

お豆腐の話



技術開発本部
小野塚 正一

「豆腐のかどに頭をぶっつけて死んでしまえ」という文句があるほど、お豆腐は“やわらか”食材の代表です。冬はお鍋に、夏は冷奴にと大活躍です。ひとつ、このお豆腐を題材に、「物理の散歩道」のまねをして、お豆腐について考えてみましょう。

スーパーに押されて町のお豆腐屋さんは、最近めっきり少なくなりましたが、どこの商店街でもお豆腐屋さんは朝早くから湯気をいっぱい吹き出しています。木の型枠に流し込まれた豆乳はにがりで固められ、一丁の大きさのお豆腐に切り分けられて、水槽の底でお母さんが買いに来るのをじっと待っています。固まった場所によるのでしょうか、しっかりしたお豆腐、やわらかいお豆腐といろいろとむらがあって、やわらかすぎるお豆腐は水からすくい出すとすぐにも壊れそうです。お豆腐は、なぜ、水の中にそっと置かれているのでしょうか。これが今回のお話です。

まず思いつくのは、“浮力”です。お豆腐も浮力の分だけ軽くなりますので、自らの重みで壊れることが無くなるのでしょうか。形あるものが壊れるのは、壊す力が働いているからだと思えるのが自然ですが、お豆腐のようにやわらかいもの、ガラスのように硬いもの、どんな力が働くと壊れるのでしょうか。また、水の中と外とでは、力の働きに差があるのでしょうか。

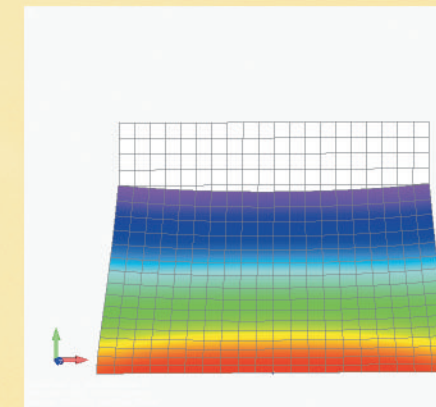
専門的になりますが、ものの中で作用している力をストレス（応力）と呼びます。そう、あなたが緊張したり疲れたりしたとき、神経を痛めつけるあのストレス

です。引っ張るストレス、押すストレス、横にずらすストレスとありますが、どうもこれのどれかが関係しそうです。

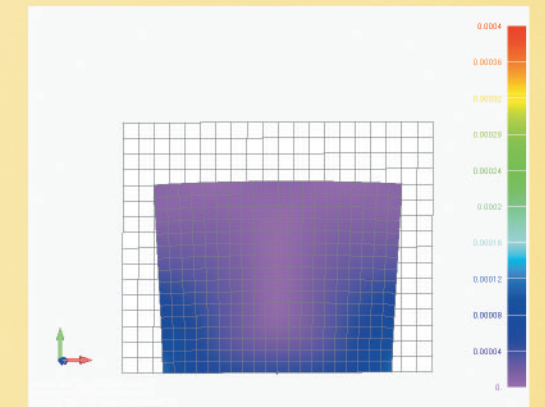
それではまず、“浮力”から、考えてみましょう。水中で浮力が働くと、その物体が押しのかけた水の重さだけ軽くなるというのが浮力の説明です。お豆腐の密度はおおよそ 1.1g/cm^3 ですので、水の重さ分を差し引いた 0.1g/cm^3 の密度のお豆腐が水の外にあると考えるのと同じでしょうか。そう考えると、お豆腐の底にはお豆腐の高さだけ、例えば、高さ 8cm のお豆腐では、 0.8g 相当の力がお豆腐の底 1cm^2 あたりにかかることになります。

ちょっと待ってください。お豆腐が 30cm 深さの水の中なら、下の面には 30cm 相当の水の圧力がかかり、この力で押されていて、お豆腐のほうも同じ力で踏ん張っているはずですから、少し、違うようです。もう少し順序だてて考えてみましょう。

まず、お豆腐を水から出して、まな板の上に置いたとします。自らの重みがかかり、一番下の面ではその高さ分の重みを支えないといけません。先ほどと同じく、 8cm 高さのお豆腐なら、(高さ)×(密度)に相当する力で押し込まれます。その結果としてお豆腐のわき腹は、横に膨れ出ようとしています。鯨が砂浜に打ち上げられて、つらい思いをしているのと同じ状況です。四角のものが末広がり膨らむことになるのですが、お豆腐の中で正方形のものを押しつぶして長方形にし



(a) まな板の上のお豆腐



(b) 水槽の底に沈むお豆腐

ようとする力、辺をずらして平行四辺形にしようとする力が合わせて働いた結果であるとも言えます。

次にお豆腐を水の中に入れてみましょう。 30cm 深さの水槽の中にお豆腐を沈めたとします。上の面は 22cm 相当の水の重みで、下の面は 30cm 相当の重みで押されます。また、横の面は、上から下へとだんだんに大きくなる力で、下がすぼまる方向に押さえ込まれます。張り出したわき腹は水の重さによって外から押されて、もとの形に戻ろうとします。

近ごろの道具を使えばそれほど難しくなくこの辺の状況を計算して、きれいな絵にできるようになりました。お豆腐の性質を適当に仮定して、お豆腐の断面を 20×16 の四辺形に区切って計算してみたのが上の絵です。左がお豆腐をまな板の上に置いたときの、右がお豆腐を水の中に沈めたときのお豆腐の形と中をひしゃげようとする“ストレス”を示しています。格子の部分が言ってみれば宇宙における無重力の、重力も水圧も作用しないお豆腐の形です。形が変わる様子は極端に拡大表示されています。断面の色分けは、赤紫がゼロで赤になるにしたがってひしゃげる応力が大きいことを示しています。まな板の上に置いたときの応力が大きいこと、お分かりいただけるとと思います。

繰り返しになりますが、水の中では水の力によってお豆腐は四方から押され、それも下の面ほど大きな力で横から押されて、下膨れにはらむのが押さえ込まれ

ます。どうもこれが水の中でお豆腐が壊れにくい理由のようです。

最近では、プラスチックパックにつめられて売られているお豆腐を多く見るようになりました。パックは、でこぼこの模様がある下面と、一枚の膜の上面でできており、中には水が入っています。お豆腐自身の上面は、パックの側面より少し上のようなようです。パックはたくさん積上げられていますが、それでもお豆腐は壊れません。そう、このパックがお豆腐を横から支えているからです。それではいくつまでお豆腐を重ねることができるのでしょうか。興味のあるところです。

全く同じとは言えませんが、このお豆腐パックに似た技術が最近ここで見られます。もうほとんど済んでしまったようですが、高速道路、新幹線の高架を支えるコンクリート脚の補強工事です。あの太いコンクリートの柱に鉄板の腹巻を巻きつける補強がされています。これも横にはらむのを押さえ込むのが目的です。

IHIでは、 1 万気圧にもなる高圧力発生装置を作ってきました。この圧力を発生させる一番のもと、アンビルと呼びますが、壊れて困ったことがありました。お豆腐と全く違ってこちらは世の中にこれ以上硬い材料があるかというほどの超合金でできていますが、これをどうやって壊れないように設計しようかといういろいろ考えました。細かなところは少し違いますが大略は同じ手順で、いろいろと検討が進められました。