

カーボンニュートラル社会に資するエネルギー・ナノマテリアル技術の開拓

研究代表者 小柳津 研一
(先進理工学部 応用化学科 教授)

1. 研究課題

本プロジェクト研究は、2014年度から10年間に亘って行われた早稲田大学スーパーグローバル大学(SGU)創成支援事業「Waseda Ocean 構想」における理工系3拠点の一つ「ナノ・エネルギー拠点」の研究成果を基盤として、その活動をSGU支援期間終了後も継続するための研究面での受け皿として2024年度に設置したものである。2025年度は前年度成果を受け、次世代のエネルギー・ナノマテリアル研究が貢献しうる多様な社会課題に対し、ナノ・エネルギー拠点の研究者が培ってきた国際的かつ高水準の研究活動を起点に、学内での若手人材育成に係る多様な取組みを包含させながら、国内外の連携先との受託・共同研究の推進や成果発信を継続的に展開した。

具体的には、ジョイントスーパービジョンプログラム(JSP)に関する協定を締結している大学の中で、高麗大、国立台湾大などとの若手・院生交流、ジョイントアポイントメント教員や訪問教員の受入実績のあるIMDEA、イタリア技術研、高麗大などからの教員等の受入れを通して、これまでのSGU活動と同等のアクティビティを継続しながら多様な国際共同研究を推進した。さらに、JSPから博士学生共同学位プログラム(JD)への格上げが検討されている国立台湾大や、新たな連携先として協議中のミュンヘン工科大などとの連携についても継続的に協議し、研究の国際化を一層推進させた。これらの基礎研究活動に新たに理工総研の場を活用した産学協同の枠組みを導入することで、社会実装を意識した展開をはかった。

2. 主な研究成果

2-1. JA, 訪問教員等による国際的な教育・研究システムの維持と発展

2025年度は訪問教員(サンターナ大学院大(SSSA)(イタリア)、ブリュッセル自由大(ベルギー))、および短期招聘教員(モナシュ大(オーストラリア)、ブリュッセル自由大、フリンダース大(オーストラリア)、アーヘン応用科学大(ドイツ)(2回)、グルノーブル・アルプ大(フランス)、国立台湾大(台湾)、南チリ大(チリ)、ミラノ大(イタリア)、マレーシア工科大(マレーシア))を受け入れて研究交流し、講演会・セミナーなどによる情報共有や実験活動を行うと共に、将来的な共同研究の発足に向けて基盤となる成果を集積した。また、ジョイントワークショップやシンポジウムなどの機会を捉えて教員・研究者を派遣・招聘(高麗大・吉林大・早稲田大ジョイントシンポジウム(8月21-23日(高麗大)、早稲田大から教員4名、学生5名が参加)、ボン大とのジョイントシンポジウム(10月(早稲田大)、3月(ボン大)))し、国際的な教育・研究システムの維持・発展に務めた。

2-2. JD, JSP等への発展を目指した海外大学等との連携

ボン大および高麗大とのジョイントイベント開催時に、JSP協定の更新や候補学生に係る

協議を実施した。また、テネシー大学との新たな連携開拓を目的として、協定に係る協議のため先方機関を訪問(2026年2月)した。テネシー大学は当拠点とのこれまでの繋がりに加え、PEPプログラム担当者である研究者も在籍しているため、今後の展開が期待できる。以上を通して、共同教育・研究指導、今後の連携に関する意見交換などで成果を集積した。その他、南チリ大などからの招聘教員と共同指導体制の枠組みについて議論した。

2-3. 国際共同の成果

JSP 制度等を通じて連携を発展させてきた協定大学(ボン大, 国立台湾大, 高麗大)の学生を受け入れ、共同教育・研究指導を行うことで、JSP の枠組みによる共同指導や学位審査等への学外指導者としての参画、共著論文の執筆指導などを通して、教育上の成果を挙げた。

2025年度は特に、高麗大(理学)との国際協働においてJSPとして受け入れた先方学生2名を筆頭著者とする国際共著論文の掲載、博論審査への学外レビューアとしての参加、博士学位と並行したJSP 修了書の授与など、具体的成果を挙げる事ができた。これらは次年度に早稲田大から高麗大へのJSP 制度による学生派遣(2026年5月より3ヶ月予定)等にもつながり、強固な国際共同体制として定着している。

2-4. 国際広報と成果発信

共同シンポジウム開催(早大・高麗大・吉林大との協定ジョイントシンポジウムなど)、ウェブ媒体、早稲田オープン・イノベーション・フォーラム 2025等を活用し、共同研究の成果報告と情報交換、広報活動を行った。

3. 共同研究者

朝日 透 (早稲田大学・理工学術院・教授)
大木 義路 (早稲田大学・理工学術院・特任研究教授)
大久保将史 (早稲田大学・理工学術院・教授)
川原田 洋 (早稲田大学・理工学術院・教授)
菅原 義之 (早稲田大学・理工学術院・教授)
関根 泰 (早稲田大学・理工学術院・教授)
武岡 真司 (早稲田大学・理工学術院・教授)
竹山 春子 (早稲田大学・理工学術院・教授)
多辺 由佳 (早稲田大学・理工学術院・教授)
中井 浩巳 (早稲田大学・理工学術院・教授)
西出 宏之 (早稲田大学・理工学術院・招聘研究教授)
野田 優 (早稲田大学・理工学術院・教授)
林 泰弘 (早稲田大学・理工学術院・教授)
本間 敬之 (早稲田大学・理工学術院・教授)
松方 正彦 (早稲田大学・理工学術院・教授)
村田 昇 (早稲田大学・理工学術院・教授)
門間 聰之 (早稲田大学・理工学術院・教授)
若尾 真治 (早稲田大学・理工学術院・教授)

4. 研究業績（研究代表者の業績のみ記載）

4.1 学術論文

1. S. Watanabe, T. Yano, Z. An, K. Oyaizu, “Aromatic Poly(dithioacetal)s: Spanning Degradability, Thermostability, and High Refractive Index Towards Eco-friendly Optics”, *ChemSusChem*, **18**, e202401609 (2025). DOI: 10.1002/cssc.202401609
2. K. Kisu, A. Dorai, K. Hatakeyama-Sato, T. Takano, S. Takagi, K. Oyaizu, S. Orimo, “Enhanced Durability of Ca Metal Battery with Dual Salt: Synergistic Effect on Solid Electrolyte Interphase and Solvation Structure for Improved Electrodeposition”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **17**, 1322-1331 (2025). DOI: 10.1021/acscami.4c18599
3. S. Watanabe, Y. Tsunekawa, K. Oyaizu, “High Refractive Index Aromatic and Ether-containing Polythioureas: Improving Transparency and Mechanical Properties via Reciprocal Hydrogen Bonds”, *Macromol. Chem. Phys.*, **226**, 2400456 (2025). DOI: 10.1002/macp.202400456
4. S. Watanabe, Z. An, H. Nishio, Y. Tsunekawa, K. Oyaizu, “Poly(dibenzothiophenylene sulfide)s: Sulfur-rich Annulated Frameworks with a Wide-range Ultrahigh Refractive Index”, *J. Mater. Chem. C*, **13**, 7933-7942 (2025). DOI: 10.1039/D4TC05458J
5. M. Han, T. Yokoo, J. Park, K. Oyaizu, S. Park, “Deep Learning Prediction of Ionic Conductivity in Polymer Electrolytes Using Hierarchical Polymer Graphs”, *Chem. Eng. J.*, **521**, 166829 (2025). DOI: 10.1016/j.cej.2025.166829
6. S. Watanabe, S. Miura, T. Miura, Y. Tsunekawa, D. Ito, K. Oyaizu, “Poly(phenylene sulfide) Derivatives as Ultralow Dielectric Loss Materials with Stable Frequency Response”, *Commun. Mater.*, **6**, 181 (2025). DOI: 10.1038/s43246-025-00917-w
7. K. Ishigami, S. Mori, K. Oyaizu, “Approach to Tuning the Dispersion Stability of TEMPO-substituted Polymer Nanoparticles for Aqueous Organic Redox Flow Batteries”, *ChemSusChem*, **18**, e202500911 (2025). DOI: 10.1002/cssc.202500911
8. S. Watanabe, Y. Tsunekawa, K. Oyaizu, “Bleaching Effect of High Refractive Index Xylylic Poly(thiourea)s with "De-conjugated" Polarizable Hydrogen Bonds”, *Chem. Commun.*, **61**, 16002-16005 (2025). DOI: 10.1039/D5CC03785A
9. D. Ito, K. Inoue, Y. Fujioka, T. Miki, S. Ishikawa, A. Happoya, S. Watanabe, T. Miura, K. Oyaizu, “Novel Polyphenylene Sulfide Resin for High-frequency Copper-clad Laminates with Low Dielectric Tangent and Flame Retardancy”, *Polymer*, **338**, 129095 (2025). DOI: 10.1016/j.polymer.2025.129095

10. K. Ishigami, K. Oyaizu, “Combining Low Viscosity and High Volumetric Redox Density of Organic Polymers for Energy-efficient Catholytes in Redox Flow Batteries: A Redox-active Polyelectrolyte Approach”, *J. Mater. Chem. A*, **13**, 34440-34446 (2025). DOI: 10.1039/D5TA03516C
11. A. Chiba, T. Yokoo, Y. Ogawa, M. Han, S. Park, K. Oyaizu, “Enhanced Lithium-ion Transportability of Poly(ether-thioether)s and Their Oxidized Products under Polymer-in-Salt Conditions”, *ACS Appl. Polym. Mater.*, **7**, 15682-15691 (2025). DOI: 10.1021/acsapm.5c03428

4.2 総説・著書

1. 小柳津研一, 「レドックス高分子システムによる有機デバイスの機能創発」, *高分子*, **74**, 12-14 (2025).
2. K. Zhang, X. Lin, Y. Shi, K. Oyaizu, Z. Jia, “Two-electron Redox Chemistry of Nitroxide Radicals: Fundamental Mechanisms and Applications in Energy Storage”, *ACS Electrochem.*, **1**, 123-137 (2025). DOI: 10.1021/acselectrochem.4c00119
3. 渡辺清瑚, 小柳津研一, 「低誘電損失材料としての含硫黄芳香族ポリマー」, *マテリアルズページ*, **25**, 45-49 (2025).

4.3 招待講演

1. K. Oyaizu, “High-density Lithium Sulfur Batteries with Polymeric Sulfur Electrodes”, Organic Battery Days, 2025.4.22-24, Adelaide (Australia).
2. K. Oyaizu, “Organic Battery Using Polymers for Energy Storage”, 16th International Symposium on Functional π -Electron Systems (F π 16), 2025.6.29-7.3, Jeju (Korea).
3. 小柳津研一, 「非金属系蓄電物質を用いた次世代レドックスフロー電池の研究動向」, 電力貯蔵技術研究会, 新レドックス系エネルギー技術研究 WG 第7回研究会, 2025.12.3, 東京.
4. K. Oyaizu, K. Ishigami, “Nonmetallic Charge Storage Materials for Next-generation Redox Flow Batteries”, The 2026 MRS Spring Meeting & Exhibit, 2026.4.26-5.1, Honolulu (USA).

4.4 受賞・表彰

1. 優秀オンデマンド発表賞 (一般部門), 渡辺清瑚, 「芳香族ポリチオウレアの多機能化: 高屈

- 折率・機械特性・溶解性制御に向けた分子設計」, 第 74 回高分子学会年次大会, オンライン, 2025.5.
2. PPC19 Poster Award, T. Yokoo, “Prediction of Ionic Conductivities of Sulfur-containing Polymer Electrolyte from Limited Experimental Data”, The 19th Pacific Polymer Conference (PPC19), Fukuoka, 2025.7.
 3. PPC19 Poster Award sponsored by Materials Horizons, Y. Nakamura, “Benzocyclobutene Cross-linked Poly(phenylene sulfide)s with Low Dielectric Properties and Enhanced Thermostability”, The 19th Pacific Polymer Conference (PPC19), Fukuoka, 2025.7.
 4. 優秀ポスター賞 (高分子学会), 吉田有希, 「テトラメチル置換ポリ(フェニレンスルフィド)の合成と誘電特性」, 第 74 回高分子討論会, 大阪, 2025.9.
 5. 優秀ポスター賞 (高分子学会), 松永華奈, 「芳香族ポリ(ジチオアセタール)の側鎖構造設計による耐熱性・屈折率制御」, 第 74 回高分子討論会, 大阪, 2025.9.
 6. 優秀ポスター発表賞 (日本化学会), 戸崎祐吾, 「ポリ(フェニレンスルフィド)骨格を有する両親媒性ブロック共重合体の合成と接着特性」, 第 15 回 CSJ 化学フェスタ, 東京, 2025.11.
 7. 優秀ポスター発表賞 (日本化学会), 石神航平, 「有機レドックスフロー電池の活物質に適用するポリマーナノ粒子の表面特性制御」, 第 15 回 CSJ 化学フェスタ, 東京, 2025.11.
 8. 優秀ポスター発表賞 (日本化学会), 尾形颯紀, 「ドーパントフリーな正孔輸送性ポリマーの π コアユニットの分子設計と全無機ペロブスカイト太陽電池への適用」, 第 15 回 CSJ 化学フェスタ, 東京, 2025.11.
 9. 優秀ポスター発表賞 (日本化学会), 柴崎隼, 「アントラセン-ナフトキノン付加体に基づく可逆架橋ネットワークの設計とレオロジー評価」, 第 15 回 CSJ 化学フェスタ, 東京, 2025.11.

4.5 学会および社会的活動

1. 高分子学会超分子研究会, 第 37 期運営委員
2. 高分子学会水素・燃料電池材料研究会, 第 37 期運営委員
3. 高分子学会関東支部, 第 37 期常任幹事
4. 日本化学会第 15 回化学フェスタ実行委員会, 実行委員

5. 研究活動の課題と展望

本プロジェクト研究では、SGU ナノ・エネルギー拠点がこれまで高い評価を得てきたことに基き、高い国際展開力を特色とした多様な国際共同研究を広範囲に継続推進した。一方、将来のカーボンニュートラル社会実現に資する研究成果を「エネルギーとナノマテリアル」をキーワードとして一般向けに分かりやすい形で示すことが今後の課題となっている。その方策として、(1) ナノサイエンスからエネルギー・マテリアル、電力システムまで、エネルギーとマテリアルに関わる新産業の創出に資する技術を提示すること、(2) 海外大学・研究機関、企業等との新たな共同研究を開拓すること、(3) エネルギーに係る理工系若手人材養成に、SGU の継続プログラムとして貢献すること、(4) 次世代のエネルギー技術を本学オリジナルのナノ材料をもとに提示することなどが考えられ、今後具体的に取り組む。