研究論文

CFRP 積層板の簡便な圧縮試験法の提案

小笠原俊夫*, 石川 隆司**

(2009年9月8日受付)

Proposal of a Convenient Compressive Test Method for Carbon Fiber Reinforced Plastics Composites

Toshio OGASAWARA* and Takashi ISHIKAWA**

(Received September 8, 2009)

Abstract: A new test method (NAL-II) for evaluating compressive properties of carbon fiber composites (CFRP) was proposed in this study. The compressive tests based on ASTM D6641 and NAL-II methods were conducted for three kinds of quasi-isotropic composite laminates (T800/3633, T800S/3900-2B, and IM600/133) for direct comparison. The stress-strain curves including compressive modulus obtained by NAL-II method were agreed with those obtained by ASTM D6641. NAL-II methods gave slightly greater compressive strengths (approximately 10%) as compared with ASTM D6641, it would be due to suppression of bending (buckling) before failure. The experimental result suggests the NAL-II method has a potential for domestic and/or international standard test method for non-hole compressive strength of carbon fiber composite laminate.

Key words: Carbon fiber composites, Compression, Test method, Standards

1. は じ め に

炭素繊維強化複合材料 (carbon fiber reinforced plastics; CFRP) を適用した複合材構造では圧縮強度が設計評定となることも多く、圧縮強度の適切な評価は実用上重要である。しかしながら、引張り試験法と比較すると圧縮試験法には様々な試験規格が存在し、特定の試験法が世界的に幅広く認知されているとは必ずしも言えないのが現状である。また、圧縮試験の持つ本質的な困難さのゆえに、試験法によって強度が異なるという実験事実もあり、このことが問題を更に複雑にしている。

圧縮試験の代表的な試験規格を、Table 1 にまとめた

示す。圧縮試験法は、大きく2つの負荷様式に分類される。ひとつは試験片のグリップ部からせん断力を介して試験片評定部に圧縮荷重を負荷する方法 (せん断負荷方式; shear-loading) であり、旧 ASTM D3410 (A法: Celanese法)¹⁾, ASTM D3410 (IITRI法)^{1,2)}, ASTM D6484 (SRM 3R-94)^{3,4)}, JIS K7076 (B法: Celanese法)⁵⁾, JIS K7018 (方法2・方法3)⁶⁾ 等がこれに対応する。このうち、ASTM D6484 (SRM 3R-94) は有孔圧縮試験法の規格であるが、孔のない試験片の圧縮試験にもしばしば適用される。もうひとつは、試験片の端部を直接加圧することによって試験片に圧縮荷重を負荷する方法 (端部負荷方式; end-loading) で、ASTM D695⁷⁾, SRM 1R-94⁸⁾, JIS K7076 (A法)⁵⁾, JIS K7018 (方法1)⁶⁾ がこれに対応する。また、せん断負荷と端部負荷を併用した複合負荷方式 (combined-loading)^{9~11)} も提案されている。

総じて言えば、せん断負荷方式では試験片と負荷方向の軸合わせ (アライメント) が、端部負荷方式では軸合わせに加えて端部破壊やタブ剥離も問題となる。圧縮試験では評定部の面外拘束がないことから、破壊前の曲げ変形 (座屈) の影響を抑制するために試験片厚さおよび

* 宇宙航空研究開発機構 研究開発本部 複合材グループ 主幹研究員 (181-0015 東京都三鷹市大沢 6-13-1) Senior Researcher, Advanced Composite Center, Aerospace Research and Development Directorate (ARD), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 6-13-1, Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan

** 宇宙航空研究開発機構 理事 Executive Director, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

Table 1 Standard test method for compressive properties of composite laminates.

	Standard test method
Shear-loading	ASTM D3410 (Method A, Celanese) ASTM D3410 (IITRI) ASTM D6484 (SRM 3R-94) JIS K7018 (Method 2, IITRI, Celanese) JIS K7076 (Method B, Celanese)
End-loading	ASTM D695 SRM 1R-94 (BSS 7260) JIS K7018 (Method 1, ASTM D695) JIS K7018 (Method 3, JIS original) JIS K7076 (Method A, SRM 1R-94) NAL-I method (proposed by JAXA)
Combined-loading	ASTM D6641 (CLC method) NAL-II method (proposed by JAXA)
Bending of sandwich beam	ASTM D5467

幅を考慮した評定部長さを選択する必要がある。試験片を厚くする方法も考えられるが、端部負荷方式の場合は端部破壊やタブ剥離が発生し易くなるため限界がある。試験片への圧縮負荷のミスアライメントや治具の剛性は、試験片の破断前座屈にも影響を及ぼすため、これらにも留意する必要がある。評定部長さを短くすれば破断前座屈の影響は減少するが、評定部長さが5 mm以下となると弾性率測定用ひずみゲージの接着が困難となるため、圧縮弾性率を測定する試験片は強度試験片とは別に用意することが必要となる（例えばSRM 1R-94）。

著者らは以前に3種類の航空機用CFRP（炭素繊維エポキシ複合材料）の擬似等方積層板を対象として、SRM 1R-94, Celanese（旧ASTM D3410）, ASTM D695, ASTM D6484（SRM 3R-94）, ASTM D6641（CLC）, JIS K7076（A法）で規定された試験法の相互比較を行った¹²⁾。その結果、安定した試験結果が得られるのはSRM 1R-94とASTM D6641（CLC法）であることを確認した。ASTM D6641はタブ接着が不要なため試験片製造コストが安く、また強度と弾性率の同時測定が可能である点でSRM 1R-94よりも有利であるが、得られた圧縮強度はSRM 1R-94と比較すると数%~10%程度低めであった。また、圧縮試験法の相互比較を行った際に、比較的簡便に実施可能な圧縮試験方法としてNAL-I法およびNAL-II法を提案し、その評価もあわせて実施した¹²⁾。このうちNAL-II法はSRM 1R-94法とASTM D6641（CLC法）の利点を併せ持っており、CFRP擬似

等方積層板の圧縮試験方法として有望であることがわかったが、試験片取り付け剛性の不足により高荷重域で試験片にわずかな座屈変形が生じることが確認され、強度への影響が懸念された。

本研究は、NAL-II法の標準試験法としての適用可能性について検討することを目的として実施したものである。3種類の航空機用CFRP擬似等方積層板を対象とし、文献12)で使用した試験治具を改良した治具による圧縮試験を実施するとともに、ASTM D6641の試験結果との直接比較を行って試験の妥当性について考察する。

2. 試験方法

2.1 供試体

実験に使用した炭素繊維/エポキシ複合材は、T800/3633（東レ）、T800S/3900-2B（東レ）、およびIM600/133（東邦テナックス）の3種類である。積層構成は、いずれも $[45/0/-45/90]_{2s}$ の16 ply擬似等方積層、公称板厚は、IM600/133とT800/3633は2.4 mm、T800S/3900-2Bは3.0 mmとなっている。

供試体本数は各10本であるが、加工不良によりIM600/133のNAL-II法による試験のみ9本である。いずれの材料も1枚の母板から各試験用の試験片の切り出しを行った。

2.2 ASTM D6641（CLC法）

この方法はcombined loading compression（CLC）法とも呼ばれ、Adamsらによって提案された^{10,11)}。治具の構成をFig.1に示す。Shear-loadとend-loadを組み合わせた方法であり、構成がシンプルで重量も5 kg程度と軽いこと、タブなしの短冊試験片が使用可能なこと、

Fig. 1 Test fixture for ASTM D6641 compressive test method (Wyoming Test Fixtures, Inc.).

強度評価と弾性率測定を同時に実施可能であること、などの利点を有しており、2001年にASTM D6641として規格化されている⁹⁾。試験片の幅は12 mm、試験片全長は144 mm、評定部の長さは12.7 mmである。ASTMとして規格化された後はCFRPの圧縮試験方法として幅広く普及しており、今後、世界標準となり得る可能性が高い試験法である。

2.3 NAL-II法

この方法は旧航空宇宙技術研究所(NAL)において筆者らが考案した試験方法である¹²⁾。治具の構成と代表的な寸法をFig. 2に示す。4本のボルトと試験片固定治具(retainer)を用いて試験片を円柱形状の治具(specimen holder)に取り付けた後、これを円筒(sleeve)にセットして端部負荷によって圧縮荷重を負荷する。試験片固定治具を取り付ける際に、治具の軸合わせが必要であるので、位置決め治具を用いて試験片を試験片固定治具に装着する。円筒には固体潤滑剤が銅合金に埋め込まれた無給油リニアプッシュが圧入されており、試験片固定治具との摩擦が極力少なくなるように工夫されている。試験片の厚さにあわせて適当な厚さのシムを挟み込むことで、試験片が円筒の中央に位置するように調整をする。試験片の幅は15 mm、試験片全長は82 mm、評定部の長さは10 mmとなっている。タブの接着は不要である。

NAL-II法における円筒間の摩擦の影響については、文献12)において既に簡単な検討を行っており、通常の

場合の摩擦はゼロである。また、円筒間の初期クリアランスがゼロという最悪の場合を想定しても破断応力の3%には達しないものと推定されている。今回使用した治具と、文献12)で使用した治具との相違は、試験片を固定する部品(retainer)の剛性を高めたこと、およびリテーナを固定するネジのサイズをM5からM8に変更したことこの2点である。

2.4 圧縮試験方法(共通事項)

すべての試験には電気機械式材料試験機(インストロン5880型, ロードセル容量100 kN)を使用し、室温大気中(温度約25°C, 湿度約50%)にて実施した。クロスヘッド速度は、1.0 mm/minとした。試験片表裏の荷重方向ひずみの測定には、ゲージ長さ2 mmの単軸ひずみゲージを使用した。

3. 試験結果

圧縮強度の平均値および標準偏差をTable 2およびFig. 3に示す。Fig. 3のエラーバーは標準偏差を示している。NAL-II法の方が10%程度高い平均圧縮強度が得られており、これは文献12)の結果とも一致している。試験結果のばらつき(標準偏差)についてはNAL-II法の

Fig. 2 Test fixture for NAL-II compressive test method.

Fig. 3 Average strengths obtained by ASTM D6641 and NAL-II compressive test methods (Error bar; standard deviation).

Table 2 Average and standard deviation of compressive strengths.

	Average (MPa)		Standard deviation (MPa)	
	ASTM D6641	NAL-II	ASTM D6641	NAL-II
T800/3633	644	705	17.5	44.5
T800S/3900-2B	578	626	19.0	29.5
IM600/133	571	643	17.6	26.7

Table 3 Average and standard deviation of elastic modulus (calculated between 0.1-0.3% of strain).

	Average (GPa)		Standard deviation (GPa)	
	ASTM D6641	NAL-II	ASTM D6641	NAL-II
T800/3633	53.0	53.2	0.3	0.5
T800S/3900-2B	49.2	49.5	0.3	0.5
IM600/133	53.0	51.4	2.4	0.3

Fig. 4 Average longitudinal elastic modulus obtained by ASTM D6641 and NAL-II compressive test methods (Error bar; standard deviation).

方が若干大きくなる傾向があり、分散 (CV) で評価すると ASTM D6641 が約 3%, NAL-II 法が約 4% となっている。

圧縮時の縦弾性係数の平均値および標準偏差を Table 3 および Fig. 4 に示す。ここで弾性率はひずみ 0.1~0.3% の範囲で計算した。弾性率の平均値は $\pm 1.5\%$ 未満の範囲で収まっており、弾性率のばらつき (標準偏差) も小さく、一部のデータ (ASTM D6641 による IM600/133 の結果) を除けば、CV 値は 1% 未満であった。少なくとも弾性率の測定に関しては、これら二つの方法はいずれも再現性のよい良好なデータが取得できるものと言える。

T800S/3900-2B における代表的な応力ひずみ線図を Fig. 5 (ASTM D6641) および Fig. 6 (NAL-II) に示す。ここで実線および点線は試験片表裏のひずみを示しており、これらの試験では破断までほぼ一致している。圧縮応力の増大に伴う緩やかな剛性低下が確認されるが、これは主として炭素繊維固有の非線形弾性特性に起因するものであり、詳細については後述する。ここでは紙面の都合で 2 例の応力ひずみ線図しか紹介していないが、一

Fig. 5 Typical stress-strain curves of T800S/3900-2B (ASTM D6641).

Fig. 6 Typical stress-strain curves of T800S/3900-2B (NAL-II).

部の例外 (10 本中 1~2 本) を除けば、ASTM D6641 法および NAL-II 法で得られた応力ひずみ線図は非線形弾性挙動も含めて破断直前までほとんど一致した。前述したように NAL-II 法で得られた圧縮強度は ASTM D6641 法で得られた値よりも 10% ほど高くなる傾向を示しているが、ASTM D6641 における破断までの応力ひずみ線図とほぼ一致していることから、NAL-II 法の試験結果は現象的には妥当なものと判断される。平均的な応力ひずみ線図から少し外れた試験結果は ASTM D6641 および NAL-II 法いずれの場合にも見受けられ、これらは試験片加工精度や試験技能に起因した試験片取

り付け時における初期不整の影響が大きいものと考えている。

圧縮試験では試験時の曲げ変形（座屈含む）が試験結果に大きく影響する。そこで、本報では試験中の曲げ率 D_B (%) による評価を行った。曲げ率としては試験片表裏における圧縮ひずみの差の 1/2 を平均の圧縮ひずみで

除した値として定義した。

$$D_B = \frac{\epsilon_F - \epsilon_B}{\epsilon_F + \epsilon_B} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 ϵ_F および ϵ_B は、それぞれ試験片表面および裏面の圧縮ひずみである。曲げ率の正負であるが、Fig. 7 に

Fig. 7 Schematic illustration showing bending deformation of specimen in case of positive value of degree of bending.

Fig. 8 Degree of bending vs compressive stress (ASTM D6641, T800/3633).

Fig. 9 Degree of bending vs compressive stress (NAL-II, T800/3633).

Fig. 10 Degree of bending vs compressive stress (ASTM D6641, T800S/3900-2B).

Fig. 11 Degree of bending vs compressive stress (NAL-II, T800S/3900-2B).

Fig. 12 Degree of bending vs compressive stress (ASTM D6641, IM600/133).

Fig. 13 Degree of bending vs compressive stress (NAL-II, IM600/133).

示すように ASTM D6641, NAL-II 法ともにボルトを差し込む側の試験片表面の圧縮ひずみが、その裏側よりも小さくなる変形をする場合を正として示してある。各材料における曲げ率と応力の関係を Fig. 8~13 に示す。ここで図中の○印は破断直前における曲げ率と応力を示しているが、データサンプリングの関係で破断強度とは必ずしも一致していない。

全体を通して、NAL-II 法では正負の偏りは顕著ではなく $\pm 2 \sim 3\%$ の範囲に分布しているが、ASTM D6641 では曲げ率 $0 \sim 5\%$ という正の範囲に分布する傾向が認められる。ASTM D6641 では破断前に曲げ率の急激な増大(座屈)が発生することが多く、一方の NAL-II 法では明確な座屈が発生せずに破断するケースが多い傾向にある。明確な破断前座屈が生じた場合の圧縮強度は低くなる傾向が認められ、逆に顕著な破断前座屈が生じない場合の強度は高めである。なお T800S/3900-2B における曲げ率が相対的に大きい理由は、この材料の試験片厚さが他の材料よりも 25% ほど厚いため、同じ応力でも荷重が高いたことが影響しているものと思われる。荷重の増大に伴う曲げ変形の増大は、評定部における試験片の座屈のみならず、Fig. 7 に示すような試験片のつかみ部における試験片固定治具やボルトの面外弾性変形にも依存するため、試験片の圧縮応力に加えて治具系に負荷される絶対的な荷重値も大きく影響すると考えられるからである。

以上の結果より NAL-II 法の方が総じて曲げ率が小さく、かつ破断前の曲げ変形が発生しにくいことから、ASTM D6641 よりも高い平均強度が得られた可能性が示唆される。逆に ASTM D6641 では破断前の曲げ変形(座屈)が発生し易いため、結果として強度のばらつきが抑えられている可能性もある。NAL-II 法は試験片セット時の軸合わせが容易にできることに加えて、試験片幅が若干大きいことが有利に働いているものと思われる。

4. 擬似等方積層板の非線形弾性挙動

一方向炭素繊維複合材料(UD-CFRP)の繊維方向引張り試験では、応力ひずみ線図に、下に凸の非線形性が現れることが知られている¹³⁾。これは PAN 系炭素繊維の微構造に起因した非線形弾性挙動であり¹⁴⁾、引張りから圧縮にかけて連続的に発現する現象である。一般に、UD-CFRP の材料主軸方向における非線形弾性変形は、非主軸方向の非線形変形と比較すると相対的に小さく、線形弾性体とみなすことに大きな問題はないとされている。しかしながら、有限要素法による複合材構造の設計では、このわずかな非線形弾性挙動が、解析結果と実験結果に大きな差異をもたらすことがある。非線形弾性変形は一般的な設計許容ひずみ以下でも認められ、微視的損傷による非線形性よりも実用上はむしろ重要である。

本節では一方向 CFRP で取得されている非線形弾性定数から擬似等方 CFRP の非線形弾性挙動を計算し、本実験で得られた応力ひずみ線図と比較することで実験結果の妥当性を検証する。非線形弾性挙動の記述には、石川らによって提案されている高次弾性論に基づいて導出された以下の構成式を適用する¹⁵⁾。

$$\epsilon_1 = S_{11}\sigma_1 + S_{111}\sigma_1^2 + S_{1111}\sigma_1^3 \quad (2)$$

このとき接線剛性 Et は、次式で表される。

$$Et = \left(\frac{d\epsilon_1}{d\sigma_1} \right)^{-1} = \frac{1}{S_{11} + 2S_{111}\sigma_1 + 3S_{1111}\sigma_1^2} \quad (3)$$

Table 4 に今回使用した CFRP に対して実験的に取得された非線形弾性パラメータおよびその他の弾性率を示す^{15,16)}。これらの値は、いずれも一方向積層板の引張り/圧縮試験から得られたものである。

上述の非線形弾性モデルと古典積層理論に基づいて、擬似等方 CFRP の応力ひずみ線図の計算を行った。計算にあたっては、初期弾性率が実験結果と一致するように、材料主軸方向の弾性率に Table 4 に示す補正係数 (correction factor) を乗じた。これは、主として製造ロット差による繊維体積率等の相違に起因するものと考えている。ひずみ増分を 0.001% とし、1 ステップ前の 0° 層の応力から 0° 層の接線剛性を計算し、これを古典積層理論に適用して擬似等方積層板としての剛性および応力を逐次計算した。熱残留応力を考慮した計算も実施したが、応力フリー温度 $0 \sim 150^\circ\text{C}$ の範囲ではその影響は軽微であることが確認されたため、以下では簡単のため熱残留応力については考慮していない。

得られた計算結果を Fig. 14~16 に示す。実験値と計

Table 4 Nonlinear elastic moduli of unidirectional CFRP (T800/3633, T800S/3900-2B and IM600/133).

	T800/3633 ¹⁵⁾	T800S/3900-2B ¹⁵⁾	IM600/133 ¹⁶⁾
E_{11} (GPa)	153	139	142
S_{11} (MPa ⁻¹)	6.86×10^{-6}	7.22×10^{-6}	6.95×10^{-6}
S_{111} (MPa ⁻²)	-1.06×10^{-10}	-7.07×10^{-10}	-5.88×10^{-10}
S_{1111} (MPa ⁻³)	3.62×10^{-13}	9.62×10^{-14}	1.35×10^{-13}
E_{22} (GPa)	10.4	8.76	7.94
G_{12} (GPa)	4.80	4.57	4.12
ν_{12}	0.31	0.32	0.36
Correction factor	1.053	1.075	1.075

Fig. 14 Experimental and calculated stress-strain curves of the quasi-isotropic laminates (T800/3633) under compressive loading.

Fig. 16 Experimental and calculated stress-strain curves of the quasi-isotropic laminates (IM600/133) under compressive loading.

Fig. 15 Experimental and calculated stress-strain curves of the quasi-isotropic laminates (T800S/3900-2B) under compressive loading.

算値は破断直前までほぼ一致しており、NAL-II法で得られた擬似等方積層板の非線形挙動は一方向CFRPの非線形弾性挙動によって概ね説明できることがわかる。

圧縮試験では引張り試験やせん断試験と異なり、破断強度近くまで90°層や45°層における微視的な損傷（マトリクスき裂）や層間剝離等の発生が顕著でないため、材料主軸方向の非線形弾性挙動のみを考慮した計算でも応力ひずみ線図の非線形性を破断直前まで表現できたものと考えられる。

以上のことから間接的ではあるが、NAL-II法によって得られた試験結果の妥当性が材料の非線形弾性挙動の面からも示されたものとする。

5. ま と め

CFRP積層板を対象とした簡便な圧縮試験方法（NAL-II法）を提案し、3種類のCFRP擬似等方積層板を対象としてASTM D6641の試験結果と直接比較を行った。その結果、応力ひずみ線図は破断までほぼ完全に一致し、ASTM D6641と比較すると10%程度高い平均強度が得られることがわかった。

NAL-II法は治具の構造が単純で、製作コストも他の

治具と比較して廉価である。治具の重量も2 kg程度と軽量であるため取り扱い性にも優れる。試験片のセッティングに必要な時間は1本あたり数分であり、作業性も良い。試験片形状はSRM 1R-94の弾性率測定用とほぼ同じ幅15×82 mmであり、タブ接着が不要で、弾性率測定と強度測定を同時に実施できるという利点もある。

このようにNAL-II法は、現在最も洗練された圧縮試験方法とされているASTM D6641と比較しても遜色ない圧縮試験方法であることが実験的に示された。現状では試験方法としての実績が不十分ではあるが、国内および国際的な無孔圧縮試験法として提案し得る可能性がある試験法と考える。

本研究に関わる強度試験の実施に対して多大なるご助力を賜りましたIHI ジェットサービス(株)藤嶋基氏、山崎隆氏、市川雅章氏、青山学院大学学生 佐々木伸之氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) ASTM Standard D3410-95: Standard test method for compressive properties of polymer matrix composite materials with unsupported gage section by shear loading, ASTM International (1995).
- 2) ASTM Standard D3410-03: Standard test method for compressive properties of polymer matrix composite materials with unsupported gage section by shear loading, ASTM International (2003).
- 3) ASTM Standard D6484-04: Standard test method for open-hole compressive strength of polymer matrix composite laminates, ASTM International (2004).
- 4) SACMA Recommended Method: Open-hole compression properties of oriented fiber-resin composites, SRM 3R-94, Suppliers of Advanced Composite Materials Association (SACMA) (1994).
- 5) JIS K7076: 炭素繊維強化プラスチックの面内圧縮試験方法, 日本工業規格 (1991).
- 6) JIS K7018: 繊維強化プラスチック積層板の面内圧縮特性の求め方, 日本工業規格 (1999).
- 7) ASTM Standard D695-02a: Compressive properties of rigid plastics, ASTM International (2002, first issued in 1942).
- 8) SACMA Recommended Method for Compressive Properties of Oriented Fiber-Resin Composites, SRM 1R-94, Suppliers of Advanced Composite Materials Association (SACMA) (1994).
- 9) ASTM Standard D6641-01: Determining the compressive properties of polymer matrix composite laminates using a combined loading compression (CLC) test fixture, ASTM International, W. Conshohocken, Pa. (2001, first issued in 2001).
- 10) D.F. Adams & E.M. Odom: Influence of test fixture configuration on the measured compressive strength of a composite material, *J. Compos. Tech. Res.*, **13**, 1 (1991), 36-40.
- 11) D.F. Adams & J.S. Welsh: The Wyoming combined loading compression (CLC) test method, *J. Compos. Tech. Res.*, **19**, 3 (1997), 123-133.
- 12) 小笠原俊夫, 石川隆司: 炭素繊維複合材料に対する無孔圧縮試験方法の相互比較と簡便な試験法(NAL-II法)の提案, 宇宙航空研究開発機構研究開発資料, JAXA-RM-08-010 (2008).
- 13) T. Ishikawa, M. Matsushima & Y. Hayashi: Hardening non-linear behaviour in longitudinal tension of unidirectional carbon composites, *J. Mater. Sci.*, **20** (1985), 4075-4083.
- 14) G.J. Curtis, J.M. Milne & W.N. Reynolds: Non-Hookean behavior of strong carbon fibers, *Nature*, **220** (1968), 1024-1025.
- 15) T. Yokozeki, T. Ogasawara & T. Ishikawa: Non-linear behavior and compressive strength of unidirectional and multidirectional carbon fiber composite laminates, *Composites: Part A*, **37** (2006), 2069-2079.
- 16) 小笠原俊夫, 横関智弘, 石川隆司: 第29回複合材料シンポジウム予稿, 日本複合材料学会 (2004), pp. 29-30.