

# 金属触媒の合理設計に基づくカーボンニュートラル反応プロセスの構築

マテリアル生産科学工学専攻 マテリアル科学コース  
教授 森 浩亮

## 1. はじめに

私は、2025年4月に大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻 材料エネルギー理工学講座 触媒材料学領域の教授に昇任頂きました。2003年に本学基礎工学研究科物質創成専攻にて金田清臣教授の下で不均一系触媒を利用した有機合成反応の研究で博士（工学）の学位を頂き、カリフォルニア大学バークレー校での博士研究員を経て、2005年12月より本領域の前身である材料理化学領域にて山下弘巳教授のもとで助手・助教・講師・准教授として勤めてまいりました。

ターゲットとする反応は時代とともに変遷しているものの、学生時代から一貫して触媒研究に取り組み、特にナノ環境触媒・光触媒による省エネプロセスでのクリーンエネルギーの開発・環境浄化に関する研究に従事し、既存の反応系を凌駕する活性・選択性を示す新触媒材料の開発に留まらず、放射光 XAFS を中心とした動作環境下での触媒表面のその場観察や理論計算を駆使し、その優れた触媒機能とナノレベルの構造との相関を明らかにしてきました。

2050年カーボンニュートラルの達成には、二酸化炭素資源化技術および水素の利用技術が、エネルギー戦略の中心に位置づけられるとともに、今後の日本の経済成長を支えるグリーン成長戦略の中でも中核を担っていると云えます。このような『エネルギー資源革命』の達成には、目的の反応に応じて原子分子レベルで精密設計した『ナノ構造触媒』が必要不可欠であります。現在、触媒材料学領域では、再生可能エネルギーを水素に変換してCO<sub>2</sub>との反応を経て貯蔵し、最終的に有効活用する一貫通貫のカーボンニュートラル水素エネルギープロセスの構築を目指しています。目的達成のために、これまで培ってきた触媒科学に関する知見に金属学の視点を加え、新奇金属触媒材料のメタラジー、すなわち融合分野の構築の観点からアプローチをしています。本稿では、触媒材料としてはまだまだ未開拓なハイエントロピー合金(HEA) ナノ粒子触媒および金属 3D 積層造形自己触媒反応管を例に、触媒材料学領域の研究の一端を紹介いたします。

## 2. ハイエントロピー合金 (HEA) ナノ粒子触媒

HEAとは、5種類以上の金属元素をほぼ等原子組成比で含み、かつ単相の固溶体を形成する材料のことを指し、従来の合金では見られない特異な合金効果が発現することが報告されています。バルク材料としての研究が盛んなこの HEA をナノ領域におとしこめれば、量子サイズ効果と相まって、さらに新機能発現が期待できると考えられます。加えて、ナノ触媒材料としての利用を想定した場合、格子歪み効果や、カクテル効果に誘起された電気

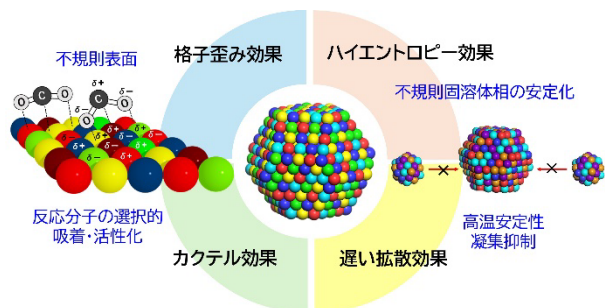


図1 HEA ナノ粒子の触媒としてのポテンシャル

的、立体的にアンバランスな粒子表面は分子の特異的な吸着・活性化を駆動することが期待できます。一方で、ハイエントロピー効果や遅い拡散効果に起因する高温安定性や凝集抑制効果は、実用触媒開発には大変魅力的であります。しかしながら、そもそも触媒としての利用に不可欠なナノ粒子化の技術が確立さ

れていないため、その検討例は少ないのが現状でした。

そこで我々は、気相の水素分子が酸化物表面上に吸着した金属を介して水素原子として流れ出し、高速に拡散する現象である水素スピルオーバーに着目しました。我々は以前、水素スピルオーバー能に優れた二酸化チタン( $\text{TiO}_2$ )を担体に用いると、従来製法では調製が困難な RuNi や RhCu といった非平衡合金ナノ粒子が合成できるという興味深い現象を見出しています。すなわち、スピルオーバーした水素は気相水素に比べて極めて強力な還元力を有していると言え、これにより HEA ナノ粒子が合成できると考えました。

目論見通り、5種類の金属前駆体( $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ru}^{3+}$ ,  $\text{Pd}^{2+}$ )を  $\text{TiO}_2$  上に担持させた試料を水素雰囲気下で昇温すると、400 °C という低温で平均粒子径 2 nm 程度の均一な HEA ナノ粒子が合成できました。また、HEA/ $\text{TiO}_2$  は  $\text{CO}_2$  水素化反応に優れた触媒性能を示します。このような HEA の特異な触媒性能は、多元素の相乗効果に由来するカクテル効果の発現により、単純な元素の足し合わせとは異なる独自の電子特性が生じたことによって説明することができます。さらに、HEA ナノ粒子触媒は、熱や電子線に対する高い構造安定性を示すことから、ハイエントロピー効果だけでなく、HEA に特徴的な遅い拡散効果がナノ粒子領域においても優位に発現することが分かってきました。

### 3. 金属 3D 積層造形自己触媒反応管

金属 3D 積層造形法では、型の製造を介さず CAD データから部材を製造できる、従来加工法では困難な複雑形状部材を製造できるという特徴に加えて、高い凝固速度や電子ビーム/レーザービーム照射条件（走査速度、走査方向、強度）により、単結晶や多結晶などの結晶組織、異方性の制御法としても他にはない特徴を有しています。既に構造材料や生体材料分野において広く研究開発が進んでいますが、我々は Ni-Cr-Fe-Mo などを主成分とした Hastelloy X を原料に用い、レーザービーム溶融結合法により触媒反応管を造形しまし

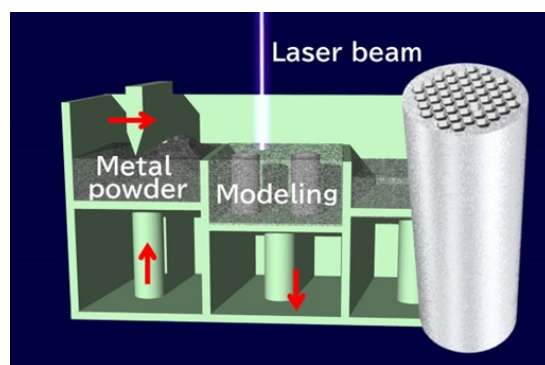


図2 金属 3D 積層造形で作製した自己触媒反応管

た。造形したままの反応管はその表面が Cr、Fe、Mo の酸化被膜で覆われており  $\text{CO}_2$  のメタン化に活性を示しません。しかしながら NaOH 水溶液中 50mV の印可電圧のもとで電気化学的表面処理を施すと、触媒作用を示す Ni 金属を表面に露出し、300°C における  $\text{CO}_2$  のメタン化反応において、転化率が飛躍的に向上し 100%近いメタン選択性を示す自己触媒反応管として機能することを見出しています。さらに、より大きな結晶粒が観察された XY スキャン試料で、X スキャンよりも高い触媒活性を示すことを見出し、結晶方位・組織制御を駆使することで、触媒性能のカスタム制御の可能性を世界に先駆け示しました。

### 4. おわりに

今後、資源、エネルギー、環境の制約が厳しくなる世界的状況の中で、新触媒への期待はますます強くなっています。これら問題を克服するには既存触媒の改良ではなく、新材料の創製が不可欠であります。構造、組成が無限の HEA ナノ粒子は、既存の金属触媒では成しえない反応の達成や、新たな知見・概念の創出の可能性を秘めています。一方で、金属 3D 積層技術の触媒材料分野での活用例も発展途上ですが、多種多様な金属材料をターゲットとできるため、産業界における今後の発展の基盤技術に成り得ます。触媒材料学領域では、真に実用的な触媒開発を意識した、学術の発展、および企業連携だけでなく、触媒科学と金属学の融合は基より、材料～化学～物理～工学と複合領域の知識を有し、時代の変化に柔軟に対応できる人材育成に努めてまいります。

(大阪大学基礎工学部卒 (1999 年)、大阪大学大学院基礎工学研究科 博士課程修了 (2003 年))