

特集 2

食品加工

テクスチャリングによる食品用粉体の 付着防止としゅう動特性の向上

株式会社不二 WPC

取締役 技術部長

熊谷 正夫

テクスチャリングによる食品用粉体の付着防止としゅう動特性の向上

(株)不二WPC 技術部 熊谷 正夫

1. はじめに

小麦粉、コーンスターチをはじめカレー粉、調味料など様々な食品用粉体は、ホッパー、シューターやコンベヤーさらに分粒用のフルイ、分包用計量器、充填機を経由して製品化される。それら搬送機器類では、ブリッジなどの排出不良(ホッパー)、目詰まり(フルイ)などのトラブルが発生し、生産効率低下や不良品増加の原因となっている。その主たる要因は、搬送機器類の表面と粉体との付着やしゅう動性不良による。

現在、食品搬送機器類表面には、粉体の付着防止やしゅう動性向上のためPTFE(フッ素系樹脂、いわゆるテフロン[®])加工が施されているものも多い。PTFE加工は摩耗やはく離が起きやすく、摩耗粉やはく離片が発生する。PTFEそのものの毒性については、『ヒトに対する発がん性について分類できない』(食品安全委員会ファクトシート:平成24年11月19日版)とされているが、そのリスク評価において、『PTFEの製造の際に助剤として使用されているPFOについて、「ヒトに発がん性があるらしい…」(同上:ファクトシート)などの報告もあり、PTFE加工品の食品用部材への使用に関しての懸念が発生している。また、食品製造産業では、食の安全を確保するために異物混入に対する対策が喫緊の課題となっており、食品搬送用機器の脱PTFE(脱コーティング)化が急速に進められている。

日本国内における食品粉末の消費量は小麦粉(600万t)、コーンスターチ等の澱粉(300万t)など総量で1000万tを超える。そのうち、0.1%が付着し洗

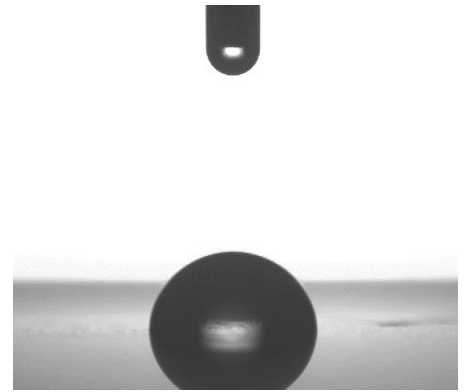
浄等により除去されても、1万tの不良粉末が生成される。それらは捕集、分別され再利用されるか廃棄物とされる。そのためエネルギーや環境負荷は膨大なものであり、エネルギー対策や環境対策のうえでも食品用粉体の付着防止としゅう動特性向上は重要である。

本稿では、WPC処理(微粒子投射処理)による表面形状の形成(テクスチャリング)を用いた、食品用粉体の付着防止としゅう動特性向上について紹介する。

2. WPC処理による食品粉末の付着防止

WPC処理は微粒子を金属系基材に投射し、疲労強度の向上やテクスチャリングによるしゅう動特性の向上を実現する手法である。テクスチャリングは各種機械金属部品同士、ペットボトルなどの高分子部品のしゅう動特性の向上などに有効で、幅広く用いられている。WPC処理によるテクスチャリングは表面被覆と異なり基材そのものの塑性変形を利用することから、異物混入の可能性がないため食品粉末への適応には極めて有用な手法である。

一方、機械金属部品や高分子部品と比較して、食品粉末の付着防止やしゅう動特性向上には、多くの困難性がある。第一に試料が粉体であり、粉体の動力学的挙動が完全に解明されていないこと、第二に粉体の物性が様々であること、具体的には試料が多様化しており個別差が大きいことである。例えば、小麦粉を例にとれば、①粒径分布が様々(薄力粉では20 μ m程度、強力粉では100 μ m程度をピークに持ち、幅広い粒径分布となっている)である、②形状も球形から薄片状



まで様々な形状を有している、③15%程度の水分を含水しており、含水量は産地、生産時期により異なり、保管状況でも変動する、などである。そうした点から、付着特性やしゅう動特性は極めて複雑である。小麦粉を傾斜した板状を滑らす場合、粉体が回転成長しながら滑る、凝集し層状に滑る、凝集層が崩壊し滑るなど、様々な形態をとる。それらは、粉体と基材表面の滑りだけでなく、粉体の量、充填度(固まり具合)や湿度など、複雑な要因が絡んでいる。

テクスチャリングによる粉体の付着性を確認するために、フルイによる付着、目詰まりを評価した。フルイでは、ワイヤー間に空隙があるために凝集物が崩壊しやすい、ワイヤー断面が円形のため粉体の付着の臨界角が顕著になる、など、基材と粉体との付着性を抽出して評価しやすい。未処理ならびにWPC処理によるテクスチャリングを形成したフルイへの、小麦粉の付着状況(と拡大写真)を図1に示す。未処理のフルイでは付着が多く、部分的に目詰まりが起きているのが観察される。一方、WPC処理を施したフルイでは付着量が大幅に低減されており、テクスチャリングによる粉体の付着低減の効果が確認される。

粉体を集合体とみた場合、荷重は全体にかかるのではなく、網目状に構成さ

れる応力鎖に伝播し、粉体が集合体として維持される要因となり、目詰まり（ブリッジの一種）などを起こす。付着低減による目詰まりの抑制は、ホッパー、シューターのブリッジや層状付着物の抑制と関連付けられ、粉体のしゅう動特性の向上に寄与すると考えられる。

3. 付着抑制のメカニズム

テクスチャリングによる粉体付着抑制のメカニズムについて、機械的な接触面積の関係ならびに化学的・物理的な作用について検討した。

機械的な観点からは、機械部品などの負荷の大きい系では、接触部の塑性・弾性変形により表面形状によらず、接触面（真実接触面）の面積は変化しないとされている。しかし、小麦粉のような軽い粉体では、下地基材の大きな変形は考えにくく、**図2**のようにテクスチャリングにより面接触から点接触へ移行し、接触面積が減

少し付着抑制に寄与すると考えられる。

一方、粉体と基材との相互作用からは、以下の結果が得られている。粉体・基材間の化学的・物理的な相互作用として、水素結合、双極子相互作用、ロンドン分散力などがある。それらは、表面自由エネルギーの測定によって計算される。表面自由エネルギーならびにその成分分けに関しては様々な理論があり、必ずしも定式化されてはいない。また、筆者らは、それらに関して多くの知見を有しているわけでない。そうした点を前提に、比較的よく使用されている、協和界面科学社製の表面自由エネルギー接触角計と解析ソフトウェアを用いて、テクスチャリングによる表面自由エネルギーの変化を測定した。具体的には、未処理の SUS304 板、ならびに各種 WPC 処理を施した SUS304 板に、極性の異なる水、ヨードメタン、エチレングリコールを滴下し、接触角を測定し、表面自由エネ

ギーの各成分を求めた。

表面自由エネルギーの各成分の計算結果を**表1**に示す。ここでは、比較的直観的に理解しやすい北崎・畑理論に基づく結果を示している。結果から、テクスチャリングにより SUS 板の表面自由エネルギーが小さくなっている（濡れにくくなっている）ことが確認される。とりわけ、表面自由エネルギー成分のうち水素結合 (γ^h)、双極子相互作用 (γ^p) に関する項目が大きく減少している。テクスチャリングによる、表面自由エネルギーの各成分の増減の物理・化学的な解釈は明瞭ではないが、小麦粉など食品粉末の付着性を理解するためには有用な結果と考えられる。

SUS 板の実表面は、クロムの酸化物や湿気等による水酸化物の混在した層に覆われていると考えられる。一方、小麦粉など食品粉体は、デンプン、たんぱく質、脂質などにより構成され、様々な官

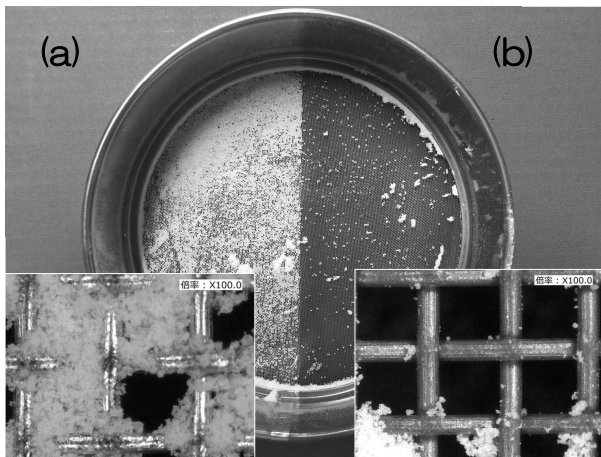


図1 未処理 (a) ならびに WPC 処理面 (b) の小麦粉の付着・目詰まりの様子

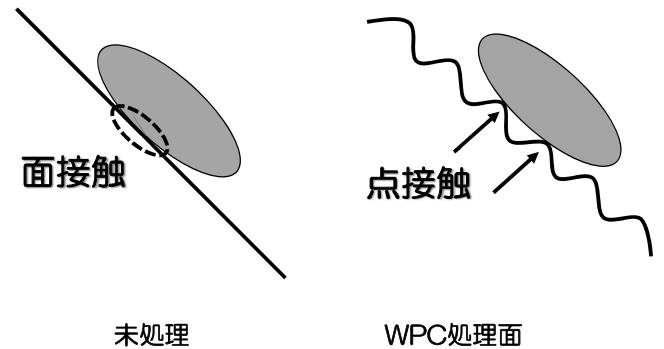


図2 未処理ならびに WPC 処理面の付着の模式図

表1 北崎・畑理論による表面自由エネルギー成分の計算結果

	分散力(γ^d)	配向力(γ^p)	水素結合力(γ^h)	Total(mJ/m^2)
未処理(鏡面)	16.7	79.7	22.3	118.7
処理A	27.4	25	9.1	61.5
処理B	32.4	6.8	1.2	40.4
処理C	26.6	10.4	2.4	39.4
処理D	34.9	4.6	3.7	43.2
処理E	30.6	15.2	6.7	52.5

能基を有している。また、水分も含有している。そのため、小麦粉などと SUS 板との付着は、SUS 板の表面の酸化物、水酸化物と食品粉体の官能基ならびに水分との水素結合が主要な要因と考えることができる。テクスチャリングにより SUS 板の（見かけの）表面自由エネルギー、特に水素結合 (γ^h) 成分が小さくなっていることは重要である。

フルイへのテクスチャリングによる、付着抑制効果に基づき、ホッパー、シューターなどの搬送基板への適応について示す。搬送基板を模した漏斗の半面に WPC 処理を施し、小麦粉を投入後の付着状態の観察例を図 3 に示す。WPC 処理面への付着が大幅に減少していることが確認される。

4. 表面形状の評価

テクスチャリングの最適化に関しては、表面形状の評価が重要である。一般には、JIS 等で定義された Ra、Rz といったパラメータが使用されるが、それらは、高さ方向の評価は可能であるが、WPC 処理面のようなディンプル形状の場合、凹凸の周期性の評価が必要であり、評価指標としては適していると言えない。

テクスチャリングの評価として粗さ

曲線のフーリエ変換を試みた。WPC 処理によるテクスチャリングは等方的と考えられるため、一次元の測定を実施した。

粗さ曲線をそのままフーリエ変換した結果では、低周波成分の寄与が大きくなり、肝心な数 μm ~ 数十 μm 領域の差が分かりにくいこと、低周波成分の誤差が大きいことが確認された。通常、フーリエ変換では振幅（強度）の基準値は周波数に依存せず一定である。WPC 処理によるテクスチャリングを考える場合、凹凸は相似形と考えるのが自然であり、 n 次の周波数成分に対しては、振幅も $1/n$ 倍とする必要がある。相似性を考慮して規格化した結果を図 4 に示す。図には鏡面、通常の WPC 処理（粒径 $54\mu\text{m}$ 以下）、微細粒による WPC 処理（粒径 $8\mu\text{m}$ 以下）の結果を示している。通常の処理では $50\mu\text{m}$ 程度を中心としたディンプル分布が、微細粒の処理では $10\mu\text{m}$ 以下のところを中心としたディンプル分布が得られており、有意な結果となっている。以上から、規格化したフーリエ変換でテクスチャリングに関する評価基準を得ることが可能となった。

5. おわりに

食品用粉体の付着防止としゅう動特

性向上に対して、WPC 処理によるテクスチャリングの有効性が確認された。本手法を現実の搬送部品に適用する場合、実部品では大型、複雑形状なものも多い。また、コスト的な観点も必要である。テクスチャリングには、機械加工、研磨やレーザー加工などの手法も用いられている。WPC 処理は大気中で実施する、試料形状に制限が少ない、処理時間が短い、さらには、メディアを循環して使用するために環境負荷が少ない、などの利点が多い。また、コスト的にも PTFE 加工だけでなく上記の手法との比較でも優位性がある。本稿では、小麦粉、コーンスターチなどについて紹介したが、カレー粉や七味唐辛子などの複合粉体など、様々な需要がある。WPC 処理は目的とする粉末に合わせて、使用するメディア（粒子）や条件（投射圧力など）により、形成する形状を変化させることや複合形状の生成が容易である。

当社では、テクスチャリングの最適化に関しては、現在、表面自由エネルギーの測定、付着粉の観察やフーリエ変換など形状測定法の確立などを基礎にしながらか、擦り合わせ的な最適化を実施しているが、種々の知見を基礎として、より設計的な取り組みを確立しようとしている。

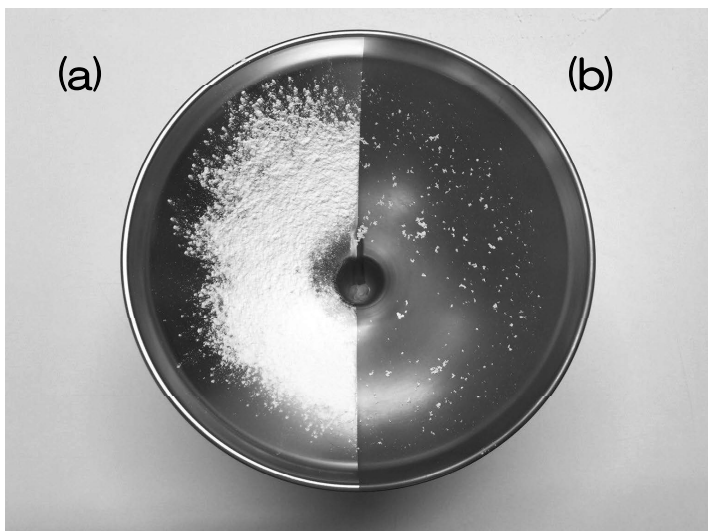


図 3 未処理 (a) ならびに WPC 処理面 (b) の小麦粉の付着の様子

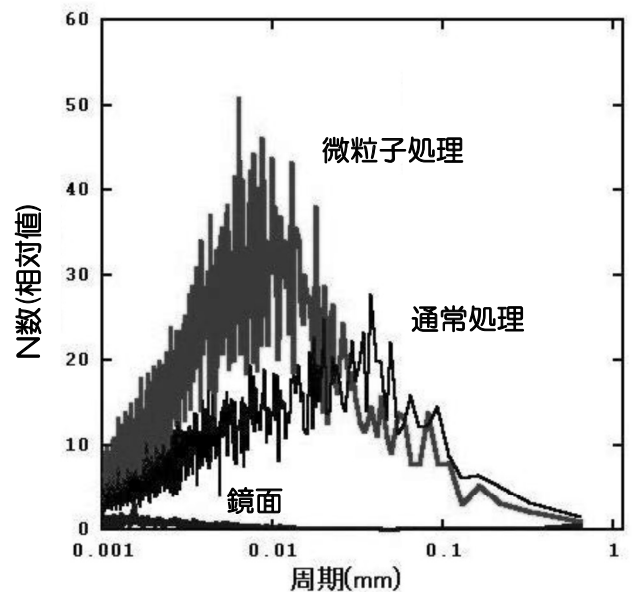


図 4 規格化したフーリエ変換による WPC 処理面の評価