有限要素法による自由曲面の平面展開問題*
(第2報, 各種設計制約がある場合)島田 哲夫*¹, 多田 幸生*²Development of a Curved Surface Using a Finite Element Method
(2nd Report, Consideration of Design Constraints)

Tetsuo SHIMADA and Yukio TADA

Recently, 3-dimensional graphic technologies are topics of rapidly growing importance in the industrial fields such as those dealing with curved surfaces. When designing for a curved surface, methods for transformation of arbitrary regions on the curved surface into flattened forms are very important in manufacturing processes. The purpose of this paper is to describe a scheme for transformation of various regions on a curved surface subject to the following conditions. First, materials which constitute regions on a curved surface have different types of elasticity. Second, an objective curved surface has some regions whose shapes are fixed. Third, lengths of border lines between two regions need to be made equal to each other. As typical and practical applications, examples of shoe models corresponding to each case are presented to illustrate the method that transforms the various regions into flattened forms.

Key Words: Design Engineering, Curved Surface, Transformation, Singular Value, Plane Stress, CAD, Region, Coupling

1. 緒 言

対象が自由曲面である形状を設計する場合, 要求されている機能を満たすような平面展開形状を決定する必要がある。従来より造船業界において, 船殻を構成する厚板材を設計する場合, 平板をしかるべき形状に切断し, これを組み立てて所定の曲面にすることということがある。また靴や被服の設計に際しては, 原型を設定するために, 足型および体表面の正確な展開ができることが重要な問題となっている。一般に自由曲面は, 非可展面と呼ばれるように厳密には変形することなく平面に展開することが不可能とされており, 平面展開には近似的手法をとらざるを得ない。このような平面展開の系統的な手法として測地線展開法や接触面展開法などがある⁽¹⁾⁽²⁾。しかし, 対象とする形状は, 曲率半径の大きな曲面に限られ, しかも部位により, 適用できるプログラムが異なるために, 一般的な曲面の平面展開に用いることはかなり難しいといえる。また, 相互に関連する曲面上の複数領域を展開するときに生じる各種の条件や, 互いに似た曲面につい

て, 基準の曲面の展開形状をもとに, 他の曲面の展開形状を順次作成する場合の制約条件については考慮されていない。

著者らは, 自由曲面上の単領域を平面に展開するため, 有限要素法を導入し, 平面応力問題として解く方法について検討を行い, 自由曲面の設計⁽³⁾や三次元グラフィックスの入力システム⁽⁴⁾に応用し, 手法の有用性を示した。この手法の利点は, 幾何学的な形状の決定問題に対して, 構造力学に基づく方法を用いることにより, 複雑な曲面を有限要素の集合体として離散的にとらえ, しかも形状決定の評価基準としてひずみエネルギーによる定量的な把握が可能となることにある。

本論文では, 実用上重要である曲面上の複数領域を対象とし, 相互に関連する条件を満たしつつ, 平面展開するときのはん用的な手法について検討する。このような条件として, (1)曲面上の複数領域を伸縮特性の異なった素材を用いて作成する場合, (2)形が固定された領域を含む曲面を平面に展開する場合, (3)複数領域間の境界線の長さを互いに同一値に保ちつつ, 平面展開する場合について, 以下に述べる。また自由曲面上の複数領域を平面に展開する典型的な例として靴設計作業をあげ, 本手法を適用する。

* 昭和63年11月26日 関西支部第248回講演会において講演, 原稿受付 昭和63年2月3日。

*¹ 正員, 兵庫県立工業試験場 (〒654 神戸市須磨区行平町)。

*² 正員, 神戸大学工学部 (〒657 神戸市灘区六甲台町)。

2. 複数領域の平面展開

2.1 異なった伸縮特性をもつ領域の展開 以下にその手法を述べる。

- (1) 曲面上の領域 $R_{r1}, \dots, R_{rm}, R_g$ を三角形要素に分割する [図1(a)]。
- (2) 平面上に初期形状 $T_{r1}^0, \dots, T_{rm}^0, T_g^0$ を設定する [図1(b)]。
- (3) 対応する二つの三角形に着目し、平面形状上の三角形要素 e_r から曲面形状上の e_R への変形を変換行列として定量化する。
- (4) 変換行列の特異値分解を行い、回転成分と伸縮成分に分割する。
- (5) 各領域の実素材のもつ引張りに対する伸び率に影響を与える値を定める。
- (6) 平面形状の各節点に負荷すべき等価力を算出する。
- (7) 平面形状の剛性行列を求める。
- (8) 全系に組み立てることにより、変位を算出する。
- (9) 形状の評価関数を計算する。
- (10) 評価値が設定条件を満たしていれば、その形状を、異なった伸縮特性をもつ素材を用いた複数曲面の平面展開形状とする。
- (11) そうでなければ、平面形状の修正処理を行って、(3)へ戻る。

図1 異なった伸縮特性をもつ領域

まず対象とする曲面上の領域 $R_{r1}, \dots, R_{rm}, R_g$ をそれぞれメッシュに分割し [図1(a)], 続いてそのメッシュに対応して平面を分割したものを初期(試行)平面領域 $T_{r1}^0, \dots, T_{rm}^0, T_g^0$ とする [図1(b)]。そこで、それぞれの面上の対応する一組の三角形 e_R と e_r に着目し、幾何的な形状の関係について、変換行列を用いて定量化する。すなわち曲面上の点 (x_R, y_R) を、平面上の点 (x_r, y_r) と変換行列 A を用いて表すと以下のようになる。

$$\begin{pmatrix} x_R \\ y_R \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x_r \\ y_r \end{pmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

ここで形状変形を回転成分と伸縮成分に分けるために、変換行列の特異値分解⁽⁵⁾を行うと、

$$A = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_p & 0 \\ 0 & d_q \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(-\beta) & -\sin(-\beta) \\ \sin(-\beta) & \cos(-\beta) \end{pmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

となる。

β, ψ は回転角であり、 d_p と d_q は $(A^T \cdot A)$ の固有値の平方根である。

図2は平面上の三角形について、基準座標系と β° 傾いている三角形の主方向の関係を表している。一つの三角形について、変換行列の特異値分解によって得られた回転角 β の主方向 p とその垂直方向 q に対して、 d_p, d_q 倍伸縮させた形状を、さらに ψ° 回転させた形状が曲面上の対応する三角形になる。そこで、平面上のある三角形要素は、単位温度熱を加えたときに、その要素の主軸方向 p, q の単位長さが、 d_p, d_q 倍となるような以下に示した異方性の線膨張率 α_p, α_q である仮想的な特性をもつものとする。

$$\begin{aligned} \alpha_p &= m \cdot d_p - 1 \\ \alpha_q &= m \cdot d_q - 1 \end{aligned} \dots\dots\dots (3)$$

m は最終形状の倍率に影響を及ぼす値である。このよ

図2 基準系と主方向の関係

うな仮想材料のもつ熱ひずみ $\{\epsilon_\theta\}$ は,

$$\{\epsilon_\theta\} = \{[T]^T\}^{-1} \begin{pmatrix} m \cdot d_p - 1 \\ m \cdot d_q - 1 \\ 0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

ここで

$$[T] = \begin{pmatrix} \cos^2 \beta & \sin^2 \beta & -2 \sin \beta \cos \beta \\ \sin^2 \beta & \cos^2 \beta & 2 \sin \beta \cos \beta \\ \sin \beta \cos \beta & -\sin \beta \cos \beta & \cos^2 \beta - \sin^2 \beta \end{pmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

である。そして、実際には熱ひずみから生じる等価な力を各要素に負荷することを考える。平面熱応力問題⁽⁶⁾において変位-ひずみ行列を $[B]$ 、剛性行列を $[k]$ 、変位を $\{u\}$ 、節点力を $\{f\}$ とすると、剛性方程式は

$$[k] \cdot \{u\} = \{f\} + \int [B][D]\{[T]^T\}^{-1} \begin{pmatrix} m \cdot d_p - 1 \\ m \cdot d_q - 1 \\ 0 \end{pmatrix} dv \dots\dots\dots (6)$$

となる。 $[D]$ は以下に示す行列である。

$$[D] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{pmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

ここで E は仮想材料の縦弾性係数であり、平面展開問題としての形状の変化を容易にするため、非常に小さな値 (たとえば $E = 1.0 \times 10^{-5}$) を定める。また ν はポアソン比である。このようにして、試行平面形状のもつ仮の剛性や、ひずみと変位および応力とひずみとの関係より、 $[k]$ 、 $[B]$ 、 $[D]$ を求め、また曲面および平面上の対応する三角形の関係から特異値分解により回転角 β と伸縮率 d_p 、 d_q を算出することができる。

さらにそれぞれの三角形がどの領域に属するかにより、その領域の実素材のもつ引張りに対する伸びを考慮することにする。その伸び率に影響を及ぼす値が式 (3) 中の倍率 m である。伸びを生じない場合は $m = 1.0$ とし、伸びが大きな素材ほど値を小さくする。ここでは初期平面形状の領域 T^0_{r1} 、 $\dots$ 、 T^0_{rm} 、 T^0_q ごとに素材に対応する倍率 m_{r1} 、 $\dots$ 、 m_{rm} 、 m_q を定める。

このようにして定めた値を式 (6) の等価節点力の項に代入して、釣合い問題を解くことにより、全体の変位ベクトル $\{U\}$ を得ることができる。平面展開の形状の評価値としてこの変位がもたらすひずみエネルギーの総和 J を算出し、

$$J \leq \epsilon \dots\dots\dots (8)$$

となるとき、その形状を、対応する曲面の平面展開形状とする。ここで ϵ は、平面展開の精度と計算時間とのトレードオフによって決まるしきい値である。式 (8) が成立しないときは、平面形状における各節点座

標 $\{X\}$ に、変位 $\{U\}$ と適当な係数 γ をかけた値を足し加え、新たな平面形状での節点座標とする。

$$\{X'\} = \{X\} + \gamma \cdot \{U\} \dots\dots\dots (9)$$

この手順を繰返すことにより、試行平面形状は、異なった伸縮特性をもつ素材を用いた複数曲面の平面展開形状となっていく。

2・2 固定領域を含む曲面の平面展開 実用上の問題として、形が固定された領域を含む曲面を平面に展開しなければならないことがある。固定したい箇所が一部分である場合、構造力学の変位を拘束する処置を施すことにより、平面展開形状を得ることができるが、固定すべき領域が複数個存在する曲面を平面に展開する場合、有限要素法の境界条件設定に帰着させて解くことはできない。そこで以下に示す手順により、複数の固定領域を含む曲面を平面に展開することを考える。

- (1) 固定領域 T_{r1} 、 $\dots$ 、 T_{rm} を平面上に設定する。
- (2) 曲面上の領域 R_θ [図 3 (a)] を三角形要素に分割する。
- (3) 初期形状 T^0_θ [図 3 (b)] を設定する。
- (4) 曲面領域 R_θ と平面形状 T^0_θ の対応する二つの三角形要素に着目し、形状の相違を変換行列として定量化する。
- (5) 変換行列の特異値分解を行い、回転成分と伸縮成分に分割する。

(a)

(b)

図 3 固定領域を含む曲面とその初期平面形状

(6) 固定領域とその他の領域の縦弾性係数をそれぞれ定める。

(7) 平面形状の各節点に負荷すべき等価力を算出する。

(8) 平面形状の剛性行列を求める。

(9) 全系に組み立てることにより、変位を算出する。

(10) 形状の評価関数を計算する。

(11) 評価値が設定条件を満たしていれば、その形状を、固定領域を含む曲面の平面展開形状とする。

(12) そうでなければ、平面形状の修正処理を行って、(4)へ戻る。

まず固定領域を平面上の適当な位置に置く。そして、三角形メッシュに分割する(図3の $T_{f1}, \dots, T_{fm}$)。次に、対象とする曲面上の領域 R_0 をメッシュに分割し[図3(a)], 続いて、曲面上のメッシュに対応して、平面を分割したものを、初期平面形状 T^0_0 とする[図3(b)]。ここで2・1節と同様の議論により得られた式(6)において、初期平面形状の固定領域 $T_{f1}, \dots, T_{fm}$ の縦弾性係数を E_f として非常に大きな値(たとえば、 $E_f = 1.0 \times 10^2$)を与え、その他の領域 T^0_0 の縦弾性係数 E_0 については、平面展開問題として、形状の変化が容易になるような値(たとえば、 $E_0 = 1.0 \times 10^{-5}$)を定める。このようにして前述のアルゴリズムを繰返すことにより、固定領域 $T_{f1}, \dots, T_{fm}$ の形を変化させることなく、他の領域の平面展開形状を得ることが可能となる。

2・3 境界線の長さを一定にする曲面の展開 複数領域を平面に展開する場合、実用上重要となる事項として、共有する境界線の平面展開後の長さを同一値にする問題がある。このためには、隣接する2節点間の距離を同一値に保つという条件の平面応力問題を設定しなければならない。以下に境界線の長さを同一値にするための平面展開の手順を示す。

(1) 曲面上の領域 R_0 [図4(a)] を三角形要素に分割する。

(2) 曲面上の領域 $R_{r1}, \dots, R_{rm}$ のそれぞれを平面に展開する[図4(b)]。

(3) 平面上に初期形状 T^0_0 [図4(c)] を設定する。

(4) 境界線の長さを同一値にする目的で仮の三角形集合 $R_{r1}, \dots, R_{rm}$ および $T_{f1}, \dots, T_{fm}$ を設定する。

(5) 曲面上と平面上の対応する二つの三角形に着目し、形状の相違を変換行列として定量化する。

(6) 変換行列の特異値分解を行い、回転成分と伸縮成分に分割する。

(7) 仮の三角形集合とその他の領域の縦弾性係数をそれぞれ定める。

(8) 平面形状の各節点に負荷すべき等価力を算出する。

(9) 平面形状の剛性行列を求める。

(10) 全系に組み立てることにより、変位を算出する。

(11) 形状の評価関数を計算する。

(12) 評価値が設定条件を満たしていれば、その形状を、境界線の長さを同一値にした曲面の平面展開形状とする。

(13) そうでなければ、平面形状の修正処理を行って、(5)へ戻る。

曲面上の領域 R_0 と $R_{r1}, \dots, R_{rm}$ との境界線を $U_{0,r1}, \dots, U_{0,rm}$ とする[図4(a)]。まず、曲面上の領域 $R_{r1}, \dots, R_{rm}$ を、それぞれ独立に平面に展開することを考える。展開後の平面形状 $T^{n_{r1}}, \dots, T^{n_{rm}}$ の境界線を $L^{n_{r1}}, \dots, L^{n_{rm}}$ とする[図4(b)]。曲面領域 R_0 を平面に展開するとき、境界線の長さを同一値にするという目的で、境界線のおおのの辺の長さに等しい辺を

図4 対象とする曲面領域とその初期平面領域

もつ三角形の領域 $T_{f1}, \dots, T_{fm}$ を図4(c)の破線のように仮に想定する。この三角形要素は計算モデル上のため必要であり、実際の展開形状からはのちに除外する。そして、その三角形メッシュを含み、対象とする曲面上のメッシュに対応して平面を分割した形状を初期平面形状とする[図4(c)]。初期平面形状において境界線の長さを同一値にする目的で、仮に設定する三角形要素の集合 T_{f1}, T_{fm} の縦弾性係数を E_f として、非常に大きな値(たとえば $E_f = 1.0 \times 10^2$)をとり、その他の領域 T^0_g の縦弾性係数 E_g については、形状の変化が容易となるような値(たとえば $E_g = 1.0 \times 10^{-5}$)を定める。以下先と同様にすることにより、境界線の長さを同一値にするという拘束条件を満たしつつ、全体の平面展開形状を得ることが可能となる。

3. 平面展開例

本手法は、任意の複数領域からなる自由曲面形状を実際に平面展開する場合のはん用的な手法である。ここでは平面展開を必要とする典型的な例として、靴設計作業⁽⁷⁾を取り上げる。靴の設計の際して、原型を設定するために、靴型形状の正確な展開ができるということが重要であり、技術者は立体形状のレプリカを作成し、それを実際に裁断して平面に展開することで、基準サイズの原型を作製している。また各種サイズの形状も、この原型をもとに、しかるべき倍率で拡大・縮小を行って作製している。このように実際の平面展開作業において単一領域のみを対象とする場合は少なく、多くの場合素材の異なる複数領域を互いに拘束条件を満たしつつ、全体として平面に展開しなければならない。そこで以下、三つの場合について靴曲面形状を対象とし、平面展開を行う。

3.1 異なった伸縮特性をもつ領域の展開例 靴の成形工程において、素材の伸びを前提として靴曲面

を作製するために、素材の伸びが領域によって異なる場合、平面展開形状のそれぞれの領域について、素材の伸びを考慮した平面展開形状を得る処置が必須である。靴曲面形状の例として図5をあげる。 U_{12} と U_{23} は曲面を裁断したデザインラインであり、 U_b はヒールラインである。これらの境界線により靴曲面は R_{r1}, R_{r2}, R_{r3} の3領域に分けられる。これらは、多くの場合異なった素材を用いるために、成形工程における材料の引張りによる伸びを考慮して、平面展開形状を作製しなければならない。そこで、領域ごとに最終形状の倍率に影響を及ぼす値 m を指定する。

図6(a)は、靴曲面モデルのデザインライン U_{12} および U_{23} に対して、 L^0_{12}, L^0_{23} を初期平面形状のデザインラインとする。そして、 $T^0_{r1}, T^0_{r2}, T^0_{r3}$ を曲面領域 R_{r1}, R_{r2}, R_{r3} の初期平面領域とする。ここで、引張りによる素材の伸びを考慮した三つの場合について平面展開を行う。比較のために T^0_{r1}, T^0_{r3} の倍率 m_{r1}, m_{r3} を1.0とし、 T^0_{r2} の倍率 m_{r2} を1.0, 0.8, 0.5と変化した平面展開形状 T^{n1}, T^{n2}, T^{n3} をそれぞれ図6(b)~(d)に示す。引張りによる伸びが大きな素材ほど m の値を小さくとる必要があることがわかる。また実際の素材に対しては $0.8 \leq m \leq 1.0$ の値をとればよい。

3.2 固定領域を含む曲面の平面展開例 通常、靴の設計は標準サイズの靴モデル(たとえば、サイズ

図5 靴曲面モデルとデザインライン [1]

(a) 初期平面形状 $m_{r3}=1.0$ の平面展開形状
(b) 倍率 $m_{r1}=1.0, m_{r2}=1.0$ $m_{r3}=1.0$ の平面展開形状
(c) 倍率 $m_{r1}=1.0, m_{r2}=0.8$ $m_{r3}=1.0$ の平面展開形状
(d) 倍率 $m_{r1}=1.0, m_{r2}=0.5$ $m_{r3}=1.0$ の平面展開形状

図6 異なった伸縮特性をもつ領域の平面展開

23.0 cm)を用いて行い,他のサイズ(たとえば,サイズ21.0~25.0 cm)については,標準サイズのパーツ形状の拡大・縮小(グレーディング作業)により作製している。ここでは,靴モデルをヒール高さを考慮に含んだ位置におき, X - Y - Z 軸について,それぞれの比率で拡大・縮小を行う(図7)。このようなグレーディング作業において,対象とする曲面のある領域に,金属やプラスチックなどの素材を用いる場合がある。このように一部分の領域の形状については,標準サイズである23 cmのパーツを用い,しかも他の形状についてはグレーディングを施したパーツを用いることが製造工程上,必須の条件となる。

そこでこの場合の例として図8に固定領域を含む靴曲面モデルを示す。ここでは R_{f1} , R_{f2} はグレーディング時において,大きさおよび形状を固定する領域である。また R_g はグレーディングを施す領域である。

図9(a)は,固定領域 T_{f1} , T_{f2} とそれを含む初期平面形状 T^0_g である。この形状において T_{f1} , T_{f2} の縦弾性係数 E_{f1} , E_{f2} を 1.0×10^2 と置くことにより, T_{f1} , T_{f2} の形状と大きさをかえることなく,しかも,三次元グレーディングを施したそれぞれの形状に対応した平面展開形状 T^n_g を得ることができる(図9(d))。

3.3 境界線の長さを一定にする曲面の展開例

曲面に忠実な展開形状を得るために,自由曲面の各領域を切り裂いて,それぞれ個別に平面展開する場合が多い。しかし,あくまで近似展開であるために,平面展開後の境界線の長さに違いがあり,成形工程において,縫製ができないという不都合が生じる。そこで境界線の長さを同一値にしながら,平面に展開することが必

図7 三次元グレーディング

図8 固定領域を含む靴曲面モデル

要となる。図10は靴曲面モデルとデザインライン[2]を表している。ここでデザインライン U_{ij} とヒールライン U_o を境にパーツ分割を行う。

最初にパーツ R_i を平面に展開した形状を,図11に示す。図11(a)の T^0_i は,パーツ R_i と位相的に等しい初期平面形状であり,図11(b)の T^1_i は n 回目の処理を施して収束した平面展開形状である。またこのときのデザインライン L^1_i の長さ d^1_i は,35.41 mmである。これを d_i とする。次に隣接するパーツ R_j について,単独で平面展開した場合(図12)と, U_{ij} に対応するデザインラインの長さを L^1_j の長さに一致させる処理を行った場合(図13)について結果を示す。図12(a)の T^{0*}_j は平面展開の初期形状,図12(b), (c)は平面展開の中間形状である。このようにして最

(a) 固定領域 T_{f1} , T_{f2} とそれを含む初期平面形状 T^0_g
(b) 1回目の形状修正作業により得られた試行形状 T^1_g
(c) 2回目の形状修正作業により得られた試行形状 T^2_g
(d) 8回目の形状修正作業により得られた展開形状 T^8_g

図9 固定領域を含む曲面の平面展開

図10 靴曲面モデルとデザインライン[2]

終的には図12(d)の展開図 T^{**}_j になる。このときのデザインラインは L^{**}_j であり、その長さ d^{**}_j は 34.32 mm である。前述の d_i とは異なるために、二つのパーツを縫製することができない。次に、変形を拘束した場合の例(図13)では、パーツ R_i を平面に展開した図[図11(b)]中の、パーツ R_i におけるデザインライン L^*_i を構成している三角形の辺の長さを、パーツ R_j を平面展開する場合の拘束条件とする。すなわち、図13(a)においてパーツ R_j と位相的に等しい初期平面形状を設定する場合に、縦弾性係数として、非常に大きな値 ($E_j = 1.0 \times 10^2$) をもつ三角形要素を、デザインラインにそって付加した形状 T^0_j をもとに平面展開を行う。こうすることにより、図13(d)における T^*_j のデザインライン L^*_j において、その長さを $d_j (= 35.41 \text{ mm})$ に一致させることができ、しかも精度のいい平面展開形状を形成することが可能となる。

曲面の設計は、製造工程および製品計画と密接に関連している。従来より設計によって得られた型紙にあわせて皮革を裁断するために鋼鉄製の打抜き刃型を用いる。この裁断刃型は型紙の数だけ必要のため、各サイズ分そろえると非常に多くなる。そこでパーツの一

部分は 0.5 cm おきの全サイズそろえないで、大・中・小の3サイズにおさえ、前後を含むサイズを一つのサイズで兼用するのが通例である。パーツの兼用は通常、

図13 デザインラインの長さを同一値にしたパーツ R_j の平面展開

図11 パーツ R_i の平面展開

図12 パーツ R_j の平面展開

図14 パーツの兼用

隣接するサイズ間で行うが、比較のために、たとえば 21.0 cm および 25.0 cm を標準サイズである 23.0 cm で兼用することを考える。前述の例(図 10)のように、23.0 cm の場合は、デザインライン U_{ij23} により R_{i23} と R_{j23} を生成する。一般に全パーツを逐次作成することはせず、通常、大きい部分 T_{j21} , T_{j23} , T_{j25} についてはそれぞれ展開図を作成するが、小さい部分 T_{i21} , T_{i25} については前述の理由で、基準サイズの展開図 T_{i23} を兼用する。

図 14 において T_{i23} のデザインライン L_{i23} の長さは 35.41 mm である。パーツごとに単独で平面展開した形状が、図 14(a), (c), (e) であり、それぞれ 21 cm モデル, 23 cm モデル, 25 cm モデルのパーツ R_{j21} , R_{j23} , R_{j25} を平面展開した図 T_{j21} , T_{j23} , T_{j25} である。また、デザインライン L_{j21} , L_{j23} , L_{j25} の長さ d_{j21} , d_{j23} , d_{j25} は、それぞれ 32.71, 34.32, 35.94 mm であり、それぞれ異なった値をとる。次にデザインラインの長さを同一値にする場合は図 14(b), (d), (f) であり、それぞれ 21 cm モデル, 23 cm モデル, 25 cm モデルのパーツ R_{j21} , R_{j23} , R_{j25} を平面展開した図 T_{j21} , T_{j23} , T_{j25} である。また、デザインライン L_{j21} , L_{j23} , L_{j25} の長さ d_{j21} , d_{j23} , d_{j25} は、ともに d_{i23} に一致した。

4. 結 言

本論文では、実用上重要である曲面の複数領域を対象とし、相互に関連する条件を満たしつつ、平面に展開する場合について検討した。このような条件として、(1)曲面上の複数領域を伸縮特性の異なった素材を用いて作成する場合、(2)固定領域を含む曲面を平面に展開する場合、(3)複数領域間の境界線の長さを同一値に保ちつつ、平面展開する場合があり、それぞれの条件を考慮した平面展開の手法化を図った。これにより、有限要素法による自由曲面の平面展開手法の適用範囲を広げることが可能となった。また、実際の例として、典型的でしかも身近な靴曲面モデルを取りあげ、本手法の有用性を示した。

文 献

- (1) 滝沢, 関西造船協会誌, 129-9(昭43), 19.
- (2) 日本造船学会数値制御委員会編, 造船における NC 技術, (昭47), 101, 産報.
- (3) 島田・多田・ほか2名, 機論, 54-498, C(昭63), 497.
- (4) 島田・多田, 情処論, 29-5(昭63), 1.
- (5) 伊理・児玉・須田, 計測と制御, 21-8(昭57), 763.
- (6) Zienkiewicz, O. C. (吉識・山田監訳), マトリクス有限要素法, (昭50), 培風館.
- (7) 日本ケミカルシューズ工業組合編, ケミカルシューズハンドブック, (昭51), 3, 日本ケミカルシューズ工業組合.