# 懸垂物を考慮した大空間構造物の動的応答解析

本間研究室 ♥ 正野 和司 ♥



大空間構造における吊り下げ大型設備の落下危機

懸垂物落下事故例の報告

↓

大空間構造の振動特性と

懸垂物に関する動的応答解析の必要性

↓

本研究では

- 懸垂物の動的な基本性状を把握する.
- 球形ドームに懸垂物を配置、非線形動的応答解析結果と線形解析結果との比較を行う.
- 振動特性や懸垂物の影響を検討する.

はじめに　解析方法　結果・考察　おわりに

## 1. ケーブル(トラス)要素の定式化

仮想仕事の原理 $\mathbf{F}(\mathbf{u},\lambda\mathbf{f}) = \int_V \mathbf{B}^*(\mathbf{u})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u})\mathrm{dV} - \lambda\mathbf{f} = \mathbf{0}$ (1)

$\boldsymbol{\varepsilon}$: 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
V : 対象領域　$\delta\mathbf{u}$ : 仮想変位

グリーンひずみ

$$\varepsilon_C = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2\right)$$

**トラス要素の平衡方程式**

$$\mathbf{F}(\tilde{\mathbf{u}}_C,\lambda\mathbf{f}) = \left(\frac{A_e E_e}{L_e}\mathbf{K}_e + \frac{N_0}{L_e}\mathbf{G}\right)\tilde{\mathbf{u}}_C + N_0\mathbf{B} - \lambda\mathbf{f} = \mathbf{0} \quad (7)$$

**トラス要素の接線剛性マトリクス**

{幾何剛性マトリクス
線形剛性＋大変形マトリクス

**座標変換**

**構造体全体への重ね合わせ**

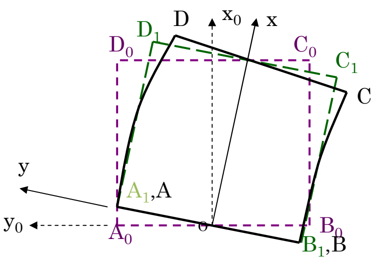
$$\mathbf{K}_{CeT} = \mathbf{K}_{CeA} + \mathbf{K}_{CeG}$$

$$\mathbf{K}_{CeG} = \frac{A_e\boldsymbol{\sigma}_C(\tilde{\mathbf{u}}_C)}{L_e^2}\begin{bmatrix}\mathbf{I} & -\mathbf{I}\\ -\mathbf{I} & \mathbf{I}\end{bmatrix} \qquad \mathbf{K}_{CeA} = \frac{A_e E_e}{L_e^2}\begin{bmatrix}\mathbf{J}' & -\mathbf{J}'\\ -\mathbf{J}' & \mathbf{J}'\end{bmatrix} \quad (10)$$

—懸垂物を考慮した大空間構造の動的応答解析—　本間研究室　正野 和司

はじめに　解析方法　結果・考察　おわりに

## 2. 剛体変位除去法によるフレーム要素の定式化




**部材要素毎に剛体変位と共に移動する移動座標系を設定**

↓

**剛体変位が除去される**

↓

**剛体変位除去法**

**フレーム要素の平衡方程式(全体座標系)**

$$\mathbf{F}(\mathbf{u}_F,\lambda\mathbf{f}) = \mathbf{L}^T\mathbf{T}_e^T\mathbf{K}_{eS}\mathbf{H}(\mathbf{L}\mathbf{u}_F) - \lambda\mathbf{L}^T\mathbf{f} = \mathbf{0} \quad (20,1)$$

**フレーム要素の接線剛性マトリクス**

$$\mathbf{K}_{FT} = \mathbf{L}^t(\mathbf{T}_e^t\mathbf{K}_{eT}\mathbf{T}_e + \mathbf{K}_{gr})\mathbf{L} \quad (20,2)$$

—懸垂物を考慮した大空間構造の動的応答解析—　本間研究室　正野 和司

## 3. 動的解析

### 運動方程式

$$\mathbf{M\ddot{u}} + \mathbf{C\dot{u}} + \mathbf{Q}(\mathbf{u}, p) = \mathbf{F}(t) \quad (22)$$

$$\mathbf{Q}(\mathbf{u}, p) = \mathbf{E}(\mathbf{u}) - p\mathbf{e} = \mathbf{0} \quad (23)$$

$\mathbf{u}$：変位ベクトル　$\mathbf{\dot{u}}$：速度ベクトル　$\mathbf{\ddot{u}}$：加速度ベクトル
$p$：静的荷重パラメータ　$\mathbf{e}$：静的荷重モードベクトル
$\mathbf{M}$：質量行列　$\mathbf{C}$：減衰行列　$\mathbf{F}(t)$：動的外力ベクトル

### ニューマーク法

$$S(\mathbf{u}, \mathbf{\dot{u}}, \mathbf{\ddot{u}}) = \mathbf{M\ddot{u}} + \mathbf{C\dot{u}} + \mathbf{E}(\mathbf{u}) - p\mathbf{e} - \mathbf{F}(t) = \mathbf{0} \quad (24)$$

ステップ $t = t_n$ に(24)式を満足する $\mathbf{u}_n, \mathbf{\dot{u}}_n, \mathbf{\ddot{u}}_n$

ステップ $t = t_{n+1}$ の $\mathbf{u}_{n+1}, \mathbf{\dot{u}}_{n+1}, \mathbf{\ddot{u}}_{n+1}$ を求める

### 固有値解析

$$\mathbf{T}_i = 2\pi / \omega_i \qquad \left| -\mathbf{m}\omega_i^{2} + \mathbf{k} \right| = \mathbf{0}$$

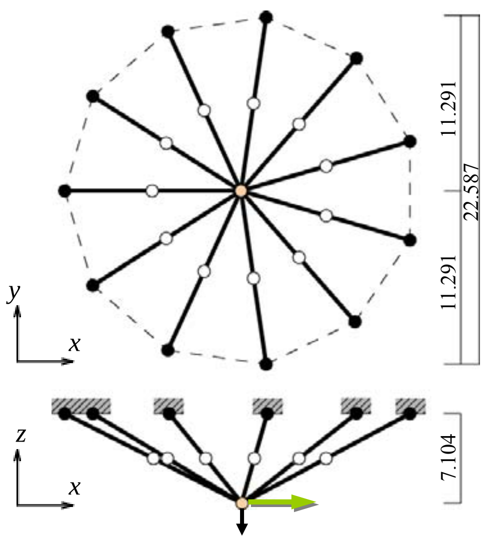
減衰行列

$$\mathbf{C} = \beta \mathbf{K} \qquad \beta = \frac{hT}{\pi} \quad (25)$$





### 11部材モデル



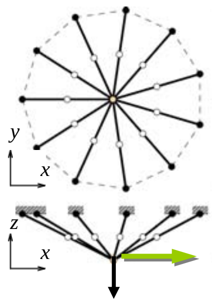

11 要素(2 分割)
23 節点

●:固定節点
○:自由節点

断面積:0.001m²
ヤング係数:2.05×10⁵ N/mm²
単位長さあたりの重さ:0.03ton/m

はじめに　解析方法　**結果・考察**　おわりに

## 11部材懸垂モデル

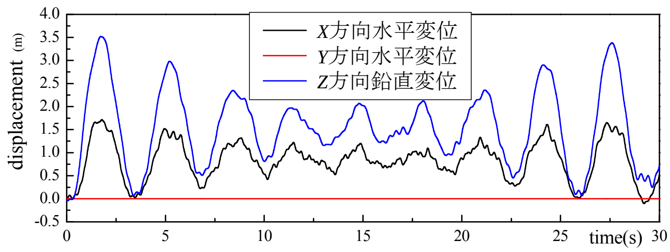


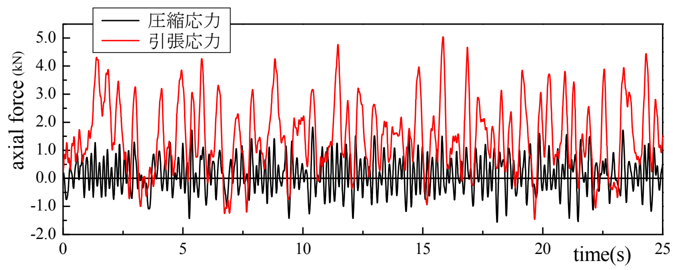

静的荷重

*Z*方向　V（自重）

ステップ荷重

*X*方向　2V

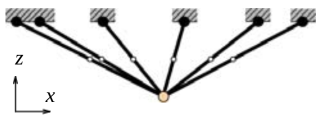


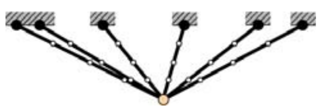

—懸垂物を考慮した大空間構造の動的応答解析—　本間研究室　正野 和司

はじめに　解析方法　**結果・考察**　おわりに

## 11部材懸垂モデル

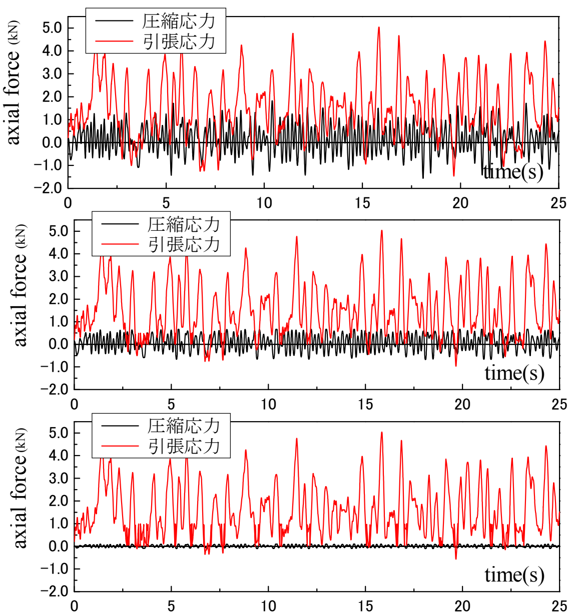



**2分割モデル**



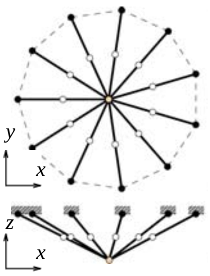
**4分割モデル**

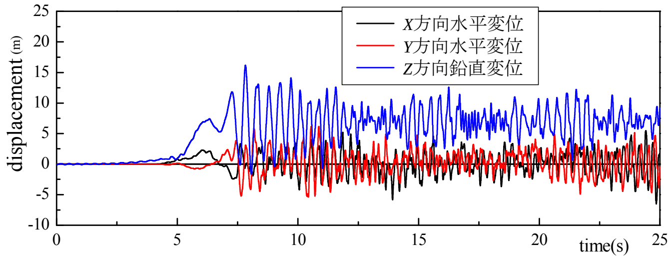
**8分割モデル**




—懸垂物を考慮した大空間構造の動的応答解析—　本間研究室　正野 和司

## 地震荷重下における懸垂物の非線形動的応答

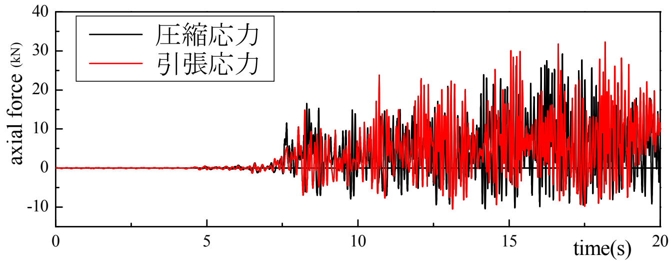



防災科学技術研究所・強震ネットワーク「K-NET」

1995年-兵庫県南部沖地震

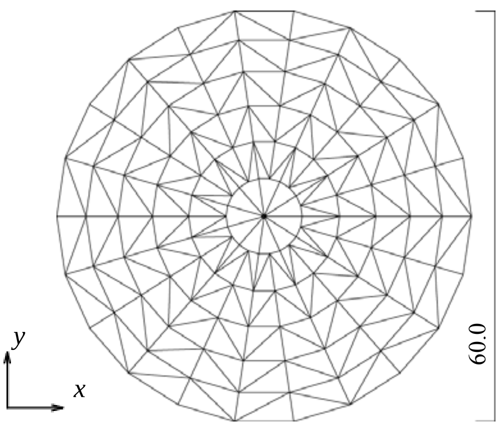
加速度データ
- EW → $x$方向
- NS → $y$方向
- UD → $z$方向

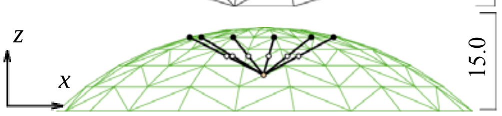







## 球形ドーム＋懸垂物のモデル



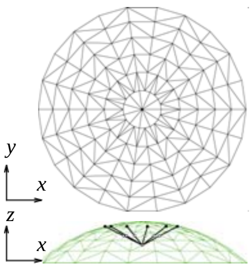



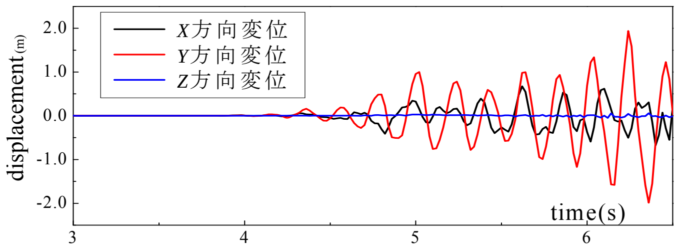

**-フレームドーム-**
鉄骨造
133節点，363要素
断面積：$A$=0.30m$^2$
ヤング係数：$E$=2.05×10$^5$ N/mm$^2$
単位長あたりの重さ：
$w_0$=0.57ton/m

**-懸垂物-**
23節点，11要素
断面積：$A$=0.30m$^2$
ヤング係数：$E$=2.05×10$^5$ N/mm$^2$
単位長あたりの重さ：
$w_0$=0.03ton/m

はじめに　解析方法　**結果・考察**　おわりに

## 地震荷重下におけるドーム及び懸垂物の非線形動的応答

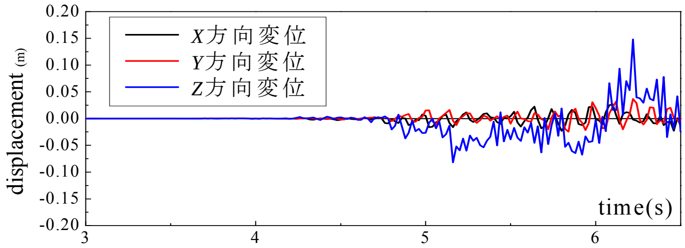



防災科学技術研究所・強震ネットワーク「K-NET」

1995年−兵庫県南部沖地震

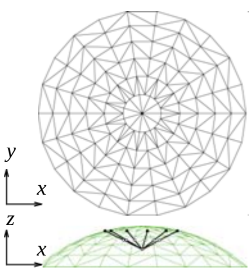
加速度データ
EW → $x$方向
NS → $y$方向
UD → $z$方向



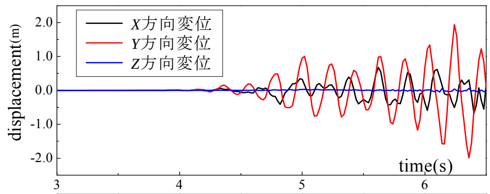



はじめに　解析方法　**結果・考察**　おわりに

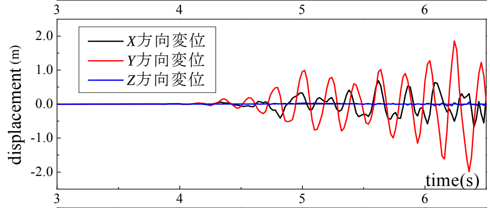
## 地震荷重下における懸垂物中央点変位



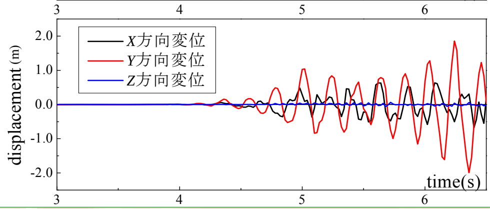

$w=w_0$




$w=2w_0$



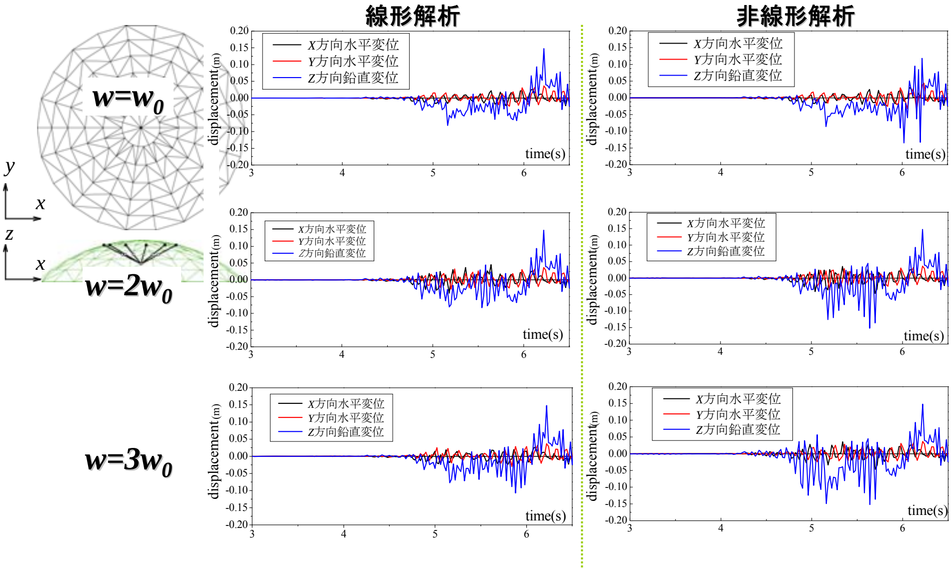

$w=3w_0$




—懸垂物を考慮した大空間構造の動的応答解析—　本間研究室　正野 和司

はじめに　解析方法　**結果・考察**　おわりに

## 地震荷重下におけるドーム中央点変位






はじめに　解析方法　**結果・考察**　おわりに

## 解析結果考察

### 懸垂物の非線形動的解析

非対称モデル　→　不規則な振動応答

要素分割数　→　厳密な弛緩現象の追跡

### 懸垂物を吊下げた球形ドームの非線形動的解析

重量増加、時間経過　→　波長に乱れ、線形・非線形解析結果の相違拡大

⬇

懸垂物振動の増大
フレームの大変位に伴う、接線剛性マトリクスの非線形項の影響

厳密な解析解により構造物の安全性の検討を行うことが可能！

―懸垂物を考慮した大空間構造の動的応答解析―　本間研究室　正野 和司

はじめに　解析方法　結果・考察　おわりに

## 今後の課題

**複雑で多様の空間構造物においての活用**

- 懸垂物がドーム構造に与える厳密な影響
- 懸垂物を考慮したドームモデルにおける十分な要素分割
- 振動特性と動的外力との関わりの検討

**重量パラメータを変化**

↓

**構造形態や構成要素分割数、固有モードなどの変化**
**力学的挙動の相違が得られるのかを検討していく必要がある**