

# A Finite Element Mesh Generation for a 3D Structure Based on Solid and Shell Parts Combined Mitsuteru YASHIKI

An automatic mesh generation method for a 3D structure based on solid and shell parts combined: The geometry of a 3D structure is created from solid and shell parts combined. For solid or shell parts, mapped or frontal method is applied depending on the geometry to generate solid and shell elements. Element meshes for solid and shell parts are connected between parts by constraint equations. Some applications are demonstrated.

## 1. はじめに

現在、3次元構造に対する有限要素メッシュの自動生成では様々な手法が提案されているが、多くのソリッド部品で構成される一般的なソリッド構造にたいし、良質な6面体ソリッド要素をベースとしたソリッドメッシュの自動生成は難しいのが現状である。また、一般的な3次元構造では、構造特性からソリッド要素とシェル要素を併用して有限要素構造解析を効果的に行うことができる。

そこで、本論文では一般の製品形状を部品の構造特性からソリッド部品と、シェル部品の結合として表現する。1つのソリッド部品が6以下の面で張られる場合には、良質な6面体ソリッド要素の生成が期待できる一般化写像法<sup>1)</sup>により、また6以上の面で張られる一般のソリッド部品の場合には、ハイブリッドフロント法<sup>2)</sup>により4,5面体を一部併用の6面体ソリッドメッシュを自動生成する。シェル構造部品では、フロント法<sup>3)</sup>あるいは写像法<sup>1)</sup>によりシェル要素を自動生成することができる。また、こうして3次元構造を構成するソリッド部品とシェル部品にたいし部品ごとに要素メッシュを自動生成したあとは、ソリッド部品間あるいはソリッド部品とシェル部品間で制約条件式を用いて部品間の要素メッシュを結合している。

本手法による有限要素メッシュ自動生成プログラムが開発され、各種の例題への適用を通してその有効性と妥当性が議論される。

## 2. 部品ベースの形状の表現

一般的な3次元構造はその構造特性からソリッド部品、シェル部品の結合として表わす。Fig.1(a)は、クランクシャフトの一部で、この場合には構造特性から3個のソリッド部品の結合として表わされている。Fig.1(b)は、タービンブレードの一部で、構造特性からソリッド部品とシェル部品の結合として形状が表わされている。薄板部品をシェル部品として表わすことによりこの部品ではシェル要素を用いることができ、構造解析を効果的に行うことができる。



(a) Three solid parts combined (b) Solid and shell parts combined

Fig.1 Solid structures made of solid and shell parts

## 3. 写像法とフロント法の併用による有限要素メッシュの自動生成

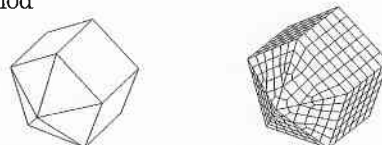
### 3.1 ソリッド部品にたいするソリッドメッシュの自動生成

一般的な3次元の構造はソリッド部品とシェル部品の結合として表わすことができた。1つのソリッド部品は、 $n$ 個の曲面による境界表現により表わすことができるが、いま、 $n \leq 6$ のときには一般化写像法<sup>1)</sup>により、また、 $n > 6$ の場合の一般的なソリッド部品では、ハイブリッドフロント法<sup>2)</sup>により、一部4,5面体併用の6面体ソリッド要素を自動生成することができる。Fig.2は5つの曲面で張られるソリッド部品にたいする一般化写像法によるソリッドメッシュの生成例で、一部4,5面体併用の6面体ソリッドメッシュが自動生成されている。Fig.3は11の面で定義されたソリッド部品にたいするハイブリッドフロント法によるソリッドメッシュの生成例で一部4,5面体併用の6面体ソリッドメッシュが自動生成された。



(a) Geometry of a curved pentahedron (b) Solid mesh

Fig.2 Mesh generation by the generalized mapped method

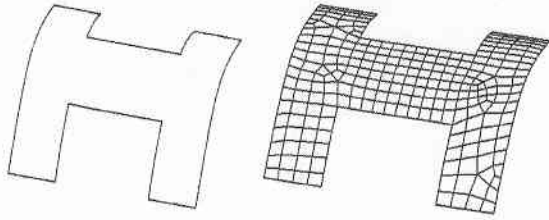


(a) A solid structure expressed by 11 surfaces (b) Solid mesh

Fig.3 Mesh generation by the frontal method

### 3.2 写像法とフロント法の併用によるシェル部品のメッシュの自動生成

一般的なシェル部品は $n$ 個の曲線で表わすことができるが、 $n \leq 4$  の場合のシンプルなシェル部品にたいしては写像法<sup>1)</sup>により、また  $n > 4$  の場合の一般的なシェル部品にたいしてはフロント法<sup>1)</sup>によりシェルメッシュの自動生成を行うことができる。Fig.4は12の曲線で定義されるシェル部品にたいし、フロント法によりシェル要素メッシュを自動生成したもので、生成する要素数 $M=300$ を与えるだけで実際には246の4角形シェル要素が自動生成された。



(a) A curved shell structure (b) Shell mesh  
Fig.4 Mesh generation by the frontal method for a shell part

### 4. ソリッド部品間の有限要素ソリッドメッシュの結合

ソリッド部品にたいしてはそれを定義する面の数  $n$  にたいし、 $n \leq 6$  の場合には一般化写像法により、また  $n > 6$  の場合にはハイブリッドフロント法により一部 4, 5 面体を併用した 6 面体のソリッド要素メッシュを自動生成することができた。いま、Fig.5で2つのソリッド部品 1, 2 (part1, part2) が接触面で部分結合しているものとし、接触面でのメッシュの結合を考える。ここで、簡単のために、部品1の節点  $a1$  が部品2の要素の節点  $b1 \sim b4$  からなるパッチ面  $P_B$  の  $B$  点に結合するものとする。いま、節点  $b_i (i=1, 4)$  の変位ベクトルを  $\mathbf{u}_{b_i}$ 、節点  $b_i$  の有限要素補間関数を  $\mathbf{N}_{b_i}$  とおくと  $B$  点の変位ベクトル  $\mathbf{u}_B$  は以下のように書くことができる。

$$\mathbf{u}_B = \sum_{i=1}^4 \mathbf{N}_{b_i}(\xi_B, \eta_B) \cdot \mathbf{u}_{b_i} \quad (1)$$

ただし、 $\xi_B, \eta_B$  は点  $B$  が存在する表面パッチ内  $P_B$  内の正規座標である。ここで、節点  $a1$  の変位ベクトルを  $\mathbf{u}_{a1}$  と書くと、 $\mathbf{u}_{a1}$  と  $\mathbf{u}_B$  が等しいことから

$$\mathbf{u}_{a1} = \mathbf{u}_B \quad (2)$$

式(2)は、部品1の節点  $a1$  を部品2のソリッドメッシュに結合する制約条件式で、これを部品1の他の節点  $a_j (j=2, 4)$  にも適用し、同様な制約条件式を得る。これらの制約条件式のもとで有限要素剛性方程式を解くことにより部品1を部品2に結合することができる。

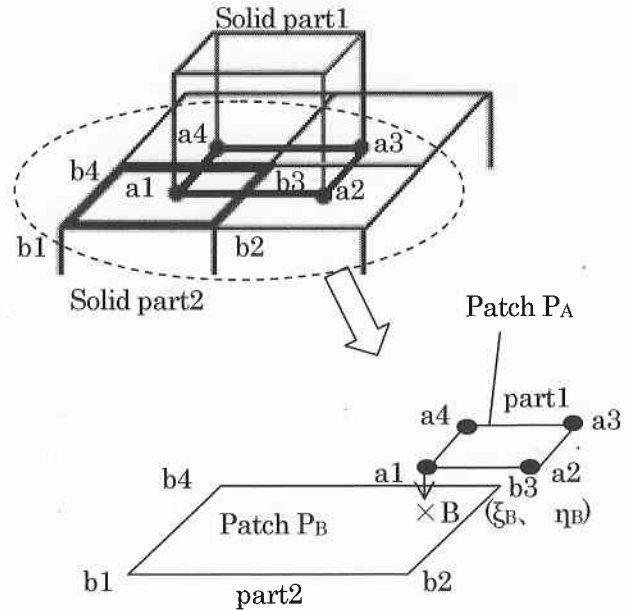


Fig.5 Connecting solid mesh between two solid parts

### 5. 適用例題

#### 5.1 立方体と直方体のソリッド部品の結合構造の静解析

ここで述べた手法にもとづき、写像法とハイブリッドフロント法を併用した有限要素メッシュの自動生成プログラムが開発された。Fig.6は一辺の長さ  $a=5\text{m}$  の立方体と、長さ  $L=20\text{m}$ 、幅  $b=1.66\text{m}$ 、高さ  $h=1.66\text{m}$  の直方体部品が部分結合する問題で、2つのソリッド部品は6つの面で張られることから一般化写像法によりそれぞれの部品にソリッドメッシュが自動生成され(Fig.7)、それらの部品の結合面で、4節で述べた制約条件を生成し結合が行われた。Table1は部品1の左端部を拘束し、部品2の右端上部の上下方向 ( $Y$ ) に  $1000 \text{ N/m}$  の線分布荷重を負荷する問題にたいし、右端の最大変位を、ここで述べた制約条件によりメッシュを結合した解 ( $B1, B2$ ) と部品1と部品2のメッシュを適合させたメッシュの解 ( $A$ ) を比較したもので両者は良好な一致を示している。

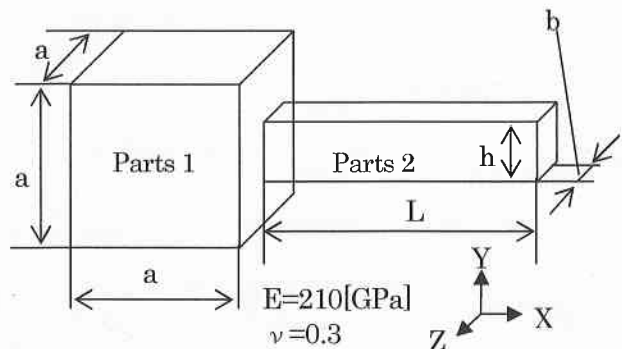


Fig.6 A solid structure with 2 solid parts combined

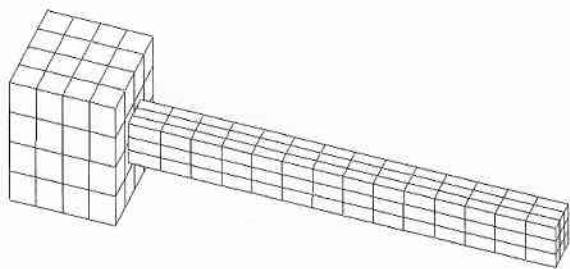
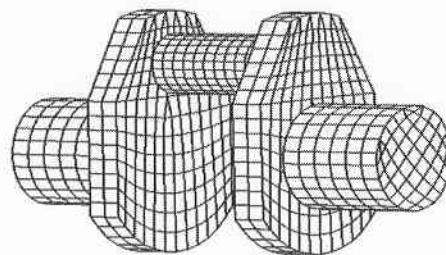


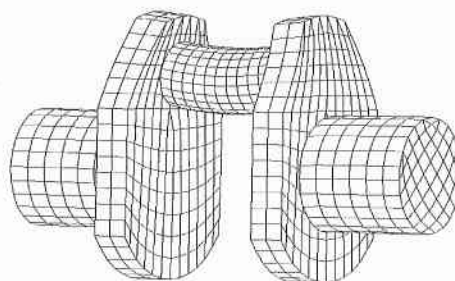
Fig.7 Finite element mesh (non-conformed)

Table.1 Comparison between conformed and non-conformed mesh

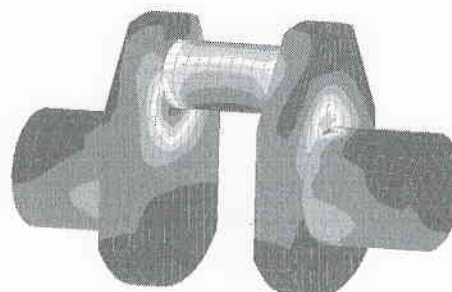
|                   | Non-conformed mesh<br>B1 (B1/A) | Non-conformed mesh<br>B2 (B2/A) | Conformed mesh<br>A    |
|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Part1 mesh        | $3 \times 3 \times 3$           | $4 \times 4 \times 4$           | $3 \times 3 \times 3$  |
| Part2 mesh        | $2 \times 2 \times 17$          | $3 \times 3 \times 14$          | $1 \times 1 \times 11$ |
| Displacement [mm] | -0.0345 (1.00)                  | -0.0338 (0.97)                  | -0.0345                |



(b)Solid mesh



(c)Displacement

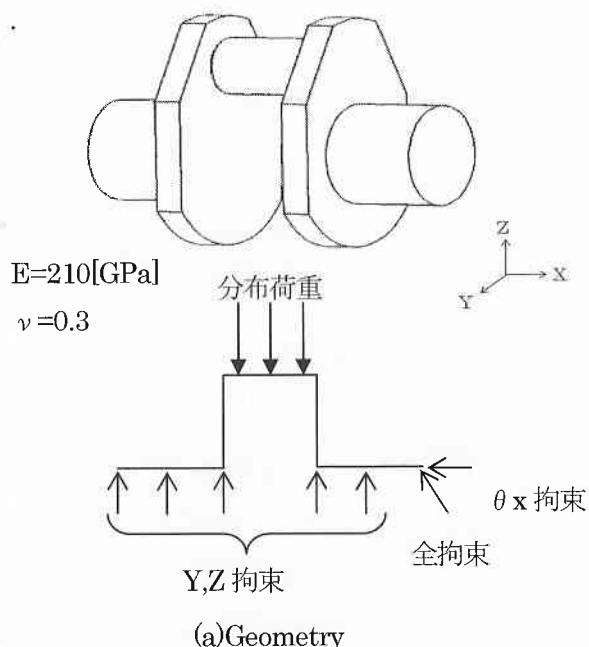


(d) Stress Z

Fig.8 A crankshaft for one cylinder

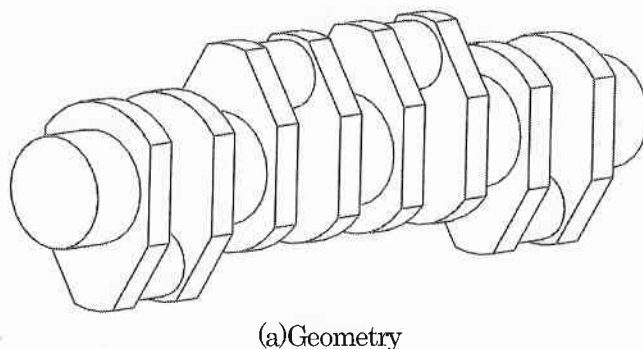
## 5.2 単気筒クランクシャフトのソリッド構造解析

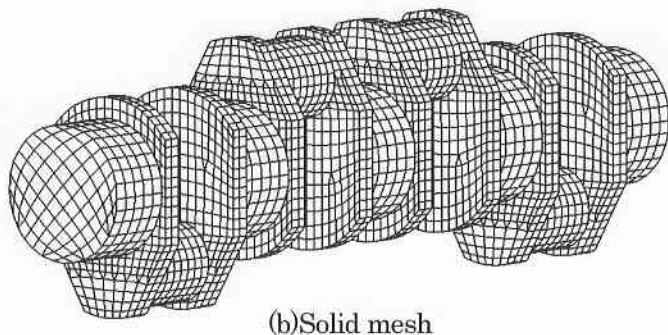
Fig.8 は単気筒クランクシャフトへの適用を表わしている. その幾何形状は 5 つのソリッド部品で構成され, アームの部分はフロント法により, ソリッド要素メッシュが, ピン, ジャーナルの部分は一般化写像法によりソリッド要素メッシュが自動生成され (Fig.8(b)), それらの部品の結合面で, 4節で述べた制約条件を生成し, 結合が行われた. 次にここで生成されたソリッドメッシュを用いて有限要素解析を行った. Fig.8(c), Fig8(d) はその有限要素解析結果で, 別途行った, 適合メッシュによる参照解と比較し, 本法によるソリッドメッシュの自動生成と部品間でのメッシュの結合の有効性を確認することができた.



## 5.3 4気筒クランクシャフトのメッシュの自動生成

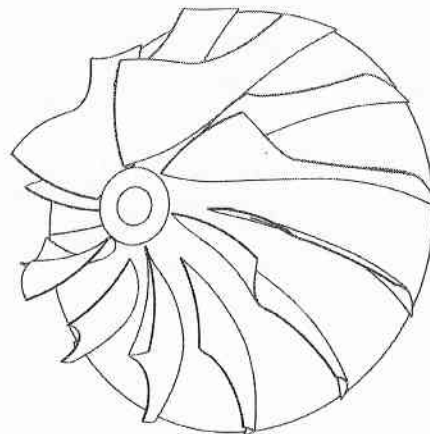
Fig.9 は4気筒クランクシャフトへの適用を表わしている. その幾何形状は 17 個のソリッド部品の結合として生成され, 生成要素数 5000 を与えるだけで, 一般化写像法とハイブリッドフロント法が併用され, 要素数が5601のソリッド要素メッシュの自動生成が可能となった.





(b)Solid mesh

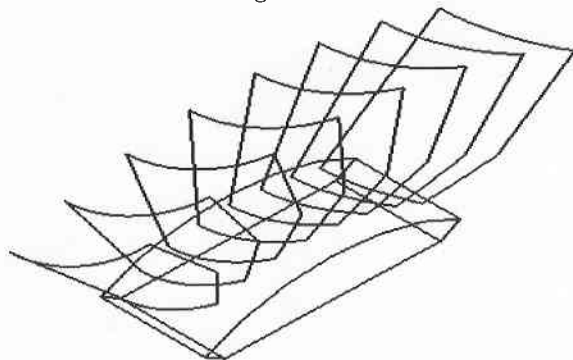
Fig.9 A crankshaft for 4 cylinders



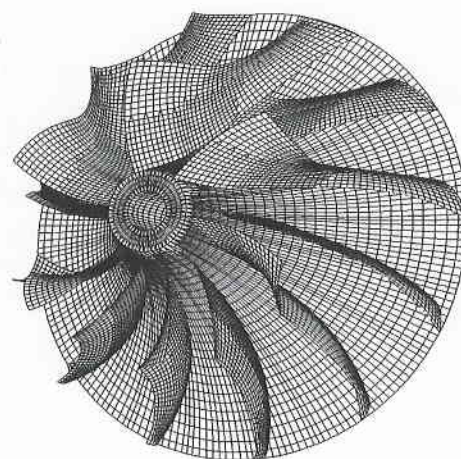
(a)Geometry

#### 5.4 タービンブレードのメッシュの自動生成

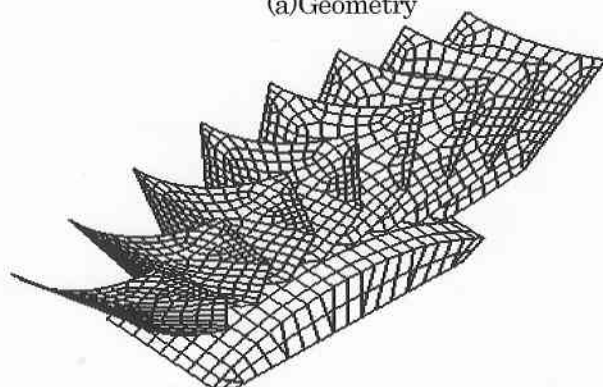
Fig.10 はタービンブレードへの適用を表わしている.その幾何形状 (Fig.10(a)) において, ボディの部分は 6 つの面で張られることから一般化写像法によりソリッド要素メッシュが, ブレードの部分は 5 つの曲線で張られることから, フロント法が適用されシェル要素メッシュが自動生成された (Fig.10(b)).



(a)Geometry



(b)Solid and Shell elements generated  
Fig.11 Turbine blower



(b) Solid and shell elements generated  
Fig.10 Turbine blades

#### 5.5.タービンブローアのメッシュの自動生成

Fig.11 はタービンブローアへの適用を表わしている. その幾何形状 (Fig.11(a)) において, ボディの部分はハイブリッドフロント法によりソリッド要素メッシュが, フィンの部分は写像法により, シェル要素メッシュが自動生成された (Fig.11(b)).

#### 6. おわりに

本論文では 3 次元構造にたいし, 構造特性からソリッド部品とシェル部品の結合として形状生成し, 各部品にたいし一般化写像法とハイブリッドフロント法を併用した有限要素メッシュの自動生成の手法と制約条件を用いたソリッド部品間のメッシュの結合手法が述べられた. また, 本手法に基づき, 有限要素メッシュ自動生成プログラムが開発され, 各種の例題への適用を通し, その有効性と妥当性を確認することができた. 今後は様々な実際問題に適用し, 実用性を高めることが重要である.

#### 参考文献

- (1)松山英人, オブジェクト指向による有限要素法の自動化の研究, 神奈川工科大学博士学位論文, 1999
- (2)松田真希子, テンプレートをを用いたフロント法による効果的なソリッドメッシュの自動生成, 第 14 回計算工学講演会論文集, 日本計算工学会, pp.611-614, 2009

(指導教員 田辺誠 教授)