

# 先端用途で成長する スーパーエンブラ・PEEK (中)

用途全般、摺動材料・コンポジット

ポリエーテルエーテルケトン (PEEK) は、先端用途の摺動材料、コンポジット、メディカル (インプラント)、3Dプリンタ材料に使用され、需要が急増している。本レポート(中)では用途全般、摺動材料、コンポジット材料についてまとめた。

2016年9月



**株式会社 旭リサーチセンター**

シニアリサーチャー 府川 伊三郎、白鳥 直行

## まとめ

- ◆芳香族ポリエーテルケトン（PAEK）はニートレジンの他に、各種コンパウンド（歯車・軸受などの摺動グレード、炭素繊維（CF） / ガラス繊維（GF）強化グレードなど）、一次加工品（フィルム、パイプ、ロッド、連続繊維強化プリプレグ、3Dプリント用フィラメントなど）、最終製品（インプラント部品）が販売されている。トップメーカーのVictrex（イギリス）はニートレジンから最終製品まで数多く事業化し、付加価値を高めている。（p. 1～7）
- ◆「Victrex PEEK」の主要用途は、携帯機器用部品（音響フィルムなど）、自動ABS部品、摺動材料、航空機用部品（ブラケットなど）、石油・天然ガス掘削用一方向コンポジットテープ、メディカル製品（インプラント）である。（p. 8～11）
- ◆PEEKは高温・高荷重に耐えるハイエンドの摺動材料である。PTFE、黒鉛、CFを各10%配合したグレードが標準で、新グレードが活発に開発されている。（p. 12～14）
- ◆短繊維あるいは連続繊維のGF/CF強化熱可塑性樹脂（PP、ポリアミドをはじめPPA、PBT、PPS、PEI、PAEK）が、自動車の軽量化のため自動車部品に実用化されつつある。ドイツを中心にヨーロッパが先行している。（p. 15～20）
- ◆熱可塑性のPAEKの連続炭素繊維強化コンポジットは、現在、航空機用途で主流の熱硬化性の連続炭素繊維強化エポキシ樹脂コンポジットに匹敵する性能を有しており、成形時間が短いことやリサイクルができる特長を有している。世界最大の熱可塑性コンポジットメーカーのTenCate（オランダ）は、航空機用にPEEKとPEKKの一方向コンポジットテープの新製品を最近上市した。（p. 21～28）
- ◆2015年に、VictrexはPAEKコンポジットの一方向テープとラミネートの販売を開始した。同年、Solvay（オランダ）はコンポジット大手のCetec（米国）を買収して、PEEKとPEKKの一方向テープとラミネートを手に入れた。  
PEKK（共重合体タイプ）は、PEEKより加工温度が低くしかも物性もよいことから、PEEKと同様にコンポジットとしての成長が期待される。PEKK樹脂の唯一の製造メーカーであるArkema（フランス）は、コンポジット用途に力を入れている。（p. 29～42）

# 目 次

はじめに	1
1 芳香族ポリエーテルケトン (PAEK) の加工品と用途	3
1.1 芳香族ポリエーテルケトン (PAEK) のコンパウンドと加工品	3
1.2 「Victrex」の用途別販売量と主要用途例	8
1.3 将来の用途—先端電子回路材料	10
2 摺動材料	12
3 コンポジット材料	15
3.1 樹脂コンポジットの分類	15
3.2 短繊維強化熱可塑性樹脂とその実用化例	16
(1) 短繊維強化PP、PA、PPAなどの実用化例	16
(2) 短繊維強化スーパーエンブラの実用化例	18
(3) Victrexの短繊維強化PEEK	19
3.3 連続繊維強化熱可塑性樹脂	21
(1) 連続繊維強化熱可塑性樹脂 (熱可塑性コンポジット) の製造法	21
(2) 熱可塑性コンポジット	22
(3) 熱硬化性コンポジット	25
(4) PEEKコンポジットとエポキシ樹脂コンポジットの物性比較 (TenCate)	26
(5) PEKKコンポジットとエポキシ樹脂コンポジットの物性比較 (Cytec)	28
(6) PEEKコンポジットとPEKKコンポジットの物性比較① (SolvayとCytec)	29
(7) PEEKコンポジットとPEKKコンポジットの物性比較② (ArkemaとTenCate)	32
(8) Victrexの取り組み：PAEKコンポジット (プリプレグ) の発売	33
(9) Evonikの取り組み	35
(10) 炭素繊維強化プラスチックの需要と航空機用途の需要	36
3.4 考察——連続炭素繊維強化PAEKコンポジットの将来	37
おわりに	43

## はじめに

芳香族ポリエーテルケトン（PAEK）に関する前リポート(上)では、PAEKの特性と製造方法、開発の歴史、製造メーカーの状況について述べた。

本リポート(中)と(下)では、PAEKの加工品と用途について述べる。特に、歯車・軸受に使用される摺動材料、資源掘削設備や宇宙・航空に使用されるコンポジット材料、人体の脊柱インプラントなどのメディカル材料、最近技術革新が著しい3Dプリンタ用材料の4分野に焦点を当てた。(中)では用途全般、摺動材料、コンポジット材料について、そして(下)ではメディカル材料と3Dプリンタ材料について述べる。かつてのVictrex 1社独占の時代から、現在は後発3社が参入し、市場が拡大している。

これら4分野においてPAEKが採用されるのは、厳しい使用条件下での耐久性が必要なニッチな用途である。そこで、各分野の全体の動きがわかるように、PAEKに限定することなく各分野の基本技術と市場を簡単に説明した。

本リポート(中)、(下)に登場する樹脂と金属材料を模式的に図1～3に示した。

PAEKの競合材料は、スーパーエンブラのPPSやPEIや熱硬化性のエポキシ樹脂である。また、PAEKは金属を代替して新用途を開発してきた。

### 【注意書きと略語・用語集】

1. どの章から読んでもわかるようにしたので、内容の一部繰り返しがあ
2. 登録商標（商標）とそれを含むものは「      」で示した。例 「Victrex」 PEEK
3. 為替換算は2010～16年平均の1ポンド＝152円、1ポンド＝1.56ドルを使用した。  
また1ドル＝100円、1ユーロ＝123円を使用した。
4. 会社名に社をつけることは省略したが、紛らわしい場合は例外的に使用した。
5. PAEKは芳香族ポリエーテルケトン（Polyaryletherketone）の略号でPEEK、PEKKなどの総称である。また、企業がポリマー構造を明らかにしたくないときに使用される。PEEK（ポリエーテルエーテルケトン）とPEKK（ポリエーテルケトンケトン）を区別しやすいように、PEKKに下線をつけた。

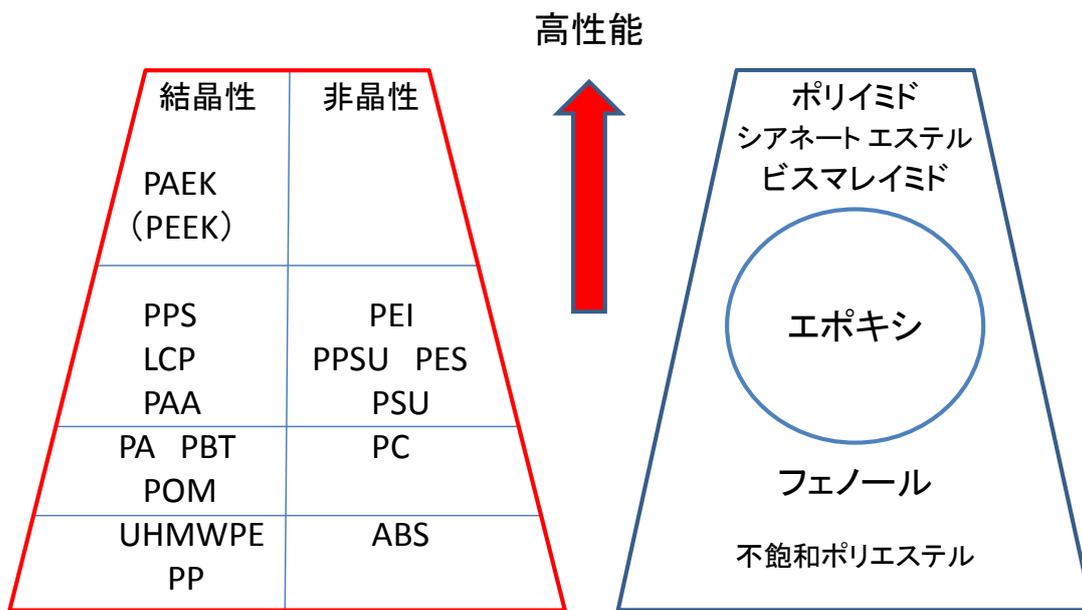


図1 熱可塑性樹脂

図2 熱硬化性・熱不融樹脂

(スーパーエンブラ：連続使用温度～260℃)

PAEK：ポリエーテルケトン  
PEEK：ポリエーテルエーテルケトン

(スーパーエンブラ：連続使用温度 150℃以上)

PPS：ポリフェニレンサルファイド  
PEI：ポリエーテルイミド  
LCP：液晶ポリマー  
PPSU：ポリフェニルスルフォン  
PES：ポリエーテルスルフォン  
PPA：ポリフタルアミド  
PSU：ポリスルフォン

(エンブラ：連続使用温度 100～150℃以上)

PA：ポリアミド  
PBT：ポリブチレンテレフタレート  
PC：ポリカーボネート  
POM：ポリオキシメチレン

(特殊樹脂、汎用樹脂)

ABS：アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン共重合体  
UHMWPE：超高分子量ポリエチレン  
PP：ポリプロピレン



図3 金属材料

出典：図1～3は各種資料より旭リサーチセンター作成。

# 1 芳香族ポリエーテルケトン（PAEK）の加工品と用途

まず、表1にPAEKメーカーの市場参入経緯、事業化している樹脂の構造と商標、加工品についてまとめた。表中のOxford Performance Materials（米国）はArkemaに買収されたが、そのメディカル事業は分離して、再びOxford Performance Materialsが設立され、3Dプリンタによるインプラント部品の製造を行っている。

表1 PAEKメーカーの状況

企業名	市場参入経緯	樹脂の構造と商標	加工品
Victrex (イギリス)	PEEKのパイオニアで、1978年にPEEKを発明し、1981年にPEEKを発売	PEEK 「Victrex」 PEK 「Victrex HT」 PEKEKK 「Victrex ST」	フィルム、パイプ、ロッド パウダー 摺動材料 一方向テープ、ラミネート メディカル部品（インプラントなど）
Evonik (ドイツ)	2005年にDegussa（後のEvonik）が吉林大学と提携して、PEEK事業進出を表明、合弁会社を設立	PEEK 「VESTAKEEP」	フィルム、パイプ、ロッド 摺動材料 メディカル部品（インプラントなど）
Solvay (ベルギー)	2006年にインドのGharda（PEEK、PES事業）買収	PEEK 「KetaSpire」 PAEK 「AvaSpire」	フィルム 摺動材料 コンポジット（子会社 Cytec） メディカル部品（インプラントなど） 3Dプリンタ用材料
Arkema (フランス)	2009年に米国のOxford Performance Materials（OPM）のPEKK事業買収	PEKK (T/I) 「Kepstan」	3Dプリンタ用材料（パウダー開発中）
	2011年にメディカル事業は分離し、OPMを設立	PEKK (T/I) 「OXPEKK」	メディカル部品（インプラントなど） 3Dプリンタ用材料

出典：各社ホームページなどより旭リサーチセンター作成。

## 1.1 芳香族ポリエーテルケトン（PAEK）のコンパウンドと加工品

図4にPAEKのニートレジン、コンパウンド、一次加工品、最終製品（二次加工品）の流れを示す。図中の黄色地はVictrexが事業化している製品である。多くの川下製品に進出していることがわかる。以下、図4に従って説明する。

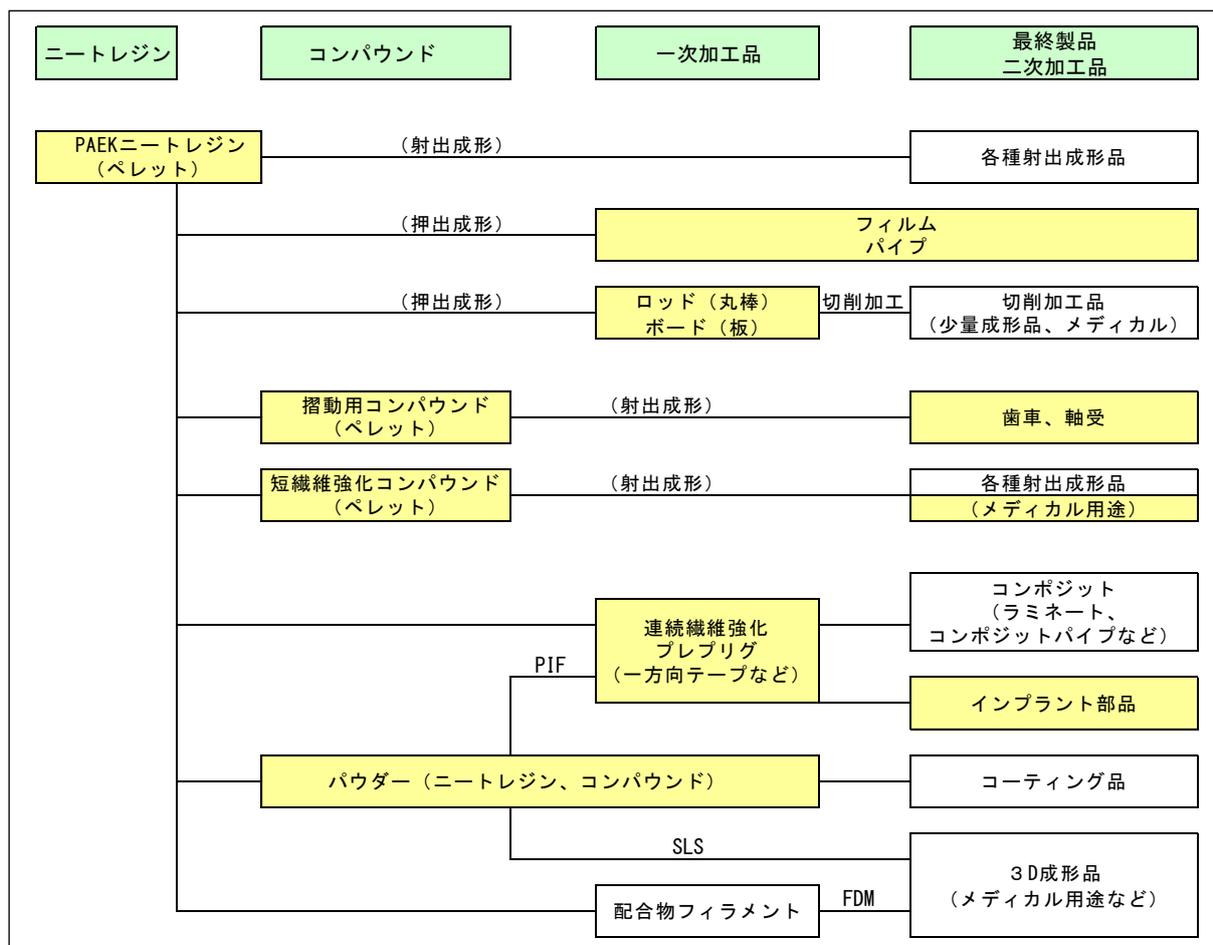


図4 PAEKのニートレジン、コンパウンド、一次加工品、最終製品の流れ

注：黄色地はVictrexが事業化している製品。  
 出典：各種資料より旭リサーチセンター作成。

### (1) PAEKコンパウンド

PAEKペレットにはニートレジンと各種添加剤や繊維を配合したコンパウンドがある。代表例は、PEEKに黒鉛、炭素繊維、フッ素樹脂をブレンドした摺動コンパウンド（グレード）である。PEEKメーカー各社が販売し、力を入れている。摺動性（摩擦と摩耗）を改良することにより、歯車のエネルギー消費を抑え、騒音や振動を減らし、また寿命を延ばすことができる。従来使われてきた金属に対しては軽量化できるメリットもある。

また、短繊維の炭素繊維（CF）やガラス繊維（GF）で強化したPAEKコンパウンドは、強度とモジュラス（弾性率）がニートレジンよりも高く、短期耐熱性の尺度である熱変形温度が大きく向上する。CFはGFよりはるかに高価格であるが、CF強化PAEKのほうがGF

強化PAEKよりも軽くて性能が優れるので、高性能樹脂であるPAEKの場合にはCFが使われることが多い。PAEKはkg当たり約1万円の樹脂であるので、GF（～1,200円/kg）はもとよりCF（2,000～4,000円/kg）よりも高い価格である。

一般に、繊維長が長いGFやCFをブレンドした長繊維強化樹脂は、短繊維強化樹脂よりも性能が優れる。短繊維コンパウンドの射出成形品中の繊維長は約0.2mmである。長繊維強化樹脂ペレット中の長繊維長はペレット長と同じ3～24mmであるが、長繊維を切断することなく長繊維コンパウンドを射出成形することは難しく、射出成形すると繊維長は約0.5mmになってしまう。それでも長繊維コンパウンドは短繊維コンパウンドよりも性能が優れるので、生産性の高い長繊維ペレットの製造方法が長年検討されてきた。

Solvayは、2015年に炭素繊維の長繊維強化樹脂（LFT：Long Fiber Thermoplastics）技術をもつEpic Polymers（ドイツ）を買収し、自社のPEEKとPAEKに応用しようとしている<sup>1</sup>。

## (2) PAEK一次加工品

ニートレジンやコンパウンドを押出成形することにより、フィルム、パイプ、ロッドなどの一次加工品がつくられる。ドイツのEnsigerはVictrex「PEEK」のロッド（丸棒）、ボード（板）、パイプなどのストックシェイプ（stock shape）を世界に販売している。

ロッドやボードの切削加工により、複雑な3次元構造を有する構造体や個数の少ない成形品ができる。後者の典型例は、患者一人一人のサイズのものをつくることが求められるインプラント部品である。5軸切削加工など切削加工技術も高度になっている。

また、テーラーメイドの成形品をつくる別の方法としては、最近話題の3Dプリンタがある。Arkema関連のOxford Performance Materialsは、既にPEKK製脊柱インプラントを3Dプリンタでつくっている。

---

<sup>1</sup> 2015年10月にEpic Polymers（ドイツ）のLFT事業を買収することを発表した。EpicのLFT技術は、高性能樹脂を長繊維のCFで強化する画期的なコンパウンド技術である。得られる長繊維強化樹脂は高温でも優れた強度、剛性、耐衝撃性があり、自動車や宇宙・航空分野の準構造部材に金属代替として使われ、軽量化に役立つ。SolvayはLFT技術を自社のコア樹脂である「KetaSpire」PEEK、「AvaSpire」PAEKに応用し、自動車分野での金属代替用途を開発する。出典：Solvayのプレスリリース

また、連続繊維にPAEK樹脂を浸漬させて一方向テープ（UDテープ：Unidirection Tape）が作られる。この一方向テープを積層すれば各種積層板（ラミネート）や積層パイプができる。一方向テープはその後加工して最終製品にするのでプリプレグといえることができる。図5に一方向炭素繊維強化テープ模式図を示す。

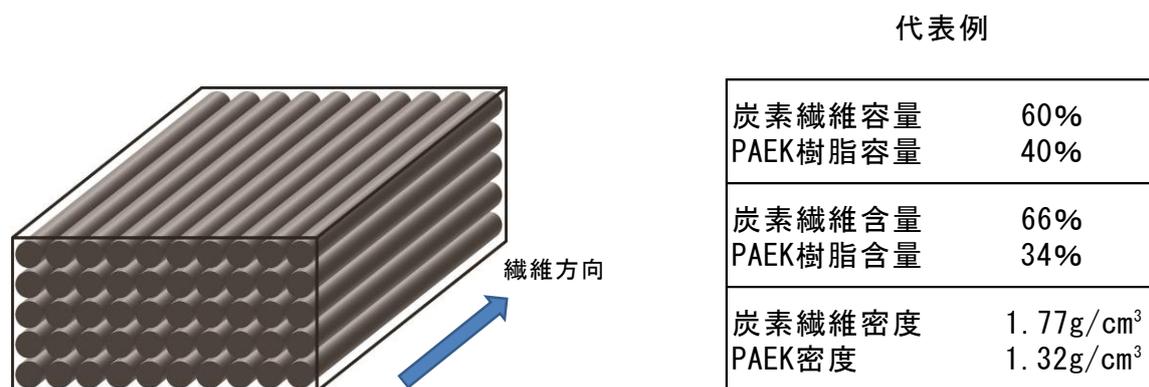


図5 一方向炭素繊維強化テープ（黒い部分が炭素繊維を表わす）

出典：各種資料より旭リサーチセンター作成。

連続炭素繊維強化PAEKは、熱可塑性コンポジットの中では最高の性能を有する。今後、成形性やリサイクル性の良さを生かして、現在航空機用途で主流の熱硬化性の炭素繊維強化エポキシコンポジットを代替することが期待される。

PAEKのニートレジンやコンパウンドをパウダー（粉末）にしたものは、いろいろの用途に使われる。一つは、パウダーを連続繊維に融着してプリプレグが作られる（Powder Impregnated Fabric (PIF) と呼ばれる）。また、パウダーを金属の表面にコーティングして、金属表面の耐腐食性、耐スチーム性、耐摩擦摩耗性を改善する。また、パウダーをレーザーで選択的にシンタリング（熔融）して形状をつくるSLS (Selective Laser Sintering) 法3Dプリンタに使われる。

一方、3Dプリンタのもう一つの重要な方式であるFDM (Fused Deposition Modeling) 法では配合物フィラメントを熔融・固化して形状をつくりながら積層する。配合フィラメントは、樹脂に着色剤やその他充填物を混ぜたコンパウンドである。

### (3) PEEKニートレジン、短繊維強化PEEK、連続炭素繊維強化PEEKの特性比較

PEEKをニートレジンから短繊維で強化したコンパウンド（ペレット）や連続炭素繊維強化一方向テープ（ラミネート）にすることにより、特性を大きく変えることができる。

特性の一つとして、それぞれの材料の引張強度と引張モジュラス（引張弾性率）を比較した（図6、7）。ニートレジンの引張強度は105MPaで引張モジュラスは4.1GPaであるが、30%短繊維GF強化PEEKは195MPa、12.0GPa、30%短繊維CF強化PEEKは265MPa、28GPa、連続CF（AS-4）66%/PEEK34%の一方向テープ（ラミネート）の繊維方向は2280MPa、130GPaであった。

以上のように、短繊維強化品はニートレジンの引張強度の約2～2.6倍、引張モジュラスは約3～7倍高くなる。特にガラス繊維に比べて炭素繊維の補強効果が大きい。

さらに、連続CF強化PEEKの一方向テープは30%短繊維CF強化PEEKに比べて、引張強度は約8倍、引張モジュラスは約5倍である。この連続CF強化PEEKの一方向テープは炭素繊維含量が66%と高く、また繊維方向の強度なので特に高強度・高モジュラスを示している。

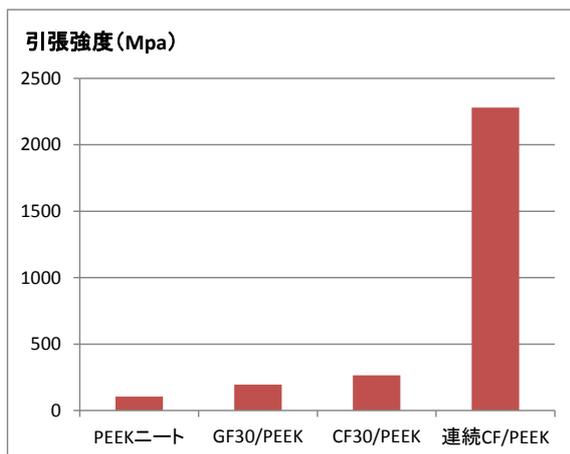


図6 各種材料の引張強度

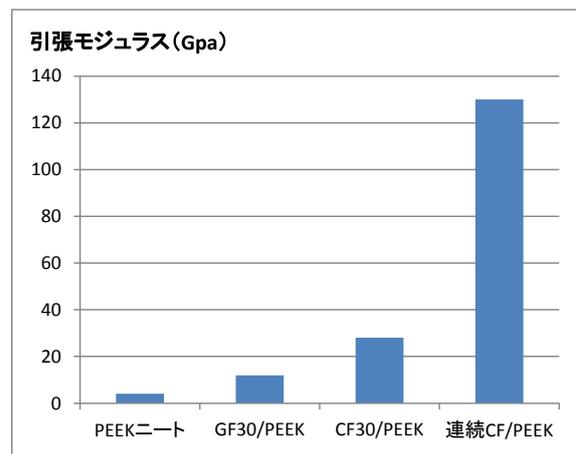


図7 各種材料の引張モジュラス

注：図6、7共通

PEEKニートレジン、30%短繊維GF強化PEEK（GF30）、30%短繊維CF強化PEEK（CF30）、連続CF（AS-4）66%/PEEK34%の一方向テープ

出典：図6、7はVictrex、TenCateカタログデータより作成した。

## 1.2 「Victrex」の用途別販売量と主要用途例

### (1) 「Victrex」の用途別販売量と使用材料

「Victrex」の用途別販売量と推定使用材料を表2にまとめた。2015年の用途別販売量は、エネルギー/工業分野が1,081トン（26%）、自動車、宇宙・航空などの輸送分野が1,104トン（26%）、半導体・携帯機器などのエレクトロニクスが1,680トン（40%）、インプラントなどのメディカルが352トン（8%）である。エレクトロニクス用途が前年比63%の増加になっている。

表2 Victrexの用途別販売量と種類別使用材料

用途	2015年販売量			ニート レジジン	摺動 グレード*	短繊維 コンパウンド*	連続繊維 コンポジット
	(トン)	(%)	(2014年比)				
エネルギー/工業	1,081	(26)	(10%減)	○	○	○	○
輸送（自動車、宇宙・航空）	1,104	(26)	(15%増)	○	○	○	○
エレクトロニクス（半導体、携帯機器）	1,680	(40)	(63%増)	○		○	
メディカル（インプラントなど）	352	(8)	(3%減)	○		○	○
合計	4,217	(100)					

出典：Victrexの用途別販売量はVictrexホームページによる。種類別使用材料は旭リサーチセンターの推定。

また、ニートレジンはすべての用途に、摺動グレードは工業や自動車を中心に、短繊維強化コンパウンドはすべての用途に、連続繊維コンポジットはエネルギー・工業、宇宙・航空、自動車、Trauma（骨折などの外傷）プレートの用途に使用されている。

### (2) 「Victrex」の主要用途例

#### ① 携帯機器用途：音響用フィルムなど

代表例は、小型音響機器に採用されたPEEK「APTIV」フィルムである。携帯機器用のイヤホンやヘッドホンの振動板（ダイアフラム）に使用されている。優れた音響特性をもつことが特長である。「APTIV」フィルムはそのほか携帯機器内部の絶縁材料に使用されている。

#### ② 自動車用途：ABSブレーキの部品

ABSブレーキにPEEKを使用した部品が使用されており、2億人のドライバーが利用している。

③ 自動車用途：歯車（ギア）部品

トランスミッションやエンジン内の各種摺動部品（歯車、軸受）に使用される。

PEEK歯車は金属歯車に比べ、ノイズが最高50%減り、重量が最高85%減り、慣性モーメントが最高80%減少し、部品コストが最高20%低減できる。

④ 航空機用途：ブラケット（腕木、支え）

荷重のかかるブラケットと荷重のかからないブラケットの両方の用途で需要が拡大している。PEEK製は、金属に比べ重量が70%軽量化、システムコストとサイクル時間が40%低減する。ブラケット用途には、連続炭素繊維強化PAEK<sup>2</sup>コンポジットにPEEK樹脂をオーバーモールドする技術（ハイブリッド モールドイング）が利用されている（34ページ参照）。また、航空機内部の電線結束用クランプにも使用されている。

⑤ エネルギー（石油・天然ガス）用途：採掘用m-パイプ

高強度炭素繊維強化PEEK製のコンポジットパイプは過酷になりつつある資源採掘条件下で使用できる。水中でスチールより90%軽量で、また海水、CO<sub>2</sub>、硫化水素、酸性ガス条件下でスチールより20倍強い。高温での使用が可能であり、スチールより耐久性がある。スプール（糸巻き枠）にコンポジットテープを巻きつけて熱圧着してパイプをつくることができる。

⑥ メディカル用途：Spine（脊柱）固定用のインプラント部品（ケージやスクリュー）

この用途向けの主力製品は従来「PEEK-OPTIMA」であったが、現在は新製品「PEEK-OPIMA HA-Enhanced」をSpine市場に投入している。この新製品はPEEKとHA（ハイドロキシアパタイト：骨の成分）を均一にコンパウンドしたもので、表面にHAが均一に分布している。このため骨との生体適合性が改良され、骨の成長が促進される。

Spine以外の用途としては、Dental（歯科）がある。「JUVORA」と呼ぶ独自のインプラントフレームが販売されている。

もう一つの用途は、Trauma（外傷：骨折など）の用途である。これはチタン合金の代替用途で、PEEKは金属と違ってモジュラスが小さく骨に近いので、骨の形成を促進さ

---

<sup>2</sup> Victrexの発表では、CF強化一方向テープ（商品名 Victrex AE250）のマトリックス樹脂はPEEKではなくPAEKと記載されている。PAEKのポリマー構造は発表されていない。

せる。2014年に開発された「PEEK-OPTIMA Ultra-reinforced polymer」（連続炭素繊維超強化PEEK）がTrauma PlateやTrauma Nailに使用される。また、将来期待される大きな用途にKnee（膝）関節代替部品（人工膝関節）がある。

### 1.3 将来の用途—先端電子回路材料

#### (1) プロジェクトの概要

これは、成形回路部品（MID：Molded Interconnect Devices）の生産技術開発プロジェクト“3D High Precision MID Assembly System（3D-HiPMAS）”およびMID用高機能コンパウンドに関するものである。

EUが出資している3D-HiPMASプロジェクトは、2012年10月から欧州のグローバル企業8社および4研究所が500万ユーロ（6.2億円）の予算で3次元の精密なMIDとその生産技術を共同開発する事業で2015年に終了した。MIDは、立体的で精度の高い電気回路を配した小型の樹脂成形体上に複数の電子部品を実装した複合機能を持つ電子デバイスで、高密度実装が可能になる。同プロジェクトでは、マイクロ燃料電池、マイクロ補聴器、マイクロスイッチ、および小型圧力センサーのMIDプロトタイプをパイロットプラントで試験生産し、その生産コストを現在の50%未満にすることが目標である。

#### (2) MIDの生産工程

初めに、a. 工学的にデザインしてMIDの全体像を構築し、b. 射出成形で複雑な形状の樹脂成形品をつくり、c. 樹脂成形品の電気回路になる部分にレーザーを照射して、その部分のポリマー構造を変化させ、d. めっきなどでその部分を金属化して電気回路にし（a.～d.までの工程をLDS：Laser Direct Structuring<sup>3</sup>と呼ぶ）、e. その回路上に複数の電子チップ部品などをマウントし、f. 最後に、金属蒸着、はんだなどで電子チップ部

---

<sup>3</sup> LDSとは、LPKF Laser & Electronics社が開発した3次元配線形成技術（MID技術）である。LDSプロセスでは、金属錯体を分散した樹脂材料を用い、レーザー光により錯体を還元し触媒核として、選択めっきにより回路形成する。

品などを固定する。MID用樹脂コンパウンドには高度の熱特性、電気特性、LDS特性、機械特性、加工特性が求められる。特に、LDSによって所望のファインピッチを実現するためには、電気回路の導電パス幅を細くして150 $\mu$ mのピッチ幅を達成することと、最高260 $^{\circ}$ Cに達する‘はんだ’のリフロー実装を可能にすることである。

### (3) MID用樹脂コンパウンド

Ensinger Compounds（ドイツ）は、同プロジェクトでMID用樹脂コンパウンドの開発を担当し、素材樹脂として、スーパーエンブラのPEEKおよび液晶ポリマー（LCP）を選択した。両ポリマーとも、熔融温度が300 $^{\circ}$ C以上で、熱可塑性樹脂中で最も熱膨張が小さく、高温の寸法安定性、剛性に優れ、耐薬品性、難燃性も良好である。Ensinger Compoundsは自社のコンパウンド技術を駆使して、熱膨張をさらに小さくする充填剤や各種添加剤を樹脂に配合して高分散化し、MIDに最適な高機能樹脂コンパウンド「Tecacomp」PEEK LDSおよび「Tecacomp」LCP LDSを開発した。それらを用いて作製した電気回路のピッチ幅は目標を達成した。導電パスを細くしても、熱による樹脂成形品からの剥離がなく、導電パスのエッジ部分は鮮明で凹凸が少ないため、導電パス間のアーク放電（ショート）が起きにくい<sup>4</sup>。

---

<sup>4</sup> Kunststoffe international, 6月/7月号 pp.73~75 (1975)

## 2 摺動材料

### (1) 概要

金属を代替して、低摩擦性と低摩耗性の良い樹脂製の歯車や軸受の使用が増えている。一般に使用される樹脂はポリアセタール（POM）である。POMは自己潤滑性があり、潤滑剤などの配合により摺動性が著しく向上する。そのほかエンブラとしては、ポリアミド（PA）やフッ素樹脂のポリテトラフルオロエチレン（PTFE）も使用される。スーパーエンブラとしてはポリフェニレンサルファイド（PPS）が比較的多く使用されている。

また近年、耐熱性と耐薬品性に優れるポリイミドとスーパーエンブラの液晶ポリマー（LCP）やPEEKが注目されている。PEEKやLCPのトライボロジー<sup>5</sup>に関する研究が国内外で盛んである。現在は、PEEKに摩擦係数を低下させるPTFE、固体潤滑剤である黒鉛（グラファイト）、機械的強度を改善する炭素繊維を配合したPEEKコンパウンドが中心になっている。

樹脂加工メーカーで、切削加工用PEEK素材（ロッドなど）の世界シェアトップのEnsinger（ドイツ）は以下のような各種の摺動材料を販売している<sup>6</sup>。

① PEEK（摩擦係数 0.30～0.38）、② PTFE配合PEEKコンパウンド（摩擦係数0.08）、③ 炭素繊維、黒鉛、PTFEを各10%配合したPEEKコンパウンド（摩擦係数0.11）、④PTFEフリーPEEKコンパウンドグレード：これは高負荷の環境下（高PV値、高荷重、高温）で使用が可能である。例えば、エンジン、ギアボックス内の過酷な環境下でも使用できる<sup>7</sup>。またPEEKの競合材料になる⑤炭素繊維、黒鉛、PTFEをそれぞれ10%配合したPPSコンパウンド（摩擦係数0.21）や汎用摺動材料の⑥POM（摩擦係数 0.32）なども販売している。

使用温度や使用条件によって最適な樹脂材料が選択されるが、PEEKはハイエンドの摺動材料として高温・高荷重などの過酷な使用条件で使用される。

<sup>5</sup> トライボロジーは摩擦、摩耗、潤滑など対象にする物理学、材料科学、応用力学などを含む総合的な科学・技術であり、幅広い産業の基盤技術である。

<sup>6</sup> Ensingerは「Viktrex」PEEKを使用している。

<sup>7</sup> Ensingerホームページ。

## (2) PEEKメーカー各社の製品

### ① Victrex

標準グレードは「Victrex」PEEK 450FC30で、ニートレジンのPEEK 450Gをベースに10%炭素繊維、10%黒鉛、10%PTFEを配合したコンパウンドである。より過酷な摺動用途に向けた特殊グレードとして、「Victrex」WG101とWG102を販売している。「Victrex」WG101とWG102はブッシング、真空ポンプのベーン・チップなど、これまで金属、ポリイミド (PI)、ポリアミドイミド (PAI) が用いられてきた用途に拡大することができる。成形加工性を犠牲にせず、金属、PI、PAIよりも優れた耐摩耗性と低摩擦係数の実現を目標としている。

Victrexは、金属に比べてPEEKの摺動部品としての特長として、相手金属の表面研磨が省けること、複雑なものほど大量生産でコストダウンできること、無潤滑で焼きつかないことを挙げている。

Victrexは摺動部品用途の重要性に鑑み、Kleiss Gearsを600万ドル（6億円）で買収した（2015年7月21日発表）。この買収により、Victrexは歯車の設計、評価および製造設備を手に入れた。金属からPEEKの歯車に代替することにより、自動車の燃費向上やNVH（Noise, Vibration, Harshness<sup>8</sup>:不快なノイズ、振動、不連続な上下振動〈車の乗り心地〉）の低減が可能となる。

### ② Evonik

PEEKコンパウンドの2000FC30と4000FC30が標準の摺動グレードである。ニートレジンの2000G（低粘度）と4000G（高粘度）をベースにそれぞれに10%炭素繊維、10%黒鉛、10%PTFEを配合したコンパウンドである。同社は2015年11月に新製品の「VESTAKEEP」Easy Slide Iを発表した。Easy Slide Iは優れた耐摩耗性と低い滑り摩擦をもっているため、真空ポンプ用などの今までにない小さくて強力な部品をつくれるようになった。

### ③ Solvay

KT-820SL30とKT-880SL30が、炭素繊維、黒鉛、PTFEをPEEKに配合した標準摺動グレー

---

<sup>8</sup> NVHは主に自動車で使われる言葉である。

ドである。同じ構成材料からなる特殊グレードとしてKT-820SL45やKT-880FW30がある。

### (3) PEEKライニング軸受

大同メタル工業は金属製軸受<sup>9</sup>の大手メーカーであるが、PEEKを金属にライニングした樹脂軸受（「DAIPEAK」）を販売している。主用途は大型水車発電用軸受、立型ポンプ用軸受、小水力発電用軸受などである。「DAIPEAK」の特長は、①軸受装置のコンパクト化：優れた耐荷重性をもち、高面圧下での摩耗量とクリープ変形量が少なく、耐焼付性にも優れているため、軸受を小型化し装置全体をコンパクト化できる。軸受の小型化により、摩耗損失が減少するため、潤滑油冷却方式を簡便化できる（空冷化が可能になる）、②起動摩擦係数が小さいため、オイルリフタ設備が不要となる、③高温時のクリープ特性に優れ、高温使用が可能になる、④電気絶縁が可能となるので、絶縁材料が不要である。⑤長寿命化が可能である——ことを挙げている。金属製軸受に対するPEEKライニング軸受の特長がわかる。

---

<sup>9</sup> 軸受は回転する部分（シャフト）を支える部品のことをいう。

### 3 コンポジット材料

#### 3.1 樹脂コンポジットの分類

樹脂コンポジット<sup>10</sup>は熱硬化性樹脂を繊維強化したFRP（繊維強化プラスチック）と、熱可塑性樹脂を繊維強化したFRTP（繊維強化熱可塑性プラスチック）に大きく分類される（図8）。

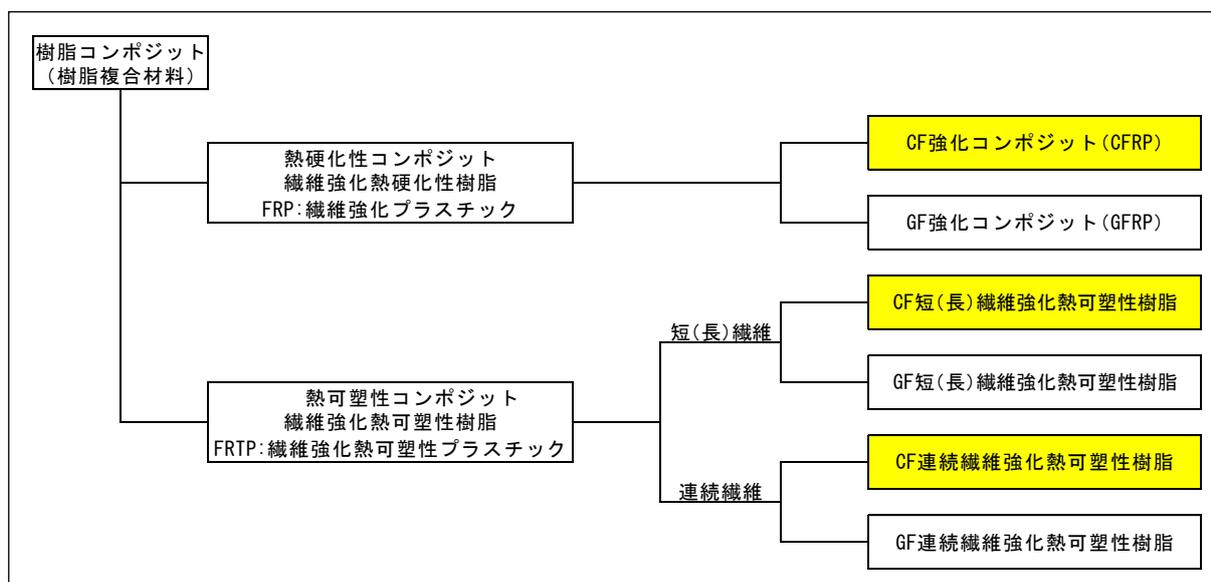


図8 樹脂コンポジットの分類（CF：炭素繊維、GF：ガラス繊維）

出典：各種資料より、旭リサーチセンター作成。

さらに、FRPは炭素繊維（CF）強化コンポジット（CFRP）とガラス繊維（GF）強化コンポジット（GFRP）に分類される。FRPのマトリックス樹脂にはフェノール樹脂やエポキシ樹脂が使用されることが多く、また繊維は、GFやCFの連続繊維を使用することが多い。

コンポジットは歴史的に熱硬化性のFRPが主流であるが、後に開発された熱可塑性のFRTPも増加している。FRTPの中ではGFやCFの短（長）繊維強化樹脂コンパウンドを射出成形するものがほとんどである。GF/CFの連続繊維や織物に樹脂を含浸したプリプレグ

<sup>10</sup> コンポジットは複合材料と呼ばれることも多いが、本レポートではコンポジットを使用する。

などのいわゆる熱可塑性コンポジットの生産は少ない。

### 3.2 短繊維強化熱可塑性樹脂とその実用化例

強化用短繊維にはガラスファイバー（GF）と炭素繊維（CF）が使用される。

マトリックス樹脂には次のものが使用される。

#### ① 汎用樹脂

PP（ポリプロピレン）

#### ② エンジニアリングプラスチック（エンブラ）

PA6（ポリアミド6〈6ナイロン〉）、PA66（ポリアミド66〈66ナイロン〉）、

PBT（ポリブチレンテレフタレート）、PC（ポリカーボネート）

#### ③ スーパーエンジニアリングプラスチック（スーパーエンブラ）

PPA（ポリフタルアミド）<sup>11</sup>、

PEI（ポリエーテルイミド）、PPS（ポリフェニレンサルファイド）、

PAEK（芳香族ポリエーテルケトン）、液晶ポリマー（LCP）

#### (1) 短繊維強化PP、PA、PPAなどの実用化例

自動車軽量化のため、PP、PA、PPAなどを使った短繊維強化熱可塑性樹脂成形品の開発が盛んで、ドイツの自動車メーカーが積極的に採用している。

#### ① 2015年、CF強化射出成形品が自動車部品市場に参入した<sup>12</sup>。

<sup>11</sup> PPA（ポリフタルアミド）は芳香族ユニットを含む半結晶のポリアミドである。融点（耐熱性）がPA66よりも高く、エンジニアリングプラスチックやスーパーエンブラに位置づけられる。いろいろなタイプが製品化されている。PA6T/66（PA6T：ヘキサメチレンジアミンとテレフタル酸の重合体とPA66との共縮合体）などである。

メーカーはSolvayがトップでDuPontが2位である。Solvayの商標は「Amodel」で結晶融点310～325℃の複数グレードがある。DuPontは「Zytel」-HTN52：PA6T/66（PA6T：ヘキサメチレンジアミンとテレフタル酸の重合体とPA66との共縮合体、結晶融点310℃）と「Zytel」-HTN51：PA6T/DT（結晶融点300℃、Dは2-メチルペンタメチレンジアミン）の2つの製品を販売している。

Evonikも「Vestamid」HT *plus*でPA6T/X（結晶融点315℃）とPA10T/Xの2つの製品を販売している。

また、Arkemaは「Rilsan」HTの商標でフレキシブルなPPAを販売している。

PPAの主用途は、自動車のエンジン回りの高温で使用する部品や電装品である。

<sup>12</sup> Plastics News Europe, 6月号 pp.13～15 (2015)

- a. 樹脂成形会社のDr. Schneider Kunststoffwerke（ドイツ）は30%CF強化PA6の射出成形品を初めて製品化した。フォルクスワーゲン（ドイツ）セダンのダッシュボードの細長い換気グリル用に採用された。
- b. 自動車会社のBMW（ドイツ）は射出成形可能な短繊維CF強化PA6を独自に検討し、成形機メーカーや成形加工メーカーの協力を得て、2015年内の実用化を目指した。短繊維CFの材料として、CF織物の屑や切れ端などの廃棄物を短繊維CF原料に利用する。すでに、クラッチペダルの17%の軽量化に成功した。
- c. ドイツの自動車内装部品会社 Grammerは、BMW用のセンターコンソールを試験成形した。Akro-Plasticの10%短繊維CF強化PA66を用いた射出成形品は30%短繊維GF強化PA66でつくられた比較品よりも機械的強度が優れ、13%の軽量化に成功した。
- d. ボルト、ねじなどの固定用部品メーカーEjot（ドイツ）は、タッピングねじにAkro-Plasticの30%短繊維CF強化PPAをテストした。現製品は、50%GF強化PPAを使用しているが、テスト品は導電性があるので、電気コネクタや、ドアの取っ手、貨物室の床などの固定に可能性がある。
- e. BASF（ドイツ）は、2014年10月に新規な15%CF強化PBTコンパウンドを発表した。このコンパウンドは、導電性、帯電防止性があるので、電子装置の保護、コンベヤーシステムや埃よけといった用途を狙っている。複雑な薄肉成形に適していて、レーザーで熔融するので、PBT部品同士の溶接も可能である。

② 2015年、軽量化のため自動車の車体構造物に熱可塑性コンポジットを使用することがヨーロッパで盛んになってきた<sup>13</sup>。

- a. ルノー（フランス）は、将来の超低燃費コンセプトカー「Eolab」に軽量化・低空気抵抗化・ハイブリッド化を取り入れ、100km/lの燃費を目指している。軽量化には、車体に熱可塑性コンポジットを多用し、従来部品の他に新概念のフロアパネル構造物、フロントガラス上下のクロスビーム、Bピラーにも使用する予定で、現時点で合計25kgの軽量化を実現し、部品数も50%近く削減した。熱可塑性コンポジットに

---

<sup>13</sup> Plastics News Europe, 7月/8月号 pp.19~21 (2015)

は、現在DuPont（米国）の「Vizilon」が採用されている。「Vizilon」は50%ガラス織物で強化したポリアミド（PA）成形品に短繊維50%GF強化ポリフタルアミド（PPA）を射出成形によりオーバーモールドしたものである。ルノーは2020年までにEolab専用の材料開発を熱可塑性コンポジットメーカーに期待している。

- b. 自動車部品メーカーのContiTech Vibration Control（ドイツ）は、メルセデス・ベンツGLクラス乗用車のエンジブラケットにBASFの50%短繊維GF強化PA66を使用して2009年から製造している。2015年からは、同樹脂を用いてメルセデス・ベンツ四輪駆動車用の後部動力伝達系構造物クロスビームも製造し、アルミニウム製と比べて25%以上の重量軽減を達成している。

## (2) 短繊維強化スーパーエンブラの実用化例

① JEC Composites見本市（2014年3月）に発泡ポリエーテルイミド（PEI）と繊維強化PEIを用いた熱可塑性樹脂サンドイッチ構造部材が出展された。特徴は軽量、耐火性、断熱性などで、用途は鉄道車両や航空機の内装材<sup>14</sup>である。

② コンポジットメーカーのPiper Plastics（米国）は、樹脂と繊維の間の接着性を強化した繊維強化熱可塑性樹脂コンパウンド「Kyron Max」シリーズを上市した。この材料は、PEEK、PPS、PPA、PA各樹脂を（新タイプの）炭素繊維、あるいはガラス繊維で強化したもので、樹脂と繊維の間の接着性を強くする同社のサイジング技術を用いて開発された。これらの材料を高圧成形した成形品はスチールより軽量で高い抗張力を有し、射出成形のため熱硬化性樹脂より低コストにできると同社はいっている<sup>15</sup>。高圧成形（射出一圧縮成形か）することが一つの特徴であるが、コストはかかると推定される。「Kyron Max」は通常の射出成形品と高価なレイ-アップコンポジット（レイ-アップは熱硬化性コンポジットの成形法）の間を埋めるもので、一例として樹脂にPEEKまたはPPAを用い、強化繊維を用いた「Kyron Max」XSシリーズ成形品の引張強度は517～827MPa、引張モジュラスは55～83GPaである。これらの値は、通常の繊維強化樹脂コン

<sup>14</sup> Kunststoffe international, 6月号 pp.14～16 (2014)

<sup>15</sup> Plastics News.com/China, 7月31日 (2014)

パウンドの値よりはるかに高い（図6、7、9、10参照）。チタン、（ステンレス）スチール、アルミニウムなどを代替できる<sup>16</sup>。

③ 2015年、世界的な長繊維コンポジットメーカーのPlastiComp（米国）は、パリで開催されたコンポジットの見本市JEC Europe 2015でイタリアのコンパウンダーXeniaと提携したことを発表した<sup>17</sup>。2社の戦略的提携の一つとして、PlastiComp製熱可塑性コンポジット「Compleat」（長繊維CFを15～50%加えて強化したPP、PEEKなど）、および、Xenia製コンポジット「Xecarb」（短繊維CF強化のPA、PPS、PPA、PEEK）をベースにして、Xeniaが欧州市場でソリューション事業を展開する予定である。

### (3) Victrexの短繊維強化PEEK

#### ① 短繊維CF/GF強化PEEK

「Victrex」にはニートレジンとして、粘度の異なる3グレード（「Victrex」PEEK 90G、150G、450G）がある。それぞれをベースレジンとしてCFやGFをブレンドした繊維強化グレードがそろっている。このうち、特記すべきは低粘度グレードの90Gと炭素繊維をブレンドしてつくられたPEEK 90HMF20（炭素繊維20%）と90HMF40（炭素繊維40%）の2グレードである。90HMFにはVictrexがもつ固有の配合技術が使われているため、同社の他の繊維強化グレードに比べ優れた機械特性（引張強度、引張モジュラス、曲げ強度、引張クリープ、耐疲労特性）と優れた耐摩耗性、低摩擦係数、低熱線膨張率をもっている。

図9、10に各種繊維強化PEEKコンパウンドの引張強度と引張モジュラスを示す。図より、繊維の充填量を増やすと引張強度と引張モジュラスがどの程度上がるかがわかる。また、同じ充填量で比較すると、炭素繊維強化PEEKはガラス繊維強化PEEKよりも引張強度と引張モジュラスが高いことが明らかである。

<sup>16</sup> Piper Plastics ホームページ。

<sup>17</sup> Plastics Technology, 4月号 p.3 (2015)

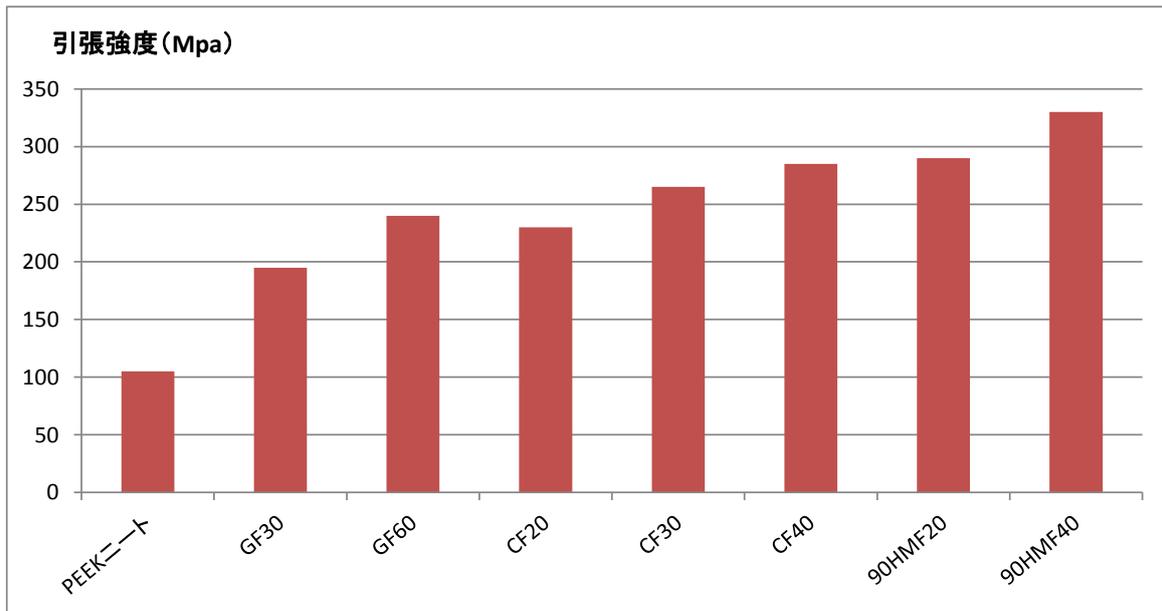


図9 PEEKニートレジジンとコンパウンドの引張強度

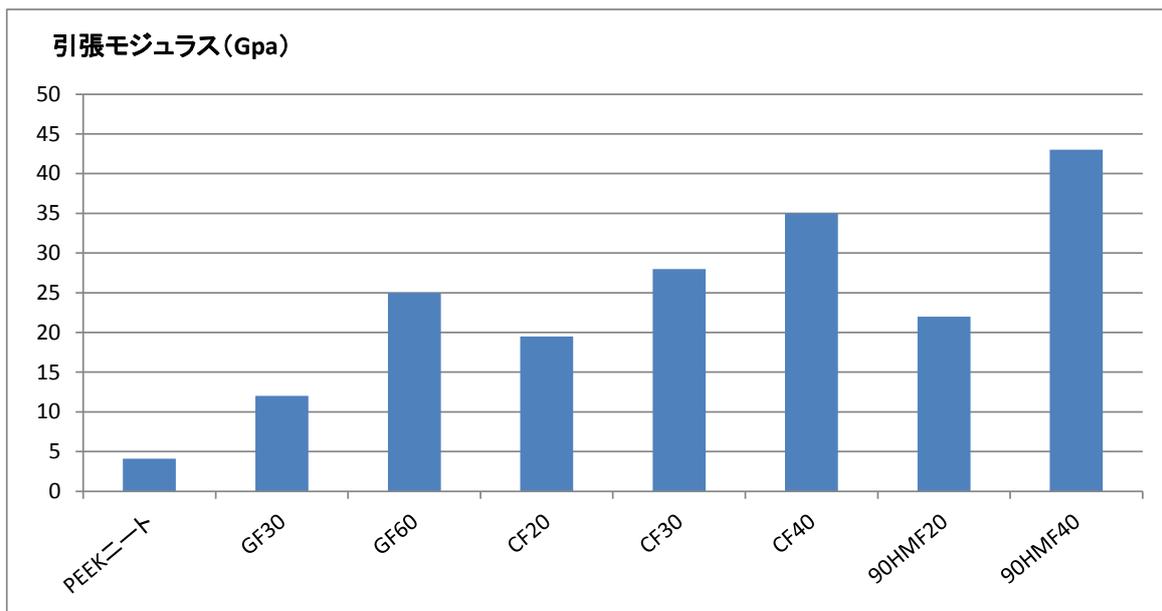


図10 PEEKニートレジジンとコンパウンドの引張モジュラス

注：PEEKニート (Victrex 90G)、GF30 (GF30%PEEK、Victrex PEEK 90GL30)、GF60 (GF60%PEEK、同90GL60)、CF20 (CF20%PEEK、同450CA20)、CF30 (CF30%PEEK、同450CA30)、CF40 (CF40%PEEK、同450CA40)、90HMF20 (CF20%強化PEEK、同90HMF20)、90HMF40 (CF40%強化PEEK、同90HMF40)  
 出典：Victrexカタログに基づき旭リサーチセンター作成。

また、図9、10よりPEEK 90HMF20 (炭素繊維20%) と90HMF40 (炭素繊維40%) の2グレードは、繊維含有量の割に引張強度と引張モジュラスが高いことがわかる。

そして最近90HMF40の採用例が2件、報告されている。

## ② CF強化PEEK製の航空機用ポンプハウジング開発 (PEEK 90HMF40)

オランダの射出成形専門会社 Egmond Plastic B.V. は、同社固有のコア技術と高性能樹脂を用いて航空機用の複雑な燃料ポンプハウジングを開発し、製造可能にした。従来のアルミニウム製の場合と比べて部品統合も可能となり、50%の軽量化と30%以上のコストダウンを達成した。使用したのは「VICTREX」PEEK 90HMF40で、機械的特性、剛性、耐久性、FST特性（難燃、煙、毒性）、耐薬品性に優れ、大手航空機メーカーのエアバスから材料認定を受けている<sup>18</sup>。

## ③ CF強化PEEK製の航空機ドア用ブラケットの開発 (PEEK 90HMF40)

PEEKを炭素繊維で強化した「Victrex」PEEK90HMF40グレードは、航空機メーカーのエアバスから材料認定を受け、旅客機A350 XWBのドア用腕木にアルミニウム置換構造材料として使われた。同腕木は、Airbus Helicopters（フランス）のドイツ工場で射出成形によって生産される。アルミニウムと比較して、強度・剛性が20%高いうえに、40%の重量軽減ができ、生産コストも40%削減する。また、アルミニウムでは航空機内の湿気対策のためにコーティングが必要だが、PEEKは必要ない<sup>19</sup>。

### 3.3 連続繊維強化熱可塑性樹脂

本項3.3では、連続繊維強化熱可塑性樹脂を熱可塑性コンポジットと略す。また、連続繊維強化熱硬化性樹脂を熱硬化性コンポジットと略す。

#### (1) 連続繊維強化熱可塑性樹脂（熱可塑性コンポジット）の製造法

以下に、現在の熱可塑性コンポジットの製造法の一例を示す<sup>20</sup>。製造法（成形法）の革新によるコストダウンとそれによる熱可塑性コンポジットの普及が強く期待されている。

##### ① 熱可塑性樹脂パウダーを用いる製造法

炭素繊維織物の表面に帯電させた熱可塑性樹脂パウダーを静電気で付着させた後、

<sup>18</sup> Kunststoffe international, 6月/7月号 p.81 (2015)

<sup>19</sup> Plastics News Europe, 12月号 pp.20~23 (2015)

<sup>20</sup> 邊 吾一、連続繊維FRTPの成形法と特性、日刊工業新聞社刊 (2015)

赤外線を照射することで織物とパウダーを溶着させ、プリプレグ<sup>21</sup>をつくる方法である。このプリプレグはPowder Impregnated Fabric (PIF) と呼ばれる。海外ではPorcher Industries (フランス、商品名「PIPREG」 thermoplastic composites) とTenCate Advanced Composites (オランダ) がこの方法でプリプレグを生産している。日本では(株)サン・テクトロがPAEKのプリプレグの試作を行っている。

#### ② ペレットを用いた押し出し/引き抜き成形法

ペレットを押し出し機により熔融押し出し、押し出し機先端のクロスヘッドで引きそろえた強化繊維に含浸させながら引き抜く方法である。強化繊維が一方向に引きそろえられた一方向テープ (UDテープ、図12) が得られる。PAEKに応用されている。

#### ③ フィルム、スタンパブルシートを用いたプレス成形法

材料に炭素繊維などの強化材と熱可塑性樹脂フィルムを交互に重ねたシートを使い、プレス装置の金型内で加熱・加圧して成形する方法である。また、すでにシート状になっている炭素繊維強化熱可塑性樹脂シート (スタンパブルシートまたは熱可塑性プリプレグと呼ばれる) を所定の寸法に裁断し、これをヒーターなどで加熱後、プレス成形する方法も含まれる。後者はプレス時間が短く (～30秒)、トータルの成形サイクル1分以内となっている。この方法の研究開発が盛んである。PAEKに応用されている。

#### ④ コミングルヤーンを用いた成形法

強化繊維束と樹脂を繊維化した繊維束を混ぜ合わせた混繊糸 (Commingled Yarn) を加熱・加圧して成形する方法である。PAEKに応用できる方法である。

### (2) 熱可塑性コンポジット

連続繊維強化の熱可塑性コンポジットのマトリックス樹脂としては、汎用樹脂のPP、エンブラのPA、スーパーエンブラのPEI、PPS、PAEKなどがある。

現在、熱可塑性コンポジットの成形時間が短いことに注目して、自動車用材料とし

---

<sup>21</sup> プリプレグはCFやGFのファイバーや織物にマトリックス樹脂を含浸させたシート状の中間材料のことである。一方向テープ (UDテープ) プリプレグやクロスプリプレグなどがある。プリプレグを後加工して、最終の成形体をつくる。

て金属や熱硬化性コンポジットを代替しようとする開発がなされている。狙いは自動車の軽量化である。

日本においても自動車用の連続炭素繊維強化の熱可塑性コンポジットの開発が、NEDOプロジェクト「サステナブルハイパーコンポジット技術の開発」で実施された<sup>22</sup>。熱可塑性コンポジットの優れた短時間成形性と熱硬化性コンポジット並みの性能を併せ持つ新規な熱可塑性コンポジットの開発が目標であった。マトリックス樹脂としてポリアミド（PA）とポリプロピレン（PP）が中心に検討された。易加工性の一方向性中間素材や等方向性中間素材の炭素繊維強化熱可塑性コンポジット（CFRTP）が開発され、また易加工性CFRTPの成形技術が開発された。2016年にプロジェクトは終了し、事後評価結果が発表されている。

図11はプロジェクトの報告資料に記載されている図を参考にして作成したものである。航空機用途に使われる最も優れた性能を有する熱硬化性の連続繊維強化エポキシプリプレグは成形サイクルタイムが長く、自動車用には使えない。成形サイクルタイムを短縮した織物を使うRTM（レジン トランスファー モールドィング）や中繊維を用いたSMC（シートモールドィング：繊維長1～10mm）も開発されているが、図のように依然として成形サイクルタイムは長く性能は低下する。

一方、熱可塑性樹脂の短（長）繊維強化ペレット（繊維長0.1～1mm）は、性能が低いが成形サイクルは短い。成形サイクル時間を維持しながら、連続繊維を使用することによりPAやPPの性能をアップさせてRTM～連続繊維熱硬化性プリプレグ並みにしようとするのがプロジェクトの目標である。これを実現して自動車に採用される道筋をつくろうというものである。

なお、図11に示すように、成形サイクルタイムの短い高性能の熱可塑性プリプレグ（PAEKやPPS）は、連続繊維強化エポキシプリプレグを代替することが期待される。

---

<sup>22</sup> NEDO プロジェクト「サステナブルハイパーコンポジット技術の開発」①成果のプレス発表 [http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_100221.html](http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100221.html)、②事後評価 [www.nedo.go.jp/content/100558176.pdf](http://www.nedo.go.jp/content/100558176.pdf)  
平松徹、炭素繊維コンポジット入門、p. 148 日刊工業新聞社刊（2015）

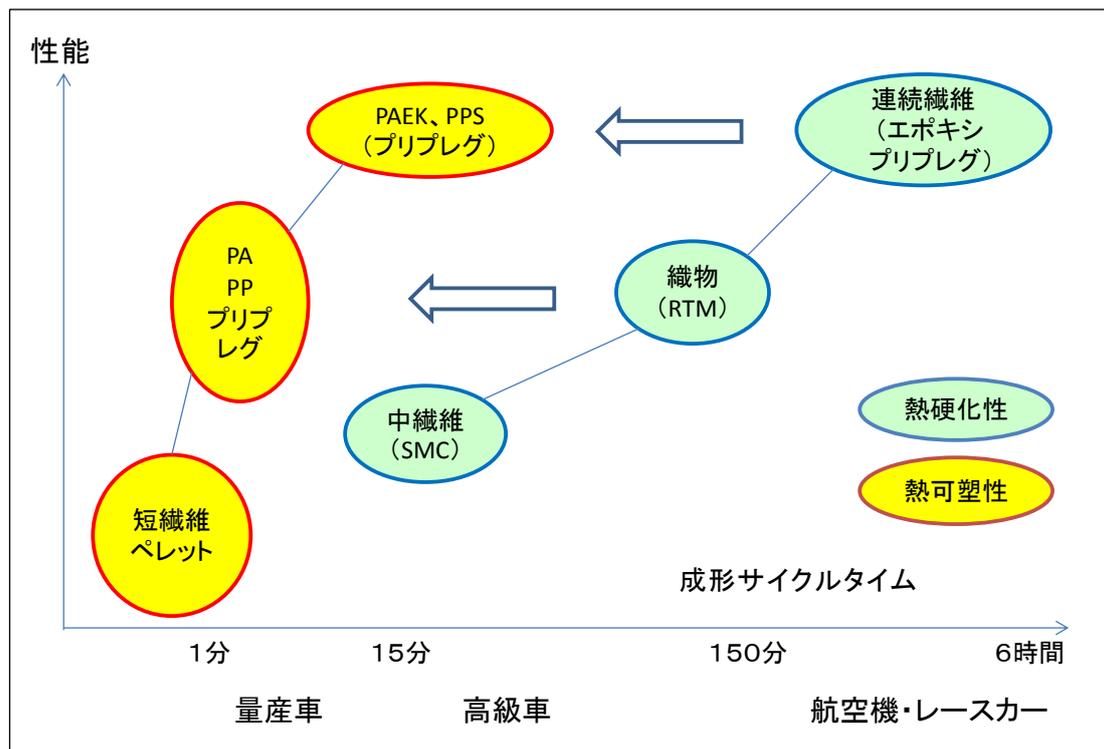


図11 炭素繊維強化コンポジットの技術動向

出典：NEDOプロジェクト「サステナブルハイパーコンポジット技術の開発」報告書資料を参考に旭リサーチセンターが作成した。

航空機などのハイエンドに使用される高性能熱可塑性コンポジットには、非晶性のポリエーテルイミド（PEI、ガラス転移温度 217℃）、ポリフェニレンサルファイド（PPS、ガラス転移温度 90℃、結晶融点 285℃）、PEKK（T/I=70/30の場合、ガラス転移温度 162℃、結晶融点 332℃）、PEEK（ガラス転移温度 143℃、結晶融点 343℃）をマトリックス樹脂とするものがある。

PEEKの価格を100とするとラフにPEI 25、PPS 10である。PEKKはPEEKより少し安く市場に出ていたようである。PEEKの価格（100）は、競合するエポキシ樹脂の価格20～40に比べて高い。

連続繊維強化PEIと連続繊維強化PPSは航空機材料としてすでに多くの採用実績があるが、それに比べて連続繊維強化PEKKとPEEKについての採用例は少ない。PEEKやPEKKの価格が高いことが一つの理由である。

熱可塑性樹脂コンポジットは一方向テープからラミネートをつくる際のキュア（熱成形）時間が短く、オープンを必要としないことがメリットである。また樹脂やコ

ンポジットのリサイクルができることも特長である。また、後で述べるようにPEKKやPEEKのコンポジットはエポキシ樹脂コンポジット並みの特性を有している。

### (3) 熱硬化性コンポジット

熱硬化性コンポジットの代表例は、フェノール樹脂やエポキシ樹脂をガラス繊維で強化したGFRPで、船体やバスタブなどに使用される。またエポキシ樹脂を炭素繊維で強化した高性能なCFRPが航空機や自動車に使われる。熱硬化性コンポジットは、熱可塑性コンポジットが代替しようとしているターゲットである。

ボーイング787やエアバスA340・A380に炭素繊維強化熱硬化性コンポジットが一次および二次構造材に大量に使用されるようになったことはよく知られている。ボーイング787の素材別比率は、コンポジット50%、アルミ合金（各種ジュラルミン）20%、チタン合金15%、スチール10%、その他5%といわれる<sup>23</sup>。

航空機材料としてはエポキシ樹脂（Tg 125～200℃）が主に使用されるが、耐熱性の高いビスマレイミド樹脂（BMI、Tg ～285℃）、シアネートエステル樹脂（Tg 177～321℃、硬化温度によってTgをコントロールすることができる）、ポリイミド樹脂（PI、Tg ～390℃）なども使われる<sup>24</sup>。エポキシ樹脂のガラス転移温度は硬化剤の種類や硬化温度によってコントロールできる。同じ、硬化剤でも硬化温度を上げるとガラス転移温度を上げることができる。航空機用にはTgが170～200℃のものが必要である。130℃くらいでキュア（硬化）させた後に、170℃くらいでポストキュア（後架橋）してつくられる。

PEEKの価格を100としたときのラフな相対価格はエポキシ樹脂20～40、ビスマレイミド樹脂100、シアネートエステル樹脂160、ポリイミド樹脂600である。

硬化前の熱硬化性樹脂は粘度が低いので加工しやすく、また強化繊維との濡れが良好であるので、プリプレグはつくりやすい。そしてプリプレグは粘着性があり、張り合わせなどの後加工がしやすい特長がある。ただし、プリプレグの寿命が短く長く保存す

---

<sup>23</sup> 炭素繊維協会ホームページ。

<sup>24</sup> TenCateの製品カタログ数値を参考にした。

ることはできないこと、熱硬化反応に時間がかかること、硬化に大きなオープンが必要なことが欠点である。

硬化時間の一例は、フェノール樹脂は60分以上、エポキシ樹脂は60～360分（130℃～180℃）、ビスマレイミド（BMI）樹脂は120分（204℃）＋ポストキュア360分（250℃）、シアネートエステル樹脂は180分（177℃）＋ポストキュア（260℃）、ポリイミド樹脂は120分以上が必要である。一方、熱硬化性コンポジットは架橋体なので荷重がかかった状態の機械特性（クリープなど）に優れるのが特徴である。

以上のように熱硬化性コンポジットは長所、短所があるものの、長年の実績から工業技術は確立されているといえる。

なお、日本は炭素繊維の生産や技術は世界一であるが、航空機用炭素繊維強化熱硬化性コンポジットを製造するための加工機械は、ドイツが進んでいるといわれる。

#### (4) PEEKコンポジットとエポキシ樹脂コンポジットの物性比較（TenGate）

表3にPEEKとエポキシ樹脂の一方方向コンポジットテープとそれを積層したラミネート品のカタログデータを示す（大手コンポジットメーカーのTenGate Advanced CompositesのPEEKとエポキシ樹脂のカタログデータを筆者が一つの表にしたものである）。使用している炭素繊維は、PEEKはAS-4で、エポキシ樹脂はHTS-40で異なる。エポキシ樹脂は130℃でキュア（硬化）するとTgが140℃の硬化物が得られ、177℃でポストキュア（後硬化）するとTgが180℃の硬化物が得られる。

プリプレグ中の繊維の容量はいずれも約60%である。繊維方向（0°方向）の機械物性が優れ、その直角方向の機械物性は低く強い配向性がある。図12に炭素繊維強化一方方向テープの模式図と物性の測定方向を示す。

表3からわかるように、エポキシ樹脂コンポジットとPEEKコンポジットの室温の性能はほとんど変わらない。違いは、エポキシ樹脂コンポジットの0°方向の圧縮強度が1730MPaとPEEKコンポジットの1300MPaより高いことである。半面、PEEKコンポジットの平面せん断強度は152MPaでエポキシコンポジットの102MPaより高いことである。

なお、エポキシ樹脂には低温と高温の詳細なデータがあるが、PEEKについては入手

できなかった。

航空機の構造材料（一次および二次）に高性能の連続炭素繊維強化エポキシ樹脂コンポジットが使用されている。これを連続炭素繊維強化PEEKコンポジットがどこまで代替できるかは注目される。

表3 PEEKコンポジットとエポキシ樹脂コンポジットの一方向テープの性能

	PEEK コンポジット	エポキシ樹脂 コンポジット		
製造メーカー	TenCate	TenCate		
製品名称 プリプレグ	Cetex TC1200 一方向テープ	TC250 Resin System 一方向テープ		
マトリックス樹脂 (Tg)	PEEK 143℃	タフタイプエポキシ樹脂 130℃または180℃		
強化繊維	炭素繊維 AS-4	炭素繊維 HTS-40 12K		
強化繊維の容量% マトリックス樹脂含量 重量% プリプレグの面積当たりの重量 繊維の面積当たりの重量 (FAW)	59% 34% 218gsm 146gsm	60% NA NA 150gsm		
ラミネートの機械特性	試験温度 室温(82℃ウエット)	試験温度		
		室温	マイナス54℃	82℃(ウエット)
0° 方向の引張特性 強度 (MPa)	2280	2103	2018	2088
モジュラス (GPa)	130	140	138	134
ポアソン比	0.33	0.3	0.35	0.29
0° 方向の圧縮特性 強度 (MPa)	1300 (1210)	1730	2011	1303
モジュラス (GPa)	124 (121)	133	134	123.8
90° 方向の引張特性 強度 (MPa)	86	56.5	63.3	33.8
モジュラス (GPa)	10	9.8	11.7	8.1
90° 方向の曲げ特性 強度 (MPa)	152	NA	NA	NA
平面せん断特性 強度 (MPa)	152	102	NA	93
モジュラス (GPa)	5.2	9.9	NA	6.3
オープンホール引張 強度 (MPa)	387	405	387	438
オープンホール圧縮 強度 (MPa)	320	278	NA	259
充填ホール 引張強度 (MPa)	NA	470	476	437
層間せん断強度 (SBS) 0° /90°	94 (77)	83	89	59

注：AS-4炭素繊維：高強度>3447MPa、中モジュラス 228GPa、HT炭素繊維：強度>2500MPa、標準モジュラス 200~280GPa。gsmはg/m<sup>2</sup>を示す。NAはデータがないことを表す。

出典：TenCate Advanced Compositesのカタログ。

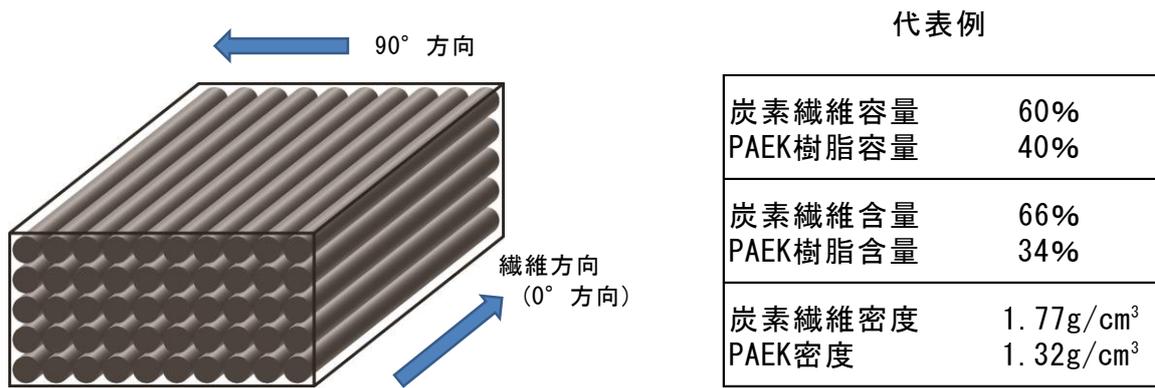


図12 炭素繊維強化一方向テープの模式図と物性測定方向

注：黒い部分が炭素繊維を表わす。

出典：各種資料より旭リサーチセンター作成。

TenCate Advanced Composites（テンカテ、以下TenCateと略す）はオランダを本拠地とするグローバル企業で、300年以上の歴史をもち、世界29カ国に4,300人の従業員がおり、年間売上高は110億ドル（1兆1,000億円）を超えている。米国に4カ所、ヨーロッパに2カ所のプリプレグ工場をもっている。熱硬化性コンポジットとしては、エポキシ、ビスマレイミド、シアネートエステル、ポリイミドをマトリックス樹脂とするものをもっている。熱可塑性コンポジットとしては、PEEK、PEKK、PEI、PPS、PCをマトリックス樹脂とするものをもっている。世界最大の熱可塑性コンポジットメーカーなので、TenCateの動向は注目すべきである。

#### (5) PEKKコンポジットとエポキシ樹脂コンポジットの物性比較（Cytec）

社団法人・日本機械工業連合会は、“従来、航空機などの輸送機器にはエポキシ樹脂などの熱硬化性コンポジットが使用されていたが、近年、高強靱性、リサイクル性、量産性の特長を有するとともに、従来の技術課題であったプリプレグ製造性、成形性を改善する技術が開発されつつある熱可塑性コンポジットが注目されていることから、2007年度（平成19年度）欧米の関係企業訪問を含む調査を行い、熱可塑性コンポジットの適用実績を調査するとともに、今後の適用候補対象について提言を行った”。

その調査報告書“平成19年度熱可塑性樹脂複合材料の機械工業分野への適用に関する

る調査報告書<sup>25</sup>”にPEKKコンポジットとエポキシ樹脂コンポジットの物性についての見解が記載されている。その要旨は、1997年頃に市場に登場したPEKKは、PPSに対して耐熱性能に優れ、PEEKに対して材料費が安い特長があり、航空機の設計上重要となる、ウェットサンプルの高温（82℃）での有孔圧縮強度および衝撃付与後の圧縮強度が、熱硬化性エポキシコンポジットと比較しても優れた性能を発揮しており、今後、PEKKコンポジットが航空機の主構造部品に適用されていく可能性があるというものである。その見解のベースになっているのは、表4のCytec Industries（米国、以下、Cytecと略す）のPEKKコンポジットと（セミ）タフタイプエポキシ樹脂コンポジットの物性比較データである。表4によれば、PEKK/CF（IM-7）とPEKK/CF（AS-4）はともに、（セミ）タフタイプエポキシ/炭素繊維に比べ明らかに性能が優れている。

表4 PEKK/炭素繊維コンポジットとエポキシ樹脂/炭素繊維コンポジットの比較

炭素繊維強化樹脂複合材	有孔圧縮強度	衝撃後の圧縮強度	有孔引張強度	有孔圧縮強度
	82℃Wet	1500in-lb/in衝撃後	室温	室温
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
PEKK/炭素繊維（IM-7）	289	276	442	318
PEKK/炭素繊維（AS-4）	300	248	470	300
タフタイプエポキシ樹脂/炭素繊維	214	268	401	282
セミタフタイプエポキシ樹脂/炭素繊維	255	217	NA	NA

注：①IM-7炭素繊維：高強度>5170MPa、中モジュラス 228Gpa、AS-4炭素繊維：高強度>3447MPa、中モジュラス 228Gpa ②衝撃強さ：1500in-lb/in=6.67J/mm。

出典：Cytec Industriesの2つの図資料を旭リサーチセンターが一つの表にした。

#### (6) PEEKコンポジットとPEKKコンポジットの比較①（SolvayとCytec）

2015年に、Solvayは大手コンポジットメーカーのCytecを買収した。Cytecは熱硬化性樹脂と熱可塑性樹脂の両方のコンポジットを製造する大手コンポジットメーカーである<sup>26</sup>。そして、PEEKとPEKKのコンポジット（プリプレグ）を販売している。

<sup>25</sup> <https://sokeizai.or.jp/japanese/rimcof/images/nikkiren-19.pdf>

<sup>26</sup> Solvayは、米国のコンポジット会社Cytec Industries（以下Cytec）を64億ドルで、2015年12月9日に買収した。Cytecの主要製品は、航空宇宙産業用コンポジット材料で、Solvayは、その軽量化技術を生かし、ビジネス分野の一つである自動車市場の軽量化要望に積極的に応えていく予定である。Cytecは、2014年売上高が20億ドルで、その3分の2がコンポジット製品である。Solvayは、2016年1月1日からCytecを吸収合併して、宇宙航空産業に軽量材料を供給する主要会社になる。

IHS Chemical Week, 7月27日/8月3日号 p.7, 11月30日/12月7日号 p.4, 12月14日号 p.10 (2015)

比較しやすいようにCytecのPEEKコンポジットとPEKKコンポジットのカタログデータを表5に集約した。同時にTenCateのPEEKコンポジット（炭素繊維はAS-4を使用）のデータを併記した（表3のPEEKコンポジットと同じ）。

#### ① CytecのPEEKコンポジット

Cytecは“APC-2-PEEKコンポジット”とよんでいる。このコンポジットは、軽量負荷では260℃まで使用できるとしている。APC-2-PEEKコンポジット（プリプレグ）は室温なら、寿命は無限である。

使用した原料のPEEKは、ガラス転移温度143℃、引張強度 100MPa、引張モジュラス 3.6GPa、破断伸度 70%、密度 1.32 g/cm<sup>3</sup>である。使用した炭素繊維はIM-7で、高強度（>5170MPa）で中モジュラス（276GPa）である。一方向テープをラミネートした試料の性能を表5に示す。

#### ② CytecのPEKKコンポジット

CytecはPEKKの一方向テープを販売している。顧客の要望があれば、テープをラミネートした製品も販売する。典型的な繊維含量は容量で50～60%であり、PEKKコンポジットは、軽量負荷条件では204℃まで使用できる。

一方向テープ（プリプレグ）は室温なら、寿命は無限である。一方向テープの樹脂含有量は34.5%、繊維単位面積当たりの重量は145g/m<sup>2</sup> キュア後の厚みは0.0055インチ（0.14mm）である。一方向テープをラミネートしたものの特性を表5に示す。

使用した原料のPEKKのガラス転移温度は乾燥時159℃、ウェット時135℃であり、融点は337℃である。引張強度 102MPa、引張モジュラス 4.5GPa、破断伸度 4%、密度 1.31 g/cm<sup>3</sup>（結晶化度が30%の時）、難燃性はUL-94法でV-0である。

Cytecの物性表には、室温ばかりでなく低温（-55℃）と高温（121℃のドライサンプルとウェットサンプル）のデータが示されている。ウェットサンプルの121℃が最も厳しい条件である。この範囲ではPEEK、PEKKともに大きな物性の低下は見られないので、この条件で使用できることを示している。また、PEEKとPEKKの物性の顕著な差もない。

表5 PEEKとPEKKの一方方向テープ（UDテープ）の性能

CytecのAP-2-PEEK（黒字）とPEKK composites（赤字）／TenGateのCetex TC1200（PEEK）

製造メーカー	Cytec				TenGate
製品名称 プリプレグ	APC-2-PEEK (PEKK composite) 一方方向テープ				Cetex TC1200 一方方向テープ
マトリックス樹脂	PEEK (PEKK)				PEEK
強化炭素樹脂	IM7 (高強度>5170MPa、中モジュラス 276GPa) (高強度>4450MPa、標準モジュラス 228GPa)				AS-4
強化繊維の容量% マトリックス樹脂含量 重量% プリプレグ 面積当たりの重量 繊維の面積当たり重量 (FAW)	60% NA (34.5) NA NA (145gsm)				59% 34% 218gsm 146gsm
機械特性	試験温度				試験温度
	マイナス55℃	24℃	121℃	121℃ (Wet)	室温
0° 方向の引張特性 強度 (MPa)	2830 (2561)	2900 (2463)	2760		2280
モジュラス (GPa)	172 (141)	172 (139)	172		130
破断伸び (%)	1.5	1.4	1.4		
ポアソン比	0.26	0.27	0.3		0.33
0° 方向の圧縮特性 強度 (MPa)	1510	1310 (1493)	1170 (1288)	1170 (1125)	1300
モジュラス (GPa)	152	152 (127)	145 (128)	145 (130)	124
0° 方向の曲げ特性 強度 (MPa)	2410	2170 (1707)	1790 (1376)	1790	
モジュラス (GPa)	159	159 (127)	152 (126)	152	
90° 方向の引張特性 強度 (MPa)	63	60 (61)	48	NA (47)	86
モジュラス (GPa)	11	10 (10.3)	8.3	NA (8.2)	10
90° 方向の圧縮 強度 (MPa)		NA (254)	NA (190)	NA (180)	
90° 方向の曲げ特性 強度 (MPa)	110	103	90	90	152
モジュラス (GPa)	9.7	9.7	7.6	7.6	
平面せん断特性 強度 (MPa)	193	179	138	131	152
0.2%Offset Shear Stress モジュラス (GPa)		NA (52.4) 5.5 (5.2)	NA (34.5) 3.6 (3.8)	NA (24.8) 2.8 (2.8)	5.2
オープンホール引張 強度 (MPa)	510 (466)	476 (452)	455	434	387
オープンホール圧縮 強度 (MPa)	345	324 (332)	262	248 (275)	320
衝撃後の圧縮 6.67J/mm 衝撃後強度 (MPa)		366 (327)			
層間破壊靱性					
モデル I (KJ/m <sup>2</sup> )	1.6	2.3			
モデル II (KJ/m <sup>2</sup> )	2.1	1.9			

注：gsmはg/m<sup>2</sup>を示す。NAと該当欄空欄はデータがないことを示す。

AS-4炭素繊維：高強度>3447MPa、中モジュラス 228GPa

出典：Cytec IndustriesとTenGate Advanced Compositesのカタログ。

(7) PEEKコンポジットとPEKKコンポジットの比較② (ArkemaとTenCate)

① ArkemaはPEKKのT/I=60/40、70/30、80/20の3グレードについてコンポジットのマトリックス樹脂として検討した。T/I=60/40では十分な結晶化度が得られず、またT/I=80/20では強度的には十分であったが、望ましい加工温度の370～385℃を超える加工温度が必要であったことから、中間のT/I=70/30がコンポジットとして最適候補と結論した。

② ArkemaはTenCateのデータ (表6) を引用して、PEEKに比べてPEKKは熔融温度が11℃低く、加工温度が20℃低く、ガラス転移温度が19℃高く、衝撃後の圧縮強度が16%高い特長があるとしている。

表6 TenCateのPEEKとPEKKの一方向テープ (UDテープ) の性能

メーカー	TenCate	TenCate
製品名称	Cetex TC 1200	Cetex TC 1320
材料	PEEK	PEKK
特性	最低～最高	最低～最高
ガラス転移温度	143℃	162℃
熔融温度	343℃	332℃
使用温度 (コンポジット)	128℃	147℃
連続使用温度 (樹脂)	250℃～260℃	260℃
加工温度 (コンポジット)	380℃～400℃	360℃～380℃
限界酸素指数 (樹脂のみ)	24%～35%	35%～40%
オープンホール強度 (室温)	387MPa	393MPa
オープンホール圧縮 (室温)	320MPa	328MPa
衝撃後の圧縮強度	265MPa	308MPa

出典：Arkemaプレゼンテーション資料<sup>27</sup>、元資料はTenCate Advanced Composites

③ 最近、TenCateはPEEKコンポジットの新製品「Cetex」TC1220を発売した。TC1220は従来品のTC1200に比べ、衝撃後の圧縮強度がかなり改善されている。

これまで、TC1200の衝撃後の圧縮強度が265MPaであったが、TC1220 (PEEK/炭素繊維・AS-4) では345MPaに、またTC1220 (PEEK/炭素繊維・IM-7) では365MPaに改善された。

<sup>27</sup> T. Spahr, Arkema 「KEPSTAN」 PEKK Polymer ([www.sampe.com.br/apresentacoes/2015/.../arkema.pdf](http://www.sampe.com.br/apresentacoes/2015/.../arkema.pdf))

TenCateは、「Cetex」TC1220の6または12インチ幅の一方向テープを販売し、用途として、①航空機一次構造材料、②航空機二次構造材料、③アクセス パネル、リブ ステイパー、ブラケット、コンポジット、フローリングを挙げている。

④ 2015年のJEC Europe 2015（パリ、2015年3月）でTenCateは Cetex TC1320 PEKKを新製品として発表した。民間航空機向けに構造用部品から内装品まで幅広い用途に使用できる材料で、難燃性、低吸湿性、吸湿時・高温時の機械特性の良好な保持性、優れた耐溶剤性、衝撃後の優れた圧縮強度といった特長を挙げている。製品は、一方向テープ（UDテープ）、ラミネートや織物ベースのプリプレグの形で入手できる。ガラス転移温度 160℃、最初のキュア温度 371℃、キュアタイム（一方向テープを積層するための成形時間）3～5分、製品の保存可能時間は無限である。なお、TC1220（PEEKコンポジット）の最初のキュア温度は385℃である。

#### **(8) Victrexの取り組み：PAEKコンポジット（プリプレグ）の発売**

##### **① 連続炭素繊維強化PAEKコンポジット（プリプレグ）「Victrex AE250」の発売**

2015年10月20日に、Victrexは航空機用の連続炭素繊維（CF）強化のPAEKコンポジットを発売することを発表した。商品名は「Victrex AE250」である。素材がPEEKでなくPAEKと記していることは注目される。「Victrex AE250」のマトリックス樹脂である「Victrex」PAEK A250と従来品のPEEK 150P（低粘度のパウダーグレード）を比較した（表7）。

PAEK A250はPEEK 150Pより結晶融点が38℃低く、ガラス転移温度は逆に4℃高い。結晶融点が低くなった分、コンポジットの加工温度を下げるができる。

販売されているコンポジット（プリプレグ）は、一方向テープ（UDテープ）と積層板（laminated panel）である。このコンポジットは、航空機中の一次構造および二次構造内のブラケット（腕木・支え）、クリップ、クランプ、ハウジングなどに使用できる。今回、川下のコンポジットの販売を開始することにより、Victrexは航空機分野のサプライチェーンを強化することができた。

表7 「Victrex」 PAEK A250と「Victrex」 PEEK 150Pの比較

	PAEK A250 (コンポジットの マトリックス樹脂)	PEEK 150P (低粘度、 ハイパーグレード)
結晶融点 (°C)	305	343
ガラス転移温度 (°C)	147	143
引張強度 (Mpa)	90	100
引張モジュラス (Gpa)	3.5	3.7
破断伸び (%)	15	15
アイゾット衝撃強度 (KJ/m <sup>2</sup> )	5	4.5

出典：Victrex (Composites World, 7月号p.19 (2015))

また、2014年に発表したハイブリッドモールディング（オーバーモールディング）技術をこのコンポジットに活用する。室温の連続CF PAEKコンポジット（「Victrex PAEK AE250」）を基材にしてその上に短繊維CF PEEKコンパウンドを射出成形して、航空機用ブラケットなどをつくる技術である。PAEK AE250の融点をPEEK 150Pより下げることにより、オーバーモールディングの際に室温のPAEK AE250成形品と溶融PEEKの融着が強固になるようにしている。

2016年2月にVictrexは、工業用一方向テープおよび医療分野のPEEKコンポジットの生産設備を増強するため、2,270万ドル（22.7億円）を投資することを発表した<sup>28</sup>。

## ② ハイブリッドモールディング（オーバーモールディング）

Fakuma 2015（プラスチック加工の国際見本市、ドイツ）に出展したVictrexは、連続炭素繊維強化PAEK（コンポジット）に、PEEK樹脂を組み合わせたハイブリッド成形加工を紹介した。宇宙・航空用途に使われる<sup>29</sup>。

Victrexは航空機部品メーカーのTri-Mack（米国）と共同でこのハイブリッド（オーバーモールド）成形を確立し、各種ブラケットの試作に成功した<sup>30</sup>。これは、連続CF樹脂コンポジットの後加工には制限があることから、この問題を克服して多様な構造部品を自由につくることを追求した結果である。上記のように、室温の連続CF PAEKコンポジットを基材にそ

<sup>28</sup> Plastics Technology, 2月号 p.8 (2016)

<sup>29</sup> Plastics News Europe, 10月号 pp.12~21 (2015)、Victrexのコンポジットカタログ。

<sup>30</sup> Composites World, 7月号 p.19 (2015)

<http://www.compositesworld.com/articles/overmolding-expands-peeks-range-in-composites>

の上に短繊維CF PEEKコンパウンドを射出成形するというものである。こうしてできたブラケットは金属製に比べ60%以上軽量化された。形状の自由度が高まり、より良いブラケットをコンピュータで設計できる（図13）。図の上部が連続CF・PAEKコンポジット（AE250）であり、下部の固定部が射出成形されたCF短繊維強化PEEKである。下部は射出成形なので、自由な構造のものをつくることができる。



図13 Tri-MackのPEEKハイブリッドモールディングによるブラケット

出典：Tri-Mackホームページ (<http://www.trimack.com/>)

なお、繊維強化樹脂シートに樹脂をオーバーモールディングする手法はすでに自動車用でポリアミドやPPで実用化されている。18ページ記載のDuPontの「Vizilon」もオーバーモールディングである。

## (9) Evonikの取り組み

① Evonikは「VESTAKEEP」PEEKを使ってパウダー コーティング法やディスパージョンコーティング法により一方向テープや織物のコンポジットをつくることを推奨している。Evonikはパウダー コーティングに好適なPEEKパウダーを販売している。

PEEK VESTAKEEP 2000とCF（TENAX HTS：引張強度 4300～4500MPa、引張モジュラス

240GPa、密度1.77 g/cm<sup>3</sup>) からなる一方向テープをラミネートしたものの特性は、比重1.61 g/cm<sup>3</sup>、マトリックス樹脂含量34±2%、結晶化度35±3%、引張強度2480MPa、引張モジュラス 145GPa、圧縮強度1370MPa、圧縮モジュラス127GPaである。これは、EvonikがTT Group (tohotenax-eu) から提供を受けたデータである。

この物性値は、使用している炭素繊維の違いを考慮すれば、CytecやTenCateのPEEKコンポジットの物性値とほぼ同じである。

② Evonikは新規な繊維強化熱硬化性コンポジット用マトリックス樹脂のポリエーテルアミド樹脂「CALIDUR」をもっており、また高性能熱硬化性樹脂であるビスマレイミド樹脂「COMPIMIDE」を有している。「CALIDUR」は最高190℃のガラス転移温度を有している。また、「COMPIMIDE」は250℃でも機械特性が保持され、シアネートエステル樹脂やエポキシ樹脂よりも性能が優れ、将来の“Advanced composites”の要求性能を満たすものである。二つの製品とも航空機用途を狙っている。

③ Evonikとコンポジット材料メーカーのSecar Technologie (オーストリア、1998年設立、従業員65名) は、自動車と航空機向けに繊維強化コンポジット部品の量産を目的とする合弁会社 Liteconeを2013年に設立した。フォームをコアとした3次元コンポジットの工業生産が目的である。Secarはコンポジット部品の量産ノウハウを有している<sup>31</sup>。

## (10) 炭素繊維強化プラスチックの需要と航空機用途の需要

### ① 炭素繊維強化プラスチックの需要

事業コンサルティング会社のGrand View Research (米国) は、炭素繊維 (CF) で強化されたプラスチック (CFRP) の世界市場は、2022年までに235億ドル (2兆3500億円) に到達すると予測している。航空宇宙および防衛産業が市場の主要分野で、2014年に30%を占めた。自動車産業は、米国および欧州の燃費規制により車両の軽量化を推進し、2015年から2022年までの成長速度が最も速い分野と予想している。また地域では、欧州が最も成長すると見ている<sup>32</sup>。

<sup>31</sup> European Plastics News, 2月号 p.24 (2014)、Secar Technologieのホームページ。

<sup>32</sup> Plastics News.com/China, 4月14日 (2016)

## ② 航空機用途の需要

熱可塑性コンポジットは、2005年以降航空機に採用が始まり、航行重量<sup>33</sup>は2015年に2万2,000トンになり、2028年には3万4,000トンに増加すると予想されている。一方、熱硬化性コンポジットの航行重量は2015年に27万トンで、2028年に34万トンに増加すると見られている。2028年に熱可塑性コンポジットは熱硬化性コンポジットの約10%になる。なお、その他の金属アロイなどの航行重量は2015年から2028年にかけて約54万トンでほぼ一定である<sup>34</sup>。

航空機用途は構造材料（一次と二次）と室内内装材料に分けられる。構造材料の高い要求性能を満たすものはPAEKだけで、一部ポリフェニレンサルファイド（PPS）やポリエーテルイミド（PEI）が使用できる。室内材料はFST規制<sup>35</sup>をクリアできるPAEK、PEI、PPS、ポリエーテルスルフォン（PES）、ポリフェニルスルフォン（PPSU）などに限られる。

### 3.4 考察——連続炭素繊維強化PAEKコンポジットの将来

前述のように、PAEKコンポジットは物性的にはエポキシ樹脂コンポジットと比べ遜色はない。ただし、エポキシ樹脂を代替していくためにはいくつかの課題を克服していく必要がある。一つは競合材料のエポキシ樹脂コンポジットや同じ熱可塑性コンポジットのPPSコンポジットやPEIコンポジットに対して、コスト パフォーマンスで優れること、もう一つはコンポジット製品をつくるための工業的製造技術の革新である。

#### (1) 高性能熱可塑性コンポジットとエポキシ樹脂コンポジットの比較

社団法人・日本機械工業連合会が2009年3月にまとめた“平成20年度 熱可塑性樹脂複合材料の航空機分野への適用に関する調査報告書”<sup>36</sup>によれば、プリプレグメーカー

<sup>33</sup> Flyaway weightを航行重量と訳した。航行中の航空機に使用されている材料の重量と推定した。

<sup>34</sup> Composites World, “The Outlook for Thermoplastics in Aerospace Composites”, 2014~2023 (September, 2014)

<sup>35</sup> 米国のFAA (U.S. Federal Aviation Admin.) の厳しいflame/smoke/toxicity (FST) 規制のこと。

<sup>36</sup> <https://www.sokeizai.or.jp/japanese/rimcof/images/nikkiren-20.pdf>

などのユーザーが指摘している高性能熱可塑性コンポジット（PAEK、PPS、PEI）の課題としては、

- a. 航空機に適用可能な種類が少ない、
- b. 価格が高い、
- c. PEEKの場合は加工温度が高い（～400℃）、
- d. プリプレグが曲げにくい、
- e. 耐熱性が低い（PPS）、
- f. クリープを生じる、
- g. 耐薬品性が劣る（PEI）が挙げられている。また、
- h. エポキシ樹脂コンポジットの一次構造材をPAEKで代替するためには、大型成形物を製造する技術の開発が必要といわれる。

a. については、高分子化学的に新規なポリマーの創出は難しいと思われるが、PAEKの中でいろいろのバリエーションが可能である。

b. の価格が高い問題はPAEKの最大の課題である。上記調査報告書の中に、PEEKコンポジット価格の中で、PEEKと炭素繊維が占める比率はそれぞれ7%と小さく、それ以外の86%の成形コストが大きいという樹脂メーカーのコメントが記載されている。しかし、PEEKコンポジットの技術進歩と普及により、成形コストが下がり原料コストの比率が相対的に高くなっていると考えられる。

c. については、前述のようにPEEKより加工温度が低いPEKKや「Victrex AE250」が販売されている。

## (2) PAEKコンポジットとPPSコンポジット、PEIコンポジットの比較

Celaneseは、エポキシ、PEEK、PPS、PEIをマトリックス樹脂に使用した場合の、最終製品コンポジットの総コストと中間材料（プリプレグ）のコストを比較している。それによればPEEKコンポジットはプリプレグコストが一番高いが、成形コストが低いので総コストはエポキシコンポジットより安い。ただし、PEEKはPEIやPPSに比べると、総コ

ストとプリプレグコストはともに高い<sup>37</sup>。

ここで、コンポジットの原料費（樹脂と炭素繊維）を計算してみた。表8は樹脂価格と炭素繊維価格を想定して計算した一例である。絶対値の妥当性はともかく、大まかな傾向と位置づけはわかる。

表8 コンポジットの樹脂原料費の試算（単位 円/kg）

マトリックス樹脂	樹脂価格 (円/kg)	コンポジット中の 樹脂原料費 (A)	コンポジット中の 炭素繊維原料費 (B)	コンポジット中の 原料費 (A+B=C)
(原単位)		[0.34]	[0.66]	[1.0]
PAEK	10,000	3,400	2,640	6,040
PAEK	5,000	1,700	2,640	4,340
PPS	1,000	340	2,640	2,980
PEI	2,500	850	2,640	3,390
エポキシ樹脂	3,000	1,020	2,640	3,660

注：炭素繊維価格を4,000円/kgとした。

出典：旭リサーチセンター作成。

炭素繊維価格（4,000円/kg）はPAEKの樹脂価格（10,000円/kg）より安いので、PAEKコンポジットの原料費（6,040円/kg）は樹脂価格より安くなる。一方、炭素繊維価格はその他の樹脂の価格より高いので、それらのコンポジット原料費は樹脂価格より高くなる。したがって、PAEKと他樹脂の樹脂価格の差よりも、原料費の差は小さくなる。

現在のPAEK樹脂価格10,000円/kgではPAEKコンポジットの原料費は6,040円/kgになり、PPSコンポジット原料費2,980円/kgの2倍であるが、PAEK樹脂価格が5,000円/kgになれば、原料費は4,340円/kgまで下がる。エポキシ樹脂コンポジットの原料費3,660円/kg、PEIコンポジットの原料費3,390円/kgとの差は相当縮まる。

Celaneseの別のレポートによれば、PEIはガラス転移温度が高いがコンポジットのクリープはPPSコンポジット並みで、PEEKコンポジットより劣る。そして、PEEKとPEKKのクリープはほぼ同じである<sup>38</sup>。

<sup>37</sup> M.Favaloro, Celanese, A comparison of the environmental attributes of Thermoplastic vs. Thermoset Composites (2013)

<sup>38</sup> H.Ramathal, M.Favaloro, Celanese, “A comparison of maximum use temperature for high performance thermoplastic composites” (2013)

一般にいわれているのは、PPSコンポジットは耐熱性が劣り、PEIコンポジットは耐薬品性が劣ることから、航空機一次構造材料にはPAEKコンポジットが主に用いられる。また、二次構造材には、PAEKコンポジットとPPSコンポジットが使用される。航空機室内材料には、PAEK、PPS、PEIのコンポジットが使用される。

### (3) PEEK、PEKK、PAEK A250の構造、物性、コストの比較

現在、コンポジット用に工業化されているのはPEEK、PEKK、PAEK A250の3種である。

PEKKのうち、コンポジットに使用されるのはPEKK (T/I = 70/30) であり、パラ結合70%でメタ結合30%の共重合体である。規則構造 (T=100%) を崩したこのような共重合体は結晶化度が下がり、一般には機械的特性が低下するものだが、PEKK (T/I = 70/30) コンポジットはPEEKコンポジットに勝るとも劣らない特性をもっている。極性のケトン基の含有量が多く分子凝集力が高いことや、ポリマー末端のカルボキシル基が炭素繊維との親和性を高めているためと推定される。

一方で、前述のように、PEKK (T/I = 70/30) はPEEKより融点が低く、加工温度が低いのが大きな特長である (表6)。そして、本リポート(上)15ページに記載のように、PEKK (T/I = 70/30) はPEEKに比べモノマーコストがはるかに安いのでコスト競争力がある。

また、2015年にVictrexが販売を開始した「Victrex AE250」も加工温度を下げるために結晶融点を下げている。「Victrex AE250」はPEEKの構造を一部崩しているものと推定される。たとえば、図14のように、原料にハイドキノンとレゾルシノールの混合物を使用して、エーテル・エーテルのパラ結合に一部メタ結合を導入することが考えられる。ハイドキノンとレゾルシノールはともに安価な市販品のあり、レゾルシノールの方が若干安いのでコスト的にはわずかに有利である。

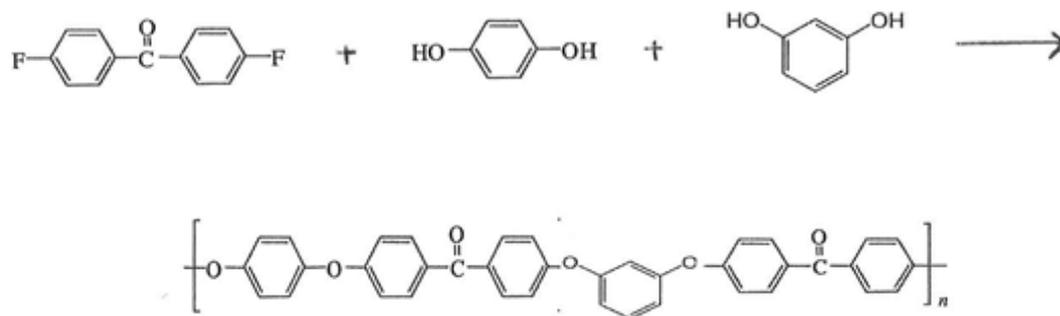


図14 「Victrex AE250」の推定製造プロセスの化学式

注：上記の化学式では、簡便のため hidroキノンとレゾルシノールが等モルの形で書いてあるが、実際は hidroキノンが主体であり、レゾルシノールは20～30%の使用であろう。

出典：旭リサーチセンター推定。

表9に各種ポリエーテルケトンの結晶融点、ガラス転移温度、絶対温度ベースのTg/Tm比をまとめた。黄色地のものはコンポジットとして使用されているものを示す。

構造がすべてパラ結合の規則的構造のもの（PEEK、PEK、PEEKK、PEKEKK）は、高分子の教科書通りTg/Tm比はほぼ2/3（0.667）になっているが、構造にメタ結合などの不規則結合が入っているVictrex PAEK A250とPEKK（T/I=80/20、70/30、60/40）は0.667よりも高いTg/Tm比になっている。コンポジットに使われているPAEK A250とPEKK（T/I=70/30）は同じTg/Tm比（0.72）になっている。規則性を崩すと結晶融点は下がるが、ガラス転移温度は下がらないので、規則性ポリマーに比べ高いTg/Tm比になる。

表9 各種ポリエーテルケトンの結晶融点、ガラス転移温度、Tg/Tm（絶対温度）

	結晶融点 (Tm)	ガラス転移 温度 (Tg)	Tg (絶対温度) / Tm (絶対温度)
PEEK	343°C	143°C	0.67
PEK	373°C	152°C	0.66
PEEKK	358°C	154°C	0.68
PEKEKK	387°C	162°C	0.66
PAEK A250	305°C	147°C	0.72
PEKK (T/I=100/0)	400°C以上	170°C	—
PEKK (T/I=80/20)	360°C	165°C	0.69
PEKK (T/I=70/30)	332°C	162°C	0.72
PEKK (T/I=60/40)	303°C	160°C	0.75

注：黄色地は、現在、コンポジットに工業的に使用されている樹脂。

出典：各社資料より旭リサーチセンター作成。

#### (4) 将来のPAEK樹脂とPAEKコンポジットの価格

PAEKの連続炭素繊維コンポジットが、宇宙・航空機分野で主流のエポキシ系連続炭素繊維コンポジットとほぼ同じ性能で、成形性に優れ（キュア時間が短く）、材料のリサイクルが可能である特長をもっていることは注目すべきことである。

現在は、原料のPEEKやPEKKの高いコストがコンポジットの需要拡大のネックになっている。価格が下がれば、大きな代替需要が見込める。これまでPAEKの高い価格水準を維持することが優先されてきたが、コンポジットについては状況が変わる可能性がある。

Victrexは2015年よりPAEKのプリプレグの販売を開始し、Solvayは2016年より子会社のCytecを通じてPEEKとPEKKのプリプレグの販売を開始した。

両社は、大量の引き合いに対しては従来よりも安い価格でプリプレグを提供する可能性もある。プリプレグの価格を下げても、PAEKニートレジンの価格に直接の影響を与えないのは好都合である。

また、PEKKを製造しているのは現在Arkema 1社であるが、PEKKの性能が良くコスト競争力があることから、将来SolvayやVictrexがPEKKの生産に乗り出す可能性がある。

## おわりに

本レポート(中)では、PAEK全体の用途について説明するとともに、摺動材料とコンポジット材料に焦点を当てて技術と市場の状況を解析してみた。次回の(下)では、残るメディカル材料、3Dプリンタ用材料について調査する予定である。

2005年頃まではVictrex 1社独占の状態であったが、Evonik、Solvay、Arkemaの3社の新規参入と3社の新增設(2016~18年完成)より競争が本格化し、半面、需要は拡大すると予想される。

特に大きな展開が予想されるのはコンポジット分野である。理由は、炭素繊維強化PAEKコンポジットが、現在航空機分野で主流のエポキシ系炭素繊維コンポジットとほぼ性能が同じで、成形性に優れ(キュア時間が短く)、材料のリサイクルが可能である特徴をもっているからである。またPEKKコンポジットがPEEKコンポジットに勝るとも劣らない性能を有していることと、PEKKの原料モノマーが安く、大量生産されるようになればコストが下がる可能性があるからである。

いずれにしてもPAEKコンポジットが本格的に航空機用途で採用されるかどうかは、現在ネックである高い価格水準の問題に対してPAEKメーカーがどう考えるかにかかっている。10年後、20年後の航空機用コンポジットに熱可塑性コンポジットがどれくらい使われるようになるか注目される。

最後に、コンポジットの分野は物性だけでなく、成形性が非常に重要である。残された大きな技術革新は成形にあるが、残念ながら成形技術については十分な説明とコメントをすることができなかった。一つは著者の力量を超えていることと、もう一つは文章中心のARCレポートでは限界があるためである。成形については、図や写真の豊富な専門の成書<sup>39</sup>などを参考にしてほしい。

---

<sup>39</sup> 最近発刊されたものに、① 邊 吾一『連続繊維FRTPの成形法と特性』日刊工業新聞社刊(2015)、② 平松徹『よくわかる炭素繊維コンポジット入門』p.148 日刊工業新聞社刊(2015)、③ 強化プラスチック協会編『基礎からわかるFRP(2016)』などがある。

<本レポートのキーワード>

芳香族ポリエーテルケトン、PEEK、PEKK、VICTREX、スーパーエンブラ、コンポジット、複合材料、FRTP、一方向テープ、摺動材料

(注) 本レポートは、ARCのホームページ (<http://www.asahi-kasei.co.jp/arc/index.html>) から検索できる。

このレポートの担当

シニアリサーチャー 府川 伊三郎、白鳥 直行

お問い合わせ先 03-3296-5056

E-mail [fukawa.id@om.asahi-kasei.co.jp](mailto:fukawa.id@om.asahi-kasei.co.jp)

株式会社 旭リサーチセンター

東京都千代田区神田神保町 1-105 神保町三井ビルディング

電話 (03)3296-3095 (代)

E-mail : [arc@om.asahi-kasei.co.jp](mailto:arc@om.asahi-kasei.co.jp)