

# メカノフュージョンにおける力学的計測

吉野博之, 田谷嘉浩, 加賀 寿

## Dynamic Measurement at Mechanofusion Process

Hiroyuki Yoshino, Yoshihiro Taya, Hisashi Kaga

### 要 旨

メカノフュージョン中にインナーピースと粉体の接触部に発生する摩擦力と圧縮力およびその中心位置の計測法を開発した。この計測法を用いてガラスビーズによる実験を行い、メカノフュージョン条件と力の関係について調べた。その結果、回転数および装入量の増加は、粉体に対して圧縮力を増加させていることが判った。また、メカノフュージョン中の正味使用電力と計測結果を元に計算した動力値はよく一致した。本実験よりメカノフュージョンの実際の挙動を解析する上での本計測法の有効性を示した。

### 1. 緒 言

最近の高機能材料の開発においては複合粒子を用いることが多く、粉体の表面改質による複合化技術が求められている。種々の複合化技術の中でも、材料の汎用性、不純物混入、表面物性の観点から、物理的処理法の1手法であるメカノフュージョン法が注目され、実用化が進められている。

メカノフュージョンでは回転するケーシングとインナーピース間での力学的作用により複合化が起こるとされている。しかし、複合粒子形成における力学的計測に関する研究はほとんどなく、その計測手法を確立する必要がある。本研究では、メカノフュージョン実稼働下での力学的計測に適用可能な手法を見出すことを目的とし、計測法の開発とガラスビーズによるモデル実験により計測法の評価を行った。さらに、ケーシングの回転数およびガラスビーズ装入量と発生する力との関係について調べた。

### 2. 計測方法と実験方法

#### 2.1. 計測原理とその方法

実験に用いたメカノフュージョン装置を図1に示す。このメカノフュージョン装置は、150ccの粉末挿入が可能で、内径150mm、高さ38mmのモータにより回転するケーシングと固定されたインナーピースおよびスクレーパーとからなる。粉体複合時のひずみと温度の測定を目的とし、インナーピース軸部には、ひずみゲージと熱電対を貼付した。

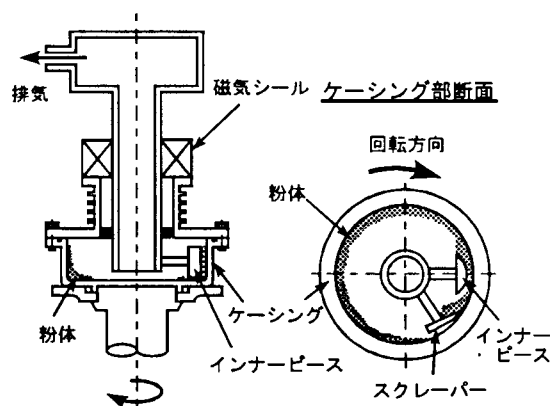
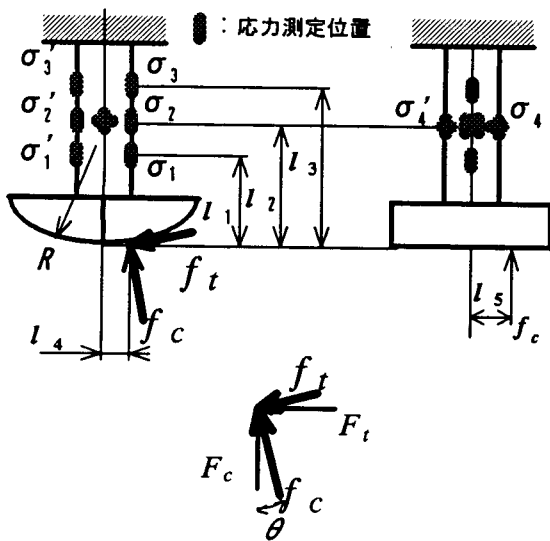


図1 メカノフュージョン装置

メカノフュージョン法では、回転するケーシングとインナーピース間で粉体が圧縮、剪断、摩擦等の力学的作用を受ける。この際、圧密された粉体がスクレーパーによりケーシングから掻き取られ、遠心力でケーシング内壁に押しつけられ、再度ケーシングとインナーピース間で力学的作用を受け、複合化が起こるとされている<sup>1),2)</sup>。本計測では、メカノフュージョン中にインナーピースと粉体の接触部に発生する摩擦力及び圧縮力とその中心位置を計測した。

いま、インナーピース軸部の応力からインナーピースと粉体の接触部に働く力について考える。図2にインナーピース軸部のひずみゲージを貼り付け位置を示す。



《 使用記号 》

- $f_t$  : 摩擦力
- $f_c$  : 圧縮力
- $F_t$  :  $f_t, f_c$  の軸直角方向成分
- $F_c$  :  $f_t, f_c$  の軸方向成分
- $\sigma_n, \sigma_n'$  : 応力 ( $n=1\sim 4$ )
- $A$  : 軸部断面積
- $Z$  : 軸部断面係数
- $R$  : インナーピース半径

図2 測定用インナーピース

接触部に働く圧縮力を $f_c$ 、摩擦力を $f_t$ とし、その軸方向成分を $F_c$ 、軸直角方向成分を $F_t$ とすると

$$F_c = f_c \cos\theta - f_t \sin\theta \quad (1)$$

$$F_t = f_c \sin\theta + f_t \cos\theta \quad (2)$$

と表され、各部の応力 $\sigma_n, \sigma_n'$  ( $n=1, 2, 3$ ) および $\sigma_4, \sigma_4'$ は、次のようになる。

$$\sigma_n = -\frac{F_c}{A} - \frac{F_c l_4}{Z} + \frac{F_t l_n}{Z} \quad (3)$$

$$\sigma_n' = -\frac{F_c}{A} + \frac{F_c l_4}{Z} - \frac{F_t l_n}{Z} \quad (4)$$

$$\sigma_4 = -\frac{F_c}{A} - \frac{F_c l_5}{Z} \quad (5)$$

$$\sigma_4' = -\frac{F_c}{A} + \frac{F_c l_5}{Z} \quad (6)$$

ここで、(3)~(6)を $F_c, F_t$ について解くと

$$F_c = -A \frac{\sigma_4 + \sigma_4'}{2} \quad (7)$$

$$F_t = \frac{Z}{(l_3 - l_1)} \frac{(\sigma_3 - \sigma_3') - (\sigma_1 - \sigma_1')}{4} \quad (8)$$

となる。また、

$$\sin\theta = \frac{l_4}{R}, \quad \cos\theta = \frac{\sqrt{R^2 - l_4^2}}{R} \quad (9)$$

であるから、(1)~(9)より、

$$f_c = F_c \frac{\sqrt{R^2 - l_4^2}}{R} + F_t \frac{l_4}{R} \quad (10)$$

$$f_t = F_t \frac{\sqrt{R^2 - l_4^2}}{R} - F_c \frac{l_4}{R} \quad (11)$$

$$l_4 = \frac{Z}{F_c} \left( \frac{F_t l_2}{Z} - \frac{\sigma_2 - \sigma_2'}{2} \right) \quad (12)$$

したがって、 $\sigma_1 \sim \sigma_4'$ を計測することで圧縮力 $f_c$ 、摩擦力 $f_t$ およびインナーピース中心から接触部中心までの距離 $l_4$  (以下 $l_4$ と記す)を知ることができる。

本計測法では、温度補償回路を有する4アクティブゲージ法<sup>3)</sup>による3組のブリッジから $(\sigma_3 - \sigma_3') - (\sigma_1 - \sigma_1')$ ,  $(\sigma_2 - \sigma_2')$ ,  $(\sigma_4 + \sigma_4')$ を測定し、(7)~(12)式によりインナーピースと粉体の接触部に発生する摩擦力及び圧縮力とその中心位置を求める。

また、構造上軸部のひずみゲージは、インナー

ピース先端から摩擦熱の影響を受け、みかけひずみが発生する。各ブリッジは温度補償回路を有するが、微小変位構造のため温度による影響を完全にはキャンセルできない。そこで、ひずみゲージ近傍に熱電対を貼り付けゲージ部の温度を測定し、温度上昇によるみかけひずみ分を補正した。

## 2.2. 基本特性の評価

計測用インナーピースを固定用台に取り付け、インナーピース先端に荷重を掛ける。その時の各ブリッジからの出力電圧を調べた。荷重と出力電圧の基本特性を図3, 4に示す。

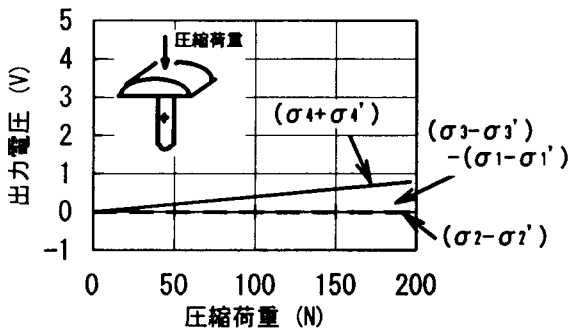


図3 圧縮荷重と出力電圧

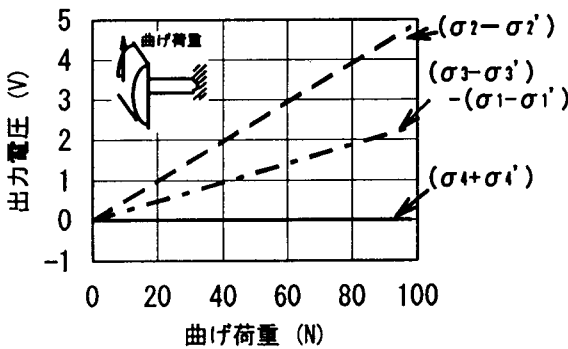


図4 曲げ荷重と出力電圧

図3は圧縮荷重と出力電圧の関係である。圧縮荷重に対し $(\sigma_4+\sigma_4')$ の出力電圧は直線関係となっている。また、 $(\sigma_3-\sigma_3') - (\sigma_1-\sigma_1')$ ,  $(\sigma_2-\sigma_2')$ の出力電圧は0Vであり、圧縮成分が消去されているのが確認できる。図4はインナーピース軸に対する曲げ荷重と出力電圧の関係である。

$(\sigma_3-\sigma_3') - (\sigma_1-\sigma_1')$ ,  $(\sigma_2-\sigma_2')$ の出力電圧は直線になり、 $(\sigma_4+\sigma_4')$ の出力電圧は0Vで曲げ成分が消去されているのが確認できる。

次にインナーピース表面に点荷重を軸方向に掛

け、実際の接触位置（荷重点）と $l_4$ の計測結果についての関係を調べた。図5にその結果を示す。実際の接触位置と計測結果はよく一致しており、 $\pm 0.2\text{mm}$ の精度となった。このことから、本計測法が圧縮荷重の接触中心位置を正確に検出していることを確認した。

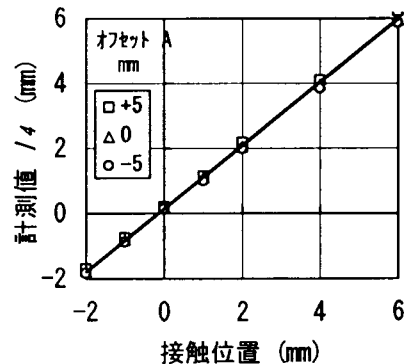
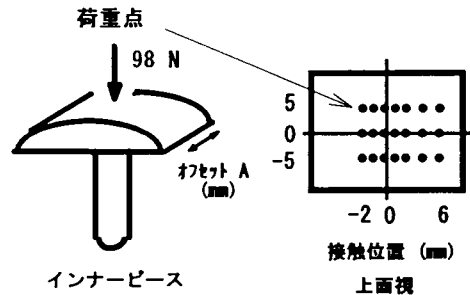


図5 接触位置の計測

インナーピースを装置本体に取り付けた状態で先端の粉体との接触部を加熱し、その時のひずみゲージ近傍の温度と温度上昇によるみかけひずみの出力電圧との関係を調べた。結果を図6に示す。温度変化に対して $(\sigma_3-\sigma_3') - (\sigma_1-\sigma_1')$ ,  $(\sigma_2-\sigma_2')$ の出力電圧は比較的小さいが $(\sigma_4+\sigma_4')$ の出力電圧は大きいものとなっている。繰り返し試験した結果、この関係には再現性があることが判った。そこで、実際の計測では図6の関係に基づき温度変化分の出力電圧を補正した。

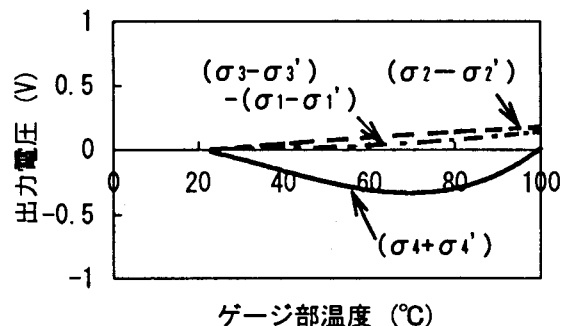


図6 温度変化と出力電圧

2.3. 実験方法

実験に用いたガラスビーズの平均粒子径は100 μmでケーシングへの装入量は80, 100, 120, 150, 200gの5種類とした。インナーピースとケーシングの隙間は2mmである。ケーシングの回転数は200~1400rpmで200rpmずつ回転数を変え、各回転数での回転時間は1分程度とした。

計測項目は、圧縮力、摩擦力、ガラスビーズとインナーピースの接触中心位置、ひずみゲージ部の温度、ケーシングの回転数に加え、ケーシングを回転させるためのモータの使用電力も併せて計測した。計測値は、各回転数において回転数が安定した後、約30秒間の数値を平均した値を使用した。

3. 実験結果及び考察

3.1. 回転数の影響

図7に回転数と圧縮力、図8に回転数と摩擦力の関係を示す。回転数が高くなるとともに圧縮力は大きくなり、両者の間にはよい直線性が認められる。摩擦力においても同様の結果が得られた。

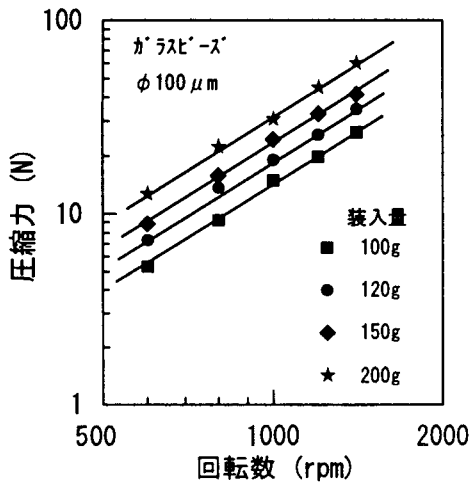


図7 回転数の影響（圧縮力）

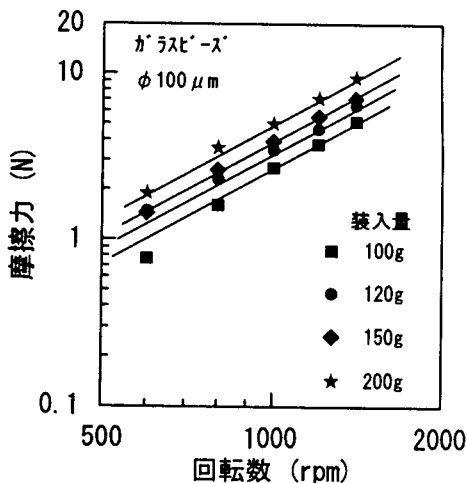


図8 回転数の影響（摩擦力）

いま、インナーピースとガラスビーズの摩擦に関してCoulombの法則<sup>4)</sup>に従うとすると、圧縮力と摩擦力の関係は

$$f_t = \mu f_c \tag{13}$$

と表される。ここで、 $\mu$ は摩擦係数で、速度に無関係に定まるはずである。回転数との関係で整理すると図9のようになる。摩擦係数が回転数に無関係にほぼ一定の値になっていることから、本計測法によって得られた摩擦力の妥当性を裏付けている。また、回転数を変えることによって圧縮力と摩擦力を制御できることがわかる。

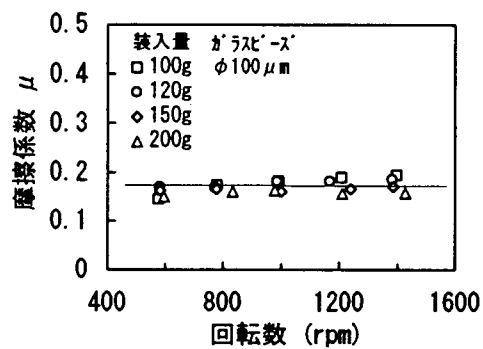


図9 回転数の影響（摩擦係数）

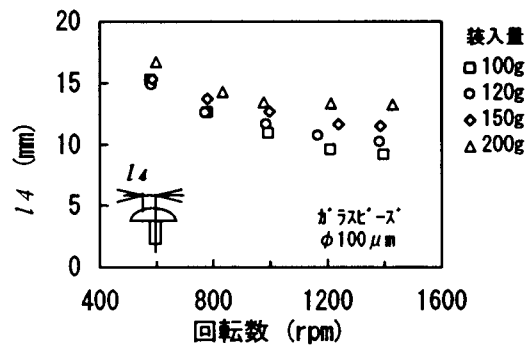


図10 回転数の影響（接触中心位置）

図10に回転数と接触中心位置との関係を示す。回転数が大きくなるにしたがって接触位置がインナーピースの中央に寄るが、ある回転数で一定になっている。これは、回転数の低い状態では遠心力が弱いため、ガラスビーズがケーシング外側下部に溜まった状態になる。結果的にガラスビーズの装入量が多い場合と同様、接触位置がインナーピース外寄りになっているものと考えられる。回転数が上がると遠心力が大きくなり、ガラスビーズがケーシング内側面全体に張り付いた形になる。このため、ガラスビーズ層は薄くなり、イン

ナーピースとの接触は中央寄りとなると推測される。

### 3.2. 装入量の影響

図11に装入量と圧縮力との関係を示す。装入量と圧縮力の間には比例関係が成立し、装入量が多いほど同一回転数では大きな圧縮力が発生している。また、回転数によりその勾配が異なっている。これは、各回転数毎に単位装入量当たりの圧縮力が一定となることを示している。装入量を増加することはインナーピースにかかる圧縮力を増加させてはいるが、複合化のために粉体に与えるエネルギーとして見ると単位装入量当たりでは変わらないということになる。しかし、これは全体的としてとらえた場合で、個々の粒子に与えるエネルギーで考えるとインナーピースと粉体の接触面積によって変わる。すなわち、装入量に比例して接触面積が増えていけば個々の粒子に与えるエネルギーは変わらないが、接触面積が一定であれば逆に個々の粒子に与えるエネルギーは増加する。これらの詳細な解析には、今後さらに接触面積あるいは圧力等の計測が必要である。

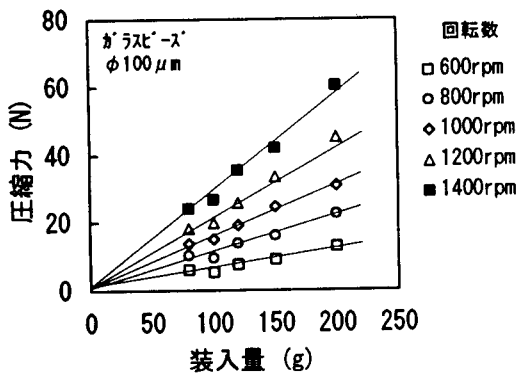


図11 装入量の影響 (圧縮力)

### 3.3. 使用電力との比較

本計測法の妥当性を判断する一つの方法として、メカノフュージョン中に消費された正味使用電力と、計測したインナーピースにかかる力から算出した動力を比較した。ここで正味使用電力はガラスビーズを処理中のモータの使用電力からガラスビーズ装入量相当の質量をケーシングに付加し、回転させたときの電力を引いたものである。また、動力Pおよびワット (W) への換算は、次式による。

$$P = T \times 2\pi \times n / 60 \quad (\text{kgm/s}) \quad (13)$$

$$w = P \times 9.8 \quad (\text{W}) \quad (14)$$

ここで、Tはトルクでインナーピースにかかる軸直角方向の力とケーシング半径から求められ、nは回転数である。

結果を図12に示す。各マークは正味使用電力で、各線はそれぞれ計測値から計算した動力値である。各装入量とも正味使用電力と動力値はよく一致している。このことから、本計測法がメカノフュージョン中に発生している力を正確に検出していることを確認した。

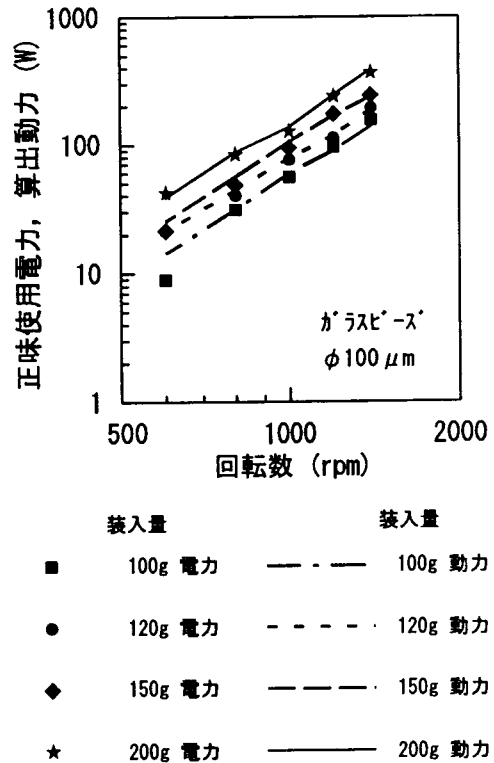


図12 正味使用電力と動力の比較

## 4. まとめ

インナーピースと粉体の接触部に発生する摩擦力と圧縮力およびその中心位置の計測法を開発し、評価実験およびガラスビーズによる実験を行った。おもな結果は次のようにまとめられる。  
 (1) ケーシングの回転数の増加は、粉体に対して圧縮力および摩擦力を増加させる。装入量の増加

は圧縮力を増加させるが単位装入量当たりの圧縮力は変わらない。

- (2)本計測法により新たにインナーピースと粉体の接触中心位置を計測できるようになり、これが、インナーピースと粉体の接触状況を把握するのに有効であることを示した。
- (3)メカノフュージョン中の正味使用電力と計測結果を元に計算した動力値を比較し、よく一致する事を確認した。このことから、本計測法はメカノフュージョンの実際の挙動を解析する上で有効であると考ええる。

#### 参考文献

- 1)丹野浩一，他；粉体工学会誌，27巻，3号（1990），P153～158.
- 2)加賀寿，他；粉末および粉末冶金，39巻，7号（1992），P546～552.
- 3)菅野 昭，他；応力ひずみ解析（朝倉書店），（1986），P41.
- 4)森口繁一；初等力学（培風館），（1959），P171.