

# 多面体釣合解の石鹼膜近似特性に関する研究

西村裕次\*<sup>1</sup>  
帯屋洋之\*<sup>2</sup>  
井嶋克志\*<sup>3</sup>  
川崎徳明\*<sup>4</sup>  
新村徹平\*<sup>5</sup>

## 梗概

本論文では、等張力の条件を満たした多面体釣合解において、曲面の形状を滑らかにかつ正確に捉えることができる合理的なメッシュ分割法として、要素内子節点の付与による要素再分割、及び、対角線変更による要素再配置の提案を行う。本手法を用いれば、曲率分布と曲面形状が複雑な条件下においても、扁平な要素形状や要素面積のばらつきを抑制する合理的な要素形状と面積配分が可能となり、滑らかな曲面近似解が得られる。

## 1. 緒言

建築構造における膜の研究では、もっぱら建築強度を得るために、応力集中の少ない、力と形の調和のとれた均一な張力の形態が追求され、その原型曲面として石鹼膜曲面(=等張力曲面)が用いられるようになった。そのため、石鹼膜曲面に関する研究<sup>1)~5)</sup>が精力的に行われ、現在では恒久大空間屋根構造として現実的な範囲の低ライズ曲面に関しては、高い精度の曲面形状を得ることができるようになったと考えられる。一方、軽量で柔軟な膜材の特性は、屋根構造だけでなく、水中構造物や地中構造物などへの応用も期待され、近年では多くの技術が実用化されている。

このような膜構造物の様々な用途を前提としたとき、石鹼膜形態解析の実施にあたっては、一定の空気圧だけでなく、水圧や土圧といった位置依存型の各種荷重条件への対応や、曲面の形状を滑らかにかつ正確に捉えることができる適切なメッシュ分割法などに関する検討が必要となる。

これまで著者ら<sup>6)~11)</sup>は、要素端節点に離散化された要素座標系表示の要素端力と基準座標系表示の節点力との間の釣合条件より導かれる接線剛性方程式を反復使用する接線剛性法を用いて、石鹼膜解析を行ってきた。これらの研究では、内圧平均化の考えに基づく内圧平均化サイマルコントロール法を提案し、内部空気圧下における膨張曲面の挙動を追跡してきた。さらに、石鹼膜本来の物理的性質であ

る「表面張力一定」の条件に着目した、膜張力平均化の考え方による張力平均化サイマルコントロール法の提案により、たとえば内部から水圧を受ける石鹼膜曲面が解析可能となるなど、石鹼膜形態解析の位置依存型荷重への適応範囲が大きく広がった。また、この手法によれば、荷重条件(空気圧や水圧、土圧など)と境界条件及びコントロールポイントの座標値を入力条件として、曲面形状と単位幅膜張力が解として出力されるため、実膜構造物設計のための原型曲面と初期張力が同時に得られる。

ところが、初期先行形状とは極端に形の異なった解形状や極端に表面積が大きくなる形状を目的解とする解析においては、たとえ厳密な釣合解が得られたとしても、要素が扁平になり過ぎたり、要素面積にばらつきが生じたりするなど、曲面を近似した解としての有意性が担保できないこともある。この問題に対しては、全節点に対して面外1方向と面内2方向から成る三次元座標系を設定し、面外方向には三角形等張力要素による石鹼膜形態解析を、面内2方向には軸力線要素によって自己釣合解を求める解析を、同時進行で並列に行う手法を提案した。この手法によれば、要素面積のばらつきが抑えられた滑らかな曲面近似解が得られ、かつ、変位増分を比較的大きく取っても着実な増分解析が可能となり、演算時間の短縮が実現することを確認した。

\*1 佐賀大学大学院 工学系研究科博士前期課程  
\*2 佐賀大学理工学部都市工学科 准教授  
\*3 佐賀大学理工学部都市工学科 教授  
\*4 佐賀大学理工学部都市工学科 技術職員  
\*5 前田建設工業株式会社

本論文では、前述の問題点に新たな別の視点からアプローチし、等張力の条件を満たした多面体釣合解において、曲面の形状を滑らかにかつ正確に捉えることができる合理的なメッシュ分割法の一つとして、要素内子節点の付与による要素再分割、及び、対角線変更による要素再配置の提案を行う。前者は極端に大きくなった要素に対して、三角形要素の重心の位置に新たな子節点を設け、1要素を3分割する要素再分割手法である。また後者は、材料剛性を持たない石鹸膜要素において、計算不安定の原因となる扁平な要素の出現を避けるため、扁平となった要素同士をより均整のとれた要素に置換する手法として、隣り合う扁平な両要素で構成される四辺形領域の対角線の変更を行うものである。本手法によれば、初期先行形状とは極端に形が異なり、表面積が大きくなる形状を目的解とするような、曲率分布と曲面形状が複雑な条件下においても、扁平な要素形状や要素面積のばらつきを抑制する合理的な要素形状と面積配分が可能となり、滑らかな曲面近似解を得られることが、数値計算により明らかになった。

## 2. 接線剛性法による石鹸膜形態解析

### 2.1 三角形膜要素の接線剛性方程式

接線剛性法では、要素端節点に離散化された互いに独立な要素端力の組み合わせを要素端力ベクトルとして定義し、これと基準座標系における節点力との間の平衡条件の非線形性を厳密に評価することが可能となる。したがって、本手法による幾何学的非線形解析では、材料剛性を全く持たない石鹸膜要素を用いる場合も材料剛性を持つ実膜要素を用いる場合と共通の幾何剛性マトリックスを使用することが可能である。

いま、要素端力ベクトルを  $\mathbf{S}$  とし、これと三次元空間に固定された基準座標系で表現される外力としての節点ベクトル  $\mathbf{U}$  との間の平衡条件マトリックスを  $\mathbf{J}$  とすれば、これらの釣合関係は、

$$\mathbf{U} = \mathbf{J}\mathbf{S} \quad (1)$$

と表示できる。よって、この釣合条件式の変分をとると、

$$\delta\mathbf{U} = \mathbf{J}\delta\mathbf{S} + \delta\mathbf{J}\mathbf{S} = (\mathbf{K}_O + \mathbf{K}_G)\delta\mathbf{u} \quad (2)$$

となり、前段階の状態からの節点力と節点変位の微小増分間の関係式である接線剛性方程式を得ることができる。

ここで、 $\mathbf{K}_O$  は要素座標系内における要素挙動に起因する接線要素剛性、 $\mathbf{K}_G$  は要素の剛体変位に起因する接線幾何剛性である。また、 $\delta\mathbf{u}$  は基準座標系表示された節点変位ベクトルである。

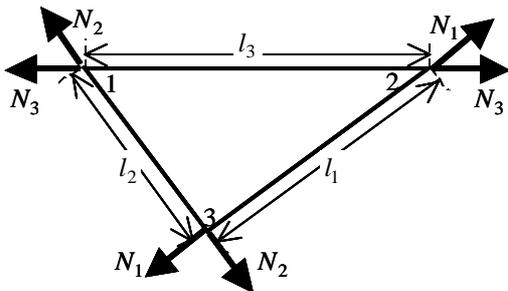


図-1 三角形膜要素

三角形膜要素に対して、図-1のような辺に沿う方向の力の組み合わせを要素端力ベクトルとして採用した場合、式(2)における接線幾何剛性 $\mathbf{K}_G$ は三角形トラスブロックと同じになり、次式のように表示できる。ここで、 $\alpha_i$  は辺  $i$  の方向余弦ベクトル、 $\mathbf{e}$  は  $3 \times 3$  の単位マトリックスである。

$$\mathbf{K}_G = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{G2} + \mathbf{k}_{G3} & -\mathbf{k}_{G3} & -\mathbf{k}_{G2} \\ -\mathbf{k}_{G3} & \mathbf{k}_{G3} + \mathbf{k}_{G1} & -\mathbf{k}_{G1} \\ -\mathbf{k}_{G2} & -\mathbf{k}_{G1} & \mathbf{k}_{G2} + \mathbf{k}_{G1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{k}_{Gi} = \frac{N_i}{l_i} (\mathbf{e} - \alpha_i \alpha_i^T) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (4)$$

### 2.2 石鹸膜要素力の定義

要素座標系内における要素挙動を規定するため、要素ポテンシャルを要素長、面積などの要素に関する幾何学量の関数として定義する。要素ポテンシャルを定義することは、要素に「仮想」の剛性を設定することと等価であり、材料の剛性とは無関係に任意の関数を定義しても、そこで規定された要素挙動に整合する釣合曲面が得られることになる。

いま、要素ポテンシャル  $P$  に対して、要素の形状を規定する上で互いに独立となる要素寸法の組を  $s$  とすれば、以下のように要素端力式が得られる。

$$\mathbf{S} = \frac{\partial P}{\partial s} \quad (5)$$

三角形要素の面積を  $A$ 、単位幅膜張力を  $\sigma t$  ( $\sigma$  = 一定、 $\sigma$  = 膜応力、 $t$  = 膜厚) として、要素ポテンシャルが面積  $A$  に比例するものと定義すれば、

$$P = \sigma t A \quad (6)$$

となる。これに対して、図-1に示したように独立な要素寸法の組を三角形要素の三つの辺長とした場合、要素端力は、

$$N_1 = \frac{\partial P}{\partial l_1} = \sigma t \frac{l_1(l_2^2 + l_3^2 - l_1^2)}{8A} \quad (7)$$

$$N_2 = \frac{\partial P}{\partial l_2} = \sigma t \frac{l_2(l_3^2 + l_1^2 - l_2^2)}{8A} \quad (8)$$

$$N_3 = \frac{\partial P}{\partial l_3} = \sigma t \frac{l_3(l_1^2 + l_2^2 - l_3^2)}{8A} \quad (9)$$

のように各辺に沿う方向の力となり、要素端力ベクトル

$$\mathbf{S} = [N_1 \ N_2 \ N_3]^T \quad (10)$$

を構成する。

以上より、接線剛性法による石鹸膜形態解析においては、一定空気圧や静水圧など与えられた荷重条件により計算された節点外力ベクトルを式(2)に代入し、以降、式(2)→式(7)~(9)→式(1)→式(2)のような Newton Raphson 法と等価な反復過程により、不平衡力がゼロに収束すれば完全な釣合形状を得る

ことになる。

なお、本論文において石鹸膜要素の要素剛性  $\mathbf{K}_0$  は接線幾何剛性  $\mathbf{K}_G$  に比べて非常に小さいものと考え、式(2)に  $\mathbf{K}_0 = 0$  を代入して計算を行っている。また、1 節点 1 自由度系への低次元化処理を施しており、常に曲面の法線方向に節点移動するように設定している。

### 3. サイマルコントロール法

#### 3.1 膜張力平均化サイマルコントロール法

本手法は石鹸膜本来の物理的性質である「表面張力一定」の条件に着目した、膜張力平均化の考えによるものである。

曲面上の任意の 1 節点に対して強制変位を与え、その時に発生する不釣合形状より算出される各節点における単位幅膜張力に相当する物理量の「換算膜張力」を平均化して順次代入することで、釣合解としての石鹸膜曲面を得ることができる。全自由節点の不均衡力とコントロールポイントの支点反力がゼロに収束すれば、コントロールポイントを含む解としての曲面形状とその時の単位幅膜張力が同時に得ることができるため、設計計算に用いるための初期張力決定のプロセスが曲面形状決定のプロセスと同時に進行する解析の流れとなる。さらに、強制変位付与の方向を常に曲面の法線方向とすれば、任意の 1 節点をコントロールポイント（極端な境界近傍を除く）に選定することが可能になる。よって、ただ単に「曲面上の任意点の節点位置を定める」という直感的な入力が可能となる。なお、強制変位のピッチ（増分幅）については、コントロールポイント周辺の要素寸法に対して、大きくなり過ぎないように配慮して設定すればよい。また、通常の荷重増分制御法の場合と全く同じ対称の接線剛性マトリックスを使用することができることになり、増分制御法の違いによらず共通のサブルーチンによってアルゴリズムを構成することができる。

この手法によれば、内圧荷重が等分布していることが必須条件とならず、水圧荷重などの位置依存型荷重を前提とした場合でも計算が可能となり、たとえば、大きな内包体積を持つ水を覆う石鹸膜曲面のような場合も、その形状を追跡することが可能となる。

#### 3.2 平均換算張力

コントロールポイント及び全自由節点について、その節点に作用する要素端力の合力に対して釣合うべき膜張力（＝換算膜張力）を算出し、これの平均値として平均換算膜張力を求める。

図-2に示すように節点  $i$  に  $m$  個の要素が繋がっているとす。要素  $j$  の外積ベクトルを  $\alpha_j$  とした場合、節点  $i$  が内圧荷重の 1/3 を負担すると考えれば、これに対応する各要素の外積ベクトルは次式となる。

$$A_{ij} = \alpha_{ij} / 3 \quad (11)$$

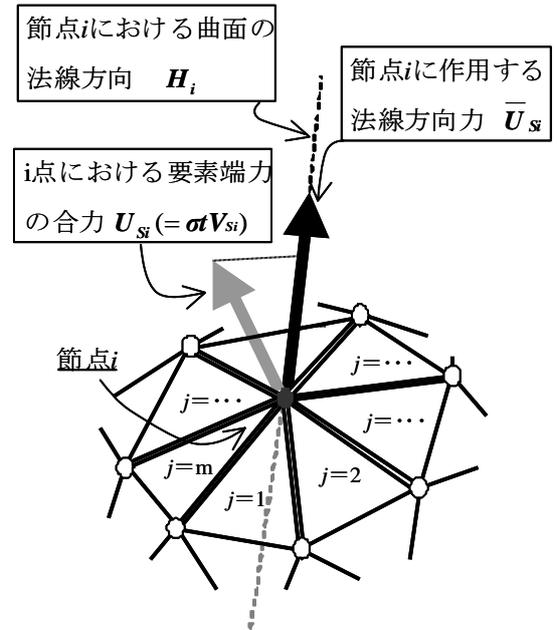


図-2 節点  $i$  に繋がる要素と法線方向力

また、節点  $i$  における曲面の法線方向余弦ベクトルは、

$$H_i = \sum_{j=1}^m A_{ij} / \left| \sum_{j=1}^m A_{ij} \right| \quad (12)$$

と表せる。一方、要素  $j$  の  $i$  端における要素端力を  $S_{ij}$  とすれば、これの基準座標系への変換は、要素  $j$  に関する平衡条件マトリックス  $J_{ij}$  により次式のように表せる。

$$U_{sij} = J_{ij} S_{ij} \quad (13)$$

よって、 $i$  点における要素端力の合力は次式となる。

$$U_{si} = \sum_{j=1}^m U_{sij} \quad (14)$$

石鹸膜曲面は曲面の法線方向にしか剛性を持たないので、要素端力の合力の法線方向成分を取り出せば、

$$\bar{U}_{si} = H_i^T U_{si} \quad (15)$$

のようになる。また、式(7)~(9)によれば要素端力  $S_{ij}$  は単位幅膜張力  $\sigma t$  と線形関係にあるので、式(15)は次のように書き換えることができる。

$$\bar{U}_{si} = \sigma t H_i^T V_i \quad (16)$$

ここで、内部から作用する等分布の圧力（内圧）を  $p_{INI}$  とし、これ以外の外部から作用する圧力（水圧、土圧、風圧など、位置依存型の圧力も設定可能）を  $p_{EXi}(u_i)$  と表示することにすれば、節点  $i$  において満たすべき曲面法線方向の釣合条件は、

$$\{p_{INI} - p_{EXi}(u_i)\} \left| \sum_{j=1}^m A_{ij} \right| - \bar{U}_{si} = 0 \quad (17)$$

となる。これに式(16)を代入すれば、

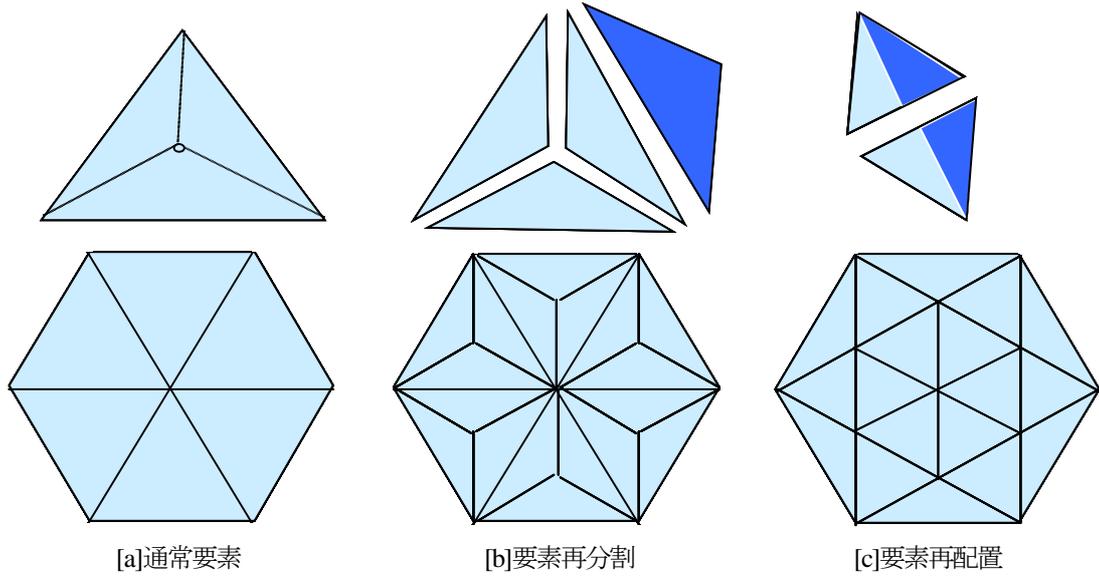


図-3 要素再分割と要素再配置

$$\sigma_{Ci} = p_i(u_i) \frac{\left| \sum_{j=1}^m A_{ij} \right|}{H_i^T V_i} \quad (18)$$

のように、この節点に繋がる要素の幾何学的条件と、圧力の条件に対して釣合すべき単位幅膜張力  $\sigma_{Ci}$  が得られ、これを節点  $i$  における換算膜張力とする。また、ここでの圧力条件  $p_i(u_i)$  は内部からあるいは外部からといった作用方向に関わらず、さらには位置依存型荷重の条件も許容するため、水を覆う石鹸膜曲面の追跡なども可能となる。

ここで、単位幅膜張力が曲面全体に亘って一定であることを目的解として換算膜張力  $\sigma_{Ci}$  を平均化することになるが、増分毎に単位幅膜張力をモニタして行くと、単位幅膜張力が無限大となる点が現れるため、換算膜張力の算術平均をそのまま用いることができない。よって、次式のように換算膜張力  $\sigma_{Ci}$  の逆数の平均値を取ることによって、平均換算膜張力  $\sigma_{AV}$  を求め、反復段階ごとに更新する。

$$\frac{1}{\sigma_{AV}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{Ci}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{H_i^T}{p_i(u_i) \left| \sum_{j=1}^m A_{ij} \right|} \quad (19)$$

これによって、内圧平均化サイマルコントロール法を用いた場合<sup>7)</sup>と同様、全節点の不均衡力がゼロに収束し、コントロールポイントを面内に含む石鹸膜曲面形状とそのときの単位幅膜張力が得られることになる。

#### 4. 要素再分割と要素再配置

複雑な曲面形状や、高サイズで極端に表面積が大きくなる形状を目的解とする解析においては、等張力の条件を満たし

た多面体釣合解であるものの、結果としては実際の石鹸膜曲面とはかけ離れた解形状となる場合がある。これは三角形要素を平面として定義しているため、曲率が大きい場合や要素数が少ない場合には、要素形状が扁平になり過ぎたり、要素面積にばらつきが生じるなど、曲面を近似した解としての有意性が担保できなくなる。そのため、曲率分布と曲面形状が複雑な石鹸膜曲面形状において解析を進めるためには、曲面形状を滑らかにかつ正確に捉えることができる合理的なメッシュ配置が必要となる。

本論文では、要素面積のばらつきの抑制に効果期待できる要素内子節点の付与による要素再分割を、また、材料剛性を持たない石鹸膜要素において、計算不安定の原因となる扁平な要素の処理として、対角線変更による要素再配置の提案を行う。要素再分割及び要素再配置の考え方は以下のとおりである。

いま、図-3[a]に示すように任意の1節点に対して6個の要素が繋がっているとす。この各要素の要素面積が極端に大きくなった場合、三角形要素の重心の位置に新たな子節点を設け、1要素を3分割することにより要素再分割を行う。この場合、6要素だったものが図-3[b]で示すように18要素になることになる。しかし、要素を細分化することにより曲面をより近似できるものの、解析を進め、要素再分割を繰り返すと、扁平な要素となってしまい、曲面を表現するためには不適切なものになってしまう。そこで、扁平な要素を避けるため、隣り合う両要素が再分割されると、この両要素で構成される四辺形領域の対角線の変更を行い、より均整のとれた要素に置換する(図-3[c])。

本手法によれば、節点数の増加により解析時間が増すものの、扁平な要素形状や要素面積のばらつきを抑制し、合理的なメッシュ配置が可能となる。

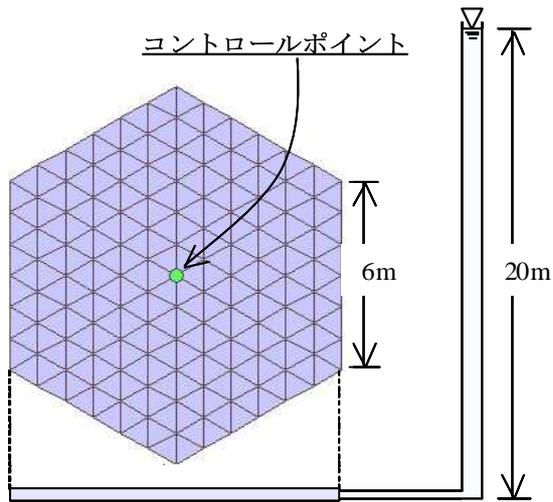


図4 正六角形境界と石鹸膜に作用する水圧の水頭

## 5. 数値計算例

### 5.1 静水圧が作用する石鹸膜曲面 —その1

図4に示すように一辺を6分割した正六角形の固定境界に石鹸膜要素を配置する。そこに、水頭20mに相当する水圧を内部から（初期段階では下側から）作用させ、張力平均化サイマルコントロール法によって正六角形中央のコントロールポイントを増分幅0.1mで上方に引き上げ解析を行った。ここでは、初期平面の一辺を12分割したときの文献<sup>10)</sup>の手法による解析結果との比較、検証を行う。なお、本提案手法による解析では、要素面積が初期段階の2倍になったときに要素再分割を行う条件としている。

図5は両手法による解析の単位幅膜張力—内包体積曲線を比較したものであり、両者はほぼ一致している。しかし、文献<sup>10)</sup>の手法ではコントロールポイント付近の要素面積が大きくなるため、内包体積が1748.0m<sup>3</sup>となる点（図5の×の地点）で解析不能に至る。

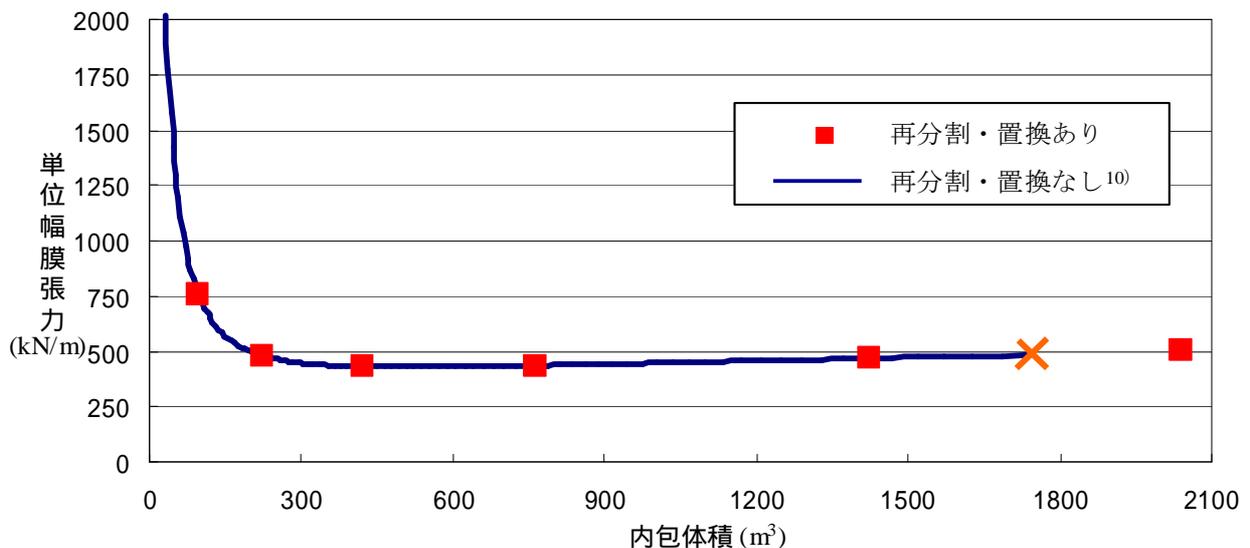


図5 単位幅膜張力—内包体積曲線

図6は、両手法による解析において、強制変位量が2m、4m、6m、8m、10mとなるまで増分解析したときの解形状を比較したものである。左図は本論文で提案している要素内子節点の付与による要素再分割と対角線変更による要素再配置の置換処理を行った解形状、右図は文献<sup>10)</sup>の手法による解形状である。なお、図-6[f]は本提案手法によって、文献<sup>10)</sup>の手法では得られなかった強制変位量11mのときの解形状である。

両手法共に、等張力条件を満たした石鹸膜要素を用いて面外方向不平衡力を収束させているため、全節点が等張力曲面上に存在していることになり、張力平均化サイマルコントロール法を用いることによって、静水圧の条件下で単位幅膜張力の極小値を超える石鹸膜曲面を多面体釣合解として求めることができる。しかし、要素再分割と要素再配置の両処理を行わない文献<sup>10)</sup>の手法による解析では、内包体積の増大に伴って、コントロールポイント付近の要素面積が大きくなってしまい、前述の図-5×の地点で解析不能になってしまう。これは、石鹸膜は面内方向に剛性を持たないため、一旦大きくなった要素面積を保持したまま、面外方向の釣合位置に収束しようとするためである。それに対し、要素再分割と要素再配置の両処理を行った解析では、低ライズ曲面では、少ない要素で曲面を多面体近似している一方、曲率分布と曲面形状が複雑な高ライズ曲面では、適切な要素形状と面積配分によって、曲面の形状を滑らかにかつ正確に捉えることができる合理的なメッシュ分割となっている。そのため、節点数の増加により解析時間が増すものの、材料剛性を持たない石鹸膜要素において、計算不安定の原因となる扁平な要素形状や要素面積のばらつきを抑え、より滑らかな等張力曲面を近似する節点配置が実現する。なお、本解析において、図-6[f]を超える釣合解を得ることは困難となる。これは、コントロールポイント付近で必要以上の再分割が行われ、増分幅に対して要素が細かくなり過ぎたためであると考えられる。

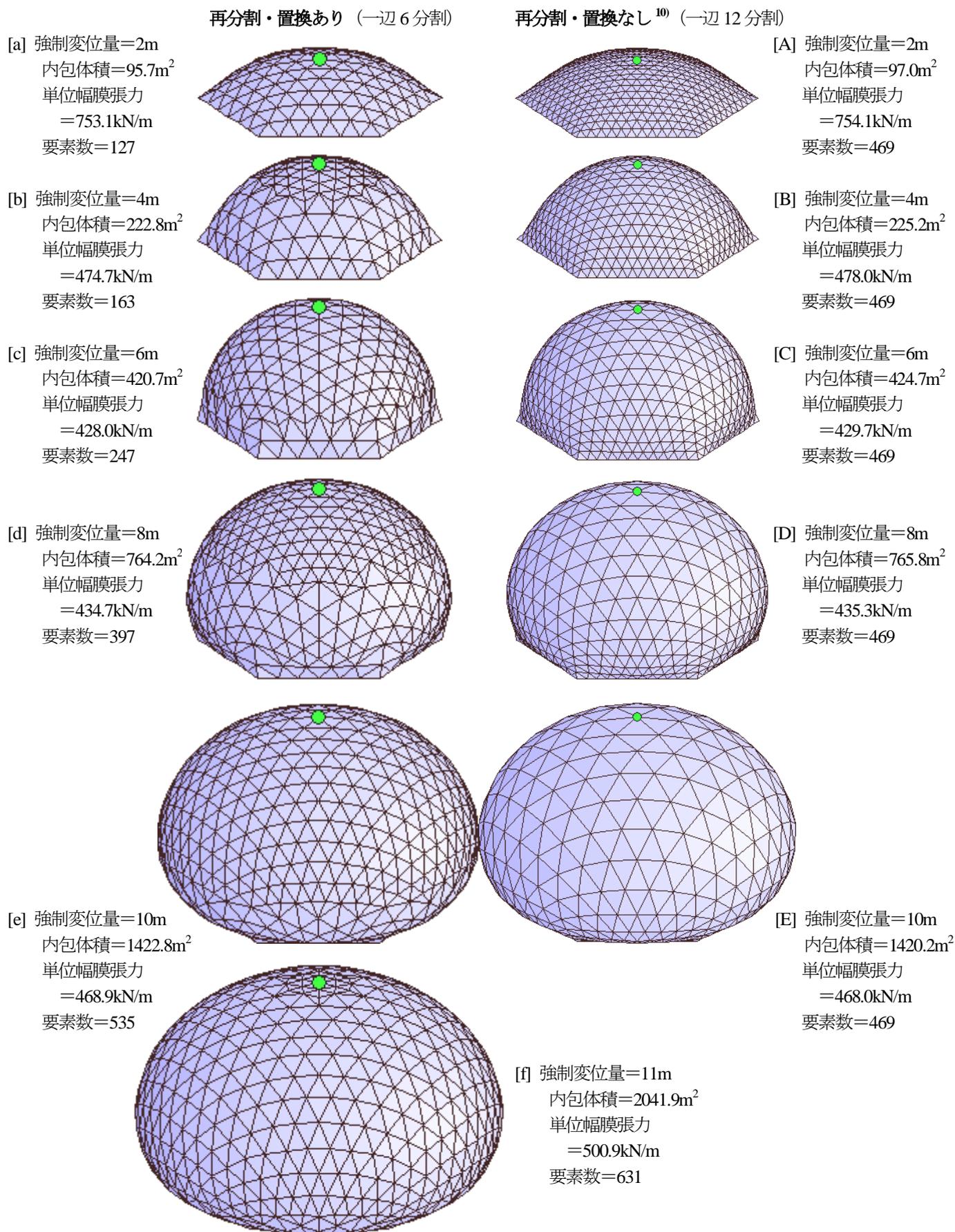


図-6 石鹼膜曲面形状

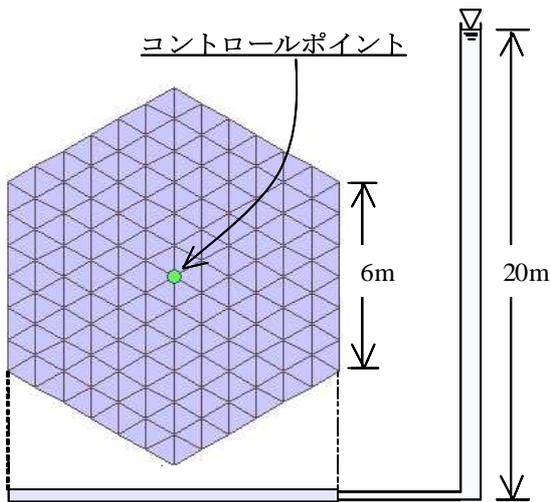


図-7 正六角形境界と石鹸膜に作用する水圧の水頭

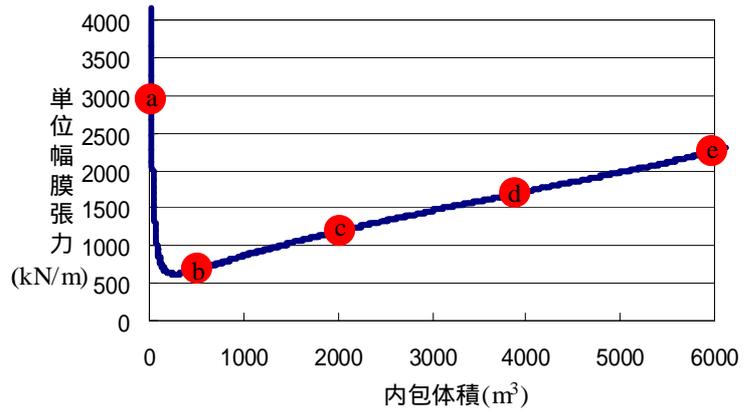


図-8 単位幅膜張力—内包体積曲線

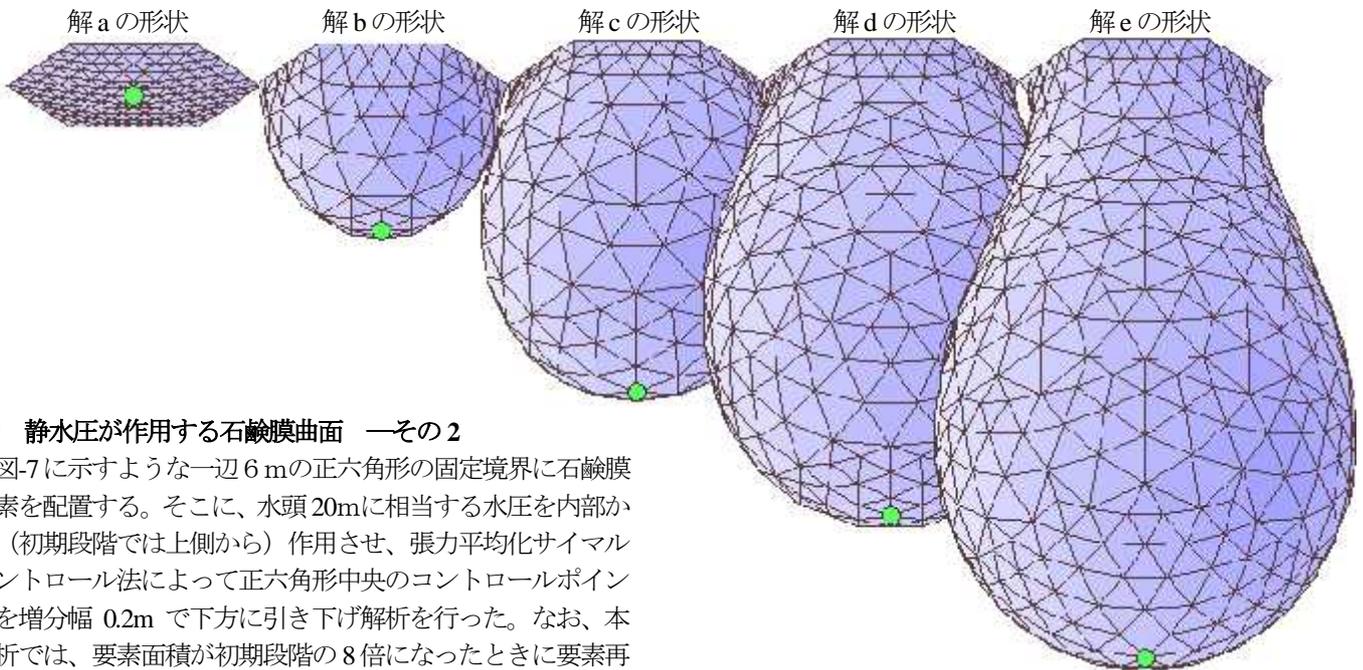


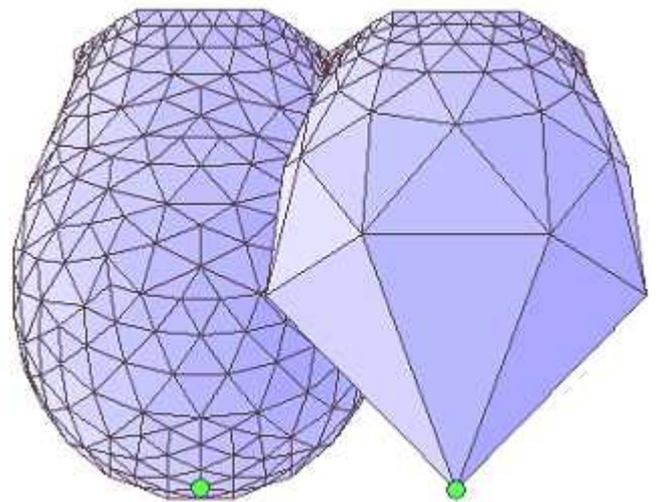
図-9 石鹸膜曲面形状

## 5.2 静水圧が作用する石鹸膜曲面 —その2

図-7に示すような一辺6mの正六角形の固定境界に石鹸膜要素を配置する。そこに、水頭20mに相当する水圧を内部から（初期段階では上側から）作用させ、張力平均化サイマルコントロール法によって正六角形中央のコントロールポイントを増分幅0.2mで下方に引き下げ解析を行った。なお、本解析では、要素面積が初期段階の8倍になったときに要素再分割を行う条件としている。図-8はそのときの単位幅膜張力—内包体積曲線であり、図-9はパス上の5つの解を抽出して、その形状を示したものである。

図-10は、強制変位量が22.6mとなるまでの増分解析において、文献<sup>10</sup>の手法による解形状と本提案手法による解形状（図-9解dの形状）を比較したものである。文献<sup>10</sup>の手法では、曲面を近似した解としての有意性が担保できないのに対し、本手法では要素面積が大きくなってしまいうコントロールポイント付近や、境界付近の曲率が急変する部分で細分割されており、その意味での合理性が確保されたと云える。

本解析では、要素内子節点の付与による要素再分割と対角線変更による要素再配置の両処理を行うことで、扁平な要素形状や要素面積のばらつきを抑えた、合理的なメッシュ配置となっている。5.1の解析例と同様に、より滑らかな石鹸膜曲面の追跡が可能となり、表面積が大きくなったときの形状は、正六角形の枠から零れ落ちる寸前の水滴のような形となっていることがわかる。



再分割・置換あり 再分割・置換なし<sup>10</sup>  
図-10 石鹸膜曲面形状

## 6. 結言

本論文では、等張力の条件を満たした多面体釣合解において、曲面の形状を滑らかなかつ正確に捉えることができる合理的なメッシュ分割法として、要素内子節点の付与による要素再分割、及び、対角線変更による要素再配置を提案した。

本手法は極端に大きくなった要素に対して、新たな子節点を設け要素再分割を行い、さらに、計算不安定の原因となる扁平な要素の出現を避けるため、より均整のとれた要素に置換する手法である。本手法を用いれば、初期先行形状とは極端に形が異なり、表面積が大きくなる形状を目的解とするような、曲率分布と曲面形状が複雑な条件下においても、合理的な要素形状と面積配分となり、滑らかな曲面近似解を得ることができる。よって、極端に表面積が大きくなるような大容積領域における、解析範囲を拡大することができた。

しかしながら、本提案手法による解析は、三角形平面要素に等張力条件を付与した要素を用いることを前提とすれば、得られる解はあくまで多面体釣合解であるに過ぎない。本手法を用いれば、滑らかな曲面近似解を得ることができるものの、効率の面から考えると、節点数の増加による解析時間の増大や、必要以上の再分割によって、要素が細かくなり過ぎるなどの問題が残る。そのため、偏りのない滑らかな曲面形状を捉えた上で、要素同士を再結合するなど、節点数を抑制する制御法の開発によって、常に適切な節点数を確保することを今後の課題とする。

## 参考文献

- 1) Ishii, K., : Analytical shape determination for membrane structure, Proc. of IASS Congress of sept., pp.67-74, 1976.
- 2) 大森博司、萩原伸幸、松井徹哉、松岡理：有限要素法による極小曲面の数値解析、膜構造研究論文集 '88, p.1-10, 1988.
- 3) 石井一夫：膜構造の形態解析（形状決定の問題）概説、膜構造論文集、No.3、pp.83-108、1989.
- 4) 鈴木俊夫、半外裕彦：極小曲面の変数低減による有限要素解析、日本建築学会構造系論文報告集、No.425、pp.111-120、1991.
- 5) 半外裕彦：膜構造の形態解析、土木学会論文集、No.501/I-29、pp.11-20、1994.
- 6) 後藤茂男、井嶋克志、帯屋洋之ほか：膜構造・骨組み構造の形状決定と挙動解析に関する統一理論の確立とプログラム開発、能村膜構造技術振興財団助成研究報告書、1995
- 7) 帯屋洋之、井嶋克志、後藤茂夫、荒牧軍治、川崎徳明：サイマルコントロール法による膨張曲面の形態解析、日本計算工学会論文集、Vol.4、pp.37-44、2002.
- 8) 帯屋洋之、井嶋克志、井口真一：形状依存追従力を受ける膜構造物のための等張力曲面形状に関する研究、構造工学論文集、Vol.51A、pp.79-86、2005.
- 9) 帯屋洋之、井嶋克志、村上卓志、西田博之、井口真一：軸力線要素置換による任意境界形状最小曲面の形態解析、膜構造研究論文集 2005、No.19、pp.49-54、2005.
- 10) 帯屋洋之、井嶋克志、西極春幸：膜張力平均化サイマルコントロール法による石鹸膜構造解析、応用力学論文集、Vol.9、pp.33-40、2006.
- 11) 帯屋洋之、井嶋克志、村上卓志、川崎徳明、西村裕次：面内方向軸力線要素を用いた滑らかな石鹸膜形状の決定手法について、応用力学論文集、Vol.10、pp.27-36、2007.

## A study on approximation of soap film by polyhedron equilibrium solutions

Hirotsugu Nishimura<sup>\*1</sup>  
Hiroyuki Obiya<sup>\*2</sup>  
Katsushi Ijima<sup>\*3</sup>  
Noriaki Kawasaki<sup>\*4</sup>  
Tepei Shinmura<sup>\*5</sup>

### SYNOPSIS

This study proposes a new technique to obtain the polyhedron equilibrium solutions which express smooth soap film surfaces with complex conditions such as very large volume or water pressure loading, and so on. The method produces a new node and new element-division depending on the size of the element when the element become extremely large. Moreover, The flatten elements are replaced with the more symmetrical element by changing their diagonal line of rectangle area formed with neighboring element to avoid existence of the flatten element. By using this technique, element shape and area distribution become more rational when curvature distribution and form of curved surface are complicated.

- \*1 Graduated Student, Saga University
- \*2 Associate Professor, Saga University
- \*3 Professor, Saga University
- \*4 Technical Staff, Saga University
- \*5 Maeda Corporation