

# 粒状構造物の 設計・維持管理方法の合理化

北海道大学大学院工学研究科  
社会基盤工学専攻地盤工学講座  
地盤解析学分野  
石川達也



# COEプログラムにおける役割

## リサイクル性材料の力学評価

耐久・リサイクル性基盤材料や粒状土材料についての研究を分担．特に粒状材料のライフサイクルにわたる力学性状の変化と予測手法の確立を目指す．

### < 重点的に行なう研究 >

粒状体で構成された構造物が種々の形態の荷重を繰り返し受ける場合の変形・強度特性を解明する．

- 1．人工粒状構造物の進行性破壊に対するライフサイクルコスト評価や合理的な耐震設計法の確立
- 2．災害に強い流域圏システム構築のために必要な地質環境要件の明確化



# 研究実施体制

## 粒状体の数値解析手法の開発

### 不連続体解析手法

- 数値計算方法(DDA・DEM)
- 要素の粒度特性
- 2次元・3次元
- 要素形状
- 摩擦接触機構の構成則

### 連続体解析手法

- 連続・不連続
- 2次元・3次元
- 材料特性の数理モデル

↓ 解析的研究の実問題への応用

## 粒状体の各種試験方法の開発

### 室内要素試験方法

- 試験方法
- 寸法効果
- 計測・制御方法

### 模型試験方法

- 試験方法
- 寸法効果
- 計測・制御方法

### 原位置試験方法

- 計測・制御方法
- 試験結果の解釈

↓ 実験的研究の実問題への応用

解析・実験の妥当性の検証

## 粒状体の変形挙動の現象解明

### 粒状体の変形挙動の解明

- 応力履歴の影響
- 主応力回転の影響
- 粒子破碎の影響
- 繰返し効果
- 速度効果
- 粒度特性の影響
- 粒子形状の影響
- 密度の影響
- 構造異方性の影響
- 石質の影響

### 粒状構造物の変形挙動の解明

- 載荷履歴の影響
- 移動荷重の影響
- 粒子破碎の影響
- 繰返し効果
- 速度効果
- 粒度特性の影響
- 粒子形状の影響
- 密度の影響
- 構造異方性の影響
- 石質の影響

ミクロからマクロへ



# 地盤解析学分野の研究課題

## ◆ 粒状体の数値解析手法の開発

- ◆ 粒状地盤材料のせん断試験を模擬した不連続体解析による数値実験
- ◆ 累積損傷度理論を用いたバラスト軌道の繰返し塑性変形挙動解析

## ◆ 粒状体の各種試験方法の開発

- ◆ 弾性波探査による破砕性粒状体の変形特性の評価に関する研究
- ◆ 火山灰地盤の液状化被害と火山灰土の動的強度・変形特性に関する研究
- ◆ 破砕性粒状体の力学特性に及ぼす凍結・融解履歴の影響評価に関する研究
- ◆ 粒状地盤材料の力学特性に及ぼす供試体寸法の影響評価に関する研究
- ◆ 碎石の繰返し塑性変形挙動に及ぼす主応力回転の影響評価に関する研究
- ◆ バラスト軌道の耐震性能評価に関する実験的研究

## ◆ 粒状体の変形挙動の現象解明

- ◆ 粒状体の強度・変形・破砕特性に及ぼす応力系の影響評価に関する研究
- ◆ 主応力回転を受ける粒状地盤材料のせん断挙動に関する解析的研究
- ◆ 移動荷重載荷時のバラスト軌道の繰返し変形挙動に関する実験的研究
- ◆ 不連続体解析によるバラスト軌道の繰返し塑性変形挙動解析
- ◆ 粒状地盤材料の凍結・融解現象のモデル化に関する研究



# 研究の具体例紹介

- 移動荷重載荷時のバラスト軌道の繰返し変形挙動に関する実験的研究
- 粒状構造物の変形挙動に対する粒子形状・粒度分布の影響評価に関する研究
- 粒状地盤材料のせん断試験を模擬した不連続体解析による数値実験



# 研究の具体例紹介

- 移動荷重載荷時のバラスト軌道の繰返し変形挙動に関する実験的研究
- 粒状構造物の変形挙動に対する粒子形状・粒度分布の影響評価に関する研究
- 粒状地盤材料のせん断試験を模擬した不連続体解析による数値実験



# 研究の背景 (主応力回転の影響)

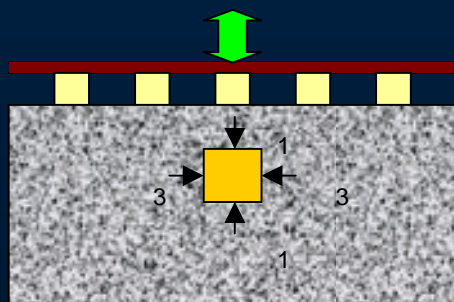
バラスト軌道の効率的な維持・管理を行うためには列車荷重載荷時の道床バラストの変形特性を解明する必要がある

## 従来の試験方法

- 模型試験: 定点載荷試験
- 要素試験: 三軸圧縮試験で現象を再現

### 模型試験

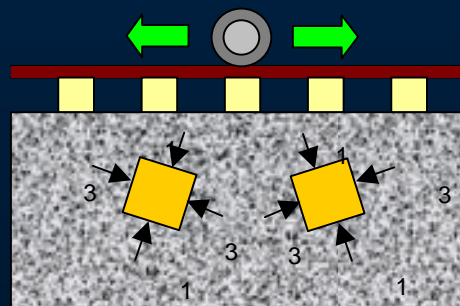
載荷・除荷による荷重増減のみ



定点載荷

### 実現象

車輪の移動による荷重増減と主応力方向の変化

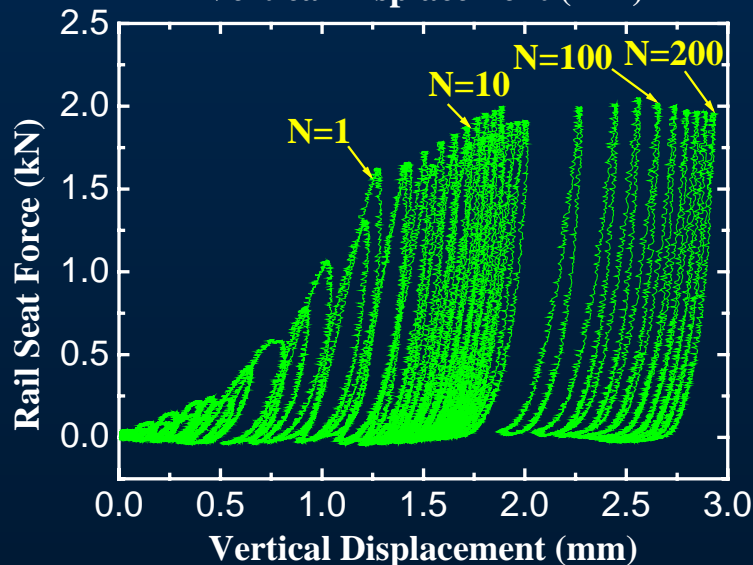
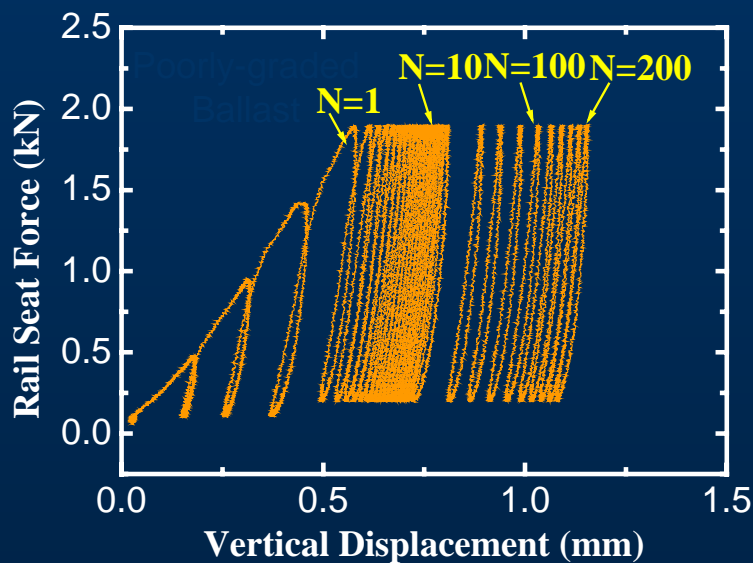
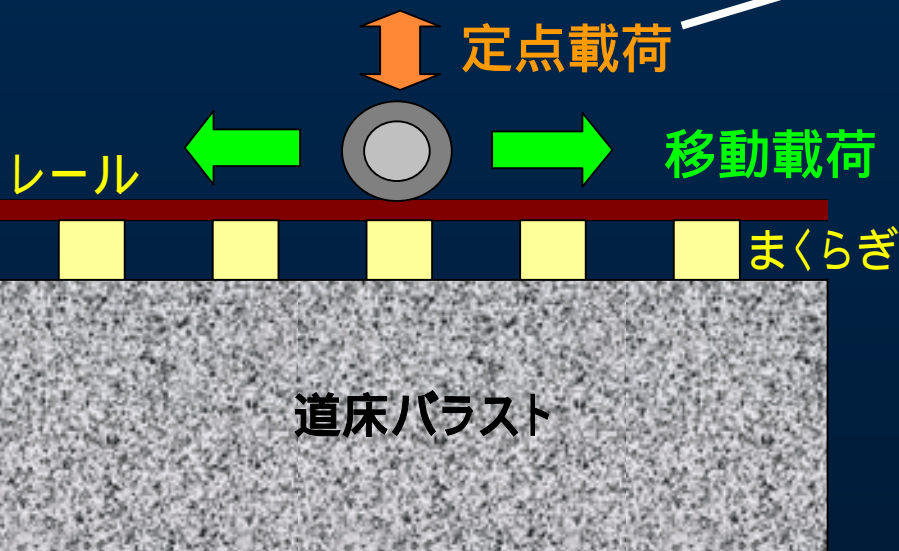


移動載荷

# 研究の背景 (主応力回転の影響)

## 移動载荷試験

列車荷重による主応力方向の変化を考慮した模型試験として移動载荷試験を実施

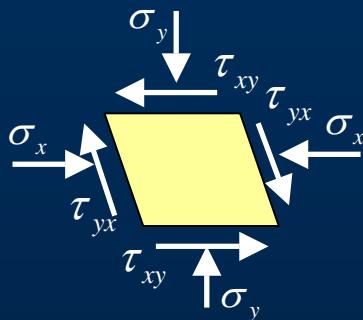
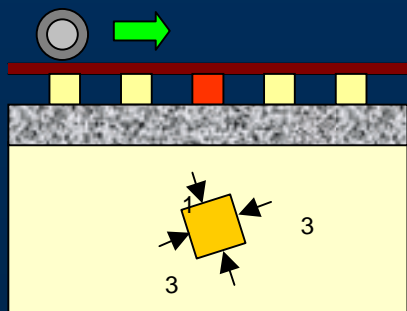


要素の段階で異なる可能性があるのでは？

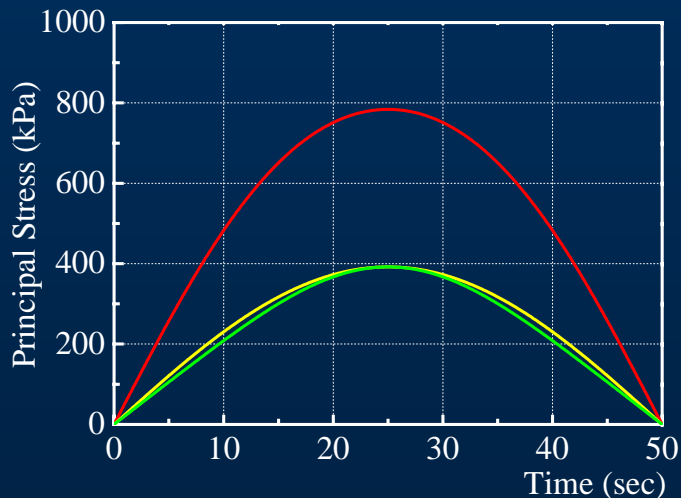


# 車輪通過現象とは？

車輪が接近する

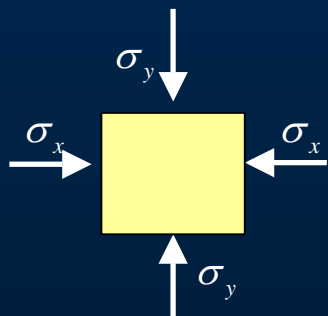
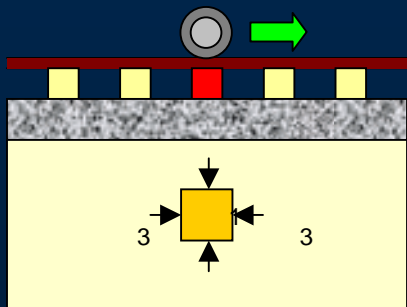


最大・最小主応力

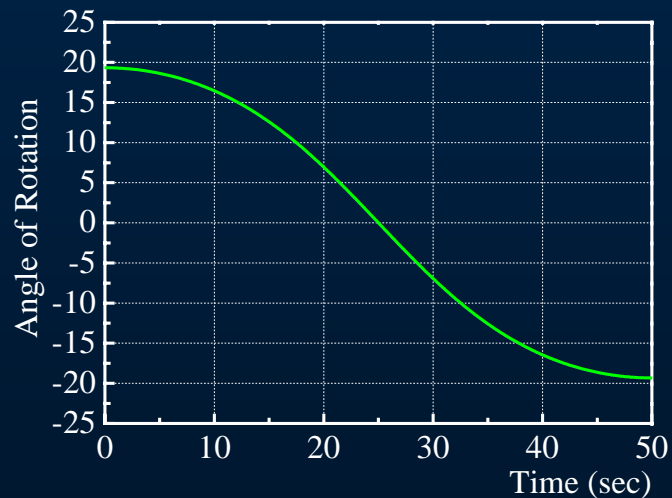


まくらぎ直上を車輪が通過時に最大・最小主応力の差が最大

車輪が直上を通過

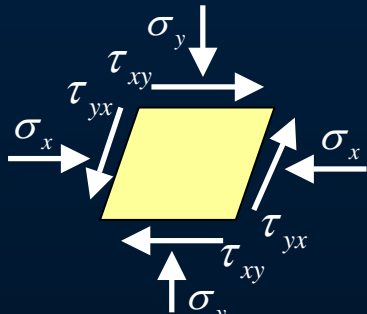
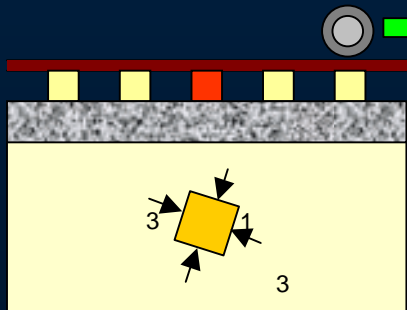


主応力回転角



まくらぎ直上を車輪が通過時に回転角が0°

車輪が遠ざかる



# 研究の概略

## 研究目的

粗粒材料を対象とした主応力回転の影響評価に適したより現実に近い簡素な要素試験機を開発し、様々な条件下での変形挙動を解明する。

## 研究内容

### 前提条件

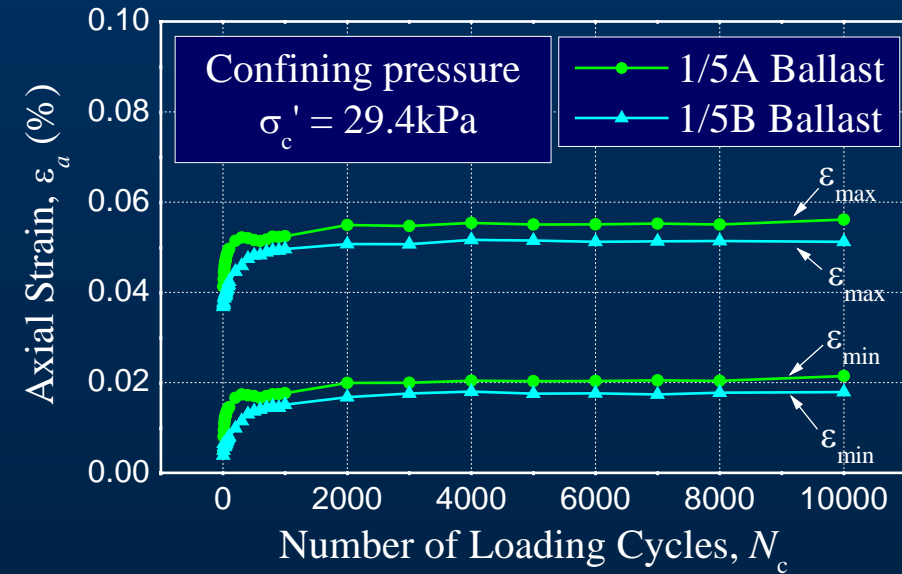
- 主応力回転の影響評価に適した要素試験
- 平面ひずみ状態を再現可能な要素試験

ねじり単純せん断試験機として  
多重リングせん断試験機の試作

→ 三軸圧縮試験結果との比較により  
主応力回転の影響を評価



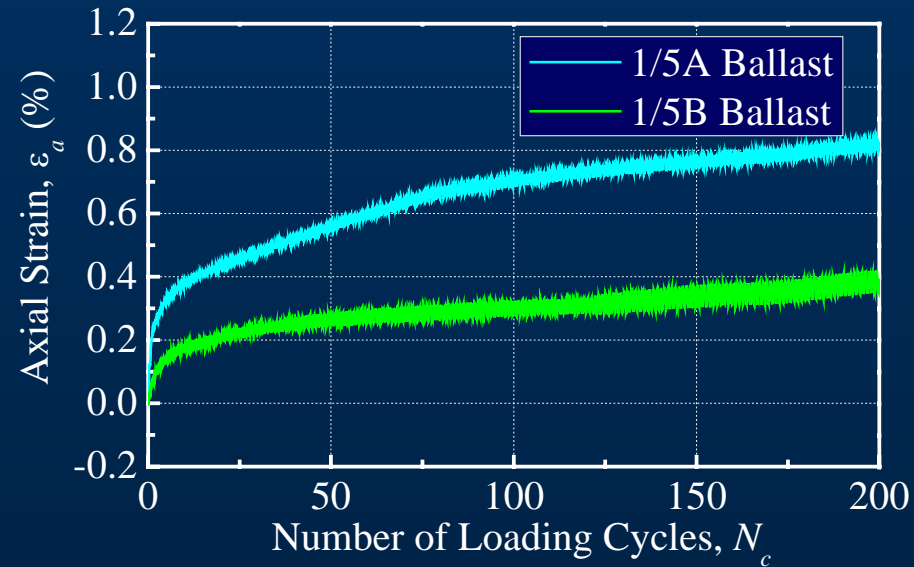
# 試験結果 (軸ひずみ ~ 繰返し载荷回数)



## 三軸圧縮試験結果

- 拘束圧一定・応力振幅一定の繰返し三軸圧縮試験結果と多重リングせん断試験結果には傾向の違いが見られることから、主応力回転は道床バラストの繰返し塑性変形挙動に強い影響を及ぼす。
- 主応力回転の影響を考慮した場合、粒度分布の差異による供試体の塑性変形挙動の違いが顕著に表れる。

➔ 試作した多重リングせん断試験は、列車荷重繰返し作用時の粒状構造物の変形挙動評価に適した要素試験であると考えられる。



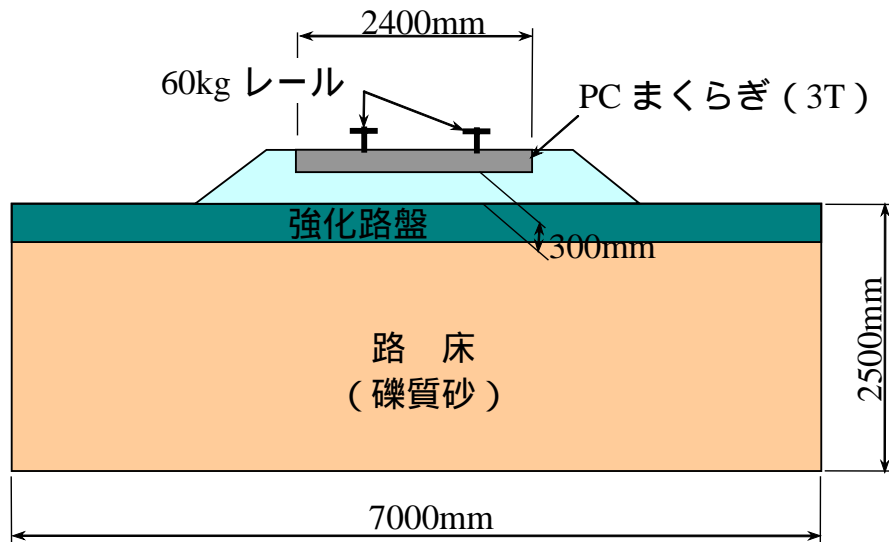
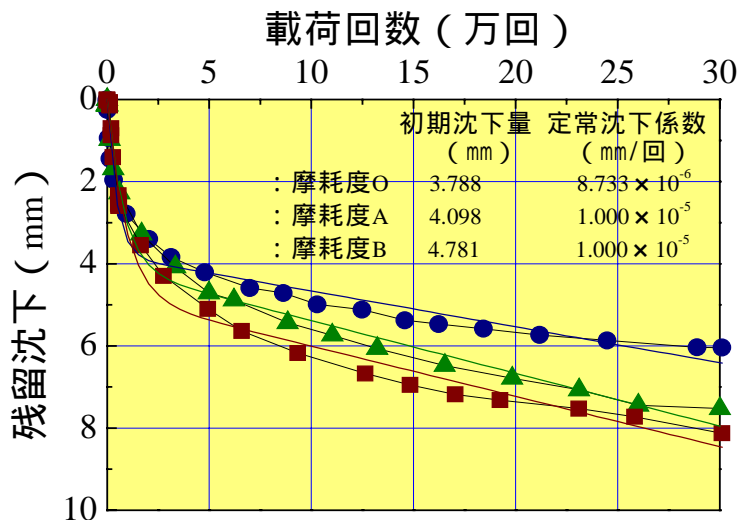
## 多重リングせん断試験結果

# 研究の具体例紹介

- 移動荷重載荷時のバラスト軌道の繰返し変形挙動に関する実験的研究
- 粒状構造物の変形挙動に対する粒子形状・粒度分布の影響評価に関する研究
- 粒状地盤材料のせん断試験を模擬した不連続体解析による数値実験



# 研究の背景 (軌道模型繰返し载荷試験)



## 摩耗の影響



摩耗度 O



摩耗度 A



摩耗度 B

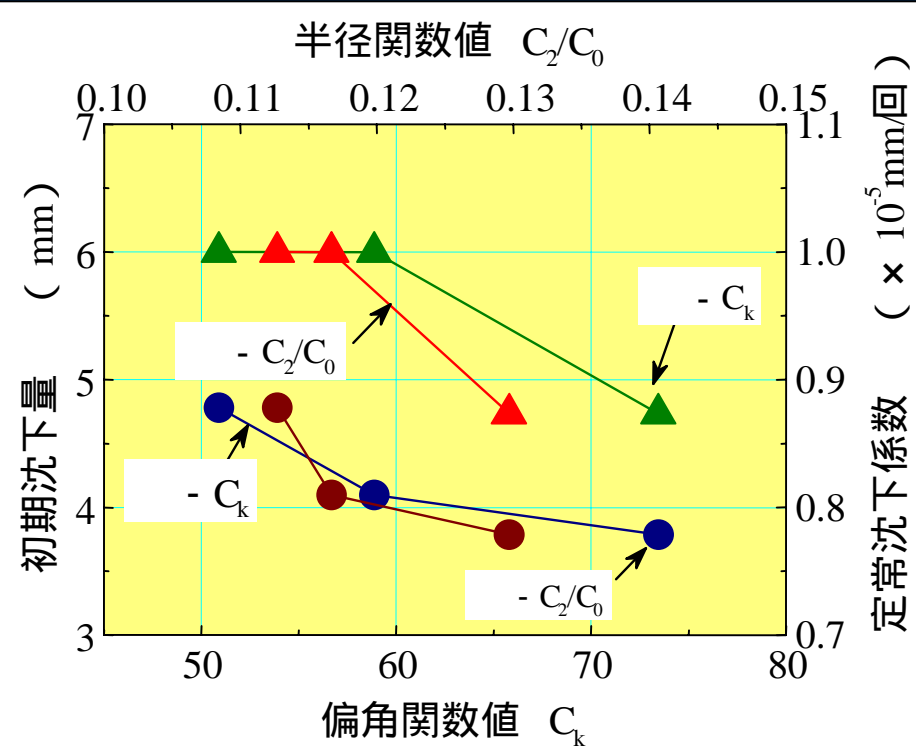
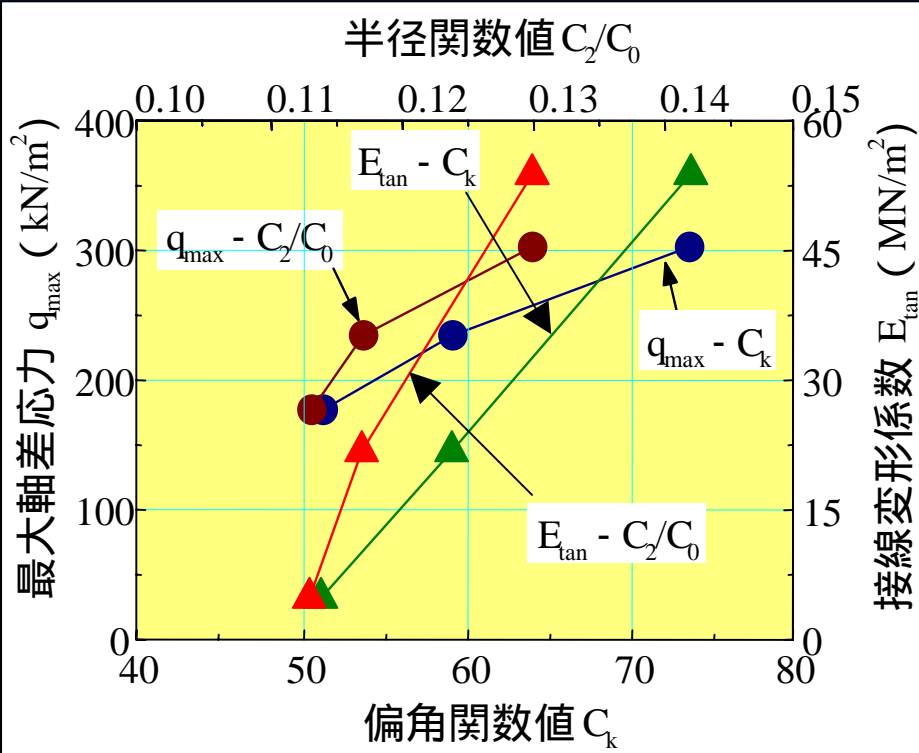


(鉄道総研の実験結果を引用)

# 研究の背景 (粒子形状と強度・変形特性)

## 三軸試験結果

## 模型軌道試験結果



(鉄道総研の実験結果を引用)

- 粒子形状は、道床バラストの強度・変形特性、軌道の繰返し荷重による沈下特性に影響を与える。
- 粒子の稜角性(偏角関数値)、粒子の球形度(半径関数値)はともに有意な形状評価手法である。



# 研究の概略

## 研究目的

粒状構造物の変形挙動予測に適した粒状体の粒状性を考慮した数値解析モデルとして、不連続体解析手法の適用方法に関する検討を行い、様々な条件下での粒状構造物の変形挙動を解明する。

## 研究内容

### 前提条件

- 複雑な粒子形状を表現可能な解析手法
- 粒子の移動傾向をトレース可能な解析手法



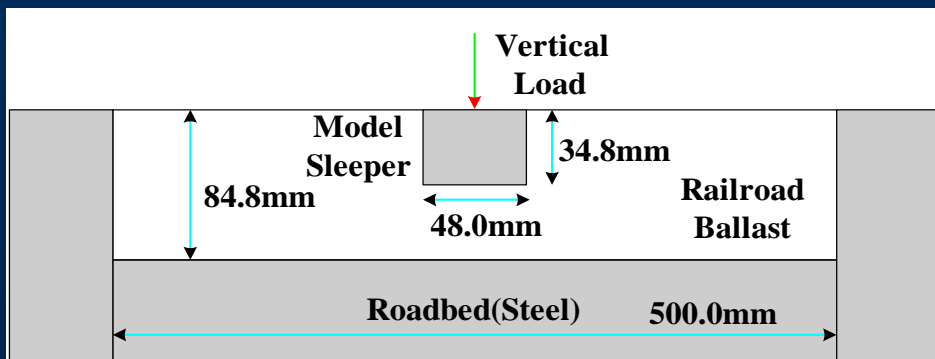
不連続変形法 (DDA, Discontinuous Deformation Analysis) によりバラスト軌道の繰返し定点載荷試験をシミュレーション



解析結果と試験結果との比較により、不連続体解析の適用性を検証

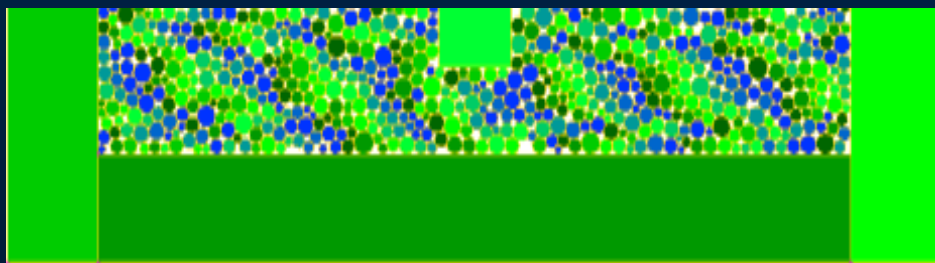
# バラスト道床の変形挙動解析

## 1/5模型バラスト軌道載荷試験



模型軌道：2次元平面ひずみ状態（線路縦断方向を想定）  
載荷方法：模型まくらぎに正弦波鉛直荷重を繰返し載荷

## 1/5模型軌道のDDA解析



解析条件：2次元平面ひずみ解析  
解析パラメーター：要素特性  $\rho, E, \nu$ , 接触特性  $C_\mu, \phi_\mu$

## 解析上の粒子形状の評価は？

### ● 粒度分布の影響評価

#### ✓ 砕石の粒度分布を考慮

- 粗粒な粒度分布
- 細粒な粒度分布

### ● 粒子形状の影響評価

#### ✓ 稜角性

- 正5角形, 正6角形
- 正8角形, 正20角形

#### ✓ 球形度

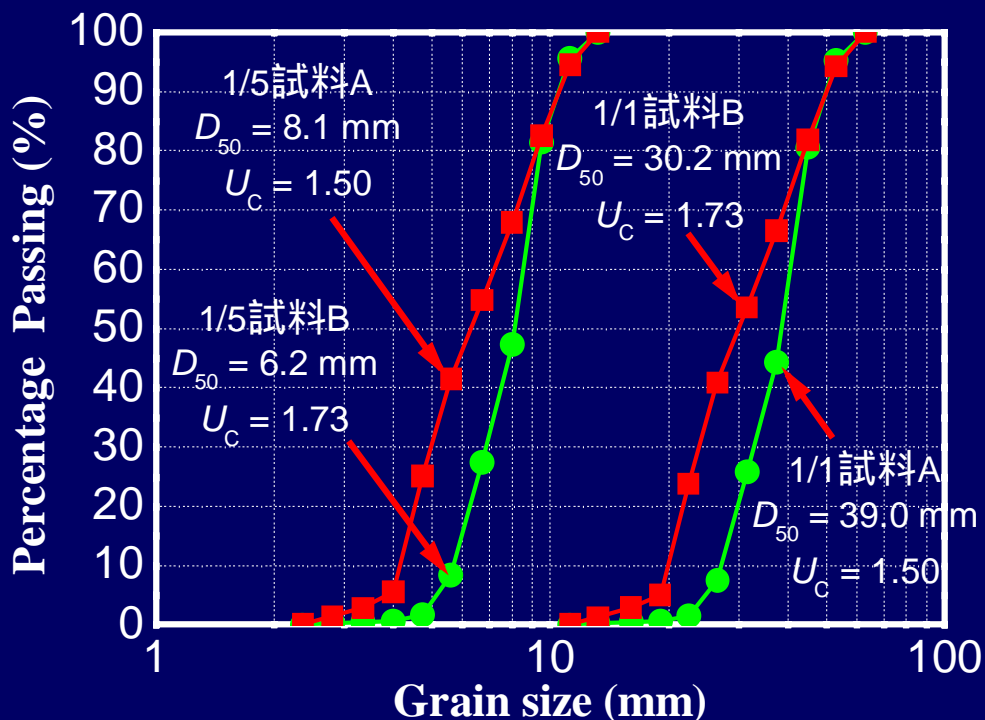
- 正多角形
- 実粒子の扁平率を考慮した多角形





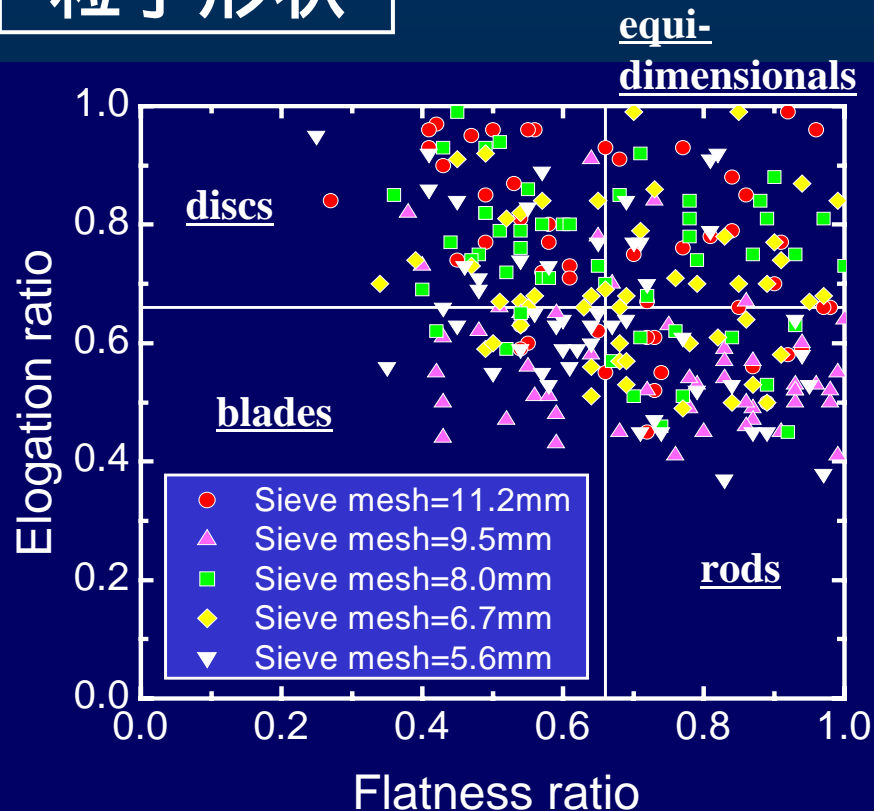
# 粒子形状・粒度分布特性

## 粒度分布



使用基準内で最も細粒・粗粒な道床碎石の1/5相似粒度(粗粒な方を粒度分布A, 細粒な方を粒度分布B)

## 粒子形状

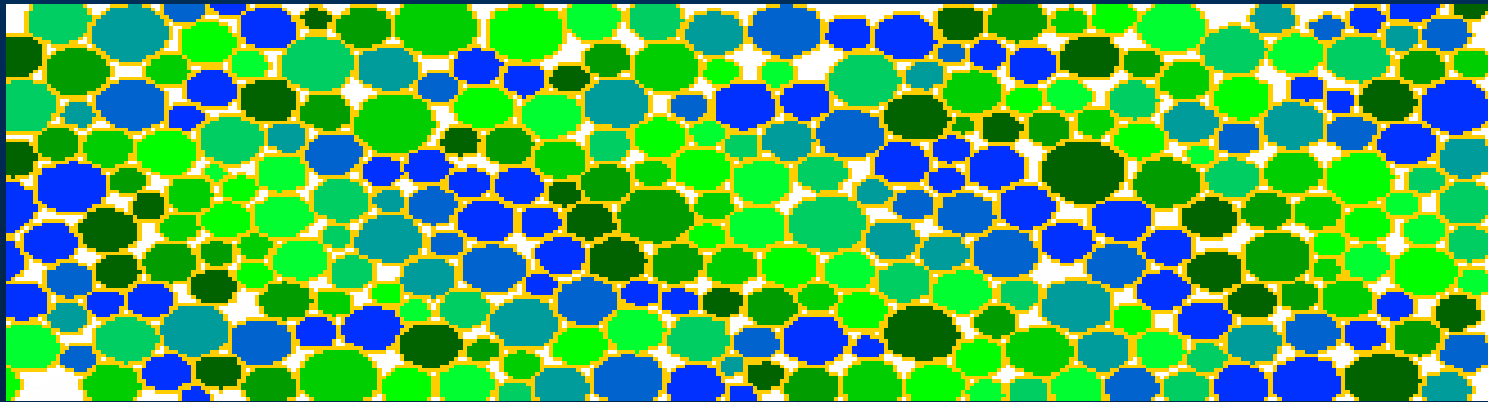


Zinggの方法による道床碎石の形状分類結果

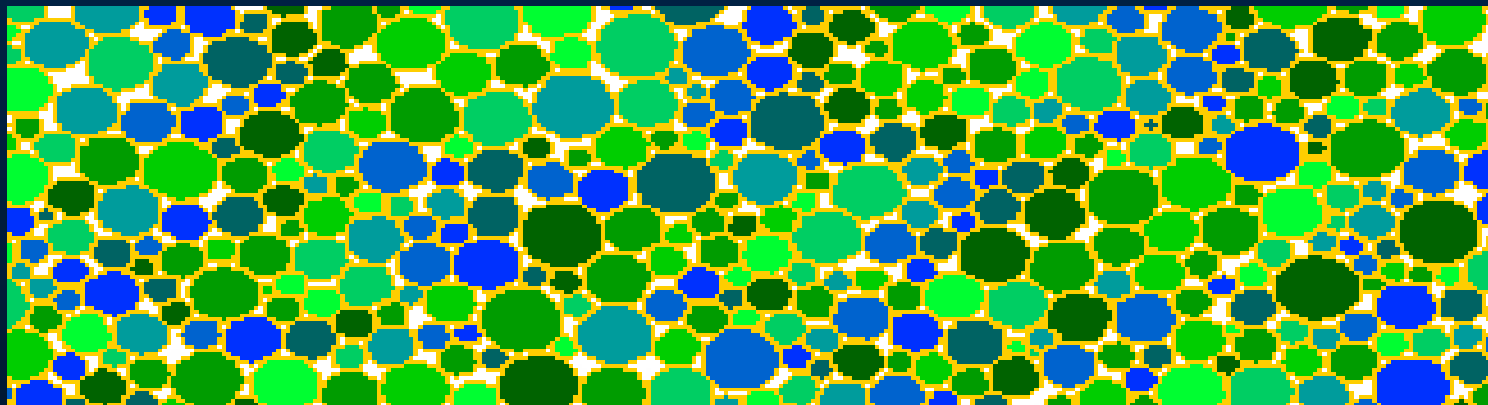


# 粒度分布による解析モデルの差異

粒度分布Aの初期解析モデル拡大図



粒度分布Bの初期解析モデル拡大図



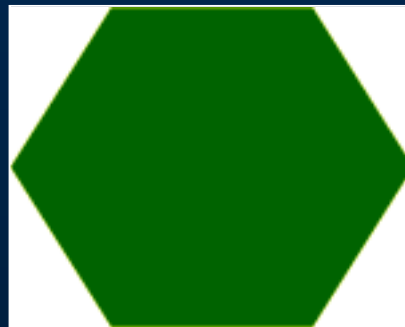
# 粒子形状の差異による影響

- 道床ブロックの形状を3種で表現
- 正20角形と正六角形の比較より稜角性
- 正六角形と六角形(伸張)の比較より球形度

正20角形



正六角形



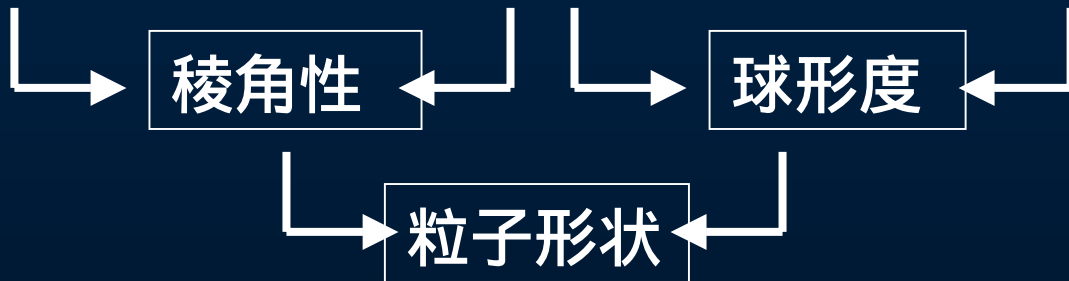
六角形(伸張)



稜角性

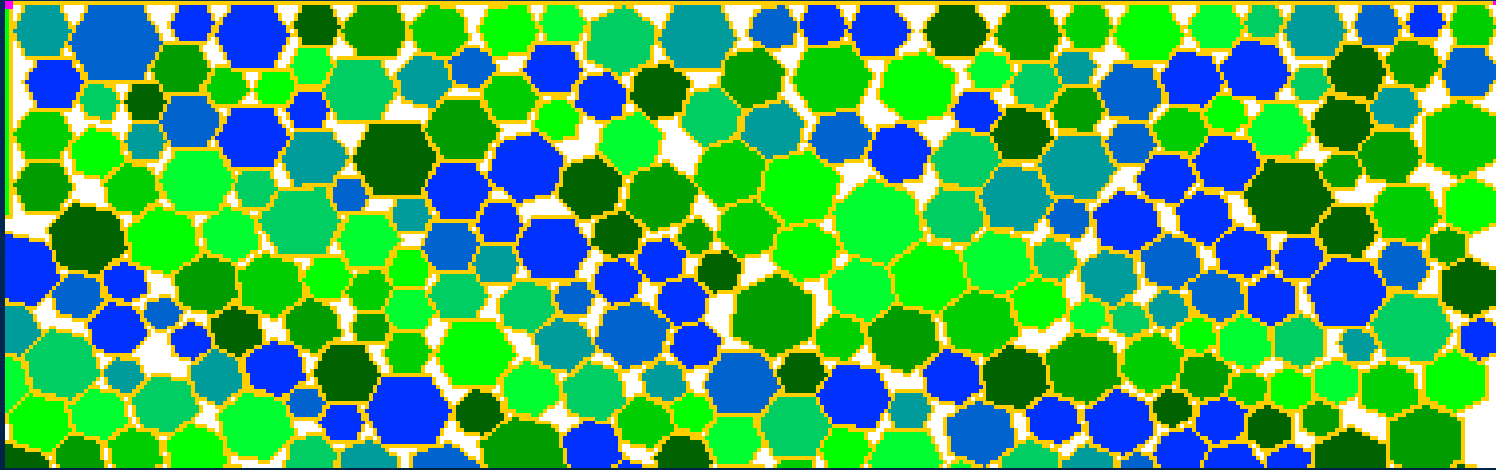
球形度

粒子形状

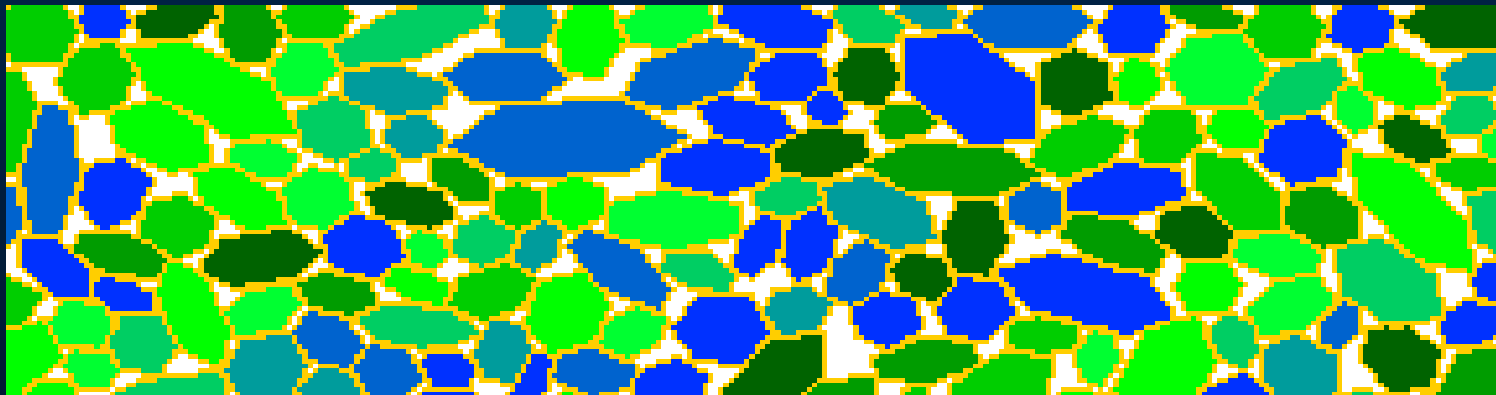


# 粒度分布による解析モデルの差異

正六角形の初期解析モデル拡大図



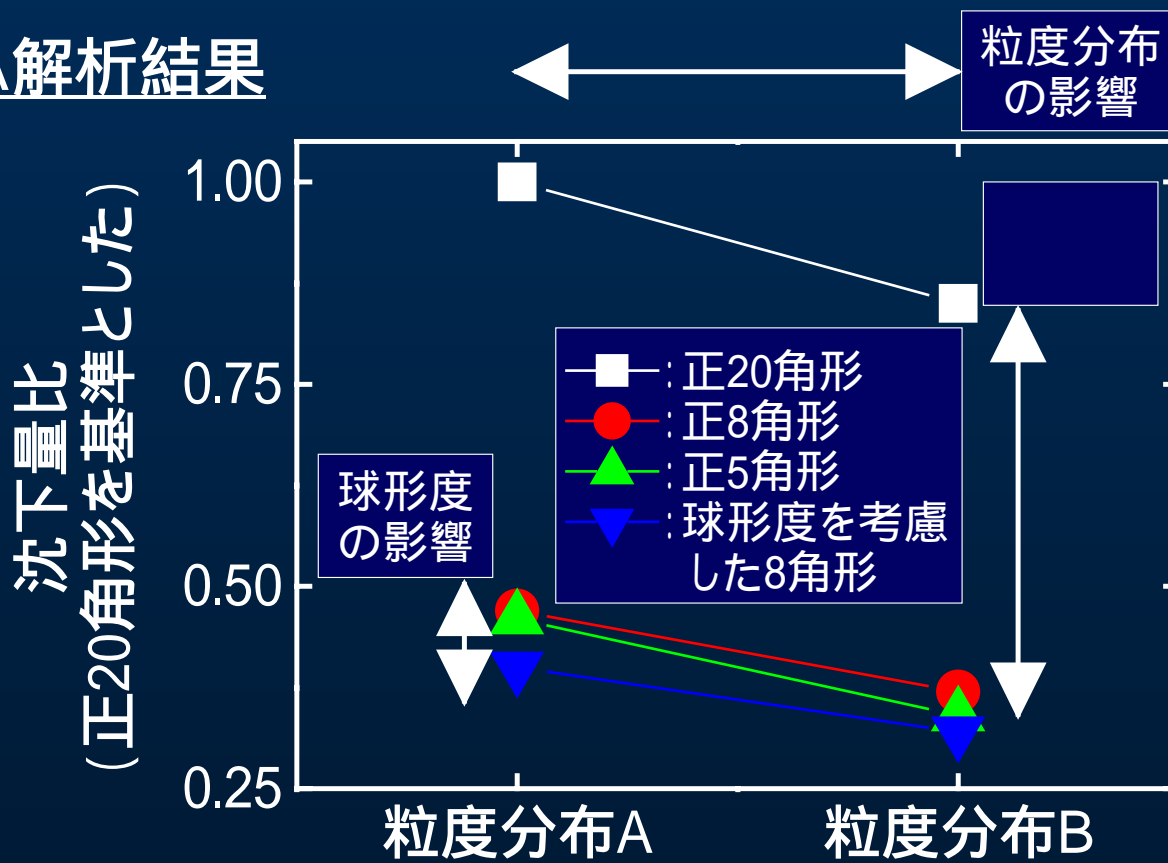
六角形の初期解析モデル拡大図



# 粒子形状・粒度分布の影響評価

粒子形状・粒度分布で沈下量は異なる？

DDA解析結果



定性的な

傾向は試

験結果と  
一致

正20角形—粒度分布Aの残留変位量を1としたもの

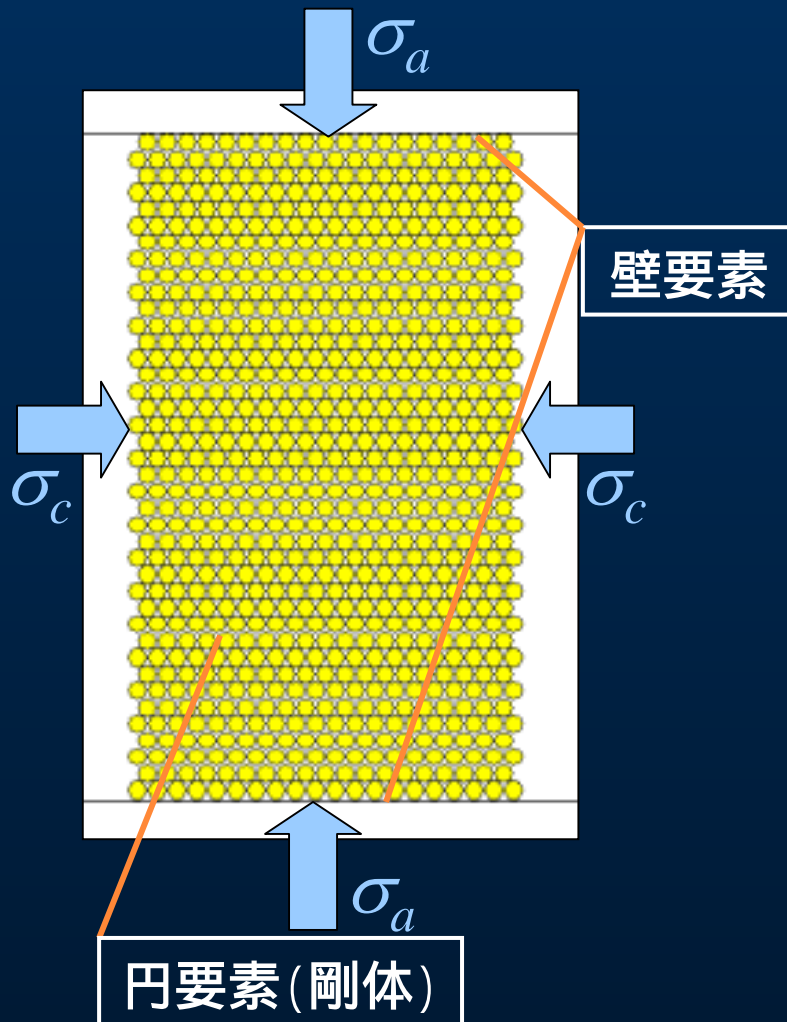


# 研究の具体例紹介

- 移動荷重載荷時のバラスト軌道の繰返し変形挙動に関する実験的研究
- 粒状構造物の変形挙動に対する粒子形状・粒度分布の影響評価に関する研究
- 粒状地盤材料のせん断試験を模擬した不連続体解析による数値実験



# 研究の背景 (2次元解析・3次元解析)



## 三軸圧縮試験のシミュレーション

- ガラスビーズを構成要素と仮定した不連続体解析モデル
- 2次元円要素解析による粒状材料の二軸圧縮試験

## 解析上の問題点は？

- 3次元問題に対する2次元近似の有効性は？
- 試験供試体の粒子配列をどのようにモデル化する？

2次元解析では実現現象のモデル化方法に課題があり、解の妥当性が保証されない。



# 研究の概略

## 研究目的

3次元粒状体解析を粒状地盤材料のせん断挙動に適用し、モデルの妥当性・適用限界を明らかにするとともに、様々な条件下での数値実験を通して粒状構造物の変形挙動をミクロ的に解明する。

## 研究内容

### 前提条件

- 3次元的な粒子配列を表現可能な解析手法
- 粒子の移動傾向をトレース可能な解析手法



粒状地盤材料の直接・間接せん断試験を**3次元個別要素法 (DEM, Distinct Element Method)**によりシミュレーション



解析結果と試験結果との比較により、不連続体解析モデルの妥当性・適用限界を検証



# 事例研究の具体例(1)

## 3次元粒状体個別要素法の間接せん断試験への適用

### ガラスビーズの三軸圧縮試験

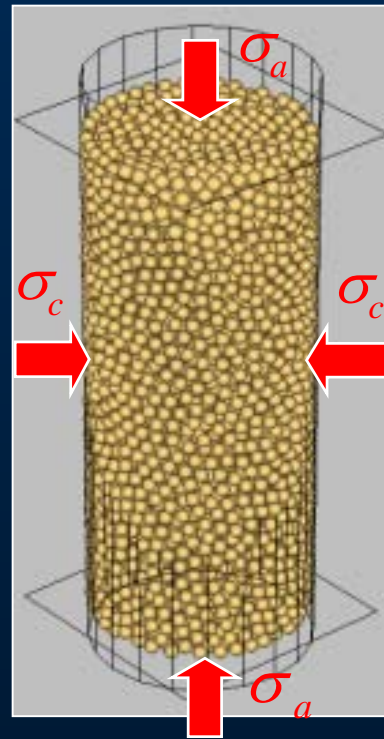


(試験前)



(試験後)

### 粒状体解析による数値実験



(解析前)

?

(解析後)

# 事例研究の具体例(2)

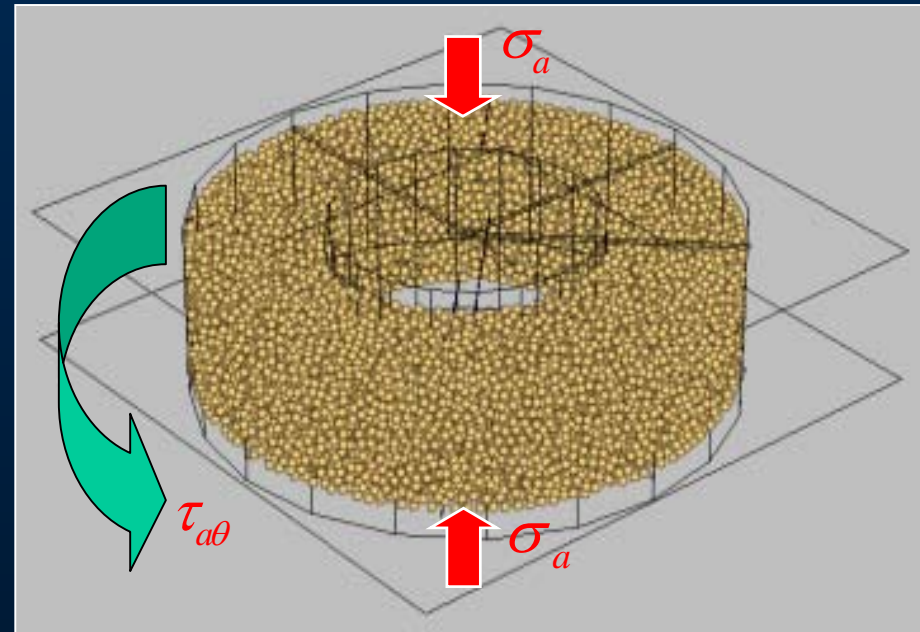
## 3次元粒状体個別要素法の直接せん断試験への適用

### ガラスビーズの多重リングせん断試験



(試験前)

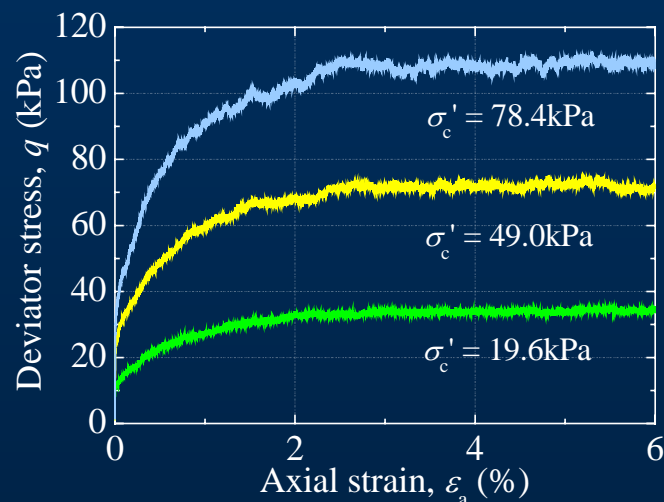
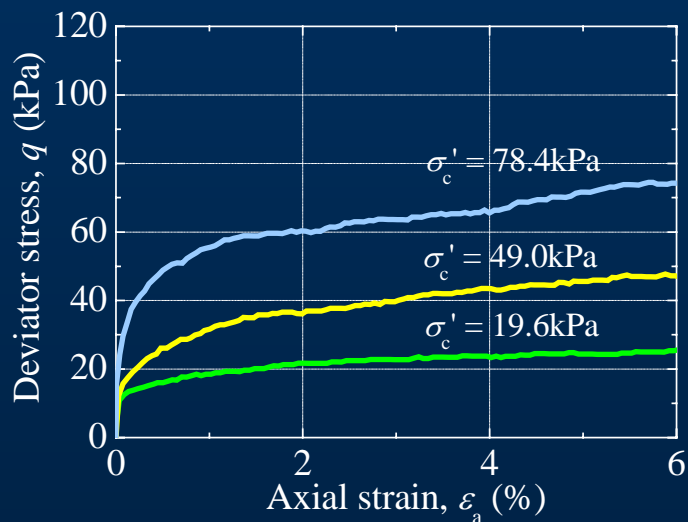
### 粒状体解析による数値実験



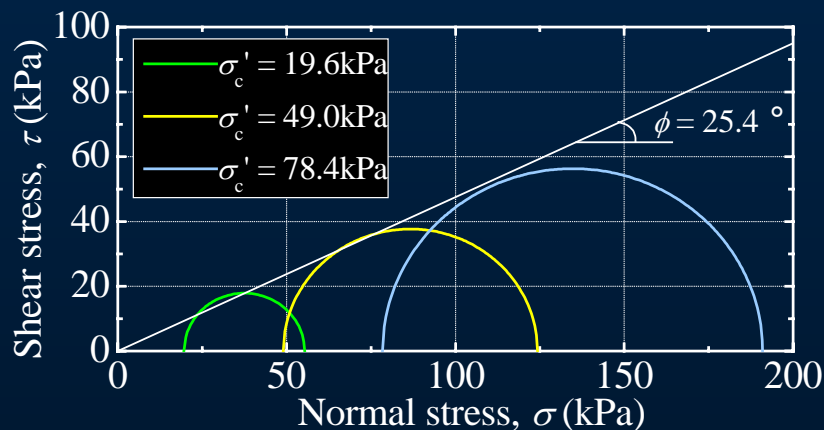
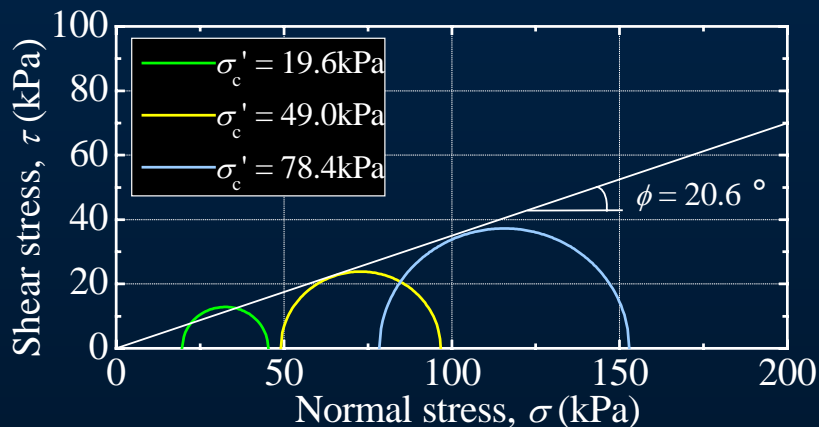
(解析前)

# 試験結果 (三軸圧縮試験)

## 応力～ひずみ関係の比較



## モールの応力円の比較

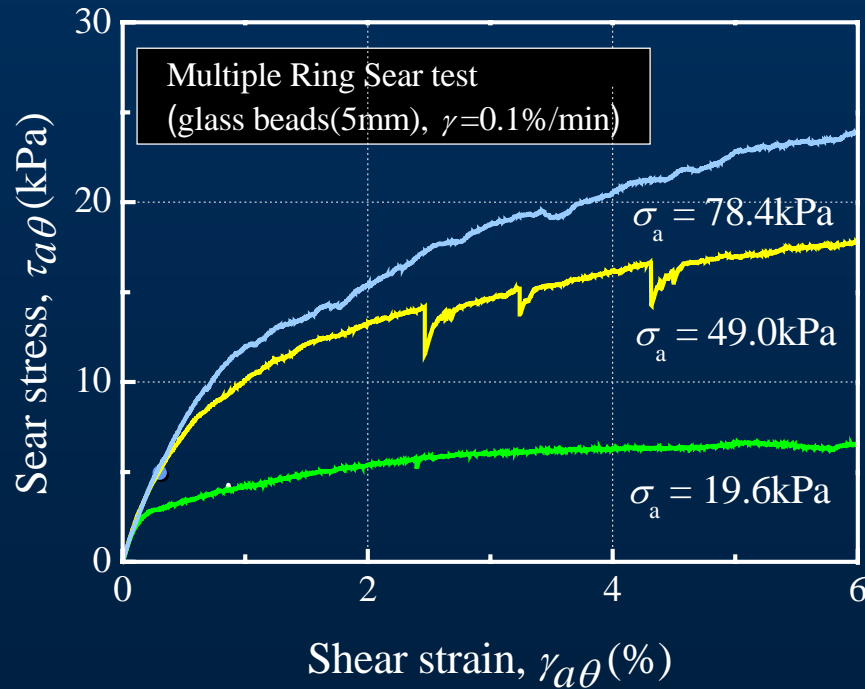


(a) 三軸試験結果

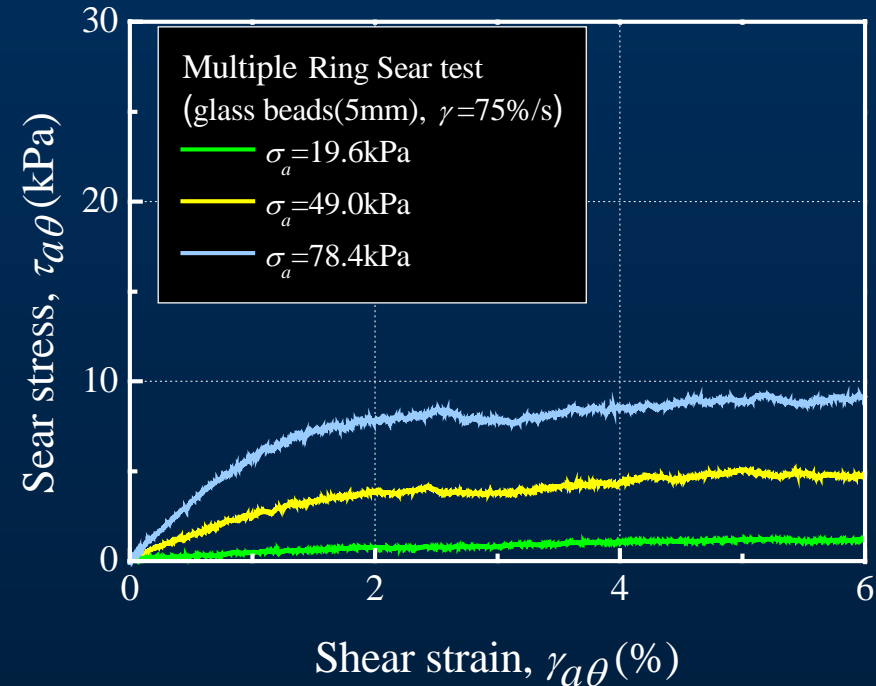
(b) 解析結果

# 試験結果 (多重リングせん断試験)

## 応力～ひずみ関係の比較



(a) リングせん断試験結果



(b) 解析結果

- 粒状地盤材料の三軸圧縮試験や多重リングせん断試験をシミュレーションした結果, 解析精度には問題が残るものの, せん断挙動の定性的な側面は再現することができた.
  - ➔ 3次元粒状体解析は, 粒状構造物のせん断挙動予測に適した数値解析モデルであると考えられる.

# COEプログラムへの貢献

< 重点的に行なう研究 >

1. 粒状体の数値解析手法の開発
2. 粒状体の各種試験方法の開発

➡ 粒状体で構成された構造物が種々の形態の荷重を繰り返し受け受ける場合の変形挙動を、室内試験・模型実験・数値解析により総合的に検討する。

Advanced Step

## リサイクル性材料の力学評価

耐久・リサイクル性基盤材料や粒状土材料についての研究を分担。特に粒状材料のライフサイクルにわたる力学性状の変化と予測手法の確立を目指す。

➡ **粒状構造物の設計・維持管理方法の合理化**

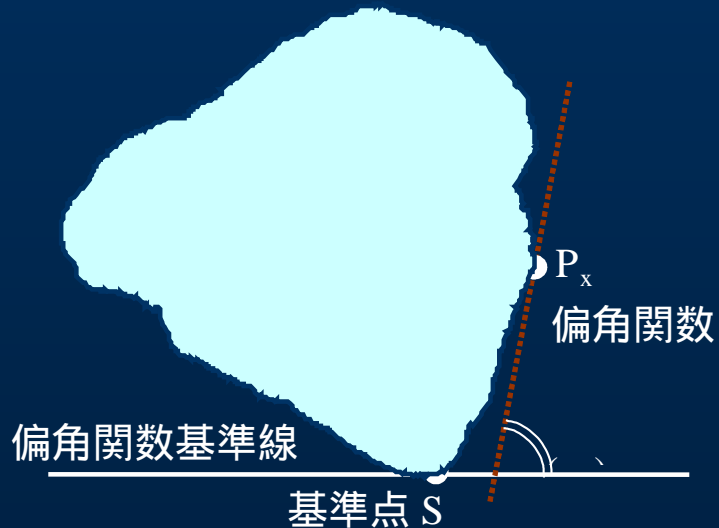


END



# 粒子形状の評価方法

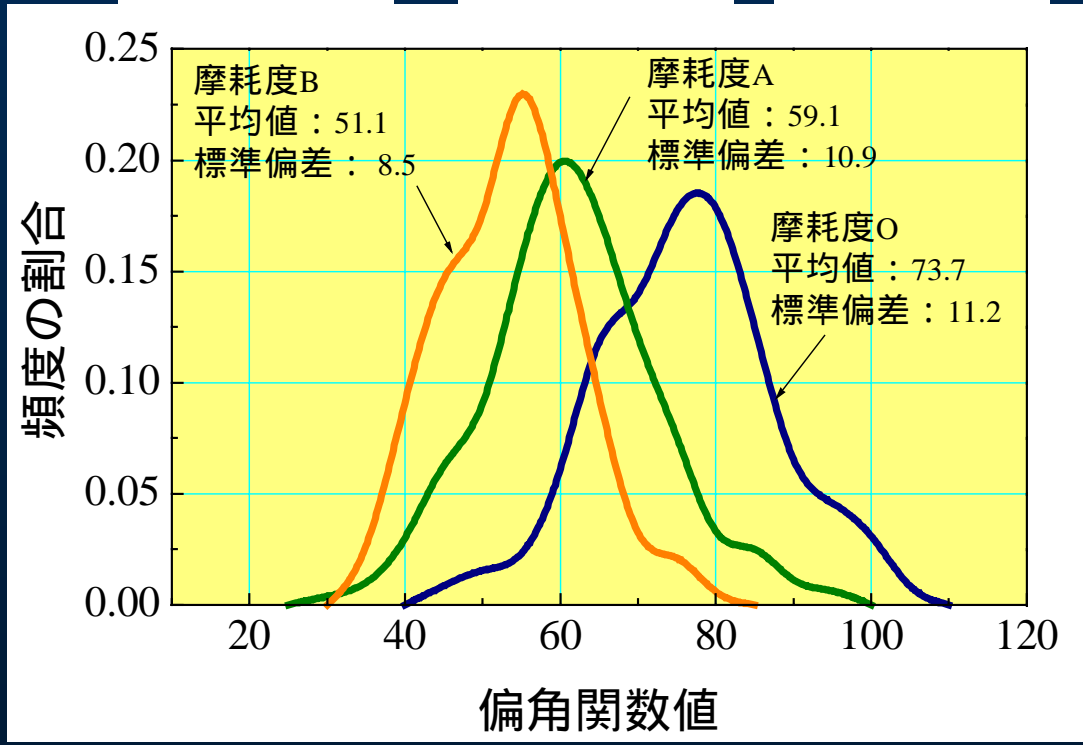
粒子の稜角性を表す指標は？



$$\theta_{N(x)} = b_0/2 + \sum_{k=1}^{\infty} \{a_k \sin(2\pi kx/L) + b_k \cos(2\pi kx/L)\}$$

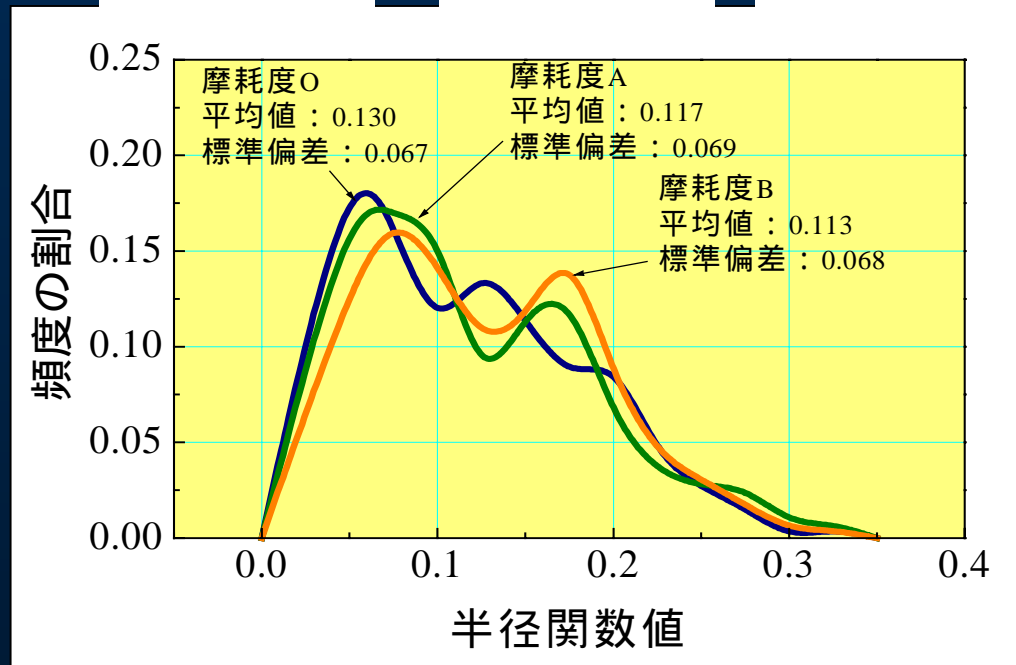
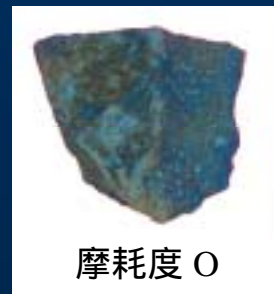
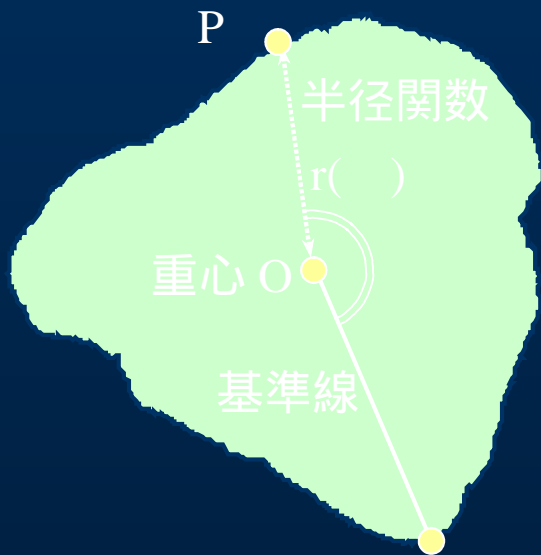
$$\text{偏角関数値} = \sum_{k=3}^{20} C_k$$

$$\text{ここで, } C_k = \sqrt{(a_k^2 + b_k^2)}$$



# 粒子形状の評価方法

粒子の球形度を表す指標は？



$$\text{半径関数値} = C_2 / C_0$$

$$\text{ここで, } C_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$$

