

新技術・新素材の利用拡大を支援するための塑性力学理論の構築

慶應義塾大学理工学部 システムデザイン工学科

専任講師 大家 哲朗

(2018 年度 一般研究開発助成 AF-2018024-B2)

キーワード：塑性力学，成形シミュレーション，材料モデル，結晶塑性，CFRP，3D プリンタ

1. 研究の背景と目的

環境保護，省エネ，省資源化などの観点からものづくりを計画することが当然となっていると同時に，開発期間短縮化やコストダウンへの圧力は依然として強いため，設計・加工・生産の困難さが増している．材料の観点からは，一層の高強度化と軽量化の同時達成を目的として高張力鋼板やアルミニウム合金に代表される軽金属類の適用が拡大している．これらは一般に難成形または成形予測困難であり，変形理論や解析技術の研究が盛んに行われている．また，CFRP 等の複合材料の変形加工も注目されつつある．技術の観点からは，サーボプレスやホットプレスによる難成形材の成形性向上の試みや，Additive Manufacturing (AM) による複雑形状成形の実現，またはネットワークやデジタル技術の適用による IoT 化が進められている．このように，社会・材料・加工技術・IoT 化の側面からの刺激を受け，塑性加工の果たす役割への期待が急激に高まっている．しかし，これらの日進月歩の進化に比較して，基盤となるべき基礎理論の発展が追いついておらず，近い将来これら新技術の進展の妨げになる可能性がある．ゆえに，材料の塑性を最大限活用できるようにするための研究の拡充が必要である．

以上のような社会背景を念頭に，本研究課題では次の 2 つのテーマを設定し，研究に取り組んだ．

- (1) 塑性理論の適用範囲拡大と物理的解像度の向上を目指す．特に予測困難な材料の成形限界近傍における変形場の高精度予測を狙う．そのために，任意の負荷経路後の材料の加工硬化を予測するためのモデルと，高度な材料モデルを活用しやすくするための数値材料試験法についての検討を行う．また代表的な複合材料である CFRP 板材のプレス成形への適用を検討するためのモデル化を行う．
- (2) セル組織構造の塑性変形モデリングを行う．これは生物や植物を構成する材料に見られる微視的階層構造であり，一般の構造材には見られない不均一性や異方性を積極活用することで極限的軽量化を達成するための鍵になる概念である．近年では AM によってこれらの構造を有する物体を作製することが可能になりつつあるが，その変形予測は十分進んでおらず，所望の巨視的機械特性を実現するためのデザイン手法は確立していない．本項目では，材料の微細構造を考慮できるデザイン手法確立のための基礎的検討を行う．

2. 成形シミュレーション高度化のための塑性理論

2・1 一般負荷経路における加工硬化挙動の予測

材料が複雑な変形履歴を経て加工される時，特に 1 次変形と 2 次以降の加工プロセスにおいて変形形態が異なる時，その変形形状や加工硬化状態は予測が困難である．このような難易度の高い材料加工を成功させるためには，成形解析による事前の試行錯誤が重要である．そのため，変形シミュレーションの精度を向上させるための材料モデルの重要性が高まっている．ここでは単調負荷のみならず，反転負荷(バウシinger効果)や交差硬化を含む複合的な加工履歴を精度よくモデル化することが必要である．バウシinger効果を含む複合的な加工履歴のモデル化に関して，これまでに種々の材料モデルが提案されている．特にバウシinger効果の表現としては移動硬化モデルが用いられることが多い．移動硬化則は，降伏曲面の大きさは変化させずに，その中心が背応力によって応力平面上を移動することにより材料硬化を表現するモデルであり，様々なモデルが提案されている．これらのモデルにより，複合的な加工履歴の予測精度は高まっているが，パラメーターの数の増加による材料試験の負担増加や，材料微細構造の考慮が不十分であるなどの問題もある．我々はこれまでに材料微視的構造に基づく複合異方硬化表現の確立を目的とした検討を行ってきた．本報告では，提案モデルの概要および有限要素多結晶モデル(FEPM)¹⁾による解析的検討事例²⁾について説明する．

提案モデルの概略を示す．前負荷経路に対する再負荷経路は 1 次負荷偏差応力テンソルと 2 次負荷偏差応力の間のなす角 α で表す．

$$\cos \alpha = \frac{\sigma'_p : \sigma'_R}{\|\sigma'_p\| \|\sigma'_R\|} \quad (1)$$

$\alpha = 0, \pi/2, \pi$ はそれぞれ前負荷の継続，直交再負荷(交差硬化曲線) $H_C(\int d\epsilon^P)$ および逆方向再負荷(バウシinger曲線) $H_B(\int d\epsilon^P)$ に対応する．ゆえに $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$ が本モデルの対象とする反転負荷経路であるが，その間の任意の方向の再負荷経路における加工硬化曲線を

$$H_R \left(\int d\epsilon^P; \alpha \right) = H_C \sin^2 \alpha + H_B \cos^2 \alpha, \quad \left(\frac{\pi}{2} < \alpha < \pi \right) \quad (2)$$

で表すことにする．仮に式(2)のような表現式が確立できれば，バウシinger曲線と交差硬化曲線のみを実験で求めることで，その間のすべての一般再負荷経路上の加工硬化曲線を予測することができる．バウシinger効果は活動す

べり系が切り替わらないすべり方向の逆転により発生し、交差硬化は活動すべり系の交代により発生すると考えられるので、再負荷方向角 α による活動すべり系の交代率の変化と $\sin \alpha$ との相関を示すことができれば、提案モデルの物理的妥当性を高められると考えた。

1次負荷と2次負荷の活動すべり系の切り替わり割合を表現する交代率1： $\rho_1(\alpha)$ と交代率2： $\rho_2(\alpha)$ を定義した。

$$\rho_1(\alpha) = \frac{N_{10}}{N_{10}+N_{11}}, \quad \rho_2(\alpha) = \frac{N_{01}}{N_{01}+N_{11}} \quad (3)$$

ここで指標の0は活動、1は非活動を表しており、 N はすべり系(またはすべり面)の個数を表している。例えば、 N_{10} は1次負荷において活動すべり系(面)であり、2次負荷において非活動すべり系(面)であるすべり系(面)の個数を意味している。つまり交代率1は、1次負荷で活動していたすべり系(面)のうち2次負荷において非活動になったすべり系(面)の割合を表している。

すべり系の活動/非活動を判定可能な逐次累積法を用いた有限要素多結晶モデルを利用して、予ひずみ0.1を与えた後、反転負荷($\alpha = \pi$)、45度方向せん断($\alpha = 5\pi/6$)、直交負荷($\alpha = \pi/2$)の3パターンでの負荷経路で計算した。例として反転負荷の際の交代率の変化を図1に示す。それぞれ、すべり系ごとの交代率とすべり面ごとの交代率を計算している。縦軸の値は予ひずみ後の変形過程にて切り替わったすべり系(面)の割合を示しており、値が小さければ切り替わりが少ない、すなわち1次負荷時に活動状態だったすべり系(面)の多くがそのまま活動状態にあったことを示す。これらの計算結果より、式(3)の交代率いずれとも、以下のような大小関係となった。

$$\rho(\pi) < \rho\left(\frac{5\pi}{6}\right) < \rho\left(\frac{\pi}{2}\right) \quad (4)$$

この大小関係より、前述のようにすべり系の交代が負荷経路の変化に応じた推移を示しており、事前に予測した通りとなった。ゆえに少なくとも活動すべり系の切り替わりの観点からは、提案モデル式の物理的妥当性が示された。

一般再負荷過程を表現できるモデルを確立することができれば、直交再負荷と逆方向再負荷のデータのみを利用して、その間の任意の加工硬化曲線を予測することが可能となる。この仮定の妥当性を検証するため、提案モデルの数値的検討を行った。本研究ではDC06の材料データを用い、Teodosiu-Hu (TH)モデル³⁾との比較を行った。比較対象として、有限要素多結晶モデル(FEPM)で表現されるバックラッシュモデルと交差硬化モデル(最大林立転位モデル)を導入し、その予測値を提案モデル式に代入した。図2~4に、各負荷経路における2次負荷時の加工硬化曲線を示す。いずれの場合も定性的な傾向は参照データ(TH)をよく表しており、定量的にも近い結果が出ている。さらなる検討は必要であるが、提案モデルの有効性は示すことができたと考えられる。

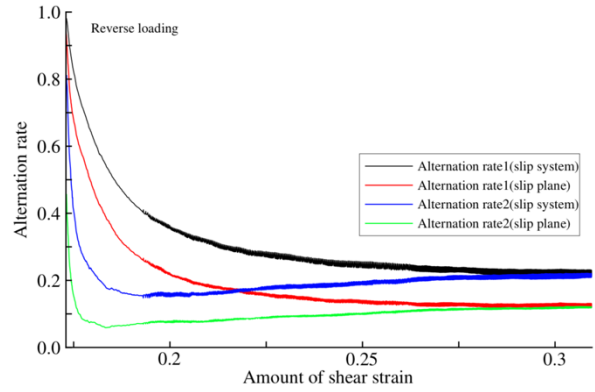


図1 交代率によるすべり系活動/非活動の割合変化

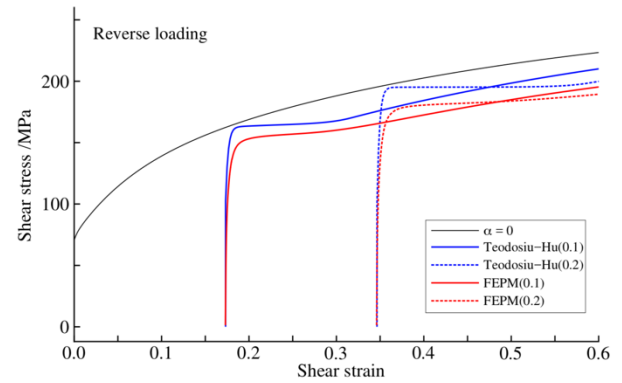


図2 反転負荷時の加工硬化曲線

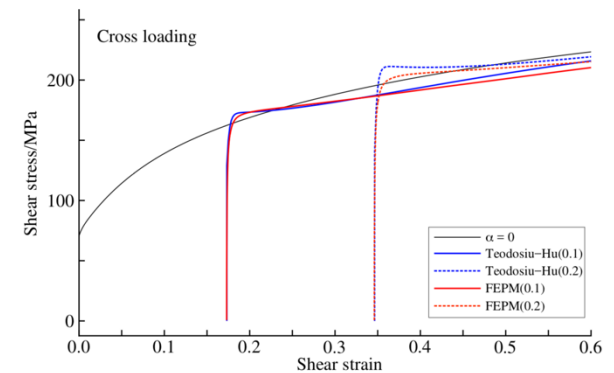


図3 直交負荷時の加工硬化曲線

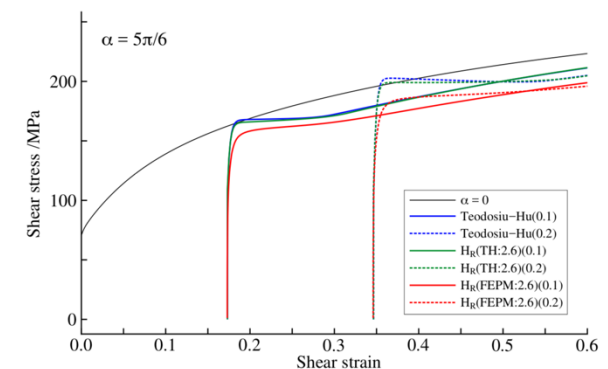


図4 中間負荷時($\alpha=5\pi/6$)の加工硬化曲線

2・2 数値材料試験法の構築

先端材料の複雑な変形挙動をシミュレーションで予測するためには、高度な材料モデルの適用が不可欠である。特に、板材成形における異方性や複合硬化を適切に表現することは困難であり、材料モデル中には複数の決定困難な材料パラメータが含まれていることが多い。ゆえに要求される材料試験の負担増大も解決すべき問題である。そのため、簡易な材料試験と数値シミュレーションを融合した数値材料試験法の確立が急務であると考えられる。

構築した数値材料試験法の概要を簡潔に説明する。材料の巨視的特性のうち、変形異方性は Lankford 値によって評価され、応力異方性は圧延方向(Rolling Direction, RD)と圧延横断方向(Transverse Direction, TD)の単軸引張試験における応力-ひずみ関係を用いて評価される。これらはオーダーの全く異なる数値であり、また物理的な意味合いでも一つの式で同時に評価・最適化を行うことは困難である。そこで、変形異方性と応力異方性の同時最適化手法として新たな手法を考案した。すなわち、Lankford 値を評価関数として結晶方位の学習を行うプロセスと、応力-ひずみ関係を評価関数としてすべり系硬化則の学習を行うプロセスを用意し、両者を交互に繰り返すことで最終的にすべてのパラメータが最適化されることを狙いとした。最適化過程として様々な手法を検討したが、遺伝的アルゴリズムに基づく手法と進化戦略および深層学習を用いた手法などにおいて効果が認められた。

まず、fcc 材料への適用性を検証するため、A1145 および A6061 アルミニウム合金板の仮想材料構築を行なった。これらに対して面内引張り試験で得られた結果を用いて材料学習を行い、仮想材料が入力値を正しく出力できるかどうかを確認した。例として A1145 について、Lankford 値の実験値と計算値の比較を図 5 に、RD・TD の応力-ひずみ関係の実験値と計算値の比較を図 6 に示す。いずれについても計算値と実験値がよく一致しており、パラメータ学習の過程によって仮想材料モデルが実材料の二種の異方性を同時に再現できていることがわかった。次に、決定された学習パラメータを用いて、多軸応力下での塑性変形応答の予測を行なった。図 7 は等二軸および平面ひずみ状態における実験値とシミュレーション結果を比較したものである。未学習データである等ひずみ引張および平面ひずみ引張のいずれについても、単軸引張試験から得られるデータのみを元に学習した仮想材料モデルが、実験値に近い値を算出していることが確認できる。応力ひずみ曲線の序盤または後半で誤差が拡大する場合はあったが、誤差の主因は硬化則に用いる近似式の形式に依存することがわかっているので、今後手法の改善を行う。また、hcp 材料として AZ31B マグネシウム合金を用いた検討も行なっている。FEM に双晶モデルを組み込み、最適化手法を工夫することによって、良好な予測結果が得られている⁴⁾。

2・3 材料モデル研究に関する研究のまとめ

任意の 2 次負荷経路をとる材料の加工硬化を表現できるモデルを構築した。結晶塑性モデルを用いた検討により妥当な予測結果を示したので、提案モデルの有効性が確認された。今後は結晶塑性モデルに転位密度等のパラメータを導入して材料組織情報との関連付けを行うことや、成形シミュレーションにも活用できるような巨視モデルへの導入等の展開が考えられる。また、数値材料試験については、fcc 材料と hcp 材料については実験データを用いた検討により、提案手法の有効性は示されている。一方で、一部の実験的検討が不十分であったため、継続して課題に取り組む必要がある。今後は bcc 材料への適用や、学習効率の向上などの課題に取り組む。このように、当初の計画は概ね達成され、見るべき成果が得られた。さらに、検討すべき重要な課題も複数発見されており、今後進展させる必要がある。

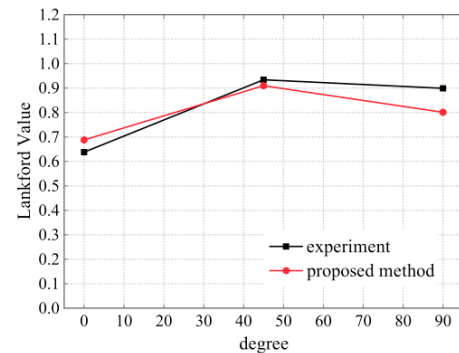


図 5 Lankford 値の予測結果の確認

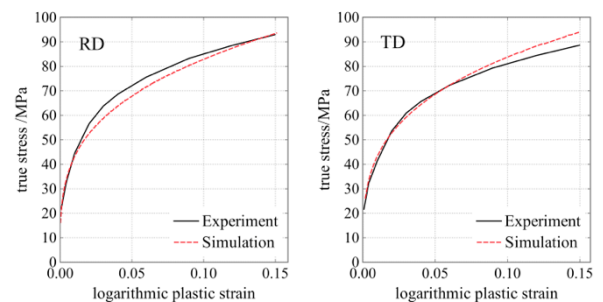


図 6 応力ひずみ曲線の計算結果と実験の比較

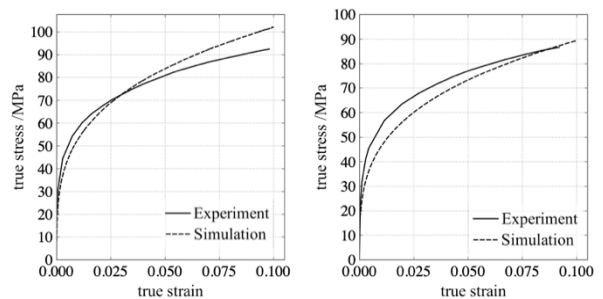


図 7 応力ひずみ曲線の予測結果と実験の比較

3. 熱硬化性 CFRP の成形性評価に関する研究

3・1 背景

熱可塑性 CFRP を中心に CFRP 板材のプレス成形への適用の動きが盛んになっている。プレス成形はサイクルタイム短縮化に寄与するため、実現すれば CFRP 製品のコストダウンと適用範囲の拡大が期待される。一方で、加工技術が実用化の域に到達したとしても、金属塑性加工分野で一般に用いられているような有限要素法による成形シミュレーション技術が CFRP 板材の解析にも適用できなければ、設計段階での試行錯誤が十分に行えないため、扱いづらい材料であるという認識は変わらない。すなわち、スプリングバック量の予測、しわの予測、成形限界予測などが CFRP 板材の成形シミュレーションにおいても比較的短時間かつ高精度に実施できるようにする必要がある。

熱硬化性 CFRP は優れた機械的性質を有するものの、低延性のために従来はプレス成形には適さないと見なされてきた。近年、条件しだいではプレス成形性が向上するとの報告もあり、そのメカニズムを検討することは力学的にも興味深い。CFRP 板材のプレス成形性は、樹脂の延性のみならず、界面強度や繊維配向角も設計変数とした層構造の最適化が必要になると考えられる。助成期間中に成形性向上の支配因子の一つである樹脂の塑性変形挙動のモデル化についての検討を行ったので⁵⁾、ここで報告する。

3・2 微視的メカニズムに基づく熱硬化性樹脂のモデル化

樹脂の応力-ひずみ曲線は次式のような初期硬化とその後の軟化・二次硬化の項から構成されると仮定する。

$$\sigma_{\text{thermoplastic resin}} = \sigma_{\text{hardening}} + \sigma_{\text{softening}} + \sigma_{\text{rehardening}} \quad (5)$$

第 1 項と第 2 項には以下の簡単な表現を用いている。

$$\sigma_{\text{hardening}} = K_1 \varepsilon^{n_1}, \quad \sigma_{\text{softening}} = K_2 (\exp(-n_2 \varepsilon) - 1) \quad (6)$$

ここで、パラメータ K_1 , n_1 , K_2 , および n_2 は、実験データを用いた最適化によって決定される材料定数である。第 3 項では、Kuhn and Gr \ddot{u} n によって提案された、分子鎖の応力と伸張の関係を表す式を利用する。

$$\sigma_{\text{rehardening}} = K_3 k_B \theta \sqrt{N} \exp(\varepsilon) L^{-1} \left(\frac{\exp(\varepsilon)}{\sqrt{N}} \right) \quad (7)$$

ここで k_B はボルツマン定数、 θ は絶対温度、 N は分子鎖のセグメント数、 L^{-1} はランジュバン関数の逆数である。式 (7) は、Arruda-Boyce モデルの分子鎖網目構造の 8 鎖モデルに基づいて定式されているが、ここでは 1 次元引張のみを考慮している。単位体積内に多数の分子鎖が存在することを表現するために、パラメータ K_3 を掛けて巨視的な引張応力となるようにしている。さらに、本モデルでは、熱硬化性樹脂の分子鎖のセグメント数 N は、定数ではなく真ひずみ ε の関数として以下のように定義される。

$$N = N(\varepsilon) \quad (8)$$

本モデルでは、変形時の分子鎖の破断を考慮できるように、

架橋点の数 n と 1 本の分子鎖のセグメントの数 N をひずみの関数として定義している。モデル全体としては、 k_B と θ は定数であるため、 N を除く 5 つのパラメータが実験値に合うように同時に決定される。

3・3 分子動力学シミュレーションによるパラメータ決定

ひずみによる分子鎖の破断はサブナノスケールの現象であるが、このようなマクロな試験では捉えにくい分子レベルの特性は、分子動力学 (MD) 解析によって決定することができる。熱硬化性 CFRP に一般的に使用されているエポキシ樹脂を対象とし、LAMMPS を用いた MD 解析によるエポキシ樹脂の硬化シミュレーションと単軸引張シミュレーションを用いたパラメータ決定を行った。

3・4 成形シミュレーションへの適用

CFRP 板材のプレス成形解析については、図 8 に示すような形状と寸法のエリクセン試験を 1/4 対称モデルとして構築した。シェル要素と複合則による応力ひずみ曲線を用いたマクロスケールモデルは、CFRP 板材の巨視的な応力分布と負荷荷重の評価には有効であるが、繊維と樹脂それぞれに作用する応力を分離できないため、CFRP 板材の成形性の向上を分析するためには不十分である。

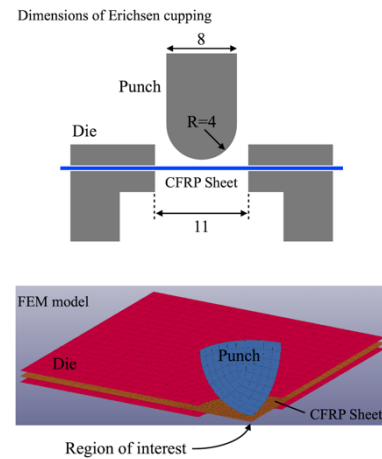


図 8 エリクセン試験解析の概要

そこで、エリクセン試験における CFRP 板材の成形性に及ぼす樹脂の影響を評価できるように、炭素繊維とエポキシ樹脂からなる CFRP の微細構造を反映した微視モデルを作成した。具体的には、図 9 に示すように、樹脂と繊維を別々にモデル化した代表体積要素 (RVE) を用いた。RVE の役割は、成形時の繊維や樹脂に生じる応力やひずみの微視的な分布を考慮できるようにすることである。このような分離モデルでは繊維と樹脂とで独立した物性値を適用できるので、本事例では樹脂には MD 解析で計算した応力-ひずみ曲線を適用した。そして、成形シミュレーションで得られた応力成分を RVE の境界条件として与えることにより、CFRP 板材が成形中に受ける任意の応力履歴下における、繊維、樹脂、繊維/樹脂界面それぞれの応力状態を解析した。

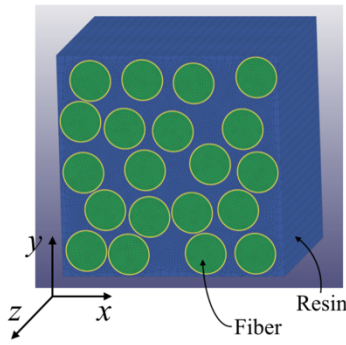


図9 繊維/樹脂 RVE

図10に局所座標系で表されるせん断応力成分と等二軸引張時の引張りひずみの関係を示す。比較のために、室温(20°C)と高温(60°C, 80°C, 100°C)の各温度の応力-ひずみ曲線を樹脂の特性に適用した。室温の場合と高温の場合では明らかな差が見られた。室温の場合、高温の場合に比べてせん断応力の増加率が大きくなっていた。この結果は、加熱されることで樹脂が軟化して繊維が移動しやすくなることで繊維への作用応力が低下し、その結果として成形性が向上しうることを示唆している。図11は、樹脂に蓄えられたひずみエネルギーと二軸引張りひずみとの関係を示すグラフである。60°Cで成形した場合は、80°Cや100°Cで成形した場合よりも大きなエネルギーを必要とすることがわかる。この結果は、加熱されることで樹脂が軟化し、変形を継続するのに必要なエネルギーが減少することからも納得できる結果である。

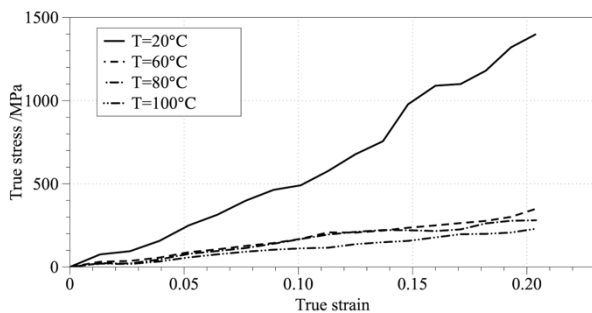


図10 温度ごとのせん断応力成分の変化

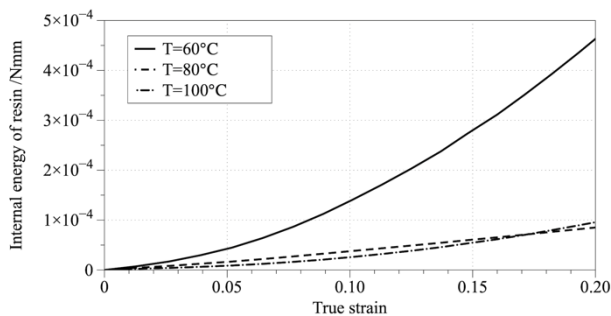


図11 温度ごとのひずみエネルギーの変化

3.5 まとめ

構築したモデルを用いて、実験で得られたエポキシ樹脂の応力-ひずみ曲線を精度よく表現できることを確認した。次に、成形解析と RVE 解析を連携させることで、CFRP 板材の成形性をマルチスケールの分析する手順を提示した。さらに、構築したモデルと解析手順を用いて、CFRP 板材の高温での成形性が向上するメカニズムを説明した。また、本モデルを用いたシミュレーションにより、温度とエポキシ樹脂の初期架橋密度が CFRP シートの成形性に及ぼす影響を考察した。

4. ボイドモデルを用いた階層的構造デザイン手法

4.1 概要

軽量かつ高い強度を有する構造部材の開発は常に追求されている課題である。近年、積層造形手法は試作を超えて実製品の生産の段階まで実用性が広がっている。積層造形手法は複雑な対象物を直接造形できるという利点を有しており、階層性を有する構造も製造可能である。しかし、材料および構造物の階層性を考慮した設計手法については現在もなお確立されていない。ゆえに階層的な材料および構造物の最適設計手法の構築が求められる。Wu らは階層ラティス構造を導入し、密度を変化させたラティス構造でグレースケール要素を表現した⁶⁾。この手法によりトポロジー最適化の結果をより正確に反映することができるようになり、さらに、トポロジー最適化の対象が設計領域の外形だけでなく、内部構造にまで及ぶようになった。

本研究ではボイドを含む材料の力学挙動を考慮し、それを外的形状と内部構造に反映させるデザイン方法を検討した⁷⁾。提案手法の概要図を図12に示す。ここでは、材料・構造最適化問題に対してボイドの存在を考慮できる GTN モデルを適用することで有効ボイド率 f の概念が導入される。GTN モデルにおける初期ボイド率 f_0 に対して、新たな変数として球状ボイド半径 r_i を与える。こうすることで球状ボイド半径が最適化変数として扱えるようになる。またその r_i に応じた力学特性として GTN モデルで定義される降伏応力以外にも有効ヤング率 E_p^* を定義する。すなわち、 r_i を介して表現される初期ボイド率 f_0 によって材料の剛性と降伏応力を表現できるようになる。実際の製造実験の際には、球状ボイド半径の値に対してある閾値を設けて段階に分けた球状ボイド半径を設定して製造を行った。

4.2 提案手法の適用実験

得られた最適化結果のモデルを 3D プリンター (AXIOM DUAL Extruder) により造形し、それらに対して 3 点曲げ試験を行うことで強度を比較した。その際、構造物内部に作成した球状ボイドの造形精度を X 線 CT スキャン (XDimensus 300) により確認した。図13より、内部に球状ボイドが造形されていることがわかる。次に作成した試験片と治具により 3 点曲げ試験を実行した。荷重は 1mm/min の等速制御で与えた。2 種類の試験片の破断の様子を図14に示す。また、全パターン荷重-変位曲線を図15に示す。

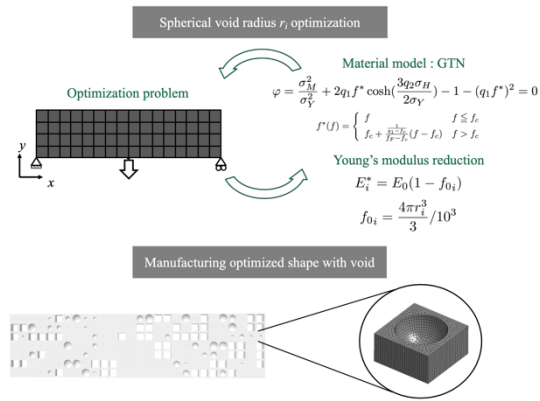


図 12 提案手法の概要

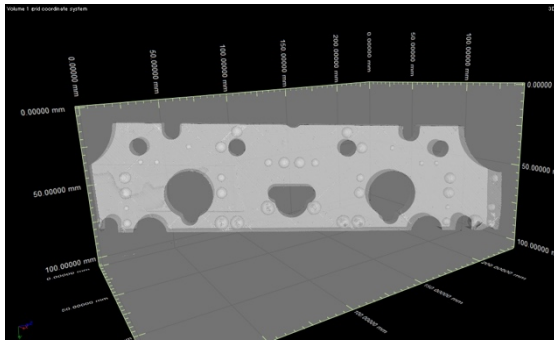


図 13 サンプルの X 線写真による内部構造の観察

4・3 適用実験の結果と考察

提案手法と比較するために、従来手法としてトポロジー最適化 (SIMP 法) で作成されたはりのモデルを積層造形した。3 点曲げ試験 (MBB はり) を行い荷重-変位曲線を取得することで機械特性の比較検討を行った。試行錯誤の結果として、変数 r_i の値が 4.51 以上の場合に表現される貫通穴の形状を正方形から円形に変化させることで、同荷重に対するたわみ量を低減させる構造を作成することに成功した。しかし、最大荷重値という観点では従来手法 (SIMP 法) に劣っており、改善が必要である。

4・4 まとめ

提案手法により得られた最適解モデルを実際に積層造形して 3 点曲げ試験を行なったところ、SIMP 法による最適解モデルと比較した際に同荷重に対してたわみ量が小さくなる剛性の大きな MBB はりを作成することに成功した。一般的な設計変数の最適化によってトポロジー最適化による結果と比較可能なレベルのデザインを創出することができることを示した。

5. 全体のまとめ

急速に進む産業のデジタル化においては、先進的なデジタル技術の活用とともに、工学的に信頼できるものづくりシステムの構築が求められる。そこでは力学理論の進展と

適用範囲の拡大が不可欠であると考え、筆者は塑性力学理論を中心に新たな基礎的研究を展開してきた。本助成期間において、一定の進展が見られたのでその一部を報告した。

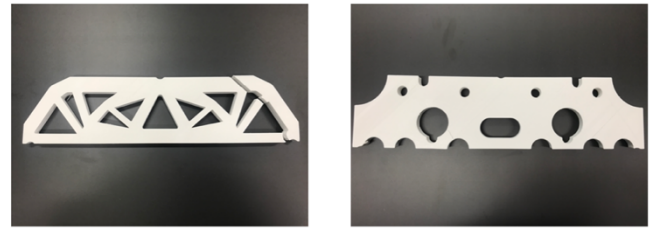


図 14 3 点曲げ試験による破断時のサンプル (左) SIMP 法による形状, (右) 提案手法による形状の 1 パターン

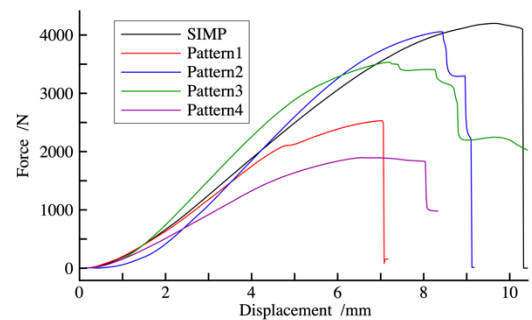


図 15 各サンプルの荷重-変位曲線

謝 辞

本研究は 2018 年度公益財団法人天田財団一般研究開発助成の支援によって行われたことをここに記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) H. Takahashi et al.: Int. J. Plast., 10(1), (1994) 63-80.
- 2) T. Oya et al.: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020, 12062
- 3) H. Haddadi et al.: Int. J. Plast., 22, (2006) 2226-2271.
- 4) G. Vago · T. Oya: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020, 12057.
- 5) T. Oya · A. Nishino: Multiscale and Multidiscip. Model. Exp. and Des., (2021) 4, 65-76.
- 6) Z. Wu et al.: Comput. Methods. Appl. Mech. Eng, 345, (2019) 602-617.
- 7) 宮橋理史・大家哲朗: Design シンポジウム 2019 発表概要集, pp. 213-215