

温度分布制御型マイクロフローリアクタによる燃焼化学反応の研究 -火炎クロマトグラフ法の誕生-



東北大学 流体科学研究所 教授
丸田 薫

研究の背景

自動車のエンジン、ガスタービン、ボイラなどの、暮らしを支える燃焼器をより高効率、クリーンに改良していくためには、燃料ごとに異なる燃焼化学反応を詳細に理解する必要があります。これまで、こうした研究には衝撃波管や急速圧縮装置などの比較的大規模で、特殊な装置が用いられてきました。

研究の成果

10年ほど前、燃焼式の超小型ヒータ「マイクロ燃焼器」を開発しようと1~2ミリ程度の炎の性質を調べていたところ偶然に、後に鍵となる特異な燃焼現象を発見しました。この現象によって、従来手法の苦手領域を補う燃焼化学反応の分析が可能になりました。本装置（温度分布制御型マイクロフローリアクタ）の基本原理は非常にシンプルで、透明な細い石英管の一端を外部熱源で加熱して管内の温度分布に勾配を設け、石英管の另一端から調べたい燃料と空気の混合気を流して管内の炎を観察するだけです（図1）。管内では、青い炎が1枚だけ観察されると予想していましたが、実際には細管であることや温度勾配があることに起因して多様な現象が観察されました。中でも微小流速条件では、温度レベルごとにいくつもの青い微弱な反応帯（Weak flame）が観察され、これら複数の反応帯は、エンジンなどで高速に進む着火時の化学反応が、温度レベル順に空間的に分離して安定化したものであることがその後の研究によって明らかになりました。このWeak flameが鍵となり、燃料によって異なる着火や燃焼化学反応、さらには着火性の指標となるオクタン価（図2）やセタン価に相当する情報が得られることも次々と明らかになりました。

この手法を、通常は1つの燃焼化学反応帯を分離して観察できるので、「火炎クロマトグラフ法」と名付けました。また本手法は、計測装置として製品化されました。さらに電機、重工、自動車、ガス、燃料などさまざまな企業やJAXAとの産学連携研究へと発展しています。

温度分布制御型マイクロフローリアクタによる分析では、当初は複数反応帯の位置（温度域）に注目し、既存

の化学反応モデルによる数値計算と比較して分析していましたが、説明しきれない現象も見られるようになり、現在は管内の各位置からガス・サンプリングを行い、中間生成物を含む反応過程の全体像分析を行っています。また、リアクタ部を昇圧状態で試験できる昇圧型装置も製作し、稼働しています。レーザー光を特定化学種に吸収させ、その蛍光を観察する光学的手法も導入しました。

今後の展望

本研究では、装置の精度向上を図るとともに、サンプリング分析にガスクロマトグラフに加えて各種の質量分析器を導入し、分析対応物質の範囲が「すす前駆体」などにまで広がりつつあります。最近では、リーンバーンガソリンエンジンでの性能予測に用いる燃焼化学反応機構の検証や、新しいエネルギーキャリアとして注目されているアンモニア燃焼への適用も始めています。さらに、外部熱源を用いるという装置の特色を活かし、可燃限界外の予混合気や、難燃性物質の燃焼性評価への適用も模索しています。

今後はこれまで決定的な手法のなかった温度1000K以下における化学反応特性と実用燃焼器での燃焼安定性との相関検討や、特殊燃焼場の化学反応機構の提案など各種用途へ研究を展開したいと考えています。

関連する科研費

平成19-20年度 萌芽研究「マイクロ燃焼の手法による連鎖分岐反応停止に起因する最低火炎温度の特定」

平成23-25年度 基盤研究(A)「革新的火炎クロマトグラフィと微量化学種吸収分光による分子レベル燃焼反応制御」

平成26-28年度 基盤研究(B)「火炎クロマトグラフによる高級炭化水素燃料の多段酸化反応場の分離抽出とその応用」

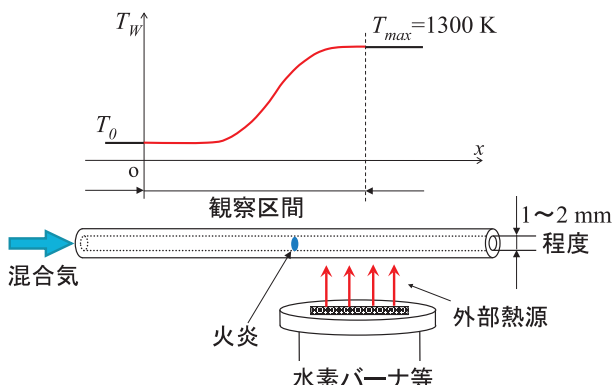


図1 温度分布制御型マイクロフローリアクタの概要

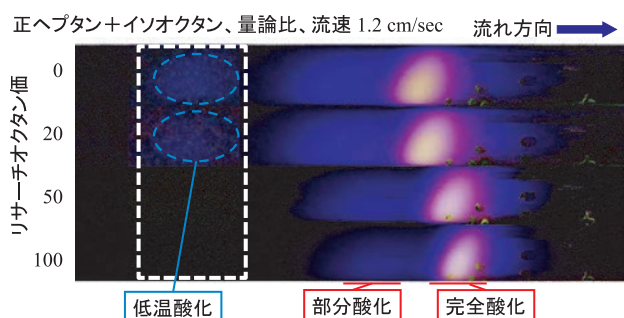


図2 リサーチオクタン価と複数反応帯（Weak flame）の変化。着火しやすい低オクタン価では顕著な低温酸化（600K〜）が見られ、オクタン価の増加とともに、反応体全体が高温側へシフトしている。