CAE —不連続繊維強化複合材料—

住 山 琢 哉*

1. はじめに

近年、二酸化炭素の排出量規制の厳格化に伴い、自動車業界においては燃費向上が急務の課題となっている。燃費向上の対策として、エネルギー効率を上げるためにエンジンの改良等のパワートレインの性能向上がある。しかしながら、パワートレインの性能向上の限界が2020年には近づくと考えられている。もう一つの方策として金属部材を繊維強化複合材料（FRP：Fiber Reinforced Plastic）に代替することによる車体の軽量化がある。FRPは繊維と母材であるマトリックス樹脂の複合材料であり、強化材となる繊維の配向方向によって、発現する強度が大きく影響を受ける。代表的なFRPの形態として、繊維を一方向のみに配向させた一方向強化材（UD：Uni-direction）や配向の異なる複数枚のUDから成る積層材がある。これらのFRPは連続繊維で構成されるため、連続繊維強化複合材料（本稿では連続FRPと記す）と称される。一般的に連続FRPは比強度・比剛性が高いことが特徴であるが、賦形性が低いため、複雑な形状に適用することが困難である。一方、繊維を特定の長さにカットした不連続繊維強化複合材料（本稿では不連続FRPと記す）は成形性に優れるため、複雑な形状にも適用が可能である¹⁾。不連続FRPを自動車の実部材に適用するためには、CAE(Computer Aided Engineering)による剛性・強度設計が必要不可欠である。しかしながら、不連続FRPは連続FRPと比較して繊維/マトリックス樹脂界面が多く存在するため、その変形挙動は非常に複雑となる。そのため、近年でも不連続FRPのCAEモデルに関する研究が盛んに行われている。

そこで、本稿では不連続FRPの構造解析を中心としたCAEと理論について紹介する。本稿で対象とする不連続FRPは図1に示す4つの形態とする²⁾。具体的には構成要素に2種類（繊維束とストランド）、配向状態として2種類（一方向とランダム方向）の形態に分類する。ここで、ストランドはUDをテープ状に引き揃えたプリプレグを一定の長さにカットしたものであり、厚みが薄いものを指す。一方、繊維束は繊維およびその集合体である。特に図1(c)、

図1 本稿で対象とする不連続FRPの形態²⁾

(d)のように繊維束、ストランドの配向がランダムである不連続FRPをそれぞれROF (Randomly Oriented Fibers) およびROS (Randomly Oriented Strands) と呼ぶ。

本稿ではこれら4つの形態に対するCAEと理論を3つ（2章 理論ベースモデル、3章 ミクロモデル、4章 マクロモデル）に分類し、近年の研究事例を紹介する。

2. 理論ベースモデル

まずは、連続FRPに関する数理モデルについて紹介する。最も構造が単純なUDにおける弾性率およびポアソン比については、繊維およびマトリックス樹脂の弾性率・ポアソン比と繊維含有率から複合則を用いることで算出することができる³⁾。このとき、弾性率は繊維の配向方向とその直交方向に対して取得可能である。さらに、積層材については層毎に繊維配向角が異なるため、配向を考慮したコンプライアンスならびに剛性テンソルを算出し、積層板理論から弾性率を求めることができる³⁾。このように連続FRPについては力学物性の推算理論が確立している。そこで、不連続FRPについても、連続FRPの推算理論を適用する事例が報告されている^{4)~6)}。Nakashimaら⁶⁾は炭素繊維/ポリアミド6のROSについて、ストランド1枚を積層材における1層とみなし、複合則ならびに積層板理論を適用することで、曲げ弾性率を導出した。このとき、ストランド形状は長方形であるため、ストランドの配向によってストランド同士の重なる領域が変化する。つまり、ROS内でストランドの積層数が分布することになり、推算理論

CAE：Discontinuous Fiber Reinforced Plastic

* Sumiyama, Takuya

東洋紡(株) 総合研究所 コーポレート研究所

シミュレーションセンター

大津市堅田 2-1-1 (〒520-0292)

takuya_sumiyama@toyobo.jp

2019.3.11 受理

図2 ROSの弾性率予測の手順⁶⁾

の適用が非常に困難となる．そこで，図2に示すようにストランド形状を等価な正方形として模擬することでROS内で積層数を均一化し，積層板理論を適用可能とした．図2には各構成要素（ストランド，セル，列）における弾性率を併記している．セル1つの弾性率 $E_{\text{cell}}^{(m)}$ はストランド1層の曲げ弾性率 E_k から積層板理論により求めることができる．さらに，1列分の弾性率 $E_{\text{row}}^{(i)}$ はセルの弾性率の平均となり，ROSの曲げ弾性率は圧子近傍の1列分の弾性率で表現できる．ここで，最小構成要素であるストランド1層の曲げ弾性率はストランドの配向角に大きく影響を受けるが，実験により全てのストランドの配向角を求めることは現実的ではない．そのため，Nakashima ら⁶⁾はモンテカルロ法によりストランドの配向がランダムとなるように決定し，板厚の異なるROSの曲げ弾性率を予測した．その結果，予測結果は三点曲げ試験結果の曲げ弾性率と板厚との傾向と一致することを報告している．

このように不連続FRPにおいても連続FRPで確立された推算理論を適用し，弾性率を予測できることは非常に有用であるといえる．実部材にFRPを適用することを考えると，FRPの変形挙動の予測が重要となる．次章以降では，CAEを用いた構造解析の研究動向を紹介する．

3. ミクロモデル

不連続FRPではストランド/繊維束とマトリックス樹脂間に多くの界面が存在するため，変形時に界面にて損傷/亀裂が発生することが報告されている^{7),8)}．さらにROF/ROSでは繊維が板厚方向（面外方向）にも配向し，その変形挙動に大きく影響を及ぼす．しかし，2章で取り上げた理論ベースモデルによる弾性率の予測では両者の影響は考慮されていない．CAEを用いてこれらの影響を考慮するために，ストランドや繊維束の形状をあらわに表現したミクロスケールの解析が多く報告されている^{9)~16)}．

Harper ら⁹⁾は図3のように繊維束を乱数によってランダムに配置したROFを2次元で作成し，その一部を代表体積要素（RVE: Representative Volume Element）として決定し，引張・せん断解析を実施している．ここで，理想

図3 ROFにおける繊維束の配置とRVEの抽出（参考文献9のFig.2より転載，一部改変）

的なRVEはマクロ構造の力学特性を代表する周期性が担保されるミクロ構造を指す¹⁷⁾．しかしながら，複合材料のような不均質材料のミクロ構造に対して，周期性が担保されたRVEを決定することは非常に困難である．つまり，予測精度はRVEのサイズに強く依存する．しかし，試験片サイズと比べて解析のスケールが小さいために，RVEによって予測した力学特性を直接，試験結果と比較することができず，妥当性を検証できない．そこで，RVEのサイズを変更して弾性率といった力学特性を予測し，その結果と平均場近似法のMori-Tanakaモデル¹⁸⁾やHalpin-Tsaiモデル¹⁹⁾，シェアラグモデル²⁰⁾といったマイクロメカニクスモデルによって推測される弾性率と比較することで解析の妥当性を検証することが多い^{10)~12)}．RVEサイズの妥当性評価が煩雑となるが，図4に示すように繊維束やストラ

図4 繊維/マトリックス樹脂間の相互作用の異なる設定下での応力分布
(参考文献9のFig.3より転載、一部改変)

ンドの端部への応力集中を表現することができるのはマイクロ解析の大きな特徴である。Harperら⁹⁾は汎用FEM (Finite Element Method) ソフトウェアのAbaqusを用いてROFの解析を実施している。著者ら⁹⁾は繊維束とマトリックス樹脂のスケール差が大きいため、マトリックス樹脂には2次元平面応力要素を用いるが、繊維束には1次元ビーム要素を用いている。さらに、図4(a)のようにビーム要素の節点と平面応力要素の節点を共有すると要素形状が歪み、計算負荷が大きくなる。そこで、計算負荷を低減するため、ビーム要素と隣接する平面応力要素の節点とを拘束する手法(図4(b)参照)が適用されている。図4から両者はよく一致しており、この手法は別のFEMソフトウェア(ANSYS)を用いた研究¹⁰⁾でも実施されていることから、RVEによるマイクロ解析では一般的な手法である。

ここまでの研究におけるRVEは2次元であったため、繊維配向は面内方向に限定されていた。3次元形状からRVEを決定することで、面外方向の繊維配向が弾性率に及ぼす影響について言及された研究事例はあるが、強度予測に必要な繊維界面や繊維同士の相互作用が考慮されていない^{13)~15)}。不連続繊維束に対しては、繊維束間の距離とそれらの相互作用について言及した事例^{12), 16)}はあるものの、

考慮している繊維束が数本程度と非常に少ない。FEMにおいて損傷は要素の形状や方向に依存することが多く、損傷進展の表現の自由度が小さい。そこで、Quら²¹⁾はROSに対して、Peridynamics理論によってストランド内部の繊維間、繊維/マトリックス樹脂間の相互作用、ならびにストランド間の相互作用をモデル化して引張変形における亀裂進展を予測している。Peridynamics理論はSilling²²⁾によって提案され、粒子の運動を解くことで連続体場を表現する手法である。Peridynamics理論では全ての物体を粒子として模擬する必要があるが、損傷進展の表現の自由度が大きいことが特徴である。

本章で見てきたようにミクロスケールの解析では変形に対する繊維ならびにストランド界面の詳細な様相を把握することができるが、計算負荷が非常に大きい。そこで、次章にてマクロスケールの構造に対する解析事例を紹介する。

4. マクロモデル

3章では繊維の形状を明示的に表現することで力学特性に対する繊維の効果を検証した事例を紹介した。一方、本章で取り上げるマクロスケールの解析では繊維の形状をあらわに表現しない。そのため、試験片スケールの変形解析が可能となり、実験結果と直接比較することができる。図5にKoら²³⁾によるROSのマクロモデルの一例を示す。著者らは、数値解析ソフトウェアのMATLABを用いて、ストランド同士の重なりを許容して、面内におけるストランドの配置・配向をランダムに決定している。試験片におけるストランドの配置は厚み方向にこの操作を繰り返すことで決定することができる。FEM解析では決定したストランドの3次元形状をそのまま利用するのではなく、情報を厚み方向に縮約して2次元化し、積層材として取り扱っている。FEM解析にはAbaqusを用いており、入力データは各要素に対する積層材としての力学物性となる。要素には連続体シェル要素を使用しており、図5(b)に示すように要素毎に配向および積層数が異なる。

マイクロモデルにおいて繊維束やストランドとマトリック

図5 ROSのストランド配置と積層数の分布
(参考文献23のFig.8より転載、一部改変)

ス樹脂の界面はランダムに分布しているため、界面の変形が非常に複雑になり、界面の損傷を考慮した事例は少ない。一方、マクロモデルでは局所的な損傷を考慮しないため、要素間の界面損傷の取り扱いが比較的容易である。Selezneva ら^{24), 25)}や Kravchenko ら^{26), 27)}は ROS に対して、連続体シェル要素間の損傷、つまりストランド間の剥離を考慮して引張解析を実施している。紹介したマクロ解析の研究では繊維束・ストランドの形状をあらわに表現しないものの、それらを意識したモデルとなっている。一方、住山ら²⁸⁾は ROS を異方性弾性を有する均質体として取り扱うことでストランドの形状を全く意識しないモデルを提案している。均質体とすることで複雑な形状に対応することが可能であり、損傷を考慮した解析においても計算コストが小さいことが特徴である。

5. ま と め

不連続 FRP の理論ベースモデルと CAE (ミクロモデル, マクロモデル) について研究事例を交えながら紹介してきた。これらのモデルは単独で利用されることは少なく、補完しながら利用されることが多い。今後、不連続 FRP の構造解析を行うにあたって、本稿が参考になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) Visweswaraiah, S. B., Selezneva, M., Lessard, L. and Hubert, P. : *J. Reinf. Plast. Compos.*, **37**(8), 548(2018)
- 2) Roy, S., Yousefpour, A., Bednar, F. and Beaulieu, P. : *Proceedings of 70th American Helicopter Society International Annual Forum*, Montreal, Canada(2014)
- 3) Hull, D. and Clyne, T. W. : *An Introduction to Composite Materials* (2nd Ed.), Cambridge University Press (1996)
- 4) Fu, S. Y., Lauke, B. and Mai, Y. W. : *Science and engineering of short fibre reinforced polymer composites* (1st Ed.), Woodhead Publishing(2009)
- 5) Sato, Y., Takahashi, J., Matsuo, T., Ohsawa, I., Kiriya, K. and Nagoh, S. : *Proceedings of 19th International Conference on Composite Materials*, Montreal, Canada(2013)
- 6) Nakashima, Y., Yamashita, S., Zhang, X., Suganuma, H. and Takahashi, J. : *Compos. Struct.*, **178**, 217(2017)
- 7) Topac, O. T., Gozluklu, B., Gurses, E. and Coker, D. : *Compos. Part A*, **92**, 167(2017)
- 8) Feraboli, P., Peitso, E., Deleo, F. and Cleveland, T. : *J. Reinf. Plast. Compos.*, **28**(10), 1191(2009)
- 9) Harper, L. T., Qian, C., Turner, T. A., Li, S. and Warrior, N. A. : *Compos. Sci. Tech.*, **72**, 225(2012)
- 10) Lu, Z., Yuan, Z. and Liu, Q. : *Comput. Mater. Sci.*, **90**, 123(2014)
- 11) Tai, J. and Kaw, A. : *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **105**, 310(2018)
- 12) Pan, Y., Iorga, L. and Pelegri, A. A. : *Comput. Mater. Sci.*, **43**, 450(2008)
- 13) Babu, K. P., Mohite, P. M. and Upadhyay, C. S. : *Int. J. Solids Struct.*, **130-131**, 80(2018)
- 14) Jain, A., Jin, B. C. and Nutt, S. : *Compos. Part B Eng.*, **124**, 31(2017)
- 15) Iorga, L., Pan, Y. and Pelegri, A. : *J. Mech. Mater. Struct.*, **3**(7), 1279(2008)
- 16) Pan, Y., Lorga, L. and Pelegri, A. : *Compos. Sci. Tech.*, **68**, 2792(2008)
- 17) 寺田賢二郎, 堀宗朗, 京谷孝史 : 応用力学論文集, **1**, 177(1998)
- 18) Mori, T. and Tanaka, K. : *Acta Metallurgica*, **21**(5), 571(1973)
- 19) Halpin, J. C. and Kardos, J. L. : *Polym. Eng. Sci.*, **16**(5), 344(1976)
- 20) Kelly, A. and Tyson, W. R. : *J. Mech. Phys. Solids*, **13**(6), 329(1965)
- 21) Qu, P., Wan, Y., Bao, C., Sun, Q., Fang, G. and Takahashi, J. : *Compos. Struct.*, **201**, 857(2018)
- 22) Silling, S. A. : *J. Mech. Phys. Solids*, **48**(1), 175(2000)
- 23) Ko, S., Chan, K., Hawkins, R., Lynch, C., Mamoune, R. El, Stokes, N., Wu, D. N. and Tuttle, M. E. : *Proceedings of 33rd American Society for Composites Annual Technical Conference*, Seattle, USA(2018)
- 24) Selezneva, M., Roy, S., Meldrum, S., Lessard, L. and Yousefpour, A. : *J. Compos. Mater.*, **51**(6), 831(2017)
- 25) Selezneva, M. : *McGill University, Ph. D. thesis*, (2015)
- 26) Kravchenko, S. G., Sommer, D. E. and Pipes, R. B. : *Part A Appl. Sci. Manuf.*, **109**, 31(2018)
- 27) Kravchenko, S. G. : *Purdue University, Ph. D. thesis*, (2017)
- 28) 住山琢哉, 松尾剛, 菅満春, 古市謙次, 野々村千里 : 日本複合材料学会誌, **43**(4), 149(2017)