

質問コーナー

「物性なんでも Q&A」第 10 回

機械的性質

佐藤勝昭 科学技術振興機構

このコーナーでは、小生のホームページの「物性なんでも Q&A」コーナーに寄せられた質問と回答の中から、結晶工学関係者にご関心のありそうなものをピックアップしてご紹介しています。ここでは第 10 回として、企業の方からの質問が多い機械的性質に関する質問をご紹介します。

分類	番号	質問内容	所属
硬さ	44	硬さと延性	学生
硬さ	54	硬さと濡れ性	企業
硬さ	74	シリコンの硬さ	修士学生
ヤング率	469	一般炭素鋼での高温でのヤング率	企業
ヤング率	747	GaN のヤング率	企業
ヤング率	1158	鉛フリーハンダ AuSn4 のヤング率	企業

44. 硬さと延性

Date: Wed, 13 Jun 2001 20:58

Q: はじめまして、B 大学の T.H です。先生の HP で金属の不思議というところを読ませていただきメールしました。私は、衝撃圧力のもとでの材料の特性について勉強しております。現在の興味は、衝撃圧力のもとで金属の硬さや衝撃圧力のもとで金属の延性というように区別して考えると関係があるように思うのですが、硬さと延性というのは何か関係がありますか。教えてください。お願いします。

Date: Sat, 16 Jun 2001 1:35

A: TH 様、佐藤勝昭です。私は、機械工学の専門家でなく、物性の専門家ですので、あなたの期待するお答えになるかどうかわかりません。ダイヤモンドは硬いですが、衝撃を加えると簡単に劈開して破壊されます。一方、金に衝撃を加えて降伏点を超えても破壊されず、非可逆的に変形します。これが延性です。このような性質の違いは、ダイヤモンドと金属の化学結合の違いにあります。前者は共有結合で結合の方向性がはっきりしているのに対して、後者は金属結合なので等方性です。金属結合では自由電子の海に原子核が浮かんでいるというイメージですが、共有結合では原子と原子の間にある電子が結合を作っています。これが金属では延性が強く、共有性のダイヤモンドが硬い原因だと思います。

Date: Sat, 16 Jun 2001 04:55

AA: 佐藤先生

佐藤先生、ご多忙中にもかかわらず、非常に丁寧にお答え頂き有難うございました。先生のご意見を元に、自分の研究に役立てていきたいと思えます。

54. 硬さと濡れ性

Date: Wed, 10 Oct 2001 16:40:25

Q: T 社の IJ です。お世話になります。

「硬さ」についてネットで調べていましたところ、本 HP を見つけました。参考にあることがいろいろあり興味深く見させていただきました。はんだ濡れ性についていろいろ調査しているのですが、濡れ性は金属の表面エネルギーが関与していることは文献等で知っています。いろいろと調査しておりますと、金属や表面処理の表面の硬さが、はんだ濡れ性に影響しているようなのです。そこで、表面の「硬さ」と「表面エネルギー（表面張力）」の関係があるかどうか知りたいのですが、相関はあるのでしょうか。ご存知でしたら教えてください。以上、よろしくお願いたします

Date: Wed, 10 Oct 2001 19:24:01

A: 私の手には負えない問題です。農工大の機械システム工学の山本先生におたずねしたところ以下のように答えていただきました。

IJ 様、農工大・山本隆司です。私はトライボロジーを専門にしている関係から、お問い合わせの内容に興

味があり、とりあえず私の見解をお伝え致します。

1. 硬さについて

まずはじめに議論を円滑に進める意味で「硬さ」について、私の見解を記述しておきます。「硬さ」は、質量、温度、密度などの物理量と異なって、測定対象の種類や定量化にあたっての測定法の種類によって測定値が大きく影響を受けるという点をまず指摘しておきたいと思います。他にも、引っ張り強さ、疲労強度などを例示すればお分かりいただけると思いますが、機械工学に関連する諸量にはこの類の「物理量」が多く存在します。

確かに「硬さ」は材料の一つの固有の性質を表してはいますが、それを実際に定量化するには、現状では、何らかの方法で対象である材料の変形を試みて、その過程の経時変化を調べるか、最終的に変形過程が終了して残留した形状変化によって、「硬さ」を量的に表示する以外にはないのです。恐らく、超音波を当てるなどしてその反射状況を調べて非破壊（非変形）による「硬さ」測定も将来開発される可能性もありますが、現状では、材料を塑性変形させて、その結果残留する形状変化と負荷荷重との関係から「硬さ」が量的に表示されているのです。

IJ様は材料の専門家とお見受けしましたので、すでに硬さの測定法はご存じだと思いますので、詳細は省きますが、ダイヤモンドや硬質金属製のピラミッド型の角錐や球を材料に押しつけることによって生じる圧痕の面積と負荷荷重の関係（負荷荷重/圧痕の面積）で硬さを表示する方法が一般的です。**HV**（ビッカース硬さ）、**HB**（ブリネル硬さ）、**HRc**（ロックウェル硬さ）、などの「単位」は塑性変形現象を利用した硬さ測定法によるもので、また、材料の弾性的な反発の程度によって硬さを量的に表示する **HS**（ショア一硬さ）もあります。

これは、たとえの話ですから、適当に聞いていただいても結構ですが、蒲鉾の硬さ測定法というのもあるのです。蒲鉾をご承知の通り、歯ごたえが問題になりますが、いわゆる弾性に富んでいるため、金属材料のように塑性的な変形はしませんので、反発の程度によって量的に表示するようです。

さらに、**モースの硬さ**試験のように標準試料をあらかじめ準備しており、測定対象に試料をこすってどちらに傷がつくかどうかということで相対比較によって、硬さを表示する方法もあります。

要するに「硬さ」は材料の固有の物性値として扱えない、一義的に決定できない性質をもっており、対象と測定方法によって表示が異なってしまうという点に留意する必要があります。従って材料に本来備わっている物性値とは異なる特性をもっている点にも留意していただきたいと思います。

誤解を恐れずに言えば、「硬さ」の物理的な意味は不明といってよいのではないのでしょうか。

2. 濡れ性との関係について

上の記述でおおよそご理解いただけたのではないかと思います。私の見解では材料の「濡れ性」は、測定法、特に圧子との接触状態に影響を与えという観点から「硬さ」の表示値に影響が表れるということは理解できます。表面エネルギーのしかりです。しかし、「濡れ性」が塑性変形に影響を与えるかどうかは、「濡れ性」が直接影響を与えるのではなく、硬さに影響を与える他の物性の指標として（濡れ性は表面物性の中でも測定が比較的容易です）取り上げられているのではないかと推定しています。つまり変形過程での回復現象（材料によって、除荷過程で変形が戻ることは十分にあり得ます。また、ソ連の研究成果（真偽のほどが現在も議論されています）に、レビンダー効果というのがあります。単結晶を引っ張った時に、表面活性の程度によって、塑性変形が変化を受けるという指摘です。これについては、最近ではあまり触れる研究者はいなくなりました。

佐藤教授が極めて時宜にかなった学外者への学術活動に関する啓蒙活動を行っている点に敬意を表して、IJ様の質問に若干のコメントを加えさせていただきました。IJ様のご質問もなかなか本質をついたおもしろい内容として読ませていただきました。

今後とも、東京農工大学をお引き立て下されれば幸いです。

Date: Thu, 11 Oct 2001 09:47:12

AA: T社IJです。お世話になります。

佐藤様、お忙しい中ご対応ありがとうございます。

ご紹介いただきました山本先生からも、早速、大変に丁寧なメールをいただきまして大変感謝しております。我々設計者としては、各分野においてはどれも素人なので、普段から勉強しながら製品開発をしております。何か問題に当たった際には調べごとをするのですが、なかなか適切な文献や情報に出会うことができずいつも苦勞しています。今後においてもお知恵を拝借いただくことがあるかもしれませんが、どうぞよろしくお願い致します。ありがとうございました

74. シリコンの硬さ

Date: Mon, 18 Feb 2002 19:17:16 +0900

Q: 突然のメールで失礼します。私、K大学の修士1年のUと申します。

物性値を調べていたら、このページにたどり着き、質問させていただこうと思いました。

薄膜を作製する際に、シリコン基板を用いることがあります。その硬さはどの程度でしょうか？（漠然としていて申し訳ありません）できればロックウェル硬さやブリネル硬さで教えていただければと思います。お手数だとは思いますが、よろしくお願いします。

Date: Mon, 18 Feb 2002 20:59:11 +0900

A: U様、佐藤勝昭です。

半導体は機能材料として調べられているので、構造材料的な評価があまりされていないとは思えません。シリコンウェハに剛球を押しつけて硬さを測ると劈開してしまうので、バルクでないと測れないと思います。

ただ、最近マイクロマシンなど、シリコンを加工して機械材料として使うので、その関係の方ならデータをお持ちかと思えます。それで、東北大学でマイクロマシンをやっておられる羽根先生にメールを出しておきましたので、お返事をいただけたら転送します。

A2: K大学U様、佐藤勝昭です。

マイクロマシンで有名な羽根先生から次のようなメールを頂きました。ご参考にしてください。

Date: Wed, 20 Feb 2002 13:24:54 +0900

シリコンの単結晶の材料特性として、幾分ばらつきもあるようですが、教科書的な値としては下記のようになっています。ロックウェル硬さやブリネル硬さの測定では、大きな圧子を用いるので、試料が壊れるなど問題があり、測定値はあまり見当たらないようです。結晶なので、金属のような塑性変形が生じにくいので、あまり測定されていない、あるいは測定してもあまり信頼できる値にならないのではないかと思います。もっと微小領域で測定できるナノインデントのような測定器を用いれば、測定できるのではないかとのことです。

降伏強度：7.0x10¹⁰dyne/cm²

ヌープ硬さ：850kg/mm²

ヤング率:1.9x10¹²dyne/cm²

シリコンの機械強度についての研究をされている先生は名大の佐藤一雄教授 sato@kaz.mech.nagoya-u.ac.jp です。マイクロの引っ張り試験を行ってみえます。お尋ねいただければ、もう少し詳しく説明いただけます。

469 一般炭素鋼での高温でのヤング率

Date: Mon, 15 Nov 2004 00:37:50 +0900

Q: 佐藤研究室 担当者 様

はじめてメールさせていただきます。WEBにて金属材料の高温での特性を検索する過程でHPの存在を知り、お聞かせ戴きたく存じます。

質問

高温（650度と700度）での一般炭素鋼（炭素>0.3%）のヤング率をご教授ください。とあるWEBサイト (<http://at.wxw.jp/binran/tbl/ElasticModulus.php>)では425度までのデータを見つけましたが、この温度以上のものはありません。

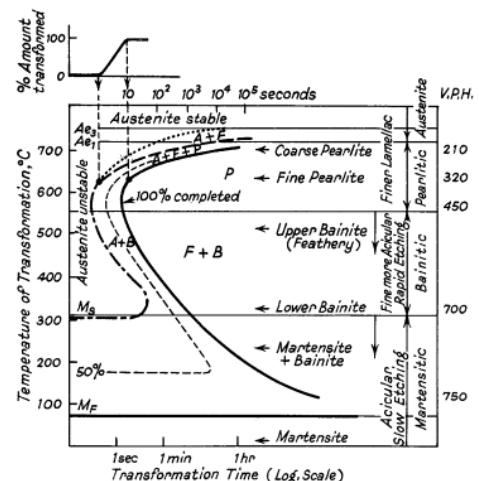
経緯

圧力容器を700度にて応力除去熱処理する際、円筒胴内部に炭素鋼管のサポートをしなくては円形が座屈し楕円形に変形をしてしまいます。この円筒胴サポートの寸法を計算求めたいというものです。何卒宜しくお願い申し上げます。WEBアップされる際は匿名でお願いします（匿名：会社員N）

Date: Mon, 15 Nov 2004 19:07:46 +0900

A1: N様、佐藤勝昭です。

私は、金属工学の専門家ではないので、手元にデータが無く、図書館で、金属データブック、鉄鋼便覧、金属便覧などを調べてみたのですが、探し方が足りないのか、見つけれませんでした。このくらいの高温になると、弾性的ではない変形（相変態、クリープなど）が起きるので、きちんとしたデータが測定



出来ないのが原因ではないかと存じます。

図の ttt 曲線(<http://www.key-to-steel.com/Articles/Art17.htm>)に示しますように、550°C付近では短時間で Austenite から Pearlite に変態するようです。従って、650度~700度で一般炭素鋼を使うのは、無謀な気がします。機械システム工学科の桑原先生にお願いして、しかるべき研究者を捜してもらっていますので、今しばらくお待ち下さい。

Date: Tue, 16 Nov 2004 01:01:48 +0900

Q2: 佐藤勝昭殿

ご返信ありがとうございます。本件 Temporary サポート用を使用するもので当然メーカーサイドで安全率を考慮しメーカーサイドの責任のもとで使用する部材となっています。(熱処理後、このサポートはスクラップとなります) 700度でのヤング率は、まさかゼロにはならないとは思いますがガラスが溶ける時のような赤く溶解した状態まではならないと思われま。 (実際 形状は保つことが出来ています) 何卒宜しくお願い申し上げます。

Date: Tue, 16 Nov 2004 09:25:58 +0900

A2: N様、佐藤勝昭です。

本学の機械システム桑原教授が製鉄会社の専門家H様に問い合わせさせていただきました。
H様から桑原先生へのお返事は下記の通りです。

=====

お問い合わせの件、直接のデータは見つかりませんでしたが、既存のデータをもとに推定してみました。

まず、0.2%C鋼での温度依存性として

室温 : 213GPa → 550°C : 175GPa

というデータがありました。温度依存性は曲線でしたが、外挿すると 700°C : 160GPa 程度でした。

他の鋼材の温度依存性 (700°Cまでのデータあり) も参考に外挿していますので、さほど悪い推定ではないと思います。ただし 425°Cにて 187GPa 程度ですので、ご紹介の <http://at.wxw.jp/binran/tbl/ElasticModulus.php> (425°C : 16700kgf/mm²) より大きい値になっています。前者は共振法による測定ですが、後者が引張試験で測定したものだとする、比例限が不明瞭で結果的にヤング率を低く同定した可能性があると思いません。

一方、室温で C 量を 0.2%から 0.3%にすることでヤング率は 1%程度しか下がらないこと、温度依存性の固溶原子量依存性は小さいことなどがうかがえるデータが別の文献に示されていました。

以上のことから、少なくとも比例限以下でのヤング率は **160GPa** としても、さほど問題はないと思われます。もちろん、加熱中の炭化物析出をとまなう組織変化や比例限を超える場合の挙動をどう考慮するかなどは考えていませんが、その影響はケースバイケースですので、とりあえずはある程度の安全係数をかけてあげるしかなさそうです。例えば、乱暴には <http://at.wxw.jp/binran/tbl/ElasticModulus.php> を外挿してしまうのも手かもしれません。

なお、ここで参考にしたデータは「鉄鋼便覧」と「レスリー鉄鋼材料学」に紹介されていたものです。頼りない回答で申し訳ありませんが、これでご容赦いただきたくお願い申し上げます。鉄鋼メーカー H

747. GaN のヤング率

Date: Wed, 01 Feb 2006 14:45:46 +0900

佐藤先生、はじめまして。P社のTと申します。GaNのヤング率を調べていますがそれを書いた文献が見当たりません。薄膜であり、測定されたデータが無いのかも知れませんがご存知でしたらご教示お願いいたします。なお、Web上では匿名にてお願いいたします。

Date: Thu, 2 Feb 2006 10:35:04 +0900

T様、佐藤勝昭です。GaNのヤング率についてはWebに載っており(信用するかどうかはご自分で判断ください。) <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/GaN/mechanic.html> に [100] Young's modulus; Y0= 181 GPa となっています。また、理論的な計算値があり、

Jian, Sheng-Rui, Fang, Te-Hua, Chuu, Der-San : Analysis of physical properties of III-nitride thin films by nano-indentation; Journal of Electronic Materials, Jun 2003

これによれば、

The Young's modulus and hardness of GaN, GaN:Si, and Al_{0.12}Ga_{0.88}N were calculated under loads of 1-3 mN. The Young's modulus of GaN, GaN:Si, and Al_{0.12}Ga_{0.88}N are 274.35-355.5 GPa, 232.27-262.06 GPa, and 272.14-358.33 GPa, respectively.

となっています。従って、GaNのヤング率は200GPa前後の値ではないかと思えます。

Date: Thu, 02 Feb 2006 09:13:09 +0900

AA: 佐藤先生

P 社 T です。貴重なお時間を割いて頂き、早速ご回答くださりまして有難うございました。私の調査不足だったようで申し訳ございませんでした。

1158. 鉛フリーハンダ AuSn₄ のヤング率

Date: Thu, 28 May 2009 16:01:10 +0900

Q: 佐藤 先生

私はH社のWと申します。 HDD に組み込まれる磁気ヘッドを製造しております。

Sn₃Ag_{0.5}Cu の鉛フリー半田を用い接合を行なっています。半田接合部の破断応力の解析を行なおうとしているのですが Au と Sn の合金である AuSn₄ のヤング率の値が分かりません。教えていただくと幸いです。また値が分からない場合定性的に Sn のヤング率に比べ AuSn₄ のヤング率は高いのでしょうか、あるいは低いのでしょうか? お教えください。

Date: Thu, 28 May 2009 17:59:37 +0900 (JST)

A: W様、佐藤勝昭です。

マイクロインデントで測定したデータによると、 AuSn₄ の Indentation Modulus E は、 $E/(1-\nu^2)=43\pm 4$ GPa となっています。(ν はポワソン比)

また M.T. Sheen, Y.H. Ho, C.L. Wang, K.C. Hsieh and W.H. Cheng : The Joint Strength and Microstructure of Fluxless Au/Sn Solders in InP-Based Laser Diode Packages ; Journal of ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 34, No. 10, 2005 の Table II に Au/Sn ハンダのヤング率として 59 GPa という値が載っていました。ご参考まで。

Date: Fri, 29 May 2009 13:17:40 +0900

佐藤 先生

貴重な情報の提供有難うございました。

ご案内: 佐藤勝昭: 「半導体物性なんでも Q & A - 対話から生まれた半導体教本 -」

2010年6月に講談社から好評発売中

この本は著者の Web サイト「物性なんでも Q&A」に寄せられた多くのご質問と、それに対する回答のうちから半導体に関するものを収録したものです。

半導体デバイスの分野は進展が速く、常に積極的な開発が行われています。このため、新規材料の探索、既存材料・製品の改良とさまざまな研究段階で基礎となる物性に立ち戻ることになります。

半導体を理解するにはかなりの基礎知識が必要です。学生時代に半導体の教育を受けた経験のある電気電子系の人でも実際の問題解決に直面したとき、「授業で学んだことがあるが身に付いていない」、「なんとなくわかっていたつもりだったけど・・・」ということがよくあります。また、異分野の出身者も「教科書を読んでもわからない・・・」、「どこから取りかかってよいか・・・」と困っているかたも多いようです。「物性なんでも Q&A」は、このようなお困り研究者の駆け込み寺です。それゆえ、ホームページに読者が集まり、それぞれの置かれた立場でそのつど再勉強しているようです。

この本では、ナマのホームページの雰囲気をしてできるだけ伝えるために、質問に対する回答を受けての再質問、それに対する回答・・・というやりとりも再録しました。

ホームページでは、html で記述しているため数式がわかりにくい、図が少ないなど、やや不親切な部分もありましたので、この本では、数式の記述、適切な図の挿入などに手を加えました。また Web の Q & A では質問者のレベルに合わせて専門用語の意味をわかっているとしてお答えしている部分があり、分野の離れた読者には不親切ではないかと考え、Follow up という項目を設け解説しました。

この本が、半導体を再学習する方々の助けになることを祈っています。

2010年6月

連絡先: 独立行政法人 科学技術振興機構(JST) イノベーション推進本部

〒102-0075 東京都千代田区三番町 5 三番町ビル

(2010年7月9日)