

先進計測・制御法と機械学習による熱流動・反応機構研究

研究代表者 古谷 正裕
(先進理工学科 共同原子力専攻 教授)

1. 研究課題

化学プラントやバイオプロセスでは、反応の選択性や効率を高めるために、攪拌により均一な場を形成させることが多い。これは偏流や対流により温度や速度、濃度が不安定になり予期せぬ分布となるため攪拌が必要とされている。さらに原料供給や反応生成が熱流動や濃度の場を不均一にする。このため熱流動や反応の方程式が既知であっても、寸法や形状が異なることで反応場が変化し、反応の予測が困難になる。

本研究の目的は、熱や流れ、化学反応を三次元過渡計測するセンサーや計測法を開発し、熱流動場と反応場を精緻に捉えることで、熱流動と反応機構を明らかにすることである。寸法や形状の違いが熱流動と反応に与える影響を把握するため、三次元付加造形技術を活用する。構造を三次元造形するだけでなく、計測センサーと制御機器を三次元造形して実装し、任意の流動・反応系をスケラブルに計測・制御するための技術開発を行う。化学プラントでは模擬実験は縮小寸法に、バイオプロセスでは拡大寸法となる場合があるが、計測制御を含めてスケラブルな実験が可能になることにより、熱流動と反応機構を解明し、化学及びバイオプロセスを統合的に解明し、実用に供する最適なスケールと形状、反応条件を見出すことを目的とする。

2. 主な研究成果

先進計測・制御法と機械学習による熱流動・反応機構研究として、初年度半期における主な成果を2つ概説する。

2.1 光ファイバーを用いた速度場・温度場計測法の開発

2 mm 間隔で温度を計測する光ファイバー用いて、速度場を同時計測する技術開発を行い、温度場・速度場を高時間・空間分解能で計測する技術を開発した(図1)。直径 0.1 mm の光ファイバーを金コーティングし、パルス加熱後の冷却曲線が速度の関数となることを用いて、温度と速度を同時計測する方法である。本原理により光ファイバーは 2 mm 間隔で 1 万点 (20 m) を 0.1 s 毎に計測できる。気中や水中の多次元変動流動場に適用して計測精度を確認した。

開発した計測法を他の計測方法と共に、縮小スケールで模擬した使用済み原子燃料プールの速度場・速度場計測に用いることで、温度成層化とその消散メカニズムを解明した。図2に計測結果の一例を示す。温度場と速度場の計測結果から、プール鉛直方向に3領域に分類できる。発熱部下部より下の領域(領域3)では流れが淀み、熱移行がないことから低温で一様分布になる。それより上は高温で一様分布となり、活発な自然対流がある上部(領域1)と流れが淀む下部(領域2)に分類できる。これらの特徴をモデル化することにより、温度及び速度分布が数値流体力学シミュレーションで再現した。

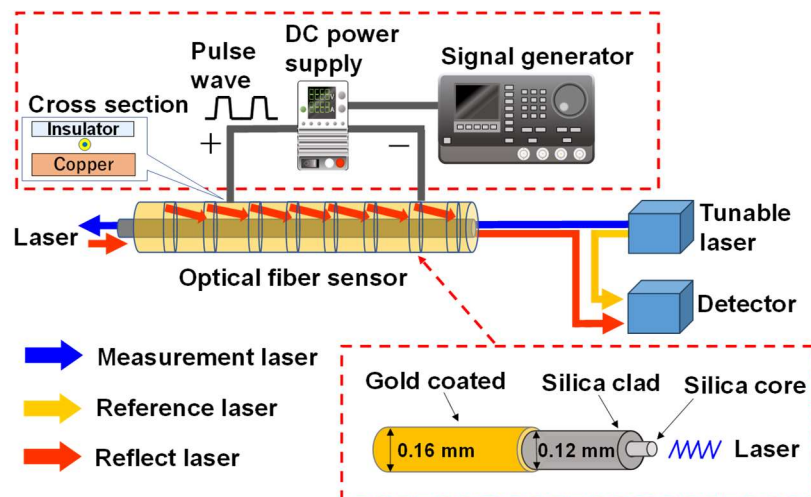
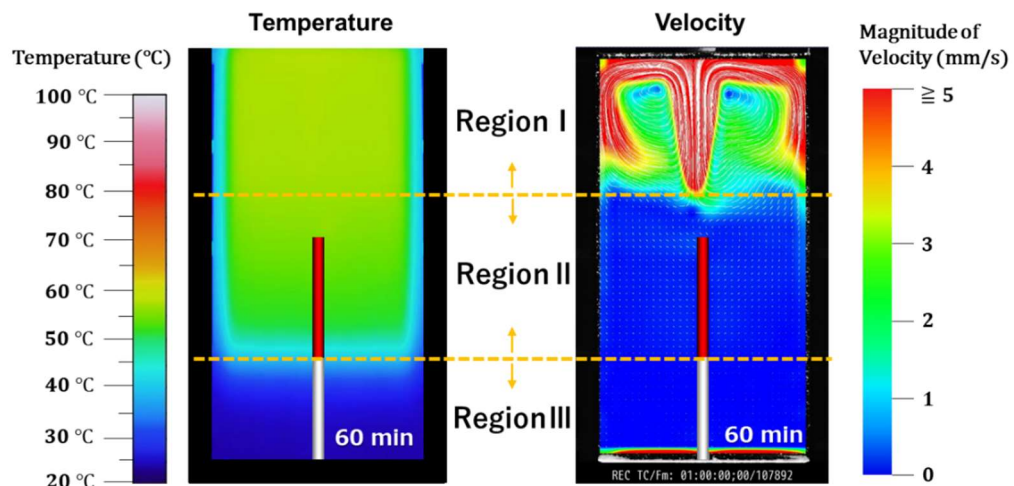


図 1 開発した光ファイバーを用いた速度場・温度場計測法



(a) 温度場：加熱部下端に成層階面 (b) 速度場：自然対流領域と淀み領域

図 2 水プール鉛直断面における温度場と速度場の 3 領域

2.2 熱伝達率と反応速度の自動計測技術の開発

バイオマス燃料の利用促進のため、水分や揮発成分を含む多孔質材料を加熱し、熱伝達率や反応速度を計測できる自動計測・制御技術を開発した。自動制御は入口温度や加熱量、キャリア流量などを任意関数で同時に制御し、出口温度や試料温度などを元にフィードバック制御できる。試料はバルクや多孔質以外にも鱗片状など様々な形状と充填率に対応できる。試料と加熱面の境界温度のみならず、中心線温度を 0.64 mm 間隔で収録速度 100 lines/s で計測できる。試料の加熱による過渡変化を計測後、データ同化により揮発や乾燥過程を再現する相関式を作成できる。

2. 共同研究者

株式会社電力テクノシステムズ 楠憲司氏、鈴木広治氏、佐久間努氏

3. 研究業績

3.1 学術論文

- Masashi Sekine, Naofumi Tsukamoto, Yasuhiro Masuhara, Masahiro Furuya, “Experimental Study on Thermal Stratification in Water Pool with Vertical Heat Source,” Annals of Nuclear Energy, Vol. 207, p. 110681, 2024.
- Masashi Sekine, and Masahiro Furuya, “Development of measurement method for temperature and velocity field with optical fiber sensor,” Sensors, Vol. 23, Issue 3, p. 1627, 2023.

4. 研究活動の課題と展望

本項では初年度半期の成果を述べた。今後は開発した計測・制御技術を活用し、実験とシミュレーション、機械学習を融合した創薬用デバイスやプラント機器の照射脆化機構解明に向けた機器開発を行う予定である。