

水曜會誌

第25卷 第3号

目 次

退職記念講演	
原子配列から見続けたマテリアルサイエンス・エンジニアリング.....	松原英一郎 197
談 話 室	
デ・レ・メタリカと開礦器法圖説と佐渡金銀山絵巻 — 旧資源工学図書室の蔵書の桂図書館への移管 —	塚田 和彦 203
電気化学や高温融体を用いたマテリアルプロセッシング	安田 幸司 220
講 座	
太陽光に近い理想の光源 — 紫色LEDベース白色光源 —	汲川 雅一 226
研究速報	230
会 報	255
卒業生名簿	278
会 則	294

令和2年10月31日発行

京 都 大 学

水 曜 会

退職記念講演

原子配列から見続けた
マテリアルサイエンス・エンジニアリング

松 原 英 一 郎*

Material Science & Engineering from Insights into the Local Atomic Arrangements of Materials

by Eiichiro MATSUBARA

1. はじめに

最終講義を行うにあたり、何を話すべきかを考えた。私の場合、36年間、大学の職員として学生の教育と研究に携わってきた。大学入学から数えると、半世紀近く大学という機関にいたことになる。この間、私は何をしてきたのか？最終講義では、私の人生に区切りをつける意味で、このことについて報告する場とすることにした。これは、私が関係した研究室で共に学び、共に研究したスタッフや学生、さらには多くのことを教えていただいた恩師や共同研究者の皆様に対する、心からの敬意と感謝の気持ちを表すものである。

最終講義の企画・開催等は、名古屋工業大学の林好一教授と東北大学の市哲哲教授のお世話になった。彼らの計らいもあり、私が担当した東北大学金属材料研究所ランダム構造物質学と京都大学工学研究科材料設計工学の各研究室の関係者を対象とする内輪での最終講義と研究科の公的な最終講義を、それぞれ2019年12月27日と2020年2月10日に開催することができた。これらの最終講義に、お忙しい中、時間を割いてご参加いただいた皆様には、心から感謝している。本稿では、これら最終講義の内容をまとめた。

2. 放射光X線回折との出会い

私の研究の根幹を成しているのが、X線回折を用いた物質の構造評価である。特に、放射光から生まれる高強度で高輝度な連続X線を用いた回折実験である。この放射光X線との出会いは、1980年のノースウエス

タン大学留学時代に遡る。当時、コーネル大学のB.W. Batterman教授が世界で初めて放射光利用施設（CHESS）を建設し、共同利用が始まった直後であった。ノースウエスタン大学で私が師事していたJ.B. Cohen教授がこの新しいX線源を用いたX線散漫散乱実験を提案し、装置からその制御ソフトまですべてを任せられ、手作りし、それらをCHESSに持ち込んでアルミニウム合金のGPゾーンの構造解析を行った^{1,2)}。ここでの経験が、その後の私の日本の放射光施設、つくばのフォトンファクトリー（PF）や播磨のSPRING-8での研究に活かされることになった。

この私のCHESSでの実験の折、同じようにCHESSに実験で来られていたペンシルバニア大学の江上教授らのグループと出会った。このグループのメンバーの1人で、当時ペンシルバニア大学の客員教授であった早稲田教授の推薦で、ノースウエスタン大学でPh.D取得後、東北大学選鉱製錬研究所（選研、現在の多元物質科学研究所）に助手として赴任した。帰国した1984年当時は、東北新幹線がまだ大宮発着であったのをよく覚えている。私が初めて訪れた仙台の街は、今とちがいで、杜の都の風情を色濃く残す街であった。この選研では、早稲田先生と共に、金属材料研究所の増本研究室や工学部の深道研究室などと共同して、アモルファス金属などのランダム系物質のX線回折による構造解析を行なった。特に、当時立ち上がって間がなかった筑波高エネルギー研究所の放射光専用施設であるフォトンファクトリー（PF）で、早稲田先生がCHESSで行っていた、元素のX線吸収端近傍でのX線原子散乱因子の異常分散項の大きな変化を利用して物質中の特定元素周りの原子配列を決定するX線異常散乱法（AXS法：Anomalous X-ray Scattering Method）を利用した、ランダム系物質の構造解析法を確立した。

*京都大学名誉教授

このAXS法をアモルファス金属^{3,4)}のみならず、酸化物ガラス⁵⁾や溶液などの様々なランダム系物質の構造解析に応用し、多くの研究成果を上げることができた。

この選研時代の研究は、ノースウエスタン大学のX線散乱散乱実験で学んだ極めて微弱なX線回折強度を高い精度で測定する実験技術や回折装置の原理や制御技術、そして放射光X線を用いた測定技術等の経験と知識によるところが大きい。また、この選研時代に扱ったX線共鳴散乱現象は、その後扱うことになる、複素蛍光X線ホログラフィー法やX線回折分光(XDS: X-ray Diffraction Spectroscopy)に発展することになった。

3. 水溶液中の金属錯体構造解析

東北大選研での9年間の研究生活を経て、京都大学に大学院生として在籍した時の恩師である長村教授の推薦で工学部の助教授として赴任し、約6年半を京都で過ごした。この助教授時代は、とにかく研究費も装置もなかった。そこで、試料の作製等に大掛かりな実験装置を必要としない、モリブデン合金のめっきの研究を、栗倉教授の研究室と共同で実施した。私が注目し取り組んだのは、古くからよく知られていたモリブデンやタングステン金属のめっきに見られる誘起共析めっきという現象の解明である。これらの金属単独では水溶液から電析できない。しかし、Niなどの遷移金属イオンが水溶液中に共存するとこれらの金属との合金を形成しめっきすることができる。そこで、モリブデンイオンを単独で含む場合、ニッケルイオンと共存する場合、錯形成イオンを添加した場合など、各水溶液中のモリブデンイオンおよびニッケルイオンが作る水溶液中の金属錯体の構造を、AXS法を用いて解析した。そして、これらの金属錯体の構造の変化から、この誘起共析めっき現象を明らかにした。ニッケルイオンが共存する場合には、錯形成イオンの助けを借りてモリブデン酸イオンが水溶液中で単独で分散する。そして、優先的に電析するニッケル金属が触媒となり、水の電気分解によって発生する活性な水素の助けを借りて、モリブデン酸イオンが還元されモリブデン金属がニッケルと合金を形成し電析することを報告した⁶⁾。ここでの溶液系を用いた研究は、その後、液相還元法を用いた金属ナノ粒子やナノワイヤの合成の研究につながっていくことになる。

4. 東北大学金属材料研究所 ランダム構造物質学研究室

1999年9月に、助手時代を過ごした選研と同じ東北大学片平キャンパスの正門近くに立つ、金属材料研究所(金研)のランダム構造物質学研究室に教授として

赴任した。金研は、日本の多くの大学附属研究所でもトップクラスの研究環境を有しており、各研究室には助教授(現在、准教授)1名、助手(現在、助教)3名が配置され、場合によっては、技官をスタッフとして抱え、大きな研究室の占有面積が保証されている。そのため当初は、研究室も整備されておらず、助手として一緒に研究をした高橋英志先生(現在、東北大工学研究科教授)やその後相次いでスタッフとなった林先生や市坪先生らに迷惑をかけたが、単結晶中の蛍光X線を発生する元素周りの3次元原子配列を再構成することができる蛍光X線ホログラフィー法の高度化の研究、井上明久所長(当時)の研究室との共同研究で金属ガラスの構造と熱安定性の研究、村松淳司教授(当時、現在多元物質科学研究所(多元研)所長)の研究室との共同研究で高光触媒能チタン酸化物の構造制御の研究、ハリマ化成株式会社との共同研究で銅ナノ粒子およびスズナノ粒子合成の研究、多元研鈴木茂教授との共同で鉄鋼さびの形成機構と添加元素の役割の研究など、多岐にわたる研究を実施することができた。

蛍光X線ホログラフィー法の研究では、林先生による丁寧な仕事によって蛍光X線ホログラフィー測定技術の高度化や、解析から得られる3次元原子配列の高精度化のための実験手法の改良がなされた。高橋幸生君(博士課程学生、現在東北大多元研教授)が行ったX線共鳴散乱を組み合わせたComplex X-ray Holography法の開発^{7,8)}は、その後の同君によるCoherent X-ray Scattering法による像の再構成技術開発⁹⁾の基礎となった研究であると考えている。

金属ガラスの構造の研究では、X線回折による金属ガラスの平均構造解析や中性子非弾性散乱によるフォノン分散解析や共鳴超音波スペクトロスコピーによる構造緩和挙動解析などを組み合わせ、バルク状のアモルファス構造を形成するような熱的安定性に優れたアモルファス形成の起源を明らかにすることができた。この研究では、金属ガラスの構造は急冷アモルファス金属に見られるようなランダムな原子配列の均一構造ではなく、強い原子結合の領域と弱い原子結合の領域から構成されており、この原子レベルでの不均一構造の存在が、エントロピー効果による熱安定性をもたらすことを示した¹⁰⁾。例えば、Pd-Ni-Cu-P系金属ガラスの場合には、金属元素(Pd, Ni, Cu)間の比較的弱く結合した領域と、金属元素と非金属元素(P)間の比較的強く結合した領域が存在し、Zr-Al-Ni-Cu系金属ガラスの場合には、Zr-Al-Cuからなる20面体クラスター領域とZr-Al-Niからなる三角プリズム構造領域が存在することが熱安定性の要因であることを明らかにした。

高光触媒能を有するチタン酸化物薄膜の合成の研究は、当時博士課程であった中村貴宏君（現在、多元研准教授）が行った研究である。構造解析を主な研究としてきた私にとっても、挑戦的な部分が多かった。しかし結果的には中村君の大変な努力があり、光触媒に優れた準安定相であるチタン酸化物のアナターゼ相を、平衡相であるルチル相に優先して薄膜成長させるには、相変態の際の歪みエネルギーの影響を殆ど受けないチタン酸化物のアモファス薄膜を出發物質にすることが有効であることを突き止めた¹¹⁾。物づくりにおける実験と理論的考察が一体となった面白い研究であると考えている。

鉄鋼の錆の研究は、鉄が何故錆びるのかを自問自答して生まれた研究である。鉄は、乾燥した場所では錆びない。また同様に、酸素が供給されない水の中でも錆びない。すなわち、適度の湿り気と乾燥の繰り返しがないと錆びることがない。我が国で鉄製の遺物があり発見されないのもそのためである。そこで、湿潤と乾燥を繰り返し、その過程で鉄鋼表面に形成する物質をその場X線回折法で連続して測定し解析するという実験を行った^{12,13)}。錆を専門に行ってこられた研究者には、やや乱暴にも思えるかもしれないが、鈴木教授と共同することで、添加元素の影響や酸化初期の鉄水酸化物や鉄酸化物などを明らかにし、その後の鉄酸化の機構解明に微力ながら貢献できたと考えている。

5. 京都大学工学研究科材料設計工学

京都大学には、材料工学専攻の村上正紀教授（当時、現在立命館大学副学長）と田中功教授の誘いもあり、6年ぶりで京都に戻ってきた。京都では、東北大金研での金属ガラスや金属ナノ粒子の研究の新たな展開に加え、X線自由電子レーザーやSPring-8のビームライン建設による蓄電池電極の構造相変態の研究などを行うこととなった。

金研時代にハリマ化成との共同研究で始めた金属ナノ粒子合成の研究は、研究室の助手となった八木俊介先生（現在、東京大学准教授）の研究によって、新たな展開が生まれた。これまで液相還元法によって合成する金属ナノ粒子の形成速度や形成の駆動力を実験的に定量測定することは殆ど行われてこなかった。八木先生は、クォーツの共鳴周波数の変化を測定することで電極表面に電析する物質の量を精度良く測定することができるQCM（Quartz crystal micro-balance）電極を液相還元中の反応浴に浸漬し、反応浴の電位変化と電析量の変化を同時に評価できることを発想した。前者からは反応浴の還元能、すなわち金属ナノ粒子形成の駆動力の大小を予測でき、後者からは金属ナノ粒子

の電析速度を予測できることを提案した¹⁴⁾。この液相還元反応プロセスのQCM電極を用いた可視化の技術は、河盛誠君（博士課程、現在神戸製鋼）やBelela君（博士課程、現在フィリピン大学准教授）による金属ナノワイヤーの合成の研究¹⁵⁾やNiナノワイヤーの不織布を用いた優れた充放電サイクル能を示すコンバージョン電極への応用の研究¹⁶⁾、塩見昌平君（博士課程、現在京都市産業技術研究所）による銅ナノ粒子を用いた赤色染料合成の研究¹⁷⁾などに受け継がれ、多様な成果を挙げるようになった。

京都大学に帰ってきてからSPring-8との関わりが強くなったこともあり、NEDOの革新型蓄電池先端科学基礎研究事業（RISING）でSPring-8のBL-28XUに蓄電池研究専用のビームライン建設を手伝うことになり、革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発（RISING2）では最初の3年間PLを務めた。蓄電池反応下での構造ダイナミクスを解析するために、アンジュレーター光源に通常のビームラインよりも早い速度でエネルギー走査することができるチャンネルカット単結晶のモノクロメータを備えたコンパクト分光器とミラーを組み合わせた光学系を備えた新たなビームラインを建設した。この光学系の設計はもともと高速でのX線吸収分光（XAS：X-ray Absorption Spectroscopy）を行うために理化学研究所播磨研究所が開発したものである。そこに、分光にのみならず回折も同時に行えるビームラインにするために、大型の回折装置を導入した。この特徴を活用した測定技術として、河口智也君（博士課程、現在東北大学助教）がX線回折分光（XDS：X-ray Diffraction Spectroscopy）を開発した¹⁸⁾。このXDS法は、DASF法などの名前知られていた方法であるが、測定に時間を要することやX線原子散乱因子中に含まれる異常分散項の取り出しの際の物質による吸収効果の精度良い補正方法など、いくつかの課題があり実用には至っていなかった手法である。この手法を、この新しいビームラインの特徴を活用し、測定技術に改良を加えることで改善した。例えば、リチウムイオン蓄電池の正極物質の異なる結晶対称位置を占有する遷移元素の環境構造の変化と電極のサイクル劣化の関係などについて明らかにすることで、劣化機構を改善するための材料設計の指針を与えることに活用されている¹⁹⁾。

このBL-28XUの高輝度性を活用することで、硬X線光電子分光（HAXPES：Hard X-ray photoelectron spectroscopy）を用いて全固体薄膜蓄電池の蓄電池反応下での正極物質中の化学結合状態変化のその場観察を行う手法も開発した²⁰⁾。この手法を用いることで、例えば、木内久雄先生が行なったりリチウムイオンの正極物質中への挿入脱離に伴って、電荷補償を電極中の

遷移金属元素や酸素元素がどのように分担しているか、電極物質の構造緩和がどのように進行するかなど、これまで得ることができなかった挿入脱離に伴う緩和過程の直接観察をすることができる。今後、全固体蓄電池の界面での機構解明などに活用されることを期待している。

X線自由電子レーザー (SACLA) の約10 fsのパルス幅と、高輝度性を用いることで、ピコ秒 (10^{-12} 秒) の時間分解能で物質中の構造変化を解析することができるフェムト秒X線回折法も開発した。この手法をDVDなどの記録媒体としても利用されているカルコゲナイト系Ge-Te光相転移物質に適用することで、フェムト秒光レーザー照射によって励起されるピコ秒域での三方晶系から立方晶系への光励起構造変化が、Te原子の八面体中心から [111] 方向に一樣にずれた位置に存在するGe原子の、光励起による八面体中心周りでラットリング運動に起因することを実験的に明らかにした²¹⁾。この研究は、フェムト秒レーザー励起直後のフォノン励起前の数ピコ秒以内の電子励起状態での化学結合変化をX線回折により直接観察できることを示したものであり、X線回折の新たな可能性を開くものである。

6. 最後 に

私が大学において研究教育に従事するにあたり、教育の本質を考える上で大切にしてきた文章がある。これは、宮澤賢治が花巻農学校「精神歌」に歌った文章の一部である。

ワレラワ黒キ ツシニ俯シ・マコトノクサノ タネ
マケリ・ケワシキタビノ ナカニシテ・ワレラヒカリ
ノ ミチヲフム。

この精神でスタッフや学生と向き合うことに努めてきた。最終講義でも示したが、これまでの研究を基盤の基石に見立ててまとめた(図1)。ノースウエスタン大学で、J.B. Cohen教授の下でX線回折、放射光実験を叩き込まれて以来、X線による構造解析を主な実験手段として、アモルファス、ガラス、水溶液、ナノ物質、蓄電池、光相転移物質など様々な物質の構造と物性の関わり、構造に基づく物質合成設計などに、多くの優秀なスタッフや優秀で快活な学生諸君と共に歩んでくることができた。図2は、身内の最終講義の際に撮った記念写真である。ここに私が共に過ごしたすべての学生を網羅していない。しかし、京都大学、東北大学の両大学を通して、数多くの選りすぐりの将来有望な若い人たちと一緒に過ごせたことが、私の人生にとって何事にも変え難い喜びであり、誇りである。

放射光X線を用いた物質評価技術の研究

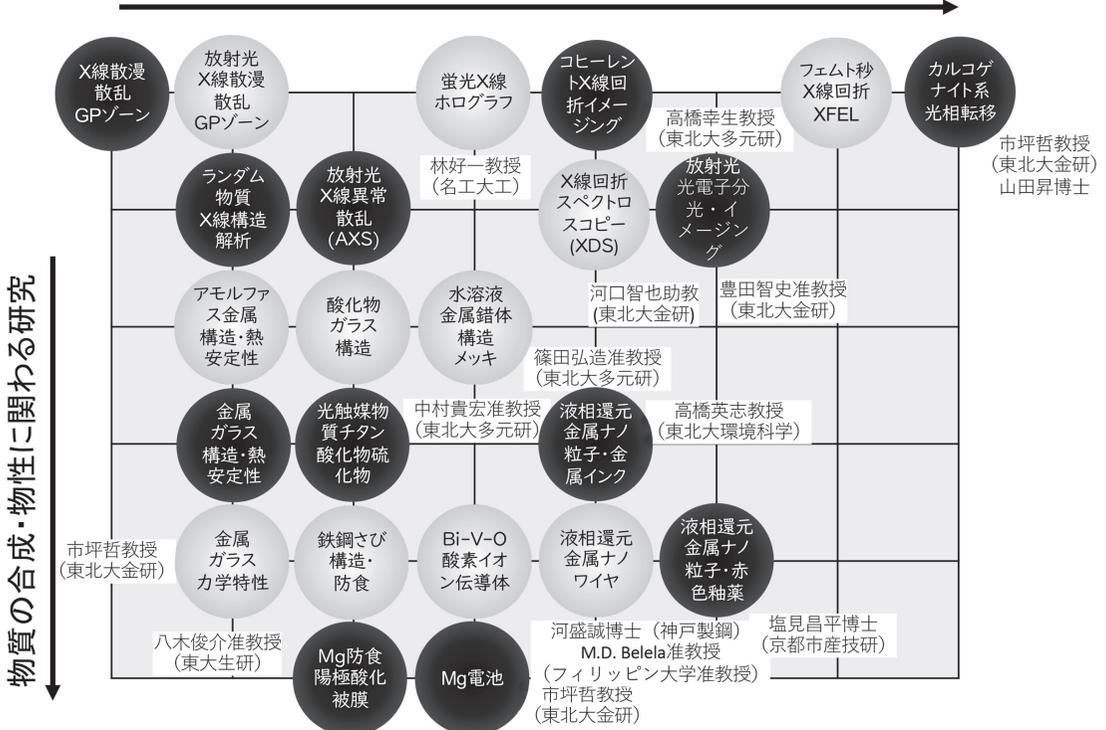


図1 原子配列から見続けたマテリアルサイエンス・エンジニアリング



図2 研究室の最終講演後の集合写真 (京都大学物理系校舎正面玄関ロビーにて)

参 考 文 献

- 1) Matsubara, E; Cohen, JB, "THE GP ZONES IN AL CU ALLOYS .1.", ACTA METALL MATER, 33 (11) pp.1945-1955 1985.
- 2) Matsubara, E; Cohen, JB, "THE GP ZONES IN AL CU ALLOYS .2. ", ACTA METALL MATER, 33 (11) pp.1957-1969 1985.
- 3) Matsubara, E; Tamura, T; Waseda, Y; Inoue, A; Zhang, T; Masumoto, "STRUCTURAL STUDY OF $ZR_{60}AL_{15}NI_{25}$ AMORPHOUS-ALLOYS WITH A WIDE SUPERCOOLED LIQUID REGION BY THE ANOMALOUS X-RAY-SCATTERING (AXS) METHOD", T, MATER T JIM, 33 (10) pp.873-878 OCT 1992.
- 4) Matsubara, E; Tamura, T; Waseda, Y; Zhang, T; Inoue, A; Masumoto, T, "AN ANOMALOUS X-RAY STRUCTURAL STUDY OF AN AMORPHOUS $LA_{55}AL_{25}NI_{20}$ ALLOY WITH A WIDE SUPERCOOLED LIQUID REGION", J NON-CRYST SOLIDS, 150 (1-3) pp.380-385 NOV 1992.
- 5) Matsubara, E; Harada, K; Waseda, Y; Iwase, M, "ANOMALOUS X-RAY-SCATTERING STUDY OF GEO_2 GLASS", Z NATURFORSCH A, 43 (2) pp.181-186 FEB 1988.
- 6) Shinoda, K; Matsubara, E; Saito, M; Waseda, Y; Hirato, T; Awakura, Y, "Structural study of poly-molybdate ions in acid Mo-Ni aqueous solutions", Z NATURFORSCH A, 52 (12) pp.855-862 DEC 1997.
- 7) Takahashi, Y; Hayashi, K; and Matsubara, E; "COMPLEX X-RAY HOLOGRAPHY", PHYS REV B, 68 052103 2003.
- 8) Takahashi, Y; Hayashi, K; and Matsubara, E; "Elemental identification of a three-dimensional environment by complex x-ray holography", PHYS REV B, 71 134107 2005.
- 9) Takahashi, Y; Nishino, Y; Ishikawa, T; Matsubara, "Approach for three-dimensional observation of mesoscopic precipitates in alloys by coherent x-ray diffraction microscopy", E, APPL PHYS LETT, 90 (18) 184105 APR 30 2007.
- 10) Hosokawa, S; Sato, H; Ichitsubo, T; Nakatake, M; Happo, N; Berar, JF; Boudet, N; Usuki, T; Pilgrim, WC; Matsubara, E; Nishiyama, N, "Inhomogeneity and glass-forming ability in the bulk metallic glass $Pd_{42.5}Ni_{7.5}Cu_{30}P_{20}$ as seen via x-ray spectroscopies", PHYS REV B, 80 (17) 174204 NOV 2009.
- 11) Nakamura, T; Ichitsubo, T; Matsubara, E; Muramatsu, A; Sato, N; Takahashi, H, "Preferential formation of anatase in laser-ablated titanium dioxide films", ACTA MATER, 53 (2) pp.323-329 JAN 2005.
- 12) Takahashi, Y; Matsubara, E; Suzuki, S; Okamoto, Y; Komatsu, T; Konishi, H; Mizuki, J; Waseda, Y, "In-situ X-ray Diffraction of Corrosion Products Formed on Iron Surfaces", MATER TRANS, 46 (3) pp.637-642 MAR 2005.
- 13) Suzuki, S; Matsubara, E; Komatsu, T; Okamoto, Y; Kanie, K; Muramatsu, A; Konishi, H; Mizuki, J; Waseda, Y, "Ex-situ and in-situ X-ray diffractions of corrosion products freshly formed on the surface of an iron-silicon alloy", CORROS SCI, 49 (3) pp.1081-1096 MAR 2007.

- 14) Yagi, S; Kawamori, M; Matsubara, E; "Electrochemical QCM Study of the Synthesis Process of Cobalt Nanoparticles via Electroless Deposition", ELECTROCHEMICAL SOLID-STATE LETTERS, 13 (2) E1-E3 2010.
- 15) Kawamori, M; Yagi, S; Matsubara, E; "Formation of Nickel Nanowires via Electroless Deposition Under a Magnetic Field", J ELECTROCHEM SOC, 158 (8) E79-E83 2011.
- 16) Kawamori, M; Asai, T; Shirai, Y; Yagi, S; Oishi, M; Ichitsubo, T; Matsubara, E, "Three-Dimensional Nanoelectrode by Metal Nanowire Nonwoven Clothes", ACS Nano Letters, 14 (4) pp.1932-1937 APR 2014.
- 17) Shiomi, S; Kawamori, M; Yagi, S; Matsubara, E, "One-pot synthesis of silica-coated copper nanoparticles with high chemical and thermal stability", J COLLOID INTERF SCI, 460 pp.47-54 DEC 15 2015.
- 18) Kawaguchi, T; Fukuda, K; Tokuda, K; Shimada, K; Ichitsubo, T; Oishi, M; Mizuki, J; Matsubara, E, "Revisit to diffraction anomalous fine structure", J SYNCHROTRON RADIAT, 21 (6) pp.1247-1251 NOV 2014.
- 19) Kawaguchi, T; Sakaida, M; Oishi, M; Ichitsubo, T; Fukuda, K; Toyoda, S; Matsubara, E, "Strain-Induced Stabilization of Charged State in Li-Rich Layered Transition-Metal Oxide for Lithium-Ion Batteries", J PHYS CHEM C, 122 (34) pp.19298-19308 AUG 30 2018.
- 20) Kiuchi, H; Hikima, K; Shimizu, K; Kanno, R; Fukunaga, T; Matsubara, E, "Operando hard X-ray photoelectron spectroscopy of LiCoO₂ thin film in an all-solid-state lithium ion battery", ELECTROCHEM COMM, 118 106790 2020.
- 21) Matsubara, E; Okada, S; Ichitsubo, T; Kawaguchi, T; Hirata, A; Guan, PF; Tokuda, K; Tanimura, K; Matsunaga, T; Chen, MW; Yamada, N, "Initial Atomic Motion Immediately Following Femtosecond-Laser Excitation in Phase-Change Materials", PHY REV LETT 117, 135501 2016.

談 話 室

デ・レ・メタリカと開礦器法圖説と佐渡金銀山絵巻 — 旧資源工学図書室の蔵書の桂図書館への移管 —

塚 田 和 彦*

**De Re Metallica, A Descriptive Treatise on Mining Machinery
and Sado Mining Scrolls
— Transfer of Shigen-kogaku Collections to New Library in Katsura Campus —**
by Kazuhiko TSUKADA

1. はじめに

この4月に桂キャンパスに新しい図書館がオープンした。工学研究科組織の桂移転が始まった2003年10月からかなりの年月が経っているが、この図書館は、これまで学科ごとに分かれていた図書室を集約・統合するとして新設されたものである。地下部分の2つの階が書庫に当てられるが、吉田キャンパスにも多数の蔵書を抱えている各学科の全ての書籍や資料を移送するには、まだ2年ほどを要すとのことである。吉田の旧工学部一号館にあった資源工学図書室は、2006年夏の地球工学科移転の際に、桂キャンパスC1棟に設けた資源系実験室の専用スペースに書庫ごと移送してあったが、その蔵書も大部分が桂図書館に移管されることになっている。

資源系と金属系には、1897年（明治30年）に創設された採鋳冶金学科の時代から、教育・研究のために教官が収集してきた実に120年余にわたる多くの書籍・雑誌、各種資料が保存されている。手元にある採鋳冶金学教室の図書原簿からは、それらの図書が、1961年（昭和30年）10月の16041番まで、一体として管理されてきたことが分かる。しかし、1977年（昭和52年）に工学部一号館に資源工学教室新館が増築されたときからは、資源系と金属系のそれぞれの図書室に完全に分別され、現在、それらは地球系図書室と物理系図書室の管理となっている。

旧資源工学図書室には、鍵のかかる書庫が一つあって、アグリコラの「デ・レ・メタリカ」や「佐渡金銀

山絵巻」など、とくに古い書籍や貴重な資料は分けて保管されていた。これらは、今後、京都大学の分類では準貴重書として、桂図書館あるいは大学として管理されることになり、すでに「デ・レ・メタリカ」などは「京都大学貴重資料デジタルアーカイブ」^{A)}において全頁公開されている。

資源系の蔵書が桂図書館へ移管されてしまえば、残念ながら、それらの資料の来歴に関する情報は失われるであろう。そこで、この機会に改めてそれら貴重書について調査し、記録として留めるに最もふさわしい「水曜会誌」において報告させて頂く次第である。

2. 旧資源工学図書室所蔵の貴重な書籍

旧資源工学図書室の貴重書庫に保管されていた書籍には、大別して、「デ・レ・メタリカ」などの洋古書、「佐渡鋳山旧式鋳業圖」などの絵巻物や絵図の他に、「天工開物」などの国内で出版された和装本、「開礦器法圖説」などの清末に出版された漢籍・漢訳本がある。絵巻物や絵図については後ほど述べるとして、それら以外の書籍を表1にまとめて示す。

2.1 採鋳冶金学科創設期の教育と図書

表1は、取得年の古いものからのリストとしているが、年代として、まず、採鋳冶金学科が創設された翌年の1898年から1905年（明治31～38年）までに収集された書籍がいくつかあることが分かる。これらは、おそらく学科開設にあたっての参考書籍として集められたものと想像されるが、それらの中には、創設期からの教授であった阿部正義や山田邦彦が、自ら所有していた古書を寄贈したものも含まれている。貴重書に

*京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 教授

は含まれないが、この時期には、教育用として非常に多くの洋書が購入されている。たとえば、1905（明治38）年の年間図書受入数は283冊にも及んでいる。それらのうち英文書籍が60冊、和書は農商務省や他の学協会からの寄贈本が主で20冊、それ以外は、フランス語の本が数点あるものの、残り200冊全てがドイツ語の書籍である。興味深いのは、それらの購入先で、英文書は全て丸善からであるが、独文書は全てCraz & Gerlachという書店からの輸入であった。

丸善は、慶應義塾で学んだ医師である早矢仕有的が1868（明治元）年に創業し、翌年、横浜で正式に開業した商社（洋書および薬品医療器の輸入販売）書店丸屋（丸屋善八）がもとである。京都には1872（明治5）年に支店（丸屋善吉）ができたとのことであるから、京都帝国大学の各学科に納められた洋書は、ほとんど

が丸善であったかもしれない。しかし、採鉱冶金学科の洋書のほとんどは、鉱業先進国であったドイツからの輸入書籍である。輸入元は、1765年に創立された世界最古の鉱山大学をかかえるフライベルグの書店（出版と販売）である。Craz & Gerlach社の創業は、鉱山大学の創立と同時期であり、当然、鉱山大学の教官の著書も出版したであろう。フライベルグ鉱山大学については後述するが、採鉱冶金学科創立期の教員のほとんどが同大学に留学していたので、最もふさわしい購入先として選択されたのではないかと思われる。

2.2 山田邦彦教授の寄贈書籍

貴重書として最も多いのが、1925（大正14）年に山田邦彦教授がなくなった後、その蔵書を子息の山田正幸氏が寄贈したものである。

創設期の採鉱冶金学科の教官は、全員が東京帝国大

表1 旧資源工学図書室所蔵の貴重書（寄贈/A：阿部正義，Y：山田邦彦，Ym：山田正幸）

(a) 和書・和刻本

取得年	寄贈	書名	著者	装丁・冊数	出版年	備考
1901年		日本山海名物図會	平瀬徹齋 編 長谷川光信 画	和装本 7分冊（巻1～巻5）	1797年(寛政9年)	初版：1754年（宝暦4年）
1901年		石丈野史	津田養徳夫	和装本 8分冊（巻1欠） （巻2～巻5、外編(上中下)、続編）	? 寛政	
1920年		本朝鍛冶考	鎌田魚抄（九峰）	和装本 12分冊（子～亥）	1796年(寛政8年)	
1920年		重訂 鑄貨圖録	佐野英山 編	和装本 2分冊（乾・坤）	1919年(大正8年)	「鑄貨圖録」1913年（大正2年）
1916年		山相秘録	佐藤信景（元伯）述	和装本 2分冊（上・下）	1876年(明治9年)	初版：享保年間？
1926年	Ym	経済要録	佐藤信淵	和装本 7分冊（巻1～巻15）	1876年(明治9年)	初版：1827年（文政10年）
1926年	Ym	天工開物	宋應星 著 江田益英 校訂	和装本 3分冊（上・中・下） （和刻本／菅生堂本）	1771年(天明8年)	原著：1637年（明・崇禎10年）
1927年	Ym	雲根志	木内重眺（石亭）	和装本 15分冊（前編、後編、三編）	1773年(安永2年)	後編：1774年、三編：1801年

(b) 漢籍・漢訳書

取得年	寄贈	書名	種別	編者／刊行	装丁・冊数	出版年
1904年	Y	四川塩法志	漢書	丁宝楨 編	和装本 20分冊（巻首、巻1～巻40）	1882年（清・光緒8年）
1901年		地學淺釋	漢訳書	江南製造局 （英國）雷伏兒 Lyell, Charles 撰；（美國）馮高温 Macgowan, Daniel 口譯；（清）華蘅芳筆述 原本：Elements of Geology, 6th ed. (1865)	和装本 8分冊（巻1～巻38）	1871年（清・同治10年）
1904年	Y	開礦器法圖説	漢訳書	江南製造局 （美國）俺特墨 Andre, George 著；（英國）傅蘭雅 Fryer, John 口譯；（清）王樹善筆述 原本：A Descriptive Treatise on Mining Machinery (1877)	和装本 6分冊（巻1～巻10、附図）	1899年（清・光緒25年）
1927年	Ym	礦學大成 ^註	漢訳書	江南製造局／再版？	和装本 2分冊	
1927年	Ym	礦務五種 ^註	漢訳書	江南製造局／再版？	和装本	
1927年	Ym	礦務叢書 ^註	漢訳書	江南製造局／再版	和装本 12分冊（子～亥）	1901年（清・光緒27年）上海書局
1927年	Ym	礦學入門	漢書		和装本	1890年（清・光緒16年）正字山房板（成都）
1927年	Ym	礦學心要新編	漢書	宋仔鳳（廣平）	和装本 4分冊	垣文善書局排板（四川省）

註）礦學大成（合本／銀鑛指南1巻、開煤要法12巻、井礦工程2巻、冶金録3巻、鍊鋼要言1巻）、礦務五種（合本／井礦工程2巻、鍊鋼要言1巻）、礦務叢書（寶藏興焉12巻）これらは、鍊鋼要言を除き、全て英国あるいは米国の書籍の漢訳本である。

(c) 洋書・訳書

取得年	寄贈	書名	著者	出版年	備考
1898年	A?	De re metallica	Agricola, Georgius	1561年	ラテン語第2版 / 初版：1556年
1898年	A	Gründlicher Unterricht von Hütte-Werken	Schlüter, Christoph Andreas	1738年	ドイツ語初版
1900年		Bericht von Bergwerken	Löhneyß, Georg Engelhard von	1673年?	ドイツ語第?版 / 初版：1650年
		Aula Subterranea Domina Dominantium Subdita Subditorum (Interpres Phraseologiæ Metallurgicæ)	Ercker, Lazarus (Berward, Christian)		ドイツ語 1672年版 / 初版 1574年 (1673年版) / 上書 1672年版からの付録
?		De re metallica (English translation)	Hoover, Herbert Clark	1921年	英訳本（妻 Lou Henry Hoover との共著）
1968年		デ・レ・メタリカ—近世技術の集大成— 全訳とその研究	三枝博音 著、山崎俊雄 編	1968年	

学卒業（阿部正義はその前身の工部大学校卒）であるが、山田邦彦も、卒業後のドイツ留学を経て、学科創設の翌年に京都帝国大学教授に迎えられている。採鉱学第1講座を担当したが、しばらくして宿痾のために須磨海浜にての静養を余儀なくされた。1911（明治44）年になって講義を再開したようである¹⁾が、おそらく、その長い静養中にも、鉱業に関する内外の書籍を収集し、採鉱冶金学という学問の成り立ちとその教育のあり方について思いをめぐらしたであろう。同教授の寄贈書には、自著の「水管分析手引表」の他に、お雇い外国人のクルト・ネットーの講義録である「涅氏冶金学」²⁾も含まれており、その収集は、我が国の採鉱冶金に関係する古い文献から、多くの絵巻物、清朝の書籍まで、実に幅広く、急速な近代化を目指した明治初期の鉱業教育を象徴するにふさわしい収集である。旧資源工学図書室の貴重書コレクションは、山田邦彦の存在なくしては成立しなかったといえる。

2.3 和書についての摘録

貴重書のうち、表1のb) 漢籍・漢訳書、c) 洋書・訳書については、別に節を設けて述べることにし、ここでは、a) 和書・和刻本の各々について簡単に紹介する。なお、下記に掲げる書籍は、そのほとんどをいくつかのデジタルライブラリ^{B),C),D)}で確認することができる。

1) 天工開物と日本山海名物圖會

これらの書物は、近代以前の産業技術を知る上で重要な、中国と日本の代表的書籍である。所蔵するこれら二つの書籍を図1に示す。「天工開物」は、明の滅亡まであと7年の1637（崇禎10）年に、南昌出身の宋應星が著わした産業技術書である。「天工」とは造化の巧み（自然の業）「開物」は人間の巧みを意味する。農業・紡績から軍事までも含めた計18の分野にわたって、その当時までのあらゆる産業技術について、文章と挿絵によって解説した書である。鉱業に関しては、第14巻「五金」の章において、金銀銅鉄錫（および鉛）の採鉱と冶金の方法が述べられている。この書が我が国へはかなり早くに伝えられたことが、1708（宝永5）年の貝原益軒「大和本草」にも「天工開物ト云書ニ詳ニノセラリタリ」などと記されている³⁾ことからわかる。教室所蔵のものは、1771（天明8）年に日本で刊行された調点や送り仮名が付された和刻本である。本草学が盛んであった当時、かなりポピュラーな読み物として普及したようである⁴⁾。

「日本山海名物圖會」も18世紀中期に出版されたものであるが、これは純然たる和書である。日本国内の様々な名産・特産物についての図絵集であるが、全五巻のうちの第一巻の全てが鉱山技術に関する解説に当

てられている。金銀銅鉄の採掘から選鉱・製錬まで、その道具までも、美しく明快な絵で示されている。絵に付属している文章は簡潔なものであるが、その絵は、さすがに浮世絵師の長谷川光信によるものだけに、「天工開物」より描写も細やかで、当時の文化的様相までよく伝えている素晴らしいものである⁵⁾。

2) 雲根志と石丈野史

両書は、今でいうところの岩石鉱物学の辞典であって、明治初期の鉱床学や鉱物学においては、欧米からの知識との照合において有用なものであったろうと想像される。「雲根志」は、「雲は岩石の間より生ず」から名付けられたもので、2000種以上の奇石や石器・化石・鉱物などについて、産地、由来、色、形などを解説した書物である。現代でも、石の収集を趣味とする人がいるが、著者の木内重暁は、号を石亭とするほどに、一生を奇石収集にささげた人で、「弄石社」まで結成して、その当時の愛好家たちの指導的役割を果たした人である。「雲根志」前編は53歳の時、後編はその翌年、三編は81歳のときの出版であって、文字通り彼の研究の集大成である。かのシーボルトが著書「日本」を執筆するにあたって、木内の研究成果の一部を参考しているとのことである^{6,7)}。

「石丈野史」は、「雲根志」と同様に様々な石について解説した本であるが、コンサイスな体裁で、名称と簡単な解説文がいろは順に記載されている。現存数が少なく、第1巻が失われているために発刊年は定かでないが、同じ津田養徳夫の著書に、1795（寛政7）年刊の「随分齋腹経解」という医学書があることから、本書も同じころの発刊と考えられる。なお、「志」は「三国志」と同じく書き記すことを意味し、「野史」とは「正史」に対する語で、在野の者が伝聞を書き記したものと意味である。

3) 山相秘録と経済要録

二つの書とも、出羽出身の経世家である佐藤信淵の著わした書である。「山相秘録」は、「山ヲ相スル法」すなわち、採鉱の術について述べた書であり、総論につづき、金・銀・銅・鉄・鉛・錫・水銀・硫黄について、山の様相や漂石の色・形によって鉱床・鉱脈（それぞれ苗・蔓と呼んでいる）を見つける秘訣が述べられている。本書は、佐藤元伯翁述、佐藤孝伯翁註、佐藤信淵校正となっているが、元伯（信景）の著書は知られておらず、「阿仁銅山及ヒ院内銀山ノ繁昌スルモ予カ祖父ノ功多カラストセス」などと書かれていて、どうも佐藤家三代の話は信淵の創作との疑いもある。一方「経済要録」は、総論・創業篇・開物篇・富国篇という構成になっているが、大部分を占めるのは第2～7巻までの開物篇である（開物とは、天工開物のそ

れである)。開物篇では、鉱業から農業・漁業・畜産業までの、あらゆる生産物について解説されている。書名が「経済」となっているのは、生産力を如何に上げるか、産物をどのように活用するかの観点が論の主となっているからで、国土の開発、産業の振興、交易の拡大によって、国家として「富国安定」を計るべきと説いている。国家という概念が希薄であった当時としては、時代に先んじた書といえる。したがって、産業振興から富国強兵へと向かった明治期において再評価された書であり、当教室所蔵のものも、「山相秘録」と同じ体裁で、1876（明治9）年に再版されたものである。

当教室では、これら2つの書の中の経世的な記述ではなく、多くを占める鉱業に関する解説に注目して収集されたのであろう。「山相秘録」は、近代以前の探

鉱法に関する唯一の書であるゆえか、計5セットが所蔵されている。取得年順でいうと、最初の2点は購入されたもので、1915（大正4）年取得の写本（上下合冊亀甲綴り）、と、もう1点は、明治9年に有隣堂から出版された上下2分冊のものである。あとは寄贈本で、山田邦彦所蔵の写本（大正15年正幸寄贈）と、大正期に採鉱学第1講座の教授であった井出健六所蔵の2点（有隣堂本と写本、ともに昭和2年に遺志寄贈）である。興味深いのは、井出健六の写本の方で、「合名會社藤田組小坂鑛山事務所」の縦罫用紙にペンで書かれたものであることから、おそらく井出が、東京帝国大学卒業後に勤務した小坂鉱山において自ら書写したものではないかと思われる。なお、「山相秘録」には、別冊として「山相秘録圖」が存在するが、残念ながら当教室には所蔵されていない⁸⁾。



図1 「天工開物」と「日本山海名物圖會」／『蜀省井鹽』の図と『金山淘汰絵』の図

4) 本朝鍛冶考と鑄貨圖録

我が国の冶金・金属加工の歴史において、刀剣製作と貨幣鑄造は、古代から綿々と続く技術として、研究上も重要な要素であった。「本朝鍛冶考」は、1796（寛政8）年に刊行された古代から江戸後期までの全国の刀鍛冶と日本刀の名鑑であり、「鑄貨圖録」は、1913（大正2）年に刊行されたもので、古代から江戸末期までの貨幣と鑄造業について、絵図とともに解説した書である。当教室所蔵のものは、ともに1920（大正9）年に購入されたものであるが、それ以前にも、羽皐隠史著「新古刀剣談」（1912年刊行）と、本阿弥光遜著「日本刀」（1914年刊行）も、発刊後すぐに購入されている。

明治9年に発布された廢刀令以降、日本刀の技術は衰退の一途をたどり、明治30年頃には十人程度の刀工しか残っていなかったようである。日本刀の鍛造品としての完成度の高さは、海外の知識を吸収してきた多くの大学人にとっても、改めて科学的に研究すべき対象となったのであろう。そのような研究者としてもっとも有名なのは、1902（明治35）年に東京帝国大学教授となった俄国一である⁹⁾。後年その成果は「日本刀の科学的研究」として纏められ、1953（昭和28）年に出版されている。日本刀の研究においては、その製作プロセスの再現がまず重要であったものと想像され、そのために、実際に刀工を大学に招いて作刀させることも行われたようである。京都大学の中に日本刀の鍛錬所があったのかどうか筆者は知らないが、実は、「大坂住高橋晴雲子高橋信秀七十三歳作、於京都帝国大学鍛之、大正六年十二月吉日」と銘の入った脇差が存在するのである¹⁰⁾。時代は下がって、九州帝国大学には1936～40年（昭和11～15年）、立命館には1939（昭和14）年から終戦まで、日本刀鍛錬所があったとのことであるが、日本刀の研究には、軍刀の製作という時代的要請の側面もあったことは忘れてはならないだろう^{11,12)}。

3. 江南製造局と開礦器法圖説などの漢訳書

教室所蔵の漢文で書かれた貴重書は、「地學淺釋」を除き、すべて山田邦彦教授の蔵書だったものである。これらの書籍は、前述の「天工開物」と異なり、中国で出版されたものである¹³⁾。その中の3点は、中国人の著わしたものであるが、残りの5点は、欧米書籍からの訳本であって、それらは全て上海の「江南製造局」が刊行したものである。

3.1 清末の洋務運動と江南製造局

江南製造局（Kiangnan Arsenal）は、清末のいわゆる洋務運動のなかで、1865（同治4）年に成立した官営の軍事生産機構（造兵廠）であり、その成立と運営

を指揮したのは、曾国藩と李鴻章である。1856年のアロー戦争（第2次アヘン戦争）や太平天国の乱を通じて、欧米列強の軍事的優位を痛感した清朝では、西洋技術の導入による産業近代化によって中国の「自強」を図ろうとする動き（洋務運動）が起こる。その運動は、欧米の優れた生産方式や設備の導入だけでなく、当然のこととして、それらを運用できる人材の育成も伴うものであった。そのため、江南製造局には、広方言館（語学学校）、翻譯館（洋書翻譯所）、工藝学堂（実業学校）も付設されていた¹⁴⁾。

江南製造局翻譯館における1868～1907年の40年間に漢訳された洋書は、鉱業、軍事関係の他に、基礎的な理工学から、鉄道、測量、医学、法律、貿易に関するものまで、200種近くに及ぶという。それらの大部分については、京都大学人文科学研究所「東方學デジタル図書館」^{F)}の「江南製造局譯書彙刻」によって確認することができる。それによれば、鉱山・冶金・金属加工に関する出版は「地學淺釋」も含めて計21点存在する¹⁵⁾。

表1に、撰・口譯・筆述と記載しているように、これらの漢訳書は、洋書の原本を、中国語は話せるが漢文は書けない欧米人が訳述し、ある程度の基礎知識はあるが洋書を直接読むことができない中国人が漢文にしたものである。「地學淺釋」の口譯を担当したD. Macgowanは医師であったし、「開礦器法圖説」のJ. Fryerに至っては宣教師にすぎなかったから、漢訳の作業は困難を極めたであろうし、彼らが直接学堂の学生を教授できたわけではない。当教室に所蔵されている江南製造局の漢訳本のうち、「地學淺釋」と「開礦器法圖説」は、単一洋書の翻訳であるが、それ以外の「礦學大成」「礦務五種」「礦務叢書」は、複数の洋書翻訳の合冊本で、おそらく、学生のための教科書か、鉱山業の実務に携わる技術者の必携書とした刊行されたものであろう。

3.2 地學淺釋と開礦器法圖説

図2に示しているように、山田教授自らの寄贈書である「開礦器法圖説」は、大判で最も丁寧な康熙綴りの装丁で、おそらく同局が発刊した初版本であると想像される。一方、1901（明治34）年に教室で購入された「地學淺釋」は、いくつか分冊だったものを国内で一冊に洋製本したものである。これらの漢訳本の原本は、表1に記載のとおりであるが、その発刊年は隔たっており、江南製造局の翻訳事業の初期と末期に属する。

「地學淺釋」の翻訳を担当した「口譯・Macgowan、筆述・華蘅芳」のペアは、それより前に「金石識別」の翻訳も行っていた。近代東アジアにおける科学思想

史の研究者であった武上真理子は、研究論文¹⁶⁾の中で「ごく限られて範囲とはいえ伝統的な本草学や鑛業の知識を利用することができた前作とは異なり、…独自の學問として成立してから日が浅く、新概念や新述語が次々と提起される状況にあった地質学…」とその翻訳の困難さについて述べている。また、武上は、「地學淺釋」は、出版10年後の1881（明治14）年に日本で和刻本が出版されるほど、明治初期の知識人たちに多大な影響を与えた書であったが、トップクラスの科学者や技術者を養成する教育機関では欧米語の原書が使われ、「地學淺釋」が教科書に指定されることはなく、参考書として図書館に配架されるにとどまったであろうと述べている。このような事情は、当教室でも同じであったろうと思われるが、地質学と鉱物学を代表する「地學淺釋」と「金石識別」の2つが、創設間もない1901（明治34）年に購入された¹⁷⁾ことは、

その当時の教育をよく象徴する事柄であるといえる。

一方、「開礦器法圖説」は、江南製造局翻譯館のかなり後期の出版物で、原著は表1記載のGeorge G. Andreの書である。あらゆる鉱山機械についての解説であって、精巧な691点の図面を伴っている。「開礦器法圖説」は、山田邦彦が1904（明治）年に寄贈したものであるが、ちょうど直前の1902年6月から1903年3月まで、政府派遣で中国の地質調査に行っているから、おそらく現地で、この初版本を手に入れたものと思われる。英文の原書は、採鉱冶金学教室創設の翌年1899（明治32）年に購入されているから、山田は、当然そのGeorge G. Andreの本を知っていたと思われる。原書には、図面に鉛筆書きの記入が見られることから、この実用的な書は、採鉱冶金学科の講義でも利用されたものと思われる¹⁸⁾。

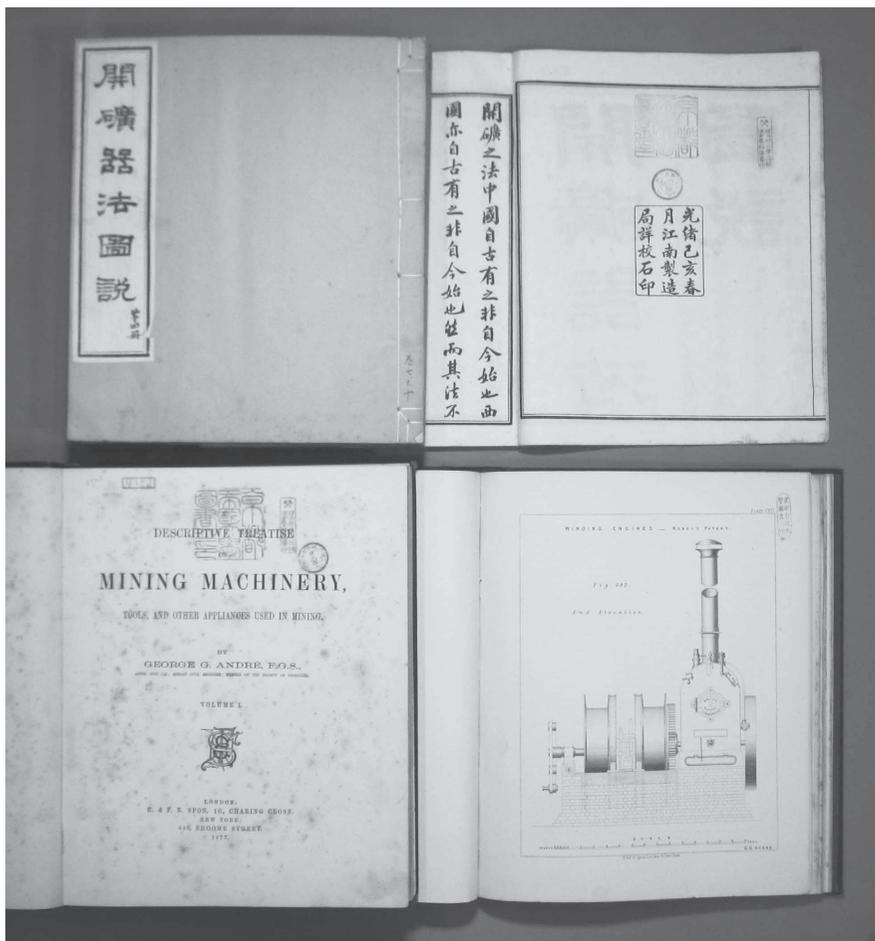


図2 「開礦器法圖説」とその原書「A Descriptive Treatise on Mining Machinery」

3.3 四川塩法志と中国の塩政

「四川塩法志」も「開礦器法圖説」と同じ時期に、山田邦彦が寄贈したものである。よってこの漢籍も、山田が中国で手に入れたものと想像される。「四川塩法志」は、1882（光緒8）年に四川総督の丁宝楨が編纂したものである。中国の塩の生産には、海塩、湖塩、井塩があって、四川省は、昔から井塩（地下の岩塩層から汲み上げた塩分の強い地下水を煮詰めて作る塩）の生産が盛んで、その中心都市であった自貢は「塩都」とも呼ばれている。その地域には天然ガスも産出した（火井）から、それを燃料としたようである¹⁹⁾。図1に示した「天工開物」の図絵は、その「蜀省井鹽」を示したものである。

中国では、漢の時代から塩は専売であって、それによる収入が国家の主要な財源（宋から清の時代まで、国家歳入の1/2にもなったという）であった。したがって、その官塩の生産、輸送、販売を管理し、その財政を預かる高度な行政機構が生まれることになる。前述の洋務運動の時代の1877（光緒3）年に四川総督となったのが丁宝楨である。「四川塩法志」はその時代の行政記録書であり、生産・輸送についての絵図も伴っている。単なる文書記録でないことが、山田邦彦がこの書籍を求めた理由ではなかったかと思われるが、鉱業の歴史を考える上で、その時代の中国を象徴する書籍の一つといえる。

4. デ・レ・メタリカなどの洋書と フライベルグ鉱山大学

4.1 アグリコラとデ・レ・メタリカ

1556年初版のGeorgius Agricolaの「De Re Metallica」は、それに含まれる290枚ほどの美しい木版画の挿絵とともに、鉱山学・冶金学の古典としてあまりに有名である。活版印刷技術の発明から約100年後に出版されたこの書籍は、すぐにドイツ語訳が出版され、ラテン語の第2版が1561年に、1563年にはイタリア語訳が出版されている。当教室の蔵書はラテン語第2版である²⁰⁾。「De Re Metallica」は、1921年に、後に米国第31代大統領となったHerbert C. Hooverによる英語訳²¹⁾が出版されてから、ルネサンス期の工学書としては稀なことに、近代でもよく知られるようになった。我が国では、1968（昭和43）年に、三枝博音による日本語訳²²⁾が出版されている。資源工学の貴重書庫に、原著、英訳本、和訳本の3冊が揃って保管されてきたことは、採鉱冶金学科を引き継いできた教官たちに、この貴重な書の存在が忘れ去られずにいたことの証といえよう。図3には、フーバーの翻訳本から「De Re Metallica」の挿絵の例を示す。

チェコのボヘミアとドイツのザクセンの境をなすエルツ山地は、その名のとおり鉱石の山（ドイツ語：Erzgebirge、英語：Ore Mountains）で、「エルツ山地（クルスナホリ）鉱業地域」として、2019年にユネスコ世界遺産にも登録されている。ドイツ・チェコ両国にわたるこの地域は、12世紀の銀鉱の発見以来、800年近くにわたって鉱山業が盛んな地域であった。Agricolaは、ザクセン州のグラウハウで1494年に生まれた人で、ルネサンスの中心地イタリアへの遊学の後、最終的には1534年から故郷に近いケムニッツで医者として生涯を送った人である。Agricolaの生きた時代が、エルス地域における鉱山業の最盛期であった。「De Re Metallica」には、鉱坑の毒気や塵芥による鉱夫の病気、いまでいうところの労働災害の防止、排水や換気による労働環境の改善に関する記述も見られる。これらは、彼の医師として経験ゆえのことであろうが、そういった事柄の重要性を力説している点から、「De Re Metallica」は鉱山を経営する者にとっての総合的な教導書となったであろう。美しい挿絵ばかりに目が行ってしまうが、単に採鉱と製錬に関する技術書ではなく、そこに理念や哲学があったからこそ、現代までも採鉱冶金学の古典として大切にされてきたのだろう。

4.2 デ・レ・メタリカに続く書籍

図書原簿に「Bericht von Bergwercken」と記されている1900（明治33）年に購入され書籍は、詳しく調査したところ、表1に記載したとおり、3つの部分からなる合冊本であった。その中で、最も重要なのは、中央に挟まれたLazarus Erckerの書であって、含まれる挿絵から筆者なりに表題を付けるとすると「選鉱・製錬と試金の術について」となるであろう。このエルカーの著書は、初版が1574年であって、「デ・レ・メタリカ」の正統な後継書として有名なものである。それに続いて綴じられているのは、エルカーの書の1672年版以降に付録として合冊されるようになったChristian Berwardが作成した専門用語集である。

合冊本の最初に綴じられているのは、原簿に記載されたドイツ語の直訳で「鉱山からの報告」と題するGeorg Engelhard von Löhneyßの著書である。このレーネセンの著書の初版は1617年の発行であるが、20世紀の研究で、技術的な説明の大部分がアグリコラとエルカーからの盗作であることが明らかとなっている。自ら印刷出版会社を経営していたレーネセンだからこそ、そのような真似ができたのであろうが、それに綴じられている挿絵は、内容的に盗作であるとはいえず、細密で美しいものである。

もう1冊の1898（明治31）年に阿部正義が寄贈した

Christoph Andreas Schlüterの著書は、そこに挟まれた「理工科大學採鋳鑛冶金學教室」の紙片に書かれていることを尊重すると「冶金学並びに試金術」という表題の書である。ただ、綴られている挿絵は、冶金や試金の作業状況を示すものではなく、すべて設備の図である。1908（明治41）3月下旬に試金室及び選鋳実習室が落成したとの記載が水曜会誌にあることから、あるいはその設備の設計に、このシュリューテルの書が参考にされたのかもしれない。なお、フーバーは、「デ・レ・メタリカ」の英訳本の前書きの中で、「1783年にSchlüterの冶金学の書が出版されるまでの180年間、

「デ・レ・メタリカ」をこえる鋳山学・冶金学のテキストは存在しなかった」として、この書が、アグリコラやエルカーに後継する重要な書籍であるとの認識を示している。これらの鋳山と冶金技術に関する古典として重要な3つの書籍が、そろって資源工学教室の蔵書となっていたことを知って、往時の教官の慧眼に敬服するとともに、何故か幸せな気分になってしまった。

なお、以上に挙げた書籍は、「デ・レ・メタリカ」も含めて、全頁をドイツのデジタルライブラリー^{①,②}で確認することができる。

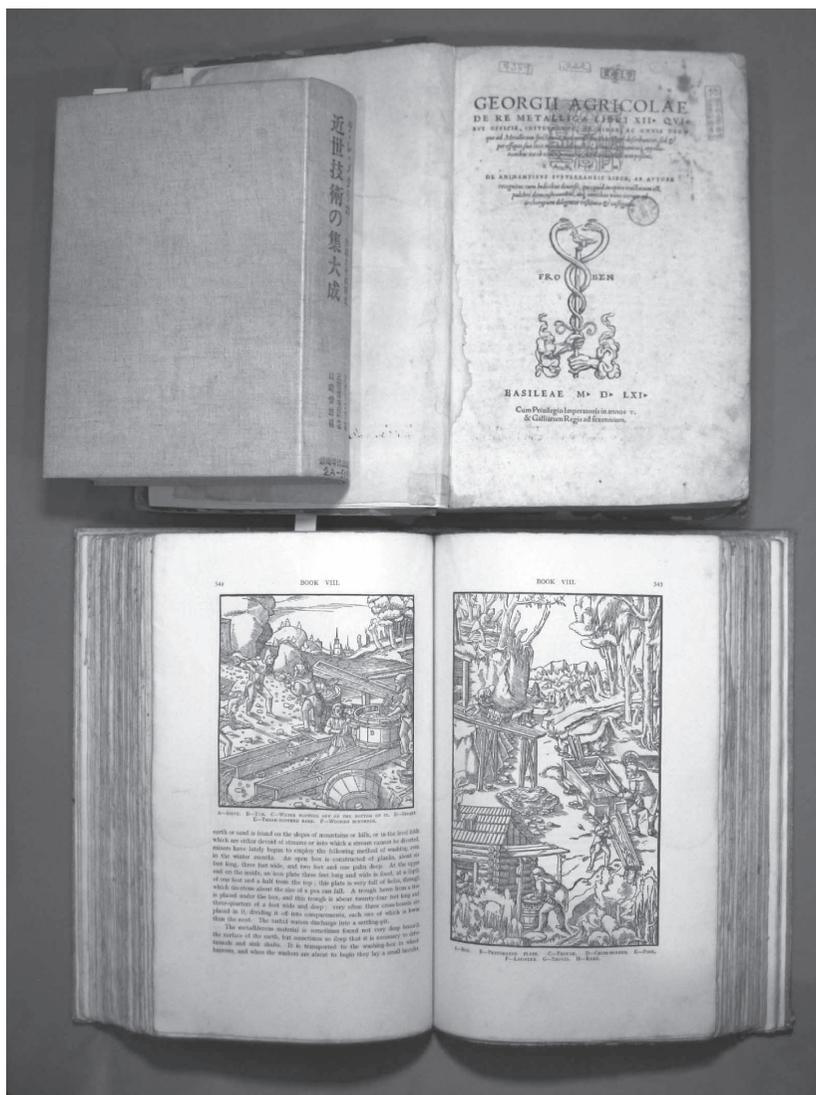


図3 De Re Metallica, ラテン語第2版（右上）英訳書（下）和訳書（左上）

4.3 フライベルグ鉱山大学と留学生

ドイツ・ザクセン州のフライベルグは、12世紀に銀鉱山が発見されたことによってその後何世紀にもわたって栄えた「エルツ山地(クルスナホリ)鉱業地域」の中心都市のひとつである。この町のシンボルが「フライベルグ鉱山大学」²³⁾である。創設は1765年で、その時期は、神聖ローマ帝国内のプロテスタントとカトリックの宗教戦争に端を発したヨーロッパ全域にわたる三十年戦争が、ようやく終息した時期に当たる。戦争によって荒廃した鉱山業を新しい技術の導入によって近代化するための人材育成が、フライベルグ鉱山大学の設立主旨であった。創設当時の教授の中で最も有名なのが、地質学者で「水成論」を唱えたアブラハム・ウェルナー (Abraham Gottlob Werner) である。1775～1817年まで教授を務めたが、教育者としてもすぐれており、多数の優秀な人材を育てた。その中の一人に、有名なアレクサンダー・フォン・フンボルト (Alexander von Humboldt) がいる。モース硬度計に名を遺すフリードリッヒ・モース (Friedrich Mohs) も1817～1826年まで、この大学の教授を務めた。また、鉄冶金学の世界的権威であったアドルフ・レデバー (Karl Heinrich Adolf Ledebur) は、1887年から教授を務め、後に学長ともなった。レデバーについては、「日本山海名圖會」を欧米に伝えた人物として前述した。

このように、フライベルグ鉱山大学は、鉱山学・冶金学・地質学・鉱物学のメッカとして、世界中から多数の留学生が集まる所となった。創設から1935 (昭和10) 年までの外国人留学生は約2900名に及び、人数として多いのはロシア、アメリカ、イギリスの順であった²⁴⁾。フライベルグ鉱山大学は、170年以上にわたって採鉱冶金学・地質鉱物学における世界の中心だったのである。お雇い外国人の一人であり「地震学会」を創設したイギリス人ジョン・ミルン (John Milne) も、王立鉱山学校を卒業したのち、フライベルグ鉱山大学で学んだのである。

留学した人数の多さで、日本は12番目の47名で、中国は11名であった。幕末から明治にかけての鉱業界の第一人者であった「大島高任」は、岩倉使節団に従ってフライベルグを視察しており、その息子で東京帝国大学の冶金学教授となった大島道太郎、それに前述した長谷川芳之助、野呂景義、渡部渡、俄国一がフライベルグへの留学生であった。驚くべきことか当然といえるのか、我が採鉱冶金学科の創設期の教授陣、阿部正義、山田邦彦、横堀治三郎、井上匡四郎、齋藤大吉、全員がフライベルグに留学していたのである。

その中で阿部正義は、少し年齢が上であるが、彼

は福井松平藩の家老を務める伯氏の九男として生まれ²⁵⁾、「穎悟夙ニ故松平春嶽侯ノ鍾愛スル所トナル」といわれる程の幼少からの俊英であった。1884 (明治17) 年に工部大学校を卒業の後、明治18年から22年まで、私費にて、フライベルグ鉱山大学やハイデルベルグ大学に遊学し、その後、1896 (明治29) 年から31年まで、政府派遣として再びフライベルグ鉱山大学に留学した²⁶⁾。資源工学貴重書の2つの洋書は、取得年がともに1898 (明治31) 年となっており、それは阿部正義が帰国して採鉱冶金学科教授に着任した年である。これらのことを考え合わせると、教室に所蔵されているアグリコラの「デ・レ・メタリカ」とシュリューテルの「冶金学並びに試金術」は、阿部正義がドイツ滞在中に自ら探し求めた稀覯本であったに違いない。

5. 佐渡鉱山の絵巻物および絵図

旧資源工学図書室の貴重書庫に保管されていた絵巻物や絵図を、表2にまとめて示す。それらは、阿部正義寄贈のものが2点 (絵巻物と浮世絵)、教室で購入された絵巻物1点、卒業生が寄贈した絵図1点、他は全て山田邦彦が所蔵していたものである。

5.1 佐渡金銀山とその歴史²⁷⁾

佐渡ヶ島は、中央部の国中平野を挟んで、2つの紡錘形の山地 (北側の大佐渡山地と南側の小佐渡山地) が北東方向を向いて雁行配列した形をしている。島内には30以上の鉱山が分布しているが、佐渡ヶ島は、東日本の鉱産資源の多くが賦存する、いわゆるグリータフ造山運動によって形成された黒鉱ベルト (東北地方西部を縦断し矩形に折れてフォッサマグナ東側を伊豆に至る) の西端にあたる。佐渡で大規模な生産が行われた鉱山は、西三河 (にしみかわ) 砂金山、鶴子 (つるし) 銀山、相川 (あいかわ) 金銀山の3つである。小佐渡山地南部を日本海へ向かって流れる西三川で砂金が採れることは、かなり古くから知られていたようであるが、鶴子、相川両鉱山 (大佐渡山地の南部にあり、尾根を挟んで北側に相川、南側に鶴子銀山が位置する) は、まず、1542 (天文11) 年に鶴子銀山が、越後の商人茂右衛門によって発見され、ついで1601 (慶長6) 年に相川金銀山が、鶴子銀山の山師たちによって発見されたとされている。

我が国の鉱工業の隆盛期は、安土桃山から江戸初期までと、幕末から明治・大正期である。どちらにも共通しているのは、体制が大きく変革したことと、海外との交易とそれに伴う人の交流が盛んであったということである。鉱工業が発展する要件として重要なのは、海外からもたらされた新しい技術を積極的に利用して

産業振興を計ろうとする新しい政権の存在である。前者では、鎖国までの徳川幕府であり、後者では、明治維新後の新政府である。それぞれの時期の鉱業の発展における主要な人物を一人ずつ挙げるとすれば、色合いは少し異なるが「大久保長安」と「大島高任」ということになる²⁸⁾。

全国の鉱山の統一的支配と積極的な鉱業振興を政策とした豊臣政権、それを引き継いだ徳川家康は、佐渡や石見などの主要な金銀山を幕府直轄とし、武田氏の金山開発も担っていた「大久保長安」を登用してそれらの経営に当たらせた。大久保は、それまでにもたらされていた坑道掘進の技術や灰吹法などの製錬技術を大々的に導入して、鉱区の拡大と生産の増進を図るとともに、町並みの整備や輸送道路の整備も行った。大久保は、奉行として1601(慶長6)年8月に石見奉行に任じられ、1603(慶長9)年7月には佐渡奉行、同12月には勘定奉行も兼ねるようになった。石見鉱山での成功をもとに、佐渡金銀山には、大久保によって、石見からの多くの技術やそれらを運用できる人材が導入されている。

一方、大島高任(たかとう)は、先に少し触れたが、「近代製鉄の父」とも呼ばれるように、自分の出身である盛岡藩で、1857(安政4)年に日本で初めて洋式高炉を建設した人である。1870(明治3)年には、新政府に対し「坑学寮新設に関する意見書」を提出しており、それが工部大学校創設の一つの契機となって、その後の多くの優秀な人材の輩出につながった。明治政府において大島は、小坂鉱山や阿仁鉱山を経て、

1875(明治8)に佐渡の初代鉱山局長となっている。佐渡においては、着任後直ちに事業拡張計画をたて、新しい堅坑や選鉱場の建設²⁹⁾、鉱区の再開発などを行った。1887(明治20)年に、大島の招きに応じて、農商務省技師として相川に赴任してきたのが渡辺渡である。渡辺も、搗鉱場や運搬用架空索道の建設によってさらなる近代化を推し進めた。また、技術者を育成する鉱山学校も開設した。彼らによって、明治初期の佐渡金銀山の隆盛が築かれたのであるが、彼らとともにフライベルグにおける鉱業実情を目の当たりにしてきた人物であるから、近代化の具体的モデルを既にしてにしていたのである。

佐渡金銀山は、これら2つの時代を境とする江戸時代を通じて、幕府の財政(貨幣政策)を支える重要な鉱山であったが、江戸初期の隆盛を経て、金銀の生産は時代とともに徐々に衰退していく。採掘域の深部化による湧水の問題が大きく、それを解決するためには、坑内排水技術の革新が必要であったが、そのことを決定的に阻害したのが、1638(寛永15)年の鎖国令であり、それに先立つ1630年の禁書令である³⁰⁾。そのような制約の下でも、佐渡においては、何人かの名奉行によって、請負制度の改革、新しい排水装置の導入、長大排水坑道の開削などが行われ、何度か生産量が持ち直した時期もあるが、全体としての衰退傾向を留めるまでには至らなかった。教室所蔵の絵巻物や絵図の成立年代を推し測る上では、それらの改革が行われた時期が、ひとつの拠り所となる。

表2 旧資源工学図書室所蔵の絵巻物・絵図 (寄贈/表1に同じ)

取得年	寄贈	名称	形態	装丁	寸法	番号	制作年/[備考]
1905年	A	佐渡鑛山旧式鑛業圖	巻物		幅31cm長さ2200cm	A1	1819~1860年代(文政2年~幕末期)
1924年		佐渡鑛山繪巻物	巻物		幅45cm長さ730cm	A2	1732~1745年(享保17~延享2年)
1926年	Ym	佐渡鑛山坑内繪巻物	巻物	□	幅29cm長さ1770cm	A3-1	1759~1790年(宝暦9~寛政2年)
		佐渡鑛山製錬繪巻物	巻物	□	幅28cm長さ1445cm	A3-2	
1936年	※	御直山佐渡ヶ嶋金銀山圖	疊物		88×173cm	B4	(推定)1695(元禄8)年の写し
1926年	Ym	相川町々及銀山岡繪圖	疊物	☆	32×40cm	B5	(推定)1838(天保9)年頃
1926年	Ym	相川銀山役所及寄勝場吹床	疊物	☆	138×60cm	B6	(推定)1834(天保5)年頃
1926年	Ym	相川銀山立合岡引圖	疊物 2冊	☆	107×67cm	C7-1	[立合(鉱脈)の走向を推定している図]
					107×67cm	C7-2	
1926年	Ym	中尾間歩惣鋪繪圖	疊物		48×69cm	D8	[坑内排水設備の配置状況を示す図]
1926年	Ym	中尾間歩坑内圖	疊物	◇	36×60cm	D9	
1926年	Ym	相川銀山御唧筒装置	疊物	☆	30×58cm	D10	
1926年	Ym	中尾間歩坑内圖	疊物		49×48cm	E11	1826年(文政7) 振矩師: 四代目山下和右衛門
			疊物	◇	48×69cm	E12	1830年(文政11) 振矩師助: 阿部六平
1926年	Ym	佐渡鑛山坑内測量野帳	巻物		幅30cm長さ1150cm	E13	1831年(天保2年)
1926年	Ym	佐渡金山振矩術測量實例	疊物		145×133cm	E14	1826年(文政7年)の大正4年の写しである
1905年	A	嘉永年間地方測量圖	軸物		幅38cm長さ97cm	F15	1848年(嘉永元年) 葛飾北斎(89歳)

※ 中村公一(大正10年卒)寄贈 □, ☆, ◇: 装丁が同一のもの

5.2 佐渡金銀山絵巻物について³¹⁾

「佐渡金銀山絵巻物」は、相川金銀山における鉱石の採掘、選鉱・製錬、小判の製造までの一連の作業工程を描いた絵巻物（巻末に西三川砂金山の描写が付いているものもある）で、美術品としても価値も高く、国内外の多くの科学史・技術史研究家の研究対象にもなっている。佐渡金銀山絵巻物は、1732～1736年（享保17～元文元年）まで佐渡奉行であった「萩原美雅」が、新しく佐渡へ赴任する役人のために制作するように指示したことに始まるものである。奉行や組頭が交代するたびに、奉行所の絵図師・山尾衛守が三代にわたって製作、提出するのが恒例となったとのことである。このような経緯で制作された「佐渡金銀山絵巻」であるから、年代に応じて含まれる作業工程に違いが生じているのは当然である（それが逆に制作年代を判定する基準ともなる）。加えて、多数の模写が作成されたこともあって、結果として様々なバリエーション

があるとともに、数量としても国内外に100点を超える所在が確認されている。海外に持ち出されたものの多くは、幕末から明治期に來日した外国人学者・技術者が購入したもの、あるいは彼らへの贈り物であったといわれており、来歴として有名などころでは、イギリス国立図書館所蔵のものは、フランツ・フォン・シーボルトが2度目の日本滞在中に手に入れたものである³²⁾。フライベルグ鉱山大学にも所蔵されているが、それは阿仁鉱山に勤務したお雇い外国人技術者のために制作されたものであるとのことである。国内に所蔵されている絵巻物は、いくつかの機関で公開されており、ネット上でそれらの絵を全長にわたって閲覧することができる³³⁾。

当教室に所蔵されていた佐渡金銀山絵巻は、表2に示したように、来歴の異なる3種類、計4巻で、最も長いものは全長22mもある。それらの外観とともに絵の一部を図4に示した。最も時代が古いと推定され

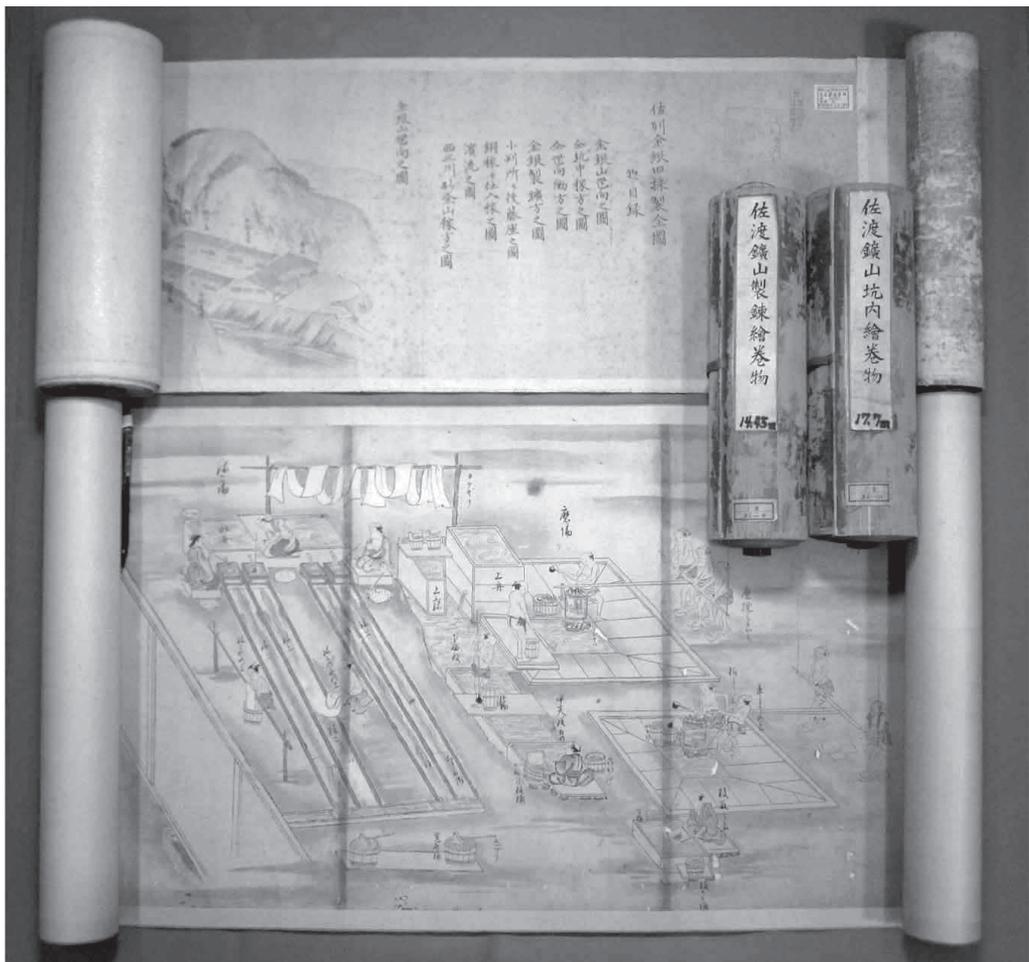


図4 佐渡金銀山絵巻（上：A1，下：A2，巻のまま：A3-1,2）

るのはA-2の巻物で、1924（大正13）年に教室で購入されたもので、用紙を縦にして25枚つないだ幅広の絵巻物である。図4に示したのは、その冒頭部で、粉碎・選鉱の工程（磨場、杵こ場）³³⁾が描かれている。巻頭に「佐渡ヶ島人足の圖」との記入があるが、確かに、この絵巻物は、生産の各工程における人員配置やそれぞれの人員の役割が明確に描かれている。つぎに古いのは、山田邦彦の所蔵品だったA3で、A3-1とA3-2は続きものである。この巻物には、A3-1の最後に、西三川砂金鉱山の作業工程を示す絵図も付随している。最も標準的な構成の絵巻物で、2代目山尾衛守の制作とも推測されている。残りのA-1は、最も長く、かつもっとも新しいもので、阿部正義が寄贈したものである。全ての工程を網羅しているものであるが、用紙ごとに絵図が独立している場合が多く、構図としての連続性はあまり意識されていない。なお、どの巻物にもその制作年代を示す記述はない。表2に示した制作年代は「佐渡金銀山絵巻検討会」³¹⁾が、当教室の絵巻物を含む数多くの国内所蔵の絵巻物について調査・比較検討し、その結果をもとに推定した年代である。

5.3 佐渡金銀山に関する絵図

1) 相川の町・鉱山・奉行所の絵図

B5「相川町々及銀山岡絵圖」は、図5に示すように、相川鉱山の鉱区と町全体を示す絵図である（「岡」とは地下の採掘域を表す「敷」に対する語であって地上を意味する）。絵図の中央において、東から西の海に向かって流れる「濁川」に分岐があるが、南側の支流が「右沢」、北側の支流が「左沢」と呼ばれる。分岐点から左沢の少し上流の位置にもう一つ支流が流れ込んでいるが、その支流を含めた左沢と右沢の間が、相川金銀山の区域である。絵図を見ると、その区域に、実に夥しい200近くの坑口（ Π の字で示されている）が存在することがわかる。一つ一つの坑口を単位として採掘が行われたわけで、その坑口とそこから坑内に広がる一単位の採掘域を指す言葉として、間歩（まぶ）という語が使われる。赤い点で示されているのが、奉行所直轄の間歩（御直山と呼ばれる）であり、この絵図では5カ所ある。それ以外の間歩は、山師が採掘を請け負い、採掘した鉱石のうち一定率を奉行所に運上する間歩（自分山、請負山と呼ばれる）であって、山師の名前が間歩の名称となっていることが多い。この絵図では、数カ所の番所を除けば、鉱山区域内に建物が一切無いが、これは、1759（宝暦9）年、寄勝場（よせせりば）³⁴⁾が設置され、鉱石の粉碎・選鉱の工程が、奉行所によって集約・管理されるようになったからである。この事実から、この絵図の成立が少なくとも1759年以降であることがわかる。

濁川の中央分岐点から西が町であって、濁川の南に位置するもう一本の川（南沢）と、濁川（北沢とも呼ばれる）の間に広がるのが町の区域（上町）である。上町は、海岸段丘の上に位置し、それより下の海沿いに広がる町並みは、下町と呼ばれる。奉行所は、上町と下町を限る段丘の上に位置している。南沢の南側には多数の寺院が集中しているが、この時代には、絵図全体で83の寺院の存在が確認できる。寺院の有無や街域の拡大縮小も、絵図の年代推定の手掛かりとなる。佐渡市の2015年の調査報告書²⁷⁻³⁾によれば、この絵図と、同じ名称・構図のものが国内2カ所に所蔵されているとのことであり、公開されている日本銀行貨幣博物館^{K)}のものと比較したところ、差異がほとんどなく、この山田邦彦所蔵の絵図は、それらと同年代に制作されたものと推定される。

B4「御直山佐渡ヶ島金銀山圖」も、鉱山全体を示す絵図である（町は含まない）が、B5とちがって、鉱区内の川筋に沿って多数の建屋が描かれていることから、寄勝場ができる以前のものであることが分かる。この絵図は、中村公一（大正10年の卒業生）が1936（昭和11）年に教室に寄贈したものであるが、これと同じ構図の絵図は、国内3カ所に所蔵されている。そのうちの一つである東京大学所蔵の品¹⁾（渡辺渡による元禄8年調製との箱書きがある）と比較したところ、ほとんど同じであるが、文字や記号の記入が少ないことが確認された。したがって、用紙の色などから東大所蔵のものと制作年代は同一とみられるが、その写しの未完成品とみるのが妥当と判断される。

B6「相川銀山役所及寄勝場吹床」は、奉行所全体の建屋の配置と構造を示す詳細な絵図面である。一般的に考えて、このような構造図は建物の新築や改築のときに必要なものであろう。相川地区は、江戸期を通じて計6回、大火に見舞われ、その度に奉行所の再建が行われている。相川町教育委員会の1995年の調査報告書²⁷⁻²⁾には、1829（文政2）年以前と、1830～43年（天保年間）の奉行所の間取りの復元図が記載されている。天保年間とされているのは、日本銀行貨幣博物館所蔵の図面^{K)}を根拠とするものであろうが、これらと教室所蔵の絵図面を比較したところ、文政2年以前の図には存在し、天保年間の図面では無い建屋が、教室所蔵の図面には残っていること、また、教室所蔵の図面では、天保年間の図ほどには増築が進んでいないことなどから、これらの中間年代に属するものと推察された。筆者としては、1834（天保5）年の大火で焼失した奉行所の再建計画を、江戸で承認してもらうために描かれた図面であったと推断したい。

C7「相川銀山立合岡引圖」は、とてもユニークな

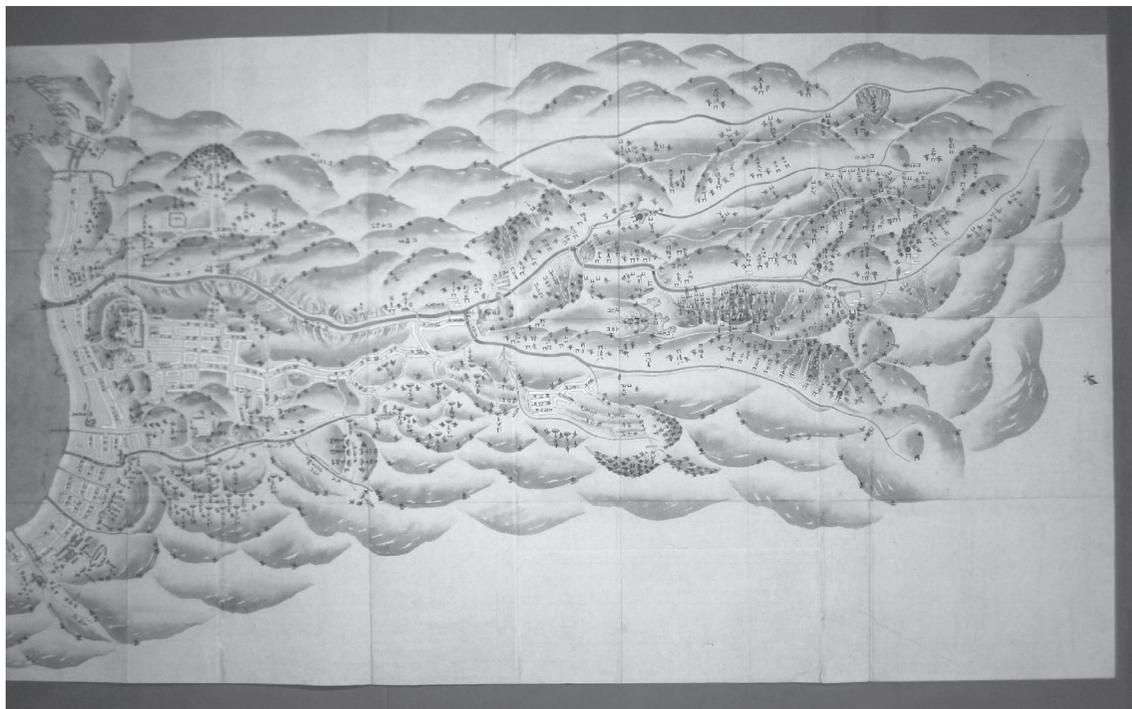


図5 相川町々及銀山岡繪圖

繪図で、同一寸法の2枚がセットになっている。1枚は、鉾山域全体における主要な間歩5つの坑口の位置と、それにつながる採掘域を示した図である。もう1枚は、同一縮尺でそれらの地上部を描いた図となっていて、2枚を重ねて見ることを意図している。地上部の繪図には、白い線で立合（鉾脈）が名称とともに描かれている。それらは、各間歩内で実際確認された鉾脈の位置を大胆に推定してつないだものと思われる。山師が、新たな坑道展開や新規の間歩の開発を考える上で資料としたのであろう。明治期につくられた地質図³⁵⁾と比較すると、全体の鉾脈の走向は符合しているけれども、間歩と間歩との間の鉾脈の繋がりには間違いもあって、実際にどれほど役に立ったかは疑問である。しかしながら、往時の地質調査・探鉾の様子を知る上で、重要な繪図だと思われる。国内にはあまり類例のないものであって、その意味からも貴重な品である。

2) 坑内の排水系統に関する繪図

D8～D10は、坑内の排水系統や設備について示したものである。御直山の一つであった中尾間歩の、D8は全体（惣舗）、D9は一部について、排水設備が坑内のどこに設けられているかを示した繪図である。多数の釣瓶の配置と、掛樋（排水用の木製の樋）がどの坑道に沿って設けられているかが描かれている。

D10は、阿蘭陀水突道具（フランカスホイ）と呼ばれる天秤式手押し唧筒（ポンプ）を利用した揚水設備について示したもので、2台の唧筒とそれらをつなぐ階段状に連結した樋の配置が示されている。これら排水設備に関わる繪図の制作年代については、フランカスホイの導入が1783（天保3）年とされているから、D10は、その頃のものであると考えてよいであろう。D8とD9の坑内図には、フランカスホイと思われる装置は描かれていないので、天保年間より前の繪図と考えるべきであろうが、定かではない。

3) 坑内における測量（振矩術）に関する繪図

E11～14として分類した4つの繪図や巻物は、坑内の測量に関するものであって、かなり貴重な資料ではないかと考えている。佐渡では測量のことを振矩（ふりがね）と呼んでいた。坑内での測量が最も重要となるのは、坑道を新たに開削するときである。どれだけの距離にわたって坑道を掘進しなければならないか、測量によって正確に算定し、所要期間、人員、予算を見積もっておく必要がある。また、掘進の過程で、今この地点であるのかを把握することも重要であった。それらを担ったのが「振矩師」と呼ばれる測量技術者であり、その任は重かったのである。2地点の間の掘進すべき岩盤（中石とよばれる）の距離と方位、高低差（高下）を求めるのであるが、それには、縄張り

きる直線区間を起点から多数連ねて、既存の坑道を辿って、折れ線を終点までつないでいくしかない。現代でいえば、閉合しないトラバース測量ということになるが、幾何学の問題であるから、彼らはいわゆる算学者（和算家）でもあったわけである。佐渡には数多くの振矩師がいたが、そのなかで重要な仕事を成し遂げたのが、静野与右衛門と山下和右衛門である³⁶⁾。静野は、1691（元禄4）年から、奉行・萩原重秀の下で始まった「南沢疏水坑」を、山下は、1824（文政7）年から始まった「中尾間歩水貫」を成功へと導いたのである³⁷⁾。

E11～14の資料は、すべて「中尾間歩水貫」の測量に関する図面と文書である。E11は、文政7年9月の計画段階における測量結果を、間歩の絵図上に記したものである。掘削すべき距離を八拾四丈三尺式寸五（255.50m）と算定しており、測量経路の途中に設けた三つの基準点について、その相互間の東西、南北、高下の距離が記されている。E12の絵図には、1824（文政7）年11月より掘進を開始して文政11年6月の時

点で、残りが五十九丈五寸八分（178.95m）であるとの測量結果が示されている。この絵図には測量結果を記した文書が貼り付けられているが、それには「振矩師助 阿部六平、振矩師 山下和右衛門」の署名がある。掘進前の測量図E11にも署名があり、「振矩師 山下？平、石和町 六兵衛」とある。「中尾間歩水貫」の測量は、石和町在住の振矩師助 阿部六平が、まだ若年であった四代目右衛門を助けて行なったものであり、貫通後に、阿部が振矩師に昇進、和右衛門も見習から振矩師助に取り立てられたとの記録が現存する³⁶⁾。E11,12の絵図の署名は、まさしくその歴史的事実に符合している。E13,14の絵図と巻物も、「中尾間歩水貫」の測量に関するもので、E13の巻物「坑内測量野帳」は、絵図ではなく文書記録であって、1831（天保2）年4月の時点で、残りが拾式丈四尺式寸六（37.65m）であることが、それまで3回の時点における途中経過とともに記されている。

E14「振矩術測量實例」は、かなり大判のもので、図6に示した写真ではその詳細がわからないが、起点

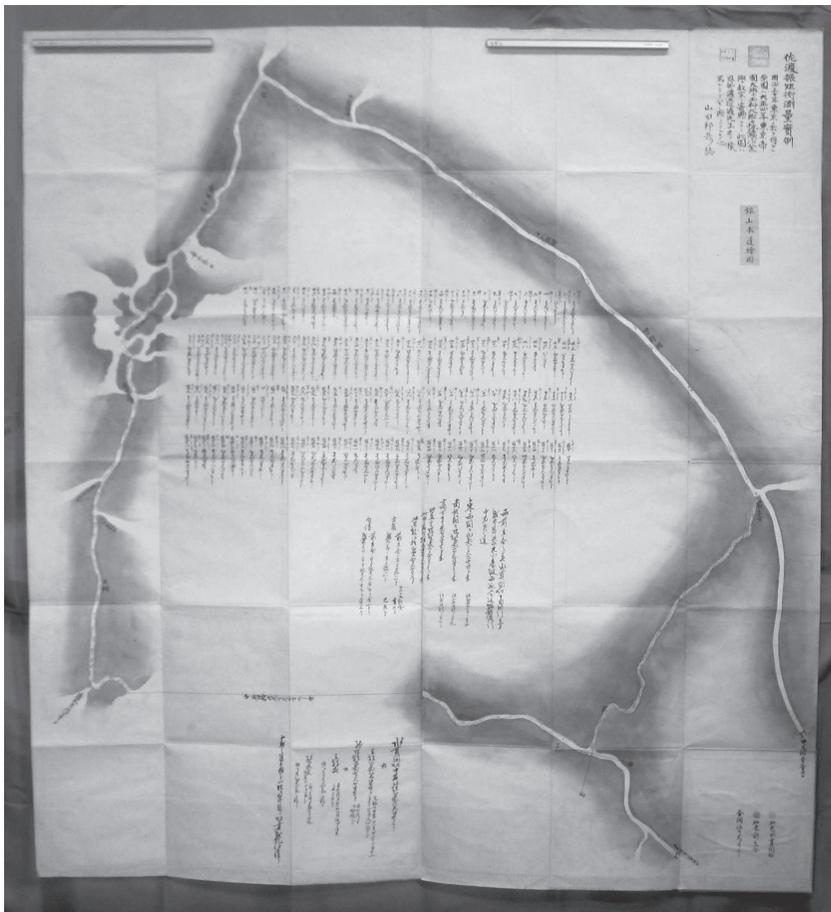


図6 佐渡金山振矩術測量實例

から終点までどのように測量をおこなったかが正確な絵図面として描かれている。坑道が曲がりくねっているため、長くても15m程度しか取れない小区間を合計148区間、折れ線状に辿っていったことがこの絵図からわかる。中央には、各区間の距離と方位も記されており、まさしく測量の実例を示す素晴らしい絵図である（暗闇での作業であることを考えれば、その苦勞は地表での測量の比ではなかったであろう）。残念ながら、この絵図面は大正4年の写しであるが、右上にこの図の来歴と原図の所在を示す重要な記述がある。

「明治三十年東京ニ於テ得タル原圖ハ大正四年東京帝国大學工科大学探鑛冶金學教室ニ寄贈シタリ此ノ圖ハ恩師渡辺渡先生コレヲ模寫セシメテ余ニ贈ラレタルモノナリ 山田邦彦 誌」と記されている。これで全てが繋がった。アグリコラ・フライベルグ・渡辺渡・佐渡金銀山・山田邦彦、調査していて正に心震える思いであった。

4) 浮世絵「地方測量之圖」

資源工学所蔵の絵巻物・絵図には、佐渡金銀山に関係するもの以外に、あと数点あるが、最後に、阿部正義寄贈のF15「嘉永年間地方（じがた）測量圖」には触れておきたい。書庫の片隅に軸物が一つだけ何気なく置かれていた。落款には「應需 齡八十九歳 叅老人筆」とある。調べて驚いた「葛飾北齋」最晩年の作である。浮世絵の収集でも有名なホノルル美術館のものと同じであり、我が国では、東京国立博物館、明治大学刑事博物館、国立国会図書館に所蔵されている（国会図書館のものは、デジタルコレクション^{D)}で見ることができる）。資源工学所蔵のこの浮世絵については、山崎孝史氏の詳しい論考³⁸⁾があり、描かれている絵の科学的な正確性が、北齋の空間表現の独創性とは相容れないのではないか、絵に描かれている長谷川善左衛門一派が出版している測量学の教本「量地圖説」（1852年、嘉永5年）の挿絵も手掛けた北齋の弟子「為齋」の手になるものではないかとしている。

鑑定のごときはさておき、この浮世絵が測量学の教材であると考えれば、「為齋」は、ちょうど「日本山海名物圖會」の「浮世絵師、長谷川光信」ということになるし、「デ・レ・メタリカ」でいえば、画家Bjorn Marius Wefring、「佐渡金銀山絵巻」では「山尾衛守」ということになる。「應需」（求めに応じて画いたもの）となっているのだから、なにも「葛飾北齋」と「測量術」の組合せに、現代的な違和感を差し挟まなくても良いのかもしれない³⁹⁾。いずれにしても、採鉱冶金学教室の初代教授である阿部正義が、とくにこの浮世絵を選んで教室に寄贈したことの意味は、自ずと推し測れるであろう。

6. おわりに

資源工学教室図書室に所蔵されていた貴重書について、明治から大正期の採鉱冶金学科の教育という文脈で、それに携わった人々の繋がりを意識して述べさせてもらった。

表題として3つの書籍名を列ねたのは、貴重書のおかげで、欧州、中国、日本の鉱山学・冶金学を代表するものをとの意図であるが、それらに共通するのは、科学としての正確性だけでなく、芸術性をも備えた絵図を伴うことである。年代はそれぞれに異なるが、実践の学問である工学においては、そのような絵図を伴うことが、教材として必須の要件であったに違いない。資源工学教室所蔵の貴重書は、実際には、数点を除けば、古典としての価値しかなかったのかもしれない。しかしながら、採鉱冶金学科の教官たちは、自分たちの拠って立つ歴史的な基盤を学生たちに知っておいてほしいとの思いから、自らの蔵書を教室に寄贈したのではないだろうか。当教室の貴重書の背後にある人々の営為を伝え残すことが、40年以上大学に居る自分の役割のような気がして、拙い文章を長々と書かせて頂いた。

採鉱冶金学教室の図書室は、昭和51年頃まで、標本室とともに旧工学部6号館分館にあった。標本室にあった膨大な鉱物標本は、いま京都大学総合博物館に保管され、それらのほとんどを収集した学科創設期からの教官「比企忠」の名を冠した「比企コレクション」として、これまで何回か展示会も開催されている。ここで取り上げた貴重書も、桂図書館に移転され、たとえば「阿部山田文庫」などとして、いつか公開されることを望みたいものである。

註

- 1) 水曜会誌、第1巻、第6号、明治43年（1910）、594頁
- 2) クルト・ネッター（Curt Adolph Netto）は、フライベルグ鉱山大学を卒業後、1873（明治6）年に、お雇い外国人として工部省官営小坂鉱山の冶金技師として来日し、1877（明治10）年には、東京大学理学部採鉱冶金学科の教師となった。同書は、ネッターの生徒であった渡部渡、野呂景義らがその講義を記録し翻訳したもので、1884（明治17）年に文部省編輯局から出版された。渡辺も野呂も、後に東京帝国大学教授となった人物で、渡辺は日本鉱業会の第3代会長、野呂は日本鉄鋼協会の初代会長である。
- 3) 貝原益軒の「大和本草」は、薬としての観点から、自然界のあらゆる植物・動物・鉱物について解説した書である。「天工開物」に触れている記述は、たとえば巻之三の金玉土石（六十七種）のうちの試金石の項に見られる。
- 4) 国内の100以上の大学や公的機関に所蔵されていることから、我が国でかなり一般的な書物であったことが分かる。中国では逆に、18世紀後半には忘れ去られた書物となっていたようで、中国人留學生が日本から持ち帰った菅生堂本をもと

- に(訓点や送り仮名を抜いた複製本として)1930年に上海華通書局から刊行されたとのことである。
- 5) 本書は、欧米にも紹介されたようである。絵図の一つは、野呂景義らのフライベルグ鉱山大学での恩師Adolf LedeburによってStahl und Eisen誌にも載っている。/Japanischer Tatar-Ofen mit Flügelgebläse (18. Jahrhundert) [Stahl und Eisen 21 (1901), S. 845]
 - 6) 近江・坂本に生まれた木内石亭の生きた時代は、幕府や各藩の殖産興業政策を背景に、本草学が物産学・博物学にまで発展した時代である。木内は、1751(宝暦元)年から大坂で、津島如蘭(桂庵)に本草学を学び、1756(宝暦6)年には江戸に出て、田村元雄(藍水)に入門した。津島の塾では、蔵書家として有名な木村兼葎堂(世爾)が同門であり、江戸の田村の門下には平賀源内がいた。多くの知識人たちとの交流によって、木内の奇石収集は、趣味の域を超えた学究の域に達していたといえるであろう。なお、前述の「天工開物」菅生堂本は、木村兼葎堂が秘蔵していた原書が元となっているとのことである。
 - 7) 「好古家ネットワークの形成と近代博物館創設に関する学際的研究I」平成29年度科学研究費基盤研究(B)(代表 内川隆志)研究成果報告。/この報告書には、シーボルトと「雲根志」の関係が詳しく書かれている。
 - 8) 佐藤信淵の書籍とその内容は、鴛田恵吉編「佐藤信淵鉱山学集」富山房(昭和19年)に詳しく解説されており、「山相秘録」や「山相秘録圖」なども載せられている(「国立国会図書館デジタルコレクション」^{D)}で公開されている)。同書によれば「山相学は佐藤家の一子相傳の秘訣にして、最も厳秘するところ」とあり、「山相秘録圖」も「本書は秘本中の秘本として・・・一回も公開せられたることなき・・・今回佐藤家の後継者たる佐藤陽二郎氏の好意により」収録できたものであると記されている。しかしながら、「山相秘録圖」は東京帝国大学の採鉱冶金学科に所蔵されており、それは、長谷川芳之助寄贈とのことであり、「東京大学/工学史料キュレーションデータベース」^{E)}にカラー画像で公開されている。なお、長谷川芳之助は、建築家として有名な「辰野金吾」とともに日本で初めての工学博士号を授与された人物で、製鉄技術を学ぶためにフライベルグ鉱山大学にも留学し、帰国後は、東京帝国大学教授への就任要請を蹴って三菱の技師長になり、同社の鉱山事業の実質的な指導者となった。八幡製鉄所の創設にも深くかかわった人物である。
 - 9) 俄国一も、1897年(明治30)に帝国大学工科大学卒業後、フライベルグ鉱山大学に留学している。帰国後、1902年(明治35)に東京帝国大学の採鉱冶金学科の教授に就任し、退官まで鉄冶金学講座を担当した。
 - 10) インターネット上の刀剣サイトで確認したのであるが、筆者も、ちょうど水曜会百周年記念の準備をしている頃、これと同一かは定かでないが、金属系教室に秘蔵されていた日本刀を見せてもらったことがある。
 - 11) この記述においては、以下を参照した。
谷村照：日本刀の冶金学的研究、鉄と鋼、Vol.67, No.3, pp.497-507 (1981)
内藤直子：ある刀工の足跡を追って、大阪歴史博物館 研究紀要、Vol.13, pp.73-84 (2015)
 - 12) 軍刀の製作への学者の関わりを象徴するものとして有名なのは、振武刀(金研刀)である。これは、満州北部やアリュシャン方面など極寒地でも折れない軍刀を必要とした陸軍が、東北帝国大学金属材料研究所に依頼したもので、本多光太郎の師事のもと職員だった刀工が開発したもので、零下40度にも耐える性能をもったという。
 - 13) これらの漢訳書が、日本国内で刊行されたものでないことは、その製本のしかたからも分かる。和装本の体裁であっても、日本の一般的な「四ツ目綴り」ではなく、全て中央の綴じ間隔が少し狭い「唐綴り」であり、「開礦器法圖説」に至っては、唐綴りの角部を蔽にした「康熙綴り」となっている。
 - 14) 洋務運動の期間、江南製造局のような軍需工場は、中国各地に数多くつくられるが、それらにも学堂と称する教育機関が付設された。そのようなものの一つである江南陸師学堂付設の礦務鐵路学堂で学んだのが「魯迅」である。魯迅は1904(暁37)年に、官費留学生として来日するが、留学先として清国が指定した東京帝国大学採鉱冶金学科ではなく、あえて仙台医科専門学校を選んだのである。/参照：蟹澤聰史「文学作品の舞台・背景となった地質学-5- 魯迅、大岡昇平の作品と地質学」地質ニュース、603号、40-57頁(2004)
 - 15) それら採鉱冶金関係の21点の書籍のうち、2点は中国人の著書で、その1つは翻訳官を務めた華蘅芳が編者となっているものである。その他の19点の漢訳本の原著者の国別は、米7/英11/日1である。それらのうち原本を筆者が確認できたのは、表に掲げた2点の他には、以下の3点である。
「金石識別」：Dana, James Dwight: Manual of Mineralogy, New Ed. (1857)
「開煤要法」：Smith, Warrington Wilkinson: A Treatise on Coal and Coal Mining, (1867)
「製犀金法」：橋本奇策「合金製造法」(1897/明治30年)
 - 16) 武上眞理子：漢譯地質學書に見る「西學東漸」-江南製造局刊『地學淺釋』を例として、東洋史研究, Vol.73, No.3, pp.413-446 (2014)
3.1節および3.2節を書くにあたっては、この論文を全面的に参考にさせて頂いた。その中で、武上は、geologyを何と訳すかは日本でも議論があったことに触れ、mineralogyを「金石学」と訳したのも彼らであると述べている。
 - 17) 教室の図書原簿によれば、「地學淺釋」と「金石識別」は、受入番号が連続で同時に購入されたものと思われるが、「金石識別」は資源工学の貴重書庫には保管されていない。
 - 18) 学科創設期に購入されたGeorge G. Andreの書籍には、他にも「A practical treatise on coal mining」と「A practical treatise on rock blasting」があり、これらも講義に用いられてもとの想像される。
 - 19) 村上正祥ほか：「中国の煎塩事情-第2回中国塩技術派遣団報告-」日本海水学会誌、第45巻、第1号(1991)を参照
 - 20) 「京都大学貴重書デジタルアーカイブ」では、理学部で1922(大正11)年に購入された初版本が公開されている。
 - 21) Herbert Clark Hooverは、1891年にStanford大学に入学し、1回生のときに機械工学から地質学に転向し、4回生のときにはGeological Surveyでインターンをしている。卒業して1年後には、ロンドンに本拠を置く鉱山会社で働くようになり、オーストラリアの金鉱山につづき、洋務運動下の中国にも派遣されて、天津近くの金鉱山の開発にも携わった。その後、独立して鉱業コンサルタントの会社を立ち上げ、多くの新規鉱山に投資して1914年までには莫大な資産を築くに至るのである。大学4回生のとき同じ研究室にいたLou Henryと知り合い1899年に結婚した。彼女は語学に秀でており、ラテン語やドイツ語にも精通していた。「デ・レ・メタリカ」の英訳本は、同じく地質学者であった彼女との合作であった。
 - 22) 三枝博音は、1922(大正11)年に東京大学哲学科を卒業した哲学者で、科学史や技術史の研究にも大きな足跡を残した人である。日本科学史学会会長であった1963(昭和38)年に、

- 鉄道事故による不慮の死を遂げたため、三枝が戦前から続けてきた「デ・レ・メタリカ」の翻訳は、後進たちの手によって出版が実現した。なお、三枝博音は、「天工開物」の研究も行っており、戦時中の1943年に「天工開物」菅生堂本の復刻版が出版されたが、それは彼の手になるものである。
- 23) 設立当初の名称は、Bergakademie Freiberg（フライベルグ鉱業学校）である。1990年のドイツ再統一後に、Technische Universität Bergakademie Freiberg（フライベルグ鉱山工科大学）となった。本稿では区別せず、フライベルグ鉱山大学との通称を使用することとした。なお、1910（明治43）年に設立された秋田鉱山専門学校（現：秋田大学鉱山学部）は、フライベルグ鉱業学校をモデルとしたようである。フライベルグは、第2次世界大戦後、東ドイツに属することになったから、戦前のような日本との交流は絶えてしまっている。
- 24) 木本忠昭「ベルグアカデミー・フライベルグと日本人留学生たち」学術の動向、13巻3号 pp. 82-89（2008）による。フライベルグ鉱山大学の大学図書館には「ゲオルグ・アグリコラ」との呼び名がつけられており、その前の道路は、アグリコラ通りである。
- 25) 1890（明治13）年に、幕末動乱期の老中首座であった阿部正弘につながる家の養子となって、それ以降、阿部の姓を名乗るようになった。
- 26) 水曜会誌、第1巻、第5号、明治43年（1910）、冒頭頁
- 27) 5.1節を書くにあたっては、できるだけ正確な記述に努めるため、以下の3つの文献を参考にさせて頂いた。具体的な引用箇所等の明示は、遺憾ながら省略させて頂く。
- 27-1) 「明治前日本鉱業技術発展史」日本学術院日本科学史刊行会（1958）
- 27-2) 「金山の町佐渡相川：伝統的建造物群保存地区保存対策調査報告書」相川町教育委員会（1995）
- 27-3) 「佐渡相川の鉱山都市景観保護調査報告書」佐渡市（2015）
- なお、27-1)の書籍の緒言は、帝国学士院第二部長として田中館愛橘が書いている。また序は、編纂委員であった前述の俵国一と桂井三（東京帝国大学教授、日本鉱業会第9代会長）が、また、三枝博音が編集者のことばを書いている。
- 28) 大久保は政治家、大島は学者と形容してよいであろう。両者の活躍を象徴するように、石見には「大久保開歩」、佐渡には「高任坑」と名づけられた鉱区がある。大久保長安は、相川鉱山の総領守として、1605（慶長10）に「大山祇神社」を町の北に建立したが、途絶えていたその神社の祭りを復活したのが大島高任で、その祭りはフライベルグの鉱山祭をまねたものといわれている。また、鉱山地区の中にも大山祇神社の分社があるが、その神社は「高任神社」と呼ばれている。
- 29) 高任堅坑、高任選鉱場と名づけられている。
- 30) 禁書の令の対象は漢籍であって、洋書は含まれない。この令は、キリスト教思想の流入を防ぐため、漢籍に混入した教義に関する書の流入を阻むのが目的であった。前述した清末の江南製造局翻訳所の役割と同じく、宣教師たちが布教するにあたっては、その教義を漢語に訳すことが近道だったわけである。西洋の産業技術導入においても漢籍は主要なルートであったろうし、いくら科学技術に関する洋書が禁じられなかったとはいえ、技術の迅速な普及を阻害したのは間違いのないであろう。
- 31) 佐渡金銀山絵巻については、平成21年から4年間におよぶ調査研究の成果報告として、次の書が出版されている。5.2節では、記述の多くをこの書によっている。佐渡市・新潟県教育委員会編「佐渡金銀山絵巻－絵巻が語る鉱山史－」同成社（2013）
- 32) Todd, Hamish “The British Library’s Sado Mining Scrolls” *British Library Journal*（1998）
- 33) 磨場（みがきば）：鉱石を微粉碎する搗鉱の工程。祢こ場（ねこば）：ねこ流しと呼ばれる比重選鉱の工程。ねこ（長い白い木綿の布）を敷き詰めた幅広い樋に微粉碎された鉱石を水とともに流下させる。比重の小さい石英や粘土分は流れ去り、比重の重い金銀を含む粒だけが、ねこに留まることになる。上の方に座っている女性を「祢こ婆」というが、これが「ねこばば」の語源である。
- 34) 採掘された鉱石は、買石（かいし）と呼ばれる製錬業者が自分の建屋の勝場（せりば）で粉碎・選鉱を行っていたが、1759（宝暦9）年に、それらは奉行所敷地内の「寄勝場」に集約された。
- 35) 「百萬分一 大日本帝国地質圖説明書」農商務省地質調査所、1900年（明治33年）
- 36) 金子勉「振矩術に関する調査研究」報告書、佐渡市教育委員会、佐渡学センター（2010）
- 37) 「南沢疏水坑」は、元禄4年から9年までに、割間歩から南西方向に503間2尺（915.15m）が完成し、その後、元禄14～15年に、海近くまで延長された。「中尾開歩水貫」は、坑内の排水坑道（中尾敷内から盛太郎敷内）で、文政7年から天保2年まで7年で完成した。延長150間2尺4寸（273.45m）。
- 38) 山崎孝史「『地方測量之圖』小考－絵師ははたして北斎か－」史林、71（4）、pp.624-640（1994）
- 39) ルネサンスを代表する「ダ・ビンチ」においては、それらが両立していたのだから。

デジタルライブラリー

- A) 京都大学図書館機構「京都大学貴重書デジタルアーカイブ」
<https://rmda.kulib.kyoto-u.ac.jp/>
- B) 西尾市岩瀬文庫：古典籍書誌データベース、(デジタルアーカイブシステム ADEAC, <https://trc-adeac.trc.co.jp/>)
- C) 国文学研究資料館：新日本古典籍総合データベース、
<https://kotenseki.nijl.ac.jp/>
- D) 国立国会図書館：デジタルコレクション、<https://dl.ndl.go.jp/>
- E) 東京大学：工学史料キュレーションデータベース、<https://da.dl.itc.u-tokyo.ac.jp/portal/collection/curation>
- F) 京都大学人文科学研究所・東アジア人文情報学研究中心「東方学デジタル図書館」<http://www.kita.zinbun.kyoto-u.ac.jp/database/>
- G) The Saxon State Library - State and University Library Dresden (SLUB) : Digitale Sammlungen,
<https://digital.slub-dresden.de/kollektionen/>
- H) The Munich Digitization Center (MDZ) : Bayerischen Staatsbibliothek (BSB), <https://www.bsb-muenchen.de/>
- I) 秋田大学：鉱山絵巻図巻デジタル・ギャラリー、
<https://archive.keiyou.jp/akitaunivda>
- J) 東京大学：鉱山絵巻・絵巻コレクション、<http://gazo.dl.itc.u-tokyo.ac.jp/kozan/>
- K) 日本銀行金融研究所貨幣博物館：調査研究資料＞所蔵資料目録＞古文書（冊子・一紙・卷子・絵図）<https://www.imes.boj.or.jp/cm/research/komonjo/>

談 話 室

電気化学や高温融体を用いたマテリアルプロセッシング

安 田 幸 司*

Materials Processing Utilizing Electrochemistry and High-Temperature Melts

By Kouji YASUDA

1. はじめに

令和2年4月1日付で京都大学大学院工学研究科材料工学専攻 非鉄製錬学講座（三菱マテリアル株式会社 寄附講座、宇田哲也教授）の特定准教授に着任いたしました。安田幸司と申します。この場をお借りしてご挨拶申し上げますとともに、これまでの略歴と研究について紹介させていただきます。

私は平成13年3月に京都大学工学部物理工学科を卒業し、伊藤靖彦教授と尾形幸生教授のご指導のもと平成17年7月に京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー基礎科学専攻で博士（エネルギー科学）の学位を取得いたしました。平成17年4月 日本学術振興会特別研究員（京都大学エネルギー理工学研究所、ドイツ エアランゲン-ニュルンベルク大学工学部、京都大学大学院エネルギー科学研究科）、平成19年1月 東京大学生産技術研究所 循環資源・材料プロセス工学研究室（岡部徹教授）学術研究支援員（平成20年4月 特任研究員、平成20年10月 特任助教）、平成21年4月 株式会社大阪チタニウムテクノロジーズ、平成23年4月 京都大学環境安全保健機構 放射線管理部門 助教（大学院エネルギー科学研究科エネルギー基礎科学専攻 エネルギー化学分野（萩原理加教授）助教 兼任）を経て、現職に至っております。

研究としては、溶融塩などの高温融体を用いたプロセッシングを行っており、溶融塩電気化学を用いた固体シリカの電解還元、アルミニウム低級塩化物ガスを用いたサブハライド還元によるシリコンの製造、炭酸溶融塩を用いたタングステンクラップのリサイクル、溶融塩を用いたレアメタルの電気めっきなどを行って

おります。ドイツへの留学中のみ、水溶液電気化学を用いた材料の高機能化に関する研究に携わっておりましたが、当時の仲間とはプロセスと国境の垣根を超えた共同研究を現在も行っております。本稿では今後への展望の意を込めて、留学時代に実施した水溶液電気化学に関する研究、ならびに最近進めている高温溶融塩を用いたリサイクルプロセスに関する研究を紹介させていただきます。

2. エアランゲン-ニュルンベルク大学への留学中の生活

筆者の留学先であったエアランゲン-ニュルンベルク大学は、ドイツ最大の州であるバイエルン州の北部に位置します。バイエルン州はチェコ、オーストリア、スイスと国境を接する南ドイツの州であり、シンデレラ城のモデルになったノイシュバンシュタイン城を含むロマンティック街道があることから、日本からの観光客にも人気の地です。エアランゲン-ニュルンベルク大学のキャンパスの大部分はエアランゲンにあり、地域の中心都市であるニュルンベルクから北20 kmに位置します。私が渡航した1月上旬のドイツは冬真っ盛りで、最高/最低気温が0℃ / -10℃、日の出と日の入りが午前9時と午後3時という、極寒の地でありました。冬のドイツはアルプス山脈に近い南部の方が寒冷で、暖流の北大西洋海流が流れている北部の方が温暖な気候となります。そんなドイツも夏が近づくと気温が上がり、各地でビール祭が開かれます。ドイツのビール祭の開催時期は街によって異なり、ミュンヘンのオクトーバーフェストは10月開催ですが、バイエルン州で最古であるエアランゲンのビール祭は6月上旬に行われます。なお、祭で売られる「フェストビア」は1リットルジョッキで販売されるだけでなく、

*京都大学大学院工学研究科材料工学専攻 特定准教授

アルコール分も10%程度で通常のビールの2倍近くもあります(写真1)。酔いにはくれぐれもご注意ください。



写真1 研究室メンバーとビール祭を楽しむ筆者(一番右)。その横がSchmuki教授。

筆者が留学した平成18年(2006年)は、ドイツワールドカップサッカーが開催された年であり、ニュルンベルクでは日本vsクロアチアの試合も開催されました。ブンデスリーガの試合も観戦したところのあるスポーツ好きな筆者は、幸いなことに日本戦のチケットをゲットし、試合をこの目で観戦することができました。なお、写真2に映っている二人の若者男性は、宿の予約もなくニュルンベルクへ渡航してきたようで、試合前日には筆者の家に泊まり、前夜祭で盛り上がったのは今でも良い思い出です。試合はキーパーがPKを止める活躍を見せたものの、攻撃陣が「急にボールが来た」とも呼ばれるチャンスを生かしきれず、残念ながら0-0の引き分けに終わりました。



写真2 サッカーW杯で日本代表を応援する筆者(一番左)。

話をエアランゲンへ移しましょう。エアランゲンは京都と同様に学術都市であり、人口10万人のうち4万

人が大学関係者とその家族、さらに4万人が電機メーカーであるSiemensの関係者で占められます。高純度シリコンの工業的製錬法であるSiemens法の基礎特許にも、エアランゲンの名が記されており、それまでシリコンの研究をしていた私にも所縁のある地があります。エアランゲン-ニュルンベルク大学は留学生も多い大学であり、研究室によって差はあるものの、私の所属先であるPatrik Schmuki教授のグループでは全41名のうち過半数を超える23名が非ドイツ人で、英語のみで意思疎通はスムーズに行えました。また、エアランゲンは旧西ドイツ域内にあるため、大学の外でも若者を中心に英語を話せる人が多く、生活面でも不自由はありませんでした(ちなみに、当時の旧東ドイツでは英語がほとんど通じず、代わりにロシア語が通じていました)。しかし、最低限のドイツ語しか話せない筆者が、唯一苦勞したのは理髪店。ドイツでは10歳で進路が分かれるため、職人コースに進んだ人は英語を話せないことが多く、私のヘアスタイルが「ショートな前髪パツン」になったのは、抜群に苦々しい思い出です。

3. アノード酸化を用いた金属酸化物ナノチューブの創製

Schmuki教授は博士課程の指導教員である尾形幸生教授と旧知の仲で、その紹介で滞在先として受け入れていただきました。滞在中には「アノード酸化によるTi-Zr合金からの自己組織化酸化物ナノチューブ創成」をテーマとし、水溶液電気化学の研究に携わりました。TiやZr、Ta、Wのような金属はバルブメタルと呼ばれ、酸化物被膜で一様に覆われることで優れた耐食性を示します。これらの金属をアノード酸化する際、電解質中にフッ化物イオンや過塩素酸イオンが含まれると酸化物被膜の一部がエッチングされ、特殊な形状の酸化物を得ることができます。最も有名なものはTiO₂ナノチューブで、印加する電圧に応じて直径20-500 nmのナノチューブがTi金属基板の上へ規則的に形成します(図1には、Ti-Zr合金から筆者が生成した代表的な酸化物ナノチューブのSEM像とTEM像を示します。規則的に配列されて一方向成長するため自己組織化構造と呼ばれます)。TiO₂は光触媒や親水性、生体親和性を示す酸化物で数多くの産業アプリケーションが期待されており、ナノチューブが有する高い比表面積を利用することで、その効率が向上することが期待されます。

当時のSchmuki研は多くのプロジェクトに参画しており、これらの応用へ向けた研究が数多くなされておりました。私もTi-Zr合金からの酸化物ナノチューブ

ブ形成¹⁾を指示されておりましたが、指示とは関係なく独自の視点からの研究も密かに進めました。応用で求められる特性の測定と向上以外に、形状などをコントロールするためのファクターを解明するのが個人的な興味だったので。特に、高比表面積を得るためにはより長いナノチューブを得るのが望ましいので、チューブ生成における律速過程を留学中に解明しようと目標を立てました。

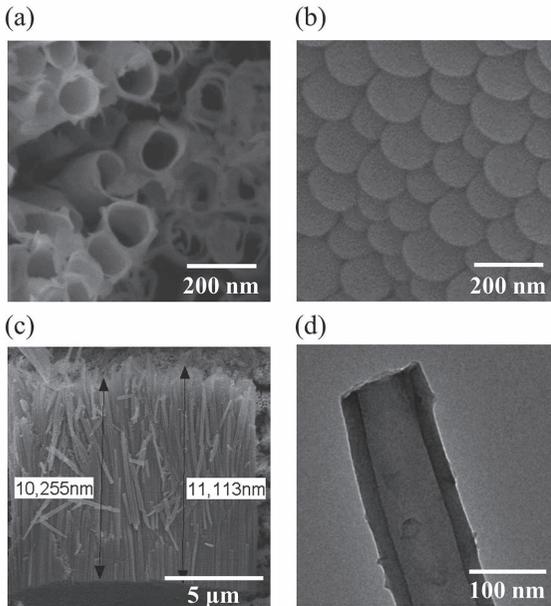


図1 Ti-Zr合金のアノード酸化で得られる代表的な酸化ナノチューブ。(a) 頂部のSEM像、(b) 底部のSEM像、(c) 側面のSEM像、(d) TEM像。いずれも、生成したナノチューブを剥離することで撮影。

紙面の都合上から、本稿では既報²⁾の中から概要のみを紹介いたします。Ti-Zr合金からの自己組織化酸化ナノチューブの形成は、スターラーで攪拌した常温の1M (NH₄)₂SO₄ + 0.5wt% NH₄F水溶液を電解質に、Pt電極を対極に用いて電圧20Vで行いました。それまでの研究¹⁾から、ナノチューブ形成のアノード電流が経時的に減少することはわかっており、筆者は拡散過程が律速過程であり、チューブ長が大きくなることで拡散距離が増加して電流が減少するものと予想しました。そこで、反応イオン(F⁻)ならびに生成イオン(MF₆²⁻, M = Ti, Zr)について、図2に示す一次元のイオン拡散を想定したモデルを検討しました。ナノチューブの長さをL、チューブ表面における電解液中の拡散層厚みをx₀、ナノチューブの多孔率をp、バルク浴中におけるイオン濃度もしくはチューブ底部にお

ける飽和イオン濃度をc₀、イオンの拡散係数をDとします。これらのイオンがチューブ底部でのみ生成もしくは消費され、他の部分では出入りが無いものと仮定する場合、F⁻イオンが律速となるイオン種の場合はチューブ底部で、MF₆²⁻イオンの場合はバルク浴でのイオン濃度がほぼゼロであり、勾配に従って拡散が起こるものと予想されます。その結果、拡散層内とチューブ内の電解質中におけるイオン流束Jはそれぞれ、

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (-x_0 \leq x \leq 0) \quad (1)$$

$$J = -pD \frac{\partial c}{\partial x} \quad (0 \leq x \leq L) \quad (2)$$

となります。また、反応電子数nとファラデー定数Fを用いると、アノード酸化の電流密度Iは、

$$I = |nFJ| = \frac{pnFDc_0}{L + px_0} \quad (3)$$

が成立します。これらの関係から、電流密度の逆数は次式に従い、ナノチューブ長さに対して線形的に増加いたします。

$$\frac{1}{I} = \frac{1}{pnFDc_0} (L + px_0) \quad (4)$$

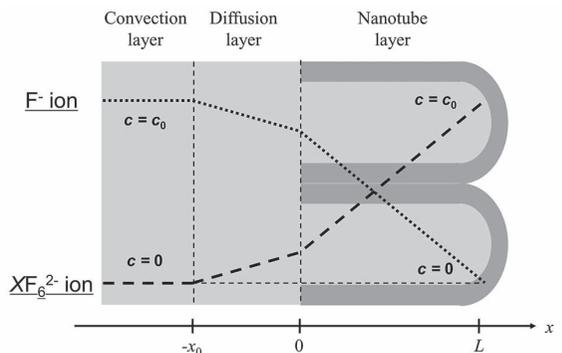


図2 Ti-Zr合金のアノード酸化時におけるイオン種の拡散モデル²⁾。

以上の関係の成立を確かめるため、I⁻¹とLとの関係をプロットしました。ここでナノチューブ長Lは通電電量から計算されて、多孔率pは重量測定や断面SEM観察により導出されて、形成開始1時間まで50%程度となります。図3に示したように、これら間には直線関係が現れ、F⁻、TiF₆²⁻、ZrF₆²⁻のいずれ

かのイオンの拡散が律速過程であると証明されます。なお、反応後期で傾きが減少するのは、ナノチューブ側壁の化学溶解が徐々に進行し、多孔率 p が増加することに起因します。次に、図3の0.5時間までの初期過程における関係を直線近似し、その傾きと切片から拡散層厚み x_0 が $11\mu\text{m}$ 、 nDc_0 の積が $5.4 \times 10^{-11} \text{ mol cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ と求められます。 $D = 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ と仮定すると F^- イオンの nDc_0 は $1.0 \times 10^{-9} \text{ mol cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ であり、律速となるイオン種は TiF_6^{2-} か ZrF_6^{2-} に絞られます。最後に、純Ti、純Zr、Ti-Zr合金における初期アノード電流を比較することで、 TiF_6^{2-} イオンが律速となるイオン種であることが解明されました。

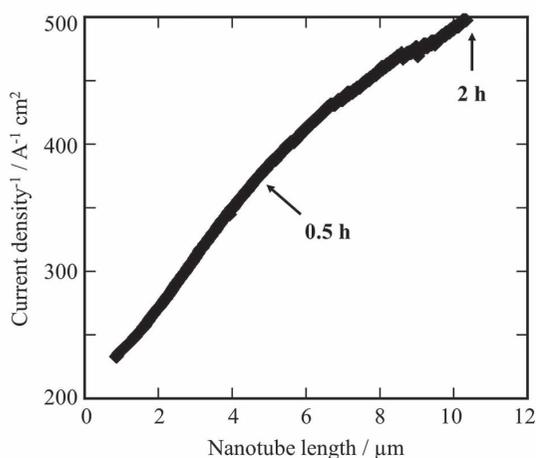


図3 ナノチューブ長と電流密度の逆数との関係²⁾。アノード酸化条件：Ti-Zr合金、電圧20 V、時間2 h、電解質1 M $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 + 0.5 \text{ wt\% NH}_4\text{F}$ 。

学生時代に行っていた高温反応では反応モデルを構築しても定量的な実証が困難なことも多いのですが、構築したモデルを単純な測定（重量測定、断面SEM、ポテンショガルバナスタット）のみで実証できた留学時の水溶液系の研究経験は、筆者の大きな自信となりました。また、議論で用いた理論の多くは、学部時代に物理工学科の授業で教わったものであり、基礎学問の大切さを心の芯まで感じた時でありました。ドイツ滞在中には、何故ナノチューブが自己組織化するのかという解析³⁾も行い、一定の成果を得て9か月後に帰国いたしました。筆者の帰国後には、酸化物が何故チューブ状になるのかという解明も行われ⁴⁾⁻⁶⁾、該当分野でそれまで少なかった反応の素過程に関する議論も活発になったようです。これらの報告は世界各国のグループから数多くの引用をされており、現在は様々な研究へと展開されています。

筆者は帰国後に高温プロセスの研究へと戻りました

が、留学時のメンバーとは国際的な共同研究を行い、ナノ構造 TiO_2 の熔融塩中での電解還元⁷⁾や、熔融塩中で電気めっきした金属Ti膜を水溶液中でアノード酸化して TiO_2 ナノチューブを得る⁸⁾など、湿式プロセスと乾式プロセスを組み合わせた新規機能材料の製造法にも取り組んでいます。

4. 高温熔融塩を用いたタングステンのリサイクルプロセス

京都大学に着任した平成23年以降は、熔融塩電解を用いた高純度シリコンの製造法や希土類磁石のリサイクル法などの研究を進める一方で、熔融塩を酸化-還元反応や酸-塩基反応の媒体として用いる研究も行っております。最近では炭酸熔融塩を用いて、超硬工具に含有されるタングステン成分を Na_2WO_4 として回収するリサイクル法の開発を進めています。

炭酸熔融塩は、作動温度 $873 \sim 943 \text{ K}$ で Li_2CO_3 - K_2CO_3 または Li_2CO_3 - Na_2CO_3 混合塩を電解質として用いる熔融炭酸塩型燃料電池(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)について多くの知見があり、酸素イオン種の化学挙動などの電池反応に関するデータは豊富な物質です。一方で、リサイクル分野で鍵となる、各元素の酸化-還元ならびに酸-塩基の反応に関する知見はきわめて乏しいのが現状です。炭酸熔融塩中における腐食反応を対象とすると、カソード材料やセパレータに用いる金属の防食を目的とした報告に限られており、 CO_2 分圧の制御による塩基度の変化の影響についても知見が限られてきました。そこで、炭酸熔融塩の物理化学の解明を通して、超硬工具に含有される炭化タングステン(WC)の Na_2CO_3 熔融塩中での酸化溶解反応の研究を行っています。以下では代表的な結果として、モデル材料であるW板の酸化溶解に関する、時間依存性ならびに排ガスのIR分析による解析を紹介いたします⁹⁾。

図4(a)には、 $\text{Ar-O}_2(0.2 \text{ atm})\text{-CO}_2(6 \times 10^{-4} \text{ atm})$ 雰囲気下における 1173 K の Na_2WO_4 へのW板の溶解厚みについて、時間依存性のグラフとして示します。いずれのグラフでも、熔融塩の深さが小さいほどW板の溶解厚みが大きくなっています。このことから、浴上面の気液界面から浴下面の固液界面(熔融塩/W板界面)への化学種の拡散が、反応の律速となることが示唆されます。従来の炭酸熔融塩の腐食の機構に従うと、[1] O_2 ガスの化学溶解による過氧化物/超氧化物イオン($\text{O}_2^{2-}/\text{O}_2^-$)の生成^{10),11)}、[2] $\text{O}_2^{2-}/\text{O}_2^-$ イオンの固液界面への拡散、[3] W板の酸化による WO_4^{2-} イオンの生成、[4] WO_4^{2-} イオンの熔融塩中への拡散、の四つの素過程に分けられ、拡散過程[2]

がW板の酸化溶解反応における律速過程であると考えられます。また、ここで注目すべきは、反応時間0時間すなわちO₂ガスが供給されていない場合においてもW板が溶解している点です。このことから、W板の酸化溶解は、O₂ガス由来のイオン種(O₂²⁻/O₂⁻イオン)が酸化剤となる反応以外に、別の酸化剤によっても進行していることが示唆されます。そこで、O₂ガスを含まないAr-CO₂雰囲気においてW板の酸化溶解反応を行い、2.5時間の反応を行ったところ、約25 μmの厚みが溶解していました。さらに、反応生成物を同定するために、反応管からの排ガスをIRにより分析したところ、図4(b)に示す通り成分ガスのCO₂に加えてCOガスが検出されました。この結果から、図5に示すように、金属W板の酸化反応は従来から知られている①O₂²⁻/O₂⁻イオンによる酸化以外に、②CO₃²⁻イオンも酸化剤として働いていることが結論付けられます。

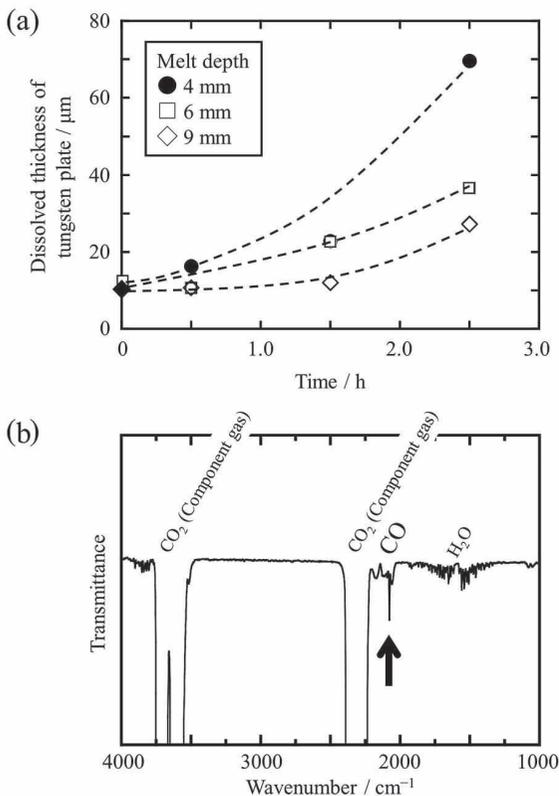
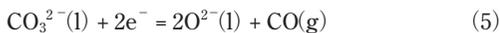


図4 (a) 1173 KのAr-O₂(0.2 atm)-CO₂(6×10⁻⁴ atm)中に保持した溶融Na₂CO₃へ溶解した金属W板の厚み⁹⁾。(b) Ar-CO₂(0.2 atm)へのW板の酸化溶解反応で生じた排ガスのIRスペクトル⁹⁾。

従来反応機構 + 新規反応機構

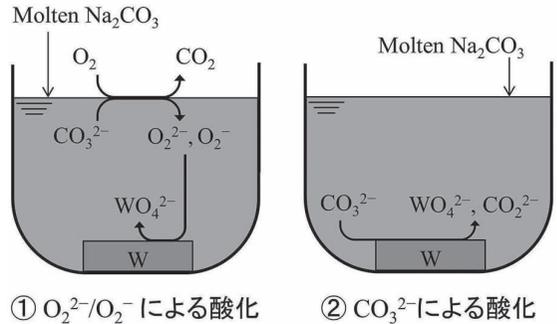
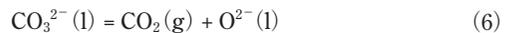


図5 溶融Na₂CO₃への金属タングステンの酸化溶解機構⁹⁾。

過去のMCFC分野においてNiやステンレスなどで行われた研究からは、CO₃²⁻イオン自身は金属と直接反応しないことが知られており、「CO₃²⁻イオンが酸化剤として機能すること」自体が本分野では大きな新発見にあたります。

CO₃²⁻イオンが酸化剤として働きうることが実験的に示されたため、熱力学データから1173 KのNa₂CO₃系の電位-pco₂図を作成し、その妥当性を熱力学的に検討しました。電位-pco₂図は水溶液系における電位-pH図に相当し、炭酸溶融塩では



の平衡があることから、CO₂分圧によって塩基度が変化した条件下で、どの化学種が安定であることを示した化学ポテンシャル図です。関連イオン種の標準生成ギブズエネルギーは、O₂(g, 1atm)/O²⁻(l, a = 1)の平衡電位を基準電位、O²⁻(l)を基準イオンとすることで求め、O₂²⁻(l)およびO₂⁻(l)の値は文献¹²⁾の実験値を用いています。作成した1173 KにおけるNa₂CO₃系の電位-pco₂図を図6に示します。中央部の実線で囲まれた領域が、溶融Na₂CO₃の電気化学的な安定領域を示しています。溶融Na₂CO₃中で酸化剤となりうるO₂²⁻/O₂⁻イオンとCO₃²⁻イオンの酸化力についてこの図から議論でき、貴な電位領域で金属の酸化が起こる場合には、酸化還元電位が貴である(a1)~(b2)O₂²⁻/O₂⁻イオンのみが酸化剤となりえます。一方、CO₃²⁻/CO平衡よりも卑な電位領域で酸化が進行する場合には、O₂²⁻/O₂⁻イオンによる酸化に加えて、CO₃²⁻イオン自身が酸化剤となってCOガスを発生しえます。ただし、COガスは溶融炭酸塩へ10⁻⁷ mol cm⁻³ atm⁻¹のオーダーで物理溶解し、また、10⁻⁶ mol cm⁻³ atm⁻¹のオーダーで化学溶解してCO₂²⁻イオンを生成することが報告されています^{13), 14)}。そのため、反応により

生成したCOガスは、気泡として気相へ放出、物理溶解して熔融塩中に存在、もしくは化学溶解して CO_2^{2-} イオンとして存在、のいずれかの形態となります。さらに、タングステン化学種の電位- p_{CO_2} 図では、 $\text{WO}_4^{2-}/\text{W}$ ならびに $\text{WO}_4^{2-}/\text{WC}$ 平衡電位は卑な領域に存在し、 Na_2CO_3 中のカソードリミットよりも卑にあります。ゆえに、熱力学的に金属Wが CO_3^{2-} イオンに酸化されるのが優位な反応 ($\Delta G^\circ < 0$) であり、 O_2 ガスを含まないAr- CO_2 雰囲気でも酸化反応が進行してCOガスが発生した結果と一致するものです。このように、熔融 Na_2CO_3 中の金属Wの酸化は、 $\text{O}_2^{2-}/\text{O}^{2-}$ イオンと CO_3^{2-} イオンの両方が酸化剤となって進行することが妥当であることが示されました。

最近では、酸化溶解反応の CO_2 分圧依存性 (塩の塩基度への依存性) や、実際の超硬チップを用いた研究を行っており、タングステンのリサイクルプロセスの構築へ向けた研究を展開しております。

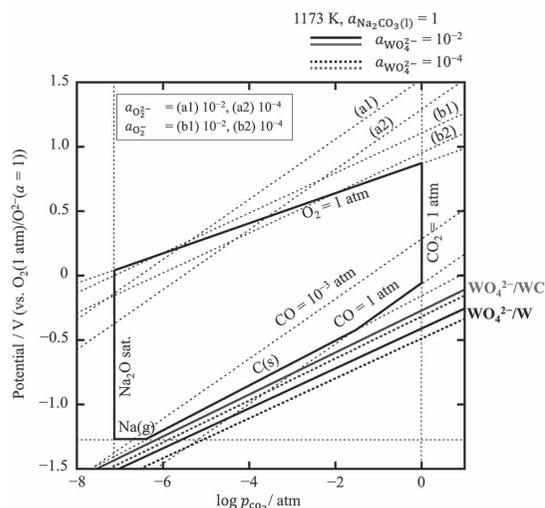


図6 1173 Kの熔融 Na_2CO_3 の電位- p_{CO_2} 図⁹⁾。実線で囲まれた領域が熔融 Na_2CO_3 の安定領域。右下に位置する実線と点線が、WやWCが酸化溶解する電位を示します。

5. おわりに

本稿では、筆者の留学時代に行った水溶液系の電気化学に関する研究と、京都大学で進めている高温熔融塩を用いたリサイクルに関する研究について紹介を行いました。筆者の得意とする分野は熔融塩化学と高温電気化学を用いた乾式プロセスではありますが、湿式プロセスに関する留学時の経験も生かすことで、乾式・湿式の両面から各種金属の製錬プロセスやリサイクルプロセスの開発へとつなげていればと考えておりま

す。特に、今まで行ってきたピーカーサイズの研究だけでなく、大型化や高速化、他元素との分離性といった工学としての側面にも狙いを向けたプロセスを研究したいと考えております。

研究者としてまだまだ未熟な身であるだけでなく、教育者としても不十分ではありますが、自分自身が非鉄製錬学や材料工学を楽しんで研究している姿を見せることこそが、学生への教育の第一歩であると感じております。これからも精進して努力してまいりたいと思いますので、皆様からのご指導とご鞭撻を賜りますよう、何卒どうぞよろしく願いいたします。

参考文献

- 1) K. Yasuda and P. Schmuki, *Adv. Mater.*, **19**, 1757–1760 (2007).
- 2) K. Yasuda and P. Schmuki, *Electrochim. Acta*, **52**, 4053–4061 (2007).
- 3) K. Yasuda, J.M. Macak, S. Berger, A. Ghicov, and P. Schmuki, *J. Electrochem. Soc.*, **154**, C472–C478 (2007).
- 4) J.M. Macak, H. Tsuchiya, A. Ghicov, K. Yasuda, R. Hahn, S. Bauer, and P. Schmuki, *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, **11**, 3–18 (2008).
- 5) S. Berger, R. Hahn, P. Roy, and P. Schmuki, *Phys. Status Solidi B*, **247**, 2424–2435 (2010).
- 6) P. Roy, S. Berger, and P. Schmuki, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **50**, 2904–2939 (2011).
- 7) K. Yasuda, A. Ghicov, T. Nohira, N. Kani, R. Hagiwara, and P. Schmuki, *Electrochem. Solid-State Lett.*, **11**, C51–C54 (2008).
- 8) H. Sopha, Y. Norikawa, M. Motola, L. Hromadko, J. R. Pereira, J. Cerny, T. Nohira, K. Yasuda, and J.M. Macak, *Electrochem. Commun.*, **118**, 106788 (2020).
- 9) K. Yasuda, F. Nozaki, R. Uehata, and R. Hagiwara, *J. Electrochem. Soc.*, **167**, 131501 (2020).
- 10) A.J. Appleby and S.B. Nicholson, *J. Electroanal. Chem.*, **83**, 309–328 (1977).
- 11) 伊藤靖彦 編, 熔融塩の科学, アイシーピー (2005).
- 12) B.K. Andersen, *Acta Chem. Scand.*, **A31**, 242–248 (1977).
- 13) A.J. Appleby and C.V. Druenen, *J. Electrochem. Soc.*, **127**, 1655–1659 (1980).
- 14) A. Borucka and A.J. Appleby, *J. Chem. Soc., Farad. Trans. 1: Physical Chemistry in Condensed Phases*, **73**, 1420–1435 (1977).

講座

太陽光に近い理想の光源
－紫色LEDベース白色光源－

汲 川 雅 一*

Ideal light source close to sunlight
－ Violet LED based white light source －

by Masaichi KUMIKAWA

1. はじめに

今や発光ダイオード（以下LED, Light Emitting Diode）を光源とするLEDランプやLED照明器具はいろいろなアプリケーションで白熱電球, ハロゲン電球, 蛍光灯等の身近にあった従来光源から次々置き換わっています。LED照明の歴史は明るい青色LEDの実用化から始まり, その実用化がどんどん進み本格的な白色LED照明になり省エネや長寿命はあたり前になった第一世代の白色LED光源から, 光の本質的な性質や特性が注目される第二世代の時代になってきています。例えば, 現在主流の第一世代白色LED光源にはブルーライトが多く含まれ眼精疲労を招くと同時に覚醒効果もあり, その光量の日常生活でのマネジメントの重要性が指摘され健康への配慮が求められてきています。

1.1 光の歴史 — 光とは何か —

「光とは何か」という問いには古くは古代ギリシャの時代から力学と同様に研究されてきました。20世紀になりアインシュタイン博士が「光は光子（フォトン）」であると発見しました。光には不思議な特性があります。一瞬で遠くまでたどり着き物にあたると反射もします。そして, 光は人の生活にはなくてはならないものの一つです。光源の歴史は50万年前には夜の闇を照らす火を人は手に入れた頃からと考えられています。身近な人口光源の歴史は電気を利用してエジソンが白熱電球を発明してからまだ120年余りです。

1.2 LED(発光ダイオード)

LEDでは電気により波動と粒子の二重性をもつ光

子（光の粒子）を生成する半導体で単色の光をつくり出します。エレクトロルミネセンス効果と呼ばれる光を放出する基本的な発光原理は20世紀初頭に発見されていて, 1906年, 英国の科学者ヘンリー・ジョセフ・ラウンドが, 炭化ケイ素に通電すると黄色く発光することを発見しました。その後, 一般照明の光源として我々の日常に溢れるようになるまで100年以上要しています。1960年以降になって赤色LED, 1990年代になって青色LED, 緑色LEDが開発されて光の三原色（RGB）がようやく揃いました。それぞれの高効率化, 高出力が進み2000年代になって一般照明用への実用化に至っています。LEDのpn接合の中で光子が生成され, その光子の波長は材料のバンドギャップによって決められます。これにより紫外線領域から可視光線領域～赤外領域までの様々な単一色の光が得られます。青色や紫色のLEDに蛍光体を塗布することにより白色のLEDが開発実用化されて一般照明の光源に広く使用されるようになりました。

2. 白色LED光源の動向

2.1 白色LED光源の歴史

現在主流の第一世代白色LED光源は青色LEDにその補色の黄色の蛍光体を組合せて白色をつくりだしています。実用化初期の頃は青色LEDと黄色蛍光体（補色）を組み合わせで単純に白色を得ていました。この組み合わせでは演色性というものの見え方の光源の特性の大切なところが十分ではないので緑色及び赤色の蛍光体を加えてより高い演色性を実現する工夫がなされてきています。しかし, そこにはつくられる光の波長域に限界があります。青色LEDの波長域より短い波長域に光がないので紫色域の白色を綺麗に区別して試みることができず, さらに青色LEDに使用

*住友林業株式会社 新事業戦略開発室 部長

できる赤の蛍光体の特性から赤の演色性が他の色に比して劣っているので深い赤色も見ることができないという課題があります。私たちはものの色を光源から出てくる光の反射で見ている。そのときの光源の波長域に限界があるとそのものの本来もっている色を認識することができません。すなわち、太陽光の下で見えるものが同じように見えないのです。分かりやすい例では、百貨店で服を買うときに窓際にもっていき太陽光の下で服の色を確認することがあるのではないのでしょうか。当然ながら太陽光は人が見ることが出来る波長域がすべて含まれています。図1に太陽光と白色LED光源のスペクトルイメージを示します。ご存じのように従来光源の白熱電球やハロゲン球はフルスペクトルを有する良い光源ではありましたが、全放射エネルギーの可視光線になる割合が非常に低く白熱電球ではわずか8%、ハロゲン球でも10%しか可

視光線になりません。これらのランプを触って火傷しそうになった方もいるかと思いますが、800nm以上の長波長の赤外領域が放射エネルギーの大部分を占めているため省エネという観点から市場から消えつつあります。

図2に太陽光、従来光源と白色LED光源のスペクトルイメージを示します。照明用の光源としての白色光源には、「照らすための光源」という大きな役割があります。照らされる側のものの色を服飾専門店や美術館等では太陽光の下で見えるように忠実に再現する高い演色性が求められます。つまり太陽光のフルスペクトルのように可視光域の波長がすべて含まれている光源が理想の人工光源になります。このような理想の人工光源を第二世代白色LED光源と称することにします。

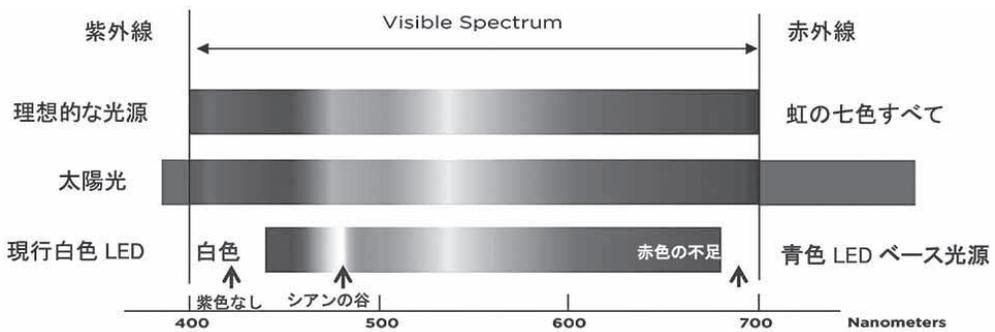


図1 太陽光と白色LED光源のスペクトルイメージ

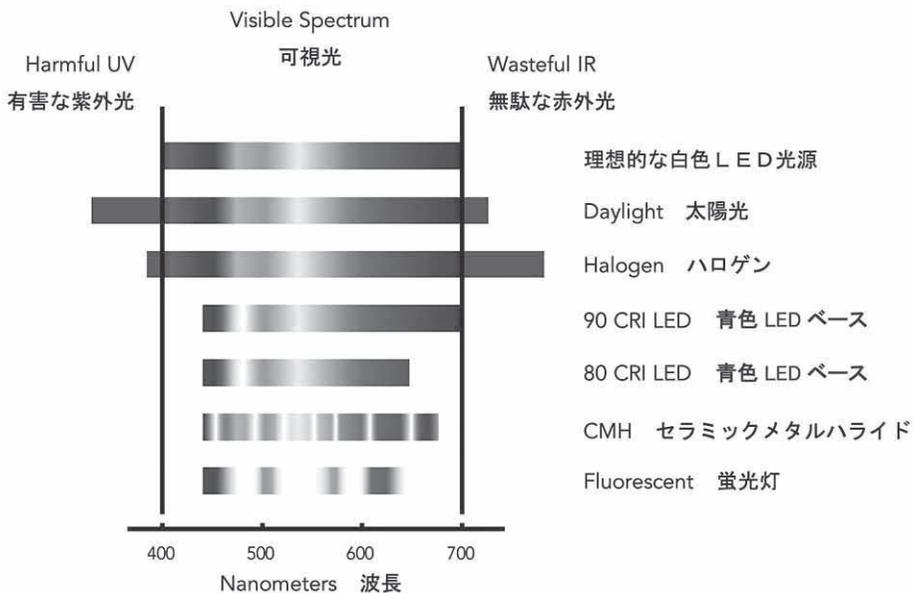


図2 太陽光、従来光源と白色LED光源のスペクトルイメージ

2.2 第二世代白色LED光源 紫LEDベース

高輝度青色LEDの実用化でノーベル物理学賞を受賞した中村修二博士は当初から現行の青色LEDベースの白色光源の限界を感じ理想の白色LED光源の実用化を追求し米国加州シリコンバレーでSORAA社を設立しました。そこで青色ではない紫色LEDベースの白色光源の開発実用化に成功しました。SORAA社独自に開発製造している紫色LEDに青色、緑色及び赤色の3つの蛍光体を組み合わせてより太陽光の下で見たときと同じような見え方になるよう白色光源の製品化を実現できました。

3. 紫色LEDベース白色光源の特徴

3.1 LEDと蛍光体

InGaN 青色LEDのピーク波長は460nmでYAG 蛍光体の励起スペクトルと一致しています。これは高効率白色LEDを実現するのに重要な要素でこの組み合わせが現在主流の白色LED光源となっています。それに対して、SORAA社の紫色LEDのピーク波長は415nmで青色、緑色及び赤色の3つの蛍光体を励起してより幅の広い範囲で発光スペクトルが可視光域をすべてカバーできるようにつくられています。図1にもあるように青色ベースの白色LED光源には(1)紫色の波長の欠落(2)シアン(青緑)を表現する波長の不足(3)深い赤色の波長の欠落という太陽光に含まれている色の3つの不足があります。

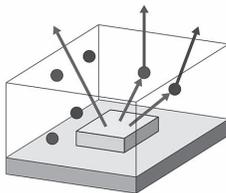


図3 青色LED

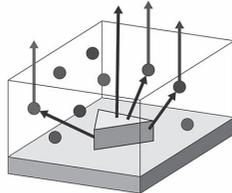


図4 紫色LED

さらに、青色LEDと紫色LEDにはチップの形状に違いがあります。図3と図4のイメージ図にあるようにLEDのチップの形状が四角と三角と異なります。これは使用される基板がサファイアかGaN(窒化ガリウム)かの違いによります。SORAA社はGaN基板を使うことにより転位密度の非常に低いLEDの量産に成功しました。そのことによりウェーハから三角形に切り出すことができるようになりました。

3.2 SORAA社の紫色LEDベースの白色光源

現行の青色LEDはサファイア基板に窒化ガリウム系の半導体を成膜していますが、SORAA社はGaN基板に成膜することにより原子間の整合性を遥かに改善しています。



図5 サファイア基板LEDチップ断面 SORAA GaN on GaN™

熱処理プロセスでの転位密度を大幅に軽減(1000倍)できたことによりウェーハからのチップの切り出しを三角形にすることができます(図6)。このことによりLED半導体のpn接合の中で生成された光子の外部への取出し効率を大幅に改善(90%)することができました。

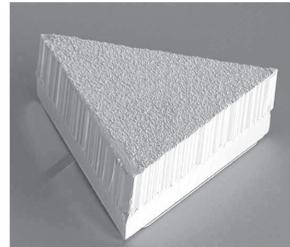


図6 SORAA GaN on GaN™ LEDチップ

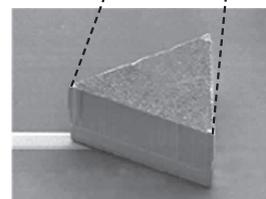
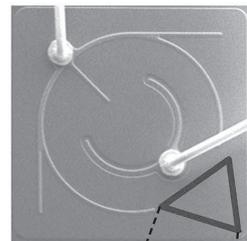


図7 従来チップとSORAAのLEDチップ

従って、同じ光量のでる面積を図7に示されるように大幅に小さくすることができました。この利点はコスト削減もさることながら光源として理想的な点光源を実現しました。

4. 紫色 LED ベース白色光源のユニークさ

4.1 青色ベース LED 白色光源の健康障害

最近青色ベース LED 白色光源の睡眠障害や健康障害が問題視されるようになってきています。医学的には目の中で光を感受する受容体は 460nm という InGaN 青色 LED のピーク波長と同じ青い波長の光に強く反応するとあります。また、この 460nm 前後の青い波長は太陽光の朝日に多く含まれてもいます。人は脳内で眠りを誘う「メラトニン」というホルモンを分泌し、体温や脈拍を下げて眠りに入ります。青い波長が多く含まれる早朝に太陽の光でこのホルモンが減り人は覚醒します。朝目覚めるときはこの「ブルーライト」がたくさんあっても問題ありませんが、夜半にこの光を見ると、サーカディアンリズム、体内時計が惑わされてしまいます。即ち、夜にこの青色 LED 光を浴びれば夜なのに体はまだ朝と勘違いしてしまうこととなります。一種の時差ボケのような反応が起きこれが睡眠障害などにつながると言われています。ブルーライトの波長は短く強いエネルギーを持っています。そのため角膜や水晶体で吸収されずに網膜まで到達してドライアイ、視力低下、睡眠不足など身体に悪影響を及ぼすといわれています。青色ベース LED の白色光源から青色を除くと白色は赤と緑の波長成分だけになるので黒体軌跡との直線上交差する色となり、その白色は黄色っぽくならざるを得ません。一方、紫色ベース LED 白色光源から青色波長を除いても黒体軌跡に白色をつくることができ自然な光になります

4.2 可視光紫外線の大切さ

2016年12月に、慶應義塾大学医学部眼科学教室（坪田教授）が太陽光に含まれる「バイオレットライト（360 nm～400 nm）」が近視の進行を抑える効果があることを発表しました。これまで世界中で屋外活動が近視進行抑制に効果があることが報告されていましたが、この研究によりその原因が明らかになりました^{[1], [2]}。2015年のネイチャー誌3月号に紹介された写真には、写っている数多くの少年達全員が眼鏡をかけています^[3]。

直射日光が強い殺菌力を持つことは既知です。紫外

線照射による殺菌作用には波長依存があり殺菌の効果は異なります。殺菌効果の最大値は260 nm付近にあり一般に253.7 nmの紫外照射が強い殺菌効果を持つことから殺菌線と呼ばれています。この波長は簡単には細菌のDNAを切っていくプロセスで繁殖を抑制します。最近の研究では405nmの狭い波長域に異なるプロセスで細菌に殺菌効果があることがわかってきて研究と実用化が進んでいます[4]。

5. ま と め

人工光源を省エネだけでなくさらに人に優しい光源と考えたとき、

- (1) 見たものが太陽光の下であるがまま見えるように同じように見えること（演色性がよい）、例えば、デパートで購入した服が後から色のイメージが違おうと感じない、レストランや食卓で食事のときに食べ物が美味しそうだと感じる
- (2) 太陽光の下と同じように健康的な日常生活が送れること、例えば、体内時計（サーカディアンリズム）に沿う、メラトニン分泌のリセットができるなど、睡眠障害の原因をつくらない
- (3) 人工光源により健康を損なうようなことがなく（近視等）、刺すような光ではなく、目に優しい光であることの3つが大切な要素となるのではないのでしょうか。

そのためには太陽光の可視光域のフルスペクトルを有する光源が理想の光源と言えるのではないかと思います。

参 考 文 献

- 1) 坪田一男、「現代社会に欠如しているバイオレット光が近視進行を抑制することを発見」、慶應義塾大学医学部 眼科学教室：https://www.keio.ac.jp/ja/press-releases/files/2016/12/26/161226_2.pdf
- 2) Megumi Hatori, et al. 現代の加齢の加齢社会におけるブルーライトが引き起こす体内時計の乱れと健康被害の可能性：Global rise of potential health hazards caused by blue light-induced circadian disruption in modern aging societies, npj Aging and Mechanisms of Disease volume 3, Article number: 9 (2017)
- 3) ネイチャー誌：PP. 276 Nature, Vol. 519, 19 March 2015
- 4) M. Maclean, et al. "405 nm light technology for the inactivation of pathogens and its potential role for environmental disinfection and infection control," Journal of Hospital Infection 88 (2014) 1-11

研究速報

工学研究科 社会基盤工学専攻

資源工学講座 応用地球物理学分野

応用地球物理学分野は物理探査工学を中心とした地球物理学関係の研究を行っている。特に弾性波や電磁波を用いて、地下構造調査・地球計測や波動伝播メカニズムの解析を行っており、探査対象領域は海洋下の深部構造から陸上の極表層の領域まで多岐に及んでいる。

全波形逆解析による地下流体流動の 高精度モニタリング

世界的に石油の需要は依然として高く、効率の良い石油貯留層の開発が望まれている。一般的に石油の回収率は一次回収、二次回収を経ても 20% から 40% 程度であり、貯留層からのさらなる石油の回収を期待して石油増進回収法 (EOR) が行われる。本研究では、EOR の中でも高い掃攻率と石油回収率で注目されているフォーム EOR に着目した研究をおこなっている。これまでの研究により、フォーム EOR の微視的・巨視的メカニズムが明らかにされてきたが、地下でどのようにフォームが進展していくかということを探査する手法はまだ完全には確立されていない。そのため、EOR の効果は主に油層シミュレーションや生産井、圧入井から得られるフィールドデータにより評価されており、フォームの不安定性等から発生する置換フロントの不安定現象を予測することは困難である。地下孔隙内流体の違いは地震波応答に影響を与えるため、地震探査手法を用いたモニタリングが有効であると考え、本研究では Reverse Time Migration (RTM), Full Waveform Inversion (FWI) といった地震探査手法を用いたフォーム EOR のタイムラプスモニタリングを提案している。図 1 に有効性検証のための数値実験に用いた Marmousi2 モデルの一部を示す。白枠の部分が想定した貯留層部であり、図 2 にその拡大図を示す。モデル (a), (b) はそれぞれ、二酸化炭素・水の圧入による EOR を想定している。フォーム部が右側に進展することを想定し、進展前後のモデルから人工地震探査データを作成し、RTM により地下を可視化した結果が図 3 である。図より、地下で流体が移動した領域が可視化されている様子が確認できることから、本手法の有効性が確認された。

地中レーダ探査による地下浅部媒質の物性推定

地下浅部の鉱物探査を目的に開発された Induced Polarization (IP) 法は、地下の媒質に生じる電磁気現象を利用する探査手法の一つである。一般的には、IP 法により地下の充電率分布を推定し、地下の比抵抗分布との対比で地下媒質に関する議論がなされる。しかし、地下の金属・鉱物資源の物性と関係についての基礎的な知識は十分とは言えず、IP 法で推定される電気的性質について未解明な部分も多い。本研究では、この電気的性質の一つである複素導電率に着目し、電磁波の反射のみを利用してターゲットとする媒質の複素導電率を推定することを試みた。この時、解析に使用する周波数を 100Hz 程度に制限することで、レーダ探査の課題の一つでもある探査深度の浅さの解決にも

取り組んだ。単純な二層構造のモデルを用いて本研究に対する理論式を導入し、理論的に下層媒質の複素導電率を求めた。また、数値シミュレーションを用いて同手法による解析をおこなうことで、理論的および実験的に本手法の有効性を評価した。本手法を用いて下層媒質の複素導電率を推定した結果、理論解と数値実験解は良い一致を示しており、本手法の有効性が示唆された。また、TM モードの電磁波の有用性が示され、100Hz 程度の周波数を用いたことから探査深度の浅さの問題も解決できる可能性がある。さらにソレノイドを用いて TM モードの電磁波を発生させることを考え、幾何的な減衰のみを考慮して受振位置において観測されるであろう磁束密度を評価したところ、ある程度離れた受振位置においても地下の探査対象からの反射波信号を十分に測定可能であることが示された。

教授 三ヶ田 均
助教 武川 順一
助教 徐 世 博

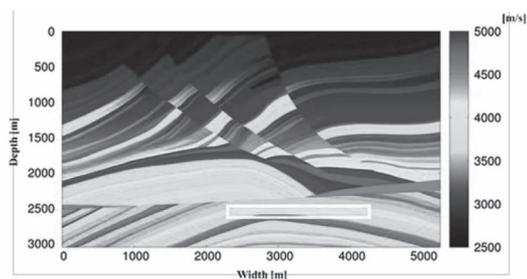


図 1 数値実験に用いた Marmousi2 モデル。白枠で囲った部分に貯留層が存在

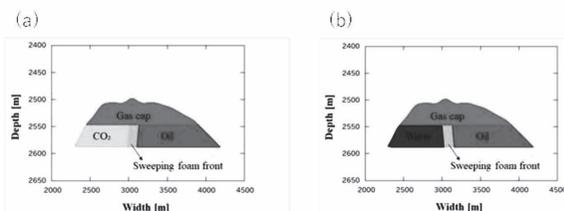


図 2 貯留層部の拡大図。(a) 二酸化炭素圧入モデル、(b) 水圧入モデル。

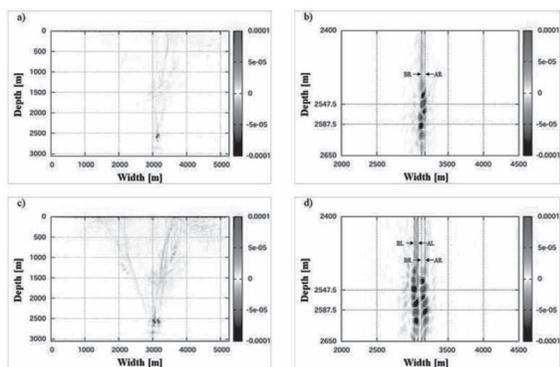


図 3 RTM によるイメージング結果。(a) と (b) は二酸化炭素圧入モデルの結果、(c) と (d) は水圧入モデルの結果である。(a) と (c) の領域は図 1 に対応しており、(b) と (d) の領域は図 2 に対応している。

工学研究科 社会基盤工学専攻

**資源工学講座
地殻開発工学分野****大型摩擦試験機を用いた岩石摩擦**

地下深くの岩石は多くの亀裂を有しており、その亀裂の進展が岩盤の不安定を引き起こす。しかしながら、岩盤が破壊するかどうかは、単純に亀裂の進展のみには支配されず、亀裂がずれることによるずれ変位が重要になる。本研究では、防災科学技術研究所所有の大型岩石摩擦試験機を用いて、メートルサイズの2個の岩石試料を積み重ね、その接触面に法線応力をかけたのち、剪断応力をかけることにより接触面に剪断すべりを発生させる。剪断すべり発生中の摩擦力の時空間変化を測定し、岩石の破壊安定性の性質を調べる。さらに、境界積分方程式法などの数値シミュレーション手法を用いて、実際の剪断破壊現象を計算機上で再現することにより、そこに働く岩石摩擦との関係を調べる。このようにして、実験室で得られた動摩擦理論を考慮し、計算機上で亀裂の破壊伝播の再現を行うことで、岩盤の安定性の評価が可能となる。大型摩擦実験によって得られた実験データより、破壊の開始プロセスの詳細を検討した。破壊は初期破壊と不安定破壊の2つの段階からなり、初期破壊から不安定破壊へ移る際のクラックサイズを初期クラックサイズと呼ぶ。これまで理論的考察により提案されている破壊開始モデルとの比較を行い、実験データはこれらの破壊開始モデルで予測されていた初期クラックサイズより大きくなった場合不安定破壊へ移行することを確認した。さらに、既存破壊面（断層）が複雑な形状をしている場合、どこまで断層が壊れるかは、亀裂の構造、外部から働くテクトニック応力、そして断層面に働く摩擦力によって決まる。数値計算により、既存亀裂が地下に複雑に分布している場合のクラックの伝播と破壊の乗り移りの計算を行い、複雑な亀裂の中で開始した破壊が誘発地震へ発達する条件を調べた。これらのアプローチにより精度の高い岩盤安定性予測が可能となることが期待される。

原位置岩盤での炭酸水注入試験

二酸化炭素地中貯留は、排出される二酸化炭素を地下岩盤に圧入して封じ込めることで、大気中への二酸化炭素排出を実質削減するため、地球温暖化対策の一つとして注目されている。しかしながら、二酸化炭素を圧入する際、地下の温度・圧力条件下において超臨界状態になることで、岩盤内で破壊を促進し、誘発地震を引き起こすことが問題視されている。そのため、二酸化炭素を直接岩盤に注入するのではなく炭酸水（炭

酸イオン）の状態で注入することで、超臨界状態になる量を減らすことができるため、誘発地震のリスクを軽減することができる。ゆえに、炭酸水を注入することによる岩盤の透水性への影響を把握することは重要といえる。そこで本研究では、二酸化炭素を直接岩盤に注入することを避け炭酸水として注入し、その際の注入圧の経時変化を測定した。特に、花崗岩質の地下岩盤に炭酸水を注入した。

本研究の結果より、炭酸水注入による透水性の時間に伴う変化はあまり認められなかった。炭酸水を注入した岩盤から岩石試料を採取し、SEM-EDSによる岩石の表面分析を行ったところ、少量ながら炭酸カルシウムの析出が確認できた。ただし、岩盤の透水性への影響は小さいものであったため、岩盤の透水性を低下させることを考える場合、炭酸カルシウムがより析出しやすく、亀裂や空隙が充填されやすい条件を構築する必要があることが示されたといえる。

**岩石のサブクリティカルき裂進展に
およぼすカルシウムイオンの影響**

地下岩盤を利用する上では、岩石破壊の時間依存性、特にサブクリティカルき裂進展について知る必要がある。岩石のサブクリティカルき裂進展は周辺環境に大きく影響を受けることが知られており、例えば水中環境下では大気中と比べてサブクリティカル亀裂進展が促進されることが既往の研究からわかっている。地下岩盤に構造物を建設する際、セメント系材料が多く用いられるため、構造物周辺の地下水中のカルシウムイオン濃度が高くなるのが考えられる。これまで水中のサブクリティカル亀裂進展の研究において、カルシウムイオン濃度が高い環境での研究は十分にはされていない。また、凝灰岩質岩盤中において地下発電所の建設が進められていることから、凝灰岩での研究を進めることも重要と言える。そこで、凝灰岩のサブクリティカルき裂進展に周辺環境、特にカルシウムイオンがどのように影響するかについて調べた。その結果、春市有無イオン濃度が高い水中では、蒸留水中よりもき裂進展速度が低くなることが示された。また、カルシウムイオン濃度の上昇とともに、き裂進展速度が低下することが示された。このことから、水中のカルシウムイオンが亀裂進展を抑制しており、岩盤中に構造物を建設する際にセメント系材料を使用することは、岩盤の長期安定性の確保に貢献できる可能性があることが示された。

教授 福山 英一
准教授 奈良 禎太

工学研究科 社会基盤工学専攻

資源工学講座 計測評価工学分野

永久磁石を用いる運動渦電流探傷について

材料の非破壊検査においては、必ず検査装置と対象材との相対運動が伴う。渦電流探傷においても、例えば線材や鋼管の製品検査では、検出コイルを材料の長さに沿って走査して探傷が行われる。一般に渦電流探傷は、交流磁界を用いて材料内に渦電流分布を実現し、その分布が欠陥の存在によって乱れることを検知する方法であるが、相対運動がある場合には、生じる渦電流場に運動渦電流効果加わることになる。本研究は、そのような運動渦電流効果のみを積極的手段として探傷に利用しようというものである。永久磁石を励磁源として用い、その移動によって材料内に運動渦電流場を実現して、欠陥の存在による渦電流場の乱れ、すなわち二次磁界の乱れを、磁気センサあるいは検出コイルで検知する方式である。本年は、一般の非磁性金属材料を対象として、その基本的特性について数値解析と模擬実験による検討を行った。その結果、運動渦電流のみによっても十分探傷が可能であること、基本的には欠陥の体積に比例する探傷信号が得られること、さらに、相対運動による磁界変動の周波数が従来の交流磁界渦電流に比べて低いため、より深い欠陥まで検知可能との利点もあることが明らかとなった。相対運動におけるリフトオフ変動による悪影響を如何に抑制するかなど、解決すべき課題も残されているが、新たな探傷技術としての可能性は大いにあるものと考えている。

LDVによる遠隔振動計測にもとづく 吊橋ハンガーロープの張力評価

構造物の引張部材として用いられているケーブルやワイヤロープの張力を測定する方法としては、振動法が最も一般的である。対象ケーブルに加速度計などの振動センサを取り付け、打撃によって発生させたケーブルの横振動を計測して、抽出された振動モードの次数と周波数の関係から張力を算定するものである。本研究は、打撃という振動の励起と加速度センサという検出要素を、風的作用や車両などの通行によってケーブルに生じている常時微動を、数10mの遠隔からレーザードップラー振動計 (LDV) によって計測するという、全く非接触の方式に変えようとするものである。ある吊橋のハンガーロープを対象とした観測の結果によれば、長時間の計測が可能であることから、張力算定に必要な固有振動のモード次数と周波数の関係を、数10次の高次まで正確に検知でき、従来の打撃法による振動測定をはるかに凌駕する性能をもつ方法であることが明らかとなった。また、そのような多くの次数のモードが可能であることによって、従来方式では困難とされたロープの剛性の影響についても、正確な見積もりが可能となるであろうことが示された。

磁気特性計測にもとづく PC ケーブルの張力測定

橋梁に用いられる鋼製のストランドやケーブルの張力を、鋼の持つ応力磁気効果、すなわち、ケーブルの磁気特性が張力によって変化することを利用して測定する方法について検討している。ケーブルの実用的腐食検査法として当研究室で開発した全磁束法と同じ装置を用いる方式であり、ケーブルにその場で巻線して形成するソレノイドによって、長手方向に強い直流磁界を与え、ソレノイドの中央で、ケーブルの磁化特性 (磁気ヒステリシス特性) を精密に測定し、そうして得られた磁化特性を表すヒステリシス曲線の形状をもとに、張力を評価する方法である。具体的にはヒステリシス曲線の形状の違いを特徴づける複数の指標を用い、それらの指標の値と張力の関係にもとづいてケーブルに作用している張力を推定する。ケーブルを近飽和まで強く磁化することによって、ケーブルが過去に受けた磁気や応力の履歴に影響を受けないこと、ならびに、直流磁界を用いることで渦電流の影響を受けずに、内部も含めケーブル総体に作用している張力を測定できること、さらに、複数の指標を用いることで、より正確に張力を評価できることを特徴としている。昨年度、ある高速道路の高架橋において実測定を行い、その実用性について検証した。ケーブル長が短い場合や、途中で屈曲部や結節部を有する場合に適用が困難となる振動法による張力評価の代替手段として有効なものと考えている。

低塩分濃度水攻法の原油増進回収メカニズムの検討

原油増進回収法の一つに塩濃度が貯留層水より低い塩水を圧入して原油回収率を向上させる低塩分濃度水攻法 (LSW) がある。この方法は、界面活性剤等の薬剤を必要しないため環境に優しく低コストな方法であるが、その主たる増油メカニズムが十分に解明されていない。このため、本研究では、原油中の極性油分子が鉱物表面のカチオンを介して吸脱着することによる鉱物表面の濡れ性変化がその主たる増油メカニズムであると考え、これまで分子動力学 (MD) 計算によって、鉱物表面のカチオンによって極性油分子の吸着安定性が異なる事、吸着状態がカチオン架橋と水架橋の2種類あることを示してきた。今回、砂岩貯留層にも含まれ、MD計算の鉱物モデルにも用いた白雲母の表面のカチオンを変えた試料を準備し、原子間力顕微鏡を用いてLSW前後の極性油分子 (ステアリン酸) の吸着状態の変化を直接的観察することを試みた。その結果、LSW前の試料ではカチオンの種類にかかわらず、その厚さからステアリン酸分子と考えられる物の薄い膜が白雲母表面に広く吸着している様子が観察できた。一方、LSW後の試料ではカチオンの種類によって吸着していたステアリン酸と考えられる膜の脱着状態が異なることが観察できた。

教授 塚田 和彦
准教授 村田 澄彦

工学研究科 都市社会工学専攻

**地球資源学講座
地殻環境工学分野****鉱物資源の分布形態と成因解明**

地殻中での鉱物資源の分布形態と成因を明らかにするために、国内外の陸域・海域を研究フィールドとして、地球統計学とリモートセンシングの手法開発、地殻金属濃度分布の高精度推定に取り組んでいる。

海底には熱水鉱床、コバルトリッチクラスト、レアアース泥などの金属資源が豊富に胚胎されていることが知られている。しかしながら、陸域での金属資源調査に比べて海底のボーリングの本数は格段に少なく、掘削深度も浅いので、少ない情報量から資源分布予測を高精度で行うことは困難である。そこで、この問題の解決に貢献する地球統計学手法を開発した。沖縄トラフでの海底熱水噴出域を手法適用のケーススタディとした結果、地質分布と金属濃度分布を3次元的に明らかにでき、これから鉱床生成メカニズムの解釈、および鉱床存在の可能性の高い場所の推定も可能になった。また、金属鉱床の元素濃度と鉱床タイプや形成年代との関係、その地域性を明らかにすることを目的とし、本学総合博物館所属の鉱石試料を用いて、元素濃度と鉱物組成分析を継続中である。スカルンやキースラガーなど各鉱床タイプに特有の鉱物組成や金属濃度の特徴などを明らかにできている。

リモートセンシング研究では、マルチスペクトル衛星画像の波長と空間分解能の両方をダウンスケールし、高分解能のハイパースペクトル画像に変換できる手法の開発を進めている。これをオーストラリア Mt. Isa 鉱山を含む衛星画像に適用した結果、熱水変質鉱物の分布域などを、より詳細に抽出できるようになった。

地殻流体流動現象の把握とモデル化

地殻中には水、油、ガスなどの重要な資源流体が存在し、これら資源の効率的・持続的利用を図るには流体の起源や流動状態の解明が不可欠になる。そこで、その解明に資する流体の地球化学的指標の分析を行うとともに、流動場の地質構造や流動現象に関わる特性の空間分布を踏まえた数値モデルを構築し、流動シミュレーションを実施することで、深部から表層までの広域にわたる流動現象を明らかにする研究を進めている。

インドネシア・バンドン盆地周辺地熱地域における地熱流体の起源と循環状態に関する研究では、ここ数年間の調査で得た熱水とガスの分析結果を統合することで、Wayang Windu と Patuha 地熱地域における地熱流体の起源や涵養域、地熱流体の上昇域を含む流動状態などを推定し、地熱システムの概念モデルを構築した。また、水素、炭素、塩素、ヨウ素の放射性同位体の分析を行い、地熱流体の滞留時間に関する検討を進めている。放射性炭素の分析結果から、Patuha 地域では、深部から上昇した地熱流体の側方流動を断層が抑制している可能性が示唆された。

地下水流動や物質移行における断層の機能を明らかにすることを目的とした研究では、断層に囲まれたコンパートメント領域を含む仮想的な水理地質モデルを作成し、断層の水理特性や収着特性、地下浅部に分布する水平な難透水層の有無などの条件を変化させて地下水流動解析と反応輸送解析を実施した。その結果、断層が低透水性の断層ガウジに加えて高透水性のダメージゾーンを有する場合でも、それ以外の水理・収着特性によっては物質移行を抑制する機能を持つ場合があることを確認した。また、地中熱利用の環境影響評価技術の開発を目的とし、微生物増殖の影響も含めてオープン型の地中熱利用で井戸の目詰まりを生じさせる沈殿物の生成を予測できるモデルを構築した。

さらに気液二相流と熱の移動を考慮した数値シミュレーションにより、変質帯キャップの形成に伴う細倉鉱床での鉱化プロセス、および沖縄トラフの海底熱水噴出域における温度圧力分布と金属濃集プロセスなどを明らかにした。

地熱貯留層・蒸気スポット検出技術の開発

地熱資源の利用促進のために、リモートセンシング・地球化学・鉱物学での先端手法を統合して、地熱発電に最適な蒸気スポットを高精度で検出できる技術の開発を進めている。インドネシアの地熱サイトであるバンドン南部の Wayang Windu と Patuha 地域では、ハイパースペクトル衛星画像へのスペクトル分離法の適用により、植生に覆われた地域からの地熱兆候地や熱水変質帯の抽出精度を向上させることができた。また、ラドン濃度のモニタリング測定結果に基づいて、深部からのガス上昇速度や蒸気量指数の推定を行った。これをリモートセンシング解析によるリニアメント抽出結果や地球化学調査の結果と統合することで、蒸気スポット存在可能性評価マップを作成できた。

また、新たな試みとして、ニューラルネットワークと地球統計学的手法を組み合わせた手法を開発し、その適用により日本列島全域にわたって深度数 km までの地温と臨界点到達深度の分布を明らかにできた。

地下構造の推定精度向上法の開発

鉱物・地熱・水資源の胚胎に関連した地下構造の推定精度を向上させるためのデータ解析法と計測法の開発を進めている。その一つとして、沖縄トラフでの海底電気探査データの逆解析により、『海底熱水鉱床の二階建て構造』を見出すことに成功した。また、複素電気伝導度特性を再現できる岩石物理モデルを構築し、電気探査データから鉱床における金属濃度分布を推定できるようになった。新たな地殻物性計測法としてリモートセンシング技術を応用した地中レーダシステムも考案し、その有用性に対する実証実験も行っている。

教授 小池 克明
准教授 柏谷 公希
助教 久保 大樹

工学研究科 都市社会工学専攻

地球資源学講座 地球資源システム分野

世界が情報社会へと変貌を遂げつつあるにもかかわらず、人類が古来より活用してきた資源・エネルギーの需給逼迫に加え、地球環境汚染、地震等による自然災害など、“地球と資源”に関わる深刻な課題が顕在化している。このような多様な課題について地球科学的視点から理解し工学的解決を模索する「地質工学」の役割が、益々重要となっている。当研究室では、石油・天然ガスや地熱などの資源・エネルギー開発、地震現象の理解、地球環境保全、防災、土木構造物の建設など、多様な課題について幅広い研究を進めており、令和元年度には主に以下の研究を行った。

プレート沈み込みによる房総半島新第三系および第四系前弧海盆の形成過程に関する研究

沈み込み帯の主要な構造の一つである前弧海盆の形成過程の解明は、日本列島とその周辺においてプレート沈み込みにより発生する地震や火山活動などの各種事象を理解・解明するための基礎的な知見になるとともに、堆積盆に賦存する天然ガスなどの地下エネルギー資源の貯留条件の究明にも寄与するものである。これまでの、沈み込み帯については付加体に関する研究が盛んになされてきたが、前弧海盆に関しては十分に研究されておらず、特に古地温分布や最大上載圧力の研究は、皆無に等しい状態であった。それに対して、本研究はフィリピン海プレートの沈み込みによる前弧海盆が陸上に広く分布する房総半島を研究対象とし、地質踏査を中心とした地質構造解析、古地温解析および最大上載圧力の測定を主軸として、房総前弧海盆の地質学的特徴および工学的特徴を統合的に検討し、プレート沈み込み運動に伴う前弧海盆の形成過程を明らかにする以下の主な成果を得た。

(1) 房総半島の東西を横断する黒滝不整合を跨いで、三浦層群と上総層群において、メソスケールでの断層と地層の姿勢・特徴や堆積軟岩の微細構造について観察・分析を行い、房総前弧海盆内の褶曲構造や断層姿勢の分布傾向が黒滝不整合を境に異なることを明らかにした。

(2) 黒滝不整合をカバーする広域において多数の地点から採取した堆積物試料に含まれる微量の植物起源の炭質物を抽出して、ビトリナイト反射率の測定を行い、各地層の古地温データの分布を得た。その結果、黒滝不整合の上位と下位地層とは、古地温の分布特徴が異なることを解明した。

(3) 房総前弧海盆の各層準における最大上載圧力を見積もる目的で、堆積軟岩試料の圧密試験を行った。その結果、房総前弧海盆の西部と東部で圧密降伏応力の傾向が異なるという特徴が明らかになったほか、軟岩の圧密過程において必ずみ軟化現象が生じるという特異的な現象を見出した。

(4) 上記の結果を統合し、房総前弧海盆の西部では

被熱温度と上載圧力が黒滝不整合を境に明瞭に異なる一方、東部では両者とも連続的であることが判明した。これらのことを踏まえ、房総前弧海盆と広域テクトニクスとの関係について論じ、それらを反映した前弧海盆の堆積・埋没・剝削などを含む形成過程のモデルを新たに提示した。

セルロースナノファイバーを用いた 環境調和型石油増進回収法に関する研究

豊富な木質資源由来で生分解性のあるセルロースナノファイバー (CNF) を油層の空隙サイズよりも小さいナノサイズの W/O または W/O/W のエマルジョンに閉じ込めて油層内の卓越流路に圧入することで、石油の増進回収 (EOR) と環境負荷低減を目指す研究を実施している。CNF を含んだエマルジョンが時間経過により破壊すると、CNF が放出されて卓越流路を閉塞し、圧入流体が卓越流路以外にも広がって残留している油が回収されるようになる。これまでの研究により、W/O エマルジョンの調製にソルビタンセスキオレートの主成分とする界面活性剤を用いた場合、ポリオキシエチレンラウリルエーテルの主成分とする界面活性剤を用いた場合に比べて、界面活性剤濃度を 1/10 に下げることができ経済的であることは分かっていたが、これに CNF が含有されているかについては未確認であった。今回、生成した W/O エマルジョンを破壊して得られる凝集体を採取し、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて観察した結果、その凝集体が CNF であることが確認され、生成した W/O エマルジョンに CNF が含有されていることを確認することができた。

カッティングス試料を用いた熱物性測定に 関する新規技術の開発

地球物理やエネルギー資源開発の分野では、地下の温度の構造を把握することが重要である。しかし、温度構造を得るために必要な熱物性の測定は、物理検層などの測定が困難であり、掘削コア試料を用いた室内測定により行わなければならない。しかも、石油・天然ガスなどの深部掘削においては、コア試料が採取されないケースが多々ある。そこで、本研究はコア試料を採取しなくても得られるカッティングス試料を用いた熱物性測定手法の新規開発を目的とした。まず、カッティングス試料に対して、熱伝導率と比熱容量の同時測定が可能な非定常面熱源法 (通称ホットディスク法) の適用可能性を検証し、適用可能な新測定プローブを考案した。また、非定常面熱源法でのカッティングス試料を用いた熱物性測定に最適化した新プローブを提案し、具体的な測定プロトコルを開発した。この新プローブを用いて実測と検証を行った結果、石英ガラス標準試料と実際の岩石試料の両方において良好な結果を得た。

教授 林 為人

助 教 石塚 師也

エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻

**資源エネルギー学講座
資源エネルギーシステム学分野****ナノポーラス金上におけるコラーゲン分子の
動的吸着挙動**

ナノポーラス金上で間葉系幹細胞を培養すると、多くの細胞がナノポーラス金基板から脱離する。一方、フラット金上で培養すると、細胞は基板から脱離することはない。細胞は自分自身でコラーゲンという細胞外マトリックスを分泌し、基板に接着する。したがって、細胞がナノポーラス金基板から脱離したのは、ナノポーラス金がコラーゲンに影響を及ぼしたためと考えられる。しかし、ナノポーラス金とコラーゲンの相互作用に関して詳しいことはわかっていない。そこで本研究では、分子動力学シミュレーションを用いて、ナノポーラス金上のコラーゲン分子の動的吸着挙動を調べた。コラーゲンは、水素結合した3つの鎖タンパク質から構成されており rigid な構造をしている。そのため、コラーゲンの構造に大きなコンフォメーション変化は見られなかった。しかし、振動数解析等を行った結果、ナノポーラス金はコラーゲンの局所的なコンフォメーションに影響を及ぼし、これが基板とコラーゲンの結合を弱める原因であることがわかった。

**ナノポーラス金アクチュエータを用いた
周期引張刺激による細胞増殖とその感知機構**

細胞は応力感知機能を有することが知られているが、その詳細なメカニズムはまだよくわかっていない。そこで本研究では、ナノポーラス金のアクチュエータ機能を利用し、線維芽細胞に周期的な微小ひずみを負荷し、細胞増殖に及ぼす影響について調べた。その結果、0.5%という微小ひずみでも、細胞増殖率が1.3倍増加した。ひずみ負荷による細胞増殖率の向上は、負荷するひずみの周波数に依存した。ウェスタンブロット解析の結果から、MAPK 経路が応力感知機能に関係することがわかった。このことは、インテグリンが応力感知機能に関与することを示している。インテグリン inhibitor を用いた実験により、応力感知機能はインテグリンの種類に依存した。

mmオーダーの3次元細胞ブロックの作製と灌流培養

スフェロイドに代表される3次元細胞培養は、再生医療にとって重要である。しかし、現状で作製できる3次元細胞ブロックの大きさは、200~400 μm が限界である。これは酸素の拡散範囲に限界があるためである。したがって、細胞ブロックのサイズアップには、血管網の導入が不可欠である。これまでの研究で毛細血管の導入が進められてきたが、動脈と毛細血管が吻合した血管網の構築には至っていない。そこで本研究では、動脈と毛細血管を別々に作製した後、細胞ブロック内に導入しそれぞれを吻合させることにより、ミリメートルサイズの細胞ブロックの作製を行った。さら

に、得られた細胞ブロックを使って、生細胞率に及ぼす血管導入の影響を調べた。その結果、毛細血管よりも動脈のほうが生細胞率向上に有効であることがわかった。

**ナノポーラス金とRGDモチーフの相互作用
：第一原理計算**

HeLa 細胞をナノポーラス金基板上で培養するとアポトーシスが生じ細胞は死んでしまう一方で、フラット金基板ではアポトーシスが誘発されることはない。このことは、ナノポーラス金が細胞と基板の接着を仲介するフィブロネクチンのコンフォメーションに影響を及ぼしていることを示唆している。フィブロネクチンの接着モチーフは、RGD アミノ酸シーケンスであることが知られている。そこで本研究では、ナノポーラス金とRGDアミノ酸シーケンスの相互作用を第一原理計算により調べた。その結果、RGDシーケンスのコンフォメーションはナノポーラス金によって大きく変化することがわかった。ナノポーラス金とDアミノ酸の相互作用と比較したところ、RGDアミノ酸シーケンスの相互作用はDアミノ酸の相互作用より大きかった。これは、RGDアミノ酸シーケンスのほうが分極が大きいためであった。

**水圧破砕法により頁岩中に造成されるき裂の
進展状況の特徴**

非在来型エネルギー資源であるシェールガスは、浸透性の著しく低い頁岩層に賦存するため、開発にはこの層にき裂を造成する水圧破砕法が用いられる。ガスの生産効率を向上させるためには、破砕き裂の形状特徴の理解が求められるが、地下深部に造成されるき裂は観察ができないことから、良く分かっていないことも多い。そこで、破砕流体に蛍光剤を添加した熱硬化性樹脂を用いて室内水圧破砕実験を実施し、実験後に供試体を加熱して破砕流体をその場で固定し、き裂を可視化し観察する手法を開発してきた。これまで、諸々の制約から実験は一軸圧縮状態で行ってきたが、側圧を印加できるように工夫した実験システムを新たに構築し、真三軸圧縮応力状態で実験を行うことを試みた。

実際に操作されている頁岩層である米国産Eagle Ford 頁岩、カナダ産Montney 頁岩の露頭サンプルから得られた供試体を用い、新たな実験システムで水圧破砕実験を行ったところ、いずれの供試体でも破砕に成功した。そこで、側圧（推定されるき裂伸展方向に直交する方向からの側方圧）5 MPa 程度の真三軸圧縮応力状態での実験と一軸圧縮応力状態（側圧0 MPa）の実験で形成されたき裂を観察すると、き裂形状に大きな違いは認められなかったが、真三軸圧縮応力状態で造成されたき裂では分岐が少ないという特徴が示唆された。

教授 馬 淵 守
准教授 袴田 昌高
助教 陳 友晴

エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻

資源エネルギー学講座 資源エネルギープロセス学分野

粗大結晶粒を有する軟鋼の不均一変形挙動に関する結晶塑性有限要素解析

実用的に用いられる鋼材は多結晶材であり、多結晶材の変形挙動を理解することは重要である。しかしながら、すべり系が多い鉄鋼では、多結晶材の複雑な変形挙動のメカニズムの知見は不足している。本研究では、粒径が数十 μm 程度の結晶粒を有する軟鋼板を用いて一軸引張負荷または単純せん断負荷下における不均一変形挙動を実験と結晶塑性有限要素解析により調査した。その結果、帯状にひずみが集中する部分（以下「ひずみ帯」と表記）の境界が部分的に粒内で確認できるものの、ほぼ粒界付近に存在した。ひずみとシュミット因子との間には相関があり、特にシュミット因子が小さい結晶粒でひずみが小さく、その粒界でひずみ帯の境界が確認された。また、ひずみ帯の方向や位置は変形初期に決定され、最大せん断応力の生じる面の方向に生じることが示唆された。また、これはシュミット因子の観点から説明できることが明らかとなった。

（岡 将司，現：JFEスチール株）

軟鋼板の非線形二軸負荷経路下における塑性流動挙動

板材のプレス成形解析の高精度化は、新規の素材や加工法の利用拡大において重要な課題である。通常、塑性流動則として法線則が仮定されるが、法線則は条件によっては適さないという報告がある。昨年度の修士論文では、面心立方構造を有する6022-T4アルミ合金板（以下、A6022板）を対象に、ひずみ経路急変後の塑性流動を観察した。そして経路変化直後は法線則を仮定した場合の参照解と異なる挙動を示すが、最終的には一致することを確認した。そこで本研究では、体心立方構造を有する軟鋼板を用いて塑性流動を観察し、A6022板の結果との比較、また法線則からずれるメカニズムを微視的な観点から調査した。その結果、経路変化後の参照解からのずれは軟鋼板の方がA6022板より小さく、また最終的には参照解と一致することが分かった。両材料でずれの度合いが異なる要因は、与えられた塑性変形に対応するためのすべり系の組合せが軟鋼板よりA6022板の方が少ないからであることが示唆された。

（達川 昂至，現：JFEスチール株）

結晶塑性モデルによるSUS430ステンレス鋼板のV曲げ解析精度の向上

金属板の曲げ加工ではスプリングバックに代表される成形不良に起因して、必要な加工精度を満足することが難しい。そのため数値解析による設計支援が行われるが、その精度は実装業における要求を満足できない場合が多い。そこで本研究では、代表的な鋼種の一つであるSUS430板を対象として、V曲げ初等解析に

おけるスプリングバック予測精度の向上を目的として、解析で用いられる加工硬化曲線の評価に結晶塑性モデルの適用を試みた。まず、種々の材料試験を通して結晶塑性モデルの予測精度を詳細に評価した。また、すべり系の相対活動度を考慮して相互作用パラメータを調整することで、パラメータの最適化を行った。その結果、結晶塑性モデルで予測された加工硬化曲線を用いることで、従来に比べてV曲げ初等解析の予測精度の向上を実現した。

（月原 啓志，現：神戸製鋼所株）

高温金属箔に衝突するポリマー水溶液液滴の沸騰熱伝達特性

金属材料の冷却による熱処理では、冷媒として水や油がよく使用されるが、水溶性ポリマー水溶液（水溶性焼入剤）の使用も増加している。水と油の中間の冷却速度が得られるポリマー水溶液の詳細な熱流動現象は未知であり、最適な冷却条件決定の阻害要因となっている。本研究では、ポリマー水溶液を用いたスプレー冷却法による鋼材の熱処理の基礎研究として、個々の液滴が加熱金属面に衝突するときの伝熱特性を実験により研究した。平均分子量が約20,000のポリマー水溶液液滴を140から600 $^{\circ}\text{C}$ の加熱ステンレス鋼板に衝突させ、その際の衝突点近傍の過渡的な温度変化を量子型放射温度計で測定した。また、比較のために同様の実験を水液滴でも実施した。その結果、水の伝熱量は鋼板の温度依存性が非常に大きい、ポリマー水溶液ではそれが小さく、冷却制御性が良い冷媒であることが確認できた。これは、水溶液中のポリマーが固体表面に皮膜を形成するためである。

（珍坂 涼太，現：パナソニック株）

移動平板に衝突する吹上水膜噴流の冷却特性

鉄鋼材料の熱間圧延工程後の水冷却では、移動する約900 $^{\circ}\text{C}$ の薄鋼板を所定の温度まで板幅方向に均一に冷却することが必要とされている。この冷却では、多数のパイプノズルを板幅方向に一定間隔で配置する方法がよく利用されているが、カーテン状の水膜噴流を利用することもある。本研究では、1.5～4.4 m/sの速度で水平移動する300～600 $^{\circ}\text{C}$ の加熱ステンレス鋼板をカーテン状水膜流で冷却し、そのときの伝熱特性をサーマルカメラによる温度分布計測と3次元熱伝導方程式の逆解析により研究した。実施した全ての実験において板幅方向に比較的均一な冷却特性が得られ、パイプノズルを利用する方法と比較して本冷却法の優位性が確認できた。しかしながら、固体と冷媒の界面に多数の蒸気気泡が発生する核沸騰と呼ばれる流動様式を呈する温度領域では、板幅方向に少なからず温度むらが発生し、かつ、その温度むらは実験ごとに変化した。これはランダムに発生する沸騰気泡のためである。（平尾 卓巳，現：関西電力株）

教授 宅田 裕彦
准教授 浜 孝之

エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻

**資源エネルギー学講座
ミネラルプロセス分野****マイクロ/ナノポーラス材料を用いた曝気システムにおける可溶性ガスの気液間物質移動**

本研究室では、マイクロ/ナノポーラス材料を用いた曝気システムにより、環境汚染物質である水中の有機物質の除去を試みている。しかしながら、有機物量の減少は達成できたものの、そのメカニズムについては不明点が多い。本研究では、当システムでの曝気過程のメカニズム解明の一環として、空気中の可溶性ガスの気液間物質移動と液性の関係について検討を行った。まず、何も添加しない水に曝気した場合のpHと重炭酸イオン濃度の関係を検討した。曝気時間の増加とともにpHは上昇するが、重炭酸イオンはほぼ一定であることが判明した。重曹を添加して同じ試験を行ったところ、同じ傾向を示すことが認められた。大気と平衡にある場合の炭酸化学種の対数濃度-pH図と比較したところ、初期重炭酸イオンによらず、曝気時の平衡値は大気圧下のそれに近づくことが分かった。重炭酸イオン溶液からのCO₂のガス相への放出に関する可逆反応について、本システムによる曝気、散気管曝気、曝気なしの3つのケースで可逆反応速度式に適用して検討した結果、本システムによる曝気は、他の気液間物質移動速度に比べて、極めて短時間で平衡に達することが判明した。

スラグ添加によるメタン発酵の収率向上

メタン発酵とは、メタン菌の作用により食品残渣や下水汚泥などの有機廃棄物を減容化するとともに、メタンを主成分とするバイオガスを獲得するプロセスである。発酵の過程で有機物内におけるタンパク質系の成分はアンモニアに分解され、発酵液に残留する。アンモニアは、高濃度の場合にはメタン生成を阻害するため、有機酸が蓄積してpHが低下し、発酵効率が落ちる。対策として、緩衝作用によりpHを保つために重曹や生石灰(CaO)などを添加する方法がある。本研究では、CaOを含む再利用可能な資源としていくつかの鉄鋼スラグに着目し、それらのメタン菌の増殖活性促進効果を利用し、メタン発酵におけるメタンの収率向上を目指した実験を行った。その結果、スラグ無添加と比較して製鋼スラグ、混合スラグ、高炉スラグでそれぞれ22%、45%、16%増加した。さらに、無添加における最終日までの発生量と同等の量を生成する期間は製鋼スラグ、混合スラグ、高炉スラグでそれぞれ60%、70%、25%短縮された。pHの推移を比較したところ、製鋼スラグと混合スラグの添加系で、CaOの溶出によって有機酸の生成によるpHの低下を緩和

したことが、メタンの生成開始を早め、メタンの収率向上に寄与したことを考察した。

高温移動鋼板へのカーテン冷却の実験的研究

鉄鋼業の熱間圧延工程では、仕上げ圧延後の高温移動鋼板を多数の柱状水噴流で急冷し、材料の組織制御、すなわち熱処理を行っている。この冷却では、温度むらに起因する鋼板の形状不良抑制が技術課題となっている。板幅方向に均一な冷却が可能なカーテン状の水噴流は有効な手段であるとされているが、先行研究が少なく、沸騰熱伝達特性の基礎的な知見は不足している。本研究では鋼板の移動速度と温度が、カーテン状水噴流の冷却特性に及ぼす影響を基礎実験により研究した。その結果、鋼板温度は噴流衝突線近傍で低下し、これは鋼板と冷却水の接触時間が長い低速度条件で顕著であることを確認した。また、噴流衝突による鋼板温度の降下量は初期鋼板温度が300℃の場合の方が、500℃より大きい。これは、300℃では鋼板表面に多数の蒸気気泡が発生する核沸騰の状態になっており、水と固体の局所的な直接接点と、蒸気気泡の攪拌効果による伝熱促進機構が作用するためであり、一方、500℃の場合は固体と冷却水の間に熱伝導率の小さい蒸気膜が存在する膜沸騰、もしくは固体と水の接触がわずかに発生する遷移沸騰であることを認め、カーテン状の水噴流は均一冷却に適していることを指摘した。

**湿式ボールミルによる黒ボク土中の有機団粒の
選択粉碎**

福島第一原発の事故により発生した除染土壌の減容化に分級洗浄法の適用が検討されているが、これは放射性セシウムが細粒分すなわち風化雲母のフレイド・エッジ・サイトに吸着しやすいことを利用したものである。農地土壌中の有機団粒の中に上述の微粒子が内包されているために、粗大な有機団粒を粉碎してその単体分離度を上げることが必須とされている。本研究では、有機団粒の選択粉碎に湿式ボールミルを適用し、粉碎時間、粉碎媒体のボール径が粉碎に及ぼす影響を粉碎工学的に把握することを試みた。ボール径を変えて黒ボク土の解泥・分級試験を行った結果、ボール径が粉碎機構に大きな影響を与えることが分かった。すなわち、15mmボールの粉碎では体積粉碎が優先的に起こっている一方で、3mmボールでの粉碎では粒子表面層を細かく剥がしとる表面粉碎が優先的に起こっていることを認め、より小径のボールを用いて緩やかな解泥を行うことにより、有機団粒の表面粉碎の効率を増大させることができるとことが明らかになった。

教授 藤本 仁
准教授 楠田 啓
助教 日下 英史

工学研究科 材料工学専攻

材料プロセス工学講座 表面処理工学分野

当研究室では、チタン等の非鉄製錬プロセス、新しいタイプの中温型燃料電池、および排熱の有効利用に向けた化学蓄熱技術について、電気化学と熱力学を駆使した研究を展開している。以下に昨年度の研究概略を記す。

チタンの新規製錬プロセス

従来のチタン (Ti) の製造法は生産効率が低く、価格が高いために一般的には普及していない。そこで本研究では、Tiの生産性の改善を目指し、次のような二種類の新しいTiの製造プロセスを研究している。

ひとつ目は、溶融ビスマス (Bi) を用いたTiの新製錬プロセスであり、 TiCl_4 の Mg 還元による Bi-Ti 液体合金の生成、Bi-Ti 液体合金から析出させた Bi_9Ti_8 の回収、および真空蒸留による Bi-Ti 合金からの Bi の除去を組み合わせることで粉末Tiを生産する。このプロセスの研究は各工程の実証実験を終えており、処理量のスケールアップと各工程の効率化など社会実装を想定した実験を進めている。その結果、Bi-Ti 合金からの Bi_9Ti_8 の回収では、細い管を束ねて作製した回収治具を用いることで Bi_9Ti_8 の回収量を向上させることができた。また、合金の真空蒸留については処理時間の大幅な短縮に加え、電子ビーム溶解や PDR 処理と組み合わせることでインゴットや球状粉末が得られることも実証できた。今後、板材等のバルク材としての利用に加え、3D プリンターなどへの応用も期待される。ふたつ目のプロセスでは、 TiCl_2 を含む溶融塩中でのTiの平滑電析によってTiの箔および板材を安価に製造する。これまでの研究で、Mo やグラッシーカーボンといったカソード基板上にTiを平滑に電析させ、基板からTiを剥離することでTi箔を得ることに成功している。ただし、Tiの析出形態は電解液の組成に影響を受けるため、平滑なTiを安定して得ることが難しい。そこで、浴中のチタンイオン濃度や酸化イオン濃度を電気化学的に測定するための手法の開発を進めている。

プロトン伝導性電解質を用いた中温型燃料電池の新規作製法の開発

プロトン伝導セラミックス型燃料電池 (PCFC) は 500–600°C 程度の中温で動作する新型燃料電池である。安価な構造材料が使用でき、コストの低減が期待されることから、水素社会実現に向けて PCFC の実現が望まれている。その代表的な電解質材料はバリウムジルコネート $\text{BaZr}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{O}_3$ (BZY20)、水素極 (アノード) 材料はニッケルである。しかし BZY20-Ni 複合アノードと電解質を 1400–1600°C で共焼結する際に

BZY 中に Ni イオンが拡散し、プロトン伝導率、輸率の低下といった劣化を引き起こすことが問題となっている。そこで本研究では、金属 Ni 多孔体を焼結済み BZY20 電解質と低温で接合することによる新しいセル作製法を開発することで、この問題の解決を試みている。これまでの研究により、多孔質 Ni と BZY20 焼結体の界面に Ni ナノ粒子ペーストを付与し 900–1100°C の熱処理により接合を行うことで、十分な強度の Ni/BZY20 接合体を作製でき、共焼結に比べて電解質への Ni の拡散が抑制されたことが確認された。しかし、作製された燃料電池セルの全抵抗は共焼結による従来のセルより数倍大きいのが現状である。今後は、系統的調査により性能のボトルネックを特定・改善し、最高効率・出力の PCFC を作製することを目指す。

排熱の有効利用のための化学蓄熱材料

化学蓄熱は化学反応熱を利用した蓄熱技術であり、低温排熱の有効利用のための技術として期待されている。しかし、実用上求められる条件 (安全・安価・高蓄熱密度・高繰り返し耐久性・非腐食性) を満たしつつ、低い反応温度域 (250°C 以下) と十分な反応速度を両立する反応系は未だに見つかっていない。ただ、我々が数年前に発見した $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3/\text{H}_2\text{O}$ 系は、100–200°C の温度域で昇降温すると小さな熱ヒステリシスで脱水・水和を繰り返すため、反応速度の観点から有望である。本系の特徴は、単相状態でホストの結晶構造をほぼ維持したまま水の挿入・脱離が進行する点にある。一方、蓄熱密度 (154 kJ/kg) が目標値より1桁小さいという課題もある。そこで本研究では、無機結晶構造データベース (ICSD) のスクリーニングにより、 $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3/\text{H}_2\text{O}$ 系の優れた特徴を有し、高い蓄熱密度が期待できる新規化学蓄熱材候補の抽出を行った。

20 万件程度の無機化合物の結晶構造が収録されている ICSD をスクリーニングした結果、同じ組成をもつ水和物-無水物ペアは 14663 種見つかり、ペアのホスト構造がほぼ同一である系が 22 種見出された。その中で最も高い蓄熱密度が期待される $\text{AlPO}_4/\text{H}_2\text{O}$ 系は、種々のゼオライト類似結晶構造が報告されている AlPO_4 のひとつであり、それらは 100°C 以下で水蒸気を吸脱着するため、一部は吸着材 (AQSOA) として実用化されている。また、 $\text{CaSO}_4/\text{H}_2\text{O}$ 系は化学蓄熱材として既に検討されているものであり、本スクリーニングによって複数の既知有望系が抽出された。これは、本スクリーニング手法の妥当性を示唆する結果である。今後、これまで化学蓄熱材として報告されていない有望系を実験的に評価することで、新しい化学蓄熱材料の発見を目指す。

教授 宇田 哲也
准教授 豊浦 和明
助教 畑田 直行
助教 岸本 章宏

工学研究科 材料工学専攻

材料プロセス工学講座 物質情報工学分野

X線分光をはじめとする分光学、輸送現象論、量子力学などにに基づき、金属材料分析のための新しい分析手法・デバイスの開発、得られた物質情報の解析に関する研究を行っている。以下に研究概略を示す。

【 d_j 法を用いたエネルギー分散型蛍光X線分析による鉄鋼の定量分析】

迅速・多元素同時分析が可能なエネルギー分散型蛍光X線分析(ED-XRF)装置は、小型化・低価格化が加速し簡易分析可能な装置として普及している一方、分析精度の悪化やアナログ信号処理方式からデジタル方式への転換に伴う分析装置の“ブラックボックス”化が進んでいる。当グループでは分析装置の信号処理過程における“ブラックボックス”を詳らかにすることで、ED-XRFを用いた簡易・迅速・精密な分析を目指している。鉄鋼の工程管理分析などの高い精度が要求される分析には、上記の“ブラックボックス”を理由に定量補正法の議論を行うことが難しいED-XRFは用いられず、分析元素に応じた分光結晶を複数台配置した波長分散型蛍光X線分析(WD-XRF)装置を用いた検量線法に基づく方法、 d_j 法が用いられており、この定量法は日本独自の高精度鉄鋼分析手法として規格化されている。一方で、蛍光X線分析の主流がWD-XRFからED-XRFへ置き換わった現在、ED-XRFで得られた蛍光X線スペクトルを基に定量を行なった場合、鉄鋼分析の定量値がどの程度の精度や正確さを有するかを評価しておくことは重要であると考えられる。そこで当グループでは、鉄マトリックス中に存在する共存元素による吸収・励起効果の補正を取り入れた検量線法である d_j 法をED-XRFにより得られた蛍光スペクトルに対して適用した場合に得られる定量精度・確度の評価を通して、試料調製やスペクトルデータ処理などED-XRF測定の高精度を向上するための因子についての検討を行っている。

【最大エントロピー法の蛍光X線スペクトルへの応用】

ED-XRFに用いられる半導体検出器のエネルギー分解能はエネルギー依存性があるため、例えばステンレス鋼中に含まれるクロムやマンガンのようにエネルギー分解能以下の範囲に両方の蛍光X線ピークが観察される元素の定量を行う場合、重なりのあるピークを分離する手法が必要となる。当グループでは、測定されたデータの情報エントロピーが最大になるという条件のもと求められる自己相関をもとに測定データの推定を行う最大エントロピー法(Maximum Entropy Method, MEM)を、従来のフーリエ変換によるデータ処理の代わりに用いることで、蛍光X線スペクトルの高分解能化やスムージングなどの物理計測データ処理に適用することを目指して研究を行っている。

【偏光X線に関する基礎研究】

偏光光学系XRF分析は偏光した入射X線を励起源と

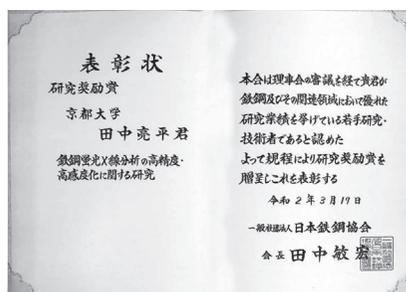
することにより、試料中の微量元素の高感度分析手法として用いられており、励起に用いるX線の偏光度が高いほどバックグラウンドが低減する。当グループでは、Compton散乱を利用した偏光白色X線の生成方法や、鉄スクラップなど未知試料中微量元素分析など実分析への応用を目指し研究を行っている。一般に、偏光度の測定には偏光X線を検出器方向に回折・散乱させるために結晶モノクロメーターが用いられるが、Braggの回折条件を満たす特定のエネルギーをもつX線の偏光度しか測定することができない。そこで白色X線の偏光度測定のために、散乱体として回折を利用しないアクリル板を使用した装置を製作、全エネルギー帯の偏光度の同時測定を行うことで、Compton散乱線の偏光度が弾性散乱線より高くなることを実証した。また、偏光光学系を用いた際に得られる蛍光X線の強度比について、 $3d \rightarrow 2p$ 遷移に伴い生じるX線の強度比に差が生じることを、自作の小型装置を用いて実験的に調べることで明らかにした。

【3Dプリンタを用いた偏光光学系蛍光X線分析装置および全反射蛍光X線分析装置の最適化設計】

機械加工による金属部品と3Dプリンタによる樹脂部品を組み合わせることで、種々の光学系を有する分光装置の試作に取り組んでいる。3Dプリンタで用いる入カデータは数値制御による機械加工で用いられるデータと同形式の3D-CAD(Computer Aided Data)形式であり、今まで機械加工で行っていた装置製作を3Dプリンタによる簡便な方式にそのまま置き換えることができる。そこで、これまでに製作してきた3次元偏光光学系蛍光X線分析装置や全反射蛍光X線分析装置などの白色X線を励起光とする蛍光X線分析装置の感度をさらに高めることを目的とし、3Dプリンタを用いて装置の最適化設計を行なった。樹脂製部品を用いることで金属製部品から生じる妨害ピークを低減、装置内部に空洞を設けバックグラウンドの原因となる樹脂からの散乱線を防ぐことで、従来装置と同程度の精度・感度を有する分析装置を簡便・迅速に行うことができた。

【その他】

田中亮平が(一社)日本鉄鋼協会より研究奨励賞を受賞した。受賞題目は「鉄鋼蛍光X線分析の高精度・高感度化に関する研究」。



日本鉄鋼協会 研究奨励賞賞状

教授 河合 潤
助教 田中 亮平

材料プロセス工学講座
ナノ構造学分野

【機械学習を援用した相図構築の効率化
-ZnSnP₂ 成膜を例に】

データ化学手法を援用した材料開発ではこれまで、コンビナトリアル実験等による大規模データの深層学習や、既に得られているデータを用いたベイズ最適化による、より良い特性を持つ材料の探索が注目されてきた。一方、特に材料開発の初期において、実験回数をできるだけ少なくしつつ詳細な相図（状態図）を描きたいという場面に直面することがある。この問題には一般的に、ベイズ最適化で取り扱うのが難しい。この問題に対処する手法として、能動学習手法のひとつである Uncertainty Sampling を用いた相図構築効率化手法が開発した。ここでいう相図は、いわゆる平衡状態図に限らず、実験パラメータを軸とする相図などにも展開できる。本研究では、分子ビームエピタキシー（MBE）装置を用いた太陽電池材料 ZnSnP₂ の成膜を一例として、開発した手法の詳細な運用方法と有効性について検証した。

本手法ではまず、Label propagation もしくは Label spreading というアルゴリズムを用いて相図中の未実験点がどの相にラベル付けされるかの確率が算出される。この結果を基に、相図中の最も不確かな点が次に実験すべき候補として選定される。その候補の実験を行い、測定結果を加えたデータセットに対して再度プログラムを実行することで相図が描かれていく。この時、相のラベル付けを工夫することで、(i) 着目した層の周りの相境界を決定する、(ii) 見つからない相を早く見つけ出す、等の目的を達成することができる。また、本手法では相のラベル付け規則と探索空間の設定以外には専門家の知識が必要なく、材料開発の初期に最も専門家の時間的コストを要してしまう相図作製を実験補助者に任せることができる。実際本研究では、経験の少ない技術補佐員単独で成膜からプログラムによる次回条件決定まで行ったが、初期データ点と15回の実験だけで ZnSnP₂ 単相の成膜条件決定に成功した。さらに、将来的に相のラベル付けの自動化が可能になれば、相図構築を実験ロボットによって自動で行えるようになる可能性も見込まれる。

【熱力学系のトロピカル極限と非線型性の
幾何学的考察】

合金において、熱力学的平衡状態にある古典離散系としての原子スケールの構造の集合 Q と Potential Energy Surface (PES) の集合 U の対応関係は統計力学平均 ϕ を写像とみたとき、 $\phi: U \rightarrow Q$ と考えることができるが、 ϕ の写像としての性質は十分には理解されておらず、特に $Q-U$ 集合の対応関係は定式化されていなかった。我々のグループは近年、自由度 f の離散系に適当な正規直交系のもとでの座標を導入した f 次元ユークリッド空間上での集合の超体積対応関係を、温度・相互作用に依存しない配位空間上の幾何学的情報のみで決まる「構造自由度における非調和性」というベクトル場 A の divergence と Jacobian を用いて定式化することに成功した。このベクトル場は配位空間上の幾何学で決まる ϕ の非線型性に対応しているが、その振る舞いを解析的に調べることが困難であり、格子の幾何学的情報との直接的な関係も不明であった。この問題を克服するため、我々はまずベクトル場 A の各成分に対する無限級数展開とスピンの対称性による格子上の diagram の選択、および適切な変数変換と極限の処理を行うことで、 A を非負・非零領域での指数型の離散力学系の時間発展として近似的に記述できることを示した。さらにこの離散力学系にトロピカル極限を適用し、その過程で通常失われてしまう格子の幾何学的情報を残す特別なスケール変換を導入することで、時間発展の特徴的な振る舞いを解析的に調べることが可能なトロピカル力学系の構築に成功した。この力学系は完全不規則状態で ϕ が universal に線型写像になるという条件を課すことで全領域で well-defined になる。トロピカル力学系の解析により、不規則状態近傍での線型性の非対称性や基底状態における $Q-U$ 超体積対応関係の singularity と、格子中で考えている自由度の図形で構成される cycle との対応関係を明らかにした。力学系を構築する際に導入した特別なスケール変換に対して具体的な物理的描像を与えることができれば、不規則状態と基底状態の間のさらなる深遠な繋がりを明らかにできると考えられる。さらに、構成粒子に対する空間的な拘束条件（格子など）を弱めることによる線型領域の拡大について、格子の幾何学的情報の観点からその定性的な傾向を明らかにした。

准教授 野瀬嘉太郎

准教授 弓削 是貴

工学研究科 材料工学専攻

先端材料物性学講座
先端材料物性学分野

析出強化多層材料の組織分布の評価

析出強化型のアルミニウム合金の複合材料の材料ならびに熱処理設計のため、多層化したアルミニウム合金板材の組織分布をマイクロビームによる走査小角散乱法により評価した。特性の異なる2種類のアルミニウム合金板の積層化材に対して相互拡散処理により組成勾配を持たせたものを試料とし、人工時効による析出物分布と強度分布の関係を調べるとともに、塑性変形下での組織の走査解析を試みた。さらに角柱形状の多層材の断面2次元組織分布を可視化するための手法として散乱トモグラフィー法をAl/AlZn積層材に対して試み、通常の吸収トモグラフィーによる組成分布に対して散乱トモグラフィーから得られる積分強度2次元分布は固溶体領域部分に積分強度分布が現れず、析出物体積率分布を与えていることが示された。

MgYZn のLPSO 組織形成過程における積層欠陥導入をとまなう変態動力学

長周期積層秩序構造を形成するMg基合金の典型例としてMgYZn 3元合金の昇温過程での組織形成を検討してきた。MgYZn合金に対する放射光での小角高角その場同時測定により、アモルファスMgYZnの結晶化直後は過飽和hcp過飽和微結晶であること、クラスター配列の異方化の進行と同時にhcp回折線の消滅、LPSO化が進行することが示された。この過程において、hcpの積層秩序破壊とLPSO形成は同時には進行せず、hcp積層秩序の破壊によって形成されるのは短範囲積層秩序状態であることを明らかにした。すなわち、組織形成過程において準安定的に短範囲積層秩序状態が実現されること、その面内構造はLPSOと同等であることが示唆される結果となった。また、積層欠陥の導入の速度論的な解析をおこなった結果、等速昇温過程では構造相転移温度のような振舞いにみえた積層欠陥導入過程が共同現象的な相転移ではなく、ランダムな核生成あるいは成長によって引き起こされる、一定の活性化エネルギーを有する過程であることが明らかとなった。これはLPSO形成において優先的に形成される秩序が2次元的な配列秩序であることを示唆する結果であり、MgYZnのLPSO相としての長周期積層秩序形成後にも一貫して見られるクラスター間距離の連続的な変化を2次元系として取り扱う正統性を示す結果であると考えられる。

軟X線共鳴SAXS及びGISAXS解析

深さ分解GISAXS法や1keV領域での共鳴散乱測定を定量化するための装置開発と解析を進めている。今年度は1.3keV領域での2次元計測定量化を目的としてAlMg合金の2次元透過散乱強度の定量化を目指し、Mg-K吸収端での共鳴小角散乱強度のエネルギー依存性および析出組織の異方性の検討をおこなった。比較的長時間熱処理を施したAlMg合金については短時間熱処理では当方的なリング状散乱パターンであったものが明確な異方性を持つように変化すること、その強度のエネルギー依存性は文献値から計算されたものといふ一致を示す結果が得られた。

貴金属表面への炭素蒸着によって形成されるナノ構造の観察

Au, Agなどに炭素蒸着を行うと、非常に形状の揃った炭素ナノ構造が形成される場合がある。我々はこの構造がC₂₀フラレンの1次元重合体であるという仮説を立て、STM(走査トンネル顕微鏡)による研究を継続している。この構造は表面への吸着が弱くSTMでは原子分解能が得にくく、このためSTM像から直接構造を決定することが出来ていない。またex-situでの赤外分光測定法は非常に再現性が悪くこちらからも完全な構造の決定に至っていない状況である。このようなことから、STM/STSによる電子状態測定と電子状態密度計算のシミュレーション結果を比較することで、構造の同定を試みている。また、本年度は蒸着条件を変更し、形成される構造の変化を観察した。我々の炭素ナノ構造はアークプラズマガン(APG)と呼ばれるカソードアークの1種を用いて表面への炭素の導入を行うことで生成される。導入の際に試料電圧を加えたところ、形成される構造の形態に変化が現れることが明らかになった。

3次元アトムプローブとSTMの複手法の開発

STMは試料表面を非常に高い空間分解能で観察できる手法である。試料内部の原子配列を保持した表面を作製することができれば、試料内部の局所的な構造を観察することが可能になる。一方3次元アトムプローブには高い元素識別能力がある。この利点を生かせるSTMを3次元アトムプローブと併用する測定手法の開発を進めている。

昨年度より高空間分解能を目指し、multi-tipの最適化を試みている。本年度はW(111)面上に1~2ML Ptを蒸着することで得られる(112)ファセットからなるナノピラミッドをSTM探針として使用することで、高空間分解能を目指した。W(111)清浄表面を得るための操作を既存の装置で行うことが困難であったため、新たに専用の装置を構成し実験を行った結果、この手法で通常のSTM観察に遜色のない空間分解能を発揮できることを示すことができ、手法の開発に成功した。なお、予想されていたことであるが、十分な空間分解能を得るためには原子オーダーで平坦な表面を得る必要がある。これには試料の方位を制御する必要がある。また形成される平坦面の面積は表面エネルギーに依存している。このようなことからまずは層状構造をもつ試料の理想表面を得る手法として応用を開始する。また応用を考えた場合、手順の最適化・簡素化も非常に重要であり、本年度はこれにも取り組む予定である。

さまざまな試料のSTM観察

STMでは他の手法で得られない情報を得られる場合があり、多くの試料への応用が期待される。本年度は非鉄製錬学講座谷ノ内特任准教授との共同研究として、CuFeS₂表面のSTM観察の研究を開始した。これは銅鉱石であるCuFeS₂からの銅の湿式抽出プロセスの詳細を解明するためである。本年度は手始めに超高真空中での劈開を行いその表面で原子分解能観察に成功した。実際の処理過程でもCuFeS₂鉱石は破砕によって微粉末化されるため、本研究で得られた情報は非常に有用であると思われる。

准教授 奥田 浩司
准教授 黒川 修

工学研究科 材料工学専攻

材料物性学講座 量子材料学分野

化合物における系統的な不変量を用いた 材料物性予測モデルの構築

機械学習手法を用いた材料探索においては、化合物や予測対象の物性が持つ対称性を考慮した特徴量を導入することが重要である。本研究では、結晶構造や元素種の情報を同時に表現可能な不変量の作成手法について検討した。第一原理計算による形成エネルギーおよび凝集エネルギーの2つの物性データに対して、元素および結晶構造特徴量を用いて物性予測モデルを構築した。形成エネルギーのデータを対象とした場合、元素種に依存する動径関数を用い、原子間距離を表現する特徴量、2次の回転不変量を用いたモデルの予測誤差は0.104 eV/atomとなり、良い予測モデルが得られた。凝集エネルギーのデータでも同様の結果が得られ、本研究提案手法は材料探索のためのモデル構築に有効であることが示された。

未知構造探索を目的とした結晶構造列挙手法の開発

既存の構造列挙手法では、構造を全列挙したのち、結晶の対称性に関して非等価な構造を選びだすため、全列挙する部分が計算のボトルネックとなり、手法を適用できる規模が限られていた。一方、制約を満たす一部分だけを列挙するデータ構造が近年注目されている。このデータ構造を結晶構造列挙の問題に応用することにより、対称性に関して非等価な結晶構造だけを効率よく列挙することを検討した。具体的には、対称性に関して非等価な組み合わせを表すZDDを構築するアルゴリズムを導入し、結晶構造集合を表現するZDDを構築する手法の開発を行った。手法の有効性を検証するため、FCCおよびHCP構造由来の構造を表現するDDを構築した。その結果、ZDDを使わない場合、列挙できる構造数は約 10^{10} 個であるのに対し、ZDDを使った場合には約 10^{17} 個もの構造を列挙可能であった。ZDDを用いることにより、効率的に広い範囲で結晶構造列挙が行えることが示している。

新規酸化物の探索に適した 流通式超臨界水熱合成装置の開発

一般的に酸化物の合成手法として用いられる固相反応法に比べて合成に必要な時間が短く、粒子生成から結晶化までを同一反応場・単一工程で行える流通式超臨界水熱合成法に着目した。本研究では、多種多様な原料の組み合わせや合成条件における予測酸化物の合成実験を効率よく行い、その運用方法の検討および合成物の特徴について考察した。 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} など二種類の陽イオンと酸化物イオン O^{2-} により構成される擬二元系酸化物の合成実験を行った。28件の実験のうち、4件において目標の擬二元系酸化物が得られた。

中でも、 $\text{Sr}(\text{NO}_3)_3$ とperoxo-Taを原料とした合成物の粉末XRDプロファイルは、未知のXRDプロファイルであり、立方晶パイロクロア型の結晶構造を有する新相の $\text{Sr}_2\text{Ta}_2\text{O}_7$ であることが判明した。立方晶パイロクロア型の $\text{Sr}_2\text{Ta}_2\text{O}_7$ は、第一原理計算の結果によると準安定であり、流通式超臨界水熱合成法により準安定相が得られたと考えられる。

合成条件データベースの構築と推薦システムに 基づいた新規擬三元系酸化物の探索

機械学習の一種である推薦システムを合成実験データに適用することで新規擬三元系酸化物の効率的な探索を試みた。また、複数の試料を同時に合成する並列化を効率的に行うため、前駆体に金属有機構造体(MOF)を用い、前駆体の作製時間を大幅に削減することを試みた。MOFのリンカーの候補として様々な有機物が存在するが、多様な金属元素と短時間でMOFの合成が行えるなど、実験効率の観点から4,4'-bipyridylを選択した。複合酸化物の合成能力の評価を錯体重合法と比較することで行った。その結果、錯体重合法によって擬二元系酸化物の合成に成功した実験条件20件中17で合成に成功した。さらに前駆体の作製時間を錯体重合法の20分の1未満に削減できたことから酸化物の効率的な並列合成法として有効と考えられる。また、合成条件データベースの作成と推薦システムの構築を行った。推薦上位に対する実験を行った結果、 BiInWO_6 を目標物質とした系から未知のXRDプロファイルが得られ、既存の化合物である BiLaWO_6 に似た構造を持つ新規複合酸化物 BiInWO_6 であることが判明した。

転移学習による物性予測モデル構築の 高効率および高精度化

機械学習を用いた材料探索においては、利用可能な既知データ数が非常に少ないことが課題である。大多数の物性に該当し、構築可能な予測モデルの精度は低く、効率的な探索ができないという状況が一般的である。本研究では、このような状況を想定し、対象とする物性以外に、他の物性や物質のデータを利用する転移学習を検討し、その有効性を検証した。第一に、大規模データである凝集エネルギーデータを利用し、データが少数である二種類の物性(格子熱伝導率、融点)に対する予測モデル構築を行った。第二に、31種類の単体を対象とした結晶構造の全エネルギーのデータを用いた、1種類の単体を転移学習による予測対象として、他の単体のデータを利用し、モデル構築を行った。その結果、場合によってはモデルの予測精度が悪化することもあるが、適切なデータを選択することにより、転移学習が有効であることが示された。

教授 田中 功
准教授 世古 敦人
助教 林 博之

工学研究科 材料工学専攻

材料物性学講座
結晶物性工学分野

Cr-Co-Ni等原子量合金単結晶の力学特性

ハイ/ミディアムエントロピー合金(H/MEA)とは複数の構成元素をほぼ等原子量ずつ含む单相固溶体合金であり、なかでもFCC構造を有するCr-Co-Ni等原子量MEAは室温から低温の温度域でもっとも秀でた強度・延性が共存することが報告されている。本研究ではCr-Co-Ni等原子量合金の単結晶材に対し機械試験を行い、この合金の優れた力学特性の起源を明らかにすることを試みた。圧縮試験の結果、この合金のすべり系は、従来のFCC合金のすべり系と同様に(111)[-101]であり、部分転位の分解幅より算出された積層欠陥エネルギーの値は従来のFCC合金に比べ比較的小さい値であった。また、臨界分解せん断応力(CRSS)は強い温度依存性を示し、固溶強化における熱活性化機構が顕著であることが示唆される。破断後の試験片のTEM・STEM観察では、変形双晶と変形誘起マルテンサイトが確認され、これが高延性に寄与していると考えられる。

カゴメ構造を有する σ -FeCrと α -Mn単結晶の室温塑性変形

近年、 σ 相やLaves相といった硬質金属間化合物が構造材料中の強化相として見直されるようになり、これらの塑性変形挙動の理解に対する要求が高まっている。本研究ではこれらの硬質金属間化合物の結晶構造に共通してみられるカゴメ網面型の原子配列に着目し、カゴメ網面型原子配列構造を持つFe-Cr系 σ 相と α -Mnについて、その室温塑性変形挙動を単結晶マイクロピラー圧縮試験法により調査した。その結果、Fe-Cr系 σ 相と α -Mnのいずれについても室温での塑性変形を確認し、活動するすべり系を特定するとともに、各すべり系の臨界分解せん断応力のサイズ依存性を明らかにした。同定したすべり系のうち、すべり方向がカゴメ網面に垂直である場合に活動する転位は、通常の金属材料で観察される転位とは異なり非常に複雑な転位芯構造を有することを実験的に明らかにした。

高次規則度を有するFe₂Al₅金属間化合物の結晶構造解析

自動車の排気系部品などに用いられる溶融Alめっき鋼板では η -Fe₂Al₅が優先的に形成される事が知られている。一方、c軸chainの規則化によっていくつかの規則相が形成されることがわかり、それぞれ η' 相、 η'' 相、 η''' 相、 η_m 相と名付けられた。しかし、 η''' 相は粉末X線回折による結晶構造解析が行われたのみであり、 η_m 相については結晶構造が明らかにされて

いない。本研究では、この2相について電子顕微鏡観察を用いて詳細な結晶構造の解析を行った。その結果、 η''' 相については2倍周期の超構造を基本構造として(001)_{C_{mcm}}面をAPBとした7倍周期の長周期逆位相構造をとると考えられた。さらに、STEMを用いた原子配列の観察により、その構造の空間群はP2₁/mと推測できた。また η_m 相についても、電子回折図形の解析から2倍周期の超構造を基本構造とした長周期逆位相構造をとると考えられる。

MoSi₂/Mo₅Si₃共晶一方凝固材の力学特性に及ぼす結晶育成条件と添加元素の影響

Ni基超合金に代わる次世代の高温構造材料の候補として、1900℃と高い共晶温度を有し一方凝固により微細なスクリプトラメラ組織を呈するMoSi₂/Mo₅Si₃共晶合金に注目し、その室温靱性と高温強度の向上を目的として、均質微細な組織を得るための最適な結晶育成条件の探索および複合元素添加の影響について調査した。熱源としてハロゲンランプを備えた光学式浮遊帯域溶融(FZ)装置を用いた場合には凝固速度の上昇に伴い、ラメラ間隔が不均質なセル状共晶組織の発達が見られたのに対し、出力・集光度が高いキセノンアークランプを備えたFZ装置を用いることで、第3、第4元素を添加した合金においても速い凝固速度においても均質微細なラメラ組織を得ることに成功した。得られた合金は二元系合金と比べて室温破壊靱性値と高温強度特性が同時に大幅に向上していることを確認した。

熱弾性型マルテンサイト変態における核生成と成長のダイナミクス

熱弾性型マルテンサイト(M)変態において等温変態の存在が実験的に認められてきたが、無拡散変態であるM変態においては熱活性化機構の存在については不明瞭な点が多く、時間軸を考慮したM変態ダイナミクス理論の構築が求められている。本研究では、核生成プロセスを有しない応力誘起M変態を示すTiNi合金および正変態過程において核生成プロセスを有する磁場誘起M変態を示すNiCoMnIn合金を用いて等温変態挙動の調査や実空間観察を行い、M変態に寄与する熱活性・非熱活性成分の役割を核生成および成長の両観点から評価することを目的とする。いずれの変態においても熱活性化過程が認められる温度域において等温変態を示すことが確認され、その挙動が時間軸を考慮した熱活性化理論により変態方向に依らず同一の式で説明できることが明らかとなった。

教授 乾 晴行
准教授 岸田 恭輔
助教 新津 甲大

工学研究科 材料工学専攻

材料物性学講座 構造物性学分野

Co-Cr-Ni系 Medium Entropy Alloyの室温変形挙動と積層欠陥エネルギー、摩擦応力の関係

Medium entropy alloy (MEA) は、2-4種類の合金元素をほぼ等モル分率で混合した高濃度固溶体である。その中でCo-CrNi系MEAは優れた強度・延性バランスを有するため注目を集めている。本研究では、摩擦応力と積層欠陥エネルギー (SFE) がCo-Cr-Ni系MEAの力学特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。高い摩擦応力を有するCo-Cr-Ni系MEA、および同程度のSFEだが低い摩擦応力を有するCo-Ni系合金の変形挙動と変形組織を調べた。Co-Ni系合金と比較して、Co-CrNi系MEAではplanarな転位組織の形成と多量の変形双晶や変形誘起マルテンサイトの生成によって高い加工硬化能が得られることが分かった。以上の実験結果は、Co-CrNi系MEAにおける高い摩擦応力が転位の交差すべりを抑制し、変形双晶・変形誘起マルテンサイトの生成を助長していることを示唆している。

種々の粒径を有する希薄Mg-Y二元合金の力学特性に及ぼす変形温度の影響

Mg合金において、結晶粒微細化およびイットリウム (Y) 添加は、強度および延性を向上させる有効な手法である。本研究では、Mg-0.1 mass% Y合金の力学特性に及ぼす結晶粒径と変形温度の影響を調べた。高圧ねじり加工と焼鈍処理により様々の平均結晶粒径を有する試料を作製し、室温および液体窒素温度において引張試験を行った。全ての試料が、液体窒素温度では室温と比較して非常に高い加工硬化率を示した。微細粒材では室温において限界すべりが確認された一方、液体窒素温度では限界すべりが抑制された。また、微細粒材では液体窒素温度において変形双晶および $\langle c+a \rangle$ すべりが室温変形と比較して活発に働き、それによって低温における加工硬化率が增大することを明らかにした。

焼きもどしマルテンサイト鋼の水素脆性挙動におよぼす変形の影響

水素脆性とは材料中に水素が侵入することによって材料が著しく脆化する現象である。高強度鋼板を構造材料として幅広く実用化していくためには、水素脆性と変形の相関を系統的に調べるのが重要である。本研究では、高強度鋼である焼きもどしマルテンサイト鋼を用いて、予変形量と水素脆性特性の相関を明らかにすることを目的とした。予変形量の増大に伴い、導入される拡散性水素量が増加した。拡散性水素量が同一の場合、予変形量が増加するにつれて全伸びと最大応力が高くなる傾向が確認され、予変形により水素脆化感受性が低下することが示唆された。この結果は、予変形を加えると水素脆性が促進されるという先行研究の結果と相反する結果である。異なる水素導入環境と予変形付与時の変形モードが水素脆化感受性に影響を及ぼした可能性が考えられた。

種々の結晶粒径を有するCu-Zn二元合金の力学特性と変形メカニズム

金属材料の強度と延性は一般にトレードオフの関係

を示すが、積層欠陥エネルギーが低い面心立方構造を有する金属材料は優れた強度-延性バランスを示す。本研究ではCu-Zn二元合金を用いて、超微細粒を含む種々の結晶粒径材の力学特性と変形機構を調べた。HPTによる巨大ひずみ加工とその後の焼鈍処理により、平均結晶粒径が $12.2\mu\text{m} \sim 0.23\mu\text{m}$ の完全再結晶微細粒組織を得ることに成功した。同程度の平均結晶粒径を有するCu-30mass% Zn合金は、Cu-10 mass% Zn合金よりも高い強度と大きな延性を示すことがわかった。変形組織観察の結果、いずれの合金においても結晶粒微細化に伴って変形双晶の量が増加することがわかった。これらの結果により、加工硬化挙動を含む変形機構は結晶粒径に依存して大きく変化することが明らかとなった。

強度比の異なるフェライト+マルテンサイト二相鋼の局所変形挙動

軟質なフェライト相と硬質なマルテンサイト相からなる二相鋼は、優れた強度延性バランスを示す。その優れた力学特性は、微視組織に由来すると考えられるが、微視組織レベルにおける変形の様子は十分に理解されていない。本研究では、二相鋼におけるフェライト相とマルテンサイト相の強度を変化させ、画像相関 (Digital Image Correlation : DIC) 法を用いて各相の局所変形挙動を定量的に調査した。試料として、二相域焼鈍後水冷で得られたDP材と、それを 400°C で焼き戻しを施した焼き戻しDP材を作製し、軟質相と硬質相の強度比の異なる試料の変形挙動を解析した。DP材は高い加工硬化能と高い引張強度を示した一方、焼き戻しDP材は低い強度と大きな局部伸びを示した。DIC法を用いてひずみ分布を調べた結果、DP材においては塑性ひずみがフェライト相へ集中する一方、焼き戻しDP材においては両相がより均一に変形した。以上の結果より、DP鋼における二相の強度比は、局所変形挙動と局部伸びなどのマクロ変形に大きく影響を与えることが明らかになった。

$\alpha + \beta$ 型チタン合金の機械的性質と破壊に及ぼす微視組織の影響

室温近傍で α 相と β 相の二相が安定な $\alpha + \beta$ 型チタン合金は、優れた強度-延性バランスを示し、鍛造・圧延加工性にも優れる。本研究では、典型的な $\alpha + \beta$ 型チタン合金であるTi-6Al-4Vを用いて、種々の加工熱処理による組織形成とそれに伴う引張変形・破壊挙動の変化を調べた。種々の条件下の加工熱処理により、 $57.5\mu\text{m} \sim 234\mu\text{m}$ の平均コロニーサイズを有するラメラ組織とバイラメラ組織が得られた。室温引張試験の結果、ラメラ組織試料の場合にはコロニーサイズが減少しても局部伸びはほとんど変化しなかったが、バイラメラ組織試料においては局部伸びは組織微細化とともに大きく増加した。破壊挙動を調べた結果、ラメラ組織とバイラメラ組織とではクラックの発生場所と伝播の様相が異なることが明らかとなり、局所伸びの変化に大きな影響を与えることを見出した。

教授 辻 伸泰

准教授 柴田 暁伸 (2020年5月 物質・材料研究機構(NIMS)に転出)

講師 高 斯

助教 白 玉

ESISM特定助教 朴 明駿

工学研究科 材料工学専攻

**先端材料機能学講座
先端材料機能学分野**

鉄鋼，鋳鉄，Ni基超合金，アルミニウム合金などは実用材料として利用されているが，高温の凝固現象は実証的に理解されているとは言い難い．本研究室では，SPring-8などの大型放射光施設で利用可能な硬X線の特長を活かしたX線イメージングによる時間分解・その場観察の手法を開発し，観察に基づいた実証的知見から凝固現象の基盤的な学理の構築，また工学的応用を目指して研究を行っている．最近の研究では，観察手法に時間分解トモグラフィー（4D-CT）を用いて金属合金が三次元的に凝固する様子その場観察を目指している．今回は物理現象に基づく画像解析技術の開発，時間分解・その場観察によるFe系合金のマッシュ的変態現象の評価，X線イメージングを用いたハイエントロピー合金の凝固現象の定量解析，Al-Cu合金の固液共存体の変形の三次元解析について紹介する．

物理現象に基づく画像解析技術の開発

4D-CTを用いた直接観察では，三次元像を得るために透過像を再構成することが必要である．しかし，再構成によって画像にノイズが付加され，本来の固液界面形状を再現するには困難があった．そこで，本研究室ではフェーズフィールドの概念に基づく画像解析手法を開発し，Al-Cu合金の直接観察の結果に画像処理を行うことで固液界面の曲率から必然的な界面形状を得ることに成功した．これにより，三次元の組織を定量的に観察・測定できるようになった．最近では，炭素鋼やAl合金の実用合金に近い組成での観察を試みている．これらの実用合金は固相と液相の区別がつきにくく，必ずしも観察には適していない組成であることが多いが，凝固組織を再現できるような解析手法が出来つつある．また，鋳鉄やNi基超合金においても，凝固過程における組織形成を実証的に明らかにした上で工学的応用を目指している．

**時間分解・その場観察によるFe系合金の
マッシュ的変態現象の評価**

時間分解・その場観察により，炭素鋼の凝固過程において，従来考えられてきた「包晶反応」は実際の凝固条件では選択されず，マッシュ的変態によって δ 相から微細な γ 相が形成されることが明らかになった．このマッシュ的変態の選択が，オーステナイト組織の形成や鋳造欠陥に関係することも分かった．また，凝固条件によってマッシュ的変態により得られる微細なオーステナイトの粒界やオーステナイト/フェライト

のヘテロ界面が溶解してデンドライトが分断し組織が微細化することを明らかにし，マッシュ的変態が材料の組織制御に利用できる可能性を示した．最近では，炭素鋼以外にステンレス鋼の凝固過程でもマッシュ的変態が選択されることが時間分解・その場観察により分かっており，炭素鋼の場合との組織形成の違いについて検討を進めている．

**X線イメージングを用いたハイエントロピー合金の
凝固現象の定量解析**

5種類以上の元素が等モル分率で混合したハイエントロピー合金の凝固現象に関して，従来の溶質濃度の小さい合金や母相に高濃度に溶質が添加された高合金との類似点や相違点は不明である．そこで，SPring-8の高輝度X線による蛍光X線その場測定を用いて，CrMnFeCoNiハイエントロピー合金の固液界面での各元素の分配を定量的に評価した．また，熱分析により固相線温度と液相線温度を決定した．実験結果から，凝固パスに沿った形でCrMnFeCoNiハイエントロピー合金を擬二元系としてみることが可能であることが分かった．この擬二元系に沿った組成で系統的に各元素の分配を評価した結果，Mnを除く4元素の偏析が小さくなる組成があることが分かった．この結果に基づいてMnを除いたCrFeCoNi合金について，偏析フリーとなるような組成探索を行なっている．また，従来合金の凝固組織形成との類似点，相違点についても4D-CTによる解析を行っている．

Al-Cu合金の固液共存体の変形の三次元解析

鋳造時のマクロ偏析や欠陥の原因の一つに固液共存体の変形によるせん断帯の形成が挙げられる．従来では，固相粒子間の液相の流動によって偏析が形成されると考えられてきたが，固液共存体の変形その場観察によって固相粒子の運動と液相の流動が独立して起きることを明らかにしている．ただし透過観察では固相粒子の運動の自由度が制限されていた．そこで4D-CTと三次元結晶方位解析（3DXRD）を組み合わせた三次元の観察手法を開発し，固液共存体の三次元での変形過程の定量的な解析を目指している．これまでに，変形によって形成されたせん断帯近傍の固相粒子の運動を定量的に評価できるようになっている．また，観察に基づいて固液共存体の特徴を再現する新しい物理モデルを提案し，数値計算によって固液共存体に特有のせん断に対する不安定性やせん断の局在化などを再現できるようになった．時間分解・その場観察と連携させて提案モデルの妥当性や，鋳造時の割れ，偏析などの課題の解決を目指している．

教 授 安田 秀幸
助 教 鳴海 大翔

工学研究科 材料工学専攻

材料機能学講座 磁性物理学分野

熱伝導・熱ホール効果測定による 非自明な磁気・電子状態の研究

近年、フラストレート磁性体やワイル電子系など、カイラルな磁気・電子状態を有する可能性のある物質が注目を集めている。このような物質の非自明な磁気・電子状態を調べるためには、種々の伝導特性を調べることが有効である。本研究では、荷電粒子である電子だけでなく、非荷電粒子であるマグノンやフォノンの伝導も観測できる熱伝導・熱ホール効果測定のための装置を開発し、カゴメ格子磁性体 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ を対象として測定を行なった。その結果、 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の熱伝導には伝導電子以外の寄与、特に低温ではマグノンの寄与が大きいこと、熱ホール効果は観測されるが、電気伝導の異常ホール効果から期待されるよりはるかに小さく、伝導電子とマグノンの熱ホール効果への寄与が逆方向に働き相殺している可能性があること、などが分かった。

Co-shanditeの低磁場ホール効果測定

シャンダイト型遷移金属化合物 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ (Co-shandite) は、磁性原子である Co がカゴメ格子を形成する金属強磁性体であり、キュリー温度 $T_C = 177$ K 近傍における磁化温度曲線の窪みや非常に遅い磁気ダイナミクス等の“異常磁気挙動”が報告されている。ごく最近のローレンツ顕微鏡による磁区観察により、この異常磁気挙動は、磁壁の運動の活発化による磁区の自発的な再組織化（バブル磁区形成）と関係している可能性が指摘された。本研究では、再組織化された磁区がトポロジカルに保護された、所謂“スカーミオンバブル”である可能性を調べるために、Co-shandite のホール抵抗測定を行い、スカーミオンのもつカイラリティの観測を試みた。その結果、強磁性領域の広い温度範囲で負のトポロジカルホール抵抗を、 T_C のごく近傍で大きな正のトポロジカルホール抵抗をそれぞれ観測した。この結果は、Co-shandite はカイラルな磁区組織を形成していること、 T_C 近傍での磁区組織再編によりカイラリティの符号の変化が起こっていること、などを示唆しており、 T_C 近傍のバブル磁区がスカーミオンバブルである可能性があることが分かった。

立方晶ラーベス相化合物 ZrFe_2 の六方晶化と 磁気異方性の発現

希土類フリー磁石の母材として、安価な元素で構成されている Fe 基金属間化合物が期待されている。磁気異方性の起源を結晶構造に求める場合には、六方晶や正方晶の化合物である必要がある。 ZrFe_2 は C15 ラー

ベス相構造で比較的高いキュリー温度を有する強磁性体であり、高温に六方晶相が存在する。本研究では、熱処理条件の検討及び元素添加により、六方晶相の安定化を試み、その磁性評価を行った。結果、Sb 添加及び急冷により六方晶相試料の合成に成功した。またその飽和磁化、異方性磁界はそれぞれ 0.77 T, 0.24 T であり、磁氣的硬さ指数は 0.6 と見積もられた。実用磁石に向けてはさらなる磁気異方性の向上が課題である。

η -carbide型 Zr 系酸化物の磁性

η -carbide 型化合物は、磁性原子が四面体を基調とした星型四面体格子を内包し、幾何学的フラストレーションの観点から注目されている物質群である。従来 η -carbide 型化合物の磁性は主に Fe を含む化合物について研究されてきたが、より強い反強磁性相互作用が期待される Cr, Mn を含む化合物の開拓が望まれる。これまでに知られている Cr, Mn が星型四面体格子を形成する化合物は $\text{Zr}_3\text{Cr}_3\text{O}$ 及び $\text{Zr}_3\text{Mn}^3\text{O}$ のみであり、その物性は不明であった。本研究では η -carbide 型 Zr 系酸化物 $\text{Zr}_3\text{Cr}_3\text{O}$ 及び $\text{Zr}_3\text{Mn}_3\text{O}$ の合成を試み、その磁性を調査した。それぞれ単相化には至らなかったものの物性評価が行える程度の試料を得ることができ、それぞれ Pauli 常磁性、反強磁性体であることが判明した。 $\text{Zr}_3\text{Mn}_3\text{O}$ については、その期待される非自明な磁気構造の解明が今後の課題である。

高保磁力材料 La-Co 共置換 SrM フェライトに対する 第三カチオン置換の磁気異方性への影響

M 型フェライトは価格優位性や化学的安定性から、広範に用いられている永久磁石材料である。近年高性能フェライト磁石として、SrM 型フェライトに、 La^{3+} - Co^{2+} を置換したものが用いられている。 Co^{2+} はある特定の結晶学的サイト（四面体サイト）の Fe^{3+} と置換した場合に、保磁力の起源となる一軸異方性を示すが、通常の合成法では Co^{2+} は一軸異方性の向上には寄与しないサイト（八面体サイト）にも置換し、その一部しか効果的に活用されていない。本研究では Co^{2+} の四面体サイト選択性を向上させるために、八面体サイト選択性の強いイオン M^{3+} (Al^{3+} , Cr^{3+} , Mn^{3+}) の追加添加効果を検討した。La, Co, M を加えた SrM 型フェライトの単結晶試料を合成し、その磁気異方性を評価したところ、Cr を添加したものでは磁気異方性が低下した一方で、Mn を加えたものは磁気異方性が向上した (Al は磁気異方性は変化せず、飽和磁化が低下した)。詳細な機構の解明はこれからの課題であるが、Mn 追加添加は性能改善に有効であると考えられる。

教授 中村 裕之
准教授 田畑 吉計
助教 和氣 剛

工学研究科 材料工学専攻

**材料機能学講座
材質制御学分野****・酸性濃厚溶液の電離度**

超強酸の超濃厚水溶液におけるイオンの電離度を評価した。55.5 mol kg⁻¹ HN(SO₂CF₃)₂ (HTf₂N) 水溶液、すなわち HTf₂N-H₂O の等モル混合物の酸解離の様相を明らかにした。浴物性測定、Raman 分光測定および NMR 分光測定を行うことで、HTf₂N 水溶液中に存在する化学種と、それらの間の相互作用について検討した。55.5 mol kg⁻¹ HTf₂N 水溶液中においては Tf₂N⁻ アニオンに関連する化学種のうち酸解離していない HTf₂N が約 60% 存在することが示唆された。強酸であっても超濃厚状態では完全解離しないことを示した。

・CuO/Cu₂O 積層薄膜の湿式形成とその評価

光電極などで注目される CuO/Cu₂O 積層薄膜の水溶液中での形成プロセスを検討した。あらかじめ電析した Cu₂O 薄膜を部分的にアノード酸化する方法、もしくは電析 Cu₂O 上に CuO 層をさらに電析する方法を試みた。1 M 水酸化ナトリウム水溶液中でのアノード酸化による作製に成功したが、CuO 層の吸収波長域での量子効率を低く、キャリア再結合中心となる格子欠陥が多く存在すると示唆された。膜厚の制御が難しいこと、膜が緻密でないなどの問題点も存在した。CuO の電析による作製では、まず、Cu₂O を腐食することなく CuO の電析が可能な配位子を熱力学データベースから探索した。2-アミノエタノールを選択し、実際に Cu₂O を腐食することなく CuO 電析が可能であった。加えて、従来の熱酸化法や上述のアノード酸化法で得られた積層薄膜とは対照的に、緻密な層を形成できた。

・銅電解精製における異常析出の促進要因

銅電解精製の電流効率は 93~98%にとどまるが、電流ロス的主要因素はカソード表面にコブ状の異常析出物（ノジュール）が発生、成長しアノードと短絡することである。本研究では、異常析出の成長促進要因の解明を目的とした。実操業から回収されたノジュールのうち、平型形状のノジュールは前工程から持ち込まれた 5~20 mm 程度の大きさの残留離型剤を核としていた。一方、丸型形状のノジュールの断面観察から、不純物粒子には電析組織の成長方向を変化させ、凸部を

形成させる効果があると示唆された。また、電気銅についたままのノジュールの断面観察も行った。電気銅表面に形成されている筋状のシームが深さ 5 mm 程度まで続いており、ノジュールの内部には途中で途切れているシームが存在していた。結晶ごとの成長速度の違いによりこのシームが淘汰されてノジュールが発生すると考えられる。

・MgB₂ 薄膜の湿式処理による超伝導特性の改善

高い転移温度 ($T_c = 39$ K) を持つ合金である MgB₂ 超伝導体は、臨界電流密度 J_c が低いのが課題である。本研究では、Si 基板上に電子ビーム蒸着した MgB₂ 薄膜を用いて、室温湿式プロセスによる Mg 欠損の導入と J_c の向上を目的とした。H₂O を 1000 ppm 含ませた臭化エチルマグネシウムエーテル溶液に MgB₂ 薄膜を 96 h 浸漬した場合、温度 20 K、外部磁場 5 T において浸漬前後で J_c が 2×10^5 A cm⁻² から 3×10^5 A cm⁻² に向上し、ニオブ合金超伝導体の温度 4.2 K、5 T における J_c である 4×10^5 A cm⁻² に迫ることがわかった。 T_c も 0.3 K の有意な向上が見られた。 T_c の向上は、MgB₂ のホウ素層におけるホール注入を意味し、Mg 欠損の導入が示唆された。

・Pt 触媒 Si エッチングによるヘリカルポアの自己組織化形成

新しい光学材料として近年注目を集める螺旋状ナノ構造体（ナノヘリックス）を、電気化学手法により作製することを目的に研究を進めた。本研究では、形状自由度の高いヘリックス作製法として、Pt 触媒 Si エッチングによる螺旋状ポア形成に取り組んだ。このポアは Pt 粒子を担持した Si 基板を HF と H₂O₂ を含むエッチャントに浸漬することで自発的に形成する。電気化学測定の結果、Si 酸化の対となる H₂O₂ の還元反応が自発的に振動し、その周期反応を起源として螺旋構造の規則的な構造が形成することを明らかにした。この知見をもとに、H₂O₂ 還元でみられる自発的な電流振動の周期が長くなる（短くなる）と螺旋構造のピッチが伸びる（縮む）ことが確認され、本手法が従来法に比べて高い形状制御の自由度を有することが明らかとなった。

教授 邑瀬 邦明

准教授 深見 一弘

助教 北田 敦

工学研究科 材料工学専攻

材料機能学講座
機能構築学分野

アルキルホスホン酸SAMの耐水性

自己集積化単分子膜 (SAM) は材料の表面改質手法の一つとして注目を集めている。中でもホスホン酸SAMは液相法で容易に製膜でき、熱安定性に優れていることなどから応用に向けて研究が進んでいる。ホスホン酸SAMの課題として耐水性の問題がある。水との界面への応用や大気中での経時劣化を防ぐためにも耐水性の向上は欠かせない。本研究では金属基板に製膜したホスホン酸SAMの耐水性を向上させるための製膜プロセスについて検討した。

アルミニウム基板では洗浄後に前駆体溶液に浸漬して作製したホスホン酸SAM試料を後処理無しで純水に浸漬すると、分子が脱離してしまい、耐水性は低いことが判明した。一方で製膜後に加熱処理を行うと脱離が抑制され、耐水性が向上した。インピーダンス測定の結果から吸着分子の配向性が向上したことで基板表面に到達する水分子を抑制したことが要因であると考えられた。銅基板では製膜後の加熱処理では耐水性に変化は見られなかったものの、製膜前に酸で洗浄すると吸着量が大幅に増加し耐水性が向上した。スズ基板も銅基板同様、酸で基板洗浄をすると吸着量が増加したが、耐水性は光洗浄した試料が最も高かった。ホスホン酸SAMの耐水性向上のためには金属基板ごとに製膜プロセスを検討する必要があることが明らかとなった。

有機単分子膜の真空紫外光励起反応

当研究室では中心波長172 nmのキセノン (Xe) エキシマランプを用いて自己集積化単分子膜 (SAM) 末端官能基の光改質を報告してきた。分子構造が規定されたSAMを用いる事で各種材料の表面改質にて生じている光化学反応のモデル化が可能となる。本研究ではより短波長のhard VUV光領域 (100~160 nm) を用いて、各種官能基を持つSAMにて生じる反応を調査した。調査したい官能基を持つSAMをSi基板上に形成し、真空チャンバー ($< 10^{-3}$ Pa) 内で光を照射した表面を分析した。Hard VUV光源には126 nmと160 nmにピークを持つ重水素 (D_2) ランプを用いた。 D_2 ランプ照射したカルボン酸終端SAM試料ではXeエキシマランプ照射の場合と比較して、カルボキシ基の解離が促進されていることが明らかになった。

酸化グラフェンアシストシリコンエッチングの反応機構解明

酸化グラフェン(GO)は触媒、半導体材料などの様々

な用途への応用が期待されている材料である。本研究ではGOの硝酸還元触媒機能を活用することで、GOアシストSiエッチングが可能であるか調査した。GOシートをSi基板上に担持した試料をフッ化水素酸 (HF) と硝酸の混合液に浸漬した。浸漬した試料のレーザー顕微鏡像より、シート部分が10 nm/min程度の速度でエッチングされていることが明らかになった。浸漬温度を変化させた時のエッチング結果から、GOシート面内の硝酸イオン吸着サイト数がアシストエッチングに有効であることが示唆された。さらに、異なる合成法で作製したGOを用いてエッチングした結果、シート内の欠陥が硝酸還元活性サイトである可能性が示唆された。

垂直・水平力同時検出バイモーダルqPlus AFMの開発

原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscopy; AFM) は、ナノスケールでの垂直・水平力の検出によってナノトライボロジー分野に大きく貢献してきた。近年、Siカンチレバーの屈曲共振モードとねじり共振モードを用いることにより、超高真空環境 (=乾燥摩擦条件) において原子分解能での垂直・水平力の同時検出が達成された。しかし、Siカンチレバーは潤滑油に用いられるような高粘度液体中では力検出感度が抑制されるため、潤滑系における固液界面の高分解能観察は期待できない。一方、水晶振動子に探針を取り付けたqPlusセンサは高粘度液体中で高分解能観察が可能なことから潤滑系の分析への応用が期待されているが、垂直・水平力を同時に検出できないという問題があった。本研究では、固液界面における潤滑油分子の静的・動的な状態を原子・分子レベルで明らかにすることによって、潤滑現象を理解し、摩擦低減に貢献することを目標に、qPlusセンサによって垂直・水平力を同時検出する方法の開発に取り組んだ。まず、連続体力学的な計算と有限要素法によってqPlusセンサの振動モードを解析した。探針の長さを1~2 mm程度にすると、探針の振動が発生することにより、1次共振では探針先端が垂直に、二次共振では水平に振動することを明らかにし、これをKBr (100) の原子分解能観察によって証明した。この結果をもとに、センサを2つの共振周波数で同時に振動させながら測定を行うバイモーダルAFMという手法を用いて形状の取得と同時にHOPGとGOの摩擦特性の違いを検出し、垂直・水平力の同時検出を達成した。さらに、この手法を高分子潤滑油に適用し、原子スケールでの垂直・水平力の同時検出を達成した。

教授 杉村 博之
准教授 一井 崇
助教 宇都宮 徹

工学研究科 材料工学専攻

非鉄製錬学講座

本講座は、三菱マテリアル株式会社の寄附により2017年4月に新設された講座である。非鉄金属の製錬・リサイクルに関して、基礎的な学術研究と、社会人や大学生・高校生らに対する教育・啓蒙活動を行っている。これらの教育志向の活動を通じて、非鉄製錬学の永続的な発展への貢献、そして本分野の産学の未来を担う人材の育成を目指している(図1)。以下に昨年度の活動の概略を示す。



図1 寄附講座の活動

・非鉄製錬プロセスに関する基礎研究

非鉄製錬で起こる現象の理解の深化、現行プロセスの課題の把握、および長期スパンでの資源循環型社会への貢献を目的に、非鉄金属の製錬・リサイクルプロセスに関する基礎研究を行っている。非鉄金属の製錬・リサイクルでは、多様な元素を分離回収するため、種々の化学反応や物理現象が利用されている。しかし、それらの機構については、定性的あるいは経験的な理解の段階であり、その詳細が明らかにされていない点が多く残っている。本講座では、浸出や電析、濡れといった幅広く利用されている化学的・物理的現象に注目し、それらの原理をより深く理解するための研究を行っている。

2019年度は前年度から継続し、黄銅鉱の酸化浸出と亜鉛の電析に関する反応機構の調査と、代表的な都市鉱山である使用済みリチウムイオン二次電池(廃LIB)と電気電子機器廃棄物(E-waste)に関する湿式リサイクル技術の開発に取り組んだ。

廃LIBのリサイクルには主に高温での熱処理を用いた手法が研究されており、有害なガスの無害化などに大型の処理設備を必要としている。そのため、リサイクル処理施設を都市部の各地に設けることは難しく、発火事故防止のために廃LIBを厳重に梱包して処理施設まで輸送する必要がある。このような廃LIBの輸送の問題を解決するため、自動車解体場など世界各地で実施可能な廃LIB失活処理技術の開発を行っている。石灰水中でLIBに対して種々の失活方法を試みた結果、窒素雰囲気等の不活性雰囲気下で液中に浸漬した

状態でセルを切断すれば、LIBを安全に失活できることが見出された。また、失活後のLIBについては破砕と簡易な物理選別によって各部材を分離でき、ニッケルやコバルト、銅に加え、従来の乾式処理ではロスしていた黒鉛やリチウムについても回収できた。石灰水中では、鉄材が錆び難く、電解液中のカーボネートの加水分解も短時間で終了する。このように、廃LIBの安全な失活手法の確立ならば部材の高い分離性と回収率が実証されており、今後は多様な種類のLIBや車載用など大型のLIBに対する本プロセスの有効性を確認する予定である。

・社会人向けWeb講座

製錬・リサイクル産業で働く技術者向けの教育活動として、社会人向けWeb講座を開講している。製錬・リサイクルに関するプロセス技術の開発・革新には、その根底にある基礎理論の理解が重要である。また、学問分野の多様化にともない、製錬プロセスに携わる技術者の出身学科も多様化している。そのため、産業界の人材育成、特に若手技術者の人材育成として、基礎学問の習熟の重要性が高まっている。社会人向けWeb講座は、このような要望に大学から応える新たな取り組みであり、本専攻の教員を講師とするオンデマンド講義やほぼ毎週のレポートの提出を通じて、産業プロセスの根底にある理論を体系的に学ぶことができる1年間の教育プログラムである。

2019年秋からは、非鉄製錬分野をはじめとする各社から計17名の受講者を迎え、第3期のプログラムを開始した。本プログラムは、熱力学や電気化学に関する4つの科目で構成されており、受講生はインターネットを利用して必要ときに何度でも講義を視聴することができる。また、前期・後期の最後には、京都大学や京都近郊のセミナーハウスにて期末試験が行われ各科目の習熟度を確認できることも特徴である。2020年の秋からは、第4期プログラムを開始する。

・高校生のための出前授業・実験教室

未来を担う人材の育成のために、高大連携の教育・啓蒙活動にも力を入れている。スマートフォンやパソコン、自動車などのハイテク製品を製造するには、銅、鉛、亜鉛、金、銀など多種多様な非鉄金属が必要不可欠である。日本国内の製錬所では、海外から輸入した鉱石を原料として、これらの非鉄金属が製造されている。また、非鉄金属の製錬所は、都市鉱山のリサイクルや廃棄物の処理にも重要な役割を果たしている。本講座では、これらの非鉄金属の製造方法と現代におけるその高い技術、および非鉄金属産業が資源循環型社会の構築に果たす役割を知ってもらうため、出前授業や実験教室などを行っている。

2019年度は、兵庫県立西脇高等学校の学生を迎えて実験教室「貴金属を作ろう!」と、京都大学ELCASへの協力として実験実習「金・銀・銅を作ろう!」を行った。

教授(兼任) 宇田 哲也
 特定准教授 谷ノ内勇樹
 特定准教授 安田 幸司 (2020.4.1~)
 助教(兼任) 岸本 章宏

エネルギー科学研究科 エネルギー社会・環境科学専攻

社会エネルギー科学講座
エネルギー社会工学分野

研究室の現状 (2020年8月現在)

博士課程学生7名 (内留学生タイ, インドネシア, カンボジア, フィリピン, イラン, チリ各1名), 修士課程が14名 (内留学生 インド1名, マレーシアへ留学中1名), 学部学生7名にスタッフ5名を加えて総勢33名 (内女性4名). 研究室内のセミナーも英語で行うなど, グローバルな環境の下, 研究を行っている.

最近の研究から

2020年9月に学位取得予定の Fahmi Machda 君の研究「Al ドープ ZnO 透明電極の耐久性と復元性」について紹介する.

透明電極は太陽光発電パネル, 液晶などのディスプレイやプロジェクターなど多くの分野で用いられている. その主な材料はインジウムスズ酸化物であるが, インジウムは資源量が乏しく, その代替材料として Al ドープ酸化亜鉛 (AZO) が注目されているが, 耐久性に問題があるなどの課題がある. 本論文はこの AZO 耐久性向上に関し, 成膜条件の影響を精査した.

1. 成膜方法として, 亜鉛-アルミニウム複合ターゲットをアルゴン-酸素混合気体によるスパッターにより酸素と反応させた場合, 薄膜の特性はスパッター中の酸素濃度に大きく依存し, 特に酸素濃度比が低い領域では002配向した膜が得られ, 後熱処理なしで実用に耐えうる透明性, 電気伝導性を示した.
2. 酸素濃度が高い試料では002方位と110方位が混合し, そのままでは十分な電気伝導性が得られないが, 水素雰囲気下550℃で焼鈍することにより実用レベルの特性を有する薄膜が得られた.
3. 高温高湿度下で加速試験を行い, 耐久性を調査したところ, 002配向の試料は高い耐久性を示した. 一方, 他の試料においては劣化がみられたが, 再び水素雰囲気焼鈍することにより特性が回復した.
4. 以上の知見を用い, 低酸素濃度比の条件の下, 成膜中の温度上昇を抑えるため低消費電力でプラスチックフィルム上への成膜を試みたところ, フレキシブルな透明電極薄膜の形成が確認できた (図1).

以上の成果は, ECS J. Solid State Sci. Technol. 2019

volume 8, issue 12, Q240-Q244, Ceramics International, 2020, 46 (10) 16178-16184, Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science 2020, 217: 1900519 に公表している.

教授 石原 慶一
准教授 奥村 英之
特定助教 小川 敬也
技術職員 武本 庸平

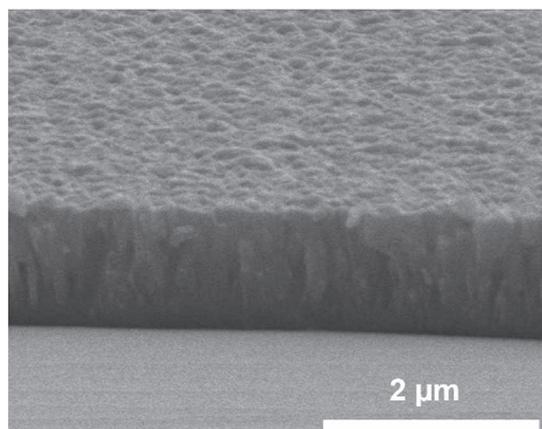


図1 プラスチックに成膜した Al-ZnO 薄膜

エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻

**エネルギー反応学講座
量子エネルギープロセス分野****半導体ナノ粒子への光学活性誘起**

I-III-IV₂型のZnS-AgInS₂(ZAIS)半導体ナノ粒子へキラル分子としてのシステインを配位させることによる光学活性誘起に関する調査を行なった。オレイルアミンが配位したZAISナノ粒子トルエン分散液とL-(or D-)システインのホルムアミド溶液をそれぞれ50vol%になるように混合し、激しくかき混ぜた。その後洗浄作業を行い、遠心分離により沈殿物を抽出し、水分散液を得た。水分散液の吸収・蛍光スペクトル、FT-IRスペクトルからZAISナノ粒子表面にシステインがチオール基とアミノ基により二座配位していることが考えられ、これはシステインの pK_1 前後でゼータ電位の符号の変化が確認されたことから支持された。

金ナノ粒子への光学活性誘起

(フランス ボルドー大学 小田グループとの共同研究)

分子集合体から生み出されたキラルなナノ空間で金ナノ粒子を作製することによる金ナノ粒子への光学活性誘起に関する調査を行なった。界面活性分子16-2-tartrateの分子集合体からなる有機ナノヘリックスの近傍でオルトケイ酸テトラエチルのゾル-ゲル反応をさせ、シリカ被覆された有機ナノヘリックスを作製した。つぎにKAuCl₄水溶液中で界面活性分子の対イオンをAuCl₄⁻へと*in situ*イオン交換を行ない、さらに*in situ*還元を経て金ナノ粒子を作製した。STEM画像からシリカヘリックス中で金ナノ粒子の存在が確認され、金ナノ粒子の表面プラズモン共鳴由来の吸収と誘起円偏光二色性が観測された。

多糖を利用した色素の集積とその分光分析

アニオン性らせんポリマーであるヒアルロン酸(HA)存在下でのカチオン性蛍光体のシアニン色素(3,3'-Diethylthiadicarbocyanine iodide: DTDC)会合体および5,10,15,20-テトラキス(1-メチルピリジニウム-4-イル)ポルフィリン*p*-トルエンスルホン酸塩(TMPyP)会合体の分光特性を比較して評価した。HA粉末はキューピー株式会社から提供を受けた(HA-Q, extracted from cockscomb. Mw: 530,000-1,330,000 g mol⁻¹)。HAとTMPyPは緩衝液(pH = 3.2, 4.9, 7.0, あるいは11)または水に溶解させた。DTDCはメタノールに溶解させた。比較的柔らかくて立体的にもかさばらないカチオン性のシアニン色素とアニオン性多糖類HAとの相互作用と、比較的剛直で立体的にかさばる

カチオン性のポルフィリンとアニオン性多糖類HAとの相互作用について対比すると、それぞれ静電相互作用による複合体の形成は認められたものの、シアニン色素では色素の凝集と蛍光の消光が観測され、一方、ポルフィリンでは色素の孤立化と蛍光強度の緩やかな増大が見られ、2つの色素でそれぞれ異なる応答を示すことが確認された。

電界紡糸ファイバーの配向制御

電界紡糸法を行う際、負電荷を帯電している金属製のコレクター上の電荷分布を調整し、ナノファイバーの配向制御を行った。4つのベンゼン環が連なったアセン骨格のルブレンとテトラセンを含有するポリメタクリル酸メチル(PMMA)のファイバーを作製し、ファイバー中の有機分子の異方性を評価した。PMMAに対して5.0wt%のルブレンとテトラセンをそれぞれ添加した8.0wt% PMMAのDMF/THF(1:1 v/v)混合溶液を調製し、電界紡糸を行った。配向角度分布の光学顕微鏡観察から得られた電界紡糸ファイバーは0°±20°の領域に配向が揃っており、ルブレンとテトラセンに起因する吸収及び蛍光スペクトルは偏光板に対する角度依存性を示し、これらの有機分子はファイバー内で異方性をもつことを確かめた。

中赤外自由電子レーザーによる格子振動の選択励起

半導体を用いた、個々のフォノンの選択的励起による、特定の格子振動が及ぼす電子状態への影響・相変化や電荷移動の積極的な制御の可能性を模索する研究を継続中である。波長可変な中赤外自由電子レーザーKU-FEL(京都大学エネルギー理工学研究所)によって光学的(非熱的)に直接的なフォノン励起を行い、さらにアンチストークスラマン散乱測定法を用いてフォノン選択励起を観測する。さらに、高次の過程により、このフォノン分光法の適用範囲を拡げるべく模索している。すでにホウ素添加時に超伝導特性を左右するダイヤモンドの赤外不活性な振動モードが単結晶試料を用いたFEL光の二光子励起によって選択励起可能であることを示しているが、測定条件を見直した再測定により、励起フォノン信号の赤方偏移を解消した。

動的光散乱法を用いた溶液中ナノ粒子のサイズ評価

液中に分散したナノ粒子の粒径を液中に存在した状態のまま知るために、動的光散乱法による液中に分散させた半導体量子構造のサイズ効果の研究に着手している。溶液中の輸送現象が律速となることの多いエネルギー変換現象への展開も模索中である。

教授 佐川 尚
准教授 蜂谷 寛

エネルギー材料学講座
材料プロセス科学分野

乾燥空気中でのクロロアルミニート系イオン液体を用いたアルミニウム電析

Alの成膜技術として、非水溶媒を用いたAl電析が研究されている。Al電析浴は吸湿性が高く、加水分解により電析不能になるため、大気下で扱うことはできない。このため、Al電析は一般的に、アルゴンや窒素などの不活性ガス雰囲気下で行なわれている。しかし、不活性雰囲気下での電析は、グローブボックスなどを用いて密閉系内で行なう必要があるため、生産性が低く、コストが高い。このことが、Al電析の産業利用が進展しない一因となっている。

吸湿だけが問題であるならば、Al電析は乾燥空気中でも実施が可能と考えられる。乾燥空気中の電析は、大気に対して半開放の状態で行なうことができるため、不活性雰囲気下での電析に比べ、大幅な生産性の向上とコスト低下が期待できる。

そこで、代表的なAl電析浴であるクロロアルミニート系イオン液体を用い、乾燥空気中でのAl電析挙動を調べた。乾燥空気中でも均一なAl膜が得られる電析浴系を明らかにするとともに、乾燥空気中で電析不良が生じる原因について考察する。

アルゴン中および乾燥空気中で4種類のイオン液体を用いて得られた電析物の外観写真をFig. 1に示す。アルゴン中ではいずれのイオン液体からも電析面の全体を覆うAl電析膜が得られることを確認した。一方、乾燥空気中では、カチオンが[Im]⁺および[Pyri]⁺のイオン液体を用いた場合、電析面の外周付近にのみ電析が起こり、中央付近には電析物は得られなかった。しかし、カチオンが[Pyro]⁺および[Am]⁺のイオン液体からは、乾燥空気中においても、アルゴン中で電析した場合と同様に、電析面全体を均一に覆う電析物が得られた。X線回折測定およびEDX組成分析により、電析物はいずれも金属Alであることを確認した。

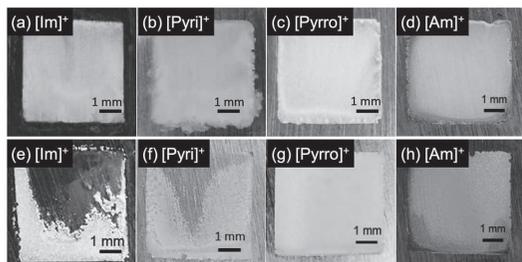


図1 (a-d) アルゴン中および (e-f) 乾燥空気中で各種イオン液体から得られたAl電析膜の外観写真。

ミストデポジション法による全無機型ペロブスカイト太陽電池の作製

次世代の太陽電池としてペロブスカイト結晶を用いる太陽電池が期待されている。CH₃MH₃PbI₃に代表される有機カチオンを含むペロブスカイト材料では、20%を超える太陽電池が報告されている。ところが、有機カチオンを含むことで耐熱性・耐久性に課題があるため、全無機型のペロブスカイト材料として耐熱性・耐久性を向上させる取り組みが行われている。一方で、全無機型のペロブスカイト材料も高い光学特性を有することが示されているにも関わらず、全無機型ペロブスカイトを用いた太陽電池特性は低いのが現状である。そこで、生産性が高く大面積化も容易なミストデポジション法を用いて全無機ペロブスカイト材料であるCsPbBr₃の高品質な成膜に取り組み、高効率な全無機型ペロブスカイト太陽電池への応用について検討した。

CsBrとPbBr₂の溶液を用いて成膜条件を詳細に検討した結果、高品質なCsPbBr₃膜の成膜手法を確立した。μmオーダーのグレインを有する緻密な膜を大面積に形成できるようになった。次に、太陽電池の構造全体をミストデポジション法で作製することを見据えて、Fig. 2 (a)に示すような構造のCsPbBr₃太陽電池を作製した。AM1.5G, 1SUNの光照射条件で得られた太陽電池の電流密度-電圧(*J-V*)特性をFig. 2 (b)に示す。7.7%という最高水準の光電変換効率が得られた。特筆すべきは、約1.5Vの開放電圧(*V*_{OC})を有していることで、これまでのCsPbBr₃を用いた太陽電池と比較しても、大きな開放電圧を示している。

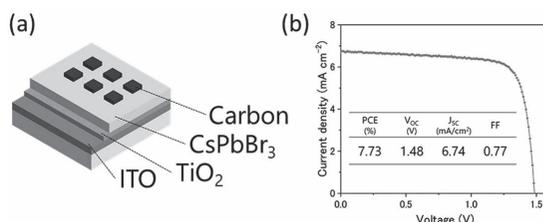


図2 (a) CsPbBr₃太陽電池の構造および (b) 得られた太陽電池の*J-V*特性

教授 平藤 哲司
准教授 三宅 正男
助教 池之上卓己

エネルギー材料学講座
プロセス熱化学分野

脱リンスラグ中の Fe_xO 活量の測定と副格子モデル

1. 緒言

脱リン反応(1)では溶鉄中のPは酸化され、スラグ中の固溶体 <Ca₂SiO₄-Ca₃P₂O₈>(以降 <C₂S-C₃P>_{ss} と表記)に取り込まれる¹⁾。

$$2[P] + 5(Fe_xO)_{slag} + 3(CaO)_{slag} = <C_3P>_{ss} + 5x\{Fe\}$$

$$K_1 = \frac{a_{C_3P}}{h_P^2 \cdot a_{Fe_xO}^5 \cdot a_{CaO}^3} \dots\dots\dots(1)$$

図1に Fe_xO-CaO-SiO₂ 三元系の 1573K での等温断面図を示す。本研究ではスラグの脱リン能を評価するため、均一液相中の a_{Fe_xO} を測定し、測定値を基にして溶体モデルを作成した。溶体モデルを利用してスラグ成分の活量を算出し、<C₂S-C₃P>_{ss}+液相の二相共存スラグと溶鉄間のリン分配比を評価した。

2. 実験方法

Fe_xO-CaO-SiO₂ スラグを純鉄るつば内に入れ、1573Kで平衡させた。ジルコニア酸素センサを用いて系内の平衡酸素分圧 p_{O₂} を測定し、式(2)より Fe_xO 活量を算出した。

$$x\{Fe\} + \frac{1}{2}(O_2) = \{Fe_xO\}$$

$$K_2 = \frac{a_{Fe_xO}}{p_{O_2}^{1/2}} \dots\dots\dots(2)$$

実験ではスラグ中の (mass%CaO) / (mass%SiO₂) (以降 C/S と表記) を一定とし、Fe_xO 濃度を変化させた。酸化還元滴定及び ICP 分析によりスラグ組成を求めた。実験組成を状態図上に示す(Fig.1)。

3. 実験結果・考察

次の3つの副格子を仮定してスラグの構造を近似した。

- ① 最密に充填する酸素の格子
 - ② ①の四面体間隙に無秩序に配置する Si の格子
 - ③ ①の八面体間隙に配置する Ca²⁺, Fe²⁺, Fe³⁺ の格子
- この時、混合の Gibbs エネルギー G^M は次のように表される。

$$G^M = \frac{X_{SiO_2}}{X'} \sum_i \alpha_{Si-i} X_i + \frac{8X' - 7X_{SiO_2}}{X'(X' - X_{SiO_2})} \sum_i \sum_j \alpha_{i-j} X_i X_j$$

$$+ RT \left[(X' - X_{SiO_2}) \ln \frac{X' - X_{SiO_2}}{X'} + X_{SiO_2} \ln \frac{X_{SiO_2}}{X'} + \sum_i X_i \ln \frac{X_i}{1 - X_{SiO_2}} \right]$$

$$\dots\dots\dots(3)$$

X_i は成分 i のモル分率、X' は②副格子の格子点の数であり、①副格子との関係から X = X_{SiO₂} + 0.5X_{CaO} + 0.5X_{FeO} + 0.75X_{FeO_{1.5}} となる。本研究の測定値及び文献値²⁻⁵⁾ を用いて相互作用パラメータ a_{i,j} の最適値を求めた。a_{Fe_xO} の実測値と計算値の比較を図2に示す。計算値は実測値をよく再現できた。また溶体モデルから求めた Fe_xO の等活量線を図1上に示す。

溶鉄中のP活量がHenry則に従うとき、式(1)は次式のように変形できる。

$$[mass\%P]_{Fe} = \left(\frac{a_{C_3P}}{K_1 \cdot a_{Fe_xO}^5 \cdot a_{CaO}^3} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(4)$$

<C₂S-C₃P>_{ss} 中では SiO₄⁴⁻ と PO₄³⁻ が置換すると考え⁶⁾、その置換率 Y を用いて a_{C₃P} は次式で表される⁷⁾。

$$\log a_{C_3P} = 2 \log Y - 2.55(1 - Y)^3 + 1.49(1 - Y)^2 \quad \text{at } 1573K$$

$$\dots\dots\dots(5)$$

<C₂S-C₃P>_{ss}+液相二相共存スラグについて、バルク組成を Fe_xO = 15mass%, P₂O₅ = 5mass% と仮定し、溶体モデルを利用して式(4)、(5)からスラグ-溶鉄間の平衡リン分配比 L_P^{slag/Fe} (≡ (mass%P)_{slag} / [mass%P]_{Fe}) を計算した。log L_P^{slag/Fe} をバルクの C/S に対してプロットした結果を図3に示す。C/S の小さい領域では <C₂S-C₃P>_{ss} と共存する液相線に沿って a_{Fe_xO} が増大するため L_P^{slag/Fe} が増加し、C/S の大きい領域では a_{Fe_xO} 減少と a_{CaO} 増大の影響により L_P^{slag/Fe} に極大値が現れた。

参考文献

- 1) H. Suito et al.; *Tetsu-to-Hagane*, 63 (1977), 1252.
- 2) S. Ban-ya et al.; *Tetsu-to-Hagane*, 66 (1980), 1484.
- 3) K. L. Fetters et al.; *Trans. AIME*, 145 (1941), 95.
- 4) E. Görl et al.; *Arch. Eisenhüttenwes.*, 37 (1966), 441.
- 5) C. Bodsworth; *JISI*, 193 (1959), 13.
- 6) M. Hasegawa, Y. Kashiwaya and M. Iwase; *High Temp. Mater. Process.*, 31 (2012), 421.
- 7) T. Saito, T. Nishimura, K. Saito and M. Hasegawa; *ISIJ Int.*, 60 (2020), in press.

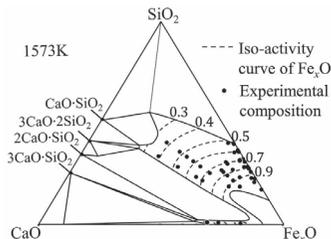


図1 1573Kにおける Fe_xO-CaO-SiO₂ 三元系状態図

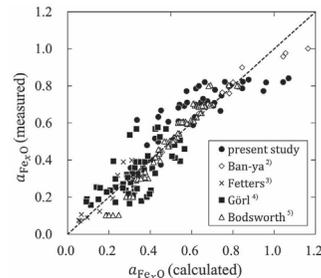


図2 Fe_xO活量の測定値と計算値の比較

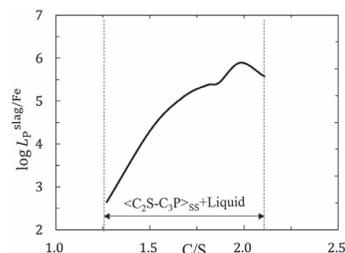


図3 1573Kにおけるスラグ-溶鉄間のリン分配比と塩基度C/Sの関係

エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料学講座
エネルギー応用基礎学分野

立方体集合組織Cuテープへの酸化物超伝導物質 のエピタキシャル成長技術

希土類 (R) 系酸化物超伝導物質 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ は安価な液体窒素 (沸点: 77.3K) の冷却で電気抵抗ゼロの状態が得られる画期的な物質であり, 実用化が望まれている。しかし, 実用的レベルのゼロ抵抗電流を流せる超伝導線を実現するには, 超伝導物質の結晶方位を超伝導線の全長に渡って単結晶的に揃える (2軸配向させる) 必要がある。当研究室は, $\{110\}<001>$ 集合組織を有する珪素鋼板や $\{100\}<001>$ 集合組織を有する FCC 金属テープをテンプレート基材として使用する超伝導線を世界に先駆けて提唱し, 低コスト超伝導線の研究開発を先導している。本稿では, $\{100\}<001>$ 集合組織 Cu テープを用いた高温超伝導線の研究開発の進捗について述べる。

昨年度から $\{100\}<001>$ 集合組織純 Cu テープ上に Ni, $(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)\text{TiO}_3$ および $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ をエピタキシャル成長させた新規な高温超伝導線材の研究を進めている。Cu テープと $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ の反応防止層として La をドーピングすることで導電性を持たせた SrTiO_3 を使用することとした。単独で Cu テープと $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 層の間の反応・元素拡散を防止する物質層は現在までに見つかっていないので, Ni と $(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)\text{TiO}_3$ の 2 層中間層を挿入した。Ni はめっき, $(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)\text{TiO}_3$ および $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ はパルスレーザー蒸着法により, 順次 Cu テープ上にエピタキシャル成長させた。

Ni 層上に界面に酸化物層を生成させることなく酸化物をエピタキシャル成長させた例は少ないが, 本研究では Ni が酸化されず, $(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)\text{TiO}_3$ が還元されない熱力学的条件下で真空成膜を行うことで, $(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)\text{TiO}_3$ のエピタキシャル成長に成功した。

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ を成長させる条件は酸素雰囲気中, 800°C 前後と高温であるため, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 成膜中に酸素が $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7 \rightarrow (\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)\text{TiO}_3$ 中を拡散し, $(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)\text{TiO}_3/\text{Ni}$ 界面に到達すると界面に NiO が生成する。そこで, $(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)\text{TiO}_3$ 中の La 濃度, 酸素濃度と導電率, 酸素拡散の速さを詳細に調べることで, $(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)\text{TiO}_3/\text{Ni}$ 界面に NiO を生成させることなく $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ をエピタキシャル成長させる条件を見出し, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7/(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)\text{TiO}_3/\text{Ni}/\text{Cu}$ 構造を完成させることができた。

作製した試料を液体窒素に浸漬して測定した超伝導臨界電流密度は $2.5 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ であり, 実用に求められる値を十分に満足するレベルであった。また, 何らかの外部的擾乱が発生して超伝導状態が局部的に破れた場合 (クエンチ発生時) には超伝導電流が中間層を通り抜けて Cu テープに回避することで, 安全性が確保できることを確認した。

現在, 国プロで研究を進めているが, 今後は実用化を目指して積極的に企業との共同研究を進めてゆく計画である。

教授 土井 俊哉

令和2年度水曜会大会

令和2年度の水曜会大会は、6月6日（土）に開催予定としておりましたが、4月7日に政府による新型コロナウイルス感染拡大に伴う緊急事態宣言が発令され、5月4日にはその期間延長が発令されたことから、連休明けの5月7日に水曜会役員で対策を検討し中止を決定しました。また、水曜会ホームページのトップページに大会中止の案内を掲示するとともに、別途、大会出席のご連絡を頂いた方々に対して電子メールで大会中止のお知らせを行いました。

総会についても、電子メールによるメール審議の形態をとらせて頂き、2019年度事業として、昨年度の水曜会大会内容、水曜会誌と名簿の発行状況、前回大会以降の水曜会会員数の動向および教室の人事異動、その他学生向けの行事の開催について報告されました。また、審議事項として、平成31年度・令和元年度の会計報告と会計監査報告、令和2年度予算案、令和2年度役員案が審議され、承認されました。平成31年度・令和元年度の会計報告と令和2年度の予算については、この記事の後に掲載しています。また、令和2年度役員は水曜会ホームページに掲載しておりますのでご確認頂けると幸いです。

今回の大会では、特別講演として、以下2件のご講演を予定しておりましたが、残念ながら中止となりました。

「三井金属鉱業における鉱山・製錬から機能材料・部品への川下展開」

三井金属鉱業株式会社 取締役常務執行役員 久岡 一史 氏

「エネルギー・気候変動の政策動向と産業への影響」

福岡大学 研究推進部 教授 堀 史郎 氏

お方にはご準備の労をお取り下さったことに感謝申し上げますとともに、改めて次の機会にご講演を頂けたら幸いです。

最後に、来年度の大会は、令和3年6月5日（土）に京都大学工学部物理系校舎にて開催する予定です。水曜会ホームページにも掲載しておりますのでご確認下さい。

平成31年度・令和元年度 水曜会会計報告

令和2年3月31日現在

(単位：円)

取 入		支 出	
前年度繰越金	10,274,376	会誌印刷代（製版・封筒・郵送料込）	
会 費	3,468,000	25巻2号	1,265,141
会誌広告掲載料（製版代込）		名簿印刷代（製版・封筒・郵送料込）	
25巻2号	832,000	令和元年11月発行	2,660,128
名簿広告掲載料（製版代込）		水曜会大会経費（令和元年6月1日）	1,164,175
令和元年11月発行	433,000	編集委員会経費（ホームページ代含む）	43,835
名簿売上	878,500	通 信 費（切手、後納郵便料）	55,786
会誌売上	3,177	会費等振込手数料	228,549
水曜会大会懇親会費	311,000	事務人件費	973,800
預 金 利 息	269	PC・プリンター・封筒・文具代等	32,006
物理工学科同窓会会費	237,367	物理工学科学生スポーツ大会援助	98,767
京土会・水曜会新入生歓迎会教員参加費	6,000	京土会・水曜会新入生歓迎会経費	30,680
旧金属系建物玄関前の桜の再植樹寄付	73,000	桜の再植樹（植栽工事・記念品・立札等）	586,839
		小 計	7,139,706
		次年度への繰越金	9,376,983
		内訳 銀行普通預金	6,847,056
		銀行定期預金	2,500,000
		郵便振替	14,138
		手持現金	15,789
収 入 合 計	16,516,689	支 出 合 計	16,516,689

上記の通り会計報告いたします。

令和2年6月6日

会 計 幹 事 中 村 裕 之

以上の通り相違ございません。

会 計 監 事 (監 査) 安 田 秀 幸

令和2年度 水曜会会計 予算書

令和2年6月6日 (単位:円)

収 入		支 出	
前年度繰越金	9,376,983	会誌印刷代 (製版・封筒・郵送料込)	
会 費	3,500,000	25巻3号	1,400,000
会誌広告掲載料 (製版代込)		水曜会大会経費 (令和2年6月6日)	650,000
25巻3号	700,000	編集委員会経費 (ホームページ代含む)	150,000
会誌売上	3,000	会誌原稿料	60,000
預金利息	200	通 信 費 (切手, 後納郵便料)	70,000
物理工学科同窓会会費	200,000	会費等振込手数料	230,000
京土会・水曜会新入生歓迎会教員参加費	5,000	事務人件費	1,000,000
		物理工科学学生スポーツ大会補助	50,000
		京土会・水曜会新入生歓迎会経費	40,000
		封筒・文具・トナー代等	50,000
		予 備 費	200,000
		小 計	3,900,000
		次年度への繰越金	9,885,183
収 入 合 計	13,785,183	支 出 合 計	13,785,183

会 報

追 悼

村上 陽太郎 先生

京都大学名誉教授村上陽太郎先生には令和元年 8 月 29 日に享年 102 歳にて逝去されました。ここに先生の生前のご功績を偲び、謹んで哀悼の意を表します。



村上 陽太郎先生のご略歴

昭和17年 京都帝国大学工学部冶金学科卒業
昭和17年 同大学院入学
昭和18年 京都帝国大学工学部講師
昭和19年 同助教授
昭和28年 京都大学教授、冶金学第四講座担当
昭和56年 退官 京都大学名誉教授
昭和56年 関西大学工学部教授
昭和63年 関西大学工学部退職
平成3年 勲二等瑞宝章受章

この間日本金属学会学会賞、功績賞、同谷川・ハリス賞、同論文賞、本多記念会本多記念賞、伸銅技術研究会技術論文賞、軽金属学会学会賞、同アルミニウム技術賞等多数の学術賞を授与されておられます。昭和56年にはドイツ金属学会名誉会員に推挙されました。また昭和61年より(財)大阪科学技術センター付属ニューマテリアルセンターの初代所長を務められました。日本金属学会理事、同副会長、日本鉄鋼協会・日本金属学会関西支部長、軽金属学会理事、同副会長、(財)軽金属奨学会理事、(財)近畿地方発明センター理事、(公財)応用科学研究所理事、全国大学金属関係教室協議会副会長、同会長の要職を歴任されました。

村上陽太郎先生を偲んで

佐藤 史郎

恩師、村上陽太郎先生の訃報に接してから早くも一年が過ぎ去ろうとしています。寂しい気持ちが募るばかりです。最後にお目にかかったのは「村上先生白寿祝賀会(平成28年2月27日)」の席上でした。その時、先生は奥様を伴ってご出席され、全国から集った百名に近い教え子を前にして、一時間にわたって“白寿を迎えて-わたしの歩んだ道”と題して、生い立ちから、学生時代のこと、そして永い研究者としての活動の経過や内外の学者たちとの交流の思い出などをかなり詳しくお話してくださいました。これは私にとって、学生時代に帰って先生の講義を聞いている時を彷彿とさせる至福のひと時でした。

その後、平成30年7月にはニューマテリアルセンターにご勤務の時の研究・調査をまとめて、大冊「新素材・新技術全集 第1集~第7集」を上梓され、100歳を超えてもますますご壮健なご様子でした。今はただ“残念”の一言です。

私が初めて村上先生にお会いしたのは昭和28年4月です。2年間の教養課程を経て冶金学科に進んだ時です。私たちは昭和26年に京都大学工学部に入学しましたが、その時、専攻学科は決まっていませんでした。2回生の終了時に専攻学科を選ぶことになったわけです。私は具体的な考えもないままに工学部に入学したため、専攻学科の選択には大いに迷いましたが、各教室の説明を聞いて回った結果として最も印象がよかった冶金学科を選びました。しかし、かなりの不安を持ったままで3回生に進んだように記憶しています。当時の冶金学科には6講座があり、西村先生や澤村先生をはじめ錚錚たるご高齢の教授がおられ、学生には近寄り難い感が否めませんでした。その中でただ村上先生だけは30歳半ばで若く、学生にとって親しみやすい存在でした。村上先生から「金属学」と「金相学」を教わりました。いつも学生の顔をしっかりと見つめながら、丁寧に教えていただきました。

当時の冶金学科の講義の内容は製造プロセスに関するものが多かったように記憶しますが、村上先生は金属の微視的構造に関する新しい研究分野のことについても平易に教えてくださいました。例えば、GPゾーン形成に関する当時の研究の最先端の話題についてもかなり詳しく教えていただき、金属の研究に関する興味をかきたてられました。将来、私が進む方向を示していただいたようにも感じたものでした。

後年、先生はご自身の著書の序文で次のように述べて、“ミクロ重視”を強調されています。“・・・材料

が何故そのような特性を示すのか、何故そのような加工法や熱処理が必要なのか、をミクロ的構造・組織から、きっちり理解しておくことが是非とも必要である。・・・”(村上陽太郎:「アルミニウム材料の基礎と工業技術」, 社団法人・軽金属学会(1985))

私は昭和30年、住友金属工業(株)に入社し、住友金属・伸銅所(その後、住友軽金属工業(株)を経て現在の(株)UACJ)で主に伸銅品の研究に従事し、研究所長、社長等を勤めて、平成17年に退職しました。私の在職中、数年おきに村上先生の門下生が入社してきました(計5名)。その全員が研究部門に配属になり、揃って要職について大いに活躍し、会社のみならず斯界の発展に貢献してくれました。これで多少なりとも村上先生の学恩に報いることができたかと思っています。

村上陽太郎先生、ありがとうございました。

(昭和30年卒)

村上陽太郎先生と軽金属奨学会

今須 聖雄

先生は60有余年にわたり理事、評議員、特別顧問として、当会の発展に大きな貢献をして下さいました。ここに感謝の意を表しますとともに、先生のご生前の当会との関わりを申し上げさせていただきます。

昭和30年に当時の東洋アルミニウム(株)社長の小山田裕吉氏が、「軽金属の業界発展に資する有為の人材輩出と大学に於ける軽金属の研究開発力の育成」という理念に基づいて軽金属奨学会を設立しました。そして当会運営にあたっての人材の推薦を、軽金属学界の重鎮で村上先生の恩師であられました西村秀雄教授にお願いし、その推挙により村上先生が理事に就任頂きました事が、当会と先生とのご縁の始まりでした。財団創設期の中核事業の企画立案にご尽力頂きました結果は「教育研究資金」、「研究補助金」、「奨学金」、「留学補助金(現海外交流補助金)」、「研究試料の提供」、「研究成果の発表」の事業として、現在まで連綿と続いております。

1965(昭和40)年に小山田社長が急逝されましたが、その功績を後世に顕彰する目的で、一般社団法人軽金属学会の『小山田記念賞』が創設されましたときにも、先生はその中心となって制定頂きました。同賞がきっかけとなり毎年、軽金属学会と連携して軽金属論文賞、同新人賞等に対して、当会としてもその表彰に参画することとなりました。

また、若手技術者の育成を目指し、当会発足以来、50年超にわたって東洋アルミニウムの八尾製造所にご来所頂き指導をして下さいました。

先生は、当会の主催する講演会でもあるいは学会の講演会や研究会でも、「基礎研究が産業に貢献する」ということを常に念頭に置いて研究することが大切であるという持論をお持ちでした。

先生は健康面には常日頃ご留意されておられました。90歳を超えても1日1万歩歩いておられました。今から5年前の当会創立60周年記念事業（2015年）の折にもお元気で功労賞を受賞されました。その後、白寿を迎えられた時、当会からのお祝い品をお贈りするに当たって何が宜しいかお尋ね致しましたところ「電動自転車」との回答を頂きました時には、そのお元気に驚くばかりでした。

当会は、村上先生のご遺志を忘れることなく、引き続きその事業の発展に邁進致します。先生に於かれましては当会を長く暖かく見守り続けて頂きましたことをここに改めて感謝する次第でございます。ありがとうございました。

（公益財団法人軽金属奨学会 理事長）

60年前の村上研

小 松 伸 也

昭和36（1961）年4月、工学部冶金学科第二講座、非鉄冶金学を卒業して第四講座非鉄金属材料学の大学院生（修士課程）に移った。当時、冶金学科には、第一鉄冶金学（盛利貞教授）、第二非鉄冶金学（久島亥三雄教授）、第三電気冶金学（西原清廉教授）、第四金属材料学（村上陽太郎教授）、第五鑄造工学（森田志郎教授）、第六金属加工学（高村仁一教授）があった。若手ほど高い階で4階から高村、盛、3階 村上、2階久島、森田、1階 西原の各教授室があった。研究、実験室は原則として教授室の周りに割り振られたが、当然不足で、赤レンガと呼ばれた旧館でも足らず、私の学部卒論は「トーチカ」と呼ばれた仮設建物で、弗酸を使った実験をやった。記念館3階の教授室の筋向いには電顕室があり、暗室が付属していた。教授室の西隣には河野さん手作りのX線装置があり、小角散乱が実験されていた。助教は湯川安雄さんと、同期の赤井さんと「半導体材料」をやっておられた。

圓城敏雄さんは、講座開祖の西村秀雄先生の衣鉢を受け継ぐ「組織学」を引き継いだ方である。河野修さんとは最もご縁が深かった。電顕と小角散乱で、微小析出物（相分離生成物）の挙動を追う、というテーマが与えられたと思ったからである。こんなテーマは高村研の空孔論と平衡論、空孔移動の速度論を重ね合わせねば解けない。

村上先生は、酒を飲まれなかった。新歓と追い出し

の年2回のコンパも、午後8時には引き上げられた。朝の60分、（のち30分）の散歩も90歳過ぎまで続けられたと伺った。ご母堂や奥様のご丹精もあろうが、102歳のご長寿を全うされるわけである。

穏やかで何事も話しやすい先生なので研究室も村上研に決めたが、一度厳しく叱られたことがあった。液体窒素（沸点77K）は抵抗測定や低温変形で使い慣れていたが、沸点90Kの液体酸素でも測定したくなった。異なる二定点温度で測定した抵抗値の比から比抵抗値を推定できるからである。内容量29リットルのステンレス製液化ガス容器に1本、業者から液体酸素を購入した。抵抗用試料を入れるガラスデュワーに入れた液体酸素は空色をしていた。

さてお叱りの内容はまず液体から気化した酸素の強い支燃性である。極端な例で決してお勧めできないが、後年関西大学で空気から液体窒素を作る時、予冷に使った酸素の屋外排出管の出口に、火のついたタバコを持って行ったら、一瞬で全体炎の塊になった。当時人工時効処理に油浴を使っていたので、「ロケットの燃焼室と同じではないか」と言われた。液化ガスを使用時は部屋の換気が大切なことはすでに知っており、酸素中での測定時には、実験室のドアと窓をあけた。終わった後の余った分は中庭の砂地に空けて処理していた。D.C.を終えて助手になり、阪大に転勤するまで6年半の間、この種の事故はなかったと思う。

（昭和36年卒）

村上先生に教わったこと

赤 松 勝 也

令和元年の初秋、先生御永眠の報に接し驚愕いたしました。一昨年、先生の白寿のお祝いの会のあと、何人かでご自宅をお訪ねしました折、「次の皇寿の祝賀会」の話しが出ますと静かに微笑んでおられました。今、そのお姿を思い出しております。

先生には、小生、大学院の5年間で降御永眠されるまでの間、言葉では言い表すことができないほどのご指導を賜りました。まず、先生にご指導を頂くようになりましていきさつにつきまして少しだけふれさせていただきます。小生は戦後の復興期、とにかく「技術屋不足」の時代に大阪の工業界の支援を受けて大阪市内に新設されたばかりの関西大学の金属工学科に入学いたしました。金属工学科を専攻した理由は、生家が小さな鑄造工場を営んでおり、小生も小さい頃から鑄造工として働いていたため、できればもう少し金属工学の知識を得たかっただけのことでした。さて、新設された関西大学の金属工学科の先生方は、京都大学の

冶金学科にご縁のある先生方がほとんどで、村上先生も非常勤講師として3年生の講義を担当されていました。そして、4年生の卒業研究が始まり就職先の話が出始めたころ、指導教授から「もう少し勉強してみるか」というお話をいただきました。この先生は村上先生の弟弟子であられた先生で、そのような御縁からか京都大学大学院の受験に至った次第です。今思えば入試のための準備など全くせず、無鉄砲さの限り、先生方は多分小生の無知さに驚かれたに違いありません。筆記試験の後の面接では、もっぱら関西大学の先生方のご担当授業科目に関するご質問が多かったように思います。数日後、諸先生方のお計らいがあったことと思いますが入学のお許しを得ることができました。かくして、翌年4月からの5年間、さらにその後の約55年間先生にご指導を頂戴することになりました。いうまでもなく当時の大学は講座制。各講座の教授は神様のような存在であられました。小生が配属となった研究室は村上先生のお部屋の斜め向かいにあったもののお目にかかれることはめったになく、直接のご指導は圓城先生に仰ぐことになりました。圓城先生には大変お世話になりました。たとえば、研究方法や、資料の調査方法、それらの進捗状況などの報告を村上先生にするわけですが、その時は圓城先生が教授室に付き添いで来て下さいます。先生の前では、圓城先生も小生も直立不動。教授室に入ってからはずまず小生がご報告する内容を圓城先生に話します。それを圓城先生が要約して下さいって村上先生に話して下さいと言う形式で進みます。そのうちに先生から「苦しゅうない。直答を許す」というようなお声がかかります。小生らの時代はそのような時代でした。圓城先生には村上先生に次ぎご指導を頂きました。

村上先生に教えていただきましたことを挙げれば、枚挙にいとまがありませんが、その二、三を述べさせていただきます。先生をお偲び申し上げたいと思います。

先生は研究室では勉強をするとともに研究器具はいつでも大変高価であるので「常にこれらを有効に使用しなければいけない」とおっしゃっておられました。とにかく研究室では勉強や実験以外のことをしてはいけないことが基本でした。そのようなある時、知人からリン青銅中のリンの挙動を調べて欲しいと頼まれたことがありました。試料を調整、顕微鏡でその組織を観ていますと後ろに先生が立っておられました。研究以外のことをしてはいけないところで余計なことをしていましたので、どれだけ叱られるのかとありのままを申し上げ謝りましたところ、先生は「謝ることはない。大学は世の中で役に立つ技術者を養成しているのである。そのような依頼があれば大いに助けてあげ

なさい。組織が出れば自分が観てやろう」とおっしゃってくださいました。先生に頂いたこのお言葉は、その後、教育職に就くようになった時、学生諸君や技術相談に見える企業さんに対する小生の基本的な考えの「礎」となりました。

博士課程も3年目、小生の就職先も恩師の先生方のご高配を得まして、関西大学に奉職することが決まりました。そのようなある日の夕方、先生から教授室に来るようにと電話をいただきました。急いでお部屋に参りますと、先生は椅子の背に深くもたれかかられながら、両足は靴をはかれたままなんと机の上に投げ出されておられたのです。そして、「誰でもしんどい時はあるわなあ」と一言だけおっしゃったあと「もうええわ」と小生に部屋を出るように言われました。5年間ご指導を頂戴して初めて見た先生のお姿でした。先生は「お前はこれから教員になるが、他人の前では決して弱音や醜態を見せてはいけない。常に身を引き締めておけ」という先生の無言のご指導でありました。

(関西大学 昭和47年博士課程修了)

村上陽太郎先生を偲んで

猪飼 靖

冶金学第四講座が村上先生のご担当でありました。私は四回生の昭和38年に志望して配属して頂きました。記念館と六号館とに研究室がありました。河野助教授、赤井助手、大西助手、吉田技官らがおられました。総勢約30人でありました。博士課程にも修士課程にも立派なメンバーがおられました。同期は6人でした。研究テーマは「 α 黄銅の応力腐食割れ」を与えられました。指導して下さいった吉田先生からは研究への集中・気迫を教わりました。(吉田博行先生は間もなく京大原子炉の教授となって赴任された。)若い者は学習に際しては、その年齢のやや歳上の者の影響を好んで受けるようです。この研究室の自由で穏やかな雰囲気におおいに勢いづいて、やんちゃもしました。忘年会の幹事を受け持った時には、「定時に開始すること」を研究室全員に通告して置いて当日を待ちました。忘年会当日の遅刻者は教授と助教授でした。そして忘年会は定刻に開始されておりました。

修士課程の卒業に際して、私はアフリカの幾つもの国々に就職を望んで交渉し、大使館を廻りました。その年にはアフリカでは幾つかの動乱があって、交渉は全て断られました。村上先生にご相談すると、「もっと肩書を付ける必要があるということさ。学位を取るべく博士課程に進学する必要がある」とのこと。そこ

で進学の許しを願ひ出ると、「君の振舞はなあ……」と初めてのご説教を受けた。それが長かったこと。小さなことをいろいろ…と半時間、これで終わりだろうと思っているとその倍の時間まで伸びた頃には、もうこれできつと終わりだろうと思ったが、さらに倍の合計2時間のご説教を受けました。忘年会のことも含まれていました。その時にやっと気づくことが出来ました。「欠点を強く指摘しない、お互いに気配りをして穏やかに仕事しよう。特に乱暴者の君には」とのご趣旨を私が納得する程度にまで付き合ってお示し下さったのだと。その後の私には乱暴者の挙動は少なくなっていたはずだが……。

結局、博士課程を終えるころには、アフリカ行を諦めて村上研での助手一年の後に神戸大学の生産機械工学科に就職をお世話頂きました。その二、三年後に村上先生にご相談申し上げました。「授業の準備に苦勞があります。何が不足でしょうか？」ご回答は「自分の話す予定の内容と、関連する自分の知識の内容との比率を高めなさい」というものでした。この教えは間もなく理解できました。話す予定の内容に対して、私の自信ある背後の知識と考察の量が2～3倍程度の場合と比較して、知識・考察量が20倍程度を超えるようになると、気持ちよく安心して話が出来ようになりました。強い質問にも、異なる角度からの検討にも、落ち着いて気持ちよく対処できるようになりました。確かに特別講演でお話しなさる先生方の、穏やかで自信のあるあの話し方とは、背後の知識・考察の量が非常に大きいものだからと想像できるようになりました。村上先生のご研究は、時効性 Al 合金から始まって、銅系合金・Ti や Mg 系合金・形状記憶合金・焼結材料・複合材料ほかに亘る多様な合金系への状態図・物性からのご研究など目もくらむ多様性と深さをお示しになっておられることは本企画で既に示されております。そのご研究のごく一部の更に末端を担当させて頂いた私ですが、自身の未熟さを恥じて反省して、現役を含む皆様の一つご検討をお願いしたいテーマがあります。……自然科学における研究とは、試行とその吟味の上に成り立つものと考えておりました。その研究をうまく進める戦略として、「試行の手数を増す」「吟味の質を向上させる」が重要だと考えて来ましたが、どうやらこれだけでは不十分だと今になって思い当たるのです。ある研究目標と現有の成果との「隔たり」を「飛び越えて繋げる着眼」を「言葉にして表す」との意識的な努力がいっそう重要だと思うに至りました。なぜならば「問のない所に答えはない(答えが現れるのは過不足のない、ふさわしい問いが言葉で表現されたときのみ)」だからです。ご批判・ご検

討ください。

本年2月初めに村上先生のお眠りになっておられる京都霊園にお参りしました。私の同期の永田公二さん・長村先生ご夫妻と私ども夫婦の五人でした。阪急電車桂駅東口からの送迎バスで案内された霊園は広大で、園内に幾つものバス停がありました。長村先生によくご案内された先生のお墓は南向きに静かに佇んでおりました。そうしてそれは、やがて皆の詠む読経の中に静かに穏やかに溶け込んでいきました。合掌。

(昭和39年卒)

村上先生から学びしこと

長 村 光 造

村上先生が他界されてからはや1年が経ちますが、ご高齢になるまで絶えることのない研究心をもたれて今でも材料工学教室の図書室で調べものをして居られるような思いにかられます。先生は若いときに大病を患われたせいか、日常の生活では健康に気をつけられていたこと、健脚で毎日万歩計が振り切れるまで歩いておられたこと、夏の暑いときでも冷蔵庫から出したお茶を冷たいままでは飲まずに一旦室温に戻して飲んでおられたことなどは門下生に共通する思い出ではないでしょうか。ところで私が4回生の頃を思い出すと、記念館には教授室があり、先生・先輩としては研究室に吉田博行さん、猪飼靖さん、赤松勝也さん、六号館の主は316号室に大西東洋司さんと私に半導体を教えて頂いた赤井慎一先生、314号室には小松伸也さん、315号室は河野修先生が居られました。存在感が一番あったのは小松さんで私は壁越しにお一いちよっと来いと大声をかけられたものです。村上先生が帰られると連絡があり我々六号館の住人は記念館に移動して酒盛りをしたものでした。卒論、修論の研究については、テーマを決めた後は村上先生から日ごとの細かい指示はなく、皆失敗もしながらも自分の研究として真剣にしかも生き生きと取り組んだものでした。このような自由が感じられる研究の場を用意することは教育という観点からは大切なことであり、それは学生さんの成長のために最適な環境となります。このような勉学の場を用意し、さらに研究分野の動向を見据えて最先端のテーマを学生さんに学んでもらうようにする、これは研究者としての鋭い考究の裏打ちがあってできる優れた教育者によりできたことだと思います。

我々の来歴の始めは戦前の採鉱冶金学科にあり、戦後冶金学科と鉱山学科の2学科に別れ、1961年には冶金学科に金属加工学科が新設され、さらに1994年金属系2学科は改組により、材料工学専攻とエネルギー

ギー応用工学専攻の一部になり現在に至っています。その歴史の中で1953年から村上先生は冶金学第四講座を担当され非鉄冶金学を主とした研究・教育に携わられました。丁度欧米との交流が盛んとなり進んだ科学技術が取り入れられ、また村上研にも留学生が来るようになった時代です。アルミニウム、銅、チタンとそれらの合金の基礎と工業技術から、さらに半導体、形状記憶合金、焼結材料、複合材料等の多様な材料への展開がなされます。これらの材料の平衡・非平衡状態図の実験的及び熱力学的な解明からミクロな材料物理学的な知見の探求へと研究を進められました。これは化学、物理学とも領域の異なる学問分野として発展してゆく材料科学の流れに沿うもので、全国の関連する大学・研究機関での同様の研究の方向性を先導して提唱・実施されてきたものです。分析機器技術の飛躍的な改良・発展により材料の本質をミクロレベルで探索することが可能となりナノスケールでの定量的な知見が得られるようになり、さらにこのような学術的蓄積を基礎にして色々な材料についてのミクロ構造の情報の全体を比較・統合できるようになりました。先生はニューマテリアルセンターにおける幅広い新技術・新素材の調査研究へとその活動を続けて来られました。いまではこれらの膨大なデータを人工知能(AI)が解析して答えを見出し、さらにこれからはAIの答える定量的な知見を活かして多くの自由度をもって新しい材料の考案が可能となります。我々の後輩が活躍する材料工学でも新しい分野のニーズに合う工業材料の創出に関する研究がすすめられています。少し村上先生の追悼記事からずれ始めているように思われるかもしれませんが、先生のご業績の位置付け、その重要性に客観性を持たせるために筆を滑らせてみました。

本水曜会誌は採鉱冶金学科の卒業生の同窓会誌として123年の歴史をもつものです。実は村上先生が恩師西村秀雄先生の追悼文を水曜会誌19(1978)74に書かれておられます。学問の流れが脈々と引き継がれていくことを強く感ずるものです。我々の分野はこの自然界からの恵みを安全に取り出しどのように合理的に人類に役立てるか、しかも安全に自然に戻すかを研究・具現化する場です。村上先生をはじめ多くの先輩の成し遂げられたこれまでの貴重な財産を我々後輩は受け継ぎ社会のためにさらに発展させてゆかねばなりません。

その想いを胸に先生の安らかな永久の眠りをお祈りいたします。

(応用科学研究所 昭和40年卒)

村上陽太郎先生を偲んで

落 合 庄治郎

村上先生の訃報に接したときは信じられませんでした。お元気なお姿が今も鮮明に浮かびます。先生には、学生時代はもとより、卒業後もご指導いただくとともに、結婚の仲人をしていただくなど公私ともに大変お世話になりました。心より深く感謝申し上げます。

非鉄金属材料に興味を持った私は、村上先生の研究室を希望し、入れていただきました。4回生時の卒論は銅合金の時効における粒界析出でした。大きな転機は、私が修士一回生になってすぐに、先生がA. Kelly先生の著作本の和訳「複合材料 強靱化の理論と応用」(丸善)を出版され、それを機に、村上研究室の研究テーマの一つとして複合材料研究を始めることになり、この分野に私を誘っていただいたことです。これが出発点となって、複合材料は私の終生のテーマになりました。村上先生のおかげで、学術テーマとしての複合材料に出会えたことを感謝しております。

複合材料研究をスタートさせるにあたり、村上先生は直接の指導教官として、複合材料の学術的なコンセプト・手法を教えてください、研究室内及び学外研究施設で試料作製、力学特性測定等の実験ができるよう整えてくださいました。最初の実験データを図にして先生に報告すると、笑顔で「いい結果だ、よくやった。」と喜んでくださったことが忘れられません。その後、新たな実験データが出て報告に行ったり、問題が生じて相談に行ったりすると、お忙しいなか、私を啓発するように「君の考えは？」と尋ねたうえで、懇切丁寧に、私の考えを論評しつつ、実験結果の解釈や問題の解決法を考えて下さいました。さらに、結果を積み重ねていくと、「論文にしよう。将来は英語で書きなさい。まずは日本語で原稿を考えなさい。日本語で論文査読者とのやり取りなどを学びなさい。」とご指導いただきました。日本語論文原稿を見ていただくと丁寧に校閲いただき、1ヶ月後に、査読者意見が返ってくると、査読者への回答書の書き方、論文修正の仕方など、丁寧に教えていただきました。2報の和文論文の後、3報目で英文論文を書きました。このときには、私の至らぬ英文を先生ご自身と在米の村上研出身者で校閲いただき、また、投稿後査読者意見が来たときは英文での回答書の書き方、修正の仕方、適切な英語表現などを学ばせていただきました。このように、研究者として重要な研究の進め方や論文執筆を、厳しさと愛情を合わせたご指導で、学ばせていただいたことに感謝しております。私も研究室を持ってから、村上先生の当時のご指導そのままに、学生と話し合う場を作って、

研究や論文執筆の指導をしてきました。中堅やベテランの年齢になった卒業生から、若手指導は当時の私の指導を思い浮かべながらやっているとの音信が届いています。村上先生の教えは時代を越えて受継がれています。私は古希を越えましたが、いまま研究スタート時の村上先生のご指導を、幸をいただいたと感謝しております。

村上先生は、京都大学で28年間、関西大学で7年間、教授を勤められた後、大阪科学技術センター・ニューマテリアルセンターで初代所長を勤められました。先生の非鉄金属材料学、新素材・新技術の広範な分野にわたる研究業績は、国内外で高く評価され、日本金属学会、軽金属学会の学会賞をはじめ、極めて多くの学術賞を贈呈されておられます。日本政府からは勲二等瑞宝章を受章され、ドイツ金属学会では名誉会員に推挙されておられます。研究とともに、教育にも尽力され、数多くの学生を育てると共に、新しい観点に立脚した多数の教科書・参考書を、出版されています。

先端の新素材・新技術の紹介・普及活動にも尽力されてきました。この活動で、特に印象に残っているのは、1990年1月から2018年4月までの28年間にわたり、101歳になるまで、毎月、大阪科学技術センター・ニューマテリアルセンターのニュースレターに、その時々々のトピックスを交えながら、「新素材・新技術」の紹介・解説記事を休みなく書き続けられ、材料科学技術の普及・広報に大きな貢献をされ続けたことです。情報収集に京大の図書館に来られ、多くのコピーを家に持って帰り、集約してわかりやすい文章にされました。そのお手伝いを少しさせていただきましたが、お会いするたびに、先生の旺盛な好奇心、明晰な頭脳・理解力・表現力にただただ敬服の念を増すばかりでした。本当にすごい先生でした。足元にも及びませんが、先生に少しでも近づければと、お目にかかるたびに気を引き締めていたことを思い出しております。

陽光の もとで学びし 青年期

古稀越えてなお 幸に包まる

陽光を 照らし賜ひし 人生に

学理輝き 教えは永遠に

(京都大学 昭和46年卒)

風格と人を思う心

岡 本 一 郎

「岡本君、どや?」、振り向くと村上先生のくしゃくしゃの笑顔。廊下を飛ぶように歩かれるあのリズムカルな足音とともに、今も深く胸に刻み込まれています。その春風のような雰囲気の後ろに、一研究者ではない、

凛とした教育者としての威厳と風格が漂っていました。在学中から今日に至るまで、先生から生涯の支えになる教えをたくさんいただいたように思います。

時代はそれぞれ、においがあります。私が京大に通ったのは、昭和50年代前半。ちょうど大学紛争が終結を迎え始めたころ。あの圧倒的なエネルギーが最後の炎を燃やしていた時期でした。建物はあたり一面張り紙だらけ。至る所に立て看が並び、教養の試験になるとなぜかヘルメットをかぶった若者達が学内に湧き出てストを宣言。テストがレポートに切り替わる繰り返しでした。いつだったか、学内に機動隊が導入されたことがあります。ジュラルミンの盾が時計台のクスノキを丸く囲むのを、工学部6号館から偶然目にしました。西日にキラキラ光る盾。無邪気に「きれいだな」と思った記憶が残ります。そんな時代でした。

今も昔も、京大は自由な学風を大切にしていると感じます。勉強したい者には惜しみなく場を与え、したくない者には気づくまで自由にさせる。そんな気風に満ち満ちています。学生時代は、これからの人生行路を決める大切な分水嶺。自ら思い悩み、方向性を探り、試す…。一意専心、学問への道を見つけ一直線に進む者。一気に多様な価値観に触れ、その大洪水を前に何をしたらよいのか果敢と立ちすくむ者。私の周りにも、たくさん悩みを抱え、糸の切れた風のように錐もみ状態になっている人間がたくさんいました。私もまさにその一人。大学にも行かず、多くを思い悩んだ時期でした。ありがたいことに、京大の懐の深さはそれを許してくれました。そんな京大で、村上先生は研究者としての目だけではなく、教育者として一段高い見地から学生たちを温かく見つめておられたと思います。研究に関しては、すでに直接学生を指導されるお立場になく、助教授や助手の方々を通じてのご指導でした。しかし、先生の言動を思い起こすと、この人間を本当に生かすにはどうしたらよいかまで踏み込み、深く考えておられたように感じます。研究者として学問の世界で生きていけるのは、限られたほんの一握り。それ以外の学生にも、一人ひとりどのように世の中に役立たせるのか、生きがいを感じさせるのか、決して押し付けるのではなく、辛抱強く自らの気づきを待たれる境地。そして困ったやつだと思いつつも、適材適所を見極め、そっと背中を押すご心境だったのではないかと推察します。

ちょうど私が大学にいたころは、二つのオイルショックに挟まれます。そして、就職を考え始めた昭和55年は第二次オイルショック直後。日本経済全体が深く冷え込んでいた時期。就職希望の提出が迫る中、私は自分の将来も明確に思い描けず、うじうじ考え込

んでいました。ただ時間だけが過ぎていきます。取敢えず「えいや〜」とリストの中から三社ほど選び、提出。すると早速村上先生が研究室に来られ、「岡本君、日軽金、希望するんか?」いつものようににっこりされました。「はっ、はい…」あいまいにお答えすると、すぐさま先輩に連絡を取ってくださり、「明日、先輩が来るから」。これで決まりでした。翌日研究室に先輩が来られ、京大会館で昼食、そこで就職が決定。「こいつは研究職ではなく、実際の現場で人と接し、汗を流した方がよっぽど役に立つ」というお考えだったのだと思います。

正解でした。先生のお見通し通り、ともに笑い、ともに泣き、生産現場やビジネスの場で、外部を含め、たくさんの良き仲間と囲まれ、たくさんの汗を流し、今日まで日々楽しく仕事を続けることができました。あの時の先生のあたたかい一押し、今も深く感謝しています。

今年64歳。あっという間に村上先生が京大を退官された年を超えてしまっている自分に気づきます。またいつか、ポンと背中をたたかれ、「岡本君、どや?」と、声がかかるといふような気がします。「先生、村上研を卒業させていただき、本当にありがとうございました。先生の頭を悩ませたあの岡本が、先生の教えをもとに、世の中でこんなことやってきました」。向こう岸で再びお会いした時、たくさんのご報告ができそうです。合掌。

(日本軽金属ホールディングス 昭和54年卒)

村上陽太郎先生を偲んで

日 高 貴志夫

私は関西大学で学部4年から大学院修士課程2年まで村上研究室にて先生にご指導を賜りました。昭和59年3月に課程を修了し、引き続き米国ノースウェスタン大学にて博士課程後期をすごさせて頂きました。先生のご指導は優しいお人柄ながら、筋の通った研究者の印象があります。村上先生は、いまは亡きジェローム B. コーエン先生と仲が良く、そのコーエン先生がポストク時代に過ごされたパリ大学のアンドレ・ギニエ先生の話がされたことがありました。ギニエ先生が廊下を歩く音が聞こえると、ポストクや大学院生達が緊張し空気が張り詰めるというくだりは、思わず「懐かしい」と共感してしまいました。村上先生には、研究内容だけでなくそこに真摯に向き合う姿勢までも教えて頂いたことを深く感謝しております。

在学中でしたがある時、「君は憤っているか。」と質問されたことがありました。あまりに唐突であったた

めに回答に苦慮しておりました。急に優しいお顔に戻られ「たまたま答を見つけ出しても、それが全てではないよ。」と付け加えてくれました。このお言葉は忘れられず、いまでは私の座右の銘になっております。

ノースウェスタン大学博士課程修了後に、(株)日立製作所に入社し、日立研究所に配属になりました。そこで超々臨界圧火力発電用耐熱鋼の研究開発を担当致しました。その頃、村上先生から日立研究所をご訪問頂き、久しぶりにお話する機会がありました。大学を定年退官された後も、精力的にご活躍されているお姿を拝見し、「The scientists never retire.」を実践されていることに胸が熱くなったことを覚えております。お亡くなりになる直前まで私を忘れずに、101歳になられても、ニューマテリアルセンターから「新素材・新技術」を定期的にお送りくださったことにも深く感謝しております。

日立も2000年代に入りますと、時代の動向で工場の海外移設および分社化が進み、国内にもの作り工場がなくなる時代に入りました。もの作り現場不在の材料研究者に限界を感じるようになりました。そこで、山形大学の地域教育文化学部の教員公募に応募し幸い御縁がありましたが、着任早々に学部改組にぶつかり、有志の先生方と心機一転、工学部建築・デザイン学科を創設して四年目になりました。現在では、学生達と電磁波遮蔽・吸収材料の開発評価をしております。先生のご冥福をお祈り申し上げます。

(山形大学 昭和59年関西大学修士課程修了)

会 報

訃 報

中廣 吉孝 先生

本会特別名誉会員中廣吉孝先生は令和元年10月24日に逝去されました。ここに先生の生前のご功績を偲び、謹んで哀悼の意を表します。

中廣吉孝先生の御略歴

昭和32年 京都大学工学部鉱山学科卒業
 昭和39年7月 京都大学助手
 昭和52年11月 京都大学講師
 昭和57年11月 京都大学助教授
 平成3年4月 京都大学大学院工学研究科
 環境地球工学専攻
 資源循環工学講座助教授
 平成6年12月 京都大学大学院工学研究科
 資源工学専攻
 精製工学講座教授
 平成8年5月 京都大学大学院エネルギー科学研究科
 エネルギー応用科学専攻
 資源エネルギー学講座
 宇宙資源エネルギー学分野
 (現ミネラルプロセッシング
 分野)教授
 平成9年3月 定年退職

中廣先生の御略歴、卒業生からの御寄稿は2012年10月発行本誌第22巻第10号752～755頁に掲載されています。先生の御在職時からの御功績につきましては、それらを改めて拝誦しても渺々たるものです。

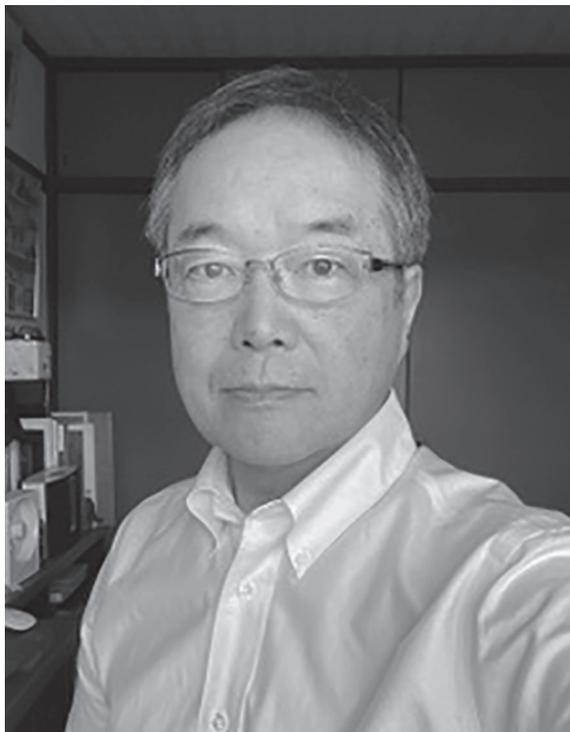
宇宙資源エネルギー学分野はミネラルプロセッシング分野と研究室(分野)と名称を変えましたが、選鉱、環境・リサイクルに中廣先生の理念を基にして発展させ、資源ならびに環境・リサイクル分野における選鉱学・精製工学、分離プロセス工学の研究室として研究・教育に取り組んでいるところです。水曜会の皆様には、今後とも、御指導、御鞭撻の程、何卒宜しく願い申し上げます。中廣先生の御恩に深く感謝申し上げますとともに、心より御冥福をお祈り申し上げます。

(日下英史 昭和61年卒)

※ 中廣吉孝先生に関しては、「水曜会誌」第22巻10号752-755頁に所載の停年ご退官に関する記事もご参照ください。[編集委員会]

会 報

京都大学大学院工学研究科教授 松原 英一郎先生は定年退職されました。



松原 英一郎先生の御略歴

松原 英一郎先生は、昭和52年3月京都大学工学部冶金学科を卒業後、京都大学大学院工学研究科修士課程冶金学専攻を経て、昭和59年6月米国ノースウエスタン大学大学院工学研究科博士課程材料科学専攻を修了し、同年8月に米国ノースウエスタン大学よりPh.Dの学位を授与されました。昭和59年7月東北大学選鉱製錬研究所助手に採用され、平成3年8月同研究所講師に昇任、平成5年4月京都大学工学部助教授に昇任、平成11年9月東北大学金属材料研究所教授に昇任し、金属材料研究所ランダム構造物質学研究部門をご担当、平成17年4月京都大学工学研究科教授に転出、ご退職まで工学研究科材料工学専攻材料設計工学講座をご担当されました。

この間長年にわたって学内においては、学生の教育と後進の研究者の指導にあたり、多くの人材を育成されてきました。平成26年10月より平成30年9月まで京都大学産官学連携本部副本部長、平成27年4月より京都大学理事補(産官学連携担当)を務められました。学外においては、平成29年4月より産総研・京大エネ

ルギー化学材料オープンイノベーションラボラトリ副ラボ長を併任、大学評価・学位授与機構材料工学会専門委員、日本学術振興会科学研究費委員会専門委員、高輝度光科学研究センター科学技術助言委員会委員、東レ科学振興会選考委員、松籟科学技術振興財団評議員、日本金属学会理事、ネオマテリアル創成研究会理事等を務め、学術行政や活動にご尽力されました。

松原 英一郎先生はこれまでにわたり金属物質の局所構造と物性に関して多くの業績を上げてきておられますが、その主なものは次の通りです。

1. 放射光X線による非平衡物質構造解析に関する研究

放射光X線を用いた物質の構造解析がまだ一般的ではなかった80年代初めに、コーネル大学の放射光施設チェス (CHESS) を用いて世界ではじめてX線散漫散乱実験を行い、帰国後もそこでの知見を活かし高エネルギー研究所フォトンファクトリー (PF)、その後、高輝度光科学研究センター SPring-8およびX線自由電子レーザー施設SACLAで、放射光X線の特徴を

活かしたX線異常散乱, 蛍光X線ホログラフィー, X線回折吸収分光, フェムト秒多結晶X線回折などの測定方法, 装置開発, 解析技術を確立し, バルク金属ガラス, 光触媒チタン酸化物ガラス, 異常共析モリブデン錯体溶液などのランダム系物質や, カルコゲナイト系光相変態物質などの構造解析に適用し, 物質の構造と物性発現との関係について多くの成果を挙げられました.

2. 液相還元法によるナノ金属物質合成に関する研究

プリンタブルエレクトロニクス用のインクとして注目されていた銀及び銅金属ナノ粒子の大量合成法を開発するために, 当時主流であった乾式法に代わり, 合成時の形態制御が容易な液相還元を用いた液相法に着目し, 合成時の金属ナノ粒子の還元反応の駆動力と析出速度をモニターできる水晶振動子マイクロバランス電極を活用した方法を考案し, 銀及び銅金属インク合成法を確立し, 共同研究を行った企業による実機での合成にも成功しました. この液相反応のその場観察技術は, その後, 産学の研究者や技術者に広く利用されています. また, この技術を強磁性金属ナノ物質の合成に適用し金属ナノワイヤー合成法にも成功しました. この金属ナノワイヤーの大きな比表面積とナノ構造に起因する応力緩和を活用し, 大きな体積膨張によるサイクル劣化の抑制が課題である大きいエネルギー密度が期待できるリチウム金属イオン電池活物質への応用を実証し注目を集めました.

3. 蓄電池反応下での蓄電池活物質の相変態に関する研究

車載用LIBの1回の充電での走行距離を延ばすために, 現状のLIBのエネルギー密度を遥かに超えるポストリチウム電池の研究開発に携わり, 蓄電池反応下の蓄電池内部で発生する様々な電極物質内部の電気化学反応を観測するために, SPring-8に蓄電池反応解析用の専用ビームラインを, 理化学研究所播磨研究所と共同で建設し, 自らのグループによる蓄電池活物質の相変態研究に利用する共に, プロジェクトに参加する企業に放射光による解析技術を提供されました. ここでの研究は, NEDO革新型蓄電池プロジェクトの中心的技術として国内外から高く評価されています.

以上の研究結果は, 学術論文として和文論文27篇, 欧文論文361篇に発表されてきました. このように, 松原英一郎教授は, 36年にわたる材料工学, 放射光・X線などの材料評価を含む金属物性の専門分野において, 斯学の進歩に大きく貢献されるとともに, 材料工学の新領域への展開において, 特に金属ガラス物質工学, 蓄電池物質反応解析および構造相転移ダイナミクス測定技術に関し指導的役割を果たされてきました.

それらの功績は誠に大きく顕著なものがあり, 後学の学者や研究者にとって大きな財産となっております. これまでの松原先生の長年にわたるご業績を讃えるとともに, これまでの数多くのご指導に厚く御礼を申し上げます. また, 松原先生におかれましては, 今後, 益々ご健勝でご活躍されますことを, 心より祈念いたしております.

市 坪 哲

(東北大学金属材料研究所 教授 平成7年卒/
平成12年博)

松原先生のご退職に寄せて

林 好 一

松原先生, ご退職おめでとうございます.

私が材料工学専攻に助手として着任したのは1996年の夏頃だったと思いますが, 松原先生が, X線研究に関する著名な研究者であることはすぐに分かりました. 私もX線回折を学生時代のテーマとしていたため, その後, いくつかの議論や実験を京大材工でご一緒させて戴く機会にも恵まれましたが, 1999年に東北大学金属材料研究所の教授として異動される際に, 一緒に付いていくことになるとは直前まで予想していませんでした.

その後, 東北大学松原研究室においては, より本格的にご指導戴くことになり, 主に蛍光X線ホログラフィーの研究に集中して取り組むことになりました. 蛍光X線ホログラフィーは今となっては, 私の名刺代わりとなっている研究テーマであります. 非常に測定が難しい手法として知られておりました. そのため, 当時は多くの研究者が試みては, 去っていくといった状況が繰り返されていたと思います. 少し専門的になりますが難しい点は, 蛍光X線中に含まれるホログラムの成分が極端に少ないことです. 例えていうと, 1000フォトンの蛍光X線の中の僅か1フォトンしかホログラムに寄与しません. このため, 目的の蛍光X線を純粋にしかも高強度で検出する必要があったのですが, なかなか当時の技術では, 良い解決法がありませんでした.

一方, 松原先生は湾曲させたグラフィット分光結晶の研究開発に取り組んでおられ, 非常に効率よく単色X線を集光させることに成功しておりました. この技術が, 運が良いことに蛍光X線ホログラフィーの研究に転用できることが分かり, 松原先生も快く貴重な分光素子を貸して下さりました. 結果は上々で, 懸案だった純粋な蛍光X線の高強度検出という問題がかなり早期に解決されました. その後, ホログラムパターンの

統計精度は一気に向上し、フーリエ変換して得られる原子像からも定量的な原子構造に関する議論ができるようになりました。今では、私の蛍光X線ホログラフィーに関する論文数は、ざっと100本以上を数えますが、この時点での技術的進展が無ければ、これも幻になっていた可能性があります。2005年に松原先生は京都大学に戻られたため、東北大で一緒に戴いた期間は決して長くなかったのですが、自身の研究テーマに命を吹き込んで下さったのだと、今では思っています。

その後もしばらくは、京大松原研に年に1~2度、遊びに行く程度の交流はあったのですが、2015年に私が名工大に異動して後、革新蓄電池開発の国家プロジェクトであるRISING2のメンバーとしてお誘い下さりました。ここで与えられた課題は、放射光を用いた電解液の構造解析でした。これにまでは結晶材料、特に、単結晶のみを取り扱ってきた私にとっては、未知の研究領域への挑戦であり、ご期待に応えられるのか、若干の不安もありました。しかも、テーマの一部は松原先生が若い時より取り組んでこられた「X線異常散乱」を利用する必要もありました。ここでも、研究の方針や実験の進め方、解析についてもご指導戴く機会に恵まれました。そのお陰もあり、最近、少しずつ論文として成果が上がっています。松原先生は、X線異常散乱の解析は簡単だと仰っておられましたが、あまり簡単で無かったように思います。しかしながら、うまく解析できると、比較的広い数ナノメートル範囲の中距離秩序構造を観測できるため、溶媒和などの比較的大きな構造体の決定に有効であることが分かってきました。もっと熟練してくると、蓄電池の各種反応の正体に近づけそうな気がします。遅まきながら、松原先生がこの手法の開発に精力を傾けてきた理由が分かったような気がしました。今後、私の研究室でも続けさせて戴き、若い人にも技術を繋げていきたいと考えています。

最後に、研究とはあまり関係ありませんが、印象深い思い出のひとつとして、松原先生が東北大に異動された直後に、夫婦ともども宇治の普茶料理の店にお誘い下さったことがあります。その時には、ご自身の夢をとうとうと語られていたと思います。そのお話から、松原先生に着いていくと自分の未来も拓けるような気がしました。普茶料理の店に、一緒に連れて行った当時0歳だった娘も、今では大学生になり、近しい分野を勉強しているようです。最後になりましたが、心よりお礼を申し上げますとともに、松原先生のご健康とご活躍を祈念しております。

(名古屋工業大学 教授 電子工学専攻 平成8年博)

松原英一郎先生のご退職に寄せて

宮崎明彦

この度は定年での退職、誠にありがとうございます。

先生には2005年4月に修士課程に進学し、松原研究室(材料設計工学研究室)に配属された時から大変お世話になっています。松原先生はその前年度まで東北大学・金研の教授を務められており、京都大学に移られて最初の年でした。ですので、私は京都大学・松原研の第一期生にあたります。実は、配属希望を出す際には、恥ずかしながら松原先生の研究内容について知っていたわけではなく、「X線を用いた構造解析が専門だが、新しい分野(ものづくり)にも力を入れていく方針」というところだけ聞いておりました。私は、新しい分野というところに惹かれて松原研を選択しました。4月に松原先生に最初にお会いした時の印象は、エネルギー&関西弁です。その時は実験装置の配置場所の寸法を測って回っておられたのですが、「心配せんでいいよ。装置が来たら死ぬほど実験させたるから。」という言葉覚えてます。

配属して直ぐ、まだ研究テーマが決まっていないうちに、松原先生から、「リチウムイオン電池ってなんで劣化するの?」と聞かれました。私は、もともとクリーンエネルギーに興味があったので、この疑問が気になって、リチウムイオン電池の論文をあこれ調べました。(2005年の4、5月ころはほとんどこれしかやってなかったと思います)。

6月に市坪先生(現:東北大学金研教授)が着任されてきてすぐ、劣化のメカニズムについての報告をさせていただいたところ、研究対象として面白いのではないかとお話をいただきました。その後、市坪先生から松原先生に相談していただき、リチウムイオン電池材料の研究をテーマとすることになりました。後で思い返してみれば、松原先生の中で蓄電デバイス分野へ進出するロードマップが頭の中ですでにあり、新しいことをしたがっていた私にちょうどいいと思ってあの質問をされたのではと思います。改めて先生の先見の明に驚かされました。

リチウムイオン電池の研究では、負極向けのグラフアイトに代わる高容量材料候補であったスズに着目して、スズの課題である体積変化に伴う劣化を抑制する方策を検討しました。松原先生の多大なご支援のおかげで、ガラスコンポジット、ナノ粒子化、多層膜化、などいろいろな形態の材料についてトライすることができました。当時、一期生ということで先輩から実験

を学ぶ機会がなかったのですが、先生から直接いろいろな実験を教えてくださいました。新規テーマでなかなか思うように結果が出ない中で、粘り強くご指導いただき大変ありがたかったです。卒業後、OB懇親会で、リチウムイオン電池研究が松原研のメインテーマの一つになっているという話を聞き、大変うれしかったです。

また、松原先生には研究活動以外でも大変お世話になりました。当時できたばかりだった、学内のレストラン“カンフォーラ”によく連れて行っていただきました。バーベキューをしたときは、車（たしかホンダ車）を出勤していただき、先生ご持参のコンロで肉を焼いた記憶があります。しかもそれより以前に私が、どこかのバイキングの店で肉質がどうかと面倒くさいことを言っていたので、わざわざいい肉を買ってもらっていました。ありがとうございます。また、機会あればご一緒したいです。

松原先生は、退官されてからも、精力的にご研究や産学連携の仕事に取り組まれると伺っております。また是非お話を聞かせていただければ幸いです。今後の益々のご健勝・ご活躍をお祈りしております。

（日本ゼオン株式会社 平成17年卒／平成19年修）

松原先生のご退職に寄せて

後 藤 なつみ

私が京都大学工学研究科材料工学専攻の材料設計工学研究室（松原研）に所属していたのは2006年～2009年の3年間で、学部4回生から修士課程修了までお世話になりました。京大で松原研がスタートしてからまだ3年目でしたが、非鉄金属・金属ガラス・電池材料・放射光分析技術開発など、バラエティに富んだ研究内容が面白そうと感じて志望しました。研究室の雰囲気としては、松原先生、市坪先生、八木先生を始め、先輩方もフランクに接してくださり、同期も7人と多く楽しく過ごしました。

私の松原研での研究テーマは電池材料でした。非鉄金属と放射光分析技術開発を中心とする松原研において、当時、電池関係は異色のテーマで、2学年上の宮崎先輩が市坪先生のご指導の下で始めたばかりの分野でした。電気化学特性の評価については機材も少なく、粟倉研（現宇田研）の装置も借りながら実験していたことを思い出します。私は研究生生活の中で電池材料に興味を持ち、卒業後から現在までも企業にて電池材料の開発に従事しているのですが、松原研らしくない進路を取ったと思っていました。しかし、松原研ではそ

の後ますます電池材料の研究・分析に力を入れられ、数年後には電池関係がメインテーマになっておられることには驚きました。放射光を使った電池の分析技術については、松原研ならではの発展だと思えます。その後、革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発事業（RISING2）のPLを務められ、更にはエネルギーシステム・マネジメントまで手掛けようとされていると聞き、松原先生の視野の広さと行動力には敬服いたします。

松原先生は研究だけでなく、産業とのつながりも非常に重視されていました。毎年、企業の実業社員の方に学生が直接話を聞ける材料工学フォーラムを松原先生が主催者として開催されていました。企業における材料開発の意義を知ることのできた大変貴重な機会でした。夏季に合宿をして、先輩社員の方々と学生でじっくりばらんに交流したこともありました。他ではなかなか無いであろうこのような特別な体験ができたのも、学生と産業をつなげようとして動いてくださった松原先生のおかげです。松原研学生としてそのお手伝いをしたのも良い経験であったと思います。

卒業後も結婚式に参列いただいたり、同窓会に赤子連れでの参加をお許しいただいたり、子供を抱っこしていただいたり、有難いことに松原先生とのご縁は続いています。昨年末の同窓会では東北大・京大の松原研卒業生が集まり、松原研での思い出や現在の話をする機会に恵まれました。全国に松原研の先輩が大勢いることを嬉しく思いました。松原研は無くなってしまいましたが、松原研出身であることを誇りに思い、それに恥じないように精進していきたいと考えております。

今年は新型コロナウイルス（COVID-19）感染症の流行で、私も現在ほぼ在宅勤務をしておりますが、在宅勤務時のお供として、先日の同窓会で土産にいただいた松原先生のサイン入りのマグカップを愛用させていただいております。このマグカップをPC横に置いて作業していると、松原先生に見守っていただいているような、また松原先生のお知恵も少し授けていただけるような気がして、仕事に向かう力を毎日いただいております。これからも松原先生のお力を勝手に拝借しながら、技術開発に邁進してまいります。

最後になりましたが、これまでの松原先生のご指導・ご鞭撻に厚く感謝申し上げますとともに、今後のご健勝・ご活躍をささやかながらお祈りいたします。またお会いできる日を夫婦ともに楽しみにしております。

（パナソニック株式会社 平成19年卒／平成21年修）

松原先生のご退職に寄せて

河 盛 誠

松原先生には、修士課程から博士課程修了までの5年間にわたり、多大なご指導ご鞭撻を賜りました。

研究の進め方や論文の書き方、学会発表に関わるご指導等に留まらず、松原先生からご教授頂いたことはとても多く、全てを表すことはできませんが、この貴重な機会をお借りして、深い感謝の意を表したいと思います。

松原研究室と出会った2008年当時、松原先生、市坪先生、八木先生が在籍され、先生方が立ち上げ・諸先輩方と共に築いてこられた京都大学松原研究室はまさに新進気鋭といった印象を受けました。非常に魅力的に感じた私は、是非、松原研で研究を行いたい、と研究室配属の希望を出しました。X線構造解析、リチウムイオン電池、金属ガラスといった多岐に渡る最先端の研究テーマ群の中、ご提示頂いた「液相還元法による鉄族金属ナノ物質の設計」の研究に没頭できた松原研究室での日々はかけがえのないものでした。松原先生の研究指導は、学生の自由な発想を促すものであり、新しい実験について相談したときには、「構わん構わん、やってみなさい。あるいは～」といった要領で、学生の着想を受け入れつつ、思いもよらないようなアイデアを頂くことが多々ありました。また、研究が誤った方向性に進みそうな場合でも頭ごなしに否定せず、議論を重ねた上でそれとなく道を示すような、学生の自主性を尊重したものと感じておりました。松原研での自由闊達な文化の中で、学生は伸び伸びと各自の研究を進めていたように思います。私自身も、実験を行っては新しく得られた結果について考察し、先生方や仲間達とディスカッションを行う研究生活を非常に楽しいと感じることができました。「研究は楽しい」と松原先生に教えて頂いたことがルーツとなって、現在でも楽しく（ときに苦しく）研究開発に従事しております。

また、研究は楽しいだけでなく生みの苦しさを伴うものであり、特に「オリジナリティー（独創性）」が重要であるとも教えて頂きました。修士課程のとき、企業への就職かあるいは博士課程への進学か進路について悩み、松原先生にご相談させて頂いたことがありました。そのとき、先生は力強く三本の指を机に置いて、「自分の強みとなる柱（専門分野）を3つ作れば倒れない基盤ができる。博士課程で第1の強みとなる誰にも負けない柱を作りなさい。」と励ましの言葉を

頂きました。当時の私は自分の強みとなるような専門分野を獲得できておらず研究者として何者でもないなと感じておりました。松原先生から頂いた激励の言葉を胸に刻み、博士課程では自分の専門性を高めることと、オリジナリティーのある研究を行うことを目標に置き、論文投稿や学会発表を通して、主に材料電気化学を専門として研究者としての基礎を築くことができたと考えております。博士課程修了後、企業に就職した現在でも、松原研で培った専門性を基盤として研究開発に取り組んでおり、生きる上での大切な武器を先生方に与えて頂いたと感じております。2019年12月に開催された松原先生のご退職記念講演会でも改めて、「自分を見失わないこと、オリジナリティー（独創性）の起源」について、ご教授頂きました。先の見えないVUCA時代と言われる現在および未来において、松原先生の言葉は心の拠り所になることと思います。

研究室卒業後も、年に1度開催される松原研同窓会にて、松原先生には引き続き数々のことを教えて頂きました。この松原研同窓会というのは、私と同窓の雪谷氏とで2010年に企画させて頂いたものであり、その後も後輩に受け継がれ、これまで約10年に渡って続いて参りました。第1期生から在学生までの多くの方々に参加され、参加者は年々増え続け、松原先生がいかに慕われていたかを物語っておりました。毎年驚いておりましたことは、松原先生が変わらず、むしろ年を重ねるにつれて、よりバイタリティーが溢れ将来を語る姿でした。還暦を迎えられた年の記念同窓会の際も、「還暦という言葉は嫌いなんや」と切り出して、洋々と今後のご研究について話されていたのが印象的でした。更にご退職記念講演会後の懇親会においても、退職後に楽をすることは簡単だがそれは君らの模範にならないだろう、とご退職後の展望について一部ご紹介頂きました。私は目から鱗が落ちる思いでした。またそのとき、先生にとっての財産は松原研の卒業生だとも仰って頂きました。松原先生に教えて頂いた多くのことを糧にして、少しでも先生の財産の一つとして社会貢献できるよう、今後、精進していきたいと考えております。

これまで松原先生にご指導頂いたことに感謝すると共に、先生が今後ご健勝で、益々活躍されますことを、心よりお祈り申し上げます。

（株式会社神戸製鋼所 平成20年卒／
平成25年博）

松原英一郎先生のご退職に寄せて

河 口 智 也

私は2009年に学部四回生として研究室に配属されて以来、博士前・後期課程、さらに学位取得後に着任した産官学連携本部特定助教での2年間を含め、8年間に渡り松原先生にご指導をいただきました。先生の第一印象は澁刺としていて、そのような先生のお人柄を反映してか、当時の研究室に所属する先生や学生もそのような方が多かったように思います。実際、その頃の松原研は材料工学専攻の中でも学生に最も人気のある研究室のひとつで、例年優秀な学生が配属され、楽しみながら院試順位を競い合っていました。今思えばこのような雰囲気は、先生の学生との絶妙な距離感と、「場」のマネジメントにより醸成されたものでした。教授室の扉は原則として開け放たれており、いつでも直接先生と研究等のご相談ができました。またお昼休みには先生自らお弁当をもって学生部屋の休憩スペースにいらっしゃり、学生と議論や談笑をしながら昼食を取るのが日常の光景でした。また、折りに触れて研究室の内外で慰労会・親睦会が開催されましたが、その際にもあくまで学生の自主性や親睦を重んじておられ、絶妙なバランス感覚で、学生同士が切磋琢磨できる雰囲気づくりをされていたように思います。当時の私は気づいておりませんでした。このような先生の取り計らいのおかげで、仲間たちと毎日楽しく研究ができました。

研究では、私が研究室に配属されたタイミングで、蓄電池の大型研究プロジェクトが開始されました。先生はその中でも放射光施設でのビームライン建設と解析技術の開発をご担当されており、私もそれに関連したテーマで研究を始めました。蓄電池研究は複合分野であるだけでなく、その研究対象も基礎から応用まで幅広いため、当時の私にとっては、何を主軸に研究をするべきか迷う状況でした。そのような中、先生には「何が本質的な問題なのかを見極めないといけない。」「やるべきことを肅々とやる。」と常日頃からお助言をいただき、最終的には共鳴X線回折から吸収分光を測定する、「DAFS法」という挑戦的な解析手法をテーマに選びました。放射光施設での実験では、貴重なビームタイムを無駄にしないように、昼夜問わず数日間実験をするのが一般的です。その中で、先生自ら夜通しで装置の組み立てや調整、測定を行っている姿を見て、非常に感銘を受けた覚えがあります。はじめは、私は言われるがままに鉛テープや種々の装置を設置し、操作するので精一杯といった具合でしたが、先生の直接のご指導のお陰

で、ビームタイムを繰り返すうちにだんだん実験も板についていったように思います。

通常、既存の測定手法でビームタイムを1週間ほど使用した際には、それなりの成果が求められます。このとき取り組んでいたのが、すぐに成果の出にくい手法開発であるという事情はあるものの、使用時間の割に思うような成果が得られない時期がしばらく続きました。ビームラインは様々な研究室や企業との共用でしたので、当時学生であった私の耳にも若干の批判的な声が聞こえてしまうことがありました。夜通しの実験で睡眠不足の頭にそのような声が聞こえると、非常にプレッシャーを感じる瞬間もありました。ただそのときも先生から「私が責任を取るから、とことん気が済むまで自由にやりなさい」とおっしゃっていただいたお陰で、心が軽くなり研究に打ち込み、最終的には博士論文にまとめられる成果が得られました。

以上のように、松原先生には研究に対する考え方や、挑戦的なテーマへの取り組み方、人間関係や学生への指導など、非常に多岐にわたりご教授いただきました。特定助教の後には、先生が学位を取られた米国シカゴの地で、私も研究をする機会に恵まれました。米国での放射光実験では折に触れて先生にご指導いただいたことを思い出すとともに、街では先生御用達の日本では珍しいメモ用紙とスニーカーが大量に並んでいる様を見て、黎明期より米国で放射光実験をされていた先生のルーツに触れられたような気がしました。学生時代から現在にいたるまで、至らぬ私を温かくご指導くださった先生には感謝の念が堪えません。先生から直接ご指導いただいたこと、松原研で学んだことや出会った仲間は私にとって大きな財産です。先生はこの度、ご退職という一つの節目を迎えられましたが、まだまだたくさんの夢があるとおっしゃっていました。私もわずかでも恩返しができるよう、これからもしっかりと自らの研究に励んでいきたいと考えております。先生のますますのご健康と、ご活躍をお祈り申し上げます。

(東北大学金属材料研究所 助教
平成22年卒／平成27年博)

松原 英一郎先生のご退職に寄せて

前 川 修 也

松原先生、ご退職誠におめでとうございます。

松原先生と初めてお会いしたのは学部三回生の時の「結晶回折学」の授業でした。私は材料工学コースの一生徒で、授業を通じて先生のご知見の深さに圧倒されつつも、原子の配列や状態を明らかにしていくX線

構造解析に惹かれていったことを思い出します。そんな私が、先生の研究内容に興味を持ち、翌年の配属では先生の研究室を真っ先に選択したことは言うまでもありません。

それから三年間の研究室生活では、本当に沢山の貴重な体験をさせていただきました。SPRING-8での泊まり込みのX線回折実験に、最先端のSACLAでの実験、また産官学連携本部の取り組みで高校生との共同研究に参加させていただいたこともありました。それらの経験の中で私が敬服したのは、大変おこがましいかとも存じますが、先生は高い視座をお持ちでありながら、常日頃から私たち学生と分け隔てなく研究内容について議論していただいたことです。柔軟な思考で意見を聞き入れ、議論を高みに発展させていくお姿は、根からの研究者であることを感じさせると同時に、我々に研究者としての姿勢を自ずと教えるものであったと記憶しております。

また、2019年の末には東北大学時代と京都大学時代の研究室同窓生が一堂に集まり、ご退職記念講演会ならびに懇親会が開催され、そこで伺った先生のお話も大変印象に残っております。「一見離散しているようにも見える多くの研究テーマにこれまで取り組んで

きたが、そのいずれも思い返せば一つの根幹から派生したものであった。自分を見失わないことこそオリジナリティー（独創性）の起源である」との内容を、同じく石の繋がりが重要な「基」をモチーフにお話いただきましたが、それが私には松原研同窓生のことのように感じられました。一口に同窓生と申しまして、アカデミアの第一線で活躍する先生とられた方々、企業で研究者として活躍されている方々、私のように社会に出て日の浅い者まで様々でしたし、学生時代の研究内容、そして現在の研究・業務内容も人により多岐に渡っておりました。しかしその全員が、松原先生とのご縁をルーツとし、それぞれの分野で知の探索と課題解決に取り組んでおられました。この事実こそが、私たちの基礎を作り、立ち返る場所となってくださった先生の存在の大きさを表しているのだと、僭越ながら思う次第です。

最後になりますが、これまで先生にご指導、ご鞭撻いただいたこと、心より感謝申し上げます。今後の松原先生のご健勝と益々のご活躍をお祈りして、お祝いの言葉とさせていただきます。

(株式会社神戸製鋼所 平成27年卒／平成29年修)

令和2年度 水曜会後援フットサル大会

- 日時 令和元年10～11月
- 会場 京都鴨川西岸グラウンド

今年も旧金属系の研究室間でフットサル大会が開催されました。今年度のフットサル大会も、水曜会からの後援を頂き、非常に盛り上がる大会となりました。今年度は13チームが参加し、大会結果は以下のようになりました。予選から得点の取り合いとなる白熱し

た試合が多く見られました。優勝は乾研、準優勝は宇田研、3位は燃烧研となりました。

参加いただいた皆様のご協力により円滑に大会を進行できましたことを心より御礼申し上げます。

スポーツを通して普段交流の無い研究室の学生とも交流が生まれ、良い刺激になったと思います。これを機会に参加いただいた皆様がよりいっそう研究に打ち込めることを期待しております。

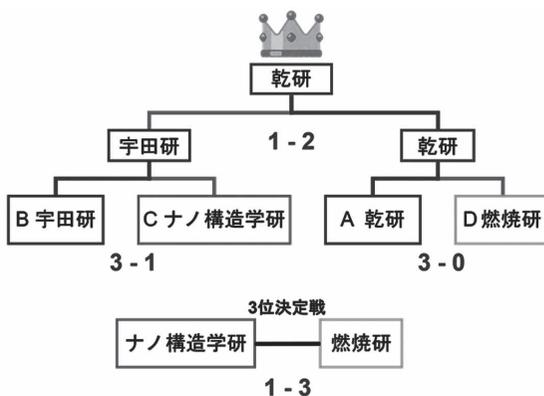
予選リーグ、決勝トーナメント結果

A 組	邑瀬研	平藤研	辻研	乾研
邑瀬研		△ 0-0	● 0-11	
平藤研	△ 0-0			● 2-3
辻研	○ 11-0			● 0-7
乾研		○ 3-2	○ 7-0	

B 組	宇田研	安田研	杉村研
宇田研		○ 4-2	○ 4-3
安田研	● 2-4		△ 0-0
杉村研	● 3-4	△ 0-0	

C 組	石原研	ナノ研	河合研
石原研		● 不戦敗	● 2-5
ナノ研	○ 不戦勝		△ 4-4
河合研	○ 5-2	△ 4-4	

D 組	土井研	田中研	燃烧研
土井研		○ 2-0	● 不戦敗
田中研	● 2-4		● 1-3
燃烧研	○ 3-4	○ 3-1	



試合の様子

会 員 通 信 欄

令和2年度水曜会大会への返信はがきには、会員の方々から多くのお言葉や近況報告を頂きました。ここにその一部を掲載致します。なお、文章を損なわない程度に表現を変えた部分もあることをお断りいたします。

三宅 敏夫(冶金・昭18) この4月で白寿(99才)となり感慨無量です。腰痛で悩まされていますが何とか日常生活は滞りなく過ごしております。

三谷 文夫(鉱山・昭23) 大正末期に生をうけ、昭和・平成・令和と生きてきました。毎年交わす年賀状は、同級生は2人ぐらいになってしまいました。医者にすすめられて、毎朝起きたら、まず、カーテンを引き、窓を開けて30分間くらい青空を眺めることにしています。老人性うつ病にならないための予防で、確かに効果はあるようです。同窓の諸兄姉にお勧めします。

中村 博(冶金・昭25) 大会の運営御苦労です。感謝して居ります。

昭和25年卒業以来、尼崎製鋼、神戸製鋼所、日発金属、国光製鋼を経て50年の業界生活を終え、老人ホームで余生を過して居ります。

二宮 脩(鉱山・昭26) 「遊学期」とかにおるわけでしょうが送って頂いている「水曜会誌」には多くの思いを重ねながら目を走らせております。有難うございます。

松村 昭(冶金・昭27) 変革期は又 発展のチャンス、御活躍を祈ります。

西村 義雄(冶金・昭28) 令和2年3月15日に満89歳となりました。2年前の夏、家内に先立たれたのですが、趣味の音楽などで気分転換しながらなんとか一人暮らしをこなしております。

米津 栄次郎(鉱山・昭31) 2021年度末まで環境省登録「地球温暖化防止コミュニケーター」の活動を続ける心算です。

野村 悦二(冶金・昭31) 年初より、見えない恐怖にさらされ、文字通り、経験したことのないような、経済の変化を目の当たりにしました。現役の皆様の、苦勞を察しています。苦勞の報われることを祈願しています。

南浦 基二(冶金・昭34) 卒業後61年となり、年相応？に暮らしております。水曜会関連のニュースは懐かしく拝見しております。

柳沢 恒雄(鉱山・昭35) 1960年鉱山科卒の血圧控目の老青年群の定例の複素空間同期会(実空間14人、

虚空間8人)は時節柄、無期限延期です。

尚、久賀君が神仏変換を受け、転居、2019年初夏 俄の事でした。

米田 元昭(鉱山・昭35) N-coronavirus 感染を避け stay home しておりますが、元気です。事務局皆様のご自愛を！

岩崎 滋(冶金・昭36) 細く永く、持続可能経営を目指します。

門脇 元則(鉱山・昭39) 送大学在学中。

澤田 進(冶金・昭39) 年なりにガタガタ、年なりに元気です。

筈井 一謙(冶金・昭39) まだ商売続けています。養殖用漁業資材フロートカバーというのを造っています。今コロナの影響で休業中です。

東 勝(冶金・昭41) 元気です。盛会を祈ります。

山川 洋(冶金・昭42) 晴耕雨読の毎日です。

岩坂 光富(金属・昭42) 元気に外出自粛しております。皆様もどうぞご自愛下さい。

黒木 正純(冶金・昭43) 新型コロナウイルスに負けず「生涯現役」を続行中。LNG(液化天然ガス)運搬船のカーゴポンプ(世界マーケットシェア90%)に続いて、液化水素ポンプのビジネスを柱にと注力。
松井 正昭(冶金・昭43) 日々元気に過しております。「大会の盛会記念」。

梶谷 幹男(金属・昭44) 皆様の御健勝を祈念しております。

戦後75年私達は終戦の年、敗戦の年に生まれました。人生最後の年月を社会と民族の貢献に努めたいと考えております。

八十 致雄(金属・昭44) 卒業し約半世紀。

学生時代の不勉強を今尚悔いています。卒業時、近藤良夫先生や藤中雄三先生に諭された言葉が身に沁みています。

萱原 徹男(資源・昭46) 一日一日を大切に生き、ライフワークを楽しんでいます。

福井 康司(金属・昭48) まだ現役で働いています。新型コロナウイルス府策のため、出張が減り、在宅勤務が増えています。

朝倉 俊弘(資源・昭49) 京都大学を定年退職して3年が経ちました。忙しくしていましたが、コロナのために(おかげで?)1ヶ月以上サンデー毎日の生活を送っています。

柏井 善夫(資源・昭49) 最近は海外の施工管理業務が多くなっております。

楠井 潤(金属・昭51) 東洋アルミのパウダー・ペースト事業グループは、日仏米中印に生産拠点が有り、アルミパウダーとアルミペースト製造販売をグローバルに展開しています。

増田 剛志(資源・昭52) 春節に1月23日帰省したまま、コロナの影響で2月3月4月と中国に戻れません。電話会議やメールのやり取りです。

宮脇 新也(金属・昭53) 新型コロナに負けないよう毎日、元気でがんばっています。

竹士 伊知郎(金属・昭54) 今日は2020年4月20日です。元気にいたしておりますが、「コロナ禍」真っ只中です。このような時と場に居合わせたことを、嘆くべきでしょうか、それとも感謝すべきなのでしょう。大きな「社会実験」の渦中にいるとしか思えないのです。本会誌が皆様の目にふれるころの「経過・結果」すら予測不可能です。あまりに脆かったパベルの塔の残骸から、この後、我々は「何を捨て、何を拾う」ことになるのでしょうか。

富永 充久(金属・昭54) 久岡氏の講演を拝聴したいと思います。

須川 壮己(資源・昭55) 消費財の調査会社インテジにて8年目になりました。元気にやっております。グループ内のIT全体のとりまとめをやっており、今回の騒ぎで90%の社員が在宅を始め、その対応で2月以降丸々つぶれてしまいました。日本も在宅が増え、生活の仕方が変わります。ビデオ飲み会も増えました。頭を切り替えていこうと思います。

土佐 正弘(金属・昭56) 昨年物質・材料研究機構を退官しましたが、しばらく居続けることになりました。どうぞ宜しくお願い致します。

平藤 哲司(金属・昭56) 桜守をはじめました。

吉留 良史(資源・昭58) 現在5月9日ですが、コロナは北海道でも落ち着きつつあるように見えます。気を許さずに過ごしていこうと思います。皆様もご自愛ください。

江澤 弘和(金属・昭58) 今後とも貴会の一層の発展を祈念いたします。

竹内 正(金属・昭58) 従来のクルマ事業とCASE・MaaS・スマートシティへの対応を同時にやる現状でも、目的は人々の幸せな暮らしと国(世界中)の発展であることに変わりはありません。その変化の

生き証人として、微力ながらお役に立ちたいと思いません。

松元 孝(金属・昭58) 定年退職→在宅勤務中
新型コロナ 不要不急の外出自粛令にて外出不可。

竹岡 広信(資源・昭59) いつもお世話になりありがとうございます。残念ながら諸事情により欠席させていただきます。

金澤 俊郎(金属・昭59) 昨年引越しました。

北河 久和(金属・昭59) 3月末をもって、36年間務めた日本製鉄株式会社を退社し、4月より日鉄テクノロジー株式会社へ移籍いたしました。試験分析、解析等、技術的にお困りのことがございましたら、お気軽にお声掛けください。皆様もコロナで大変かと存じます。一日でも早く終息しますよう頑張ってお参りしよう。

安田 豊(金属・昭59) JX金属㈱で金属・リサイクル事業を担当しております。

高谷 正彦(資源・平元) 昨年30年勤めたNTTを退職し新たな職につきました。またイチから勉強です。

初山 茂康(資源・平元) 新型コロナの影響で自宅テレワークが続いています。通勤がなくなったのは良いですが、往復約3時間分の「歩き」がなくなり、体がなまってくるので、散歩などで調整しています。皆様もお元気で。

中内 啓雅(資源・平3) 海外での技術コンサルしておりますが、コロナウイルスの影響で渡航が困難となり四苦八苦です。しかし、健康が第一と思って充電しております。

岡松 俊宏(金属・平5) コロナに負けずモノづくりの強化を推進中。

西 孝文(資源・平7) ソニーにてCMOSイメージセンサーの開発を続けています。

山口 智彦(エネルギー・平11) 今夏よりアメリカに赴任することになりましたが、コロナウイルスの影響で時期未定となりました。

若吉 潤(旧姓 西川)(材料・平13) 姓が変わりまして、若吉潤になりました。現在、中国へ赴任しております。

竹長 勝行(資源・平14) 家族で健やかに過ごしています。

八木 俊介(材料・平14) 非常事態宣言延長のため、今年度の大会総会・特別講演会ともに欠席とさせていただきます。

松長 剛(資源・平16) 50歳を機に26年在籍した会社から転職しました。新しい職種への取り組みが今から楽しみです。

前田 哲平(資源・平21) 中京テレビ放送㈱から転

職し、名古屋から東京に引っ越しました。

前川 修也(材料・平27) 本年度の水曜会ですが、予定を合わせる事ができず、誠に残念ながら欠席させていただきます。ご盛会を心よりお祈り申し上げます。

福島 翔太郎(エネルギー・平28) 日立製作所に転職し、横浜に引っ越しました。

遠藤 将一(元教官) 盛会を祈念します。

段野 勝(元教官) 94才になりますが、何とか元気にしています。

水曜会誌卒業年次幹事制について

水曜会では、下記のような付則にもとづき卒業年次幹事を委嘱しております。年次幹事には卒業の年次ごとに金属系、資源系より各1名の年次幹事を定め、各系同年次会員の連絡先の掌握や同年次会員を代表して水曜会運営へのご協力をお願いすることになります。年次幹事にご就任頂く会員の方々には、水曜会の活動をより充実したものとするため、何卒ご協力の程お願いいたします。

水曜会年次幹事に関する付則

(目 的)

第1条 水曜会の円滑な運営のため年次幹事を定め、水曜会会長は次の任務を依頼する。

1. 同年次会員の連絡先の掌握。
2. 同年次会員を代表して水曜会運営への協力

(定 員)

第2条 年次幹事を各卒業年次ごとに旧資源系(鉱山) 1名、旧金属系(冶金) 1名を定めるものとする。

(任 期)

第3条 任期は2年とし、重任は妨げないものとする。

(委 嘱)

第4条 年次幹事の選任は、同年次会員の推薦により会長が委嘱するものとする。

この付則は平成15年6月14日より施行する。

令和2年3月卒業生名簿

旧資源系

● 学部卒業生

氏 名	研究論文題目	就 職 先
応用地球物理学分野 (旧 ジオフィジクス分野)		
萱 間 浩 輔	異なる引張亀裂深度が撓み波の分散特性に及ぼす影響	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
水 島 亮 太	個別要素法を用いた岩石の延性挙動の再現	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
地殻開発工学分野		
鎌 田 健 人	破壊した泥岩の透水係数測定	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
津 田 秀 人	誘発地震の最大規模測定に向けての断層破壊伝播シミュレーション	エン・ジャパン(株)
渡 辺 俊	岩石摩擦実験において不安定すべりへ遷移する際の核形成長さ	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
計測評価工学分野		
市 江 明日香	LDVを用いた吊橋ハンガーロープの遠隔振動計測にもとづく張力評価	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
片 瀨 俊 貴	永久磁石を用いた運動渦電流探傷について	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
庄 晋太郎	非磁性体に対する永久磁石を用いた電磁力探傷法について	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
谷 本 明 駿	磁気ヒステリシス特性に基づくPCケーブルの張力測定	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
地殻環境工学分野		
青 木 月 丸	仮想水理地質モデルを用いた核種移行に関する断層機能の評価	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
家 木 優 成	ニューラルクリギングと温度検層データを用いた日本全域での三次元地温分布のモデリング	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
遠 藤 友貴哉	Open型地中熱利用における井戸目詰まりのモデル化	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
地球資源システム分野		
鶴 木 智	比抵抗を基とした葛根田地熱地域における空隙率・塩濃度分布のベイズ推定	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
西 川 拓 己	低濃度界面活性剤によるCNF含有W/Oエマルションの調製	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
平 中 章 貴	Wide-swath SAR データを用いた台湾地域における時系列地表変動の解析	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
藤 井 元 宏	掘削コア試料の測定による火山地域の岩石の比抵抗特性とその考察	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)

氏 名	研究論文題目	就 職 先
資源エネルギーシステム学分野		
呉 裴 征	ミリメートルオーダーの三次元細胞ブロックの作製	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
寺 田 圭 汰	筆めっきを用いた導線の新接合法	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
富 田 和 毅	細胞接着に及ぼすナノポーラス金の影響	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
永 井 雄 基	インテグリン $\alpha 2 I$ ドメイン異性体のコラーゲン結合：分子動力学シミュレーション	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
資源エネルギープロセス学分野		
岡 上 隆一郎	非線形な二軸負荷を受ける軟鋼板の塑性変形特性とその評価	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
西 拓 樹	デジタル画像相関法を用いた粗大結晶粒を有する軟鋼の不均一変形挙動に関する研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
平 山 健太郎	種々の応力状態における鋼板の非線形除荷挙動	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
ミネラルプロセッシング分野		
河 合 健 太	マイクロ/ナノポーラス材料を用いた曝気システムにおける可溶性ガスの気液間物質移動	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
砂 原 啓 人	スラグ添加によるメタン発酵の収率向上	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
日 方 徳 真	高温移動鋼板へのカーテン冷却の実験的研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
本 間 義 隆	湿式ボールミルによる黒ボク土中の有機団粒の選択粉砕	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)

● 修士課程修了者

氏 名	研究論文題目	就 職 先
応用地球物理学分野 (旧 ジオフィジクス分野)		
木 村 巧 志	電磁波反射を利用したCole-Coleモデルによる地下浅部の物性推定の研究	JXTGエネルギー(株)
田 村 怜	地震探査手法を用いたフォームEORにおける地下圧入流体流動モニタリングの基礎的研究	石油資源開発(株)
地殻開発工学分野		
今 北 啓 一	室内水圧破碎実験時に生じるAcoustic Emissionの震源パラメータ推定	大阪ガス(株)
桶 谷 和 生	原位置岩盤での炭酸水注入試験	太平洋セメント(株)
竹 田 浩 之	凝灰岩のサブクリティカル亀裂進展における周辺環境の影響	(株)レールテック
西 口 正 剛	砂岩におけるカルシウム化合物による空隙充填への周辺環境の影響および透水性との関係	大阪市高速電気軌道(株)
松 田 幹 生	大深度金鉱山におけるAE観測データに対するGeneralized Inversion Techniqueの適用	(株)日水コン
計測評価工学分野		
河 原 純 平	ローレンツフォース渦電流探傷法の基本的特性に関する検討	東京製綱(株)
高 木 麻 希	レーザーアブレーションによるコンクリート剥離欠陥部の振動励起に関して	三菱重工業(株)
津 川 黎 史	加熱型光ファイバによる密度計測のための研究	TIS(株)
地殻環境工学分野		
加 納 陸 生	地球化学的手法を用いた地熱地域における流体の広域循環状態の解明	(株)ネットプロテクションズ
川 口 草 太	物性データに基づく岩盤の浸透率推定法の開発	中央復建コンサルタンツ(株)
富 田 昇 平	数値シミュレーションによる海域・陸域での熱水鉱床の生成条件の特定	京都大学大学院工学研究科(博士課程進学)
山 田 勇 次	観測技術の最適化による地熱資源域での三次元比抵抗構造の推定精度の向上	国際石油開発帝石(株)
渡 邊 雄 平	地中ガスラドン濃度の時空間変化に基づく地熱流体パスの特定	阪急阪神ホールディングス(株)
地球資源システム分野		
井 上 陽 太	Observation of Changes in Adsorption State of Polar Oil Molecules on Muscovite due to Differences in Surface Cation and Flooding Water Salinity (白雲母に対する表面カチオンと浸水塩濃度の違いによる極性油分子の吸着状態変化の観察)	国際石油開発帝石(株)
清 水 悠太郎	石灰石鉱山における発破振動を利用した残壁斜面の健全性評価方法についての考察	東京電力ホールディングス(株)
永 田 翔	掘削試料を用いたコア変形法による岩盤応力測定のカースタディ	東京電力ホールディングス(株)
三 浦 直 也	非定常面熱源法によるカッティングス試料の熱物性測定の新プローブの開発と適用	大阪ガス(株)

氏 名	研究論文題目	就 職 先
資源エネルギーシステム学分野		
大 杉 亮 輔	mm サイズの3次元細胞ブロックの作製とその灌流培養	AGC(株)
加 藤 陸 至	Cell Proliferation by Cyclic Stretch Using Nanoporous Gold Actuator and Its Sensing Mechanism (ナノポーラス金アクチュエータを用いた周期引張刺激による細胞増殖とその感知機構)	(株)モリタ製作所
堤 直 史	水圧破砕によって岩石中に造成されるき裂の進展状況の特徴	国土交通省
林 優 歩	ナノポーラス金とRGDモチーフの相互作用：第一原理計算	PwCあらた有限責任監査法人
横 山 遼	Dynamical adsorption behavior of a collagen segment on a nanoporous gold surface (ナノポーラス金上におけるコラーゲン分子の動的吸着挙動)	ブラザー工業(株)
資源エネルギープロセス学分野		
岡 将 司	Crystal-plasticity finite-element analysis of heterogeneous deformation behavior of mild steel oligocrystals (粗大結晶粒を有する軟鋼の不均一変形挙動に関する結晶塑性有限要素解析)	JFEスチール(株)
達 川 昂 至	Plastic flow of a mild steel sheet under nonlinear biaxial loading paths (軟鋼板の非線形二軸負荷経路下における塑性流動挙動)	JFEスチール(株)
珍 坂 涼 太	Boiling heat transfer characteristics of aqueous polymer solution droplets impacting on a hot metal foil (高温金属箔に衝突するポリマー水溶液液滴の沸騰熱伝達特性)	パナソニック(株)
月 原 啓 志	Improvement in accuracy of V-bending analysis for a SUS430 stainless steel sheet by using crystal-plasticity model (結晶塑性モデルによるSUS430ステンレス鋼板のV曲げ解析精度の向上)	神戸製鋼所(株)
平 尾 卓 巳	Cooling characteristics of upward planar jet impinging on moving plate (移動平板に衝突する吹上水膜噴流の冷却特性)	関西電力(株)
ミネラルプロセッシング分野		
今 井 優 記	ガスハイドレート近傍におけるゲスト分子の置換挙動のモデル化と効果的な置換条件の評価に関する研究	防衛省
杉 原 大 樹	ガスハイドレートにおける自己保存効果に関する基礎研究	日本メドトロニック(株)

● 博士後期課程修了者

氏 名	研究論文題目	就 職 先
地殻環境工学分野		
石 須 慶 一	Clarifying detailed resistivity structures in seafloor hydrothermal fields by inversion of electric and electromagnetic data (電気及び電磁データ逆解析法による海底熱水域での比抵抗構造の詳細解明)	東京工業大学
Shoedarto Riostantieka Mayandari	Water and rock geochemical characterization to clarify fluid circulation process in transitional geothermal reservoir with a case study of the Wayang Windu field, West Java, Indonesia (水と岩石の地球化学的特徴抽出による遷移型地熱貯留層での流体循環プロセスの解明とインドネシア西ジャワ ワヤン ウインドゥ地区への適用)	研究員
地球資源システム分野		
神 谷 奈 々	Evolution of the Mio-Pleistocene forearc basin induced by the plate subduction in the Boso Peninsula, central Japan (プレート沈み込みによる房総半島新第三系および第四系前弧海盆の形成過程)	京都大学大学院工学研究科 ((独) 日本学術振興会 PD 特別研究員)
資源エネルギープロセス学分野		
藤 村 隆 志	鉄道車両用車輪のリム部に発生する損傷の分析とその抑制に寄与する材料および製造プロセスの最適化に関する研究	日本製鉄株, 社会人ドクター

● 博士学位授与者 課程博士

氏 名	研究論文題目	主 査	取得年月日	備 考
地殻環境工学分野				
石 須 慶 一	Clarifying detailed resistivity structures in seafloor hydrothermal fields by inversion of electric and electromagnetic data (電気及び電磁データ逆解析法による海底熱水域での比抵抗構造の詳細解明)	小 池 克 明	令和2年3月23日	
Shoedarto Riostantieka Mayandari	Water and rock geochemical characterization to clarify fluid circulation process in transitional geothermal reservoir with a case study of the Wayang Windu field, West Java, Indonesia (水と岩石の地球化学的特徴抽出による遷移型地熱貯留層での流体循環プロセスの解明とインドネシア西ジャワ ワヤン ウインドゥ地区への適用)	小 池 克 明	令和2年3月23日	
地球資源システム分野				
神 谷 奈 々	Evolution of the Mio-Pleistocene forearc basin induced by the plate subduction in the Boso Peninsula, central Japan (プレート沈み込みによる房総半島新第三系および第四系前弧海盆の形成過程)	林 為 人	令和2年3月23日	
資源エネルギープロセス学分野				
藤 村 隆 志	鉄道車両用車輪のリム部に発生する損傷の分析とその抑制に寄与する材料および製造プロセスの最適化に関する研究		令和元年9月24日	日本製鉄(株), 社会人ドクター

● 博士学位授与者 論文博士

氏 名	研究論文題目	主 査	取得年月日	備 考
地殻環境工学分野				
久 保 大 樹	結晶質岩体におけるマルチスケールでの亀裂分布モデリングと水理特性に関する研究	小 池 克 明	令和2年1月23日	平成23年3月 熊本大学大学院修了

旧 金 属 系

● 学部卒業生

氏 名	研究論文題目	就 職 先
表面処理工学分野		
大 田 滉 貴	黄銅鉱結晶の作製およびそのアノード溶解反応の調査	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
小 野 貴 裕	第一原理計算に基づくプロトン伝導性酸化物の水和エネルギー評価	東京大学大学院工学系研究科 (修士課程進学)
金 山 侃 生	無機分子の網羅的構造列挙および安定構造探索への応用	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
菊 池 健 矢	分光法によるバリウムジルコネート中の微量固溶不純物の評価	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
滝 山 雅 也	ヨウ化物溶融塩中でのチタン電析の高速化に向けた異種アニオンの添加	京都大学大学院エネルギー科学研究科 (修士課程進学)
物質情報工学分野 (旧 プロセス設計学分野)		
田 代 達 哉	偏光素子による散乱X線スペクトル変化	京都大学大学院エネルギー科学研究科 (修士課程進学)
野 村 宗 佑	応力変化に伴う発光現象	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
吉 川 遊	最大エントロピー法の蛍光X線スペクトルへの応用	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
劉 達 昀	3Dプリンタによる全反射蛍光X線装置の最適化設計	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
ナノ構造学分野		
石 谷 康 平	錫カルコゲナイド固溶体の単結晶作製と物性評価	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
北 村 泰 晟	カノニカル平均の非線型性の幾何学的考察	京都大学大学院理学研究科 (修士課程進学)
杉 江 昂	特殊構造に基づく自由エネルギーの定式化	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
辻 創 太	MoO ₃ 上の液体Inの濡れ性の機構解明	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
先端材料物性学分野		
青 山 恵 太	PS-P2VP薄膜のTenderX線による構造解析の試み	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
井 上 陽 向	多層アルミニウム合金材料の組織・力学特性分布の評価法の基礎検討	京都大学大学院エネルギー科学研究科 (修士課程進学)
藤 岡 幹 大	STM 観察によるカルコパイライト劈開面の方位と表面原子配列の同定	京都大学大学院エネルギー科学研究科 (修士課程進学)
久 保 潤 記	APT 法による天然カルコパイライトのバルク・表面近傍でのナノスケール組織観察	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)

氏 名	研究論文題目	就 職 先
量子材料学分野		
栗 本 悠 司	イオン記述子を用いた化合物組成の推薦システム	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
巽 一 巧	粉末X線回折データからの結晶構造解析の自動化スクリプトの作成	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
三 嶋 脩 斗	並列固相反応法のための自動スラリー分注システムの開発	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
三 島 有 貴	格子振動計算による熱力学量の定量的評価	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
渡 辺 啓 介	分子動力学法を用いた固体における熱力学計算手法の検討	東京大学大学院学際情報学府 (修士課程進学)
結晶物性工学分野		
岩 村 泰 樹	Fe-Al B2合金の塑性変形挙動と磁性	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
上 村 遥	Mo添加NbSi ₂ /Nb ₅ Si ₃ 一方向凝固共晶合金の微細組織と力学特性	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
王 小 豊 (WANG XIAOFENG)	η -Fe ₂ Al ₅ 単結晶マイクロピラーの塑性変形と変形組織観察	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
大 村 航 暉	FCC構造を有するミディアムエントロピー合金単結晶の積層欠陥エネルギーと力学特性	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
嶋 田 太 一	β -Si ₃ N ₄ 単結晶マイクロピラーの変形組織	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
森 下 文 寛	セメントタイト単結晶マイクロピラー圧縮変形組織	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
構造物性学分野		
千 葉 竜 涼	純鉄のHall-Petch係数に及ぼす微量炭素と結晶粒径の影響	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
袴 田 滋 天	画像相関法を用いたTRIP鋼の巨視的不均一変形挙動の解明	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
橋 野 達 郎	鉄含有チタンの β 相逆変態挙動とバイモーダル組織の形成過程	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
橋 本 颯	動的フェライト変態におよぼす外部負荷応力の影響	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
山 下 徹 哉	CoCrFeMnNiハイエントロピー合金における第二相析出におよぼす変形量の影響	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
先端材料機能学分野		
小 林 龍 哉	Al-Cu合金の固液共存体の変形と結晶粒生成の観察	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
南 里 幸 宏	Fe-C合金のマッシュ的変態により γ 相に導入される欠陥検出の試み	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
野々村 真 誉	時間分解X線CTを用いたデンドライト成長の定量評価	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
山 田 翔 也	偏析フリーハイエントロピー合金を目指したCrFeCoNi合金のコングルーエント組成探索	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)

氏 名	研究論文題目	就 職 先
磁性物理学分野		
鵜 飼 柚 希	フラストレート磁性体ZnFe ₂ O ₄ の誘電率測定	京都大学大学院理学研究科 (修士課程進学)
小西池 一 樹	Y-Co-Ga三元系化合物の単結晶育成および物性探索	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
須 賀 隆 裕	Zr ₂ Fe ₁₂ P ₇ 型構造を有する4元系化合物の磁性	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
張 靖 遠	遍歴電子強磁性物質Y ₂ Co ₁₂ P ₇ 単結晶の磁気特性	京都大学大学院エネルギー 科学研究科(修士課程進学)
富 岡 昌 平	高濃度La-Zn共置換による高飽和磁化M型フェライトの 探索	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
中 村 海 斗	一軸異方性をもつ強磁性体Fe ₃ GeTe ₂ の弱磁場での磁気 異常	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
野 田 涼 介	フラストレート磁性体CdFe ₂ O ₄ の単結晶作製および磁 性評価	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
材質制御学分野		
石 川 雄 基	銅電解精製におけるノジュール成長におよぼす不純物の 影響	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
鈴 木 邦 拓	濃厚 CaCl ₂ 水溶液を用いた電析 Cr の結晶構造	
中 田 昌 宏	Pd-Cu 電析におけるらせん状ナノ構造の自己組織化	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
村 上 勇 樹	電析による NH ₃ 合成用ハイエントロピー合金触媒の作 製	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
芳 中 知 明	非水溶媒を用いた Sc 電析	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
機能構築学分野		
坂 本 紘 一	金属-シクロオレフィンポリマー光活性化接合界面のせん 断接着強度評価	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
鈴 木 七 央 也	液中AFMによるpoly- <i>α</i> -olefin/固体界面の構造分析	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
竹 村 育 生	酸化グラフェンアシストシリコンエッチングにおける基 板物性依存性	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
廣 富 祐 二	電気化学剥離酸化グラフェンのSTM構造分析	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
山 岡 遼 也	SUSの表面処理による高分子材料との光活性化接合	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)

氏 名	研究論文題目	就 職 先
エネルギー社会工学分野		
今 村 陽 子	硫酸水溶液におけるプロトン/デューテロン伝導現象	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
清 島 敦 洋	酸化チタン粉末の振動ボールミルにおける流体抵抗の影響	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
鈴 木 翔 太	FeNi系触媒を用いたアンモニア合成	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
吉 田 将 基	プロトン伝導性ホスホン酸ジルコニウムの合成と評価	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
材料プロセス科学分野		
竹 内 芳 州	イオン液体からのタングステン電析の検討	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
北 堯	EMIC-AlCl ₃ -Phenanthroline 浴を用いたネジへの Al バレルめっき	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
合 田 元 英	昇温結晶化法による CsPbBr ₃ Cl _x 結晶の作製	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
孫 芸 華	ミスト CVD 法によるエピタキシャル Ni _{1-x} Mg _x O 薄膜の Mg 組成制御	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
藤 田 幸 祐	深共晶溶媒浴を用いた Ni-Cr 合金電析	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
和 田 愼 史	ミストデポジション法による Cs ₂ AgBiBr ₆ 厚膜の作製	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
プロセス熱化学分野		
石 田 祐 樹	還元反応とコークスガス化反応間のカップリング現象評価のための充填層内ガス流れシミュレーション	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
河 田 一 郎	化合物Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃ に包接されたアニオン置換反応の評価	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
樋 口 晃 一	脱炭スラグの再利用に向けた溶解機構の解明	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
松 村 実 典	高温超伝導線材作成に向けた導電性中間層の選択的ガス透過能の評価	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
山 内 遼 平	CaO-SiO ₂ -Cr ₂ O ₃ 三元系スラグの相平衡関係とCr ₂ O ₃ 活量	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)

● 修士課程修了者

氏 名	研究論文題目	就 職 先
表面処理工学分野		
角 木 祥太郎	溶融塩中のTiイオン濃度および酸化物イオン濃度のその場測定	三菱マテリアル(株)
金 森 翔太郎	第一原理計算に基づく多元系金属ハロゲン化物蒸気種の予測	PwCあらた有限責任監査法人
高 陽	合成鉱物を用いた黄銅鉱の硫酸浸出挙動の解析	サンケン電気(株)
手 塚 康 介	無機結晶構造データベースを利用した新規化学蓄熱材の探索及び脱水・水和挙動調査	日産自動車(株)
橋 本 将 愛	金属とセラミックの接合による PCFC 用セルの新規作製方法の開発	大同特殊鋼(株)
物質情報工学分野 (旧 プロセス設計学分野)		
田 中 誠 人	3次元偏光光学系蛍光X線分析の高感度化	(株)GSユアサ
山 下 大 輔	Compton散乱による白色X線の偏光と測定	三菱商事天然ガス開発(株)
山 本 貴 大	偏光光学系による蛍光X線強度比変化	(株)小松製作所
ナノ構造学分野		
大 田 将 之	配位空間上の幾何学的に基づく合金の統計熱力学	関西電力(株)
武 村 友 輝	蒸留単離を利用したSnSバルク・薄膜作製プロセスの検討	京セラ(株)
先端材料物性学分野		
伊 藤 樹 人	Mg-TM-Y (TM = Zn, Ni) LPSO合金中のクラスター配列構造の放射光による解析	(株)UACJ
稲 毛 康 介	Cobalt-Shandite の劈開面の同定及び磁気構造の観察	ホシデン(株)
梅 村 拓 実	APTとSTM の併用による複合測定手法の高空間分解能化	JFEスチール(株)
量子材料学分野		
奥 野 隆 平	化合物における系統的な不変量を用いた材料物性予測モデルの構築	(株)NTTデータ
篠 原 航 平	Crystal Structure Enumeration Method for Searching Unknown Crystal Structures	京都大学大学院工学研究科 (博士課程進学)
鈴 木 絵美利	新規酸化物の探索に適した流通式超臨界水熱合成装置の開発	パナソニック(株)
林 克 幸	合成条件データベースの構築と推薦システムに基づいた新規疑三元系酸化物の探索	(株)LIXIL
久 田 洋 平	転移学習による物性予測モデル構築の高効率化および高精度化	三菱電機(株)

氏 名	研究論文題目	就 職 先
結晶物性工学分野		
江 原 和 輝	Cr-Co-Ni等原子量合金単結晶の力学特性	住友電気工業(株)
奥 谷 将 臣	カゴメ構造を有する σ -FeCrと α -Mn単結晶の室温塑性変形	JFEスチール(株)
境 龍太郎	高次規則度を有するFe ₂ Al ₅ 金属間化合物の結晶構造解析	JFEスチール(株)
武 田 康 誠	MoSi ₂ /Mo ₅ Si ₃ 共晶一方向凝固材の力学特性に及ぼす結晶育成条件と添加元素の影響	住友電気工業(株)
矢 野 凱 己	熱弾性型マルテンサイト変態における核生成と成長のダイナミクス	セイコーエプソン(株)
構造物性学分野		
池 内 琢 人	Co-Cr-Ni系Medium Entropy Alloyの室温変形挙動と積層欠陥エネルギー、摩擦応力の関係	アクセンチュア(株)
沖 和 洋	種々の粒径を有する希薄Mg-Y二元合金の力学特性に及ぼす変形温度の影響	日本製鉄(株)
嶋 康 平	焼きもどしマルテンサイト鋼の水素脆性挙動におよぼす変形の影響	京セラ(株)
鄧 彰 凡	種々の結晶粒径を有するCu-Zn二元合金の力学特性と変形メカニズム	United Imaging Healthcare社
藤 村 雄 斗	強度比の異なるフェライト+マルテンサイト二相鋼の局所変形挙動	KIOXIA
先端材料機能学分野		
市 田 晃 大	4D-CTと回折を用いたFe-Cr-Ni系合金のマッシュプの変態における γ 粒組織形成の解析	(株)UACJ
加 藤 勇 一	4D-CTにより測定されたAl-Cu合金のデンドライト3次元形状とミクロ偏析モデルへの応用	(株)コベルコ科研
河原崎 琢 哉	時間分解X線CTによるデンドライト組織の定量評価	(株)IHI
中 田 匠	X線トモグラフィーとX線回折を用いた Al-Cu 合金の固液共存体の変形及び偏析形成の解析	古野電気(株)
磁性物理学分野		
小 川 朋 也	熱伝導・熱ホール効果測定による非自明な磁気・電子状態の研究	ヤンマーホールディングス(株)
渋谷見 雄 貴	Co-shanditeの低磁場ホール効果測定	関西電力(株)
西 田 浩 紀	高保磁力材料La-Co共置換SrM型フェライトに対する第三カチオン置換の磁気異方性への影響	日本精工(株)
堀 川 滉 貴	η -carbide型Zr系酸化物の磁性	京セラ(株)
三 浦 瑞 生	立方晶ラーベス相化合物ZrFe ₂ の六方晶化と磁気異方性の発現	

氏 名	研究論文題目	就 職 先
材質制御学分野		
土 田 直 輝	酸性濃厚溶液の電離度	パナソニック(株)
三 浦 隆太郎	CuO/Cu ₂ O 積層薄膜の湿式形成とその評価	京都大学大学院工学研究科 (博士課程進学)
三 野 翔 平	銅電解精製における異常析出の促進要因	経済産業省
森 崇 裕	MgB ₂ 薄膜の湿式処理による超伝導特性の改善	京都大学大学院工学研究科 (博士課程進学)
安 田 拓 海	Pt 触媒 Si エッチングによるヘリカルポアの自己組織化形成	京都大学大学院工学研究科 (博士課程進学)
機能構築学分野		
井 村 洸 介	有機単分子膜の真空紫外光励起反応	住友商事(株)
窪 田 航	酸化グラフェンアシストシリコンエッチングの反応機構解明	京都大学大学院工学研究科 (博士課程進学)
日和佐 登	アルキルホスホン酸SAMの耐水性	キオクシア(株)
山 田 祐 也	垂直・水平力同時検出バイモーダルqPlus AFMの開発	京都大学大学院工学研究科 (博士課程進学)
エネルギー社会工学分野		
宮 内 昂 昭	新しい触媒を用いたアンモニア合成プラントの経済性評価	YCPグループ
村 上 銀 河	光触媒による色素分解反応促進に向けた吸着現象に及ぼす諸要因	マツダ(株)
山 口 蒼一郎	高PageRank論文が引用する論文リストの統計調査	(株)ストラテジーコンサルティングパートナーズ
和 田 航 大	Mn ₅ Si ₃ 型エレクトライドのガス貯蔵能の理論的・実験的評価	東京電力(株)
量子エネルギープロセス分野		
アルトゥン ムトゥル エゲ (Altun Mutlu Ege)	Preparation of zinc doped tin oxide as an electron transport interlayer for organic solar cells	ヴィーナ・エナジー・ジャパン(株)
木 原 義 喜	メチルレッドを分子インプリントした中空酸化チタンナノファイバーによる有機色素の光分解	京セラ(株)
竹 内 徳 真	ポリメタクリル酸メチル電界紡糸ナノファイバーの配向制御	ニチコン(株)
中 谷 真 大	金属および半導体ナノ粒子への光学活性誘起に関する研究	(独)大阪産業技術研究所

氏 名	研究論文題目	就 職 先
材料プロセス科学分野		
平 田 瑞 樹	乾燥空気中でのイオン液体からのアルミニウム電析	(株)小松製作所
市 田 智 士	溶液成長法による CsPbBr ₃ 層の成長	トヨタ自動車(株)
木 村 信	ミスト CVD 法による酸化バナジウム薄膜のエピタキシャル成長	住友金属鉱山(株)
滝 野 天 琴	ミスト CVD 法を用いた NiO 薄膜のエピタキシャル成長と NiO / β -Ga ₂ O ₃ ヘテロ接合ダイオードの作製に関する検討	日本航空(株)
安 田 修 平	イオン液体を用いたアルミニウムバレルめっき	キヤノン(株)
安 田 創	Ni めっき {100} <001> 集合組織 Cu テープ上への Sr (Ti _{0.85} Nb _{0.15})O ₃ の連続成膜	住友金属鉱山(株)
プロセス熱化学分野		
粟 屋 康 介	スラグ-溶鉄間の硫黄分配比に及ぼす FeO 添加の影響	日本製鉄(株)
岩 橋 広 大	クロム含有高合金鋼溶製に向けた精錬スラグの熱力学	ダイキン工業(株)
奥 田 大 将	脱硫スラグの Sulfide Capacity に及ぼす 遷移金属元素の価数の影響	大同特殊鋼(株)
エネルギー応用基礎学分野		
井 上 靖 也	低コスト YBa ₂ Cu ₃ O ₇ 超伝導線材のための新規導電性中間層の開発および有限要素法による電流分布の検討	日本ガイシ(株)
柏 木 勇 人	(Y _{1-x} Dy _x)Ba ₂ Cu ₃ O ₇ 配向厚膜の高配向化に向けた印加磁場条件および厚膜成形条件の検討	(株)小松製作所
北 村 直 也	薄膜型 MgB ₂ 超伝導線材特性向上に向けた保護層及び金属基材テープと MgB ₂ 層間反応防止層の検討	パナソニック(株)
寺 尾 奈 浦	珪素銅板上に中間層を介して YBa ₂ Cu ₃ O ₇ を形成した超伝導線材における剥離現象の解明	(株)日立製作所
濱 田 剛	{100}<001> 集合組織 Cu テープ上に Sr _{1-x} La _x TiO ₃ を導電性中間層として配置した YBa ₂ Cu ₃ O ₇ 超伝導線材の研究	三菱電機(株)

● 博士後期課程修了者

氏 名	研究論文題目	就 職 先
表面処理工学分野		
井 上 貴 博	四塩化チタンの金属熱還元における還元挙動の解明ならびに金属塩化物の浸出分離法の探索	(株)大阪チタニウムテクノロジーズ
熊 本 和 宏	低温溶融塩中でのチタンの電析および高温での固液分離を利用したチタン製錬に関する研究	東邦チタニウム(株)
鎮 目 邦 彦	化学蓄熱材への応用を見据えた希土類硫酸塩の気固反応に関する包括的研究	京都大学大学院工学研究科 材料工学専攻
量子材料学分野		
梅 田 裕 二	Rational design of dielectric oxide materials through first-principles calculations and machine-learning technique (第一原理計算と機械学習法による誘電体酸化材料の合理的設計)	TDK(株)
構造物性学分野		
Yi Jangho (李 長昊)	Effect of Microstructural Parameters on Mechanical Properties and Fracture in $\alpha + \beta$ Titanium Alloy	立命館大学総合科学技術研究機構 博士研究員
先端材料機能学分野		
Chatcharit Kiattisaksri	Time-Resolved and In-Situ Study on Evolution of Spheroidal Graphite Nodules and Volume Change During Solidification in Ductile Cast Iron (ダクタイル鋳鉄の凝固過程における球状化黒鉛の形成と体積変化の時間分解その場観察)	ISID SOUTH EAST ASIA (THAILAND) CO., LTD
南 澈 熙	Quantitative investigation of solidification in Ni-based superalloys by in-situ X-ray imaging techniques (X線イメージング技術によるNi基超合金の凝固現象の定量評価)	(株)POSCO
材質制御学分野		
安 達 謙	濃厚水溶液を用いる金属電析プロセスに関する研究 (Metal Electrodeposition Processes Using Highly Concentrated Aqueous Solutions)	京都大学大学院工学研究科 材料工学専攻

● 博士学位授与者 課程博士

氏 名	研究論文題目	主 査	取得年月日	備 考
表面処理工学分野				
井上 貴博	四塩化チタンの金属熱還元における還元挙動の解明ならびに金属塩化物の浸出分離法の探索	宇田 哲也	令和2年3月23日	
熊本 和宏	低温溶融塩中でのチタンの電析および高温での固液分離を利用したチタン製錬に関する研究	宇田 哲也	令和2年3月23日	
鎮目 邦彦	化学蓄熱材への応用を見据えた希土類硫酸塩の気固反応に関する包括的研究	宇田 哲也	令和2年3月23日	
量子材料学分野				
梅田 裕二	Rational design of dielectric oxide materials through first-principles calculations and machine-learning technique (第一原理計算と機械学習法による誘電体酸化物材料の合理的設計)	田中 功	令和2年1月21日	
構造物性学分野				
Yi Jangho (李 長昊)	Effect of Microstructural Parameters on Mechanical Properties and Fracture in $\alpha + \beta$ Titanium Alloy」 ($\alpha + \beta$ 型チタン合金の機械的性質と破壊に及ぼす微視組織の影響)	辻 伸泰	平成30年9月24日	
先端材料機能学分野				
Chatcharit Kiattisakri	Time-Resolved and In-Situ Study on Evolution of Spheroidal Graphite Nodules and Volume Change During Solidification in Ductile Cast Iron (ダクタイル鋳鉄の凝固過程における球状化黒鉛の形成と体積変化の時間分解その場観察)	安田 秀幸	令和元年9月24日	
南 澈熙	Quantitative investigation of solidification in Ni-based superalloys by in-situ X-ray imaging techniques (X線イメージング技術によるNi基超合金の凝固現象の定量評価)	安田 秀幸	令和元年11月25日	
材質制御学分野				
安達 謙	濃厚水溶液を用いる金属電析プロセスに関する研究 (Metal Electrodeposition Processes Using Highly Concentrated Aqueous Solutions)	邑瀬 邦明	令和元年9月24日	
量子エネルギープロセス分野				
戸畑 温子	多糖を利用した色素の集積とその分光分析	佐川 尚	令和元年9月24日	
材料プロセス科学分野				
Dinh Van Quy	LOW THERMAL EXPANSION OF ELECTRODEPOSITED COPPER IN THROUGH SILICON VIAS	平藤 哲司	令和2年5月23日	

会 則

改訂（2018年6月2日）

【名 称】

第1条 本会を水曜会と名付ける。

【目 的】

第2条 本会は資源、エネルギー、環境および材料に関する学問、技術並びに経済の発展に寄与し、会員相互の親睦をはかることを目的とする。

【会 員】

第3条 会員を分けて正会員と学生会員とする。

第4条 正会員は以下の各項のいずれかに該当する者とする。

1. 別表1に掲げる学科、専攻または講座を卒業あるいは修了した者。
2. 別表2に掲げる別表1の学科等の後身である講座または分野において学部教育あるいは大学院教育を受けて卒業あるいは修了した者。
3. 前項の講座または分野の教員および元教官並びに元教員。
4. 別表2に掲げる別表1の学科等の後身である講座または分野の教員が主査となつて論文博士を取得した者で、本人が入会を希望し、関連講座または分野の教員の推薦がある者。

第5条 学生会員は別表2に掲げるコース、講座または分野に在籍する学部学生とする。

【役 員】

第6条 本会には以下の役員を選出する。任期は1年とし、重任を妨げない。ただし、幹事は2年とし、重任を妨げない。

会 長	1名
副 会 長	若干名
会 計 監 事	2名
編 集 委 員 長	1名
幹 事	若干名

第7条 会長は本会を総括し、本会を代表する。会長は役員会の推薦により水曜会総会において承認する。副会長以下の役員は別途に定める細則により会長が指名する。副会長は会長に事故のあった場合、その職務を代行する。会計監事のうち1人は財務の管理、他は会計の監査を行う。編集委員長は別途に定める細則にもとづき会誌の編集を行う。幹事は会誌の編集、広告、名簿、行事およびその他について、会長、副会長、会計監事および編集委員長を補佐し、会務を、別途に定める細則にもとづき処理する。

【総 会】

第8条 総会は毎年1回開催する。

【役 員 会】

第9条 役員は、役員会を構成し、本会の重要事項の審議を行う。

【事 業】

第10条 本会は会誌「水曜会誌」および「水曜会名簿」を発行する。

第11条 本会はその他本会の目的を達成するために必要な事業を行う。

【経 費】

第12条 本会の経費は別途に定める会費、寄付金その他の収入により支弁する。

【会則変更】

第13条 本会の会則は役員会の議を経て、総会の議決により変更することができる。

第14条 第13条の規定によらず、別表1, 2※および細則は役員会の議決により変更することができる。

【付 則】

1. この会則は平成25年6月15日から施行する。
2. 従前の会則による既会員は従前の会則に基づく会員資格を有するものとする。

水曜会講座等一覧（その1：旧学科，旧専攻等）

2001年現在

学 部	工 学 部	採鉱冶金学科 鉱山学科，資源工学科，冶金学科，金属加工学科，金属系学科
大 学 院	工学研究科	鉱山学専攻，冶金学専攻，金属加工学専攻，資源工学専攻 環境地球工学専攻資源循環工学講座

水曜会講座等一覧

2017年現在

学 部	工 学 部	地球工学科	資源工学コース	全講座・分野	資源系
		物理工学科	材料科学コース	全講座・分野	金属系
			エネルギー応用工学 コース	エネルギー社会工学分野	
				材料プロセス科学分野	
プロセス熱化学分野					
大 学 院	工学研究科	社会基盤工学専攻	応用地球物理学分野	資源系	
			地殻開発工学分野		
			計測評価工学分野		
		都市社会工学専攻	地殻環境工学分野		
			地球資源システム分野		
			材料工学専攻		全講座・分野
	エネルギー 科学研究科	エネルギー社会・環境科学専攻	エネルギー社会工学分野	資源系	
		エネルギー応用科学専攻	資源エネルギーシステム学分野		
			資源エネルギープロセス学分野		
			ミネラルプロセッシング分野		
			材料プロセス科学分野	金属系	
		プロセス熱化学分野			
エネルギー応用基礎学分野					
エネルギー基礎科学専攻	量子エネルギープロセス分野				

水曜会会費細則

(2017年9月29日改正)

1. 正会員は、年間3,000円の会費を納入する。

水曜会誌投稿規定 (平成25年10月31日改訂)

1. 投稿要領

- (1) 投稿原稿の著者（連名の場合は1名以上）は水曜会会員でなければならない。ただし、水曜会誌編集委員会（以下編集委員会という）で認めた場合はこの限りではない。
- (2) 投稿原稿は論文、報告、総説、講座、資料、会員消息などとし、分類指定がない場合には編集委員会が判定する。
- (3) 投稿原稿の分類はつぎの基準にしたがうものとする。
 - a. 論文 他の刊行物の未発表のもので、独創性をもつ著者の基礎研究または応用研究の成果、技術の開発改良などを内容とするもの。
 - b. 報告 現場の操業報告などに類するもので、学術的に価値があると認められるもの。
 - c. 総説 特定の問題について普遍的に広い視野から解説し、その推移を知るうえに役立つもの。
 - d. 講座 特定の問題について掘り下げて解説し、会員の啓蒙、再教育に役立つもの。
 - e. 談話室 会員の近況や展望など、会員の意見・情報交換に役立つもの。
 - f. 資料 学問的あるいは技術的に価値のある内容を含み、会員の参考資料として役立つもの。
- (4) 論文、報告には英文表題のほかに100字前後の英文概要を添付されたい。
- (5) 原稿の長さは必要な図・表を含めて次表に示すとおりとし、これを超える場合は必要経費を負担されたい。但し依頼原稿についてはその限りではない。なお、会誌1頁は図表のないときには2,400字（25字×48行×2列）であり、表題および英文概要は刷上り1/4頁～1/2頁を要することを考慮されたい。

分類	制限ページ数
論 文	会誌刷上り 6頁以内
報 告	会誌刷上り 6頁以内
総 説	会誌刷上り 10頁以内
講 座	会誌刷上り 10頁以内
談 話	会誌刷上り 4頁以内
資 料	会誌刷上り 4頁以内
各 種 記 事	会誌刷上り 4頁以内

- (6) 投稿に際しては本会規定の原稿用紙を使用し、原稿整理カードを添付されたい。
- (7) 原稿の送付先はつぎのとおりとする。
 - i) 水曜会ホームページからの原稿の投稿
(<http://www.suiyokwai.jp/>)
 - ii) 郵送による原稿の投稿（下記）

〒606-8501 京都市左京区吉田本町
 京都大学工学部物理系校舎内
 京都大学工学部水曜会誌編集委員会宛

- (8) 原稿是水曜会誌編集委員会が受理した日をもって受理日とする。
- (9) 投稿原稿に対し、編集委員会は査読を行って掲載の可否を決定する。また、査読結果に基づき編集委員会は投稿原稿に対して問い合わせ、または内容の修正を求めることがある。
- (10) 編集委員会は、用語ならびに体裁統一のため編集係によって文意を変えない程度に投稿原稿の字句の修正をすることがある。
- (11) 初校・第二校は著者にて行い、第三校以降は編集委員が行う。
- (12) 別刷については、著者には50部が贈呈される。50部を超える場合は実費を負担されたい。

2. 原稿の書き方

- (1) 章・節などの区分はポイント・システムによる。すなわち、章に相当する1・緒言などは中央に2行分をとり、節に相当する1・1実験方法などは左端に書き、つぎの行より本文を書くようにする。また、項や目に相当する(1)試料などは左端に書き、2字分あけて本文をつづける。A4判を縦に用い、横書きで上下左右に十分な余白を取り(余白にページ番号を記入)、1ページあたり25行程度の行間隔とする。
- (2) 図面は鮮明なものであること。刷上り図面の大きさは横幅でもって指定するものとするが、横は1段(65mm以内)または2段通し(140mm以内)のいずれかとなることを考慮されたい。原図は刷上り図面の少なくとも2倍に書かれたい。この際図面の縮尺を考慮して作図し、とくに図の文字の大きさについては十分に注意を払われたい。また、原図の左下隅に著者名、論文名、図番号などを必ず明記されたい。図面の画像データについては600dpi程度の解像度とする。
- (3) 単位は国際単位系(SI単位系)によることが望ましい。
- (4) 参考のため文献を記す場合には本文の肩に1), 2)などを付し、論文末尾に「1) 著者, 誌名, 卷数, [号数], 頁数, (年度:西暦).」の形式で書き加えること。
例:
1) 大塚一雄, 宮城 宏:日鉱誌, **87**, [100], 521-525, (1971).
2) M.R. Taylor, R.S. Fidler and R. W Smith: Metallurgical Trans., AIME., **2**, [7], 1793-1798, (1971).

以上

水曜会誌の原稿募集について

水曜会誌編集委員会

本委員会では、学術研究や技術開発の成果、操業報告、特定の課題や分野の解説・啓蒙・普及など、会員の皆様が関与されている様々な領域や分野についての研究・業務に関する原稿、あるいは皆様の近況、意見、展望など幅広い原稿を募集しております。

投稿原稿は、論文、報告、総説、講座、談話室、資料、各種記事（会員消息、会員の声、会員通信欄など）に分類されております。投稿方法につきましては投稿規定をご参照ください。

- (1) 論文：他の刊行物に未発表のもので、独創性をもつ著者の基礎研究または応用研究の成果、技術の開発改良などを内容とするものを対象としております。
- (2) 報告：現場の操業報告などに類するもので、学術的に価値があると認められるものを対象としております。
- (3) 総説：特定の問題について普遍的に広い視野から解説し、その推移を知るうえに役立つものを対象としております。
- (4) 講座：特定の問題について掘り下げて解説し、会員の啓蒙、再教育に役立つものを対象としております。
- (5) 資料：学問的あるいは技術的に価値のある内容を含み、会員の参考資料として役立つものを対象としております。
- (6) 談話室：会員の皆様の近況や展望など幅広い内容記事を紹介する「談話室」を設けております。「談話室」は、会員各位の意見・情報交換の場としてご利用頂くことを目的としたものです。次のようなものを対象としております。
 - 第一線で活躍中の会員の幅広い展望・随想
 - 各企業の研究所の紹介（特殊機器や意外な研究内容など）
 - 研究についてのトピックス（形式は問わない）
 - 国際会議や海外出張の紹介・こぼれ話
 - 種々の分野でご活躍の会員の特異な体験記事
 - 新教員の自己紹介や抱負など
 - 水曜会の活動における歴史的こぼれ話
- (7) 会員の声：会員の皆様の幅広い意見・提言を募集する「会員の声」を設けております。
- (8) 会員通信欄：水曜会大会返信葉書の通信欄を始め様々な形で寄せられておりますお便りを掲載致しております。
- (9) その他：(6)～(8)の何れかに区分させて頂くことになると思いますが、“同窓会誌”的な肩の凝らない気楽な記事（…の思い出、…の頃、等々）についても、“学会誌”としての体裁維持も念頭におきながら、積極的に掲載したいと存じます。

また、このほかに取り上げるべき企画や記事などご提案がございましたら編集委員会までお知らせ下さい。

次号の発刊に向け、常時、会員の皆様からの投稿をお待ち致しておりますので、奮ってご応募くださるようお願い致します。投稿を予定されて今回、間に合わなかった原稿につきましても、引き続きお待ちしておりますので、どうぞよろしくお願い致します。

なお、水曜会webサイト (<http://www.suiyokwai.jp>) の充実を目指し、水曜会誌バックナンバーのPDF掲載、記事のweb投稿の開始などを行なっています。今後ともどうぞ宜しくお願い申し上げます。

水曜会会員からの図書の寄贈について

水曜会会員より、以下の図書の寄贈を受けました。製本が終了次第、蔵書として京都大学付属図書館に登録し、工学研究科物理系図書室に配架いたします。貴重な文献をご恵贈いただき、ありがとうございました

高馬 勇 様

『標準化と品質管理』（日本規格協会発行）

1993/06, 1993/09～1999/12, 2000/02～2007/02,
2007/04～2009/12, 2011/01, 2011/05～09, 2015～2011/09, 2015/01

『標準化ジャーナル』（日本規格協会発行）

2000/07～2001/08

逝 去 会 員

水曜会誌25巻2号を発行してからご逝去の連絡を受けた方々です。
謹んでご冥福をお祈り申し上げます。

平成30年7月	丸橋 茂昭	昭和32・冶金
令和元年9月9日	佐伯 博蔵	昭和21・鉱山
令和元年6月22日	久賀 俊正	昭和35・鉱山
令和元年7月6日	岡島 弘明	昭和41・冶金
令和元年8月24日	世良 孝	昭和43・金属
平成28年4月30日	中野 勇男	昭和44・冶金
令和2年2月22日	田中 稔	昭和22・冶金
令和元年10月24日	中廣 吉孝	昭和32・鉱山
平成27年	鹿取 精一	昭和24・冶金
令和元年8月23日	薬師寺正雄	昭和28・冶金新制
平成24年	佐藤 進	昭和29・鉱山
	菅野 強	昭和41・資源
令和2年1月29日	菅 健郎	昭和36・鉱山
平成31年2月3日	芦原 孝始	昭和50・金属
令和元年10月11日	高林 悟	昭和27・鉱山
平成30年	野寄 正敏	昭和59・金属
平成30年10月1日	田中 晃三	昭和27・冶金
令和2年4月9日	奥村 昇	昭和27・冶金
令和元年10月31日	小澤不眠夫	昭和34・鉱山
令和2年3月28日	斎藤 修二	昭和40・資源
	森川 賢一	昭和45・資源
令和元年8月	小林 剛	昭和41・金属
平成30年	石原 禮三	昭和23・鉱山
令和2年2月8日	西村 山治	昭和28・冶金旧制
	宮崎 伸吉	昭和28・冶金旧制

令和元年10月23日	津島 健治	昭和39・冶金
平成29年4月27日	芦田 喜郎	昭和41・金属
平成27年	林 康代	昭和35・冶金
令和元年9月	竹村 進	昭和41・資源
令和元年7月13日	高田 真吾	昭和27・鉱山
	高橋 延幸	昭和33・冶金
令和2年1月7日	有田 健二	昭和32・鉱山
令和元年	谷口 利廣	昭和23・冶金
令和2年7月	山本 道晴	昭和52・金属

教 室 報 告

教員人事

<旧資源系>

令和元年10月16日	柏谷 公希	准教授に昇任 地殻環境工学分野
令和2年1月16日	塚田 和彦	教授に昇任 計測評価工学分野
令和2年2月1日	久保 大樹	助教に採用 地殻環境工学分野
令和2年4月1日	村田 澄彦	准教授 計測評価工学分野に配置換 地球資源システム分野から
令和2年8月1日	武川 順一	准教授に昇任 応用地球物理学分野

<旧金属系>

令和元年11月1日	岸本 章宏	助教 表面処理工学分野に 異動 非鉄製錬学講座から
令和2年3月31日	松原英一郎	教授 材料設計工学分野 定年退職
令和2年4月1日	奥田 浩司	教授に昇任 材料設計工学分野 先端材料 物性学講座 (准教授) から
令和2年4月1日	安田 幸司	特定准教授に採用 非鉄製錬学講座 京都大学環 境安全保健機構(助教)から
令和2年5月1日	柴田 暁伸	准教授 構造物性学分野 NIMS (鉄鋼材料グループ・ グループリーダー)へ転出
令和2年7月1日	柏谷 悦章	教授に昇任 プロセス 熱化学分野 エネルギー応 用基礎学分野(准教授)から
令和2年8月31日	谷ノ内 勇樹	特定准教授 非鉄製錬学 講座 九州大学(材料工 学部門・准教授)へ転出

令和2年度水曜会誌編集委員

委員長 邑瀬 邦 明
幹 事 豊 浦 和 明(会誌) 奈良 禎 太(広告・HP担当)
編集委員(学内) 奥 田 浩 司 三 宅 正 男 福 山 英 一
編集委員(学外) 森 下 浩 平 松 井 雅 樹 佐 野 光
日 外 勝 仁 石 川 茉莉江

令和2年10月25日 印刷 令和2年10月31日 発行

編集兼
発行者
印刷者

杉 村 博 之
小 林 誠 造

日本印刷出版株式会社

553-0004 大阪市福島区玉川4丁目7番13号
電話 大阪 (6441) 6594 (代)
FAX 大阪 (6443) 5815

発行所 京都大学工学部

606-8501 京都市左京区吉田本町
京都大学工学部物理系校舎内
電話 (075) 753-5930 (火・金曜日)

振替口座 京都 01090-8-26568 水曜会
銀行口座 みずほ銀行出町支店 普通 1242526 水曜会

Suiyōkwai-Shi

TRANSACTIONS OF THE MINING AND METALLURGICAL
ASSOCIATION
KYOTO

CONTENTS

Retirement Memorial Lectures

Material Science & Engineering from Insights into the Local Atomic Arrangements of Materials	Eiichiro MATSUBARA	197
---	--------------------------	-----

Forum

De Re Metallica, A Descriptive Treatise on Mining Machinery and Sado Mining Scrolls – Transfer of Shigen-kogaku Collections to New Library in Katsura Campus –	Kazuhiko TSUKADA	203
Materials Processing Utilizing Electrochemistry and High-Temperature Melts	Kouji YASUDA	220

Lecture

Ideal light source close to sunlight – Violet LED based white light source –	Masaichi KUMIKAWA	226
---	-------------------------	-----

Current Studies in Laboratories	230
--	-----

Suiyokwai Information	255
------------------------------------	-----

Letter to Editor	278
-------------------------------	-----

Regulations	294
--------------------------	-----