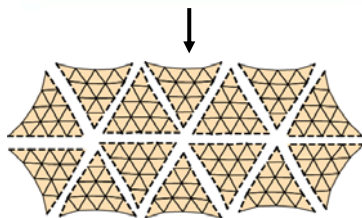
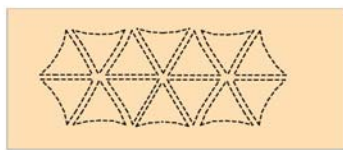


## 膜構造物の裁断図解析

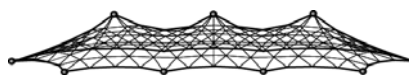
本間研究室 森 哲也

### 研究背景と目的① (膜構造物の施工手順)

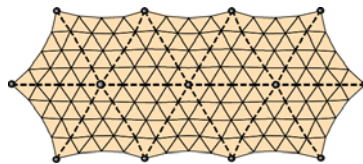
① 布状の膜材を立体裁断する。



③ 張力を与え、境界構造部に固定

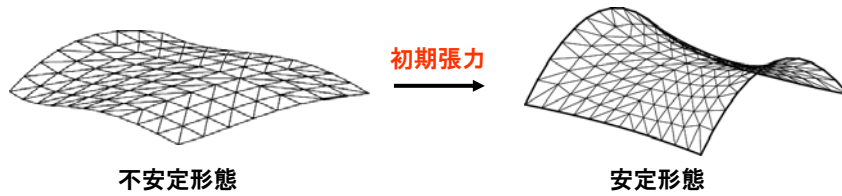


② 膜材を溶着(縫合)する。



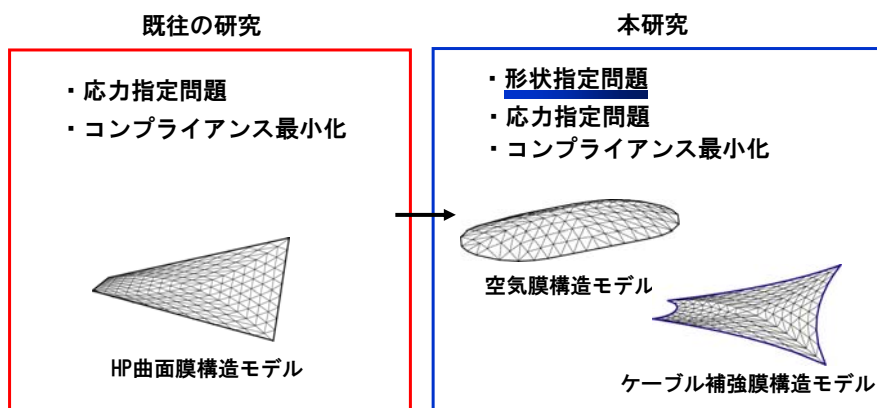
膜曲面が設計条件を満足するためには、精度の良い裁断図解析が必要。

## 研究背景と目的② (解析法)



座標値を未知量とする有限要素法を用い、  
裁断図解析を実施する。

## 研究背景と目的③ (既往の研究)



複雑な曲面形状, 構造条件を有する膜構造物の  
裁断図解析法を確立させる。

## 座標仮定による定式化

仮想仕事の原理より平衡方程式を導く

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{f}, \lambda) = \int_{\Omega} \mathbf{B}^*(\mathbf{X})^T \boldsymbol{\tau}(\mathbf{X}) d\Omega - \delta \mathbf{X}^T \lambda \mathbf{f} = \mathbf{0} \quad (1)$$

$\mathbf{X}$ : 安定化後の座標ベクトル,  $\mathbf{f}$ : 荷重モードベクトル,  $\lambda$ : 荷重パラメータ

$\mathbf{B}^*$ : ひずみ増分-座標増分関係行列式,  $\boldsymbol{\tau}$ : 応力,  $\Omega$ : 解析領域,  $\mathbf{0}$ : 零ベクトル

グリーンひずみ

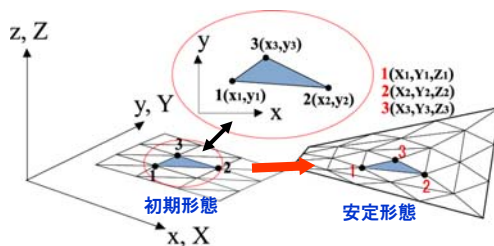
$$\gamma_{ij} = \frac{1}{2} \left( \delta_{\alpha\beta} \frac{X_{\alpha}}{x_i} \frac{X_{\beta}}{x_j} - \delta_{ij} \right) \quad (i, j, \alpha, \beta = 1, 2, 3) \quad (3)$$

$x_i, X_i$ : 各々変形前と変形後の直交直線座標系の座標成分,  $\delta$ : Kronecker's Delta

接線剛性行列

$$\mathbf{K}_G(\tilde{\mathbf{X}}) = \int_{\Omega} \frac{\partial \tilde{\mathbf{B}}^{*T}}{\partial \tilde{\mathbf{X}}} \boldsymbol{\tau} d\Omega \quad \mathbf{K}_S(\tilde{\mathbf{X}}) = \int_{\Omega} \tilde{\mathbf{B}}^{*T} \frac{\partial \boldsymbol{\tau}}{\partial \tilde{\mathbf{X}}} d\Omega \quad (5-a,b)$$

## 膜要素の離散化定式化



膜要素の離散化平衡方程式

$$\frac{1}{4S_e} \left( \mathbf{Q}^T \mathbf{X}_e \right) \mathbf{D}_e \left[ \frac{1}{8S_e^2} \left( \mathbf{X}_e^T \mathbf{Q} \mathbf{X}_e \right) + C_e \right] - \lambda \mathbf{f}_e = \mathbf{0} \quad (9)$$

$S_e$ : 要素面積,  $\mathbf{D}_e$ : 構成関係行列

接線剛性行列

$$\mathbf{K}_{te} = \mathbf{K}_{Ge} + \mathbf{K}_{Se} = \frac{1}{4S_e} \mathbf{Q}^T \boldsymbol{\tau}_e + \frac{1}{16S_e^3} \left( \mathbf{Q}^T \mathbf{X}_e \right) \mathbf{D}_e \left( \mathbf{X}_e^T \mathbf{Q} \right) \quad (11)$$

## 空気膜構造モデル (39節点, 55要素)

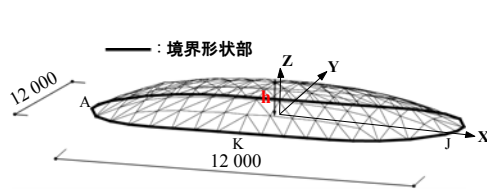


図1.a 鳥瞰図(mm)

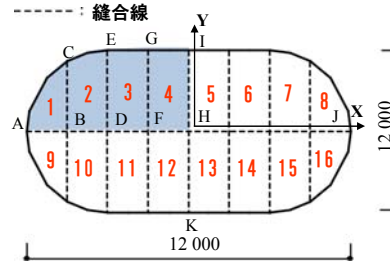


図1.b 膜帯接続情報

- : 内部既知節点
- : 裁断線上の未知節点(境界線)
- : 裁断線上の未知節点(縫合線)

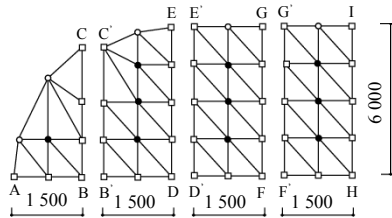


図1.c 要素分割モデル (mm)

表1 材料定数

膜-I (A種膜材)	
膜厚	$t = 0.8 \text{ mm}$
縦弾性係数	$E_x \cdot t = 213.8 \quad E_y \cdot t = 645.3 \text{ (N/mm)}$
ポアソン比	$\nu_{xy} = 0.3000 \quad \nu_{yx} = 0.9055$
せん断剛性	$G_{xy} \cdot t = 55.90 \text{ (N/mm)}$
単位質量	$1.215 \times 10^{-6} \text{ (kg/mm}^2\text{)}$

## 空気膜構造モデル(形状指定問題)

想定形状は線形解析により求め、 $h=1000(\text{mm})$ とし、内圧 $30\text{mmAq}$ 作用時の形状を想定する形状指定問題を設定する。

$$\text{Minimize} \quad f(\mathbf{x}^*) = \sum_{i=1}^r \frac{1}{2} \left[ \left( \sum_{j=1}^{\hat{m}_j} S_{je} \right) - S_{Lj} \right]^2 \quad (12a)$$

$$\text{subject to} \quad 1.0 \leq t\sigma_x, t\sigma_y \leq 1.5 \quad (\text{N/mm}) \quad (14)$$

$r$ : 膜帯数

$\hat{m}_j$ : 各膜帯での膜要素数

$S_{je}$ :  $j$ 膜帯の膜要素 $e$ の面積

$S_{Lj}$ :  $j$ 膜帯の目標面積

$t$ : 膜厚

$\mathbf{x}^*$ : 膜材の自然状態における節点座標値情報

$\sigma_e$ : 膜応力

### 空気膜構造物の解析手順

指定膜帯面積 $S_{Lj}$ を内圧を調整しながら徐々に増加させ、段階的に内圧 $30\text{mmAq}$ 作用時の最終サイズに近づける。

## 空気膜構造モデル(解析結果1)

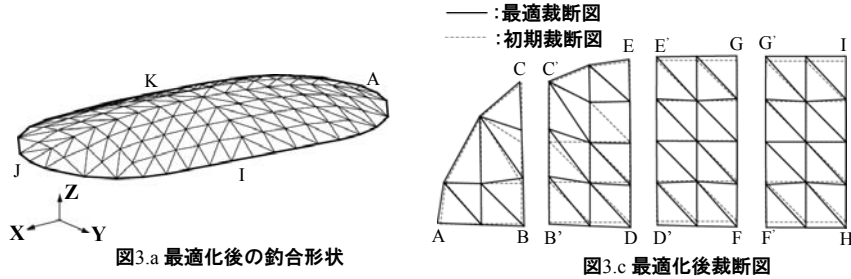


図3.a 最適化後の釣合形状

図3.c 最適化後裁断面

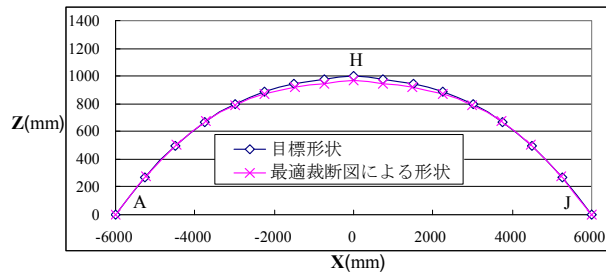


図3.d 目標形状と釣合形状との形状比較図

## 空気膜構造モデル(解析結果2)

表2 最適化後の応力結果(N/mm)

	最適化後の釣合形状	
	$t\sigma_x$	$t\sigma_y$
目標応力	$1.0 \leq t\sigma_x, t\sigma_y \leq 1.5$	
平均値	1.255	1.223
最大値	1.443	1.468
最小値	1.003	1.009
標準偏差	0.101	0.138

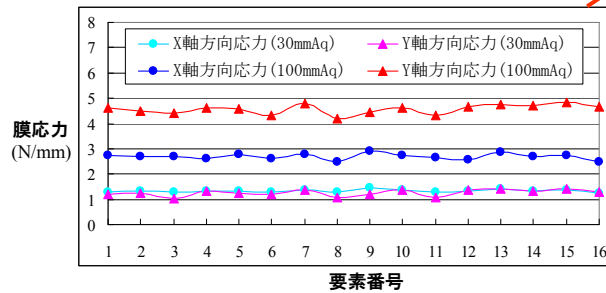
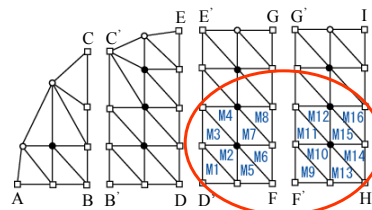


図3.e 100mmAq作用時のX, Y方向-応力分布図



## 境界ケーブル膜モデル(解析結果1)

— :最適裁断図  
 - - - :初期裁断図

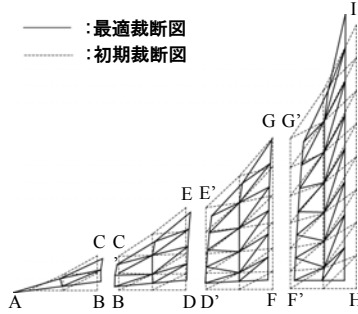


図4.c 最適化後裁断図

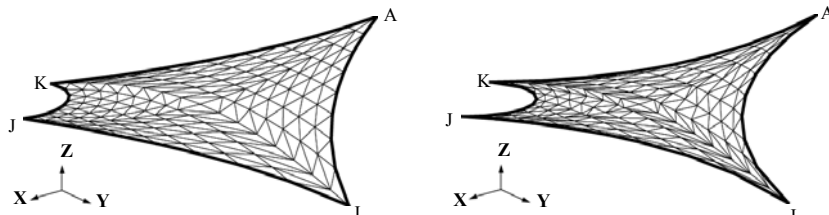


図 初期裁断図による釣合形状

図4.a 最適化後の釣合形状

## 境界ケーブル膜モデル

表3 最適化前後の応力結果

	初期裁断による釣合状態			最適化後の釣合状態		
	$t\sigma_x$	$t\sigma_y$	$N$	$t\sigma_x$	$t\sigma_y$	$N$
単位	N/mm			N/mm		
目標応力	kN			kN		
				$5.0 \leq t\sigma_x, t\sigma_y \leq 7.0$		
				$N = 50.0$		
平均値	44.0	38.4	755	5.57	5.55	50.1
最大値	52.2	51.2	766	6.97	6.99	50.8
最小値	40.3	33.3	732	5.01	5.01	49.8
標準偏差	3.24	4.54	11.4	0.487	0.524	0.347

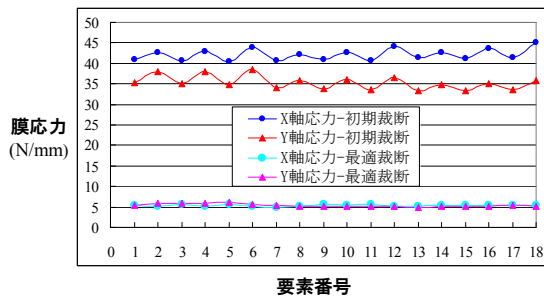
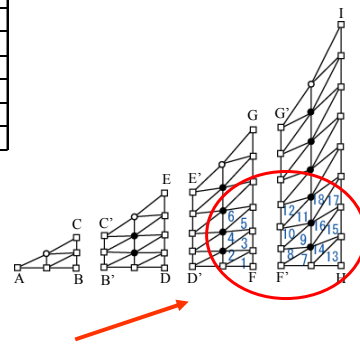


図 最適化前後の釣合形状における応力比較



## 考察

---

### 空気膜モデルの裁断図解析

想定形状に近似し、膜応力の制約条件を満足した釣合形状が得られた。

得られた釣合形状において、暴風時を想定し100mmAqを作用させた際、ばらつき小さい応力状態を示した。

形状指定問題の裁断図解析を実施できた。

### 境界ケーブル膜構造モデルの裁断図解析

目標ケーブル張力に近似し、膜応力の制約条件を満たした釣合形状が得られた。

## まとめ

---

形状指定問題を示し、空気膜構造モデルとケーブル補強膜構造モデルの裁断図解析を実施できた。

本解析手順を応用する事で、複雑な曲面形状、構造条件を有する膜構造物の裁断図解析も実施可能

## 今後の展開

---

- ・膜溶着部の剛性評価
  - ・ケーブルと膜のすべり
  - ・骨組膜構造物
- 膜構造物の裁断図解析の評価