

2024 年度 同志社大学ハリス理化学研究所研究発表会
講演予稿集

日 時 2024 年 11 月 26 日 (火) 12:30~16:30
場 所 ホテルグランヴィア京都

目 次

○印は講演者 (敬称略)

◆ 部門研究/研究助成金 研究成果発表 ◆

【栄華の間】

How do Men Describe Their Childhood and Early Adolescent Sexual Contacts with Older Partners?	○Philip TROMOVITCH	1
月レゴリスのその場資源利用研究 (ISRU)	○鈴木 祐太	6
生体内で有毒ガス成分を選択的に吸着する人工ヘモグロビン化合物の開発	○北岸 宏亮	10
経皮吸収における異種の共融混合物の比較検討	○田原 義朗	13
下部臨界現象を示すイオン液体のダイナミクスの非線形分光法を用いた検討	○木村 佳文・島田 皓平・寶亀 桃子 藤原 正季・赤井 里衣・大澤 浩二	16
機械学習を活用したマグネシウム合金の腐食メカニズムの解明	○湯浅 元仁・須田 昌貴・宮本 博之・染川 英俊	22
スケールフリー性を考慮した反復的グラフ走査を含む問合せ最適化	○波多野 賢治・楠 和馬	26

【金葉の間】

日本人の環境意識と環境配慮行動の特徴に関する実証分析	○鄭 躍軍	32
組織の心理的安全性と自己成長、自己効力感、幸福感の関係	○余語 真夫	38
科学コミュニケーション手段としての日本のテレビ放送研究	○榎 太一・阿部 康人	44

非線形シュレディンガー型方程式の初期値問題の適切性	○田中 智之	47
免疫逃避を支える新たながん細胞代謝経路の発見	○和久 剛	49
腱への力学的負荷が除神経による筋萎縮に及ぼす影響	○高倉 久志・土屋 吉史	54
番組視聴による知識量変化から見る日本の地上波テレビの 科学コミュニケーション効果分析	○榎 太一・阿部 康人	59

How do Men Describe Their Childhood and Early Adolescent Sexual Contacts with Older Partners?

Philip TROMOVITCH*

(Received September 5, 2024)

The *Multinational Life Experience and Personality Project* (MLEPP) is collecting data for multiple investigations on human sexuality from general population samples of adults aged 18 to 59 in several countries. The initial phase of the MLEPP questionnaire asked respondents if they had experienced any sexual contacts, with a partner five or more years older than themselves, prior to puberty as well as in the period from puberty to age 16. This article presents analyses of descriptive data from participants regarding their early, willing sexual experiences, exploring what adjectives they associate with the experiences. To be included in these analyses they had to meet four criteria: the respondent was male; they reported having a willing sexual contact during either or both of the noted time periods; they did not report any unwanted, forced, or coerced sexual contacts in those time periods; they chose to answer the relevant follow-up question. A total sample of $N = 195$ Japanese and U.S. men answered the follow-up question, making 880 selections in total. These men overwhelmingly endorsed positive descriptors for their experiences. It is concluded that in general, men find their early, willing sexual contacts with older partners to be pleasurable, satisfying, and fun -- negative associations are uncommon.

Keywords : childhood sexual experience, adolescent sexual experience, feelings, labeling, MLEPP

1. Introduction

The *Multinational Life Experience and Personality Project* (MLEPP) is comprised of a large, multiphase, multinational set of studies. The MLEPP is collecting cross-sectional data in waves on a funds-available basis from adults aged 18 to 59; these data are combined to form larger samples for analysis. The first phase of the MLEPP started data collection in 2014 and completed it in 2017. Data was collected from more than 1000 men in the United States and from more than 1000 men in Japan. Preliminary analyses of the demographic data suggest that the samples are representative of their respective nations. For more information on the methodology and representativeness of the MLEPP see Tromovitch (2015)¹.

The MLEPP questionnaire asked respondents about the occurrence of childhood (i.e., prior to puberty) and early adolescent (i.e., puberty to age 16) sexual contacts with partners five or more years older than themselves at the time of the experience. Participants were asked about three types of sexual contact: those that were willingly engaged in, those that were unwanted but where no force or coercion was used, and those where force or coercion was present (see also Tromovitch, 2017)². Male participants who indicated they had a willing sexual contact and who reported no unwanted, forced, or coerced experiences were asked a follow-up question to elicit their feelings and associations with regard to their willing sexual experience(s). The English version of this follow-up question read "Which of the following adjectives do

* Harris Science Research Institute, Doshisha University, Kyotanabe City, Kyoto 610-0394
Telephone: +81-774-65-6671, E-mail: ptromovi@mail.doshisha.ac.jp

you associate with your sexual experiences prior to age 16, with someone who was 5 or more years older than you? Please check all that apply." The participants were then presented with 20 adjectives and could select any number of these descriptors.

To ensure that there would be no order effects, the 20 adjectives were displayed in a random order for each respondent, hence it is unlikely that any two respondents were presented with the descriptors in the same order.

2. The Descriptors

Ten positive descriptors (e.g., "happy", "wonderful", "affectionate") were presented and ten negative descriptors (e.g., "depressing", "miserable", "unhappy") were also presented. In creating the list of adjectives, the author attempted to create a balanced level of positive and negative descriptors where each might reasonably be expected to be associated with sexual experiences.

In retrospect, the author considers two of the negative descriptors that were used to be problematic, given the goal of the question. The purpose of the question was to elicit the respondents' feelings about the event due to the nature of the experience itself, however, two of the descriptors could reasonably be associated with the experience but be due to the larger society/culture in which the experience took place. This author views the most problematic term to be "scary" because the experience could have been completely positive yet the respondent may have been scared that their parents would find out about the sexual experience/relationship, and thus although "scary" is associated with the experience, it may not be due to the nature of the experience itself (in fact being due to the cultural attitudes or legal structures of the society where the respondent grew up). The other problematic term was "victimized". The author views this term as potentially problematic because again, a completely positive sexual experience could, in retrospect (i.e., when answering the

MLEPP questionnaire), be seen through a societal lens that views all intergenerational sexual contacts as inherently abusive and thus victimizing. A historical overview of societal attitudes toward the early sexual contacts of boys and young men with older partners shows a great deal of acceptance of such relations, however, there are also time periods and societies wherein such contacts are reviled; in modern times, both Western and Westernized cultures usually view such experiences negatively. Future research of this type should avoid such terms, or in some way ensure that the researcher can clearly distinguish the source of the association (i.e., the experience itself versus the society/culture in which it took place).

3. Valance of Selected Descriptors

The "average" respondent selected 4.5 out of the 20 possible descriptors. Across the 195 respondents, 880 descriptors were selected in total.

Over 92% of the respondents selected more positive descriptors than negative descriptors, with over 81% of the men exclusively selecting positive adjectives to describe their experience of having a sexual contact with an older partner prior to age 16 (see Table 1 for a more detailed breakdown). Both the median and modal experience appears to have been exclusively positive, based on these data.

4. Subgroups of Respondents

Because willing sexual contacts prior to puberty might be experienced differently than the same contacts were they to occur in early adolescence, the respondents were asked about these two time periods separately. Thus, a respondent could report having only had childhood experiences, only having had early adolescent experiences, or they could report having had both (creating three possible subgroups per country).

No Japanese men reported having only willing childhood sexual contacts, 14 reported only having had early adolescent experiences, and 12 reported having had both. Thus 100% of those with willing childhood sexual experiences with older partners also had willing adolescent experiences with older partners. Further follow-up data were not collected hence it is not known if these later adolescent experiences were with the same partners or with different partners.

Seven U.S. men reported only having had willing childhood sexual contacts, 90 reported only having had early adolescent experiences, and 72 reported having had both. Similar to the Japanese men, over 90% of the men who had willing childhood sexual experiences with an older partner also had such contacts in early adolescence.

5. Similarity of Subgroups

An important question/issue to address for the present analyses is to determine to what degree the intra-country subgroups responded similarly to each other, for example, did respondents with only childhood experiences rank the descriptors in a notably different way than respondents who only had adolescent experiences? To address these questions, rank-order correlation analyses were employed.

For each subgroup, the frequency of selecting each descriptor was determined, then ranks were assigned (i.e., the most frequently selected descriptor received a rank of 20, the least frequently selected descriptor received a rank of 1; ties were handled by assigning the arithmetic mean of the relevant ranks). Pearson correlation was then used to assess the similarity of these rankings (cf. Spearman rank-order correlation).

Regarding the interpretation of the size of a correlation, Cohen³⁾ suggested that when a correlation reaches $r = .1$ it would be appropriate to call it "small", upon reaching $r = .3$ it could be labeled "medium", and if an $r = .5$ or more it could be categorized as "large"; this implies a "very large" designation starting at $r = .7$ as well

as the inherent "very small" designation for correlations below the $r = .1$ level. In the present author's experience, large and very large correlations almost exclusively occur when doing instrument development, for example, two items that were both designed to measure self-esteem might have a large correlation with each other, however, in typical correlational research large and very large magnitude findings rarely occur.

All of the possible intra-country pairs produced very large rank-order correlations, with the *smallest* being $r = .77$ (see Table 2). Because of the high similarity between rankings, the subgroups were merged to create country-level datasets and a rank-order correlation between the Japanese data and the U.S. data was performed.

The inter-country rankings were found to be very similar, producing a very large correlation ($r = .86$). Given the high degree of similarity, the data from both countries was combined for the primary analysis.

6. Rank-Order of the Descriptors

As previously indicated, the 195 respondents made a total of 880 selections from the 20 descriptors. The top 10 most frequently selected descriptors were the 10 positive descriptors, each being selected by 21.5% to 70.8% of the respondents. The 11th ranked descriptor, selected by 11.8% of the respondents, was the problematic descriptor "scary" (e.g., it is unclear if the experience was scary, or if the respondents selected *scary* due to fear that their sexual relationship would be discovered). The remaining 9 negative descriptors were each selected by less than 5% of the respondents. See Fig. 1 for a more detailed breakdown.

7. Conclusions

The data clearly show that regardless of country (Japan or the United States) or the age at which the sexual contact occurred (prior to puberty or between puberty and

age 16), willing sexual contacts with older partners are overwhelmingly viewed by men as positive experiences. The three most commonly selected descriptors, each selected by over half of the respondents, indicated that the experience was pleasurable, satisfying, and/or fun.

Although it has varied across time periods and cultures, in modern times many societies view sexual contacts between young people and older partners as being abusive, nevertheless, it is important to be aware that this is a label being assigned by a society/culture and does not correctly characterize the experiences of the people involved. Furthermore, using misleading terms such as "victimized" can lead people with such experiences to start to view themselves as victims, which can lead to nocebo effects wherein the person develops problems (e.g., depression, anxiety, a sexual dysfunction) as a result of expectation (cf. the placebo effect). Researchers need to carefully choose the terminology they use in describing other people's experiences, not only as a matter of scientific accuracy and precision, but also so they do not inadvertently contribute to an environment that imposes harm through expectancy effects.

This research was supported in part by grants-in-aid from the Harris Science Research Institute of Doshisha University.

References

- 1) P. Tromovitch, "The Multinational Life Experience and Personality Project (MLEPP): Data Collection and Demographics of the 2014 U.S. and Japanese National Samples", *The Science and Engineering Review of Doshisha University*, **55**[4], 308-316 (2015). Available at: <https://doshisha.repo.nii.ac.jp/record/23096/files/023055040002.pdf>
- 2) P. Tromovitch, "The prevalence of, and self-reported reaction to, sexual contacts between young people and older partners in Japan and the United States". 2017 年度同志社大学リエゾンフェア・ハリス理化学研究所発表会, 47-51 (November 28, 2017).
- 3) J. Cohen, *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates: Hillsdale, New Jersey, (1988).

Table 1. How men described their willing sexual contacts with an older partner prior to age 16.

	Japanese Males	U.S. Males
negative descriptors only	15.4%	3.6%
mixture of positive and negative	7.7%	14.2%
positive descriptors only	76.9%	82.2%

Table 2. Rank-order correlations of the descriptors by intra-country subgroups.

	r	r^2
U.S.: (adolescent only) correlated with (childhood only)	.79	63%
U.S.: (both child and adolescent) correlated with (childhood only)	.77	59%
U.S.: (adolescent only) correlated with (both child and adolescent)	.96	93%
Japan: (adolescent only) correlated with (both child and adolescent)	.80	64%

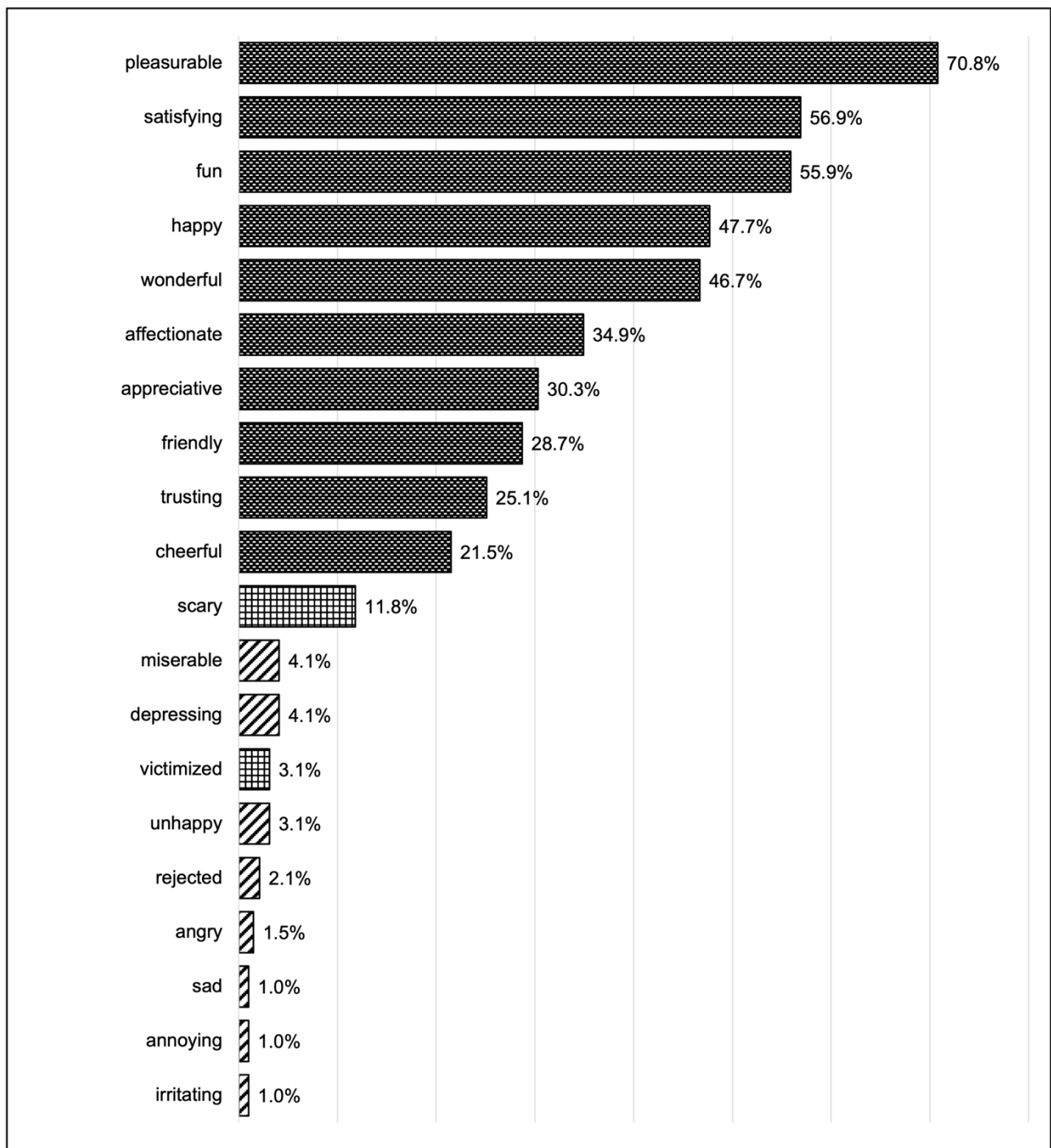


Fig 1. Rank order of the frequency of selection of 20 adjectives men associated with their early, willing sexual contacts with older partners.

Research on in situ Resource Utilization of Lunar Regolith

Yuta SUZUKI*

(Received August 26, 2024)

The electrochemical extraction of valuable metals from metal oxides in high-temperature melts containing molten salts is a game-changer for procuring resources locally from the lunar regolith. For example, silicon obtained by electrochemical reduction of silica, the most abundant element in lunar regolith, is a material for solar cells. This process is not just a step forward but a leap towards constructing an environmentally friendly and inexpensive solar power generation system and a method to realize a sustainable resource and energy system to build an SDG society on the Moon and Earth. In this study, we aimed to obtain data on basic physicochemical properties such as thermophysical properties of high-temperature melt and electrochemical behavior and coordination structure of metal ions. To elucidate the interfacial phenomena between the electrode surface and the melt, we report on the relationship between the electrodeposition mechanism of metal ions in the melt and the melt structure by electrochemical methods, high-temperature Raman spectroscopy, and quantum chemical calculations based on density functional theory. This study will show that the melt design of the high-temperature melt is essential in controlling the electrode/melt interface phenomena and will help to evaluate the feasibility of resource utilization on the Moon.

Key words : lunar regolith, ISRU, electrochemical process

キーワード : 月レゴリス, ISRU, 電気化学プロセス

月レゴリスのその場資源利用研究（ISRU）

鈴木 祐太

1. はじめに

近年、宇宙開発事業の急速な拡大に伴い、宇宙空間での持続可能な活動を可能とする資源的・エネルギー的観点からの研究開発が重要視されるようになった。有人宇宙活動は、NASA のアルテミス計画や中国政府独自の宇宙開発計画など、近い将来において拡張されていくことが想定されている。そのため、現地において如何にして資源を獲得し、持続可能なエネルギーシステムを構築するかは、地上からの物

資の運搬を極力減らして、コスト面においても宇宙開発を進めていく上で重要なテーマとなる。月面上での有人宇宙活動を目指した基地建設などを想定した場合、特に資源が限られている空間では、地球上のように豊富な資源を用いた現行のプロセスを月面にそのまま転用することが難しい場合が多い。月面上では複合金属酸化物から成る月レゴリス¹⁾を資源として利用するプロセスの構築が重要となる。

*Harris Science Research Institute, Doshisha University, Kyoto, E-mail: yusuzuki@mail.doshisha.ac.jp

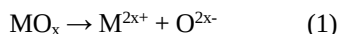
このような背景に対して、本研究は、月面上のその場資源利用: ISRU (in situ Resource Utilization) に関する研究である。本研究では、月面資源として月レゴリスの利用を考え、電気化学プロセスによりその主成分であるシリコン等を抽出するプロセスを提案する²⁾。シリコンは太陽電池の材料であるため、月レゴリスからのシリコンを製造してそのシリコンで更に発電をして、別の領域で再び発電した電力を駆動力にしてシリコンを得るという、自己増殖的に月レゴリスから太陽電池を製造することが可能となる (Fig. 1)。本プロセスを実現する上で、金属イオンの電気化学挙動や高温融体中での錯体構造などの基礎物理化学挙動を電気化学測定法、分光学的手法^{3,4)}、計算化学的手法などのツールを用いて解明していくことが重要となる。



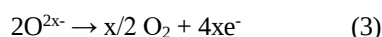
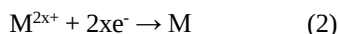
Fig. 1. Schematic image for proposed ISRU on the Moon.

2. 実験原理・方法

本研究で使用する電気化学プロセスの反応原理は次の通りである (Fig. 2)。まず、月レゴリスを構成する金属酸化物が高温融体中に溶解し、式(1)に従って金属カチオンと酸化物イオンが生成される。



この浴に電極を配置して通電すると、金属イオン (M^{2x+}) は式(2)に従って金属へと還元される。一方で、不溶性陽極を用いた場合には、酸化物イオン (O^{2x-}) は陽極上で酸素へと酸化される (式(3))。



月面のレゴリスは複合金属酸化物となっており、(1)-(3)の反応プロセスを通して、原理的には電極

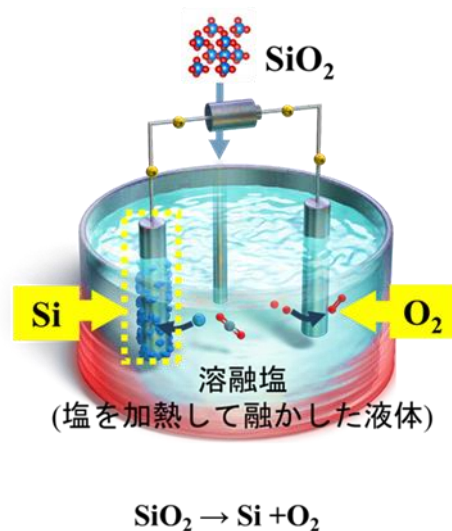


Fig. 2. Principle of producing metal (M) from oxide (MO_x) by electrochemical processing in high-temperature melt. This figure shows the silicon deposition process from silica as an example.

電位を制御によって各種金属と酸素を選択的に回収することができる。

本研究では、金属酸化物としてシリカ (SiO_2) を選択し、シリカからのシリコン電析に関して、溶融フッ化物とシリカとの混合浴中での電気化学計測を行った結果を報告する。

実験はすべて大気中の水分の影響を避けるためにアルゴン雰囲気下で行った。電解試験では、作用極に Ag, 対極にグラッシーカーボン, 参照極に疑似 Ni 電極を用いた。電解後試料は洗浄後, XRD, SEM, EDS 分析を行い生成物の同定を行った。高温ラマン分光分析では、光源に波長が 532 nm の半導体レーザーを用い昇温後の溶融塩に対してその場分光分析を行った。密度汎関数理論に基づく量子化学計算ではソフトウェアとして Gaussian 09 (Revision B. 01) を使用した。各種 Si イオン構造に対する構造最適化計算とラマンスペクトルの振動数計算は、B3LYP/6-311+G (d) を用いた。

3. 結果と考察

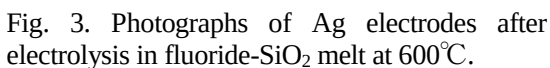
高温融体中へシリカを溶解させ、そして陰極上でのシリコン電析が進行するかを調べるために、600℃のフッ化物含有融体中でのシリコン電析試験を実施した。Figure 3 に、Ag 電極を用いて異なる印

み合わせることで、有人宇宙活動で発生する二酸化炭素からの燃料や酸素の製造が可能となる⁷⁻⁹⁾。このように、本提案プロセスによって各種酸化物の物質変換を制御し、閉鎖系の中で物質循環を可能とするシステムの構築を目指すことが重要となる。

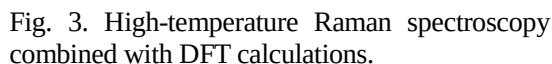
本研究では、月面上でのその場資源利用プロセスとして、電気化学的手法を用いた月レゴリスからの金属抽出方法を提唱した。本プロセスを実現するための基礎研究として、熔融塩を含む高温融体中でのシリカからのシリコン電析を実験的に実証した。月面上において実際に複合酸化物である月レゴリスから金属を回収するには、浴組成、浴温、印加電圧などの調整によって、回収金属の選択性を制御することが重要となる。その指針については、発表会当日に最新の研究データも用いて紹介する予定である。

本研究の一部は、ハリス理化学研究所研究助成金によって行われた。ここに謝意を表する。

- 1) C. Schmandt, J. A. Hamilton, D. J. Fray, I. A. Crawford, "The production of oxygen and metal from lunar regolith, *Planet. Space Sci.*, 74 (2012) 49.
- 2) Y. Suzuki, Y. Inoue, M. Yokota, T. Goto, "Effects of Oxide Ions on the Electrodeposition Process of Silicon in Molten Fluorides", *J. Electrochem. Soc.* 166 (2019) D564-D568.
- 3) Y. Suzuki, S. Nozaki, S. Tanaka, T. Goto, "Coordination Structure of Si(II) Ions in Binary Melts (LiF–KF, LiF–NaF, and NaF–KF) and Ternary Melt (LiF–NaF–KF) ", *Inorg. Chem.*, 63 (2023) 203.
- 4) Y. Suzuki, T. Park, K. Hachiya, T. Goto, "Raman Spectroscopy for Determination of Silicon Oxyfluoride Structure in Fluoride Melts ", *J. Fluorine. Chem.*, 238, (2020) 109616.
- 5) Y. Suzuki, Y. Matsuo, Y. Shimizu, Y. Fukunaka, T. Goto, "Structural Control of Molybdenum Silicide by Electrolytic Silicification of a Mo Substrate", *J. Electrochem. Soc.*, 169 (2022) 112512.
- 6) K. Okada, Y. Suzuki, T. Goto, "Formation of titanium oxide on Al₂O₃ substrate in molten



高温融体中でのイオンのミクロな挙動は、高温ラマン分光分析および量子化学シミュレーションによってその場計測が可能である (Fig. 4). 原子レベルでの制御によって、Fig. 3 の電解プロセスにおいて所望の特性をもつ金属中抽出が実現可能となる.



本電解プロセスは、上記のようなシリコンのみならず、他の有価物の生成にも適用できる。例えば、半導体材料であるモリブデンシリサイドの形成⁵⁾やチタニア (TiO₂) からのチタンの製造がある⁶⁾。チタニアは月面の海の領域に豊富に含まれる金属酸化物である。また、二酸化炭素の分解プロセスとも組

LiF-KF", *The Harris science review of Doshisha University* 62(1) (2021) 1-7.

- 7) Y. Suzuki, S. Tanaka, T. Watanabe, T. Isogai, A. Yamauchi, Y. Kishikawa, T. Goto, "New Route of Acetylene Synthesis via Electrochemical Formation of Metal Carbides from CO₂ in Chloride Melts", *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 12 (2024) 2110.
- 8) Y. Suzuki, S. Tanaka, T. Watanabe, T. Tsuchii, T. Isogai, A. Yamauchi, Y. Kishikawa, T. Goto, "High-efficient acetylene synthesis by selective electrochemical formation of CO₂-derived CaC₂", *Chem. Eng. J.*, 494 (2024) 153013.
- 9) Y. Suzuki, T. Takeda, T. Goto, " Direct Electrochemical Formation of Carbonaceous Material from CO₂ in LiCl-KCl Melt", *Electrochim. Acta*, 456 (2023) 142464.

Development of Artificial Hemoglobin That Selectively Absorbs Toxic Gas Components *In Vivo*

Hiroaki KITAGISHI*

(Received September 13, 2024)

In fire accidents, carbon monoxide (CO) is generated by incomplete combustion of wood materials. In addition, hydrogen cyanide (HCN) is generated by combustion of synthetic materials such as urethane and acrylic materials. Both CO and HCN are highly toxic gases and the mixture of these two gases that frequently generates in building fire shows extremely high toxicity. To date, there is no clinically available antidote for CO poisoning as well as CO/HCN mixed gas poisoning. In our laboratory, we have been studying the synthesis and characterization of artificial hemoglobin compounds “hemoCDs”. hemoCDs are composed of synthetic iron-porphyrin and per-*O*-methylated β -cyclodextrin dimers. In this work, we found that two hemoCD analogues, hemoCD-P and hemoCD-I, are quite useful for simultaneous CO/HCN poisoning. The 1:1 mixed solution of hemoCD-P and hemoCD-I was named as hemoCD-Twins. Using CO/HCN simultaneous poisoning model animals, we investigated the toxic effects of CO and HCN and antidotal effects of hemoCD-Twins. Upon infusion of hemoCD-Twins, the accumulated CO and HCN in blood were immediately reduced, resulting in the remarkable recovery effect on animals. Injected hemoCD-Twins were smoothly excreted in urine, that is another advantageous point of hemoCD-Twins because excessively injected hemoCD-Twins should not be remained in the body, resulting in negligible side effects. We are currently trying to use our hemoCD systems as a ready-to-use fire-gas antidote that can be always available in the emergent fire accidents.

Key words : carbon monoxide poisoning, cyanide poisoning, artificial blood

キーワード : 一酸化炭素中毒, シアン中毒, 人工血液

生体内で有毒ガス成分を選択的に吸着する人工ヘモグロビン化合物の開発

北岸 宏亮

はじめに

京都アニメーション放火殺人事件(2019)や北新地ビル放火殺人事件(2021)では、一酸化炭素(CO)中毒により多くの犠牲が発生した。建物内の火災では密閉された空間において燃焼が起こるため酸素不足により不完全燃焼が起こりやすく、CO ガスが発生しやすい。さらに建物内で家具等に用いられるウレタ

ンやアクリルなどの素材が燃焼すると、CO だけでなくシアン化水素(HCN)も同時に発生することがある。CO と HCN はどちらも致死性の極めて高いガスであるだけでなく、作用機序が類似しているために両者が混ざると単独よりも低い濃度でも致死性の高いガスとなる。HCN によるガス中毒(シアン中毒)は、青酸中毒とも呼ばれる。シアン中毒には臨床で解毒

*Department of Molecular Chemistry and Biochemistry, Faculty of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-7442, E-mail: hkitagis@mail.doshisha.ac.jp

剤が存在するが、酸欠が疑われる場合には使用できない。一方で CO 中毒に対しては、現状では酸素換気するしか治療方法がないため、先述の放火殺人事件においても駆けつけた医師は満足な治療行為を施すことができなかった。

建物火災における主な死因はガス中毒であり、火傷よりも多い (Fig. 1)。ガス中毒には高気圧酸素チャンバーを用いた治療が適用されるが、実際にはチャンバーを有する医療施設までの搬送中に状態が悪くなるため、適用される機会はそれほど多くない。CO や HCN によるガス中毒を現場からの搬送中において迅速に治療することができれば、多くの人命を救助することにつながる。

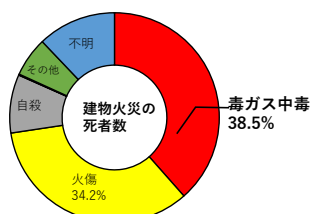


Fig. 1. Percentage of deaths caused by building fires (from the Overview of the White Paper on Fire Service).

我々はこれまでに血液中のヘモグロビンの酸素運搬機能を再現する目的で、hemoCD と名付けた化合物 (Fig. 2) を合成し、その機能評価および応用研究を展開してきた¹⁾。その過程において CO および HCN を強く捕まえて尿中に排泄する 2 種の hemoCD を見出し、これを混合した系である hemoCD-Twins を火災ガス中毒の特効薬として利用することを考えた。ここでは hemoCD-Twins の設計指針および効果について概説する。

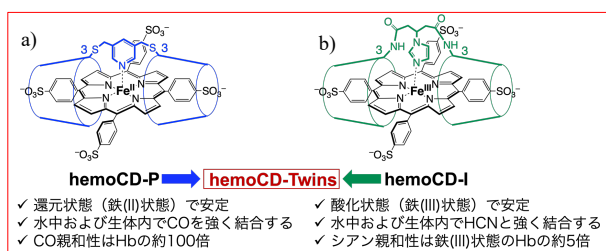


Fig. 2. Artificial hemoglobin compounds, hemoCD-P and hemoCD-I.

結果と考察

ピリジン環を有するシクロデキストリン二量体を用いて Fe ポルフィリンを包接した化合物 hemoCD-P (Fig. 2a) は、Fe(II)の還元状態で安定であり生体内で CO を強く捕捉する²⁾。一方でイミダゾール基を有する hemoCD-I は、Fe(III)の酸化状態で安定であり、生体内でシアン化物イオンを強く捕捉する (Fig. 2b)³⁾。いずれの化合物も動物に投与すると 2 時間程度ですべて尿中に排泄される特徴があるため、体内に残らず副作用を示さない。hemoCD-P と hemoCD-I を混合した溶液を hemoCD-Twins と呼び、CO/HCN 同時中毒の解毒剤としてデザインした (Fig. 3)⁴⁾。

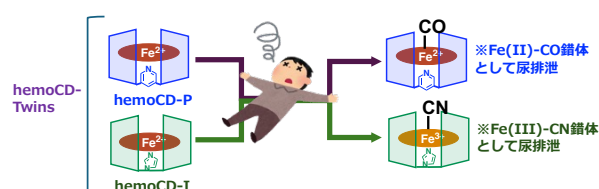


Fig. 3. Detoxification mechanism of hemoCD-Twins against CO and HCN simultaneous gas poisoning.

CO およびシアンの同時中毒モデル動物を用いて、毒性評価および hemoCD-Twins による治療効果の検証を行なった。NaCN を経口投与後に 5000 ppm の CO ガスを 5 分間吸入したラットでは、血圧が急激に下降した。一方 hemoCD-Twins の投与群では、下降した血圧は投与直後より回復した (Fig. 4a)。また血中の CO およびシアン濃度はガス吸入後に急激に上昇し、空気換気を行うとそれらは徐々に減少したが、hemoCD-Twins 投与群では有意に素早い減少が確認された (Fig. 4b)。したがって hemoCD-Twins は、CO とシアンの同時中毒に対して顕著な治療効果が認められた。

結論

これまでに治療薬のなかった火災ガス中毒に対して、我々の研究室で開発した人工ヘモグロビン錯体

hemoCD-Twins が顕著な治療効果があることを示した。需要はあるにも関わらず薬のない領域は「アンメット・メディカルニーズ」と呼ばれるが、hemoCDは正に火災ガス中毒においてそこを満たす創薬シーズであり、現在は社会実装をめざした開発を進めている。

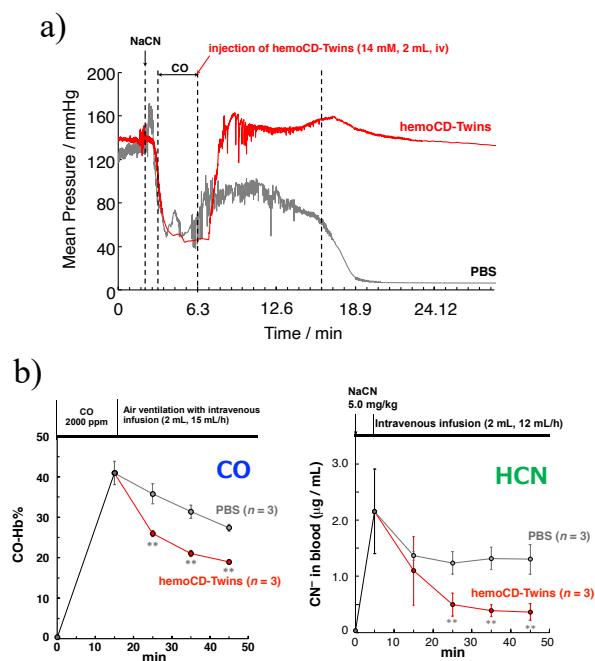


Fig. 4. Verification of hemoCD-Twins against CO and HCN simultaneous poisoning using model animals. a) blood pressure profiles, b) blood CO and HCN concentration profiles without and with the treatment by hemoCD-Twins.

本研究は毛斉悦博士（同志社大学特任助教），国立建築研究所，東海大学医学部との共同研究により遂行した。また本研究は科学研究費補助金およびハリス理化学研究所助成金により遂行された。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) H. Kitagishi and K. Kano, “Synthetic heme protein models that function in aqueous solution” *Chemical Communications*, **57**, 148–173 (2021).

- 2) H. Kitagishi, S. Negi, A. Kiriya, A. Honbo, Y. Sugiura, A. T. Kawaguchi, and K. Kano, “A Diatomic Molecule Receptor That Removes CO in a Living Organism” *Angewandte Chemie International Edition*, **49**, 1312–1315 (2010).
- 3) K. Watanabe, H. Kitagishi, and K. Kano, “Supramolecular Ferric Porphyrins as Cyanide Receptors in Aqueous Solution” *ACS Medicinal Chemistry Letters*, **2**, 943–947 (2011).
- 4) Q. Mao, X. Zhao, A. Kiriya, S. Negi, Y. Fukuda, H. Yoshioka, A. T. Kawaguchi, R. Motterlini, R. Foresti, and H. Kitagishi “A synthetic porphyrin as an effective dual antidote against carbon monoxide and cyanide poisoning” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **120**, e2209924120 (2023).

Transdermal delivery of lidocaine using eutectic mixture

Yoshiro TAHARA*

(Received September 10, 2024)

Transdermal delivery is one of the most attractive administration method of drugs. The studies using eutectic mixture for transdermal drug delivery have been reported, but there is a lack in comparative studies that used different types of drug-based eutectic mixtures. In the present study, four different types of lidocaine-based eutectic mixtures were prepared and tried to evaluate the effect of transdermal lidocaine delivery using these mixtures. Skin penetration study suggested that the molar ratio is more important than weight fraction. According to the comparative study in a same molar ratio, it was found that lidocaine-menthol eutectic mixture showed effective transdermal delivery of lidocaine. The result of this study provides important knowledge for transdermal delivery using eutectic mixtures.

Key words : transdermal delivery, eutectic mixture, lidocaine

キーワード : 経皮吸収, 共融混合物, リドカイン

経皮吸収における異種の共融混合物の比較検討

田原 義朗

1. はじめに

経皮吸収とは皮膚から薬を体内に投与する医薬品の投与ルートである。注射剤や、口から投与される経口ルートと比較して、安全かつ簡便であり、消化管や肝臓での薬の分解や代謝の影響がないことから、理想的な薬の投与経路として期待されていた¹⁾。しかしながら皮膚直下の局所的な病変の治療薬の開発は可能であっても、全身性の効果を期待する薬の経皮吸収は難しく、新しいドラッグデリバリーシステムの創出が期待されている²⁾。

近年、共融混合物という新しい概念をもった液体が注目されている。共融混合物とは2つ以上の化合物を混合した際に、それらの化合物間の相互作用によって融点が低下した混合物であり³⁾、相互作用の

多くは水素結合が関係しており、水素結合受容体と供与体を組み合わせることによって単独では固体であった化合物の融点が下がり、液体化することなどが知られている。また共融混合物は相転移において組成が変化しないと定義されているため、1つのモル分率について1つの共融混合物が規定されるが、共融混合物中の成分のいずれかが過剰に存在していたとしても過剰分が共融混合物に溶解することで全体として液体として存在することも可能である。

共融混合物による経皮吸収は前例があり、リドカインは最も多くの研究が報告されている薬である。例としてリドカインとプリロカインという薬を組み合わせで作成された共融混合物は経皮麻酔薬として実用化もされている⁴⁾。一方でメントール⁵⁾やイブプ

*Department of Chemical Engineering and Materials Science, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-6656, E-mail: ytahara@mail.doshisha.ac.jp

ロフェン⁶⁾などもリドカインと組み合わせることで共融混合物の経皮吸収を行った報告がされているが、異種の共融混合物を比較し、どのような化合物と組み合わせることで経皮吸収が向上するのかを議論した研究はほとんどなく、今後の発展のために重要である⁷⁾。そこで本研究ではリドカインを用いて調製された異種の共融混合物を統一された条件で比較することで、リドカインの経皮吸収性を向上させる共融混合物の探索を行った。

2. 実験・結果・考察

2.1 重量分率およびモル分率と皮膚透過性の関係

リドカインとメントールを様々な重量分率（モル分率）で組み合わせることによって共融混合物（+α：過剰量のリドカインまたはメントール）を作成し、フラッツ拡散セルを用いたマウス皮膚透過実験を行った。ここでマウス皮膚上には単位面積あたりの共融混合物（+α）の重量を一定として投与しており、皮膚上の単位面積あたりのリドカインの重量は異なるものを投与して比較した。リドカインの皮膚透過量は高速液体クロマトグラフィーを用いて測定した。

その結果、リドカインの重量分率 40 wt%までは重量分率の増加に伴い、リドカインの皮膚透過量も増加していったが、40 wt%以上ではリドカインの重量分率が増加してもリドカインの皮膚透過量は増加しなかった。リドカインとメントールのモル比が 1 : 2（共融点）である共融混合物のリドカインの重量分率は 42.9 wt%であることから、共融点を超える量のリドカインを投与しても過剰量のリドカインが経皮吸収に寄与する訳ではないことが示唆された。

2.2 異種の共融混合物の皮膚透過性

上記の検討によって共融混合物による薬の経皮吸収ではモル分率（モル比）が重要であることが示唆されたことから、リドカインとモル比 1 : 2（モル分率 33.3 mol%）および 1 : 1（モル分率 50 mol%）で共融混合物を作成可能な、乳酸、イブプロフェン、プリロカイン、メントールについてマウス皮膚透過性を比較した。今回はマウス皮膚上には単位面積あたりのリドカインのモル量（重量）を一定として、リドカ

インのモル分率 33.3 mol%および 50 mol%の共融混合物を投与しており、皮膚上の単位面積あたりの共融混合物の重量は異なるものを投与して比較した。

その結果、リドカインのモル分率 33.3 mol%および 50 mol%のいずれの場合であっても、共融混合物による皮膚透過性はメントールが最も高い皮膚透過性を示すことが明らかとなった。重量分率基準で考えてもリドカイン 42.9 wt%であるリドカイン-メントール（モル比 1 : 2）のほうが、リドカイン 72.2 wt%であるリドカイン-乳酸（モル比 1 : 1）よりもリドカインの皮膚透過性は上回っていたことから、メントールは共融混合物による経皮吸収において、高い経皮吸収促進効果を示すということが明らかとなった。

3. 結論

本研究によって異種の共融混合物による薬の経皮吸収を比較するにはモル分率を統一して比較することが重要であることが示唆された。この知見に基づくモル分率基準の新しい評価によって、メントールは経皮吸収促進効果の高い共融混合物を作成できる有用な物質であることが明らかとなった。

本研究はハリス理化学研究所研究助成金によって実施いたしました。また高速液体クロマトグラフィーの測定では京都バイオ計測センターの装置を使用させていただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) A. Zaffaroni, “ALZA: An enterprise in biomedical innovation”, *Technovation*, **1**, 135-146 (1981).
- 2) F. Sabbagh and B.S. Kim, “Recent advances in polymeric transdermal drug delivery systems”, *J. Control. Release*, **341**, 132-146 (2022).
- 3) E.L. Smith, A.P. Abbott, K.S. Ryder, “Deep Eutectic Solvents (DESs) and Their Applications”, *Chem. Rev.*, **114**, 11060-11082 (2014).
- 4) T. Matsumoto, T. Chaki, N. Hirata, M. Yamakage, “The eutectic mixture local anesthetics (EMLA) cream is more effective on venipuncture pain

compared with lidocaine tape in the same patients”, *JA Clin. Rep.*, **4**, 73 (2018).

- 5) L. Kang, H.W. Jun, J.W. McCall, “Physicochemical studies of lidocaine–menthol binary systems for enhanced membrane transport”, *Int. J. Pharm.*, **206**, 35-42 (2000).
- 6) P. Berton, K.R. Di Bona, D. Yancey, S.A.A. Rizvi, M. Gray, G. Gurau, J.L. Shamshina, J.F. Rasco, R.D. Rogers, “Transdermal Bioavailability in Rats of Lidocaine in the Forms of Ionic Liquids, Salts, and Deep Eutectic”, *ACS Med. Chem. Lett.*, **8**, 498-503 (2017).
- 7) M.H. Zainal-Abidin, M. Hayyan, G.C. Ngoh, W.F. Wong, C.Y. Looi, “Emerging frontiers of deep eutectic solvents in drug discovery and drug delivery systems”, *J. Control. Release*, **316**, 168-195 (2019).

Study on Dynamics of Ionic Liquids showing the Low Critical Solution Temperature by Non-linear Spectroscopy

Yoshifumi KIMURA^{***}, Kohei SHIMADA^{**}, Momoko HOKI^{*}, Masaki FUJIWARA^{**}, Rie AKAI^{**}, Koji, OSAWA^{*}

(Received August 29, 2024)

Transient grating spectroscopy has been applied to the mixtures of ionic liquid and water which shows the low-critical separation temperature. Two different types of spectroscopic methods have been used to investigate clustering of cations and anions near the critical temperature. One is the temperature jump method, which revealed the formation of the cluster of cations and anions in water pool. The size of the cluster was an order of nm with increasing the size by approaching to the critical temperature from the lower-temperature. The other is the diffusion probe method. The diffusion coefficient of diphenylacetylene (DPA) in the mixture solution reflects the cluster size, since DPA is trapped in the cluster of cations and anions and moves tighter with the cluster. The estimated cluster size was slightly smaller than that estimated by the temperature jump method. The estimated cluster size by the diffusion probe method was dependent on the anion species.

Key words : LCST, ionic liquid, cluster, transient grating spectroscopy, diffusion

キーワード : 下部臨界温度, イオン液体, クラスター, 過渡回折格子分光, 拡散

下部臨界現象を示すイオン液体のダイナミクスの 非線形分光法を用いた検討

木村 佳文, 島田 皓平, 寶亀 桃子, 藤原 正季, 赤井 里衣, 大澤浩二

1. はじめに

イオン液体は一般に 100℃以下で液体状態にて存在する塩の総称であり, 構成イオンであるカチオンとアニオンを種々に変化させることにより, 通常の液体にはない特異な局所構造を形成することができる. イオン液体の中には水などの通常の液体と混合することにより, 下部臨界現象(LCST)を示すような液体を作成できることが報告されており, 分離プロセスなどへの応用が期待されている¹⁻³⁾. Figure 1 に相分離の一例を示す. このイオ

ン液体水混合系は 30℃付近に臨界点があり, それ

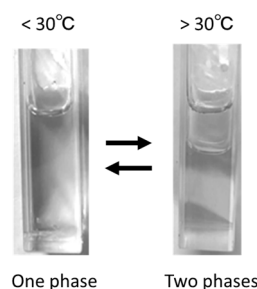


Fig. 1. Phase separation of [P₄₄₄₄][TMS]/H₂O.

^{*}Department of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto, 0774-65-6561, yokimura@mail.doshisha.ac.jp

^{**}Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto

よりも高い温度では二相に分離し、低い温度で一相となる。

LCST を示すイオン液体/水混合系の構造が臨界点に近づくにつれてどのように変化するかは興味もたれ、小角 X 線散乱実験や動的光散乱の方法により調べられ、臨界点に近づくにつれて局所構造が成長することが示されてきた⁴⁶⁾。しかしながら、臨界点近傍における溶液の動的性質については十分には検討されていない状況にある。

本研究では、このような LCST を示すようなイオン液体と水の混合系における、臨界点近傍での局所構造のダイナミクスを明らかにするために、過渡回折格子レーザー分光法 (TG 法) をもちいて検討をすすめることを企画した。今回二つのアプローチを行った。一つは、臨界点近傍のイオン液体・水混合系に対して温度ジャンプ法⁷⁾を用いて、局所的な熱発生にともなって生成する凝集体のダイナミクスをとらえ、その運動性や大きさを明らかにすることを試みた。もう一つは、溶質分子の拡散係数を調べることで凝集体の大きさを明らかにすることも試みた⁸⁾。

2. 実験

Figure 2 に今回の実験で用いたイオン液体ならびに化合物の構造を示す。イオン液体としては

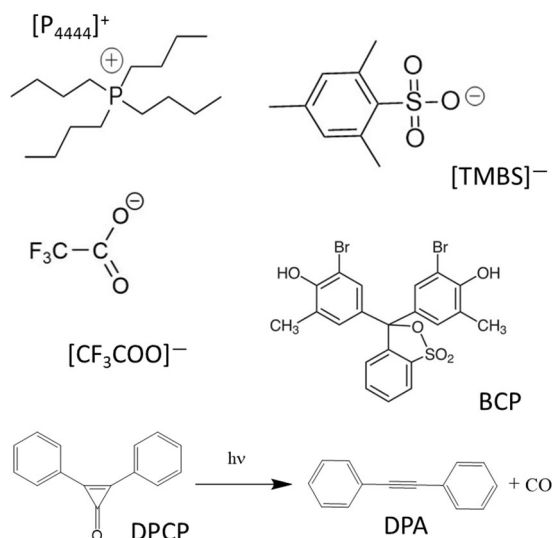


Fig. 2. Chemical structures of ions and molecules used in the experiment.

[P₄₄₄₄][TMBS]および[P₄₄₄₄][CF₃COO]の二種類を用いた。いずれのイオン液体も水と混同することにより下部臨界現象を示す。[P₄₄₄₄][TMBS] は水のモル分率が 0.95 になるように調整し、[P₄₄₄₄][CF₃COO]については水のモル分率が 0.97 になるように調整した。いずれの溶液も、目視により確認した下部臨界温度は 30°C であった。

溶質分子として BCP あるいは DPCP を溶解させた。BCP は熱プローブ分子であり、吸収した光を熱として放出することにより、系に温度ジャンプを起こすことができる。温度ジャンプによって生じた揺らぎからクラスターが形成され、その拡散係数からクラスターの大きさを評価することができる。DPCP は光解離反応により DPA と CO を放出する。このうち、DPA が溶液中のイオン液体から構成されるクラスターに取り込まれて拡散するため⁸⁾、その拡散係数からクラスターの大きさを知ることができる。

Figure 3 に過渡回折格子 (TG) 法で用いた実験装置の概略を示す⁸⁾。励起光として Nd:YAG レーザーの三倍波 (355 nm, パルス幅 10 ns) をもちいた。励起光をビームスプリッターで二つに分けたのち、一定の交差角度(θ)でサンプル上に同時に入射した。励起光によって生成した回折格子に従ってサンプルが励起され、熱や物質分布による回折格子が生成する。この回折格子の時間変化をプローブ光 (He-Ne レーザー; 633 nm) の回折光強度 (TG 信号) によって評価した。サンプルは光路長 1 cm の光学セルに封入し、セルの温度はカートリッジ

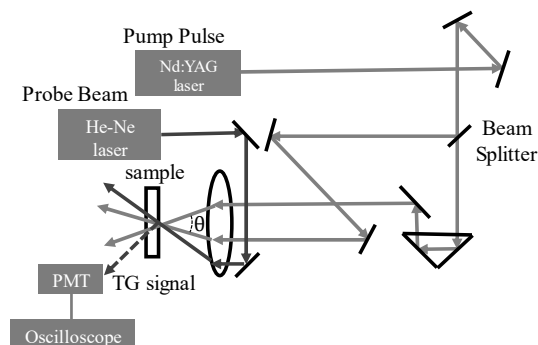


Fig. 3. Schematic illustration of TG spectroscopy system.

ヒーターもしくはペルティエ素子を用いた自作の温度コントローラーを用いて調整した。溶液の粘度はコーンプレートタイプの回転式粘度計 (Brookfield DV-II+Pro) により測定した。

3. 結果と考察

3.1 温度ジャンプによる評価

Figure 4 に [P₄₄₄₄][TMBS]/水系で BCP をプローブとした TG 信号を示す。Figure 4(a) に示すのは、通常の TG 信号であり、BCP の光励起後の無輻射失活による熱放出に伴う熱グレーティングの減衰を表しており、この減衰速度から熱拡散係数が評価できる。一方で Fig. 4(b) は徐々にレーザーのパルスエネルギーを上げていったときにあらわれる TG 信号を示している。熱拡散の信号がマイクロ秒のオーダーで減衰するのに対して、この信号の減衰は3桁以上遅く、温度ジャンプにより生成したクラスターの拡散の信号と考えられる。この信号がクラスターの一拡散減少に由来するのであれば、この信号を指数関数でフィットし得られた速度定数(k)はグレーティング格子ベクトルの大きさ(q)

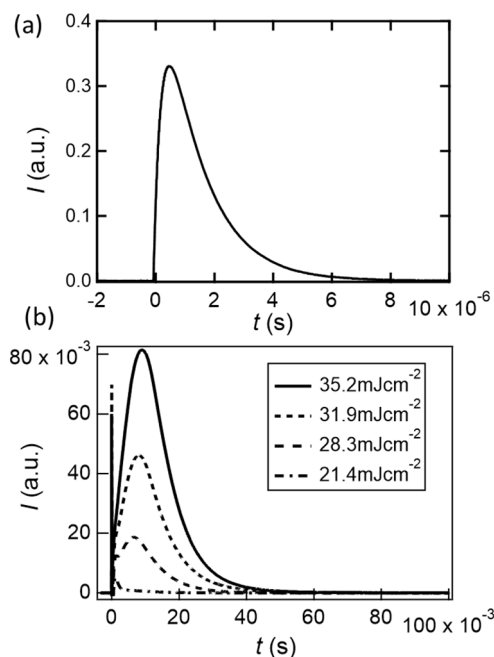


Fig. 4. (a) Typical TG signal due to the thermal grating. (b) Typical TG signals under high laser pulse energies.

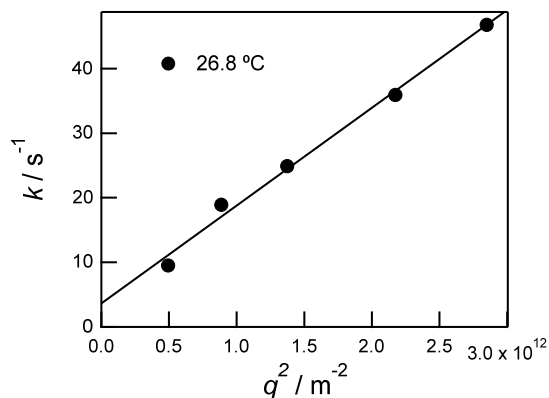


Fig. 5. Decay rate against q^2 at 26.8°C.

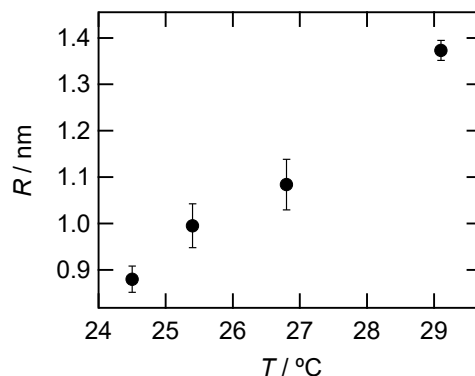


Fig. 6. Apparent radius of cluster determined by the temperature jump TG method.

の二乗に比例するはずである。すなわち

$$k = D_c q^2 + k_d$$

ここで D_c はクラスターの拡散係数、 k_d はクラスターが壊れる速度を表しており、また

$$q = \frac{4\pi \sin(\theta/2)}{\lambda_{\text{ex}}}$$

である。ここで θ はポンプレーザーの交差角、 λ_{ex} はポンプレーザーの波長である。Figure 5 にプロットの一例を示す。理論が予想するように、減衰の速度は q^2 に対して線形の関係にあり、この傾きからクラスターの拡散係数が、切片からクラスターの崩壊速度がわかる。

得られた拡散係数から次に示す Stokes-Einstein 式(SE 式)を用いて拡散する物質の見かけの半径 R を評価した⁹⁾。

$$R = \frac{k_B T}{6\pi\eta D_c}$$

ここで k_B はボルツマン定数、 T は絶対温度であり、 η は溶媒の粘度である。Figure 6 に得られた半径の温度依存性を示す。この系の臨界温度は 30 °C であり、臨界温度に近づくにつれ、半径が大きくなっていくことがわかるが、極端に増大することはない。ここで得られたクラスター半径の最大値は 1.4 nm 程度であり、イオン液体を構成するイオンサイズを考えると、25 イオンペア程度の塊であると考えられる。ここで得られたクラスターサイズは動的光散乱で測定された値と比べてかなり小さい⁹⁾。今回強制的な熱揺らぎによるクラスター生成によって非線形な揺らぎが生じ、自発的な揺らぎと異なる結果になったことが考えられるが、この程度の大きさのクラスターが存在することは次の拡散プローブの実験によっても確認できた。

3.2 拡散プローブによる評価

Figure 7(a)に溶質に DPCP を溶かした通常のイオン液体である 1-methyl-3-octylimidazolium bis

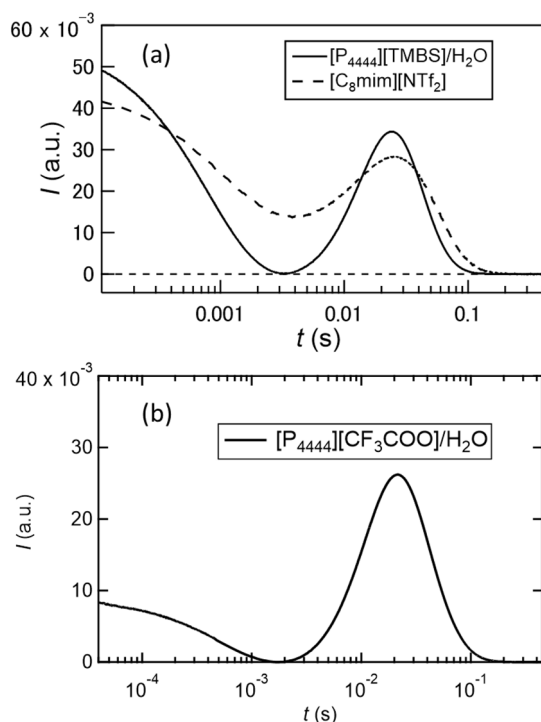


Fig. 7. (a) Typical TG signal of DPCP in $[C_8mim][NTf_2]$ and $[P_{4444}][TMBS]/H_2O$. (b) Typical TG signal of DPCP in $[P_{4444}][CF_3COO]/H_2O$.

(trifluoromethylsulfonyl) amide ($[C_8mim][NTf_2]$)と、 $[P_{4444}][TMBS]/$ 水系で TG 測定を行ったときに得られる TG 信号をしめす。 $[C_8mim][NTf_2]$ は一般的な有機溶媒でみられる信号と同じ形をしており、図 (Fig. 7(a))に示した領域では3つの指数関数の重ね合わせの二乗で次式であらわされる¹⁰⁾。

$$I_{TG}(t) \propto [\Delta n_{CO} \exp(-D_{CO}q^2t) + \Delta n_{DPA} \exp(-D_{DPA}q^2t) + \Delta n_{DPCP} \exp(-D_{DPCP}q^2t)]^2$$

ここで Δn_i は回折格子の明部と暗部における分子 i の屈折率の差を表しており、 D_i は分子 i の拡散係数を表す。通常の液体では $\Delta n_{CO} < 0, \Delta n_{DPA} > 0, \Delta n_{DPCP} < 0$ であり、これは分子のもつ屈折率と反応プロセスによって決定づけられている。速い時間の減衰が CO の拡散に対応しており、その後の立ち上がりが DPA の拡散、最後の減衰が DPCP の拡散である。信号が立ち上がるか、下がるかは Δn_i の符号と拡散の速度によって決まる。通常、拡散係数の序列は $D_{CO} \gg D_{DPA} > D_{DPCP}$ であり、分子サイズを考えると SE 式の予測に従っている。一方で、LCST を示すイオン液体・水混合系では信号の形が大きく異なり、CO の拡散に由来すると思われる信号のあとでいったんゼロにつく。解析の結果、この信号を再現するには $D_{CO} \gg D_{DPCP} > D_{DPA}$ でなければならないことが分かった。このような逆転が起こるのは、DPA が溶液中に存在するイオン液体のクラスターに取り込まれて拡散するためであり、実際に見ているのはイオン液体のクラスターの拡散係数であると考えられる⁸⁾。

Figure 7(b) に LCST を示す別の系である $[P_{4444}][CF_3COO]/$ 水系に DPCP を溶解させて TG 信号を測定した一例を示す。 $[P_{4444}][TMBS]/$ 水系の場合と同様の信号の形をしており、こちらでも DPA の拡散が DPCP の拡散より遅いことが分かった。いずれの溶媒においても信号を解析した結果えられた減衰定数の q^2 に対する依存性を検討したところ、きれいな直線関係がえられたので(Fig. 8)、確かにそれぞれの分子の拡散係数がえられていることが分かった。

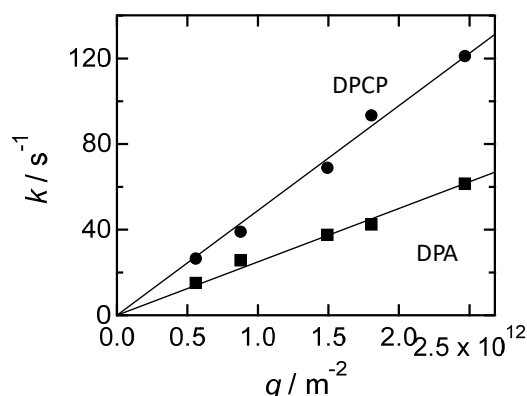


Fig. 8. Decay rates of DPCP and DPA against q^2 in $[P_{4444}][TMBS]/H_2O$ at 25.0 °C

この信号の解析によって得られた拡散係数から SE 式によって計算した DPA の見かけの半径の温度変化を Fig. 9 に示す. Figure 9(a) に $[P_{4444}][TMBS]/$ 水系の結果, (b) に $[P_{4444}][CF_3COO]/$ 水系の結果を示した. Figure 9(a) には比較のため, 温度ジャンプで決定した値が載せてある. Figure 9 に示されるように DPA をプローブとして調べた場合, 温度ジャンプで見られるクラスターよりも少し小さめに評価されることがわかる. ただ, 両者はおおむね同じ傾向を示しており, 今回の手法で臨界点近傍のイオン液体クラスターのダイナミクスが評価できることが分かった. 一方で, イオン液体の種類が違えば見かけのクラスターサイズが非常に大きく異なることが分かった. $[P_{4444}][CF_3COO]/$ 水系で見られるクラスターの大きさは, $[P_{4444}][TMBS]/$ 水系のそれと比較して一桁ぐらい大きな値となっている. これは, 臨界揺らぎの大きさがアニオンによって変化することを示唆しており, 大変興味深い. その原因は現時点では不明であるが, 水素結合の仕方などが CF_3COO^- と $TMBS^-$ では大きく異なることが予想されるため, 水素ネットワークのあり方などが原因のひとつではないかと考えられる.

4. まとめ

本研究では LCST を示すイオン液体/水混合系において, 過渡回折格子分光法をもちいて臨界点近傍で生成するクラスターのダイナミクスについて検討した. 臨界点に近づくにつれてカチオン, アニ

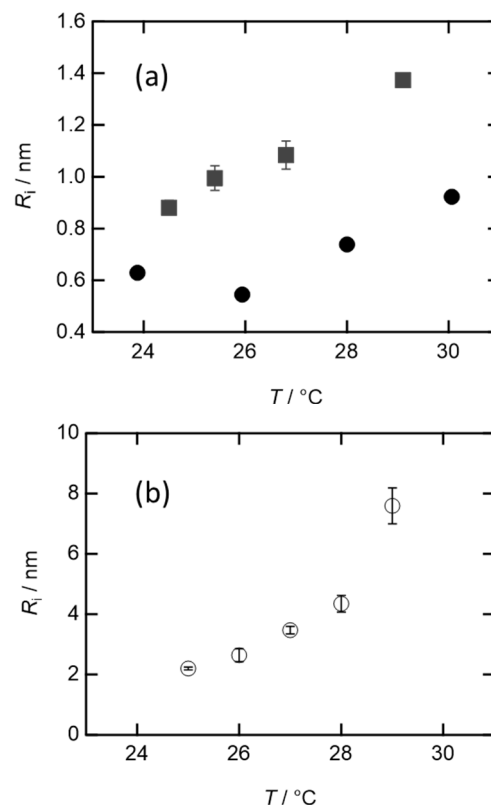


Fig. 9. (a) Temperature dependence of apparent radius of DPA (circles) and cluster (squares) in $[P_{4444}][TMBS]/H_2O$. (b) Apparent radius of DPA in $[P_{4444}][CF_3COO]/H_2O$.

オンからなるクラスターが水中で生成し, それが実態をもって拡散することが明らかになった. また DPA をもちいた拡散プローブ法がイオン液体のクラスターダイナミクスを評価するのに有効であることが分かった. 今回の結果によれば臨界点近傍で生じるイオン液体のクラスターはアニオンの種類によって大きく異なることが分かった. その原因については今後, さらに検討する必要がある.

最後に, 本研究を支援していただいたハリス理工学研究所研究助成金に謝意を表す. また本研究の一部は科研費 (No. 22H02040) によって行われた. ここに謝意を表す.

参考文献

- 1) H. Ohno and Y. Fukaya, "Task Specific Ionic Liquids for Cellulose Technology", *Chemistry Letters*, **38**, 2-7 (2009).

- 2) Y. Kohno, H. Arai, S. Saita, and H. Ohno, "Material Design of Ionic Liquids to Show Temperature-Sensitive LCST-type Phase Transition after Mixing with Water", *Australian Journal of Chemistry*, **64** 1560-1567 (2011).
- 3) Y. Kohno and H. Ohno, "Temperature-responsive ionic liquid/water interfaces: relation between hydrophilicity of ions and dynamic phase change", *Physical Chemistry Chemical Physics*, **14** 5063-5070 (2012).
- 4) A. Nitta, T. Morita, H. Ohno, and K. Nishikawa, "Fluctuations and Mixing State of an Aqueous Solution of the Ionic Liquid Tetrabutylphosphonium Trifluoroacetate around the Critical Point", *Australian Journal of Chemistry*, **72**, 93-100 (2019).
- 5) A. Nitta, T. Morita, S. Saita, Y. Kohno, H. Ohno, and K. Nishikawa, "Density Fluctuations in Aqueous Solution of Ionic Liquid with Lower Critical Solution Temperature: Mixture of Tetrabutylphosphonium Trifluoroacetate and Water", *Chemical Physics Letters*, **628**, 108-112 (2015).
- 6) R. Wang, W. Leng, Y. Gao, and L. Yu, "Microemulsion-like Aggregation Behaviour of an LCST-type Ionic Liquid in Water", *RSC Advances*, **4**, 14055-14062 (2014).
- 7) H. Inoue, K. Katayama, K. Iwai, A. Miura, and H. Masuhara, "Conformational Relaxation Dynamics of a Poly(N-isopropylacrylamide) Aqueous Solution Measured Using the Laser Temperature Jump Transient Grating Method", *Physical Chemistry Chemical Physics*, **14**, 5620-5627 (2012).
- 8) Y. Kimura, R. Akai, K. Shimada, M. Hirata, K. Fujii, and T. Endo, "Anomalous Dependence of Translational Diffusion on the Water Mole Fraction for Solute Molecules Dissolved in a 1-Butyl-3-methylimidazolium Tetrafluoroborate/Water Mixture", *The Journal of Physical Chemistry B*, **127** 5684-5692 (2023).
- 9) H. J. V. Tyrrell and K. R. Harris, "Diffusion in Liquids", Butterworth-Heinemann, 1984.
- 10) Y. Nishiyama, M. Fukuda, M. Terazima, and Y. Kimura, "Study of the Translational Diffusion of the Benzophenone Ketyl Radical in Comparison with Stable Molecules in Room Temperature Ionic Liquids by Transient Grating Spectroscopy", *Journal of Chemical Physics*, **128**, 164514(1-9) (2008).

Corrosion Mechanism of Magnesium Alloys Using Machine Learning

Motohiro YUASA*, Masataka SUDA*, Hiroyuki MIYAMOTO*, Hidetoshi SOMEKAWA**

(Received September 13, 2024)

The corrosion properties of AZ31 magnesium alloys processed by five different wrought processes (forging, rolling, extrusion, equal-channel-angular-extrusion, and caliber rolling) were systematically investigated to evaluate the effects of microstructure factors on corrosion resistance. Machine learning and statistical methods were employed to quantify the impact of microstructure factors on corrosion properties. This study utilized models such as random forest algorithm and multiple regression analysis to predict the corrosion rates in NaCl solutions. Among these models, the random forest algorithm demonstrated the highest accuracy in predicting the corrosion rates across the different processing methods. Using the random forest model, corrosion rates were predicted, and the relative importance of microstructural factors was evaluated. The performance of the model was further enhanced by optimizing input features, reducing correlations, and refining the classification process. The analysis revealed that the basal plane orientation is the most critical microstructural factor influencing corrosion resistance. The accuracy of the proposed model could be further improved by incorporating additional data and extended to other alloy systems by adjusting the dataset.

Key words : magnesium alloys, corrosion, microstructure, machine learning

キーワード : マグネシウム合金, 腐食, 組織, 機械学習

機械学習を活用したマグネシウム合金の腐食メカニズムの解明

湯浅 元仁, 須田 昌貴, 宮本 博之, 染川 英俊

1. はじめに

近年, 地球温暖化対策が業界の垣根を超えて要請されている。輸送機器 (乗用車, 航空機など) 分野では燃費を向上させることによる省エネルギー化が求められており, 材料の軽量化かつ高強度化が業界内での共通課題の一つとなっている。この問題を背景に, マグネシウムは軽量材料として様々な業界に

注目されている。マグネシウムは比重が 1.7 と実用金属中で最も軽量であり, 運輸業界などではマグネシウムの軽量化により, 現在の温室効果ガスの排出量を 30%削減できると言われている¹⁾。しかしながらこのような優れた特性を有する一方, マグネシウムには耐食性や, 発火性, 加工性という観点で実用化に向けて多くの欠点が残されている。

*Department of Mechanical Engineering and Science, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-7078, Email: myuasa@mail.doshisha.ac.jp

** Research Center for Structural Materials, National Institute for Materials Science, Ibaraki,

その中でも特に、耐食性が悪いという点がマグネシウムの実用化を大きく妨げており、この問題を解決すべく、マグネシウム合金の耐食性に関する研究はこれまでに多くなされてきた²⁾。

本研究では、耐食性と強度を同時に向上させることを可能にする金属組織制御に着目した。耐食性は金属組織の影響を受けることがわかっており、マグネシウム合金に塑性加工を施すと、組織の変化に伴い耐食性も変化することが明らかになっている³⁾。例えば、圧延材において、結晶粒の微細化に伴い耐食性が劣化する傾向が確認されている⁴⁾。しかし、加工法が異なると結晶粒の微細化が耐食性の向上につながるという報告もあり⁵⁾、その腐食メカニズムが十分に理解されているとは言い難い。そこで本研究では、複数の異なる塑性加工法により加工されたマグネシウム合金に対し、組織と耐食性の関係を評価した。これらの組織と耐食性の関係を機械学習を用いて整理・体系化することで、マグネシウム合金の腐食メカニズムを明らかにするとともに、耐食性を改善する組織を探求することを目的とした。

2. 実験方法

2.1 塑性加工と組織観察、耐食性の評価

5つの異なる塑性加工法(鍛造、圧延、押出し、Equal-Channel Angular Processing: ECAP、溝ロール圧延)により加工されたAZ31マグネシウム合金に対し、5mass%NaCl水溶液を用いた塩水浸漬試験により腐食速度を算出した。塩水浸漬試験に供した試験片は、加工まま材、熱処理材(熱処理温度: 473 K, 573 K, 673 K, 熱処理時間: 90 min)である。すなわち、5つの加工法×4種類の熱処理で合計20種類の異なる条件下で作製した試験片を塩水浸漬試験に供した。これらの試験片に対し、組織の情報を得る目的で、光学顕微鏡による結晶粒径算出、X線回折による底面集合組織測定、Scanning Electron Microscope(SEM)による金属間化合物観察を行った。

2.2 機械学習による腐食速度の予測と重要度評価

機械学習にはランダムフォレストモデルを用いた。ランダムフォレストモデルは複数の決定木を作成し、

それぞれの決定木から算出された予測値の平均をとって分析を行う手法である。ランダムフォレストの作成時には、グリッドリサーチを用いて調節可能なパラメータの一つである「決定木の本数」と「決定木の最大深さ」をモデルの予測精度が最大となるように最適化を行った。

3. 結果および考察

3.1 組織と耐食性の関係

Figure 1に各加工法で加工したマグネシウム合金の塩水浸漬試験により算出した腐食速度と結晶粒径の関係を示す。まず、圧延材に着目すると、結晶粒径が大きくなると腐食速度が小さくなる傾向が見られる。これは、結晶粒径が大きくなると格子ひずみや転位密度が減少し、表面電位が低下することで腐食速度が減少するためであると考えられる⁴⁾。その一方で、ECAP加工に着目すると、結晶粒径が大きくなるほど腐食速度が大きくなる傾向が見られる。こちらは、結晶粒径が微細化することで表面被膜の形成を促進させ、腐食速度が減少するためであると考えられる⁵⁾。すなわち、先行研究で見られた通り、異なる加工法においては、特定の金属組織(組織因子)が腐食速度に及ぼす影響は異なることが確認できた。

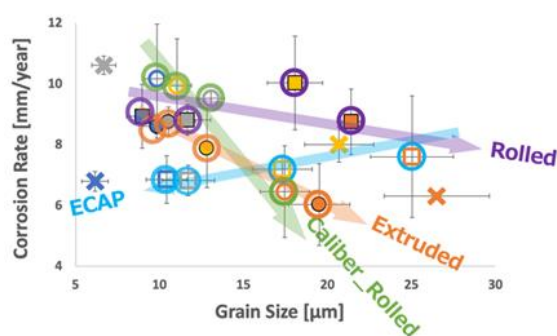


Fig. 1. Relationship between grain size and corrosion rate in AZ31 alloys processed by five different wrought processes.

同様に Fig. 2 に腐食速度と底面配向度の関係を示す。熱処理をしても各加工法で底面配向はほぼ一定であることが確認できた。圧延加工は底面配向が強いが、鍛造、ECAP加工は底面配向度が弱い結果となった。こちらは先行研究にて圧延材は底面集合組

織が強いことや、ECAP 材がルートによっては底面集合組織をランダム化することと一致していた。異なる 5 種類の加工法をまとめて評価すると、全体的に底面配向度が高いほど腐食速度が高い傾向が見られたものの、相関係数 0.27 とかなり低かった。底面はすべり面の中で最も面密度が高く、耐食性が優れている面であるという報告があるが⁶⁷⁾、今回の結果は逆の傾向になった。

なお、金属間化合物の数や面積率などの結晶粒径や底面集合組織以外の組織因子と耐食性の関係においても、それぞれの加工法においては腐食速度と組織に相関がみられたが、5 つすべての加工法をまとめて評価すると相関が弱くなる傾向は一致していた。

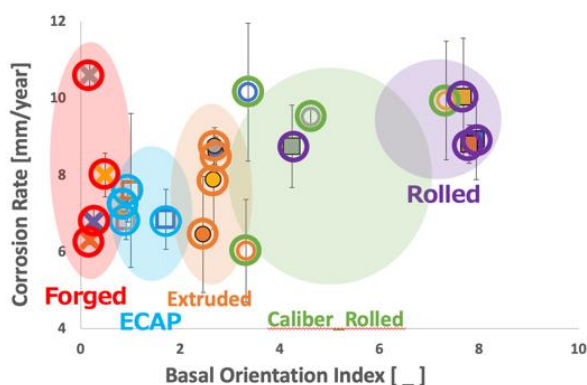


Fig. 2. Relationship between orientation index of basal plane and corrosion rate in AZ31 alloys processed by five different wrought processes.

3.2 機械学習を用いた耐食性の予測

異なる加工法により作製されたマグネシウム合金の腐食に最も影響を及ぼす組織因子を評価するため機械学習を用いた。機械学習の手法と学習用データセットと評価用データセットの配分を決定するため、複数の機械学習モデル、データセット配分割合で腐食速度を予測した。その結果を Fig. 3 に示す。重回帰、スパース回帰、ランダムフォレスト、リッジ回帰で学習用データセットを 40~90% の割合で評価した結果、ランダムフォレスト、かつ学習用データセットの割合を 50% としたとき RMSE 値(二条平均平方誤差)が最も小さくなった。以降、ランダムフォレストで解析した結果を示す。

ランダムフォレストを用いて、組織因子から腐食

速度を予測するモデルを作成したところ、モデルが腐食速度を予測する精度(決定係数)は 0.54 となり、予測精度が低いモデルとなった。そこで、各組織因子同士の相関と既存の腐食メカニズムを参考に特徴量選択を行った。特徴量選択後の腐食速度の予測モデルの結果を Fig. 4 に示す。モデルの決定係数は 0.73 となり、精度の向上が確認できた。

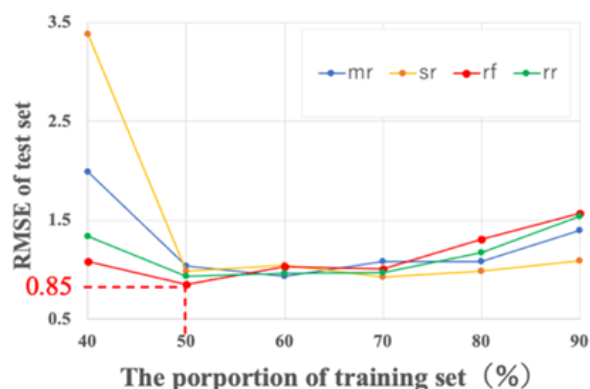


Fig. 3. Corrosion rate prediction performance of multiple regression models (mr), Sparse regression models (sr), Ridge regression models (rr), Random Forest models (rf). Different division ratios of training set and test set were used.

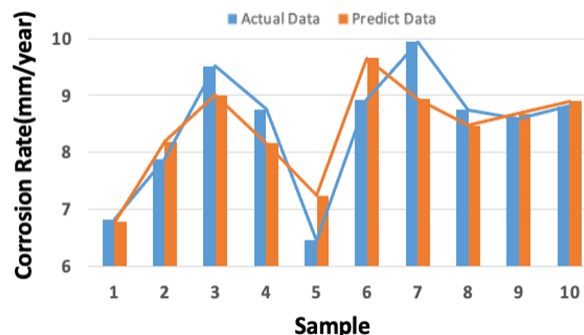


Fig. 4. Comparison between the immersion test measured corrosion rate and machine learning model by using 5 dimensions input model predicted corrosion rate.

この特徴量選択後の機械学習モデルに決定木による重要度分析を施して、このモデルが腐食速度を予測する過程を可視化することで組織因子と腐食速度の関係性の分析を試みた。今回の分析では、予測モデルから出力される腐食速度の値に、各特徴量が与える影響を示す重要度評価を行い、関係性の可視化を行った。その結果を Fig. 5 に示す。Figure 5 より底面配向度が最も腐食速度に影響している因子であること、続いて金属間化合物の粒子数、平均結晶粒径

の標準偏差の順で大きな影響を与えていることが示唆された。すなわち、マグネシウム合金を塑性加工にて製造する場合、いずれの加工法でも底面集合組織が低くなるように加工すると耐食性が向上する可能性が高いことがわかった。

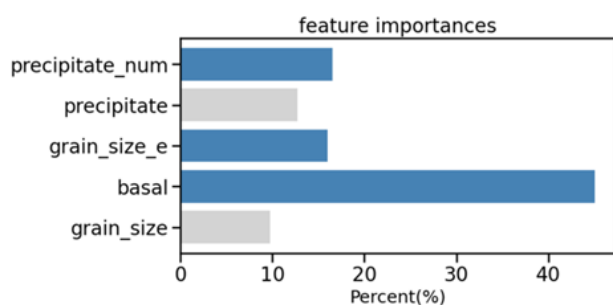


Fig. 5. Input features importance bar graph (shows the magnitude of the effect of microstructure factors on corrosion rate) based on the random forest regressor model.

4. まとめ

異なる5種の加工法(鍛造, 圧延, 押出し, ECAP, 溝ロール圧延)で加工されたAZ31マグネシウム合金に対し, その腐食速度に及ぼす組織因子の影響を機械学習を活用することで評価した。組織因子から腐食速度を予測するモデルは, ランダムフォレストのアルゴリズム適用することで, 誤差範囲が最小に収まることが確認できた。特徴量選択によりその予測の精度は向上すること, 底面配向度が最も重要度が高いことを見出した。

本研究の一部は, 2023年度同志社大学ハリス理化学研究所助成金, ならびに公益財団法人軽金属奨学会2023年度研究補助金を受けて実施された。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) S. R. Golroudbary, I. Makarava, E. Repo, A. Kraslawski and P. Luukka, “Magnesium Life Cycle in Automotive Industry”, *Procedia CIRP*, **105**, 589-594 (2022).
- 2) G. Song and A. Atrens, “Understanding Magnesium Corrosion—A Framework for Improved Alloy Performance”, *Advanced Engineering Materials*, **5**, p 837-858 (2003).
- 3) A. Bahmani, M. Lotfpour, M. Taghizadeh and Woo-Jin

Kim, “Corrosion Behavior of Severely Plastically Deformed Mg and Mg Alloys”, *Journal of Magnesium and Alloys*, **10**, 2607-2648 (2022).

- 4) H. Chen, J. Tang, W. Gong, Y. Gao, F. Tian and L. Chen, “Effects of Annealing Treatment on the Microstructure and Corrosion Behavior of Hot Rolled AZ31 Mg Alloy”, *Journal of Materials Research and Technology*, **15**, 4800-4812 (2021).
- 5) N. Birbilis, K. D. Ralston, S. Virtanen, H. L. Fraser and C. H. J. Davies, “Grain character influences on corrosion of ECAPed pure magnesium”, *Corrosion Engineering, Science and Technology*, **45**, 224-230 (2013).
- 6) K. S. Shin, M. Z. Bian and N. D. Nam, “Effects of Crystallographic Orientation on Corrosion Behavior of Magnesium Single Crystals”, *JOM*, **64**, 664-670 (2012).
- 7) R. Xin, B. Li, L. Li and Q. Liu, “Influence of texture on corrosion rate of AZ31 Mg alloy in 3.5 wt.% NaCl”, *Materials and Design*, **32**, 4548-4552 (2011).

A Query Optimization Approach for Efficient Repeated Graph Traversal with based on Scale-free Property

Kenji HATANO* and Kazuma KUSU*

(Received September 16, 2024)

Graphs are data structures consisting of nodes and edges representing data relationships. Due to their complexity, graphs can become large and complex to manage. Graph Database Management Systems (GDBMS) have been developed to tackle this, allowing efficient search and analysis of large graph structures. In real-world graphs, a few high-degree nodes often dominate, while most other nodes have fewer connections. This fact can lead to inefficiencies in graph traversal, where these high-degree nodes are encountered frequently, slowing down the search process. Our previous research, RPD-index, was designed to reduce the cost of searching high-degree nodes. As the graph grows, however, building the RPD-index becomes time-consuming. This study proposes a more efficient method for constructing the RPD-index and evaluates its effectiveness in improving the performance of graph traversal while minimizing construction time.

Keywords: graph database, graph index, repetition path

キーワード：グラフデータベース，グラフ索引，反復経路

スケールフリー性を考慮した反復的グラフ走査を含む問合せ最適化

波多野 賢治, 楠 和馬

1. はじめに

グラフはノードとエッジで構成されるデータ構造の一種であり、それらの組合せによりデータ内の関係性を表現することができる。一般的に、ノードは人や物などのような実体をもつデータを、エッジは実体同士の関係性を表現するため、グラフは実体間の関係性を表現したデータとして扱うことが可能である。

しかし、グラフデータは関係性を表現するために容易に巨大かつ複雑になりやすい性質があることが、ネットワーク科学分野の研究により明らかとなっている²⁾。そのため、グラフを効率的に検索するグラフデータベース管理システム（GDBMS）が開発され^{3),4)}、グラフ検索効率化を図るデータ構造が研究されてきた。GDBMSは、ノードごとにエッジが張られているノード（隣接ノード）を参照できるように管理されているため、グラフの要素数が増

加してもグラフ検索の性能に直接的に影響を受けないという特性を持っている。

一方で、GDBMSの特性上、隣接ノード数（度数）が大きいノードの存在はグラフ検索における効率性のボトルネックになる。グラフが持つスケールフリー性は、度数が大きいノードは少数であるが、エッジを繰り返し辿ることで走査中のノードが度数の分だけ倍増するため高次数なノードに到達する可能性を高くする。したがって、高次数なノードに到達した場合であっても効率的な処理を可能にする方法を提案する必要がある。

我々の以前の研究では、GDBMSにおいて検索コストが高い処理を省略可能にするデータ構造（索引）であるRPD-indexを提案した⁵⁾。また、クエリ内で指定されたグラフ走査回数に従い、繰り返しエッジを辿る処理（反復グラフ走査）を実行中にRPD-indexを利用可能にするグラフ走査フレーム

* Faculty of Culture and Information Science, Doshisha University, Kyoto 610-0394, Japan
Telephone: +81-774-65-7663, E-mail: {hatano,kusu}@mil.doshisha.ac.jp

ワークも提案した。RPD-index を用いることで、索引を用いない場合に比べて反復的なグラフ走査（以下、反復走査）の速度を最大 1.38 倍高速化することができた。

しかし、グラフ要素数の増加に伴い索引構築に要する時間が指数的に長くなる問題が残っている。そこで本研究では、グラフ索引 RPD-index を効率的に構築する方法を提案する⁶⁾。また、索引構築の効率評価に加えて索引読出しによる遅延が発生しても処理性能を向上させることができるか確認するため、索引を用いたグラフ走査の処理性能向上における有用性を示すための評価実験を行う。

2. 関連研究

本節では、問合せ内の経路を検索するために、隣接リストに基づくグラフ走査に焦点を当てた研究を議論する。

2.1. 隣接リストに基づくグラフ走査

GDBMS は、各ノードの隣接リストを参照することで、効率的にグラフ走査することができる^{3),7)}。しかし、従来の GDBMS は、各ノードの隣接リストのような局所的な索引しか持たないため、長い経路のグラフ走査を実施するには膨大な時間を要する。GDBMS が「友達の友達」や「文書リンクの連結」のような反復的にエッジをグラフ走査する必要がある問合せを実行する場合、高次数なノードに到達するとを走査する必要のある経路数が大幅に増加する。その結果、検索対象が低次数なノードであっても、グラフ走査においては高次数なノードを辿る可能性が高くグラフ走査性能の向上の余地がある。

2.2. 経路索引

ほとんどのグラフ索引は、膨大な数の小さなグラフを対象として設計されてきた。⁸⁾ こうしたグラフを対象としたグラフ索引を用いて巨大な単一グラフを索引付けする場合、相互に接続されるグラフ要素が増加するため索引の構築時間が長くなる。また、あらゆる問合せで頻繁に検索される経路パターンを索引付けするには索引対象が膨大な数となり、グラフ索引サイズも大きくなる。

3. 提案手法

本研究における高次数なノード (HDN; High-Degree Node) の概念は、ネットワーク科学におけるハブと呼ばれる別の概念と重複する²⁾。これに対して、HDN 以外のノードは低次数ノード (LDN; Low-Degree Node) と定義する。スケールフリーやスモールワールドといった実世界のグラフの性質から、他のノードから反復経路を検索すると HDN に到達する確率が高くなることに着目する。本研究では HDN に対するグラフ走査にかかる処理コストを削減し、GDBMS が効率的に反復的なグラフ走査を実行可能なグラフ索引を提案する。

3.1. 反復経路索引のデータ構造

RPD-index は索引付けが重複するという冗長性が含まれており、その影響により構築コストが高くなっていた⁵⁾。索引付けで生じる冗長性を削減するために、本研究では到達可能なノードの検索に特化したグラフ索引を提案する。RPD-index を効率的に構築するために、索引付けの単位を経路からノードに変更し、索引付けされる反復経路を効率的に検索できるように再帰的に索引を利用可能な仕組みを導入する。これは、GDBMS がノードを HDN であるかどうかを判断しながら、効率的に反復経路を検索できるようにすることが目的である。そのため、HDN を他のノードと区別するために、グラフデータが実用上で反復的に走査されることが多いエッジのラベルを考慮する必要がある。クエリ内では基本的に 1 種のラベルと任意の回数を指定して経路パターンが指定されるため、本研究もそれに倣う。

Figure 1 はハッシュマップを用いた RPD-index のスキーマを示しており、キーは HDN ID と反復経路の長さの組であり、値は HDN からの反復経路のリストである。

3.2. 反復経路索引の構築アルゴリズム

グラフ内を走査する場合、同じノードを辿る可能性があることを考慮し、幅優先探索により繰返し経路のための索引付けを行い、探索中に LDN に到達した場合は探索を継続する。一方で、他の HDN に到達した場合はその HDN 以降の探索は索引付けられるため探索を中断し Alg. 1 の

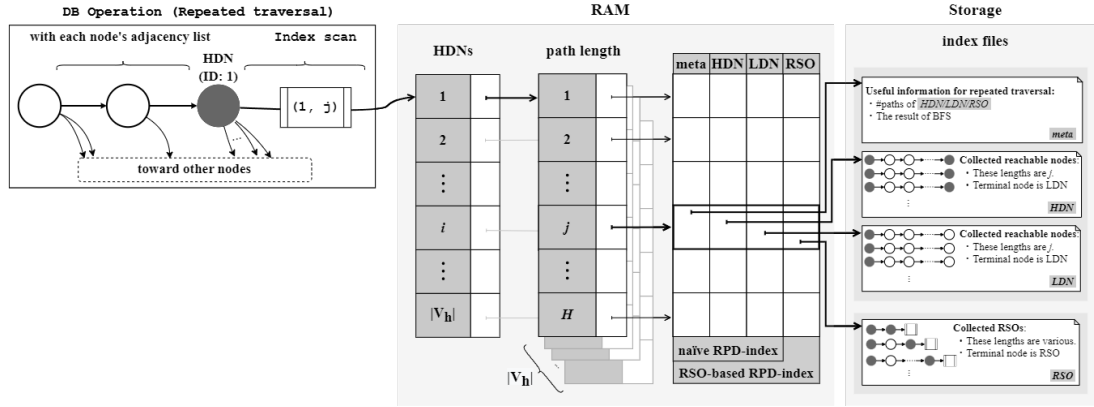


Fig. 1 RPD-index. This figure is a schema of RPD-index.

Alg. 1 CREATERECURSIVESCANOPERATION

Input hdn: an HDN, hop: a number of hops.

Output rso: a data structure for an RSO.

- 1: **function** CREATERECURSIVESCANOPERATION(hdn, hop)
- 2: rso.hdn $\leftarrow$ hdn
- 3: rso.hop $\leftarrow$ hop
- 4: **return** rso
- 5: **end function**

CREATERECURSIVESCANOPERATION により, HDN の ID と残りホップ数と記録した再帰索引読み込み命令 (RSO) を生成する. 生成した RSO は Fig. 1 の左側に示すように HDN 以降の経路の代わりに索引付けする.

上記の方法により, 繰り返し走査中に到達した HDN に対するグラフ走査を回避できるようになるため, RPD-index 構築時間の削減を可能にする.

3.3. 反復経路索引を用いたグラフ走査

本項では, RSO が格納された RPD-index (RPD-index w/ RSO) を利用した繰り返し走査のアルゴリズムについて述べる.

RPD-index w/ RSO は, RSO によって省略された反復経路の本来の到達ノードを得るために, 全ての RSO を実行する. また RPD-index w/ RSO は, Alg. 2 の 2 行に示すように, 指定された HDN とそのノードからのホップ長が与えられた場合, 到達した HDN から実行すべき RSO を取得することができる. RSO は HDN の数に等しい長さを持つ配列であり,

Alg. 2 Traversal with RPD-index.

Input hdn: HDN ID, hop: 走査回数

Output D: 全ノードに対する距離配列

- 1: $D \leftarrow \text{RPDi}[(\text{hdn}, \text{hop})].\text{BFS}$
- 2: $R \leftarrow \text{RPDi}[(\text{hdn}, \text{hop})].\text{RSO}$
- 3: **for each** rso $\in R$ **do**
- 4: $D_r \leftarrow \text{rso.EXECUTE RSO}()$
- 5: $D \leftarrow \text{MINIMIZE DIST}(D, D_r)$
- 6: **end for**
- 7: **return** D

配列要素は HDN ID と反復走査の回数の両方を持ち, Alg. 3 の Alg. 2 行において, EXECUTE RSO を呼び出す. これにより, RPD-index w/ RSO の再帰探索を実現し, 反復経路の表現の冗長性を低減することができる. 最後に, 元の到達ノードと指定された HDN からの距離を計算するために, 5 行の各ノードの距離集合から, 各ノードの最小距離を選択する.

RSO により索引構築時の冗長性を削減することができるが, 索引探索に要する処理時間とトレードオフの関係がある. RSO の実行により索引からのデータ読み出しが発生し索引探索に要する処理時間も増加するため, グラフ走査による処理時間と比較する必要がある.

4. 評価実験

本節では, 索引構築性能と反復走査性能の二つの実験評価を行う. RPD-index w/ RSO の有効性を, 索引構築と索引探索に要する時間の観点から評価す

Alg. 3 RSO execution.

Input maxhop: 走査上限回数**Output** RPDi: RSO RPD-index

```
1: function EXECUTE_RSO(maxhop)
2:   hopr = maxhop - rso.hop
3:   return RPDi[(rso.hdn, hopr)]
4: end function
```

Table 1 Experimental environment.

項目	内容
OS	Rocky Linux 9.1 (x86_64)
CPU	Intel Xeon Silver 4114 (2.20 GHz, 10 core) × 2
RAM	256 GB

Table 2 LDBC SNB dataset.

SF	# ノード	# エッジ
1	3,181,724	17,256,038
10	29,987,835	176,623,445
100	337,403,991	2,286,478,782

る. RSO を用いない RPD-index (RPD-index w/o RSO) を構築する方法と, RPD-index w/ RSO の構築に要する時間を実験的に比較した. また, 隣接リスト (ベースライン) や RPD-index w/o RSO, RPD-index w/ RSO を用いたグラフ走査と比較して, 反復走査を効率的に行うことができるかを評価した. 本実験で用いた計算環境は Table 1 に示した通りである.

4.1. ベンチマーク

本実験では, 反復経路を検索する手法の性能とそのスケール可能性を評価するために, 巨大で複雑な実グラフを模したグラフデータとそのデータに対する問合せ例を必要とした. そこで, データ量を調整可能な Linked Data Benchmark Council (LDBC)⁹⁾ が開発した Social Network Benchmark (SNB) を利用する.

LDBC SNB は, ソーシャルネットワークとしてモデル化されたデータセットを生成し, スケールファクタ (SF) でデータ量を調整することができる. したがって, このベンチマークで GDBMS のスケール可能性を評価することができる.

実験の準備として以下の作業を行った.

- Table 2 に示すように, プログラム¹⁰⁾ で SF を 1, 10, 100 とし, 三つのサイズのデータセットを用意した.
- 最後に, 度数分布に従って, 各ノードが HDN か LDN かを決定した.

LDBC SNB の問合せには, 2 種類の反復経路がある¹¹⁾. 一つ目は, 二つのユーザ間の知人関係を表す **knows** とラベル付けされたエッジから構成される. 一方, 二つ目は **replyOf** とラベル付けされたエッジで構成され, **replyOf** は投稿やコメントに対する返信を表す. 本実験では, 反復走査が高コストになりやすい多対多関係である **knows** 関係を索引付けの対象に採用した.

4.2. 索引構築の性能評価

Table 2 に示すように, 多様なデータ量に対して RPD-index w/ と w/o のそれぞれを構築し, 提案手法の有効性を評価した. 特に, RPD-index w/ RSO を構築するために消費される時間について, RPD-index w/o RSO と比較して評価した. また, 反復走査の開始ノードである HDN 集合の大きさは, SF や HDN 比率によって異なる. そこで, SF10 以下の HDN を全て反復走査の開始ノードとした. SF100 の場合は, HDN の総数が過剰に多くなるため SF10 と HDN 比 20% の場合と同じ HDN 数とし, RPD-index の設定に従って全 HDN から無作為に選択した.

4.1 で述べたように, 本実験では, 多対多の関係であるため, **Person-knows-Person** パターンに対して索引付けを行った. 各 SF と閾値 $\theta_{n\%}$ の場合について, RSO を考慮する場合としない場合のそれぞれの構築時間を測定したが, Table 3 により, どちらの RPD-index も各 SF に関する索引付けを終了できたことを示している.

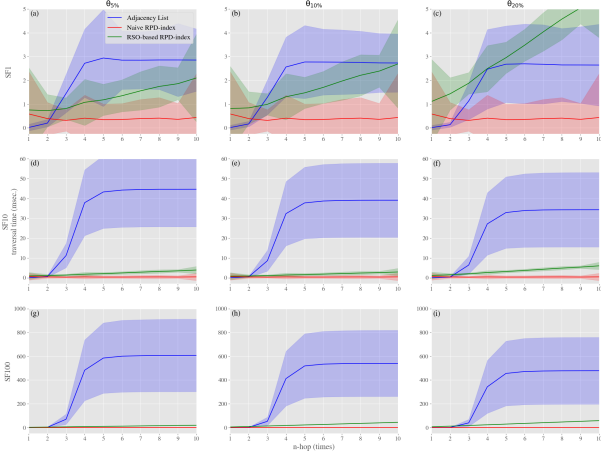
4.3. 索引利用の性能評価

本節では, RPD-index の効率的な反復走査の有効性を評価することを目的とし, 各 HDN からの反復走査に要する処理時間を計測する実験を行った. 本実験では, 4.2 項で説明したデータサイズと HDN 比率を利用した.

本実験では, SF と HDN 比の全てのケースにおい

Table 3 Time consumption for indexing RPD-index w/ and w/o RSO

SF	HDN 比 $\theta_n\%$	RPD-index w/o RSO		RPD-index w/ RSO	
		All (sec.)	(sec./HDN)	All (sec.)	(sec./HDN)
1	5%	5''	0.011	4''	0.010
1	10%	8''	0.008	8''	0.008
1	20%	16''	0.008	13''	0.007
10	5%	3'29''	0.064	2'59''	0.054
10	10%	7'4''	0.065	4'37''	0.042
10	20%	13'22''	0.061	5'22''	0.024
100	5%	4°24'44''	0.708	3°13'49''	0.520
100	10%	8°42'7''	0.698	5°26'56''	0.453
100	20%	17°45'32''	0.732	6°27'8''	0.259


Fig. 2 The time performance for repeated traversal.

て、反復経路の最大長を 10 とした。また、反復走査の開始ノードである HDN 集合のサイズは、スケールファクターと HDN 比によって異なる。そこで、SF10 以下では全ての HDN を反復走査の開始ノードとする。SF100 の場合は、SF10 と HDN 比 20% の場合と同数の開始 HDN 数を設定し、RPD-index の設定に従って全 HDN から無作為に選択した。

さらに、本実験では、隣接リスト、RSO の有無の差に基づく RPD-index の 3 種のアプローチについて、反復経路のグラフ走査性能を比較した。2 種の RPD-index の実験結果から、反復走査と索引探索の性能を確認することができた。

Figure 2 は、前述の 3 種のアプローチのグラフ走査性能の比較結果として、反復走査の消費時間を示している。Figure 2 の各 x 軸は HDN から反復経

路の長さを示し、各 HDN からのホップ数 (n) を示す。Figure 2 の各 y 軸は反復走査の消費時間を表す。詳細には、それぞれの折れ線グラフにおいて、折れ線はホップ長別の反復走査の平均消費時間を示し、折れ線に並んだ帯は誤差範囲を示す。また、誤差範囲の上限値 e_i^{upper} と下限値 e_i^{lower} は、Eq. (1) を用いて計算した。

$$e_i^{\text{upper}} = \mu_i + \sigma_i, \quad e_i^{\text{lower}} = \mu_i - \sigma_i, \quad (1)$$

ここで、 μ_i は長さが i (本実験の設定では ≤ 10) の反復経路の平均消費時間を表し、 σ_i はホップ長による消費時間の標準偏差を表す。

4.4. 考察

本節では、実験的評価の結果に基づき、本研究の貢献について以下のように考察する。

索引探索性能. RPD-index と naïve RPD-index の性能は、各手法の標準誤差を表す帯域に着目することで、隣接リストを用いた探索と比較して安定していた。一方、Fig. 2(a), (b), (c), Fig. 2(d), (e), (f) に示すように RPD-index では、閾値 ($\theta_n\%$) が消費時間に影響していた。

Figure 2(c), (d), (e), (f) のように、RPD-index を用いることで、HDN から 3 ホップ以上の反復経路を高速に検索することができる。RSO を用いた RPD-index の探索は、SF10 と 100 の全ての状況で隣接リストを用いたグラフ走査よりも優れていた。SF1 の場合、グラフが小さいため、各ノードの次数は全体的に小さくなる。そのため、各 HDN の隣接リス

トを参照した場合の性能は、Fig. 2 の帯の重なりから示唆される通り、RPD-index 探索した場合と同等かそれ以上に高速であった。また、SF1 では、RSO ベースの RPD-index は、隣接リストを参照する時間に対して RSO の実行時間が消費されるため、ベースラインである隣接リストに基づくグラフ走査よりも反復走査性能が遅くなる。しかし、ホップ長が大きくなるにつれて、RSO を用いた RPD-index を用いた反復探索の性能はベースラインと比較して大幅に向上する。

索引構築性能. Table 3 で示したように、同じ SF で HDN あたりの索引構築時間は一定であった。一方、RPD-index では、省略可能な探索が増えるため、HDN 比率が大きくなるほど HDN あたりの消費時間が速くなる。Table 3 に示す通り、RPD-index は、SF が大きいほど消費時間が短くなることがわかった。この結果から、HDN 比 $\theta_n\%$ が大きいほど良いというわけではなく、効果的に消費時間を短縮できる限界は $\theta_{20\%}$ であることがわかった。これは、一般的に次数分布はべき乗則に従うため、最低次数から上位 80% は LDN で占められているためである。

5. おわりに

本研究では、GDBMS 上で効率的な反復走査を行うためのグラフ索引 RPD-index と、索引付けの効率化を可能にする方法を提案した。3 種のグラフに対して索引構築時間を計測したところ、RSO を用いることで RPD-index の構築を高速化することができた。ノードの平均次数が小さくなるような小さなグラフデータでは索引が上手く機能せずグラフ走査を非効率化させるが、データサイズが大きくなるにつれて RPD-index を利用したグラフ走査の方が性能が上回る結果が得られた。

今後の課題としては、索引付けの対象を単一のラベルに限定する制約を取り除くことで RPD-index の汎用性を拡張する。

本研究は、ハリス理化学研究所研究助成金、同志社大学大学院文化情報学研究科研究推進補助金、JSPS 科研費 JP21H03555, JP22H03594, JP23H03694,

JP23H03401 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Marko A. Rodriguez and Peter Neubauer. Constructions from Dots and Lines. *Bulletin of the American Society for Information Science and Technology*, Vol. 36, No. 6, pp. 35–41, 2010.
- 2) Albert-László Barabási and Márton Pósfai. *Network Science*. Cambridge University Press, 2016.
- 3) Neo4j. Neo4j Graph Database, <https://neo4j.com/>, (accessed on Sep. 10th, 2024).
- 4) TigerGraph. TigerGraph, <https://www.tigergraph.co.jp/>, (accessed on Sep. 10th, 2024).
- 5) Kazuma Kusu and Kenji Hatano. A Hub-based Graph Management for Efficient Repetition Path Traversing. In *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing*, pp. 188–191. IEEE, 2021.
- 6) Kazuma Kusu, Takahiro Komamizu, and Kenji Hatano. Towards Efficient Data Access Through Multiple Relationship in Graph-Structured Digital Archives. In *From Born-Physical to Born-Virtual: Augmenting Intelligence in Digital Libraries*, pp. 377–391. Springer International Publishing, 2022.
- 7) Ian Robinson, Jim Webber, and Emil Eifrem. *Graph Databases*. O'Reilly Media, Inc., 2015.
- 8) Sherif Sakr and Ghazi Al-Naymat. The Overview of Graph Indexing and Querying Techniques. In Sherif Sakr and Eric Pardede, editors, *Graph Data Management: Techniques and Applications*, chapter 4, pp. 71–88. IGI Global, 2012.
- 9) LDBC. LDBC's HP, <http://ldbncouncil.org/>, (accessed on Sep. 10th, 2024).
- 10) LDBC. `ldbc/ldbc_snb_datagen.git`, https://github.com/ldbc/ldbc_snb_datagen, (accessed on Sep. 10th, 2024).
- 11) Orri Erling, et al. The LDBC Social Network Benchmark: Interactive Workload. In *Proceedings of the 2015 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, pp. 619–630. ACM, 2015.

An Empirical Analysis on Characteristics of Japanese Environmental Consciousness and Pro-environmental Behavior

Yuejun ZHENG*

(Received September 13, 2024)

Japanese people's consciousness toward energy issues and environment issues has been falling for the last three decades (A public opinion poll on environment issues, the Cabinet Office of Japan, 1979-2019). The reason retreating Japanese environmental measure is concerned not only with the insufficiency of policy from government initiative but with the Japanese environmental consciousness falling. To improve the quality of environment in and outside Japan sustainably, it becomes a critical issue to evoke people's pro-environmental behavior (PEB) based on the feature of Japanese values, consciousness, and behavior pattern.

This research aims to specify the promotional and obstructive factors of Japanese PEB and explore the PEB evocation methods which are suitable for Japanese based on a statistical survey. Results of data analysis have clarified following facts: Firstly, a large majority of Japanese thinks the citizen is the most important social actor of environment preservation, while recognizing there is a bad influence from the environmental problems, also stressing people should make use of nature. Secondly, most Japanese satisfy with the current situation of air, water, greenery, and residence conditions near house. Thirdly, few respondents had experience related to participation in the collective environmental conservation activities. Lastly, the performance frequency of PEB is not increasing significantly except bringing the echo-bag, and a lot of respondents think that purchasing eco-friendly products and recycling things are to care for environment, but water saving, energy saving and using public transportation are to save money.

Key words : environmental ethics, environmental awareness, plastic trash, food loss, decarbonized society

キーワード : 環境倫理, 環境認知, プラスティックゴミ, フードロス, 脱炭素社会

日本人の環境意識と環境配慮行動の特徴に関する実証分析

鄭 躍軍

1. はじめに

日本は 1970 年以降公害対策と環境行政を積極的に推進し始め、世界から「環境大国」という好評を博した後に、1990 年代後半には「環境先進国」を目指していた。しかし、2017 年の COP23 においては、パリ協定離脱を表明した米国と同様に、日本も「環

境後進国」という不評を買った。特に、気候変動に取り組む 130 か国の 1800 を超える世界最大の環境 NGO「Climate Action Network (CAN)」は日本政府の脱化石燃料への取組に消極的であることを理由に、2020 年の COP25 から 4 年連続で不名誉な“化石賞”を日本に贈り、日本を「環境後進国」と悪評している。

*Faculty of Culture and Information Science, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-7489, FAX: +81-774-65-7618, E-mail: yzheng@mail.doshisha.ac.jp.

国内では、内閣府「環境問題に関する世論調査」によると、エネルギー問題と環境問題に対する日本人の関心度が、ここ十数年間低下している¹⁾。言い換えれば、日本における環境対策が後退した原因は、政府主導の対応不足のみならず、日本人の環境意識と行動力が低下しているのではないかと考えられる。他方、2020年に発生した新型コロナウイルス感染症(COVID-19)の拡大にともない、経済活動が停滞していた状況で人びとの意識や行動の変容が見られはじめ、「以前に比べ、環境問題や環境に配慮した暮らしにより関心を持つようになった」と思っている日本人が回答者の50%以上に昇ったと報告された²⁾。

日本政府は地球温暖化ガスの排出量を2030年度までに2013年度比で46%削減し、2050年には実質ゼロにするという高い目標を掲げている。それを着実に達成させるためには、一般市民の環境配慮行動力を向上させる取組が不可欠である。例えば、2020年7月より全国の小売店でレジ袋の有料化が義務づけられた。同年の10月に実施されたISSP国際比較調査「環境」結果によれば、レジ袋を利用している人が有料化前の94%から50%に減り、レジ袋の有料化がプラスチックごみの削減に「つながる」と考える人は70%と高い。つまり、レジ袋の有料化のような取組で環境に配慮したプラスチック製品使用意識の醸成が期待できる³⁾。

同様に、近年多くの地方自治体ではごみを減らすために、リフューズ(Refuse:ごみの発生回避)、リデュース(Reduce:ごみの排出抑制)、リユース(Reuse:製品・部品の再利用)、リサイクル(Recycle:再資源化)という4R取り組みが展開されており、二酸化炭素排出削減及びゴミ減量に寄与している。

今日の環境問題の多くが人間活動に由来している。IPCC第5次評価報告書は人びとの行動を変化させることによって、環境負荷を軽減させることが期待されていると指摘した⁴⁾。言い換えれば、一人ひとりの環境配慮行動の促進こそが環境負荷を軽減させる原動力である。そこで、日本で真価のある脱炭素化社会や資源ゴミの抑制・再利用を本格的に実現するためには、日本人の一般的価値観・意識・行動の特

徴を念頭に置いた環境配慮行動促進策を構築することが重要な課題となる。

本研究では、一般市民の脱炭素化と資源ゴミ再利用に関わる意識と行動を主眼に置き、社会調査データを中心とした実証的研究の視点から、日本人全体の脱炭素化と環境ゴミ再利用に関する意識と環境配慮行動の実態と課題を明らかにし、実効性のある環境配慮行動促進策を構築することを目的とする。

2. 研究方法

研究用データの収集では、18歳以上～79歳以下の日本人を調査対象とし、専門調査会社に登録している公募モニターから性別・年齢の割当により1,500名分以上の有効回答の回収を目標とした。調査票は一般市民の環境意識及び行動(環境倫理、環境認知、環境満足度、環境配慮行動(日常生活・低炭素化・フードロス・4Rなど))に関する一般質問36問、個人の人口統計学的属性9問、計45問から構成されている。

調査は2024年1月11日(木)～18日(木)の8日間にWeb上で実施し、データ・クリーニングを経て有効と判断された1,602名の回答結果を得た⁵⁾。

データ分析方法として、各々の質問の全体的な回答傾向を把握するために、質問ごとの単純集計を行った。また、質問と属性の関連性を検証するために、クロス集計及び独立性検定を行った。なお、質問群の関連性や内部構造を解明するために、対応分析及びロジスティック分析などを用いて進めている。

3. 分析結果

本報では、データ分析結果の基本情報として、環境倫理、環境満足度、環境保全活動、環境配慮行動の4カテゴリーの質問を焦点に絞り、それぞれの質問の全体的な回答傾向と性別との関連性だけを示しておく。

3.1 環境倫理

環境倫理は、あらゆる行動において当事者が環境との関係の中でどのような価値判断を下し、行動選択をするかという倫理的な問題を問うことを指す。特に、自然と人間との関係を論じ、環境保全の根拠

を示す点が重要されている。本研究では、以下の質問を導入して、日本人の環境倫理観を調べた。

問4 自然と人間との関係について、つぎのような意見があります。あなたがこのうち真実に近い（ほんとうのことに近い）と思うものを、1つだけお選びください。

- 1 人間が幸福になるためには、自然に従わなければならない。
- 2 人間が幸福になるためには、自然を利用しなければならない。
- 3 人間が幸福になるためには、自然を征服していかななければならない。
- 4 人間が幸福になるためには、自然と共存しなければならない。（※自由回答の内容をもとに事後追加）

男女別の選択肢ごとの回答割合から、過半数以上の回答者は「自然を利用」を選択していることがわかった（Fig.1）。特に、女性より男性にはそのような傾向が強い。一方、「自然を征服」や「自然と共存」を選ぶ回答者はごく少数であった。

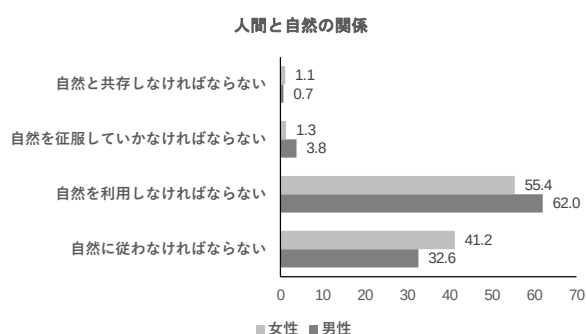


Fig.1. Distribution of response to relation between and nature

環境変化に対する人びとの感知を把握するという視点から、環境問題の日常生活への影響の有無を確認するための質問を設けた。

問5 あなたは、今日のさまざまな環境問題がご自身の日常生活に悪影響を及ぼしていると思いますか。

- 1 そう思う
- 2 ややそう思う
- 3 あまりそうは思わない
- 4 そうは思わない

男女別の回答結果から、性別にかかわらず、約70%の回答者は環境問題が自身の日常生活に何らかの悪影響がある（そう思う＋ややそう思う）と認めていることがわかった（Fig.2）。特に、男性より女性にはその傾向がやや強い。

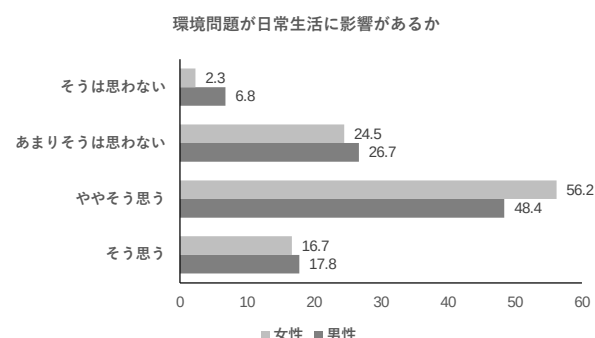


Fig.2. Harmful influences on daily life of environmental problems

自然環境の悪化に対する心配の度合いを問うためには、次の質問を取り上げた。

問11-d（前略）あなたは、つぎのようなことについて不安を感じることはありますか。

d. 自然環境の悪化

- 1 非常に感じる
- 2 かなり感じる
- 3 少しは感じる
- 4 まったく感じない

男女別の回答分布から、約40%の回答者は自然環境の悪化について「非常に感じる」か「かなり感じる」と答えたが、男性より女性の割合が5%ほど高い（Fig.3）。言い換えれば、約60%の回答者は自然環境の悪化に心配していないことがわかった。

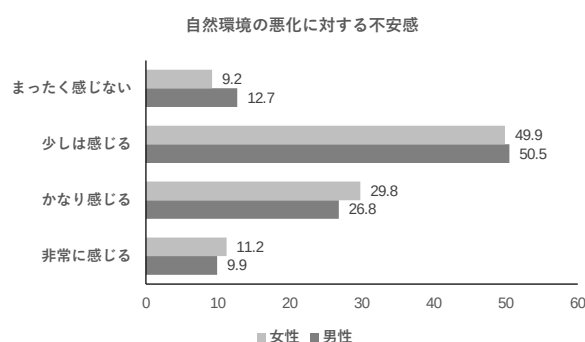


Fig.3. Anxiety over destruction of natural environment

環境を守るためにどの社会的集団がもっとも重要な役割を果たしているかということは重要な論点の1つであるため、以下の質問を設けた。

問25 政府、企業、一般市民、環境NGOのうち、環境を守るためにもっとも重要な役割を果たしているのはどれだと思いますか。

- 1 政府
- 2 企業
- 3 一般市民
- 4 環境NGO

男女別の回答結果から、男女を問わずに約 40%の回答者は、環境を守るためにもっとも重要な役割を果たしている社会的集団として「政府」や「企業」ではなく、「一般市民」を選んだ。また、「政府」とともに「環境NGO」に対する評価は高くないことが浮き彫りになった (Fig. 4)。

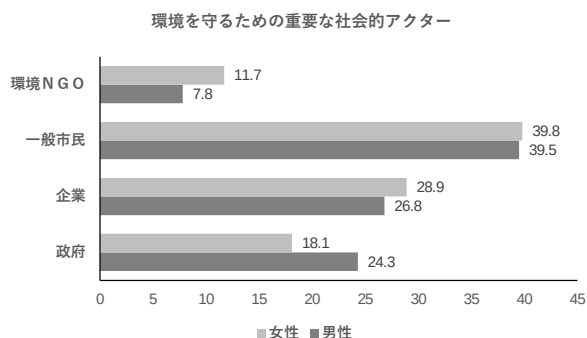


Fig. 4. Most important social group for environmental conservation

3.2 環境満足度

住まいの近くの自然環境に対する満足度は人びとの環境に対する意識を測るための重要な指標の1つである。本研究では、以下の質問を取り上げた。

問 8 あなたは、お住まいの近くの自然環境に、どの程度満足していますか。それぞれの項目について、あなたが感じていることにもっとも近いものをお選びください。

- a. 空気の清浄さ
- b. 水のきれいさ (付近の川や海など)
- c. 緑の豊かさ
- d. 住環境の心地よさ

選択肢：1 満足 2 やや満足 3 やや不満 4 不満

Figure 5は男女別の4つの環境要素に対する回答(「満足」と「やや満足」)をまとめた結果である。

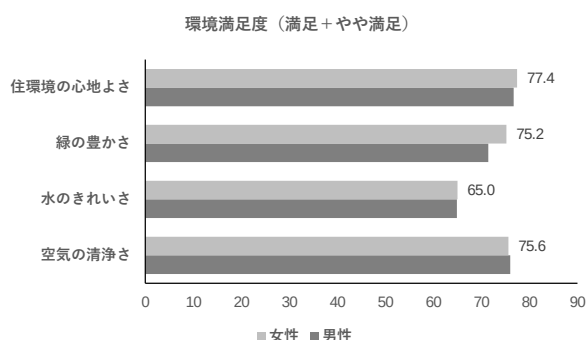


Fig. 5. Feeling of satisfaction with neighboring environments

住まいの近くの自然環境に「満足」と答えた回答者は約 20%に留まっているが、「満足」と「やや満足」を合わせると、「空気の清浄さ」「水のきれいさ」「緑の豊かさ」「住環境の心地よさ」に対する満足感はいずれも 65%以上に達しており、多くの回答者は居住地周辺の環境状況に満足していると言える。なお、男女差はほとんど見られなかった。

国内の環境問題がこれからどう変わっていくかを予想することで、回答者が環境変化を楽観的にみているか、それとも悲観的にみているかを読み取ることができる。ここでは、以下の質問を取り上げた。

問 10 わが国では、これから先の5年間ほどにつぎのような環境問題が好転すると思いますか、それとも悪化すると思いますか。

- a. 空気の汚染
 - b. 水の汚染
 - c. 森林・緑地の減少
 - d. 食品安全性の低下
 - e. 家庭ゴミの増加
 - f. 産業廃棄物の増加
- 選択肢：1 好転する 2 やや好転する
3 変わらない 4 やや悪化する
5 悪化する

Figure 6はもっとも楽観的な選択肢「好転する」を選んだ男女の割合を示している。6つの環境問題のうち、「好転する」割合は10%未満で、すべての環境問題に「変わらない」か「やや悪化する」を選んだ割合がもっとも多い。なお、「食品安全性の低下」を除いて、「空気の汚染」「水の汚染」「森林・緑地の減少」「家庭ゴミの増加」「産業廃棄物の増加」に女性より男性は楽観的に予想している割合が高い。

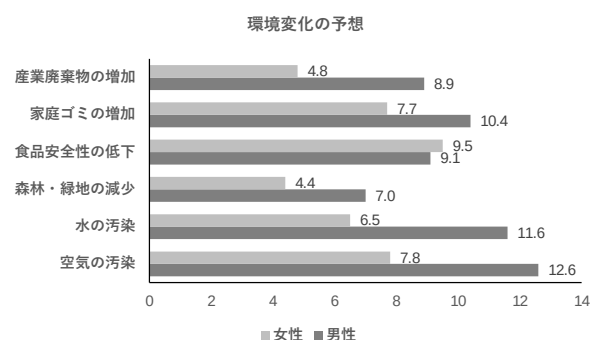


Fig. 6. Prospective views of environmental change in the next five years

3.3 環境保全活動参加経験

環境保全活動は、日常生活の中で誰でも実施でき

ることから、費用がかかることさまざまなものがある。活動参加の有無は環境問題に対する関心の度合を測れるため、以下の質問を取り上げた。

- 問 12 つぎに挙げるような環境問題にかかわる行動について、あなたがこれまでにおこなった経験がある場合は「ある」、経験がない場合は「ない」とお選びください。
- a. 環境に関する講演会やセミナーなどに参加したこと。
 - b. 環境保全などのボランティア活動に参加したこと。
 - c. 環境問題に関する請願書や要望書に署名したこと。
 - d. 環境保護団体に寄付をしたこと。

選択肢：1 ある 2 ない

Figure 7は代表的な環境保全活動に参加したことがある回答の割合を示すものである。性別を問わず、4種類の活動に参加した経験がある回答者はともに10%前後に留まっており、極めて少ない。

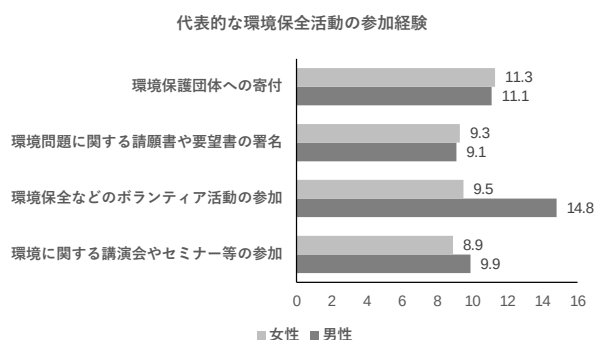


Fig.7. Participation experience of environmental conservation activities

3.4 環境配慮行動

環境配慮行動 (Pro-environmental behavior) は、日常生活において、個人が環境を守るために取れるあらゆる行動である。各々の環境配慮行動が個人の態度、信念と状況的な要因に影響されるため、行動の実施状況及びその理由を聞く質問を導入した。

問 15 つぎに挙げる日常生活で実施できる活動は、あなたがこの1年くらいの間にどの程度実施していますか。それぞれについて、ご自身の状況にもっとも近いものをお選びください。

- a. 省エネ効果が高く、エコマークのついた商品を購入すること。(エコ商品購入)
- b. ものを捨てないで再利用したり、リサイクルに出すこと。(リサイクル)
- c. 洗い物、シャワーに水を無駄使いしないよう努力す

ること。(節水)

- d. 照明、冷暖房などに使うエネルギーを節約するよう努力すること。(省エネ)
- e. 自家用車を使わず、バス、電車などの公共交通機関を利用すること。(公共交通機関利用)
- f. 買い物の時に、買い物袋を持参し、レジ袋や包装を断ること。(レジ袋持参)

選択肢：1 いつもしている 2 時々している

3 あまりしていない 4 まったくしていない

行動の理由を聞くためには、項目ごとに選択肢「1」か「2」を選んだ回答に追加で次の質問を聞いた。

SQ. その理由はなんですか。主な理由を1つだけ挙げてください。

- 1 お金を節約するため 2 環境に配慮するため

Figure 8は過去1年間に6種類の環境配慮行動を実施している(いつもしている+時々している)頻度の回答結果を示すものである。男性より女性があらゆる行動を積極的に実施していることがわかった。また、「エコ商品購入」「公共交通手段利用」を実施している回答者は50%前後であるが、「リサイクル」「節水」「省エネ」「レジ袋持参」のいずれに対しても75%以上の回答者が実施している。

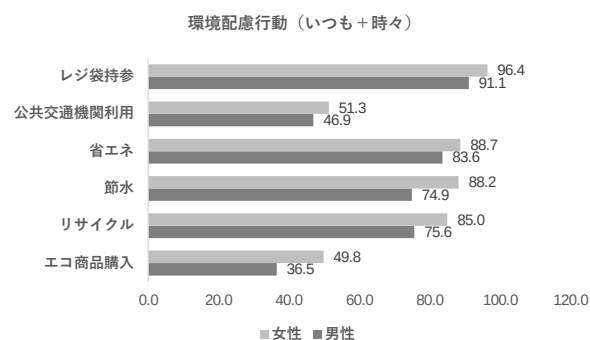


Fig. 8. Practice of pro-environmental behaviors in the last year

Figure 9は「いつもしている」または「時々している」を選んだ回答者のうち、「環境に配慮するため」を選んだ割合を示している。「エコ商品購入」を実施している回答者は少ないが、70%の回答者は「環境に配慮するため」を選んだ。一方、「節水」「節電」「公共交通機関利用」「レジ袋持参」を実施している回答者のうち、「環境に配慮するため」を選んだ回答者の割合は20%から50%の間に留まっている。

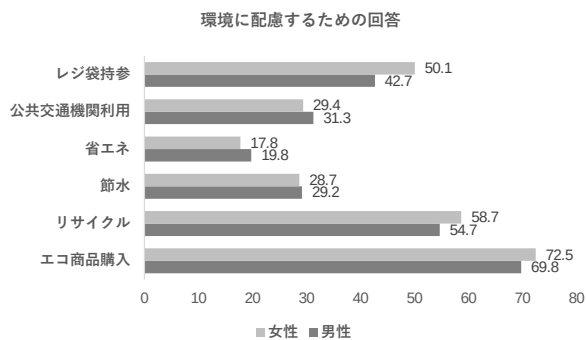


Fig. 9. Reasons for pro-environmental behaviors
環境配慮行動を阻害する要因を特定するためには、以下の質問を設けた。

問 16 普段の生活で環境に優しい行動に取り組もうとすると、次に挙げることは、あなたにとって妨げになると思いますか。

- a. 手間や時間がかかること。
- b. 費用がかかること。
- c. 自分でやれることが思いつかないこと。
- d. 取り組む効果があるのかわからないこと。

選択肢：1 そう思う 2 ややそう思う
3 あまりそうは思わない 4 そうは思わない

Figure 10 は挙げた 4 つの阻害要因に対して「そう思う」か「ややそう思う」を選んだ割合を示している。男女ともに、6 割以上の回答者にとって、環境知識の欠如や費用・時間がかかることはすべての環境配慮行動を妨げる要因となっている。

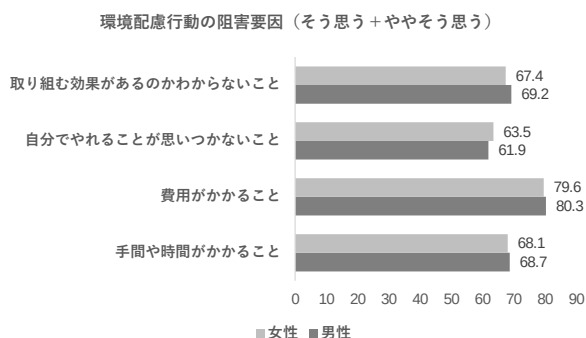


Fig.10. Obstruction factors of people's pro-environmental behaviors

4. 考察

以上の基礎的データ分析結果から、以下のことが明らかになった。

環境倫理：多くの日本人は「自然を利用しなければ

ならない」を選好し、環境問題が自らの日常生活に悪影響を与えている。また、今後の環境が悪化するだろうと予想している。一方、政府や企業ではなく、一般市民が環境を守るためにもっとも重要な社会的集団と考える人は多い。

環境満足度：過去の調査結果と同様に、大多数の日本人は居住地周辺の空気の清浄さ、水のきれいさ、緑の豊かさ、住環境の心地よさに満足している。

環境保全活動経験：環境保全活動に参加した経験がある回答者は極めて少ない。つまり、環境問題を理解し、行動しようとする日本人は少数派である。

環境配慮行動：エコ商品購入、公共交通機関利用を積極的に実施している回答者は少ない一方で、お金を節約するために、もののリサイクル、節水、省エネとレジ袋持参をいつもしている割合は高い。

今後、データ分析をさらに進め、日本人の環境意識と環境配慮行動の特徴を明らかにし、有効性の高い行動喚起対応策を考案していく。

本研究の一部は同志社大学ハリス理化学研究所部門研究費の支援を受けた。

参考文献

- 1) 内閣府, ”環境問題に関する世論調査”, (1979-2019). <https://survey.gov-online.go.jp/r01/r01-kankyoyou/> (2024. 9. 5 閲覧)
- 2) Greenpeace, コロナ禍と暮らしや環境問題への意識に関する調査：報道用資料, (2021). https://www.greenpeace.org/japan/wp/wp-content/uploads/2020/10/820c31ec-20201019_covid_poll.pdf (2024. 9. 4 閲覧)
- 3) NHK, ISSP 国際比較調査「環境」：単純集計結果(日本), (2021). https://www.nhk.or.jp/bunken/research/yoron/pdf/20210201_8.pdf (2024. 9. 4 閲覧)
- 4) IPCC, IPCC 第 5 次評価報告書の概要-WG1(自然科学的根拠), (2013). <https://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/> (2024. 9. 3 閲覧)
- 5) 鄭 躍軍, 王 喆珺, 吉野諒三, ”Web 調査における回答バイアスの検出方法の一検討”, 日本行動計量学会第 52 回大会抄録集, **52**, 222-225, (2024)。

Psychological Safety, Personal Growth, Self-efficacy and Happiness in Organization

Masao YOGO*

(Received September 16, 2024)

Among the potential factors that could adapt to the era of VUCA (Volatile, Uncertain, Complex, and Ambiguous) and improve productivity (performance), we focused on the benefits of ‘Psychological Safety’ in organizations. This paper reports the results of one of our research projects, which measured psychological safety status, self-efficacy and well-being in the Japan Self-defense forces (Maritime SDF and Ground SDF), and calculated descriptive statistics of the variables and correlation coefficients between the variables. Weak positive correlation coefficients were found between psychological safety scores and self-efficacy scores and between psychological safety scores and happiness scores in the MSDF Aviation and surface ships. A moderate positive correlation coefficient was found between self-efficacy scores and happiness scores in the MSDF. No correlation was found between psychological safety scores and self-efficacy scores in the GSDF. Weak positive correlations were found between psychological safety scores and well-being scores, and between self-efficacy scores and well-being scores in the GSDF. The significance of focusing on psychological safety in organizations is discussed.

Key words : Psychological safety, Personal growth, Self-efficacy, happiness, organization

キーワード : 心理的安全性, 自己成長, 自己効力感, 幸福感, 組織

組織の心理的安全性, 自己効力感, 幸福感

余語 真夫

1. はじめに

本稿では, ハリス理化学研究所 C 部門「組織とコミュニティにおける心理的安全性の創成の科学研究」プロジェクト (2023 年 4 月から 2024 年 9 月までの期間) の研究成果の一部を説明する. 同部門では, 八木 匡 (経済学部), 多田 実 (政策学部), 横山勝彦 (スポーツ健康科学部) の各教授を共同研

究者として, 職業組織や地域コミュニティにおける生産性を向上させる方策の一つとして「心理的安全性 (Psychological safety)」¹⁾という概念とその利用価値に着目し検討している.

本稿では部門研究プロジェクトの成果の一部として, 自衛隊をフィールドにした調査研究の暫定的結果を説明する.

*Faculty of Psychology, Doshisha University, Kyoto

Telephone: +81-774-65-8221, FAX: +81-774-65-8223, E-mail: myogo@mail.doshisha.ac.jp

1.1 VUCA の時代

現代の世界-政治、経済、産業、軍事、科学技術、自然災害を含む環境問題などは VUCA という概念で描写できる。その概念は 1985 年に出版された経済学者 Bennis と Nanus の著書「Leaders:The Strategies for Taking Charge」²⁾で登場した。VUCA とは Volatile (変動性), Uncertain (不確実性), Complex (複雑性), Ambiguous (曖昧性) という 4 つの概念を表す用語の頭文字を短縮したものだ。

Volatile (変動性): 現代の科学技術の進歩、それに伴う価値観や社会の仕組み、そして顧客ニーズなどが急激に変化していくことを指す。めまぐるしく変化する世界に対して、人々は将来の予測が困難になっている Z 世代などに代表される人々の考え方の多様化や、AI の急激な発達などのテクノロジーの進化による社会の仕組みの変化などがあげられる。短期間で大幅かつ急速な変化を察知し、迅速に的確な判断をすることが求められる。**Uncertain (不確実性)**: 気候変動、新型コロナウイルス感染症、株価変動、安全保障状況などを的確に予測することは困難である。不確実な要素が多く予測不可能な中での意思決定は難しくなっている。**Complex (複雑性)**: 産業・経済のグローバル化や安全保障情勢の変化、SNS などの情報の拡散により、多様な法律やルール、規範、習慣が混在している目下の世界情勢は複雑化している。**Ambiguous (曖昧性)**: 変動性・不確実性・複雑性が組み合わさることで、因果関係が不明で、前例のない出来事が増えている。これは、過去の実績や成功例に基づいたやり方では通用しない、曖昧性の高い世界へと突入していることを示している。

VUCA という概念は、1990 年代、アメリカ陸軍が着目し、士官学校での教育と訓練、軍事組織における意思決定とリーダーシップを展開させるようになり、世界的に有名になった³⁾。VUCA という諸条件に適応して組織を機能させていくためには、例えば適応力の強化、情報収集と分析、リーダーシップの強化、イノベーションと学習が有用だとされる。適応力の強化とは変動性や不確実性に対応するために、柔軟な戦略や迅速な意思決定を可能にす

る能力の強化を指す。情報収集と分析は、複雑性や曖昧性に対応するために、情報を収集し、状況を理解するための分析能力を高めることだ。リーダーシップの強化では、ビジョンを共有し、チームを鼓舞し、明確な方向性を示すことが求められる。イノベーションと学習とは、新しいアプローチや技術の導入を促進し、継続的な学習を通じて変化に対応すること、試行錯誤を奨励し、学びを活かして改善を図ることを指す。

1.2 心理的安全性

VUCA の時代に適応し生産性（パフォーマンス）を向上させると考えられる潜在的な諸要因の中で、我々は「心理的安全性（Psychological Safety）」に着目した。

心理的安全性の概念は 1960 年代に登場したが、実際に心理的安全性という概念が世界的に注目されるようになったのは、1999 年に Edmondson が定量的研究の成果を発表して以来のことだ⁴⁾。心理的に安全な職場環境では組織全体の学習とパフォーマンスが向上する。

心理的安全性とは、個人がグループ内で自分の意見やアイデアを自由に表現し、間違いを犯しても非難されたり恥をかかされたりすることなく、自分自身でいることができると感じる環境を指す。すなわち、自分の考えを表現したり、質問したり、アイデアを共有したり、ミスをしたりしても、恥をかいったり、拒絶されたり、罰せられたりすることを恐れずにいられるという組織構成員個々人の信念のことである。心理的安全性は、職場において新しい提案や問題の指摘、支援やフィードバックを求めるといった、対人的リスクを選択する結果についての知覚である⁵⁾。

1.3 VUCA 環境と組織の心理的安全性

我々は、VUCA 環境と心理的安全性の関係を次のように想定した。**変動性**: 急速な環境や状況の変動は組織成員に心理的不安やストレス反応を生じさせるが、組織に心理的安全性があれば、組織成員は変化に対処するためのサポートを受けやすくなるだろう。**不確実性**: 不確実性と予測可能性が高い環境や状況では必然的に組織成員にストレス反応が

生じる。心理的に安全な組織では、組織成員は質疑を活発化させ、問題の共有が促進される。**複雑性**: 複雑な問題への対処には組織成員の協力とイノベーションが有用である。心理的に安全な組織では協力とイノベーションが促進されやすい。**曖昧さ**: 曖昧な状況に対処するには実験や学習が必要である。心理的安全性の高い組織では失敗を恐れずに実験を行い、失敗から学ぶ意欲が高まる。VUCA 環境で心理的安全性を育むことで、個人やチームが直面する課題によりよく対処でき、パフォーマンスの向上や革新、全体的な幸福感が得られると考えられる。

英国国防省（Ministry of Defense）が 2021 年から 2022 年にかけて、陸海空軍を含む国防省の隷下組織における心理的安全性の効用に関する定量的・定性的調査研究を実施している⁴⁾。心理的安全性のスコアは、ウェルビーイングスコアの分散の 29.4% を占め、組織のパフォーマンススコアの分散の 37.5% を占めることが明らかになった。VUCA 環境に適応することが求められる国防組織において、心理的安全性は組織のウェルビーイングとパフォーマンスに大きな影響を与えていることが示唆された。

本研究部門では心理的安全性という観点では先行研究が存在しない自衛隊を研究対象とし、心理的安全性、自己効力感、幸福感の相関関係を調べることにした。本研究では、心理的安全性を測定する尺度として国際的に流通している 7 項目¹⁾を使用した。自己効力感²⁾は、個人がある状況において必要な行動を効果的に遂行できる可能性の認知を指し、実際に各種の能力のパフォーマンスや心身健康状態を予測することが知られている⁶⁾。本研究では一般的な状況に対する自己効力感を測定する信頼性と妥当性を備えた尺度として 16 項目の一般性セルフエフィカシー尺度⁷⁾を使用した。最後に、本研究では、組織のウェルビーイングを反映する概念の一つとして 15 項目の主観的幸福感尺度⁸⁾を使用した。

各種の民間組織¹⁾と国防組織⁵⁾で実施された定量的研究の知見にもとづく本研究の基本的な仮説は、自衛隊における成員の心理的安全性スコアの分散

は、成員の自己効力感スコアの分散および幸福感スコアの分散と正の相関を示すというものである。この仮説が支持できる結果が得られた場合、自衛隊のパフォーマンスとウェルビーイングを改善していくために、心理的安全性の涵養に取り組む意義を指摘することが可能になる。

2. 方法

2.1 調査対象

本研究への協力を得た海上自衛隊の航空隊 4 部隊 (n=938)、水上艦 8 隻 (n=1383)、陸上自衛隊の 7 部隊 (n=449) に、2023 年 11 月から 2024 年 1 月までの期間にアンケート調査を実施した。調査対象になった部隊の特定を避けるため、各部隊で得られたサンプル数は明示しない。

2.2 測度

本研究では上述したように、心理的安全性尺度¹⁾、自己効力感尺度（一般性セルフエフィカシー尺度）⁷⁾、主観的幸福感尺度⁸⁾を組み合わせた質問紙を作成した。それぞれの質問項目に対して回答者は「まったくあてはまらない=1 点」から「非常によくあてはまる=5 点」の 5 点尺度で評定するよう求められた。以下の統計解析では、それぞれの測度に対して回答者単位で算出したスコアの平均値を使用した。

2.3 手続き

質問紙は匿名（氏名、ID、年齢、性別、職位などを伏せて）で回答するよう求められた。調査計画は同志社大学心理学部の研究倫理審査を受け、認可（SJ23005）を受けたうえで実施された。

3. 結果と考察

3.1 測度の平均値と標準偏差値

海上自衛隊の航空隊 4 部隊、水上艦 8 隻、陸上自衛隊 7 部隊のそれぞれの心理的安全性スコア、自己効力感スコア、幸福感スコアの平均値と標準偏差値を算出した。なお、部隊の特定を防ぐため、各部隊のサンプル数の表示はしない。

海上自衛隊の航空隊で得られた各部隊の各測度のスコアの平均値に対する 1 要因の分散分析を行

った結果、心理的安全性 ($F(3, 934) = 5.94, p < .001, \text{partial } \eta^2 = 0.02$)、自己効力感 ($F(3, 934)$

Table 1. *Mean and SD of scores on Psychological Safety, Self-efficacy, and Happiness scales calculated by 4 units of Maritime Self-Defense Force aviation (JSDF Aviation)*

	Unit α		Unit β		Unit γ		Unit δ	
	<i>Mean</i>	<i>SD</i>	<i>Mean</i>	<i>SD</i>	<i>Mean</i>	<i>SD</i>	<i>Mean</i>	<i>SD</i>
Psychological Safety	3.81	0.61	3.99	0.72	3.71	0.72	3.69	0.68
Self-efficacy	3.13	0.60	3.23	0.44	3.08	0.54	2.96	0.55
Happiness	2.81	0.42	2.96	0.42	2.78	0.43	2.76	0.48

Table 2. *Mean and SD of scores on Psychological Safety, Self-efficacy, and Happiness scales calculated by 8 units of Maritime Self-Defense Force destroyers (JSDF Surface ships)*

	Unit α		Unit β		Unit γ		Unit δ	
	<i>Mean</i>	<i>SD</i>	<i>Mean</i>	<i>SD</i>	<i>Mean</i>	<i>SD</i>	<i>Mean</i>	<i>SD</i>
Psychological Safety	3.81	0.61	3.99	0.72	3.71	0.72	3.69	0.68
Self-efficacy	3.13	0.60	3.23	0.44	3.08	0.54	2.96	0.55
Happiness	2.81	0.42	2.96	0.42	2.78	0.43	2.76	0.48

	Unit ϵ		Unit ζ		Unit η		Unit θ	
	<i>Mean</i>	<i>SD</i>	<i>Mean</i>	<i>SD</i>	<i>Mean</i>	<i>SD</i>	<i>Mean</i>	<i>SD</i>
Psychological Safety	3.75	0.60	3.66	0.68	3.60	0.67	3.64	0.67
Self-efficacy	2.93	0.47	2.95	0.54	2.98	0.50	3.05	0.56
Happiness	2.79	0.41	2.67	0.52	2.74	0.43	2.68	0.47

Table 3. *Mean and SD of scores on Psychological Safety, Self-efficacy, and Happiness scales calculated by 5 units of Grand-Self-Defense Force (JGSDF)*

	Unit α		Unit β		Unit γ		Unit δ		Unit ϵ	
	<i>Mean</i>	<i>SD</i>	<i>Mean</i>	<i>SD</i>	<i>Mean</i>	<i>SD</i>	<i>Mean</i>	<i>SD</i>	<i>Mean</i>	<i>SD</i>
Psychological Safety	3.83	0.65	3.91	0.56	3.78	0.75	3.77	0.67	3.67	0.89
Self-efficacy	3.26	0.56	3.31	0.41	3.24	0.55	3.13	0.53	3.26	0.73
Happiness	2.91	0.32	2.95	0.31	2.90	0.40	2.87	0.44	2.97	0.43

$= 8.40, p < .001, \text{partial } \eta^2 = 0.03$)、幸福感 ($F(3, 934) = 6.20, p < .001, \text{partial } \eta^2 = 0.02$) で有意な効果が認められた。海上自衛隊の水上艦で得られた各

測度のスコアの平均値に対する 1 要因の分散分析を行った結果、心理的安全性 ($F(7, 1536) = 2.67, p < .001, \text{partial } \eta^2 = 0.01$) で有意な効果が認められた

が、自己効力感 ($F(7, 1536) = 1.38, p < .021, \text{partial } \eta^2 = 0.01$)、幸福感 ($F(7, 1536) = 1.95, p < .006, \text{partial } \eta^2 = 0.01$) では有意な効果が認められなかった。陸上自衛隊で得られた各測度のスコアの平均値に対する 1 要因の分散分析を行った結果、心理的安全性 ($F(4, 444) = 0.50, p < .074, \text{partial } \eta^2 = 0.00$)、自己効力感 ($F(4, 444) = 1.03, p < .039, \text{partial } \eta^2 = 0.01$)、幸福感 ($F(4, 443) = 1.47, p < .021, \text{partial } \eta^2 = 0.01$) のいずれの測度においても有意な効果は認められなかった。

以上の解析結果は、海上自衛隊航空隊においては部隊間で心理的安全性、自己効力感、幸福感のスコアに差異があり、海上自衛隊水上艦艇間では心理的安全性のスコアに差異があること、また陸上自衛隊部隊間ではそれらの測度スコアに差異が認められないことを示唆した。

3.2 測度間の相関係数

海上自衛隊の航空隊と水上艦艇、陸上自衛隊部隊のそれぞれにおける各測度スコア間のピアソンの相関係数を算出した (Table 4)。

海上自衛隊航空隊と水上艦においては心理的安全性スコアと自己効力感スコアとの間、また幸福感スコアとの間に弱い正の相関係数が認められた。自己効力感スコアと幸福感スコアとの間には中程度の正の相関が認められた。陸上自衛隊においては心理的安全性スコアと自己効力感スコアとの間には相関は認められなかった。心理的安全性スコアと幸福感スコアとの間、また自己効力感スコアと幸福感スコアとの間には弱い正の相関が認められた。

海上自衛隊航空隊、水上艦、陸上自衛隊部隊において、心理的安全性と幸福感が正の相関を示すこと、すなわち心理的安全性とウェルビーイングが相関することを示唆した。また自己効力感が比較的一貫して幸福感との間で正の相関を示すことを示唆した。

3.3 本研究の解析結果が示唆すること

本研究では海上自衛隊の航空隊と水上艦、陸上自衛隊部隊で心理的安全性に関する質問紙データを得た初の事例である。本研究の結果、心理的安全性は自衛隊において一定の心理学的機能を果たしている可

能性が示唆された。

Table 4. Pearson's correlation coefficients among Psychological Safety, Self-efficacy, and Happiness scales calculated by Maritime Self-Defense Force aviation (JSDF Aviation), Maritime Self-Defense Force (JSDF destroyers), and Grand Self-Defense Force (JGSDF)

<u>JSDF Aviation</u>		
	1	2
1. Psychological Safety		
2. Self-efficacy	.31*	
3. Happiness	.35*	.61*
<u>JSDF Destroyers</u>		
	1	2
1. Psychological Safety		
2. Self-efficacy	.33*	
3. Happiness	.30*	.55*
<u>JGSDF</u>		
	1	2
1. Psychological Safety		
2. Self-efficacy	.12	
3. Happiness	.47*	.46*

海上自衛隊の航空隊、水上艦においては、心理的安全性のスコアに部隊（艦艇）間の差が認められたが、陸上自衛隊の部隊間ではそのような差は認められなかった。このことは、海上自衛隊の航空隊および水上艦艇における心理的安全性のレベルは、独立した職場の物理的環境と人的環境の影響を受けやすい可能性があり、一方、陸上自衛隊の部隊は比較的均質であることを示唆している。とはいえ、こうした組織による差が認められた背景には、サンプル数の違いが反映されている可能性を排除して解釈することはできない。

組織のウェルビーイングとの関連では、心理的安全性のスコアよりも自己効力感のスコアの方が強い正の相関を示したが、心理的安全性スコアとの正の相関も一貫して認められた。この結果は、英国国防

(Ministry of Defense, 2022) ならびに民間職業組織 (Edmondson, 1999) で得られた定量的分析の結果と一致する傾向であると考えられる。

今後の研究課題は、第一に、組織の生産性（パフォーマンス）の客観的スコアと心理的安全性のスコアの関係性を調べることだ。第二に、心理的安全性のスコアが相対的に低い組織において、心理的安全性のレベルを改善する介入を行うことが組織のパフォーマンスとウェルビーイングのレベルの改善を導くのかどうかを確かめることだ。本稿では自衛隊を対象にした心理的安全性およびその他の心理学の変数についてのデータと解析結果を示したが、さまざまな構造と機能を備えた民間組織において同様の質問紙調査を実施することにより、組織の特性に独自の心理的安全性の機能と効用を明らかにすることができるかもしれないし、異質な組織に横断的で普遍的な心理的安全性の機能と効用を明らかにすることができるかもしれない。

最後に、冒頭に言及した VUCA 環境に組織が適応していく方策の一つとして心理的安全性のレベルの改善が実際にどれほど有効であるのかを検討することが、今後の重要な研究課題である。

本稿の研究プロジェクトは同志社大学ハリス理化学研究所部門研究費（2023 年度, 2024 年度）によって実現できた。またデータ管理と統計処理では部門研究補助員の間賀田悠吾氏（同志社大学大学院心理学研究科博士課程後期課程生）の支援を受けた。最後に海上自衛隊と陸上自衛隊には本研究の趣旨を理解し、貴重なデータを収集することに協力をしていただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) A. エドモンドソン（著）村瀬俊朗・野津智子（訳），恐れのない組織：「心理的安全性」が学習・イノベーション・成長をもたらす，（英治出版，東京，2021）。
- 2) W. G. Bennis and B. Nanus, “Leaders: The Strategies for Taking Charge”, (Harper Business, New York, 2007).
- 3) P. Kingsinger, and K. Walch, “Living and leading in a VUCA world”, (Thunderbird University. Retrieved from <http://knowledge.network.thunderbird.edu/research/2012/07/09/kingsinger-walch-vuca/>).
- 4) Ministry of Defense, “Psychological Safety in MOD Major Projects”, (Ministry of Defense, London, 2022).
- 5) A. バンデューラ（著）原野広太（訳），社会的学習理論，（金子書房，東京，1979）。
- 6) 坂野雄二・東條光彦，“一般性セルフ・エフィカシー尺度作成の試み”，行動療法研究，12，73-82, 1986.
- 7) 伊藤裕子・相良順子・池田政子・川浦康至，“主観的幸福感尺度の作成と信頼性・妥当性の検討”，心理学研究，74，276 - 281, 2003）。

Research on Japanese Television as a Medium for Science Communication

Taichi MASU*, Yasuhito ABE**

(Received September 13, 2024)

In order to clarify the characteristics of Japanese television as a medium for science communication, this study conducted a program content analysis of television broadcast about scientific topics during the year 2023-2024. We selected 'blue carbon' as the science topics, which is currently attracting a lot of attention and media exposure in Japan and requires a certain level of scientific knowledge for viewers to understand its content. The content analysis was conducted using a coding method based on the level of science communication expected by blue carbon researchers and covered 18 TV programs. The results revealed that some of the content, which researchers expected to be communicated by the programs were not communicated to the viewers by any of the programs, highlighting the characteristics and challenges of Japanese television as a medium for science communication.

Key words : science communication, television, blue carbon, content analysis

キーワード : 科学コミュニケーション, テレビ, ブルーカーボン, 内容分析

科学コミュニケーション手段としての日本のテレビ放送研究【経過報告】

梶 太一, 阿部 康人

1. はじめに

科学技術の急速な発展と日常生活への浸透に伴い、科学に関する情報や議論を社会全体で広く共有し議論する「科学コミュニケーション」の重要性が高まる中、これまで日本ではサイエンスカフェに代表される双方向的手段による実践と研究が積み重ねられてきた。しかし近年、サイエンスカフェがリーチする市民は「科学・技術への関心層」に偏る傾向が強めて強く、低関心層には殆どリーチできていないことが指摘され始め¹⁾、世論調査の結果から8割以上

が低関心層に属するとされる日本においては特に、効果範囲が極めて限定的であることが新たな課題として浮かび上がってきた。そのため、既存マスメディアに代表される一方向的手段も含めて、多様な科学コミュニケーション手段に視野を広げ、それぞれの効果と特性を理解して活用していく必要性が強調され始めている。科学低関心層にもリーチしうる手段の有力候補として²⁾は「テレビ」と「インターネット」の2つを挙げており、後者は比較的近年発展してきた新興メディアとして海外を中心に学術研究

* Harris Science Research Institute, Doshisha University, Kyoto

Email: tmasu@mail.doshisha.ac.jp

** Department of Media, Journalism and Communications Faculty of Social Studies, Doshisha University

Email: yabe@mail.doshisha.ac.jp

が展開され始めている。一方、前者の「テレビ」は歴史の長い既存メディアであり、インターネットを始めとするメディアの多様化により近年は相対的に影響力が減じていると指摘されているものの、直近の新型コロナウイルスに関する情報流通調査³⁾の結果は、社会全体にとって最大の情報取得源がテレビであったという事実を示しており、日本において今なお強力な科学コミュニケーション手段であることが示唆されている。それにも関わらず廣野ら⁴⁾の指摘通り、日本でテレビを対象とした科学コミュニケーション研究は未だ乏しく、その効果範囲や特性は未解明に等しい状態で、廣野らは今後の展開の必要性を訴えている。著者はそれに対し、メディア・コミュニケーション研究者との共同研究によりテレビの科学コミュニケーション手段としての効果範囲と特性を解明する研究を現在進めており、本稿ではそのうち番組内容分析を用いた研究について成果の一部を報告する。テレビ報道によって伝えられる特定の科学情報について、「その分野の専門家側が期待している科学コミュニケーション内容」と「実際に報道された内容」との間に存在するギャップに焦点を当てることを通して、テレビの科学コミュニケーション手段としての特性を明らかにする。

2. 手法・データセット

マスメディアにとって特定の科学情報を繰り返し扱う機会が生じる場合として、社会的な注目度が高まっていて、かつその科学的 content について視聴者の認知が進んでいないトピックの出現が考えられる。それらの条件を満たすものとして本研究では、「ブルーカーボン」という新興科学トピックに着目した。ブルーカーボンとは、海洋生態系に隔離・貯留される炭素、あるいはそういった海洋が持つ機能のことを指し⁵⁾、日本では温暖化対策の切り札として注目が高まっている一方で、内容の理解には一定水準以上の科学的知識（海洋生態系、CO₂ の隔離・貯留プロセス等）が不可欠であり、本研究に適したトピックであると判断した。

まず「実際に報道された内容」として、ブルーカーボンを扱ったテレビ番組を収集した。テレビメタ

データを提供する株式会社エム・データからの協力を得て、2023 年 3 月 1 日から 2024 年 3 月 1 日までの 1 年間、東京都で視聴可能だった地上波テレビ主要 7 局（NHK 総合、NHK 教育、日本テレビ、テレビ朝日、TBS、フジテレビ、テレビ東京）において、「ブルーカーボン」というキーワードが出現した全ての番組を抽出した。提供された番組リストに基づき、著者らが所持している全番組録画レコーダを用いて、該当した全ての番組の映像データを得た。該当した番組のうち、固有名詞の一部として「ブルーカーボン」という用語が出現したのみで内容説明が一切存在しなかったケースについては分析対象から除外した。その結果、ブルーカーボンについて、少なくとも内容説明を含んで報道していた番組、合計 18 件を分析対象とした。

一方、「専門家側が期待している科学コミュニケーション内容」については、科学者によって大きく異なることが考えられたが、新興科学トピックである「ブルーカーボン」を研究テーマとしている科学者は国内では限定的で、(researchmap の研究キーワード検索「ブルーカーボン」では 12 人のみが該当。2024 年 9 月 10 日閲覧) 本研究ではその内、ブルーカーボンについて網羅的かつ詳細に紹介した書籍であり 2019 年度に「日本沿岸域学会 出版・文化賞」を受賞した「ブルーカーボン 浅海における CO₂ 隔離・貯留とその活用」(地人書館) を編著した 2 名の研究者を、日本におけるブルーカーボン研究の代表的な専門家であると見なし、両名の協力を得て「専門家側が期待している科学コミュニケーション内容」の具体的な項目を作成した。両名と著者との間の複数回の協議の結果、専門家 2 名が共通して期待する科学情報に 5 つの項目が見出されたため、それらを基準としてコーディングを実施することとした。著者 2 名が各番組の映像データを視聴しながら個別にヒューマン・コーディングを実施し、結果の一致率の確認、不一致項目についての検討を経た上で、番組内容を分析した。

3. 結果・考察

「専門家側が期待している科学コミュニケーション

ン内容」の5項目すべてを満たした番組は、期間中には存在しなかった。また1つの項目については18件中16件が満たしていた(すなわち、それに関する科学情報を番組内で十分に伝えられていた)一方で、別の項目については18件すべての番組が満たしておらず、項目によって極端な偏りが見られる結果となった。村松⁶⁾はテレビにおける科学番組の特性で考慮すべき点として、時間の制約により紹介できる情報が極めて限定的であることを指摘している。そもそも情報の限定とは選別のプロセスを伴うものであり、今回のように項目によって極端な偏りが見られたという結果は、放送する局や番組ジャンルによらず、テレビによる報道には科学情報に関して、共通する特定の傾向が存在していることを示唆している。前述の通り日本において強力な科学コミュニケーション手段の一つとして機能しているテレビ報道であるが、専門家側が期待する内容の一部については極めて伝えづらい特性を持っている可能性があり、今後、その特性がテレビ特有のものなのか、マスメディア全般に共通するものなのか、といった詳細を明らかにするために、同期間の新聞報道についてもコーディングによる分析を進めているところである。

成果報告会当日は、今回対象とした番組18件のリスト、コーディングに用いた5項目の基準、コーディング結果についても具体的に発表する予定である。

本研究は、コーディング基準の作成に際し、ブルーカーボン研究者である桑江朝比呂氏(港湾空港技術研究所)、堀正和氏(水産研究・教育機構)の多大なる支援・協力を頂いた。またデータセット取得に際し、(株)エム・データから番組メタデータの提供を受けた。ここに厚く御礼を申し上げる。

本研究の一部は、2024年度同志社大学ハリス理化学研究所助成金、2023年度同志社大学SDGs研究プロジェクトにより行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 加納圭ら, “サイエンスカフェ参加者のセグメンテーションとターゲティング: 「科学・技術への関与」という観点から”, 科学技術コミュニケーション, 13, 3-16 (2013).
- 2) 早川雄司, “国民の科学技術に対する関心と 科学技術に関する意識との関連”, 科学技術・学術政策研究所 (2014).
- 3) 「新型コロナウイルス感染症に関する情報流通調査報告書」(2024年9月10日閲覧)
https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban18_01000082.html
- 4) 廣野喜幸ら, 科学コミュニケーション論の展開, (東京大学出版会, 東京, 2023).
- 5) 堀正和, 桑江朝比呂, ブルーカーボン: 浅海におけるCO₂ 隔離・貯留とその活用. (地人書館, 東京, 2017).
- 6) 村松秀, “2S2-S2 テレビの科学番組制作から考える科学的リテラシー (科学的リテラシー向上へ 科学教育学会に求められるもの, 学会企画シンポジウム, 特別セッション, 転換期の科学教育: これからの科学的リテラシー)”, In 日本科学教育学会年会論文集 32 (pp. 5-8), 一般社団法人 日本科学教育学会. (2008).

Local well-posedness for nonlinear Schrödinger type equations

Tomoyuki Tanaka*

(Received September 24, 2024)

Nonlinear partial differential equations appear in various fields as models for understanding physical phenomena. Their mathematical study has centered around the key question of "how initial data propagates due to nonlinear equations." One class of nonlinear partial differential equations, known as nonlinear dispersive equations, includes the nonlinear Schrödinger equation and the KdV equation, whose solutions describe wave propagation. The solutions of nonlinear dispersive equations exhibit opposing characteristics: the dispersive effect brought about by the linear part of the equation and the nonlinearity that tends to concentrate waves. The behavior of these solutions is governed by the interaction of these effects. The purpose of this research is to gain a deeper understanding of nonlinear dispersive equations by proving the well-posedness of initial value problems for these equations. Here, well-posedness refers to the existence, uniqueness, and stability (with respect to initial data) of solutions. In particular, we consider the nonlinear Schrödinger equation with the modulated dispersion.

Key words : dispersive equations, nonlinear Schrödinger equation, local well-posedness

キーワード : 分散型方程式, 非線形シュレディンガー方程式, 時間局所適切性

非線形シュレディンガー型方程式の初期値問題の適切性

田中 智之

1. はじめに

非線形分散型方程式は、解となる波の位相速度が振動数に依存する性質を持つ方程式の総称であり、非線形 Schrödinger 方程式や KdV 方程式を含み、様々な物理現象のモデルとして現れる。その解の挙動は、分散性と非線形性の競合によって多様な挙動を示す。分散性が優位で時刻無限大で安定な解に漸近する散乱解、分散性と非線形性の影響が拮抗した孤立波解(ソリトン解)、非線形性の影響が強くなり特異性が発生する爆発解などがある。現象理解のためには解の解析が必要だが、一般には非線形方程式に対

して解を具体的に明示できない。このため初期値問題の適切性(解の存在、一意性および初期値に対する安定性)は、方程式の妥当性を保証する基本的な役割を持つ。また、適切性の研究で開発される議論は汎用性が高く、例えば数値解析では、近似解と厳密解の誤差評価にアプリオリ評価の議論が用いられる。このように初期値問題の適切性の研究は、理論と技術の両面で偏微分方程式研究の基盤をなす。

非線形分散型方程式の多くは、物理現象を背景に持つため、エネルギーや電荷などいくつかの保存量を持つ。これらの保存量が定義される自然なクラスは、自乗可積分空間

*Department of Electronic Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-6239, E-mail: tomtanak@mail.doshisha.ac.jp

を基礎とするソボレフ空間である。ソボレフ空間は可微分性の指数を持つ関数空間であり、指数の値が小さいほど関数空間としては広くなる。例えば、ディラックのデルタ関数は、ある負の指数を持つソボレフ空間に属する超関数である。適切性研究の主要な興味の対象は、初期値を取るソボレフ空間の指数をどこまで小さくしても(つまり、滑らかさの低い関数に対しても)適切性が成立するかを明らかにすることで、方程式と関数空間の関係を理解することにある。閾値となる正則性のおよその値は方程式に応じた尺度変換により予想できるが、適切性の証明では正則性の値が小さくなるにつれて解析が難しくなる。証明の過程では、ある関数空間上での作用素を定義し、その作用素が縮小写像であると示すことが一般的である。このとき不動点定理により作用素の不動点が得られ、これが方程式の解であると結論できる。ここで作用素は方程式から自然に決まるため、関数空間をどのように選ぶかが重要となる。関数空間の例として、方程式の分散性を活用するストリッカーズ評価が使えよう関数空間との共通部分を取ることはよく知られている。しかしストリッカーズ評価は、周期境界条件下では非線形性を制御するのに十分ではないことが知られていた。非線形分散型方程式の適切性は、Bourgain²⁾が開発した手法によって飛躍的に進んだ。その基本的なアイデアは、方程式に応じた関数空間を設定し、その関数空間上で議論を行うことである。

本研究では、線形部分に確率的な影響を考慮に入れた非線形シュレディンガー方程式(以下、mNLS と呼ぶ)を考え、その初期値問題の適切性について議論する。本研究で扱う方程式は、Bourgain によるフーリエ制限ノルム法の議論を直接適用することは難しい。また、mNLS に対するストリッカーズ評価は部分的にしか証明されていないため、線形の評価で分散性をフルに活用するのは難しい。

2. 主結果

mNLS は、非線形シュレディンガー方程式の極限移行をしたものとして導出される。その数学的研究は近年注目を浴びている^{1,4)}。確率的な影響の代表的な例として、ブラウン運動がある。しかしながらブラウン運動は可微分性が低いため、初期値問題の適切性を証明する上で困難が生じる。Chouk-Gubinelli³⁾は、ブラウン運動を含むようなある関数のクラスを導入し、そのクラスに属する関数に対するヤ

ング積分の理論を構築した。ヤング積分を通じて、ノイズによって引き起こされる平滑化効果を活用することで時間局所適切性を証明した。彼らの手法は、確率的な効果を関数空間のクラスに閉じさせたため、証明手法は決定論的な議論である。その結果は、1次元空間における3次の非線形項に対するものであった。本研究では、これを一般空間次元かつ任意の奇数乗の非線形項に対するものに一般化した⁶⁾。Chouk-Gubinelli の研究を一般化させる上で鍵となるのは、周波数空間における格子点の個数の数え上げである。その際、確率的な効果のない通常の非線形 Schrödinger 方程式に対する一意性の研究で用いられた評価⁵⁾を応用した。この評価と自明な評価(分散性のないソボレフの埋め込みによる評価)を補間することで、適切性の証明に必要な多重線形評価を証明することができた。

本研究は、2023 年度同志社大学ハリス理化学研究所研究助成金、EPSRC New Investigator Award (grant no. EP/V003178/1) および研究活動スタート支援 23K19019 によって行った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) A. de Bouard and A. Debussche, *The nonlinear Schrödinger equation with white noise dispersion*, J. Funct. Anal. 259 (2010), 1300-1321.
- 2) J. Bourgain, *Fourier transform restriction phenomena for certain lattice subsets and applications to nonlinear evolution equations. I. Schrödinger equations*, Geom. Funct. Anal. 3 (1993), 107-156.
- 3) K. Chouk and M. Gubinelli, *Nonlinear PDEs with modulated dispersion I: Nonlinear Schrödinger equations*, Comm. Partial Differential Equations 40 (2015), 2047-2081.
- 4) A. Debussche and Y. Tsutsumi, *1D quantic nonlinear Schrödinger equation with white noise dispersion*, J. Math. Pures Appl. 96 (2011), 363-376.
- 5) N. Kishimoto, *Unconditional local well-posedness for periodic NLS*, J. Differential Equations 274 (2021), 766-787.
- 6) T. Tanaka, *Remark on the local well-posedness for NLS with the modulated dispersion*, arXiv preprint: 2407.20005.

Discovery of a Novel Cancer Cell Metabolic Pathway Supporting Tumor Immune Evasion

Tsuyoshi WAKU*

(Received September 16, 2024)

In tumor tissues, cancer cells are attacked by cytotoxic CD8⁺T lymphocytes (CTLs). This "cancer immune response" requires recognition of type I major histocompatibility complex (MHC-I) on cancer cell surfaces by CTLs. Interestingly, recent reports show that cancer cells can evade CTL recognition and attack by degrading their own MHC-I through autophagy. Consequently, the quantitative control mechanism of MHC-I via autophagy is gaining attention in cancer immunology research. We have previously reported that the transcription factor Nrf3 contributes to tumor growth, but its impact on cancer immune responses was unknown. Recently, we discovered that Nrf3 contributes to the induction of autophagy-related factors. Based on these previous findings, we hypothesize that "Nrf3 induces cancer immune evasion through autophagy-mediated MHC-I degradation". To verify this hypothesis, we first examined the relationship between Nrf3 expression and MHC-I levels in cancer cells using flow cytometry. Results showed that Nrf3 overexpression decreased both surface and intracellular MHC-I levels. Next, we investigated whether Nrf3 reduces MHC-I through autophagic degradation by treating the inhibitor chloroquine (CQ) or knocking down the autophagy factor Atg7. The Nrf3-dependent reduction of MHC-I levels were restored by CQ treatment or Atg7 knockdown. We then searched for autophagy factors related to MHC-I levels, and found that knockdown of Cln3, a lysosome-localized membrane protein, or Nbr1, an adaptor protein for selective autophagy, restored MHC-I levels reduced by Nrf3 overexpression. These results indicate that Nrf3 induces autophagy, reducing cancer cell MHC-I levels.

Key words : Cancer immune evasion, autophagy, Nrf3, MHC-I

キーワード : がん免疫逃避, オートファジー, Nrf3, MHC-I

免疫逃避を支える新たながん細胞代謝経路の発見

和久 剛

1. はじめに

1-1. がん細胞は免疫応答から逃避する

がん細胞を取り囲む腫瘍微小環境 (TME, Tumor microenvironment) は, がんの発生や進行, 転移, および治療への反応に大きな影響を及ぼす¹⁾. TME は

免疫細胞・線維芽細胞・内皮細胞・ニューロン・脂肪細胞などの様々な細胞と, 細胞外マトリックスやケモカイン・サイトカイン・成長因子・細胞外小胞などの非細胞成分で構成される^{2, 3)}. 近年, TME におけるがん細胞と免疫細胞の相互作用に焦点をおい

* Department of Medical Life Systems, Faculty of Life and Medical Sciences, Doshisha University, Kyoto
TEL: +81-774-65-6280, E-mail: twaku@mail.doshisha.ac.jp

た研究が精力的に進められてきた^{4,5)}。

免疫細胞によるがん細胞への攻撃は、以下の7つのステップから成る「がん免疫サイクル」で行われる。(1) 細胞死したがん細胞によるがん抗原の放出、

(2) 放出されたがん抗原を取り込んだ樹状細胞のリンパ節への遊走とがん抗原の提示、(3) リンパ節における樹状細胞によるT細胞のプライミング・活性化、(4) 活性化されたT細胞の腫瘍への遊走、(5) T細胞の腫瘍への浸潤、(6) T細胞によるがん抗原の認識、(7) T細胞によるがん細胞の殺傷。そして殺傷されたがん細胞から新たながん抗原が放出され、再び(1)に進む。つまりこのサイクルが回り続けることで、免疫細胞によるがん細胞の攻撃が効果的に行われる^{6,7)}。

1-2. 細胞傷害性T細胞はMHC-I上のがん抗原を認識してがん細胞を殺傷する

がん免疫サイクルにおいて重要な役割を果たす細胞傷害性T細胞(CTL, Cytotoxic T lymphocyte)は、がん細胞を抗原特異的に殺傷することができる。CTLのT細胞受容体(TCR, T cell receptor)が、がん細胞表面の主要組織適合遺伝子複合体クラスI

(MHC-I, Major histocompatibility complex class I)上にあるがん抗原と結合することで、がん細胞を認識するためである^{8,9)}。がん細胞を認識したCTLは、細胞溶解タンパク質であるPerforinを放出することでがん細胞の膜に細孔を形成し、セリンプロテアーゼの一種であるGranzyme B (GzmB)を送り込み、がん細胞のアポトーシスを誘導する¹⁰⁾。またCTLはInterferon-gamma (IFN γ)をはじめとするサイトカインも分泌する。IFN γ の作用として、がん細胞表面におけるMHC-Iの発現(抗原提示)の促進や、がん細胞のアポトーシス誘導などが知られている^{11,12)}。

一方で、制御性T細胞(Treg, Regulatory T cell)は、過剰な免疫応答による自己免疫などの有害な免疫反応を抑制することができる。Tregは、IL-2受容体によるIL-2の消費、CTLA-4とCD80/86の結合による樹状細胞の成熟抑制、抑制性サイトカインや細胞傷害性物質産生によるCTLの抑制などによって免疫反応を抑制することが知られている^{13,14)}。

1-3. 転写因子NRF3は様々ながん種で高発現し、患

者の予後不良に寄与する

Nrf3はCNCファミリーに属する転写因子の一つとして同定された¹⁵⁾。Nrf3は塩基性ロイシンジッパー型の転写因子であり、小胞体にアンカーされている状態からタンパク質切断酵素DDI2による切断をうけて、核に移行し小Maf群因子とヘテロ二量体を形成する。そして標的遺伝子の制御領域に存在する抗酸化剤応答配列に結合し、標的遺伝子の発現を活性化する¹⁶⁾。我々はこれまでに、NRF3が様々ながん種で高発現し、NRF3が高発現しているがん患者の生存率は低く、がんの再発率が高いことを明らかにしてきた¹⁷⁾。

1-4. Nrf3はオートファジーを介してMHC-I分解を促進している

オートファジーは隔離膜であるオートファゴソームが基質を包み込み、リソソームと融合することでタンパク質を分解する機構である。オートファゴソームの形成に関わるタンパク質は、コアATGタンパク質と呼ばれる^{18,19)}。オートファジーは無作為に細胞質成分を分解すると考えられていたが、近年の研究により、オートファゴソームが特定の分解標的(カーゴ)を選択的に認識・隔離・分解する「選択的オートファジー」の存在が明らかになった。選択的オートファジーは、特定の可溶性タンパク質、超分子複合体、液-液相分離した液滴、異常・余剰なオルガネラ、病原性細菌を分解することで、細胞の恒常性維持に貢献している。選択的オートファジーにおいて、選択性を担保するために用いられる受容体はユビキチン結合型受容体とカーゴ局在型受容体の2つに分けられる。ユビキチン結合型受容体は、カーゴのユビキチン鎖とATGタンパク質に結合し、カーゴをオートファジー分解に導く。一方で、カーゴ局在型受容体はカーゴ上に直接局在し、ATGタンパク質に結合することでカーゴをオートファジー分解に導く^{20,21)}。

我々はこれまでに、Nrf3がオートファジー関連遺伝子Cln3 (Ceroid lipofuscinosis, neuronal3)やNbr1 (Neighbor of BRCA1)を転写誘導することも明らかとなっている²²⁾。Cln3はリソソーム局在の膜貫通タンパク質としてエンドソーム輸送とオートファジー

に必要であること²³⁾, Nbr1 はユビキチン結合型受容体として選択的オートファジーに寄与する²⁴⁾ことがそれぞれ知られている。

そこで本研究は Nrf3 による MHC-I 分解メカニズムの詳細な解析, および Nrf3 が in vivo におけるがん免疫応答を抑制するのかを同系移植によって検証することを目的とした。その結果, Nrf3 の過剰発現によって細胞表面の MHC-I 量が減少し, オートファジー阻害剤であるクロロキン (CQ) や, オートファジー因子である Atg7 のノックダウンによって MHC-I 量が回復することを見出した。また, オートファゴソームとリソソームの融合に関わる因子 Cln3 や, 選択的オートファジー受容体 Nbr1 を介してがん細胞の MHC-I 量を減少させることを明らかにした。さらに Nrf3 が腫瘍の増大に寄与し, また腫瘍内の CTL 数を減少させることで, がん細胞の免疫逃避に寄与する可能性を見出した。

2. 試料および実験手法

本研究は同志社大学組換え DNA 実験安全管理規程, 同志社大学動物実験等の実施に関する規程に則り, 各審査委員会の承認を得た上で, 実験指針やガイドラインに準拠して実施した。また人体に有害な作用を及ぼす化学物質の取り扱いに関しても, ドラフト等設備の完備した実験室でガイドラインに準拠して行った。

2-1. 細胞

マウス大腸がん細胞 MC38 から樹立された Nrf3 過剰発現細胞 (oeNrf3 細胞), およびコントロール細胞 (Ctr 細胞) を用いた。

2-2. 細胞表面 MHC-I の定量

Ctrl 細胞と oeNrf3 細胞を 24 時間培養し, 生細胞における細胞表面の MHC-I をフローサイトメーターによって定量した。

2-3. 腫瘍増殖曲線

Ctrl 細胞と oeNrf3 細胞 を 4 週齢の雄 C57BL/6CrSlc マウス右脇腹の皮下に移植し, 移植後 5 日目から 2 日毎に腫瘍径を測定し, 腫瘍体積を算出した。さら

に移植後 21 日目に腫瘍を摘出し, 重量を計測した。

2-4. 腫瘍内の CTL および Treg の解析

Ctrl 細胞と oeNrf3 細胞 を C57BL/6CrSlc マウス (4 週齢, 雄) の右脇腹皮下に移植し, 移植後 7 日目に腫瘍を摘出した。そして CD8・CD45 陽性の生細胞を CTL として, また CD4・CD25・Foxp3 陽性の生細胞を Treg として, フローサイトメーターを用いて定量した。

2-5. トランスフェクション

細胞播種とともに Opti-MEM, siRNA, RNA-iMAX を混合して添加した。

2-6. 遺伝子発現解析

細胞から Total RNA を抽出し, リアルタイム qPCR により目的遺伝子の mRNA 量を定量した。

2-7. 統計解析

データは平均値±標準偏差 (SD) で表示した。2 群間および複数群間の比較には, それぞれ Welch t-test および One-way analysis of variance (ANOVA) followed by Tukey's post hoc test を用いた。

3. 結果および考察

3-1. Nrf3 はオートファジーを介してがん細胞 MHC-I 分解を促進する

Nrf3 過剰発現が MC38 細胞表面 MHC-I へ及ぼす影響について検証した結果, コントロール細胞 (Ctrl) に比べ oeNrf3 細胞表面の MHC-I 量は減少していることを見出した (Fig.1(A), 左 vs. 中央)。次に, oeNrf3 細胞で見られた MHC-I の低下がオートファジーを介しているかを調べた。オートファジー阻害剤のクロロキン (CQ, 終濃度 25 μ M) を細胞播種と同時に添加したところ, Nrf3 によって減少した MHC-I 発現量は回復することを見出した (Fig.1(A), 中央 vs. 右)。同様の結果は, 必須オートファジー因子の 1 つである Atg7 のノックダウンからも見出すことができた (Fig.1B)。これらの結果は, Nrf3 はオートファジーを介してがん細胞表面の MHC-I を減少させることを示している。

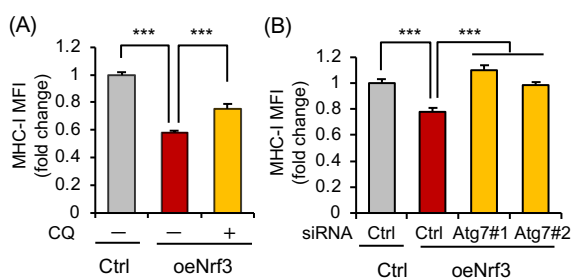


Fig.1. Nrf3-mediated MHC-I reduction is restored by autophagy inhibition (n=3, mean+SD, ***: $p < 0.005$)

3-2. オートファジー関連因子 Cln3 と Nbr1 は Nrf3 依存的な MHC-I 分解量に関与する

次に, Nrf3 による MHC-I 量の制御に関与するオートファジー関連分子を探索した. 先行研究では, オートファゴソームとリソソームの融合に関わる因子 Cln3 や選択的オートファジー受容体 Nbr1 が, Nrf3 によって転写誘導されることを報告している²²⁾. そこで本研究でも Cln3 に着目して解析を進めた. リアルタイム qPCR 解析の結果, 期待通り Nrf3 過剰発現で Cln3 および Nrf1 の mRNA は増加していた (Data not shown). さらに, Cln3 や Nbr1 が Nrf3-MHC-I 軸に及ぼす影響を検証した結果, Nrf3 過剰発現で低下した MHC-I 量が, Cln3 もしくは Nbr1 ノックダウンで回復することを見出した (Fig.2). これらの結果は, Cln3 と Nrf1 が Nrf3-MHC-I 軸におけるオートファジー制御の責任因子であることを示している.

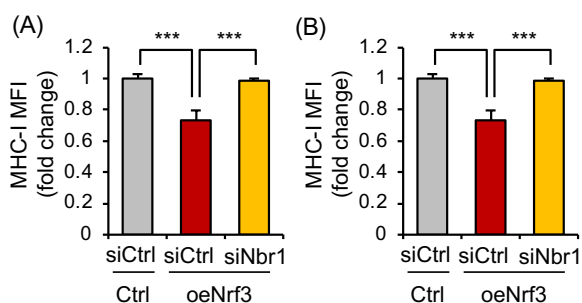


Fig.2. Nrf3-mediated MHC-I reduction is restored by knockdown of autophagy-related factors Cln3 (A) and Nbr1 (B) (n=3, mean+SD, *: $p < 0.05$, ***: $p < 0.005$)

3-3. Nrf3 は CTL を減少させることで腫瘍増大に寄

与している

さらに MHC-I 分解を行う Nrf3 が腫瘍増大に寄与するかを検証した. その結果, oeNrf3 細胞を移植した腫瘍は著しく増大することを見出した (Fig. 3(A)). そこで最後に Nrf3 が腫瘍中の CTL, および CTL を抑制する Treg に与える影響を調べた. その結果, Nrf3 は腫瘍中の CTL を減少させた一方で, 腫瘍中の Treg には影響を与えなかった (Fig. 3(B)). 腫瘍微小環境中の CTL はがん細胞表面の MHC-I 上のがん抗原を認識すると, サイトカインの産生量を増加させ, CTL の増殖を促進する⁴⁾. したがって oeNrf3 細胞を移植した腫瘍中の CTL は MHC-I 量の低下によってがん抗原の認識が不全となり, 増殖能が低下したと推察される.

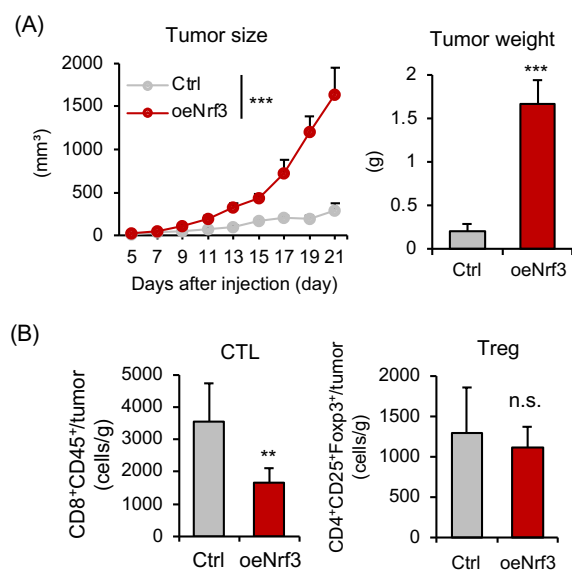


Fig.3. Nrf3 overexpression leads to tumor growth (A) and reduces tumor-infiltrating CTLs, but not Tregs (B). (n=3, mean+SD, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.005$, n.s., not significant)

本研究は, 同志社大学ハリス理化学研究所 第 11 期部門研究 (D 部門) によって行った. ここに記して謝意を表する.

参考文献

- Yi, X. Dihua, Y. Tumor microenvironment as a therapeutic target in cancer. *Pharmacology & Therapeutics* **221**,

- 107753 (2021).
- 2) Costas, A. Lyssiotis. Alec, C. K. Metabolic Interactions in the Tumor Microenvironment. *Trends in Cell Biology* **27**, 863-875 (2017).
 - 3) Ting, W Yun, D. Tumor microenvironment and therapeutic response. *Cancer Letters* **387**, 61-68 (2017).
 - 4) Maura, A. Yelena, U. Cancer and the Immune System: The History and Background of Immunotherapy. *Seminars in Oncology Nursing* **35**, 150923 (2019).
 - 5) Yuanyuan, Z. Zemin, Z. The history and advances in cancer immunotherapy: understanding the characteristics of tumor-infiltrating immune cells and their therapeutic implications. *Cellular & Molecular Immunology* **17**, 807-821 (2020).
 - 6) Ira, M. Daniel, S. C. Thomas, P. Shannon, J. T. The cancer-immunity cycle: Indication, genotype, and immunotype. *Immunity* **56**, 2188-2205 (2023).
 - 7) Daniel, S. C. Ira, M. Oncology Meets Immunology: The Cancer-Immunity Cycle. *Immunity* **39**, 1-10(2013).
 - 8) Qingjun, L Bin, G. Manipulation of MHC-I / TCR Interaction for Immune Therapy. *Cellular & Molecular Immunology* **5**, 171-82 (2008).
 - 9) Brandie, C. T. Justin, M. B. Mechanisms of MHC-I Downregulation and Role in Immunotherapy Response. *Frontiers in Immunology* **13**, 844866 (2022).
 - 10) Ilona, R. Evzen, K. Granzyme B-induced apoptosis in cancer cells and its regulation. *International Journal of Oncology* **37**, 1361-1378 (2010).
 - 11) Angela, M. G. Creg, J. W. Dario, A. A. V. Interferon- γ : teammate or opponent in the tumour microenvironment? *Nature reviews immunology* **22**, 158-172 (2022).
 - 12) Xiao, Z. Song, W. Yuanyuan, Z. Minghui, Z. Yan, Z. Zhengbin, Y. Qiuxu W. Xiaobo, L. Double-edged effects of interferons on the regulation of cancer-immunity cycle. *OncoImmunology* **10**, 1929005 (2021).
 - 13) James, B. W. Atsushi, T. Shimon S. Human FOXP3+ Regulatory T Cell Heterogeneity and Function in Autoimmunity and Cancer. *Immunity* **50**, 302-316 (2019).
 - 14) Yoshihiro, O. Hiroyoshi, N. Regulatory T (Treg) cells in cancer: Can Treg cells be a new therapeutic target? *Cancer Science* **110**, 2080-2089 (2019).
 - 15) Kobayashi. A. Ito, E., Toki, T. Kogame, K. Takahashi, S. Igarashi, K. Hayashi, N. Yamamoto, M. Molecular cloning and functional characterization of a new Cap'n' collar family transcription factor Nrf3. *Journal of Biological Chemistry* **274**, 6443-6452(1999).
 - 16) Chowdhury, A. M. M. A. Katoh, H. Hatanaka, A. Iwanari, H. Nakamura, N. Hamakubo, T. Natsume, T. Waku, T. Kobayashi, A. Multiple regulatory mechanisms of the biological function of NRF3 (NFE2L3) control cancer cell proliferation. *Scientific Reports* **7**, 12494 (2017).
 - 17) Waku, T. Nakamura, N. Koji, M. Watanabe, H. Katoh, H. Tatsumi, C. Tamura, N. Hatanaka, A. Hirose, S. Katayama, H. Tani, M. Kubo, Y. Hamazaki, J. Hamakubo, T. Watanabe, A. Murata, S. Kobayashi, A. NRF3-POMP-20S Proteasome Assembly Axis Promotes Cancer Development via Ubiquitin-Independent Proteolysis of p53 and Retinoblastoma Protein. *Molecular and Cellular Biology*. **42**, 1-19 (2020)
 - 18) Beth, L. Guido, K. Biological Functions of Autophagy Genes: A Disease Perspective. *Cell* **176**, 11-42 (2019).
 - 19) Danielle, G., Sandra, B. Kay, F. M. Autophagy: cellular and molecular mechanisms. *Journal of Pathology* **221**, 3-12 (2010).
 - 20) Mohammad, O. F., Yoshinobu, I. Masaaki, K. Selective autophagy. *Cancer Science* **112**, 3972-3978 (2021).
 - 21) Gabriele, Z. Sascha, M. Mechanisms of Selective Autophagy. *Journal of Molecular Biology* **428**, 1714-1724(2016).
 - 22) Waku, T. Nakada, S. Masuda, H. Sumi, H. Wada, A. Hirose, S. Aketa, I. Kobayashi, A. The CNC-family transcription factor Nrf3 coordinates the melanogenesis cascade through macropinocytosis and autophagy regulation. *Cell Reports* **42**, 111906 (2023).
 - 23) Susan, L. C. Stéphane, L. CLN3, at the crossroads of endocytic trafficking. *Neuroscience Letters* **762**, 136117 (2021).
 - 24) Nikoline, L. R. NBR1: The archetypal selective autophagy receptor. *Journal of Cell Biology* **221**, e202208092 (2022).

Impact of Tendon Mechanical Stimulation on Denervated-induced Muscle Atrophy

Hisashi TAKAKURA*, Yoshifumi TSUCHIYA**

(Received September 16, 2024)

It is an established fact that physical exercise is crucial for maintaining health. However, elderly individuals often face issues such as decreased muscle mass and bone density, which necessitate engagement in low-intensity exercises that may have minimal effects. This situation often leads to a cycle of "physical inactivity–frailty–reduced quality of life." Therefore, innovative strategies are required to prevent and improve age-related muscle atrophy and osteoporosis without overloading muscles and bones. In this study, we identified that tendon cells produce factors that promote myogenic progression in mouse-derived primary cells *in vitro*. Additionally, we investigated whether local vibration of tendons could prevent denervation-induced muscle atrophy in the hindlimb *in vivo*. This result showed that local tendon stimulation prevented atrophy of the extensor digitorum longus (EDL) muscle. Taken together, our findings suggest that tendon local stimulation induces factors that ameliorate skeletal muscle atrophy by enhancing the communication between tendons and muscles.

Key words : tendon, muscle, mechanical loading, muscle atrophy

キーワード : 腱, 筋, 力学的刺激, 筋萎縮

腱への力学的負荷が除神経による筋萎縮に及ぼす影響

高倉 久志, 土屋 吉史

1. はじめに

加齢に伴い筋量・筋力が減少するサルコペニアは、運動器機能低下症の主要因であり、生活の質 (QOL) の低下をもたらし、そのため、この進行を防ぐ試みは、心身ともに健康を維持する上で欠かせない。しかしながら、サルコペニア研究は盛んに行われてきたにもかかわらず、明確な答えは得られていない。この背景には、従来の研究の多くが筋組織単一を治療標的としており高齢者の実情に即していないことが挙げられる。これまでに、筋萎縮に対する運動効果は個別に証明されているものの、実際に筋萎縮や骨粗鬆症など複数の運動器障害を抱えている高齢者

は、結局、効果の現れにくい低用量の運動を繰り返さざるを得ず「運動不足-虚弱-QOL 低下の悪循環」に陥り易い現状にある。加えて、昨今の COVID-19 感染拡大の影響による外出機会の減少・活動量の低下が問題視されており、ますます運動器の脆弱を軽減する研究・学術的基盤の拡大が求められる。そこで申請者は、これまで殆ど注目されてこなかった、骨格筋と骨とを繋ぐ「腱」に着目した。なぜなら近年、興味深いことに「腱」でも機械的負荷や運動により筋や骨量維持に重要な因子 (IL-6/BMP) の産生や血管新生が報告されるようになったためである¹⁾。また、複数の系譜をもつ細胞集団や分泌に特化した

* Faculty of Health & Sports Science, Doshisha University, Kyoto

** Department of Life Sciences and Biotechnology, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Kagawa
Telephone & FAX: +81-774-65-7149, E-mail: htakakur@mail.doshisha.ac.jp

細胞集団^{2,3)}、コラーゲントランパク分泌・合成の概日リズム、オートファジー機構の存在も明らかにされ始めている^{4,5)}。これらの報告は、腱が単なる結合組織ではなく、近傍の筋肉や骨に作用する生理活性因子を生み出す内分泌器官であることを示唆している。こうした事実から、筋の近傍に位置する腱に力学的な刺激を加えて腱の多臓器連関能を引き出すことができれば、サルコペニアに対抗する強力なツールになるとの着想に至った。以上のことから、本研究では、「腱」への力学的刺激が腱由来因子を介して、筋萎縮症を改善するか否かを検証することとした。

2. 試料および実験手法

2.1 試料

マウスの初代培養細胞を用いた細胞実験および除神経誘導性筋萎縮モデルを用いた動物実験はすべて6週齢の雄 C57BL/6 マウス (n = 50; 清水ラボトリーサプライ株式会社, 京都, 日本) を用い、温度 23°C, 12 時間 : 12 時間の明暗サイクルに保たれた環境で 4 日間馴化させた。

餌と水は自由摂取とした。動物を用いた実験はすべて、同志社大学動物倫理委員会の承認を得て行われた (承認番号 : A22077, A23057)。

2.2 筋芽細胞および腱細胞の単離・培養

マウスの前脛骨筋およびアキレス腱からそれぞれ筋芽細胞と腱細胞を単離・培養した。まず、それぞれの細胞を十分な数が得られるまで培養し、実験に耐えられる細胞数が得られた後、これら細胞の共培養実験 (異なる種の細胞を同一培養皿で細胞接触無しに培養できる系) を行った。筋組織 (約 0.5~1.0g) から筋以外の組織 (脂肪, 結合組織) をすべて取り除いた後、約 0.1 cm³ 未満の断片にカットし、コラーゲナーゼ, ディスパーゼ, および専用培地にて溶解し、37°C, 5%CO₂ で 1 時間消化した。組織を 15 分ごとに攪拌し、100μm のセルストレーナーで濾過した。濾過した筋芽細胞を専用の増殖培地 (30%ウシ胎児血清含有) で洗浄後、T25 フラスコに播種し、十分な細胞数になるまで培養した。

腱組織 (約 1.0~2.0 g) は、腱以外の組織をすべて

取り除いた後、約 0.5~1 cm³ の小片に切断し、II 型コラーゲナーゼを含む専用の消化培地で消化した。その後腱細胞専用の腱増殖培地 (10%ウシ胎児血清) で洗浄し、600 g で 6 分間遠心した後、腱細胞を T75 フラスコに播種し、腱細胞専用培地で十分な細胞数になるまで培養した。

筋芽細胞と腱細胞の培地は 2-3 日ごとに交換した。本実験はすべて、細胞継代数を 4 以下で行った。

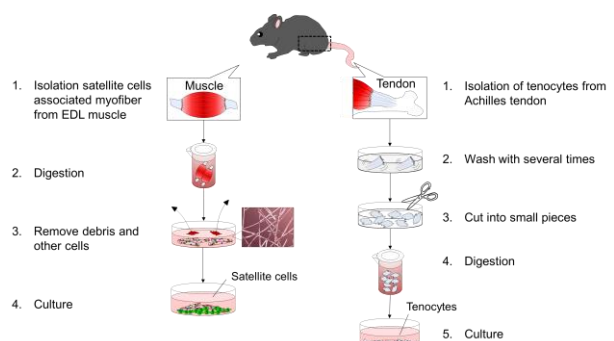


Fig. 1. マウスの筋・腱組織から筋芽細胞と腱細胞を単離する手順

2.3 共培養実験

腱細胞の存在下で、筋芽細胞がどのように分化制御されるのかを観察する実験のため、共培養実験を行った。共培養には、インサートウェルチャンバー (孔径 8.0 μm) を含む 24 ウェルプレートを用いた。筋芽細胞は 0.6×10^4 個/ウェルの密度で 24 ウェルプレート (ボトムウェル) に播種し、筋芽細胞または腱細胞は同じ密度 (0.6×10^4 個/ウェル) でインサートウェルチャンバー (アッパーウェル) に播種した。共培養を開始する前に、インサートウェルとボトムウェルの全細胞を、最初は別々に 12 時間培養し、十分な接着を行った。接着後、滅菌したピンセットを用いて、細胞の入ったインサートウェルチャンバーを、既に筋芽細胞が

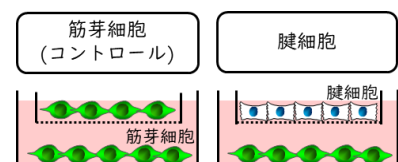


Fig. 2. 共培養の概念図

既に筋芽細胞が接着しているボトムウェルに移した。条件は、① インサートウェルのみ条件 (細胞無し, ネガティブコントロール), ② 筋芽細胞ありのインサートウ

エル条件, ③ 腱細胞ありのインサートウェル条件を設定した (Fig. 2). 増殖能は 3 日間, 分化能は 5 日間共培養した.

2.3 免疫蛍光染色と撮影

培養後の筋芽細胞および筋管は, 固定, 透過処理, ブロッキングを経て, 適切な一次抗体とともに 4℃で一晩インキュベートした. その後二次抗体および核染色を施し染色を行った. すべての染色像は, 専用の蛍光顕微鏡で観察し, デジタル画像を撮影した. 1 ウェルにつき 20 倍の倍率 (850 μm×650 μm) で 5 枚の画像 (カバーガラスの中央, 上, 左, 下, 右側) を撮影し, 取得したデジタル画像を Fiji ソフトウェア (NIH, Bethesda, MD, USA; version 1.52) を用いて染色結果を定量した. 筋芽細胞の分化能は成熟度として評価し, FM20 (筋分化マーカー) 陽性の筋管内核数が ≥ 5 となる核を全核数で割って算出した.

2.4 除神経手術による筋萎縮誘導

細胞培養実験では, 腱細胞の存在下において筋の増殖及び分化が促進されるという結果が得られた. 次のステップとして我々は, 腱に力学的刺激を加えることで腱の臓器連関を誘発させ筋萎縮を防ぐことが出来るか否かを個体レベルで明らかにすることを目的とした. マウスを 4 日間の馴化後, ランダムに ① 安静群 (Negative Control), ② 除神経+腱刺激無し群 (Control), ③ 除神経+腱刺激有り群 (Ten) の 3 群に分けた. ① は除神経による筋萎縮が生じているか否かを確認するために Negative Control として設定した.

群分け後, ② と ③ の群のマウスに対し下肢筋群が萎縮する除神経手術を行った. 手術は麻酔下で行われた. まず, 大腿部を 5 mm 程度切開し, 筋の深部にある坐骨神経を 2-3 mm 程度切除した.

2.5 腱への刺激

除神経手術から 2 週間経過後, 手術を行った側の足のアキレス腱に振動刺激装置 (RG-01, Doctor Air, Japan) をあてて行った. まず, マウスの足関節をひもで固定しその後マウス補てい具を用いることで,

腱刺激装置を腱にあてることのできる状態を整えた. その後, ③ の Ten 群のマウスには 58 Hz の腱刺激装置をアキレス腱に当てた. 刺激時間は先行研究に倣い 15 分間行った⁶⁾. なお, ② の Control 群のマウスには, 同様の操作を振動刺激無しで施した. 期間は 2 週間とした. 解剖は 10 週齢で行い, 下肢筋群の質重量を測定した.

3. 結果および考察

3.1 細胞培養実験

本研究では共培養実験モデルを, 腱細胞が筋芽細胞の分化制御に及ぼす影響を細胞接触なしに検出するために採用した. まず, 培養中のウェル底部とインサートウェルとの間の空間的なスペースによる培地の流れが, 条件間の筋分化反応に影響を及ぼす可能性を明らかにするため, 空のインサートウェルをネガティブコントロールとして設定した. さらに, 筋芽細胞をインサートウェルに播種し (筋芽細胞条

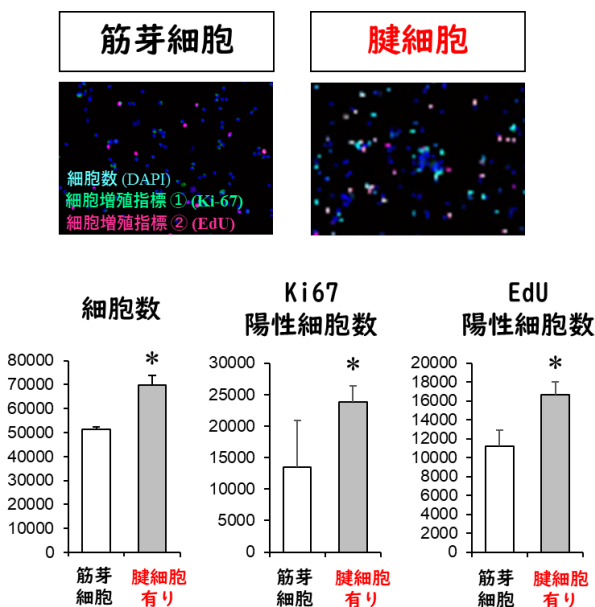


Fig. 3. 腱細胞の存在下で, 筋芽細胞の増殖は促進する

件), 筋再生に対する腱細胞とは異なる効果を検出した (Fig. 2, 3).

これまで, 骨格筋内結合組織に存在する腱様細胞が筋再生時にサテライト細胞の活性をサポートすることを報告されている. しかし, 腱由来細胞が筋再生に直接寄与するかどうかは知られていない. そこで我々は, 腱細胞が筋芽細胞の増殖能に寄与してい

るか否かを評価するために、細胞周期関連マーカー [Ki67 (細胞周期 (G1, S, G2, M 期) に居る細胞を示す) および EdU (DNA への EdU の取り込みにより細胞周期の S 期に入る細胞を示す)] による免疫蛍光染色を行い、増殖段階にある筋芽細胞の総数を測定した。筋芽細胞 (Dapi 陽性) の総数は、腱細胞条件インサート単独 (ネガティブコントロール) および筋芽細胞条件に比べ有意に高かった (Data not shown)。さらに、腱細胞の存在下では筋芽細胞は、Ki67 陽性細胞数および EdU 陽性細胞数の有意な増加が認められた (Fig. 3)。これらの結果は、腱細胞が液性因子を介して筋芽細胞の細胞周期のエントリを促進させ結果的に増殖を促進させていたことを示している。

サテライト細胞は、筋分化の過程で活性化期と増殖期を経て、互いに、あるいは既存の筋線維と融合

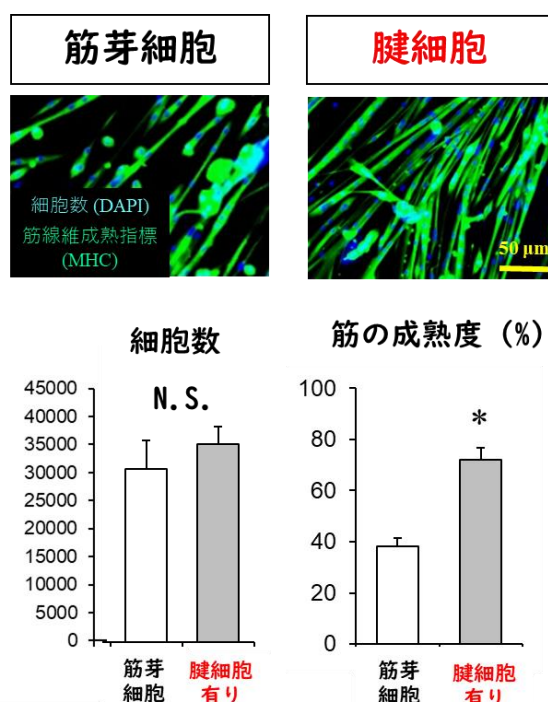


Fig. 4. 腱細胞の存在下で、筋芽細胞の分化は促進する

することで筋線維へ分化していく。そこで、この融合能を調べるために、5 日間共培養した際の筋芽細胞の筋分化能を調べた。その結果、核数は、条件間に差は認められなかったものの、筋の成熟度は腱細胞の存在下で高まっていることがわかった (Fig. 4)。なお、ネガティブコントロールと筋芽細胞条件との間に有意な差は認められなかった (Data not shown)。

3.1 動物実験

腱刺激が除神経による筋萎縮抑制効果をもつか否かを検証するために、解剖にて 5 種の下肢筋群の質重量を測定した。まず、手術と腱刺激介入に伴う体重変化に群間差が認められるか否かを検証したが、介入終了後の体重に群間差は認められなかった ($P < 0.05$)。また、筋質重量

に関して、除神経を行った両群 (② Control 群と ③ Ten 群) は、何もしていない ① Negative Control 群に比べ有意に減少していることが観察された。これらの結果は、除神経手術

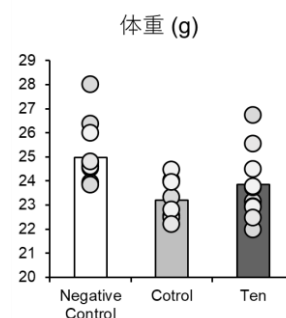


Fig. 5. 各群における体重

は体重の著しい減少を伴わず適切に下肢筋群を萎縮させていたことを示すものである。興味深いことに、長趾伸筋 (Extensor Digitorum Longus: EDL) はコントロールに比べ有意な高値を示した ($P < 0.05$)。一方で、前脛骨筋 (Tibialis Anterior: TA)、ヒラメ筋 (Soleus: Sol)、腓腹筋 (Gastrocnemius: Gas)、足底筋 (Plantaris: Pla) には群間差は認められなかった ($P > 0.05$)。

腱への振動療法を行った既存研究では、固定化による過敏症や骨密度の低下に対する予防効果、および足底痛や下肢痙縮に対する治療効果が報告されている⁷⁾。

また、腱・靱帯への振動刺激が筋再生を主に担

う筋サテライト細胞の活性化に寄与し、力学的な刺激を受容する細胞表面のタンパク質等の発現亢進を介してギプス固定による廃用性筋萎縮から回復させた報告もある⁶⁾。本研究では、生化学的手法による細かな解析には至っていないが、先行研究結果と同様に腱刺激が、筋刺激受容に関連するタンパク質発

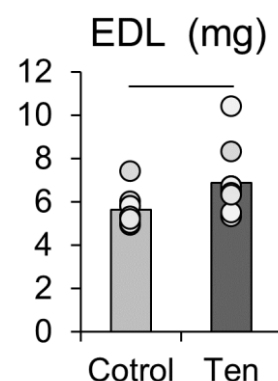


Fig. 6. 腱への振動刺激は、長趾伸筋の萎縮進行を抑える

現亢進を促した結果、EDL の筋萎縮進行を抑制したものと予想される。

本研究で用いた刺激周波数はこれまでの研究のものより低周波であり⁶⁾、一般者であっても購入可能な刺激装置を用いた。このため、本方法は安価で非侵襲的に筋萎縮を抑える戦略として有効であることが考えられる。

4. 結論

本研究では、腱細胞から筋芽細胞の筋分化を促進させる分子が放出されていること、腱組織への力学的刺激が除神経に伴う長趾伸筋の萎縮進行を抑制することを明らかにした。

本研究の実施にあたり、共同研究者の方々にご指導を頂いた。日本赤十字看護大学の白井美穂先生には筋萎縮モデル作成法、立命館大学スポーツ健康科学部の福谷充輝先生には腱組織への刺激方法をご指導いただいた。同志社大学スポーツ健康科学部の井澤鉄也教授には細胞採取をご指導いただき、土屋吉史助教（現在は産業技術総合研究所）には細胞培養および除神経手術後の解剖と解析を実施頂いた。同志社大学理工学部の小山大介教授と松川真美教授には、骨研究に関する助言・ご指導をいただいた。また小山教授と松川教授からは、本助成を賜るきっかけをいただき大きく尽力いただいた。他にも、本研究に関わった多くの方々や犠牲になった実験動物に対しても、ここで謝意を表する。

参考文献

- 1) K. Mubyana and D. T. Corr “Cyclic Uniaxial Tensile Strain Enhances the Mechanical Properties of Engineered, Scaffold-Free Tendon Fibers” *Tissue Eng Part A*, **24**, 1808-1817 (2018)
- 2) K. T. Best and A. E. Loiselle, “Scleraxis lineage cells contribute to organized bridging tissue during tendon healing and identify a subpopulation of resident tendon cells” *FASEB J*, **33**, 8578-8587 (2019).
- 3) J. E. Ackerman, K. T. Best, S. M. Muscat, E. M. Pritchett, A. E. C. Nichols, C. L. Wu and A. E. Loiselle, “Defining the spatial-molecular map of

fibrotic tendon healing and the drivers of Scleraxis-lineage cell fate and function” *Cell Rep*, **41**, 111706 (2022).

- 4) J. Chang, R. Garva, A. Pickard, C. C. Yeung, V. Mallikarjun, J. Swift, D. F. Holmes, B. Calverley, Y. Lu, A. Adamson, H. Raymond-Hayling, O. Jensen, T. Shearer, Q. J. Meng, and K. E. Kadler¹, “Circadian control of the secretory pathway maintains collagen homeostasis” *Nat Cell Bio*, **22**, 74–86, (2020).
- 5) C. Montagna, R. B. Svensson, M. L. Bayer, S. Rizza, E. Maiani, C. C. Yeung, G. Filomeni and M. Kjær, “Autophagy guards tendon homeostasis” *Cell Death Dis*, **13**, 402 (2022).
- 6) F. Usuki, M. Fujimura, A. Nakamura, J. Nakano, M. Okita, I. Higuchi. “Local Vibration Stimuli Induce Mechanical Stress-Induced Factors and Facilitate Recovery From Immobilization-Induced Oxidative Myofiber Atrophy in Rats” *Front Physiol*, **10**, 759, (2019).
- 7) Y. Huang, Y. Fan, M. Salanova, M. Salanova, X. Yang, X. Yang, and L. Sun, and D. Blottner ”Effects of plantar vibration on bone and deep fascia in a rat hindlimb unloading model of disuse” *Front Physiol*, **9**, 616 (2018).

Analysis of Science Communication Effects on Japanese Television, Based on Changes in the Amount of Knowledge by TV Viewing

Taichi MASU*, Yasuhito ABE**

(Received September 13, 2024)

This study aims to quantitatively clarify the science communication effects of Japanese television, focusing on two aspects: "the effectiveness of scientific knowledge sharing" and "reaching low-interest groups in science." We conducted a web-based survey on the news program *Shinso Hodo Bankisha!* that aired on May 28, 2023, featuring the scientific topic "blue carbon." Scientific knowledge was assessed using questions related to blue carbon, and audience interest levels in science were categorized based on the Victoria Segmentation (VSEG) method. The results revealed that viewers of the TV program demonstrated significantly higher levels of scientific knowledge compared to non-viewers, and that the program reached a diverse audience, including low-interest groups. These findings suggest that Japanese television can have a significant effect on the sharing of scientific knowledge even in natural viewing environments, and that it may have the potential to reach low-interest groups in ways that differ from more interactive approaches such as science cafés. This study highlights the potential and challenges of using television media as an effective tool for science communication.

Keywords : science communication, television, blue carbon, interest in science

キーワード : 科学コミュニケーション、テレビ、ブルーカーボン、科学関心度

番組視聴による知識量変化から見る日本の地上波テレビの 科学コミュニケーション効果分析【成果報告】

梶 太一, 阿部 康人

1. はじめに

科学情報を社会全体で広く共有する「科学コミュニケーション」は、90年代に生まれた一方向的な「欠如モデル」への批判以降、サイエンスカフェのような対話を伴う「双方向コミュニケーション」を重視した考えが主流となり、研究・実践とも積み重ねら

れてきた。しかし近年、それらのリーチ対象の科学関心層¹⁾への極端な偏り、8割以上が科学非関心層に属するという日本国内の世論調査結果、さらに“欠如と対話の双極的価値判断”により一方向的な科学コミュニケーションの意義が軽視されている現状²⁾など、一定の課題と限界も明らかになりつつあ

* Harris Science Research Institute, Doshisha University, Kyoto

Email: tmasu@mail.doshisha.ac.jp

** Department of Media, Journalism and Communications Faculty of Social Studies, Doshisha University

Email: yabe@mail.doshisha.ac.jp

る。標葉³⁾は「一方向・双方向含めたより裾野の広い知識・情報・意見の『共有』が重要である」と指摘した。そんな中 2020 年に端を発したコロナ禍では、ウイルスの性質や感染対策、ワクチンの原理といった科学情報を数千万人スケールで共有する科学コミュニケーションが求められる状況が生じたが、総務省の新型コロナウイルスに関する情報流通調査によれば、「民間放送テレビ」が全体の 7 割を超える最大の情報取得源となっていたことが明らかとなった。情報媒体が多様化する昨今、テレビメディアの影響力は相対的に減じていると一部で指摘されているものの、日本においては今なお強いリーチ力を持つ科学コミュニケーション手段であることが示唆されている。しかし廣野ら⁴⁾が指摘するように、テレビメディアを科学コミュニケーション手段として捉えた研究は日本において極めて乏しく、その効果範囲と特性は今なお未解明である。

そこで本研究では、民放テレビがもつ科学コミュニケーション機能の効果範囲と特性、具体的にはその「科学知識の共有効果」と「科学非関心層へのリーチ」に着目し、定量的に明らかにしようと試みた。特にコロナ禍のような新興科学情報を社会全体で共有する状況を想定し、比較的まだ知られていない新興科学トピックである「ブルーカーボン」を研究対象とした。ブルーカーボンとは海洋生態系に取り込まれ蓄積される炭素のことを指し、海洋国である日本ではカーボンニュートラルの文脈で近年注目が高まりつつあり、認知拡大の過程にあると考えられる科学トピックである。

2. 対象

ブルーカーボンを扱った数多くのテレビ番組の中で、本研究では、日本テレビ系で毎週日曜日午後 6 時から 6 時 55 分 (JST) まで放送されているニュース番組「真相報道バンキシャ！」(以下「バンキシャ」) が 2023 年 5 月 28 日にブルーカーボンを扱った放送回に注目した。この日の番組内では、約 16 分間にわたり熊本県芦北町の高校生たちによる海草再生の取り組みを報道する中で、ブルーカーボンという用語の紹介、その科学的原理を説明していた。こ

の番組は著者の 1 人が制作に参加し出演していたことから、番組側の了承・協力を得て事前に放送予定日と放送内容を把握することで、ブルーカーボンに関する知識レベル評価設問の事前作成、放送終了直後の web 社会調査の実施が可能となり、自然視聴環境下においてテレビ番組が視聴者に及ぼす影響を効果的に測定することが可能であった。一方で多くの学者が強調するように⁵⁾、研究者自身が内部視点を持つ場合、そのメリットとは裏腹に、調査デザインと結果が完全に偏りのないものであると保証することは難しい。そこで今回は、潜在的バイアスを軽減するため、調査デザインおよび結果の分析について、番組に関与したことのない研究者と共に実施することで外部視点を加えておこなった。

3. 手法

「科学知識の共有効果」は、ブルーカーボンに関する科学知識問題 5 問を設定し、「間違っていると思う、わからない、正しいと思う」の 3 択による回答で、その正答数 (5 点満点) をもって知識量を測定することとした。設問は、ブルーカーボンの研究者 1 名、ブルーカーボンの実務家 1 名、著者 2 名の四者の議論により妥当性を慎重に確認しながら作成された。一方「科学非関心層へのリーチ」については、もともとはオーストラリアのビクトリア州政府によって開発され、のちに後藤ら⁶⁾によって日本でも検証されたビクトリア・セグメンテーション (VSEG) 法を用いた。この手法は、3 つの単純な質問に対する回答の組み合わせによって、回答者を科学・技術への関心度によって「関心層」「潜在的関心層」「低関心層」の 3 つのカテゴリーに分類することができる。⁷⁾

株式会社電通マクロミルインサイトへの委託により、放送直後に当たる 5 月 28 日午後 7 時から関東地区 1 都 6 県 (東京・神奈川・千葉・埼玉・茨城・群馬・栃木) の住民を対象に web 社会調査を実施した。全回答者に 2023 年 5 月 28 日のテレビ番組視聴状況を尋ね、その中から「バンキシャ」をリアルタイム・見逃し配信・録画で視聴したと答えた 1000 人を抽出し、そのうち番組視聴によって初めてブルーカーボ

ンを知ったと答えた回答者 445 人を「テレビ影響群」とした。一方「バンキシャ」を視聴しなかった 1000 人も抽出し、そのうちブルーカーボンを知らないと答えた 667 人を「非テレビ影響群」とした。両群とも番組放送前にはブルーカーボンを知らなかったため、放送直後に測定した知識量の両群の差は、当該番組視聴による変化を反映したものであると考えた。番組視聴の有無により抽出された各 1000 人は、居住地域・性別・年齢の人口構成比に合わせて抽出した。データ収集は放送後 24 時間以内に完了した。

4. 結果・考察

VSEG 法による分類の結果、テレビ影響群 445 人の内訳は、「関心層 52.1%，潜在的関心層 41.1%，低関心層 6.7%」であった。一方テレビ非影響群 667 名は、「関心層 18.7%，潜在的関心層 52.0%，低関心層 29.2%」であった。加納ら⁷⁾によれば、日本人全体の内訳は「関心層 16.1%，潜在的関心層 61.4%，低関心層 22.6%」であり、テレビ非影響群が比較的日本人全体の割合に近かった一方で、テレビ影響群は、科学技術に関心を持つ人の割合が高いことが示された。しかし、関心層が 8 割を超えることも報告されているサイエンスカフェの参加者⁸⁾と比較して、今回の調査対象番組は低関心層を含めて多様な層が視聴していたことが示された。一方、科学知識量は、テレビ影響群の平均スコア ($M=2.16$, $SD=1.32$) は、テレビ非影響群 ($M=0.95$, $SD=1.15$) を有意に上回っていた。($t(1100)=15.80$, $p<.001$, $d=0.993$) さらに、VSEG 法による関心度別に比較した結果、いずれの関心度グループにおいても、テレビ影響群の平均スコアは、テレビ非影響群を有意に上回っていたことがわかった。これらの結果は、自然視聴環境下においてもテレビ番組が一定の科学知識の共有効果を持つことを示唆するものであり、またその効果範囲が低関心層にも及ぶという、従来重視されてきたサイエンスカフェなどの手段とは異なる特性を持っている可能性を示している。成果報告当日は、より具体的なデータを含む結果、考察、また今後の研究の展開についても報告する予定である。

本研究は、知識量測定設問の作成に際し、ブルーカーボン研究者である桑江朝比呂氏（国立研究開発法人 港湾空港技術研究所）、ブルーカーボンに関する市民活動の専門家である木村尚氏（NPO 法人 海辺つくり研究会）の両名から多大なる協力・助言を頂いた。ここに厚く感謝申し上げる。また、社会調査に向けて必要な情報の閲覧・利用を許可して下さった「真相報道バンキシャ!」、日本テレビ放送網株式会社にも、ここに厚く感謝申し上げる。

本研究の一部は、同志社大学ハリス理化学研究所 第 11 期 部門研究 (B 部門) により行われた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 加納圭, 水町衣里, 岩崎琢哉, 磯部洋明, 川人よし恵, & 前波晴彦, “サイエンスカフェ参加者のセグメンテーションとターゲティング: 「科学・技術への関与」という観点から”, 科学技術コミュニケーション, 13, 3-16 (2013).
- 2) 内田麻理香, & 原塑. “欠如モデル・一方向コミュニケーション・双方向コミュニケーション 科学技術コミュニケーションにおける中核概念の再配置”. 科学技術社会論研究, 18, 208-220 (2020).
- 3) 標葉隆馬, “政策的議論の経緯から見る科学コミュニケーションのこれまでとその課題. コミュニケーション紀要”, 27, 13-29 (2016).
- 4) 廣野喜幸, 藤垣裕子, 定松淳, & 内田麻理香. 科学コミュニケーション論の展開. (東京大学出版会, 東京, 2023).
- 5) Creswell, J. W., & Báez, J. C. 30 Essential Skills for the Qualitative Researcher. Los Angeles, CA: Sage Publications. (2021)
- 6) 後藤崇志, 工藤充, 水町衣里, & 加納圭, “科学・技術イベント参加者層評価に豪州発セグメンテーション手法を用いることの有効性”, 科学技術コミュニケーション, 15, 17-35 (2014).
- 7) 加納圭: 「STI に向けた政策プロセスへの関心層別関与フレーム設計 (PESTI=ペスティ)」研究開発実施終了報告書 (2016).
http://www.jst.go.jp/ristex/pdf/stipolicy/JST_1115110_12101738_kano_ER.pdf (2024 年 9 月 10 日閲覧) .
- 8) 加納圭, 水町衣里, & 一方井祐子, “科学イベントへの参加意向と実際の参加者層の分析—「サイエンスカ

フェ」と「サイエンスとアートの融合イベント」と
の比較―， 科学教育研究， 44(4)， 254-260 (2020).