

FRP のリアルタイム最適成形システムの開発

Development of real-time optimized molding system of FRP

知能機械システム工学コース

機能性材料工学研究室 1205046 出口 洸二

1 緒言

大型な FRP 製品の製造では、温度分布によって硬化度にムラが生じやすい。しかし、最適な成形条件が確立されていない。そのため、FRP 複合材料の最適な成形条件の探索には多くの試行回数が必要であり、それが FRP 製品の製造コスト増加の一因となっている。そこで、より効率的な最適成形条件の探索手法が求められている。

本研究では、埋め込みセンサを用いたリアルタイム硬化度測定と、シミュレーションによる成形条件の最適化を組み合わせたリアルタイム成形システムの構築を目的とする。リアルタイム硬化度測定システムでは、ノイズの大きいプリプレグにも適用可能なシステムを目指した。また最適成形システムの開発では成形中に得られた値を基にして、シミュレーションモデルを改良し、そのモデルを用いて硬化進展を予測し、最適な成形パラメータを決定するシステムを構築し、シミュレーションを行った。

2 リアルタイム硬化度測定システムの構築

2.1 リアルタイム硬化度測定システム

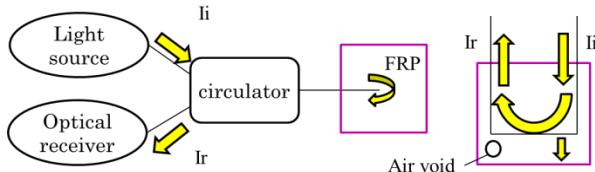


Fig.1 Refractive index measurement using optical fibers

図 1 に光ファイバ屈折率測定法の概略を示す。光源から出た光は光ファイバを介して樹脂中に入射され、フレネル反射光量を計測する。計測された光量より、屈折率変化 Δn を算出し、式(1)を用いて硬化度 α を算出する。

$$\alpha = \frac{\Delta n(\alpha, T) - \frac{dn}{dT}(0)(T - T_s)}{\Delta n(1, T_0) + \left\{ \frac{dn}{dT}(1) - \frac{dn}{dT}(0) \right\} (T - T_0)} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta n(\alpha, T)$ は硬化度 α 、温度 T における屈折率、 $dn/dT(\alpha)$ は硬化度 α の樹脂屈折率の温度依存性、 T_s は基準温度、 T_0 は各パラメータを求めた時の参照温度を示す。

織物繊維を用いたウェット成形では、 Δn に生じるノイズは非常に小さく、リアルタイム硬化度測定を行えることが明らかになっている。しかし、プリプレグの硬化モニタリングでは、硬化開始前に大きなノイズが生じる。このノイズは、測定精度に大きな影響を与えるため、リアルタイム測定を行うためにはこのノイズを除去しなくてはならない。図 2 に、本研究で提案するシステムのブロック図を示す。図中の n_{eff} は光ファイバの有効屈折率、 n_{ref} は参照メディアの屈折率、 n_s は T_s での屈折率を示す。まず、光出力 I からカットオフ周波数 f_c のパスフィルタ (LPF) を使用してノイズを除去した。

実験より、低域カットオフ周波数 $f_c=0.034\text{Hz}$ 、時間幅 $dt=2/f_c$ とした。時刻 $t=0$ における光量から I_{air} を、 T_s における光量から I_s をそれぞれ求めておく。成形温度が基準温度に達した後、式(1)を用いて硬化度を算出する。また、CFRP プリプレグは、LPF では取り除けないほど大きなノイズが生じているため、フィルタリング処理を行う前に、測定中のデータから閾値を設けることによって、大きなノイズを取り除く処理を行った。図 3 に測定された光量と、本システムを用いてフィルタリング処理を行った光量を示す。図から、ノイズが減少し、硬化度算出に影響の少ないデータを得られたことがわかる。

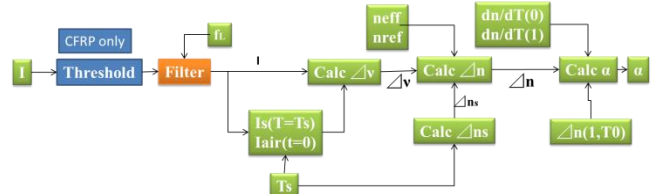


Fig.2 System diagram for calculating degree of cure in real-time

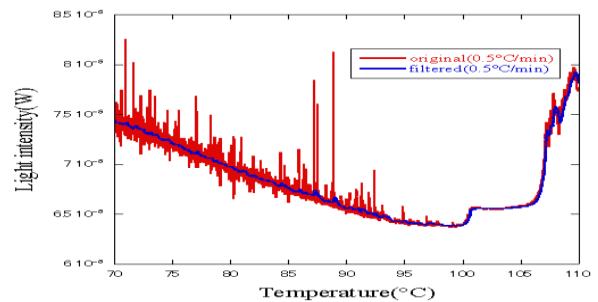


Fig.3 Comparison of original light intensity with filtered light intensity

2.2 プリプレグのリアルタイム硬化モニタリング

本研究では、GFRP プリプレグ、CFRP プリプレグを一方方向に 10 枚積層し、加熱プレス成形を行って試験片を作成した。5°C/min、3°C/min、2°C/min、1°C/min、0.5°C/min の温度パターンを用意し、初期温度から GFRP プリプレグは 200°C まで昇温させ、その後完全硬化させるために 1 時間の温度保持を行った。CFRP プリプレグは 220°C まで昇温させ、その後、自然冷却を行った。また、光ファイバセンサおよび熱電対を繊維方向に埋め込んだ。得られたデータに対して、リアルタイム硬化度測定プログラムを適用する。

図 4、図 5 にリアルタイム測定プログラムを適用した GFRP プリプレグ、CFRP プリプレグの硬化度曲線を成形温度に対してそれぞれ示す。ここでは、GFRP プリプレグは 90°C を T_s とし、CFRP プリプレグは昇温速度によって T_s を変更し、硬化度を算出している。本研究で開発したリアルタイム硬化度測定プログラムにより基準温度でのノイズが除去されたため、硬化度にはノイズの影響は現れず硬化度の算出が行えた。また、GFRP プリプレグでは、昇温速度 1°C/min、2°C/min、3°C

/min の硬化度はほぼ 1 であり、精度良く硬化度が測定できている。ただし、昇温速度 0.5°C/min, 5°C/min では硬化度が 1 から 0.1 程度前後している。また、CFRP プリプレグでは、昇温速度 3°C/min では、硬化度がほぼ 1 だが、そのほかの昇温速度では、GFRP プリプレグ同様 0.05~0.1 程度前後している。

以上より、プリプレグの測定では 0.1 程度の誤差があるものの、リアルタイムで硬化度測定が可能であることが示された。

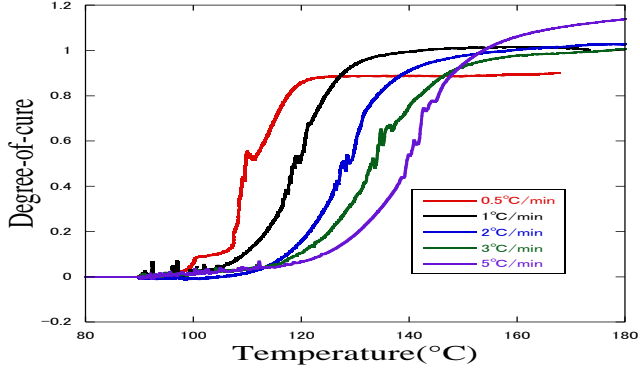


Fig.4 Filtered degree-of-cure curves of GFRP laminates

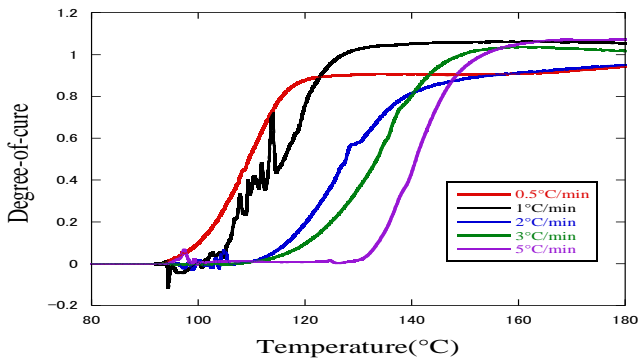


Fig.5 Filtered degree-of-cure curves of CFRP laminates

3 最適成形システム

3.1 解析モデルおよび同定方法

本研究では、図 6 に示すような上面からのみ加熱を行う厚み一定の GFRP 積層板の硬化過程の問題を取り扱う。金型の上に、厚さ $L=5.3\text{mm}$ の GFRP を積層し、上面に同じ温度 T_{top} を与える。また、金型の下面は空気 (温度 T_{Air}) である。面内方向の分布は一樣と仮定し、1 次元問題として考える。上面を $x=0$ として、 $x=0$ (Top), $x=L/2$ (Middle), $x=L$ (Bottom) の位置に温度および硬化度センサが埋め込まれているものとする。また、 T_{top} を制御温度とする。

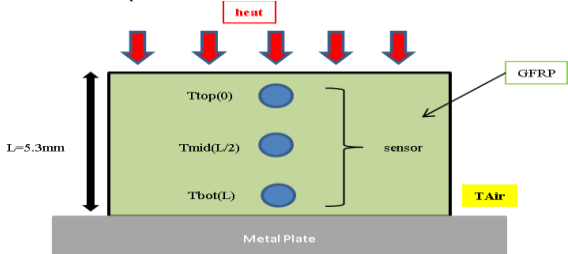


Fig.6 Analytical model of degree-of-cure and temperature of GFRP

非定常熱伝導方程式と硬化反応速度式を連成させることにより、温度と硬化度の連成計算を行った。以下に硬化発熱項を含む非定常熱伝導方程式を示す。

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda * \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q \quad (2)$$

$$Q = \rho H \dot{\alpha}, H = \int_0^\infty \dot{q} dt \quad (3)$$

ここで x は厚み、 ΔT は温度変化、 Δt は時間変化、 λ は熱伝導率、 c_p は定圧比熱、 ρ は密度、 Q は発熱項、 H は単位重量当たりの硬化発熱総量、 \dot{q} は硬化反応熱、 α は硬化度である。また本研究では硬化反応モデルに Kamal モデルを用いた。Kamal モデルの式を以下に示す。

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2 \alpha^m)(1 - \alpha)^n \quad (4)$$

$$k_1 = A_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), k_2 = A_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) \quad (5)$$

A は係数、 m, n は反応次数、 E は活性化エネルギー、 R は気体定数である。DSC 測定により得られる熱量 \dot{q} 、時間および温度の関係から、硬化度、硬化速度および時間の関係を得ることができ、式(2)に当てはめることで、物性を得る。また、初期条件と境界条件を以下に示す。境界条件には、上面に制御温度、下面に熱流を与えた。

$$T(0, x) = 25^\circ\text{C}, \quad (6)$$

$$\alpha(0, x) = 0$$

$$T(t, 0) = T_h(t) \quad (7)$$

$$q(t, L) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(t, L) = h\{T(t, L) - T_{Air}(t)\}$$

以上の式を連成して解き、温度と硬化度の時間・空間分布が求められる。

境界条件を用いて計算された温度および硬化度をセンサ測定値 $\tilde{T}_k, \tilde{\alpha}_k$ とする。次に、解析で用いる下面空気温度 T_{Air} は、前回ステップから線形的に変化するものとした。 $T_{Air,k}$ を変化させて温度と硬化度の解析を行う。得られた温度・硬化度はセンサ測定値と異なるため、誤差の最小二乗和を誤差関数とする。この誤差関数を最小化する $T_{Air,k}$ を求めることで $T_{Air,k}$ を同定する。次のステップでは、同定値を用いて計算された温度・硬化度分布を初期条件とする。

本研究では、下面空気温度が硬化プロセス中に変化する場合に、リアルタイムでモデルのシステム同定を行うことを考える。今回は最大温度 $T_{max} = 100^\circ\text{C}$ 、初期温度 $T_0 = 25^\circ\text{C}$ 、 T_{max} に到達する時間 $t_1 = 4500[\text{s}]$ 、最大時間 $t_{max} = 10800[\text{s}]$ とし、3種類の下面空気温度条件を与えて得られる解析結果をセンサ出力とする。

3.2 下面大気温度の同定結果

$T_{Air,k}$ を 5°C ずつ変化させて、 $\Delta t_k = 1000[\text{s}]$ として解析を行った。図 7 に、横軸を時間、縦軸を空気温度として、同定された空気温度を実際に与えた空気温度と共に示す。図より、すべてのケースに関して同定値は与えた空気温度と非常に一致しており、本手法によって正確な同定が行われることが示された。

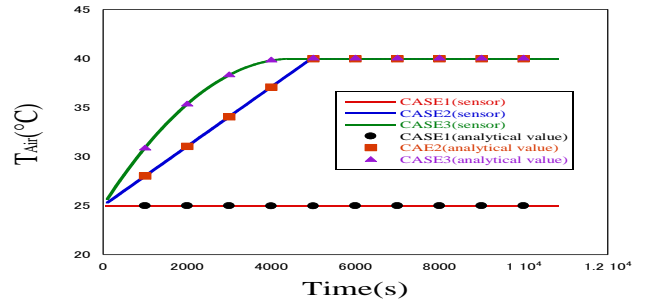


Fig.7 Relationship between analytical value and sensor value of T_{Air}

3.3 リアルタイム最適化手法

全体の硬化プロセスを評価するためのパラメータとして、本研究では最小の硬化度(本モデルでは下面の硬化度)が95%に達するまでの時間 $t_{0.95}$ と、硬化ムラとして最小の硬化度(本モデルでは上面の硬化度)が95%に達したときの下面硬化度との差 α_{UE} を用いた。

一方で、 k 区間における目的変数には、硬化ムラ $\Delta\alpha_{UE,k}$ と、硬化時間 t_c を用いた。それぞれの定義を以下に示す。

$$\Delta\alpha_k = \frac{1}{L} \int_0^L \Delta\alpha dx = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{\alpha_k(t_{k+1}, x_i) - \alpha_k(t_k, x_i)\} \quad (8)$$

$$t_c = \dot{\alpha}^{-1} = \frac{\Delta t_k}{\Delta\alpha_k} \quad (9)$$

$$\Delta\alpha_{UE,k} = \alpha_k(t_{k+1}, 0) - \alpha_k(t_{k+1}, L) \quad (10)$$

ここで $\Delta\alpha_k$ は硬化速度、 t_c は硬化度を1上げるのに必要な時間、 $\Delta\alpha_{UE,k}$ は k ステップの時間経過による硬化ムラを意味する。昇温速度 \dot{T}_k を0から5まで0.5刻みで与えて、2つの目的変数の応答 $t_c(\dot{T}_k)$ と $\Delta\alpha_{UE,k}(\dot{T}_k)$ を求める。得られた応答それぞれの最大値と最小値を用いて0から1までの値に正規化し、エルミート補間によって応答曲面 \bar{t}_c を求める。そして、目的関数として、以下の関数を定義する。

$$F_1 = \left\{ \bar{t}_c^2 \cdot a + \frac{\Delta\alpha_{UE,k}^2}{\Delta\alpha_{UE,k}^{OPT2}} (1-a) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

ここで、 a は重みであり、0~1の値をとる。目的関数 F_1 を最小化するパレート解 $\dot{T}_k^{OPT}(a)$ 、 $t_c^{OPT}(a)$ 、 $\alpha_{UE,k}^{OPT}(a)$ を求めた。

パレート解集合から1つの解を選択するために、MaxMin法を用いた。

得られたパレート解の最大値と最小値を用いて、0から1までの値に正規化し、以下の関数

$$f_1 = \left\{ \frac{t_c^{OPT2}}{t_c^{OPT2} + \Delta\alpha_{UE,k}^{OPT2}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

を最小とする重みを最適な a^{OPT} とする。得られた a^{OPT} に対する設計変数 $\dot{T}_k^{OPT}(a^{OPT})$ を最適な昇温速度とする。

3.4 最適化結果および考察

図8に、初期昇温速度 $\dot{T}(0) = 1,3,5[^\circ\text{C}/\text{min}]$ 、 $\Delta t_1=600[\text{s}]$ 、 $\Delta t_i=300[\text{s}]$ として目的関数 F_1 について最適化を行って得られた最適温度パターン T_{top} を示す。図より、最適化開始後の昇温速度 \dot{T} が初期昇温速度 $\dot{T}(0)$ に関わらずほぼ等しく、約 $2.3^\circ\text{C}/\text{min}$ をとり、硬化度が1に近づく \dot{T} は小さくなるのが分かる。このことから、最適成形条件は初期昇温速度 $\dot{T}(0)$ にほとんど依存しないことが分かる。また表1に成形評価パラメータを示す。表より、 \dot{T} が大きいほど α_{UE} は大きく、 $t_{0.95}$ は小さくなるのが分かる。

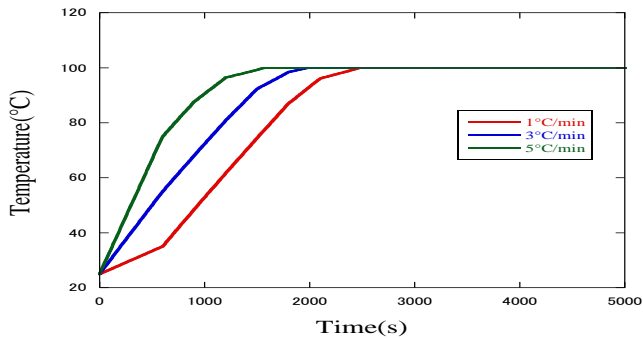


Fig.8 Relationship between time and temperature ($\dot{T}(0) = 1,3,5[^\circ\text{C}/\text{min}]$)

Table 1 Parameters of the optimum molding conditions ($\dot{T}(0) = 1,3,5[^\circ\text{C}/\text{min}]$)

	1	3	5
α_{UE}	0.4578	0.4658	0.4816
$t_{0.95}$	7679	7425	7081

3.5 最適成形システム

最適成形システムでは、成形中に環境が変化した場合にも自動で適応し、最適な条件を求める必要がある。そこで3.2節での下面空気温度条件としてCASE2を用いた場合に T_{Air} の同定と温度条件最適化を同時に行った。

図9に、昇温速度 $\dot{T} = 2[^\circ\text{C}/\text{min}]$ 、 $\Delta t_1=300[\text{s}]$ 、 $\Delta t_i=300[\text{s}]$ として目的関数 F_1 について最適化と同定を行った場合に得られた最適温度パターン T_{top} を示す。また図10に、同定を行ったときの大気温度 $new T_{Air}$ を示す。図より、同定と最適化を成形中に行うことができることが示された。得られた最適温度パターンはCASE1の下面空気温度に対して行った最適化の解と大きな違いは見られなかったが、これは下面空気温度が最適な成形温度に及ぼす影響が小さいためである。

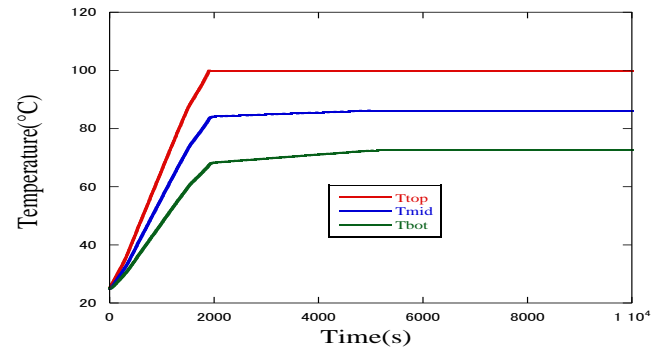


Fig.9 Relationship between time and temperature (T_{Air} =CASE2)

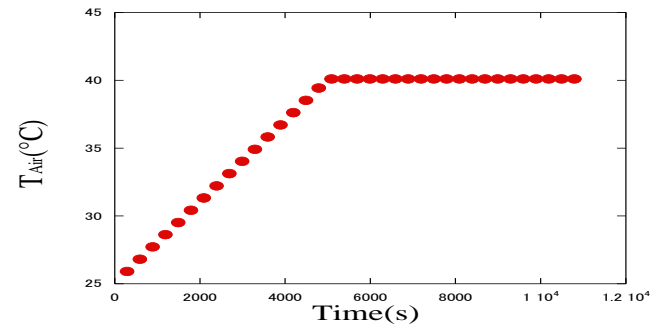


Fig.10 Relationship between time and temperature of identified T_{Air}

4. 結言

本研究では、ウェット成形だけでなく、ノイズの大きいブリプレグにも適用可能な硬化モニタリングシステムを開発した。また、硬化ムラと成形時間を同時に最小化する最適成形システムを構築し、シミュレーションによって、リアルタイム最適化が可能であることを示した。

謝辞

本研究は、内閣府・戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「航空機用高生産性革新PMCの製造・品質保証技術の開発：成形プロセスモニタリング・モデリングの学術基盤研究」の助成を受けたものである。