

構造材料と材料特性試験

1. 本テーマのねらい

本テーマのねらいは構造材料について調べることである。構造材料とは建物、橋、船、あるいは鉄道、道路、港湾など、広くインフラに使用される材料である。例えば、鉄鋼、セメント、ガラス、プラスチック、木材などである。構造物とは所定の目的・機能を果たすように作られた物体であるが、外力が作用してもきちんと所定の形状を保持する必要がある。すなわち基本的に強度が必要である。

構造材料は多種にわたる。ここでは、鋼、アルミ、CFRP(炭素繊維強化複合材料)について調べる。鋼、アルミは今後も主要な構造材料として使われていくと思われる。CFRP は比較的新しい特徴的な構造材料の代表としてとりあげた。本プロジェクトでは2つのことを目的にする。

- ・実験によってこれら材料の強度特性を調べること。
- ・これら材料はどのようにして製造し、利用しているのか、何が利点なのかを調べること。

2. 構造材料と社会の発展

図1は産業革命以後の技術革新の系譜を示す。産業革命は蒸気機関と石炭と鉄鋼によってもたらされた。鉄道や紡績工業が発展した。19世紀には自然科学と技術が発展し、工学が育ち始めた。19世紀の終わり頃から電力や石油が利用された。やがて自動車や航空機、電気通信技術、合成化学が発展した。20世紀に入り、大量生産の時代を迎える。ジェットエンジン、原子力、コンピュータ、高速交通・通信網が発達し、人類の活動範囲が拡大した。

この中で構造材料はどんな役割を果たしてきたのか。あまり目立たないが、きわめて重要な働きをしてきた。産業革命以前の構造材料といえば岩石・煉瓦・木材が主であり、金属は武器や装飾品として使われる程度だった。鉄鋼の大量生産がなければ鉄道や大型船の普及は難しく、工場の機械装置もできなかったはずである。材料・エネルギー・情報が工学を支える基礎であると言われるが、材料(構造材料に限らない)が一要素をなしていることは確かである。

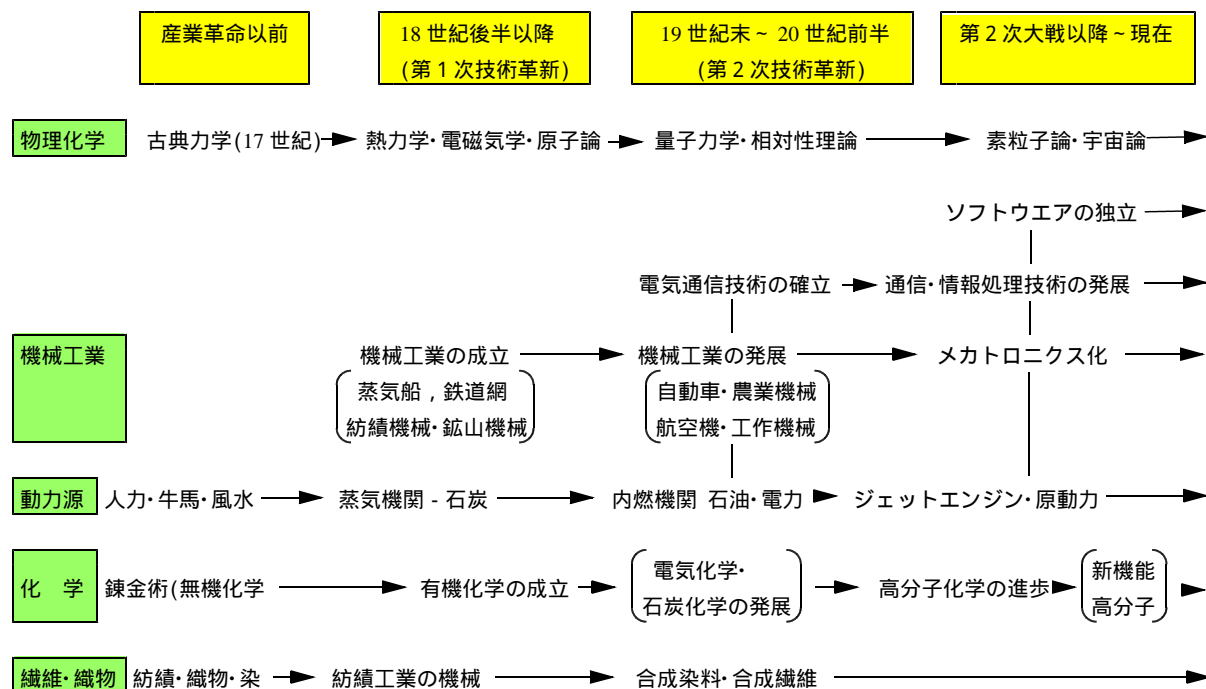


図1. 技術革新の系譜

3. 構造材料の基礎知識

3.1 クラーク数と素材生産量

構造材料の素材を生産するためには、何よりもその資源が地球上に存在することが先決である。アメリカの地質学者クラーク(1847-1931)が推定した地殻中の元素の存在度がクラーク数である(表1)。これによれば金属ではアルミが1位、鉄が2位である。11位までの合計で全体の99%を超える。全く微量しか存在しない金属でも、他の鉱物に混合して産出される。

2000年の世界と日本での構造材料の素材生産量は表2のようである。この場合、鋼やアルミの生産量にはかなりリサイクル材が含まれている。

表1. クラーク数

順位	元素	クラーク数(重量%)		
1	O	49.5	▲	▲
2	Si	25.8		
3	Al	7.56		
4	Fe	4.70		
5	Ca	3.99	(97.91%)	(99.43%)
6	Na	2.63		
7	K	2.40		
8	Mg	1.93	▼	
9	H	0.87		
10	Ti	0.46		
11	Cl	0.19		▼

表2. 世界の原材料生産(2000年)

	世界の生産量	日本の生産量
粗鋼	8億トン	1億トン
アルミ地金	2500万トン	ほぼゼロ(200万トン輸入)
プラスチック原料	1億7000万トン	1400万トン(構造材200万トン)
セメント	15億トン	6500万トン

3.2 構造材料に求められる性質

構造材料に種々の性質が要求される(表3)。基本的には力学的特性と加工性が不可欠である。個々の構造物によって要求される特性は違うが、コストは極めて重要な要素である。最近では機能だけでなく、環境に配慮したエコマテリアルの思想が構造材料にも要求されるようになってきた。

表3. 構造材料に求められる性質

特 性	内 容
力学的	強度、靱性、延性、耐衝撃性、弾性率、比強度、比弾性率
熱的	熱膨張率、耐熱性、耐低温性
化学的	耐酸性、耐アルカリ性、耐薬品性、耐食性
電磁氣的	導電性、磁性、X線透過率、電磁遮蔽性
審美的	美観、光沢、色彩、触感、清潔感
経済的	素材コスト、加工コスト、維持コスト
加工性	切削性、塑性加工性、溶接性、接着性

4. 鉄鋼

[資源] 地球科学によれば地球の内核は鉄あるいはニッケルからなる。地球の構成比率の35%が鉄といわれる。クラーク数では鉄は金属の中でアルミの次に多い。一般に鉄鋼と呼ぶが、炭素量2%以下を鋼、2%以上を鉄と呼ぶ。世界の鉄の推定埋蔵量は1600億トンである。主な産出国はブラジル(21.9%)、オーストラリア(17.6%)、中国(17.0%)、インド(7.6%)、ロシア(6.7%)、アメリカ合衆国(6.4%)である。日本は鉄鉱石と製鉄用石炭を主にオーストラリアから輸入している(図3)。

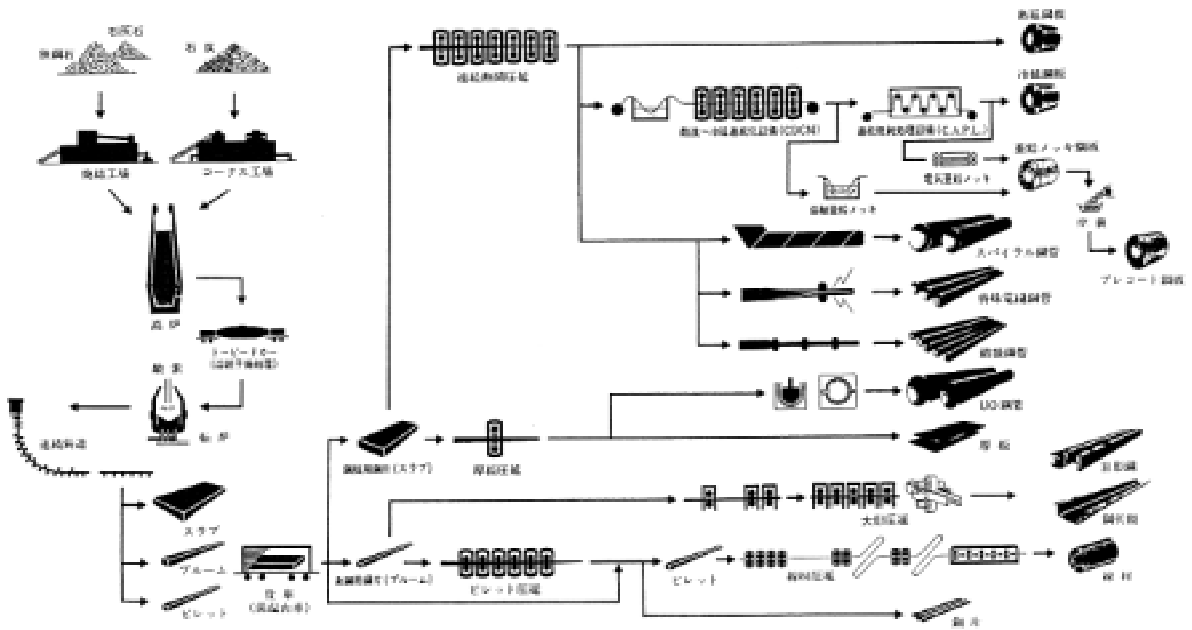


図2. 鉄鉱石から鉄鋼製品ができるまで

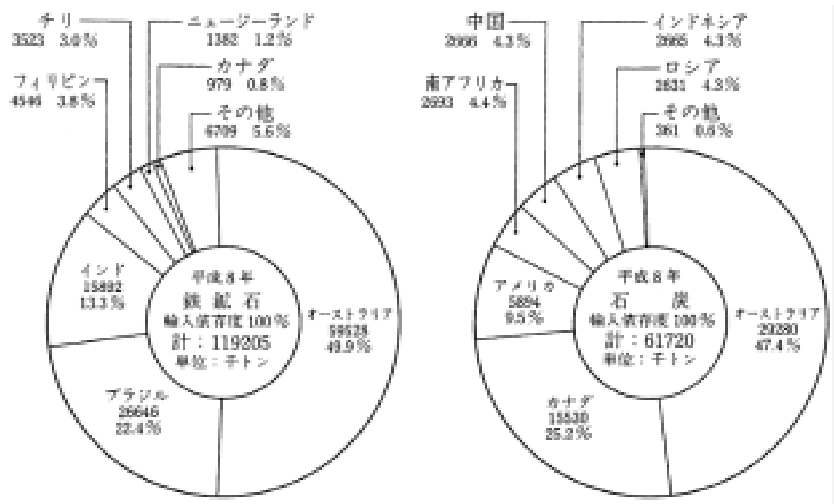


図3. 鉄の原料の輸入状況

〔製鉄の歴史〕鉄は有史以前から人類が使用してきたが、ある程度量産する技術を開発したのは紀元前 17 世紀のヒッタイト帝国(現在のトルコ)である。剣や槍などの武器材料として軍事機密になっていたらしい。世界で最初に溶鉱炉で銑鉄を作ったのはベルギーである(15 世紀)。中国ではこれ以前に鉄の還元技術を開発していた。溶鉱炉で出来る銑鉄の炭素成分を調整して鋼を工業的に製造する技術が、1856 年に英国のベッセマーにより開発された。これに改良が加えられ 1870 年頃から粗鋼生産が世界的に急増した。鋼の大量生産が 19 世紀後半から 20 世紀前半にかけての鉄道の普及、鉄橋や長大橋の建設、高層ビルの建設、大型船舶の建造へとつながる。1870 年の世界の粗鋼生産量は 70 万トンだったが、現在国内の一製鉄所で年産 900 万トンに達する。

〔製鉄と製鋼〕溶鉱炉(高炉)で鉄鉱石を還元して銑鉄を作る。銑鉄 1 トンを製造するのに鉄鉱石 1.5 トン、石炭 800kg、石灰石 150kg、水 30~60 トン、電力 10~80kWh が必要である。銑鉄は 4~5% の炭素を含む。銑鉄の炭素を下げ必要な元素を加えて鋼を製造する。製鋼炉には転炉、平炉、電気炉があるが転炉が主である。溶鋼から鋼塊、半製品を作り、これを圧延して鋼板、形鋼、棒鋼、線材を作る。連続铸造法による場合は鋼塊を作らず半製品を作る。圧延された鋼板は熱処理して



図4. 明石海峡大橋

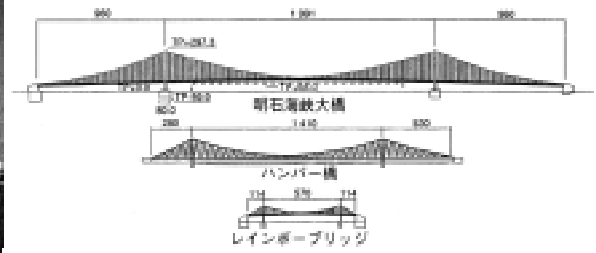


図5. 橋梁規模の比較

性質を調整する(図2)。日本の鉄鉱石、原料炭の輸入依存度はほぼ 100 %であり、2001 年度は鉄鉱石 1 億 2,649 万トン、原料炭 6,277 万トンが輸入された。

〔構造物と鉄鋼〕なぜ構造物には鉄鋼が多用されるのか。材質が一定で、強く、加工しやすく、大量かつ安く入手できる材料といえは鉄鋼以外には見あたらない。24 万トンのタンカー(長さ 300m)には鋼材が 3 万トン使われる。世界最長スパン 1991m を誇る明石海峡大橋には引張強さ 180kgf/mm²、長さ 4000m のケーブル用ワイヤ(素線径 5.23mm)が要求された。使用鋼材は 27 万トンにのぼった(図4, 図5)。熱処理と成分元素により鉄鋼の強さや硬さは大幅に変化する。鉄鋼を切断したり切削する工具も鉄鋼材料である。一般に鉄鋼は大変錆びやすいが、99.999 %の純鉄になると塩酸・硫酸にも溶けない(99.995%では錆びる)。

〔鋼材の種類〕鋼材の分類の仕方はいろいろある。成分・製造法・形状によって分類すれば表4のようになる。日本の鉄鋼市場は土木・建築 50%、自動車 20%、産業機械 8%、電気機械 7%、造船 3%、その他 12%となっている。

表4. 鋼材の種類

成分	普通鋼(炭素鋼)、特殊鋼
製造法	熱間圧延材、冷間圧延材、鋳鋼材、鍛鋼材
形状	条鋼：棒鋼、平鋼、形鋼、線材、レール 鋼板：厚板、熱間薄板、冷間薄板、表面処理鋼板 鋼管：継ぎ目なし鋼管、溶接管、鍛接管

5. アルミニウム

〔資源〕アルミはクラーク数が金属で第1位であり、確認埋蔵量は 150 億トンを超える。アルミの原料であるボーキサイトは地球上どこでも発見されるが、鉱石が太陽熱と降雨で風化が進んだ熱帯あるいは亜熱帯地域で多く産出される。“粘土”の中に化合物として含まれていたため、アルミの発見は遅れた。ボーキサイトが発見されたのは 1821 年、南仏でのことである。1827 年ドイツの F.ウェーラーが塩化アルミニウムを金属カリウムで還元し、金属アルミニウムを単離した。彼がこの元素の発見者とされている。一般の人々にこの金属が紹介されたのはフランスのドビーユが 1855 年のパリ万国博覧会にこれを出品したときである

〔アルミの製造法〕金属アルミニウムは、ボーキサイトを原料とし、バイヤー法による高純度アルミナの製造およびアルミナのホール=エルー法(1886)による電解還元によって製造される。バイヤー法は 1888 年にオーストリアの K.J.バイヤーが発明して以来、ボーキサイトから高純度アルミナをつくるための最も経済的な方法として利用されている。製造工程は次のようになる。

第1段階：ボーキサイト(Al₂O₃ : 45~60%、Fe₂O₃ : 3~25%、SiO₂ : 2.5~18%)を NaOH 液に溶かしてアルミン酸ソーダ(NaAlO₂)液を作り、そこからアルミナ(Al₂O₃)を抽出する。

第2段階：アルミナを溶融氷晶石の中で電気分解することによりアルミ地金を製造する。

第3段階：地金を原材料にして圧延・押し出し・鍛造・鋳造などの加工を行い、種々の形状の製品素材に成形する。

日本が2001年に輸入したアルミ地金は208万トンで、輸入先はオーストラリア31%、ロシア22%、ニュージーランド10%、ブラジル8%、インドネシア6%、カナダ5%、南アフリカ5%等である。

[アルミの分類と用途] アルミ合金は軽量かつ高強度であるため航空機には不可欠な材料である。最近では鉄道車両、自動車、船舶(例えばテクノスーパーライナー)に使われている。強度があり錆びにくいので建築用にも多用されている。自動車車体重量の6~9%がアルミ材料である。合金成分系によって表5のように分類される。航空機材料とその変遷を図6、図7に示す。

表5. アルミの分類

種類	特性	用途
1000系：純アルミ	強度は低いが、熱伝導性・電気伝導性にすぐれている。	箔・キャパシタ・反射板・電線など。
2000系：Al-Cu系 Al-Cu-Mg系	高強度であるがCuの含有量が多いため耐食性で劣る。	航空機材料。2017はジュラルミン、2024は超ジュラルミンと呼ばれる。
3000系：Al-Mn系	純アルミ並に加工しやすく、耐食性にもすぐれる。	電球口金・アルミ缶など各種容器。
4000系：Al-Si系 Al-Si-Cu-Mg系	Si量が多いと熱膨張率が小さく、耐摩耗性にすぐれる。	エンジンのピストン・VTRヘッド。
5000系：Al-Mg系	アルミ合金の中で最も耐食性にすぐれる。5083は溶接構造材。	5052材は車両・船舶・建築、5083は船舶・車両・温タンク・圧力容器。
6000系：Al-Mg-Si系	中強度材で耐食性あり。	6N01は光学機器、6063は建築用サッシ・建築内外装材。
7000系：Al-Zn-Mg系	7075は超々ジュラルミンと呼ばれ、アルミ合金中最強。	航空機材料。(注)7075相当材が日本で開発され零戦に使用された。

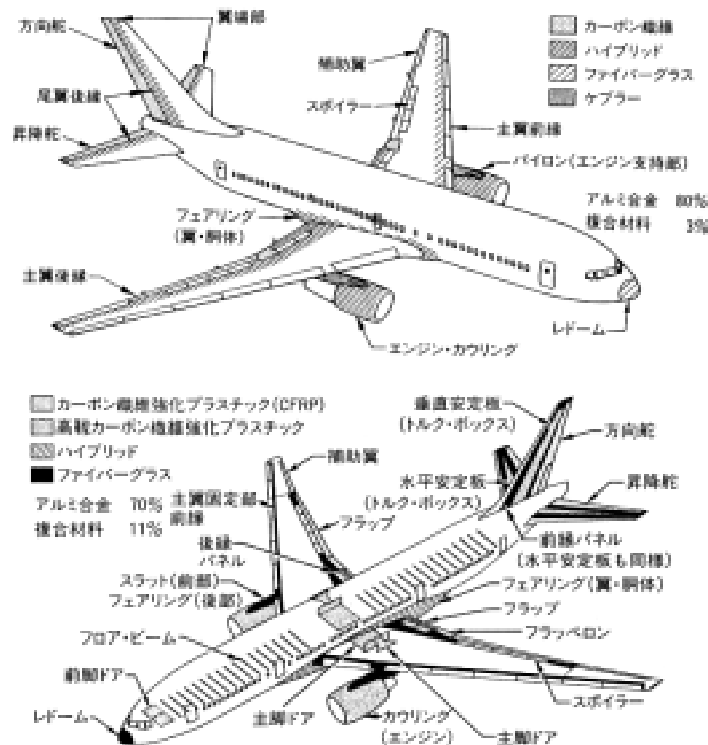


図6. ボーイング767(上)と777(下)の主な材料

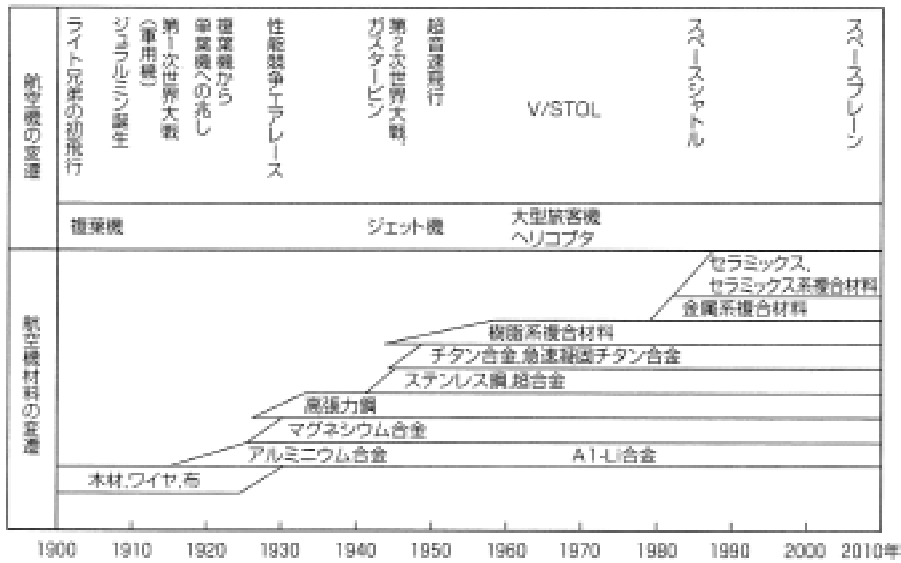


図7. 航空機材料の変遷

6. プラスチック

[開発の歴史] プラスチックは合成樹脂と訳される。樹脂とは木の脂で成形が自由で腐らない。漆は代表的な天然の樹脂。プラスチックは人工的な樹脂で 19 世紀中頃、アメリカでビリヤードのボールの材料である象牙が不足したことがきっかけで開発された(セルロイド)。現在のプラスチックは石油から作られている。プラスチック(plastics)は塑性、すなわち成形が自由という意味であるが、C や H 等の分子が多数連結した構造をなすので高分子材料とも呼ばれる。合成高分子はプラスチック、合成繊維、合成ゴムに分類される。プラスチックの工業化は、ポリスチレン(1930)、合成ゴム(1932)、メタクリル樹脂(1936)、塩化ビニル樹脂(1938)、ナイロン(1939)、高圧法ポリエチレン(1939)、ケイ素樹脂(1944)、フッ素樹脂(1950)などと比較的新しい。

[プラスチックの種類] プラスチックは熱可塑性樹脂、熱硬化性樹脂に大別される。軽くて丈夫、錆びない、腐らない、着色自由、大量生産可能、電気絶縁性、断熱性があるが、熱に弱く、キズがつきやすい。自動車にはバンパー、ハンドル、シートのクッションなど内装部品として、普通乗用車で約 75kg/台使われている。プラスチックは日本で 1364 万トン(熱可塑性樹脂 89.2%、熱硬化性樹脂 9.3%)、世界で 1 億 8200 万トン製造されている(2001 年)。日本・世界とも包装容器が最大の用途である。

[繊維強化プラスチック] プラスチック単体の引張強さ、弾性率はそれぞれ 2~4kgf/mm²、200~300kgf/mm² で、構造材料としては鉄やアルミニウムの値に比較してかなり小さい。そこで、これら金属材料に代替しうる合成樹脂として生み出されたのが、高強度繊維で補強した繊維強化プラスチックである(fiber reinforced plastics ; FRP)。使用される繊維はガラス、ポロン、炭素、アラミド繊維(代表が DuPont 社のケブラー)等で、GFRP、BFRP、CFRP などと略称される。

6.1 CFRP

[炭素繊維の製造工程] 炭素繊維は製造原料からセルロース系、ポリアクリロニトリル(PAN)系、ピッチ系の 3 種に分類される。現在は PAN 系が主流である。その工程を簡単に述べる(図 8)。

- ・ PAN の溶液をオリフィスから吐出して繊維とする(湿式と乾式がある)。
- ・ PAN 繊維を空气中 200~300°C で熱処理する(安定化)。
- ・ 安定化処理した繊維を非酸化雰囲気中で約 1200°C 以上で熱処理すれば炭素繊維が得られる。

炭素繊維は直径 8μm の黒鉛の結晶である。この結晶は繊維方向に並んでいるので強度が高い。炭素繊維は熱に強く、密度が小さく、ヤング率は異方性をもつ。日本は炭素繊維の製造でオリジナルな開発をしており、世界の炭素繊維の 7 割以上を生産している。CFRP のマトリックス樹脂には主にエポキシや不飽和ポリエステルが使われる。

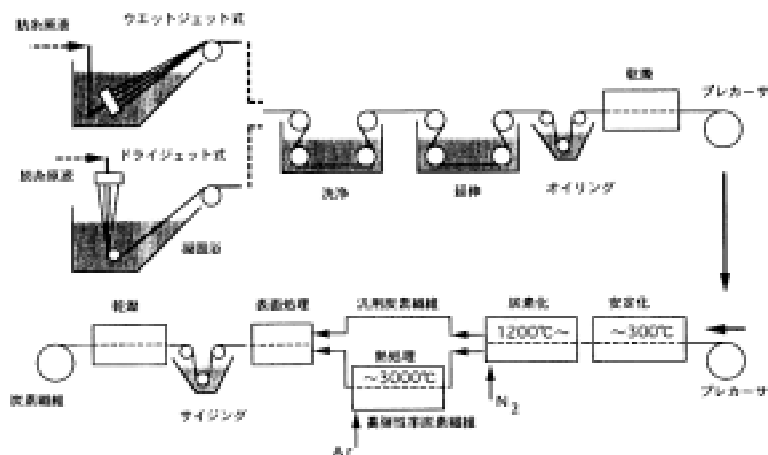


図8. PAN系炭素繊維の製造工程

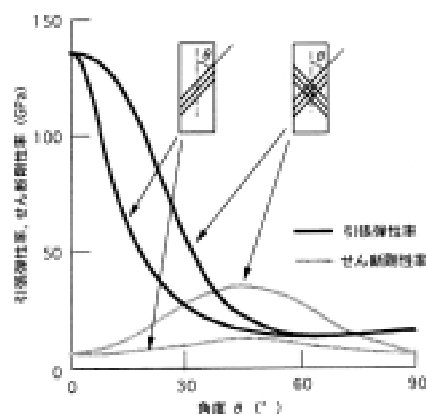


図9. CFRPの力学的特性

[CFRPの強度の異方性] FRP は繊維方向と外力の作用方向によって強度や剛性が著しく変化する(図9)。従って、繊維の方向を組み合わせた積層材として利用されることが多い。

[CFRPの用途] CFRP は軽くて強いいため、早くから宇宙航空分野で使用されてきた(図6)。B777機体の垂直・水平安定板およびフロアビーム、H-IIA ロケットモーターケース等もその例である。ゴルフクラブ、テニスラケット、釣り竿などは一般消費者向きである。最近では自動車のドライブシャフト、エンジンパーツ、スポイラー、鉄道関係の車体や椅子、自転車のフレーム、建築物の屋根、鋼製橋脚の補強(炭素繊維シート)、風力発電の羽根材料、新聞印刷などの高速回転機用ローラーなど、広範囲に使用されるようになってきた。

7. 材料試験

7.1 引張試験

構造物を設計する場合は使用する材料の強度、延性、靱性(割れにくさ)、剛性(変形しやすさ)などを知る必要がある。このうち、最も基本的なものが引張強度である。通常、引張試験では引張強度、降伏強度、伸び、弾性率(ヤング率)などが同時に測定できる。これらの性質は試験片のサイズや試験条件(引張速度、試験温度)によるので、一般には JIS 規格に従って実験を行う。

[引張試験] 引張試験では、試験片に作用する荷重と変位(伸びまたは歪み)の関係を求める。荷重は力の単位(kgf、tonf、kN など)、変位は長さの単位(mm、 μm など)をもつが、荷重は応力(荷重/断面積)、変位は歪み(標点間伸び/標点間距離；無次元)で表す方が一般性がある。これらを図に示したのが図10であり、特徴ある点(降伏荷重点、最高荷重点など)を材料特性として記述する。ヤング率は応力-歪み線図の直線部の傾きに相当する。降伏荷重点が明瞭に現れない材料もある。その場合は便宜的に0.2%耐力で降伏強度を定義する。

[材料特性の定義]

- ・引張強度 = 最高荷重(kgf)/断面積(mm^2)、(注) $1\text{kgf}/\text{mm}^2 = 9.807\text{MPa}$
- ・降伏強度 = 下(上)降伏荷重(kgf)/断面積(mm^2)
- ・伸び(破断ひずみ) = 標点間伸び(mm)/標点間距離(mm)、(注)一般に%で表す。
- ・ヤング率 $E = \tan\theta$ (応力-ひずみ線図の直線部の傾き)、(注)単位は kgf/mm^2 , or MPa , or GPa
- ・比重 $\gamma = \text{重量(kgf)}/\text{体積}(\text{mm}^3)$

7.2 比強度・比剛性

航空機や自動車のように移動する構造物、あるいは橋梁のように自重が大きい構造物では軽く強い材料が望まれる。このような場合、比強度・比剛性が材料特性として用いられる。

[定義]

- ・比強度 = 引張強度/比重(密度や比重を使用することもある)、(注)長さの次元になる。
- ・比剛性 = ヤング率/比重(密度や比重を使用することもある)、(注)長さの次元になる。

7.3 実験で求めること

引張試験を行い降伏強度、引張強度、伸び、ヤング率を求める。また、材料の比重量を測定して比強度、比弾性率を求める。

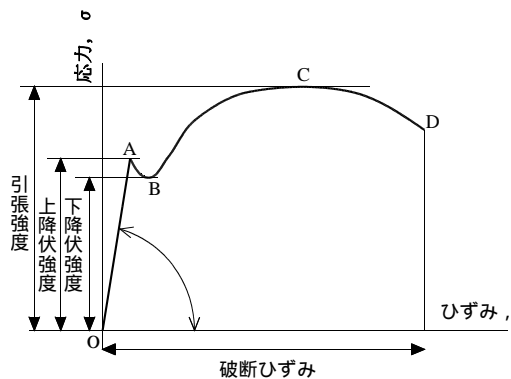


図10. 軟鋼の応力-ひずみ線図

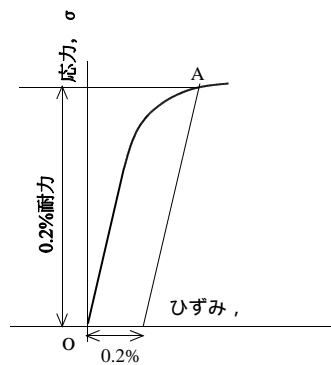


図11. 0.2%耐力の定義

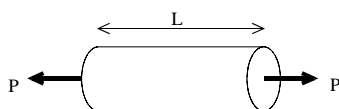


図12. 棒の一樣引張

[比強度・比剛性の解説]いま、断面積 A 、長さ L の棒(比重量 γ ; 単位体積当たりの重量)に荷重 P が作用する場合を考える(図12)。物体重量と作用応力の関係を求める。

重量 W は $W = \gamma LA$

応力 σ は $\sigma = P/A$

、から $W = PL/(\sigma/\gamma)$

から、 $W \propto (\sigma/\gamma)^{-1}$

σ を破壊応力と考えれば重量は (σ/γ) に反比例する。すなわち (σ/γ) が大きい材料ほど軽量になる。

いま、A,B という2種類の同一寸法の棒があるとすれば、から、添え字を A,B として

$$W_A/W_B = (\sigma_B/\gamma_B)/(\sigma_A/\gamma_A) \quad \dots\dots$$

から異種材料の比較ができる。また、剛性については、で $\sigma = E\varepsilon$ を代入すれば、

$$W \propto (E/\gamma)^{-1} \quad \dots\dots$$

は (E/γ) が大きい材料ほど軽量になることを示す。 γ の代わりに密度 ρ を用いて説明してあるものも多い。ここでは、引張の場合について示したが、荷重様式や構造形態によって比強度・比剛性は違ってくる。

8. レポートと課題

- ・実験結果を簡単にまとめてレポートする。
- ・次の(a)~(e)のうち1つ以上について調べ、コメントを加えてレポートする。
 - (a)鉄鋼、アルミ、CFRPの生産量について
 - (b)鉄鋼、アルミ、CFRPの素材価格について
 - (c)鉄鋼、アルミ、CFRPの製造時のエネルギー消費について
 - (d)鉄鋼、アルミ、CFRPのリサイクルについて
 - (e)これからの構造材料について

参考文献

構造材料に関する教科書や著書はおびただしい数にのぼる。“おはなし”的な著書を多く挙げたのは、教科書はどうしても難しい表現になってしまうが、それらの中で結構親しみ深く示唆に富む解説がなされていることが多いためである。また、文献が広範囲にわたるのは、現実の構造物は、構造・材料・設計・加工・コスト等を関連づけて考えなければならないからである。例えば、飲料容器材料はアルミ、スチール、PET(プラスチック)、紙、ガラスがあり、内容物によって使い分けられている。ビール缶にアルミを使うのは、スチールでは鉄分が溶け出してビールの味を損うかもしれない(実際は缶の内面をコーティングしているのでその心配はないらしい)というのが一番の理由のようである。いずれにしても、求められる機能・容器の製造単価・リサイクル性などを勘案した結果が現在の容器の構成比率になっているわけである。歴史的視点も重要である。なぜ、そのような材料が必要とされたのか、開発の過程ではどんな苦労があったのか、現在だけでなく歴史を遡って考えてみることは将来を展望するためにも大切である。そんなわけで、おやと思われる文献も挙げておいた。

[歴史的な視点から書かれたもの]

- ・合田良實 ; “ 土木と文明 ”、鹿島出版会(1996)
- ・解体新書編集部編 ; “ モノの技術・技術の歩み ”、日刊工業新聞社(1998)
- ・菅建彦 ; “ 英雄時代の鉄道技師たち ”、山海堂(1987)
- ・三輪修三 ; “ 機械工学基礎コース 機械工学史 ”、丸善(2000)

[具体的な構造物のはなし]

- ・古屋信明 ; “ 世界最大橋に挑む ”、NTT 出版(1995)
- ・瀧澤宗人 ; “ 船のはなし ”、技報堂出版(1991)
- ・柳生一 ; “ 図解・ハイテク飛行機 ”、講談社ブルーバックス(1996)

[構造力学に関するもの]

- ・ゴードン著(石川廣三訳) ; “ 構造の世界 - なぜ物体は崩れ落ちないでいられるか - ” 丸善(1991)
- ・尾田十八 ; “ テクノライフ選書 形と強さのひみつ ”、オーム社(1997)
- ・望月重 ; “ ビルはなぜ建っているか なぜ壊れるか ”、文春新書(2003)
- ・三木千壽 ; “ 鋼構造 ”、共立出版(2000)

[材料に関するもの]

- ・ウォーク編著(増本健監修) ; “ 金属なんでも小事典 ”、講談社ブルーバックス(1997)
- ・長崎誠三監修 ; “ 金属を知る事典 ”、アグネ(1978)
- ・大和久重雄 ; “ 鋼のおはなし ”、日本規格協会(1984)
- ・中沢護人 ; “ 鋼の時代 ”、岩波新書(1964)
- ・小林藤治郎 ; “ アルミニウムの話 ”、日本規格協会(1985)
- ・日本複合材料学会編 ; “ 複合材料を知る事典 ”、アグネ(1982)
- ・小林昭 ; “ 入門複合材料 ”、日本経済新聞(1986)
- ・高久明・多田尚 ; “ 複合材料をつくる ”、共立出版(1995)
- ・ケン・イースタリング(石崎幸三訳) ; “ トゥモローズ・マテリアル ”、内田老鶴圃(1999)
- ・環境材料研究会編 ; “ 図解エコマテリアルのすべて ”、工業調査会(2003)
- ・東千秋 ; “ 材料工学と社会 ”、放送大学教材(2001)
- ・小宮山宏 ; “ 地球持続の技術 ” 岩波新書(1999)

[材料試験に関するもの]

- ・須藤一 ; “ 材料試験法 ”、内田老鶴圃(1976)

[生産に関するもの]

- ・半田邦夫 ; “ 航空機生産工学 ”、オフィス HANS(2002)
- ・(社)軽金属学会編 ; “ 自動車軽量化のための生産技術 ”、日刊工業新聞社(2003)
- ・中尾政之・畑村洋太郎 ; “ 生産の技術 ”、養賢堂(2002)