

第4期ものづくり塾「新素材の勘どころ」

2020年5月～9月

塾長 大同大学名誉学長 澤岡 昭

「ものづくり」産業の生産高上位を占める自動車や電機・電子産業をはじめ、ほとんどの製造業は素材技術に支えられていると言っても過言ではありません。国際競争が一層激化する昨今、製造業における我が国の最後の生命線が人材であると確信しています。文系理系を問わず“ものづくり”に係わる企業人にとって新素材の知識は必須の素養です。

1980年は新素材元年と言われた年でした。澤岡は85年以降の35年間、新素材の知識啓蒙に傾注してきました。また、2017年3月まで13年間文部科学省元素戦略プロジェクトの責任者（プログラム・ディレクター）を務め、我が国の先端材料開発の実態を熟知しています。

中部の産業で働く企業人を対象に、新素材の知識普及を目的とした「ものづくり塾～新素材の勘どころ」を2017～19年度3期に亘り実施しました。

本案内は2020年度に実施する第4期ものづくり塾についてです。なお本塾は大同大学の社会貢献の一環として行うものでありますので受講料は無料であり、参加による義務等は一切ございません。

応募資格

文系、理系出身を問わず、ものづくり産業で働く企業人、またはこれに準ずる個人で、高等学校の数学、化学、物理学の基礎学力を有する方を希望します。生物学や地学のみの履修であり、化学、物理学を全く履修しなかった方でも、十分な学習意欲がある方の挑戦も歓迎します。

塾生同士の関係

塾生登録にあたって、氏名、住所、所属等について差支えない範囲での記載を求めますが、名簿は非公表として、個人情報への保全に努め、塾生同士のメールによる意見交換等の場は設けません。メール配信はすべてBCCで行います。応募は企業を通じてまたは個人どちらでも結構です。

学習の方法

電子メールを活用した通信教育とし、教材配信は毎月1回行います。教材と同時に送られるアンケートへの回答をお願いします。質問は随時受け付けます。質問に対する回答は原則1週間以内に塾長から直接に行います。

スクーリング

5カ月間に4回のスクーリングを行います。第1回2020年6月6日(土)、第2回7月18日(土)、第3回9月5日(土)、第4回10月24日(土)9時~12時10分、会場は大同大学(名古屋市南区滝春町10-3、名鉄空港線大同町駅徒歩5分)、塾長による講義と神谷純生博士(元トヨタ自動車部長)による特別講演を予定しています。

費用

本事業は社会貢献の一環として行うもので、費用は頂きません。

テキスト

6月~10月の月初めにA4判20~25頁のテキストのPDF(各頁約1200字)をメール添付ファイルとして送付します。PDFデータ読みとりはデスクトップ型、またはタブレット型ディスプレイが必要です。スマホ級のディスプレイでは読み取りが困難ですので、必要な方は、適当な方法でプリントして下さい。コンビニでPDFデータのプリントが可能です。

毎回配信されるテキストは「ベーシック編」「アドバンス編」「事例編」に分かれています。塾生自身の判断で「ベーシック編」のみの学習も歓迎します。参考に第3期ものづくり塾(2019年)テキストの一例を添付します。

申し込みとお問合せ

以下の事項を記載したメールをお送り下さい。

E-mail: mono2020@daido-it.ac.jp

メールのタイトルは「ものづくり塾登録」として下さい。いただいたデータは個人情報として守秘し、目的以外には使用しません。

記載事項:①氏名(ふりがな)、②年齢、③所属、④メールアドレス(テキスト配信等に使用します)、⑤FAX番号、お申し込みメールには数日以内に返信します。

返信メールが届かない場合は、以下の番号にFAXでお問合せ下さい。

宛先:ものづくり塾長 澤岡 昭、FAX:052-612-3833

申し込み締め切り 2020年4月24日(金)、整理の都合上なるべく早くお申込み下さい。

塾長紹介

塾長の澤岡は東京工業大学工業材料研究所勤務の1980年代に年2回、毎回3カ月間(財)神奈川科学技術アカデミーにおいて、中堅技術者を対象に毎土曜日(終日)材料技術全般の講義をコーディネートしました。この講座を通じて、金属・無機・高分子・複合材料全般に明るいオールマイティの材料技術者を育てることの重要性を痛感し、多くの教科書を出版しました。その後、この任務を後継者に託し、90年代は非専門家を対象とした新素材教育に力を注ぎました。代表的な啓蒙書として「新素材のはなし」日本実業出版社(1992)を出版しました。本書は韓国語にも翻訳されました。大同大学長に赴任後も、職業訓練法人日本技能教育開発センターの依頼で3冊の通信教育講座教科書「セラミックスがとこと

んわかる」(2004)、「電子・光材料がとことんわかる」(2005)、「ものづくりの切り札『新素材』」(2015)を執筆しました。この他に大学初年次教科書「電子・光材料」森北出版(2015)を出版しました。

第4期ものづくり塾テキストの内容(予定)

第1回 材料の性質を決める3つの要素

第2回 金属材料

第3回 セラミックス材料

第4回 高分子材料、複合材料

第5回 電子材料、環境材料

スクーリング特別講演(第3期の実施例)

講師 神谷純生博士(元トヨタ自動車部長)

第1回 自動車会社における材料技術者の想い

第2回 自動車を取り巻く環境

第3回 自動車用セラミック部品の開発例

第4回 自動車の軽量化

テキストの例

第3期、第2回 金属材料ベーシック編の一部

2.1.4 高度な製法でつくられる日本刀

最も歴史が古く、多く使われている金属は鉄です。日本では弥生時代に鉄器が使われていたと中学校で教わったような気がしますが、弥生時代の遺跡からは製鉄の痕跡が見付かっておらず、国産品か輸入品かを巡って、歴史家の意見は分かれています。5世紀半ばの広島遺跡から大規模な製鉄の跡が見付かっており、その頃から国産の鉄製品が普及したと考えられます。刀もつくられています。当時はまだ反りのない直刀でした。

反りがついた日本刀がつけられたのは平安中期からです。武器としての刀は、折れず、曲がらず、良く切れることが必要条件です。硬い金属は脆(もろ)いことが欠点です。日本刀は粘りのある鋼(はがね)を心材とし、硬い鋼で包んで、熱しながらハンマーで叩いてつくられます。炭素が0.02%以下の鉄は軟らかい軟鋼です。2.1%までを鋼と呼んでいます。日本刀は炭素量が異なる3種類以上の鋼を組合せて、加熱しながらハンマーで叩いて一体化したものです。ねばりのある低炭素鋼を硬い高炭素鋼で包み、鍛造して一体化したものが日本刀です。日本刀の製作過程は秘密とされてきましたが、徐々に拡散して、日本の鍛造技術の基になりました。

日本刀の主成分となる不純物の少ない鉄は、山陰地方に産出する砂鉄(主成分は磁鉄鉱)を原料として得られる玉鋼(たまはがね)が多く使われました。砂鉄原料は木炭の燃焼によって加熱され、磁鉄鉱に含まれる酸素は木炭の炭素と反応して一酸化炭素や二酸化炭素ガスとして除去されます。玉鋼には木炭から入った炭素が約1%含まれており、低炭素鋼と

高炭素鋼の中間の素材であるということが出来ます。

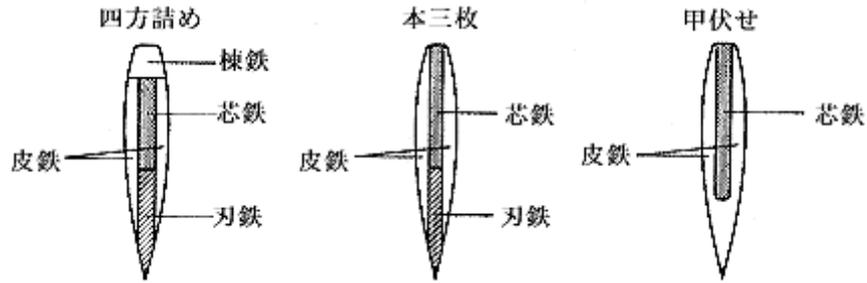


図2.1.5 日本刀の断面

本テキストでは3種の鋼を組合せた「本三枚」と呼ばれる刀について説明します。

刃先に使われる刃鉄（はがね）は、玉鋼に炭素の多い鉄を加えてつくります。刃鉄の後部の芯鉄（しながね）は、包丁鉄と呼ばれる炭素分の少ない粘りのある玉鋼を使用します。芯金は粘りがありますが、曲がりやすいので、刃鉄と芯鉄の両側を包丁鉄よりもう少し炭素分の多い皮鉄で包みます。

3種類の鉄を組合せた集合体を約800℃に熱して、叩いて鍛えます。鍛えるということは、異種の鋼の接合部に残った錆（さび）や不純物を叩いて押し出し、金属組織を均一にするための操作のことです。

鍛え終わると次は焼き入れです。日本刀の強さを引き出す最後の操作が焼き入れであり、真っ赤に焼いた刀の原形を水に浸けて冷やします。水に浸ける直前の温度が非常に重要なので、刀鍛冶は暗い中で、目視で最適な状態を判断したと伝えられています。

刀身には粘土を塗って、水に浸したときの冷却速度の調整をします。粘土の厚みは、刃先部が薄く、後方には厚く盛り付けます。

水に入れて焼入れすると刀身全体が弓なりに反ります。その後刀身全体を削石で削り、砥石で研いで美しい日本刀へ仕上げます。なお、焼き入れ冷却速度を調整するために塗った粘土のパターンを反映して、刃先後方に波形の美しい模様が現われます。

写真は東京国立博物館に展示されている国宝相州正宗の刀です。14世紀の作であり、300年を経た1609年に埋忠寿歳斎によって研がれたとの銘が記録されています。実にほればれと見とれてしまう名刀です。

刀鍛冶が、刀身全体を水に入れて焼入れするとどうして弓なりに反るのでしょうか。それは刃先部分の刃鉄の体積が膨張するからです。金属を熱すると膨張し、冷却すると収縮します。どうして、刃鉄は膨張するのでしょうか。



図2.1.6 国宝相州正宗、鎌倉時代、14世紀、東京国立博物館蔵

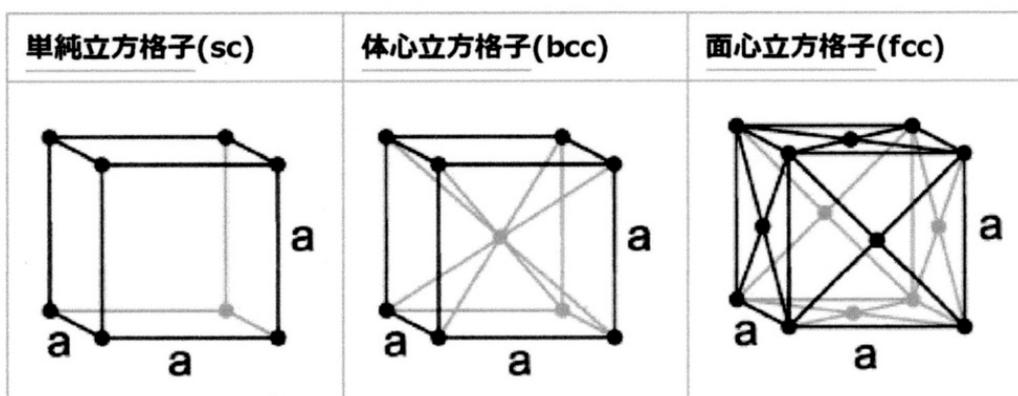


図2.1.7 左図は立方体の8つの角と中心に原子が位置する体心立方格子、
右図は8つの角と6つの面の中心に原子が位置する面心立方格子

鋼材は鉄原子とわずかの炭素原子が混合した集合体です。鉄の元素記号はFeです。純鉄は上中の図のように、さいころ状の立方体のコーナー（隅）と中心にFe原子が配置した格子からできています。この格子を体心立方格子と呼んでいます。温度を約900℃以上上げると、右の図のような立方体のコーナーと各面の中心にFe原子が配置した面心立方格子に変化します。

炭素（C）原子の大きさはFeの約半分です。面心立方格子の真ん中は空いているので小さなC原子が入りこむことができますが、体心立方格子では真ん中にFe原子があるので、入り込む隙間はありません。1%程度C原子が入った鉄を900℃以上に加熱して水に浸けて急冷（急速冷却）するとFe原子の面心立方格子は体心立方格子に変わり、C原子は行き場なくなり、体心立方格子の隙間に取り残された結果、体積が膨張し、複雑な金属組織に変化します。このことによって刃先は硬いだけでなく強くなります。以上が日本刀の反る理由であり、同時に刃先が硬く、強くなる理由です。

第3期 第4章 複合材料ベーシック編の一部

5.1.1 土壁も日本刀も複合材料

農村では数十年前まで土壁が普通に使われていました。粘土質の土に短く切ったわらを混ぜて、水で練り上げて壁をつくります。乾くと結構強く断熱性が良いので土壁は何百年も前から使われてきました。粘土をわらで補強した壁、これは立派な複合材料です。三種類の鋼を合わせて鍛えた日本刀は伝統的な複合材料です。

鉄筋コンクリートも複合材料です。コンクリートは圧縮に強く、鉄筋は引張りに強い素材です。鉄筋コンクリートが十分な強度を発揮するには、鉄筋とコンクリートの接着力が十分である必要があります。コンクリートに入れる砂利や砂に塩分が多く含まれると、鉄筋の表面がボロボロになって接着力が低下し、コンクリートの強度が低下します。

最近ではコンクリートと鋼材を接着剤で固定することが多く行われていますが、厳密に工程を管理しなければ事故の原因になることがあります。

最も多く使われている FRP の繊維はガラス繊維です。風呂タブや建物屋上に設置されている水槽、レジャーボート等さまざまな分野で使用されています。

5.1.2 複合化によって必ずしも強くならない

異なる性質の素材を混ぜ合わせて、元の原料にはなかった特性を引き出した素材が複合材料です。炭素繊維をエポキシ樹脂で固めた複合材料がその代表です。この複合材料は、釣り竿やゴルフシャフトへの応用から始まり、最近では大型旅客機の翼やボディに使われるようになりました。

それぞれの特長をもった素材を組合せて、お互いの弱点を補うつもりで複合化してみたら、弱点が強調されて、元より悪くなったという話を聞くことがあります。素材の複合化によって、材料の特性が向上することはむしろ少なく、大部分は劣化するとさえ考えたほうが実態に合っていると思います。

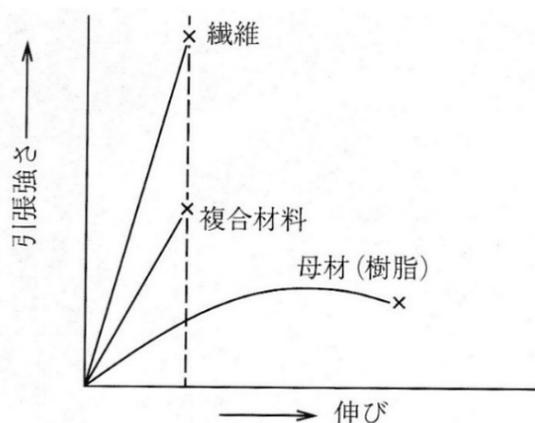


図 5.1.1 繊維強化プラスチック複合材料の強化モデル

繊維強化複合材料 FRP は、繊維を一方向、二方向だけではなく、三方向の立体に織り上げた織物に樹脂を浸み込ませたものがあります。浸み込ませる樹脂をマトリックス又は母材と呼んでいます。

一方向強化複合材料の引張り破断のモデルを図 5.1.1 に示します。図中の引張り強さ（応力）と伸び(歪) の関係が直線部分の傾きを**弾性率**と呼んでいます。一定の荷重に対して伸びが小さい、直線の傾きが大きいほど弾性率が大きいと言えます。

FRP は樹脂をマトリックスにした複合材料です。材料の特性をあらわす指標として弾性率を比重で割った**比弾性率**、強度を比重で割った**比強度**が使われます。比弾性率が大きいということは長さの変化が小さいこと、比強度が大きいということは軽くて強いことを意味しています。

炭素繊維を使った CFRP は比弾性率と比強度が共に大きく、航空機材料として使用量が増加しています。航空機には軽くて強い、信頼性の高い複合材料が必要です。燃費改善のために軽くて強い CFRP の需要が増えています。すでに自動車にガラス繊維を使った FRP が多量に使用されていますが、本格的な強度部材としては CFRP が本命です。しかし、価格が高く、加工が難しいため多量生産には至っていません。

5.1.3 究極の炭素繊維を求めて

大気圧付近での安定な炭素の結晶構造は黒鉛型です。黒鉛の結晶構造は図 5.1.2 に示すように、角（コーナ）に炭素原子がある 6 角形の**ベンゼン環**が層状に並んでいます。層内の隣り合った炭素原子同士は強い共有結合で結ばれています。一方、層間の結合は弱い 2 次結合です。バルク(固まり)状の黒鉛は柔らかく、機械加工ができる素材です。それは層間の結合が弱いため、容易に層間で**剥離（はくり）**するからです。

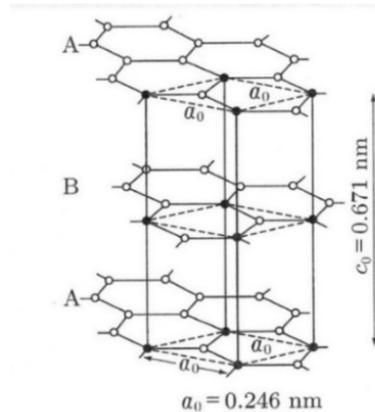


図 5.1.2 黒鉛の結晶構造、黒丸と白丸は炭素原子、 a_0 と c_0 は格子定数。

炭素原子が共有結合で結ばれた層(図中の水平方向)が長手方向にそろった繊維は極めて強いことが予想され、高強度炭素繊維の開発が開始され、1960 年代の初め、日本の二人の研究者が相次いで、それぞれ異なる原料を用いて高強度の炭素繊維合成に成功しました。それが 47 年以上経った現在でも世界の炭素繊維の主流となっていることに誇りを感じています。

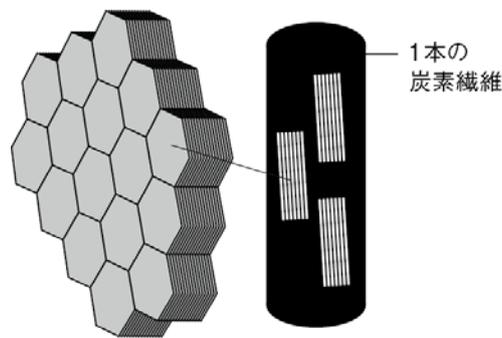


図 5.1.3 炭素繊維の原子配列モデル

図 5.1.3 に炭素繊維の炭素原子の配列モデルを示します。この図では炭素原子の層が少し傾いていますが、理想的には繊維の長手方向に炭素原子層が揃ったときが最強になるはずですが。炭素繊維の断面の電子顕微鏡写真を図 5.1.4 に示します。この炭素繊維はピッチを原料として製造されたもので薄い帯状黒鉛の集合体であることが分かります。

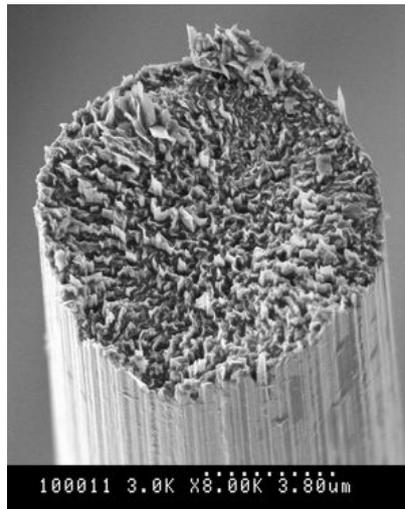


図 5.1.4 直径約 $10\mu\text{m}$ のピッチ系炭素繊維の断面の電子顕微鏡写真

実用化されている炭素繊維は直径約 $10\mu\text{m}$ で、髪の毛よりも細いものです。しかし、こんなに細くても、同じ太さのピアノ線よりもはるかに強いものですが、このように細いファイバーをそのまま使うことはできないので、千本以上を束ねて、バラバラにならないように軽くねじって極細の毛系のようにして使います。

5.1.5 CFRP の泣き所～難加工性

繊維を配向させて、マトリックス樹脂、硬化剤、充填材を含浸させた未硬化の熱硬化性、または熱可塑性樹脂の中間素材が**プリプレグ**(prepreg)です。プリプレグの積層や押し出しによって予備成形する工程が**プリフォーム**です。プリフォームされた素材全体をプリプレグと呼ぶ場合があります。

規格化されたプリフォーム中間素材を専門メーカーから購入して、 $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ で金型成形することができれば、CFRP 部材の量産が可能であり、価格の低減が可能です。しかし、

成形ができて穴あけ、接着は容易ではありません。繊維とマトリックスの樹脂がしっかりと結合しなければ、複合材料本来の性能はできません。マトリックスの接着性を向上させるためには繊維の表面処理が不可欠であり、各社の重要なノウハウになっています。

図 5.1.6 に東レのプリプレグシートを示します。同社のカタログによると厚み 0.06～0.24mm、炭素繊維含有率 56～80%のプリプレグシートが提供されています。母材のエポキシ樹脂の硬化温度は 130～180℃であり、航空機用は 180℃です。プリプレグシートを重ねて目的にあったプリフォームを製造します。最近では注文に応じてプリフォームを製造する企業が増えています。



図 5.1.6 プリプレグシート（東レ）の例

穴をあけた 2 枚の CFRP シートをボルトでつないで引っ張ると、ボルト穴は変形して容易にちぎれます。プリプレグの接合は母材と同じエポキシの接着剤で行います。

プリプレグシートやプリプレグ部材を重ねて接着する時、接着面に空気が入らないよう、脱気に加えて、外部から加圧する必要があります。重ねたプリプレグを耐熱プラスチックのシートで覆い、脱気し、ガス圧力によって加圧しながら加熱します。このための加圧加熱容器がオートクレーブです。



図 5.1.7 一体成形されたポルシェ 911 の CFRP ボディ

図 5.1.7 にポルシェ 911 の CFRP ボディを示します。販売用部材ではありませんがここまでできるというデモンストレーション品です。金型の上にプリプレグを置き、全体を耐熱性プラスチックバッグで包んで、オートクレーブの中でバッグ内部を脱気した後、全体を高圧ガスで加圧しながら加熱して製作したと思われます。

同様の方法でボディを一体成形した航空機が HondaJet（ホンダジェット）です。同社のホームページには以下のように記載されています。

「HondaJet は胴体を一体成型とすることで接合部をなくし、より軽量の構造となっている。内側の補強材は、コックピット周辺と尾部は複雑な曲面形状を作れるハニカムを用いて層流ノーズとなる形状を実現し、ほぼ円筒形状となるキャビン部分にはフレームとストリンガー（縦通材）を用いることで客室空間を最大化している。このような 2 種類の内部構造を持ちながら一体成型をする技術は非常にユニークなものである」。

ホンダは乗員を含めて 7 人乗りのビジネスジェット機を製造することを 1997 年に決定し、すべての技術開発を米国で行い、2015 年米連邦航空局から型式証明を取得しました。17 年に月産 4 機体制を確立、43 機を出荷、小型ビジネス機世界 No. 1 を達成しました。19 年には月産 9 機の製造が行われています。同機は全長 13m、主翼上面にエンジンを取り付けたユニークな構造で、広い室内、高速、燃費が良く、航空業界の常識を塗り替えています。



図 5.1.8 組立て中の HondaJet

5.1.6 民間航空機へ導入が始まった

いまや炭素繊維は、航空機産業にとって、なくてはならないものになりました。しかし、ここまでの道のりは、決して楽なものではありませんでした。素材として使用された歴史が浅いため信頼性の保証に乏しく、加工が難しいため、航空機部材としての CFRP の採用が遅れてきました。

航空機燃料の価格高騰や環境問題の深刻化により、旅客機を軽くして、燃費を下げるのが重要な課題となり、CFRP が注目されました。CFRP はまずスキー板とゴルフシャフト、

次いでテニスラケット、釣り竿などへと用途が広がり、性能が徐々に向上し、遂に本格的な炭素繊維の時代が到来しました。

現在、日本の企業は航空機をはじめ高級複合材料部材原料として、世界の炭素繊維の市場をリードしています。次の桁違いに大きな市場が自動車です。すでに後発の国々の激しい追い上げが始まっています。

旅客機製造で世界シェア No. 1 のボーイング社は航空機構造材料を複合材料に置き換えることに極めて熱心な企業です。図 5. 1. 9 に同社の中型主力旅客機に使用されている素材の割合（重量）を示します。約 25 年前に初飛行した B767 の CFRP の割合（円グラフではコンポジットと表示）は 3% でしたが、2011 年に運用開始した B787 では 50% に急増しました。B787 は日本の企業が主要な部分の製造を分担しています。主翼は三菱重工、胴体の一部は川崎重工が製造して中部空港から米国シアトルのボーイング社組立工場に空輸しています。

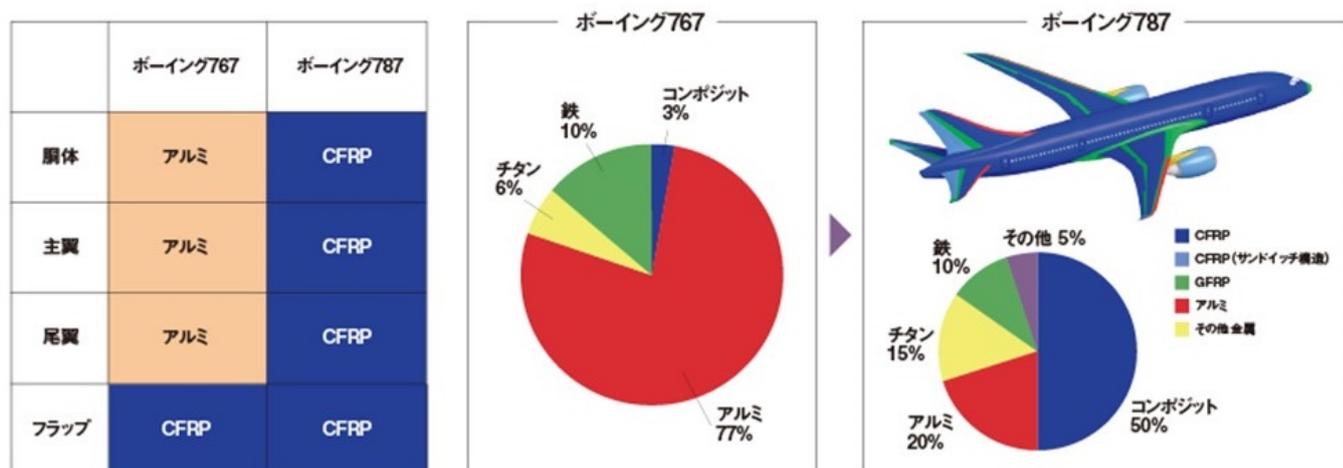


図 5. 1. 9 B767 と B787 の機体材料

以上