

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 30 日現在

機関番号：54601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760111

研究課題名(和文) 金属粉末の金型成形時における成形割れ発生予測手法の開発

研究課題名(英文) Development of Single Shear Test for Metal Powder Compact

研究代表者

谷口 幸典 (Taniguchi, Yukinori)

奈良工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：10413816

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：金属粉末の圧粉成形時において問題となる圧粉体のせん断割れ発生について調査するため、高面圧下でも粉体層の一面せん断試験が可能な二軸試験機と試験片作成方法を提案・開発した。せん断破壊時の応力状態を実測可能となり、これまで未知であった圧粉体の割れ発生条件として限界応力状態曲線を得た。曲線の傾きは潤滑剤添加量が少ない場合、および、粒度分布の幅が狭く粒子径が大きい場合に低下することがわかった。得られた値からDrucker-Pragerの降伏条件に含まれる破壊曲面の同定が可能であることから、今後有限要素法などで圧粉成形解析の際の材料定数決定法として活用していくことが期待される。

研究成果の概要(英文)：In the metal powder compaction process using closed-die system, which applies to mass production for various PM parts, failure of green compact such as slip-crack often occurs especially for compaction of multi-step part. It is considered that the slip-crack appears in the boundary of high density part and low density part as shear failure plane. Therefore, investigation of shear property in a powder layer on compression-shear plane will provide critical stress state for crack occurrence. We have developed single shear tester for metal powder to investigate stress state in shear failure occurrence. Critical stress state in several compact densities has been estimated in constant volume shearing. Critical State in shear failure with density increasing has been estimated experimentally, and angle of friction increases with particle size increasing. Numerical simulation of single shear test by using distinct element method solver has been conducted to discuss shear failure properties.

研究分野：機械材料学，塑性加工学，粉末成形

キーワード：粉末冶金 粉末成形 一面せん断試験 個別要素法 破壊包絡線

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 背景：塑性加工によるものづくり現場においては、低コスト化および環境負荷低減への要求がますます高くなってきている。これを受けて、加工工程の設計に各種数値解析技術が積極的に導入され、鍛造などの塑性加工の生産現場において大きな成果を挙げている。その一方で、生産に要するエネルギーの低減が可能な粉末成形～焼結による部品生産手法については数値解析技術の導入が進んでいない。これは、粉末材質や粒子径、粒子形状、添加混合する潤滑剤の功罪、等々、圧粉成形挙動に関与する因子が非常に複雑であるため、その数値解析手法やそれに必要となる材料特性値の計測手法が一般化されていないことに起因している。したがってその工程設計においては粉末成形中、あるいは圧粉体の型からの抜出し時の割れ発生の対処において、技術者のノウハウと勘に依存する試行錯誤による部分が多い。圧粉体の破壊挙動に関する知見が十分に得られていない。もちろん、粉末の圧密構成式は既に確立されており、市販の一部の成形解析ソフトウェアにはその構成式が組み込まれているため、成形体の密度分布の予測等も利用可能となっている[1]。しかしながら、構成式中の材料特性値については特殊な装置と実験法(ex.Shima らによる三次元圧縮試験[2])によってその都度求めなくてはならない。加えて、材料特性値の物理的意味合いも明確でなく粉末粒子間摩擦の影響など個別に検討することが困難であるため、せん断破壊のような成形不良のシミュレートは難しいという問題が Shima 自身によって指摘されている[3]。本研究でその手法の確立を試みる一面せん断試験法とは、粉体を充填した上下せん断箱の界面としてあらかじめ規定されたせん断面に対し、垂直力とせん断力を直接負荷することで、粉体層のせん断強度を直接計測する強度試験である。原理が単純で、かつ、得られる材料定数(内部摩擦係数、粘着力)が実際の粉体層の崩壊をよく近似するという利点より、土質工学などの分野では汎用試験法として一般化されている。これを金属粉末圧粉成形に適用し、圧粉体のせん断破壊条件式を得れば、有限要素法などの数値解析による破壊発生の予測が可能となるが、高压で圧密固化した圧粉体において特定の粉体層において一面せん断を生じさせることは不可能であり、破断面の検出とその応力状態の計測は困難である。例えば Shima らの実験結果[4]では破壊条件を提案するに十分な計測精度が得られず、定性的な結果に留まり、破壊条件式の提案に至っていない。

(2) 動機：本研究は、これまでに試作済みの高面圧一面せん断試験装置を改良して降伏曲面の直接計測を試み、さらに粒子個別要素法による数値解析を行うことで、実際と理論の両面から圧粉体の破壊挙動を解明することを目的とする。具体的には、圧粉体の破壊

条件の定式化およびそれを規定する材料特性値の実測を行い、材料定数の同定を図る。破壊挙動に及ぼす粉末因子(材質、粒子径等)および潤滑剤の影響について、実験と解析の両面から調査して破壊条件式を修正することで金属粉末に特化した粒状材料の破壊条件式を新たに提案し、最終的には実際の事案を模擬した圧粉成形モデルに関して、成形時および抜出し時の割れ発生をケーススタディとしてシミュレートすることで、破壊発生の抑制手法(粉末因子の最適化指針など)を理論的に提案する。

## 2. 研究の目的

筆者が考案しているせん断強度の直接計測試験法を用いて破壊条件式および材料定数を実測し、破壊条件式の妥当性を粒子個別要素法により検討する。様々な粉末因子(材質、粒子径、粒子形状等)の影響を複数の材料パラメータとして精度よく実測して解析に反映させることで、金属粉末に特化した粒状材料の破壊条件式を提案し、最終的には有限要素法によって圧粉成形中の破壊発生を精度よく予測できるようにする。

## 3. 研究の方法

本研究費で一面せん断試験装置を改良し、実験データの取得ならびに破壊挙動の解明を行う。破壊条件式を新たに提案し、粉末特性を反映する材料定数の同定を行う。

個別要素法ソフトウェア PFC2D によって圧粉体せん断破壊の数値解析を行い、試験結果と比較することで構成式の妥当性を検証する。

## 4. 研究成果

(1) 試験方法の確立 新たに導入する設備であるせん断用アクチュエータの仕様をさらに詳細に決定するために、予備実験として、圧粉体の一軸破壊試験ならびに半径方向圧裂試験を行った。その結果、破壊条件式の実測に関して精度を確保するためには、より低速なストローク制御が必要であることが判明した。そこで当初導入予定であった油圧サーボシリンダよりも微細な動作が可能なサーボモータ式シリンダを特注によって作製導入した。これにより、せん断中は試料の収縮・膨張挙動を主軸シリンダ変位として検出しつつ、破壊界面に作用する垂直力が一定となるようにストローク制御できるようになった。なお、予備実験の結果についてはまとまった知見が得られたために、(社)塑性加工学会関西支部若手技術交流会にて発表した。また、既存設備である汎用有限要素法解析ソフトウェア“LUSAS”によって、簡易的な破壊条件式の仮定の下での数値解析を実施しており、その結果を H24 年度日本機械学会関西支部定時総会講演会にて発表している。試作した一面せん断試験機の概略図を図 1 に示す。試験部は島津製作所製サーボパルサーに設置されており、それにより軸方向の拘束圧を供試体に負荷する。主軸と直交する

せん断軸に新東工業製サーボシリンダを設置し、供試体のせん断を行う。その際に軸方向の拘束圧が変化しないようにサーボパルサーによって主軸の変位を制御した。せん断に伴う主軸変位が正の値の場合、供試圧粉体はせん断に伴って（見かけの）体積膨張しながら破壊することになる。一方で主軸変位が負の値となれば供試圧粉体はせん断によって（見かけの）体積収縮したこととなり、この場合は圧粉が継続される応力状態でせん断したこととなる。このような挙動は土質工学などでダイレイタンスーと呼ばれている。

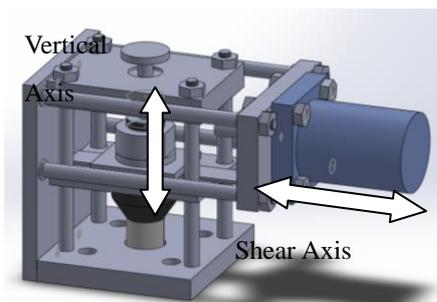
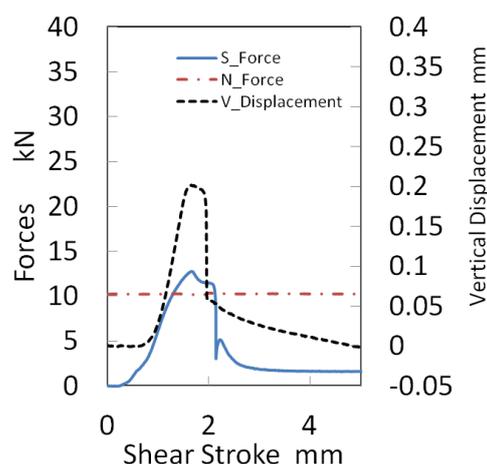


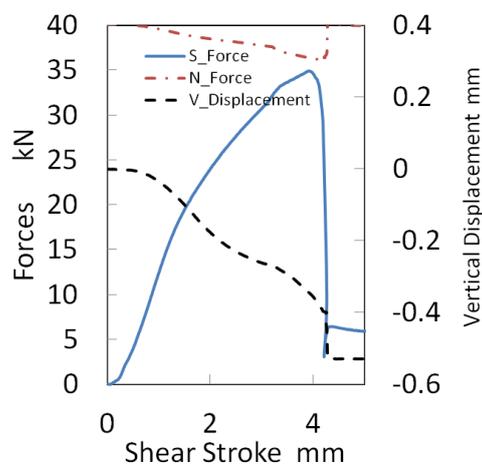
図1 圧粉体一面せん断試験機試験部の概略

(2) 試験結果 平均粒子径が約  $100\mu\text{m}$  のアトマイズ鉄粉を円板状に成形した圧粉体を供試体とした。試料直径は  $\phi 20\text{mm}$  とし、成形密度比を  $0.70\sim 0.90$  まで変化させて、それらを  $10\text{kN}\sim 50\text{kN}$  の軸方向垂直圧の下で軸方向と直交する方向にせん断した。せん断面上の応力状態を知るには主応力面に対する傾きを知る必要があるがそれは容易ではない。そこで、本研究では供試体を圧粉成形する際にその成形を二回に分けることで、軸方向中心位置を横切って粒子同士のかみ合いや結合の度合いを低減させ、せん断試験の際にその面において優先的にせん断破面が形成されるようにすることで一面せん断を実現した。このように、軸方向拘束圧とせん断破壊時のせん断応力の二つでせん断挙動を簡易に考察した。

図2に、ステアリン酸亜鉛を潤滑剤として  $1.0\text{wt.}\%$  混合した鉄粉末からなる密度比  $0.75$  の供試圧粉体の一面せん断試験におけるせん断ストロークに伴うせん断荷重および供試体垂直変位の変化の一例を示す。図2(a)は軸方向拘束力が約  $10\text{kN}$  の場合で、図2(b)は  $40\text{kN}$  の場合である。せん断力には明確なピーク値が現れ、そのストロークにおいてせん断面が形成される。拘束力が低い場合は垂直変位が正の増加を示し、せん断破壊が生じていることがわかる。一方、拘束力が高い場合はせん断に伴いせん断面における圧密が生じるので垂直変位が圧縮方向に増大しながらせん断されたことが見て取れる。このように、金属粉末に一面せん断破壊を生じさせた場合において、明確なダイレイタンスー現象が認められる。



(a) 軸方向拘束力  $10\text{kN}$



(b) 軸方向拘束力  $40\text{kN}$

図2 せん断ストロークに伴うせん断力および垂直変位の変化挙動

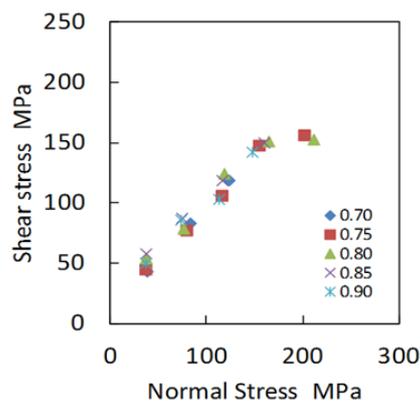


図3 せん断面におけるせん断（破壊）応力と垂直応力の関係

図3はせん断面が形成された際の荷重値からせん断面の応力状態を垂直応力とせん断応力の関係で整理したもので破壊包絡線と呼ぶ。せん断破壊時のせん断応力は拘束圧の増加に伴ってほぼ直線的に増加し、密度比の違いの影響は比較的小さい。これは、潤滑剤が十分添加されていることから粉末粒子の流動が生じやすく、その結果せん断強度が低下しているためであると考えられる。

図4はせん断面が形成された際の垂直応力と垂直変位の関係である。供試体の密度比が増加するに伴い、せん断破壊の挙動が膨張から収縮（圧密）に転じる拘束圧が増加していることが見て取れる。このことは、拘束がゆるい場合においてせん断が加わることで圧粉体が容易にせん断割れを生じることを示しており、破壊を抑制しながら圧密を継続するためには拘束圧を増加させなければならないことを意味している。

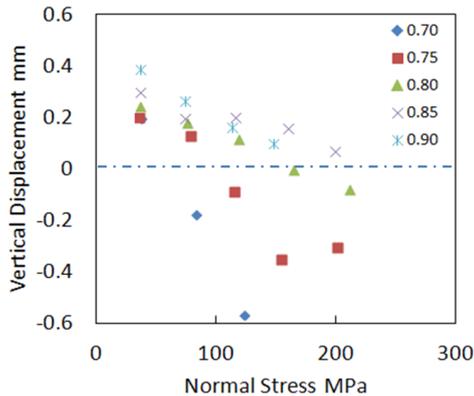


図4 せん断時の供試圧粉体の膨張・収縮挙動

図5は、せん断に伴う垂直変位が0の場合の応力状態について、それぞれの供試体密度についてプロットしたものである。プロットをつなげた線は、応力状態が圧密から破壊に転じる限界の応力状態を示すことから、限界状態曲線と呼ぶ。一点鎖線は潤滑剤添加量が少ない場合で、曲線の傾きが大きいことから、本試験で粒子間摩擦の影響が正確に反映されていることが分かる。二点鎖線で示した、潤滑剤添加量 1.0wt.%の場合については特に、せん断応力が0となる際の圧密に要した垂直応力（成形圧力）をプロットしており、すなわち、破線で示すような圧密曲線が予想される。例えば、密度比 0.85 を達成するに要する成形圧力は約 500MPa であるが、仮に成形中にねじりを加えるなどせん断変形を粉体層に生じさせることで必要な成形圧力は低くなることを意味する。この事実は、実際の金型成形時において経験的に知られている。

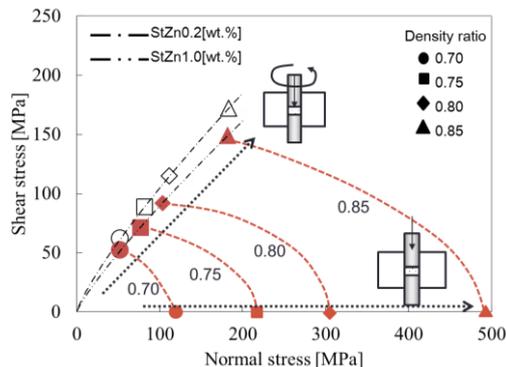
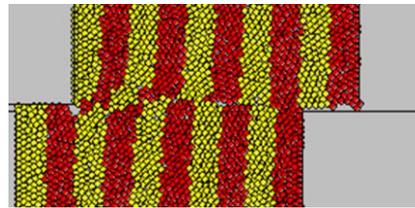


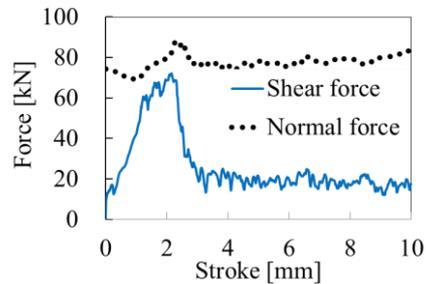
図5 実測された鉄粉末の限界状態曲線

密度比 0.85 の例ではせん断応力 150MPa 程度を加えた際に 200MPa まで成形圧力は低くなる。ここで、せん断応力が過大となり、150MPa 以上になると、応力状態は限界状態曲線上に達する。すなわち、圧粉体の割れが発生することになる。このように、提案した一面せん断試験によって圧密から破壊に転じる限界の応力状態を示す限界状態曲線を直接計測することができた。粒子径を変えて調査したところ、粒子径が大きい場合は粒子間摩擦係数が大きくなることが分かった。

図6は本研究で導入した個別要素法数値解析ソフトウェアで一面せん断試験を模擬した結果である。図6(a)の解析の様子では、実際の試験片の一面せん断挙動を正確にシミュレートできることが分かった。図6(b)はせん断ストロークに伴うせん断力と垂直力の変化を示しており、図2に示した実験結果と同様の結果が得られることが分かる。



(a) 解析の様子



(b) せん断ストロークに伴う垂直力とせん断力の変化（密度比 0.85 の場合）

図6 個別要素法による一面せん断試験

(3)個別要素法による解析結果 図7は、数値解析において限界状態曲線を求めてみた結果である。これと図5を比較すると、定性的には同様の傾向が得られたが、解析結果のほうがやや低めの応力状態となった。

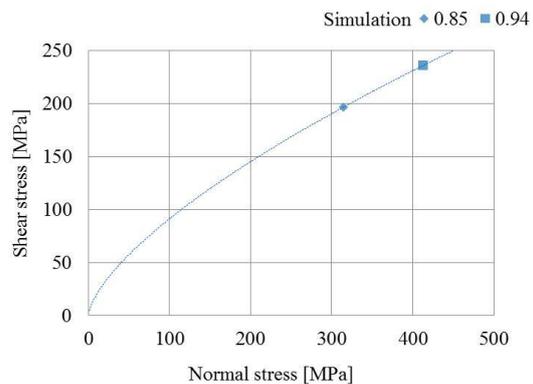


図7 個別要素法による限界状態曲線

個別要素法による一面せん断試験の模擬においては、粒子間の相互作用として適切な物性値の設定（ばね剛性、粒子間接合強度）が必要である。しかし、定性的には破壊のシミュレートが可能であり、例えば、鉄粉末の微細圧粉体カプセルの破壊のシミュレートを行った結果、破断発生の起点となる位置を予測することが可能であった。計測値と解析値の差については、今回、粒子間摩擦係数については図5の実測値を反映させることができたが、ばね剛性等の最適化まではできなかったことが原因であり、今後の課題である。例えば、円盤状圧粉体の半径方向圧縮による圧裂試験を実験および数値解析し、引張破断特性を求めることで解決可能と思われる。

(4)まとめ 以下に、本研究課題で得られた成果と今後の展望についてまとめる。

①せん断時における供試体の膨張、圧密挙動から、供試体が膨張（破壊）を生じずに、せん断が行われる限界の応力状態曲線を外挿によって計測することができた。

②限界状態曲線より潤滑剤添加量の差として粒子間摩擦の影響を確認できた。

③実験結果で得られたせん断特性パラメータを用いて個別要素法による数値解析を行った結果、圧粉体の破壊現象を定性的に再現することができた。

本研究では、金属粉末圧粉体の高面圧におけるせん断特性について直接計測に成功し、個別要素法による解析で圧粉体の成形中のせん断破壊現象をシミュレートすることができた。しかし、個別要素法は粒子の流動をシミュレートできる反面、実際の生産現場において必要となる破壊時の応力状態をシミュレートするためにはその他の物性パラメータを必要とする。しかし、破壊包絡線および限界状態曲線から Drucker-Prager の降伏条件に含まれる破壊曲面の同定が可能であることから、今後有限要素法などで圧粉成形解析の際の材料定数決定法として活用していくことが期待される。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 0 件）

〔学会発表〕（計 5 件）

①谷口幸典, 福垣内学, 三木靖浩, 浅野誠, 児玉謙司, 鉄粉末を媒介した Ti 箔の絞り加工による微細粉末カプセルの作成, 日本塑性加工学会春季講演会講演論文集, 2014 137-138, 2014 年 6 月 6 日（つくば国際会議場）

② Yukinori Taniguchi, Kenji Kodama, Tatsumi Ichise, Yasuhiro Miki, Manabu Fukugauchi, Makoto Asano, Nobuyoshi Hosoi, and Hiroki Kuniyasu, Capsulation Process of Fe Powder Particles by Indent-Extrusion of a Multi Layered Blank

for Hyperthermia Cancer Care, Proceedings of The 9th International Conference on MicroManufacturing (ICOMM2014), 2014 年 3 月（査読あり）（シンガポール）

③扇田大生, 谷口幸典, 金属粉末用一面せん断試験法の開発（第一報：試験機の試作）, 日本機械学会関西学生会学生員卒業研究発表講演会, 2014 2-19, 2014 年 3 月（大阪府立大学）

④三谷 涼太郎, 谷口 幸典, 金属粉末用一面せん断試験法の開発（第二報：せん断挙動の考察）, 日本機械学会関西学生会学生員卒業研究発表講演会, 2014 2-20, 2014 年 3 月（大阪府立大学）

⑤谷口幸典, 定圧一面せん断試験による鉄粉末のせん断破壊挙動の実測, 日本塑性加工学会連合講演会講演論文, 64th 387-388, 2013 年 10 月（大阪大学）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 1 件）

名称：箔の絞り加工

発明者：谷口 幸典, 児玉 謙司

権利者：国立高等専門学校機構

種類：特許

番号：特願 2014-038088

出願年月日：2014 年 2 月 28 日

国内外の別：国内

○取得状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

谷口 幸典 (TANIGUCHI YUKINORI)

奈良工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：10413816

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：