<技術論文>

(受理:平成17年12月26日)

熱溶着 (ヒートシール) の溶着面における 剥離エネルギーの計測と評価法の提案

菱 沼 一 夫*

要 旨

プラスチックのフィルムやシートの接着には熱溶着が適用されているが、加熱温度によって、剥がれシールと破れシールが発現する。

現状ではこれらのヒートシール面の明確な強度評価法が提示されていない。本研究では剥離エネルギーに基づく強度評価法を提案し、その有効性について確認した。

1. 緒 言

プラスチックの包装資材のほとんどの接着には熱溶着 (ヒートシール) が使われる。熱溶着 (ヒートシール) には熱可塑性の単一素材又は複数の素材にブロック共重合体を用いて貼り合わせたプラスチックのフィルムやシートが使用される。熱溶着 (ヒートシール) は熱溶着層 (ヒートシーラント) を溶融温度以上に加熱/圧着することによって成立する。ヒートシーラントの表層からの発熱体の直接接触加熱や電磁波や超音波によるフィルム内部の界面の発熱による加熱方法がある。

現行の代表的なヒートシール方法と特徴を Table 1 に示した。最も多く使用されている一対の発熱ブロックで被加熱体を挟み込んで加熱するヒートジョー方式のメカニズムを Fig. 1 に示した。両面が同一温度の加熱の場合には、加熱ブロックの圧着によって、被加熱材は表面から温度が上昇して接触界面の溶着層に伝熱加熱される。Fig. 1 には圧着開始 ($t=0$) から ($t=1$), ($t=2$) の材料内部の温度分布を図解したものを示している。両面加熱の場合は溶着界面の温度応答は、材料の初期温度の影響を少し受けて、材料厚さと熱容量によって決定される。

片面加熱の場合は一方からの加熱流のみに依存するので溶着界面の温度応答は材料の初期温度、材料厚さと熱容量、更に受け台の温度によって決定される。繰り返しの加熱操

作によって受け台の温度は変動するので加熱流に影響して、片面加熱の溶着界面の温度制御は両面加熱より難しい。ヒートシールは加熱温度によって溶着状態は大別して以下の2通りがある。

- (1) ヒートシーラントの溶着面の界面のみで接着する剥がれシール (Peel seal)
- (2) ヒートシーラントが高温加熱により完全に溶融接着して溶着面のエッジが破断する破れシール (Tear seal)

熱溶着 (ヒートシール) 操作によって発生する Peel seal と Tear seal の部位の説明と引張試験の剥がれと破れの状態²⁾を Fig. 2 に示した。

2つの溶着状態は加熱温度で変化するので、加熱温度はヒートシール完成と信頼性に強く関係している。

熱溶着のヒートシール強さは引張試験によって評価されてきている。従来は引張試験の最大値を以って接着 (溶着) の状態の評価を行っている^{1,2)}。

この評価法は破断点までの破断エネルギーの考え方に基いている³⁾。熱溶着 (ヒートシール) では、接着面が数 mm から 10 数 mm までの巾のヒートシール面 (Fin) を作っている。(Photo. 1 参照)

プラスチックのフィルムや薄手のシートでの場合には、引き裂き応力は溶着面全体にかかるのではなく応力ライン線上に作用する。実際では、エッジで破断する破れシール (Tear seal) の加熱方法が“常態的”に適用されているので、フィンの機能は接着に関しては利用されていない。

従来、熱溶着 (ヒートシール) に関連する不具合が発生すると、破断エネルギー理論をよりどころにして、包装材

* 菱沼技術士事務所

川崎市幸区小倉 1232 〒212-0054

(原稿受付日:平成17年8月23日)

Table 1 Kind and Characteristics of Heat Seal Technology

Method	Heating Surface		Principle of Heating	Characteristics	Use
	Double	Single			
(1) Heat Bar	○	○	Conduction from Front Surface	-Big Capacity of Heating (Double) -Influence of Cradle Temperature (Single)	-Lamination Film -Single Layer Film
(2) Impulse	(○)	○	Conduction from Front Surface	-Small Capacity of Heating -Heat Seal Fin is Small -Easy Use, Low Cost	-Single Layer Film -Lamination Film (Thin)
(3) Hot Air	○	○	Blow of Hot Air	-Direct Heating for Melting Surface -Influence is Small of Heat Conductance of Base Material	-Paper Carton -Tube
(4) Ultra Sonic		○	Energy Loss Spread Division	-Influence is Small of Heat Conductance of Base Material -Inappropriate Character for Metal Material	-Single Layer Film (Heavy)
(5) Induction		○	Joule Heat of Conduction Material	-Need of Metal Material -Heating Only Circumference	-Metal Multi-lyre Film -Heating Only Circumference
(6) Electric Field	○	(○)	Flush of Electric Loss	-Influence is Large of Water Content of Base Material	-Paper multi Layer Sheet

(a) Heating model of double heating
(Same temperature)

(b) Heating model of single heating

Fig. 1 Heating flow model of heating block with heat sealing action

料の厚さや強度の強い材料の選択が行われている。

しかし、厚さを増加させると、材料の熱容量が増加するので、熱溶着（ヒートシール）の加熱時間を変更前より長く（運転速度を低下）するか、加熱温度の高温化を必要とする。熱溶着（ヒートシール）の利用者の多くは、生産性を落としたいくないので、加熱温度の高温化を選択している。

加熱温度の高温化は以前より材料への熱ダメージを大きくするので材料の変更によって不具合の悪循環を起こしてしまっていることが多い。

本研究では、熱溶着部位の熱ダメージの少ない Peel seal 領域の剥がれ現象における剥離エネルギーを利用する新規な方法によって、プラスチック材料の適正な熱溶着（ヒ-

Fig. 2 The description of the failure modes ²⁾ with the genesis region place of peel seal and tear seal

Photo. 1 Heat sealing Fin of the flexible packaging

トシール) 性能を発揮させる改善方法について論ずる。

本研究で得られた結果から、医薬、医療包装品分野で要求されている開封の際に接着面の微細な包装材料の破片の発生が防御でき、血管中への異物の混入を避けることが期待できる。

2. 理 論

2.1 熱溶着の評価と破断エネルギー

材料の強さを評価する方法として引張試験法が古くから使われている。この方法は破断の起こった時の引張強さを主な評価指標にしている。プラスチックの熱溶着 (ヒートシール) の評価にもこの方法が準じて使われている¹⁻²⁾。引張試験法は剛性の大きい材料の破断面や接着面に引張応力が均一にかかる場合の評価を主にしている。しかし、プラスチックシートのように柔らかく、薄い材料の剛性は小さい。従って、熱溶着面全体に均一に引張応力はかからず、溶着のエッジの「ヒートシール線」に応力が集中する⁴⁾。引張応力によってヒートシール線には破れ又は、剥れが生じる。この様子を Fig. 3 に示した。従来の引張試験法では計測値の最大値を以て溶着強さの評価をしているので、

Fig. 3 Stress which works to fusing surface

Peel seal より Tear seal の方が良好とされている。しかし包装製品の製造工程中や物流中で発生する衝撃や荷重で、Tear seal の加熱領域では包装袋のヒートシール線に破れやピンホールが発生して、食品包装・医薬品包装や高度の酸素遮断を要求する精密機械部品の包装において、不具合の原因になっている。

2.2 剥離エネルギー論の構築

プラスチックは長さが数十 μm の糸状の高分子が絡み合った状態になっている。相対したヒートシーラントが加熱によって軟化・半溶解した状態で加圧されると相対するヒートシーラントは双方に数 μm 程度の「食い込み」を起こす。この状態で冷却されると食い込み部分に摩擦接着が起こり Peel seal の熱溶着が成立する。

他方、融点 (T_m) 以上に加熱されて、完全な熔融状態で相対するヒートシーラントは「混合」状態となり、冷却されると糸状の高分子は絡み合う。一部は酸化を起こす

Fig. 4 The schema of fusing condition of peel seal and tear seal

ジカル現象で高分子鎖の破断を起こすような Tear seal になる。2つの溶着状態の模式図を Fig. 4 に示した。

前者の熱接着状態は界面接着となり、ヒートシーラントの破断は起こらない。後者は双面のヒートシーラントは一体化して接着界面は存在しなくなる。溶着面に応力が作用すると各分子には不均一に応力がかかり、糸状の微小部位に応力が集中して部分破断を起こし、雪崩的にヒートシール線付近から破れると推定できる。

15mm 巾の引張強さ値の比較では

$$(\text{Peel seal 強さ}) \leq (\text{Tear seal 強さ})$$

となる。小さい伸びや剥がれを伴う破断現象では、単位巾当たりの破断のエネルギー $[St]$ は次式で表すことができる。

$$St = \sum_{L=0}^{Lt} k \cdot F_{(L)} \cdot \Delta l / w \quad (1)$$

St : 破断エネルギー (J)

$F_{(L)}$: 各引張距離点の引張強さ (N)

Δl : エネルギー演算の設定単位距離 (m)

(任意に設定)

Lt : 破断の発生時の引張距離 (m)

k : エネルギー演算距離の単位長さへ変換係数

w : サンプル巾 (m)

実際には、引張試験の応答の立ち上がりは鋭いのでこの試験ではもっぱら強さ $[F_{(L)}]$ のみに着目している。破断が起こらない Peel seal では引張強さは上昇後、溶着巾の剥がれの間は、ほぼ一定値となる。同一式を使い、積分範囲を $L=0$ から剥がれ巾の Ln までの積分を行う。この演算を剥離エネルギー $[Sp]$ と定義すると次式で表すことができる。

Fig. 5 Definition description of peel energy and break down energy

$$Sp = \sum_{L=Lb}^{Ln} F_{(L)} \cdot \Delta l / w \quad (2)$$

$[Sp]$: 剥離エネルギー (J)

Ln : 剥がれ巾 (m)

ここで定義した $[St]$ と $[Sp]$ の関係を Fig. 5 に示した。

2.3 剥離エネルギーの活用の探求

既に論じてきたように、プラスチックの熱溶着（ヒートシール）における破断強さは剥離強さより大きい。剥がれが起こるように熱溶着して、外力による発生する剥離／破断エネルギーを剥離エネルギーに変換（吸収／消費）すれば、破れの発生を抑制することができる。

すなわち“緩衝”機能で破断エネルギーを連続的に吸収し、破れ／ピンホールの発生を防御することができる。加熱温度に依存する剥がれシール強さと剥がれ距離（ヒートシール Fin 巾）の組み合わせで $(Sp \geq St)$ が見出せれば、

熱溶着 (ヒートシール) の新規な信頼性向上と技法の開発が可能になる。

3. 実験

本実験では、市販商品に使われているアルミラミネーションの包装材料を使用した。

材料の構成は PET (12 μ m)/PE (15 μ m)/AL (7 μ m)/PE (15 μ m) である。各素材間の接着にはブロック共重合の接着剤が使用されている。

3.1 引張試験片の作成

溶着面温度を直接加熱管理する溶着面温度測定法を適用して⁵⁾ Peel seal 帯から Tear seal 帯の熱溶着サンプルを 2 ~ 10℃ 間隔で加熱作成した。

3.2 引張試験の方法

各溶着面温度で加熱したサンプルを巾 15mm, 引張試験機にかけ初期間隔が 30mm になるように切断し, JIS 法¹⁾ に準じた引張試験を行う。引張試験機の引張距離と引張強さの全データ (引張パターン) を A/D 変換してパソコンに取り込む。引張試験の方法の構成図を Fig. 8 に示した。

3.3 引張試験データの積分範囲と演算方法

引張試験データの引張距離と引張強さ値をデジタル変換して, 全データをパソコンに “EXCEL” ファイルとして取り込む。

Fig. 6 Tension pattern example of the peel and tear sealing

(引張距離) $\times 1/2$ が剥離長さとなるので, 全引張距離採取データに $1/2$ を乗じた上で, 長さを (m) に置換する。全剥離長さは 10mm 程度なので剥離距離の最小単位は 0.1 ~ 0.2mm となるようデジタル変換し, 破断エネルギーと剥離エネルギーの近似積分の精度を確保するように考慮した。引張値は (N) に変換した。

剥がれのデジタル変換距離を 0.1mm とすると,

$$Ln \text{ 点の仕事量は } (F_{(Ln)} \times 0.1 / 1000)$$

となる。

この場合には $k=1/1000$ となる。

加熱温度毎の “EXCEL” ファイルのデータの剥離開始点から破れの発生点 (降伏点) 又は所定の剥がれ距離 (例えば; 5, 7.5, 10mm) までの全引張データの (総計) $\times$ (演算巾) の仕事量; 剥離エネルギーを計算した。

4. 実験結果及び考察

4.1 引張試験パターン

実験の引張試験パターンは加熱温度毎に得られる。代表例として, Peel seal; 100, 105, 124℃ と Tear seal; 125, 135℃ の引張試験パターンを Fig. 6 に示した。

Peel seal ゾーンの加熱サンプルでは, ヒートシール強さは立ち上がり後, 剥がれ範囲で加熱温度に応じたほぼ一定の強さを維持している。他方 Tear seal は破れの発生と共にヒートシール強さは下降している。引張試験パターンの立ち上がりが垂直にならないのは, 加熱線 (ヒートシール線) は直線であるが非加熱面も加熱ブロックの輻射熱と被加熱体からの伝熱で弱い溶着が発生しているためである。Fig. 6 には検証した剥がれ距離の積分範囲 (剥離エネルギーの計測範囲) 5, 7.5, 10mm と破断点の縦線を付記した。この縦線と引張試験パターンの交点までが剥離エネルギーの演算範囲となる。

4.2 破断エネルギー, 剥離エネルギーの測定結果

全ての加熱温度の引張試験パターンの剥離エネルギーと破断エネルギーの演算処理結果を縦軸に仕事量 (J/15mm), 横軸を加熱温度 (溶着面温度) ベースで集計した結果を Fig. 7 に示した。併せて従来の評価法である JIS 法¹⁾ のヒートシール強さを参考に付記した。

4.3 剥離エネルギーの機能の考察

Fig. 7 の結果から破断/剥離エネルギー解析から本実験の包装材料では 125℃ 付近に Peel seal と Tear seal の境界温度があることが分かる。剥がれ巾が 5mm の場合には, 剥離エネルギーは何れの温度帯でも破断エネルギーより小さいので, ヒートシールフィンを利用した熱溶着の性能改善には不適である。フィン幅が 5mm 以下のケースはイン

Fig. 7 The enforcement example of the peel energy method

Fig. 8 The tensile test method for the peel and tear energy measurement

パルスシールのような細線状のヒートシール方式の採用の場合に該当する。

剥がれ巾が7.5mm以上になると、105~124℃の広い温度帯で Peel seal の剥離エネルギーが Tear seal の破断エネルギーより大きくなり、剥離エネルギー論の有用性を見出すことができる。従来の JIS 法のヒートシール強さの評価法ではヒートシール強さの立ち上がり後の熱溶着の状態が識別できないので剥離エネルギーでの議論が困難であることが分かった。

従来のヒートシールの管理法では、熱溶着は大きなヒートシール強さの達成が至上命題であったが、剥離エネルギー論の適用で適正なヒートシール強さ制御の議論ができるようになった。

Photo. 2 The "tuck" seen to commercial goods

Fig. 9 Increase of the stress line by advance of exfoliation

4.4 剥離エネルギー論の実際への適用効果の考察

プラスチックを利用した包装袋（パウチ）はシート状の材料を熱溶着によって袋状にしている。平面状の袋に製品を充填して立体状にするので、パウチには原理的に必ず“タック”が発生する。（Photo. 2 参照）破袋やピンホールの発生は“タック”の頂点とヒートシール線の交点が起点になって発生する。実際には、実験室の引張試験のように15mm巾のヒートシール線に応力が均一にかかることはなく点状に応力がかかる。例として、30N/15mmのヒートシール強さを持つ材料の場合で、応力点の大きさを1mmφとすると $30\text{N}/15\text{mm} = 2\text{N}/\text{mm}^*$ となり、わずかな応力でもピンホールや剥がれが起ることになる。

実際は Fig. 9 に示したように円弧状の剥がれが発生する。剥がれ巾をLとすれば、剥がれラインは $(\pi \cdot L)$ となる。又、剥がれ面積は $(\pi \cdot L^2)$ になる。15mm巾の試験結果と比較すると、Lが5mmより大きくなると実験結果に余裕が出てくる。別の解釈として、ヒートシールのフィン巾が5mm以上にとれば Peel seal の適用で受圧応力線の長さが剥がれ巾の π 倍になる。外力が一定ならば受圧応力線が拡大するので、単位長さ当たりの受圧応力は減少するので、剥がれ強さとバランスして剥離の進行を自己制御する特長を利用できる。

4.5 剥離エネルギー論の適用効果の確認

実験に使用した同一の材料で10×10cmサイズの4方（辺）シールの袋を作成し、これに水を充填して、JIS法¹⁾

	Peel seal [120℃]	Tear seal [130℃]
Situation of load
	Peel (7mm retreat)	Destruction
Load of destruction	189N	113N

Fig. 10 Verification example of the application effect of peel energy

で荷重試験を行った。結果を Fig. 10 に示した。

130℃で熱溶着した Tear seal 袋では 113N の荷重で破袋した。他方、120℃の Peel seal 袋では 189N の荷重で、剥がれ巾は最大 7mm であった。剥がれ線は円弧状であった。この検証から熱溶着における剥離エネルギー論の破袋防御の有効性が確認できた⁶⁾。

5. 結 論

- (1) 剥離エネルギー論の実用的な有用性が確認できた。
- (2) 熱溶着（ヒートシール）における Peel seal 溶着の有用性の検証できた。
- (3) 従来の評価法では包装材料の適正溶着の評価が困難であることが分かった。
- (4) 本研究の展開で破れ破片の発生しにくい Peel seal の積極的な適用が可能になる。
- (5) ヒートシールのフィン巾の適正設計ができるようになる。
- (6) Peel seal の適用で高信頼な熱溶着（ヒートシール）

が可能となり、ヒートシーラントの厚さの増加が不要になるので、包装材料の廉価化が図れる。

6. 謝 辞

本研究の実験に協力戴いた味の素冷凍食品株式会社の角田 光弘氏，プラスチックの溶融特性についてご指導を戴いた小山コンサルティング事務所所長小山 武夫氏，研究のご指導を戴いた東京大学大学院農学生命科学研究室小野 拡邦教授に紙面より感謝いたします。

引 用 文 献

1) JIS : Z 0238 (1998)
2) ASTM Designation: F88-00 (2000)
3) (社) 日本包装技術協会, 「包装技術便覧」, p. 981, p. 1394 (1995)
4) 菱沼 一夫, 第 13 回日本包装学会年次大会要旨集, p. 92-, (2004)
5) 菱沼 一夫, 「日本包装学会誌」, 14(2) 119 (2005)
6) U. S. Patent No. US 6,952,959 B2, Method of Designing a Heat Seal Width, October 11, 2005

<Technical Report>

The Proposal of the Evaluation and Measurement Method of Peeling Energy of the Heat Sealing on the Basis of Melting Surface

Kazuo HISHINUMA *

*HISHINUMA CONSULTING ENGINEER OFFICE
1232 Ogura Saiwai-ward Kawasaki-city Japan 212-0054
(Accepted for publication : December 26, 2005)

Abstract

It is used by the heat sealing for the adhesion of plastic film and sheet. Peeling seal and breaking seal manifest the adhesion condition by the heating temperature. In present state, clear strength evaluation method of these heats sealing plane has not been presented. In this study, strength evaluation method based on peeling energy was proposed, and the effectiveness was confirmed.

(Received : August 23, 2005)