

小型船舶用新材料の特性に関する研究

櫻井 昭男^{*}、小野 正夫^{*}、多賀 謙治^{*}、千秋 貞仁^{*}
前田 利雄^{**}、津島 聡^{***}

A Study on the Mechanical Characteristics of New Materials for Small Vessels

by

Akio SAKURAI, Masao ONO, Kenji TAGA, Sadayoshi CHIAKI,
Toshio MAEDA and Satoshi TSUSHIMA

Abstract

Recently, PWC (Personal Water Craft) is remarkably improved in performance and its market is expanding rapidly. For the mass production of PWC, SMC (Sheet Molding Compound) came to be used as the construction material of PWC hull. Since SMC is suitable for molding, the manufacturing process of the hull becomes much simpler than that of by hand-lay-up. Besides of SMC, new materials such as acrylic resin for small vessels, polyolefin for folding vessels and etc. are used, nowadays. However, the strength of these new vessels is confirmed only by the drop test based on "Special Rules for PWC". This test is considered to be insufficient for flotsam collision and severe bottom slamming during high-speed cruising. It is necessary to grasp and verify the dynamic properties of the new materials to impact loads and the resulting fatigue.

In this research, the strength of SMC and polyolefin to the static and the dynamic loads have been studied. The complex hull form and permanent set were also considered to evaluate the strength. Based on the study, the authors proposed the appropriate indices for the inspection of the vessels made of the new materials.

^{*} 大阪支所 ^{**} 海上安全研究領域 ^{***} 元大阪支所
原稿受付 平成 年 月 日
審査済 平成 年 月 日

目 次

1. まえがき	2
2. SMC材料の特性に関する調査研究	2
2.1 実施概要	3
2.2 供試材	3
2.2.1 SMC成形法とは	3
2.2.2 供試材	4
2.3 試験結果	5
2.3.1 外観・寸法及び組成	5
2.3.2 静的引張強度	5
2.3.3 静的圧縮強度	7
2.3.4 静的曲げ強度	8
2.3.5 落錘3点曲げ衝撃強度	9
2.3.6 引張疲労強度	9
2.3.7 曲げ疲労強度	10
2.3.8 吸水特性	11
2.3.9 吸水時の強度	12
2.4 まとめ	13
2.5 留意事項	13
3. ポリオレフィンの特性に関する調査研究	13
3.1 実施概要	13
3.2 ポリオレフィンの概要	13
3.2.1 ポリエチレン	13
3.2.2 ポリプロピレン	15
3.3 供試材	16
3.3.1 高密度ポリエチレン(記号:PEB)	16
3.3.2 中密度ポリエチレン(記号:PEM)	17
3.3.3 低密度ポリエチレン(記号:PEL)	17
3.3.4 ポリプロピレン(記号:PPF)	17
3.3.5 ポリプロピレン(記号:PPS)	18
3.4 試験結果	18
3.4.1 密度	18
3.4.2 デュロメータ硬さ	18
3.4.3 静的引張強度	18
3.4.4 静的圧縮強度	19
3.4.5 静的曲げ強度	20
3.4.6 落錘3点曲げ衝撃強度	21
3.4.7 引張疲労強度	22
3.4.8 曲げ疲労強度	23
3.4.9 繰り返し折り曲げ強度	26
3.4.10 耐寒性(アイゾッド衝撃強度)	27
3.4.11 熱安定性(静的曲げ試験)	28
3.4.12 定応力環境応力き裂特性	35
3.4.13 滑り摩耗撃特性	35
3.4.14 耐候性(促進暴露試験)	40
3.5 まとめ	44
3.6 留意事項	45
3.6.1 材料の特性	45

3.6.2 検査上の留意事項	46
4. あとがき	46
謝辞	46
参考文献	46

1. まえがき

近年、小型船舶の用途の多様化と科学技術の進歩に伴い、従来船殻材料に用いられてこなかった材料が使用されるようになってきた。これらの材料は、その基本的材料特性について工業規格が定められていないものもあり、船舶としての性能試験等に基づき安全性の確認が行われているのが現状である。そこで本研究では小型船舶の船体構造用新材料として、水上オートバイの艇体を使用されるSMC(シートモールディングコンパウンド)材、並びに小型バス釣りボートや折畳式構造船に使用されるポリオレフィン(ポリエチレン、ポリプロピレンなど)を採り上げ、それら新材料の静的・動的機械的特性、温度・湿潤・紫外線等に対する耐環境性等を調査した。また、それらの結果をふまえて、これら新材料を使用した小型船舶に対する検査の方法、対処方針、基準(案)の策定・検討を行った。

2. SMC材料の特性に関する調査研究

ここ数年、飛躍的に市場が拡大している水上オートバイの艇体の構成材料として、従来のハンドレイアップ工法とは全く異なるSMC工法により製作された材料が使用されている。また、最近の水上オートバイ性能は著しく向上しているが、新材料を使用した小型船舶の強度の確認については、「水上オートバイ特殊基準」等に基づき落下試験等を行うのみである。漂流物との衝突や高速航走時の波浪衝撃等を考慮すると、疲労、衝撃などの動的強度特性を把握し、これらの面からの検証が必要となってくる。

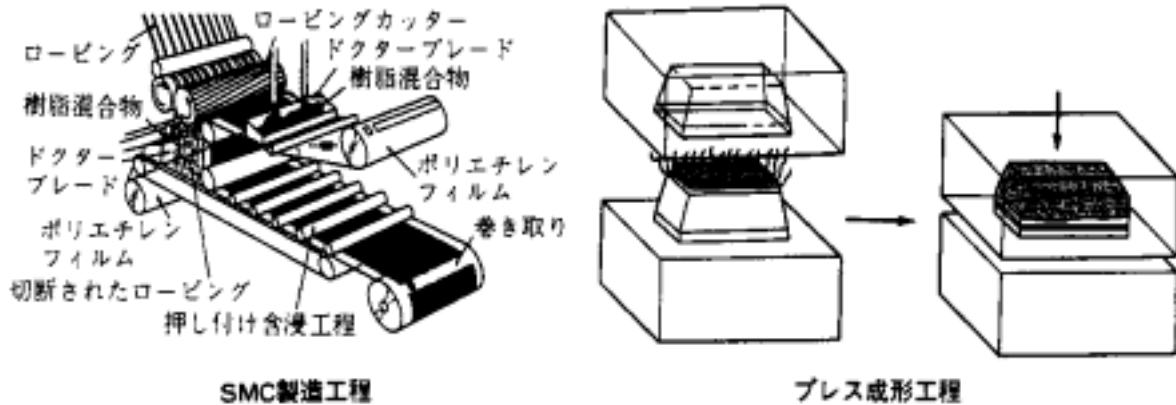
このため、SMC工法による材料の静的強度並びに疲労、衝撃試験などの動的強度特性等の基本的な特性を把握するとともに、船殻材料として使用する場合の検査・設計上の留意事項を策定するために、以下の調査研究を行った。

水上オートバイの船殻として新規に成形された素材各部位より切り出した試験片について、組成調査、静的強度試験、衝撃試験、吸水試験等を実施した。

試験艇として使用された水上オートバイの船殻から切り出した試験片について、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

表 - 2.1 試験項目

	項目	適用基準	試験片	試験設備
組成調査	外観・寸法			
	比重・密度	JIS K7112		
	繊維含有率	JIS K7052		
	パーコル硬さ	JIS K7060	曲げ試験片	
静的試験	引張試験	JIS K7054	A型試験片	インストロン型材料試験機 (容量：100kN)
	圧縮試験	BEF法	短冊形試験片	
	曲げ試験	JIS K7055 (3点曲げA法)	短冊形試験片	
疲労試験	引張疲労試験	JIS K7118	短冊形試験片	油圧サーボ式疲労試験機 (容量：50kN、100kN)
	曲げ疲労試験	JIS K7119	短冊形試験片	
衝撃試験	落錘3点曲げ	(JIS K7211)	短冊形試験片	
吸水試験	吸水試験	ASTM D570 (JIS K7209)	曲げ試験片	

図 - 2.1 SMC 成形法 ¹⁾

的試験を実施した。

上述の試験結果をふまえて、検査・設計上の留意事項を提案した。

2.1 実施概要

本研究の初年度には新規成形 SMC 材料について、また次年度には試験艇として使用された水上オートバイの船殻から切り出した試験片について、外観検査、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、新規成形材の劣化特性を調べるため、吸水試験並びに吸水強度の測定もあわせて行った。試験項目を表 - 2.1 に示す。

2.2 供試材

2.2.1 SMC 成形法とは

SMC 成形法は、FRP の機械成形法の中では最も主要な技術であり、成形効率の優れた圧縮成形法である。この SMC 成形法は、SMC 材料の製造工程とプレス機による成形工程とからなる。

表 - 2.2 SMC 成形法の特徴 ¹⁾

長所	材料を流動させて成形するため、形状の制限が少ない。 表面の平滑性に優れる。 圧縮成形法のなかで、最も成形効率の優れた方法である。 省力化、自動化ができる。 リブ、ボス、インサートができる。 連続長繊維の強化材を使用できる。
短所	強度が低くなる。 流動による繊維の方向性が発生することがある。

製造工程ではまず、不飽和ポリエステル樹脂と硬化剤、増粘剤、充填材、内部離型剤、顔料などを混合したペースト状の混合物をガラス繊維チョップドストランドに含浸し、両面をフィルムで覆ってシート状とする（図 - 2.1 左）。これを所定の温度に一定時間置き、化学反応によって増粘させ粘着性のない状態としたものが SMC である ²⁾。

表 - 2.3 供試材

供試材記号	供試材	使用	形態
A	K 社製 Jet ski 1100Zxi ハルボトム	新規成形材	成形したまま
B	K 社製 Jet ski 750Xi ハルボトム	新規成形材	成形したまま
C	K 社製 Jet ski 1100Zxi ハルボトム	H8年1月製造	実機より切り出したもの
M	Y 社製 MJ-1200GP ハルボトム	新規成形材	成形材より切り出したもの
N	Y 社製 MJ-760GP ハルボトム	H8年12月製造	実機より切り出したもの

成形工程は、加熱した金型内に SMC を成形品の形状に合わせてチャージし、プレス機によって加圧流動させて賦形し（図 - 2.1 右）、加熱硬化後、離型する方法である¹⁾。

SMC 成形法の特徴を表 - 2.2 に示す。

2.2.2 供試材

強度試験に使用する SMC 材料は国内主要メーカー2社よりご提供いただいた。表 - 2.3に概要を示す。

A、B及びM材は水上オートバイの船殻として新規に成形したものである。A、Bについては成形したままの状態のものを入手することができた。また、経年材であるC及びN材はメーカーの性能確認艇あるいは試験艇として約2～3年使用されたものである。各供試材とも、平面部が比較的広く、密集して数多くの試験片が採取できるように、図 - 2.2に示す部位より供試板を切り出している。なお、本報告ではそ

れぞれの部位に3桁の記号を付与して区分した。すなわち、記号の左桁は上下位置(S：側板、B：底板)、中央桁は左右位置(L：左舷側、R：右舷側)、右桁は前後位置(F：前側、B：後ろ側)を示す。

試験片は、試験項目を勘案し、また採取部位及び採取方向の差異を明らかにできるよう考慮して寸法及び位置決めを行った。ただ、平面部が限られることから、十分な数量を確保できない試験項目もあった。加工は、基本的に精密ダイヤモンドカッターで行い、また引張試験片のダンベル形状への加工はFRP専用のフライス盤により行った。なお、強度試験用の試験片の板厚は原則として元厚のままとしたが、板厚が不均等で試験に支障が生じる場合は必要最小限の研削を施している。また、経年材は実機から採取したため、接着剤、ステッカー等が付着したものもあったが、試験に支障のないよう注意深く取り除いた。

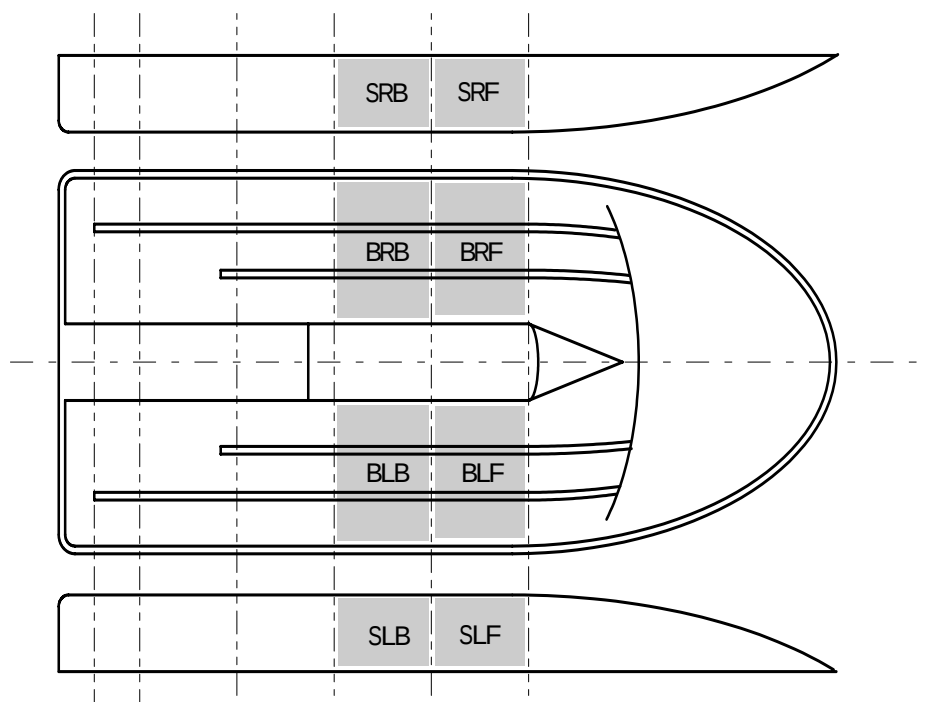


図 - 2.2 SMC 供試板採取位置と記号

2.3 試験結果

2.3.1 外観・寸法及び組成

外観検査の結果、新規成形材はいずれもキズ、ひけ、変形等の欠陥は目視では観察されなかった。また、供試板を切り出した際の切断面についても調べたが、同様であった。経年材については、運搬時に付いたと思われる小さな擦り傷が船底部に見られたが、その他は新規成形材と同じであった。また、経年材から供試板を採取する際に、補強材と接着剤で固定してある箇所を調べたが、強固に接着しており不具合な箇所は見られなかった。

各供試板（左舷側）の平均板厚、平均比重並びに組成は表 - 2.4のとおりである。なお、組成はJIS K7052に従って樹脂分を燃焼させた後、残留物を繊維と充填材とに分別して計測した。

これによると、いずれの供試材も採取部位により板厚の違いがあるものの、同一メーカーでは繊維含有率等の組成の違いがほとんど認められない。したがって、採取部位による比重の差異もあまり認められない。バーコル硬さについては、全体的に新材よりも経年材の硬さがやや増大する傾向が見られるが、採取部位による明らかな違いはあらわれなかった。

2.3.2 静的引張強度

静的引張試験はJIS K7054に準じて行った。試験

片は全長180mm、幅20mm、平行部長さ60mm、平行部幅15mmのA型（ダンベル型）とし、試験前に60℃の熱風炉に24時間以上放置して、乾燥させた。その後、デシケータ内で常温に戻し、20℃にて試験に供した。試験はインストロン型材料試験機（容量：100kN）を用いて、引張速度1mm/minで行った。引張ひずみは試験片表裏面に貼った2方向ひずみゲージにより測定した。各供試板の引張強さと引張弾性率を表 - 2.5に示す。

引張強さは、ほとんどの供試材において、側板よりも底板が、また船長方向よりも船幅方向が大きな値を示している。試験部位による強さの違いは板厚が影響しているものと考えられる。一方、方向性については強化繊維の配向性の影響が強いものと思われる。したがって、プレス成形工程におけるSMCの型内流動が顕著で、繊維の方向性が発生しやすいであろう側板において、強さの方向依存性がよりはっきりと現れている。これらは引張弾性率の特性についてもほぼ同様の結果であることがわかる。

しかしながら、試験片の破壊形態には顕著な違いは認められない。すなわち、いずれの試験片も図 - 2.3に示すような荷重 - 伸び関係でほぼ直線的に変形して破壊に至り、クリープ的な挙動はほとんど見られなかった。破断面は図 - 2.4に示すように、部分的に繊維の引き抜けが生じていた。

表 - 2.4 SMC 供試板の板厚、比重、組成及び硬さ

供試材	供試板	平均板厚 (mm)	平均比重	繊維 (wt.%)	充填材 (wt.%)	樹脂 (wt.%)	バーコル 硬さ
A (新材)	BLF	5.99	1.90	31.5	43.9	24.6	46
	SLF	5.02	1.87	25.7	48.5	25.8	43
	BLB	5.68	1.91	29.2	46.1	24.7	46
	SLB	4.26	1.90	25.4	48.6	25.6	42
B (新材)	BLF	6.81	1.89	25.5	48.6	25.9	40
	SLF	4.29	1.90	24.4	48.8	26.8	39
	BLB	6.84	1.89	26.9	47.2	25.9	41
	SLB	4.23	1.92	26.0	48.4	25.6	41
C (経年材)	BLF	6.05	1.92	25.9	47.6	26.5	46
	SLF	5.09	1.88	24.0	49.3	26.7	50
	BLB	5.93	1.92	28.2	46.3	25.5	49
	SLB	4.55	1.90	27.9	45.0	27.1	51
M (新材)	BLF	7.26	1.72	37.3	26.2	36.5	40
	SLF	4.41	1.71	35.9	27.6	36.6	42
	BLB	7.10	1.71	35.7	25.9	38.4	43
	SLB	4.37	1.71	37.9	25.8	36.3	46
N (経年材)	BLF	6.84	1.73	38.4	25.0	36.6	46
	SLF	4.32	1.72	39.8	24.1	36.2	57
	BLB	6.79	1.74	35.2	25.0	39.8	51
	SLB	4.40	1.72	37.8	23.6	38.7	46

表 - 2.5 S M C 供試板の引張強度特性

供試材	供試板	引張強さ(MPa)				引張弾性率(GPa)			
		船長方向		船幅方向		船長方向		船幅方向	
		平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.
A (新材)	BLF	-	-	-	-	-	-	-	-
	SLF	-	-	-	-	-	-	-	-
	BLB	59.02	2.48	-	-	12.07	0.65	-	-
	SLB	44.31	6.41	76.23	9.56	10.50	0.38	12.91	1.11
B (新材)	BLF	53.82	5.02	59.57	6.08	11.29	0.87	11.57	0.52
	SLF	-	-	-	-	-	-	-	-
	BLB	50.54	3.98	67.57	5.62	10.82	0.68	12.10	0.66
	SLB	47.01	2.78	-	-	10.90	0.65	-	-
C (経年材)	BLF	-	-	-	-	-	-	-	-
	SLF	-	-	-	-	-	-	-	-
	BLB	56.22	7.41	-	-	12.53	0.82	-	-
	SLB	37.14	3.35	53.98	4.56	10.23	0.76	13.66	0.44
M (新材)	BLF	76.70	16.55	-	-	9.98	0.20	-	-
	SLF	51.12	4.12	-	-	9.56	0.52	-	-
	BLB	-	-	-	-	-	-	-	-
	SLB	-	-	-	-	-	-	-	-
N (経年材)	BLF	69.62	12.40	-	-	8.93	0.63	-	-
	SLF	72.01	7.38	54.73	7.92	10.09	0.61	11.31	1.00
	BLB	-	-	-	-	-	-	-	-
	SLB	-	-	-	-	-	-	-	-

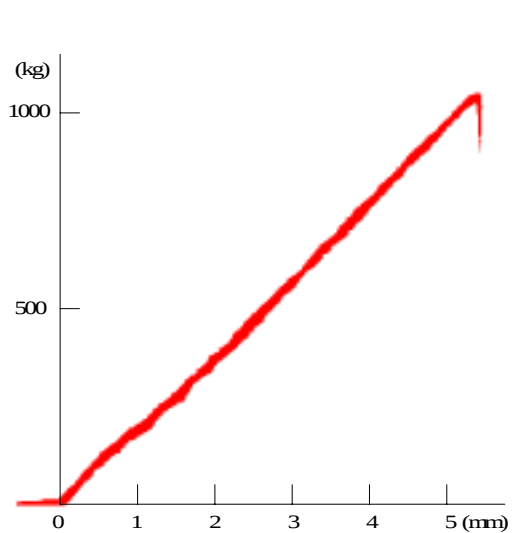


図 - 2.3 引張試験における荷重 - 伸び線図の一例

新材と経年材との比較においては、特段の差異は認められなかった。サンプル数が少なく、ある程度のばらつきもあることから確定的ではないが、引張強度特性はガラス繊維の特性が支配的であるためであろう。



図 - 2.4 引張試験片破壊状況

2.3.3 静的圧縮強度

静的圧縮試験はBEF（Both End Fixed）法³⁾を用いて行った。これは試験片の両端をそれぞれ別々の治具（図 - 2.5）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 K7076の試験方法で得られる結果との違いはない。試験片は全長100mm、幅15mmの短冊型とし、インストロン型材料試験機を用いて、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ひずみゲージにより測定した。

各供試板の圧縮強さと圧縮弾性率を表 - 2.6並びに図 - 2.6に示す。側板から採取した試験片では、船長方向の圧縮強さが100MPaに達しなかったものが少なくなかったが、それは繊維の方向性の影響に加えて、板厚が薄いためにバックリング変形が生じたためである。その他のものについては、引張強さのおよそ2倍の値を示している。新材と、経年材との違いはほとんどみられない。

圧縮弾性率においては、N材が経年により、やや大きくなる傾向を示している。

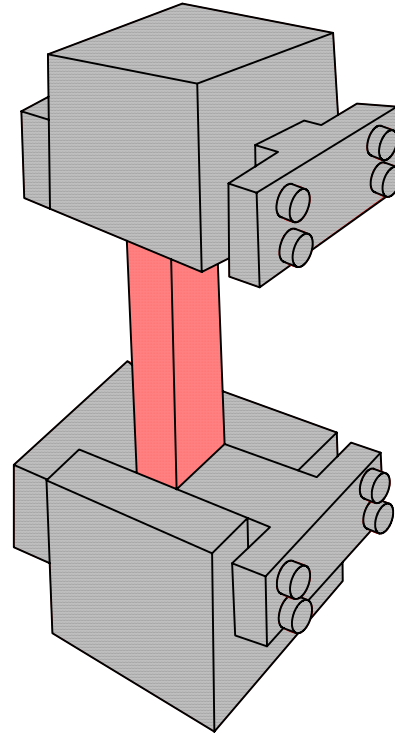


図 - 2.5 B E F 法³⁾

表 - 2.6 S M C 供試板の圧縮強度特性

供試材	供試板	圧縮強さ(MPa)				圧縮弾性率(GPa)			
		船長方向		船幅方向		船長方向		船幅方向	
		平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.
A (新材)	BLF	125.68	12.68	140.06	8.67	13.42	1.54	14.39	0.20
	SLF	113.10	9.37	111.22	16.27	12.76	0.51	13.72	0.48
	BLB	116.42	10.62	141.80	12.18	13.12	1.06	14.71	0.58
	SLB	-	-	-	-	-	-	-	-
B (新材)	BLF	124.46	7.06	121.27	15.93	11.79	0.32	13.86	0.64
	SLF	85.74	5.97	103.14	10.18	12.60	0.52	13.31	0.69
	BLB	116.74	9.86	144.48	9.87	13.19	0.57	14.50	0.69
	SLB	-	-	112.81	-	-	-	13.40	-
C (経年材)	BLF	109.42	5.84	128.45	10.79	12.18	1.41	13.88	0.69
	SLF	96.12	13.94	121.64	8.19	11.13	0.75	13.72	0.70
	BLB	107.32	10.47	114.35	4.96	12.19	1.05	14.46	0.57
	SLB	-	-	-	-	-	-	-	-
M (新材)	BLF	145.29	21.73	164.51	6.80	10.35	1.37	12.82	0.23
	SLF	65.83	-	-	-	8.52	-	-	-
	BLB	126.56	23.72	168.26	5.16	9.99	0.98	12.00	0.20
	SLB	86.18	7.13	125.84	9.42	9.46	0.63	13.05	1.20
N (経年材)	BLF	130.46	15.31	156.34	17.12	11.11	1.75	12.64	2.81
	SLF	-	-	-	-	-	-	-	-
	BLB	113.25	17.18	160.43	10.61	9.99	1.08	16.72	3.93
	SLB	67.08	4.26	124.76	11.41	13.03	0.78	15.76	2.07

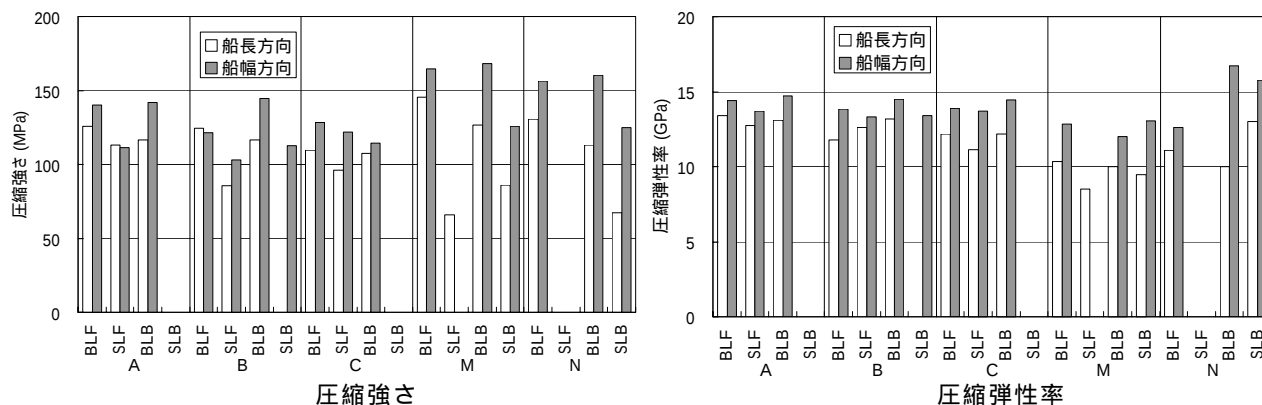


図 - 2.6 SMC 供試板の圧縮強度特性

2.3.4 静的曲げ強度

静的曲げ試験はJIS K7055に準じて3点曲げで行った。試験片は全長100mm、幅15mmの短冊型とし、インストロン型材料試験機を用いて、スパン80mm、試験速度2mm/minで行った。このため、ひずみ速度は板厚により異なるが、0.008～0.015(s⁻¹)程度である。

曲げ強度及び弾性率は次式を用いて計算した。

$$\text{曲げ強度 } \sigma_b = \frac{3PL}{2bh^2} \quad \text{曲げ弾性率 } E_b = \frac{L^3}{4bh^3} \times \frac{W}{\delta}$$

P：荷重値

L：スパン

b：試験片幅

h：試験片厚さ

W/δ：荷重 - たわみ線図の初期傾斜

各供試板の曲げ強さと曲げ弾性率を表 - 2.7並びに図 - 2.7に示す。なお、今回提示する曲げ強度データは、水圧荷重を考慮して、いずれも外表面に圧縮応力、内表面に引張応力が作用するように載荷している。

表からわかるように曲げ強さと曲げ弾性率のいずれも船幅方向が船長方向より卓越しており、その

表 - 2.7 SMC 供試板の曲げ強度特性

供試材	供試板	曲げ強さ(MPa)				曲げ弾性率(GPa)			
		船長方向		船幅方向		船長方向		船幅方向	
		平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.
A (新材)	BLF	124.52	21.82	170.23	6.93	10.63	1.22	12.43	0.44
	SLF	122.59	13.01	164.81	18.82	10.08	0.80	12.29	0.78
	BLB	125.47	23.15	181.63	31.55	10.97	0.59	12.50	1.00
	SLB	-	-	-	-	-	-	-	-
B (新材)	BLF	108.81	20.14	156.19	23.60	9.77	0.03	11.62	0.67
	SLF	107.78	4.70	162.85	26.61	9.95	0.51	12.20	0.47
	BLB	129.79	21.03	151.57	23.47	10.71	0.95	11.62	0.52
	SLB	-	-	160.58	7.66	-	-	12.53	0.06
C (経年材)	BLF	111.39	21.28	150.20	15.11	9.28	0.79	11.94	0.40
	SLF	93.19	12.01	148.27	16.65	8.63	0.18	11.53	0.34
	BLB	108.68	28.59	138.39	2.68	9.53	0.87	11.44	0.51
	SLB	-	-	-	-	-	-	-	-
M (新材)	BLF	151.25	21.23	210.22	12.50	7.49	0.66	10.39	0.71
	SLF	105.15	-	-	-	6.64	-	-	-
	BLB	150.28	44.37	182.37	31.74	7.93	0.63	9.68	0.59
	SLB	133.13	16.80	221.26	28.36	7.33	0.31	12.12	1.37
N (経年材)	BLF	138.81	25.02	184.62	25.60	7.51	1.49	9.70	0.65
	SLF	-	-	-	-	-	-	-	-
	BLB	125.30	13.33	226.56	23.76	7.70	0.93	11.23	1.14
	SLB	91.41	12.65	193.39	32.79	6.60	0.37	10.58	1.18

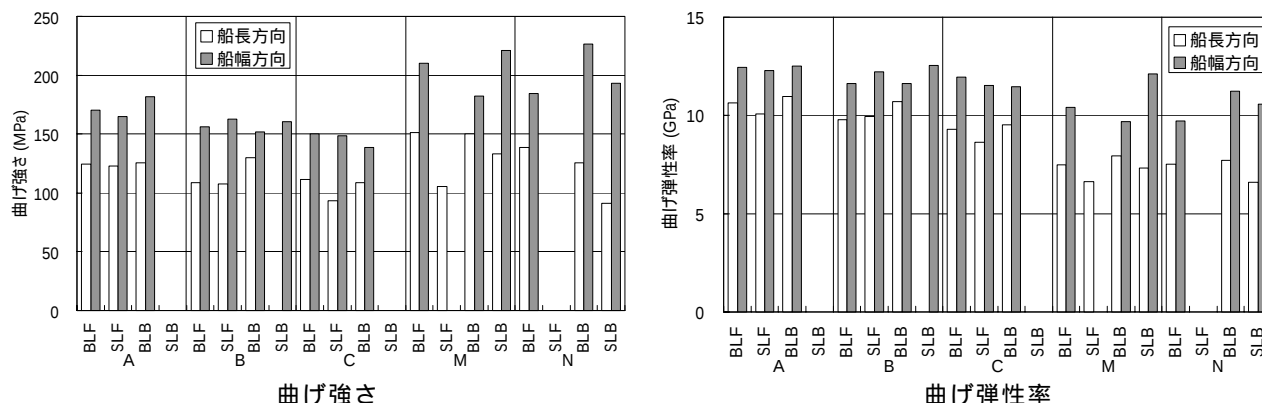


図 - 2.7 SMC 供試板の曲げ強度特性

違いは圧縮強度特性の場合よりも顕著である。これは、曲げ試験において大きな応力が生じる表面近傍において繊維の方向性がより顕著であることによるものと考えられる。

新材と経年材との比較においては、強さ、弾性率ともC材がA材よりわずかに低下する傾向がみられるが、3年以上の使用の結果であり、経年劣化はほとんど問題ないものと考えられる。

2.3.5 落錐3点曲げ衝撃強度

衝撃試験は落錐3点曲げ試験装置を使用して行った。落錐重量は0.77、0.81kg、落錐落下高さは1.2～1.4mとした。衝撃荷重は支点到に設置したロードセルにより計測し、サンプリング速度10μsでパソコンに取り込み、処理した。試験片は全長100mm、幅15もしくは20mm、スパン80mmである。

衝撃曲げ試験の結果を静的曲げの結果とあわせて図 - 2.8に示す。衝撃曲げ強さは、静的試験の結果より高くなる傾向にあることがわかる。経年材と新材とでは、曲げ強さに顕著な差はあらわれなかった。この理由として、実際の水上オートバイでは船底の剛性を上げるために、縦通材や横フレームがあり、この補強材の効果で船底部の撓み等が抑えられ、疲労等の経年劣化の影響はほとんど表れなかったものと考えられる。

破壊様相は、静的試験の場合、初期に引張側のマトリックスにき裂が生じ、その後、繊維の引張破壊及び層間剥離等を伴う複合破壊となったが、衝撃試験の場合は確実に破壊する高さとしたことから、静的試験の場合より破壊が進んだ状態となる。しかし、衝撃破壊様相も静的な場合と同様な複合破壊であり、両者に大きな違いは見られなかった。

2.3.6 引張疲労強度

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。試験片は長手方向が船長方向、すなわち、船長方向に引張応力が

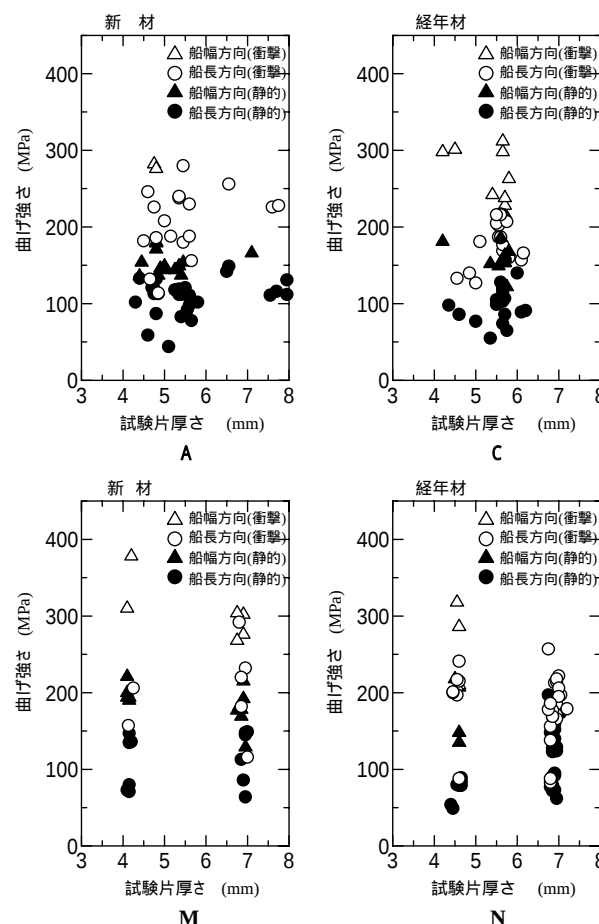


図 - 2.8 SMC 供試板の曲げ衝撃強さ

作用するように採取した。試験片の寸法は幅15mm×長さ175mmの短冊形とし、厚さは元厚とした。試験片は各供試材より所定形状、寸法に切り出し、試験前に60℃の熱風炉に24時間以上放置して、乾燥させた。その後、デシケータ内で常温に戻し、20℃にて試験に供した。試験は油圧サーボ式疲労試験機（容量：50kN、100kN）を使用して、5Hz sin波の引張応力を与え、荷重制御により行った。

疲労試験では試験材の制約から十分な数の試験を行うことができなかったが、表 - 2.8に示す結果を

表 - 2.8 SMC 供試板の引張疲労試験結果

A		C		M		N	
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
35.40	4	38.93	248	37.17	1	49.52	211
39.91	6	35.21	3331	38.44	248	45.11	637
30.30	30	31.09	25948	31.68	27428	38.93	23340
26.48	288	28.05	80008	29.32	197186	35.60	32762
20.59	5046	25.40	404228	22.95	>10000000	35.59	382480
15.78	>7739481	23.93	>14500000	18.34	>10000000		
		22.26	>10000000				

得、これをもとに図 - 2.9に示す応力 - 繰返し数線図を作成した。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、今回の試験においても、 10^7 回を越えて試験片にき裂の発生がみられなかった場合は、その応力を疲労限とし、試験を停止した。この図より、A、C材がM、N材より時間強度及び疲労限がやや小さくなっているが、静的試験の結果と同様、繊維含有量等組成の相違によるものと考えられる。また、いずれの試験材も経年材の時間強度が新材よりもやや高くなる傾向にある。この原因については明確ではないが、少なくとも通常の使用による疲労強度の低下については問題ないことを示していると考ええる。

引張疲労破壊様相は、先にマトリックスにき裂が生じ、その後繊維の引き抜けや切断により、試験片の分断破壊となるケースがほとんどであった。そこで、疲労過程における試験材の剛性変化を調べた結果の一例が図 - 2.10である。この図と、疲労破壊の進行を対比させると、試験材表面にき裂が見えた直後から急激に剛性低下を生じたが、き裂の生じないものは初期の剛性を保持していた。このため、表面き裂の有無が耐久性判断の指針になるものと考ええる。

2.3.7 曲げ疲労強度

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。試験片は長手方向が船長方向となるように採取した。試験片の寸法は幅 15mm × 長さ 100mm の短冊形とし、厚さは元厚とした。試験片の前処理は引張疲労試験と同様である。試験は油圧サーボ式疲労試験機（容量：50kN）を使用して、2Hz sin 波の片振り曲げ応力を与え、荷重制御で行った。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、繰返し速度は引張疲労試験の場合より遅くしている。スパンは 80mm とし、応力は水圧荷重を考慮して、外表面に圧縮応力、内表面に引張応力が作用するように載荷した。なお、引張疲労試験において、いず

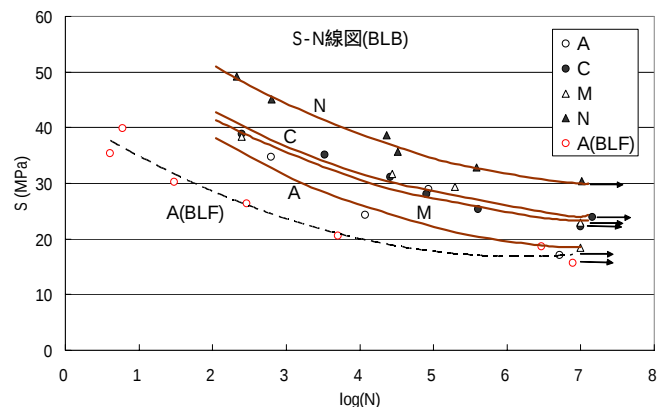


図 - 2.9 引張応力 - 繰返し数線図

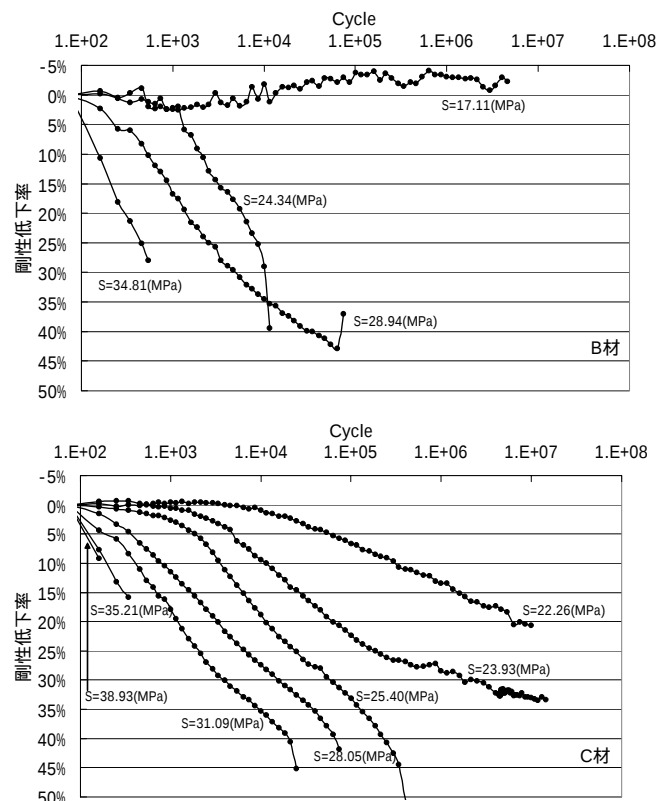


図 - 2.10 引張疲労過程における剛性低下率

れの試験材も応力 - 繰返し数線図が似た傾向を示していたので、曲げ疲労試験については経年材についてのみ実施した。

表 - 2.9 に疲労試験結果、図 - 2.11 に応力 - 繰返し数線図を示す。引張疲労試験結果と比較して値のばらつきが大きい、平均的にはほとんど同じ線図となっている。

破壊様相は、はじめに引張側のマトリックスにき裂が生じ、その後繊維の引き抜け、破断、層間はく離等が複合して試験片の破壊が進行した。この間の剛性変化を図 - 2.12 に示したが、引張疲労の場合と

表 - 2.9 SMC 供試材の曲げ疲労試験結果

C		N	
最大応力差 (MPa)	繰返し数	最大応力差 (MPa)	繰返し数
55.42	7	68.79	4
33.67	98	51.75	18
22.16	820	41.60	942
22.37	1096	39.17	20328
22.81	2261	32.53	>1543816
29.48	13573	25.01	>1858692
24.67	110334		
20.49	>1239996		
18.62	>1930901		

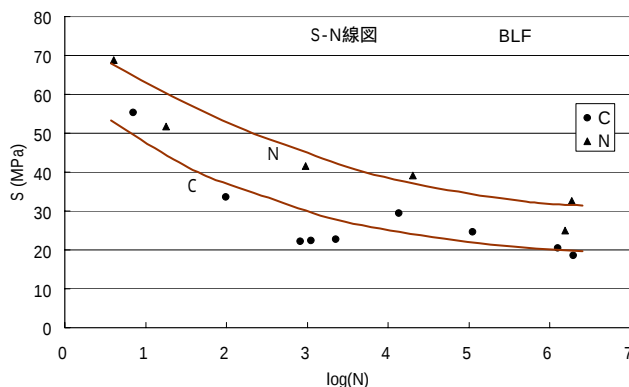


図 - 2.11 曲げ応力 - 繰返し数線図

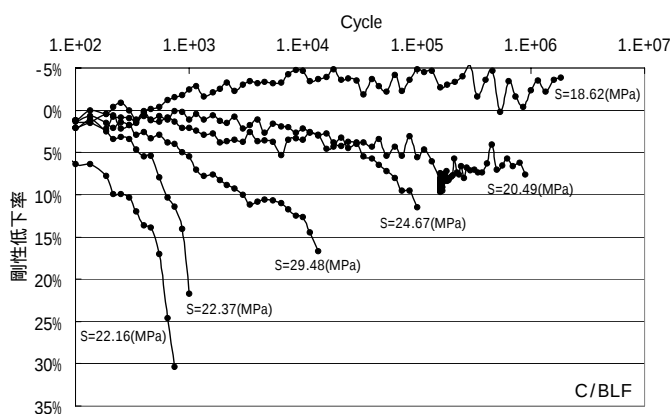


図 - 2.12 曲げ疲労過程における剛性低下率(C 材)

比較して、剛性の低下が直線的でなく、特に寿命の末期における低下が著しい。換言すると、剛性低下率が10%を越えると、疲労破壊の可能性が高まったことを示しており、注意を要するものと考えられる。

2.3.8 吸水特性

疲労試験では、はじめに試験材表面にき裂が入り、その直後から急激に剛性低下を生じていくことを示した。実機ではき裂が生じれば、そこから水分が進入し、さらに特性が低下するであろうことは十分予測される。このため、SMC材料の吸水時の物性を調べることにし、はじめに吸水率の測定を行った。

吸水特性の測定はASTM D570 (Standard Test Method for Water Absorption of Plastics、プラスチックの吸水試験方法)に準拠して行った。この方法はJIS K7209 (プラスチックの吸水率及び煮沸吸水

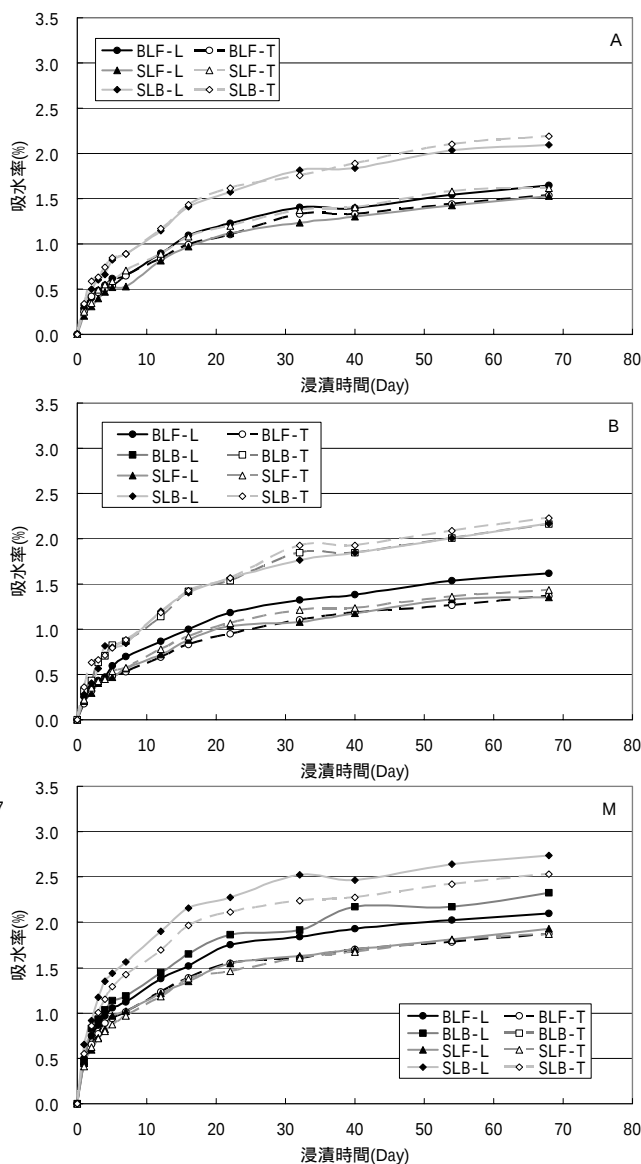


図 - 2.13 吸水特性
L : 船長方向 T : 船幅方向

率試験方法)とほぼ同等である。ただし試験片は吸水時の強度測定を考慮し、曲げ試験片と同じ100mm×15mmの長方形板とした。板厚は原寸とした。試験片は50 で24時間乾燥させ重量を測定した後、所定温度の精製水に浸漬して、時間の経過に伴う重量の変化を測定し、次式により吸水率βを求めた。

$$\beta = (w_2 - w_1) / w_1 \times 100 (\%)$$

w_1 : 浸漬前の試験片重量
 w_2 : 浸漬後の試験片重量

海水でなく精製水を使用したのは、精製水が海水に比べ、接触角が小さく、毛細管現象による吸水性が高いためである。吸水条件は通常海域の海面近傍を想定し、20 常圧とし、恒温水槽で再現した。

図 - 2.13は各供試材の吸水率と浸漬時間との関係調べた結果である。これによると、いずれの試験片も浸漬開始直後に顕著に吸水し、その後吸水率の増加は徐々に緩やかになって浸漬60日を過ぎるとほぼ飽和吸水率に達する。供試した試験片は機械加工面すなわち試験片の側面に繊維 - 樹脂界面が露出しているので、吸水の大部分は樹脂内部ではなく、繊維と樹脂との界面に毛細管現象で取り込まれているものと考えられる。繊維含有率が高いほどこの界面は多く存在するので、供試材による吸水率の差はこれにより生じたものと推察できる。

2.3.9 吸水時の強度

吸水時の強度は、供試板から所定形状に切り出した試験片中に十分水分が浸透するよう2ヶ月間常温水中に放置し、飽和吸水状態とした試験片を用いて、静的曲げ試験により調べた。

表 - 2.10に曲げ強度特性を示す。また、図 - 2.14は先に示した乾燥状態の試験片で行った結果とあわせて比較している。

表 - 2.10 各供試板の曲げ強度特性（飽和吸水）

供試材	供試板	バー コ ル 硬 さ	曲げ強さ(MPa)				曲げ弾性率(GPa)			
			船長方向		船幅方向		船長方向		船幅方向	
			平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.
A	BLF	31	81.63	12.16	102.04	6.13	7.87	0.23	9.26	0.25
	SLF	36	84.26	5.33	86.87	9.79	7.37	0.18	8.60	0.73
	BLB	30	84.17	11.33	115.22	20.63	7.70	0.50	9.28	0.75
	SLB	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B	BLF	22	83.36	13.74	105.99	12.31	6.53	0.06	8.12	1.15
	SLF	29	71.90	6.47	102.23	5.26	7.74	0.63	9.49	0.85
	BLB	25	88.54	11.82	107.36	16.13	7.20	1.13	8.39	0.58
	SLB	32	-	-	97.95	3.87	-	-	9.67	0.47
M	BLF	45	125.59	11.74	159.82	9.29	6.33	0.58	8.67	0.27
	SLF	44	86.91	-	-	-	5.56	-	-	-
	BLB	43	119.48	13.48	164.01	5.36	6.68	1.24	8.48	0.44
	SLB	48	107.82	12.08	161.75	11.65	6.14	0.36	9.73	0.52

バーコル硬さについては、表 - 2.4と比較して、A、B材で、吸水に伴う低下が認められるが、M材についてはほとんど影響がなかった。

曲げ強さ、弾性率は、いずれの試験材も、吸水に伴い減少している。多いものでは 1/2 程度にまで低下しているものもあり、吸水、特にガラス繊維が露出するき裂等からの吸水に注意を払う必要があることがわかった。ただし、試験片の破壊は引張側のき裂から開始しており、これについては乾燥試験片の場合とほとんど違いは認められなかった。

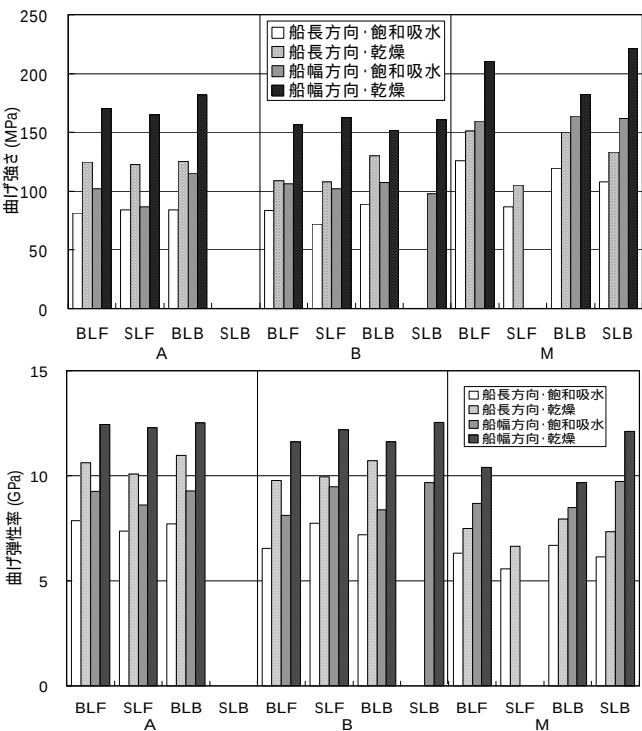


図 - 2.14 吸水に伴う曲げ強度の変化

2.4 まとめ

新規成形材及び経年材から採取したSMC材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。

同一艇における組成は安定しており、部位によるばらつきも少ない。

プレス成形工程におけるSMCの型内流動により発生すると考えられる強化繊維の配向性の影響により、船長方向よりも船幅方向の強度が大きくなる。特に、曲げにおいて、この傾向が顕著であった。

経年材の静的強度は新規成形材と比較して、一部に小さくなるものもあるが、大半は同程度かやや大きくなった。経年材の経過年数や船底材に配置された補強材の効果を考慮すると、通常使用の経年劣化はほとんど問題ないものと考えられる。

衝撃強さは静的強さよりも大きくなることが認められた。

SMC材について、明確な疲労限は認められないが、時間強度は経年材の方が大きく、通常の使用による疲労強度の低下については問題ないと考えられる。ただし、材料表面にき裂が生じると急激に剛性低下を生じる。特に曲げ疲労では剛性低下率が10%を越えると疲労破壊の可能性が高まる。

飽和吸水した供試材の曲げ強度は吸水前の半分近くにまで低下するものもあった。吸水の大半が露出した繊維・樹脂界面からの水分侵入であり、また、前項の疲労破壊過程を考慮すると、表面き裂の有無が耐久性判断の指針となるであろう。

2.5 留意事項

新規成形材及び経年材から採取したSMC材について強度等の物性を調べた結果は前節で示したとおりである。

したがって、通常の使用状態においてき裂等が認められない場合には、使用による強度の低下はほとんど問題ないと考えられる。しかし、水上オートバイは海浜で 사용되는ことが多く、船底を外部から砂利でこすられる可能性が高い等の使用形態を考慮すると、検査の際には顕著なき裂や、板厚が大幅に減少する摩耗がみられた場合には、局部的な剛性とそれに伴う船体強度の低下を疑い、補修等の対策をとる必要がある。また、圧縮側よりも引張側から破壊が進行することが多いことから、外表面に異常が見られない場合でも、内表面側にき裂等が存在する可能性があることを念頭に置いて、必要に応じテストハンマー等による打音検査を実施すべきである。

3. ポリオレフィンの特性に関する調査研究

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、使用実績が少なく、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すべきかの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は検査・設計上の留意事項を策定するために、調査研究を行った。

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、外観検査、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、熱安定性、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-3.1に示す。

3.2 ポリオレフィンの概要⁴⁾

3.2.1 ポリエチレン

(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 -オレフィン単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単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 -オレフィン単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-3.8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

表 - 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	インストロン型材料試験機 (容量：100kN)
	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	油圧サーボ式疲労試験機 (容量：50kN、100kN)
	曲げ疲労試験	JIS K7119	号試験片		
	繰返し 折り曲げ試験		平板	三鷹	型削盤
衝撃試験	落錘 3点曲げ	(JIS K7211)	短冊形試験片	大阪	
耐環境性	耐寒性試験	JIS K7110	2号試験片	三鷹	アイゾット試験装置
	熱安定性試験	JIS K7212	静的曲げ試験片	三鷹	ギヤーオープン
	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低温試験研究棟（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）

力によって、高圧法、中圧法、低圧法に分けられる。

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、製造法・分子構造・密度を絡めた分類がよく使われる（表 - 3.2）。高圧法、すなわち 1000 気圧以上の高圧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、高圧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・低圧下、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、密度が高いエチレンの単独重合体となる。高圧法では密度の高いものがないので、単に HDPE と呼ばれる。ところが、中・低圧法でも α -オレフィンと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 - 3.2 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	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) 製造法

工業的なポリエチレンの製造法は、表 - 3.3 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 100～400MPa 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 - 3.3 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
高压法	100 ~ 400MPa	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	3 ~ 7MPa	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	
				溶液重合	オートクレーブ型	
低压法	0.5 ~ 5MPa	配位重合	チーグラ-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	

(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。

3.2.2 ポリプロピレン

(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「夢の繊維」として期待されたが、染色性等の問題から繊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-3.1はPPの主鎖を伸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) 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 $TiCl_3$

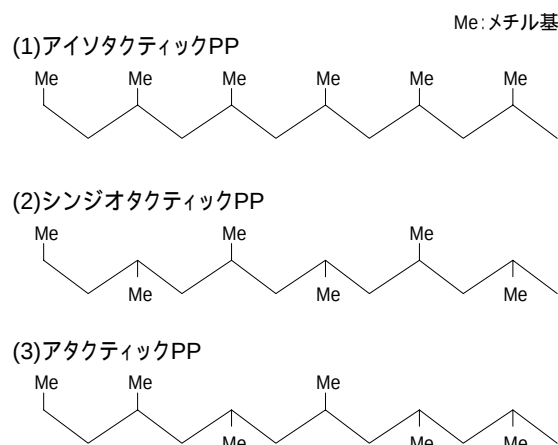


図-3.1 PPの立体規則性

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。

(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 である。電気絶縁性・高周波の誘電特性もよい。また、耐水性・対薬品性もある。ただし、耐候性は悪く、接着・印刷は困難である。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。

3.3 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国内メーカー2社より入手した。また、それ以外のは pellets 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 - 3.4、図 - 3.2）を用いて矩形平板に成形し、試験に供した。表 - 3.5 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。

3.3.1 高密度ポリエチレン（記号：PEB）

M 社が製造するプレジャーボート（図 - 3.3）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った。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 - 3.4）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。

表 - 3.4 加熱プレス機の主要目

熱板寸法	250mm角
ストローク	100mm
最大出力	100kN
最高調節温度	300



図 - 3.2 加熱プレス

表 - 3.5 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	M社から入手
PEM	中密度 ポリエチレン	ペレット	三井化学(株) Iボリユ SP-4030 (イクソ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(株) ノバテック LD
PPF	ポリ プロピレン	成形板	F社から入手
PPS	ポリ プロピレン	ペレット	出光石油化学(株) PP E-250G



図 - 3.3 高密度ポリエチレン製プレジャーボート⁵⁾



図 - 3.4 ブロー成形機⁵⁾

3.3.2 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であったので、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することとした。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㈱製エポリュースP-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 - 3.6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。

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℃、

表 - 3.6 中密度ポリエチレンのカタログ値^{6,7)}

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		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、F50	hr	>500	>1000

3MPaで30分保持した後、徐冷する条件で行った。

3.3.3 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。

3.3.4 ポリプロピレン（記号：PPF）

F社が製造する折り畳み式プレジャーボート（図 - 3.5）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、片面にエンボス加工が施してあり、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 - 3.6）を使用している。



図 - 3.5 ポリプロピレン製プレジャーボート⁸⁾

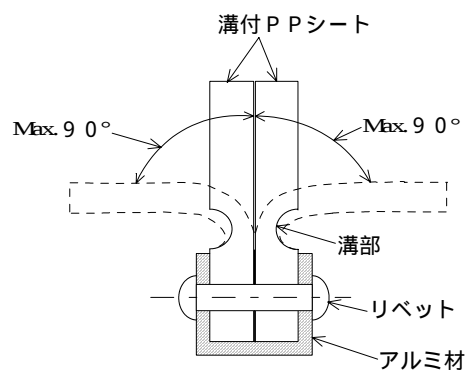


図 - 3.6 PPF 溝付きヒンジ構成部



図 - 3.7 PPS 成形品の一例

3.3.5 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℃、3MPaで30分保持した後、徐冷して行った。成形品の一例を図-3.7に示す。

表-3.7 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

3.4 試験結果

3.4.1 密度

密度は、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、精密天秤（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。試験片は、静的曲げ試験用に成形した短冊状試験片を使用した。

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-3.7に示す。また、表-3.8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-3.8 密度によるポリエチレンの分類⁴⁾

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

3.4.2 デュロメータ硬さ

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-3.8に示すゴム硬度計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。試験片には全長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。なお、試験点数は各供試板につき10点である。

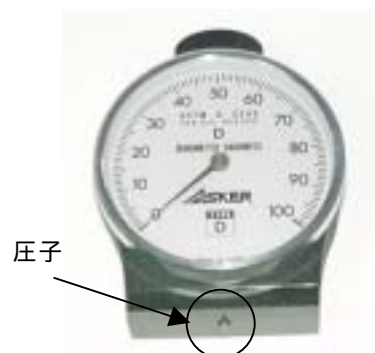


図-3.8 デュロメータ

各供試板のデュロメータ硬さ(HDD)を表-3.9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⁹⁾。

表-3.9 デュロメータ硬さ

供試材	HDD	
	平均	標準偏差
PEB	63.5	0.8
PEM	60.9	0.9
PEL	55.2	0.4
PPF	71.0	1.2
PPS	72.8	0.8

3.4.3 静的引張強度

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。試験はインストロ



図-3.9 静的強度試験機

ン型材料試験機（容量：100kN）（図 - 3.9）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をポリプライマーで処理した試験片表裏面に瞬間接着剤で貼り付け、測定した。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。なお、試験本数は各供試板につき 10 本である。

各試験片を引っ張ると、図 - 3.10 に表されるような応力（公称応力）- 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 - 3.11 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 - 3.10 及び図 - 3.12 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。

3.4.4 静的圧縮強度

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で求めるが、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、2.3.3 項で示した

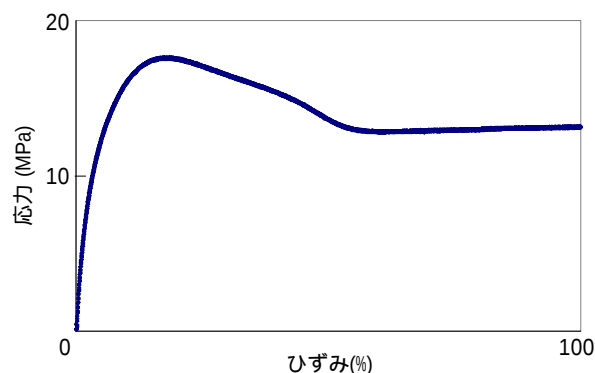


図 - 3.10 引張応力 - ひずみ線図の一例



図 - 3.11 引張試験片

表 - 3.10 引張試験結果

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

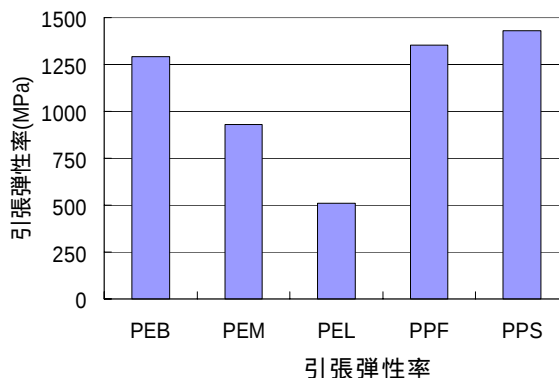
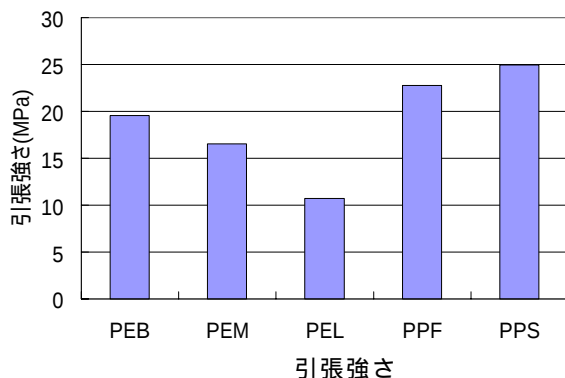


図 - 3.12 引張試験結果

BEF(Both End Fixed)法を用いて測定した。試験はインストロン型材料試験機（容量：100kN）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方向ひずみゲージにより測定した。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

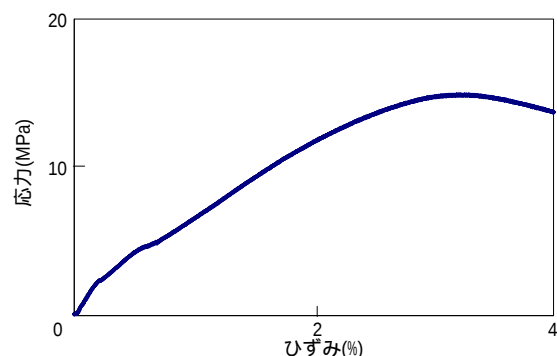


図 - 3.13 圧縮応力 - ひずみ線図の一例

表 - 3.11 圧縮試験結果

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

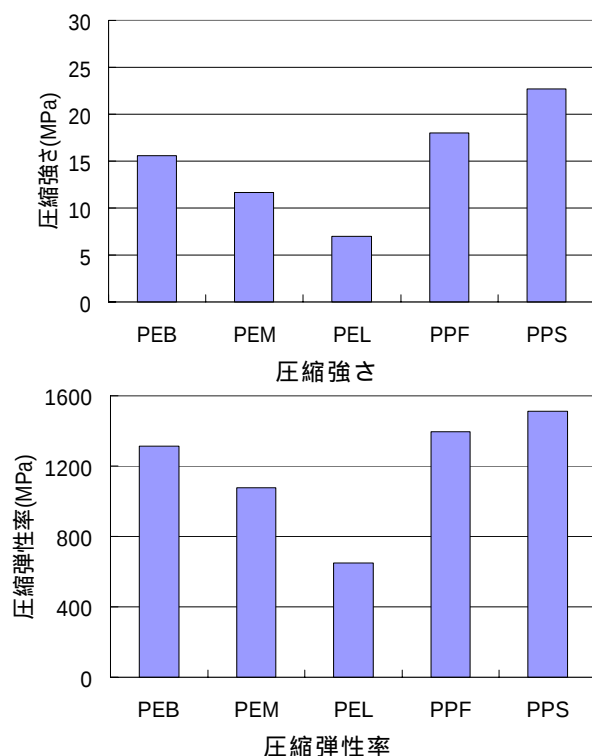


図 - 3.14 圧縮試験結果

いものを使用した。試験本数は各供試板につき10本である。

各試験片を圧縮すると、図 - 3.13に表されるような応力（公称応力） - 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 - 3.11及び図 - 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。

3.4.5 静的曲げ強度

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。インストロン型材料試験機（容量：100kN）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

$$S_r = \frac{6hV}{L^3}$$

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 ~ 0.016 min^{-1} 程度である。なお、試験本数は各供試板につき10本である。

曲げ強度及び弾性率は次式を用いて計算した。

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

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

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 - たわみ線図の初期傾斜

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。

各試験片を曲げると、図 - 3.15に表されるような曲げ荷重 - 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 - 3.12及び図 - 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。これは初期傾斜 W/δ 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

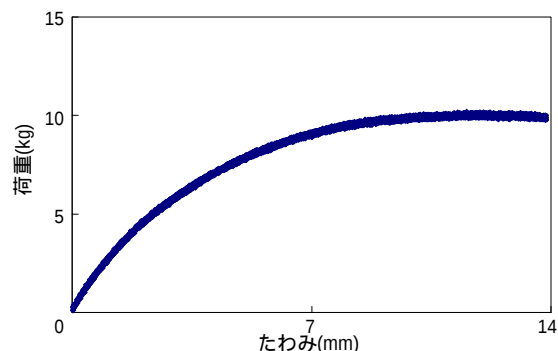


図 - 3.15 曲げ荷重 - たわみ線図の一例

表 - 3.12 曲げ試験結果

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

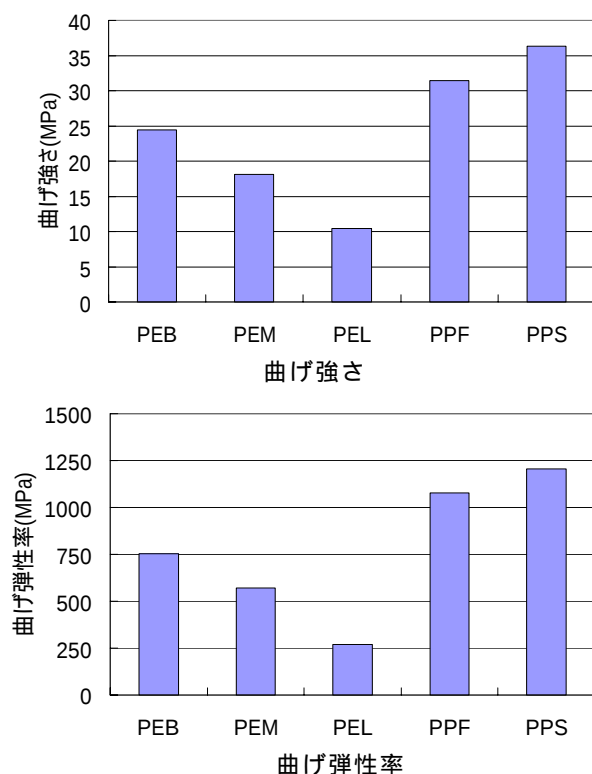


図 - 3.16 曲げ試験結果

状況を観察すると、PPS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。

3.4.6 落錘3点曲げ衝撃強度

衝撃試験には、落錘3点曲げ試験装置を使用した。図 - 3.17に衝撃試験装置を示す。落錘重量は0.77 kgである。落錘落下高さは、0.5～2 m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(株東京測器研究所製 TCLZ-500KA)により計測した。データのサンプリング速度は、10 μ sec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ロン試験機UTM-10Tを使用し、ヘッド速度は2 mm/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、超音波探傷器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。

試験片の形状は短冊形とし、試験片寸法は、長さ100 mm、幅20 mm、板厚約3.5 mm(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弾性的な特性を示し、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点曲げ試験を行った。

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



図 - 3.17 落錘衝撃試験装置

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、これは落下した落錘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。

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

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

表 - 3.13 弾性率測定結果

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

表 - 3.14 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=0.5m	h=1.0m	h=1.5m	h=2.0m
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

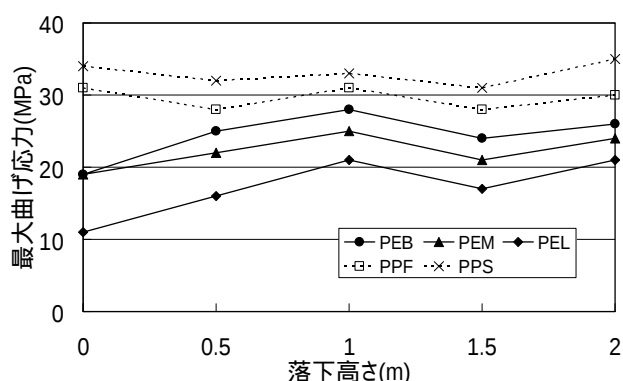


図-3.18 落下高さの影響

測定結果を表 - 3.13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のローパスフィルター処理を行った波形データから求めることとした。

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 - 3.14及び図 - 3.18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。

3.4.7 引張疲労強度

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。試験は容量50kN及び100kNの油圧サーボ式疲労試験機 (図 - 3.19) を使用して、5Hz sin波の引張応力を与え、荷重制御により行った。

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。

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ったが、表 - 3.15 に示す結果を得、これをもとに図 - 3.20 に示す応力 - 繰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



図 - 3.19 疲労試験機

表 - 3.15 引張疲労試験結果

PEB		PEM		PEL		PPF		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	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

ない。同図には破断繰返し数 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みられず、その後破壊応力が低下してくることがわかる。

各供試材の引張疲労破壊様相の代表例を図 - 3.21 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、白化が生じるとその部分に繰返し応力が集中し、疲労破断に至ると考えられる。

そこで、疲労過程における試験材の剛性変化を検討した。剛性は所定繰返し数での最大荷重、最小荷重の差と、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。

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

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

ここで $E_n A$: n 回目の剛性
 $E_0 A$: 初期の剛性
 $F_{n\text{-max}}$: 最大荷重 $F_{n\text{-min}}$: 最小荷重
 $L_{n\text{-max}}$: 最大変位 $L_{n\text{-min}}$: 最小変位
 s : チャック間距離

図 - 3.22 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、低荷重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と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

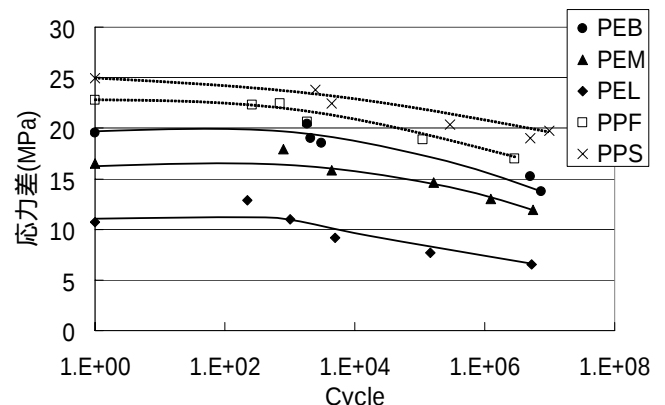
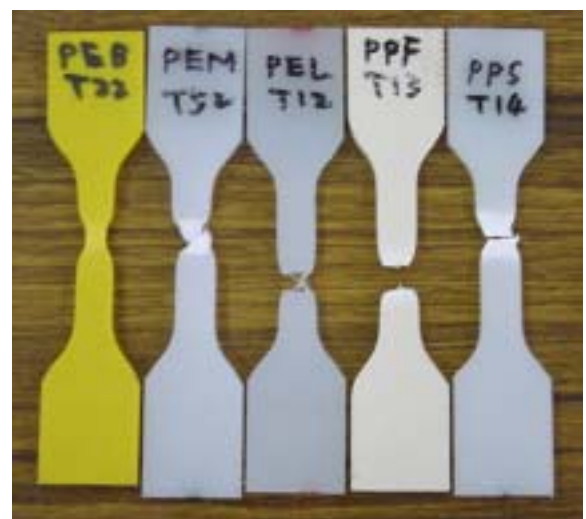


図 - 3.20 引張応力 - 繰返し数線図

図 - 3.21 引張疲労破壊様相
られなかった。

3.4.8 曲げ疲労強度

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50kNの油圧サーボ式疲労試験機を使用し、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、繰返し速度は引張疲労試験の場合より遅くして、2Hz sin

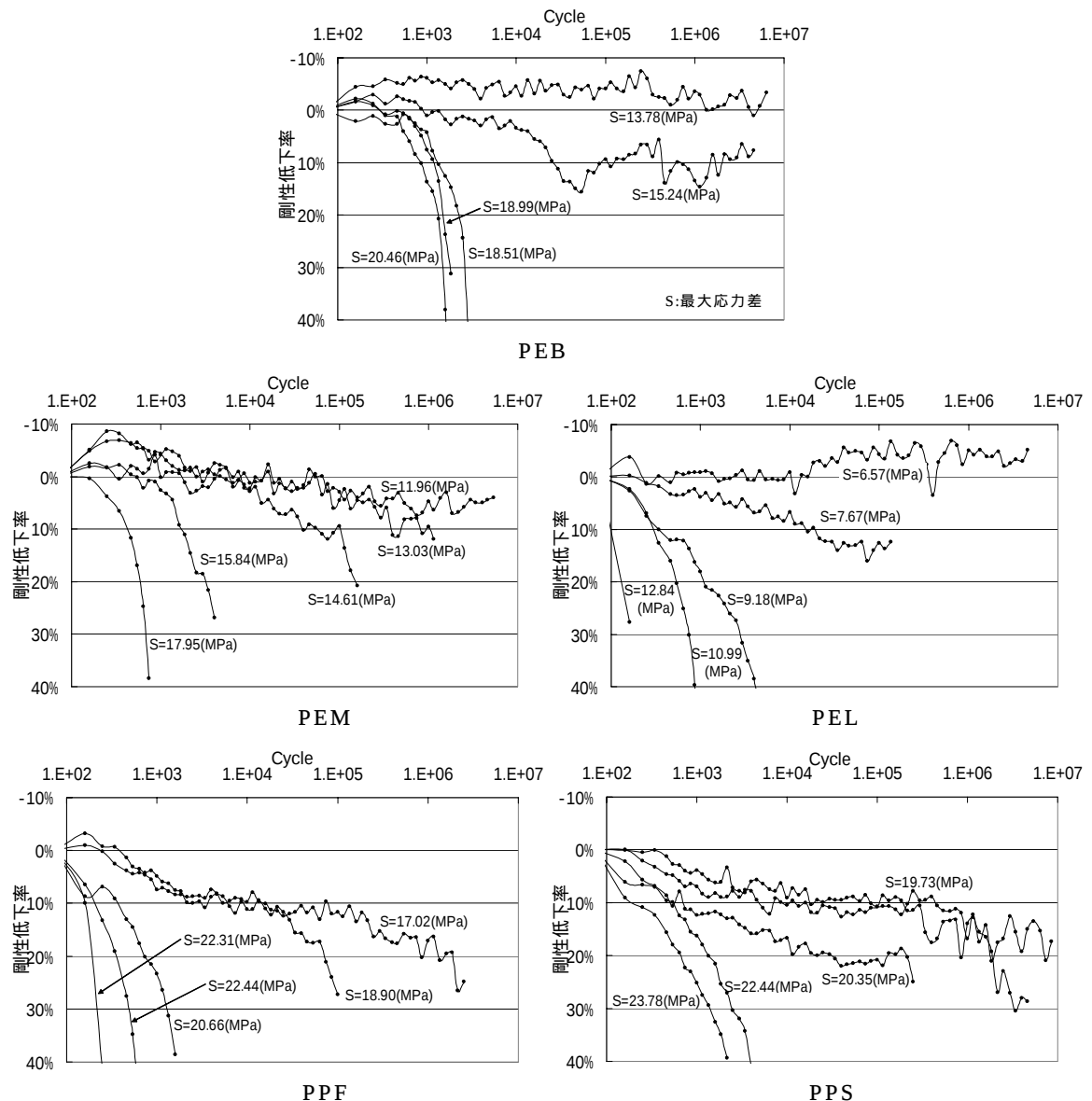


図 - 3.22 引張疲労過程における剛性低下率

波の片振り曲げ応力を与え、スパンは80mm、荷重制御とした。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、全長110mm、幅35mm、厚さ6mmの短冊型試験材を新たに加熱プレス成形した。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、低温で弾性率が増大することを利用して、+1 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 - 3.23に浸漬疲

労試験システムの写真を示す。

表 - 3.16 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 - 3.24 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 を越えたときとした。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 とし、剛性を上げたためである。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。

破壊様相は、静的曲げ試験の場合と同様PPS材に引



図 - 3.23 浸漬疲労試験

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、脆性的にき裂が進んだように見受けられる。低温の影響、荷重速度の影響等が考えられる。

図 - 3.25に剛性変化を調べた結果を示す。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。

表 - 3.16 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		

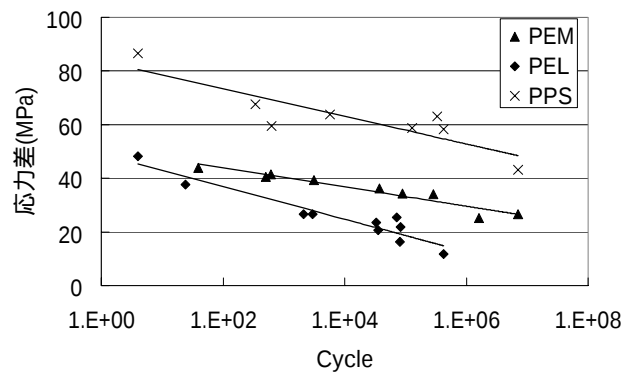
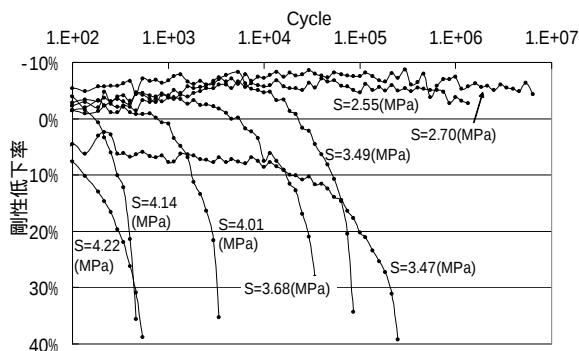
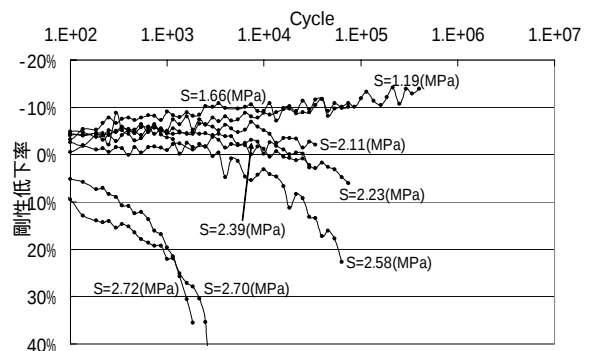


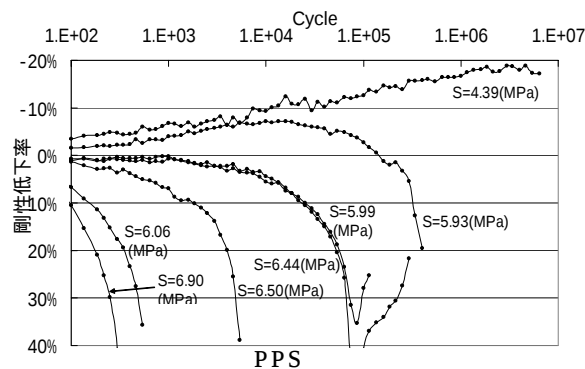
図 - 3.24 曲げ応力 - 繰返し数線図



PEM



PEL



PPS

図 - 3.25 曲げ疲労過程における剛性低下率

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により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くることは考えられる。今後の課題であるが、剛性変化を余寿命の判定に使用するの

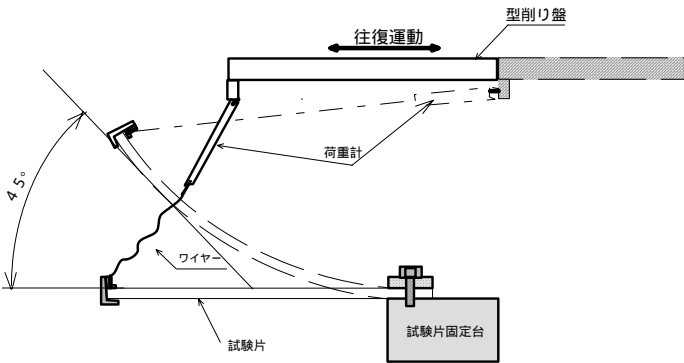


図 - 3.26 繰り返し折り曲げ試験装置(片曲げ)

3.4.9 繰り返し折り曲げ強度

繰り返し折り曲げ試験は 2 種類の方法により行った。まず型削り盤の往復運動を利用して、図 - 3.26 に示す方法により、176×160×3～4 (元厚) mm の試験片について、片側繰り返し折り曲げ試験を行った。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的位置まで戻らず、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錘を取り付けて元の位置まで戻るようにして行った。

また図 - 3.27に示す方法により、両側繰り返し折り曲げ試験も行った。試験片は176×50×3～4 (元厚) mmとし、曲げ角度は片側45°及び67.5°の2通りとした。繰り返し速度は両方法とも1分間に20回、繰

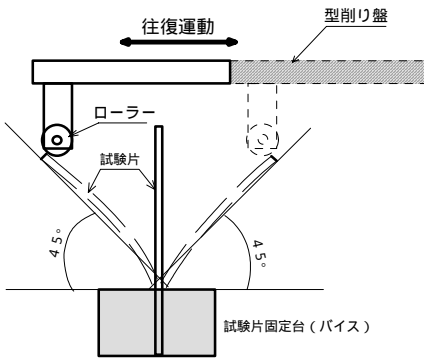


図 - 3.27 繰り返し折り曲げ試験装置 (両曲げ)

表 - 3.17 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

表 - 3.18 2万回までの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	少し白色化	片面が11.5mm程度白色化

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

り返し回数は2万回とし、試験温度は室温(23～28)で行った。

各供試材の寸法を表 - 3.17に、また折り曲げ試験の結果を表 - 3.18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。

3.4.10 耐寒性（アイゾット衝撃強度）

耐寒性試験はJIS K7110の硬質プラスチックのアイゾット衝撃試験に準拠して、- 60、- 40、- 30、- 20、- 10、0、10、20、50 の各温度において行い、アイゾ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。

試験片は幅（供試材の元厚）3～4mm、厚さ

表 - 3.19 耐寒性試験片

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

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 - 3.19に示す。なお、試験本数は各供試版につき5本としたが、ばらつきが多く傾向のはっきりしない場合は追加試験を行った。

各供試材のアイゾット衝撃試験結果を表 - 3.20に示す。また、アイゾット衝撃値と温度との関係を図 - 3.28に示す。ポリエチレン系のPEBは- 5 付近まではあまり変化は見られないが、- 5 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 付近までは温度の低下に伴い増加する傾向を示し、0 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 付近にあり、PEM及びPELの遷移温度域は0～10 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ゾット衝撃値は温度の低下に伴い徐々に減少し、20 より低くなると急激に減少する傾向が見られる。このことはPPF及びPPSの遷移温度域が20～0 付近であることを示している。

アイゾ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 - 3.29～3.33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 以下の温度で表面粗さが減少している（図 - 3.29）。また、PEMは- 10 破面の表面粗さが減少している（図 - 3.30）。しかしながら、PELでは- 10 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 - 3.31）。

ポリプロピレン系のものはさきに述べたように、ポリエチレン系より遷移温度域が高く、10 になると

表 - 3.20 アイゾット衝撃値

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	557.34	33.73	478.14	24.20
15	----	----	----	----	----	----	258.19	45.75	----	----
10	576.81	96.93	647.57	70.00	708.96	30.17	155.68	15.02	188.21	38.33
5	----	----	----	----	720.62	22.48	131.12	6.30	----	----
0	511.07	115.11	644.34	26.65	735.97	62.77	90.58	5.98	81.35	1.81
- 5	598.10	50.67	100.81	20.10	----	----	----	----	----	----
- 10	263.06	77.89	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	----	----	----	----	----	----	----	----
- 40	93.39	46.78	24.31	5.62	50.67	7.38	21.55	1.78	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

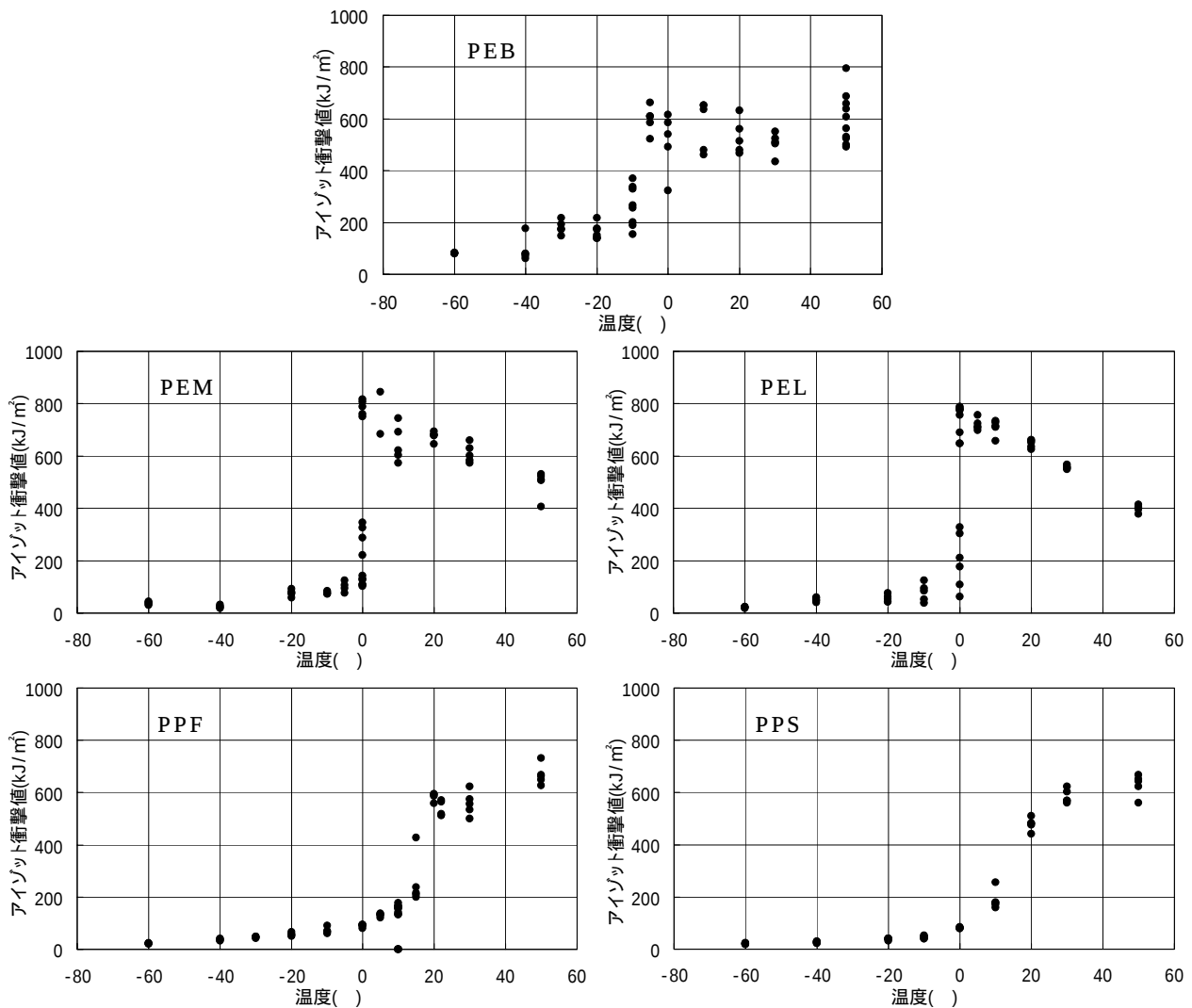


図 - 3.28 アイゾット衝撃値と温度との関係

ほぼ完全に破断するようになる。また、破断面は10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で、PPSでは10での表面粗さが急激に小さくなっている。(図 - 3.32、3.33)

3.4.11 熱安定性（静的曲げ試験）

熱老化性試験は、JIS K7212のプラスチック - 熱可塑性プラスチックの熱安定性試験方法 - 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で試験時間は0、100、200、300、400、500時間とした。

劣化の判定は目視観察によって、試験片に局所的な粉化、割れ、ひび、変形、変色などの発生、重量の変化、曲げ試験による性能の低下、を調べることに由り行った。

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 - 3.21に示す。

試験の結果、肉眼観察では試験片に局所的な粉化、割れ、ひび、変形、変色などの発生は認められなかった。

重量の変化については、重量の変化率と試験の経過時間との関係を図 - 3.34に示す。試験片の重量は熱安定性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り表面積が大きい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。

曲げ試験結果については、熱安定性試験後の曲げ強度及び曲げ弾性率を調べた結果を表 - 3.22、3.23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 - 3.35に示す。総じて、曲げ強

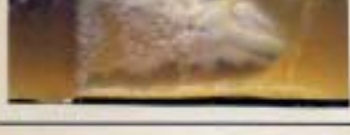
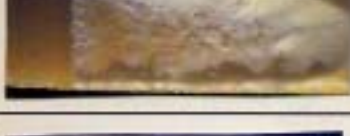
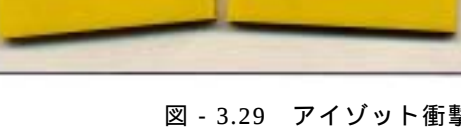
試験温度	破壊様相 (打撃)	破断面	表面粗さ(μm)
50°C			Ra: 5 Rmax: 29
20°C			Ra: 11 Rmax: 26
10°C			Ra: 9 Rmax: 24
0°C			Ra: 11 Rmax: 26
-5°C			Ra: 7 Rmax: 44
-10°C			Ra: 4 Rmax: 23
-20°C			Ra: 9 Rmax: 26
-40°C			Ra: 2.7 Rmax: 12.3
-60°C			Ra: 3.4 Rmax: 18.4

図 - 3.29 アイゾット衝撃試験片の破壊様相(PEB)

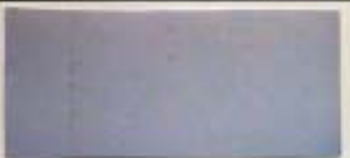
試験温度	破壊様相 (打撃)	破断面	表面粗さ(μm)
50°C			Ra: 9 Rmax: 46
20°C			Ra: 7 Rmax: 37
10°C			Ra: 7 Rmax: 57
0°C			Ra: 7.6 Rmax: 14.6
-5°C			Ra: 8.6 Rmax: 22.1
-10°C			Ra: 6.6 Rmax: 5.9
-20°C			Ra: 3.3 Rmax: 16.2
-40°C			Ra: 6.1 Rmax: 10.2
-60°C			Ra: 5.9 Rmax: 23.5

図 - 3.30 アイゾット衝撃試験片の破壊様相(PEM)

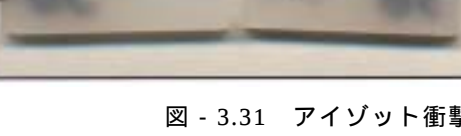
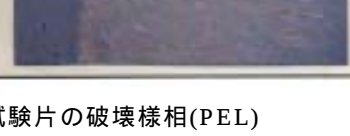
試験温度	破壊様相 (打撃)	破断面	表面粗さ(μm)
50°C			Ra: 31.2 Rmax: 24.4
20°C			Ra: 17.8 Rmax: 54.6
10°C			Ra: 18.4 Rmax: 45.9
0°C			Ra: 31.5 Rmax: 71.6
-10°C			Ra: 36 Rmax: 161
-20°C			Ra: 36 Rmax: 63
-40°C			Ra: 7 Rmax: 49
-60°C			Ra: 4 Rmax: 28

図 - 3.31 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 - 3.32 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 - 3.33 アイゾット衝撃試験片の破壊様相(PPS)

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。

熱安定性試験による劣化を調べるために、熱安定性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と試験時間との関係を求めたものが図 - 3.36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

表 - 3.21 熱安定性試験片

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

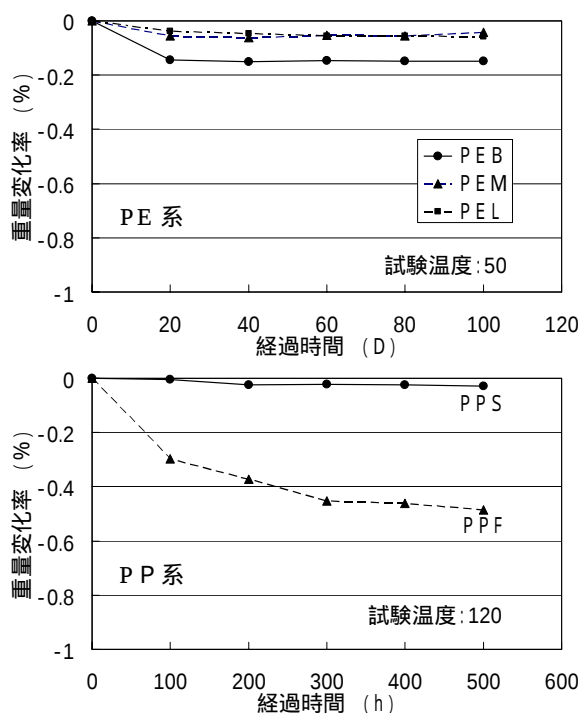


図-3.34 重量変化率の経時変化

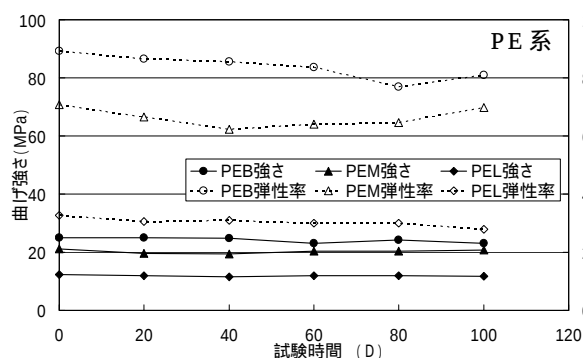


表 - 3.22 熱安定性試験材の曲げ強度特性 (PE 系)

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 - 3.23 熱安定性試験材の曲げ強度特性 (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

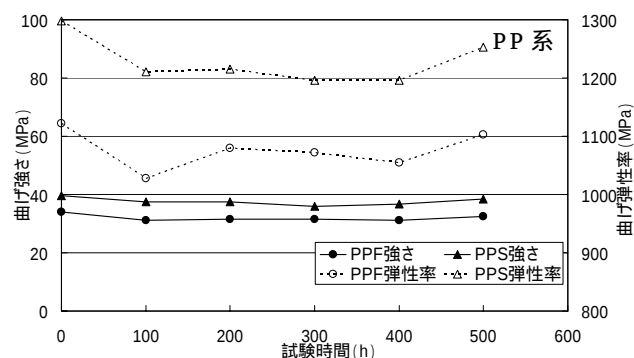


図 - 3.35 曲げ強度の経時変化

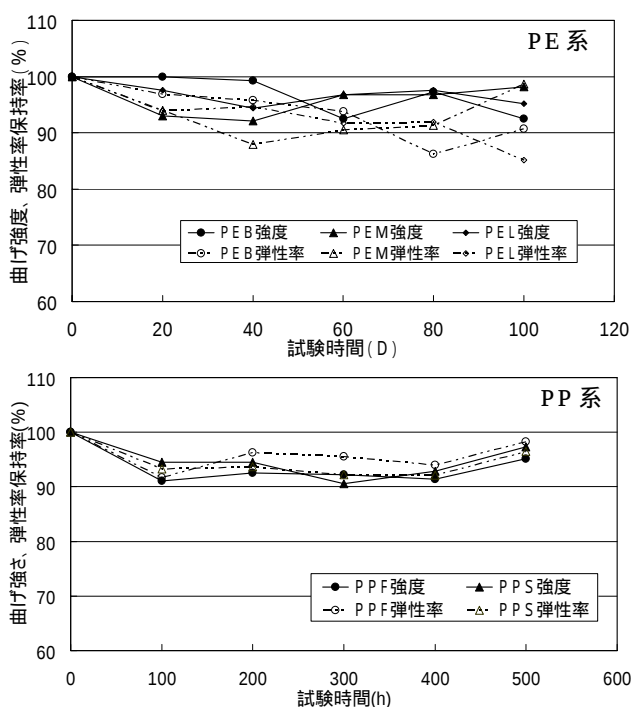


図 - 3.36 曲げ強度保持率の経時変化

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。

3.4.12 定応力環境応力き裂特性

定応力環境応力き裂試験は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原則として初期応力を7.48MPa、

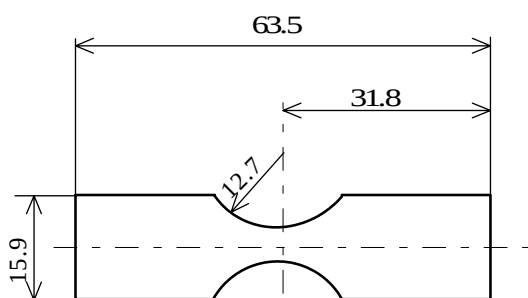


図 - 3.37 定応力環境応力き裂試験片

表 - 3.24 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

8.82MPa、9.80MPaのいずれかとし、50 の恒温水槽中に行った。

試験片の形状及び寸法は図 - 3.37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 - 3.24に示す。

各供試材の試験時伸びと経過時間との関係を図 - 3.38 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、伸び変化は少なくなった。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 - 3.39 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 、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。

3.4.13 滑り摩耗撃特性

滑り摩耗試験は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 - 3.40に示すディスク状の試験治具を用いて、上部ディスクに10×10×2~3 (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。

$$V_s = V/PL$$

ここで V_s : 比摩耗量 $\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{km})$

V : 摩耗量 mm^3

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 mm^3

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/m^3

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。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 - 3.25に示す。

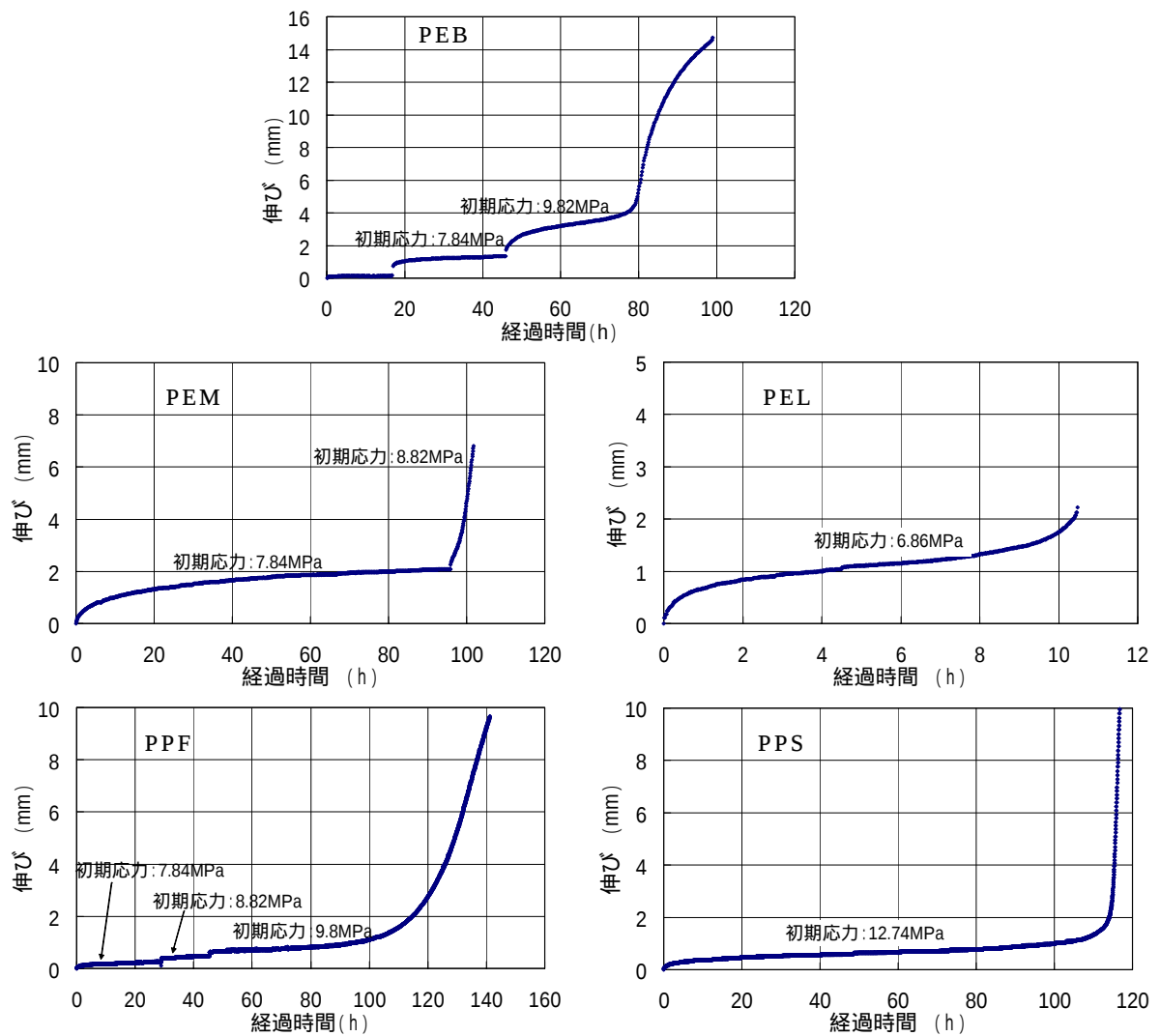


図 - 3.38 伸びの経時変化

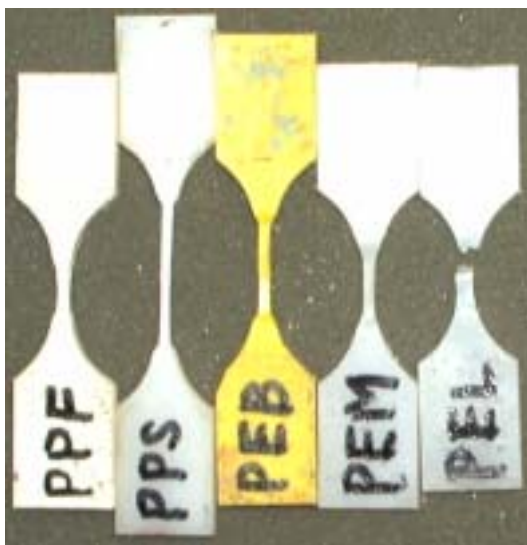


図 - 3.39 破壊様相

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 - 3.26 に示す。

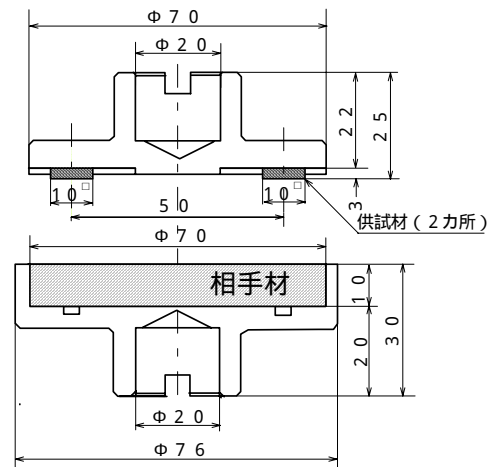


図 - 3.40 摩擦試験治具

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。

表 - 3.25 滑り摩耗試験片

供試材	厚さ (mm)	
	平均	標準偏差
PEB	3.69	0.06
PEM	3.52	0.12
PEL	3.76	0.06
PPF	2.80	0.02
PPS	3.24	0.34

表 - 3.26 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

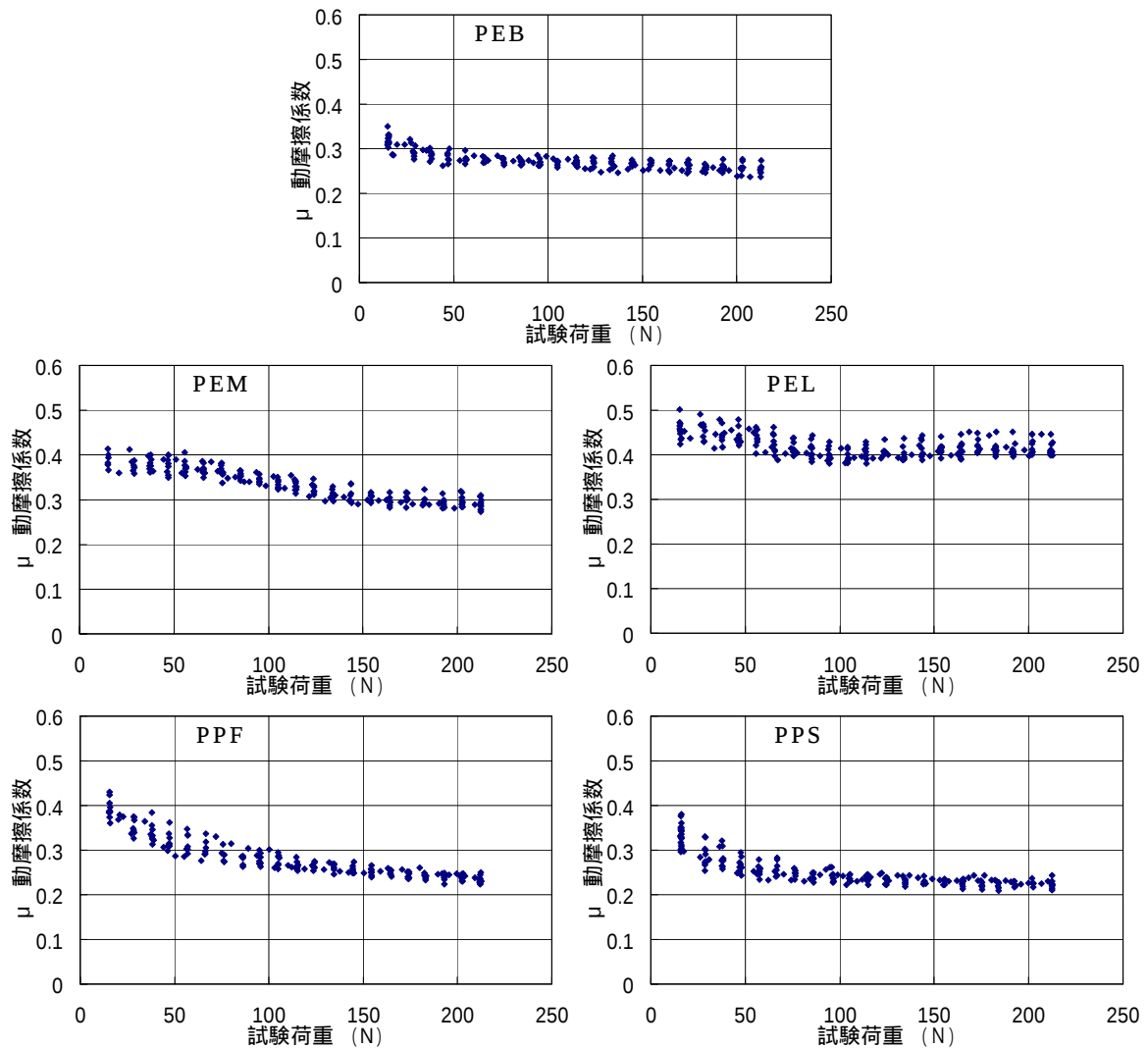


図 - 3.41 動摩擦計数と試験荷重

図 - 3.41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。また全体的に、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

表 - 3.27 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

て行った。試験温度24～26℃で摩耗試験を行った結果を表-3.27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-3.42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に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、激しく削られる状況が見ら

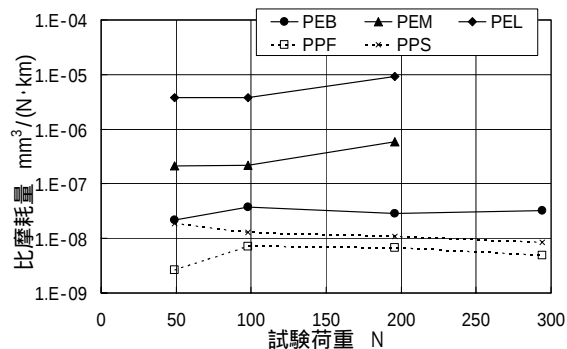


図 - 3.42 比摩耗量と試験荷重との関係

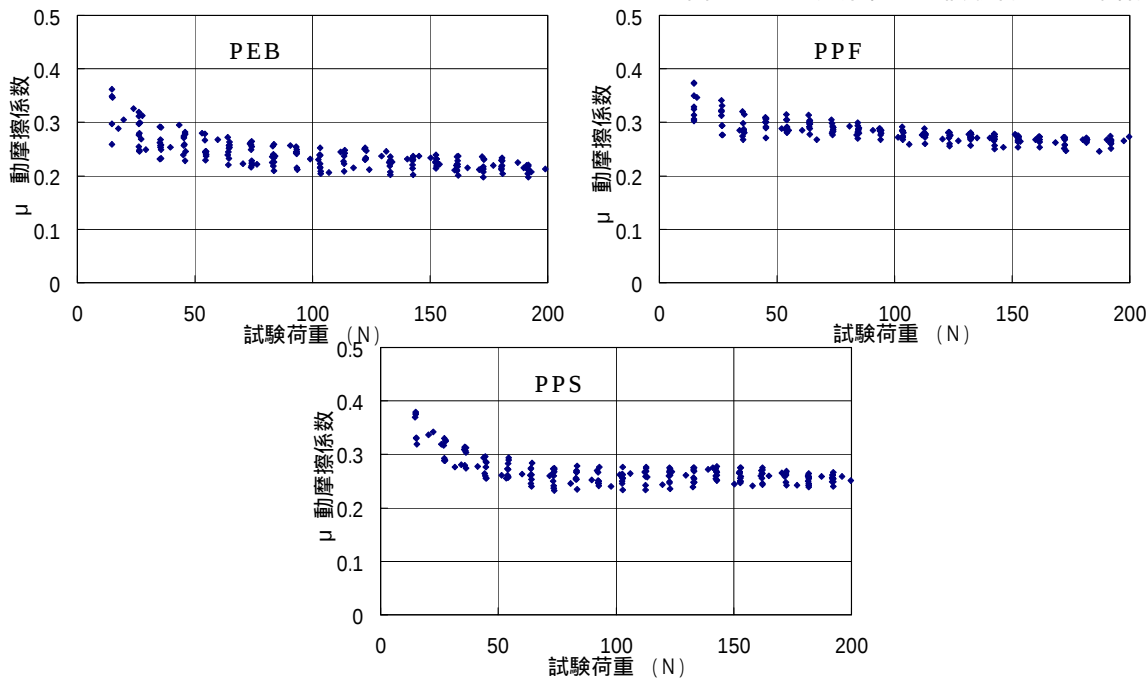


図 - 3.43 吸水状態における動摩擦係数と試験荷重

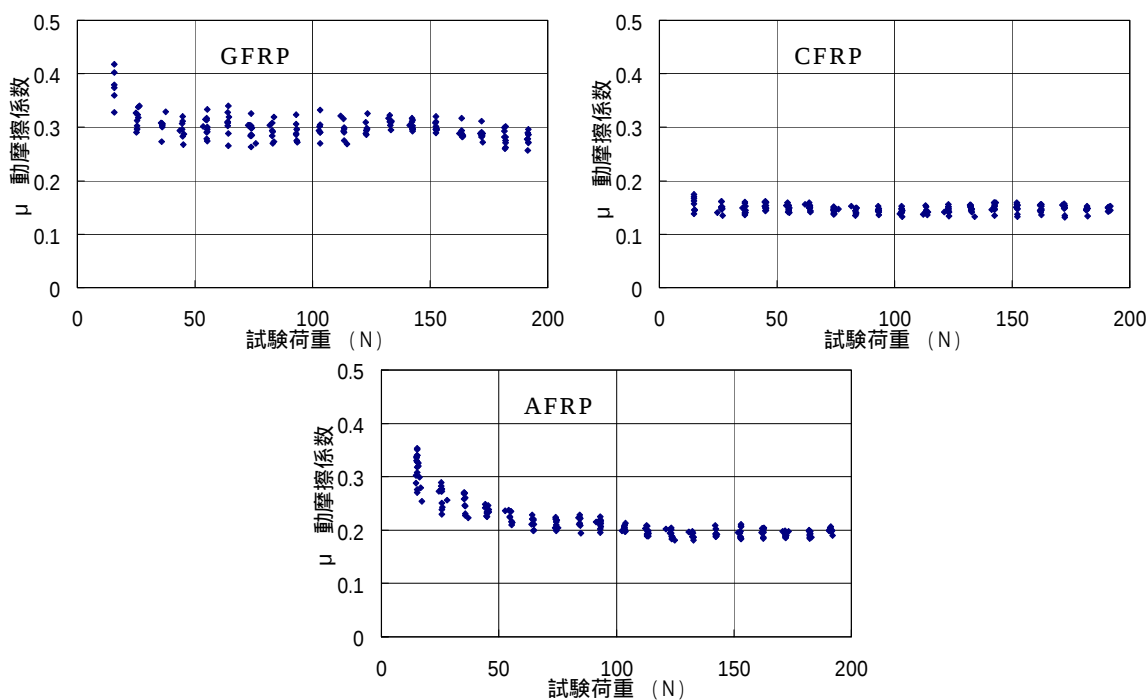


図 - 3.44 吸水状態における動摩擦係数と試験荷重

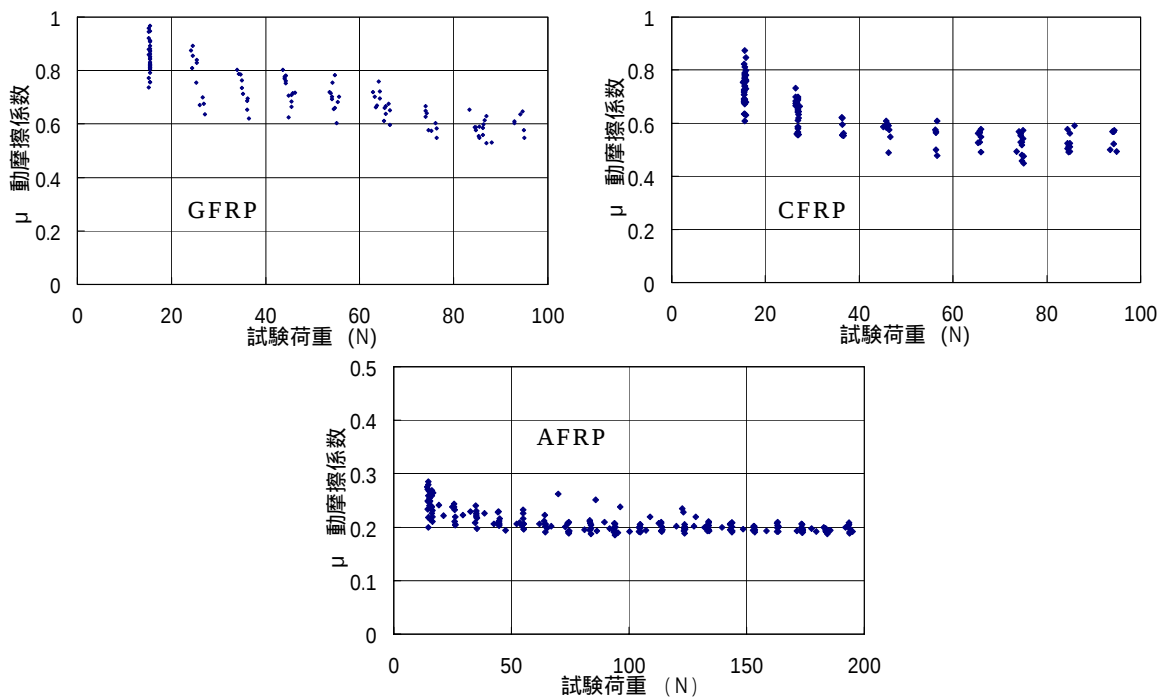


図 - 3.45 乾燥状態における動摩擦係数と試験荷重

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よる差異はほとんど見られない。

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 は比損耗量が 1 桁、PEL では 2 桁大きくなった。

つぎに、上述した乾燥状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の関係を求めた結果を図 - 3.43 に示す。

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¹⁰⁾の一例を図 - 3.44（吸水状態）、図 - 3.45（乾燥状態）に示す。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 - 3.46 に示す。図中、PPG はガラス繊維強化ポリプロピレンである。また、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。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乾燥状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。

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 - 3.47 に示す。比摩耗量の場合も動摩擦係数と類似の傾向

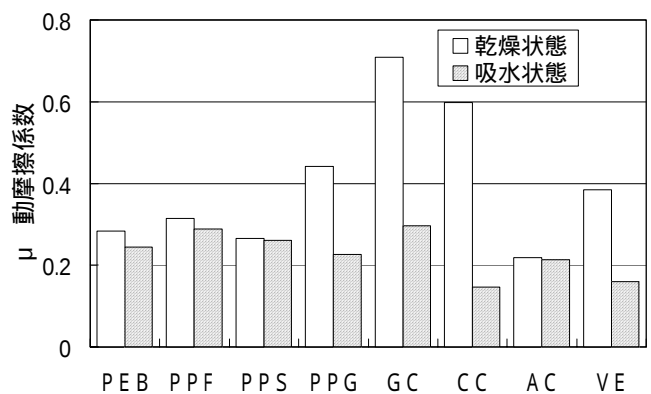


図 - 3.46 試験荷重 50N 付近の動摩擦係数

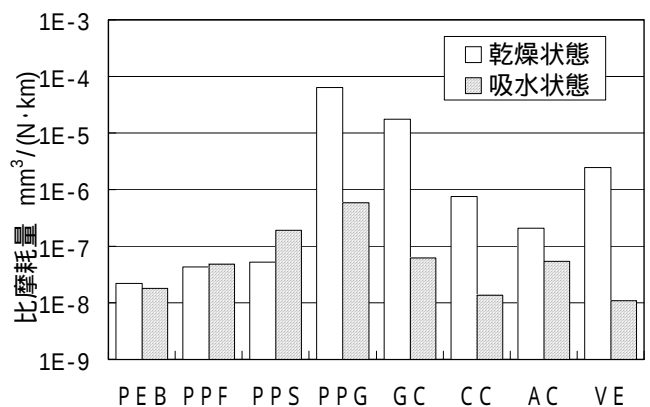


図 - 3.47 比摩耗量の状態による違い(W: 49N)

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。

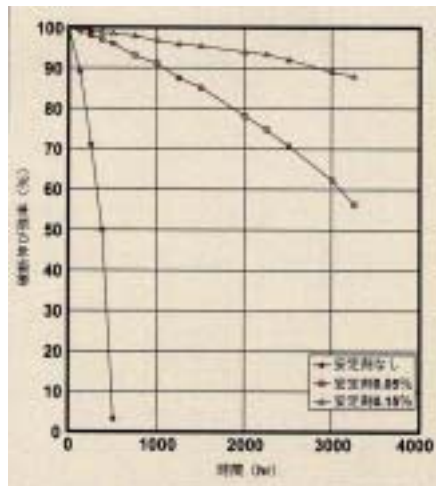
3.4.14 耐候性（促進暴露試験）

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 - 3.48 に示す¹¹⁾。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。

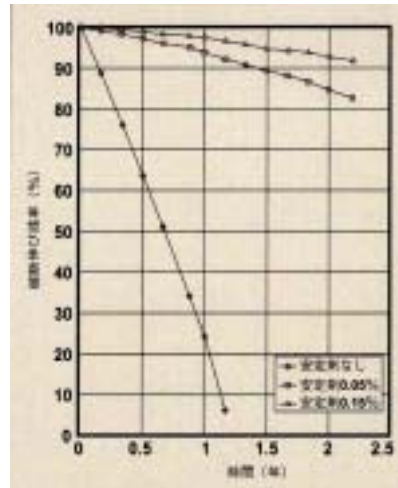
促進暴露試験は大阪府立産業技術総合研究所に依頼し、JIS K7350-4 プラスチック - 試験室光源による暴露試験方法 - 第4部：オープンフレームカーボンアークランプに準拠して実施した。試験機はスガ試験機(株)製スーパーロングライフウェザーメータ WEL-SUN-DC を用い、ブラックパネル温度 63 ± 3 、

湿度（水噴霧のないとき） $50 \pm 5\% \text{RH}$ 、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。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ゾ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。

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。照射枚数については、ウェザーメーター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） $\times$ （照射時間5段階） $\times$ （4枚）= 100枚照射した。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本の試験片を長さ70mm、幅15mmの短冊形に、またアイゾット衝撃試験も各条件の照射材1



(a) サンシャインカーボンアーク



(b) 屋外暴露

図 - 3.48 暴露によるポリエチレン伸び残率の変化



図 - 3.49 暴露試験片(PPS)

枚ずつから試験片10本を切り出して長さ70mm、幅10mmの短冊形にそれぞれ加工して試験に供した。

目視観察結果

PPS材では図 - 3.49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 - 3.28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つ

表 - 3.28 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

た。

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 - 3.29

表 - 3.29 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

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 - 3.50 ~ 3.52 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ったため、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。

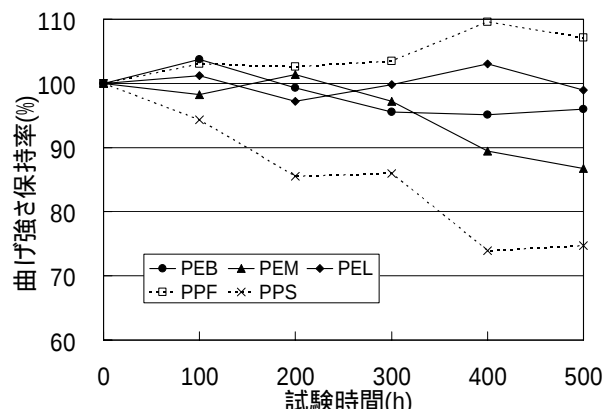


図 - 3.51 曲げ強さの変化

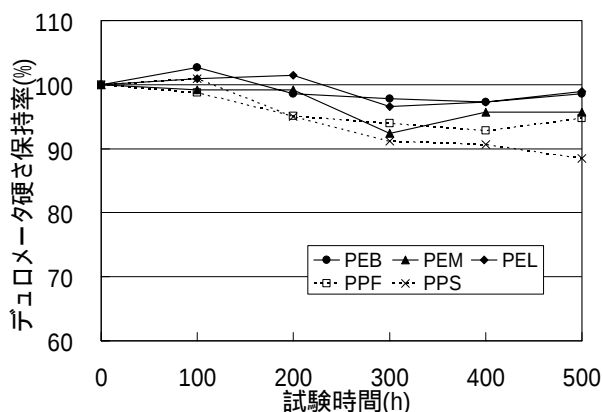


図 - 3.50 デュロメータ硬さの変化

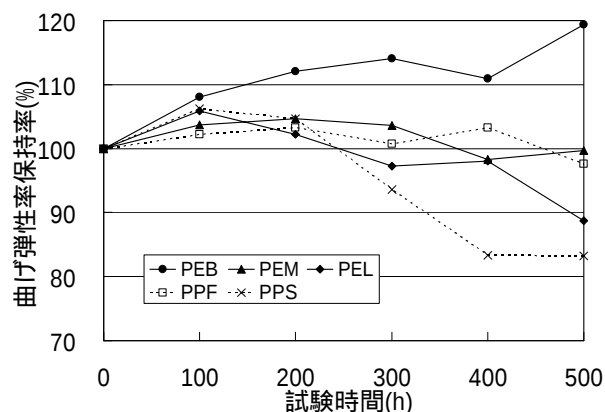


図 - 3.52 曲げ弾性率の変化

表 - 3.30 促進暴露後のアイゾット衝撃値

暴露時間(h)		0		100		200		300		400		500	
		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	283.59	156.73	651.30	24.98	593.65	57.95	680.71	58.01	376.50	73.81	645.45	9.68
	0	189.02	149.68	675.86	95.85	596.14	72.49	566.74	49.24	566.75	29.32	700.42	32.20
	10	517.68	203.50	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	426.78	79.95	189.17	26.58	252.09	52.80	200.60	26.83	200.60	26.83	178.56	15.83
	20	258.68	87.18	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	295.41	16.98	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

アイゾット衝撃試験結果

表 - 3.30 に耐寒性試験の結果を踏まえ、各供試材の脆化温度付近の温度でアイゾット衝撃試験を行った結果を示す。また、各供試材のアイゾット衝撃値と暴露時間との関係を図 - 3.53(a) ~ (e)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

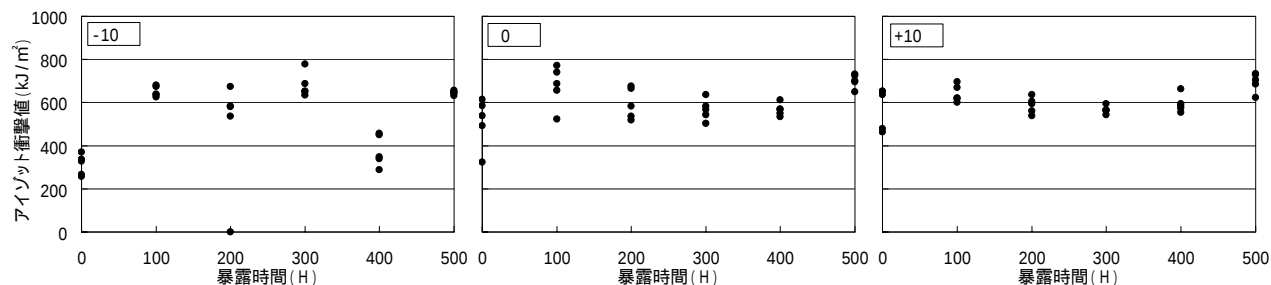


図 - 3.53(a) アイゾット衝撃値と暴露時間との関係(PEB)

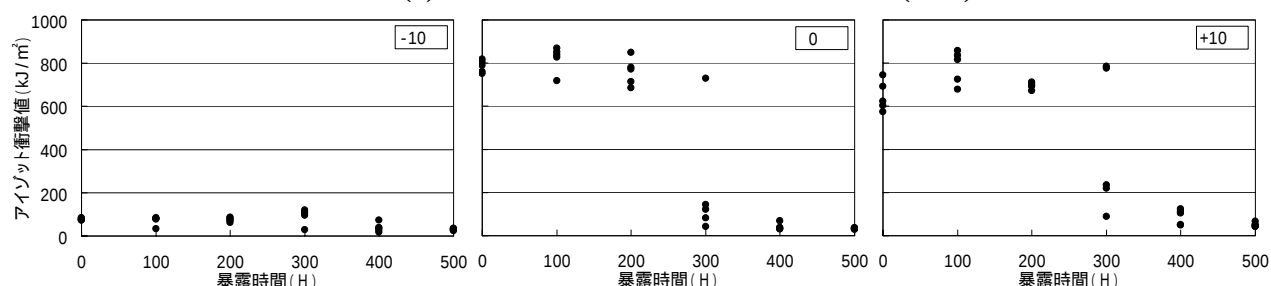


図 - 3.53(b) アイゾット衝撃値と暴露時間との関係(PEM)

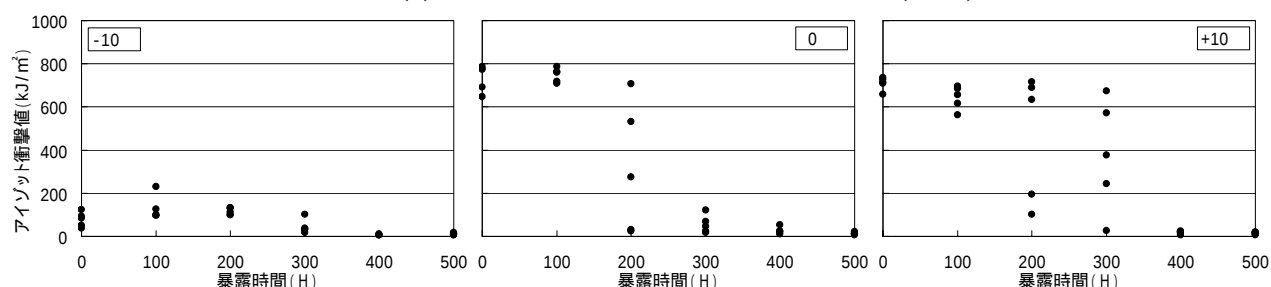


図 - 3.53(c) アイゾット衝撃値と暴露時間との関係(PEL)

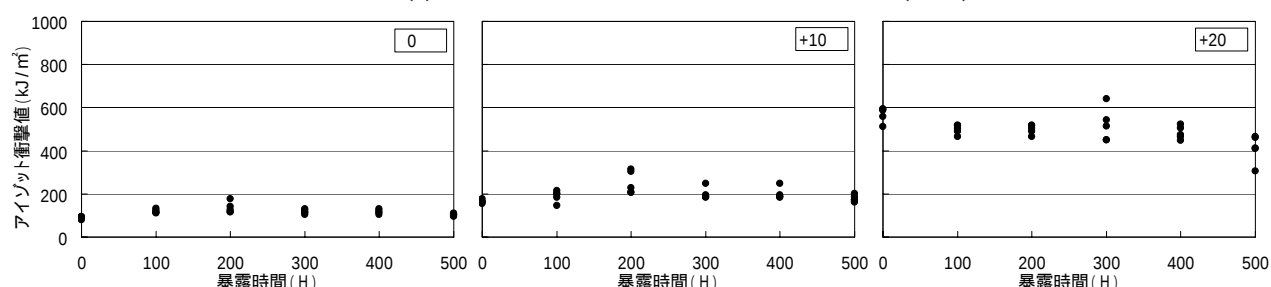


図 - 3.53(d) アイゾット衝撃値と暴露時間との関係(PPF)

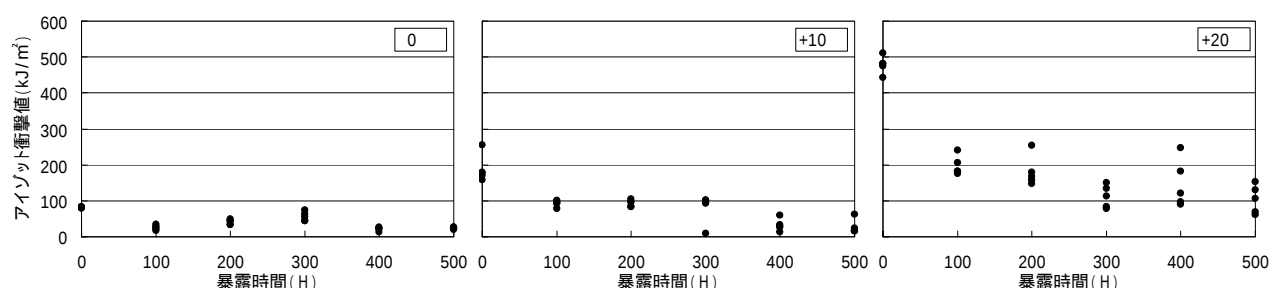


図 - 3.53(e) アイゾット衝撃値と暴露時間との関係(PPS)

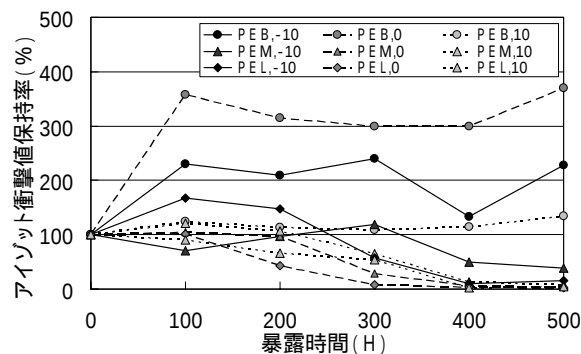


図 - 3.54(a) アイゾット衝撃強度保持率(PE系)

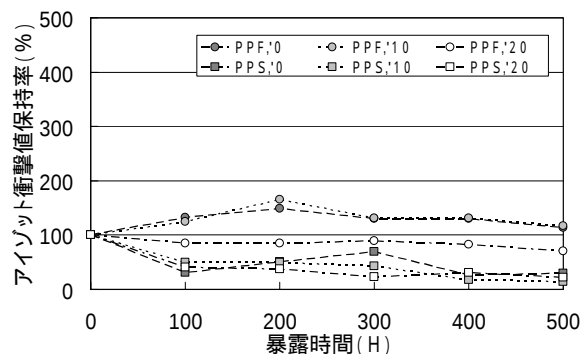


図 - 3.54(b) アイゾット衝撃強度保持率(PP系)

大きく、試験前と同程度の値を示している。300時間以上ではアイゾ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ゾット衝撃値は、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のアイゾット衝撃値はいずれの温度でも大きく低下し、暴露100時間で試験前の1/4から2/5の値となっている。

暴露試験による耐久性を調べるため、暴露試験後のアイゾット衝撃値と試験前のアイゾット衝撃値との比率をとったアイゾット衝撃値保持率と暴露時間との関係を求めた。図 - 3.54(a)にポリエチレン系のアイゾ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 - 3.54(b)に示すポリプロピレン系では、PPFの試験温度0及び20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。

3.5 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。

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。

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。

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曲げによる強度の低下が大きい。

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。

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。

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付近、中密度及び低密度ポリエチレンは0～-10付近、ポリプロピレンは20～0付近であった。

熱安定性試験の結果、ポリエチレンは50、100日間、またポリエチレンは120、500時間放置することにより、曲げ強さが約10%低下した。

低密度ポリエチレンに、50、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。

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。

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、アイゾ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いずれも劣化が認められた。

3.6 留意事項

3.6.1 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。

(1) 高密度ポリエチレン

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。

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。

アイゾッド衝撃試験における遷移温度域は - 5 ~ - 20 付近である。

50 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。

定応力環境応力き裂は起こらない。

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。

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。

(2) 中密度ポリエチレン

静的強度は高密度ポリエチレンにやや劣る。

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。

アイゾッド衝撃試験における遷移温度域は 0 ~ - 10 付近である。

50 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。

定応力環境応力き裂は起こらない。

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。

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) 低密度ポリエチレン

静的強度は高密度ポリエチレンの約1/2にとどまった。

低温での曲げ疲労試験では繰り返し曲げによる強度低下が大きく、注意を要する。

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。

アイゾッド衝撃試験における遷移温度域は 0 ~ - 10 付近である。

50 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。

50、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。

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。

促進暴露時間の増加と共にアイゾット衝撃値が低下し、顕著な劣化が認められる。

(4) ポリプロピレン

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。

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。

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。

アイゾッド衝撃試験における遷移温度域は 20 ~ 0 付近である。

50 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。

定応力環境応力き裂は起こらない。

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 $2.6 \sim 7.2 \times 10^{-9} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{km})$ 、PPSは $8.5 \times 10^{-9} \sim 1.9 \times 10^{-8} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{km})$ であった。

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、アイゾ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。

3.6.2 検査上の留意事項

(1) ポリエチレン

材料承認に当たっての確認事項

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。

使用環境における温度が遷移温度域を下回らないこと。

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。)

構造強度についての留意事項

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。

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。

定期的検査に当たっての確認事項

船体の内外部に白化、き裂等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。)

衝撃荷重については常温では問題ないが、氷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に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。)

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。)

(2) ポリプロピレン

3.6.2(1)のポリエチレンと同じ。ただし、は以下のとおりとする。

アイゾット衝撃値及び引張降伏強さを確認すること。

4. あとがき

小型船舶の高速化、高機能化に対応して適用されつ

つある新しい船体材料について、機械的特性を中心に系統的に調査した。実機から試験材を切り出して各種評価試験に供するという性格上、十分な数量の試験片を確保することが簡単ではなかったが、可能な限り有効活用して試験データの信頼性を確保した。そして、SMC、ポリオレフィン等を船体材料として使用する場合の検査上の留意事項の策定にまでまとめることができた。本研究の所期の目標は達成できたと考える。

本研究によりとりまとめた、水上オートバイ等を使用される SMC 材料、並びに小型艇に使用される熱可塑性樹脂に関する承認及び検査上の留意事項は有効に活用されると期待する。また、長期耐久性、耐環境性に関する詳細なデータは、船体材料として新たに適用する際の設計指針として活用されたい。

一方、促進暴露試験は、従来はカーボンアークを使う方法が一般的であったが、最近ではキセノンランプを使用する方法が主流となり、ISO もこの流れに沿った見直し作業を行っている。しかしながら、キセノンランプを用いて FRP を劣化させた系統的データはほとんどなく、新たに検討する必要がある。それとともに、今後も新たな材料に対応して、研究を続ける必要があると考える。

謝辞

本研究を実施するにあたり、艇体材料をご提供いただいた川崎重工業(株)、ヤマハ発動機(株)、みのる化成(株)及びフリージア・マクロス(株)に感謝致します。また試験結果の解析にあたり貴重な御意見をいただいた「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委員会」の金原勲委員長並びに委員各位に感謝致します。さらに成果のとりまとめにご協力いただいた小型船舶検査機構の皆様にお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 後藤卒士民、「わかりやすい実践FRP成形」、工業調査会(1998)
- (2) 宮入裕夫、「FRP試験マニュアル」、日本規格協会(1989)
- (3) 吹上紀夫、津島聰、小野正夫、「CFRPの圧縮試験方法の検討」、41st FRP CON-EX'96講演要旨集(1996) pp59-60
- (4) 井手文雄他、「実用プラスチック辞典 材料編」、産業調査会(1997)
- (5) みのる化成(株)会社概要より抜粋
- (6) エクソンモービルケミカル社ホームページより抜粋

- (7) 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
- (8) ホームページより抜粋
- (9) 海上技術安全研究所大阪支所内部資料

- (10) 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)、pp185-186
- (11) ㈱三井化学分析センターホームページより抜粋