研究論文

エネルギーダイレクターを用いた
CFRP の超音波溶着に関する数値シミュレーション若山 耕大^{*1}, 上原光太郎^{*1}, 小 柳 潤^{*2}, 武田 真一^{*3}

(2019 年 9 月 19 日受付)

Numerical Simulation of Ultrasonic Welding for CFRP Using Energy Director

Kodai WAKAYAMA,^{*1} Kotaro UEHARA,^{*1} Jun KOYANAGI^{*2} and Shinichi TAKEDA^{*3}

(Received September 19, 2019)

Abstract: An energy director (ED), a sharp, flat- or triangular-shaped resin bead, is usually inserted between CFRPs during ultrasonic welding. In this study, a two-dimensional model was used to conduct finite element analyses for CFRP ultrasonic welding. The effects of the ED shape on the temperature increase, deformation history, and dissipated energy behavior are discussed. The results of the numerical simulations show that the triangular ED more easily increases the temperature than the flat ED does, and thus its use consumes less energy and time than using the flat ED. However, this study indicates that a triangular ED is not always better than a flat ED. In the ED, the temperature is distributed significantly; that is, the temperature range between points is vast. There is the possibility that unexpected chemical reactions such as oxidation occur. It is found that an abrupt temperature increase is caused by a synergic effect. That is, the increase in temperature causes the viscoelastic and frictional dissipated energy to be remarkable, and an increase in dissipated energy increases the temperature. Consequently, it is difficult to optimize the parameters, such as overall pressure, frequency, and welding time, for ultrasonic welding.

Key words: Ultrasonic welding, Energy director, Temperature, CFRP, Numerical simulation

1. 緒 言

Carbon fiber reinforced plastic は、比強度、比剛性に優れるため、近年まで航空宇宙産業において広く用いられてきた。今後は自動車産業を始め多岐にわたる分野への CFRP の適用が期待されている。これまではその多くが熱硬化性樹脂複合材料を用いて成形されているが、成形性や生産性の観点からこれに代わり熱可塑性複合材料を使用する動きが年々加速している^{1~5)}。熱可塑性樹脂複合材料は、耐衝撃性やリサイクル性⁶⁾に優れ、さらには、加工時間が短い⁷⁾などの利点がある。また、熱可塑性

樹脂の特徴を生かした溶着接合が可能であり⁶⁾、部材同士をボルトやリベットを用いずに接合することで、軽量化や応力集中の減少に繋がる。溶着接合の一つに、超音波溶着という方法が存在する^{5,8,9)}。超音波溶着は、振動エネルギーを溶着界面に伝えることで発生する熱を利用して、樹脂を溶融させ溶着する方法である¹⁰⁾。熱可塑性樹脂を短時間、省エネルギーで高効率に溶着可能なため、将来的に航空機などの大型部品の接合に用いられることが期待される^{11~13)}。超音波溶着では界面に樹脂の突起物を挿入して溶融することが一般的であるが^{1,14~16)}、この突起部のことをエネルギーダイレクター(以下 ED)と呼ぶ^{17~19)}。ED は溶融の起点となるため、界面に導入することで再現性の高い溶着を可能とする。

既存の研究では、ED について数多くの議論がなされている^{1,12,14,17,19,20)}。Tao らは、フラットな ED を界面に挿入した場合、挿入しない場合と比べて、未溶融の範囲と亀裂の数が著しく減少すると報告している¹⁰⁾。また Levy

^{*1} 東京理科大学大学院基礎工学研究科材料工学専攻
Graduate School of Tokyo University of Science

^{*2} 東京理科大学基礎工学部材料工学科
Department of Materials Science and Technology, Tokyo University of Science

^{*3} 宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

らによると、フラットなEDの端部で溶着界面に滑りが生じ、摩擦による発熱が起こることを報告している¹⁾。別の論文では、三角形のEDを導入した場合、先端に応力集中が起こり、粘弾性のエネルギー散逸による発熱が支配的になると報告している²¹⁾。このようにEDの形状によって、樹脂溶融の開始点や溶着時間が異なることが報告されている。そのため、良好な接着がなされるためには、最適なEDの形状について議論することが必要不可欠である。いずれにしても、これまでの研究において摩擦によるエネルギー散逸と非弾性変形によるエネルギー散逸の一部が熱となってEDの温度上昇に寄与していることが明らかとされている^{1,3,13,16,18,22,23)}。

本論文では、二次元における超音波溶着モデルを作成し、EDの形状の違いと押入圧力の違いがEDの温度上昇挙動にどのような影響を及ぼすかについて考察することを目的とした。尚、EDの形状はフラットなもの、三角形の二種類を対象とした。解析は有限要素法を用いて行い、超音波振動は、複合材の上部に振動する応力を繰り返し負荷することで表現した。また本解析では、計算コスト削減のために、約20 kHzである実際の振動周波数^{1,14,24~26)}を10 Hzとして設定した。これにより振動エネルギーが実際よりも低くなることを避けるため、本解析では、EDの比熱と密度を実際より低い値に設定することで、得られる発熱量を大きくした。また簡略化のため、樹脂の非弾性挙動は塑性を考慮しない線形粘弾性としてEDをモデル化した。尚、粘弾性によるエネルギー散逸とは、外力を加えた際、貯蔵されずに失うエネルギーのことを指す。また、アレニウス型の温度時間換算則を粘弾性挙動に導入した。すなわち、EDの温度が上昇すると粘弾性挙動がより顕著となるため散逸エネルギーが増加し、このことがさらなる温度上昇に繋がるという関係をモデル化した。結果と考察の章では、最初にEDの形状の違いによる変形の経時変化について比較した。次に、発熱とエネルギー散逸を算出し、その速度を定性的に考察した。最後に、EDの形状による、発熱の際のEDの温度分布を算出し、その違いを比較した。

2. 解析手法

2.1 有限要素解析

Fig. 1に示す二次元超音波溶着モデルを作成した。本数値解析では、汎用有限要素解析コードABAQUS 2018を用いた。複合材は正方形として、一辺の長さを1 mmとした。EDの形状は、長方形(フラット)と三角形である。また、EDのメッシュをFig. 2に示す。複合材とED

Fig. 1 Analysis model of thermoplastic polymer welding.

Fig. 2 Mesh over the computation domain; (a) Flat ED, (b) Triangular ED.

Table 1 Material properties.²¹⁾

	Composite	ED (resin)
Conductivity (W/m K)	4.5×10^{-4}	1.5×10^{-4}
Density (kg/m ³)	31.1	32.5
Young's modulus (Pa)	9.3×10^9	2.8×10^9
Poisson's ratio	0.2	0.4
Specific heat (J/kg K)	35.2	25.0

に設定した材料特性を以下のTable 1に示す²¹⁾。尚、本解析ではCFRPの特性は重要ではないため、複合材料の異方性、積層構造を考慮しない簡単なモデルとなっている。振動する応力は0.6 MPaと4.5 MPaとした。数値シミュレーションを行うにあたり、実際の溶着時間(～1 s)と振動周波数(～ 10^{-5} s)の違いが大きいため、計算が困難である。そこで本研究では、実際より低い値の比熱と密度を設定することで、1回の振動で得られる発熱量を大きくし、10 Hzの振動で約20 kHzの超音波振動を模擬した。複合材とEDの間には界面相互作用特性を導入

Fig. 3 Stress relaxation data.

し、摩擦係数を 0.13 とした。

2.2 粘弾性特性

今回、ED には

$$E(t) = \frac{E(0)}{\left(1 + \left(\frac{t}{\tau_c}\right)^n\right)} \quad (1)$$

の式により緩和弾性率 $E(t)$ を定義した²⁷⁾。ここで、 $E(0)$ は初期弾性率、 τ_c は緩和時間、 n はべき乗則である。本研究では、 $\tau_c = 5.0 \times 10^6$ s、 $n = 0.30^{28)}$ として (1) 式より弾性率と時間の関係を導出した。正規化した曲線 (Fig. 3) を作成し、任意の時間における弾性率を求めた。

また、温度が高いと緩和時間が短くなる熱レオロジー的単純性を仮定した。今回、換算時間は

$$\xi(t) = \int_0^t \frac{ds}{A(\theta(s))} \quad (2)$$

と定義した。ここで、 $A(\theta(s))$ はシフト関数と呼ばれる。温度がある基準温度 T_R から任意の温度 T に代わると、すべての緩和時間が T_R における値の $\xi(t)$ 倍になる。シフト関数には

$$\ln(A) = \frac{E_0}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \quad (3)$$

で表せるアレニウス則を用いた。 E_0 は活性化エネルギー、 R は一般ガス定数である。本研究では、活性化エネルギーは 150 kJ/mol¹¹⁾、基準温度は -35°C とした。尚、この基準温度の設定は大きな意味を持たないが、定性的な評価を目的としている本解析の結果には影響を及ぼさない。

2.3 発熱の支配方程式

摩擦すべりによるエネルギー散逸率を

$$P_{\text{fr}} = \tau \cdot \dot{\gamma} \quad (4)$$

と定義した¹⁾。ここで、 τ は摩擦応力、 $\dot{\gamma}$ はすべり速度である。さらに、熱として各表面に解放されるエネルギーの量は

Fig. 4 Time-dependent ED of melting; (a) Flat ED (0.6 MPa), (b) Triangular ED (0.6 MPa), (c) Flat ED (4.5 MPa), (d) Triangular ED (4.5 MPa).

$$q_A = f\eta P_{\text{fr}}, \quad q_B = (1-f)\eta P_{\text{fr}} \quad (5)$$

とした。 q_A は ED 界面、 q_B は複合材界面に熱として変換されるエネルギー量である。また η は熱に変換される摩擦エネルギーの割合である。 f は各表面に分配される割合で、今回は 0.5 と仮定した。

続いて、粘弾性のエネルギー散逸を

$$\gamma^{pl} = \eta^{pl} \sigma : \epsilon^{pl} \quad (6)$$

と定義した。 η^{pl} は非弾性熱変換率であり、0.9 に設定した。 σ は応力、 ϵ^{pl} は非弾性ひずみ速度である。

尚、基準温度と同様、この数値設定に大きな意味はなく、定性的な評価から逸脱することはない。

よって、熱として変換されるエネルギーの総量 Q は、摩擦すべりによるエネルギー散逸と粘弾性のエネルギー散逸の合計で表され、

$$Q_A = q_A + \gamma^{pl}, \quad Q_B = q_B + \gamma^{pl} \quad (7)$$

Fig. 5 Stress distribution at 0.25 s; (a) Triangular ED (1 MPa), (b) Flat ED (1 MPa).

となる。

3. 解析結果及び考察

3.1 エネルギーダイレクターの変形

モデルに応力を負荷したときのEDの変形量の様子をFig. 4に示す。左端(0.000 s)は応力負荷前の様子で、時間の経過とともにEDの変形が大きくなる様子を示している。まず、モデルに0.6 MPaの応力を負荷した場合について述べる。三角EDと比べ、フラットなEDの変形は極めて小さかった。続いて、4.5 MPaの応力を負荷すると、フラットと三角EDのどちらも変形した。しかし、三角EDの方が1回目の応力負荷で変形が開始したのに対してフラットEDの方は10回目の応力負荷で大きな変形が開始した。これは、界面と接触する頂点に応力集中が生じるためであると考えられる。Fig. 5に0.6 MPaの応力を負荷したときの0.25 sにおけるフラットと三角EDの応力分布を示す。フラットEDは一様であるのに対して、三角EDでは界面と接触する頂点において応力集中が生じていることが分かる。つまり式(6)に示されるように粘弾性のエネルギー散逸は応力に比例しており、頂点の応力集中によって粘弾性散逸が顕著になり優先的に発熱していくと考えられる。本研究の解析結果は、三角EDはフラットEDに比べて小さい振動エネルギーで溶着することができるという実験事実²⁹⁾を裏付けるものである。

3.2 エネルギーダイレクターの温度変化

0.6 MPaの応力を負荷した場合の、時間変化に対するEDの温度変化をFig. 6に示す。尚、ここでいう温度とは、ED全体の平均温度のことを指す。

Fig. 6 Temperature histories of the polymer (0.6 MPa).

Fig. 7 Dissipation energy of viscoelasticity (0.6 MPa).

Fig. 8 Dissipation energy of friction (0.6 MPa).

Fig. 6より、三角EDについては3回目と10回目の応力負荷時に温度上昇が顕著に表れているのに比べて、フラットEDでは確認できなかった。この結果はエネルギー散逸に起因していると考えられる。同じ負荷条件における粘弾性によるエネルギー散逸を示すとFig. 7のようになる。三角EDでは、Fig. 6の温度変化と同様に3回目と10回目の応力負荷時に顕著な上昇を示した。同じ負荷条件における摩擦によるエネルギー散逸をFig. 8

Fig. 9 Temperature histories of the polymer (4.5 MPa).

Fig. 10 Dissipation energy of viscoelasticity (4.5 MPa).

Fig. 11 Dissipation energy of friction (4.5 MPa).

に示す。粘弾性によるエネルギー散逸と比べ、摩擦によるエネルギー散逸は微小な量であった。以上の結果から、応力集中が顕著な三角EDを用いた場合、エネルギーダイレクターの温度上昇は樹脂の粘弾性特性による影響が支配的であることが明らかとなった。

以上より押入圧力が低い場合、三角EDを用いる場合、超音波振動を与えると初めに粘弾性によるエネルギー散逸が起こる。続いて、散逸したエネルギーが熱に変換されることでEDの温度が上昇し、アレニウス型の温度時

間換算則により見かけの時間が加速され見かけの剛性が低下する。その結果、EDが溶融するというようなプロセスになることが示唆される。

4.5 MPaの応力を負荷した場合の、時間変化に対するEDの温度変化をFig. 9に示す。0.6 MPaのときとは異なり、10回目の応力負荷時にフラットEDの温度が上昇するという結果を得た。また、粘弾性によるエネルギー散逸と摩擦によるエネルギー散逸の時間変化についてFig. 10とFig. 11に示す。フラットEDでは、粘弾性と摩擦の両方において、9回目の応力負荷まで徐々に散逸エネルギーが上昇して、10回目の応力負荷で急増していることが分かる。まず9回目までの応力負荷について述べる。粘弾性の散逸エネルギーに比べて、摩擦の散逸エネルギーの方が傾きが顕著なため、式(5)にしたがって、界面に摩擦の散逸エネルギーによる発熱が先に起こり、EDの温度が上昇する。続いて、アレニウス型の温度時間換算則に従い見かけの時間が加速され見かけの剛性が低下する。よってEDは変形し、式(6)に従って粘弾性の散逸エネルギーが上昇していく。次に10回目の応力負荷について述べる。本解析では温度が80°C付近に到達すると、アレニウス則の温度時間換算則に従い、見かけの剛性が一気に下がり、粘弾性の散逸エネルギーが急増する。加えてEDが大きく変形するため、接触面が増えて摩擦のエネルギーも急増する。つまり、温度上昇と、粘弾性と摩擦の散逸エネルギーの3つが連成状態になると推測される。尚、80°Cというのは本解析の場合であり、他の条件の場合でもある程度温度が上昇すると上記の連成状態になると考えられる。

実際の超音波溶着では、振動エネルギーと加圧力、そして溶着時間が溶着の質に関わる主なパラメーターである。今回EDの形状にかかわらず、EDの温度が急増するという結果を得た。これは、パラメーターの最適化を困難にする可能性があり、超音波溶着の研究の進展に影響を及ぼしている原因であると考えられる。

本研究の解析では20 kHzの超音波振動を10 Hzの振動で模擬するため、比熱と密度の値を本来より低い値に、熱容量を高い値に設定している。三角EDの温度上昇はフラットEDより温度上昇が早い、つまり少ない振動エネルギーで溶着可能であるという過去の研究結果^{1,21)}と定性的に一致しているが、定量的な温度上昇速度を議論することは今後の課題である。さらに、簡単のため比熱が温度によらず一定であると仮定したことで、EDの温度が発散するという結果を得た。しかし、本来は比熱が温度に依存するため、エネルギーの散逸による発

Fig. 12 Temperature distribution of Triangular ED (4.5 MPa); (a) 0.010 s, (b) 0.011 s.

Fig. 13 Temperature distribution of Flat ED (4.5 MPa); (a) 0.945 s, (b) 0.946 s.

熱は収束するはずである。比熱の温度依存性を考慮して解析することも今後の課題となる。

3.3 エネルギーダイレクターの温度分布

4.5 MPa の応力を負荷したときの三角 ED の温度分布の時間変化について Fig. 12 に示す。複合材と接触している頂点が局所的に発熱しており、ED 内部に温度差が生じていることが分かる。また、4.5 MPa を負荷したときのフラット ED の温度分布の時間変化について Fig. 13 に示す。図から、三角 ED と比べると ED 内部は比較的均一に発熱していることが分かる。溶着中に、ED 内部に温度差が生じると、溶融している箇所と溶融していない箇所が同時に存在することで、ED が焦げる可能性が生じる。よって今回の解析では、フラットな ED に比べると、三角 ED を用いた場合、局所的で過剰な加熱により、予期しない化学反応が起きてしまう懸念が示される。

4. 結 言

本研究では、超音波溶着における二種類の ED の二次元モデルを作成し、各々の変形、温度、散逸エネルギー

に関する経時変化を比較した。フラット ED に比べて三角 ED の方が早く変形が開始する結果を得た。したがって、フラット ED に比べて、三角 ED は溶着エネルギーを少なくかつ溶着時間を短縮できる可能性があると考えられる。ED の発熱プロセスについて、粘弾性によるエネルギー散逸、摩擦によるエネルギー散逸、温度上昇が連成状態になり、急激に温度が上昇する可能性があることが示唆された。よって、超音波溶着において圧力、振動数、溶着時間の最適化が困難であるのは、上述した急激な温度上昇が要因である可能性がある。フラット ED 内部での温度が比較的均一であるのに対して、三角 ED は頂点に局所的な温度分布となっており、ED 内部での温度差が大きく生じている結果となった。つまり、三角 ED は溶着エネルギーを少なくかつ溶着時間を短縮できる可能性があるが、局所的な加熱が過剰である可能性があるため、予期しない化学反応が起きてしまう懸念が示唆される。

参 考 文 献

- 1) A. Levy, S. Le Corre & I.F. Villegas : *J. Mater. Process. Technol.*, **214** (2014), 1361-1371.
- 2) P.G. O'Shaughnessey, M. Dubé & I.F. Villegas : *J. Compos. Mater.*, **50** (2016), 2895-2910.
- 3) A. Yousefpour, M. Hojjati & J.P. Immerigeon : *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, **17** (2004), 303-341.
- 4) K. Wang, D. Shriver, M. Banu, S.J. Hu, G. Xiao, J. Arinez & H.T. Fan : *J. Manuf. Sci. Eng.*, **139** (2017), 111001-111010.
- 5) I.F. Villegas & R. van Moorleghem : *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **109** (2018), 75-83.
- 6) 田邊大貴, 西藪和明, 倉敷哲生 : 日本機械学会論文集, **81**, 826 (2015), 15-00005.
- 7) 水上孝一, 水谷義弘, 轟 章, 鈴木良郎 : 日本機械学会論文集, **80**, 812 (2014), SMM0084.
- 8) I.F. Villegas : *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, **28** (2015), 66-85.
- 9) M. Roopa Rani & R. Rudramoorthy : *Ultrasonics*, **53** (2013), 763-772.
- 10) W. Tao, X. Su, H. Wang, Z. Zhang, H. Li & J. Chen : *J. Manuf. Process.*, **37** (2019), 196-202.
- 11) K. Goto, K. Imai, M. Arai & T. Ishikawa : *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **116** (2019), 126-137.
- 12) G. Palardy & I.F. Villegas : *Compos. Interfaces*, **24** (2017), 203-214.
- 13) G. Palardy, H. Shi, A. Levy, S. Le Corre & I.F. Villegas : *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **113** (2018), 339-349.
- 14) A. Benatar : *Materials and Processing Report*, **3**

- (2016), 1-10.
- 15) A. Levy, S. Le Corre, N. Chevaugnon & A. Poitou : *Eur. J. Mech. A/Solids*, **30** (2011), 501-509.
 - 16) S.Q. Yang, Z. Dong, J.C. Yan & J.B. Ju : *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)*, **13** (2000), 80-83.
 - 17) I.F. Villegas, L. Moser, A. Yousefpour, P. Mitschang & H.E. Bersee : *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, **26** (2013), 1007-1024.
 - 18) S. Tutunjian, M. Dannemann, F. Fischer, O. Eroğlu & N. Modler : *J. Manuf. Mater. Process.*, **3** (2018), 1-17.
 - 19) F. Senders, M. van Beurden, G. Palardy & I.F. Villegas : *Adv. Manuf. Polym. Compos. Sci.*, **2** (2016), 83-92.
 - 20) K.S. Suresh, M.R. Rani, K. Prakasan & R. Rudramoorthy : *J. Mater. Process. Technol.*, **186** (2007), 138-146.
 - 21) A. Levy, S. Le Corre & A. Poitou : *Int. J. Mater. Form.*, **7** (2014), 39-51.
 - 22) X. Wu, T. Liu & W. Cai : *Journal of Manufacturing Processes*, **20** (2015), 321-331.
 - 23) M.N. Tolunay, P.R. Dawson & K.K. Wang : *Polym. Eng. Sci.*, **23** (1983), 726-733.
 - 24) F. Balle & J. Magin : *Phys. Procedia*, **70** (2015), 846-849.
 - 25) C.J. Nonhof & G.A. Luiten : *Polym. Eng. Sci.*, **36** (2004), 1177-1183.
 - 26) C. Zhang & L. Li : *Mater. Process. Sci.*, **40** (2009), 196-207.
 - 27) J. Koyanagi, M. Nakada & Y. Miyano : *Mech. Time-Dependent Mater.*, **16** (2012), 19-30.
 - 28) J. Koyanagi : *Compos. Sci. Technol.*, **69** (2009), 2158-2162.
 - 29) I.F. Villegas & G. Palardy : *Compos. Interfaces*, **24** (2017), 515-528.