

伝統技術に息づく日本人の感性，と科学

黒田 孝二*

1. はじめに

紙に貼り付いた粘着テープをゆっくり剥がす技は、異種分子の剥離を手応えで感知制御するナノテクである。ものと人との対話から課題を見出す感性と、成功を探究する試行錯誤で獲得した暗黙知が伝統技術の源泉である。一方、科学はデータと理論の共有でこの暗黙知を解明、再現して多彩な機能製品を開発し生活を豊かにしてきた。

第5期科学技術基本計画の重点は、IoT、数理論理学、AI、セキュリティ、センサ、ロボット、素材、ナノテクなどの新産業創出とされている。ものづくりの安全安心社会への貢献には、物質と生命の循環の連携を果たす、ナノからマクロ領域までの物質とエネルギー相互作用の広い時間軸制御が必須であるが、研究は手探り段階にある。

図1には、ゆらぎ状態の分子にリズムを誘起して核の形成を促し、タイムリーなエネルギー制御で機能体に成長させる動的スキームを示した。これを実現するには、素反応と材料機能を設計・制御する科学と非線形な発展過程を経験則で制御する現場や伝統技術などの感性との融合イノベー

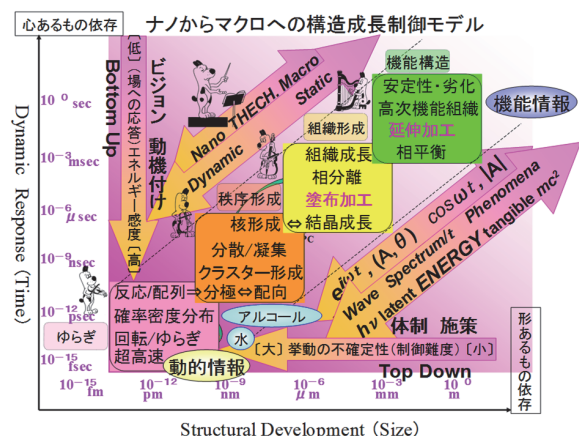


図1. ナノ領域から機能発現に至るプロセス制御要因

ションを引き起こす発想が必要である。

また、日本のものづくり産業のグローバルな競争力に懸念されることは、川上から川下産業が個々に最適化をしても産業全体の最適化は望めないことである。垂直統合と広い視野を持った人材育成が大きな課題といえる。

欧米の大手化学産業は、材料・プロセス・製品の全体最適化のビジョンがある。日本には、優れた現場技術があるが、多くが川上・川中・川下に分かれた暗黙知で産業の垂直連携には難がある。

日本の次世代に現場の知的資産を手渡すには、材料の挙動を見極め、次の挙動を適切に予測し、最適に制御するための感性と科学の融合の重要性の認識が大切である。

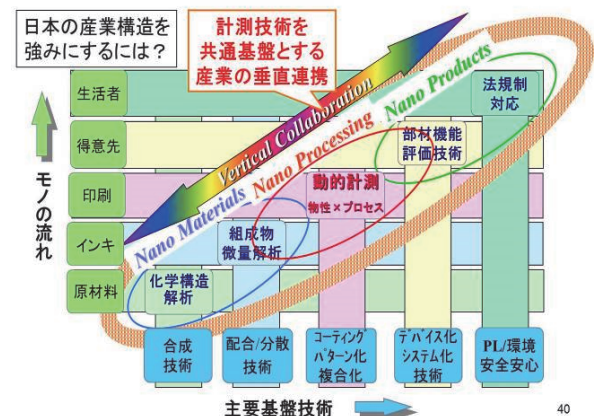


図2. 日本の産業現場活力の垂直連携を促す動的計測

2. プロセスにひそむナノテクと現場感性¹⁾

(1) プロセス下のインキのナノ挙動観察

印刷インキの転移は1ミリ秒以下と高速である。高速液体挙動として水面に水溶性赤インキを滴下して起きるミルククラウン現象の特異性を検証した。水の表面同士は反発し、出現したクラウンは予期に反し赤く、反跳した赤インキ液柱が液滴と

*京都工芸繊維大学伝統みらい教育研究センター

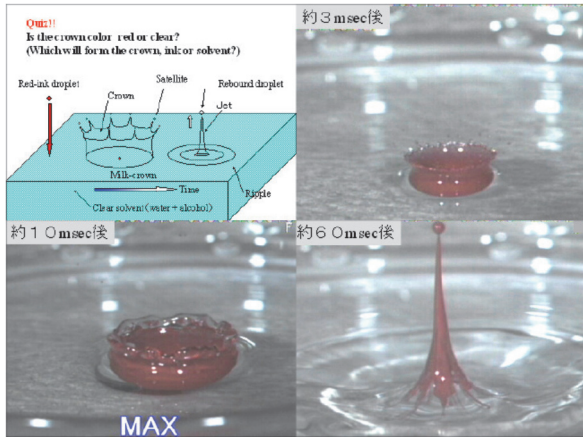


図 3. 水性赤インキ滴の水面落下挙動の高速 VTR 映像

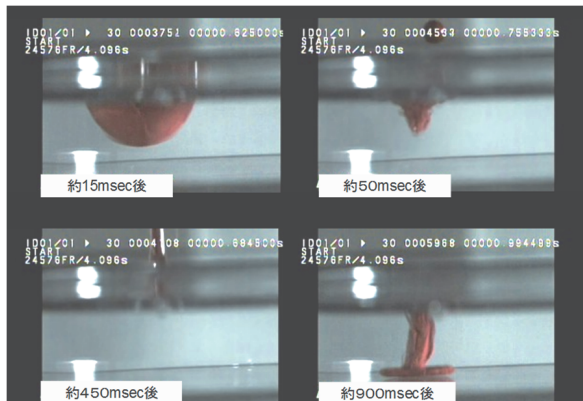


図 4. 水性赤インキ滴の水面落下象の高速 VTR 側面映像



図 5. メタノール(上)とトルエン(下)着色滴の液面落下

なって落下する約 500 ミリ秒後には、水との界面で反発せず通過して水面下に潜り底まで到達する。

水分子の誘電率は高く小型で運動は高速だが、表面などの特異場では配列して局所に一過性の強い分極構造をとる。

当初は赤インキが水面と誘電反発して水面に広がり赤いクラウンとなるが、ナノ界面が相互拡散後に落下する赤インキは界面を容易に通過する。

一方、印刷や塗装産業で膜面の均一性と平滑さを出すとされ常用されてきたトルエンでは、着色液滴を落下させると、液面では反発せず通過する。自動車のスプレー塗装の希釈には、経験則でトルエンが多用される理由は液滴が相互反発せず、スムーズに融合して一体化して成膜する挙動にあると理解できる。

伝統技術術には個性豊かな水を使い分ける工学要素があり、現代のエネルギー・バイオ分野の材料挙動のナノからマクロまでを統合的に制御するためのヒントがひそんでいる。

(2) ナノ機能材料成膜プロセス設計の勘所

乾燥プロセス中に塗布膜内部の核形成がいつどこで起きるかが、後の機能組織形成を左右する。プロセス設計には材料固有の多様に複合した緩和時間への配慮が肝心である。

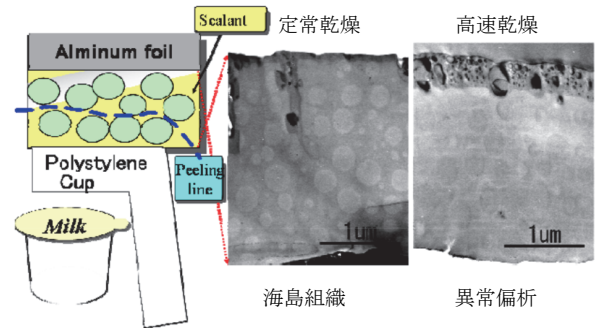


図 6. 乾燥貢献の差によるミルク容器の剥離不良

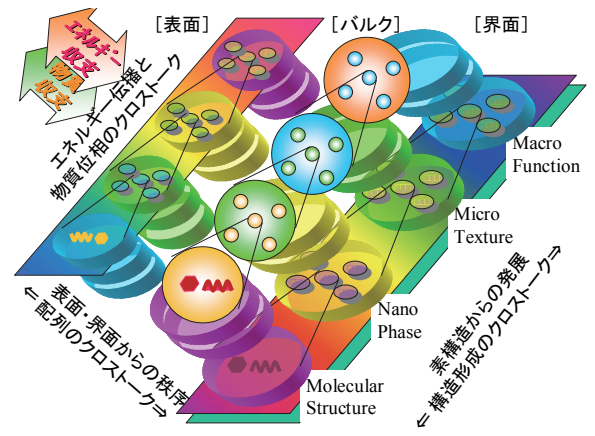


図 7. 塗布からの成膜挙動とエネルギー物質取支モデル

ミルク容器の剥離不良例の右図では、強風乾燥により異常な海島構造が表層に偏析している。高機能材料ほど材料内部挙動の把握とプロセスエネルギーの時間軸整合が肝要である。

図7に示す塗膜形成モデルで、緩和時間を考慮したプロセスエネルギー収支と物質収支のバランスが表面と界面と内部に起きる核形成から組織成長に至る動的挙動を誘発することが大切であることが理解できる。

3. 感性と科学のハーモニー¹⁾

(1) 現場挙動の動的計測の重要性

現場では、平衡論より臨機応変な速度論による制御が重視される。

ナノ領域の挙動は微細で高速だが、映像化技術の活用により直感的な予測制御が容易になる。ナノ現象がマクロ機能に発展する規序を動的に計測して川上川下産業間で共有化できれば、現場の暗黙知の継承、産業基盤の強化が図れ、新産業創出も期待できる。

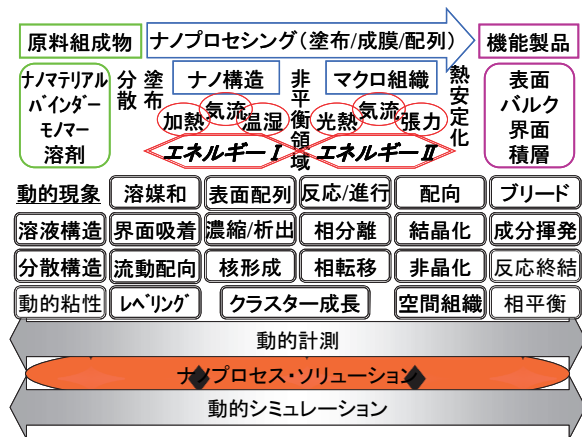


図8. 塗布プロセスにおける液膜内部の物質現象

(2) 主観的確信の積重ねで拓くイノベーション

モノの真の姿をみるには“七み”を活用する。
見=目に映る像を解釈 観=全体のしくみをみる
視=問題意識を持って探る 診=問いかけて
応答をみる 看=経過をスムーズにする 察=上記の五みを駆使して、自分流の仮説を立てる 顧=実現象をよく観察して仮説を立て直す。

仮説モデルは物事を見る基準となり、想定に近

い満足感と、遠い挫折感の積重ねが本質を見抜く目を養う。

仮説基準を持つことが微かな変化の予兆を捉える感性の獲得に繋がる。他人と異なる視点で主観的確信の多様性を生む現場教育が大切である。

失敗を検証しつつ仮説を持って前進すれば成果に繋がる。失敗を糧とする現場教育が個性豊かな知的財産を生む源泉となる。

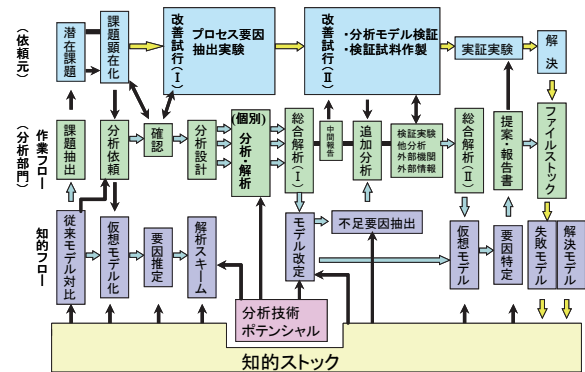
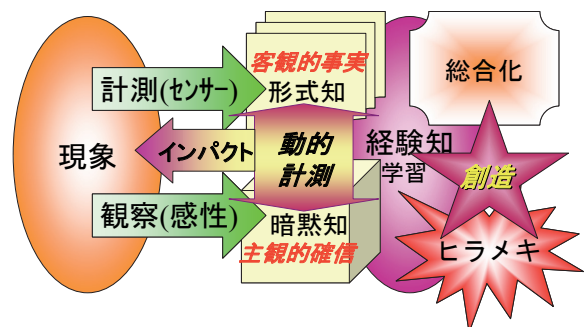


図9. 課題解決提案部門における知的ワークフロー

(3) 感性と科学のハーモニーを目指して

材料挙動を感性で把握するには、働きかけに応じた手応え感を各自の感性空間に投影して、成功の達成感と失敗の挫折感に塗り分ける必要がある。

主観的な感性体感と、客観的な計測を同時並行して把握することで「人を知るようにモノを知る」努力を続ければ未知のナノ挙動を操る道が開けると期待する。見る「INPUT 感性」を、知る「科学」で解釈して、操る「OUTPUT 感性」に繋ぎ「感性サンドイッチ型の科学」にして初めて強力な武器は生まれる。科学を次世代に活用するには、入口と出口の感性をより高める必要がある。



ナノ～マクロ現象を“見る”“知る”“操る”

図10. 動的計測による感性とサイエンスのハーモニー

4. 伝統技術を支える感性

京都工芸繊維大学伝統みらい教育研究センターでは、「伝統の暗黙知を科学技術の力で形式知化し、日本のものづくりに活かし、日本の未来を切り拓くこと」を目指している。2008年から2013年の年報の研究実績をまとめて作成したコンセプトを図11に示す。

伝統技術の源泉はものと人との対話にある。熟練者の技には計測不能な未解明の工学要素がひそ

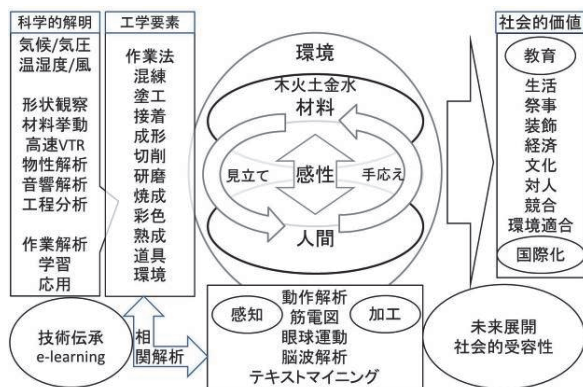


図11. 伝統みらい学の研究体系と社会的機能

んでいる。

- 1) 御弓士21代目柴田勘十郎氏は、弓の外側には柔軟な竹材、内側には剛性のある竹材を選定する。判別は竹材の厚みに関わらず一振りで行われる。感性知には、経験則の無意識の変換がかり、一振りの手応えから完成時の厚みの手応えを想定、感知している可能性が考えられる。
- 2) 蒔絵師の下出祐太郎氏の漆塗り作業を高速VTR撮影して、掌中の刷毛が1秒に10回程前後に振動して、漆面の光沢が揺らぐ現象を見出した。この現象は、刷毛先の漆の粘弾性振動に繋がり応力緩和（粘度低下）を誘起し刷毛目を平坦化する効果が想定される。刷毛を固く握る非熟練者では塗面の刷毛目が目立つ。

いずれの場合も、手作業の働きかけに応答する材料の「手応え感」を経験則に照らして成否を的確に判定しているところが共通点である。

(1) 感性感知の多次元空間モデル化および科学計測

主観的な試行錯誤で得られる、対象の挙動に即時応答する感性の仕組み（図12）と、再現する応答を客観データとして共有する科学計測を共創的に発展するモデル構築を目指している。

人間は騒音の中でも意識の集中で相手の話を際立たせて聞き取れるのに対し録音機は背景音も均

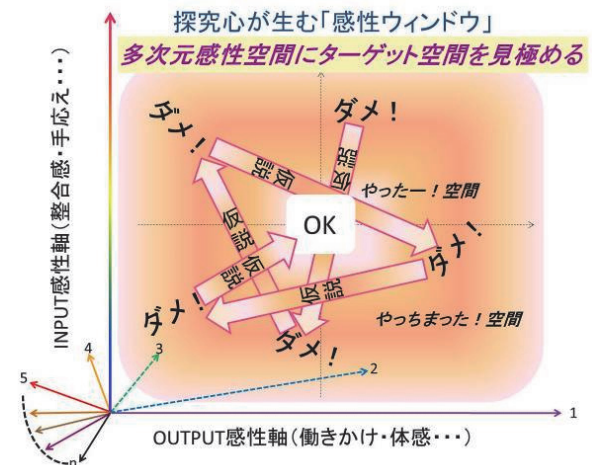


図12. 感性感知の多次元空間モデル

等に再生して聞き取り難い。この意識集中によるリアルタイムの情報選択機能をここでは「感性フィルター」と呼ぶ。

図12は、人間が多様な感性で捉えた情報を多次元の感性軸からなる感性空間に投影して把握するモデル図である。ここに様々な仮説に基づいて挑戦と失敗を重ねて成功に辿り着く試行錯誤のスキームを示した。

失敗を受け止めて仮説を立て直す修業を重ねて感性空間を失敗で埋め尽くして残るのが成功空間である。

感性軸には、対象から感知するエネルギーのリズム感を想定した位相（周波数）を位置づけている。ここに感知した対象のリズム感を投影して、多次元の感性空間に、その人に個有の感性と経験に基づいた成功と失敗の感性領域を得ることができる。

熟練者は目的にかなう成功空間の波動を想定して、心地よい整合感覚を求めるだけで匠の技が達成できる。

修行の過程では、対象の応答波動と目標とする波動との位相ギャップを違和感として把握する感性を培い「手応え感」の良し悪しに即時対応して、より共鳴感の強い成功空間まで辿りつく知覚・制御システムがあるものと考えられる。失敗の苦い経験を重ねたことで、図12の失敗空間で強い違和感を感じ、目標との位相が整合したときの「達成感」を求めて成功空間の心地良い方へ速やかに転進できるようになるものと考えられる。

(2) 感性と科学のハイブリッド工学基盤へ

図13には、遠隔から目的に近づくのに有利な科学と目標に近づく達成感が湧く感性の特徴を対比した。

この融合が感性と科学のハイブリッド工学基盤となれば、新たなものづくりへの道が期待できる。

図14に示すように、位相感知は対象のエネルギー変化のない配列変化にも敏感である。21世

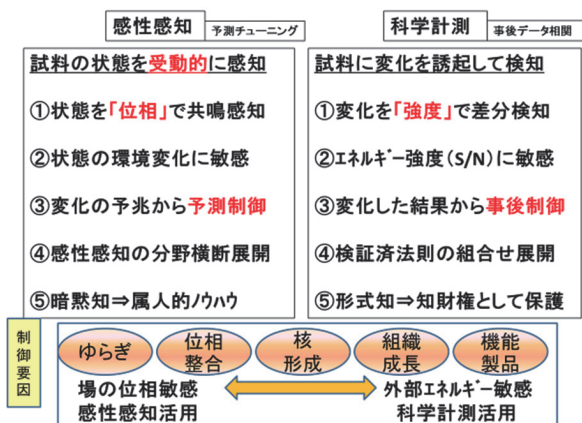


図13. 感性感知と科学計測の特徴対比

赤：目的パターン 青：感知パターン

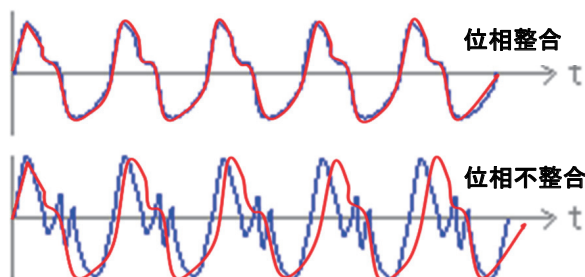


図14. 感性感知の目的と感知パターンの位相比較モデル

紀に期待されるバイオ、エネルギー分野の発展には、水中の原子・分子ゆらぎや界面への配列など

素過程の高速挙動と、マクロな循環や機能へ発展する連鎖の機序を解明する必要がある。ものづくりプロセス中の材料の緩和挙動の把握と制御には感性感知が適しており、マクロの大きな変化の挙動解明には科学計測が効果的であり、互いに相補的な役割を果たすことが好ましい。(図1)

5. 水特有の表面分極と動的作用の解明

(1) 水滴の分極と衝突挙動のシミュレーション

大阪大学山口康隆准教授との共同研究で、水分子150個同士を相対速度70 m/sで衝突させると、合体直前に減速し、イソプロピルアルコール(IPA)分子500個同士では減速しないと判明した。(図15)

水分子は慣性モーメントが小さく電荷や特異場に敏感に応答する一方で、分子分極が大きいので、

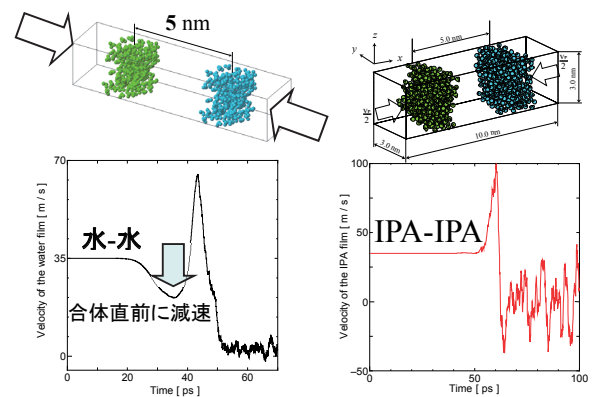


図15. 水滴同士、IPA液滴同士の衝突シミュレーション

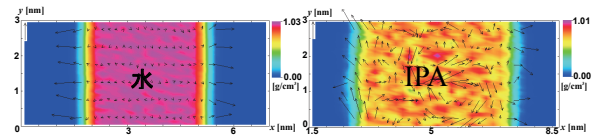


図16. 水分子とIPA分子が作る分極場の方位と強度分布

表面などに整列して集まると強い分極場を長く形成する特徴を持つ。

表面で水分子は水素を外向きに配列して分極場を作り、合体して表面配列が崩れるまで、表面相互の誘電反発が継続するという、水特有の現象であると推定される。(図16)

(2) 荷電壁面への接触角の分子動力的解析³⁾

印刷インキの転移促進策のひとつに電位付与が

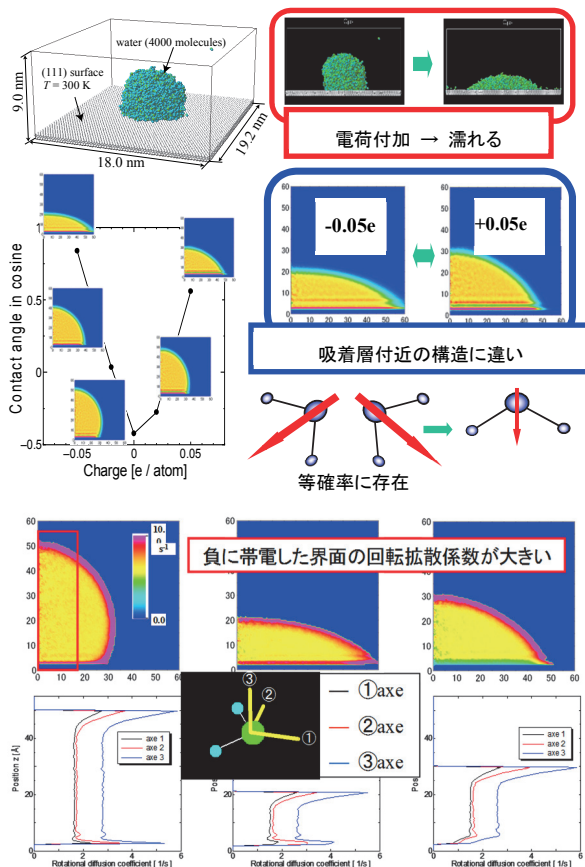


図 17. 壁面電荷への濡れと壁面近傍の分子配列状態のシミュレーション (水分子はSPC/E, 相互作用はL-JとCoulombモデル)

ある。水の分子動力学シミュレーションでは、電荷を持つ壁面へは濡れが促進されること、プラスとマイナス荷電では配列方位の差で、後者が水の接触角が低い結果を得た。(図 17) さらに、水分子の回転をアインシュタインの関係式で計算すると、プラスよりマイナス荷電界面近傍で回転拡散係数が高くなり併進粘性が低い結果を得た。この検証のため、撥水性基板への水の濡れ百万コマ/秒の高速 VTR で観察して、マイナス荷電の方がプラス荷電より濡れが良好と確認した。(図 18)

(3) 水のナノ挙動に対する一考察

ナノ領域では、水分子の存在が微弱な場を増幅して、流動の変化や核生成を誘発する劇的な結果をもたらす。

- 1) 水分子は熱揺らぎで高速で回転・並進するが、慣性モーメントが小さいので界面など

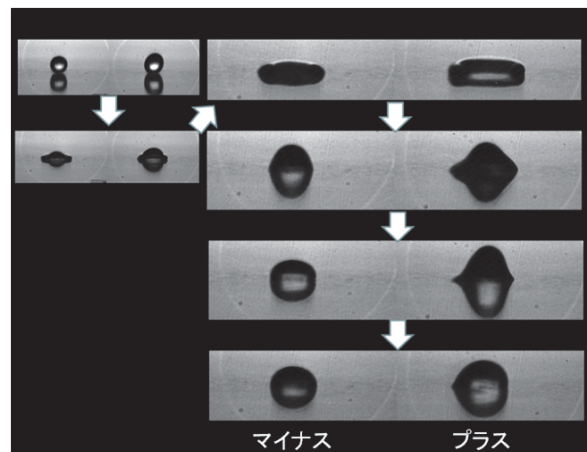


図 18. 撥水性荷電壁面への水の濡れ

の場に敏感に方位を変える。

- 2) 負の荷電界面では、水の回転軸が荷電面と平行になり、水分子の自由な移動を誘発して併進粘度は下がる。

6. 伝統技術にひそむ暗黙知の抽出と解明の試み

(1) 京壁の刀鍛冶製法の鍔の混練作用⁴⁾

京壁は京都の粘土と稲藁を一定時間練り置き、塗工前に藁切、砂、微塵砂で流動性を調整して3層に塗り重ね、各層ごとにコテ（鍔）を使い分ける。特に、仕上げに用いる刀鍛冶製法で鍛えた水撫ぜ鍔は、練り段階から土壁の流動性を向上する作用が認められたので紹介する。

(2) 実験結果

鍔で練った土壁材料を掬い、肘を支点に鍔を傾けて約 30cm 下方に落下する挙動を高速 VTR 撮影した。同一の土壁材料約 60 g を、刀鍛冶製法の旧水撫ぜ鍔で練ると流動性は高まり下垂する。

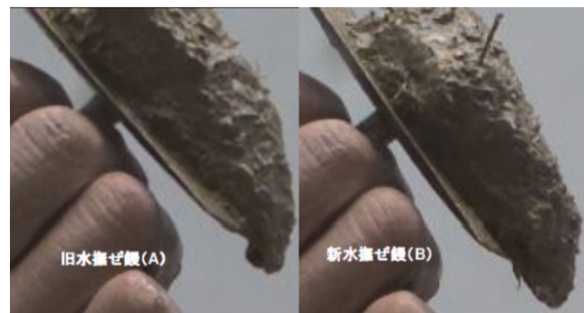


図 19. 土壁の鍔面上の流動性



図 20. 鋺から落下し、飛沫を発生した土壁材料の性状

現代の新水撫ぜ鋺で練っても、流動性の高まりはない。さらに、落下時の飛沫数は旧水撫ぜ鋺に多くなることから、混練物が一体化した粘弾性体になっていることが示唆される。

(3) 機械的流動性評価

京都産の深草土と土砂（数 10 μm ）110 g と水 30 g を旧水撫ぜ鋺と無鍛造鋺で混練しで流動性を評価した。

アルミ筒（4.5 mm 径）を 10 mm/秒速度で上下して応力プロファイルと比較し、旧水撫ぜ鋺で混練すると粘性流動，無鍛造鋺の混練では塑性変形が検証された。無鍛造鋺混練では内部に空隙を

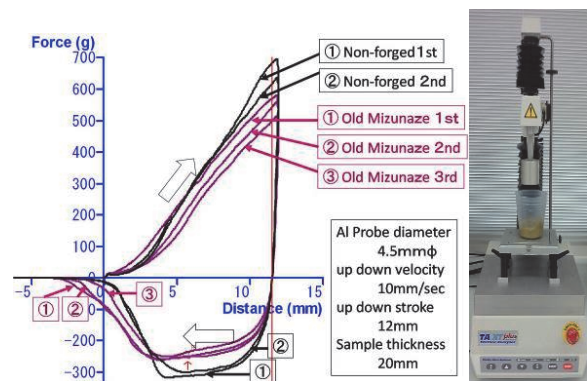


図 21. 流動性評価（英国 TAXT PLUS Texture Analyzer）

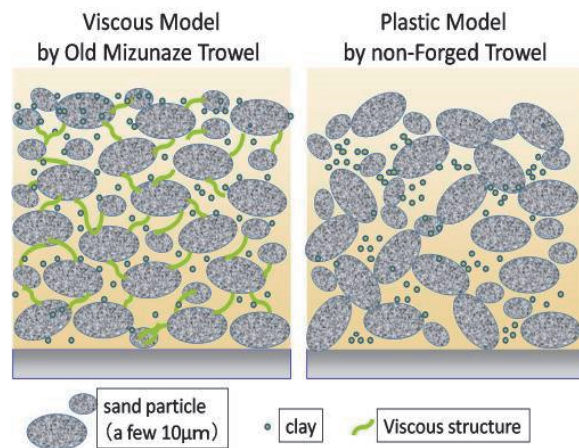


図 22. 京壁の混練モデル（左：旧水撫ぜ鋺，右：無鍛造鋺）

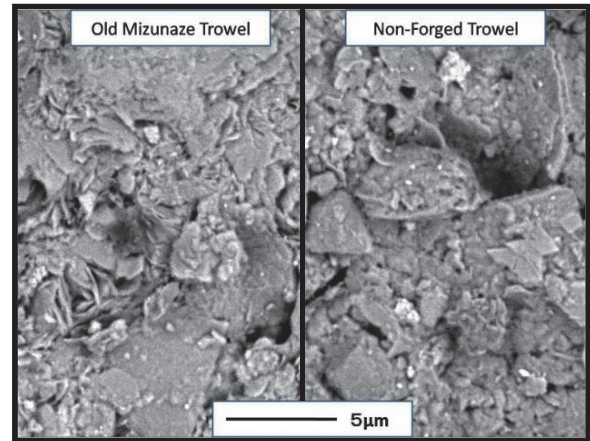


図 23. LV-SEM 観察（左：旧水撫ぜ鋺，右：無鍛造鋺）

持つモデルが考えられる。

次に、混練塗工乾燥後の表面を低真空走査型電子顕微鏡（LV-SEM）で観察し、旧水撫ぜ鋺で混練した土壁では、カオリナイト状粘土が土砂を覆い、緻密な表面構造を持つことが確認された。（図 23）

(4) 鋺の鍛造効果の検証実験

鋺の鍛造効果を検証すべく、熱間鍛造，焼きなまし，生ならしの各鍛造段階の SK-5 鋼を製作して土壁を混練，塗工，乾燥して表面性状を観察した。その結果，熱間鍛造後の鋼に表面性状の向上効果が顕著に現れた⁴⁾。

熱間鍛造直後の鋼による混練が土壁の流動性を向上し緻密な仕上りを呈することが検証できた。

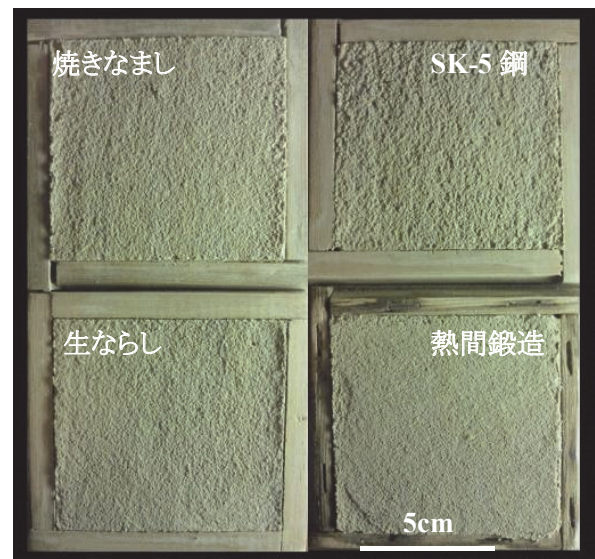


図 24. 各鍛造工程後の SK-5 鋼により混練した土壁表面

しかし、熱間鍛造組織は不安定で、焼きなましによる安定化が必要である。刀鍛冶製の旧水撫せ鍔が安定して優れた性能を持つのは、繰り返し折り畳む日本刀の鍛造法が、熱間鍛造直後の状態を維持することが示唆される。

(5) 微粒子分散液の混練効果のシミュレーション⁵⁾

次に、手作業の混練でナノ構造を持つ粘土層を形成する機構解明のため以下のシミュレーションを行った。

山口由岐夫らは粘土相当のシリカ微粒を水系にせん断力で分散する実験で、せん断速度 10^3 までは分散効果で粘度低下し、せん断速度 10^4 にかけて増粘ピークを経て 10^5 にかけて粘度低下する結果を報告している。

この現象は、山口らの開発による粒子分散シミュレーションシステム SNAP で、実験と同様の粘度プロファイルが得られている⁶⁻⁷⁾。このせん断速度 10^4 前後の増粘ピークにおける、内部の粒子挙動を可視化して検証したところ、初期に(0

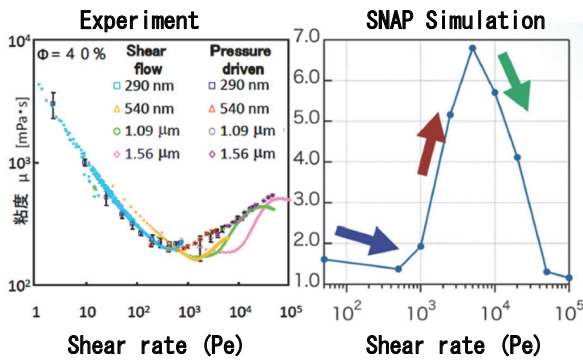


図 25. コロイダルシリカの分散実験とシミュレーション結果

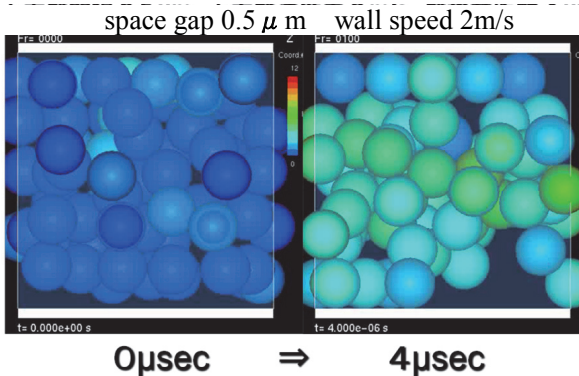


図 26. 高速せん断領域における微粒子の配列挙動 (微粒子の色変化は明るい程粒子ほど連結が多いことを示す)

μsec) は溶媒全体に微粒子が分散して低粘度を示すが、経時的に ($4 \mu\text{sec}$) 微粒子同士の連結機会が増えて配列し、流動配列した微粒子の層間の溶媒が潤滑作用を持つことでせん断力をスムーズに全体に伝える仕組みが認められた。

ここで粒子の配列で押し出された溶媒は壁面に滲出して壁面の潤滑性を持つことが把握できた。溶媒が系外に押し出される現象は、京壁の塗布直後に滲出する「ノロ」現象に相当し、一般に粉体を水などと混練する作業で終点を見極める方法として表面に出る「照り」が広く用いられていることと通じるものと考えられる。

(6) 考察

伝統技術の工学要素として技巧に加えて、京壁の鍔や漆の刷毛など道具が重要な意味を持つことが判明した。道具がナノ領域制御の主要因であることを見出した先人の知恵を現代の科学と相補的に組み合わせて、未来社会の安全安心に活かすのは我々の責務ではないだろうか。

7. おわりに

21 世紀には人が安全安心に暮らせる環境と持続的な社会が共存する科学が求められる。

自然の美りと豊かな水に恵まれた日本人の心は、ものや自然との調和感覚を培って、共感性の高い感性をベースに独自の文化を作り上げてきた歴史がある。(表 1)

表 1. 日本の感性の源泉と国際比較

日本の感性の特異性の源泉と国際比較	
【日本】	大陸から移り定住した歴史から (価値観) 地震、火山、台風、津波 < 水と自然の恵み (特徴) 自然との調和 自然の変化に敏感で恵み享受、受動的。 (雲のねずみ色を多様に見分け、太陽の赤感性が高い) (感性) 自然やモノを擬人化 微妙な変化を察知する繊細さ。 カブクではなく、相手のタイミング(位相)をみて働きかける。調和型。
【米国】	荒野を開拓して住みついた歴史から (価値観) 敵対する自然を克服する戦いの中で生きる (特徴) 利権を守るシエルターを作り攻撃する。能動的。 (感性) 自己リスク極小化し人生(経済)ゲームに機敏。パワー優先。
【欧米】	民族存続をかけた熾烈な闘争の歴史から (価値観) 戦争頻発、厳しい社会環境で、いかに民族を存するか。 (特徴) 民族共存の知恵を最優先。自己存続のルール作り得意。 (感性) 自然変化より社会変化に敏感。形式優先。保護的。保身的。

欧州は厳しい社会状況で社会契約の文化が、米国では開拓精神から環境克服の文化が主流であるようにみえる。

日本人と自然の環境で培われた伝統を大切に活かすために、伝統産業にひそむ暗黙知を大切に維持する努力を積むと同時に、その時代時代の科学技術で、未解明の多様な現象を徐々に解き明かし、洞察して、現在であれば、ナノ・バイオ、ものづくりの技術革新に結び付けてイノベーションを起こし、日本の次世代に継ぐことが我々世代の使命であると考えます。

参考文献

- 1) 黒田孝二, 『一橋ビジネスレビュー』 54, No.6, pp. 76-99 (2007) (東洋経済新報社)
- 2) 黒田孝二 “ものづくり暗黙知を発展させる「感性と科学のハイブリッド工学基盤モデル」”, 21世紀科学と人間シンポジウム論文誌第8巻 (2015) (印刷中)
- 3) D. Surblys, Y. Yamaguchi, K. Kuroda, T. Nakajima, and H. Fujimura, the Journal of Chemical Physics 135, 014703 (2011)
- 4) 黒田孝二, 佐藤ひろゆき, 高井由佳, 後藤彰彦, 濱田泰以 “土壁材料の流動特性に及ぼすコテの作用効果”, 日本機械学会 2012 年次大会 G040074, (2011).
- 5) 黒田孝二 “京壁の美観を支える鍛造^{コテ}の鍛造効果の検証と解明”, 日本機械学会機械材料・材料加工技術講演会 2013No.724, (2013)
- 6) M. Fujita, et al, Physical Review E, Vol. 77, No. 2, 026706, (2008)
- 7) 辰巳怜, 小池修, 山口由岐夫, “濃厚ナノフルイドの非平衡構造形成シミュレーション”, 化学工学, Vol. 80, No. 3, pp. 179-182, Mar (2016)