

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 8月23日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22760524

研究課題名（和文） 短繊維強化プラスチックにおける成形プロセス・機械的特性の
統一的評価技術の構築研究課題名（英文） A unified technique for evaluating the molding process and the
mechanical properties in short-fiber-reinforced plastics

研究代表者

矢代 茂樹（YASHIRO SHIGEKI）

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：00452681

研究成果の概要（和文）：本研究では、粒子法を利用した短繊維強化プラスチックの成形シミュレーションと、成形解析結果を利用した弾性率分布の予測手法を開発した。繊維を剛体または弾性体として扱い、流れ解析と弱連成させた。射出成形やプレス成形における繊維の流動や変形状態の解析結果を実験結果と比較して、本手法の妥当性を実証した。さらに、ランダム配向材のプレス成形後の弾性率分布を予測し、実験結果と定性的に一致する傾向を得た。

研究成果の概要（英文）：This study has developed a mold-filling simulation for short-fiber-reinforced plastics using a particle method, as well as an approach to predict distribution of mechanical properties in molded composites based on the analyzed fiber orientation. Fibers were considered as rigid bodies or elastic solids, and the analysis for fibers interacted weakly with the fluid analysis. Fiber flow and fiber deformation in injection molding and compression molding were compared between the present approach and observations, and its usefulness was demonstrated. Furthermore, predicted distribution of elastic moduli in compression-molded composites agreed with an experiment result.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学，複合材料・物性

キーワード：FRP

1. 研究開始当初の背景

射出成形やプレス成形による不連続繊維強化プラスチック（Fiber-Reinforced Plastic, FRP）は、成形コストが安価で成形自由度が高い、成形サイクルが短く高効率などの利点を持つ。また、FRPは軽量である程度の剛性や強度を有していることから、近年では自動車非構造部材、電子機器の筐体など幅広く使

用され、さらなる用途拡大が期待されている。

FRPのマクロな機械的特性は、強化繊維の長さ、繊維配置・配向、繊維／樹脂の接着性などによって大きく変化するとともに、成形材の中で物性にばらつきが生じる。また、繊維含有率を増加させると成形中に繊維が破断するといった問題が起こる。これが、FRPの利用を阻む最大の要因になっている。

FRP の射出成形に関する研究は数多くなされ、繊維の配向とレオロジー特性が注目されてきた。また、射出成形材の繊維配向、剛性分布、成形後の変形などを予測する汎用ソフトウェアも開発されている。しかし、これらでは、流れから繊維の配向を予測しているにすぎず、現時点で直面している繊維の凝集や破断といった現象を再現できない。

生産の現場では、成形条件の決定が技術者のノウハウに依存しているため、これらの問題へ適切な対応ができない。そこで、定量的に成形プロセスを評価し、成形条件を最適化する手法の確立が求められている。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、複合材料の成形における繊維に関する現象を評価するための解析技術の開発を目的とする。そのために、複合材料の構成要素であるすべての繊維と樹脂を粒子で表現する粒子法を利用した成形解析ツールを構築する。特に、繊維配向だけでなく、成形材の機械的特性の支配因子の一つである強化繊維の変形を表現可能とする。また、温度場を導入したマルチフィジック解析に拡張し、樹脂の粘性変化を考慮する。

(2) 短繊維強化プラスチックの射出成形を行い、繊維の流動状態（繊維の含有率、長さ、配向分布）を詳細に観察する。実験結果との比較により、構築する解析を検証する。

(3) 不連続繊維プラスチックの模擬プレス成形を行い、繊維の流動と変形状態を観察する。繊維を弾性体としたプレス成形解析を実施し、観察結果との比較によりその妥当性を検証する。

(4) 成形シミュレーションで得られた繊維の流動状態の情報をもとに、成形材の弾性率を予測する手法を開発する。これにより、成形プロセスと材料特性の関係を考察する。

3. 研究の方法

(1) 連続体を粒子の集合として表現する MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法を用い、繊維強化プラスチックの成形シミュレーションを開発した。樹脂は非圧縮性粘性流体、強化繊維は剛体（繊維が短い場合）または弾性体（繊維が長い場合）として扱った。

強化繊維は複数の粒子を直線状に連結させることで表現する。したがって、その流動や配向、変形は、解析結果において直接観察できる。まず、樹脂中に配置された繊維の運動の予測精度を、理論と比較して検証した。

MPS 法の微分演算子モデルを適用して熱伝導方程式を解き、温度場を求めた。温度とせん断速度の関数としての熱可塑性樹脂の

粘度変化モデルを用い、各粒子位置における粘度を求めた。

(2) ガラス繊維 (GF) / ポリプロピレン (PP) 複合材料の射出成形を行った。本研究では T 字分岐部に着目した。流路は分岐の右側は分岐部から 50 mm で止まり、左側はその先へ続いている。樹脂の固化を抑制し、樹脂の流動による繊維配向を抽出するため、射出成形時の金型温度は 140°C とした。

GF/PP 射出成形材の X 線 CT 画像を取得し、ガラス繊維の配向を調べた。分岐部を 12 の領域に分割し、領域ごとに繊維の長さや角度を測定した。それぞれの領域における繊維の繊維配向分布を 10° ごとに算出した。ここで、配向分布は、ある繊維角度範囲にある繊維の長さを総和し、領域内の合計繊維長さで除すことで得られる。

また、3(1) で構築した解析を用い、T 字分岐部におけるガラス繊維（長さ 1 mm、剛体）/ ポリプロピレン複合材料の射出成形シミュレーションを実施し、繊維の流動を予測した。繊維配向の解析結果を実験結果と比較し、解析手法の適用可能性を検証した。

(3) GF をリブへ押し込む簡易プレス金型を製作した。金型をアクリルで作ることで GF の流動を観察可能とした。アスペクト比の大きなリブへ意図的に GF を押し込む模擬プレス成形を行い、GF の変形を観察した。樹脂の代わりに、流体にはカルボキシメチルセルロースで 10 Pa·s に粘度調整した水溶液を用いた。GF は長さ 10 mm、直径 10 μm である。ビデオマイクロスコープを用いて、GF の流動を金型の横から撮影した。

また、この繊維の挙動を、3(1) において非圧縮性流れと弾性体の解析を連成させた粒子法で予測した。解析結果を実験結果と比較し、解析手法の妥当性を検証した。

(4) 成形後の繊維配向の情報を利用し、弾性率を予測する手法を構築した。粒子モデルでの繊維の分布からある領域における配向分布関数を得られる。これを配向テンソルに変換した。ある繊維配向分布をもつ成形材のステイフネステンソルは、一方向材のステイフネステンソルを配向割合によって重みづけ平均することで算出される。このモデルを適用し、弾性率を計算した。

初期状態で繊維がランダムに配向した基材をプレスし、その繊維の流動を配向テンソルで予測した。さらに、その繊維配向分布から、プレス成形後の弾性率を予測した。

4. 研究成果

(1) 直線状に並んだ複数の粒子を連結させ、それらを強化繊維として扱った。繊維と流体

の相互作用は大きくないと仮定し、それらの計算アルゴリズムを陽的に連成させた。短繊維では、連結した粒子を剛体として流動（移動と回転）を解析した（図 1）。長繊維では、連結した粒子を弾性体として流動および変形を解析した（図 2）。

剛体繊維の流動解析の精度を、理論との比較によって検証した。単純せん断流れに一本の剛体繊維を配置し、その回転を解析した。解析で得られた配向角の経時変化が Jeffery の解と一致することを確認した（図 3）。さらに、直線流路における複数の繊維配向を調べ、繊維間相互作用の予測の妥当性を検証した。スキン領域とコア領域での繊維の配置から、それぞれの領域における、ある角度範囲に存在する繊維の存在確率分布（配向分布関数）を求めた。これを、繊維干渉係数をパラメータに流れ場から予測した結果と比較した（従来手法）。繊維体積含有率が大きいほど従来手法の干渉係数の大きいケースに対応し、本手法が繊維間相互作用を正しく表現できることを示した。以上により、樹脂の流動とそれに伴う繊維の運動を正しく予測できることを実証した。

温度場と粘度変化を考慮した射出解析の結果を図 4 に示す。粘度はせん断速度と温度の関数としての 3 定数モデルを用いて求めた。流入時の樹脂温度は 200°C、壁の温度は 80°C とした。流体と接する壁面には初期温度として 80°C を与え、樹脂が接触することによる温度変化を考慮した。樹脂は壁面で冷却され、壁面と接触している粒子で 140°C 程度になった。しかし、樹脂の熱伝導率が低いことから、図 4 に示す 0.1 s で冷却されたのは金型壁面近傍の粒子だけだった。流動形態は平行平板間の流れと同様であり、この時間スケールでは温度変化の流動への影響は小さいことがわかる。この解析では、185°C まで冷却された樹脂粒子の運動を停止させ、固化したとみなした。固化により、表面に粒子サイズの凹凸ができ、詳細な流れ場は固化粒子によって乱された。この影響により、予測した繊維配向分布は実験で観察できる配向と異なった。したがって、粒子法での固化の取り扱いにはさらなる改善が必要である。

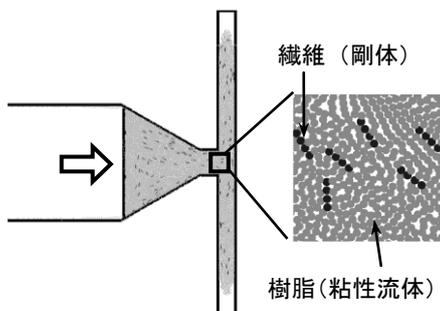


図 1 繊維を剛体で表現した射出成形解析

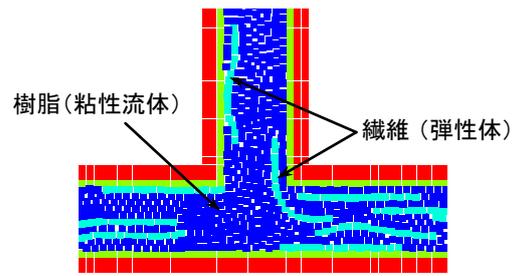
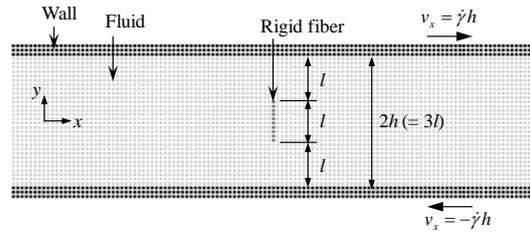
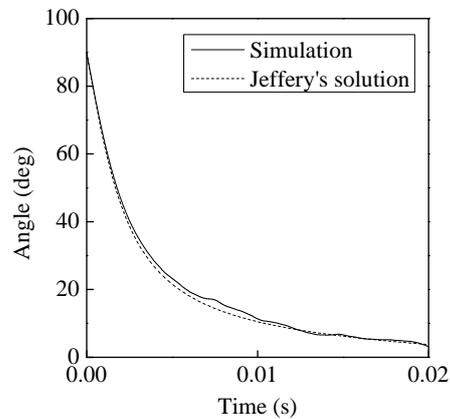


図 2 プレス成形解析において変形する弾性体繊維

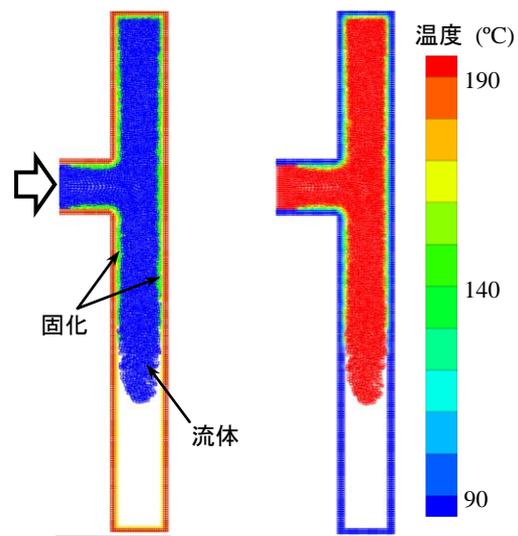


(a) 解析モデル



(b) 繊維配向角の経時変化

図 3 単純せん断流れにおける繊維配向角変化の予測

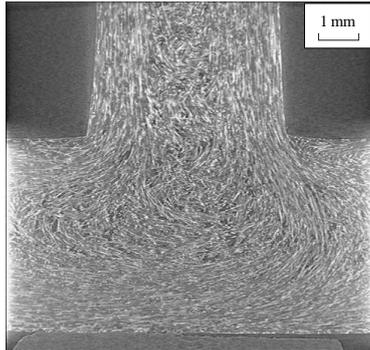


(a) 流動の様子 (b) 温度分布

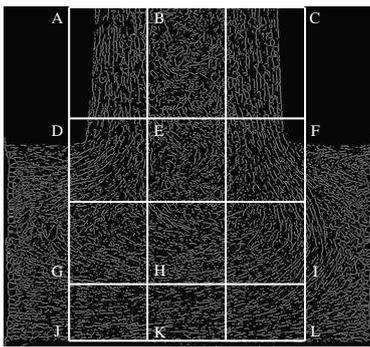
図 4 温度場と粘度変化および固化を考慮した射出成形解析

(2) GF/PP 射出成形材の X 線 CT 画像を取得し、画像処理によってガラス繊維の配向を調べた (図 5)。従来の知見と同じく、表面近傍では、ガラス繊維は主に流動の方向を向き、厚さ方向中央部ではランダムに配向していることがわかる。

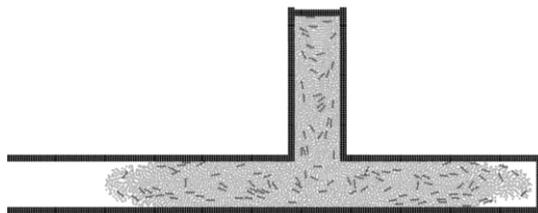
また、これに対応する剛体繊維/粘性流体の射出成形解析を行った (図 6)。壁面近傍での速度勾配 (せん断速度および渦度) に起因して、壁面近傍の繊維は壁面と平行に配向し、せん断速度の小さい流路の中央部ではランダム配向になることがわかる。



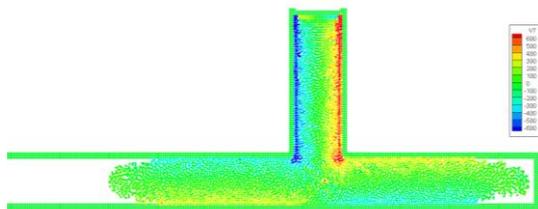
(a) X 線 CT 画像



(b) 繊維を細線化した画像処理
図 5 GF/PP 射出成形材の繊維配向観察

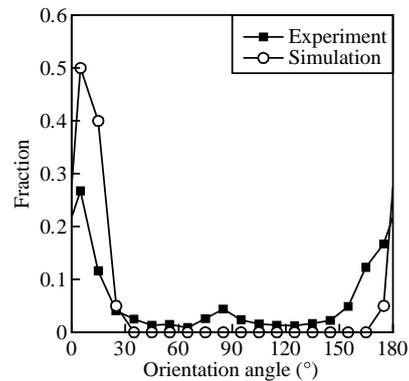


(a) 剛体繊維および樹脂の流動

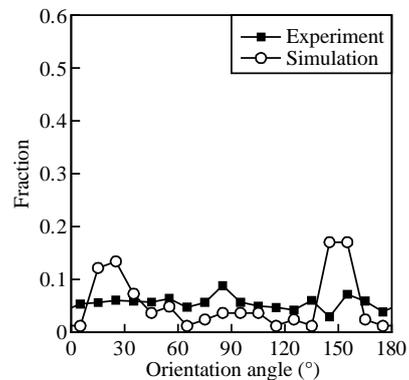


(b) 渦度分布
図 6 剛体繊維による射出成形解析

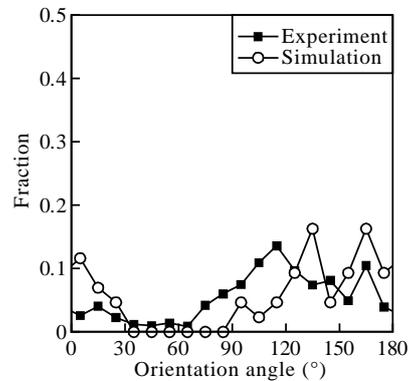
流動の特徴が顕著に現れた流入部の壁面近傍領域、流路中央領域、および左コーナー部において、繊維配向分布の実験結果を解析結果と比較した (図 7)。配向角は、流入流路の方向と繊維の間の角として定義した。繊維は分岐流入部の側部で 0° 方向に高い割合で配向した (図 7(a))。流路の中央部ではすべての角度に不規則に繊維は配向した (図 7(b))。これらは渦度分布 (図 6(b)) やせん断速度分布に起因する。左側のコーナー部 (図 7(c)) では、コーナーに沿って流体が運動し、それによる渦度分布によってコーナーに沿った繊維配向が見られた。これらの配向分布の解析結果は実験結果とよく一致し、本成形流動解析が妥当であることを示した。



(a) 壁面近傍領域 (領域 A)



(b) 流路中央部 (領域 B)



(c) コーナー部 (領域 D)

図 7 繊維配向分布の解析結果および観察結果との比較

(3) 模擬プレス成形によるガラス長繊維の変形挙動を観察した (図 8)。ガラス繊維は、繊維長に比べて細いリブに流入する際、粘性流体の流動とともに2つに折れ曲がるように変形し、最終的に大きな曲率を示した。

繊維を弾性体としたプレス成形解析により、繊維および樹脂を充てんさせた平板状の樹脂槽から樹脂をプレスし、それらがリブに流入する様子を解析した。解析での繊維直径 (=粒子サイズ, 0.25 mm) は実際の繊維直径 (10 μ m) よりも大きく、解析では繊維の曲げ剛性が著しく大きく評価される。そこで、繊維が流体から受ける抗力に注目した補正係数を運動方程式に導入し、見かけ上、弾性率を減少させた。その結果、繊維はリブ近傍で弧状に変形しながら流動し (図 9)、その様子は実験結果とよく一致した。

さらに、繊維体積含有率 V_f をパラメータとして、複数の繊維をリブに流入させる数値実験を行い、 V_f がプレス成形のプロセスに及ぼす影響を調べた。図 10 にプレス圧力の経時変化を示す。繊維含有率の増加につれて必要なプレス圧力は増加した。実際の成形でも高 V_f は大きい成形圧力を必要とする。このように、本解析は実際の現象を再現できることを実証した。

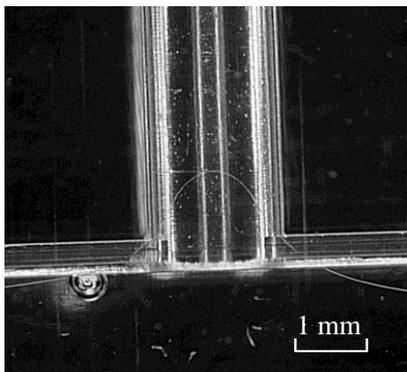


図 8 可視化金型を用いた模擬プレス成形によるガラス長繊維の変形の観察

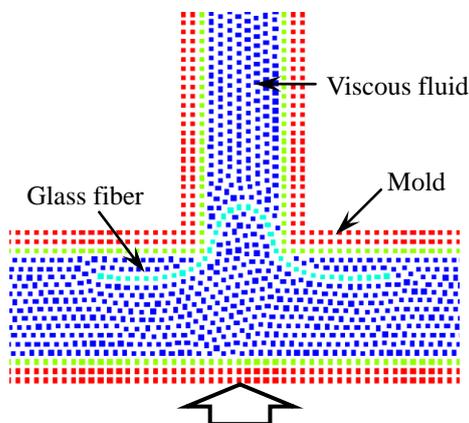


図 9 プレス成形解析における弾性体繊維の変形と流動

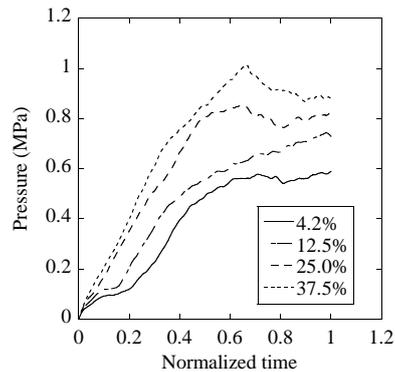
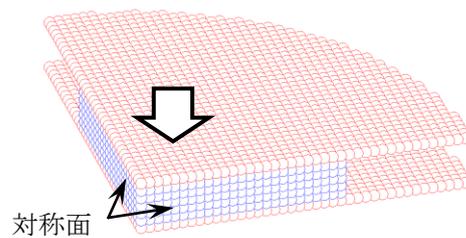
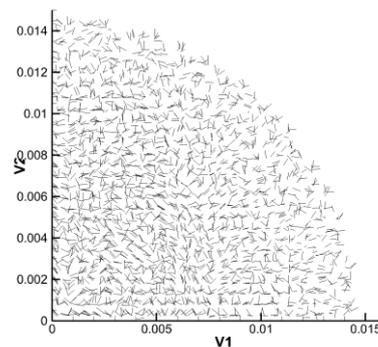


図 10 成形圧力の繊維体積含有率による変化



(a) 解析モデル

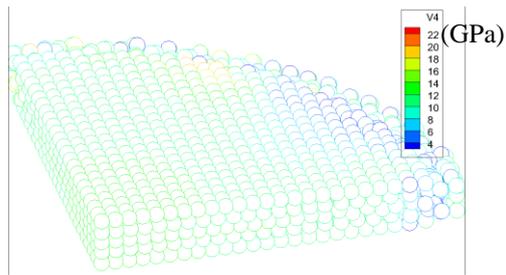


(b) 主配向の分布

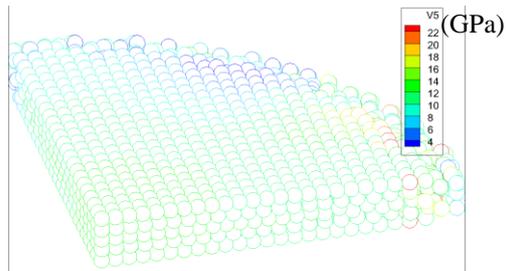
図 11 ランダム基材のプレス成形解析

(4) 初期にランダム配向した基材のプレス成形シミュレーション (従来手法) を行い、得られた繊維配向分布から成形材の弾性率を予測した。予測された繊維の主配向分布と、弾性率分布の一例を図 11 に示す。ここで、繊維配向は配向テンソルで予測されているため、各点 (粒子) においてある角度範囲での存在確率分布として表現されており、図 11(b) は、最も確率の高い配向角の分布を表示した。この図より、この材料では成形後もランダム配向が維持されることがわかる。また、図 12 に示すように、流動先端を除けばほぼ一律なヤング率が予測され、別に行った実験と同様の傾向が得られた。

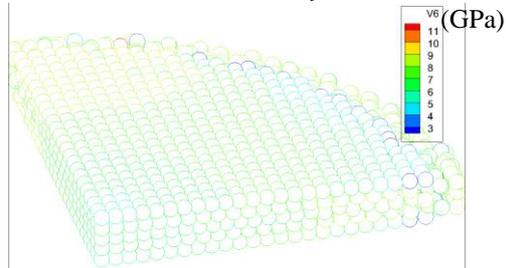
本研究課題で開発した手法では、繊維の分布からある領域における配向分布関数および配向テンソルを算出できる。したがって、粒子ごとでなく一定の体積を有する領域ごとではあるが、弾性率を予測可能である。



(a) ヤング率 E_x 分布



(b) ヤング率 E_y 分布



(c) ヤング率 E_z 分布

図 12 プレス成形後の弾性率分布の予測

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① Tomonaga Okabe, Hiroaki Matsutani, Takashi Honda, Shigeki Yashiro. Numerical simulation of resin flow using the moving particle semi-implicit method. Composites Part A, 査読有, Vol. 43(10), 2012, pp. 1765-1774.
- ② Shigeki Yashiro, Hideaki Sasaki, Yoshihisa Sakaida. Particle simulation for predicting fiber motion in injection molding of short-fiber-reinforced composites. Composites Part A, 査読有, Vol. 43(10), 2012, pp. 1754-1764.
- ③ Shigeki Yashiro, Tomonaga Okabe, Kisa Matsushima. A numerical approach for injection molding of short-fiber-reinforced plastics using a particle method. Advanced Composite Materials, 査読有, Vol.

20(6), 2011, pp. 503-517.

[学会発表] (計 11 件)

- ① 矢代茂樹. 複合材料の成形と加工に関する粒子シミュレーション. 愛媛大学炭素繊維高度利用研究会発足セミナー／東北大学機械系複合材料研究センター最終セミナー, 2012年04月13日. 松山市.
- ② 石井克典, 矢代茂樹, 坂井田喜久. 変形を伴う不連続繊維の成形流動解析の提案. 第3回日本複合材料合同会議(JCCM-3), 2012年3月8日, 京都市.
- ③ 矢代茂樹. 粒子法を用いた短繊維複合材料の成形シミュレーション(招待講演). 日本鉄鋼協会 創形創質工学部会数値モデリングフォーラム, 2012年1月25日, 東京都.
- ④ 矢代茂樹, 佐々木英晃, 坂井田喜久. 短繊維強化プラスチックの射出成形中の繊維流動に関する粒子シミュレーション. 日本複合材料学会第36回複合材料シンポジウム, 2011年10月21日, 仙台市.
- ⑤ 上西宏幸, 矢代茂樹, 岡部朋永, 松島紀佐. 短繊維強化プラスチックの射出成形解析と配向テンソルに基づく繊維配向予測. 日本複合材料学会第35回複合材料シンポジウム, 2010年10月14日, 広島市.
- ⑥ 矢代茂樹. 粒子法を用いた短繊維強化プラスチックの成形流動解析と配向テンソルに基づく繊維配向予測. 日本複合材料学会複合材料に関する講演・討論会, 2010年8月26日, 静岡県三島市.

[その他]

ホームページ等

<http://ssy.eng.shizuoka.ac.jp/yashiro/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

矢代 茂樹 (YASHIRO SHIGEKI)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号: 00452681

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし