

粘着テープの剥離を記述するモデル¹

東大総合文化 佐藤 勝彦² 広島総合科 戸田 昭彦

粘着テープの剥離現象は思いのほか複雑である。(1) 剥がれの界面は剥がれの進行方向に垂直に周期的に波打つ。(其れは波の形が手の形に似ていることからフィンガリングと呼ばれる) (2) 粘着力曲線(剥がし速度に対して剥がすのに必要な力をプロットしたもの)は一般に複雑な曲線を描く。其の曲線は粘着剤の性質などに依るが大まかには図2のような2つ山の曲線を描く。(3) 剥離のタイプには基盤からの剥がれ方の違いによって凝集剥離, 界面剥離の2つに分けられ, 同じ界面剥離であっても粘着剤の中に空洞を作りながら剥離ががすすむ現象がある[2]。

これらの複雑な現象を大まかではあるが現象の本質をつかむ作業の(我々の中の)第一歩として, 我々は線形バネとダッシュポットの連結だけによってこの剥離現象を記述するある簡単なモデルを作り, 其のモデルを使って上で述べた(2)の剥がし力曲線に対するある考察を行い, ある見解を得た。(そのモデルや其の具体的な議論は論文[1]を参照のこと)。

其の見解は以下のようなものである。

この簡単なモデルを使った計算によると, 粘着力(粘着テープを剥がすために必要な力)は粘着剤の弾性率が大きければ大きいほど小さくなるという結論がまず得られる。このことは日常の経験から(湿布を足などから剥ぐときやわらかい湿布のほうが剥ぐのが大変で硬いほうがすんなり取れるという経験などから)も比較的容易に賛同できることであろう。粘着剤の剥離条件として基盤に接触している粘着剤の垂直応力がある一定の値に達したら剥離するという仮定をおいた。(この臨界垂直応力を σ_c と書くことにする)

粘着剤は単なる高分子メルトであり, いわゆる粘弾性の性質を持っている。その弾性率は大まかに流動領域, ゴム領域, ガラス領域の3つのものがあり, 其の3つの領域の境目の時間をそれぞれ τ_r , τ_g とするとこの特徴的な時間をまたぐような変形のスピード変化があると弾性率が大きく変わることになる。

粘着剤が剥がされる前に力を受け始める深さを l とすると粘着剤が力を受け始めてから剥がれるまでの時間は $\tau = l/v$ である(v ははがしスピード)。この τ が上に述べた τ_r, τ_g をまたぐと粘着剤の見かけの弾性率は大きく変わり其れに伴って粘着力は大きく変化することになる。

其のことをモデルを使って具体的に計算した図が図3である。はがし速度を上げていって τ が τ_r, τ_g をまたぐとき大きく粘着力が変化していることがわかる。

しかし, すぐに気づくように図3は実験から得られる図2と定性的にも一致していない。(実験で得られる図2は正のスロープを持つのに対しモデルからの其れは負のスロープしか現れない)

図3は臨界垂直応力 σ_c を一定だとして得られたものであるが, もし σ_c が何らかのメカニズムによって剥がし速度に依り且つ速度に対して緩やかに単調に増加するものであったとしたのなら, 図3の負の傾きの部分は弾性率が急激に変化するところ部分だけが残し, 実験から得られる図2に大変よく似たものになるだろう。

¹この発表の内容は Journal of the Physical Society of Japan の 2004 年 8 月号に掲載予定の “Modeling of the Peeling Process of Pressure-sensitive Adhesive Tapes with the Combination of Maxwell Elements” というタイトルの論文の内容と同じものである。詳細は論文を参照していただきたい。プレプリントは <http://xxx.yukawa.kyoto-u.ac.jp/abs/cond-mat/0406746> からダウンロードできます。

²E-mail: sato@complex.c.u-tokyo.ac.jp

もちろん何故臨界 σ_c が剥がし速度によるのかということには直ちには答えることはできないが(其のひとつの案を論文[1]で提案してはいる)粘着剤の大幅な弾性率の変化が実験に現れる2つの山の原因であることはほぼ間違いないだろう。

実際古くからこの2つの負の傾きが現れる剥がし速度と粘着剤のゴム化, ガラス化とが深くかかわっているということは多くの実験家によって指摘されてきていた[3]. 今回, 我々は其の statement を簡単なモデルを使って粘着剤の物質と其の負の傾きが現れる剥がし速度とを具体的に関係付けてあからさまに示したということになる。

この考察は破壊現象に関するあるひとつの大きな問題を提起したと我々は考えている. 我々の簡単なモデルは剥離条件の臨界垂直応力 σ_c が剥がし速度に依るということを示しているわけだが, これは果たして本当であるのだろうか?(モデルの簡略化しすぎの所為というのも考えられなくはない) もし本当であるとしたのなら何故臨界 σ_c は剥がし(破壊)速度に依るのであるだろうか? 先にも述べたように臨界 σ_c が剥がし速度に依りうるひとつの説明を論文[1]に提出したわけだが, 其れだけが唯一の説明であるわけではない. 他にも十分ありうる. この臨界 σ_c が破壊速度によるという予想が本当であるのか? 本当であるのなら其れはどのような理由によるものなのか? この問題が議論され解決されたのなら, やわらかい物質の破壊現象に関する一つの重要な見解が得られると我々は予想している。

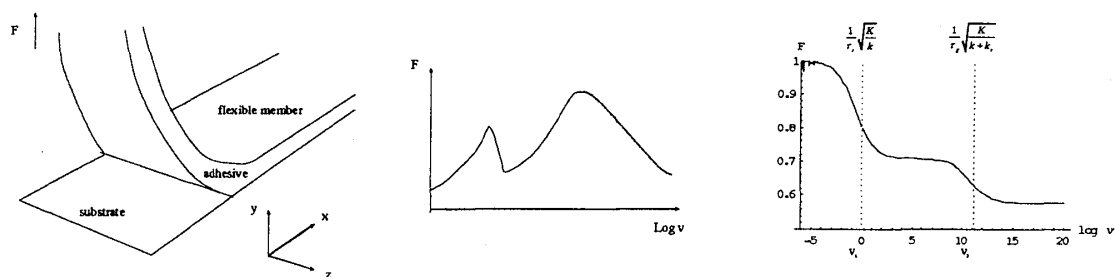


図 1: 粘着テープの剥がし実験 図 2: 実験で得られる粘着力曲線の模式図 図 3: モデルから得られる粘着力曲線

参考文献

- [1] K. Sato and A. Toda: "Modeling of the Peeling Process of Pressure-sensitive Adhesive Tapes with the Combination of Maxwell Elements" (preprint) <http://xxx.yukawa.kyoto-u.ac.jp/abs/cond-mat?cond-mat/0406746>
- [2] Y. Yamazaki and A. Toda: Journal of the Physical Society of Japan **71** (2002) 1618.
- [3] D. Satas: Handbook of pressure sensitive adhesive technology, edited by D. Satas, New York: Van Nostrand Reinhold, 1989, 2nd ed, Chap. 5.