

PS-12 船舶への複合材利用に向けた炭素繊維の

曲率線配置に関する研究

構造基盤技術系 * 竹澤 正仁、松尾 宏平、櫻井 昭男

1. はじめに

船舶では、プロペラや艀装品への複合材の利用が進んでおり、将来的には強度部材を含む船殻構造についても利用が進むと予想される。複合材の中で、炭素繊維強化樹脂（CFRP, Carbon Fiber Reinforced Plastics）は軽量かつ高い強度を有する複合材であり、金属の代替材料として様々な分野で注目を集めている。著者らは船舶への複合材、特に CFRP の利用を想定し、その設計法や成形法に関して研究開発に取り組んでいる^{1), 2)}。本誌では、曲率線情報に基づく炭素繊維トウの配置法による CFRP 成形手法について報告する。

2. 曲率線情報に基づく炭素繊維の最適配置

2.1 曲率線¹⁾

曲率線とは面外曲り（法曲率）の極大・極小方向をそれぞれ結んだ曲面上の2組の曲線のことである（図-1 参照）。極大・極小のそれぞれの曲率線は曲面上で互いに直交する。任意の曲面は、曲率線を展開基線とすることで、幾何学的に合理性を持って平面展開、及びその逆操作である曲面成形が可能となる。本研究は、曲率線情報を CFRP 成形に応用することで、構造物の性能の高度化（軽量化、高機能化）及び CFRP 成形の生産性向上を目指すものである。

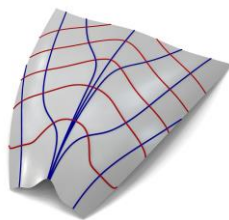


図-1 自動車フード曲面とその曲率線

2.2 展開図の生成

CFRP 成形において、平らな繊維基材から非可展面の目的形状を成形するためには、基材に切込みを入れる必要がある。一般的に織物である繊維基材は、歪ませることにより、ある程度の伸縮操作が可能ではあるものの、複雑な形状を成形する際には、切込みを入れなければ大きなシワが発生し、成形品の強度低下を招くことになる。著者らは、CFRP 成形における各層のプリフォームの形状に、曲率線展開法³⁾を適用する手法を提案している。

曲率線展開法は、元来は船舶外板を対象とした手法であるため、この手法を用いて薄いシート状の材料から複雑な3次

元曲面を成形しようとする、成形曲面の境界にガタつきを生じる場合があった。著者らはこの課題に対して、曲面境界まで精度良く復元できるように修正した展開方法を開発した⁴⁾。図-1の自動車フード曲面を例として、当該手法を適用して生成した2種類の平面展開図を図-2に示す。

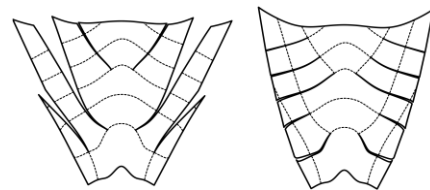


図-2 自動車フード曲面の平面展開形状

また図-2の展開図から、紙を用いて曲面を成形した試行結果を図-3に示す。図から確認できる通り、2種類の成形曲面は元の目的形状を精度よく復元している。また成形曲面の切込み線は目的曲面の曲率線に沿っている様子が確認できる。本誌で提案する CFRP 成形法では、曲率線展開法により生成できる2種類の展開図を、各層のプリフォーム形状に交互に適用する。

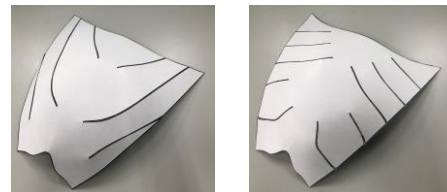


図-3 紙を用いた曲面成形の試行結果

2.3 炭素繊維トウの配置

著者らの提案する炭素繊維の最適配置手法の骨子は、束状の炭素繊維トウを曲面上の曲率線に沿って配置するものである。本手法を用いることで、以下の項目が期待される¹⁾。

- 炭素繊維配置を合理的な設計思想に基づいて設計できる。これにより、構造部材の強度性能の向上が期待できる。
- 複合材の設計、製造工程を自動化でき、生産性の向上に貢献できる。また、設計、製造プロセスを定量化でき、よって品質の安定化や熟練作業からの解放ができる。
- 構造部材の物性を設計者が柔軟に選択できるようになる。

本手法により、これまでの製品とは異なるコンセプトの新製

品の創造などに期待ができる。

実際の成形においては、刺しゅう機の仕様上、3次元の目的曲面上に沿って直接、炭素繊維トウを配置することは出来ないため、一旦、目的曲面の平面展開図上で炭素繊維トウを配置することで各層のプリフォームを作製する。その後、目的曲面の成形型にプリフォームを積層して目的の3次元形状を成形する。

本手法では、曲率線展開法によって生成した平面展開図に対して、曲面の曲率線情報に沿って炭素繊維トウを展開図内部に配置する。そうすることにより、3次元形状を成形した際に、配置した炭素繊維トウが目的曲面の曲率線に沿って配置されることになる。図-2の展開図を利用して、刺しゅう機を用いて炭素繊維トウを配置した様子を図-4に示す。トウを縫い付ける繊維基材には、ガラスクロス材を用いた。

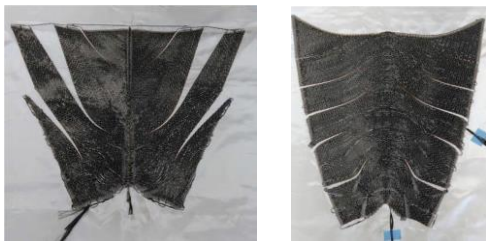


図-4 刺しゅう機による炭素繊維トウの配置の様子¹⁾

3. 成形実験

曲率線に沿った炭素繊維配置法による成形実験の事例を紹介する。CFRPの成形には、VaRTM (Vacuum assisted Resin Transfer Molding) 法を用いた。本手法を用いることで、大型の製造設備を必要とせず、比較的lowコストで品質の良い製品を成形することが可能となる。VaRTM法では、型に沿って積層したプリフォームをフィルムで覆って固定した後、内部を真空状態にすることで樹脂を含ませて成形する。図-4のプリフォーム2種類を交互に積層させて成形した結果を図-5に示す。



図-5 VaRTM法による成形結果

成形した結果は、目的の3次元形状を復元するとともに、炭素繊維トウが目的曲面の曲率線に沿った配置となった。そのため積層したプリフォームごとに炭素繊維トウが直交する様子を確認することが出来た。また展開図に沿って炭素繊維トウを配置したため、製品強度に一番の影響を与える炭素

繊維トウ自体を切断することなく成形することが出来た。さらにガラスクロス基材に対しては、展開図に沿った切込みが入ることで、成形の際に大きなシワが発生することなく、品質の良い成形品を得ることが出来た。

4. 船舶への適用

船舶への複合材利用に向けて、著者らは、まずプロペラへの本手法の適用を考えている。プロペラ曲面の曲率線を計算した結果を図-6に示す。本手法を用いることにより、既存の複合材料プロペラよりも高強度でありながら、かつ負荷時の弾性変形量を自在に制御可能なプロペラの実現を目指している。

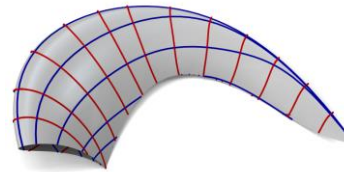


図-6 プロペラ曲面とその曲率線

5. まとめ

本誌では、曲面の曲率線情報に基づくCFRP成形手法について紹介した。本手法を用いることで、新しい機能性を有する製品の製造、成形作業の効率化、品質の安定化などに期待ができる。今後は、炭素繊維トウを展開図内部の指定した流れに沿って自動的に配置できるように、ツールパス生成に関する研究開発にも取り組む予定である。

謝辞

本研究は日本学術振興会の科学研究補助金(18H01355)の助成を受けたものであり、横浜国立大学大学院 前川卓教授のご協力のもとで進めています。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松尾宏平, 竹澤正仁, 櫻井昭男, “複合材における炭素繊維の曲率線配置に関する研究”, 第9回 日本複合材料会議(JCCM-9), 2018.
- 2) K. Matsuo, M. Takezawa and A. Sakurai, “On a concept of a 3D CAD/CAM system based on geometric theory for CFRP plates molding process in shipbuilding”, 18th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding, 2017.
- 3) 松尾宏平, 松岡一祥, “船舶の曲り外板製造を支援する新しい外板展開システムの開発”, 日本機械学会論文集 C 編, 76巻 771号(2010), pp.2797-2802, 2010.
- 4) M. Takezawa, T. Imai, K. Shida and T. Maekawa. "Fabrication of freeform objects by principal strips", ACM Transactions on Graphics (TOG), Volume 35 Issue 6, November 2016, Article No. 225.