炭素繊維／炭素複合材の特性に及ぼす組成と低温気相熱分解炭素被覆の効果

大谷 杉郎*・小島 昭**・飯塚 重雄**
星野 新吾**・神津 正史**

(昭和 57 年 8 月 30 日受理)

Effects of Components and Low Temperature Pyrolytic Carbon Coating on the Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Carbon

Sugio Ōtani*, Akira Kojima**, Shigeo Iizuka**,
Shingo Hoshino**, and Masashi Kōzu**

* Faculty of Technology, Gunma University; Tenjin-cho,
Kiryu-shi 376 Japan

** Gunma Technical College; Toriba-cho, Maebashi-shi 371 Japan

The most appropriate conditions were determined for the preparations of carbon fiber reinforced carbon (CFRC) bar (2 mm in diameter) for the core materials of carbon dental implant, which require the flexural strength more than 150 MN/m², the compressive strength more than 100 MN/m² and the elastic fracture behavior.

The carbon fiber reinforced plastics were prepared by use of phenol resin containing some amounts of graphite powder and high performance carbon fiber (CF) heat-treated prior to forming, and then carbonized CFRCs up to 1000°C under nitrogen. The most suitable composition of CFRC bar was found to be as follow;

2500 °C treated CF : 65 w/o
graphite powder : 15 w/o
resin carbon : 20 w/o

Then, the resulting unidirectionally CFRC bar (2 mm in diameter) was coated with low temperature pyrolytic carbon (LTPC, 0.5 mm in thickness) by use of cis-1,2-dichloroethylene as a source. The LTPC coating resulted in a great increase of compressive strength. Typical mechanical properties of the coated CFRC bar are 290 MN/m² in flexural strength, 9 GN/m² in flexural modulus and 145 MN/m² in compressive strength.

The brittle fracture behavior improved with raising the preheat-treatment temperature of CF and the CFRC bar reinforced with CF preheated at 2500°C exhibit fiber pull out more than 100 μm in length at the fracture surface. While the bar coated with LTPC gave a trapezoid stress-strain curve and fiber pull out became shorter than that of the uncoated bar.

1. 緒 言

炭素と生体との親和性のよいことに着目し、炭素を生体用材料として使用するための研究が 1960 年代前半か

ら行なわれ¹⁾、炭素人工歯根材、炭素人工心臓弁および炭素人工関節等の製造について検討が行なわれてきた^{2,3)}。

炭素を生体用材料として使用する場合の必要条件としては、G.M. Jenkins⁴⁾あるいは伊藤⁵⁾らも述べているように、次の 4 項目が必要である。

- 1) 抗血栓性であること。
- 2) 生体組織に対する刺激性がないこと。
- 3) 生体組織との接着性が良好であること。

* 群馬大学工学部合成化学科：〒376 桐生市天神町 1-5

** 群馬工業高等専門学校工業化学科：〒371 前橋市鳥羽町 580

4) すぐれた機械的特性を有していること。

これらの中で、1)~3)については主として炭素特有の性質であるが、2), 3)については形状からくる生体物理的な影響も加味される。また、もっとも最初に解決しておかなければならない問題は、4)の機械的特性である。

この機械的特性として考えられることは、次の5点である。

- a) 高い曲げ強度
- b) 生体組織(特に骨)と同程度の弾性率
- c) 表面堅牢性
- d) 靱性
- e) 圧縮強度

これら5つの機械的特性を具備することが、実用性のある生体用炭素材料の条件になる。

これまでに試みられた生体用の炭素材料としては、高強度等方性人造黒鉛、ガラス状炭素、LTI (Low Temperature Isotropic 炭素) およびCFRC (炭素繊維補強炭素) 等がある。しかし、前三者は靱性に欠け、CFRCは表面堅牢性を欠くうらみがある。また、これらの生体材料に共通して欠けている点は、表面構造がもたらす周囲組織への生物物理学的な影響への考慮の不足である。そこで、著者らは医学関係の研究者との協同の下で、表面に微細なラーメン構造からなる多孔層をもつ生体用炭素材料(Fine Rahmen surface carbon, 以下FRS炭素材と略記する)の作成を試みている⁶⁾。この材料の作成にあたっては、

- 1) 前項5つの機械的特性を満足する芯材の調製
- 2) 微細なRahmen層(FRS)の構築

の2つの問題が生ずる。本報告は、前者の芯材に関する研究のうち、直径2~3mmの丸棒および板状試料に関する結果をまとめたものである。

現段階で、靱性のある炭素材料としてもっとも可能性のあるものはCFRCである。H. Brückmannら⁷⁾は、熱硬化性樹脂をマトリックスとして用い、CFRP (炭素繊維補強樹脂) を作り、これを炭化あるいは黒鉛化することにより靱性をもったCFRCをえたと報告しているが、その製法の詳細にはふれていない。また、安田、木村等⁸⁾は、フラン樹脂を用いたCFRPを炭素化し、更にこれを黒鉛化することによって靱性のあるCFRCを得ている。

靱性の発現は、マトリックス炭素と炭素繊維との界面接着強度の調節にあると考えられる。そこで、本実験ではCFRC全体を黒鉛化温度まで加熱するのではなく、使用する炭素繊維だけをあらかじめ黒鉛化温度(2500℃)で処理することによって、マトリックスとの接着性を弱め、複合材料としての最終処理温度を1000℃程度にとど

めることを試みた。この最終処理温度の低下は、CFRCの弾性率や強度にも影響することが考えられる。そこで、最初にa)項の高い曲げ強度(少なくとも200MN/m²)以上、b)項の人間の骨と同程度の曲げ弾性率(8~20GN/m²)⁹⁾をもつ一方向性の板状および棒状(直径2mm)CFRCをつくる条件を求めた。一方向性のCFRCは、引張強度や曲げ強度には大きな値が期待できるが、人工歯根用材料に要求される圧縮強度については極めて弱いと考えられる。このため表面堅牢性の付与を兼ねて、LTPC (低温気相熱分解炭素) 被覆を行ない¹⁰⁾、この処理が圧縮強度の改善にどの程度寄与できるかを検討した。

2. 実 験

2.1 素 材

炭素繊維は、日本カーボン(株)製、ポリアクリロニトリル系高強度炭素繊維、CARBOLON Z-3 (3000フィラメント)を用いた。使用する前に、炭素繊維表面上に塗布してある収束剤をエチルメチルケトンを用い、ソックスレー抽出器中で5時間抽出し除去した。

この炭素繊維をCF (A)とする。さらにCF (A)を、電気抵抗炉中にいれ不活性ガスを流しながら10℃/minの速度で1500℃あるいは2500℃まで昇温し、この温度に30分間保持し炭素繊維の熱処理を行なった。1500℃で熱処理した炭素繊維をCF (B)、2500℃で黒鉛化した炭素繊維をCF (C)とする。

CFRPを製造するための炭素繊維のバインダーは、フェノール樹脂(レゾール型、群栄化学(株)製、PL-1211)を用いた。さらに、添加剤として黒鉛微粉末(日立化成(株)製、HITASOL GP-60、平均粒子径1~4μm)を用い、これをフェノール樹脂メタノール溶液と共にボールミル中にいれ、十分に分散させた。

2.2 製造方法

CFRCの製造方法の概略をFig. 1に示した。黒鉛粉末を均一に分散させたフェノール樹脂メタノール溶液(フェノール樹脂21w/o、黒鉛微粉末9w/o、メタノール70w/o)中に、炭素繊維を含浸し、風乾後80℃の乾燥器中に2~3分間いれ、表面上についている樹脂分がべとつかない程度にまで乾燥させプリプレグ繊維を作った。この場合、樹脂量は用いた炭素繊維の重量とはほぼ同じになるよう調整した。ついで約60℃に加熱してある金型中に注意深く一方向にそろえて並べ、金型を軽く手で押しつけて板状または棒状のプリホームを製造した。次に、150℃に加熱してある金型中にプリホームをいれ、ただちに30MN/m²まで加圧し、3回のガス抜きを行ないながら硬化させ、そのまま加圧下で150℃に3分間、さらに250℃で2時間保持した後、徐冷した。この硬化処理

Fig. 1 Preparation of CFRC.

CF(A): High performance carbon fiber.

CF(B): Heat-treated CF(A) at 1500°C

CF(C): Graphitized CF(A) at 2500°C

にあたって、棒状試料の場合は繊維軸方向に張力をかけるため両端に1 kgの鉄ブロックをつり下げた。金型から取り出した硬化試料をさらに180°Cの乾燥器で2昼夜保持して焼成用のCFRPとした。えられたCFRPの外形は板状の場合15mm×2~3mm×60mm(繊維方向)、棒状の場合直径2mm×250mm(繊維方向)である。CFRPの炭素化は、窒素ガスを流しながら1000°Cまで、10°C/hrの昇温速度で行なった。ついで得られたCFRCに対し、次の方法で緻密化処理を行なった。CFRCをフェノール樹脂メタノール溶液(60 v/o)中に入れ、まず超音波発振器(周波数25 kHz, 出力40W)で試料から気泡の出なくなるまで約1時間超音波を照射し、ひきつづき減圧(約2mmHg)、加圧(10MN/m², 窒素圧)処理をほどこし、硬化後前述の炭化の場合と同条件で熱処理した。この処理を2回繰り返して緻密化CFRCを作った。CF(A)を用いて作られた緻密化CFRCをCFRC(A)とし、CF(B)およびCF(C)の場合も同じように、それぞれCFRC(B)およびCFRC(C)とした。

CFRC中の炭素繊維、黒鉛微粉末およびマトリックス炭素の含有率は次のようにして求めた。炭素繊維量は最初の使用重量がそのまま変らぬものとした。次に、CFRPの段階で炭素繊維以外の黒鉛微粉末および樹脂合計量を求め、この合計量中の黒鉛微粉末量は用いたフェノール樹脂-黒鉛微粉末混合液組成に対応すると考えて計算し、この絶対量はCFRC段階でも変化しないとして取り扱った。したがって、マトリックス量はCFRC全量から上記のように求めた炭素繊維および黒鉛微粉末合計量を差し引いて求めた。

2.3 CFRCのLTFC被覆

CFRCにLTFCを被覆することにより、機械的特性がどのような影響を受けるか検討を行なった。試料としては2500°Cで熱処理したCF(C)から作られたCFRC(C)(直径2mm, 長さ10cm)を用いた。被覆法は、加熱を直接通電法によって行なった。他は既報¹⁰⁾と同様でcis-1, 2-ジクロロエチレンを原料とし下記条件で行なった。

キャリアーガス：アルゴン

被覆温度：900°C

原料ガス濃度：13 v/o

ガス流量：460ml/min

被覆時間：5時間

2.4 測定および観察

曲げ強度：万能型試験機(東洋測器(株)製, MODEL UTM-4L, SS-105D-B-UTM)を用い、三点曲げ試験法で測定した。

その際、試料の厚さを2mmとし、スパンの長さを10mm, 20mm, 40mm, 80mmと変えることにより、スパンの長さで試料の厚さとの比(s/d)による、曲げ強度に対する影響を検討した。棒状試料(直径2mm)の場合も同様にして測定した。いずれの場合も荷重速度は4mm/min, 測定試料数は3ヶである。

曲げ弾性率：上記の曲げ強度測定時の荷重-歪曲線の初期直線部の傾きより算出した。

層間せん断強度：ショート・ビーム試験法(s/d=5)により測定した¹¹⁾。

圧縮強度：破壊荷重が100 kg以下の場合には曲げ強度の測定と同じ万能試験機を、それ以上の場合には島津万能試験機(島津製作所製, RH-10型)を用いた。測定試料の形状は、直径2~3mm, 長さ10mmである。この試料の両断面は平坦で、炭素繊維の繊維方向に対して直角に仕上げた。次に、直径2~3mmの面を加圧面とし試験機の測定台上に直立するようにコンパンドを用いて固定し、繊維の配列方向と同じ方向から圧縮荷重を加えた。荷重速度は前者では4mm/min, 後者では2.5mm/minである。

破断面の観察：走査電子顕微鏡(日本電子(株)製, JSM-T-200型)により観察した。

3. 結 果

3.1 板状炭素材

7種類の炭素繊維含有率のことになった、厚さ2~3mmの板状CFRCを作成した。試料形状をFig. 2の(1)に示した。炭素繊維の熱処理温度が違っていても外観的な差はみられなかった。炭素繊維含有率と曲げ強度(s/d=5)と

Fig. 2 CFRC plate and CFRC bars.
(1) CFRC plate, (2) CFRC bar,
(3) Low temperature pyrolytic carbon (LTPC)
coated CFRC (C).

Fig. 3 Variation of flexural strength ($s/d = 5$)
with carbon fiber content.
1: CFRC(A), 2: CFRC(C).

の関係を図3に示した。この場合のCFRC中の黒鉛微粉末含有率は約15 w/oである。いずれの場合も、熱処理をしない炭素繊維(CF(A))を用いて作られたCFRC(A)よりも、黒鉛化処理をした炭素繊維(CF(C))を用いた場合のCFRC(C)の方が曲げ強度は大きく、炭素繊維含有率が65 w/oのCFRC(C)が最も大きな曲げ強度(280 MN/m²)を示した。

次に、黒鉛微粉末含有率と曲げ強度($s/d = 5$)との関

係を図4に示した。黒鉛微粉末の添加は、CFRC(C)に対してより効果的で、黒鉛微粉末含有率15 w/oの場合が最大の曲げ強度を示し、20 w/oの添加では強度は減少した。従って図3および図4の結果より、曲げ強度の高いCFRCを作る場合の最適組成は、炭素繊維65 w/o、黒鉛微粉末15 w/o、樹脂炭20 w/oであった。

Fig. 4 Variation of flexural strength ($s/d = 5$)
with graphite powder content.
1: CFRC(A), 2: CFRC(C).

3.2 棒状炭素材

前項で求めた最適組成を用い、熱処理条件の異なる三種類の炭素繊維から図2の(2)および(3)に示したような直径2mmの丸棒状一方向CFRCおよびLTPC被覆したCFRC(C)試料を作成した。LTPC層の厚さは、原料ガス導入側でやや厚く、反対側がやや薄い、平均500 μmで、被覆した試料の直径は3mmであった。

それら試料の機械的特性をTable 1に示した。用いた炭素繊維の熱処理温度が高くなるとCFRCの曲げ弾性率、層間せん断強度および圧縮強度は小さくなったが、嵩密度および曲げ強度は大きくなった。このTable 1中で注目される点は、1030 MN/m²という大きな曲げ強度と、人間の骨と同程度の曲げ弾性率を示したことである。また、LTPC被覆を行なうことにより、曲げ強度

Table 1 Several mechanical properties of various CFRC bars*.

	CFRC (A)	CFRC (B)	CFRC (C)	LTPC coated CFRC (C)
Bulk density	1.50	1.55	1.58	1.61
Flexural strength [MN/m ²]	420	660	1030	290
Flexural modulus [GN/m ²]	28	21	12	9
Interlaminar shear strength [MN/m ²]	32	27	20	—
Compressive strength Load [kg]	83	36	16	102
Calc. [MN/m ²]	290	120	60	145

* CFRC(A) was prepared from CF(A).
CFRC(B) was prepared from CF(B), heat-treated CF(A) at 1500°C.
CFRC(C) was prepared from CF(C), graphitized CF(A) at 2500°C.

および曲げ弾性率は減少したが、圧縮強度は著しく増加した。

曲げ強度の測定に際し、予備実験を行なったところ、 s/d 比によって曲げ強度として得られる値は大きく変化することがわかった。そこで、三種類の炭素繊維から作ったCFRCと、比較試料の人造黒鉛材(冶金用、日本カーボン(株)製、EG-36)を用い s/d 比を 5, 10, 20 および 40 として曲げ強度を求め、その結果を Fig. 5 に示した。人造黒鉛材の場合は s/d 比によってあまり影響されなかったが、CFRC の場合は s/d 比によって変化した。

Fig. 5 Flexural strength of UD-CFRCs versus rate of thickness and support distance.
1: CFRC(A), 2: CFRC(B),
3: CFRC(C), 4: Artificial graphite.

Fig. 6 Flexural modulus of UD-CFRCs versus rate of thickness and support distance.
1: CFRC(A), 2: CFRC(B),
3: CFRC(C), 4: Artificial graphite.

s/d 比が大きくなるとCFRC(A)およびCFRC(B)の場合は一定になったが、CFRC(C)の場合は $s/d=20$ 付近に極大値を示した。次に、曲げ弾性率と s/d 比の関係を Fig. 6 に示した。 s/d 比が大きくなると、曲げ弾性率は減少し、 $s/d=40$ になるといずれの試料でも曲げ弾性率にあまり差は認められなくなった。

3.3 CFRCの破壊挙動

曲げ強度を測定した時のCFRCの破壊挙動は、CFRC(A)、CFRC(B)およびCFRC(C)では s/d 比にかかわらず全く異なっていた。各CFRCの応力-歪曲線を Fig. 7 に示した。CFRC(A)の場合は、一般炭素材と同様に降伏点を示すことなく、完全に二つに割れ破断に際して炭素粉末が飛散した。ところがCFRC(B)およびCFRC(C)の場合は、最初にグニャリと折れ曲がるだけで微粉末を生じることはなく、複雑な形状の応力-歪曲線を示した。

Fig. 7 Load-deflection curves of various CFRC bars.

1: CFRC(A), 2: CFRC(B),
3: CFRC(C), 4: LTPC coated CFRC(C).

また CFRC(C)にLTPC層を被覆させた場合(Fig. 7 中の(4))は、更に異なり明確な降伏点をもつ曲線となった。

四種類のCFRCの破断面の様子を走査電子顕微鏡で観察し、その様子を Fig. 8 に示した。人造黒鉛材と同様の破壊挙動を示したCFRC(A)の場合は、せん断破壊で4~5個の繊維束に分裂し、マトリックスからの炭素繊維のひきぬきは見られない。CFRC(B)およびCFRC(C)の場合は、せん断破壊により2~3個の繊維束に分裂すると同時に、各繊維束内でマトリックスから炭素繊維のひきぬかれているのが見られ、引きぬかれた繊維の長さは前者で100~300 μm 程度、後者では1000 μm を越すものもあった。

LTPC被覆のCFRC(C)では、最終的には圧縮側のLTPC層が芯材表面からむしり取られるように半円筒状に剝離した。一方、反対側ではLTPC層はそのまま残り、繊維の引き抜きも若干見られた。引き抜かれた繊維の長さはCFRC(B)の場合よりも短くなっていた。

Fig. 8 Fractured surface of various CFRC bars.
1: CFRC(A), 2: CFRC(B), 3: CFRC(C),
4: LTFC coated CFRC(C).

また、圧縮強度を求めた際の試料の破壊状況にも差が認められた。CFRC (A) の場合は完全に二つに割れたのに対し、CFRC (B) および CFRC (C) の場合は、バナナの皮をむくように少しずつ外側から裂けはじめ、LTFC 被覆の CFRC (C) ではまず LTFC 層にクラックが入り、次に 4~5 個の繊維束に分裂した。

4. 考 察

(1) 今までに高強度の CFRC の作成に関しては多数の報告がある。Jenkins ら¹²⁾ は、フェノール樹脂をバインダーとして用い、 800 MN/m^2 の一方向 CFRC 棒を製造した。CFRC の HTT (最終熱処理温度) は、今回の場合と同じ 1000°C 程度であるが、得られた CFRC が靱性を有しているとは報告していない。一方、安田、木村等⁸⁾ は、フラン樹脂をバインダーとし、フィラメントワインディング法により炭素繊維を配列して CFRP を作成し、それを炭化あるいは黒鉛化することによって、曲げ強度が $100\sim 360 \text{ MN/m}^2$ の CFRC を作成した。その際、CFRC の HTT が 2000°C 以下では脆性破壊を示したが、 2600°C および 2800°C の場合は靱性を示した。その理由として、HTT が 2000°C 以下の場合、マトリックス

はガラス状炭素であることと、炭化時の収縮によりマトリックスは炭素繊維を強くしめつけてよく接着しているため、クラックの発生により、容易に炭素繊維が切断されるので脆性を示す。それに対し、HTT が 2600°C 以上では、マトリックスが炭素繊維を中心に同心円状に黒鉛化する結果、炭素繊維との剥離やひきぬきが顕著になり靱性を示すと報告している。

このように、CFRC 全体を黒鉛化温度で熱処理することによって靱性を付与させた。ところが今回の著者らの実験では HTT が 1000°C であっても CFRC に靱性を与えることができた。両者の曲げ強度測定時の応力-歪曲線を見てみると、HTT が 2600°C 以上の安田らの場合は降伏点をもつ曲線を示したが、著者らの場合は最大負荷に達するまで弾性的に変形し、その後は脆性破壊を示し、応力は段階的に減少した。両者の差は、マトリックスおよび炭素繊維の配列方法のちがいが主な理由だと考えられるが、その他に測定方法のちがいもある。前者では四点曲げ試験法で、その荷重速度が 0.1 mm/min であるのに対し、後者では三点曲げ試験法でその速度は 4 mm/min と異なっていることも一因かもしれない。また、安田らが指摘している CFRC の HTT が 2000°C 以下の場合、マトリックスが炭素繊維を切断するために脆性破壊をするのべている。著者らの場合は HTT が 1000°C であっても CF (B) を用いた場合には顕著な切断はみられなかった。事実、走査電子顕微鏡観察でも炭素繊維の切断よりもマトリックスからの引き抜きが見られた。このように炭素繊維とマトリックスとの接着が CFRC の破壊挙動に大いに影響を与え、CFRC に靱性をもたせるか、あるいは靱性を付与させるかは、炭素繊維の熱処理温度を変えることによって調節することが可能になった。

(2) 生体用炭素材料が具備していなければならない機械的特性は、前述の (a)~(e) 項までの 5 項目である。この中の (a), (b) および (d) は、CFRC (C) を用いることにより充分満足することができた。しかし、歯根材として使用するにはさらに残り二つの特性をも有していなければならない。特に (e) 項の高い圧縮強度は、歯根材の場合常に咀嚼作用が繰り返し行なわれるものであり、解決しておかなければならない。この二点を同時に解決するために、CFRC (C) 棒に約 $500 \mu\text{m}$ の LTFC 層を被覆させると、圧縮破壊荷重が 102 kg と人間の歯根の最大咀嚼圧 ($60\sim 80 \text{ kg}$) よりも高くなり、圧縮強度を著しく向上させることができた。圧縮時の破壊挙動にもちがいがあらわれたのは、CFRC (C) の周囲が堅い LTFC 層でぐるりと取り囲まれ、炭素繊維束をかたくしめつけたことに基因し、このことが圧縮強度を増加させたのであろう。また、この CFRC 棒の表面は熱

分解炭素特有の堅さを示した。

一方, LTPC被覆によってCFRCの曲げ弾性率は低下した。これはCFRC(C)の弾性率が 12GN/m^2 であるのに対し, LTPCのそれが 1.7GN/m^2 と低い事によるのであろう。CFRC棒の直径の増加分から概算した, LTPC被覆した試料中の組成は, LTPC 55 v/o, CFRC 45 v/oであるので, これに複合則を適用するとほぼ測定値に近い弾性率になった。曲げ強度もLTPC被覆によって低下した。LTPCそれ自身の曲げ強度を測定していないので試算することはできないが, 弾性率の場合と同じように複合則が適用できるものと考えている。また, Fig. 7の(4)に示した応力-歪曲線のようにLTPC被覆したCFRC(C)は, 明確な降伏点を示し靱性の補強に効果的であった。

このように黒鉛化処理をした炭素繊維を用いて作成したCFRCと, LTPC被覆との組合せにより, 生体用材料として不可欠な諸特性を満足することができた。

(3) 生体用材料を顎骨あるいは大腿骨中に埋入する場合, 柳澤¹³⁾およびE. Fitzer¹⁴⁾も指摘しているように, 人間の骨とうまくマッチングさせるには, 骨と同程度の弾性率を有していることが重要である。G. M. Jenkins¹²⁾あるいはE. Fitzer¹⁵⁾により製造された一方向CFRCの曲げ弾性率は $160\sim 290\text{GN/m}^2$ で人間の骨($7\sim 20\text{GN/m}^2$)⁹⁾よりは, はるかに高く骨とうまく適合するとは考えられない。ところが, 著者らの製造したCFRC棒は 12GN/m^2 と人骨と同じ程度の弾性率を示し, その上靱性も有しており破壊に際しても炭素微粉末が生じることではない。このことは, 歯科医あるいは整形外科医等が臨床使用に際し最も懸念している体内に炭素粉末が混入するという点⁶⁾が防止できることから望ましいことである。

このようにLTPC被覆したCFRC棒は, FRS炭素インプラント用の芯材として満足できるものと考えている。ねじりせん断力や, 層間せん断力をさらに大きくするた

めには, CFRC棒の周囲に炭素繊維ペーパーを巻いたり, 炭素繊維ヤーンでフィラメントワインディングを行なうことも効果的と考えられる。

本研究は昭和56年度文部省科学研究費(試験研究)の援助を受けて行なったものである(1981年12月, 炭素材料学会第8回年会(一部)発表)。

文 献

- 1) V. L. Gott, D. E. Koephe, R. L. Daggett, W. Zarnstorff and W. P. Young, *Surgery* **50**, 382 (1961)
- 2) J. C. Bokros, L. D. LaGrange and F. J. Schoen, "Chemistry and Physics of Carbon" (ed. by P. L. Walker Jr), **9**, 103 (1972), Marcel Dekker.
- 3) J. C. Bokros, *Carbon* **15**, 355 (1977)
- 4) G. M. Jenkins, *Clin. Phys. Physiol. Meas.* **1**, 171 (1980)
- 5) 伊藤晴夫, 炭素 **1981** [No. 104] 9.
- 6) 大谷杉郎, 小島 昭, 柳澤定勝, 岩田照史, 新島邦雄, 西連寺永康, 日本化学会第45春季年会予稿集 I, p. 454 (1982)
- 7) H. Brückmann and K. J. Hüttinger, *Biomaterials* **1980**, Vol. 1, 67.
- 8) 安田英一, 田中英彦, 木村修七, 炭素 **1980** [No. 100] 3.
- 9) F. G. Evans, "Mechanical Properties of Bone", (Edited by C. C. Thomas), Springfield, Illinois (1973).
- 10) 大谷杉郎, 小島 昭, 小浜裕司, 桜井 智, 日化 **1979**, (4) 494.
- 11) 大谷杉郎, 木村 真, 「炭素繊維」 p. 339 (1972).
- 12) G. M. Jenkins, *Carbon* **15**, 33 (1977).
- 13) 柳澤定勝(日本語訳監修), 「インプラント(その臨床と現状)」(1980) 書林.
- 14) E. Fitzer, W. Hüttner and L. Claes, *Carbon* **18**, 383 (1980).
- 15) E. Fitzer, W. Hüttner and L. M. Manocha, *Carbon* **18**, 291 (1980).