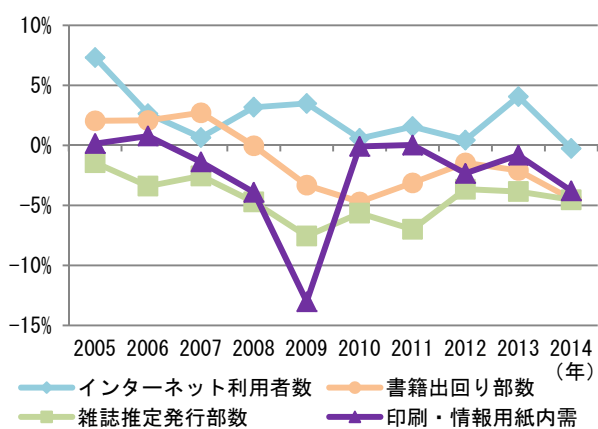


新素材として注目されるセルロースナノファイバー

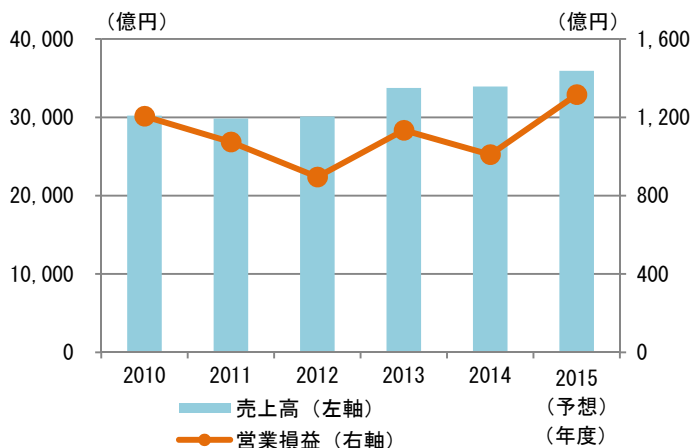
1. 新素材として注目されるセルロースナノファイバー

- 情報通信技術の進歩に伴いインターネットが普及し、書籍、雑誌などの紙媒体の発行部数が減少しており、それらに使われる印刷・情報用紙の内需も減少傾向にある（図表1-1）。
- そして、紙の主力製品である印刷・情報用紙の内需は、食料品などの輸送に使用される段ボールをはじめとする板紙を含む紙・板紙全体の合計と比べ、減少幅が大きくなっている（図表1-2）。
- 紙・板紙の内需は、2009年のリーマンショックの影響により急減した反動で2010年に増加に転じたものの、その後は減少が続いている（図表1-2）。一方、製紙会社の収益は、市況の回復などにより持ち直してきている（図表1-3）が、国内の人口減少もあり、内需の拡大は期待しづらく、製紙会社は、海外での事業展開を強化するとともに、エネルギー事業をはじめとする新たな収益基盤を構築する取り組みを強化している。
- 製紙会社の新たな事業分野のなかで、今後、成長が期待されているものの一つにセルロースナノファイバーがある。セルロースナノファイバーは、紙の原料のパルプなどの植物繊維をナノサイズ（10億分の1メートル）まで細かく解きほぐしたものである。鋼鉄と比べ重量が5分の1ながら強度は5倍以上、粘性が高いといった特徴に加え、リサイクル性が優れていることもあり、炭素繊維やガラス繊維に代わる、プラスチックやゴムをはじめとする合成樹脂の補強材などとしての実用化に向けた研究が進められている。
- 本稿では、新素材として注目されているセルロースナノファイバーの特徴、国内外の実用化への取り組み状況、利用拡大に向けた課題を整理する。

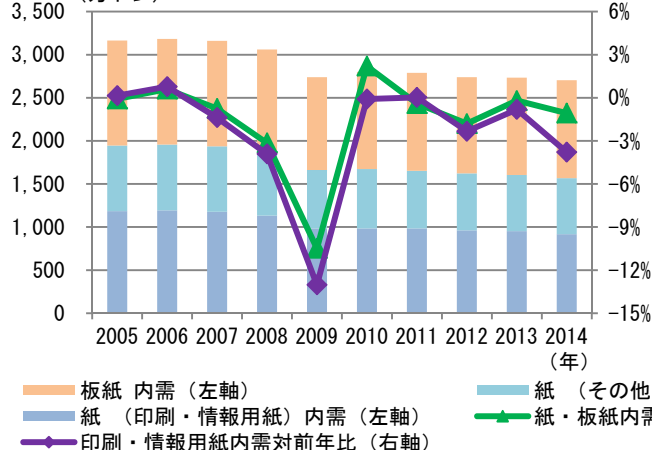
図表1-1 情報媒体等利用状況の対前年比の推移



図表1-3 主要製紙会社業績の推移（連結）



図表1-2 紙・板紙内需（国内出荷+輸入）の推移



(備考) 図表1-1は、総務省「通信利用動向調査」（インターネット利用者数）、公益社団法人全国出版協会・出版科学研究所「出版指標年報」（書籍出回り部数、雑誌推定発行部数）、日本製紙連合会「紙・板紙統計年報」（印刷・情報用紙）により作成
図表1-2は、日本製紙連合会「紙・板紙統計年報」により作成
図表1-3は、各社有価証券報告書により作成

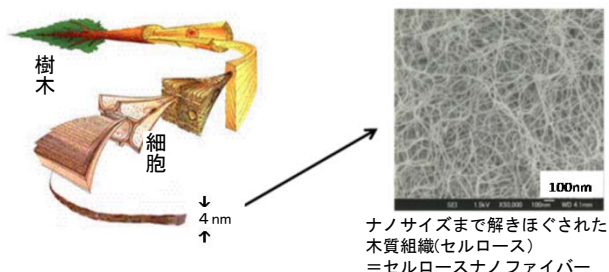
(注1) 書籍出回り部数は、新刊・重版・注文品の流通総量で、返品を活用による再出荷分を含む。したがって、実際の生産量は、この出回り部数の7割前後と推定される。

(注2) 本稿の主要製紙会社は、王子ホールディングス株式会社、日本製紙株式会社、大王製紙株式会社、北越紀州製紙株式会社、三菱製紙株式会社、中越パルプ工業株式会社の6社

2. セルロースナノファイバーとは？

- セルロースは、木材などの植物繊維の主成分である。セルロースは、植物を構成する物質の3分の1を占めており、紙の原料（パルプ）になっている。
- セルロースナノファイバーは、パルプやジュースの搾りかす、稲わらなどの植物繊維を化学的、機械的に処理してナノサイズまで細かく解きほぐした（解繊した）ナノセルロースの一形態であり、平均幅が数～20ナノメートル程度、平均長さが0.5～数マイクロメートル程度のサイズの繊維状の物質である（図表2-1～2-2）。
- セルロースナノファイバーは、30～40本のセルロースの鎖が結晶状に結合しており、従来の繊維よりも細く、また、分子が整って配列しているため、①軽量でありながら高強度、②熱による変形が少ない、③比表面積が大きい、④ガスバリア性が高い、⑤水中で粘性を示す、⑥高い透明性などの特徴を有している。合成樹脂にセルロースナノファイバーを数～10%程度混ぜて、その特徴を生かすことにより、自動車部品や住宅建材、フィルター、ガスバリアフィルム、化粧品、食品、透明シートをはじめ幅広い用途での活用が期待されている（図表2-3）。
- セルロースナノファイバーを製造するため、パルプなどをナノサイズまで解繊する方法には、化学変性と機械解繊がある。化学変性は、イオン性の液体を原料に加え、結晶化していない部分のセルロースの鎖のまわりにイオンが入り込んで表面をイオン化して電気的な性質を持たせ、電気の反発力でセルロースの鎖をバラバラにして、結晶化していない部分を取り除く方法である。一方、機械解繊は、超高压水流で物理的・機械的に解きほぐす方法である。
- セルロースナノファイバーは、合成樹脂の補強材として活用されている炭素繊維やガラス繊維と比較すると、ガラス繊維より熱による変形が少なく、炭素繊維やガラス繊維と比べリサイクル性も優れている。しかし、220～230℃で樹脂に混ぜた際に茶色に着色するため融点の高い樹脂の補強に使用できない、解繊の際のエネルギー消費量が多く製造コストが高い、といった課題もある（図表2-4）。

図表2-1 セルロースナノファイバーとは？



(備考) 経済産業省「平成25年度製造基盤技術実態等調査（製紙産業の将来展望と課題に関する調査）報告書」

図表2-2 ナノセルロースの分類

	セルロースナノファイバー	セルロースナノクリスタル
平均幅	数～20nm程度	数～10nm程度
平均長さ	0.5～数μm程度	200nm程度
形状	繊維状	紡錘形

(備考) 各種資料により作成

(注) 1nm(ナノメートル) = 10億分の1メートル
1μm(マイクロメートル) = 1,000ナノメートル

図表2-3 セルロースナノファイバーの特徴および期待される用途

特徴	期待される用途
軽量(鋼鉄の5分の1)でありながら高強度(鋼鉄の5倍以上)	自動車部品、住宅建材、内装材
熱による変形が少ない(ガラスの50分の1程度)	半導体封止材、プリント基板
比表面積が大きい(250m ² /g以上)	フィルター、紙おむつ用消臭シート
ガスバリア性が高い	ガスバリアフィルム(食品包装容器)
水中で粘性を示す	化粧品、食品、塗料
高い透明性	透明シート

図表2-4 素材間の特性の比較

特性	セルロースナノファイバー	炭素繊維	ガラス繊維	ポリプロピレン	鉄
密度	1.6g/cm ³	1.82g/cm ³	2.55g/cm ³	0.92～0.95g/cm ³	7.8g/cm ³
引張強度	3GPa	3.5GPa	3.4GPa	0.03～0.05GPa	0.34GPa
引張弾性率	140GPa	230GPa	74GPa	3.5GPa	250GPa
線熱膨張係数	0.1ppm/K	0ppm/K	5ppm/K	100～200ppm/K	10～12ppm/K
軟化温度	220～230℃で着色	—	850℃	100℃	800℃
使用温度(上限)	190℃	500℃	380℃	60℃	500℃
製造コスト	4,000～10,000円/kg	3,000円/kg	2,000円/kg	150～200円/kg	100円/kg
リサイクル性	可	一部可(サーマルリサイクル)	不可	可	可

(備考) 図表2-3～2-4は、各種資料により作成

3. 国内の動向①—国・地方

- セルロースナノファイバーの開発は、1990年代に精製パルプやコットンの酸加水分解によるナノクリスタルセルロースおよびバクテリアによって製造されるナノセルロースであるバクテリアナノセルロースが開発された後、2000年代に入ってから本格的に始まった。
- 経済産業省が2005年に地域新生コンソーシアム研究開発事業の一つとして「バイオマスナノファイバーの製造と高植物度ナノコンポジットの開発」を採択して以降、政府もセルロースナノファイバーの研究開発を後押ししている。2012年5月に策定された「バイオマス利用技術ロードマップ」にバイオマテリアル技術の原料としてセルロースナノファイバーに言及され、2014年6月に取りまとめられた「日本再興戦略」改訂2014には、「セルロースナノファイバー（超微細植物結晶繊維）の研究開発等によるマテリアル利用の促進に向けた取組を推進する」と明記された（図表3-1）。
- 関係者間による連携の動きも見られる。2014年6月、製紙会社、化学メーカーなどの供給側と情報家電、自動車、化粧品をはじめとする需要側の連携推進、国際標準化への関与等を目的に、国レベルで産学官が参画するナノセルロースフォーラムが産業技術総合研究所に設立された（図表3-2）。2014年8月には、省庁間の情報共有を図るとともに、施策の連携を模索するため、農林水産省、文部科学省、経済産業省、環境省がナノセルロース推進関係省庁連絡会議を設置した（図表3-3）。
- 地方においても、産学官が連携し、各地の有力産業や地域資源を活用してセルロースナノファイバーの実用化を推進する体制が整備されてきている。部素材産業—CNF研究会には、京都大学や京都市産業技術研究所、兵庫県立工業技術センター、近畿地方に拠点を有する不織布、プラスチック、ゴムの部素材関連企業などが参加している。兵庫県神戸市に本社のある神栄化工株式会社（資本金20百万円、従業員数34名）は、靴のゴム底にセルロースナノファイバーを混ぜた高強度で軽く、寸法精度の高い靴底の開発に向け、兵庫県立工業技術センターと共同研究をおこなっている。ふじのくにCNFフォーラムは、製紙会社と輸送機械、電気機械、食品、医薬品、医療機器などの産業集積を生かしたネットワーク形成と製品（用途）開発支援を目的に活動している。薩摩川内市竹バイオマス産業都市協議会は、豊富な竹資源を活用した産業振興や雇用創出を目的としており、竹セルロースナノファイバー活用促進等分科会では、竹セルロースナノファイバーの活用促進、販路開拓を目指している。みえセルロースナノファイバー協議会は、林業が盛んであることを背景に、セルロースナノファイバーの製品開発や新たなビジネス化を支援するため、企業のマッチングや共同研究実施支援をおこなっている（図表3-2）。

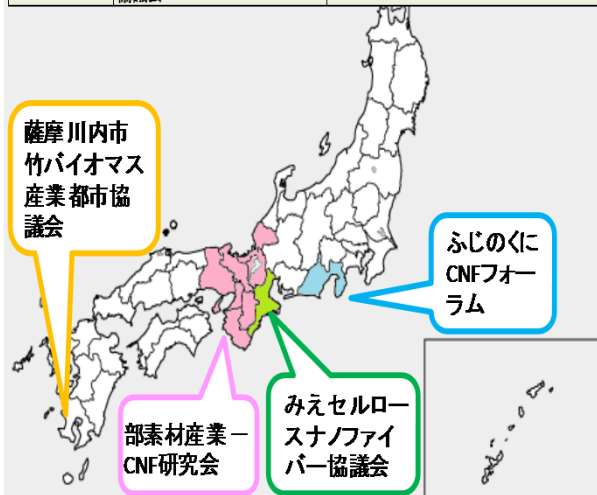
図表3-1 国の戦略

年月	戦略	具体的内容
2012年5月	バイオマス利用技術ロードマップ	バイオマテリアル技術の原料としてセルロースナノファイバーを明記（農林水産省等）
2014年3月	L ² (エル)-Tech(テック)・JAPAN(ジャパン)イニシアティブ	2015年度より、セルロースナノファイバー等の次世代素材活用調査を含む、先導的低炭素技術(L ² -Tech)推進基盤整備事業を開始(環境省)
2014年6月	「日本再興戦略」改訂2014	セルロースナノファイバー(超微細植物結晶繊維)の研究開発等によるマテリアル利用の促進に向けた取組を推進する
2015年6月	科学技術イノベーション総合戦略2015	車、航空機などの輸送機器向け革新的構造材料の開発(内閣府、文部科学省、経済産業省、環境省)
2015年6月	「日本再興戦略」改訂2015	セルロースナノファイバーの国際標準化に向けた研究開発を進めつつマテリアル利用の取組を推進する

(備考) 各種資料により作成

図表3-2 産学官連携による実用化支援組織

設立年月	組織名	事務局
2014年6月	ナノセルロースフォーラム	国立研究開発法人産業技術総合研究所
2014年12月	部素材産業—CNF研究会	経済産業省近畿経済産業局
2015年6月	ふじのくにCNFフォーラム	静岡県
2015年7月	薩摩川内市竹バイオマス産業都市協議会	薩摩川内市
2015年11月	みえセルロースナノファイバー協議会	公益財団法人三重県産業センター



(備考) 各種資料により作成

図表3-3 ナノセルロース推進関係省庁連絡会議の役割分担

関係省庁	役割分担
農林水産省	農林業や食品産業からの国産セルロース原料の供給
文部科学省	セルロースナノファイバーに関する基礎研究
経済産業省	セルロースナノファイバーの製造(技術の研究開発等)
環境省	地球温暖化対策に資する分野への具体的な展開

(備考) 環境省資料により作成

3. 国内の動向②－民間企業

- 国内では、製紙原料としてパルプを利用している製紙会社や、製紙会社と関連のある製品を製造・使用する化学メーカーなどがセルロースナノファイバーの実用化に取り組んでいる（図表3-4）。

【試験生産・実証生産】

- 2005年以降、産学官連携による共同研究が進められてきた成果に基づき、2013年から試験生産・実証生産設備が順次稼働し、サンプル提供が本格化してきた（図表3-5）。

【用途開発→実用化】

- 用途開発は、樹脂との複合化に課題のある自動車部品などの構造材よりも、規格を満たせば実用化しやすい機能性素材の開発が先行しており、2015年に実用化され始めた（図表3-6）。
- 第一工業製薬株式会社が2013年6月より三菱鉛筆株式会社と実用化を検討してきたセルロースナノファイバーをインク増粘剤に採用したボールペンは、2015年3月に北米、同年9月には欧州で発売された。セルロースナノファイバーをインクに混ぜることにより滑らかに書けるようになっている。
- 日本製紙株式会社は、2015年4月に消臭、抗菌機能を有するシートの実用化に成功し、同年10月、機能性シートを採用した大人用紙おむつをグループ企業の日本製紙クレシア株式会社から発売した。
- オンキヨー株式会社は、2015年11月にセルロースナノファイバーを使用し、高域再生帯域が拡大した振動板を開発した。この振動板を採用したスピーカーを2016年に発売する予定である。

【量産】

- 日本製紙株式会社は2016年度、中越パルプ工業株式会社は2017年度に量産設備設置の報道がある。
- 一方で、北越紀州製紙株式会社は、自社では製造せず、外部から調達することにより、用途に適したセルロースナノファイバーを活用しようとしている。

図表3-4 民間企業の主な取り組み

企業名	主な連携相手	試験生産・実証生産	用途開発	主な共同研究相手		実用化	量産
製紙会社	王子ホールディングス株式会社	京都大学	2013年 東雲研究センター 2016年度 富岡工場(報道)	2013年 透明連続シート 2015年 化粧品原料	三菱化学株式会社 日光ケミカルズ株式会社		
	日本製紙株式会社	東京大学	2013年 岩国工場	包装材料	花王株式会社 凸版印刷株式会社		2016年度 計画の報道あり
	大王製紙株式会社	愛媛大学	2016年度 三島工場(報道)	2015年 消臭、抗菌シート		2015年 大人用紙おむつ	
	北越紀州製紙株式会社			食品用包装材	愛媛大学		
	三菱製紙株式会社			フィルター			
	中越パルプ工業株式会社	九州大学	2015年 高岡工場	不織布			
				2015年 複合材料	出光ライオンコンボジット株式会社 株式会社三幸商会		2017年度 計画の報道あり
化学メーカー	第一工業製薬株式会社	東京大学	2014年 大潟事業所	2015年 インク増粘剤	三菱鉛筆株式会社	2015年	ボールペン
	星光PMC株式会社	京都大学	2014年 竜ヶ崎工場	自動車部品	三菱化学株式会社		
	旭化成せんい株式会社			不織布			
電機メーカー	オンキヨー株式会社			2015年 振動板		2016年	スピーカー(予定)

図表3-5 生産設備稼働状況(2016年3月)

企業名	生産拠点名	稼働開始	生産能力
王子ホールディングス株式会社	東雲研究センター	2013年3月	N.A.
日本製紙株式会社	岩国工場	2013年11月	30t/年
中越パルプ工業株式会社	高岡工場	2015年3月	数十t/年
第一工業製薬株式会社	大潟事業所	2014年3月	N.A.
星光PMC株式会社	竜ヶ崎工場	2014年10月	1~2t/月

図表3-6 民間企業の主な用途開発状況

企業名	自動車部品・住宅建材・内装材(構造材)	半導体封止材・プリント基板等(エレクトロニクス関連)	フィルター・紙おむつ用消臭シート	ガスバリアフィルム等(包装部材)	化粧品・食品・塗料
王子ホールディングス株式会社		○			○
日本製紙株式会社			○	○	
大王製紙株式会社				○	
北越紀州製紙株式会社			○		
三菱製紙株式会社			○		
中越パルプ工業株式会社	○				
第一工業製薬株式会社		○			○
星光PMC株式会社	○				
旭化成せんい株式会社			○		
オンキヨー株式会社		○			
実用化に向けた要検討事項	耐熱性に課題 ・220~230℃で着色し、高融点の樹脂補強に使用できない 複合材料の衝撃性に課題 ・ポリプロピレン樹脂に均等に分散しない	プリント基板等で使用する際は親水性が問題になり得る	ナノ構造を生かせる		親水性を生かせる

(備考) 図表3-4~3-6 各社プレスリリース、各種報道記事などにより作成

4. 欧米の動向

- セルロースナノファイバーの研究開発や実用化に向けた取り組みは、紙パルプ産業の盛んな北欧を中心とする欧州および北米などでも進められている。欧米は、実証生産設備の設置では日本を先行したが、樹脂複合化を見据えた用途開発は、化学メーカーなど産業間の連携の密な日本が進んでいる。

【実用化推進体制】（図表4-1）

- フィンランド、スウェーデン、米国は、中核となる拠点がサンプル提供や実用化支援をしている。
- カナダは、マギル大学（ケベック州）、木質バイオマス関連総合研究所のFPInnovations（ケベック州）、研究機関のAlberta Innovates（アルバータ州）、トロント大学（オンタリオ州）など地方に拠点がまたがっているが、ほとんどの研究開発や事業化にFPInnovationsが関わり中枢機能を担っている。

【試験生産・実証生産】

- 特許出願件数を技術区別にみると、日本が用途開発も視野に入れて原料から樹脂複合化まで均等にカバーしてきたのに対し、欧州は解繊工程、米国は原料に関する出願割合が高かった（図表4-2）。生産技術の確立を重視してきた欧米は、試験生産・実証生産設備の設置で日本を先行した（図表4-3）。

【用途開発→実用化】

- 用途開発は、特に北欧において製紙会社が将来的に印刷・情報用紙以外の製品と市場を開拓する必要があるとの危機感から、製紙会社が使用する包装容器、紙力増強剤など製紙用途を中心に進んできた。
- 北欧は、国内に化学メーカーなどセルロースナノファイバーの利用が期待される企業が少なく、産業間の連携に限られており、用途開発の課題になっている。米国は、サンプルを提供して用途開発を促している。一方で、カナダは、FPInnovationsを核として、日本と同様に産業間の連携に積極的である。
- 製紙会社では、フィンランドのUPM-Kymmene Ltd. およびStora Enso Ltd.、化学セルロース・メーカーを買収した南アフリカのSappi Ltd.のほか、カナダのDomtar Corp. やKruger Inc. も実証生産を実施している（Domtar Corp.はFPInnovationsとCelluForce, Inc. を設立している）。
- また、カナダの製紙会社Mercer International Inc. およびResolute Forest Products Inc. が共同出資により設立したPerformance BioFilaments Inc. は、研究開発でFPInnovationsの支援を受けながら、自動車部品や建材、化粧品などでの実用化も視野に入れ、2018年の商業生産開始を目指している。
- 実用化に向けて、欧米でも用途開発とコストダウンが課題になっている。日本が先行する用途開発については、樹脂複合化などの高付加価値化に向け、現実的な性能の評価を進めつつある。また、コストダウンは、セルロースナノファイバーの収率を上げて実現しようとしている。

図表4-1 欧米の実用化推進体制

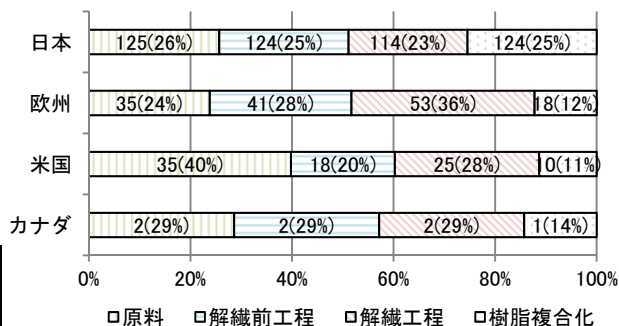
(注) 網掛け：
サンプル提供者

国名	産	学	官
フィンランド	UPM-Kymmene Ltd.	ヘルシンキ工科大学(現Aalto大学)	フィンランド国立技術研究センター
	Stora Enso Ltd.		
スウェーデン	Inventia AB	王立工科大学 ヴァルンベリ木材科学センター	
	American Process Inc. Paperlogic	メイン大学	農務省森林局
カナダ	CelluForce, Inc.	マギル大学	FPInnovations
	Performance BioFilaments Inc.	トロント大学	Alberta Innovates
	Domtar Corp.		
	Kruger Inc.		

図表4-3 生産設備稼働状況（2016年3月）

所在地	企業・組織名	種類	稼働開始	生産能力
フィンランド	UPM-Kymmene Ltd.	CNF	2011年11月	N.A.
	Stora Enso Ltd.	CNF	2011年中	N.A.
スウェーデン	Inventia AB	CNF	2011年2月	100kg/日
米国	The US Forest Service's Forest Products Laboratory	CNC	2012年8月	50kg/週
	The US Forest Service with the University of Maine	CNC, CNF	2013年4月	1,000kg/週
	American Process Inc.	CNC, CNF	2015年4月	各500kg/日
	Paperlogic	CNF	2015年5月	2,000kg/日
カナダ	FPInnovations	CNC	2006年	3kg/日
	CelluForce, Inc.	CNC	2012年1月	1,000kg/日
	Alberta Innovates-Technology Futures	CNC	2013年9月	20kg/日
	Kruger Inc.	CNF	2014年6月	5,000kg/日
	Performance BioFilaments Inc.	CNF	2018年(予定)	N.A.
オランダ	Sappi Ltd.	CNF	2016年(予定)	8t/年

図表4-2 出願人国別・技術区分別特許出願件数
(2001年～2011年累計)



(備考)

図表4-1は、各種資料により作成
図表4-2は、経済産業省「平成24年度中小企業支援調査（セルロースナノファイバーに関する国内外の研究開発、用途開発、事業化、特許出願の動向等に関する調査）報告書」により作成

図表4-3は、各種資料により作成

(注) CNF：セルロースナノファイバー
CNC：セルロースナノクリスタル

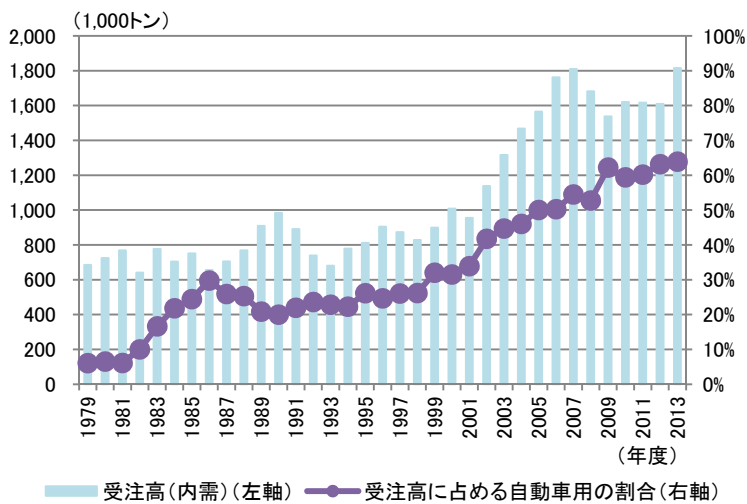
5. 新素材の実用化・普及事例①ーハイテン

- セルロースナノファイバーは、2000年以降に本格的な研究開発が始まり10数年を経て、2015年に初めて実用化された。しかし、普及までには、他の新素材と同様に、長期に亘り技術開発、用途開発に継続的に取り組む必要がある。以下、ハイテンや炭素繊維が実用化されてから普及するまでの経緯をみることで、今後、セルロースナノファイバーの普及に向けて検討すべき事項を整理する。

【ハイテン（高張力鋼板：High Tensile Strength Steel）】

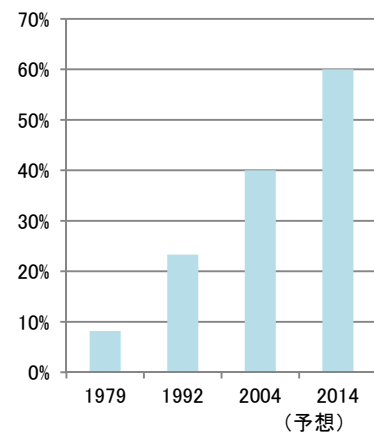
- ハイテンは、製鉄プロセスでシリコン、マンガン、チタンなどの合金元素を添加して、引張強度（一定方向から引っ張られた際、破断せずに耐えられる力）を高めた鋼板である。一般鋼材より強度が高く、薄くても同じ強度を確保しながら軽量化でき、衝突安全性も高いため、軽量化と安全性の両立が求められる自動車や鉄道車両、船舶、圧力容器、橋梁、海洋構造物などに使用されている。
- ハイテンの基本的な製造方法は、1965年頃に炭素や窒素を極力少なくすることで加工性を高めたIF鋼（Interstitial Free：極低炭素）が開発され、1972年には急速高温加熱、急速冷却のできる連続焼鈍設備が稼働を開始して、広範な強度レベルを有するハイテンの生産が可能になって確立された。そして、1973年と1979年の石油危機を契機とする自動車軽量化による燃費改善ニーズの高まりや、自動車の衝突安全性向上への対応の必要性から、10%超の軽量化を実現しながら衝突安全基準も満たすことができるハイテンの自動車での使用が増加した。その後も高強度化により用途が拡大し、現在、自動車に使用されている鋼材に占めるハイテンの割合は約60%になっている（図表5-1～5-2）。
- 鉄鋼メーカーと自動車メーカーの間では、鉄鋼メーカーが鉄製品の成分や表面処理などの構造設計を行い、自動車メーカーが自動車部品の設計、鋼板のプレス加工を担当している。実際には、新しい鉄製品の材料の特性は鉄鋼メーカーの方が理解しているため、新しい鉄製品によりどのような部品ができるか、また、どのようなプレス加工をすべきかを鉄鋼メーカーが自動車メーカーに提案し、鉄鋼メーカーと自動車メーカーとの摺り合わせを経て実用化され、用途が広がってきた（図表5-3）。

図表5-1 ハイテンの受注高（内需）および自動車用割合の推移



(備考) 日本鉄鋼連盟資料により作成

図表5-2 自動車におけるハイテン採用率の推移



(備考) 杉山隆司
「高強度鋼板の車体への適用の変遷」
『塑性と加工』第46巻第534号などにより作成

図表5-3 自動車用ハイテンの変遷

年代	1970年以前	1970年代	1980年代	1990年代	2000年代	2010年代
用途特性	軟らかい鋼板		一般的なハイテン (~440MPa)	ハイテン (~590MPa)	ハイテン ~ 超ハイテン (~980MPa)	超ハイテン (1,180MPa以上)
用途		外板パネル			足回り	
		ボディ骨格				

(備考) 各種資料により作成

5. 新素材の実用化・普及事例②—炭素繊維

【炭素繊維】

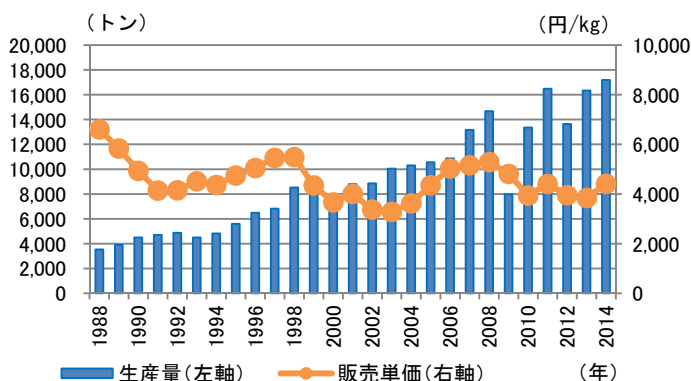
- 炭素繊維は、有機繊維を焼成して得られる炭素含有率が90%以上の、ほぼ炭素原子のみで構成される繊維である。軽い、強い、硬い、錆びない、耐熱性が高いといった特徴を有しており、樹脂などの中に埋め込まれた複合材料として使用されている（図表5-4）。
- 炭素繊維は、1879年にエジソンが白球電球のフィラメント用に木綿や竹を焼いて初めて製造した。その後、米国で宇宙開発のため耐熱性の高い炭素繊維が必要とされ、1959年にレーヨン系炭素繊維の生産が開始された。
- 日本では、東レ株式会社が1971年にPAN（ポリアクリロニトリル）系炭素繊維の本格商業生産を開始した後、鮎の釣竿（1972年）やゴルフクラブのシャフト（1973年）、テニスラケット（1976年）などスポーツ用途に炭素繊維複合材料（CFRP：Carbon Fiber Reinforced Plastic）が使用され始めた。
- 1973年の第一次石油危機を契機に、米国のNASAが1975年から燃費半減を目標とした10年にわたる研究に着手した後、米国の航空機業界がアルミ合金のかわりに炭素繊維を使用して軽量化、燃費改善の効果を確認し、1981年にボーイング767の方向舵などの二次構造材にCFRPが採用された。そして、1987年にエアバスA320の水平尾翼、1989年にはボーイング777の水平・垂直尾翼やフロアビームといった一次構造材にもCFRPが使われるようになった。2011年に就航開始したボーイング787では、主翼や胴体など機体の50%にCFRPが適用され、ボーイング767と比べ機体重量が20%削減されている。
- 1990年代半ばからは、世界的な生産量の増加に伴う価格下落を契機に、高級スポーツ用品や航空機だけでなく、産業用途での使用も増えている。コストが高い、量産化が難しい、リサイクルが難しいといった課題があり、スポーツカーや超高級車、もしくは一部の部品に使用されるにとどまっていた自動車向けCFRPも、軽量化への対応の必要に加え、短時間で成形できるCFRPの開発の進捗もあり、BMW「i3」（2013年発売）やトヨタ「MIRAI」（2014年発売）などに採用された（図表5-5～5-6）。
- 新しい素材だった炭素繊維は、当初は炭素繊維メーカーが用途開発を主導した。その後、航空機メーカーの品質要求を満たす素材を開発して航空機に使用され、技術開発も進んだ。自動車用には、炭素繊維メーカーが素材をどのように活用できるか提案し、炭素繊維メーカーと自動車メーカーの技術者が開発を進めているが、量産化、リサイクルへの対応は引き続き課題となっている。

図表5-4 炭素繊維の特徴および用途

特徴	用途分野	用途例
軽い（鋼鉄の4分の1）	スポーツ・レジャー	ゴルフシャフト、釣竿、テニスラケット、自転車
強い（鋼鉄の10倍以上）	航空・宇宙	飛行機、ロケット、人工衛星、電波望遠鏡
硬い（鋼鉄の7倍以上）	医療機器	X線グリッド
錆びない	土木・建築	コンクリート補強材
高い耐熱性	圧力容器	CNGタンク、水素タンク
高い耐薬品性	オーディオ	音響スピーカー
X線透過性がある	エネルギー関連	風車ブレード、海底油田設備
電気伝導性がある	輸送機械	自動車、自動二輪車、鉄道車両
	機械部品	板ばね、ロボットアーム

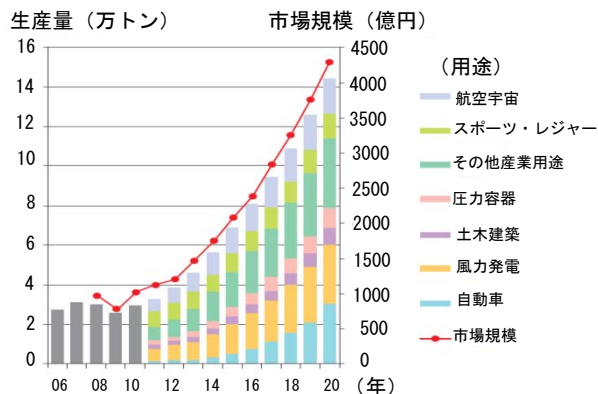
（備考）各種資料により作成

図表5-5 炭素繊維の国内生産量および販売単価の推移



（備考）図表5-5 「経済産業省生産動態統計年報 資源・窯業・建材統計編」により作成
図表5-6 経済産業省「2014年版ものづくり白書」

図表5-6 炭素繊維の需要および市場規模予測



5. 新素材の実用化・普及事例③—新素材普及のポイント

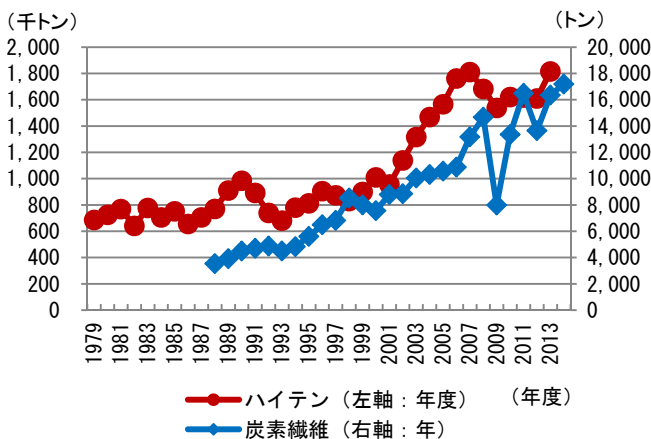
- ハイテン、炭素繊維とも1960年代より技術開発が進められ、1970年代以降、本格的に実用化された。普及拡大の契機は、1973年および1979年の二度にわたる石油危機だった。石油危機を受けて自動車や航空機の軽量化による燃費改善ニーズが高まり、鉄鋼メーカーや炭素繊維メーカーは、技術開発と同時にユーザーへの用途の提案、ユーザーとの共同開発などの用途開発に取り組み、市場を拡大させた。併せて、コストダウンも推進し、産業用途での炭素繊維の使用も増加した（図表5-7～5-8）。
- ハイテンおよび炭素繊維の実用化・普及事例からは、素材メーカーとユーザーの連携による技術開発と用途開発、コストダウンの積み重ねが、普及のポイントになったことがうかがえる（図表5-9）。
- 技術開発と用途開発は、両者が密接に関わっており、素材メーカーとユーザー双方からの提案が実用化につながっている。
- 鉄鋼メーカーは、ハイテンの用途開発に当たり、ハイテンを使用することで何ができるか、ハイテンにどのような加工をすればよいかをユーザーに提案し、実用化につなげていった。鉄鋼メーカーは、用途を拡大するために高強度化を目指した技術開発を継続的に行っており、自動車に使用される鋼材に占めるハイテンの割合は約60%まで上昇した。
- 炭素繊維は、航空機メーカーの品質要求を満たす技術開発を続けることで、航空機に使用されるようになった。当初は、方向舵など二次構造材への採用にとどまっていたが、信頼性の向上と継続的な技術開発により、尾翼をはじめとする一次構造材にも用途が拡大した。
- コストダウンも、用途を拡大させるためには欠かせない。
- 炭素繊維は、当初は製造コストが高かったため、まずは釣竿をはじめとする高級スポーツ用品から使われ始めたが、1990年代になり製造コストが下がってくると、産業用途での使用も増加していった。

図表5-7 ハイテンおよび炭素繊維の実用化・普及の歴史

		1960年代	1970年代 石油危機	1980年代	1990年代	2000年代	2010年代
ハイテン	技術開発	IF鋼	連続焼鈍	高強度化			
	用途開発 (自動車)		外板パネル			足回り	ボディ骨格
炭素繊維	技術開発	一部実用化	商業生産本格化	品種増大 成形加工技術進歩	コストダウン	大型構造材への展開 加工法多様化	
	用途開発		スポーツ用途	航空機用途			産業用途 (自動車用途)

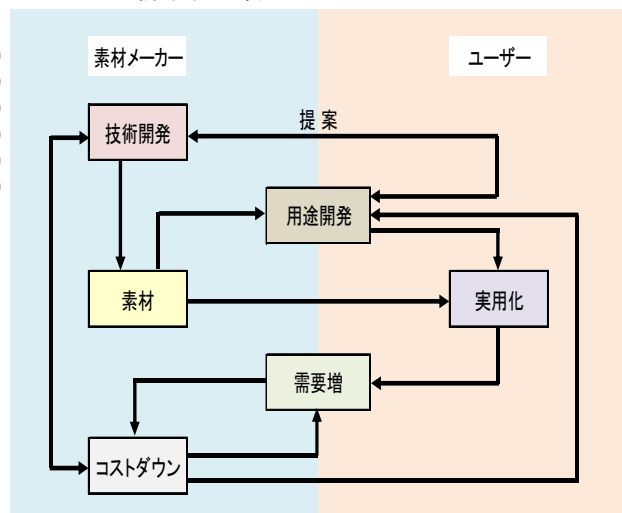
(備考) 各種資料により作成

図表5-8 ハイテンの受注高（内需）および炭素繊維の国内生産量の推移



(備考) 日本鉄鋼連盟資料および「経済産業省生産動態統計年報 資源・窯業・建材統計編」により作成

図表5-9 素材メーカーとユーザーの連携による新素材の普及サイクル

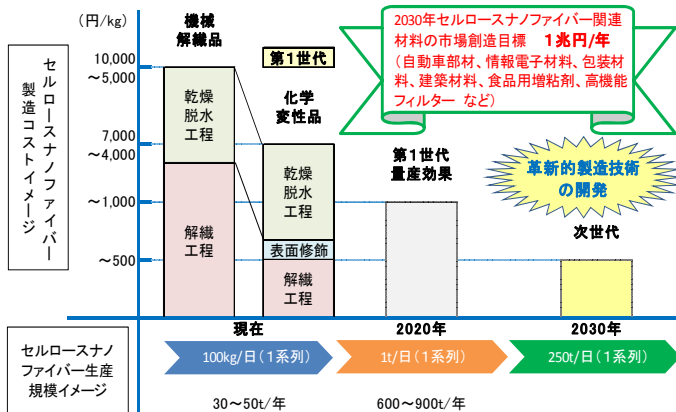


(備考) 日本政策投資銀行作成

6. セルロースナノファイバーの利用拡大に向けた課題

- 政府は、高度バイオマス産業創造戦略において、2030年にセルロースナノファイバー関連材料で1兆円の市場創造を目標としている（図表6-1）。自動車部品（内装材・部品、外板）の30～50%の市場をセルロースナノファイバー強化樹脂で代替した場合、セルロースナノファイバー強化樹脂の市場規模は3,600～6,000億円/年と推計されている（図表6-2）。
- しかし、セルロースナノファイバーは新しい素材であるため、ハイテンや炭素繊維と同様、利用拡大に向けて技術開発と用途開発、コストダウンに継続的に取り組まなければならない。
- セルロースナノファイバーを、ガスバリア性に優れた包装材料（ガスバリアフィルム）、透明性に優れた光学材料（透明ディスプレイ）、耐熱性に優れた電子材料（プリント基板）、軽量・高強度の構造材料（自動車部品）などに利用するには、素材による特性の違いを踏まえ、耐熱性の弱さや親水性があるため樹脂に均等に分散できないといった課題に対応する技術開発を、用途開発を意識しながら進める必要がある（図表6-3）。
- 実用化に向けては、自動車部品などの構造材は高い信頼性が求められ、信頼性の検証に時間を要するため、まずは規格を満たす機能性の素材を中心に、小規模な市場から徐々に利用を拡大していく、炭素繊維のような展開が現実的と考えられる。
- 現在の製造コストは、機械解繊品は5,000～10,000円/kg、化学変性品は4,000～7,000円/kgで、解繊工程における電力使用量の多い機械解繊品の方が高い。製造コストは炭素繊維の3,000円/kg、ガラス繊維の2,000円/kgを上回っており、それらを代替するにはコストダウンも欠かせない。年間数千t規模の量産体制に入れば現在の技術でも1,000円/kgを切れると言われているが、2030年の目標の500円/kgを実現するには革新的な製造方法の開発が求められる（図表6-1、6-3）。
- 事業環境の変化を受けて、製紙会社は、新たな収益源となり得るセルロースナノファイバー実用化に向けた取り組みを強化している。セルロースナノファイバーは耐熱性が炭素繊維やガラス繊維より弱く、製造コストが下がっても、それらを完全に代替できないが、素材の特性を生かした用途開発を化学メーカーをはじめとする産業界と共同で進め、製紙会社などの成長につなげることが期待される。

図表6-1 セルロースナノファイバーによる新市場創造戦略



図表6-2 セルロースナノファイバーが自動車部品に適用された場合の市場規模試算

自動車部品	代替割合	市場規模		
		セルロースナノファイバー (t/年)	セルロースナノファイバー (億円/年)	セルロースナノファイバー強化樹脂 (億円/年)
内装材・部品	10%	5.734	29	287
	30%	17.202	86	861
	50%	28.670	144	1,440
外板	10%	21.470	107	923
	30%	64.410	321	2,769
	50%	107.350	535	4,615
合計	10%	27.204	136	1,210
	30%	81.612	407	3,630
	50%	136.020	679	6,055

(備考) 図表6-1～6-2

経済産業省「平成25年度製造業基盤技術実態等調査（製紙産業の将来展望と課題に関する調査）報告書」により作成

図表6-3 各種資料により作成

図表6-3 利用拡大に向けた課題

課題	対応状況
素材による特性の違いを踏まえた利用	<p>特性に応じて用途に適した素材を選択できるようになってきている</p> <ul style="list-style-type: none"> ●化学パルプ由来は疎水性のリグニン含有分が少ないため保水性が高く、親水性材料と相性がよい ●機械パルプ由来はリグニン含有量が多いため、脱水性に優れ加工効率が高く、疎水性材料との混合性の向上も期待できる ●雑誌古紙由来は微細化された無機粒子を含むため、樹脂と複合した際に安価に補強効果を見込める ●段ボール古紙由来は機械パルプ由来と同様、リグニンを多く含むため疎水性材料との優れた混合性を期待できる
耐熱性が弱い	<ul style="list-style-type: none"> ●セルロースナノファイバーは220～230℃で着色するが、融点のより高い、リグニンとセルロースを完全には分離しないリグノセルロースナノファイバーの研究が進められている ●リグノセルロースナノファイバーはナイロン6(融点230℃)との複合化にも耐えられるものの、融点が250℃を越える樹脂の補強には使用できず、炭素繊維を完全に代替することはできない
親水性があるため樹脂に均等に分散できない	<p>樹脂に混ざりやすくするため表面を改質する研究が進められている</p> <ul style="list-style-type: none"> ●石炭由来の化学素材を表面に吸着させて樹脂に混ざりやすくする ●乾燥させても繊維同士が強く結合しないように表面を改質
製造コストが高い	<ul style="list-style-type: none"> ●事前にセルロースをナノ化し、解繊消費電力を削減する前処理技術の開発が進められている ●解繊前工程、解繊工程にてセルロースナノファイバーの収率を向上させる技術開発が進められている ●現在の生産方法でも量産化が進めば1,000円/kg程度まで下がるが、500円/kgにするのは不可能

【産業調査部 関口 陽一】

- ・本資料は、著作物であり、著作権法に基づき保護されています。著作権法の定めに従い、引用する際は、必ず出所：日本政策投資銀行と明記して下さい。
- ・本資料の全文または一部を転載・複製する際は著作権者の許諾が必要ですので、当行までご連絡下さい。

お問い合わせ先 株式会社日本政策投資銀行 産業調査部
Tel: 03-3244-1840
E-mail: report@dbj.jp