

複合材料

—これまでのあゆみと適用の現状—



ボーイング767の外面に使われている複合材料の部位

- 炭素繊維複合材料
- 炭素繊維×アラミド繊維によるハイブリッド複合材料
- アラミド繊維複合材料

スペースシャトル表面の断熱材料にみる複合材料の使用例

- 炭素繊維強化グラファイト(C/C コンポジット)
- 高温用シリカタイル(アルミナ繊維×ボロン×シリカ)
- 低温用シリカタイル(アルミナ繊維×ボロン×シリカ)
- アラミド繊維フェルトによる屈曲性断熱材料

「金属をこえる」材料として注目されてきた複合材料だが、その価格はシンプルなプラスチック材料の時のように劇的に下がる気配はなかなか見られない。コストダウンが難しいのはなぜなのだろうか。また将来、複合材料のコストダウンによって金属材料が大幅に代替されていくといった可能性はあるのだろうか。複合材料の生いたちからの全体像を概観しつつ、その実情を追ってみる。

ガラスからカーボンへ

近代的複合材料の原点は、1942年に製造されたGFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) すなわちガラス繊維によって強化されたプラスチックである。この技術はその2年前の1940年に、ガラス繊維の製造技術が確立され、可能になった。

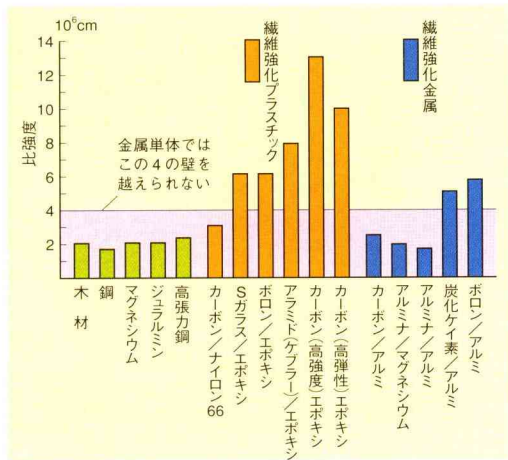
当時、プラスチックは軽量で加工性に優れた「夢の材料」として大きな期待が寄せられていたが、構造材としては、剛性、耐衝撃性などの点で、どうしても金属に比肩することができなかった。FRP (繊維強化プラスチック) の誕生は、そうしたプラスチックの弱点を補完するものだった。

当初は、不飽和ポリエステルをマトリクス (母材) とし、ガ

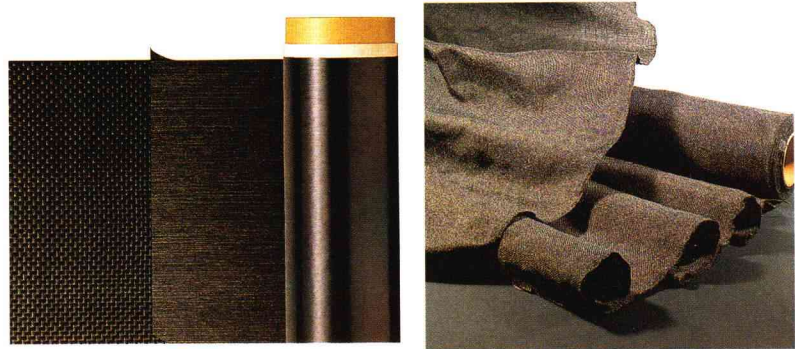
ラス繊維で強化するという組み合わせだったが、その後マトリクスにはエポキシ樹脂が使われるようになり、現在もこの組み合わせがGFRPの主流になっている。

その後、軽くて強度が高い (比強度が高い) GFRPは、航空機材料としてさまざまな形で適用されていくことになったが、それでも性能的には従来の金属材料を大きくこえるまでには至らなかった。

そうした中で航空・宇宙分野の厳しいニーズに応えるべく1959年に米国で開発されたのがボロン繊維だった。ボロンはダイヤモンドに次いで硬い高融点の元素だが、繊維にはできない。そこでタングステンを芯材として (現在は炭素繊維も使われる)、その周囲にボロンを化学蒸着させることで繊維にする



各種材料の比強度 (出典：福田「複合材料入門」大月書店)



PAN系炭素繊維のプリプレグ (熱硬化樹脂を含浸させたもの／東レ)。ピッチ系炭素繊維の一例 (呉羽化学工業)。

(したがって、正確にはボロン被覆繊維とよぶべきであるが、以下習慣にしたがってボロン繊維という) 技術が開発された。

ボロン繊維が開発されたのと同年の1959年、複合材料の花形ともいべき炭素繊維の最初のものが米国ユニオン・カーバイド社によって開発・製造された。最初の炭素繊維はレーヨンを原料にしたもので、今日のような高度な機能は達成されていなかった。とくに弾性率の点でボロン繊維におよばなかったため、戦闘機、爆撃機などの新鋭の軍用機には、当初、価格面でかなり高いボロン繊維強化プラスチック (BFRP) が採用されていた。

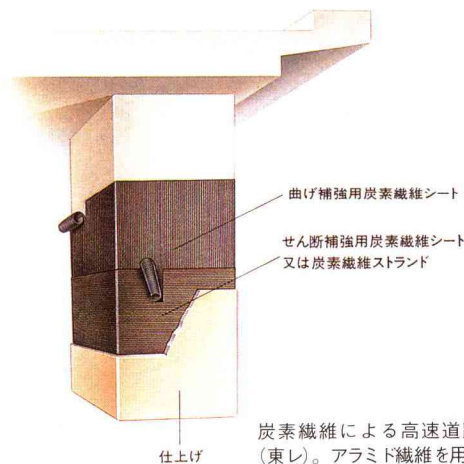
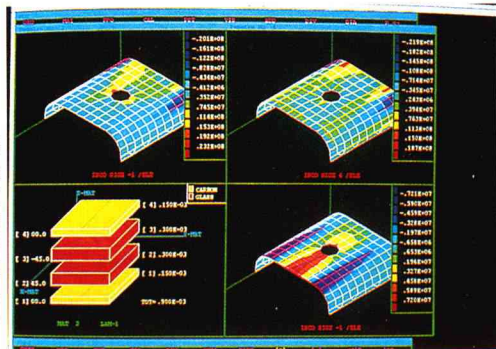
高い弾性率をもつ炭素繊維ができたのは1964年で、開発したのは英国王立航空研究所だった。この研究の成功が航空機材料としての炭素繊維の可能性を開いた。今日では、ボロンに比べてコスト的にもかなり有利な炭素繊維複合材料 (CFRP) が、航空機材料の中でかなりの比率を占めるまでになってきている。

よく知られるように炭素繊維の開発では日本も大きな役割を果たした。レーヨン系炭素繊維が開発された1959年に工業技術院・大阪工業試験所で世界初のPAN (ポリアクリロニトリル) 系炭素繊維の研究が始められたが、このPAN系こそがその後の高機能炭素繊維の主流になっていくのである。この研究成果をもとに1969年には日本カーボンがPAN系炭素繊維の企業化に成功している。

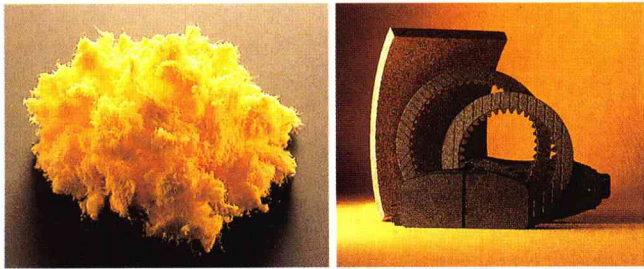
高度な機能性が売りものの炭素繊維複合材料だが、一般材料として普及するには、価格が高すぎるという難点がある。そこでコスト問題を横目に浮上してきたのが石炭または石油ピッチを原料とするものだった。

ピッチ系炭素繊維には、等方性ピッチ系炭素繊維とメゾフェースピッチ系炭素繊維があり、このうち前者はいわゆる汎用炭素繊維と呼ばれるもので、比較的安価である。しかしPAN系に比べると強度、弾性率ともに低く、短繊維であることから用途は限定され、断熱剤、シール・パッキン材、摺動部材としてのCFRP用途向けとなっている。その意味で、いわゆる高機能炭素繊維とは一線を画するものである。また後者は高

CAEによる炭素繊維複合材の設計画面。異方向性を生かして最適の強度配分を行えるのが複合材料のメリットでもある (東レパンフレットより)。



各種アラミド繊維 (帝人)。



アラミド繊維のチョップド・ファイバー（左）とその応用製品例（右）。アスベスト代替品として活用されている例（東レ）。

弾性率の特徴を生かした新たな用途を開拓してきてはいるが、生産規模がPAN系に比べてかなり小さく、この点からコスト低下にはまだむずかしい面がある。いずれも性能とコスト問題とを両立できるまでには至っていないようである。

コスト面での利点があるアラミド繊維

金属をこえる性能をめざして炭素繊維複合材料が開発された経緯には触れたが、高機能炭素繊維の価格はまだまだ高い。高度な機能性と同時に価格も安い材料はないのだろうか。そうしたコスト問題を背景として注目されるようになってきたのがアラミド繊維（全芳香族ポリアミド）である。

アラミド繊維は、1965年に米国デュポン社によってメタ配向のものが最初に生産され、1972年にはより高性能なパラ配向のものが生まれた。比剛性や圧縮強度面でボロン繊維や炭素繊維におよばないが、比強度や衝撃強度では、炭素繊維よりも有利という数値もあり、期待度が高い繊維である。なにより価格面で炭素繊維よりも大幅に安く、米国では2,500円/kg程度となっている。残念ながら日本での価格はもう少し高く3,500～4,000円/kg以上といわれるが、炭素繊維よりは安価な素材といえる。

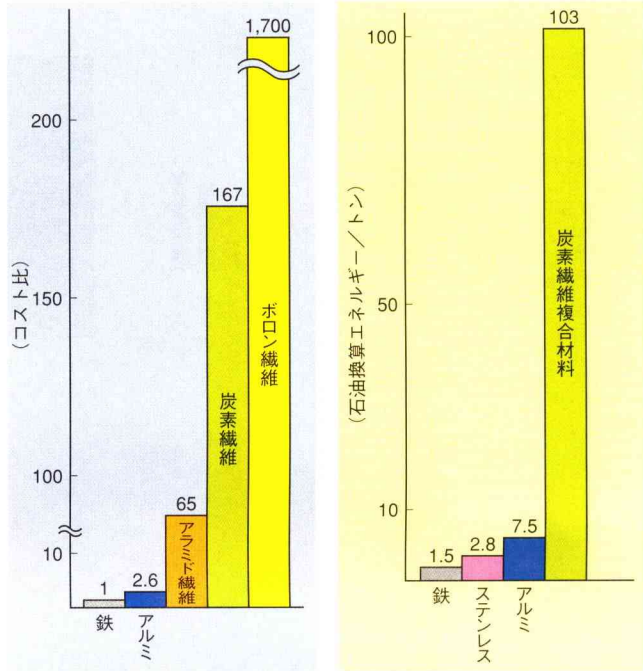
複合材料は安くなるのか？

一時は、金属材料にとって代わることができるとまでいわれた複合材料だが、使用にあったってハードルとなるのが、いうまでもなくコスト問題である。原素材の代表格である炭素繊維を例にとってみると、性能によって価格は大きく異なるが、だいたい10,000～25,000円/kgとなっている。ボロン繊維は、その約10倍といわれる。

たとえば、鉄の代わりにGFRPを、またアルミの代わりにCFRPを使えるという議論がある。FRPは腐食環境に強く耐久年数を延ばせるから、コストパフォーマンスあるいはライフサイクルコストを考えれば十分に代替できるという発想だが、本当だろうか。

鉄鋼の場合、よく「大根と同じ値段」という表現がされるが、鉄筋用の丸棒材の卸価格で60円/kg前後である。10,000円と60円という価格差は、同一線上で比較するには、あまりにも大きなものではないだろうか。

複合材料のコストダウンが難しいという実態は、製造に要するエネルギーを比較してみるとさらに明確になる。たとえば、材



鉄を1とした場合の各材料のコスト比
「先端複合材料」内田盛也編著（工業調査会）および日刊鉄鋼新聞をもとに作成

材料1トンを製造するのに必要なエネルギー消費量（石油換算）
「トゥモロウズマテリアル」ケン・イースタリング著、石崎幸三訳 1990（内田老鶴圃）より作成

料を1トン製造する場合に必要なエネルギーは、鉄の場合（普通鋼を鉄鉱石から製造する場合）、石油換算で約1.5トン程度である。ステンレスでも2.8トン。アルミが約7.5トン程度である。

それに対して炭素繊維複合材料では約103トンとなっている。つまり、複合材料では製造にあたって必要とされるエネルギーそのものが、シンプルな金属材料と比較して2桁も大きいわけだ。

それでも誕生から約半世紀を経て、FRPはさまざまな形で金属に代わる材料として使われるようになってきていることも確かである。繊維の開発例を中心に話を進めてきたが、マトリクスのプラスチック素材にもさまざまな進歩があったことはいうまでもない。エンジニアリング・プラスチックやスーパー・エンジニアリング・プラスチックなどが登場し、ポリマー・アロイの技術とあいまってさまざまな組み合わせが見出だされている。

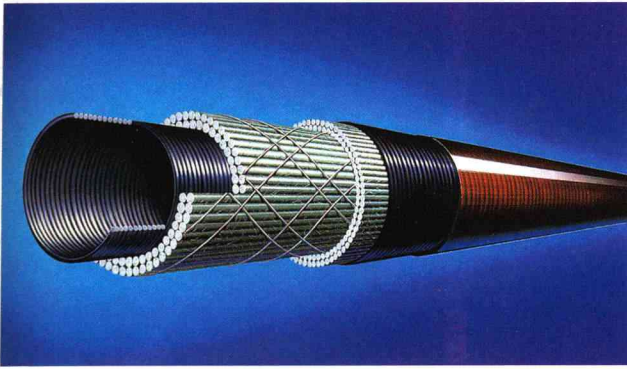
たとえば、OA製品のダウン・サイジングや軽量化の波の中で、静電気を放電させやすい炭素繊維複合材料は重要な役割を果たした。

また、スポーツという官能性や極限的な機能性を求められる場では、複合材料はなくてはならない素材となってきた。

自動車用にも、主要な構造材に使われる例は少ないものの、部材・部品としては、コンポジット材料などが多用されるようになってきている。アスベストの代替品としても、ブレーキパッドやガスケットなどに、複合材料は重要な位置を占めてきている。

土木への応用という用途も、使用量から考えると有望なマーケットのひとつとなっている。たとえば、老朽化したコンクリート建造物の補強をFRP技術で行うというものがある。

昨今では、首都高速道路の老朽化が問題になっているが、



炭素繊維複合材料による釣竿（カーボンロッド）の構造例（東レバンフレットより）。

取り壊しから再建というコスト負担や機能停止による損失を考えると、取り壊し・再建はかなりの困難をとまなう。こうした場合にFRP補強で寿命を延ばすことができれば、そのほうがトータルコストを抑えられることになる。老朽化が進んだ現大阪城の補強工事にも同様の技術が用いられて話題を呼んだことも記憶に新しい。

航空機への適用例から経緯を読む

コストは、用途へ直結してくる。10万円/kg以上というボロン繊維は、米国での軍需用途以外に適用されるケースはほとんどない。一時は日本でもボロン繊維複合材料の釣竿やテニスラケットなどが研究されていたことがあるが、満足度の高い高機能炭素繊維が生まれたこともあり、BFRP製品は商品化されるには至っていないようである。日本国内で唯一ボロン繊維を製造していた真空冶金も5年前に製造を中止し、現在ボロン繊維製造は米国メーカーの独壇場となっている。

米国でも、ボロン繊維は高価すぎて民間機には適用されていない。軍需もしくは宇宙開発などの特殊な用途に限定されているのが実態である。日本の自衛隊にも採用されているF-16やそれ以前のF-4ファントムあたりで、軽量化を目的にアルミニウム合金の尾翼骨格の上にボロン繊維強化エポキシで補強成形が行われているなどの事例がある。

しかし、近年では炭素繊維の性能が高度化したことによって、ボロンよりは安い炭素繊維複合材が航空機分野でもより多く使われるようになってきているようだ。

フォークランド紛争などで名を馳せた英国のハリヤー（垂直離着陸機）あたりでは、主翼の約70%（重量比）が炭素繊維複合材料になっている。米国でもコストダウン・軽量化が重視され初めたF-18戦闘機あたりでは、主翼と尾翼のかかなりの部分に大量の炭素繊維複合素材が採用されているが目立つ。

民間機では、軍用機のように贅沢にコストをかけるわけにはいかないことから、ボロン繊維が使われるケースはまったくといっていいくらいにない。1960年前後から1980年頃までに設計・製造された旅客用の機体を例にとれば、年を追うごとに複合材料の比率が増えているが、その主体はGFRP（ガラス繊維複合材料）だった。ジャンボジェットとして知られるボーイ



フレームに炭素繊維複合材料を使用したスポーツ用自転車（ブリヂストン）。

ング747ではGFRPの比率は全体で20%（重量比）を大きくこえるまでになっている。

ところが、1980年代になってから登場してきたボーイング757や767では、GFRPの比率は数%程度まで縮小された。代わりに大きな比率を占めるようになったのが炭素繊維複合材料と、アラミド繊維複合材料である。とくに炭素繊維とアラミド繊維をハイブリッドで使用したいわゆるハイブリッド複合材料が全体の20%をこえている点は、大きな変化といえる。すべての複合材料を合計した比率は全重量の約30%にまで達した。

これらは大型機を中心とするケースだが複合材料の使用比率は大型機よりも、小型機でより多く、高性能ビジネスジェットや回転翼機（ヘリコプター）などでは、さらに多くなる傾向があり、将来は大型機でも、さらに複合材料の比率が高まる機運があるようだ。

進む金属・セラミックの複合化

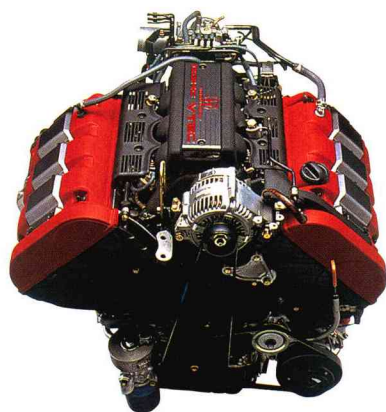
繊維強化プラスチックを主体に話を進めてきたが、複合材料のもうひとつの大きなくくりとして繊維と金属の複合化による材料、すなわちFRM（Fiber Reinforced Metal）が存在する。強化繊維として使用される素材には、炭素、ボロン、炭化ケイ素、アルミナなどがあり、マトリックスとしては現状、アルミが中心になっている。

先進的な例でいえば、スペースシャトルの胴枠を構成する管状支柱が、ボロン繊維で強化されたアルミのコンポジットである。

もう少し身近な例では、本田技研工業がアルミナ（ Al_2O_3 ）短繊維と炭素繊維で強化したアルミの複合材料をVTECエンジンのシリンダーライナーに採用している。従来、鋳鉄が使用されてきた部分である。

このFRM製のシリンダーライナーは、日本製スーパーカーとして知られるNSXの3.2ℓエンジンをはじめ、同社のFFスポーツカーなどに採用されている。NSXでは、このシリンダーライナーだけで、約3kgの軽量化に成功したという。

また、商品化はされていないが、トヨタ自動車ではアルミナ（ Al_2O_3 ）およびシリカ（ SiO_2 ）繊維で強化したアルミをディーゼル・エンジンのピストンに使用する研究が進んでいる。その他の自動車メーカーでも、アルミナや炭化ケイ素の繊維で強化



FRMをシリンダーライナーに採用したC32B3.2ℓエンジン（本田技研工業）。

したFRMをエンジン回りの部品に適用する研究は盛んに行われているようだ。

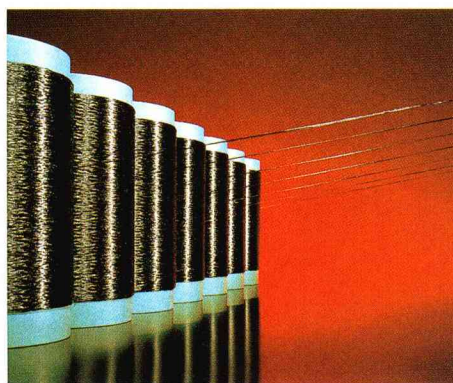
FRMからは少しずれるが、スペースシャトル関連の複合材料では、やはり断熱材用に開発された先端複合材料の開発例に着目してみるべきだろう。

シャトルの大気圏突入時に最も高温となるのは機首突端部分で、最高では1,500℃近い高温になる。この部分をはじめ表面温度が1,260℃以上になる部分に使われるのはグラファイト（黒鉛）を炭素繊維で強化した複合材料、つまりC/Cコンポジットといわれるものである。グラファイトはきわめて融点が高く2,000℃の高温にも耐える素材だが、シャトルのC/Cコンポジットはこれを炭素繊維で強化し、さらに耐酸化性を向上させるために表層を炭化ケイ素に変質させ、シリカを充填処理してあるという。C/Cコンポジットは、核融合実験炉の内壁にも使用されているが、その価格は9～15万円/kgとボロン繊維に負けず高価な材料である。

スペース・シャトルの表面被覆には、このC/Cコンポジットのタイルを頂点に、高温用シリカタイルと低温用シリカタイル、そしてアラミド繊維フェルトによる屈曲性の断熱材というように、表面温度に応じて4種類の断熱材が使われている。耐熱シリカタイルは、純粋シリカにアルミナ繊維とボロンを複合化したセラミック複合材料である。

機能性を十分に認識した用途開発の重要性

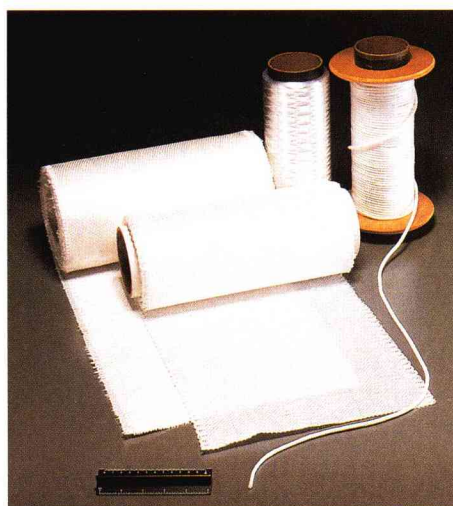
複合材料は、材料技術のひとつのフロンティアに位置する技術である。だが今後コストダウンが進むことで、より大量に使用ができるようになっていくことには、手放しで喜んでいいのかわかどうかが疑問が残る面もある。先に出てきたような製造時エネルギー消費量の大きさの問題である。ここでコストダウン問題を



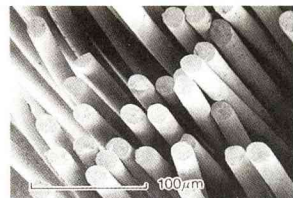
炭化ケイ素繊維の一例（日本カーボン）。



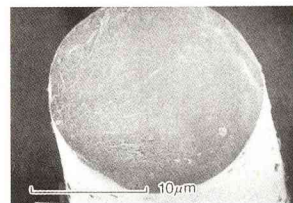
炭化ケイ素繊維アルミの各種製品例（日本カーボン）。



アルミナ繊維の一例（住友化学工業）。



Scanning Electron Micrograph of "Altex"
走査電顕写真



Transmission Electron Micrograph of "Altex"
透過電顕写真

アルミナ繊維の電子顕微鏡写真（住友化学工業）

横目に、むやみに「量」を追及することになると、時代性にそぐわないものとなる可能性は高いはずである。

リサイクル性の問題もある。サーマルリサイクル（廃棄後熱源としてエネルギー回収をする）などの検討もなされているが、複合材料がリサイクル性の面からは不利な材料であることはやはり最終的に否定できないだろう。

また、FRPのマトリクスとしてもっとも一般的であるエポキシ樹脂の一部は、現在、環境ホルモンとして指摘されているビスフェノールAを出発材料にしている点にも、目を向けておく必要があるかもしれない。

そうしたことも考え合わせていくとき、むやみに使用量を増やすというよりは、やはりより少ないエネルギーで製造でき、使用していける材料との共存の中で、ある限定された条件下での高度な機能性を複合材料が分担していくという方向性こそが、複合材料の適正なありかただと考えられそうだ。

参考文献：

1. 先端複合材料 内田盛也編著 工業調査会
2. おもしろい複合材料のはなし 日本複合材料学会編 日刊工業新聞社
3. 新素材・新材料のすべて 第4版 ニューマテリアル研究会編 日刊工業新聞社

〔取材協力・写真提供：呉羽化学工業(株)、真空冶金(株)、住友化学工業(株)、帝人(株)、東レ(株)、日本カーボン(株)、プリヂストンサイクル(株)、本田技研工業(株)〕