

## サブディビジョンサーフェス活用のすすめ

3D形状の設計作業では、有機的な曲面形状の作成が必要な場合があります。特に意匠性が重要視される家電品や家庭日用品等の製品設計では曲面が多用されています。

ところが、3D-CADの基本的な編集機能だけでは有機的な曲面の作成が難しい場合があるため、このような曲面形状を効率的に作成する手法として、サブディビジョンサーフェス機能を取り入れる3D-CADが増えてきています。

【サブディビジョンサーフェス】（日本語では【細分割曲面】と表現されます。）は従来3D-CGで用いられていたポリゴンメッシュ（ポリゴンで構成された形状）編集機能です。

ポリゴンは元々平面なので曲面的な形状（近似曲面）を表現するためには細かいポリゴンを規則的に配置する必要があります。しかし、膨大な数のポリゴンを任意に配置して滑らかな曲面を編集することは現実的ではありません。これを解決する手法の一つであるサブディビジョンサーフェスでは、制御メッシュ（元となるポリゴンメッシュ）を規則的に分割することで、近似曲面を効率的に生成することができます。制御メッシュの形状情報を保ったまま近似曲面化されるため、形状修正も容易に行うことができます。

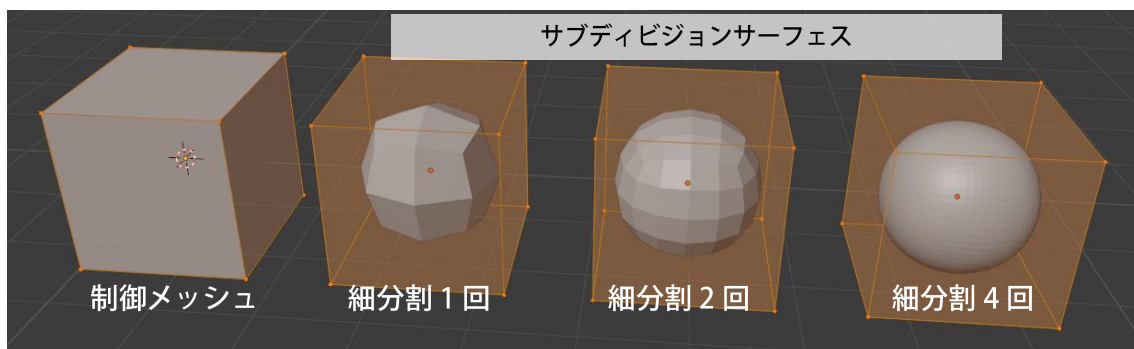


図1.サブディビジョンサーフェスの概要

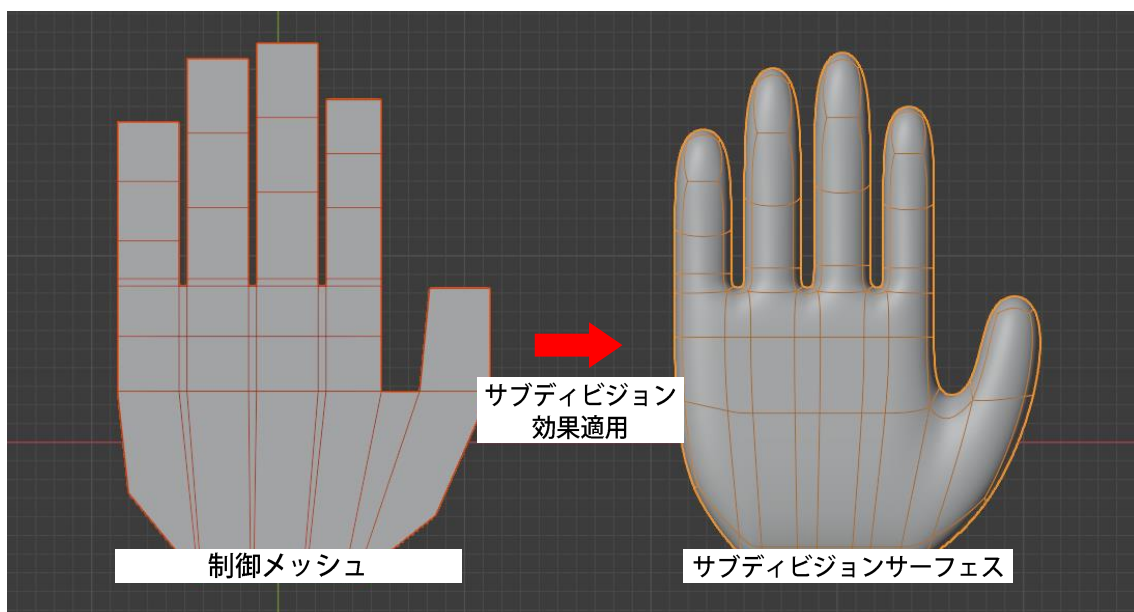


図2.サブディビジョンサーフェス適用イメージ

前述のとおり [3D-CG におけるサブディビジョンサーフェス] はあくまでも近似曲面ですが、[3D-CAD で用いられているサブディビジョンサーフェス] では完全な曲面を表現することができ、CAD の基本機能で作成した形状と同様に使用することができます。サブディビジョンサーフェスは、自由度の高い形状編集が可能なことから粘土細工に例えられることがあります。曖昧で不規則なものではなく、関数曲面であるため、一定のルールに沿って使用することで金型作製等にも活用することができます。



ドライヤー



シャンプーボトル



バスタブ(一部サブディビジョンサーフェスのイメージを合成しています)

図 3. サブディビジョンサーフェスを活用した 3D-CAD データ作例

● サブディビジョンサーフェスの特徴

- ・ 図4のように制御メッシュの各ポリゴンの向きを接線方向として曲線・曲面が生成されます。

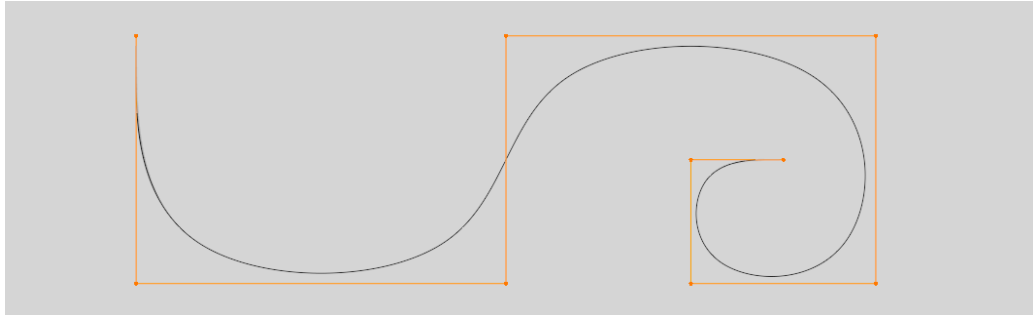


図4.制御メッシュポリゴンの向きと生成される曲線・曲面の関係

- ・ 制御メッシュの頂点の位置関係が近いほど曲率が高くなり、遠いほどなだらかな曲面になります。

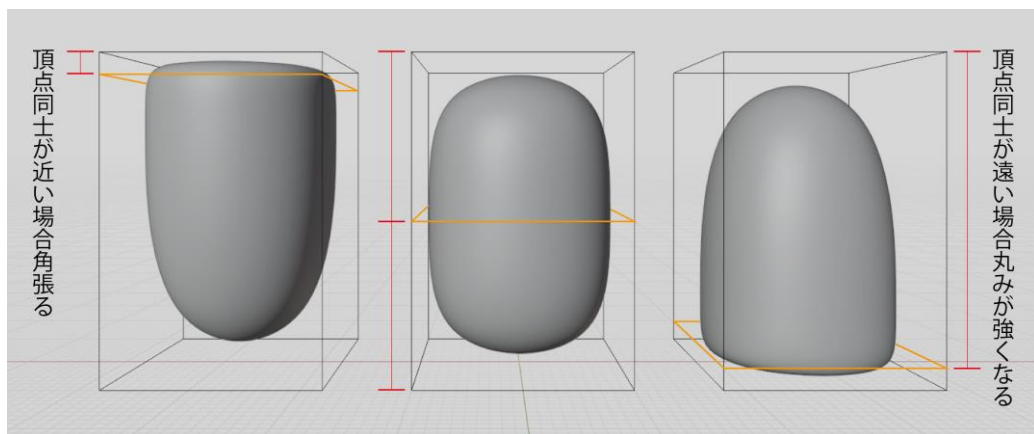


図5.制御メッシュ頂点同士の位置関係による曲率の変化

- ・ 一般に3次関数を用いられており、制御メッシュの3つの頂点が同じ直線上に連続した場合、生成される〔曲線〕は直線に接します。また、4点以上同じ直線上に連続した場合、連続の開始点及び終点を除く間の区間は直線と一致します。<sup>\*</sup>  
<sup>\*</sup>隣り合うポリゴンとのねじれがない場合を除く

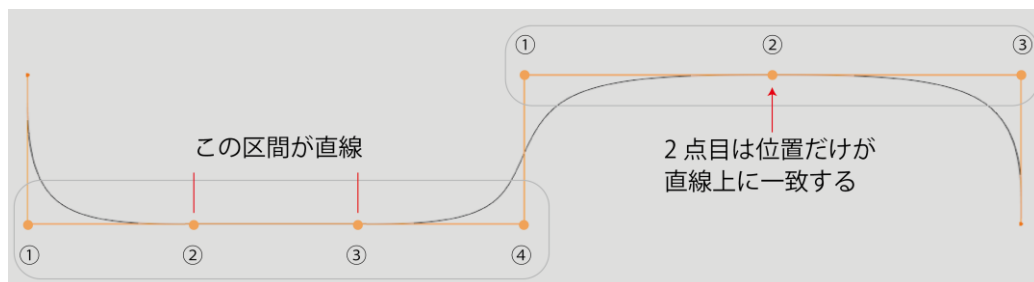


図6.制御メッシュ頂点の配置による曲線の制御



- サブディビジョンサーフェスの〔曲面〕を平面と一致させるためには、縦横の制御点を平面状に配置する必要があります。3×3の9つの頂点が平面状に配置された場合、生成される〔曲面〕は平面に接し、4×4の16点が平面状に配置された場合、中央の区域が平面と一致します。

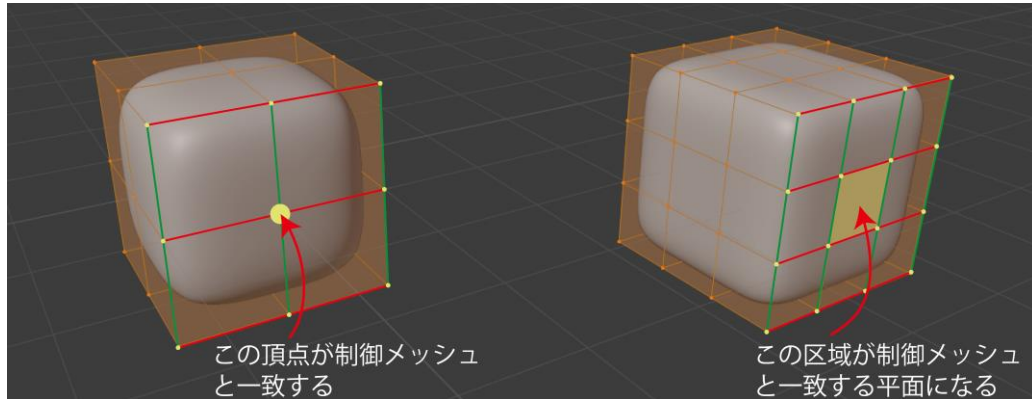


図 7. 制御メッシュ頂点の配置による曲面の制御

- 制御メッシュは原則として4頂点のポリゴン（四角ポリゴン）で構成する必要があります。（特にCGとCAD間でデータを受け渡しする場合）
  - 3頂点のポリゴン（三角ポリゴン）は用いる部位によって曲面化できない、連続性が損なわれる等のエラーの原因となるため、基本的には使用せず、構成上どうしても必要な場合にのみ、前述のエラーを確認した上で用いるようにしてください。

5つ以上の頂点を持つポリゴン（Nゴン）については、使用するソフトウェアによって扱いが異なります。5つ以上のポリゴンを許容しないソフトウェアでは、該当するポリゴンが含まれている制御メッシュは曲面化されません。許容されるソフトウェアにおいては操作を簡略化できるメリットがあるものの、曲面化の挙動が把握しづらい等のデメリットがあります。

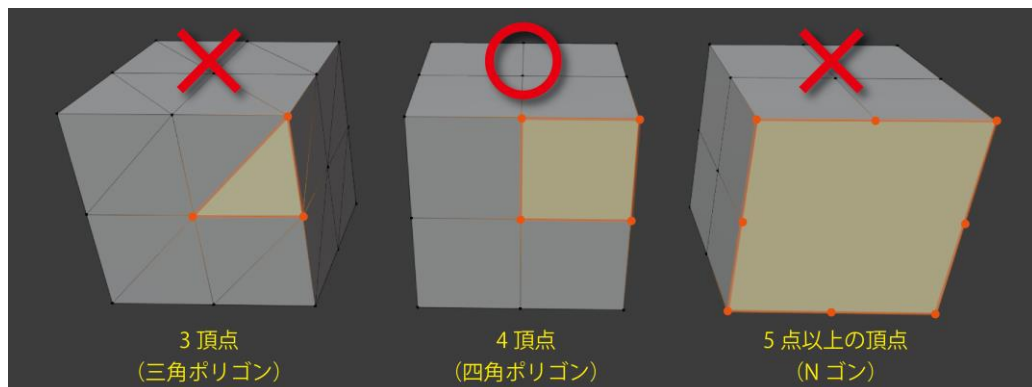


図 8. サブディビジョンサーフェスに適するポリゴン頂点数



- 頂点を共有するポリゴン数が 4 つの場合、曲率連続 (C<sup>2</sup> 連続) の曲面が得られます。3 つのポリゴン及び 5 つ以上のポリゴンが 1 点を共有している場合、その点は特異点となり、その部分の連続性は接線連続 (C<sup>1</sup> 連続) となります。回転体や円筒状の形状等は、三角ポリゴンの頂点が軸中心位置に集中してしまい、曲面に意図しない「しわ (歪み)」が発生する。この場合「三角ポリゴンを四角ポリゴンに修正する」、「中心の周辺のポリゴンにリング状の分割を増やす」等で回避することができます。

ポリゴンの操作は、ポリゴン数が増えるほど編集が煩雑になり難易度が増すため、最低限のポリゴン数に抑え、かつ形状の流れに沿った配置を行うことで、滑らかな曲面を得ることができます。

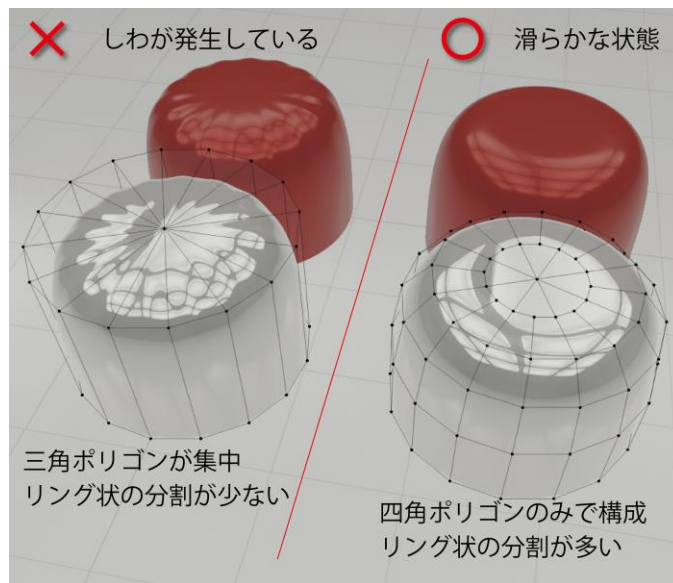


図 9.三角ポリゴンの問題と回避方法

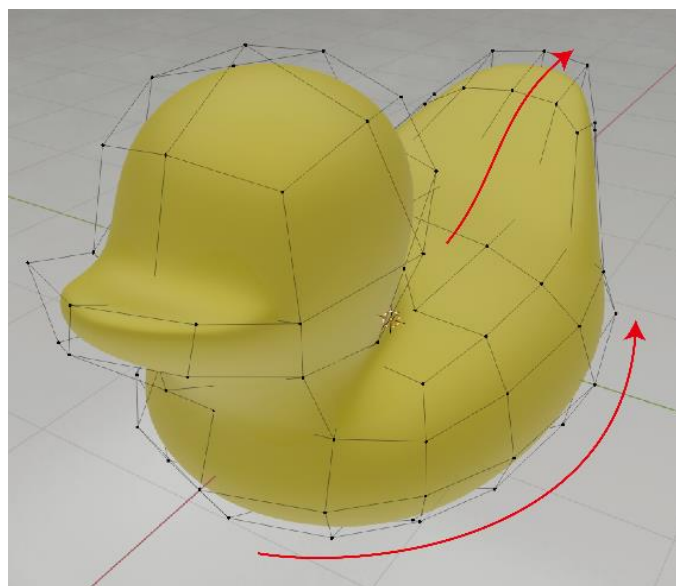


図 10.形状の流れに沿ったポリゴン配列



● サブディビジョンサーフェスの汎用的なモデリング方法

サブディビジョンサーフェスは、基本的にポリゴンを曲面化する機能なので、前述の特徴を考慮して操作する以外は通常のポリゴンモデリングと同じです。サブディビジョンサーフェスを使用することで、以下のような形状が簡単に作成でき、修正も容易に行うことができます。

・ 形状の一部を押し出す

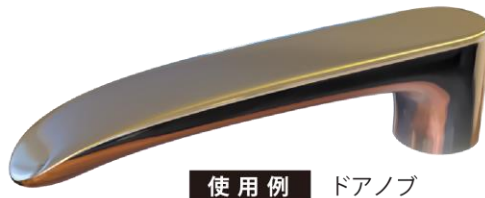


図 11.形状の【押し出し】による形状編集

・ 別の形状を滑らかに繋げる



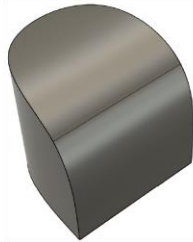
図 12.【ブリッジ】を使用した形状の結合



・ 任意の部分を角張らせる



角張らせたい  
エッジを選択



【折り目】を適用  
(完全に折れた状態)



角張らせたい  
エッジを選択



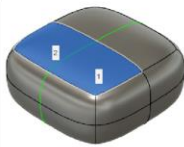
エッジを近接させる  
(任意に調整できる)



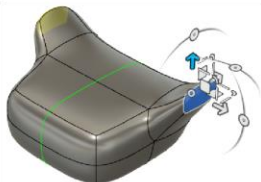
使用例 化粧水容器

図 13.エッジのコントロール方法

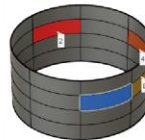
・ 対称編集



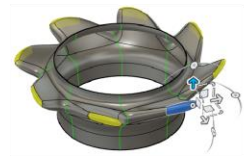
【対称/ミラー】



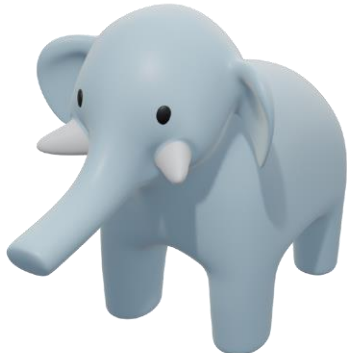
編集が面対称に  
反映される



【対称/円形】



編集が回転対称に  
反映される



ゾウのマスコット



使用例 ファン

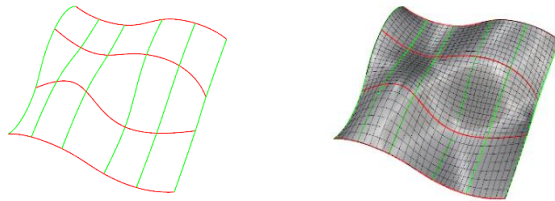
図 14.対称編集を用いた形状作成

### ● CADでサブディビジョンサーフェスを使用する場合の要点

CADでの形状表現は一般的にNURBS (Non-Uniform Rational B-Spline (非一様有理Bスプライン)) と呼ばれる関数曲面 (サーフェス) が使用されています。(ソリッドも関数曲面の集合です。) 縦組みと横組みの曲線を編みカゴのように構成することでサーフェス形状が得られます。サブディビジョンサーフェスもCADで用いられる場合は最終的に、このNURBSサーフェスに変換されます。このためサブディビジョンサーフェスの編集の際には、NURBSサーフェスの構成に適した状態にしておく必要があります。

#### NURBSサーフェス

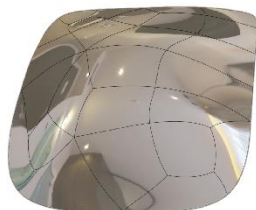
編みカゴを作るように形状を規定する縦横の曲線を構成し指定することで、曲線を補完するサーフェスが作成される。



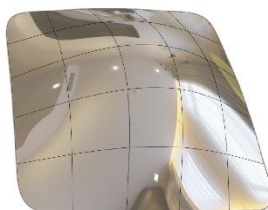
縦組、横組の曲線を構成 → 作成されたサーフェス

図 15.NURBSサーフェスの概要

サブディビジョンサーフェスからNURBSサーフェスへの変換では、制御メッシュのポリゴンが縦横に規則的に配列されている部分がNURBSの縦組み横組みの構成に変換されます。このため効率的かつ滑らかな形状に変換するには、形状の流れに沿って縦横にポリゴンを配列させる必要があります。また3つのポリゴンまたは5つ以上のポリゴンが1点を共有している場合、その部分は特異点となり、変換の際にはその部分でサーフェスが分割され、 $C^1$ 連続となるため、なるべく特異点がない状態にすることで、より滑らかな形状を得ることができます。



ポリゴンが整列されていないためゆがみがある (いびつ)



ポリゴンが整列されておりゆがみがなく滑らか

画像はサブディビジョンサーフェスの形状を、鏡面反射させることで、形状評価をしている様子です。

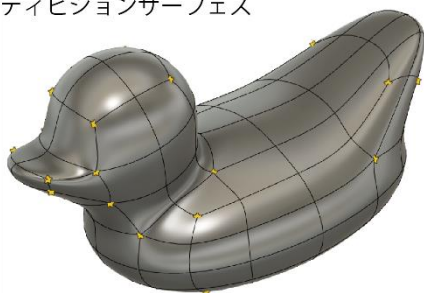
左側の形状では、ポリゴンの配列がバラバラのため形状がいびつになり、映り込みがゆがんでいます。

右側の形状では、ポリゴンの配列が縦横に整列されているため、滑らかな形状になり、映り込みも滑らかになっているのが分かります。

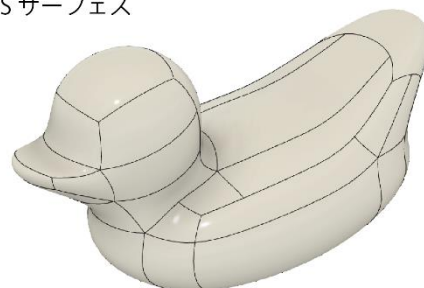
図 16.ポリゴン配列による曲面の状態

サブディビジョンサーフェス

NURBSサーフェス



変換 →



★マーク = 特異点  
(3つのポリゴン及び5つ以上のポリゴンが1点を共有している状態)

ポリゴンが縦横に規則的に配列されている部分がNURBSの縦組み横組みの構成に変換される  
特異点がある部分でサーフェスが分割される

図 17.特異点とサーフェス変換の関係



● 3D-CG ソフト併用の利点

3D-CG ソフトは元々ポリゴン操作が前提となっているため、サブディビジョンサーフェス作成・編集についても 3D-CAD と比べ相対的に操作性が優れています。また、3D-CG 特有の機能もあるため、形状データ作成時に 3D-CG を併用することで 3D-CAD 単独で使用するより、作成できる形状の自由度を飛躍的に高めることができます。

3D-CG 特有の機能例

◇ ディスプレイスメント

ポリゴンメッシュを任意の形状に凹凸変形させる機能

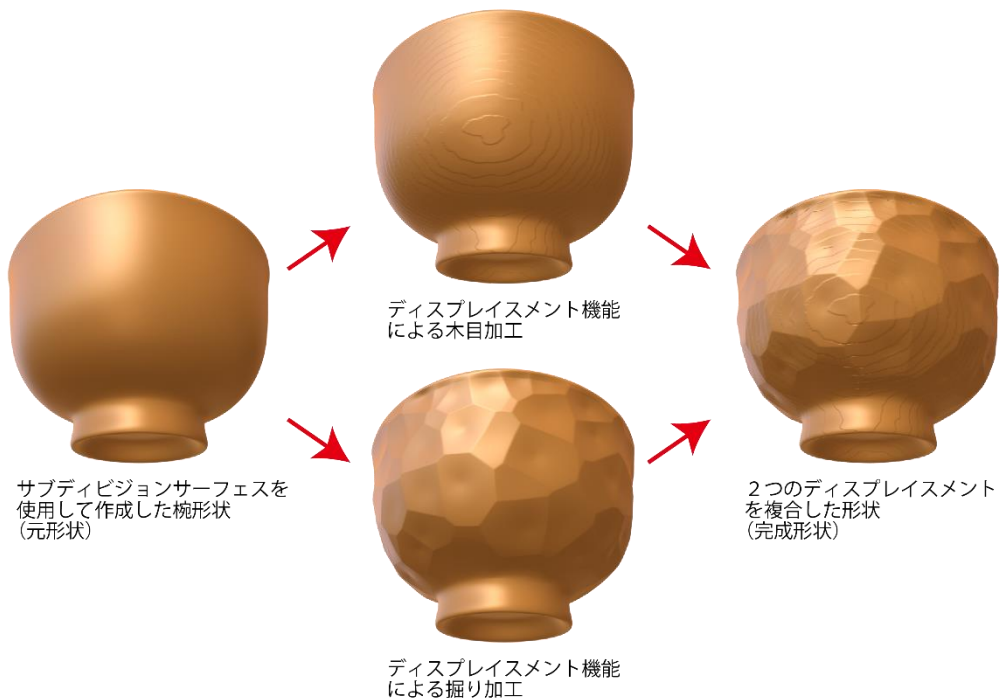


図 18.ディスプレイメント使用例

◇ 各種物理シミュレーション

布や液体等様々な材質・現象について、物理的挙動を計算し視覚化する機能



図 19.物理シミュレーション使用例

● NURBS サーフェスと複合活用事例

CAD でサブディビジョンサーフェスを使用する場合、単体で用いられることは少なく、通常は CAD の基本機能でモデリングを行い、必要な部分のみにサブディビジョンサーフェスを使用するなど、多くの場合 NURBS サーフェスとの併用（複合活用）が必要となります。簡便な併用方法としては、形状の集合演算（形状同士の和・差・積）等がありますが、本項では NURBS サーフェスの一部を CG ソフトで作成したサブディビジョンサーフェス形状に置き換え、エンボス加工を施す事例を紹介します。

使用ソフトウェア：Robert McNeel & Associates Rhinoceros®（サーフェスマデラー）  
Blender Foundation Blender（3D-CG）  
Autodesk® Fusion 360®（3D-CAD）



図 20.サブディビジョンサーフェスを活用したエンボス加工

- ・ Rhinoceros を使用して元となる回転体形状を作成します。
- ・ 【サーフェスをアイソカーブで分割】コマンドを使用して、変形させたい部分を切り出します。（縮小オプションは【はい】を選択）

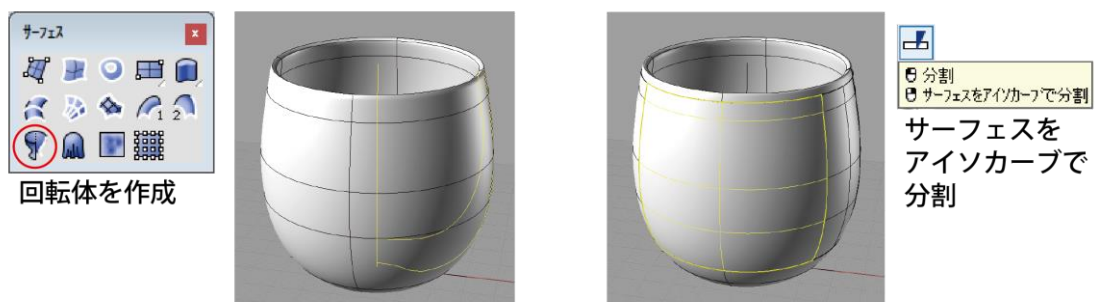


図 21.任意部分の切り出し

- ・ 【サーフェスからメッシュを作成】 コマンドを使用して、切り出したサーフェスからメッシュを作成します。コマンド実行の際表示されるポリゴンメッシュ詳細オプションで、最大縦横比を1にし、エッジからサーフェスの最大距離の値を調整することでポリゴンの大きさを制御します。プレビューを表示して四角ポリゴンで構成されていること、ポリゴンの扁平率が1対1に近い状態になっていることを確認してください。メッシュの元となったサーフェスは削除しておきます。  
 （この際、メッシュの元となったサーフェスと、作成されたメッシュが同じ位置にあるため、間違えないように注意してください。）

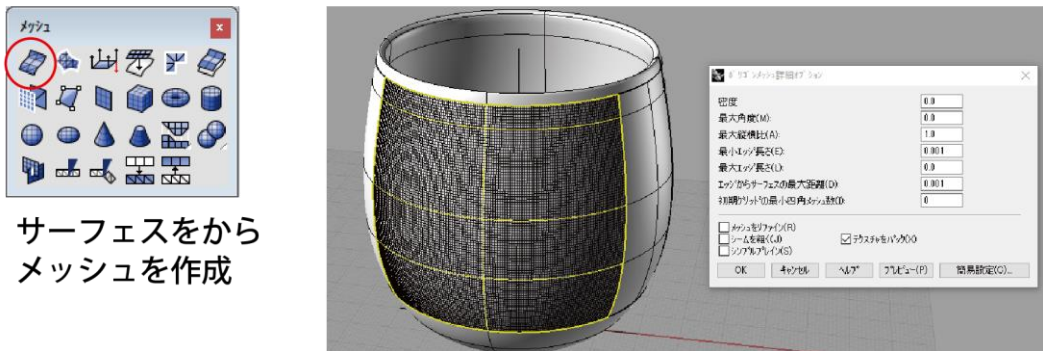


図 22. 【サーフェスからメッシュ作成】 の操作

- ・ 作成されたメッシュを選択した状態で【選択したオブジェクトをエクスポート】を実行します。形式はobj形式を選択します。（四角ポリゴンの出力が可能のため）



図 23. 【選択したオブジェクトをエクスポート】

- ・ 保存したobj形式のファイルをBlenderに【Import】します。

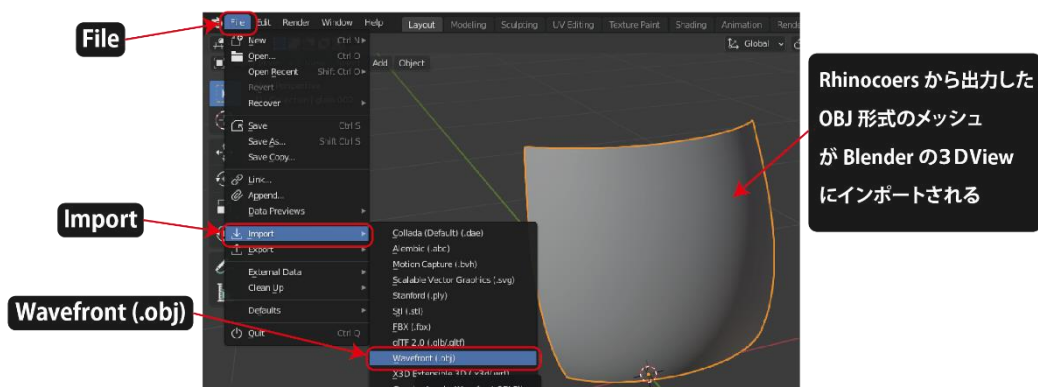


図 24. 【Import】 操作

- ・ 3D ビューでインポートした形状を正面から見る状態にし、【UV Mapping／Project from View(Bounds)】 コマンドで UV 展開します。

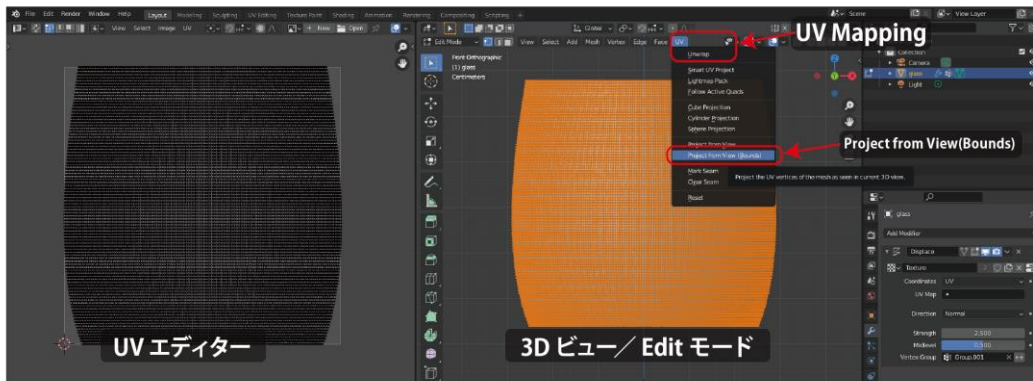


図 25. 【UV Mapping】 操作

- ・ エンボス加工の元となるテクスチャを設定します。

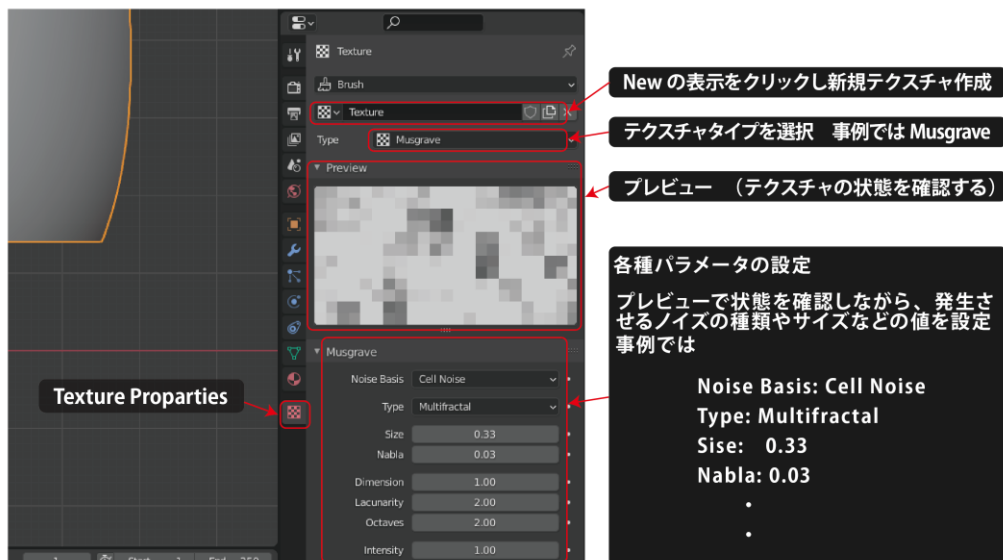


図 26. テクスチャ設定

- ・ 【Dispalace】 モディファイアを使用して、エンボスを設定します。

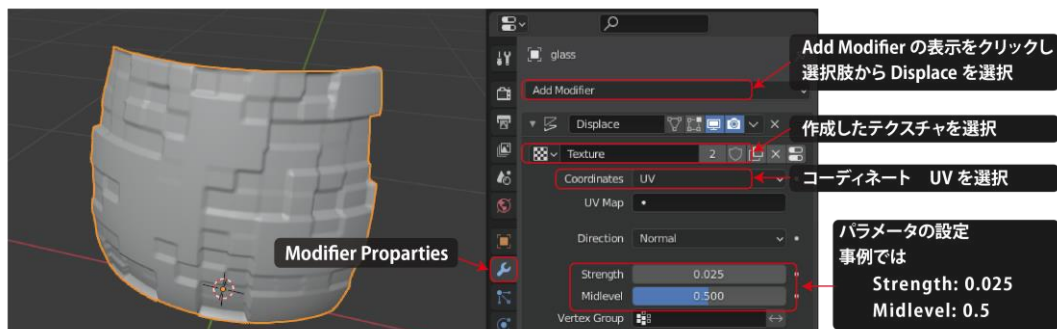


図 27. 【Displace】 モディファイアの設定





- Rhinoceros で作成した本体の形状と上手く結合するために【Weight Group】の設定と【Weight Paint】を使用して、エッジ付近が変位しないようにします。
    - ◇ まず、Edit モードでメッシュの中程のポリゴンを選択します。(変位させたい領域)。新規のバーテックス (頂点) グループを作成し、選択しているポリゴンをそのグループに割り付けます。
- 前項【Displace】モディファイアの設定/Weight Group の欄に、作成した Weight Group を指定します。

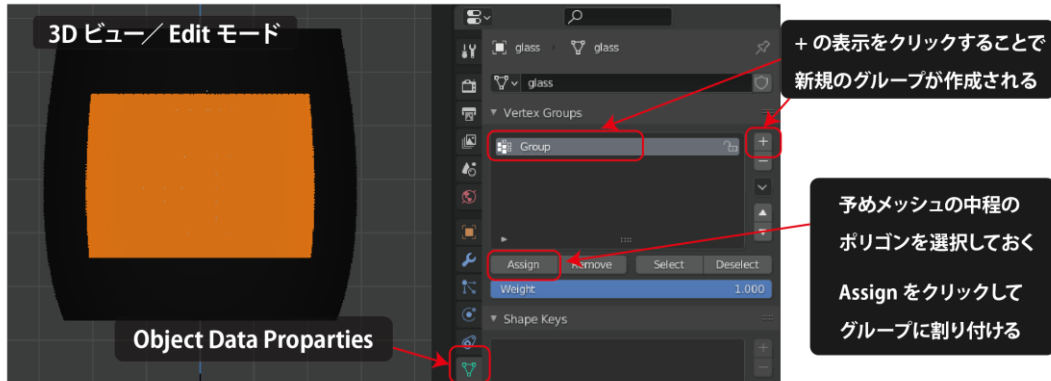


図 28.【Weight Group】による形状変位範囲設定

- ◇ 続いて画面表示を weight Paint モードに切り替え、メニュー【Weight/Smooth】を選択します。画面下部に表示される Smooth Vertex Weights ダイアログの Iterations の値を調整しウエイトのコントラストを滑らかにします。

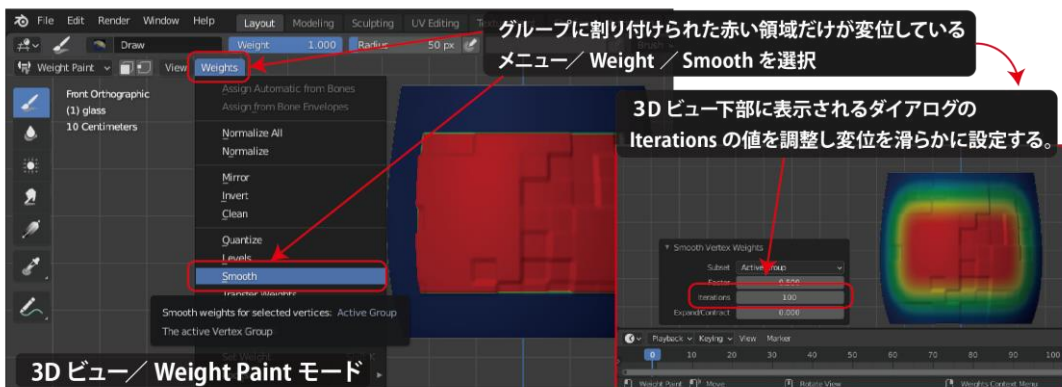


図 29.【Weight/Smooth】による変位範囲のぼかし設定

- 変形させた形状を obj 形式で、【Export】します。
- Rhinoceros からは、メッシュにした部分以外のサーフェスを iges 形式で【エクスポート】します。



- ・ Fusion360 で Rhinoceros から【Export】した iges 形式のデータを開きます。
- ・ 形状が読み込まれた後、【デザイン履歴をキャプチャ】を選択することで、以降の操作履歴が記録され、操作パラメータ等の再編集が可能になります。

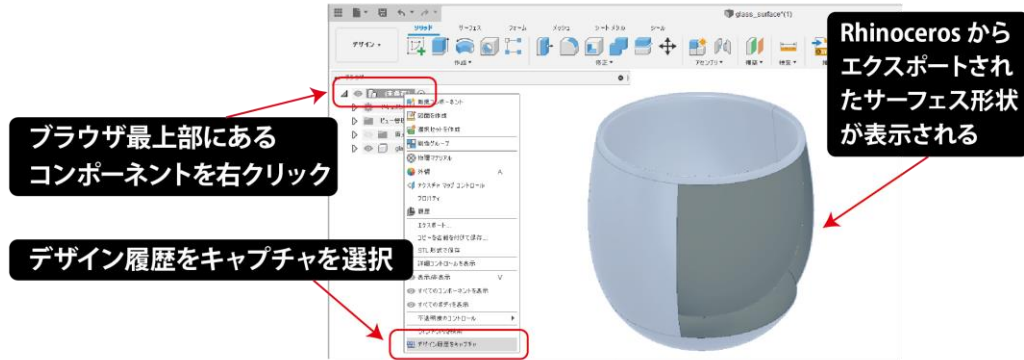


図 30.Fusion360 へのサーフェスデータインポート

- ・ Blender から【Export】した obj 形式のデータを挿入します。



図 31.Fusion360 へのメッシュデータインポート

- ・ 画面上部のメニューから【フォームを作成】を選択します。
- ・ 【ユーティリティ/変換】でメッシュをサブディビジョンサーフェスに変換します。



図 32.メッシュデータからサブディビジョンサーフェスへの変換



- ・ 変換が完了した後、【フォームを終了】メニューを選択することで、サブディビジョンサーフェスが更に、NURBS サーフェスに変換されます。
- ・ 画面上部のメニュー／サーフェスを選択し、サーフェス編集モードにします。
- ・ メニューから【ステッチ】を選択し、全てのサーフェスを選択します。全エッジが緑色にハイライト表示されていることを確認し OK で決定し完成します。

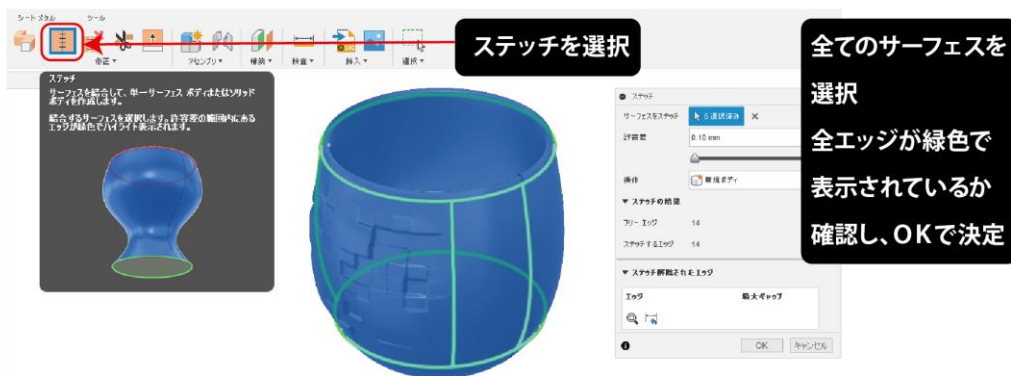


図 33. 【ステッチ】によるサーフェスからソリッドへの変換



図 34.完成形状（ガラス質感によるレンダリング画像）

完成した形状はソリッドデータとなり、通常のデータと同様に編集・使用することができます。

本事例ではエンボス表現の手法を紹介していますが、サブディビジョンサーフェスは、構造全体の表現から詳細部分編集まで、必要に応じて様々な用途に活用することができます。