研究論文

光ファイバによる C/C 複合材料の面圧破壊モニタリング

高橋 淳^{*1}, 野村 正人^{*2}, 津田 浩^{*1}, 北出真太郎^{*3}
永井 英幹^{*4}, 剣持 潔^{*1,†}, 林 龍一^{*1,‡}, 福田 博^{*5}

(1996 年 7 月 18 日受付)

Bearing Failure Monitoring of C/C Composites with an Attached Optical Fiber

Jun TAKAHASHI,^{*1} Masato NOMURA,^{*2} Hiroshi TSUDA,^{*1} Shintaro KITADE,^{*3}
Hideki NAGAI,^{*4} Kiyoshi KEMMOCHI,^{*1,†} Ryuichi HAYASHI^{*1,‡} and Hiroshi FUKUDA^{*5}

(Received July 18, 1996)

To realize future transport such as SST (HSCT), HST and space plane, we have to develop drastic technologies for lightening weight and assuring reliability of composite structures. In this connection, authors have studied damage monitoring techniques for composite structures by using fiber optic methods. In this paper, we investigated a possibility of bearing failure monitoring of the bolted joints of C/C composites by detecting the breaking of an attached optical fiber. Results obtained are summarized as follows: (1) Damage cannot be detected unless the plastic coating of optical fibers is stripped. (2) When attaching the stripped optical fiber longitudinally to the loading direction, bearing and net tension failure can be detected though shear-out failure cannot be detected. (3) When attaching the stripped optical fiber transversely to the loading direction, both bearing and shear-out failure can be always detected. There is a proportional correlation between the distance from the optical fiber to hole edge and the pin displacement at optical fiber breaking. This attached type fiber optics is effective to apply to the practical structure monitoring, i.e., not only high temperature composite structures but also some kinds of infrastructures.

1. 緒 言

炭素繊維強化プラスチックをはじめとする高性能複合材料は、その軽量性と高性能・高機能にもかかわらず、各種構造体への適用が期待に反して遅れている。その理由はコスト高と信頼性保証技術の未成熟である¹⁾。21世紀初頭に運行開始が予定されている次世代の超音速輸送機 (supersonic transport; SST あるいは high speed civil transport; HSCT, マッハ2レベル) や亜音速旅客機は、まさにこれらの解決なくしては実現が厳しい状況にある。例えば、SST が経済的・環境親和的に社会に受け入れられるためには約 60% の重量減 (空力特性向上による 30% と材料軽量化による 30%) が必須とされており^{2,3)}、複合材料技術に限っても、この先 5~10 年間に材料 (開発・評価試験)・設計・成形・組立・検査・修理法等の様々な技術分野でのブレークスルーが必要となる。

このような世界規模の情勢と軌を一にして、材料及び構造体の信頼性向上並びに成形・運用・保守のコストと

^{*1} 工業技術院物質工学工業技術研究所主任研究官 (305 つくば市東 1-1)

Senior Researcher, National Institute of Materials and Chemical Research, 1-1, Higashi, Tsukuba 305, Japan

[†] 室長 Head, [‡] 部長 Director

^{*2} 東京理科大学大学院生 (278 野田市山崎 2641)
Graduate Student, Science University of Tokyo, 2641, Yamazaki, Noda 278, Japan

^{*3} 石川島播磨重工業 (株) 研究員 (235 横浜市磯子区新中原町 1)
Research Engineer, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd., 1, Shinnakahara-cho, Isogoku, Yokohama 235, Japan

^{*4} 東京大学工学部助手 (113 東京都文京区本郷 7-3-1)
Assistant, University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

^{*5} 東京理科大学基礎工学部教授 (278 野田市山崎 2641)
Professor, Science University of Tokyo, 2641, Yamazaki, Noda 278, Japan

エネルギー低減をターゲットとする「知的材料/構造」なる研究分野が土木・建築等の関連分野をも巻き込んで盛り上がりを見せている⁴⁻⁸⁾。中でも特に、光ファイバによる複合材料の温度・歪・き裂・層間剝離・コロージョン等のモニタリング技術は早期実現の可能性が最も大きく、上述の次世代輸送機に十分間に合う技術であると筆者らは考えている。すなわち、ここ数年内にモニタリング技術が成熟し、センサシステムとしての信頼性・耐久性が保証されるようにまでなれば、各種次世代輸送機の大規模な軽量化・低コスト化と信頼性向上をもたらすものとして期待できる^{6,9)}。

以上の視点から、筆者らは次世代輸送機への適用を念頭に、破断歪の小さな耐熱複合材料を対象とし、各種光ファイバによる損傷進展過程のモニタリングの可能性を検討している。本論文では、層間剝離と並んで各種複合材料構造の強度上の弱点となるボルト接合部の面圧破壊をモニタリングの対象とし、光ファイバの破断を利用した損傷検出の可能性を明らかにした結果を報告する。

2. C/C 複合材料のピン負荷破壊試験

複合材料を構造体、特に高温構造体を利用する場合には、一体成形が困難なことに加えて接着剤の信頼性に問題が生じることから、ボルトによる接合が不可欠となる。そしてこの接合部は、一般に応力集中を伴い、強度上の弱点となる¹⁰⁻¹⁶⁾。ここでのダメージの有無を光ファイバでリアルタイムモニタリングする技術が確立できれば、信頼性の飛躍的向上はもちろん、設計・運用データの少なさからくる過剰設計が不要となり¹⁷⁾、またメンテナンス期間もより合理的に設定できるなどの多くの利点が期待できる。

そこで本研究では、まず種々の円孔付き試験片のピン負荷（締め付け圧なし）による破壊試験を行い、そこでの損傷の進展を円孔近傍に貼り付けた光ファイバによってモニタリングする技術について検討した。

2.1 モニタリング対象材料

次世代輸送機としては、SST (M2.2, 機体表面温度：-50~180°C)・HST (hypersonic transport, M5)・SP (space plane) が考えられており、それぞれに対して耐熱合金や耐熱複合材料の適用が検討されている^{18,19)}。すなわち、ここで用いられる材料の破断歪は通常のCFRPよりも低く、また靱性はモノリシックなセラミックスよりも大きいことから、これらの損傷過程における歪の再配分を模擬出来る代替材料はない。そこで本研究では、上記の候補材料中最も破断歪が小さい（約0.2%）

Table 1 Constitutive materials, manufacturing condition and mechanical properties of tested C/C composites.

Fiber	Type: HTA(Besfight) No. of filaments: 3000
Matrix	Base: Phenolic resin Densification: Coal tar pitch
Composite	Plain woven fabric Heat treatment: 1600°C 4 plies/mm Vf=60 vol% Density =1.5 g/cc Young's modulus =92.1 GPa Shear modulus =8.32 GPa Poisson's ratio =0.0875 Tensile strength =155 MPa

C/C 複合材料を用いることとした。

実験に用いた平織 C/C 複合材料の主な仕様と機械的特性を Table 1 に示す。ここで、Table 1 における基礎弾性特性は、以下の実験に先だって、繊維に平行方向及び 45 度方向の引張り試験を行って求めたものである。

2.2 光ファイバセンサ

損傷のモニタリングのためには光ファイバセンサを当該部に密着させる必要があるが、耐熱複合材料の成形温度を考えると、光ファイバを埋め込んで成形することは現実的ではなく、貼り付けて、あるいは貼り付けた後に上からコーティングを施して使用する方が実用的である。

また、センサの形態としては光の位相差や後方散乱等を利用する高感度な方法が知られている²⁰⁻²⁵⁾が、現状では非常に高価でありまたシステムも複雑となる。本研究では、まずはセンサ形態として最も単純な光ファイバ自体の破断を検出する方法を採用し、上記の高感度な方法への拡張も考慮してシングルモードの光ファイバを使用する。なお、センサの設置形態として曲線状のものも考案されている²⁶⁾が、本研究では、高温用光ファイバの宿命である可撓性の低さとクリープによる感度低下の可能性²⁷⁾を考え、貼り付け方は直線状とする。

一方、高温用光ファイバとしては、石英系のファイバに高温用のコーティング（ポリイミド：~400°C、金：~900°C、メタル：~1,400°C）をしたものやサファイアファイバ（コーティングなし：~1,700°C）が知られているが、光ファイバの破断が目的であれば、通常はセンサ部のコーティングを剥いで使用すると考えられる^{25,28)}。そこで、石英系のファイバの被覆を剥いだ状態での破断歪がサファイアファイバと同等であることから、本研究で

は石英系のシングルモードファイバ (3M, FS-SN-3224) を用い, その被覆を剥いだ部分をセンサ部とした。

2.3 試験片

ピン負荷による破壊形態は Fig. 1 に示されるとおり面圧・剪断・引張りの3種があり, これらの発現は円孔の径と円孔の試験片上端部及び側部からの距離との比で決まる^{11,13,15}。このうちの面圧破壊以外は不安定な破壊であるため, 通常の構造物では面圧破壊が生じるように設計されるわけであるが, 本研究では基礎データの収集のため, すべての破壊モードに対して破壊のモニタリングの可能性を調べた。

本実験で用いた試験片の形状と光ファイバの設置位置

Fig. 1 Typical failure modes of the pin loading test specimen.

等に関する寸法記号の定義を Fig. 2 に示す。すなわち本実験では, 円孔の直径を 6 mm に固定し, 3 種の破壊モードが生じるように²⁹⁾ その試験片端部及び側部からの距離を変化させた計 10 種類(各 2 本)の試験片を準備した。これらの具体的な寸法は実験結果とまとめて Table 3 に後記する。

また, 2.2 節における検討から, Fig. 2 の中図に示されるように, シングルモードの光ファイバを荷重方向に對

Photo. 1 Tested specimens in each failure mode (Nos. 86-1, 82-1, 14-1).

Fig. 2 Configuration of the specimen and the definition of the symbols used in this study. (In the case of transversely attached optical fiber, h_{y1} , h_{y2} , k_{y1} and k_{y2} are used to distinguish two optical fibers. h_{y1} is the h_y of nearer fiber from a hole edge and k_{y1} indicates a pin displacement at nearer fiber's breaking.)

して平行か垂直となるように直線状に貼り付け、それぞれの円孔端部からの距離 (hx, hy：ただし、荷重に垂直な方向については同時に2本貼る場合を考え、円孔に近い方から hy1, hy2 とし、それぞれの破断時のピン変位を ky1, ky2 とする) と損傷検出感度の関係を調べた。ここで、光ファイバのセンサ部はファイバストリップでコーティングを剥ぎ、エタノールで洗浄したものを歪ゲージ用の接着剤 (共和, STRAIN GAGE CEMENT, CC-33A) を用いて歪ゲージと同様に圧着した。ただし本章では、比較のためにプラスチックコーティングを剥がずに貼り付けた場合の結果も併せて示す。Photo. 1 は各破壊モードにおける試験片 (試験後) であり、Photo. 2 は貼り付けた断面の拡大写真 (試験前) である。

Photo. 2 A cross section of an attached optical fiber.

Photo. 3 Appearance of pin-loading test.

2.4 ピン引張り試験

ピン引張り試験の治具等は JIS-K7080³⁰⁾ に準拠したものを用い、クロスヘッドスピード 0.5 mm/min の変位制御で試験を行った。このとき、荷重と同時に試験片へのピンのくい込み量 (Fig. 2 の Pin displacement: δ) に相当する変形量をダイヤルゲージで測定した。Photo. 3 は試験機に試験片を取り付けた際の外観である。

2.5 光 学 系

Fig. 3 は実験で用いた計測システムの概要図であり、Table 2 は構成部品の一覧表である。すなわち、まず光源から発射したレーザー光は集光器を介して光ファイバに入り、カプラで分岐された後試験片に貼り付けたセンサ部を通過してフォトダイオードで電圧に変換される。透過光強度に対応する電圧信号は、荷重・ピン変位の信号と同時にレコーダーに記録される。

Fig. 3 A schematic of the fiber optic damage monitoring system.

Table 2 The fiber optic damage monitoring system.

Light Source He-Ne Laser	ORIEL	MODEL79255 (Wavelength=633nm)
Fused Coupler Coupler	ORIEL THORLABS	HVC-13-633-S-4 L22S63C50
Detector Detector FC Adapter Detector	THORLABS THORLABS	SM1FC PDA50 (Spectral response =320-1100nm)
Others Optical fiber	3M	FS-SN-3224 (Single mode OF) (Operating wavelength =630nm)
FC Adapter	3M	02-00075
Bear Fiber Adapter	3M	8294

Table 3 Experimental results.

No.	Size				Failure data			Distance from attached optical fiber to hole edge			Pin displacement at optical fiber breaking		
	T (mm)	D (mm)	W (mm)	e (mm)	Failure Mode	P _{max} (kgf)	δ _F (mm)	hx (mm)	hy1 (mm)	hy2 (mm)	kx (mm)	ky1 (mm)	ky2 (mm)
86-1	3.00	6.09	29.98	17.94	Bearing	246.0	0.106	-	0.20	2.23	-	0.234	1.104
86-2	3.02	6.08	30.02	17.96	Bearing	243.0	0.122	# 0.47	# 0.41	-	# 4.240	# ×	-
76-1	3.01	6.09	23.95	17.93	Bearing	247.0	0.082	0.35	0.54	-	0.886	0.792	-
76-2	3.04	6.09	23.98	17.96	Bearing	225.0	0.070	1.37	# 2.15	-	1.304	# 2.120	-
66-1	3.02	6.07	18.00	17.94	Bearing	214.0	0.115	-	-	-	-	-	-
66-2	3.04	6.08	17.99	17.95	Bearing	232.0	0.097	-	1.57	2.66	-	0.710	0.975
75-1	3.03	6.06	23.95	12.03	Shear Out	167.0	0.116	-	1.24	-	-	0.605	-
75-2	3.02	6.08	23.94	11.97	Shear Out	173.0	0.116	-	0.89	-	-	0.268	-
65-1	3.02	6.07	18.00	11.96	Shear Out	180.0	0.136	-	-	-	-	-	-
65-2	3.02	6.09	17.98	11.93	Shear Out	188.0	0.113	-	# 1.31	2.78	-	# ×	1.248
82-1	2.99	6.05	29.99	6.00	Shear Out	71.0	0.134	0.24	0.43	-	×	0.342	-
82-2	2.99	6.10	30.00	5.98	Shear Out	74.0	0.242	# 1.09	# 0.45	-	# ×	# ×	-
62-1	3.03	6.04	17.99	5.85	Shear Out	80.5	0.112	-	1.10	-	-	0.636	-
62-2	3.01	6.07	18.00	5.92	Shear Out	82.0	0.104	0.70	1.73	-	×	0.440	-
26-1	3.00	5.99	10.44	17.96	Net Tension	162.0	0.195	1.08	-	-	×	-	-
26-2	3.01	6.01	10.40	17.96	Net Tension	168.0	0.225	# 1.06	# 0.49	-	# ×	# ×	-
24-1	2.98	5.98	10.43	8.99	Net Tension	137.0	1.886	1.42	-	-	×	-	-
24-2	2.95	5.96	10.41	8.98	Net Tension	137.0	1.928	0.56	0.85	-	2.040	×	-
14-1	2.94	6.01	9.02	8.97	Net Tension	104.0	1.083	-	-	-	-	-	-
14-2	2.98	5.98	9.00	8.98	Net Tension	94.0	0.688	# 0.47	1.12	-	# ×	×	-

P_{max} : maximum load

: data of the optical fibers whose coating is not stripped

× : no fiber breaking

The definition of other symbols are shown in Fig.2.

3. 実験結果・考察

行った全実験における試験片寸法・破壊モード・最大荷重 (P_{max})・最大荷重時のピンの食い込み量 (δ_F)・円孔端部から光ファイバまでの距離 (hx, hy1, hy2, Fig. 2 参照)・光ファイバ破断時のピンの食い込み量 (kx, ky1, ky2) をまとめて Table 3 に示す。ここで、表中の # 印はセンサ部における光ファイバのコーティングを剥いでいない場合であり、× 印はピンの食い込み量が 5 mm を越えても光ファイバが破断しなかったことを意味している。

3.1 光ファイバのコーティングの影響

光ファイバのコーティングは本来光ファイバの損傷を防止するためのものであるから、このままでは強度・靱性が大きく、光ファイバの破断により損傷を検知する場合には、これを剥がないとセンサとして働かないことが知られている^{25,28)}。もちろん、本研究の目的は高温用複合材料への適用であり、2.2 節でも述べたようにコーティングを除去した状態での感度を調べるのが本来の目的であるが、比較のためコーティングを残した状態で貼り

付けた場合についても実験を行った。

その結果、コーティング付きの光ファイバは面圧破壊時の 2 件 (No. 86-2 の kx と No. 76-2 の ky1) を除いて破断せず、破断したものも最大荷重時の変形量をはるかに越えたところでのものであった。このことから、C/C 複合材料よりも破断歪が大きな材料 (CFRP, 金属等) も含めて、コーティング付きの光ファイバをピン負荷下の損傷センサとして用いることは困難であると結論出来る。

ところで、コーティングを除去すれば、後述するように損傷のモニタリングが可能となるが、曲げに対して非常に弱くなるという問題が生じる。このため、貼り付け作業が大変困難となり、また貼り付けた後も光ファイバが折れないように注意して取り扱わなければならないなど、実用上はセンサとしての信頼性を確保する手段を別途考える必要がある。

以下の議論はすべてコーティングを剥いたものに対して行うこととする。

3.2 各破壊モードに対する結果

面圧破壊に対しては荷重方向に平行 (hx)・垂直 (hy)

Photo. 4 A magnification of the bearing damage area and broken optical fibers (No. 66-2).

Photo. 5 A magnification of the shear-out damage area and unbroken optical fibers (No. 62-2).

Photo. 6 A magnification of the net tension damage area (No. 14-1).

Fig. 4 Experimental result of bearing failure specimen (No. 66-2).

Fig. 5 Experimental result of shear-out failure specimen (No. 62-2).

Fig. 6 Relationship between the distance from the transversely attached optical fiber to the hole edge, hy, and the pin displacement at the optical fiber breaking, ky.

いずれの方向に配置した光ファイバも試験片の破壊に応じて破断したが、剪断破壊に対しては垂直に貼り付けたもののみすべてが破断し、引張り破壊に対しては平行に貼り付けたもののみ一部が破断した。

Photo. 4, 5, 6 はそれぞれ面圧・剪断・引張り破壊を生じた試験片の拡大写真である。まず引張り破壊においては円孔の両端で、剪断破壊においては円孔上部で集中的に損傷が生じたことがわかるが、このことは上記の光ファイバの破断結果と良く対応している。

一方、面圧破壊時の写真から、まず剪断破壊と同様に円孔上部に損傷が集中すると同時にその両側にも損傷が広がっている様子が読みとれる。さらに、Photo. 4 と Photo. 5 を比較してみると、剪断破壊時には生じる円孔上部への歪の解放が面圧破壊過程ではないため、その両サイドに引張りが作用して上述のような損傷の拡がりとなったものと考えられる。面圧破壊時の荷重方向の光ファイバの破断はこの引張り歪によると考えられる。

以上の結果から、実構造物のボルト接合部で問題となる面圧破壊については、いずれの貼り方でもモニタリングできることが明らかとなったが、面圧破壊が進行した場合に剪断破壊に遷移する可能性がある²⁹⁾ことを考えれば、実用的には荷重方向と垂直に貼る方が合理的と結論出来る。

3.3 貼り付け位置と感度の関係

Fig. 4 はコーティングを剥いだ光ファイバを荷重方向と垂直に2本貼り付けた面圧破壊用の試験片 (No. 66-2, Photo. 4 参照) の結果であり、ピンの食い込み量と荷重及び光ファイバの出力結果を重ねてプロットしてある。ここで、光ファイバの出力値には単位はなく、最初が光が通っている状態で、値がステップ状に低下した後が光が通っていない状態を表している。同図から、面圧破壊の特徴である最大荷重以後の広範囲な安定破壊領域と同時に、円孔の近くに貼った光ファイバの方が先に破断している様子が読みとれる。

一方、Fig. 5 はやはりコーティングを剥いだ光ファイバを荷重方向に平行と垂直に1本ずつ貼り付けた剪断破壊用の試験片 (No. 62-2, Photo. 5 参照) の結果である。ここでは、3.2 節で述べたとおり荷重と平行な光ファイバは破断していないことが読みとれる。

Fig. 6 はコーティングを剥いで荷重方向と垂直に貼り付けた光ファイバについて、円孔端からの距離 (hy1, hy2) とその破断時のピンの食い込み量 (ky) の関係をまとめたものである。同図より、hy と ky の間にはほぼ比例関係があることがわかる。すなわち、光ファイバの貼

り付け位置を調節することによって、センサとしての感度の調節が可能と考えられる。また、Photo. 4~6 からは確認し難いが、面圧破壊の場合には他の破壊モードの時よりもピンの接触部において顕著な層間剥離が生じている²⁹⁾。これにより光ファイバを貼り付けた部分が盛り上げられたことが、貼り付け位置が円孔に近いところでの面圧破壊の検出感度が剪断破壊の場合よりも若干低くなった原因と考えられる。

3.4 考察

以上の結果から、コーティングを剥いだ光ファイバによりピン負荷による3種の破壊モードすべてが検出できることが明らかとなった。ところが、Fig. 4 や Fig. 5 からもわかるように、以上の光ファイバの応答はいずれも最大荷重以降に生じている。このことは、モニタリングの対象が荷重制御型の負荷の場合には、光ファイバの応答があったときには構造物も破壊していることを意味しており、センサとしての価値はない。

しかし、ここでモニタリングの可能性を検討した実構造物のボルト接合部は面圧破壊が生じるように設計されており、かつ作用する負荷は一般にコンプライアンス付き変位制御下のものである。すなわち、実構造物のボルト接合部においても Fig. 4 に示されるような最大荷重以降の大きな安定破壊領域があるものと考えられる。よって、本論文で検討した光ファイバセンサにより、実構造物の終局的な破壊以前にボルト接合部の破壊が検出できることになる。

3.5 本研究の応用の可能性

本研究の応用としては、当初の目的である高温構造体の他に常温で使用されている多くのインフラストラクチャーのボルト接合部が考えられる。この場合、使用材料の破断歪が C/C 複合材料よりも一桁大きいので、コーティングを剥いだ光ファイバを貼り付けることにより、最大荷重以前での損傷の検知が可能となると考えられる。また、いずれの場合においても、感度向上のために光ファイバのクラッド層を薬品でエッチング処理することも考えられるが、3.1 節で述べたようにセンサシステムとしての信頼性に問題が生じることに十分注意しなければならないことを付記しておく。

なお、実用に際してはボルトの締め付け圧^{10,14~16,30)}を考慮する必要があるが、3.3 節の結果から層間剥離の抑制はむしろ感度の向上につながると予想される。また、ボルトによる締め付け面積がある場合には、光ファイバを円孔近傍に貼り付けられないが、この場合、ボルトで締め付けた部分の外側で、やはり円孔近傍と同様の歪分

布が生じると考えられるので、ここで検討した手法が同様に適用できるものと考えられる。

4. 結 言

本論文では、次世代輸送機の軽量化と信頼性向上を目的とし、光ファイバによる C/C 複合材料のボルト接合部の損傷過程モニタリングの可能性を検討した。主要な結果を要約すると以下の通りである。

(1) コーティング付き光ファイバでは、破断歪の小さな C/C 複合材料はもちろん CFRP や金属等の破断歪の大きな材料であっても破壊のモニタリングは困難である。

(2) コーティングを剥いだ光ファイバを用いた場合、荷重方向と平行に貼った場合には引張り破壊と面圧破壊が、荷重方向と垂直に貼った場合には剪断破壊と面圧破壊がモニタリングできる。面圧破壊と剪断破壊が同時に検出できることから、光ファイバの貼り付け方向は荷重方向と垂直が実用的である。

(3) 荷重方向と垂直に貼った光ファイバから円孔端までの距離と光ファイバ破断時のピンの食い込み量はほぼ比例するので、センサの感度を貼り付け位置により調節できる。

(4) 現状では最大荷重以前の破壊の検知は困難であるが、実構造物で予想される安定破壊領域においては、本研究で検討した技術により十分に検知可能である。

参 考 文 献

- 1) 例えば、平成 7 年度航空機用先進低コスト複合材料構造に関する調査報告書、(財)次世代金属・複合材料研究開発協会、日機連 7 先端-11 (1996)。
- 2) 前川昭二：機械振興、**29**, 5 (1996), 56-62。
- 3) 平成 3 年度超音速輸送機用材料技術動向調査報告書、(財)次世代金属・複合材料研究開発協会、日機連 3 先端-20 (1992)。
- 4) M.V. Gandhi & B.S. Thompson : *Smart Materials and Structures* (1st Ed.), Chapman & Hall, London (1992)。
- 5) スマートコンポジットに関する調査、(財)次世代金属・複合材料研究開発協会、NEDO-IT-93001 (1995)。
- 6) 知的構造システムの先導研究、(財)次世代金属・複合材料研究開発協会、NEDO-PR-95011 (1996)。
- 7) 福田武人：日本複合材料学会誌、**22**, 3 (1996), 85-91。
- 8) 高橋 淳：日本複合材料学会誌、**22**, 4 (1996), 123-128。
- 9) D.L. Grande : Abstracts of the first US-Japan Workshop on Smart Materials and Structures, Seattle (1995), pp. 26-27。
- 10) J.H. Stockdale & F.L. Matthews : *Composites*, January (1976), 34-38。
- 11) T.A. Collings : *Composites*, January (1977), 43-55。
- 12) I. Eriksson : *J. Compos. Mater.*, **24**, December (1990), 1246-1269。
- 13) 毎熊宏則、久保村健二：材料、**41**, 466 (1992), 1114-1120。
- 14) H. Fukuda, G.S. Ger & K. Kawata : Proc. Second International Symposium on Composite Materials and Structures, Beijing (1992), pp. 726-731。
- 15) K. Kemmochi, T. Ogasa, O. Okuda, M. Hojo & R. Hayashi : Proc. AIST-NUTEC Seminar on Polymer Technology, Sweden (1992), pp. 1-18。
- 16) 菊川廣繁：日本複合材料学会誌、**22**, 3 (1996), 100-107。
- 17) 菊川廣繁：文献 6) の p. 128。
- 18) 菊川廣繁、織田裕子：第 34 回構造強度に関する講演会講演集、札幌 (1992), pp. 198-201。
- 19) 坂本 昭：新素材 (1991), 47-55。
- 20) 越出慎一、北出真太郎：機械の研究、**44**, 8 (1992), 893-898。
- 21) 川神裕志：機械の研究、**45**, 11 (1993), 1193-1197。
- 22) R.M. Measures : *Composites Engineering*, **3** (1993), 715-750。
- 23) 西村 昭：文献 5) の pp. 265-308。
- 24) E. Udd : *Fiber Optic Smart Structures*, John Wiley & Sons, Inc., New York (1995)。
- 25) 北出真太郎：日本複合材料学会誌、**21**, 2 (1995), 46-51。
- 26) 北出真太郎：強化プラスチック、**40**, 2 (1994), 54-59。
- 27) T. Alavie : 私信。
- 28) 北出真太郎、福田武人、逢坂勝彦：材料、**44**, 504 (1995), 1196-1200。
- 29) J. Takahashi, H. Tsuda, J. Watanabe, K. Kemmochi, R. Hayashi & H. Fukuda : Proc. 73rd JSME Spring Annual Meeting, Vol. VI (1996), pp. 1-4。
- 30) 炭素繊維強化プラスチックの面圧強さ試験方法、(財)日本規格協会、JIS-K7080 (1991)。