

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 5月10日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360352

研究課題名（和文）航空機用先進複合材料の成形プロセスに関するマルチスケールモデリング

研究課題名（英文）Multiscale modeling of manufacturing process for the advanced composite materials

研究代表者

岡部 朋永（OKABE TOMONAGA）

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50344164

研究成果の概要（和文）：本研究では複合材料の成形に関して、樹脂の流動特性から界面における分子構造までを系統的に扱い検討を行った。具体的には（1）分子動力学による界面の結合構造に関する数値シミュレーション（2）粒子法による濡れ性を考慮した成形シミュレーション（3）比較的簡単な構造を有する繊維集合体への樹脂の含浸シミュレーション（4）結合力要素を利用した繊維・マトリックス界面特性に関する数値シミュレーション（5）繊維・樹脂の濡れ性に関する実験的評価（6）比較的簡単な構造を有する繊維集合体への樹脂の含浸の実験的評価（7）異なる化学構成を有する界面の機械的特性に関する実験による評価の7つの研究テーマを実施した。

研究成果の概要（英文）：This study addressed the development of the production of the composite material by considering the resin flow and atomic structures. The contents done in this study are as follows; (1) Molecular dynamics simulation of interface between fiber and matrix, (2) Development of particle modeling for the resin transfer molding, (3) Resin transfer molding simulation for the modeled unit cell structures, (4) Micro mechanical simulation for the interface between fiber and matrix using the cohesive zone model, (5) Experimental study for the modeled unit cell structures, (7) Experimental evaluation of interface between fiber and matrix.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2011年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2012年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	9,300,000	2,790,000	12,090,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：分子シミュレーション、界面、応力伝達、クロスリンク、繊維破断プロセス

1. 研究開始当初の背景

航空機においては、軽量化を目的に先進複合材料の積極的な適用に期待がかけられている。中でも国産旅客機は尾翼を Resin Transfer Molding (RTM) によって成形すると

いう手法を採用している。RTM は複雑な構造にも対応でき、かつ低コストである一方、材料内部の微視構造のコントロールが難しいという問題点がある。特に、界面欠陥やその周辺のボイドは構造全体の強度に直結する

ため、定量的評価が必要不可欠である。さらに、上記界面の濡れ性は繊維・樹脂界面における分子構造に強く影響を受ける。つまり分子レベルでの材料構造についての検討も必要である。

2. 研究の目的

複合材料の成形に関して、樹脂の流動特性から界面における分子構造までを系統的に扱うことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 分子シミュレーションによる検討（概要の(1)に対応）

本研究では、RTMにおけるCFRPの成形プロセスを対象として、繊維/樹脂間の濡れ性の発現要因を分子スケールから検討するため、分子動力学シミュレーションにより、CFRPの成形過程で重要となる繊維/樹脂界面の吸着過程をモデル化 (Fig. 1) した。繊維の表面酸化処理を想定し、繊維表面の官能基構造が界面吸着特性におよぼす影響を評価した。

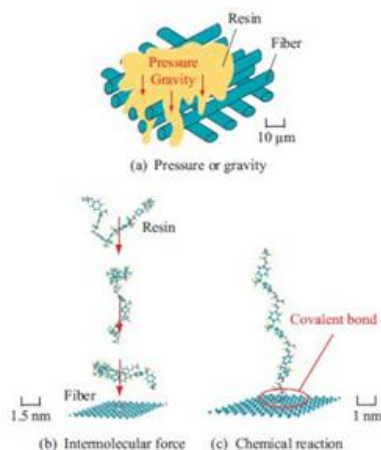


Fig 1. CFRPにおける界面形成過程

(2) 粒子法による含浸シミュレーション（概要の(2)、(3)、(5)、(6)に対応）

繊維束の濡れ性および流速の変化によるマイクロボイド形成への影響を調べるため、粒子法の一つであるMPS法を用いて繊維束間の樹脂流動シミュレーションを行った。濡れ性による効果を考慮するため、レナード・ジョーンズポテンシャルを導入した。また、実際にFRPの成形を行い、濡れ性の違いによるボイド含有率の変化を調べた。

(3) マルチスケールモデリングによる微視的損傷解析（概要の(4)、(7)に対応）

CFRPの横方向破壊に関して、微視構造モデルを用いた周期セル解析により破壊モード遷移を調査した。負荷速度による破壊モード遷

移を再現するため、マトリクスに弾粘塑性構成則を適用し、また連続体損傷力学によりマトリクスクラックをモデル化した。界面には結合力要素を導入し、界面はく離をモデル化した。結果は文献中の実験結果と比較した。

4. 研究成果

(1) 分子シミュレーションによる検討

界面吸着過程 (Fig. 2) の指標として、繊維/樹脂間の距離と系のポテンシャルエネルギー変化との関係性を評価し、界面間の付着仕事および分子間力を算出した。その結果、繊維の表面酸化処理により生成される水酸基およびカルボキシル基が、界面間の付着仕事および分子間力といった界面吸着特性を向上させることが明らかとなった。

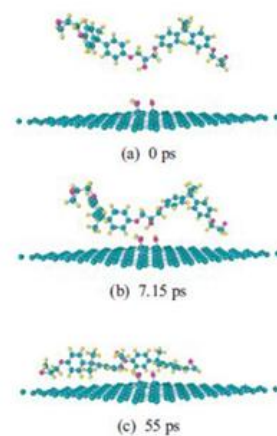


Fig 2. 樹脂と繊維表面との吸着過程

(2) 粒子法による含浸シミュレーション

濡れ性が良い場合、樹脂と繊維間の強い表面張力が表面から空気粒子を押しのけるため、ボイド含有率が低くなる。また流速が低い場合、濡れ性が悪くてもボイド含有率が低下する。これは粘性の低下による流頭の乱れの低下に起因する。以上の結果よりボイド含有率は速度、粘性及び濡れ性が支配的になるしきい値があると言える。

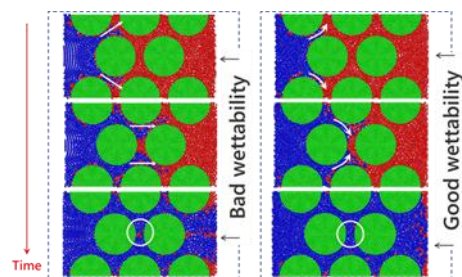


Fig 3. The resin flow by the difference in wettability

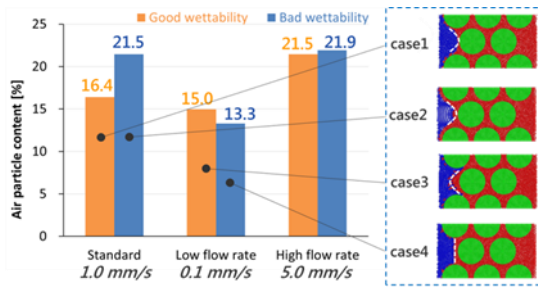


Fig 4. The air particle content in a fiber tow

(3) マルチスケールモデリングによる微視的損傷解析
 負荷速度による破壊モード遷移を再現し、文献中の実験結果と定性的に一致した。これにより、破壊モード遷移はマトリクス速度依存挙動に起因することが確認された。適切な結合力要素の特性を用いた場合のみ破壊モードが遷移し、この結果を利用することで、測定が困難な界面の特性を推定することが可能であることが示された。

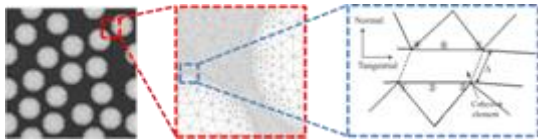
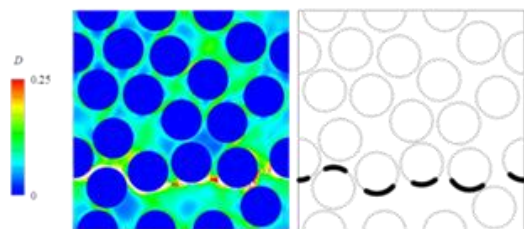
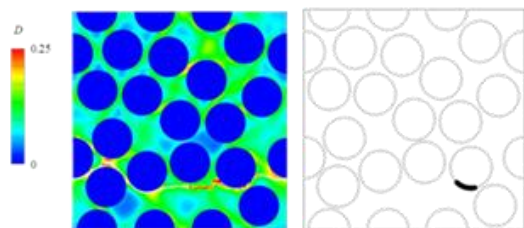


Fig 5. (a) The entire unit cell model. (b) Magnified finite-element meshes. (c) Schema of cohesive element.



(a) High strain rate (4.0×10^{-3} /s): Interface failure dominant mode.



(b) Low strain rate (4.0×10^{-6} /s): Matrix failure dominant mode.

Fig 6. Distribution of damage parameter and highlighted debondings.

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4件)

① Toshiki Sasayama, Tomonaga Okabe, Yoshiteru Aoyagi, Masaaki Nishikawa, Prediction of Failure Properties of Injection-Molded Short Glass Fiber-reinforced Polyamide 6,6, Composites Part A, accepted for publication. 査読有

<http://www.plum.mech.tohoku.ac.jp/publication.html>

② T.Okabe, S.Yashiro, Damage detection in holed composite laminates using an embedded FBG sensor, Composites Part A, 43 (2012), 388-397. 査読有

<http://www.plum.mech.tohoku.ac.jp/publication.html>

③ Tomonaga OKABE, Hiroaki MATSUTANI, Takashi HONDA, Shigeki YASHIRO, Numerical simulation of microscopic flow in a fiber bundle using the moving particle semiimplicit method, Composites Part A, 43 (2012), 1765-1774. 査読有

<http://www.plum.mech.tohoku.ac.jp/publication.html>

④ S.Yashiro, T.Okabe, Estimation of fatigue damage in holed composite laminates using an embedded FBG sensor, Composites Part A, 42 (2011), 1962-1969. 査読有

<http://www.plum.mech.tohoku.ac.jp/publication.html>

[学会発表] (計8件)

① 後藤聡, 西川雅章, 北條正樹, マイクロボンド法による炭素繊維への熱硬化性樹脂の接着・硬化過程の観察 Observation of thermoset polymer curing and adhesion to carbon fiber by microbond test, 第37回複合材料シンポジウム, 2012年10月19日, 愛知県名古屋市

② Shusuke OTA, Tomonaga OKABE, Hiroaki MATSUTANI, Flow simulation in resin transfer molding using the moving particle semi-implicit method, American Society for Composites 27th Annual Technical Conference/The 15th US-Japan Conference on Composite Materials, 2012年10月2日, テキサス アーリントン USA

③ Tomohiro Takehara, Tomonaga Okabe, Noriyuki Hirano, Keisuke Inose, Study on Curing Reaction Characteristic of Epoxy Resin, American Society for Composites 27th Annual Technical Conference/The 15th US-Japan Conference on Composite Materials, 2012年10月1日, テキサスアーリントン USA

④ Masaaki NISHIKAWA, Masaki HOJO, and Satoshi GOTO, Finite Element Simulation for Curing and Adhesion Process of Epoxy Resin to Carbon Fiber, Interface 21, 2012年8月8日, 京都府京都市

⑤ 太田修介, 岡部朋永, 松谷浩明, 粒子法を用いたRTM成形時のポイド形成に関する数値シミュレーション, 第3回日本複合材料合同会議 JCOM-41/JSCM2012, 2012年3月9日, 京都府京都市

⑥ 竹原大洋, 岡部朋永, 平野啓之, 猪瀬啓介, エポキシ樹脂の硬化反応特性に関する数値シミュレーション, 第3回日本複合材料合同会議 JCOM-41/JSCM2012, 2012年3月9日, 京都府京都市

⑦ 今村洋弥, 岡部朋永, 小柳潤, 米山聡, CFRP 積層板の自由端損傷進展解析, 九州大学応用力学研究所平成 22 年度共同利用研究集会, 2012年1月6日, 福岡県春日市

⑧ 竹原大洋, 岡部朋永, 平野啓之, 猪瀬啓介, エポキシ樹脂の硬化反応特性に関する数値シミュレーション, 九州大学応用力学研究所平成 22 年度共同利用研究集会, 2012年1月6日, 福岡県春日市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡部 朋永 (OKABE TOMONAGA)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：50344164

(2) 研究分担者

西川 雅章 (NISHIKAWA MASAOKI)
京都大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：60512085

(3) 連携研究者

()

研究者番号：