

京都大学	博士 (工学)	氏名	島田 泰拓
------	---------	----	-------

論文題目	定容積せん断試験法による粉体力学特性評価に関する研究
------	----------------------------

(論文内容の要旨)

本論文は、試験装置の大きさ・形状および操作条件に依存しない粉体力学特性評価法を確立するために定容積せん断試験法に着目し、せん断面に作用する内部応力を正確に測定するための機構を考案するとともに、操作法を基礎から検討して新しい試験法を開発し、その効果をミクロンサイズおよびナノサイズの粒子を用いて検証することを目的として研究を行ったものであり、全5章で構成されている。

第1章は序論であり、粒子の付着力の発現機構と測定法および粉体のせん断試験法ならびに流動性評価法を体系的に分類し、粉体の操作性を評価する上で必要な力学特性を正確かつ詳細に解析する技術の重要性を指摘したのち、本研究の目的と研究の位置づけを示している。

第2章では、新しい粉体流動性評価法として、定容積せん断試験装置を開発している。せん断試験は、粉体層せん断面にかかる垂直応力とせん断応力を解析・評価するものであるが、粉体層せん断面にかかる垂直応力を直接測定することが難しく、粉体層上部にかかる垂直応力が代用されてきた。本章では、セルの構造および応力の検出機構を見直し、ロードセルを上部だけでなく下部にも取り付けて、任意の高さにおける粉体層せん断面にかかる垂直応力を正確に測定する方法を考案した結果、応力の時間変化を定量評価する応力緩和率と粉体層上部からせん断面への応力伝達率の解析を可能にしている。また、粉体層の内部応力に関する微分方程式を立て、せん断面に作用する垂直応力を定式化している。さらに、粉体層の高さを正確に測定するために非接触センサーを取り付けて、粉体層の空間率を変数とする破壊包絡線、圧密崩壊線、限界状態線、せん断付着力を1回の測定で取得する方法を確立しており、従来の定荷重せん断試験装置では取得できなかった圧密崩壊線と破壊包絡線を連結するとともに、せん断応力を垂直応力と空間率の関数で表すことに成功している。

第3章では、内径が異なる粉体充填セルを定容積せん断試験装置に組み込み、粉体層の高さを操作変数として粉体力学特性を解析・評価している。粉体層上部からせん断面への応力伝達率の測定結果は、垂直応力から壁面摩擦応力への変換係数をパラメータとして導出した理論式と良好に一致することを示している。また、せん断面垂直応力とせん断応力の関係を用いることにより、セルの内径と粉体層の高さの影響を受けることなく、破壊包絡線と圧密崩壊線が得られることも実証している。さらに、せん断試験の測定結果からモールの応力円に基づいて求めたフローファンクションにより、ミクロンサイズで異なる粒子径の粉体流動性を適切に評価することに成功している。

第4章では、近年注目されているナノ粒子の力学特性を解析している。ナノ粒子はサイズ効果を有効に利用できるが、付着性が非常に高く、粉体層の空間率も極端に大きいので、せん断試験の要件を満たすように改良したセルを用いて、アルミナ、シリカ、チタニアナノ粒子の応力緩和率、応力伝達率、摩擦特性を解析している。ここでは、せん断試験の新たな応用

京都大学	博士（工学）	氏名	島田 泰拓
<p>として、ナノ粒子の力学特性に及ぼす親水性と疎水性の表面物性の違いに着目して、親水性粒子は疎水性粒子に比べて応力緩和率は低いが、せん断付着力および動摩擦角は大きくなることを明らかにしている。空間率が極端に大きいナノ粒子でも、破壊包絡線、圧密崩壊線を正確に取得でき、フローファンクションによる粉体流動性の評価を適切に行えることを実証している。</p> <p>第5章は結論であり、本研究で得られた成果を要約している。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、粉体力学特性の新しい評価法として、定容積せん断試験法に着目し、内部応力を正確に測定する機構を考案するとともに、試験法を基礎から検討して、ミクロンサイズおよびナノサイズの粒子で検証することを目的として研究を行ったものであり、得られた成果は以下のとおりである。

1. 任意の高さにおける粉体層せん断面の内部応力を正確に測定する方法を考案し、応力緩和率および応力伝達率を解析した。また、粉体層の内部応力に関する微分方程式を立て、水平せん断面に作用する垂直応力を定式化した。さらに、粉体層の空間率を変数とする破壊包絡線、圧密崩壊線、限界状態線、せん断付着力を1回の試験で取得する方法を確立し、圧密崩壊線と破壊包絡線を連結して、せん断応力を垂直応力と空間率の関数で表すことに成功した。

2. 内径が異なる粉体充填セルを定容積せん断試験装置に組み込み、粉体層の高さを操作変数として粉体力学特性を解析・評価した。粉体層上部からせん断面への応力伝達率の測定結果は、垂直応力から壁面摩擦応力への変換係数をパラメータとして導出した理論式の解と良好に一致した。また、せん断面に作用する垂直応力とせん断応力の関係を用いることにより、セルの内径と粉体層の高さの影響を受けることなく、破壊包絡線と圧密崩壊線が得られることを実証した。さらに、せん断試験の測定結果からモールの応力円に基づいて求めたフローファンクションにより、ミクロンサイズで異なる粒子径の粉体流動性を適切に評価することに成功した。

3. ナノ粒子はサイズ効果を有効に利用できるが、付着性が非常に高く、粉体層の空間率も極端に大きいので、せん断試験の要件を満たすように改良したセルを用いて、アルミナ、シリカ、チタニアナノ粒子の応力緩和率、応力伝達率、摩擦特性を解析した。特に、ナノ粒子の力学特性に及ぼす親水性と疎水性の表面物性の違いに着目し、親水性粒子は疎水性粒子に比べて応力緩和率は低い、せん断付着力および動摩擦角は大きくなることを明らかにした。空間率が極端に大きいナノ粒子でも、破壊包絡線、圧密崩壊線を正確に取得でき、フローファンクションによる粉体流動性の評価を適切に行えることを実証した。

以上、本論文は粉体定容積せん断試験法を基礎から検討して、装置の大きさおよび操作条件に依存しない粉体力学特性評価法を確立しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年1月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。