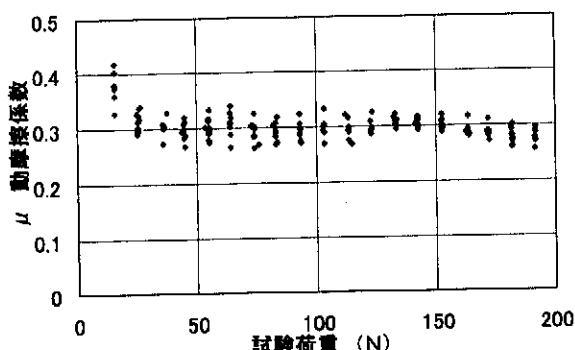


図-2.3.61 吸水状態における動摩擦係数と試験荷重(GC)

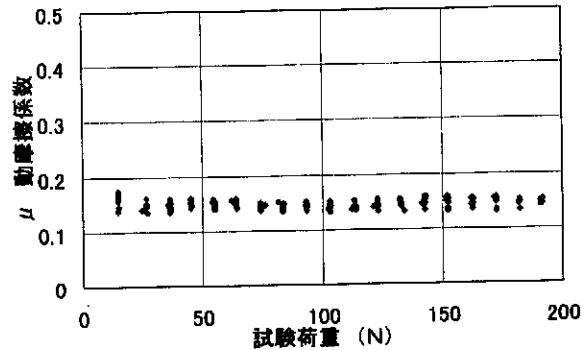


図-2.3.62 吸水状態における動摩擦係数と試験荷重(CC)

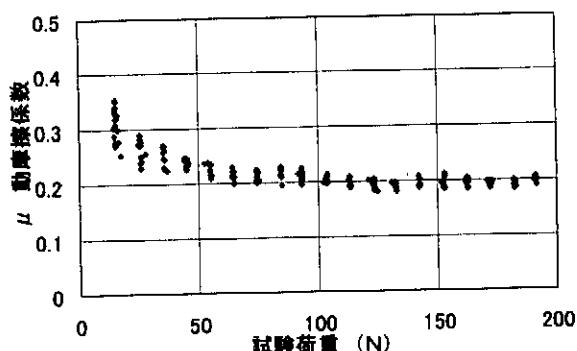


図-2.3.63 吸水状態における動摩擦係数と試験荷重(AC)

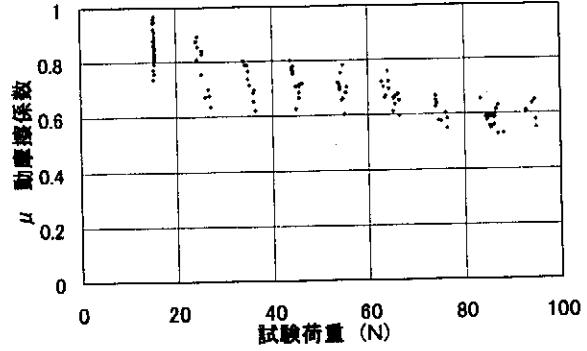


図-2.3.64 乾燥状態における動摩擦係数と試験荷重(GC)

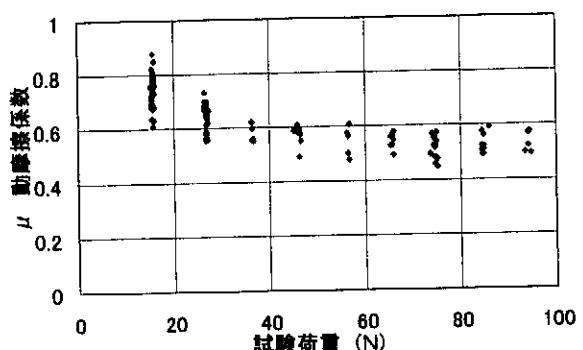


図-2.3.65 乾燥状態における動摩擦係数と試験荷重(CC)

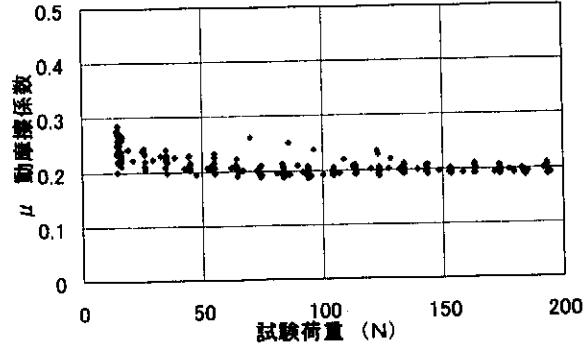


図-2.3.66 乾燥状態における動摩擦係数と試験荷重(AC)

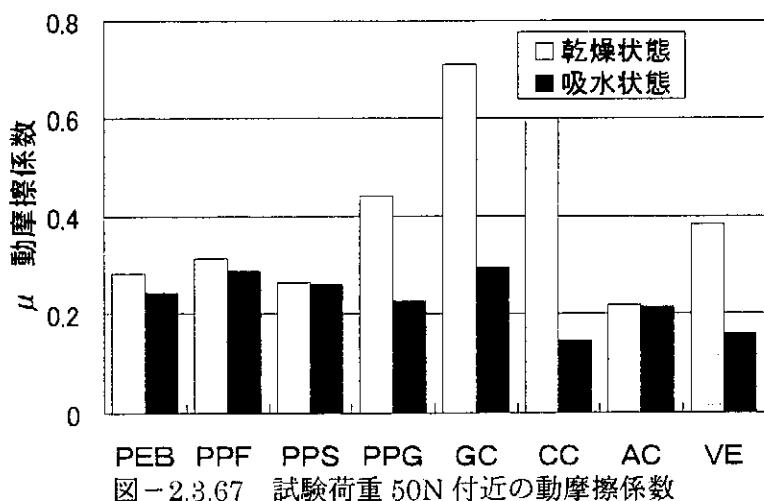


図-2.3.67 試験荷重 50N 付近の動摩擦係数

動摩擦係数と同様に FRP を含めて、比摩耗量について乾燥状態と吸水状態とを比較して図-2.3.68 に示す。比摩耗量の場合も動摩擦係数と類似の傾向を示している。このことは比摩耗量が動摩擦係数に依存していることを示している。

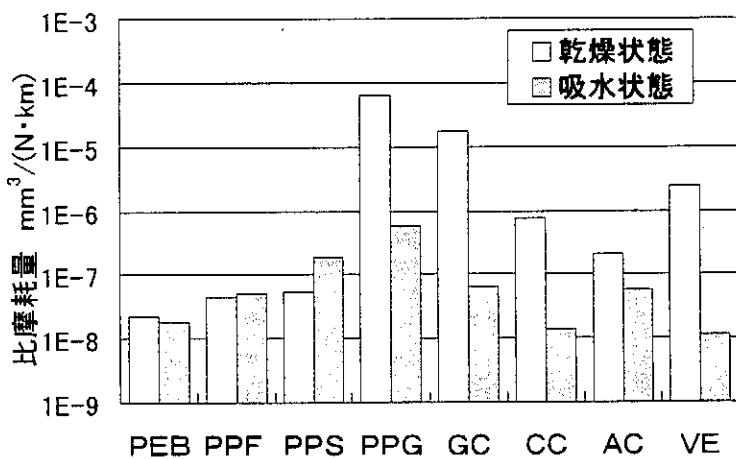


図-2.3.68 比摩耗量の状態による違い(W: 49N)

2-3-3-14 促進暴露試験結果

(1) 試験方法

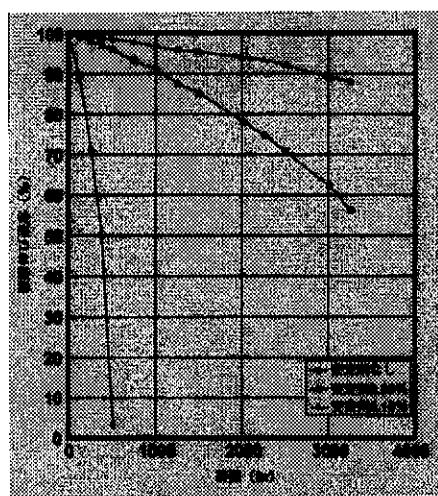
促進暴露試験にはサンシャインカーボンアーク、キセノンランプ、紫外線カーボンアーク、蛍光ランプ等の方法があるが、ここでは一般的なサンシャインカーボンアークにより行うこととした。サンシャインカーボンアークの促進効果を精密に表現することは難しいが、ポリエチレンによる屋外暴露との比較結果の一例を図-2.3.69に示す¹⁰⁾。線図を詳細に比較すると、サンシャインカーボンアークの500時間照射がほぼ1年の屋外暴露に相当していることがわかる。

促進暴露試験は大阪府立産業技術総合研究所に依頼し、JIS K7350-4プラスチック試験室光源による暴露試験方法-第4部:オープンフレームカーボンアークランプに準拠して実施した。試験機はスガ試験機(株)製スーパーロングライフウェザーメータWEL-SUN-DCを用い、ブラックパネル温度 $63 \pm 3^\circ\text{C}$ 、湿度(水噴霧のないとき) $50 \pm 5\%$ RH、水噴霧時間120分中18分の先行噴霧、フィルターA、ドラム回転数1rpmとした。また、試験時間は500時間まで100時間おきとした。図

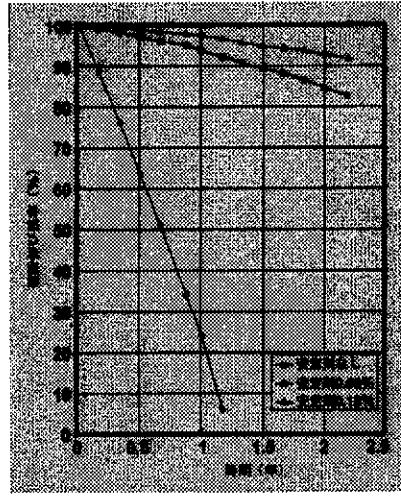
－2.3.70に暴露条件等を記した大阪府立産業技術総合研究所発行の試験報告書を示す。

劣化状況の評価は目視観察とデュロメータ硬さ、静的曲げ試験及びアイソット衝撃試験で行うこととし、これらは海上技術安全研究所大阪支所、三鷹本所で実施した。

なお、照射枚数については、ウェザーメータでの最大照射枚数が決まっているため、1 条件につき 4 枚、すなわち（試験材 5 種）×（照射時間 5 段階）×（4 枚）＝100 枚照射した。曲げ試験は、各条件の照射材を 1 枚ずつ取り出し、ここから 5 本の試験片を切り出して実施した。また、アイソット衝撃試験も、各条件の照射材 1 枚ずつから試験片を切り出して実施し、衝撃試験 1 条件当たりの試験片は 5 本である。



(a)サンシャインカーボンアーク



(b)屋外暴露

図-2.3.69 暴露によるポリエチレン伸び残率の変化¹⁰⁾

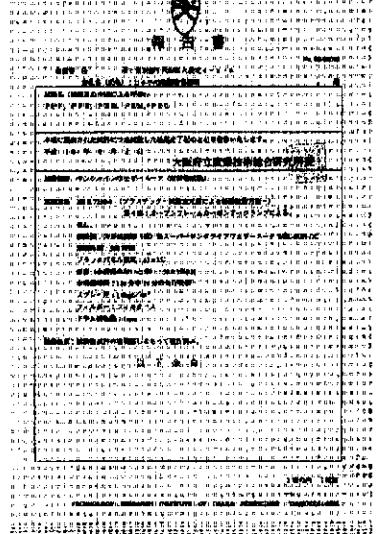


図-2.3.70 試験報告書

(2) 試験片

暴露試験の試験片は全長 120mm、幅 70mm の短冊形とし、板厚は元厚のままとした。PPF 材については平滑面側を暴露面とした。所定時間の暴露が終了した試験片は目視観察のあと、曲げ試験は長さ 70mm、幅 15mm の短冊形に、またアイソット衝撃試験は 70mm、幅 10mm の短冊形にそれぞれ加工して試験に供した。各供試材の厚さを表-2.3.26 に示す。

表-2.3.26 促進暴露試験片

供試材	厚さ (mm)	
	平均	標準偏差
PEB	3.22	0.03
PEM	2.91	0.08
PEL	2.91	0.04
PPF	3.70	0.03
PPS	2.94	0.07

(3) 試験結果

① 目視観察結果

PPS材では図-2.3.71に示すように、試験時間200時間で照射面に2~3mm間隔で葉脈状のき裂が入りはじめ、300時間では間隔1mm以下になった。それとともに表面の光沢も失われた。500時間では裏面の一部にもき裂が認められた。そこで、超音波によるき裂深さの測定を行った。測定プローブは縦波5MHzのものを使用した。その結果、表-2.3.27に示すように目視とほぼ対応して、試験時間とともにき裂が深くなっている。一方、その他の供試材では500時間試験後も目視での変化はほとんどみられなかった。

表-2.3.27 き裂深さ(PPS)

試験時間(h)	き裂深さ(mm)
0	-
100	-
200	-
300	0.2
400	0.2-0.3
500	0.2-0.4

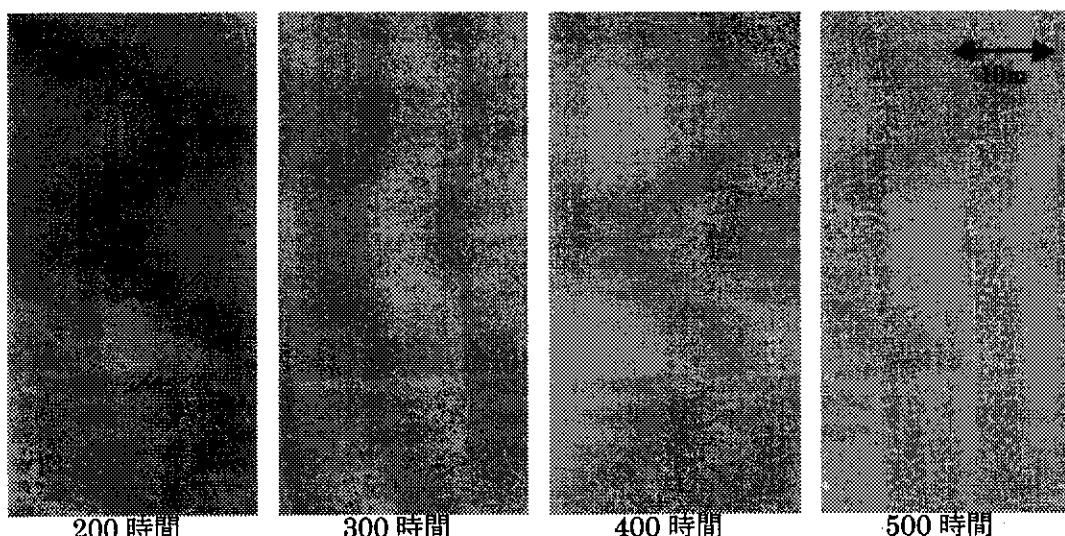


図-2.3.71 暴露試験片(PPS)

② デュロメータ硬さ及び静的曲げ試験結果

各供試材について、試験時間とデュロメータ硬さ、静的曲げ強度特性との関係を調べた結果が表-2.3.28である。それらを試験前の値との比、すなわち保持率で整理したものが図-2.3.72～2.3.74である。デュロメータ硬さは500時間後でもその低下は高々1割程度であった。特にポリエチレン系の低下はわずかであった。曲げ試験については促進暴露試験装置の容量の関係から標準よりも小さめの試験片を使用せざるを得なかつたため、試験結果のばらつきが大きくなっているが、全体の傾向としては、ポリエチレン系の試験材が暴露の影響が比較的少なく、500時間後の強度低下は最も大きいPEM材で1割程度にとどまった。一方、ポリプロピレン系では、目視でき裂が認められたPPS材の劣化が顕著であった。製品から切り出したPPF材については着色され、かつ光安定化剤が混入されていると考えられ、500時間での劣化はほとんど認められなかった。

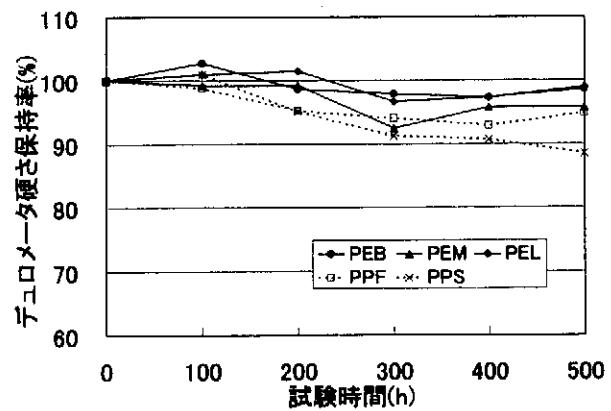


図-2.3.72 デュロメータ硬さの変化

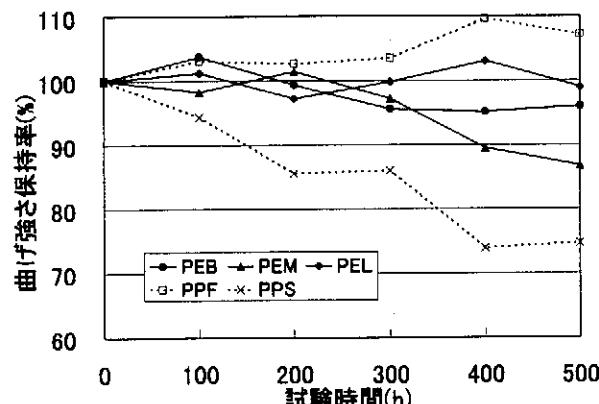


図-2.3.73 曲げ強さの変化

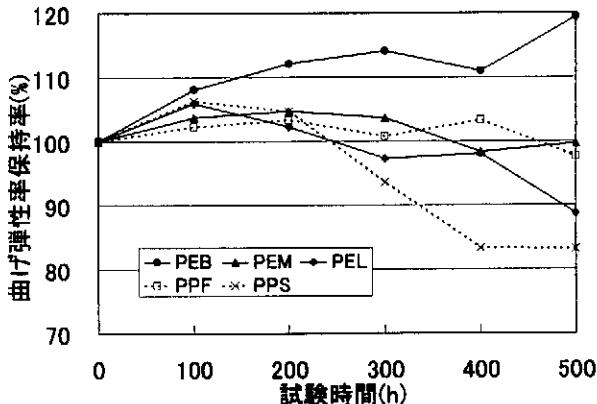


図-2.3.74 曲げ弾性率の変化

表-2.3.28 促進暴露による硬さ、曲げ強度の変化

供試材	試験時間	デュロメータ硬さ		曲げ強さ(MPa)		曲げ弾性率(MPa)	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
PEB	0	63.5	0.8	20.32	1.07	731	43
	100	65.2	0.6	21.07	1.03	790	84
	200	62.6	0.5	20.18	1.18	819	113
	300	62.1	0.6	19.42	1.36	834	50
	400	61.8	1.0	19.32	1.61	811	56
	500	62.6	0.5	19.50	1.49	873	139
PEM	0	60.9	0.9	18.62	0.40	723	108
	100	60.4	0.7	18.30	0.40	750	44
	200	60.4	0.5	18.88	1.42	757	63
	300	56.3	0.7	18.10	0.83	749	24
	400	58.3	0.7	16.65	2.94	711	98
	500	58.3	0.7	16.15	1.29	721	77
PEL	0	55.2	0.4	12.68	1.84	408	30
	100	55.7	0.7	12.83	0.46	432	8
	200	56.0	0.8	12.32	0.54	417	49
	300	53.3	0.5	12.66	1.34	397	57
	400	53.7	0.8	13.06	1.08	400	26
	500	54.6	0.5	12.55	0.56	362	27
PPF	0	71.0	1.2	31.75	3.94	1088	23
	100	70.1	0.7	32.70	0.70	1112	22
	200	67.5	0.7	32.57	1.18	1124	36
	300	66.7	0.5	32.85	1.65	1096	62
	400	65.9	0.9	34.80	1.69	1124	50
	500	67.3	0.5	34.00	2.53	1062	57
PPS	0	72.8	0.8	36.04	3.70	1364	53
	100	73.5	0.5	33.99	0.78	1449	30
	200	69.2	1.0	30.82	2.25	1428	42
	300	66.4	1.0	30.98	1.31	1277	84
	400	66.0	0.8	26.66	2.87	1137	87
	500	64.4	1.0	26.94	1.39	1135	81

③ アイソット衝撃試験結果

表-2.3.29に耐寒性試験の結果を踏まえ、各供試材の遷移温度付近の温度でアイソット衝撃試験を行った結果を示す。また、各供試材のアイソット衝撃値と暴露時間との関係を図-2.3.75～図2.3.79に示す。なお、暴露時間：0(H)の値は耐寒性試験の値を使用している。

ポリエチレン系ではPEBが各温度とも暴露前の値よりやや大きくなっているが、PEM及びPELは一体に、暴露時間200～300時間まではバラツキが比較的大きく、試験前と同程度の値を示している。その後のアイソット衝撃値は急激に低下している。ポリプロピレン系ではPPFの促進暴露後のアイソット衝撃値は、試験温度0℃及び10℃では暴露前の値よりやや大きくなっているが、試験温度20℃ではやや小さくなっている。これに対してPPSのアイソット衝撃値は大きく低下し、暴露100時間で試験前の1/4から2/5の値となっている。

表-2.3.29 促進暴露後のアイソット衝撃値

暴露時間(h)		0		100		200		300		400		500	
	温度(℃)	平均(kJ/m ²)	標準偏差	平均(kJ/m ²)	標準偏差	平均(kJ/m ²)	標準偏差	平均(kJ/m ²)	標準偏差	平均(kJ/m ²)	標準偏差	平均(kJ/m ²)	標準偏差
PEB	-10	311.83	48.78	651.30	24.98	593.65	57.95	680.71	58.01	376.50	73.81	645.45	9.68
	0	511.07	115.11	675.86	95.85	596.14	72.49	566.74	49.24	566.75	29.32	700.42	32.20
	10	576.81	96.93	641.72	39.97	587.02	38.34	565.90	18.17	593.93	41.14	695.74	45.16
PEM	-10	77.40	4.56	70.73	20.63	75.43	9.05	92.23	37.01	38.70	20.77	29.92	4.39
	0	784.58	28.61	820.66	59.01	759.57	64.12	223.91	285.34	40.68	15.46	32.88	3.20
	10	647.57	70.00	782.45	77.44	694.74	15.01	421.06	333.27	88.53	35.92	49.96	9.28
PEL	-10	78.27	34.44	130.77	57.58	115.41	15.83	44.81	32.83	7.47	1.61	11.74	4.65
	0	735.97	62.77	747.84	32.52	313.52	303.45	55.81	42.19	25.69	16.66	12.92	5.30
	10	708.96	30.17	643.76	54.77	467.60	294.68	378.89	258.08	18.71	6.87	27.48	2.32
PPF	0	90.58	5.98	120.03	8.34	135.31	25.22	117.73	10.23	117.73	10.23	103.33	5.51
	10	152.17	14.11	189.17	26.58	252.09	52.80	200.60	26.83	200.60	26.83	178.56	15.83
	20	583.59	16.81	498.82	21.83	498.82	21.83	519.33	79.24	483.66	30.52	411.20	64.93
PPS	0	81.35	1.81	25.18	6.62	41.08	6.90	56.50	12.74	21.78	5.05	24.04	2.69
	10	188.21	38.33	92.58	8.72	93.36	9.52	80.10	39.85	32.56	16.95	27.29	20.10
	20	478.14	24.20	197.24	26.82	181.66	42.31	112.23	31.36	147.75	66.33	104.04	38.96

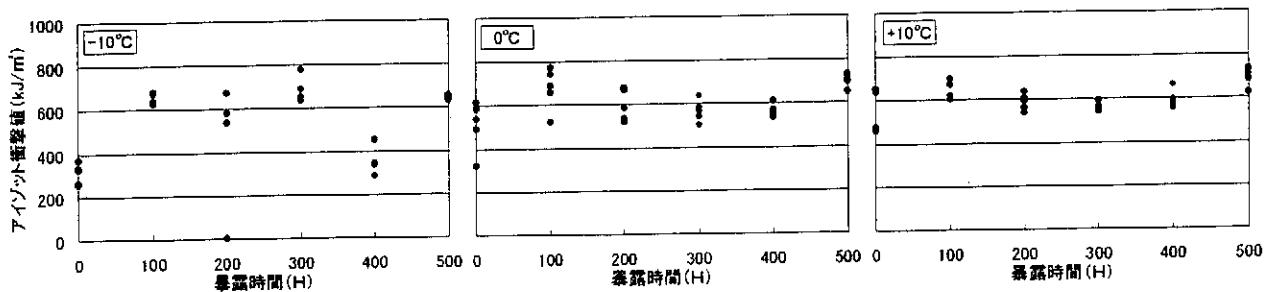


図-2.3.75 アイゾット衝撃値と暴露時間との関係(PEB)

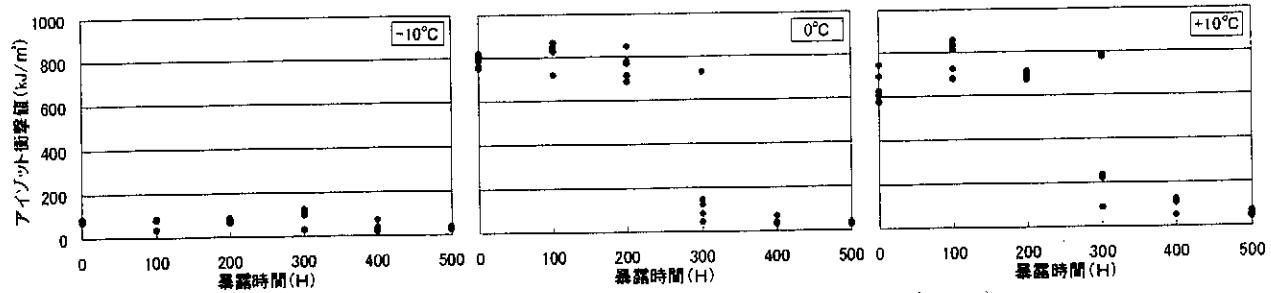


図-2.3.76 アイゾット衝撃値と暴露時間との関係(PEM)

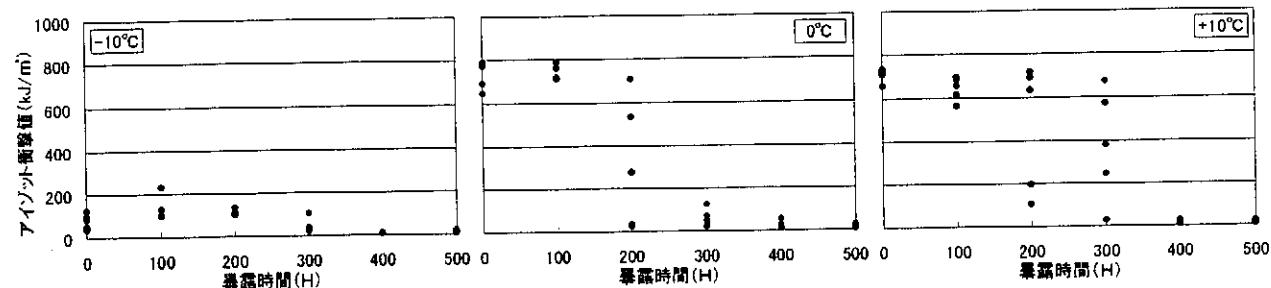


図-2.3.77 アイゾット衝撃値と暴露時間との関係(PEL)

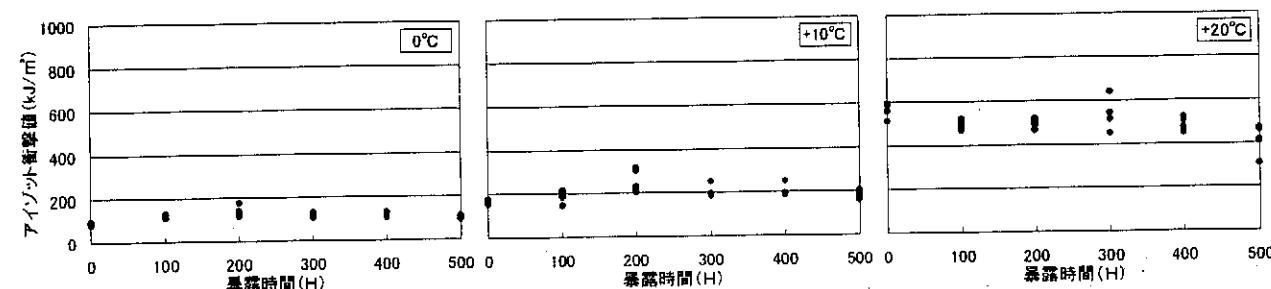


図-2.3.78 アイゾット衝撃値と暴露時間との関係(PPF)

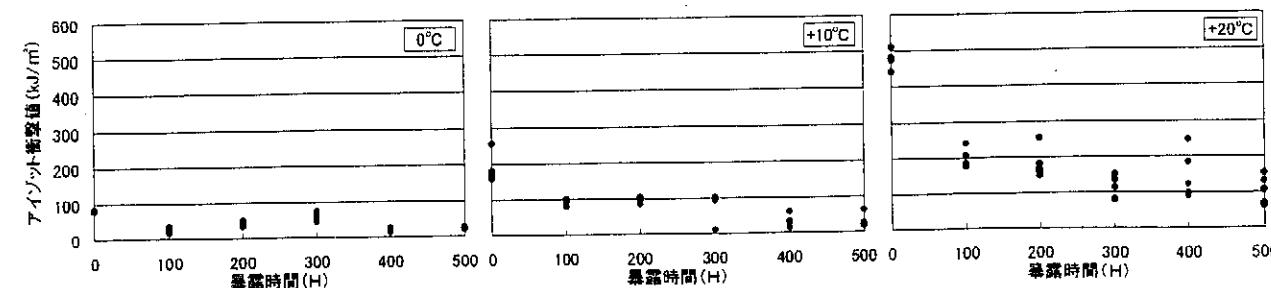


図-2.3.79 アイゾット衝撃値と暴露時間との関係(PPS)

暴露試験による耐久性を調べるために、暴露試験後のアイソット衝撃値と試験前のアイソット衝撃値との比率をとったアイソット衝撃値保持率と暴露時間との関係を求めた。図-2.3.80にポリエチレン系のアイソット衝撃値保持率と暴露時間との関係を示す。ポリエチレン系ではPEBが100%以上の保持率を示し、劣化は認められない。PEMは暴露200時間付近までは100%の保持率を示すが、その後は急激に減少し400時間では20%以下の保持率となった。また、PELは暴露時間の増加と共に保持率が低下し、顕著な劣化が見られる。

図-2.3.81に示すポリプロピレン系では、PPFの0°C及び10°Cの場合は100%以上の保持率を示し、劣化は認められなかったが、20°Cでは100時間で85%、500時間では70%まで保持率が低下した。これに対しPPSは、暴露100時間で50%以下の保持率となり、劣化が認められる。

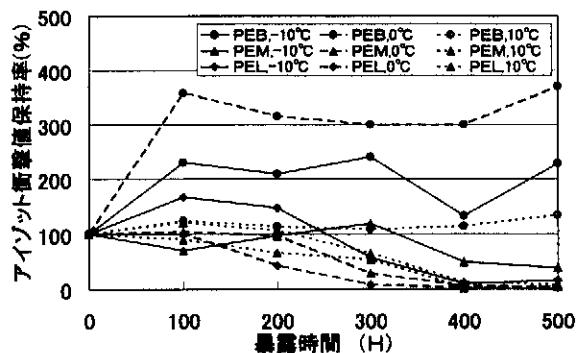


図-2.3.80 アイソット衝撃強度保持率(PE系)

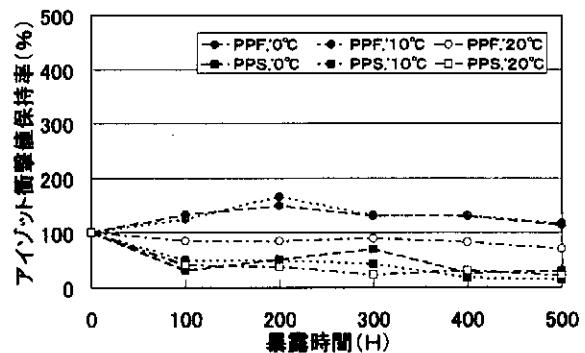


図-2.3.81 アイソット衝撃強度保持率(PP系)

2.4 まとめ

船体より採取、あるいは、船体材料同等品として製作したポリエチレン及びポリプロピレンについて強度等の物性を調べ、以下のことを明らかにした。

- ① ポリプロピレンはポリエチレンに比べて硬く、デュロメータ硬さ値と密度とに正の相関がある。
- ② ポリプロピレンの静的強度は強さ、弾性率とも、高密度ポリエチレンと比較して同等か、または、優れている。ポリプロピレンはポリエチレンに比べ密度が小さいことから、比強度ではさらに優れた特性を示すことになる。一方、低密度ポリエチレンは高密度ポリエチレンの約1/2の強度にとどまった。
- ③ 常温での引張疲労試験について明確な疲労限は認められなかった。また、疲労曲線の低下が比較的緩やかで、疲労耐久性に優れていることがわかった。また、疲労過程の剛性変化と試験片様相を対比すると、ポリプロピレンでは破断直前の急激な剛性低下と前後して白化現象がみられた。これに対して、ポリエチレンは疲労回数の進行とともにほぼ一様に剛性が低下し、白化との関連はみられなかった。一方、低温での曲げ疲労試験では低密度ポリエチレンが繰り返し数の影響が大きい。
- ④ 20000回までの繰り返し折り曲げ試験の結果、高密度ポリエチレンに異常は見られず、ポリプロピレンも端部の白色化と折り曲げ部の軟化がみられる程度で、折り曲げ耐久性は十分である。これに対して、中密度及び低密度ポリエチレンは試験途中で破断した。
- ⑤ 三点曲げ衝撃強さと静的曲げ強さに著しい違いはみられなかった。
- ⑥ 耐寒性試験の結果、高密度ポリエチレンの遷移温度域は-5～-20°C付近、中密度及び低密度ポリエチレンは0～-10°C付近、ポリプロピレンは20～-10°C付近であった。

- ⑦ 熱老化試験の結果、ポリエチレンは50°C、100日間、またポリプロピレンは120°C、500時間放置することにより、曲げ強さが約10%低下した。
- ⑧ 低密度ポリエチレンに、50°C、10時間程度で定応力環境応力き裂が発生したが、他の供試材は問題なかった。
- ⑨ 滑り摩耗試験では高密度ポリエチレンとポリプロピレンが同程度の良好な結果を示した。中密度ポリエチレンは比摩耗量が1桁多くなり、低密度ポリエチレンではさらに1桁多くなった。
- ⑩ 促進暴露試験の結果、高密度ポリエチレン及びPPF材、すなわち実艇もしくは同等材から切り出した試験材は500時間後も、静的曲げ強さ、アイソット衝撃値とも劣化が認められなかつた。これに対してペレットから製作し、添加剤を含まない試験材はいずれも劣化が認められた。

参考文献

- 1) 井手文雄他、実用プラスチック辞典 材料編、産業調査会、1997
- 2) みのる化成㈱会社概要より抜粋
- 3) エクソンモービルケミカル社ホームページより抜粋
- 4) 三井石油化学㈱高分子研究所ポリオレフィングループ資料
- 5) ホームページより抜粋
- 6) 実用プラスチック辞典 材料編、p3、産業調査会(1997)
- 7) 海上技術安全研究所大阪支所内部資料
- 8) 吹上紀夫他、“CFRPの圧縮試験方法の検討”、41st FRP CON-EX'96講演要旨集(1996)
- 9) 前田利雄他、“熱可塑性樹脂の摩擦・摩耗特性”、第31回FRPシンポジウム (2002)
- 10) ㈱三井化学分析センターホームページより抜粋

3. 船体構造用材料として使用する場合の 検査上の留意事項

3 船体構造用材料として使用する場合の検査上の留意事項

3-1 材料の特性

本調査研究の結果に基づく、各種ポリエチレン及びポリプロピレンに関する材料別の材料特性は、以下のとおりとなる。

3-1-1 高密度ポリエチレン

- ① 常温での引張疲労試験について明確な疲労限は認められなかった。また、疲労曲線の低下が比較的緩やかで、疲労耐久性に優れている。また、疲労回数の進行とともにほぼ一様に剛性が低下し、白化との関連はみられなかった。
- ② 折り畳み式ボート等の折り曲げ部を模擬した片曲げ及びそれより過酷な両曲げ試験を行ったが、繰り返し2万回行っても異常は見られず、折り曲げ耐久性は十分である。
- ③ アイゾット衝撃試験における遷移温度域は-5～-20°C付近である。
- ④ 50°Cに100日間さらした場合の曲げ強度の低下が10%程度あり、高温で長時間使用する場合はやや注意する必要がある。
- ⑤ 定応力環境応力き裂は起こらない。
- ⑥ 滑り摩耗試験によると、滑り速度：20m/minでの動摩擦係数は0.25～0.3であった。また、摩耗特性はポリプロピレンと同程度の比較的良好な値を示した。
- ⑦ 促進暴露500時間後でも試験前の機械的強度と同程度またはそれ以上の値を示し、劣化は認められない。

3-1-2 中密度ポリエチレン

- ① 静的強度は高密度ポリエチレンにやや劣る。
- ② 片曲げの繰り返し曲げ試験では異常が見られなかったが、片側67.5°の両曲げ試験では10140回で破断した。
- ③ アイゾット衝撃試験における遷移温度域は0～-10°C付近である。
- ④ 50°Cに100日間さらした場合の曲げ強度の低下が10%程度あり、高温で長時間使用する場合はやや注意する必要がある。
- ⑤ 定応力環境応力き裂は起こらない。
- ⑥ 滑り摩耗試験によると、滑り速度：20m/minでの動摩擦係数は0.3～0.4であった。また、摩耗特性は比較的良好な値を示した高密度ポリエチレンより1桁大きな比摩耗量を示した。
- ⑦ 促進暴露200時間付近までは機械的強度の低下は見られないが、それ以上の時間では徐々に低下し、顕著な劣化が認められた。

3-1-3 低密度ポリエチレン

- ① 静的強度は高密度ポリエチレンの約1/2にとどまった。
- ② 低温での曲げ疲労試験では繰り返し数の影響が大きく、注意を要する。
- ③ 45°の繰り返し片曲げでは異常がなかったが、それ以外では67.5°片曲げで4000回、67.5°両曲げでは1800回で破断した。
- ④ アイゾット衝撃試験における遷移温度域は0～-10°C付近である。
- ⑤ 50°Cに100日間さらした場合の曲げ強度の低下が10%程度あり、高温で長時間使用する場合はやや注意する必要がある。

- ⑥ 50°C、10時間程度で定応力環境応力き裂が発生するので、注意を要する。
- ⑦ 滑り速度：20m/minでの動摩擦係数は0.3～0.45であった。また、摩耗特性は比較的良好な値を示した高密度ポリエチレンより2桁大きな比摩耗量を示した。
- ⑧ 促進暴露時間の増加と共にアイソット衝撃値が低下し、顕著な劣化が認められる。

3-1-4 ポリプロピレン

- ① 静的強度は強さ、弾性率とも、高密度ポリエチレンと比較して同等か、または優れている。また、ポリプロピレンの密度はポリエチレンに比べ小さいことから、比強度ではさらに優れた特性を示すことになる。
- ② 引張疲労試験において、疲労過程の剛性変化と試験片様相を対比すると、破断直前の急激な剛性低下と前後して白化現象がみられた。
- ③ 繰り返し曲げ試験では端部が白色化し、折り曲げ部が軟らかくなる。特にPPFの溝付試片では溝部のみが曲げられるため顕著である。
- ④ アイソット衝撃試験における遷移温度域は20～-10°C付近である。
- ⑤ 120°Cに500時間さらした場合の曲げ強度の低下が10%弱あり、高温で長時間使用する場合はやや注意する必要がある。
- ⑥ 定応力環境応力き裂は起こらない。
- ⑦ 滑り速度：20m/minでの動摩擦係数は0.23～0.4であった。また、摩耗特性は比較的良好な値を示し、比摩耗量はPPFが $2.6 \sim 7.2 \times 10^{-9}$ 、PPSは $8.5 \times 10^{-9} \sim 1.9 \times 10^{-8}$ であった。
- ⑧ 促進暴露試験の結果、実艇から切り出した試験材は500時間後も、静的曲げ強さ、アイソット衝撃値とも劣化が認められなかった。これに対してペレットから製作し、添加剤を含まない試験材は劣化が認められた。

3-2 検査上の留意事項

3-2-1 ポリエチレン

(1) 設計承認に当たっての確認事項

- ① 密度、引張強さ、引張破断伸び及びデュロメータD硬さを確認すること。
- ② 使用環境における温度が遷移温度域を下回らないこと。
- ③ 耐候性試験を行い、静的強度及び衝撃強度に著しい低下が認められないこと。

(高温側に対しては通常の範囲では問題ないと考えられるが、紫外線による影響については何も対策をとらない場合、かなり顕著に劣化が進むため、紫外線吸収剤等光安定剤の添加や着色が必要である。)

(2) 構造強度についての留意事項

- ① 熱硬化性樹脂よりは繰り返し荷重に対する耐久性に優れているため、構造強度の確認は落下試験で良い。
- ② 直接計算により構造強度を確認する場合、中密度及び低密度ポリエチレンの静的強度が高密度ポリエチレンより劣るため、これらを使用する場合は使用応力を吟味して設計すること。

(3) 定期的検査に当たっての確認事項

- ① 船体の内外部に白化、き裂等の異常が生じていないか確認し、顕著な異常が認められる場

合には、メーカーによる修理等を検討すること。

(白化が生じるとそこを起点に破壊に進む恐れがある。また、低密度ポリエチレンにおいては定応力環境応力き裂が発生することもある。)

- ② 衝撃荷重については常温では問題ないが、冰点下ではかなり危険度が増すため、そのような環境での使用を極力避けるか、もしくは鋭利なものにぶつかるなどの衝撃を与えないよう注意を払う必要がある。(所有者に事情聴取し必要に応じてその旨助言する。)
- ③ 高温に長時間さらされると強度が若干低下するため、盛夏炎天下での放置を避ける等の対策が重要である。(所有者に事情聴取し必要に応じてその旨助言する。)

3-2-2 ポリプロピレン

3-2-1のポリエチレンと同じ。ただし、(1) ①は以下のとおりとする。

- ① アイソット衝撃値及び引張降伏強さを確認すること。