

[ 別紙 2 ]

## 論文審査の結果の要旨

申請者氏名 菱沼 一夫

論文題目 熱溶着（ヒートシール）の加熱温度の最適化

現在の包装では、「包む」という従来機能に加えて被包装物の長期品質保証のために、外部からの微生物、有害物質、酸素、水分の侵入防止や内部からの香気成分、水分等の流出防御に係わる密封性の機能が求められている。この機能を満たす材料として、プラスチックが商品保護のためあらゆる分野で利用され、日常生活と生産活動に不可欠なものになっている。プラスチックのシートやフィルムを利用する包装では、古くからプラスチックの熱可塑性を利用して加熱と冷却によって容易に接着のできる熱溶着（ヒートシール）（以降、ヒートシールと称す）を適用して接着を行い、袋、容器を作ってきた。ヒートシールによる密封性の確保には、接着面のピンホールや破れの防御のために分子レベルの確実な溶着を必要とする。熱溶着には加熱温度依存性があり、溶着低温度域では界面剥離する剥がれ接着（ピールシール）が、高温度域での溶着では応力集中をもたらすピンホールや“ポリ玉”と呼ばれる樹脂塊状物などが発生しやすい状態での接着（テアシール）が起き、それぞれで破壊特性が異なる。確実な接着のためには溶着面の正確な加熱温度調節が重要な因子となる。従来は、溶着面の汎用的な温度計測技法が提示されてなかったこともあって、加熱源の温度を基準にして熱溶着したサンプルを日本工業規格（JIS）やAmerican Standard for Testing Materials（ASTM）の規定に従って破断、荷重、衝撃試験と壊れの観察により検査するのが常であり、溶着面温度をパラメータにしたプラスチック材料の熱溶着状態と接着特性との関連性の検討は殆どなされていない。本研究は、溶着面温度をパラメータとして材料の接着性を再検討し、従来の定性的・経験則的な解析との比較検討、従来評価方法の改善と材料の接着特性を確実に発揮させる熱溶着の提案による加熱方法の最適化に関するものである。論文は、13章および開発した装置に関する付帯説明2章より成る。以下に、主たる概要を述べる。

### 1. 従来試験法の検討と課題の抽出

ヒートシール部分の品質試験に関する試験法として、国際的規格であるASTMおよびJISを取り上げ精査した結果、高温加熱で発生する“ポリ玉”の生成や内容物容積から発生する接着部への応力が原因となる応力集中部での破壊応力は無視され、破壊部と接着部の単なる平均応力が測定されることが判明した。

### 2. 溶着面温度測定法の検討

確実なヒートシールには、熱溶着面の温度が大きな因子となるので、溶着面の定量的な解析のため溶着面温度の動的変化を直接的に把握できる計測法の作成検討を行った。自作

した微細な温度センサーを使用して溶着部の温度測定を行ったところ、温度計測の再現性や精度などにおいて満足すべき結果が得られたので、溶着面温度測定装置として開発し以降の実験に供した。

### 3. ヒートシール材料の熱溶着特性測定法の検討

ヒートシーラントの熔融状態に至るまでの過程を上記溶着面温度測定装置により検討した。熔融温度以上で加熱して得た応答を温度を微分演算処理して、材料の軟化、液化化、含有物の気化温度に対応した変化が現れることを見出した。次いで、ヒートシールサンプルを変化点温度付近で作成し、加熱温度とヒートシール強さの関係およびピールシールの発現との関係を把握した。この結果は、加熱温度でのピールシール温度帯（ピールシールゾーン）と テアシールゾーンの識別に应用できることが判明した。

以上の結果を受けて、従来の熱溶着法の妥当性の確認を行った。圧着圧とヒートシール強さの関係、加熱体の表面にテフロンシートを貼る効用、片面加熱のリスク等において、従来の常識と異なる以下のような知見を得た。(1) ヒートシール強さは圧着圧によって調節可能とされていたが、低い圧着圧では熱伝導が不足する等でヒートシール強さが変わる。0.1~0.2MPa のヒートシール強さではほぼ一定となる。これより強い圧着では、“ポリ玉”生成されるようになり見かけ上の強さは大きくなる。(2) 常用されていた加熱体へのテフロン装着は熱流を抑止するので、結局は加熱体の高温化に繋がる。従って、加熱体の高温化を防ぐためにテフロン装着を省き、低温で溶着した方が安定したヒートシールには有利となる。以上の知見から、熱溶着に多大な悪影響を及ぼす“ポリ玉”抑制のための圧着ギャップの提案を行った。また、適性加熱には従来のテフロンシートは不要であり、これにより溶着部の熱安定化をもたらす加熱体の低温化に反映できることが分かった。なお、本提案法によれば、包装用フィルムと熱板金属の剥離は容易であることを見いだしている。

### 4. Peel seal の剥離エネルギーと破れ破壊エネルギーの比較と Peel Seal の有効性

数種類のピールシール温度帯のヒートシールサンプルを作り、剥がれ巾と引張応力からそれぞれの剥離エネルギーと材料の破壊エネルギーを比較して、あるヒートシール幅以上でピールシールが有利になることを見いだした。従来、“ポリ玉”などへの応力集中による破れ破壊を避けるため材料を厚くし、熔融温度を高めることが採用されてきた。しかし、これでは“ポリ玉”が相変わらず発生することから、応力集中を避け安定な接着を得るにはピールシールを用いた方が良いとの結論に達した。

以上の検討の他に、イージーピール性（使用時に簡単にはがしやすい性質）、レトルト食品などの密封性保証に関してヒートシール特性と「適性熔融温度」との関連を広範な実証試験により検討し、効率的加熱法を提案している。

以上の研究は、ヒートシール特性のパラメータとして溶着面の熱挙動を検討して、従来無視されがちであった破壊形態におけるピールシールの有用性を示したものであり、木工製品や食品を含む種々な製品の保護や気密性を持たせる包装技術に対しての実用的知見を提供するもので、今後の製品設計に対し多大の貢献が期待できる。

よって審査委員一同は本論文が博士（農学）の学位論文として価値あるものと認めた。