

紫外線防御化粧品と評価装置の製品化

— 産総研の論理・戦略的方法と工業技術院の経験・試行錯誤的方法を 組み合わせた地域連携型の製品化研究 —

高尾 泰正*¹、山東 睦夫²

紫外線防御化粧品の製品開発の研究事例を紹介する。最近の化粧品は、UV防御・透明感・使用感の3課題を同時に解決する必要がある。しかし、最適な製法と使用感の評価法は確立していない。本研究は、産総研の戦略的地域連携とAIST認定付与ベンチャー、事前シナリオを設定しない工業技術院時代の即効的な技術指導とを組み合わせ、新製法と新評価法を具現化し、独自性の高い化粧品および粉体評価装置を製品化した。特に社会的要素（地域連携）について、*Synthesiology*誌の提唱するアウフヘーベン型・ブレイクスルー型・戦略的選択型の研究開発の方法論と、進化論など自然現象とのアナロジーによる人文系のアイデアとを比較検証し、方法論としての一例証を示す。

キーワード:セラミックス複合粒子、紫外線防御化粧品、粉体層剪断評価、装置工学、工業技術院、産総研認定付与ベンチャー

Products and evaluation device of cosmetics for UV protection

– AIST commercialization based on regional collaboration that combines the current strategic logic, and an intermediary's experience and trial-and-error approach –

Yasumasa Takao*¹ and Mutsuo Sando²

We introduce a case study of UV-protective cosmetic product development. Recently, cosmetics need to solve 3 problems simultaneously: 1) UV-protective effect, 2) transparence, and 3) smooth-textured touch. However, the best recipe and usable evaluation methods are not established. This research is the result of a strategic regional alliance of the AIST grant venture and the technical guidance that did not set a prior scenario with immediate effect of the national research institute. A new manufacturing and evaluation method has been commercialized in the forms of a highly original cosmetics and a new evaluation device. An example of the methodology is shown concerning social factors (regional alliances), particularly. The example is illustrated by comparing 2 elements. The first is the R&D methodology that the *Synthesiology* journal advocates (the Aufheben type, breakthrough type and strategic selection type). The second is the humanities way of thinking by analogy with natural phenomena such as the evolutionary theory.

Keywords: Ceramic composite particles, UV-protective cosmetic, shearing evaluation of powder-bed, apparatus engineering, Agency of Industrial Science and Technology, AIST grant venture

1 研究の背景～「紫外線防御化粧品」の課題と問題点

本稿の目的は、セラミックス粉体技術をベースとして、戦略的シナリオと経験的な試行錯誤を組み合わせた研究開発について、方法論としての一例証を示すことにある(図1)。

最近の化粧品は、透明感や使用感に加え、有害な紫外線(UV)を遮蔽することが必須の技術的要素となっている。図2(a)のように、化粧品用セラミックス粒子にUV防御用のナノ粒子(=数10 nm粒子の光散乱サイズ効果と、チタニアのバンドギャップのUV-B遮蔽効果を利用)を加えると、セラミックス粒子間にナノ粒子の凝集体が不均一に生

ずる。所望のUV防御を達成するには、過剰にナノ粒子を加えざるを得ず、可視光の遮蔽(=透明感の低下)と、凝集粒子による高摩擦(=使用感の低下)が発生する。透明感・使用感の低下を抑えるためナノ粒子量を抑制すると、十分なUV防御能が得られないというジレンマに直面する^{[1][2]}。

そこで図1(a)のように、本研究は、UV防御・透明感・使用感の「技術的要素」に対しては、複合粒子^[1]と自乗法近似モデル^[2]を、産総研的な戦略的アプローチ^{[3][7]}(=成果と責任を明確化した短期的契約に基づく開発・連携法を意図)として、提示する(詳細なシナリオは第2章、構

1 産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門、2 産業技術総合研究所 産学官連携推進部門中部産学官連携センター
〒463-8560 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2266-98

1. Material Research Institute for Sustainable Development, AIST Anagahora 2266-98, Shimo-Shidami, Moriyama-ku, Nagoya 463-8560, Japan * E-mail: lilliput@ni.aist.go.jp

Original manuscript received December 2, 2009, Revisions received March 4, 2010, Accepted March 4, 2010

成的方法論は第3章）。

また具体的な材料・製法のアイデア提案や、各組織の利益の齟齬の調整等の「社会的要素」に対して、工業技術院的（＝経験的な試行錯誤を意図）な地域連携^{[1][2]}を提案する（図1(b)）。

以上、セラミックス粉体単位操作の基盤技術の応用^[1]と、産総研認定付与ベンチャー等による評価技術の確立^[2]、短期的な組織利益を一時停止した長期的連携^{[8][13]}で、粉体系材料（化粧品）と評価装置を製品化した（第4章）^{[14][21]}。特に社会的要素の解決過程について、最近の比較研究^{[3][8]}（＝自然現象^{[22][29]}とのアナロジー）を参照し、研究開発の方法論として検証する（第5章）。

2 解決シナリオ

2.1 技術的要素の解決シナリオ

化粧品の①UV防御・②透明感・③使用感を満たすには、①「高い紫外光遮蔽性」②「高い可視光透過性」③「高い滑沢性」の各技術要素を同時に達成できる製法の確立が急務である^{[1][2]}。中でも③使用感の滑沢性評価は、図3(a)に示すとおり、現状では定性的な官能試験（主にアンケート調査）しかない。まず評価試験法・装置の標準化が急務で、その上で、滑沢性の向上に資する粉体設計指針を提供しなければならない^[2]。

本研究では、現状の化粧品の設計・混合工程が、設計ではナノ粒子偏析を事前に想定しておらず、混合では単純な機械的混合が主流である点に着目した。図4のように、粒子充填模型（固相法）、水系でのナノ粒子均一分散（液相法）、液滴の急速固化（気相法）を組み合わせ、基盤技術としての複合粒子法を完成した（構成的方法論詳細は第3章）^{[1][2][14][21]}。

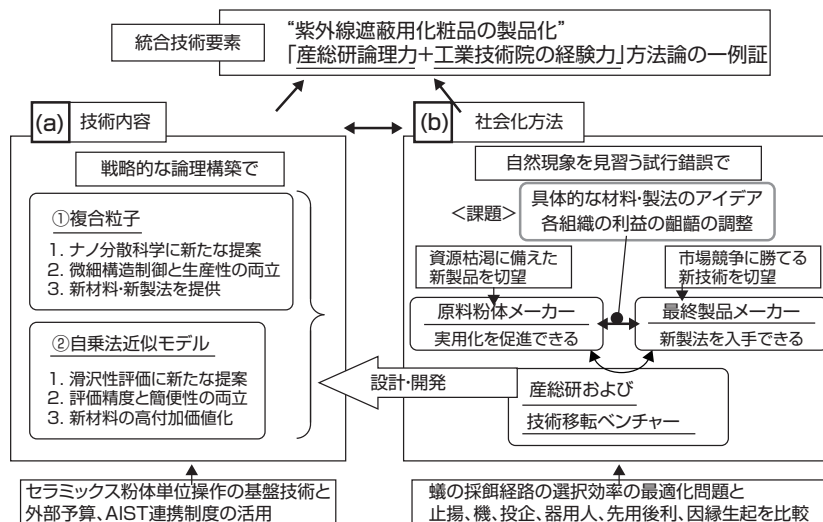


図1 論文の構成：「死の谷」克服策（技術的・社会的解決策）として
 (a) 技術的要素の解決策（＝粉体技術を用いた論理・戦略的なシナリオ）
 (b) 社会的要素の解決策（＝即効的シナリオを設定しない名工試時代の技術指導型の地域連携）

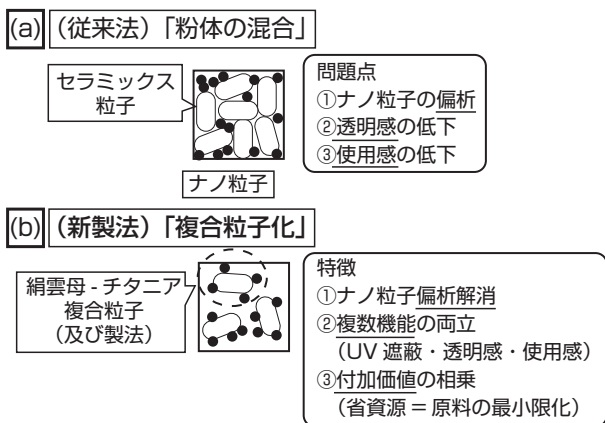


図2 紫外線防御化粧品の課題・問題点（本研究の技術的着眼点）

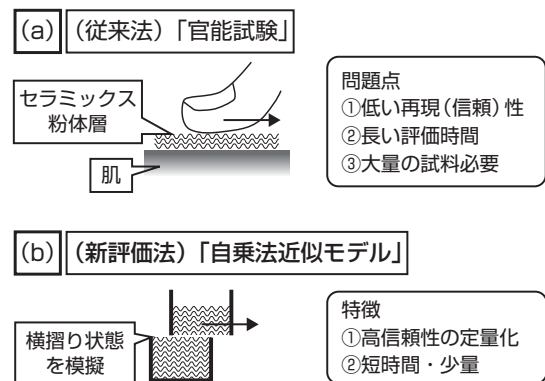


図3 化粧品の「使用感」に対する課題・問題点（本研究の技術的着眼点・その2）

滑沢性評価については、現状が治具への試料充填密度が安定し難く横摺り力の再現性が低い点（＝圧密状態の設定が困難）に着目した。短時間・少量で評価可能な基盤技術として、法線力と横摺り力の自乗法近似モデルを考案した。図5において、図5(a)に示したように従来法は、充填密度が安定するまで圧粉しており、サイロなど特定の粉体単位操作を除き、実際のセラミックス製造工程を反映した評価とならない。図5(b)に見られるように新モデルでは、遷移状態の法線・横摺り力を連続的に検出することで、圧密状態の設定問題を解決した（方法論の詳細は第3章）^{[1][2][14][21]}。

2.2 社会的要素の解決シナリオ

独自のアイデアや組織間の利害調整等、社会的要素の解決法として、90年代以前は科学や技術の研究開発と平行し、実用・製品化を優先した対症療法的な産官連携が（特に地域試験所において）行い得た^{[1][2]}。その後、広範な研究基盤や企業との信頼関係の上になった、企業～産総研間のWin-Win関係構築のための論理的・戦略的な対応の実践^{[3][7]}が目立っている。

図1(b)に示すとおり、本研究では、資源枯渇に備えた新製品を切望する原料メーカー^[15]と、市場競争に勝てる新技術を早急に求める製品メーカー^[17]間で、材料・製法の開発指針の具体化と、各組織利益の齟齬の調整という社会的問題に直面した。

本研究で選択した社会的要素の解決策を、図6に示す。工業技術院名古屋工業技術試験所時代～現在までの、セラミックス粉体単位操作の基礎研究と、外部予算・連携制度の活用経緯で、中央に年表、その上段に材料開発、下段に評価装置の経緯を図示している。地域特産品の高付加価値化を狙った技術指導から出発し（90年代）、外部予

算で粉体合成パイロットプラント建設（03年）、滑沢性評価について公的ベンチャー起業（05年）、実施契約を必須としない緩やかな地域連携を経て（07年）、粉体系材料・評価装置を製品化（10年）した（構成的方法論詳細は第3章）^{[1][2][14][21]}。

社会的要素の解決の方法論として、①アウフヘーベン型（相反する二命題を一時「止揚」し新概念を創出）②プレイクスルー型（基盤技術の一意的な「成長」モデル）③戦略的選択型（「論理的」シナリオによる仮説検証法）^[5]が、昨年 Synthesiology 誌に整理された。本研究は、短期的な組織利益の判断を一時停止（先送り）するという意味で、①アウフヘーベン型のアイデアを社会的要素に適用した事例と言える（当時は、全く無意識であったが）。

3 解決策（構成的方法論）

3.1 技術的要素の論理的・戦略的な解決策

<化粧品用セラミックス粉体系材料>

図4のように、粒子充填模型（固相法）と、ナノ粒子の液（水）中分散に DLVO 理論（液相法）を用いて、化粧品の最終形態（＝ポリマーなど他成分と配合されたセラミックス成形体状態）でナノ粒子が（雲母の粒間に）偏析しない条件を予め計算し、原料粉体の仕込み組成に反映させる^{[1][21]}。

図7に、複合粒子など、粉体の構造制御プロセスを図示する。絹雲母^[15]とナノ粒子の混合スラリーを噴霧し（気相法）、絹雲母単体とナノ粒子のみ（または複数個づつ）が含まれる状態にスラリーを分割（液滴化）する。この液滴を、連続的に乾燥（または反応）させ、セラミックス単体の粒表面のみにナノ粒子を付着させた複合粒子（図7(a)）や顆粒体を合成した（図7(b)～(d)は第4章で詳述）^{[1][2][14][21]}。

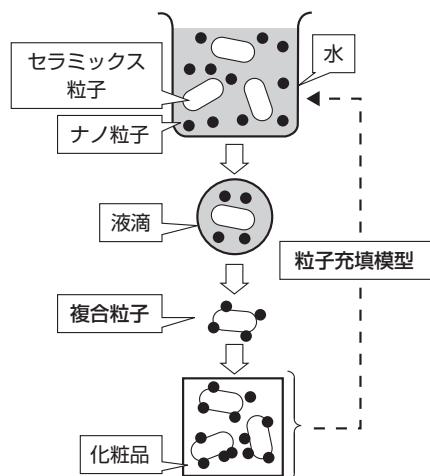


図4 技術的解決策（新製法）：制御性とコストを整合化した「複合粒子法」

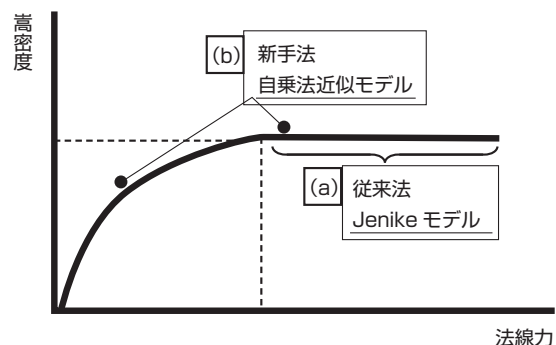


図5 技術的解決策：新評価法；法線力と横摺り力の「自乗法近似モデル」

(a) 従来法「Jenike 法」：静摩擦に相当しホップ圧密状態等を再現（与圧密状態）

(b) 新手法「自乗法近似モデル」：動～静摩擦を網羅し、従来法では不可能な圧密過程の非定常（動摩擦）状態を定量化でき、以下の特徴を有す。①実際の粉体材料系の使用状態を再現、②高コストパフォーマンス（少試料・短時間）

<セラミックス粉体特性評価装置>

図5(a)のように、現状の滑沢性評価技術は、横摺り力の低い再現性（=測定容器への粉体の充填密度の不安定性）を解消する目的で、予め過度に圧密（「予圧密」=固め嵩密度の状態）している。この条件は、ホッパなど過充填になり易い一部の粉体単位操作を除き、化粧品や電子フィラーなど、一般的なセラミックス粉体系材料には適合しない^{[2][14][16]}。

図8に、自乗法近似モデルを図示する。図8(a)～(b)のように、充填～圧密で条件毎に試料交換していた従来法を改め、法線力・横摺り力を、0～連続的に検出する。次にクーロン粉体を仮定した法線力・横摺り力の自乗法近似で、両者の傾き（内部摩擦角）を算出する（図8(c)）。図5(a)従来法（=数学的包絡線近似）に比べ、新モデルは、遷移状態から圧粉状態まで広域に法線・横摺り力の関係を評価でき（図5(b)）、一般のセラミックス工程を反映した簡易型評価法という特徴がある。現在、本手法をJIS標準粉体や化粧品・フィラー・薬剤・食品の各実用材料に適用し、粉体評価法としての再現性と信頼性を保障するとともに、品質管理技術としての妥当性を確認している^{[1][2][14][21]}。

3.2 社会的要素の経験的・試行錯誤的な解決策

<ベースとなった地域の産官連携（旧・技術指導制度）>

図6に示したとおり、独立行政法人になる以前の工業技術院（90年代）時代より、地域の雲母メーカー^[15]と愛知

県の特産品（天然鉱物）の高付加価値化を目標に、短期的な組織利益を互いに棚上げした協働（技術指導）を開始した。その過程で、属する組織の目的の齟齬等が原因で、担当者や連携の危機を何度も経験しながら、結果的に、セラミックス粉体の基礎研究成果（新規な複合粒子や形態制御法等）と、一定の信頼関係が熟成できた^[2]。

<粉体系材料の製品化作戦>

セラミックス粉体単位操作に関する一定の進展（=第1種基礎研究レベル^{[6][7]}）は得られたが、紫外線防御化粧品の製品化と、その実施契約に至るには、完成度不足であった（≠第2種基礎研究レベル）。地域の原料メーカー^[15]・製品メーカー^[17]サイドも、実施契約例の経験に乏しく、社内の（始めから資金負担できない等）・心理的（高再現性の合成条件を重視するか否か等）な障壁も大きかった。以上、属する組織目的の齟齬から、連携の危機（=死の谷^{[3][7]}）に直面した。

一般に、これら組織間の利害調整等の社会的要素は、論理・戦略の帰納的方法だけでは必ずしも解決せず、要素の数を増やす・関係を複雑化する・時間的に一時棚上げする等、技術的外部不経済を内部化する経済的手法（LCCや、環境リスク学、ピグー税等）の必要性が多数報告されている（この構成的方法論の妥当性は第5章で検討^{[8][13]}）。

これを参考に、図1(b)のとおり産総研の当面の利益や制度（実施契約等）を一時的に棚上げ（止揚^[5]）し、先ず

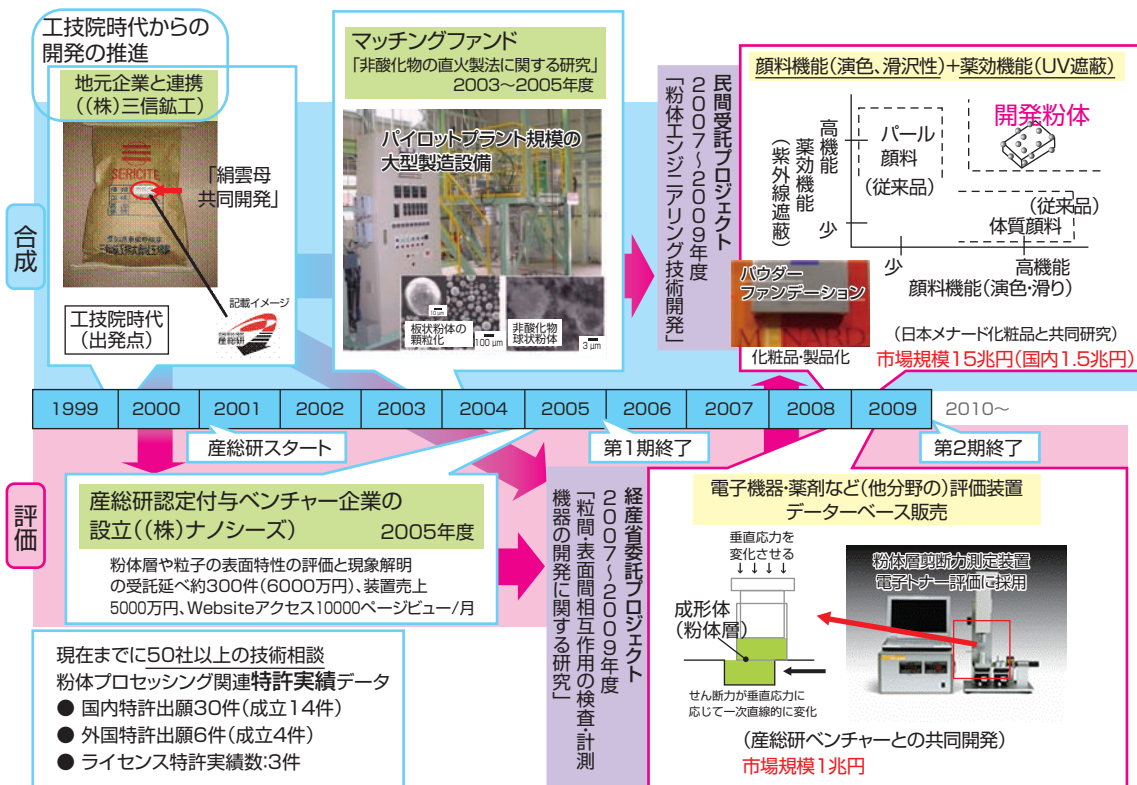


図6 研究ロードマップ（社会的課題に対する本研究の解決策の時間的経緯）

製品メーカーと緩やかな情報提供関係を構築した(02年)。この協力関係を使い、第2種基礎研究レベルを達成するための製品化の課題（化粧品原料基準（粧原基）に違反しない具体的な材料性情報等）を得た。次に外部予算を用い、実機レベルの粉体合成パイロットプラントを建設（03年）し、上記の社会的課題より先に、3.1節の技術的要素を解決した。以上、原料メーカー・製品メーカーとの受託研究契約（07年）を経て、粉体系材料を製品化（10年度予定）するという、関係調整を行った^{[1][2][14][21]}。

<粉体特性評価装置の製品化作戦>

上述の材料開発から派生して、滑沢性評価についても、第1種基礎研究レベルの進展（滑沢性の簡易型評価法のアイデア等）は得られた^[2]。しかし、紫外線防御化粧品に高滑沢性を付与できる原料粉体の設計指針や、他のセラミックスの製造現場への品質管理技術を提供可能な第2種基礎研究レベルとしては、完成度不足であった。

一般に評価技術は、独自性・希少性を要求する材料型

製品とは違って独占利用させるより、JIS や ISO 等の標準化規格のように、汎用性を訴求する複数チャンネルを有したプラットフォーム化、例えば会社組織による評価受託請負形態等が望ましい。一方で、株式会社等の組織形態は、歴史を辿れば航海の度に募集される籤のようなもので、現在であれば宇宙探査並みのリスクがある^[12]。現下のような困難な社会的状況で、これを緩衝化する一手として、公的ベンチャー論が展開されている^{[6][7]}。

そこで図6のように、産総研のTLO制度を活用し、滑沢性評価技術の受託評価や評価装置開発の公的ベンチャー^[16]を起業した（05年）。これを市場の窓口に、日常業務として複数企業からの受託評価を行って、第2種基礎研究レベルを達成するための製品化課題（=品質管理技術として不足している評価パラメーター等）を明確化した。結果、3.1節の技術的要素（①高いUV防油性②高い可視光透過性③高い滑沢性）の中の滑沢性向上に資する原料粉体の設計指針を提供できた。同時に、製品化レベルの

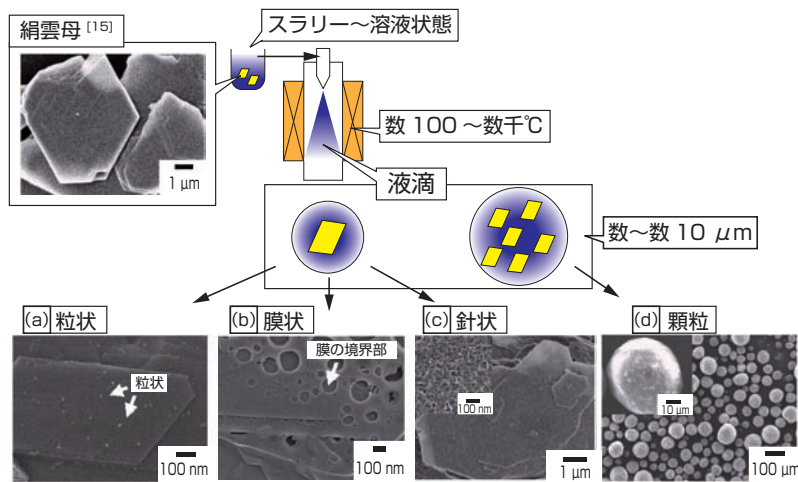


図7 技術的成果：形態制御バリエーション

- (a) 粒状被覆・複合粒子：雲母表面に粒状チタニアナノ粒子が均一に複合化
- (b) 膜状被覆・複合粒子：雲母表面にチタニア薄膜が均一に複合化（識別し易いように膜が剥離した部分のFESEM写真を示す）
- (c) 針状被覆・複合粒子：雲母表面に針状チタニア粒子が均一に複合化
- (d) 雲母・顆粒体（中実）：その他、中空体や、チタニア顆粒（中実・中空）も可能

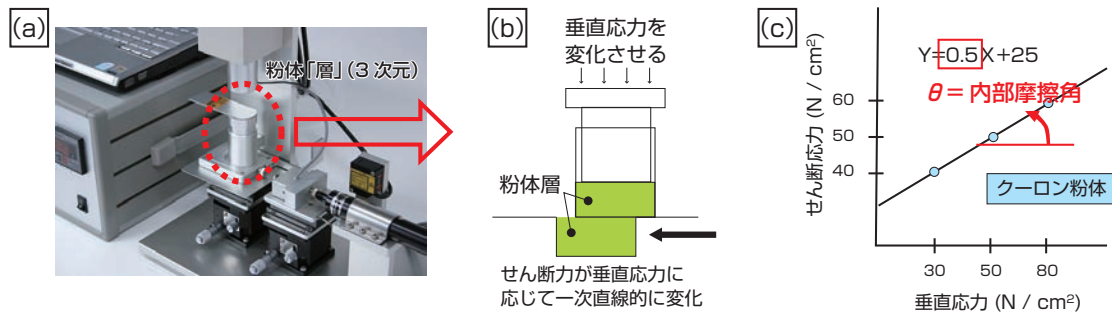


図8 技術的解決策：簡便な「内部摩擦角」の定量化法を確立

- (a) 産総研認定付与ベンチャーで製品化した評価装置の中心部
- (b) 新手法「自乗法近似モデル」の模式図
- (c) 評価パラメーター：内部摩擦角

材料設計に資する評価法であるという既成事実が、評価装置の社会的信頼性も高め、装置の普及（マーケティング）と装置開発の受注を促進（10年度）するという、関係調整に（結果的に）発展した^{[1][2][14][21]}。

4 研究成果と考察

4.1 Ordered-mixture（ナノ粒子偏析の解消）とUV防御・可視光透過性を両立

ナノ粒子の粒間の偏析を抑え、化粧品用セラミックス単体（絹雲母^[15]）の粒表面のみにナノ粒子を付着させた複合粒子（Ordered-mixture）を合成した成果を、図9（a）TEM像と図9（b）～（c）EDS線分析マップで示す。板状のセラミックス単体粒子（絹雲母）の表面（直方体の卓・端面の両方）に、微細均一に球状のナノ粒子が付着している。ナノ粒子は、単体表面以外には観察されず、粒間の偏析を抑制できている^[1]。

また図7（a）～（d）に、複合粒子の複合（被覆）状態を形態制御した結果（a）～（c）と、マイカ顆粒体（d）を示す。複合粒子は、セラミックス単体粒子の表面に（a）粒状、（b）膜状（=膜を判別し易いように敢えて膜の破断部分を撮影）、（c）針状にチタニアを析出させた。この他、板状のセラミックス単体粒子の卓・端面の一方のみに、ナノ粒子を（制御された不均一状態で）被覆させることもできる^{[1][2][14][21]}。

顆粒体として、セラミックス単体（マイカ）粒子の中実顆粒を図7（d）に示す。この他、別の板状セラミックス単体（窒化ホウ素BN）や、ナノ粒子（チタニア）の中実（又は中実）

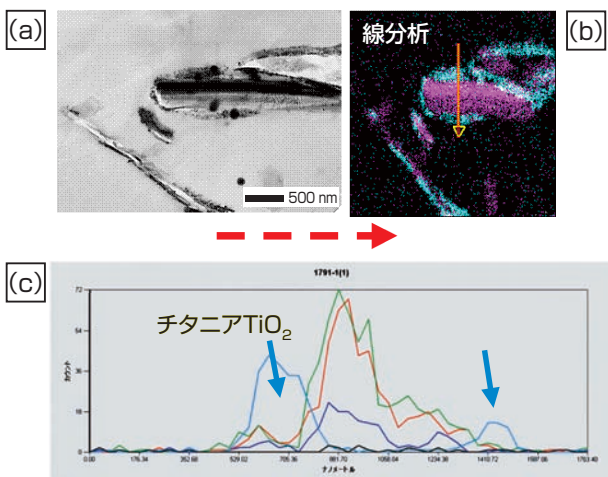


図9 技術的成果：“Ordered-mixture”状態を具現化（ナノ粒子偏析を解消）

- (a) TEM像：雲母から剥離したチタニアナノ粒子が存在しない（埋め込み研磨）
- (b) WDS面分析結果：中心の板状粒子が雲母、周囲の球状粒子がチタニア
- (c) EDS線分析結果：雲母の周囲にチタニアナノ粒子が均一に複合化

顆粒、水分を内封～吐出できる膨潤顆粒も作製可能である^{[1][21]}。

以上の形態制御は、液中の静電ヘテロ凝集・ホモ反発力と粒子充填モデルの併用等、2・3章で詳述した固・液・気相法の制御因子を適宜選択することで実施できる^{[1][2][14][21]}。

材料特性として図10に、UV防御・透明感を両立した成果を示す。図10（b）既往製品は、約400 nm以下のUV域で光透過率が下がらず、UVのみの遮蔽が不十分だけでなく、400 nm以上の可視光域でも透過率が極端に低下し、透明性が悪化している。一方、複合粒子法による図10（a）開発品は、UV域の低透過率化（=高遮蔽能）と、可視光域での図10（c）原料単体の透過率低下を抑制できた（=高い透明感）^[1]。以上により、化粧品の①UV防御・②透明感・③使用感の3課題に対し、①「紫外光だけの高い遮蔽性」②「高い可視光透過性」を達成できた。紫外光領域だけに特異的な遮蔽能を実現できた理由として、ナノ粒子の板状のセラミックス単体粒子（絹雲母）間の偏析を抑え、原料粒表面の卓・端面に「制御された異方性」状態で配合でき、色調の制御性が向上した効果を、挙げる事ができる^[21]。

4.2 滑沢性の定量化と、高使用感（素肌感）も同時に達成

図11に、紫外線防御化粧品の残りの技術的要素：③高い滑沢性に関し、図5および図8で示した自乗法近似モデルで評価した法線力・横摺り力線図を示す。図11（b）の既往製品は、図11（c）の原料単体に対し、法線力と横

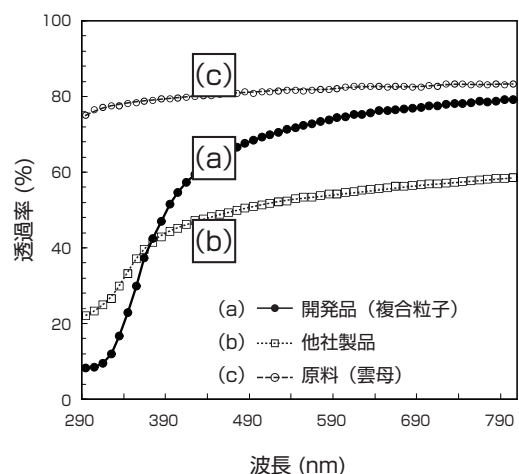


図10 技術的成果：UV防御と可視光透過性を両立

- (a) 開発品「複合粒子」＝静摩擦に相当しホップ圧密状態等を模型的に再現（理想状態）
- (b) 他社製品＝UV防御能は改善するがナノ粒子凝集のため透過（透明）性まで低下し、化粧の「顔の白浮き」が発生する
- (c) 原料（雲母）粉体＝可視光透過（透明）性は高いがUV防御機能がない

摺り力の傾き（＝内部摩擦角）が増加し、使用感が悪化している。一方、図 11 (a) 開発品により、内部摩擦角を低減でき（＝高い使用感）、高い滑沢性が達成可能となった。

高使用感の理由として、ナノ粒子の絹雲母間の偏析を抑え、原料粒子の表面のみに配合でき、（結果的に）絹雲母およびナノ粒子の使用量の極少化を実現した効果を挙げることができる。

過剰な原料使用を抑制できた効果は、3R（＝リデュース・リユース・リサイクル）のリデュース（省資源化）に相当し、サステナブルマテリアル研究部門のミッション＝「持続的発展を可能とする素材開発にむけたイノベーション推進や資源の有効活用」に、貢献できる可能性を示唆している^{[1][2][14][21]}。

4.3 具体的な製品例

図 12(a)～(c) に、合成および評価研究の製品例として、(a) 化粧品「材料」製品と、(b) 評価「装置」製品、(c) 公的ベンチャー^[16]を示す。3.2 節で述べたとおり、合成（材料）と評価（装置）研究を事前シナリオで限定せず、転用可能な基盤技術は柔軟に利用し合えるようにした。その結果、合成（材料）研究の複合粒子法が、評価装置の適用可能性の広範さを担保し、また同時に、評価（装置）研究が粉体材料の高機能化に貢献した。

以上の相乗効果が、互いの技術的要素の解決を促進し、社会的要素の競争力向上に寄与し、産総研成果活用マーク付き化粧品やベンチャーの評価装置の上梓に結実した^{[1][2][14][21]}。

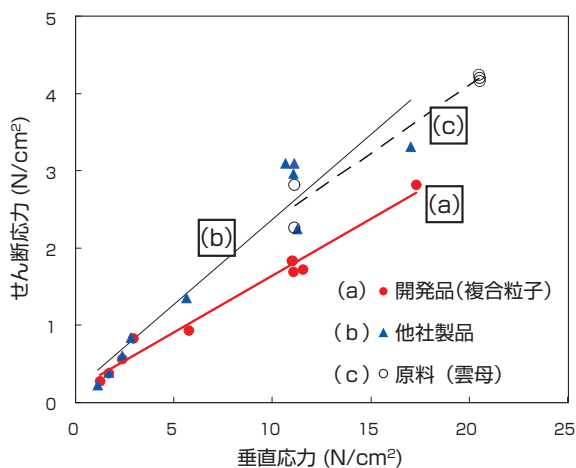


図 11 技術的成果：光学特性（図 10）に加え、滑沢性の定量化と、高使用感（素肌感）も同時達成
 (a) 開発品「複合粒子」：内部摩擦角・最小値
 (b) 他社製品：(UV 防御能は改善するが) ナノ粒子凝集のため滑沢性（使用感）は低下し、内部摩擦角が増加
 (c) 原料（雲母）粉体の内部摩擦角（両・複合体の中間値）

5 自然現象とのアナロジーによる研究開発方法論の検証と、まとめ（展望）

5.1 社会的要素の経験的・試行錯誤的な解決策の検証

本研究の、特に社会的要素の解決策を振り返り、産総研の当面の組織目標や規則を一時棚上げした判断の妥当性を、以下に考察する。

特性向上や新規性の発揮等、目標の統一化が比較的図り易い技術的要素と異なり、組織間の利害調整等の社会的要素は、論理・戦略の帰納的方法だけでは解決しないことが多数報告されている^{[8]-[13]}。

解決の方法論として Synthesiology は、①アウフヘーベン型②ブレイクスルー型③戦略的選択型を主張している^[5]。そこでは、主として技術的要素の解決策として議論されている。本研究は（2.2 節のとおり）、短期的な組織利益の判断を一時停止（先送り）するという意味で、既報^[5]のアイデアを社会的要素にも適用している。

最近、研究開発の方法論として、ポパーやソシュールらの漸進的・持続的進化論や循環・仮説検証モデル等、人文系のアイデアを用いた第 1 種基礎研究（観察）～Synthesiology 誌（事実知識）～第 2 種基礎研究（設計）の整理法が進展している^{[6][7]}。進化論など自然現象とのアナロジー^{[3]-[7]}は、組織間の利害調整の報告^{[8]-[13]}と同様、個体レベルの最適が、必ずしも全体最適とならないこと（＝合成の誤謬）を示している。

例えば木村資生の中立説は、突然変異は自然選択だけ



図 12 技術的（社会的）成果：製品例
 (a) 物質（合成）製品：開発粉体を地元メーカー^{[15][17]}より製品化（特許実施契約と産総研成果活用マークのコモディティ商品への付与：高いマーケティング効果）
 (b) 方法（評価）製品：新評価法を評価装置として産総研認定付与ベンチャーより製品化
 (c) 産総研認定付与ベンチャー^[16]

でなく、DNA レベルでは試行錯誤的に起こるといふ、進化論を細分化し、自然現象を動植物個体（論理的主体）と環境（経験的客体）に腑分けした概念である^[29]。蟻の採餌経路選択では、低い採餌能力個体が集団内に存在する方が、優秀な蟻だけの場合より、新経路の発見確率の向上等を原因に、集団採餌効率が高いことが報告されている^{[23][24]}。既報^{[8][13]}のような競争社会では、一方向的な論理・戦略の帰納法だけでは意思決定バイアスに陥り易く、常に新しいことを続けないと生き延びられない自転車操業の赤の女王（レッド・オーシャン）化する認知的傾向（Heuristic）が指摘されている^{[22][25][29]}。歴史人口学は、人口増減の波が1万年に4回あったことを示し、人口減少期（文明の成熟期）には、富山の薬売りやオフィスグリコなど「三方よし」や「先用後利（＝他者に先に利用して貰い他者が儲かってから返して貰う）」という概念が重視されると述べている^{[25][28]}。原因→結果の一意的ロジックだけではなく、未踏の他者まで含めて論理の射程範囲を拡張する考え方は、武道の「機」、禅の縁起（因縁生起）や隻手音声、Bricoleur（＝器用人；Claude Lévi - Strauss）などに見られる（図1（b））^{[11][13]}。

以上、局所最適≠全体最適（合成の誤謬）は、進化論など自然現象においてむしろ前提条件となっている。したがって既報^{[3][7]}のアナロジーには、少なくとも成熟期を迎えた現代においては、次世代技術シーズの揺籃として短期的組織利益を保留する社会的要素の解決策も、既に含意されているもの、と考える。本研究は（進化論における中立説などと同様に）、これら既報^{[3][13]}の方法論を、技術的要素（＝3.1節の論理・戦略）と社会的要素（＝3.2節の短期的利益の棚上げ）に細分化したものと位置づけられる。

5.2 本研究のまとめと今後の展望

本研究は、Synthesiology 誌の提唱するアウフヘーベン型^[5]に分類され、技術的要素の解決に粉体技術を用いた論理・戦略的なシナリオ法を、社会的要素の解決に（即効的シナリオを必ずしも設定しない）技術指導型の地域連携とを組み合わせた。結果、地域ブランド特産品（絹雲母^[15]）の化粧品展開と、公的ベンチャーの評価装置販売に結実し、事後的に、実施契約や産総研研究成果活用製品マークによる基礎研究の実用化につながった^{[1][2][14][21]}。

現時点の問題として、研究開発を経て実用化に至って後（死の谷の克服）、既存製品との競争など技術や製品の広範な事業化のための市場競争がある（＝ダーウィンの海^{[3][7]}）。複合粒子法は、複数の製法を組み合わせるため、工程増加を招き、製品単価が高くなった結果、高機能化粧品に用途が限定され、市場規模の大きい汎用品には配合し難くなっ

てしまった。自乗法近似モデルも、技術的に煩雑な側面があり、簡便なセラミックス品質管理技術として十分に認知されていない。開発期間が限られていたとはいえ、材料の機能開発や、製法・評価法の費用対効果の検討が不十分であったと、反省している。

今後、高制御製法として形態制御例の拡大や、機能・用途の新規開拓、評価パラメーターの科学的側面の明確化やJIS・データベース化を進め、汎用化を促進する。また3R（リデュース）の側面にも着目して、地域連携による利害調整で培われた信頼関係を生かし、サステナブルマテリアル研究部門のミッション＝「持続的発展を可能とする素材開発にむけたイノベーション推進や資源の有効活用」に、貢献できる可能性を模索する。

6 謝辞

本研究推進において、10年に渡り絹雲母開発に共に取り組んできた三信鉱工(株)浅井 巖主任研究員、産総研ポストドクから起業された(株)ナノシーズ島田泰拓社長および産総研成果活用マーク付き製品開発の日本メナード化粧品(株)浅野浩志主管研究員ほか、関係各位の御指導に感謝します。

参考文献

- [1] 高尾泰正, 浅井 巖, 浅野浩志, 津幡和昌, 奥浦朋子: ナノ粒子の凝集・解砕による複合粉体と顆粒体その製法と装置, 特願2009-238461 (2009.10.15).
- [2] 高尾泰正: 複合粒子と特性評価装置の開発とベンチャー起業, 産総研TODAY, 9(4), 6-7 (2009).
- [3] 中島秀之: 構成的研究の方法論と学問体～シンセシオロジーとはどういう学問か, Synthesiology, 1(4), 305-313 (2008).
- [4] 市川惇信: 科学が進化する5つの条件, 1-10, 岩波科学ライブラリー(2008).
- [5] R.K. Lester, 小林直人: シンセシオロジーへの期待, Synthesiology, 1 (2), 139-143 (2008).
- [6] 吉川弘之: オープンラボによせて, 産総研TODAY, 9 (1), 2-8 (2009).
- [7] 吉川弘之: 観察型と設計型科学者(51-69) 公的ベンチャー論(110-122) 第二種基礎研究の原著論文誌(240-249), 本格研究, 東京大学出版会 (2009).
- [8] 中西準子: 環境リスク学～不安の海の羅針盤, 1-10, 日本評論社 (2004).
- [9] 箭内道彦: 流されるから遠くに行ける(51-69), クリエイティブ合気道, アスキー(2007).
- [10] 小笠原 泰: 日本型イノベーションのすすめ, 1-23, 日本経済新聞社 (2009).
- [11] 内田 樹: 「機」の思想(158-210), 日本辺境論, 新潮社(2009).
- [12] 池田信夫: トヨタ・パブル「擦り合わせ」ではもう生き残れない(182-201), 希望を捨てる勇氣～停滞と成長の経済学, ダイアモンド社(2009).
- [13] 茂木健一郎, 南 直哉: 存在の根拠としての欠落(102-107), 人は死ぬから生きられる, 新潮社(2009).
- [14] 技術内容に関する産総研公式ウェブサイト<http://staff.aist.go.jp/yasumasa.takao/>
- [15] 愛知産の雲母「絹雲母」製品<http://www.sanshin-mica.com/CCP005.html>

- [16] 技術移転ベンチャー企業と評価装置 <http://www.nanoseeds.co.jp/co/gaiyo.html>
- [17] 実用化した地元化粧品メーカー製品 <http://www.menard.co.jp/products/skin/embellir/index.html>
- [18] Y.Takao and M.Sando: Flame synthesis of aluminium nitride filler-powder, *J. Chem. Eng. Jpn.*, 34, 828-833 (2001).
- [19] Y.Takao and M.Sando: Al-system non-oxide spherical powder synthesis by liquefied petroleum gas firing, *J. Am. Ceram. Soc.*, 88, 450-452 (2005).
- [20] Y.Takao, K.Shuzenji and T.Tachibana: Preparation of aluminum oxynitride and nitride spherical powders via flame synthesis assisted by DC arc plasma, *J. Am. Ceram. Soc.*, 91, 311-314 (2008).
- [21] 浅井 巖, 浅野浩志, 津幡和昌, 奥浦朋子, 高尾泰正: ナノ粒子の表面電位や凝集性を利用した微粒子複合化技術の開発, 2009年度色材研究発表会優秀講演賞, 23A08 (2009).
- [22] Clayton M. Christensen: 持続的イノベーションと破壊的イノベーション(27-59), *イノベーションのジレンマ～技術革新が巨大企業を滅ぼすとき*, 翔泳社 (2001).
- [23] 長谷川英祐: 「集団」行動の最適化, *日本動物行動学会 Newsletter*, 43, 22-23 (2004).
- [24] 田尾知巳, 中川寛之, 西森拓: 環境変化下での蟻集団のトレイル戦略評価, *数理解析研究所講究録*, 1413, 164-175 (2005).
- [25] 野中郁次郎, 戸部良一, 鎌田伸一, 寺本義也, 杉之尾宜生, 村井友秀: 分析的アプローチと解釈的アプローチ(336-366), *戦略の本質～戦史に学ぶ逆転のリーダーシップ*, 日本経済新聞社 (2005).
- [26] 鬼頭 宏: 人口増減の波は1万年の間に4回(1-10), *人口で見る日本史*, PHP (2007).
- [27] Jacques Attali: 21世紀の企業のあり方(193-237), *21世紀の歴史～未来の人類から見た世界*, 作品社 (2008).
- [28] Niall Ferguson: マネーの系譜と退歩(金融業界と進化システムに共通する特徴) (450-470), *マネーの進化史*, 早川書房 (2009).
- [29] 吉村 仁: 溺れる子を助けられない理由(30-74), 共生する者が進化する(211-229), *強い者は生き残れない～環境から考える新しい進化論*, 新潮社 (2009).

執筆者略歴

高尾 泰正 (たかお やすまさ)

1990年に工業技術院名古屋工業技術試験所へ入所。1997年に大阪府立大学より博士(化学工学)。1998年に(財)ファインセラミックスセンターへ出向。2001年からフィンランド国立技術研究所で在外研究。本研究では、要素技術の研究開発と構成化を担当した。



山東 睦夫 (さんどう むつお)

1976年に工業技術院名古屋工業技術試験所に入所。1987年に名古屋大学より博士(化学工学)。2004年から2年間、佐賀県工業技術センター所長。現在は中部センター産学官連携部門産学官連携コーディネータ。本研究では、地域連携企業との仲介、工技院時代から現在に至る粉体・装置工学に関する研究開発と、俯瞰的な指導・統括を担当した。



査読者との議論

議論1 技術的要素と社会的要素

コメント(清水 敏美:産業技術総合研究所研究コーディネータ)

第一稿では、技術要素の構成方法を分類するに当たって、いわゆる「技術的要素」と、予算制度や支援制度等の「社会的背景・要素」が混在した議論になっています。技術的要素だけに絞って、構成分類を考えてはいかがでしょうか。

コメント(五十嵐 一男:産業技術総合研究所生産計測技術研究センター)

第一稿では、シナリオ解決策として、始めには、「課題の技術的・社会的要素に対し、複合粒子法・自乗法近似モデルと、産総研的な戦略シナリオと工業技術院時代の地域連携を組み合わせた方法を提案する」となっていますが、結論では、「……アウフヘーベン型を再現した。」等となっています。具体的な提案が何なのか、明確に記述する必要があります。

回答(高尾 泰正)

技術的要素(論理・戦略的シナリオ)と社会的要素(経験的試行錯誤)を分離して明示できるよう、緒言以下の構成と、新原稿の図を修正いたしました。また、技術的要素の解決に粉体技術を用いた論理・戦略的シナリオを、社会的要素の解決に名古屋工業技術試験所時代の速攻的なシナリオを設定しない技術指導型の地域連携を組み合わせることを、解決策としました。

議論2 UV遮蔽

質問(清水 敏美)

本研究の目的は、UV遮蔽用ナノ粒子と化粧品用セラミックスとの新規な複合化技術を開発することにより、化粧品粉末の透明感と使用感を両立させることです。ところが、本文では、UV遮蔽、透明感、使用感の三つの課題全ての両立とあります。UV遮蔽は化粧品として当然の必要事項としますので、課題は二つ、すなわち、透明感と使用感の両立と思いますが、UV遮蔽をわざわざ課題として設定している理由は何でしょうか。

回答(高尾 泰正)

ご指摘のとおり、ナノ粒子で必然的に得られるUV遮蔽を列挙する必要はありません。現状では粒子表面に適切に配置する技術がないため、透明感・使用感を両立するにはナノ粒子を過剰に抑制しなければならず、その結果、UV遮蔽が得られなくなります。

議論3 技術要素課題

コメント(清水 敏美)

第一稿では、技術要素課題が、「UV遮蔽」、「透明性」、「使用感」とありますが、それらの用語は感覚的、非技術的な表現です。基本物性からすれば、例えば、各々「高い紫外光遮蔽性」、「高い可視光透過性」、「高い滑沢性」等と言い換えることができます。あるいはそれに匹敵する適切な「物性を表現できる用語」に修正することをお勧めします。

回答(高尾 泰正)

ご指摘のとおり、適切な「物性を表現できる用語」に修正しました。

議論4 滑沢性評価装置と技術的課題の関係

質問(清水 敏美)

使用感を定性的に評価するために、まずは滑沢性評価装置を開発したのは理解できます。しかし、本来の高い使用感、言い換えれば高い滑沢性をUVナノ粒子/セラミックス複合材料に付与するために、技術的課題としてどのような製造条件を設定し、技術課題を克服したのかが記述されていないように思います。この点に関して、単なる試行錯誤で技術的に解決したという意味でしょうか。高使用感達成を評価装置の開発で解決したという論理は容易には理解できません。

回答（高尾 泰正）

高使用感の理由として、ナノ粒子の絹雲母間の偏析を抑え、原料粒子の表面のみに配合でき、（結果的に）絹雲母およびナノ粒子の使用量の極少化を実現した効果を挙げることができます。その旨、文中に追加して記載しました。

議論5 Synthesiologyの構成法の3つのタイプ

質問（五十嵐 一男）

第一稿では、Synthesiology, 1(2), 139-143 (2008)の構成法の3つのタイプを引用していますが、本報告事例と比較する際に、何と何を比較するのですか。また、統合型の技術的・社会的解決策と記載されていますが何を意味するのでしょうか。

回答（高尾 泰正）

社会的要素の解決の方法論として、Synthesiology 誌は、①アウフヘーベン型（相反する二命題を一次、「止揚」して新概念を創出）、②ブレイクスルー型（基盤技術の一意的な「成長」モデル）、③戦略的選択型（「論理的」シナリオによる仮説検証法）と三つのタイプを整理しています。本研究は、短期的な組織利益を一次、止揚（停止）するという意味で、①アウフヘーベン型のアイデアを社会的要素に適用した事例と言えます。

議論6 社会的解決策

質問（五十嵐 一男）

社会的解決策が地域ブランドと独自製法で製品競争力を高めるという意味を教えてください。

回答（高尾 泰正）

合成（材料）と評価（装置）研究を事前シナリオで限定せず、転用可能な基盤技術は柔軟に利用しあえるようにしました。その結果、合成（材料）研究の複合粒子が、評価（装置）の適用可能性の広範さを担保し、それにより評価（装置）研究が粉体材料の高機能化に貢献しました。言い換えれば、合成（材料）と評価（装置）研究が、互いの技術的要素の解決と社会的要素の競争力向上に寄与しました。

議論7 蟻の採餌経路選択問題

コメント（五十嵐 一男）

第一稿では、自然現象との対比として「蟻の採餌経路選択問題」を取り上げ、その論理構造の類似性を挙げていますが、一般読者には、蟻の採餌経路選択問題の論理構造はほぼ不明です。さらに、新経路の発見確立の向上などが方法の高度化に有利であることと、本論文のシナリオとの関係が不明です。

回答（高尾 泰正）

「個体レベルの最適が必ずしも全体最適とならない」ということが本論文の重要視点ですので、改訂稿においては文章中でその点が明確になるよう記述しました。