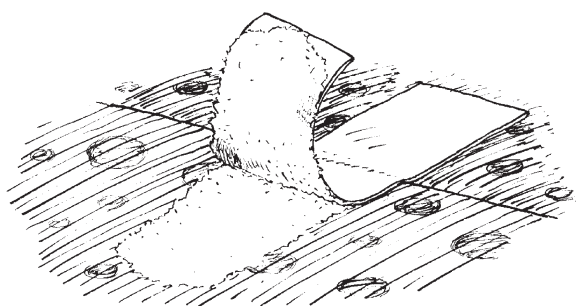


はがし方二題

第二話：値札のはがし方



折角のきれいな包装紙が――



工学博士 西尾 宣明

元・東京ガス(株) 基礎技術研究所

4要素粘弾性モデル

与太郎：大家さん。こないだ聞きそびれたこと、教えてもらいに来ました。

大 家：ああ、何か言ってましたね。どんなことでしたっけ？

与太郎：ほら、よくお菓子やお茶の箱なんかきれいな包装紙で包んでますよね。家内がそれを取って置きたがるんですよ。それで、貼ってある値札やシールやセロテープをきれいに剥がしてくれて頼まれるんだけど、それが厄介なんですよね。シールや包装紙がすぐに切れちゃうんですよ。

大 家：包装紙だけじゃないですね。きれいなガラスの器に貼ってある値札なんかも、古い物だと紙がこびりついていて粘着材が汚く残ってしまうことがありますね。それでも、ガラスなら水に漬けてスプーンなどで削り落とすこともできるけれども、日曜大工の店で売っている材木に粘着材が残ったりすると後の始末が一苦労なんです。

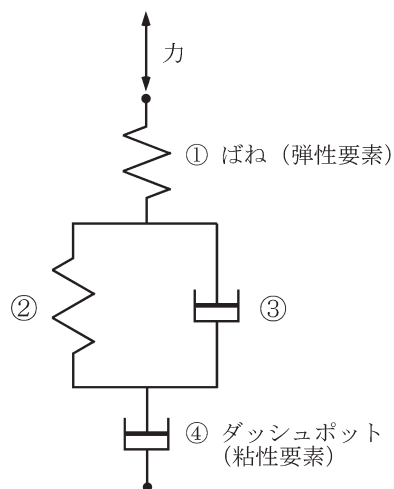
ところが、この問題もこないだ話した物の性質を応用するとかなりうまく行くんですよ。

与太郎：こないだの話って、固体は液体で液体は固体だっていうことですか？

大 家：そういうことです。ただ、そう言うただけでは変形の速さの影響がどういう風に表れるかをきちんと説明できないので、ちょっと難しいかも知れませんが、固体の性質を粘弾性モデルというものを使って表すことにしますね。

与太郎：ねんだんせいモデルなんて、ちょっと難しいところじゃなさそうですね。

大 家：そうかも知れませんが、少し我慢して下さいね。一番単純なモデルとしては図のような4要素モデルが分かりやすいですね。



4要素粘弾性モデル

①と②はバネを表します。つまり弾性要素です。③と④はダッシュポットと呼ばれるものです。ダッシュポットは水鉄砲のような物です。シリンダー、つまり筒の中でピストンが動くんですが、水を勢いよく飛ばそうとすると大きな抵抗を感じますね。反対にピストンをゆっくり押せば水はだらだらと流れ出して、抵抗も小さいです。ああ、そうそう、自動車の緩衝装置に使われているダンパーがこのダッシュポットですね。これが粘性要素です。そして弾性要素と粘性要素を組み合わせたのが粘弾性モデルです。

与太郎：やっぱり、あんまり分かりやすくもないですね。でも、まあいいか。

大 家：悪いけど少し辛抱して下さいね。

一般に④のダンパーはすごく固くて、大きな力が加わってもなかなか動かないと考えられます。③はそれほどでもない。そこで、固体に急に大きな力が加わると、伸びるのは①のバネと、②（バネ）と③（ダンパー）が並列に合わさった部分です。力を取り除けば、①はすぐ元に戻ります。②のバネも元に戻ろうとしますが、③のダンパーが急な収縮には抵抗するので、少し時間をかけてじわーっと縮みます。④は固くて少ししか伸びないけれども、力を取り除いても元には戻りません。

与太郎：ふうーん。そういうものですか。図の格好は電気の世界の抵抗とコンデンサーに似てるけど、中身はちょっと違いますね。

大 家：もしかしたら、結構似たところもあるかも知れませんがね。

電圧と電流に力と変形あるいはひずみ、またはひずみ速度などを対応させることができるかも知れませんね。実際、ポリエチレンなどを含む高分子材料の動的な特性をこのようなモデルで解析することもあるんですよ。

与太郎：ふうーん。動的な特性ねえ。でも、瓶の蓋が開くとか値札が切れちゃうとかもううまく説明できるんですか？

大 家：そう、それが問題なんですね。今までこのモデルはもっぱら動的特性の説明にしか使われていませんでした。それをポリエチレンの寿命、つまり破壊の問題に使ったのがこの私なんですよ。

与太郎：へえー。大家さんは地震の研究で博士号を取ったんでしょう？ こういうことでも世界で初めての仕事をしたなんて凄いいじゃないですか。このモデルど

んな風に使ったんですか？

大 家：それまではこのダッシュポットのピストンは上にも下にも無制限に動けるとして解析されていたんですね。だから、動的特性の解析にしか使えませんでした。私は破壊はこのダッシュポットで起きると考えたんです。この図に描いたように、ダッシュポットのシリンダーは水鉄砲のように一方が開いていて、そこまで動くとピストンがすっぽ抜ける、つまり材料は破壊すると思ったんです。シリンダーが長ければ破壊までの変形つまりひずみは大きく、短ければ小さい変形で破壊が起きると考えたわけです。

前にガス用ポリエチレン管のクリープ寿命の話をしたでしょう？（No-Dig Today 67号『ガリレオ爺さんの手柄話—ポリエチレン管談義』）あれにはこの考えが応用されているんです。

与太郎：そうだったんですか。それで——やっぱり4つの要素のモデルですか？

大 家：そうです。ただし、低い応力が長い間加えられる時に起きるクリープだけに注目すれば、④のダッシュポット一つの簡単なモデルでも十分な精度で近似できます。全周ノッチクリープ試験（同前、『手柄話』参照）はそのモデルで解析されるんです。

しかし、実際の埋設管では「一定の力」がずっとかかり続けることは少なく、例えば管を直接曲げて配管した時とか地盤沈下などで管が曲げられたときなど、「一定のひずみ」が加えられることが多いんです。この時に生じた応力はゆっくりと減少して、いわゆる応力緩和という現象が起きるんですが、それを解析する時は4要素モデルが必要になります。

与太郎：そんなときは大家さんのクリープ試験っていうのは役に立たないんですか？

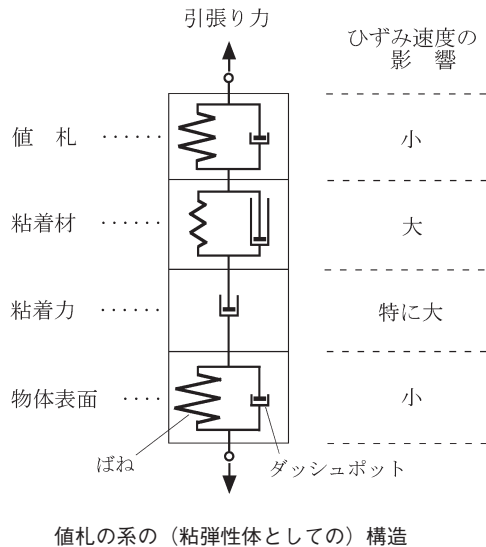
大 家：いやいや、やっぱりとても重要なんです。私が定年になって、後を継いだ若いAさんという研究員がこの応力緩和について素晴らしい着想で実験をしてくれましてね。私の研究を完成させてくれたんですよ。

与太郎：ふうーん。なんだか随分難しい話になっちゃったけど、値札を剥がす問題とどんな関係があるんですか？

値札の系の構造

大 家：それが大ありなんですね。

値札の系の構造は図のような粘弾性モデルで表すこ



とができると思います。

与太郎：値札なんてそんな複雑なものなんですか？

大 家：見た目よりずっと複雑なんです。まず値札そのものです。これは紙でできた固体です。ただ、固体としてはかなり強度は低いです。次に、値札に塗ってある粘着材です。これはかなり流動性のある、いわば半固体と言えるようなものです。そして貼り付ける相手の包装紙とかガラスとか木材といったもの、これも固体です。最後に、粘着材と値札や包装紙などの間の粘着力が持っている性質です。図はこの四つの要素を弾性要素と粘性要素の並列モデルで表したものです。

与太郎：へえー。随分七面倒臭いもんですね。でも、最後に言った粘着力っていうのは物じゃないですよ。

大 家：確かに、物ではなくて、粘着力の性質を表しているんですね。しかし、粘性要素とか弾性要素というのはそもそも物の性質を表すものですから、それをモデルに組み込んでもそんなにおかしいことはないんですよ。

与太郎：そういうもんですか。

大 家：四つの要素のうち、値札と相手の物体の強さは変形の速さにはあまり関係なく、ほとんど一定の強さを保つと考えられます。それに対して、粘着材は液体に近い性質を持っていて、速い変形に対しては大きな抵抗を示します。それで、値札を急に引き剥がそうとすると粘着材が値札より強くなって、値札や包装紙のほうがちぎれてしまったりします。粘着力も同じで、速く剥がそうとすると粘着力が粘着材の強さを上回って、速さによっては粘着材のほうがちぎれて、相手の物体の表面こびりついたままになります。

これは値札が貼られてからどれだけ日数が経っているかにも大きく影響されると思います。

与太郎：図で、大きく描いたバネとダッシュポットの長さはどんな意味があるんですか？

大 家：バネを大きく描いたのは固いとか強いという意味です。ダッシュポットの長さは、長いほど壊れるまでの伸びが大きいということです。しかし、ダッシュポットにはもう一つ「ひずみ速度の影響」というのがあって、粘着材や粘着力は急な変形には大きな抵抗を示します。そのため、条件によってはその抵抗力が値札やそれを貼付けた物体の強度を上回って、粘着部が剥がれたり粘着材が切れたりする前に値札などのほうが壊れてしまうこともあるということです。

与太郎：ふうーん。あんまりよくは分かんないけど、値札を剥がすっていうことにもいろんな物の性質が関係してるってことなんですね。

大 家：そうなんです。そのことさえ分かってくれば、細かいところまで全部分からなくてもわたしはありがたいですね。

値札をうまくはがすコツ

与太郎：そうすると——あれですか？きれいに値札を剥がすにはなるべくゆっくり剥がしたほうがいいってことですか？

大 家：結論はそういうことですね。ただ、なぜそうなるかという原理をはっきりさせないと本当にそれを理解したことにはならないし、条件が変わった場合への応用も利かないと思います。それでわざと七面倒くさい粘弾性モデルを持ち出してみたわけです。

与太郎：大家さん。そこに何かシールのついた段ボール箱がありますね。それで試させて下さいよ。

大 家：ああ、これね。いいですよ。やっpegおらんさい。

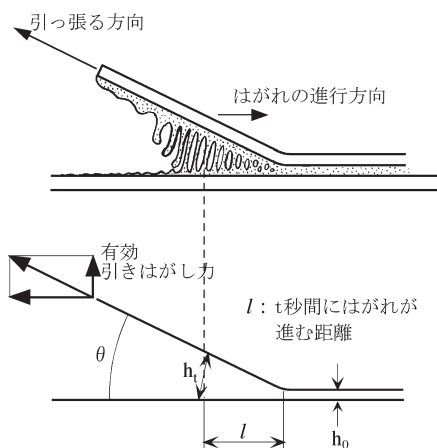
与太郎：こうやって、ゆっくりとね。

あれ。だめだ。シールが切れちゃった。

大 家：ただゆっくりというだけでは駄目なんです。実はもう一つ、本当にゆっくり剥がすコツがあるんです。

与太郎：なあんだ。まだ秘密を隠してたんですね。

大 家：最初に値札の角を爪の先で丁寧に剥がしますね。そうして起こした値札の角を例えば親指と中指の爪の先でつまみます。そして、剥がす方向とは反対の方向に値札を引っ張るんです。この図のように……。



値札のうまいはがし方と説明のための記号

なぜそうするかというと、安全に粘着材の変形速度を小さくするためです。

厳密に言うと、変形速度とはひずみ速度のことです。粘弾性モデルのダッシュポットの抵抗力はひずみ速度の大小によって決まるんです。

与太郎：その低抗力が大きいと値札のほうがち切れたりするんですけど？

大 家：まさにそのとおりです。

図のように、 t 秒という時間をかけて剥がれが距離 l だけ進むとします。そのとき、初めに h_0 という厚さだった粘着材が h_t に伸びたとします。そのとき、ひずみ ε_t は伸びた量 $h_t - h_0$ を元の厚さ h_0 で割ったものとして表されます。実際には h_0 はうんと小さいので、ひずみは近似的にこの式で表すことができます。

$$\varepsilon_t = h_t / h_0$$

そして、ひずみ速度はこれを時間 t で割った次のような式で表されます。

$$\dot{\varepsilon}_t = \varepsilon_t / t$$

与太郎：つまり、ひずみ速度はひずみに比例するんだから、 h_t が大きいと大きくなるんですね？

大 家：そうそう。そのとおりです。

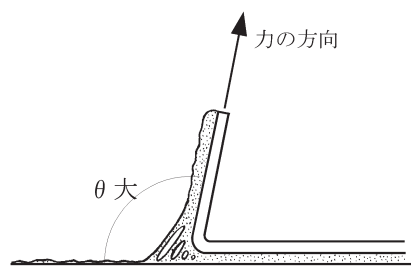
その h_t は図のように剥がす角度 θ が小さいほど小さくなります。実際には θ があまり小さいと有効な引き剥がしの力が小さくなって剥がすのに一苦労しますから、 θ を 30° から 40° ぐらいにするつもりで値札を引っ張れば理想的です。実際には 45° ぐらいにするのが精一杯かも知れませんがね。

与太郎：剥がす方向と逆の方向に値札を引っ張るってのは変な感じがするけど……。

大 家：確かに変な感じかも知れませんが、しかし、こうすることで剥がれかたが突然速くなるとか——そう、暴走するっていうんですかね——そういうことが少なくなるんです。ちょっとこのシールをはがしてみましょうね。

与太郎：ああ。ほんとだ。きれいに剥がれますね。

大 家：さっき与太郎さんが剥がそうとしたときは力の方向がこの図のようになっていましたね（まずい剥がし方の図）。これだと角度 θ がうんと大きくなって、いくらゆっくり剥がそうと思ってもひずみ速度を思うように調節するのがとても難しくなるんです。



値札のまずいはがし方

与太郎：そういうことなのか。

大 家：今の説明では粘着材が伸び切って破断するように考えましたが、一般には粘着材が切れる前に粘着の界面で剥がれますから、粘着材が切れて取り残されることは少ないと思います。この場合でも θ が大きくて剥がす速度——というよりはひずみ速度ですね——それが大き過ぎたり、貼ってから長い時間が経って粘着界面の強さ、つまり粘着力のほうが強くなって粘着材が切れて取り残されることがあります。

与太郎：あれ？その界面っていうのは面だから厚みはないんでしょう？そのひずみ速度ってどういうものなんですか？

大 家：いやあ、まいった。鋭いところを突かれましたね。確かに界面がひずむということはありません。界面の場合は剥がれる速さとも考えたほうがいいですね。

いずれにしても、粘弾性モデルというのは変形や強さの動的な特徴を表すもので、必ずしも物の形には対応しないということでしょうか。これは苦しい言い訳になってしまいましたが……。

与太郎：でも、値札を剥がす要領は分かりましたよ。これからは剥がすのが楽しみだな。