

複合材料の力学と破壊について

1. 複合材料とは

複合材料とは、一般に二つ以上の材料から構成される材料のことである。航空宇宙構造材料となる最先端複合材料だけでなく、食堂のお盆に使われている様な廉価なもの、さらには藁くずを入れた土壁も複合材料の範疇に入る。また生物を構成している生物材料も広い意味で複合材料である。図1に竹の断面の顕微鏡写真を示した。強い繊維が長手方向に並んでこれを軟い組織が連結している。典型的な繊維強化複合材料である。曲げの強い力が働く方向に繊維が入っていることも大きな意味があるが、さらにできるだけ外側に強い繊維が入っているなどは傾斜機能材料である。また、同じだけの材料を使う場合に、中実な棒よりもパイプのような中空の棒のほうが曲げに対する抵抗が強い。竹はこの原理をあたかも知っているように中空になっている。パイプを曲げると断面がつぶれるような変形をして壊れるが、竹の節は適当な間隔に入って、この断面のつぶれるのを防いでいる。この様に竹は材料力学的に非常に理にかなった構造を有している¹⁾。最先端の技術でもこれほど機能的なものを製作することは困難であろう。生物が生存競争の中で獲得したものは人には思いも付かないような合理的な設計になっていることが多く驚かされる。また学ぶことも多い。

ところで、「竹のようにしなやか」とか「竹を割ったような性格」といったたとえがある。よく考えると矛盾するたとえである。竹の棒は大きくしなっても壊れないが、縦に簡単に割れてしまう。これらの特徴から上記の表現が生まれたのであろう。これらの言葉はそのまま繊維強化材料の特徴を示している。竹の持っているこのような特徴を考えることで、複合材料構造の設計の難しさが理解できるかもしれない。



図1 竹断面の顕微鏡写真

2. 構造材料を理解するためには

¹⁾ 棒を壊すとき、引張って壊すのではなく、折り曲げて壊すだろう。曲げる力が加わるとき、ある種のものでこの原理が働いて、加えた力に比べてずっと大きな力が材料内に発生する。これが曲げることによって材料が壊れやすい原因である。竹のように背の高い植物は風のために強い曲げモーメントが働くが、この力に効率よく耐えることが生存競争の上で必須だったと思われる。

構造材料の力学的特性または機械的特性を議論するには様々な知識が必要になる。この中で最も基本的な特性に強度、弾性率、靱性という概念がある。強度とは材料の強さを表す量である。これは、壊れるまでに単位面積あたりどれくらいの力に耐えられるかということによって定義される。この単位面積あたりに働く力のことを応力と言う。応力の単位はパスカル(Pa)である²⁾。多くの材料は加えた力に比例して変形が増えていく。これを発見者にちなんでフックの法則と呼んでいる。変形の度合いを表す量をひずみというが³⁾、フックの法則は、結局応力とひずみが比例することを意味している。この応力とひずみの比を弾性率と呼ぶ。すなわち、弾性率(=応力)/(ひずみ)は、材料の変形しにくさを表す量になっている。弾性率の単位は、強度と同じでパスカル(Pa)である。材料の強度や弾性率は、大きな値になるのでメガパスカル(MPa)とかギガパスカル(GPa)といった単位でしばしば表される。次に靱性という特性は少し分かりにくい概念であるが、材料のもろさとか粘り強さとかを表す言葉である。図2に示したように、陶器の茶碗は外から大きな力が働いた場合パリンと割れてしまうが、金属でできたやかんはグニャと変形してしまうが全体はつながって、まだいくらかの力に耐えられる。このような材料の持つ粘りのような性能を表す言葉が靱性である。この場合、やかんの材料である金属は靱性が高く、陶器は靱性が低いということになる。これを定量的に表す量として引張試験をしたときに材料が破断するときの破断ひずみや、破断までに吸収できるエネルギーなどを用いたりする。また破壊力学的な量である応力拡大係数とかエネルギー解放率を用いるときもある。ここでは難しくなるので説明は省略する。靱性という概念は構造が大きくなるほど重要になってくる。例えば、ビー球はガラスでできているが落としたりするくらいでは割れない。しかし、金魚鉢くらいの大きさになると落としたりするとすぐ割れてしまう。同じ材料でも大きくなると脆くなったように感じられる。これを寸法効果と呼んでいるが、大型の構造物を作るほど、靱性の高い材料を使いたくなる理由である。

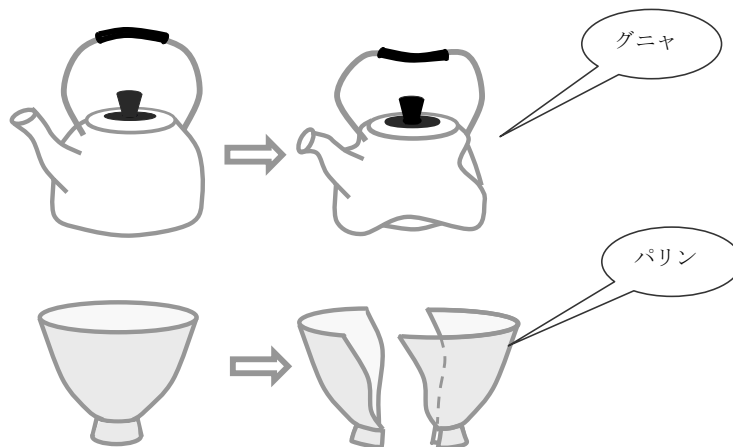


図2 材料の粘り強さ。やかんは変形するが陶器のようにバラバラにはならない。

3. 複合材料はなぜ軽くて強いのか

²⁾ 1kgの物体に働く重力は約9.8Nであり、1Paとは1m²あたり1Nの力が加わっていることを意味する。1気圧は約10万Paに相当する。

³⁾ たとえば1mの棒が1cm伸びて1.01mになったときひずみは0.01または1%ということになる。金属等のひずみを表すときには、100万分の1の何倍かで表すことが多い。100万分の1は1マイクロと表されるので、1%は10000マイクロということになる。

塊上の物体は、内部または表面に原子配列の不連続な部分や欠陥などがあり、原子や分子の結合強度から考えられる理想的な強度を実現するのは難しく、実際理想強度に比べてはるかに小さい強度しか持たない。しかし、小さなもの細いものであれば欠陥が入り込む確率が低くなるので強いものができる。また、小さなもの細いものであれば欠陥の少ない材料、また理想強度に近い材料を作るプロセス技術が確立しやすいという事情もある。ガラス繊維では、何百 m もほとんど傷のない均質なものが作られている。このためにガラス本来の強さを実現できる。ガラス繊維は 2GPa (1mm²あたり約 200kgf の力に耐えられる) の強度を持ち、切れるまでに 3% くらい伸びる。ガラスからは想像しにくいけれども、非常に粘り強く強い材料である。また炭素繊維の構造は、図 3 のように六角形の原子構造からなるシートが繊維方向にほぼ平行に並んでいる。この炭素原子の結合の強さや変形しにくさが炭素繊維の強さや剛性の秘密である。繊維だからこのように結晶を配向させられる。

主な高強度の繊維と金属の強さを表 1 に比べてみる。ここで比強度・比弾性とは強度や弾性率を材料の密度で割った量で、「軽くて強い」、「軽くて変形しにくい」という特性をあらわす指針となる量である。中炭素鋼 S45C は普通広く使われている軟鋼である。鋼は、安くて強くて使い易く、最もよく使われる金属である。鉄鋼は密度が大きいことをのぞけばすばらしい金属材料である。しかし、航空機材料として使うには密度が大きく重過ぎる。密度が軟鋼の 3 分の 1 で軽くて強い高強度アルミニウム合金が開発され、木材とワイヤと布の変わりに航空機材料の主力となった。ところで超音速機では空力加熱といって機体が数百度に熱せられる現象が起こる。この温度になるとアルミニウム合金は軟らかくなって強度を維持できなくなる。チタン合金は 500~600°C まで強度を維持できる耐熱材料で、高温にさらされる部位、たとえば超音速機の外板やエンジン部などに用いられている。チタンはレアメタルの一つで高価だけでなく加工が難しい材料であるが、密度が小さく高強度・高弾性なうえに耐腐食性にすぐれている。ある意味で理想的な軽金属である。最近ではその用途が航空機材料に限らず、生体材料やスポーツ用品など広く使われるようになってきている。

これらの金属と比べてガラス繊維は、比強度で 5 倍になる。また炭素繊維は比強度・比弾性で軽金属の 10 倍以上になっている。これらの繊維をうまく使えば、金属よりはるかに軽くて強い材料が可能だと想像できるであろう。

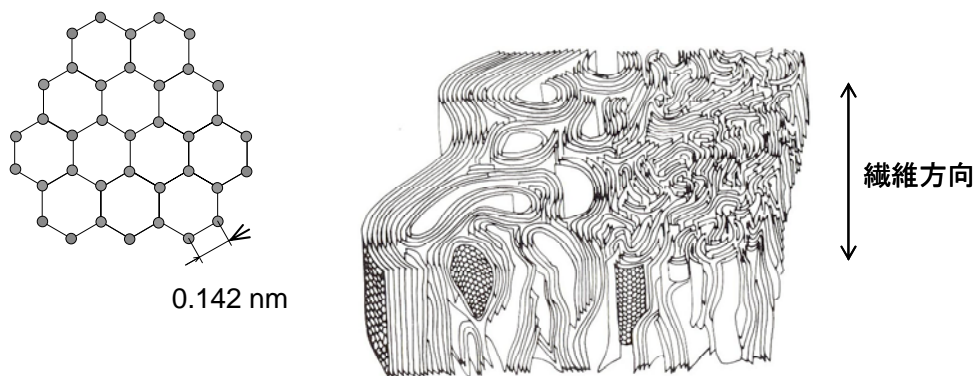


図 3 炭素繊維の強さは、このような原子構造のシートが繊維の軸方向に配向しているためである[1]。

しかし、繊維は、このままではロープとかワイヤとしてしか使えない。この繊維を固めて、繊維の性能を有効に使うと、強い材料ができる。繊維を固める材料(マトリックスと呼ぶ)としてプラスチック(樹脂)を使えば繊維強化プラスチック (FRP) という。またプラス

表 1 強化繊維と金属材料の力学的特性の比較[2,3]

	密度 (g/cm ³)	引張強度 (MPa)	比強度 (10 ³ m)	ヤング率 (GPa)	比弾性 (10 ⁶ m)
中炭素鋼 (S45C)	7.86	569	6.5	205	2.6
Al 合金	2.7	510	19	73	2.7
Ti 合金	4.4	1000	23	112	2.5
Eガラス繊維	2.55	2410	95	69	2.7
炭素繊維 (T1000G) (M60J)	1.80	6370	354	294	16.3
	1.94	3920	202	588	30.3
アラミド 繊維 (ケブラー 49)	1.45	2800	193	133	9.2

チック基複合材料(PMC)とも呼ばれる。もちろん、複合材料の特性には繊維とマトリックスだけでなく、繊維とマトリックスの境界(界面)の特性が大変重要で、多くの研究が進められている。また金属やセラミックスで固める場合もある。例えばセラミックスで固めた強く信頼性の高い複合材料 (CMC) が実現できれば、超耐熱材料として熱機関内の温度を数百度高く設定でき、熱効率が一段階よくなり省エネルギーに直接貢献できるだろう。

ここではとくに繊維強化プラスチックの強度について話を進める。繊維強さイコールFRPの強さとはいかない。まず繊維と樹脂の体積割合(体積含有率)が問題となる⁴。繊維が切れるときの樹脂の応力は桁低いので無視できるので、繊維の強度が F_f で体積含有率が V_f のとき、繊維方向の複合材料の強度 F_L はおよそ $F_L = F_f V_f$ と推定できる。 $V_f=50\%$ とするとFRPの強度は、繊維強度の約半分になる。繊維と直角方向に引っ張ったときには繊維ではなくプラスチックが力を受け持つことになり、この場合の複合材料の強さはプラスチックの強さと同程度になる。さらに、弾性率の異なる材料が混在するために、繊維の周りのプラスチックに平均より大きな力が働く(応力集中)。このために、繊維と直角方向に力が働いたときには、FRPはプラスチックからできているとは思えないほど弱く脆くなる。これが竹を割ったような特性の理由である。強い繊維方向よりも弱い直角方向の力に対してもろいのである。このことが、複合材料の設計を難しくしている。

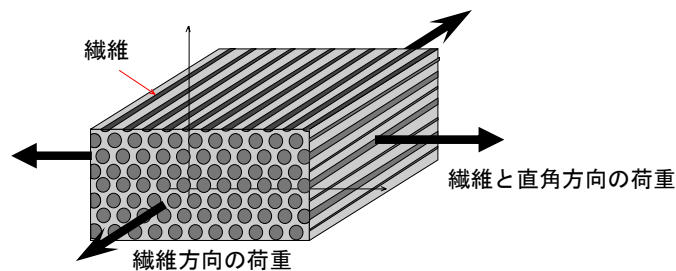


図 4 繊維方向に引っ張られたときと繊維と直角方向に引っ張られたときの強さはまったく違う

⁴繊維の体積含有率とは全体積中に繊維が占める割合を表す。たとえば繊維と樹脂がどう体積あるときには $V_f=50\%$ となる。ガラス繊維複合材料の場合、体積含有率の代わりに重量含有率が使われることが多い。ガラスの場合比重が樹脂よりも大きいので重量含有率は、体積含有率より比重分だけ大きな値になる。

4. 重ねて使う

複合材料は設計できる材料(テイラードマテリアル)といわれているが、逆にいうと複合材料を効率よく使うためには設計しなければならないことになり、複合材料の使用を躊躇させる原因となっている。性能を追及するのではない基礎的な設計はそれほど難しいものではないが、高性能を目指した設計は、経験のないエンジニアにとってはどこから手をつけていいのかわからず、困難なものに見える。複合材料の設計の手法を理解できるエンジニアの育成が重要だといわれる所以である。

ベニヤ板を思い浮かべてみよう。木材は、竹と同様、一方向強化の生物複合材料である。木目方向には強いが木目と直角の方向は弱い。ベニヤ板は薄い木材を重ねて作られている。このことで木材の木目と直角な方向に弱いという短所を補って、全体として強い材料となっている。FRPの場合もいろいろな方向の層を重ね合わせることで直角方向に弱いという弱点を補うだけでなく、繊維方向に強いという長所を生かしている。どのような繊維方向の層を重ねるかだけでなく、どのような順番で重ねるかでも特性に差がでる。例えば釣り竿を複合材で作って非常に評判がよい物ができたが、ゴルフクラブではシャフト部分に強いねじりの力が加わる、ゴルフクラブのシャフトを釣り竿と同じに作るとふにゃふにゃと振れてとても使えない。そのために、ゴルフクラブではねじりに対する剛性をあげるためにシャフト軸に対して繊維が 45° 傾いた層を挿入してねじりに対して強くなるように設計された。傾いた層の数を調整することにより振れ方と曲がり方をコントロールすることができる。これが設計できるということ、または設計しなければならないということである。

積層板にする場合、 $(360/n)^\circ$ づつ、ずらして n 層積層する($n \geq 3$)とすべての方向で弾性特性が同じになり、擬似等方性板と呼ばれる。このようにすると弾性率は繊維方向の半分程度になる。すなわち、積層して異なる層を入れることで比弾性率・比強度がまた半分になる。これまでの話で繊維だけの比弾性率や比強度が積層板にすることによりほぼ $1/4$ になり、表1の繊維だけの比強度・比弾性を少し減じる必要があることが分かるだろう。

5. 複合材料の設計許容強度とは

複合材料を積層して作られる積層板に力が加わると、繊維の破断はほとんどおきない状態で繊維と平行にマトリックス割れが発生したり、積層した層と層の間がはがれたりすることがある。この場合荷重の主な伝達機構である繊維が破断していないので複合材料全体の荷重伝達能力は十分高く材料破壊まで十分な余裕がある。しかし樹脂割れがあるような材料を使うことは心配である。このような場合の設計基準をいかに扱うかがまた大きな問題である。このようなマイナーな損傷から化学的な劣化を引き起こしたり、内部の気体や液体の漏洩が問題になったりする場合はあきらかに問題であるが、そうでない限りほとんど最終破壊と結びつかない。しかし、ときどきこのマイナーな損傷が不幸にも連成しあって予想外に小さい力でメジャーな破壊に結びつくことがあり、マイナーな損傷を許す設計基準の設定を難しくしている。

また複合材料は、金属に対して靱性が小さいという問題と強度などのばらつきが大きく信頼性にかけるという問題を抱えている。この点を克服しないと人命の危険が生じる航空機の一次構造⁵に用いることはできない。この点を考慮して航空機構造に複合材料を適用す

⁵ その構造の破損が航空機の飛行に直接問題となるような構造で主翼や尾翼の桁などを一次構造といい、脚を格納する部屋の蓋などその部材の破壊がそのまま全機の墜落等に結びつかない構造を二次構造という。

る場合、損傷が発生したとしても構造が崩壊しないような設計をする。たとえば、衝撃後圧縮強度（Compression After Impact、CAI 強度）の問題がある。これは複合材料の設計を行う場合に複合材料の本当の圧縮強度を用いるのではなく、外から発見が難しい衝撃損傷⁶⁾を与えたときの強度を用いて設計する。これは航空機の翼などに工具などが落下して衝撃損傷が発生したにもかかわらず、損傷を発見できずに飛行した場合に重大な事故につながるということを想定して作られた規制である。この規制のために圧縮強度を真の強度の半分以下で設計することを余儀なくされている。先の比強度がさらに半分以下となると繊維の比強度・比弾性が 10 以上あったとしてもこれではそのメリットがまた小さくなる。この規制があまりに厳しただけでなく、CAI 強度の根拠があいまいなところが問題視されている。さらにこの試験が非常に大掛かりなものになっていて航空機開発段階でこの強度試験をすることが開発上大きな負担になっている。この規制が物理的に何を意味していることになっていてどのような複合材料の弱点をカバーしているかを明らかにすればもっと合理的な設計手法を提案できるであろう。

6. 最後に

複合材料は設計できる材料であるといえれば長所となり、設計しなければいけない材料であるといえれば短所になる。複合材料は設計のための自由度が大きく上手に使いえば非常に面白い特性を引き出せるが、下手をすると非常に大きな問題を引き起こす。また複合材料の設計基準を設定するにあたっては破壊に先立ってかなり低い応力で発生するマイナーな損傷の発生メカニズムの研究とマイナーな損傷から破壊に至るメカニズムの解明など複雑な力学現象が関係しており、力学的な問題の理解が必須である。しかし、設計に当たっては難しい数学を使わなくても、日常生活での経験を生かして物理的に挙動を理解できる現象も少なくない。

ところで、複雑な設計にかかわっていける人材の教育も重要な仕事である。破壊や損傷など複合材料を総合的に理解して設計していける人材は最も大事な宝物である。この点はすべての科学や工学の分野に共通だと思う。我々自身の研究も重要だが、独り立ちをして研究をしていくことのできる人材を育てていくことが大学人としての楽しみでもあり義務でもある。これからも航空宇宙の分野のみならず多くの分野で軽量化とコスト削減のために複合材料を応用する試みがなされていくであろう。また、スマートマテリアル、ナノ・コンポジットや生体適合複合材料など新しい研究もなされている。これらにかかわって複合材料産業が延びていくことを期待している。

参考文献

1. D. Hull, An introduction to composite materials, Cambridge University Press, 1981.
2. 日本機学会編, B4 材料学・工業材料, 日本機械学会、1998 年
3. 日本複合材料学会編, 複合材料活用事典, 産業調査会, 2001 年

⁶⁾ Barely Visible Damage、BVD という。