博士（工学）　柴　田　俊　春

学 位 論 文 題 名

粉粒体の形状解析とその応用に関する研究

学位論文内容の要旨

粉粒体の物理的，工学的処理及びその物性，挙動に深くかかわる粒子形状の指標化が求められている。本研究では粒体形状解析に適用するフーリエ変換法を，その基礎から検討し，粒子投影又は断面を代表する２次元画像輪郭曲線からの特徴抽出に関して効果的な被変換関数を提案した。加えて各種の処理を行った実粒子に本変換法を適用，その展開理論の有効性を実証した。

本論文の構成は，基礎編と応用編－Ⅰ，Ⅱとの３編からなる。Ⅰが解析法の直接適用，Ⅱは拡張を含む粒子形状データ処理法である。

基礎編は本論文での基本的事項を述べたもので５章からなる。

第１章では形状解析にあって情報変換の立場から，従来の研究経過を述べた。その中でこれまで代表的変換法の一つとして知られているフーリエ変換法に注目した。通常のフーリエ変換法（全区間型）を用いた粒子形状解析は粒子輪郭を表現する動径関数，あるいは偏角関数を対象に行われている。これら被変換関数と変換法に関して幾つかの研究に言及した。しかしこの全区間型展開法は次に述べるような問題点を含んでいる。すなわち対象関数が対称性を示さない場合，正弦と余弦関数の組合せ，または正（余）弦関数と位相角の組合せが必要である。正弦関数も余弦関数も同一種類の三角関数であるが，直接２つの変換係数の大小を比較出来ず，必ず異なった種類の係数が一緒に存在する。同様に正，余弦関数の合成で得られる正弦関数と位相角を用いた解析中，位相角を省略することは一般には非対称である不規則形状を対称形状で近似することになるので'最後の手段'である。これに対処出来る半区間型フーリエ変換を述べた。

第２章は半区間型フーリエ変換法に関する導式，証明，正（余）弦変換係数の種々の性質を述べた。任意の関数（動径，偏角関数等）は，正弦関数あるいは余弦関数単独で表現可能（半開区間の内変域）でもあるし，正－余弦関数の組合せも可能である。しかし正弦係数と余弦係数に含まれている小さな係数の個数を数えた結果，正弦係数のほうが多いことの理由で正弦変換法を推薦できる。

第３章では粒子のモデル形状として，軸対称平面図形をとり，正弦変換した結果を述べた。図形は正多角形，星型であり，角数と正弦係数の特徴を調べた。

第４章では実粒子の篩分で，篩を通過できた粒子の最大径は同一であっても，二，三次元的粒子寸法を調べると大きく異なる場合が多い。従来の平均径使用では誤った結果になることを述べ，長短度を考慮した指標の必要性を示した。

第５章は，粒子解析に直接かかわることではないが，個数の多い収束する数列の部分和が最大頁を代表できるとする著者等の数学的経験則がフーリエ変換係数列へも近似的に適用出来ることを述べた。

応用編－Ⅰでは，モデル粒子を想定して，これを粉砕し，'形と径' で分級し，表面を処理した前後の粒形変化を調べる過程を意図した５章からなる。

第１，２章では異形粒子の角を取ると共に，それ（親）からの破砕粒子形成に注目した。成形のために穏やかな粉砕のボールミルを用いた。成形の様子はフーリエ係数に基づいて明瞭に追跡出来た。親粒子が不要の場合はボールミルにかえてクラッシャーが用いられる。第２章ではこれら２種の粉砕機を用いて得られた細粒子を '形' で比較し，細粒子形状での共通性を明らかにした。

第３，４章には大小，異形粒子混合物の篩による分級整粒を調べた。各章は篩への装塡粒子量が薄層，厚層の場合である。薄層実験にあって第Ⅰ編・第４章で述べた通り篩を通過した粒子は即同一径であると判断するのは誤った結論になる。篩分は時間経過につれて，最初は異形性の少ない粒子が得られ，後に異形性が強くなることが形状解析から読み取れる。また篩分速度についても検討した。厚層篩分は分級速度の面からは機構の変化を示す特徴点を有す。しかし粒子の '形' の分離ではその有効性が薄かった。粒径－粒形分離の点からみると，厚層で粗く整粒した後その粒子を薄層篩分で粒形分離をする必要がある。

第５章では粒子の簡単な加熱変形を追跡した。熱変形は対象試料によって，表面形状が局部的に変わるもの，角が丸くなったり，膨張，収縮等，形と径の両方に変形が表れて来る。本章は熱可塑性物質の熱変形例を述べた。第２編を通して，粒子の簡単な二次元像のフーリエ変換法が有効であるとの結論を得た。

応用編－ⅡはⅠと関連する問題と今後の問題を含めて７章からなる。

第１章は粒子形状の３次的解析である。漁師は細線状，あるいは薄片状でなければ，厚みを考えねばならない。規則形状であるなら問題は少ない。しかし通常は不規則形状が処理対象である。本章では従来の薄積層解析にかえて，粒子をある中心軸に等角度間隔回転毎得られる二次元投影

像を組合せて凸面固体を近似する解析を行った。そのフーリエ変換を用いた解析によって固体の表面積や体積の評価，形の3次元的分類が可能になった。等回転角からの像に加えて，1固体に関し最小限三画面の像を解析することで，目的にかなった知見の得られることも示した。これは固体（粒子）の体積，面積変化を伴う粉砕速度や溶解速度解析への適用も可能である。

第2章は，第1章に引続き小粒子表面の凹凸が強い際の解析である。表面積の直接測定が困難な粒子について，濡れ現象の利用，および第1章での画像情報からの体積評価を用いた解析を行った。

第3章は，数種の小粒子が共存する画像から粒子を分別する可能性について論じた。白黒の二値画像を用いての分別（形の特徴利用）は幾分曖昧さを含むが大筋で有効であると結論した。

第4章は非球形粒子の充填層の通気特性を取り上げた。従来は寸法次元として球体積相当径を使用していたが，比表面積径が有効であることを示した。本章で体積，表面積は粒子が回転体に近いので近似的に数学公式を使用したが，フーリエ変換を利用した形状解析処理法は一律処理が可能な利点がある。

第5章は粒子表面の改質例に於ける形状複雑化の問題を扱っている。動径関数が多価になり解析出来なくなった際，代わりに用いるのは偏角関数とこの関数のフーリエ変換である。ここでは表面改質物質の付着量と形状の関連を偏角法で処理した。その過程で偏角関数に幾つかの問題点のあることを追認した。本章ではより良い新しい手法として輪郭線上の座標x，yを関数値として順次検出する方法を案出した。内容的には次章で検討するが種々の適用性を有す。

第6，7章では前章提案の粒子輪郭像からの逐次座標値検出によるx，y－関数のフーリエ変換を考察した。両関数は動径関数，偏角関数と比較して関数値の上下変動は激しくない。曲線（関数）形状は余弦関数，正弦関数と似ている。これは容易に予想されるように正弦関数類似の関数の正弦フーリエ変換は低周波へ情報を集めるので，少ない係数で形状逆変換が可能になる。また，フーリエ係数を用い面積，長短度が相関可能である。

第8章は粒子形状関連の最近の研究を述べ論文の結びとした。

学位論文審査の要旨

主　査　　教　授　　山　口　賢　治
副　査　　教　授　　佐久間　哲　郎
副　査　　教　授　　古　市　隆三郎
副　査　　教　授　　小　平　紘　平

最近の画像関係技術の進歩により，座標の読み取りもかってのX－Yレコーダーに比べて大幅に高速化した。これにより従来定性的でしかなかった金属，合金をはじめ分散系複合材料，生物，生体などあらゆる組織，構造の定量的な解析が可能になった。粉粒体についてはかねてから粒子形状とその物性との間になんらかの相関があると予感されていたが，形状の指標化，特定化とそのための一次データの測定の困難さゆえにながいこと拱手せざるをえなかった。また，形状解析の多くが2次元画像についてであるのに対して，粉粒体の場合3次元立体についての諸元，表面積，体積の予知予測を可能にする指標であることが要求される。粉砕，晶出などの処理を経た粉体は本来不定形，irregularといわれるように，各粒子とも異なり，しかもその1粒1粒の形状を表示するにも多数の係数，定数が必要である。工学的利用を考えるとき，この数を可能な限り少なくすること，いいかえれば形状情報を可能な限りコンパクトに，濃縮して含む係数，定数であることが望まれる。本研究は，これらの現状を背景に粒状体の形状とくにその特徴抽出を可能にする定量的な指標化を考究し，これに要する係，定数および一次データの数を従来のほぼ半分以下に減らしうることを実証，さらに粒子の表面積，体積との相関を確認し，算出法を示した。

本論文は，基礎（理論）1，応用2各編の3編から成る。基礎編は，従来型の粒子形状指標を概説し，フーリエ変換法の利用から改良，形状情報をコンパクトに含む係数群の導出までの経緯について述べている。固体粒子の2次元投影画像について，その重心を原点とする極座標で輪郭曲線を表わし，これを動径関数とよんでいる。従来型の手法では，この動径関数を全区間型フーリエ展開し，その正，余弦係数および位相角の値をもって形状諸元としている。そのために1個の粒子形状についてすでに数十の定，係数値が必要となり，粉体を代表する多数の粒子についてとなると膨大な数になり，実用に適さない。また，しばしば位相角の提示を省略した利用がみられるが，この場合形状の対称，非対称を無視するだけでなく，逆変換による形状復元は全く無意なものになる。本研究では，従来型の全区間型ではなく半区間型フーリエ展開し，これにより位相角のもつ形状情報が正，余弦係数に移ることに着目し，その省略が可能であることを証明した。

さらに，正，余弦いずれか一方の展開係数で十分なこと，したがって従来型の半分程度の係数値を用いる逆変換で十分形状の復元が可能であることを確認した。その他形状指標としてここで提案する半区間型フーリエ展開係数，とくに正弦展開係数についての諸特性について検討し，特徴抽出の手法，粉体の一次物性として平均粒径だけでは不十分で，少なくとも長短度の考慮が必要なことなどを明らかにしている。

応用編Ｉは，上述の指標が実際に形状の異同を識別する，いいかえればその特徴を抽出する性質を十分具備しているか否かを，いくつかの粉体操作に適用，検討，考察した内容である。粉砕過程では，粒径だけでなく，粒子形状も変化すること，粉砕機によっては砕製品の粒子形状が異なることを，この指標を用いて確認している。また，回分式フルイ分けにおけるフルイ下の粒径，粒形の時間的変化，また可塑性固体粒子の加熱による変形過程における膨張，収縮や凸部の変化などの追跡にこれを適用し，多くの知見を得るとともに，粒子形状の変化過程への一般的な適用性を裏づけている。

応用編Ⅱは，２次元形状情報，指標と表面積，体積などの３次元立体諸量との関係および凝集塊などのように凹部をもつ形状の解析手法が主内容である。立体諸量については，中心線のまわりで輪郭曲線を回転し，その回転体から推定する考え方をもとに諸量と係数間との相関関係を明らかにし，算出法を示している。凹部をもつ形状の回析には輪郭曲線－フーリエ展開法は不適で，偏角関数を用いる方法が提案されているが，一次データのばらつきが避けられず実用の可能性はうすい。本研究では，輪郭曲線をＸ，Ｙ－座標値として取り込み，これにフーリエ展開法を適用する試みを示し，成功している。この方法はとくに凝集体や結晶粒など凹凸をもつ粒子形状解析に突破口を開くもので，その証明に二，三の事例を挙げ，その有用性を示唆している。

これを要するに，著者は粒子の２次元投影画像，輪郭曲線について動径関数の半区間型フーリエ変換およびＸ，Ｙ－座標値の利用による形状指標化を試み，その妥当性を裏づけている。これによって得た知見および応用の可能性は高く評価することができ，その意義は大きく，よって博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。