

# 柔軟な紙の3次元動的変形解析 ～製品機器への適用事例～

(株)富士電機総合研究所  
高野 幸裕

- ・背景
- ・2次元変形モデル
- ・3次元変形モデル
- ・解析結果
- ・まとめ

## 背景

紙葉類を扱う機器の設計では紙の挙動の把握が重要

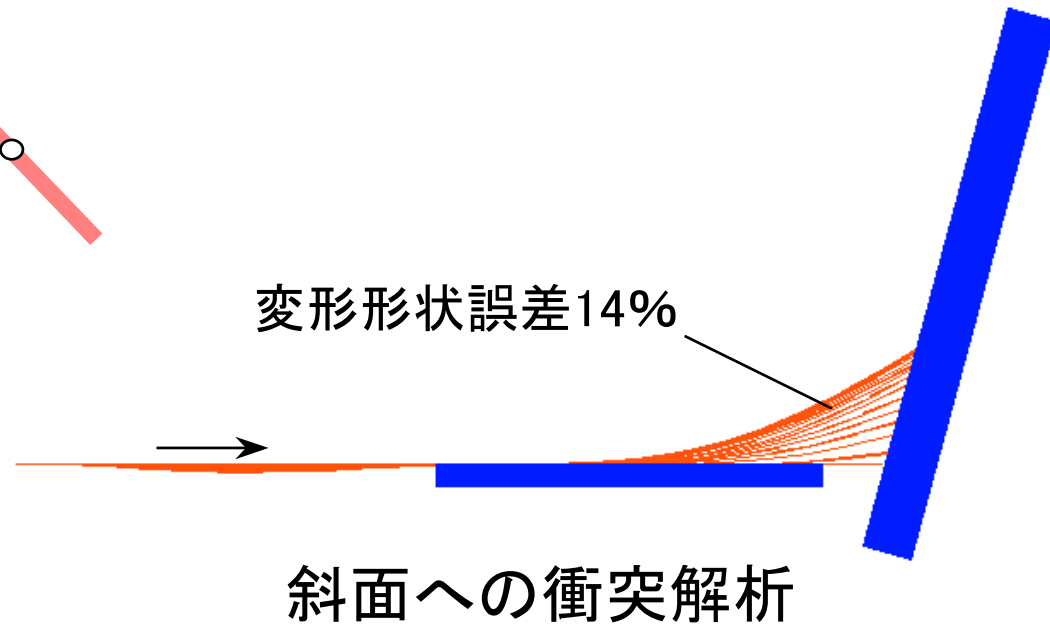
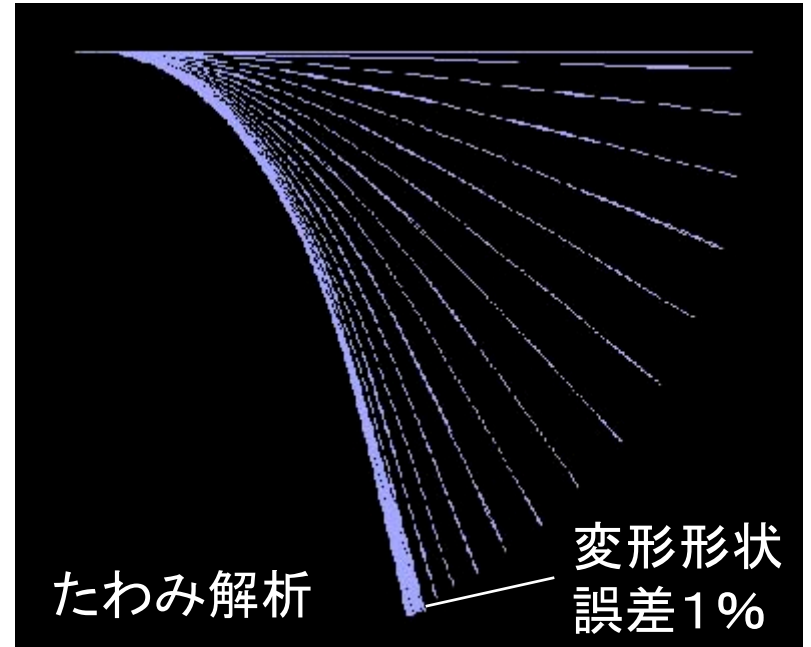
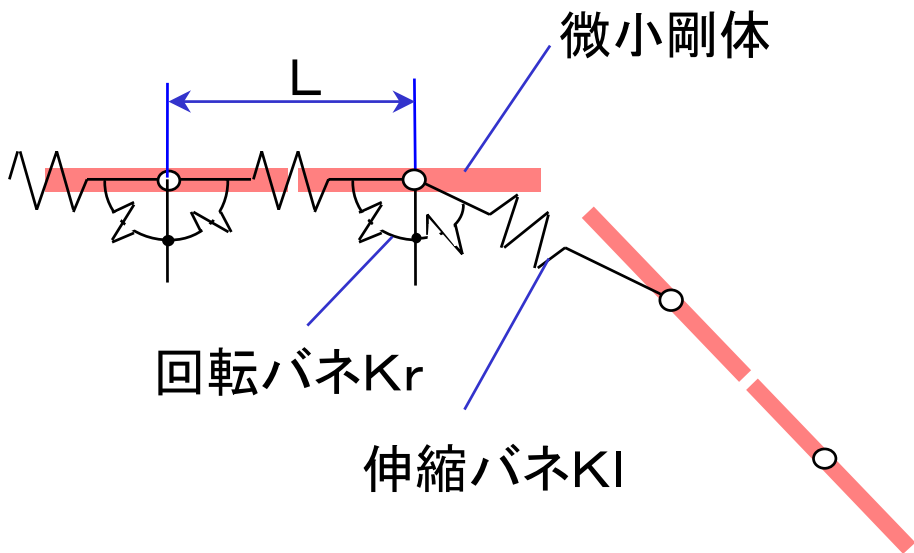


紙は柔軟なため、挙動の定量的な把握が困難

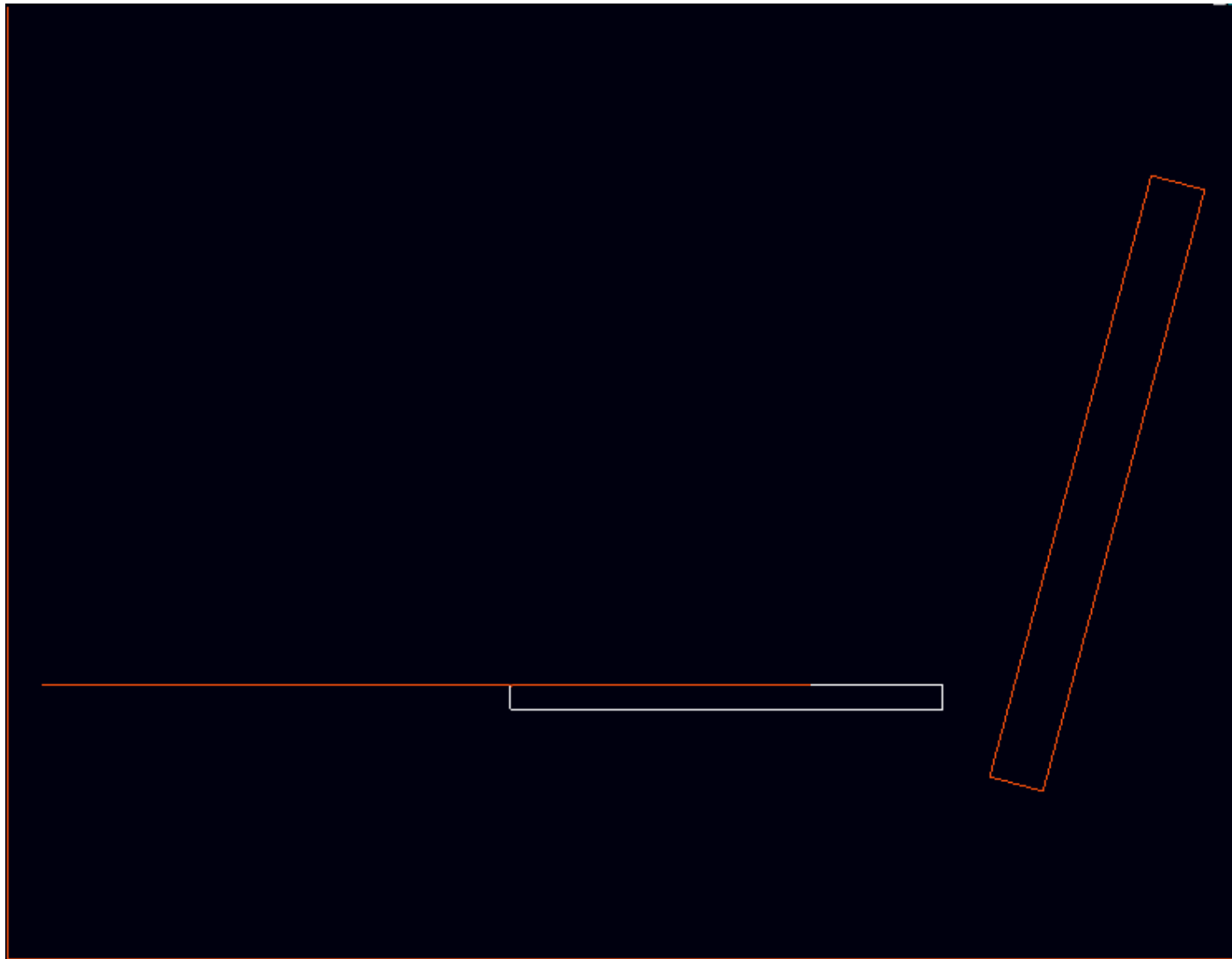


紙を微小剛体の弾性体連結としてモデル化し、運動解析を実施

# 2次元変形モデル



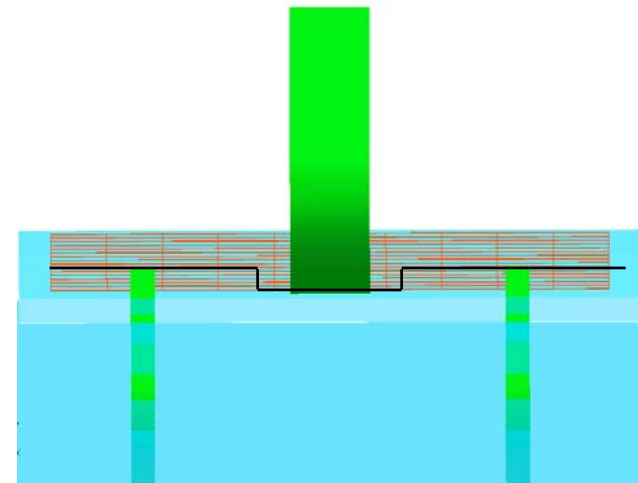
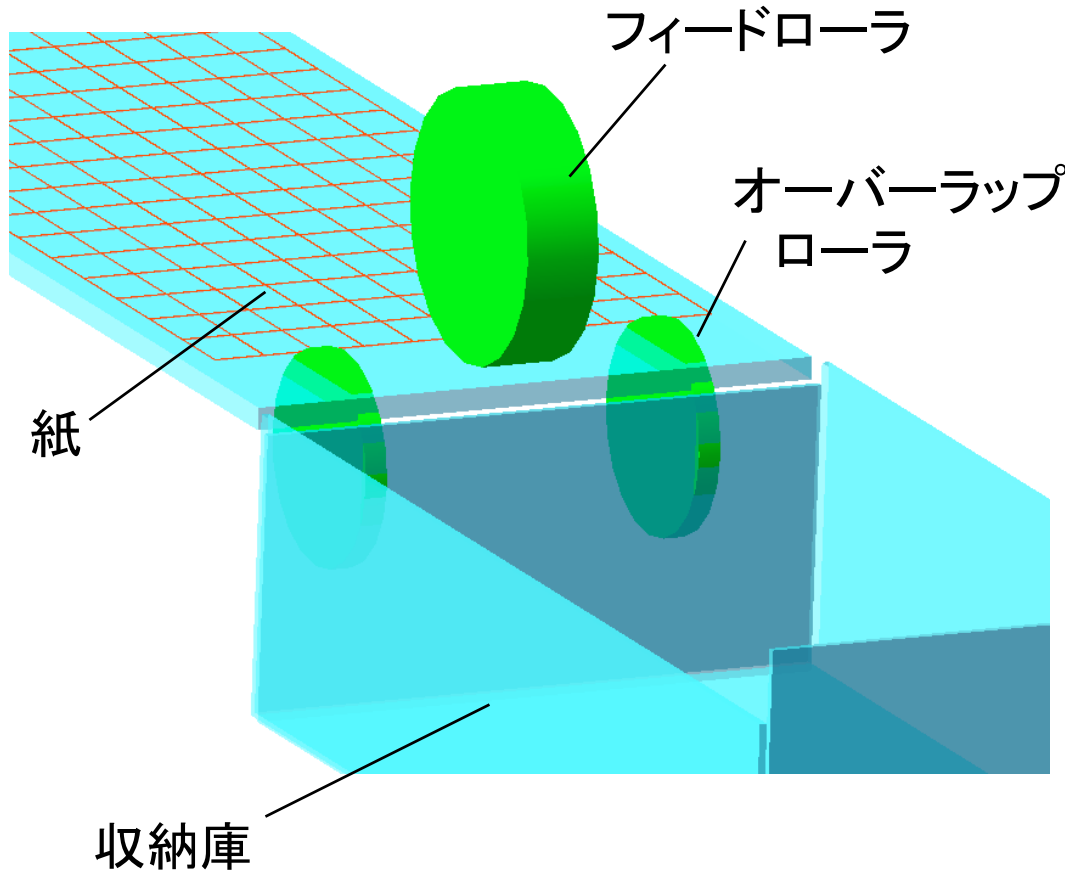
# 斜面への衝突解析例



# モデリング

## 3次元変形モデル → 紙の収納機構モデル

- ・互いに段違いになった3つのローラにより構成
- ・オーバーラップローラによる紙の3次元動的変形を解析

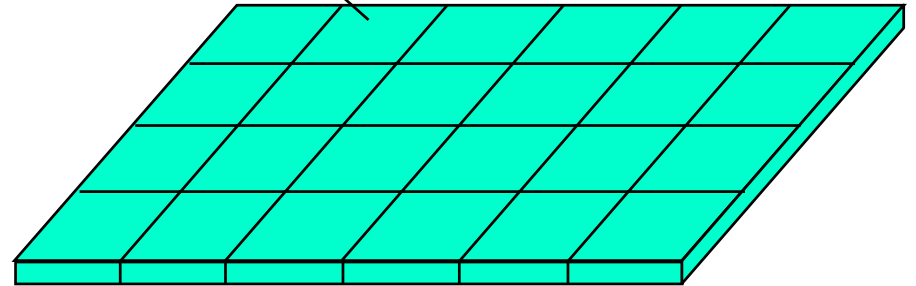


# モデリング

## 紙モデル

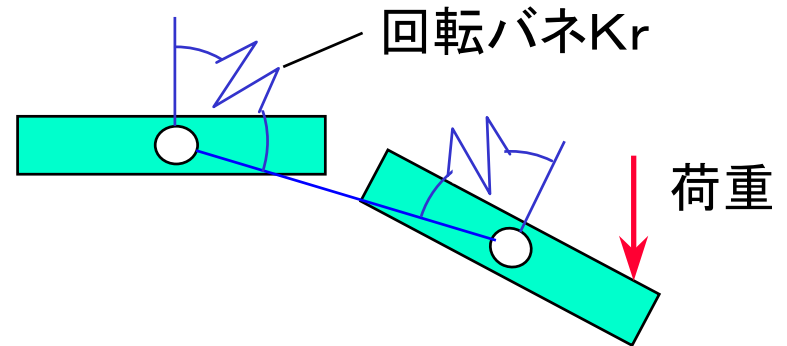
微小剛体を4種類の  
弾性体で連結

微小剛体



## たわみ

回転バネ  
梁のたわみ式を離散化  
 $K_r = 2EI/L$



E: ヤング率 L: 微小剛体間距離 I: 断面2次モーメント

# モデリング

## ねじり

### ねじりバネ

長方形断面のねじり式

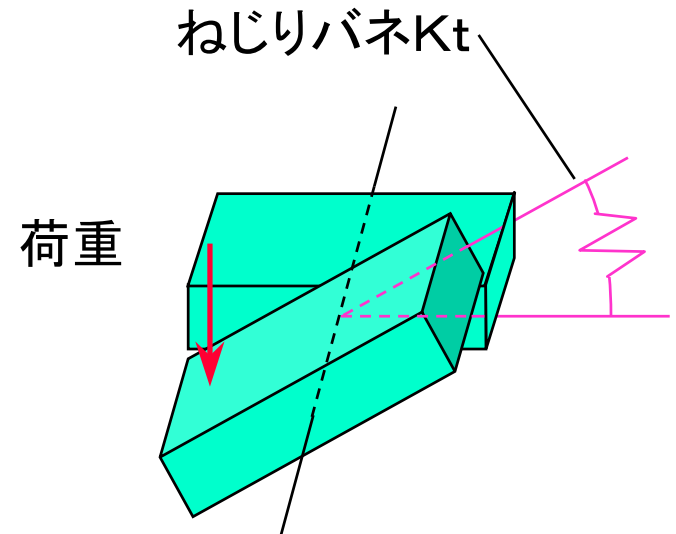
$$d\theta / dx = T / \alpha bh^3G$$

を離散化

$$Kt = \alpha bh^3G / L$$

G: 横弾性係数 T: トルク b: 幅 h: 厚さ

$$\alpha = 1/3 - 0.21h(1 - h^4/12b^4)/b$$



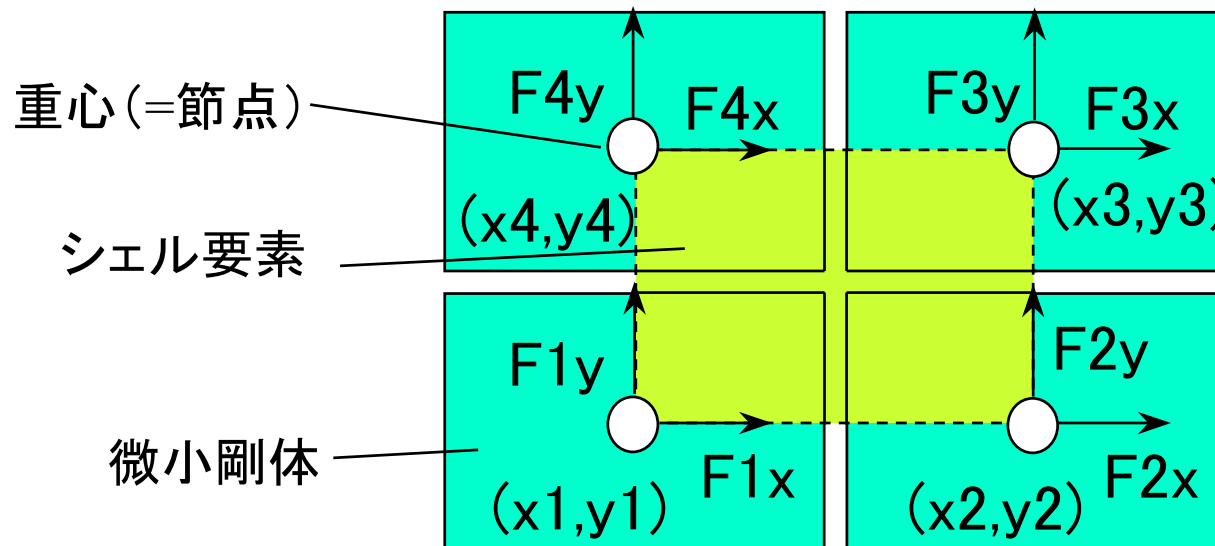
# モデリング

## 伸縮、面内せん断

### 四角形シェル要素

剛性マトリクスKmatを用いて微小剛体の重心に力を作用

$$[F_{1x}, F_{1y}, F_{2x}, F_{2y}, F_{3x}, F_{3y}, F_{4x}, F_{4y}] \\ = Kmat[x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4]$$





# モデリング

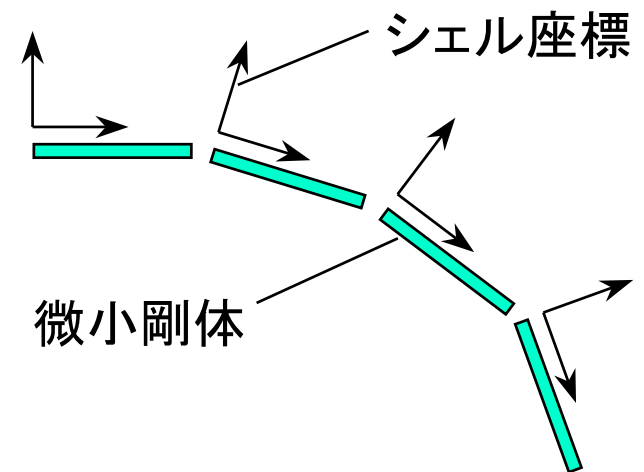
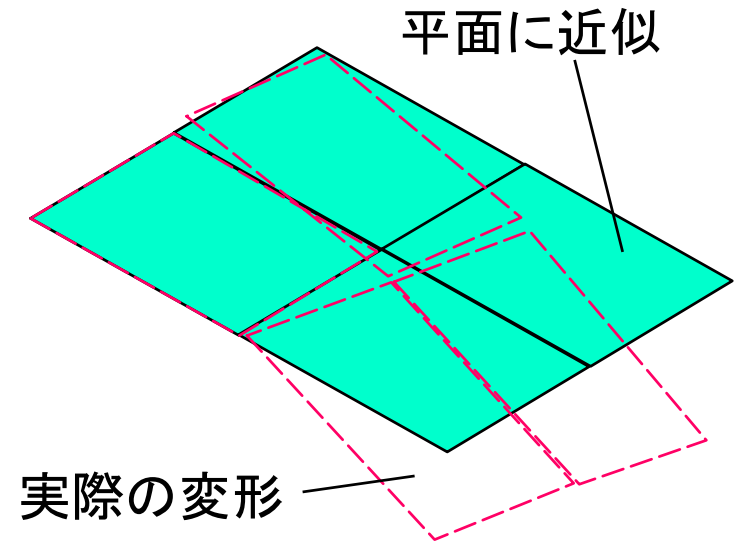
## 伸縮、面内せん断

### 線形近似

シェル要素で連結された4つの要素  
⇒同一平面上にあると近似

### 大たわみ対応

各シェル要素に個別の座標系  
⇒たわみとともに座標系も傾く



# モデリング

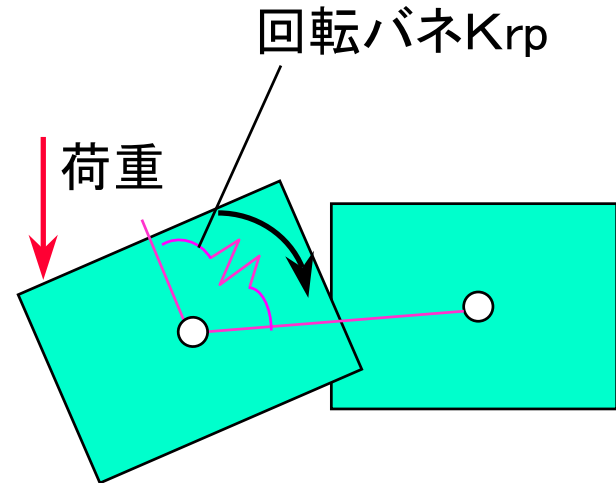
## 面内回転

### 回転バネ

面内回転の相対角度に対して作用

$$K_{rp} = 2EI_y/L$$

$I_y$ : 面内回転方向の断面2次モーメント



# モデリング

## 接触力

接触力をバネ、ダンパ、摩擦でモデル化

$L > 0$

バネ力  $F_k = 0$

ダンピング力  $F_c = 0$

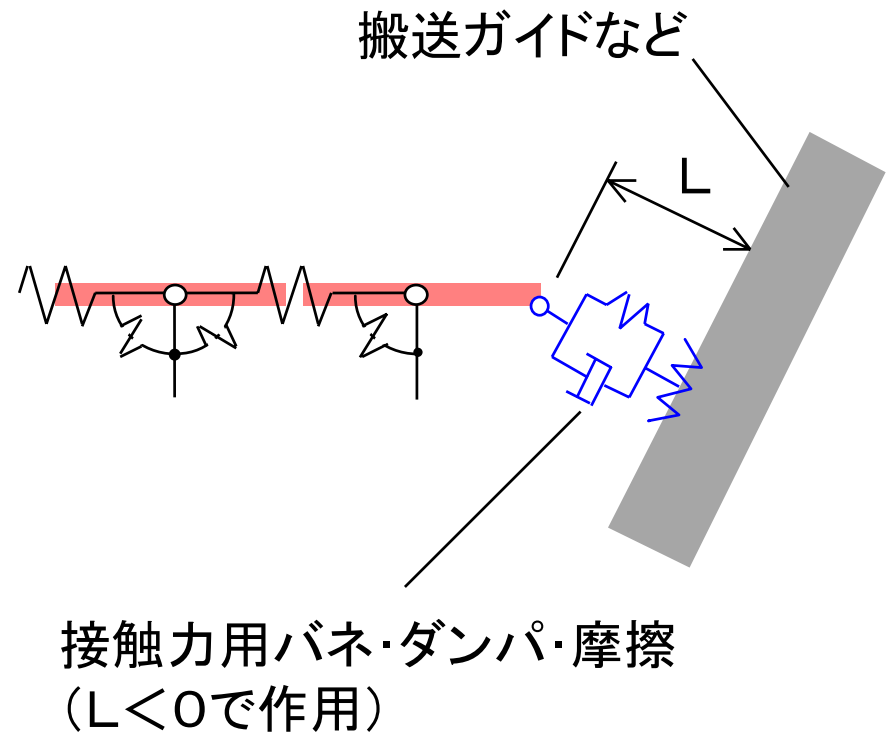
摩擦力  $F_f = 0$

$L \leq 0$

バネ力  $F_k = -k L$

ダンピング力  $F_c = -c \frac{dL}{dt}$

摩擦力  $F_f = \mu (F_k + F_c)$



# モデリング

## 空気抵抗

### 空気抵抗力

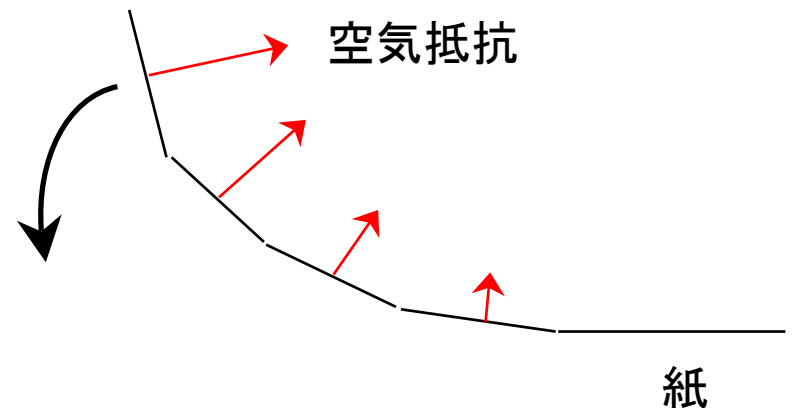
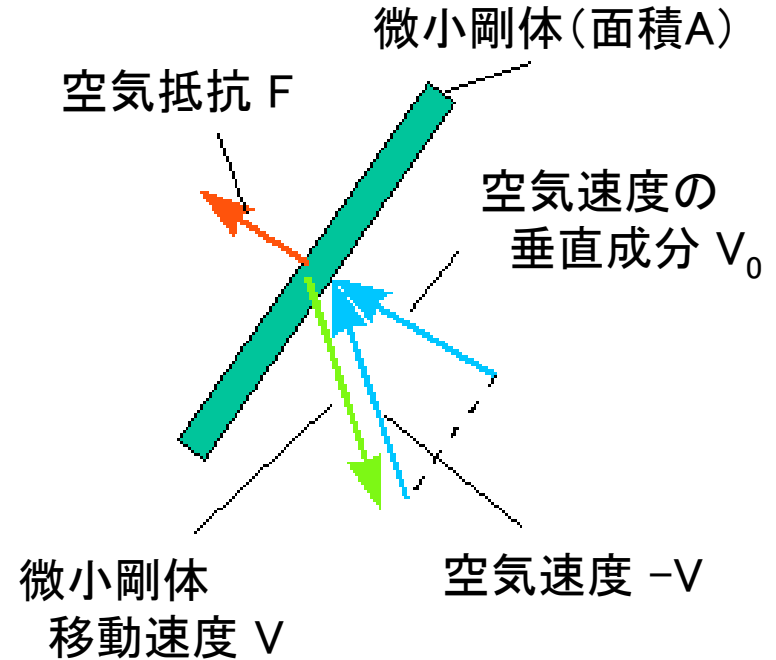
各微小剛体に空気の動圧  
が垂直に作用

$$F = 1/2 \rho V_0^2 A$$

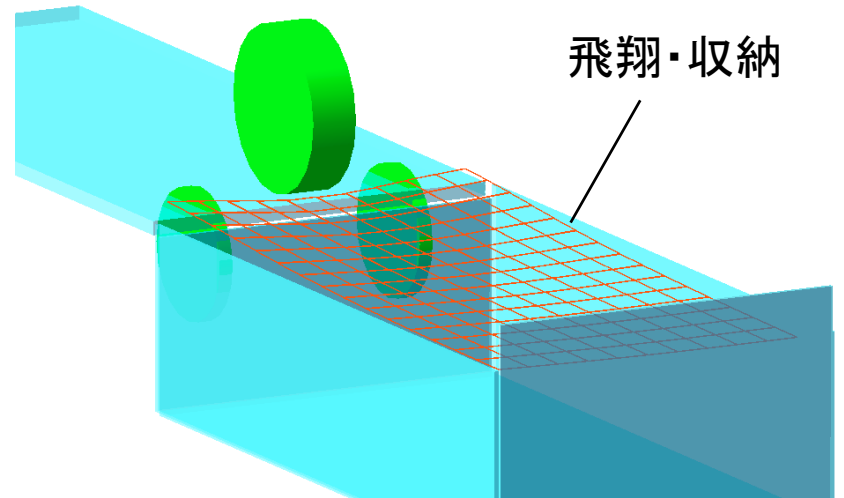
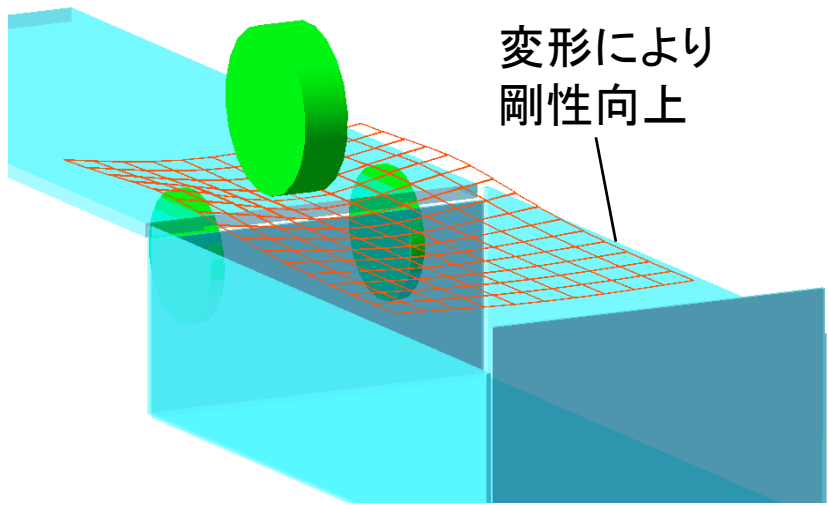
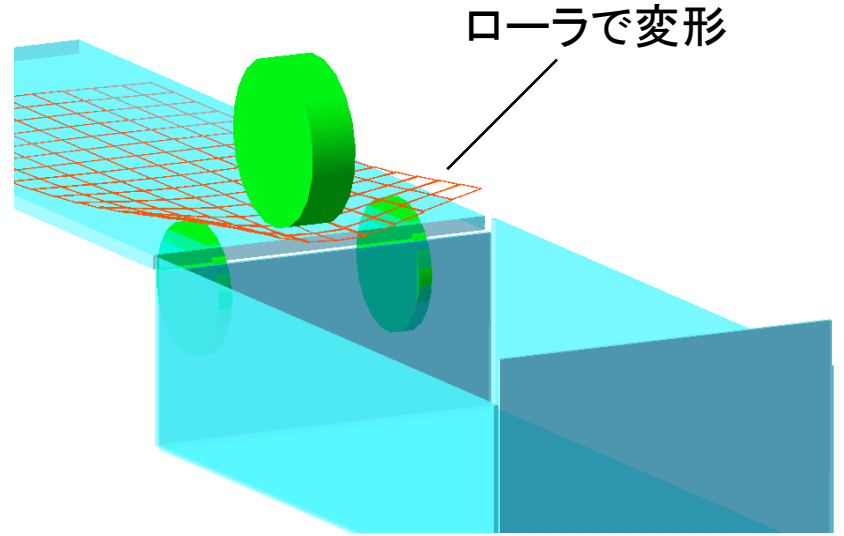
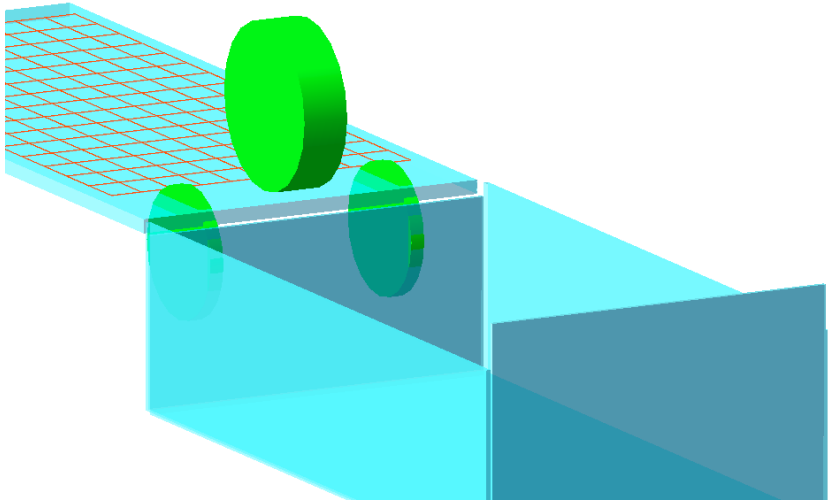
$\rho$  : 空気密度

$A$  : 微小剛体の面積

$V_0$  : 空気速度の微小剛体に垂直な成分

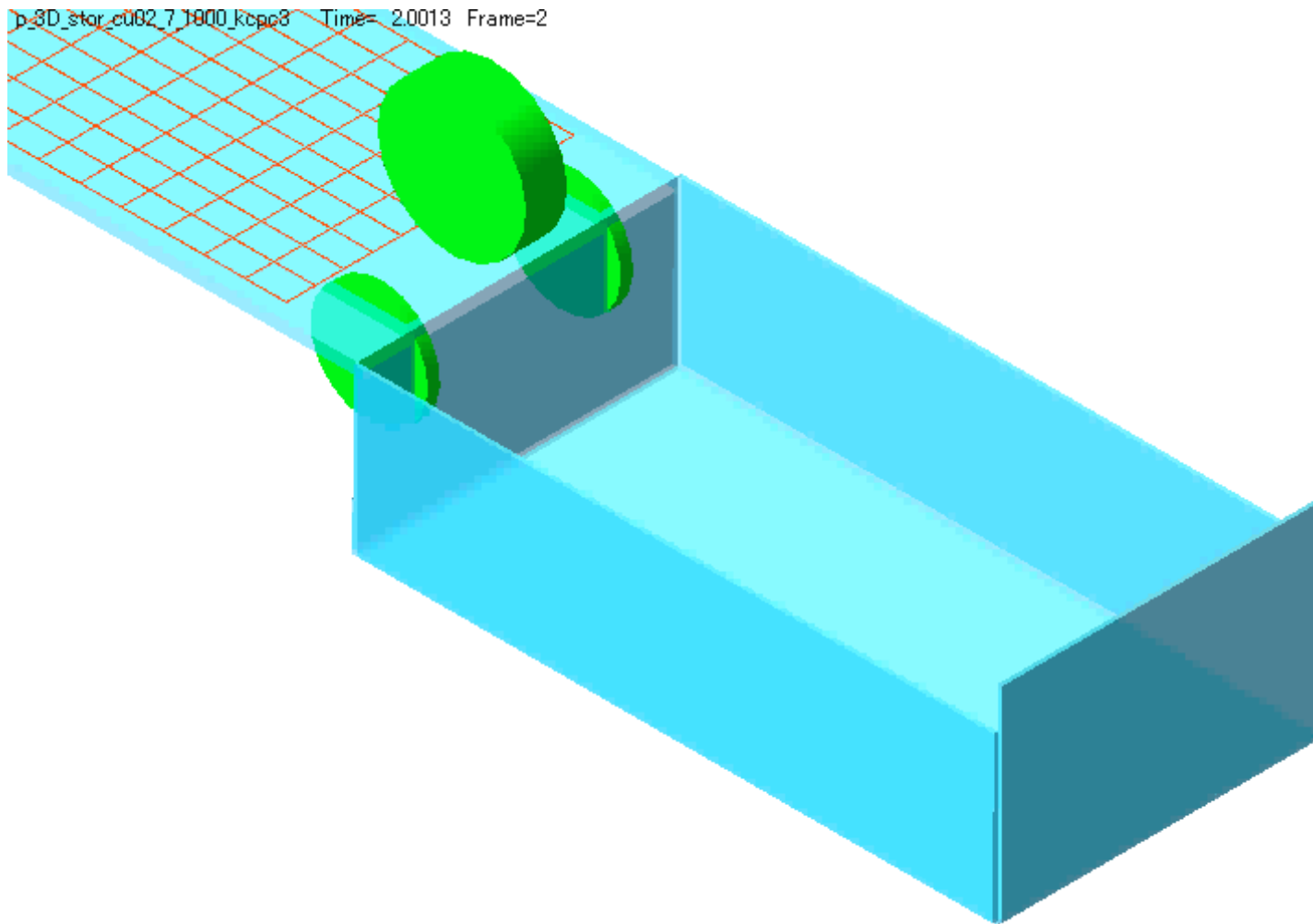


# 解析結果(アニメーション)



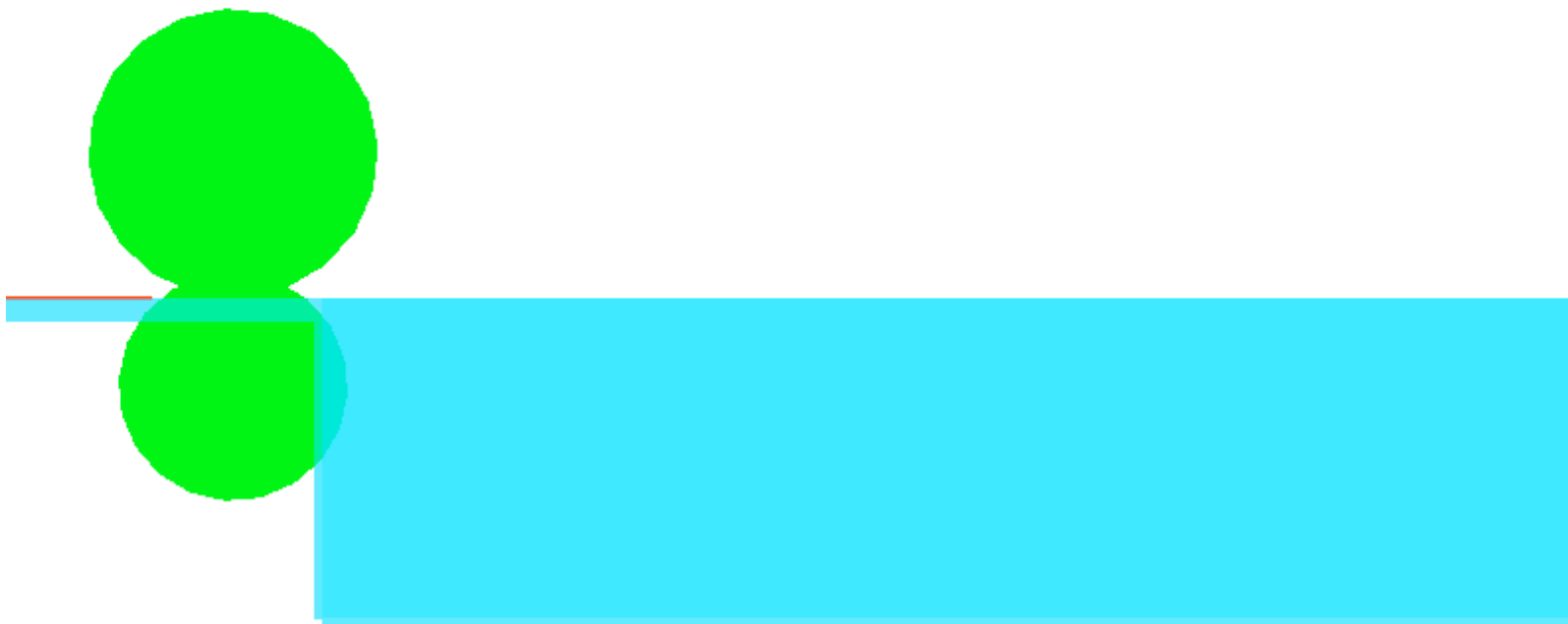
# 解析結果(アニメーション)

p\_3D\_stor\_c002\_7\_1000\_kcpo3 Time= 2.0013 Frame=2



# 解析結果(アニメーション)

p\_3D\_stor\_cu02\_7\_1000\_kcpc3 Time= 2.0013 Frame=2



# 解析結果(変形量)

寸法: 160 × 76 × 0.09mm

弾性係数:

$$E_x = 4406 \text{ MPa}$$

$$E_y = 2944 \text{ MPa}$$

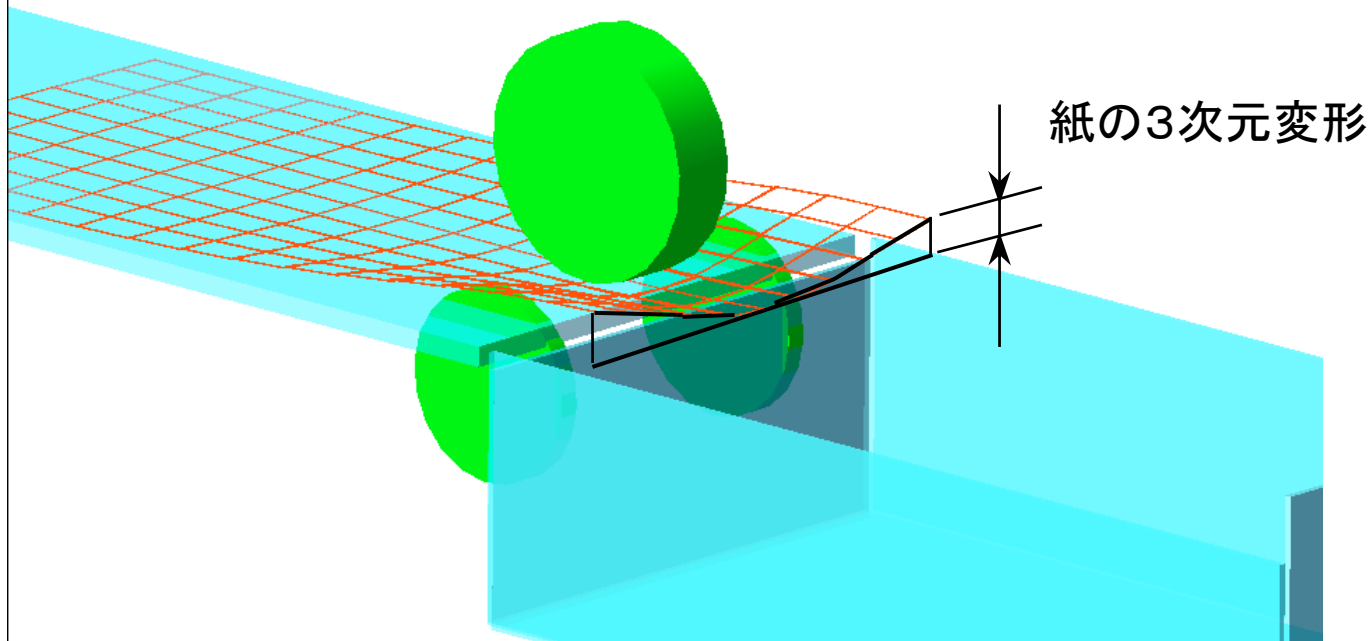
$$G = 1394 \text{ MPa}$$

密度: 84.9 g/m<sup>2</sup>

## 紙先端の変形量

	実験値	シミュレーション
変形量	8.0mm	9.0mm(誤差11%)

p\_3D\_stor\_cu02\_7\_400 Time= 81.9981 Frame=42





## まとめ

紙の3次元動的変形解析を実施  
微小剛体を4種類の弾性体で連結  
収納機構内部での変形を解析



実機と挙動がほぼ一致  
紙の変形量が定量的に一致



本解析手法が有効であることを確認