

## 技報「こまくさ」第22号発刊にあたって

一般財団法人信州大学工学部若里会 理事長 神田 鷹久

### 研究助成報告

#### Mg<sup>2+</sup> - 黒鉛層間化合物の電気化学形成に基づく二次電池反応の開発

物質化学科 准教授 清水 雅裕

#### 廃熱を利用した冷凍機(吸収式氷スラリー生成機)の開発

機械システム工学科 准教授 浅岡 龍徳

#### 酸化物系メモristaを用いた人工シナプスの作製

電子情報システム工学科 先鋭材料研究所 准教授 山本 明旦定

### | 研 | 究 | 室 | 紹 | 介 |

#### 工学部のバイオ系研究室として(野崎研究室)

物質化学科 准教授 野崎 功一

#### 磁気記録から生まれたスピントロニクス(劉研究室)

電子情報システム工学科 教授 劉 小晰

#### 持続的なまちづくり(森本研究室紹介)

水環境・土木工学科 助教 森本 瑛士

#### 計算材料科学研究室(松中研究室)の紹介

機械システム工学科 教授 松中 大介

#### 伝統的な住環境の仕組みを風工学から読み解く(南研究室)

建築学科 助教 南 健斗

# 目 次

技報「こまくさ」第22号発刊にあたって ／一般財団法人信州大学工学部若里会 理事長 神田 鷹久 .....	1
--	---

## 研究助成報告

Mg <sup>2+</sup> -黒鉛層間化合物の電気化学形成に基づく二次電池反応の開発 ／物質化学科 准教授 清水 雅裕 .....	2
廃熱を利用した冷凍機（吸収式氷スラリー生成機）の開発 ／機械システム工学科 准教授 浅岡 龍徳 .....	6
酸化物系メモリスタを用いた人工シナプスの作製 ／電子情報システム工学科 先鋭材料研究所 准教授 山本 明旦定 .....	10

## 研究室紹介

工学部のバイオ系研究室として（野崎研究室） ／物質化学科 准教授 野崎 功一 .....	16
磁気記録から生まれたスピントロニクス（劉研究室） ／電子情報システム工学科 教授 劉 小晰 .....	18
持続的なまちづくり（森本研究室紹介） ／水環境・土木工学科 助教 森本 瑛士 .....	20
計算材料科学研究室（松中研究室）の紹介 ／機械システム工学科 教授 松中 大介 .....	22
伝統的な住環境の仕組みを風工学から読み解く（南研究室） ／建築学科 助教 南 健斗 .....	24

なお、研究助成報告において、本号で公開予定でした元物質化学科 田川聡美先生（現 宮崎大学）の報告ですが、都合により次号で公開する予定です。

# 技報「こまくさ」第22号発刊にあたって

一般財団法人信州大学工学部若里会  
理事長 神田 鷹久

今年も異常な暑さが続くなか、線状降水帯による水害と土砂災害が連日報道されております。

本誌の巻頭言には、従来からの大きな事業の柱として実施してきました研究助成事業について報告いたします。本誌発刊にあたり、ご投稿いただきました著者ならびに編集を担当された委員のみなさまに感謝申し上げます。

研究助成事業は平成7(1995)年度に始まり、当財団の公益性と社会寄与を原点とし、最新の科学技術の進展と科学の探求を目的として展開してきました。当時は若手教員の方々が国際学会等で最近の研究成果を発表することの一助として主に渡航費を助成するものでした。平成7年度から平成21年度まで15年間続けてきました。それぞれの分野における研究成果を教員の方々が広く国内はもとより国外にも発信してきました。国際的な学術機関に成果を発表し、信州大学に大きく貢献してきました。先生方の経済的負担を少しでも軽減することを主としました。表1に当時の助成件数と金額を示します。

平成23(2011)年に、従来の財団は一般財団法人に関する法律の施行により、新たに一般財団法人として長野県知事より認定され現在に至っています。これを機に若里会の事業計画を新たにし、従来の“若手教員の研究助成”を“工学に関する研究助成”そして現在は“研究助成”の名目で事業を継続しております。若手教員を対象として研究と教育活動を支援し基本的に一件100万円を2件助成しております。平成23(2011)年から令和6(2024)年までの応募者数と採択者数及び助成金額を表2に示します。

年度(平成)	助成者人数(人)	助成金額(円)	年度	応募者数(名)	採択者数(名)	助成金額(円)		
7年度	5	600,000	平成	23年度	14	1	1,000,000	
8年度	6	850,000		24年度	9	2	2,000,000	
9年度	8	980,000		25年度	12	2	2,000,000	
10年度	4	450,000		26年度	15	2	2,000,000	
11年度	8	885,000		27年度	12	2	2,000,000	
12年度	3	450,000		28年度	12	3	2,000,000	
13年度	10	1,000,000		29年度	11	3	2,000,000	
14年度	5	690,000		30年度	8	2	2,000,000	
15年度	10	760,000		令和	元年度	14	2	2,000,000
16年度	6	650,000			2年度	13	3	2,000,000
17年度	7	850,000			3年度	7	2	2,000,000
18年度	2	200,000			4年度	6	2	2,000,000
19年度	4	550,000			5年度	12	3	2,000,000
20年度	1	100,000	6年度		7	2	2,000,000	
21年度	2	250,000	総計	152	31	27,000,000		
総計	81	9,265,000						

平成22年度は実施なし

表1. 国際学会等の出席者数と助成金額

表2. 研究助成の応募者数と採択者数および助成金額

以上、若手教員に対する研究・教育に関する助成を平成7年から令和6年までの状況を報告しました。表1、2でみられるように、年々応募者数が減少していく傾向がみられます。諸事情があると思われませんが実情は分らない現状です。また一方で、当財団では基金が少なくなり、今後の事業計画を再検討する必要性が生じています。全体の事業計画は一般財団法人として県との関係、制約もあり、二年後を目途に見直す必要性があり、若里会理事会に於いても複数の意見が出ております。研究助成事業について本誌では報告しましたが、今後全体の事業(現在8項目)についても母体である工学部同窓会と一緒に検討し、将来の方向性を示すことが重要と思われれます。

今後、みなさまのご意見を集約し検討をしたいと考えています。“若里会”へのみなさまの一層のご理解とご協力をお願い申し上げます。

(2024年7月 記)

## Mg<sup>2+</sup> – 黒鉛層間化合物の電気化学形成に基づく二次電池反応の開発



信州大学工学部 物質化学科 准教授 清水 雅裕

### はじめに

太陽光などの自然エネルギーの有効利用や電気自動車の航続距離増大に向けてリチウム二次電池の需要は一層強くなってきている。近年では、資源制約を受けない二次電池として、リチウム二次電池に相補的な役割を担う次世代蓄電池が盛んに研究されてきている。その対象は、Na イオンや K イオンなどの 1 価のアルカリ金属イオンに広がってきており、最近では 2 価の Mg イオンや Ca イオンにも大きく注目が集まってきた<sup>1-3)</sup>。その背景には、Li とは異なり豊富な資源が存在することに加え、2 電子反応を介した大きな充放電容量が得られることが挙げられる。Mg イオンをキャリアとする系に着目すると、その負極には Mg 金属の析出-溶解反応を用いるものに限定されるといっても過言ではない。これは、Li 金属の析出時に典型的に見られる、短絡を招く針状析出物が Mg では成長しないため、蓄電池の安全性を確保できるといった利点がある。さらに、その理論容量が重量当たり (2205 mA h g<sup>-1</sup>) だけでなく、体積当たり (3830 mA h cm<sup>-3</sup>) でも大きく、これが Mg 二次電池開発のモチベーションとなっている。しかしながら、析出-溶解 (充放電) 効率が低いなどの課題があり、Mg 二次電池負極の研究報告の大部分は高効率な析出-溶解反応をもたらす電解液 (溶媒・アニオンの最適化) の開発に関するものである。負極活物質に関しては、その Mg 吸蔵機構の違いによって大別される (表 1)。

(1) 析出-溶解型 (例: Mg 金属)<sup>4-6)</sup>、(2) 挿入-脱離型 (例: TiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>7</sub> など)<sup>7,8)</sup>、(3) 合金化-脱合金化型 (例: Sn, Sb, Bi など)<sup>9,10)</sup>。Mg イオンがホスト材料に出入りする (2) は、容量こそ限定されるものの高い反応可逆性と高サイクル寿命を示すことが特徴である。(3) の合金化-脱合金化反応型では、挿入-脱離型と比較してその容量は増大するものの、充放電にともなう相分離や結晶格子の再構築が可逆性の低下を招くため、サイクル安定性に乏しいという欠点を抱えている。他方、従来の Li

表 1 Mg 二次電池用負極活物質の候補とその充放電容量

Active Material	Composition after full Magnesiumation	Reaction mechanism	Reversible capacity / mA h g <sup>-1</sup>
Mg metal	Mg (-)	Deposition	2205
Sn	Mg <sub>2</sub> Sn	Alloying	900
Sb	Mg <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub>	Alloying	660
Bi	Mg <sub>3</sub> Bi <sub>2</sub>	Alloying	350
InSb	Mg <sub>3</sub> Sb <sub>2</sub> /In	Alloying	300
Li <sub>4</sub> Ti <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	Mg <sub>4</sub> LiTi <sub>5</sub> O <sub>12</sub> (ICP)	Insertion	175
TiO <sub>2</sub>	Mg <sub>0.16</sub> TiO <sub>2</sub>	Insertion	110
Na <sub>2</sub> Ti <sub>3</sub> O <sub>7</sub>	Mg <sub>0.5</sub> NaTi <sub>3</sub> O <sub>7</sub>	Insertion	78

二次電池負極材料である黒鉛 (層間挿入-脱離型) に目を向けると、その報告例は極めて少ない<sup>11,12)</sup>。これは、Mg イオンの強いルイス酸性が原因となり、ルイス塩基である溶媒から脱溶媒和が進行しにくく挿入反応が生じにくいことが背景にあると考えられる。仮に、Li イオンと同程度に MgC<sub>6</sub>の組成まで層間化合物が形成される場合においては、その理論容量は従来のリチウム二次電池負極として用いた際の 2 倍 (744 mA h g<sup>-1</sup>) を示すことから、黒鉛は極めて魅力的な材料といえる (図 1)。Mg イオンとの二元系黒鉛層間化合物が本質的に不安定であることも指摘されているが<sup>13)</sup>、筆者らは挿入イオン種として溶媒和イオンにまで視野を広げ、これが可逆的に挿入-脱離できるかについて検討を行ってきた。本稿では、筆者らの取り組みを中心に Mg 二次電池負極としての黒鉛の可能性について紹介する<sup>14)</sup>。

### 電解液溶媒の選択とその重要性

従来型のリチウム二次電池の電解液溶媒に用いられる EC:DEC (ethylene carbonate/diethyl carbonate) に対して Mg 塩 [Mg (TFSA)<sub>2</sub>: Magnesium bis (trifluoromethanesulfonyl) amide] を溶解し、これを黒鉛電極に対して適用しても可逆的な還元・酸化応答は得られない。そこで溶媒のドナーナンバーに着目し、EC:DEC 以外に 2-MeTHF (2-methyltetrahydrofuran)、DME (1,2-dimethoxyethane)、

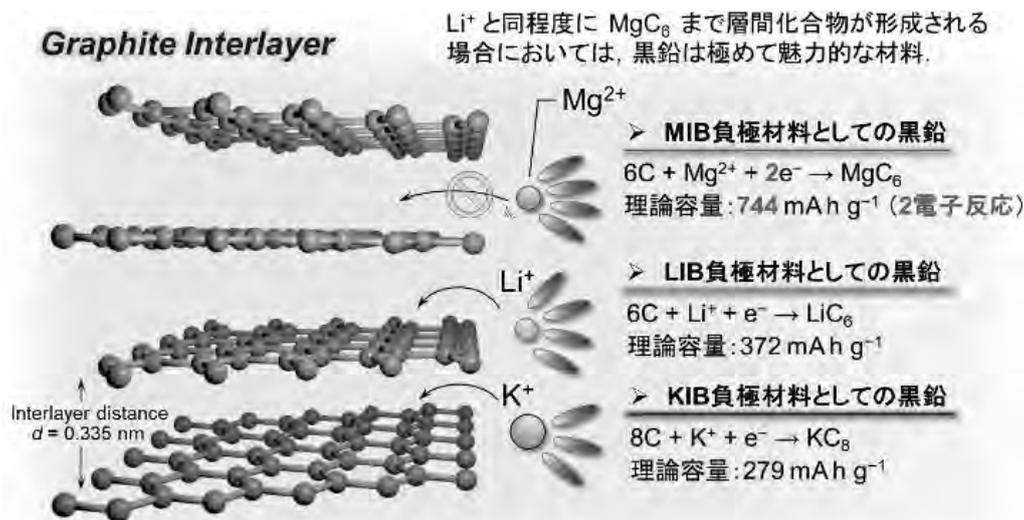


図1 黒鉛電極の充電反応の模式図：電荷移動担体：(上) Li<sup>+</sup>，(下) Mg<sup>2+</sup>。強いルイス酸を示す Mg<sup>2+</sup>はルイス塩基である溶媒分子からの脱溶媒和反応が進行しにくく、黒鉛層間化合物の形成が生じない。

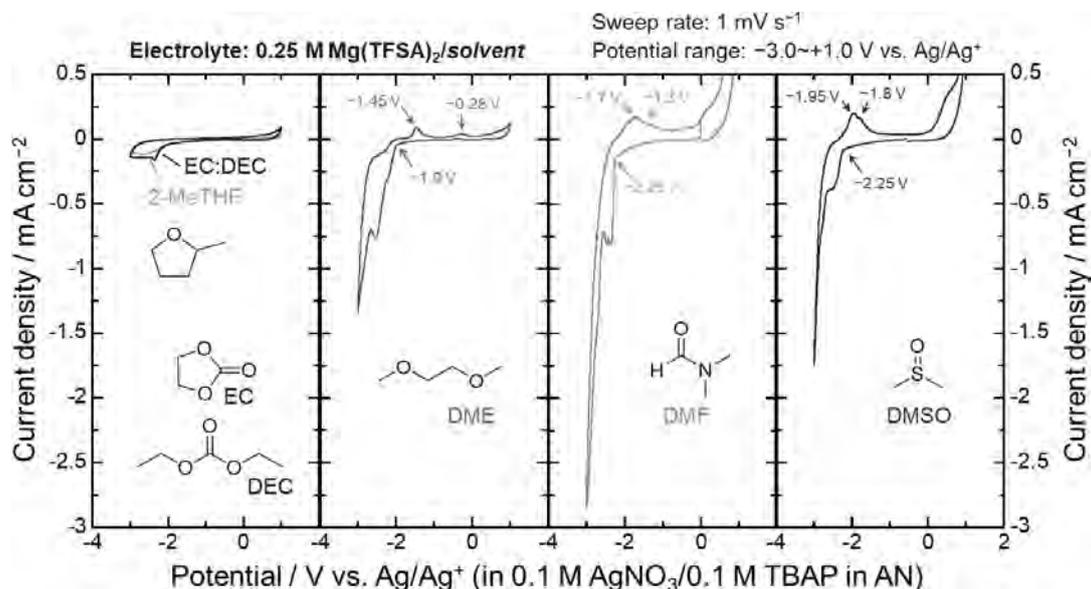


図2 黒鉛電極のサイクリックボルタグラム：電解液：0.25 M Mg(TFSA)<sub>2</sub>/solvent. EC:DEC および 2-MeTHF を適用しても可逆的な還元・酸化応答は得られなかった。

DMF (*N,N*-dimethylformamide)、DMSO (dimethyl sulfoxide) を検討した。その結果、環状などの高高い分子を含む場合ではほとんど電流応答が得られなかったものの、鎖状系では還元に対応する酸化応答も認められた。EC や 2-MeTHF などの高高い分子が Mg<sup>2+</sup> に溶媒和する系においてレドックスが見られないことを鑑みると、DME、DMF、DMSO において見られた電流応答が Mg<sup>2+</sup> 単独ではなく、溶媒分子に取り囲まれた状態の Mg<sup>2+</sup> が黒鉛層間に挿入-脱離したことが予想された。換言すると、溶媒和 Mg<sup>2+</sup> の挿入-脱離において、その溶存種が高高い場合では層間への挿入反応 (共挿入) が進行しない

ものと推察される (図2)。

その電流応答が電解液の還元分解または共挿入反応かを现阶段では完全に判別できていないものの、Mg 最も大きい還元・酸化応答電流が認められた DMF を溶媒とする系において、その黒鉛層間化合物が形成される挙動を調査した (図3a)。二次電池負極材料の電気化学挙動を調査するうえでは、対極にゲストイオン種の金属 (リチウム二次電池の場合では Li 金属) が使用される場合が多く、その試験の下限電圧は 0 V 以上に設定される。これは、0 V 以下においてそのゲストイオンの還元により金属の析出を招くことを避けるためである。電流密度 7.44

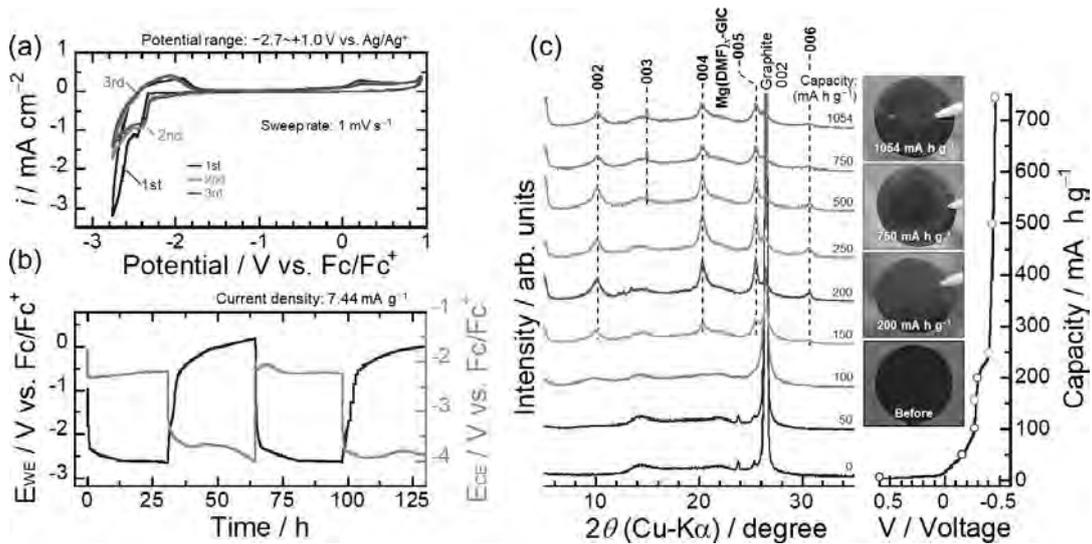


図3 (a) Mg(TFSA)<sub>2</sub>/DMFにおける黒鉛電極のサイクリックボルタモグラム (0.5 M)。 (b) 充放電容量を 250 mA h g<sup>-1</sup> に設定した最の黒鉛電極および対極 (Mg 合金) の電位変化。 (c) (b) 試験時における黒鉛電極の XRD パターン。

mA g<sup>-1</sup> の定電流条件において、黒鉛電極に 250 mA h g<sup>-1</sup> の充電または放電容量を与えた際の Mg 合金 (AZ31) 対極の電位を Fc/Fc<sup>+</sup> に対してモニタリングすると (図 3b)、黒鉛電極の還元時には対極電位が最大で 2 V 程度も変化することが分かる。電気化学測定において、参照極を含む三極式セルを用いるのが一般的ではあるが、特に Mg 二次電池系では電位制限を設けた試験において参照極の重要さがうかがえる。試験の簡略化の都合上、ここでは定電流印加時の黒鉛電極の X 線回折 (XRD) パターンを測定し黒鉛層間化合物の形成挙動をモニターした (図 3c)。

充電容量が 150 mA g<sup>-1</sup> を超えたところで黒鉛の積層構造を示す 002 回折のピーク強度が減少し、20.4、25.5、30.6° に黒鉛層間化合物の形成に基づく複数の回折ピークの出現を確認した。また、250 mA g<sup>-1</sup> に到達した時点で黒鉛の 002 回折のピーク強度は著しく減少し、500 mA g<sup>-1</sup> 以上の容量を与えた段階で黒鉛が青色を帯びた。Lerner らの気相合成法による三元系黒鉛層間化合物の検討において (W. Xu, M. M. Lerner, *Chem. Mater.*, **30** (2018) 6930–6935)、ethylenediamine を配位子とする Mg<sup>2+</sup> の共挿入により黒鉛が青色を呈することを報告されており、このことから筆者らの系においても、層間への挿入種は溶媒和された Mg<sup>2+</sup> であることが示唆された。青色を呈した時点における黒鉛層間の拡張距離は 10.87 Å であり、元の層間間隔である 3.35 Å を考慮すると、挿入イオン種は Mg<sup>2+</sup> 単独ではなく [Mg(DMF)<sub>x</sub>]<sup>2+</sup> である可能性が大きい。ラマン分光解析の結果、電解液バルク中では、6 分子の DMF

が Mg イオンに溶媒和していることを確認しており、層間拡張距離がこの溶存イオン種のサイズに匹敵することも共挿入反応が進行したことを示している。さらに、定電流条件下において 250 mA h g<sup>-1</sup> の充電および放電を行う前後の黒鉛電極の断面走査型電子顕微鏡像をみると、充電時にその活物質層が少なくとも 1.33 倍にまで膨張しており、放電後にはグラフェンシートの積層構造が乱れていた。電極膨張度合いが極めて大きいことと、1 価のアルカリ金属イオンである Li<sup>+</sup> や K<sup>+</sup> が単独で挿入–脱離した際よりも積層構造の秩序性が低下していたことも含めると、溶媒和 Mg イオンの挿入が多角的に支持される。これらの定電流印加を行った試験において、250 mA h g<sup>-1</sup> の容量は C<sub>6</sub> に対して 0.34 mol の Mg<sup>2+</sup> に相当する。このような溶媒分子をともなう共挿入反応とそれに基づく三元系黒鉛層間化合物の形成は、DMSO においても進行することを確認している。ただし、Mg 金属負極の析出–溶解が可能な Grignard 溶液 (1 M CH<sub>3</sub>MgBr/THF) においては、これらの共挿入反応は進行せず、Mg 金属が析出するのみであり (図 4)、共挿入反応において溶媒および対アニオンがもたらす効果の解明が今後必要である<sup>15)</sup>。また、実際に蓄電池に用いることを考慮すると、脱離 (放電) 時の電位ヒステリシスが課題であり、黒鉛層間中における Mg<sup>2+</sup> の拡散について更なる検討が必要である。また、本研究で得られた知見を他の多価カチオン二次電池の開発に繋げたい。

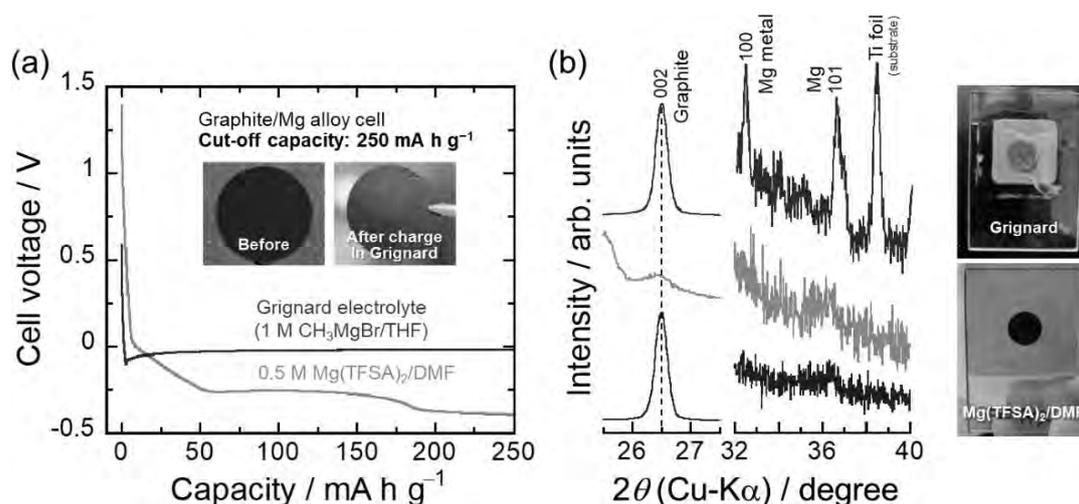


図4 (a) 1 M  $\text{CH}_3\text{MgBr}/\text{THF}$  溶液中における黒鉛電極の充電挙動。(b) 充電容量:  $250 \text{ mA h g}^{-1}$ に至った段階における黒鉛電極のXRDパターン。

## 謝辞

本研究は、一般財団法人信州大学工学部若里会の令和5年度研究助成を受けて実施しました。多大なご支援に感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) D. Wang, X. Gao, Y. Chen, L. Jin, C. Kuss, P. G. Bruce, *Nat. Mater.*, **17**, 16–20 (2018).
- 2) Z. Li, O. Fuhr, M. Fichtner, Z. Zhao-Karger, *Energy Environ. Sci.*, **12**, 3496–3501 (2019).
- 3) R. Mohtadi, M. Matsui, T. S. Arthur, S.-J. Hwang, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **51**, 9780–9783 (2012).
- 4) S. Yagi, A. Tanaka, T. Ichitsubo, E. Matsubara, *ECS Electrochem. Lett.*, **1**(2) D11–D14 (2012).
- 5) A. Kitada, Y. Kang, Y. Uchimoto, K. Murase, *J. Electrochem. Soc.*, **161**(3) D102–D106 (2014).
- 6) T. Mandai, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 39135–39144 (2020).
- 7) Y. Meng, D. Wang, Y. Zhao, R. Lian, Y. Wei, X. Bian, Y. Gao, F. Du, B. Liu, G. Chen, *Nanoscale*, **9**, 12934–12940 (2017).
- 8) C. Chen, J. Wang, Q. Zhao, Y. Wang, J. Chen, *ACS Energy Lett.*, **1**, 6, 1165–1172 (2016).
- 9) N. Singh, T. S. Arthur, C. Ling, M. Matsui, F. Mizuno, *Chem. Commun.*, **49**, 149–151 (2013).
- 10) T. S. Arthur, N. Singh, M. Matsui, *Electrochem. Commun.*, **16**, 103–106 (2012).
- 11) D.-M. Kim, S. C. Jung, S. Ha, Y. Kim, Y. Park, J. H. Ryu, Y.-K. Han, K. T. Lee, *Chem. Mater.*, **30**, 3199–3203 (2018).
- 12) C. God, B. Bitschnau, K. Kapper, C. Lenardt, M. Schmuck, F. Mautner, S. Koller, *RSC Adv.*, **7**, 14168–14175 (2017).
- 13) M. Calandra, F. Mauri, *Phys. Rev. B: Condens. Matter Mater. Phys.*, **74**, 094507 (2006).
- 14) M. Shimizu, A. Nakahigashi, S. Arai, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **23**, 16981–16988 (2021).
- 15) W. Xu, M. M. Lerner, *Chem. Mater.*, **30**, 6930–6935 (2018).

# 廃熱を利用した冷凍機 (吸収式氷スラリー生成機) の開発



信州大学工学部 機械システム工学科 准教授 浅岡 龍徳

## 1. はじめに

カーボンニュートラルといわれるように、化石燃料などの有限なエネルギー資源を大切に、地球環境を守っていくことは、人類に課された最も重要な課題のひとつである。自然エネルギーのような、化石燃料以外の新しいエネルギーの利用を増やしていくと同時に、無駄に捨てられるエネルギーを減らしていく努力が求められる。

エネルギーの有効利用を目指すうえで「熱は電気よりも低質なエネルギーである」という考え方が重要である。電気はあらゆる用途に利用できるエネルギー形態である。電気製品を動かせるうえに、ヒーターを使えば発熱してあらゆる温度を簡単に与えることができる。しかし、当然ながら熱で電気製品を動かすことはできないし、熱を電気に変えることは簡単にはできない。一般的な熱駆動型の発電機は十分な温度がないと動かすことができないため、工場な

どで排出された  $200^{\circ}\text{C}$  以下の熱（廃熱）は発電には使えずちょうどいい使い道がなければ利用できずに捨てられることが多く、未利用エネルギーとよばれている。

筆者はこのような未利用エネルギーを有効活用するための技術として吸収式氷スラリー生成機を提案し研究を続けている。この技術により、現在未利用のままになっている膨大な廃熱を冷房・冷凍などに有効に使うことができれば、電気と熱を合わせたトータルのエネルギー消費量を大幅に削減できる。

## 2. 吸収式氷スラリー生成機の原理と技術的課題

吸収式氷スラリー生成機の利点は、吸収式冷凍機の原理を使って工場廃熱から冷熱をえることができる点、および、熱輸送媒体として氷スラリーを用いることで冷熱を効率的に貯蔵・輸送することができる点にある。

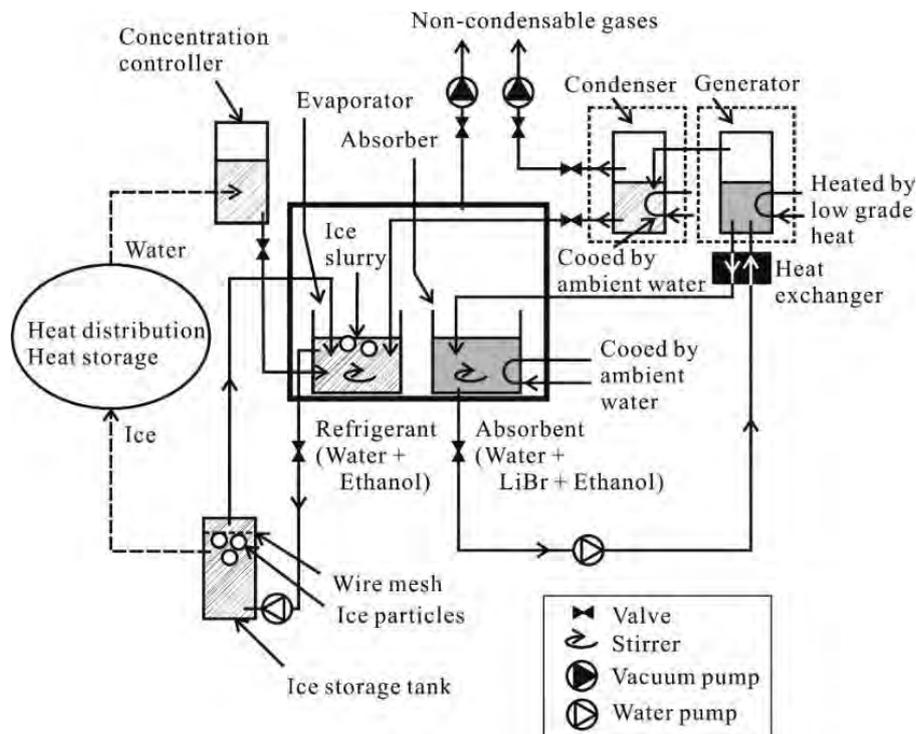


図1 吸収式氷スラリー生成機の概要<sup>(1)</sup>

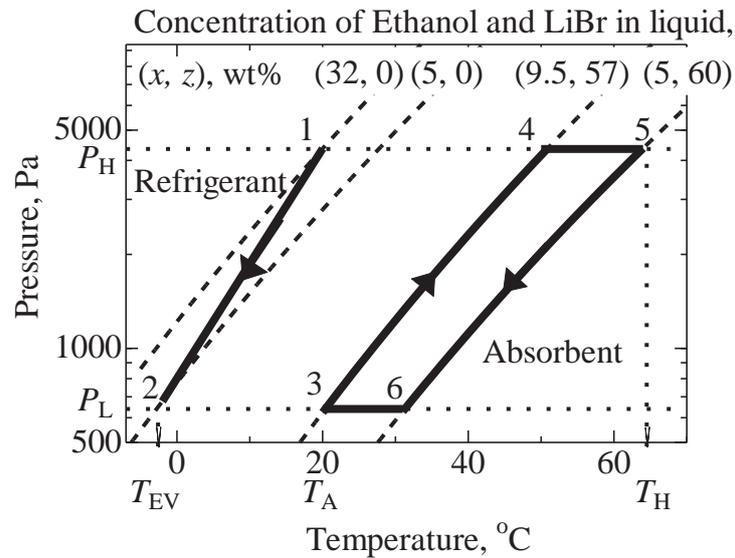


図2 単段単効用型の吸収冷凍サイクルのP-T線図<sup>(2)</sup>

吸収式氷スラリー生成機<sup>(1)</sup>の概念図<sup>(1)</sup>を図1に示す。冷凍サイクルは、一般的な吸収式冷凍機と同様に、蒸発器・吸収器・再生器・凝縮器から成る。冷媒としてエタノール水溶液、吸収剤として臭化リチウム (LiBr) を用いる。吸収式冷凍機の原理で蒸発器の温度を下げ、蒸発器内で冷媒中に氷スラリーを生成する。

蒸発器内で発生した冷媒蒸気を吸収することで、吸収器内の吸収剤は LiBr・水・エタノールの3成分混合物となる。水とエタノールの濃度が高くなるほど、吸収剤の作用が低下するため、再生器において昇温することで冷媒を分離し吸収液を濃縮して、吸収器に戻す。再生器の温度は 100°C 以下でよいため低温廃熱が利用できる。

図2に、蒸発器内の冷媒のエタノール濃度を 5mass%、再生器内の吸収剤の LiBr 濃度を 60wt%、環境温度を 20°C としたときの吸収冷凍サイクルの P-T 線図を示す。1-2 が冷媒の状態変化、3-4-5-6 が吸収剤の状態変化である。熱交換器の温度効率<sup>(2)</sup>は 0.8 とした。このとき、蒸発器の温度 (製氷温度) は -1.8°C、再生器の温度は 65°C、理論 COP (成績係数) は 0.78 となる。すでに商用化されている一般的な吸収式冷凍機の理論 COP が 0.7~1 程度であることを考慮すると、著者の提案する吸収式氷スラリー生成機の COP は十分な値を示すといえる。また、再生器に必要な入熱温度は 65°C 程度であり本技術は比較的低温の低い熱の利用の用途に適する。

凝縮器で液化した冷媒液を、膨張弁を介して蒸発器に戻す際にジュールトムソン効果で冷却される。簡単にいえば、蒸発器内は、圧力が非常に低い真空



図3 氷スラリー

状態であるために、液が蒸発し気化熱で冷却されるということである。この冷却作用により、蒸発器内に氷スラリーが生成する。氷スラリーとは図3の写真のように、エタノール水溶液を冷やしてシャーベット状 (水溶液中に多数の微細な氷粒子が共存した状態) にしたものである。液体の流動性による扱いやすさを維持しつつ、固体の融解熱を使うことで高い蓄熱密度と温度維持性を有する、優れた熱輸送媒体である。水を凍らせるとひとかたまりの固い氷になることはよく知られている通りであるが、適量のエタノールを加えて水溶液にすることでスラリー化させることができる。図4に示す通り、2mass%のエタノール水溶液では、氷粒子同士が凝集してくっついた状態になってしまうことがあるため、十分な流動性を維持するためには 5mass% 以上のエタノール濃度が必要である。

吸収式氷スラリー生成機では、蒸発器内に生成し

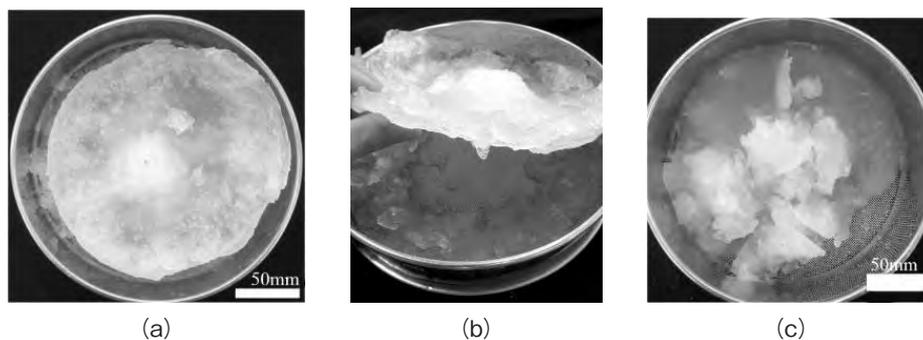


図4 氷スラリー中の氷粒子の様子。(a)、(b)は2mass% エタノール水溶液、(c)は5mass% エタノール水溶液から生成したもの。(c)は水の凝集が抑制されている。<sup>(1)</sup>

続ける氷スラリーを連続的に除去する必要がある。蒸発器内の水の量が増えるほど冷媒の蒸発の妨げとなり、冷凍サイクルの動作に悪影響を及ぼすためである。許容される水の量は、IPF (Ice Packing Factor) で5mass% 程度であることがわかっているため、液送ポンプを用いて、蒸発器-氷貯蔵部-濃度調整器-蒸発器の間で氷スラリーを循環させ、その途中の氷貯蔵部で氷を分離することで、蒸発器中のIPFを低く維持する。

この吸収式氷スラリー生成機はまだ要素設計の段階である。実際の装置を設計することを考えると、既存の吸収式冷凍機的设计がそのまま応用できそうな部分もあるが、新しく設計しなおさなければならない要素は少なくない。中でも重要な技術的課題となるのが、氷貯蔵部において氷スラリーから氷を分離する手法である。これについて検討した結果を以下に紹介する。

### 3. 氷分離・貯蔵装置

前述の通り、吸収式氷スラリー生成機の連続運転を実現するためには、図1中にある氷貯蔵部において安定的に氷スラリーから氷を分離しつづければならない。

氷はエタノール水溶液よりも比重が小さいため、放っておくと浮上して水面上に堆積するため、装置のスケールに対して氷スラリーの流れが十分に遅ければ特別な装置を使わなくても氷粒子を分離することができる。しかしながら、氷スラリー生成機では、多量の水を連続的に分離しなければならないため、氷スラリーの流れを遅くすることは現実的ではない。そこで、本研究では、氷スラリーの流れの中にメッシュを配置することで、氷粒子を分離し氷貯蔵部内に氷を堆積させる方法を採用した。

氷スラリーに含まれる氷粒子は、図5に示すように、0.1~0.5mm程度の楕円形（おはじき形）である。しかし、目開きの異なる数種類のメッシュを用いて試験した結果、目開き2mm以上のメッシュでは、全ての氷粒子はメッシュを通過するが、目開き1mmのメッシュを用いると図6のようにメッシュ上に氷粒子が堆積することがわかった。このことは、氷粒子が凝集してかたまりになっており、その凝集体のサイズは1mmよりも大きいことを意味している。前述のように、エタノールを添加することで氷粒子の凝集を抑制する効果があるものの、一部は凝集したまま残っているということである。

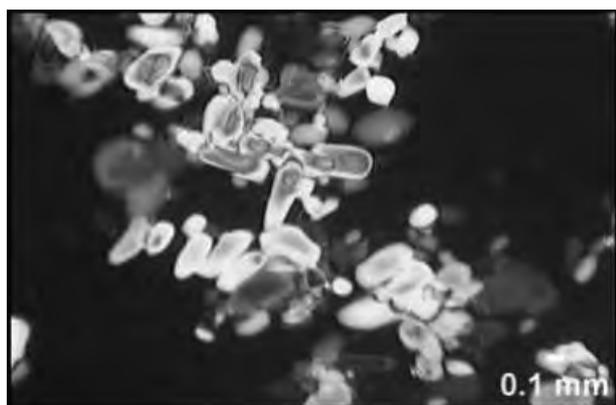


図5 氷スラリー中の氷粒子の写真



図6 目開き1mmのメッシュに堆積する氷粒子の様子

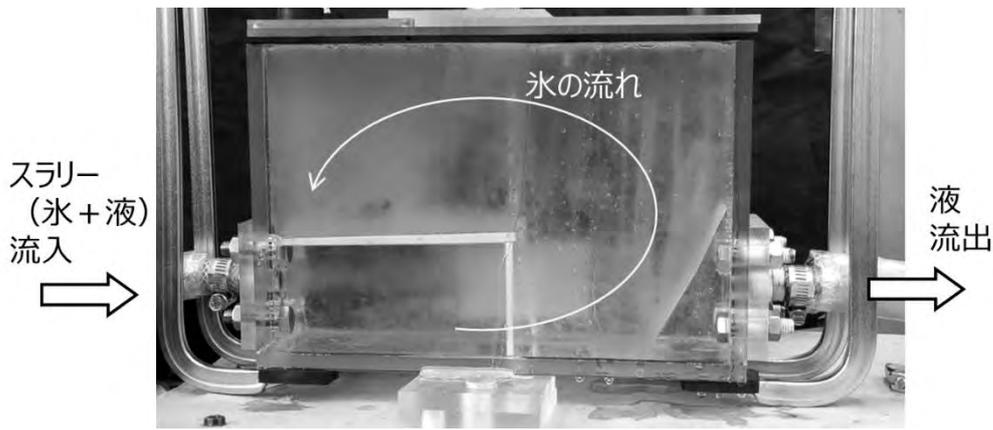


図7 氷スラリーから分離された氷粒子が分離装置内に堆積する様子

この結果から、矩形の氷貯蔵部に目開き 1mm のメッシュを配置し図7のような装置を製作した。図の左側から氷スラリーが流入し、氷貯蔵部内で氷粒子が分離されて、右側から液のみが流出する。出口直前にはメッシュが設置されており、液は出口方向に流れ、氷は上方向に分離される。図のように氷は容器内を循環して入口側に戻るため、新たに流入してくる氷スラリーに氷が合流しないように、入口の上面にもメッシュを設置した。これにより、氷スラリーから分離した氷粒子を容器の左上部に集めることができる。

この装置を用いた試験により、流速によらず安定して氷を分離・貯蔵できることを確認した。実際に装置を製作する際には、吸引式氷スラリー生成機の製氷速度に合わせた容量の氷貯蔵部を設計する必要があるが、この方式は容量によらず適用可能であると考えている。

#### 4. おわりに

本稿で紹介した吸引式氷スラリー生成機は、まだ要素設計の段階であり、実用化のためには、設計・製作において冷凍機メーカー企業の協力が不可欠である。学会等を利用した関連企業との情報交換を継続しつつ、ここで示したような基礎的な知見を整備していくことが社会実装につながると信じて、本研究に取り組んでいる。

#### 謝辞

本研究は、一般財団法人信州大学工学部若里会の令和5年度研究助成により行った。この支援により研究を大いに推進することができた。ここに心より感謝を示す。

#### 文献

- 1) T. Asaoka, Y. Endo: Int. J. Heat and Mass Transfer, **162**, 120333 (2020).
- 2) 浅岡龍徳、藤村克己、船山蔵: 冷空論、**33**(4), 343 (2016).

# 酸化物系メモリスタを用いた人工シナプスの作製

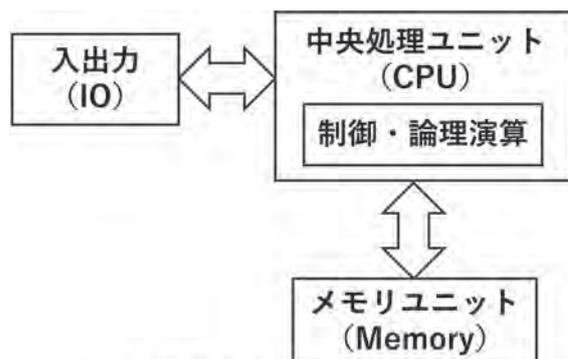


信州大学工学部 電子情報システム工学科 先鋭材料研究所  
化合物半導体エレクトロニクス(橋本・山本)研究室

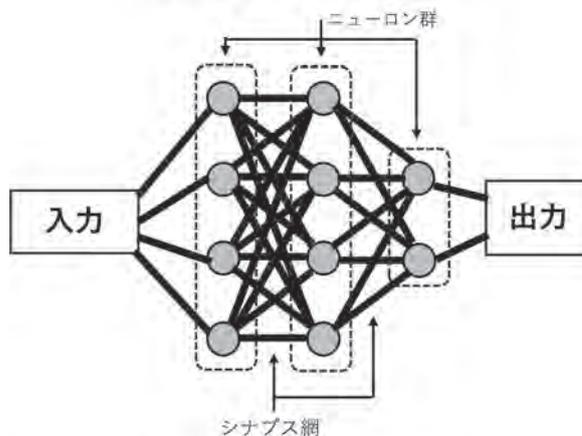
准教授・博士(工学) 山本 明旦定

## 1. はじめに

21世紀の現在、電子制御技術が著しく発展し、洗濯機、冷蔵庫、エアコンなど身の回りの日常生活用エレクトロニクス製品などはもちろん、車、飛行機などの移動・運搬車両、住宅、オフィスなどの居住施設、移動通信機器、精密医療機器、ロボットなど多様な産業機械、各種のエンタテインメント用機器などあらゆる分野に浸透し、現代社会に必要不可欠な存在になった。8ビットの簡易マイクロコントローラ回路から出発し、現在は128ビットの高性能コントローラシステムが格納されているデジタルコンピュータにまで拡張され、高性能な電子制御技術の根幹をなしている。今後は、電子制御ができるあらゆる機器(物)同士の大規模な通信網が全世界で構築され、高性能コンピュータの需要が益々高まると思われる。一方、電子制御に用いられるコンピュータの数が劇的に増加することにより、電力の消費もかなり増大していくことが予想される。現在のCMOSトランジスタ技術を基盤とするコントローラを搭載しているノイマン型デジタルコンピュータに比べ(図1(a))、人間の脳の仕組みを模倣した演算仕組みであるニューロモーフィックコンピューティング(Neuromorphic computing)技術は膨大化するデータの処理を高速に行えるうえ、エネルギー効率が極めて高い(約10万倍程度)ため、次世代のハードウェアとして期待されている<sup>1,2)</sup>。図1(b)に示す脳型ニューロコンピュータは、演算処理機能とデータ保存機能を兼ね備えている並列回路網で構成されている。これにより、従来のコンピュータシステムでは、1つの指令(クロック)に対して、1つの演算処理しかできなかったのに対し、脳型ニューロコンピュータでは構成されているニューロンの数に比例して、大量の並列演算処理を実施できる特徴を持つ。また、ニューロン間の接続網となるシナプスは伝達された信号の刺激に依存して柔軟に組み換えられる性質を持つことから、様々な制御システムへ効率よく変調し、展開できる。現



(a) 従来のノイマン型デジタルコンピュータの概略構造



(b) 脳型ニューロコンピュータの概略構造

図1: 従来と将来のコンピュータ構造の比較

在、脳型ニューロコンピュータの基本構成素子として欠かせないシナプス細胞の性質を模倣可能なアナログスイッチングデバイスの実現が求められている。これまでに磁気抵抗変化方式、誘電体変化方式、相変化方式、抵抗変化方式など様々な仕組みのデバイスが検討されている中で、酸化物系材料を用いた抵抗変化方式のメモリスタはアナログスイッチングデバイスの有力な候補の一つとして注目されている。図2(a)に示すようにメモリスタは比較的簡単

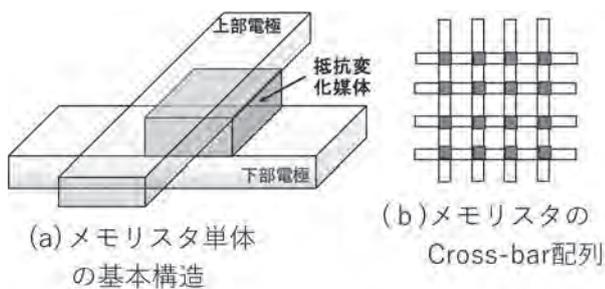


図2：シナプスの性質を模倣可能な抵抗変化型メモリスタの基本構造

な2端子構造を有しており、cross-bar 配列構造(図2(b))を用いて大規模な集積化が可能なおえ、ニューロンコンピュータに必要なシナプス網として簡単に展開できる特徴をもつ<sup>3)</sup>。

これまで著者は、多様な形態を有する  $\text{AlO}_x$ 、 $\text{MoO}_x$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZnO}_x$ などの酸化物材料を用いてメモリスタ素子を作製し、優れた抵抗変化特性を確認してきた<sup>4-10)</sup>。しかし、酸化物系抵抗変化媒体の伝導メカニズムを支配する酸素欠陥の形態が確率的に変化してしまうため、不確定性やばらつきが生じやすく制御がかなり難しい問題がある。著者らの研究室では、ナノメートルオーダーの規則性を有する多孔質アルミナの特長な構造に注目し、抵抗変化媒体として多孔質アルミナの微細構造内に伝導経路の形成部位を意図的に局在化させ、メモリスタ特性へ与える影響を調査した。本稿では、多孔質アルミナ細孔状態や内包する物質の状況などが及ぼす効果について論ずる。また、 $\text{MoO}_x$ 薄膜を用いたメモリスタを試作し、シナプスの性質に類似する刺激パルス依存性について述べる。

## 2. 多孔質アルミナ膜を用いたメモリスタ

### 2.1 多孔質アルミナ膜及び素子作製条件の検討

図3(a)に多孔質アルミナ( $\text{AlO}_x$ )を用いて試作した素子の断面透過電子顕微鏡(TEM)像を示す。ソーダライムガラス(SLG)基板上に下部電極(Al)を真空蒸着法により堆積した後、2段階陽極酸化法を用いて多孔質アルミナ膜を形成した。最後に真空蒸着法により上部電極(Al)をつけて素子構造を完成させた。上部電極は細孔内の底部までに部分的に堆積されている様子が確認された。多孔質アルミナ細孔のアスペクト比(細孔深さと細孔径の比)は陽極酸化する際の酸化電圧、電解液濃度、2回目エッチング処理条件などによって調整し、作製した<sup>4)</sup>。図4に2段階陽極酸化法<sup>11)</sup>の概要を示す。2段階陽極酸化法では1回目の陽極酸化によってアルミニウム素

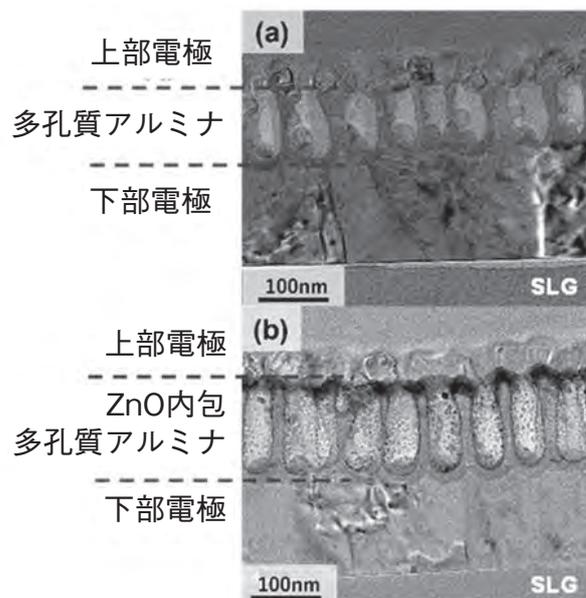


図3：(a) 多孔質アルミナのみ、(b)  $\text{ZnO}$  内包多孔質アルミナを用いて作製したメモリスタの断面TEM像。(SLG：ソーダライムガラス)

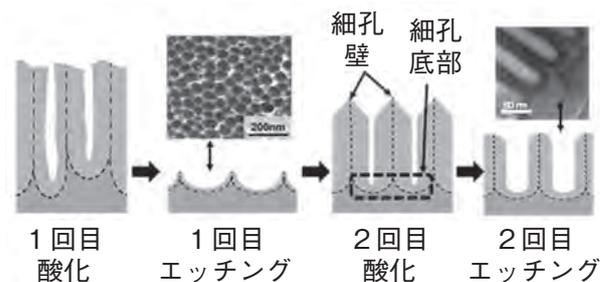


図4：2段階陽極酸化工程の流れ。1回目の酸化によって、不均一な細孔が形成される。1回目のエッチングにより、不均一な酸化皮膜を除去し、規則的に配列されたカップ状の型を形成する。2回目の酸化で、規則的な細孔が得られる。最後の2回目のエッチングによって、細孔のアスペクト比が調整される。

地に生成した規則化したカップ状のくぼみを基点として2回目の陽極酸化を行うことで規則的な多孔質皮膜が形成される。図5に電解液濃度を3wt% (硫酸水溶液)、反応温度を20℃に設定し、酸化電圧を5Vから25Vの範囲で変更して作製した試料の表面SEM像を示す。酸化電圧が5Vでは、細孔径が比較的小さく、アルミナ表面のSEM像からは細孔構造を確認できず、表面にくぼみが発生していた。10Vで陽極酸化した試料では、細孔径がSEM像で確認できるほどに拡大し、5Vより深くくぼみも形成された。15Vの試料では、細孔の密度が増加していることが確認された。また、25Vの試料と比較すると細孔の大きさにばらつきがあり、表面に段差が見られた。25Vの試料では表面にくぼみはみられず、

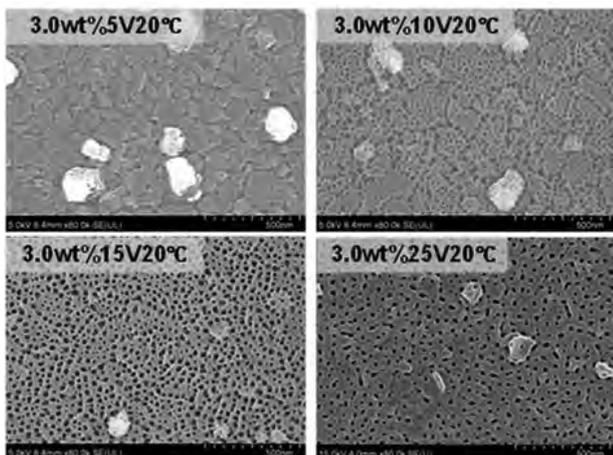


図5：陽極酸化法を用いて作製した多孔質アルミナ膜の表面SEM像。

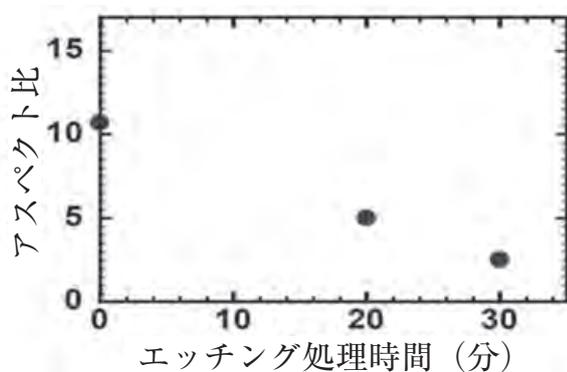


図6：陽極酸化法を用いて作製した多孔質アルミナ細孔のAspect比とエッチング処理時間の関係

比較的平坦な表面を持つ多孔質皮膜が得られた。他の3条件で見られた段差も少なく、比較的均一な表面が形成されていることが分かった。一方、表面に開口している細孔の占有率は、15 Vの試料に比べ、減少している傾向が確認された。図6には5wt%のリン酸水溶液を用いて2回目のエッチング処理時間

を変更して細孔のAspect比を調整した実験結果を示す。エッチング処理時間の増加に伴い、平均細孔径は15 nmから45 nmへと増加し、細孔の平均深さは約150 nmから120 nmに減少した。これは、エッチングによって細孔壁が侵食されることから細孔径の拡大や細孔深さの減少が生じ、その結果、細孔の平均Aspect比が15から2.5程度に変化したと考えられる。

## 2.2 細孔構造とメモリスタ特性の関係

図7に異なる細孔の平均Aspect比を持つ多孔質アルミナ膜を抵抗変化媒体として用いたメモリスタデバイスの特性を比較して示す。図7(a)で示すように高抵抗状態(off)と低抵抗状態(on)の比率(off/on抵抗比)は細孔の平均Aspect比が減少するにつれて増加する傾向を示す一方、ばらつきが大きくなっている。平均Aspect比が低い試料で、ばらつきが増加した原因に細孔径が関係していると思われる。平均Aspect比が2.5の試料では2回目のエッチング処理時間が長いため、細孔径が45 nmまで増加しており、抵抗変化に寄与する伝導経路が集中的に形成されると思われる細孔底部(図4参照)の実行的な面積が広がっていることに起因していると考えられる。一方、平均Aspect比が10の試料では、off/on抵抗比が $2.5 \times 10^2$ 程度となり、最も安定なばらつき特性を示している。これは、伝導経路の変化が15 nm径を持つ細孔底部の比較的狭い領域内に局在化されていることから不確実性が減少した可能性を示唆している。すなわち、高抵抗状態から低抵抗状態あるいはその逆の状態遷移を起こすのに必要な伝導経路の変化(形成あるいは分断)が細孔底部の実行面積に依存していると推定される。

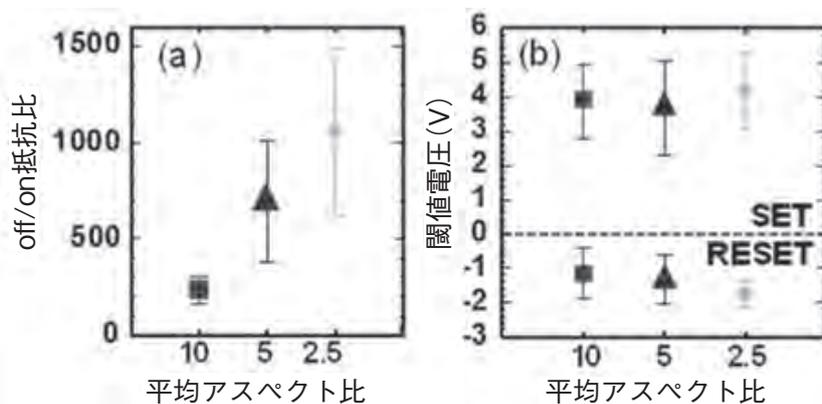


図7：異なる細孔平均Aspect比を持つ多孔質膜を用いたメモリスタの特性。(a) off/on抵抗比、(b) SET/RESET 閾値電圧。

次に、高抵抗状態から低抵抗状態への遷移に必要な閾値電圧 (SET 電圧) 及び低抵抗状態から高抵抗状態への遷移に必要な閾値電圧 (RESET 電圧) の比較を図 7(b) に示す。本デバイスでは、下部電極に対して上部電極に高い電位を掛けたとき、高抵抗状態から低抵抗状態へ遷移し (SET)、その逆バイアスの場合は、低抵抗状態から高抵抗状態に戻る (RESET) ため、バイポーラ型の動作特性を確認した。いずれの試料においても SET 閾値電圧が RESET 閾値電圧より大きくなっている傾向が見られた。また、閾値のばらつきは、SET 閾値電圧のほうが大きい傾向が見られた。これは、上部電極と下部電極との間にあるアルミナ細孔膜の構造が非対称的になっていることが起因していると考えられる。一方、閾値電圧と細孔の平均アスペクト比に明確な依存性は確認できなかったことから、本デバイスの抵抗変化メカニズムは面積に依存しないフィラメント型が主体である可能性が高い。

### 3. ZnO 内包多孔質アルミナ膜を用いたメモリスタ

図 3(b) に ZnO 内包アルミナ膜を用いたメモリスタの断面 TEM 像を示す。スパッター法によって堆積した ZnO はアルミナ細孔内壁にナノ微粒子の状態で形成されていることが確認された。また、上部電極とアルミナ多孔質膜の間に数十ナノメートル程度の薄膜が堆積されていることが分かった。細孔の平均アスペクト比が異なる多孔質膜内に同一条件で ZnO を内包したデバイスの特性を図 8 に比較して示す。図 8(a) から、off/on 抵抗比が平均アスペクト比の低下と共に減少する傾向が確認され、ばらつきは比較的小さいことが分かった。この結果は ZnO の内包がないアルミナ多孔質膜のみを用いたデバイスと逆の傾向である。平均アスペクト比が

15 の試料では、最も高い off/on 抵抗比である  $5 \times 10^3$  程度が得られた。一方、平均アスペクト比が 5 の試料では、最も低い off/on 抵抗比である  $1.6 \times 10^2$  程度が確認された。約  $3.5 \times 10^2$  の最も安定した off/on 抵抗比は平均アスペクト比が 10 の試料で得られた。平均アスペクト比が 5 の試料において、ZnO の内包がある場合とない場合を比較すると、ZnO が内包されている試料のほうが off/on 抵抗比の安定性が高いことが分かった。また、平均アスペクト比が 10 の場合、ZnO の内包有無にかかわらず、最も安定な off/on 抵抗比を示した。これらの結果より、安定な off/on 抵抗比が得られやすい適切な細孔のアスペクト比や適度の ZnO の内包状況が存在していることが分かった。一方、ZnO 内包アルミナ膜を用いたメモリスタの off/on 抵抗比は従来の ZnO 薄膜のみを用いた Al/ZnO/Al 構造のデバイス<sup>9)</sup> に比べ、比較的大きな値を実現しており、平均アスペクト比や ZnO の内包状態を調節して、off/on 抵抗比を制御できる可能性が示唆された。

図 8(b) に異なる平均アスペクト比を持つ ZnO 内包アルミナ膜を用いたメモリスタの閾値電圧を示す。閾値電圧と平均アスペクト比の明確な関係性は見られなかった。いずれの試料においても RESET 閾値電圧が SET 閾値電圧より小さくなっており、ZnO 内包がないときと同じ傾向が見られた。また、閾値電圧値とそのばらつきは、いずれも ZnO 内包がないときより小さくなっており、動作の安定性が向上している結果が得られた。平均アスペクト比が 15 の試料において、3~4 V 程度の SET 電圧が見られたが、平均アスペクト比が 10 の試料では、比較的低い 1.8~2.2 V 程度の値となり、最も安定したばらつき特性を示した。RESET 電圧を比較した場合も同様の傾向が見られた。平均アスペクト比が 10 の

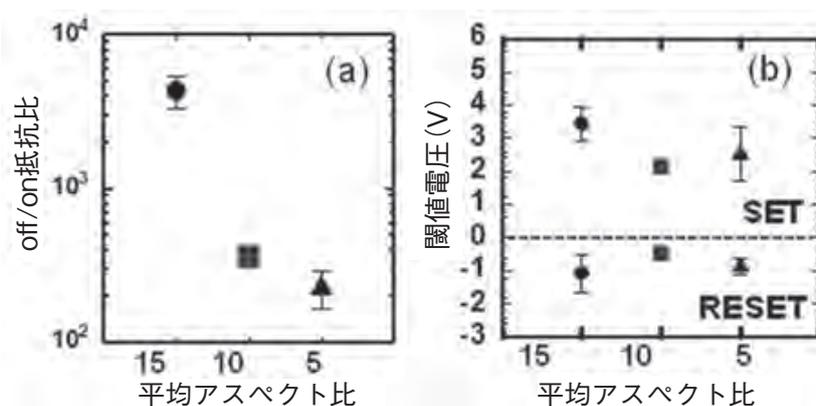


図 8 : 異なる細孔平均アスペクト比を持つ ZnO 内包多孔質膜を用いたメモリスタの特性。  
(a) off/on 抵抗比、(b) SET/RESET 閾値電圧。

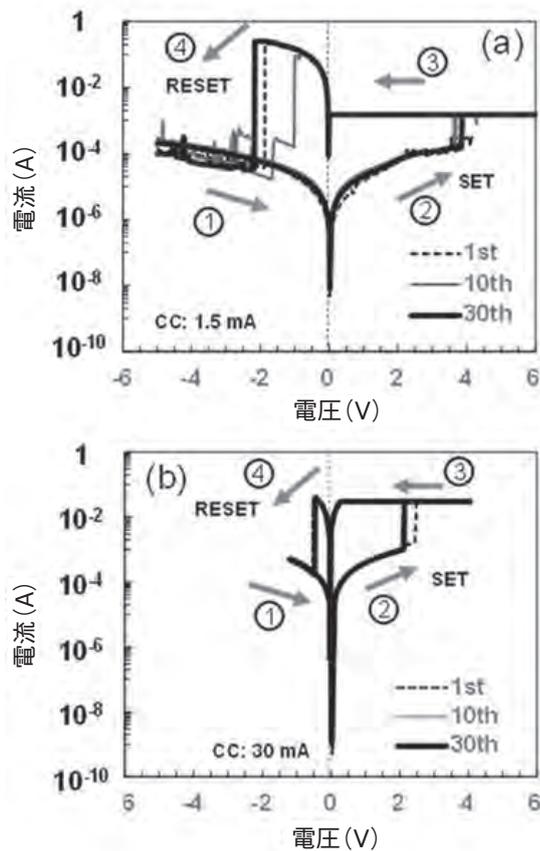


図9: (a) 多孔質アルミナ膜のみ、(b) ZnO 内包多孔質アルミナ膜を用いたメモリスタの電流-電圧特性。

試料では、今回調査した全ての試料中、一番低い動作電圧 ( $-0.27 \sim -0.72$  V) を示し、最も優れた安定性が得られた。ZnO 内包なしの試料では閾値電圧のばらつきが  $\pm 2$  V 以上であったのに対し、ZnO 内包ありの試料では、 $\pm 1$  V 以下に収まった。ZnO を内包した試料において、閾値電圧が減少し、ばらつき特性が改善した原因として、抵抗変化に寄与する伝導経路の生成または破断が生じる領域が直径 15 nm 程度の細孔内に補填されている ZnO 粒子内や細孔の底部に集中していることに起因すると思われる。これに加え、湿度や雰囲気中の酸素濃度の影響を受けて性質が変化しやすい ZnO 粒子を安定なアルミナ細孔内に閉じ込み、周囲から隔離することによって、安定性の向上に寄与したと考えられる。図9に平均アスペクト比が10の共通構造に ZnO 内包がない試料とある試料の電流-電圧特性を比較して示す。30回まで繰り返し測定した結果を比べると、ZnO 内包ありの試料がない試料より再現性が高い結果が得られた。また、ZnO を内包した試料のほうが低抵抗状態で 30 mA 程度に電流を流しても非可逆的な破壊が起こらなかったのに対し、ない試料では 1.5 mA 程度までしか耐えられなかった。これ

は、アルミナ細孔内に補填された ZnO 粒子内に高密度の伝導経路が効率よく生成・消滅できることを意味し、高い電流密度に耐えられたと考えられる。

#### 4. MoO<sub>x</sub>を用いたメモリスタのシナプス性質

図10に Mo/MoO<sub>x</sub>/Mo 構造を持つメモリスタに 100 個の正電圧パルス (振幅 2 V、パルス幅 50 ms) を印加した後、100 個の負電圧パルス (振幅 -0.5 V、パルス幅 50 ms) を印加した場合のコンダクタンス特性を示す。図10(a)に示すように正電圧パルスを連続的に印加すると、パルス数の増加とともにデバイスのコンダクタンスが増加することが確認された。その後、図10(b)のように負電圧パルスを連続的に印加すると、デバイスのコンダクタンスが減少する傾向が見られた。また、コンダクタンスの増減をパルスで繰り返し制御しても、再現性良く変化した。この性質は刺激信号によりシナプスが增強または抑制される現象に類似しており、脳型コンピュータの基本構成素子として期待される。

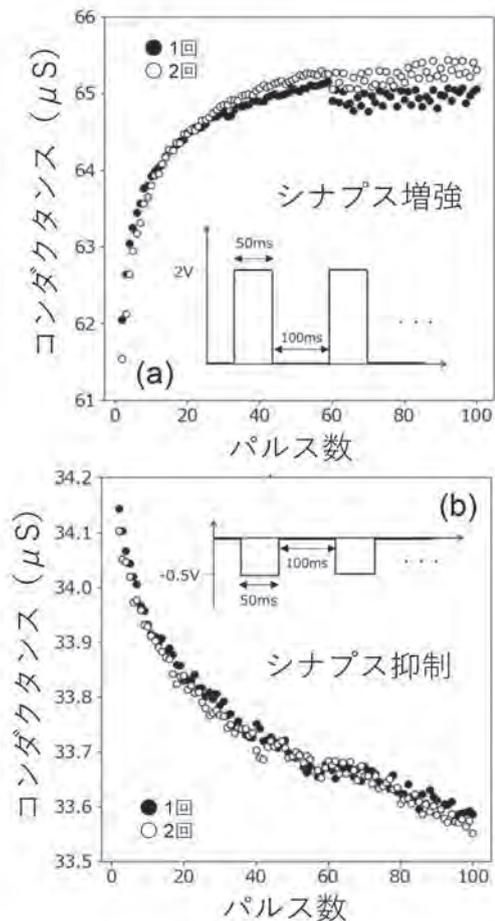


図10: 刺激電圧パルスに依存して(a) シナプス增強、(b) シナプス抑制現象の様子。それぞれの挿入図は用いた刺激パルスの概略を示す。

## 5. まとめ

著者らは、ZnO 内包アルミナ膜を用いたメモrista を試作し、その特性について調べた。多孔質アルミナ膜の非対称構造に由来し、SET 電圧と RESET 電圧の閾値が異なる特性を示した。ZnO を内包することで、閾値電圧の減少と共に動作特性の安定性が向上した。本成果により、抵抗変化に寄与する伝導経路を局在化させることが、欠陥の不確定性を抑制し、特性の安定性向上に有効であることが示唆された。MoO<sub>x</sub>を用いたデバイスでは、刺激パルスに依存してコンダクタンスが連続的に変化し、シナプスに類似した性質を示した。今後は、脳型コンピュータへの応用に展開し、cross-bar 配列のシナプス回路網を構築する予定である。

## 謝辞

本研究は信州大学工学部若里会の研究助成を受けて実施した。研究補助をして頂いた信州大学工学部の修了生である永岡千枝氏及び石原嘉人氏に感謝する。信州大学技術部の山上朋彦氏、南澤比佳理氏には TEM 分析に多大なご協力を頂いた。ここに感謝の意を表す。信州大学工学部の准教授曾根原誠氏には、一部の研究設備の利用にご協力を頂いたことを感謝する。

## 参考文献

- 1) Jack D. Kendall and Suhas Kuma, The building blocks of a brain-inspired Computer, *Appl. Phys. Rev.* **7**, 011305 (2020).
- 2) NEDO 技術戦略研究センター、人工知能を支えるハードウェア分野の技術戦略策定に向けて、TSC Foresight, Vol. 30, (24 pages) (2018). <http://www.nedo.go.jp/library/foresight.html>
- 3) Meiran Zhao, Bin Gao, Jianshi Tang, He Qian, Huaqiang Wu, Reliability of analog resistive switching memory for neuromorphic computing, *Appl. Phys. Rev.* **7**, 011301 (2020).
- 4) Myo Than Htay Yamamoto, Yoshito Ishihara, Yoshio Hashimoto, Fabrication of ZnO-encapsulated porous alumina structure utilizing a two-step anodizing technique for memristor applications, *Jpn. J. Apply. Phys.*, **63** (1), 01SP16-1-01SP16-8 (2024).
- 5) Sanjay Kumar, Mangal Das, Myo Than Htay, Sharath Sriram, Shaibal Mukherjee, Electroforming-Free Y2O3 Memristive Crossbar Array with Low Variability, *ACS Applied Electronic Materials*, **4**(6), 3080-3087 (2022).
- 6) Mangal Das, Amitesh Kumar, Sanjay Kumar, Biswajit Mandal, Gaurav Siddharth, Pawan Kumar, Myo Than Htay, Shaibal Mukherjee, Impact of Interfacial SiO<sub>2</sub> on Dual Ion Beam Sputtered Y2O<sub>3</sub>-based Memristive System, *IEEE Trans. Nanotechnology*, **19**, 332-337 (2020).
- 7) Mangal Das, Amitesh Kumar, Biswajit Mandal, Myo Than Htay, Shaibal Mukherjee, Impact of Schottky Junctions in the Transformation of Switching Modes in Amorphous Y2O<sub>3</sub>-based Memristive System, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **51**, 315102 (2018).
- 8) Mangal Das, Amitesh Kumar, Rohit Singh, Myo Than Htay, Shaibal Mukherjee, Realization of Synaptic Learning and Memory Functions in Y2O<sub>3</sub> based Memristive Device Fabricated by Dual Ion Beam Sputtering, *Nanotechnology*, **29** (5), 055203 (2018).
- 9) Amitesh Kumar, Mangal Das, Vivek Garg, Brajendra Singh Sengar, Myo Than Htay, Shailendra Kumar, Abhinav Kranti, Shaibal Mukherjee, Forming-free high-endurance Al/ZnO/Al memristor fabricated by dual ion beam sputtering, *Appl. Phys. Lett.*, **110** (25), 253509 (2017).
- 10) 永岡千枝, ミヨー タン テイ, 橋本佳男, 陽極酸化法によるメモrista 向け酸化モリブデンの作製と評価, IEICE Tech. Rep., CPM2022-45, **122** (231), 33-36 (2022).
- 11) Hideki Masuda and Kenji Fukuda, Ordered Metal Nanohole Arrays Made by a Two Step Replication of Honeycomb Structures of Anodic Alumina *Science*, **268** (5216), 1466-1468 (1995).

# 研究室紹介

## 工学部のバイオ系研究室として (野崎研究室)

物質化学科 准教授 野崎 功一



### はじめに

野崎研究室(酵素化学研究室)は、2015年に始まり今年でちょうど10年目を迎えます。大学院生6名、学部4年生6名からなる計12名が所属しており、微生物由来の酵素について基礎と応用の研究をしています。本稿では、工学部でバイオ系の研究をする醍醐味と最近の研究内容について紹介します。

### 工学部でバイオ？

工学部の物質化学科には3つのバイオ系研究室があります。よく「他学部のバイオと何が違うの？」と質問されますが、「我々は製品やものづくりに直結した基礎と応用研究をやっています」と答えています。本学部ではレアで少人数のグループですが、工学部は基礎研究よりも応用研究というイメージからか、県内外の食品・化学系企業様から多くのご相談や共同研究のご提案をいただいております。その中でも私は生体触媒である「酵素」の研究をしています。酵素は食品製造や医薬品、洗剤や化粧品、燃料製造などに広く利用されており、穏和な条件で副反応がなく、かつ効率的に化学反応を進めることができます。我々の学問のベースは化学と生物です。しかし、物質化学科の学生の中で高校時代に生物を履修してきた学生はごく少数であり、学科の専門7科目と1つの学生実験によってバイオの基礎を修得してもらっています。バイオ系の実験の難しさ、言

い換えればその面白さは、複雑な生命システムを科学的に明らかにすることにあります。すでに完成した生命体があり、それを理解し応用することは、他のものづくりの研究とは明らかに違った考え方が求められます。生命現象の完全な解明には膨大な時間が必要です。できるかどうかはわかりません。その一部ではありますが、学生は研究室に在籍中のたった数年間でまとまった結果を出す必要があります。大きな期待と重いプレッシャーの中で研究を進めています。ただし、学生の若さと適応能力は素晴らしく、新4年生でも夏休みを過ぎた頃には、普通に専門的な研究の話をするようになります。

### バイオの研究：微生物の気持ちになりなさい

と、私は学生によく言います。ある学生が微生物を培養して酵素を生産させる実験をしていました。マニュアル通りに実験しても酵素ができません。詳しく聞くと、「直前まで冷凍保存していた菌を直接培養した」と言うのです。私「もし、あなたがその微生物で冷たいところで気持ちよく眠っていたら、いきなり酵素を作るかい？」学生「絶対に作らない」。我々の実験対象は生き物なので、他の実験にはない特別な配慮が必要なのです。以後、この学生は培養している菌を毎日観察しに行くようになりました。増殖具合や匂い、色を確認して、ペットのようにかわいがってくれています。

「酵素は刺し身だと思って扱いなさい」これもよく言います。私「一週間も冷蔵庫に放置した刺し身を食べるのかい？」長期保存するなら急速冷凍して、解凍もドリップが出ないようにしないと食べられたものではありません。酵素は刺し身と同じで鮮度が大事です。放っておくと徐々に活性が下がっていくし、ナマモノなので腐ります。

### バイオ系のプレゼンテーション

私の研究室で力を入れている指導の一つにプレゼンテーション(研究成果発表)があります。研究室



2023年度卒業式での集合写真



学生実験で3年生を指導する大学院生

内の発表会>学会発表>生物系研究室の合同発表会>卒論発表会>修士論文発表会>大学院入試のプレゼン。実はこの順番でバイオの専門家が少なくなります。100→0にです。それは、我々は化学系の学科の中ではレアな存在だからです。つまり、他の研究分野と違って、うちの学生は時と場合に応じた様々なスタイルでのプレゼンテーションを経験します。例えば、専門用語の使い方や実験方法の説明など、聞き手の状況をはっきりさせてから発表資料を作る必要があるのです。これらの経験は、研究だけでなく、就職活動や仕事、人間関係を構築する上でも大いに役立っていると考えます。

### 基礎研究：新規な酵素を探し出す・スーパー酵素を作り出す

これまでに見つかった微生物は約1万種類、未発見の微生物は数100万種類にもなると推定されています。また、1つの微生物には数千種類もの酵素が存在することから、酵素の総数はざっと100万×5,000種類です。この中には、我々の生活を豊かにしてくれる未知の酵素がたくさんあるはずですが、これらを見つけ出してスポットライトを当てるのが我々の仕事です。現在は遺伝情報データベースやDNAの化学合成技術、PCRなどの遺伝子増幅技術を活用することで、微生物が手元になくともそのタンパク質を遺伝子組換え技術で作ることが可能です。また、DNA配列を人工的に書き換えることで望ましい性質の酵素を作ることもできます。これまでに、我々はこのような技術を使用して、微生物

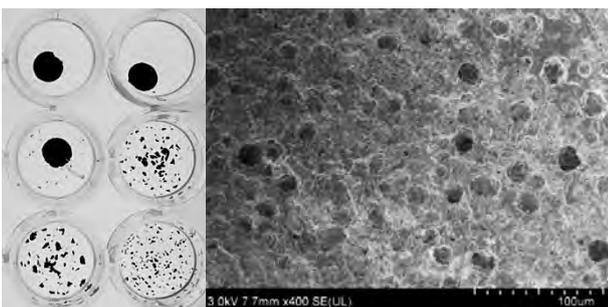
由来の各種バイオマス分解酵素とその性質を改変した酵素を150種類以上作り出してきました。バイオマス分解酵素、特にセルラーゼは複数の種類の酵素の組み合わせによって高い分解力を発揮します。手持ちの酵素の数が増えると、セルロース分解における個々の酵素の役割を明らかにできますし、それぞれの酵素がセルロース分解全体に及ぼす効果を正確に評価することも可能になります。このようにして、反応のデメリット（安定性が低いあるいは反応の律速）になっている酵素を見つけ出し、その性質を改良することで反応効率を高めることが可能になります。

### 応用研究：生分解性プラスチック分解酵素

農業用シート（生分解性マルチシート）は、環境負荷の低減や省力化、廃棄コストの削減に大きく貢献できる製品です。しかし、自然環境における分解速度の調節は困難で、予期せぬ早期分解や分解の遅延が発生する場合があります。我々は、これらの原因となる土壌微生物や分解酵素を調査しています。例えば、通常2~3ヶ月で分解するマルチシートは、土壌微生物を完全に死滅させると全く分解しなくなり、分解酵素を散布すればたった1日で分解することが可能です。これらをうまく制御することで製品の特性を最大限に活かした使用方法を提案することが可能になります。

### おわりに

心折れるときも、忙しいときも、いつも私のモチベーションを高めてくれるのは学生が真剣に実験に取り組む姿です。単に優しく楽な研究室ではなく、我が子を送り出した親御さんの気持ちになって社会で活躍できる人材を育てることが目標です。そして、私も共に成長できたら幸いですと考えています。



酵素で分解したマルチシート（左）とその電子顕微鏡写真

# 磁気記録から生まれたスピントロニクス (劉研究室)

電子情報システム工学科 教授 劉 小晰



## 1. はじめに

文字に残された磁気現象に関する記述は紀元前400年に上る【~400BC《鬼谷子》：“其察言也、不失若磁石之取针、舌之取燔骨”】。天然磁石を針状に磨くと南北指す指向性を用いた指南針の作成方法及び地磁気の磁気偏角に関する詳細な記述も930年以上の歴史がある【沈括，《夢溪筆談》，1086年-1093年】。しかしながら、学理的に微細な針状磁石の磁界中の振る舞いを徹底的に研究し、デジタル社会の「情報倉庫」でもあるデータセンターの主記憶装置のハードディスクドライブ (HDD) の記録密度向上に導いた学術論文発表されたのは1948【E. Stoner, E. Wohlfarth, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 240 (826), 599-642. (1948)】年のことでした。

筆者は大学の卒論テーマを悩んでいた時に、当初中国の大学の図書館に見つけたのが、恩師の信州大学名誉教授・2019年春瑞宝中綬章受章者(故)松本光功先生の昭和52年に発行された【磁気記録、共立出版株式会社】の中国語訳本でした。大学院の時に、松本先生と恩師信州大学名誉教授森迫昭光先生の共著の【磁気記録工学、共立出版株式会社、1990年】を勉強した。HDDの技術の核心は磁気ヘッドに集約している。1990年代に、磁気の本質である電子のスピンの認識が深まって、磁気ヘッドの読み出す分解能を飛躍的に向上させたのがスピンの量子効果、すなわち、巨大磁気抵抗効果、トンネル磁気抵抗効果である。

近年、研究室はスピンの磁界、電界、電流、応力、熱との相互作用に集中し、特にスピンの高速・低消費電力のメモリ、論理ゲート、高感度の磁気・電流センサーへの応用に関する研究を行って来た。

## 2. スピントロニクスに関する研究

内閣府が推進するSociety5.0と地球温暖化対策の両立には、情報ストレージ及び演算処理のデバイ

スの超低消費電力化・超高速化・高集積化の実現が必要不可欠である。しかし近年高集積化によりトランジスタのサイズは基本的な障壁となる原子サイズまで微細化され物理的な限界に近付いており、いわゆるムーアの法則の限界が示唆されている。

この様な中、これまでの電子の電荷の自由度を利用したエレクトロニクスであったシリコンベースのCPU・メモリに代わる全く新しい技術として、不揮発性の電子のスピンの自由度を論理演算・メモリに応用し、超低消費電力・超高集積化・不揮発性の機能や性能を持つデバイスを実現しようとする研究が世界中で活発化している。学術的にはスピントロニクスという新しい学術分野が生まれている【S. A. Wolf, et al., *Science*, 294, 1488-1495 (2001)】。

スピントロニクスの中で、情報ストレージ・新規計算への応用に、特に期待されるのが磁気スキルミオンとそれらを代表するトポロジカルスピントロニクスチャである【A Fert, et al., *Nature Reviews Materials* 2, 17031 (2017)】。その特長は、以下の通りである。

特長①：トポロジカルスピントロニクスチャは伝統的な磁界、電流で制御可能と共に、キラリティー(掌性)的にスピンの方向が変化するため、電界でトポロジカルスピントロニクスチャを制御できるのが大きな特徴である。電界駆動では電流のジュール熱が発生しないため、より効率的な超低消費電力駆動手法として期待できる。

特長②：磁気スキルミオン、磁気渦などトポロジカルスピントロニクスチャのサイズは数nm程度で極めて小さくすることができる。しかも、安定状態間に高いエネルギー障壁があるため、同じサイズのスピンの平行配列の単磁区状態より安定し、高密度なメモリ、論理回路への応用が期待できる。

研究室はこれまで、スピントロニクスの分野では、世界各地の研究者と共著して、*Nature Communications*, *Advanced Materials*, *Nano Letters*, *Physical Review Letters* などインパクトの高い Web of

Science (WoS) Core Collection 学術論文誌に論文 180 本以上を掲載された。これらの論文は他の研究者から 5000 回以上引用され、WoS の検索結果より、これまで掲載された論文の内、Top1%論文 2 本、Top 5%論文 12 本、Top 10%論文 36 本と質の高い論文を掲載している。

### 3. おわりに

磁気記録からスピントロニクス分野では、基本的な試料作製に関して、金属・酸化物多層薄膜の堆積、微細素子の形成ための微細加工、薄膜の電気特性、磁気特性、微細素子のスピン配列（磁区構造）を観察、計測など設備が必要と共に、効率的に研究目標達成するための計算機シミュレーションも必要になる。研究室では、これらの試料作製、評価に必要な設備を有するとともに、中央演算処理装置（CPU）より桁的に早いグラフィックス・プロセッサ・ユニット（GPU）を用いたスピン素子の動作をシミュレーションする環境も整えている。研究室は積極的に新規素子作製装置、評価装置を開発している。当研究室の学生の皆さんには、これらの研究を通じて、卒業・修了後も社会で活躍できるための研究・技術力を身に着けるように願っています。

# 持続的なまちづくり (森本研究室紹介)

水環境・土木工学科 助教 森本 瑛士



## 1. はじめに

私はコロナ初年度の2020年10月に信州大学に着任しました。研究室学生の指導を行うようになったのは翌年の2021年4月からとなります。現在は博士課程1名、修士課程7名、学部生3名、研究生1名の計12名の学生と研究をしています。研究室の学生は自分たちの研究室のことを都市計画研究室と呼んでいる通り、主に持続的なまちづくりに向けた都市計画に関する研究をしています。本稿ではその中から2つのテーマを取り上げてご紹介します。

## 2. 研究背景

人口減少に応じて都市の形を小さくしようというコンパクトシティが多くの方で目指されています。これはインフラの維持管理コストの低減や環境負荷低減、健康増進、地域活性化など様々な分野に好影響を及ぼすとされているためであり、持続可能なまちをつくるためには欠かせないパーツの一つです。実際に各市町村は都市計画マスタープランを定め、将来の都市構造を描いてきました。近年では2014年に市町村が立地適正化計画も策定できるようになり、その計画の中では都市機能誘導区域や居住誘導区域と呼ばれるエリアを地図上に正確に明示することができます。このように具体的にコンパクト化の範囲を描き、それに向けて補助金等を使いつつ施設や人口をゆるやかに誘導することで将来のコンパクトシティに向けた実現を目指しています。今後は人口減少に応じて施設の撤退も予想されますが、これらエリアは施設や居住環境の維持が目指されるため、他地域に比べるとこのエリアに住んでいる方が、将来の生活利便性が悪くなりにくいということでもあります。

しかし、それら都市機能誘導区域や居住誘導区域の設定方法やその見直しの際の評価基準は市町村の判断に委ねられており、明確な基準がないのが現状です。そのため、いくつかの問題が生じているのですが、本稿では①災害危険性の高いエリアが誘導区

域に設定している市町村がある点、②見直しの際の評価基準（KPI：重要度評価指標）として使われることの多い人口の維持が困難である点、の2点に絞ってご紹介します。

## 3. 研究内容

### 3-1. 災害リスクを踏まえた誘導区域設定

誘導区域設定方法の明確な基準がなかった結果、居住誘導区域内に浸水想定区域を含む自治体が約9割に及びました。これらや激甚化する災害を受けて2020年には災害レッドゾーンの原則除外の対象範囲を広げ、災害イエローゾーンは防災指針を作成し対策するなどが各市町村に求められるようになりました。これを受けて災害レッドゾーンを除外する市町村が増えたものの、災害イエローゾーンについては除外が進んでいないのが現状です。今後人口減少するのであれば、それら危ない地域に人々を住まわせないようにすることが重要です。しかし、誘導区域から災害リスクを除くことのメリットに関する客観的データが不足しているという問題があると考えています。

そこで、誘導区域から災害リスクを除くことのメリットを示すことで誘導区域指定による災害リスク低減に向けた知見を得ることが研究①の目的です。2019年東日本台風(19号)にて実際に誘導区域で被災のあった千曲川流域の自治体を対象に分析を実施しました。その結果の一部を図1に示します。図から分かるように人口は全体的に減少傾向にあるものの、被災のなかった都市機能誘導区域や居住誘導区域では人口が増加するなど誘導区域設定の一定の効果があることが示唆されます。一方で被災のあった場合、誘導区域であっても人口は減少しています。これは地価でも同様の傾向を示しました。このことから人口や地価の維持という観点からも災害リスクを除外することのメリットが示せました。

ただし、全ての地域で災害リスクからの撤退は難しく、今後はインフラによるハード対策や避難前提

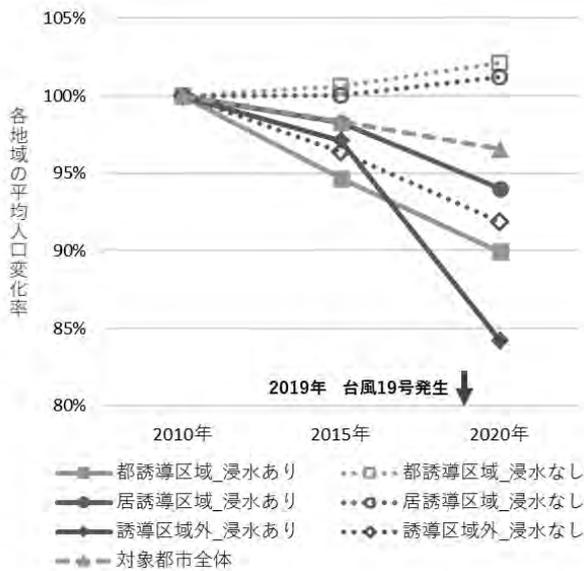


図1 浸水被害前後の人口変動

のソフト対策などを複合的に検討していくことが考えられます。

### 3-2. 都市機能誘導施設を維持するための人口密度

立地適正化計画は5年に1度見直しを実施しますが、その際に居住誘導区域内の人口の変化などを評価するとともに、今後の人口の目標値を設定します。近年では人口維持が困難であることから、現状より低い値を目標人口にしている市町村が存在します。これは日本全体として人口減少しているため、仕方のないことなのですが、今後の見直しの度に目標人口を現状より低くし続けるといつかは施設が撤退する人口ラインを下回り、そもそも都市の維持ができなくなる恐れがあります。しかし、各施設の商圏人口や、市町村規模レベルでの施設と人口の関係は明らかになっているのですが、都市機能誘導区域というエリア全体で見た時の維持が出来る人口の最低ラインが分かっていないのが現状です。

そこで、都市機能誘導区域内にある施設を維持できるための人口規模を明らかにすることで、持続的な都市運営に向けた知見を得ることが研究②の目的です。まずは都市機能誘導区域の施設とそれを利用することが想定される居住誘導区域内の人口の関わりに着目しました。具体的には都市機能誘導区域内に種類別の各施設が存在する場合の居住誘導区域内の人口を算出することで、一体どの程度の人口が存在すれば各施設が立地しているのか分析しました。分析結果の一部を抜粋して図2に示します。これらの分析を福祉機能などでも実施し、各機能が揃う最低限の人口規模を算出すると約7,000~25,000人、人口密度にすると3,000~5,000人/km<sup>2</sup>が必要なことが明らかとなりました。つまり各市町村はこの人口規模を下回らないよう努めていくことが求められます。

ただしこれらは中核市レベルでの分析であり、もっと人口の少ない自治体も対象に入れて分析するともっと人口の少なくても維持できている場合があることも現在の研究で示唆されています。今後は施設の相互関係も含めて分析していく予定です。

### 4. おわりに

今回は2つのテーマを取り上げご紹介しましたが都市にはまだ沢山の課題があります。それらは複数の分野、複数の自治体に絡んだ問題も多く、非常に難しいのが都市計画です。局所的・短期的な損得ではなく、広域的・将来的な、いわば地球全体の将来のために、幅広い視点から今後も研究を学生とも協力して進めてまいります。



図2 累積比率による立地確率が50%及び80%にあたる居住誘導区域人口

# 計算材料科学研究室 (松中研究室) の紹介

機械システム工学科 教授 松中 大介



## 1. はじめに

計算材料科学研究室は2015年からスタートし、今年度で10年目を迎えています。現在は大学院修士課程7名と学部4年生5名の学生が在籍しています。スタッフには澁谷陽二特任教授(大阪大学名誉教授・長崎大学客員研究員)に教育研究に参画していただいているほか、事務補佐員1名にもご協力いただいています。

## 2. 研究内容

当研究室では材料で生じる多様なマルチスケール・マルチフィジックスな現象を解明し、新しい機能やより高い性能を持つ材料を設計することを目指しています。例えば、構造用材料において変形や強度は重要な力学的機能ですが、そのメカニズムには転位などの原子スケールの格子欠陥の理解が必要になります。また、複合材料や電子デバイスなどでは異なる材料間の界面が必ず含まれ、界面での化学結合や原子配列を明らかにすることが重要です。私たちは電子・原子レベルの計算科学手法を用いて材料物性の微視的なメカニズムの研究を行っています。研究テーマによっては、機械学習・データサイエンス的手法、ナノインデンテーションやマイクロ力学試験などの実験も行っています。以下に当研究室で取り組んでいる研究テーマのうちの2つを簡単にご紹介します。

## 2.1 マグネシウム合金の変形機構の解明

今日の社会に不可欠の輸送機器である自動車には十分な安全性の確保に加えて省エネルギー化やCO<sub>2</sub>排出削減などが求められており、車両構造の健全性や製造コスト低減など様々な要件を満たしつつ軽量化を実現することが重要な課題になっています。マグネシウム(Mg)は実用金属材料中で比強度・比剛性が高いことから、自動車だけでなく航空機などの輸送機器への適用による軽量化・省エネルギー化に対する期待が高まっています。しかし、室温域における延性や靱性が低く、成型性が悪いことや、耐食性、耐クリープ性が低いことなどがMg材料の幅広い実用化のための課題として残っています。その中で、YやGdなどのレアメタル元素を微量添加したMg合金において延性が著しく改善することが注目されていますが、そのメカニズムは未だ十分に解明されていません。

本研究では、Mg合金の力学的性質を原子レベルから理解し、合金元素の効果を明らかにすることによって、効果的な合金元素の選択や材料組織の制御など材料設計に関する指針を得ることを目的としています。例えば、分子動力学法(MD)解析から各すべり変形・双晶変形の微視的な解明を行ってきました。I<sub>1</sub>型積層欠陥からのc+a転位の生成挙動の解明(図1)や、双晶転位のエネルギー論的評価などがあります。さらに、第一原理計算によって積層欠陥、双晶境界、表面など力学的性質に関係する種々の欠

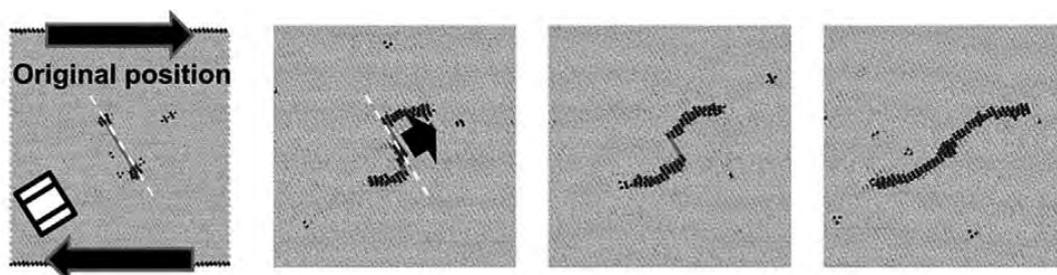


図1 I<sub>2</sub>型積層欠陥に対するせん断変形 MD 解析 (Yoshikawa, Matsunaka, Comp. Mater. Sci.179 (2020) 109644)

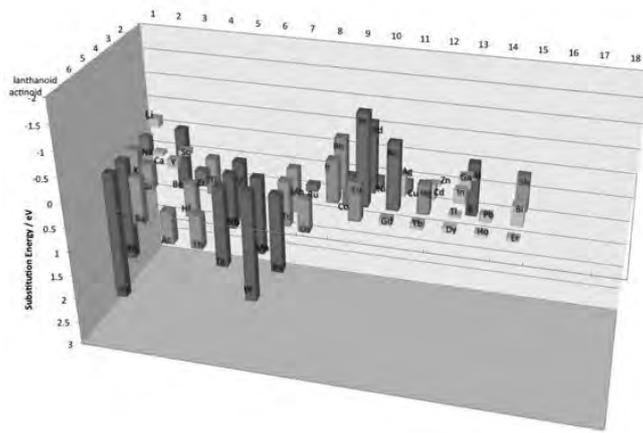


図2 Mgにおける合金元素効果の第一原理計算

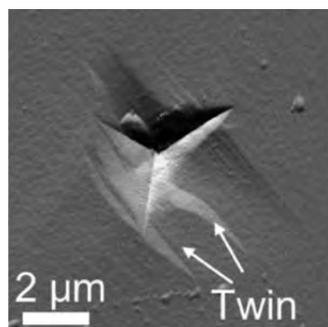


図3 ナノインデンテーションによる変形双晶の形成  
(須藤、松中、染川、日本金属学会誌 第85巻(2021) 1-6)

陥に対する合金元素の影響を明らかにしてきました(図2)。最近では、原子レベルの計算科学と相性の良い微小スケールの実験力学も導入して変形挙動の解明を目指しています(図3)。

## 2.2 機械学習原子間ポテンシャルの開発

結晶性固体材料の強度・延性・破壊靱性などの力学特性において転位やき裂などの欠陥の挙動が主要な基礎的メカニズムであり、実験的に直接観察が容易でない材料内部の欠陥挙動を調べるためにMDをはじめとする原子シミュレーションは強力な研究手法になっています。しかし、MDに用いられる従来タイプの原子間ポテンシャルは、その関数形を仮定しているために、結晶構造と異なる乱れた原子配列や異種原子間相互作用などに対して精度が限定的であるという課題がありました。近年、計算機性能の向上と機械学習技術の発展を背景として、多数の第一原理計算のデータをもとにして適用性の高い原子間ポテンシャルを開発する研究が世界的に行われています。本研究では、欠陥を解析対象とする場合に機械学習原子間ポテンシャルを開発する技術を確立し、第一原理計算精度で欠陥の振る舞いを明らか

にすることを目指しています。例えば、ポテンシャルの適用性の評価手法、不足データに関する原子モデルの生成技術、微小なエネルギー変化の弾性定数の安定的学習などを構築しています。その成果として、マグネシウムの各変形モードに対する合金元素効果を再現するポテンシャル、Si//GeやAl/Cuなどの異種材料界面系のポテンシャルについて高い精度を達成しています。

## 3. おわりに

当研究室には機械システム工学科の学生が配属されてきますが、マクロな連続体的描像に基づく機械工学分野の専門科目を学習した彼らにとって目に見えない材料内部の原子や電子は馴染みが少なく、最初は戸惑う学生もみられます。それでも、研究活動を進めていく過程で不足していた知識を習得していき、テーマに対する理解や計算結果への考察も深くなっていきます。そのような様子は教員としてうれしく感じますし、研究の進展に彼ら学生の研究活動が大きく貢献してくれていることに感謝しています。

# 伝統的な住環境の仕組みを 風工学から読み解く（南研究室）

建築学科 助教 南 健斗



## 1. はじめに

我々の生活において空気は必要不可欠なものです。そよ風が心地よいと感じることも、強風によって物が飛ばされることも空気が流れる「風」による現象です。南研究室では、風の流れをシミュレーションによって予想するCFD（Computational Fluid Dynamics）の技術を軸としながら、建物が密集する建築都市空間から広大な農村における風環境まで幅広く取り扱います。本稿では、宮城県北西部に位置する大崎耕土の伝統的な屋敷林である「居久根（いぐね）」の保全を目的とし、再現解析に基づき居久根による防風効果の定量化を行った研究についてご紹介します。

## 2. 東北地方の伝統的な屋敷林「居久根」

屋敷林は防風や日射遮蔽など屋外空間の環境制御や、木材の建材利用や落ち葉の燃料利用などの生活資材の確保等々、住居と人間の生活のなかで多様な関係性を持ちながら維持されてきた樹木群であると言えます。研究対象とする大崎耕土の居久根は、冬季の北西風や洪水被害の軽減を図って配置されたものですが、水田や水路と共に居久根が点在すること

で、独特な農村景観を形成しています（図1）。大崎耕土の居久根は、地域世帯数の約4割（24300戸）の住居で現存に至るまで維持されていると言われており、居久根による伝統的な文化は今でも人々の生活の中に強く根付いています。

### 2.1 樹木を含む流れ場における計算手法の検討

樹木（屋敷林）の防風効果を適切に再現するため、樹木を含む流れ場の計算手法について検討を行っています。近年、風環境の評価においては、平均風速だけでなく瞬間風速についても考慮する必要があると考えられています。CFD解析を用いた瞬間風速の予測では、乱流モデルにLarge-eddy simulation（LES）を用いた解析手法が研究分野を中心に用いられています。乱流は大小様々なスケールの渦により構成されており、LESでは、流れを代表するような大きなスケールの渦を直接計算し、小さなスケールの渦のモデル化を行います。また、CFD解析により樹木を含む風環境予測を行う場合、樹木は葉や枝など非常に小さな要素で構成されているため、これらを再現できる小さな計算格子を作成し、計算を行うことは困難を極めます。そこで、樹木に対応す



図1 大崎耕土の農村景観

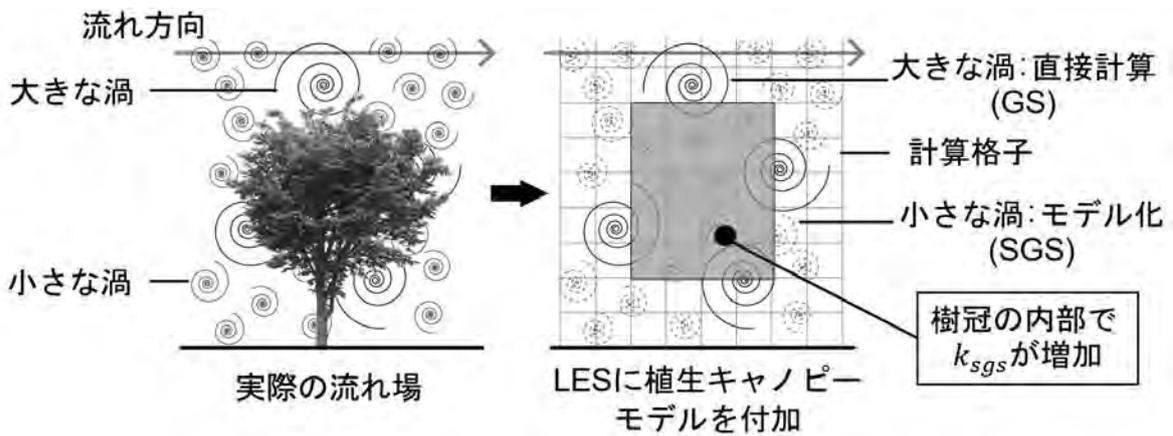


図2 LES (Large-Eddy Simulation) の植生キャノピーモデル

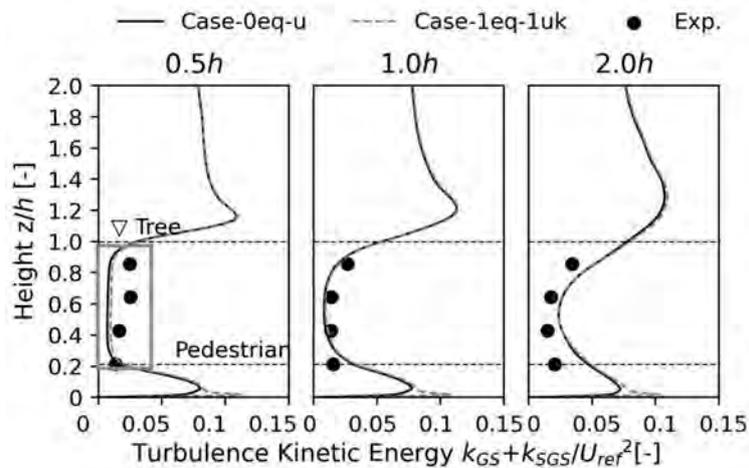


図3 乱流エネルギーの鉛直分布の比較

る格子には、植生キャノピーモデルと呼ばれる植生による影響を流体の基礎方程式に付加する手法がよく用いられています。植生の流体力学的影響は、抗力だけでなく、植生を通過する際に乱流渦がより細かいスケールに分解され、Subgrid scale (SGS) の乱流エネルギー  $k_{SGS}$  が増加する効果を考慮する必要がありますとされています(図2)。本研究では、樹冠での  $k_{SGS}$  の増加を考慮した1方程式モデルと、抗力項のみを考慮したSmagorinsky型の0方程式モデルを用いて植生のある流れ場の再現解析を実施し、歩行者空間の流れ場の特徴から、0方程式型の植生キャノピーモデルの歩行者空間における風環境予測への適用性の検討を行いました。

日本建築学会「都市の風環境予測のためのCFDガイドブック」に掲載されている、樹木周辺の流れのベンチマークケースを対象に解析を行いました。図3に乱流エネルギーの鉛直分布の比較を示します。樹木高さ  $h$  に対し、樹木後方  $0.5h$ 、 $1.0h$ 、 $2.0h$  の位置における乱流エネルギーの鉛直分布を示しています。樹木の近傍にあたる  $0.5h$  では、0方程式

モデルの Case-0eq-u と1方程式モデルの Case-1eq-1uk で乱流エネルギーに若干の差が生まれました。一方で、この乱流エネルギーの差によって、平均風速および瞬間風速へ与える影響はほとんどないことが確認できました。以上より、利便性の高い0方程式モデルを用いた場合でも、解析結果に与える影響が小さいことを明らかにしました。

## 2.2 再現解析に基づく居久根の防風効果の定量化

一軒の住居と屋敷林が独立して配置される散村形態の住居(宮城県大崎市)を対象に分析を行いました。居久根は冬期の卓越風向である西北西の強風から居住空間を守るように、敷地の西側及び北側に配置されています(図4参照)。西側の居久根は、高木と低木が植えられており、高木はいずれもスギとなっています。西側の居久根は地面から7m程度まで竹が高密度で分布しており、スギの枝下から敷地に風が流入しない仕組みとなっています。北側は、アジサイやツバキなど様々な樹種の低木と高木のスギで構成されています。

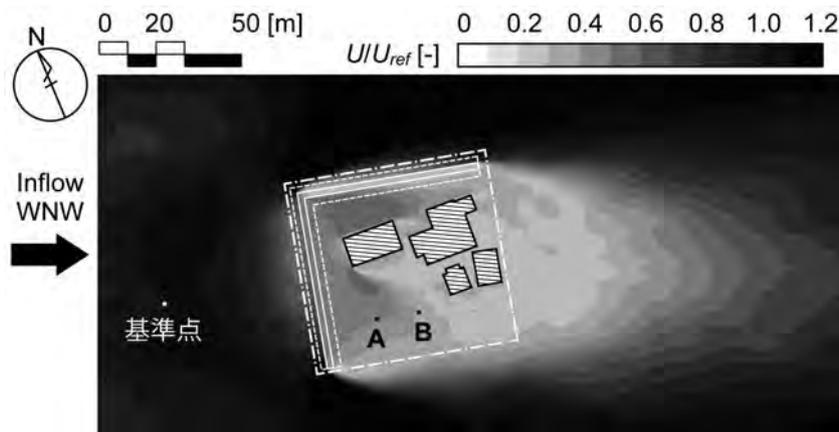


図4 歩行者高さの平均風速分布  
(図中の実線は低木の断面、点線は高木、斜線部は建物の断面、一点鎖線は敷地境界を示す)

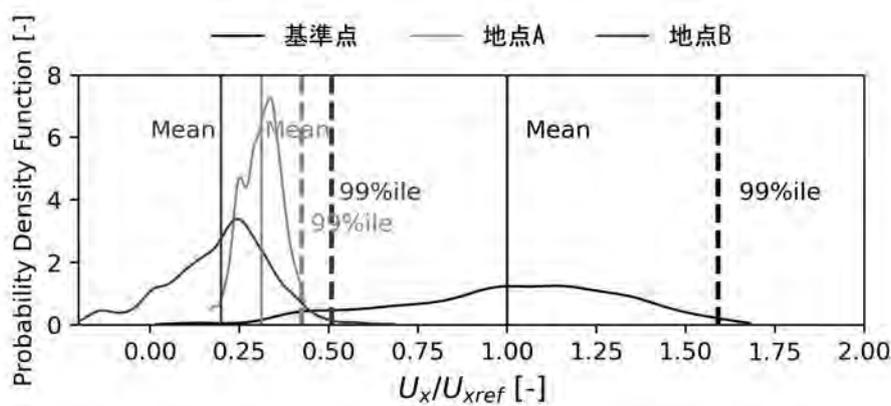


図5 歩行者高さにおける風速の確率密度関数

居久根および住居を解析対象としてLESに基づく数値解析を実施しました。風向は、冬季の卓越風向である西北西を対象としました。住居の形状や居久根の配置は、ドローンを用いて敷地全体を包含するような182地点からの写真撮影を行い、これらの画像から作成した数値表層モデルを参考に、3DCADで再現しました。居久根のある領域では、前節で検討した植生キャノピーモデルを与えました。葉の付き具合である葉面積密度について、低木ではタケ、高木ではスギを想定しそれぞれ異なる値を与えています。

図4に歩行者高さ(1.5 m)の平均風速分布を示します。諸量は、居久根から50 m風上側の地点で高さ1.5 mの基準点における平均風速  $U_{ref}$  で無次元化しました。敷地内の無次元風速はおおむね0.3以下となっており、居久根により風速が1/3程度に低減されており、風速低減効果は観測結果とも概ね一致していました。また、居久根による弱風域は敷地全体を覆うように分布しており、敷地後方にも弱風域が形成されていました。

図5に歩行者高さにおける風速の確率密度関数を

示します。解析の確率密度関数から極まれに発生する強風に対する防風効果を分析しました。基準点は低風速から高風速まで幅広く値が分布しており高風速側の分布が多くなっていました。一方で、地点Aおよび地点Bでは、弱風側に確率密度関数が大きく偏っており、極まれに発生する強風である風速の99%ile値では、基準点と比較して、およそ1/3程度に低減されていました。従って、居久根の後方では、平均風速だけではなく突風の大きさも1/3程度に低減されていることが明らかとなりました。

### 3. おわりに

人々の生活様式や世帯構成の変化に伴い、地域で作られてきた伝統的な景観や環境的な仕組みは全国各地で変化を余儀なくされています。南研究室では、伝統的に作られてきた集落やその住環境について再評価し、保全や再利用のための環境的効果の定量化に取り組んでいきます。研究を通して、その効果の一般化や工学的な評価を行うことで、伝統的な仕組みから学び、知見や技術を将来へ繋いでいきたいと考えています。

本書の内容の一部あるいは全部を無断で複写（コピー）することは、法律で認められた場合を除き、著作者および本会の権利の侵害になります。複写とそれ以外の許諾（著作物の引用、転載、翻訳等）に関しては、（一財）信州大学工学部若里会へお問い合わせください。

「技報 こまくさ」 第 22 号 令和 6 年 10 月発行  
(非売品)

発行者 一般財団法人信州大学工学部若里会  
〒 380-8553

住 所 長野県長野市若里 4 丁目 17-1  
TEL (026) 266-8209 (FAX 共有)  
E-mail : kdoso@wakasatokai.jp

印刷・製本 株式会社アイデスク  
〒 381-0025 長野市北長池 1263-1  
TEL (026) 244-4551

技報  
こまくさ  
KOMAKUSA

一般財団法人 信州大学工学部 若里会

