

ISRU に有効な技術としての燃焼合成応用

東京工大総理工 小田原修

Application of Combustion Synthesis to *In-situ* Resource Utilization

Osamu Odawara

Tokyo Institute of Technology, J2-48, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 226-8502

E-Mail: odawara@materia.titech.ac.jp

Abstract: A combustion synthesis technology is advantageously applied to *in-situ* resource utilization in space without any oxygen supply, which can initiate chemical reactions with partial heating and to provide heat for driving the accomplishment of compound synthesis through the reaction itself and not by an external source. Since the heat generated by the exothermic reaction is sufficient for applications in heat treatments of various materials, the technology has been world-widely investigated not only in fundamental purposes but also in practical developments.

Key words: *In-situ* Resource Utilization, Gravitational Reaction, Reaction Propagation

「燃焼合成」は、1967年にロシアのメルジャーノフにより提案された SHS(Self-Propagating High-Temperature Synthesis)法に端を発し、40年が経過している。これまでの数多くの世界的な研究開発により、燃焼合成研究は大きく進展してきた。遠心力と燃焼反応を融合させた金属-セラミック複合構造管の製造法(遠心テルミット法)の提案や液体窒素の応用を特徴とする窒化物燃焼合成技術や高機能性微粒子半導体化合物合成など、その成果が広く展開されている技術も多い。

微小重力環境での燃焼合成研究については、1987年に日本で提案された。1990年に日本とロシアで初めて世界的に発表され、特に燃焼過程で気相や液相が関与する系や燃焼波面後方の高温領域での凝固過程において、地上での結果に比べ転換率の向上や生成物の微細化が顕著になることが示された。このような事実は、主に熱対流の抑制に起因するものであり、反応帯近傍での反応物の組成均一性の維持や冷却過程にある高温領域での空間的溫度均一性の保持が、微小重力環境で向上することによって考えられた。このような研究は、落下塔や航空機などで形成される短時間微小重力環境での実験でも遂行できるため、すでに数多くの実験を通して有益な知見が得られ、「微小重力燃焼合成」という新しい分野を形成するまでになった。

このような状況にあって、月資源の活用を指向した「その場資源有効利用(ISRU: **In-situ Resource Utilization**)」や「その場修復技術(ISFR: **In-situ Fabrication and Repair**)」の取組みが重要となっている今日、エネルギー供給の不要な「燃焼合成」の活用は、微小重力環境ばかりでなく、高真空や無酸素な環境における超高温の供給技術として有効

である。月面のような超高真空・低重力環境での技術を実現するためには、局所的な反応誘導で形成される自発的な反応伝播過程の安定化技術を確立し、物質合成ばかりでなく生成する反応熱を利用した化学炉としての応用も目指すことが期待できる。

本研究では、ISRUへの応用として進めてきた燃焼合成研究を総括し「燃焼合成」の体系化を完成させ「宇宙燃焼合成」研究の展開に資するとともに、その場資源有効利用に活用する燃焼合成を信頼性高くするための制御技術及び燃焼科学の根幹である反応帯領域での現象の詳細な評価・検討手法の確立へ向けての取組みを推進する。反応伝播過程での物質移動と熱移動の挙動が伝播機構を左右し引き続く構造化過程を決定するので、微小重力環境での燃焼合成によって生成物の均一な組成および構造の制御が可能であるというこれまでに見出した知見を踏まえ、反応伝播過程の可視化による波面の伝播速度の制御及び安定性の維持技術の確立を目指す。たとえば、反応伝播過程でガス生成の少ない炭化物系(TiC、SiC、等)を対象に円柱状の原料圧粉体の一端を加熱し、反応伝播と温度変化の様子を CCD やサーモビジョンなどで観察し、そのデータを解析する。凝縮系燃焼合成を対象に熱伝導・熱伝達と対流項の相互作用を明らかにした後、気相の関与する項に問題を展開し圧力項も加味した相互作用を明らかにする。応用研究開発として ISRU への応用のみならず ISFR としての燃焼利用の優位性は周知であるが、信頼でき安心・安全に活用するためには燃焼現象の高度制御技術の確立は必須であり、その達成の技術的意義は非常に大きい。ISRU あるいは ISFR を対象としての燃焼合成研究開発には、燃焼伝播挙動と燃

焼波後方の高温領域での構造化についての知見が必要であり、短時間と長時間の両方からの研究の取組みが効果的である。

ISRU への応用に有効な燃焼合成の実現を目指して結成された「宇宙燃焼合成研究班」は、小田原修をリーダーとして、燃焼合成研究会（1988年設立）の有志【山田修（大阪産大）、大柳満之（龍谷大）、秋山友宏（北大）、薄葉州（産総研）、牧野敦（JAXA）、友重竜一（崇城大）、大谷茂樹（物材機構）】と東京工業大学イノベーション研究推進体（フロンティア分野）のメンバー【矢野豊彦、大竹尚登（現：名古屋大）、原和彦（現：静岡大）、吉本護】で構成されている。本研究班の宇宙燃焼合成に関する取組みの展開は、日米科学技術宇宙応用プログラム(JUSTSAP: Japan-US Science, Technology and Space Application Program)での日米共同やロシアのマクロカインेटィクス研究所 (ISMAN: Institute for Structure Macro-kinetics in Materials Science) との協働体制の充実で培われてきた。

「宇宙燃焼合成研究班」では、研究開発の展開として、微小重力のみならず、高真空や無酸素環境での燃焼現象（燃焼誘導、燃焼伝播、反応転換、など）を系統的に研究し、様々な環境での燃焼合成技術の制御システムを構築する予定である。また、燃焼現象に特異的に作用する環境における支配因子を抽出することにより、複雑系である燃焼現象での優先過程を明らかにし、加速的に進展する場における反応素過程を究明する。本取組みは、国内外の他の研究機関を主導する独創的な研究開発であり、学際的な分野の体系化のみならず安心・安全社会の構築及び環境に適応した循環社会の構築での環境保全やエネルギー問題に関わる分野の発展にも十分貢献し得ると期待できる。

「宇宙燃焼合成研究班」の宇宙実験へ向けての準備状態としては、落下塔実験や航空機実験さらに小型ロケット実験で経験があり、実験系の組立でも十分微小重力環境での作動を考慮して対応出来る状態である。Fig.1 には、ISMAN がデザインした宇宙燃焼合成実験の装置システムを示す。実験

環境が要求する重量やコマンド条件への対応の自由度も十分であり、実験遂行においては問題なく対処出来る。また、反応伝播挙動を中心に実験を遂行するので、観察-着火-挙動把握-試料交換のプロセスの自動化が、コマンド数も少ない実験システムであり、臨機応変に適応可能である。着火はフィラメントで対応出来ると確実性が高いが、供給パワーの都合で高電流(>20A)が困難な場合は、開発した着火具で対応する。観察については、ヒューム等を排除した高速撮影技術を確立しているので、十分成果に繋がる結果を得ることができる。



Fig. 1 SHS Chamber Developed by the ISMAN