

論文の内容の要旨

論文題目 粉粒体貯槽における物理現象の解明

氏 名 竹 内 孝 次

序論で、サイロ問題で起こる様々な事例を列挙し、それらの現象解明のために必要な測定法の考え方を示し、本研究の目的を述べる。サイロ内で生じる物理現象（サイロ現象と呼ぶ）として、粒子の流れ、粒子間の接触によって生じる力、壁面でやり取りする熱、粒子間あるいは粒子と壁との間で生じる音、などの力学的現象に注目する。しかし、このような力学量をとらえる検出器が現在ない。そこで、本研究の目的は、(1)サイロ内の現象で局所的な異常圧力が発生すると想定して後述の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（動的現象と呼ぶ）を導入する、(2)サイロ内で生じる物理現象をとらえるために総合的に物理量（変形、力、熱、音）を検出する検出器機を開発する。それらは粉体圧の測定を目的とした圧力計、壁面応力計、また音の周波数や熱変形の測定を目的としたすべり速度計、表面温度計、内部温度・流速計などである、(3)現象解明のために直径1mのサイロ（中形モデルサイロと呼ぶ）を製作し、それから得られるデータで動的現象を明らかにする。それ

らを基に動的理論と実測値とを比較し、動的理論を確立する、(4)開発した検出器を用いて、小形モデルサイロ（直径0.13m）、中形モデルサイロ、大形モデルサイロ（直径8m）、大形石炭サイロ（直径30m）の応力測定を行い、構造設計や粉粒体をサイロに投入してから排出するまでの行程（サイロプロセスと呼ぶ）の開発のためのデータベースを得て、サイロの大きさの状態の無次元化（サイロの相似則と呼ぶ）を確立する、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静的な現象の力学理論（静的理論と呼ぶ）の他に、新たに動的理論を取り入れ、更に、相似則理論の3つの理論を扱う。静的理論は既存のヤンセンの理論に摩擦応力を導入し、本研究で得られたデータとの比較検討に用いる。静的応力は粉体が時間的に安定した状態を保つので時間変化を無視でき、現象の理解や理論の実証が容易である。しかし、実際の動的現象は、粉粒体圧の発生原因が粒子と粒子、粒子と壁面との接触によって生じており、摩擦の影響を多大に受ける。動的理論として、粉粒体の動く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推測した”応力伝播”の理論と、粉粒体の流動時に異常な圧力が生じる要因として、粉粒体が急激に排出されたときにその真上の粉粒体層は流下せず、その状態を作り出すために上下方向の力が釣り合った状態になり、壁面に大きな圧力が発生する”だるま落とし”（支持力の空間的・時間的な分布の肩代わり）の理論とを構築した。”相似則理論”は長尾が提唱している理論で、状態変数を無次元化し大きさの異なるサイロの相似性を理論的に求めたもので、本論では相似則理論の実験的検証を行う。

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。力学系の中で最も重要なのが力（圧力と摩擦応力）の測定であるが、ここでは圧力計と壁面応力計について詳細に述べた。

壁面の応力は、粒子が押す力と粒子の間隙に含まれている液圧との加算で検出される。これらの力を面に垂直な方向の力と面に平行な方向の力に分解し、面積で割れば前者が圧力、後者が摩擦応力として検出される。また、サイロ内で生じる音を測定し、その音の周波数を分析しすべり速度を、壁面の深さの異なる2点における温度変化から表面温度を、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検出する。

第4章で、小形モデルサイロから中形、大形、大形実物サイロを用いて主に応力を測定したが、その実験方法と実験結果について述べた。ここでの主なデータは応力（圧力、摩擦応力）変化、合応力分布、荷重変化などである。また、中形サイロでは、サイロ現象解明のためにサイロの構造と内壁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（荷重、応力）、熱、音などの測定を行った。

第5章で、4章から得たデータを基に、粉粒体の流れ、力、音、熱、摩擦などの測定結果からわかったサイロ内の物理現象についての検討を述べる。その主なものは次の通りである。(1) 粉粒体の流れ：サイロ内の粉粒体内部には粉粒体が流れやすくなるようなブリッジ（架橋）が発生し、一定の速度で排出される。(2) サイロ内の応力：サイロ内の応力は投入時（この時の応力を静的応力と呼ぶ）と排出時（この時の応力を動的応力と呼ぶ）とに分けて考える必要がある。(3) 壁面と粉粒体との摩擦：壁面での摩擦係数はすべり速度に関係なくほぼ一定になる。しかし、水分を含んだ石炭はすべり速度が大きくなると摩擦が大きくなる。(4) すべりと音：すべり速度計に組み込んだマイクロホンや加速度計で測定した音の波形を周波数分析すると、100 Hzと1 kHzとにピーク値が現れる。これらのパワースペクトル比はすべり速度に比例する。また、圧力波形の周波数分析でも、同様の結果を得た。(5) 発熱と伝熱：熱は粉同士のス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。しかし、ここで取り扱っている粉粒体の排出過程では発熱のもとになるエネルギーは粉粒体の位置エネルギーの差だけなので、非常に小さく温度上昇が微小（最大約1℃）であるため、粒子の衝突や摩擦で生じた熱を検出することができなかつた。

第6章で、前章で得られたそれぞれの現象の検討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メカニズムと異常圧力の発生するメカニズムを解明した。また、サイロ内の応力状態を、第2章で前述した理論と、従来考えられていた理論とで分析した。この結果、第2章で述べた理論が正しいことを証明した。

第7章で、本研究から得られた結論を述べる。

本研究で得られた結論は次の通りである。(1)サイロの力学的理論を構築するために、静的な状態と動的な状態とに分けた理論構成を行い、新たに動的理論を導入した。(2)サイロの現象をとらえるために総合的な物理量を検出する各種の検出器を開発した。(3)サイロでの基本的な動的現象をとらえ、“応力伝播”現象、“だるま落とし”現象と“荷重分担の肩代わり”（支持力の空間的・時間的な分布の肩代わり）現象を解析し、動的理論を確立した。その結果、粉粒体と壁面の摩擦が応力変動の最大要因になっていることがわかった。(4)長尾が唱えているサイロの力学的な相似則理論を検証した。また、本研究で得た知見はサイロ設計やサイロプロセスの発展に大きく貢献するばかりでなく、多くの粉粒体関係分野に応用することができると考える。