

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03910

研究課題名(和文) 曲率線展開法に基づくCFRP成形技術の開発と応用

研究課題名(英文) Development of CFRP forming based on principal strips and its applications

研究代表者

前川 卓 (Maekawa, Takashi)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：70361863

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では自由曲面を最大主曲率方向に沿った短冊群と、最小主曲率方向に沿った短冊群に改良型曲率線展開法を用いて展開し、これらの短冊群を交互に積層あるいは編みこむことにより展開前の形状を復元する方法を考案した。改良型曲率線展開法では、パッチを形成する4本の曲率線を平面に等長展開し互いに直交するように最適化計算により接続している。そこでCFRP成形の際に、各層毎の炭素繊維シート形状の計算に改良型曲率線展開法を利用し、交互に2種類の展開図を適用して積層させていくことで新しいCFRP成形手法を開発した。この技術をペーパークラフト、シートメタル、プラスチックによる建築モデル、CFRPに適用した。

研究成果の概要(英文)：Our novel method uses orthogonal principal strips to fabricate objects whose boundary consists of freeform surfaces. This approach not only lends an artistic touch to the appearance of objects, but also provides directions for reinforcement, as the surface is mostly bent along the lines of curvature. Moreover, it is unnecessary to adjust the bending of these orthogonal strips during the construction process, which automatically reforms the design shape as if it is memorized, provided the strips possess bending rigidity. Our method relies on semi-isometric mapping, which preserves the length of boundary curves, and approximates angles between boundary curves under local minimization. Applications include the fabrication of paper and sheet metal craft, and architectural models using plastic plates, and CFRP. We applied our technique to several freeform objects to demonstrate the effectiveness of our forming method.

研究分野：形状処理工学

キーワード：形状モデリング 曲率線 炭素繊維強化プラスチック

### 1. 研究開始当初の背景

地球の温暖化に伴い、今後 CO<sub>2</sub> 排出量の規制強化がますます進むと予測される中、自動車、航空機、船舶等日常的に使用される乗り物の軽量化は、CO<sub>2</sub> 排出量の削減に直接的に大きく貢献することができる。このような背景の中、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は鉄と比較して高価ではあるものの、重さが約4分の1、強度が10倍の高機能材料であり、鉄の代替材料として注目を集めている[1]。その中でもとりわけ、自動車、航空機の翼と胴体とのブレンド曲面、新幹線のノーズ、船舶のプロペラ、ハル等の形状は意匠性や流体力学特性を満たさなければならない複雑な曲面をしており、各層毎のCFRPの切込みをどのように決めれば高強度でかつ、仕上げ工程の少ない製品に仕上がるのかという統一された基準がない。本研究ではこれらの複雑な曲面に曲率線展開法に基づいた新たな成形加工方法を適用することにより様々なCFRP曲面を成形し、その用途に応じた強度試験や数値シミュレーションを通してその妥当性を検証する。

### 2. 研究の目的

#### (1) 改良型曲率線展開法

Martin[2]により提案された曲率線パッチは曲率線によって囲まれた曲面パッチである。一般的に曲率線パッチは可展面ではないため、平面に展開するためには可展面として近似される必要がある。本研究では曲率線に沿った測地線曲率 $\kappa_g$ を用いてパッチ境界の4本の曲率線を平面に等長展開して、一つ一つの展開パッチを接続して並べていくことで高精度な展開方法を開発する。

#### (2) 改良型曲率線展開法に基づく成形

本研究で提案する改良型曲率線展開法では、同一の曲面を用いて2種類の短冊状の展開図を生成することが可能となる。それらは最大主曲率方向に沿った Maximum principal strip と、最小主曲率方向に沿った Minimum principal strip の展開図であり、この直交する strip の組み合わせを用いることで、積層あるいは編込みの方法により展開前の形状を復元することができる。ここで重要なことは、曲率線が曲面上で互いに直交する性質から、これらの展開図を基に成形した曲面を重ねると、切込み線も3次元空間で直交することである。そこでCFRP成形の際に、各層毎の炭素繊維シート形状の計算に改良型曲率線展開法を利用し、交互に2種類の展開図を適用して積層させていくことで新しいCFRP成形手法を開発する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 改良型曲率線展開法

曲率線展開法は松尾ら[3]によって開発された、曲率線を展開基線として非可展面の船舶外板のCADモデルを平面に展開する手法である。この手法では、境界から境界まで算出される曲

率線を、最大主曲率線と最小主曲率線が互いに直交するという性質を利用してその曲率線に沿った測地線曲率 $\kappa_g$ を用いて平面に等長展開する方法である。曲率線展開法は、元々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3次元曲面を成形しようとする、成形曲面の境界に大きなガタつきを生じる場合があった。

竹澤ら[4]は曲面上の曲率線に囲まれた領域(曲率線パッチ)に注目し、曲率線パッチを平面に展開した後、平面上で曲率線に沿って並べることで、曲面境界まで精度良く復元できるように展開方法を修正した。曲面上の曲率線パッチは4本の曲率線(最大・最小主曲率線、それぞれ2本)によって構成される場合が一般的である(Fig. 1(a)参照)。初めに曲率線パッチを構成する4本の曲率線を、それぞれ測地線曲率 $\kappa_g$ を用いて平面に展開する。平面に展開された曲率線を、曲面上での接続関係に基づいて接続すると、平面上で展開quadが形成されるが、その形状は自由度を有しており、一意に定まらない。そこで曲面上の曲率線が曲面上で直交網を形成することを踏まえ、展開quadの頂点角度が90度からの誤差が最も小さくなるような形状を求める。Fig. 2(b), (c)に示すように、展開quadの頂点とその頂点角度をそれぞれ $V_i, \omega_i (i = 0, \dots, 3)$ とし、角度 $\psi_i, \delta_{i,1}, \delta_{i,2} (i = 0, \dots, 3)$ を定めると角度 $\omega_i$ は以下のように表現される。

$$\omega_i(\psi_0) = \psi_i(\psi_0) + \delta_{i,1} + \delta_{i,2} \quad (i = 0, \dots, 3). \quad (1)$$

ここで角度 $\psi_0$ を変数とした。よって目的関数は以下になる。

$$F(\psi_0) = \sum_{i=0}^3 \left( \omega_i(\psi_0) - \frac{\pi}{2} \right)^2. \quad (2)$$

式(2)を最小化するために、式(3)を満たす角度 $\psi_0$ を、Newton法を用いて求める。

$$\dot{F}(\psi_0) = \sum_{i=0}^3 2 \left( \omega_i(\psi_0) - \frac{\pi}{2} \right) \dot{\omega}_i(\psi_0) = 0. \quad (3)$$

ここで $\dot{\cdot}$ は角度 $\psi_0$ についての微分を表す。

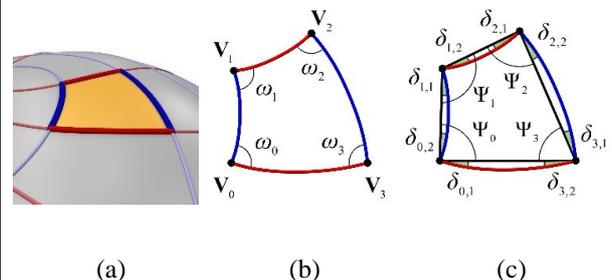


Fig.1 (a) Four sides of principal patch. (b) Definitions of  $V_i, \omega_i$ . (c) Definitions of  $\psi_i, \delta_{i,1}, \delta_{i,2}$ .

N辺形( $N > 5$ )パッチの場合も同様に最適化を行うことで、曲面上の曲率線パッチを平面に展開することができる。

Fig. 2(a)は小型船舶曲面の曲率線である。この曲率線パッチを平面にすべて展開し、最大・

最小主曲率線に沿って並べることで、2種類の展開図を生成することができる (Fig. 2 (b), (c) 参照)。

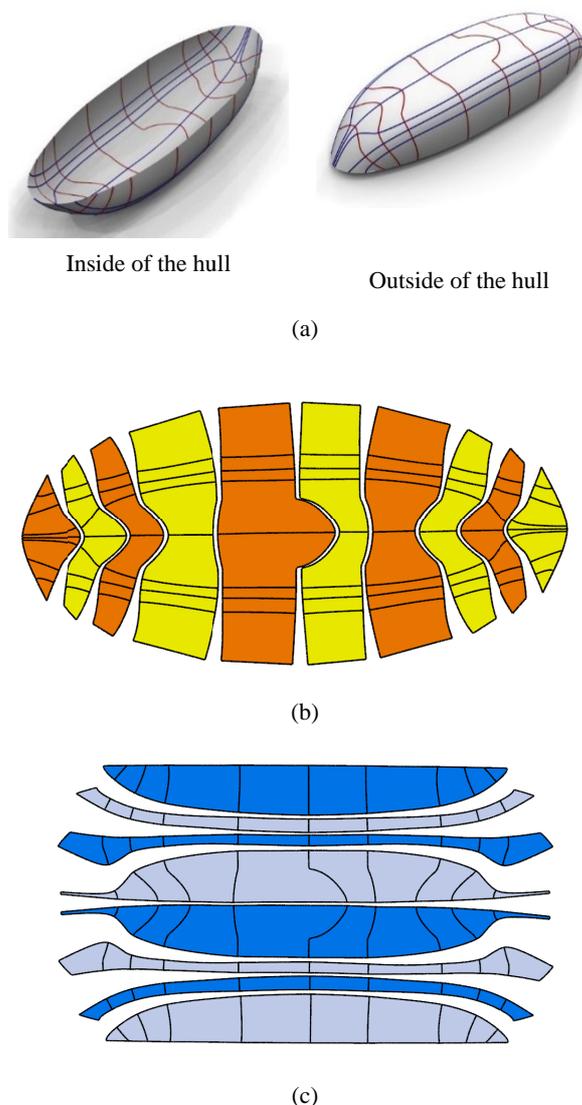


Fig. 2 (a) Small boat with evenly distributed lines of curvature. (b) Maximum principal strips. (c) Minimum principal strips.

## (2) 改良型曲率線展開法に基づく成形

Fig3(a)は x 軸、y 軸、z 軸方向の径の半分の長さが  $a = 80\text{mm}$ ,  $b = 60\text{mm}$ ,  $c = 40\text{mm}$  である楕円体である。楕円体には 4 つのレモンタイプの臍点が存在し、178 枚の 4 曲線パッチと、4 枚の 2 曲線パッチから構成される。Fig 3.1 (b) のように、これらの曲率線パッチを平面に展開し、展開パッチを生成する。これらの展開パッチを、Fig 3.1 (c) のように最大主曲率方向に沿って並べると Maximum principal strip が生成され、Fig 3.1 (d) のように最小主曲率方向に沿って並べると Minimum principal strip が生成される。これらの直交する strip の組み合わせを用いることで、2 通りの方法で展開前の形状を復元することができる。一つは積層による方法で、

もう一つは編込みによる方法である。

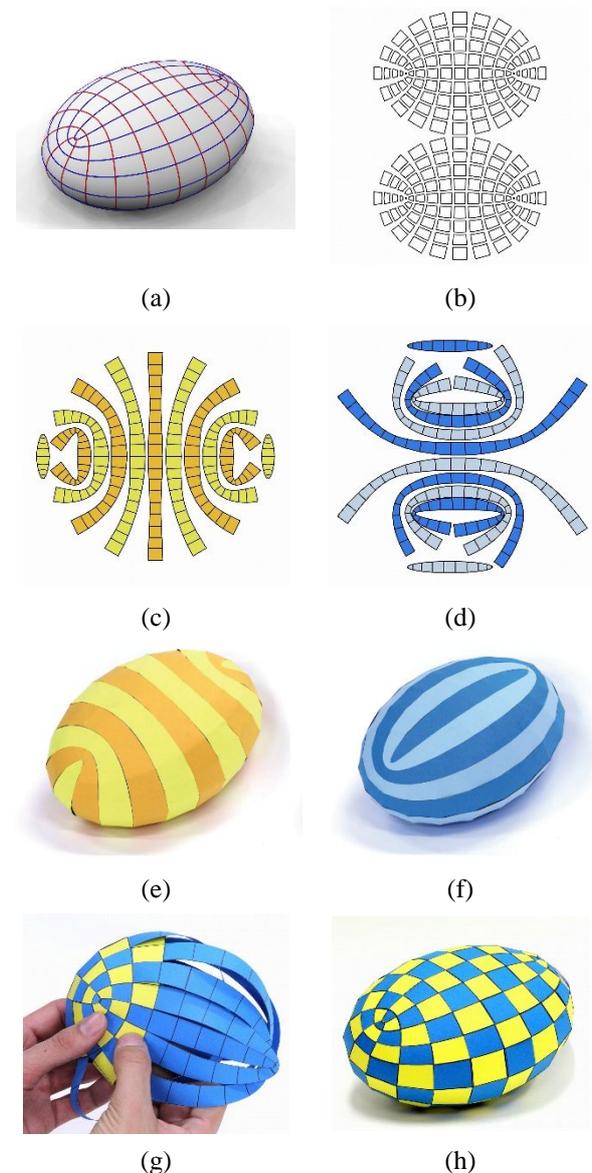


Fig. 3.1 (a) Ellipsoid with evenly distributed lines of curvature. (b) Unfolded principal quads. (c) Maximum principal strips. (d) Minimum principal strips. (e) Two-layered principal strips with maximum principal strips on the visible side. (f) Two-layered principal strips with minimum principal strips on the visible side. (g) Plain-weaving of the principal strips. (h) Woven principal strips.

### a. Strip の積層

Fig 3.1 (e) と (f) のように積層された strip は、Maximum principal strip と Minimum principal strip の層から構成される。ここで、Maximum principal strip には黄色と山吹色の色紙が用いられており、Minimum principal strip には青色と水色が用いられている。Fig 3.1 (e) と (f) において、紙の色は異なるものの対応する展開パッチ

は全く同じ形状をしている。これらの構造物を積み重ねていくことで、多重の積層シェル構造物を形成できる。これまで、材料の厚さを考慮していなかったが、積層数が多くなる場合は、厚みを無視できなくなってくる。strip の厚さを  $t$  と仮定すると、曲率線はオフセット曲面  $r_o(u, v) = r(u, v) + tN(u, v)$  上のものが計算されなければならない。ここで  $N(u, v)$  は単位曲面法線ベクトルである。オフセット曲面とオリジナル曲面の曲率線は、互に対応することがよく知られている。言い換えれば、オリジナル曲面  $r(u_k, v_k)$  上の曲率線が計算されれば、オフセット曲面上に対応する曲率線は  $r_o(u_k, v_k)$  となる。しかし、オフセット曲面上の曲率線に沿った測地線曲率  $\kappa_g$  を求めるためには、 $r_o(u, v)$  を Joo ら[5]のアルゴリズムに適用させて計算しなければならない。

#### b. Strip の編込み

Strip の編込みは、Maximum principal strip と Minimum principal strip とを交互に編込んでいくことにより構築される。ペアとなる展開パッチを糊などで接着することにより、より強固な構造物となる。Fig. 3.1 (g) は strip を編んでいる過程を示しており、Fig. 3.1 (h) が編込みの結果を示している。このアルゴリズムは薄い strip の場合に非常に有効であるが、strip が厚くなった場合、Fig. 3.3 に示されるように、曲げ剛性によって strip にオーバーシュートが生じ始める。そのため、strip には Fig. 3.2 のように伸ばしが必要になる (図の白い部分)。

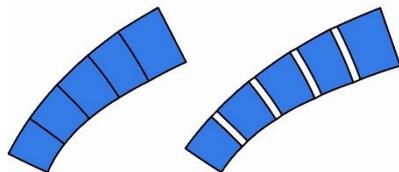


Fig. 3.2 Stretching of principal strip. (left) Before stretching. (right) After stretching.

はりの理論により、中央角度  $\alpha$ 、曲率半径  $\rho$  を定めると、中軸の長さは  $\rho\alpha$  であり、また厚さ  $t$  の strip の表面における曲率半径は  $\rho + \frac{t}{2}$  である (Fig. 3.3 参照)。従って、ひずみは  $\varepsilon = \frac{(\rho + \frac{t}{2} - \rho)\alpha}{\rho\alpha} = \frac{t}{2\rho}$  となる。Fig. 3.3 より、平織りの手順において展開パッチに必要な伸ばし量は、 $\delta = 4\rho(\alpha - \sin \alpha) = \frac{2t}{\varepsilon}(\alpha - \sin \alpha)$  と推定される。本研究では  $\alpha = \frac{\pi}{4}$  を用いて、ひずみ  $\varepsilon$  はそれぞれの材料における応力ひずみを参考にした。

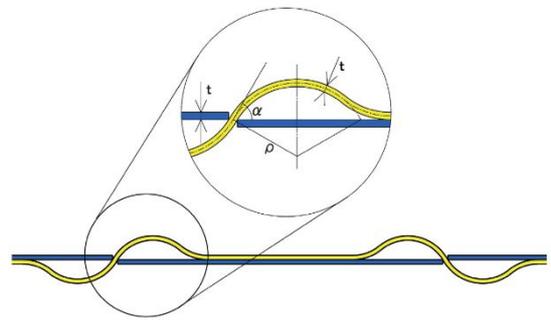


Fig. 3.3 Amount of elongation necessary in plain-weaving for a quad with thickness  $t$ .

## 4. 研究成果

### (1) 改良型曲率線展開法

従来法である曲率線展開法と比較するために、本手法を用いて自動車フード曲面のゼブラ展開図を計算した結果が Fig. 4.1 である。また Fig. 4.1 (a) を基に成形した曲面が Fig. 4.2 (a) であり、Fig. 4.1 (b) を基に成形した曲面が Fig. 4.2 (b) である。従来法では成形曲面の境界でのずれが大きく、段差が生じていた (Fig. 4.3(a) 参照)。本手法では接続される曲線同士が等長となり、展開精度の向上が確認できた (Fig. 4.3 (b) 参照)。以上から本手法を用いることで、CFRP 成形法に適用するための、より適切な展開図生成が可能となったと言える。

さらに、従来法と比較したアルゴリズムの優位性について列挙する。

- 曲率線の直交網の特異点となる臍点が存在する場合でも展開に支障が無いこと。
- 展開図の境界部分も一意に定まること (従来の曲率線展開法では境界部分の計算方法が曖昧であった)。

以上から、提案手法は曲率線展開法と比べて、より高精度でロバスト性の高い展開手法であることがわかる。

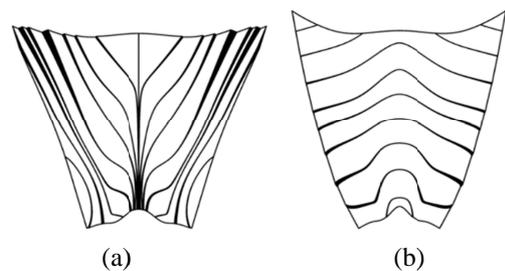
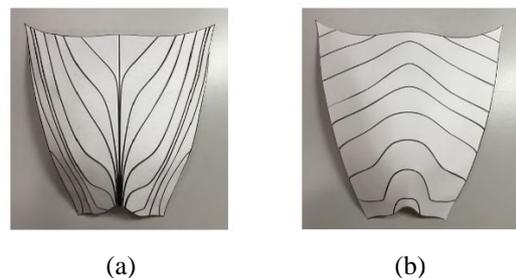


Fig.4.1: フード曲面の展開図。(a) 最大主曲率線方向に沿った切込みのもの。(b) 最小主曲率線方向に沿った切込みのもの。



(a) (b)

Fig4.2: 紙を用いたフード曲面の復元。(a) Fig 4.1(a) から復元された曲面。(b) Fig 4.1(b) から復元された曲面。

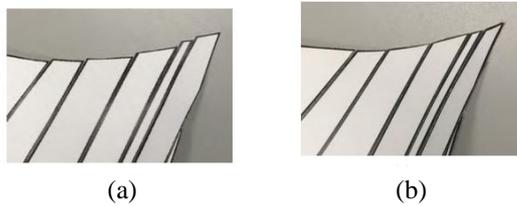


Fig4.3: 従来法との曲面境界の比較。(a) 従来の曲率線展開法によるもの。(b) 本手法(Fig 4.2(a))。

(2) 改良型曲率線展開法に基づく成形

CFRP の成形には比較的安価で仕上がりの品質の高い CFRP を成形できる VaRTM 法 ( Vacuum assisted Resin Transfer Molding)を用いる。VaRTM 法は炭素繊維シートを雌型であるオープンモールドにセットし、パキュムフィルム等で覆った後、内部を減圧することによって発生する負圧を利用して樹脂を含浸・硬化させることで CFRP を成形する手法である( Fig. 5 参照 )。

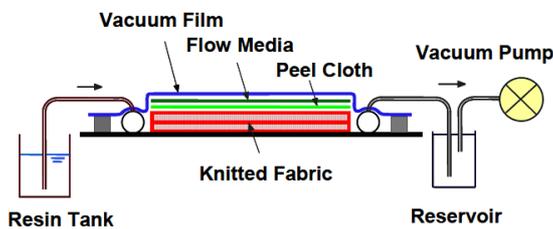


Fig. 5 Schematic view of VaRTM device.

Fig 6 に VaRTM 法で成形した CFRP の自動車の

(a) フード曲面並びに(b)プロペラ曲面を示す。このように、改良型曲率線展開法で作製した自由曲面を有する CFRP には皺がなく、高品質な CFRP を成形することができた。また、Fig 7 に JST・NEDO 主催のイノベーションジャパン 2017 に出展した横浜元町キタムラとの共同制作によるサイクリッド曲面のハンドバッグを示す。この本革製の曲率線短冊を編み上げたハンドバッグは、メディアからも注目を受け、読売新聞、東京新聞、神奈川新聞に掲載された。

まとめ

以上のように改良型曲率線展開法を開発し、ペーパークラフトや CFRP に適用した。これらの成果は、コンピュータ・グラフィックス(CG)/形状モデリングの分野で最高峰の学術論文誌 ACM Transactions on Graphics ( IF=4.218 )に掲載された[4]。このように、展開技術に関しては大きく進展したものの、現時点において展開するためには炭素繊維シートに切込みを入れねばならず、局所的な強度の低下を避けることはできていない。今後は、この点について改善を図る必要がある。

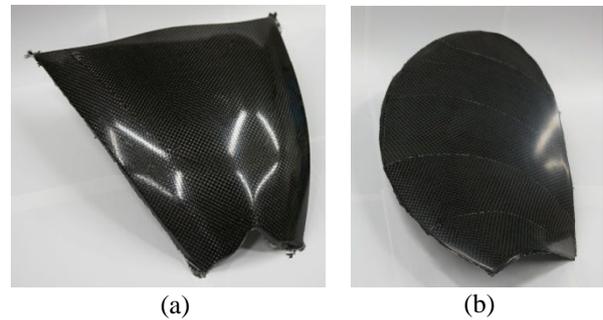


Fig. 6 (a) CFRP Hood model. (b) CFRP Propeller model.

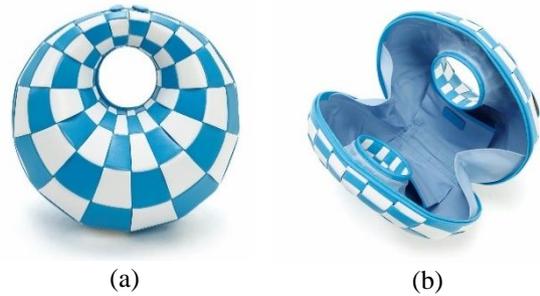


Fig. 7 Cyclide handbag. (a) Outer appearance. (b) Inner appearance.

<引用文献>

[1] NEDO 技術開発機構 などのテクノロジー・材料技術開発部, “自動車軽量化炭素繊維強化複合材料の研究開発”, pp.1-58, 2008年 11月.  
 [2] R. R. Martin. Principal patches - a new class of surface patch based on differential geometry. In P. J. W. Ten Hagen, editor, Eurographics '83, pages 47-55, 1983.  
 [3] K. Matsuo and K. Matsuoka. Development of new system for developing curved shell plates of ships. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. C, 76(771):2797-2802, 2010. In Japanese.  
 [4] M. Takezawa, T. Imai, K. Shida, and T. Maekawa. "Fabrication of freeform objects by principal strips" ACM Transactions on Graphics 35 (6) 225, 2016.  
 [5] H. Joo, T. Yazaki, M. Takezawa and T. Maekawa. "Differential geometry properties of lines of curvature of parametric surfaces and their visualization", Graphical Models, 76(4), pages 224-238, 2014.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

M. Takezawa, T. Imai, K. Shida, and T. Maekawa, "Fabrication of freeform objects by principal strips", ACM Transactions on Graphics 35 (6) pages 225, 2016. 査読有 doi:10.1145/2980179.2982406

[学会発表] (計 4 件)

宇佐美陸, 櫻井昭男, 松尾宏平, 竹澤正仁, 鈴木健稔, 飯村峻, 澁谷忠弘, 前川卓, 「曲率線展開法に基づく新たな CFRP 成形技術の開

発」, 第 9 回 日本複合材料会議 (JCCM-9), 2018 年

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 年  
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 (国際学会), 2017 年  
櫻井昭男, 「海上技術安全研究所の RTM 研究開発動向」, 関西 FRP フォーラム(招待講演) 2016 年

研究員

研究者番号: 50782489

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称:形状取得装置、目的面形状物製造装置、目的面形状物製造方法およびプログラム

発明者: 前川卓, 竹澤正仁

権利者: 国立大学法人横浜国立大学

番号: PTC/JP2016/085042

出願年月日: 2016 年 11 月 25 日

国内/外国の別: 外国

名称: 目的面形状物製造方法、目的面形状物製造装置、部材形状取得装置およびプログラム

発明者: 前川卓, 竹澤正仁

権利者: 国立大学法人横浜国立大学

番号: 特願2015-232125

出願年月日: 2015 年 11 月 27 日

国内/外国の別: 国内

[その他]

ホームページ

<http://maekawalab-ynu.com/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

前川 卓 (MAEKAWA, Takashi)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 70361863

### (2)研究分担者

澁谷 忠弘 (SHIBUTANI, Tadahiro)

横浜国立大学・リスク共生社会創造センター・准教授

研究者番号: 10332644

松尾 宏平 (MATSUO, Kohei)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・研究員

研究者番号: 00399528

櫻井 昭男 (SAKURAI, Akio)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・研究員

研究者番号: 20373417

竹澤 正仁 (TAKEZAWA, Masahito)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・