

特集 HACCP 制度化における正しいサニテーションのための手引書

食品製造設備における マイクロディンプル処理の多様な効果

株式会社サーフテクノロジー
熊谷 正夫

食品製造設備における マイクロディンプル処理の多様な効果

株式会社サーフテクノロジー
熊谷 正夫

1. はじめに

食品製造設備に求められる課題は、ますます多様になってきている。食の安全性確保の観点からは異物混入や微生物対策が、資源・環境的にはフードロス対策などへの対応が迫られている。一方、生産プロセスでも、生産効率の向上や少子化などを起因とした労働力不足の観点から自動化、IoT、AIの導入などの要求がある。

食品製造設備の特殊性としては、一般産業機械と比較して、扱う品物が多種多様であり季節要因などの影響を受けること、大規模生産から個人営業まで企業規模も幅広く、現物合わせ的な生産設備の製造がなされていることなどが挙げられる。

当社は、それら食品製造設備に求められる課題解決のための要素技術として、基材表面にマイクロディンプル（微細凹凸）を形成し、食品の滑り性や付着特性を改善する手法を開発し、食品製造業界に展開している。また、新たに微細凹凸による抗菌効果も確認されている。本稿では、マイクロディンプル処理によるそれらの効果について紹介する。

2. マイクロディンプル処理について

各種部品に粒子を投射する処理には、ショットピーニングとブラスト処理がある。一般的には、ショットピーニングは球状の粒子を投射し、基材表面に変形を起こし、表面を圧縮し破壊（疲労）強度の向上や硬度を上げる処理である。ブラスト処理は鋭角の粒子を投射し基材表面を削り取る処理で、塗装下地や錆び取りなどに使用される。

投射する粒子の径を小さくすることにより、より表層部の強化（疲労強度の向上や硬度上昇）が可能となり、数十 μm の粒子を用いる方法を微粒子投射処理（商用ではWPC処理）と呼び、機械構造部品や輸送機器、具体的には歯車、パネや自動車用部品などに用いられている。また、同手法では、表面に微細な凹凸が形成され、機械部品の滑り面の摩擦を低減するなどの効果も得られている。

マイクロディンプル処理は、微粒子投射処理を食用材料（小麦粉、野菜など）に適用したものである。WPC処理が機械材料部品の強化（残留応力の付与）を目的にしているのに対して、マイク

ロディンプル処理は食用材料の付着抑制や滑り性の向上のため、さまざまな表面形状の形成を目的としている。マイクロディンプル処理の特長としては、試料形状に制限が少ないこと、成膜等と比較してコスト的に低く抑えられること、手法そのものの環境負荷が小さいことなどが挙げられる。

3. マイクロディンプル処理による食品の付着抑制、滑り性向上、洗浄性向上

食品材料の製造過程、具体的には、分別系（フルイなど）、搬送系（ホッパー、シューターなど）や成型系（食品型など）では付着抑制や滑り性向上のため、フッ素系樹脂（皮膜）をはじめとした表面被覆が用いられることが多い。フッ素系樹脂に関しては製造の際の助剤の発癌性の懸念や環境負荷に対する課題も存在する。また、表面被覆は摩耗や剥離を発生しやすく、異物混入の要因となる。

現在、表面に微細な凹凸を形成することにより、食品の付着抑制や滑り性向上が可能となってきた。表面形状の形成法としては、レーザ加工や機械加工によるものなどもあるが、マイクロディンプル処理は、実用的な容易さだけでなく、異なる特徴を有している。レーザ加工や機械加工は基

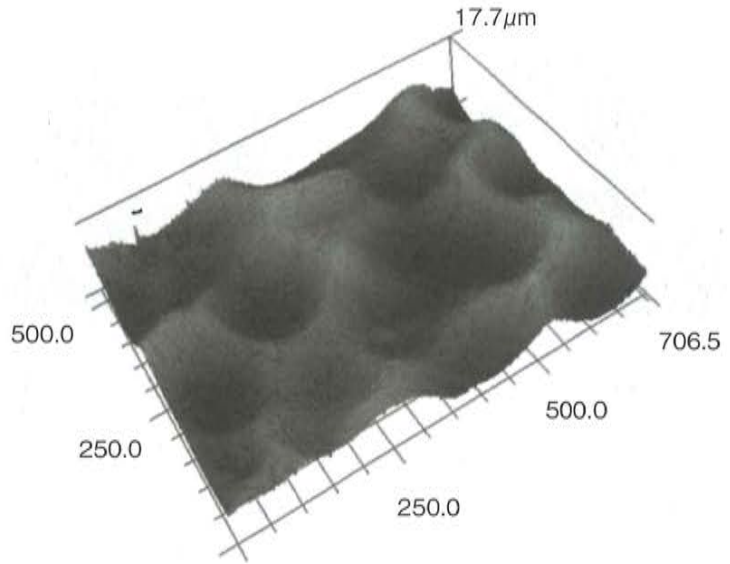


図1 マイクロディンプル処理面のレーザ顕微鏡による3D観察像

本的に除去加工であるために、加工面は凹部と平坦部の混在であり、形状や凹部の空間配置も規則的である。一方、マイクロディンプル処理では、ランダムに複数回の投射が重畳されるため、表面形状は複雑であり規則性を有していない、また、塑性変形が主であるために、ディンプル状凹部と同時に、凹部周辺への盛り上がり（凸部）が形成される。処理面のレーザ顕微鏡による計測例（Z軸を拡大している）を図1に示す。マイクロディンプル処理による食品付着抑制の例として、フルイならびにシューターを模した漏斗への小麦粉の付着抑制例を図2に示す。処理により付着が大幅に

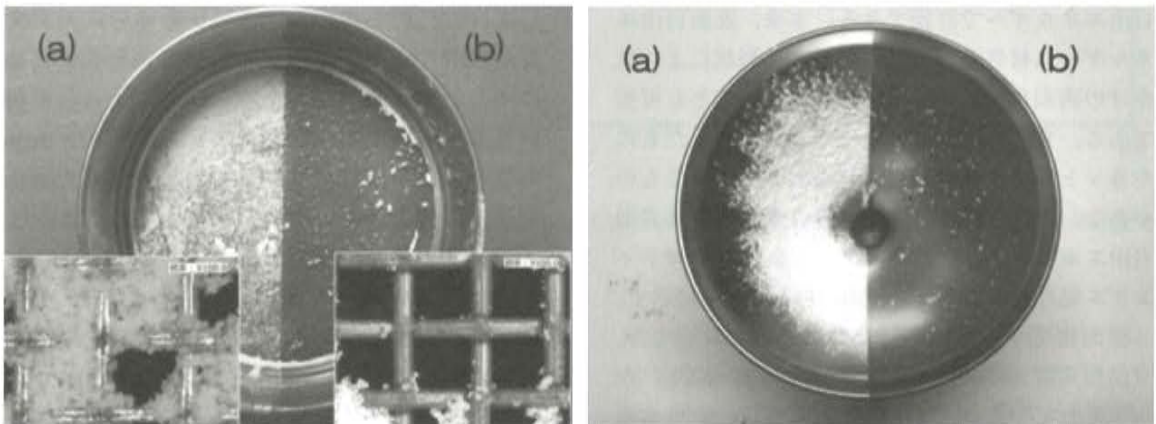


図2 未処理部(a)とマイクロディンプル処理面(b)への小麦粉の付着の様子 フルイ(左)、シューターを模した漏斗(右)

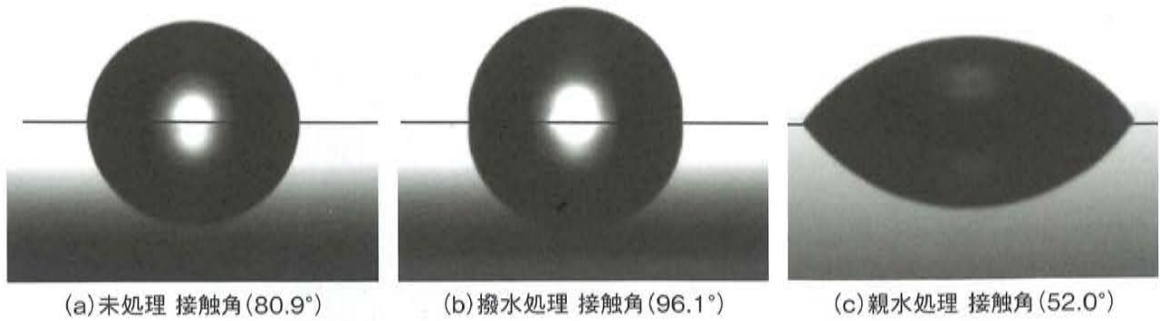


図3 マイクロディンプル処理による水に対する濡れ性の様子 (a)未処理、(b)撥水処理、(c)親水処理

表1 表面マイクロディンプル処理と接触角ならびに粉体付着の関係

処理	接触角	北崎-畑				Owens-Wendt			付着
		d	p	h	T	d	h	T	
未処理(鏡面)	66.3	26.5	21.2	7.7	55.4	33.3	11.4	44.7	×
処理a	71.3	11.1	29.0	36.2	76.3	13.9	41.3	55.2	×
処理b	87.4	41.9	0	2.2	44.1	36.9	1.8	38.7	○
処理c	84.4	32.5	2.6	0.9	36.0	35.5	2.9	38.4	○
処理d	90.3	40.8	0	0.1	40.9	35.8	1.3	37.1	○

d:分散成分, p:極性成分, h:水素結合成分, T:各成分の合算

低減されていることがわかる。付着抑制のメカニズムに関しては、図1に示したように形成された凸部により粉体が支えられ、多点接触となり接触面積が減ること、接触点が凸部のため粉体を支える応力鎖が不安定になり、容易に応力鎖の崩壊と再構築がなされることなどによると考えられる。

また、材料表面に形状を形成することにより、種々の表面物性(撥水性、親水性など)を付与することが可能である。濡れ性などの表面物性は表面自由エネルギーで評価できる。本来、表面自由エネルギーは材料固有の値であるが、形状により見かけの表面自由エネルギーを制御することも可能である。食品材料には、油分や水分を含んだものやカット野菜など濡れた材料などさまざまなものがある。それらの付着抑制や滑り性向上には表面自由エネルギーの制御が有効である。マイクロディンプル処理による濡れ性制御の様子を図3に示す。

表面物性から付着抑制効果について検討する。食品製造設備は、防錆上ステンレス鋼(SUS)が用いられている。ステンレス鋼表面は、クロム酸化物と水酸化物の混在と考えられ、小麦粉の水分

や小麦粉を構成している有機物由来の官能基との相互作用が付着要因と考えれば、表面自由エネルギーのなかで水素結合成分が付着に関与していると考えられる。各種マイクロディンプル処理による小麦粉の付着と表面自由エネルギーの成分分けの関係を表1(接触角は測定条件で大きく変化するため図3とは異なる値となっている)に示す。水素結合成分の低減が付着抑制や滑り性向上に効果があることが確認される。

洗浄性に関しては、水洗による水分の残存や食品残渣は、大腸菌などの繁殖要因となるために極力低減する必要がある。形状による付着抑制効果と表面物性が関与している。実際、食品粉体ではマイクロディンプル処理を施した表面では、付着力が弱いいため、水洗を行うことなくエア・ブロー等で容易に除去が可能である。また、チーズやパスタ等の固体付着では、未処理(平滑面)では、基材と食品が密着しているため、洗浄の際に付着面に水分が浸透しにくく、ブラシ等による機械的な剥離が必要であるが、マイクロディンプル処理面では、食品が凸部に支え

られているため、凹部からの水分の浸透が容易なため、剥離が容易となる。実際に、チーズ等の生産ラインでは洗浄性向上を理由として採用事例がある。また、水洗などが必要な工程では、マイクロディンプル処理により表面の性質（親水性、撥水性）を選択可能である。水洗後の乾燥に対して、エア・ブロー等を行う場合は撥水（滑水）性表面が有効であり、自然乾燥を行う工程では、親水表面が有効で、生産ラインの洗浄方法に対応した表面も選択可能である。

4. マイクロディンプル処理による抗菌効果

食品の製造ラインでは、大腸菌などの細菌繁殖抑制や抗菌は重要な課題である。実際、洗浄後の食品残渣や冷凍食品の加熱から冷却過程など微生物の発生可能な状態が存在する。現在、大腸菌などの細菌対策では、次亜塩素酸ナトリウムやエタノールなどの殺菌剤が用いられる。殺菌剤使用は、耐性菌の存在、殺菌剤の食品への残留などの問題点がある。

上記の解決の一つとして、材料の表面形状形成による抗菌効果が注目されつつある。バイオミメティクス（生物模倣）として昆虫（セミ、トンボなど）の羽の抗菌効果を模倣する形の抗菌表面の形成なども報告されている。具体的には、ナノ加工領域の構造でMEMSなどを用いて、ピラー構造（針状構造）を作製するなどが提案されている。ここでは、マイクロディンプル処理による抗菌効果について紹介する。

食品機械の多くがステンレス鋼を使用している

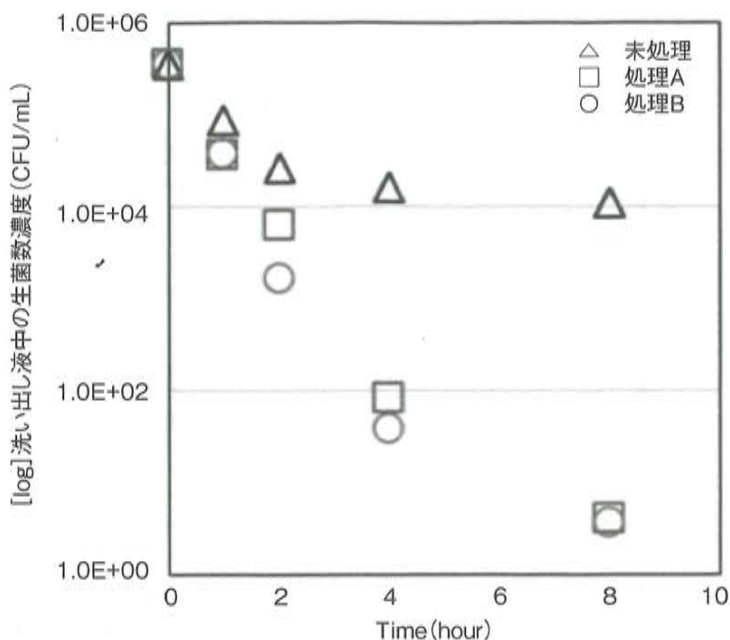


図4 未処理SUS板とマイクロディンプル処理板の大腸菌数の時間変化

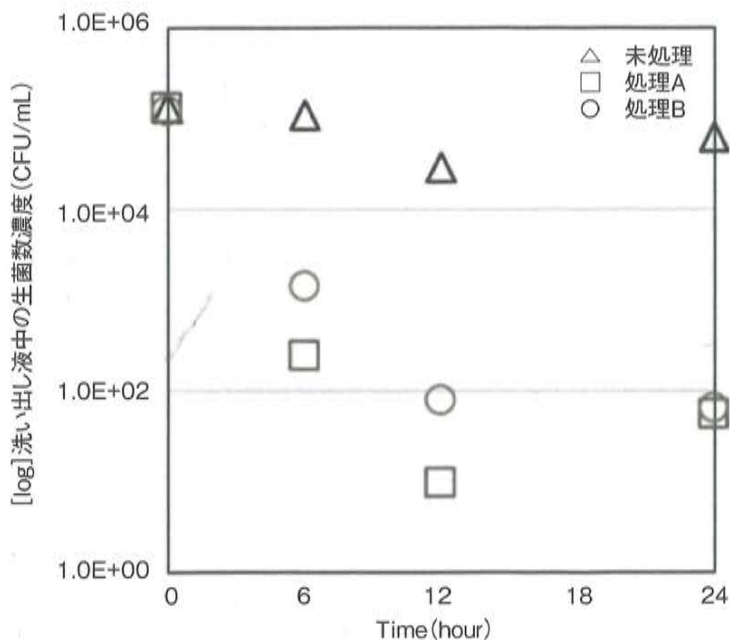


図5 未処理SUS板とマイクロディンプル処理板の黄色ブドウ球菌数の時間変化

ことから、SUS304 基材にマイクロディンプル処理を施し、抗菌試験を実施した。菌種としては、グラム陰性菌（外膜を有し、細胞膜が薄い）として大腸菌、グラム陽性菌（外膜を有さず、細胞膜が厚い）として黄色ブドウ球菌を用いた。抗菌試

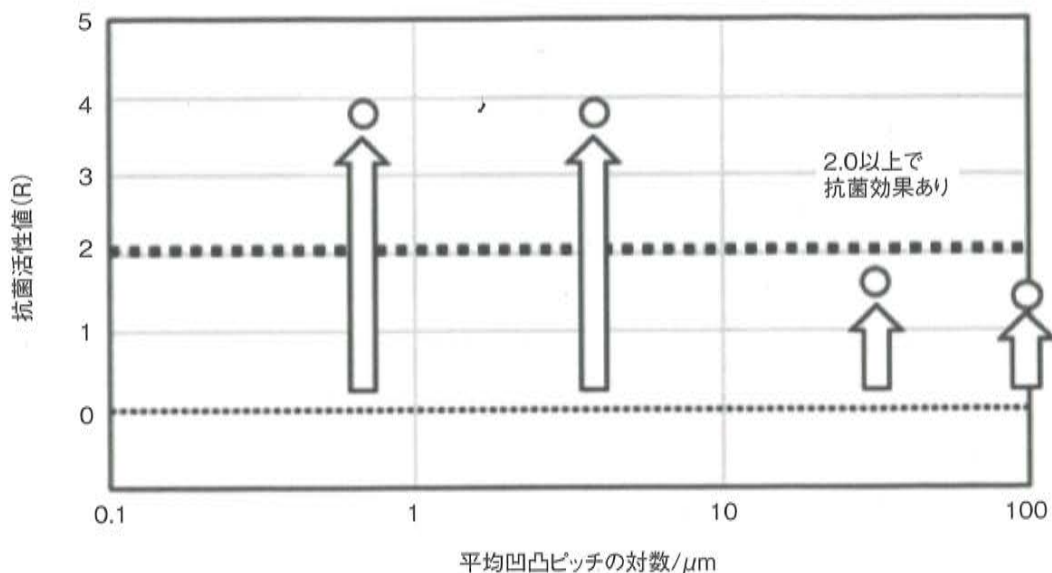


図6 凹凸ピッチと抗菌活性値(R)の関係

験は、JIS Z2801に基づいた（（独）神奈川県立産業技術総合研究所で実施）。JISでは、大腸菌ならびに黄色ブドウ球菌に対して、24時間後に参照試料との比較で2桁以上（99%以上）の菌の減衰があれば、抗菌効果を有するとして定義されている。大腸菌ならびに黄色ブドウ球菌の減衰の時間変化を図4、5に示す（大腸菌に関しては減衰が早かったので8時間）。ステンレス鋼自体で一定の抗菌効果が見られるが、処理により大幅に細菌が減少していることが確認される。

抗菌効果とディンプル径の関係を図6に示す。マイクロディンプル処理による表面形状は分布を有しているので、ディンプル径は平均的な値で示した。ディンプル径と抗菌効果に関しては相関がみられ、sub- μm から数 μm のディンプル径で抗菌効果が高いことが確認された。大腸菌は $0.5 \times 3.0\mu\text{m}$ 、黄色ブドウ球菌は $1.0\mu\text{m}$ 程度であり、抗菌効果の高いディンプル径と同程度となっている。抗菌効果の発現機構については、現在のところ不明であるが、マイクロディンプルの大きさが寄与していると示唆される。マイクロディンプル処理のディンプル径の分布は付着抑制などの複合化や処理条件のバラツキなどにも対して有利に働く。

マイクロディンプル処理の大きな特長は、すでに、粉体付着抑制や摺動性ならびに洗浄性向上などの商用に実施している処理による効果であり、複合効果が得られていることである。

5. おわりに

付着抑制は、環境対策の上でも重要である。小麦粉やコーン・スターチなどの食物粉体の国内消費量は1000万t/年といわれており、搬送工程で0.1%の付着があれば、飼料等の再利用を想定しても洗浄により1万tの廃棄物が発生し、環境負荷は膨大となる。滑り性や洗浄性も、生産効率の向上ばかりでなく、品質の安定性や菌発生を抑制するなど食の安全に係る課題である。

抗菌効果は、食の安全性確保、衛生管理上の必須の課題である。食品製造設備や食品工場の出入り口等に抗菌処理を施すことでも、食品への細菌汚染を大きく低減することができる。

マイクロディンプル処理は付着抑制、滑り性向上や洗浄性向上に関して実績を上げており、食品製造設備の抱える課題の解決のための有効な手段となる。