

## 審査の結果の要旨

たけ うち たか つぐ

論文提出者氏名 竹 内 孝 次

本論文は、粉粒体を貯蔵する容器（サイロ）内の物理現象を解明することを目的とする。一般に素材を細かくすると、反応や搬送において多くのメリットが得られるので、多くの産業分野で粉粒体は扱われている。その中でも石炭、穀物、砂などの粉粒体は需要が多いが、特にそれらを貯蔵する時、サイロについての問題が蓄積されている。すなわち、問題は大型化したがつて、サイロが排出時に崩壊、閉塞、亀裂などを多発することである。本研究はその原因究明のために、サイロ内で生じる物理現象に対し、理論の構築と現象の解明を行った。

序論で、サイロの事故で起こる様々な事例を列挙し、まず、それらの現象解明のために必要な手法の考え方を示し、次に本研究の目的を述べる。本研究の目的は、(1) サイロの力学的な理論を構築するために、新たに動的な現象の力学理論(動的理論)を導入する、(2) サイロ内で生じる物理現象(変形、力、熱、音)を検出する検出器を開発する、(3) 現象解明のために、中形モデルサイロ(直径 1m)を用いて動的な現象を測定し、動的理論を確認する、(4) 小形モデルサイロ(直径 0.13m)、中形モデルサイロ、大型モデルサイロ(直径 8m)、大型実物サイロ(直径 30m)のそれぞれについて応力測定を行い、サイロの大きさが現象に及ぼす影響(サイロの相似則)を解明する、などである。

第 2 章で、サイロの力学理論を構築するために、従来の静的な現象の力学

理論（静的理論）だけでなく、新たに動的理論を取り入れ、さらに、相似則の計3つの理論を扱う。静的理論は既存のヤンセンの理論を用いる。動的理論は、粉粒体が動くという現象が、サイロの底で始まりサイロ上表面に伝わることをモデル化した“応力伝播”の理論と、粉粒体が底から急激に排出された時にその真上の粉粒体層は流下せず、下からの圧力が減少した分だけ、壁に摩擦力でふんばって上下方向の力を釣り合わせることをモデル化した“だるま落とし”の理論とを構築する。すなわち、支持力を空間的・時間的に肩代わりしたのである。相似則の理論は状態変数を無次元化して、大きさの異なる容器内の粉粒体の相似性を理論的に求めた、長尾が提唱した相似則理論を用いる。

第3章で、サイロ内の力学的現象をとらえるために、筆者らが開発した各種の粉粒体用検出器について述べる。壁面の応力測定では、粉粒体による力が方向性を持つので、壁に垂直な方向の力（圧力）と面に平行な方向の力（摩擦力）に分解して検出する。サイロ内で生じる音の測定では、その音の2つの周波数を分析することですべり速度を検出する。表面温度の測定では、壁面から深さの異なる2点において、温度を測定することで表面温度を検出する。さらに、粉粒体内部にトレーサを埋め込み、粉粒体の流れをそれぞれ観測する。

第4章で、小形モデルサイロから中形、大形、大形実物サイロまでの4つを用いて、主に応力の測定結果を述べる。主なデータは、応力変化、合応力分布、荷重変化、などである。特に、中形サイロでは、サイロ現象の解明のためにサイロ内壁の材質や胴部・底部の接合に特殊な工夫を施し、壁材の摩擦条件、供試体の種類、排出速度、などの条件を変えて、流れ、力、音、熱などを測定した。

第5章で、中形モデルサイロから得られた粉粒体の流れ、力、音、熱、摩擦などの測定結果を基に、サイロ内の物理現象を検討する。その結果、次の現象がわかった。(1) 粉粒体は流れはじめると、サイロ内の粉粒体内部に断続的にブリッジ(架橋)を発生させる。その結果、底部の排出口では一定の速

度で排出される。(2) 上記の(1)の流れる時に発生するブリッジによって、サイロ内の応力は投入時(静的応力)と排出時(動的応力)とで異なる。(3) 壁面での摩擦係数は、粉粒体の種類によって異なるが、それぞれすべり速度に関係なくほぼ一定の値を示す。(4) すべり速度で測定した音を周波数分析すると、100 Hz と 1 kHz とにピーク値が現れるが、これらのパワースペクトル比はすべり速度に比例する。(5) 発熱は、粉同士のすべりや、壁と粉粒体とのすべり、粉粒体と空気との化学的反応、などで発生するが、約 1℃ と非常に小さい温度上昇しか生じない。

第 6 章で、第 4 章と第 5 章で得られた実験結果を総合的に考察した。その結果、粉粒体が滑らかに排出する時の流れのメカニズムと、異常圧力の発生する時とのメカニズムを、実測したサイロ内の応力変化を用いて証明した。また、第 2 章で構築したサイロ理論を、実測データを用いて検討し、サイロ理論がほぼ正しいことを確認した。

第 7 章で、本研究で得られた結論を述べると、次のとおりである。(1) サイロの中の粉粒体の現象を証明するには、力学的理論として、投入時には静的理論を、また排出時は断続的なブリッジを想定した動的理論を導入すればよい。(2) 粉粒体の現象を測定するために応力、摩擦力、温度、音、などの物理量を検出する各種の検出器を新たに開発した。(3) サイロ内での動的現象として、“応力伝播”の現象、“だるま落とし”現象、“荷重分担の肩代わり”現象、などを実験結果で示し、動的理論を確認した。いずれも、粉粒体の自重を支持する力を、時間的空間的に部分部分が肩代わりするように、応力が変化する。また排出時には極端に肩代わりを行う例が見られ、静的な時の 3 倍程度の応力が測定された。(4) サイロ内の粉粒体において、力学的な相似理論を検証した。

以上述べたように、本論文で得たサイロの動的な理論、及び現象の測定データは、工学的にサイロの設計やプロセスの発展に大きく貢献するばかりでなく、実際に工業的に多くの粉体関係の製造分野に応用できると考える。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。