

炭素繊維で社会が変革する

早稲田大学 機械科学・航空学科 川田宏之

プラスチック基複合材料（PMC）の強化繊維の一つであるPAN系炭素繊維が1961年に発明されてから約半世紀が経過した。この間、炭素繊維自体の性能向上はさることながら、PMC製造プロセス等の地道な技術開発が繰り返され、これまで機器の極限性能を追求する特別な用途にしか使われなかった炭素繊維が炭素繊維強化プラスチック（CFRP）として民間航空機や量産型自動車のメインの構造材料になり始めている。CFRPが先進材料と称されて久しい。ここでは機械工学の立場からCFRPの技術的革新が進んで来た理由を紹介する。

CFRPの利用が加速した原因はいくつかあるが、これまで革新的と言われるCFRPの生産技術や材料開発を俯瞰してみると、1）中間基材である半硬化性シート（プリプレグ）の開発、2）オートクレーブ成形法やVaRTM（真空含浸法）などの確立、3）積層層間に熱可塑性樹脂の粒子を分散させた層間高靱性化CFRP（T800S/3900-2B（東レ））あるいは熱可塑性樹脂を母材としたCFRTPの開発などが挙げられる。

中でも1）のプリプレグの開発は、この分野の最大級の発明と称賛される技術であって、CFRPの成形精度を一気に高めることになった。そもそもプラスチック基複合材料では、強化繊維の配向性を高めて、できるだけ多くの繊維を樹脂に効率良く含浸させるかが最大の課題であった。プリプレグとは、引き揃えた強化繊維に樹脂を含浸させ、薄いシート状の形態をしているものである。樹脂である熱硬化性樹脂の硬化反応を途中で停止（Bステージあるいは半硬化状態）させていて、このシートを何枚か積層し、加圧・再加熱させることで所定のCFRP板が完成する仕組みとなっている。オートクレーブと称する圧力容器が必要ではあるが、繊維の配向角を変化させることで擬似的等方性材料にすることや、型に合わせて積層することによって自由な曲面を成形することも可能となった。

3）の層間高靱性化CFRPの開発は民間航空機の1次構造部材にCFRPが採用されたきっかけとなった技術であり、高い評価を得ている。航空機材料の基礎的概念の一つとして、CAI強度

（Compression After Impact）なるものがある。この強度は、CFRPパネルの表面に横方向の衝突物で衝撃的な損傷を受けた場合、CFRPの残存圧縮強度が損傷前後でどれ程低下しているかの指標となる物性値である。従来のCFRPでは、面方向に衝撃負荷が作用すると大規模な層間はく離が発生し、当然のことながら圧縮強度の低下は著しい。この層間での破損を抑止する技術として、層間のはく離靱性を向上させた技術が層間高靱性化CFRPである。アイデアとしては、CFRPの積層層間に第3相となる微細なポリアミド系粒子を分散させることによって成し遂げたものである。

以上のように、CFRPの異方性材料・ぜい性材料としての欠点を克服し、従来困難とされてきた分野に適応することが可能となった。

炭素繊維でできた構造物は安全か

一般論として、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）は疲労しにくい材料との認識が主で、疲労強度あるいは長期耐久性に関して、基礎的研究、特に「破壊力学」を前提とした研究は積極的に推進されて来なかった。疲労強度は決して無視できない設計パラメータであって、CFRPは繊維方向の強度が主たる強度メンバーとなっていることから、面内等方性にするために多方向の積層形態（擬似的等方性）をとることが一般的である。一方で、航空機はひずみ基準で設計されることが多い。もし何等か理由で欠陥部位が存在することになれば、基準値となるひずみ範囲内でも擬似的等方性材料の最弱層における層間き裂（トランスバースクラック）が発生し、それに継続して大規模損傷進展（層間はく離）が生じる可能性がないとは言えない。

CFRPはシェル構造物のパネルとしての薄板あるいは薄肉円筒等の形状で利用されることが多い。しかし、先に紹介した「層間高靱性化CFRP」の面外方向の機械的物性値を十分なデータ取得がなされていないことから、大型航空機の翼部の設計が変更となってしまったことは記憶に新しい。運行中のバードストライクや異物との衝突等における機体への損傷は避けることができない。今後のCFRPの利用技術の課題として、非破壊検査による損傷部位の検出精度を高める技術や安全点検としての定期的な検査の履行が極めて重要であると考えている。



半導体の結晶を、手を変え品を変えつくる。 いわば材料の錬金術が仕事です。

発光ダイオード、レーザーダイオード、太陽電池、人体間通信などに欠かせない半導体、それらの中心材料である化合物半導体の研究をされてきた小林教授。研究の内容や学生の指導法について伺った。

早稲田大学 理工学術院 教授

小林 正和

Kobayashi Masakazu

——元々は早稲田大のご出身ですね。

そうです。大学4年生のときに未知の半導体を開発する研究を始めまして以後はずっと同じ仕事です。東京工大を経て米国のパデュー大学に就職しましたが、仕事はずっと同じでした。違うのは、いろんな結晶材料を手を変え品を変えて作製し、応用するという研究してきていることですね。学生時代には恩師や先輩諸氏には厳しく躰けていただきました。今でも学会等で声を掛けていただけるので大変感謝しています。2000年から早稲田に戻ってきました。

化合物半導体を未来志向で研究

——半導体の用途も、先生が始められたころとは随分変わったのではないですか。

当初は、高速のトランジスタを創るための研究が主でした。実際のトランジスタを創るというよりも、それに使われるであろう結晶をつくって、どんな特徴を示すかを調べるという内容でした。

——結晶づくりは、作製方法でも特性が違うわけですね。扱っている材料は何に使われるのですか。

化合物半導体といいます。原子をゆっくり一つ一つ積み重ねる方法から、マイクロメートル程度の結晶を一度に作る方法もあります。材料開発の成功例について最近の話題でいえば、白色LED（発光ダイオード）があります。その中心材料が化合物半導体です。白色発光が得られる前に青色LEDの開発があって、これが成功してノーベル賞受賞に繋がりました。私自身も昔は、青色LEDをつくるにはどういう半導体がいいか、というような研究をしていました。

■profile■

1983年早稲田大学理工学部電気工学科卒業。88年東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了、工学博士。米国パデュー大学、千葉大学工学部助教授をへて2000年より現職。



——2014年に、赤崎、天野、中村教授がノーベル賞を取られたジャンルですね。

赤崎先生たちは1980年代に誰も取り組んでいない材料について研究されていました。当時は学会の会場にいくと、発表会場には赤崎先生、天野氏、中村氏しかいない。他の多くの方々は、私たちを中心に大混雑の別会場にいたわけでした。青色LED用に開発が進んでいた材料は2種類あったのです。私たちが取り組んでいた材料はジンクセレン（ZnSe）というのですが、当時は、この材料が主流でした。青色レーザーへの応用も期待されていました。それはフロッピー、CD、DVDブルーレイとメディアの変化に対応した素子が求められていたからです。情報を高集積するのに必要なのです。

——当時、異端だったほうが後に主流になった。

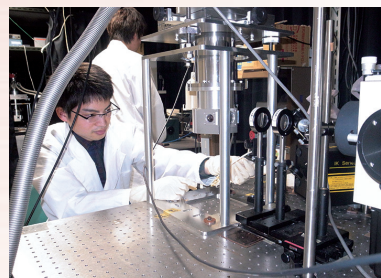
ええ。その材料に関する基礎的研究は中村氏らが一掃した格好になりました。台風が通り過ぎたような感じでした。ほとんどの研究者が移っていきましたが私はいまでもジンクセレンに似た材料を研究しています。風に乗っていくのは簡単だが、乗っていく理由が見つからなかった。

——トランジスタ、LEDときて、いまはどういうジャンルに使うのですか。例えば携帯電話などですか。

ジャンルという意味では、もうすこし先の方を見据えての研究になります。例をあげれば人体間通信ですね。スマートフォンや携帯電話に組み込むことができるシステムです。電話番号やメールアドレスはお互いが赤外線を使う等何らかの行為を行って初めて交換できるわけ



2016年 秋桜会集合写真



実験風景

ですが、人間間通信の技術が組み込まれた機器をポケットに入れて握ったときにアドレス交換ができる。あるいは車の扉を開錠することができる、駅の改札を通ることもできるわけです。両手に荷物をもったままで改札口を通過できるわけです。

化合物半導体でキーデバイスを開発すると、いろんな生活やビジネスシーンの用途に応用できるのです。

1000回の実験、うち990回は失敗。その失敗から発見する。

——かなり未来志向というか、次世代の用途

ですね。その用途を広げるのに鍵になるのが、材料開発なのですか。

そうですね。物理的には可能であるとわかっていて期待されるデバイスやシステムは多いです。しかしそれらを実現させるのには必ず要となる材料があって、それがなかなか創り出せない。実現させるためには、手を変え品を変えて新規材料をつくっていかねばなりません。ですから私は学生には、材料研究とは錬金術であるといっています。それには知的好奇心と行動力・忍耐力が要ると。

実験をしても簡単に成功することはない、1000回行ったら990回は失敗します。失敗したと言い放って切り捨てるのではなく、その実験結果を丁寧に調べていくとおもしろい発見がある。その積み重ねが重要なのです。錬金術のゴールである金にたどりつかなくても、多くの成果が得られます。

——大学のウェブの受験生向けの対談企画では教授同士で対談され、太陽光パネルについても言及されていますね。

私が取り組んできたのは光に関係するデバイスの材料なのです。発光ダイオード、レーザーダイオードも光を扱います。太陽電池も光に関係するので、興味のある分野です。世界的スケールで見るとカドミウムを使った材料の太陽電池がどんどん広がってきている。日本ではかつて公害問題が起きてしまったこともありその材料に係わった研究

は進んでいない。だから似た性質を示す新しい化合物を開発しています。従来の材料ですと、他にも価格の問題や原料の枯渇問題などがありますので、その先を見据えた研究を行っているのです。

不便な機械を使わせてデータの取り方を学ばせる

——学生さんへの指導について、どういうことを重視していますか。

私の研究する材料は、将来に向けたものなので今すぐ使えるものではない。会社で行われている研究はもっと近未来のことが中心なので、学生は会社に入ると、身近なことに取り組めないというギャップが生まれてしまいます。そうならないように身近で基礎的なことも勉強しながら将来のことも見てほしい、ということですね。

——具体的な取り組みは、ありますか

意識的に取り組んでもらっていることは、機械をどう使ってデータをだすのか、データをどう見るかを考えるということです。これはどんな場所へ行っても研究に取り組む際でも必要な能力なのです。技術が進み、様々な測定器などがコンパクトになりコンピュータ画面を操作するだけであつという間にデータが得られます。ブラックボックス化されているので作業は簡単なのですが、変なデータが出てきても気づかない。事前の入力ミスがあったことに気づきにくくなっています。得られたデータが正しいか否かの判断力が必要になります。その判断力をつけさせるために、少し前の時代の機器をつかい、つまみを順々にいじって調整しないとデータが取れない環境を作っています。ブラックボックスでは無いため作業時間はかかりますが、電圧がどういふふうにかかって、こう測定値が出てくるというのを針を見、頭を使いながらやりますので、感覚的にデータの取り方を覚えられるわけです。これが大事ですね。

あとはできるだけ学会で発表するように指導をしています。学部生は国内で、大学院生は海外で行えということです。学内だけでとじこもっていると、隣の者をみて比較する程度で満足してしまいます。そうではなくて、もっと広い視野でみることを望んでいます。そうすると違うものが見えてきて、レベルアップにつながります。

2015年度 第2回 ZAIKEN Festa 受賞者紹介

1938年鑄物研究所として創立された本研究所も創立50周年を契機に1988年「各務記念材料技術研究所」に名称を改めた。現在、14名の研究員により、基幹研究とプロジェクト研究を中核とした多様かつ先鋭的な材料研究が展開されている。新しい事業として研究者・研究室間での相互理解を深め、異分野交流の促進、研究情報発信の推進を図るため、材研OB等の企業の方も参加可能な材研フェスタ（学生ポスターセッション）を企画・開催した。



左から小松崎巧さん、城裕一朗さん、小山先生、宮崎真澄さん、前田聡志さん

特別賞

勝藤研究室 D1 稲葉康介さん

黒田研究室 M2 島崎佑太さん

黒田研究室 M2 薄 京佳さん

小山研究室 M2 白谷あゆみさん

多辺研究室 D1 羽原 将さん

最優秀賞

菅原研究室 修士2年 前田聡志さん

「ATRPによるポリマー被覆ナノ粒子を用いた高屈折率TiO₂/PMMA ハイブリッドの作製」

このような賞を頂き、大変光栄に思います。受賞にあたり、菅原義之教授、井戸田直和助教をはじめとする研究室の皆様ならびに材研職員の皆様に御礼申し上げます。私の発表は、ATRPという精密高分子重合法を用いてTiO₂ナノ粒子を高分子マトリックス中にナノレベルで複合化させ、高分子材料の透明性を損なうことなく屈折率を向上させるというものです。ZAIKEN Festaでは専門外の方からも多くのアドバイスを頂くことができ、大変勉強になりました。今回の受賞を励みにこれからも研究活動に一層邁進していく所存です。

鈴木研究室 修士2年 城 裕一朗さん

「第1世代Ni基単結晶超合金 TMS-1700の耐酸化性に及ぼす硫黄の影響」

この度は、最優秀賞を頂き、誠にありがとうございます。私の研究をこのような形で評価して頂き、大変光栄に思います。鈴木研究室では、材料物性の取得から、金属材料開発、加工技術開発に至る10の研究テーマが存在します。私の研究班では、使用済みタービン翼のリサイクル技術の確立を目的としております。修了後は、学生時代に培った知識と経験を活かし、ジェットエンジンの国産化に尽力したいです。

最後になりますが、ご協力をいただいた皆様に感謝し御礼申し上げます。

小山研究室 修士2年 小松崎巧さん

「Mn-Si-V合金における近似結晶H相の結晶構造と構造欠陥の特徴」

材研フェスタでは、普段自分たちが関わることのない分野についての発表を聞くことができ、とても有意義な時間を過ごせました。その上、このような素晴らしい賞をいただくことができて非常に光栄な気持ちです。私が所属する小山研究室は、グループの垣根を越えた助け合いだったり、意見交換の場が多い研究室だと感じています。そういった多くの人の支えがあって初めて研究ができるということを忘れずに、今後も研究に励んでいきたいと思います。

竹延研究室 修士1年 宮崎真澄さん

「BP3T単結晶の光増幅特性におけるポーラロン効果」

この度、2015年度材研フェスタにて最優秀賞に選ばれたことを非常に誇りに感じております。竹延研究室では、未だ世界で誰も成し遂げていない電流励起による有機レーザーを目標にしており、様々な取り組みを行って参りました。私の研究は、レーザー発振に至らない原因を解明し、改善していくことを主眼に置き、光損失の妨げとなる要因について一つ一つ検討することをテーマとしています。まだレーザー発振には至っていませんが、今後更なる検討を進め、世界初の有機レーザーを狙っていききたいと思います。