

近赤外分光法に基づく顕微領域の温度・水分同時イメージング法の開発

研究代表者

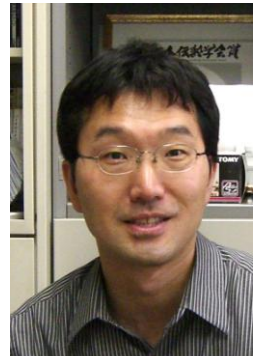
角田 直人 首都大学東京

共同研究者

有本 英伸 産業技術総合研究所

近藤 克哉 鳥取大学

山田 幸生 電気通信大学



1. 研究の背景と達成目標

温度と物質濃度の測定は、熱物質輸送現象の学理から化学分析や燃料電池などの実用分野に至るまで極めて重要である。特に、熱化学反応や熱物質協同効果の重要性を鑑みれば、温度と濃度は同時に測定されなければならない。加えて、近年は多くの分野で試料の微量化とシステムの小型化が図られており、混合・溶解、界面反応、膜透過時の各成分の振る舞いとそれらの定量的解明が求められている。そのため顕微領域を対象とした可視化研究はこれまで精力的に行われてきたが、温度と濃度を同時に画像化できる技術は確立されていない。これは対象領域が微小且つ密閉された構造であることに加え、同時測定のためには2つ以上の独立した画像情報が必要であり、蛍光体などを用いて実現するのは極めて難しいためである。

本研究では、水の近赤外吸収特性を応用した温度と水分量の同時イメージング法を開発し、その有用性を実証することを目的とする。物質添加や特殊な測定光を必要とせず、封入されている微量水溶液を測定できることが特長である。期間中に同時イメージングシステムを確立し、温度と水分量の測定精度を検証する。具体的には、温度 0.1 K と水分量 0.05 %の分解能で 100 fps のフレームレートで画像化することを数値目標とする。マイクロ流路内の異なる水溶液による拡散混合現象や中和反応を測定し、反応拡散場での温度と濃度を可視定量化することを目指す。

2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

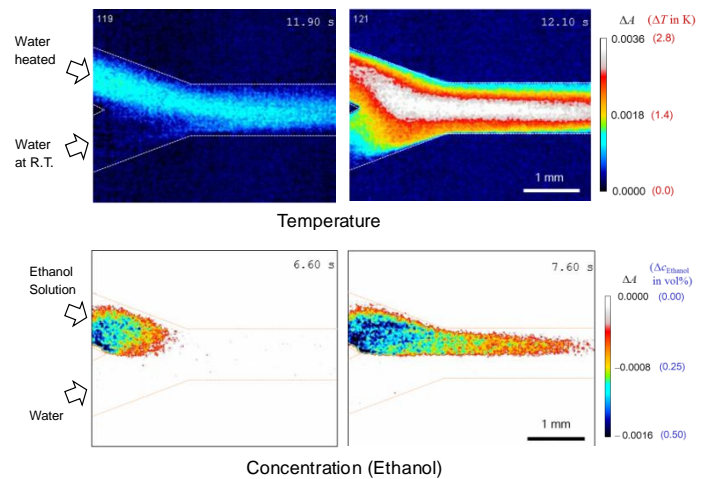
- 温度・水分量同時イメージングシステムの開発：水溶液の近赤外吸収分光特性に基づき、温度感度波長と非温度依存波長を利用した同時イメージング装置を開発した。マイクロ流路などに存在する微量な水溶液に対して温度分解能 0.1 K、水体積分率 0.05 %の精度を実現した。
- 熱物質の拡散移流現象の可視化：アルコール水溶液などを対象に温度と溶質濃度を画像化し、温度と溶質の拡散係数の違いや液液界面の形成を確認した。
- 実用性：近赤外光を透過する材料であれば、その内部に存在する微量な水溶液の温度と濃度を蛍光物質などの添加なしで画像化できるため、熱物質輸送に関する基礎研究からマイクロ化学分析などへの実用分野まで様々な応用が考えられる。

3. 研究成果

水の近赤外吸収帯における温度感度波長(1412 nmもしくは1905 nm)と非温度依存波長(1442 nmもしくは1935 nm)を用いて、これらの光を試料に交互照射し、フレームレート 100 fps で同期撮影するシステムを開発した。吸収係数の異なる波長 1412 nm と 1905 nm を使い分けることで光路長(試料厚さ)が 0.01~1

mm の水溶液に対応できる。温度依存・非依存性の両波長とも水分量には敏感であるため、両吸収画像から分光特性に基づく変換式によって温度と濃度の時系列画像を構成できた。較正実験により、目標の精度を実現できることを確認した。

本方法は熱物質の拡散移流現象の可視化が可能である。そこでマイクロ流路内を流れる種々の水溶液を画像化し、拡散様相の違いを定量化した。右図はY字流路内の温度と水体积分率（溶質濃度と相反）を画像化した一例であるが、流れと拡散の過程が明瞭に画像化された。さらに、中和反応実験によって反応前後の酸・アルカリ水溶液の濃度変化を画像化できた。発熱と生成物に関する画像定量は今後の課題であるが、以上の成果は本方法の有用性を十分実証するものである。



【上段図】 Y字型流路(幅 1 mm、深さ 0.5 mm)の上側枝流路から加熱(約 3 K)された純水、下側から室温の水が流入し合流したときの温度画像。右は流入直後で左は 0.2 s 後の画像。【下段図】 同流路に上側からエタノール水溶液(0.5vol%)、下側から純水が流入したときの水の体積分率(エタノール濃度と相反)画像。

4. 今後の展開

本研究の温度・水分同時イメージング法は近赤外吸収特性を利用した独創的な方法であり、顕微領域の同時イメージングを世界に先駆けて実施する意義を有する。熱物質移動の定量的解明は、マイクロ化学分析、燃料電池、膜分離などの産業技術に関連した研究から、温度と物質濃度の協同効果(Marangoni 効果、Soret 効果)などの基礎研究に至るまで重要であるため、本方法は幅広い分野への貢献できると考えている。実用上の課題の一つは、反応プロセスにおける反応・生成物の同定と定量化が挙げられる。2 波長で原理的に説明できないこのような反応系に対応するため、現在、原理と装置を改良している段階である。今後は、現在の測定安定性と簡便さを失わない形で、より多くの画像情報から温度と各物質濃度の画像を構成できるシステムの開発に取り組んでいく。

5. 発表実績

- (1) N. Kakuta, Daisuke Kawashima, K. Kondo, H. Arimoto, Y. Yamada, Simultaneous imaging of temperature and water volume fraction of aqueous solutions using near-infrared absorption characteristics of water, The Seventh International Conference on Advanced Vibrational Spectroscopy, P-333, Aug. 2013.
- (2) N. Kakuta, K. Kondo, H. Arimoto, D. Kawashima, Y. Yamada, Simultaneous imaging of temperature and concentration of aqueous solutions using the near-infrared absorption characteristics of water, The Eleventh International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, 73155, Jun. 2013.
- (3) N. Kakuta, K. Kondo, H. Arimoto, Y. Yamada, Development of simultaneous imaging method of temperature and water concentration of aqueous solutions based on the near-infrared absorption characteristics of water, The Third International Forum on Heat Transfer, 028 (4 pages), Nov. 2012.
- (4) D. Kawashima, N. Kakuta, K. Kondo, H. Arimoto, Y. Yamada, Visualization and analysis of heat and mass transfer around liquid-liquid interface using the simultaneous two-wavelength imaging method, The 24th International Symposium on Transport Phenomena, 124 (5 pages), Nov. 2013.
- (5) 角田直人, 近藤克哉, 有本英伸, 山田幸生, 水の近赤外吸収特性を利用した非接触温度イメージング, システム制御情報学会誌, Vol. 57, No. 12, pp. 493–498, 2013.