

PAN系炭素繊維の開発*

高 松 亨**

1. 大阪工業技術試験所での研究
2. 初期の製品化の試み
3. イギリスでの高性能化研究
4. 東レの参入経路
5. イギリスでの熱狂
6. プロジェクトでの研究開発
7. 米英が遅れをとった過程
8. 東レでの本格生産
おわりに

PAN系炭素繊維の生産をリードしているのは日本である。1997年末の時点で、東レ、東邦レーヨン、三菱レイヨン、およびこの3社の海外関連企業が、世界のPAN系炭素繊維生産能力の7割以上を占めている。⁽¹⁾その開発をリードしてきたのも日本である。PAN系炭素繊維は大阪工業技術試験所の進藤昭男によって59年に開発され、62年には日本の炭素メーカーが最初に製品化した。さらに72年に、世界に先立って本格生産に乗り出したのも日本の東レである。

炭素繊維は複合材料の強化材に使われている。炭素繊維のなかで、「鉄よりも強く、アルミニウムよりも軽い」といわれて登場し、スポーツ用品や航空機部材に用いられているのが、ポリアクリロニトリル(PAN)繊維、すなわちアクリル繊維からつくられるPAN系炭素繊維である。

* 1999年12月18日受理，炭素繊維，日本の研究開発，複合材料，材料技術史，化学工業
** 大阪経済大学

(1) 『化学工業年鑑』(1998年版)化学工業日報社，1998年，523頁より算出した。

炭素繊維は、最初、レーヨンを原料として1950年代にアメリカに登場した。日本で PAN 系が開発されたあと航空宇宙分野での利用に期待が高まると、60年代後半にはイギリスが国をあげて PAN 系炭素繊維の実用化に取り組む。その後、航空宇宙分野での利用が本格化した80年代には、アメリカが国防上の見地からその自給体制づくりをめざした。その用途として期待されたのは日本に需要のとばしい航空宇宙分野であり、しかもイギリスやアメリカも開発競争に参加していた。

にもかかわらず日本が、生産のみならず開発でも世界をリードしてきた経過を検討するのが本稿の目的である。おもに検討されるのは、大阪工業技術試験所での開発から東レが本格生産を開始するまでの15年間である。ほぼ日本の高度成長期とかさなってすすめられた PAN 系炭素繊維の開発過程において論じたいのは、日本の研究開発体制の発展段階や創造性についてではなく、むしろ研究開発における国際的連携の重要性である。

1. 大阪工業技術試験所での研究

PAN 系炭素繊維を開発することになるのは、大阪工業技術試験所の進藤昭男である。進藤は1952年の入所以来、同所第1部（無機化学部門）の炭素研究室に配属され、「炭素の崩れ」を研究テーマとして与えられていた。その研究について、進藤はのちに次のように述懐している。⁽²⁾

炭素の崩れは研究の仕方によってはテーマとして必ずしも悪くはないが、工業材料の開発という点からは実り多い成果は期待できそうに思えなかった。

進藤は「なにか工業化につながるような研究」を求めていた。

大阪工業技術試験所での炭素の研究は、1922年の電気用炭素刷子の製造に関する研究にはじまる。第二次大戦中にはゴムの補強材として用いられるカーボンブラックの研究が、その自給態勢を確立するために活発におこなわれた。戦後も継続されたカーボンブラックの研究を主導したのは仙石正である。仙石は、第1部（無機化学部門）の部長を10年間つとめたあと、58年からは所長となっていた。⁽³⁾ 進藤がおこなっていた「炭素の崩れ」の研究は、その仙石の研究の延長線上に位置していた。⁽⁴⁾

進藤が炭素繊維研究に着手するきっかけとなったのは、アメリカからの炭素繊維開発の情報であった。アメリカの William F. アボットが1950年代中頃にレーヨンを原料として炭素繊維を開発し、カーボン・ウール社という会社が生産を開始していた。⁽⁵⁾ 1959年には、UCC 社の子

(2) 進藤昭男「カーボンファイバー」、『セラミックス』21巻10号、1986年、941～945頁。

(3) 大阪工業技術試験所は、前身の大阪府立工業試験所を農商務省所管に移管する形で1918年（大正7年）に設立された。前年の理化学研究所の設立にもみられる当時の風潮を反映して、とくに化学工業の振興がめざされた。設立当初は「大阪工業試験所」だったが、工業技術院の設立により「大阪工業技術試験所」となるのは、進藤が入所した1952年のことである。

(4) 『大阪工業技術試験所五〇年史』1967年、21～31頁および118～121頁。

(5) US Patent 3,053,775, "Method for Carbonizing Fibers". この特許は、1956年に出願された "Method for Carbonizing Fibers, and Articles Produced Therefrom" を破棄して、1959年に再出願され、62年に受理されている。

会社であるナショナル・カーボン社が2500℃以上でレーヨンを黒鉛化させた炭素繊維を発売している。⁽⁶⁾

進藤はデパートの布地売り場で端切れを買うなどして、合成繊維を集めて研究を開始した。⁽⁷⁾ 入手したナイロンなどの合成繊維をスプリング式熟天秤の小さな石英バスケットにいれて手あたりしだいに窒素ガス雰囲気中で数百から千℃に加熱してみる。しかし、取り出した資料は跡形もなく消えてなくなっているか、残っていても繊維の形状をとどめないただの炭になっていた。⁽⁸⁾

そこで合成繊維の性質について調べてみた進藤は、合成繊維の性質一覧表のなかでオーロンには融点の記載がないことに注目する。⁽⁹⁾ オーロンはPAN 繊維のデュポン社の商品名である。オーロンを試みることにしたその日に、以前からいろいろな合成繊維を送ってくれるように頼んでおいた帝人につとめる進藤の実弟から合成繊維の束がとどいた。そのなかにあったオーロンをさっそく焼成してみると、バスケットのなかには少し小さく丸まってはいるものの黒い毛玉が残っていた。これが、世界で最初のPAN 系炭素繊維研究のはじまりとなった。

有機物を焼成して「炭素を作る」工程は、1) 炭素以外の元素がほとんどなくなる1000℃までの炭素化過程と、2) 黒鉛結晶が成長していく3000℃までの黒鉛化過程からなる。炭素の骨組みは炭素化過程でほぼ決定されるため、ここで繊維状の炭素ができるかどうかが決まる。炭素化過程でできた試料をさらに高温で焼成すると黒鉛化された炭素繊維ができる。

試料を作るために、進藤はPAN 繊維の糸の向きをそろえて石英管の中に入れ、電気炉で1000℃くらいまで加熱した。取り出した炭素繊維は指に巻つけることのできる黒い糸となった。ところが、試料の構造や物性を調べるために一度に多数の繊維を焼成すると、今度はすぐに粉々になるもろい繊維しかできなかった。この原因をさぐる過程で、PAN 系炭素繊維をつくる上で決定的に重要な方法が発見されることになる。

原因は、不完全な窒素雰囲気中で実験をおこなったことにあった。繊維を少量しか焼成しな

(6) 進藤は『日刊工業新聞』1959年5月29日の「レーヨンのような繊維を三千度Cに加熱し熱化学的に黒鉛にする方法が米国ナショナル・カーボン社で完成された」ことを伝える記事を見て研究を開始したとしている(1997年1月21日の聞き取り、および進藤、前掲書(注2))。ただし、当時の進藤の直接の上司であった松尾寛二氏によると、炭素繊維開発について記載された1950年代中頃の洋雑誌の記事を同所第4部の片岡長正が仙石に見せ、仙石が松尾と進藤に研究をすすめたのが、大阪工業技術試験所での炭素繊維研究のはじまりであったという(2000年6月5日の聞き取り)。片岡氏からも同様の証言を得た(2000年6月9日の聞き取り)。松尾と片岡の証言に従うなら、日本での研究はアボットによる炭素繊維開発の情報をもとに開始されたことになるが、その洋雑誌を特定することはできなかった。当時、日本に炭素繊維開発の情報を伝えた洋雑誌として確認できたのは、“Process Converts Textiles Directly to Pure Graphite”, *Science News Letter*, May 9, 1959, p.296 および *J. Electrochem. Soc.*, Vol.106, No.6, 1959, p.147C である。

(7) 当時、入手できる合成繊維には、ナイロン、ビニロン、ポリエステルがあった。アクリル繊維はすでに日本でも生産されていた。1959年といえば先発の鐘淵化学のあとをおって日本エクスラン、三菱ボンネル、旭化成が参入し、いわゆる「アクリルラッシュ」がおこった年でもある。

(8) 進藤、前掲書2)。

(9) たとえば、繊維学会編『化繊便覧』丸善(1953年)に記載されている *Textile World's Synthetic-Fiber Table*, 1953 Revision には、オーロンの熱による影響について、「455°Fで粘る」とある。

かったときには、管内に残存する酸素によって酸化されてから炭素化するために、強い繊維状の試料ができていたのである。その発見について進藤は次のように記している。⁽¹⁰⁾

石英管は直径10cm、長さ15cmの中央部の両側に直径5cmのチューブのついた大きなもので、ガス流量を少なくできるように、一端を閉じ、他端をT字型に塩ビチューブをつないでN₂ガスを流し続け、焼成中に発生するガスは外に出るが、外気は入らないようにしていた。だから、繊維が少ないときは温度の上昇に伴って、初めにあった空気です度々に酸化され、続いて不活性ガス中で炭化するが、繊維が多いときはほとんど酸化されずに炭化するという事に気づいた。

こうして、加熱すると軟化して繊維が接合してしまうという、レーヨンにはないPAN繊維の問題を克服する方法として、焼成する前にPAN繊維をあらかじめ空気酸化しておく前処理の方法が発見された。⁽¹¹⁾ PAN繊維を前処理してから、窒素雰囲気中で1000～2700℃まで加熱して、炭素化さらに黒鉛化させることにより炭素繊維が得られた。PAN系炭素繊維の国内基本特許となる「アクリルニトリル系合成高分子より炭素製品を製造する方法」が⁽¹²⁾出願されたのは1959年9月7日である。特許には、「……150～350℃以下の比較的低温の空气中で加熱し、……あらかじめ部分的に脱水素したる後更に高温に加熱するさいは炭化収率を増大し、引張り強度の大なる良質の炭素繊維を得ることができる」と記されている。

進藤はまず59年10月に国内の学会で⁽¹³⁾口頭発表をおこなったあと、61年から次々と日本の雑誌に論文を発表した。⁽¹⁴⁾ そこに記された炭素繊維の機械的性質は、ナショナル・カーボン社のレーヨン系炭素繊維の値を上回っていた(図-1)。ついで学位論文(理学博士)として、『大阪工業技術試験所報告』に“Studies on Graphite Fiber”と題する論文を、同誌には珍しく英文でまとめる。⁽¹⁵⁾ これが世界初のPAN系炭素繊維研究として、のちに世界中の研究者に引用されることになる。

ところが、進藤は外国特許を出願しなかった。外国でPAN系炭素繊維の基本特許を取得し

(10) 進藤昭男「炭素繊維」、『高分子』42巻1号、1993年、41～42頁。

(11) 前処理は、安定化、耐炎化処理、予備酸化処理などもよぶ。PAN繊維を酸化処理すると耐炎性の繊維ができることについては、すでに報告されており特許も出願されていた。デュポン社のHoutzは、耐炎化処理したPAN繊維について、十分に強くてしなやかだが、織物にするにはもろいと記している(R. C. Houtz, “Orlon Acrylic Fiber: Chemistry and Properties”, *Textile Research Journal*, Vol.20, 1950, pp.786～801)。さらにデュポン社のW.K.Wilkinsonは、織物にできる耐炎化PAN繊維の製法について、塩化ビニリデンなどのハロゲン化物を共重合させていないPAN繊維を事前に延伸処理してから酸化する方法を開発し、1957年に特許を出願している(US Patent 3,027,222, “Fiberproof Acrylonitrile Copolymers”)。しかし、彼らは酸化処理したPAN繊維を焼成して炭素繊維にはしなかった。

(12) 特公昭37-4405。

(13) 1959年10月19日、化学関係学協会連合秋季研究発表大会。

(14) 進藤昭男「黒鉛繊維の性質」、『窯業協会誌』69巻10号、1961年、C195～C199頁、進藤昭男「炭素繊維の研究I・II」、『大阪工業技術試験所季報』12巻2号、1961年、110～118頁および119～122頁、進藤昭男「黒鉛繊維」、『高分子』11巻11号、1962年、11～14頁。

(15) Shindo, A., “Studies on Graphite Fiber”, *Report of the Governmental Industrial Research Insutitute, Osaka*, No.317, 1961.

たのは、進藤の最初の学会発表を聞いて研究を開始し⁽¹⁶⁾、1961年に特許を出願した東海電極製造(現、東海カーボン)⁽¹⁷⁾であった。63年になってから進藤も外国特許を出願するが、すでに優先権主張の期限が過ぎていた。しかもその外国特許の出願は、たまたま大阪工業技術試験所を見学してきたイタリアのモンテカチーニ社の人にうながされて、ようやくおこなったのだ⁽¹⁸⁾。「なにか工業化につながるような研究」をめざしていた進藤がみずからの研究の国際的価値に気づくまでには時間がかかった。

2. 初期の製品化の試み

開発された炭素繊維は、すぐに製品化のための研究に移された。最初に炭素繊維の生産に乗り出したのは日本カーボンであった。進藤の上司であった仙石正が1960年に大阪工業技術試験所を退官したあと日本カーボンに籍を置いていたつながりもあった。

日本カーボンは1960年6月に大阪工業技術試験所と受託研究契約をむすび、約半年間、研究員を大阪に派遣して炭素繊維製造の技術指導を受けたあと、61年4月には通産省の工業化試験研究の指定を得て、製造試験をおこな⁽¹⁹⁾った。1年間の工業化研究の結果、引張強度1GPa、引張弾性率100GPaの炭素繊維(図-1)を製造できるようになった日本カーボンは、月産500kg⁽²⁰⁾のパイロットプラントを完成させて、62年に「カーボロン」という製品名で炭素繊維を発売する。

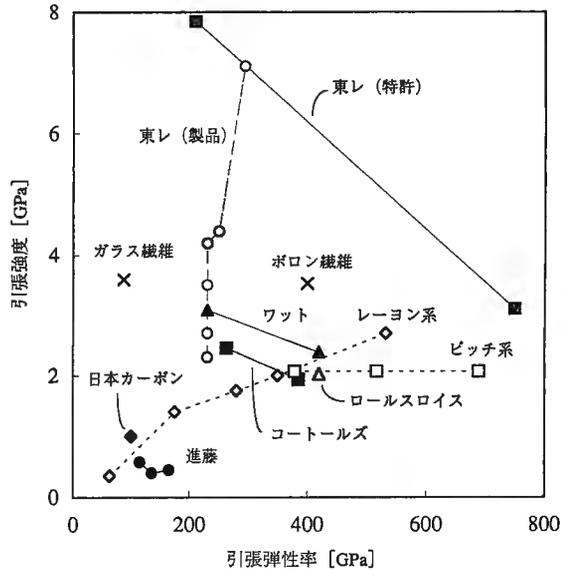


図-1 炭素繊維の高性能化経路

(注) レーヨン系、ビッチ系はUCC社の値。おもに時期により測定方法にちがいがあがるが、おおよその経過は確認できる。
(出所) レーヨン系は『窯業協会誌』71巻、1964年、C184頁、F. Glasso, *High Modulus Fibers and Composites*, 1969, p.54, および G. Lubin, *Handbook of Composites*, 1982, p.226。進藤はShindo『大阪工業技術試験所報告』317号、1961年、43、46頁。ワットはNature, vol.213, pp.690-691。コートールズはGlasso, *op. cit.*。ロールスロイスは『工業材料とその開発I』(別冊化学工業)、1971年、130頁。東レ(特許)はUS Patent 1,110,791。東レ(高強度品)は森田健一『炭素繊維産業』近代編集社、1984年、104頁、山田恵彦『カーボンファイバの化学』内田老鶴圃、1995年、42頁、および鳥村昭治『カーボンファイバ』オーム社、1984年、212頁。ビッチ系はG. Lubin, *op. cit.*。ガラス繊維とボロン繊維は森田、前掲、25、33頁。

(16) 進藤、前掲書(注2)。PAN系炭素繊維の外国特許取得について東海電極側の記述は見あたらない。たとえば、特許出願当時に東海電極の研究課長をしていて、ガラス状炭素繊維の開発もおこなった山田恵彦は、その著書『カーボンファイバの科学』(内田老鶴圃、1995年)において、ガラス状炭素繊維の開発については記述しているにもかかわらず、PAN系炭素繊維の開発過程や外国特許の取得についてはまったく触れていない。社史においても同様である。

(17) 1960年出願のBritish Patent 911,542, "Improvement in or relating to the Manufacture of Heat Resistant and Corrosion Resistant Polyacrylonitrile Fibres". PAN系炭素繊維研究の起点を東海電極の研究であるとする記述も存在する。たとえば、G. Lubin ed. *Handbook of Composites*, New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1982, pp.198-199。

(18) 進藤からの聞き取り(1997年1月21日)および、進藤、前掲書(注2)。

(19) 日本カーボン株式会社『日本カーボン50年史』1967年、154頁。

(20) 『日経産業新聞』1976年12月15日。

この「カーボン」が、製品化されたものとしては日本初の炭素繊維であり、同時に世界初のPAN系炭素繊維となった。日本カーボンのほかにも、松下電器産業、東海電極製造、日東紡績が大阪工業技術試験所から特許権の実施許諾を受けて、製品化を試みている⁽²¹⁾。

しかし、この時期の製品化の試みはおおむね低調に終わった。日本カーボンでは、「コストがキロ当たり3-5万円と高い上に、ユーザーの方でも何に使えばいいのかわからないこともあって、販売活動はイバラの道だった⁽²²⁾」という。62年11月から翌年4月までの売り上げは、37、8万円にしかならなかった⁽²³⁾。

日東紡績の場合、63年に開発に成功したとされるが、その後、PAN系炭素繊維が製品化された様子はなく、レーヨンを耐炎処理しただけの安価な耐炎繊維を発売している。東海電極製造は、64年に「サーモロン」という商品名で発売したが、その販売について社史にも記述はない⁽²⁴⁾。

当時の炭素繊維は、のちに「鉄よりも強く、アルミニウムより軽い」といわれ複合材料の強化材として利用される炭素繊維と同じ製品とみなすことはできない。「カーボン」がめざした用途は、石油ストーブの芯、電熱布、静電気防止材、パッキングであった⁽²⁶⁾。この時期、炭素繊維に期待されていた性能は、従来の炭素製品にはない柔軟性であった。

柔軟な炭素製品としての製品化は、アメリカのレーヨン系炭素繊維についても同様である。カーボン・ウール社が発売したレーヨンを1000℃までの温度で炭素化させた炭素繊維の用途は、断熱材、フィルター、吸着剤であった⁽²⁷⁾。その後、UCC社系のナショナル・カーボン社につづいて、HITCO社、3M社、グレート・レイク・カーボン社、カーボランダム社も、炭素化糸や黒鉛化糸を発売した。しかし、プラスチック補強材として用いるには強度が弱く、またコストは1ポンド当たり25~38ドルときわめて高かった⁽²⁸⁾。用途として主にめざされたのは、ロケットが大気圏に突入する際に生じる熱を断熱するためのアブレーション材である。炭素繊維に期待されていた性能は、強度ではなく耐熱性であった。

したがって、日本の各社が既存の炭素製品に柔軟性をプラスした製品としてしか炭素繊維を

(21) 大阪工業技術試験所、前掲書(注4)、126~127頁。

(22) 『日経産業新聞』前掲、(注20)。

(23) 『日経産業新聞』1976年12月18日。

(24) 日東紡績株式会社『日東紡半世紀の歩み』1979年、92頁。ただし、研究は精力的に継続されていて、日東紡績繊維研究所の宮道一夫らは「ポリアクリロニトリル繊維の炭素化に関する研究」と題する9編の論文を1965年から67年にかけて発表している。『繊維学会誌』21巻12号、1965年、635~642頁、同22巻1号、1966年、24~33頁、同22巻12号、1966年、538~551頁、同23巻1号、1967年、36~39頁、同23巻5号、1967年、239~245頁、同23巻7号、1967年、342~347頁。

(25) 東海カーボン株式会社『東海カーボン七十五年史』1993年、269~270頁。

(26) 日本カーボン、前掲書(注19)、220頁。

(27) Roger Bacon, "Carbon Fibers from Rayon Precursors" in *Chemistry and Physics of Carbon*, ed. by P. L. Walker, Jr. and Peter A. Throver, New York, Marcel Dekker, Inc., 1973, pp.6~7. アメリカでの炭素繊維製造について松井醇一(「炭素繊維の話—その2」、『強化プラスチック』43巻6号、1997年、214~218頁)は、カーボン・ウール社のライセンサーである Barnebey-Cheney 社が1957年に最初に炭素繊維のトウ、マット、綿状製品を製造販売したとしているが、詳細は不明である。

(28) D. L. Schmidt and W. C. Jones, "Carbon-base Fiber Reinforced Plastics", *Chemical Engineering Progress*, Vol.58, No.10, 1962, pp.42~50.

とらえられなかったのは、仕方のないことであった。進藤自身も、炭素繊維の用途としてプラスチック補強材を意識していたわけではなく、特許や論文において炭素繊維の特徴として強調していたのは糸や布として利用できる柔軟性であった。化学的関心もあって、その後、進藤の研究は機械的性質を高める方向にではなく、原料にポリビニルアルコールやレーヨンを用いた炭素繊維の研究へと向かう⁽²⁹⁾。

その間にアメリカやイギリスでは、航空宇宙分野での利用をめざして、炭素繊維の機械的性質を高めるための高性能化が追求されていた。炭素繊維が、すでに利用されていたポロン繊維やガラス繊維のような複合材料の強化材として具体化するのには、UCC社が高弾性品を開発した1965年からである。UCC社によるレーヨン系炭素繊維の高性能化の方法は、緊張処理であった。緊張処理とは、加熱されて縮もうとする繊維を軸方向にひっぱることで結晶の配向度を高め、弾性率や引張強度を向上させる処理である。合成繊維の製造において一般におこなわれていた緊張処理(あるいは延伸処理)を、炭素繊維にも適用したことになる。これによりレーヨン系炭素繊維の機械的性質は、一挙に進藤のPAN系炭素繊維を上まわった(図-1)。複合材料の強化材としての利用がひらけると同時に、炭素繊維の性能として柔軟性ではなく堅さが求められるようになった。

堅い炭素繊維が求められていることを進藤が知るのには、65年に進藤の研究を調査しにきたアメリカ空軍材料研究所のポステルネク(Postelnek)⁽³⁰⁾大佐の発言を聞いたときであった。

(ポステルネクに試料を手渡すと)焼成した試料を取り出したときに我々がやるように、彼はフィラメント1本1本を指にはさんで両手で引っ張りながら「ストロング、ストロング」といっていた。その当時、私はまだ炭素繊維はもっとしなやかなものでなければと思っていました。しかし、彼は堅い方が良いのだといった。弾性率の高いことが炭素繊維の利点であることをその時知った。

また、彼が炭素繊維強化プラスチックというものはじめて手にしたのは、ポステルネク大佐⁽³¹⁾が帰国後におくってくれたものであった。

3. イギリスでの高性能化研究

進藤の研究成果が世界に知られるのは、彼がPAN系炭素繊維を開発してから4年後のことである。進藤は63年夏にアメリカで開催された第6回アメリカ炭素会議(American Carbon Conference)に出席し、“On the Carbonization of Polyacrylonitrile Fiber”と題した報告をおこなう。61年に『大阪工業技術試験所報告』に英文で書いていた学位論文の前半部分にあたる炭素化の過程についての報告であった。進藤の報告を伝え聞いたイギリスのRAE(Royal

(29) 特公昭45-31707「炭素繊維を製造する方法」やShindo, A., et al., “Carbon Fibers from Cellulose Fibers”, *Applied Polymer Symposia*, No.9, 1969, p.271.

(30) 進藤, 前掲書(注2)。

(31) 同上。

Aircraft Establishment, 王立航空研究所)が、同年秋に PAN 系炭素繊維の改良研究を開始する⁽³²⁾。

RAE の研究の目標は、はじめから航空機部材に用いる複合材料の強化材の開発にあった。RAE のワット (Watt) らは、研究を開始して半年後の64年4月に、前処理工程での緊張処理法を開発した⁽³³⁾。UCC 社がレーヨン系炭素繊維に適用したのと同じ方法を、同じ年に PAN 系炭素繊維にも適用して、高性能化させたことになる。

1966年から研究成果を発表したワットらの PAN 系炭素繊維は、引張強度と弾性率において進藤の PAN 系炭素繊維、さらには前年に UCC 社が生産を開始したレーヨンの高性能炭素繊維を上回っていた⁽³⁴⁾。このことからワットらは、進藤のものとは異なる「高弾性、高強度の炭素繊維を作る新しい技術」を独自開発したと主張した⁽³⁵⁾。

進藤もワットらのとほとんどかわらない方法で、緊張処理をほどこしていた⁽³⁶⁾。

……炭素繊維は堅い繊維なので、屈曲していると引っ張りに弱くなるので、フィラメントをできるだけ真っすぐにするために、PAN 繊維を針金の四角いフレームに縮みしろをある程度見込んで平行に巻きつけ、これを空気中で加熱して黒色化させた。

(略)

……前処理過程の緊張は特許というよりもむしろノウハウという考えであった。そのため、前処理過程の緊張処理については、最初の報告に意識的に緊張を明記することなく、「フィラメントが真っすぐなるように調整した」と記述するにとどめた。その記述に、「tensionによって」と加えていれば Watt らの出願特許はどのようになっていたであろうか。進藤が前処理段階で緊張を与えたのは、試料を直線状にするためであった。海外にひろく紹介された英文の論文“Studies on Graphite Fiber”には、「引張り強度を正確に測定するため」と書かれている⁽³⁷⁾。複合材料の強化材として用いるために炭素繊維の配向度を高め引張強度と弾性率を向上させることをめざしたワットらと、柔軟性を炭素繊維の特徴だと考えていた進藤とでは、同様の方法に対してそのとらえ方にちがいが生じるのは当然であろう。その後もワット

(32) A.H.Cottrell “Introductory remarks”, *Proc. Roy. Soc. London*, A319, 1970, pp. 3～4 は、RAE の研究が1963年の Royal Society での Discussion Meeting をきっかけに開始されたと記している。これに対し、『大阪工業技術試験所六十史』1978年、62～63頁、および、進藤の前掲書(注2)や「PAN 系炭素繊維の開発動向」『日本複合材料学会誌』8巻3号、1982年、79～85頁などでは、RAE の PAN 系炭素繊維の研究は、進藤のアメリカでの報告をきっかけとして1963年秋に開始されたとしている。松井(「炭素繊維の話—その3」、『強化プラスチック』43巻8号、1997年、32～36頁)は、ワットらの特許に記載された実施例について検討を加え、進藤の報告を聞いたイギリスの参加者がワットらに伝えた可能性が高いと推察している。

(33) British Patent 1,110,791, “The Production of Carbon Fibres” および US Patent 3,412,062, “Production of Carbon Fibres and Compositions Containing Said Fibres”.

(34) W. Watt, L. N. Phillips and W. Johnson, “High-Strength High-Modulus Carbon Fibres”, *The Engineering*, No.221, 1966, pp.815～816 および R. Moreton, W. Watt and W. Johnson, “Carbon Fibres of High Strength and High Breaking Strain”, *Nature*, Vol.213, 1967, pp.690～691.

(35) W. Watt and W. Johnson, “New Materials Make Their Mark”, *Nature*, Vol.220, 1968, p.835.

(36) 進藤, 前掲書(注2)。

(37) 進藤, 前掲書(注15), 5頁。

らは、緊張処理法の決定的役割を強調しつづけ、炭素繊維の機械的性質に与える緊張処理の影響について詳しく分析を進めた⁽³⁸⁾。

ワットらの成果を受けて、AERE (Atomic Energy Research Establishment, 原子力エネルギー研究機構) や、繊維メーカーのコートールズ社、炭素メーカーのモルガナイト社を加えて、国家的プロジェクトとして炭素繊維の開発をいそいだ。RAEとは別に、ロールスロイス社も独自にPAN系炭素繊維の開発を進めていた⁽³⁹⁾。各社が製品化した炭素繊維は、おおよそワットらの測定値をなぞるような機械的性質を示している(図-1)。

日本での高性能化の研究は、アメリカからの製造依頼をとおして炭素繊維メーカーで開始された。日本カーボンは65年に、アメリカ空軍の炭素繊維採用の意向を受けたボーイング社から、国際電話で高性能炭素繊維の製造可能性についてたずねられる。「日本カーボンにとっては寝耳に水のことだった⁽⁴⁰⁾」が、イエスと答えると、「その一週間後にはボーイング社の技術者が飛んで来た」という。

開発は容易ではなかった。まずぶつかった問題は、炭素繊維生産に適したPAN繊維の入手であった。市販の衣料用PAN繊維(アクリル繊維)には、繊維の柔軟性と染色性を高めるためにアクリル酸メチルなどの共重合体が5~15%含まれている。従来の汎用炭素繊維の製造には衣料用でもよかったのだが、高性能化のためにはアクリロニトリル95%以上の高純度PAN繊維が必要とみられた。しかし、需要の少ない炭素繊維用のためだけに高純度のPAN繊維を作ってくれるメーカーはなかった。仕方なく衣料用PAN繊維を用いることにして、日本カーボンは68年に研究所にプロジェクトチームを作り研究を開始する。原糸には、満足する純度ではなかったが、安定供給を確約してくれた旭化成の「ピューロン」をもちいた。

もうひとつの問題は、RAE特許を侵害せずに前処理と焼成をおこなう方法であった。しかも、焼成のプロである炭素メーカーにとっても、繊維の緊張処理の経験はなかった。当時の研究担当者は、「技術的には繊維の延伸と同じで“糸屋”にはたやすいことなのだろうが、“炭屋”には難しいこと⁽⁴¹⁾であった」と述べている。

焼成雰囲気工夫するなどして、日本カーボンが高弾性炭素繊維「カーボロンZ-1」を発売したのは69年であった。東海電極製造も、66~68年にアメリカ空軍委託研究として炭素繊維の高性能化の研究をおこない、68年末に高強度炭素繊維「サーモロンS」⁽⁴²⁾を発売している。

こうして日本の炭素メーカーもイギリスのあとを追いかけた。しかし、高純度PAN繊維の

(38) W. Watt and W. Johnson, "The Effect of Length Changes during the Oxidation of Polyacrylonitrile Fibers on the Young's Modulus of Carbon Fibers", *Applied Polymer Symposia*, No.9, 1969, pp.215~227.

(39) A. E. Standage and R. Prescott, "High Elastic Modulus Carbon Fibre", *Nature*, Vol.211, 1966, p.169.

(40) 『日経産業新聞』前掲書、(注20)。

(41) 同上。

(42) 東海カーボン株式会社『東海カーボン65年史』1983年、252頁。

入手の困難は、炭素メーカーにとって炭素繊維開発の困難の手始めでしかなかった。ワットらが強調した緊張処理の効果は、衣料用 PAN 繊維（アクリル繊維）を用いた場合にしか確認できないことが、その後の研究によって明らかにされている。⁽⁴³⁾ PAN 系炭素繊維の高性能化の焦点が、衣料用 PAN 繊維の緊張処理から、炭素繊維用 PAN 繊維の開発へと移行しはじめると、炭素メーカーの困難はさらに深まることになる。炭素繊維用 PAN 繊維は、イギリスが緊張処理の効果を前面に押し出して、国家的プロジェクトのもとで炭素繊維の実用化をいそぎ、日本の炭素メーカーがそれを追走するまさにその時に、炭素繊維の開発を意図していない日本での研究から生まれた。

4. 東レの参入経路

東レの基礎研究所でおこなわれていたナイロン66の新原料開発のための研究が、炭素繊維の開発を新しい段階に導くことになった。東レは1956年に滋賀に中央研究所を開設していた。そこでは不十分だとされた基礎研究の充実を目的として、1962年に鎌倉に開設されたのが基礎研究所である。中央研究所での研究が既知の合成繊維の工業化をめざしたのに対し、基礎研究所では新しい合成繊維や合成物質およびその新合成法の発見を目的とした。⁽⁴⁴⁾

ナイロンの主流であるナイロン66はデュポン社によって1938年に開発された。デュポン社によるナイロン開発の刺激を受け、東レが41年に独自開発したのはナイロン6である。ナイロン6の本格生産を開始するにあたって、東レは51年にデュポン社と技術提携をかわした。その技術提携により東レは、ナイロン66を生産する権利を手に入れていたが、設備費や原料費の問題からしばらくはナイロン66を生産しなかった。⁽⁴⁵⁾

ナイロン66は、アジピン酸とヘキサメチレンジアミンの縮重合反応によってつくられる（図-2）。従来この2原料は、コールタールから得られるフェノールなどを出発原料として、まずアジピン酸を合成し、さらにそれを脱水アミノ化してヘキサメチレンジアミンを合成する経路で作られていた。石油化学工業の発展とともに原料転換がはかられ、59年にはデュポン社がブタジエンからアジポニトリルを経由して合成する方法を工業化する。ついで、63年にはモンサント社がアクリロニトリルからのアジポニトリルの生産を開始した。⁽⁴⁶⁾ PAN 繊維の原料であるアクリロニトリルは、60年のソハイオ法の開発によって安価な入手が可能となり、石油化学工業の中間材料として重要な位置を占めはじめていた。

東レがナイロン66の生産を開始するのは65年のことである。カプロラクタムからヘキサメチレンジアミンを合成する方法を独自に開発したのがきっかけとされる。しかし、もうひとつの

(43) 森田健一『炭素繊維産業』近代編集社、1984年、50頁。

(44) 東レ株式会社『東レ70年史』1997年、364～371頁。

(45) 同上、207頁。

(46) たとえばK. Weissmehl and H.-J. Arpe (向山光昭監訳)『工業有機化学』東京化学同人、1978年、236頁。

PAN系炭素繊維の開発(高松)

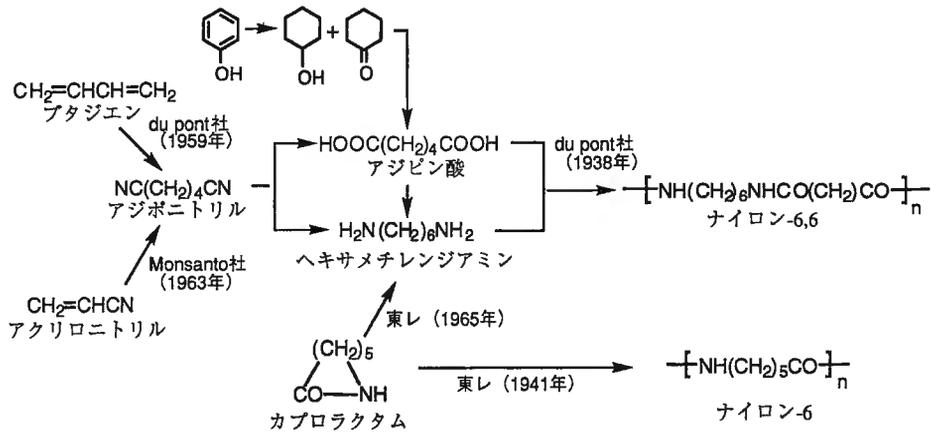


図-2 ナイロン原料の変遷

(出所) K. Weissermel and H.J. Apre (向山光昭訳)『工業有機化学』東京化学同人, 1978年, 234~238頁, および阿河利男ら『有機工業化学』朝倉書店, 1988年, 75~76頁, 81頁をもとに作成した。

原料であるアジピン酸は外部から購入した。⁽⁴⁷⁾

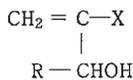
ナイロン66の製造が開始されてからも、基礎研究所の森田健一らはモンサント社とは異なる方法でアクリロニトリルからアジポニトリルを合成するための研究をおこなっていた。モンサント社が電気化学的方法をとったのに対し、触媒をもちいた化学的方法での合成が試みられたのである。結局、アジポニトリルは合成されず、この研究は失敗に終わる。しかしその過程で森田らは、ある種の有機燐化合物を触媒としてアクリロニトリルをアセトアルデヒドと反応させると、それまで知られていなかった新規化合物が生成されることを1966年に発見する。⁽⁴⁸⁾

すぐにこの新規化合物を利用するための研究がおこなわれた。新規化合物をまず利用しようとしたのは、アクリル繊維の吸水性を向上させることであった。新規化合物には親水性のある水酸基(-OH)があるので、アクリロニトリルと共重合させることにより、吸水性が向上することを期待したのであった。愛媛の繊維研究所で新規化合物を共重合させたアクリル繊維を紡糸して、1年間ぐらい開発が試みられるが、結局はものにならないことがわかる。

この新規化合物の利用をめざした研究は、アクリル繊維の吸水性向上の試みのほかにも十数項目についておこなわれた。⁽⁴⁹⁾ そのなかから、新規事業として飛躍していくことになるのが炭素

(47) 東レ, 前掲書(注44), 463, 858頁。この方法はコストがかかり、結局91年にはモンサント社からアジピン酸・ヘキサメチレンジアミン塩を購入する契約を結ぶことになる。

(48) Ken-ichi Morita, Zennosuke Suzuki and Hiromitsu Hirose, "A Tertiary Phosphine-catalyzed Reaction of Acrylic Compounds with Aldehydes", *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, Vol.41, No.11, 1968, p.2815. 得られたヒドロキシメチルアクリル化合物は、下図のRとして水素やメチル基, エチル基などの脂肪族基, および芳香族基, Xとしてシアノ基, カルボン酸エステルが入る化合物群である。



(49) 森田健一「炭素繊維の研究開発」, 『高分子』28巻9号, 1979年, 651頁。

繊維である。

新規化合物を共重合させた PAN に関する最初の特許「耐熱性重合体の製造法」が出願されたのは、68年2月である。⁽⁵⁰⁾ 共重合体を熱処理して得られる耐熱性重合体の用途として記載されているのは、耐熱性フィルム、炭素化繊維、各種反応用触媒（例えば脱水素、脱水、過酸化水素、およびギ酸の分解、自動酸化、ヒドラジンおよび酸化窒素の分解）、自動車排気ガス浄化用触媒、感光樹脂等である。炭素繊維も用途のなかに含まれてはいるが、基礎研究所では糸が作れなかったため、この段階ではフィルムについてだけの実験であった。また、空気中で200℃まで加熱して得られた耐炎フィルムについての特許であり、炭素化にはいたっていない。

しかし特許のなかで森田らは、新規化合物に含まれる水酸基が重合開始点となってすみやかに耐熱性高分子が生成することを論じている。これを炭素繊維製造の前処理工程に当てはめれば、新規化合物を共重合させた PAN 繊維をもちいると、前処理の時間が短縮されることを意味する。

そのころ東レは、日本カーボンと東海電極製造に炭素繊維の研究用に PAN 繊維を提供していた。森田らが新規化合物の利用法をさぐっていたときは、2社がちょうど炭素繊維の高性能化をめざして、炭素繊維製造に適した原糸を求めていたときである。森田らは愛媛工場に頼み、新規化合物を含む PAN を糸にしてもらい、2社に持ち込む。東海電極から炭素繊維用原糸としての高い評価が返ってきた上に、共同で特許を出願する提案もあったという。⁽⁵¹⁾

炭素繊維を製造する炭素メーカーからの高い評価を得て、森田らは逆に社内での企業化をめざすことにする。60年代末は、合成繊維産業の成熟化にともない、非繊維部門への多角化が強く意識されはじめたときであった。炭素メーカーからの評価が東レの研究者を動かしたことに、進藤の研究にはじまり日本の炭素メーカーでおこなわれていた炭素繊維製造が、その後の合成繊維メーカーでの発展に果たした役割を確認することができる。同時にそれは、炭素繊維製造の中心が炭素メーカーから合成繊維メーカーへと移行しはじめる瞬間でもあった。

それまで原料合成の研究をしていた基礎研究所の有機合成グループ6、7人全員が、テーマを炭素繊維に変更して、その焼成と評価にあたった。⁽⁵²⁾ その結果、当時20数時間かかるとされていた酸化工程が数時間に減少し、しかも、得られた炭素繊維の機械的特性が大幅に向上するという重大な事実を発見する。炭素繊維に関する森田らの最初の特許「炭素体の製造法」は、68年7月に出願された。⁽⁵³⁾ その後もつぎつぎと出願された特許からは、発見された新規化合物群のうち炭素繊維の原糸に適したものが徹底的に調査されたようすがうかがえる。⁽⁵⁴⁾ 特許に記載され

(50) 特公昭46-35853。

(51) 森田健一氏からの聞き取り（1999年3月24日）。日本カーボンからは明確な返答はなかったという。前述のように、すでに旭化成の「ピューロン」の使用を決定したあとだったのかもしれない。

(52) 松井醇一「炭素繊維の話—その6」、『強化プラスチック』44巻1号、1998年、29～33頁。

(53) 特公昭48-16426。

(54) ほかに、新規化合物を用いた炭素繊維製造の特許（特公昭47-18901、特公昭47-22653、US Patent 3,632,798）のなかで、さまざまな化合物について炭素繊維の機械的性質の比較がなされている。

た機械的性質は、炭素化糸（高強度炭素繊維）と黒鉛化糸（高弾性炭素繊維）の両方において、従来のワットらの値をおおきく上まわっていた（図-1）。

森田は、社内の会議で炭素繊維の事業化を主張する。最初は、需要が乏しいことを理由に消極的意見が大半を占めていた。しかし、69年5月には工業化研究をスタートさせることになり、開発研究所長の伊藤昌壽（のち社長、会長）をリーダーとした全社的なプロジェクトがスタートする。プロジェクトは、基礎研、繊維研、工務研、開発研、愛媛工場の研究者・技術者50名を中心として、総勢約200名に達するおおがかりなものとなった。伊藤は当時を振り返り、「相当ゴリ押しをした⁽⁵⁷⁾と繰り返し述べている。しかし、東レが炭素繊維に参入しようとしたこの時期は、ちょうど炭素繊維に猛烈な追い風が吹いていたときであった。

5. イギリスでの熱狂

60年代末には、「材料革命」がさかんに議論されていた。そのなかでも急速に注目を集めていたのが、「材料革命の主役⁽⁵⁸⁾」、「宇宙時代の花形材料⁽⁵⁹⁾」とされた炭素繊維である。

ブームの火付け役は、PAN系炭素繊維の複合材料への利用をいそぐイギリスであった。1969年3月、イギリス下院科学技術特別委員会（Select Committee of the House of Commons on Science and Technology）は、「大規模な炭素繊維製造プラントの建設を急ぐことは、国家にとってきわめて重要である⁽⁶⁰⁾」とする勧告を発表し、コートールズ社、モルガナイト社、ロールスロイス社が3社共同で年産450トンの工場を建設するよう訴えた。イギリスの科学雑誌Natureも、「イギリスにとって世俗的だが切迫した問題は、この発明をうまく利用する方法を見いだして、国の経済に最大限の利益をもたらすことである⁽⁶¹⁾」と主張して、本格的工業化をあおっている。イギリスは、炭素繊維という「驚異の製品への熱狂⁽⁶²⁾」のなかにあった。

(55) 森田, 前掲(注51)。

(56) 森田, 前掲書(注49)および松井, 前掲書(注52)。

(57) 『日経産業新聞』1990年1月17日, および伊藤昌壽「ナイロン, 炭素繊維, 人工皮革の開発」(通商産業省『産業技術の歴史の継承と未来への創造』通商産業調査会, 1992年) 82~86頁。

(58) 『日本経済新聞』1969年5月12日。

(59) 『エコノミスト』1969年11月11日号, 9~10頁。

(60) *Economist*, Mar. 15, 1969, pp.70~71.

(61) *Nature*, Vol.221, 1969, pp.987~988.

(62) *Economist*, op. cit. イギリスでの熱狂は、手に入れた世界でのリードを死守したいがための焦りをたぶんに含んでいた。たとえば、下院科学技術特別委員会が各社に早急の工場建設を望んだのは、アメリカのキャッチアップをおそれたことであった。コートールズ社とモルガナイト社は、アメリカ企業と技術提携してアメリカ市場への進出をはかっていた。モルガナイト社はホイットカー社と合弁企業を設立してアメリカで炭素繊維の製造をおこなう提携をし、コートールズ社はハーキュリーズ社に自社製炭素繊維の独占的販売権を認め、将来それを製造する選択権も与えていた。この技術提携によってアメリカに技術が流出することをおそれた下院科学技術特別委員会は、RAE特許を管理するNRDC(National Research Development Corporation)に憂慮を示した。これに対してNRDCは、パイ・アメリカン法が発令されれば独占できないこと、アメリカが特許をすり抜ける製法を見つけるだろうこと、さらには特許権を侵害されてもイギリスにそれをとがめる力がないだろうことを上げて、技術提携によってアメリカ企業から技術知識のフィードバックを得た方が有利であると主張した。イギリスが、国家的利益の見地で炭素繊維を見つめ、その強敵としていかにアメリカをおそれていたかがわかる。日本はノーマークであり、むしろRAE特許侵害者として賠償請求の相手とみなされる程度であった(*Nature*, Vol.226, 1970, p.394)。

イギリスのなかでも、実用化の点で先行していたのがロールスロイス社である。67年にロールスロイス社は、自社製の炭素繊維強化プラスチック (CFRP) を開発中のジェット・エンジンに採用することを発表した。⁽⁶³⁾ 68年3月にはRB 211エンジンのロッキード社エアバス・トライスター1011への搭載が決まる。炭素繊維を採用したイギリスのエンジンが、アメリカのGE社、P & W社との受注競争に勝ってアメリカの大型旅客機に採用されたことは、「技術の勝利」として日本でも報じられた。⁽⁶⁴⁾

その間、ロールスロイス社はエンジン開発を急ぐために、BOAC社(英国航空の前身)の協力を得て既存の自社製コンウェイ・エンジン20基をCFRPに交換した。このCFRPを用いたエンジンは67年中に完成し、68年4月に型式証明を取得した上で、5月にVC10機のエンジン4基のうち1基に搭載されて初飛行し、実際にアフリカ航路に就航した。⁽⁶⁵⁾

さらに、70年に大阪で開催された万国博覧会では、イギリスは炭素繊維を自国が発明した世紀の材料として大々的に宣伝した。会場にはRB 211エンジンが展示され、PAN繊維から炭素繊維をへて複合材料のファンブレードを作るまでの工程が映写された。日本の炭素繊維関係者も当然この展示を目撃している。たとえば松井は、「(展示されたRB 211エンジンを) 驚異と興味をもって眺めた記憶がある」という。⁽⁶⁶⁾

その間、アメリカではレーヨン系炭素繊維の高性能化が追求されていた。UCC社は65年のソーネル25につづいて、70年までにソーネル40、50、75とつぎつぎと高弾性品を発売し、弾性率においてPAN系を追いぬいた(図-1)。カーボランダム社、ヒトコ社もレーヨン系の高弾性品を開発している。この時点で、レーヨン系とPAN系の開発競争の行方は予測できなかった。

高弾性化にともない、試験段階ながら航空機での使用計画がすすみ、航空宇宙分野をリードするアメリカでの炭素繊維利用の本格化が現実のものとなりつつあった。「近い将来、航空機全体の金属が炭素繊維複合体に置き換えられる」というアメリカのノースロップ社の発表が、日本の炭素繊維に関する記述に繰り返し登場した。⁽⁶⁷⁾

アメリカでもPAN系の試みが開始されていた。ホイタッカー社がイギリスのモルガナイト社と合弁企業を設立して炭素繊維製造をおこなう提携をむすび、ハーキュリーズ社はコートールド社製炭素繊維の独占的販売権と将来の製造権を獲得していた。UCC社はすでに独自に研究を開始していたが、⁽⁶⁸⁾ 高性能炭素繊維を得ることができないでいた。

(63) 神保喜一「ロールス・ロイスの“黒いブレード”」、『科学朝日』1971年6月号、45～50頁。

(64) たとえば、『週刊東洋経済』1968年4月20日号、44～45頁。

(65) R. M. Gill, *Carbon Fibres in Composite Materials*, London, Iliffe Books, 1972, pp.168～175.

(66) 松井醇一「炭素繊維の話—その3」、『強化プラスチック』43巻8号、1997年、32～36頁。ほかに日東紡績の宮道一夫らも、大阪万博イギリス館で映写されていたロールスロイス社のパッチ式炭素繊維製造法について触れている(宮道一夫、片山将道「アクリル繊維を原料とするカーボン繊維」、『化学増刊—繊維の形成と構造(Ⅱ)』1971年、241～260頁)。

(67) たとえば、友枝宗則「炭素繊維—その特性と製品開発—」、『工業材料』17巻9号、1969年、84～92頁、および「構造化材としての炭素繊維展望」、『化学と工業』23巻2号、1970年、243頁。

(68) British Patent 1,213,387 およびFrench pat. 1,579,198, “Procédé fabrication de textiles de carbone à partir de textiles à base de polyacrylonitrile”.

そんなときに UCC 社は、東レの炭素繊維用原糸について知る。69年1月にアメリカで開かれた高分子関係の会議に出席した東レの米国駐在員は、UCC 社の研究者とかわした雑談のなかで、UCC 社が自社製のアクリル繊維から高性能炭素繊維を作れないでいることを聞く。そこで、東レのアクリル繊維技術について話したところ UCC 社の研究者が関心を示してきたという。この話を聞いた伊藤は、藤吉副社長が UCC カナダ社にナイロン工場の技術診断の回答を持って行くのに同行し、ニューヨークの UCC 社を訪ねた。炭素繊維に共同で取り組むことを持ちかけると、話はすぐにまとまった。その後、東レがサンプルを送ると、UCC 社が「飛びついてくる⁽⁶⁹⁾」。

日本の炭素メーカーにつづいて、炭素繊維のパイオニアであったアメリカの UCC 社が東レの炭素繊維用 PAN 繊維を認めたのである。森田は、「最終的にはアメリカの UCC 社の評価が会社を動かした⁽⁷⁰⁾」という。

6. プロジェクトでの研究開発

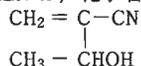
東レが炭素繊維用 PAN 繊維の共重合体として利用することになるのは、新規化合物のうち、東レが HEN と呼んだ化合物である⁽⁷¹⁾。しかし、HEN の利用だけで、東レが炭素繊維に参入したわけではない。69年に結成された大がかりなプロジェクトのなかで、炭素繊維製造に関してさまざまな研究がおこなわれた。

ひとつの事例として、前処理工程の方法についての徹底的検討を上げることができる。前処理には、進藤が発見し PAN 系炭素繊維の生産を可能にした酸化処理がもちいられていた。プロジェクトでは、酸化処理のかわりに、硫化ないしはニトロソ化することによって、前処理をより効率的にする研究がおこなわれた。硫化とニトロソ化についての特許は、69年10月から70年6月までの間につぎつぎと出願されている。結局、硫化法は後工程である炭素化工程の効率が上がらないために、またニトロソ化法はコストが高すぎるために実用化されることはなく、従来の酸化法を用いることになった⁽⁷²⁾。しかし、こうした研究をとおして、炭素繊維製造の化学的理解はふかまった⁽⁷³⁾。

(69) 松井, 前掲書(注52)および『日経産業新聞』1976年12月17日。

(70) 森田, 前掲(注51)。

(71) HEN は、化学名 2-(1-hydroxyethyl)acrylonitrile のことをいう。



(72) 二酸化硫黄中で前処理をおこなう硫化法については特公昭47-21906「高強力炭素繊維の製造法」、特公昭47-29932「炭素繊維の製造法」、特公昭47-36461「炭素体前駆繊維」、特公昭47-36462「高強力炭素繊維」、British Patent 1,297,670などがある。一酸化窒素中でおこなうニトロソ化については特公昭47-22659「炭素繊維の製造法」、特公昭47-36460「炭素体前駆繊維」、特公昭47-24974「炭素繊維の製造方法」、特公昭47-26977「高強力炭素繊維の製造方法」、British Patent 1,282,500などがある。ともに外国特許が取得されている様子からは、実用化の可能性を本気で検討したことがうかがえる。

(73) 森田, 前掲(注51)。

(74) 硫化法の検討をとおして、前処理工程のメカニズムを分析した論文として、Ken-ichi Morita, Hiroshi Miyachi and Tohru Hiramatsu, "Stabilization of Acrylic Fibers by Sulfur Atoms Mechanism of Stabilization", *Carbon*, Vol.19, 1981, pp.11~18がある。

焼成技術については、工務研究所で開発がすすめられた。69年7月には各工程ごとの処理炉がミニチュア・サイズで完成し、70年1月にバッチ式ベンチが稼働する。このバッチ式の設備によって、長さ1メートルの炭素繊維束100グラム程度が定常的に試作できるようになった。試作に成功すると、すぐにマーケティングが開始された。「(試作品を) 急遽編成された技術出身の営業部隊が直径5cmのガラス管に入れて大切そうに世界各地を歩き、市場開拓を開始した⁽⁷⁵⁾」という。そのマーケティングの結果、開発目標が黒鉛化糸(高弾性品)から炭素化糸(高強度品)へと変更されることになる。

……当初我々は出来るだけ高温処理を行い、引張り弾性率の高い糸、つまり黒鉛化糸を作ろうと、懸命に努力していた。……しかし、評価していただいたお客さんの反応では、確かに黒鉛化糸は弾性率が高いが、その分切断伸度が低く、毛羽が出易く使いづらいというもので、むしろ千数百度で処理したいいわゆる炭化糸が扱い易く興味があるというものであった⁽⁷⁶⁾。

こうした化学的検討、焼成技術の向上、マーケティングをへて1970年4月に締結されたのが、東レとUCC社とのクロスライセンス契約であった。東レは焼成技術を含む特殊アクリル繊維製造技術を提供し、UCC社は高温焼成技術に関するノウハウを提供することになる。

この技術提携については、「糸屋の東レには焼成技術がないので技術提携をした」というのが通説となっている。東レ自身もそう言いつけてきた。しかし、焼成技術のなかった東レにそっくりUCCの技術をもたらしたわけではない。UCC社からのノウハウ提供といっても、レーヨン系の実装置とPAN系の試験装置を見学しただけであった。レーヨン系とPAN系の製造技術の違いがあり、「参考になったことは少なかつた⁽⁷⁷⁾と思う」と当時の工務研究者は書いている。

以前、繊維研究所でタイヤコードの接着処理の研究をしていて、炭素繊維にプラスチックを浸させたプリプレグを製造するプロジェクトに加わった松井は、70年6月に成形加工技術習得のためにUCC社の研究所を訪問したときのことについて、次のように記している⁽⁷⁸⁾。

あちらもまだ研究の初期期であり、プリプレグ加工とコンジット成形工程は、成熟したタイヤコードやタイヤ産業に比べるときわめて幼稚であり、こんなものかという印象であった。焼成工程についても同様であり、そっくりそのまま使えるところは少なかった。

UCC社との技術提携は、UCC社規格の樹脂含浸ヤーン試験片の導入により性能試験が簡便になり技術開発をスピードアップさせたことや、UCC社の設備をみたことで得た自信など、

(75) 渡辺静男「炭素繊維“トレカ”の開発の頃」、『化学工学』58巻1号、1994年、24～27頁。

(76) 同上。

(77) たとえば、前掲書(注57)。

(78) 渡辺、前掲書(注75)。

(79) 松井、前掲書(注52)。プリプレグは、強化材繊維に樹脂を含浸させた成形材料。これを積層し、熱硬化させて複合材料を作る。

有形無形の技術的効果をもたらしたのは事実である⁽⁸⁰⁾。しかし東レがもっとも期待したのは、日本にはほとんど炭素繊維需要がなかった時代に、軍事用途を持つ UCC 社の販路を手に入れることだったのかもしれない。実際、東レが炭素繊維の生産を開始したとき、UCC 社の販路がおおきな役割を果たすことになる。

東レは、70年6月に工業技術院から進藤特許の実施許諾権を得て、月産1トン規模のパイロットプラント建設を決める。東レが炭素繊維の生産に乗り出そうとしていたとき、逆にイギリスでは国を挙げての炭素繊維への熱狂が急速に冷めはじめることになる。

7. 米英が遅れをとった過程

70年5月、年内にロッキード社のエアバスに搭載されるはずだったロールスロイス社のエンジン開発の遅れが伝えられた⁽⁸¹⁾。炭素繊維を用いたファンブレードに問題が生じたためである。試験的に使用していた VC 10機の飛行で、雨や砂によるエロージョンの問題が発生した。対応策としてステンレス・シートをブレード前縁部に組み込んだところ、鳥のような大きな異物を吸い込んだ際の衝撃に対して弱くなってしまった。そこで、薄いスチール・シートを前縁部に⁽⁸²⁾何枚も取りつけたが、今度は負荷を繰り返し与えた際の耐疲労性が低下した。結局、炭素繊維を用いた本格的ジェット・エンジンの誕生は断念され、RB 211エンジンのファンブレードは従来のチタン合金に置き換えられることになる。そのために、ロールスロイス社の開発費は予定をおおきく上まわった。

ロールスロイス社の経営不振が伝えられたのは70年11月である。政府が財政援助をおこなうが、翌年2月にロールスロイス社は倒産にいたる。倒産は、再設計された RB 211エンジンが⁽⁸³⁾試運転に入った翌日のことであった。倒産の原因には、契約獲得のための利益を無視した低価格での入札があったが、その背景には「炭素繊維を用いたタービン・ブレードの製造という⁽⁸⁴⁾キャンブルをおこなったロールスロイス社の技術的熱狂」があった。

ロールスロイス社は自動車部門を切り離した上で、エンジン部門を国有化する形で生き残った。RB 211エンジンの開発は、継続か停止かで米英間の政治問題にまで発展したが、イギリスが開発費の2億8800万ドルを負担することでロッキード社とのあいだで合意が成立して、⁽⁸⁵⁾継続されることになる。

しかし、RB 211エンジンを搭載したトライスター1011の開発は遅れ、ロッキード社も倒産の危機に瀕する。キャンセルがあいつぐなか、あらたな販路を開拓しようとしたロッキード社は、

(80) 松井、同上。

(81) たとえば、*Nature*, Vol.226, 1970, p.2.

(82) *Nature*, *Ibid.* および Gill, *op. cit.*, pp. 170~172.

(83) ビル・ガンストン(見森昭訳)『世界の航空エンジン—2 ガスタービン編』グランプリ出版、1996年、182頁。

(84) *Nature*, Vol.229, 1971, pp. 441~2.

(85) 『日本経済新聞』1971年3月31日。

日本で田中角栄首相や檜山廣丸紅社長らが逮捕される「ロッキード事件」を起こす。72年に檜山廣が田中角栄にトライスター購入を要請した際、「トライスターは英国ロールスロイス社のエンジンを使っています。トライスターの導入は英国にも貸しを作ることになり、米英に対し一石二鳥です」とすすめた⁽⁸⁶⁾とされる。

アメリカでは、UCC社のPAN系の炭素繊維製造はすすまなかった。すでに69年6月の第10回国際炭素会議において、レーヨン系に対するPAN系の優位が化学者の共通認識となりつつあった⁽⁸⁷⁾。その後、77年頃にはUCC社もレーヨン系の炭素繊維製造を中止することになる。東レとのクロスライセンス契約によって技術の入手も可能であったにもかかわらずUCC社がPAN系に即座に移行しなかったのは、原料が安価なピッチ系炭素繊維の開発をめざしたためであった⁽⁸⁸⁾。将来的にピッチ系に重点を移すまでのあいだ、基本特許を日本あるいはイギリスに押さえられているPAN系は東レに任せておき、必要になれば東レから技術を導入する方針をUCC社はとった⁽⁸⁹⁾。

UCC社は多数の研究者を投入してピッチ系の開発をいそいだ⁽⁹⁰⁾。75年にはピッチ系高弾性炭素繊維ソーネルP-55が発売され、その後もつぎつぎと高弾性品が開発されていく。しかし、ピッチ系は引張強度においてPAN系を上回ることができなかった(図-1)。

イギリスは、もっとも困難なジェット・エンジンでの炭素繊維利用を急ぎすぎた。アメリカは、市場が高弾性品から高強度品へと指向をかえはじめるなか、高弾性品を安価な原料から生産しようとしていた。その間に、東レがPAN系炭素繊維の生産を開始する。

8. 東レでの本格生産

東レ滋賀工場に月産1トンのパイロットプラントが稼働するのは1971年2月のことである⁽⁹¹⁾。同年7月に東レは炭素繊維の発売を発表する⁽⁹²⁾。主力の高強度品トレカT300の発売価格(キロ当たり9万5千円)は、当時の国際価格の半値であった。用途として、宇宙機器、航空機材料に加え、高層建築、プラント、タンクなどの構造材料やゴルフクラブシャフト、スキーなどのスポーツ用品が想定されていた。

(86) 現代司法研究記者グループ『ドキュメント—ロッキード事件』学陽書房、1979年、38頁。

(87) 友枝、前掲書、および石川敏功「カーボン繊維」、『化学増刊—繊維の形成と構造(Ⅱ)』1971年、224頁。

(88) UCC社のシンガーは、石油・石炭のタール状物質を乾留して得られるピッチを液晶状(メソフェーズ)にして高弾性炭素繊維を製造する方法を1970年に発見したとされる。そのときすでに群馬大学の大谷杉郎は同様の方法について内外で特許を出願していた。日本では大谷とシンガーの両方の特許が成立し、アメリカでは先発主義によりシンガー特許が成立したことについて、松井は疑問を投げかけている(松井醇一「炭素繊維の話—その4」、『強化プラスチック』43巻9号、1997年、37~41頁)。

(89) その後も、愛媛工場にUCC社の技術者が頻りに訪れている(森田、前掲(注51))。

(90) 森田は、東レのプロジェクトと同じ50人規模の技術者が投入されたと見ている(森田、前掲(注51))。

(91) パイロットプラントは当初、月産300kgで稼働した。月産1トンでの建設が決まっていたが、「とても最初から月産1トンは作れない」(渡辺、前掲書(注75))のために、公称能力を下げたスタートし、半年後に月産1トンに増設された。

(92) 『日本経済新聞』1971年7月28日。

発売当初の販売活動は困難をきわめた。社内ではカラスのような色をした炭素繊維のことを「クロー」とよんでいたが、真意は販売の苦勞を皮肉っていたという話や海外でトンのオーダーで売りさばくようにいわれヨーロッパ全域を歩き回るが、20kgしか注文を取れなかったという話が残されている。新規材料であるためにユーザーの理解を得ることの困難もあったが、それだけではなかった。発売当初は、用途開発のための準備がととのわず、しかも性能に問題があった。

東レが最初にスポーツ用品市場を開拓したのは釣竿である。最初はこのメーカーも、技術的興味は示すものの開発には乗ってこなかった。すでに実用化されていたガラス繊維をもちいた釣竿の場合には、織物状のガラス繊維に樹脂を含浸させたプリプレグで作られていた。ところが当時、炭素繊維では織物が作れなかった。繊維を一方向にそろえただけのプリプレグしか提供できなかったことが、釣具メーカーを躊躇させたのであった。⁽⁹⁵⁾

ようやくオリムピック釣具を口説き落として試作品づくりの共同研究に入る。まず炭素繊維強化プラスチックを用いることにしたのは、ガラス繊維だと柔らかすぎた穂先であった。ところが作ってみると、強度がガラス繊維より劣るものも混じり、「曲がる、折れる、割れる」の連続となった。そのとき、穂先だけでなく竿全体を炭素繊維で作ることを提案したのは釣具メーカーの方であった。炭素繊維の一方向プリプレグとガラス繊維の織物プリプレグを組み合わせてようやくできた鮎竿は、72年2月に釣具見本市に展示されて話題をさらう。鮎釣り解禁日に向けて受注も好調だった。しかし、量産をはじめると原因不明の事故が多発して、50本の限定販売でしのがなければならなかった。⁽⁹⁶⁾

パイロット・プラントでの操業は、「商品化にたえるような製造技術にはほど遠かった」。⁽⁹⁷⁾ 処理過程でよくケバが出たために、糸が切れやすくなり、性能もばらついた。おおきな需要がないにもかかわらず、滋賀工場には「販売サイドから矢のような催促が続いた」。⁽⁹⁸⁾

72年11月には、愛媛工場で月産5トンのセミワークス建設がはじまる。需要が明確でないなかでの5トン・プラント建設を決めたトップの英断が、東レ成功の鍵だとされてきた。⁽⁹⁹⁾ しかし、セミワークスの建設はパイロットプラントのたんなるスケールアップではなかった。

セミワークスが稼働する前に出願された特許からは、研究の中心が共重合体の検討や前処理の方法から、焼成技術を中心とした生産技術へと移行していったようすが確認できる。⁽¹⁰⁰⁾ こう

(93) 『日経産業新聞』、前掲書(注69)。

(94) 『日経産業新聞』1976年12月18日。

(95) のちには、釣竿やゴルフクラブのシャフトのようなパイプ形状のものには、一方向プリプレグの繊維方向を90°ずらして積層する方法が用いられるようになる。

(96) 『日経産業新聞』、前掲書(注94)、および松井、前掲書(注52)。

(97) 『日経産業新聞』、前掲書(注69)。

(98) 渡辺、前掲書(注75)。

(99) 森田、前掲書(注43)、17頁、『日経産業新聞』、前掲書(注57)および(注92)など。

(100) 72年に出願された特許には、つぎにみる高速炭化法など以外に、予備処理工程で発生するタールを除去する方法(特公昭50-34130)、延伸を2段階に分けておこなう方法(同51-24603)、炉内のローラの配置(同51-24004)などがある。

した生産技術についても、以前は基礎研究所に所属し有機合成をテーマとしていた研究者が当たった。彼らは、炭素繊維開発の進展およびそれともなう開発拠点の移動とともに、鎌倉の基礎研究所から滋賀の開発研究所へと移動したことになる。⁽¹⁰¹⁾ 彼らはその後、繊維研究所愛媛研究所へも移動している。

炭素繊維の生産性や性能を向上させるうえで重要だったのは、前処理工程と炭素化工程を高速化させる方法であった。炭素化工程では、分解されたガスがポリマー内を拡散して繊維の外に放出される。このとき温度の上昇が急激すぎると、気泡が膨張して繊維のなかに多数の微細な孔が生じ、性能が低下するため、従来は昇温速度を毎分1℃以下にする必要があるとされた。⁽¹⁰²⁾ ワットらの特許に記載された実施例では炭素化工程に24時間もかけている。⁽¹⁰³⁾ 新規化合物 HEN を共重合させた炭素繊維用 PAN 繊維を用いた場合でも数時間を要した炭素化工程について、森田らは機械的特性に影響を及ぼすのがおもに1000℃以上の温度勾配であることをみつけ、処理時間を大幅に短縮させることに成功する。⁽¹⁰⁴⁾ 前処理工程については、通常の温度での酸化処理をはやめに切り上げてから、高温で短時間(十数秒間)酸化することにより、処理時間を短縮させる方法について特許が⁽¹⁰⁵⁾出願されている。

こうした技術を採用したセミワークスは73年3月に稼働する。処理時間の短縮は生産性を向上させただけでなく、焼成中に生じる損傷を減らすことにより、性能のばらつきをおさえた。

愛媛工場での安定操業にあわせるように、スポーツ分野で需要が生じた。航空宇宙分野での利用をめざして開発されてきた炭素繊維をスポーツ分野に応用する試みは、70年頃からアメリカやイギリスで開始され、炭素繊維強化プラスチックをもちいたゴルフクラブやテニスラケットが試作されていた。⁽¹⁰⁶⁾ 用具の性能向上のためなら少々の価格上昇も受け入れるであろうスポーツ分野は、市場規模からみても、航空宇宙分野に先行した需要の立ちあがり期待されるようになり、72年頃にはユーザーの反応を待つ段階に達していた。⁽¹⁰⁷⁾

最初に需要が拡大したのはゴルフクラブであった。72年10月に日本で開催された太平洋クラブ・マスターズでアメリカの選手がブラックシャフトを使って優勝したことも手伝って、セミワークスが稼働する73年3月に向けて、日本で「ブラックシャフト・ブーム」がおこる。そのとき、アメリカ市場での UCC 社をとおした販路構築が功を奏した。東レはトレカ T 300 を UCC 社に送り、UCC 社はそれを自社のブランド名をつけてソーネル300としてゴルフクラブ・メーカーに売り、できあがったシャフトは日本に輸出されてゴルフクラブに組み立てられた。

(101) 森田, 前掲書(注49)。

(102) 森田, 前掲書(注43), 67頁。

(103) Wattら, 前掲書(注33)。

(104) 特公昭51-12087「炭素繊維の製造法」(1972年出願)。特許に記載された実施例では、15秒で炭化工程を終えている。

(105) 特公昭51-6244「炭素繊維の製造法」(1972年出願)。特許に記載された実施例では、新規化合物を共重合させた炭素繊維用 PAN 繊維を用いた場合でも3~4時間かけていた酸化工程が、数十分に短縮されている。

(106) W. Paton, "Carbon Fibre in Sports Equipment", *Composite*, Vol.1, No.4, 1970, pp.221~226.

(107) Gill, *op. cit.*, pp.183~184.

愛媛工場のセミワークスは稼働と同時に4組3交代の連続運転に入った。セミワークスがフル生産を開始すると、東レはただちにセミワークス2の建設を決める。74年9月にセミワークス2が操業すると、生産能力は月産15トンに達し、東レは世界最大の炭素繊維メーカーとなった。⁽¹⁰⁸⁾

ついで需要が開拓されたのがテニスであった。74年にアメリカで炭素繊維強化プラスチックを用いたラケットが発表されたあと、炭素繊維の特性を有効利用したラージサイズ・ラケットがアメリカのウィルソン社によって76年に発売されると、炭素繊維のテニスラケットでの利用が本格化した。同時期に、釣竿にも炭素繊維が普及している。

東レはその後もつぎつぎと炭素繊維の高強度化をすすめた(図-1)。その高強度化の達成は当時の常識をこえていて、「開発当初は学会でも理解や信用が得られなかった」という。レーヨン系やピッチ系では得られない高強度品の生産を可能にしたのは、黒鉛化にいたる前の炭素化の段階で繊維の配向が残りやすいPAN繊維の特性であった。⁽¹⁰⁹⁾高強度化とともに拡大したスポーツ分野での需要に先導されて、東レは79年に生産能力を月産35トンに倍増させる。PAN系の技術能力をいち早く開花させた東レは、80年までに炭素繊維生産における技術的優位をかためた。⁽¹¹⁰⁾

PAN系炭素繊維の用途と市場が明確になると、75年に東邦レーヨン⁽¹¹¹⁾が日本カーボン⁽¹¹²⁾を一挙に上まわる月産3トンで参入して、東レを追いかけた。それまでコートールズ社から輸入した炭素繊維を加工販売していた三菱レイヨンも、83年には生産を開始した。

PAN系炭素繊維で可能となった高強度化により、80年代に航空宇宙分野での利用が本格化すると、欧米でもPAN系の設備増強や新規参入がさかにおこなわれた。とくに国防上の見地からPAN系炭素繊維の国内調達をめざすアメリカでは、炭素繊維やその原系の現地生産が急進展した。東邦レーヨンの炭素繊維を輸入販売していたセラニーズ社が、東邦レーヨンからの技術と原系の供給をうけて82年に炭素繊維生産を開始している。それまで東レのPAN系炭

(108) それ以前は、呉羽化学のピッチ系の月産10トンプラントが世界最大とされていた(『化学と工業』、前掲書(注67))。ナフサを火炎分解してエチレンとアセチレンを得る設備を1964年から稼働させていた呉羽化学は、火炎分解に際して多量に副生するピッチの有効利用をめざし、群馬大学の大谷杉郎が開発した方法にもとづいて、ピッチから耐熱材料などに用いられる汎用炭素繊維を製造していた(大谷杉郎、大谷朝男『カーボンファイバ入門』オーム社、1983年、56頁)。

(109) 山田、前掲書(注16)、42頁。

(110) 炭素化の段階で、ポリマーの主鎖に酸素を含むレーヨンは分子鎖がバラバラに切断される。原料の分子量が低いピッチ系は、この段階ではPAN系に比べ分子量が低い(森田、前掲書(注43)、45頁)。また、ピッチ系では炭素層間のずれが生じやすいことや表面欠陥の影響が出やすいことも、PAN系に比べて強度が低い原因だとされる(D. D. L. Chung, *Carbon Fiber Composites*, 1994, Butterworth-Heinemann, Newton, p.7)。さらに原系であるPAN繊維製造時のクリーン化や紡糸条件の最適化によってPAN系の高強度化がすすんだ(植田昭夫「新展開をみせるPAN系炭素繊維・複合材」『工業材料』34巻10号、1986年、30~39頁)。

(111) 当初は子会社の東邦ベスロンで炭素繊維事業を展開していたが、85年に吸収した。

(112) 日本カーボンは、旭化成との合併で旭日本カーボンファイバーを設立したあと、86年には炭素繊維事業から撤退する。

(113) アメリカ国防総省が、炭素繊維を原系から製品まで一貫して国内調達することを要請したとされる(化学工業日報社『化学工業年鑑』(昭和59年版)、1984年、478~479頁)。87年12月に炭素繊維原系を戦略物質に指定して、軍需向けの50%を国産化することを法制化したという報道もある(『朝日新聞』1989年2月10日)。

素繊維を輸入販売しながらピッチ系の開発に力を入れていた UCC 社は、東レからの技術導入により83年に原糸からの PAN 系一貫生産を開始した⁽¹¹⁴⁾。さらに、アメリカの PAN 系炭素繊維のトップメーカーであるハーキュリーズ社は、コートールズ社から住友化学へと原糸輸入を切り替えて大幅増設をすすめたあと、88年には住友化学と合弁で原糸生産に乗り出す。また、コートールズ社は現地企業と合弁会社を設立してアメリカでの炭素繊維生産を開始した。ヨーロッパでは、東レがフランスに合弁会社ソフィカル社を設立し、東邦レーヨンが西ドイツのエンカ社に技術と原糸を供給した⁽¹¹⁵⁾ほか、コートールズ社は設備を増強してヨーロッパで最大の炭素繊維メーカーの地位を維持した。

しかし、90年代に入り東西冷戦構造の解体により航空宇宙分野での需要が低迷すると、欧米では炭素繊維からの撤退があいついだ。PAN 系高強度化の出発点であったコートールズ社は、91年にイギリスの工場を閉鎖し、アメリカの生産拠点も三菱レイヨンに売却して炭素繊維から撤退した。セラニーズ社を買収し、炭素繊維への参入に積極姿勢を示していた BASF 社系の BSM 社も、93年に工場を閉鎖した。またハーキュリーズ社は、プリプレグを製造する大手航空機部品メーカーのヘクセル社に96年に炭素繊維事業を売却している⁽¹¹⁶⁾。

これに対し日本では、もともと航空宇宙分野への依存が欧米にくらべて少なかったうえに、圧力容器や建造物の補強材などの産業用途を開拓することにより、航空宇宙分野での低迷とスポーツ分野の成熟化に対処し、むしろ増設がおこなわれた。その結果、90年代末には国内の東レ、東邦レーヨン⁽¹¹⁷⁾、三菱レイヨン⁽¹¹⁸⁾、およびフランスの東レ系ソフィカル社、ドイツの東邦レーヨン系テナックス社、アメリカの三菱レイヨン系グラフィル社が世界の生産能力の7割以上を占めるにいたった。⁽¹¹⁹⁾

おわりに

PAN 系炭素繊維の開発とほぼ時を同じくして進行していた日本の高度成長は、産業発展の過程であると同時に、研究開発体制が整備されていく過程でもあった。その途上にあった高度成長期には、一般に、生産サイドの課題と研究テーマとがうまく結びつかなかったために研究

(114) ただし、UCC 社は84年にインドのボパールで起こした化学工場事故の賠償のため炭素繊維事業をアモコ社に売却し、その後、東レとの技術的つながりは切れた。

(115) 東レは85年にフランスの SNEA 社との合弁でソフィカル社を設立したのち、88年にはその経営権を取得した。83年に東邦レーヨンとライセンス契約をむすんだ西ドイツのエンカ社は、東邦レーヨンからの技術と原糸の提供により86年に炭素繊維生産を開始した。(化学工業日報社『化学工業年鑑』各年)。

(116) 同上。

(117) 東邦レーヨンは、国内3社の増設競争のなかで90年代後半にシェアを落とし、99年9月には帝人の傘下に入った(『日本経済新聞』1999年9月10日)。

(118) 三菱レイヨンは、94年に撤退した新旭化成カーボンファイバーの設備を96年に稼働させたほか、98年にも大增設をおこなった。

(119) アクゾ社系列のエンカ社が事業から撤退したあと、93年に東邦レーヨンはアクゾ社の子会社アクゾ・ファーゼル社との合弁でテナックス・ファイバーズを設立し、97年にはそれを実質子会社とした(『化学工業年鑑』各年)。

開発は十分な成果を生みだせず、その後、低成長期に入ってから成果があがるようになったとされる。⁽¹²⁰⁾

PAN 系炭素繊維の開発もおおよそ同じ経過をたどった。高度成長初期に発明されたときには、試みられた製品化はほとんど成功をおさめず、国内ではさほど注目もされなかった。研究開発体制が整備されていった高度成長末期の研究開発をへて、低成長期に PAN 系炭素繊維は開花することになる。

しかし、こうした経過は国内条件だけで生じたわけではない。国際的商品となる炭素繊維の開発過程において注目すべきは、研究開発の国際的な連携である。各国が相互に影響を与えあいながら炭素繊維が発展した様子は、本文中に繰り返し示した。イギリスが、やや強引に独自開発を主張しながら技術的独占をねらい、実用化をいそぎすぎて失敗したのは象徴的である。

研究開発の国際的連携のなかで、各国がになうことになった技術的役割は、国内関連産業の状況に強く規定されて割りふられた。炭素繊維は前処理の必要のないレーヨン系から登場することになった。航空宇宙分野で先行するアメリカがレーヨン系の開発をになうのは自然なことであった。航空宇宙分野のない日本で、漠然とした工業化意識のもとで PAN 系が発明されたあと、航空宇宙分野でアメリカに追いつけようとしたイギリスでは、PAN 系への過剰な熱狂が起こった。そのかわりで PAN 系を新しい段階にすすめ本格生産に乗り出したのは、非繊維部門への多角化をめざす日本の合成繊維メーカーであった。その間アメリカでは、PAN 系をさけたピッチ系の開発が追求されていた。

さらに各国が獲得した成果は、開発対象として割り振られた技術がもつ固有の能力を反映して分配された。強度においてレーヨン系とピッチ系が PAN 系におよばなかったのは、いうまでもなく、開発をになったアメリカの研究開発能力の責任ではない。各原系の科学的特性にその原因がある。しかも、技術の固有能力を事前に知ることはできない。レーヨン系、PAN 系、ピッチ系がおおよそ同等の性能を示していた1970年頃に、その後の PAN 系の飛躍的な高強度化を予測することはできなかった。イギリスでの実用化が早急すぎたというのも、事後的な解釈でしかない。

研究開発は、単線的な国別開発競争ではない。また、あらかじめ設定された目標への到達競争でもない。技術導入に依存して達成したとされる高度成長期に、しかも石油化学工業を例として技術導入依存がもっとも顕著だとされた化学工業の研究開発が、研究開発の不確実性と国際的な連携の前線にすでに位置していたことを、産業としての規模は小さいけれども、PAN 系炭素繊維の開発過程は示している。

(120) 中岡哲郎「民間企業研究と技術導入」(中山茂編『通史—日本の科学技術』(第2巻), 1995年, 学陽書房) 170~179頁, および中山茂「企業内研究開発活動の興隆」(同上(第3巻), 1995年) 44~50頁。

[謝辞] おおくのご教授をいただいた進藤昭男氏（もと大阪工業技術試験所）と森田健一氏（現，横浜桐蔭大学），および適切なアドバイスをいただいた松尾寛二氏と片岡長正氏（もと大阪工業技術試験所），田中宏佳氏（東レ）に感謝する。もちろん本稿に間違いや誤解があれば，すべて筆者の責任である。

Development of PAN-Based Carbon Fiber

by

Toru Takamatsu

(Osaka School of Economics)

Carbon fibers serve as reinforcement material for composites. The most important fiber among them, which is used in sports equipment and aircraft, is prepared from polyacrylonitrile (PAN) fiber.

PAN-based carbon fiber was invented by Shindo of the Government Industrial Research Institute, Osaka, in 1959. The Toray Co., the leading synthetic fiber firm in Japan, commenced the first large-scale commercial production in 1972; thereafter, the world production has been led by Japanese synthetic fiber firms. Japan's successful R & D and production of PAN-based carbon fiber are examined in this paper.

Carbon fiber was first produced from cellulose in the U.S. in the 1950's. After the invention of PAN-based carbon fiber by Shindo, there were increased expectations of its application to aircraft. While the U.S. continued to pursue cellulose-based carbon fiber, the U.K. made intensive R & D to put PAN-based carbon fiber into practical use in aircraft. Before the success of the trial in U.K., the Toray Co., trying to diversify into non-textile areas, succeeded in developing a suitable precursor to improve processing and enhance the performance of the fiber. To meet the growing needs of the sports equipment industry, Toray's commercial production followed that of other Japanese synthetic fiber firms.

The course of development of PAN-based carbon fiber suggests that not only the preparation of domestic R & D organizations but also the interaction of R & D activities at an international level played important roles in the worldwide advance of the product.