

氏 名(本籍) 谷 口 幸 典(三重県)
学 位 の 種 類 博 士(工学)
学 位 授 与 番 号 甲 第 2 3 8 号
学 位 授 与 日 付 平 成 16 年 9 月 8 日
専 攻 生 産 開 発 シ ス テ ム 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目 金 属 粉 末 の 圧 縮 成 形 に お け る 摩 擦 特 性 評 価 法 の 開 発
(Development of Evaluation Methods for Characterization of
Friction in Metal Powder Die Compaction)
学 位 論 文 審 査 委 員 (主 査) 教 授 堂 田 邦 明
(副 査) 教 授 戸 梶 恵 郎 教 授 服 部 敏 雄
助 教 授 王 志 剛

論 文 内 容 の 要 旨

粉末に目的とする形状を与えるための成形プロセスとして、密閉金型を用いた金属粉末の圧縮成形は最も単純で簡単な手法であり、最も広く用いられている。しかし、工具(ダイス)壁面と粉末間の摩擦の影響で、圧粉体の密度は均一とはならない。密度分布の度合いが大きくなると、焼結後の寸法変化や機械的強度の不均一を招く。また、圧粉体を型から抜き出す際、摩擦が大きい場合および壁面における法線方向力が高い場合は接触面に大きなせん断力が加わることとなり、工具面を傷つけたり、圧粉体に割れが生じたりする場合がある。一方、粒状材料はそのせん断強度が拘束圧に依存するという性質を有し、その降伏・破壊挙動は摩擦則と呼ばれる。これは、粉末粒子間に生ずる摩擦抵抗によってその降伏・破壊条件が規定されることを示している。これらの成形時の摩擦挙動の変化に起因する粉末内部の応力状態や圧密挙動の変化を正確に把握し、何らかの定量的な理解を得ておくことは、圧粉成形プロセスの最適化のみならず、圧粉成形シミュレーションの実現・実用化においても重要な意味を持つものと思われる。

本研究は、金属粉末の金型圧縮成形時における摩擦の問題に関する二つの目的を有する。一つは、圧密挙動におよぼす壁面摩擦の影響に関する新たな知見を得ることである。壁面摩擦力の発生による成形圧力損失、および圧粉体に生ずる加圧方向の密度分布の定量的な評価を試みることで、均一な密度を得るための潤滑条件を明らかにする。もう一つは、未だ未解明な部分が多い圧粉体の破壊について、その定量的評価手法を確立して特性化を行い、粒子間摩擦および内部摩擦に関する新たな知見を得ることである。この二つの摩擦現象に関する評価手法の提案・開発を行うことで、圧粉成形の数値解析の実用化に関し、壁面摩擦係数および材料特性値の面から貢献できると期待される。

壁面摩擦に関しては、以下に示す3種の手法を用いることによって、潤滑剤添加量に対する圧密挙動および壁面摩擦挙動の変化の定量的な評価を試みた。

①フォース・バランスの計測による圧密挙動の評価

②密度分布の定量的評価

③壁面摩擦係数の計測

①では、圧縮成形時において成形圧力と圧粉体の底面に作用する伝達圧力を同時に計測し、壁面摩擦力によって生ずる加圧方向の圧力損失を調べた。②では、成形した圧粉体を軸方向に4つに分割し、それぞれの密度を個別に測定することで、軸方向密度分布の度合いについて定量化を試みた。③では、超硬合金 (G2) を摩擦材とし、金属粉末との摩擦試験を行うことで壁面摩擦係数の計測を試みた。得られた結果から、圧密挙動と壁面摩擦現象との相関性について検討し、さらに、密閉金型圧縮成形時の圧粉体内部応力状態の変化に関して言及を行った。その結果、壁面潤滑を行うことで圧力伝達率は増加するもののその効果は乏しく、密度分布の改善に関しては添加量の増加が必要であること、さらに、空隙に存在する潤滑剤がより効果的に壁面摩擦係数を減少せしめることを明らかにした。

一方、粉末粒子相互間の摩擦に関しては、その特性が粒状材料の破壊・降伏条件を決定するという観点から、これまで調査することが困難であった高圧力下における金属粉末のせん断特性を調べることによってその現象の特性化を試みた。金属粉末用改良形一面せん断試験法を新たに提案し、装置の開発および評価手法の確立を行った。結果、せん断界面におけるせん断に伴う圧粉体の膨張・収縮挙動 (ダイレイタンスー特性) を観測し、粒状材料の降伏条件に含まれる内部摩擦係数の計測が可能とであることを示した。さらに、鉄粉末、およびステンレス粉末についてせん断破壊特性を詳細に調べた結果、圧粉体の破壊包絡線が密度によって異なる曲線群となることを明らかにした。せん断破壊の特性化に関しては、密度の相違に起因するせん断界面の接触状況の相違を考慮して、その密度を得るために必要な成形圧力とせん断面における垂直応力との比である無次元化垂直応力 ω を定義し、せん断面の見かけ上の摩擦係数 μ_n との関係を調べた結果、せん断面における摩擦特性が $\mu_n = C_2 \omega^{-n}$ という式で特性化できることを明らかにした。 C_2 および n は材料定数であり、ステンレス粉末に比べて塑性変形の生じやすい鉄粉末の場合は n 値が高くなること、また潤滑剤を添加混合した場合は n 値が小さくなることを示した。このことから、 C_2 値は粉末粒子のかみ合わせの度合いを、 n 値は粒子相互の固着部の摩擦抵抗をそれぞれ特性化するものと考えられ、これらのパラメータで粉末粒子間の摩擦特性を評価できると期待される。

論文審査結果の要旨

粉末に目的とする形状を与えるための成形プロセスとして、密閉金型を用いた金属粉末の圧縮成形は最も単純で簡単な手法であり、最も広く用いられている。しかし、工具 (ダイス) 壁面と粉末間の摩擦の影響で、圧粉体の密度は均一とはならない。密度分布の度合いが大きくなると、焼結後の寸法変化や機械的強度の不均一を招く。一方、粒状材料はそのせん断強度が拘束圧に依存するという性質を有し、その降伏・破壊挙動は摩擦則と呼ばれる。これは、粉末粒子間に生ずる摩擦抵抗によってその降伏・破壊条件が規定されるこ

とを示している。これらの成形時の摩擦挙動の変化に起因する粉末内部の応力状態や圧密挙動の変化を精確に把握し、何らかの定量的な理解を得ておくことは、圧粉成形プロセスの最適化のみならず、圧粉成形シミュレーションの実現・実用化においても重要な意味を持つ。

本研究は、金属粉末の金型圧縮成形時における摩擦の問題に関する二つの目的を有する。一つは、圧密挙動におよぼす壁面摩擦の影響に関する新たな知見を得ることであり、壁面摩擦力の発生による成形圧力損失、および圧粉体に生ずる加圧方向の密度分布の定量的な評価を試みることで、均一な密度を得るための潤滑条件について言及している。もう一つは、未だ未解明な部分が多い圧粉体の破壊について、その定量的評価手法を確立して特性化を行い、粒子間摩擦および内部摩擦に関する新たな知見を得ている。

本論文第2章では、金属粉末の圧縮特性に及ぼす各種粉末因子および潤滑条件の影響について調べると共に、密度分布に関して検討を行っている。さらに、圧密に伴う粉末粒子の変形挙動について、画像解析を用いた粒子形状の特性化を行うことで知見を得ている。

第3章では、壁面摩擦力および壁面摩擦係数の計測手法と、それによって得られた潤滑剤の効果および圧密に伴う圧粉体内部応力状態を明らかにした。結果、ステアリン酸亜鉛を用いた壁面潤滑によって壁面摩擦力は低減されるもののその効果は乏しく、密度分布の改善および壁面摩擦係数の低減には原料粉末に潤滑剤を添加混合する混合潤滑がより効果を望める反面、過度な添加量が成形圧力の増大を招き、成形中の半径応力および壁面摩擦力の増加につながることを明らかにしている。

第4章では、圧粉成形の有限要素解析で用いられる構成式中のパラメータとなる高圧下における金属粉末の内部摩擦特性をより簡易かつ精確に計測することができる金属粉末用改良形一面せん断試験法を提案している。せん断変位に伴う応力の変化、および圧粉体の膨張・収縮挙動（ダイレイタンス特性）について調べた結果から、降伏条件の一部を成す粉末の限界状態曲線および内部摩擦係数の見積りを行い、提案した試験法が金属粉末の内部摩擦係数の計測に有用であることを示している。

第5章では、従来調べることが困難であった圧粉体の密度とせん断強度の相関関係について調査し、成形中の圧粉体の破壊条件となる破壊包絡線の定式化を試みている。破壊特性を示す材料定数である n 値および C_2 値について、粉末粒子間摩擦の観点から考察を行い、圧粉体の破壊現象に関する知見を得ている。

本論文の成果は、金属粉末の圧縮成形時に問題となる壁面摩擦現象および圧密挙動を決定する内部摩擦現象について、従来法および新たに提案した手法を用いた詳細な検討を行い、これまで明らかにされていなかった壁面摩擦力と圧粉体密度分布の相関関係、および金属粉末の内部摩擦特性と破壊条件について新たな知見を得たことである。

本論文によって得られた成果は、圧粉成形プロセスおよび潤滑条件の最適化のみならず、圧粉成形シミュレーションの実用化に関しても大いに利用できることが期待される。

最終試験結果の要旨

論文内容および関連する学問分野に関する口頭試問の結果，学位授与に相当した高い学力および語学力を有することが認められたので，最終試験を合格と判定した。