

甘味の代表選手“飴”は、お酒と同じくらい古くから大切にされてきました。日本書紀の神武記には、武力に頼らない大和平定の成否を、80枚のお皿を作り、このお皿の上で飴（たがね）ができるかどうかで占ったとあります。2670年も昔のお話ですからちょっと怪しいですが、書紀が書かれた1300年前には、飴が作られていたようです。

蒸したお米や粟に^{あわ}麦芽などの酵素を加えてんぷんを糖化させたのが日本古来の飴（水飴、粟飴）ですが、その後、砂糖を水飴で固めたキャンディ、ドロップ系の飴が伝えられました。意外に思われるでしょうが、マシュマロは代表的な柔らか系キャンディです。

火事にあった鉄骨が強さを失くして自身の重み（質量）

で“飴のように”垂れ下がった無残な様子が報道されることがあります。映画“ゴジラ”では、ゴジラが吐き出す熱い熱い息で鉄塔が崩れ落ちる様子を、飴の鉄塔で再現しました。飴がとろけるこんな様子を思い浮かべながら、金属の“降伏”についてお勉強しましょう。

“伸び”たり“縮ん”だり“へこん”だりすることを“変形”と言います。“弾性変形”と“塑性変形”がしばしばお目にかかる“変形”です。これの特徴を見てみましょう。

まず、“弾”は、“はじく”、“うつ”、“たま”、“ただす”、“ひく”と読み、弓の弦で“たま”を“はじく”ことを意味し、“弾性変形”は、押したらへこみ離せば戻

飴のお話

技術開発本部
小野塚 正一



る変形のことです。弾性の棒を引張ると、力に比例して棒は引張られた方向に伸びますが同時に、横方向に伸びた割合のおおよそ 30%の割合で痩せます。結果、その体積は大きくなることとなります。一方、“塑”は“でく”と読み、土で作ったままでまだ焼かれていない像を意味します。“でくの坊”は“木偶”の字を充てますので少し違うようですが、どうなのでしょう。“塑性変形”は、粘土のこね回し、固まりかけた飴やガラスのような元に戻らない変形を言い、“弾性変形”と違い押しでも曳いてもその体積は変わりません。ですから、引張って大きな飴を楽しもうとしても残念ながらそれはできません。金属の場合は、外から力が働いて原子の間の距離が広がったり狭まったりして伸び縮みするのが弾性変形、力がある限度を超えた結果原子の並びがずれてしまうのが塑性変形です。“すべって”“ずれる”ので、体積は変わらないのです。この“すべり”を“転位”というモデルで説明しようとする努力がなされ、最新の顕微鏡を使った観察で多くの裏付証拠が集められました。

金属材料の多くは、細かな結晶の集まりです。小さな塊がいっぱいくっつきあっているようなものですから、お隣の結晶との間には垣根（結晶粒界）があり、玄関の向き（方位）も違います。すべりの方向が違うことになるので、一つの結晶粒内で起きたすべりがお隣を侵略しようとする粒界でレジスタンスの抵抗に会い、占領するためには垣根を打ち倒すエネルギーが必要になります。粒が小さく垣根がたくさんある材料ではレジスタンスの抵抗機会が多いので、これを打ち破るためにたくさんのエネルギーが必要です。そこで、破るのに手がかかる、塑性変形しにくい強い材料だということになります。

境目（粒界）があるということはここで引き剥がされることもあることを意味します。水素の原子はとっても小

さいので金属組織の中を動き回ることができるのですが、強い力が働いている場所に吸い寄せられる性質も併せ持っています。こうして集まった水素が結晶粒の境界（粒界）に悪さをして、割れを引起すことがあります。またこれとは別に、高い温度で金属が長い時間引張られた状態で頑張っているとき、粒界に空洞がゆっくり成長して割れになってしまうこともあります。結晶の界面が剥がれてできるこれら破面は、見た目、硬いキャンディを割った形そっくりなので、“ロックキャンディパターン”と呼んで、粒界が割れたことの証拠としています。粒界の割れをさけるには粒界を無くしてしまえば良いというのが理屈ですが、1 000°Cを超える高い温度で使われるガスタービンの翼には、粒界のない単結晶の合金が使われます。

広い範囲で“ずれ”が生じる塑性変形の開始を yielding と言います。動詞 yield の 2 通りの意味、“give”と“give-up”の中から、2 番目の意味を充てて“降伏”と訳しています。

人間世界では戦争で無条件降伏した敗者に勝者は好き勝手にしまくり敗者は無抵抗を余儀無くされますが、金属は降伏の後もわずかに増強（加工硬化）しながら抵抗を継続します。例えば鋼はどれくらいまで塑性で頑張るでしょうか、お手許のゼムクリップで簡単にお試しになれます。1 巻き半の丸めを伸ばして、持ちやすいよう手許を適当に曲げて振じります。ぐるぐるぐると振じ上げます。さあどこまでいけるでしょう。大いにびっくりされることでしょう。

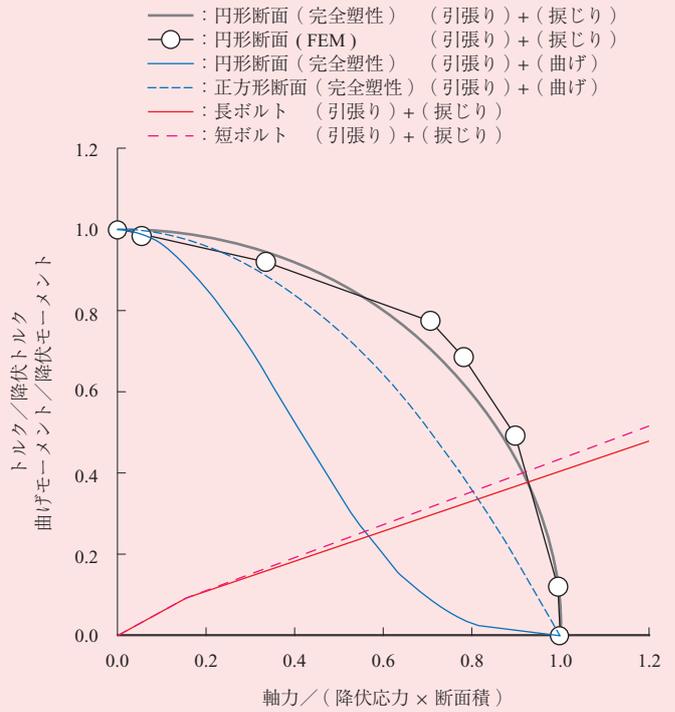
つい先日、「ボルトを塑性締めしたい」との相談を受けました。「直径 10 mm 程のボルト 30 本を塑性状態まで締め上げて、安定な締付けを確保したい」というご希望でした。降伏の基本で興味深い点がありましたので簡単にこれをご紹介します。

（64 ページに続く）

〔 館のお話 〕 35 ページから)

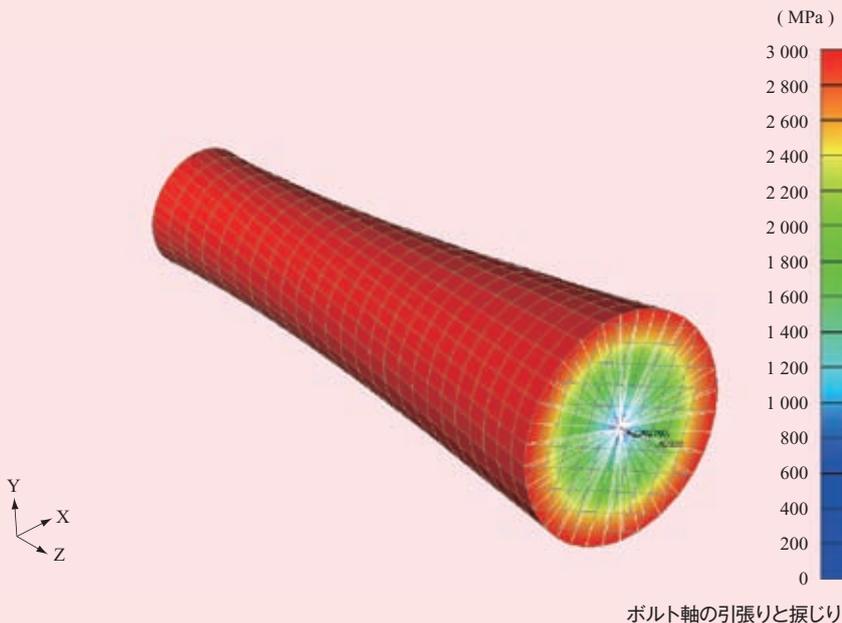
ボルトは振じって締め上げられるので軸は引っ張られると同時に振じられます。引っ張られるだけならボルトの降伏軸力は材料の降伏点から簡単に計算でき、振じられるだけの場合もごく簡単な限界トルクの計算式があります。ですが、引張りと振じりが一緒に作用し加工硬化があるとなると、ことはそう簡単ではありません。軸がずるずる伸びを開始するときの締付軸力がいくつか、それが問題でした。

良い知恵も浮かばず仕方なしに、今回も今様の道具のお世話になり、力任せの計算をしました。こんなことばかりしているとおつむが退化するばかりでいけないのですが、それはともかく、下図は、ボルト軸が引張り振じられる様子の一例です。外側の赤い部分に大きな力がかかっています。右上のグラフは、ずるずる伸びが始まるときの軸力と軸トルクの組合せを絵にしています。横軸は(軸力) / (引張るだけのときの限界値)で、縦軸は(振じりトルク) / (振じりの限界値)です。塑性開始状態における両者の関係は、4分の1円の関係になりました。一方、締め上げるときの軸力と軸トルクの関係は右上がりの線になりますので、両者の交点がこのボルトのずるずる伸び開始



ボルトの降伏軸力に対する軸トルクの影響

点になります。取り上げたケースでは、降伏点基準軸力の93%でずるずる伸びが開始する結果になりました。ボルト締付力の限界は引張っただけのボルト軸力降伏限界より7%も小さいのです。図には、丸棒、角棒を引張り曲げるケースも並べました。丸棒と角棒では傾向が大きく違い、丸棒では極端に曲げの影響が大きいのが目に付きます。ボ



ボルト軸の引張りと振じり

ルト継手の設計では曲げがかからないよう注意することが大事ですが、何らかの理由で横滑りしてボルトに曲げがかかると思ったより小さな軸力でずるずる伸びが始まってしまうことが分ります。

飴に戻りましょう。八丁堀に住む弥次さん喜多さんのご子孫は、深川のお不動様に初詣です。飴に目がないお二人は黄粉をまぶした飴がお目当てでしたが、先の大震災で飴屋さんは川崎大師にお引越したとか。「それならば」と、こんどは、川崎大師にお参りです。川崎大師入口の角では、“トンのトン”と拍子を取りながら、黄粉をまぶした水飴を切り切り売っていました。とんとん飴を手に入れて大満足の弥次さんは、お家にご帰還。飴を頬張りごろっと寝転んで、文庫本の「坊っちゃん」です。東京を発とうとする坊っちゃんに清さんは、お土産に「越後の笹飴」をご所望です。それではと、弥次さん喜多さん思い立ったが吉日で、笹飴を求めて高田（上越市）までお出かけです。その飴屋さんでは、なんとその昔、ご先祖の大恩人一九さんがお世話になったとか。（笹に包まれたこの飴は、ほんのり笹の香りがする逸品です。ただ、歯にくっつきまますので、噛んではいけません。私事ですが、高田は我がアイドルのゆかりの地でもありました）。飴屋さんでは、来る11日の“松本あめ市”が話題です。それではと、“塩の道”糸魚川経由で、こんどは松本まで。その昔、今川の塩封鎖を見かねた上杉さんから送られた塩が、この日、松本に到着したのが“あめ市”の起源だとか。あめ市では京都からのお客さんと飴談義です。なんでも京都の砂糖菓子は“金平糖”だそうで。それではと今度は京都に遠征です。“金平糖伝来”はさらに20年古い1550年ですって。そして、金平糖の突起の数は24、ご存知でしたか。ここで頭の体操です。24の頂点を持ち全て同じ面で構成される立体は可能でしょうか。答えは？



越後の「笹飴」

そんなに易しくありませんが、ゆがんだ菱形を一つの面とする24面体（頂点24）が可能です。

ちいっと遠回りして京都がゴールになりましたが、現代版弥次喜多早足飴道中膝栗毛はこれでおしまい。

金平糖が出てきたところで、サッチモおじさんがしわがれ声で“きらきら星変奏曲”を歌います。

“I see green of trees, red roses, too. …”.

ついこの間まで、私はこの曲を結婚式の祝福歌だとはかり思っていました。全くの認識不足もいいところで、ベトナム戦争終結を願って、作者はこの歌を作ったんだそうです。色を対比させた心温まる歌詞がとっても素敵ですが、実はこれが英文法の復習歌です。タイトル“*What a wonderful world*”がそもそも感嘆文ですが、知覚動詞に始まって、分詞構文、現在完了、未来文、比較文、関係代名詞まで、良くもまあ短い中にこれだけ入れ込んだものですが、そんなことはどうでも良くて、締めくくりのお勧め曲です。是非一度、お試しください。