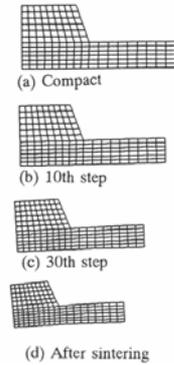


## 粉末焼結のシミュレーション

豊橋技術科学大学  
森 謙一郎

### 有限要素法



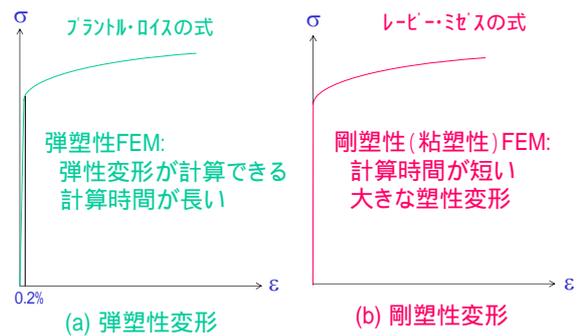
## 塑性変形用有限要素法の歴史

- 60 弾性有限要素法: 航空機の設計
- 弾塑性: 微小変形理論
- 剛塑性: 平面応力
- 70 弾塑性: 大変形理論
- 剛塑性: ラグランジュ乗数法, ヘナルティ法, 圧縮特性法  
粉末加工
- 80 各種加工法への適用: 摩擦, 接触問題, 定常変形
- 90 実加工への応用: 板成形, 鍛造, 圧延, 焼結  
動的陽解法
- 市販ソフトウェアの機能充実: プリ・ホスト

### 塑性加工の有限要素シミュレーション

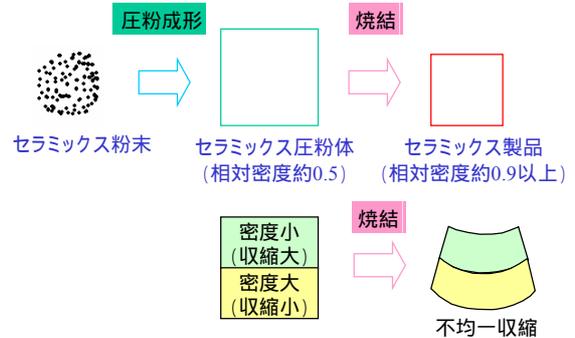
- 1) 鍛造加工  
軸対称鍛造, 3次元鍛造, 座屈, 割れ発生の予測, 温度分布
- 2) 押し出し・引抜き加工  
軸対称変形, 3次元変形, 割れ発生の予測, 温度分布
- 3) 板材成形  
深絞り, 曲げ, 張出し, 3次元成形, 異方性, 成形限界, 温度分布, 組織予測, クラッド材
- 4) 粉末成形  
粉末鍛造, 圧粉成形, 焼結, 金属粉末射出成形
- 5) 圧延加工  
平面ひずみ圧延, 3次元圧延, 厚板圧延, エッジング圧延, 管材圧延, 孔型圧延, 組織予測
- 6) 切削・せん断加工  
平面ひずみ, 3次元変形, 材料の分離
- 7) 表面処理  
ショットピーニング

## 塑性変形用有限要素法



- 1) 有限要素法の定式化
- 2) 焼結シミュレーションの例
- 3) 焼結割れの予測
- 4) ネットシェイプ
- 5) 微視的シミュレーション

## セラミックス製品の成形



### 圧粉成形の多孔質体粘塑性有限要素法

降伏条件

$$3\sigma_{ij}'\sigma_{ij}' + 2(\frac{\sigma_m}{f})^2 - 2(\rho^k \bar{\sigma})^2 = 0$$

体積変化

構成式

$$\{\sigma\} = [D]\{\dot{\epsilon}\}$$

節点力

$$\{P\} = \int_{V_e} [B]^T [D] [B] dV \{v_e\}$$

釣合い, 繰返し計算

### 焼結収縮の粘塑性有限要素法

全ひずみ速度

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \underbrace{\dot{\epsilon}_{ij}^s}_{\text{焼結収縮}} + \underbrace{\dot{\epsilon}_{ij}^p}_{\text{塑性変形}}$$

構成式

$$\{\sigma\} = [D][B]\{v_e\} - [D]\{\dot{\epsilon}^s\}$$

節点力

$$\{P\} = \int_{V_e} [B]^T [D] [B] dV \{v_e\} - \int_{V_e} [B]^T [D] \{\dot{\epsilon}^s\} dV + \int_{V_e} g\gamma \{N\} dV$$

塑性変形      焼結収縮      自重

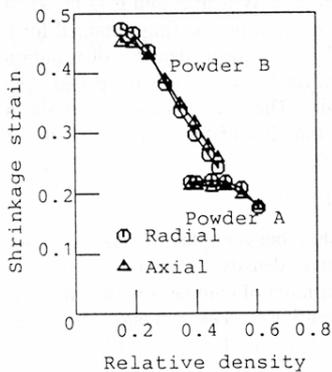
釣合い

- 1) 有限要素法の定式化
- 2) 焼結シミュレーションの例
- 3) 焼結割れの予測
- 4) ネットシェイプ
- 5) 微視的シミュレーション

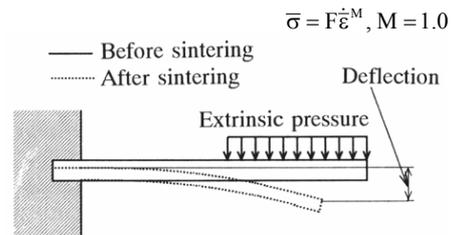
### セラミックス粉末の物性値

	アルミナ A 粉末	アルミナ B 粉末	ジルコニ ア粉末
1次粒径 μm	0.10	0.15	0.05
成形密度 g/cm <sup>3</sup>	2.30	1.60	2.70
焼結密度 g/cm <sup>3</sup>	3.96	3.92	6.00
焼結温 度	1350	1600	1500

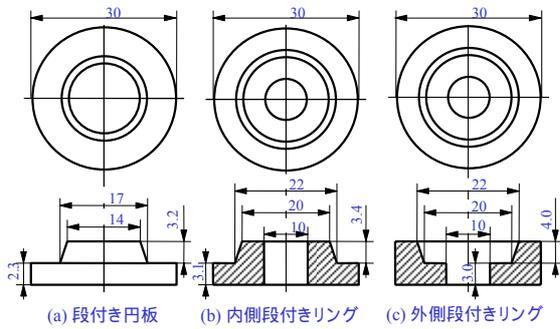
### 焼結収縮ひずみと相対密度の関係



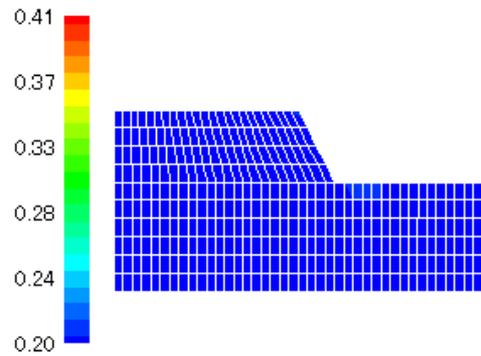
### 焼結時の変形抵抗を測定する曲げ試験



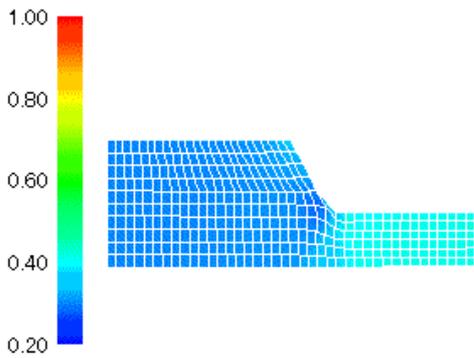
### 焼結実験に用いた圧粉体の形状



### 圧粉成形における相対密度分布



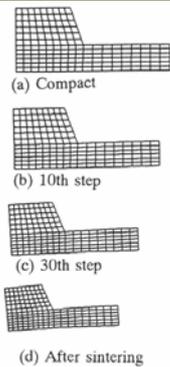
### 焼結における相対密度分布



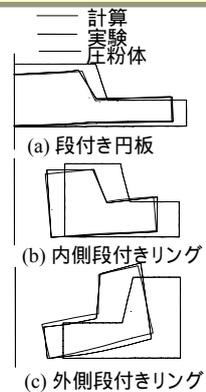
### 圧粉体の相対密度分布



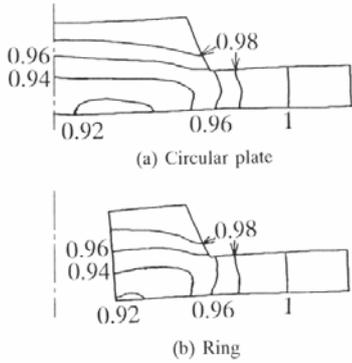
### 密度分布を有する圧粉体の焼結における不均一収縮



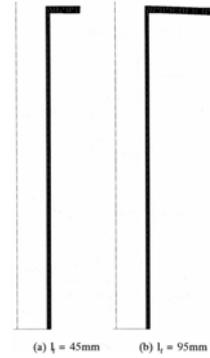
### 焼結体の断面形状



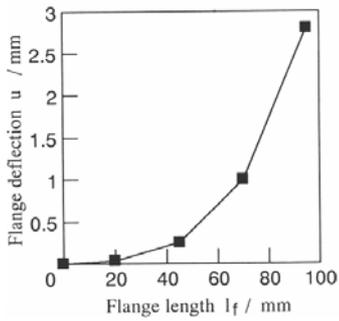
焼結体の密度分布



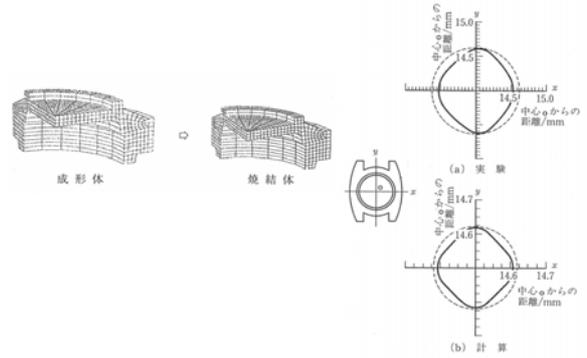
フランジ付き円環の焼結における不均一収縮



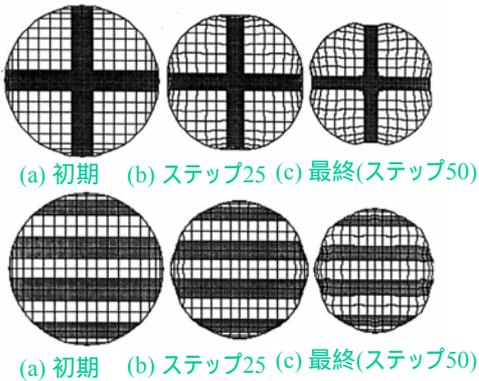
フランジ付き円環の焼結におけるフランジ部のたわみ



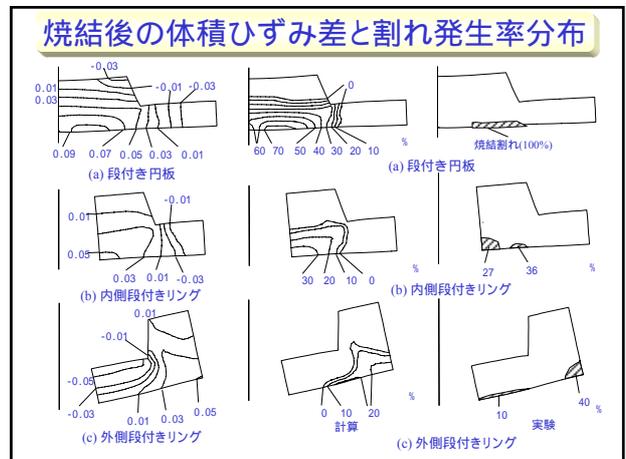
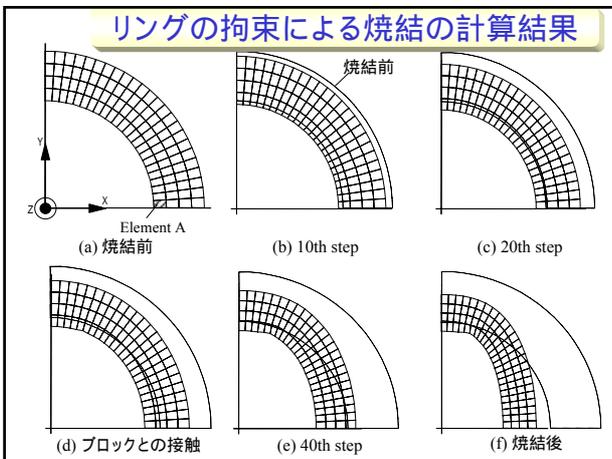
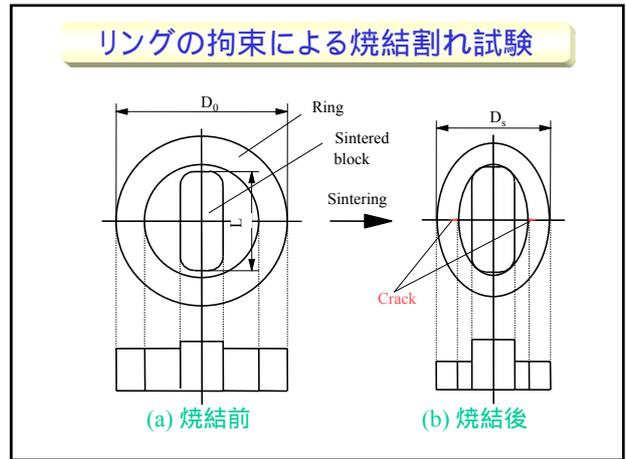
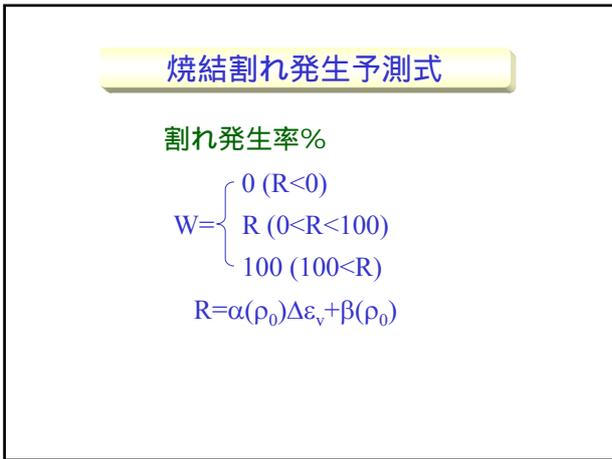
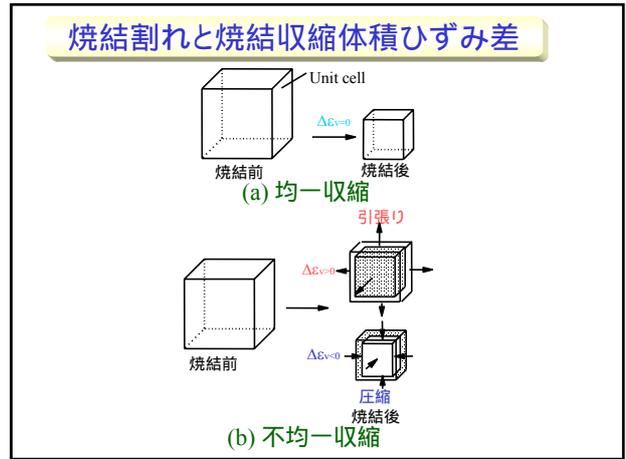
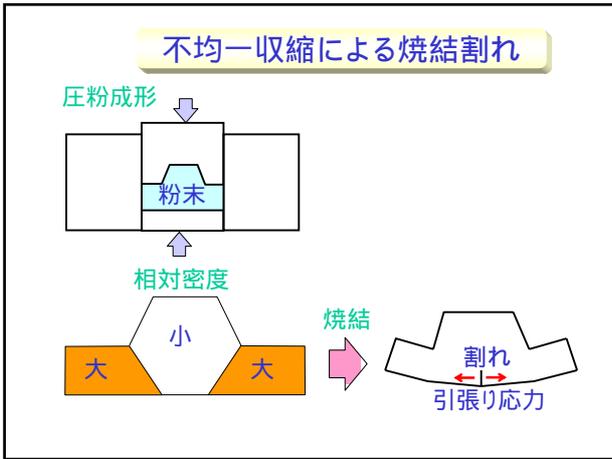
金属粉末射出成形材の焼結



2層粉末材の焼結における不均一収縮

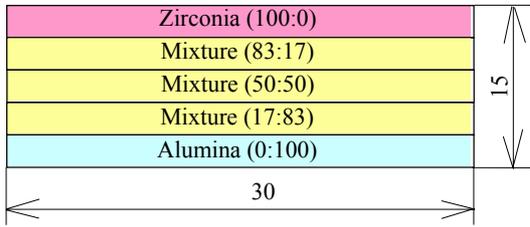


- 1) 有限要素法の定式化
- 2) 焼結シミュレーションの例
- 3) 焼結割れの予測
- 4) ネットシェイプ
- 5) 微視的シミュレーション

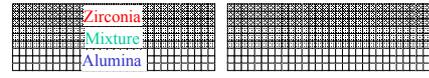


### 傾斜材料の焼結

5層円板



### 3層傾斜材料円板の焼結における収縮挙動



(i) 焼結前

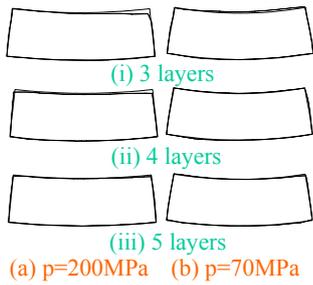


(iii) 焼結後

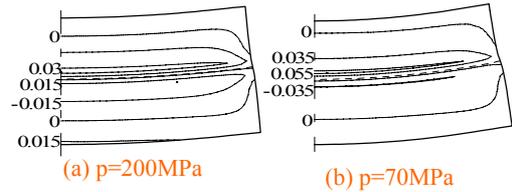


### 傾斜材料円板の焼結後の形状

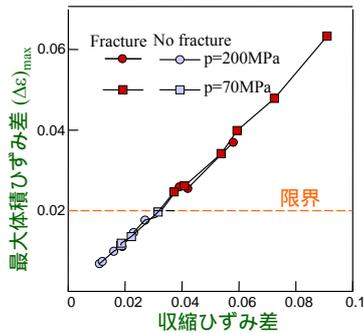
— 計算  
— 実験



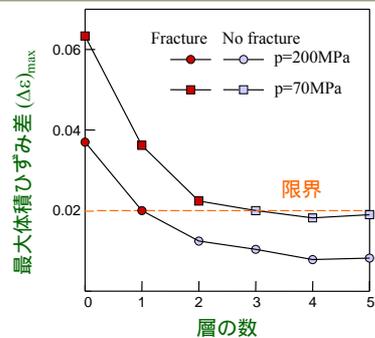
### 2層圧粉体における体積ひずみ差の分布



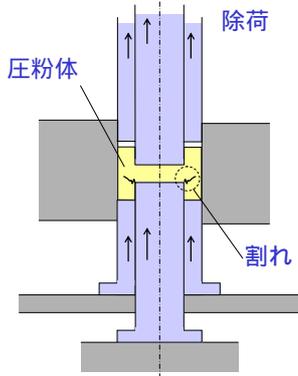
### 焼結割れにおける最大体積ひずみ差と2層の収縮ひずみ差の関係



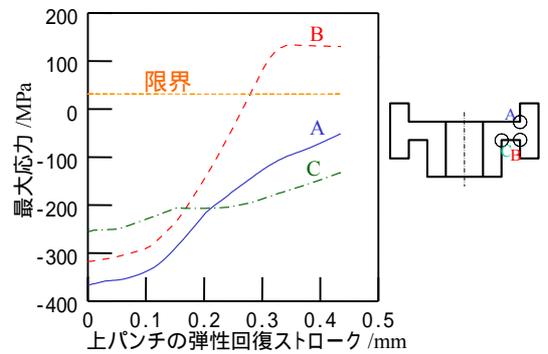
### 多層圧粉体における焼結割れの予測



### 圧粉成形における除荷時の割れ

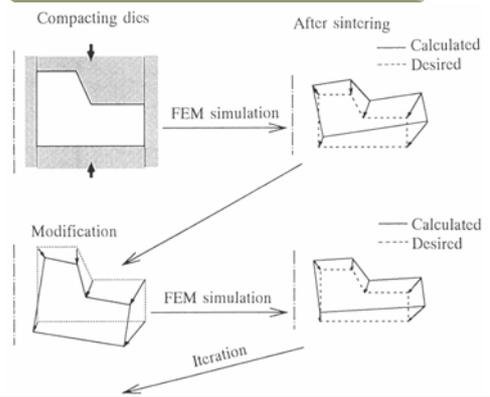


### 除荷時の応力の変化

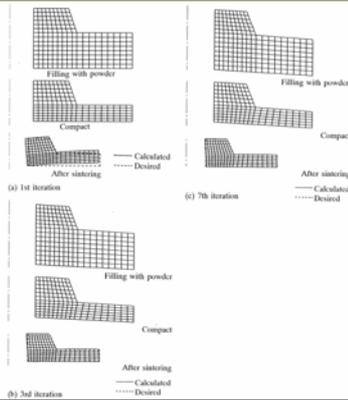


- 1) 有限要素法の定式化
- 2) 焼結シミュレーションの例
- 3) 焼結割れの予測
- 4) ネットシェイプ
- 5) 微視的シミュレーション

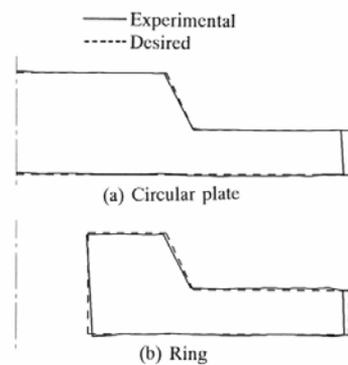
### 焼結体のネットシェイプ成形



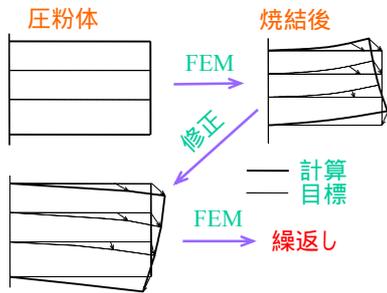
### 圧粉体形状の最適化



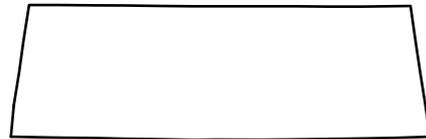
### 最適化された圧粉体の焼結実験



有限要素シミュレーションを用いた  
多層圧粉体の形状の最適化

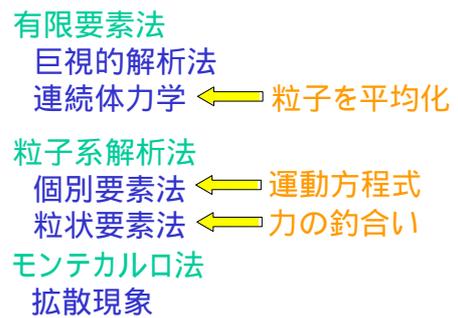


最適化された5層圧粉体の焼結実験結果

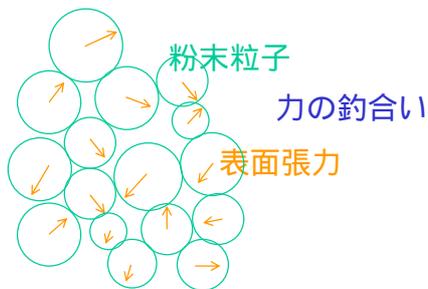


- 1) 有限要素法の定式化
- 2) 焼結シミュレーションの例
- 3) 焼結割れの予測
- 4) ネットシェイプ
- 5) 微視的シミュレーション

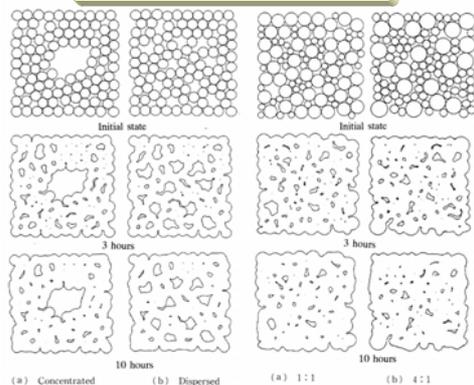
焼結収縮の計算法



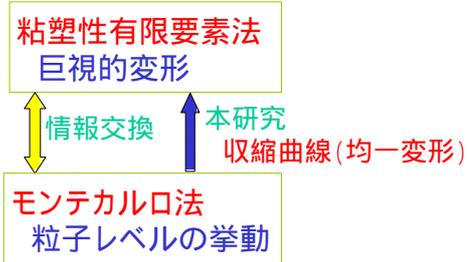
粒状要素法による粉末粒子の焼結



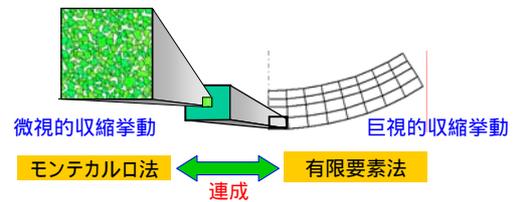
粉末粒子の収縮挙動



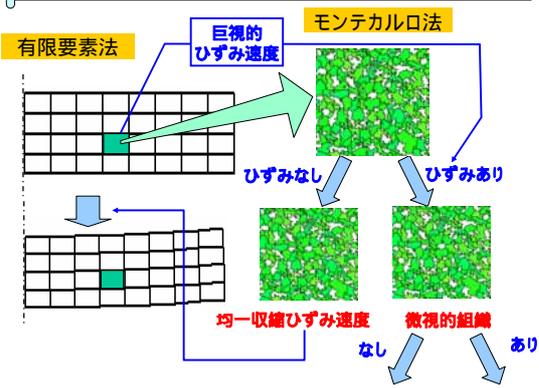
### 粘塑性有限要素法とモンテカルロ法の結合



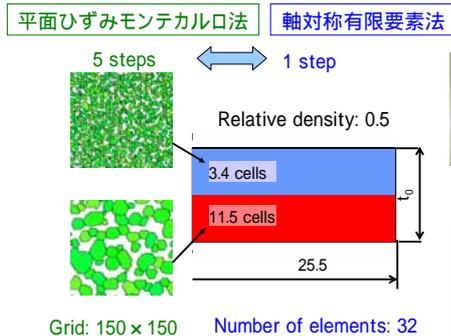
### モンテカルロ法と有限要素法の連成による焼結のマイクロマクロシミュレーション



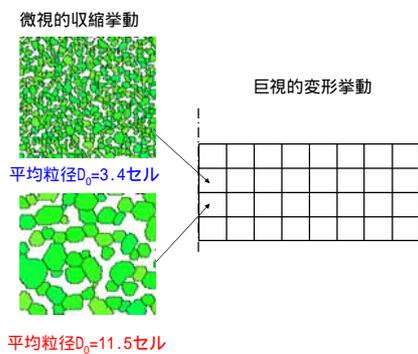
### マイクロ-マクロシミュレーション法



### 2層圧粉円板の焼結シミュレーション



### 計算結果



- 1) 有限要素法の定式化
- 2) 焼結シミュレーションの例
- 3) 焼結割れの予測
- 4) ネットシェイプ
- 5) 微視的シミュレーション