

# 世界最先端の熱分解分析機器および分析技術の開発を目指して

## Towards Development of Innovative Analytical Pyrolysis Technologies

熱分解 - ガスクロマトグラフィー / 質量分析法 (Py-GC/MS 法) による高分子のキャラクタリゼーション、廃プラスチックのリサイクルやバイオマス資源の有効利活用に向けた高分子の分解反応評価、これらを可能とする新しい分析手法および分析機器開発 (熱分析装置、ガスクロマトグラフ、質量分析装置、それらの周辺機器など) を行っている。また、フロンティア・ラボが有する海外拠点を通じて研究成果を世界に発信、海外との研究交流や共同研究を実施することで、グローバル人材の育成にも積極的に取り組む。

We are developing innovative pyrolysis technologies, such as pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (Py-GC/MS), and the related equipment for polymer characterization and development of pyrolysis processes for feedstock recovery from waste plastics and biomass resources. We are also trying to develop human resources capable of global perspectives through international collaborative researches and seminars with Frontier Laboratories' global branch offices.

### 熱分解 -GC/MS によるスーパーエンジニアリングプラスチックの燃焼・熱分解反応解析を実現

本講座では、ポリマーの構造解析および廃プラスチックやバイオマス化学原料に転換するための手法として、熱分解法に着目している。熱分解法は不活性ガス雰囲気下において「熱」によって種々の化学結合を切断する手法である。本講座では、小型熱分解装置 (通称: パイロライザー) を用いてプラスチックやバイオマス等の高分子を熱分解し、熱分解によって生じる揮発生成物をガスクロマトグラフ / 質量分析装置 (GC/MS) により直接分析するアプローチを研究している。

今年、本講座では、マルチショットパイロライザー (EGA/PY-3030D) にキャリアガスとして空気を導入し、GC 手前で空気をヘリウムで希釈するラインを新設することで (Fig. 1)、パイロライザー内で燃焼反応を進行させ、その燃焼ガスを直接 GC により分析 (Fig. 2) する手法を開発した。本手法を用いて、スーパーエンジニアリングプラスチックであるポリエーテルエーテルケトン (PEEK) の燃焼反応ガスをインライン分析することに成功した。本研究は、同研究科吉岡研究室、Chongqing University との共同成果として、

### Thermo-Oxidative Degradation of Super Engineering Plastics Using Customized Pyrolysis-Gas Chromatography/Mass Spectrometry

Pyrolysis is a promising approach for polymer characterization (analytical pyrolysis) and chemical feedstock recovery from polymer wastes (applied pyrolysis), as it can thermally decompose a wide range of polymers into smaller molecules under an inert atmosphere. Pyrolysis-gas chromatography (Py-GC) couples a micro-pyrolyzer with direct GC analysis of the resulting products, enabling rapid and reliable characterization of polymer microstructure and composition as well as efficient screening of pyrolysis conditions for feedstock-recycling process design.

This year, in this course, we developed a method in which air is introduced as the carrier gas into a multi-shot pyrolyzer (EGA/PY-3030D), with a newly installed line to dilute the air with helium upstream of the GC (Fig. 1). This setup enables combustion to proceed inside the pyrolyzer and allows for direct GC analysis of the resulting combustion gases (Fig. 2). Using this approach, we achieved inline analysis of combustion gas products from poly(ether ether ketone) (PEEK), a super engineering plastic. This work, conducted jointly with the Yoshioka Laboratory and Chongqing University, was published in open-access format in the pyrolysis-focused journal listed below.

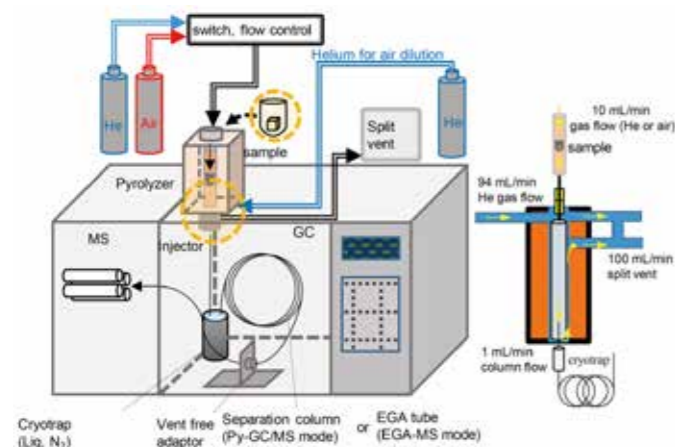


Fig. 1 Schematic illustration of a customized pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry (Py-GC/MS) system capable of using air as the carrier gas for combustion.

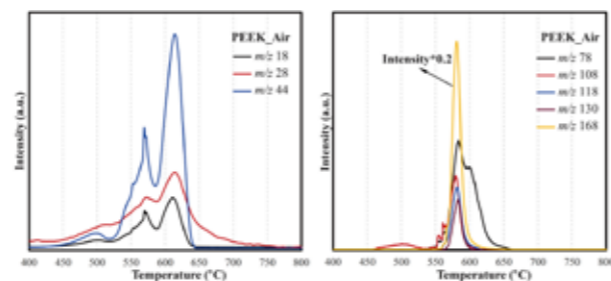


Fig. 2 Extracted-ion chromatograms of pyrolysis/combustion products under an air atmosphere.



教授 吉岡 敏明  
Professor (兼務)  
Toshiaki Yoshioka



准教授 渡辺 壱  
Associate Professor  
Atsushi Watanabe



准教授 熊谷 将吾  
Associate Professor (兼務)  
Shogo Kumagai

下記の熱分解法の専門誌にオープンアクセス掲載した。

#### 論文情報:

"Experimental and ReaxFF MD study on the thermo-oxidative behavior of polyether ether ketone", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 190, 107141 (2025).

#### 日本分析化学会奨励賞の受賞記念論文を発表

熊谷将吾准教授が受賞した 2024 年日本分析化学会奨励賞に関する受賞記念総合論文「有機炭素資源利用プロセス開発への熱分解ガスクロマトグラフィーの応用」が分析化学誌に掲載された。これまで本講座で開発された各種熱分解分析法とその応用例を紹介し、プラスチックやバイオマスの化学原料化プロセス開発に対する熱分解ガスクロマトグラフィーの貢献について解説した。

論文: 「有機炭素資源利用プロセス開発への熱分解ガスクロマトグラフィーの応用」, 分析化学, 74, 635-644 (2025).

#### PYROASIA 2025 国際会議の共催

フロンティア・ラボ株式会社が Co-organizer として、2025 年 12 月に PYROASIA 2025 (Pattaya, Thailand) を開催し、本講座の熊谷将吾准教授は International Co-Chair として会議運営に貢献した。

#### 招待講演

- [1] 熊谷将吾, 「熱分解法によるプラスチックのケミカルリサイクル」, 2025年度高分子学会東北支部研究発表会 (2025/11/13)
- [2] Shogo Kumagai, 「Co-Pyrolysis of Plastics, Biomass, and Petroleum: Recent Advances and Current Developments」, PYROASIA2025 (2025/12/11)
- [3] Atsushi Watanabe, 「Advances in Polymer Characterization Using Multifunctional Pyrolysis-GC/MS System」, the 21<sup>st</sup> China symposium on analytical and applied pyrolysis (2025/11/23)



Fig. 3 Certificate of Appreciation Ceremony: PYROASIA 2025 Chair to Prof. Watanabe



Fig. 4 Group photo of the core members of the PYROASIA 2025 symposium.



Fig. 5 Distinguished Researcher Award Ceremony for Prof. Yoshioka

Paper: "Experimental and ReaxFF MD study on the thermo-oxidative behavior of polyether ether ketone," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 190, 107141 (2025).

#### Publication of an Award Paper for the JSAC Award for Young Researchers

An award review article titled "Application of Pyrolysis-Gas Chromatography in the Development of Organic Carbon Resource Utilization Processes," authored by Prof. Shogo Kumagai, has been published in *Bunseki Kagaku (Analytical Chemistry)* in connection with the 2024 JSAC Award for Young Researchers from the Japan Society for Analytical Chemistry. The article presents pyrolysis-based analytical methods developed in our laboratory with representative applications and highlights the contributions of pyrolysis gas chromatography to chemical feedstock recovery from plastics and biomass.

#### Co-organizing the PYROASIA2025 Conference

Frontier Laboratories Ltd. co-organized an international symposium, "PYROASIA 2025," held at Pattaya in Thailand. At this laboratory, Prof. Kumagai was involved as an international cochair and contributed significantly to the management of the conference.

#### 原著論文

- [1] C. Ma, G. Huang, S. Kumagai\*, M. Sato, Y. Saito, A. Watanabe, C. Watanabe, N. Teramae, T. Yoshioka, "Experimental and ReaxFF MD study on the thermo-oxidative behavior of polyether ether ketone", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 190, 107141, (2025).
- [2] 熊谷将吾\*, 吉岡敏明, 「有機炭素資源利用プロセス開発への熱分解ガスクロマトグラフィーの応用」, 分析化学, 74, 635-644 (2025).
- [3] C. Senger, J. P. D. de Matos, O. Drescher, Z. Shao, M. D. Mellor, C. Burdett, T. Yoshioka, S. Kumagai, A. R. Muniz, R. Katsumata\*, "Branched polyethylenimine fragmentation enabling efficient nitrogen doping and healing of defective graphene" *Carbon*, 246, 120736 (2025).