数理科学会　第 42 回数理科学講演会講演論文集
［2023. 8. 26　都立産技高専　荒川キャンパス］

PLA ヒートシール部の強度と光弾性特性の関係

Relationship between strength of PLA heat seal and photoelastic properties

○二反田 将(東京電大)　　◎五味 健二(東京電大)
Masashi NITANDA, Department of Mechanical Engineering, Tokyo Denki University 5 Senjyu-asahi-cho, Adachi-ku, Tokyo 120-8551
Kenji GOMI, Department of Mechanical Engineering, Tokyo Denki University 5 Senjyu-asahi-cho, Adachi-ku, Tokyo 120-8551

1.　緒言および目的

ヒートシールは，フィルム同士を熱と圧力により，接着させる技術である．ヒートシール溶着（以後，シール）は，テープやひもなどを使用した封止方法より，密閉性が高い．シールは，製品に混入する恐れがある接着剤を使用しないため，食料品や医薬品にもこの技術は用いられている．JIS に規定されてある強度評価方法 [1]は，引張試験などの破壊や接触を必要とする方法が主流であり，効率的ではないため，インライン検査には不向きである．そのため，ヒートシールされた部分（以後，シール部）を非破壊・非接触で，シール強度を検査可能な方法が望まれている．

菱沼 [2]は，シール部の状態を溶着温度，溶着時間，圧着圧の 3 つの項目で管理できると示した．各条件に対するシール強度を引張試験で確認し，各条件に対応するシール強度を求めた．フィルムの材質が異なれば，対応関係も変わるのと，インラインでの非破壊検査には向かないため，その要望が生産現場で高まった．

Michael Barnes[3]らは，偏光応力画像とレーザ散乱画像を用いて,シール領域の非接着領域を検出した．しかし，検査結果と剥離強度についての関係は求めていなかった．

Karlien D’huys[4]らは，赤外線サーモグラフィカメラによってシール直後の温度分布を撮影し，シール領域の異物介在を検出した．シール直後の画像を使用するため，インライン検査に適しているが，検査結果と剥離強度の関係は求めていなかった．

以上を踏まえて，本研究では，レーザ光を用いた光弾性法により，非破壊・非接触でヒートシールの剥離強度を推定する．光弾性法により，複屈折位相差と複屈折方向を測定し，引張試験により測定した剥離強度と比較し，光弾性法により，ヒートシールの剥離強度を推定できるかを実験的に調査することが本研究の目的である．

2.　実験装置と測定原理

2.1.　実験装置

2.1.1.　光弾性装置

図 1 は，透過型レーザ光弾性実験装置の略式図である．透過型レーザ光弾性実験装置の仕組みを以下に示す．

He-Ne レーザ装置から横方向に射出された波長 1150 [nm] の赤外線は，ミラーによって垂直に反射される．その後，レーザの出力を調整するアッテネータ，特定方向の偏光子を通り，直線偏光になる．その後，偏光状態を調整し微弱な変化の検出を可能とする PEM（Photoelastic Modulator），直線偏光を円偏光へと変換する 1/4 波長板，試験片の順に通過する．試験片は移動ステージの上に固定する．試験片通過後，レーザ光は 1/4 波長板を通過することで，円偏光から直線偏光に変換され，偏光子と同じく特定方向の偏光を通過させる検光子を通過し，光検出子に当たる．検光子で検出されたレーザ光は電圧信号として SCM（Signal Conditioning Module）に入力され，分解された信号がそれぞれ電圧計で光強度（I_{DC}），2 台のロックインアンプで I_{AC1}，I_{AC2} として測定される．本装置ではこれらの測定値を使用して，複屈折位相差と複屈折方向をコンピューターで計算する．

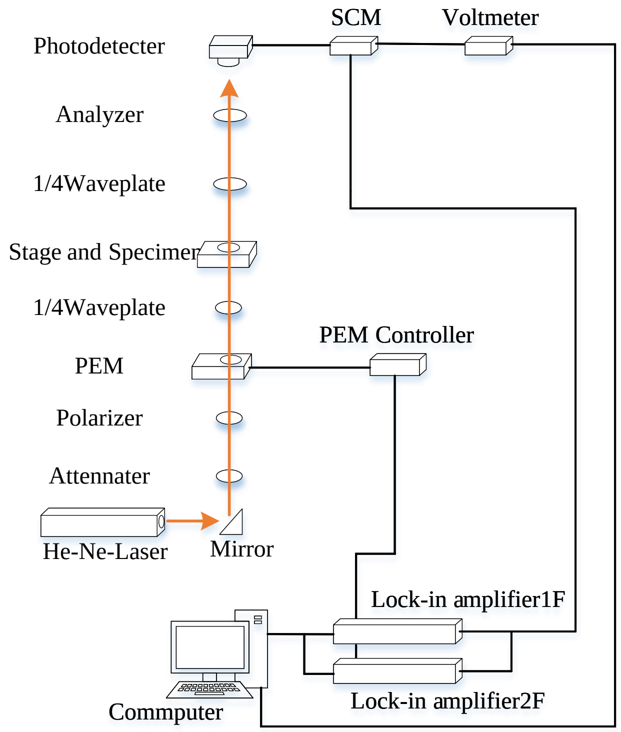

Fig.1　Schematic of experimental apparatus

2.1.2.　引張試験機

引張試験機（MCT-2150W，株式会社エー・アンド・デイ）を使用した．治具（JM-JFM-500 N，株式会社エー・アンド・デイ）を引張試験機に固定して，試験片を治具に取り付けた．JIS Z 0238:1998[1]に基づき上下治具間間隔を 50 mm 以上離した．本装置で，剥離強度を測定した．

2.2.　測定原理

2.2.1.　Brewster の法則 [5]

複屈折位相差と応力の関係を表す Brewster の法則について説明する．

応力を加えられていない状態の物体の屈折率をn_0，物体に加えられた応力を σ_1，σ_2，応力方向に振動する偏光の屈折率をn_1，n_2，物体特有の定数を T，Uとすると，

$$n_1 - n_0 = T\sigma_1 + U\sigma_2 \tag{1}$$
$$n_2 - n_0 = T\sigma_2 + U\sigma_1 \tag{2}$$

が成り立つ．
式(1)から式(2)を引くと，

$$n_1 - n_2 = (T - U)(\sigma_1 - \sigma_2) = C \cdot (\sigma_1 - \sigma_2) \tag{3}$$

になる．C は Brewster 定数である．真空中の光速を c，物体を σ_1，σ_2 方向に振動する偏光が通過する速度を v_1，v_2 とすると，

$$c = v_1 n_1 = v_2 n_2 \tag{4}$$

が成り立つ．
物体の厚さを d とすると，式(4)より 2 方向の偏光が物体を通過する時間差Δtは，

$$\Delta t = \frac{d}{v_1} - \frac{d}{v_2} = \frac{d}{c}(n_1 - n_2) \tag{5}$$

となる. 偏光の角振動数を ω とすると, 複屈折位相差$\gamma = \omega\Delta t$と表せる．$\gamma = \omega\Delta t$に式(5)を代入すると，

$$\gamma = \omega\Delta t = \omega \cdot \frac{d}{c}(n_1 - n_2) \tag{6}$$

となる．光が単色光である時の波長を λ とすると，
$\lambda = c \cdot (2\pi/\omega)$と表せる．式(6)に$\lambda = c \cdot (2\pi/\omega)$と式(3)を代入すると，

$$\gamma = C \cdot \frac{2\pi}{\lambda}(\sigma_1 - \sigma_2)d \tag{7}$$

となる．
　式(7)の d，λ，C は全て定数であるため，複屈折位相差 γ は 2 方向の応力差$(\sigma_1 - \sigma_2)$に比例していることが分かる [6]．これを Brewster の法則という．

2.2.2. 複屈折位相差と複屈折方向の導出 [5]

　光弾性法により, 複屈折位相差と複屈折方向を導出する過程について説明する．
　光検出子により，検出された入射光の強度を I，レーザ光の強度を I_0，複屈折方向を θ，PEM の複屈折位相差を δ とすると，

$$I = \frac{\alpha I_0}{4}\{1 + \sin\gamma\,(\cos\delta\sin 2\theta + \sin\delta\cos 2\theta)\} \tag{8}$$

が成り立つ．
α は測定点での試験片の透明度である．δ は，PEM の変調の振幅を δ_0 とすると，

$$\delta = \delta_0 \sin\omega t \tag{9}$$

となる. 光検出子により, 検出された入射光の直流成分をI_{DC}，交流成分をそれぞれ I_{AC1}，I_{AC2} としたとき，式(8)に式(9)を代入してフーリエ級数展開すると，

$$I_{DC} = \frac{\alpha I_0}{4}\{1 + J_0(\delta_0)\sin\gamma\sin 2\theta\} \tag{10}$$

$$I_{AC1} = -\frac{\alpha I_0}{2} \cdot J_1(\delta_0)\sin\gamma\cos 2\theta \tag{11}$$

$$I_{AC2} = \frac{\alpha I_0}{2} \cdot J_2(\delta_0)\sin\gamma\sin 2\theta \tag{12}$$

となる．
ここでの，$J_0(\delta_0)$，$J_1(\delta_0)$，$J_2(\delta_0)$は Bessel 関数である．$J_0(\delta_0) = 0$となるように δ_0 を調整すると, 式(10)は$I_{DC} = \alpha I_0/4$となる．式(10)~(12)より，I_{AC1}，I_{AC2} とI_{DC}の比を算出すると，

$$\frac{I_{AC1}}{I_{DC}} = A \cdot \sin\gamma \cdot \cos 2\theta \tag{13}$$

$$\frac{I_{AC2}}{I_{DC}} = B \cdot \sin\gamma \cdot \sin 2\theta \tag{14}$$

となり，レーザ光の強度 I_0 や試験片の透明度 α に依存しない．よって，式(13)，(14)の A，B は試験片の状態に依存しない定数（以後，装置定数）となる．以上のことから，式(13)，(14)より，複屈折位相差 γ と複屈折方向 θ は以下の式で表される．

$$\gamma = \sin^{-1}\sqrt{\left(\frac{I_{AC1}}{I_{DC} \cdot A}\right)^2 + \left(\frac{I_{AC2}}{I_{DC} \cdot B}\right)^2} \tag{15}$$

$$\theta = \frac{1}{2}\tan^{-1}\left[\frac{A \cdot I_{AC2}}{B \cdot I_{AC1}}\right] \tag{16}$$

3. 試験片の作成および実験方法

　試験片は，昨今の世界的な環境問題に配慮して，生分解性プラスチックである PLA（Polylactic Acid，厚さ 150 µm，大同至高株式会社）を使用した．本実験では、ヒートシーラ（NL-453PA-5，株式会社石橋電機製作所）を使用した．シール条件は, 溶着温度 80.4, 84.3, 90.5, 94.0, 98.7, 107.0 ℃の 6 条件で，溶着時間 1.5 s，冷却時間 3.0 s で一定とした．試験片は，各条件で，24 本ずつ用意した．図 2，図 3 にシールの寸法と向きを示す．試験片は，A4 判 PLA フィルムの長辺を半分に切断した後，重ね合わせて，図 3 のようにシールした．JIS Z 0238:1998[1]に準拠し，2 枚のフィルムを 5 mm 幅でシールした．

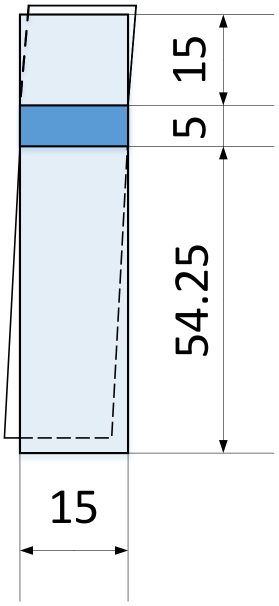

Fig.2　size of test piece

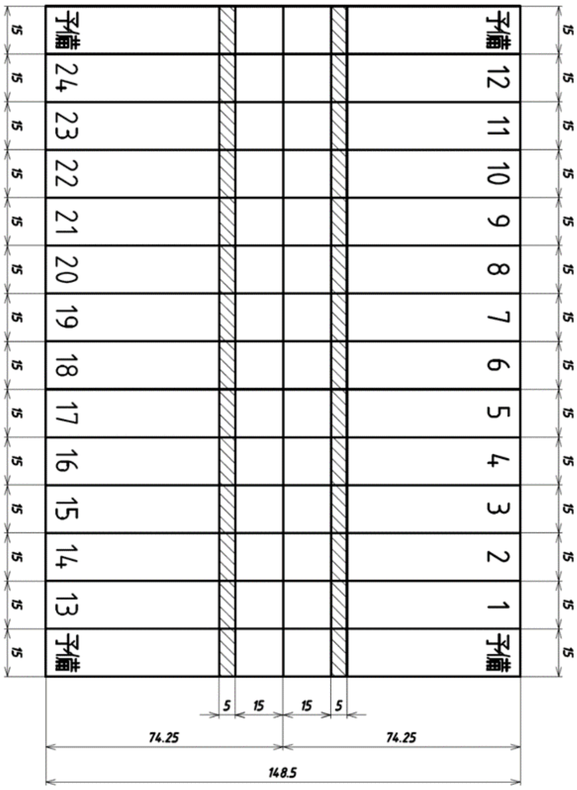

Fig.3　shape of test piece

各条件で，6 本の試験片を抜き取り，光弾性実験を行い，複屈折位相差と複屈折方向を算出した．光弾性実験後，すべての試験片で，引張試験を行い，剥離強度を測定した．今回は，光弾性実験と引張試験の 2 つの測定を行った各条件 6 本の試験片を比較した．

4.　実験結果および考察

光弾性装置を用いて複屈折位相差と複屈折方向を測定した各条件 6 本の試験片の複屈折位相差と剥離強度を比較したグラフを図 4，図 5 に示す．図 4 は，シール部の複屈折位相差の算術平均値と剥離強度のグラフである．図 5 は，シール部の複屈折位相差の最大値と剥離強度のグラフである．破断した試験片の結果は，図 4，図 5 から除外した．

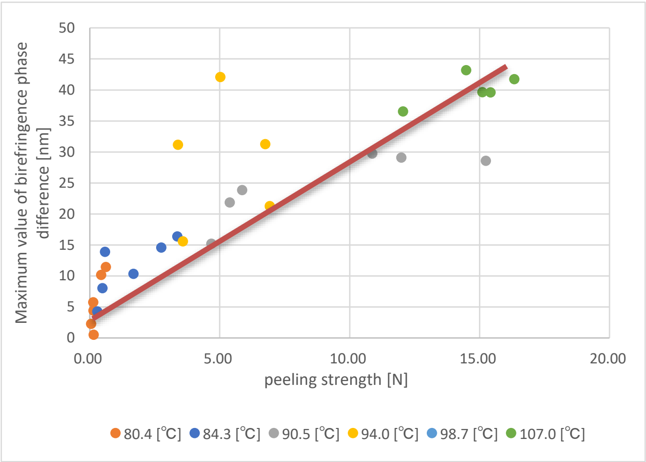

Fig.5　Maximum value of birefringence phase difference and peeling strength

図 4 より，シール部の複屈折位相差の算術平均値と剥離強度に正の相関があることが分かる．また，図 5 より，シール部の複屈折位相差の最大値と剥離強度にも正の相関があることが分かる．図 4 も図 5 も複屈折位相差と剥離強度に正の相関がみられるが，図 5 の複屈折位相差の最大値と剥離強度のグラフの方がより直線的な近似線となることが分かる．そのため，複屈折位相差の最大値と剥離強度の関係を調べることで，剥離強度をより正確に推定できると考えた．図 4，図 5 は，破断した試験片の結果を除外したため，破断した試験片の本数を確認することができる．溶着温度 98.7 ℃試験片は，6 本中 6 本破断している．溶着温度 107.0 ℃試験片は，6 本中 1 本破断している．このように溶着温度 98.7 ℃試験片は，溶着温度 107.0 ℃試験片に比べて，破断した試験片が多いことがわかる．本実験では，1 条件に対して，A4 判 PLA フィルムを 1 枚使用した．そのため，フィルムの個体差が実験結果に影響を及ぼした可能性がある．

光弾性装置を用いて，複屈折位相差と複屈折方向を測定した各条件 6 本の試験片の複屈折方向と剥離強度を比較したグラフを図 6 に示す．破断した試験片の結果は，図 6 から除外した．

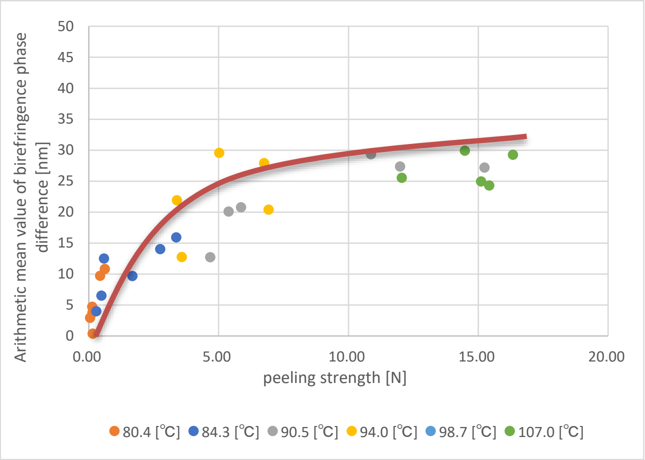

Fig.4　Arithmetic mean value of birefringence phase difference and peeling strength

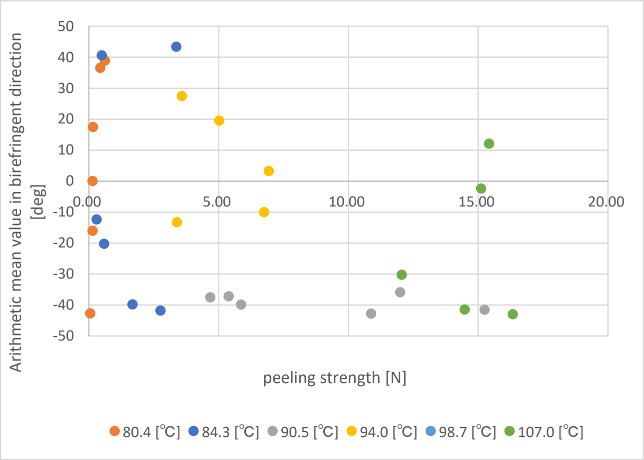

Fig.6　Arithmetic mean value in the direction of birefringence and peeling strength

図6より，溶着温度が低温から高温になると，複屈折方向の算術平均値が80度程度変化している．しかし，ばらつきが大きいため，今回の結果から，複屈折方向と剥離強度の関係性を示すことは難しい．

5. 結論

本研究では，光弾性法により，ヒートシールの剥離強度を非接触，非破壊で推定することができるかを実験的に確かめることを目的とした．光弾性法により，複屈折位相差と複屈折方向を算出して，引張試験により，測定した剥離強度と比較した．その結果，溶着温度80.4~107.0 ℃の間の試験片には，剥離強度と複屈折位相差に正の相関があることを示した．よって，光弾性法により，ヒートシールの剥離強度を非接触，非破壊で検査できる可能性を示した．

参考文献

(1) 日本産業規格(JIS)，JIS Z 0238:1998，ヒートシール軟包装袋及び半剛性容器の試験方法．
(2) 菱沼一夫，熱溶着（ヒートシール）の加熱方法の最適化，東京大学博士論文，(2006), pp.1-13, 61-67.
(3) Michael Barnes， Mike Dudbridge， Tom Duckett， Polarised light stress analysis and laser scatter imaging for non-contact inspection of heat seals in food trays， Journal of Food Engineering， Volume 112， Issue 3， October 2012， Pages 183-190.
(4) Karlien D'huys，Wouter Saeys，Bart De Ketelaere，Active Infrared Thermography for Seal Contamination Detection in Heat-Sealed Food Packaging，2016 2(4) 33， https://doi.org/10.3390/jimaging2040033.
(5) 五味健二，赤外線レーザ光弾性法の開発と半導体ウエハの応力測定への応用，博士論文，(2001)，pp.20-21，pp.24-25．
(6) 河田幸三，光弾性,光塑性の実験法，高分子，8巻，3号，(1959), pp.153-157.