

令和 6 年 5 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03765

研究課題名（和文）粘着界面のはく離メカニズムに基づくはく離強度評価指標の確立

研究課題名（英文）Evaluation of Interfacial strength based on peeling mechanism along adhesive interface

研究代表者

高橋 航圭（Takahashi, Kosuke）

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：60619815

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、粘着テープのはく離強度評価手法の確立に向け、粘着剤層とテープ基材のはく離力に及ぼす影響の解明に取り組んだ。まず、超弾性ゲルシートを粘着剤層、鋼ピンと磁石の間の磁力を界面結合力に見立てた粘着テープ模擬サンプルのピール試験により、粘着剤層の寄与を定量化することに成功した。次に、粘着剤層が伸長するはく離領域における応力分布を取得できる計測装置を開発し、テープ厚さの異なるサンプルの結果を比較することで、テープ基材の寄与を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粘着製品は、エレクトロニクスや医療分野を中心として新しい用途が拡大しており、従来の化学的、材料科学的な知見に基づく試行錯誤的な粘着製品設計のアプローチでは立ち行かなくなっている。本研究によって力と変形量の関係に基づく材料力学的な解釈が構築されることで、機械製品で行われているようなコンピュータシミュレーションに基づく応力解析を活用した効率的な製品設計手法へと結び付けることが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, the contribution of the adhesive layer and backing of the adhesive tape to the peel strength was clarified. First, an adhesive tape was modeled using the hyperelastic gel sheet and the steel pins on the magnet, which represent the adhesive layer and the interfacial bonding force, respectively. Their contribution to the peel force was successfully quantified. Next, a testing machine was developed to measure the stress distribution in the peeling region where the adhesive layer stretches. By comparing the results of samples with different tape thicknesses, the effect of the backing thickness on the peeling force was also quantified.

研究分野：Fracture mechanics, Adhesive bonding

キーワード：Adhesive Interfacial strength Peel test

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

粘着剤は、瞬間的な接着性や大きな変形への追従性、熱応力の緩衝作用を有することから多種多様な産業分野で用いられている。エレクトロニクス分野では、製品の小型化や薄型化、フレキシブル化に伴って粘着テープや粘着フィルム等の需要が著しく増大している。医療分野においても、皮膚に貼付する絆創膏やサージカルテープ、湿布薬等の身近な用途に加え、術後縫合を代替するために体内器官への適用が検討されている。こうした新しい用途においては、単に粘着力を向上させるだけではなく、必要に応じて綺麗にはがすことも要求される。強固な固定力と容易な離性を両立する理想的な粘着製品を実現するためには、粘着現象を正しく理解し、それに基づいてはく離強度を評価する技術を構築することが必要不可欠である。

粘着製品のはく離強度の試験方法は、粘着テープを端からはがす際のはく離力を計測するピール試験が最も一般的である。しかしながら、はく離力は粘着剤層厚さ、テープ基材厚さに依存することが知られており、同じ材質の粘着テープであっても用途に応じて個別に評価せざるを得ないのが現状である。これは、粘着製品のはく離強度が、化学的・材料科学的な知見に基づく試行錯誤的なアプローチで評価されており、力と変形量に基づく材料力学的な解釈が不十分なためである。こうした背景から、粘着界面のはく離メカニズムに基づいた汎用的かつ簡便なはく離強度評価指標を確立することが望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、力と変形量の関係に基づく材料力学的な観点から、粘着テープの粘着界面におけるはく離メカニズムを明らかにし、それに基づいた汎用的かつ簡便なはく離強度評価指標の確立を目的とする。まず、はく離力が粘着剤層と被着体との界面力と粘着剤層の伸縮に起因する点に着目し、はく離力におけるこれらの寄与を個別に評価する独自手法に取り組んだ。次に、ピール試験におけるテープ基材の曲げ変形に着目し、粘着剤層が伸長するはく離領域における応力分布を取得するための計測装置を開発してはく離力との関係解明に取り組んだ。

3. 研究の方法

(1) 粘着テープの模擬サンプルを用いたはく離力の内訳定量化

粘着テープのピール試験で測定されるはく離力 P は、引きはがす距離との積で表されるはく離仕事は、はく離によって生成された表面エネルギーに消費されたものとして、はく離エネルギー $G = P(1 - \cos\theta)/b$ として評価される。ここで、 θ ははく離角度、 b はテープの幅である。この関係は、粘着剤層、テープ基材がともに弾性変形であることを前提としているが、粘着剤は粘弾性体であり、はく離による粘着剤層の伸縮過程で粘性の効果によってエネルギーが散逸されるため、はく離エネルギー G にはこれが含まれていることになる。この内訳を定量的に求めるため、超弾性ゲルシート的一面に PET フィルムを貼り付け、逆側の面に鋼ピンを敷き詰めて貼り付けた模擬サンプルを製作した。鋼ピン側をネオジウム磁石に磁力で接着し、PET フィルムを引き上げることでピール試験を行う。これにより、界面力を鋼ピンとネオジウム磁石で表し、粘着剤層を超弾性ゲルシートで表すことを意図している。具体的には、以下の順に実験を進めた。

1. 図 1(a)のように PET フィルムに鋼ピンを並べて接着し、ネオジウム磁石と間でピール試験を行って界面力を測定する
2. 図 1(b)のように PET フィルムと鋼ピンの間に超弾性ゲルシートを貼付したサンプルを製作し、ネオジウム磁石とのピール試験により、はく離力に及ぼす超弾性ゲルシートの変形の影響を考察する
3. 2.の模擬テープサンプルのピール試験を側面からマイクロスコップで観察し、図 1(c)に示すようにはく離に伴う超弾性ゲルシートの伸長量を計測する
4. 超弾性ゲルシート単体の引張試験を行うことで応力ひずみ関係を取得し、3.のピール試験で計測した伸長量に相当するひずみエネルギーを取得する

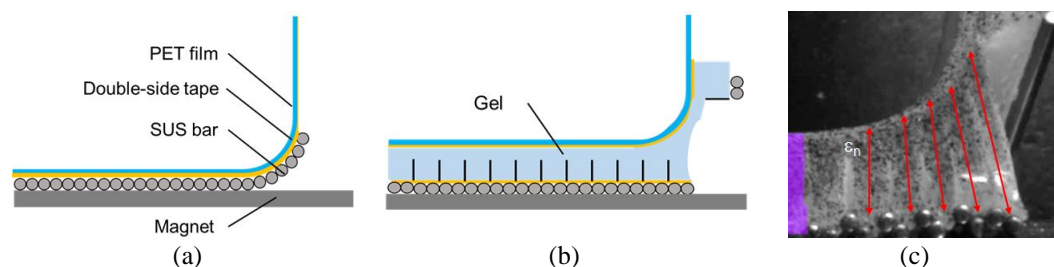


図 1 (a)界面力だけを模擬したテープサンプル, (b)界面力と粘着剤層の伸びを模擬したテープサンプル, (c)模擬テープサンプルの観察例

(2)ピール試験のはく離領域における応力分布の計測

ピール試験のはく離荷重を粘着界面における応力分と関係づけるため、はく離領域における応力分布の計測装置を開発した。計測装置のイメージを図2に示す。この装置の被着体にはアクリル板を用い、リニアガイドを介して土台に設置した。テープを引っ張る部分の上側にはロードセルを取り付けており、ピール試験と同様にはく離力を測定できる。アクリル板を図2に示すように右からⅠ、Ⅱ、Ⅲの範囲に分断し、アクリル板Ⅱの下側にだけロードセルを取り付けた。この範囲だけにかかる荷重を計測することで、はく離領域内の局所的な応力を抽出することができる。様々な粘着剤厚さ、テープ基材厚さの粘着製品を用意し、この装置でピール試験を行った。具体的な試験手順を以下に示す。

1. 上側と下側のロードセルで荷重を測定し、定常はく離の状態では各計測値が一致することを確認する
2. はく離領域がアクリル板Ⅰからアクリル板Ⅱに移行する際の下側ロードセルの計測値の時間変化を取得する
3. 2の結果とはく離速度から応力を算出する
4. はく離領域を側面からマイクロスコブで観察した結果と対応させ、はく離領域における応力分布を明らかにする

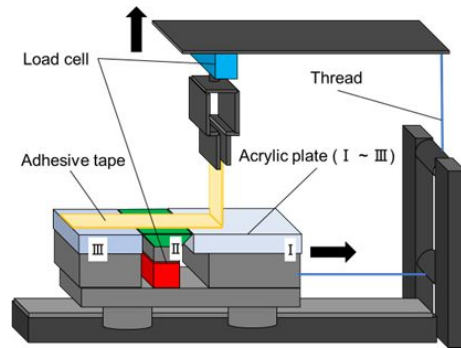


図2 粘着剤層の有無に伴うはく離力の計測結果

4. 研究成果

粘着テープの模擬サンプルでピール試験を行った結果を図3に示す。PETフィルムに鋼ピンを直接貼付した結果を青マーカー、PETフィルムと鋼ピンの間に超弾性ゲルシートを貼付した結果を赤マーカーで示している。はく離角度に関わらず、超弾性ゲルシートがあることではく離力が高くなった。すなわち、ピール試験で計測されるはく離力には、界面における結合力だけではなく粘着剤層の変形が大きく寄与することを実証した。次に、側面観察の結果(図3)から超弾性ゲルシートの伸長量を計測した。このひずみに相当するひずみエネルギーを超弾性ゲルシート単体の応力ひずみ関係から見積もったところ、およそ図3で見られた結果の差異に相当する値となった。以上より、粘着剤の応力ひずみ関係が及ぼすはく離力への寄与を明らかにし、界面における結合力との分離に成功した。

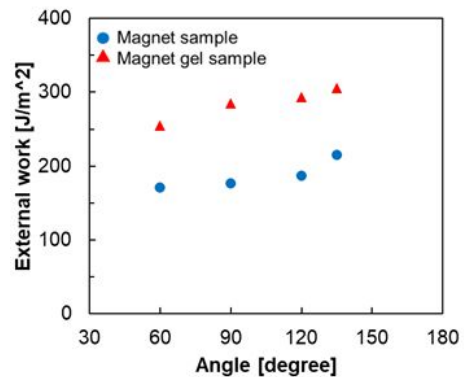


図3 粘着剤層の有無に伴うはく離力の計測結果

ピール試験のはく離領域における応力分布を取得した結果を図4に示す。開発した計測装置により、粘着剤が伸び始めるはく離領域の先端部付近で応力が最大となり、それ以降の糸引き領域ではおよそ一定となる応力分布を取得することができた。厚さの異なる粘着テープと比較した結果、応力の最大値は粘着剤層が薄いほど高かった。また、はく離領域の前方(粘着剤が伸び始める前の領域)では、テープ基材が厚いほど大きな圧縮力が生じることが示された。ピール試験のはく離力として計測されるのは、この圧縮力とはく離領域における引張力の和であることから、テープ基材が厚い場合には粘着剤の伸びによるはく離力が相殺されてしまい、テープの性能を過小評価しうることが明らかとなった。

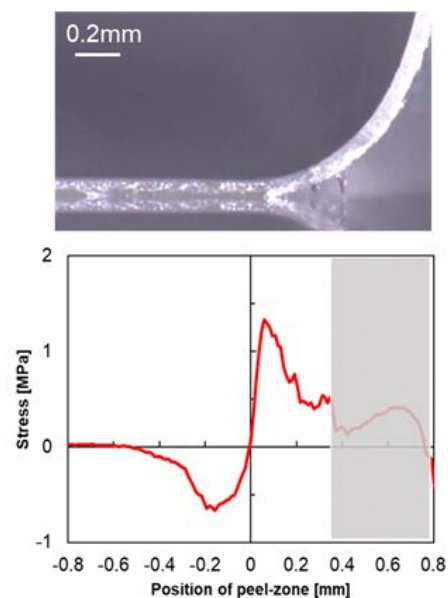


図4 粘着剤層の有無に伴うはく離力の計測結果

以上より、ピール試験で計測されるはく離力に対して、粘着テープの模擬サンプルから粘着剤層厚さの寄与を、応力分布計測装置からテープ基材厚さの寄与を定量的に表すことに成功した。今後は、ピール試験におけるそれぞれの寄与を定式化することで、材料定数としてのはく離強度評価指標の確率を進めていく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yamada Masako, Takahashi Kosuke, Fujimura Nao, Nakamura Takashi	4. 巻 271
2. 論文標題 Generalized characteristics of peel tests independent of peel angle and tape thickness	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Engineering Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 108653 ~ 108653
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.engfracmech.2022.108653	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 鈴木崇玄, 高橋航圭, 藤村奈央, 中村孝
2. 発表標題 ピール試験のはく離領域における応力分布とはく離形態のはく離速度依存性
3. 学会等名 日本接着学会第60回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋航圭, 因幡和晃, 岸本喜久雄, 小曾根雄一, 杉崎敏夫
2. 発表標題 粘着剤の系引き過程の微視的観察に基づくタッキファイヤ付着効果の解明
3. 学会等名 日本接着学会第60回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田理子, 高橋航圭, 藤村奈央, 中村孝
2. 発表標題 ピール試験における粘着剤層のひずみ速度に着目したはく離強度評価
3. 学会等名 日本接着学会第59回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田理子, 高橋航圭, 藤村奈央, 中村孝
2. 発表標題 粘着テープのはく離強度に及ぼす粘着剤層の変形とはく離形態の影響
3. 学会等名 第20回破壊力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田理子, 高橋航圭, 藤村奈央, 中村孝
2. 発表標題 試験法によらない粘着テープの界面はく離強度評価指標の確立
3. 学会等名 日本界面学会2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masako Yamada, Kosuke Takahashi, Nao Fujimura, Takashi Nakamura
2. 発表標題 Evaluation of Adhesion Strength by Focusing on Strain Rate of PSA Layer in Peel Test
3. 学会等名 EURADH 2021 - 13th European Adhesion Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kosuke Takahashi
2. 発表標題 Effect of Tape Thickness on Relationship Between Peeling Load and Stress Distribution in Peel-zone
3. 学会等名 47th Annual meeting, The Adhesion Society (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------