

総説

最近のヒートシール技法の改革情報 — “一条シール”の発明がもたらした経験則からの脱皮 —

菱 沼 一 夫*

Recent Information on Heat Sealing Technique Reform — Molting from the Rule of Thumb of the Invention of "Filigree Seal" —

Kazuo HISHINUMA*

キーワード：ヒートシール、“一条シール”、密封と易開封、包材の剛性、溶着面温度応答、“MTMS”、

Keywords : Heat sealing, Filigree Seal, Closing, Easy opening, Response of Melting Surface Temperature, “MTMS”

1. はじめに

ヒートシールはプラスチック材の熱可塑性を利用して、簡単な圧着加熱で容易に材料面の接着ができる特徴がある。包装用のプラスチック開発と連動してヒートシール技法は進展し、その歴史は既に半世紀を超えている。歴史上の古典的な誤認が今日も支配していて新規なニーズや技術展開の妨げになっている。

今やプラスチックの包装材への利用は、圧倒的な市場展開が図られ、日本では約10個／日・人（約10億個／日）が包装製品に展開されていると推定される。

エンドユーザー（商品製造社、消費者）の今日的な期待は、当初の単なる機械的な溶着から、接着面の破袋耐性の向上、ノッチ方式に依らない易開封性の達成等の新たな機能展開の期待が更に高まっている。

合理性の不明確な従来の「温度」、「時間」、「圧力」をパラメータにしたヒートシール管理の今日の状況を計測・制御工学的に診ると《閉鎖的論理》に陥って、破綻し始めている。

『ヒートシールの Validation』¹⁾ がアメリカの学際から再び提起され、抜本的

* 菱沼技術士事務所（〒212-0054 川崎市幸区小倉 5-6-21）
HISHINUMA CONSULTING ENGINEER OFFICE, 5-6-21 Ogura Saiwai-Ward Kawasaki-City JAPAN
Email: rxp10620@nifty.com

な改革が求め始められている。日本においても速やかな改善対応が必要であろう。

ヒートシール技法の今日的なターゲットは「密封」と「易開封」の両立である。

2)

これを達成した“一条シール”^{® 3-10)}の技術展開は、従来の誤認を克服し、新理論の統合化が図れた。この技法を支えた新知見を基に従来のヒートシール技法の問題点を筆者のノウハウの全面開示をすると共に総説する。

紙面の都合で詳細説明を割愛した個所の論拠は提示した引用文献の参照を期待する。

2. “一条シール”[®]の開発がヒートシール技法の革新を実証した

2.1 ヒートシール面の「密封」と「易開封」はヒートシール技法の究極の課題

「密封」と「易開封」は包装の重要な基本機能である。プラスチック材の熱接着面の評価に際して、ASTM F88—[4.1]は「接着強さ」だけではなく「剥がれ強さ」の評価を同時に求めている。²⁾

今日、定量的に *Validation* されたヒートシール面を利用した「易開封」方式は提示されておらず、ノッチ方式やイージーカット方式が「易開封」の主流となっている。

これらの方式は消費者の要求を満足できず、いつも非バリアフリーの筆頭に挙げられている。この課題の発生には、「密

封」には「強い接着」が不可欠の“常識”が原因になっている。そして、低温作動化と分厚いシーラントの採用が支配し、凝集接着偏重への誘導となっている。

筆者は「探傷液法」の微細部位の漏れ検知能力^{11,12)}を利用して、0.1～0.2 N/15 mm帯の接着特性を検証し、加熱によるラミネーション表層材の剛性軟化を利用した密封性のメカニズムを検討した。その結果、従来の“常識”を覆し、微弱ヒートシール強さ帯での密封を見いだすことができた。この知見をベースに統合的な検討を重ねて、ヒートシール面の「密封」と「易開封」を複合的に達成する“一条シール”の開発に成功した。新技法の開発は、従来のヒートシール技法の革新そのものであり、ヒートシール現象の新規解釈と数々の誤認を見出した。以下に“一条シール”の発明で見出された詳細を先ず記す。

2.2 “一条シール”の開発で発見された新規の論理と技術事項

ヒートシール技法のヒートシール面において「密封」と「易開封」を同時に達成することは古典的な理論と論理では“困難”とされてきた。筆者は剥がれシールの機能性に着目し、ヒートシール技法を構成する個別操作の合理性を永年追求してきた。

“一条シール”の完成に寄与した合理化事項は、真にヒートシール技法の革新であった。

本論の詳細記述に先出しし、これらの項目と革新事項を先ず紹介する。革新事項とそのまとめの16項目を表1に示す。

“一条シール”の開発に展開された新論理、新技術と従来（古典的な）論理／技術の比較検討を次に記す。

表1「密封」と「易開封」を複合的に可能にした“一条シール”の開発に関与した論理の改革要素

適用項目		内容	関連説明項目
1	「密封」と「易開封」は独立メカニズム現象である新規に確認	・一条突起の局部圧着による「密封」の完成 ・弾性面圧着による剥がれシールの実施	* 2.1, 2.2, 7.2
2	「探傷液法」の活用による新規な漏れ試験法を確立	・段差部等の微細部分の漏れ箇所、漏れ量の検出能力の定量化。	7.3
3	剥がれシール帯でも密着が成り立っていた	・平面接着の 0.5~1.0 N/15mm の低ヒートシール強さ帯でも「密封」を確認	* 7.4
4	「密封性」にラミネーション表層材の剛性の影響を発見	・ヒートシール面の密着に材料の剛性が大きく影響しているのを発見。（「探傷液法」の適用）	7.4
5	ヒートシール強さ定義の見直し	・界面接着剥離、層間剥離（デラミ）、凝集破壊、材料の伸び、それぞれの特性と相互関係を識別して目的に応じた適用の確立	5.
6	OPP ラミネーション材における易開封シーラントの適用条件の新設計法の開発	・OPP 材の高剛性が Hot Tack の原因を究明、軟化温度帯で易開封機能のある材料の選択法の開発（シーラントの作動温度の高温化）	* 7.4
7	加熱温度の定義を溶着面温度応答に変更。	・材料の熱特性に合わせた加熱制御を接着面温度（溶着面温度）に変更	* 5.3.1
8	材料が接触する加熱体の表面温度の常時（On-Line）計測	材料に接触する加熱面温度が溶着面温度応答のパラメータとなる。この On-Line 計測法を適用。（加熱体表面温度の外乱削除）	* 5.3.1
9	加熱体の表面温度を利用した On-line 溶着面温度応答のシミュレーション	・常時の溶着面温度応答の監視によって、（≒2℃の）溶着面温度応答の推定制御を可能。	* 5.3.1
10	ヒートパイプ利用による加熱体の表面温度の均一化	・加熱面温度の高速均一化。発熱温度の加熱体表面温度への移行。	5.6
11	平衡温度の（CUT: 95 % 応答時間）の利用	過加熱を 3℃以内に自己制御できるようになった。カバー材設置の誤認排除	5.5
12	FHSS（機能性ヒートシール強さ）の導入	・過加熱によるエッジ切れ防御法の適用 ・引張試験の剥がれシール寸法（≒50 %）で最適加熱条件を見出す方法。製袋時温度配慮。	6.
13	熱接着面の剥離エネルギーの利用	・破袋防御を剥離エネルギーの理論で確立。最適加熱条件を保障、FHSS の基幹理論	* 6.1
14	易開封方法の新論理の構築	・包装製品の開封力の力学解析による最小開封力とヒートシール強さの関係を構築	* 8.
15	ヒートシールの Validation に接近	・「加熱温度」、「密封」と「易開封」の Validation は完成	* 4.
16	「加熱速さ」の変移が発現するか否かの識別	・ヒートシール強さのバラツキへ要因の把握 カバー材撤去の論理構築	7.1
*: 特許取得済み			

3. 現行の公的規格の課題

3.1 ヒートシール技法の公的規格とその問題点

世界中に標準的に普及しているヒートシール規格は1968年に制定された《ASTM F88-》が基幹規格として君臨している。

これに付随して《JIS Z0238》が1981年制定されている。両規格は《ヒートシール強さ》の評価のみに特化していて、ヒートシール技法の基幹パラメータである加熱温度に関する規定は一切ない。

2000年になって加熱温度に関する《ASTM F2029》がやっと制定されている。

加熱温度の取り扱いを上げた《ASTM F2029: 7.3》では《5℃》ステップより、狭い計測結果の比較を避けている。加熱温度に対する規定が最近まで制定されなかったところに、ヒートシール技法において《加熱温度》の汎用的な取り扱いに関し多くの課題が未解決であると言える。JISを始め加熱温度に関する規格は未だにない。ISOには、未だにヒートシール技法の規格がない。アメリカにお

いて《ヒートシールの Validation》がやっと取り上げられたが、今日世界的に見てもヒートシールの加熱温度を保障した包装機は見られないし、供給者はノルマとっていないようだ。

3.2 既存の公的規格の特徴比較

《ASTM F88,F2029》と《JIS Z 0238》の共通的な事項の比較を表2にまとめた。

基幹事項の《ヒートシール強さ》の計測方法に相違があるので、測定結果の Validation にも相違がある。

筆者が提唱している“MTMS”^{13,14,15)}を参照するとその特徴（欠陥）がより明確になる。

この基本的相違は規格を適用する各国のヒートシール文化の相違として、今日に大きな影響を及ぼしている。

3.3 公的規格にみるヒートシールを評価する諸試験項目

《ASTM F2029》が加熱体の調節温度を元に[加熱方法]、《ASTM F88—》、

表2 ヒートシールの公的規格の仕様（ヒートシール強さ、加熱温度）の定義比較

	ヒートシール強さの計測法				加熱温度の規定	計測結果の Validation
	標本幅 (mm)	標本長さ (mm)	計測方法	引張速さ (mm/min.)		
ASTM F88	10～25	76×2	平均値	200～300	なし	計測結果を Validation せず
JIS Z 0238	15	100 以上	最大値	300±20	なし	適格でないが 規定性強い
ASTM F2029	ASTM F88 に準拠				加熱体 温度	計測結果を Validation せず
“MTMS”	< 15	25～35	目的によりパターンから抽出	50 付近	溶着面 温度	計測結果を Validation する

表 3 現行法（古典法）の課題

- ・試験の管理／評価に熱接着時の温度パラメータがない
- ・使用材料の接着の基本性能の試験法がないので測定値の適正性の評価ができない
- ・「より強い接着強さ」を評価する方法なので、加熱が過剰になりやすい
- ・エッジで破断する接着状態を“良好”としている
- ・剥がれシール（界面接着）を評価の対象外にしている
- ・しかし、矛盾するヒートシール幅（フィン）を要求している。
- ・凝集接着を誘導し、過加熱をもたらしている
- ・凝集接着のヒートシール強さは材料の伸び力であることを明示していない
- ・ヒートシールの信頼性の最大の阻害原因であるエッジ切れやピンホールが発生原因に関与していない
- ・各試験結果の相互関係が明記されていない
- ・関連して発生する“不具合”の原因確認ができない
- ・易開封性に関する規定がない。
- ・《JIS Z 0238》の【参考】の取り扱いに業界内でかなりの混乱がある

《JIS Z 0238》は[引張試験]、[破裂試験]、[落下試験]、[漏れ試験]を標準的に規定してきた。

包装現場のヒートシールの問題点を摘出すると表 3 のように不具合を「標準化」して、列挙ができる。¹⁶⁾ 現状は規定と実際の課題との連携が薄く、規定の現場対処性に多くの課題が潜在している。

3.4 基幹の公的規格がカバーしていない“不具合”項目

今日、ヒートシールの課題は①加熱温度、②応答時間（加熱応答）、③「加熱速さ」、④「圧着圧」、⑤「加熱体の表面細工」、⑥「漏れ検査」、⑦「包装材料の仕様」、⑧「引張試験方法」、⑨「ヒートシ

ール強さ」（順不同）の 9 項目群を複合して評価する必要がある。

しかし、現行の公的規格の総合的評価／解析能力は不十分であり、表 4 のまとめのような課題が鬱積している。

4. 《ヒートシールの Validation》の期待（定義）

PACKEXPO2016 において、ヒートシール関連機械の出展社はこぞって『ヒートシールの Validation』を課題として取り上げていた。2002 年の問題提起が再来している。この課題の提起は FDA が主導していると考えられる。

筆者は『ヒートシールの Validation』の具体的な展開として、次の課題を設定し

表 4 古典規定の支配している現状のヒートシール技法の課題

- ◆ヒートシール条件の「圧力」、「時間」は何であるか？
- ◆運転速度はどのような根拠で決めているか？
- ◇生産量の都合で運転速度を決めていないか？
- “波型”シール(線シール)はどんな機能を期待しているか？
- ◇ピールシール設計は巧く機能しているか？
- ◇ヒートシール強さの管理で安心できるか？
- どうしてテフロンシートを使うのか？
- ◆どうして片側加熱を使うのか？
- ◆ヒートシール巾(フィン)の寸法はどのように決定しているか？
- ◇破袋が発生したらどのような対応をしているか？
- ◆2層, 4層の同時シールをどのように管理しているか？
- ◆クッションにシリコンゴムを使ってどんな効果を期待しているか？
- ◇剥れシール(Peel Seal)と破れシール(Tear Seal)はどのように識別しているか？
- ◇剥れシール(Peel Seal)と破れシール(Tear Seal)の使い分けができるか？
- 又どのように制御しているか？
- ◆レトルト包装のヒートシールのHACCP達成方法は？
- ◇ヒートシールの「品質保証」を求められたら定量的な保証範囲を提示できるか？
- ◇ヒートシールの改善のため(?)包装材料の過剰設計の抑制をしているか？
- ◆噛み込みシールをどのように処理しているか？
- ◆インパルスシールの条件設定はどのように決めているか？
- ◆インダクションシールの励磁条件はどのように決めているか？
- ◇ヒートシール検査機がどうして欲しいのか？
- ◆溶着面の白濁, 発泡をどのように処理しているか？
- ヒートシーラント(接着層)の厚さはどのようにして決めているか？
- ◇ラミネーション強さはどのように定義しているか？
- その強さは何に機能しているか？
- ◆:基本認識の問題、◇操作上の問題、■論拠不明確

している。

動対応しているかどうかに懸る。¹⁷⁾

(1) Tamper resistance の確立 [Defense

から Protect]

(2) ヒートシール面の「密封」と「易開封」の保証、

(3) (1)、(2) を確実に達成するための合理的な加熱方法の確立 (高精度な溶着面温度応答の管理技術の確立)

ヒートシール技法の近代化は、9 項目群の各操作要素が Validation の要求に連

5. プラスチックの熱接着に関与している諸要素の合理性の検討／検証

プラスチックフィルム of ヒートシール操作において、基幹となる制御対象は《熱接着強さ》と《加熱温度》である。

5.1 熱接着強さ(ヒートシール強さ)の定義と合理性の検討

5.1.1 公的規格によるヒートシール試験標

本の作り方

熱接着強さ（ヒートシール強さ）はプラスチック材の熱可塑性によって発現する。

単一フィルムの場合、溶着面温度の上昇と共に合わせ面の界面接着力は上昇して、熔融状態になると凝集接着となり、接着面は一体化してモールド状となり接着面はなくなる。

ヒートシール強さは加熱方法：《ASTM F2029》と《ASTM F88》が統合している。二つの規定を主体に、その試験法を要約すると次のようになる。

《ヒートジョー方式》で次の条件を設定して作成し特性を計測する

①両面の加熱体調節温度を同一温度にする。（ASTM F2029：7.2.3.1）

加熱体の表面温度管理の必要性は論じているが、具体法の提示はない

②0.1～0.4 MPa の圧着圧環境下で実施（ASTM F2029：7.2.3.2）

③加熱体の調節温度値をパラメータにした加熱標本の作製

《ASTM F2029：7.3》では 5～10℃のインターバルの選択を規定

④引張試験のグリップ距離を 150 mm 以上とする

⑤加熱後の標本を 10～25 mm 幅に切断する（JIS Z 0238 は 15 mm）

（筆者註：加熱時の標本の幅は設定幅の約 3 倍が好ましい）

⑥ 300 mm/min で引張試験をする

（筆者註：引張速さはヒートシール強さに関係しないから剥離状態の容易な観察のために 50-100 mm/min を推奨）

⑦引張試験の出力をアナログ記録して、引張りパターンから目的に沿ったその強さを計測する。

・《ASTM F88》では強さが計測パターン中の 80% 以上の平均値を計測値とする、

・《JIS Z 0238》ではデータパターン中の最大値を選択

⑧各加熱温度の測定で得られたデータ群の加熱温度を横軸に取り、プロットしてグラフ化したものをヒートシール特性としている。

⑨「ヒートシール強さ」は一定の幅の（平均）引張強さのスカラー量を計測している。

強さの比較で接着性能（耐破袋性：破袋エネルギー）を議論する間違いを犯している。

この結果、“強い接着”（凝集接着偏重）が推奨される悪習慣に至っている。

5.1.2 現行方法で採取された「ヒートシール特性」の非汎用性の検証

「加熱速さ」による変移現象を加味した測定例をモデル化したものを図 1 に示したが、引張試験の測定結果は次の理由によって汎用化できない。

（1）データの抽出方法が合理的ではない（平均値、最大値の選択）

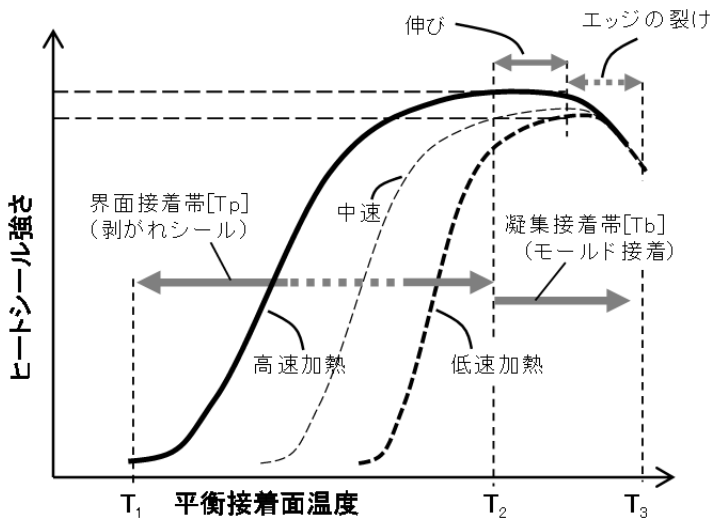


図1 モデル化したヒートシール強さ特性

(2) 100 mm 以上のグリップ間長さはヒートシールエッジに垂直な引張荷重を掛けることを意図しているから標本の幅(10~25 mm)の平均値測定になる。

(3) 標本幅の 10~25 mm の設定は、広い接着面の剥がれ荷重の平均化を意図している。(“ポリ玉”の検知は困難)

(4) 100 mm 以上の長い標本の選択で、伸び特性に引張強さが平均化されて伸び特性に埋没してしまう。¹⁸⁾

(5) 以上の試験はヒートシールエッジに均一な荷重を掛け、材料固有の熱接着特性を平均値化した試験法であり、ヒートシール製品の密封や破袋耐性の *Validation* に適しているとは言い難い。

(6) カバー材の任意選択の適用で「加熱速さ」が変動し、ヒートシール強さの発現変移の影響がヒートシール強さに影響

する。^{19,20)} 同一温度加熱でもヒートシール強さの相違が発生する。[これは、長年、関係者の間で、(カバー材の相違で)同じヒートシール強さの取得ができない悩みの原因である]

(7) (6) が原因で同一材料でも厚さが変わると接着強さが変わる。

(8) (接着強さ) > (材料の伸び強さ) の領域では(引張強さ)は材料の(伸び強さ)を示す。

(9) (7) と (8) が原因で同一材料でも厚さが変わると接着強さが変わる。

(10) ≪5℃≫インターバル内で起こる変曲特性は検知できない。あるいは異なったパターンを得ることになる。

実際の仕上がったグラフは≪5℃≫ステップの折れ線グラフになる

(11) 複合フィルムではシーラントと表

層材のラミネーション強さが関与してくる。

(接着強さ)>(ラミネーション強さ)のとなる領域では(引張試験強さ)はラミネーション強さを示す。

熱接着強さ(ヒートシール強さ)は“無限個”ある。一つの材料に一つの“ヒートシール強さ”を《JIS Z 0238》は最大値に定義し、関係者は従順しているが、これは凝集接着偏重を誘導して、ヒートシール技法の合理性を著しく混乱させてきている。

5.2 複合フィルムが示すヒートシール特性の特徴と活用

上記にヒートシール強さの測定結果の汎用性の欠陥を記したが、シーラントの設計上の特性も大きく関係する。

ラミネーション材の場合はヒートシール強さとして計測されたものに次の要素が含まれている。引張試験から得られた結果を単純にヒートシール強さとして評価すると材料の設計仕様の本質的な機能を見失うことになる。

(1) シーラントの接着面の剥離：

①シーラントの界面剥離強さ、②剥がれシール強さ

(2) シーラントのエッジ切れ強さ：

①シーラントは凝集接着状態、②材料の破断強さ、③シーラント伸びが僅少な場合は破断 ④シーラントの伸びが大、かつ、ラミネーション強さが小

さいとデラミが起る。

⑤ヒートシールの試験標本の側面から裂断を起こす。

(3) シーラントと表層基材の層間剥離を起こす：①伸びやすいシーラントの選択、②弱いラミネーション強さ、③容易なエッジ切れ、④この現象を巧みに応用した材料設計が「層間剥離」シーラントである

(4) シーラントの凝集破壊：

①(層間接着力) $\geq$ (界面接着力) > (シーラントの凝集破壊力) がなされると引張試験によってシーラントは凝集破壊を起こし剥離する ②この特性を巧みに利用するとヒートシール面の「易開封」を実行できる。

“一条シール”ではこの特性材料を適用して、「密封」シール下で「易開封」を複合的に達成している。

5.3 現状の加熱温度の定義と合理化の検証

ヒートシールの *Validation* の技術上の基幹は加熱温度の制御である。加熱温度の定義の代表規定は《ASTM F2029》が支配して、加熱体の温度調節設定値が指定されているが、合理的ではない。

表 5に現行の様々な加熱温度の定義と適用圧着圧帯を併記してまとめた。共通的には加熱体の温度調節設定を定義している。筆者は微細センサを接着面の直接挿入して実際の「溶着面温度：“MTMS”」

の計測を提唱している。²¹⁾

実態の改善課題ニーズを表 6 に整頓した。

“MTMS”を参照すると従来法の温度ステップの粗さが明らかになり、従来法の定義がヒートシール理論の構築／解析／検証に問題があったことが分る。結果として上限開放型の加熱方式が標準化して、凝集接着偏重の古典的な技法の確立になってしまった。

5.3.1 加熱体表面温度を利用した溶着面温度応答のシミュレーション法の確立

ヒートジョー方式の加熱メカニズム構成図を図 2(a)に示した。発熱源のヒータから材料の接着面への熱伝導プロセスを電気回路に相似すると図 2(b)のようになる。²²⁾

材料の熱接着面（溶着面）の温度応答に直接関係する発熱部位は材料と直接接

体表面温度と溶着面温度応答の計測データを正確に取得すれば加熱体表面温度のパラメータにした溶着面温度応答のシミュレーションができる。^{16,23)}

5.3.2 加熱体表面温度の“外乱”制御による溶着面温度応答の Validation

発熱源のヒータから加熱体の表面への温度伝達はいくつかの要素を通過する。加熱体の表面温度には表 7 に示したような加熱体の形状、構造物、表面からの伝熱、放熱等の“外乱”によって動的な変動が起こる。最善な努力をしても計測・制御工学上で証明される 4～6℃の変動がある。調節温度値で適格な加熱温度の制御ができないことの理論上の不具合が理解できよう。《ASTM F2029》が 5℃以内のインターバル避けている論拠はここにあると思われる。では手っ取り早く加熱体表面温度を調節検知点に採用すればよい

表 5 ヒートシールの加熱温度のさまざまな定義

	加熱温度精度 (°C)	インターバル (°C)	加熱時間 (s)	適用圧力 (MPa)
ASTM F2029	加熱体の温度調節 精度: ±1°C	5~10	(1)平衡時間: 1-10 (2)トランジェント: ~25 μm: 0.5 25~64 μm: 1.0	0.138~0.413 (20-60psi)
ISO 17557	加熱体温度: 規定なし	5 《間は内挿 で求める》	平衡時間: 2	0.2
メーカーの カタログ	加熱体温度 (不明: 社内規定が 多い)	5	平衡時間: 0.5, 1.0, 3.0 ...	0.1~0.4
“MTMS” 法	溶着面温度: ±0.1°C	0.2~2	(1)設定溶着面温度の - 0.1°Cの到達時間 (2)加熱途中は 直接計測で定量	0.1~0.25

表 6 加熱温度の定義と特徴の比較

方法	説明	特徴
加熱体温度 (静的温度)	加熱体の温度調節 設定値が管理指標	1) ASTM F2029が採用 2) 調節用センサの設置場所で加熱体の 温度調節結果が異なる 3) 加熱の平衡時間の把握ができない 4) 加熱体温度で定義されたヒートシール 強さデータの横断性が乏しい
加熱体 表面温度 (静的温度)	加熱体と加熱材料 の接触面温度	1) 表面温度の検出に配慮が必要 2) 加熱温度の定義個所として最適 3) トレーサビリティの取得が容易 4) 表面温度の調節法の確立済み ※1
溶着面温度 (動的温度)	材料の接着面の 温度	1) 材料の接着面の到達温度を微細センサ で直接計測 2) 製造工程に直接適用できない 3) 溶着面温度応答データから <u>加熱速さデータを取得できる</u> 4) 加熱体表面温度との連携で製造製品の 溶着面温度を間接的に制御できる ※2 5) 材料の【Hishinuma効果】の <u>現象把握には不可欠</u>

で高精度の温度調節は計測・制御工学的に見て困難である。(7.1.2 参照)

5.4 加熱体表面温度のモニタ／制御で溶着面温度応答のシミュレーションができる

加熱体表面温度のモニタによって加熱体表面温度を一定になるように温度調節操作の補完をすれば、運転中の加熱体表面温度の“外乱”を取り消すことになる。

24、25)

加熱体の表面温度は溶着面温度応答のパラメータとなるので、高精度のモニタ／制御によって、運転中の溶着面温度応答

を直接計測しなくとも、予めラボで得た「加熱体表面温度」と「溶着面温度応答」のシミュレーションデータが利用できる。
16、23)

そしてこの方策によって、間接的に溶着面温度応答を *Validation* できる。(7.1.2 参照)

5.5 加熱温度と加熱時間の融合解釈

古典的なヒートシール理論では「温度」、「時間」、「圧力」はヒートシール強さの発現の独立パラメータとして定義する間

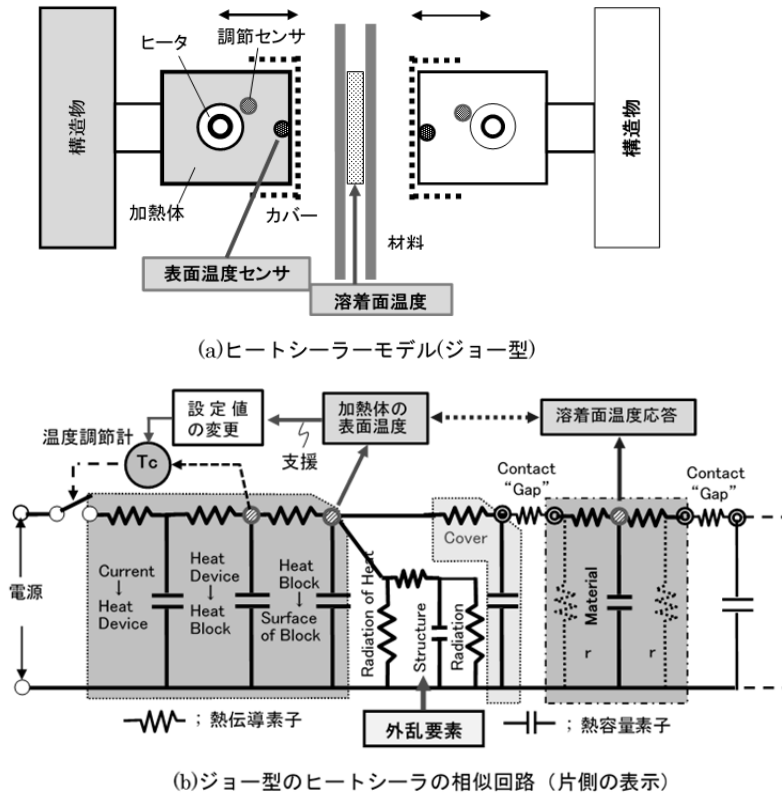


図 2 ヒートジョー方式のモデル化：“MTMS”の構成

違いを犯している。

加熱温度の実際は「加熱温度応答」として温度と時間が融合した動的なモノである。応答カーブを支配するのは包装材料の熱伝導性と熱容量である。加熱温度と溶着面温度応答は次の 3 種のパターン群を観ることができる。そのモデルパターンを図 3 に示した。

① 同一材料（厚さ）で加熱温度を変更した場合の溶着面温度応答、(a)

② 加熱時間を変更した場合の溶着面温度応答 (b)

③ 材料厚さを変更した場合の同一加熱

温度の溶着面温度応答（「加熱速さ」の変更） (c)

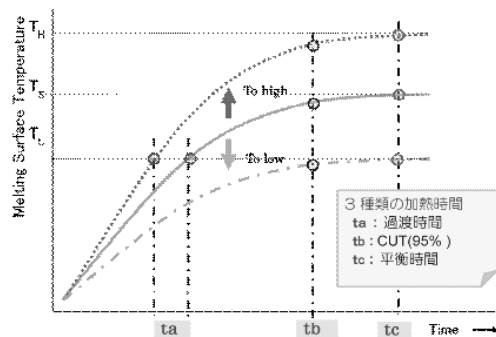
5.5.1 加熱温度と加熱時間の相互関係[平衡温度と CUT の設定]

この応答に 3 種の時間点を次のように定義する。

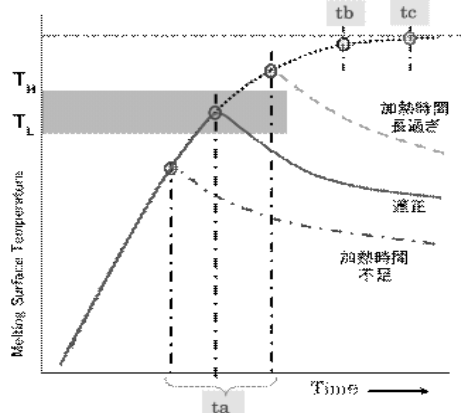
ta : 立ち上がり応答中の過渡時間

tb : 平衡温度の 95% 応答の CUT (Come Up Time)

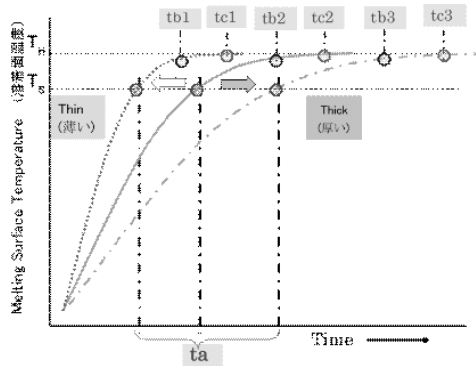
tc : 平衡温度；加熱体表面温度漸近する到達温度



(a) 同一包装材料で、加熱温度を変更した時の溶着面温度応答の変化



(b) 加熱時間を変更した時の溶着面温度応答の中止点応答



(c) 同一温度で、包装材料の厚さを変更した時の溶着面温度応答

図3 モデル化した溶着面温度応答における加熱時間の定義

表7加熱体表面温度のバラツキ原因の検証

加熱体表面温度を構成する各要素のバラツキを小さく見積もっても次のようになる

- ①調節計の指示と調節精度；1℃（メーカーカタログより）
- ②熱電対センサの精度；1.5℃（JIS規格より）
- ③温度調節センサの設置場所による検出バラツキ；2~4℃，
- ④温度調節点と加熱体表面温度の相違の発生；3~5℃，
- ⑤室温変動による冷接点補償；1~2℃

これら要素を元に加熱体表面温度の統合バラツキを計算すると次式で表される。

$$T_x = \sqrt{1^2 + 1.5^2 + (2 \sim 4)^2 + (3 \sim 5)^2 + (1 \sim 2)^2} \approx 4.2 \sim 6.9 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

ヒートバーの計測／調節方法では、4℃程度の精度確保が限界であることが分る。①、②は機材の固有的性能で決まる精度であるが、③～⑤は周辺構造物の蓄熱や環境の温度変化の動的原因で、比較的長時間での変動が起こる。従って、③～⑤については固定的(静的)な方策では修正できず、In-line の常時補正が必要である。[図5参照]

5.5.2 加熱温度と加熱時間の選択方法

図2(b)の加熱時間の調節方法では予め取得したシミュレーションデータから加熱終了温度を決める。

図2(a)で $\langle T_L \rangle$ を所望溶着面温度に選ぶと平衡温度加熱時間（CUT）は $\langle t_b \rangle$ である。高温、中温設定では高速化する過渡加熱 $\langle t_a \rangle$ となり、温度上昇の速い時間点になる。

図2(c)では過渡時間加熱を選択すると材料が薄くなると高精度の加熱時間制御が求められる。平衡温度加熱法を選べば回分速度の調整で同一温度加熱ができる特徴を見出せる。

いずれの場合も時間制御の精度の課題が発生する。

更に操作時間は「加熱速さ」に直接関与するので、「加熱速さ」の影響を受けやすい包装材料では、溶着面温度とヒートシール強さの関係が変移するので剥がれシール強さを厳密に調整する場合には留意が必要である。

5.5.3 実際の運転時間と加熱温度と加熱時間(溶着面温度応答)の展開上の課題

ヒートシールにおける加熱時間は自動運転の間欠動作の単位時間から逆算したものを選択設定している向きがある。図4に間欠動作のタイミングモデルパターンを示した。²⁶⁾充填やヒートシールは機械が停止している間に操作する必要がある。この操作時間は回分周期で決まり、その約50%が充てられる。この時間内に

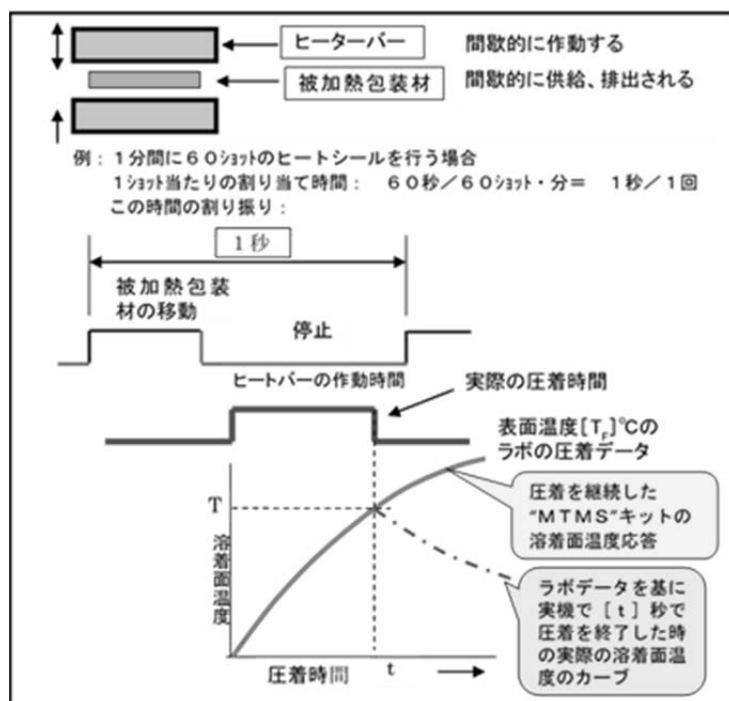


図4 実動をモデル化した間欠動作のタイミングパターン

所定の溶着面温度応答を確保する必要がある。生産性を優先して、高温で高速加熱を適用して、圧着時間を短縮すると材料の表層部の蓄熱による伝熱遅れで数°C～10°C程度のオーバーランが発生し、所望の熱接着強さを得られなかったり、過加熱の原因になっている。(図5参照)

5.5.4 CUT 加熱の有意性？：しかし運転速度が下がる！

ヒートシールの加熱時間は運転の回分操作時間内に所定の温度に到達させようとする論理が常套化している。(図4参照) 図5に過渡温度加熱と平衡温度(CUT)加熱のモデル比較を示した。回分操作時間の制約(t_a)を優先すれば、必然的に

過加熱側の温度設定となる。常套手段がいかに加熱操作によるトラブル発生(“ポリ玉”生成)の危険を含む方策であったことが理解できよう。

CUTに近い加熱時間を選択して、許容時間内に収まるように回分動作時間(運転速度)を設定すれば、5°C以下のズレに自己制御された適格な加熱ができる。

しかし、担当者の懸念は、今までの“常識”から上司は「そんなに遅くすることを容認しない」と言われることを懸念している。心配不要！ 今迄の“常識”には隠し財産がある。[7.]の【Hishinuma 効果】の説明で記述したようにカバー材が「加熱速さ」の主要な制御要素になっている。

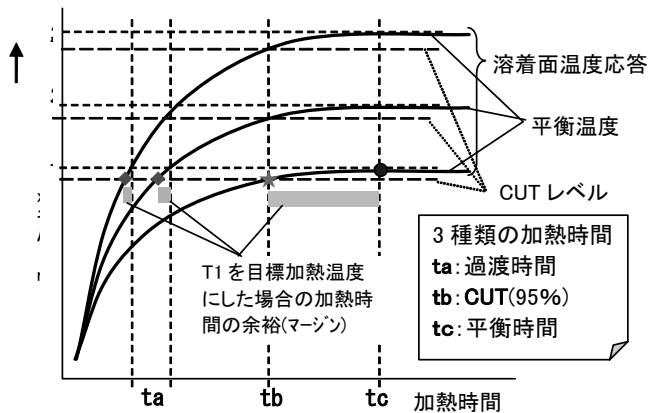


図5 過渡温度加熱とCUT加熱の加熱時間のマージンの比較

平衡温度加熱をすれば熔融状態にならないからカバー材を必要としなくなる。

10 μm の PET をカバーに使うと CUT は 0.13 s である。0.2 mm の Teflon 材料だと 0.56 s である。もしカバー材が使われなければ加熱時間は $\ll 0.13 / 0.56 \div 1/5$ となり、逆に過渡加熱より加熱時間は早くできる。²⁷⁾

もし加熱体の表面の傷着が心配なら天

ぷら鍋と同様に DLC 処理をすればよい。

加熱体の表面温度を管理すれば $\ll$ ヒートシール温度の *Validation* $\gg$ が可能になる。^{24,25)}

5.6 加熱体表面温度の熱力学的温度分布の検証とヒートパイプによる安定化

5.6.1 合理的な加熱体(ヒートバー)の構成

ヒートシール操作における加熱体 (ヒ

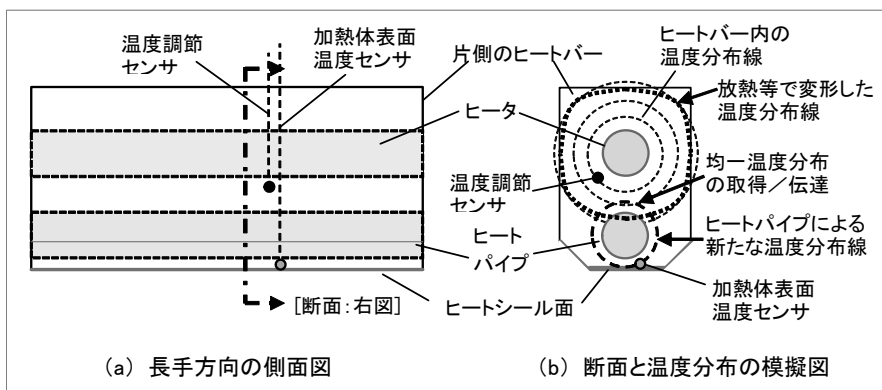


図6 熱接着加熱体の表面温度が一樣にならない原理とヒートパイプの設置の加熱体表面温度の安定化の説明

ートバー)の加熱は円柱形の電気ヒータと四角又は多角形の金属ブロックで構成される。円形の発熱体を円柱の加熱体に装着すれば発熱体の表面温度は均一な分布になる。しかし、少なくともヒートシール操作には平面の圧接部位が要求され円柱から逸脱する。加熱体の表面温度は放熱特性や取り付け構造体への伝熱等で発熱の調節温度と原理的に一致しなくなる。図 6(b)に示したように加熱体の表面温度は歪む。更に装置の機械的な都合で加熱体の構造は変更され、温度分布線の歪みに拍車が掛っている。

5.6.2 調節用センサの取り付け位置の重要な配慮

加熱体の温度調節はヒートバーの発熱温度を検知して、発熱源を On-Off するフィードバック制御が通常的に行われている。適格な温度調節を実施するには加熱体温度の検出方法が重要である。最も好ましい検出点は図 6(b)に示したように発熱源(ヒータ)に近く均一な温度分線を検知しなくてはならない。しかし実際には、外乱の影響の大きいヒートバーの表面にセンサをネジ止めしたり、ヒートバーの端末に取り付けたり、熱容量の大きいセンサが適用される等の間違いが世界的に横行していて、ヒートシールの温度の精度確保の妨げになっている。

5.6.3 ヒートパイプの適用の効果

ヒートパイプを金属ブロック内に密着して配すると、ヒートパイプの周辺温度は高速で均一になる特長がある。この特性を利用して、ヒートパイプをヒータと加熱体表面間に配置すれば、あたかも均一な加熱源を加熱体表面付近に設置したのと同様な効果を持たせることができる。

金属ブロックを一定の大きさより大きくして、加熱体内の均一な温度分布線に接するようにヒートパイプを配置すれば、分布線の温度を加熱体の表面に的確に移行できる。

図 6 はこの構造図を示し、断面の伝熱の均一化について説明した。

ヒートバーは包装袋のヒートシール長さより大きくとる必要がある。長手方向の温度分布は専らヒータの発熱バラツキに依存するからヒートパイプの設置の効果は長手方向の均一化にも大きな効果を示す。ヒートジョー方式の加熱バーにはヒートパイプの設置は不可欠である。

5.6.4 加熱ブロックの容積の大きさの影響

加熱ブロックの容積を大きくすることは、①均一な温度分布線が沢山できる。②on-off 調節のバラツキの平滑化が図れる。③加熱供給容量が増大するので、材料との接触による表面温度の低下変動を小さくできる。

6. FHSS (*Functional Heat Seal Strength*) によるヒートシール技法の統合的 *Validation*

《個別操作の課題と解決／改善策》について述べてきたがこれらを統合することによって初めて確実なヒートシールの *Validation* が達成できる。

6.1 FHSS の計測要素

レトルトパウチのヒートシール HACCP の *Validation* 研究で見出された《FHSS システム》を紹介する。²⁸⁾

この研究は次の要素で構成されている。

- (1) 加熱に溶着面温度を適用
- (2) 加熱面から排出熱量によるヒートシール面に発生する温度分布に着目
- (3) 解析パラメータにヒートシールエッジの垂直線上のヒートシール強さに着目
- (4) 解析パラメータにヒートシールエッジからの剥がれ寸法（破断寸法）を取り入れた
- (5) 剥がれシールの《剥離強さ》を《剥離長さ》で積分して、ヒートシールの相違による剥離エネルギーを取得した。
- (6) 剥離エネルギーの大きさを“破袋特性”と定義した。^{29,30,31)}

この実施事例を図 7 に示した。

6.1.1 FHSS の計測条件

ヒートシール標本は CPP シーラントに熱伝導率が大きいアルミ箔をラミネーションした複合材料である。圧着圧：0.3MPa を共通条件とした。

加熱温度(溶着面温度)は平衡温度の《CUT》を適用して次のように設定した。

- ・ 140℃：接着強さ 23 N/15mm 以下の界

面剥離

- ・ 144℃：接着強さが約 23 N/15mm の界面剥離

- ・ 146℃：引張試験でヒートシール幅の約 50% までが剥がれでその後部分破れを起こす加熱温度

- ・ 150℃：約 3 mm の剥離後破れを起こす加熱温度

- ・ 170℃：シーラントの《 T_m 》の参照温度

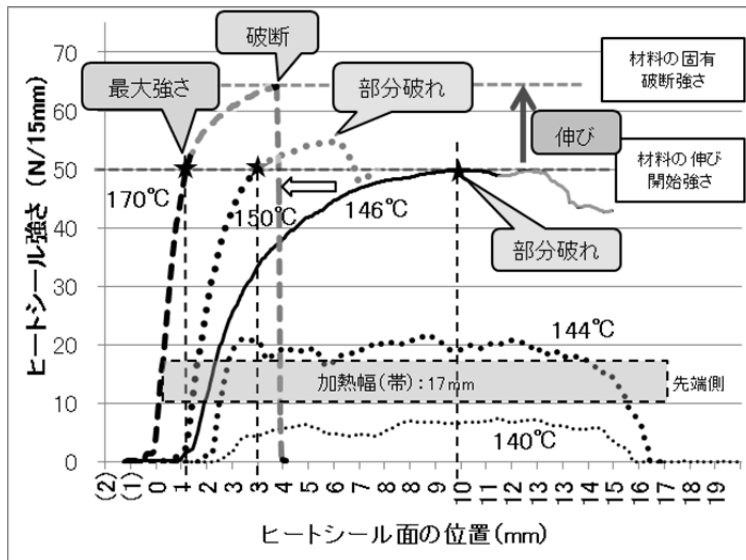
6.1.2 FHSS の引張試験パターン解析から分るヒートシール特性

作製標本の引張試験パターンを内側のヒートシールエッジからの距離をパラメータにしてプロットした結果を図 7(a)に示した。この標本は熱伝導性が高いので、170℃加熱では《ポリ玉》が生成し、ヒートシールエッジより更に内側までが接着している。146℃加熱では約 50% の剥離の後に部分破断が起こっている。146℃付近がこの標本材料の界面接着と凝集接着の境界温度であることが分る。(約 50% 未満は溶着面温度が袋の内側への熱流出によって 146℃以下の低温化していることになる)

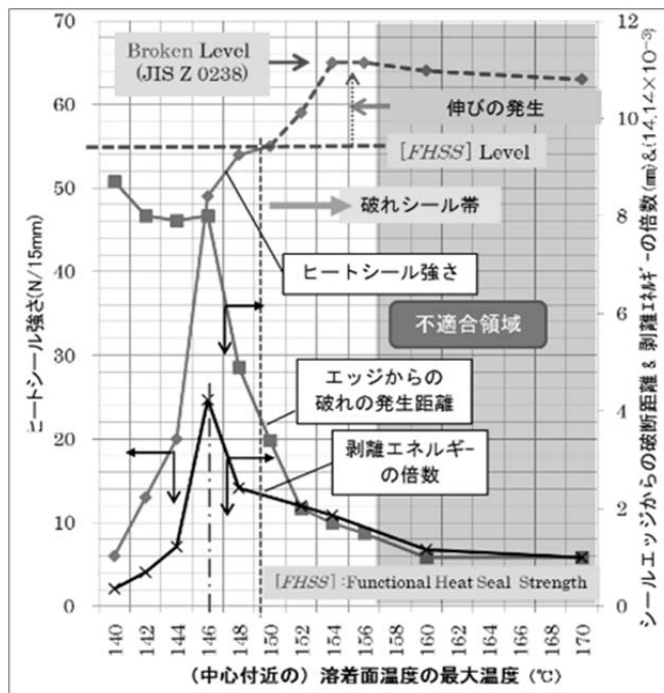
この材料は《50 N/15mm》を超すと引張強さは材料の伸び強さなる。

この強さ以降の引張試験結果は材料の降伏破断強さとなる。

凝集接着では凝集接着線より外側の接着面は破袋防御には何ら機能してなく見せかけである。



(a) 各溶着面温度の剥離パターン



(b) 剥離パターンFHSS 処理結果

図7 FHSS 方式によるヒートシール特性の抜本解析事例

これらの引張試験パターンでの破断到達点までと接着状態が剥がれシール状態の

標本については全剥がれまでの距離を積分対象に選択し、剥がれ面の剥離エネルギー

ギーを計算した。

この積分結果を加熱温度(溶着面温度)をパラメータにしてプロットして剥離エネルギーパターンを図7(b)に示した。この図にはヒートシールエッジからの「剥離開始点」、[統合ヒートシール強さ]を併記したので、FHSS から得られる最適ヒートシール条件との比較ができる。剥離エネルギー特性から得られる《破袋防御性》は 145～152℃に適格範囲が診られる。

6.1.3 FHSS 解析から得られるレトルトパウチの HACCP の最適ヒートシール条件

計測／解析結果の図7から、レトルトパウチ包装における「密封」と「破袋防御」制御は溶着面温度：145～152℃の選択によって、*Validation* が可能であることが分る。

“MTMS”を推奨するが、どこでも容易に実施できる方法は約 20～50%の剥離が起こる加熱条件を設定すれば、HACCP の保障が可能になる。この方法は《23 N/15mm》事後管理規定より遥かに合理性が高い。

ヒートシールのエッジ切れ状態を“良好”とする高温側選択（155℃以上）は言語道断である。古くから推奨されている《Tm》相当の 170℃加熱の例で示したように、高温加熱ではヒートシールエッジより更に内側にヒートシール面が拡張する。もし製袋工程でこの条件が実施されると、充填後のトップシールで高温にさ

らされた部分のヒートシール温度を最適温度で加熱しても「密封」不全が発生する。³²⁾

7. 革新されているヒートシールの緒操作

7.1 「加熱速さ」がヒートシール強さの発現変移に関与【Hishinuma 効果】

7.1.1 高精度な加熱制御をしてもヒートシール強さの安定化はできない

同じ包装材料に同一温度の適用でも、工場間や使う機械によって発現するヒートシール強さが異なり、再現性のあるデータ取得の困難が永年の課題であった。

その原因は加熱温度の精度上の問題であるとされてきた。

筆者はヒートシール強さの汎用的再現手段として、ヒートシールの高度な加熱温度制御を主要研究テーマとして取り組んできた。ヒートシールの熱接着面に微細センサを挿入して接着面計測のできる測定法：溶着面温度測定法：“MTMS”を開発した。¹³⁾ 更に On-Line の加熱体の表面温度の計測法を開発して、運転中の溶着面温度応答を間接的に管理ができるようにした。そして、0.5℃程度の高精度加熱に成功して、加熱温度の *Validation* に、は成功したが高精度の加熱制御でも相変わらずヒートシール強さの再現性のバラツキの課題は解消できなかった。この原因が「加熱速さ」によるものであった。

7.1.2 片面(通過熱加熱)と両面加熱(平衡温度に収斂)の特徴

ヒートシールの加熱は、いくつか方法がある。³³⁾

大別すると①材料の表面から材料の熱伝導をした加熱、②接着面付近を熱風で直接加熱、③接着面付近の発熱加熱、がある。①の表面加熱には、両面に加熱体構成する場合と片方を常温に構成する場合がある。前者を「両面加熱」、後者を「片面加熱」と呼称している。

一般的には《ASTM F2029》も推奨している同一温度に調節した両面加熱のヒートジョー方式が多く利用されている。片面加熱はカップやトレイのように接着面に関与する材料の構成が異なる場合や両面加熱が構造上困難な場合に利用される。単一フィルムでは両面加熱すると全体が熔融状態になってしまう場合に、片側の軟化残余剛性を利用するインパルスシールに利用されている。

両面加熱の特長は平衡温度への自己収斂性があるところである。他方、片面加熱の加熱温度は通過熱流と材料の熱抵抗によって接着面の温度が決定される。

表面からの加熱方式(片面・両面共通)の接着面温度は T_b :溶着面温度応答、 T_1 :加熱体(1)の表面温度、 T_2 :加熱体(2)の表面温度、 T_3 :周辺温度、 k :熱伝導係数、 n :材料の厚さの均一係数 とすれば、溶着面温度は

$$T_b = [T_1 - (T_1 - T_2)/n] \cdot (1 - e^{-kt}) + T_3 \quad (1)$$

で表される一次遅れのステップ応答となる。

材料厚さが均一で、両面の加熱体表面温度が同一に制御された場合は、 $n=2$ 、 $T_1=T_2$ となり、溶着面温度応答は設定された平衡温度に収斂し、加熱温度の *Validation* が達成できる。すなわち、片面加熱又は両面温度の ($T_1 \neq T_2$) 設定の場合は、 T_1 と T_2 の《外乱制御》に失敗したのと同様に *Validation* は不可になることが容易に理解できよう。

加熱体表面温度の《外乱》制御を含む管理法は既に提案されている^{24,25)}

7.1.3 カバー材設置の有効性はあるのか？

従来、正確なヒートシール強さを果たそうとしたら正確な平衡温度加熱で、分厚いカバー材(テフロン含浸グラスウール)を適用して、低速加熱することが常識であった。

ある時、破れかぶれにカバー材を付けずに試みたところ、10°C近い低温側でヒートシールの発現を発見した。¹⁹⁾

従来の常識を振り返ると、次のように定義されていた。

①同一温度加熱なら同一の剥がれヒートシール強さが発現

②厚さが変わっても同一材料なら同一の剥がれヒートシール強さが発現

③低速加熱が安定した剥がれヒートシ

ール強さが発現

しかし、発見された現象（【Hishinuma 効果】）はこれらを覆していた。

7.1.4 「加熱速さ」によるヒートシール強さの 発現変移の実際例

CPP: 50 μ m 材で「加熱速さ」0.13~3.1 s の変化に対応するヒートシール強さの発現変移事例を図 8 に示した。「一定ヒートシール強さ線」、ある加熱温度（溶着面温度）から垂線を引いてみると「加熱速さ」の影響の大きさを観察できる。従来のヒートシール強さのバラツキ原因は「加熱速さ」に起因していたと断言できよう。

ヒートシール強さの発現は古典的な論理では「加熱温度」と「ヒートシール強さ」の関係を 2 次元現象として捉えてき

た。しかし、実際は「加熱速さ」（温度と時間）と「ヒートシール強さ」の 3 次元現象であった。

7.1.5 【Hishinuma 効果】の発現要因の検討

我々の通常の操作において、「加熱速さ」は CUT 換算で 0.05 s ~ 3s まで分布している。【Hishinuma 効果】の発現はこれらの「加熱速さ」帯に一致して起こることが分っている。近年、シーラント機能の改善を図るためにシーラントに種々の混合物を添加している。³⁴⁾

「加熱速さ」によるヒートシール強さの発現変移はシーラントの分子量分布の広がり起因していると推定できる。従来はプラスチックの加熱時の再結晶化時間は数十秒~数分と考えられている。

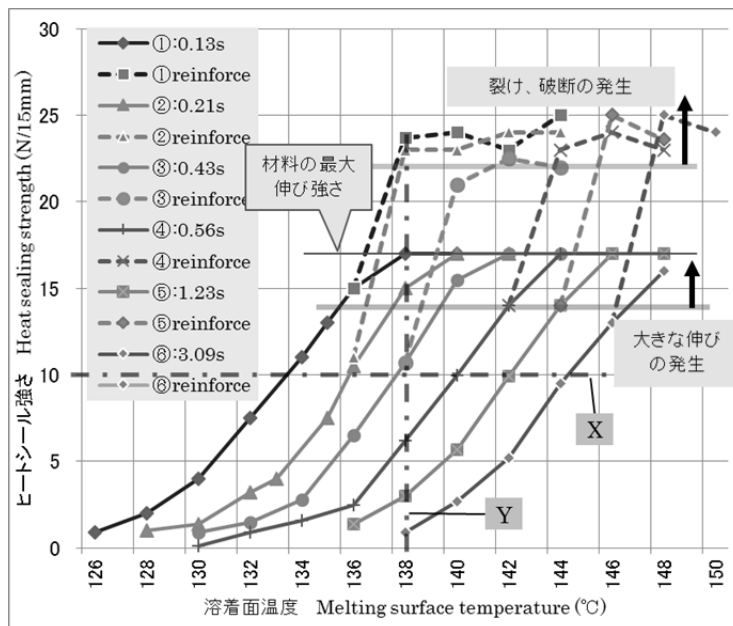


図 8「加熱速さ」の変化によるヒートシール強さの変移の実測例 (CPP: 50 μ m)

従ってヒートシールの加熱時間内では接着面に変化を起こさないものと考えられていた。図 7 に示したデータを発現したヒートシール強さを「加熱速さ」をパラメータにして診ると(図の提示は省略) 130~138℃の界面接着温度帯において、「加熱速さ」が 200℃/s (100 μm ; Teflon) ~ 600℃/s (10 μm ; PET) の高速加熱帯において「加熱速さ」とヒートシール強さの発現が線形になっている。このことからヒートシール面における高分子の再結晶速度が従来の知見と大きく異なっていることが観察される^{19,20)}

7.2 加熱体の表面のローレット仕上げは

《間引き圧着》となる

ヒートシール市場を観るとヒートシール面にはローレット仕上げをしたり、ノコギリ目細工を(世界中で)多く見ることができる。どんな目的で施しているのか明確な答えは得られず。他社追随と言うことになっている。力学的に見ると《50%の間引き圧着》ある。

目的通りに仕上がると接着強さは約 50% になるので、開封強さは約半分になり、易開封が可能になる。しかし、この接着面に「探傷液」を点滴すると、段差部のみならずヒートシール面全体に貫通孔ができる。密封の不全が見つかり、全面が熔融状態になるようにシュリンクの発生を覚悟して加熱温度を上げて対処

する経験則が多くみられる。

“一条シール”では、微細な一条突起で長手方向の「密封」を行いつつ、対面の加熱体の表面に構成した弾性体を利用して、平面圧着に複合的に自動移行して、意図した加熱温度帯で、この課題の論理矛盾を解消している。

7.3 「探傷液法」で微細部の漏れ試験ができるようになった

従来の ASTM や JIS の漏れ試験法は陰圧の水中に試験標本を水没させて、発泡を確認したり、浸透性の高いガスを注入した後に圧縮して、検知紙の反応で検査していた。これらの方法では漏れ箇所の詳細な部位の確認ができないのと漏れ量の定量化ができなかった。

近年、機械加工物のクラック等の検査に使われている「探傷液法」がヒートシールの漏れ検査に広く採用されて、現場での漏れ点検に寄与している。筆者は 2014 年に定量性の確認報告を行っている。^{11,12)} この結果によれば検知能力は、プラスチック材料のバリア性議論レベルに隣接している検知能力を確認できた。

この性能はヒートシール面、段差部、塑性変形圧接部の漏れ検知に有効で、かつ微細部の漏れの“見える化”機能があり、ヒートシール技法の詳細な解析/評価に革新的な貢献している。「密封」と「易開封」を複合的に達成した“一条シール”の開発には不可欠なツールであった。

7.4 微弱なヒートシール強さでも「密封」している。

「密封」の阻害要因は表層材の剛性が強く関与

ヒートシールの熱接着は高分子の熱可塑性現象によって成り立っている。従って、その現象はナノサイズであるが、古典的な「理論」によれば、界面接着状態を“疑似接着”、“接着不良”と位置付け、凝集接着のモールド状態を“良好”としてきている。従って、ヒートシール技法の標準的条件は熔融温度《 T_m 》以上とされてきた。《JIS Z 0238》は最大値の採用を規定しているので、いつの間にか《モールド接着》≒《適格接着》≒《密封》の論理が創成されている。

筆者が 20～50 μm のポリエチレン、ポリプロピレンシート of 単体又は複合フィルムを平面（平行度 10 μm 以内）の熱圧着した標本に、「探傷液法」を用いて、密着発現状態を確認したところ、表 8 に示したように《0.1 N/15mm》の微弱な剥がれシール帯で密着が確認でき、従来の

常識を覆していた。汎用化されている《OPP/LLDPE》の複合フィルムでは密着は《0.8 N/15mm》となっている。

《OPP/CPP》の複合フィルムでは《0.1 N/15mm》の接着強さでも密着が完成する。OPP の剛性（ヤング率）は 1700－4000 あり、非常に大きいので軟化温度帯に加熱しないと Hot tack の影響で、密着不全となる。又、OPP/CPP の結果を参照すると、接着層粘度（接着力）の大小が密着性に関与することが分る。

ヒートシールの接着面の密着性の議論が進まなかったのは接着面の微細な接着状態を検知する方法がなかったことにある。「探傷液法」の定量化性研究はヒートシール技法の革新に寄与している。

7.5 シーラントの低温化の展開論理の間違いの検証

今日、シーラントの低温化設計が常套手段となっている。それは古典的な論理にいくつかの間違いがあることによって

表 8 低ヒートシール強さ帯の密着成立確認の試験結果

材料（厚さ： μm ）	各ヒートシール強さ（N/15mm）の加熱温度、 加熱温度：95% CUT						
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.8	7～10
CPP（50）	108	110		113			
LDPE（25）	94				95		
OPP/LLDPE（30/20）						102	106
OPP/CPP（30/20）	108			113			

・表示温度は各ヒートシール強さが発現する溶着面温度、・圧着圧：0.25 MPa

(1) 温度範囲(上限)の制御できる加熱制御法がなかった

(2) OPP 材のようにシュリンク温度帯避ける上限の加熱温度の制約に対処する方策がなかった。

(3) 温度制御の揺れ幅が大きくても制限上限温度に余裕を持たせたい。

《OPP/LLDPE》材はシュリンク開始の 140°C 付近以下。LLDPE は 100°C 近辺で熱接着が発現する。この組み合わせでは 40°C 近い間隔がある。125~130°C 付近に加熱体温度が設定されても運転上の加熱温度の 10°C 程度のバラツキに対処できる。125~130°C 辺りでは、LLDPE は完全な熔融状態になっているのでモールド接着の論理は一応成り立っている。しかし、この条件は界面接着の剥がれシール温度帯とは大きくかけ離れている。

7.6 エッジ切れメカニズムにおける“ポリ玉”の関与の解明

従来は圧着するヒートバーのエッジが鮮明に仕上がりエッジ切れとなる加熱操作が“良好”とされている。代表的な例は図 7(a)に示した《170°C》のデータである。この例ではヒートシールエッジはヒートバーの圧着エッジより更に内側になっている。引張試験の結果は《約 65 N/15mm》で破断している。

この標本の《170°C》加熱付近は熔融温度《 T_m 》付近なのでモールド状態であり、シーラントは圧着圧で自由運動す

る状態である。圧着圧によって、シーラントはヒートシールエッジに不均一にはみ出し、“ポリ玉”を形成する。“ポリ玉”のサイズはシーラントの厚さの約 2 倍位になる。ポリ玉の生成点に袋のタックの先端が確率的に合致すると内部圧力の上昇で部分破袋(ピンホール)の発生となる。³⁵⁾

ポリ玉サイズが《50 μm 》とすればヒートシール強さ試験法の応力比較で検証すると部分的には《 $15/0.05=300$ 》の大きな部分引裂き力となり、引張試験では僅かな引張強さの変化なので検出は困難となっている。しかし、《約 65 N/15mm》の引張試験結果は“強い接着”として採用されている。誤認の危険が放任されている。²⁸⁾

ヒートシール面の断裂、破断はピンホールが起点となって起こっている同一現象である。従って、“ポリ玉”の制御はヒートシールの制御の重大課題である。《FHSS》はこのニーズに応えるために開発されている。

引張試験において、容易にエッジ切れ状態が把握できる試験法:「角度法」が既に提供されている³⁵⁾

8. まとめ

(1) 本総説で記述した主要事項は論文発表/特許取得し、公的評価を既に仰いである。

(2) ヒートシールの *validation* 方策の具

体論を展開できた。

(3) 古典的技法は経験則に頼り、適格な計測・制御技術の適用が不十分であった。

代表的な事項は次の通りである。

◆加熱温度／時間

- 1) 溶着面温度適用の回避
- 2) 加熱と応答を別扱いにしてきた
- 3) 高温の過渡加熱が常套化している
(平衡温度加熱〔CUT〕の不採用)
- 4) 加熱範囲未制限の加熱方法
- 5) 「加熱速さ」によるヒートシール強さの変移発現 (【Hishinuma 効果】) の未理解
- 6) 加熱温度の検出点の不適格 (最適な温度分布線の検出の未適用)
- 7) 加熱体の温度分布と応答速さの不理解 (加熱体表面温度の未活用)
- 8) 温度制御の不確かさの未認識
- 9) 加熱時間の選択の間違い (運転速度優先)
- 10) 材料による流出熱の非考慮 (均一加熱と思っている)
- 11) 加熱体表面温度の均一化 (ヒートパイプの未採用)

◆引張試験

- 1) 引張試験のアナログデータの未活用
- 2) 剥離メカニズムの理解不足、剥離エネルギーの未活用
- 3) ヒートシール強さの発現メカニズム探求不足
- 4) 材料の伸び強さをヒートシール強さ

に混用

(4) 古典的方式は凝集接着への偏重を誘導していた。

(5) 易開封のメカニズム探求と実施策については紙面の都合で割愛した。関連文献の参照を期待する³⁶⁻⁴⁰⁾

(6) 「密着」は「強い接着」状態で成り立つと誤認している。

(7) ヒートシール技法における包装材料と包装機械の機能分担意識が軽薄であった。

1) 供給材には①推奨制御温度帯、②剛性の軟化温度帯、③剥がれシール特性の提示

2) プラスチック材を目的に合った熱接着するには振れ幅が≪4℃≫以内の溶着面温度応答の制御が機械装置に求められている

(8) 包装材料の「バリア性」の研究と「密封性」、「操作性」の課題がリンクしていない。

特に加工性(ヒートシールの密封性)の課題が多い。

(9) 経験則に頼り、古典的方式の見直し機運が起こらなかった。これは関係技術者の個別の問題ではなく(世界の)関連学際に対処体制に問題があろう。

(10) エンドユーザー(包装商品の製造者、消費者)は不具合に対する学際認識を我慢していて、要望の提起を拘っている。

(11) 課題対処に高価な包装材料を採用

せざるを得なかった。(学際の怠慢による消費者の負担増)

- (12) 最新理論と技術の説明に古典論理の欠陥の付帯説明が必要である。並行の説明の労はそろそろ修了した方が良さそうである。
- (13) 筆者の 20 数年間の研鑽のノウハウを集大成した。本報がヒートシール論の合理的展開の一助になって、ヒートシール技法の発展・向上に寄与できれば幸甚である。
- (14) 紙面の都合で本文中の引用説明を割愛している。Reference の参照を願う。

<引用文献>

- 1) 菱沼 一夫、PACK EXPO2016、取材情報
- 2) ASTM F88-07a 4.1, 1(2007)
- 3) 菱沼 一夫、第 24 回日本包装学会年次大会要旨集 (b-10) ,134-135 (2015)
- 4) 菱沼 一夫、「缶詰時報」、95(4),15-29(2016)
- 5) 特許第 5779291 号、PCT/JP2015/003189 (2015)
- 6) EU 特許出願、15834127.1, (2016)
- 7) アメリカ特許出願、15375609, (2016)
- 8) 中国特許出願、201580023756, (2016)
- 9) 韓国特許出願、10-2016-7035707, (2016)
- 10) タイ特許出願、1601002043, (2016)
- 11) 菱沼 一夫、第 23 回日本包装学会年次大会要旨集 (d-01)、12-13 (2014)
- 12) 菱沼 一夫、日本包装学会誌(投稿済)
- 13) 菱沼 一夫、日本包装学会誌、14(2),119-130, 14(3), 171-179, 14(4), 233-247(2005)
- 14) 特許第 3465741 号 (2003)
- 15) U.S. Patent US 6,197,136B1 (2001)
- 16) 菱沼 一夫、高信頼性「ヒートシールの基礎と実際」(幸書房)、x(2007)
- 17) 菱沼 一夫、第 25 回日本包装学会年次大会要旨集 (d-12)、34-35 (2016)
- 18) 菱沼 一夫、高信頼性「ヒートシールの基礎と実際」(幸書房)、172-177(2007)
- 19) 菱沼 一夫、第 20 回日本包装学会年次大会要旨集 (d-1)、134-135 (2011)
- 20) 菱沼 一夫、「缶詰時報」、91 (11) ,21-34(2012)
- 21) 菱沼 一夫、高信頼性「ヒートシールの基礎と実際」(幸書房)、36-52(2007)
- 22) 菱沼 一夫、高信頼性「ヒートシールの基礎と実際」(幸書房)、37-39(2007)
- 23) 菱沼 一夫、高信頼性「ヒートシールの基礎と実際」(幸書房)、44(2007)
- 24) 菱沼 一夫、高信頼性「ヒートシールの基礎と実際」(幸書房)、127-130(2007)
- 25) 特許第 4623662 号 (2006)
- 26) 菱沼 一夫、高信頼性「ヒートシールの基礎と実際」(幸書房)、16,145 (2007)

- 27) 菱沼 一夫、高信頼性「ヒートシールの基礎と実際」(幸書房)、66-68(2007)
- 28) 菱沼 一夫、第 26 回日本包装学会年次大会要旨集 (f-06)、126-127 (2017) (投稿済)
- 29) 菱沼 一夫、高信頼性「ヒートシールの基礎と実際」(幸書房)、83-91(2007)
- 30) 特許第 3811145 号 (2006)
- 31) U.S. Patent US 6,952,956B2 (2005)
- 32) 菱沼 一夫、第 19 回日本包装学会年次大会要旨集 (p-08)、26-27 (2010)
- 33) 菱沼 一夫、高信頼性「ヒートシールの基礎と実際」(幸書房)、20-30(2007)
- 34) Gerge L.Hoh、DuPont, US Patent No. 6952956 B2, (1982)
- 35) 菱沼 一夫、高信頼性「ヒートシールの基礎と実際」(幸書房)、77-82(2007)
- 36) 菱沼 一夫、「缶詰時報」、90 (4) ,63 -77(2011)
- 37) 特許第 5260707 号、(2011)
- 38) 特許第 5388313 号、(2013)
- 39) 特許第 5435813 号、(2013)
- 40) 特許第 6032450 号、(2016)

(原稿受付 2017 年 6 月 29 日)