

スマートウィンドウ用サーモクロミック二酸化バナジウムナノ粒子コンポジットフィルムの開発

(コニカミノルタ株式会社¹⁾) ○山本 昌一¹

Development of thermochromic vanadium dioxide nanoparticle composite films for smart windows (¹KONICA MINOLTA, INC.)

○Shoichi Yamamoto¹

Smart windows are an energy-saving technology that provides advantages in both summer heat management and winter heat utilization. This study focuses on the development of smart window materials that utilize monoclinic vanadium dioxide ($\text{VO}_2(\text{M})$) nanoparticles dispersed in a polymer matrix. These materials exhibit infrared thermochromism induced by the metal-insulator transition.

Our approach integrates computational science and rapid synthesis processes to create thermochromic vanadium dioxide nanoparticle composite films with excellent optical properties. The development process can be reached by two synergistic factors: predicting optical functionality for nanoparticle dispersion and controlling crystalline phase and morphology in nanoparticle high-speed manufacturing.

Firstly, we developed a multi-scale optical calculation framework to predict the optical properties of nanoparticle-dispersed materials. This framework amalgamated first-principles calculations¹⁾, electromagnetic optical calculations²⁾, and theoretical geometric domain equations. Verification was achieved by comparing the experimentally obtained data with the calculated dielectric function and crystal distortion resulting from chemical doping.

Secondly, $\text{VO}_2(\text{M})$ nanoparticles were obtained by a continuous hydrothermal flow synthesis (CHFS) method³⁾. This system enables rapid/high temperature heating by mixing the precursor suspension with supercritical water in the flow reactor of CHFS, drastically reducing crystallization time from hours to seconds⁴⁾. The method also allows precise control of particle size ($< 30\text{nm}$) and confirmed the formation of mixed crystals through chemical doping.

$\text{VO}_2(\text{M})$ nanoparticles composite films produced using our developed process exhibited high visible light transmission and significant infrared thermochromism. This is attributed to the small size of the crystalline nanoparticles and suppressed aggregation within the polymer matrix. This work is expected to be an important step toward the development of nanoparticle-dispersed materials with optical functions and the industrial application of smart windows.

Keywords : smart window, vanadium dioxide, nanoparticle, optical simulation, flow synthesis

スマートウィンドウは、夏の遮熱と冬の採熱を両立する対応すること省エネルギー技術として着目されている。本報告では、樹脂分散させた単斜晶二酸化バナジウム ($\text{VO}_2(\text{M})$) ナノ粒子の金属-絶縁体相転移による赤外サーモクロミズムを利用したスマートウィンドウ材料の開発について紹介する。

優れた光学特性を持つ二酸化バナジウムナノ粒子コンポジットフィルムの開発を目指し、ナノ粒子の分散に関する光学特性の予測と、ナノ粒子の高速製造における結

晶相と形態の制御という、2つの技術構築に取り組んだ。

まず、ナノ粒子分散材料の光学特性を予測するために、マルチスケール光学計算フレームワークを整備した。このフレームワークは、第一原理計算¹⁾、電磁光学計算²⁾、理論幾何学領域方程式を統合したものである。計算された誘電関数と化学ドーピングによる結晶歪みは、実験データと比較することによって計算の妥当性を確認した。

次に、VO₂(M) ナノ粒子の合成には、連続水熱フロー合成法 (CHFS 法)³⁾を用いた。この方式は、CHFS のフローリアクター内で前駆体懸濁液を超臨界水と混合することで、急速・高温加熱を可能とし、VO₂(M) の結晶化時間を数時間から数秒に大幅に短縮した⁴⁾。また、この方式では、均一なサイズをもつ粒子 (< 30nm) や化学ドーピングによる混晶が形成された。

本開発プロセスに則り試作した VO₂(M)ナノ粒子コンポジットフィルムは、高い可視光透過率と大きな赤外サーモクロミズムを示した。これは、結晶性ナノ粒子の粒子サイズが小さく、ポリマーマトリックス内での凝集が抑制されていることに起因すると考えられる。本研究は、光学機能を有するナノ粒子分散材料の開発や、スマートウインドウの産業応用に向けた重要な一歩となることが期待される。

謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機(NEDO)の委託業務(JPNP16010)の結果得られたものです。プロジェクトの成果を活かして 2022 年 4 月に「データ駆動型材料設計技術利用推進コンソーシアム」が、設立されており⁵⁾、データ駆動型材料開発」の入り口・情報交流の場・業界全体の技術力向上への貢献が期待されています。

文献

- 1) A. Varadwaj and T. Miyake, *ChemistrySelect*, **2022**, 7, e202200171.
- 2) 松井 正冬, 中村 恒夫, 第13回, 分子科学討論会 **2019**.
- 3) D. Malarda *et al.*, *Chem. Rev.* **2017**, 117, 17, 11125-11238.
- 4) S. Yamamoto and M. Fuji, *8th Asian Particle Technology Symposium APT2021* **2021**.
- 5) <https://unit.aist.go.jp/cd-fmat/ja/c-dmd/index.html>