

水曜會誌

第25卷 第1号

目 次

大会記念講演

凡人の本懐	二村 文友	1
(株)UACJの高機能アルミニウム材料開発と将来展望	洪江 和久	3

談話室

我が国における物理探査100年回思	佐々 宏一	14
スイスにおける高レベル放射性廃棄物地層処分の動向	榊 利博	17
熱弾性型マルテンサイト変態の相平衡と動力学	新津 甲大	22

研究速報	27
------------	----

会 報	53
-----------	----

卒業生名簿	66
-------------	----

会 則	82
-----------	----

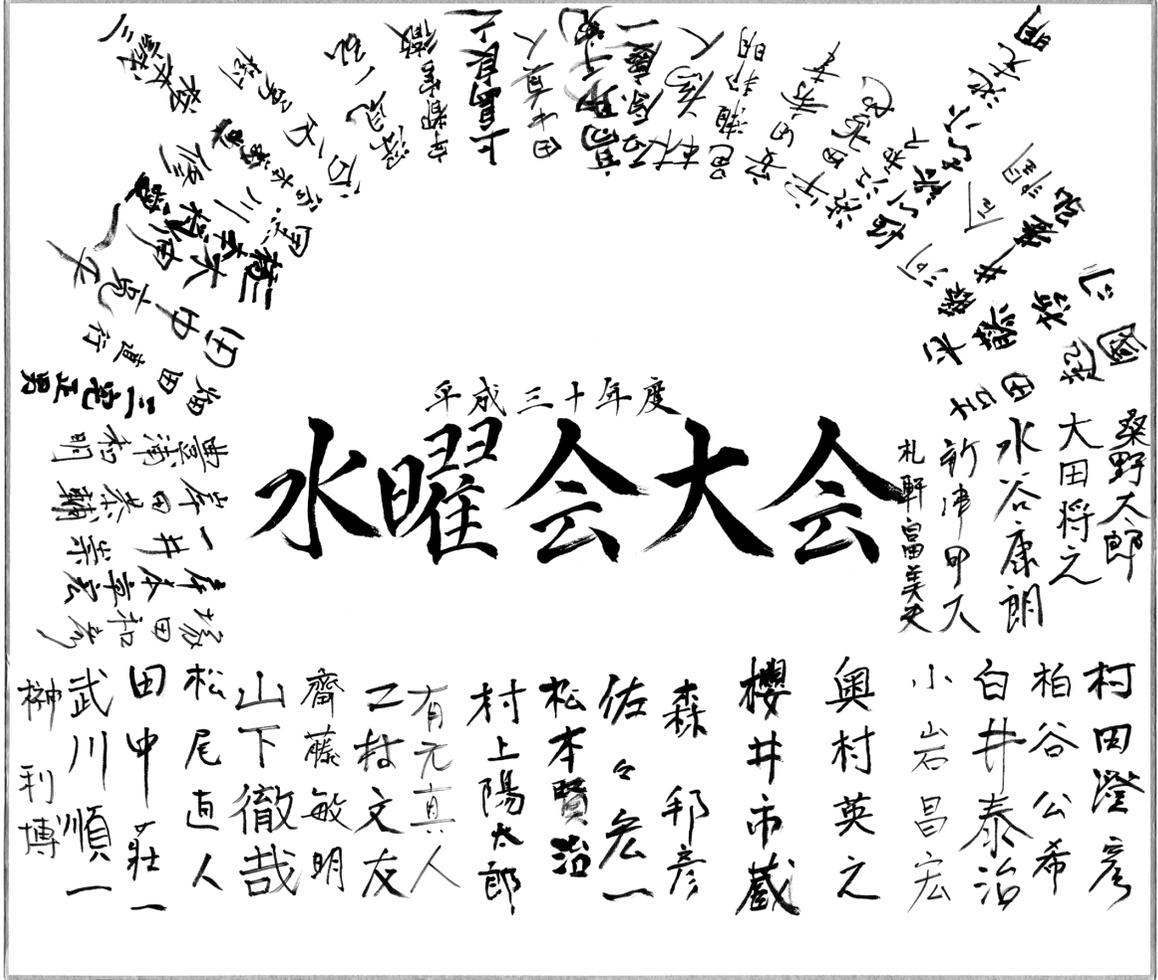
平成30年10月31日発行

京 都 大 学

水 曜 会



平成30年度 水曜会大会 記念写真 (平成30年6月2日 京都大学 工学部物理系校舎にて)



平成30年度 水曜会大会 懇親会寄せ書

大会記念講演

凡人の本懐

二 村 文 友*

What is the Raison D'être for Engineers in Manufacturing?

by Bun-yuu FUTAMURA

1. はじめに

今年1月下旬に突然、宅田先生より連絡があり、「6月の水曜会大会の講演会で何か話を」との依頼があった。もう現役を退いているのでデータに基づいて話すようなことは難しい、製造業人の拙い人生観でよろしければ、ということで恐れ多くもお引き受けした。

テーマは「凡人の本懐」。少し銜ったタイトルだが、製造業人生の中で果し得なかった後悔の念から、モノづくりに携わる現場技術者に向けて、本懐とは何か、またどうすれば本懐に至るのか、愚見をお話することにした。

2. 自己紹介

私は滋賀の湖南地区の小さな貧乏寺に生まれた。1947年、団塊の世代である。父は京都の仏教大学で教鞭をとっていた。3～4回生の頃は大学紛争が盛んであり、育った家庭環境も手伝ってか、大学の途中で2度ばかり進路に迷ったことがあった。そんな中途半端な気持ちで1972年、新日本製鐵株式会社（現新日鉄住金株式会社）に入社した。

3. 会社人生

入社翌年の第一次石油危機が始まり、1985年のプラザ合意後の急激な円高進行、金融緩和によるバブル経済とその崩壊、1995年には1ドル80円を切るまでの急騰、近くは2000年に入って中国の急成長、そして2008年のリーマンショック等々、立て続けに様々な経済危機に襲われた。

鉄鋼業ももちろんこれらの危機に直面し、省エネ・

エネルギー多様化の推進、大合理化の断行、海外調達・海外進出へのかじ取りを迫られた。加えて、それぞれの危機を背景にした個々の顧客から出現してくる多様な品質要求への対応策を逐次講じていく必要があった。それは、今ある鋼材への高機能化（高強度化、良加工性、高耐蝕性、あるいは高靱性、良溶接性等）要求であり、高純鋼をベースに生産性の低い、合金添加の多い、コストの高い加工熱処理型鋼材への品種転換ばかりであった。中国の急成長までの約25年間は、量的伸びのない低成長の中でまさに大合理化と熾烈な品種転換競争であった。因みに世界の粗鋼生産は、この間7～8億トンで変わらず横這いであった。鉄源集約・ミル集約も含めた極限までの固定費の圧縮を図りながら、高機能化対策としての多額な設備投資の実行も余儀なくされた。

しかしながら一方で、こうした危機や市場動向に対応する力こそが、企業が生き残っていく上で最も重要な競争力であることを、身をもって痛感した。そしてこの競争力の決め手は、開発から実機化までの工期短縮であり、そのために顧客との距離を縮めるあらゆる工夫と社内における営業・研究・製造の一体運営の重要性を日々実践の中で学ぶことが出来た。

4. 持続的成長

様々な貴重な体験を重ね、会社人生の終盤10数年を経営側で末席を汚す機会を得た。従前にも増して最大の関心事は「事業の寿命」とか「企業における持続的成長」の意味であり、そもそもそれは一体何のためなのかを考える機会でもあった。一つは時代のニーズ・市場の動向に応えながら世の中の人の役に立つ製品を安定供給し社会に貢献するためであり、一つはその活動を通じてすべての従業員に成長と生甲斐を感じてい

*元新日鐵副社長（技術開発本部長）

く場を提供し続けるためだと考えた。

しからは、製造業は持続的成長のために一体何をなさねばならないのか？一つはグローバルな時代の変化や市場動向の的確な把握と迅速な対応、一つは事業運営基盤の陳腐化・老朽化対応、そしてもう一つは言うまでもなく継続的な人材の確保と育成。それが自らの体験と多くの諸先輩方から学んだ結論である。そして経営側の果たすべき責任は、この3つの要素をチェックするモニタリング機能を用意し、常に課題抽出して中長期的視点で明確化した施策を着実に実行推進するところにあると思う。

5. 人材育成

しかし言うには易いが、最大の難題は人材育成であると思う。実際、多くの企業は新入社員教育に始まり、中堅社員教育、部・課長研修、等々工夫を凝らしたプログラムを用意しているが、あまりいい評判を耳にしたことがない。なぜならそうした教育や研修は、スキルを身につけるのには役立つが、いわゆる「その気になる」「尻に火が付く」といった心から突き動かされる切っ掛けにはなかなか得ないからである。

製造業への道を選んできた一人ひとりには、どのようにして自己の成長と生甲斐を感じていけばよいのか、年と共にどう自己変革を遂げていけばよいのか、その切っ掛けとなるものは何なのかを考えなくてはならない。製造業という場では非凡な素質を有する人も多いが、所詮自分一人では何もできないというやや自己否定的な自覚のもとに、互いに役割を決め、組織間の連携（チームワーク）で事を成し遂げていくのが基本である。そしてそう自覚した非凡なる凡人たちが共にモノづくりに励み共に成長していく人生のマイルストーンが実に2500年以上も昔の中国で明らかにされていた。「論語」である。

吾十有五而志乎学，三十而立，四十而不惑，
五十而知天命，六十而耳順，七十而從心所欲不踰矩

これが我々製造業人にとっての人生の道標として、そして「その気になる」切っ掛けの名言として相応しいと確信したのは、ある先輩の勧めで洪沢栄一の「論語と算盤」を読んだ時のことである（「立志と学問」という章で詳しく述べられている）。30にして社会で自立するまでに成長し、40にして一生を貫いてやることのできる自信を得て、そして50にして天命を知るといのである。「天命を知る」とは、言い換えると自分は何をするために生まれてきたのかという根本的な問いに対する答えを得ることであり、いわば、人生の拠、自分が生きている社会的根拠が明確になるという意であろう。企業人の生活に当てはめると30前後に掛長、40前後に課長、50前後に部長という10年ピッチの成長目標に見事に符合している。そしてこれはチームワークを自覚した凡人たるすべての製造業人が目指すべき本懐である。また製造業における継続的人材育成にとって、この本懐を遂げた一定の塊をなす50前後の人材の存在が如何に重要であるかを思えば、我々凡人の本懐とそこに至る道程を示唆した中国古代の聖人には有難く唯々頭が下がるばかりである。

6. おわりに

今後も間違いなく世界は目まぐるしい変革を繰り返すであろう。愈、変化に強い体質を鍛え、本懐を遂げる人材を常に創出して企業は持続的成長を遂げていくしかない。

もう少し早く気づいておれば、筆者も論語の教えに従って成長を遂げ、凡人の本懐を得て、少しは後輩の人材育成に役立っていたかもしれない。しかし、本日、将来を背負うであろう多くの若い人に話せたことで後悔の念は随分薄らいだと思う。

御清聴、ありがとうございました。

大会記念講演

**(株) UACJ の高機能アルミニウム
材料開発と将来展望**

渋 江 和 久*

**UACJ's R&D Activities for Functional Aluminum
and its Future Vision**

by Kazuhisa SHIBUE

1. はじめに

株式会社 UACJ (以後、UACJ) は古河スカイと住友軽金属工業の二社が2013年に経営統合し、誕生したアルミニウム軽圧メーカーです。UACJ はアルミニウム関連事業において100年を超える歴史を有し、新合金の開発や製品化において日本の素材産業をリードしてまいりました。2018年時点で圧延板の生産量として世界第三位グループに属し、日本発のアルミニウムメジャーとしての歩みを始めております。本報ではUACJのアルミニウム研究開発のいくつかの事例を概説するとともに、今後の展望について述べます。

2. アルミニウム産業の世界動向と UACJ の役割

世界におけるアルミニウム板の需要は年率 3.9% で拡大し、2021年には年間 3000 万トンに達すると予想されています¹⁾。この急速な需要拡大は新興国における飲料缶や空調機器の普及、先進国における輸送機器へのアルミニウムの増加により説明づけられます。輸送機器の中では特に自動車用のパネル材の伸びが高く、各国の自動車燃費規制に伴い軽量かつ高強度のアルミニウムが採用されつつあります。他方、EV (電気自動車) 化の流れは、航続距離の延長のために軽量化が本質的であり、アルミニウムが多用されることが期待されます。EV には LIB (リチウムイオン電池) その他のバッテリーが多用されるため、電極材としてのアルミニウムが大きな新市場を形成し、2016年度の年間 5 万トンから10年間で約 4 倍の市場規模に達すると予想されています。このようなアルミニウム材料の市場の拡大においては、新たな製品用途向けのスペ

ックに適應するため、合金開発や製品開発をグローバル競争の中で進めていく必要があります。また、飲料缶や空調機器用に代表される既存市場のため、東南アジア等新市場での顧客のビジネスへの対応が求められます。ここでは、研究開発活動もローカル適用およびグローバル化を避けることが出来ません。UACJ では社内生産技術および顧客支援をも含む研究開発機能をグローバル化するとともに、各分野でコアとなる技術の競争力を高め、製品を通じて世界の顧客に満足と信頼を与えることを目標としています。本報では新技術が生み出す価値に着目し、自動車用材料をはじめとするいくつかの研究開発事例を紹介させていただきます。

3. 自動車用板材・構造材

地球温暖化対策として全世界的に CO₂ 排出量の低減が大きな目標となっています。日本における CO₂ 排出量は2016年の統計で年間約12億トンであり、そのうち、自動車走行時に排出する CO₂ 量は 1 億9000 万トンと全体の約 15% を占めます。このように自動車の走行による CO₂ 排出量は多く、燃費向上への要求は非常に大きいといえます。このため、各国ではそれぞれに燃費向上に向けた法規制を策定しております。例えば米国では自動車メーカーごとに基準が設定される燃費目標 (CAFE) が定められ、その基準を満たさないと多額の罰則金を課せられる仕組みが採用されています。この燃費目標は燃費性能の向上が CO₂ の総排出量に与える影響の大きい車種や部品を研究開発におけるターゲットとして明示する点で優れ、市況変化や競合といった外部要因ではなく、研究課題の面で燃費向上を主題に据えることを促す仕組みであると考えられます。これらが契機となり、自動車メーカー各社は本質的な技術革新を通して燃費向上に取り組んでき

*株式会社 UACJ 専務取締役 R&D センター所長

ました。

日本においては2016年の全車平均燃費はJCO8 と呼ばれるモードで21.9Km/Lとなっており、2000年当時の13.2Km/年(10・15モード)から66%(モードの差を考慮すると80%程度)も向上しています。この向上はエンジン、トランスミッションの改良、ハイブリッド化など主にパワートレインの革新によるところが大きく、ここ4～5年は燃費向上が頭打ちとなっています。自動車の軽量化は当然、燃費向上に有効ですが、衝突安全性強化への対応、各種快適化装備の充実などむしろ必要となる車体構造の重量は増加傾向にあり、それを補う目的でアルミ等の軽量化素材の使用

量も増加しています。今後もアルミや樹脂等の軽量化素材を多く使った思い切った軽量化はEV化と並ぶトレンドとなると予想されます。

上述のCAFEに対応するため、米国で年間80万台以上の生産量がある北米最量産車種であるフォードF150シリーズのアップーボディは、図1に示すようにほぼオールアルミ化されました²⁾。これを契機として北米での自動車用アルミ材の需要が急増していますが、多くの自動車では、主にフロントフード(ボンネット)、バックドア/リアゲート、フェンダー、ドアなどのパネル類のアルミ化が進んでいます。表1に自動車の部材ごとに要求される特性とそれを達成するた



図1 フォード F150 のアップーボディ各部品の材質

表1 自動車の部材ごとの要求特性と各素材を使用した場合の重量

	板厚決定要因										部品例
	張り剛性		耐デント性		部材剛性		耐久強度		大変形衝突強度		
外板	◎		○				△		○		フード、ドア、トランクリット/アウタ
内板	◎		△		○		○		○		フロア、ダッシュ
構造部材	剛性				◎		○		○		ボデーサイド・クロスメンバー
	耐久性				○		◎		○		サイド・デフマウントメンバー
	強度				○		○		◎		ドアインパクトビーム サイドメンバー、バンパー
パラメータ	$E t^3$		$\sigma_y t^2$		$E t$		σ_{TS}		$\sigma_y^{0.6} t^{1.8}$		
	板厚	重量	板厚	重量	板厚	重量	板厚	重量	板厚	重量	
軟鋼	1	100	1	100	1	100	1	100	1	100	
45 キロ	1	100	0.72	72	1	100	0.68	68	0.80	80	
50 キロ	1	100	0.65	65	1	100	0.60	60	0.75	75	
60 キロ	1	100	0.56	56	1	100	0.52	52	0.68	68	
80 キロ	1	100	0.48	48	1	100	0.39	39	0.62	62	
アルミ板 (Al-4.5Mg 合金)	1.44	50	1.10	38	2.96	102	1.10	38	1.07	37	<軟鋼ベース> 軟鋼と同一特性にした 時の板厚比・重量比

めに必要な各材料の物性とそれによって達成できる軽量化効果を示します。

パネルへの応用では張り剛性が重要であり、軟鋼板をハイテン化しても軽量化効果が少なく、アルミが有利な部材であるといえます。フードやドアなどは外板と内板の二重構造となっており、外板は飛んできた石などでへこみ（デント）が生じないように剛性ととも高い耐力が必要です。パネル用材料としては、当初は成形性が優れた5000系合金が使われていましたが、塗装焼付け時に時効硬化で耐力が増加（バークハード）する6000系合金は耐デント性に優れ、外板に特に適しているため、現在ではパネル用板材の主流となっています。外板用6000系合金に求められる特性は、バークハード性に加えてプレス成形時のリジグマークの抑制、ヘム曲げ時の割れ抑制などがあります。特にヘム曲げ性は自動車外板への応用における大きな課題でした。図2にヘム曲げの概要を示しますが、フードなどの外板と内板を繋ぐ際に、外板を折り曲げ、内板にかしめるヘミングと呼ばれる工程があり、この時の180°の曲げ加工で外板に割れが発生することがあります。ヘム曲げ性は材料の伸びと必ずしも対応せず、自然時効で強度が増大するにつれて悪化することが知られて

いました。この対策としては溶体化温度の低温化や第二相粒子を小さくするための高純度化などが行われてきましたが、必ずしも充分ではありませんでした。UACJではヘム曲げ性に及ぼす結晶方位の影響に関して、各種の方位を持つ単結晶板を作製して検討した結果、Cube方位が他の方位と比較して圧倒的にヘム曲げ性が良好であることを明らかにしました。これは、Cube方位は曲げのような大ひずみ変形を与えても加工硬化が少なく、せん断帯が発生し難いためであることによりますが、この知見を得て図3に示すように通常の多結晶体においてもCube方位を持つ結晶粒を多くすることにより、ヘム曲げ性が向上することが確認されました。この技術は量産材にも適用され、材料の組織制御により顧客工程で求められる加工性を担保する事例となっています。

アルミが有利なパネル類とは異なり、自動車の構造材は高い強度が要求され、ハイテンとの比強度と価格の上での直接の競争が生じます。近年、強度が1GPaを越える超ハイテンが実用化され、自動車の構造材として使用されるようになってきました。アルミで対抗するためには超ハイテンに匹敵する比強度を有する、いわゆる超々ジュラルミンと呼ばれるAl-Zn-Mg-Cu 4元

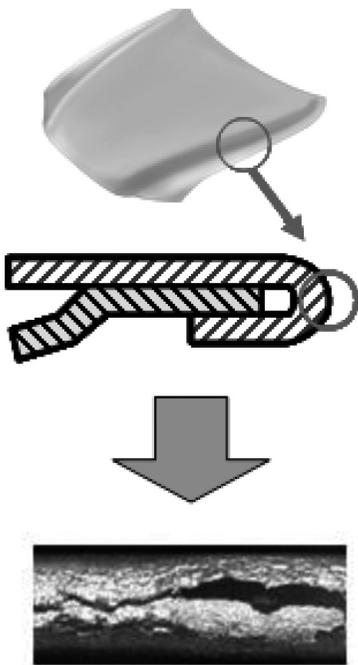


図2 ヘム曲げの概要

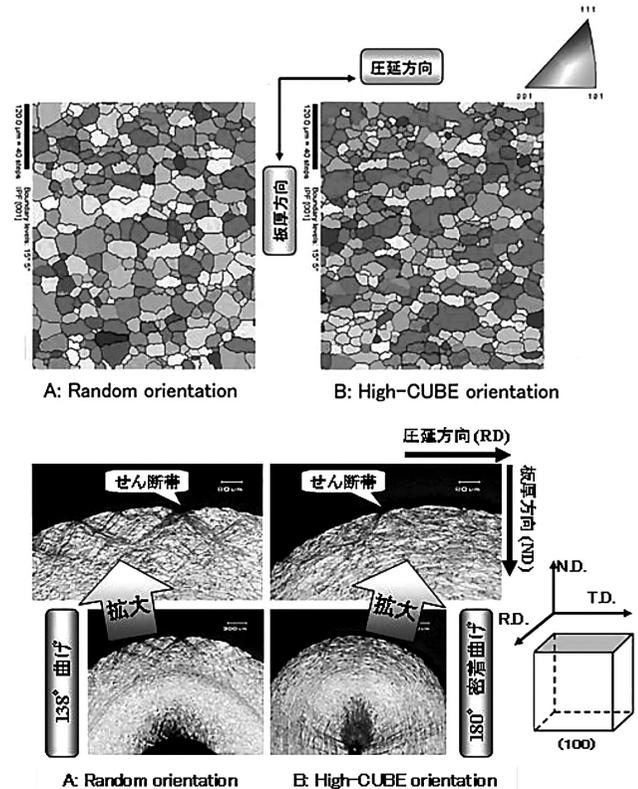


図3 Cube方位が多い多結晶材のヘム曲げ

系7000系合金が必要となります。超々ジュラルミンは主に航空機用に開発・使用されてきました。この合金では専用の溶体化・焼き入れ装置等が必要であり、自動車向けとしては价格的に折り合いをつけることが困難であるとされてきました。近年、超ハイテン用に高温でプレスし、そのまま焼きを入れるホットスタンプが普及してきており、この手法をアルミに利用することで超々ジュラルミンの自動車への適用の可能性が生まれました。これは加工技術の進展に伴い既存合金の用途が広がる好例であると言えます。

一方で、アルミ押出材の特徴である自由な断面形状を使ってハイテンに対抗する試みも行われています。その一例として軽量バンパーシステムが挙げられます。バンパー付近の複雑な構造を加工自由度の高いアルミにより実現する動きです。図4にマツダロードスターに採用されたフロントバンパーを示しますが、これは閉断面形状が可能なホロー押出で作製した7000系合金ZK-170のレインフォースと6063のクラッシュボックス、5052のセットプレートを組み合わせたものであり、従来の鋼製バンパーより2.4kg軽量化することができました。これらの各部材は、図5に示すようにそれぞれの要求特性に合わせて組織を最適化しており優れた衝突安全性を持っています。このように、合金の多様性を生かし、多面的な要求特性を満足する構造を高い生産性の下で実現できる点にも、アルミ合金の優位性を見ることができます。

このような構造材としてのアルミの応用においては、他の部品との接合が重要となります。従来アルミの溶接は鋼材と比較して難易度が高く、施工上の課題となっていました。その中で、1990年代にイギリスのTWIがアルミの高温での低い変形抵抗を活かした摩擦かくはん接合（FSW）と呼ばれる手法を開発しました。これはピンとショルダーのついた工具をアルミ材料中に挿入して回転させ、その摩擦熱でアルミ材料を塑性流動させることで接合するものです（図6）。FSWは溶融させない固相接合であるため、入熱が少なく“そり”などの溶接後の変形を低く抑えることが出来る画期的な手法と言えます。また溶接に伴うスパッタの発生がないなど、作業環境面からも優れた手法です。

現在このFSWを使った接合方法がアルミの接合に広く用いられており、その一例として図7にフロントフード内のレインフォース部品をFSWで接合したテールロードブランクを示します。テールロードブランクは板厚および材質が異なる材料を事前に接合し、一体として成形する手法です。テールロードブランクは製造プロセスの簡素化、コストダウンが可能であり、主に鋼材で使用されてきました。本例はアルミにおける最初の

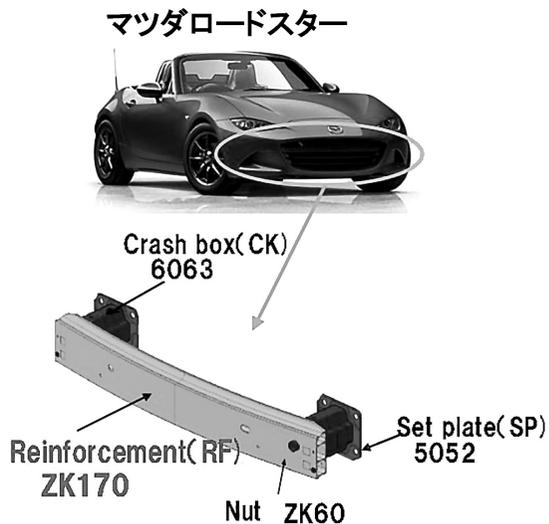
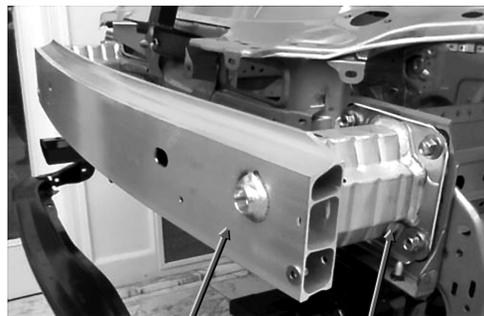
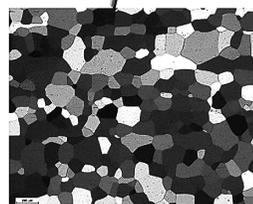


図4 アルミ製フロントバンパーシステム



Fiber Microstructure
(Higher Strength)



Recrystallized
(well Ductility)

図5 バンパーシステムの各部の組織

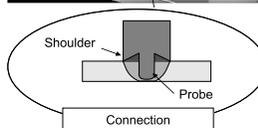
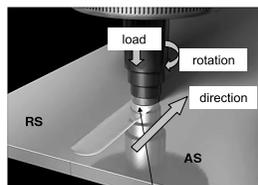


図6 摩擦かくはん接合（FSW）



図7 FSWを使用したアルミ板材のテールードブランク

テールードブランクの実用化であり、FSWの優れた特性を活かした事例とも言えます。

今後、構造部材にアルミを適用する際は、アルミ同士だけではなく、他の材料との接合も必要となってくることから、信頼性とコストに優れた異材接合技術の開発が重要となりつつあります。

4. リチウムイオン電池用アルミニウム材料 —加工軟化現象の製品適用—

上述のように環境保護の観点から自動車におけるEV化の動きも活発になっています。特にヨーロッパはその気運が高く、イギリス・フランスでは2040年以降はガソリン車の販売を認めない政府方針が示され、欧州自動車メーカーはEV開発に舵を切りつつあります。この商用車におけるEV化を実現したデバイスがリチウムイオン電池(LIB)です。表2に示すように、LIBはこれまでの電池に比べ出力および単位重量あたりのエネルギー密度が高く、自動車の動力源として内燃機関を置き換える原動力となっています。LIBモジュールには図8に示す通り、多くの部品にアルミニウムが用いられます。LIBセル構造の一例を図9に示します。この中でケース、封口板、正極板(箔)にアルミニウムが使われます。

ここで、材料学的な知見を活かしたLIB用の製品開発の一例を示します。集電体用極(箔)材はゲージダウンのために高強度化が求められます。また、通電性を考慮しますと、電気抵抗の小さい(導電率の高い)特性が求められます。これまで高強度化のために

表2 二次電池性能比較

種類	電圧 (V)	エネルギー密度 (Wh/kg)	出力 (W/kg)	充放電効率 (%)
鉛蓄電池	2.1	30-40	180	50-92
ニッケル-鉄電池	1.2	50	100	65
ニッケル-水素電池	1.2	30-80	250-1000	65
リチウムイオン二次電池	3.6	160	1800	80-90

Al-Mn (3003) 合金箔が利用されていましたが、Mn添加により導電率は低下します。ここでは、Mn添加のない1000系合金の高強度化プロセスを開発し、図10に示す高強度・高導電性1000系アルミニウム合金箔の量産に成功しました。

角型ケースは飲料缶ボディと同様、DI(しぼり、しごき)加工で成型されます。ダイス鋼との焼付きを抑えるため、缶ボディ材と同じAl-Mn系合金が選ばれています。LIBは充放電を繰り返し使用しますが、温度の上昇と内部構造体の膨張で、ケースが内圧を受けてクリープ変形することがあります。このクリープ変形を抑制するにはMgやCu添加が有効で、これらを添加した合金成分調整がなされています。

ケースを密封するための封口板は所定の内圧に耐えるため、1000系アルミニウム合金よりも強度の高い3003合金が用いられています。内圧が上限値以上に上昇する異常事態においてケースが破裂する事態を避けるため、封口板には防爆弁が設けられています。防爆弁は局部的に薄い領域を有し、内圧が高くなると部分的に亀裂が生じて内圧を開放するよう作動します。すなわち、ハードウェア的にも破裂や爆発を回避する仕

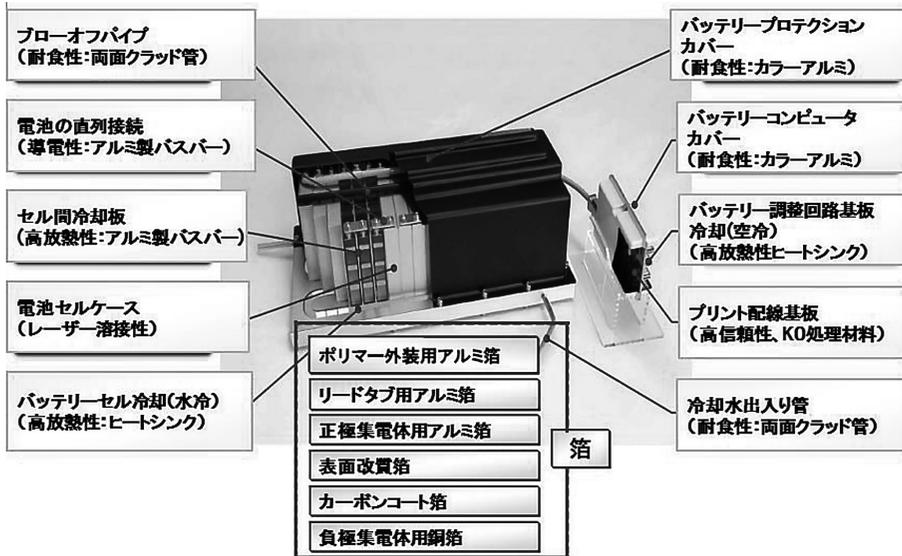


図8 リチウムイオンバッテリーモジュール例

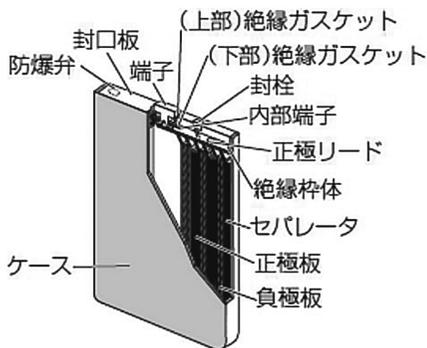


図9 角型 LIB の構造

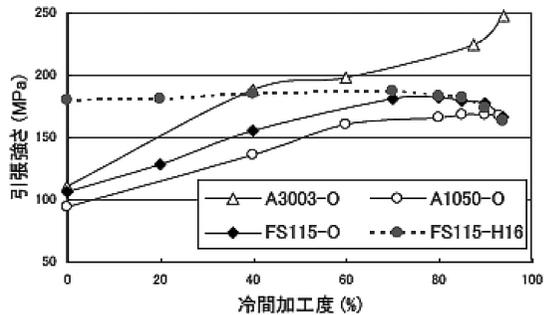


図11 各種材質の加工硬化、加工軟化特性

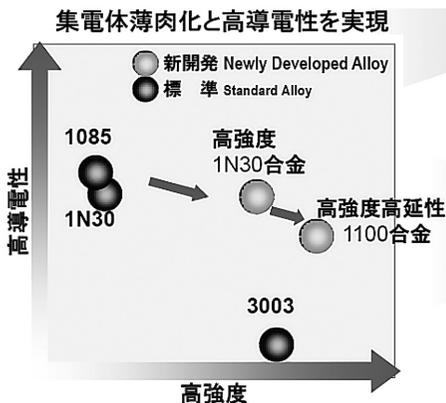


図10 正極集電体用箔材の特性

組みが取り入れられています。この防爆弁を生産プロセスの上で形成する手順として、封口板相当部に穴を開け、内側に1000系合金箔をレーザー溶接する手順が採用されています。この部品をプレス加工で成形できれば、溶接に比べて生産性は大幅に向上しますが、3003合金は加工硬化能が高いため、プレス加工が採用できませんでした。他方、1000系合金ではプレス加工によって防爆弁を成形することができますが、元板強度が低いために封口板として使用には適しませんでした。この問題を解決するために、加工軟化現象を利用する材料設計を行いました。

一般に冷間加工を加えると金属材料は加工硬化しますが、前田ら³⁾は加工軟化現象を見出しています。その発生機構には不明な点が多く、これまでに工業製品に積極的に利用されてきませんでした。しかし、加

工において局所的に軟化する特性は、封口板の防爆弁加工と使用に適すると考え、製造工程も含めた改良検討を行いました。結果として、図11に示す特性の加工軟化材 (FS115) を量産することに成功し、一つの材料において、局所的に加工部が軟化することで防爆弁として機能する部品が実現されました。

5. 熱交換器と防食設計—耐食銅管“DANT®”の材料開発

アルミニウムの優れた加工性と熱伝導性、耐食性から熱交換器用にアルミニウムが幅広く利用されています。特に軽量化が必要な自動車用の熱交換器には、冷媒循環のための押出多孔管と外気との熱交換のためのフィン材とがろう付けにより接合された複雑かつ生産性の高い構造が用いられています。屋外で使用される熱交換器としては、製品全体の耐食性が重要な性能指標となります。アルミニウムは表面に緻密な酸化皮膜(不動態皮膜)が自然に形成されるために高い耐食性を示します。しかしながら環境中に塩化物イオンが存在すると、この不動態皮膜の一部が破壊され、孔食といわれる局所的な腐食が発生することがあります。孔食は、材料の厚さ方向への腐食速度が非常に速いため、貫通が製品の機能損失に直接かわる熱交換器の冷媒流路においては製品寿命を律速する腐食現象となります。アルミニウム熱交換器の孔食の防食方法として、犠牲防食(カソード防食)の技術が適用されています。犠牲防食とは、防食する側の電極電位を防食される側の溶解電位よりも低く保ち、製品の厚さ方向への孔食発生を抑制する方法です。すなわち、一つの製品の中においても、板のクラッド、表面への異種材料の溶射、塗布などの技術の組み合わせにより、機能低下につながる腐食を抑制した熱交換器を実現することができます。UACJでは、電気化学的知見に基づく防食技術、および、幅広い技術を用いた腐食解析技術を組み合わせた防食設計技術を駆使し、使用環境において、犠牲防食を最大限に発揮できる熱交換器用高耐食アルミニウム合金を開発しています。

他方、エアコン等に用いられる熱交換器においてはコストと生産性の両面から銅管が使用されています。銅における局部腐食の一種である蟻の巣状腐食は、ギ酸や酢酸といったカルボン酸との接触により発生することが知られています⁴⁾。腐食の断面形状は文字通り“蟻の巣”のように複雑に入り組んでおり、腐食の間口が数 μm ~数十 μm と非常に微小で肉眼で見えることは困難な上、深さ方向への進行が速いという特徴があります。エアコン用銅管については、給水・給湯用および冷凍空調用等の水道水や、冷却水が流れる場

合と比較して発生する腐食の種類は少なく、蟻の巣状腐食が主要な腐食問題として位置づけられています。最近では環境要因によって、外面側から発生する蟻の巣状腐食が世界中で増加しています。

これまで蟻の巣状腐食の発生機構は概ね明らかにされてきましたが、有効な対策材は存在しませんでした。蟻の巣状腐食の材料要因として銅中のリンの影響が指摘されており、リンを含まない無酸素銅 (C1020) に比べて、リンを微量含むリン脱酸銅 (C1220 : 0.015~0.040 mass%P) では、蟻の巣状腐食が激しくなることが知られていました⁵⁻⁷⁾。UACJでは蟻の巣状腐食の発生に及ぼす銅中のリン濃度の影響をより広く検討し、リンを一定量以上に増量すると蟻の巣状腐食に対する耐性が劇的に向上するという、新たな知見を発見し、耐食性に優れた銅管“DANT®”を開発し、市場に供給しています。

本開発においてはまず、蟻の巣状腐食挙動に及ぼす銅中のリン添加濃度の影響を検討するため、リン濃度を0(無酸素銅)~1mass%の範囲で含有するCu-P合金板材を作製し、蟻の巣状腐食試験を行いました。図12にギ酸暴露試験20日後の、銅中のリン添加濃度と最大腐食深さの関係を示します⁶⁾。従来の知見どおり、蟻の巣状腐食による腐食深さは、無酸素銅 (C1020) よりもリンを微量含有するリン脱酸銅 (C1220) でより深くなりました。しかしながら、リン濃度がさらに増加すると、腐食深さが大幅に抑制されることが見出されました。実際に使用されている伝熱管の肉厚は0.25mm程度であるため、リン添加量を0.2mass%以上とすることが蟻の巣状腐食による異常発生防止に有効であると結論付けられました。この結果に基づき、本開発合金を用いた高耐食銅管 (DANT®) を試作し、その耐食性を前述の試験法にて評価しました。P添加濃度は従来材である0(C1020), 0.027(C1220) および0.22, 0.24, 0.29 mass% (DANT®) として比較したところリン添加濃度が0.2mass%以上 (DANT®) では、80日経過後も腐食の進行が非常に緩慢であり、腐食深

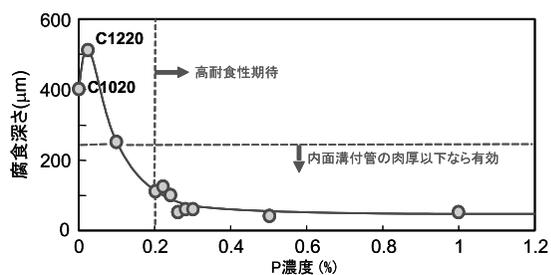


図12 リン添加濃度と腐食深さの関係⁶⁾

さは最大でも 150 μm 未満に抑制されていました。一方、従来材である C1220 および C1020 では、わずか 20 日以内に肉厚を貫通する腐食が生じました。試験 80 日後の断面観察結果を図 13 に示します⁶⁾。DANT[®] では浅い半球状の腐食形態を呈しており、蟻の巣状腐食が抑制されていることがわかります。

本開発事例においては、通常は腐食特性に悪影響を与えると考えられていたリンを想定以上に添加した場合の挙動というセレンディピティの発見が新製品開発の源となっております。腐食試験という長期の性能評価において、こうした予想外の結論を見出した点に材料開発と製品化の難しさと面白さを見ることができます。

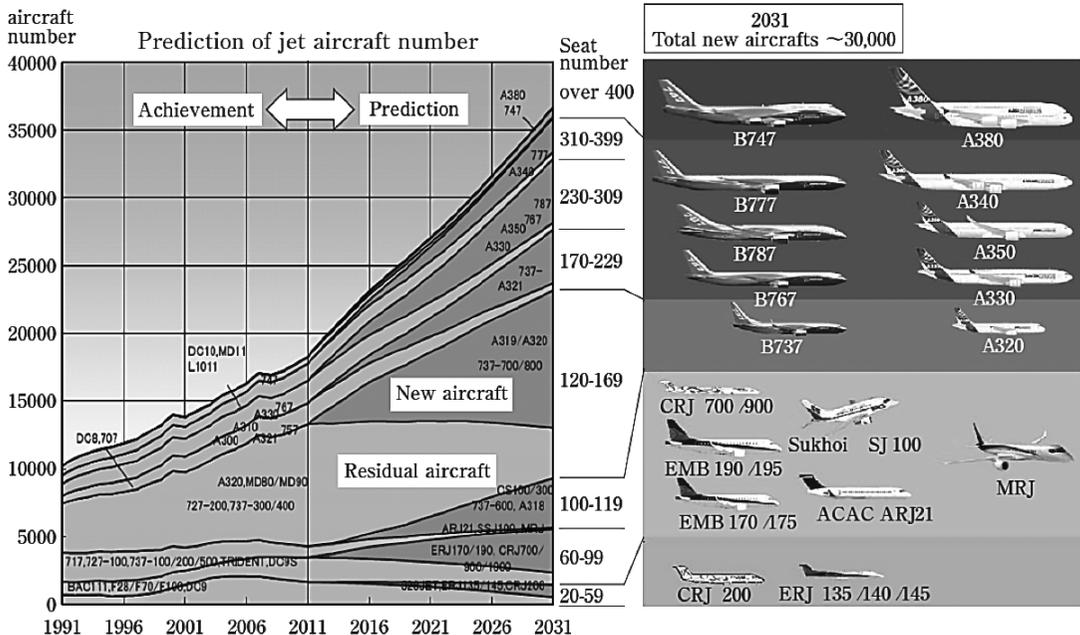
6. 航空機用材料

従来、航空機用材料としては軽量で強度が高い 2000



図 13 0.1 mass% ギ酸霧雰囲気暴露 80 日後の溝付管の断面観察結果⁶⁾

系、および 7000 系アルミニウム合金が主に使用されており、代表的な長距離大型機であるボーイング 777 (初飛行 1994) では構造材料の 70% をアルミニウム合金が占めています。その一方で CFRP を始めとする繊維 / 樹脂複合材の開発が進み、年々構造材に占める比率を上げてきています。その中で 2009 年に初飛行したボーイング 787 では複合材の比率が 50% となり、アルミニウム合金の 20% を大きく超えました。続くエアバス A350XWB においても複合材の比率が 50% を超え、航空機の構造材の主流は複合材に移ったことが示されています。これらの事例から航空機用としてのアルミニウム合金の利用が縮小する印象が強くなりますが、実際にはこれとは反対の動きも多く見られます。例えば、開発中の国産リージョナルジェットである MRJ ではアルミニウム合金が構造材料の 83% を占め、アルミ合金製の航空機と言っても過言ではありません。こうしたリージョナルジェットの分野ではシェアトップのエンブラエル社 (ブラジル) の次期主力機である E-2 シリーズでも同様にアルミニウム合金主体の設計がなされています。こうしたアルミニウム合金の多用は、小型機では複合材による軽量化効果が比較的小さいことに加えて、生涯経費における燃料費が大きい大型長距離機に対して、小型近距離機では機体取得費の



From "The current status and issues of Japan aircraft industry" (2013), METI.

Demand trend of jet aircraft by number of seats

藤江 社: MRJ の開発状況, <http://www.jasst.jp/archives/jasst11n/pdf/S1.pdf>

図 14 今後新造される機体サイズごとの旅客機生産機数の予測⁸⁾

比率が高いため、安価で実績のあるアルミニウム材料が選定されていることにより説明されます。図14に今後新造される旅客機の座席数ごとの数量予測を示しますが、2031年までに製造される機体の60%が座席数169以下の小型機であり、このことから将来も多くのアルミニウム合金が使用され続けると予想されます。⁸⁾

航空機用アルミニウム合金の代表的として7075合金が挙げられます。これは戦前、日本で開発されたESD合金と類似する合金であり、現在も焼入れ性や破壊靱性を改良した7050、7150などの合金が航空機用材料の主力として使用されています。一方、1950年代から旧ソ連や米国ではLiを添加したAl-Li合金が開発され、1980年代になると民間機にも適用されるようになってきました。Al-Li合金は比重が小さく、高い比強度と比剛性が得られるため航空宇宙機用材料として注目されてきましたが、Liは化学的な反応性が高く、 casting

特殊な雰囲気制御が必須である等、量産には多くの技術開発と設備投資が必要となります。日本においても1989年に共同研究開発会社アリシウムが設立され、技術開発が行われ実用化の目処が立ちましたが、投資に見合う市場が無いとの判断で量産化には至りませんでした。航空機産業が大きい欧米ではその後もAl-Li合金の量産と開発が行われ、2000年代からはLi添加量が低く、比重の低下は少ないものの、多くの欠点を克服した第三世代Al-Li合金と呼ばれる2055、2195等が使用されるようになりました。このように日本と欧米ではAl-Li合金に関する実用化技術において大きな差が開いてしまった中、伝統の7000系合金によりAl-Liに対抗できる新合金を開発すべく2013年から10年計画で「革新的新構造材料等研究開発プロジェクト」が国のプロジェクトとして開始されました。図15にその目標性能を示しますが、新たな合金及びプロセスを用いる

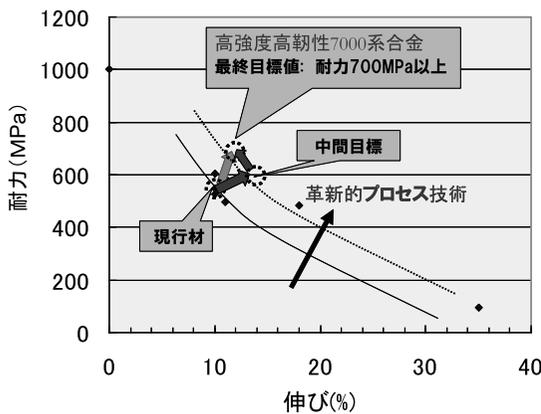


図15 高強度高靱性7000系合金合金の目標性能

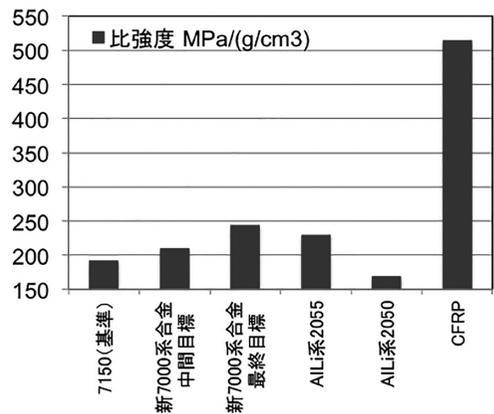


図16 各航空機用材料の比強度

<目標> ベンチマークは現行機で使用される最も高強度な7150合金

	TS、MPa	YS、MPa	EL、%
7150-T77511	≥572	≥545	≥9
中間目標値	≥660	≥600	≥14
最終目標値	≥750	≥700	≥12



ラボ圧延機; ISMA 千年分室(UACJ)



図17 新開発合金で得られたサンプルサイズと機械的特性

ことで、従来の強度-伸びの関係から一段上のラインの実用材料の開発を目指しています。具体的な最終目標値としては引張強さ 750 MPa 以上、耐力 700 MPa 以上、伸び 12% 以上が掲げられています。これは従来の7000系合金の延性、韌性を維持したまま、強度を25%向上させるものであり、図16に示すように第三世代 Al-Li 合金である2055より高い比強度が得られます。生産技術に関しては、既に図17に示す比較的大きなサイズの板材が製造可能であることが実証されており、中間目標値を超える特性が得られています。小径のラボサイズに限れば最終目標をクリアした押出材も得られています。この開発合金は Al-Li 合金よりも低コストで製造することが可能であり、欧米の Al-Li 合金と充分競合できると期待されています。航空機材は自動車材ほどの市場規模は期待できませんが、日本のアルミニウム製造業の国際競争力を維持するためには欠かせない製品の一つとして、今後も研究開発を続けていく予定です。

7. 新製錬プロセス：イオン液体からの電解析出

各種アルミニウム材の使用拡大に伴い、膨大な電力を消費する Al 新地金製錬（ホール・エルー法）の環境負荷低減と低コスト化が課題となっています。また、電気自動車の普及が進めば、これまで Al スクラップの主な用途であったエンジン用の鋳物合金の需要が減少し、再利用できない Al スクラップが増大することが予想されます。そこで、地金製造法として、エネルギー効率に優れた Al 新地金の革新的な製法である室温電解製錬（イオン液体法）の開発、およびイオン液体を利

用した独自の Al スクラップ再生技術の開発がおこなわれています。この Al の室温電解製錬プロセスでは、ボーキサイトから水酸化アルミニウム ($\text{Al}(\text{OH})_3$) を従来のバイヤー法により合成し、その後、 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ を経て Al 地金を製造するものです（図18）。本プロセスにおいては、 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ の脱水反応により AlCl_3 を合成してから Al 地金を製造する方法と、 AlCl_3 を経由しないその他の方法とが考えられます。現在、①室温電解製錬のプロセス開発、②Al スクラップを高純化するプロセス開発、③電解液から箔状の Al 地金の回収プロセス（図19）、の開発と生産性向上を進めています。

Al の析出電位 (-1.66V vs. NHE) は、水からの水素発生電位よりもかなり卑であるため、金属 Al を電気化学的に得るためには非水系の電解液を用いる必要があります。従来の Al 新地金製錬において用いられるホール・エルー法の電解液（フッ化物系溶融塩）も非水系ですが、これを室温において実施する点にプロセスとしての新規性と高い将来性があります。イオン液体法においては、金属 Al の析出に寄与するイオン種の濃度を高くできる塩化アルミニウム (AlCl_3) と 1-エチル-3-メチルイミダゾリウムクロライド (1-ethyl-3-methylimidazolium chloride (EMIC)) から構成されるイオン液体を主に使用します^{9,10}。この EMIC- AlCl_3 イオン液体から金属 Al を析出させると液中の AlCl_3 が消費されますが、外部から AlCl_3 を供給することで連続的に金属 Al を析出させることが可能となります。UACJ が実現を目指す室温電解製錬（イオン液体法）の基本的な考え方は、ボーキサイトから容易に得られる $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ から、 AlCl_3 を合成するプロセスを開発

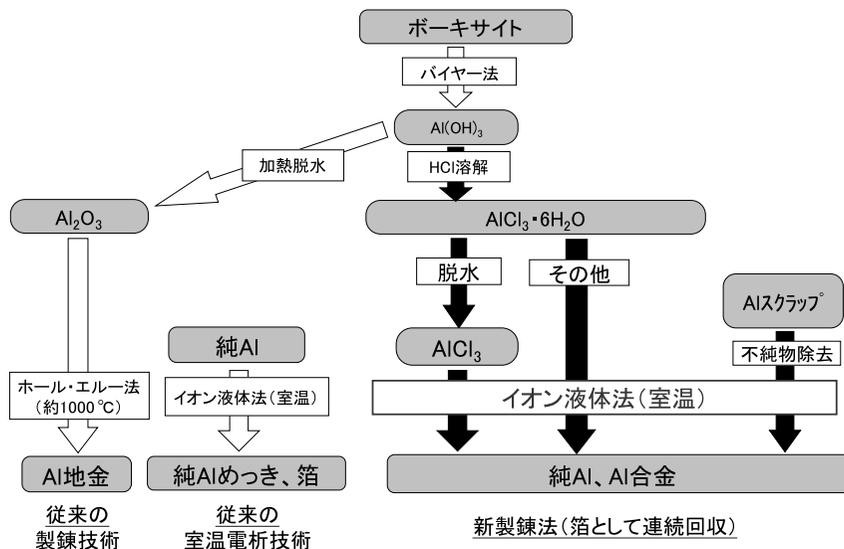


図 18 従来プロセスと新製錬プロセスの比較

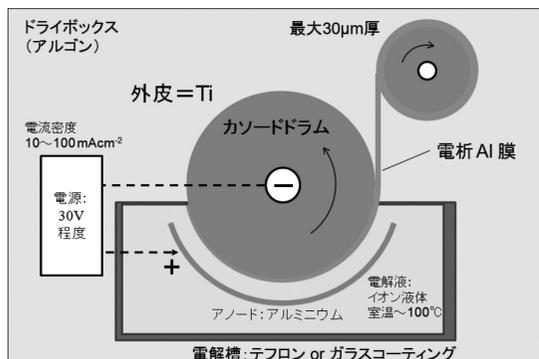


図19 連続電析装置の構成

し、 AlCl_3 を前述のEMIC- AlCl_3 イオン液体に供給して連続的に金属Alを析出させるものです。また、 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ から直接、金属Alを析出させるプロセスも研究開発課題の一つとなっています。

EMIC- AlCl_3 イオン液体を用いた金属Al析出プロセスのもう一つの特徴として、アノード電極にAlを用いた場合にAlが電解液に溶出し、電解液中のAl濃度を一定に保つことができる点が挙げられます。この特徴を利用して、アノード電極に低純度のAlを用いてAl供給源とすることで、カソード電極上に高純度のAlを析出させることができます。本手法により実際に得られた高純度Alを電子線マイクロアナライザー(EPMA)で分析したところ、溶出前のアノードよりもAl純度が向上することが確認されています。現在、電解セルの構造および浴成分の安定化手法を工夫することで、より効率の高い高純化技術を開発中です。

従来の製錬法であるホール・エルー法は、操業時の槽内温度が約1000℃であり、製錬された液状のAl地金を連続的に槽の底部から取り出します。一方、室温電解製錬(イオン液体法)により得られるAl地金は固体であり、連続的に槽外へ取り出すためには、ドラム基板上に電析させたAl薄膜を剥離し回収する手法が効率的であると考えられます。連続操業を想定し、チタン(Ti)製のカソードドラムを回転させながら析出したAl箔をカソードドラムから剥離させて回収する技術(図19)も同時に開発しています。これらの検討により、ポーキサイト由来の $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ からAlを含む電析物を回収するプロセス確立の可能性を見出しました。

本研究は、国立研究開発法人 新エネルギー・産業総合開発機構(NEDO)の委託業務として実施中です。

8. まとめ—これからのアルミニウム材料開発

本記事ではアルミニウムの市場動向を概観し、新た

なニーズに対応したUACJの材料開発の事例を紹介しました。飲料缶用アルミニウムは第二次大戦後のエポックメイキングな製品ですが、ここではアルミニウム材料は高度に規格化された顧客工程に対して、比較的少数のアルミニウムメジャーが大量に板材を供給するという構図を有していました。これらの研究開発は開発要素が極めて強く、基礎研究からやや離れた存在でした。日本国内の大学や研究機関においてアルミニウムの研究が他の材料ほど盛んになされなかったのは、こうした産業構造にも由来すると考えられます。他方、本講演では需要が伸びつつある自動車や電池用途において、基礎研究までさかのぼる技術開発が、市場における製品の競争力に直結する例が多数見受けられます。製品化の歴史浅く、産業全体での最適化を目指した試行錯誤の途上にあるこれらの製品においては、普遍化された金属材料に関する知見の横展開が、製品開発においても重要となる段階にあると考えられます。これは、より多くの技術者に活躍の場が残されている分野であるともいえます。関連分野の多くの研究者・技術者ともに、技術を通じて世界のアルミニウム産業の発展に寄与することを願い、本報のまとめとします。

謝 辞

本報は2018年6月1日 水曜会大会における発表「(株)UACJの高機能アルミニウム 材料開発と将来展望」をまとめたものです。伝統ある本会において発表の機会をいただきましたことを、関係者各位に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) CRU Aluminium Rolled Products Market Outlook November 2017.
- 2) <http://blog.caranddriver.com/in-depth-with-the-2015-ford-f-150s-aluminum>
- 3) 前田新平：軽金属, **11**, [17], 213-245, (1961).
- 4) 能登谷武紀, 河野浩三：伸銅技術研究会誌, **37**, [1], 27-33, (1998).
- 5) 宮一善：材料と環境, **61**, [11], 438-442, (2012).
- 6) 河野浩三, 鈴木忍, 金森康二, 玉川博一, 京良彦, 大谷良行：銅と銅合金, **55**, [1], 140-145 (2016).
- 7) 伊藤真一, 細木哲郎, 渡辺雅人, 土屋昭則：銅と銅合金, **55**, [1], 130-134, (2016) .
- 8) 藤江社 MRJ の開発状況
<http://jasst.jp/archives/jasst11n/pdf/S1.pdf>
- 9) 上田幹人, 宇井幸一：表面技術, **60**, [8], 491-496, (2009).
- 10) J. S.Wilkes, J. A. Levisky, R. A.Wilson, and C. L. Hussey: Inorg. Chem., **21**, [3], 1263-1264, (1982).

談 話 室

我が国における物理探査100年回思

佐 々 宏 一*

Reminiscences Related to the Very First Geophysical
Exploration Conducted in Japan 100 Years Ago.

by Koichi SASSA

物理探査が我が国で最初に実施されてから間もなく100年になる。先ずその根拠を示す。

我が国に於ける物理探査に関する学会である「社団法人物理探査学会」の前身である「物理探査技術協会」は1948年(昭和23年)5月に創立され、会誌「物理探査」第1巻第1号が発行された。その第1巻第1号の巻頭に編輯委員会著の「本邦に於ける物理探査の回顧と展望」と題する記事が掲載されている。その最初の文を掲載されている通りに下に紹介する。

『§1. 抑々本邦に於ける物理探査の始まりは、大正8年(1919)7月に京大工学部の山田賀一助教授がターレン・ティーベルグ磁力計に拠り兵庫県宍粟郡高野嶺山に於ける磁鉄鉱探査を以て嚆矢として、翌9年(1920)5月日本鉱業學會第7回大會に稍詳細に互り報告せられた。』

そこで、物理探査の揺籃期における水曜会会員の多大な貢献を紹介することにする。

物理探査とは、地球物理学的な手法を用いて地下の状況を遠隔的に調査する手法である。鉱物資源を探査対象にする場合には物理探査と呼ばれ、その他の地下構造を調査する場合には物理探査と呼ばれることが多かったが、近年では探査対象に関係なく物理探査と呼ばれている。

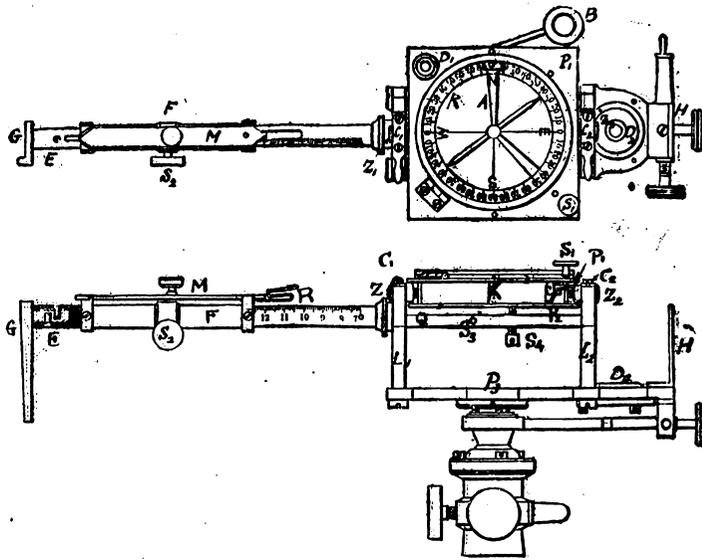
京都帝国大学工学部採鉱冶金学科の採鉱学第1講座の第2代担任教授であった井出謙六先生は明治40年に東京帝国大学を卒業され、明治44年に京都帝国大学助教授に就任後、欧米へ留学され、大正2年に帰国されて直ちに担任教授に昇任された。井出教授は早くから物理探査の重要性を認識されてターレン・ティーベルグ式磁力計を輸入されたが数年間は使われずに置いてあっ

た。しかし、大正6年に京都帝国大学採鉱冶金学科を卒業されて当学科の助教授だった山田賀一先生が上記のように大正8年(1919)7月にこのターレン・ティーベルグ式磁力計を用いて兵庫県において磁鉄鉱の鉱床探査を実施された。その成果は大正9年(1920)の日本鉱業会誌(Vol. 36, No. 426)に、「磁力測量」と題する論文として掲載されている。この論文は691頁から731頁までの41頁にも及ぶ論文で、方法・装置・結果が詳細に記載されている。図1はそこに記載されている磁力計の図の一例であり、図2は測定結果の一例である。筆者は探査工学講座の助教授であった頃にこの磁力計を見たいと思い、先ず備品台帳を調べた。その台帳には磁力計が2台登録されていた。そこで、測定機器が保管されていた部屋へ行ったところ、台帳記載の備品番号が記入された頑丈な細長い木箱を2個見つけた。古い木箱の中の磁力計はかなり破損しており、使用不可能であった。もう一方の箱の中の磁力計はかなり使われていたが使用可能と判断できた。筆者が停年退官する少し前に、教室で保管している貴重な備品は大学の総合博物館で保管できる、との連絡があったので、比企先生が収集されて鉱物標本室に保管されていた多数の鉱物標本等と共にこの磁力計も総合博物館で保管して頂く手続きをすることにして筆者は停年退官した。そこで、総合博物館で保管されているはずだと思って総合博物館に問い合わせたところ、准教授の塩瀬隆之先生が親切に対応して下さいと磁力計の写真撮影が可能になった。図3が現在博物館に所蔵されている磁力計の写真である。

なお、山田賀一先生は大正12年(1923)5月には採鉱冶金学科冶金学第三講座の担任教授に昇任され、浮遊選鉱法の研究で多くの業績を挙げられた。

大正11年に採鉱冶金学科を卒業され大正13年に助教

*京都大学 名誉教授



大正九年八月三十二日 第四百貳拾六號
 第六圖 ターレンティベルグ磁力計
 論説及報告 磁力測量

図1 山田先生の論文に記載されているターレンティベルグ磁力計の図の一例。

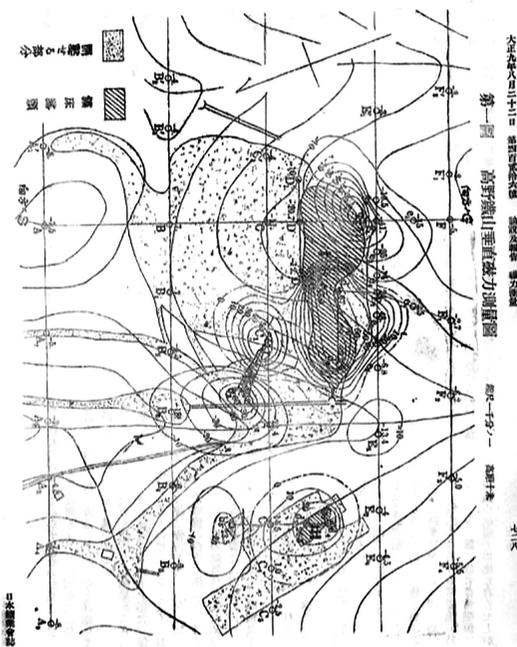


図2 山田先生の論文に記載されている測定結果の一例。

The Mines Magazine, March, 1934, に掲載されている。その記事に参考文献として38件の我が国の研究者の論文が記載されている。この記事のコピーを筆者は所持している。それは、昭和46年に資源工学科を卒業されて探査工学講座に助手として勤務され、USAのColorado School of Minesに留学して学位を取得された斎藤章先生にお願いして入手できた貴重な資料である。

藤田義象先生は帰国後直ちに採鉱学第1講座の担任教授に昇進された。藤田先生の学位論文は「流電電位探鉱法による脈状鉱床探索に関する実験的研究」である。

昭和初期の京都帝国大学における物理探査に関する研究・調査は、地震探査（弾性波探査）は理学部地球物理学科の地球物理学第一講座で、重力探査及び放射能探査は理学部地質学鉱物学科の物理地質学講座（松山基範教授担任）で、電気探査の理論的研究は工学部電気工学科の電気工学第六講座（加藤信義教授担任）で、電気探査及び磁気探査の適用性や鉱物の電気的特性などに関する研究は採鉱冶金学科の藤田義象先生が中心となって実施されていた。

昭和15年(1940)12月に採鉱冶金学科に我が国で最初の物理探鉱学講座が新設された。初代の担任教授として藤田義象先生が就任され、採鉱学第一講座も兼任された。設立当時の物理探鉱学講座は、教授は藤田先生、助教授は伊藤一郎先生、講師は梶川弘二先生だった。伊藤先生は昭和16年に採鉱冶金学科を卒業され、直ちに物理探鉱学講座の講師に就任され昭和17年3月には助教授に昇進された。伊藤先生の学位論文は自然電位

授に就任された藤田義象（ふじたよしかた）先生は物理探鉱に関する研究を積極的に実施され、昭和7年(1932)から昭和10年(1935)まで、USAのColorado School of Mines等に留学され、その時に執筆された「GEOPHYSICAL PROSPECTING IN JAPAN (THE PRESENT STATUS)」と題する6ページの記事が、



図3 ターレンティベルグ磁力計（京都大学総合博物館所蔵）

法に関する論文である。講師として着任された梶川先生は理学部地球物理学卒業で、主として地震探査に関する研究・教育を担当された。

先の大戦中に日本政府は欧州先進国の植民地であった東南アジア地域での地下資源探査関連技術を調査するための調査隊を組織し、現地調査を実施させた。この調査隊の重力探査班には理学部地質学鉱物学科の物理地質学講座の助教授だった熊谷直一先生が参加され、地震探査班には物理探査学講座の梶川講師が参加された。この調査隊の科学者は現地に放置されていた探査関連の資料や使用されていた物理探査装置一式を見られ、我が国でも物理探査に関する研究・調査を加速させる必要性を痛感された。そこで、商工省地質調査所の飯田波事博士（退職後は名古屋大学教授）が中心となられ、昭和23年（1948）5月に物理探査技術協会（現在の公益社団法人物理探査学会）が設立された。この学会の学会誌の第1巻第1号に梶川先生の「金属鉱床に於ける弾性波探査に就いて」と題する論文が掲載されている。戦況が芳しくなくなったので、この東南アジア調査隊は帰国することになった。梶川先生や隊員が乗船した船は、シンガポールからの最期の帰国船となった「阿波丸」で、この船は日米間の協定で安全航行が保証されていたはずだった。しかし、阿波丸は昭和20年（1945）4月に台湾付近を航行中に米海軍の潜水艦クイーンフィッシュからの魚雷攻撃を受けて沈没し、梶川先生や調査隊員を含む2,000人以上の乗船者

は船と共に海底で眠られることになった。ここに改めてご冥福をお祈りする。

昭和18年（1943）2月に京都帝国大学から当時の文部省に設置申請をして、財団法人物理探査研究会（現在の名称は一般財団法人地球システム総合研究所）が京都帝国大学内に設立された。設立時の寄付行為（定款）では、「理事長は京都帝国大学総長、専務理事は工学部教授と定められていたので、初代の理事長は12代総長の羽田亨先生、初代の専務理事は藤田義象教授となった。この財団法人は事業として、物理探査研究所（所長は藤田義象教授）及び京都探査技術員養成所（所長は工学部電気工学科加藤信義教授）を開設し、研究・調査及び技術者養成を行った。しかし終戦と共に研究所や養成所は廃止され、昭和22年6月には寄付行為（定款）が「理事長の選任は理事会で行う」と変更され、財団の事務所も大学構内から吉田中阿達町へ移転し、昭和21年10月に大学を退職された藤田義象先生が理事長に就任された。藤田先生が退職された時の京都大学の名誉教授称号授与規定では藤田先生の経歴は規定に達していなかった。しかし、昭和40年代に名誉教授称号授与規定が改正され、藤田先生の経歴がそれを満したので、その時点で藤田先生に名誉教授の称号が授与された。藤田先生が称号拝受のために大学に来られた時に伊藤一郎先生の教授室を訪ねられた。筆者はたまたま伊藤先生の教授室へ行き、藤田義象先生とお話できる機会を得ることができた。貴重な思い出である。

談 話 室

スイスにおける高レベル放射性廃棄物
地層処分の動向

榊 利 博*

Current Status of the High-Level Nuclear Waste
Geological Disposal in Switzerland

by Toshihiro SAKAKI

1. はじめに

平成29年8月16日付で社会基盤工学専攻資源工学講座計測評価工学分野の教授に着任しました榊利博と申します。この機会をお借りしまして着任のご挨拶を申し上げますとともに、これまでの経歴およびここ数年来取り組んできた研究業務などを簡単に紹介させていただきます。

私は昭和62年に九州大学工学部水工土木工学科を卒業後、米国コロラド大学土木環境工学科の修士課程に進学しました。修了後は帰国し大成建設株式会社に勤務しました。この間、動力炉・核燃料開発事業団東濃地科学センターへの約2年間の出向を通して放射性廃棄物に関する業務に携わる機会を得ました。その後、米国コロラド大学の博士課程に進学のため再渡米し、亀裂性岩盤内の流体の移動に関する研究で平成16年にPhDを取得しました。その後はコロラド鉱山大学の環境科学工学科にて地盤内の流体や熱に関する様々な研究を実施しました。同校では、AMAX Laboratoriesという大きな実験施設の管理者も兼務し各国からの留学生の研究指導をしながら時には一緒に数m規模の実験装置を組み立て実験データを取得したりしました。

平成24年1月から京都大学着任までの期間は、スイス放射性廃棄物管理共同組合(Nagra)にてプロジェクトマネージャとしてスイスの放射性廃棄物の地層処分を安全に実施するための技術開発および実証のための原位置試験プロジェクトなどに深くかかわる機会を得ました。以下は主にスイスにおける放射性廃棄物処分事業の進捗や経験を紹介させていただきます。

2. スイスの放射性廃棄物地層処分

私が5年半ほど在籍したNagraはスイスの放射性廃棄物管理の実施主体で1972年に電力会社と連邦政府によって設立されました。日本でいうと原子力発電環境整備機構(NUMO)に相当します。スイスの原子力法では低レベル(医療や研究で発生するものも含む)から原子力発電所で発生する高レベルまでの放射性廃棄物を対象として国内で処分することとなっています。そのため廃棄物の管理費用は廃棄物発生者である電力会社及び連邦政府が負担します。

スイスには1969年から1984年にかけて建設された原子炉が5基ありますが、2011年3月の福島第一原発の事故の直後に、連邦議会はこれらが営業運転終了した後は段階的に原子力発電から撤退する方針に転換しました。同国では発電により発生した使用済燃料およびガラス固化体を高レベル放射性廃棄物として大深度の地層処分場に処分する予定ですが、現在は発電所内または中間貯蔵施設に貯蔵しています。

処分場のサイト選定はSectoral Planという計画に基づき3段階で進められ、候補地の絞り込みが進んでいます。処分場のサイト選定手続きが2031年頃に終了後、処分場の建設を開始、2060年頃に操業が始まると見込まれています。

放射性廃棄物の地層処分施設では廃棄物を長期間安全に隔離するために高いシール性が求められますが、処分坑道や人工バリアで何が起きているのかを知るためのモニタリングはそのシール性を低下させてしまいます。スイスでは地層処分の主たる施設の近傍に「パイロット施設」を併設し、ここに若干量の廃棄物を処分しモニタリングします。この処分概念は「監視付き長期地層処分」と呼ばれています。

*京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 教授

スイスでは高レベル放射性廃棄物とは、ガラス固化体および使用済燃料の両方を指します。その処分コンセプトは既に決まっており、諸外国と同様に多重バリアシステムにもとづきます(図1)。ガラス固化体または使用済み燃料を収納した鋼製キャニスタを処分坑道に設置した高密度の圧縮ベントナイトブロックにより形成された台座上に定置します。これは日本では横置き概念と呼ばれるものです。鋼製キャニスタと処分坑道壁面のすき間は、高密度に充填できるような製造された粒状ベントナイトで埋め戻します。

スイスの高レベル放射性廃棄物処分事業は、世界的にみてフィンランド、スウェーデン、フランスに次いで進んでいます。地層処分場は同国北部の深さ400~900m地下に分布する堆積岩であるオパリナス粘土を母岩とすることになっています。これは約1億7千年前の中生代にできた地層です。

スイスには2箇所の地下研究所があります。これら



図1 スイスの高レベル放射性廃棄物処分コンセプトの実物大模型(グリムゼル試験場)

の施設では、様々な研究が実施されてきました。当初は結晶質岩を対象とした研究が先行しており最初の地下研究所であるグリムゼル試験場はアルプス山中の結晶質岩に作られました。施設のほとんどは1984—85年の1年間で建設されました。図2左のように地元の電力会社の連絡トンネルから横に拡張したような形態で、Nagraがこの施設を所有し運営しています。水平坑道でのアクセスですが、試験場位置では土被りは約450mあります。

グリムゼル試験場では、欧州各国、米国、日本、台湾、韓国等の機関が参加し、様々な試験を国際共同プロジェクトとして実施しています。初期フェーズでは、現地の岩盤特性把握、調査技術開発などが重点的に行われましたが、処分コンセプトが確定した現在は長期的な試験や実規模での実証試験に移行しています。また世界でも類を見ない放射性核種を実際に破碎帯に注入するトレーサ試験なども実施しています。その他、世界各国の技術者を対象とした育成コースの積極的な実施などを通し、30年以上にわたって蓄積してきたノウハウの次世代あるいは諸外国への伝承にも注力しています。そのような面からも、同国では処分技術が確立しつつ処分場サイトが決定が遠くない段階にあることが感じられます。

モンテリ岩盤研究所は、処分場の母岩となるオパリナス粘土が隆起しているスイス北西部において高速道路が建設される際に同粘土層を貫通する箇所の避難坑道から水平に拡張する形で1996年に設置されました(図2右)。現在はスイス国土地理院(swisstopo)が管理し、オパリナス粘土に関する、あるいはオパリナス粘土環境下での様々な研究を実施しています。この

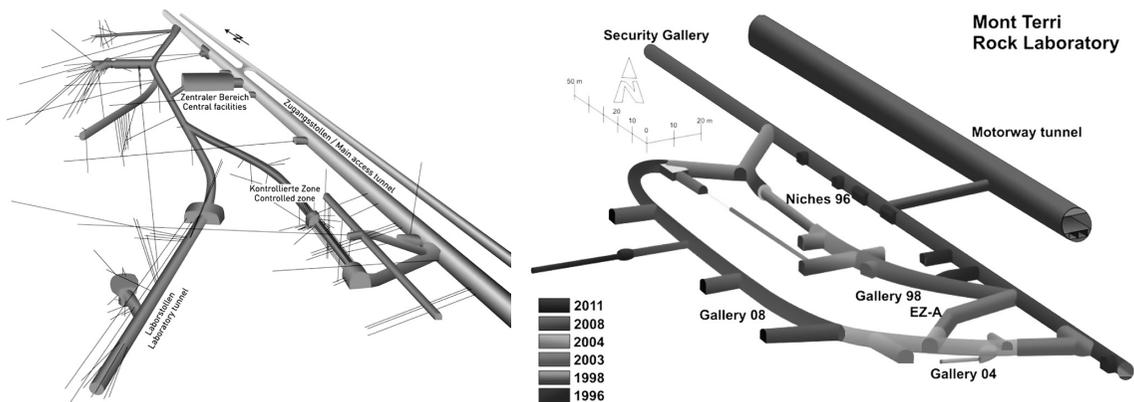


図2 スイスの地下研究所、左図)グリムゼル試験場、土被り450m、右の薄いグレー部が現地電力会社の連絡坑道、右)モンテリ岩盤研究所、土被り250m、右端の太い直線部は高速道路の本道、その隣の細い直線部は避難坑道、研究所はその横に建設、凡例は掘削年を示す(図はNagraより提供)

施設も水平坑道でのアクセスですが試験場直上の土被りは約 250m あります。ここでも欧州各国、米国、日本等の機関が参加して様々な試験を国際共同プロジェクトとして実施しています。特に粘土岩を母岩としているフランスのプロジェクトへの出資率はスイスに次いで大きく、積極的に自国に有用な知見を得ようとする姿勢が感じ取れます。モンテリ岩盤研究所の施設紹介のために稼働中の原位置試験に関する地図があるのですが、大小様々な40以上の試験が常時同時進行しています。このようにスイスの2箇所の地下研究所は、グリムゼル試験場が人工バリア関連・技術開発・人材育成など、モンテリ岩盤研究所がオパリナス粘土の理解・人工バリアと岩盤の相互作用・実証試験などの母岩に特化した研究に注力し、それぞれの役割をもって稼働しています。

これらの地下研究所は水平坑道によるアクセスと書きましたが、車でのアプローチが可能であるため、機材の搬入などがかなり柔軟に行えます。コンクリート

プラグの打設の際には生コンミキサー車なども打設現場の近くまで入ることができ、作業効率に大きな支障が発生しません。私の腰痛が悪化した時などはさらに計測地点近くまで車で行けるよう取り計らってくれ本当にありがたい環境でした。

我が国にも結晶質岩を対象として岐阜県の瑞浪超深地層研究所、堆積岩を対象として北海道の幌延深地層研究センターがあります(図3)。前者は地下500mまで、後者は地下350mまで掘削してある施設です。立坑からのアクセスのため水平坑道とは状況異なります。日本の地下研究所での原位置試験は基本的に日本が独自に実施するのに対し、スイスの地下研究所での試験は上述の通り共通の目的を持つ各国の実施主体や企業が資金や人材を出し合い国際プロジェクトとして進められることに大きな特徴があります。特に実スケールの原位置試験などは億単位またはそれ以上の費用がかかり、実施期間も10年以上など大変大がかりなものになります。複数の国々が協力しこれを実現させており、日本の機関や企業もスイスの地下研究所の原位置試験には参画しています。

3. 実スケールの人工バリア実証試験

上述のように処分場候補地の絞り込み段階にあるスイスでは、廃棄物地層処分の母岩となるオパリナス粘土環境下で高レベル放射性廃棄物の定置概念の実証、及び人工バリアや周囲の岩盤における熱-水-力学挙動のさらなる理解のため、モンテリ岩盤研究所において Full-scale Emplacement experiment (FE 試験, Müller et al, 2017) を実施しています。この試験はオパリナス粘土中に掘削した直径3m、全長50mの水平坑道において実際の処分コンセプトおよびその施工過程を実スケールで再現するものです。図4に示すように圧縮ベントナイトブロック製の台座に模擬廃棄体(ヒーター)を3体定置し、その周辺を粒状のベントナイトで埋戻します。坑道内、坑道周辺には千個以上の様々な計器が入っています(Vogt, et al, 2015; Müller et al, 2017)。

幸運にも私がスイスへ赴任した直後にちょうどこの

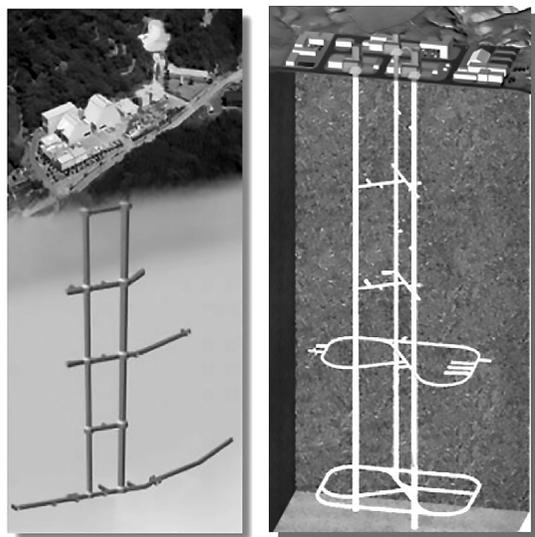


図3 日本の地下研究所 左図) 岐阜県瑞浪超深地層研究所、右図) 北海道幌延深地層研究センター (図は日本原子力研究開発機構ウェブサイトより)

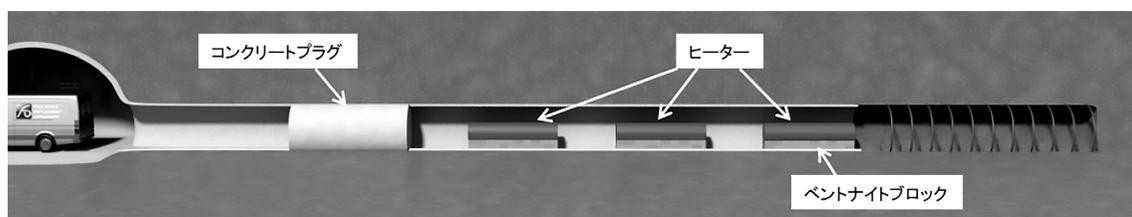


図4 モンテリ岩盤試験場での実スケール実証試験 (FE 試験)の概要図 (図は榊ほか, 2014より抜粋)

坑道の掘削が始まりました。業務に慣れてきたころには計測機器の設置などが始まりました。同時に坑道を埋め戻すためのベントナイトの製造、埋戻し機の製作、模擬充填試験なども実施されていました。

この坑道を埋め戻すベントナイトは廃棄体と岩盤の間をしっかりとシールして廃棄体を長期間隔離するために十分に低い透水性を持たなければなりません。ベントナイトは密度が高いほど透水性が低くなることが知られています。したがって、施工時には所定の乾燥密度を満たすように管理します。まだ処分事業は始まっていないため原位置試験での話になりますが、ベントナイトの密度は投入した重量と充填された体積から平均密度を出すのが主流でした。

ベントナイトのサンプルが製造され予備充填試験が始まるころ、密度をもっと詳細に計測することを試みました。誘電式の土壌水分計をこれに適用することとした（榊ほか、2015; Sakaki et al., 2015a,b）のですが、

これは重量含水比を一定に製造されたベントナイトであれば高密度の場合はセンサー周辺により多くの水分とベントナイト粒子が存在し水分の体積割合が高い反応を利用したものです。

粒状ベントナイトの充填は図5のようなスクリーフィーダ（鋼管中のスクリーウの回転で粒状体を押し出す）を用います（Müller et al, 2017）。5本のスクリーフィーダが廃棄体（図中の黒い円柱）周辺の空間にベントナイトを充填するため、スクリー近傍の密度が高いことが推察されます。センサーでの密度計測によって、スクリーで充填されたベントナイトがどの程度均質なのか、不均質などのような密度分布なのかを解明することができるようになります。

図6は予備試験の一つです。長さ5m、高さ1m、奥行き80cmのタンクの上端から40cmの箇所からスクリーフィーダを1本設置し、粒状ベントナイトを充填した例です。図中に示した8本の鉛直の点線に沿っ



図5 スクリューフィーダ充填機 (Müller et al., 2017)

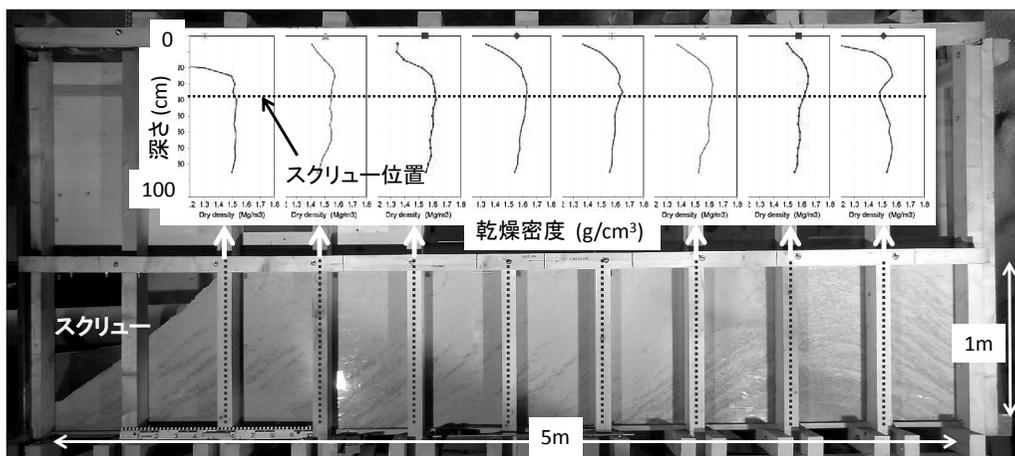


図6 2次元タンクを用いた粒状ベントナイトの充填模擬試験。スクリーフィーダは上端面から40cmに位置 (Sakaki et al., 2015a)。

て設置した土壌水分計によって乾燥密度分布を計測しました。図中上部に示す乾燥密度の鉛直分布は、スクリーに近い箇所において乾燥密度が高くなっていることが確認できます。その他、スクリーの力が伝達する範囲が数十 cm 程度しかないこと、特に上方向へはそれが顕著であることがわかりました。材料を押し出しているスクリー近傍の密度が高くなるのはごく当たり前のことなのですが、これまではそのような計測事例がなかったため実際の乾燥密度分布に関するデータがなかったのです。欧州においてもごく最近になって緩衝材の不均質性に関するデータ収集が始まったところではあります。

投入重量と充填体積から算出した平均充填乾燥密度は 1.51 g/cm^3 、センサーにて計測した分布より算定した平均密度は 1.57 g/cm^3 でした。上端・下端の密度が低いと思われる部分で計測データがないことを考慮すると、同手法によって緩衝材としてのベントナイトの密度を計測するというアプローチについて高いポテンシャルが示唆されたと考えられます。その後は校正をさらに精度よくすることなどを含めて研究を進めています。並行して光ファイバをもちいて緩衝材の密度などの状態を計測する研究も実施 (Sakaki et al., 2017; 榊ほか, 2017, 2018) しています。

4. お わ り に

スイスでの数年間は地下研究所という特殊な環境で上述のような実規模またはそれに近い原位置試験を含め、数々のプロジェクトにかかわってきました。国内では触れられないようなものも多々あり、非常に良い経験となりました。今後はその経験を日本の放射性廃棄物処分の進展のために活かしていけるよう微力ながら貢献できればと思っています。

参 考 文 献

榊利博, Tobias Vogt, Herwig Müller, Holger Wörsching, Miroslav Vrzbá (2014), モンテリ FE 試験におけるオパリナス粘土岩内含水量モニタリング用 TDR プ

- ローブの開発, 第69回土木学会年次学術講演会, 大阪大学, September 10-12, 2014.
- 榊利博, 真田祐幸, 大貫賢二, 竹内竜史 (2015), 坑道埋戻し材の密度管理への誘電水分センサーの適用予備試験, 第70回土木学会年次学術講演会, 岡山大学, September 16-18, 2015.
- 榊利博, Berrak Firat-Lüthi, Tobias Vogt, 丹生屋純夫, 西村政展, 鶴山雅夫 (2017), 光ファイバ熱伝導率計の計測範囲の実験的評価, 第72回土木学会年次学術講演会, 九州大学, September 11-13, 2017.
- 榊利博, B. Firat-Lüthi, T. Vogt, 鶴山雅夫, 西村政展, 丹生屋純夫 (2018), 加熱型光ファイバケーブルによる緩衝材未充填部の検出, 第73回土木学会年次学術講演会, 北海道大学, August 29-31.
- Müller, H. R., B. Garitte, T. Vogt, S. Köhler, T. Sakaki, H. Weber, T. Spillmann, M. Hertrich, J. Becker, N. Giroud, V. Cloet, N. Diomidis and T. Vietor (2017), Implementation of the full-scale emplacement (FE) experiment at the Mont Terri rock laboratory, *Swiss Journal of Geosciences*, vol. 110(1), 287-306, DOI 10.1007/s00015-016-0251-2
- Sakaki, T., S. Köhler and H. R. Müller (2015a), FE Experiment: Density measurement of granulated bentonite mixture in a 2D pre-test using a dielectric moisture profile probe, P-04-02, *Clay Conference 2015*, March 23-26, Brussels, Belgium.
- Sakaki, T., S. Köhler, M. Hertrich and H. R. Müller (2015b), FE Experiment: Density measurement of granulated bentonite mixture in a 3D 1:1 scale mockup test using dielectric tools, P-04-03, *Clay Conference 2015*, March 23-26, Brussels, Belgium.
- Sakaki, T., B. Firat-Lüthi, T. Vogt and S. Niunoya (2017), Experimental demonstration for estimating density and water content distribution of granulated bentonite mixtures using heated fiber-optic cables, A-878-0014-00100, *Clay Conference Davos 2017, 7th International Conference on Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, 24-27 September 2017, Davos, Switzerland.
- Vogt, T., H. R. Müller, T. Sakaki, M. Hertrich, T. Spillmann, B. Garitte, N. Giroud and T. Vietor (2015), FE Experiment: The instrumentation and monitoring of a 1:1 scale heater experiment, P-16-08, *Clay Conference 2015*, March 23-26, Brussels, Belgium.

談 話 室

熱弾性型マルテンサイト変態の相平衡と動力学

新 津 甲 大*

Phase Equilibria and Kinetics of Thermoelastic Martensitic Transformations

by Kodai NIITSU

1. はじめに

平成29年10月付けで材料工学専攻結晶物性工学研究分野(乾研究室)の助教に就任しました新津甲大と申します。経歴を簡単に述べますと、平成21年に東北大学工学部材料科学総合学科を卒業後、同大学院工学研究科金属フロンティア工学専攻に進学し、計算材料構成学分野にて貝沼亮介教授のご指導の下、平成26年3月に博士(工学)の学位を取得しました。同年4月からは理化学研究所創発物性科学研究センターにて特別研究員として在籍し、電子線ホログラフィーによる電磁場解析の研究に従事しました。今回この場をお借りして、最近の研究および今後の展望について、特に熱弾性型マルテンサイト変態に係る相平衡と動力学に関する内容について紹介させていただきたいと思います。

2. 熱弾性型マルテンサイト変態の相平衡と動力学

(I) 応力・磁場誘起マルテンサイト変態の温度依存性

応力・磁場誘起マルテンサイト(M)変態は一般に『超弾性』、『メタ磁性相変態』とも称され形状記憶の主たる機能として広く研究されている。工学応用上の要請としては室温以上の中～高温域で機能することが期待されるが、基礎学理としての現象の本質はフォノンの影響が相対的に小さくなる低温域でむしろ露わになる。今回、その一端についてベンチマーク材であるTi-Ni合金とCu-Al-Mn合金を例に紹介する。室温以下の種々の温度で得たTi-51.8Ni(at.%)¹⁾およびCu-17Al-15Mn(at.%)²⁾の応力-歪曲線を図1(a), (b)に示す。高歪域で見られる曲線の屈曲・プラトーはそれぞれM相の生成・成長に対応する。正変態の開始応力および逆変態

の完了応力を σ_{Ms} , σ_{Af} と表記しその温度依存性を挿図に示す。Ti-Niでは低温になるに従い正変態～逆変態に要する変態ヒステリシス $\sigma_{hys}(-|\sigma_{Ms}-\sigma_{Af}|)$ が大きくなっているのに対し、Cu-Al-Mnでは温度依存を持たずほぼ一定の値を保持していることが分かる。一方で、挿図中に点線で示したオーステナイト相(A相)とM相

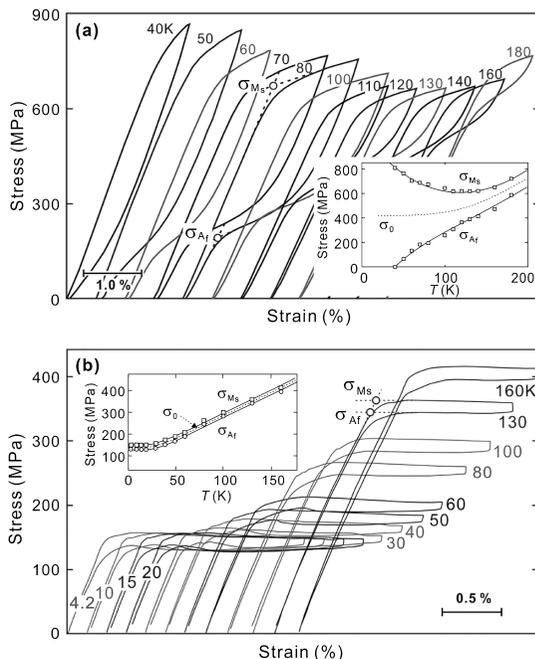


図1 (a) Ti-51.8Niの応力-歪曲線の温度依存性(圧縮, 歪速度 $\dot{\epsilon}=2.4 \times 10^{-4}(\text{s}^{-1})$)¹⁾および(b) Cu-17Al-15Mnの応力-歪曲線の温度依存性(引張, 歪速度 $\dot{\epsilon}=5.0 \times 10^{-5}(\text{s}^{-1})$)²⁾. 挿図は臨界応力 σ_{Ms} , σ_{Af} の温度依存性。各温度での試験は超弾性歪が約1%得られた時点で折り返している。

*京都大学大学院工学研究科材料工学専攻 助教

の平衡応力 $\sigma_0 \sim (\sigma_{Ms} + \sigma_{Af})/2$ は両合金で同様の温度依存性を示している。M 変態に係る相平衡と動力学はそれぞれ σ_0, σ_{hys} によって特徴づけられることから、両者の温度依存性について以下別々に考察を行う。

(II) 変態ヒステリシス σ_{hys} の温度依存性

両合金の σ_{hys} の温度依存性を図2に示す。この温度依存性については変態の動力学、特に晶癖面の易動度が大きく関係していると考えられる。そこで転位の熱活性化運動^{3,4)}に倣う形で晶癖面移動における熱活性化の影響を検討すると、変態を駆動するのに必要な正味の応力は $\sigma_{hys}/2$ であり、これが次式のように非熱活性化項と熱活性化項の和として表される¹⁾。

$$\frac{\sigma_{hys}}{2} = \sigma_{\mu} + \sigma_{TA} \left[1 - \left(\frac{T}{T_{TA}} \right)^{1/q} \right]^{1/p} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで p, q は熱活性化のエネルギー障壁の形を特徴づけるパラメータであり、 $\sigma_{\mu}, \sigma_{TA}$ はそれぞれ σ_{hys} の非熱活性化成分、0Kにおける熱活性化成分である。また熱活性化発現の開始温度 T_{TA} は

$$T_{TA} = Q_{TA}^0 / k_B \ln(\dot{\epsilon}_0 / \dot{\epsilon}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

で表され歪速度 ($\dot{\epsilon}$) 依存性を有する。 $Q_{TA}^0, k_B, \dot{\epsilon}_0$ はそれぞれ0Kにおける活性化エネルギー、ボルツマン定数、未知パラメータである。 $p=1/2, q=3/2, T_{TA}=212$ Kとしたときの曲線はTi-Niの $\sigma_{hys}/2$ の温度依存性をよく再現していることから、低温での σ_{hys} の増大は熱活性化機構の顕在化によるものと考えられる。対照的にCu-Al-Mnの σ_{hys} は温度に依らずほぼ一定であることから熱活性化機構をほとんど有しないことが推測される。なお紙面の都合で割愛するが、低温での

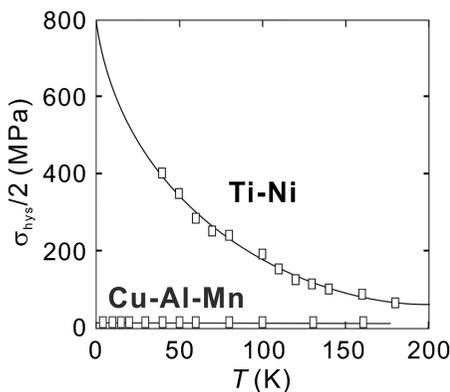


図2 Ti-51.8Ni および Cu-17Al-15Mn の σ_{hys} の温度依存性。曲線は(1)式によるフィッティング。

Ti-Ni の σ_{hys} の歪速度依存性についても(1), (2)式に従う関係を得ており、 Q_{TA}^0 が約0.5eVであることを見出している。

(III) 平衡応力 σ_0 の温度依存性

σ_0 の温度依存性は以下の Clausius-Clapeyron 式に従う。

$$\frac{\partial \sigma_0}{\partial T} = - \frac{\Delta S}{\epsilon V} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで ΔS は変態前後のエントロピー変化、 ϵ は変態歪、 V はモル体積である。この式からわかるように、 σ_0 の温度依存性は A/M 相間の平衡に係る情報として ΔS を与える。図3に(3)式より求めた両合金の ΔS の温度依存性を示す^{1,5)}。なお、十分なデータ点を得るため組成を僅かに変えた合金で得られた ΔS もプロットしている。また図中曲線は A, M 相それぞれが安定な組成の合金に対比熱 c_p^A, c_p^M を求め、次式より導出した ΔS の温度依存性である。

$$\Delta S = \int_0^T \frac{c_p^M - c_p^A}{T} dT \quad \dots\dots\dots (4)$$

両合金に見られる共通の傾向として、低温にいくほど ΔS の絶対値は小さくなり最終的に0に収束する傾向が見てとれる。これは比熱から導出された温度依存性でも同様であり、『絶対零度ではエントロピー S は0に収束する(したがって ΔS も0に収束する)』という熱力学第三法則を体現する物理現象に他ならない。なお、Ti-Ni では(3)式から求まる ΔS と(4)式から求まる ΔS では有意なずれが見られるが、これは(4)式中の c_p^A を得るために極低温まで A 相が安定な合金を調製することによる組成変化の影響であると考えられる。

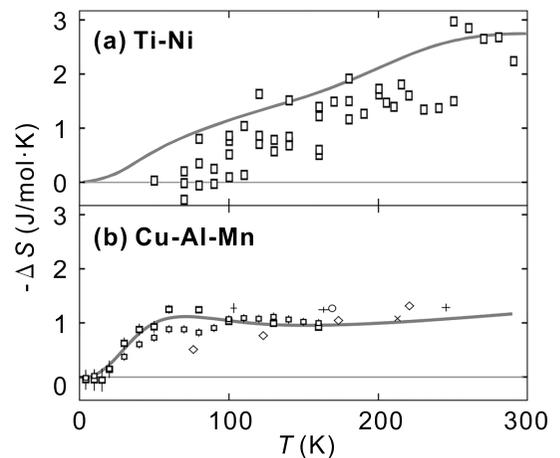


図3 (a) Ti-51.8Ni⁵⁾ および (b) Cu-17Al-15Mn¹⁾ の M 変態に伴う ΔS 。プロットは(3)式、曲線は(4)式よりそれぞれ導出している。

一般に M 変態直上の A 相では顕著な格子軟化が起こり、この際に緩慢な比熱ピークを伴うが、基底状態で A 相が安定な合金ではこのような格子軟化はほとんど起こらない。したがって極低温まで A 相が安定な合金と低温で M 変態を経験する A 相では格子軟化の程度は異なっており、 S も異なる。その意味では(3)式から求まる ΔS と(4)式から求まる ΔS がきれいな一致を示す Cu-Al-Mn はむしろ幸運なケースと言える。

(IV) 状態図と等温変態

(II), (III)では A/M 相間の応力誘起相変態挙動の温度依存性について、 σ_{hys} と σ_0 に対しそれぞれ動力学、熱平衡の観点から考察した。(IV)では両パラメータを加味した状態図を決定し、そこから読み取れる現象として等温変態挙動について考察する。

温度 T と組成 x を変数とする一般的な状態図に σ_0 の温度依存性についての情報を反映させるには応力から組成への変数変換が必要である。組成場に対する Clausius-Clapeyron 式は、以下のエネルギー平衡の変分に関する式

$$-S^A dT + \sum_i \mu_i^A dx_i = -S^M dT + \sum_i \mu_i^M dx_i \dots\dots\dots (5)$$

を出発点とし、Ti-Ni であれば

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{\Delta\mu_{\text{Ti}} - \Delta\mu_{\text{Ni}}}{\Delta S} \dots\dots\dots (6)$$

と記述される。ここで S^A, S^M は A, M 相の S , μ_i^A, μ_i^M は元素 i の A, M 相における化学ポテンシャル、 $\Delta\mu_i$ は両者の相変態に伴う変化、 x は合金の Ni 組成である。(6)

式と(3)式を合わせると

$$\frac{dT}{dx_0} = \frac{dT}{d\sigma_0} \frac{\Delta\mu_{\text{Ti}} - \Delta\mu_{\text{Ni}}}{\varepsilon V} \dots\dots\dots (7)$$

となり、 σ_0 と平衡組成 x_0 (『平衡』を示す表記として 0 を付した) の関係式が導かれる。(7)式より $\sigma_0 \Leftrightarrow x_0$ の変数変換が可能となる。またこれは単に数学的な変数変換処理に他ならないため、正変態開始組成および逆変態完了組成をそれぞれ $x_{\text{Ms}}, x_{\text{Af}}$ と定義すれば $\sigma_{\text{Ms}} \Leftrightarrow x_{\text{Ms}}, \sigma_{\text{Af}} \Leftrightarrow x_{\text{Af}}$ の変数変換も同様に可能となる。この変換により図 1(a) から図 4 のような状態図を得る⁶⁾。なお、本来状態図は平衡状態の相境界を図示するものであるが、ここでは非平衡な変態ヒステリシスも加味して図示する。これまで 51Ni 近傍を境に熱掃引による 200 K 以下での M 変態は報告されておらず、M 変態の特異な停止現象とされてきた⁷⁾が、図 4 より x_{Ms} が低 Ni 側へせり出すことにより温度掃引では x_{Ms} を跨ぐことができなくなることが原因であったことが理解できる。また(6)式からも分かるように低温での $\Delta S \rightarrow 0$ という収束は $dT/dx_0 \rightarrow -\infty$ という x_0 の温度依存性に反映されている。組成は実験上の都合として連続的な掃引が困難な変数であるが、温度や応力、磁場と同様に示強変数の一つである。今回、仮想的に『組成誘起 M 変態』なる変態様式を考えることで、(7)式による変数変換を経て応力誘起 M 変態の温度依存性を状態図上に転写することが可能となった。以下ではこの仮想的な組成誘起 M 変態について、特に特徴的なパラメータである平衡組成 x_0 と組成ヒステリシス

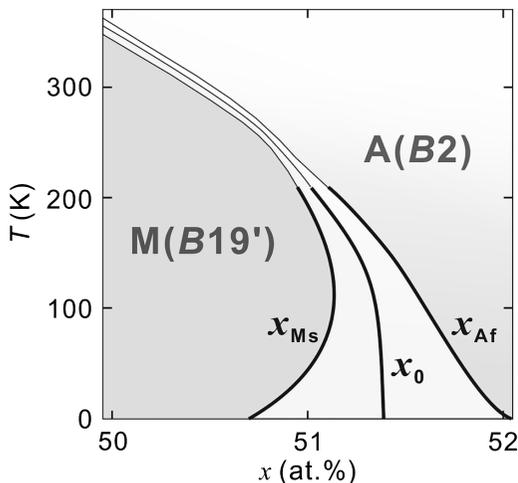


図 4 Ti-Ni 系における変態ヒステリシスを加味した A/M 相間の状態図⁶⁾。太線部は今回決定された領域。

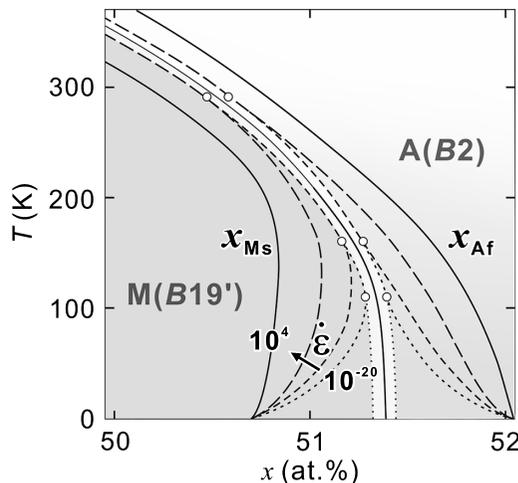


図 5 Ti-Ni 系における変態ヒステリシスを加味した A/M 相間の状態図。 $x_{\text{Ms}}, x_{\text{Af}}$ は $\varepsilon = 10^{-20} \sim 10^4 (\text{s}^{-1})$ の範囲で $10^8 (\text{s}^{-1})$ 毎に記載している。プロットは各 ε における T_{TA} 。

$x_{\text{hys}} (\sim |x_{M_s} - x_{A_f}|)$ が持つ物理的意味についてさらに考察する。

(II)で説明した通り、 σ_{hys} は熱活性化成分と非熱活性化成分の和として表され、低温での増大は熱活性化機構の顕在化によって説明される。また増大開始温度である T_{TA} は歪速度 ($\dot{\epsilon}$) 依存性を持ち、 $\dot{\epsilon}$ が大きくなるほど高温側へシフトする。これらの関係は(7)式により組成場にもそのまま適用されることから、 x_{hys} を加味した状態図中は $\dot{\epsilon}$ の変化に応じて図5のように変化する。 $\dot{\epsilon}$ の概念を組成場に変換すると『組成変化速度 \dot{x} 』なるパラメータを考える必要があり、これが大きくなるほど x_{hys} の熱活性化成分は大きく、またより高温側までせり出すことになる。以上より、 x_{M_s} , x_{A_f} の形状を決定する要素として時間が重要な役割を担っていることが理解できる。今、このように時間に依存して可変な熱活性化正変態ヒステリシス領域内の温度・組成条件におかれた状況を考えてみる。何らかの温度あるいは組成の変化を以ってこのような条件に落とし込む過程では \dot{x} は有限であり、したがって x_{hys} は熱活性化成分を持つ。しかしひとたび静的環境に置かれてしまうと $\dot{x}=0$ となり熱活性化成分は消失する。この過程で試料は x_{hys} を跨ぐことになるため変態が開始される。すなわち等温変態が生じる。熱活性化機構の存在は等温変態のダイナミクスまでも説明することができるのである。図6に正変態および逆変態時の熱活性化ポテンシャル障壁 δ とそれを乗り越えるためにある静的駆動力下で蓄えられたエネルギー Δg の関係を

示す。正変態(a)ではある温度 T_2 において余剰のエネルギー障壁 $\Delta (= \delta - \Delta g)$ が極小値を取ることから、この温度近傍にて熱活性化励起確率 P が極大を示す。等温変態に至るまでの潜伏時間はこの逆数 (P^{-1}) に比例するため、 T_2 を nose とする C カープが現れることがわかる。一方で、逆変態(b)では Δ は温度上昇とともに単調に減少し、 $\Delta=0$ となる温度を境に等温変態のための潜伏時間が消失する。このとき等温変態では C カープの下側しか現れない。以上より、熱活性化機構を加味した状態図から正変態と逆変態で非対称な等温変態の挙動を示すことが定性的に説明された。

(V) 小括

熱弾性型マルテンサイト変態の相平衡と動力学について、Ti-Ni および Cu-Al-Mn の応力誘起 M 変態を例に紹介した。低温での A/M 相間の平衡関係は熱力学第三法則によって特徴づけられ、また変態ヒステリシスは晶癖面移動に係る熱活性化機構の導入によって説明された。これらは Clausius-Clapeyron 式に基づく変数変換によって状態図上に転写され、低温の相平衡と等温変態挙動までを説明した。より厳密には、変態のダイナミクスが逆変態では成長(収縮)のみで記述されるのに対し、正変態では核生成と成長によってなされることから両過程における熱活性・非熱活性化機構を考える必要があり、変態ヒステリシスは正変態と逆変態で非対称な分布となる。少数の兄弟晶の成長・収縮によって達成される応力誘起 M 変態では核生成の寄与は小さいが、等方的で微細な M 組織を呈する温度

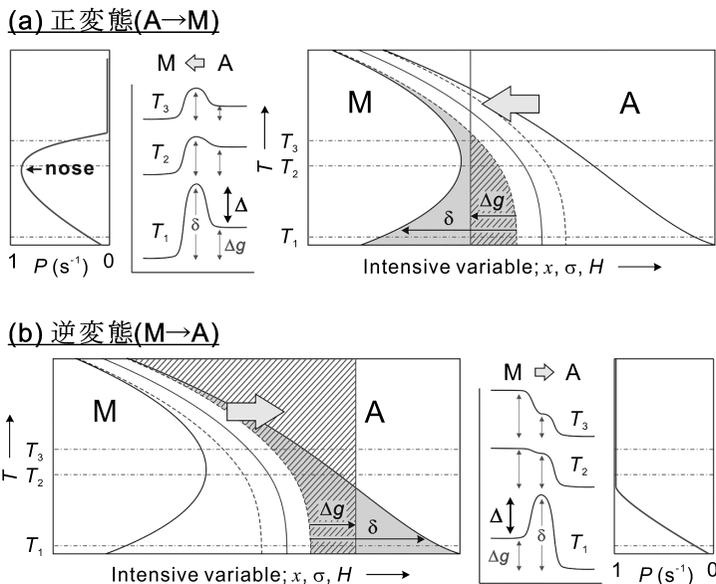


図6 (a)正変態および(b)逆変態における等温変態の概略図。

誘起および磁場誘起 M 変態では核生成の影響が正変態のみに有意に重畳する傾向を実際に確認している。

これまで熱活性化機構の存在は合金ごとにその有無について区別されてきたが、筆者は熱弾性型 M 変態を示すあらゆる合金において大なり小なり熱活性化機構は存在していると考えている。またこれまでほとんど注目されてこなかったが、熱活性化機構の存在は M 変態の学理上重要な意味を持つ。すなわち、熱活性化機構の寄与は外場（温度・磁場・応力・組成等）の印加速度に応じて変化することから、外場掃引下での物性応答は大なり小なり熱活性の影響が重畳していることになる。この意味において変態挙動は一意に定まらず、例えば図 5 が示す通り変態誘起温度は冷却・加熱速度に応じて変化することになる。

最後に、本稿で紹介したすべての式展開・考察が 2, 3 の極めて古典的な物理の理論のみで説明されたことを申し添えたい。M 変態を特徴づけるような制約を一切課していないことから、これまでの説明はあらゆる一次変態にも転用可能であると考えており、今後多様な物理現象の説明・探索への手がかりになると期待している。

3. おわりに

本稿では、熱弾性型マルテンサイト変態の相平衡と動力学について簡単に紹介させていただきました。現在は、M 等温変態の正変態・逆変態におけるダイナミクスについて取り組むとともに、金属の強化機構と転

位運動の素過程に関する研究にも取り組んでいます。材料科学に関わる多様な研究活動に取り組むことで、学生とともに知的探求心の醸成に努め、新たな学理の構築および産業界への貢献ができる教育者・研究者になるため励んで参りたいと思います。今後ともご指導ご鞭撻のほど何卒よろしくお願い致します。

参考文献

- 1) K. Niitsu, T. Omori, and R. Kainuma: "Stress-induced Transformation Behaviors at Low Temperatures in Ti-51.8Ni (at.%) Shape Memory Alloy", *Appl. Phys. Lett.*, **102**, 231915, (2013).
- 2) K. Niitsu, Y. Kimura, T. Omori, and R. Kainuma: "Cryogenic superelasticity with large elastocaloric effect", *NPG Asia Mater.*, **10**, e457, (2018).
- 3) 加藤雅治：転位論入門，裳華房 (1999).
- 4) A. Seeger: "The temperature dependence of the critical shear stress and of work-hardening of metal crystals", *Philos. Mag.*, **45**, 771, (1954).
- 5) K. Niitsu, Y. Kimura, and R. Kainuma: "Transformation entropy change and precursor phenomena in Ni-rich Ti-Ni shape memory alloys", *J. Mater. Res.*, **32**, 3822, (2017).
- 6) K. Niitsu, Y. Kimura, X. Xu and R. Kainuma, "Composition dependences of entropy change and transformation temperatures in Ni-rich Ti-Ni system", *Shap. Mem. Superelasticity*, **1**, 124, (2015).
- 7) S. Sarkar, X. Ren, and K. Otsuka, "Evidence for Strain Glass in the Ferroelastic-Martensitic System $Ti_{50-x}Ni_{50+x}$ ", *Phys. Rev. Lett.*, **95**, 205702, (2005).

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。

音波検層による横等方弾性体における全波形逆解析の研究

地下に存在するフラクチャや岩石鉱物の選択的な配向によって、地下には地震波速度の異方性が存在している。地震波速度の異方性は地下の応力場を反映しているため、地震波速度の異方性に関する情報を得ることは、正確な水圧破砕計画の策定をおこなう上で重要である。しかしながら、異方性パラメータはその方位や強度によって複雑に変化するため、一般的にその高精度な推定は困難であるとされてきた。そこで本研究では、高精度に地盤物性を推定することができる手法として注目を集めている全波形逆解析(FWI)を、異方性を有する地盤モデルに適用した。異方性媒質を独立な弾性要素として21要素を有する一般的な線形弾性体としてではなく、5つの独立なパラメータとして記述できる横等方弾性体に方位、傾斜パラメータを組み込んだ計7つのパラメータで記述する方法を新たに提案した。図1は、提案したFWIにより各パラメータが収束していく様子を表している。100の反復計算の後、全てのパラメータがわずかな誤差の範囲で求まることがわかる。この結果から、提案手法により地下の速度異方性を高精度に予測できる可能性が示された。

多孔質体内を流動する流体と微小固体粒子の相互作用の研究

出砂現象は、エネルギー資源の効率的な生産を妨げる大きな問題として認識されている。しかし、地下での流体と固体粒子の相互作用についてはまだ未解明な部分が多く残されており、効率的な生産のためにはこの理解が大きな課題となっている。本研究では、数値実験により砂粒子の貯留層内流動と砂粒子の発生メカニズムを研究し、砂粒子の存在が流体の運動にどのような影響を及ぼすかを、粒子法に基づく数値シミュレーションにより検討した。図2は、本研究における数値シミュレーションの一例を示している。孔隙を模した不動粒子(灰色)の隙間を、微小な浮遊粒子(黒色)が流体粒子(青色)とともに流動している様子や、赤丸で囲った領域で浮遊粒子が流路を閉塞させる様子が確認できる。シミュレーション中の流量変化を測定したところ、流路の閉塞が流体流動に大きく影響することがわかった。今後は、微小粒子の発生から流動や閉塞挙動を一貫して扱うことのできるシミュレータを

開発し、石油・ガス貯留槽や地熱貯留槽内の個体・流体流動解析を実施していく予定である。

教授 三ヶ田 均
助教 武川 順一

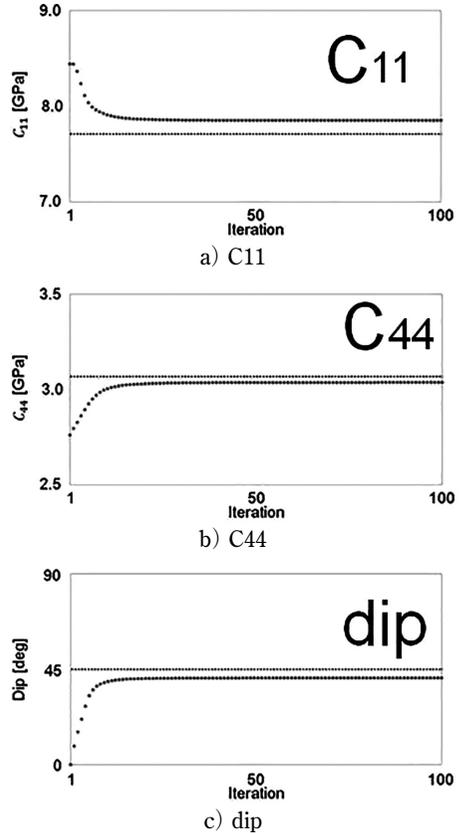


図1 FWIによる各パラメータの逆解析結果を表す。独立なパラメータを7つに減らすことにより、逆解析結果が局所解に陥ることなく、真の値に収束していることがわかる。

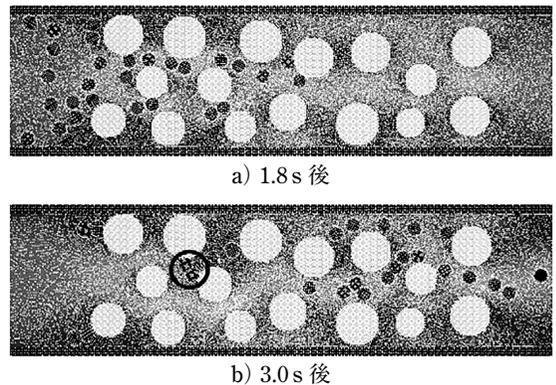


図2 灰色粒子は動かない固定粒子、黒色粒子は浮遊粒子、色がついている粒子は流体粒子を表している。暖色系ほど流速が早く、寒色系ほど流速は遅い。

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

水と CO₂による原位置水圧破碎試験

新しいエネルギー資源として注目を集めているシェールガスは北米やヨーロッパの固いシェール(頁岩)層に含まれている天然ガスを採掘するもので、ガスを含んでいる地層を水圧で破碎しないと採掘できない。また高温で乾燥した岩体(Hot Dry Rock)から地熱を抽出して発電を行う高温岩体発電においても、岩盤を水圧で破碎する必要がある。これらの開発に現在利用されている水を用いた水圧破碎の代わりに、地球温暖化の原因とされるCO₂(二酸化炭素)を利用することができれば、エネルギーの生産とともにCO₂を地中に隔離することができるため、地球温暖化防止を実現するうえで有用である。

我々の研究グループは、CO₂で岩盤を破碎すると水で破碎するより細かい亀裂が広い範囲に3次元的に広がり、シェールガスの生産や高温岩体発電に有利な亀裂が造成されることを室内実験で明らかにした。しかし室内実験では、破碎孔から供試体の表面にまで短時間に亀裂が進展するため、水圧破碎の範囲の大きさの違いを検討することができない。そこで、原位置の花こう岩で水とCO₂を用いた小規模水圧破碎試験を実施し、AE(Acoustic Emission: 岩盤の破壊音)の連続収録を行って破碎範囲の大きさの違いを検討した。その結果、CO₂を用いた破碎では、水を用いた破碎よりも広範囲にAE震源が分布する傾向がみられ、CO₂を用いると水に比べて広範囲に亀裂が造成されることがわかった。しかし、CO₂の圧入で観測されたAEの発生メカニズムを調べると、亀裂の閉塞によると思われるAEが多数観測されていることから、AE震源の広範囲の分布がそのまま激しい不安定な亀裂の進展を意味しているわけではないと思われ、さらに詳細にデータの分析を行っていきたいと考えている。

カルシウムリッチな水中での岩石の サブクリティカルき裂進展

岩石破壊の時間依存性の一つである「サブクリティカルき裂進展」に関する知見の集積は、地下岩盤の長期利用を考える上で極めて重要である。既往の研究より、岩石のサブクリティカルき裂進展は、周辺環境(温度、湿度、水質)が強く影響を及ぼすことが明らかにされてきた。特に、水中では大気中よりもき裂進展速度が高くなるのが様々な研究者によって報告されている。また、アルカリ性環境下では、ケイ酸塩岩石のき裂進展速度が促進されるという報告もある。

地下岩盤を工学的に利用する場合、多くのセメント系材料が使用されることが予想されるため、岩盤空洞周辺の地下水中のカルシウムイオン濃度は高くなるこ

とが予想される。ただし、カルシウムイオンが岩石のき裂進展に及ぼす影響については十分に調べられていない。そこで、ベレア砂岩を試料としてサブクリティカルき裂進展測定を行うことによって、カルシウムイオンがき裂進展速度に及ぼす影響を調べた。

その結果、カルシウムイオン濃度が高くなる水中環境下において、き裂進展速度が低くなることが示された。特に、カルシウムイオン濃度が高い水中では、アルカリ性(pH=12)である場合においても、中性の水中(pH=6)よりも、き裂進展が低くなることが示された。この結果は、従来の報告とは異なるものであり、本研究において見出された新たな知見であるといえる。ゆえに、カルシウムイオン濃度が高い環境下では、岩石のき裂進展は抑制され、長期安定性確保に貢献できる可能性が指摘できる。

南アフリカ大深度金鉱山における微小破壊観測

南アフリカ共和国では、現在では地表下4キロメートルに及ぶ深さで採掘が行われている。大きな地圧のかかる大深度での採掘は周囲に大きな応力擾乱を引き起こし、岩盤の動的剪断破壊(地震)を誘発する。これらの人工誘発地震は鉱山の操業において大きなリスクであり、鉱山での地震被害の低減につながる研究が必要とされている。

我々の研究グループでは、2007年以降、南アフリカの地表下数kmで、小さいものでMw(モーメント・マグニチュード)にして-5程度(典型的な破壊サイズ数cm)まで検知可能な微小破壊観測を行ってきた。これは、鉱山で従来地震活動監視に使われてきた観測網(Mw-1程度が検知限界)に比べて段違いの検知能力を持つ。鉱山内で起こる破壊のサイズ分布は、自然地震と同じく冪則にしたがうため、小さいものまで観察するだけで検知イベント数が爆発的に増え、解析の時空間分解能が大きく向上する。

これらの観測データを用いた昨年までの研究において、鉱山内のMw2の地震の余震中に、同じ場所で同じ大きさで繰り返し発生し、同じ波形を持つ、Mw-4程度の超微小繰り返し地震が起こっていることを明らかにした。これらの中には震源が十分重なっており、厳密な意味で繰り返し地震とみなせるものもあるが、波形は十分似ているにもかかわらず、震源決定誤差を考慮しても震源が有意に離れているものも見ついている。本震時の断層すべりにより、面の突起部のかみ合わせパタンが急変し、それによって生じた短波長応力擾乱により、多数の面上微小破壊が一時的に生じたものと考えられる。一方、本震前の微小破壊活動においては、このような地震はほとんどみられなかった。

教授 石田 毅
准教授 奈良 禎太
助教 直井 誠

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****大深度地下の水理環境のモニタリング**

放射性廃棄物処分場は大深度地下に建設され、廃棄物を定置後は粘土などからなる遮水材(人工バリア)を施工し最終的に閉鎖される。坑道の掘削によって周辺岩盤は損傷したり大気圧に開放され不飽和化するなどの影響を受ける。坑道閉鎖後は地下水が戻ることにより不飽和化した岩盤や遮水材などは飽和過程をたどるが、大深度の高水圧環境下における飽和・不飽和問題については未解明の部分も多い。岐阜県の地下研究施設では地表面下500mに位置する坑道の一部をコンクリート遮水壁で隔離し、試験区間を再冠水させて地下水環境がどのように回復するかを評価する試験を実施している。このような条件下での湿潤・冠水過程を予測するための構成則を確立するための基礎実験や理論的な評価を実施している。また、長期にわたる岩盤内の水分挙動の評価は大変重要であるが、岩盤水分は計測自体も容易でなくその手法の研究を進めながら挙動を評価している。冠水条件下の飽和過程の計測結果より、高圧条件下においては比較的早く飽和状態に戻っている可能性が示唆された。

放射性廃棄物処分場の人工バリアの品質モニタリング

廃棄体の周辺を埋め戻す緩衝材にはベントナイトという粘土系材料を用いる。岩盤から地下水が流入すると、ベントナイトは膨潤して埋め戻した空間をしっかりとシールする。これによって万一廃棄体から放射性物質が漏洩しても閉じ込める性能を発揮する。この遮水性能は施工時に所定の密度で埋め戻すことで管理するが、施工時の密度モニタリング計測手法やその後の地下水流入による飽和過程をモニタリングする技術は確立されたものがない。最近の研究で埋め戻した直後のベントナイトはその施工方法によっては不均質な分布を示し、これが湿潤・膨潤により長い時間をかけて均質化していくことがわかってきている。廃棄物先進国の欧州においても最近になってこの不均質性が着目されてきている。ベントナイトの密度を計測するために誘電式のツールや光ファイバなどを応用する研究を実施し、これらを精度よく校正することにより緩衝材の不均質性が精度よく計測できるようになってきた。

**高精度傾斜計の潮汐応答にもとづく
大規模地下空洞周辺岩盤の長期挙動観測**

供用中の大規模地下空洞の長期力学的安定性を監視するために用いられているナノオーダーの精度を持つ高感度傾斜計に関して、10年近くにわたった実地計測データの詳細分析と空洞安定性把握に結び付く有益な情報の抽出について検討している。空洞周辺に設置された複数の傾斜計から取得された時系列データには、それが高精度であるがゆえに、潮汐、気圧変動、地震など、様々な要因による変動が含まれているが、本年度は其中で、潮汐応答に注目することとした。潮汐応答は、時系列データの変動成分として比較的大きく、しかもかなり安定したものであることから、長期観測における計測の信頼性を判断する材料になること、石油備蓄基地など海岸に近い地下空洞において観測される傾斜応答では、固体地球潮汐よりも、海洋潮汐による荷重変動の影響の方がかなり大きく、それらは松本らによって開発されたGOTIC2による予測値と相対値としては良い一致をみることが示された。また、逆に、その予測値との差異にもとづいて、地下空洞の存在自体や断層などの地質構造の影響を議論できること、並びに、潮汐応答の経年変化にもとづいて大規模地震発生前後における地下空洞周辺岩盤の変化をも議論できる可能性が示された。

ローレンツフォース渦電流探傷法に関する基礎的検討

導電性材料に対する渦電流探傷法の全く新しい形態として、最近、ローレンツフォース渦電流法という方法が欧州で提案された。この方法は、材料内への渦電流励起に従来のような交流磁界を用いるものではなく、永久磁石による静磁界と対象材との相対運動によって誘起される渦電流を利用するものであり、しかも、欠陥の存在によって起こる渦電流の大きさの変動を、材料内に生じるローレンツ力の反作用として励磁源である永久磁石に作用する曳力や揚力として計測するという、これまでとは全く異なる検出原理にもとづく探傷法である。探傷という行為自体に、検出要素と材料との相対運動が必然的に伴われること、また、その相対運動による磁界変動の周波数が、従来の渦電流探傷法に比べれば低いことから、より深い欠陥まで検出可能であることなどが注目されている。本研究室では、この方法が真にどれだけの実用性をもつものであるか検証するための実験的な検討を行っている。本年度は、二重鋼管を試料とした予備的な回転探傷の実験を行って、内側の鋼管の欠陥まで探知可能であることを示すことができた。

教授 榑 利博
准教授 塚田 和彦

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・水資源の分布形態と成因解明

世界的に需要が急増している鉱物と水資源の分布形態や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、リモートセンシングと地球統計学の手法開発に取り組んでいる。

リモートセンシング研究では、地下水が求められる半乾燥地域のモザンビーク中部を対象とし、断層系や地質物性・植生情報から地下水資源ポテンシャルを評価した。特に、合成開口レーダ画像の後方散乱係数から地表の風化程度を推定できるようになった点に新規性があり、本手法はレゴリスが発達し、透水性の高い領域を抽出するのに役立つ。また、Landsat シリーズや ASTER に代表される衛星データの観測範囲は広いが、観測波長帯数が少なく、空間分解能も低いので鉱物の識別精度が低いという欠点がある。この精度を高めるために、衛星画像の波長と空間の高分解能化法を開発した。その結果、通常の衛星画像から現在の最高レベルの波長・空間分解能画像をシミュレートすることができ、ネバダ州の熱水変質域 Cuprite での現地検証によって、手法の有効性を検証できた。

次に、地球統計学研究では、海底ボーリングデータを用いて海底熱水噴出域での主要金属元素の3次元濃度分布をモデル化した。複数の金属濃度が高いゾーンはほぼ同じ位置にあり、これは高密度・低比抵抗ゾーンと重なるところが多い。このように鉱物の分布形態を初めて詳細に把握できるようになった。さらに、気液二相流の熱水流動シミュレーションによって、対象地域の熱水流動のパターンと温度分布を明らかにできたとともに、変質鉱物の安定化温度に基づき、鉱床生成の可能性のある領域を特定した。

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、それらの利用を図る上で流体の起源や流動状態の理解が不可欠である。そこで、その理解に役立つ地球化学的指標を活用しながら、流動場の地質構造や流動現象に関わる特性の空間分布に基づくモデル構築を行い、流動状態をシミュレーションすることで、地球の深部から表層まで様々なスケールの流体流動現象を明らかにするための研究を進めている。

地熱流体の起源と循環状態把握を目的とした研究では、インドネシア・バンドン盆地周辺の4箇所の地熱サイトで湧出するガスを採取し、成分濃度や同位体特性の分析を行った。希ガス同位体の分析結果からは、盆地南側よりも北側のサイトで、マントル起源のヘリウムの割合が高いことが明らかとなった。これと同様に、メタンでも北側サイトで深部由来ガスの寄与が大きい。これらの結果は、盆地北側と南側の地熱システムで地熱流体循環の活発さが異なることに起因する可

能性が高い。

地下水流動と物質移行における断層の機能解明を目的とした研究では、断層近傍の深度300mと500mに分布する研究坑道の壁面を対象にシュミットロックハンマー反発度を測定した。同じ壁面で測定した浸透率と比較したところ、10m区間ごとの反発度の平均値と浸透率の平均値の間には負の相関が認められた。断層の影響で岩石中に微視的なダメージが生じ、その結果浸透率が高い区間では反発度が小さいと考えられる。浸透率を空隙率に換算した上でモデルに反映し、現在物質移行解析を進めているところである。

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。モデルサイトであるバンドン南部のWayang Windu 地区では、地形データからの抽出リニアメントに基づく推定亀裂面は、ボーリング調査による亀裂データの方向と概ね対応した。また、生産井先端の80%以上が本手法による推定亀裂面上に存在したので、リニアメント解析から亀裂系の3次元分布形態を推定できることがわかった。新たな反射スペクトル分離法によって、衛星画像から高植生被覆下での熱水変質帯も抽出できるようになった。

さらに、計測井を24箇所に設置し、ラドン・水銀濃度やガス成分のモニタリング測定を継続中である。ラドン濃度が特に高く、時間的な変化が小さいサイトは地殻ガスの上昇と供給が活発であることを示唆し、地熱資源胚胎の有望地とみなせる。その活発さは、放射性壊変則に基づく数値シミュレーションによって検証できた。

海底資源・地熱資源に対する物理探査技術の開発

資源探査が海へと向かう中、海底のエネルギー・金属資源の探査手法の高度化が不可欠となっている。そこで、物理探査データ解析、地下構造のモデリングおよび解釈の3つについて研究開発を進めている。データ解析技術では、独立成分分析を周波数領域に発展させた手法を開発し、電磁探査データの解析精度の飛躍的な向上を達成した。地下構造モデリング技術では、従来の電磁探査に簡易的な探査法を追加することで、地熱地域の地下構造解析精度を向上させる新技術を提案した。また、海底電気探査データのインバージョン法の開発や、これによる地下構造モデルの信頼度評価法の開発を行った。地下構造解釈技術では、海底熱水鉱床域の岩石物性や鉱物組成の分析を行い、岩石の比抵抗と導電性金属含有量の関係を定量化できた。さらに、岩盤の透水性の把握を目的として、限られた地質情報や物理探査情報の統合解析法を開発した。

教授 小池 克明
准教授 後藤 忠徳
助教 柏谷 公希

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

当研究室では、石油や天然ガスなどの地下エネルギー資源を開発する地球工学分野から、科学掘削において沈み込み帯の断層運動を描像する地球科学分野まで、“地球”、“資源”、“エネルギー”、“断層”、“環境”などをキーワードに、幅広く研究を行っている。平成29年度に行った代表的な研究の例を以下に紹介する。

非弾性ひずみ回復法(ASR法)を用いた南海トラフ沈み込み帯における原位置応力解析

プレート境界断層で発生する巨大地震は、ある周期を持って同一断層帯において繰り返し発生することが知られている。しかし、断層強度や地震発生による断層付近の応力降下量は各サイクルで不変なのか、変化する場合は何が決定要因であるかなど、未解明の問題が多く残されている。このような問題の解明には、第一に断層近傍における応力状態の把握が重要であるが、一般に応力測定、特に大深度における測定は困難であり、実測データが不足しているのが現状である。本研究では、大深度における応力測定に適用可能な非弾性ひずみ回復法を用いて、プレート境界型巨大地震発生帯の1つである南海トラフ沈み込み帯における原位置応力測定を行い、その三次元応力状態を決定した。その結果、室戸沖では横ずれ断層タイプの応力状態が卓越しており、紀伊半島沖と比べ、同一沈み込み帯にも関わらず両者は全く異なる応力状態が形成されていることが示された。また浅部の応力状態はすべり欠損速度分布と相関を有することが示唆された。

CO₂/塩水/白雲母三相界面系における接触角の塩分濃度依存性に関する研究

地球温暖化ガス二酸化炭素(CO₂)の大気中への排出量の削減技術の一つとしてCO₂地中貯留(CCS)がある。CO₂の大規模発生源から排出前のCO₂を回収し、地下約1~3kmの貯留層に圧入して、半永久的に貯留する。貯留層の上部の遮蔽層が機能することによってCO₂を地上に漏洩することなく長期的に安定して貯留することができる。遮蔽層のシール性能は鉱物粒子間に作用する毛管圧力の閾値によって評価される。接触角は温度・圧力など様々な要素によって影響を受けるが、塩分濃度増加に伴ってCO₂/塩水/白雲母の三相界面系での接触角は増加傾向を示す。これは遮蔽性能低下の可能性を示す傾向である。そこで、本研究では接触角の塩分濃度依存性を研究対象とし、各種極限環境条件でも適用可能な分子動力学シミュレーションを用いて、原子の密度分布から接触角の算出と界面近傍の構造の解析を行い、濡れ性変化のメカニズムについて考察した。塩分濃度の増加に伴ってCO₂/塩水/白雲母系での接触角は増加する傾向が確認され

た。膜の構造変化、デカンとの比較を通して、CO₂系では表面電荷の変化で膜の厚みが減少し、接触角が増加することがわかった。

石油増進回収技術への応用を目的とした油-鉱物二相界面の吸着構造評価

経済的で環境負荷の低い石油増進回収(EOR)技術として、海水や地層水より塩分濃度が低い塩水を圧入する低塩分濃度水攻法が注目されている。そのEORメカニズムの一つとして、低濃度塩水により、鉱物表面の濡れ性が油濡れから水濡れに変化することが考えられている。そこで、まず、鉱物表面の初期の油濡れを確認するため、分子動力学(MD)計算により、白雲母表面における酸性油分子の吸着構造を調べた。その結果、白雲母表面のカチオンがNa⁺やMg²⁺の場合は水分子を介して酸性油分子が吸着するwater bridge構造になるのに対し、K⁺やCa²⁺の場合は直接酸性油分子が吸着するcation bridge構造となることが分かってきた。さらに、このことを検証するため、白雲母表面のカチオンをK⁺、Ca²⁺、Mg²⁺にして酸性油分子のステアリン酸を吸着させた白雲母基板を準備し、高輝度放射光施設であるSPring-8においてX線CTR散乱法の測定を行った。その結果、実験データから推定される白雲母表面近傍の電子密度分布が示すステアリン酸分子の吸着構造は、上記のMD計算結果と整合することがわかった。

石油増進回収法への適用を目的としたCNFの圧入性改善手法の開発

豊富な木質資源由来で生分解性のあるTEMPO酸化セルロースナノファイバー(以下、CNF)を、環境負荷が大きいHPAMに代わる石油増進回収法用ポリマーとして用いる研究を重ねてきた。その結果、CNFは環境負荷が低く、HPAMに比べて良好な粘度特性、耐温性を示すものの、CNF同士が絡み合っ油層の孔隙を目詰まりさせ、圧入できなくなるという欠点を有することが分かってきた。そこで、この問題を解決するため、油層の空隙を十分に通過できると考えられる直径1μm以下のW/OエマルジョンにCNFを内包させることでCNFどうしの絡み合いを防ぎ、その圧入性を改善することを試みた。

n-ドデカン、0.2wt%のCNF懸濁液、非イオン系界面活性剤、NaClaqの系において、界面活性剤の種類とNaClaqの塩濃度を変えてW/Oエマルジョンの調整を試みた結果、4000mMの高濃度の塩水においてもCNFを内包する直径1μm以下のW/Oエマルジョンを調整することに成功した。また、孔径が1μmのフィルターにも、500mMのNaClaqで飽和した浸透率約300mDのベレア砂岩にも、目詰まりせずに圧入できることを確認した。

教授 林 為人
准教授 村田 澄彦

資源エネルギー学講座
資源エネルギーシステム学分野

中空ナノポーラス白金触媒の開発

燃料電池の空気極触媒として使用される白金は非常に高価かつ希少な金属資源であるため、触媒特性を向上させて白金の使用量を減らすことが求められている。本研究では、白金の比表面積増大・性能向上を目的として「中空ナノポーラス白金」を作製し、燃料電池の空気極で起こる酸素還元反応の触媒性能を評価した。

アーク溶解炉と熱処理を用いて作製した Cu-Mn 合金を室温で塩酸に24時間浸漬し、Mnのみを選択溶解してナノポーラス銅を作製した。このナノポーラス銅をグラッシーカーボン電極上に固定したうえで種々の温度・濃度の $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ 水溶液に浸し、銅に対する白金置換めっきとした。最後にその試料を室温で 0.1 mol/L HNO_3 中に浸し、銅を溶かし出した。

走査電子顕微鏡、透過電子顕微鏡 (TEM) を用いて試料観察を行うとともに、エネルギー分散型 X 線分光法で元素組成を分析した。また、試料の固定された電極を作用極とし、 H_2SO_4 電解液中、回転数 200–3600 rpm にてサイクリックボルタンメトリ (CV) 測定を行うことで、酸素還元反応性能を評価した。

TEM 観察の結果、ナノポーラス銅の構造を引き継いで中空ナノポーラス白金ができていたことが確認された。CV 測定の結果、活性化支配電流の値が 1.48 mA/cm^2 となった。これは平滑な白金試料の文献値 (0.25 mA/cm^2 等) と比較して著しく大きな値である。さらに担体の銅を溶出した後の活性化支配電流の値は 4.18 mA/cm^2 となった。

ナノポーラス金上での接着性ヒト細胞の培養

近年、ナノオーダーの孔を有するナノポーラス (np) 金の抗菌特性が明らかとなった。この抗菌特性は従来の金属の抗菌性発現機構である金属イオンや活性酸素などの効果とは異なる、np 金独自のものである。本研究では、np 金がヒト細胞の活性に対しても影響するかどうかを確認した。

細胞には、ヒト接着性上皮癌細胞 (HeLa 細胞) を用いた。基板上で24時間細胞を培養し、基板への接着率を経時的に調べたところ、np 金上で特に大幅な値の減少が確認された。HeLa 細胞は基板を足場とし増殖するため、np 金の表面効果が HeLa 細胞の接着に直接影響を及ぼしたことになる。

HeLa 細胞の脱着機構を解明するため、細胞外マトリクスであるフィブロネクチン (FN) に着目した。FN は培養の際に基板上に分散させる二量体タンパク質であり、細胞と結合することで接着斑を形成し、細胞を基板へと接着させる。そこで、np 金の影響により (1) FN が単量体などより小さな分子に分解、あるいは (2) FN の結合部位 (RGD) が変性し細胞と解離したと推察しそれらの検証を電気泳動や ELISA により調べた結果、(2) の可能性が示唆された。すなわち、np 金独特の分極により FN 内の結合可能な RGD が減

少した結果、HeLa 細胞の接着率低下を引き起こしたと考えられる。

マグネシウムにおける転位と二重双晶の相互作用に及ぼす Y および Al 偏析の影響の原子シミュレーション

マグネシウム (Mg) は次世代の軽量構造金属材料として注目を集めており、輸送機器への適用が目指されている。しかし Mg は延性に乏しく難加工性である点が実用化の障害となっている。このような Mg の加工性の向上に向けてイットリウム (Y) やアルミニウム (Al) の添加が有効であることが知られており、延性向上メカニズムの解明が必要である。Mg では二重双晶 (特に粒界三重点) に転位が堆積することで破壊の起点が形成され、また添加元素は転位の運動に影響を及ぼす。そこで本研究では、モンテカルロ (MC) 及び分子動力学 (MD) 計算を用いて、Y 及び Al 偏析 Mg 二重双晶における転位と粒界三重点の相互作用解析を行った。MC 計算の結果、Al 及び Y は粒界三重点及び双晶界面にも偏析することが示された。また MD 計算の結果、Y 偏析二重双晶では偏析した Y は粒界三重点における双晶転位の放出を促進し、Al 偏析粒界では偏析した Al が双晶転位の運動を止めることで、いずれの場合も偏析元素は粒界三重点への転位の堆積を妨げ、破壊を抑制することが示唆された。Y 及び Al の挙動の違いは、前者では Mg と Y の原子半径の差に起因するメカニカル効果、後者では Mg と Al の強い共有結合に起因するケミカル効果がそれぞれ支配的であることに起因すると考えられる。

水圧破砕法により頁岩中に造成されるフラクチャーの伸展パターン解析

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シェール層に賦存するため、開発にはこの層にフラクチャー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、破碎フラクチャーの形状特徴の把握が求められる。そこで、破碎フラクチャーの形状評価を目的として、破碎流体に蛍光剤を添加した熱硬化性樹脂を用いて頁岩供試体を対象に室内水圧破碎実験を実施し、実験後に加熱して破碎流体を固定し、フラクチャーを可視化し、観察・評価した。実験には、米国産 Eagle Ford 頁岩、本邦産井内頁岩、釧路頁岩を用い、観察面は破碎孔に直交する面とした。フラクチャーの複雑性の指標として、伸展方向に沿うフラクチャー本数 (分岐特性) とフラクタル次元解析を行った。その結果、釧路頁岩では複雑性が低く、井内頁岩、Eagle Ford 頁岩では同程度に高いことが明らかとなった。その理由の一つとして、頁岩中の構成鉱物分布の違いが考えられた。比較的粒径の大きい鉱物 (石英、長石、カルサイト等) がフラクチャー伸展方向を急変もしくは分岐させる様子が観察され、井内頁岩、Eagle Ford 頁岩では、釧路頁岩よりそのような構造が多いことがフラクチャーが複雑になる要因と考えられた。

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

純チタン板の粘塑性挙動に関する 結晶塑性有限要素解析

工業用純チタン板は低温韌性や耐熱性、耐食性に優れており、航空宇宙分野や医療分野、民生部品等で用いられている。金属板の成形では、加工速度が成形性に影響を及ぼすことや離型後に成形品の形状変化が徐々に進行することなど、時間に依存した塑性変形挙動を呈することが知られている。純チタン板はひずみ速度依存性の強い塑性変形特性を示すため、さらなる利用拡大にはその時間依存変形挙動を明らかにする必要がある。しかしながら、その特性や詳細な変形メカニズムはほとんど明らかにされていない。そこで本研究では、JIS1種工業用純チタン板(板厚1mm)の時間依存変形挙動を結晶塑性有限要素法解析によりモデル化することを試みた。研究の結果、代表的な時間依存変形である応力緩和特性およびクリープ特性を解析により定性的に再現することができた。また解析結果から、応力緩和時とクリープ時では、結晶粒レベルの塑性変形メカニズムは大きく異なることを明らかにした。

(堺 勇行, 現:川崎重工工業(株))

加熱固体面に衝突するポリマー水溶液液滴の 接触挙動と冷却特性

金属材料の焼き入れ用冷媒として、水溶性高分子ポリマー水溶液を使用することがある。この冷媒は、冷却途中の材料表面にポリマー皮膜を形成することが知られており、それが焼き割れなどの製品不良の発生を緩和するとされている。しかし、ポリマー皮膜の詳細な形成プロセスや、伝熱特性は不明である。本研究では、垂直落下する水溶性高分子ポリマー水溶液の液滴を清浄な加熱固体面に衝突させ、その際に起こる固液接触挙動と熱伝達特性をラボ実験によって研究した。供試液体として分子量約20,000の水溶性ポリマーを10wt%に希釈した水溶液を用いた。固体面として接触面観察実験ではサファイアを、伝熱実験ではステンレス箔を用いた。実験の結果、サファイア表面温度が350~580℃でポリマー皮膜の一時的な形成が確認され、それ以下では皮膜は永続的に形成された。また、ステンレスの表面温度が400℃以下では、ポリマー水溶液液滴の抜熱量は、水液滴よりも小さくなることを明らかにした。

(坂根 将伍, 現:パナソニック(株))

遷移および膜沸騰温度域の移動体への 吹上衝突噴流冷却

鉄鋼業の熱間圧延プロセスでは、圧延終了後の高温鋼板を多数のパイプライン流で冷却している。この冷却は鋼板の機械的特性を決定する要素技術であり、高精度な鋼板の温度制御が求められている。とりわけ、

高強度鋼の製造では、遷移沸騰と呼ばれる不安定かつ高伝熱量領域での正確な冷却停止が必要である。しかし、その沸騰領域の学術的な知見は不足している。本研究では、水平移動する高温のステンレス鋼板の下面に吹上棒状水噴流を衝突させ、その流動および熱伝達特性をラボ実験により研究した。噴流速度(0.9~1.5m/s)、移動平板速度(0.5~1.5m/s)、冷媒温度(17, 36℃)および鋼板温度(300~700℃)の諸因子の影響を調査した。その結果、遷移沸騰と膜沸騰の境界を示す局所熱流束(MHF)温度は諸因子によって変化すること、遷移沸騰領域の伝熱特性は膜沸騰領域と比較して諸因子の影響を大きく受けることなどを明らかにした。

(中原 純也, 現:新日鐵住金(株))

結晶塑性有限要素法による A5083-O 板の 加工硬化挙動の予測

近年の地球環境問題から、輸送機器の軽量化が達成すべき喫緊の課題であり、そのため従来の鋼板に替わって低密度なアルミニウム合金板の利用が拡大している。一方、プレス成形性の把握にはさまざまなひずみ経路下での変形特性を理解する必要があるが、その特性は十分に明らかにされていないのが現状である。そこで本研究では、5000系アルミニウム合金板の加工硬化挙動の理解と近年注目を集める結晶塑性解析を用いたその高精度なモデル化を目的とした。研究の結果、転位密度を内部変数として各すべり系のひずみ硬化発展を記述したモデルと、離散転位動力学により決定された転位の相互作用マトリクス成分を用いることで、一軸引張や一軸圧縮、反転負荷、単純せん断などの一軸負荷時の加工硬化挙動だけでなく二軸引張時の異方硬化挙動を良好に再現できることを明らかにした。

(生川 遼太, 現:新日鐵住金(株))

純チタン 1 種および 2 種材の 2 段階変形挙動に 関する結晶塑性解析

工業用純チタン板は低温韌性や耐熱性、耐食性に優れており、航空宇宙分野や医療分野、民生部品等で用いられている。純チタン圧延板は、常温では六方最密構造を有していること、また強い底面集合組織を示すことから、顕著な塑性変形異方性を呈する。最近では用途の拡大に伴い、その塑性変形特性の解明が求められているが、その詳細はほとんど明らかにされていない。昨年度は、純チタン 1 種材が荷重軸の変化を伴う二段階負荷を受けた際の塑性変形挙動を研究した結果、その挙動には一次経路における双晶活動が大きな影響を及ぼすことを明らかにした。そこで本研究では、1 種材に比べて双晶活動の小さい純チタン 2 種材も用いて、双晶活動と塑性変形特性の関連を更に詳細に研究した。その結果、双晶回復の顕著な反転負荷経路では、双晶活動の活発な 1 種材では 2 種材に比べて加工硬化率の変化が顕著であることを明らかにした。

(畠山 真一, 現:ブラザー工業(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

孔隙充填型ハイドレートの生成挙動における 基礎的研究

近年、 CH_4 ハイドレートの商業生産に向けた開発研究が盛んに行われており、その中でも CO_2 - CH_4 ガス置換法が注目されている。本研究では初期段階として、様々な条件の孔隙充填型 CH_4 ハイドレート生成過程における基礎的な特性をつかむことを目的とした。その結果、まず、粒径0.05 mmでの生成では飽和率が38%であるが、粒径0.1 mm, 0.2 mmでは50%前後とやや高い値が得られた。これらの飽和率の相違には孔隙径の大きさの違いによるガスと水との接触の影響があると推察できた。また、実地条件での生成では飽和率が100%と高い値が得られた。次に、多孔質体内部の温度変化については、有意な変化が2か所見られた。1.5 h付近において圧力が急激に低下しており、同時に温度上昇が見られたが、ここでは CH_4 ハイドレートの生成が始まり、生成熱が発生していると推察できた。また、4 h付近において3℃近い温度の上昇が計測された。ここでは、残留水が凝固することによる凝固熱が発生しているのではないかと推測された。以上などから孔隙充填型ハイドレートの生成時の僅かな熱の変化や孔隙径の大きさによるハイドレート飽和率の違いを捉えることが可能となった。

硫砒銅鉱のマイクロバブル浮選における粒径の影響

近年、硫化鉱をはじめとした鉱石中の不純物が増加しているが、その存在形態が微細かつ複雑であることが指摘されている。そのような鉱石から不純物を分離するためには単体分離のために微粉砕が必要となる。当研究室では、マイクロバブル浮選（以下MBF）を新規の微粒子選鉱技術として注目してきており、本研究では、微粒硫砒銅鉱のMBFにおける粒径の影響について基礎的な検討を行った。その結果、粉砕時間が長くなるにつれ平均粒径が小さくなることが確認できた。また、粉砕時間0 minから80 minまで増加するとBET比表面積も増加する傾向をみました。XRDの測定結果から、80 min湿式粉砕しても硫砒銅鉱の結晶構造が維持されることが判明した。次いで、硫砒銅鉱微粉砕試料に対して酸化物の捕収に有効なドデシルアンモニウム酢酸塩（DAA）を捕収剤として1 ppm添加し、粉砕時間を変化させてMBFを行った。粉砕時間が長くなるほど回収率が上昇する傾向が認められた。これは、硫砒銅鉱の粒径が小さくなるにつれ優先的に酸化を受けた粉砕断面が増加し、ドデシルアンモニウムイオン吸着による粒子疎水化が促進されたことによると考えられた。

マイクロバブル浮選による亜鉛の除去

環境規制の対象となっている重金属イオンを含む事

業系排水は各種処理法が実施されているが、環境規制値は年々厳しくなっており、従来の処理では規制値を満たすことができず、そのために新しい技術開発が望まれている。本研究では規制重金属の中でもとりわけ除去が困難とされるZnの希薄水溶液を対象とし、水酸化物沈殿を生成して、マイクロバブル浮選（MBF）を適用させることで、目的物質であるZnの回収を試みた。また、水溶液中におけるZnの水酸化物粒子のζ電位の測定を行い、Zn回収率との相関性について検討した。その結果、pHが中性から塩基性に向かうにつれてζ電位の負の値が増大していることを認め、このような界面動電学的特性を有する粒子を陽イオン性捕収剤であるドデシルアンモニウム塩化物（DAC）でMBFにより浮上回収することを試みたところ、塩基性側のpHで高い回収率を示し、特にpH 10付近で回収率がピークに達していることが分かった。一方で、酸性側のpHでは回収率はほぼ0%であった。このことは $\text{Zn}(\text{OH})_2$ のζ電位が負の値をとっているpH域でDACによる回収が有効であることを示しており、捕収剤の静電的吸着が支配的であることが分かった。また酸性側pH域では溶液中の $\text{Zn}(\text{OH})_2$ が溶解して Zn^{2+} の様態になっているため捕収剤陽イオン性であるドデシルアンモニウムイオンの静電的吸着は期待できず、回収困難であることも判明した。

海洋系大型藻類のメタン発酵に向けた適応性の研究

近年、バイオマスエネルギーについて活発に研究開発が行われている。海洋系バイオマスは、陸上作物に比べて、単位面積当たりの収穫量が多い、 CO_2 吸収量が多い等、多くのメリットが挙げられる。また、海岸における海藻ごみの焼却処分が問題になっており、これらをメタン発酵することにより、海藻ごみの減容化、エネルギーとしてのメタンガス回収、焼却処分に用いられる化石燃料の節減につながり、廃棄物問題・エネルギー問題の解決の一助になりうると考えられる。本研究では、バイオガス発生量増進を試みるため、海洋系大型藻類からのメタン発酵における前処理法を検討するとともに、海洋系大型藻類のメタン発酵に向けた適用性について考察した。その結果、発生した累積メタン発生量を比較すると、熱アルカリ処理の場合が最もメタン発生量が大きく、未処理に対するメタン発生量は約1.2倍となった。アルカリ濃度、加熱温度それぞれ、0.20 wt%, 100℃の場合に最も効果が大きく、未処理に対するメタン発生量はそれぞれ約1.2倍、約1.4倍となった。メタン発生量増加の原因を考察するために、混合液中の溶存CODを計測したところ、熱アルカリ処理は未処理に比べて約1.9倍のCODの値が計測された。熱アルカリ処理によってメタン発生量が増加した要因は、律速段階である可溶化の促進によるものだと考えられた。

准教授 楠田 啓
准教授 藤本 仁
助教 日下 英史

工学研究科 材料工学専攻

材料設計工学講座
材料設計工学分野

二酸化炭素削減が世界的規模で取り組まれる中で、運輸部門での二酸化炭素排出量の削減が大きな課題である。そのため世界中で二酸化炭素を全く排出しないZEV (Zero Emission Vehicle) を含む自動車の戦略転換が起きている。このような背景の下、そのZEVのコア技術となる蓄電池技術が世界的に注目され、我が国においても様々な国家プロジェクトが行われている。本講座を担当する松原は、NEDO「革新型蓄電池実用化促進基盤技術開発 (RISING2)」のプロジェクトリーダー (PL) として、2016年度より5年間の予定でポストリチウムイオン電池の開発とその電池開発を支援するための高度解析技術開発に取り組んでいる。一方、学生の研究は、DVD材料としてよく知られているカルコゲナイド系 GeSbTe 光相転移直後のピコ秒領域での構造変化をX線自由電子レーザーからのフェムト秒X線パルスを利用して観察し、光励起相転移の本質的な理解を目指す研究や、ポストリチウムイオン電池の候補の一つとして注目されているフッ化物イオン電池のフッ素イオン伝導性に優れた電解質の探査や、磁場中での金属ナノ粒子合成による金属ナノワイヤ製造とその応用研究などである。

教 授 松原英一郎

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、新しいタイプの中温型燃料電池、チタン等の非鉄製錬プロセス、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。

・プロトン伝導性電解質を用いた 中温型燃料電池の開発

プロトン伝導性電解質を用いた固体酸化物燃料電池は、現在実用化に至っている酸化物イオン伝導性電解質のものと比較して動作温度が低く、安価な構造物の使用が期待できる。また、燃料希釈が起らないために水素の利用率も向上するなど多くのメリットを有しており、次世代の燃料電池として期待されている。我々の研究グループでは、イットリウム (Y) などのアクセプタドープにより加湿雰囲気では優れたプロトン伝導性を発現するバリウムジルコネート (BaZrO_3) について、基礎および応用研究を進めている。

プロトンを伝導キャリアとして結晶中に導入するために不可欠なアクセプタは、そのキャリアを束縛し伝導を阻害する悪影響があることも指摘されている。我々の研究グループでは、Y をドープした BaZrO_3 (BZY) をモデル系に、第一原理計算に基づく精緻なプロトン伝導挙動解析により、このプロトントラッピング効果を定量評価した。その結果、BZY 結晶中のプロトン移動度は Y 濃度の増加に伴って単調減少することが明らかとなった。一方、拡散シミュレーションにより見積もられた伝導度は、 300°C において Y 濃度 25% 付近で極大を取ることが明らかとなった。これは、Y 添加によるプロトンの“濃度上昇”と“拡散係数低下”がトレードオフの関係にあることを意味する結果である。また、Y ドープド同士が会合しクラスタリングすることで、トラッピング効果が増大傾向にあることも明らかにした。また、応用研究では、BZY 電解質を用いた燃料電池セルの作製を進めている。これまでの研究により、 600°C で 30 mS/cm の大きな伝導度を実現し、さらに、水素極支持型燃料電池を試作した結果、開回路起電力 1.03 V 、ピーク電力 172 mW/cm^2 を達成している。現在、燃料電池のさらなる高性能化および高耐久性の実現を目指し、燃料電池作製プロセスおよび電極に関する研究を遂行している。

・チタンの新規製錬プロセス

Ti は資源量が豊富で軽くて強く、海水中でも高い耐食性を示すため、エネルギー効率の高い輸送機器や半永久的に使用可能な海洋建築物の製造にも高いポテンシャルを有す。しかし、従来の製造法は生産効率が

低いために、Ti の価格は高く、一般的に普及していない。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 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 合金からの偏析による Ti の濃縮、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、プラント化に向けた実験に移行しつつある。近年は合金の処理量のスケールアップと真空蒸留の高速化を進めており、72 時間で約 60 g の Ti 粉を得ることに成功した。さらに、3D プリンターなどへの応用を目指した球状 Ti 粉の作製にも着手している。ふたつ目のプロセスでは、 TiCl_4 の Mg 還元による TiCl_2 の生成と TiCl_2 を含む溶融塩中での Ti の平滑電析を組み合わせ、Ti の箔および板材を安価に製造する。昨年までの研究で、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 箔が得られた。

・排熱の有効利用のための化学蓄熱材料

工場などでは $100\text{--}250^\circ\text{C}$ 程度の排熱が多量に捨てられている。化学蓄熱は化学反応を利用した蓄熱技術であり、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見つかっていない。そこで本研究では、新規化学蓄熱材候補として硫酸ランタン水和物 $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ の脱水・水和反応に着目している。この反応は $80\text{--}250^\circ\text{C}$ の間で進行し、良好な繰り返し性および小さな温度ヒステリシスを示すことから、 250°C 以下で動作する蓄熱材として期待される。反応メカニズムについて実験と第一原理計算により検討したところ、 $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3$ 結晶中へ H_2O が脱挿入され、 H_2O は結晶中を水分子の構造を保ったまま拡散するという、硫酸塩としては珍しい機構が明らかとなった。昨年度は H_2O 以外の気体と $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3$ との反応性を実験と第一原理計算により調査した。その結果、 $\text{La}_2(\text{SO}_4)_3$ は H_2O の他に NH_3 とも可逆的に付加・脱離反応をすることが明らかとなった。一方、付加モル数は H_2O に比べ NH_3 は約 $1/5$ であり、蓄熱密度の観点からは H_2O が適した反応ガスであることが示唆された。

教 授 宇田 哲也
准 教 授 豊浦 和明
助 教 畑田 直行
特定准教授 韓 東麟 (プロトニックセラミクス産学共同講座)

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

【エネルギー分散型蛍光X線装置の 高精度化に関する基礎研究】

迅速・多元素同時分析が可能なエネルギー分散型蛍光X線分析装置は、小型化・低価格化が加速し、簡易分析が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”を詳しくすることによって、エネルギー分散型蛍光X線分析装置を用いた簡便・迅速・精密な分析を目指し、以下のような実験・理論計算に基づく研究を行っている。

(1) 蛍光X線理論強度計算による鋼材分析の高定量精度化

蛍光X線の理論強度を計算することで定量を行うファンダメンタルパラメータ法について、その理論強度計算式をエネルギー分散型蛍光X線分析用に改良することにより、その定量精度の向上を試みた。従来、ファンダメンタルパラメータ法で用いられる蛍光X線理論強度式は波長分散型蛍光X線分析用の式であり、その積分変数は波長である。エネルギー分散型蛍光X線分析で得られるスペクトルは横軸がエネルギーであるため、波長からエネルギーへと積分変数の変換を行い、エネルギーに依存する新たな補正項を考慮した強度計算式を導出した。改良したファンダメンタルパラメータ法に基づく定量計算プログラムを作成し鋼材分析に適用した結果、市販装置と比較して、より高精度な定量分析を行うことに成功した。

(2) XRFスペクトル中のアーティファクトの解析

エネルギー分散型蛍光X線分析装置では、検出器からのパルス信号の電圧値がスペクトルのエネルギーに変換されるため、測定環境に起因するノイズによるパルス信号の乱れは、蛍光X線スペクトルに予期せぬ変化（アーティファクト）を及ぼし得る。現在のデジタルシグナルプロセッサは高計数率測定やスペクトル歪みの解消などの信号処理を可能にする一方で、複雑な処理過程を必要とするため、測定結果の変化要因を理解することが難しい。種々の測定環境で生じる誤差因子とその処理過程の関係を明らかにすることは、エネルギー分散型蛍光X線分析装置を用いた分析精度の向上につながると考えている。そこで、伝送線路内で生じる反射波によるノイズを除去するためのアルゴリズムを自作しX線スペクトルの信号処理に適用した。その結果、市販の波高分析器で生じていた反射波に起因するスペクトル変化を除去することができ、内部処理過程に依存しないX線スペクトルを得ることに成功した。

【偏光光学系蛍光X線分析装置の開発と 鋼材分析への応用】

スペクトル中のバックグラウンドが著しく低減可能な偏光光学系蛍光X線分析は、微量元素の高感度分析手法として用いられている。当グループでは、鋼材

中微量元素分析への偏光光学系蛍光X線分析の応用を目指し、低出力X線源を用いた小型分析装置の開発や偏光光学系が蛍光X線スペクトルに与える影響について研究を行っている。作製した装置を用いたステンレス鋼材の分析を行った結果、偏光素子から生じる弾性散乱線とCompton散乱線の強度比が、鋼材のスペクトル強度に影響を及ぼすことを明らかにした。

【Compton散乱による白色X線の偏光生成と 偏光度測定】

偏光光学系蛍光X線分析による試料に含まれる未知の微量元素の迅速分析のためには、多元素同時分析可能な白色X線を励起光に用いる必要がある。また、入射X線の偏光度が高いほどバックグラウンドは低減されるため、高偏光度を有する白色X線を励起光に用いる必要がある。当グループでは、偏光素子上で生じるCompton散乱に着目し、白色X線偏光生成のための新たな手法を提案した。また、低出力X線源と3Dプリンタ製の検出器角度可変ホルダを組合せ、X線偏光度測定装置を作製することで、0から30keVのエネルギー範囲における白色X線を同時に偏光させ、その偏光度を単色化することなく測定し、高偏光白色X線の生成を実証することができた。

【日本鉄鋼協会浅田賞受賞】

第2次大戦直後に神戸製鋼所社長に就任し、壊滅状態にあった産業の再建に多大な寄与を成した浅田長平氏にちなむ学術貢献賞（浅田賞）を、鉄鋼協会第175回春季講演大会（2018年3月）にて河合潤が受賞した。対象となった業績は「小型鉄鋼分析装置の開発と実用化」である。詳細は、ふえらむ、23（2018）352-357。

教授 河合 潤
助教 田中 亮平



日本鉄鋼協会第175回春季講演大会
学術貢献賞（浅田賞）メダル

工学研究科 材料工学専攻

材料プロセス工学講座
ナノ構造学分野

【化合物太陽電池におけるバッファ層材料の開拓】

太陽電池の光吸収層とヘテロpn接合を形成する材料（バッファ層）は、Cu(In,Ga)Se₂やCdTe太陽電池で実績のあるZnOやCdS等のn型カルコゲナイドが用いられることがほとんどであり、選択肢は多くない。

一方、光吸収層材料Zn₃P₂に関する研究では、n型カルコゲナイドとの接合は変換効率3%以下であるのに対し、Mgとの接合で6.08%の変換効率が報告されていた。我々はこれまで、Mg/Zn₃P₂界面には三元化合物半導体Mg(Mg_xZn_{1-x})₂P₂が形成され、Zn₃P₂との格子・バンドの接続が太陽電池として理想的であることを解明した。ここでIIA-Zn-P三元系（IIA=Mg, Ca, Sr, Ba）には、Mg(Mg_xZn_{1-x})₂P₂と類似した化学量論比の材料が報告されているものもあり、我々の着目しているZn₃P₂やZnSnP₂と格子・バンド整合が整合した材料系として有望である可能性がある。

しかし、構成元素の蒸気圧や反応性が高いという問題があり、実験を行うことが難しい。これに対し我々は、低融点金属であるSnを反応場として系に加えた四元系の平衡実験により三元系の相平衡関係を調査することにより、IIAがいずれの場合にもIIA:Zn:P=1:2:2の組成を有する三元化合物が存在し、Zn₃P₂と平衡することを見出した。特にIIA=Mg, Caの場合には三元化合物はバッファ層として適した光学的特性を示し、Zn₃P₂やZnSnP₂と格子・バンド整合の整合性も良いことを明らかにした。

【ZnSnP₂太陽電池におけるヘテロ接合】

当グループでは、薄膜太陽電池の光吸収層材料としてカルコパイライト型リン化物半導体ZnSnP₂に着目しており、これまでに、ZnSnP₂太陽電池では世界最高となる3.44%の変換効率を達成した。さらなる高効率化のために、ヘテロ接合界面である、ZnSnP₂/Cu裏面電極界面とバッファ層/ZnSnP₂界面の詳細な解析および検討を行った。

バッファ層としてはZnSnP₂と同じくカルコパイラ

イト型構造を有するn型半導体CdSnP₂に着目した。スパッタリングによりCd-Sn合金膜をZnSnP₂ウエハ上に成膜後、リン化することでCdSnP₂/ZnSnP₂ヘテロ接合の作製に成功した。この試料の電流-電圧特性は明瞭な整流性を示し、ダイオード理想因子は従来の(Cd, Zn)Sを用いた場合よりも小さい1.8程度であった。さらに、試料断面に対する電子線回折により、CdSnP₂はZnSnP₂上でエピタキシャル成長していることも分かった。したがって、CdSnP₂はZnSnP₂に対するバッファ層として(Cd, Zn)Sよりも有望であると結論付けられる。

裏面電極に関する検討では、ZnSnP₂とCuが400℃以上の熱処理で反応し、接合界面にはCu₃Pが形成されることを明らかにした。Cu₃PはZnSnP₂とエピタキシャル関係にあり、キャリア輸送の観点からは有利に働くと考えられる。しかし、反応の副生成物である液相Snを媒介とし、Cu電極が凝集してしまうことが分かった。これを防ぐために、Cu₃PをスパッタリングによりZnSnP₂上に成膜し、ZnSnP₂/Cu₃P/Cu積層構造を作製した。この試料は、熱処理を施さずとも、低抵抗かつOhmic性を示すことが分かった。

【統計力学平均の全単射性の崩れの解明と理論計算状態図構築への応用】

ある温度で平衡状態にある構造を観測したとき、その構造を与えるようなpotential energy surface (PES)を決めることは逆問題に相当し、その一意性・安定性は多体相互作用する系では自明でない。我々は配位空間上の幾何学的性質に着目し、統計力学平均の写像としての全単射性の崩れが、ある特別な領域内においては格子の幾何学的性質のみから決まる「構造自由度の調和性」というスカラー量の単調増加関数になることを理論的に導いた。この性質を利用することで、構造から逆予測したPESにどの程度の不確実性が含まれるのかを先験的に知ることができる。我々はこの理論をMg-Y-Zn 3元合金の長周期積層構造に現れる特異な2次元相に適用し、その平衡状態図を初めて明らかにした。

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****軟X共鳴小角散乱法によるAl-Znおよび
Al-Mg合金の組織評価法の開拓**

軽金属構造合金の代表的なものであるAl-Mg-XやAl-Zn-X合金の析出組織の評価としてマクロ領域の平均構造を定量化できる小角X線散乱(SAXS)法は電子密度差の小さいAl-Mg系などにおいては適用が困難であった。異常分散効果を利用する上で、AlやMgのK吸収端は軟X線領域、いわゆるTender領域にあり、硬X線領域で用いるX線検出器や強度校正方法が利用できないなど、通常SAXS測定とは異なる技術的困難がいくつか存在する。われわれはTender領域のX線強度の2次元測定に適したCCDベースの検出器を導入し、これをもとにした小角散乱測定システムを構築してAlならびにMg吸収端における異常小角散乱測定をおこなった。今年度はMg吸収端での測定の定量化をこころみ、強度標準試料の検討を進めた結果、グラッシーカーボンの1.3keV領域での測定に目処をつけることができ、標準試料法でのTender領域での絶対測定が可能であることを実証した。また、Mg吸収端での異常小角散乱測定をAl-Mg合金の313Kでの熱処理材料に適用することにより、長時間熱処理材では従来報告されている準安定状態図と良い対応関係を示す結果が得られた。

アモルファスリボンからのMg基長周期積層秩序構造の形成初期におけるクラスター形成過程とクラスター配列秩序の検討

アモルファスからのLPSO形成過程を放射光により調べているが、 $Mg_{35}Y_9Zn_6$ の周辺で組成を変化させた場合の形成過程の変化を検討するとともに、鑄造材で顕著に見られた偏析層内でのクラスター密度の大幅な変化のモデル化を検討するため、小角散乱強度とSTM像の関係性を調べた。アモルファスの結晶化によるhcp強制固溶体作成によってLPSO形成キネティクスを調べる手法はアモルファス形成能や結晶化時の溶質排除などの組成依存性に大きく影響される。今回6-9組成より低組成側では著しいアモルファス形成能の低下により、均一アモルファスリボンを得ることができなかった。一方、より高組成ではhcp過飽和固溶体形成におけるクラスター密度には大きな変化はなく、むしろhcp結晶の粒成長にともなう界面偏析の進行により、hcp粒界での溶質濃度が顕著に上昇し、Y組成が13%を超えるような場合では粒界での準安定相形成が先行することが明らかとなった。一方鑄造材での偏析層におけるクラスター配列の解析では黒川グループによるSTM像のフーリエ変換と小角散乱強度の対応関係を調べることににより、小角散乱強度解析に対応する実空間クラスター分布モデルの妥当性について検証することができた。

**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。この構造のSTMによる観察を継続している。これまでの研究からこの構造が C_{20} フラレーンの1次元重合体である可能性が考えられる。本年度は(110)面での研究を行った。これは C_{20} フラレーンの1次元重合体と考えられる炭素ナノ構造の繰り返し周期がAu, Agの最近接原子間距離の2倍の繰り返し周期を持っていることから着想を得たものである。(110)面においても、表面上に最近接原子間隔が存在しているが、その方向は[-110]方向のみであり、基板の繰り返し周期と炭素ナノ構造の形成が関係している場合には(110)面での構造形成には特徴が現れるものと予想される。実験の結果、炭素ナノ構造は[-110]方向[001]方向の2方向に形成されることが明らかになった。また、炭素量が少ない場合には[-110]方向[001]方向の繰り返し周期は異なっており、基板の繰り返し周期とほぼ同じであるが、炭素量が増えてくると、(111)面での構造と同じものが形成されることが明らかになった。すなわち、炭素ナノ構造は始め基板原子との結合をベースに形成が開始するが、その後、安定な構造である C_{20} フラレーンの1次元重合体と考えられる構造になるという描像を想定することができる。

LPSO合金の変形組織のSTMによる観察

Mg-LPSO合金はその強度と加工性の良さから次世代構造材料としての応用が期待されており、活発な研究が行われている。この合金はキンク変形と呼ばれる特異な変形機構で変形することが知られているが、その初期形成過程の詳細に関しては不明な点が残されている。

今年度はMg-LPSO合金の初期変形過程における構造の観察を試みた。その結果、キンク変形組織周りの構造とともに、底面内の転位ループと考えられる構造の観察に成功する一方、解釈が簡単ではないいくつかの構造も観察された。今後のLPSO合金の変形挙動の研究の進展に伴って、我々の観察した構造の解釈が可能になる可能性があり、注視していきたい。

3次元アトムプローブとSTMの複手法の開発

STM(走査トンネル顕微鏡)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。

今年度は、Pt-Irおよび TiO_2 試料を用いて研究を行い、Pt-Ir試料ではSTMによって観察された形状と、3次元アトムプローブにおけるイオンの検出密度の均一/不均一の違いを結びつけることに成功した。また TiO_2 試料においては、原子ステップとテラス構造の観察に成功した。この結果は目標としている3次元アトムプローブによるSTM観察試料面の作製が可能であることを示しており、この手法の実現可能性を示す結果である。

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

精度保証付き線形回帰原子間ポテンシャルの構築について

多数の第一原理計算を機械学習することで高精度な原子間ポテンシャルを構築する手法が提案され、第一原理計算の実行が困難である大規模構造への応用が期待されている。しかし、大規模構造に対して精度が保証できるポテンシャルを構築することは容易ではない。その理由として、そもそも大規模構造の計算コストが高いため、予測精度の評価が容易ではないことや、大規模構造を学習データとして使えないことなどが挙げられる。本研究では、大規模構造の一例として対称傾角粒界を選び、その第一原理計算を実施することなしに予測精度を見積もる方法を提案した。さらに、粒界構造に対する精度の向上を目指した学習データの構築選択方法についての検討を行った。

まず原子間ポテンシャル構築のための学習データに含まれる構造群と、対象となる粒界構造との類似度を定量化するために、Mahalanobis 距離を導入し、Mahalanobis 距離と予測精度との関係を調べた。その結果 Mahalanobis 距離が大きいほど、予測誤差は大きくなり、Mahalanobis 距離が予測精度の指標の一つとなり得ることが分かった。また、Mahalanobis 距離が予測精度の指標となる結果を踏まえ、粒界構造に対する精度を向上させる方法として、計算コストが低いかつ予測対象である粒界構造との Mahalanobis 距離が小さな構造を学習させることを試みた。その結果、粒界構造に対する予測精度を向上させることができた。

六方晶 Ti 変形双晶における原子のダイナミクスの第一原理計算

Ti を代表とする HCP 金属は、結晶構造の異方性が高くすべり変形が容易でないため、通常の変形条件で変形双晶が発生しやすいと考えられている。しかし、その双晶変形の機構について詳細には理解されていない。特に、原子のダイナミクスのなどの微視的な観点からの双晶変形の理解はすすんでいない。本研究では、原子のダイナミクスの観点から双晶変形を理解するために、六方晶 Ti の $\{11\bar{2}\}$ 変形双晶を対象として、第一原理分子動力学 (MD) 計算および調和近似に基づく第一原理フォノン計算を用いて双晶界面付近の原子のダイナミクスの解析を行った。

フォノン計算の結果から 0K で動的安定である双晶モデル構造が、600K の MD 計算では稀に $\langle\bar{1}\bar{1}26\rangle$ へ界面近傍の原子が集団移動し結果的に双晶界面が移動することが分かった。移動する界面を座標の基準として

用いるために adaptive common neighbor analysis を用いて、原子の配位環境から界面位置を決定した。 $\langle\bar{1}\bar{1}26\rangle$ に直交する他の 2 方向に対しては、フォノン計算と MD 計算で得た原子の二乗平均平方根変位量がほぼ同等になることが分かった。一方で、 $\langle\bar{1}\bar{1}26\rangle$ への原子の変位量は MD 計算の結果の方が有意に大きい。さらに、界面からおよそ 2Å 程度離れたあたりで $\langle\bar{1}\bar{1}26\rangle$ の原子の変位量は特に大きくなることが分かった。また、MD 計算における原子の変位の歪度を $\langle\bar{1}\bar{1}26\rangle$ に対して計算した結果、界面近傍の原子で変位の歪度が $\langle\bar{1}\bar{1}26\rangle$ に有意に大きいことが分かった。このことから、双晶界面近傍では $\langle\bar{1}\bar{1}26\rangle$ へ非等方的な原子の集団移動が発生しやすい原子結合環境となっていると考えられる。

第一原理計算とベイズ最適化法を用いた効率的な安定化合物予測

本研究では、ベイズ最適化法を用いて低エネルギーの結晶構造を逐次的に選択する手法を開発し、既知の酸化物 (BeO, MgO, CaO, SrO, BaO, ZnO, CdO, SnO, PbO) において安定な結晶構造がどの程度効率的に予測されるかを検討した。まず、ICSD に登録のある 164 種のプロトタイプ型結晶構造を初期構造として与え、第一原理計算により緩和した構造と形成エネルギーをデータとして使用した。結晶構造記述子としては、①部分動径分布関数とガウス関数との内積値、②ボンドオーダーパラメーターを用いた。さらに、配位原子が影響を与える度合いとしてボロノイ多面体を用いて「配位度」を定義した。この③配位度を考慮したボンドオーダーパラメーターも記述子として用いた。これらの記述子を用いて、ベイズ最適化法により最低の形成エネルギーを持つ構造を探索した。

その結果、いずれの記述子を用いても、ベイズ最適化法によればランダムサンプリングに比べて最安定構造探索を効率的に行うことができたが、特に配位度を考慮したボンドオーダーパラメーターを記述子とした場合に、最安定構造探索に必要なデータ数を大幅に削減することができた。配位原子との原子間距離の情報と角度情報を同時に取り込むことで結晶構造の特徴を適切に取り込むことができ、形成エネルギーと相関のある記述子を作成できたからであると考えられる。したがって、配位度を考慮したボンドオーダーパラメーターを用いて結晶構造を記述し、ベイズ最適化法により最安定構造を探索することで効率的な安定化合物予測が可能であることが分かった。

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

MoSi₂/Mo₅Si₃ 共晶合金の界面構造・微細組織と力学特性に及ぼす添加元素の影響

高融点 (2020 °C)、優れた耐酸化性を有する金属間化合物 MoSi₂ は Ni 基超合金に替わる超高温構造材料の候補材として注目されている。この材料の高温強度、室温韌性を補う観点から他の金属間化合物との複相化が検討されており、本研究では 1900 °C と高い共晶温度を有する MoSi₂/Mo₅Si₃ 共晶合金に着目した。特に共晶組織の最適化と力学特性の改善の観点から添加元素の影響を調査した。実験の結果、Ta 添加材では格子ミスフィットが増大すると共に組織が微細化しており、その両方が破壊韌性値の上昇に寄与することが分かった。これは、格子ミスフィットの増大により界面剥離が促進され、さらに組織が微細化することによって剥離しやすい界面密度が上昇し、クラックパスが延長されるためだと考えられる。また 1400 °C での耐クリープ特性を調べた所、高応力域では二元系合金のクリープ強度を上回ったが、低応力域では下回っていた。これは Ta の添加により低応力側でクリープ機構が転位クリープから拡散クリープに変化したためだと推測される。さらに Ta+B 複合添加材では、組織の微細化や格子ミスフィットの増大の効果以上に破壊韌性値の上昇が確認できた。3D アトムプローブ解析から界面に B が偏析していることを確認しており、これが界面結合を弱めていると考えられる。

Fe-Zn 系金属間化合物 Γ 及び δ_{1p} 相の塑性変形

優れた耐食性及び溶接性、塗装性を有する合金化溶融亜鉛めっき鋼板は地鉄基板から順に Γ (Fe₃Zn₁₀-bcc), Γ_1 (Fe₁₁Zn₄₀-fcc), δ_{1k} (FeZn₇-hexagonal), δ_{1p} (Fe₁₃Zn₁₂₆-hexagonal), ζ (FeZn₁₃-base centered monoclinic) 相という 5 種類の Fe-Zn 系金属間化合物相が形成される。なかでも主相とされる δ_{1k}/δ_{1p} 相は変形能に優れると考えられているが詳細な力学特性は未だ不明である。そこで本研究ではマイクロピラー圧縮試験によりめっき

構成相の変形機構を明らかにすることを目的とした。その結果 δ_{1p} 相は底面すべり系及び柱面すべり系が活動し、 δ_{1k} 相は底面すべり系が活動する事が分かった。各すべり系の転位組織観察及び剛体球モデルに基づく重なり体積、 γ -surface 計算の結果、Fe-Zn 系金属間化合物相は Fe 濃度が低いときは結晶構造に特有の Fe 原子を中心とし Zn 原子を頂点にもつ多面体 (Fe@Zn₁₂20 面体) が切断されないような原子面においてすべり系は活動するものの、Fe 濃度が上がるにつれて Fe@Zn₁₂20 面体を切断する必要があるため変形応力抵抗が大きくなることが分かった。

η -Fe₂Al₅ 相の結晶構造解析と塑性変形挙動

溶融 Al めっき鋼板に代表される Fe/Al 間の界面反応では様々な金属間化合物が生成するが、なかでも優先的に成長するとされる Fe₂Al₅ 相については複数の高次規則相の存在が示唆されており、これらの機械特性、もとより結晶構造についても十分なコンセンサスを得るには至っていない。本研究では様々な組成、温度にて均質化した Fe₂Al₅ 相の結晶構造の解析を行い、さらにマイクロピラー圧縮試験により同相の変形機構を明らかにすることを目的とした。その結果、既報の Fe₂Al₅ 相の結晶構造 (η : *Cmcm*) に加えて、その結晶構造を母構造とする 3 つの超格子構造 (η' , η'' , η''') がそれぞれ異なる組成・温度域にて安定に存在することを確認した。それらの超格子構造の詳細な結晶構造解析の結果、全て Fe₂Al₅ 相に存在する不規則サイト (*c* 軸 chain) の規則化によるものであり、骨格となる framework の原子配列は一切変化しないことがわかった。また一般に脆性な金属間化合物であると認識されている Fe₂Al₅ 相であるが、単結晶マイクロピラー圧縮試験よりミクロンサイズの試料では一定の塑性変形能を有することがわかった。

教授 乾 晴行

准教授 岸田 恭輔

助 教 岡本 範彦 (2017年6月東北大学へ異動)

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

希薄 Mg-Y 合金の室温力学特性に及ぼす 結晶粒径と Y 添加量の影響

Mg に微量の Y を添加することで延性が向上することが報告されている。一方、結晶粒微細化も Mg の強度を損なうことなく延性を改善することができる。本研究では HPT 法による巨大ひずみ加工と焼鈍処理により純 Mg と Mg-Y 合金の超微細粒組織を作製し、Mg の力学特性に及ぼす結晶粒径と Y 添加の影響を調べた。粗大粒純 Mg と Mg-Y 合金では転位すべりと双晶変形が主な変形機構であることがわかった。超微細粒純 Mg では粒界すべりによる大きな塑性変形が生じた。Y の添加により粒界すべりが抑制されたが、Mg-Y 合金微細粒材においては、Y 添加により非底面 (a+c) すべりの活動が促進され、加工硬化率の増大を通じて高い強度と十分な延性が得られることを見出した。

8Ni-0.1C マルテンサイト鋼の水素脆性における 破壊様式と負荷応力の関係

高強度マルテンサイト鋼の典型的な水素脆性破壊様式として粒界破壊と擬へき開破壊が報告されている。本研究では、マルテンサイト鋼の水素脆性破壊様式に及ぼす負荷応力および水素量の影響を調べた。種々の負荷応力で定荷重引張試験を行った結果、水素量の増加とともに水素脆性破壊が発生する時間が減少したが、破面には違いが見られなかった。また、負荷応力の増大によって水素脆性破壊はより早期に発生したが、水素脆性破面における擬へき開破壊の割合が増加する傾向が見られた。こうしたことから、水素量は破壊様式にほとんど影響を及ぼさないことと、水素脆性における破壊様式は主に負荷応力によって支配されていると結論づけることができた。FRASTA 法により水素脆性破壊挙動を調べ、負荷応力の増大とともにき裂の伝ば過程における破壊様式が粒界破壊から擬へき開破壊へ遷移することを明らかにした。

中 Mn 鋼の加工熱処理に伴う組織形成過程の その場中性子線解析

第三世代 Advanced High Strength Steel (AHSS) として期待される中 Mn 鋼は、残留オーステナイトの変形誘起マルテンサイト変態による TRIP 効果を利用して優れた力学特性を有することが知られている。本研究では中 Mn 鋼である Fe-5Mn-2Si-0.1C において、オーステナイト+フェライト二相域で加工熱処理を行い、組織・相変化を組織観察および J-PARC での加工熱処理中その場中性子線回折によって評価した。高温圧縮と等温保持によってオーステナイト逆変態が大きく促進されること、加工温度の上昇に伴い逆変態オーステナイトの体積分率が増加するが、水冷後マルテンサイト変態するオーステナイトは増加することがわかった。オーステナイトの安定性には、Mn の濃化とオーステナイト結晶粒径の微細化が大きな影響を与えることが示唆された。

Si 添加高 Mn オーステナイト鋼の塑性変形と 破壊に及ぼす結晶粒微細化の影響

典型的な高 Mn オーステナイト鋼である Fe-22Mn-0.6C は、高強度と高延性を示すが、FCC 構造のため降伏強度が低い。本研究では、Si 添加と結晶粒微細化による強化機構に注目し、それらが機械特性に及ぼす影響を調べた。高圧ねじり試験と焼鈍処理を施すことにより、粒径 $1\mu\text{m}$ 以下の超微細粒を含む様々な結晶粒径を有する 22Mn-0.6C-3Si 鋼を作製した。粗大粒材には引張破面に階段状の脆性破面が見られたが、その面積率は結晶粒微細化に伴って減少した。また、引張変形により生じる変形誘起 ϵ マルテンサイトの体積分率は結晶粒微細化に伴って減少した。き裂の発生挙動を調べた結果、階段状脆性破面は ϵ マルテンサイトが衝突した粒界における破壊に対応しており、結晶粒微細化によって ϵ マルテンサイト変態が抑制され、強度と延性が同時に増加することが明らかとなった。

24Ni-0.3C 準安定オーステナイト鋼の 加工硬化挙動に及ぼす粒径の影響

24Ni-0.3C 準安定オーステナイト鋼は結晶粒微細化と変形誘起マルテンサイト変態による TRIP 効果を組み合わせることで優れた強度-延性バランスを示すことが報告されている。本研究では優れた力学特性を生み出す大きな加工硬化に着目し、引張変形に伴う組織・相変化を詳細に調べた。変形誘起マルテンサイト変態は結晶粒微細化により抑制され、加工硬化能が低下することがわかった。一方、J-PARC での引張変形その場中性子線回折の結果、マルテンサイトとオーステナイト間には、変形の適合性を満たすために内部応力が生じていることを見出した。内部応力は結晶粒微細化に伴って増加し、それによって加工硬化率が增大することを明らかにした。

FCC 構造を有する High/Medium Entropy Alloy の 摩擦応力と Hall-Petch 関係に及ぼす構成元素の影響

High entropy alloy (HEA) とは 5 種類以上の元素を等原子量ずつ混ぜ合わせた合金であるが、最近では 4 種類以下の元素から合構成されるほぼ等原子量の組成を有する Medium entropy alloy (MEA) も含め、次世代の新材料として注目されている。本研究では、FCC 構造を持つ CrFeCoNiCu 五元素 HEA とその派生系である MEA の超微細粒組織を HPT 法による巨大ひずみ加工と焼鈍処理により作製し、摩擦応力と Hall-Petch 関係に及ぼす構成元素の影響を評価した。引張試験の結果、本研究で用いた合金の中で $\text{Co}_{20}(\text{CrNi})_{80}$ が最も大きな強度と摩擦応力を示すことが明らかとなった。この実験結果は mean field Labusch model によって計算された結果と一致し、FCC 構造を持つ MEA の強度は構成原子の配列によって生じる格子ひずみを用いて予測できることが示唆された。

教授 辻 伸泰
准教授 柴田 暁伸
助教 白 玉 (BAI YU, バイ イ)
ESISM 特定助教 朴 明駿 (2017年11月着任)

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****放射光 X 線イメージングを用いた
時間分解・その場観察手法の開発**

可視光に対して不透明である金属材料の凝固・結晶成長を実証的に理解するために、新しい観察手法の開発が必須である。そこで、本研究室では、SPring-8などの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、凝固現象の基盤的な理解と工学的応用を目指している。これまでに、透過イメージングによる二次元観察により、鉄鋼材料、Ni 基超合金、アルミニウム合金、マグネシウム合金の凝固現象の観察を実施してきた。

平成29年度は、X 線イメージングと蛍光 X 線分析を組み合わせた手法により、凝固・相変態における相平衡関係（溶質分配）を定量的に測定する手法を実現した。従来手法に比べて、この手法は効率的かつ系統的に測定できる特長があり、Ni 基超合金などの相平衡関係を系統的に明らかにした。また、材料組織形成、特に凝固・結晶成長の観察に応用できる時間分解トモグラフィー（4D-CT）が実現できれば、三次元の組織形成だけでなく結晶方位分布の測定も可能になる。従来の透過イメージングに比べて、三次元で組織を定量的に観察・測定できるので、獲得できる情報が飛躍的に向上すると期待される。そこで、放射光の特長とこれまでのイメージング技術を活かし、Al 合金などで時間分解能 1s 以下での凝固組織形成の三次元観察を実現した。他の合金系においてもこの手法を用いた観察が実現しつつある。

金属材料の組織形成機構の解明と応用

鉄鋼、鋳鉄、Ni 基超合金は実用材料として利用されているが、1000℃以上の温度域における凝固現象は実証的に理解されているとは言い難い。観察に基づいた実証的知見から基盤的な学理を構築し、組織・欠陥

を制御する手法の実現を目指して研究を行っている。

例えば、鉄鋼材料の基本である Fe-C 系では、これまで凝固時に液相と δ 相 (BCC) から γ 相 (FCC) が生成する包晶凝固 ($L + \delta \rightarrow \gamma$) が起こると考えられてきた。しかし、時間分解・その場観察により、従来の「包晶反応」がほとんど選択されず、 δ 相の固相変態により γ 相が形成されることが明らかになった。さらに、この変態を通じた組織形成が、オーステナイト組織の形成や鑄造欠陥に関係することも明らかになりつつある。また、鋳鉄においても力学特性に影響するグラファイトの形状を支配する因子を時間分解・その場観察を用いて明らかにしている。Ni 基超合金や軽金属においても、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。

凝固組織形成のダイナミクス**(固液共存体の変形挙動)**

凝固過程で必ず生じる固液共存状態は、液体や固体とは違った特有の力学特性を発現する。この特異な現象が、固相粒子スケールの固相間の相互作用に起因していることを時間分解・その場観察により実証した。さらに、工学的課題である割れ、偏析などの欠陥形成にもこの機構が寄与していることが明らかになった。本研究室では、材料組織スケールでの観察に基づいて、固液共存体の変形機構の解明に取り組んでいる。さらに、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、モデルの妥当性、工学的課題（割れや偏析）の解決を目指した応用を行っている。例えば、提案した数値モデルを用いた数値計算により固液共存体に特有のせん断に対する不安定性、せん断の局在化などを再現できることを明らかにした。今後も、時間分解・その場観察と物理モデルの構築を連携させて、工学的課題を解決するスキームの構築を目指す。

教授 安田 秀幸

助教 森下 浩平(平成30年5月1日付九州大学に異動)

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

Pb を含む M 型フェライトの単結晶育成と磁性

M 型フェライトは Fe^{3+} が磁性を担う一軸異方性の強いフェリ磁性体であり、その中でも M 型 Sr フェライトは永久磁石材料として広く用いられている。また近年では Ba フェライトなどを中心にマルチフェロイック現象やスカーミオン格子形成など新奇な物性も発見されており、基礎・応用の両観点から精力的に研究されている物質群である。本研究では、Pb を含む M 型フェライト $\text{PbFe}_6\text{Ga}_6\text{O}_{19}$ で最近報告された磁化の温度依存性から、スカーミオン格子形成の可能性を見出し、純良な単結晶育成と詳細な磁化測定によりそれを調べた。

磁化の温度依存性や交流磁化率の周波数依存性などから、 $T_c = 315\text{K}$ 近傍の温度で極めて遅いスピンドYNAMIX や磁化の極小を見出し、スカーミオン格子相のようなトポロジカル相の出現を示唆する結果を得た。また低温では零磁場冷却磁化と磁場中冷却磁化が大きく離れる振舞を見出し、この物質でリエントラントスピングラス転移が起こっていることを示唆する結果を得た。強磁性からスピングラスへのリエントラント転移とスカーミオンのようなトポロジカルなスピントクスチャの出現に密接な関係があることは最近 Ni-Mn などでも報告されており、非常に興味深い結果である。

カゴメ格子磁性体 Co シャンダイトにおけるディラック電子系の可能性

磁性遷移金属元素の Co がカゴメ格子を組む層状化合物 Co シャンダイト $\text{Co}_3\text{Sn}_{2-x}\text{In}_x\text{S}_2$ はカゴメ格子の幾何学に起因した特異な磁性や伝導現象の発見が期待できる物質である。本研究では $\text{Co}_3\text{Sn}_{2-x}\text{In}_x\text{S}_2$ の単結晶試料を育成し、その電気伝導特性を詳細に調べた。その結果、 $x=1$ 近傍では電気抵抗が log 発散的な振舞を示すなど特異な半金属的振舞が見出された。また、詳細なホール抵抗測定の結果、正常ホール係数から極めてキャリア数が少なくなっており、温度低下とともに減少すること、異常ホール係数の電気伝導度に対するスケールリングが通常の磁性体とは異なっていることなども観測された。これらの結果はこの化合物でディラック電子系が実現している可能性を示唆している。

磁性クラスタ化合物 $\text{GaMo}_4\text{S}_4\text{Te}_4$ の絶縁体強磁性

少数の原子の集団（クラスタ）が周期的に配列した

構造を持つ化合物はクラスタ化合物と呼ばれており、中でも遷移金属原子がクラスタを形成しその分子軌道に不対電子を持つ化合物は磁性金属クラスタ化合物と呼ばれている。近年では、磁性金属クラスタ化合物の GaV_4S_8 や GaMo_4S_8 において磁気スキルミオンが観測され注目されている。この系でのスキルミオンの発現には低温でのヤーンテラー構造相転移が重要な役割を担っていると考えられている。一方で Te を導入した GaMo_4Se_8 で構造相転移が消失するという報告があり、構造と磁性の相関に興味を持たれ、本研究では、 GaMo_4S_8 の Te 置換化合物を作製しその物性を評価した。

試料作製の結果、 GaMo_4S_8 に Te は固溶せず、定比化合物 $\text{GaMo}_4\text{S}_4\text{Te}_4$ が得られることがわかった。構造解析の結果、Te 原子は GaTe_4 クラスタを形成し、それらが磁性クラスタ Mo_4S_4 を媒介する秩序化合物であることが判明した。またこの化合物には低温での構造相転移は存在しない。磁気測定の結果、 GaMo_4S_8 が螺旋磁性的な振舞いを示す一方で、 $\text{GaMo}_4\text{S}_4\text{Te}_4$ では磁気相関が強磁性的であり、 $T_c = 11\text{K}$ で強磁性転移することが明らかとなった。電気抵抗測定では VRH 伝導を示し、 $\text{GaMo}_4\text{S}_4\text{Te}_4$ は稀な強磁性絶縁体であることがわかった。

磁性材料の微視的評価に向けた広帯域無同調強磁性 NMR 装置の開発

近年、永久磁石を始めとする磁性材料の開発競争が激化しており、次世代の高性能製品を開発するための指導原理が求められている。そのためにはベースとなる物質の微視的磁性の詳細な情報が不可欠である。磁性体を構成する原子の原子核位置での内部磁場を直接観測できる強磁性 NMR は分解能やサイト選択性に優れ、微視的磁性評価法として有用性が高いが、従来の周波数同調型の NMR 装置による測定では、膨大な実験時間と専門的な測定技術が要求されることから、磁性材料開発の場では積極的には用いられて来なかった。

本研究では、汎用化の方策として、装置や測定法が著しく簡便になる無同調式 NMR に着目した。パルス NMR 法を用い、1 回の測定毎に周波数を変化させながら高速で積算する手法を導入することで、感度の劣化を相対的に多数回の積算で補う工夫を行なった。それにより、これまでは固定していたパラメーターも変化させることができる様になり、信号強度の周波数・振動磁場強度 2 次元マップの全自動測定に成功した。

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****疎水性アニオンを含む濃厚水溶液からの
HCP 金属電析**

HCP 金属のカドミウム (Cd), 亜鉛 (Zn) は航空機部品, 自動車鋼板への防食めっきに用いられ, *c* 軸配向性の増大により耐食性が増加する。本研究では, 疎水性アニオンを含む HCP 金属塩の溶液濃厚化に伴う自由水減少によってもたらされる水素結合網の破壊と水和構造の変化が, 電析挙動におよぼす影響を調べた。

Cd, Zn とともに疎水性アニオンの使用で, 析出過電圧が増大したにもかかわらず, *c* 軸配向性が増大し, 平滑性も増した。また, 親水性アニオン金属塩に疎水性アニオン金属塩を少量添加した系でも, 配向性や表面形態が著しく変化した。疎水性アニオンの添加剤作用機構として, 電極表面への吸着もしくは電極近傍への濃化の発現が示唆された。

ジグライム浴を用いたアルミニウム平滑電析

アルミニウム (Al) は軽量で資源も豊富にあり, 自然酸化皮膜による優れた耐食性などの利点から, 新しい電気めっき材料や次世代二次電池の負極材候補として注目されている。しかし, Al 電析に用いられてきた電析浴である有機溶媒, 高温溶融塩, イオン液体は揮発性やコストに問題がある。

当研究室では, 溶媒として沸点が 162℃ と室温において安全でコストも安いジグライム (G2) に注目し, AlCl₃/G2 浴から室温における金属 Al の電析に成功している。しかし, 析出物表面が多孔質で平滑でなかった。本研究は AlCl₃/G2 浴を用いた金属 Al の平滑電析に成功した。

様々な条件を鋭意検討した結果, モル比 AlCl₃:G2 = 1:5 の組成をもつジグライム浴にジメチルアミン塩酸塩を 5 mg dm⁻³ 添加し, 電位 -1V vs. Al での予備電解を 12 時間 × 3 回行ったのちに, PR 法 (Periodic reverse current plating) によるパルス電析を行った。矩形波パルス電析では定電位電析と同じく針状の粒子からなる黒色外観を示したが, クラックが生じないという利点が得られた。さらに対称三角波パルス電析では球状の粒子からなる, 金属光沢に準ずる灰色外観を得た。定電位→矩形波パルス→三角波パルスとなるに従って拡散層が薄くなるため, 粒子形状も変化したと考えられる。このように印加波形の変化によって Al 電析物の表面形状と外観の制御に成功した。

銅電解精製における異常析出現象

銅製錬の最終工程は電解プロセスである。銅電解は水素発生を伴わないため理想的な電析電流効率率は 100% になるはずであるが, 実際の電流効率は約 95% と低い。電析過程でカソード表面に形成するコブ状の異常析出による, 対面のアノードへの接触 (ショート) が原因である。本研究では, コブ状析出のメカニズム解明の足がかりとして, 実験室規模でのコブ状析出物

の成長挙動を調べた。

浮遊アノードスライムの付着が異常析出の引き金となっているかを調べた。カソード表面にアノードスライムを模擬した物質 (銀または絶縁性樹脂) を埋め込んだ状態から電析を開始した結果, いずれの場合も銅は平滑に電析された。よって, 不純物の存在自体が異常析出の引き金なのではない。

次に, ある高さの銅突起を付与した状態から電析を始め, 40 時間の電析における突起の成長挙動を調べた。その結果, コブ状析出発生初期の 5 mm までの突起高さでは成長は遅く, 突起高さが 5 mm を超えるとデンドライト成長が発現し, 成長速度が指数関数的に増大した。しかし, 実験室規模の電析ではショートするために必要な約 25 mm の高さまで成長し得ない成長速度であった。

また, 極板面積を大きくしても突起の成長が促進され, デンドライト成長が発現する突起高さの閾値も小さくなった。実操業での極板面積は実験室規模に比べて約 300 倍の大きさであるため, 電流集中がより加速されてショートに至ると考察した。

Pt 粒子触媒による Si ヘリカルポア形成とその応用

らせん状微細構造は電子・光学デバイスへの利用の観点から興味深い。しかし, 現在の作製手法は工程が複雑で, より簡便な手法が必要である。本研究では, Pt 触媒粒子を担持した Si をエッチング液に浸漬する操作のみでヘリカルポアを作製できる Si の金属触媒エッチングに着目した。しかし, ヘリカルポア形成のメカニズムが不明である。そこで形状制御した Pt 粒子を用いてヘリカルポアを作製し Pt 粒子の形状が与える要因を調査した。

無電解めっきにより作製した Pt 粒子を触媒に Si をエッチングした試料では, Pt 触媒が回転運動をしながら Si へと沈み込みヘリカルポアが形成された。孔壁には筋状のエッチング痕がみられたことから, Pt 触媒は常に同じ面を Si に接触させて沈み込んでいることが明らかになった。リソグラフィーにより形状制御した Pt 粒子を用いたところ, Pt 触媒が Si 内部に沈み込んだ後, Si 表面へ戻っていた。このとき, ヘリカルポアの湾曲部と同じような形状のポアが形成されており, 無電解めっき試料と同様に Pt 触媒粒子が同じ面を Si に接触させてエッチングが起きたと考えられる。Pt 触媒の形状によって Si のエッチング挙動に大きな差が確認できたことから, Pt 触媒形状の制御がヘリカルポア形状を制御につながると示唆された。

また応用に向けた検討として, ヘリカルポアをテンプレートに用いたらせん状微細構造の作製も試みた。導電性高分子や金属の電析析出を行った試料では, ポア内部にヘリカルポアの形状を転写した析出物が確認できた。このことから, 本手法が新たならせん状微細構造形成法として期待できることがわかった。

教授 邑瀬 邦明
准教授 深見 一弘
助教 北田 敦
助教 豊田 智史

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

平滑アルミニウムと高分子材料の表面化学活性化接合

当研究室では、真空紫外 (VUV) 光照射による表面改質を利用して、シクロオレフィンポリマー (COP) 同士の接着剤フリー接合や、金属箔やシリコン基板と COP の異種材料接合に成功した。特に原子スケールで平滑な表面を持つシリコン基板では室温接合に成功した。本研究では、平滑なアルミニウム箔へ各種 SAM を成膜し、基板の粗さ、SAM の鎖長、末端官能基が光活性化接合に与える影響を調査した。

平滑アルミニウム箔 (表面粗さ: 約 10 nm) を洗浄した後、各ホスホン酸前駆体の溶液に浸漬し、 CH_3 基終端化 SAM、 COOH 基終端化 SAM、及び OH 基終端化 SAM を成膜した。各条件で表面処理したアルミニウムを VUV 光照射した COP と貼り合わせ、熱圧着した。

各接合試料の剥離試験を行い、接合可能な温度範囲および接合強度を比較した。その結果、表面粗さが小さい平滑アルミニウム箔に鎖長の短い親水基終端化 SAM を被覆すると、これまでより低温の 70°C でも接合可能となった。また、 COOH と OH 基終端化表面の接合可能温度範囲が同じ程度であったことから、末端官能基の種類に依存した接着性の変化は小さいことが示唆された。

LTO/イオン液体界面の電気化学 FM-AFM 解析

スピネル型チタン酸リチウム ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$; LTO) はリチウムイオン電池負極材料の一種であり、充放電のサイクル特性に優れ、すでに一部実用化されている。LTO は Li^+ イオン挿入により、結晶格子のサイズがほとんど変化しない無歪材料と呼ばれている。しかし、表面では一般的に表面緩和・再構成によりバルクとは異なる結晶構造を取り得る。 Li^+ イオン脱挿入は電極/電解液界面でのみ起こることを考慮すると、その高分解能 in situ 分析は学術・実用両面において重要であると言える。本研究では、電気化学環境下において原子間力顕微鏡 (AFM) により LTO/イオン液体を分析することで、 Li^+ イオン脱挿入過程における界面構造変化の直接可視化を目的とした。

AFM には当研究室で開発を進めてきた qPlus センサを用いた FM-AFM を使用した。LTO (111) 単結晶膜を Li 塩添加 (濃度 1%) イオン液体電解液中で電圧を印加して、 Li^+ イオンを挿入させる充電過程で AFM 観察を行なった。

Li^+ イオン挿入前後で得られた LTO (111) の Li 塩添加イオン液体中における AFM 表面形状像から、充電前後で LTO 由来の原子ステップが維持されることが分かった。この結果は LTO の優れたサイクル特性の要因の一つとして考えられる。充電後の LTO (111) 面の電解液中 FM-AFM 像において、原子スケールに配

列した輝点が確認できた。充電前とは輝点間隔が異なるものの、結晶面の原子配列と一致した。充電前後で LTO (111) 表面構造が原子レベルで変化することが示唆された。

水素終端化シリコンへの分子混合 SAM の作製

自己集積化単分子膜 (Self-Assembled Monolayer; SAM) はメモリーやセンサー応用が期待されている。本研究では、水素終端化シリコン表面への SAM 成膜時における溶媒の選択が表面状態に及ぼす影響について調査し、その結果をもとに分子混合 SAM の作製を行った。分子混合 SAM の作製により、特定の分子の被覆率や吸着構造の制御が可能になる。

成膜する分子には、電気化学活性を持つフェロセン誘導体の 11-Ferrocenyl-1-Undecanethiol (FUT) と、電気化学的に不活性なアルカンチオール 1-Octanethiol (C_8SH) を用いた。水素終端化 Si (111) 基板を各種溶媒から作製した吸着前駆体溶液に浸漬し、光励起法を用いて SAM の成膜を行った。

XPS 測定結果から decane を溶媒として用いた場合のみ、FUT と C_8SH が高密度に基板表面へ成膜できることが示唆された。次に、decane を溶媒に用いて、これらの混合溶液を用いて SAM を作製した。溶液中の FUT の濃度比が減少したことに対応して FUT の吸着量の減少が示唆された。また、FUT & C_8SH 混合 SAM の AFM 表面形状像において、水素終端化シリコン (111) 基板に由来するステップ-テラス構造が確認できたことから、均一な分子混合 SAM の成膜が示唆された。

酸化グラフェンの液体炭素源アシスト VUV 光還元

グラフェン系二次元材料の大量生産方法として当研究室では真空紫外 (VUV) 光を用いた GO の還元を報告してきた。本研究では還元処理した GO (rGO) のさらなる還元度向上、構造回復を目指すべく、GO 還元時に外部から分子を供給する手法を試みた。具体的には分子の供給源として 100 nm の厚みを持つ反応液薄膜を GO 上に作製し、これに VUV 光を照射することで従来の光還元に加え、光活性化した反応液による還元を試みた。

GO を担持した Si 基板上に反応液 (decane+ethanol) を滴下し、セルで封入した。このセルによって形成した 100 nm 厚の反応液膜を介して VUV 光を照射した。

XPS スペクトルでは $\text{C}1s$ の酸素含有基由来のピークが低減したことが確認でき、GO の光還元が確認された。ラマンスペクトル測定より、光照射前後で G ピーク位置がシフトしたことから、 sp^2 ドメインの回復が示唆された。液相 VUV 光還元した rGO の電気伝導特性は高真空中で VUV 光還元した試料よりも向上した。これは外部分子が sp^2 ドメインを回復させ、キャリアの移動経路形成に寄与した可能性が示唆された。

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。

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。例えば、黄銅鉱の酸化溶解反応について、結晶性の差や不純物の影響の調査、および溶解機構の微視的解明に取り組んでいる。2017年度の取り組みにより、硫化鉱物の合成法について基礎的な知見を得ることができた。また、亜鉛の電解採取について、アルカリ浴中でのNiアノードの利用によるセル電圧低減や電析物の組織形成のメカニズム解明に取り組んでいる。これまでの取り組みにより、酸素発生時の過電圧と理論分解電圧の低減によって電解採取における電力消費を3割程度削減できる可能性が示された。

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 講座を開講した。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。

第1期は、7社より計14名の受講者を迎えて2017年秋に開始した。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YouTube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。2018年秋には第2期生の教育プログラムを開始する。今後、より多くの受講生を受け入れるなど、さらに発展した取り組みとなる予定である。

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、様々な非鉄金属が製造されている。また、これらの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、国内製錬所における非鉄金属の製造方法とその高い技術、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。例えば、2017年夏には、高校生向け実験教室「金・銀・銅を作ろう！」を京都大学にて開催した。本イベントには、京都市立京都工芸院高等学校から15名の学生が参加し、「銅の電解精製」「金の溶媒抽出」「灰吹法による金銀の定量分析」の実習を通じて、非鉄金属の製造法や元素の分離精製技術を学んだ。

教授(兼任) 宇田 哲也
特定准教授 谷ノ内勇樹
特定助教 岸本 章宏



図1 寄附講座の活動

**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 (2018年8月現在)

博士課程学生 5名 (内留学生タイ, 台湾, インドネシア, カンボジアから各1名), 修士課程が16名 (内留学生 インドネシアから2名, 中国から1名, タイへ留学中1名), 学部学生4名にスタッフ5名を加えて総勢30名 (内女性5名). 10月にはタイから短期留学生在が2名滞在し, 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

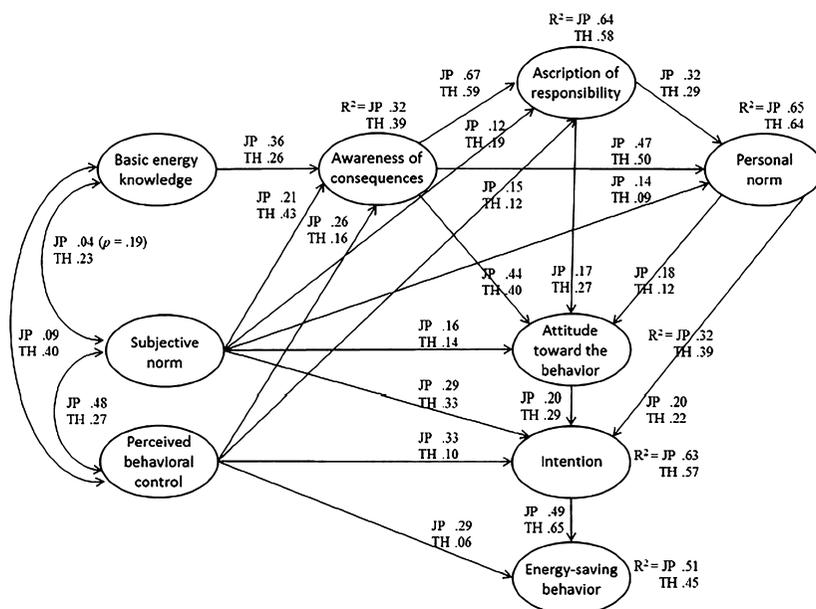
2018年3月に学位を取得した秋津裕君の研究について紹介する.

1) 日本の中学生のエネルギーリテラシーの現況を調査し, 米国 (ニューヨーク州) の中学生と比較した. 日本の中学生のエネルギー関連知識は低く, 学校教育によるエネルギーリテラシーへの影響の可能性が低い一方で, 家族の態度や行動が生徒のエネルギーリテラシーに寄与していることが示唆された. 日米比較では, 一般的な知識では日本は米国よりも高いが, 関心や自己有効感は米国の方が高く, 関心・態度と行動との相関も米国の方が強いことから, 日本の中学生の知識の高さは, エネルギーリテラシーにおける関心・態度, 行動への

の寄与が低いことが明らかとなった.

- 2) 計画的行動理論と価値信念規範理論を統合した, 9つの構成要素 (エネルギーの基礎的知識, 重要性認知 (危機感), 責任感, 個人的規範, 行動に対する態度, 主観的規範, 行動統制可能性, 行動意図, 省エネ行動) からなるエネルギーリテラシー構造モデルを提案し, このモデル検証と併せて調整変数によるモデルへの効果を調べた.
- 3) 提案したエネルギーリテラシー構造モデルの適用可能性と, 異なる属性におけるエネルギーリテラシー構造の相違を調べるために, タイと日本の中学生の比較をおこなった (図). 日本はタイよりも「エネルギーの基礎的知識」は高いものの, 「責任感」, 「個人的規範」, 「行動に対する態度」, 「主観的規範」, 「行動統制可能性」, 「行動意図」, 「省エネ行動」はタイが有意に高い結果となった. また日本は学年進行にしたがって, 知識以外の構成要素が低下する傾向が明らかとなった. 一方タイは, 日本よりも周囲の期待 (プレッシャー) に応えようとする「主観的規範」が高く, このことがエネルギーリテラシー構造にも影響していることが明らかとなった.

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



エネルギーリテラシー構造モデル

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****有機薄膜太陽電池あるいは有機金属ハライドペロブスカイト型太陽電池の界面制御**

有機薄膜太陽電池あるいは有機金属ハライドペロブスカイト型太陽電池は、既存のシリコン系太陽電池と対比して部材の重量が格段に軽量であることから、太陽光発電が可能な新しいプリンタブル電子デバイスの一つとして注目されており、簡便かつ安価で作製できるプロセスの開発が多く研究者らによって進められている。さらに、光電変換効率向上やデバイスの長寿命化が検討され、現在では、単位重量当たりの発電量に関して、市場の90数%を占めるシリコン系太陽電池の十数倍に至るものまで得られるようになった。当研究分野においても、有機薄膜太陽電池あるいは有機金属ハライドペロブスカイト型太陽電池における活性層あるいは電子輸送層用の金属硫化物または硫化物からなる新材料及びそれらの薄膜を作製するためのプロセスを開発すると共に、薄膜デバイスの種々の有機材料と無機材料の接合を巧みに工夫することを検討してきた。すなわち、有機薄膜太陽電池におけるバルクヘテロ接合の作製において、溶液の対流と揮発性有機成分の自然蒸発現象を伴うメナスカス方式の溶液塗布法を採用し、p型の導電性ポリマーやn型のフラーレンの結晶化を促すトリクロロベンゼンを共存させたところ、p型とn型の適度なミクロ相分離により活性層のホール移動度が向上すると共に、活性層表面粗さが減少して電荷収集効率が改善され、それらの相乗効果により光電変換特性を増大させることができた。また、有機金属ハライドペロブスカイト型太陽電池の電子輸送層として酸化チタンを上述のメナスカス方式の溶液塗布法で成膜する際に、直径4~6nmの均質に分散したAgInS₂量子ドットを添加すると、電子輸送層の電子移動度が増大すると共に、金属硫化物量子ドットから有機金属ハライドペロブスカイト層へのダウンコンバージョンによる光電流発生効率の増大が観測され、最高値で17%の光電変換効率を達成した。さらに有機金属ハライドペロブスカイト型太陽電池のガラス封止を行い、室温暗所下で保存したところ、変換効率を損なうことなく200日以上安定に作動することを確認し、金属硫化物量子ドットの添加による長寿命化が実現できた。

偏光フィルターあるいは波長変換材料への応用を指向した有機色素とらせんポリマーを含む電界紡糸ナノファイバーの作製と分光スペクトル特性評価

らせん構造を持つアニオン性のヒアルロン酸と、カ

チオン性ピレンまたはカチオン性ポルフィリン誘導体を混合し、ポリエチレンオキシドと共に電界紡糸を行ってナノファイバーを作製した。直径400nm前後の均質なナノファイバーが得られ、これらのナノファイバーは、ピレンやポルフィリンの吸収に由来する可視領域に大きな円偏光二色性を観測した。ナノファイバーを基板上で一方向に固定化すると、円偏光二色性の角度依存性が認められたことから、直線偏光または複屈折と真の円偏光二色性の総和として見かけの偏光特性が増大することを示した。ヒアルロン酸とピレン及びポルフィリン、あるいはヒアルロン酸とピレン及びフラーレンを、ポリエチレンオキシドと共に電界紡糸により作製した有機色素含有ナノファイバーに関して、ピレンからポルフィリンあるいはピレンからフラーレンへの蛍光共鳴エネルギー移動を検討した。ナノファイバー中にピレンとポルフィリンが共存すると、ピレンエキシマーに帰属される発光スペクトルが消光してポルフィリン由来の発光ピークが現れ、蛍光共鳴エネルギー移動効率96%と見積もられた。一方、ピレンとフラーレンの場合はピレンエキシマーに帰属される発光スペクトルの消光のみが観測され、フラーレン由来の発光ピークは確認できなかったものの、消光から見積もられる蛍光共鳴エネルギー移動効率は93%であり、いずれの場合も色素を電界紡糸により数百ナノメートルの空間に閉じ込めることによって高い蛍光共鳴エネルギー移動効率が見出された。

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とともに、ハイパーラマン散乱、高次の過程の観測等により、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。多様な構造・機能相関のみられるペロブスカイト型の、無機および有機-無機ハイブリッド化合物における、振動モード励起と特定フォノン励起による物性の発現メカニズムの解明のため、ホウ素添加ダイヤモンド(BDD)、SrTiO₃(STO)と有機金属ハライドペロブスカイト(MAPbI₃)を対象とした研究を行っている。

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

非水溶媒からのアルミニウムめっき

アルミニウムの製膜技術として、非水溶媒からのアルミニウム電析について研究を行っている。アルミニウムは、水溶液からは電析できないが、有機溶媒、無機溶融塩、イオン液体といった非水溶媒を電解浴として用いることで電析が可能である。当研究室では、これまで、分子性有機溶媒であるジメチルスルホンを用いたアルミニウム電析について研究を行い、110℃程度の低温で、緻密で平滑なアルミニウム膜を電析する条件を確立するとともに、光沢アルミニウムめっき被膜およびポーラスアルミニウム層の形成にも成功している。

また、イオン液体浴を用い、アルミニウム-タングステン合金の電析にも取り組んでいる。1-エチル-3-メチルイミダゾリウムクロリド・塩化アルミニウムイオン液体を基本浴とし、タングステンイオン源として、+II 価のタングステン塩を用いることで、高タングステン濃度のアルミニウム-タングステン合金からなる緻密な電析膜が得られることを明らかにした。これらの電析膜は高い耐食性を有しているだけでなく、高硬度・低ヤング率の機械的特性を有しており、優れた耐磨耗性も期待できる。

水溶液プロセスによる半導体製膜

化学浴析出法に代表される水溶液中での化学反応を利用した各種半導体材料の製造プロセスの開発を行っている。常温・常圧下で行われる水溶液プロセスは、低エネルギー消費型のプロセスと言える。基板上に溶液を定常的に供給しながら基板のみを加熱することができる反応装置（フローリアクター）を用い、反応溶液の濃度、pH および供給速度を精密に制御することで、高品質な半導体膜の形成を目指している。

ZnO は約 3.4eV のバンドギャップを持ち、励起子束縛エネルギーが大きいので、光学素子への応用が期待されている。そこで、ZnO の温度による溶解度差を利用した水溶液プロセスによって p 型 GaN 基板上へのヘテロエピタキシャル成長を試みた。反応溶液の pH、添加剤濃度、GaN 基板の表面状態を制御することで、GaN 基板上へエピタキシャル成長した緻密な ZnO 膜を得られることが明らかとなった。得られた、ZnO 膜は n 型伝導性を示し、p 型 GaN 基板との接合で整流特性を示した。

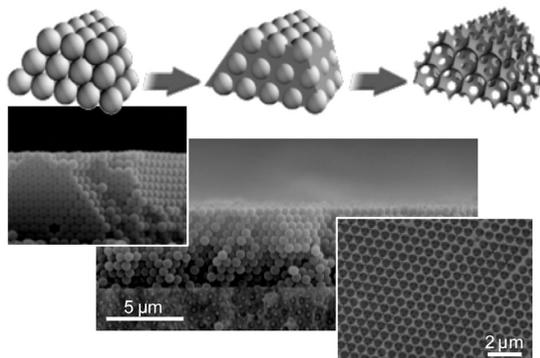
ミスト CVD 法による薄膜成長

溶液を原料としながらも気相成長と同様の成長が可能なミスト CVD 法による半導体材料の製膜にも取り組んでいる。この方法は、金属原料を含む有機化合物の水溶液やアルコール溶液を超音波によって霧状にし、加熱された反応炉内における熱分解反応によって製膜を行うものである。このミスト CVD 法を用いて、レアメタルや毒性元素を用いない次世代の太陽電池の光吸収層の成長に取り組んできた。さらに、このミスト CVD 法を、これまでの酸化物・硫化物薄膜から、金属単体や炭化物・有機無機ハイブリッドペロブスカイト太陽電池材料などへの応用展開を行っている。

太陽電池の光吸収層として期待される p 型の Cu_2O と $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ については、ミスト CVD 法で高い結晶性と電気特性を有する膜を実現した。今後、デバイスへの応用が期待できる。また、Cu や Ni の金属単体、 Mo_2C や $\beta\text{-WC}$ の炭化物の成膜を実現した。ペロブスカイト太陽電池材料では、 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ や電荷輸送層となる NiO をミスト CVD 法で作製し、6.1% の変換効率を有する太陽電池を実現した。

三次元フォトニック結晶の作製

フォトニック結晶は、内部に屈折率の周期的分布をもつ人工結晶で、光の伝搬や発生を自在に制御できる可能性をもつ新しい光材料である。オプトエレクトロニクス・デバイスへの応用を目指し、光学特性だけでなく、電気的特性にも優れたフォトニック結晶を得る作製プロセスの開発に取り組んでいる。その作製法の一つとして、コロイド結晶をテンプレートとして用い、この空隙を ZnO で充填した後、テンプレートを溶解除去することで、コロイド結晶の反転構造をもつ ZnO からなる三次元フォトニック結晶を得るプロセスの開発を行っている。



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
プロセス熱化学分野

**CaO-SiO₂-Al₂O₃不均一系酸化物の
サルファイドキャパシティ**

1. 緒言

製鋼工程におけるスラグ-溶銑間の硫黄に関する反応は次式で表される。



式(1)は吸熱反応であるため、高温、高塩基度、低酸素ポテンシャル下で脱硫反応は進行する。本研究では不均一系酸化物の硫黄吸収能に着目したが、これは脱硫工程での温度低下に伴う復硫反応や硫黄を含有する酸化物相からの固相晶出を解析する上で基礎的なデータと成り得る。本研究ではCaO-SiO₂-Al₂O₃系酸化物の固液共存域を含む組成において、比較的低温での硫黄吸収能を測定した。

2. 実験方法

均一液体スラグへのS₂ガス溶解反応は次式で表される。



式(2)の平衡定数K(2)から、スラグの硫黄吸収能の指標であるSulfide capacity, C_Sは次式で定義される¹⁾。

$$C_S \equiv (mass\%S)_{slag} \cdot (P_{O_2}/P_{S_2})^{1/2} = K(2) \cdot a_O^{2-} / f_S^{2-} \quad \dots\dots(3)$$

CaO/SiO₂の質量比を38/42で一定とし、Al₂O₃濃度(mass%Al₂O₃)を変更した試料を用いた。Ar+H₂+CO₂+SO₂混合ガスを炉内に流通させ、1573K~1673Kの一定温度でスラグと平衡させた。一定時間保持した後急冷し、スラグ中硫黄濃度(mass%S)_{slag}を測定した。制御したガス分圧P_{O₂}, P_{S₂}及び(mass%S)_{slag}より、式(3)からC_Sが算出できる。本研究では固液共存域を含むスラグを実験対象としたため、(mass%S)_{slag}にはバルク濃度を用いた。

3. 実験結果・考察

(mass%Al₂O₃)=20の試料は実験温度範囲で均一液相となった。この組成でのC_Sと温度の関係を図1に示す。図には組成に近いCaO-SiO₂-Al₂O₃系の文献値も示した¹⁻⁴⁾。温度が低下するとC_Sは低下した。本実験で得られたC_Sを高温側へ外挿した値と比較すると、同一組成の文献値はよく一致し、塩基度が若干高いスラグの文献値は高くなったことから、本実験値は文献値と整合していたと言える。また1773K以上でC_Sと光学的塩基度Aの関係が式(4)で提案されている⁵⁾。

$$\log C_S = (22690 - 54640A)/T + 43.6A - 25.2 \quad \dots\dots(4)$$

本実験組成のA(=0.641)を代入した回帰式を図中に破線で示すが、低温でのC_Sの傾向も再現できている

と言える。

C_Sと(mass%Al₂O₃)の関係を図2に示す。均一液相ではAl₂O₃濃度が高いほどスラグの塩基度が低下し、C_Sは低下した。(mass%Al₂O₃)=0の試料は固相CaSiO₃であり、ほとんど硫黄を吸収しなかった。固液共存域ではAl₂O₃濃度が上昇すると液相が増加し、C_Sは高くなった。液相の組成が変化しないとき、液相の割合をθ、固相と液相のSulfide capacityをそれぞれC_S(S), C_S(L)とすると、固液共存域でのC_Sは次式で表されることが分かった。

$$C_S = C_S(S) \times (1 - \theta) + C_S(L) \times \theta \quad \dots\dots(5)$$

1623Kから1573Kに低下するとき、(mass%Al₂O₃)=20では均一液相のままであるが、(mass%Al₂O₃)=15では均一液相から固液共存となり、固相晶出に伴ってC_Sの低下幅が大きくなることが示唆された。

参考文献

- 1) F.D. Richardson and C.J.B. Fincham; *J. Iron and Steel Inst.*, 178(1954), 4. 2) M.R. Kalyanram et. al.; *J. Iron Steel Inst.*, 195(1960), 58. 3) M. Goernerup and O. Wijk; *Scand. J. Metall.*, 25(1996), 103. 4) E. Drakaliysky et. al.; *Can. Metall. Quarterly*, 36(1997), 115. 5) D.J. Sosinsky and I.D. Somerville; *Metall. Trans. B*, 17B(1986), 331.

准教授 長谷川将克

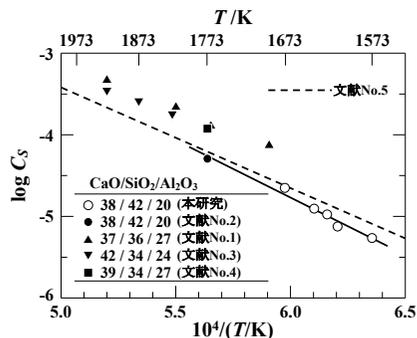


図1 均一液相における Sulfide capacity の常用対数と温度の逆数の関係

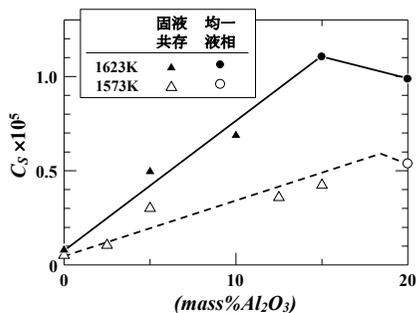


図2 Sulfide capacity とスラグ中 Al₂O₃ 濃度の関係

エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻

エネルギー材料科学講座
エネルギー応用基礎学分野

圧延再結晶集合組織金属テープへの希土類系酸化物超伝導物質のエピタキシャル成長技術

希土類 (RE) 系酸化物超伝導物質 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ は安価な液体窒素 (沸点: 77.3 K) 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銅板や $\{100\}<001>$ 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, 大幅な低価格化を実現できる可能性をもつ $\{110\}<001>$ 集合組織を有する珪素銅板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。

現在, 配向性の高い珪素銅板を用いた基材上の様々な中間層形成に取り組んでいる。図 1 に高配向性 $\{110\}<001>$ 集合組織珪素銅板上に作製した $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{YSZ}$ 膜の $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 層 (YBCO 層) の (103) 極点図を示す。中間層が望ましい方位 ($(100)_{\text{YSZ}}//(\text{110})_{\text{Fe}}$ かつ $[\text{110}]_{\text{YSZ}}//[\text{001}]_{\text{Fe}}$) に成長することで得られる超伝導層の 2 軸配向粒由来の 4 回対称性のスポットが得られた。この結果より, 高配向電磁銅板上で超伝導 YBCO 薄膜が望ましい方向に高い配向度で 2 軸配向していることが確認できた。しかし, 組織観察から, 珪素銅板中に含まれる Si が酸化した層が珪素銅板表面に形成されることがわかっており, この課題の解決に向けて研究を進めている。

磁場を用いた希土類系酸化物超伝導物質の三次元結晶配列技術

異方的結晶構造を有する機能性材料では, その特性が結晶方位に強く依存することが多い。そのため, 結晶方位制御を適切に行うことによって機能性の向上が期待できる。しかし, バルク単結晶, 薄膜単結晶などで使われるエピタキシャル成長技術以外の結晶方位を揃える技術はそれほど多くない。当研究室では新しい結晶配向制御法である変調磁場を使った「2軸結晶配向」に関する研究にも取り組んでいる。

変調磁場の一つである間欠回転磁場は, 180 度ごとに静止と回転を繰り返す磁場である。静止工程で磁化

容易軸が, 回転工程で磁化困難軸が配向し 2 軸が固定されることで, 結果的に 3 結晶軸を揃えた結晶配列が「室温で」実現する。また, 永久磁石の 100~1000 倍の磁力を発生する 10 テスラ級超伝導電磁石を用いることで, 通常非磁性と呼ばれる弱磁性物質も対象物質となりうる。

図 2 に, 双晶構造をもち磁場配向に不利とされる $\text{DyBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (Dy123) 高温超伝導物質の粉末をエポキシ樹脂中に分散させ, 室温で 1 テスラの変調磁場下で配向させた Dy123 粉末配向体試料の (103) 極点図を示す。明瞭な 4 回対称性を有するスポットが得られ, 双晶を含み結晶粒レベルで磁気異方性が消失する可能性のある結晶粒子でも 2 軸結晶配向が実現できることがわかった。また, この配向効果は 1 テスラの磁場下で得られたものであり, 永久磁石レベルで三次元結晶配向が可能であることを示唆している。今後, 粒径制御や磁場印加条件の最適化などを進め, 原理証明レベルから高温超伝導線材や機能性セラミックスの新しい製造プロセスの確立に向けて研究開発を進める。

教授 土井 俊哉
准教授 堀井 滋

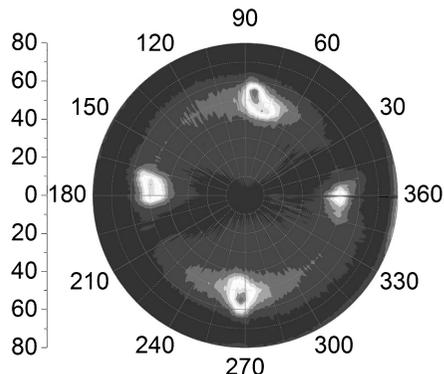


図 1 YBCO/ Y_2O_3 /YSZ/珪素銅板の YBCO 層の (103) 極点図。

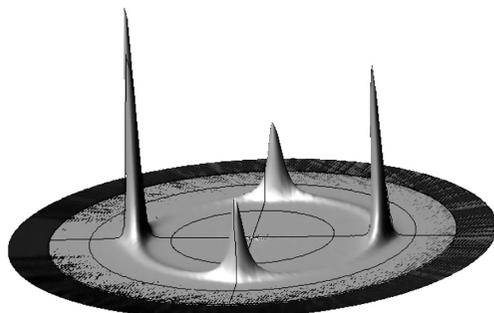


図 2 Dy123 粉末配向体の (103) 極点図測定結果。

平成30年度水曜会大会

- 日 時 平成30年6月2日(土) 11:00~16:00
- 会 場 京都大学吉田キャンパス工学部物理系校舎

平成30年度水曜会大会が6月2日(土)に開催されました。京都大学本部構内の工学部物理系校舎にて午前に研究室紹介のポスター展示、午後から懇親会、総会、特別講演会が行われました。正会員と学生の両方を合わせて、約90名の方々にご参加いただきました。

工学部物理系校舎2階廊下にて各研究室紹介のポスター展示と質疑応答が約1時間行われた後、同校舎214・215セミナー室にて懇親会が開催されました。邑瀬邦明教授の司会のもと、河合潤会長の挨拶の後、村上陽太郎先生に乾杯のご発声をいただきました。しばらく歓談の時間が続いた後に、新任・昇任教員からの自己紹介もあり、和気藹々とした雰囲気の中、平藤哲司教授の閉会の辞とともに盛会のうちに閉会となりました。その後、物理系校舎の前で記念撮影が行われました。

総会は、315講義室に会場を移して行われました。まず、三ヶ田均教授の司会のもと河合会長より平成29年度の事業報告がありました。次に、小池克明教授による会計報告、安田秀幸教授からの監査報告がなされ、いずれも承認されました。続いて次期役員推挙により、新会長に平藤哲司教授が選出された後、新会長が挨拶され、抱負などを述べられました。その後、同会場で以下2件の特別講演が行われました。

「高機能アルミニウム材料の展望」

株式会社UACJ 取締役兼専務執行役員(R&Dセンター 所長) 渋江 和久 氏

「凡人の本懐」

元 新日本製鐵株式会社 副社長(技術開発本部長) 二村 文友 氏

来年度は、平成31年6月1日(土)に京都大学国際イノベーション棟西館5階(シンポジウムホール、ホワイエ)にて開催される予定です。奮ってのご参加をお待ちしております。

平成29年度 水曜会会計報告

平成30年 3月31日現在

(単位：円)

収 入		支 出	
前年度繰越金	5,779,558	会誌印刷代（製版・封筒・郵送料込）	
会 費	4,014,000	24巻10号	1,403,594
会誌広告掲載料（製版代込）		水曜会大会経費（29年6月3日）	1,114,992
24巻10号	1,043,100	編集委員会経費（ホームページ代含む）	87,372
名簿売上	10,500	会誌原稿料	20,000
会誌売上	6,536	通 信 費（切手、後納郵便料）	37,576
水曜会大会懇親会費	220,000	会費等振込手数料	120,842
預 金 利 息	241	事務人件費	992,000
物理工学科同窓会会費	181,409	PC・プリンタ・封筒・文具代等	13,392
地球工学科資源工学コース水曜会会費	339,880	物理工学科スポーツ大会援助	98,900
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	32,570
		小 計	3,921,238
		次年度への繰越金	7,679,986
		内訳 銀行普通預金	5,132,745
		銀行定期預金	2,500,000
		郵便振替預金	20,290
		手 持 現 金	26,951
収 入 合 計	11,601,224	支 出 合 計	11,601,224

上記の通り会計報告いたします。

平成30年 6月2日

会 計 幹 事 小 池 克 明

以上の通り相違ございません。

会計監事(監査) 辻 伸 泰

平成30年度 水曜会后援ソフトボール大会

●日程 平成30年5月～6月

●会場 京都御苑今出川グラウンド

今年度のソフトボール大会も昨年度に続き水曜会から後援していただけるということで非常に盛りあがる大会となりました。大会の結果は以下のようになりました。下記の結果より優勝は今谷研、準優勝は杉村研、3位は邑瀬研になりました。

梅雨の時期の開催とあって試合延期が多くありましたが、参加者様のご協力により円滑に大会を進行できたことを幹事として心より御礼申し上げます。

スポーツを通して研究室のメンバーの絆が深まり、他の研究室の学生と交流を持つことで刺激を受けあったと思います。この機会をもとに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。

(古川舜也 記)

リーグA

順位	チーム	勝ち点	得失点	総得点
1	邑瀬研	6	14	30
2	教員チーム	3	9	30
3	河合研	3	7	33
4	安田研	0	-30	4

リーグB

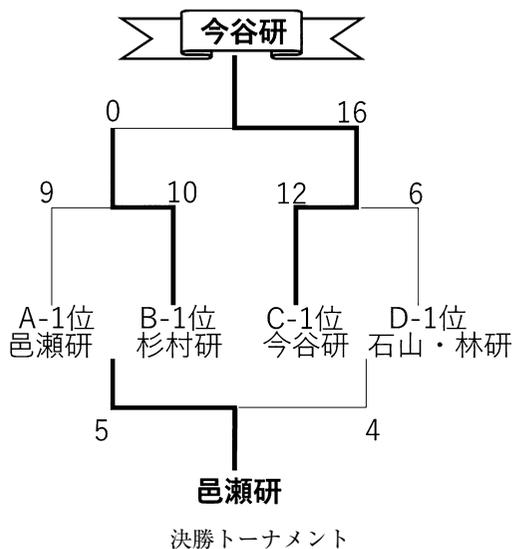
順位	チーム	勝ち点	得失点	総得点
1	杉村研	6	24	30
2	田中研	3	4	18
3	乾研	3	0	18
4	辻研	0	-28	6

リーグC

順位	チーム	勝ち点	得失点	総得点
1	今谷研	6	22	29
2	平藤研	6	8	19
3	ナノ構造研	0	-14	10
4	土井・長谷川研	0	-16	8

リーグD

順位	チーム	勝ち点	得失点	総得点
1	石山・林研	6	6	7
2	中村研	3	0	10
3	宇田研	3	-4	9
4	石原研	0	-2	4



大会の様子

平成29年度 水曜会後援フットサル大会

- 日時 平成29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、水曜会からの後援もあり、どの試合も楽しく熱い試合になり、大盛り上がりでの大会となりました。また、研究室間の良い交流の場になったと感じています。今年度は15チー

ムが参加し、大会結果は以下のようになりました。優勝は平藤研究室、準優勝は石原研究室、3位は乾研究室となりました。また、優勝チームの平藤研究室がサッカーボールを寄贈くださったことをここで感謝いたします。

来年度の春にはソフトボール大会があり、こちらの大会も水曜会に支援していただけるようです。去年に引き続き、水曜会所属の研究室の教師陣で組まれた特別チームも参戦されるようなので、大会が待ち遠しいです。

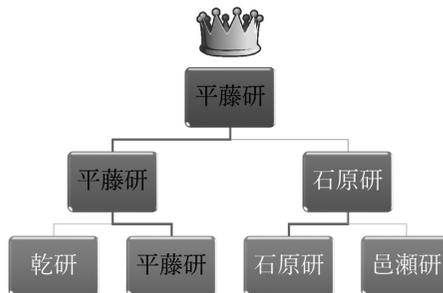
予選リーグ、決勝トーナメント結果

C組	ナノ研	松原研	田中研	石原研
ナノ研		○1-0	●0-4	△1-1
松原研	●0-1		△2-2	●1-3
田中研	○4-0	△2-2		●0-1
石原研	△1-1	○3-1	○1-0	

A組	河合研	長谷川研	石山研	乾研
河合研		○3-1	●3-4	△3-3
長谷川研	●1-3		△0-0	●0-1
石山研	○4-3	△0-0		●1-4
乾研	△3-3	○1-0	○4-1	

B組	先端研	土井研	平藤研
先端研		○3-1	●1-5
土井研	●1-3		●0-1
平藤研	○5-1	○1-0	

D組	辻研	邑瀬研	杉村研	宇田研
辻研		●0-1	△1-1	○4-1
邑瀬研	○1-0		○1-0	△0-0
杉村研	△1-1	●0-1		○1-0
宇田研	●1-4	△0-0	●0-1	



フットサル大会の写真

会 員 消 息

資源工学昭和52卒同窓会 報告

私たちは、昭和48年（1973年）資源工学に入学しました。総勢36名、当時の講座は、地質鉱床学[港研]、探査工学[吉住研]、採鉱機械学[平松研]、開発工学[伊藤研]、精製工学[向井研]、加工設備学[小門研]の6つです。就職が決まった後に病気で亡くなり悲しい思いをした1名を除き、35名は（若干遅れた者もいましたが）、昭和52年に京大を卒業しました。

「昭和48年の第一次オイルショックを契機に高度成長期は終焉を迎えた」と言われます。ですが、私たちは（確かに就職での苦労はありましたが）、貧しいながらも楽しい大学という感じで、36名と先生方、先輩・後輩が一体で生活し、成長していったという印象が強くあります。

ということで41年目の写真です。卒業後、何回か同窓会は行われてきましたが、ここ数年は幹事を研究室持ち回りとし、趣向（酒肴）をこらして毎年のようにみなに声をかけています。今回は七夕の夜に東京駅八重洲口近くの薩摩料理屋に15名が集まりました。同じ仕事を続けている人、再就職した人、奥さん孝行の人、海外にはばたく人、教員、お役人、国の研究者、協会、民間、和尚さん・・・と同じ学科とは思えぬ広がりを持った35名になっています。平成の次の時代もみな笑顔が集まることを楽しみに、資源S52卒同窓会のご報告とします。

最後に、記事の掲載を快諾していただいた編集委員の方々に感謝するとともに、水曜会のますますのご発展をお祈りします。

（平成30年同窓会幹事 平松研一同）



東京駅八重洲口近くの路上にて（平成30年7月7日撮影）

1986年卒 同窓会開催@東京

1986年卒金属系同窓会が9月29日(土)に東京で開催されました。2年ごと定期的に京都と東京と交互に実施しているものです。いつもだと懇親会だけなのですが、今回は昼過ぎから京大東京オフィスにて勉強会を企画しました。まず最初に京都大学大学院工学研究科

先端材料機能学 安田教授、次に大阪大学工学研究科 ビジネスエンジニアリング 上西教授による特別講演を、その後は金属、電力・インフラ、通信・IT、自動車業界の研究所や現場の第一線で活躍されている同窓生が、世界を取巻く諸環境や問題について解説し、皆で活発な議論がなされました。約20名が懇親を深め「楽しく為になる同窓会」でした。



京大東京オフィスの会議室での安田教授の特別講演



八重洲での懇親会の様子

旧金属系建物玄関前の桜の再植樹について
—水曜会創立 120 周年記念事業として—

水曜会 会 長 平藤 哲司
副会長 宅田 裕彦

西日本豪雨，台風21号，北海道胆振東部地震と大きな災害が続きます。被災された皆様にお見舞い申し上げますとともに，一日も早く復旧されることを心よりお祈り申し上げます。

さて，9月4日の台風21号による強風のため，かつて主に金属系，一部資源系が使用しておりました建物（旧工学部6号館，現総合研究13号館）玄関前の桜の老木が倒壊しました。この桜は見事な景観を提供していましたが，無残な姿となりました（水曜会ホームページ（<http://www.suiyokwai.jp/>）に写真を掲載しています）。この桜を惜しんで，水曜会として何かできないかとの声が上がりました。

水曜会ホームページで，この桜に関する思い出などの情報提供および倒木の利用法についてのご提案をお願いしましたところ，下に引用します「旧金属系建物玄関前の桜の植樹」にありますように昭和44年度卒業の有志によって植樹されたことが明らかとなりました。昭和44年度卒業の方々から再植樹のご希望がありました，その案を頂戴して，水曜会創立120周年記念事業として，再植樹を行うことといたしました。

.....

旧金属系建物玄関前の桜の植樹

水曜会のホームページに掲載された，「旧金属系建物玄関前の桜・・・」の記事を同期生の連絡網の経由で知り，この桜についての情報をお求めとのことですので，植樹に関わった一人としてその経緯を説明させていただきます。

当時，昭和44年3月の金属系卒業生は，卒業アルバム委員会を作り，アルバム作成のために会費を集めましたが，アルバムの完成後に残余金が出ましたので，それで植樹しようということになりました。6号館の南側にあった生協の事務所の側に桜の木があったので「6号館の側にも桜を！」となり，委員会から依頼を受けて，小生の親戚の植木屋に頼んで植樹してもらいました。

アルバム委員会が大学当局に話をして植樹と場所の

了解をとりつけ，委員会の世話人の明智君，事務職員の方と小生が立ち会って植樹しました。卒業を目前にして始まった大学紛争の影響で卒業式の開催も危ぶまれる中，卒業記念植樹とはめずらしいと思われたのか，大学当局が立派な看板を作ってくれたのが印象に残っています。木製だったため，長い年月の間に朽ち果てたようです。

植樹のための穴を掘っていくと，土の中から薬品瓶やレンガのかけらなどが大量に出てきて，こんな場所で無事に育つだろうか心配したものでした。その後，立派に成長して長い間，多くの人々の目を楽しませてくれていたと伺い，植樹に関わった一人として喜びに堪えません。

自然災害のためとはいえ，来年の卒業50周年を目前に倒れてしまったのは誠に残念です。今回，倒れた桜を加工して後々まで記念品として残すことを，水曜会が計画して下さると伺い，心から喜んでいます。

（昭和44年入会 池内 建二）

.....

つきましては，水曜会員の皆様に，下記の通り寄附を募りたく，お願い申し上げます。集まった寄附金は，桜の再植樹に必要な経費，記念品の作製，その後の維持管理のための基金にあてさせていただきます。記念品といたしましては，保存しております倒木を利用して，コースターなどの木工品に水曜会の銘を入れ寄附者の皆様に贈呈する，寄附者名を記入したプレートを作製し桜に添えるなどの案が既に寄せられています。さらに良いアイデアがありましたら水曜会までお寄せください。

なお，植樹場所はエネルギー科学研究科の管理下であり，石原慶一研究科長（元水曜会長）の承認など事務手続き上の問題はなく，また倒木は既に撤去され，整地されており，植樹の準備は整っていることを申し添えます。

以上，何卒よろしくお願い申し上げます。

記

水曜会創立 120 周年記念事業

「旧金属系建物玄関前の桜の再植樹」寄附募集要項

1. 寄附金の使途

- (1) 桜の再植樹に必要な経費
- (2) 記念品の作製および送料・設置費用など
- (3) 桜の維持管理に必要な経費（基金とする）

2. 寄附対象者

水曜会員およびその関係者

3. 寄附金の額

1口3,000円とします。なお、金額の多寡にかかわらず、ありがたく承ります。

（領収書、寄附金控除に係わる証明書の発行はい
たしかねますので、ご容赦いただきますようお願いいたします）

4. 募集期間

植樹は新芽が開く前の平成31年春までに行う予定ですが、寄附はその後も継続して受け付けます。

5. 申込方法

水曜会誌送付時に同封の振込用紙をご利用ください。

そのほか、下記振込口座への振り込みも受け付けます。

振込依頼人情報として、**入会年・お名前**をご記入ください。

・郵便振替口座 01090-8-26568

口座名「水曜会」

・みずほ銀行 出町支店 普通預金 1242526

口座名「水曜会」

6. 問合せ先

水曜会事務局

〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学工学部
水曜会事務局 宛

E-mail : suiyokai@kumst.kyoto-u.ac.jp

寄附の案内は

水曜会ホームページ (<http://www.suiyokwai.jp/>)
にも掲載しております。水曜会誌が届かない会員も
多くいらっしゃいます。メール等で広くお声かけい
ただきますようお願い申し上げます。

以上



2018年9月6日撮影

会 員 通 信 欄

平成30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。

村上 陽太郎(冶金、昭17) この4月7日に満101才になりました。今のところ、元気に過しております。

三宅 敏夫(冶金・昭18) 恙なく毎日を過ごしております。

山本 剛男(冶金・昭20) 年の割にはなんとか生活しています。級友が減ったのは淋しい限り。

佐伯 博蔵(鉱山・昭21) 心身共に老化は進んでいますが、年齢相応(95才)には元気にしており、静かな規則正しい生活をしています。

寺井 士郎(冶金・昭22) なんとか元気に過して居ります。

三谷 文夫(鉱山・昭23) 平々凡々な毎日を過ごしております。気が向けば水彩画を少し楽しんでおります。天気の良い日には家のまわりを1時間ほど歩いております。戦争だけは絶対にしてはいけません。大正ロマンティズムの末期に生まれ、多くの学友を戦場で失った93歳の世捨人の遺言です。

松岡 秀夫(鉱山・昭27) 高齢のため、総会には出席出来ません。

西村 義雄(冶金・昭28) 平成最後の3月に満87歳を迎えました。父(秀雄)の享年86歳を越えたこととなります。いくつかの持病を抱えながらも、毎日をなんとか過せることに感謝しております。

清滝 昌三郎(鉱山・昭30) 相変らずの晴耕雨読。ゴルフ仲間は91才、87才の高齢乍らエージシュートを常に狙うツワモノばかり。元気を貰ってます。

米津 栄次郎(鉱山・昭31) 大阪府池田市役所 広報「いけだ」市民記者(14年目)、IPCCリポートコミュニケーター(3年目)

野村 悦二(冶金・昭31) 同期の懇親会は、開催が難しくなり、近隣のメンバーで、時々顔を合わせ、お互いの健康診断をしています。

南浦 基二(冶金・昭34) 週に1~2回のゴルフを楽しみ、目下は何とか元気にしています。併せて京大農学グランドから銀閣寺聖由哲学の道を通り南禅寺までの散歩も東京から毎年楽しんでます。

久賀 俊正(鉱山・昭35) 2018年1月、ぼうこう全摘出手術成功。2月退院。本日5月2日現在、元気に静

かに生きています。

柳沢 恒雄(鉱山・昭35) 1960年鉱山科卒の複素空間同期会は2017年5月19日に新横浜駅側で開催。出席は実空間より中納・小泉・萩原・松下・久賀・藤本・上村・米田・梅原・成瀬・伊藤・柳沢。虚空間より、中林・福中・小山・池見・北神・岡田※・西田。欠席は、灘谷・中村・楢原。

当日は、松下が前年、人食いバクテリアに襲われ、俄に気絶し、気付いたら、片足を切断除去。これで助かった体験談を拝聴。体内ホルモンバランスが原因不明で破れ、瞬間的に、普段無害の常在菌が活動したのが因らしい。

※岡田は卒業以来、特異点にあり、接続不能であったが、最近、神仏変換により、無次元から新帰元になり、虚空間の南無阿弥座標に投影された為に接続し、初出席となった。

山田 武弘(冶金・昭35) システムエンジニアのまねごとをしながら家業のサポートおよび自己のボケ防止に努めております。

豊島 由之助(鉱山・昭36) 元気にやっています。

恩田 怜(冶金・昭36) 田畑各1反を借りて有機農業に通って、米野菜自給。共同自費出版『銀のスプーン』36集を2017年6月に発行。37集の原稿を集めています。日本にも「緑の党」をと活動しています。

白井 勲(鉱山・昭37) 鉱山学科同期会を今年3月に一泊二日で京都で開催した。関東から6名、関西から3名の計9名が参加した。時計台下でランチ、吉田キャンパス散策のあと、鴨川のほとりで宿泊。大いに語り合い、楽しみ、再会を誓い合って散会した。

木畑 朝晴(金属・昭40) 加齢と共に心身上いろいろ不具合も出ていますが元気に過しています。比較的理理解しやすい各大学の市民講座やシニア大学、高齢者大学で時々講演を聞いてボケ防止対策をしています。

吉田 起國(金属・昭40) 水曜会のお手配お世話になります。

森 邦彦(冶金・昭41) 元気に好きなことをやって遊んでいます。

綿谷 英男(冶金・昭41) 盛会をお祈りしております。

地元機械メーカー（コマツ）の協力企業さんグループのもの作り技術支援をしております。

大園 智哉(金属・昭41) みちのく庄内の地に移住して五年。喜寿ともなると、春を迎える喜びもひとしおである。拙作、「この冬を共に事なく越えたるを謝しつつ春の朝の日を浴む」

白井 秀明(金属・昭41) 金加41年学部卒業の仲間は全員がメーリングリストでつながり、毎年、小旅行を。今年も22名がラ・トゥールで学術、健康、連れ合い、プチ終活(がけっぶち)を語り合いました。

山口 敏通(冶金・昭42) 全く久しぶりに会社現役時代の研究所で若手研究者と議論する機会がありました。テーマは「感性の高い材料とは」。現役時代とは視点の大きな変化を感じました。

岩坂 光富(金属・昭42) 元気に過しております。会員の皆様の御健勝をお祈り致します。

井上 修(資源・昭43) 元気に生きてます^^ スポーツ少々、福祉士少々してます。

田中 莊一(資源・昭43) 6月2日の水曜会大会には、仕事の調整がうまくつけば出席したいと思っています。黒木 正純(冶金・昭43) 夜中、自宅にて転倒。顔面打撲なるも白内障レンズ、脳に異常無し。3月26日の50年ぶりの京都での学科同窓会を欠席。残念無念。

寄る年波、皆様も年齢を覚悟・認識されたし。それでも生涯現役。人生100年也。

浅井 達雄(資源・昭44) 変わらず中京学院大学経営学部の教壇に立っています。7月から地元のロータリークラブの会長も務めます。

橋爪 清(資源・昭44) 一般社団法人火薬学会事務局に11年間勤務致しましたが、平成29年度に退職しました。

中野 幸紀(冶金・昭45) 平成28年(2016年)3月に関西学院大学総合政策学部教授を定年退職し、2年が経過しました。現在(平成30年5月)も、関西学院大学イノベーション研究センター客員研究員(非常勤・無給)、同国際学部非常勤講師などを務めております。

河野 健策(資源・昭46) 古希を迎えましたが、元気にしています。同じ研究室(小門研)の先輩の二村さんの特別講演を拝聴したいと思います。

萱原 徹男(資源・昭46) 退職後の活動に光明が見えて来ました。希望を持ち、感謝を思い、生きています。

内貴 治三(冶金・昭47) 早稲田大学の奈良美術の講座や武蔵野大学の古建築の講座を受けて、日本文化を学ぶと共に、ボケるのを防ごうとしております。地域のボランティア活動にも参加しております。現在のところ、近くの小学校の図工の授業補助をしております。また、退職した会社のOB会の幹事となって、会員の

訃報を担当しておりますが、会員の平均年齢が74歳となっており、やや忙しくなって来ております。

中山 正章(冶金・昭47) 昨年6月末に退職しました。現在は、晴耕雨読の生活を楽しんでおります。

水原 誠(冶金・昭47) 定年後、毎日元気な生活を送っています。

福井 康司(金属・昭48) まだ現役で働いています。海外出張も多く、世界中を飛び回っています。

朝倉 俊弘(資源・昭49) 定年退職して1年が経ちました。お蔭様で元気で忙しくしています。

柏井 善夫(資源・昭49) ウガンダで新ナイル橋の施工管理に従事しております。

田中 英年(金属系・昭49) 2015年9月末で神戸製鋼所を退職

小崎 明郎(金属系・昭50) 2017年3月31日をもって勤務先(一般財団法人 電力中央研究所)を定年退職致しました。

城戸 正憲(金属系・昭50) 元気に僧侶の生活を送っています。

永尾 卓己(金属系・昭51) 佐賀市にて故郷での第3の人生を始めました。

広沢 哲(金属系・昭51) 物質・材料研究機構で元素戦略磁性材料研究拠点の運営に従事。

堀井 康司(金属系・昭51) 研究科修了後40年を過ぎましたが、まだ今のところ会社勤めを続けております。どうぞよろしくお願い致します。

楠井 潤(金属系・昭51) 東洋アルミのパウダーペースト事業本部で、日仏米中印の5カ国においてアルミ粉、アルミペーストを製造販売しています。

石田 毅(資源・昭52) すみませんが、所要のため、今年度は欠席させていただきます。

小野木 孝二(金属系・昭52) 現在、岐阜校友会の代表幹事をしています。

稲岡 数磨(資源・昭53) 資源の同窓会にあわせて京都に参ります。特別講演の二村先輩分だけでも聴講いたしたく。

三崎 規生(金属系・昭53) 3月末をもってJFE条鋼を退職いたしました。

宮脇 新也(金属系・昭53) 今年4月に旧足立研究室の同窓会を聖護院御殿荘で開催し楽しいひとときを過ごせました。

元山 義郎(金属系・昭53) 昨年2017年8月より、前職を離れ、セカンドチャレンジを単身赴任で日々頑張っております。

竹士 伊知郎(金属系・昭54) 昨年、二度目のご奉公を退任。現在、顧問・嘱託、大学非常勤講師、団体指導講師など品質管理関連の仕事のかたわら執筆活動も

行っております。7月には「統計的方法の入門書」を上梓予定。縁がございましたら、よろしく願いいたします。

山名 壽(金属系・昭54) 60才を超えてなお忙しい毎日を過ごしています。自然に恵まれた富山に、またお越し下さい。

竹内 清一郎(金属系・昭54) 3月に退任して4月から無職になりました。

北村 公亮(資源・昭55) 2018年3月に定年退職、そのまま同じ職場で再雇用。嘱託の身分で週四日 大阪まで通勤生活を続けています。本当の定年は、この再雇用期間が終わる(早ければ)三年後となります。また、京都での生活では、町内会長のお役を務めることとなり、改めて京都と言う街の奥行きを知ることとなりました。まだまだ、年若き60歳です。ライフワークである陸上競技も、マスターズ M60 クラスで頑張っています。

須川 壮己(資源・昭55) 市場調査会社の企業グループであるインテジグループに勤務しております。4月からグループの(株)インテジアソシエイツに移りIT関係からは離れました。勤務場所は秋葉原です。元気にやっております。

竹川 禎信(金属系・昭55) 昨年(2017年)4月より大阪・京橋にある一般社団法人環境技術普及促進協会です仕事をしています。温室効果ガスの削減に取り組んでいます。

中川 泰仁(金属系・昭55) 多忙につき出席できませんが、盛会を祈ってます。

道本 龍彦(金属系・昭55) 2月で還暦を迎え、一応定年退職となりましたが、再雇用していただきました。仕事の内容は現役時代と実質的には何ら変わっていません。

平田 敏幸(資源・昭56) 昨年カナダ駐在(19年間)より帰国し、大変久しぶりに東京で勤務しています。

及川 初彦(金属系・昭56) 技術部門から営業部門に移り5年となります。東から西、東と転々としておりますが、毎日多忙な日々を過ごしております。今でも、時々、技術的な指導を実施しております。

柿本 誠三(金属系・昭56) 三年ほど前にシャープ株式会社を退社し、現在は、日産化学工業株式会社に勤務しております。東京に単身赴任です。

濱田 和一(金属系・昭56) 3月末で定年になりましたが、4月以降再雇用で新生日立金属 桶川工場(旧三菱マテリアル 桶川製作所)で働いています。

平藤 哲司(金属系・昭56) 町内会副会長として、地域活動にも貢献しています。

札軒 富美夫(金属系・昭56) 今回、初めて参加しま

す。先生方、諸先輩、同級生に会うのを楽しみにしております。

有元 真人(金属系・昭57) 初の水曜会大会出席です。水曜会の皆様にお会いできるのが楽しみです。トヨタ自動車燃料電池システム開発を担当しています。なんなりとご用命下さい。

吉留 良史(資源・昭58) 北海道で天然ガス(LNG)の営業をしています。まだまだ勉強することが多いです。関東を中心に電気・ガスの自由化が進んでいますが、北海道でもそろそろ活発になっていくのでしょうか。

竹内 正(金属系・昭58) レシプロエンジン車、HEV、PHEV、FCEV、B(バッテリー)EVと多数の原動機をタイミングよく開発してゆくのが大変な時代となりました。世界的にSUV(スペースユーティリティビークル)がよく売れるようになり、車系が様変わりしています。そんな中で開発に携われるのは幸せと考えるべきなのでしょうか?定年まであと少し、がんばります。

田中 晶(金属系・昭58) 東京高専に着任して8年経ちました。

小川 和久(資源・昭59) 平成30年4月1日付けで、鹿児島県高速道対策室から鹿児島県南薩地域振興局河川港湾課に異動しました。

岡 一宏(金属系・昭59) 2017年3月に三菱電機株式会社を退職し、同4月から新光電機株式会社(大阪府豊中市・蛍池)に転籍勤務しております。

澤井 隆(金属系・昭59) 昨年、新日鉄住金から日鉄住金テクノロジーに転籍し、7月より富津事業所長として、新日鉄住金技術開発本部の研究開発支援業務を統括しています。

木村 得敏(金属系・昭61) 本社勤務が4年目に入りました。

奥村 英之(金属系・昭62) 子煩惱な親として、また大学教員として、社会の一員として奮闘しております。

燕 関民(資源・昭63) 2018年1月を以って、(株)ジェイテクトを定年退職しました。都合により大会欠席といたしますが、ご盛会をお祈りいたします。

岡部 徹(金属系・昭63) 相も変わらずチタンをはじめとするレアメタルの製錬・リサイクルの研究を続けています。

高谷 正彦(資源・平1) 昨年7月に3年間の単身赴任を終え、関西に戻ってきました。

吉房 宏之(資源・平1) ご無沙汰しております。東京での勤務になって8年が過ぎました。

辻 伸泰(金属系・平1) 出張のため欠席します。

中森 英行(金属系・平1) 今年は同期同窓会を京大生協カンフォーラで行いたいと思います。

吉村 眞一(金属系・平1) 人口減とITの浸透から、

今更感がありますが銀行業界もいよいよ本格的なビジネスモデルの転換とリストラの時代を迎えたように思います。キャッシュレスがより進むと一等地の店舗は不要となり、マスリテールはネット上で完結するものとなるでしょう。これからはサービス・情報に対価を支払う時代を予想します。

中野 博志(資源・平2) 2017年4月1日付神鋼不動産株式会社に転籍。所属はプロパティマネージメント事業部賃貸営業部で主に建物の長期修繕計画等を行っていました。2018年4月1日付同社品質管理部に異動となり品質を始めました。とにかく楽しく頑張っています。

荻野 剛正(金属系・平4) 現在、大連(中国)に単身赴任中です。

西 孝文(資源・平7) CMOSイメージセンサーの開発を続けています。

磯部 誠(資源・平7) 大学卒業後は九州と関東の転勤を繰り返して、現在千葉県に在住しています。

武内 淳(資源・平7) 現在単身赴任で横浜在住です。新東名高速道路などの高速道路維持管理を担当しています。健康のためにスポーツジム通いを続けたいのですが、なかなか難しいです。

松井 雅樹(理工工・平11) 2016年10月に神戸大学大学院工学研究科応用化学専攻に着任致しました。

上山 正樹(理工工・平14) 変わりなく過ごしております。

松長 剛(地球工・平16) 後輩の成長が日々の喜びです。

酒井 明(元教官) 6月2日は残念ながら東京に行っておりますので、大会行事は欠席させていただきます。宜しくお願致します。

山岡 幸男(元教官) 54才から21年間、韓国のワイヤメーカーを技術指導していましたが、去年終了しました。「経済の発展した朝鮮王朝」のような国でびっくりする事ばかりで大変おもしろい経験でした。最近の「水かけ姫」事件はまさしく朝鮮王朝そのものです。

平成 30 年 3 月 卒 業 者 名 簿

旧 資 源 系

学部卒業者

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)		
田 村 怜	フォームEORにおけるAVOを用いたフォーム挙動把握の基礎的研究	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
木 村 巧 志	電磁波反射による媒質の複素比誘電率推定の基礎研究	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
須 田 みなみ	電磁波反射を用いた導電性媒質複素誘電率測定的基础研究	(株)NIPPO
地殻開発工学分野		
今 北 啓 一	室内水圧破砕において生じる Acoustic Emission の絶対規模推定	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
桶 谷 和 生	粘土を懸濁した水を用いた原位置岩盤透水試験	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
竹 田 浩 之	堆積岩のサブクリティカル亀裂進展におけるカルシウムイオンの影響	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
西 口 正 剛	砂岩におけるカルシウム化合物沈殿とその透水性への影響	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
松 田 幹 生	大深度金鉱山で発生したマグニチュード2の地震前後の微小破壊活動とその絶対規模推定	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		
河 原 純 平	ローレンツフォース渦電流探傷法についての実験的検討	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
高 木 麻 希	ニューラルネットワークを用いたコンクリート剥離欠陥検出	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
津 川 黎 史	光ファイバ熱伝導率計の密度計測への適用 - 計測の最適化のための数値計算 -	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
中 島 和 昌	誘電式水分計を用いた粒状ベントナイトの乾燥密度計測による充填挙動の解明	(株)巴コーポレーション
水 田 暉 人	オーディオケーブルによる長尺 TDR プロープの特性把握および模擬適用実験	PwC コンサルティング合同会社
地殻環境工学分野		
加 納 陸 生	光学センサ画像の鉱物指数と DEM リニアメントによる地熱兆候地の抽出	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
川 口 草 太	比抵抗・ヤング率に基づいた岩盤の浸透率推定	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
富 田 昇 平	伊平屋北海丘周辺の海底噴気域における熱水流動シミュレーション	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
弥 富 文 次	希ガス同位体と炭素同位体に基づくバンドン盆地周辺地域の地熱ガスの起源推定	(株)インフォバーン
山 田 勇 次	磁場変動を用いた地熱地域の地下比抵抗構造解析法の開発	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
地球資源システム分野		
井 上 陽 太	低塩分濃度水攻法における鉱物表面の濡れ性に及ぼすカチオンと塩濃度の効果	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
清 水 悠太郎	CCSに対する流体流動-力学連成解析シミュレーションにおける入力物性値の感度評価	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
永 田 翔	泥岩に適應できる ASR 法の主応力値測定手法の確立	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
深 田 紘 平	レジン分によって安定化された O/W エマルションの分散・凝集状態の分析および観察	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
三 浦 直 也	カッピングス試料を用いた非定常面熱源法による熱物性計測手法の開発	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
資源エネルギーシステム学分野		
大 杉 亮 輔	金属培養ディッシュへの通電による細胞剥離	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
堤 直 史	水圧破砕フラクチャーの可視化研究に用いる真三軸圧縮応力状態実験システムの構築	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
林 優 歩	ナノポーラス金と RGD モチーフの吸着挙動の第一原理計算	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
横 山 遼	ナノポーラス金によるコラーゲンの構造変化：第一原理解析	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		
達 川 昂 至	単純せん断における 5000系アルミ合金板の大ひずみ域での加工硬化特性	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
珍 坂 涼 太	加熱金属箔に衝突するポリマー水溶液液滴の冷却特性	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
月 原 啓 志	2段階負荷下における純チタン1種および2種材の異方硬化挙動	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
平 尾 卓 巳	高温移動体に衝突する棒状吹上水噴流の沸騰熱伝達	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		
加 藤 陸 至	孔隙充填型ハイドレートの生成挙動における基礎的研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
田 端 聖 久	硫砒銅鉱のマイクロバブル浮選における粒径の影響	住友商事(株)
富 田 裕 一	マイクロバブル浮選による亜鉛の除去	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
脇 坂 肇	海洋系大型藻類のメタン発酵に向けた適應性の研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)

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)		
田 中 智 章	多成分波形の CSP gather を用いた地下物性値の同時推定法の研究	アイシン・コムグループ(株)
谷 本 尚 希	多孔質体内を流動する流体と微小固体粒子の相互作用の研究	日本海工(株)
中 川 俊 樹	漏洩磁場検出による鋼材裏面探傷の研究	フジテック(株)
扶 瀬 聡 史	Full Waveform Inversion of Sonic Logging Data in Transversely Isotropic Media	シュルンベルジェ(株)
渡 辺 旺 智	流体流動に伴う微小地震波を利用した貯留層内部流体性状の推定可能性の研究	昭和シェル石油(株)
地殻開発工学分野		
藤 戸 航	瑞浪地点水圧破碎実験時に発生した AE の波形相関を利用した震源メカニズム推定	(株)日水コン
南 隆 太 郎	南アフリカ Mponeng 金鉱山地表下 3.3 km において発生した M2 の地震前後の超微小繰り返し地震活動	ヒワサキコンピュータシステム(株)
山 口 純 弥	南アフリカ Cooke 4 金鉱山地表下 1 km の断層上で観測された超微小繰り返し地震	コスモエネルギー開発(株)
計測評価工学分野		
春 山 裕 喜	レーザーアブレーション現象によるコンクリート剥離部の振動特性	(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構
吉 貞 祥 護	炭素繊維複合材ケーブルの電磁的非破壊検査手法に関する研究	近鉄グループホールディングス(株)
地殻環境工学分野		
大 田 優 介	海底熱水活動域岩石サンプルの物性と鉱物組成に関する研究	京都大学大学院工学研究科 (博士課程進学)
北 村 将 悟	地熱地帯でのガス化学と断裂系との関連性	東京海上日動火災保険
小 林 雄 樹	Optimization of renewable energy installation with modeling of electricity supply system in Japan (電力供給システムのモデリングによる日本での再生可能エネルギー導入に関する分析)	日産自動車
佐 藤 真 也	On the noise reduction of magnetotelluric data based on frequency-domain independent component analysis (周波数領域独立成分分析に基づく地磁気地電流データのノイズ除去法)	京都大学大学院工学研究科 (博士課程進学)

氏 名	研究論文題目	就 職 先
地球資源システム分野		
久保田 歩	セルロースナノファイバの圧入プロファイル改善手法への適用に関する研究	国際石油開発帝石(株)
志 賀 正 茂	Molecular Dynamics Study on the Salinity Dependence of the Contact angle of CO ₂ /Brine/Muscovite System (CO ₂ /塩水/白雲母三相界面系における接触角の塩分濃度依存性に関する分子動力的研究)	東京大学大学院新領域創成科学研究科(博士課程進学)
杉 本 達 洋	In-situ Stress State Analysis at the Nankai Trough Subduction Zone, SW Japan, by Anelastic Strain Recovery Method (非弾性ひずみ回復法を用いた南海トラフ沈み込み帯における原位置応力解析)	京都大学大学院工学研究科(博士課程進学)
俵 谷 侑 吾	Molecular Dynamics Study on Effect of Cations on Adsorption of Acidic Oil Molecule onto Calcite Surface (分子動力学法によるカルサイト表面における酸性油分子吸着に及ぼす陽イオンの影響に関する研究)	(株)日立製作所
村 松 玲 奈	Effect of Cation on the Adsorption Structure of Oil-Mineral Interface (鉱物表面における油分子吸着構造に及ぼすカチオンの影響)	出光興産(株)
資源エネルギーシステム学分野		
石 野 翔 大	マイクロバブル浮選による環境放射能物質の除去に関する基礎的研究	中国電力(株)
佐 藤 優 斗	Platinum and palladium catalysts on sacrificial nanoporous-metallic support for oxygen reduction reaction (犠牲ナノポーラス金属担体を用いた酸素還元反応用白金およびパラジウム触媒)	経済産業省
鈴 木 俊 也	Atomic simulations of effects of Y and Al segregation on interactions of a dislocation with a double twin in Mg (マグネシウムにおける転位と二重双晶の相互作用に及ぼすYおよびAl偏析の影響の原子シミュレーション)	東邦ガス(株)
森 重 有 矢	Analysis on development pattern of microfractures induced by hydraulic fracturing in shales (水圧破砕法により頁岩中に造成されるマイクロフラクチャーの伸展パターン解析)	新日鐵住金(株)
資源エネルギープロセス学分野		
堺 勇 行	Crystal-plasticity finite-element analysis of visco-plastic behavior in a commercially pure titanium sheet (純チタン板の粘塑性挙動に関する結晶塑性有限要素解析)	川崎重工業(株)
坂 根 将 伍	Contact behavior and cooling characteristics of aqueous polymer solution droplets impinging on heated solid surface (加熱固体面に衝突するポリマー水溶液液滴の接触挙動と冷却特性)	パナソニック(株)
中 原 純 也	Cooling properties of upward pipe-laminar jets impinging on moving hot solid in transition and film boiling regime (遷移および膜沸騰温度域の移動体への吹上衝突噴流冷却)	新日鐵住金(株)
生 川 遼 太	Prediction of work-hardening behavior of an A5083-O sheet using crystal plasticity finite element method (結晶塑性有限要素法による A5083-O 板の加工硬化挙動の予測)	新日鐵住金(株)
畠 山 真 一	Crystal plasticity analysis of two-step deformation behavior in commercially pure titanium Grade 1 and Grade 2 sheets (純チタン1種および2種材の2段階変形挙動に関する結晶塑性解析)	ブラザー工業(株)

氏 名	研究論文題目	就 職 先
ミネラルプロセス分野 佐野直幸	浮遊選鉱法による銅精鉱の脱ヒ素処理に関する基礎的研究	ローム(株)
新宮淳平	Adhesive Human Cells Cultured on Nanoporous Gold (ナノポーラス金上で培養された接着性ヒト細胞)	トヨタ自動車(株)
脇本和輝	高効率天然ガス精製を目指した金属有機構造体のガス分離薄膜の開発	大阪ガス(株)

博士後期課程修了者

氏 名	研究論文題目	就 職 先
計測評価工学分野 廣岡知	高精度傾斜計測による大規模地下空洞の安定性監視に関する研究	JX 金属探開(株)
地殻環境工学分野 Nguyen Tien Hoang	Development of transformation method of multispectral imagery into hyperspectral imagery for detailed identification of metal and geothermal resources-related minerals (金属と地熱資源関連鉱物の詳細抽出を目的としたマルチスペクトル画像からハイパースペクトル画像への変換法の開発)	京都大学工学研究科外国人共同研究者
Luis André Magaia	Development of regional exploration techniques for groundwater resources in semiarid areas through integration of remote sensing and geophysical survey (リモートセンシングと物理探査の統合による半乾燥地域での地下水資源の広域探査手法の開発)	京都大学工学研究科外国人共同研究者
資源エネルギープロセス分野 西村隆一	高強度鋼板のフランジアップ成形に関する研究	新日鐵住金(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 Nguyen Tien Hoang	Development of transformation method of multispectral imagery into hyperspectral imagery for detailed identification of metal and geothermal resources-related minerals (金属と地熱資源関連鉱物の詳細抽出を目的としたマルチスペクトル画像からハイパースペクトル画像への変換法の開発)	小 池 克 明	平成29年9月25日	
Luis André Magaia	Development of regional exploration techniques for groundwater resources in semiarid areas through integration of remote sensing and geophysical survey (リモートセンシングと物理探査の統合による半乾燥地域での地下水資源の広域探査手法の開発)	小 池 克 明	平成30年3月26日	
資源エネルギー プロセス学分野 西 村 隆 一	高強度鋼板のフランジアップ成形に関する研究	宅 田 裕 彦	平成29年9月25日	

旧 金 属 系

学部卒業者

氏 名	研究論文題目	就 職 先
材料設計工学分野		
加 藤 勇 一	X線 Operando 解析による全固体電池の蓄電池反応解析	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
田 中 誠 人	金属空気電池の酸素極アモルファス材料 $\text{Ca}_2\text{FeCoO}_5$ の遷移金属環境構造	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
藤 村 雄 斗	亜鉛空気電池における強アルカリ性水溶液中の亜鉛イオンの環境構造	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
安 田 拓 海	金属ナノワイヤー複合厚膜電極の電池特性	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
表面処理工学分野		
石 松 勇 樹	四塩化チタンとモリブデンの反応性調査	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
井 村 洸 介	BaAl_2O_4 の新規イオン伝導体としての可能性評価	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
角 木 祥太郎	アルカリ浴中での亜鉛の低電圧電解採取	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
手 塚 康 介	$\text{La}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ の粉碎による加熱・脱水生成相の変化	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
田 村 哲 史	硫酸カルシウムの脱水・水和拳動に関する第一原理計算	東京大学生産技術研究所
物質情報工学分野 (旧 プロセス設計学分野)		
野 田 憲 海	計数率による X 線スペクトル変化の研究	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
森 崎 聡 志	X 線偏光子の研究	(株)バйкаレント・コンサルティング
山 下 大 輔	Compton 散乱による白色 X 線偏光	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
山 本 大 地	3D プリンタによる掌サイズ全反射 X 線装置の試作	鹿島建設(株)
ナノ構造学分野		
大 田 将 之	構造自由度の調和性	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
奥 應 仁	配位空間状態密度の微細構造	サンディスク(株)
武 村 友 輝	太陽電池用硫化物半導体のバルク結晶作製とその物性評価	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
山 縣 慎 吾	MBE による ZnSnP_2 の成膜	東京大学大学院工学系研究科(修士課程進学)

氏 名	研究論文題目	就 職 先
先端材料物性学分野		
梅 村 拓 実	3DAP と STM の併用による複合測定手法の高空間分解能化	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
洪田見 雄 貴	STM による $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の表面電子状態の観察	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
伊 藤 樹 人	Mg-Y-Zn LPSO 構造におけるクラスター配列秩序の検討	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
葉 山 将太郎	Al-Mg 系合金の析出過程の解析	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
量子材料学分野		
奥 野 隆 平	線形回帰ポテンシャルにおける予測精度の学習データ分布依存性	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
金 森 翔太郎	特微量の次元削減手法による材料物性予測の高精度化	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
篠 原 航 平	化学組成の事前知識を用いた推薦システムによる新規化合物の予測	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
林 克 幸	合成条件推薦システムのための並列合成実験手法の検討	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
久 田 洋 平	インクジェットプリンタを用いた組成傾斜薄膜の作製	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
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結晶塑性	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
奥 谷 将 臣	Fe-Cr 系 σ 相の単結晶マイクロピラー圧縮試験	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
境 龍太郎	Al 過剰組成の η - Fe_2Al_5 相に現れる高次規則相の結晶構造解析	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
武 田 康 誠	$\text{MoSi}_2/\text{Mo}_5\text{Si}_3/\text{Mo}_5\text{Si}_3\text{C}$ 三相共晶合金の組織と力学特性に及ぼす Ta 添加の影響	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
矢 野 凱 己	NiCoMnIn 合金における熱弾性型マルテンサイト変態の等温変態挙動	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		
池 内 琢 人	Co-Cr-Ni Medium Entropy Alloy の力学特性に及ぼす Co 量の影響	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
沖 和 洋	Mg-Y 二元系合金における変形双晶の形成と消滅	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
嶋 康 平	マルテンサイト鋼の水素脆性におよぼす旧オーステナイト粒界の影響	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
中 田 匠	Al 添加した高強度 TWIP 鋼における力学特性と変形メカニズムの粒径依存性	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
日和佐 登	超微細粒アルミニウム「加工軟化」現象におけるマクロ変形帯の役割	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
先端材料機能学分野		
市 田 晃 大	X線イメージングによる時間分解・その場観察を用いたTi-6Al-4Vの $\beta \rightarrow \alpha$ 変態過程の解明	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
河原崎 琢 也	レーザー走査によるNi基超合金の急速溶解における凝固組織	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
西 田 浩 紀	Fe-1mass% Cにおける固液共存体の応力印加時の組織変化	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
三 野 翔 平	4D-CTを用いたFe-18Cr-11Ni合金における δ/γ 変態前後の体積変化及び結晶方位の測定	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
磁性物理学分野		
小 川 朋 也	チムニーラダー構造を持つ遍歴電子磁性体 $\text{Cr}_{11}\text{Ge}_{19}$ の磁性と伝導特性	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
橋 本 将 愛	カゴメ格子磁性体 $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ の低磁場ホール抵抗測定	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
三 浦 瑞 生	Zr-Fe 六方晶ラーベス相の磁性	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
和 田 航 大	W型フェライトの結晶育成	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
材質制御学分野		
鈴 木 絵美利	ナノポーラスSiCの酸素還元触媒活性	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
土 田 直 輝	グライム浴中における銀ナノ粒子の合成	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
三 浦 隆太郎	光電気化学デバイス用 $\text{CuO}/\text{Cu}_2\text{O}$ 積層薄膜の湿式形成	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
水 野 湧 太	環状配位ヒドロニウム溶媒和イオン液体の物性	THK(株)
森 崇 裕	グラファイト型マグネシウム合金超伝導体へのソフト化学的ドーピング	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		
大 谷 龍 剣	光活性化接合 COP フィルムの接合強度評価	東京大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
窪 田 航	酸化グラフェンへの異種元素共ドーピング	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
萩 原 洋 平	スズ箔表面への単分子膜の形成と脱離制御	ナレッジビーンズ(株)
堀 川 滉 貴	有機亜鉛錯体の光酸化によるZnO薄膜形成	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
山 田 祐 也	液体金属中AFMによるReRAMの金属/酸化物界面構造解析	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		
北山 優太	反応スパッター法による B ドープ ZnO 透明導電膜の作製と評価	三井不動産(株)
山口 蒼一郎	メカニカルミリングによる TiO ₂ /MgO の複合化と二酸化炭素光還元能の評価	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
吉川 晃司	硫酸塩による環境浄化作用のメカニズム	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
宮内 昂昭	メカニカルミリング処理をした窒化リチウムの酸化反応	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
村上 銀河	タンタル酸窒化物光触媒による水分解反応のアクションスペクトル解析	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
量子エネルギープロセス分野		
中谷 真大	カチオン性配位子に置換した ZnS-AgInS ₂ 量子ドットの作製	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
材料プロセス科学分野		
市田 智士	溶液成長法による CsPbBr ₃ 膜作製の検討	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
木村 信	ミスド CVD 法による酸化バナジウム薄膜の作製	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
鈴木 悠太	イリジウム電析膜の熱処理	東京大学新領域創成科学研究科
滝野 天琴	ミスド CVD 法による六方晶酸化モリブデン薄膜の作製	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
永縄 智大	ミスド CVDD 法で作製した WC _{1-x} 薄膜電極の水素発生性能の評価	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
安田 修平	EMIC-AICl ₃ 浴を用いた Al 連続電析	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
安田 創	非水溶媒を用いたイリジウム電析の検討	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
プロセス熱化学分野		
粟屋 康介	Cu-Co-S 液体合金中の S 活量に及ぼす Co 添加の影響	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
岩橋 広大	ガス-スラグ-メタル平衡法による固体酸化物中の Cr ₂ O ₃ 活量の測定	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
白田 景大	鉄鋼スラグを利用したバイオディーゼル燃料の製造と固体塩基触媒の挙動	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
奥田 大将	低温用脱硫剤としての包接化合物 Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃ の特性評価	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
柏木 勇人	(Y _{1-x} Dy _x)Ba ₂ Cu ₃ O _y の 2 軸磁場配向および配向度の Dy ドープ効果	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
濱田 剛	{100} <001> 集合組織 Cu テープ上に導電性中間層を配置した YBa ₂ Cu ₃ O ₇ 超電導線材の作成と評価	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
柳井 創太	カルシウムフェライトの凝固過程における生成物と低温側 TTT 線図	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
材料設計工学分野		
今 西 功 一	カルコゲナイド系 GeSbTe 光相転移物質のフェムト秒レーザー励起による光物性変化の構造依存性	(株)神戸製鋼所
島 洋 輔	層状岩塩リチウムイオン二次電池正極材料の構造安定化における遷移金属元素の役割	(株)村田製作所
周 嘯 宇	The Synthesis and Electrochemical Characterization of MoS ₂ Nanosheet and Graphene Composite Films (MoS ₂ ナノシートとグラフェンを用いた薄膜形成と電気化学的特性)	住友電気工業(株)
速 水 脩 平	金属フッ化物薄膜表面の構造・電子状態解析	新日鐵住金(株)
表面処理工学分野		
植 野 雄 大	1300-1600℃における BaO-ZrO ₂ -Y ₂ O ₃ 擬三元系の相平衡関係	京都大学大学院工学研究科 (博士後期課程進学)
加 藤 広 平	中温型燃料電池に向けた電解質材料の検討とその性能発揮に向けた指針の確立	三井金属鉱業(株)
田 居 宏 隆	硫酸ランタンにおける脱水・水和拳動および蓄熱密度に関する第一原理解析	福田金属箔粉工業(株)
船 津 晃 平	チタンの平滑電析に及ぼすアノード反応の影響と電析膜の剥離回収	三菱電機(株)
孟 维 杰	Y 添加 BaZrO ₃ におけるプロトン伝導拳動の第一原理解析	(株)アイランド
物質情報工学分野 (旧 プロセス設計学分野)		
杉 野 智 裕	鉄鋼用偏光蛍光 X 線装置の開発	JFE スチール(株)
吉 田 昂 平	X 線スペクトルのアーティファクトに関する研究	ヤンマー(株)
ナノ構造学分野		
岩 田 晃 樹	反応拡散を利用した SnS 太陽電池におけるヘテロ界面構造制御	パナソニック(株)
大 慶 哲 也	空間的拘束に基づく材料統計力学手法の開発と応用	三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング(株)
田 部 孝 治	新規熱電硫化物半導体 II-Ti-S 系化合物の探索	トヨタ自動車(株)
先端材料物性学分野		
小 林 拓 登	STM による LPSO 相変形組織の局所構造観察	新日鐵住金エンジニアリング
山 本 良 平	Ag 表面におけるフラーレン重合体形成過程の解明	みずほ銀行
浴 畑 嶺	Tender 領域における 2 次元異常小角散乱測定の実現	(株)シマノ
安 岡 祐 樹	Mg ₈₅ Zn ₆ Y ₉ 周辺組成におけるアモルファスリボンからの LPSO 形成過程	神戸製鋼所

氏 名	研究論文題目	就 職 先
量子材料学分野		
大 槻 祐 介	精度保証付き線形回帰原子間ポテンシャルの構築について	(株)NTT データ
小 田 陽 之	六法晶 Ti 変形双晶における原子のダイナミクスの第一原理計算	(株)日立製作所
村 瀬 颯 登	第一原理計算とベイズ最適化法を用いた効率的な安定化合物予測	(株)UACJ
結晶物性工学分野		
神 原 佑 季	MoSi ₂ /Mo ₅ Si ₃ 共晶合金の界面構造・微細組織と力学特性に及ぼす添加元素の影響	川崎重工業(株)
橋 爪 志 周	Fe-Zn 系金属間化合物 Γ 及び δ_1 相の塑性変形	JFE スチール(株)
東 雅 也	η -Fe ₂ Al ₅ 相の結晶構造解析と塑性変形挙動	(株)IHI
構造物性学分野		
瓦 田 一 郎	希薄 Mg-Y 合金の室温力学特性に及ぼす結晶粒径と Y 添加量の影響	Fringe 81 (株)
竹 田 泰 成	8Ni-0.1C マルテンサイト鋼の水素脆性における破壊様式と負荷応力の関係	三菱重工業(株)
中 村 慶 彦	中 Mn 鋼の加工熱処理に伴う組織形成過程のその場中性子線解析	東海旅客鉄道(株)
Hwang Suk-young	Si 添加高 Mn オーステナイト鋼の塑性変形と破壊に及ぼす結晶粒微細化の影響	京都大学大学院工学研究科 (博士後期課程進学)
毛 文 奇	24Ni-0.3C 準安定オーステナイト鋼の加工硬化挙動に及ぼす粒径の影響	京都大学大学院工学研究科 (博士後期課程進学)
吉 田 周 平	FCC 構造を有する High/Medium Entropy Alloy の摩擦応力と Hall-Petch 関係に及ぼす構成元素の影響	京都大学大学院工学研究科 (博士後期課程進学)
先端材料機能学分野		
富 依 勇 太	凝固組織形成の観察に向けた時間分解 CT 手法の開発とメゾスケールの偏析形成機構の検証	(株)神戸製鋼所
道 原 健 人	X 線イメージングを用いた Ni 基超合金の凝固物性値の効率的なその場測定手法の開発とその応用	リョービ(株)
磁性物理学分野		
渋 谷 広 樹	Pb および Ca を含む M 型フェライトの単結晶育成と磁性	新日鐵住金(株)
竹 田 圭 佑	カゴメ格子磁性体 Co シャンダイト化合物における Dirac 電子系の可能性	住友金属鉱山(株)
中 西 嶺	Mo クラスタ化合物 GaMo ₄ S _{8-x} Te _x の構造と磁性	(株)小松製作所
材質制御学分野		
井 口 翔 太	疎水性アニオンを含む濃厚水溶液からの HCP 金属電析	京都大学大学院工学研究科 材料工学専攻博士課程
加 藤 有 紀 也	ジグライム浴を用いたアルミニウム平滑電析	DOWA ホールディングス(株)
仲 井 雄 哉	銅電解精製における異常析出現象	日産自動車(株)
松 崎 健 太	Pt 粒子触媒による Si ヘリカルポア形成とその応用	日産自動車(株)

氏 名	研究論文題目	就 職 先
機能構築学分野		
高 谷 祐 毅	水素終端化シリコンへの分子混合 SAM の作製	(株)GS ユアサ
寶 雄 也	LTO/イオン液体界面の電気化学 FM-AFM 解析	(株)神戸製鋼所
米 田 真	酸化グラフェンの液体炭素源アシスト VUV 光還元	全日本空輸(株)
羅 紫 馨	平滑アルミニウムと高分子材料の表面化学活性化接合	中国商用飛行機有限責任公司 (COMAC)
エネルギー社会工学分野		
坂 本 大 記	酸化物担持した TaON 光触媒能の向上に関する研究	三菱日立パワーシステムズ(株)
福 島 翔太郎	ATaON (A = Ca, Y, La) の作製とその光触媒能	サンディスク(株)
安河内 大 祐	ZnS ナノ粒子による CO ₂ 光還元反応	パナソニック(株)
横 野 遼太郎	Cu ₂ O/TaON 系光触媒の反応メカニズム	ダイキン工業(株)
量子エネルギープロセス分野		
河 合 翼	ホスト-ゲスト錯体の設計と光スイッチング挙動に関する研究	浜松ホトニクス(株)
仙 道 正 英	有機-無機ハイブリッド太陽電池用酸化亜鉛ナノロッド電子輸送層の作製と界面制御	三菱ロジスネクスト(株)
談 書 雅	インジウム及びアルミニウムを共ドーブした酸化亜鉛ナノ構造体の作製と有機-無機ハイブリッド太陽電池用電子輸送層への応用	ルネサスエレクトロニクス(株)
前 田 椋	中空酸化チタンナノファイバーの作製	ピアス(株)
横 山 大 樹	光捕集能の向上を目指した太陽電池への ZnS-AgInS ₂ ナノ粒子の導入	近畿大学附属福岡高等学校
材料プロセス科学分野		
中 村 優太郎	水分濃度を減少させた EMIC-AlCl ₃ -W ₆ Cl ₁₂ 浴からの金属 W 電析の試み	ナブテスコ(株)
山 田 健太郎	イリジウム電析膜のクラック形成に及ぼす電析条件の影響	(株)小松製作所
山 本 顕	化学浴析出法による ZnO エピタキシャル成長とその電気的特性	コニカミノルタ(株)
吉 田 拓 司	ミスド CVD 法を用いた炭化タングステン薄膜の作製と機械的特性評価	中部電力(株)
若 島 涼	ミスド CVD 法により作製した Cu ₂ O 薄膜の電気特性評価と太陽電池への応用に関する検討	京セラ(株)
プロセス熱化学分野		
玉 置 和 志	メタル-スラグ平衡法による CaO-SiO ₂ -FeO 三元系スラグのサルファイドキャパシティー及び FeO 活量の同時測定	(株)神戸製鋼所
徳 野 隼 也	固溶体 Ca ₂ SiO ₄ -Ca ₃ P ₂ O ₈ と共存する低塩基度スラグのリン含有量と分配比の関係	JFE スチール(株)
永 田 翔 梧	復硫反応解析に向けた固液共存不均一系スラグのサルファイドキャパシティーの測定	関西電力(株)

氏 名	研究論文題目	就 職 先
エネルギー応用基礎学分野		
有 本 樹	磁場配向法による $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 超伝導線材の創出に向けた回転変調磁場印加条件の検討	パナソニック(株)
高 畑 仁 志	Cu および Al 基板上への MgB_2 超伝導薄膜の作製と J_c の歪依存性の検討	シャープ(株)
田 所 朋	電磁鋼板上に安定化 ZrO_2 及び Y_2O_3 , CeO_2 を中間層として用いた $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 超伝導線材の開発	日本電産(株)
廣 瀬 勝 敏	{100}<001> 集合組織 Cu テープを基材とした $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 超伝導線材のためのチタニア系導電性中間層の開発	(株)イトクロ
前 田 啓 貴	{100}<001> 集合組織 Cu テープを基材とした $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 超伝導線材構造最適化に関する研究	(株)村田製作所

博士後期課程修了者

氏 名	研究論文題目	就 職 先
ナノ構造学分野		
勝 部 涼 司	Investigation on properties of zinc phosphide related materials and interfaces for optoelectronic devices	京都大学大学院工学研究科 材料工学専攻 特定研究員
竹 内 一 仁	Efficient exploration of configuration space toward accurate construction of alloy phase diagrams	ヤフー(株)
構造物性学分野		
Reza Gholizadeh	Formation Mechanisms of Fine/Ultra-fine Grains in Metals Highly Deformed by Torsion at Various Temperatures and Strain Rates	京都大学大学院工学研究科 特定研究員
磁性物理学分野		
高 尾 健 太	磁性材料の微視的評価に向けた広帯域無同調強磁性 NMR 装置の開発および M 型フェライトの磁気異方性に関する研究	日立金属(株)
機能構築学分野		
Ahmed Ibrahim Abdelhamid Soliman	Vacuum Ultraviolet Light Irradiation towards Photochemical Surface Architectures	京都大学 研究員
屠 宇 迪	Photo processing and Microfabrication of Graphene Oxide	中華人民共和国 深圳大学
エネルギー社会工学分野		
秋 津 裕	A Study of Energy Literacy among Lower Secondary Students in Japan (日本の中学生エネルギーリテラシー研究)	
量子エネルギープロセス分野		
グァーキッチャー ナワポーン (Navaporn Kaerkitcha)	Materials design and processing development of electrospun nanofibers for energy conversion systems	PTT Public Company Limited (タイ石油公社)

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
ナノ構造学分野 勝 部 涼 司	Investigation on properties of zinc phosphide related materials and interfaces for optoelectronic devices	杉 村 博 之	平成30年 3 月26日	
竹 内 一 仁	Efficient exploration of configuration space toward accurate construction of alloy phase diagrams	田 中 功	平成30年 3 月26日	
構造物性学分野 Reza Gholizadeh	Formation Mechanisms of Fine/Ultra-fine Grains in Metals Highly Deformed by Torsion at Various Temperatures and Strain Rates (種々の温度・ひずみ速度で強加工された金属における微細粒・超微細粒組織の形成機構)	辻 伸 泰	平成29年 9 月25日	
磁性物理学分野 高 尾 健 太	磁性材料の微視的評価に向けた広帯域無同調強磁性 NMR 装置の開発および M 型フェライトの磁気異方性に関する研究	中 村 裕 之	平成30年 3 月26日	
機能構築学分野 Ahmed Ibrahim Abdelhamid Soliman	Vacuum Ultraviolet Light Irradiation towards Photochemical Surface Architectures	杉 村 博 之	平成29年 9 月25日	
屠 宇 迪	Photo processing and Microfabrication of Graphene Oxide	杉 村 博 之	平成30年 3 月26日	
エネルギー 社会工学分野 秋 津 裕	A Study of Energy Literacy among Lower Secondary Students in Japan (日本の中学生エネルギーリテラシー研究)	石 原 慶 一	平成30年 3 月26日	
量子エネルギー プロセス分野 早 川 明 伸	p-n 接合及び p-i-n 接合有機無機ハイブリッド太陽電池の高効率化と高耐久化に関する研究	佐 川 尚	平成29年 9 月25日	
グァーキッチャー ナワポーン (Navaporn Kaerkitcha)	Materials design and processing development of electrospun nanofibers for energy conversion systems	佐 川 尚	平成30年 3 月26日	

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
物質情報工学分野 (旧 プロセス設計学分野) 恒 川 裕 志	薄鋼板の表面性状制御における冶金学的設計指針とその応用	河 合 潤	平成28年7月25日	京都大学大学院工学研究科冶金学専攻修士課程修了 昭和57年3月 (JFE スチール)
東 康 弘	SIMS およびレーザ SNMS による半導体表面分析の高精度定量化に関する研究	河 合 潤	平成28年9月23日	東京大学大学院工学系研究科工業化学専攻修士課程修了 平成2年3月 (NTT)
上 原 康	電子部品用金属化合物の X 線発光・吸収分光による研究	河 合 潤	平成30年3月26日	京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻修士課程修了 昭和59年3月 (三菱電機)

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, 巻数, [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。

逝 去 会 員

水曜会誌24巻10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29年10月27日	和気 潔	昭和25・冶金
平成29年7月28日	吉田 幹夫	昭和21・冶金
平成29年9月12日	岡町 昌哉	昭和26・鉱山
平成29年11月27日	柳沢 雅勇	昭和16・12月
平成29年12月10日	松岡 輝俊	昭和44・冶金
平成29年2月20日	勇野喜正裕	昭和24・鉱山
平成29年5月	北尾 盛功	昭和39・鉱山
平成30年1月29日	嶋崎 義尚	昭和35・冶金
平成28年11月25日	相原 知穂	昭和21・冶金
平成29年3月24日	河原 純	昭和45・冶金
平成29年8月31日	福林 徹	昭和47・資源
平成30年4月2日	苔口富士夫	昭和19・冶金
平成30年1月12日	江崎 澣	昭和29・冶金
平成29年7月1日	杉江 正彦	昭和29・冶金
平成29年11月27日	河合 敬	昭和23・冶金
	田中 宏	昭和26・冶金
平成30年2月	川端 修	昭和31・鉱山
平成29年12月30日	飯田 秀雄	昭和33・鉱山
平成29年3月27日	南光 宣和	昭和31・鉱山
平成29年5月	武智 光男	昭和38・鉱山
平成30年5月6日	井ノ山直哉	元教官(名)
平成30年3月13日	樋上 寛	昭和28・鉱山新制
平成30年3月7日	森田 信昭	昭和25・冶金
平成29年夏	川島 弘之	昭和26・冶金
平成30年1月1日	西村 慶喜	昭和35・冶金
平成30年	脇元 一政	昭和47・冶金
平成30年3月	脇出 享	昭和54・金属
	澤 正文	昭和18・鉱山
平成28年	北原 宏一	昭和41・資源
平成29年12月14日	山口 洋平	昭和48・資源

平成30年2月18日	清水 克己	昭和26・冶金
平成30年4月1日	鈴木 禎一	昭和23・冶金
平成29年	日野谷一郎	昭和21・冶金
平成30年1月1日	小平 博	昭和18・冶金
平成29年10月	中島 利勝	昭和36・鉱山
平成28年11月29日	溝内 紳之	昭和38・冶金
平成30年2月	谷井 充	昭和33・冶金
平成30年2月16日	武智 弘	昭和31・冶金
平成30年4月	松村 嘉高	昭和28・冶金旧制
平成30年9月	植田 義	昭和36・鉱山
平成29年	横山 和弘	平成5・金属系
平成30年10月2日	三木 伸一	昭和49・金属系

教 室 報 告

教員人事

<旧資源系>

平成29年8月16日	榎 利博	教授に採用
平成30年3月31日	保田 尚俊	助教 退職 4月1日より京都大学工学研究科 社会基盤工学専攻 災害リスクマネジメント工学講座 (JR西日本) 特定助教

<旧金属系>

平成29年10月1日	新津 甲大	助教(乾研) 理化学研究所から採用
平成29年10月1日	岸本 章宏	特定助教 (非鉄製錬学講座) 宇田研特定研究員から採用
平成30年5月1日	森下 浩平	助教(安田研) 九州大学 材料工学部門(准教授)へ転出

水曜会会員からの図書の寄贈について

平成29年度水曜会 会長 河合 潤

水曜会会員及び会員関係者から以下の図書の寄贈を受け、備品として京都大学附属図書館に登録しました。理工工学科図書室蔵書と重複しない本は、理工工学科図書室に配架されています。重複のある書籍は関連の深い研究室が所蔵しています。附属図書館のホームページから検索が可能です。貴重な書籍をご恵贈いただきありがとうございました。

山崎 豊彦 様

『石炭液化の研究：羽幌炭の水素添加試験』 山崎 豊彦 著

苔口 久雄 様

『銅精錬』 上下 池田 謙三 著

恩田 怜 様

『鉄の歴史』 ベック 著, 『大航海時代叢書』 岩波書店,

『The ABC of Iron and Steel』, 『銀のスプーン, プロジェクトH』 恩田 怜 他 著

平成30年度水曜会誌編集委員

委員 長 中 村 裕 之

幹 事 一 井 崇(会誌) 浜 孝 之(広告・HP担当)

編集委員(学内) 邑 瀬 邦 明 柴 田 曉 伸 三 ヶ 田 均

編集委員(学外) 瀬 村 康一郎 安 藤 哲 也 伊 藤 和 博

青 柳 和 平 安 倍 達 彦

平成30年10月25日 印刷 平成30年10月31日 発行

編 集 兼
発 行 者

平 藤 哲 司

印 刷 者

小 林 誠 造

日本印刷出版株式会社

553-0006 大阪市福島区吉野1丁目2番7号

電 話 大阪 (6441) 6594 (代)

FAX 大阪 (6443) 5815

発 行 所 京 都 大 学 工 学 部

水 曜 会

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

Memorial Lecture in the Annual Meeting of Suiyokwai

What is the Raison D'etre for Engineers in Manufacturing?	Bun-yuu FUTAMURA	1
UACJ's R&D Activities for Functional Aluminum and its Future Vision	Kazuhisa SHIBUE	3

Forum

Reminiscences Related to the Very First Geophysical Exploration Conducted in Japan 100 Years Ago.	Koichi SASSA	14
Current Status of the High-Level Nuclear Waste Geological Disposal in Switzerland	Toshihiro SAKAKI	17
Phase Equilibria and Kinetics of Thermoelastic Martensitic Transformations	Kodai NIITSU	22

Current Studies in Laboratories		27
--	--	----

Suiyokwai Information		53
------------------------------------	--	----

Letter to Editor		66
-------------------------------	--	----

Regulations		82
--------------------------	--	----