短繊維強化ポリカーボネート射出成形品の 疲労挙動の解析[†]

濱 田 泰 以* 泊 清 隆* 肖 建 宇*** 前 川 善一郎*

Fatigue Properties of Short Fiber Reinforced Polycarbonate Injection Moldings

by

Hiroyuki HAMADA*, Kiyotaka TOMARI**, Jianyu XIAO*** and Zenichiro MAEKAWA*

The fatigue properties of short fiber reinforced polycarbonate fabricated with injection molding were discussed. As the results, it appeared that the fatigue properties are affected by surface treatment of fibers, fiber content, frequency of testing, etc.. The effect of surface treatment was same as that in tensile test. It indicated that the optimization of surface treatment can be executed by comparing the tensile strength of products. The specimen treatment with an aminosilane coupling agent and a urethane binder showed the best fatigue property in this study. By this treatment, the fatigue limit increased with increasing fatigue frequency. It can be attributed to the decrease of AE energy during testing. The frequency dependence, however, changed to quite the opposite under the elastic limit when the fiber content was 10 wt%. It was caused by the thermal failure occurring at the surface of specimen.

Key words : Fatigue, Short fiber reinforced polycarbonate, Fiber content, Surface treatment, Fatigue limit, Frequency, AE

1 緒 言

近年,自動車,家電産業を中心としたあらゆる産業 分野で部品の軽量化やコスト低減の要求が高まり,そ れにともない種々のエンジニアリングプラスチック が金属代替材料として構造部材や機構部品に使用さ れるようになってきた.特に繊維強化熱可塑性樹脂 (FRTP)は,射出成形法により製品を低コストで大 量生産でき,また機械的物性や熱的物性にも優れてい ることから,さらなる用途拡大が期待される.

充分な強度設計を行った部品でも長期使用中に疲労 破壊を起こし、大規模な事故につながることが多いた め、構造部材に用いられる材料には高い疲労強度が求 められる.また、疲労に関する系統的な研究、データ 集積が必要となる.高分子材料の疲労特性に関しては 1964 年頃から、不飽和ポリエステル樹脂とガラス繊 維マットを積層複合化した、いわゆる FRP について 本格的な研究が開始された.疲労破壊は、繊維と樹脂 の界面のはく離、樹脂マトリックス中でのクラックの 進展,繊維の破断などが複合化して生じると考えられ るが,これまでの研究ではクラック伝ばに注目した研 究が多かった。切欠きを有する試験片に繰返し荷重が 加えられる場合のき裂の進展速度の変化から疲労現象 の解明が試みられ,材料の応力拡大係数とき裂進展速 度の関連性が明らかにされてきた。しかし,高分子材 料は粘弾性材料であり,温度などの条件により特性が 非線形に変化する材料であるため,疲労特性も複雑で 充分に解明されているとは言い難い.特に,FRTP の疲労に関する研究は非常に少なく,その疲労機構の 解明が求められている.

そこで、本研究では、繊維強化熱可塑性ポリカーボ ネート射出成形品の疲労特性に及ぼす諸因子(繰返し 応力、繰返し周波数、表面処理剤、強化材含有率、切 欠きの有無、温度や湿度など)の影響について検討し た.応力振幅一定の正弦波による繰返し疲労試験を行 い、複合材料の内部破壊に関する研究に有効な手法で ある AE(アコースティックエミッション)計測や破

† 原稿受理 平成6年3月7日 Received Mar. 7, 1994

* 正 会 員 京都工芸繊維大学繊維学部高分子学科 〒606 京都市左京区松ヶ崎御所海道町, Dept. of Polymer Tech., Kyoto Inst. of Tech., Sakyo-ku, Kyoto, 606

^{**} 大阪市立工業研究所 〒536 大阪市城東区森ノ宮, Osaka Mun. Tech. Res. Inst., Joto-ku, Osaka, 536

^{***} 京都工芸繊維大学繊維学部高分子学科 〒606 京都市左京区松ヶ崎御所海道町, Dept. of Polymer Tech, Kyoto Inst. of Tech., Sakyo-ku, Kyoto, 606

断面の SEM 観察などにより得られた知見を用いてその疲労機構の解明を試みた.

2 実 験 方 法

2・1 成形材料および表面処理剤

成形材料として、ガラス短繊維強化ポリカーボネート(FRPC)を用いた.これは、射出標準グレードのポリカーボネート(ユーピロン S2000, 三菱ガス 化学製)に E ガラス短繊維を二軸押出機を用いて混 練したものである.繊維含有率は10 wt% と 20 wt% とした.

ガラス繊維の表面処理剤をTable I に示す. カップ リング剤として γ -アミノプロピルトリメトキシシラ ン(以下, APMS と略す)を用い, これ単体で処理 した場合とウレタン収束剤(以下, UB と略す)と混 合処理した場合(以下 APMS+UB と略す)につい て検討を行った. また, これらの表面処理剤と比較す るために, 繊維含有率 10 wt% の場合は UB 単体処 理した試料, 20 wt% の場合は無処理試料を用意した. 各処理試料の静的引張強度と平均繊維長を Table II に示す.

Table I. Surface treatment agents of grass fiber.

Glass fiber content	Surface treatment agents				
10 wt %	Urethane binder γ-Aminopropyltrimethoxy-silane APMS+UB	UB APMS APMS+UB			
20 wt %	Untreated γ-Aminopropyltrimethoxy-silane APMS+Urethane binder	Blank APMS APMS+UB			

2·2 射出成形

ダンベル型引張試験片(全長 216 mm, 平行部長さ70 mm, 厚さ3.2 mm, 幅 12.7 mm)をスクリュ式横型射出成形機(日本製鋼所製 N100BH)を用いて成形した.成形条件は、シリンダ温度290°C,金型温度80°C,射出圧力(1次圧力)8.23 MPa,保圧 8.23 MPa,保圧時間7s,冷却時間20sとした.

2·3 疲労試験

東京衡機製 PAS-063 を用いて室温下での疲労試験 を行った. 完全片振り形正弦波の荷重を試験片に与え, *S-N*曲線を求めた. 繰返し周波数は, 2 Hz, 10 Hz, 20 Hz とした. また,低周波数繰返し試験時の破壊挙動を検討する ためにインストロン万能試験機 4206 型を用いて,三 角波疲労試験を行った.周波数は 0.01,0.002 Hz (クロスヘッド速度2,0.4 mm/min)とした.

2・4 断面観察

疲労試験における試料の破断面を走査型電子顕微鏡 (SEM:日本電子製 JSM-5200)を用いて観察した.

2・5 AE 測定

用いた AE 変換子は 150 kHz 共振型変換子 (R-15)であり,これをダンベル試験片平行部の中心位置よ りつかみ具側へ15mm移動した位置に1個取付けた。 これにより検出された AE 信号をプリアンプ(1220 A) により増幅した後, AE 解析装置 (Physical Acoustic Corporation 3000 acoustic emission) に取 込み演算処理した. AE 信号の増幅率は、プリアンプ において 40 dB, AE 解析装置のメインアンプにおい て 20 dB とし, アンプの総合利得は 60 dB とした. 35 dB 以下では多数の雑音が計測されるため、しきい 値を 40 dB に設定した. 音響的な損失を減じるとと もに検出感度の安定性と再現性を向上させるために AE 変換子の取付部にグリースを塗布した. また, 試 験時につかみ具から発生する AE を抑制するために, AE の発生が極めて少ないポリ塩化ビニル製のタブを 試験片両端に貼付けた.

3 結果と考察

3・1 S-N 線図による疲労特性の評価

Fig.1および **Fig.2**に正弦波疲労試験における *S-N* 線図を示す(繰返し周波数は10 Hz).

Fig.1 はガラス繊維含有率 20 wt% の場合を示す. 各処理試料に関して最大応力 (σ_{max}) は logN (N は破 断までの繰返し数)の増加にともなって直線的に減少 している.その特性線は logN = 4.5 において折れ曲 がりを示し、この折れ曲がり点より高い応力範囲より も低い応力範囲の方が直線の傾きが大きくなっている. 表面処理を変えてもその傾向は同じで、いずれの試料 も logN = 4.5 に折れ曲がり点を有している.この挙 動はある応力条件を境にして疲労機構が異なることに 起因しているものと推察される.

Fig. 2 に繊維含有率 10 wt% の場合を示す. ここで も 20 wt% の場合と同様に直線的な変化が認められ, log N = 4.7 および 5.2 の 2 箇所に折れ曲がり点が現れ

lable II.	Tensile strength and average fiber length.

	Glass fiber content	Glass fiber content APMS+UB		UB	Blank	
Tensile strength	10 wt %	69.2	57.3	60.5		
(MPa)	20 wt %	85.2	67.3	—	51.2	
Average fiber legth	10 wt %	129	109	161		
(µm)	20 wt %	224	132		104	









た.繊維含有率が低いほど材料の疲労機構が複雑であ ることが分かった.折れ曲がり点の意味や疲労機構に ついては後で考察する.

本研究における測定範囲(logN=6.0 以下)では 明確な疲労限度が認められなかったため、繰返し回数 logN=6.0 の時の σ_{max} を疲労限度と定義した(一般 的に高分子材料では明確な疲労限度が現れにくいため N=10⁶以上の測定は行わない場合が多²⁷). 各試料の 疲労限度を Table III に示す.

繊維含有率 20 wt% の場合, 無処理試料の疲労限 度が 14.3 MPa であったのに対して, APMS, APMS

Fable III. Fa	atigue limit of	FRPC at N	$V = 10^{6}$ (10 Hz).
---------------	-----------------	-----------	----------------	---------

Glass fiber	Fatigue limit (MPa)						
content	APMS+UB	APMS	UB	Blank			
10 wt %	19.6	11.1	15.6	·			
20 wt %	30.0	23.4		14.3			



Tensile Strength (MPa)



+UB 処理試料はおのおの 23.4, 30.0 MPa となり, 繊維の表面処理により疲労限度は 60~100% 向上する ことが分かった. 含有率 10 wt% の場合も同様で処 理剤の違いにより 70% 以上の差があった. 静的引張 強度で評価した場合と同様に用いた処理剤に中では APMS+UB 試料が最も良い結果を示した. Fig.3 に 静的引張強度と疲労限度の関係を示す. 表面処理剤の 種類によらず引張強度が高い材料ほど疲労限度も高く なり, 両者の間には相関が認められた.

APMS+UB処理剤を用いた場合について比較する と、繊維含有率が高いほど疲労強度も高くなった.こ れは、含有率の増加により静的引張強度が向上するこ とに起因する.そこで、静的引張強度に対する疲労限 度の比、すなわち比疲労強度を求めた.繊維含有率 20 wt% の場合が比疲労強度は約 0.30, 10 wt% の場 合が約 0.24 となり、含有率の高い材料の方が疲労特 性が良いことが分かった.これより、耐久性に優れた 部品を製造するためには繊維含有率の低い材料で厚肉 にするよりも、繊維含有率の高い材料で薄肉化する方 が効果的であると考えられる.

3・2 疲労特性の周波数依存性

最も疲労強度に優れた APMS+UB 処理試料を用 いて周波数の影響について検討した.高周波数条件に よる疲労試験では樹脂が発熱現象を起こし,疲労現象 が複雑となるため,これまでは 0.1 - 1 Hz 程度の比較 的低周波数条件で検討されることが多かった.しかし, 実際の部材はさらに高い周波数領域で使用されること が多い.低周波数条件の試験結果では疲労現象のある 一部分しか把握できないと考えられる.そこで,本研 究では,2~20 Hz の比較的高周波数条件で検討した. Fig.4 は繊維含有率 20 wt% の場合の疲労特性の周 波数依存性を示す.周波数の違いにより折れ曲がり点 を有する S-N 線図の特性は顕著な変化はなく,周波



Fig. 4. Frequency dependence of fatigue property (20 wt%, APMS+UB), Frequency : 2 Hz (\triangle), 10 Hz (\bigcirc), 20 Hz (\square).







数が高いほど破断までの繰返し数が増加する傾向が見 られた.

Fig.5 に繊維含有率が10 wt% の場合の周波数依存 性を示す.20 Hz の場合の線図は10 Hz の場合とほ とんど同じであった.2 Hz と10 Hz のデータを比較 すると,応力条件に応じて疲労特性に及ぼす周波数の 影響が逆転することが分かった.すなわち,最大応力 が40 MPa 以上では含有率20 wt%の場合と同様に 周波数が高いほど疲労限度が向上したが,それ以下の 応力では,逆に周波数が低いほど寿命が増加した.

3・3 AE 測定による疲労挙動の解析

Fig. 6 は静的引張試験における応力および AE 事象 数の時間変化を示す(本実験では AE 発生挙動を詳 細に検討するために高感度の測定を行ったので,応力 が最大値となる前に AE 信号量が飽和し,これ以後 のデータは意味を持たない).処理剤は APMS+UB である.繊維含有率 10 wt% の場合(同図(a)),引張



Fig. 6. Acoustic emission responce of FRPC during static tensile testing (APMS + UB), Fiber content: (a) 10 wt%, (b) 20 wt%.

開始直後には AE はほとんど発生しないが、応力が 20 MPa 以上になると AE 発生が始まった. さらに 40 MPa になると AE 事象数は急激に増加し、最終的 な破断に至ることが分かった. AE 事象数が急増する 応力を σ_c とする. 図(b)に示した含有率 20 wt% の場 合も 10 wt% の場合と同様の傾向が認められた. こ の場合の AE 事象数が急増する σ_c は 50 MPa であっ た.

 σ_c は荷重-変位曲線における弾性限度に一致するこ とが分かる.つまり,静的引張試験において応力が弾 性限度内であれば,内部損傷はほとんど発生しないが, 弾性限度以上の応力に達すると急激に内部損傷が発生 し,破壊が進行すると考えられる.

つぎに, S-N 曲線に見られた折れ曲がり点の意味 について繊維含有率 10 wt% 試料を用いて検討した. 前述の σ_c と折れ曲がり点の応力と必ずしも一致せず, その相関は不明である.そこで試料の破壊形態との相 関が報告されている AE 振幅分布を求めた.

2つの折れ曲がり点を境にして疲労特性を3つの領 域に分類した.すなわち、(Ⅰ)低応力領域、(Ⅱ)中 応力領域、(Ⅲ)高応力領域である.各領域における AE 振幅の分布を Fig.7 に示す.低応力領域(a)およ



Fig. 7. Amplitude distribution during tensile testing, Fiber content : 10 wt%, APMS + UB; (a) I, (b) II, (c) III.

び中応力領域(b)で発生した AE はおよそ 40 dB~60 dB の範囲に分布し,数平均値はおのおの 48.5,46.7 dB と比較的低いことが分かった.しかし,高応力領 域(c)では事象数分布は大きく変化して分布範囲は 40 ~75 dB に広がるとともに数平均値は 54.6 dB と高く なった.つまり,低中応力領域では,主に繊維/樹脂 界面における変形やずれに起因した低振幅の AE の みが発生するのに対して,高応力領域では界面のはく 離やクラックが生じ,それらに起因した振幅の高い AE が発生し始めたものと推察される.

つぎに,高周波数疲労試験では繰返しごとの AE 計測が非常に困難であるため,三角波低周波数条件



Fig. 8. Acoustic emission during cyclic tensile testing (0.002 Hz, 10 wt%, APMS+UB).

(0.002, 0.01 Hz)下での測定を行った.

Fig.8は繊維含有率10wt% 試料について三角波疲 労試験時の応力および AE 事象数の変化を示す. 周 波数の影響が最も顕著であった 48.1 MPa の応力条件 で測定を行った. AE 事象数は応力の増減にともなっ て増減した. 繰返し数7回目までの各サイクルで発生 した AE 事象総数とエネルギーを Table IV にまとめ た. サイクルごとに 0.002 Hz と 0.01 Hz 条件の AE 事象数を比較すると、1回目において 2019、2116 (おのおの 0.002, 0.01 Hz の場合)と、周波数が変化 してもほとんど同じ事象数であった. 2回目以降のサ イクルでも同様であった.しかし、AE エネルギーは、 1回目の場合に、2162、1479(おのおの0.002、0.01 Hz の場合)となり、周波数が高いほどエネルギーは 低かった. 2回目以降のサイクルでも周波数が高いほ どエネルギーは低くなった. つまり, 周波数が増加し ても、破壊の発生数はほとんど変化しないが、破壊の

	Frequency (Hz)	Frequency	Avoraço	Cycle No.						
		Average	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	
Hits	0.002	916	2019	416	531	510	846	1039	1057	
	0.01	953	2116	534	419	620	879	1029	1077	
Energy	0.002	1 009	2162	775	776	520	787	1042	1002	
	0.01	669	1479	333	289	456	654	727	746	

Table IV. AE hits and AE energy during cyclic tensile testing (fiber content 10 wt%, σ_{max} =48.2 MPa, APMS+UB).

Table V. AE hits and AE energy during cyclic tensile testing (fiber content 20 wt %, σ_{max} =57.7MPa, APMS+UB).

	Frequency	ency z) Average	Cycle Nö.						
	(Hz)		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7
Hits	0.002	1851	1 0 6 4	170	297	1074	3 0 9 4	3706	3 5 5 8
	0.01	1 288	887	149	304	1047	2130	2 2 2 2 1	2279
Energy	0.002	2070	1 405	181	355	1 408	3471	3980	3695
	0.01	854	525	86	229	822	1 589	1 389	1 344

規模は大幅に減少することを示している. 同様に 20 wt% 試料について AE 事象数とエネルギーを Table V に示した. 応力条件はやはり周波数依存性の高 かった 57.7 MPa とした. 10 wt% の場合と同様に, 周波数の違いによる事象数の変化は少ないが,エネル ギーには大きな差が認められた. やはり,周波数が低 いほど破壊の規模が大きいことが分かった.

以上の測定結果は,通常の疲労試験と比べて低い周 波数条件で得られたためある条件における現象に適用 できるとは限らない.しかし,これらのデータからは, 繰返し応力が同じであっても,周波数が低いほど一回 の負荷で発生する破壊の規模が大きくなり,そのため に疲労寿命が低下すると考えられる.

3・4 疲労試験試料の破断面観察

AE 測定の結果からは周波数が高いほど疲労寿命が 向上すると考えられた.しかし、繊維含有率 10 wt%



20µm



50 µm



Fig. 9. SEM photographs of fatigue fracture surface for 10 wt% GF polycarbonate (APMS + UB), Frequency : (a) 2 Hz, (b) 20 Hz. の場合に見られた周波数依存性の逆転現象,すなわち 低応力条件下では周波数が低いほど寿命が長くなると いう現象は説明できなかった.そこで,疲労破壊した 試料の破断面観察を行った.

Fig. 9 は含有率 10 wt% 試料の破断面端部の SEM 写真である.(a)は周波数が2 Hz の場合を示す.マト リックスが繊維に強固に付着しており界面状態が良好 であることが分かった(矢印).疲労破壊は繊維間の マトリックス領域においてぜい性的に生じたと考えら れる.

(b) は周波数 20 Hz の場合である. 繊維の周辺に無 数のボイドあるいは空洞が観察された(矢印). これ らは,マトリックスが溶融したために生じた痕跡であ る.これを「熱破壊」と呼ぶこととする. 熱破壊は破 断面の両端部以外では観察されなかった. Fig. 10 は 繊維含有率 20 wt% 試料の破断面 SEM 写真である. ここでは,周波数によらず熱破壊は全く観察されな かった.つまり,熱破壊は高周波数条件下で繊維含有







20µm

(b)

Fig. 10. SEM photograph of fatigue fracture surface for 20 wt% GF polycarbonate (APMS+UB), Frequency : (a) 2 Hz, (b) 20 Hz. 率 10 wt% 試料にのみ発生することが分かった.

射出成形品中の繊維は必ずしも均一分散せず,表面 のスキン層では樹脂のしみだした現象が生じて樹脂比 率が若干高くなる.荷重が加わる場合に樹脂比率の高 い表層と樹脂比率の低い内部層間に生じるわずかなひ ずみの差がせん断発熱を促し,これが繰返されること により熱破壊が生じたと考えられる.

周波数依存性が逆転する時の応力は,Fig.6(a)に示 した弾性限度応力と一致したことから考えると,繊維 含有率 10 wt% の場合,クラックが発生しない低応 力条件では疲労寿命は表層付近に生じる熱破壊の影響 を大きく受ける.この場合,周波数が高いほど熱破壊 が生じやすくなり,寿命が低下する.一方,含有率 10 wt% の場合よりも弾性率が高い 20 wt% 試料では, 疲労試験時のひずみ量が小さいためにせん断発熱によ る熱破壊の影響を受けず,周波数依存性の逆転現象は 生じなかったと考えられる.

熱破壊現象を考慮することにより S-N 線図の傾き 変化を説明することができる. 高応力領域ではクラッ クが著しく発生するが,その近傍で熱破壊が生じるた めにその進展が抑制される結果, S-N 線図の傾きは 比較的小さくなる. 中応力領域ではクラックは減少す るが熱破壊が発生する前にクラックが進展する結果, 線図の傾きは大きくなる. クラックがほとんど発生し ない低応力領域では,疲労破壊は主に熱破壊にのみ起 因するため,線図の傾きは再び小さくなる. ただし, 繊維含有率が高い場合にはこの領域は現れない.

4 結 言

繊維強化ポリカーボネート射出成形品の疲労特性に 及ぼす繊維の表面処理,繊維含有率,周波数の影響に ついて検討した結果,以下のような知見が得られた.

(1) 静的引張強度の場合と同様に疲労強度は繊維の 表面処理の影響を受け,静的引張強度に優れた表面処 理剤が疲労強度に関しても効果的であることが分かっ た.用いた処理剤中ではアミノシラン剤とウレタン集 束剤を併用した場合が最も優れた疲労特性を示した.

(2) 繊維含有率が高いほど疲労特性が向上した.比 疲労強度と繊維含有率の関係より,同じ強度設計の製 品であれば,繊維含有率が高いほど耐久性が高いこと が分かった.

(3) 繰返し周波数が高いほど疲労寿命が向上した. AE 測定による解析結果によれば、これは疲労試験の サイクル当たりに発生する破壊規模の差に起因すると 考えられていた.しかし、繊維含有率が10 wt%の 場合の周波数依存性は弾性限度応力以下で逆転した. これは試験片表層付近で生じた熱破壊による物性低下 の影響が大きくなるためと考えられる.

(平成5年8月27日 日本材料学会第3回高分子材料シンポジウムにて

講演)

参考文献

- 1) K. H. Boller, Modern Plastics, 41 (10), 146 (1964).
- 2)秋庭義明,原田昭治,柳生佳則,中野雅弘,材料,41, 1285 (1992).
- 3)平野一美,古江治美,日本機械学会論文集,A-55,17 (1989).
- 4) 古江治美,平野一美,材料,41,232 (1992).
- 5) 鈴木 恵, 岩本正治, 植田広志, 日本機械学会論文集, A-41, 3332 (1975).
- 6)鈴木 恵,岩本正治,梶屋俊幸,日本機械学会論文集, A-43,3621 (1977).
- 7) 横堀武夫, 笹平誠一, 日本機械学会講演論文集, No. 187, p 125 (1968).
- 8) 宮本 博, 立石哲也, 日本機械学会講演論文集, No. 187, p.129 (1968).
- 9)鈴木 恵,中西 博,岩本正治,山本泰裕,近藤昌樹, 材料,31,1150 (1982).
- 10) 鈴木 恵,中西 博,岩本正治,山本泰裕,材料,32, 82 (1983).
- 11)網島貞男,谷本敏夫,松岡 敬,森 雅明,材料,34, 286 (1985).
- 12) 長田雅一, 鈴木 恵, 材料, 19, 455 (1970).
- 13) D. H. Banasiak, A. F. Grandt Jr., L. T. Montulli, J. Appl. Polym. Sci., 21, 1297 (1997).
- 14) 白石哲郎, 曽山義朗, 森 慎之助, 材料, 34, 406 (1985).
- 15) 白石哲郎, 妻鳥浩昭, 曽山義朗, 材料, 38, 1040 (1989).
- 16) 仏性尚道, 強化プラスチックス, 14, 344 (1968).
- 17) 鈴木 恵, 自念栄一, 強化プラスチックス, 15, 162 (1969).
- 18) W. V. Titow and B. J. Lanham, "Reinforced Thermoplastics", Chap. 6, 174, (1975) Applied Science Pub., Essex England
- 19) J. Theberge, B. Arkles and R. Robinson, Proc. 29th SPI, 20-D (1974).
- 20) A. Takahara, K. Yamada, T. Kajiyama and M. Takayanagi, J. Appl. Polym. Sci., 25, 597 (1980).
- 21) J. Yuan, A. Hialtner and E. Baer, Polym. Compo., 7, 26 (Feb 1986).
- 22) 鈴木 恵, 伊村 真, 自念栄一, 岩本正治, 日本機械学 会論文集, A-56, 1030 (1990).
- 23) 鈴木 恵,伊村 真,自念栄一,岩本正治,日本機械学 会論文集,A-56,1036 (1990).
- 24) 福田武人,逢坂勝彦,谷口 誠,日本複合材料学会誌, 17,58 (1991).
- 25)泊 清隆,原田敏彦,前川善一郎,濱田泰以,高田聡明, 山口世麻,繊維学会誌,49,91 (1993).
- 26)"アコースティック・エミッション 1990", p.52(1990) 日本非破壊検査協会
- 27) 大石不二夫,成澤郁夫共著,"プラスチック材料の寿命" (1987) 日刊工業新聞社
- 28)網島貞男,谷本敏夫,松岡敬,材料,31,1156 (1982).
- 29)網島貞男,谷本敏夫,松岡 敬,越智昭夫,材料,34, 293 (1985).
- 30) 森川明彦,石垣卓俊,土川秀治,木村慎一,材料,41,804 (1992).
- 31) R. G. Kander, Polymer Composite, 12, 237 (1991).