

# VaRTM 成形 FRP の成形温度最適化

## Optimization of molding temperature of VaRTM FRP

知能機械システム工学コース

機能性材料工学研究室 1205042 塩田 湧己

### 1. 緒言

大型形状の FRP 一体成形時、温度分布の不均一によって、硬化度分布の不均一が生じることが考えられる。この場合、成形ひずみに分布が生じて、結果として反り等の成形誘起変形や成形残留応力を引き起こす。これをできるだけ防ぐためには、成形時に生じる温度・硬化度の進展を把握し、適切な温度条件を与える必要がある。一般に、最適温度条件は様々な温度条件下で製品を成形して、その特性を力学試験によって評価する試行錯誤によって求められているが、この手法は効率が悪い。そこで、成形中の材料内部の状態の変化を把握する成形モニタリングや、最適温度条件をシミュレーションによって求める成形条件最適化に関する研究が行われている。

筆者らは、FRP 中の局所的な硬化度をフレネル反射型の光ファイバ屈折率センサを用いてリアルタイムで測定できることを明らかにしてきた。また、硬化度測定で得られた硬化反応モデルを用いたシミュレーションにより、硬化度分布を精度良く推測できることを明らかにしてきた。

本研究では、2次元方向に硬化度分布が生じる FRP 板の成形における温度条件最適化手法の構築を目的として、実験および解析を行った。

### 2. 解析手法

#### 2.1 温度および硬化度連成解析

本研究では、温度と硬化度の連成解析を行った。下に非定常熱伝導式および硬化反応速度式を示す。

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + Q \quad (1)$$

$$Q = \rho H \dot{\alpha}, H = \int_0^\infty \dot{q} dt \quad (2)$$

ここで  $\Delta T$  は温度変化、 $\Delta t$  は時間変化、 $\lambda$  は熱伝導率、 $c_p$  は定圧比熱、 $\rho$  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、 $\alpha$  は硬化度である。

硬化度は、以下に示す Kamal モデルで計算した。

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2 \alpha^m)(1 - \alpha)^n \quad (3)$$

$$k_1 = A_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), k_2 = A_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) \quad (4)$$

$A$  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。熱流  $\dot{q}$ 、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 (3)、(4) に当てはめることで物性を得る。

#### 2.2 実験による解析モデルの検証

本研究では、解析モデルの検証に図 1 に示す条件で実験及び FEM 解析を行った。初期条件は 17°C 一定とし、ヒーター部に測定された温度を与え、スチール金型の下面は大気解放されている。下面の境界条件には以下の対流条件の式を用いた。

$$q(t, x, L) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}(t, x, L) = h(T(t, x, L) - T_{Air}) \quad (5)$$

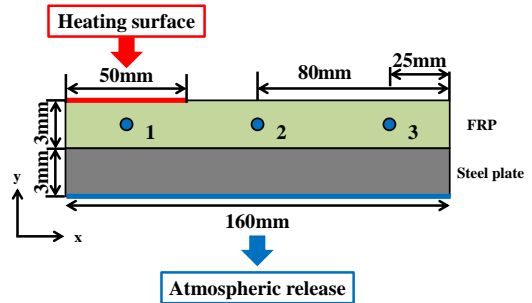


Fig.1. A model for measurement and analysis of distribution of temperature and degree of cure

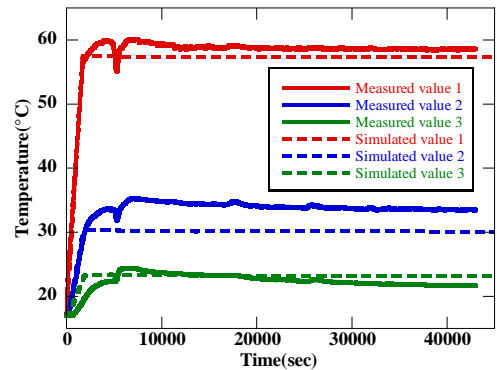


Fig.2 Measured and simulated temperature curves against process time at positions 1, 2 and 3

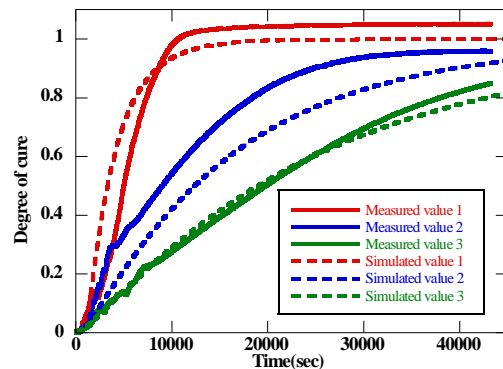


Fig.3 Measured and simulated degree-of-cure curves against process time at positions 1, 2 and 3

ここで、 $T_h$  はヒーター温度、 $T_{Air}$  は大気温度、 $h$  は大気と鉄の間の熱伝達率である。

実験では、エポキシ樹脂基 GFRP 織物試験片 (60mm × 160mm × 5mm) の成形中の温度、硬化度の多点測定を、細径熱電対およびフレネル反射型光ファイバセンサを用いて行った。図中の 1,2,3 が温度および硬化度の測定位置であり、加えてヒーター直下面の温度測定も行った。加熱条件は室温か

ら 80°Cまで 2°C/min で昇温, 80°Cを 12 時間保持した.

図 2,3 に位置 1,2,3 で測定された温度と硬化度の成形時間に  
 対する曲線を解析結果とともにそれぞれ示す. 図より, 温  
 度・硬化度ともに解析結果と実験結果はある程度一致して  
 おり, 本解析手法の有効性が示された. 位置 2 の温度・硬  
 化度の解析値と測定値の誤差が大きいのは, 位置 2 での  
 温度勾配が大きく, 埋め込まれた後にセンサの位置がず  
 れた影響が大きく出たためではないかと考えられる.

### 3. 成形温度最適化

図 4 に示す厚みの異なる GFRP の上 2 面に異なるヒーター  
 を配置する問題について, ヒーターに接する境界温度の最  
 適化を行った. 面 A の昇温速度を 5°C/min 固定とし, 面 B  
 の昇温速度  $\dot{T}_B$  を 0.5, 1, 2, 3, 4°C/min とした. さらに  
 到達温度  $T_{max}$  は, 両面共に 60, 70, 80, 90, 100°C の 5  
 パターンとした. つまり面 B の昇温速度と  $T_{max}$  が設計  
 変数となる. また, 目的変数としてモデル下面の硬化度  
 が全て 0.95 以上に達した時間  $t_{0.95}$ , ヒーターから加  
 熱面に流入する熱流を  $t_{0.95}$  まで積分した値を成形熱  
 量  $q_{cure}$ , 下面の硬化度最大値が 0.95 に達した時の下  
 面の硬化ムラ  $\Delta\alpha$  を考えた.

図 5 に  $t_{0.95}$  の応答値を示す. 図より, 硬化完了時間は最大  
 温度に大きく依存するが, 昇温速度にはほとんど影響され  
 ないことが分かる. これは, A 面側下面の硬化進展が B  
 面側下面より遅いため,  $t_{0.95}$  が A 面側下面の硬化進展  
 でほぼ決まり, また B 面の昇温速度は A 面側下面の硬化  
 進展にほとんど影響しないためである.

図 6 に成形熱量の応答値を示す. 図より, 成形熱量は最大  
 温度および昇温速度による影響が顕著に表れていること  
 が分かる. 同じ最大温度では, 昇温速度が大きくなるほ  
 ど成形熱量は小さくなる. 一方, 昇温速度が 2°C/min 以  
 上の場合には最大温度が大きくなるほど成形熱量が小さ  
 くなり, 昇温速度が 1°C/min 以下の場合には逆に成形  
 熱量が大きくなる.

図 7 に下面の硬化ムラ  $\Delta\alpha$  の応答値を示す. 図より,  $\Delta\alpha$   
 は昇温速度が 3 および 4°C/min の場合は最大温度の増  
 加とともに増加する傾向にあるが, それら以外の昇温速  
 度では, 最大温度に対して単調な傾向を示さないことが  
 分かる. 昇温速度 0.5°C/min の場合は  $T_{max}=90^\circ\text{C}$   
 で最小値をとり, また 1°C/min の場合は  $T_{max}=70^\circ\text{C}$   
 で, 2°C/min の場合は  $T_{max}=90^\circ\text{C}$  で最大値をと  
 ることが分かった. このように  $\Delta\alpha$  が複雑な応答を示  
 す理由は, 下面において硬化度が最大となる位置が昇  
 温速度と最大温度に大きく影響されるためである.

以上より,  $t_{0.95}$  と  $q_{cure}$  の最小化を目的とする場合は,  
 本研究の設計変数範囲内では  $T_{max}=100^\circ\text{C}$  かつ  $\dot{T}_B=4$   
 が最適解となる. これに対して  $\Delta\alpha$  の最小化を目的と  
 する場合は,  $T_{max}=90^\circ\text{C}$  かつ  $\dot{T}_B=0.5$  が最適解とな  
 る. この解における  $t_{0.95}$  は最小ではないがその次に  
 小さく,  $t_{0.95}$  と  $\Delta\alpha$  の最小化を目的とする場合  
 この解を最適解として選択できる. 一方で, この解  
 では,  $q_{cure}$  の値は 2 番目に大きな値となり, 消費エ  
 ネルギーの観点からは最適な解ではない. 3 つの目的を  
 同時に最適化するためには, 応答局面法を用いた最適  
 化でパレート解を算出する必要がある.

### 4. 結言

本研究では, 部分的に厚みの異なる FRP 板の成形温度  
 条件最適化を行う手法を提案し, 解析モデルを成形時の  
 測定によって検証した後, 設計変数に対する応答解析を  
 行った. その結果, 硬化ムラと硬化時間を最小化する温  
 度条件を求めることができた. しかし, 消費エネルギー  
 を加えた 3 目的での最適値を 3 つの目的変数の応答  
 グラフから探るのは困難であり, 応答局面法によるパ  
 レート解の算出が必要であると考えられる.

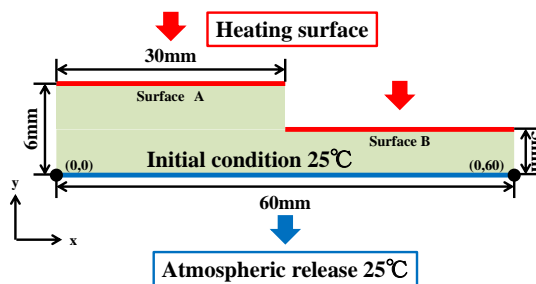


Fig.4 A model for curing process optimization

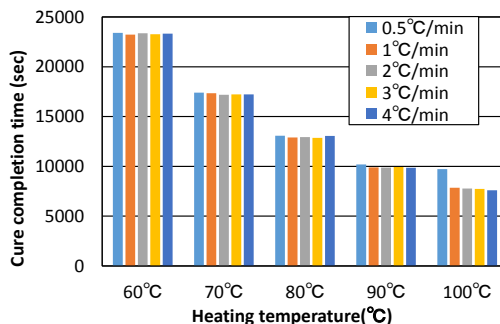


Fig.5 Relationship between cure completion time and maximum temperature at various heating rate

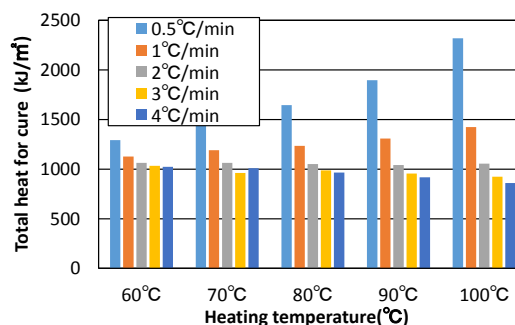


Fig.6 Relationship between total heat for cure and maximum temperature at various heating rate

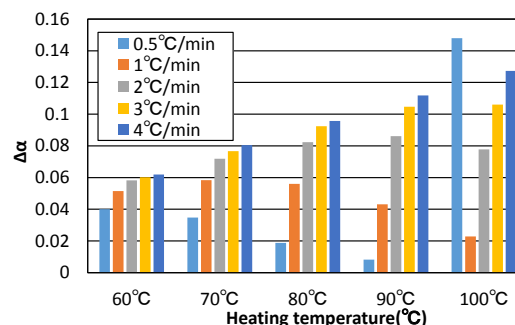


Fig.7 Relationship between unevenness of degree-of-cure distribution on bottom surface and maximum temperature at various heating rate

### 文献

(1)高坂達郎, 逢坂勝彦, 澤田吉裕, ” シングルモード光ファイバを用いた屈折率リアルタイム測定法による樹脂の硬化モニタリング”, 材料, Vol. 59, N05 (2010) pp.391-397

### 謝辞

本研究の一部は, 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.