

2022-2023年度
共同利用・共同研究報告書(国際共同研究)
FY2022-2023
Joint Research Reports (international collaboration)

名古屋大学未来材料・システム研究所

共同利用・共同研究委員会

Joint usage/joint research committee

Institute of Materials and Systems for Sustainability, Nagoya University

2022-2023年度 報告書目次(国際共同研究)

FY2022-2023 Joint Research Reports Contents (international collaboration)

* 所属は2024年3月現在

* Affiliation displayed are current as of March 2024.

	整理番号 Reference No.	研究代表者 Principal Investigator	所属機関 Affiliation	研究課題名 Project title	頁 Page
1	2022-2-001	Barbara Milow	German Aerospace Center	Preparation and characterization of organic-inorganic aerogels for super-thermal insulation applications	1
2	2022-2-002	Chen Chun-Wei (陳 俊維)	National Taiwan University	Advanced energy utilization technology based on atomic layer materials	3
3	2022-2-003	Klaus Leifer	Uppsala University	Nanostructure and nucleation phenomena during in-situ synthesis of Cu ₂ ZnSnSe ₄ thin films	5
4	2022-2-004	Budimir Kliček	Ruder Bošković Institute	Development of e/ μ separation method for cosmic-ray radiography	7
5	2022-2-005	Elena Firu	Institute of Space Science - ISS	Development of a high-precision radiation film batch in space	9
6	2022-2-006	Hassan Bevrani	University of Kurdistan	Inverter-based Dynamic Shaping in Renewable Integrated Power Grids	11

有機無機ハイブリッドエアロゲルによる超断熱部材の作製と性能評価

Preparation and characterization of organic-inorganic aerogels for super-thermal insulation applications

研究代表者・Prof. Dr. Barbara Milow・ドイツ航空宇宙センター (DLR)・材料研究所・教授

研究所担当教員氏名・中西和樹・未来材料・システム研究所・材料創製部門・教授

研究所担当教員氏名・長谷川丈二・未来材料・システム研究所・材料創製部門・特任准教授

1. 研究目的

低密度でナノ／メソスケールの細孔構造が高度に制御されたエアロゲルは、可視光透過性と非常に低い熱伝導率を示し、採光・視認性と高性能断熱を併せもつ部材の基礎となる。従来、機械的強度が非常に低い無機組成部材が多く、粉末形態を除いて社会実装に至った例はない。本研究では、有機無機ハイブリッド組成を採用することにより、機械的強度や柔軟性を改善したエアロゲルを得ること、そしてその構造・物性評価を行って、透明超断熱部材の広範な応用範囲を開拓する。

2. 研究内容と成果

2022 年度

DLR と緊密な提携関係にあるケルン大学から博士課程学生(Kai Steffens 氏)を受入れ、約 2 週間の滞在中に名古屋大学の有する有機無機ハイブリッドエアロゲルの作製法を指導するとともに、その微細構造や力学物性の測定を実際に経験する機会を提供した。Steffens 氏は無機組成からなる脆弱なシリカエアロゲルの柔軟化に取り組んでおり、純シリカ系と有機無機ハイブリッド系における力学挙動の比較を行うとともに、純シリカ系の示す高い可視光透過性と断熱特性を損なわずに、ハイブリッド系組成において柔軟性を付与したエアロゲルを得るための出発組成及び合成過程の最適化について、情報交換を行った。

2023 年度

DLR の計算機モデリンググループよりケルン大学所属の博士課程学生(Nina Borzecka 氏)を受入れ、約 2 週間の滞在中に、有機無機ハイブリッドエアロゲルのもつナノスケールの網目構造を実際に合成して観測するとともに、同グループの計算手法（粒子や棒状単位の凝集構造からの界面エネルギーに駆動される緩和を利用する）に基づいて、実試料と同等な網目構造を再現する方法を検討した。

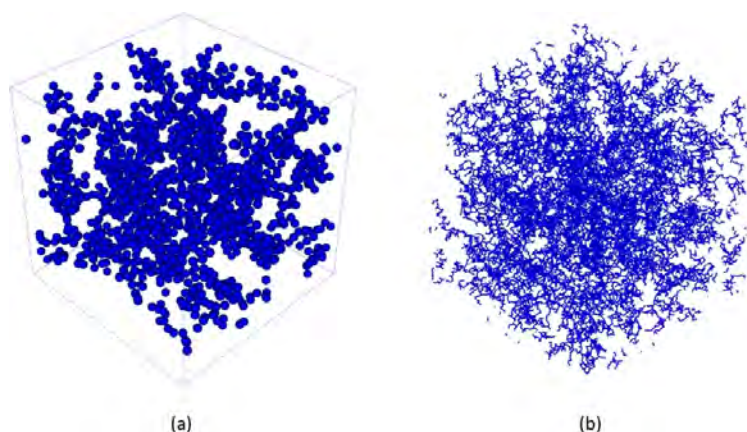


図: 計算機中に構築した、粒子状(a)および棒状(b)の構造単位が連結した、低密度網目モデルの 2 次元投影図。棒状構造単位は連結性を保ったまま低密度の網目を形成できるが、力学的に脆弱になる。棒の長さや太さ、連結性を構造パラメーターとして、実在試料の物性の再現に取り組んでいる。

2023 年 6 月には、約一週間の旅程で来日した研究代表者 Milow 教授を名古屋大学、京都大学、および関連の技術開発・製品化を担当するベンチャー企業で受入れ（旅費は別財源）、世界最大の塊状エアロゲルの視察や、DLR で開発中のエアロゲル複合軽量断熱建材に関して、受入側研究者との技術課題を共有するとともに、今後の更なる共同研究の方向を議論した。同年 9 月には、スペイン・サンセバスチャンで開催されたエアロゲル材料国際会議において、共同研究成果を含む基調および招待講演を行った。

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

- Aney, S., Pandit, P., Ratke, L., Milow, B., Rege, A., On the origin of power-scaling exponents in silica aerogels. *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, Springer-Nature, Online Published (2023). <https://doi.org/10.1007/s10971-023-06156-0>
- Borzęcka, N., Nowak, B., Pakuła, R., Przewodzki, R., Gac, J.-M., Diffusion/reaction limited aggregation approach for microstructure evolution and condensation kinetics during synthesis of silica-based alcogels. *Int. J. Mol. Sci.*, 24(3), 1999 (2023). <https://doi.org/10.3390/ijms24031999>.
- Ueoka, R., Hara, Y., Maeno, A., Kaji, H., Nakanishi, K., Kanamori, K., Unusual flexibility of transparent poly-(methylsilsesquioxane) aerogels by surfactant-induced mesoscopic fiber-like assembly, *Nat Commun* 15, 461 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-44713-5>

<国際・国内会議>

- 中西和樹, Mechanical resilience and transparency of siloxane-based hybrid aerogels -Recent progress of clearer and tougher hybrid aerogels-, 2nd International Conference on Aerogel Inspired Materials, San Sebastian, Spain, 2023 年 9 月 27~29 日
- 中西和樹, Organic-Inorganic Hybrid Aerogel Monoliths -Challenge to Mechanical Resilience and Transparency- 7th International Conference on Multifunctional, Hybrid and Nanomaterials (HYMA 2022), Genoa, Italy, 2023 年 10 月 19~22 日
- 中西和樹, Phase Separation×Sol-Gel~A Personal View, The 21st International Sol-Gel Conference (Sol-Gel 2022), Lyon, France, 2022 年 7 月 24~29 日
- Steffens, K., Bialuschewski, D., Milow, B., Flexible Hybrid Silica-Aerogels: Studying the Influences of Different Geometries and Shapes, 10th NRW Nano Conference, 23-24 May 2023, Dortmund, Germany.
- Steffens, K., Bialuschewski, D., Milow, B., Improving the properties of flexible hybrid-silica aerogels, FEMS Junior EUROMAT 2022, 19-22. July 2022, Coimbra, Portugal.
- Steffens, K., Bialuschewski, D., Milow, B., Improving the properties of flexible hybrid-silica aerogels: addition of pores for a more lightweight material, 6th International Seminar on Aerogels, 28-30 September 2022, Hamburg, Germany.
- Borzecka, N., Pandit, P., Rege, A. How accurately can silica aerogels be computationally modelled?, 2nd International Conference on Aerogel Inspired Materials, 27-29 Sep 2023, San Sebastian, Spain.
- Borzęcka, N., Kalmár, J., Forgács, A., Nowak, B., Przewodzki, R., Gac, J.-M., Kinetics and mechanism of methyltrimethoxysilane hydrolysis, The international Sol-Gel Conference, 24-29 July 2022, Lyon, France.

<産業財産権>

- 出願状況・取得状況 該当なし

原子膜物質を基軸としたエネルギー高度利用技術の創成

Advanced energy utilization technology based on atomic layer materials

陳 俊維・国立台湾大学・材料科学工学科・特聘教授

塚越一仁・物質・材料研究機構 WPI-MANA・グループリーダー

長田 実・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授・長田 実

1. 研究目的

持続発展型社会の基盤技術構築に向け、原子膜物質（2次元ナノシート）の利用による革新的電池材料の開発やエネルギー高度利用技術の創成を目指した研究を進める。研究代表者と未来研・長田教授とは、2016 年より原子膜物質のエネルギー応用に関する共同研究（台湾・科学技術庁プロジェクトなど）を推進しており、新規材料の合成、機能開拓、太陽電池応用など新局面を切り拓き、当該分野を先導してきた。本研究では、台湾大、名大グループの有するナノシート合成技術、精密集積技術、デバイス評価技術を融合させ、現行の材料、技術では実現できない斬新な機能・性能を発揮する創エネルギー材料、蓄電デバイスの創製を目指す。特に、階層構造が機能発現の鍵であり、さらに材料がボトルネックの一因で未だ普及していない太陽電池、光触媒、熱電変換、蓄電デバイスの開発を行う。

2. 研究内容と成果

2-1. 新規ナノシートの精密合成：

2次元ナノシートは、高電子・イオン移動度、柔軟性、透明性、高耐熱性など、従来のバルク材料・薄膜とは異なる機能の発現が期待され、エレクトロニクス、環境・エネルギーなど多様な分野の未来を先導するシーズ技術としてのポテンシャルを有する。しかしながら、従来のナノシートの合成には、層状化合物の剥離というトップダウン手法が利用されており、多彩な機能を有し、応用上重要である非層状無機化合物には適用できず、得られる材料、機能のライブラリーは限定されていた。本課題では、名大・長田グループで最近開発した「2次元ナノ界面鑄型合成法」を活用し、エネルギー材料応用に好適な非層状ナノシートのボトムアップ合成に挑戦した。2元系単純酸化物については、界面活性剤を利用したソフトテンプレートによる鑄型合成法を開発し、 CeO_2 、アモルファスシリカなどの非層状酸化物のナノシート合成に成功した。さらに、ソフトテンプレート、ナノシートを鑄型とした界面反応法などを広く、酸化物、金属系に拡張することで、Pt、Pd、 BaTiO_3 などのナノシート合成に成功した。

2-2. エネルギー高度利用技術の開発：

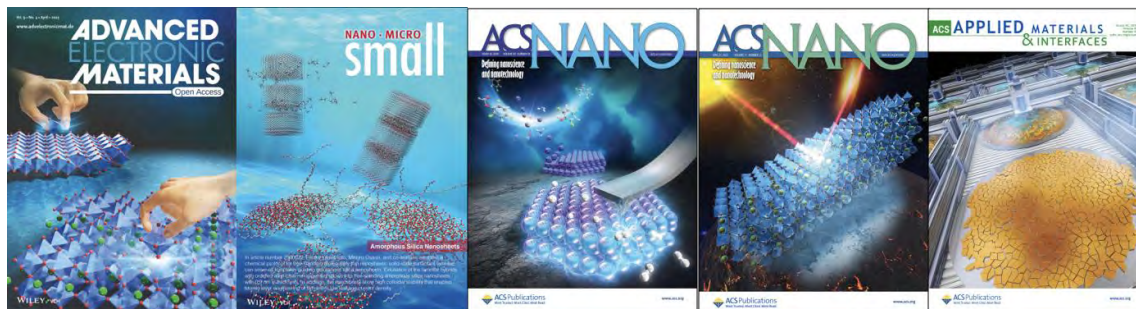
ナノシート技術では、異なる機能のナノシートをブロックにして人工超格子を作製することで、ナノからメソスケールで次元、構造、階層、空間を設計・制御した高次機能材料を構築することが可能となる。こうした特徴は、階層構造やヘテロ接合が機能発

現の鍵である電子デバイス、環境・エネルギー材料の開発に有効になるものと考えられる。本課題では、ナノシートの超格子集積技術を活用し、原子膜光触媒、電極触媒、蓄電キャパシタなどの開発に成功した。また、高い近赤外反射性能をもつ新しい透明導電体ナノシート ($\text{Cs}_{2.7}\text{W}_{11}\text{O}_{35-d}$) を発見し、これをガラス上にコートすることで、世界最高性能の近赤外反射率 53%と遮熱効果を示す日射遮蔽膜の開発に成功した。本研究で開発した日射遮蔽膜は、優れた遮熱効果と可視光透過性を併せ持っており、建築物、自動車の窓ガラスに適用することにより、冷房負荷削減、空調の省エネルギー化を実現するキー技術としての発展が期待される。

【研究成果の公表状況】

<原著論文>

- Y. Shi, T. Taniguchi, K-N. Byun, D. Kurimoto, E. Yamamoto, M. Kobayashi, K. Tsukagoshi, M. Osada, Damage-free LED lithography for atomically thin 2D material devices, *Sci. Rep.* **13**, 2583 (2023-02).
- K. Hagiwara, K-N. Byun, S. Morita, E. Yamamoto, M. Kobayashi, X. Liu, M. Osada, Molecularly thin BaTiO_3 nanosheets with stable ferroelectric response, *Adv. Electron. Mater.* **13**, 2583 (2023-02). 表紙に採用. 日刊工業新聞他で紹介.
- Y. Shi, E. Yamamoto, M. Kobayashi, M. Osada, Automated one-drop assembly for facile 2D film deposition, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **15**, 22737 (2023-04). 表紙に採用. 日刊工業新聞他で紹介.
- H-J. Kim, S. Morita, K-N. Byun, Y. Shi, T. Taniguchi, E. Yamamoto, M. Kobayashi, Y. Ebina, T. Sasaki, M. Osada, Ultrahigh energy storage in 2D high- κ perovskites, *Nano Lett.*, **23**, 3788-3795 (2023-05). 日刊工業新聞、日経産業新聞他で紹介.
- H. Tsunematsu, Y. Shi, E. Yamamoto, M. Kobayashi, T. Yoshida, M. Osada, Gigantic thermal shielding in 2D oxide nanosheets, *ACS Nano*, **17**, 11396 (2023-05). 表紙に採用. 日本経済新聞、日経産業新聞他で紹介.
- L. Nurdiwijayanto, K. Hayashi, N. Sakai, Y. Ebina, D-M. Tang, S. Ueda, M. Osada, K. Tsukagoshi, T. Sasaki, T. Taniguchi, Thermal and chemical phase engineering of two-dimensional ruthenate, *ACS Nano*, **13**, 12305 (2023-06)
- S. Ando, E. Yamamoto, M. Kobayashi, A. Kumatani, M. Osada, Facile synthesis of Pd nanosheets and implications for superior catalytic activity, *ACS Nano*, **18**, 461 (2024-01). 表紙に採用. 日刊工業新聞、化学工業日報他で紹介.
- Y. Shi, H. Li, H. Tsunematsu, H. Ozeki, K. Kano, E. Yamamoto, M. Kobayashi, H. Abe, C-W. Chen, M. Osada, Ultrafast 2D nanosheet assembly via spontaneous spreading, phenomenon, *Nat. Commun.* 投稿中.



Cu₂ZnSnSe₄ 薄膜合成におけるナノ構造及び核生成現象その場観察
Nanostructure and nucleation phenomena during in-situ synthesis of Cu₂ZnSnSe₄ thin films

Klaus Leifer・ウプサラ大学・材料科学専攻・教授

Sharath Kumar・ウプサラ大学・材料科学専攻・院生

Edgardo Saucedo・バルセロナ工科大学・電子工学専攻・准教授

武藤俊介・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

1. 研究目的

太陽電池の開発と製造においては近年著しい進展がありながらも、ほとんどの太陽電池材料は現在でも希少で有毒な元素を含んでいる。そのため、地球に豊富に存在する元素だけからなるケステライト (Cu₂ZnSnSe₄ など) は、持続可能な太陽電池の構築において優れた選択肢となる。過去 10 年間のケステライト太陽電池の効率向上は著しいが、合成プロセスにおける構造形成の詳細な理解は未だに不十分である。透過電子顕微鏡 (TEM) による結晶粒核生成、成長、および拡散経路のナノスケール分析は、太陽電池材料の改善に寄与する高い潜在力を持つ。本共同研究では、名古屋大学でしか利用できない四重極質量分析計を搭載した反応科学超高压電子顕微鏡 RS-HVEM-QMS を使用した結晶成長その場観察スキームを確立し、合成プロセスにフィードバックする新たな知見を得ることを目的とする。

2. 研究内容と成果

名古屋大学の環境 HVTEM を用い 1 MV の加速電圧で Cu₂ZnSnSe₄ ケステライト薄膜の TEM 内その場合成実験を行った。薄膜の構造変化は、TEM 像、電子回折図形、および EELS スペクトルによって解析した。Cu₂ZnSnSe₄ 層の合成のためには、通常ガラスまたはシリコン基板上に金属またはケステライト前駆体薄膜 (Cu/Zn/Sn 金属積層、Cu/Zn/Sn 合金膜、または Cu₂ZnSnS₄ 層) を蒸着させ、真空中で 400-500°C に昇温することで Se 蒸気曝露させる [1,2]。HVTEM 内実験では、Cu/Zn/Sn の金属積層と Cu₂ZnSnS₄ の両方を TEM に導入し、450°C までの温度で Se 蒸気下でのその場観察を行った。Se の蒸発は質量分析計でモニターした。また比較のため、Ag 系のケステライトである Ag_xCu_{2-x}ZnSnS₄ についても同様の実験を実施した。

Cu₂ZnSnS₄ サンプルでは、室温での粒子サイズが 10 nm から高温では約 40 nm に増加する過程が観察された。同時に、ハフ変換を用いて回折パターンを定量的に評価することで、S の約 50% が Se に置換されたことが明らかになった。

Ag_xCu_{2-x}ZnSnS₄ サンプルの TEM 内その場合アニーリングでは、300°C において銀の外拡散により、SiO_x シェルを持つセレン化物ナノ粒子が形成された (Fig. 1(a)参照)。550°C のより高い温度では、これらのナノ粒子の SiSe_x コアの一部が Ag_xCu_{2-x}ZnSnS₄ マトリックス

クスに再溶解された (Fig. 1(b)参照)。この $\text{Ag}_x\text{Cu}_{2-x}\text{ZnSnS}_4$ サンプルでは、マトリックス材料への Se の取り込み量は約 10%未満であった。

以上により HVTEM での (Ag) CZTSe の TEM 内その場合成では、ナノスケールでの Ag の拡散、試料の部分的なセレン化、および高温での粒子成長を観察することができ、ケステライトの成長メカニズムに関するいくつかの有益な情報を得たが、前駆体材料が堆積されたシリコン基板が加熱プロセス中に蒸発することが判明した。そのため、プロジェクトを 1 年延長し、改善された試料システムで同じ実験を繰り返したいと考えている。

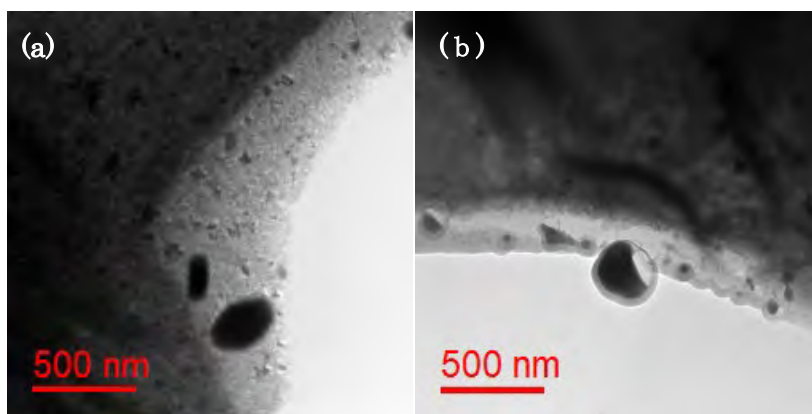


Fig. 1 $\text{Ag}_x\text{Cu}_{2-x}\text{ZnSnS}_4$ の TEM 内加熱によって形成された SiO_x シェルを持つセレン化物ナノ粒子. (a) 300°C . (b) 550°C。

参考文献

- [1] Thersleff, T., S. Giraldo, M. Neuschitzer, P. Pistor, E. Saucedo, and K. Leifer. "Chemically and Morphologically Distinct Grain Boundaries in Ge-Doped $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ Solar Cells Revealed with Stem-EELS." *Materials & Design* 122 (May 2017): 102-09.
- [2] Giraldo, S., T. Thersleff, G. Larramona, M. Neuschitzer, P. Pistor, K. Leifer, A. Perez-Rodriguez, C. Moisan, G. Dennler, and E. Saucedo. " $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ Solar Cells with 10.6% Efficiency through Innovative Absorber Engineering with Ge Superficial Nanolayer." *Progress in Photovoltaics* 24, no. 10 (Oct 2016): 1359-67.

【研究成果の公表状況】

<国際・国内会議>

K. Leifer, S. Arai, J. Rusz, H. Ali, B. Hjorvarsson, E. Saucedo, S. Kumar¹ and S. Muto, "Analysis of structural evolution and magnetisation of thin films of energy materials using in-situ HVTEM and intermediate-voltage TEM", *Proc. Inter'l Conf on Materials & Systems for Sustainability 2023*, Nagoya, Dec. 1-3, 2023, S1-I-3 (0248).

<産業財産権>

・出願状況、取得状況：なし

宇宙線ラジオグラフィーのための電子/ μ 粒子識別法の開発

Development of e/ μ separation method for cosmic-ray radiography

Budimir Kliček • Ruđer Bošković Institute • Division of

Experimental Physics • Research Associate

Tsutomu Fukuda, Nagoya University, Institute for Advanced Research,

Designated Lecturer

Osamu Sato, Advanced Measurement Technology Center,

Elementary Particle Measurements Section, Designated Associated Professor

1. 研究目的

Currently, particle detectors using nuclear emulsion are very effective in elementary particle physics such as neutrino research due to their excellent spatial resolution. They are also used in cosmic-ray muon radiography, a method which uses natural cosmic-ray muons to see inside large structures. Cosmic-ray electrons arriving from the atmosphere together with muons act as a background for such measurements, creating a barrier to obtaining detailed internal fluoroscopic information. In this study, we will investigate the performance of a nuclear emulsion detector in discrimination between muons and electrons, by using simulations and performing actual measurements. We will determine the optimal experimental setup to maximize the background rejection, which will consequently enable us to obtain a clearer image of the internal structure.

2. 研究内容と成果

The nuclear emulsion detector consists of a stacked structure of a nuclear emulsion as the tracking part and a particle scattering part such as iron, lead, and/or water. This allows for the measurement of the momentum of charged particles from Coulomb scattering in the scattering part. In addition, the ionization loss of recorded tracks in the tracking part can be used for particle identification of electrons and muons. First, GEANT4 simulations were performed of a nuclear emulsion detector stacked with water, iron and nuclear emulsion (Water ECC), which has a proven track record in neutrino experiments, irradiated with electrons and muons with a momentum of 100 MeV/c. The detector structure consists of tracker units interleaved with 2mm thick water layers. A tracker unit is created by sandwiching a 500 μ m thick iron plate between two nuclear emulsion film. Figure 1. shows the tracks of electrons and muons, respectively. Since electrons have a lighter mass, they exhibit larger scattering compared to muons. Additionally, the thickness of the lines indicates the ionization loss in the nuclear emulsion, with muons showing greater ionization loss compared to electrons.

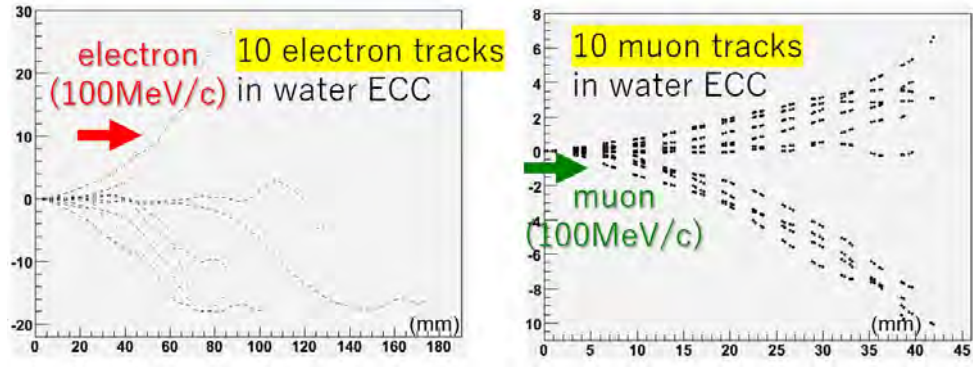


Figure 1. 100 MeV/c electrons in Water ECC (left) and 100 MeV/c muons in Water ECC

Initially, we planned to comprehensively evaluate the particle identification of electrons and muons by considering both momentum and ionization loss. However, the simulation results showed that sufficient identification performance could be achieved using only the ionization loss, as shown in Figure 2.

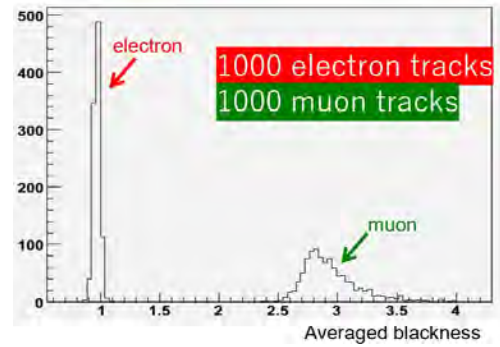


Figure 2. e/μ separation in Water ECC

To validate the simulation results, we conducted a demonstration experiment at the positron beamline of Tohoku University's Research Center for ELection and PHoton Science (ELPH). Figure 3. shows the setup for this demonstration. In the experiment, positrons with momenta of 300, 500, and 800 MeV/c were irradiated onto the Water ECC. The reason for measuring positrons with momenta higher than 500 MeV/c is to study whether particle identification between electrons and muons can be achieved based on scattering alone when high-energy electrons penetrate the Water ECC. The development of the nuclear emulsions is now complete, and scanning using the automatic track-reading device for nuclear emulsions is underway. As shown in Figure 4., tracks of positrons with various energies have been detected. With further detailed analysis, it should be possible to experimentally demonstrate the particle identification performance between electrons and muons.

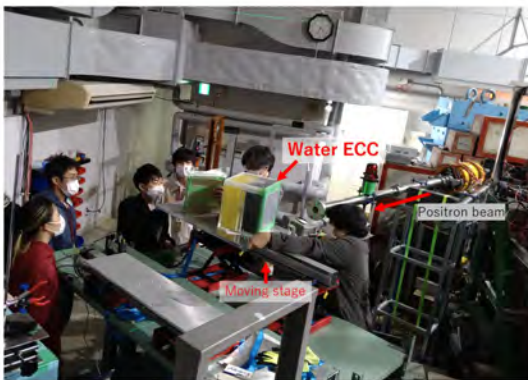


Figure 3. Set up for positron exposure

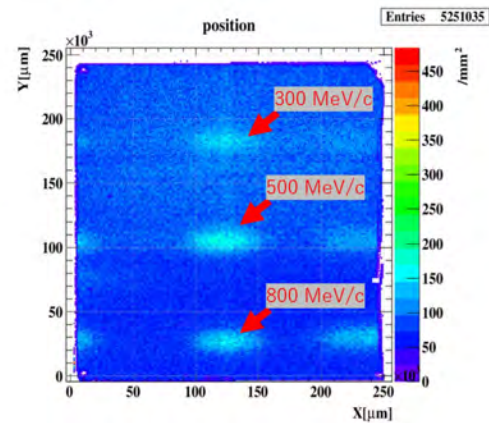


Figure 4. Position distribution of positron tracks

宇宙空間における高精度放射線フィルムバッチの開発

Development of high-precision radiation film batch in space

Elena Firu • Institute of Space Science – subsidiary of INFLPR

• Laboratory of High Energy Physics • Scientific researcher

Tsutomu Fukuda • Nagoya University •

Institute for Advanced Research • Designated Lecture

Naotaka Naganawa • Nagoya University • Advanced Measurement Technology Center,

Elementary Particle Measurements Section • Designated assistant professor

Osamu Sato • Nagoya University • Advanced Measurement Technology Center,

Elementary Particle Measurements Section • Designated associated professor

1. Research Objectives

The nuclear emulsion is used in elementary particle physics, and its use has been greatly enhanced by the increasing speed of automatic track readout technology for nuclear emulsions. The purpose of this study is to develop a high-precision radiation film batch using nuclear emulsion for monitoring radiation damage to the human body in the space environment for future human habitation. We have been working together on the application of nuclear emulsion in space, and this joint collaboration will further enhance our research.

2. Research Content and Results

We conducted development and research on the following two items for the use of nuclear emulsion as a high-precision film batch in space. The first item is the development of a machine-sent liquid emulsion gel coating method, aiming for the production of thick-type emulsion films in the future. Conventionally, coating has been done by hand, but considering mass production, it is necessary to switch to machine-sent liquid coating to improve efficiency.

Figure 1 on the left is a schematic diagram of the developed machine-sent liquid coating system, and Figure 1 on the right is a photograph of the actual system. By using this machine-sent liquid coating system, we were able to control the liquid delivery volume, which had previously been done by human senses, and avoid problems with the mixing of defoamers. This not only improved efficiency but also led to advancements in the production technology of nuclear emulsions in terms of performance.

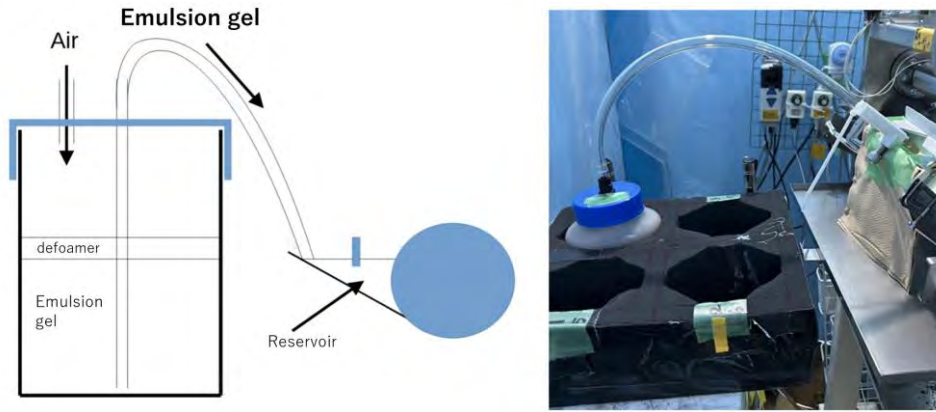


Figure 1. A machine-sent coating system

The second study focuses on the ON/OFF function of nuclear emulsion. These emulsions are sensitive to charged particles upon coating, leading to the buildup of background tracks before use in space. To address this, we researched a “refresh” function to erase these tracks for the nuclear emulsion with large silver bromide crystals which assumed be used in space. In the refresh process, emulsions are left in a high-humidity (>90%), high-temperature (30°C) environment for over 24 hours, resulting in erasing of over 75% of silver particles. However, this process also led to a decrease in sensitivity to charged particles. Using two methods, grain density (GD) and optical density (OD), to examine the number of silver particles per unit length and the ratio of transmitted light intensity, respectively, we tested three samples with redundancy, as shown in Figure 2, and found a decrease in sensitivity for all samples. While maintaining sufficient sensitivity for the use of nuclear emulsions, the mechanism behind this is not yet understood, posing a challenge for future research.

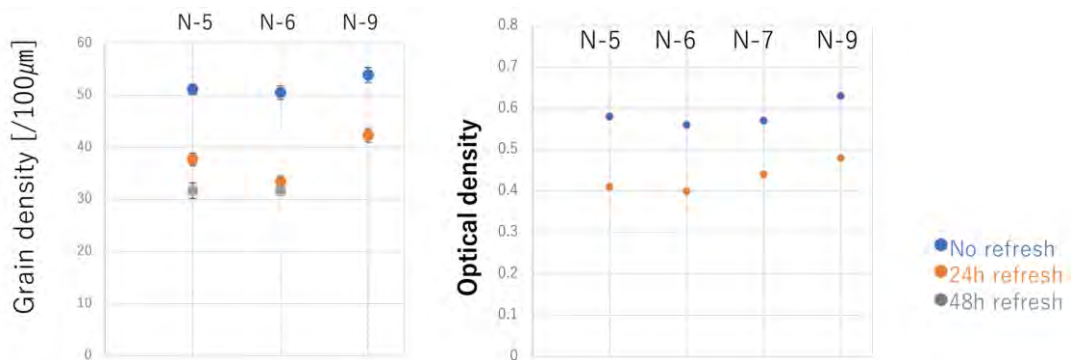


Figure 2. Grain density and Optical density before/after refresh process

In the plan for this study, measuring at balloon altitudes was also a goal. However, this was not accepted, and we were unable to achieve it. Nonetheless, we were able to carry out fundamental development for future use at high altitudes.

インバータ連系再エネ電源による電力系統動特性の向上

Inverter-based Dynamic Shaping in Renewable Integrated Power Grids

Hassan Bevrani・University of Kurdistan・Smart/Micro Grids Research Center・Director
Sharara Rehimî・名古屋大学・工学研究科電気工学専攻・D2
加藤丈佳・名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

1. 研究目的

電力供給の脱炭素化に資する太陽光発電等の出力変動に対応するための需給調整力として応動性に優れた蓄電池の活用が期待されている。太陽光発電や蓄電池はインバータを介して電力系統に接続する電源であり、従来の同期発電機のような慣性力を持たない。このため、これらが大量導入される将来の電力システムでは、インバータ電源自身が周波数・電圧を決める電圧制御方式の Grid Forming(GFM)インバータ電源に擬似的な慣性力を持たせる制御の適用が検討されている。その際、GFM インバータの制御手法では、従来の Grid Following(GFL)インバータと比較して擬似慣性力や出力ダンピング等に関する多くの制御パラメータを設定する必要がある。本研究では、疑似慣性力制御を有するインバータ電源の制御手法の実用性向上に向け、導入条件が異なる様々な地点に適したパラメータ設定を容易にするため、動的制御器の設計問題を静的出力フィードバック問題(SOF: Static Output Feedback)に帰着させる手法の開発を行った。

2. 研究内容と成果

一般に、GFL では出力電圧の位相角を PLL の計測値に基づき設定するのにに対し、GFM では次式の動揺方程式から得られる位相角 δ_m 、および電圧と無効電力出力に基づき出力電圧の位相角と大きさの指令値を決定する。

$$\frac{M}{\omega_n} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} + \frac{D}{\omega_n} \frac{d \delta_m}{dt} + K \delta_m = P_m - P_e \quad \left(\begin{array}{l} M: \text{慣性定数、} D: \text{制動係数、} K: \text{同期化定数、} \\ \omega_n: \text{位相基準軸の角速度、} P_m: \text{入力有効電力、} P_e: \text{出力有効電力} \end{array} \right)$$

検討対象とした動揺方程式を考慮したモデルベースド制御を図 1 に示す。本制御の適切な動作のためには、モデル内の 8 ヶ所のゲイン $K_i \in \{K_q, K_{pe}, K_{ie}, K_p, K_{xw}, K_{xp}, K_{xi}, J\}$ を適切に設定する必要がある。また、実用性を高めるためには、条件が異なる様々な地点に適したゲイン設定を容易にできることが重要である。

そこで本研究では、図 2 に示すように、制御手法を静的制御部と動的制御部

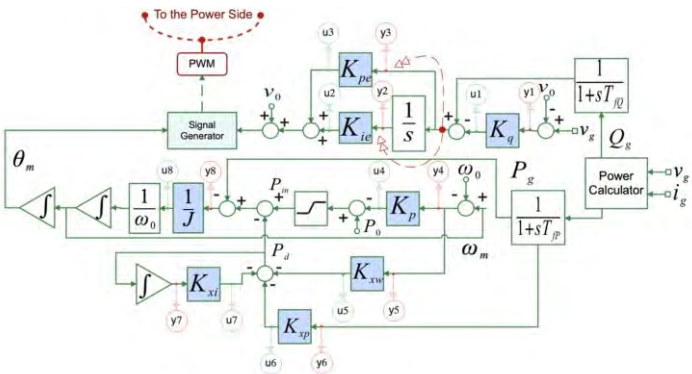


図 1 動揺方程式を考慮したモデルベースド制御

とに分離し、動的制御特性を制御対象の本来の動特性に組み込むことで新たな動特性を持つ制御対象モデルを構築し、これを積分項を含まない静的制御器のみによって制御する SOF 問題に帰着し、ゲイン設定の容易化を図った。そして、図 1 のモデルを微分方程式の導出し、これを LMI (線形行列不等式) 問題に帰着して各ゲインを設定した。

このようなゲイン設定の有用性を確認するため、MATLAB Simulink を用いた簡単な計算機シミュレーションを行った。8ヶ所のゲイン K_i に対するステップ応答の結果を図 3 に示す。比較として、従来手法によってゲイン設定した場合の結果を併記する。同図に示すように、提案手法で設定したゲインを用いる場合、安定したステップ応答が得られ、提案手法の有用性が確認できた。

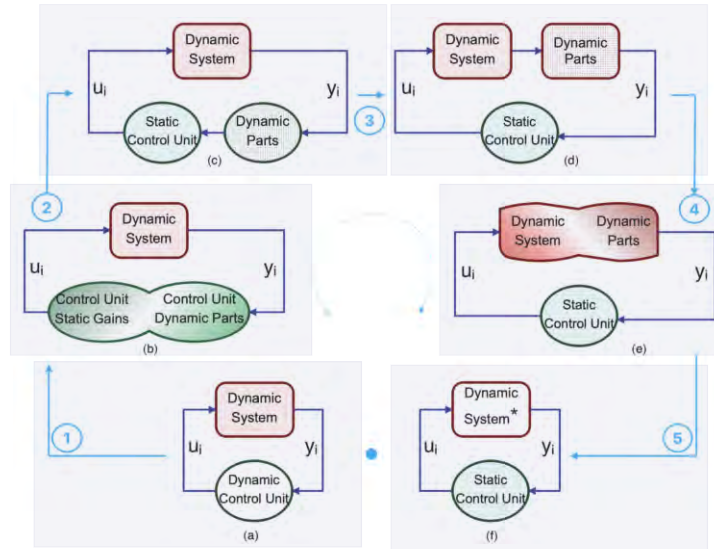


図 2 SOF 問題への帰着プロセス

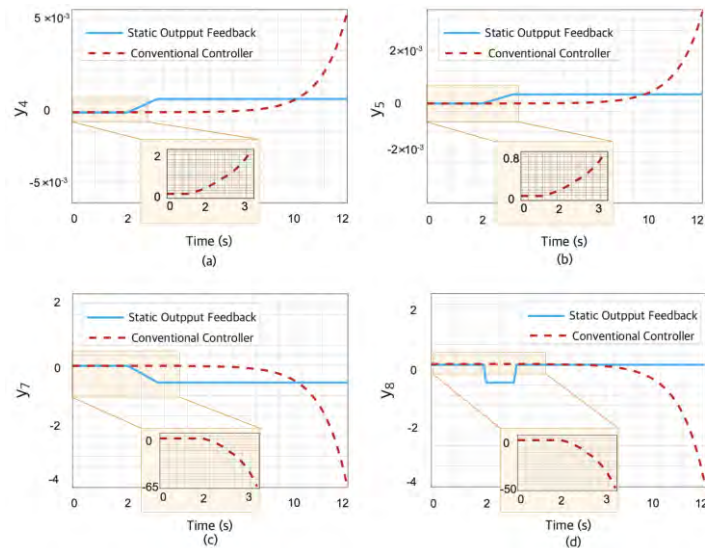


図 3 各部のステップ応答に関する計算機シミュレーションの結果

【研究成果の公表状況】

＜国際・国内会議＞

- S. Rehim, H. Bevrani, C. T. Urabe, T. Kato: “Transient Response Enhancement in an AC Microgrid Using a Simple Two-Stage Controller, The 10th Int. Conf. on Power and Energy Systems Engineering (CPESE 2023), Nagoya, 8 – 10, Sep. 2023
- S. Rehim, H. Bevrani, C. T. Urabe, T. Kato: “Dual Mode Grid Forming-Following Converters”, Int. Conf. on Materials and Systems for Sustainability (ICMaSS 2023), Nagoya, 2 – 3, Dec. 2023
- S. Rehim, H. Bevrani, C. T. Urabe, T. Kato, T. Kato: “Robust Tuning of Grid-Forming Converters Using Kharitonov Theorem”, The 11th Int. Conf. on Applied Innovations in IT (ICAII 2023), Koethen Germany, 7, March 2024