

材料デザイン学 第2回

機械的特性 / 強度

岸田 逸平

Last-modified: 2016/10/12 22:25:02.

1 導入: デバイスと材料、性能

自分の興味のあるデバイス・工業製品を想像してみよう。たとえば、

- スマートフォン
- 電気自動車
- デジタルカメラ

私の場合は電池に興味があり、電池の研究をしている。なのでここでは例として電池が関係するものが挙がっている。諸君はどういうものに興味があるだろうか？導入なので対象は何でも良い。自動車でもいいし、パソコンでもいい。自分の興味があるものを考えよう。何にも思い付かなければ、前回の小レポートで選んだ題材を考えよう。

そのデバイスのどの性能を上げるとより便利になるか考えてみよう。たとえば、携帯電話はもうちょっと軽くなったらもっと嬉しいかもしれない。電池がもっと持てばもっと嬉しい。処理がサクサク動けばもっと嬉しい。前面ガラスが割れ難ければもっと嬉しい。自動車の場合は車体が軽ければ加速力・登坂力が上がるし、燃費も良くなる。電気自動車では電池容量が増えれば航続距離が伸びる。デジカメでも同様だが、デジカメの場合は暗いところで綺麗な写真を取るために受光感度が高いと嬉しいだろう。この観点では、「重視」した性能ではなく「弱点」も重要になる。良い所を伸ばすか、弱点を克服するか。まず、「どうなったら嬉しいか」という妄想を沢山しよう。

さてその性能の改善は、具体的にどのようにしたら実現できるだろうか？先の妄想は、実現可能でなければ工学的には意味がない。そこで、その妄想を実現するためにはその性能

が実はどのような機序で実現されているのかを深く知る必要性がある事に気付くだろう。

開発コスト 工業製品に使われる材料は決まった材料を決まったプロセスで処理することで生産される。材料開発とは、天文学的な数にも及ぶ素材とプロセスの組み合わせの中から、1つを絞り込む作業と言える。その性能がどのように発現するのかについて理解しておかなければ場当たりの開発となり、開発はなかなか進まない。

同じ成果を出すのなら時間・コストが低い方が良いのは言う間でもない。時間が短ければライバルが開発している間に自分は完成させ、先に販売することができる。開発コストが低ければその分価格を抑えることができ、消費者にとっての購買意欲に繋がる。

2 構造材料

「より強い材料を開発したい」という要求を持ったとしよう。材料の機械的特性を向上させるためのアプローチについて考えることになる。^{*1 *2}

- 構造材料: 力学的特性が要求され、自重や外力に対して形状・構造を保つことを期待される材料。
- 機能材料: 力学的特性以外が要求され、電気的特性・光学的特性・磁気的特性といった性質を期待される材料。

Q. Table 1 のそれぞれは、構造材料・機能材料のいずれに分類されるべきか？

表 1 (table2015)

Si 半導体	
コンクリート	
プリズム用ガラス	
磁石	
鉄骨	
木材	

^{*1} 工業製品は一定の機械的強度を要求されることが多いため、強い方がより少ない材料で強度を実現でき、軽量小型という要求を満たし易くなる。

^{*2} 前回の小レポートでも、機械的特性に注目して書いてあったものがほとんどであった。

構造材料・機能材料の分類は使用方法による分類であり、素材によって決まるものではない。また、人間の使用目的に注目した分類であり、材料そのものの性質での分類でもない。

たとえば鉄はエンジンの部材やビルの鉄骨として使えば構造材料であり、磁針として使えば機能材料である。構造材料であり、かつ機能材料であるものも定義としては存在しうる。たとえば先に挙げた磁針は単一素材で構成され、構造材料として自重を支えつつ、機能材料として磁性を保持する必要がある。

2.1 歴史・分類

- 石器: 天然の石英や黒曜石。
- 土器・レンガ
- 木材
- 金属
- ファインセラミックス
- 高分子

Q. 現代工業における三大材料は何？

_____, _____, _____
Q. 土器・レンガは「伝統的セラミックス」とも呼ばれる。これと「ファインセラミックス」の違いは？

伝統的セラミックス: 陶磁器、ガラス、セメントなど。天然土質を原料とする。主に _____ 材料に利用される。

ファインセラミックス: 精製された微粉末を原料とし、材料の微組織を高度に制御しつつ精度よく製造した付加価値の高い無機材料。 _____ 材料としても、 _____ 材料としても利用される。

2.2 期待される基本特性

- 強度
- 靱性
- 耐磨耗性

おおまかに、これらをひっくるめた _____ と呼ばれる性質が重視される。構造材料であっても、機械的強度以外の物理的特性や化学的特性と無縁で

はない。たとえば耐火性・耐熱性などの物理的性質や、耐食性などの化学的性質など。

_____ であっても機械的特性と無縁ではない。応力・ひずみ環境下におかれることがあり、製品の寿命に影響を与える。例として、ジルコニア (ZrO_2) を挙げる。高温でジルコニアは酸素イオン伝導性を有し、酸素センサに使われる。非稼動状態と稼動状態とで、室温と高温とを行き来することになり、熱応力が生じる。純粋なジルコニアは脆性を有し、亀裂の発生などで機能を損ねることがある。

2.3 応用分野

一言に「構造材料」と言われるが、応用分野によって要求性能やその度合いが異なる。強度・靱性はほぼ全ての構造材料で必要とされる。

道具・工具

- _____
- _____
- _____
- _____

第1回授業のドライバーの例。

車両・船・工場設備

- _____ : 振動のような繰り返し変形を受けたときの破壊しにくさ。

鉄やアルミ合金などの金属材料が主に使われる。

航空機

- _____
- _____ : 質量あたりの強度
- _____ : 質量あたりの弾性率

Al合金・Ti合金・CFRPなどが主に使われる。

エネルギー機器 ボイラー、タービンなど。

- 耐熱性
- 耐クリープ性
- 耐酸化性

金属・セラミックスが主に使われる。

建築物 ビル・ダムなど。

- _____ : 大量に使用されるため、特に重要。
- 耐久性
- 耐食性
- 耐火性
- 軽量性 (屋根)
- 美観 (外装)

鉄筋コンクリートが主に使われる。

宝石 宝石は厳密には構造材料ではないと言えるが、機械的特性が要求される。

Q. なぜか？ _____

参考: モース硬度 (Table 2)

表 2 モース硬度と鉱物。

モース硬度	鉱物	備考
10	ダイヤモンド	
9	コランダム	サファイア、ルビー
8	トパーズ	
7	石英	
6	正長石	
5	燐灰石	
4	蛍石	
3	方解石	
2	石膏	
1	滑石	

3 鉄の高強度化

今、手元に純鉄がある。これで刀を作ったら折れはしないものの曲がりまくって使い物にならなかった。刀が曲がったら切られて死ぬ。刀が折れても死ぬ。顧客が死ねば売れなくなり、自分が飢え死にする。強い材料を作りたい。さあ、どうする？

3.1 金属材料の強化機構

機械的強度とはマクロスコピックに見ると塑性変形のしにくさであるが、この実体は現象をミクロスコピックに捉えると転位の移動のしにくさである。そのため、機械的強度を理解するためには、まずこの転位の移動を阻害するための機構がどのようになっているかを把握する必要がある。

そこでまず、金属材料の強度を向上させる代表的な 4 つの手法をリストアップしてみよう。

- _____ : 母材以外の合金元素が入ることで、原子配置のスケールで転位の移動を阻害する。
- _____ : 母組織から析出した微小な粒が、転位の移動を阻害する。
- _____ : 結晶粒界によって、転位の移動を阻害する。
- _____ : 前もって導入された転位によって、転位の移動を阻害する。

金属材料学の教科書等によく挙げられるのは上記の 4 つであるが、この他にも以下の方法がある。

- 複合材料化 (e.g., 鉄筋コンクリート, 繊維強化プラスチック): 異なる機械的特性を持つ材料と組み合わせることで変形を抑止する。
- 表面制御 (e.g., アルマイト, 木彫のニス): 強度の高い皮膜や粒界として作用する多層膜を表面に作ることで強度を向上させる。

特定の材料の強度改善のみを目的とする場合、その材料での強度を支える機構を調べることが第一歩である。伸ばすべきを伸ばし、さらに使われていない機構があればそれを利用することを考える。

3.2 組成をいじる

- Fe に固溶する元素の場合、固溶強化が働く。(Mn, Si, Mo)
- Fe に固溶せず析出する元素の場合、析出強化が働く。(C, TiC)

3.3 熱処理

鉄鋼を高温から急冷すると極端に硬化する。これは _____ という処理で、この時材料には _____ 変態が生じている。

_____ 変態の詳細は機械材料学、材料基礎学 II など
で学んでいる筈なので割愛する。

- 微細組織となる . _____
- 炭素が過飽和に固溶される . _____
- 転位 (格子欠陥) 密度が上昇する . _____

単純に焼き入れただけの鋼材は脆いので、焼戻しという熱処理を加えて粘りを出す。

3.4 加工硬化

圧延などによって機械変形を加えることによって組織に転位を導入する。

3.5 強化機構の組み合わせ

オースフォーム鋼 高温の _____ 相において鍛造・圧延などによって強加工 (_____) された鋼材を焼き入れすることで、高密度に転位が導入されたマルテンサイト組織が得られる。

マルエージング鋼 _____ 変態の後、時効処理 (_____) することで Ni, Ti 金属間化合物などを析出させ、析出強化が働く。現在得られる最も高強度の鋼の一つ。

マルエージング鋼でオースフォーミングすればいいんじゃない？ マルエージング鋼は組成を厳密に調整し、炭素を排除している。オースフォームで強度を出すには組成に炭素が必要。炭素の利用という観点において両者は排他的な関係にあるため、これらの強化は両立しない。

3.6 新材料開発のために

既知の機構の組み合わせ 注目する材料をよく調べ、十分に活用されていない強化機構を組み入れるのが基本。§3.5 で挙げた材料の開発は、この観点から説明することができる。^{*3}

既知の機構の強化 ある機構が働いていることが分かっている場合に、その機構の働きをより強化することで、さらなる高性能化が期待できる。

未知の機構の利用 詳細が解明されていない現象が鍵となるだろう。

高強度化に伴って脆化するなど、何らかのデメリットが同時に生じることも多い。「硬くはなったが折れ易くなった」ではシャレにならない場合がある。注目する特性だけでなく、その他の特性がどう変化するかにも注意を払う必要がある。

勿論何かの性能が低下しても、それが許容範囲内ならば問題ない。自分の目的に対して最良の材料をデザインするのは、全体としてより良くする為だ。特定の目的に対して材料デザインでない純粋な材料開発であった場合、何かの性能の悪化を伴ったとしても既知のあらゆる材料よりも何かの特性の最高性能^{*4}を更新したならば、きっと何かには使える有用な材料となるだろう。

4 まとめ

- 構造材料と機能材料
- 共通して求められる基本特性
- それぞれの用途における要求特性 (科学技術用語として重要)
- 金属材料の強化機構とその利用

*3 厳密な開発動機、発見過程などは異なるかもしれない。

*4 チャンピオンデータと呼ぶことがある。

5 小レポート

去年のテキストを <http://c502.mech.eng.osaka-cu.ac.jp/~ippeii/index.html> に置いておいた。この URL は、「大阪市立大学 工学部 機械工学科 C502 サーバ」から、「材料デザイン学」のリンクを辿ったところである。

今年の内容とは多少異なっている点に注意。去年は第 2 回が「特性発現機構とスケール」だった。

5.1 前回の講評

- 強度と靱性の混同
- 強度と耐摩耗性の混同

機械材料学 (1 年後期・必修) でやってる筈。

5.2 ジュラルミンの強化機構についての考察

金属材料の強化機構については、当然だが材料自身が人間に「こういう強化機構をしているよ」と教えてくれるわけではなく、先人たちが実験結果と考察でもって明らかにしてきたことである。ここでは事実から機構を推測することをやってみよう。

航空機には従来、アルミニウム合金が多く用いられてきた。アルミニウム合金は、比重が軟鋼の $1/3$ と軽く、比強度が高いため、航空機の外板や構造部などに広く用いられている。ジュラルミンは Al を母材として Cu, Mgなどを添加した合金であり、アルミニウム合金の代表格の一つである。ジュラルミンの特性として、高温もしくは焼き入れ直後は強度がさほど高くなく、さらに適度な温度 (室温程度) で時効処理をすることで強度が大幅に向上する。これらのことから、ジュラルミンにおける高強度に寄与している強化機構を推測し、また、上記の処理のみでは効果的に使われていない強化機構を指摘せよ。

ヒント

- 純粋アルミニウムに対し異種元素が添加されていることから、固溶強化か析出強化が働いていることが分かる。
- 時効によって硬化することから、強化は経時的な現象に依存していることが分かる。固溶と析出のうち、経時的な現象はどちらか。

- 室温から 500 までの範囲で Al 母相は fcc 構造であり、相変態を伴わない。よってマルテンサイト変態は生じえない。