

**遺伝的アルゴリズムを用いた
複合ケーブル構造の形態形成**

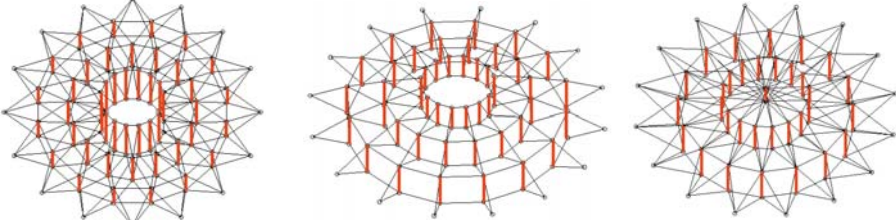
鹿児島大学 ○猿木 洋二郎

複合ケーブル構造

連続した引張材 + 独立した圧縮材
ケーブル + ストラット

軽量化と大空間

Tensegrity System



Zetlin roof

Geiger roof

Tensegrity roof

各ケーブル材に初期張力を導入

自己釣合状態を形成

本研究の目的

遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた張力導入の最適化を行い、
複合ケーブル構造の初期形態の決定法を示す。

—— 既往の最適化問題 ——

- | | |
|-----------|-------|
| ○逆変分原理 | 線計問題 |
| ○剛性最大化 | |
| ○変位ノルム最小化 | 非線形問題 |
| ○固有振動数最大化 | |

○GAを用いた方法

小規模なモデルの最適化 \longrightarrow 線計問題

定式化

仮想仕事の原理より、次の支配方程式を得る。

支配方程式
$$F(\mathbf{u}, \mathbf{f}) = \int_{\Omega} \mathbf{B}^*(\mathbf{u})^T \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}) d\Omega - \mathbf{f} = \mathbf{0} \quad (1)$$

↓ 通常のニュートンラプソン法で
近似解を求める

$$\mathbf{K}_t = \mathbf{K}_G + \mathbf{K}_S \quad \mathbf{K}_S = (\mathbf{K}_{lin} + \mathbf{K}_{lag}) \quad (2)$$

幾何剛性項 + (線形 + 大変位剛性項)

$\mathbf{K}_G = \int_{\Omega} \frac{\partial \mathbf{B}^*(\mathbf{u})^T}{\partial \mathbf{u}} \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}) d\Omega$	$\mathbf{K}_S = \int_{\Omega} \mathbf{B}^*(\mathbf{u})^T \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u})}{\partial \mathbf{u}} d\Omega$
--	--

(3)

線計問題 : $\mathbf{K}_G + \mathbf{K}_{lin}$ 非線形問題 : $\mathbf{K}_G + \mathbf{K}_S$

$\boldsymbol{\varepsilon}$: ひずみベクトル	$\boldsymbol{\sigma}$: 応力ベクトル	\mathbf{u} : 変位ベクトル	\mathbf{f} : 荷重ベクトル
$\delta \mathbf{u}$: 仮想変位	\mathbf{K}_t : 接線剛性マトリクス	$\mathbf{B}^*(\mathbf{u})$: ひずみ増分-変位増分関係	

初期張力導入

○ 初期張力 N_0 を与える場合

$$\sigma_0 = \frac{N_0}{A}$$

↓

$$\underline{\sigma = E\varepsilon + \sigma_0}$$

○ 初期ひずみ ε_0 を与える場合

初期張力 N_0 → ε_0

↓

$$\underline{\sigma = E\varepsilon_0}$$

幾何剛性項

$$\mathbf{K}_G = \int_{\Omega} \frac{\partial \mathbf{B}^*(\mathbf{u})^T}{\partial \mathbf{u}} \sigma(\mathbf{u}) d\Omega \quad (3)$$

↓

自己釣合状態

遺伝的アルゴリズム(GA)

本解析は単純GAを用いる

● 適応度

$$fitness = \frac{1}{f(x)} \quad (4)$$

$$\text{minimize} \rightarrow \min f(x) \quad (5)$$

$$\text{subject to} \quad g_i^L \leq g_i(x) \leq g_i^U \quad i=1,2,\dots,q \quad (6)$$

$f(x)$: 目的関数、 $g_i(x)$: 制約条件

● 情報エントロピー

$$H(N) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_j(N) \quad (9)$$

解析の手順

ベンチマーク問題

- 線形問題 (線形 + 幾何剛性)
- 非線形問題 (幾何学的非線形)



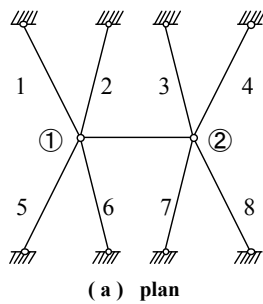
GAの有効性確認



複合ケーブル構造

- Zetlin roof
- Geiger roof
- Tensegrity roof

解析モデル



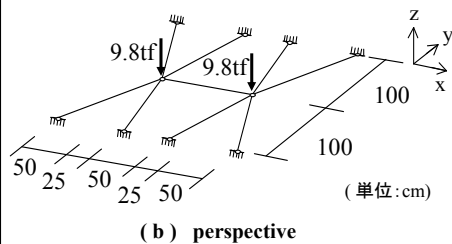
● 目的関数

- Case-1 (変位ノルム最小化)

$$f_1(x) = \sum_i \sqrt{|d_i|^2} + p \quad (10)$$

- Case-2 (行列式最大化)

$$f_2(x) = \frac{1}{\det[\mathbf{K}_G + \mathbf{K}_S]} + p \quad (11)$$



● 制約条件

- (i) 各部材軸力値

$$N_{\min}^i \leq N^i \leq N_{\max}^i \quad i = 1, \dots, m \quad (13)$$

- (ii) 固有値が正值

図1 ケーブル構造モデル

- 線計問題の解析例
- 非線形問題の解析例

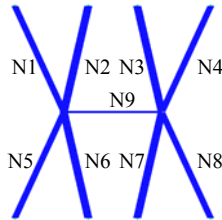


図 2 軸力状態

最適軸力値

文献[2]の変位ノルム最小化の数理解法と一致

GAの有効性確認

解析結果

○Case-1 (変位ノルム最小化)

表1-1 Case-1 (変位ノルム最小化 : 線計問題)の軸力値

表2-1 Case-1 (変位ノルム最小化 : 非線形問題)の軸力値

部材軸力	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9
変位ノルム最小化	3.12	3.74	3.74	3.12	3.12	3.74	3.74	3.12	0.98
変位ノルム最小化 初期張力 N_0	3.12	3.74	3.74	3.12	3.12	3.74	3.74	3.12	0.98
変位ノルム最小化 初期ひずみ ϵ_0	3.12	3.74	3.74	3.12	3.12	3.74	3.74	3.12	0.98

(単位: $\times 10^4$ kN)

○Case-2 (行列式最大化)

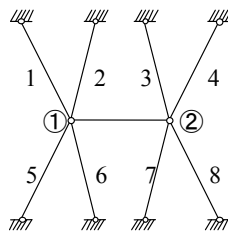
表3-1 Case-2 (行列式最大化 : 線計問題)の軸力値

表4-1 Case-2 (行列式最大化 : 非線形問題)の軸力値

部材軸力	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9
変位ノルム最小化	3.12	3.74	3.74	3.12	3.12	3.74	3.74	3.12	0.98
接線剛性の 初期張力 N_0	3.12	3.74	3.74	3.12	3.12	3.74	3.74	3.12	0.98
行列式最大化 初期ひずみ ϵ_0	3.12	3.74	3.74	3.12	3.12	3.74	3.74	3.12	0.98

(単位: $\times 10^4$ kN)

- 線計問題の解析例
- 非線形問題の解析例



節点①、②の変位

初期張力 N_0 の場合と
初期ひずみ ϵ_0 の場合

変位が異なる

○Case-1 (変位ノルム最小化)

表1-2 Case-1 (変位ノルム最小化: 線計問題)の節点変位

節点番号	変位ノルム最小化			変位ノルム最小化					
	dx	dy	dz	初期張力 N_0			初期ひずみ ϵ_0		
①	0	0	-7.63	0	0	-7.63	0	0	-7.53
②	0	0	-7.63	0	0	-7.63	0	0	-7.53

表2-2 Case-1 (変位ノルム最小化: 非線形問題)の節点変位

節点番号	変位ノルム最小化			変位ノルム最小化					
	dx	dy	dz	初期張力 N_0			初期ひずみ ϵ_0		
①	-0.025	0	-7.04	-0.025	0	-7.04	-0.020	0	-6.86
②	0.025	0	-7.04	0.025	0	-7.04	0.020	0	-6.86

(単位: cm)

○Case-2 (行列式最大化)

表3-1 Case-2 (行列式最大化 : 線計問題)の節点変位

節点番号	変位ノルム最小化			接線剛性マトリクスの行列式最大化					
	dx	dy	dz	初期張力 N_0			初期ひずみ ϵ_0		
①	0	0	-7.63	0	0	-7.63	0	0	-7.53
②	0	0	-7.63	0	0	-7.63	0	0	-7.53

表4-1 Case-2 (行列式最大化 : 非線形問題)の節点変位

節点番号	変位ノルム最小化			接線剛性マトリクスの行列式最大化					
	dx	dy	dz	初期張力 N_0			初期ひずみ ϵ_0		
①	-0.025	0	-7.04	-0.025	0	-7.04	0.020	0	-6.86
②	0.025	0	-7.04	0.025	0	-7.04	0.020	0	-6.86

(単位: cm)

解析モデル

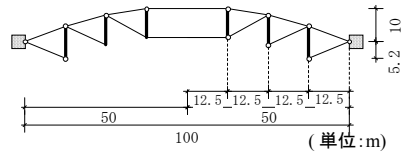
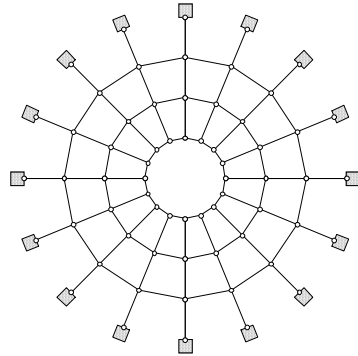


図3 解析モデル (Geiger roof)

●目的関数

○Case-1 (変位ノルム最小化)

$$f_1(x) = \sum_i \sqrt{|d_i|^2} + p \quad (10)$$

○Case-2 (行列式最大化)

$$f_2(x) = \frac{1}{\det[\mathbf{K}_G + \mathbf{K}_S]} + p \quad (11)$$

●制約条件

(i) 各部材軸力値 (梗概表5参照)

$$N_{\min}^i \leq N^i \leq N_{\max}^i \quad i = 1, \dots, m \quad (13)$$

(ii) 固有値が正值

(iii) 全体的な振れモードの排除

○Case-1 (変位ノルム最小化)

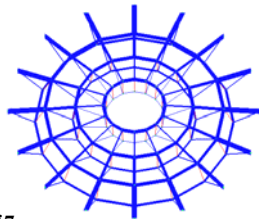


表7-a

部材	S1	S2	S3
軸力値 (kN)	-17.45	-13.79	-4.22
部材	C1	C2	C3
軸力値 (kN)	908.22	553.07	243.70
部材	C4	C5	C6
軸力値 (kN)	175.65	158.70	50.55
部材	R1	R2	R3
軸力値 (kN)	595.15	673.01	593.97
部材	R4	R5	R6
軸力値 (kN)	455.87	352.57	104.88

○Case-2 (行列式最大化)

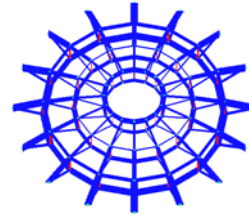


表8-a

部材	S1	S2	S3
軸力値 (kN)	-368.20	-212.40	-143.45
部材	C1	C2	C3
軸力値 (kN)	1473.40	857.07	452.73
部材	C4	C5	C6
軸力値 (kN)	578.23	377.95	339.64
部材	R1	R2	R3
軸力値 (kN)	779.02	277.62	1050.60
部材	R4	R5	R6
軸力値 (kN)	1404.30	875.36	727.60

図7,8-C 自己釣合状態の軸力値

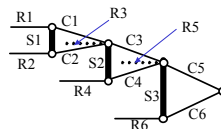


表7-b

節点	初期の座標値 (m)	釣合状態	変形後
Z1	10.000	6.695	5.830
Z2	13.300	8.513	7.092
Z3	15.200	9.741	7.957
Z4	0.000	-2.514	-3.178
Z5	4.100	-0.617	-2.003
Z6	6.500	1.055	-0.737

自己釣合状態の座標値

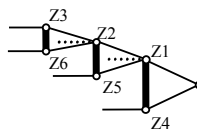
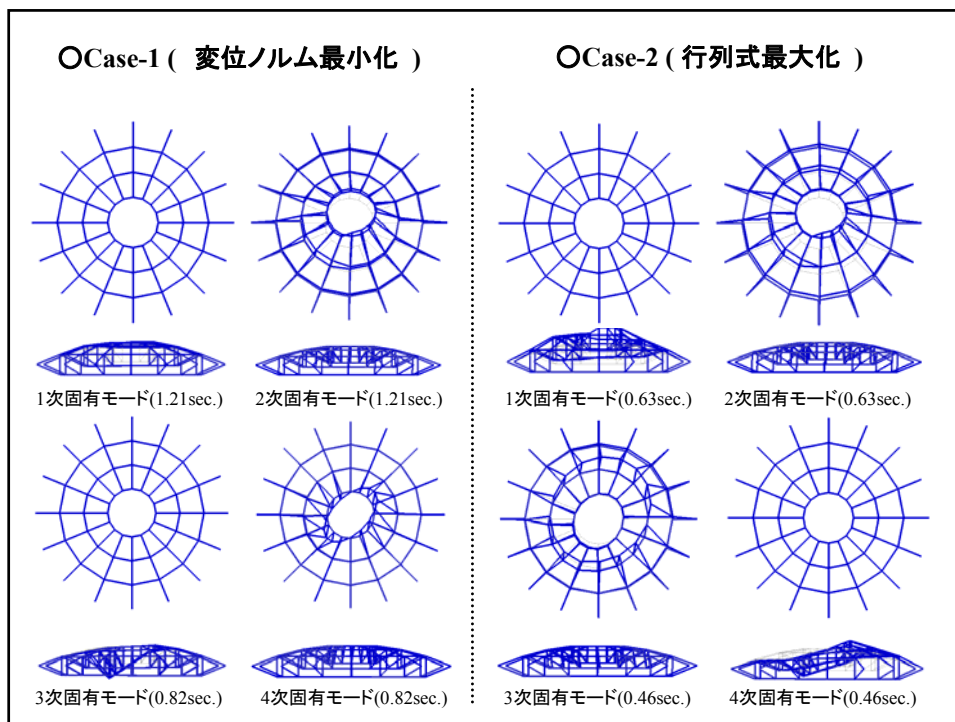


表8-b

節点	鉛直方向の座標値 (m)		変位(m)
	初期座標値	釣合状態	
Z1	10.000	7.325	-2.675
Z2	13.300	9.493	-3.807
Z3	15.200	12.622	-2.578
Z4	0.000	-1.845	-1.845
Z5	4.100	0.612	-3.488
Z6	6.500	3.964	-2.536



まとめ

GAを用いた複合ケーブル構造の初期形態の解析を示した。

○ 初期張力導入法

初期張力 N_0

初期ひずみ ε_0



- 線形問題 (線形 + 幾何剛性)
- 非線形問題 (幾何学的非線形)

○ベンチマーク問題は一致

○複合ケーブル構造の幾何学的非線形必要性

○線形問題 (線形 + 幾何剛性)

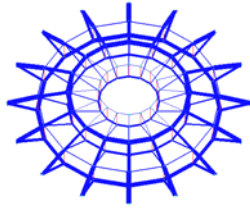


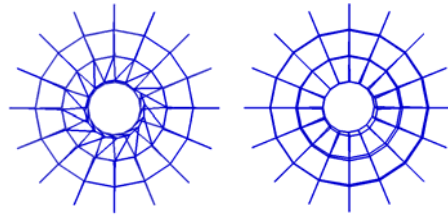
表 : 各部材軸力値

部材	S1	S2	S3
軸力値(kN)	-10.17	-92.58	-23.04
部材	C1	C2	C3
軸力値(kN)	950.98	636.51	69.16
部材	C4	C5	C6
軸力値(kN)	545.21	273.21	202.40
部材	R1	R2	R3
軸力値(kN)	162.99	990.38	94.74
部材	R4	R5	R6
軸力値(kN)	861.53	507.65	373.94

表 : 自己釣合状態の座標値

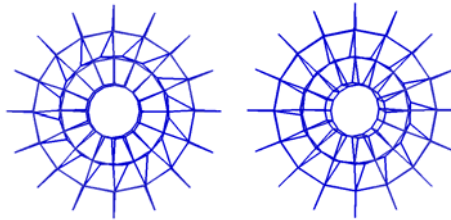
節点	鉛直方向の座標値(m)		変位(m)
	初期座標値	釣合状態	
Z1	10.000	7.246	2.754
Z2	13.300	9.264	4.036
Z3	15.200	12.403	2.797
Z4	0.000	-2.714	2.714
Z5	4.100	0.090	4.010
Z6	6.500	3.708	2.792

○Case-2 (行列式最大化)



1次固有モード(3.35sec.)

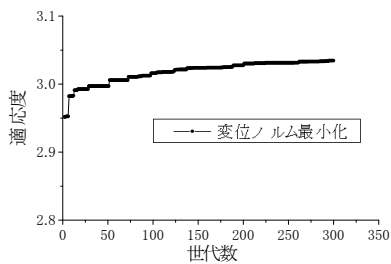
2次固有モード(2.26sec.)



3次固有モード(2.04sec.)

4次固有モード(2.03sec.)

○Case-1 (変位ノルム最小化)



○Case-2 (行列式最大化)

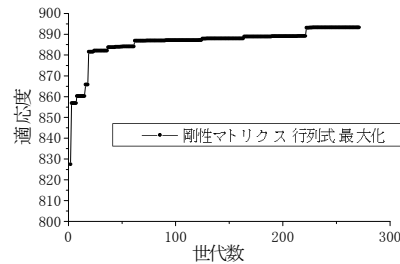


図: 世代毎における適応度の推移例

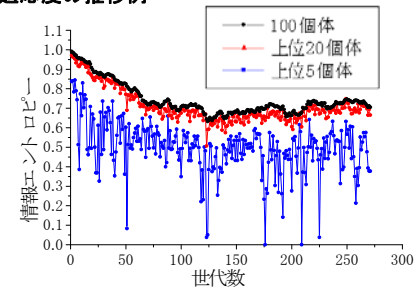
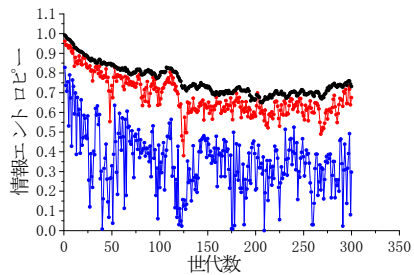


図: 世代毎における情報エントロピーの推移例

○初期座標値からの移動量最小化問題

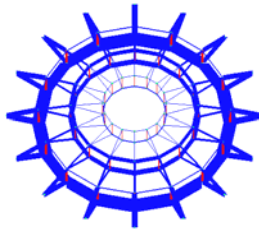
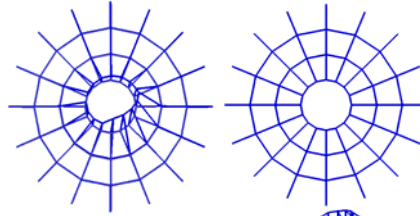


表 各部材軸力値

部材	S1	S2	S3
軸力値 (kN)	-287.12	-110.84	-14.15
部材	C1	C2	C3
軸力値 (kN)	594.50	265.45	12.97
部材	C4	C5	C6
軸力値 (kN)	660.34	248.14	51.44
部材	R1	R2	R3
軸力値 (kN)	138.21	438.48	30.02
部材	R4	R5	R6
軸力値 (kN)	1531.70	601.04	115.54

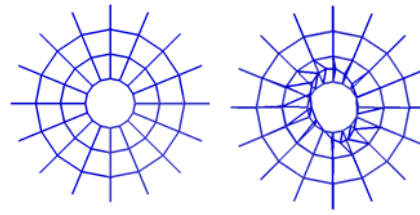
表 自己釣合状態の座標値

節点	鉛直方向の座標値 (m)		変位(m)
	初期座標値	釣合状態	
Z1	10.000	9.767	-0.233
Z2	13.300	12.977	-0.323
Z3	15.200	15.248	0.048
Z4	0.000	0.092	0.092
Z5	4.100	4.103	0.003
Z6	6.500	6.572	0.072



1次固有モード(2.48sec.)

2次固有モード(2.48sec.)



3次固有モード(1.97sec.)

4次固有モード(1.97sec.)

○Case-1 (初期座標値からの移動量最小化)

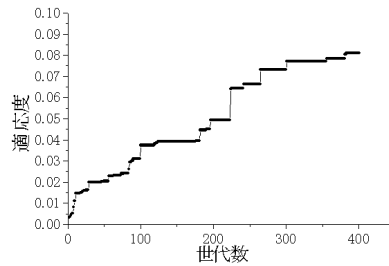


図: 世代毎における適応度の推移例

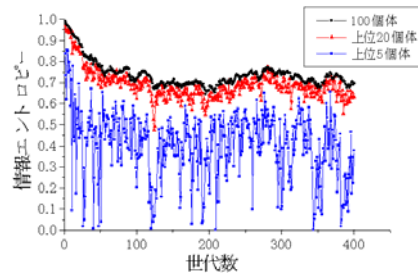


図: 世代毎における情報エントロピーの推移例

