

水曜會誌

第25巻 第4号

目 次

退職記念寄稿

理学部から工学部、そしてエネルギー科学研究科へ (資源工学教室の改組前夜の思い出).....	宅田 裕彦	301
---	-------------	-----

大会記念講演

三井金属鉱業における鉱山・製錬から機能材料・部品への川下展開.....	久岡 一史	304
カーボンニュートラルと日本の産業界の対応.....	堀 史郎	312

談 話 室

金鉱山と実験室における断層面近傍の不均質変化.....	吉光 奈奈	319
東京工業大学火山流体研究センターでの研究活動.....	石須 慶一	324
酸化モリブデン薄膜上における液体インジウム完全濡れ現象.....	勝部 涼司	328
3次元X線回折とX線CTを組み合わせた マルチモーダルイメージングの基礎研究とその応用.....	平山 恭介	332
軟質フェライト相と硬質マルテンサイト相からなる 二相鋼の不均一変形挙動の解明.....	朴 明駿	336
FCC単相ハイ・ミディアムエントロピー合金の結晶粒微細化と強化機構	吉田 周平	340

研究速報	346
------------	-----

会 報	371
-----------	-----

卒業者名簿	388
-------------	-----

会 則	403
-----------	-----

令和3年10月31日発行

京 都 大 学
水 曜 会

退職記念寄稿

理学部から工学部、そしてエネルギー科学研究科へ
(資源工学教室の改組前夜の思い出)

宅 田 裕 彦*

Memories of the days before the reorganization of the department of
mineral science and technology

by Hirohiko TAKUDA

18歳の私は、ただ漠然と研究者になりたいという気持ちから、昭和49年に理学部を受験し、合格した。入学はもちろん4月からだが、3月の合格発表後すぐに全く知らない天王寺高校の先輩という方から電話が入り、高校で待ち合わせて会うことになって、アメリカンフットボール部への勧誘を受けた。当時、個人情報などの概念はなく、母校の体育の教諭から運動能力の高い学生の連絡先を聞いて電話してきたのであった。そして入部。当時の部の状況(QB(クォーターバック)は4回生の一人だけ、育てられようとしていた2回生がその重圧に耐えられなくなつて脱走)から、野球やってたなら肩強いだろうということで、私はQBとして育てられることになった。

入部当時は、教養課程が終わって3回生になったから退部しよう、くらいの軽い気持ちで始めたのだが、そういう状況で2回生からレギュラーのQBに、そして、3回生の秋に、戦後しばらく後から延々と続いていた関学の関西でのリーグ戦連勝記録をついにストップ。一夜明けると新聞に自分の写真がでかでかと載っていた。残念ながら関大に取りこぼしていたおかげで同率優勝止まり、プレーオフの末敗れて甲子園には行けなかったが、1月3日に国立競技場で行われたライスボウル(当時は東西の学生選抜対抗、NHKで全国中継)でも大活躍し、アメフトというマイナースポーツではあるが、気がつけば有名選手になっていた。

当時は今のような留年生ばかりの部ではなく、ちゃんと授業にも出て、大学院にもストレートで進学していた部員が多かったのも、私も留年などプライドが許さないし、ちゃんと単位もそろえ、まだ研究

者への夢もあきらめていなかった。でも、なんとかしても日本一になりたいという気持ちは強く、さあ、最終学年、どうしたものかと、そのシーズンオフに考えることになった。先生方や学生からは、あいつは体育会系の人間という目で見られるようになっていたし、第一、友人たちの助けがあったからこそ単位も取得できていた状況で、このままその友人たちと理学部にいても将来は絶望的だった。しかし、捨てる神あれば拾う神あり。そこで天の声が。当時のアメフト部の部長は工学部資源工学科の小門純一教授で、大学院はこちらを受けないかと。

よし、それしかない、と決めた私は、もう理学部に未練はなく、なりふり構わず単位を集めに走り、掲示板で集中講義を見つけては受けに行き、レポートだけで通してくれるという科目があると聞けば全く面識のない先生のところへ恐る恐るレポートを出しに行き、もちろん通常の受講していた科目の試験も受けて、卒業に必要な単位を全て3回生まででそろえてしまった。当時の理学部では卒業研究は必修ではなかったし、専門科目は履修登録というものがなく、どんな科目でも受験できたこと、さらに1、2回生で取りためてあった教養の理系の科目の多くを卒業単位に算入できたことが、そういうことを可能にしてくれた。(そんな制度でも、理学部の学生は勉強が好きで、友人たちは誰に言われずともしっかり勉強していた。)

というわけで、もうそれからは理学部へ行くことなく、3月から工学の大学院の入学試験の勉強を始めた。と言っても、全く受講したことのない科目で、しかも当時は科目数も今よりはるかに多く、最初は雲をつかむようなものだった。資源にはいなかったが、幸い高校の同級生がたくさん工学部にいたおかげで、

*京都大学名誉教授

げで、共通科目のノートや過去問を手に入れたりしながら必死に独学で勉強した。専門以外に英語と第2外国語まであったが、英語はQBの勉強としてアメフトの専門書を何冊も読まされたおかげで、ドイツ語も趣味でアメフトのシーズンオフにゲーティンスティチュートに通ってたりして一般の学生よりははるかに得意としていたおかげで、語学の2科目でかなり得点をかせいだということを後から聞いた。そして8月末、なんとか受かればと思って受験したところ、結果として専攻のトップで合格した。これがどういうルートで漏れたのか、私の合格に関して週刊朝日で文武両道を称える記事まで出た。

さて、最終学年だが、そんな中、春は社会人チームも含めた西日本トーナメントで初優勝、創部30周年を記念して行った関東の強豪大学との招待試合も全て完勝、入試が終わって憂いなく迎えた本番の秋のリーグ戦も連戦連勝で、1年間無敗で最終戦の関学戦を、大観衆で埋め尽くされた日生球場で迎えた。当然自分が受けるであろう優勝インタビューの言葉まで考えていたのだが、結果は奇跡の大逆転負け。なぜだが、私は最後はいつも勝利の女神からそっぽを向かれてしまい（日本一になるまで彼女は作らないという、いじらしい願掛けまでしていたのに）、京大が日本一になるには、それからさらに6年かかることになった。

さて、大学院生活だが、院の科目に加えて独学だけだった学部科目の受講も含めて、そこそこ一生懸命勉強したが、部のコーチとして毎日農Gに立つ生活で、研究を本格的に始められていなかった中、M2の夏、博士課程を受験してもいいかと、小門先生に相談しに行った。そしたら、「受験せんでええ、助手になれよ。博士課程行くのも、助手になるのも、やることは同じや。学費払うか、給料もらうかの違いだけや」と。こんな有難い話ありますか？言われたのはただ一言、「4年で学位をとれ」と。ご存知のように課程に行かない場合の最短でと。それを守って学位取得した後は、フンボルト財団の奨学生として1年8か月も西ドイツ（当時）に留学もさせてもらった。小門先生にはいくら感謝してもしきれないほどだが、そういう折に先生から言われたのは、「礼は上の者に返すのではなく、君の後輩にこそしてやれ」と。

さて、話は飛んで、副題の資源工学教室改組前夜のこと。

平成7年の6月30日（金）の午後。昼休みか何かの外出から自室に戻って来たら、「臨時の教室会議を行っているの、至急会議室まで」という由の置手

紙が。行ってみると、ただならぬ雰囲気には会議室は包まれており、議題はエネルギー科学研究科への参画についてだった。この時点まで、エネルギー科学研究科の発足について、資源工学は一切関わってきっておらず、当時の教室の課題は専ら土木・衛生工学との大学科への改組に関するものだった。それが、次年度のエネルギー科学研究科発足に向けての概算要求が文部省を通過するかどうかの最終段階に至って、エネルギーを扱っている資源工学教室からの参画がないのはおかしいではないか、というクレームが文部省から出たということで、工学部からの、一研究室だけでもいいから参画してくれ、という依頼で開かれた教室会議だった。依頼とは言え、断ることのできないものであることは明瞭で、さてどうするか・・・。

ここに至るまでの資源工学教室の経緯を振り返ってみると、工学部の大学科への改組については大変遅れをとったと言わざるを得ず、一時、例えば化学工学や数理工学などの小規模の学科を集めて総合工学科のような学科を作れないかというような構想もあったようだが、実現に向けて動きがあったのかどうかも定かではなく、なかなか具体化せずにいた。また、そういった最中、しっかりした教室会議での合意のないまま（当時の教室会議には議事録すらない曖昧さ）、合意が取れたと思った主任教授がある方向へ引っ張ろうとしたことに反発して、教室会議を一部の者がボイコットし、教室は真っ二つに割れて、教室会議が数か月開けないという恥ずかしい事態までおきた。私はボイコットした5名のうちの一人で、当時講師という中途半端な身分だった私は、もうこれでこの教室での昇進はないと観念したくらいだ。その後、ここでも小門先生のお世話になるのだが、どちらの側も信頼するOBの小門先生に依頼し、公平な仲裁をしていただいたおかげで教室は正常化した。有難いことに、その際、今回のことは人事に持ち込まないという約束まで取り付けてくださって、その後私は助教授に昇進し、この平成7年を迎えていた。

そのような経緯で資源工学科は最後まで残ってしまい、土木系学科と衛生工学科の中に入らせてもらうということになり、平成6年ころから準備作業に参加した。土木系学科と衛生工学科は元々関係が深く、それだけで大学科が編成できる規模で、すでに準備が進んでいるところに、途中から入れてもらったという形だ。当時の資源工学の教室会議メンバー（講師以上）の年齢構成はある意味異常で、ちょうど40歳になったばかりの私に一番近い年齢の先生は一回り上の52歳で、本来なら多くいるはずの、いわ

ゆる団塊の世代がごっそりと抜け落ちていた。要するに若手は私一人であり、地球工学科への改組のためのカリキュラム編成や、6講座だったのが改組で7分野（さらにエネ科参画で8分野）に部屋を再配分する作業など、雑務を一手に引き受けるという状態だった。

さて、話を平成7年6月30日（金）に戻そう。もう十分閉塞感に満ちていた私は、新しい組織に行こうと思った。一研究室でもという気持ちで。しかし、その日は、いっそのこと、教室全部で移ろうかという意外な結論だった。しかし、土日も会議を開き、結局落ち着いたのは、3分野が参画する、というものだった。資源工学は資源の上流から下流までカバーしており、金属の加工プロセスを扱う私の研究室のような下流側の分野、すなわちエネルギー科学研究科の母体となっている金属系に近い分野が移籍する、というのが論理的ではあり、基本的にはそうだったが、結局移籍することになったのは、先に述べた教室会議ボイコットメンバーで、教授の名前をあげると、八田、中廣、西山（若松先生はすでに退職）で、助教授は私一人だけだった。

週明けの月曜日から、設置審のための書類作成など、エネルギー科学研究科への参画に向けた作業が始まり、ただでさえ地球工学科発足の準備で忙しかったうえに、この作業を短期間で終えなくてはならず、目のまわるような忙しさだった。今では考えられないが、パソコン作業ができない教授がいて、直属の上司である八田先生の分はともかく、中廣先生の設置審の書類まで私が作成せざるを得なく、また、その時点では助手で助教授候補の福中先生、楠田先生の書類作成への助言も含めて、まあ、今にして思えば、よくこなしたかと、そう、若かったんですね。私は決して夜遅くまで仕事するタイプではなく、常に余力を残しておくほうで大して仕事もしなかったが、当時の集中力についてだけは自慢したいですね。大学にいる日は、朝8時から午後4時くらいまで、5分ほどの昼食をはさんでわき目もふらずに仕事し、そこで切れそうになった集中力をチョコレートか何かの力を借りて戻し、6時過ぎまで頑張って終わり、ジムのプールで泳いで帰るというような毎日だった。

さて、ここまで言及しなかったが、同じ採鉱冶金学科をルーツとする資源工学科と金属系学科がなぜ工学部再編の際に一緒に大学科を作ろうということにならなかったのだろうか。私を知る限りは、そのような動きがあったということも聞かない。カリキュラムが違いすぎるということも問題だったかも知れ

ない。しかし、それを言うなら、物理工学科の中の機械系と材料系の違いはどうだろうか。水曜会大会や新入生歓迎の比叡山登山競走などで、金属系の先生方とはよく接する機会があり、建物も近くにあった。もし、一緒になっていれば、同窓会組織も一元化でき、メリットも大きかったと思うのだが、そもそも新宮先生が中心となって進めていたエネルギー科学研究科の発足においても、土壇場になるまで、一切資源工学になぜ声がかからなかったのだろうか。真相は当時の私は若すぎてわからないが、結局のところ、組織を作るのは個々の人間だからだろう。金属系から当時の資源の教授連中に声をかけにくかったというのはなんとなくわかる。エネルギー科学研究科発足の際に、資源から移籍した教授陣も、研究分野の近さではなく、気の合うメンバーだったというのも同様のことだろう。まあ、助教授だった私には、そのような選択の余地はなかったが。

エネルギー科学研究科が発足して、すでに20年以上を経過した。その中のエネルギー応用科学専攻に私は所属しているが、そこには資源からの3分野と、昔の名前で言うところの鉄冶金、非鉄冶金の研究室が主立つ研究室だ。この専攻だけが唯一水曜会の資源と金属系が一緒になって構成しているとも言える。発足当時は八田先生や岩瀬先生などの個性の強い先生がいて、なかなか気をつかうことも多かったが、今は何でも打ち解けて話し合える専攻となっている。これには、同じ水曜会という文化の近いメンバーであるということも大きく作用していると思う。

最後になるが、大学院組織はいろいろ変わったが、やはり教育の基本は学部教育にあると思う。金属系のほうの学部教育の詳細については存じ上げないが、資源は旧資源工学教室をルーツとする8分野でコースを形成し、改組後も変わらず学部教育を担っている。そのためのコース会議も月に一度開催している。これからも学部教育を軽視することなく、コース運営を続けていただきたいと思う。エネルギー科学研究科の本専攻以外の専攻が、学生の確保に苦労している中で、しっかりと学部教育に足をおいた研究室の集まりである本専攻がいかにか恵まれているか。その有難さの実感は工学研究科の皆さんにはやや希薄かも知れないが、優秀な学生の確保の重要性は十分理解いただけるものと思う。

大会記念講演

三井金属鉱業における鉱山・製錬から機能材料・部品への川下展開

久岡 一史*

Chronicles of Mitsui Mining & Smelting: Where Do We Come From?
What Are We? Where Are We Going?

by Isshi HISAOKA

1. はじめに

昭和55年に冶金学科を卒業した。真嶋先生の研究室で、栗倉先生と松田先生が助手でいらしかった。卒論で使った鉱石が、三井金属鉱業の関係会社である八戸製錬から提供されたアンビル鉛亜鉛バルク精鉱という縁で入社したが、当時は亜鉛の会社ということしか知らなかった。

本稿では40年前に入社した三井金属鉱業という会社がどのように鉱山・製錬から機能材料・部品に川下展開していったかを、自身の会社生活も振り返りつつお話ししたい。

2. 40年前と現在の三井金属鉱業

40年前の三井金属鉱業は世界一の亜鉛生産者という売りであった。しかしながらソ連、東欧など東側諸国を除いてのシェア3%程度だったと記憶している。まだ神岡鉱山が隆盛を誇っていた。2700億円の単体売上高で金属事業が6割を占めていた。

現在の亜鉛のプレゼンスは世界シェア1.5%、18位に低下し、5200億円の連結売上高の3分の1が機能材料、3分の1が亜鉛などの非鉄地金、3分の1が自動車部品その他となった。グローバルニッチ商品の集合体に変化した（図1）。社名は未だにマイニング&スマルティングを冠している。



出典：統合報告書2018

図1 グローバルニッチ商品の集合体

*三井金属鉱業株式会社 顧問

3. 亜鉛を取り巻く状況の変化

亜鉛の世界需要は40年間で600万t／年から1400万t／年に増加した。しかしながらその需要増の殆どは中国で、現在700万t／年と半分を占めている。一方国内需要は1980年の70万tから1990年の80万tをピークに足許40万tまで減少している（図2）。用途別でみると日本、中国、世界ともメッキが6割と過半を占めている。

銅は電気伝導性、加工性の良さ、リサイクル市場の確立などから多岐に渡ってお客様がいらっしゃるが、亜鉛は防錆用途で鉄鋼メーカーがメインのお客様となり、市場硬直性が高い。銅に比べ、製錬プロセスの複雑さ、副産物処理の困難さ、リサイクルの難しさも相まって、マイナーで低収益な非鉄金属となっている。

亜鉛価格は長期的にはUS\$のインフレレートに追従している（図3）。価格の陥没時期があり、1990年頃からの低価格はソ連崩壊で東側諸国から地金流入、2000年頃からの低価格はWTOに加盟した中国の無秩序な増産によるもので、亜鉛にとって冬の時代であった。この当時は超円高もあり、\$1000、80円でのサバイバルプランが議論された。短期的な需給バランス変動の影響で神風が吹くのは10年に1回程度となっている。

この低収益の亜鉛中心の鉱山・製錬から機能材料・部品への川下展開がどのようになされたのかを例示する。

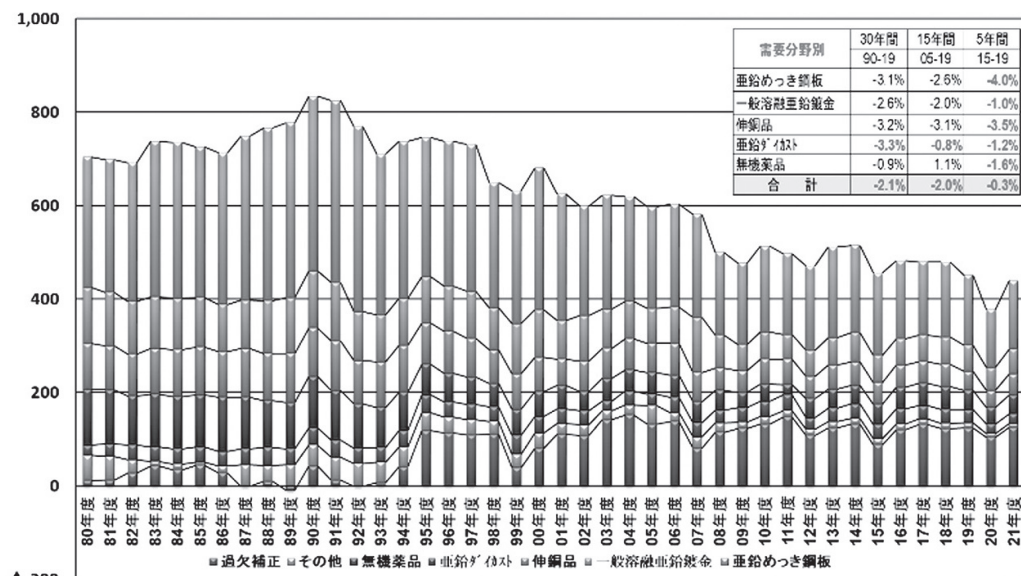
4. 会社生活のスタート

40年前最初の配属先は岡山県玉野市日比にあった銅の溶鉱炉であった。既に銅製錬の主流は自溶炉に移行しており、当時世界に4炉しか残っていなかった生鉱吹の銅の溶鉱炉で、既に休止も決まっていた中、幕引き役としての配属であった。

入社2年目に調合担当となったが、基本パラメータであるFe/SiO₂、S/Cuを揃えても炉況が全く安定せず苦労した。当時主力だったブーゲンビル鉱中心の調合から、ディスプタータ鉱中心の調合にシフト中で、代えると徐々に炉況が悪化、元に戻すと直ぐ落ちてく。理由を突き止めたいと思った。手許にあった分析装置は、古い熱天秤と古いX線回折装置、そしてシース熱電対くらいであった。

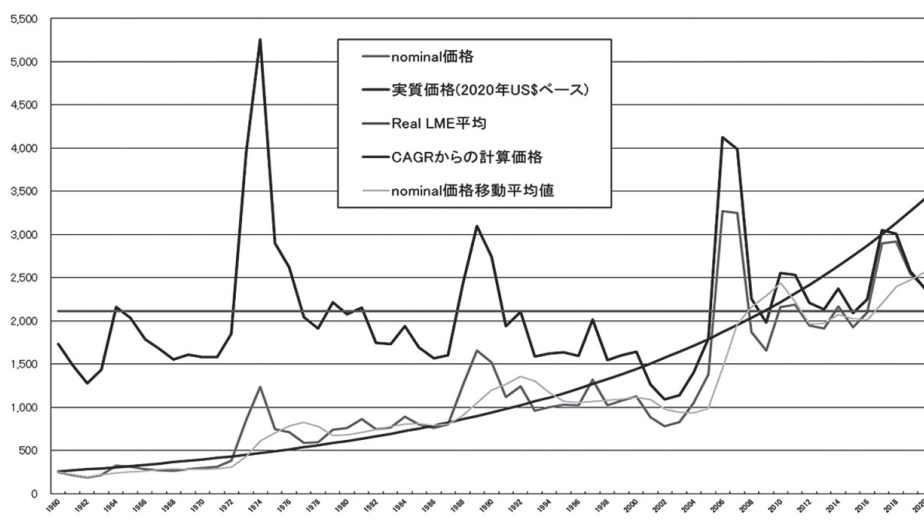
古い熱天秤は、感度は悪いものの0.数gまで載せることができたので、色々な昇温速度、雰囲気で熱天秤に載せてはX線回折を続けた。するとほぼ同じCu、Fe、S品位でもブーゲンビルはCuFeS₂主体、ディスプタータはCuFeS₂が少なく、Cu₂S、FeS、FeS₂の混合物と分かった。また還元雰囲気ではFeS₂のS一つが低温で遊離することが分かった。

続いて、珪酸鉱やコークスの塊鉱部と、水とリグニンと精鉱が練られた練り鉱部それぞれにシース熱電対を炉頂から差し入れて荷が下がっていく時の温度変化を調べた。塊鉱部は炉頂カーテン直後から直ぐに温度が上がるが、練り鉱部は水分があるので羽口直上まで低い温度で推移した。



出典：経済産業省・非鉄金属等需給動態統計調査

図2 亜鉛国内需要推移



出典：CRU Zinc Market Outlook 2021 January

図3 亜鉛価格推移

Sは本来なら羽口で燃えてくれれば燃料になっていたが、FeS₂含有量が多い鉱石はSの一部が還元雰囲気下の溶鉱炉上部で遊離し、エレメンタルサルファとして燃料にならないまま系外に出ていくということが分かった。FeS₂含有量が多い鉱石の時には、エレメンタルサルファでの遊離分を考慮して調合計算すべしというアウトプットだったが、FeS₂も全て燃料にできる自溶炉の優位性が良く分かった試験となった。

翌年、フィリピンのパサールに銅製錬所を建設することになり、鉱石中のSb、Asが高いということで除去の委託試験が舞い込んできた。精製炉羽口からライムとソーダ灰の混合物をインジェクションしてスラグ化することを試みた。

当時あったスラグと溶銅間のSb、Asの分配係数とかけ離れた値が出て行き詰まり、福中先生にご相談に伺った。平衡論ではなく、ライムを中心とした固液反応速度論で整理することで、なぜ高い除去効率になるのかの仮説を提示することができた。当時のしきたりでサード・オーサーだが、英文のプロシーディングにまとめると色々な国の人に引用して頂き、会社人としてやっていける自信になった。

銅溶鉱炉はその数年後に休止となり、私は雇用の受け皿として機能性粉体の新規事業に移ったが、その中の一つがマグネタイトだった。製錬所の排水処理工程に使われていた酸化チタン工場出の副産硫酸鉄を原料とした。

磁性を持ち、黒色であり、電気抵抗もあることで、モノクロレーザービームプリンターの一成分系トナ

ーの主原料に使われた。八面体、サイコロ状、粒状の0.1～0.2 μmの均斉の取れた粒子で、必要な磁性、着色度、隠ぺい力、流動性などお客様の要望に合わせ、形状を作り分け、粒度を揃え、化学処理や物理処理を施した。

当時世界最大規模の月産800tのマグネタイト専用工場で使用した合成槽は、神岡鉱山の選鉱場で開発されたナガーム浮選機を改良したものであった。ナガーム浮選機を用いることで、高濃度、高粘度、高比重の固液混合スラリーを均一分散、かつ微細で安定したエアレーションを得ることができた。また硫酸鉄溶液を完全溶解させずに、硫酸鉄結晶が含まれた過飽和状態で反応させることができ、生産性向上に大きく寄与したが、硫酸鉄結晶が第一鉄イオンのリザーバーとなり粒子の均斉にも寄与したと考えている。また硫酸鉄溶液中にアルカリを入れるのではなく、アルカリ溶液中に硫酸鉄を入れる逆中和も可能となり、原料の副生硫酸鉄に含まれるマンガン、マグネシウム、チタンなどの不純物の優先析出を抑え、同じく粒子の均斉を得ることができた。

このように初期の機能材料への川下展開は鉱山・製錬技術の移転によって化学メーカーとは異なるオリジナリティのあるものとなったと思っている。

5. 機能材料・部品への川下展開

他の川下展開の事例を示す。

5.1 電解銅箔

現在の三井金属の主力商品の一つが電解銅箔であ

る。昭和40年代に竹原製錬所の銅電解工場で枚葉型の箔製造、回転電極を導入しての連続箔製造、そして上尾工場で商業生産へと、製錬技術の移転によってなされた。当時竹原、日比の銅電解が高電流密度電解を採用していたことが役立った。その後1976年にアメリカ、1980年に台湾、1991年にマレーシアと海外展開した。

現在は厚み1.5～5 μm の極薄箔マイクロシンが主力となっている(図4)。電解液の高速流動で電気二重層を壊すことで極薄箔を均一に生成することが出来た。剥離層は銅の防錆に発想を得て有機系の剥離層を開発した。有機剥離層を介してキャリア銅箔に極薄箔を電析させるという発想で、世界のスマホの9割以上にマイクロシンが載っている。回路巾が40 $\mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$ 以下になりサブトラ工法では回路形成が難しくなってきた、マイクロシンを使ったMSAP工法が本格化した。MSAP工法とマイクロシンは切っても切れない関係にある。

ICパッケージから少し遅れて、マザーボードの回路巾も30 $\mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ になってくるとMSAP工法の適用が始まり、マイクロシンが使われ始めている。

近年半導体パッケージではファンアウトが注目され始めた。その登場に合わせ、キャリア銅箔に代わりガラス基板上に銅薄膜を成形したHRDPを上市した。2 $\mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ までの回路形成が可能であり、次世代半導体パッケージの薄板化、実装性向上にも資するものとなっている。マイクロシンとは似ても似つかぬものだが「剥がせる」というキーワードは一緒である。

5.2 電池材料

三井金属の電池材料は、1949年の電解二酸化マンガンの世界初の商用生産が始まりで、亜鉛粉、鉛合金、酸化カドミウムなどを開発してきた。1981年には竹原に電池材料開発に特化した電池材料研究所を設立した。そして1992年に無水銀電池用亜鉛粉を世界初上市、1997年に水素吸蔵合金がハイブリッド車用ニッケル水素電池で世界初採用、リチウムイオン電池の正極材では主にLMOを製造している。

現在耳目を集めているのは全固体電池用の硫化物固体電解質だが、これも亜鉛精鉱の焙焼炉をルーツに、無機EL材料となる硫化亜鉛製造を経て、硫化物固体電解質に繋がっている。幾つもの組成があるが、高いイオン伝導率を持つアルジロナイト型を中心に展開している。

5.3 薄膜材料

液晶パネルの透明導電膜に使われるITOターゲットも世界シェアトップクラスだが、Inは亜鉛製錬の副産物であり川下展開の一つと言える。In精製からITOターゲット生産、リサイクルまで自社内で一貫して行える唯一の会社となる。お客様でスパッタしてパネルになるITOはわずか5%で、戻りのターゲット材70%、チャンパーなどに付着したITO 25%、合わせて95%をぐるぐる回すビジネスモデルである。

酸化インジウムと酸化錫の混合物を成型、焼成する技術は、亜鉛製錬の精留塔に使われる匣鉢を内製しており、そのセラミックス製造技術から学んだ。

5.4 触媒

電池材料として始めた電解二酸化マンガンだが、1970年にその触媒活性を利用した自動車排ガス用触媒を開発した。しかし耐久性、耐熱性に限界があり、

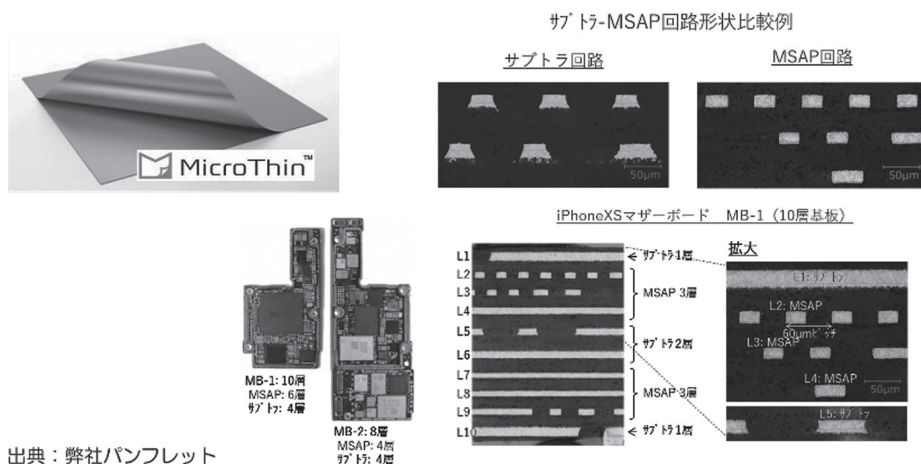


図4 マイクロシン

その後1976年に国産初のパラジウム・ハニカム触媒を上市，現在海外7拠点，国内2拠点で生産，二輪用途で世界シェア6割を占めている。

5.5 触媒

独立系として世界シェア20%とトップクラスのドアロックも，その黎明期は亜鉛ダイカストの用途展開であった。しかしながら軽量化・コストダウンで早々に樹脂成型に切り替え，亜鉛とは関わりがなくなった。現在海外12拠点で生産，従業員数は6000人と会社の半分を占めている。

ロジスティクスが事業の大きなポイントであるところは採鉱と似ており，事業のこれまでの拡大には資源出身エンジニアの活躍があった。

5.6 青果物糖度センサ

1980年代後半に，人工衛星ランドサットからの鉱床探査で用いられる探査技術を，桃の糖度の非破壊測定に転用できるのではないかと考え，世界初の果実糖度センサを開発した。当初は反射型だったが，透過型に変わり，現在は，桃から，みかん，スイカ，メロン，おにぎりまで，測定項目も，糖度から，水分，腐敗まで，青果物や食品の内部品質センサとして幅広く展開している。

6. 鉱山・製錬のその後

それでは祖業の鉱山・製錬はどうなったかを示す。

6.1 神岡鉱山の地下利用

神岡鉱山は2001年に鉱石の大規模採掘を休止したが，現在は地下空間活用でそのレガシーを活かして

いる。最も有名なのがスーパーカミオカンデである。1991年に空洞の掘削開始，1996年から観測開始，2016年には20周年式典が執り行われた。地表から1000mの深さにあり宇宙線の影響を極力排除している。

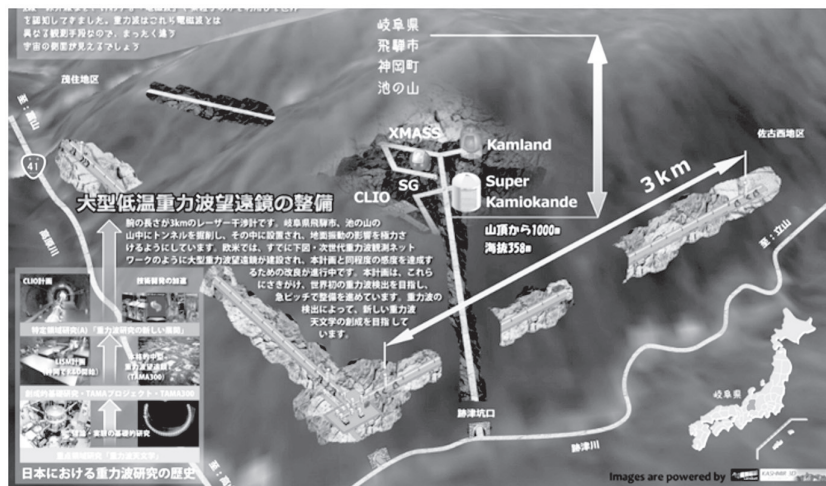
現在はカムランドとなっている初代カミオカンデ，スーパーカミオカンデ，KAGRA，XMASS，CLIO，SGなどの観測施設は旧茂住坑に設置されている（図5）。

2020年にはスーパーカミオカンデの感度アップのためガドリニウムが添加された。この高純度硫酸ガドリニウム14tは三井金属の関係会社である日本イットリウムが供給した。不純物であるトリウムの定量下限1pptの分析技術開発でこれを実現しており，精製技術・分析技術で鉱山・製錬に繋がっている。

現在スーパーカミオカンデの5倍の容量を持つハイパーカミオカンデが建設中である。KAGRAが振動を極めて嫌うので，8km離れた旧栃洞鉱に設置される。ハイパーカミオカンデの地下空洞は34万m³で，栃洞鉱最大であった10番鉱床の1.5倍の大きさとなる。

6.2 ペルーのワンサラ・パルカ鉱山

神岡鉱山の採鉱・選鉱技術はペルーのワンサラ・パルカ鉱山に引き継がれている。ワンサラ鉱山は2018年に開山50周年を迎えた。坑内掘りのため，開山当時と外観が変わらないのは地球環境にやさしいと言えるかもしれない（図6）。数少ない日の丸鉱山の一つとして，規模は小さいながら資源の安定供給に寄与している。これまでに二千万トンの鉱量を



東京大学 KAGRAホームページ
<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/multimedia/image> より

図5 神岡鉱山の地下利用

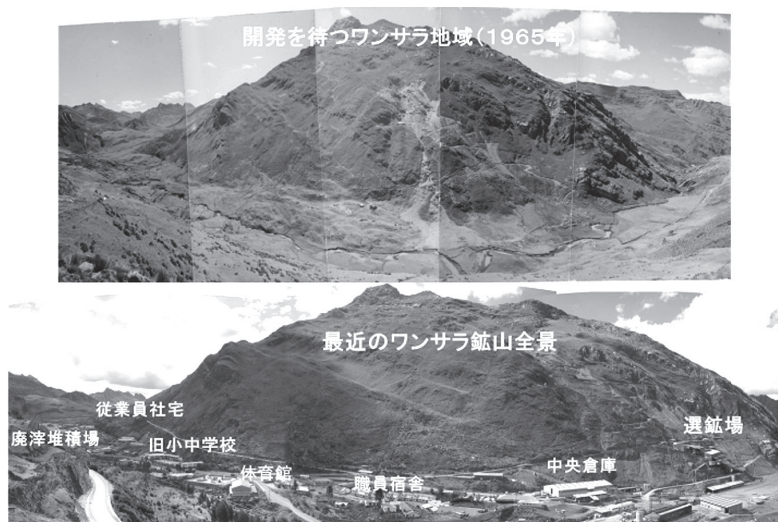


図6 ワンサラ鉱山

確認し、内4分の3は採掘済みで、ヤマとしては老齢期に入っているが、レクエルド深部の銅鉱床、パルカ鉱山標高4600m準のモリブデン鉱床など面白いものも見つかっている。またワンサラとパルカの中間にあるアトラヤでも調査を進めている。亜鉛価格のアップダウンに合わせ、ゴーアンドストップのオペレーションを行っている。

ワンサラ鉱山は2002年までに環境対応を完了し、ペルーの環境法適法の最初の鉱山となった。ワンサラ・パルカ鉱山とも自前の水力発電所を持ち、使用電力の7割を自給している。ワンサラの近隣のワジャンカ村にも余剰電力を供給し、環境及び地域に貢献している。

6.3 亜鉛リサイクル比率アップ

製錬のその後を示す。亜鉛製錬は、神岡、彦島、共同製錬である八戸の3製錬所体制を続け、リサイクル比率を世に先駆けてアップしてきた。世界のリサイクル比率が10%のところ、55%と世界最高水準である(図7)。

6.4 製錬ネットワーク

9つの製錬所で製錬ネットワーク(図8)を構築し、各製錬所から発生する中間品をやりとりして、20種類以上の元素種を回収している。亜鉛ネットワークとしては、彦島、神岡、八戸、そして粗酸化亜鉛製造の三池となり、鉛ネットワークとしては、神岡、八戸、竹原となる。この亜鉛・鉛製錬所を中心とする製錬ネットワークは、他社の銅製錬所を中心とする製錬ネットワークで厄介者となる鉛、ビスマス、錫、アンチモンなどを回収するという補完的意味合いも

大きいと考えている。

リサイクル製錬の要である鉛溶鉱炉は、神岡と竹原にあり、神岡はバッテリースクラップ主体、竹原は滓類主体の操業を行っている。滓類処理量アップのため、竹原の炉床面積を広げた。

6.5 多様性の島

概観してきたように、非鉄金属の中でも低収益の亜鉛に依存していた三井金属は否応なく川下展開せざるを得なかった。しかしながらマテリアルの知恵を活かすことで、川上も残しつつ、川下でもグローバルニッチ商品の集合体として事業活動を継続している。これからは鉱山・製錬を根っこに持って、多様性の島であり続けたい(図9)。

京都大学とのつながりでは、京大発ベンチャーであるミストCVD法のプロスフィア、多孔性配位高分子材料のアトミスと協業を進め、新しい島を創出している。

6.6 SDGsの取り組み

SDGsの取り組み(図10)を考える時、イタイイタイ病は最大の反省である。1972年以来、認定患者、要観察者の方々への賠償、農業被害への補償、汚染田の復元事業への協力、発生源である神岡鉱業での公害防止対策の実施などについて誠心誠意取り組んできた。2013年に被害団体の方々と当社の間で全面解決に至り、新たな枠組みの中で患者の方々への補償、健康管理支援一時金制度の実施、公害防止対策の更なる充実を図っている。

思い返せば、会社内定後に倉知先生の授業に出ていたら、お前三井金属鉱業に入社だってとお声

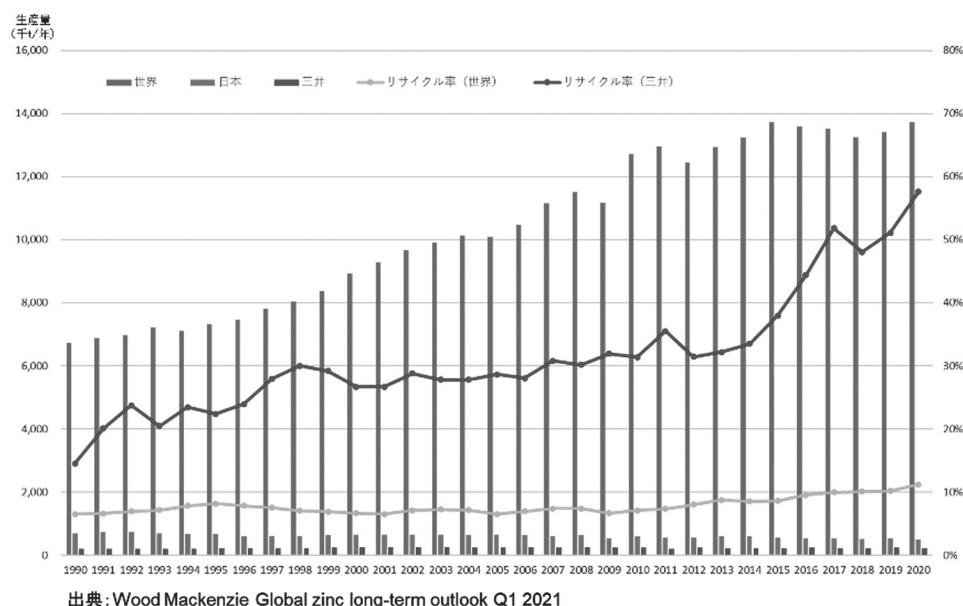


図7 亜鉛生産量とリサイクル比率推移



出典：Esprit No.68 2021年4月

図8 製錬ネットワーク

をかけて頂き、社会には幕引き役も必要だからな
と先生の御本を渡された。直接の関わりは無かっ
たが、2013年の全面解決は誠に感慨深く、当時
のお言葉を思い出した。

7. 終わりに

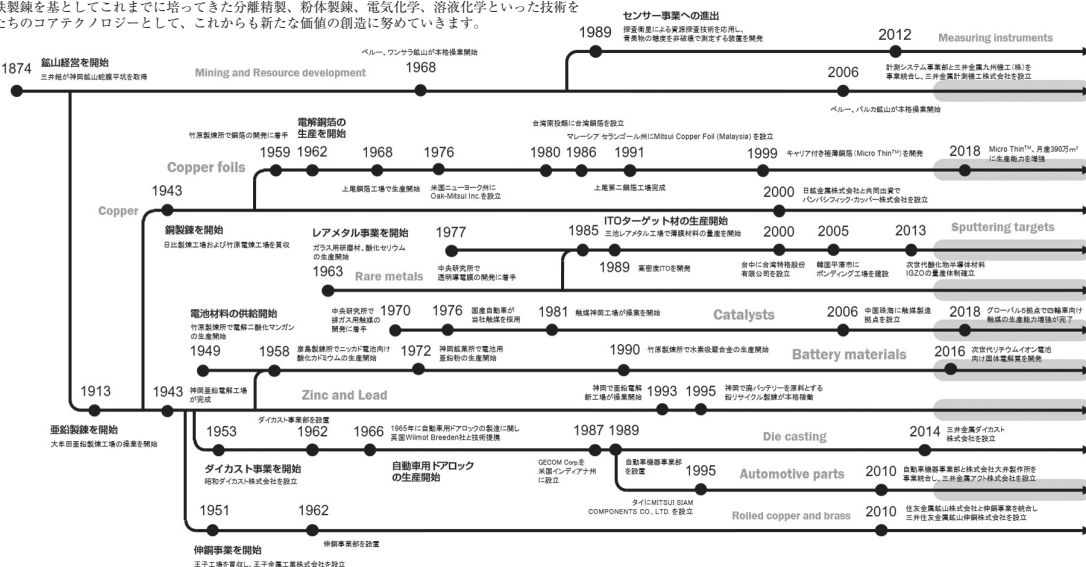
振り返ると40年間様々な出来事があったが、1980年に史上最高価格6500円だった金が高値を更新したのが2020年であることは、非鉄金属のレジリエン

スを象徴していると思う。三井金属鉱業にとっては選択と集中より分散とネットワーク化の40年間であった。

コロナは足元の最大の危機だが、地球温暖化は今後数十年単位の長期の危機である。1.5℃シナリオ達成のためには、2030年まで毎年7%のCO₂削減が必要となる。コロナ禍の2020年のCO₂削減量が5.8%だったから、これ以上の削減を毎年続けることになる。CO₂排出量だけで見れば、40年前の1980年に時計の

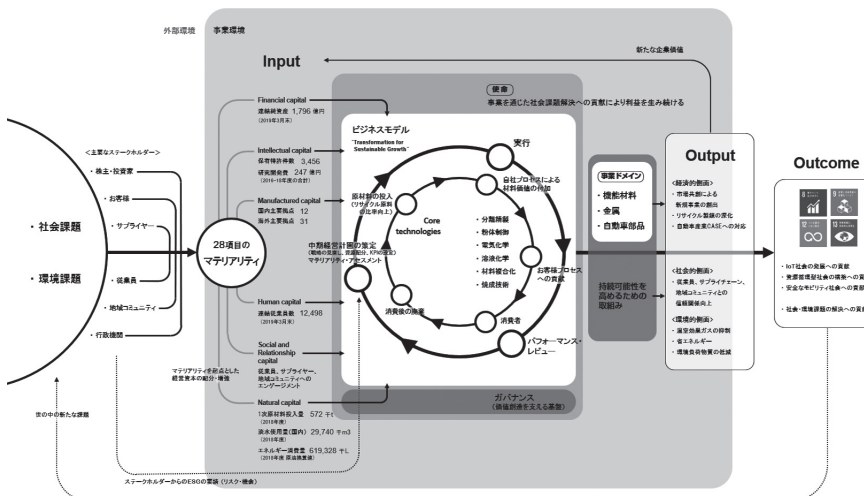
三井金属の事業のあゆみ

地球からの恵みである資源を開発し、非鉄金属を製錬すること、それが私たちの出発点です。鉄金属素材に付加価値を加え、あるいは加工し、さらには組み立てて、多くの産業に欠かすことができない材料や部品を供給し続けてきました。非鉄製錬を基としてこれまでに培ってきた分離精製、粉体製錬、電気化学、溶液化学といった技術を私たちのコアテクノロジーとして、これからも新たな価値の創造に努めています。



出典：統合報告書2020

図9 多様性の島としての三井金属鉱業



出典：統合報告書2020、CSR報告書2017

図10 SDGsの取り組み

針を戻すことになる。三井金属鉱業の国内CO₂排出量は日本全体の0.1%にしか過ぎないが、数十年の単位でCO₂削減を継続しなければならない。

緩やかな環境の変化なら適応可能でも、急激な環境の変化では撤退か滅亡しかない、一旦環境が悪化するとそれに対処できるのは普段からそれに慣れていた弱者という。辺境の地にこれからもイノベーターが生まれてくるのを期待している。

8. 謝 辞

本報は2021年6月5日水曜会大会における講演をまとめたものである。2020年2月に平藤先生より内々に講演依頼を頂いたが、直後のコロナ禍で1年越しの発表となった。拙いリモートでの発表であったが、自身の会社生活を振り返る又とない機会を与えて頂いた皆様に深く感謝したい。

現在の中心的な事業にメインを構成している分野
* 各事業の主な出来事・取組みのみを記述しています

日本の近代化、産業の発展に貢献してきた神岡鉱山には、公害の原因を生み出した事業拠点という側面があります。水俣病、新潟水俣病、四日市ぜんそくとともに、日本の高度経済成長期における「四大公害病」として知られるイタイイタイ病です。

1910年代から富山県神通川流域で発生した病、1955年（昭和30年）に新聞にイタイイタイ病として初めて報道され、世の中から注目されるようになります。1968（昭和43）年、被害者家庭から成る原告、当社三井金属が被告として始まった訴訟は原告側全面勝訴となった1972（昭和47）年の控訴審まで続きました。

以来当社は、イタイイタイ病認定患者、要観察者の方々への賠償、農業被害への補償、汚染田の復元事業への協力、発生源である神岡鉱業での公害防止対策の実施について誠心誠意取り組んでまいりました。2013年（平成25年）12月に、神通川流域カドミウム被害団体連絡協議会等と当社の間で神通川流域カドミウム問題の全面解決に至り、新たな枠組みの中でイタイイタイ病患者の方々への補償、健康管理支援一時金制度の実施、公害防止対策のさらなる充実を図ることになりました。

このような問題を二度と発生させないために、三井金属グループではとくに環境汚染の予防を重点に据え、環境管理体制の強化と教育の徹底に努めています。

大会記念講演

カーボンニュートラルと日本の産業界の対応

堀 史 郎*

Carbon neutral and strategy in Japanese industry sectors

by Shiro HORI

1. は じ め に

「我が国は2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指すことをここに宣言する」。菅義偉首相は昨年10月の臨時国会でこのように、2050年までに、温暖化ガスの排出を「全体としてゼロ」とする方針（いわゆるカーボンニュートラル）を内外へアピールした。すでに世界120カ国超が打ち出している目標で、日本も今後2050年に向けて国を挙げての取り組みが求められている。しかし、その実現となると決して容易ではない。特に、電力供給における再生可能エネルギーの飛躍的な拡大や産業界における革新的技術の導入が必要となる。

この宣言を受けて昨年12月に開催された総合資源エネルギー調査会（以下「総合エネ調」という）において、2050年の再生可能エネルギー電源を5～6割にする案が示された。また、日本の産業界も2050年、カーボンニュートラルに向けた動きを打ち出している。日本自動車工業会は2020年12月に「2050年カーボンニュートラルに向けた取り組み」を発表し、日本鉄鋼連盟は2021年2月に「我が国の2050年カーボンニュートラルに関する日本鉄鋼業の基本方針」を発表した。さらに、5月には、電気事業連合会が、「2050年カーボンニュートラルの実現に向けて」を発表している。

国際的な動きとしては、4月22日に、米国主導で気候サミットが開催され、ここで、日本は、2030年までの46%削減を打ち出している。IEA(国際エネルギー機関)は、IEA Net Zero by 2050と題するレポート

を5月18日に発表し、2050年までのカーボンニュートラルに向けた道筋を示した。このように、世界的レベルでも2050年目標に向けた取り組みが加速している。

2. カーボンニュートラルがもたらすもの

国際的なカーボンニュートラルに向けた道筋を、IEA Net Zero by 2050レポートで見よう。2050年のネットゼロを達成するには、まず2030年までに、すべての新築の建築物でゼロカーボンreadyとすること、先進国では対策がなされていない石炭利用を段階的に停止すること、電力部門では先進国は2035年までに、世界的には2040年ころまでにネットゼロ排出とすること、などがうたわれている。ただし、運輸や産業の一部は2050年になっても、CO₂排出ゼロは難しいため、全体でのネットゼロのためには、BECCS（CCS（CO₂回収・貯留）とバイオマスエネルギーを組み合わせた技術）、DACCS（CO₂の直接大気回収と貯留を組み合わせた技術）といったCO₂排出をマイナスにする技術（ネガティブエミッション）の導入が必要になる。具体的な方策で見てみるとネットゼロに向けた貢献としては、2030年までは風力と太陽光発電の導入が最も貢献が大きく、次いで、電化と省エネとなっている。しかし、このためには、2030年までに、風力・太陽光は、現在の3倍の容量になり電源構成の6割を占めることが必要となる。省エネは、2030年まで毎年エネルギー強度を4.2%づつ改善することが前提となっている。2050年までの道のりを見ると、電化が最も貢献が大きく、次いでCCUS（炭素分離貯蔵・利用）となっている。電化とは、化石燃料に頼るエネルギーから脱炭素電源への転換であり、この結果、2050年には電力供給が2020年に比べて2倍になると想定されている。電化による2050年までの排出削減

*福岡大学教授

量は、総削減量の2割となると想定されている。

このような大規模なエネルギー供給、エネルギー使用の転換には、当然、大きな経済変革を伴う。IEAがIMF（国際通貨基金）と共同で試算したGDPの成長率見通しは、カーボンニュートラル戦略をとった場合、現在の政策の延長モデル（STEPS）による成長と比べて、年率で0.5%成長を押し上げる効果があるとされている。また、2030年までに再生可能エネルギーセクターにおいて、900万人の新規雇用が生まれ、3000万人の新たな技術者のニーズが発生すると試算されている。ただし、このような産業構造の転換が起きるためには、現在まだ実証段階にある、もしくはプロトタイプ段階である技術の実用化が前提であり、CO₂排出削減の半分は、こうした技術の実用化によってもたらされると想定されている。

さて、日本の2050年電源目標は、2020年12月に総

合エネ調基本政策分科会において経済産業省の試算として提出された。（図1、2）、2050年までの電源構成を、再エネ6割、原子力と化石燃料（+CCUS）で3～4割、水素・アンモニアを使用した火力で1割前後、という推計がだされている。これを、諸外国の2050年目標と比較するとどうであろうか。例えば、島国で他の隣国からの電力輸入が期待できないという日本と条件が似ている、イギリスと比較してみよう。イギリスのネットゼロレポートは2019年に公表され、再エネ約6割、火力（+CCS）が2割、原子力が1割となっており、日本の電源構成に比較的類似する構成になっているといえよう。ただし、日本の電源コストは諸外国（欧州、米国、中国）と比べて高く、今後、再エネの大量導入によりどのようにコストを低減させるかが、重要な課題となってくる。

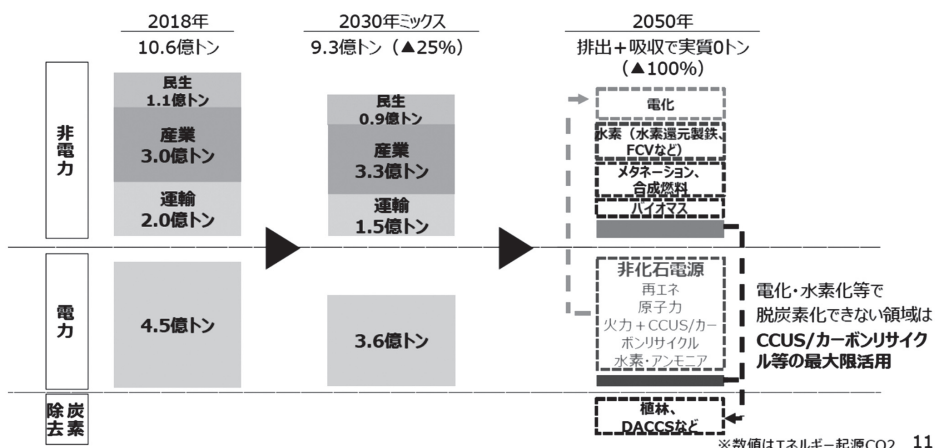


図1 2050年のエネルギー供給見通し 資料：総合資源エネルギー調査会（2020年12月）

確立した脱炭素の電源	再エネ	2050年における主力電源として、引き続き最大限の導入を目指す。 - 最大限導入を進めるため、調整力、送電容量、慣性力の確保、自然条件や社会制約への対応、コストを最大限抑制する一方、コスト増への社会的受容性を高めるといった課題に今から取り組む。 - こうした課題への対応を進め、2050年には発電電力量（※1）の約5～6割を再エネで賄うことを今後議論を深めて行くにあたっての参考値（※2）としてはどうか。
	原子力	- 確立した脱炭素電源として、安全性を大前提に一定規模の活用を目指す。 - 国民の信頼を回復するためにも、安全性向上への取組み、立地地域の理解と協力を得ること、バックエンド問題の解決に向けた取組み、事業性の確保、人材・技術力の維持といった課題に今から取り組んでいく。2050年には、再エネ、水素・アンモニア以外のカーボンフリー電源として、化石+CCUS/カーボンサイクルと併せて約3～4割を賄うことを今後議論を深めて行くにあたっての参考値（※2）としてはどうか。
イノベーションが必要な電源	化石+CCUS	- 供給力、調整力、慣性力の利点を持つ一方で、化石火力の脱炭素化が課題。 - CCUS/カーボンサイクルの実装に向け、技術や適地の開発、用途拡大、コスト低減などに今から取組み、一定規模の活用を目指す。2050年には、再エネ、水素・アンモニア以外のカーボンフリー電源として、原子力と併せて約3～4割を賄うことを今後議論を深めて行くにあたっての参考値（※2）としてはどうか。
	火力	- 燃焼時に炭素を出す、調整力、慣性力の利点を持つ一方で、大規模発電に向けた技術確立、コスト低減、供給量の確保が課題。今からガス火力、石炭火力への混焼を進め、需要・供給量を高め安定したサプライチェーンを構築にも取り組む。 - 産業・運輸需要との競合も踏まえつつ、カーボンフリー電源として一定規模の活用を目指す。水素基本戦略で将来の発電向けに必要な調達量が500～1000万トンとされていることを踏まえ、水素・アンモニアで2050年の発電電力量の約1割前後を賄うことを今後議論を深めて行くにあたっての参考値（※2）としてはどうか。

図2 2050年の電源構成の見通し 資料：総合資源エネルギー調査会（2020年12月）

3. 再生可能エネルギーの主力電源化は可能か

前節でみたように、2050年には、日本の電力構成の5～6割は再生可能エネルギーで占められ、再生可能エネルギーが日本の発電の主力を担うことが期待されている。2020年12月に開催された総合エネ調において、いくつかの調査機関からの電源構成の試算が提示された。例えば、電力中央研究所から2050年の太陽光・風力推計に基づく再生可能エネルギー導入量が約4億kw、発電電力量が6500億kwhという数字が提示されている。この数値は、出力制御を要請される割合を勘案すれば、電力構成の4割～5割となっており、水力の1割を加えれば、目標値5～6割に似た数字になる。この目標値の達成のため、すなわち、再生可能エネルギーの主力電源化のための課題と展望を考えよう。2019年における電源構成は、火力が7割を占め、水力が8％、太陽光が7％、風力が1％であった。すなわち、現在の再生可能エネルギーは水力と太陽光が占めており、今後太陽光発電に期待するところが大きい。他方、太陽光発電には、太陽光パネルを設置する土地が必要となり、すでに、森林を除いた設置可能地域での設置率は日本は世界でも非常に高い。すでに、日本では利用可能な土地が少なくなっているという問題がある。では、風力発電はどうであろうか。上記の電力中央研究所の試算では、風力が陸上で4100万kw、洋上が4700万kw、合計8800万kw必要になると試算された。洋上風力においては、官民の協議会がとりまとめた「洋上風力ビジョン」において2040年

までに3000万kw～4500万kwとさらに前倒しの実現が提言されている。この目標値は、現在の風力導入量420万kwと比べると、実に20倍であり、いかに壮大な計画であるかがわかるであろう。日本風力発電協会は、1000万kwの洋上風力発電の建設に必要な資金は、直接投資5～6兆円と試算しており、4500万kwなら、（単純推計で）22～27兆円の規模になることになる。これだけの投資の負担は、電気料金となって国民負担になってくる。FITでの国民負担はすでに3.6兆円となっており、FITの買取費用は、7割近くが事業用太陽光発電である。さらに、約6割が、制度発足の2012年から2014年の3年のうちに買取が決定した施設に由来する（表1）。買取費用は20年間の買取価格を保証しているため、当初3年間の高い買取費用の設定が、今後も長期間影響することを意味している。このように、今後、洋上風力の導入が加速化する段階であるので、初期の発電コストをどのように低減させるかは極めて重要な課題である。

4. 水素とアンモニア

カーボンニュートラルの取組には、電源の脱炭素化とともに非電力部門における水素利用やメタネーションなどの取組が不可欠である。すなわち、産業や輸送においては、電気への代替が困難なセクターが存在し、そうしたセクターにおいては、化石燃料に代替するエネルギー源として水素やアンモニアといった燃料が必要となってくる。電化が困難なセクターとしては、高温のエネルギーが必要な産業、運転中の電力供給が難しい航空機などがある。現在、こうした代替燃料として、水素、有機ハイドライド、アンモニア、メタネーションなどがあるが、それぞれ、利点と欠点がある（表2）。パリ協定に基づく長期計画では2030年に300万トンの導入量、2050年には2千万トンの導入を目指すことになっている。水素導入コストは、現在の100円/Nm³程度から2030年には30円にさらに2050年には20円に下げることが目標となっている。現在の水素の調達コストとしては、電力中央研究所の試算では、国内で再エネ電力を利用した場合の53円、豪州の褐炭由来水素は41円と試算されている（電力中央研究所報告M19003）。国内の製造コスト53円は、再エネ電力のコスト低減と電解装置のコストを3分の1程度に下げていくことが求められている。欧州での水素製造は、再エネ電力の余剰電力利用を想定しているので、電力調達コストが非常に安いと思われる。他方、日本では、そもそも、再エネ電力が足りていないので、水素製造用に余剰電力を充当するとすれば設備利用率が極端に悪くなる（上記の試算によれば、設備利用率8％）。豪州からの褐炭由来水素は、製造コスト自体

表1 買取費用の内訳

資料：総合資源エネルギー調査会基本政策分科会
(2020年11月)

＜買取総額の内訳＞			
住宅用太陽光		0.3兆円	8%
事業用太陽光	2012年度認定	0.8兆円	21%
	2013年度認定	1.0兆円	58%
	2014年度認定	0.4兆円	11%
	2015年度認定	0.1兆円	3%
	2016年度認定	0.1兆円	3%
	2017年度認定	0.06兆円	2%
	2018年度認定	0.05兆円	1%
	2019年度認定	0.01兆円	0%
	2020年度認定	0.002兆円	0%
(合計)		(2.5兆円)	(66%)
風力発電		0.2兆円	5%
地熱発電		0.02兆円	0.5%
中小水力発電		0.09兆円	2%
バイオマス発電		0.7兆円	18%
合計		3.8兆円	—

表2 水素等の特性 資料：資源エネルギー庁資料(2021年)をもとに筆者作成

	液体水素	有機ハイドライド	アンモニア	メタネーション
体積(対常温常圧水素)	1/800	1/500	1/1300	1/600
状態	液体(-253度、常圧)	液体(常温常圧)	液体(-33度、常圧等)	液体(-162度、常圧)
毒性	なし	あり	あり	なし
高純度化	容易	追加設備	追加設備	追加設備
特性変化時の消費エネルギー	25～35% 将来18%	35～40% 将来25%	水素化7～18% 脱水素化20%	-32%
技術的成熟度	液体水素ローリー等の国内運搬設備は成熟	水素化・脱炭素プラントは実証段階	脱炭素設備が成熟	国内外で実証試験
	国際運搬用の大規模液化機、運搬船等はこれから開発	国内外の運搬には既存のインフラ可能	国内外の既存サプライチェーン利用可能	国内外の既存サプライチェーン利用可能

は10円程度であるが、輸入に係るコストが21円かかり、今後、30円の目標に近づけるなら国際輸送等の設備費を半減する必要がある。各地の水素製造コストを比較したIEAの試算によれば、サウジアラビアで天然ガスから製造される水素が最も安価とされる。他方、中東からのエネルギーの輸入はエネルギーセキュリティの観点からの脆弱性を考える必要がある。水素利用は、ローカル、モビリティ、パイプライン、トレードと需要の拡大に従って、進化するといわれている。今後、水素の大量使用に伴う水素貿易が拡大する場合、エネルギーセキュリティからの検討を再度見直す必要がある。

5. 企業は具体的にどのように取り組むか

さて、企業にとっての気候変動対応の今後の課題は、情報開示、社内体制、資金調達があげられる。気候変動に関する情報開示については、2017年にTCFD（気候関連財務情報開示タスクフォース）が報告書を公表している。TCFDはG20からの要請を受けた金融安定理事会が2015年に設置したものであり、企業のガバナンス、戦略、リスク管理、指標・目標の4項目について開示することを求めている。TCFDは、対象とする気候関連リスクを非財務情報と位置づけ、各国の開示要件に従って、年次財務報告への記載を原則として奨励している。これを受けてイギリス財務省は2025年までに、気候変動が財務や事業に与える影響に関する情報の開示を企業に義務付けると表明した。

社内体制については、TCFD勧告においても、適切な社内体制の構築が求められているが、特に、気候変動のリスクと機会は全事業部に及ぶため、全社的な対応が必要となっている。すなわち、これからは取締役会や担当部署の対応、といった全社的なガバナンスがますます重要となってくると思われる。筆者らが食品会

社の担当者を対象に行ったアンケートにおいても、長期シナリオの実施にあたっての課題としては、データの不足とともに、社内認知度をあげた回答の割合が高かった。東京証券取引所は、こうした企業の企業統治の在り方について、コーポレートガバナンスコードを改訂し、①取締役会は気候変動などの地球環境問題への配慮～（中略）～など、サステナビリティを巡る課題への対応はリスクの減少のみならず収益機会にもつながる重要な経営課題であると認識し、中長期的な企業価値の向上の観点から、これらの課題に積極的・能動的に取り組むよう検討を深めるべきである（原則2-3）、また、②プライム市場上場会社は、気候変動に係るリスク及び収益機会が自社の事業活動や収益等に与える影響について、必要なデータの収集と分析を行い、国際的に確立された開示の枠組みであるTCFDまたはそれと同等の枠組みに基づく開示の質と量の充実を進めるべきである（原則3-1）、と記載している。

資金調達については、気候変動に対応するためには巨額の投資が必要となると見込まれており、2040年までの累計で約7000兆円規模の投資が必要とされている（IEA）。このような投資は、再生可能エネルギー等のグリーン投資の推進に加え、排出削減の困難なセクターにおける低炭素化など、脱炭素へのトランジション（移行）を図っていくことも重要とされている。また、気候変動対応は、IEAが述べたように、いまだ実用化していない技術によって、総排出量の5割を削減していくことが期待されている。金融庁は経済産業省、環境省とともに、トランジションファイナンスの基本方針を取りまとめ、気候変動への対策を検討している企業が、長期的な戦略に沿った温室効果ガス削減の取組を行っている場合、その取り組みを支援する金融手法について、2021年5月に取りまとめを行った。

それでは日本企業はこのような気候変動への対応をどのように行っているのでしょうか。筆者らは、2019年5月に売上高1000億円以上の企業（公営企業、中小金融機関等を除く）1700社に対し、アンケート調査を行った（有効回答数235）。まず、自社の企業理念は気候変動と整合的であると回答した企業は8割近くになっている。また、気候変動対策は企業にとっての義務であるとの質問に対して、強く思うとの回答が8割、ややそう思うとの回答を併せると99%の企業が気候変動を企業の義務としてとらえている。また、7割の企業が気候変動の数値目標を設定しており、長期ビジョンを設定もしくは策定中の企業が45%に達している。企業にとって、情報開示、やファイナンスは気候変動の強いインセンティブになることは、この調査でも表れている。長期目標の設定と情報開示は強い正の関係があること、金融の差別化は数値目標の設定や長期ビジョンに、インセンティブになることが調査結果から分かっている。なお、この調査結果から、業種により取り組みや考え方に差がみられる。気候変動は生産性向上に寄与すると答えた企業が製造や建設では高かったのに対し、卸売り、小売り、サービスでは低かった。気候変動はビジネスチャンスになるとの回答は、全業種では、8割近い企業が肯定的であるが、小売り、サービスでは低かった。気候変動はリスクになりうるかとの質問は、全業種では6割以上の企業が肯定したが、製造やエネルギーでは高く、建設、運輸、サービスなどでは低い傾向がみられた（表3）。

6. 日本の鉄鋼業と自動車業界はどうするか

さて、日本の産業界は、2050年カーボンニュートラルに向けた対応策を打ち出している。産業界の対応には、どのような課題と可能性があるであろうか。鉄鋼業界と自動車業界の対応について、これらの問題を概観してみよう。

日本鉄鋼連盟は、2021年2月に「我が国の2050年カーボンニュートラルに関する日本鉄鋼業の基本方針」を公表した。この中で、「カーボンニュートラルという野心的方針に賛同し、これに貢献すべき、実現に向けて果敢に挑戦する」と述べている。このように、方針に賛同しつつ、その達成の道のりが不確実性が大きいと、実現に向けて挑戦する、という考え方は、他の産業界の方針にも共通する考え方となっている。従来は、日本の産業界としては実現が見通せない目標にコミットするということは、非常に慎重であった。しかしながら、世界的な流れとして2050年カーボンニュートラルが共通の目標となりつつあり、これに対応しないことには世界貿易においても不利になるという状況が生まれつつある。そうであれば、むしろ、自社、あるいは業界団体として、その実現に挑戦しつつも、課題を明確にして、自社あるいは業界団体がスムーズな脱炭素に移行できるような道筋をリードする方が利益になる、という考え方に転換しつつあるといっていよいであろう。

もちろん、鉄鋼のような産業の脱炭素化は、困難な道筋である。したがって、日本鉄鋼連盟も、「現在鋭意推進中の「COURSE50 やフェロコークス等を利用した高炉のCO₂抜本的削減+CCUS」、更には「水素還元製鉄」といった超革新的技術開発への挑戦に加え、スクラップ利用拡大や中低温等未利用廃熱、バイオマ

表3 企業の業種別の気候変動への取組姿勢

業種	1 企業理念は気候変動への対応に影響を及ぼす	2-1 気候変動は生産性向上に関係する	3 気候変動がビジネスとなる可能性	4 気候変動はビジネスのリスクとなる可能性	5 気候変動対策を行うことは企業活動として当然と思う	6-1 事業活動でCO ₂ を減している	6-2 CO ₂ 削減に貢献する製品の開発・販売をしている	6-3 途上国に技術移転をしている	6-4 取引先・購買先にCO ₂ 削減を求めている	7 気候変動対策はコスト増要因になる
建設業	4.8	4.6	5.0 *	3.8	4.9	4.9 *	4.8 *	2.5	3.8	4.0
製造業	4.3	4.4 *	4.5	4.2	4.9 *	4.7 *	4.5 *	2.8 *	3.5	4.1
電気・ガス業	4.8	4.3	4.7	4.6	4.9	4.9 *	4.4	4.1 *	3.6	4.7
運輸業	4.0	4.3	4.3	3.7	4.8	4.6	3.6	2.7	3.3	4.2
卸売り・小売業	3.5	3.6 *	3.8	3.7	4.5 *	4.3	3.7	1.9 *	2.7	3.6
金融・保険業	3.6	3.5	3.8	3.7	4.8	3.7 *	3.1 *	2.2 *	2.9	3.3
その他サービス	3.7	3.7 *	3.8 *	3.6	4.6	4.4	3.4 *	2.1 *	2.6	3.6

資料：筆者作成（2021）

注）数字は、5段階評価（5:強く思う～1:思わない）の回答企業の平均値

ス活用などあらゆる手段を組み合わせ、複線的に推進する」と述べている。このように気候変動対応の方策としていくつかの選択肢が掲げられているが、気候変動対策においては気候変動現象の不確実性ととも、政策の不確実性も大きい。例えば、政策対応が強化されれば、炭素税などによって、利益の減少が生じるかもしれない。逆に対策が何も取られないと、水害等によって損害が発生するかもしれない。あるいは、事業への社会的評価が低下してビジネスにマイナスの影響が出るかもしれない、というリスクが複合的に存在している。加えて、気候変動への対応は自社のみにあって達成できるものではなく、社会全体の対応が必要という面も重要である。日本鉄鋼連盟の資料には、「ゼロカーボンスチールを目指すための外部条件として下記が不可欠である」と記載されており、具体的には、ゼロエミ水素の大量安定供給、CCUSの社会実装、などがあげられている。究極の技術と目される、水素還元製鉄には、大量の水素が必要である。日本の鉄鋼生産量8千万トンに必要な水素量は800億 m^3 と試算され、現在の鉄鋼価格と同等な生産のためには、約8円/ Nm^3 での水素供給が必要とされている。鉄鋼生産の革新的技術の実装には、このような、水素供給が調達できる社会システムが求められている。

自動車業界の実現へのプロセスも複合的である。日本自動車工業会は2020年12月に「2050年カーボンニュートラルに向けた取り組み」を公表した。「自動

車業界を挙げてチャレンジする、ただ、大変難しいチャレンジであり、しかも、自動車業界の取組だけでは対応が難しく、国のエネルギー政策そのものと関連がある」と述べている。自動車のカーボンニュートラル化においては、材料、製造、走行、廃棄のすべての段階で発生する CO_2 を計算することが求められている。したがって、製造段階で消費する電力のゼロエミ化が必要となる。フォルクスワーゲンが2020年にプレス用にリリースした資料によれば、EV(電気自動車)の製造工程の CO_2 発生量(57 g/km)はエンジン車(29 g/km)を上回る。また、走行1kmあたりの CO_2 排出量は、ゼロエミ電力だと590 gだが、ドイツ(4割が化石由来電力)だと142 g、中国(7割が化石由来電力)だと182 gであり、現行ではディーゼル車の排出量140 gを上回っている。ちなみに日本はドイツと中国の中間くらいである。したがって、現状では、ガソリン車より CO_2 を3割程度減らせる、HV(ハイブリッド車)が一番 CO_2 の排出が少ない、という試算結果がだされている(図3)。また、仮にFCV(燃料電池自動車)が導入されても、水素の製造に伴う CO_2 の発生量が重要となる。自動車の脱炭素化は、EVやFCVを増やすことだけで、解決する問題ではなさそうである。

このように、気候変動問題の解決には、個別の業界の取組はもちろんであるが、社会システム全体として、電力の再エネや安価な水素の調達という課題と並行して取り組んでいく必要がある。

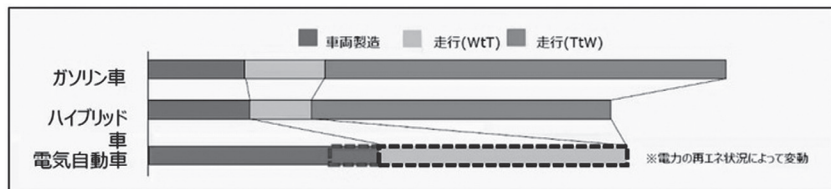
1. 自動車のカーボンニュートラル化のポイント (2)

jama

②カーボンニュートラル実現に向けた課題

- 自動車業界にとっても、サプライヤー含む生産の脱炭素化が進まなければ、欧米への輸出が阻害され、競争力喪失する可能性あり
- 安価な再エネ普及が必要

部品/車両製造・燃料製造時含めた CO_2 削減(再エネ化)が必要だが、再エネの入手性やコスト面課題が産業競争力に大きく影響。



以上

出典：IEA Global EV Outlook 2020（第4.2回）のデータセットに2017年の日本の電力原単位を加味して算出

6

図3 自動車のカーボンニュートラル化の比較
資料：日本自動車工業会（2020年12月）

7. 終 わ り に

2015年に合意されたパリ協定では、世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2度より十分低く保つ（2度目標）とともに、1.5度に抑える努力を追求する（1.5度目標）とされた。この2度目標のためには、2050年には、排出量を現状の6割～8割削減する必要があるといわれている。そして、1.5度目標のためには、2050年の排出量をネットゼロにする必要があり、このためには、さらなる革新的技術の開発、ネガティブエミッション技術（BECCS, DACCS）の実用化、人々の行動変容が必要とされる。しかし、こうした、技術の開発、ネガティブエミッション、行動変容は、実現に不確実性が高い。特に、CCUSの社会的受容性の問題と並んで、BECCSに含まれるバイオエネルギーは、食料安全保障との関係で、反対する意見も増えつつあり、IEAもバイオマスエネルギーの見通しを引き下げ

ている。EUは、2021年7月に2050年までにカーボンニュートラルを目指す気候変動対策計画を発表した。しかし、これも合意に至るまで数年を要するであろう、と言われている。

このように、気候変動対応には不確実性が多く、将来のことは明確にわからないことも多い。しかし、気候変動問題は、企業にとり、リスクとともに機会でもある。したがって、これに備えをしておくとともに果敢にチャレンジをしていくことが大事である。

こういう不透明な未来に向かうにはどうすればいいであろうか。関西弁に、非常にマッチしたことがあある。こういう精神が気候変動には重要ではないかと筆者は思うのである。

せないかんやろ。けど、どうなるか、まあ、知らんけど。

談 話 室

金鉱山と実験室における断層面近傍の不均質変化

吉 光 奈 奈*

Heterogeneity change around the fault zone in a gold mine and laboratory rock samples

by Nana YOSHIMITSU

1. は じ め に

2021年3月1日に社会基盤工学専攻 資源工学講座 地殻開発工学分野の助教として着任いたしました，吉光奈奈と申します．このようなご挨拶の機会を与您いただき，お礼申し上げます．

私は立命館大学理工学部物理科学科を卒業後，修士課程を経て，立命館大学大学院 理工学研究科 総合理工学専攻において川方裕則先生のご指導の下で博士（理学）を取得いたしました．その後，東京大学地震研究所やStanford Universityでの研究員としての勤務を経て，本学に着任いたしました．本稿ではこれまでの研究の一部として，金鉱山と実験室という2つの異なるスケールにおける，せん断すべりに伴う断層周辺の不均質構造の変化を透過波を用いて観測した事例についてご紹介させていただきます．

2. 金鉱山における断層透過波の減衰

立命館大学の物理科学科にはナノ物理から宇宙，理論から実験まで多彩な研究室がありましたが，そのうちの一つに地震学をテーマとして取り扱う固体地球物理学研究室がありました．卒業研究の配属先を選ぶ際に，小笠原宏先生と川方先生が携われていた南アフリカ金鉱山（以下南ア金鉱山）における地震観測に興味を抱き，この研究室への配属を希望しました．この研究室で先生方がおこなっていた研究の一つに，金鉱山の地下数kmの坑道に赴いて地震計やひずみ計などの観測機器を設置し，数年にわたる長期観測をおこな

うというものがありません．断層帯から数百mしか離れていない震源近傍まで自らの足でアクセスして観測と解析に取り組むという，この研究室でしかできない研究内容が面白そうだと感じていました．

卒業研究では，断層成長とその周囲の岩盤内における亀裂の増加を，地震波を使って推定する研究に取り組みました．1960-70年代におこなわれた岩石の圧縮破壊実験により，断層すべりが発生する際に，破壊に先立ち試料の体積増加が起こることが知られていました（Scholz et al., 1973）．この現象はダイラタンシーと呼ばれ，試料内部に亀裂が増加したことを反映していると考えられています．実験研究の観測事例を受け，このようなダイラタンシーが自然環境で観測できれば地震発生予測にもつながるのではないかと期待が高まりましたが，その後の観測では地震発生と関係づけられるほど明瞭なダイラタンシーは見られませんでした．そこで，完全な自然環境よりもある程度破壊の位置や時期を予測して観測網を準備することができる鉱山の誘発地震について，震源近傍で観測された地震データを用いて，自然環境の断層における亀裂の増加について調べてみたいと考えました．南ア金鉱山では薄板状の金鉱脈の採掘がおこなわれており，採掘に伴い応力バランスが崩れることによって，採掘域周辺，特に断層やダイクなどの既存弱面において誘発地震が発生しています．誘発される地震の規模はマグニチュード（M）-2から大きいものでは5程度にもなり，地震に伴う落盤は労働者の安全を脅かす大きな問題となっています．立命館大学を中心とした観測グループは，2001年に Bambanani 金鉱山の Tanton 断層周辺に

*京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 助教

地震計を設置し、2年以上にわたって継続観測を実施しました。断層は地表面に対してほぼ鉛直に走っており、サンプリング周波数2 kHzの加速度計が断層西側に設置されました。観測期間中の2003年2月と4月にM2級の地震が2回発生しました。

これまで日本の東北地方釜石沖をはじめとした世界の様々な場所で、波形が互によく似た繰り返し地震と呼ばれる地震群が発見されてきました。波形同士の相互相関係数が高いということは、同じメカニズムを持つ地震から放出された波が同じ伝播経路を通ってきたということで、要するにこれらはほぼ同じ位置で発生した地震群ということになります。Tanton断層の東側でこのような波形相関の高い繰り返し地震が2年間にわたって発生していたことから、繰り返し地震を人工振動源のように扱い、この波を断層西側に観測することによって地震時の断層帯の構造変化を捉えようとした(図1)。2つの繰り返し地震のスペクトル比を計算することによって地震波の透過効率の変化を調べたところ、地震が発生しない時期の地震波スペクトル比は、利用した全周波数帯(20-160 Hz)で等しく波が透過していました(図2a)。これはつまり透過波の伝播経路の不均質状態に変化がなかったことを意味します。一方、M2の地震前後の繰り返し地震のスペクトル波形を比較したところ、地震の前に比べて後の方が高周波の波が透過しにくくなっている様子がわかりました(図2d-e)。これは、波の透過経路上にある断層帯にせん断すべりにともなって亀裂が生成されるなどして、透過経路の不均質状態が変化したことが原因と考えられます。さらに興味深いことに、M2地震が発生するはるか前と発生直前3日間の地震波スペクトル比は、すでに高周波の減衰を示していました(図2d-c)。このような地震発生直前の透過効率の低下は2

度の地震両方について見られ、大きな地震が発生する数日前から有意に亀裂精製等の不均質状態の変化が起こっていることが明らかになり、地震が発生する前から断層周辺で準備が進んでいることが示唆されました。

初めての研究ながらも地震発生の前にも明瞭な変化が見えるという面白い結果が得られ、その後の研究生活へのはずみがつきました。解析の結果はYoshimitsu et al. (2012) として出版されましたが、この論文は初投稿が2008年であったので採択までに非常に長い時間がかかりました。何もわからない状態から始めた卒業研究でしたが、リジェクトされた原稿を再構成する過程で様々な大学や研究所の先生方にご意見を伺う機会をいただいたことで、様々な面で自分を大きく成長させてくれたと感じています。

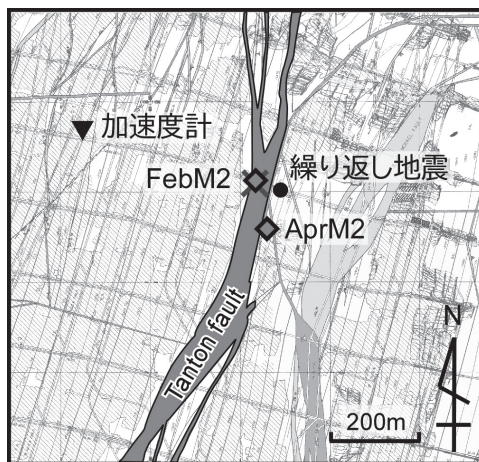


図1 南アフリカBambanani金鉱山の観測サイトの平面図。逆三角は加速度計、2つの四角はそれぞれ2月と4月のM2級地震の発生位置。黒丸は繰り返し地震群の震源重心。

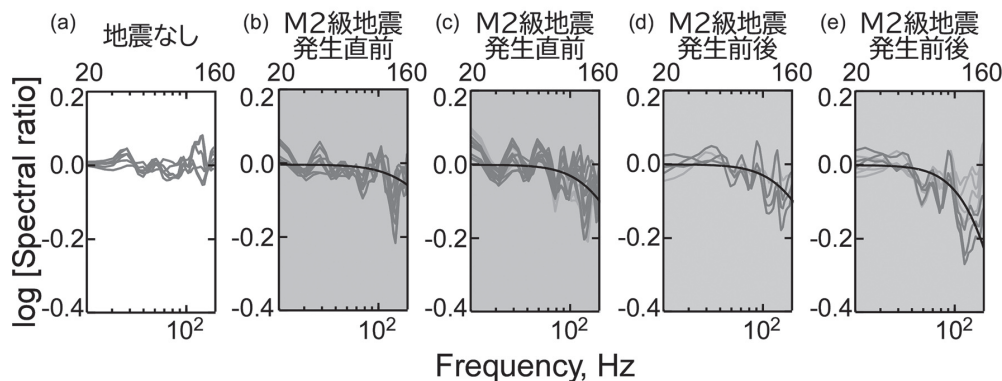


図2 南アフリカ Bambanani 金鉱山で得られた繰り返し地震のスペクトル比。(a) M2級地震が発生する前、(b) 2月のM2地震が発生するはるか前と直前、(c) 4月のM2地震が発生するはるか前と直前、(d) 2月のM2地震が発生するはるか前と後、(e) 4月のM2地震が発生するはるか前と後のスペクトル比。

3. 三軸条件下の岩石試料透過波の減衰

実際に観測データを取り扱ってみて感じたのは、想像していたよりもずっとデータは汚く、なかなか思い通りに取り扱えないということでした。震源近傍で観測をしているため伝播経路におけるノイズは少ないとはいえ、収録に起因するノイズや停電等によるデータ欠損など、理想通りのデータを得ることは難しいのだと感じました。また、前述の南ア金鉱山における観測では、好きな場所に稼働中の他の観測点がなかったため、複数の波動伝播経路の結果を比較することができませんでした。南ア金鉱山での観測は掘削の終了した坑道から100m前後のボアホールを掘って観測機器を埋設しますが、元々の坑道の位置やドリリングマシンの稼働制約などから、必ずしも置きたい場所に観測機器を置くことができるとは限りません。より制御した環境で観測をおこないたい、という気持ちから、実験室における観測に興味を持ち、川方先生が取り組んでいた封圧下での三軸圧縮試験に参加させていただくようになりました。実験研究からダイラタンシーの示唆がなされた1970年代から80年代にかけては、AE (Acoustic Emission) の観測や摩擦実験など様々な実験の結果が世界中で次々と発表された時期でした。しかし、当時の収録装置の性能の限界などから解析可能な高周波の波形を連続収録することはできなかったた

め、震源位置や最大振幅を用いた解析が主流でした。近年、PCの性能が上がったことなどから、高周波の実験波形の収録に十分な高速サンプリングが可能になりつつありましたが、波形解析ができる記録を得るためには十分な帯域を持ったセンサの導入が必要でした。地下の圧力状態を油圧により再現した三軸実験においては、一般的には耐压性能を持つPZT(チタン酸ジルコン酸鉛)の圧電素子が利用されていますが、AEや人工透過波の周波数解析をおこなうためには、1 MHz程度までの帯域が収録できる広帯域センサを導入する必要があります。そこで我々は、封圧下での広帯域収録を目指して広帯域センサの圧力から保護する機構を考えるとともに、高速サンプリングが可能な収録システムの開発に取り組みました。センサを保護する金属容器を設計することで100 MPaの圧力下において200–1000 kHzに感度を持つ広帯域センサの利用を実現するとともに(Kawakata et al., 2011)、高速収録時にメモリのスタックによって記録がオーバーフローして収録がストップしないように、収録プログラムにFIFOと呼ばれるデータの取り扱いやストリーミングレコーディングを組み込むことで、毎秒100 MHzでの高速収録を実現しました。

過去の実験室におけるダイラタンシー研究は、圧縮が進む試料内に人工的に弾性波を透過させ、その速度

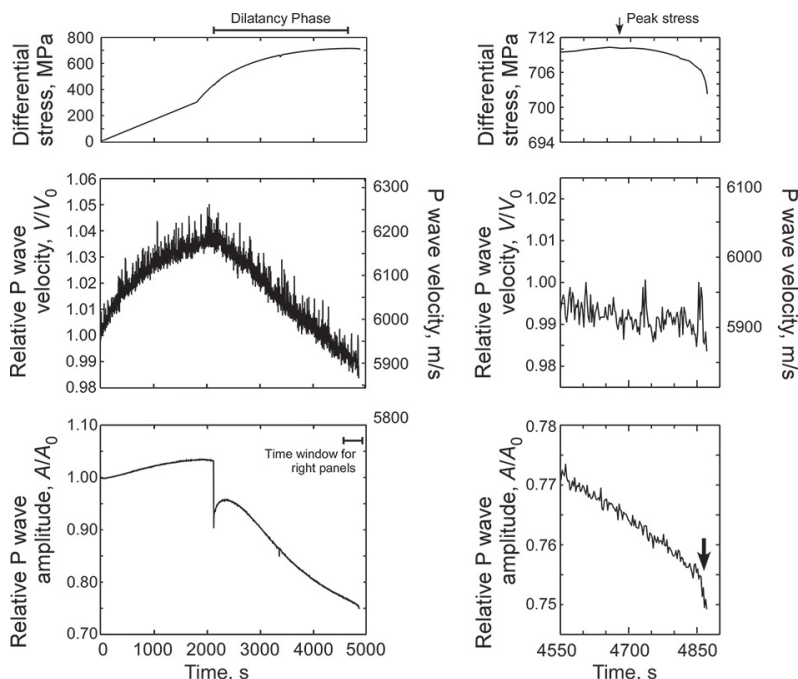


図3 広帯域収録された透過弾性波の時間変化。上段は差応力、中段は速度、下段は振幅を表す。左側のパネルは圧縮開始から圧縮終了まで、右側のパネルは圧縮終了時刻周辺を拡大したものになる。右下の矢印は振幅の減少が加速しはじめる位置を表している。

や振幅の変化を観察することによって、試料内部の状態が推定されてきました(例えば, Yukutake et al., 1989). 我々は広帯域計測によってダイラタンシーの新たな側面が見えるのではないかと期待して、上述の広帯域連続収録システムを用いて封圧 80 MPa 下における花崗岩試料の三軸圧縮試験と透過弾性波の収録を実施しました。この際に周変位制御で圧縮速度をコントロールすることにより、ゆっくりとした破壊の進行と、断層面の成長途中での試料回収を実現しました。圧縮開始から広帯域センサにより試料内を透過させた弾性波を収録し、その速度・最大振幅の時間変化を調べたところ、図3のような結果が得られました。圧縮開始から約 2000 秒後にかけて、速度や振幅が増加している様子が見えますが、これは試料内に存在するクラックが閉塞している様子を反映しています。さらに圧縮が進むと、一転して速度・振幅は減少し始めます。これは試料内に新たに亀裂やせん断面が生成されていることを反映していると考えられます。注目点としては、破壊強度を越えたのちに、速度は試験終了まで一定の減割合で減少し続けているのに対して、振幅の方は減少が加速している様子が見られます(図3黒矢印)。このような速度と振幅のふるまいの違いや、振幅減少の加速は、これまでの弾性透過波計測では見られなかったものです。この速度と振幅の違いは、速度は他の帯域の波が遅くとも最も早く届いた周波数帯の波が計測されるのに対して、振幅は様々な帯域の波の重なり合いなので少しでも振幅が減少する帯域があればそれが影響を及ぼすからではないかと考えました。これは生成された不均質領域のスケールに応じて帯域による違いが表れたもので、将来の不均質サイズの把握などにもつながる可能性がある、広帯域計測ならではの観測成果といえます。この解析結果は Yoshimitsu et al. (2009) にまとめるとともに、その後さらに波形から岩石試料内の減衰を数値化した Q 値と呼ばれる減衰定数を求めました。これは、これまで実験室では自然地震解析と同じ指標で不均質場を評価することが難しかった点を克服する取り組みとなりました(Yoshimitsu and Kawakata, 2011)。

4. さらなる観測の高度化

その後、AE 計測を目的として、開発したシステムのさらなるアップデートに取り組み、三軸条件下における広帯域・多チャンネル・連続計測を実現しました。これにより、自然地震解析では一般的な多くの手法を実験波形の解析に直接使えるようになりました(Yoshimitsu et al., 2014)。岩石圧縮破壊試験における AE 計測は、以前資源工学教室にいらっしゃった柳谷

俊先生が熱心に取り組まれていましたが(Yanagidani et al., 1985)、三軸広帯域計測の実現をご報告したところ大変喜んでくださいました。博士課程時代に京都大学防災研究所で AE 収録に取り組んだ際には、アンブツくりにより様々な計測のノウハウを教えていただき、非常に勉強になりました。

南アフリカ金鉱山における誘発地震観測に関しては、修士課程・博士課程を通して SATREPS プロジェクトに携わせていただく機会を得たため、制御震源を埋設して実スケール弾性波透過実験のような観測を目指して、観測網の立案、加速度計の改良、収録システムの作成、そして埋設からデータ取得と解析に取り組みました。坑道を利用した実スケールの透過弾性波計測といえば、佐野修先生が多数の観測経験をお持ちですが、この計画の際にも有益なアドバイスをいただきました。学生として長期の現場観測に携わる場合、通常は別の研究者が過去に埋設した計器の記録を解析することになりますが、数年間という長い期間をかけて国内外の多くの研究機関の方々と共に一つのプロジェクトの全工程に携われたのは非常に幸運なことだと感じています。

5. おわりに

本稿で述べましたように、私はこれまでは地震学の枠組みの中で岩石実験や誘発地震の波形を扱いながら解析をおこなってきました。研究を進めていく過程で、地震学分野の研究者の方々のみならず、多くの工学分野の方々から研究に関して様々なアドバイスをいただき、視野が広がる思いでした。これまでの経験を生かして、これから資源工学という新しいフィールドで研究の幅をさらに広げていきたいと思っています。ここ数年は岩石実験から離れていましたが、再び実験を始められる環境に来ることができて嬉しく思うと同時に、どのような実験をしようかとわくわくしています。意欲的な研究テーマに挑むとともに、本学の学生の教育に貢献できるよう努めてまいりますので、今後ともどうぞよろしくお願いいたします。

参考文献

- Scholz, C. H., L. R. Sykes, and Y. P. Aggarwal, Earthquake prediction: a physical basis, *Science*, 181 (4102), 803-10, (1973).
- Yoshimitsu, N., H. Kawakata, A. Yamamoto, H. Ogasawara, and Y. Iio, Temporal changes in attenuation of S waves through a fault zone in a South African gold mine, *Geophys. J. Int.*, 191 (3), 317-324, (2012).

- Kawakata, H., N. Yoshimitsu, and N. Takahashi, Development of a broadband transducer assembly under triaxial compressive conditions, Proceedings of the 10th SEGJ International Symposium, Kyoto, (2011).
- Yukutake, H., Fracturing process of granite inferred from measurements of spatial and temporal variations in velocity during triaxial deformation, J. Geophys. Res., 94, 15639-15651, (1989).
- Yoshimitsu, N., H. Kawakata, and N. Takahashi, Broadband P waves transmitting through fracturing Westerly granite before and after the peak stress under a triaxial compressive condition, Earth Planets Space, 61, e21-e24, (2009).
- Yoshimitsu, N., H. Kawakata, Temporal Changes in the Q of Broadband P Waves Transmitting through a Fracturing Westerly Granite Sample under Triaxial Compressive Conditions, Bull. Seismol. Soc. Am., 101(1), 421-426, (2011).
- Yoshimitsu, N., Kawakata, H., and Takahashi, N., Magnitude - 7 level earthquakes: A new lower limit of self-similarity in seismic scaling relationships, Geophys. Res. Lett., 41, 4495-4502, (2014).
- Yanagidani, T., S. Ehara, O. Nishizawa, K. Kusunose, and Terada, M., Localization of dilatancy in Ohshima granite under constant uniaxial stress, J. Geophys. Res., 90(B8), 6840-6858, (1985).

談 話 室

東京工業大学火山流体研究センターでの研究活動

石 須 慶 一*

Research activities at Volcanic Fluid Research Center, Tokyo Institute of Technology

By Keiichi ISHIZU

1. は じ め に

石須慶一と申します。小池克明先生の指導の下、2020年3月に京都大学都市社会学専攻博士課程を終了しました。小池先生の研究室（地殻環境工学講座）では、物理探査を用いた海底資源の分布調査に関する研究を行っていました。博士課程を終了後の2020年4月から、東京工業大学火山流体研究センターでポストドクをしています。火山流体研究センターという組織に属していることもあり、火山に関連した研究を現在行っております。本投稿では、簡単にですが東京工業大学火山流体研究センターでの私の研究活動を紹介します。

2. 東京工業大学火山流体研究センター

東京工業大学火山流体研究センターは、東京工業大学理学院の一部局で活火山を対象とした基礎研究を行っています。研究成果は、火山噴火予知の高度化、火山災害の軽減に活用されてきました。火山流体研究センターは、大岡山オフィス（東京都目黒区にある本キャンパス）および群馬県草津白根火山観測所で構成されています。観測所が群馬県草津町にあることから、本センターでは、特に草津白根火山を対象とした研究活動を行っています（図1）。本センターの特徴としては、地球化学と地球電磁気学の観測的研究分野を融合した研究組織である点です。地球化学を専門とする研究者が二名、地球電磁気学専門とする三名の研究者が本センターに所属しております。私は主に地球電磁気学に着目して、火山について研究しております。

勤務地に関しては、私は大岡山オフィスで普段は働

いており、観測の際は群馬県草津白根火山観測所に出張する形で勤務しております。大岡山オフィスから観測所までは車で4時間程度です。観測所には宿泊棟があり、本センター所属の職員・学生が宿泊することが可能です。2020年から執筆時に至るまで（2021年7月）、コロナウィルス蔓延防止の観点から、出張の制限はありましたが、定期的に草津白根火山で野外観測を行うことができております。出張制限の他に、天候のため草津白根火山で野外活動できるのは、5～11月と限られております。冬季期間中は、積雪のため山頂へのアクセスできません。



図1 東京工業大学火山流体研究センター
群馬県草津白根火山観測所の外観

3. 草津白根火山・草津温泉

私の主な研究対象地域は、草津白根火山であるため、まず草津白根火山を説明します。草津白根山は群馬県北西部の長野県との県境近くに位置する火山であります（図2）。草津白根山の歴史は古く、100万年以上前に現在の本白根山付近を中心とした火山活動が始まり、松尾沢火山が形成されました¹⁾。その後の侵食期

*東京工業大学理学院火山流体研究センター

を経て約70万年前に洞口溶岩が流出しました。長い活動休止期の後、約30万年前から大規模な太子火砕流が噴出し、草津白根山一帯を広く覆いました²⁾。その後、米無溶岩や大量の青葉山溶岩を噴出しました。また、少量の矢沢原火砕流の噴出によって草津町北側に平坦な扇状大地が形成されました。これら一連の活動後、再び20～30万年の長い活動休止期に入りました。約1万数千年前から活動期に入り、約3000年前まで溶岩流出を伴う活発な活動を繰り返し、現在の草津白根山の地形が形成されました。これらは、マグマの流出を伴う噴火であります。より詳しい草津白根火山の地質情報などは、参考文献1,2,3にまとめてあります。

一方、現在は水蒸気爆発による噴火が、草津白根火山では発生しています。1805年の噴火記録以降、マグマの流出を伴う噴火は観測されず、水蒸気爆発による噴火が起こってきました³⁾。水蒸気爆発は、マグマから間接的にもたらされた熱によって地下水が沸騰して起こり、大きな噴石を飛ばします。水蒸気爆発は、一般的に地震活動などの前兆現象が発現しにくいいため、予知が難しいです。近年では、2018年に草津白根火山の本白根で、水蒸気爆発が起こり、噴石により一名の命が失われました⁴⁾。また、水蒸気爆発被害でよく知られているのは、御嶽山のものが挙げられます。御嶽山において、2014年に水蒸気爆発が起こり、火口付近に居合わせた登山者ら58名が死亡しました⁵⁾。水蒸気爆発は前兆が乏しいため、その危険性が見逃されてきましたが、実際に起きた際に大きな被害が発生しています。

草津白根火山は熱水系が発達した火山であり、火山の麓には草津温泉があります。草津温泉は東京都中心部から直線距離で150km程度であり、車で4時間程度で到着できます。新宿駅や渋谷駅から高速バスが出

ており、バスで向かうこともできます。草津温泉の温泉水は、pH2程度の強酸性であるという特徴があり、多くの病気に効くとも言われております。草津温泉は、有馬温泉、下呂温泉と並び日本三名泉の一つとして有名です。草津温泉の中心にある湯畑源泉は、観光客や沿道のお店で賑わっています(図3)。草津町の人口は約7000人ですが、町内の宿泊施設は172件あり、収容可能人数は約12000人と町の人口よりも多いです。また、草津町では旅館の温泉のみならず、町民によって管理されている無料の共同浴場温泉場が19箇所あります。現在は、コロナウィルスの関係で町民以外の利用を制限しているところもありますが、観光客が利用可能な無料の共同浴場温泉場もあります。このように草津町は、草津白根火山の熱水を利用しており、火山と共生した町です。それ故、草津白根火山の噴火が、草津町および草津町の観光業に及ぼす影響が大きく、町民の草津白根火山への注目も大きいです。

4. 筆者の研究活動紹介

私は、上述にある水蒸気爆発の予知に向けた地下構造モニタリング技術に関する研究を行っています。水蒸気爆発は前兆が乏しいため、その発生予想は難しいという課題があります。また、水蒸気爆発が地下のどこで発生し、どのようなメカニズムで発生しているかということも詳細に分かっておりません。そのため、地下構造モニタリングにより、水蒸気爆発の発生メカニズムを解明し、その発生を予測できれば、火山防災に大きく貢献できます。私は、非破壊で地下比抵抗構造の情報を得ることができる電磁探査に着目しました。比抵抗とは電気の流れやすさを表す物性値で、熱水・ガス・マグマなどの存在に敏感です。

電磁探査法は、これまで火山の地下構造探査に用いられてきました。従来の電磁探査法は、自然信号を用



図2 群馬県草津白根火山の様子



図3 群馬県草津町の湯畑源泉

いたマグネトテリック (MT) 法が用いられてきました。しかし、MT法は粘土層など低比抵抗を示すものを検知するのに優れていますが、水蒸気などの高比抵抗体を検知することは難しいです。これは、MT法は水平方向の電流を使用しているためです。そのため、高比抵抗体を示す水蒸気を検知するためには、鉛直方向の電流を地下に流す必要があります。そこで、私は人工電流源を用いて鉛直電流を地下に流し、水蒸気を検知するコントロールソース電磁探査 (CSEM) 法を用いて、この課題を解決しようと考えています。また、人工電流源を用いることで、自然信号を用いるMT法に比べて、S/N比を改善でき高精度なデータ取得できることが期待されます。CSEM法を用いて高精度なデータを取得することにより、地下構造の時間変化を検出でき水蒸気爆発の予知に向けた地下構造モニタリングを行うことができると考えております。

実際に昨年度から本年度にかけて、CSEM法を用いた観測を草津白根山で実施しております。電磁受信機を草津白根山で水蒸気噴火が頻繁に行っている湯釜火口周辺に三次元的に配置しました(図4)。湯釜火口は、写真にもあるように景観が良いため、観光客に人気のスポットでした。しかし、現在は水蒸気噴火の発生の危険性から、湯釜周辺の立ち寄りが禁止されています。そのため、私が研究を行っている電磁探査による地下構造モニタリング手法を用いて、的確に水蒸気噴火発生の危険性を事前に把握できれば、観光客の立ち入り許可にも繋がる可能性もあります。人工電流源の送信場は、湯釜火口から南に3km程度離れた石津硫黄鉱山跡地に設置しております(図5)。現在に至るまで、これらの送信点と受信点で連続して電磁観測を行っています。連続観測により、地下構造のモニタリングを

行います。

現在は、取得したデータを解析して地下構造に焼き鈍す作業を行っております。解析した結果、水蒸気を含む地下構造を従来の手法に比べてより真の構造に近く再現し、水蒸気爆発の発生メカニズムを解明することを私自身楽しみにして解析を進めております。一方、私は、データを解析して地下構造に変換する「逆解析手法」についても自作しております。逆解析手法に関しても、既存の技術を改善するべき点があります(例えば、解析に地質情報など他の情報を組み込まないこと)。そのため、逆解析手法についても改善を行い、ソフトウェアの面からも技術発展に貢献したいと思っています。通常の電磁探査法では、受信機を地下に埋めて設置するのですが、火山地域は、人間がアクセスできる場所が限られているため、観測点を綺麗に3次元的に配置することは難しいという課題があります。



図5 石津硫黄鉱山跡地の人工電流送信所



図4 草津白根山湯釜での電磁受信点の設置風景



図6 ドローンをを用いた新たな電磁探査法開発に向けた実験の様子

このような課題も解決するために、私は受信機をドローンに載せて観測する新たな電磁探査法についても現在実験を行っています (図6)。

上で述べたCSEM法を用いた地下構造モニタリング技術が確立されれば、国内外様々な火山監視に役立つことが期待されます。さらに、本技術は火山のみならず、様々な用途に適用できます。例えば、水蒸気・熱水の生産量が低下した地熱貯留層に水を涵養して生産量の回復を図る増進型地熱システム (EGS) や二酸化炭素を地中に貯留する (CCS) などの工学的目的にも利用できると期待されます。そのため、今後は、火山という軸を持ちつつ、その適用対象を地熱、環境など幅広く広げて、これまで解決されていない課題を解決していきたいと考えております。

5. 結 語 に

この記事では、東京工業大学火山流体研究センターでの私の研究活動を紹介しました。私は資源工学分野で博士号を取得し、特に海底金属鉱床について学生時代は研究していました。現在は、火山について研究していますが、火山・金属鉱床は共通点が多く、資源工学で得た知見を火山の研究に活かすことができいま

す。一方、今後は火山で得た知識を金属鉱床の研究に活かすことで、金属鉱床研究へ新たなアプローチをしていきたいと思います。京都大学水曜会の方々とは、火山の分野でも仕事する機会が多くあります。今後も皆様と仕事をさせていただくことも多々あると思いますが、どうぞよろしくおねがいします。

引 用 文 献

- 1) 平林順一. (1999). 火山流体の生成と火山活動. 温泉科学, 49 (3), 99-105.
- 2) 平林順一. 草津白根山. <https://www.mlit.go.jp/common/001017605.pdf>
- 3) 寺田暁彦. (2018). 水蒸気噴火発生場としての草津白根火山. 地質学雑誌, 124 (4), 251-270.
- 4) 小川康雄 他 (2019). 2018 年草津白根火山噴火に関する総合調査-草津白根山火山噴火から 1 年-. 自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, 56, 1- 5
- 5) Kaneko, T., Maeno, F., & Nakada, S. (2016). 2014 Mount Ontake eruption: characteristics of the phreatic eruption as inferred from aerial observations. Earth, Planets and Space, 68 (1), 1-11.

談 話 室

酸化モリブデン薄膜上における液体インジウムの完全濡れ現象

勝 部 涼 司*

Complete wetting behavior of liquid indium
on molybdenum oxide thin films

By Ryoji KATSUBE

1. は じ め に

令和3年3月付けで材料工学専攻先端材料機能学講座（安田秀幸教授）に助教として着任いたしました。これまでの経歴を述べますと、京都大学大学院工学研究科材料工学専攻博士後期課程にて野瀬嘉太郎先生のご指導のもと、平成30年3月に「Investigation on properties of zinc phosphide related materials and interfaces for optoelectronic devices」という題目の研究で博士（工学）を取得しました。その後は引き続き野瀬嘉太郎先生のもとで、JST-CRESTプロジェクトの特定研究員（令和2年4月より特定助教）として従事してきました。学生時代は一貫してりん化亜鉛（ Zn_3P_2 ）という化合物半導体を用いた薄膜太陽電池を研究対象とし、製膜プロセスからヘテロ接合を形成する材料開拓まで、幅広く自由に研究させていただきました。研究員としては、第一原理計算やデータ科学を専門とする研究者と連携し、新しい光吸収半導体の創製および製膜プロセス構築の効率化に関する研究に携わりました。

私の前任の立場はいわゆるポスドクでしたので雇用当初はプロジェクトの研究に専念する義務がありましたが、従事して1年程度経過した頃、ポスドク自ら立案した研究を遂行できるようにエフォートや専従義務を緩和する制度が大学・JSTの双方で始まりました。幸いにも本制度利用についてプロジェクトリーダーの大場史康先生からの推奨をいただき、科研費も採択さ

れましたので、掲題の酸化モリブデン薄膜上における液体インジウムの完全濡れ現象に関する研究を遂行しておりました。未だ萌芽段階の研究で仮説も多く含まれますが、本稿ではこの研究について裏話も交えながらご紹介いたします。

2. 研究のきっかけ：Templated Liquid Phase (TLP) 法によるInPの製膜

次世代エネルギーとしての太陽光発電の研究開発は1970年代から世界中で活発となり、現在では大きく分けて3種類（結晶Si系、 $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ 系、 CdTe 系）の太陽電池が商業的に生産されています。2020年時点での世界市場規模は1000億USD以上、発電能力で計算して100 GW以上の太陽電池が1年間に導入されるほどの産業となっています^{1,2)}。しかしながら世界の年間発電量に占める太陽光発電の割合は依然として数%に過ぎず、エネルギー問題に資するためには少なくとも数10倍の生産量を実現する必要があると考えられています。以上の背景から太陽電池の低コスト化を目指した材料・プロセスの開拓は現在でも盛んに行われています。

りん化インジウム（InP）やひ化ガリウム（GaAs）等のIII-V族化合物半導体は発光ダイオードや半導体レーザーにも用いられる優れた光電特性を有する材料であり、太陽電池材料として用いた場合も非常に高効率なデバイスを構築できることが知られています。しかしIII-V族太陽電池は結晶Si系太陽電池と比較して生産コストが高いため、主な用途は宇宙用と集光型に

*材料工学専攻先端材料機能学講座 助授

限られており、大規模に民生用としての生産は行われていません。III-V族太陽電池は高コスト要因と捉えられることの多いレアメタル (In, Ga) を構成元素としますが、実はプロセス (基板、製膜) のコストが生産コストの大部分を占めます。特に、従来のIII-V族太陽電池はIII-V族半導体単結晶基板の上に種々の薄膜を成長させることで製造されてきましたが、この単結晶基板はSi単結晶の10倍以上もの高価格で販売されている代物です。したがって、高品質なIII-V族半導体結晶を非単結晶基板上に作製できればIII-V族太陽電池の低コスト化につながると考えられ、種々のプロセス開発が進められています。

金属薄膜とりんを含む気体とを反応させるりん化法は、種々のりん化合物半導体を任意の基板上に製膜するボトムアップ型プロセスのひとつです。りん化法によってInPを製膜する際に問題となるのが、液体Inの脱濡れ現象です。一般的に液体金属は水等の分子性液体と比較して大きな表面張力を有するため、固体上で液体化する脱濡れを起こしやすいことが知られています。Inの融点は156.6℃と低温ですので、In薄膜をりん化しようと熱処理するとプロセス中に脱濡れするため、図1上段に示すように島状のInPが形成します。これに対し、液体Inの脱濡れを防いで太陽電池等のデバイス作製に適した一様なInPを製膜するTemplated Liquid Phase (TLP, 別名Thin-Film Vapor Liquid Solid process) 法という改良型のりん化プロセスが、米国UC BarkleyのProf. Ali Javeyの研究グループにより報告されました^{3,4)}。このプロセスでは電子ビーム蒸着法によって製膜されたSiO_x薄膜をcap layerとすることで液体Inの脱濡れが防がれ、一様なInPの製膜

を可能としています (図1下段)。

我々は種々のりん化合物半導体を用いた薄膜太陽電池を研究していましたので、これを参考に高品質なりん化合物の製膜プロセスを開発しようと考え、再現実験を行ったのが液体Inの濡れに関する研究の発端でした。

3. 液体Inの完全濡れ現象発見の経緯

TLP法によるInP製膜の再現実験は当時の修士課程学生だった留学生のYang Yuming君 (現: キオクシア) と一緒に着手し、元々のプランでは再現実験は早々に終わって研究室でメインの研究対象としていた別の材料の製膜へ展開しようと考えていました。ところが、一向に先行研究のように均一なInPの製膜はできず、それどころか我々の行った実験間で表面形態やりん化度合の再現性すら取れないという事態が1年ほど続きました。これはマズいということでYang君や彼と同級生だった桑野太郎君 (現: 材料工学専攻博士後期課程) と毎日のように、時に終電まで議論を重ねた結果、(i) それまで行った実験ではMoをスパッタ製膜してからInを製膜するまでの間に大気中で保持していた期間にかなりのバラつき (数時間～数か月) がある(ii) 先行研究ではMo箔の上にInを製膜していた、という2つの点に気が付きました。そこでMo製膜後の大気中保持期間に着目して実験結果を整理しなおしたところ、保持期間が長い、つまりMo表面の酸化が進行している方が平坦な表面形状でInPの体積分率の大きい薄膜が得られていることが分かりました。さらに論文精査の結果、Prof. Javeyのグループでは二報目以降の論文では酸化モリブデン (MoO_x) を“nucleation promoter”として挿入しているが、MoO_x上における液体

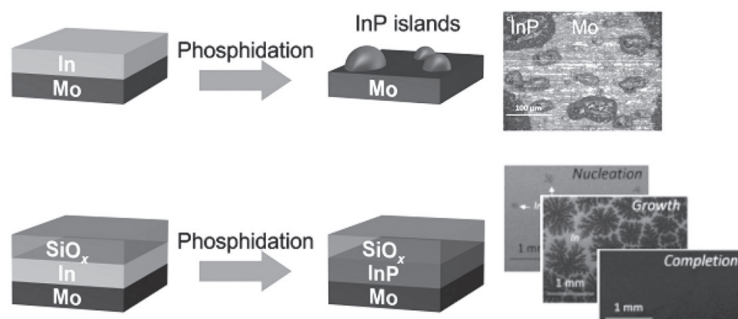


図1 りん化法 (上段) およびTLP法 (下段) によるInP製膜。TLP法ではInPは島状にならず、一様な薄膜が作製できている。Kapadia et al., Scientific Reports 3, 2275(2013)。

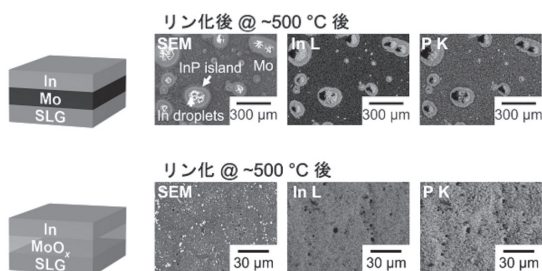


図2 Mo上(上段), MoO_x上(下段) In薄膜のりん化によるInPの製膜. Katsube et al., ACS Applied Electronic Materials 1, 877 (2019) .

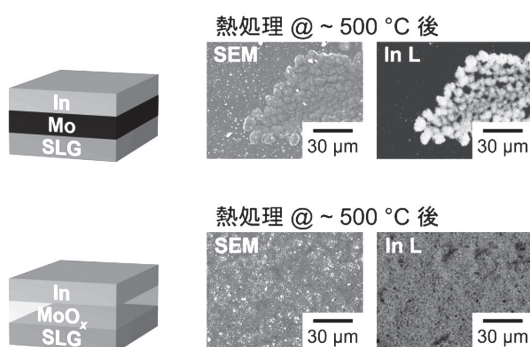


図3 Mo上(上段), MoO_x上(下段) In薄膜の熱処理後のSEM-EDS分析結果. MoO_x上のIn膜は溶融・凝固後も基板上全体に存在しており, 液体Inは完全濡れ状態にあったことが分かる. Katsube et al., ACS Applied Electronic Materials 1, 877 (2019) .

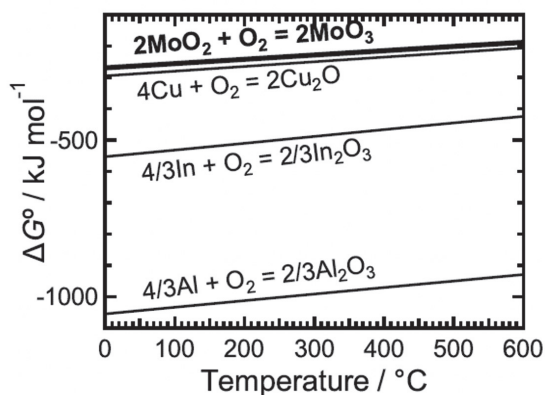


図4 Ellingham図.

Inの濡れについては一度も調べていない, という事実も浮かび上がってきました.

以上の議論の末, TLP法によるInP製膜のキーファ

クターはキャップ層であるSiO_xよりもむしろ下地層であるMoO_xではないか? という仮説にたどり着きました. これを検証すべく対照実験を行っていた中で, 図2に示すようにMoO_x上に製膜したIn膜をりん化することで, SiO_xキャップ層を製膜せずとも均一なInP薄膜を作製できることが分かりました. この実験事実の背景にあったのが, MoO_x上における液体Inの完全濡れ現象です. MoO_x蒸着膜上にInを製膜した試料をInの融点以上に昇温し, 室温まで冷却した試料のSEM-EDS分析結果を図3に示しますが, 熱処理後もInは基板上全体に存在しており, 全く脱濡れが起きていなかったことが分かります⁵⁾.

4. 展開: 液体金属の完全濡れを実現する指導原理確立へ向けて

前述のように液体金属は大きな表面張力を持つため, MoO_x上の液体Inのように完全濡れ状態となる液体金属/固体酸化物系はほとんど報告されていません. そこで, この稀有な例を起点として様々な液体金属の完全濡れ状態を実現する学理を探究すべく, この系における濡れのメカニズムの解明を進めています. 未公表のデータが含まれますので詳細は割愛させていただきますが, 液体InとMoO_xとの界面において反応が起こり, In₂O₃が形成することが高い濡れ性に寄与していることが分かってきています. ここで, 図4に示すEllingham図を参照すると, MoO₂/MoO₃酸化還元対は非常に貴な位置に存在しているため, MoO₃は貴な金属であるCuをも酸化できるほどの酸化力をもつことが分かります. したがって, MoO_x下地層は液体Inの場合のように界面反応に起因して完全濡れ状態となるような系を調査する良い舞台と捉えることができ, これに着目した研究も展開しています.

5. おわりに

以上のように表題の研究は決して初めから狙って始めたものではなく, 日々の実験の中で遭遇した予想外の問題に取り組む中で見出したセレンディピティ的なものでした. 思い返せば筆者のこれまでの研究はこのような性格の強いものが多く, 性急に成果を求められる昨今において, 腰を据えて試行錯誤を続けさせていただけの経験は貴重な財産となっています. 修士課程の時分にはもっとスマートに予想通りの成果を出したいと思っておりましたが, 上記の経験から, 真に面白

い研究は予想外の結果の解釈に泥臭く取り組む中から生まれると考えを改め、今では筆者の研究信条になっています。現所属ではこれまでとは全く異なる凝固に関する研究に取り組めますが、これまでの教訓を活かして予想外を楽しみ、伝統ある材料工学専攻の名に恥じぬような仕事ができるよう一層精進いたします。また、筆者は学生時代～ポストドク時代を通して材料工学専攻に所属しておりましたが、これからは助教として優秀な後輩たちと共に研究を続けられることは大変嬉しく、また身の引き締まる思いでいっぱいです。これまでの経験を糧に、優れた技術者・研究者を輩出していけるような教育にも邁進してまいりますので、今後ともご指導ご鞭撻のほど何卒よろしくお願い申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Solar PV Panels Market Size, Share & Trends Analysis Report by Technology (Thin Film, Crystalline Silicon) , By Grid Type, By Application (Residential, Commercial) , By Region, And Segment Forecasts, 2020 – 2027, Grand view research, <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/solar-panels-market>
- 2) Snapshot of Global PV Markets 2020, International energy agency, https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/04/IEA_PVPS_Snapshot_2020.pdf
- 3) R. Kapadia, Z. Yu, H.-H.H. Wang, M. Zheng, C. Battaglia, M. Hettick, D. Kiriya, K. Takei, P. Lobaccaro, J.W. Beeman, J.W. Ager, R. Maboudian, D.C. Chrzan, and A. Javey, Scientific Reports 3, 2275 (2013).
- 4) K. Chen, R. Kapadia, A. Harker, S. Desai, J. Seuk Kang, S. Chuang, M. Tosun, C.M. Sutter-Fella, M. Tsang, Y. Zeng, D. Kiriya, J. Hazra, S.R. Madhvapathy, M. Hettick, Y.-Z. Chen, J. Mastandrea, M. Amani, S. Cabrini, Y.-L. Chueh, J.W. Ager III, D.C. Chrzan, and A. Javey, Nature Communications 7, 10502 (2016).
- 5) R. Katsube, Y. Yang, S. Nakatsuka, and Y. Nose, ACS Applied Electronic Materials 1, 877 (2019).

談 話 室

3次元X線回折とX線CTを組み合わせた
マルチモーダルイメージングの基礎研究とその応用

平 山 恭 介*

Development of multimodal imaging using X ray CT
and pencil-beam XRD

By Kyosuke HIRAYAMA

1. は じ め に

令和3年3月1日付けで京都大学大学院工学研究科材料工学専攻 材料設計工学研究室（奥田浩司教授）の助教として着任いたしました平山恭介と申します。この度はこのような機会を頂き誠にありがとうございます。まずはじめに、著者の略歴とこれまでの研究について紹介させていただきます。

平成25年3月に熊本大学大学院自然科学研究科博士後期課程産業創造工学マテリアル工学講座で連川貞弘教授のご指導のもと「強磁性遷移金属の粒界局所磁気モーメントに関する研究」というテーマで博士(工学)の学位を取得しました。計算では、報告例のあるものの実験では測定が困難である強磁性遷移金属の粒界局所磁気モーメントをTEM(透過電子顕微鏡)/EELS(電子エネルギー損失分光法)を用いて実験的に測定することに成功しています。その後、平成27年1月まで、熊本大学産学官連携研究員として永久磁石の研究に携わっていました。平成27年2月からは、九州大学大学院工学研究院機械工学部門 構造材料評価研究室（戸田裕之教授）の助教に着任しました。着任後は、放射光を用いた鉄鋼やアルミニウム合金といった構造材料の3D/4Dイメージングの研究を行っています。本研究は、京都大学着任後も進めている内容です。本稿では、X線CT(Computed Tomography)によるイメージングにX線回折実験を組み合わせたマルチモーダルイメージングに関する研究について紹介させていただきます。

2. 多結晶組織3次元イメージング

X線回折は、1912年にLaueによって見いだされた現象です¹⁾。その後、X線の波長と結晶の面間隔との関係性をBraggらが数式化しており、この数式はBraggの法則として、広く知られています²⁾。X線回折で得られるパターンは物質によって様々であり、そのパターンを解析することで物質の結晶構造や結晶粒方位を決定することが可能です。ごく最近では、日本のSPRING-8で戸田らによって開発されたX線回折援用結晶粒界追跡(Diffraction amalgamated grain-boundary tracking :DAGT)法³⁾や欧州のEuropean Synchrotron Radiation Facility(ESRF)の回折コントラストモグラフィー(Diffraction Contrast Tomography :DCT)法⁴⁾、米国のAdvanced Photon Source(APS)の3D-XRD法⁵⁾など、X線回折現象を利用したイメージング手法の研究が行われています。これらのイメージング手法は、多結晶材料の3次元の結晶粒像とその結晶方位を取得可能で、これまで3次元の結晶粒像および結晶方位を取得するために、電子線後方散乱回折法を利用したリアルセクションングが広く行われています。この手法は、試料表面を手動もしくはイオンミリングなどにより研磨し、表面を観察、再度研磨し表面観察といったように、研磨と観察を繰り返すことで多数の2次元画像を取得し、それらを積層して3次元の再構築画像を得ています。一方で、放射光を用いた多結晶組織の3次元イメージング技術の利点は、非破壊で測定可能であることに加えて、その場試験が可能であるという点であり、多結晶組織と変形や変態、亀裂の進展などの様々な現象との関連について応用研究が行われています^{6)~12)}。

*東京工業大学理学院火山流体研究センター

3. 回折コントラストトモグラフィーによる多結晶アルミニウム合金の変形・破壊挙動の3次元イメージング¹³⁾

本章では、欧州のESRFで開発されたDCT法を用いた多結晶アルミニウム合金の変形・破壊挙動の3次元イメージングについて紹介します。著者は、本手法を開発したESRFのLudwig教授のもとで、1ヶ月半、本手法について学び、その後、日本のSPRING 8にて実際に実験を行いました。DCT法の3次元イメージングについて簡単に説明します。通常の特モグラフィーでは、試料を180°回転させれば3次元の再構成像を取得できますが、DCT法では、より高精度な測定を行う

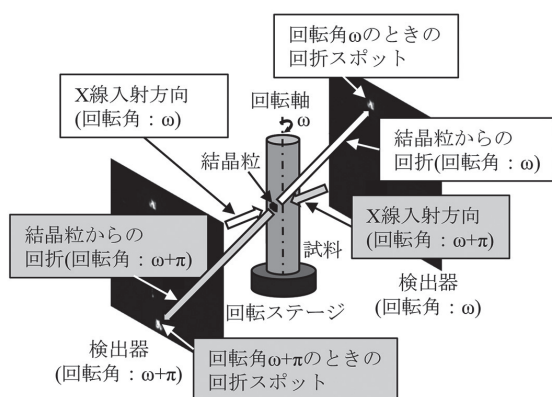


図1 1つの結晶粒から得られるFriedel pairの模式図。ある回転角 ω のときに結晶粒の $(h\ k\ l)$ 面がBraggの条件を満たして回折を起こす。回転角 $\omega + \pi$ のとき同じ結晶粒の $(-h\ -k\ -l)$ 面から回折が起こる。これら2つの回折スポットがFriedel pairである。2つの回折スポットを結んだ線上にX線を回折させた結晶粒が位置している。

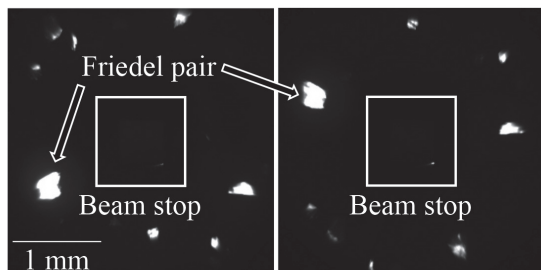


図2 実際の回折コントラストトモグラフィー実験により得られる結晶粒の回折像。中央の白四角は、1mm角の鉛のビームストップを示している。検出器上で、Friedel pairはX線の中心を境に上下対照に現れる。

ために、試料を360°回転させてFriedel pairsを活用しています¹⁴⁾。図1は、1つの結晶粒から得られる回折スポットのペアであるFriedel pairの模式図です。回転角 ω のときの入射X線および結晶粒からの回折を白矢印、回転角 $\omega + \pi$ のときの入射X線および結晶粒からの回折を灰色矢印で示しています。Friedel pairとは、同一の結晶粒の $(h\ k\ l)$ 面と $(-h\ -k\ -l)$ 面から、ちょうど180°離れた試料回転角で測定される回折スポットの組です。Friedel pairは、並行で向きが逆である散乱ベクトルと回折ビームを持っています。1つの結晶粒から複数のFriedel pairsが得られ、それらから結晶粒の形状を再構成し、位置および結晶粒方位を決定します。図2は、著者が実際にDCT実験を行ったときに得られた回転角 ω および $\omega + \pi$ のときのAl-Zn-Mg合金の結晶回折像です。複数の結晶粒の形状をした回折スポットが鮮明に取得できています。図3は、回折スポットから結晶粒を再構成したAl-Zn-Mg合金の3次元像です。結晶粒の色は、引張軸方向の結晶方位であり、電子線後方散乱回折法（Electron Back Scatter Diffraction : EBSD）によって得られた結果と一致しており、正しく結晶粒方位を取得できています。結晶粒方位については、カラーの図が掲載されている文献13を参考ください。3次元結晶粒像に加えて、変

図3は、回折スポットから結晶粒を再構成したAl-Zn-Mg合金の3次元像です。結晶粒の色は、引張軸方向の結晶方位であり、電子線後方散乱回折法（Electron Back Scatter Diffraction : EBSD）によって得られた結果と一致しており、正しく結晶粒方位を取得できています。結晶粒方位については、カラーの図が掲載されている文献13を参考ください。3次元結晶粒像に加えて、変

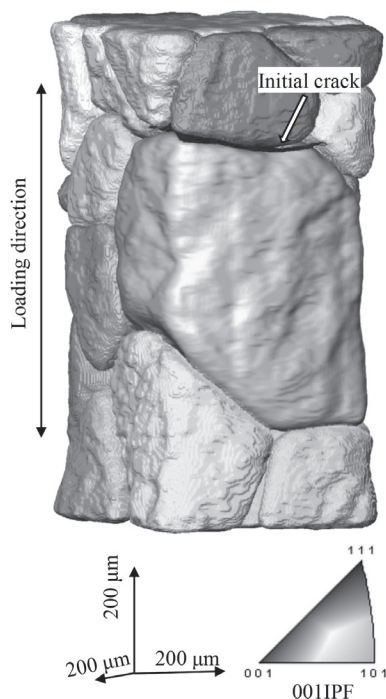


図3 回折コントラストトモグラフィー法により得られた3次元結晶粒像と破壊経路予測技術⁸⁾により推定された初期亀裂。

形・破壊挙動を同時にX線CTにより取得しており、結晶粒形状・方位と変形・破壊挙動の関係を調査しています。図3において、最終的に破断面を形成する初期亀裂を示しています。初期亀裂の位置の特定には、4次元の破壊経路予測技術⁸⁾を使用しています。この手法は、破断面近傍の粒子やボアなどを特徴点として用い、破断面を初期状態まで追跡することで初期位置を特定します。初期亀裂は、粒界上に存在しており、結晶方位差や結晶粒径などの解析を行っています。また、粒内で破断した亀裂においては、特定した結晶粒方位と亀裂位置から、亀裂が特定の結晶面を通過しているかどうかなどの解析も行うことが可能となっています。

4. 極細束X線を用いた三次元X線回折とX線CTを組み合わせたマルチモーダルイメージングの基礎研究¹⁵⁾

本章では、極細束X線を用いたX線回折実験とX線CTを組み合わせた新しい手法について紹介します。本手法では、ビーム径を1–3 μm 程度まで絞る事で、結晶粒径が数 μm の実用構造物の結晶方位3次元マッピングと、それにX線CTを用いたイメージングを組み合わせることで、確度の高い結晶学的な解析を用いる学術アプローチを確立しています。このアプローチ手法を結晶粒径が約3 μm の残留オーステナイト粒を含むフェライト/オーステナイト二相鋼の加工誘起変態挙動の研究に応用しています。加工誘起変態挙動と

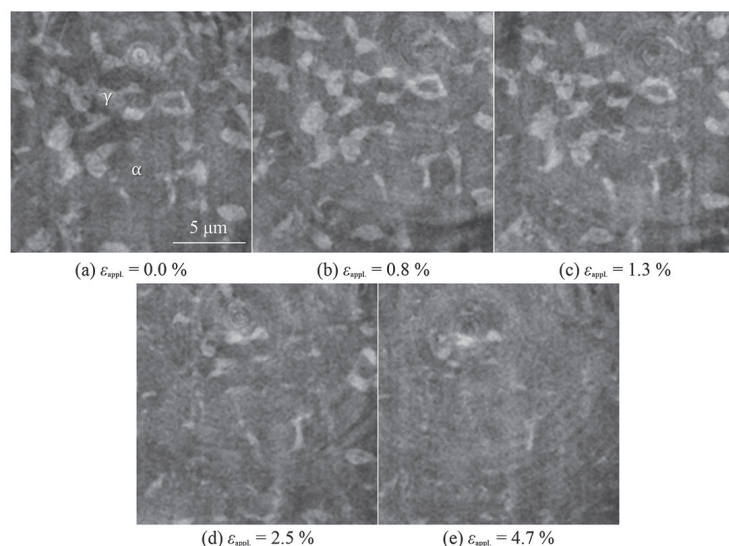


図4 フェライト(a)/オーステナイト(γ)二相鋼に引張負荷をかけた時の残留オーステナイト相のIn-situ変態挙動。

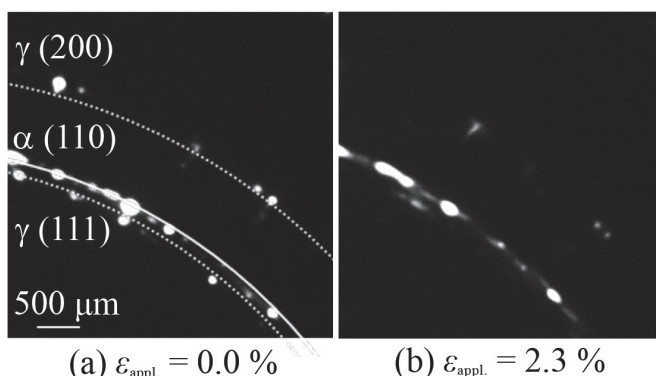


図5 X線ビームを直径約1 μm まで集光し、フェライト(a)/オーステナイト(γ)二相鋼に照射して得た $\gamma(111)$, $\gamma(200)$ などのX線回折斑点。(a)無負荷と(b)引張歪み2.3%

は、引張などの負荷を加えることによって残留オーステナイト粒がマルテンサイトへと変態する現象です。個々の残留オーステナイト粒の変態挙動が、3次元で直接的に可視化することで、負荷ひずみに対するある一つの残留オーステナイト粒の体積変化および変態挙動についても評価を行っています。負荷ひずみ0.8%では、変態していない残留オーステナイト粒が、負荷ひずみ1.3%で、結晶粒の一部の領域で変態が開始しています。その後、負荷ひずみ2.5%では、ほとんどの結晶粒の変態が進行し、4.7%ではほぼすべての結晶粒で変態が完了しています。変態挙動の直接可視化により、同一のオーステナイト粒でも変態の起こりやすさが異なることがわかりました。この変態挙動の差は、オーステナイト粒内の炭素濃度のばらつきや周りの粒との相互作用によって異なっていると考察しています。また、ある一つの残留オーステナイト粒からの回折スポットを負荷ひずみ毎に追跡し、回折リングの中心からの距離を測定することで、変形に伴う転位密度の変化をWilliamson-Hall式を用いて計測できることも確認しています。今後は、結晶粒の方位や形状に加えて転位密度と変態挙動の関係について調査をしていく予定であります。

4. お わ り に

本稿では、著者が現在、京都大学で進めている3次元X線回折とX線CTを組み合わせたマルチモーダルイメージングの基礎研究について紹介しました。本手法は、これまで完全には理解できていなかった金属材料の様々な諸現象に対して、真の理解をもたらし、新たな金属材料の設計・開発にブレイクスルーを起こせるものだと期待しています。

研究者としてまだまだ未熟者であるがゆえ、至らない点多々あるかと存じますが、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) W. Friedrich, P. Knipping and M. von Laue: Sitz.ber. K. Bayer. Akad. Wiss. 1912, (1912), 303–322.

- 2) W. H. Bragg and W. L. Bragg: Proc. R. Soc. Lond. A, 88 (1913), 428–438.
- 3) W. Ludwig, S. Schmidt, E. M. Lauridsen and H. F. Poulsen: J. Appl. Cryst., 41 (2008), 302–309.
- 4) H. F. Poulsen: Three-Dimensional X-Ray Diffraction Microscopy, Springer, (2004).
- 5) H. Toda, T. Kamiko, Y. Tanabe, M. Kobayashi, D. J. Leclerc, K. Uesugi, A. Takeuchi and K. Hirayama: Acta Mater., 107 (2016), 310–324.
- 6) A. King, W. Ludwig, M. Herbig, J. Y. Buffière, A. A. Khan, N. Stevens and T. J. Marrow: Acta Mater., 59 (2011), 6761–6771.
- 7) M. Herbig, A. King, P. Reischig, H. Proudhon, E. M. Lauridsen, J. Marrow, J. Y. Buffière and W. Ludwig: Acta Mater., 59 (2011), 590–601.
- 8) H. Toda, H. Ogo, K. Horikawa, K. Uesugi, A. Takeuchi, Y. Suzuki, M. Nakazawa, Y. Aoki and M. Kobayashi: Metall. Mater. Trans. A, 45 (2014), 765–776.
- 9) L. Nervo, A. King, A. Fitzner, W. Ludwig and M. Preuss: Acta Mater., 105 (2016), 417–428.
- 10) A. King, P. Reischig, J. Adrien and W. Ludwig: J. Appl. Cryst., 46 (2013), 1734–1740.
- 11) S. A. McDonald, P. Reischig, C. Holzner, E. M. Lauridsen, P. J. Withers, A. P. Merkle and M. Feser: Scientific Rep., 5 (2015), 14665.
- 12) D. Shiozawa, Y. Nakai, R. Miura, N. Masada, S. Matsuda and R. Nakao: Int. J. Fatigue, 82 (2016), 247–255.
- 13) 平山恭介, 軽金属, 69 (2019), 587–590.
- 14) W. Ludwig, P. Reischig, A. King, M. Herbig, E. M. Lauridsen, G. Johnson, T. J. Marrow and J. Y. Buffière: Rev. Sci. Instrum., 80 (2009), 033905.
- 15) 戸田裕之, 平山恭介, ふえらむ, 25 (2020).

談 話 室

軟質フェライト相と硬質マルテンサイト相からなる
二相鋼の不均一変形挙動の解明

朴 明 験*

Characterization of Heterogeneous Deformation Behavior
in Dual-Phase Steels Composed of Ferrite and Martensite

By Myeong-heom PARK

1. は じ め に

令和3年2月1日付けで京都大学大学院工学研究科材料工学専攻 構造物性学講座の助教に着任いたしました朴明験と申します。この場をお借りしてご挨拶申し上げますとともにこれまでの略歴と研究について紹介させていただきます。

私は平成22年8月に韓国・慶北国立大学金属工学科を卒業し、平成24年4月に京都大学大学院工学研究科・修士課程に国費留学生として入学しました。辻伸泰教授のご指導のもと平成26年3月に京都大学工学研究科材料工学専攻で修士課程修了、平成29年3月に京都大学工学研究科材料工学専攻で博士学位を取得いたしました。平成29年4月に京都大学・学際融合教育研究推進センター構造材料元素戦略拠点ユニットで特定研究員、平成29年11月から令和3年1月まで同所属機関で特定助教を経て、現職に至っております。

研究としては、構造物金属材料におけるマクロ力学特性とミクロ変形挙動との関係を解明することを目的としており、軟質相と硬質相からなる複相金属材料の変形不均一性が力学特性に及ぼす影響について主に研究を行っております。最近ではリユース変形やセレーション挙動を示す材料にも興味を持ち巨視的不均一変形と応力応答との関係を調べております。

本稿では博士後期課程で実施したフェライト+マルテンサイトからなる二相鋼 (Dual-Phase (DP) 鋼) におけるミクロ変形挙動とマクロ力学特性との関係について紹介させていただきます。

2. 結晶粒微細化による DP 鋼の力学特性の向上

軟質なフェライト相と硬質なマルテンサイト相からなる二相鋼 (Dual-Phase (DP) steel) は、優れた強度・延性バランスを示すことから自動車鋼板などの実用材に幅広く使用されています。DP鋼の力学特性は粒径、分布状態、各相の硬さ、相分率などの組織因子に強く依存していることが知られており¹⁻⁴⁾、これまで多くの研究がなされてきました。一方、DP鋼の組織中にはフェライト相とマルテンサイト相が複雑な形で混在しているためミクロ組織レベルでの局所変形挙動の理解やその定量化が困難とされてきましたが、近年、画像相関 (Digital Image Correlation: DIC) 法の導入により局所ひずみの定量評価が実験的にできるようになりました^{5,6)}。私はこの画像相関法を活用し、フェライト粒径の異なるDP鋼のマクロ・ミクロ変形挙動について詳細に調査しました。図1に58.3 μm 、4.1 μm のフェライト粒径を有するDP材の (a) 微視組織と (b) 公称応力-公称ひずみ曲線を示します⁷⁾。粒径が微細になると高い応力とともに延性も大幅に向上することが分かりました。多結晶金属材料における強度と延性の機械的性質は一般的にトレードオフの関係にあるとされていますが、DP材は結晶粒微細化でなぜ強度と延性が両立できるかについて考えてみます。まずは、試験片レベルでの変形挙動の違いを調べます。画像相関法により得られた変形中の試験片の相当ひずみ分布マップを図2に示します。公称ひずみが10%まではいずれの引張試験片においてもゲージ部にひずみが均一に分布していますが、公称ひずみが15%まで増加するとネckingがかなり進みひずみ分布が大きく異なることが分かりました。粗大粒径DP材は公称ひずみが15%の時点で明確なひずみ集中が見られているのに対して微

* 京都大学大学院 工学研究科材料工学専攻 構造物性学講座 助教

細粒径DP材においてはネッキング部のひずみ集中帯が強く発達しておらず、ひずみ量も小さいことが分かりました。なぜこうした違いが出たのか組織レベルで

変形の様子を覗いてみます。

3. ミクロ組織の局所変形挙動

ミクロ組織に画像相関法を適用するために変形前後の同一視野SEM観察を行いました。基本的に組織由来のコントラストを変位追跡のためのマーカーとして利用しますが、解析精度を向上させるためにFIB (Focused ion beam) で試料表面に予めグリッド補助線を導入しました。図3に約12%の公称ひずみを与えたときの変形組織(左)と画像相関法より得られたひずみ分布マップ(右)を示します。両試料とも不均一なひずみ分布を示すこと、また引張軸に対して約45°方向、つまり最大せん断応力作用面に沿ってひずみ集中バンドが生じていることが見受けられました。粗大粒径DP材にはより大きなひずみ集中バンドが観察されフェライト/マルテンサイト界面近傍にマイクロボイドの形成も観察されました。

局所ひずみマップデータから抽出したフェライト相とマルテンサイト相それぞれのひずみヒストグラムを図4に示します。粗大粒径DP材においてフェライト相のひずみヒストグラムが高ひずみ側にあり、フェライト相とマルテンサイト相のひずみ分配が明確に生じていることが確認されました。微細粒径DP材においては両相のひずみヒストグラムのほとんどが重なってお

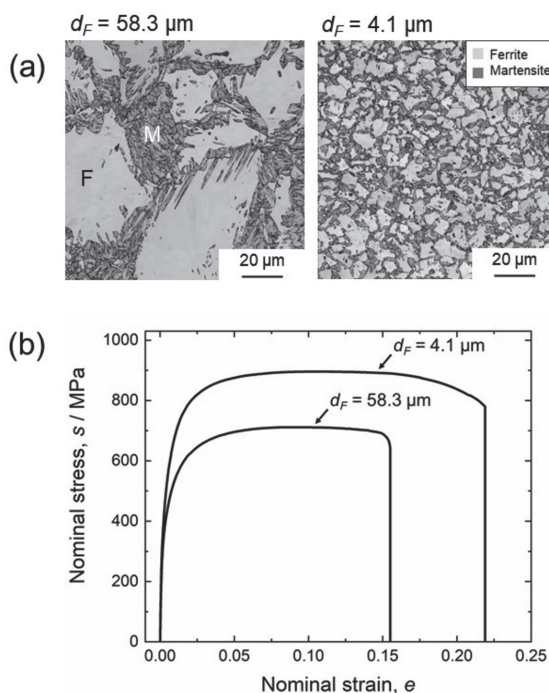


図1 (a) 異なるフェライト粒径 (d_F) を有するDP鋼の微視組織 (EBSD Image Quality map) と (b) 公称応力-公称ひずみ曲線

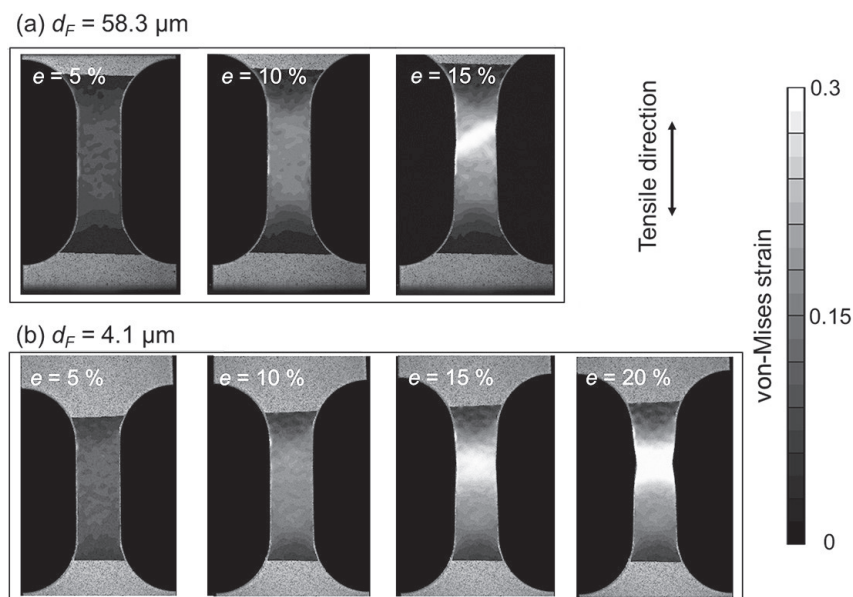


図2 (a) 粗大粒径DP材と (b) 微細粒径DP材における引張変形中の試験片のひずみ分布の変化

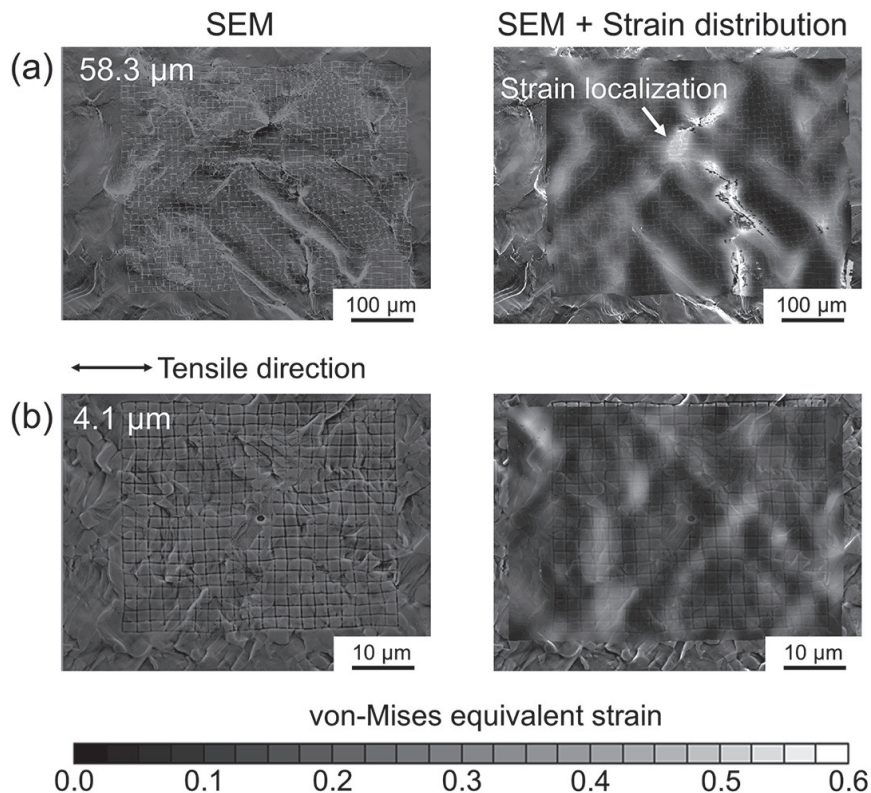


図3 公称ひずみ12%変形後の(a) 粗大粒径DP材と(b) 微細粒径DP材の引張変形組織 (左) とミクロひずみ分布マップ (右)

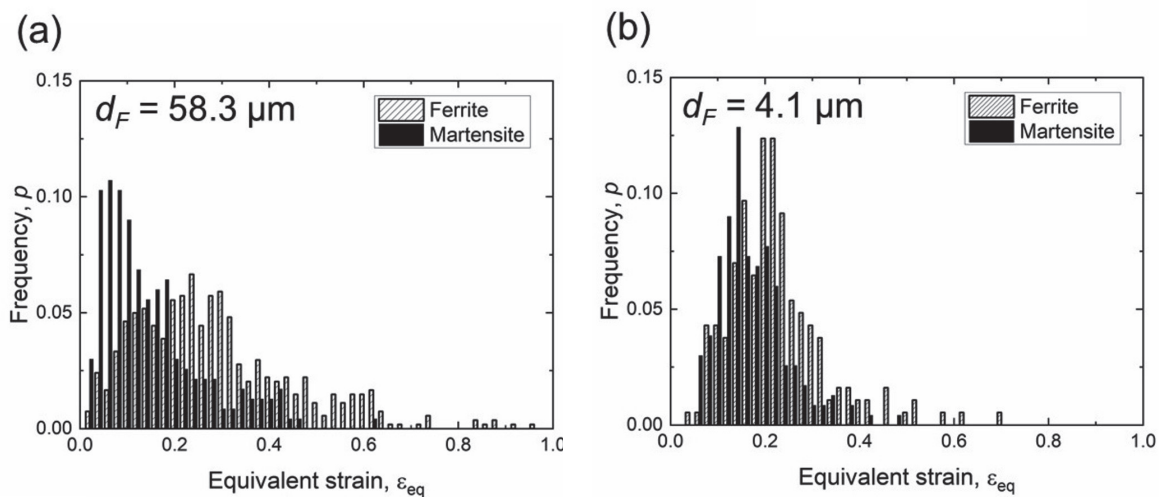


図4 (a)粗大粒径DP材と(b)微細粒径DP材におけるフェライト相とマルテンサイト相のひずみ分布ヒストグラム

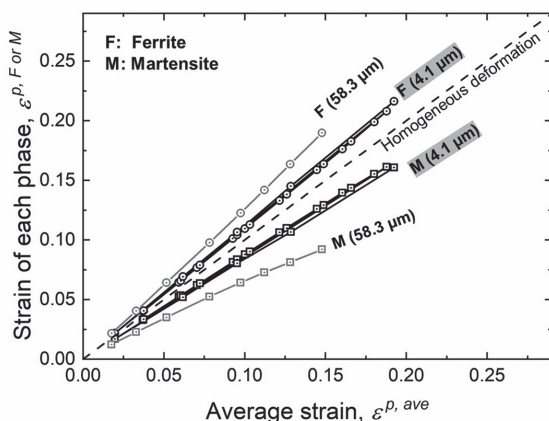


図5 引張変形中のフェライト相(F)とマルテンサイト相(M)のひずみの変化

り、両相がより均一に変形することが明らかになりました。

今まで特定の公称ひずみ量 ($\epsilon \sim 12\%$) における局所ひずみを調べてまいりましたが、引張変形中に各相のひずみの変化を見ます (図5)。横軸は画像相関法解析視野内の平均ひずみ量、縦軸はフェライト相とマルテンサイト相それぞれの平均相当ひずみを表しております。変形が進むにつれてフェライト相がマルテンサイト相より常に大きいひずみ量を担いながら線形的に増加していくことが分かりました。一方、微細粒径DP材の各相のひずみは粗大粒径DP材料の直線より内側にあることから変形の全領域においてより均一に変形することが明らかになりました。以上の結果より、DP材は結晶粒微細化によってマルテンサイト相がより変形するようになり、フェライト側へのひずみ集中が大きく抑制されたため、高強度・高延性が実現できたと考えられます。

4. おわりに

本稿では、筆者が博士課程で行ったDP組織の結晶粒微細化による高強度・高延性の両立、またマイクロ局所変形挙動が力学特性に及ぼす影響について紹介させていただきました。近年、画像相関法や引張変形中その場中性子回折実験などといった先端解析手法の導入より従来未知であった変形中の材料の中身がその場で観察できるようになりました。今後もこれらの手法に積極的に活用し、マイクロ変形挙動とマクロ力学特性との関わりを基礎的に解明してまいりたいと思います。研究者としても教育者としても至らない点が多くまだまだ未熟な身ですが、私なりのペースで好きな研究分野においては自信を持って着実に研究を進めたいと思います。今後とも何卒よろしくお願いいたします。

参考文献

- 1) M. Calcagnotto, Y. Adachi, D. Ponge and D. Raabe, *Acta Mater.* **59** (2011) 658-670.
- 2) D. Terada, G. Ikeda, M.-H. Park, A. Shibata, N. Tsuji, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, **219** (2017) 012008.
- 3) K. Park, M. Nishiyama, N. Nakada, T. Tsuchiyama, S. Takaki, *Mater. Sci. Eng. A* **604** (2014) 135-141.
- 4) H. Li, S. Gao, Y. Tian, D. Terada, A. Shibata, N. Tsuji, *Mater. Today Proc.* **2** (2015) S667-S671.
- 5) V. Herrera-Solaz, L. Patriarca, S. Foletti, J. Segurado, M. Niffenegger, *Mater. Sci. Eng. A* **751** (2019) 99-106.
- 6) S.H. Joo, J.K. Lee, J.M. Koo, S. Lee, D.W. Suh, H.S. Kim, *Scr. Mater.* **68** (2013) 245-248.
- 7) M.H. Park, A. Shibata, N. Tsuji, *MRS Adv.* **1** (2016) 811-816.

談 話 室

FCC単相ハイ・ミディアムエントロピー合金の
結晶粒微細化と強化機構

吉 田 周 平*

Grain refinement and strengthening mechanism in high/medium
entropy alloys with FCC single-phase

By Shuhei YOSHIDA

1. は じ め に

令和3年度6月付で材料工学専攻材料物性学講座構造物性学分野（辻研究室）の助教に着任しました吉田周平と申します。私の経歴を簡単に述べますと平成28年に東京大学工学部機械工学科を卒業後、京都大学大学院工学研究科材料工学専攻に進学し、材料物性学講座構造物性学分野にて辻伸泰教授のご指導の下、令和3年3月に博士（工学）の学位を取得しました。同年4月からは同研究室の特定研究員として在籍しておりました。大学院入学時から現在に至るまで、新しい構造用金属材料であるハイ・ミディアムエントロピー合金（High/Medium entropy alloy: HEA/MEA）の材料組織と力学特性に関する研究に従事してきました。今回は、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FCC構造を有するHEA/MEAの結晶粒微細化と強化機構に関する内容を中心に紹介させていただきたいと思います。

2. 研 究 背 景

ハイエントロピー合金（HEA）は、5種類以上の合金元素をはほぼ等原子量で固溶させた、新しい合金設計思想に基づく高濃度多元系固溶体合金である。CoCrFeMnNi等原子量HEAは、Yehら¹⁾、およびCantorら²⁾によって2004年にそれぞれ独立に報告された最初のHEAである。CoCrFeMnNi HEAは、高温においてFCC単相固溶体を安定に形成し、室温や低温において優れた強度・延性バランスを示すことが明らかになるなど、今日までに非常に多くの研究がなされてい

る³⁻⁵⁾。これまでのハイエントロピー合金の研究は、実験室レベルで少量の合金を溶解・鋳造し、得られた試料をそのまま、あるいはせいぜい均質化处理を施して用いられることが多かった。一方、金属材料の重要な特徴の一つは微視組織（microstructure）を有する点にあり、加工や熱処理によって微視組織を制御すると、同一化学組成であってもその特性を幅広く変化させることができる。ハイエントロピー合金の場合にも、加工や熱処理、あるいはそれらを組み合わせることによって微視組織を制御すれば、鋳造材よりも優れた特性を実現することが可能であると考えられる。

また、CoCrFeMnNi HEAを構成する5種類の元素から2-4種類を選択し、それらを等原子量で固溶させることによってFCC単相固溶体を得られる場合がある⁶⁻⁸⁾。こうした合金は、配置のエントロピーがHEAほどは大きくないことから、ミディアムエントロピー合金（MEA）と呼ばれている。例えばCoCrNi MEAは幅広い温度域でFCC単相固溶体を形成し、CoCrFeMnNi HEAよりも高い強度・延性バランス、破壊靱性を示すことが知られている⁹⁾。これらの結果は、単純な合金元素数（配置のエントロピー）の増加が必ずしも力学特性の向上に結び付くわけではなく、従来の希薄合金と同様に組成によってHEA/MEAの特性が大きく変化することを示唆している。

筆者らは、様々な組成のMEAに対して巨大ひずみ加工と焼鈍を施すことで、幅広い平均結晶粒径を有する完全再結晶超微細粒材を作製する方法を検討してきた。また、室温においてその力学特性を評価し、高濃度固溶体合金の力学特性の平均結晶粒径依存性、組成依存性について系統的な調査を行ってきた¹⁰⁻¹²⁾。

*京都大学大学院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辻研究室 助教

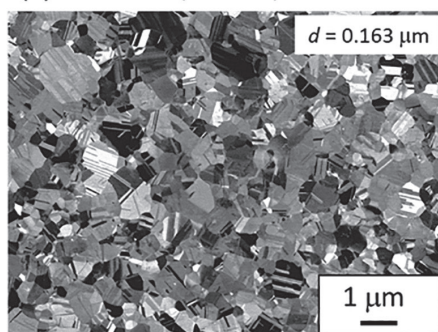
3. FCC単相HEA/MEAの結晶粒微細化

CoCrFeMnNi HEAのサブ・システムの中でも、CoCrFeNi, CoFeMnNi, CoFeNi, CoMnNi, FeMnNi等原子量MEA, および $(\text{CoNi})_{(100-x)}\text{Cr}_x$ ($x = 5, 20$ at. %), $\text{Co}_{20}(\text{CrNi})_{80}$ 非等原子量MEAは、高温でFCC単相固溶体を形成することが先行研究より明らかとなっている^{6,11,13}。そこで本研究では、真空アーク溶解を用いてこれらの合金のボタン・インゴットを铸造した。その後、インゴットを90%冷間圧延し、1200°Cにおいて24 hの均質化処理を施した後に水冷した。さらにそれらに対してHigh-Pressure Torsion (HPT)法による巨大ひずみ加工を施した¹⁴。5回転のHPT加工を施した材料に対して600~1100°Cの温度域において10 s~7.2 ksの焼鈍を行い水冷することで、様々な平均結晶粒径を有する完全再結晶材を得た。

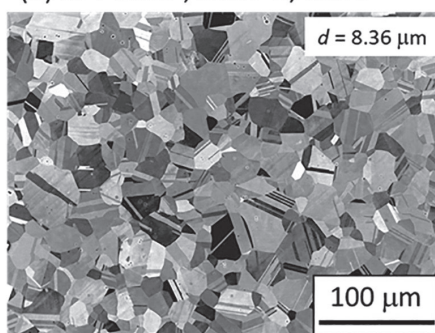
MEAにHPTを施した後に焼鈍することで得られた完全再結晶組織の一例として、図1にCoCrFeNi MEAのSEM-BSE像を示す。どの試料においても等軸形状の結晶粒が試験片全体で観察されており、完全再結晶していることが確認された。HPT 5回転の後に800°Cで30 sの焼鈍を施した完全再結晶試料の平均結晶粒径が最も小さく、0.163 μm であった(図1(a))。また、焼鈍の温度と保持時間を変化させることにより、平均結晶粒径を0.163 μm から32.2 μm まで幅広く調整することが可能であった(図1(a-c))。他の多くのMEAでも、HPTと短時間の焼鈍により、比較的容易にサブミクロンスケールの非常に小さな平均結晶粒径を有する完全再結晶超微細粒組織が得られた。

HEA/MEAにおいて完全再結晶超微細粒組織が容易に得られる理由としては、次の3つが考えられる。まず、(1) HEA/MEAでは多量の固溶元素を含むことから、FCC構造の $\{111\}$ 面における積層欠陥エネルギーが低くなる傾向があると言われており、変形中の動的回復が抑制されることが予想される。そのため、FCC単相HEA/MEAでは加工時に多量の転位が蓄積され、数多くの再結晶核が高密度に導入されやすくなり、一次再結晶完了時の粒径が小さくなると考えられる。2つ目の理由として、(2) HEA/MEAの粒成長速度が非常に遅く、一次再結晶完了後の組織の変化が緩やかであるという事である。先行研究¹⁵によれば、CoCrFeMnNi HEAの粒成長の活性化エネルギーは321.7 kJmol⁻¹であり、他のFCC金属に比べて非常に粒成長が遅いことが示されている。粒成長は粒界をまたいだ原子のジャンプによって起こるため、様々な元素が混ざり合ったHEA/MEAでは、特定の元素が粒界部に低いポテンシャルエネルギーを持って位置し、粒成長を律速している可能性がある。3つ目の理由として、(3)

(a) HPT 1800°, 800 °C, 30 s



(b) HPT 1800°, 1000 °C, 600 s



(c) HPT 1800°, 1100 °C, 1.2 ks

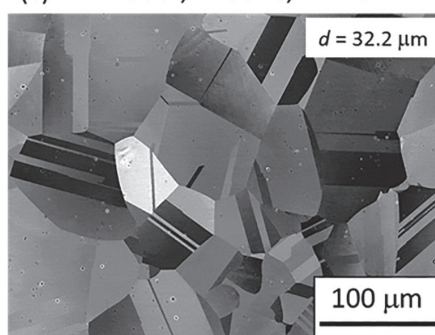


図1 CoCrFeNi MEAに対し5回転(1800°)のHPTを施した後、(a) 800°C-30s, (b) 1000°C-600s, (c) 1100-°C 1.2ksの焼鈍を施した試料の材料組織写真

HEA/MEAは焼鈍双晶を生成しやすいという事がある。FCC単相のHEA/MEAの多くは比較的低い積層欠陥エネルギーを有するため^{16,17}、再結晶時に多量の焼鈍双晶を生成する傾向がある。例えば図1(a)の焼鈍双晶境界を含む、または含まない平均結晶粒径はそれぞれ0.1630 μm , 0.590 μm であり、焼鈍双晶の寄与が大きいことが分かる。焼鈍双晶境界の多くの部分は整合性の良い $\Sigma 3$ 粒界であり、易動度が小さい。以上のような理由から、HEA/MEAにおいては加工と焼鈍といった比較的単純な加工熱処理のみでも、容易に完全再結晶超微細粒組織が得られると考えられる。

4. FCC単相HEA/MEAにおける強化機構

様々な平均結晶粒径を有する完全再結晶MEAに対して室温で初期ひずみ速度 $8.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ の下、引張試験を行って得られた公称応力-公称ひずみ曲線の一例として、図2 (a) にCoCrFeNi MEAの場合を示す。平均結晶粒径が小さくなるにしたがって降伏強度が増大した。ここで一つ注目すべき点として、平均結晶粒径がおよそ $0.5 \mu\text{m}$ 以下の試料において降伏点降下が生じていた。この降伏点降下は、BCC構造の炭素鋼などで知られている溶質原子による転位の固着に起因したものとは異なり、結晶構造を問わずにはばあらゆる種類の超微細粒金属・合金で共通して見られる現象である。完全再結晶超微細粒MEAの変形特性に關してもう一つ注目すべき点として、高い加工硬化能と優れた強度・延性バランスが挙げられる。例えば図2 (a) において、平均結晶粒径 $0.295 \mu\text{m}$ の試料においては降伏応力 720 MPa 、破断伸び 42% が得られている。多くの超微細粒金属材料（平均粒径が $1 \mu\text{m}$ 以下）では、高い降伏強度が得られるものの、マクロ降伏後にはほとんど加工硬化しないため、早期に塑性不安定条件が達成され、引張延性（均一伸び）が $1 \sim 2\%$ 以下まで極端に低下するという問題点があった。しかしながら今回の結果を含む多くのFCC単相HEA/MEAの場合には、サブミクロン粒径であっても、降伏後に十分な加工硬化が現れ、大きな引張延性が維持される。

図2 (a) の応力-ひずみ曲線から得られた降伏応力 (σ_Y) (0.2%耐力) を、平均結晶粒径 (d) の $-1/2$ 乗の関数としてプロットしたものを図2 (b) に示す。一般的に、多結晶体の平均結晶粒径と降伏強度の間には以下の関係が成り立つ。

$$\sigma_Y = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad (1)$$

これはHall-Petch関係^{18,19)}と呼ばれる。 σ_0 は摩擦応力と呼ばれ、平均結晶粒径無限大の場合の材料の降伏強度に相当する。FCC金属の場合は σ_0 をTaylor因子で割ることによって、単結晶における $\{111\} \langle 110 \rangle$ 転位すべりの臨界分解せん断応力と等価な値が得られるため、 σ_0 は転位が固溶体の結晶格子中をすべり運動する際の基礎抵抗として物理的に解釈することが出来る。 k はHall-Petch定数と呼ばれ、転位が粒界に堆積 (Pile-up) し先頭転位にかかる応力集中によって隣接粒の転位すべりが活性化されマクロな降伏が起こると考えた場合の臨界応力や、材料の弾性定数等と相関があると考えられている²⁰⁾。CoCrFeNi MEAにおいて、降伏点降下が生じなかった平均結晶粒径 ($d > 0.553 \mu\text{m}$) の試料のデータ点に対して、式(1)を用いてフィッティ

ングを行った結果は、図2 (b) において黒の実線で表されている。粗大粒領域においては、式(1)がよく成り立っている。一方、降伏点降下がみられる超微細粒域においては、降伏強度が式(1)の値 (黒の実線) を上回っている。これはExtra-hardeningと呼ばれており、降伏点降下とともに多くの超微細粒金属材料で見られる現象である。Extra-hardening現象が起きる理由として、超微細結晶粒内の転位源の枯渇や粒界からの転位放出などが議論されているが²¹⁻²⁵⁾、詳細なメカニズムは完全には明らかになっていない。

次に摩擦応力 (σ_0) に注目する。実験的に得られたHall-Petch関係の切片から決定された種々のHEA²⁶⁾、MEA^{10,11)}、及び純Ni²⁷⁾の摩擦応力をヤング率 (E) で規格化した値を、図3に示す。純Niが最も小さく、CoCrNiやCo₂₀(CrNi)₈₀は純Niの10倍以上の摩擦応力を有していることが分かる。

一般的にFCC構造を有する純金属ではパイエルス

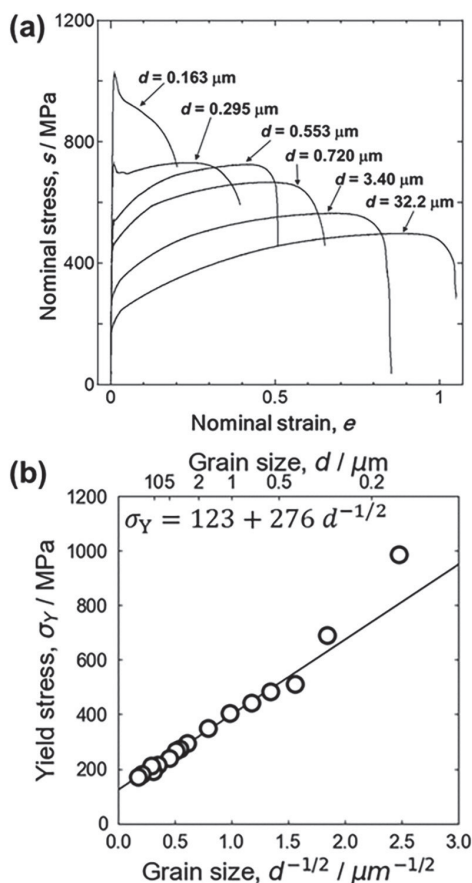


図2 種々の平均結晶粒径を有するCoCrFeNi MEAの (a) 公称応力-公称ひずみ曲線と、(b) Hall-Petch関係。(b) の図中の式は黒の実線を表す。

応力が低く、摩擦応力は小さな値となる。純金属に合金元素が添加された場合には、溶質原子の周辺にミスフィット(格子ひずみ)が生じる。このミスフィットは、転位の弾性場と相互作用することで固溶強化をもたらすことが古くから知られている。Labuschは、0 Kにおいて合金中の転位は複数の障害物(溶質原子のミスフィット)から同時に弱いピン止め力を受けながら運動すると考え、希薄合金における転位すべりの臨界せん断応力($\tau(0\text{ K})$)が以下の式で表せることを理論的に示した²⁸⁾。

$$\frac{\tau(0\text{ K})}{G} \propto (\eta'^2 + \alpha^2 \varepsilon^2)^{\frac{2}{3}} \rho^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

ここで、 G は合金のせん断弾性定数、 η' は弾性定数ミスフィット、 ε は原子サイズミスフィットである。 ρ は転位のすべり面近傍における障害物の密度を表し、希薄系では溶質濃度 c と等しい値を仮定すると実験データと一致することが知られている。 α は定数であり、Labuschは $\alpha=16$ を仮定した。多くのFCC金属の場合、 $|\eta'| \ll |\alpha \varepsilon|$ であるため²⁹⁾、弾性定数ミスフィットの効果は無視できる。式(2)は、 $\rho=c$ とした場合、合金系によっては溶質濃度 $c \sim 10\text{ at.}\%$ 程度までは成り立つが、一般的には溶質濃度が高くなると成り立たなくなる。HEA/MEAの固溶体中では様々な大きさの元素が高濃度で混ざり合っており、図4に模式的に示すように、結晶格子が大きくひずんでいると考えられる。これはSevere lattice distortionと呼ばれ、HEA/MEAが示す重要な特徴の一つと考えられている。し

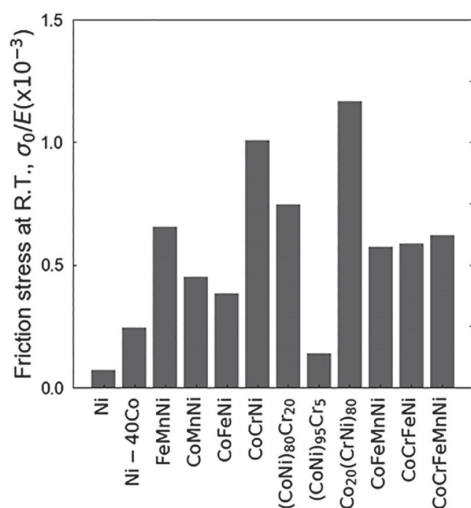


図3 種々のFCC単相HEA/MEA、および純Niの室温における摩擦応力。摩擦応力の値はそれぞれの室温でのヤング率で規格化されている。

かし、こうした大きな格子ひずみ(Severe lattice distortion)とHEA、MEAの強度の関係は、これまで定性的にしか語られてこなかった。Wuら⁸⁾は、種々のHEA、MEAに対して溶質と溶媒を適当に決め、Labuschモデルをもとにそれらの強度を見積もった。モデルから得られた強度値を彼らの実験値と比較すると、大まかには相関があるものの、モデル計算と実験との間で傾向に大きな差が見られた。つまり、HEA/MEAに対して従来の固溶強化理論を当てはめることはできず、別の新たな理論モデルが必要となる。

HEA/MEAに適用可能な強化理論モデルが近年いくつか提唱されてきている。その中でも実験データと良い一致を示すものとして、Varvenne、Curtinらのモデル³⁰⁾や、Toda-Caraballoらのモデル^{31,32)}がある。本質的に両者は等価な理論モデルであり、どちらも共通してLabuschモデルをもとに考えられている。

本稿では、扱いが容易な後者のモデルを主に用いて、図3に示した摩擦応力と合金組成の関係を考察する。ここで図5(a)のように、仮想的な2元系全率固溶体合金の強度と溶質濃度の関係を考える。溶質濃度が等原子量程度になると、合金の強度が溶質濃度(障害物密度)に依存しなくなると考えられる。つまり、等原子量合金においては、 ρ は一定値をとると考えることができる。次に、HEA/MEAの場合を考える。HEA/MEAにおいては、ほぼ等原子量で合金元素が混ざり合っているため、転位は様々な強さの障害物が高密度に敷き詰められた環境下で運動することになる(図5(b))。これを平均的な強さの障害物が同じ密度で敷き詰められた「平均場」として考えることにする。また、二元系の場合と同様に、 ρ は一定値となると仮定する。以上から、HEA/MEAにおいて式(2)を次のように書き換えることができる¹¹⁾。

$$\frac{\tau(0\text{ K})}{G} \propto \varepsilon_{\text{ave}}^{\frac{4}{3}} \quad (3)$$

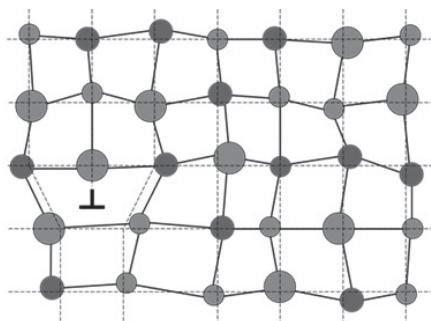


図4 HEA/MEAにおける大きく歪んだ結晶格子

ここで ε_{ave} は、原子サイズミスフィット (ε) を合金元素濃度によって重み付けした平均値 (後述) を表す。Wu ら⁷⁾ は、種々の HEA/MEA の降伏強度の温度依存性を既に報告している。よって本研究では、彼らの結果をもとに、 k が温度に依存しないと仮定し図3の摩擦応力の値を0 Kまで外挿した後、ランダムな方位分布の場合の Taylor 因子 (= 3.06) で割ることによって、0 Kにおける臨界せん断応力 ($\tau(0\text{ K})$) を決定した。Toda-Caraballo ら³¹⁾ は、平均原子サイズミスフィット (ε_{ave}) を求めるための簡便なモデルを考案している。彼らのモデルによれば、合金の平均格子定数 (a) は次の式で推定することが出来る。

$$a = f \sum_{ij} \frac{s_{ii}^2 K_i x_i + s_{jj}^2 K_j x_j}{s_{ii} K_i x_i + s_{jj} K_j x_j} x_i x_j \quad (4)$$

ここで s_{ii} , K_i , x_i はそれぞれある元素種 i の原子半径、体積弾性率、濃度 (at. %) を表す。 f は定数であり、FCC 構造の場合は $f = \sqrt{2}$ である。本研究では、原子半径として各元素の金属結合長を用いた³³⁾。 ε の平均値である平均原子サイズミスフィット (ε_{ave}) は、次の式で求められる。

$$\varepsilon_{ave} = \sum_{ij} \left| \frac{1}{a} \frac{da}{dx_i} \right| x_i x_j \quad (5)$$

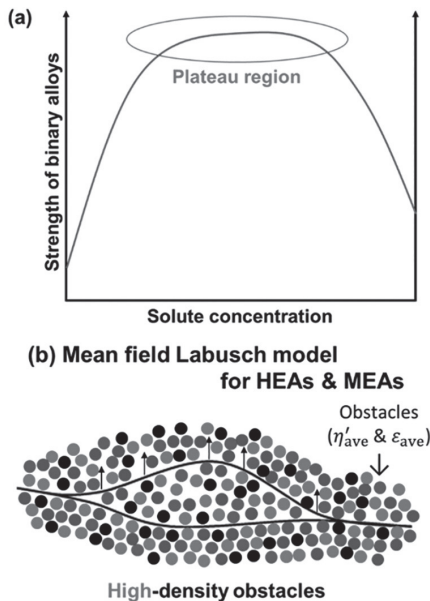


図5 (a) 二元系全率固溶体における合金元素と強度の関係。 (b) 平均場 Labusch

本研究では、式 (3) における ε_{ave} として、式 (5) によって求められた値を使用した。

図6に、0 Kに外挿された種々の合金の強度と Toda-Caraballo モデルより求めた平均原子サイズミスフィットの関係を示す。白抜ききの点で表される HEA/MEA のデータ点は、黒の実線で示される平均場 Labusch モデルと良い一致を示している。つまり、これら HEA/MEA においては、大きな格子ひずみ (Severe lattice distortion) と転位との相互作用が、合金の強化 (降伏応力) を支配的に決定しているといえる。

近年では、HEA/MEA において短範囲規則化がその強度に大きな影響を与えていると主張する論文が散見される。しかし、少なくとも FCC 単相の HEA/MEA においては熱処理温度を変化させても力学特性が変化しないことが報告されており^{12,34)}、短範囲規則化は主要な強化因子ではないと考えられる。一方、HEA/MEA の出現により、今までは全く考えられてこなかった組成の高濃度多元系合金が数多く生み出され、時には従来の金属材料学の常識 (希薄系の理論) では理解できない特異な性質が報告されてきている。そのため、本稿で述べてきたような強化機構が支配的でない合金が発見される可能性もあると考えられる。今後 HEA/MEA に関する研究が進展していくことで、金属材料学の理解が大きく深まり、新たな学理が生まれていくことが期待される。

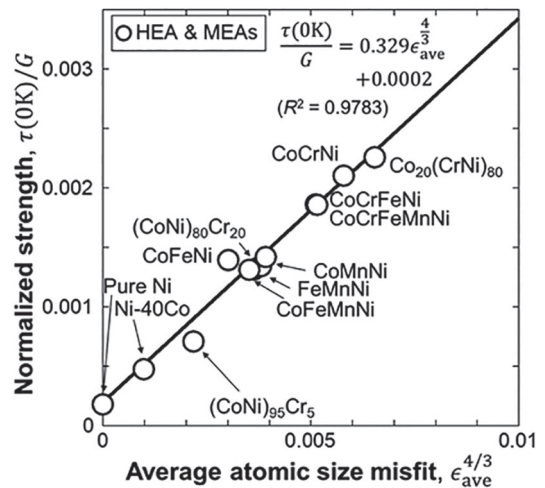


図6 せん断弾性定数で規格化された0 Kにおける摩擦応力と平均原子サイズミスフィットの関係。図中の式は黒の実線を表す。

5. おわりに

本稿では、FCC単相HEA/MEAにおける結晶粒微細化と強化機構に関する筆者の研究について紹介させていただきました。現在は、電子顕微鏡による材料組織観察や変形中のその場放射光X線・中性子回折測定を行うことでFCC、またはBCC単相のHEA/MEA、およびその他の高濃度合金における材料組織の発達や変形挙動の詳細を明らかにする研究に取り組んでいます。今後は、学内外、国内外の先輩教員、先輩研究者の皆様の背中を見て学ぶことで、独自の研究を展開する自立した研究者に、そして学术界、産業界で活躍できる後輩を育てることが出来る教育者になれるよう日々励んで参りたいと思います。今後ともご指導、ご鞭撻のほどよろしくお願い申し上げます。

参考文献

- 1) J.-W. Yeh, S.-K. Chen, S.-J. Lin, J.-Y. Gan, T.-S. Chin, T.-T. Shun, C.-H. Tsau, S.-Y. Chang, *Adv. Eng. Mater.* 6(2004)299–303.
- 2) B. Cantor, I.T.H. Chang, P. Knight, A.J.B. Vincent, *Mater. Sci. Eng. A* 375–377(2004) 213–218.
- 3) M.-H. Tsai, J.-W. Yeh, *Mater. Res. Lett.* 2(2014) 107–123.
- 4) D.B. Miracle, O.N. Senkov, *Acta Mater.* 122(2017) 448–511.
- 5) E.P. George, D. Raabe, R.O. Ritchie, *Nat. Rev. Mater.* 4(2019)515–534.
- 6) Z. Wu, H. Bei, F. Otto, G.M.M. Pharr, E.P.P. George, *Intermetallics* 46(2014) 131–140.
- 7) Z. Wu, H. Bei, G.M. Pharr, E.P. George, *Acta Mater.* 81 (2014) 428–441.
- 8) Z. Wu, Y. Gao, H. Bei, *Acta Mater.* 120(2016)108–119.
- 9) B. Gludovatz, A. Hohenwarter, K.V.S. Thurston, H. Bei, Z. Wu, E.P. George, R.O. Ritchie, *Nat. Commun.* 7(2016)10602.
- 10) S. Yoshida, T. Bhattacharjee, Y. Bai, N. Tsuji, *Scr. Mater.* 134(2017) 33–36.
- 11) S. Yoshida, T. Ikeuchi, T. Bhattacharjee, Y. Bai, A. Shibata, N. Tsuji, *Acta Mater.* 171 (2019)201–215.
- 12) B. Yin, S. Yoshida, N. Tsuji, W.A. Curtin, *Nat. Commun.* 11(2020)2507.
- 13) T. Omori, J. Sato, K. Shinagawa, I. Ohnuma, K. Oikawa, R. Kainuma, K. Ishida, J. *Phase Equilibria Diffus.* 35(2014)178–185.
- 14) R.Z. Valiev, N.A. Krasilnikov, N.K. Tsenev, *Mater. Sci. Eng. A* 137(1991)35–40.
- 15) W.H. Liu, Y. Wu, J.Y. He, T.G. Nieh, Z.P. Lu, *Scr. Mater.* 68(2013)526–529.
- 16) N.L. Okamoto, S. Fujimoto, Y. Kambara, M. Kawamura, Z.M.T. Chen, H. Matsunoshita, K. Tanaka, H. Inui, E.P. George, *Sci. Rep.* 6(2016) 35863.
- 17) G. Laplanche, A. Kostka, C. Reinhart, J. Hunfeld, G. Eggeler, E.P. George, *Acta Mater.* 128(2017) 292–303.
- 18) E.O. Hall, *Proc. Phys. Soc. Sect. B* 64(1951)747.
- 19) N.J. Petch, *J. Iron Steel Inst.* 174(1953)25–28.
- 20) S.D. Antolovich, R.W. Armstrong, *Prog. Mater. Sci.* 59 (2014) 1–160.
- 21) N. Kamikawa, X. Huang, N. Tsuji, N. Hansen, *Acta Mater.* 57(2009)4198–4208.
- 22) X. Huang, N. Hansen, N. Tsuji, *Science* (80-.). 312 (2006)249–251.
- 23) T. Shimokawa, T. Kinari, S. Shintaku, *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.* 75 (2007) 1–11.
- 24) T. Shimokawa, *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.* 82(2010)1–13.
- 25) M.A. Tschopp, D.L. McDowell, *Scr. Mater.* 58 (2008)299–302.
- 26) F. Otto, A. Dlouh, C. Somsen, H. Bei, G. Eggeler, E.P. George, *Acta Mater.* 61(2013)5743–5755.
- 27) C. Keller, E. Hug, *Mater. Lett.* 62(2008)1718–1720.
- 28) Labusch. R, *Phys. Status Solidi* 41(1970)659–669.
- 29) R.L. Fleischer, *Acta Metall.* 10(1962)835–842.
- 30) C. Varvenne, A. Luque, W.A. Curtin, *Acta Mater.* 118(2016)164–176.
- 31) I. Toda-Caraballo, J.S. Wrobel, S.L. Dudarev, D. Nguyen-Manh, P.E.J. Rivera-Diaz-Del-Castillo, *Acta Mater.* 97(2015)
- 32) I. Toda-Caraballo, *Scr. Mater.* 127 (2017)113–117.
- 33) N. Greenwood, N. A. Earnshaw, *Chemistry of the Elements*, Second Edi, Elsevier, Oxford, UK, 1997.
- 34) D. Zhou, Z. Chen, K. Ehara, K. Nitsu, K. Tanaka, H. Inui, *Scr. Mater.* 191(2021)173–178.

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た新しい物理探査手法の開発、破壊を伴う岩石挙動や地下の流体流動解析、それらを組み合わせた連成解析など、資源・エネルギーの開発に必要な研究を幅広く行っている。

貯留岩の浸透率推定精度向上の研究

石油、ガス、その他非在来型資源の生産効率向上のためには、それらを有する地下貯留層の浸透率を高精度に予測することが重要である。本研究では、貯留層を構成する固体粒子の粒径分布が浸透率に及ぼす影響を調べるため、様々な粒径分布を有する岩石のデジタル供試体を作成し、流体流動シミュレーションによってデジタル供試体の浸透率を測定した。その際、Weibull形状係数をパラメータとして粒径分布を表現することを提案した。数値実験の結果、Weibull形状係数の増加に伴い浸透率は単調減少する傾向が明らかとなった。この原因を調べるため、デジタル供試体の間隙構造を定量的に分析し、Weibull形状係数の変化が間隙構造変化に与える影響を明らかにした。これらの結果を基に、Weibull形状係数と間隙率から浸透率を推定する式を新たに提案した。これにより、従来の間隙率のみから浸透率を推定する式と比べて、より高精度に浸透率を推定することが可能になった。

全波形情報を用いた地震の 震源メカニズムの高精度推定

地震の発生直後にその震源メカニズムを精度よく推定することは、地震防災を考える上で極めて重要な課題である。本研究では、資源探査の分野で注目されている全波形逆解析と呼ばれる手法を震源メカニズム推定に適用することを提案した。全波形逆解析では、得られた地震動データ全てを用いて震源メカニズムを推定する。従来手法に比べて用いるデータ量が飛躍的に増加するため、より高精度な震源メカニズムの推定が期待される。提案手法の有用性を確認するため、実際の地震発生を模擬した数値実験をおこない、震源メ

カニズムがどの程度精度に推定できるか確認した。その結果、震源断層面上のすべり量分布を高精度に予測可能であることが示された(図1)。

地下の流体流動に起因する地震波を 利用した受動的地震探査法の研究

地下で流体が流動すると、それに起因する微小な地震動が発生する。その地震動を長期間にわたって観測し、それを解析することで、地下流体流動域を推定することが可能になる。しかし、どの程度の期間観測をおこなえば、どの程度の精度で地下を可視化できるかはわかっていない。そのため、比較的長期間にわたって観測がおこなわれるのが現状であり、それがこの手法の短所となっている。本研究では、地下で流体が流れる際にどのような地震動が発生するかをシミュレーションし、それにより地下流体流動域がどの程度可視化できるか研究している。図2の結果は、地震動の観測時間を10秒から100秒に変化させたときの地下イメージング結果の違いを表している。これにより、どの程度の観測期間を設ければ流体流動域(白枠線部)が高精度にイメージングできるか定量的に評価することが可能になる。

教授 三ヶ田 均
准教授 武川 順一
助教 徐 世博

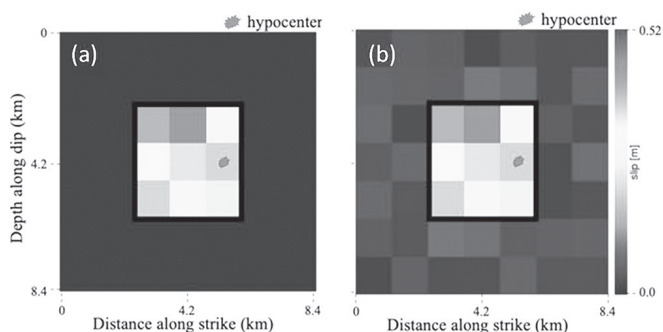


図1 震源断層面上のすべり量分布推定結果。(a)真のすべり量分布と(b)全波形情報を用いた推定結果。

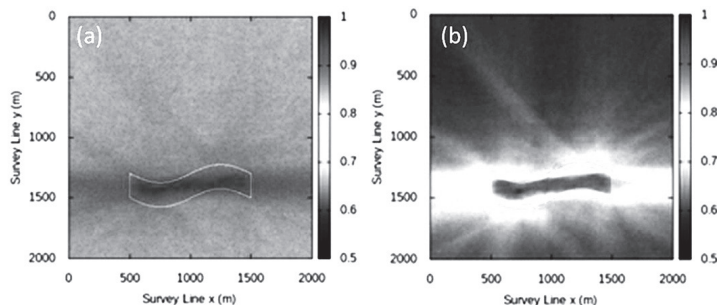


図2 異なる観測時間における貯留層位置推定結果。(a)観測時間10秒と(b)観測時間100秒の結果。

工学研究科 社会基盤工学専攻

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

地下深くの岩石は多くの亀裂を有しており、その亀裂の進展が岩盤の不安定を引き起こす。しかしながら、地下の高封圧下において岩盤が破壊するかどうかは、単純に亀裂の進展のみには支配されず、亀裂のずれ変位が重要になる。本研究では、防災科学技術研究所所有の大型岩石摩擦試験機を用いて、メートルサイズの岩石試料を用いた岩石摩擦実験を行なった。剪断すべり発生中の摩擦力の時空間変化を測定し、岩石の破壊安定性を調べた。また、境界積分方程式法などの数値シミュレーション手法を用い、実際の剪断破壊現象を計算機上で再現することにより、実験室において完全に測定できない岩石摩擦を破壊伝播との関係で調べた。さらに、実験室で得られた動摩擦理論を考慮し、計算機上で亀裂の破壊伝播の再現を行うことで、岩盤の安定性の評価に向けた研究を行なった。

自然界の断層にはガウジ層と呼ばれる摩擦物の層が挟まっていることがある。ガウジ層は断層の長距離変位によって生成されることがわかっており、主に大地震の際に生成される。このガウジ層の有無が岩石摩擦に及ぼす影響を大型岩石摩擦実験により調べた。ガウジ層を挟む場合と挟まない場合の岩石摩擦は、基本的な摩擦の性質を示す速度状態依存摩擦則パラメータの a 、 b 値はガウジの有無による影響は見られなかったが、面の状態を表すパラメータ D_c は、ガウジを挟んだ場合、挟まない場合の値より2オーダーほど大きな値となった。これは亀裂の生成のみならず生成された亀裂の面の状態が岩盤の安定性に影響を及ぼすことを示している。さらに、地下の亀裂はいくつもの不連続を有しているが、その不連続が破壊進展に及ぼす影響を数値計算により考察し、不連続な亀裂が連結するための条件は、応力拡大係数による予測とほぼ一致することがわかった。

砂岩における炭酸塩鉱物析出と透水係数測定

地下岩盤を利用する二酸化炭素地中貯留や放射性廃棄物地層処分などのプロジェクトにおいては、岩盤の透水性に関する情報を知ることが重要である。岩石内の亀裂や空隙の分布や連結性が岩石の透水特性に影響することが分かっているが、外的要因によって亀裂の閉塞や空隙の充填が起これば、岩石の透水性は低下する可能性がある。これまでに化学的作用によって鉱物が析出して岩石内の空隙を充填することは明らかにになっている。しかし、岩石の亀裂・空隙を鉱物で充填した際の透水性の変化についてはまだ明らかにされていなかった。そこで本研究では、砂岩供試体を用いてカルシウム化合物による供試体の空隙充填の状況を観察し、その透水性への影響について調べた。岩石の透水性を評価する方法として、本研究では変水位透水試験を用いた。

供試岩石には、スコットランド産のClashach砂岩を用いた。X線回折(XRD)分析の結果、主要鉱物は石英(SiO_2)であり、その他少量の長石が含まれていることが分かっている。試験には直径50 mm、高さ25 mmとなるように成形した供試体を用いた。また、初期状態では空隙率は18～19%であった。

岩石供試体を炭酸水で飽和させて空隙を炭酸水で満たしたのちに、水酸化カルシウム水溶液中で保存するという手順を繰り返した場合、試験を行うごとに空隙率と透水係数の値が低下した。また、走査型電子顕微鏡を用いて分析を行った結果、供試体表面に広くカルシウム化合物が析出していることが確認された。岩石供試体はアルカリ性かつカルシウムイオン濃度が高い溶液中に保存されていたことから、岩石内で鉱物析出を短期間で起こし、透水係数を低下させるには、カルシウムイオン濃度の高いアルカリ性環境下が最も適していると考えられる。

応力降下量推定手法の改良

工業活動に誘発される地震の発生様式が自然地震と同じ震源特性を持つかは、震動予測や発生メカニズムの理解において非常に重要である。震源特性として、断層すべりの際に解放される応力の大きさである応力降下量や、すべりの特性を反映した震源パラメータが推定されてきた。既往研究では推定精度が安定せず、得た値の解釈が難しかった。本研究ではその原因が推定手法の不安定性にあると考え、統計学的手法を利用した。

応力降下量の算出には、変位波形記録に対して理論モデルと観測波形それぞれについて震源位置が近接した大小ペアの地震のスペクトル比を計算し、両者の比較を通して、地震モーメント比、大小地震それぞれのコーナー周波数という3つの震源パラメータを求める。従来はグリッドサーチ法が主流であったが、本研究ではマルコフ連鎖モンテカルロ法を応用した統計学的手法を導入・改良することで、応力降下量の絶対値を推定するだけでなく、推定値のトレードオフや、計算の安定性を評価することを可能にした。

解析には確率密度関数が必要となるが、推定にスペクトル比が使われることから、正規分布よりも比の形式を持った確率密度関数であるF分布の方が適しているのではないかと考えた。シミュレートイベントを発生させて検証した結果、正規分布を確率密度関数として利用した場合よりもF分布を用いた場合の方が、安定的に推定ができていた。さらに、アメリカ合衆国オクラホマ州で発生した誘発地震記録に対して解析手法を適用し、応力降下量を推定した。その結果、推定された応力降下量の値はその地域で発生する自然地震と同程度であり、自然地震と誘発地震の震源特性は同じであることが示唆された。

教授 福山 英一
准教授 奈良 禎太
助教 吉光 奈奈

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****非磁性材料を対象とした永久磁石を用いた磁気力探傷について**

磁気を用いる非破壊検査は、これまで主に、磁気に対して鋭敏な応答を示すがゆえに、鋼などの強磁性材料を対象としてきた。しかし、非磁性金属材料のみならず、高分子材料や無機材料も、その磁化率は微小とはいえ真空とは異なる値を有している。したがって、材料に含まれる欠損部の検知など、非磁性材料に対しても、磁気に対する反応を利用した新しい非破壊検査手法が実現できるのではないかと考えられる。しかしながら、強い磁界下において対象材の極めて微小な磁気応答を検知するには、通常の磁気センサのダイナミックレンジでは不十分であり、何らかの別の計測要素を用いる必要がある。そこで、本研究では、永久磁石を励起源とし、磁気に対する微小な応答を、永久磁石に働く力として検出する方法を採用することとした。この新しい磁気的非破壊検査法について、まず数値解析によって、その実現可能性を検討したところ、精密天秤で計測できる程度の磁気力応答が期待できることが示された。また、いくつかの材質（常磁性体である高分子材料や反磁性体である非磁性金属材料）について、板材を積層させたモデルを用いて実験を行い、欠損部の検知が可能であることとともに、応答が過剰でないがゆえに、非磁性材の方がかえって深い位置の欠損まで検知できる可能性があることが示された。

TDR法を用いた板材の広域表面探傷について

インフラ構造物の劣化診断など、非破壊検査の適用は、一般的な材料や設備にまで広がるとともに、精密性よりも広い領域を一括して簡便に検査できる、いわゆるスクリーニング検査への需要が高まってきている。本研究室では、その一つの可能性として、マイクロストリップ線路を用いたTDR (Time Domain Reflectometry) 法による表面検査について検討している。マイクロストリップ線路をラインセンサに見立て、それと対象材との間の静電容量など、ラインに沿った電磁特性の局所的異常をもって、表面欠陥などの存在を、時間領域応答として検知しようとするものである。まず数値解析によって、その実現可能性を確認するとともに、表面欠陥に対する検知感度や隣接欠陥との弁別性などを判断材料として、ストリップ線路の寸法やシールド形状など、センサとしての適正構造について検討した。また、アルミ材表面に様々な寸法・形状の欠陥を設け試料を対象として、設計したマイクロストリップ線路による探傷実験を実施し、いまだ改良すべき点は多々あるものの、広域一括検査の一手法として、ある程度実用可能であることが示された。

CNFナノ粒子の生成と環境調和型石油・天然ガス増進回収法への応用

セルロースナノファイバー (CNF) は、豊富な天然素材であり、人工の化学薬剤に比べて安価で環境にも優しい。また、繊維状のCNFは互いに絡まり合っって小さな空隙を閉塞するため、石油・天然ガス貯留層の卓越流路の良好なブロッキング材となる。本研究室では、空隙を閉塞させないサイズのCNFを含むW/Oエマルション (CNFナノ粒子) を生成し、それを貯留層の卓越流路に圧入することで、その崩壊によって放出されるCNFにより卓越流路をブロックして石油・天然ガス増進回収法 (EOGR) の掃攻効率を改善する技術の開発を行っている。そこで、そのブロッキング効果を確認するため、人工コア試料に対するCNFナノ粒子の圧入実験を行うとともに、ブロッキング位置制御のためのCNFナノ粒子の安定性評価実験を行った。その結果、浸透率が高いコアでもCNFによるブロッキング効果を確認することができた。また、CNFナノ粒子は、生成可能な範囲において、その調整に用いる塩水の塩濃度が高いものほど長時間安定であり、貯留層に圧入された場合にCNFナノ粒子が接触する地層水の塩濃度に応じて変化することが分かった。このことから、CNFナノ粒子による貯留層のブロッキング位置の制御が可能であることが示唆された。

**数値シミュレーションによる
アスファルテン析出問題の検討**

原油中のアスファルテンの析出は、重大な生産障害を引き起こす。その対策は実験によって検討されているが、アスファルテン析出に伴う流路の閉塞挙動は十分に理解されていない。そこで、アスファルテン粒子同士の相互作用を考慮してアスファルテン流動場におけるアスファルテン粒子の凝集とそれによる流路の閉塞過程をシミュレートできる計算手法について検討し、確率的回転動力学法 (SRD: Stochastic Rotation Dynamics) によるシミュレーションプログラムを開発した。SRDは計算格子を用いない方法であるため、固液境界の設定が計算に用いるグリッドサイズに依存しない。また、溶媒粒子の単純な並進演算と衝突演算によりNavier-Stokes方程式に従う流体流動を正しく計算できる他、溶媒粒子と微小固体粒子の相互作用ポテンシャルおよび微小固体粒子間の相互作用ポテンシャルを考慮することで、微小固体粒子のブラウン運動も正しく計算することができる。今回、簡単な平行平板間の層流に対して、アスファルテン粒子間の相互作用ポテンシャルを変化させたアスファルテンの凝集シミュレーションを試みた。その結果、相互作用ポテンシャルの井戸が深くなるにつれ、アスファルテン粒子の凝集が早まる様子を確認できた。

教 授 塚田 和彦
准教授 村田 澄彦

工学研究科 都市社会工学専攻

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

世界的に需要が急増している鉱物資源の分布形態や成因を明らかにするために、新たなリモートセンシングや地球統計学的手法開発、地殻金属濃度分布の解明に取り組んでいる。

リモートセンシング研究では、観測範囲は広いが空間・波長分解能が低い衛星画像を高解像度化させるダウンスケールリング法を開発した。本手法をオーストラリア北部マウントアイザ鉱山周辺に適用した結果、機械学習による超解像技術よりも、低解像度のASTER衛星画像を高解像度のHyMap航空機画像に適切に変換でき、主要な熱水変質鉱物である白雲母とカオリナイトの分布を高精度で明らかにできた。

地球統計学研究では、フィリピンの浅熱水性鉱脈型鉱床を対象とし、複数の鉱脈形状を正確に推定できるシミュレーション法を検討した。その応用による岩相・金銀濃度の空間分布と熱水流動解析を組み合わせた結果、熱水が高透水性の岩相を浸透して鉱脈を形成したと解釈でき、富鉱部生成に関わる熱水の温度・圧力条件も推定できるようになった。また、海底熱水噴出域や深海底泥層での岩相とベースメタル・レアアース濃度の3次元分布をシミュレートすることで、岩相と濃度の関連や高濃度部の分布形態を明らかにでき、その支配要因も把握できた。さらに、本学総合博物館所属の鉱石試料を用いて元素濃度と鉱物組成分析を行った結果、日本の熱水鉱床の金属濃度は、鉱床生成に関与した火山フロントとの位置関係とそれに起因する熱水の酸化度に支配されている可能性が見出された。

地殻流体流動現象の把握とモデル化

地殻中に存在する、水、油、ガスなどの重要な資源流体の利用を図る上で不可欠な流体の起源や流動状態の理解のために、地球化学的指標から流動場の地質構造や流動現象のモデル構築を行い、数値シミュレーションを行うことで、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研究を進めている。

地球化学的指標に基づく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・バンドン盆地の北部のTampomas地熱地域に胚胎される熱水の起源と滞留時間について検討した。水の水素酸素同位体比やハロゲン化合物イオンの濃度、放射性塩素同位体比などの分析結果から、本地域の熱水は主に天水を起源としているが、一部の地点では天水とは異なる特異な水素酸素同位体比を示し、化石海水である可能性と、その地点では海成有機物の影響も認められることが明らかとなった。また、海水の同位体比を初期値と仮定して放射性塩素同位体から求めた滞留時間は最大で40万年程度であることが示された。

また、堆積岩層の堆積、続成過程で生じる間隙水の

移動と水質進化に関する研究を、北海道幌延地域の海成堆積岩層を対象に行った。堆積過程で生じる堆積物の圧密とその結果生じる間隙水の上方への移動、シリカ鉱物の相変化に伴う脱水と同位体交換、U、Thの α 崩壊で生成する ^4He の蓄積などをモデル化し、一千万年以上の長期間における地下水の塩化物イオン濃度、水素酸素同位体比、 ^4He 濃度の時空間変化を推定できた。この他、地球化学モデリングによる井戸目詰まり原因物質の生成予測モデルの構築や、地下水位の変動支配要因の影響度評価と高精度な地下水位変動予測の実現、京都盆地の地中熱ポテンシャル評価と地中熱利用技術の高度化を目的とした研究も進行中である。

地熱貯留層・蒸気スポット検出技術の開発

地熱資源の利用促進のために、リモートセンシング・地球化学・鉱物学の先端手法を統合し、地熱発電に最適な蒸気スポットを検出できる技術の開発を進めている。インドネシアの地熱サイトであるWayang Windu地区とPatuha地区では、ハイパースペクトル衛星画像を用いて新たな植生ストレス指数を提案し、これとスペクトル分解による熱水変質鉱物の推定分布を組み合わせることで、植生下の地熱兆候地や熱水流動パスの分布を推定することができた。これをリアメント抽出や地球化学調査の結果と統合することで、蒸気スポット存在可能性評価マップを作成した。差分干涉SAR処理に地球統計学を導入することで、従来よりも地形変化の抽出精度が向上し、地形変化をもたらす地熱貯留層圧力の変化が特に大きい地点を特定できるようになった。

さらに、深層学習と地球統計学を組み合わせたニューラル・クリギング法を改良し、キュリー点深度などを考慮することで、日本全域の地温分布を深度5 kmまで推定できた。これから水の臨界点を超える高温域の分布形態を明らかにし、地熱資源量の評価も試みた。

金属・流体資源関連物性の計測とモデル化技術開発

海底資源、および熱水・地下水を含む流体資源の分布と量に関する評価の精緻化が不可欠である。そこで、新規の計測技術と数値シミュレーション、岩石物理モデルにより、これらの資源胚胎に関連した地下構造と物性の高精度推定を目指した研究開発を進めている。海底資源では、熱水噴出域での岩石試料の複素電気伝導度特性を再現できる岩石物理モデルを開発し、これを海底比抵抗探査データに応用することで、ベースメタル量を算定できるようになった。また、数値シミュレーションとモデル実験によって、偏波を利用した地中レーダーシステムの有効性を検証し、帯水層の抽出などに有効に適用できる可能性を見出した。

教 授 小池 克明
准 教 授 柏谷 公希
特定准教授 麻植 久史
助 教 久保 大樹

工学研究科 都市社会工学専攻

**地球資源学講座
地球資源システム分野**

世界が情報社会へと変貌を遂げつつあるにもかかわらず、人類が古来より活用してきた資源・エネルギーの需給逼迫に加え、地球環境汚染、地震等による自然災害など、“地球と資源”に関わる深刻な課題が顕在化している。このような多様な課題について地球科学的視点から理解し工学的解決を模索する「地質工学」の役割が、益々重要となっている。当研究室では、これらの多様な課題について幅広い研究を進めており、令和2年度には主に以下の研究を行った。

**非弾性ひずみ回復測定法による原位置応力測定の高高度化研究：
ベイズ統計モデリングに基づく新規解析手法の構築と
活断層掘削への適用**

地下深部に賦存する石油等のエネルギー資源を安全で効率よく開発するために、あるいは、地震断層の活動を理解するために、地殻応力状態を知ることが不可欠である。しかし、地殻応力は、地殻運動、地質構造、地形、岩石物性などの多くの要素に左右され、顕著な時空間変化を有すると共に、正確な測定と測定精度の評価が困難という問題がある。応力測定手法として様々なものが開発されており、岩石の掘削コア試料を用いた非弾性ひずみ回復法（Anelastic Strain Recovery Method, ASR法）は、確かな測定原理に基づき、簡便かつ安価という特徴を有し、近年、成功した適用例が積み重ねられ、有望視されるようになってきた。しかし、このASR法においても、結果の信頼性評価が困難であるのみならず、仮定に基づいて測定結果の解析をしなければならないという問題があった。本研究では、ASR法の更なる高度化を目指し、実験と理論の両面から上記の問題の解決に取り組んだ。主な成果は次の3点に要約される。そのうち、新規考案したASR法の斬新な解析手法は従来法と比べ、その有効性と優位性が実証され、地球工学と地球科学の諸分野に対する貢献が期待できる。

(1) 岩石の掘削コア試料から測定された非弾性ひずみ回復であるASRの時系列データに、これまで当該分野に全くなかったアイデアとして、ベイズ統計モデルを導入した応力解析手法を考案した。擬似データを用いた検証実験などを通して解析コードを開発し、当該解析手法の確立に成功した。この新解析手法により、非弾性ひずみ回復コンプライアンスの仮定が不要となると共に、応力解析結果の不確かさの評価も可能となった。淡路島で行われた野島断層掘削のASR測定データにこの手法を適用し、その有効性を確認した。

(2) ASR法の火山地域への適用を兼ねて、阿蘇カルデラ近くで発生した2016年熊本地震の主震源断層である布田川断層掘削のコア試料を用い、断層近傍の応力測定を実施した。その結果、地震後において鉛直応力が最大主応力となる正断層型の応力状態が支配的であ

るという結果が得られた。これは、地震時の横ずれ型の断層運動により、地震前は水平面内にあったと推察される最大主応力が著しく低下したことを示唆する。

(3) コア法を用いて主応力の方向を決定するためには、コア試料の原位置における方位情報が必須となる。本研究では、岩石の自然残留磁化を用いた定方位化に注目し、推定結果に対する客観的な品質評価が可能となる測定のプロトコルを開発した。海洋掘削で得られた堆積軟岩試料に適用し、当該プロトコルの有用性を実証した。

**2018年大阪北部地震前後の地表変動の推定と
変動要因の解明**

地震によって、震源断層周辺の地下水位が変化することが知られており、このような地下水位変化によって地表変動が発生することがある。そのため、人工衛星データを用いた干渉SAR時系列解析によって広域の地表変動の分布を捉えることにより、地下水システムについて理解を深めることが期待される。そこで、2018年大阪北部地震を含む約3年間の京阪神地域の地表変動を推定し、変動の要因について解釈を行った。地表変動を推定した結果、六甲山活動セグメント近傍では約2.5 mm/年の沈降方向の地表変動が推定された。この地域の地表変動は、地震に伴う顕著な変化は見られなかった。一方、大阪平野の一部等では、地震に伴って地表の隆起速度が大きくなったことが推定された。地質学的特徴や周囲の地下水位データと比較したところ、推定された地表変動傾向の変化は、地下水位変化に関係すると推測された。

**布田川断層掘削の岩石コア試料を用いた
実測による熱物性の特性解明**

本研究の既往研究から、熊本地震本震の震源断層である布田川断層を貫く掘削孔内（深度約700 m）の温度構造は明らかな分布の異常が見られた。この温度異常の原因を解明することは、阿蘇火山地域の地下温度構造を理解するだけでなく、地震メカニズムの更なる解明にもつながると期待される。そこで、当該掘削の岩石コア試料を計60個採取して、深度約300～700 mに分布する地層を構成する主要な岩種の熱物性を測定した。熱物性の測定には、地層中の熱移動に係わるすべての岩石熱物性である熱伝導率、熱拡散率、比熱を同時に測定する非定常面熱源法（ホットディスク法）を用いた。その結果、鉛直掘削の深度450 mより以深の温度構造は、実測された岩石の熱物性値を用いて、地殻深部からの地殻熱流量によるものであると解釈できることが判明した。一方、450 m以浅においては、岩石の熱物性値から実測の孔内温度構造を再現できず、すなわち、この温度異常は地殻熱流量以外によるものであると確認された。

教 授 林 為人
助 教 石塚 師也

エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻

**資源エネルギー学講座
資源エネルギーシステム学分野****ナノポーラス金基板上の接着細胞**

ナノメートルオーダーの孔径を有するナノポーラス金 (NPG) は、表面に大きな格子ひずみを有する多孔質材料であり、通常のパルク金にはない性質を示す。例えば、格子ひずみがNPG表面の固体電気二重層を増強し、特殊な電子状態を引き起こすことが知られている。当研究室の先行研究ではNPGを細胞培養基板として用いると、接着したHeLa細胞の自発死を誘導することが示されたが、NPGの孔径による影響は詳細には解明されていない。そこで本研究では孔径が異なるNPG基板を作製し、細胞接着と分化に及ぼす影響を調べた。

細胞の接着を調べるため、異なる孔径のNPG基板上にヒト線維芽細胞を播種して24時間培養した結果、孔径が小さいほど細胞の接着率が低下した。一方、細胞の分化を調べるため、間葉系幹細胞に対し異なる孔径のNPG基板上で脂肪細胞と骨芽細胞への分化誘導を行った結果、有意な差は認められなかった。

これらの結果により、NPGは細胞接着には影響するが、細胞分化には影響せず、従来研究されてきたアルミナやチタニア等のポーラス培養基板とは異なる影響を細胞に及ぼしていることが示された。

**スフェロイドを用いたミリメートルサイズの
3次元細胞組織の作製**

近年の再生医療において、スフェロイド(三次元細胞凝集体)で構成・代表される三次元細胞組織が注目されている。しかし、現状で作製できる三次元細胞組織の大きさは200~400 μm が限界である。これは、酸素の拡散範囲に限界があるためである。サイズアップのためには、血管網の導入により酸素を供給することが有効である。そこで本研究では、スフェロイドから血管網を含むミリメートルサイズの三次元細胞組織の作製を試みた。

ヒト新生児皮膚線維芽細胞と血管内皮細胞を共培養することで、毛細血管網を含むスフェロイドを作製した。作製したスフェロイドを三次元培養容器の中に充填し、中空糸を埋設した上で一か月間の灌流培養を行った。中空糸を抜糸した後、その部分に血管内皮細胞を播種して動脈血管とした結果、血管網を含む三次元細胞組織の作製に成功した。また、作製した三次元細胞組織に対し一か月間の灌流培養を行うと、毛細血管と動脈血管との吻合が確認された。

これらの結果により、人体内の臓器と近い細胞密度の三次元細胞組織の作製に成功したと言え、将来移植可能な人工臓器の作製に向けての第一歩として期待できる。

銅めっきによる異種材料の接合

近年、輸送機器における軽量化、エレクトロニクス分野における多機能化を目的としたマルチマテリアル化に伴い、新たな異種材料接合技術の需要が高まっている。そこで本研究では当研究室が提案する銅めっき接合技術を用いて、セラミックス、CFRP、樹脂などとアルミニウムの異種材料同士の接合を試みた。

セラミックスはあらかじめ無電解ニッケルめっきにより導電性を付与し、その後エッチング処理によって表面粗化を行い、陽極酸化処理の施されたアルミニウムと銅めっきによって接合した。接合後の試料は17.4 MPaの接合強度を示し、室温においてセラミックスとアルミニウムの異種材料同士が接合可能であることを示した。

CFRPと6061アルミニウム合金の接合においては、Al合金にあらかじめ陽極酸化処理を施した。また、CFRPには過マンガン酸エッチング、陽極酸化、スルホン化の表面処理を行った。これらの前処理ののち銅めっきで接合すると、最大で138 MPaという、従来のCFRP/金属の接合法に比べ非常に高い接合強度を示し、CFRPと金属材料の高強度な室温接合技術を創出した。

**アルミニウム合金板のめっき接合における
アンカー効果**

輸送機器の軽量化・マルチマテリアル化などの背景を受け、本研究では当研究室が提案するめっき接合技術を用いて、6061アルミニウム合金の接合を試みた。特に、あらかじめAl合金に陽極酸化処理を施すことで接合面(表面)に数百ナノメートルオーダーの孔径を持つ微細なポーラス構造を形成させた。この表面の微細孔にめっきを析出させ物理的な引っ掛かりを生じさせ、接合界面の強度を向上させる「ナノアンカー効果」を純アルミニウムについては見出しているが、ここではこのナノアンカー効果の合金への適用範囲拡大と最適化に挑戦した。

25~40 Vの異なる電圧で陽極酸化を施したところ、酸化被膜の気孔率が変化することが明らかとなった。またこの気孔率が銅めっきによる接合後の試料の強度と正の相関を持っており、電圧35 Vの試料において気孔率、接合強度ともに最も大きくなった。

さらに、高延性・高硬度で知られるナノ結晶ニッケルめっきによって接合を試みたところ、291 MPaという非常に高い接合強度を得た。また、引張試験時に接合部でなく母材で破断したことから、母材強度を超える接合強度を得られたと考えられる。

頁岩中に造成される水圧破砕亀裂の進展状況の特徴

シェールガスは世界的なエネルギー需要に応える資源の1つとして重要な役割を担っている。その開発では、浸透性の低い頁岩に亀裂を造成してガスの浸透性を高めるために水圧破砕法が用いられる。亀裂の進展状況は破砕時の微小地震のモニタリングで解析されるが、複雑な亀裂の進展状況は解明されていない。当研究室では、蛍光剤を添加した熱硬化性樹脂を用いて室内水圧破砕実験による亀裂を直接観察する手法を考案し、その進展状況の解析を進めてきた。そこで、北米の主要産地であるEagle Ford, Montney, Wolfcamp頁岩のサンプルを用いて実験を行い、亀裂進展状況を比較した。その結果、それぞれに特徴的な亀裂進展状況があることが明らかとなった。また、亀裂の複雑化が認められる箇所注目すると、岩石内に存在する有機物や粒界、岩脈および空隙が亀裂分岐の端緒となっていることが確認された。

教授 馬 測 守
准教授 袴田 昌高
助教 陳 友晴

**資源エネルギー学講座
資源エネルギープロセス学分野****移動鋼板水噴流冷却の伝熱量評価**

長尺金属材料の水冷媒による急冷熱処理では、移動加熱体への衝突噴流冷却が広く利用されている。この工業プロセスでは領域平均された熱伝達モデルで伝熱量を評価しており、それが材料温度制御の高精度化の阻害要因となっている。そこで本研究では、伝熱特性を高空間解像度で評価する手法の開発に取り組んだ。350℃から550℃に加熱された移動ステンレス鋼板を傾斜柱状水噴流で急冷却し、ただちに冷却水を鋼板面から離脱させるラボ実験装置を作成した。この冷却装置では、噴流衝突点で鋼板表面に低温度領域が形成され、その後、材料内部からの熱伝導に起因する温度回復現象が発生する。実験では強冷却領域である噴流衝突点近傍の流動を画像観察で計測し、さらに冷却直後の材料表面温度分布をサーモグラフィーカメラで測定した。これらの測定情報を境界条件とする3次元非定常熱伝導解析モデルを作成し、数値解析によって抜熱量分布を定量化する評価手法を提案した。水噴流衝突時の熱伝達量は鋼板表面温度に強く依存するなどの知見を得るとともに、提案モデルの妥当性や有用性を確認した。

(塩入 悠太, 現: (株) IHI)

**複数の吹上柱状水噴流による高温移動体冷却の
沸騰熱伝達特性**

鉄鋼業の熱間圧延プロセスでは、所望の機械特性を得るため仕上げ圧延後の高温薄鋼板を搬送テーブル上で水冷却している。この冷却では、鋼材の温度制御の高精度化に向けて移動体に衝突する水噴流の詳細な沸騰熱伝達特性の理解が必要とされている。本研究では、水平方向に移動するステンレス製の加熱薄鋼板の下面を板幅方向に設置した3本の吹上柱状水噴流により冷却するラボ実験を実施し、その際の熱伝達特性を調査した。実験条件は、鋼板温度250～600℃、搬送速度4.4 m/s、冷却水流量3.0および3.5 L/min、ノズル内径7 mm、ノズル間隔15 mmとした。実験の結果、同一冷却条件では、3つの噴流衝突点近傍の鋼板温度の降下量はほぼ一致した。しかし、中央噴流によって冷却される面積は、両隣の噴流のそれに比べて明らかに小さくなった。これは、中央噴流の水膜の広がり、両隣の噴流により抑制されたためである。したがって、中央噴流の抜熱総量は、両隣の噴流より小さくなった。

(寺崎 健悟, 現: JFEスチール(株))

DP590鋼板の塑性変形挙動に関する結晶塑性解析

二相組織 (DP) 鋼板は、延性に富んだ母相と高強度な第二相によって構成され、自動車構造部材などに利用されている。DP鋼板のさらなる利用拡大には、その塑性変形挙動を明らかにすることが重要である。複雑な結晶組織を持つDP鋼板の機械的特性を数値的に予測する手法として、結晶方位と各相の分布を考慮した代表体積要素に基づく結晶塑性有限要素法解析が近年注目されている。しかしながら、各相の空間的分布や機械的特性がDP鋼板の機械的特性に及ぼす影響が十分明らかではないため、解析により種々の変形モードにおけるDP鋼板の機械的特性を高精度で予測するに至っていないのが現状である。そこで本研究では、DP鋼板を構成する各相を模擬した単相鋼板の特性に基づいてDP鋼板の結晶塑性有限要素法解析を行うことにより、各相の微視的変形状態とDP鋼板の巨視的変形挙動の関係を調査した。その結果、各相における加工硬化挙動の違いは、応力反転後に生じるパウシンガー効果に大きな影響を与えることが明らかとなった。

(畠山 健太郎, 現: 日本製鉄(株))

**現象論モデルおよび結晶塑性モデルを用いた
A6022-T4 アルミニウム合金板の
加工硬化挙動のモデリング**

成形条件決定にかかる時間とコスト削減を目的として、現象論モデルを用いた数値解析が工業的に広く利用されている。近年HAHモデルと呼ばれる新たな現象論構成則が提案され注目されているが、アルミニウム (Al) 合金板にこのモデルを適用した例は少ない。またHAHモデルはその材料パラメータ決定のために多くの材料試験を必要とするため、その実用的利用は容易ではない。一方、結晶塑性 (CP) モデルは、結晶粒レベルの微視的変形をモデル化することで巨視的な加工硬化挙動そのものを予測できるという特長がある。そのため、CPモデルを用いることでHAHモデルのパラメータ決定の高効率化が期待されているが、調査された例はない。そこで本研究では、A6022-T4Al合金板を用いて、HAHモデルの適用可能性とCPモデルによる材料パラメータ決定の可能性の調査を行った。研究の結果、両モデルは、種々のひずみ経路下におけるAl合金板の変形挙動を精度よく記述できた。また反転荷重試験における記述精度を比較することによって、HAHモデルの材料パラメータはCPモデルにより良好に決定できることが示された。

(松浦 遼, 現: 日本製鉄(株))

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
ミネラルプロセッシング分野****製鋼スラグの炭酸化過程の工業鉱物学的評価**

鉄鋼業においては、操業時に排出されるCO₂の削減や、製鋼過程における副産物である製鋼スラグの有効利用が求められており、そのために製鋼スラグを用いたCO₂の固定化が提案されている。本研究では、CO₂固定化にあたって湿式ボールミルによる製鋼スラグの粉碎を検討している。しかし、粉碎されたスラグの組成や結晶構造などには不明な点が多く、本プロセスの最適化のためにはそれらのより詳細な調査が望まれる。本研究では、湿式ボールミルを用いた粉碎によって炭酸化されたスラグの組成や結晶構造について工業鉱物学的な調査を行った。その結果、粒径1.00–2.36 mmのスラグ試料に対してCO₂雰囲気下で粉碎を行った場合の粉碎産物について、その重量分布は+75 μ mが42.9%、–75 μ mが57.1%であった一方で、CO₂由来のCについてはその98.1%が–75 μ mに存在することが判明した。また、この残渣等に対しXRD分析を行った結果、常温・常圧で安定なCalciteであることが判明した。

高温移動鋼板への3本及び単一吹上柱状水噴流の熱伝達特性

鉄鋼業の熱間圧延工程では、仕上げ圧延後の高温移動鉄鋼業での熱間圧延工程では、高温移動鋼板に多数の柱状水噴流を衝突させて急冷している。この冷却が鋼板の機械的特性を決定するため、高度な温度制御が求められている。それには移動体に対する複数噴流の熱伝達特性の理解が不可欠である。本研究では、3本噴上柱状水噴流と単一噴流の熱伝達特性の差異を実験により研究した。その結果、3本噴流と単一噴流の平均熱流束は比較的良好に一致したことから、3本噴流における熱伝達特性の実験は、単一噴流で代用できる可能性があることを提案した。

マイクロ/ナノポーラス材料を用いた曝気システムにおけるアンモニアの揮発

マイクロ/ナノポーラス材料を用いた曝気システムによる、水中の溶液反応や水溶性ガスの気液間物質移動に関するメカニズム解明と工学的利用促進を目的に、本研究では、窒素、特に水中のアンモニア性窒素に着目し、マイクロ/ナノポーラス材料であるSPG膜を用いた曝気システムにおけるアンモニアの揮発についての速度論的な検討を行った。その結果、SPGを用いた曝気では他の手法より反応速度定数 k が1.8倍大きい、すなわちNH₃-N濃度の半減期が1/1.8であることが分かった。これは、SPG膜を用いた曝気手法では

水中の単位体積当たりの気液界面積が非常に大きくなり、水中のアンモニア分子がより速やかに気相へ移動したためである。また、本曝気システムによるNH₃揮発速度は、初期NH₃-N濃度が25 mg/L ~ 250 mg/Lの範囲で k 値に大きな差は見られず、すなわち初期濃度によらないことも分かった。次に、水温の影響について検討し、水温を303 Kから313 Kへ上げると k 値が1.4倍となり、半減期が1/1.4となることも認められた。これは、温度上昇に伴うアンモニア溶解度の減少に起因しているが、SPGを用いて曝気することで水中のNH₃を比較低温でより速やかに気相へ移動可能であることを確認した。

水噴流冷却された高温移動鋼板の熱伝達特性評価

移動高温固体へ衝突する水噴流は、種々の金属材料の熱処理で利用されている。熱伝達特性の詳細把握が望まれているが、その知見は不足している。本研究では、移動高温鋼材を水噴流で冷却する際の熱伝達特性を評価する新手法を提案し、傾斜衝突流に適用した。水噴流が移動加熱鋼材に衝突した場合の温度履歴を検証した結果、鋼板温度は濡れ領域で大きく低下し、湯き領域において復熱により温度回復する傾向が認められた。また、熱流束は、温度低下に伴い減少して極小値を取り、再び増加した。これは沸騰状態が膜沸騰から核沸騰に遷移するためと考えられた。

カット野菜残渣のメタン発酵に向けた前処理に関する基礎研究

近年、食の簡易化が進行しカット野菜の需要が伸びている。しかしその一方で年間約164万トンもの残渣が発生している。野菜は含水率が高く処理が難しいため、野菜残渣の処理には高含水率のバイオマスにも適用可能なメタン発酵が適している。本研究では、カット野菜残渣のメタン発酵に向けた熱アルカリ前処理に関する基礎研究を行った。その結果、カット野菜残渣試料の累積メタン発生量が、熱処理のみのメタン発生は大きく遅れ、これは加熱中にフルフラールなどの物質が生成し、メタン発生を阻害したためと推測された。また、累積メタン発生量のアルカリ濃度による差が小さいことを認め、カット野菜残渣に対しては熱処理・熱アルカリ処理では効果が得られないことが判明した。一方、乳酸発酵を施した試料においては、累積メタン発生量は著しく改善され、この理由として乳酸発酵によってフルフラールの原料となる糖が分解され、フルフラールなどの阻害物質が生成しなかったことを推察した。

教授 藤本 仁
准教授 楠田 啓
助教 日下 英史

工学研究科 材料工学専攻

**材料プロセス工学講座
表面処理工学分野**

当研究室では、チタン等の非鉄製錬プロセス、中温型燃料電池について、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。

**非鉄金属製錬プロセスの開発に向けた金属の
電析形態に関する調査**

チタン (Ti) および亜鉛 (Zn) の効率的な製錬プロセスの開発を目指し、溶融塩中でのチタンの電解精製およびアルカリ性水溶液 (アルカリ浴) 中での亜鉛の電解析出に関する研究を以下の通り実施した。

従来のTiの製造法は生産効率が低く、板材や箔材への溶解・加工コストも高いために一般的には普及していない。そこで、Ti板材および箔材の新しい連続製造プロセスとして、ビスマス (Bi)-マグネシウム (Mg) 合金を用いたTiCl₄の還元によってBi-Ti液体合金を生成し、次にこれをアノードに用いた電解精製によってTiを平滑に析出させて回収するプロセスを研究している。これまでに、Bi-Ti合金の生成法とカソード基板上に析出させたTiの適切な剥離条件は確立できしており、昨年度は溶融塩中でのBi-Ti合金からの電解精製によるTiの平滑電析に着手した。その結果、合金をアノードに用いた電解精製では電流密度に加えて溶融塩中のTi²⁺とTi³⁺の濃度比がTiの析出形態に影響を与えることが分かり、これらを適切に制御することで平滑なTiを析出させることに成功した。

また、Znの湿式製錬プロセスでは硫酸酸性浴を電解浴に用いたZnの電解採取が行われているが、消費電力が大きく、プロセスのさらなる効率化が求められている。本研究では、省電力化が期待されることからZnの電解採取の電解浴にアルカリ浴を使用することを提案している。しかし、アルカリ浴からはZnが多孔質な形態で析出することが知られており、電解浴の随伴によるロスや析出物の洗浄が問題となる。そこで、このようなZnの析出形態の制御と形成メカニズムの解明を目指し、昨年度はフローセルを用いてアルカリ浴中でのZnの電解析出のその場観察を実施した。その結果、低電流密度ではコケ状、高電流密度では水素発生を伴ってデンドライト状のZnが析出する様子を観察することができた。また、電解浴を高速で流した場合には緻密な形態のZnが析出し、電解浴の攪拌が析出形態の制御に重要であることが分かった。今後は、緻密な亜鉛の析出に適した条件を引き続き探索するとともに、原料に由来する不純物がアルカリ浴に混入した際のZnの電解採取への影響を調査する。

**中温型燃料電池の酸化物空気極における
微量ガスによる反応阻害挙動の解明**

プロトン伝導セラミックス型燃料電池 (PCFC) は 500-600 °C 程度の中温で動作する新型燃料電池である。安価な構造材料が使用でき、コストの低減が期待されることから、水素社会実現に向けてPCFCの実現

が望まれている。しかしPCFCの空気極として有望なLa_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O_{3-δ} (LSCF6428) は、より高温で動作する固体酸化物型燃料電池 (SOFC) の空気極として使用した際、空気中に含まれるCO₂、SO₂などの微量ガスによって電極性能が劣化することが報告されている。熱力学的にはこの傾向は動作温度低下に伴って顕著になると予想されるため、本研究ではPCFCにおけるLSCF6428と微量ガスとの反応挙動を調査した。これまでに、500°CにおいてLSCF空気極へCO₂を導入すると数分で過電圧が増大する一方、SO₂の影響は24時間程度では小さいことが分かった。ただし、LSCFとCO₂、SO₂の反応は100時間もしくはそれ以上の長期スケールで進行することも示唆され、そのメカニズム解明とそれに立脚した材料開発が必要である。

**マスター方程式を用いた
固体内拡散評価手法の開発とその応用**

近年の計算機性能・計算技術の飛躍的向上により、結晶中における原子拡散の素過程やその遷移頻度は、第一原理計算に基づいて精確に評価できるようになってきている。そして、得られた拡散素過程の情報は、モンテカルロ動力学法 (KMC) 法に基づく拡散シミュレーションにより拡散係数に繋げるのが通例である。ただ、ホスト結晶の対称性低下とともに計算コストが増大するなど、KMC法には実用上の問題点がある。そこで当研究室では、“マスター方程式の数値解析”を用いることで、KMC法より計算コストを大幅に抑えた拡散係数評価手法の開発を行った。本手法は、各サイトにおける拡散粒子の流入・流出の収支を連立微分方程式として表現するものであり、最終的に行列の固有値問題に帰着することから計算コストは大幅に低減される。また、マスター方程式に基づく拡散評価は、従来、相互作用のない独立粒子系に用いられてきたが、本研究では、他粒子との相互作用を平均場として取り入れ、粒子間相互作用の存在下でも適用できるよう手法の拡張を行った。

本手法の応用例として、PCFCの電解質として用いられるBaZrO₃中のプロトン伝導評価を実施した。この電解質中のドーパント配置は高温下においてもランダム配置から外れていることが報告されており、その配置のズレがプロトン伝導性に与える影響を定量評価することが本研究の目的である。実際、ドーパントが“ランダム配置”および“焼結温度における熱平衡配置”しているセルでプロトン拡散係数を評価したところ、後者の拡散係数が高いことが明らかとなった。また、“ドーパントによるプロトントラッピング効果”、“ドーパント近傍の優先伝導効果”、“一部プロトンのトラップサイト占有効果”の定量評価も実施し、本系におけるプロトン伝導の支配因子は“ドーパントによるトラッピング効果”であることも特定した。

教 授 宇田 哲也
准教授 豊浦 和明
助 教 畑田 直行
助 教 岸本 章宏

工学研究科 材料工学専攻

**材料プロセス工学講座
物質情報工学分野****コロナ下での研究**

2020年4月から、新型コロナウイルスの影響で、講義がZoomになると同時に、毎週金曜日午後に行っていた研究室ゼミもZoomとなった。卒論からそのまま河合研の修士1回生に進学した院生は卒論のテーマを発展的に引継ぐ研究テーマとし、修士2回生もM1の研究テーマを維持したが、研究内容は在宅で可能な計算へシフトした。例えば走査電顕(SEM)で測定した2次元電子像を基にAIによって3次元立体データの構築の可能性を研究テーマとする「SEMによる二次電子像の3次元復元」というテーマ、M1で測定した鉄鋼標準試料のX線スペクトルから計算によって定量値を算出するテーマ「鉄鋼のdj法による蛍光X線定量分析」などの内容へと変わった。新しく河合研に配属された学生・院生は、数値シミュレーションを主とする「スプライン補間によるXRFスペクトルスムージング」などのテーマとなった。ちょうど、2019年11月に河合研関係者4名で執筆した『物理科学計測のための統計入門』(河合潤, 田中亮平, 今宿晋, 国村伸祐 共著, アグネ技術センター)を基に、モンテカルロ計算, スムージング, デコンボリューション, 最大エントロピー(MEM)法, 測定データが2個しかない場合の母標準偏差の推定方法「モンテカルロ解析を用いた母標準偏差推定」などについて研究を発展させた。研究室ゼミがZoomになったことから、MEM法に詳しい京大化研 向山毅 名誉教授などに、研究室外からZoomで研究室ゼミに参加してもらった。

コロナ下での実験

コロナ下では、大規模な実験は難しい。とくにコロナの正体が良くわからなかった緊急事態宣言下の2020年春には(2020年4月7日に東京, 神奈川, 埼玉, 千葉, 大阪, 兵庫, 福岡の7都府県に緊急事態宣言が出され, 4月16日に全国に拡大, 京都の緊急事態宣言解除は5月21日), はたして実験をしてよいものかさえわからない状況だった。教職員は, 4月以降在宅勤務が許可された。

当研究室では, 2017年秋から3Dプリンタによってポリ乳酸樹脂を材料として様々な装置を製作する試みが続けてきた。3Dプリンタは, 学生一人で実験装置が簡単に自作できる。自作してみて問題点が見つければ, 必要の手直しも容易である。当研究室では2000年代初頭から1W前後の小電力X線管を用いた実験を行ってきたが, その低電力X線管と3Dプリンタとを組み合わせることによって, 「多層散乱体によるX線の偏光」(写真1), 「低出力X線源を用いたX線回折装置の開発」, 「コンプトン散乱の強度と偏光」など, X

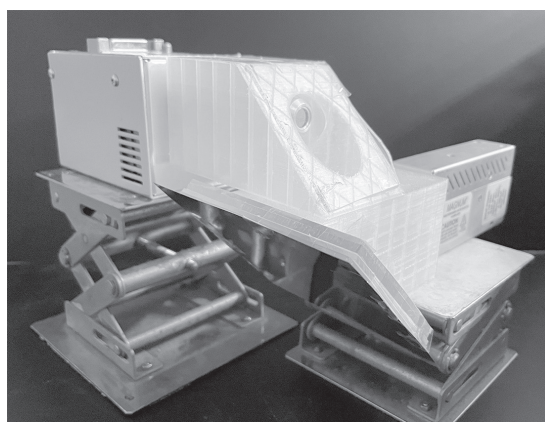


写真1 加藤駿英: 卒論「多層散乱体によるX線の偏光」2021年3月より。右下はX線管, 左上はX線検出器。X線管から出たX線は, 手前のアクリル板とTi板とからなる多層散乱体に45°で入射し, 真上に散乱され, さらに別のアクリル板(写真では外してある)に45°で入射し, X線管の光軸と90°の水平方向へ散乱されてX線検出器に入る。

線装置を試作して実験するという方式で装置開発を行った。杉村研と共同のテーマとして「ポリマーのX線表面分析」も行った。

実験中心の研究テーマの学生には, 英語論文の執筆とその指導に多くの時間をかけることができた。

コロナ下での学会発表

コロナ下では, 2020年3月以降の年会や講演会のほとんどが中止になり, 夏ごろからZoom, Webexなどによる学会発表が始まった。国際会議でも従来の数百ドルの参加費に比べて格安(数十ドル)で発表できるようになったため, 米国デンバーX線会議(2020年8月)等で複数の修士院生が発表した。デンバー会議の学生発表は, パワーポイントによる発表をZoomで録画したものをアップロードして, オンデマンドで視聴する方式だった。対面に比べると質問数は予想通り少なく, 十分な教育効果は得られないという批判が外国の研究者から聞かれた。招待講演には良いが, 学生の発表の場合には, 教育効果は低減した。

河合はインドネシアDiponegoro Universityの学生200余名に対してZoomでリアルタイムの講義を行ったが, 講演後の質問から判断すると, こういうリアルタイムの講義・講演は概して成功したようである。若手とベテランが交互に, 毎週1人1時間ずつや, 毎月1人ずつ研究発表する研究会(journal club)が研究者の間で定着しつつある。

教授 河合 潤

助 教 田中 亮平(2021年3月インターステラテクノロジズ㈱に転出)

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【低融点金属反応場を利用した半導体の
バルク・薄膜作製プロセス】

々は通常の結晶成長においてフラックスとして用いられる低融点金属を半導体合成の反応場として捉えることによる、新しいプロセスを検討している。このプロセスに関して従来にはない種々の特徴があるが、低温で目的化合物が合成できることを利用した研究例を示す。

SnS と GeS は黒リンと同様の puckered 構造を有する層状の化合物半導体であり、これらのバンドギャップはそれぞれ 1.1, 1.6 eV と報告されているが、固溶体の形成によりバンドギャップを制御できれば広範な素子への応用が期待できる。SnS-GeS 擬二元系状態図は報告されており、温度 500 °C 以下では全率固溶体を形成するものの、それ以上の温度ではそれぞれが構造相転移するために相分離する。したがって、通常の融液からの凝固により固溶体を作製することは難しい。そこで本研究では、反応場として機能し得る第 4 元素を系に添加して 500 °C 以下での固溶体形成を行うとともに、蒸留を利用した固溶体バルク結晶の単離を試みた。

まず、反応場である低融点金属の候補として Al, Bi, Ga, Zn を選択して 3 元系における平衡実験を行った結果、Bi のみが SnS, GeS と平衡することがわかった。さらに、Ge-Sn-S-Bi 4 元系において同様の実験を行った結果、固溶体 (Ge,Sn)S と Bi 液相, Ge 固相との平衡が確認され、Bi が添加元素として最適であることが実証された。次に、平衡試料を蒸発源として蒸留単離により化合物を得るプロセスを検討した。SnS, GeS は単体金属である Bi, Ge, Sn よりも蒸気圧が高く、適切な熱処理により Bi と SnS, GeS を分離することができる。実際に、真空封管内で Bi/Ge/GeS 三相平衡試料を 500 °C に保つと GeS が優先的に気化して反対側に凝集し、GeS バルク結晶が得られた。興味深いことに、GeS 試薬を 500 °C に保った場合には顕著な昇華は見られない。つまり、低融点の Bi を加えて液相と GeS との平衡を利用することで、通常では昇華しない低温においても気化が起こることがわかった。これらの結果をもとに、Bi/Ge/(Ge,Sn)S 三相平衡試料を蒸発源として蒸留単離を行い、固溶体作製を試みた。その結果、組成が均一な固溶体バルク結晶が得られた。また、蒸発源の Ge/Sn 比を制御することで得られる結晶の組成も制御でき、さらに組成に伴って、格子定数、バンドギャップも連続的に制御できることがわかった。以上より、目的とする固溶体を得るプロ

セスを確立できた。

なお、提案したプロセスは気相を利用した成長法であるため、バルク結晶のみならず薄膜結晶へも応用が可能であり、現在研究を進めている。

【熱力学系における非線型性の本質の解明：
トロピカル幾何学、情報幾何学からのアプローチ】

合金系に代表される、組成一定下で多体相互作用する古典離散系において、力学変数としての物理量 A や原子スケールの構造の集合 Q の熱平衡状態での温度依存性やその揺らぎの振舞いの本質の理解は、基礎的な興味に加えて材料設計の観点からも極めて重要である。この問題は系の取り得る Potential Energy Surface の集合を U とすると、統計力学平均 ϕ を写像とみたとき、 $\phi:U \rightarrow Q$ や $\phi:U \rightarrow A$ の非線型写像としての性質を理解することに一般化される。 ϕ の複雑な非線型性の振る舞いは厳密には分からないが、我々は前年度において非線型性を表す配位空間上のベクトル場のモーメントに基づく無限級数展開に対して、無限和に関する（物理的に妥当な）拘束条件と特別なスケール変換を導入したトロピカル極限を適用することで、自由度 $f=1$ の系については自由度に対する（格子点あたりの k 次単純サイクル数の比例定数としての）空間的拘束の強さが非線型性の支配的因子であることを明らかにした。これを踏まえ、今年度は 2 自由度系での非線型性にトロピカル極限を適用した。その結果、非線型性には 1 自由度系と同様の自由度毎の拘束に加え、自由度間の単純な重ね合わせでは説明できない別の寄与が、特にある程度規則化した状態において存在することが分かった。これらの寄与を定量化するために、我々はユークリッド空間とは異なる、 α -接続された双対平坦なリーマン多様体上で適当なアフライン変換、双対直交葉層化および拡張ピタゴラスの定理を用いることで、 ϕ の非線型性が幾何学的に必ず 3 つの寄与の（Kullback-Leibler Divergence としての）和に分解できることを証明した： $[\phi \text{ の非線型性}] = [\text{各自由度毎の拘束のガウスからのズレ}] + [\text{自由度間のもつれの強さ}] + [\text{もつれの非加法性}]$ 。特に $[\text{もつれの非加法性}]$ は構成元素数が 3 以上の多元系に特有の寄与であり、ハイエントロピー合金のような多元系合金での複雑な非線型性を理解し、制御するカギになると考えられる。現在、このような幾何学的な非線型性の不規則構造から規則構造にわたる揺らぎを含んだ発展を扱う新しい確率熱力学の確立や、特異ホモロジーに基づく多元・多自由度系における非線型性の振る舞いの研究等を精力的に進めている。

准教授 野瀬嘉太郎

准教授 弓削 是貴

工学研究科 材料工学専攻

**先端材料物性学講座
先端材料物性学分野****析出強化多層材料の組織分布の評価**

析出強化型のアルミニウム合金の複合材料の材料ならびに熱処理設計のため、多層化したアルミニウム合金板材の組織分布をマイクロビームによる走査小角散乱法による評価を進めている。今年度は組織分布の定量化を目指し、相互拡散層についてAl/AlZn/Al多層板内部のトモグラフ再構成のボクセル帰属量の絶対値化の検討をおこない、2元系については吸収係数の絶対値化により内部組成分布の定量評価が可能であることをEPMAによる切断断面の組成分布検証により確認した。また、透過率の高精度評価より、散乱トモグラフィーの絶対値評価についても見通しがつく段階まで来た。

**希薄系MgGdZn, MgYzn合金のLPSO
組織形成過程**

長周期積層秩序構造を形成するMg基合金の典型例としてMgYzn3元合金の昇温過程での組織形成を検討してきた。MgYzn, MgGdZnの希薄合金は軽量性を損なわないとともに材料コストの観点からも要請の強い低組成LPSO系合金開発の観点から、LPSOの基本構造単位である積層欠陥+L12クラスター構造が熱処理条件、組成により形成されていく過程について放射光を用いて検討した。Mg97Gd2Zn1の組成においては溶体化処理からの焼入れにより、低温側で過飽和固溶体中にクラスターが形成成長していく一方、ある温度を挟んで一旦クラスターが溶解消失し、別の安定性を持ったクラスター配列構造が形成されることが明らかになった。このような2つの異なる安定性を持つクラスターの存在はMgYZnの希薄組成においても同様に認められることがわかった。したがって材料の強化に寄与するクラスター形成は溶体化処理後の熱処理温度を高温側に安定領域を持つ析出構造を形成する条件に設定する必要があることが明らかとなった。このクラスターはEXAFSの解析によりLPSO相中のL12クラスターと同一の構造を持っていることが明らかとなった。また、その構造はGdの場合はYよりややヘテロ核生成による長周期性を持ちやすい傾向はあるものの、 casting徐冷組織や650 K以上の熱処理などで認められるLPSO構造では認められない長周期(24R)を含め、広い周期の混合を示すプロファイルを示すことがわかった。一方、Yzn合金についてはGdZn系と同様に低温クラスターと高温クラスターの安定領域の明確な分離が観察される一方、偏析層の周期的多層化の進行ははるかに遅いという結果が得られている。現在結晶粒径との関係にも注意しつつ、析出動力学的違いを検討している。

軟X線共鳴散乱の定量測定実現

深さ分解GISAXS法や1 keV領域での共鳴散乱測定を定量化するための装置開発と解析を進めている。今年度は1.3 keV領域での2次元計測定量化を目的としてAlMg合金の2次元透過散乱強度の定量化を目指し、その基盤となる強度標準試料の選定及び作成の検討を進めた。今年度はいくつかの条件で製造されたガラス状炭素の薄膜化を試み、その散乱データのテングーX線による散乱プロファイルの安定性、再現性の検討を

おこない、絶対強度測定のための標準試料としての有効性を検討した。

**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同定**

Au, Agなどに炭素蒸着を行うと、非常に形状の揃った炭素ナノ構造が形成される場合がある。我々はこの構造がC₂₀ フラーレンの1次元重合体であるという仮説を立て、STM(走査トンネル顕微鏡)による研究を継続している。この構造は表面への吸着が弱くSTMでは原子分解能が得にくく、このためSTM像から直接構造を決定することが出来ていない。本年度は、STM/STSによる電子状態測定と電子状態密度計算のシミュレーション結果を比較することで、構造の同定を試みた。研究の結果、1次元重合体においては計測された電子状態密度のエネルギー依存性は理論計算の結果とおおよそ一致を示した。また、この1次元構造が形成された表面を100℃程度に加熱すると2次元アイランド構造が形成されることを確かめた。このアイランド構造に対しても電子状態密度計測を行った結果、1次元重合体のそれとは異なる特徴の結果が得られた。加熱による拡散と凝集に伴い、新たな結合を形成している可能性が示唆された。

3次元アトムプローブとSTMの複手法の開発

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

昨年度までに、理想的な走査用探針であると考えられるPt/W(111) ナノピラミッドを用いたアトムプローブ(APT) 試料の観察に成功している。本年度は本手法の汎用性を高めるため、STM超高真空チャンバー内に新たに電界蒸発装置を設けることによってSTM装置内での試料作製を可能にした。これはAPTからSTMへの試料搬送の際に試料が大気に暴露されることによる酸化・汚染をSTM装置内で取り除くことを目的としたものである。この装置は簡易なものとし、電界蒸発イオンの位置・飛行時間計測の機能は持たず、単純にイオン数のカウントだけを行う。この装置で実際に電界蒸発が可能なことを確認しており、研究を進めている。

さまざまな試料のSTM観察

STMでは他の手法で得られない情報を得られる場合があり、多くの試料への応用が期待される。本年度も引き続き九州大学谷ノ内准教授との共同研究として、CuFeS₂表面のSTM観察の研究を行っている。STMによる原子分解能観察に合わせて、EBSDによる劈開面の方位同定を行い、この試料の劈開面に関する微視的情報を得た。また磁性物理学研究室田畑准教授との共同研究として、Dy(Ru_{1-x}Cox)₂Si₂劈開面のSTM観察を行い、こちらも原子分解能観察に成功している。現在複数考えられる劈開面の同定およびそれらの電子状態密度計測を進めている。最終的にはこの表面のスピン偏極STM観察を行い、Dyスピンの検出を目指す。

教授 奥田 浩司
准教授 黒川 修

材料物性学講座
量子材料学分野酸化物の合成条件探索のための
自動分注装置の開発

本研究では、推薦された合成条件で逐次実験を行い、その結果をまた合成条件推薦システムにフィードバックすることで効率よく新規物質の探索を行う手法を検討した。錯体重合法による多種多様な条件下での合成実験を同時並列して行うために、ロボットアームやマイクロコンピュータ等を用いた自動分注装置の開発を行った。本装置を用いて獲得した合成条件データを用いて、より少ない実験回数で合成条件の予測精度を向上できる逐次的な合成データの追加方法を検討した。具体的には、自動分注装置を用いて、錯体重合法により全2025件の合成実験を行った。焼成体の相同定には粉末X線回折測定を用い、目標とする酸化物組成に対しての合成の成否を整理し合成条件データセットを作成した。2025件のうち、(1) 2通り以上の条件で合成できた66種の擬二元系酸化物に対する合成実験292件、もしくは(2) 無作為に選択した合成条件292件を初期データとして合成条件推薦システムで学習し、その予測に基づき10件の合成結果を新たに追加するフィードバックループを構築した。本研究では1通りの条件でしか合成できなかった11の擬二元系酸化物を最も少ない実験回数で発見できるデータの追加方法を検討した。

その結果、推薦システムを用いた場合はいずれもランダムの場合より効率よく発見できていることがわかった。11酸化物すべてを発見できた回数は、(1) および(2) の場合は1400件および1700件であり、推薦システムを用いることで網羅的な実験より15-30%ほど実験回数を省略できることがわかった。このことは、探索領域がより広範になった場合でも、合成可能な既知物質の合成条件を初期の学習データとすることで探索効率の向上が望めることを示唆している。

金属有機複合体を前駆体とした酸化物の
並列合成手法の開発

本研究では、金属イオンを架橋配位子（リンカー）で周期的に連結した金属有機構造体（Metal-Organic Framework, MOF）に着目した。MOFを前駆体とした酸化物の合成例は限られているため、まず単一の金属イオンとリンカーの組み合わせでMOFの生成条件を調べ、それをもとに二種類の金属イオンを含む場合のMOFの生成条件を予測し、それを前駆体として実際に擬二元系酸化物が合成できるかどうかを検討した。金属イオン溶液の原料、金属イオン濃度、リンカーの種類、リンカー濃度、リンカー溶液の溶媒、およびリンカー溶液の滴下量をパラメータとし、混合時間や

乾燥時間など実験操作に関する条件は全実験で一律として、計2660件のMOF合成実験を行った。また、単一金属イオン水溶液での実験結果からMOFを形成する主要因を抽出するために決定木分析を行い、前駆体MOFの作製に適切なリンカー溶液の条件を検討した。

本手法では、1回で40件の前駆体を約3時間で合成することが可能であり、錯体重合法等には比べ前駆体の合成を大幅に効率化することができた。本研究で対象とした28種すべての金属イオンでMOFを生成可能な単一のリンカーはなく、金属イオンごとにMOFを生成する条件は様々であった。また、MOFの生成条件の分類に用いられた頻度として、金属イオンや溶液と比べてリンカーに関する要因が多く用いられていることがわかった。この結果をもとに合成条件を予測した二種の陽イオンを含むMOFを前駆体とした既知酸化物の合成実験を行ったところ、約半数で合成に成功した。以上から様々な複合酸化物合成の前駆体としてMOFが候補となることが示された。

効率的データ構造を用いた不定比性化合物における
結晶構造列挙手法の検討

非等価な置換型結晶構造（Derivative Structure, DS）列挙は、金属間化合物などの多成分系の基底状態を探索に広く用いられている。当研究室では、ZDDと呼ばれるデータ構造を用いて、最大 10^{18} 程度の非等価なDSを列挙する手法を開発しているが、DSの単位胞拡大に対してDSの数は指数関数的に増加する。本研究では、ZDD上で制約を導入し、高速にDSを絞り込む方法の開発を行い、実際に不定比性化合物を対象としてDSの列挙を行った。

まず、 TiO_{2-x} 系において結晶構造列挙を行った。DSを列挙するためのモデルとして、 TiO_2 ルチル構造を基本構造とし、ルチル構造のカチオン位置と八面体位置に Ti^{2+} , Ti^{3+} , Ti^{4+} , 空孔の4種類を配置させるモデルを導入した。このモデルのもとで、まず制約のないすべてのDSを表現するためのZDDを構築した。その後、DSを絞り込むための制約として、Pauling第二則を導入し、その制約式を満たすDSのみをZDD上で抽出した。他にも SnO_{2-x} , MoO_{3-x} , WO_{3-x} などの系についても同様にモデリングを行い、列挙を試みた。Pauling第二則を導入することで、制約なしで全構造を列挙した場合と比べて、大幅に構造探索の候補を削減できおり、その効果は単位胞が大きいほど顕著である。また、このように制約付きで結晶構造を列挙する方法は、 TiO_{2-x} の系に限らず、他にも SnO_{2-x} , MoO_{3-x} , WO_{3-x} など様々な系に対しても適用可能であることを実証した。

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****Development of Fe-based Superalloys
Strengthened by the γ' Phase**

Fe-based superalloys strengthened by the γ' phase can be an alternative to the Ni-based superalloys practically used in power plant application. However, the stable $L1_2$ γ' phase exists only in Fe-Ge binary phase, making it challenging to develop Fe-based superalloy. Both Fe-Ge and Ni-Ge binary phase diagrams show the stable γ' phase region at around 23-25 at % Ge. However, the γ' Fe_3Ge is stable below 700 °C, above which the γ' phase transforms into ε phase with DO_{19} structure. With reference to such a situation, the first objective of this research is to determine the ternary phase diagram of Fe-Ni-Ge toward development of novel Fe based superalloys with stable γ/γ' phases. Furthermore, mechanical properties of the designed alloys are also investigated at elevated temperature.

As the results, the Fe-Ni-Ge phase diagrams at temperature sections of 650, 800, 1000, and 1100 °C have been determined. The stability of γ/γ' phase changes insignificantly with temperature and minor additions of a forth element such as Ti, Nb, Mo, Ta, Co, and V are less advantageous on the volume fraction, morphology and thermal stability of the γ' phase. The designed superalloy Fe-34Ni-15.8Ge has superior yield strength compared to stainless steels, and superior ductility compared to Inconel 740 and Haynes 282. The high temperature strength capability of polycrystalline Fe-based superalloy is also superior than any stainless steels. For the single crystal Fe based superalloy, the orientation dependence of yield strength is observed with [111] orientation is comparable with Ni based superalloys such as Haynes 230, Haynes 282, and Inconel 740.

Mg-Zn-Y系LPSO相のキンク帯形成機構

Mg-Zn-Y合金が押し出し加工により優れた力学特性を発現する理由として、析出相であるLPSO相においてキンク組織が発達することが関係していると考えられている。本合金の組織制御理論の確立のためには、キンク組織の形成過程を明らかにすることが必要である。そこでMg-Zn-Y系LPSO相単結晶のマイクロピラー圧縮試験を行い、キンク帯形成に影響を及ぼす要因を明らかにすることを目的とした。マイクロピラー圧縮

試験の結果、14H型および18R型LPSO相のいずれについてもa軸からのずれ角が数度を超えると底面すべりが活動を開始することを確認した。また試験条件(傾角、ひずみ速度)により、明確な界面を有するキンク帯組織が速やかに発達する場合と、変形初期段階において緩やかに試料の湾曲が進む場合があることがわかった。さらにアスペクト比や積層周期の違いによって変形挙動に差異が現れることが明らかとなった。

 η - Fe_2Al_5 を基礎とする高次規則相の相平衡

熔融Alめっき層では η - Fe_2Al_5 が優先的に形成される事が知られている。この結晶構造について、 η - Fe_2Al_5 を基礎とする4種類の高次規則相(η' 相, η'' 相, η''' 相, η'''' 相)の報告があるが、これらの相の熱的安定性や生成反応について説明しうる状態図の報告は未だ存在しない。そこで本研究ではこれら η - Fe_2Al_5 を基礎とする高次規則相の相平衡と結晶構造の同定を試みた。その結果、低温域にて複数の反応が確認され、 η 相は従来低温まで安定と考えられていたが、331°C近傍で η'' 相と η''' 相に相分離することが分かった。またこれらの高次規則相は、構造的・化学的変調を引き起こす逆位相境界(APB)が周期的に導入された長周期規則構造を有するなど、結晶構造に似たような特徴を持っていることが明らかとなった。

**BCC構造を有する5元系等原子量
ハイエントロピー合金の塑性変形**

5種以上の元素からなる高濃度固溶体合金はハイエントロピー合金(HEA)と呼ばれ、従来の合金に比べて優れた力学特性を示すものが多数報告されていることから注目を集めている。代表的なBCC型HEAとしてTi-Zr-Nb-Hf-Ta系およびV-Nb-Mo-Ta-W系の等原子量合金が挙げられ、それぞれ室温における延性、高温での強度特性に優れることが報告されているが、その起源については明らかにされていない。そこで本研究では、これらのHEAについてバルク多結晶圧縮試験および単結晶マイクロピラー圧縮試験を行い、変形機構の異方性を調査した。その結果、Ti-Zr-Nb-Hf-Ta系HEAでは相対的に{112}面すべりが優勢となり、その傾向は温度低下に伴い顕著となった。一方でV-Nb-Mo-Ta-W系HEAでは室温で{110}面すべりが比較的優勢となる傾向を示し、77Kでは塑性変形せず破壊に至ることが明らかとなった。

教 授 乾 晴行
准教授 岸田 恭輔
助 教 新津 甲大

工学研究科 材料工学専攻

材料物性学講座 構造物性学分野

高Mn鋼のセレーション挙動の本質

本研究では、引張変形中のその場放射光X線回折法とデジタル画像相関法(DIC法)を用いて、高Mn鋼において観測されるセレーション挙動を系統的に調査した。不均一変形帯であるPortevin-Le Chatelier (PLC) bandの形成・伝播・消滅が材料全体の変形およびセレーション挙動に対応していることを明らかにした。転位-固溶炭素間の相互作用と動的ひずみ時効との関係に着目し、高Mn鋼におけるセレーション挙動の粒径依存性を考察した。

Al-Mg合金の変形挙動に及ぼす結晶粒径およびMg量の影響とその変形機構

本研究では、種々の粒径、Mg含有量を有するAl-Mg合金の室温力学特性を系統的に調査した。Mgが粒界偏析することによりHall-Petch関係の傾きが増大することが示唆された。Mg含有量の多い合金では、溶質-転位間および溶質-溶質間の相互作用によって高い加工硬化能が得られた。また、Al-Mgにおいて観察されたセレーション挙動と不均一変形挙動が対応していることを明らかにし、動的ひずみ時効とセレーションの発現機構、加工硬化挙動との関係を考察した。

FCC構造を有する高・中エントロピー合金の材料組織と力学特性

High/medium entropy alloy (HEA/MEA)は、複数の合金元素をほぼ等原子量で固溶させた高濃度多元系固溶体合金である。本研究では、種々のFCC単相HEA/MEAおよび従来のFCC合金の室温における材料組織と力学特性を系統的かつ詳細に調査し、HEA/MEAにおいて支配的な強化メカニズムと変形メカニズムを解明した。HEA/MEAといった高濃度多元系合金では、高濃度で固溶した合金元素と転位が相互作用することで転位の運動が阻害され、高い強度と大きな引張延性が得られることが示唆された。

FCC単相Medium Entropy Alloy (MEA)における圧延変形組織の発達と力学特性

高濃度多元系固溶体合金は、希薄合金や純金属に比べて高い摩擦応力(転位の運動に対する基礎抵抗)を示す。本研究では高い摩擦応力を有する $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{40}\text{Ni}_{40}\text{MEA}$ 、およびそれと同様な物性値を有し摩擦応力が低い $\text{Co}_{60}\text{Ni}_{40}$ 合金における冷間圧延時の変形組織発達と力学特性を比較することで、高濃度合金の大ひずみ域における変形挙動の特徴を調査した。 $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{40}\text{Ni}_{40}$ では $\text{Co}_{60}\text{Ni}_{40}$ 合金に比べて高密度かつ多量の変形双晶が観察され、これにより $\text{Co}_{20}\text{Cr}_{40}\text{Ni}_{40}$ は $\text{Co}_{60}\text{Ni}_{40}$ 合金よりも高い変形応力と加工硬化能を示すことが示唆された。

準安定オーステナイト鋼の変形機構と変形誘起マルテンサイト変態の速度論質

本研究では、Fe-24Ni-0.3C (wt.%) 準安定オーステナイト鋼の変形挙動とその結晶粒径依存性を系統的に調査した。準安定オーステナイト鋼の加工硬化挙動は、変形誘起マルテンサイト変態の進行に伴うオーステナイトとマルテンサイト間の応力分配挙動に対応していることが明らかとなった。また、変形誘起マルテンサイト変態の進行速度の結晶粒径依存性を調査し、「プラストン」の概念を基にマルテンサイト変態の活性化過程について考察した。

中Mn鋼のオーステナイト逆変態機構と組織形成に及ぼす加工熱処理の影響

Mnを3~10 wt.%程度含む中Mn鋼は強度と延性を両立した優れた力学特性を示すことから近年注目されている。本研究では、中Mn鋼の $\alpha + \gamma$ 二相域における加工熱処理中の組織形成過程を調査した。無応力下では置換型元素が拡散しない場合の平衡状態であるバラ平衡モードに従う相変態挙動が観察された。一方、 $\alpha + \gamma$ 二相域において圧縮変形を加えると、全元素が分配されるオルソ平衡モードに従う相変態挙動が確認された。

粒径の異なるDP鋼における変形・破壊挙動

軟質なフェライト相と硬質なマルテンサイト相からなるDP鋼は、優れた強度延性バランスを示すことが知られているが、微視組織レベルにおける変形挙動は十分に理解されていない。フェライト粒径の異なる2種類のDP材を作製し、変形・破壊挙動を詳細に調べた。粗大粒材ではひずみが特定の局所領域に著しく集中しており、そこからボイドが発生していた。一方、微細粒材は比較的均一にひずみが分布し、ボイド成長が大きく抑制されることが判明した。

マルテンサイト鋼およびフェライト鋼の水素環境下における疲労破壊

水素環境下では高強度鋼の疲労破壊が助長されるが、その機構は不明である。本研究では、代表的な高強度鋼であるマルテンサイト鋼、およびマルテンサイト鋼と同じBCC結晶であるが単純組織を有するフェライト鋼の水素環境下での疲労破壊挙動を調査した。水素の有無によらず $\{0\ 1\ 1\}$ 面がBCC鋼の主な疲労破壊経路であること、またマルテンサイト鋼では旧 γ 粒界における早期き裂発生が疲労寿命低下の一因であることが明らかになった。

純チタンにおける疲労き裂進展挙動の結晶学的解析

研究では、多結晶純チタンにおける疲労き裂進展に及ぼす結晶方位と粒界の影響を調査した。疲労き裂は、最大のシュミット因子を有する柱面に沿って進展することがわかった。粒界近傍においては、小さなシュミット因子を有するすべり面に沿って疲労き裂が進展していたことから、粒界は疲労き裂伝播の障害物として働くことが示唆された。微細粒組織を有する試料においては、粗大粒材に比べて疲労限が増大することを明らかにした。

航空機向けチタン合金鍛造のマクロゾーン微細化技術に関する研究

チタン合金鍛造材には、 α 相の結晶方位が類似した局所集合組織ドメイン(マクロゾーン)が形成され、検査時の超音波探傷時に散乱ノイズ信号の発生原因となり問題を引き起こす。本研究では、種々のチタン合金に対して、熱間鍛造で形成されるマクロゾーンの特徴と微細化指針の解明に取り組んだ。マクロゾーンは β 相と α 相の加工集合組織の発達、並びに $\beta \rightarrow \alpha$ 変態でのバリエーション選択に起因して形成されることが明らかとなった。

教 授	辻 伸泰
准教授	柴田 暁伸 (2020年5月 物質・材料研究機構 鉄鋼材料グループリーダーに転出)
講 師	高 斯
助 教	白 玉 (2021年2月 中国大連理工大学副教授に転出)
助 教	朴 明駿 (2021年2月 着任)
助 教	吉田 周平 (2021年6月 着任)
ESISM特定助教	崇 巖 (2021年1月 着任)
CREST特定助教	黄 錫永 (2021年4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**

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

【物理原理に基づく画像解析技術の開発】

4D-CTを用いた直接観察では、三次元像を得るために透過像を再構成することが必要である。しかし、再構成によって画像にノイズが付加され、本来の固液界面形状を再現するには困難があった。そこで、本研究室ではフェーズフィールドの概念に基づく画像解析手法を開発し、Al-Cu合金の直接観察の結果に画像処理を行うことで固液界面の曲率から必然的な界面形状を得ることに成功した。これにより、三次元の組織を定量的に観察・測定できるようになった。最近、炭素鋼やステンレス鋼、Al合金、Ni基超合金など多様な合金系の凝固過程における組織形成の実証的な解明を目指している。また、多種多様な合金系に適用できるミクロ偏析モデルを検討するなど、直接観察で獲得した実証データの工学的応用を目指している。

【時間分解・その場観察によるFe系合金のマッシブ的変態現象の評価】

時間分解・その場観察により、炭素鋼の凝固過程において、従来考えられてきた「包晶反応」は実際の凝固条件では選択されず、マッシブ的変態によって δ 相から微細な γ 相が形成されることが明らかになった。また、Fe-Cr-Ni系ステンレス鋼等の平衡論的には γ 相が初晶として現れる鋼種においても、準安定 δ 相の生成から γ 相へのマッシブ的変態が起こることが見出され、広く鉄鋼材料の casting 組織を制御するには、マッシブ的変態現象を理解することが重要であることが分かってきた。最近では、添加元素を加えることでマッシブ的変態前後において δ/γ 界面や γ/γ 界面の移動速度が変化することも分かりつつあり、詳細なメカニズムの解明とそれに基づく casting 組織制御に向けた研究

を展開している。

【X線イメージングを用いたハイエントロピー合金の凝固現象の定量解析】

5種類以上の元素が等モル分率で混合したハイエントロピー合金の凝固現象に関して、従来の溶質濃度の小さい合金や毎相に高濃度に溶質が添加された高合金との類似点や相違点は不明である。そこで我々は、SPring-8の高輝度X線を用いた4D-CTや蛍光X線その場測定を用いて、種々のハイエントロピー合金の凝固収縮量やデンドライト、および凝固過程における各元素の分配を解析している。これまでにCrMnFeCoNi系等モル合金は凝固パスが擬二元系に投影できることを見出したが、さらに擬二元系の端組成のCrFeCoNi合金は一致溶融に近く、ほぼ偏析フリーの casting 材となりうることが分かった。さらに、4D-CT解析の結果によるとCrMnFeCoNi系とそのサブシステムの合金は他のfcc合金と比較して凝固収縮量が小さく、この観点からも casting 材に適している可能性がある。また、fcc-fcc二相共存となることが知られているCrMnFeCoCu合金の凝固過程観察の結果、均一な液体から液-液分離状態を経て、それぞれの液相中に2つのfcc相が形成する、という複雑な凝固パスを取ることが明らかとなった。

【Al-Cu合金の固液共存体の変形の三次元解析】

casting 時のマクロ偏析や欠陥の原因の一つに固液共存体の変形によるせん断帯の形成が挙げられる。従来では、固相粒子間の液相の流動によって偏析が形成されたと考えられてきたが、固液共存体の変形のその場観察によって固相粒子の運動と液相の流動が独立して起きていることが明らかにされている。ただし透過観察では固相粒子の運動の自由度が制限されていた。そこで4D-CTと三次元結晶方位解析（3DXRD）を組み合わせた三次元の観察手法を開発し、固液共存体の三次元での変形過程の定量的な解析を目指している。これまでに変形による固相粒子の移動速度ベクトルからひずみ速度分布を計算して局所的な見かけ体積の膨張と収縮が起きていることを明らかにし、均一な連続体とは異なる粒子集合体の振る舞いを定量的に評価できるようになっている。また、観察に基づいて固液共存体の特徴を再現する新しい物理モデルを提案し、数値計算によって固液共存体に特有のせん断に対する不安定性やせん断の局在化などを再現できるようになった。時間分解・その場観察と連携させて提案モデルの妥当性や、 casting 時の割れ、偏析などの課題の解決を目指している。

教 授 安田 秀幸

助 教 鳴海 大翔

助 教 勝部 涼司（2021年3月 着任）

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

高濃度 La-Co 置換 M 型 Sr フェライト
 $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ の単相化と
磁気異方性に関する研究

La-Co 置換 SrM ($\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$) は高性能フェライト磁石と呼ばれ、モーター用途品として注目されている。Co²⁺の軌道モーメントによって一軸異方性が増大し、保磁力が向上するため、Co の高濃度置換はさらなる高性能化が期待できる。現在商用のものでは、Co²⁺の最大置換量は0.3程度である。我々の先行研究では、合成時の酸素分圧を上げると Co²⁺高濃度な M 相が得られ、 $p_{\text{O}_2} = 387 \text{ atm}$ では 1.0 まで置換したものが合成でき、非置換のもの3倍程度の非常に高い磁気異方性を有することを報告している。しかし、これらの試料は副相を含んでおり、材料としては単相化の条件を解明することが重要となる。本研究では、高濃度 La-Co 置換 SrM 試料の単相化条件の探索を行なった。XRD, WDX を用いた分析の結果、 $p_{\text{O}_2} = 1.0 \text{ atm}$ で $x = y = 0.3$ の単相試料が得られ、 $p_{\text{O}_2} = 10 \text{ atm}$ では $x = y = 0.6$ までの単相試料が得られることが明らかとなった。

FCC フラストレート磁性体 $R\text{InCu}_4$ ($R = \text{Gd, Tb, Ho}$) の
単結晶作製およびその磁性

3次元磁性体の幾何学的フラストレーションの構造単位は正四面体である。辺共有四面体が構成する FCC 格子は、最近接反強磁性相互作用のみを考えると完全フラストレート系であるが、第2近接以降の相互作用が無視できず、多くの FCC 磁性体は、フラストレーションが部分的に解消され高温で磁気秩序し、最近接 FCC フラストレート系の適切なモデル物質は、ほとんど知られていない。そのような状況下、立方晶 C15b 型の構造を持つ GdInCu_4 は Gd が FCC 格子を組み、最近接相互作用が支配的な系として知られ、FCC フラストレート磁性体のよいモデル物質と考えられて

いる。多結晶を用いた先行研究から、 GdInCu_4 では、磁気秩序が極低温まで抑制され、磁気転移温度以下においても、スピン自由度が一部残存する部分無秩序状態が提案されていた。本研究では純良な単結晶試料を作製し、詳細に磁化の異方性を調査した。その結果、磁化の温度依存性において逐次的な異常を観測し、また異方性の存在を確認した。その異方性は、多結晶で提案されていた磁気構造と矛盾する可能性があり、モデルの再考の必要性が示唆された。

フラストレート磁性体 ZnFe_2O_4 及び CdFe_2O_4 の
スピングラス様磁性

スピネル型酸化物 AB_2O_4 は、B サイトが3次元フラストレート格子であるパイロクロア格子を形成する、フラストレート磁性体の典型例として精力的に研究がなされている。そのようなスピネル型酸化物の中で、 ZnFe_2O_4 及び CdFe_2O_4 は、低温でスピングラス様磁性を示し、ランダムネスフリーのスピングラス物質として注目されている。しかし、これらのスピングラス様磁性が、パイロクロア格子の幾何学的フラストレーションに由来しているのか、結晶の不完全さから来るランダムネスに由来するのかについては、よく分かっていない。我々は、様々な育成条件で ZnFe_2O_4 及び CdFe_2O_4 の単結晶・多結晶を作製し、それらの結晶の不完全さの指標として A, B サイトのカチオン反転度 δ に着目し、作製した試料の δ と磁性との関係を調べた。 δ の異なる複数の試料の磁性を、磁化の磁場履歴現象の発現、非線形磁化率の異常の有無などの観点から調べた結果、 ZnFe_2O_4 及び CdFe_2O_4 のスピングラス様磁性は、 δ が小さいほどより顕著になり、 δ が 0 の極限でスピングラス相転移となる傾向を示すことが分かった。これは、これらの試料で、ランダムネスフリーで幾何学的フラストレーション由来のスピングラスが発現していることを強く示唆している。

教 授 中村 裕之
准教授 田畑 吉計
助 教 和氣 剛

工学研究科 材料工学専攻

材料機能学講座
材質制御学分野

濃厚電解質溶液環境における電気化学反応に関する研究を紹介する。濃厚電解質溶液は、希薄溶液に比べて溶媒分子の電気化学安定性に優れるため、電気化学の反応場として注目されている。溶質濃度が増すことによって溶質イオンとの相互作用をもつ溶媒分子の比率が高まり、相互作用をもたない溶媒分子(自由溶媒)は減る。一方、近年は濃厚電解質水溶液の電気化学プロセスへの工学応用が盛んに試みられているものの、そのような環境において顕在化する溶媒分子と溶質イオン間の相互作用に関する基礎的理解が不足している。濃厚電解質溶液環境下の電気化学反応に対し、溶質イオンが与える影響を解明する必要がある。

溶媒としての水は安全であり最も工業的に利用される。銅の電解精製浴も濃厚電解液の一種である。銅の電解精製の実操業では、水素発生を伴わないにもかかわらず電流効率が93-98%と低い。この主要因は、カソード上に生じるコブ状の異常析出物(ノジュール)を原因とする電極間の短絡にある。ノジュール成長挙動の理解と成長抑制策の提案のために、電解液中の物質拡散に由来する濃度過電圧や電解液対流の影響を加味した「3次電流分布」について、有限要素法による数値シミュレーションを行った。ノジュール高さが4 mm以上では、自然対流下ではノジュール先端がカソード平板近傍の自然対流層から逸脱した環境になり拡散層厚さに不均一分布が生じた。また、電流分布の主な支配因子は電解液の導電率であり、導電率が低いほどノジュールへの電流集中が顕著となった。よって実操業において系内の総硫酸イオンに占める遊離硫酸の割合を増やし電解液の導電率を高く保つことがノジュール成長の緩和に有効である。

比較的卑な電極電位をもち水素析出(吸着や水素ガス発生)と競合する金属電析反応についても検討した。亜鉛電析において、自由水の減少が電析亜鉛の基底面配向をもたらすことを明らかにした。吸着水素原子の減少によって吸着金属イオンの表面拡散や電析金属の核成長が促進され、最も小さな表面自由エネルギーをもつ基底面の基板水平方向への成長に適した状況が実現したためと考察した。モリブデン電析では、 LiCl-MoCl_5 塩化物系濃厚水溶液から金属状態のアモルファスモリブデンが得られた。 LiCl の濃厚化によってカソードでの水素発生を十分に抑制することが、液中モリブデン種を金属状態にまで還元する上で重要であった。このように濃厚電解質水溶液における自由水の減少が溶分解(水素析出)反応と金属電析反応との競合関係を変え、電析金属の表面性状に影響をおよぼすことが示された。

通常の濃度の水溶液においては溶解度の低い塩(塩化銀や塩基性領域の銅(II)塩)が、濃厚化によってよ

く溶けることを見出すとともに、その金属イオンの溶存状態や電析挙動を解明した。濃厚ハロゲン化物系水溶液では、銀イオンの溶解度が塩化物系、臭化物系、ヨウ化物系となるにつれて1桁ずつ向上した。濃厚化によってイオンの拡散係数が著しく減少した結果、拡散層がむしろ薄くなり電析銀の平滑性が向上することもわかった。濃厚塩化物系銀スズ合金浴では、 NaOH 添加によりほぼ銀のみが沈澱しスズと分離できた。廃液処理での銀回収の簡素化が期待される。太陽電池や光電極などに用いられる Cu_2O 半導体の電析浴は濃厚 NaOH -乳酸水溶液であるが、銅(II)イオンの溶存化学種を特殊な質量分析(エレクトロスプレー法)や滴定手法の工夫によって解明するとともに、紫外可視スペクトルの多変量解析によって錯生成定数を算出した。これによって溶存錯体と電析 Cu_2O の配向性の相関を検討することが可能となった。このほか、濃厚 KF 水溶液を SiC の陽極酸化用の新たな電解液として用いたところ、希薄系の場合のようなケイフッ化カリウム析出が見られず、陽極酸化による SiC のメソポーラス化に成功した。

非水系の濃厚電解液についての研究では、イオン伝導挙動に着目しており、濃厚化によってイオンが溶媒よりも速く動くホッピング伝導の事例を見出している。高沸点エーテルのグライム類を用いる LiTf_2N ($\text{Tf} = \text{SO}_2\text{CF}_3$)溶液は、安全性の高い Li^+ イオン電池用電解液として注目されている。トリグライム、テトラグライム、ペンタグライム系において、エーテル酸素数に対する Li^+ イオンの比が $[\text{O}]/[\text{Li}^+] = 3$ である濃厚領域で Li^+ イオンホッピングが起こることを自己拡散係数測定により見出した。一方で鎖長の短いジグライムではホッピングは見られない。 $[\text{O}]/[\text{Li}^+] = 3$ ではジグライムではグライムと Li 塩のモル数が等しいが、長鎖グライム系では Li 塩が過剰となる。また、長鎖系で Li 塩とのモル数が等しい場合もホッピングは見られない。よってグライム分子が Li^+ イオンを架橋できる溶液環境の構築がホッピング伝導の発現に重要であると結論した。水:イミド超強酸:オリゴエーテル = 1:1:1の3元系等モル混合物は、ヒドロニウムイオン(H_3O^+)がオリゴエーテルで溶媒和されたプロトン性溶媒和イオン液体となる。18-crown-6(18C6)を配位子とする系では、余分な中性分子が含まれないにもかかわらず、 H_3O^+ の自己拡散係数が18C6配位子のそれよりも大きく、通常の水溶液中でのプロトンジャンプとは異なる高速プロトン伝導が現れる。この機構の理解のため、配位子形状の影響を調べた。環状配位子では高速プロトン伝導が、鎖状配位子(グライム)ではピークル機構が発現した。環状配位子では錯カチオン同士が向かい合い親水性領域が連続しやすいために高速プロトン伝導が起こると考察した。

教 授 邑瀬 邦明

准教授 深見 一弘

助 教 北田 敦

工学研究科 材料工学専攻

材料機能学講座
機能構築学分野

温度可変AFMによる熔融金属-固体界面の構造解析

金属材料生産プロセスにおいて、熔融金属と固体材料との界面で起こる種々の現象は金属材料の電氣的・機械的特性に大きく影響を与えるため、これらの界面における動的過程のその場 (in situ) 分析を行うことは非常に重要である。当研究室では、このような熔融金属-固体界面の分析を可能とするため、圧電素子である音叉型水晶振動子からなるフォースセンサ (qPlusセンサ) を用いた、熔融金属中で動作する原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscopy; AFM) の開発に取り組んできた。本研究では合金化現象についてさらに知見を深めるために、温度制御を導入し、熔融GaでのAu-Ga合金の構造変化のin situ分析を試みた。

まず熔融Ga中における熱振動スペクトル測定により、熔融Ga中のAFM分析は160~190℃程度まで可能であることを見出した。次にこの結果を用いて熔融Ga/Au界面において温度可変AFM分析を行ったところ、室温でファセット面を有していた結晶が、加熱によりファセット面が消失し、丸みを帯びた形状に変化することを確認した。この結果は温度が高くなったことでステップの自由エネルギーがゼロとなりファセットが消失する相転移 (ラフニング転移) が起きたと考察される。

酸化チタン被覆高分子への銅めっき

高分子系複合材料表面への金属めっきは、プリント配線基板作製等において重要であり、絶縁物上に無電解めっき過程による、金属薄膜作製が必要とされている。従来の銅薄膜作製過程では、パラジウムを触媒として用いて無電解めっきしているが、パラジウムは高価な金属であるため、低価格な手法を確立することが新たな課題である。当研究室では、Cyclo-olefin polymer (COP) 表面にTi acetylacetonate (TAA) 錯体の膜を形成して、乾燥空気中で真空紫外 (VUV) 光照射することで、室温下でのTiO₂薄膜を作製することに成功している。COP表面に形成されたTiO₂薄膜が光触媒特性をもつことを利用し、本研究では、光還元銅めっき手法の確立とその後の無電解めっき等により金属銅薄膜作製条件最適化を目的とする。

銅イオン溶液中でTiO₂被覆試料にUV光を照射することで、光還元銅めっき手法が原理的に可能であることを確認したが、銅膜の模様にムラが確認できた。ドロップキャストでTAAを担持してTiO₂の吸着量を増やした被覆試料を用いることで、UV光還元による均一な銅色の薄膜形成に成功した。本試料を無電解銅めっき液に浸漬すると、銅薄膜の膜厚は全体的に増加

し、電気めっき過程に必要な導電性を持つ銅膜の形成に成功した。

酸化グラフェンを援用したSiパターンエッチング

酸化グラフェン(GO)は触媒、半導体材料などの様々な用途への応用が期待されている材料である。当研究室ではGOの硝酸還元触媒機能を活用することで、GOアシストSiエッチングに成功した。本研究ではGOを真空紫外 (VUV) 光でパターンニングしたのちGOアシストエッチングを行うことで、Siのパターン作製を試みた。

VUV光を大気圧と高真空環境下でフォトマスクを介して照射することで、GOシートにパターンを描画した。パターンを形成したGO/Si基板はフッ酸-硝酸系エッチング液に浸漬した。その結果、遮光部位のGO領域はより深くエッチングが進行し、マイクロメートル幅のパターン形成に成功した。GOシートに存在する構造欠陥が硝酸還元の反応活性点となり、エッチング促進に寄与していることが示唆された。

イオン液体/チタン酸リチウム界面溶媒と構造のAFM解析

固液界面の液体分子の非等方的密度分布、いわゆる溶媒と構造の微視的AFM分析が近年数多く報告されている。これまで、その研究の多くでは、静的な場を対象としてきた。一方、電極/電解液界面は、開回路状態にあっても酸化還元の平衡状態にあり、静的な場ではない。われわれはこれまで、qPlusセンサをフォースセンサとする周波数変調 (FM-) AFMにより、イオン液体 (IL) / 固体界面の溶媒と構造分析に取り組んできた。本研究では、スピネル型チタン酸リチウム (Li₄Ti₅O₁₂, LTO) 電極とIL電解液界面溶媒と構造のqPlus AFM分析を行った。LTOはリチウムイオン電池 (LIB) の負極材料の一つとして実用化されており、LTO/IL電解液界面分析はLIB研究に対しても基礎的な知見を与えうる。

LTO (111) 単結晶膜にLi塩添加 (濃度1%) イオン液体電解液を滴下し、界面で二次元周波数シフトマッピングを行った。その結果、LTO表面に平行な層状コントラスト (層間距離: 約0.77 nm) が存在する領域と存在しない領域の両方が確認された。層間距離はイオン液体構成分子のイオンペアサイズと良い一致を示した。Li塩を添加していない電解液中ではLTO表面に平行な層状のコントラストが均一に確認された。Li塩添加により、界面はLi⁺イオン脱挿入の平衡状態にあることから、静的な状態と電気化学的平衡状態での界面溶媒と構造の違いが示唆された。

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。



図1 寄附講座の活動

非鉄製錬プロセスに関する基礎研究

非鉄製錬で起こる現象の理解の深化、現行プロセスの課題の把握、および長期スパンでの資源循環型社会への貢献を目的に、非鉄金属の製錬・リサイクルプロセスに関する基礎研究を行っている。非鉄金属の製錬・リサイクルでは、多様な元素を分離回収するため、種々の化学反応や物理現象が利用されている。しかし、それらの機構については、定性的あるいは経験的な理解の段階であり、その詳細の多くが明らかにされていない。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。

2020年度は前年度から継続し、亜鉛の電析に関する反応機構の調査と、代表的な都市鉱山である使用済みリチウムイオン二次電池（廃LIB）に関する湿式リサイクル技術の開発に取り組んだ。また、新規なテーマとして、非鉄金属の高温電解精錬技術の開発と、溶融塩を用いたレアメタルのリサイクル技術の開発、ならびにアルミニウム鉱石からのガリウムの回収に向けた基礎研究にも取り組んだ。

廃LIBのリサイクルには主に高温での熱処理を用いた手法が研究されており、有害なガスの無害化などに大型の処理設備を必要としている。そのため、リサイクル処理施設を都市部の各地に設けることは難しく、発火事故防止のために廃LIBを厳重に梱包して処理施設まで輸送する必要がある。このような廃LIBの輸送の問題を解決するため、自動車解体場など世界各地で実施可能な廃LIB失活処理技術の開発を行っている。

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

社会人向けWeb講座

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

2020年秋からは、非鉄製錬分野をはじめとする各社から計25名の受講者を迎え、第4期のプログラムを開始した。本プログラムは、熱力学や電気化学などに関する4つの科目で構成されており、受講生はインターネットを利用して必要ときに何度でも講義を視聴することができる。また、前期・後期の最後には、京都大学や京都近郊のセミナーハウスにて期末試験が行われ、各科目の習熟度を確認できることも特徴である。2021年の秋からは、第5期プログラムを開始する。

高校生のための出前授業・実験教室

未来を担う人材の育成のために、高大連携の教育・啓蒙活動にも力を入れている。スマートフォンやパソコン、自動車などのハイテク製品を製造するには、銅、鉛、亜鉛、金、銀など多種多様な非鉄金属が必要不可欠である。日本国内の製錬所では、海外から輸入した鉱石を原料として、これらの非鉄金属が製造されている。また、非鉄金属の製錬所は、都市鉱山のリサイクルや廃棄物の処理にも重要な役割を果たしている。本講座では、これらの非鉄金属の製造方法と現代におけるその高い技術、および非鉄金属産業が資源循環型社会の構築に果たす役割を知ってもらうため、出前授業や実験教室などを行っている。2020年度は、京都大学ELCASへの協力としてオンライン講義「レアな金属の分離法とレアじゃないレアメタルの話」を行った。

教授（兼任）	宇田 哲也
特定准教授	安田 幸司
助教（兼任）	岸本 章宏

エネルギー科学研究科 エネルギー社会・環境科学専攻

社会エネルギー科学講座 エネルギー社会工学分野

研究室の現状 (2021年7月現在)

博士課程学生5名(内留学生 インドネシア, カンボジア, フィリピン, イラン, チリから各1名), 修士課程が15名(内留学生はインドから1名, ミャンマーから1名), 学部学生6名にスタッフ4名を加えて総勢31名(内女性4名). 10月にはインドネシアから研究生が1名, 研究室内のセミナーも英語で行うなど, グローバルな環境の下, エネルギーシステムからエネルギー・環境に関連する材料開発に至るまで幅広く研究を行っている.

最近の研究から

2021年9月に学位を取得予定のMeng Sopheak 君の研究について紹介する. Synthesis and Characterization of BiVO_4 -based photocatalysts (BiVO_4 ベースの光触媒の合成と特性評価) 太陽光エネルギーの有効利用はカーボンニュートラル社会の基盤技術として注目されている. その中で光触媒は有害物質の分解, 二酸化炭素分解から水分解まで多くの応用があり期待される現象である. 光触媒材料の中で特に近年注目されているものの一つに, 可視光領域に対応するバンドギャップを有する BiVO_4 がある. しかしその特性はまだ十分解明されておらず, 複合化による機能強化など多くの研究の余地がある. 本論文ではKClを用いた水熱合成法により BiVO_4 を合成し, KClの添加量が及ぼす光触媒能への影響を調査するとともに, SnS_2 との複合化を試み, その特性を詳細に検討した.

- (1) KCl添加量と BiVO_4 の形態と光触媒能との関係を調査し, 3 mmol ($\text{Bi}:\text{Cl}=1:3$ 相当) 添加した際に合成される十字形状(図1)のものが最も高い触媒能を示すことを見出した. その要因は酸素欠損量に起因しており, 酸素欠損量は異なる雰囲気化にて焼鈍を施すことにより制御できることを見出した.
- (2) $\text{BiVO}_4/\text{SnS}_2$ 複合光触媒を合成し, 詳細に調査したところ, 界面に Bi_2S_3 が存在していることを見出し, $\text{SnS}_2:\text{BiVO}_4$ が1:0.03のとき最も大きな光触媒能を示すことを発見した. またその原因についてZスキームモデルにより説明し, Bi_2S_3 が重要な役割を果たしていることを示した.

- (3) これらの結果を踏まえて, 最適化した十字形 BiVO_4 と SnS_2 を複合化することにより高機能な光触媒を合成することに成功した.

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

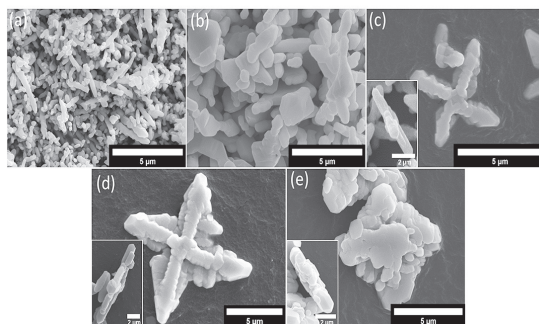


図1 KCl添加量と BiVO_4 の形態. (a)-(e) は $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 1mmol に対してそれぞれKClを0,1,2,3,5mmol添加した. (c)(d)(e)の左下挿入図は粒子側面を示す.

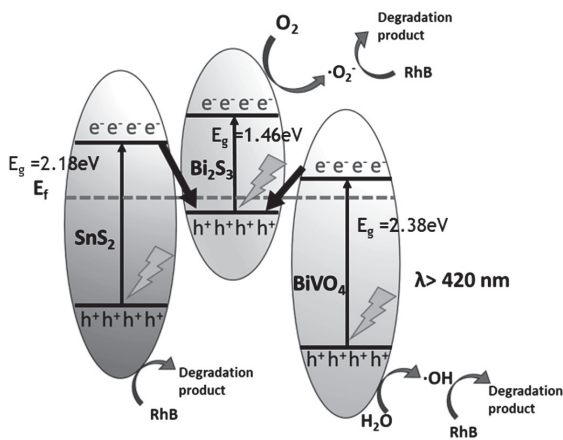


図2 $\text{BiVO}_4/\text{Bi}_2\text{S}_3/\text{SnS}_2$ 複合光触媒の電子・ホール移動機構.

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****ナノ結晶、量子ドットとその複合フィルムの作製**

- i) フランス ボルドー大学 Reiko Odaグループほかとの共同研究により、らせん状シリカを足場としてその表面にペロプスカイト CsPbBr_3 ナノ結晶を固定化した複合体を作製した。 CsPbBr_3 ナノ結晶シリカがトルエン中に分散したコロイド溶液状態の場合には、円偏光二色性 (CD) と円偏光発光 (CPL) は確認されなかったものの、キャストフィルムとして固体化すると、らせん状シリカの右巻きと左巻きに相応する CD と CPL が観測された。また、CPL を示す固体フィルムを溶媒 (トルエン) に浸すと CPL が消失し、再度乾燥させると CPL が復元することが確かめられた。この現象について、斜入射小角 X 線散乱法 (GISAXS) や透過型電子顕微鏡観察 (TEM) による 3 次元構造評価を行った結果、固体フィルム中では CsPbBr_3 ナノ結晶の粒子間距離が近く ($< 1.2 \text{ nm}$)、らせん状シリカに沿って CsPbBr_3 ナノ結晶がスパイラル配列構造を形成していることがわかった。一方、コロイド溶液中では CsPbBr_3 ナノ結晶の粒子間距離が比較的遠く ($> 5.6 \text{ nm}$)、スパイラル配列構造を形成していないことが判明した。また、Coupled Dipole Method (CDM) によるシミュレーションを行ったところ、 CsPbBr_3 ナノ結晶の粒子間距離が 1 nm から 4 nm へと遠くなると CD 信号が 10% 以下に低下することがわかり、実験結果を支持する結果が得られた。すなわちナノ結晶間距離が短くなることにより、隣接するナノ結晶との電子カップリングが促進され、その結果、電子軌道の重なりが増え、らせん状シリカを足場としていることに基づくキラリティの転写が有効に発現したものと考えられる。
- ii) 中国 蘇州大学 Wanli Ma グループほかとの共同研究により、量子ドットの表面に付いている配位子を部分的あるいは全部置換すると、分散度の調節や、メニスカス方式の Convective Deposition 法でナノ結晶をナノ空間に充填する際の駆動力となる表面張力を調節でき、 PbS 量子ドットを ZnO ナノロッドアレイのインターロッド空間へ稠密充填させることを実現できた。

**電界紡糸 (エレクトロスピンニング) 法を駆使した
機能性ファイバーの作製**

光触媒自身が繊維状になった酸化チタン中空ナノファイバーを電界紡糸 (エレクトロスピンニング) 法により作製し、この中空酸化チタンナノファイバーに、アゾ染料の一つであるメチルレッドを鑄型分子として形と大きさが鑄型分子に一致する空間を形成させる手法である分子インプリント法を適用し、メチルレッドへの分子認識特性を付与させることによる光分解反応効率向上及び選択性発現を確認した。基質の取り込みと吸着サイトにおける分解反応の速度論解析を行い、触媒を固定化したリアクターについて、タイキングモンクット工科大学トンプリ校 Surawut Chuangchote グループ及びタイ国立科学技術開発機構 (National Science and Technology Development Agency) Verawat Champreda グループとの共同研究を進めている。

中赤外自由電子レーザーによる格子振動の選択励起

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 大垣英明グループとの共同研究) による光学的 (非熱的) な直接的フォノン・モードの選択励起の研究を継続している。中赤外光源による励起と可視パルスレーザーによるアンチストークスラマン散乱による観測、それぞれの分光系に高次の過程を取り入れることにより、このフォノン分光法の適用範囲を広げるべく模索している。ダイヤモンドの赤外不活性な振動モードの選択励起に加えて、チタン酸ストロンチウム、酸化チタン等における、ラマン不活性なモードの選択励起とアンチストークス・ハイパーラマン散乱による観測に着手した。

動的光散乱法を用いた溶液中ナノ粒子のサイズ評価

液中に分散したナノ粒子の粒径を液中に存在した状態のままで知るために、動的光散乱法による液中に分散させた半導体量子構造のサイズ効果の研究に着手している。イオンサイズの大きなイオン液体中の輸送現象への展開も進行中であり、計算と実験の両面からのアプローチを行っている。

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

水和物を添加したイオン液体からの アルミニウム-タングステン合金電析

Al 合金は、耐食性、耐酸化性に優れていることから、コーティング材料としての需要が高まっている。Al 合金の成膜技術として電析法が注目されており、イオン液体 (IL) をはじめ、様々な非水系電解液が開発されている。しかし、Al の耐食性や耐酸化性を高めるために有用な W や Mo の塩は、Al 電析浴への溶解度が低いため、これらの元素を高濃度で含む Al 合金の電析は困難である。我々は、W (II) 塩 W_6Cl_{12} が、1-エチル-3-メチルイミダゾリウム (EMIC)- $AlCl_3$ IL に高濃度で溶解し、W 含有量の高い Al-W 合金が電析可能になることを報告した¹⁾。しかし、使用された W_6Cl_{12} は合成過程で水を含むことが判明し、その水分が W_6Cl_{12} の溶解度を高めていた可能性が疑われた。

そこで、含水率の異なる3種類の W イオン源 (Fig.1) を用い、W イオン源の IL への溶解度に及ぼす水分の影響を調べるとともに、これらの W イオン源を添加した浴から Al-W 合金の電析を試みた。

EMIC- $AlCl_3$ IL 中の各 W イオン源の飽和濃度は、無水 W_6Cl_{12} では 1 mM 以下であったのに対し、 $W_6Cl_{12} \cdot 2H_2O$ および $(H_3O)_2[W_6Cl_{14}] \cdot 7H_2O$ では、それぞれ 80 および 120 mM にまで上昇した。これらの W 塩が溶解した浴を用いて 0 V vs. Al/Al (III) より卑な電位で定電位電析を行った結果、Al と W からなる電析膜が得られた。得られた膜の W 含有率は、無水塩浴、水和錯体浴のそれぞれで 1, 15 at.% であり、電析の電流効率はいずれの浴においてもほぼ 100% であった。水和錯体浴から得られた電析膜の EDX, XPS 測定から、電析膜中の Al と W は金属状態で存在していることがわかった。水和物を W イオン源として用いることで、無水塩を用いた場合よりも、高 W 含有率の Al-W 合金が電析可能になることが明らかとなった。

1) Shota Higashino, et.al., Journal of the Electrochemical Society, 164, D120 (2017)

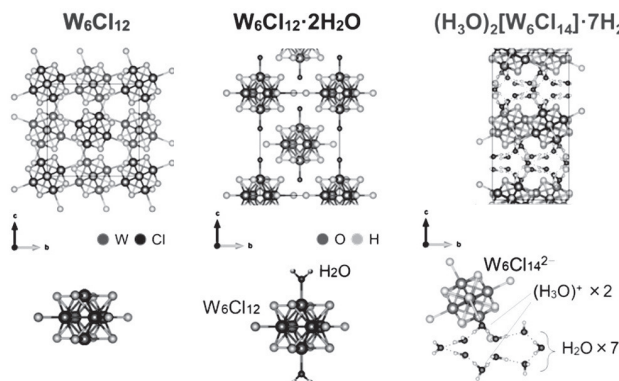


図 1 無水 W_6Cl_{12} 、 $W_6Cl_{12} \cdot 2H_2O$ および $(H_3O)_2[W_6Cl_{14}] \cdot 7H_2O$ の結晶構造

ミストデポジション法による 全無機型ペロブスカイト太陽電池の作製

次世代の太陽電池としてペロブスカイト結晶を用いる太陽電池が期待されている。 $CH_3MH_3PbI_3$ に代表される有機カチオンを含むペロブスカイト材料では、20%を超える太陽電池が報告されている。ところが、有機カチオンを含むことで耐熱性・耐久性に課題があるため、全無機型のペロブスカイト材料として耐熱性・耐久性を向上させる取り組みが行われている。一方で、全無機型のペロブスカイト材料も高い光学特性を有することが示されているにも関わらず、全無機型ペロブスカイトを用いた太陽電池特性は低いのが現状である。そこで、生産性が高く大面積化も容易なミストデポジション法を用いて全無機ペロブスカイト材料である $CsPbBr_3$ の高品質な成膜に取り組み、高効率な全無機型ペロブスカイト太陽電池への応用について検討した。

$CsBr$ と $PbBr_2$ の溶液を用いて成膜条件を詳細に検討した結果、高品質な $CsPbBr_3$ 膜の成膜手法を確立した。 μm オーダーのグレインを有する緻密な膜を大面積に形成できるようになった。次に、太陽電池の構造全体をミストデポジション法で作製することを見据えて、Fig.2(a) に示すような構造の $CsPbBr_3$ 太陽電池を作製した。AM1.5G, 1SUN の光照射条件で得られた太陽電池の電流密度-電圧 (J - V) 特性を Fig. 2(b) に示す。7.7% という最高水準の光電変換効率が得られた。特筆すべきは、約 1.5 V の開放電圧 (V_{oc}) を有していることで、これまでの $CsPbBr_3$ を用いた太陽電池と比較しても、大きな開放電圧を示している。

教授 平藤 哲司

准教授 三宅 正男

助教 池之上卓己

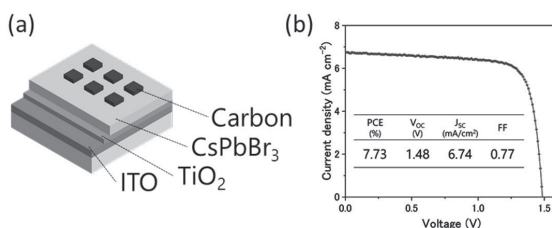


図 2 (a) $CsPbBr_3$ 太陽電池の構造および (b) 得られた太陽電池の J - V 特性

エネルギー材料学講座 プロセス熱化学分野

CaO-SiO₂系スラグのSulfide capacityに及ぼすFeO添加の影響

1. 緒 言

溶鉄からの脱硫反応が進行する熱力学的条件は、高温、高塩基度スラグ、低酸素ポテンシャルである。本研究ではスラグの硫黄吸収能をSulfide capacity, C_{S2-} を用いて評価した¹⁾。

$$\frac{1}{2}S_2 + (O^{2-})_{slag} = (S^{2-})_{slag} + \frac{1}{2}O_2 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$C_{S2-} = (mass\%S)_{slag} (P_{O_2}/P_{S_2})^{1/2} \quad \dots\dots\dots(2)$$

FeOは融点が高い塩基性酸化物であるため、スラグの液相量を増やし、 C_{S2-} を上昇させて脱硫を促進する可能性がある一方で、酸素ポテンシャルを上昇させて復硫を引き起こす原因にもなる。本研究では復硫反応抑制を目的にCaO-SiO₂系スラグにFeOを添加した時の C_{S2-} とFeO活量 a_{FeO} を測定し、硫黄分配比に及ぼすFeOの影響を調査した。

2. 実験方法

CaO/SiO₂比（塩基度C/S、質量比）を一定とし、FeO濃度を变化させた。スラグ試料とCu-Fe-S合金を実験温度で平衡させ、平衡酸素分圧 P_{O_2} を酸素センサで測定した。

S₂ガスがCu-Fe合金中に溶解する反応は次式で表される。

$$\frac{1}{2}S_2 = [S]_{Cu-Fe} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$K(3) = f_S [mass\%S]_{Cu-Fe} / P_{S_2}^{1/2} \quad \dots\dots\dots(4)$$

f_S は溶銅中の1mass% Sを標準状態としたSの活量係数²⁾である。合金組成、スラグ組成、スラグ中のS濃度($mass\%S$)_{slag}を分析した。式(4)より求めた P_{S_2} を式(2)に代入し C_{S2-} を算出した。

また合金-スラグ間のFeに関する平衡式は次のように表される。

$$Fe + \frac{1}{2}O_2 = (FeO)_{slag} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$K(5) = a_{FeO} / [a_{Fe} \cdot P_{O_2}^{1/2}] \quad \dots\dots\dots(6)$$

合金組成から求めた a_{Fe} を式(6)に代入し a_{FeO} （標準状態は純粋液体FeO）を算出した。

3. 実験結果・考察

C/S = 1.0における C_{S2-} とFeOの質量%濃度の関係を図1に示す。一定の塩基度ではFeO濃度が増加するほど C_{S2-} は上昇し、高温ほど高い値を示した。 C_{S2-} の値に関してモデル³⁾を適用することで測定値を再現できた（図中破線）。また a_{FeO} の測定結果を用いて正則溶体モデル⁴⁾のパラメータを最適化した。図2に1673KにおけるCaO-SiO₂-FeO三元系状態図⁵⁾を示し、モデルより計算した等FeO活量線図を描いた。

得られた C_{S2-} と a_{FeO} の値から、溶鉄中への硫黄の溶解反応(7)を考慮すれば、スラグ-溶鉄間の硫黄分配比 $L_S = (mass\%S)_{slag} / [mass\%S]_{Fe}$ を(8)式のように算出できる。

$$\frac{1}{2}S_2 = [S]_{Fe} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$L_S = C_{S2-} K(5) / [a_{FeO} \cdot K(7)] \quad \dots\dots\dots(8)$$

図3に1673Kにおける等 L_S 線図を示す。なおスラグ-溶鉄間の反応に寄与する酸素ポテンシャルはFe+FeO平衡で定まると仮定した。液相領域における L_S はFeOの添加率が高いほど大きくなり、FeOを含むスラグでも熱力学的には復硫反応が起こりにくいことが示唆された。

参考文献

- 1) F. D. Richardson and C. J. B. Fincham; J. Iron and Steel Inst., 178(1954), 4.
- 2) C. B. Alcock and F. D. Richardson; Acta Metallurgica, 6(1958), 385.
- 3) M. M. Nzotta, Du Sichen and S. Seetharaman; ISIJ Int., 38(1998), 1170.
- 4) S. Ban-ya and M. Hino; Tetsu-to-Hagane, 74(1988), 1701.
- 5) A. Muan and E. F. Osborn; Phase Equilibria among Oxides in Steelmaking, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, (1965).

教 授 柏谷 悦章

准教授 長谷川将克

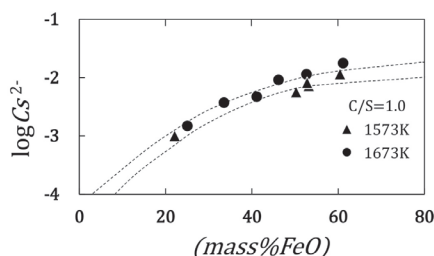


図1 Sulfide capacityとFeO濃度の関係

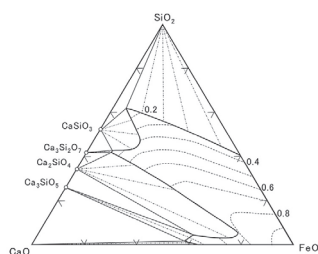


図2 1673KにおけるCaO-SiO₂-FeO三元系スラグのFeO活量

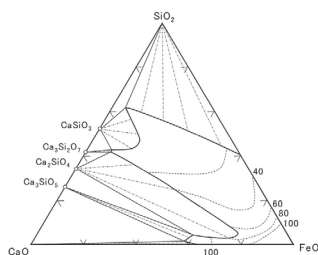


図3 1673KにおけるCaO-SiO₂-FeO三元系スラグ-溶鉄間の硫黄分配比

エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻

**エネルギー材料学講座
エネルギー応用基礎学分野****立方体集合組織Cuテープへの酸化物超伝導物質の
エピタキシャル成長技術**

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

一昨年度から $\{100\}<001>$ 集合組織純 Cu テープ上に Ni, $(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)/\text{TiO}_3$ および $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ をエピタキシャル成長させた新規な高温超伝導線材の研究を進めている。Cu テープと $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ の反応防止層として La をドーピングすることで導電性を持たせた SrTiO_3 を使用することとした。単独で Cu テープと $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 層の間の反応・元素拡散を防止する物質層は現在までに見つかっていないので, Ni と $(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)/\text{TiO}_3$ の 2 層中間層を挿入している。Ni はめっき, $(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)/\text{TiO}_3$ および $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ はパルスレーザー蒸着法により, 順次

Cu テープ上にエピタキシャル成長させた。

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

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ を成長させる条件は酸素雰囲気中, 800°C 前後と高温であるため, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 成膜中に酸素が $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7 \rightarrow (\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)/\text{TiO}_3$ 中を拡散し, $(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)/\text{TiO}_3/\text{Ni}$ 界面に到達すると界面に NiO が生成する。そこで, $(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)/\text{TiO}_3$ 中の La 濃度, 酸素濃度と導電率, 酸素拡散の速さを詳細に調べることで, $(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)/\text{TiO}_3/\text{Ni}$ 界面に NiO を生成させることなく $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ をエピタキシャル成長させる条件を見出し, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7/(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)/\text{TiO}_3/\text{Ni}/\text{Cu}$ 構造を完成させることができた。作製した試料を液体窒素に浸漬して測定した超伝導臨界電流密度は $8.2 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$, $(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x)/\text{TiO}_3$ 中間層の抵抗率は $0.13 \text{ } \Omega \text{ cm}$ であり, 実用に求められる値を十分に満足するレベルであり, 何らかの外部の擾乱が発生して超伝導状態が局部的に破れた場合 (クエンチ発生時) にも超伝導電流が中間層を通り抜けて Cu テープに回避することで, 安全性が確保できることが確認したできた。

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

教授 土井 俊哉

令和3年度水曜会大会

●日 時 令和3年6月5日（土）13:00～16:00

●会 場 Zoomを用いたオンライン会場

令和3年度水曜会大会が6月5日（土）に開催されました。今年度の大会は新型コロナウイルス感染症の感染拡大状況を鑑みてZoomを用いたオンライン形式により開催され、総会および特別講演会が行われました。正会員および学生を合わせて、133名の方々にご参加いただきました。

13時の開会に合わせてZoomのギャラリービューによる記念撮影を行いました。次に、昨年度および一昨年度に着任あるいは昇任した教員から挨拶があり、その後、総会と特別講演会が行われました。オンライン形式での開催となったことから、研究室紹介のポスター発表と懇親会は残念ながら中止となりましたが、オンラインであることが幸いし、日本全国から多数の皆様にご参加いただきました。

総会は、塚田和彦教授の司会のもと杉村博之会長より令和2年度の事業報告がありました。次に、林為人教授による会計報告と中村裕之教授による監査報告の後、林為人教授から次年度の予算案が提示され、いずれも承認されました。さらに、次期役員が推挙・承認され、新会長に選出された田中功教授が挨拶され、抱負などを述べられました。引き続いて以下の2件の特別講演が行われました。

「三井金属鉱業における鉱山・製錬から機能材料・部品への川下展開」

三井金属鉱業株式会社 取締役常務執行役員 久岡一史 氏

「カーボンニュートラルと日本の産業界の対応」

福岡大学 研究推進部 教授 堀史郎 氏

来年度の水曜会大会は、令和4年6月4日（土）に京都大学吉田キャンパス工学部物理系校舎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。



令和2年度 水曜会会計報告

令和3年3月31日現在

(単位：円)

収 入		支 出	
前年度繰越金	9,376,983	会誌印刷代（製版・封筒・郵送料込）	
会 費	3,207,000	25巻3号	1,267,916
会誌広告掲載料（製版代込）		水曜会大会経費（大会案内印刷・郵送）	831,394
25巻3号	780,000	編集委員会経費（ホームページ代含む）	37,290
名簿売上	10,500	会誌原稿料	60,000
会誌売上	1,589	通 信 費（切手，後納郵便料）	35,882
預 金 利 息	184	会費等振込手数料	167,578
物理工学科同窓会会費	232,047	事 務 人 件 費	867,280
旧金属系建物玄関前の桜の再植樹寄付	3,000	PCとプリンターの消耗品・封筒・文具代等	53,858
		小 計	3,321,198
		次年度への繰越金	10,290,105
		内訳 銀行普通預金	7,746,215
		銀行定期預金	2,500,000
		郵便振替預金	17,841
		手持現金	26,049
収 入 合 計	13,611,303	支 出 合 計	13,611,303

上記の通り会計報告いたします。

令和3年6月5日

会 計 幹 事 林 為 人

以上の通り相違ございません。

会計監事(監査) 中 村 裕 之

令和3年度 水曜会会計 予算書

令和3年6月5日（単位：円）

収 入		支 出	
前年度繰越金	10,290,105	会誌印刷代（製版・封筒・郵送料込）	
会 費	3,200,000	25巻4号	1,400,000
会誌広告掲載料（製版代込）		水曜会大会経費（令和3年6月5日）	950,000
25巻4号	700,000	編集委員会経費（ホームページ代含む）	50,000
会誌売上	1,500	会誌原稿料	50,000
預金利息	180	通信費（切手，後納郵便料）	50,000
理工学科同窓会会費	200,000	会費等振込手数料	170,000
京土会・水曜会新入生歓迎会教員参加費	5,000	事務人件費	1,000,000
		理工学科学生スポーツ大会補助	50,000
		京土会・水曜会新入生歓迎会経費	40,000
		PCとプリンターの消耗品・封筒・文具代等	50,000
		予備費	200,000
		小 計	4,010,000
		次年度への繰越金	10,386,785
収 入 合 計	14,396,785	支 出 合 計	14,396,785

会 報

京都大学大学院エネルギー科学研究科教授 宅田裕彦先生は定年退職されました。



宅田裕彦先生のご略歴

宅田裕彦先生は、1978年3月に京都大学理学部をご卒業後、同年4月京都大学大学院工学研究科修士課程資源工学専攻に進学され、1980年3月に同課程を修了、同年4月に京都大学工学部に助手としてご就職されました。1988年10月に京都大学工学部講師に、1994年11月に同助教授に昇任され、1996年4月に京都大学大学院工学研究科へ、同年5月に京都大学大学院エネルギー科学研究科へ配置換えの後、2002年4月に教授に昇任され、京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー応用科学専攻資源エネルギー学講座資源エネルギープロセス学分野をご担当されました。この間、1984年11月には「Über das Warmwalzen für die Breit-
enabnahme der stranggegossenen Brammen（連続鋳造スラブの熱間幅圧下圧延に関する研究）」によって京都大学工学博士の学位を授与されておられます。また、1985年8月から1987年3月までアレクサンダー・フォン・フンボルト財団の奨学生として西ドイツに滞在され、ミュンヘン工科大学客員研究員として研鑽を

積まれました。

京都大学にご奉職されて以来、学生の教育と研究者のご指導に当たり、多くの人材を育成されるとともに、2008年4月から2010年3月まで京都大学教育研究評議会評議員および京都大学大学院エネルギー科学研究科副研究科長、2010年4月から2014年3月まで京都大学大学院エネルギー科学研究科長を務められ、それらに伴い、教育制度委員会委員、経営協議会委員、施設整備委員会委員、企画委員会委員などを歴任されました。また、2016年4月から2020年3月までエネルギー科学系長をお務めになるなど、大学の運営にもご尽力されました。

学外においては、日本塑性加工学会および日本鉄鋼協会を主な舞台として精力的に活動して来られました。日本塑性加工学会では、関西支部長、本部理事、副会長などを歴任されるとともに、新進賞、会田技術奨励賞、学会大賞を受賞されました。また日本鉄鋼協会では、評議員をお務めになるとともに、澤村論文賞

を2度受賞されるなど、塑性加工学の分野における学術発展に大きく貢献されました。その他、独立行政法人大学改革支援・学位授与機構 国立大学教育研究評価委員会専門委員を2度にわたりお務めになられました。

宅田裕彦先生は、これまで約40年間にわたって金属材料の塑性加工プロセスに関するご研究に従事され、数多くの成果を挙げておられます。その代表的な業績のひとつが、連続鋳造-熱間圧延工程間の省エネルギー、省工程化に関する研究です。この研究では、スラブの再加熱なしに連続鋳造と熱間圧延の両工程を直結化する、いわゆる直送圧延、さらに熱間圧延を省略してロール間で溶鋼から直接薄板を鋳造する、双ロール式薄板連続鋳造について、材料の凝固、変形および温度変化を数値解析により解明され、これらの実用化に大きく貢献されました。とりわけ、連続鋳造スラブの幅変更のための幅圧下圧延における材料の3次元変形の有限要素解析に関するご研究は、幅圧下圧延設備設計に対して多くの重要な指針を示されました。これらは、わが国のエネルギー消費の10数%を占めるエネルギー需要産業である鉄鋼業における省エネルギー促進に資する成果として、学術的・実用的に高く評価されています。このほか、板材の成形性向上および軽量化に関する一連のご研究も高く評価されている成果のひとつです。この研究では、低密度材料であるアルミニウムおよびマグネシウム合金板、高強度材料である高張力鋼板といった軽量板材について、塑性加工における成形性向上のための最適な圧延、焼鈍方法などを実験的に調査されるとともに、延性破壊条件式と有限要素解析の組み合わせによる成形限界予測法を提案されました。ご提案された予測法は広範囲な板材の成形限界予測を可能にするものであり、国内外の学術論文で数多く引用されるとともに実用化されるなど、当該分野の発展に多大な貢献をされております。

以上のように、宅田裕彦先生はこれまで金属材料の塑性加工プロセスにおける広範な課題を対象として丁寧なご研究を展開され、その斯学の発展に多大な貢献をされるとともに、実用化を通じた社会貢献を常に視野に入れて指導的役割を果たして来られました。これらの功績は誠に大きく、国内外で高く評価されております。

研究室および卒業生を代表して、これまでの宅田裕彦先生のご指導とご高配に深謝申し上げるとともに、今後ともご健勝で一層のご活躍をされることを祈念申し上げます。

浜 孝 之

(資源エネルギープロセス学分野 教授(2021年4月より))

宅田先生のご退職に寄せて

馬 潤 守

宅田先生と初めてお会いしたのは、私が学部3回生の時でした(宅田先生は助手でした)。当時は3回生後期から仮配属として研究室に配属されていました。中二階に学生部屋があり、一階が実験室になっており旋盤等工作機械が所狭しに置いてありました。そんな実験室で宅田先生をお見かけしたのが最初でした。旋盤の機械が小さく見えるほど、ゴツイ体格をした先生だというのが最初の印象でした(大変申し訳ありません)。そのことを先輩に話したら、「お前、“アメフトの宅田”を知らんのか!」と研究室破門と言わんばかりに言われたのをよく覚えています。恥ずかしながらその時はクォーターバック(QB)って何?という具合でしたので、宅田先生が学生時代に京大アメフトの名QBとしてご活躍されたことを全く知りませんでした(再び大変申し訳ありません)。それ以来アメリカンフットボールを勉強(?)して、今ではスーパーボウルやライスボウルはテレビにかじり付いて見えます。

大学を卒業後会社に就職しましたが、縁あって宅田先生とエネルギー科学研究科で一緒に仕事をさせて頂く機会を得ました。西も東もわからない私に、いろいろ教えていただき大変感謝しております。宅田先生と一緒に仕事をさせて頂いて印象に残っていることは、宅田先生が研究科長を就任された時の所信表明です。「エネルギー問題解決に向けて信念をもってやってください、云々」。余分なことは言わず、ストレートに本質を突く、宅田先生の真骨頂!と心の中で拍手を送ったことを覚えています。

宅田先生がご退職されて数か月が経ちましたが、宅田先生の存在の大きさが今更ながら気づかされます。先日、ある問題が生じたときに、宅田先生ならどうされただろうと考えている自分がいました。コロナ禍の影響で、ご退職のお祝いが一切できませんでした。それが心残りです。この記事が世に出る頃にはコロナが終息し、ご退職のお祝いができていることを切に希望しています。

(資源エネルギーシステム学分野 教授
昭和60年学部卒/昭和62年修士了)

宅田先生とビール

藤 本 仁

宅田先生とは、私が4回生になって加工設備学講座に配属されて以降、学生として、その後、後輩の教員として実に30年あまりの長きにわたって一緒に過ごさせていただきました。この間、大学の本部構内では建物の耐震工事や建て替えがすすみ、さらに自動車の入構制限の実施によって、見栄えの良いキャンパスに変わっています。長らく研究室のあった工学部6号館分館も今はありません。

その一方で、宅田先生の「ビール好き」は全く変わっていないように思えます。先生が若かりし頃、研究室の飲み会は「ちくわ」という店が定番でした。口のまわりに泡のひげをこしらえながら、いつも浴びるようにビールを飲まれていました。宅田先生のペースに合わせて飲める学生は、なかなかいなかったように思えます。宅田先生の留学先であったドイツのミュンヘン工科大学の話、ミュンヘンで毎年秋に開催されるビール祭り（Oktoberfest）、オペラ、フットボールなど、いろいろなことを聞きました。

数年前、私がある宴席を設けることになり、宅田先生にどのような店が良いかお尋ねすると「最近は、そんなに飲めない」と言いながら「ビールがたくさん飲める所がいい」というリクエストを受けました。相変わらずであるなあと感じたものです。



工学部6号館の中庭から撮影した6号館分館（2013年1月撮影）

コロナ禍でドイツの Oktoberfest が2年連続で中止になったというニュースを見て、このようなことをふと思い出しました。私から見た宅田先生は、兄のように頼りがいのある方です。「人とは仲良く」というのがモットーで、実にいろいろなことで助けていただきました。大変お世話になりました。この場をお借りして、感謝申し上げます。

（ミネラルプロセッシング分野 教授
昭和63年学部卒/平成2年修士了）

宅田先生のご退職に寄せて

藤 村 隆 志

宅田先生、この度はご退職おめでとうございます。心よりお祝い申し上げます。

先生には、学部、大学院修士課程、社会人博士後期課程と、多大なるご指導を賜りました。この場をお借りして改めて厚く御礼申し上げます。

先生と私の出会いは1987年、大学2回生の時に研究室配属の話が出てきた際と記憶しています。当時、私は体育会のクラブに所属していました。したがって私からすれば、宅田先生は配属先の研究室の先生であるとともに、体育会のご経験のある先生であったので、とても身近で頼りになるであろう先生という見方でした。そして、それが現実のものとなりました。

「超塑性」をテーマにした卒論・修論では、直接論文をご指導いただく中で、学術的な内容は勿論のこと、私見ですが先生の代名詞であるダイナミックな技術的ものの考え方を、先生に教えていただきました。大学を卒業してから私は、研究室の中では卒業後の王道とでも申しましょうか、鉄鋼メーカーに就職したわけですが、先生に教わった「ダイナミック思考」を、しっかりと自分のやり方として体に染み込ませて仕事をしている自分に改めて気付いたと思います。

「鉄道車輪の製造プロセス最適化」をテーマにした博論では、先生にとって新分野であった鉄道車輪の世界に入り込んでいただき、親身になってご指導いただいたからこそ、無事博士号を取得できたと思います。至らぬ点が多々あったかは存じますが、宅田先生にご指導いただいて本当によかったと感じております。

一方、先生からみた私の印象は、今となっては「おもしろかった世代のまじめな奴」という表現が最も適切ではないかと考えております。ここでその理由を詳しく説明すると長文になりますので差し控えますが、決して世間一般の「まじめ」ではなかったこの私が「まじめな奴」に映るほど、当時の研究室は「はちゃめちゃ」な世代が続いていました。そして、そういった世代で

あったからこそ、まだお若い頃の先生と一緒にゼミ旅行に行ったり、研究室対抗の野球に主力として加わっていたいたり、一線を画しきっていないながらも、先生と学生の美しい人間関係が築かれていたように思います。

一つ思い出話をさせていただきます。先生は私が研究室配属になった頃、ママチャリで通勤されていました。運転免許をお持ちではなかったからです。私が社会人になったばかりの頃であったと記憶しておりますが、先生はついに運転免許を取得されました。世間一般の考え方としては、原動機付き自転車すら運転経験のない初心者は、最初に少々傷がついても惜しくない車を所有し、自分の運転スキルや同乗者などの状況、そして財布を見ながら、車をグレードアップしていくものと理解しておりますが、先生は違いました。初心者マークであった先生が仰ったのは、「やっぱり車はベンツやろ」でした。そして先生はそのダイナミック思考を有言実行されたとうかがっております。

ご退職記念祝辞として相応しくない「はちゃめちゃ」な内容になってしまい誠に恐縮ではございますが、私にとって「ダイナミック思考」の恩師であり、ある意味身近な存在であった宅田先生がご退職されたことは本当に名残り惜しく、まだまだ先生から教えていただきたいことが多くあるような気がいたします。

ご退職まことにおめでとうございます。末永きご多幸と益々のご健勝をお祈り申し上げます。

(Standard Steel, LLC (日本製鉄㈱より出向中))

平成元年学部卒/平成3年修士了/令和元年博士了)

宅田先生のご退職に寄せて

久 保 雅 寛

宅田先生は、私がまさに目標とする研究者です。宅田先生の退職に寄せて、ここで先生との思い出を振り返りたいと思います。

私が宅田先生に初めてお会いしたのは15年前のことです。当時3年生であった私は、資源工学コースを選択し、専攻科目の講義を受けたときだと記憶しております。教室の隅でも聞きやすくわかりやすい、声量ある声で講義をされていたのが印象に残っています。このような授業での印象に加え、金属加工や流体プロセスといった研究内容、さらには吉田地区にある研究室ということで、宅田研究室を志望し、無事希望が叶い、4年生で入室することができました。私は、その後の学生時代、宅田先生が直接ご指導されている塑性加工分野ではなく、藤本先生のもとで流体力学の研究をしていましたが、ゼミや発表の予行練習などで、わ

かりやすく報告を伝えるための的確な指導をいただきました。いまでも、先生に教えていただいたわかりやすく伝える大切さを身にしみて感じながら、私は会社での研究開発業務を行っています。

宅田研究室のモットーは、一言でいうと「よく遊び、よく学べ」でした。当時は徹夜で研究をする研究室もありましたが、宅田研は宿泊禁止、必ず家に帰ることというルールがあり、さらにはフレックスタイム制が導入されていました。近年よく言われるライフワークバランスの推進が学生時代から図られていたように思います。宅田先生は、研究だけではなく、スポーツにおいても有名で、アメフトの学生の指導なども精力的にやられておりました。研究の忘年会やその2次会では、先生が学生時代にアメフト選手であった時の武勇伝を伺い、ともにお酒を飲んだことが思い出されます。

宅田先生に本格的に研究のご指導をいただくことになったのは、5年前に社会人Dr.として、また宅田研にお世話になった時でした。宅田研の出身という縁もあってか、当時の新日鉄において塑性加工の研究開発を担当することになり、会社の研究テーマをもとに、宅田先生と浜先生に、投稿論文・博士論文についてまたご指導をいただけることになったのは大変幸せなことでした。論文のストーリーや実験結果をどう説明するかなど深く議論させていただきました。また、英語論文の書き方について一文一文、「これはどういうことがいいんや?」、「わからん、説明しなおい」などご指導いただき、そのご指導のお陰でなんとか論文を仕上げるのができ、学位を取得することができました。宅田先生のご指導のもとで得られた、研究遂行・論文作成のスキルは、今でも貴重な宝物であると確信しています。教えていただいたことを糧にし、企業研究者として日々精進して参ります。

最後になりましたが、この度のご退職にあたり、これまでのご指導に改めて感謝を申し上げますとともに、宅田先生の益々のご活躍をお祈り申し上げます。また、今後ともご指導・ご鞭撻の程、宜しくお願い致します。(日本製鉄株式会社)

平成20年学部卒/平成22年修士了/平成30年博士了)

宅田先生のご退職に寄せて

大 橋 美 和 (旧姓:割鞘)

宅田先生、定年退職おめでとうございます。最後の宅田先生直下の学生としてご指導いただき、ありがとうございました。

宅田先生との思い出を振り返ると、配属初日に「男

しかなかったから何か困ったことがあれば、秘書のお姉さんに言いなさい」と言われたことや「女の子だから危ない、早く帰きなさい」と言われたこと、ホワイトデーの合唱チケットをもらったこと、教授室で歌っていたこと、昼過ぎに研究室に行って怒られたこと、数え上げるときりがありません。勉強面だけでなく、女性だからということもあり、宅田先生にはとても心配をかけたと思いますが、おかげで無事、何事もなく卒業することができました。そんな日々を振り返る中で真っ先に思いつくのが宅田先生の誕生日です。

私が修士1回生の時、ちょうど還暦を迎えられました。誕生日が4月でしたが、年度末から「誕生日はやるな」、「赤いちゃんちゃんこはいらない」と言われ、どうしたものかと頭を抱えましたが、せっかくの節目ということもあり、何としても驚かせたい一心でこそそと準備を始めました。

OBの方からお祝いを集めようと思い、水曜会の名簿をめくり、研究室のOBに手当たり次第にメールを送りました。後にも先にも私があの名簿をめくったのはこの時だけです。せっくなので、宅田研・宅田先生らしいテンプレートも用意しようと、試験片、液滴、アメフトボールや音符を作成し、案内文と一緒に発信しました。気がつくと1988年卒から2015年卒の方まで幅広い年代の50名近くの方から宅田先生へのお祝いをいただくことができ、宅田先生に満面の笑みで受け取っていただきました。おそらく研究室のハードディスクのどこかにまだ当時の写真や色紙が残っているかもしれません。ご協力いただいた皆様のおかげで、宅田先生のベストスマイルを見ることができました。ご協力いただき、ありがとうございました。この場を借りて改めてお礼申し上げます。

当時、先生の退職までまだ5年もあると思っていましたが、気付くとあっという間に退職の年を迎えておりました。卒業して4年ほどは毎年、研究室に伺っておりましたが、県をまたぐ移動の自粛が求められているため、退職時には訪問できず、最後の姿を見ることができなかったことが、非常に残念です。また、退職記念のイベント等が全くできなかったと聞いています。この状況が落ち着いたところで最終講義だけでも聞ける日が来ることを心から願っています。

最後になりますが、長い間、本当にお疲れ様でした。退職後もスポーツに合唱にと変わらずお元気にお過ごしください。京都に行った際、またお会いできることを楽しみにしております。

(所属：JFEスチール株式会社
平成26年学部卒/平成28年修士了)

宅田裕彦先生の御退職に寄せて

月 原 啓 志

この度は定年での御退職、誠にとおめでとうございます。昨年(2020年)3月に私が修士を卒業する際には「お前らとその下を見届けて終わりや」とおっしゃっていましたから、今年は先生の退職記念行事並びに講演会を盛大に執り行われるのだらうと想像するとともに、直近の卒業生として準備をお手伝いできるのかなと思っておりました。しかしながらコロナウイルス感染症に起因する予断を許さぬ情勢により華々しくお祝いできないこと、とても寂しく感じます。

今思い返してみると、科学者としての立ち振る舞い、中でも話し方について、私は宅田先生から多くのことを教えていただいたと感じます。学部3回生の時に初めて受けた講義にて、先生は実に明朗闊達にお話しされていました。今なら教室のどこからでも聞き取れる声量と冗長さを極力排した話し方が要諦であったとわかりますが、当時の私はただとても分かりやすく思ったのみでした。そんな私が学部4回生となり幸運にも宅田研に配属されたときには、先生は既に退職を見据えてか、藤本仁先生と浜孝之先生の両先生およびその下につく私たち学生のサポートを主としていらっしゃいました。ですので私は浜先生に直接指導いただいておりました。しかしながら、宅田先生と少し距離があったからこそ、先生の前で行う発表にはとても緊張するとともに、科学者らしい話し方を学ぶことができたのだと思います。特に卒論発表に向けた研究室での発表練習会において、先生から受けた「研究内容云々よりも、まずそのテレビショッピングみたいな話し方何とかせえや」というお叱りは今も心に残っております。すなわち、ただ流暢に話すだけでは学術的な発表にならず、そのような発表のためには簡潔かつ必要十分に情報を伝え、そして語尾表現にも気を付けた話し方をする必要がありますと気づくことができました。そのおかげもあって、十二分に準備を整えた学会発表では賞をいただくことができました。実は学会発表の直後に先生は「よかったぞ」とおっしゃっていたことから、もしかしたら発表の出来から受賞することを予見していたのかもしれないと思っております。一方で学部新入生に向けた別の発表では、自分としてよく準備できた部分とそうでない部分をきっちり見抜かれてしまい、やはり先生の前では下手な発表は出来ないと再認識したこともありました。もっとも、先生の前で行う最後の発表となった修論発表では、自分の出来る限りの準備をして臨んだにもかかわらず「わかりやすい発表ではあったが質疑応答ではけむに巻かれたような気がす

る」という感想をいただきました。結局よかったのか悪かったのか、科学者らしい発表ができていたのかどうか、機会があれば先生にお聞きしたいものです。

私が宅田研を卒業してから1年以上が過ぎましたが、過去の文献を調べるごとに先生の名前が目に入ります。そのたびに先生の活躍のほどを実感するとともに、そんな活躍ができる科学者になれるよう自分の日々の業務を頑張ろうと気を引き締めています。最後に改めまして、宅田先生、定年での御退職、誠にめでとうございます。先生の益々のご健勝とご活躍をお祈り申し上げます。

(株式会社神戸製鋼所
平成30年学部卒/令和2年修士了)

宅田裕彦先生のご退職に寄せて

浜 孝 之

2004年10月に宅田研究室の助手として採用いただいてから宅田先生のご退職されるまでの長きにわたり、大変お世話になり誠にありがとうございました。これまでいただいたご厚情、ご支援、ご高配、そしてご尽力に対して感謝申し上げるのはこの寄稿文だけでは全く足りませんが、その一端でもお伝えできればと思い筆を執りました。

まず思い出されるのが、私が宅田研究室の助手に採用いただく際に宅田先生からいただいた、「大学にいる時間の90%は教育・研究に使いなさい。」という言葉です。着任してから准教授に昇任するまでの間、まさに文字通りの環境で教育・研究に没頭することができたのは、本当に幸せでした。ポストの任期や予算獲得、学内業務等に忙殺されスピード感が求められる最近の若手研究者から見ると、垂涎ものの恵まれた環境だったと思います。実は宅田先生の若手に対するこのようなスタンスは、先生が執筆されたエッセイ記事[塑性と加工, 43-503 (2002), 1119.]でも余すことなく書かれております。この記事を読んだ他大の知り合いからは、当時しきりに羨ましがられたものです。この環境なくして今日の私がなかったのは言うまでもなく、これもひとえに“有言実行”の宅田先生のおかげと、今でも感謝しております。

宅田先生は、研究室では普段多くを語る方ではありませんでしたが、私はその背中をみてさまざまなことを学ばせていただきました。学内業務の円滑な進め方、予算の使い方、(ケアを要する)学生への対応など、宅田先生から(こっそり)学んだ点は枚挙に暇がありません。ただ、私がお酒を全く飲むことができないた

め、お酒の嗜みだけは学ぶことができなかったのが悔やまれます。逆に、夜の席で私がお酒を勧められた際、宅田先生が「彼の方は私が飲みますから!」とさりげなくフォローして丸く収めた下さったことをよく覚えています。

宅田先生はオペラにも造詣が深いことは、読者の皆様はよくご存じのことと思います。海外出張でも、業務後の余暇を有効にオペラ鑑賞に当てられるなど、万全なスケジュールリングにはいつも舌を巻いておりました。そんな中、私も一度だけ海外出張で宅田先生と余暇のオペラ鑑賞をご一緒させていただいたことがあります。立ち見の自由席だったのですが、入場してから目当ての席までの一寸の隙も無いコース取りや休憩場所の確保、終演直後の誰よりも早い「ブラボー!」の掛け声など、私にとっては異次元のことばかりで圧倒されっぱなしだったことも良い思い出です。

宅田先生のご退職されてからは研究室のスタッフが私一人となり、研究室運営や学生対応など、あらゆることを自ら判断する立場となりました。まだまだ不慣れな中、様々な局面で、宅田先生だったらどのようにご判断されているか、と考えている自分にふと気づくことが良くあります。宅田先生の背中をみて学んだことを思い出し、今後の教育・研究に活かしていきたいと思っています。また学んだ多くのことを、今度は私が次世代へ伝えていくのも大きな責務であり、精進してまいります。今後とも、温かく見守っていただければと存じます。今まで本当にお疲れ様でございました。これまでのご配慮に改めて感謝を申し上げますとともに、引き続きのご健勝をお祈りして、筆を置かせていただきます。

(資源エネルギープロセス学分野 教授(2021年4月より))

会 報

京都大学名誉教授倉知三夫先生は令和3年1月19日に享年93歳にて逝去されました。ここに先生の生前のご功績を偲び、謹んで哀悼の意を表します。



倉知 三夫先生の御略歴

昭和22年 3月 京都大学工学部冶金学科を卒業
昭和28年 同大学院研究奨励学生
昭和32年 10月 京都大学工学部冶金学科助手
昭和37年 3月 同助教授 工学博士（京都大学）
昭和63年 10月 教授 電気冶金学講座担当
平成2年 京都大学名誉教授

この間永年に渡り学生の教育と研究者の指導に尽力され、多くの人材を育成されました。

先生はマンガンやクロムの硫酸塩水液から高純度金属マンガンや高純度金属クロムを効率よく電解抽出する方法について基礎的電解条件を明らかにされ、わが国における金属マンガン、金属クロムの電解製造工業の創出と発展に大きく寄与されました。また

従来、電気鍍金は単一金属の電解析出法が一般でありましたが、先生は2種の金属の電解析出法を着想され、ニッケル-亜鉛、ニッケル-カドミウム、ニッケル-錫、銅-亜銅等の合金の電解析出法に関する基礎的研究を行われました。現在、ニッケル-亜鉛合金組成の電気鍍金は防錆の効果が高く自動車産業で多用されていますが、その先鞭を開かれたものであります。また鉱山における金属精錬工程の実地調査を行い、各工程の排水処理について改善対策を示し、この実施により河川水質が格段に改善されるという、多大な成果を挙げられました。

このように先生は電気冶金学、金属電気化学、金属工業排水処理の専門分野において斯学の進歩に大きく貢献されました。また、学外においてはハルピン工業大学応用化学系の招へい教授等を歴任され、ハルピン工業大学名誉教授の称号を受けられました。

倉知先生を偲んで

今 井 庸 二

私が倉知三夫先生の研究室(当時は「金属電気化学」研究室という名称でした)に卒業研究を行うために配属されたのは、昭和47年4月でした。

先生は昭和28年に冶金学科の西原研究室(電気冶金学講座?)を卒業され、そのあと金属クロムの電解製錬に関する研究で学位を取られたと聞いています(すみません、私も少々毫碌してきていて、記憶間違があるかもしれません。ご容赦ください)

倉知先生から伺った先生の学生時代の話として、『実験を続けていても全くうまくいかず、少々あきらめ気味であったところ、ある日、たまたま昼休みのレクリエーションの野球が長引いて、午前中に調製していた電解浴を長時間放置したままになり、そのあと実験に取り掛かったら、初めて成功した。それで、原因を調べてみたら、電解浴の放置によってある種のイオンの会合が起こることが成功のカギであった。参照していた論文や特許にはそのようなことが全く書いてなくて、初めてキーとなる事実が分かった』とのことでした。今の言葉でいうとセレンディピティです。たしか、白川英樹博士のノーベル化学賞(導電性高分子)にもそのような逸話(想定外に高濃度の触媒?を実験ミスで誤って用いたらうまくいった)があったと思います。世の中の素晴らしい研究には、もちろん不断の努力が必要で、その場合にもみ幸運の女神がほほ笑むのだということを教えられた気がします。

当時、金属電気化学研究室には「濃厚電解質水溶液の熱力学物性」「合金の電気化学」「金属表面工学(表面処理と腐食)」の3グループがあり、私自身は大学院生の時、合金のグループに属していましたが、先生からは「電気化学のみにとらわれすぎず、金属の視点が重要」と教えられ、勉強するように指示されたのは電気化学のテキストのみならず金属物性のテキストでした。当時はHume-Rotheryの経験則やMottの解釈がまだまだ幅を利かせていた時代で、そのあとEngel-Brewerの理論がようやく人口に膾炙しようとしていた時代です。物性の専門家ならいざ知らず「(古臭い?)冶金学」の研究者がこのような知見を蓄えられていたことなど、私自身が密度汎関数法の計算に手を染めるようになった1990年代中盤になって、ようやく時代を超えた偉大さに気付いた次第です。

一方では、先生は「大学は孤高の塔であってはならない」ということを絶えず実践され、神岡鉱山のイタイイタイ病の対策にも湿式製錬の立場から尽力されました。その研究から、大阪市大や京都大学経済研究所などの教授職を勤められた、日本のこの分野を指導する著名な研究者を輩出しております。

それに引き換え、不肖の卒業生であった私は、先

生のご薫陶に全く反した生き方をしてしまい、手抜きばかりを覚え、社会に出てからは先生のお教えとは全く逆の方向に進んでしまいました(手を動かさずに、計算機に仕事をさせて、もっともらしい理屈をこねることにのみ励んできました)。いまさら取り返しはつきませんが、先生の訃報を聞いて、もう少ししめじな研究者だったら、多少は社会の進歩に貢献できたかも…と、今更ながら悔いるばかりです。

(東京理科大:昭和48年入会)

倉知先生から学んだこと

迫 田 章 人

倉知先生の電気冶金学分野における業績は、金属学と電気化学との学際領域「金属電気化学」のパイオニアとして、電析と腐食に係わる基礎的研究を進められたことだと思っています。

小生が研究室の一員となった時には、先輩方が電析に関する分野で先進的な研究に取り組まれていました。Aさんが、銅の電析メカニズムについての基礎的研究を、Iさんは、当時は自動車用表面処理として注目を集めていた合金めっきの電析過程について、サブミクロンオーダーでの解析を精力的に進めておられました。研究室の歴史としては、70年代後半は「電析時代」と呼べるのかもしれませんが。その集大成として、1980年には、金属表面技術協会(現在は表面技術協会)からの依頼に応じて、合金めっきに関する総説を寄稿されました。まさに「金属電気化学」の視点で俯瞰された優れた総説でした。

大学院の講義においては、「Theory of Corrosion and Protection of Metals」(N.D.Tomashov 著、B.H.Tytellら訳、1966)をテキストに採用して、腐食防食に関する実践的な知識を教授されていました。この旧ソ連科学アカデミーの手になるテキストは、広く深く腐食現象を扱った名著であり、先生は、講義の中で、とりわけ“Heterogeneity (不均一性)”をキーワードとして強調されていました。材料の不均一性も環境の不均一性も腐食発生の駆動力となり得るので、どんな不均一性が生じて腐食現象に影響を与えているのか?…という視点を常に持つべきだと教えていただきました。この講義で学ばせていただいた知識によって、曲がりなりにも40年間、鉄鋼メーカーで技術者として働けたのだと感謝しています。

キーワードと言えば、先生が常々仰っていた“Philosophy”も忘れ難いです。「基本的な視点・考え方」「真実を見極める眼力」「個の主張」といった意味で使われていたと思っています。小生が(公社)腐食防食学会の副会長をしていた時に、北大のA教授と懇談する機会がありました。A教授から「先生からは、“Philosophy”を以て研究しなさいと、再三叱咤されました」と伺い、「うちもそうでしたよ」「あの世代は、

気骨のある人が多かったのですね」などと話したことを思い出します。

二つのキーワードを合わせ読むと、『多様性』や『個性の大切さ』が尊重される社会を目指さなければいけないと教えてくださったのかもしれないね。

倉知先生！深読みでしょうか？

(日鉄テクノロジー：昭和54年入会)

倉知先生を偲んで

吉 岡 秀 穂

倉知三夫先生の訃報を受け取ったのは二月でした。この数年、先生から毎年いただいていた年賀状が来なくなり、気にはなっていたのですが、まだまだご健在でいらっしゃるものと思っていただけに、驚きと共に残念でなりませんでした。

私が京都大学で倉知研に在籍したのは、昭和55年度のたった一年間でしたが、先生のご指導を受けたことはその後の人生において、貴重な糧となり深く感謝している次第です。

先生とは三回生時の専門科目の講義で初めてお会いしました。冒頭で全員に「金属」のイメージを聞かれた後、「ところで、冶金の冶とはどう意味が知ってるか？」と問われたのをよく覚えています。私含め誰からも正解は出てこず、「冶とは『とろかす』いうことや。」と教えてくださいました。

ただ、配属となった倉知研は電気冶金学講座とはいうものの、「とろかす」実験は一切なく、合金メッキに没頭した四回生の一年間でした。卒業後製造業に従事し、治具を冶具と誤記したものを目にするたび、先生の講義を思い出していました。

先生に御世話になったことを二つ書きます。一つは就職先選定です。求人が来ていた企業の中から第一希望を選んだ際、同期の他研究室の者と重なったのですが、私を推してくださいました。威張れた成績ではない私でしたが、先生のおかげで助かりました。

もう一つは私ども夫婦の媒酌をしてくださったことです。北白川仕伏町のご自宅に二人で伺い、緊張しつつお願いし、快くお引き受けくださった時のことを昨日のこのように思い出します。妻は宮城県仙台市の人間だと言うと、先生は岩手県釜石のお生まれだとのこと。そのとき初めて知りました。新婚旅行帰りに大学に御礼を申し上げに寄り、楽友会館でランチをご馳走になりながら歓談したのも忘れられません。

その後は不義理を重ね、先生とお会いしたのは数えるほどしかありません。最後は十数年前の羽村守技官の退官パーティーでした。

まだまだ各地を飛び回ってご活躍中の頃で、澁淵とした御姿だったのを見て安心していましたが・・・

倉知先生、本当にありがとうございました。心よ

りご冥福をお祈り申し上げます。合掌

(株式会社 宇部スチール 昭和56年入会)

倉知先生、ありがとうございました

堀 義 人

倉知先生、大学時代そして卒業後もご指導を頂き、深く感謝しております。

倉知先生の訃報に触れた時に、何とも言えない悲しく寂しい気持ちになりました。同時に教えを授かり御指導頂いた、楽しかった学生時代が走馬灯のように思い出されました。

僕が倉知研に配属されたのは、1年間の休学を経て京大に復学した1985年4月のことでした。M1に入学同期の清州がいて、M2には桂さんがいました。こちんまりとした研究室で、温かみがある空間でした。

時代はバブル全盛期。その当時の僕は、いわゆる「遊び人」で（今も変わっていないですが）、勉強にはさほど関心を持っていませんでした。昼間は殆ど通学せずにバイトに精を出し、夜はデザイナーズブランドに身を包み、河原町・祇園に遊びに行っていました。大学の授業・実験よりも、街中の人間行動や社会の在り方に強い関心を抱いていました。人間観察を経て、ナンパをしたり、友人を作ったりし、人間とのリアルな遭遇やリアクションを楽しんでいました。

そんな遊び人の僕を温かく優しい笑顔で包み込み、受け入れてくれたのが倉知先生でした。驚くことにこんな遊び人の僕を受け入れるどころか、ポジティブに評価してくれました。

倉知先生は、「学生時代に遊んでいた人の方が、大成するんや」と何度も言ってくれました。また、飲みにつれて行って頂くと、人間の軸ということを強く説いてくれました。「いいか、良く聞け。人間は軸が無いとフラフラするんや。人間の軸をつくるためには、遊んでいた方がいいんや」と。

僕は、倉知研卒業後に研究の道に進まずに、住友商事に入社しました。「人間と人間が創り出すビジネスをグローバルな次元で営む商社で、自らの視野と見識を広めたい」と思いました。その後、「遊び人」だった僕にも学びたいことが見つかり、社費留学でMBAに進学することを決めました。幸いハーバード経営大学院に合格でき、住商としては初めてのハーバードMBA生となりました。

MBA取得後に帰国して1年後にグロービスを設立しました。理念は、「ヒト、カネ、チエの生態系をつくり、社会の創造と変革を行う」です。日本最大となる経営大学院の創設から、ベンチャーキャピタルまで。さらには、一般社団法人G1サミットや一般財団法人KIBOWの創設など、「日本を良くする」ために、社会の創造と変革に尽力してきました。

その間もことあるごとに倉知先生に会いに京都に



帰っていました。1993年8月に結婚した際には、快く仲人を引き受けて頂きました。挙式の前日に、二人で学士会館に泊まり、一緒に飲みに行ったのは、本当に良い思い出です。

こんなどうしようもない「遊び人」が、ある程度しっかりとした人間性を得られたのも、倉知先生が大学時代に僕の事をポジティブに評価してくれたからだと思います。とても感謝しています。倉知研に入らなかったら、どういう人生を歩んでいたかは、本当に想像できません。

倉知先生に心より感謝申し上げます。どうぞ安らかにご永眠ください。合掌

(株式会社グロービス社長、昭和61年入会)

「あー、廉太君か」

西 原 廉 太

倉知三夫先生は、いつも私のことを心配してくださっていました。私の祖父である西原清廉がかつて冶金研究室の教授をしていたこともあり、倉知先生は、私の父である西原実も、また私も幼い頃から、気にかけてくれていました。私が金属工学科に入学した際には、大層、喜んでくれました。新入生歓迎比叡山登山競争の朝、倉知先生が私に、「廉太君、あなた優勝しなきゃあかんよ、優勝杯は『西原杯』言うんやから」と、満面の笑みを浮かべながら、おっしゃってくださったのを今でも鮮明に覚えています。結果はおそらくブービー賞に近かったと思います。

入学してからほどなく、京都駅の南側、東九条地域で主に在日コリアンの子どもたちと遊ぶサークルに入りました。そこで出会った在日の青年たちと親しくなり、日韓の歴史をはじめとして、さまざまな社会的諸課題についても学び始めました。それまで、社会問題などにはほとんど関心のなかった私は、工学部での学生生活とのギャップに次第に悩むようになり、指導教授でもあった近藤先生や新宮先生にもご迷惑をおかけしました。そんな状況は、父親や祖母などにも伝わるところとなり、倉知先生からも、「親父さん、心配しとったで」とお声をかけてもらったこともありました。

私が関心を持つことになった社会的課題の一つが、公害問題でした。日本におけるさまざまな公害に対する取り組みを学ぶ中で、実は、最も身近にいてくださった倉知先生こそが、イタイイタイ病問題研究の第一人者であることを知り、少なからず衝撃を受けたものです。最終的には、倉知先生にも随分とご指導いただき、なんとか金属工学科を卒業することができました。しかしながら、卒業後の進路については、先生方が勧めてくださった企業の内定を卒業間際で辞退し、紆余曲折を経ながら、最終的にはキリスト教神学研究の道に進んだのでした。

その後、立教大学文学部で教鞭を取るようになったのですが、ある年、所属している日本基督教学会が京都大学を会場に行われました。卒業以来約30年ぶりに京大金属工学科があった研究棟をふと訪れました。もちろん、倉知先生も新宮先生もすでに退官されておられましたが、教授となられた石原慶一先生とお会いすることができました。石原先生は私のことなども覚えてくださっていて、新宮先生も仏教思想などを深められていて、一度、西原の話なども聞きたがっておられることなどを教えてくださいました。あれだけご迷惑をおかけした金属工学科のみなさんの温かさに接し、まさに故郷に戻ってきた放蕩息子のような思いでした。

昨年11月に富山を仕事で訪れた際に、イタイイタイ病資料館で、イタイイタイ病対策協議会会長の高木勲寛さんのご講演を拝聴する機会がありました。そのお話の中で、何度も「倉知三夫」先生のお名前が登場したのでした。30数年の時を経て、富山の地で、倉知先生と再会を果たせたのかも知れません。高木さんと名刺を交換させていただき、高木さんも私が倉知先生の不肖の弟子であることに驚かれ、私の知らなかった倉知先生のお働きについても教えてくださいました。

私が、今年4月から立教大学の第22代総長に就任することになり、その報告をしたく、1月上旬に倉知先生のご自宅にお電話をしました。ちゃんとした会話にはなりませんでした。最後には「あー、廉太君か」とはっきりおっしゃってくださいました。それが、私が倉知先生と交わした最後の言葉となりました。倉知先生のご逝去直前に、先生のお声を聴けたことは奇跡的なことであったのかとも思います。倉知先生のご逝去は、高木さんからのお電話で知りました。私の父、西原実の住友金属の研究所での同僚であった迫田章人さんからもご連絡を頂戴し、このように、追悼文の寄稿者に加えていただいたことを、心から感謝する次第です。

倉知三夫先生の魂の平安と、残されたご家族の慰めを祈ります。倉知先生、ありがとうございます。本当に、お世話になりました。

(立教大学総長、昭和62年入会)

会 員 通 信 欄

令和3年度水曜会大会への返信はがきには、会員の方々から多くのお言葉や近況報告を頂きました。ここにその一部を掲載致します。なお、文章を損なわない程度に表現を変えた部分もあることをお断りいたします。

三谷 文夫（鉱山・昭23） 人生96年有余を生きしてきました。半年ほど前から杖を使うようになり、残念ながら行動範囲がぐっと狭くなりました。

同窓諸兄のご健康を祈ります。

二宮 脩（鉱山・昭26） 新型コロナウイルスまんえんの中、皆様方のご活躍の内にあるご配慮には想像を絶するものと配察致します。更めて御礼申しあげます。昨今の会誌もなつかしく思いを重ねながら目を通しております。有難うございます。

堀 敬二（冶金・昭28） 昭2生れ、縁者遠く彼方に。意力減退、コロナで無くても巣ごもり。たゞ体育会系の名残 太極拳とテニスを週一。

大久保 勝夫（冶金・昭29） ご盛会を・・・、と言えぬコロナ禍の不条理さですが、新形式でのご成功をお祈り致します。私の方は、卒寿の加齢負荷を味わいつつも元気に過ごしています。現役時代の研究テーマだった“設備寿命の予測と長寿命化”の知見を、寿命末期のわが身で検証していますが、社会負荷になる長寿命は避けたいところです。

清滝 昌三郎（鉱山・昭30） コロナウイルスに振り回された空白の1年でした。お蔭様で目下のところは影響なく、詩吟とゴルフ（スコア無視）のみが外との繋りです。

佐藤 史郎（冶金・昭30） 銅のこと、アルミのこと、チタンのこと、往時渺茫。平穏な毎日です。

米津 栄次郎（鉱山・昭31） 化石燃料を生業とした罪滅しに、気候変動は生涯のテーマと考えています。

野村 悦二（冶金・昭31） コロナ禍の中、現場の生産量に大きな変化がなく安心しています。しかし、その分、現役の皆様は、私達が経験したことのないような、努力をされていることでしょう。努力の報われることを祈願しています。

尾竹 嘉三（鉱山・昭34） 社会福祉法人市原寮にありますが、何とか元気で過しています。

南浦 基二（冶金・昭34） 9月に86才の予定ですが、目下は週一回のゴルフと偶に美味しいものをお酒と一緒に楽しみつつ年令相応に生きているのかなと思っています。水曜会は懐しいです。

岩崎 滋（冶金・昭36） オンライン講演有難く存じます。世間並みにコロナによる減収にあえいでおりますが、心身健康です。

澤田 進（冶金・昭39） 年なりに元気にヨタヨタと
望月 志郎（資源・昭40） コロナ禍 ストレスが溜まる日々ですが歳なりに元気にしております。

酒井 一夫（金属・昭40） なんとか生きています。

伊藤 紘一（冶金・昭41） On-line 参加たのしみにしています。よろしく願い致します。

東 勝（冶金・昭41） 祈盛会、元気です。

森 邦彦（冶金・昭41） 電車・バスには全くのらず、自宅附近の散歩と簡単な体操で健康維持をしています。

大園 智哉（金属・昭41） 山形県より茨城県つくば市に転居いたしました。

松井 正昭（冶金・昭43） 日々元気なり。コロナ下庭いじりで過しております。末尾ながら盛会記念。

高山 新司（金属・昭43）（英国）York 大学物理学科も退職し、さらに新たな興味に挑戦しています。

浅井 達雄（資源・昭44） 自分史的随筆集「言葉と思索の散歩道」を出版しました。恩師との出会い、卒業してからのこと、そして今思うことなどについて書いています。Amazonでも注文できます。近況に代えて以上報告まで。

横川 清志（冶金・昭44） オンライン式になり喜んでおります。新型コロナウイルス感染症には感染せず、近々ワクチン接種の予定です。

八十 致雄（金属・昭44） 古文書を読む会に入って7年。太極拳教室には半年前から。各々細々と続いています。前者は読解力がさっぱりつきません。後者は心身の健康に好適です。

水曜会の皆様に後者を是非おすすめします。

友田 陽（冶金・昭45） 産総研つくば第二事業所にて小型中性子源を用いる実験をやっています。中性子散乱計測の産業利用拡大が目的です。

森棟 文夫（冶金・昭45） 砂漠で淡水を海水から作り、その淡水で砂漠を緑化することを考えていますが、効率を上げるため低温沸湯の技術を知りたい。どなたか御存じの方、又は共同でシステムを考えようと思われ

る方おられません。神戸製鋼はたしかこの技術を持っているはずですが。

河合 潤（金属・昭45）まだ現役で仕事に頑張っております。

香田 圓（金属・昭45）昨年12月末で千代田化工建設を退社しました。

穴戸 正和（金属・昭45）寺院住職を退き、東京都に転居いたしました。

萱原 徹男（資源・昭46）高齢と疫病にさらされながらも、ライフワークに励み、日に一つの歩みを積み重ねています。

中島 正博（資源・昭47）コロナに負けず、頑張っています。

高崎 誠（冶金・昭47）コロナ禍で家にとじこもっています。3回目の緊急事態宣言で「今まで国は何をしていたのか？」と言いたいです。

内貴 治三（冶金・昭47）コロナウイルス感染拡大のため、昨年1月以降旅行に出ることもなく、近所の散歩、必要にせまられて新宿の家電店、デパートに買い物に出かけるも直ちに帰宅という日常です。

白神 哲夫（金属・昭47）数年間続けていた京都での47同期会もコロナのため、中断しています。最初の年は辻先生他多数の先生方の御協力で研究室見学をさせて頂いたことを改めて、お礼申し上げます。

川村 健一（資源・昭48）US、東京、広島の生活です。

高橋 渉（金属・昭48）コロナがこれ以上ひどくならないかぎりひさしぶりに京都観光を兼ね、参加したいと思います。公民館活動に注力しています。

福井 康司（金属・昭48）昨年6月に東洋アルミニウムの業務を終了し、今は軽金属学会、軽金属奨学会の仕事をしています。

コロナ禍のために、オンラインでの業務を中心に技術資料作成、技術論文審査、打合等で、忙しい毎日を行っています。

伊藤 茂生（金属・昭49）現在、退職し、年金暮らしをしております。お世話頂き、ありがとうございます。

白井 泰治（金属・昭49）本年度水曜会大会は、コロナ禍のため欠席させて頂きます。

高島 章（金属・昭49）ワクチン接種を終える迄、自分と向き合う時間が十二分にあって、これはこれで有意義です。

則竹 和光（資源・昭50）コロナ禍ではありますが、畑仕事は一人なのでいつもと変わらずやっています。いつか行くスペインのコンポステーラ巡礼の準備のため、ウォーキングを始めました。効果あって、減量し、

体が軽くなりました。元気でやっています。盛会を祈っています。

刀根 規久男（資源・昭50）NPO法人KIR（京都イノベーションリソース）に所属

東田 賢二（金属・昭50）佐世保高専校長を定年退職いたし、5年ぶりに福岡に帰って参りました。

楠井 潤（金属・昭51）東洋アルミのパウダー・ペースト事業で日仏米中印に拠点をおいていますが、コロナでWEB会議が増えました。

広沢 哲（金属・昭51）10年プロジェクト「元素戦略プロジェクト」での永久磁石の研究拠点の事業も2021年で10年目となり最終仕上げの段に到りました。

浦野 英孝（金属・昭52）フルタイムの現役で仕事をしています。

山下 清胤（金属・昭52）昨年8月に三協立山(株)代表取締役社長を退任し、相談役に就任しました。

谷村 晶夫（金属・昭53）昨年11月に65才となりましたが、来年3月迄延長で非常用発電機の仕事をしております。週1で在宅勤務。コロナワクチンも4/28～予約可となりました。早く収束してほしいものです。

中堂 益男（金属・昭53）'80年に退職し、現在自宅にて園芸、料理など趣味に興じています。

三宅 正人（金属・昭53）昨年1月コマツを退職致しました。

村地 洋二（資源・昭54）2021年6月末で三井石油開発(株)を退職します。

吉田 真（資源・昭54）会社勤務を継続中、コロナ禍により在宅勤務が主。

竹士 伊知郎（金属・昭54）大学での非常勤の講義も社会人向けのセミナーの講義も全てリモートです。これが普通になる怖さに思いをいたしています。

山名 壽（金属・昭54）奈良で第2の人生を過ごしています。近くまで来られたら、御連絡下さい。

北村 公亮（資源・昭55）京都に移り住み7年が経ちました。キャンパスの変わりようには驚いておりますが、大文字山は昔のままです。

父の一周忌と重なり残念ながら欠席します。

千葉 昭彦（資源・昭55）関東で毎年秋に鉱山・資源部門の懇親会を開催しています。コロナ禍が収束していれば、今年は10月15日（金）に東京で開催する予定です。夏ごろにご案内を差し上げますので、皆様のご参加をお待ちしております。

須川 壮己（資源・昭55）IT分野の仕事を30年ほどやっていますが、情報やデータ提供のサービスは国境の垣根が無くなり、ソフト開発も少しづつ海外に取られていく戦国時代になりました。もうひとふんばりあがいてみます。

小野 玲児（金属・昭55） コロナ禍の中で同窓の友人にも会えておりませんが、とりあえず元気でやっております。

柏木 健（金属・昭55） 完全にリタイアして、顧問業と趣味に専念しております。

竹川 禎信（金属・昭55） 大阪・京橋で環境省の関連業務をしています。

及川 初彦（金属・昭56） 現在、有楽町に勤務しております。慣れない仕事ではありますが、頑張っております。

札軒 富美夫（金属・昭56） 新型コロナ禍の為、テレワーク中心のこの頃です。早くワクチンが普及して、この禍が収束することを願っています。

喜多 隆介（金属・昭57） 今年度より静岡大学工学部長を務めています。コロナ禍の中で大学も大きく影響を受けています。

竹内 正（金属・昭58） 昨年4月に60歳定年となり、再雇用で同じような仕事をしています。変化が大きく速い状況なので、常に新しいことに興味を持ち続けて、健康に頑張れたら、と思います。会社トップが、方向性を内外に明確に示し、自ら先頭を切って動く方なので（ご参考：トヨタタイムズ）、有難いと思う日々です。

山元 一幸（金属・昭58） 活動いつもご苦労様です。

大塚 裕之（資源・昭59） 三菱ガス化学㈱から子会社に出向となりました。もうちょっと頑張ります。

小川 和久（資源・昭59） 本年3月末日をもって鹿児島県庁を退職しました。

平林 哲（資源・昭60） JFEスチール㈱から米国NUCORとの合弁会社（メキシコ）NUCOR-JFE STEEL MEXICOへ勤務先が変わっています。

森本 聡（金属・昭61） 当日午前中京都におり、久しぶりに出席できそうなので、大会への出席を申し込み致します。誠に勝手ながら、記念撮影と総会には間に合わない可能性があるため、講演会のみに参加とさせていただきます。久しぶりに参加でお世話になりますが、よろしくお願いします。

鳥居 健（金属・昭62） 今回の特別講演会、オンラインで聴講できるのを楽しみにしております。

西原 廉太（金属・昭62） この4月から第22代立教大学総長に就任しました。

広瀬 靖洋（金属・昭62） 金融の世界に身を置けてきましたが、60歳の定年も近くiPS研究所に何か貢献出来ないか考える日々です。

古澤 光一（金属・昭62） 本年 オムロン株式会社を定年退職致します。引き続き同じ職場にて開発業務を継続する予定です。

田畑 仁（金属・昭63） 今年の大会はオンライン

併催の為、初めて水曜会大会に参加させていただきます。

吉房 宏之（資源・平元） ご無沙汰しております。この1年はテレワークが主流となり、新しい働き方が漸く軌道に乗ってきたところです。コロナ禍が早く収束することを願っております。

西尾 裕司（金属・平元） コロナに負けず頑張っています。

後藤 太（資源・平2） 海外赴任から帰任し、大和鋼帯㈱に転籍いたしました。

吉田 慎一（金属・平4） ご無沙汰しております。本年4月、18年ぶりに関西に戻り、兵庫県伊丹市で勤務しています。

岡松 俊宏（金属・平5） セラミックコンデンサ扱っています。金属も扱っています。

中村 哲也（金属・平5） 2019年12月末で高輝度光科学研究センターを退職し、2020年1月より東北大学で勤務しております。

西 孝文（資源・平7） 変わらずCMOSイメージセンサーの開発に携わっています。

大竹 康一郎（金属・平8） 国際たくみアカデミー自動車エンジニア科所属

山口 智彦（エネルギー・平11） 2021年2月よりアメリカ・カンザス州に赴任となり、田舎暮らしに少し慣れてきました。2020年7月赴任予定がコロナウィルスの影響で大幅に遅れ、開発部門から製造子会社出向という大幅な業種変更の中 赴任早々トラブル続きで多忙です。アメリカは予防接種が早く、4月に接種を完了しました。あとは竜巻が来ないことを祈ります。

清水 広朗（材料・平13） 恐縮ですが、欠席させていただきます。

上山 正樹（材料・平14） アメリカで元気に過ごしております。

武川 将也（エネルギー・平14） トヨタ自動車にて勤務

駒嶺 聡史（資源・平21） 水曜会大会のご連絡ありがとうございます。今回、出席できず申し訳ございません。

勝部 涼司（材料・平25） 本年度から、先端材料機能学講座に異動しました。

山岡 幸男（元教官） EU, USAに阿り、平身低頭してもワクチン接種率は数%,世界65位(2021年4月)。首相以下政治家は3世,4世でメダカみたいな奴ばかり。TVを映ければ芸能人のバカ騒ぎ! JAPAN AS No.1を体験した者としてはNIPPONの凋落は歴然。そして、経済大国に押し上げたその高齢者が優先してコロナ死するこの矛盾。こんなNIPPONになぜ成った??

段野 勝（元教官） 96才になりますが、元気にしています。

安田 幸司（現教官） 2020年4月に非鉄製錬学講座に着任し、水曜会にも入会いたしました。どうぞよろしくお願いいたします。

水曜会誌卒業年次幹事制について

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

水曜会年次幹事に関する付則

（目 的）

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

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

（定 員）

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

（任 期）

第3条 任期は2年とし、重任は妨げないものとする。

（委 嘱）

第4条 年次幹事の選任は、同年次会員の推薦により会長が委嘱するものとする。

この付則は平成15年6月14日より施行する。

令和3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يوفジクス分野)		
石 月 綾 音	地下の流体流動に起因する地震波を利用した受動的地震探査法の研究	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
松 尾 俊 希	独立成分分析による反射法地震探査データの表面波分離の研究	(株)日立製作所
地殻開発工学分野		
神 津 拓 海	2次元破壊フロント伝播によって生じるAEイベントの活動	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
濱 口 直 也	回転剪断試験による大理石の摩擦実験	京都大学大学院工学研究科 (研究生)
福 田 達 也	不連続な屈曲断層における誘発地震の最大乗り移り距離	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
緩 詰 晃 太	アメリカ合衆国カリフォルニア州産花崗岩の亀裂進展の測定	京都大学大学院エネルギー科学研究科 (修士課程進学)
計測評価工学分野		
浅 川 拓	静電容量計測による薄層内物質分布の可視化の検討	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
田 村 祐太郎	漏えい磁束探傷における簡易的なきず深さ推定方法について	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
中 岡 龍 星	SRD法を用いたアスファルテンの凝集シミュレーション	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
美 馬 龍太郎	塩水との接触に対する CNF 含有 W/O エマルションの安定性評価	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
地殻環境工学分野		
岸 本 将 英	可視・反射赤外域での反射スペクトルデータを用いた混合鉱物試料の端成分含有率の算定法	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
小 村 悠 人	堆積岩の圧密・続成過程における間隙水移動と水質変化の数値モデル化	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
酒 井 郁 人	重回帰分析を用いた地下水位の変動メカニズムの推定	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
村 岡 俊 季	浅熱水性鉱脈型鉱床における富鉱部の分布形態モデリングと鉱床生成プロセスの解釈	京都大学大学院総合生存学館 (思修館) (修士課程進学)
地球資源システム分野		
嶋 章 裕	深層学習を用いた地熱系シミュレーションのパラメータ推定手法の開発	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
菅 本 大 仁	地熱坑井のカッティングス試料を用いた熱物性測定及び温度構造解析	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
橋 本 駿	カッティングス試料を用いた熱物性測定に対する新手法の導入：新しい充填媒質の提案と検証	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
宮 崎 裕 博	千葉県房総半島東部に分布する第四紀堆積軟岩の圧密異方性	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)

氏 名	研 究 論 文 題 目	就 職 先
資源エネルギーシステム学分野		
麻 田 裕 樹	毛細血管と疑似動脈を有する三次元細胞ブロックの長期灌流培養	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
澤 木 祥 伍	ナノポーラス金アクチュエータを使った周期引張刺激による細胞シートの細胞配向	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
高 橋 駿 介	水圧破砕によって花崗岩中に生じる亀裂の観察	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
柳 和 弥	細胞の初期接着斑形成におけるモンテカルロシミュレーション	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
山 本 雄 紀	被接合アルミニウム合金の陽極酸化被膜構造制御によるめっき接合の高強度化	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		
清 原 陸	粗大結晶粒純アルミニウムにおける単純せん断変形時の不均一変形挙動	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
田 村 悠 真	DP 590鋼板における微視的および巨視的加工硬化特性	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
塚 本 麻 耶	種々のひずみ経路下におけるA6022-T4アルミニウム合金板の加工硬化挙動	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
吉 田 輝	種々の負荷経路におけるZX10マグネシウム合金板の塑性変形挙動	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
ミネラルプロセッシング分野		
浮 田 真 行	製鋼スラグの炭酸化過程の工業鉱物学的評価	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
富 樫 明 寛	高温移動鋼板への3本及び単一吹上柱状水噴流の熱伝達特性	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
藤 田 研 人	マイクロ/ナノポーラス材料を用いた曝気システムにおけるアンモニアの揮発	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
前 川 瑛 亮	水噴流冷却された高温移動鋼板の熱伝達特性評価	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
吉 村 伊 澄	カット野菜残渣のメタン発酵に向けた前処理に関する基礎研究	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)		
益 邑 遼	Weibull分布の形状係数を用いた貯留岩内の浸透率推定についての研究	(株)コアコンセプト・テクノロジー
JANG Iktae	Estimating the earthquake source mechanism using Full Waveform Inversion	千代田化工建設(株)
地殻開発工学分野		
下 田 晃 嘉	断層間の摩耗物が不安定すべりの発生に与える影響の評価	日本生命保険相互会社
田 中 壘	深層学習による室内水圧破碎実験時に生じる微小破壊のモーメントテンソル解析	(株)横河ブリッジ
前 崎 智 史	海水環境下における巨視亀裂を導入した高強度高緻密コンクリートの透水係数の変化	石油資源開発(株)
計測評価工学分野		
高 橋 祐 貴	TDR法を用いた板材の広域表面探傷についての基礎的検討	阪急阪神ホールディングス(株)
舘 祐 史	鋼板裏面欠陥の渦電流探傷におけるバイアス磁界の効果について	日本製鉄(株)
前 田 梨 帆	多重周波数渦電流探傷における周波数選択の適応的最適化	(公財)鉄道総合技術研究所
地殻環境工学分野		
犬 飼 郁 也	地球化学的手法を用いた地熱地域における流体の広域循環状態の解明	三菱重工業(株)
権 守 宏 明	ハイパースペクトル衛星画像を用いた高植生被覆域における地熱兆候地抽出法の開発	出光興産(株)
下 地 悠	鉱石試料分析に基づく日本の熱水鉱床のタイプと生成年代による金属濃度の特徴	太陽石油(株)
中 村 友 洋	偏波特性を利用した地中レーダ探査法の有効性に関するモデル実験と数値シミュレーション的検討	日本総合システム(株)
久 保 勇 也	鉱床関連鉱物のマッピング精度向上を目的としたマルチスペクトル衛星画像の波長・空間分解能のダウンスケーリング	(株)メイツ
地球資源システム分野		
石 井 幹 人	Basic study on the stability of novel CNF-containing foam for environment friendly fracking (環境調和型水圧破碎への適用に向けたCNF含有フォームの安定性に関する基礎的研究)	アーサー・ディ・リトル・ジャパン(株)
佐 野 暉	Characterization of thermal properties of rock samples retrieved from the Futagawa fault drilling by Hot Disk method and evaluation of mixing models (ホットディスク法を用いた布田川断層掘削の岩石試料における熱物性の特性解明および熱伝導混合モデルの評価)	大阪ガス(株)
重 光 勇 太 朗	Estimating surface displacement velocities and their mechanisms around the Keihanshin area using satellite SAR interferometry (衛星干渉SAR解析を用いた京阪神地域の地表変動速度及び変動メカニズムの推定)	京都大学大学院工学研究科 (博士後期課程進学)
村 瀬 佑 樹	Application of W/O emulsion containing cellulose nanofibers to conformance improvement (セルロースナノファイバー含有W/Oエマルションのコンフォーメーション改善手法への適用に関する研究)	出光興産(株)

氏 名	研 究 論 文 題 目	就 職 先
資源エネルギーシステム学分野		
伊 東 慎 平	Different developing patterns of hydraulically-induced fractures in shale specimens (頁岩供試体中に造成される水圧破砕き裂の進展状況の違い)	日本製鉄(株)
田 邊 雄 亮	スフェロイドを用いたミリメートルサイズの3次元細胞組織の作製	ダイキン工業(株)
内 藤 江 児	Joining of dissimilar materials by copper electrodeposition (銅めっきによる異種材料の接合)	AGC(株)
廣 瀬 蒼 矢	Anchor effect in electrodeposition joining of aluminum sheets (アルミニウム板のめっき接合におけるアンカー効果)	レーザーテック(株)
牧 拓 也	細胞挙動に及ぼすナノポーラス金の孔径の影響	古河電気工業(株)
資源エネルギープロセス学分野		
塩 入 悠 太	Evaluation of heat transfer of water jet cooling to a moving hot plate (移動銅板水噴流冷却の伝熱量評価)	(株)IHI
寺 崎 健 悟	Boiling heat transfer characteristics of multiple upward water jet impingement onto a moving hot steel sheet (複数の吹上柱状水噴流による高温移動体冷却の沸騰熱伝達特性)	JFEスチール(株)
畠 山 健太郎	Crystal plasticity analysis of plastic deformation behavior of a DP590 steel sheet (DP590 鋼板の塑性変形挙動に関する結晶塑性解析)	日本製鉄(株)
松 浦 遼	Modeling of work-hardening behavior of an A6022-T4 aluminum alloy sheet using phenomenological and crystal-plasticity models (現象論モデルおよび結晶塑性モデルを用いたA6022-T4アルミニウム合金板の加工硬化挙動のモデリング)	日本製鉄(株)
ミネラルプロセッシング分野		
富 田 裕 一	熱・アルカリ前処理によるリグノセルロース系バイオマスのメタン発酵への影響評価	コニカミノルタ(株)
上 田 雄 輝	Various approaches to promote methane fermentation for applying marine macroalgae (海洋大型藻類のメタン発酵適用に向けた様々な研究)	日本水産(株)
白 川 稜 治	メタンハイドレート開発におけるNaCl添加によるCO ₂ -CH ₄ ガス置換法の回収率向上に関する研究	関西電力(株)
末 廣 亮 馬	製鋼スラグの有効利用に関する基礎的研究	電源開発(株)

● 博士後期課程修了者

氏 名	研 究 論 文 題 目	就 職 先
地殻環境工学分野		
大 田 優 介	Development of Resource Evaluation Technology by Integration of Geophysical Exploration Data and Rock Physics (物理探査データと岩石物理学の統合による資源評価技術の開発)	名古屋大学 大学院環境学研究科附属地震火山研究センター 特任助教
佐 藤 真 也	Development and application of methods to evaluate temporal changes in subsurface resistivity structures using magnetotellurics (地磁気地電流法を用いた地下比抵抗構造の時間的変動評価手法の開発と応用)	アマゾンウェブサービスジャパン(株)
地球資源システム分野		
杉 本 達 洋	Anelastic strain recovery method for in-situ stress measurements: a novel analysis procedure based on Bayesian statistical modeling and application to active fault drilling (非弾性ひずみ回復測定法による原位置応力測定の高高度化研究: ベイズ統計モデリングに基づく新規解析手法の構築と活断層掘削への適用)	日鉄ソリューションズ(株)

● 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				
大 田 優 介	Development of Resource Evaluation Technology by Integration of Geophysical Exploration Data and Rock Physics (物理探査データと岩石物理学の統合による資源評価技術の開発)	小 池 克 明	令和3年3月23日	
佐 藤 真 也	Development and application of methods to evaluate temporal changes in subsurface resistivity structures using magnetotellurics (地磁気地電流法を用いた地下比抵抗構造の時間的変動評価手法の開発と応用)	小 池 克 明	令和3年3月23日	
地球資源システム分野				
杉 本 達 洋	Anelastic strain recovery method for in-situ stress measurements: a novel analysis procedure based on Bayesian statistical modeling and application to active fault drilling (非弾性ひずみ回復測定法による原位置応力測定の高高度化研究: ベイズ統計モデリングに基づく新規解析手法の構築と活断層掘削への適用)	林 為 人	令和3年3月23日	

旧 金 属 系

● 学部卒業生

氏 名	研 究 論 文 題 目	就 職 先
表面処理工学分野		
上 山 慎 司	Ag-Al-Cu-Cl系における各種蒸気の気体輸送法による蒸気圧測定	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
岡 村 信 吾	ハロゲン化反応・カルコゲン化反応を利用したSn分離抽出に関する熱力学的解析	Play Sports Group Limited
高 橋 司	ハイシリカゼオライト中におけるプロトン伝導の微視的描像	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
中 村 知 史	ボーキサイトの炭素還元ならびにアルカリ浸出時におけるガリウムの挙動解析	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
橋 本 篤 典	Ba ₃ Y ₄ O ₉ のZr置換による化学的安定性・電気伝導特性への影響	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
松 尾 優 介	アルカリ浴での亜鉛の低電力電解採取におけるマンガン不純物の影響の調査	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
物質情報工学分野		
大 橋 律 禅	スプライン補間によるXRFスペクトルスムーシング	京都大学大学院工学研究科材料工学専攻(修士課程進学)
加 藤 駿 英	多層散乱体によるX線の偏光	京都大学大学院工学研究科材料工学専攻(修士課程進学)
徐 智 和	モンテカルロ解析を用いた母標準偏差推定	(株)クニエ
松 巾 拓 未	ポリマーのX線表面分析	京都大学大学院工学研究科材料工学専攻(修士課程進学)
ナノ構造学分野		
伊 藤 遊 大	トロピカル極限からみる統計力学の非線形性	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
大 北 友 哉	ZnSnP ₂ のフォトルミセッセンスに及ぼすリン分圧の影響	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
西 原 郁 生	局所系の熱力学平衡状態を特徴付ける原子配置	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
住 吉 壱 心	新規リン化合物半導体に対するオーミック電極の開発	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
先端材料物性学分野		
青 木 星 也	硫化物のアトムプローブ分析の試み	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
河 合 郁 弥	Mg ₉₇ Zn ₁ Gd ₂ 材のLPSO構造形成過程の検討	東京大学大学院工学研究科(修士課程進学)
下 山 健 太	Al-Mg-X合金の軟X線異常小角散乱による評価	
曾 田 光 亮	Dy(Ru _{1-x} Co _x) ₂ Si ₂ 劈開面のSTM/STS観察	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
常 盤 大 樹	アルミニウム合金のベクトルトモグラフィ評価の基礎的検討	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)

氏 名	研 究 論 文 題 目	就 職 先
量子材料学分野		
石 村 一 輝	機械学習による形成エネルギー予測モデルの構築	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
鵜 川 大 輝	合成条件推薦システムのオンライン学習法の検討	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
重 岡 諒 行	スラリーを用いた並列固相反応法における溶媒の検討	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
末 岡 倫太郎	フォノン計算による固体の熱力学計算	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		
伊 藤 充 洋	CrCoNi 等原子量合金における短範囲規則と力学特性	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
黒 岩 省 吾	CrCoNi 等原子量合金の双晶変形	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
鈴 木 広 崇	α -Mn のマイクロビラー圧縮変形	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
中 瀬 仁 太	FeAl B2 型規則合金における転位の磁性と力学特性の相関	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		
朝 田 遼	Cr 添加した高Mn鋼の結晶粒微細化と力学特性	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
鈴 村 拓 未	オーステナイト + B2 二相組織を有する Fe-20Ni-5Mn-8Al-0.8C 合金の引張特性	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
前 河 佳 晃	低周波疲労変形下におけるマルテンサイト鋼の水素脆性破壊	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
林 成 浩	変形誘起マルテンサイト変態に伴う局所ひずみ・応力分布の測定	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
先端材料機能学分野		
有 本 将 吾	圧縮変形による単結晶デンドライトの溶断現象の解析	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
上 松 健 太	三次元ミクロ偏析モデルのための 4D-CT による Al-Cu 合金デンドライトの定量解析	京都大学大学院理学研究科(修士課程進学)
太 田 誠	Fe-C 系合金のマッシュの変態時における δ/γ 界面の移動速度に及ぼす Zr、Hf の影響	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
富 山 拓 己	蛍光 X 線その場測定を用いたコングルーエントに近い Cr-Fe-Co-Ni 四元系合金の凝固界面における溶質分配の解析	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		
塩 谷 太 基	Zr ₂ Fe ₁₂ P ₇ 型化合物 Y ₂ Fe ₁₂ P ₇ におけるサイト選択的要素置換による磁性の研究	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
中 井 慎 司	高濃度 La-Co 置換 M 型 Sr フェライトの磁石化に向けた磁場配向試料の作製と助剤の検討	京都大学大学院工学研究科(修士課程進学)
前 上 義 大	カノニカルスピングラスにおける Kibble-Zurek 機構の検証	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
材質制御学分野		
石 川 快	濃厚ハロゲン化物系 Sn-Ag 合金電析浴	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
伊 藤 哲 夫	濃厚 KF 水溶液を用いた陽極酸化によるメソポーラス SiC の作製	(株)大阪真空機器製作所
荒 神 良 樹	濃厚グライム溶液における Li ⁺ イオン伝導	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
中 村 文 昭	金属触媒 Si エッチングの数値シミュレーション	
湯 浅 隆 祐	アルカリ性濃厚乳酸浴からの Cu ₂ O 電析における Cu(II) 錯体と析出配向性の相関	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
渡 辺 孝 章	金属触媒エッチングによる Si への高規則配列マクロポアの形成	サービス&セキュリティ(株)
機能構築学分野		
安 部 耀 介	炭化水素系潤滑油/固体界面の Bimodal qPlus AFM 分析	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
泉 祥	酸化グラフェンの Layer-by-Layer 積層	(株)ナベル
太 田 光 映	ホスホン酸 SAM 被覆銅基板の電気化学インピーダンス解析	(株)シグマクシス
鹿 取 温 希	SAM 被覆 Si 基板の Mott-Schottky 解析	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
津 吉 順 平	原子分解能 AFM による濃厚水溶液/固体界面の構造分析	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
松 浦 竜 也	減圧環境での真空紫外光照射によるポリオキシメチレンの表面活性化	京都大学大学院工学研究科 (修士課程進学)
エネルギー社会工学分野		
宇佐美 岳 良	メカニカルミリングによる Fe-Ni 固溶体の作製と熱安定性	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
播 村 文 香	メカニカルミリングによる CuO のナノ粒子化と光触媒能	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
松 葉 勇 貴	スパッタ法による AZO 薄膜成膜時のガス流量比が性能に及ぼす影響	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
水 本 隆 太	メカニカルミリングによる Fe-Ni 固溶体の作製と物性	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
八 代 竜之介	ゾルゲル法による AZO 薄膜成膜過程の諸条件が性能に及ぼす影響	楽天グループ(株)

氏 名	研 究 論 文 題 目	就 職 先
材料プロセス科学分野		
山 本 龍 雄	メルトスパン法で形成された Al-Zn 合金箔の選択エッチングによるポーラスアルミニウムの作製	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
上 野 暢 路	ミスト CVD 法による NiO 薄膜のドーパントの検討	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
風 間 大 地	ミスト CVD 法による R 面サファイア基板上への VO ₂ /TiO ₂ 薄膜のエピタキシャル成長	東京大学大学院工学系研究科(修士課程進学)
川 上 未央子	ミストデポジション法による (CH ₃ NH ₃) ₃ Bi ₂ I ₉ 厚膜の作製	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
辻 本 青 児	深共晶溶媒浴を用いた電析法による Ni 箔の作製	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
山 本 恭 司	乾燥空気中における尿素-AlCl ₃ 浴およびベンズアミド-AlCl ₃ 浴からのアルミニウム電析	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
プロセス熱化学分野		
太 田 知 也	カルシウムフェライトへの Al ₂ O ₃ 添加による SFCA-I 生成挙動	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
黒 田 海	包接化合物 Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃ と共存する CaO-Al ₂ O ₃ -FeO 三元系スラグの Sulfide capacity と FeO 活量	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
小 林 直 樹	CaO-SiO ₂ -Cr ₂ O ₃ 三元系スラグの相平衡関係と化合物 CaCr ₂ O ₄ の Gibbs エネルギー	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
坂 井 孝 輔	リチウムイオン電池正極材料 LiFePO ₄ からの乾式処理によるリチウムの回収	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)
前 岡 莉 歩	湿式メカニカルミリングを併用した CO ₂ 処理によるスラグの再資源化	京都大学大学院エネルギー科学研究科(修士課程進学)

● 修士課程修了者

氏 名	研 究 論 文 題 目	就 職 先
表面処理工学分野		
井 上 誠 也	中温型燃料電池の酸化物空気極における微量ガスによる反応阻害挙動の解明	住友電気工業(株)
田 中 祐 輝	Bi-Ti 合金アノードを用いた Ti の平滑電析	パナソニック(株)
藤 井 健 雄	マスター方程式を用いた固体内拡散評価手法の開発とその応用	本田技研工業(株)
宮 下 匠 人	その場観察によるアルカリ浴での亜鉛の電析メカニズムの解明	旭化成(株)
物質情報工学分野		
瀬戸山 巧	低出力 X 線源を用いた X 線回折装置の開発	(株)ラクスパートナーズ
松 本 晋太郎	SEM による二次電子像の三次元復元	A.T.カーニー(株)
大 倉 慎 史	鉄鋼の dj 法による蛍光 X 線定量分析	(株)日立製作所
斎 藤 直 樹	コンプトン散乱の強度と偏光	(株)デンソー

氏 名	研 究 論 文 題 目	就 職 先
ナノ構造学分野		
市 川 智 士	低融点金属反応場を利用した (Ge,Sn)S パルク・薄膜作製プロセスの検討	(株)堀場アドバンスドテクノ
三 宅 遼 吾	格子の幾何学的情報に基づく特殊な原子配置と自由エネルギー	ヤンマーホールディングス(株)
材料設計工学分野		
藤 田 健	アモルファス Mg-Cu-Y 合金の低温昇温下での LPSO 構造形成過程	大阪大学大学院工学研究科 (博士後期課程進学)
山 下 元 気	Ag(111) 表面上に形成される鎖状ナノカーボン構造の解明	日産自動車(株)
量子材料学分野		
浅 原 脩 悟	効率的データ構造を用いた不定比性化合物における結晶構造列挙手法の検討	(株)三井住友銀行
西 航 平	酸化物の合成条件探索のための自動分注装置の開発	大和証券(株)
森 光 佑 太	金属有機複合体を前駆体とした酸化物の並列合成手法の開発	
結晶物性工学分野		
大 影 晃 平	Mg-Zn-Y 系 LPSO 相のキンク帯形成機構	いすゞ自動車(株)
濱 田 鉄 也	η -Fe ₂ Al ₅ を基礎とする高次規則相の相平衡	(株)デンソー
松 浦 周太郎	BCC 構造を有する5元系等原子量ハイエントロピー合金の塑性変形	三菱重工業(株)
構造物性学分野		
加 山 達 也	中 Mn 鋼のオーステナイト逆変態機構と組織形成に及ぼす加工熱処理の影響	(株)モンスター・ラボ
田 鎖 悠 一	粒径の異なる DP 鋼における変形・破壊挙動	日本製鉄(株)
松 宮 久	マルテンサイト鋼およびフェライト鋼の水素環境下における疲労破壊	京都大学大学院工学研究科 (博士後期課程進学)
山 崎 直 人	FCC 単相 Medium Entropy Alloy における圧延変形組織の発達と力学特性	日産自動車(株)
王 赫	純チタンにおける疲労き裂進展挙動の結晶学的解析	(株)日立ハイテク
先端材料機能学分野		
菅 健	Fe-C 合金のマッシュ的変態後のオーステナイト粒の粗大化機構	JX金属(株)
中 野 敬 太	Cr-Mn-Fe-Co-Ni 合金の凝固過程における相平衡関係とデンドライト成長の評価	JFEスチール(株)
吉 村 卓 磨	高エネルギー X 線 CT による Al-Cu インゴット中の凝固組織の三次元定量解析	(株)デンロコーポレーション
Luo Litian	Investigation of Solidification in High-entropy CrMnFeCo-Cu Alloys by X-ray Imaging (X線イメージングによる CrMnFeCoCu 系ハイエントロピー合金の凝固現象)	TOWA(株)

氏 名	研 究 論 文 題 目	就 職 先
磁性物理学分野		
岸 龍 平	フラストレート磁性体 ZnFe_2O_4 及び CdFe_2O_4 のスピングラス様磁性	日亜化学工業(株)
木 原 史 瑛	FCC フラストレーと磁性体 $R\text{InCu}_4$ ($R = \text{Gd}, \text{Tb}, \text{Ho}$) の単結晶作製およびその磁性	大同特殊鋼(株)
羽 仁 健 登	高濃度 La-Co 置換 M 型 Sr フェライト $\text{Sr}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_{12-y}\text{Co}_y\text{O}_{19}$ の単相化と磁気異方性に関する研究	日本製鉄(株)
材質制御学分野		
大 澤 燎 平	ハロゲン化物系濃厚水溶液を用いた銀めっき	JX金属(株)
川 田 稀 士	プロトン性溶媒和イオン液体のイオン伝導	住友金属鉱山(株)
高 井 亮 太	濃厚塩化物系水溶液を用いたモリブデン電析	川崎重工業(株)
宮 本 真 之	銅電解精製における異常析出の3次電流分布解析	京都大学大学院工学研究科 (博士後期課程進学)
機能構築学分野		
相 羽 柚 香	温度可変 AFM による溶融金属-固体界面の構造解析	デロイトトーマツコンサルティング(合)
小 澤 叶 夢	酸化チタン被覆高分子への銅めっき	三井物産(株)
島 川 紘	酸化グラフェンを援用した Si パターンエッチング	ソニーセミコンダクタマニュファクチャリング(株)
鮑 一 帆	イオン液体/チタン酸リチウム界面溶媒和構造の AFM 解析	京都大学大学院工学研究科 (博士後期課程進学)
エネルギー社会工学分野		
安 保 厚 志	分散表現を用いた学術論文の特徴抽出	東京ガス(株)
田 中 大 輔	細孔フィリングアニオン伝導膜の特性評価	(株)日本政策投資銀行
鳥 居 和 真	Ru/TiMn_2 触媒によるアンモニア合成のキネティックス	三菱地所(株)
山 口 源 貴	DNA 折り紙を用いた単原子イオンチャネル作製の試み	ヴァンデージ・マネジメン ト(株)
吉 川 晃 司	天気予報を用いたアグリゲーターの運用戦略	博報堂DYメディアパート ナーズ

氏 名	研 究 論 文 題 目	就 職 先
量子エネルギープロセス分野		
朴 在 雫 (Park Jaewang)	Defect passivation and increased carrier concentration in Al and In co-doped ZnO nanoparticles for solar cells application, Ulsan National Institute of Science and Technology	Ulsan National Institute of Science and Technology (博士後期課程進学)
李 一 婷 (Li Yiting)	Solar cell application using CdSe/CdS core/shell nanorods with different lengths and band offsets	(株)資生堂
赤瀬川 怜	中赤外自由電子レーザーによる選択的格子振動励起法の赤外不活性振動モードへの適用	京都大学大学院エネルギー科学研究科(博士後期課程進学)
岡和田 遥 平	CsPbBr ₃ ナノ構造体の作製とペロブスカイト太陽電池への応用	(株)小松製作所
木 村 純 斗	動的光散乱を利用した量子ドットのサイズと蛍光の評価	日本ペイントホールディングス(株)
木 村 考 岐	ナノ構造無機半導体へのニオブドープとペロブスカイト太陽電池への応用	京都大学大学院エネルギー科学研究科(博士後期課程進学)
材料プロセス科学分野		
田 中 優 也	選択エッチング法による多孔質アルミニウム箔の作製	(株)小松製作所
山 上 晶 暉	乾燥空気中でのアセトアミド-AlCl ₃ 浴および 1-エチル-3-メチルイミダゾリウムクロリド-AlCl ₃ 浴からのアルミニウム電析	(株)村田製作所
プロセス熱化学分野		
齋 藤 啓次郎	脱炭スラグ再利用時の融解挙動に及ぼすスラグ成分の影響と滓化促進法の提案	京都大学大学院エネルギー科学研究科(博士後期課程進学)
藤 澤 彩 夕	選択的ガス透過能を持つ導電性薄膜の作製と評価	日清紡ホールディングス(株)
光 山 童 夢	復硫反応解析に向けた CaO-SiO ₂ 系スラグの硫黄吸収能に及ぼすFeO添加の影響	東京電力ホールディングス(株)
エネルギー応用基礎学分野		
太 田 圭 祐	導電性中間層として La ドープ SrTiO ₃ を用いた新規構造 YBa ₂ Cu ₃ O ₇ 超伝導線材の研究	パナソニック(株)
吉 岡 雄 太	{110}〈110〉集合組織 Ag テープ上に YBa ₂ Cu ₃ O ₇ 層をエピタキシャル成長させた YBa ₂ Cu ₃ O ₇ /Ag 線材を接続部に配置した超伝導接続技術の基礎検討	住友電気工業(株)
神 部 広 翔	薄膜型 MgB ₂ 超伝導線材特性向上に向けた保護層及び金属基材テープと MgB ₂ 層間反応防止層の検討	東京エレクトロン(株)
壁 谷 将 生	導電性中間層として (Sr _{1-x} Nd _x)TiO ₃ を用いた YBa ₂ Cu ₃ O ₇ 高温超伝導線材の研究	中部電力(株)

● 博士後期課程修了者

氏 名	研 究 論 文 題 目	就 職 先
表面処理工学分野		
植 野 雄 大	ペロブスカイト型酸化物を電解質に用いた中温型燃料電池の高性能化に向けた熱力学ならびに電気化学的探究	京都大学大学院工学研究科特定研究員
結晶物性工学分野		
AFANDI Ahmad	Development of Fe-based Superalloys Strengthened by the γ' phase	Indonesian Institute of Science (IPI)

氏 名	研 究 論 文 題 目	就 職 先
構造物性学分野		
伊 藤 良 規	航空機向けチタン合金鍛造材のマクロゾーン微細化技術に関する研究	(株)神戸製鋼所材料研究所 主任研究員
黄 錫 永 (Hwang Sukyoung)	Nature of serration behavior in high-Mn austenitic steel	京都大学大学院工学研究科 特定助教
毛 文 奇 (Mao Wenqi)	Deformation mechanism of metastable austenitic steel with TRIP effect and associated kinetics of deformation induced martensitic transformation	日本原子力研究開発機構 博士研究員
吉 田 周 平	Microstructure and mechanical properties of face-centered cubic high/medium entropy alloys: From a viewpoint of heterogeneity on atomic-scale	京都大学大学院工学研究科 特定研究員 / 助教
蘭 小 東 (Lan Xiaodong)	Effects of grain size and Mg contents on deformation behavior and strengthening mechanisms in Al-Mg alloys	国立研究開発法人物質・材料研究機構 ポスドク研究員
先端材料機能学分野		
小 林 祐 介	Fe-Cr-Ni-Mo-Cu 合金における固液間溶質分配係数およびミクロ偏析予測に関する研究	日本冶金工業(株)
磁性物理学分野		
鈴 木 啓 幸	ThMn ₁₂ 型非平衡磁石母材の結晶構造と磁気特性に関する研究	(株)日立製作所
材質制御学分野		
井 口 翔 太	Studies on Electrochemical Reactions Using Concentrated Aqueous Electrolytes (濃厚電解質水溶液環境における電気化学反応に関する研究)	三菱マテリアル(株)
陳 天 羽	Study on the Copper (II)-Lactate Complexes in Cu ₂ O Electrodeposition Baths: From Determination to Application (Cu ₂ O 電析浴における銅(II)-乳酸錯体に関する研究: その同定から応用まで)	(株)ポケモン
機能構築学分野		
呉 承 澤	Drawing Functional Micropatterns on Flexible Polymer Substrates via VUV-lithography	(株)HGSTジャパン

● 博士学位授与者 課程博士

氏 名	研 究 論 文 題 目	主 査	取得年月日	備 考
表面処理工学分野				
植 野 雄 大	ペロブスカイト型酸化物を電解質に用いた中温型燃料電池の高性能化に向けた熱力学ならびに電気化学的探究	宇 田 哲 也	令和3年3月23日	
結晶物性工学分野				
AFANDI Ahmad	Development of Fe-based Superalloys Strengthened by the γ' Phase	乾 晴 行	令和2年9月23日	

氏 名	研 究 論 文 題 目	主 査	取得年月日	備 考
構造物性学分野				
伊 藤 良 規	航空機向けチタン合金鍛造材のマクロゾーン微細化技術に関する研究	辻 伸 泰	令和3年3月23日	
黄 錫 永 (Hwang Sukyoung)	Nature of serration behavior in high-Mn austenitic steel (高 Mn 鋼のセレーション挙動の本質)	辻 伸 泰	令和3年3月23日	
毛 文 奇 (Mao Wenqi)	Deformation mechanism of metastable austenitic steel with TRIP effect and associated kinetics of deformation induced martensitic transformation (TRIP 効果を示す準安定オーステナイト鋼の変形機構と変形誘起マルテンサイト変態の速度論)	辻 伸 泰	令和3年3月23日	
吉 田 周 平	Microstructure and mechanical properties of face-centered cubic high/medium entropy alloys: From a viewpoint of heterogeneity on atomic-scale (FCC 構造を有する高・中エントロピー合金の材料組織と力学特性: 原子スケールの不均一性の観点から)	辻 伸 泰	令和3年3月23日	
蘭 小 東 (Lan Xiaodong)	Effects of grain size and Mg contents on deformation behavior and strengthening mechanisms in Al-Mg alloys (Al-Mg 合金の変形挙動に及ぼす結晶粒径および Mg 量の影響とその変形機構)	辻 伸 泰	令和3年3月23日	
先端材料機能学分野				
小 林 祐 介	Fe-Cr-Ni-Mo-Cu 合金における固液間溶質分配係数およびミクロ偏析予測に関する研究	安 田 秀 幸	令和3年3月23日	
磁性物理学分野				
鈴 木 啓 幸	ThMn ₁₂ 型非平衡磁石母材の結晶構造と磁気特性に関する研究	中 村 裕 之	令和2年9月23日	
材質制御学分野				
井 口 翔 太	Studies on Electrochemical Reactions Using Concentrated Aqueous Electrolytes (濃厚電解質水溶液環境における電気化学反応に関する研究)	邑 瀬 邦 明	令和3年3月23日	
陳 天 羽	Study on the Copper(II)-Lactate Complexes in Cu ₂ O Electrodeposition Baths: From Determination to Application (Cu ₂ O 電析浴における銅(II)-乳酸錯体に関する研究: その同定から応用まで)	邑 瀬 邦 明	令和2年9月23日	
機能構築学分野				
呉 承 澤	Drawing Functional Micropatterns on Flexible Polymer Substrates via VUV-lithography	杉 村 博 之	令和2年9月23日	
エネルギー社会工学分野				
竹 内 一佐枝	Leadership Roles in Energy and Environmental Projects (エネルギー環境プロジェクトにおけるリーダーシップの役割)	石 原 慶 一	令和3年3月23日	

氏 名	研 究 論 文 題 目	主 査	取得年月日	備 考
材料プロセス科学分野				
Tran Van Nhat Anh	MONITORING OF SULFUR – CONTAINING ADDITIVES IN COPPER ELECTRODEPOSITION BY ROTATING RING – DISK ELECTRODE AND COPPER ELECTRODEPOSITION FOR HYBRID BONDING	平 藤 哲 司	令和3年5月24日	

会 則

改訂（2018年6月2日）

【名 称】

第1条 本会を水曜会と名付ける。

【目 的】

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

【会 員】

第3条 会員を分けて正会員と学生会員とする。

第4条 正会員は以下の各項のいずれかに該当する者とする。

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

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

【役 員】

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

会 長	1名
副 会 長	若干名
会 計 監 事	2名
編集委員長	1名
幹 事	若干名

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

【総 会】

第8条 総会は毎年1回開催する。

【役 員 会】

第9条 役員は、役員会を構成し、本会の重要事項の審議を行う。

【事 業】

第10条 本会は会誌「水曜会誌」および「水曜会名簿」を発行する。

第11条 本会はその他本会の目的を達成するために必要な事業を行う。

【経 費】

第12条 本会の経費は別途に定める会費、寄付金その他の収入により支弁する。

【会則変更】

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

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

【付 則】

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

水曜会講座等一覧（その1：旧学科，旧専攻等）

2001年現在

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

水曜会講座等一覧

2017年現在

学 部	工 学 部	地球工学科	資源工学コース	全講座・分野	資源系
		物理工学科	材料科学コース	全講座・分野	金属系
			エネルギー応用工学 コース	エネルギー社会工学分野	
				材料プロセス科学分野	
				プロセス熱化学分野	
					エネルギー応用基礎学分野
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	金属系	
	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	
				プロセス熱化学分野	
		エネルギー基礎科学専攻		エネルギー応用基礎学分野	金属系
		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	文	会誌刷上り	6 頁以内
報 告	告	会誌刷上り	6 頁以内
総 説	説	会誌刷上り	10頁以内
講 座	座	会誌刷上り	10頁以内
談 話	室	会誌刷上り	4 頁以内
資 料	料	会誌刷上り	4 頁以内
各 種 記 事		会誌刷上り	4 頁以内

- (6) 原稿の送付先はつぎのとおりとする。

- i) 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

- (7) 原稿は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。
- (8) 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合わせ、または内容の修正を求めることがある。
- (9) 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。
- (10) 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。

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

水曜会会員からの図書の寄贈について

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

高馬 勇 様

『標準化と品質管理』（日本規格協会発行）

1993/06, 1993/09～1999/12, 2000/02～2007/02,

2007/04～2009/12, 2011/01, 2011/05～09, 2015～2011/09, 2015/01

『標準化ジャーナル』（日本規格協会発行）

2000/07～2001/08

逝 去 会 員

水曜会誌25巻3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。

令和2年9月3日	池田 拓夫	昭和19・冶金
令和2年5月14日	田中 伸昌	昭和41・冶金
令和2年12月8日	荒川 次郎	昭和26・冶金
平成30年3月13日	樋上 寛	昭和28・鉱山新制
令和3年1月20日	三宅 敏夫	昭和18・冶金
令和3年1月19日	倉知 三夫	昭和28・冶金旧制
令和3年1月6日	花岡 菖	昭和33・鉱山
令和2年11月16日	小田 哲	昭和34・鉱山
令和2年11月29日	広瀬 圭介	昭和36・冶金
令和元年10月30日	中山 剛健	昭和37・冶金
令和2年1月11日	樽井 文男	昭和43・冶金
令和2年12月8日	鈴木 日出夫	昭和54・金属
令和元年	中野 皓司	昭和28・冶金旧制
令和2年	青木 信美	昭和24・冶金
平成31年1月24日	山本 章裕	昭和56・金属
令和2年10月31日	村瀬 松三	昭和29・冶金
令和2年10月25日	伊藤 正雄	昭和33・鉱山
令和3年2月18日	西内 政雄	昭和39・冶金
令和元年10月25日	諏沢 利明	昭和43・金属
令和3年1月8日	上阪 光正	昭和43・金属
令和2年6月22日	松本 一良	昭和31・鉱山
令和3年4月29日	森田 章義	昭和40・金属
令和3年1月24日	川村 一俊	昭和28・冶金旧制
令和2年11月	松井 均	昭和43・資源
令和元年6月22日	奥城 丈志	昭和52・金属
令和3年5月5日	小島 勢一	昭和29・冶金
令和3年4月19日	浅川 良男	昭和34・鉱山
令和3年3月13日	橋本 卓三	昭和39・冶金
令和2年12月10日	下里 省夫	昭和30・冶金
	大西 稔泰	昭和32・冶金
	福岡富士雄	昭和29・冶金
令和2年9月26日	竹中金二郎	昭和32・冶金
令和3年5月	森本 武	昭和28・冶金新制
令和3年9月28日	栗倉 泰弘	昭和43・冶金
令和3年3月5日	新堀 義門	昭和29・鉱山

教 室 報 告

教員人事

<旧資源系>

令和3年3月1日	吉 光 奈 奈	助教に採用 地殻開発工学分野
令和3年3月31日	宅田 裕彦	教授 資源エネルギープロセス学分野 定年退職
令和3年4月1日	浜 孝之	教授に昇任 資源エネルギープロセス学分野

<旧金属系>

令和2年12月1日	鎮目 邦彦	特定助教に採用 表面処理工学分野 同分野（日本学術振興会特別研究員）から
令和3年1月31日	BAI, Yu	助教 構造物性学分野 大連理工大学材料工学院（副教授）へ転出
令和3年2月1日	朴 明駿	助教に採用 構造物性学分野 学際融合教育研究センター 構造材料元素戦略研究拠点ユニット（特定助教）から
令和3年3月1日	平山 恭介	助教に採用 材料設計工学分野 九州大学大学院工学研究科（助教）から
令和3年3月1日	勝部 涼司	助教に採用 先端材料機能学分野 ナノ構造学分野（特定助教）から
令和3年3月31日	田中 良平	助教 物質情報工学分野 インターステラテクノロジズ㈱（研究員）へ転出
令和3年5月1日	ZHANG, Zelei	特定助教に採用 材質制御学分野 同分野（研究員）から
令和3年6月1日	吉田 周平	助教に採用 構造物性学分野 同分野（特定研究員）から
令和3年9月1日	植野 雄大	特定助教に採用 プロトニックセラミックス 産学共同講座 同講座（特定研究員）から
令和3年9月30日	新津 甲大	助教 結晶物性工学分野 物質・材料研究機構（独立研究者）へ転出

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

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

- (1) 論文：他の刊行物に未発表のもので、独創性をもつ著者の基礎研究または応用研究の成果、技術の開発改良などを内容とするものを対象としております。
- (2) 報告：現場の操業報告などに類するもので、学術的に価値があると認められるものを対象としております。
- (3) 総説：特定の問題について普遍的に広い視野から解説し、その推移を知るうえに役立つものを対象としております。
- (4) 講座：特定の問題について掘り下げて解説し、会員の啓蒙、再教育に役立つものを対象としております。
- (5) 資料：学問的あるいは技術的に価値のある内容を含み、会員の参考資料として役立つものを対象としております。
- (6) 談話室：会員の皆様の近況や展望など幅広い内容記事を紹介する「談話室」を設けております。「談話室」は、会員各位の意見・情報交換の場としてご利用頂くことを目的としたものです。次のようなものを対象にしております。

- 第一線で活躍中の会員の幅広い展望・随想
- 各企業の研究所の紹介（特殊機器や意外な研究内容など）
- 研究についてのトピックス（形式は問わない）
- 国際会議や海外出張の紹介・こぼれ話
- 種々の分野でご活躍の会員の特異な体験記事
- 新教員の自己紹介や抱負など
- 水曜会の活動における歴史的こぼれ話

- (7) 会員の声：会員の皆様の幅広い意見・提言を募集する「会員の声」を設けております。
- (8) 会員通信欄：水曜会大会返信葉書の通信欄を始め様々な形で寄せられておりますお便りを掲載しております。
- (9) その他：(6)～(8)の何れかに区分させて頂くことになると思いますが、“同窓会誌”的な肩の凝らない気楽な記事（…の思い出、…の頃、等々）についても、“学会誌”としての体裁維持も念頭におきながら、積極的に掲載したいと存じます。

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

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

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

令和3年度水曜会誌編集委員

委員長	奥田浩司		
幹事	豊浦和明(会誌)	武川順一(広告・HP担当)	
編集委員(学内)	宇田哲也	奥村英之	奈良禎太
編集委員(学外)	森下浩平	松井雅樹	佐野光
	斉藤拓也	石須慶一	

令和3年10月25日 印刷 令和3年10月31日 発行

編集兼
発行者
印刷者

田中功
小林誠造
日本印刷出版株式会社

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

発行所 京都大学工学部 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

Retirement Memorial Essay

- Memories of the days before the reorganization of the department of
mineral science and technology Hirohiko TAKUDA 301

Memorial Lectures in the Annual Meeting of Suiyokwai

- Chronicles of Mitsui Mining & Smelting: Where Do We Come From?
What Are We? Where Are We Going? Isshi HISAOKA 304
- Caron neutral and strategy in Japanese industry sectors Shiro HORI 312

Forum

- Heterogeneity change around the fault zone in a gold mine
and laboratory rock samples Nana YOSHIMITSU 319
- Research activities at Volcanic Fluid Research Center,
Tokyo Institute of Technology Keiichi ISHIZU 324
- Complete wetting behavior of liquid indium
on molybdenum oxide thin films Ryoji KATSUBE 328
- Development of multimodal imaging using X ray CT
and pencil-beam XRD Kyosuke HIRAYAMA 332
- Characterization of Heterogeneous Deformation Behavior
in Dual-Phase Steel Composed of Ferrite and Martensite Myeong-heom PARK 336
- Grain refinement and strengthening mechanism in high/medium
entropy alloys with FCC single-phase Shuhei YOSHIDA 340

Current Studies in Laboratories 346

Suiyokwai Information 371

Letter to Editor 388

Regulations 403