

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：54601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04204

研究課題名(和文) 圧粉成形における降伏関数パラメータの同定手法一般化と成形不良事例の解析

研究課題名(英文) Testing Method to Identify Yield Parameters on Metal Powder Compaction for FEM Analysis of Compaction Failure Occurrence

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：金属やセラミックス粉末を対象として圧粉工程設計現場における有限要素法解析の活用を推進するために必要となる降伏関数パラメータを同定するにあたり、実際の設計現場において運用可能な試験機は存在しないため、その試験手法を含めて、パラメータの簡便な同定手法を確立し、市場にある主要な粉末に関して、材料特性値データベースを作製、最終的に、型からの抜出し時の破壊に至るまでの成形不良事例の「見える化」を図ること、の3点を遂行した結果、提案手法によって粉末の降伏曲面を簡易に同定できたほか、解析によって低密度域、パンチスプリングバックの影響が見える化できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、粉末成形の理論が確立され、有限要素法を適用し、型からの抜出し時の割れ発生を含めた圧粉工程設計の事前検討～最適化に活用できるようになった。ところが、金属粉末圧粉工程設計における活用例がみられない。これは、DPCモデルの降伏曲面形状が複雑であり、金属粉末においてはその形状を決定する降伏関数パラメータの同定手法が一般化されていないことに起因している。本研究成果は、簡便な試験によってパラメータを同定できることを示すと同時に、解析によって不良発生事例が見える化できることを示したものである。既に活用されている鍛造解析と同様に、粉末成形の生産現場においても解析技術活用を推進できる点で意義がある。

研究成果の概要(英文)：In this study, we attempt FEM analysis for a series of compaction process, which are Compacting into inner flange shape, Unloading of tools, And ejection from die cavity. FEM analysis of iron powder compaction process for inner flange shape has been performed to demonstrate shear yield behavior on unloading and ejection stage. Three different tool motion, semi-double and double action pressing were investigated. The magnitude of density distribution becomes narrow on double-action tool motion with adequate tool speed ratio, and it can be examined what speed ratio should be applied. It was possible to predict where cracks may occur by the evaluation of stress path in ejection stage.

研究分野：粉末成形

キーワード：Powder Compaction Drucker-Prager CAP model Finite Element Method Powder Metallurgy

1. 研究開始当初の背景

粉末に所望の形状を付与する手法として、金型および複数の成形工具を用い、プレス機で加圧することで圧粉体を得る金型成形法が主流となっているが、目的形状が複雑になればなるほど金型キャビティ内で均一な体積収縮が生ずるよう多数の成形パンチを組合せた複雑な動作設定が求められる。これが適切でない場合は、加圧中～圧粉終了後の型からの抜出しの際に割れが生ずる。この対処は所謂、「匠の技」で行われているのが実情である。

近年、粒状材料の降伏関数の理論が確立されつつあり、破壊条件式と圧密構成式の両者を組み合わせた **Drucker-Prager Cap** モデル (以下、**DPC** モデル) を用いた有限要素法解析システムによって、型からの抜出し時の割れ発生を含めた圧粉工程設計の事前検討～最適化に活用できるようになった。ところが我が国においては、成長分野である錠剤製造業界ではその導入が進んでいるものの、金属粉末圧粉工程設計における活用例が皆無である。これは、**DPC** モデルの降伏曲面形状が複雑であり、金属粉末においてはその形状を決定する降伏関数パラメータの同定手法が一般化されていないことに起因している。粒状材料の降伏・破壊挙動は、単軸破壊 (間接せん断) や一面せん断、単軸・三軸圧密など複数の試験法により総合して調査しなくてはならない。ここで金属粉末の降伏挙動が錠剤や土砂等の他の粒状材料と比べ金属粉末は数百倍のオーダーの応力状態であることがネックとなり、複雑な構造の試験機を自作しなくてはならない現状がある。

2. 研究の目的

本研究がねらいとするのは、金属やセラミックス粉末を対象として圧粉工程設計現場における有限要素法解析の活用を推進することである。解析に必要となる降伏関数パラメータを同定するにあたり実際の設計現場において運用可能な試験機は存在しないため、まずはその試験手法を含めて①パラメータの簡便な同定手法を確立すること、その後、市場にある主要な粉末に関して②材料特性値データベースを作製すること、最終的に、型からの抜出し時の破壊に至るまでの③成形不良事例の「見える化」を図ること、の3点を目的とする。

3. 研究の方法

現状では、ある密度比 (圧粉密度をその粉末素材の密度で除した比) の降伏曲面形状を決定するために、三軸圧密試験と複数の破壊試験を行って図1に示すようにそれぞれ圧密降伏関数と破壊条件関数でフィッティングしなくてはならない。具体的には、三軸応力比を種々に変化した三軸圧密試験により圧密 **Cap** 上のデータを、軸方向破壊や半径方向破壊など複数の破壊試験により破壊条件上のデータを、それぞれ数点取得するものとされている。

ここで両関数を外挿して得られる状態変数 K_0 値は限界応力状態を意味し、**DPC** モデルにおいて K_0 値は圧密が継続するか破壊が発生するかを判別する **Key** となるパラメータである。ところが通常の破壊試験では低静水圧領域しか模擬できないために外挿による誤差が大きい。この状態変数 K_0 値の同定には高静水圧領域での破壊を模擬する試験手法が有効である。本研究ではこれまでに開発した一面せん断試験法から得られる知見から K_0 値を同定し、材料特性値データベースの構築を図る。圧粉体の単軸破壊試験と単軸圧密における側方向力計測試験で、破壊および圧密降伏関数上の代表値を取得、一面せん断試験法で同定した K_0 値との相互依存関係から、圧粉密度に対応する降伏曲面形状の決定を試みる。得られた材料特性によって、図2に示すような内側カップ形状の成形における工具動作の影響に関する有限要素法解析を行う。また実証実験を実施するための簡易複動プレス成形装置を構築する。

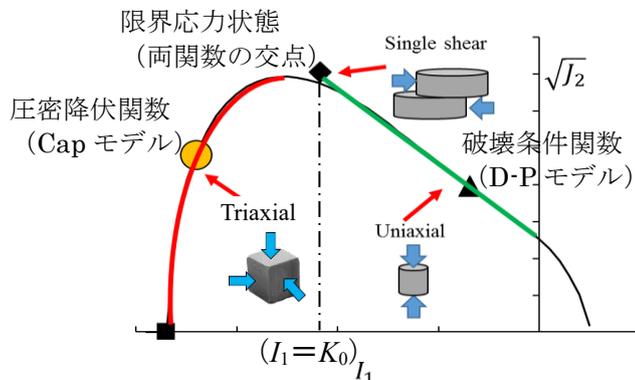


図1 ある密度比の圧粉体に関する降伏面上の応力状態の計測手法

- K_0 値の増加挙動から加工硬化挙動 (σ_0 値の増加傾向) を定式化できる

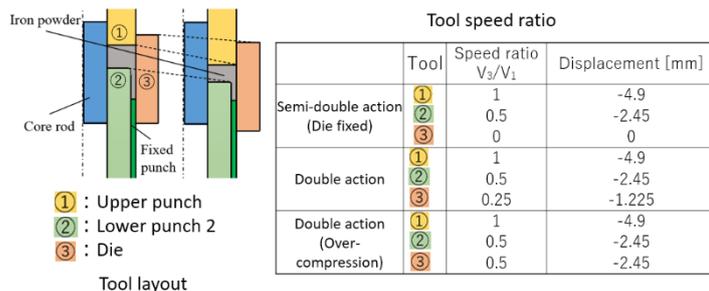


図2 解析形状および工具動作条件

4. 研究成果

(1) パラメータ同定手法の確立～材料特性

密閉金型での片押し法による圧縮応力と密度比の関係を定式化すると以下の実験式を得た。

$$P = F \left(\ln \left(\frac{1 - \rho_0}{1 - \rho} \right) \right)^n$$

F および n は圧密に対する抵抗を定義する定数である。表 1 に、同じアトマイズ鉄粉であるが、圧縮性の異なる 3 種の鉄粉末について DPC パラメータを同定した結果を示す。また、同定したパラメータを用いて、密度比 0.80 における降伏曲面形状を描画した結果を図 3 に示す。なお、降伏曲面においてせん断降伏応力軸との交点となるパラメータ σ_0 (粘着応力) は、以下の式で近似が可能であることが明らかとなった。

$$\sigma_0 = C_1 \left(\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{C_2} - 1 \right)$$

ここで、 C_1 、 C_2 は材料定数であり、図 4 に示す密度比と単軸破壊応力の関係を反映して、粉末 A で $C_1 = 2.02 \text{ MPa}$ 、 $C_2 = 5.50$ 、粉末 C で $C_1 = 1.62 \text{ MPa}$ 、 $C_2 = 5.60$ であった。また、計装金型による圧密曲線としての P と破壊応力の関係は原点を通る直線で示され、粉末 A の場合では成形圧の 40.3%、粉末 C の場合では成形圧の 37.6% で破壊試験時の最大応力となっていた。メーカーカタログ値としては、粉末 C が最も圧密されやすく、かつ抜出性も優れる反面、圧粉体抗折強度は若干低いものとなっている。その性質は降伏曲面において高い圧縮性を示す反面、粘着力が低くなっていることで特性化されており、本研究で提案する材料特性値の同定手法は妥当であることがわかった。

表 1 異なるアトマイズ鉄粉の DPC パラメータ

Powder A					Powder B					Powder C							
ρ_0, ρ	0.450	0.70	0.75	0.79	0.84	ρ_0, ρ	0.45	0.70	0.75	0.79	0.85	ρ_0, ρ	0.460	0.70	0.75	0.79	0.84
X_i, X_o	-10	-341	-478	-635	-847	X_i, X_o	-10	-338	-471	-623	-874	X_i, X_o	-10	-296	-421	-565	-764
σ_0	4	21.0	31.6	45.3	59.4	σ_0	4	19.4	29.0	40.2	58.3	σ_0	3	15.4	23.4	32.7	45.8
α	0.1642					α	0.1685					α	0.2015				
R_c	2.51					R_c	2.51					R_c	2.5				
$W1c$	0.7577					$W1c$	0.7577					$W1c$	0.7357				
$D1c$	0.00265					$D1c$	0.00270					$D1c$	0.0029				
$D2c$	-6.5×10^{-7}					$D2c$	-7.0×10^{-7}					$D2c$	-7.0×10^{-7}				

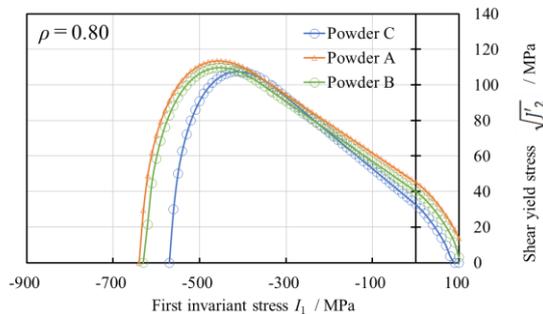


図 3 同定値で描画した降伏曲面形状

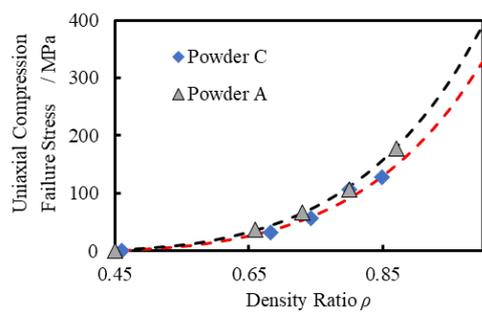


図 4 圧粉体破壊応力の変化挙動

表 1 のパラメータの同定手法として用いた一面せん断試験結果を、せん断中のせん断力と垂直力の関係として図 5 に抜粋して示す。波形の立ち上がり時、試験片のなじみを要するため若干の垂直荷重増加を示し、その後わずかに垂直荷重が減少しつつせん断荷重が増加する挙動を示した。限界応力状態 (CSL) は、せん断荷重がピークを示す手前にてせん断荷重の単調増加の開始点として定義すると、図中に示している一点鎖線のように推定できた。応力に換算後のせん断強度の傾きは粉末 A で 0.701、粉末 C で 0.745 であった。破壊包絡線の傾き α は単軸破壊応力と CSL 座標を接続して得られ、粉末 A で $\alpha = 0.164$ 、粉末 C で $\alpha = 0.202$ となった。なお、DPC モデルにおいては簡単のため α を密度依存を示さない定数として扱うことが多く、よって α が既知となれば、粘着応力の挙動を得ることで、任意の密度比の CSL 座標が計算可能となって、簡単に DPC パラメータを同定することができる。このように本提案手法では、より少ない実験回数で材料特性値の同定が可能となる。

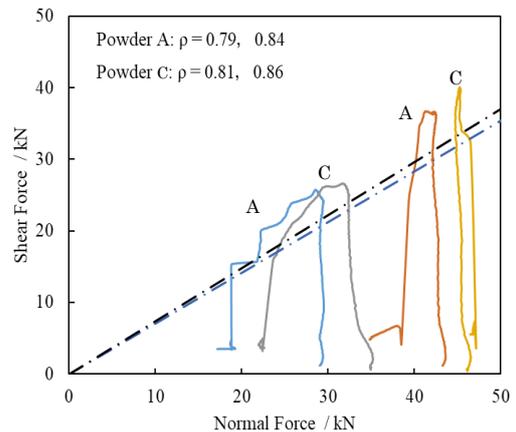


図 5 一面せん断試験による CSL の決定

(2) 有限要素法による成形不良事例の「見える化」

図6は、内側カップ形状の成形において下パンチを成形パンチの速度の1/2とした場合において、(a) 金型を固定した場合と、(b) 金型を成形パンチの1/4とした場合、および(c) 金型も下パンチと同期して下降させた場合、の解析事例である。後者は明らかに低密度部とリム部の過度な圧密が発生しており、このように不良発生箇所を予測することができた。

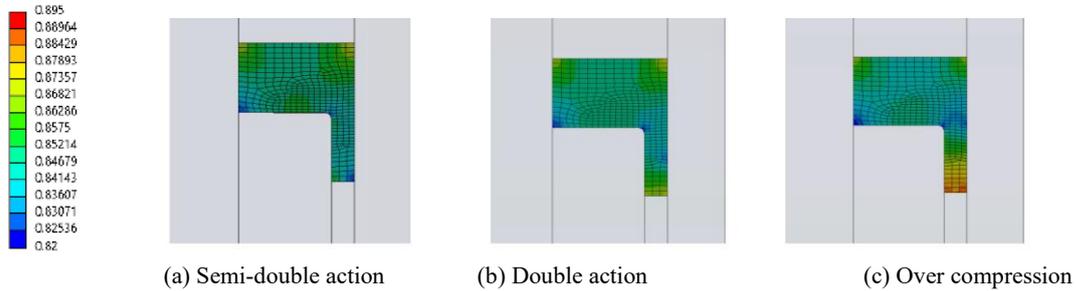


図6 工具動作による密度分布発生状況の見える化

図7は、フランジの内側角部における圧粉成形～拔出し行程の応力経路を金型の速度比で比較したグラフである。圧粉～除荷までは大きな相違はないが、除荷終了後の拔出しの最中に、(a)の金型固定（速度比 0）の場合は応力状態が再度左上方向に増加して破壊包絡線上に達しており、せん断破壊が生じているものと言える。

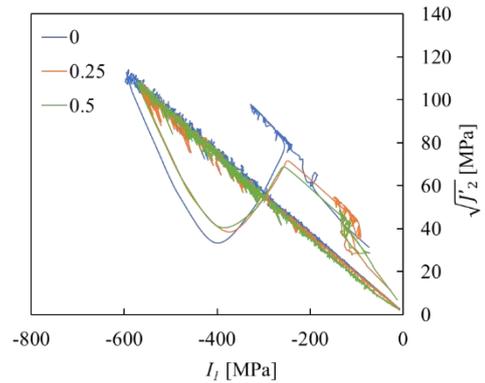


図7 内側角部の応力経路

次に、パンチも弾性体として取り扱い、パンチスプリングバック量が除荷～拔出し挙動に与える影響を「見える化」した結果を図8～図9に示す。ここで、パンチ長さを、パイプ形状の固定パンチ（下第二パンチ）に対して1.4倍とした場合と、2倍とした場合について「見える化」を行った。図からわかるように、パンチが長くなると最大せん断応力の分布に大きな偏りが生じるようになり、またひずみがフランジ部に大きく残留する傾向を模擬できている。

また、圧粉体が型の上から抜き出される際に生じる圧粉体表面のせん断応力の集中は、パンチ長さが長い場合により顕著となり、内側フランジ角部まで高いせん断応力分布が生じることから、パンチの弾性回復が圧粉体に破損をもたらすことが予測されているものと言える。

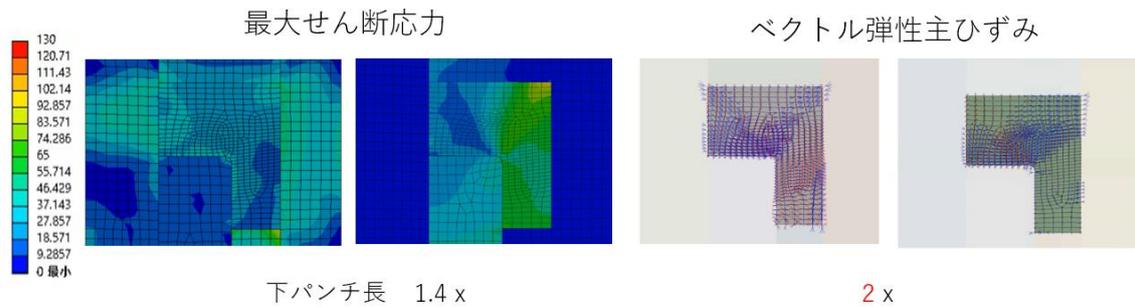


図8 除荷時においてパンチ長さがせん断応力とひずみ分布におよぼす影響

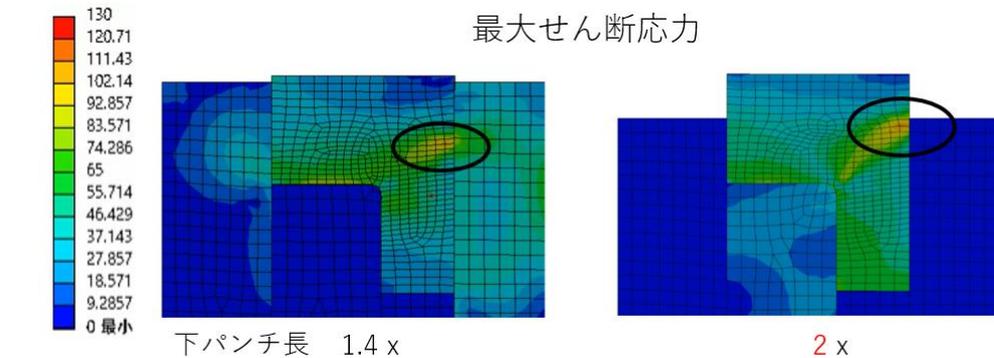


図9 拔出し時においてパンチ長さがせん断応力におよぼす影響

以上、本研究の目的を達成する研究成果を得ることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ogawa R, Fujii J, Taniguchi Y	4. 巻 886
2. 論文標題 Yield Parameters for Iron Powder Compaction on Different Particle Size	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 012060 ~ 012060
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1757-899X/886/1/012060	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 谷口 幸典	4. 巻 5
2. 論文標題 圧粉成形の有限要素シミュレーション	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ぶらすとす	6. 最初と最後の頁 263 ~ 269
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.32277/plastos.5.53_263	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 谷口幸典, 林真由
2. 発表標題 フェライト粉末の力学的圧粉特性について
3. 学会等名 粉体粉末冶金協会2021年度秋季大会 (第128回講演大会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷口幸典, 林真由
2. 発表標題 金型圧粉成形 - 抜出し行程の FEM 解析
3. 学会等名 第72回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mayu Hayashi and Yukinori Taniguchi
2. 発表標題 Prediction of shear crack occurrence on iron powder die compaction by FEM analysis
3. 学会等名 International Conference on Design and Concurrent Engineering 2021 & Manufacturing Systems Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤井惇平、谷口幸典
2. 発表標題 金属粉末圧粉体の弾性変形挙動に関する研究
3. 学会等名 第71回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷口幸典, 林真由
2. 発表標題 金型圧粉成形-抜出し行程のFEM解析 第2報 除荷行程における工具スプリングバックの影響
3. 学会等名 2022年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷口幸典, 林真由
2. 発表標題 種々の粉末降伏特性における圧粉成形のFEM解析
3. 学会等名 2022年度粉体粉末冶金協会春季講演大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------