

粘着テープ剥離の数理モデル

山崎義弘、戸田昭彦*

早稲田大学理工学術院、〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1、yoshy@waseda.jp

*広島大学大学院総合科学研究科、〒739-8521 東広島市鏡山 1-7-1、atoda@hiroshima-u.ac.jp

Modeling for motion of peeling front of adhesive tape

Yoshihiro Yamazaki, Akihiko Toda*

Waseda Univ., 3-4-1 Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555

*Hiroshima Univ., 1-7-1, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8521

Abstract: We examined various spatiotemporal patterns evolving in deformed adhesives during peeling. The patterns are regarded as a spatiotemporal distribution of a tunnel structure formed by the deformed adhesive, and are classified into the following four types: (A) uniform pattern with tunnel structure, (B) uniform pattern without tunnel structure, (C) striped pattern alternating between A and B in time, and (D) spatiotemporal pattern made by the coexistence of two regions with and without the tunnel structure. These patterns and the dynamical behaviors are reproducible by a model with a state variable representing the stability of the tunnel structure.

Keywords: spatiotemporal pattern, tunnel structure, morphology-dynamical phase diagram, state variable

1. はじめに —実験事実—

図1のように、粘着テープを平板に貼り、バネを取り付け、テープの剥離を行った。剥離の際、剥離速度 V とバネ定数 k をコントロールパラメータにして、テープをはがす際に必要な力を測定した。図2はバネ定数が異なる2つのテープ剥離における速度-力曲線を示している。これらの図から以下のような特徴がわかる：(i) 図の白丸は定常的な剥離が行われていることを示し、低速域と高速域に2つの定常剥離領域が存在する。(ii) それらの中間の速度域では、バネ定数が小さい場合(図2(a))、力の自励振動（縦の線分で振動の振幅を表示）が起きている。ところが、(iii) バネ定数が大きくなるに従って振動領域は狭まり、あるバネ定数より大きいバネを用いると、自励振動が起こらなくなる(図2(b))。

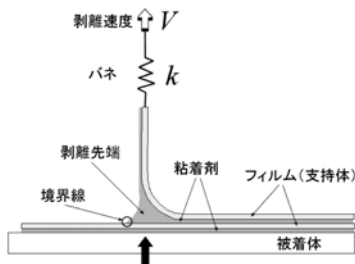
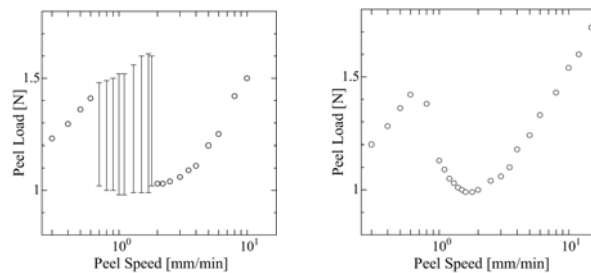


図 1



(a) $k = 2.9 \times 10^2$ N/m (b) $k = 2.4 \times 10^4$ N/m

図 2

さらに、剥離後の粘着テープに着目すると、 V と k の値に応じて図3のようなパターンが得られる。図3では、上から下に剥離が進行している。低速域では粘着剤の変形が大きく粘着剤に空気が入り込み、トンネル状の構造が形成される。このトンネル構造は、図3(a)の白い領域としてパターンに表されている。一方、高速域では比較的変形が小さいためにトンネル構造は形成されず、図3(b)のように特徴的なパターンは表れない。さらに、中間の速度域でバネ定数が小さい場合には、トンネル構造を伴う剥離と伴わない剥離が交互に現れ、力が自励振動する原因となっている(図3(c))。また、バネ定数が大きくなったことにより力の自励振動が起こらない領域では、トンネル構造の伴う剥離と伴わない剥離が一つの剥離先端内に共存したパターンが得られる(図3(d))。図4は以上の結果に基づいて得られた動的相図である。○、●、◎、△はそれぞれ、図3の(a)、(b)、(c)、(d)で示されるようなパターンが得られる測定条件を示している。

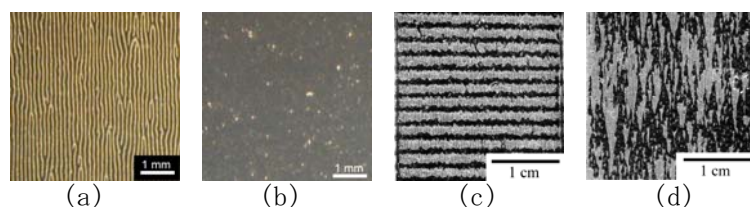


図 3

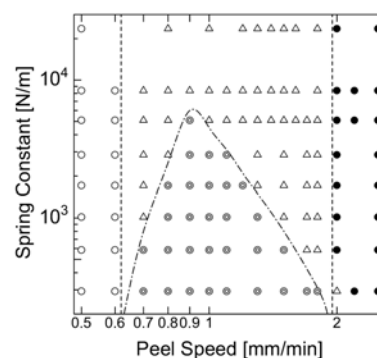


図 4

2. モデリング

剥離後のパターンがトンネル構造の有無によって形成されることに着目し、トンネル構造の安定性を表す状態変数を導入した。そして、剥離先端を状態変数が一次元的に並んだ系とみなし、その集団運動として剥離挙動を捉えるため、バネの復元力と粘着力との釣り合いに関する式、および状態変数の時間発展式で構成されるモデルを構築した。

3. 結果・考察

我々が提案したモデルに基づき、剥離挙動およびパターン形成における本質的な要因が、(i) トンネル構造の安定性によって生じる2状態の双安定性、(ii) 2状態の境界ではトンネル構造が壊れやすいという局所的相互作用と、テープ全体での粘着力を平均した値が各状態変数に外力として働いているという大域的相互作用との競合であると結論づけられる。特に、動的相図における△の領域では、局所的相互作用によってトンネル構造の存在している領域が減少すると、テープ全体の剥離力は低下する。ところが、剥離力が低下すると、大域的相互作用により双安定状態の限界に近づくため、トンネル構造の形成が引き起こされ、テープ全体の粘着力は強くなる。そして、トンネル構造が形成された領域では、ふたたび局所的相互作用によりトンネル構造の領域が減少し、テープ全体の剥離力は低下することになる。このサイクルを繰り返すことによって共存パターンが形成され、2つの相互作用の効果が釣り合うように剥離先端内でのトンネル構造が占める割合および剥離に必要な力が決定されると考えられる。